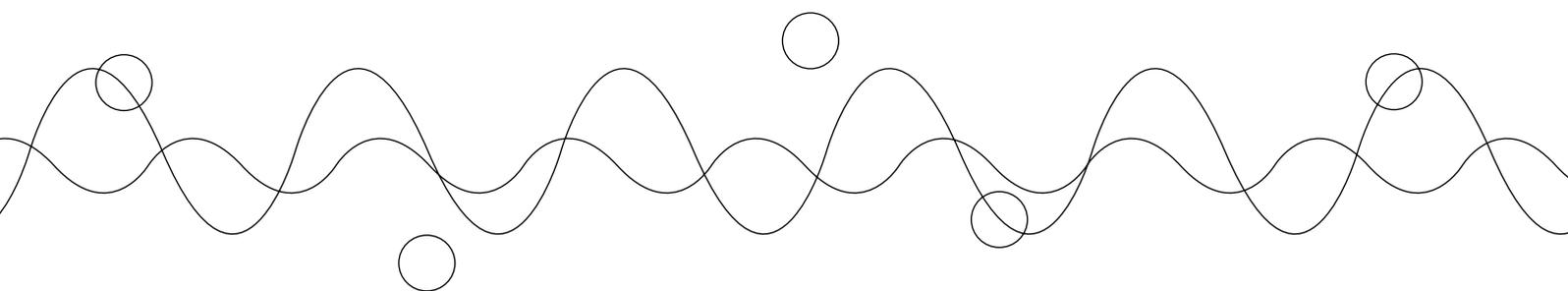


CRDS-FY2015-WR-13

俯瞰ワークショップ報告書
平成27年度 環境科学技術分野
最新研究開発動向



国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

目 次

1. サマリー	1
1-1. 環境分析技術	2
1-2. 環境予測・評価技術	4
1-3. 環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）	6
2. 趣旨	9
3. 環境分析技術	10
3-1. 「現場観測データのネットワーク化」 小林拓（山梨大学 生命環境学部 環境科学科 准教授）	10
3-2. 「バイオエアロゾルの定量および個別粒子観察法の必要性」 松木篤（金沢大学 環日本海域環境研究センター 准教授）	16
3-3. 「マイクロ・ナノ分析デバイスと環境科学」 火原彰秀（東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授）	22
3-4. 「大気圧プラズマを用いた新しい分析装置」 沖野晃俊（東京工業大学 大学院総合理工学研究科 准教授）	29
3-5. 「環境化学物質のノンターゲットモニタリングとインフォマティクス」 橋本俊次（国立環境研究所 環境計測研究センター 有機計測研究室 室長）	37
3-6. 「環境、生体に対するナノパーティクルの影響を評価する超高感度・迅速分析システム」 平田岳史（京都大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 教授）	43
3-7. 「微量元素・同位体に基づく海洋研究」 宗林由樹（京都大学 化学研究所 教授）	51
3-8. 「データ駆動型アプローチによる環境分析・状態評価」 菊地淳（理化学研究所 環境資源科学研究センター 環境代謝分析研究チーム チームリーダー）	57
3-9. 「循環型水利用における計測技術」 鳥村政基（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）	65
3-10. 総合討論	72
4. 環境予測・評価技術	77
4-1. 「気候変化に対する全球植生の応答を予測するシミュレーター（動的全球植生モデル）の俯瞰と課題」 佐藤永（海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野 研究員）	77
4-2. 「長期・複合的観測に基づいた森林生態系の光合成能力の時空間変動の解明と予測」 村岡裕由（岐阜大学 流域圏科学研究センター シニア教授）	86
4-3. 「生態系動態予測・制御に向けた生態複合モニタリング・モデリング技術の開発」 近藤倫生（龍谷大学 理工学部 教授）	94

4-4. 「宇宙線生成核種等の同位体を用いた環境復元研究」 横山祐典（東京大学 大気海洋研究所 教授）	101
4-5. 「長期湖沼モニタリングと関連研究一定性から定量へ」 今井章雄（国立環境研究所 地域環境研究センター センター長）	107
4-6. 「大気エアロゾルによる環境影響と微物理化学特性」 兼保直樹（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 大気環境動態評価研究グループ グループ長）	114
4-7. 「PM2.5 が引き起こす気候変動の定量的評価と予測」 竹村俊彦（九州大学 応用力学研究所 教授）	121
4-8. 「人間活動を考慮した統合水循環・水資源モデル」 花崎直太（国立環境研究所 地球環境研究センター 主任研究員）	129
4-9. 「これからの社会に求められる洪水予測警報技術ー鬼怒川洪水を教訓としてー」 芳村圭（東京大学 大気海洋研究所 准教授）	137
4-10. 総合討論	143
5. 環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）	149
5-1. 「コベネフィット型水環境保全技術の開発に向けた取り組み」 珠坪一晃（国立環境研究所 地域環境研究センター 地域環境技術システム研究室 室長）	149
5-2. 「発生土の有効利用と環境安全性」 勝見武（京都大学 大学院地球環境学 教授）	157
5-3. 「分子認識材料を活用した環境対策技術」 木田敏之（大阪大学 大学院工学研究科 准教授）	165
5-4. 「植物機能の多様性を利用した重金属回収と浄化技術の研究開発」 榊原均（名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授 / 理化学研究所 環境資源科学研究センター 生産機能研究グループ グループディレクター）	173
5-5. 「界面微生物工学によるゲームチェンジング環境バイオテクノロジー」 堀克敏（名古屋大学 大学院工学研究科 教授）	179
5-6. 「微生物の振る舞いの理解と環境対策技術」 野尻秀昭（東京大学 生物生産工学研究センター 教授）	185
5-7. 「ジオミメティクスによる環境材料の創出」 笹木圭子（九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 教授）	192
5-8. 「戦略的都市鉱山開発に向けた取り組み」 大木達也（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）	200
5-9. 「泡によるレアメタルの選択濃縮分離」 二井晋（鹿児島大学 大学院理工学研究科 教授）	208
5-10. 「化学プロセッシングを用いた資源循環技術」 吉岡敏明（東北大学 大学院環境科学研究科 研究科長 / 教授）	214
5-11. 「輸入依存から脱却した次世代リチウム資源循環型社会への挑戦」 星野毅（日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 研究主幹）	221
5-12. 総合討論	228

6. 各話題提供のハイライト	237
6-1. 環境分析技術	237
6-2. 環境予測・評価技術	241
6-3. 環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）.....	245
付録 ワークショッププログラム.....	250

1. サマリー

CRDS は、各科学技術分野を俯瞰して分析すること、俯瞰の分析に基づいて今後国として重要な研究開発戦略を提言することを主な任務としている。その俯瞰及び提言に資する活動の一環として、具体的な技術シーズや最新の研究開発動向を把握するために、最前線で活躍する研究者による話題提供と意見交換の会合を、環境分野の 3 つの要素技術ごとに 3 回開催した。各会合から抽出された主要な動向は下記の通りである。

環境分析技術では、主に研究用途を想定した先進的で高感度・精密な分析技術開発と、全球的なモニタリングや現場観測を想定した安価、簡易、可搬的な分析技術開発の 2 つの方向性が示された。また、測定技術の発展により、膨大な物質を同時検出する研究開発が進展している。それに伴い、大量のデータを処理する情報処理技術の活用が必然となり、定量の自動化などを行うソフトウェア開発、ライブラリ整備が求められている。

環境予測・評価技術では、複雑な地球システムとその現象を把握するため、モデルの精緻化や高解像度化だけでなく、気候変動予測または気候変動影響に関連する多種多様なモデルの統合が進められている。地球システムに作用する要素として、土地利用などの人間活動も統合され始めている。また、様々なモデルが開発される中で、国際的にモデルを相互比較するプロジェクトが実施されている。

環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）では、目的とする課題解決と同時に、省エネ化、低炭素化、低コスト化、副産物の回収、高付加価値物の創出などを達成する技術開発が行われている。環境対策技術は、要素技術だけでなく、要素技術を組み合わせてシステム化・統合化する研究開発を推進することも必要である。さらに、学際融合のみならず業界や行政などとも連携した取り組みが必要とされる。環境対策技術が社会に受容されるためには、処理メカニズムの解明とともに、技術の評価とその結果の提示も必要である。

得られた知見は、2017 年に発行予定の俯瞰報告書の作成や、各種提言活動、情報発信等に広く活用する。

各会合で紹介、議論された個々のトピックスや課題、今後の方向性、研究開発の進め方を次頁以降にまとめた。

1-1. 環境分析技術

(1) トピックス

- 二極化

主に研究用途を想定した先進的で高感度・精密な分析技術開発と、全球的なモニタリングや現場観測を想定した安価、簡易、可搬的な分析技術開発の 2 つの方向性がある。

- 網羅性とインフォマティクスとの融合

測定技術の発展により、膨大な物質の同時検出が進展し、大量のデータ処理技術の活用が必然となっている。個々の物質のみならずその相関で生態系の状態評価をする取組もある。最近の装置はオープンなデータベースにアクセスしデータをとることが一般的になっている。

- ◇ 前処理が不要な環境化学物質の網羅的分析とソフトウェアの開発、データベース整備

- ◇ 核磁気共鳴 (NMR) 等を用いた試料の一斉分析とインフォマティクスによる環境の状態評価

- サンプル量の微小化

微小な試料での分析、さらには微小領域における低濃度試料の分析への展開がある。

- ◇ 抽出・分離・濃縮・検出をワンチップに集積化したマイクロ・ナノ分析チップの開発

- ◇ 微小な液滴を 1 粒だけプラズマ中に導入できるドロップレットネブライザによる微小試料分析

- 高感度化

分析機器の発展 (ハード・ソフト開発) や検出手法 (キレート樹脂、タンパク質へのナノパーティクルタグ付け等) の開発により、超低濃度の微量元素や同位体、1 分子レベルでの検出が可能になりつつある。感度向上により、省試料化や省試薬化、省廃棄物化も実現できる。

- ◇ レーザー分光を用いたプラズマ質量分析計での超微量分析技術でナノパーティクル 1 個を検出、質量分析計と分光法の融合による超高感度分析と同位体分析

- ◇ キレート樹脂を応用した 9 元素の一括分離濃縮技術による微量元素・同位体分析

- 分析対象の拡大

生体、プラスチックなど熱に弱い物質の分析も可能となりつつある。定性定量検出のみならず、微粒子の形状や組成、状態の把握も進展している。

- ◇ 大気圧低温プラズマによるフラグメントの少ないソフトイオン化と表面付着物の高感度同定

- ◇ フェムト (10^{-15}) 秒レーザーを利用した高感度化によるプラスチックや鉱物試料、金属試料等の安定分析

- ◇ 偏光 OPC (Optical Particle Counter) によるエアロゾル形状と組成の把握

- ◇ 黄砂と共に運ばれてくる微生物や生物由来の有機物であるバイオエアロゾルの、蛍光検出器を付加した OPC による観察

- 総リスク把握

排水処理分野では、水の再利用から、食料・エネルギー・淡水を同時に作るプラントシステム

へとシフトしてきている。水質については、様々なリスクを総合的にモニタリングする技術の必要性が生じている。

(2) 課題

- 機器開発は標準化に失敗するとガラパゴス化する危険性がある。環境研究のモデル計算に使うデータはネットワークによる標準化したデータが必要であり、ある程度のシェアを取らないと他は淘汰される。特に気候分野では全球的なデータが必要であり、その傾向が強く、日本の貢献は低い。
- 日本は分離技術では優れた要素技術を持っているが、元素分析では負けつつある。
- 標準物質（細胞や大気粉塵）が無い。現状では代用している。
- データベースの構築と管理が必要。統一的ではないデータの AI による解析があるとよい。
- 低濃度物質のデータ信頼性を向上させるサンプリング手法が必要。
- モニタリングの効率化や自動化、広域化、リアルタイム性、低コスト化が必要。ツールや基盤のメンテナンスや予算も課題。長期間の継続が重要である。
- 新たなリスクに対する技術開発（生理活性物質やその代謝物、多剤耐性遺伝子など）が必要とされている。
- 構造式によるマススペクトルの推定は未成熟。マススペクトルから構造推定し合成により確認する方法がとられているが、合成には技術やコスト、時間がかかる。
- 分析と同時に、物質の毒性や影響の把握も必要。
- 現場観測は論文になりにくい。モデル開発と比較するとさらに若手研究者が少ない。
- アジアの環境監視が重要である。排出により地球環境への影響が変化する。

(3) 今後の方向性

- 高額の開発費用が必要となる、主に研究開発用とを想定した先進的で高感度・精密な分析技術と、全球的なモニタリングや現場観測を想定した安価、簡易、可搬的な分析技術の、2 つの方向性での研究開発（二極化）。
- 網羅的分析や状態解析等の一層の進展とインフォマティクスとの融合。その為のアルゴリズム開発やライブラリ整備。
- 微小領域における低濃度試料の測定の一層の進展。さらに定量の先の定性把握や、細胞などの単一粒子中の超微量分析の実現、蛋白質 1 個の動態把握など。
- ソフトマテリアル（高分子や生体分子などの柔らかい物質）等分析対象の拡大と技術のさらなる発展。生態系における相関把握への応用。
- サンプリング、モニタリングの効率化、自動化、広域化、高頻度化。ゾンデ（気球に取り付けて飛ばす観測機）やドローンなども用いた手法の開発。データの集約と共有、リアルタイム公開。

(4) 研究開発の進め方

- ハード開発と同時にソフト開発やライブラリ整備の実施が必要である。
- モニタリング技術の普及には標準化への戦略的な働きかけが求められる。
- 毒性やリスク評価における疫学との融合など、異分野連携による研究開発推進が必要である。

- 長期的モニタリングを可能とする観測基盤構築と維持管理、データ蓄積による情報基盤構築・維持管理が重要である。
- 広域観測のための国際的ネットワークの構築が必要である。

1-2. 環境予測・評価技術

(1) トピックス

① シミュレーション

- 統合化

複雑な地球システムと現象を把握するために、関連する多種多様なモデルの統合が進められている。地球システムに作用する要素として人間活動をも取り込み始めている。

- ◇ 全球気候モデルへの統合

- ◇ 気候変動の影響評価モデルの統合

- 精緻化

機構的・定量的な不確実性の縮小に影響を与える様々な要素に関する各論的な研究や変数の追加が盛んに行われている。

- 高解像度化

全球雲解像モデル (NICAM) では解像度 3.5km まで開発済みであるなど、高解像度化は一層進むと予測される。リージョナルモデルによる地域的な詳細化が進展している。

- 多様化

対象やスケールが異なるモデルが開発されている。現実の複雑なシステムを再現する取組み以外にも、メカニズムを特定せず経験則で生態系の動態を予測するモデルのような独創的な研究も存在する。

- ◇ 対象による分類…気候、生態系、植生、水循環、物質など

- ◇ 空間スケールによる分類…全球、領域、地域、集団、個体、葉など

- ◇ 時間スケールによる分類…長期、短期、影響、動態など

- ◇ 目的による分類…把握、再現、復元、長期予測、短期 (災害) 予測、制御など

- ◇ その他の分類…定性/半定量/定量、物理/化学/生物など

- モデル比較研究

様々なモデルが開発される中で、国際的にモデルを相互比較するプロジェクトが実施されている。

② 実測

- 実測技術の進展により新たに得られるようになったデータがシミュレーションに活用されている。ツールとして、人工衛星、環境 DNA、放射性核種などの活用が期待される。

- 従来技術による長期的な継続モニタリングも、シミュレーションの進展や新たな知見の獲得に貢献している。

(2) 課題

① シミュレーション

- 不確実性をより縮小するための各論的な要素の研究は多数あるが、それらを整理・比較し、統一的にまとめる作業が不足している。
- 様々な領域での活用や課題解決に向けた研究開発は途上にある。
- 多くの要素が複雑に相関する現象解明や予測の難しさが依然として存在している。
- 野外データが不足している。分野によって研究フェーズに差があり、特に生態系に関するモデル研究に必要なデータが不足している。
- 長期スパンで応答する環境の予測には長期間の継続的なモニタリングが必要（数十年～数百年単位）。
- 使いやすいソフトウェアを持つモデルがブラックボックス的に使われ、他が淘汰される傾向にある。目的に合わせた理解と適用が必須である。
- モデルとデータベースの継続的な運用・サポート体制が不十分である。
- 若手のモデル研究者が不足している。論文になりにくく成果としてカウントされない。

② 実測

- 長期間の継続的なモニタリングによるデータの積み重ねが、研究開発の深化と発展に不可欠である。しかし、地道な計測、観測点維持、データベース整備など、人材・資金の継続性の課題や、成果としてカウントされない活動であるという課題がある。
- 国際共同研究には試料の長距離・長時間輸送方法の開発が必要である。

(3) 今後の方向性

① シミュレーション

- 統合化と精緻化による一層の高度化。
- 実測技術の進展やモデルの高度化、ダウンスケーリング（データの空間詳細化）などによる、対象地域や活用分野の拡大、データ蓄積と解析によるさらなる発展。
- 具体的な用途や地域を見据えた応用研究。
- 高度化の一方で、途上国などへの展開に向けたハンドリングしやすい仕様の作成や、ユーザ獲得のためのインタフェースデザインの構築。

② 実測

- コスト・労力共に効率的で統計学的にも優れた実測手法の開発。
- 機能解明に寄与する新たな計測手法の開発。
- 長期的モニタリングのための観測機器の開発と観測網の整備・維持。
- データの蓄積や統合、管理、解析技術の発展。

(4) 研究開発の進め方

- 長期間観測とデータ蓄積、そしてそれに基づくモデル研究を継続的に実施する。そのために、モニタリングへの貢献、モデルやデータベースの維持・管理を評価するしくみ、サポートするしくみの構築が必要である。
- 各論的な研究を整理・比較し、統一的にまとめる研究も必要である。

- 各領域での活用や課題解決を視野に入れた研究開発を進展させる。
- モデルの普及のためには、技術開発と同時にユーザインタフェースなどの検討を実施する必要がある。
- 超長期的期間に対する分析がベースラインの設定に有効である。各種現象は多様な因果関係の帰結として起きており、その関係性を全て正確に把握することは容易ではない。特に、ベースラインの設定については多くの学説があり統一化が困難である。このとき、数万年規模の傾向の解析など、超長期を対象とした分析が有効となりうる。
- 長期的・超長期的な分析を継続するためには多組織の連携が不可欠である。常に最先端研究を要求される大学は、継続的な活動を行う場合、様々な制限があることが多い。国研における維持も必ずしも万全な体制とはなっていない。官庁や自治体、場合によっては民間の連携と人材育成・流動によって分野を維持することが望まれている。同時に、科学コミュニケーションとして、開発されたモデルによって得られる情報の理解と共有を広げていくことも必要である。
- 国際的な連携の実施、特にアジアへの展開が重要である。

1-3. 環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）

(1) トピックス

- 高付加価値化
省エネ化、低炭素化、低コスト化、副産物の回収、高付加価値物の創出などを同時に達成する技術開発が行われている。
 - ◇ 省エネや創エネも同時に実現する微生物を用いたコベネフィット型排水処理技術
 - ◇ 化学修飾によるプラスチックのアップグレーディングリサイクル
- システム化
環境対策技術では、要素技術を組み合わせるシステム化し、総合的に研究開発を推進することが求められる。
 - ◇ 地盤汚染のメカニズム解明と対策、リスク評価手法の開発ならびに基盤整備による発生土（汚染土壌）管理や有効利用
 - ◇ 資源自給率の獲得を目指した動脈・静脈連携による戦略的都市鉱山開発の取組
- 新たな材料や機器、手法の開発
従来技術の課題や不可能な点を解決する吸着剤や担持体、分離手法等の新規開発が進められている。分離・認識材料開発では、多孔性三次元空間材料による様々な有害物質の除去研究が主流となっている。
 - ◇ シクロデキストリンを用いた水中の有機フッ素系化合物や油中の PCB の吸着・除去
 - ◇ 微生物細胞固定化ナノファイバー（AtaA）を用いた微生物の固定と化学反応への応用
 - ◇ ジオミメティクス（模倣的地化学物質）による難吸着性陰イオン吸着剤の開発
 - ◇ 泡の層からなる分離塔によるレアメタルの選択濃縮分離技術の開発
 - ◇ リチウムイオン伝導体を用いた海水からリチウムを回収する技術の開発

- 微生物や植物の活用
水質や土壌などを微生物や植物を用いて浄化する手法が研究されている。特に微生物に関しては、微生物が集団としてどう振る舞うかの理解やシングルセル解析、インフォマティクスとの融合が最近の方向性である。
 - ◇ コケ植物の原系体を用いたファイトレメディエーション（植物を用いた浄化）
 - ◇ 微生物の物質分解機能および集団の振る舞いの理解と有機汚染物質分解への応用

(2) 課題

- 個別技術の研究開発は進められているがシステム化研究、生産技術的な研究が少ない。
- 技術などのデータベース化とそれを活用できる人材の育成が必要である。
- 環境対策技術には複数分野の知見が求められ分野融合が必要だが、実績がない初期の段階のサポート体制が不足している。
- 資金的なサポートが少ない。また、長期間の研究が必要である。
- 社会受容性の為の対策の評価とリスク評価の共有が不足している。
- 廃棄物や汚染物の処理では、全体のフロー管理や廃棄物管理の仕組み構築、キャパシティ確保、基準や評価法など現在の手法の限界、社会受容性の確保（汚染物処理、遺伝子改変）に課題がある。災害廃棄物や放射性物質も今後の課題である。
- 土壌汚染については、地下構造の把握や対策、評価が難しい。自然由来重金属も課題となっている。
- 都市鉱山からの金属再生プロセスの構築は極めて未成熟である。レアメタルの分離や材料開発は活発だが、リサイクルを生産技術として捉えた研究は少なく、資源循環は進んでいない。金属製錬など古い技術に関する知の蓄積も急速に喪失している。
- 高価な資源以外のリサイクル（プラスチック）も必要。ハロゲン元素が問題となる。

(3) 今後の方向性

- 高付加価値型の技術開発（目的とする課題解決と共に省エネ・創エネ実現、副産物の回収、付加価値物の創出などを達成）
- 要素技術開発とシステム化研究の統合
- データベースの構築やインフォマティクスの活用
- 新興国や途上国、地域に適合した技術の開発や適応、現場での解決
- 輸入に頼らない身近な資源からの回収

(4) 研究開発の進め方

- 現実的な課題をターゲットとすると分野融合が必然となる。初期の段階から融合する両者が潤うことは難しく、相手が引き取れる程度の段階まで持って行く必要はある。
- 材料開発などにとどまらず、供給・回収・再利用・処理も含めた全体的な検証が必要で、プロセスの観点からの研究や、技術とシステムの融合研究が求められる。
- 社会の中で循環させるために、分野融合のみならず、業界融合や、行政なども踏まえた取組が必要である。また、処理等にかかるコストの内部化が技術の普及で重要となる。
- 社会受容性のためには処理メカニズムの解明や、対策技術の評価とその提示が必要である。
- 地域に適した技術の展開や、新興国や途上国への技術展開を視野に入れる。

2. 趣旨

松本麻奈美（CRDS環境・エネルギーユニット フェロー）

CRDSの主な任務は、分野全体を俯瞰して分析すること、そして、俯瞰の活動に基づいて、今後国として重要な研究開発戦略を提言することである。この活動の実行に当たっては、さまざまな関係者や関係機関と積極的に連携し、情報・意見交換を行っている。CRDS内に分野ごとに設置されているユニットでは、担当する分野について2年をかけて俯瞰報告書を作成する。この俯瞰の活動に基づいて、毎年、重要テーマの抽出を行い、そのテーマについて1年をかけて深掘調査を実施し、戦略プロポーザルという提言書を作成する。その提言を関連省庁の政策に活用していただくことを目指している。

環境・エネルギーユニットでは、2015年に公開した俯瞰報告書における活動の方針として、3E+S（安定供給、経済効率性の向上、環境への適合、安全性）というエネルギー政策の基本方針のような社会的期待の観点から環境エネルギー分野を俯瞰することとした。そして、環境・エネルギー分野を、エネルギー供給区分、エネルギー利用区分、原子力区分、環境区分の4つの区分に分類し、この4つの区分をさらに92の研究開発領域に分け、それぞれについて研究開発動向分析と国際比較を行った。

環境区分については、上記の活動の方針と同様に、社会的期待または社会が目指す方向性の観点で研究開発領域の設定を行った。その結果、1つの研究開発領域に様々な分野の知見が必要となる環境分野の特徴を表現することができ、今後の大きな方向性を確認することができた。一方で、領域を構成する個々の技術や最新の研究開発動向が把握しづらいという課題があり、その課題に対応するために最新の技術シーズの把握に取り組んでいる。本日はその取り組みの一つとして、様々なバックグラウンドを持ち、最先端で活躍されている研究者をお呼びして、最新の技術シーズと研究開発動向の把握、今後の方向性の議論の場を設けた。提言につながるようなテーマも探索したいと考えている。

改めて、本日は、環境分析技術に関するさまざまな分野の動向や課題の共有、そして、今後国として推進すべき研究開発の方向性や領域の抽出を行いたい。そのために話題提供いただく内容として、まず、ご自身の研究や目標について、次に分野コミュニティの動向、そして研究環境や実用化に向けた課題、最後に今後国として注目すべき方向性やテーマをご発表いただきたい。

3. 環境分析技術

3-1. 「現場観測データのネットワーク化」

小林拓（山梨大学 生命環境学部 環境科学科 准教授）

私のバックグラウンドであるが、工業高専で電子制御を学び、大学編入後に衛生工学を学んだ。最近の研究は、光を利用した環境計測であり、特に散乱を利用した環境計測が得意な分野である。光のやりとりを扱う放射伝達計算が専門で、測定装置を開発し、その装置で観測を実施したりしている。今年は南極と北極のどちらにも行った。大気と海のいずれも粒子状物質の散乱に興味がある。

IPCCのレポートでは地球温暖化への影響を評価しているが、私の興味は、大気中の浮遊微粒子である大気エアロゾルによる影響評価である。エアロゾルは地球を基本的に冷却すると考えられているが、どの程度冷却するか、もしくはエアロゾルの存在による雲の変化などがこの評価に関わっている。気候研究は、それぞれの影響の程度を評価すること、またそれらを将来予測することが目標となる。その際、エラーバーである不確実さをいかに減らしていくかが研究の大事な柱になる。

気候研究は、一次レベルとしては現場観測である。現象を捉える、また継続的に測定することで時系列データを得る。これは点もしくは線のデータにしかならないので、二次レベルとしてリモートセンシングを活用することで、空間的な広がりを得ることができる。そして、これらのデータを三次レベル、モデルシミュレーションに繰り入れることで、時間的、空間的に内挿もしくは外挿して将来を予測する。

データは、一次、二次、三次と流れていくが、要求は三次レベルから来る。すなわち、モデルシミュレーションに必要なプロセス、例えばエアロゾルがどのように雲と関係しているのか、そうした各プロセスやモデルで計算するデータが正しいかどうか、さらに最近だと観測データを逐次、モデルに組み入れて修正しながら将来を予測するというデータ同化に必要なデータの要求が来る。リモートセンシングだと、例えば衛星データからモデルへのデータ供給がある。また、現場観測からもモデルにインプットする。

リモートセンシングにおいても、信号からデータを抽出するためには物理過程の理解が必要であり、これは現場観測に基づいて構築されるので、一次の現場観測が非常に大事である。しかし、産業構造と同じで、一次は天候に左右されたり、結果が出るまでに時間がかかるといったように様々な面で大変であり、論文の生産性も他と比較すると低く、若い人が余り携わらなくなりつつある。

研究対象の一つは黄砂である。これは物質循環、気候影響、健康影響から注目されている。それを連続してモニタリングしたいということが動機である。エアロゾルの観測装置としてさまざまなものがあるが、よく使われているのがOPC（Optical Particle Counter、光散乱式気中粒子計測器）であり、レーザー光線に粒子を導入し、散乱光の数を数えることでエアロゾルの個数を調べる測器である。粒子からの散乱光はエアロゾルの形で偏光特性が変わる。レーザー光線は、球形の粒子に当たると偏光状態がそのまま保たれるが、黄砂のように形が丸くない場合、偏光状態が変わる。このため散乱光の偏光を調べることで形状の情報を得ることができる。偏光を検出するセンサーをOPCに取りつけて、大きさだけでなく偏光情報も取得する装置を開発しており、今年特許を取得している。得られたデータの点の一つ一つが個々のエアロゾルに対応する（図1）。横軸は大きさ、縦軸は形状の情報となり、このグラフの

中で黄砂に相当する信号が分かれば、黄砂を他のエアロゾルと分離して定量することができる。従来の化学分析と比較することで、粒子を大気汚染系（人為起源）、黄砂のような鉱物系、海塩系に分類でき、3つの成分ごとの情報が得られる。

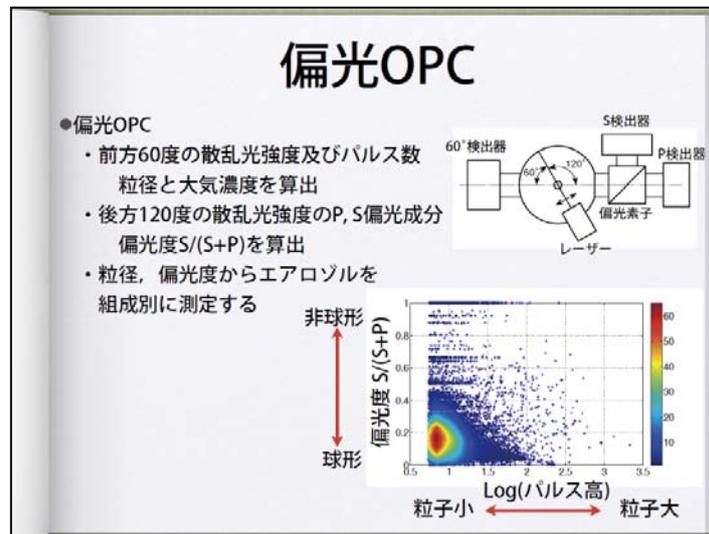


図1

甲府気象台の記録との比較を行うと、必ずしも鉱物粒子が高いときに黄砂と判定していないことや、鉱物粒子が高いときに気象台の記録がないことがある。また近傍で舞い上がったものを観測している場合もある。空間的・時間的に広範囲にわたる現象を捉えるためには観測拠点をネットワーク化する必要があるため、現在、北京、ソウルを含めていろいろな場所にこの装置を置いて、ネットワークを構築している。

また、雲の姿を見るために、雲粒を浮遊させたまま撮影する装置を作っている（図2, 3）。濃度を出すには体積当たりの個数を数える必要がある。撮影範囲は分かるが、どの程度の深さまで測れているかを決定するため、対象物との距離を変えながらピントの合う範囲を検討した。また、ピンぼけ画像をどのように除去するかも検討した。

装置を作成し北極で雲の観測を実施した。係留気球にぶら下げ、雲の中に入れて大きさを測ることで、例えば雲の中の低いところ、高いところで雲の粒子の大きさが変わっている様子を捉えることができた（図4）。また、市販化されている据え置き型の測定器と比較し、オーダーはきちんと合っていることが確認されている。まだ改善点が多いが、改良を進めている。

雲粒子の姿をそのままみたい

- 混合層雲の放射特性や微物理特性に不明な点が多い
- 極域大気境界層内の雲粒子の有効半径や水粒子、氷粒子の混合比を明らかにする
 - レーダーやライダー観測のアルゴリズム開発や検証に貢献
- 水・氷粒子の混合比の測定には粒子像の取得が有効
 - CPI, 2D-S(SPEC inc.)など既存の測器
 - 主に数十 μm 以上の比較的大きい粒子が対象
- 10~数十 μm 程度の浮遊した雲粒子を撮像可能な雲粒子顕微鏡を開発

図2

CPMの概要

- Cloud Particle Microscope
- 光学系
 - 雲粒子を浮いたまま撮影
 - 同軸落射ケラー照明による暗視野観測
 - キセノンフラッシュランプ
 - 浜松フォトニクス, L12336-01
 - パルスの周波数: 70Hz
- 係留できるよう小型軽量化
 - 密閉型バッテリーから電源供給
 - ミニPCにより制御

図3

測定結果 (6/27)

- 同一の雲内部の鉛直方向に異なる3地点で測定
- 雲底部から雲頂部にかけて、雲粒子の粒径が増加

図4

さらに、海洋は地球の7割を占めており、海洋上のエアロゾルは気候影響を考える上で非常に大事である。しかし、船で行くしかないため観測が非常に限られている。太陽周辺光を測るとエアロゾルの光学特性に関する情報を引き出せることから、揺れる船の上でも測れる装置も作った。ポイントは、太陽を捉えるのにカメラを使っており、例えば太陽から10度離れたところを観測するときには、太陽の方向から10度離れたところに向ける制御を加えることである。これにより常に10度ずれたところを追いかけることができる。現在、南極観測船「しらせ」で観測中であるが、来年、韓国の観測船にも載せて、観測のネットワークを広げようと考えている。

観測においてネットワークが非常に大事になる。観測拠点をネットワークで結びつけることで、データを線から面的にすることができるので、情報の価値を向上させることができる。ただ、それぞれの地点のクオリティが異なると、その価値が落ちるため、測定法や機器構成を含めて、データの質をそれぞれの地点でそろえる必要がある。これは標準化を進めることである。オリジナルの技術を使うのであれば、それを標準化まで至らせないと淘汰されてしまい、ガラパゴス化してしまう可能性がある。プロセス研究には最先端の観測機器の研究が必要であるが、モデル計算には、標準化された観測ネットワークによるデータが必要である。

これまでの現場観測の動向を話す。海色リモートセンシングは、海中のプランクトン量を推定する衛星観測である。70年代にアメリカが試作機を作りその有効性が分かり、日本が世界に先駆けて1996年に海色衛星を打ち上げた。この頃はアメリカと共に日本は世界をリードしていたが、残念ながらこの衛星は半年で停止してしまった。翌年、アメリカがSeaWiFSというセンサーを打ち上げ、非常に優秀で最近まで活動していた。その後、いろいろな衛星が打ち上げられており、2002年にADEOS-IIという衛星を日本が打ち上げたが、これも1年で停止してしまい、世界の潮流から日本は完全に取り残されている状況である。2010年には韓国が世界で初めての静止軌道の海色衛星を打ち上げた。これは、1時間ごとに海の中の様子を観測できるため、潮流の様子など新しい情報を引き出すことができ、世界的に非常に注目されている。最近では日本、アメリカ、ヨーロッパだけではなく、中国やインドも打ち上げを進めている。そのような中で、アルゴリズム開発に必要な現場観測機器は、大きくは海外の2社で占められている。このため、日本はそれを使わざるを得ない状況にある。(図5)

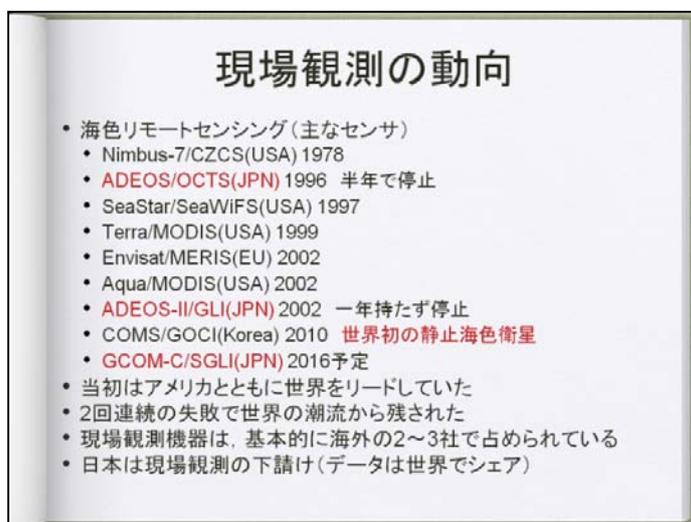


図5

それから、太陽周辺光を測ることでエアロゾルの情報を引き出す装置は、80年代に東北大学のグループが開発した。これによりSKYNETという観測ネットワークを構築したが、一方でNASAとフランスの研究機関が同じ原理の測定機を作成し、AERONETというネットワークを構築している。AERONETは、日本、アジアを含めて世界各地で展開しているが、SKYNETは日本とアジア、ヨーロッパの一部にしかなく、全球的な観測ネットワークはAERONETの方が充実している。観測のサポート体制、データ配信など、いろいろな意味でNASAのサポートにはかなわない状況である。(図6)

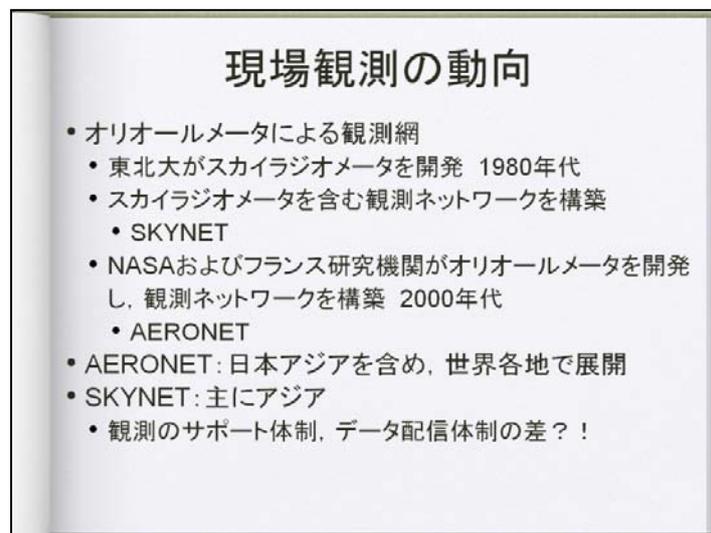


図6

大気エアロゾルの測定器について、オリジナルを追及する、海外製品を買いそのまま使用するという2パターンの研究者がいる。もちろん、サイエンスとしてオリジナルであればいずれも価値があるが、機器の研究開発という意味では、一部を除き日本の独自性は出せていない状況である。先ほど説明したように、独自のものは認められないと淘汰される可能性があるし、またモニタリングには研究予算がつきにくい。一方、予算を獲得するためには、独自の新しい測器を開発し続けなければならないといった相反する二面性がある。モニタリングは研究というよりは本来気象庁や環境省などの定常官庁が行うものと思うが、そこで実施してもらうためには標準化を進める必要があり、敷居が高い状況である。

今後の注目すべきテーマとして、アジアの環境監視が重要になってくる。中国から排出される物質のうち、何が減るか、何が増えるかによって地球に対する影響が変わってくるので、きちんとモニタリングし続ける必要がある。また、排出された物質が自由対流圏に巻き上げられると偏西風ののり、北半球全体に輸送される可能性がある。その中で放射過程や雲の諸特性に影響を与えるので、自由対流圏に入った排出物のモニタリングも重要になり、富士山頂といった山岳域での観測が求められる。

今後、衛星観測では、ハイパースペクトルセンサーや高分解能センサーが重要になってくる。情報量が格段に増加するので、モニタリングよりもプロセス研究での物理過程などを把握するのに有効になる。例えば海を見ると、これまでみることができなかった波の形1個1個が見えてくるため、海面を平坦な面

として扱うことはできなくなる。このため、新しい知見やそれを基にしたアルゴリズムが必要になる。また、データ量も飛躍的に大きくなるので、それをどう活用するかという技術も必要になってくる。

まとめると、地球環境問題といったスケールの大きな現象を扱う上で観測拠点をネットワーク化することが非常に重要であるが、標準化を図る必要があり、独自の新しい技術をそのまま組み入れていくことは非常に難しい。もちろん、これまで捉えられなかった現象をみるためには先端的な技術も必要である。一方で観測対象によっては、先端技術ではなく既存技術の組み合わせで十分対応できることが多い。しかし、研究者はどのような既存技術があるのか知る機会がないため、企業と研究者のニーズをうまく結びつけるネットワークが必要と感じている。これまでの産学連携は大学の技術を産業界にフィードバックするためのものであったが、産業界の技術を大学や研究所に伝える連携も必要であり、今後このような連携を進めていくためのネットワークが必要になってくると思う。

[質疑応答]

Q: テクニカルな話で雲の中のエアロゾルを撮影する場合、付着水はどのような評価になるか。画像だけでどう判断できるのか。

A: この観測は雲そのものの大きさがポイントであり、その中身については見ていない。

Q: 気球による観測、衛星観測、富士山などの地上のサンプリングがあるが、今後環境分野の研究開発を考えたときに、R&Dとして一番重要なところはどこか。

A: テクニカルな点では、エアロゾルは混合体になっている可能性があるので、混合体をどう評価するかが重要なテーマになると思う。1個1個の粒子の特性（どのような物質であるかという化学特性、散乱・吸収特性を表す光学特性、雲の種になるかどうかといった微物理特性）をどう見ていくかに新しいニーズがあると思う。このため浮いている状態、もしくは浮いているものをその場で観測することが必要である。

Q: 動的な対流や沈降、動きに対するモニタリングの今後についてどのように考えているか。それはあくまでモデリングか。

A: 動的に動いているものの観測は難しい。このため観測とモデルを組み合わせで評価することになる。

3-2. 「バイオエアロゾルの定量および個別粒子観察法の必要性」

松木篤（金沢大学 環日本海域環境研究センター 准教授）

主に空気中の微粒子であるエアロゾルや、フィールドでの雲の観測をメインに実施している。スペシフィックなトピックとして、バイオエアロゾルの定量及び個別粒子観察法の必要性について話をする。

北京では、現在でもしばしば日本の環境基準を10倍上回るような大気浮遊粒子濃度が観測され、現地の方々の健康への脅威であることが知られている。しかし、年間を通じて観測すると、北京よりインドのニューデリーの濃度が高かったり、経済発展の途上にある大都市では概ね似たような状況である。

東アジア地域では、大気エアロゾルを大量に放出するユニークな現象として黄砂がある。また、黄砂の通り道に位置しているため、人為的な大気汚染物質であるPM_{2.5}と自然起源の黄砂が混ざり合っている地域である。

気象庁の半世紀にわたる統計として、全国60カ所の測候所で黄砂を観測した日数を延べ日数で示す(図1)。2000年までは延べ観測日数で300を超える年は2回しか観測されなかったが、2000年代以降になるとラインを超える年が増え、一気に社会問題化したという背景がある。金沢大学近くの2枚の写真は、左が通常の日で遠くの山の輪郭がよく見えているが、右の2010年3月の大規模な黄砂の飛来時は空が黄色くなった。こういう状況を日本で見るようになるとは思ってもよらなかった。

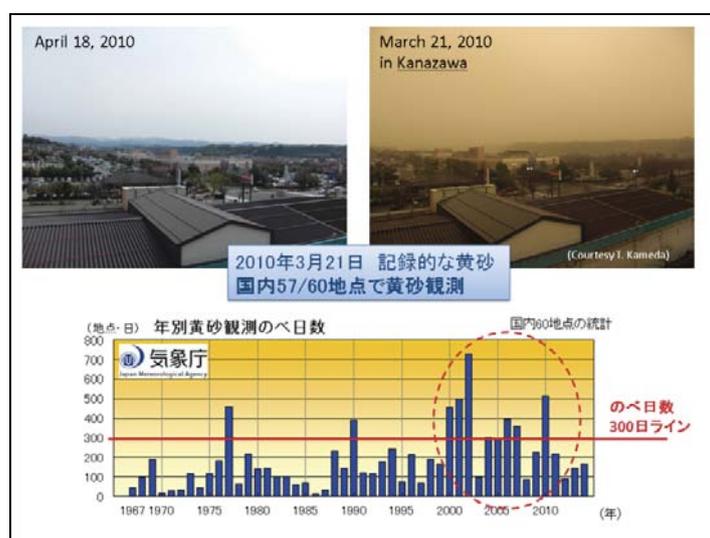


図1

PM_{2.5}や黄砂は、人間が高濃度でさらされると、例えば気管支などの呼吸器系のみならず、循環器系の疾患の原因になることが報告されており、そのために環境基準などが設けられている。近年、我々の分野で注目されているトピックとして、黄砂とともに運ばれるバイオエアロゾル、いわゆる空气中に浮遊する微生物あるいは生物に由来する有機物でできた粒子に注目が集まってきている。注目される理由の一つは、黄砂を用いたマウスでの動物実験の結果（マウスに黄砂を経口投与）である。加熱処理をした黄砂と処理していない黄砂によるマウスの細胞における比較として、過熱処理をしていない黄砂の方

が、より炎症が進みダメージが大きいことが分かっている。これは原因の一つとして、鉱物粒子だけでなく、黄砂の粒子に含まれる微生物、例えばバクテリアやカビなどの細胞壁中の多糖類が細胞の炎症を増悪させていることが指摘されており、加熱によりこれらの物質が分解され炎症の増悪作用が起こりにくいためと考えられる。このような観点からも黄砂と共に飛来するバイオエアロゾルに注目が集まっている。(図2)

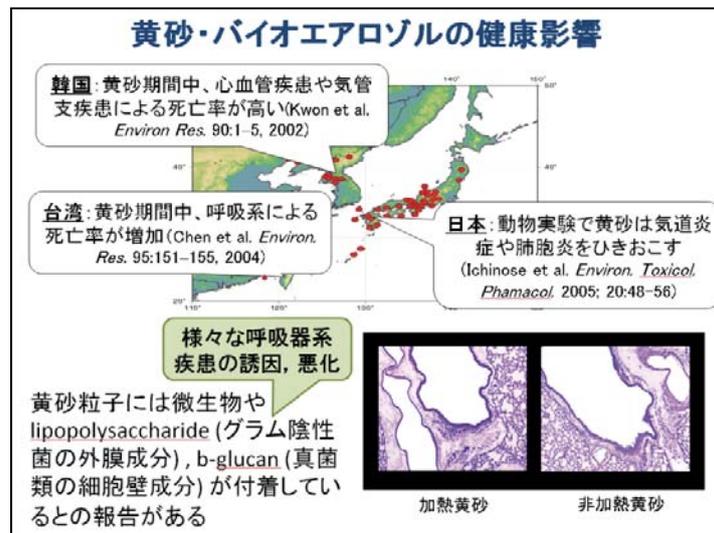


図2

さらに最近では、スペイン、アメリカ、日本人も加わった研究グループにより、日本における川崎病の流行と西風との関連性を指摘した論文がある。川崎病は乳幼児、4歳以下の子どものみに見られる全身の血管に炎症を起こす病気であり、重篤な場合だと心臓病などの非常に重大な後遺症を残す怖い病気であるが、発見から半世紀を経ても、いまだにその原因が分かっていない。特にこの研究では西風によって大陸から運ばれてくる微生物、特にカンジダと呼ばれるカビ菌の仲間が、川崎病を引き起こすトリガーとなっているのではないかと仮説を立てている。

航空機を使った観測で、日本上空で実際にエアロゾルを採取し、エアロゾルの中の微生物をクローニングしてDNAを調べ、そこから系統的にどのような属の微生物がいるかを調べている。上空ではカンジダが優先していたという報告がされている。ただし、この結果は1回の航空機観測がベースであり、スナップショット的な意味合いが強いため、現在、私の研究室ではこの研究グループと共同で、空気塊の通り道にある石川県の能登半島の先端で大気エアロゾルを経時的にサンプリングし、実際にカンジダのようなものと川崎病の疫学的な調査との関連性を結びつける取り組みを行っている。

我が国における大気汚染物質に対する対策の現状を見ると、例えばPM_{2.5}に関しては環境省のPM_{2.5}の観測点が全国的に展開され、レーザーレーダーを使った上空の黄砂のリモートセンシング網が発達してきている。黄砂やPM_{2.5}に関しては、コンピュータシミュレーションがweb上でも公開されており、感受性の強い方に関しては、明日は外出を控えるとか、マスクをして外出するなどの対策を講じるためのインフラが整ってきている状況である。しかし、現状ではこうしたインフラの対象は黄砂やPM_{2.5}などの

無機物が中心である。そのため、先ほど紹介した風送拡散する病原性の微生物への対策は、無防備とい
ってよい状況である。ということで、総合的な健康影響を予測するには、バイオエアロゾルも含んだ粒
子の風送情報を迅速かつ簡便に知る必要があると思う。現在、黄砂や人因起源粒子を大まかに分類でき
るライダー観測のネットワークなどもあるが、こうしたインフラでは不十分で、近い将来、早期警戒態
勢実現を見据えたバイオエアロゾルのオンライン自動モニタリング技術の普及が必須になってくると
考えている。(図3)

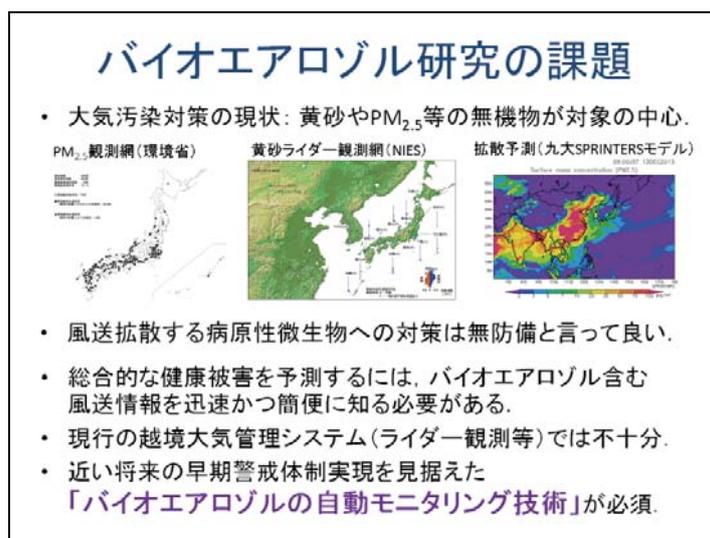


図3

現在、実用化されているオンラインのバイオエアロゾル自動測定装置の基本的な原理はいずれも似て
おり、OPCをベースにした技術である。これらの装置に共通していることは、OPCに新たな紫外線の光
源がついており、フィルターで特定の波長領域のみの蛍光を検出するディテクターが付加されたもので
ある。これらの全ての装置は、ビタミン、アミノ酸、コエンザイムなどの生体内に普遍的に含まれる分
子がUVに対して持つ特定の波長の自家蛍光を検出原理としている。特にこれらの装置は、アメリカで
社会問題になったバチルス属の炭疽菌によるバイオテロリズムの対策として急激に研究が進んだ技術
である。ただ、これらの装置は1,000万円、2,000万円クラスと非常に高額であり、まだ普及の段階には
至っていないと考えられる。また、メーカーは大体、アメリカ、イギリスである。

実際に私もこの装置のデモ機を国内の代理店から借用し、金沢大学の能登半島先端の大気観測拠点
(能登スーパーサイト)に持ち込んで、実大気エアロゾルを対象に試運転を行った。その結果を紹介し
たい。まず、OPCにより観測期間中、2回の黄砂のイベントを捉えることができた。黄砂はエアロゾル
の中でも比較的粒径が大きいために、粒径の大きなチャンネルでの係数が著しく上昇することで飛来が
確認される。この時のUV-APSと呼ばれる蛍光OPCの反応を示した(図4)。

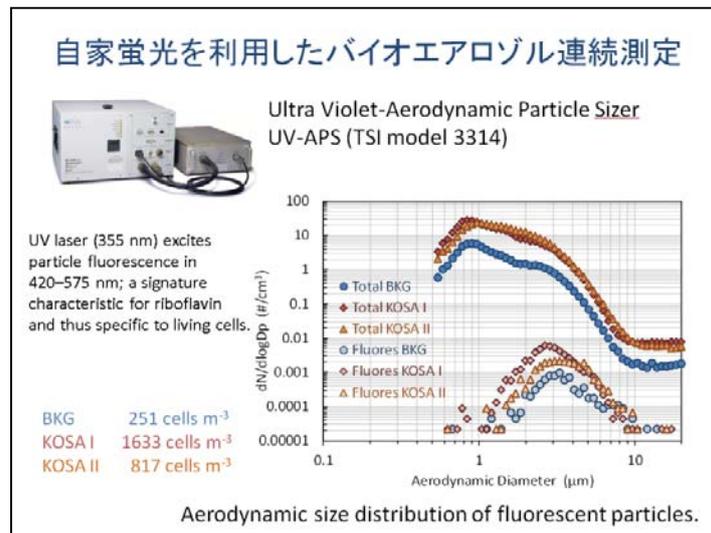


図4

図4は大気中のエアロゾルの個数粒径分布を直径が0.5µmぐらいからそれ以上の大きな粒子で、どの大きさの粒子が何個あるかというのを示したスペクトルである。青が通常、オレンジと赤は黄砂飛来時の濃度である。実際、10倍ぐらい黄砂の飛来とともに比較的大きな数ミクロンの直径を持った粒子が増加している。自家蛍光を発した粒子の個数粒径分布も、青が通常時、黄砂飛来時がオレンジ、赤である。自家蛍光を発した粒子の中心粒径は、直径3ミクロンぐらいにあるが、粒子全体の濃度からすると蛍光粒子の割合は、大体3桁から4桁ほど低い結果になっている。しかし、黄砂粒子全体と同じように蛍光粒子の割合も、黄砂飛来とともに増加しており、バイオエアロゾルと考えられる粒子の割合が通常に比べて数倍程度増加している結果が得られている。

一方で、全く原理が異なる別の研究例として、黄砂の飛来前後で実際に粒子を採取して、LIVE/DEADという染色液で微生物を染色することで、強制的に蛍光を発するようにし、蛍光顕微鏡下でカウントしている。この方法の興味深い点は、生きている細胞と死んでいる細胞を判別できることである。その生菌、死菌の数を蛍光顕微鏡下で数えると、黄砂粒子と思われる粗大な粒子の数とほぼ同等レベルの数がカウントされる。先ほどの蛍光OPCの結果では両者に大体3桁から4桁ぐらいの開きがあるのに対して、数がこちらははるかに多く計数している。さらに、1個1個のバイオエアロゾルがせいぜい1ミクロンぐらいしかないのに対して、自家蛍光OPCでは、3ミクロンぐらいである。すなわちオンラインの自家蛍光粒子とオフラインの染色プラス蛍光顕微鏡観察の結果は、粒子数濃度、中心粒径ともに必ずしも一致しないという問題がある。オフラインの染色プラス蛍光顕微鏡観察は非常に手間のかかる方法であり、オンラインの自家蛍光OPCでは実際に自家蛍光しているものは何かということが課題として残っている。当然、実際の大気中の粒子はさまざまな物質が混ざっている複雑系であり、バイオエアロゾルだけが飛んでいるわけではない。このため、黄砂に含まれる鉱物そのものが蛍光を発している可能性も指摘されている。

先ほど紹介した装置はアメリカ、イギリスなどの欧米の会社が作ったものである。ごく最近、シャープから大変興味深い装置が発表された。先ほどの装置が2,000万円クラスであるのに比べれば、1台80万

円程度と普及の意味ではより現実的な価格である。この装置の特徴は微生物を200℃に加熱し焦がすことで自家蛍光の強度を飛躍的に増加させることにある。この仕組みにより、ちりやほこりと微生物を分けることができることを謳っている。ただし、安価な分OPCのように粒子を実際にカウントするわけではなく、バルクの蛍光強度から実験室で検量線を引いて、どのぐらいの微生物がいるかを推定することになる。その場合、例えばバクテリアと真菌では大きさと質量が全然違うので、蛍光強度に対して、バクテリアか真菌かの仮定により、推定される数濃度が変わってくる。このため概ね、微生物が多いか少ないかを追いかけるには良い装置と思うが、実際にバイオエアロゾルがどの程度浮かんでいるかの正確な値を出すまでには至っていない。そこで、実際にOPCが検出する自家蛍光を持つ粒子が一体何なのか、その正体を個別粒子レベルで明らかにする必要が課題として残っている。そのためには、なるべく大気中に浮かんでいる条件に近い状態で、非破壊、非接触で明らかにする必要があると考えている。例えば、蛍光OPCの中と同じ条件で粒子を自家蛍光で光らせ、スクリーニングした後に、例えば原子間力顕微鏡などを使って、非接触でナノスケールでの形態を観察する、さらに同一視野中で顕微レーザーラマン分光装置などを使って、実際にそこから有機物のピークが検出されるかなどを検証する必要がある。(図5)

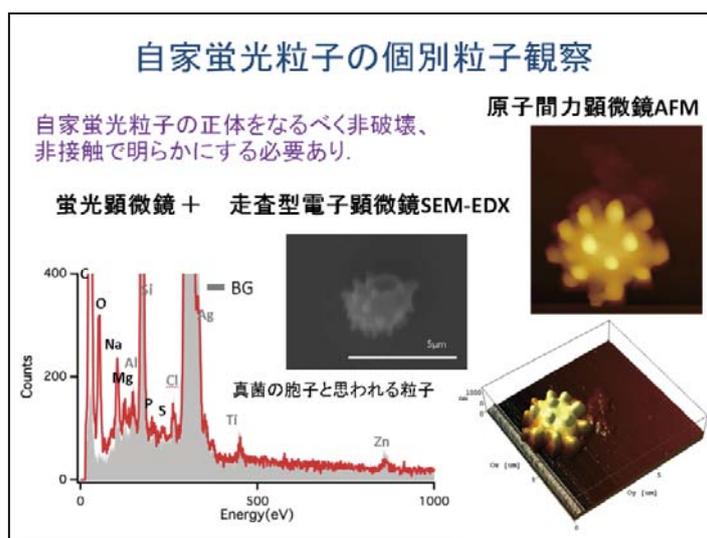


図5

まとめである。今後、バイオエアロゾルのコンピュータによる拡散シミュレーションの精緻化に向けた課題は、川崎病の研究例のように、遺伝学的な解析手法により微生物の群集構造を遺伝子レベルで系統分類学的に解析する必要がある。それと実際に未知の微生物を集積、培養し、その中に病原性を持ったものがあるかの確認、さらには疫学の専門家の協力を得ながら、疫学調査をおこなって微生物の健康影響を評価する必要がある。また、大気エアロゾルとの空気中の挙動を調べるために、蛍光OPCを改良して、ネットワークを構築していく必要がある。同時に、個別粒子観測法を開発して、バイオエアロゾルの挙動の理解を深めていく必要がある。(図6)

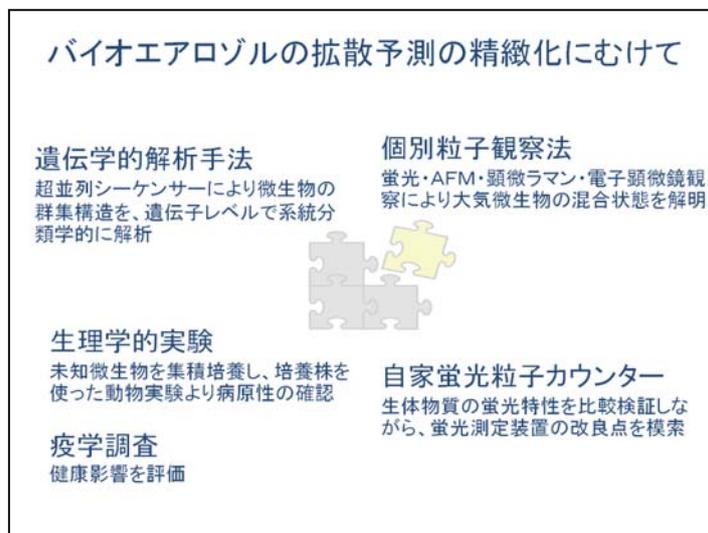


図6

[質疑応答]

- Q:** ラマンのスポット径は2ミクロンぐらいが限度なので、ウルトラソニックで分散させてマッピングをとれば、鉱物系もカーボンもオーガニックも、全部ラマンで見られないか。
- A:** 分解能を上げる最先端技術はあるが、環境試料のような複雑系で未知の試料に対しては、安定したスペクトルを全ての粒子から得るところで、実用の段階までいっていない。
- Q:** このような粒子は室内環境浄化のようなエンジニアリングで無害化できるか。
- A:** 検出部を安価に小型化して、空気清浄機、量販店で売られているようなもののセンサー部に組み込むことが重要と思う。
- Q:** 0.2ミクロンぐらいまでの粒子は普通のHEPAでとれるが、ナノ粒子はフィルターでとれない。小さいサイズの粒子の捕獲はどう対処するか。
- A:** ナノ粒子は難しい。既存の技術で大きい粒子を排除し、例えば静電気で100ナノメートル以下の粒子だけを集める方法や、わざとナノ粒子を結露させて大きくし、その後、フィルターでこしとる採取方法がある。ただ、その後、微量なものを高時間分解能で定量することにブレークスルーが必要になる。

3-3. 「マイクロ・ナノ分析デバイスと環境科学」

火原彰秀（東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授）

マイクロ流体、ナノ流体と呼ばれる、リソグラフィ、ナノインプリント、型どりなどで分析機器を作る研究を行っている。

通常の実験はサンプリングや分析前処理や検出などで構成されるが、これを全てスライドガラス程度の面積に集積化する技術である。狙いは操作の自動化や高速化、省資源、あるいは分析概念の革新であり、現状では環境よりもバイオ分析や診断技術など人を対象にしたものが大きなモチベーション、ドライビングフォースとなって進んでいる分野である。(図1)

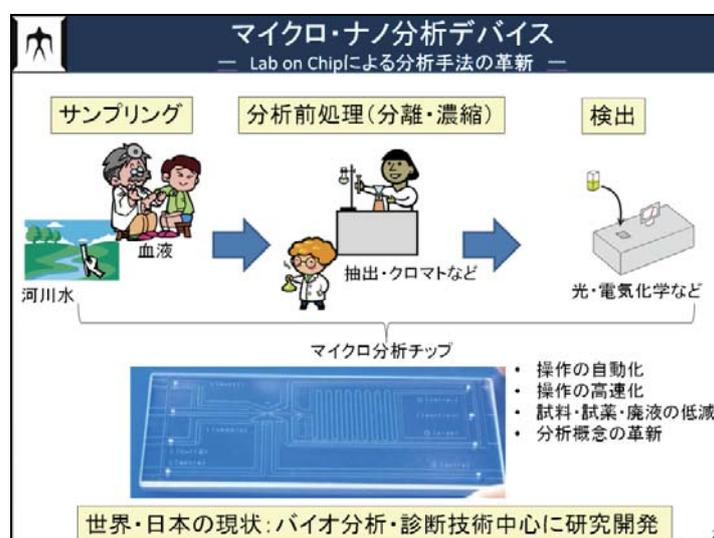


図1

分析化学は対象の中に何がどれだけあるか、空間的にどこにあるか、時間変化はどうか、その物質の状態・反応はどうかを対象としている。そのため、まずは指針があり、定量や定性をどうやるかのコンセプトがあり、それを手動か自動か、時間はどうか、量はどうかの指針に対して、サンプリングや具体的な各手法がある。

従来手法は、分析手法という群として、どこに適用するかで、バイオ分析、環境分析、工業分析として進んできた。今、私はこれを革新して、主にバイオ分析に使っていこうとしている。研究の歴史として、早くは1976年にアメリカの博士論文で、ガスクロマトグラフを10センチ径のシリコンウエハに集積化した研究が1件だけある。これは、サンプルインジェクター、分離カラム、熱伝導度計が10センチ径に載っている。その次は早稲田大学の庄子先生と東大の鷺津先生であり、1980年代には人に貼るような分析装置、あるいは細胞を二つ融合させるために細胞を流して、交流電場を印加する装置を発明していた。その後、分野の父と呼ばれているアンドレアス・マンツという人が、チップ電気泳動分析を発表した。ヒトゲノム計画が進んでいる頃であり、高速に電気泳動することが非常に注目され、大ブレイクをしたという背景がある。

論文数については、1991年にアンドレアス・マンツがその概念を提唱してから急に伸びて、今やフォローできないほどであり、4,000件ぐらい論文が出ている。

化学・生命工学などの研究者を集めた国際会議MicroTASをアジア、ヨーロッパ、北米の持ち回りで、毎年開催しており、毎回1,000人程度の参加者がある。1,000件程度の論文投稿があり60%程度が採択される。日本はアメリカで実施するとき以外は常にシェアトップであり非常にアクティブである。日本の国内学会として、化学とマイクロ・ナノシステム学会がMicroTASの日本版であり、年2回学会を実施している。さらに、アジアでの国際会議としてISMMSを年1回主催している。

アナロジーの話をする。コンピュータでは、トランジスタなどの要素を集積回路にしてIC・LSIが作られる。この演算素子をマザーボードなどの周辺技術とあわせて、コンピュータを高速化することが狭い意味での計算ハードウェア研究の中心的な考え方である。化学も単純に混合・二相合流・細胞培養・加熱などの要素を集積し、マイクロ化学システムを作っていく。私も含めて分野の主な流れとしては、このマイクロ化学システムを主に生化学分析へ適用することを目指している。(図2)

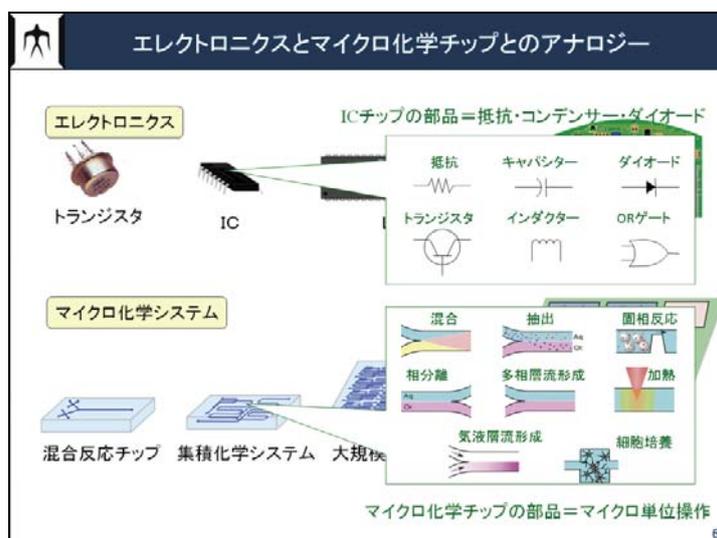


図2

IC・LSIなどの高速化によりスパコンが非常に速くなるのと同時に、別分野で簡単なICの利用、例えば炊飯器や電子レンジに入ったりして、性能が非常に良くなり大きな波及効果を及ぼした。同じように、比較的簡単なマイクロ化学システムを使うことで、環境科学が変わる、あるいは工業分析が変わることがあり得る。

化学をマイクロ・ナノスケールに集積化するためには、従来の化学装置をただ単に小さくしても働かない。ミクروسケールの特性をうまく使う必要がある。拡散距離が短い、比界面積が大きい、低レイノルズ数でほとんど層流しか作らない、小さくなるほど重力や慣性力より表面張力が強くなるので、これを上手く使う必要がある。(図3)

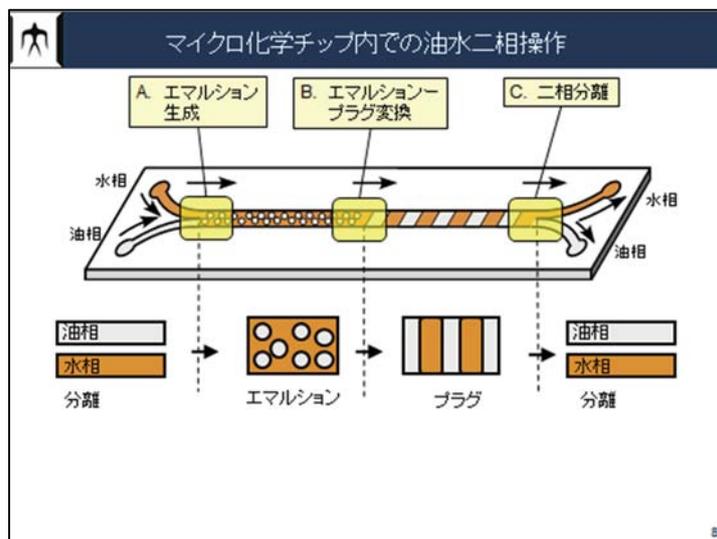


図3

私の専門の一つは、ミクロスケールで水と油が接触する現象の理解とその分析応用である。ガラスチップ中の100ミクロンスケールの流路で水と油を接触させる場合、例えば水と油を混ぜてエマルションとし、次にガラス表面の親水性・疎水性を変えることでエマルションをプラグに変換し、最後に水と油が自動的に分かれるような操作も可能である。例えば、水相中の亜鉛を測りたいとき、キレート剤を入れた油相と水相を接触させ、金属イオンをキレート抽出し、油相の色を測る。この操作をマイクロ化学チップで行うと、10秒で抽出は全て終了する。このような自動抽出操作は、設計次第で何段にも集積可能で、科警研と共同で覚醒剤検出を実施した例では3段の連続抽出を実現している。まず、pH4の尿試料に油を入れ抽出、残った水相のpH塩基性に変えて油を入れ抽出し、残った水相のpHを中性付近に変えもう一回抽出する。この前処理操作は数秒で完了する。分取された各油相分画をそれぞれGC/MSで計測すると、分画1、分画2、分画3でそれぞれカフェイン、メフェンテルミン、ヒドロキシメタンフェタミンが検出され、数時間かかる従来器具での前処理と同等の結果が得られることがわかった。

生命科学やベッドサイドの診断は省スペースの高速・自動化分析が好ましいため、小さくすると早くなる効果を研究している。

ここまで紹介した手法では、小さく早くするために微小空間を使ったが、本質的には従来の分析手法である。汎用性もある程度あり、バイオ分析に使っていた手法は、同等技術で環境分析や工業分析、食品分析、基礎分析化学など様々な対象に応用できる。(図4)

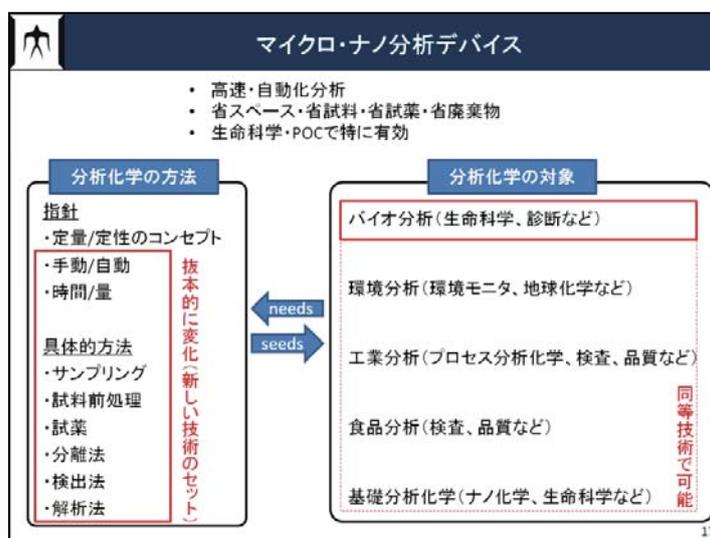


図4

マイクロ流体デバイスについて2011年にある調査会社が調べたところ、ベンチャーが何社あるかも分からない程になっており、製品の数も全く数えられないほど出ている。薬学用のものや、ハイスループットアナリシスに使われる前段階のもの、*in vitro*の医療診断、血液分析などである。メディカルデバイスは体に埋め込むようなものまで最近では売られてきている。2011年には市場規模が既に15億ドル弱あったが、2016年には数倍になると2011年時点で予想されており、実際にもそのように推移している。

マイクロ化学チップを用いると、定量や定性のコンセプトそのものが変わってくるのではないかと。量の変化があるレベルを超えると、質の変化に徐々に変わってくる。分析の概念自体が変わってくることも紹介したい。

ここに1ミリリットルの液体があり、PCRに使うDNAの場合の 10^{-15} モラー（フェムトモラー）を仮に考えてみる。これを1ピコリットルの液体に分割していく。これはインクジェットプリンターの吐出量程度である。このぐらい小さくすると、 10^{-15} モラーに1ピコリットル、すなわちマイナス12乗リットルを掛けると、 10^{-4} 分子になる。これは1,667個に1個だけDNAが入っている状況を作ることである。

今までの分析化学は、たくさんあることが前提、統計平均が前提で、例えばそれを色として検出していた。これに対して、上記のように液滴内に1個のDNAがあるか、空の液滴かという状況では、例えば目的の微生物のDNAが1個、2個、3個あると数えるようになっていく。技術的に言えば、油中水滴を作る技術が進んでおり、10ミクロン程度の液滴を作るのは簡単である。そうすると、その中で何かしらの検出ができればという前提（例えばDNAではPCRという化学増幅法がある）であるが、PCR産物を種類別に赤と緑に識別して、ヒストグラムとして赤がこれだけ、緑がこれだけと測れるだろう。（図5）

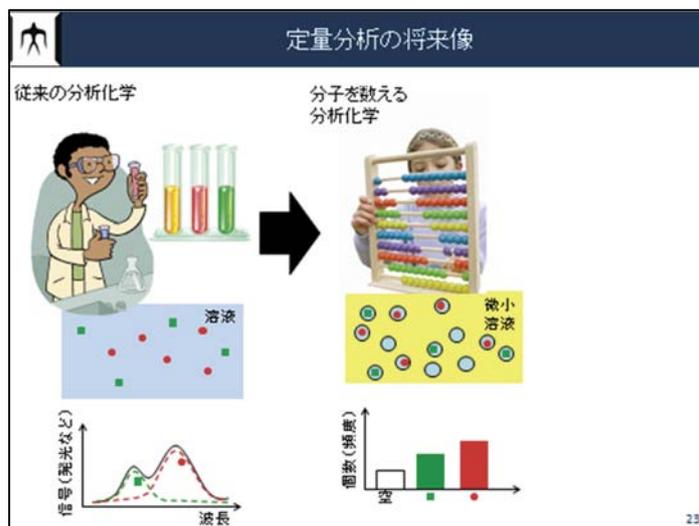


図5

このようなコンセプトは様々な場面で可能であり、環境分析においてしばしば問題になる大気サンプルリングでも、小さな体積に分けてコンタミしない状況を作ることが考えられる。コンタミと試料が別々の容器（液滴）に入るような状況では、検出反応などの工夫でより正確な分析が期待できる。このような分析法は非常に魅力的であるが、問題は感度である。一つ一つに分けられたとして、どうやって測るかということが問題であり、今後開発が必要な分野である。

このように小さくすることのメリットの一つとして、リソグラフィー技術を用いて多数の並列化が可能となり、様々な分析応用が考えられる。例えば、結晶化や凝固の解析では、単純に冷却して結晶析出させると、多数の結晶（多形）が生成しても、準安定多形は熱力学的に不安定なので、最終的には安定多形だけが残る、多形ごとの解析は困難である。ところが、体積を小さく分けて冷却し、この微小体積中で確率的に一つしか核生成が起こらないような状況を作ると、不安定多形が残ったままになり、これも解析可能となる（図6）。例えば硝酸カリウムの結晶化を解析した研究例では、結晶の形ごとに析出タイミングを計測することが実現している。

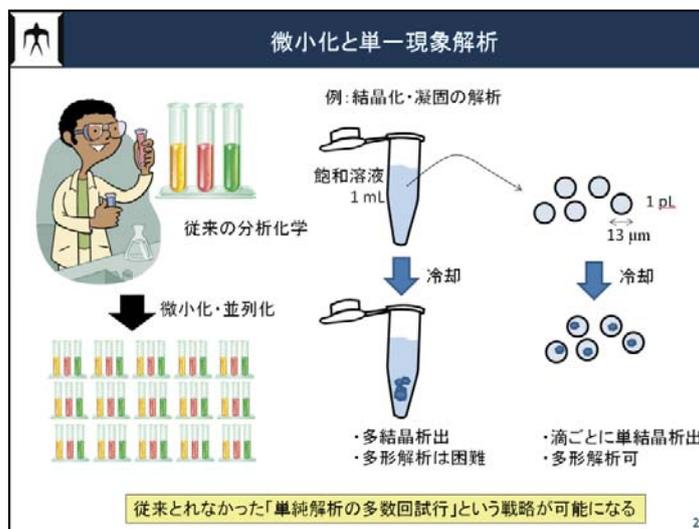


図6

もう一つ、環境関連で最近興味があることは氷である。世の中には様々な場所に氷があり環境に影響を与えていると考えられるが、その影響を解析するためには解明すべきことが多く残っている。図7は塩化ナトリウムと水の相図である。マイナス22度付近の共晶点より下であれば、水の結晶と塩化ナトリウムの結晶という形になるが、0度からマイナス22度では、共存線に沿った組成の水溶液が氷中に存在する。例えば、希薄な塩化ナトリウム水溶液を最初にマイナス100度程度で凍らせ、マイナス10度まで温度を上昇させると、2.7モラーの水溶液の液溜りが、純氷中に存在することになる。2.7モラーより低濃度のどんな塩化ナトリウム濃度から始めても、氷/液相の体積比率は初期濃度により変化するが、マイナス10度になると必ずこうなる。この液溜りの形も、いろいろな形のものができるということが最近分かってきている。スポットタイプなものからストリークタイプなもの、ハニカムのようなものなど、溶質によって変わってくる。液溜めは氷と氷の間に形成され、数ミクロン以下の空間に閉じ込められることが多い。このような状況では、氷表面から受ける水素結合や電荷の効果などがあり、例えば単純な蛍光分子の加水分解反応が、同じ温度の液相での反応と比べ早くなる。このようなことは、氷が存在することで、化学反応、特に速度が影響を受けることを示しており、環境中でも同様な例はいずれ議論されることになると考えられる。

このような現象を見てしまうと、水や大気的环境科学はたくさんあるが、氷の効果は十分考えられておらず、これを先ほどの結晶化の技術を使って行うことを考えた。これをサイエンスにするには研究が必要で、画像処理など様々なことをしてデータをとるなどの工夫が必要であるが、それはマイクロチップを使うのが良いと思っている。

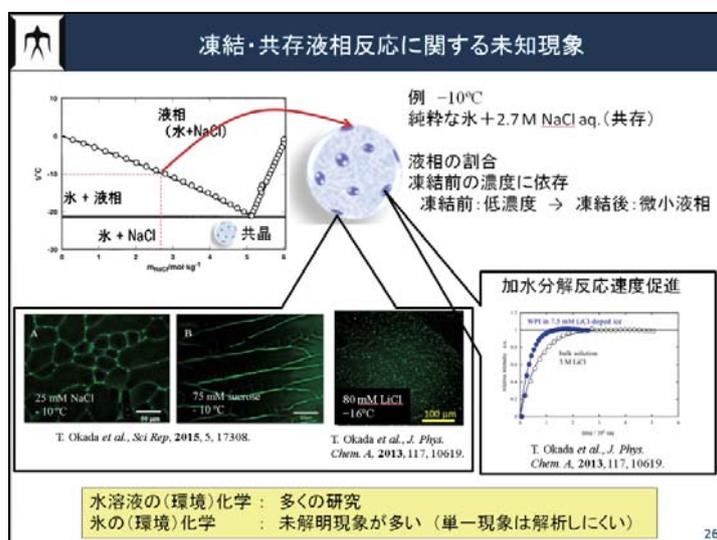


図7

微小化するとエネルギー分野にも使えることが最近発表されており、オランダ人のEijkel氏は、小さくすると表面電荷を有効利用できるとしている。これはケルビンドロップパーといって、タンクに穴をあけて上から圧をかけると水滴が落ちるが、そのとき電位をかけると水滴に電荷がたまる。電荷のたまった

た水滴が落下するときに、電場をさかのぼらせるように配置するとエネルギーを獲得できる。その分の電流を集める回路により、彼らの出しているデータで計算すると48%のエネルギー効率になる。

ツールの革新がデバイス研究になり実用化していくことを前半で話したが、近年ではツールの革新からコンセプトの革新が進展しつつある。コンセプトの革新からフィージビリティ研究、デバイス研究をして実用化がある。環境科学に関しては、この両方が必要と思っている。

これまではサンプリングしたものを分析センターに持ち込み測っていたが、分析機器を現場に持ち込み簡便に測るとというのがマイクロ・ナノ分析デバイスによる分析のイメージである。既に一部では実現しつつあり、海中ロボットが海底でPCRを行う等の例がある。また、日常活動を利用して、例えばテレビや自動車に化学分析が搭載すると、質は低いかもしれないが多くのデータがとることができると思う。

[質疑応答]

Q: MicroTASでコンピュータとのアナロジーはよく分かる。コンピュータでは、中央集積部分は素晴らしいが、ACアダプターは未だによろしくない。MicroTASも未だにシリンジポンプを使っている。分析も熱レンズは面白い方法と思うが、GC/MSはよろしくない方法と思う。入/出の部分はどうにかならないか。逆にいうと、MicroTASの研究者は、なぜそこをもっとエンジニアリングとしてやらないのか。例えば圧電を使って送液する、マイクロ流路でマニホールドを上手く作るなど、もっと進んでも良いと思う。

A: やっている人もいる。ただ、バイオを目指しているところがネックになっていると思う。シリンジポンプは医療機器の認可にそのまま使える。電気浸透流ポンプもあるが、それで医療認可をとることは大変である。医療以外では使えると思うが、信頼性に関してどれぐらいコンセンサスがとれるかが微妙なところである。出口のディテクターの研究者もたくさんいる。電気化学のセンサーを使うという方向性や、質量分析をとにかく指に載せるぐらいにする方向性で取り組んでいる人もいる。

Q: 単一分子レベルではシグナル化が弱く検出が難しい点についてはどうか。

A: 答えは今のところ持ち合わせていない。しかし、PCRも最初はできるとは思っておらず、一回できてしまうと、いろんなゲノム増幅法ができた。何か化学反応としてなだれが起こるような現象などを見つけてディテクションに持っていく形になると思う。振動反応など、様々な試みがあると思う。

3-4. 「大気圧プラズマを用いた新しい分析装置」

沖野晃俊（東京工業大学 大学院総合理工学研究科 准教授）

我々は、大気圧プラズマを使った種々の装置を作製しており、そのメインターゲットが分析装置である。プラズマは、 H_2O の例だと0度以下が氷で固体、0度以上が水で液体、100度以上が水蒸気で気体、もっと温度を上げると電離してプラズマになる。プラズマは反応性があるので、半導体プロセッシングや空気清浄、脱臭に使われる。また、プラズマは光を出すのでプラズマディスプレイやレーザー分析などに使われている。さらに、環境分析、有害物質の分解、核融合などに使われてきた。

基本、プラズマは低圧で作っていたが、ここ数年、大気圧プラズマが大流行している。私は、1990年くらいから大気圧プラズマの研究をしていたが、当時、アメリカの電気学会のプラズマの部門では、ほとんど誰も大気圧プラズマは研究していなかった。2005年くらいまでは発表の割合が1%を切っていた。それが、2006年、2007年と倍に増加し、2012年には1/4程度になっている。この理由は、低温プラズマが開発されたためである。2013年以降は、この学会では発表は減り、医療、農業、化学などの新しい大気圧プラズマの学会や研究会ができていているという現状である。

低温プラズマは、触ることができたり、ジェットにしたり、また、我々が開発した零下のプラズマでは、水に当てると水が凍るといった不思議な状況を作ることができる。これによって、従来のプラズマ処理は、金属や半導体くらいだったが、プラスチック、繊維、紙、生体など、何でもプラズマを当てられるようになり、プラズマの応用が表面処理や医療の分野で始まっている。(図1)



図1

プラズマ中でどのようなことが起きているかというと、イオン、電子、励起分子などは非常に温度が高く、 $Ar+O_2$ プラズマの場合、従来は Ar^+ 、 O^+ 、 e^- 、 Ar^* 、 Ar^m 、 O^* のようなものが使われてきた。一方、低温プラズマではほとんどの原子・分子は室温のままである。一部の原子・分子が高温になっているという、かなり非平衡な状態になっている。さらに、温度が下がってきたので、今までほとんど注目

されてこなかった数eVのラジカルなど、高エネルギーの粒子よりは若干低めのものが注目されている。このラジカルが化学反応で様々なことを起こす点を利用して、血液凝固、表面処理などに使われてきている。環境分析の分野では、従来、高温のプラズマを使った励起、イオン化が行われてきたが、今後は、ラジカルによるソフトなサンプリングやイオン化への使用を我々は考えている。

まず、高温のプラズマでは質量分析の装置が30~40年前から発売されている。超高感度な装置として世界中で利用されている。分析感度が非常に高く、市販装置で検出下限がpptを下回るような装置が普通に売られている現状である。従来の元素分析では、液体の試料を霧吹きで吹き、それをプラズマ中に導入して、質量分析、発光分析などを実施する方法であった。この方法だと、分析感度はすごく良いが、0.1ml程度の量の分析試料が必要であった。

これに対して我々は、極少量のものを測定するためドロプレットネブライザというものを作製し、液滴1個で測定可能にした。従来の50万分の1の溶液試料を分析することができる(図2)。このドロプレットネブライザから出る信号は1ms程度と非常に短い。これに対して、市販の装置は100ms程度を積算するので、そのままでは使えない(図3)。そこで、超高速サンプリングを開発した。その結果、図4のように、ドロプレットが一つ飛んできたときの信号を数十万点のポイントで超高速にとる。それで、SNを稼ぐことで可能となり、検出下限の絶対量は55zg (10⁻²¹g)まで測定できるようになった。

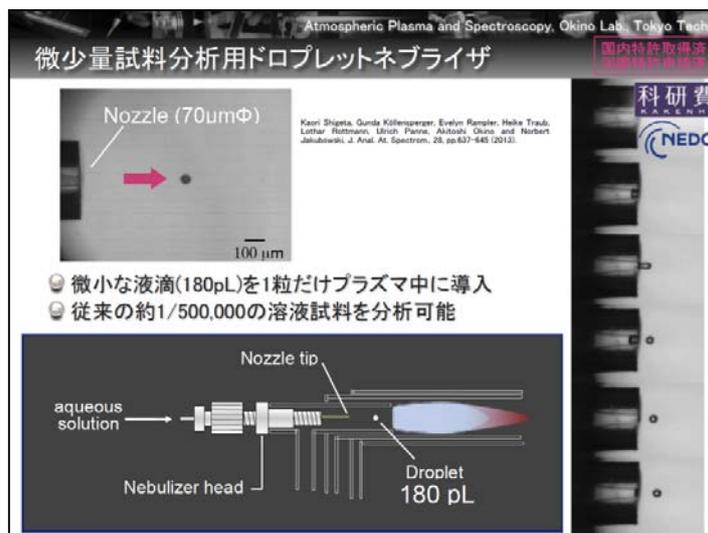


図2

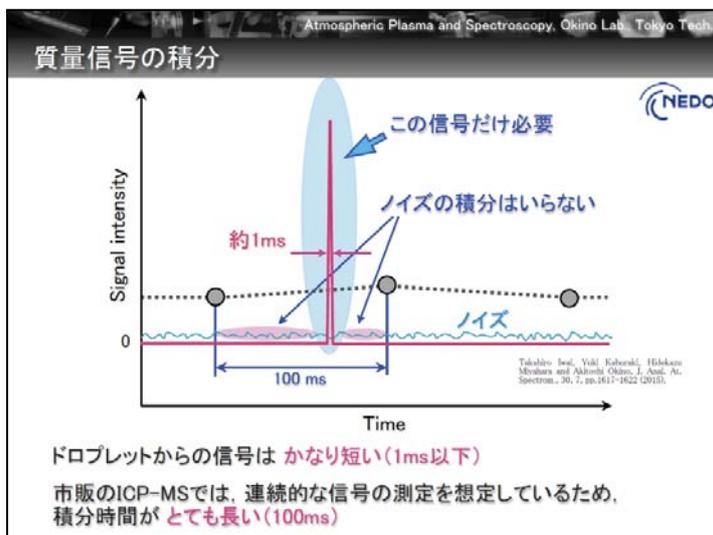


図3

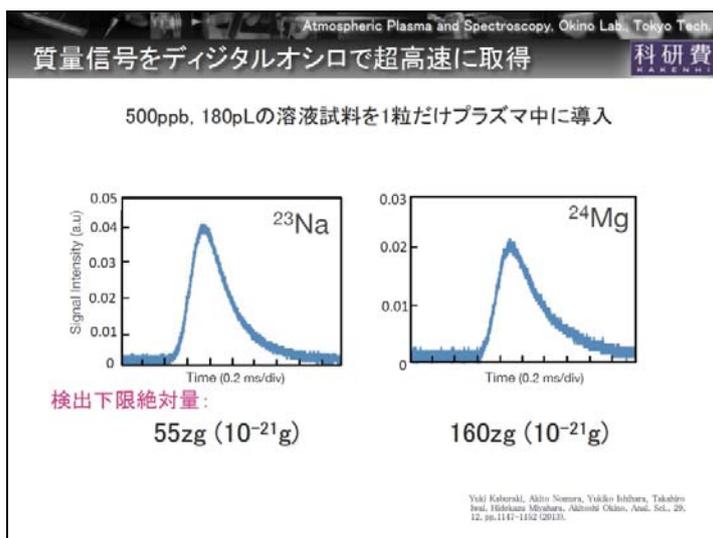


図4

低温プラズマを適用した一例として、ガスクロ用にプラズマイオン化検出器を製作したことが挙げられる。これは図5のようにヘリウムガスを流し放電を起こすと、ヘリウムが励起された状態になる。これにガスクロで分解された試料が混ざる。ヘリウムはエネルギーが高いので試料をイオン化して検出するという手法である。これだと今までのFID（水素炎イオン化型検出器）や熱伝導度検出器などで分析できなかった水素などもppbレベルで分析可能となる。また、酸素も分析できる。このように水素、酸素、窒素、メタンなどの一括高感度測定が可能になった。この装置は既に市販されている。

これを水素中の微量不純物の測定に使用することを考えている。水素ステーションの水素は100%ではなく、不純物が混ざっている。その中の微量物質の測定に利用しようということである。現在、そういう装置を開発中である。

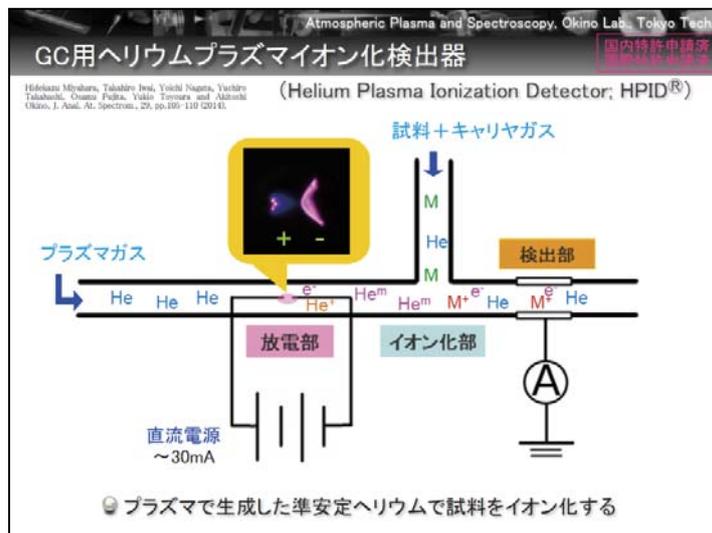


図5

もう一つ、低温プラズマを使った表面付着物の脱離というものを実施している。これは、プラズマを物の表面に当てると、表面が親水化され、表面についていたものが飛ばされ、きれいになる。その飛ばしたものを捨てずに分析するのがこの手法である。図6の場合は、脱離したものをその場でソフトにイオン化した後、質量分析を行い、表面付着物を高感度で同定する手法である。

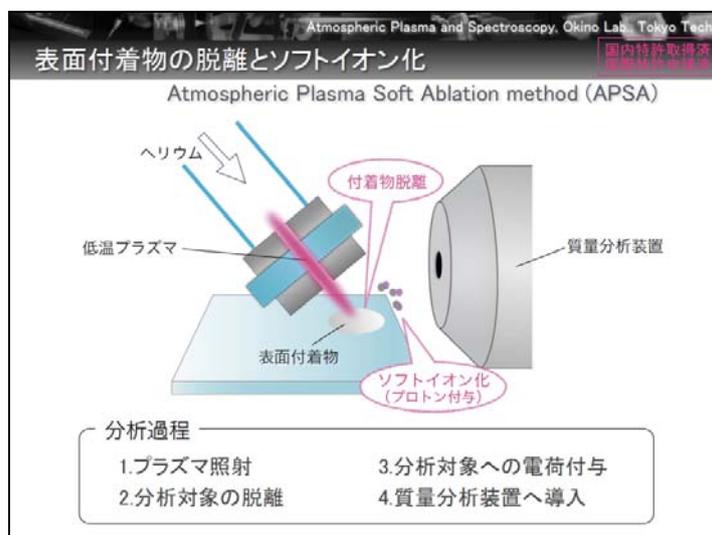


図6

この手法は、熱ではなくプラズマの活性種で脱離させることができる。また、プラズマの温度が低い
ため、フラグメントがあまり生成しない。分子が分解されずに出てくる。さらに、ソフトなイオン化により、きれいなピークを得ることができるので、表面付着物をそのまま分子状で分析できる。将来的に

は、プラズマを肌に当て、汗の成分を分析することにより病気の診断ができるかもしれない。それから、化粧品の成分も分析できる。現在、そのような装置を開発中である。

環境分析機器開発について、分析機器を製作するインパクトは非常に大きく、機器を製作できる国が世界の科学をリードすると考えられている。実際にノーベル物理学賞や化学賞のうち、計測機器に関する成果は2割近くを占めていると言われており、日本の環境関係の計測機器は世界でもトップレベルである。特に、質量分析装置、電子顕微鏡や分光装置は世界のトップクラスである。シェアでは、アメリカが強く6割強、それに日本とドイツが続いている。中国はまだまだであるが急速に追い上げる可能性が指摘されている。問題点としては、分析機器の開発強化が必要だが、機器メーカーの開発余力が不足していること、大学等でこのようなハードウェアを研究している人が少ないこと、海外製の計測機器への依存度が大きくなっていることが挙げられる。

そんな中、JSTの先端計測分析技術・機器開発プログラムでは、多種多様な装置が開発されている。特に、固体の局所分析やイメージング(SIMS、電顕、X線、レーザーなど)はかなり進展している。それから、液体や気体の希薄試料の分析(ICP-MS、GC、LCなど)も進展している。さらに、アプリケーションは日本が得意な分野で、環境関連のデータの解析法や利用法も世界トップクラスと思う。ただ、次の重要なターゲットは、微小領域の希薄試料の分析と考えている。微小領域(微量)の希薄(低濃度)試料、この両方がターゲットと考えている。微量で希薄ということは、絶対量が極めて少ない物質ということである。

人体に含まれる元素には、多量元素から少量元素、微量元素、超微量元素まである。濃度的にはたくさん試料があれば普通の市販の装置ICP-MSで全て分析することが可能である。しかし、細胞1個中だったかどうかという絶対量が非常に少なく、急に厳しくなる。SPring-8を使用しても50ag (10^{-18})程度までが限界と言われている。それ以下はSPring-8でも測定できない領域になる。

どのようにして少量の物質を測定するかというと、弱くて連続的な信号はノイズレベルより低くなり検出できないので、同じ信号量でも強く短い信号であればノイズに勝てるだろうと考えた。同じ面積(同じ信号量)でも一瞬で来ればノイズを上回って測定できる。この一瞬で来るというのは何かというと、短い時間で試料を導入して、かつ高濃度の試料をそのまま入れようというわけである。これには、従来の霧吹きのようなものと、連続でエアロゾルになり不可能であると考えた。また、レーザーアブレーションはパルス的な導入だがエアロゾルなので濃度は薄いと見え、絶対量の少ない試料にはパルス的な導入をして、さらに、固体のまま入れることを考えた。この手法であれば、例えば、細胞1個、大気粉じん1個、細菌1個など、そういうものを分析できるのではないかと考えている。従来は、多数の細胞や粒子を使用して微量元素の平均情報を得ていたが、それぞれ1個の細胞の中が測定できるようになると、様々な効果があるかもしれない。(図7)



図7

これまで多数の粒子の平均情報としての超微量成分や、単一粒子中の主成分に近い部分の成分の分析が行われてきたが、今後は、細胞や大気粉じんなどの超微量成分の調査が期待できるようになる。大気粉じんや細胞なども、それぞれ一つずつ個性を持っているかもしれない。もしかしたら、実は一緒かもしれない。そのような調査ができると考えている。

それをどうやって実現するか。液滴の中に細胞や粒子を入れて飛ばし分析すればいいと思いデモ的に試みた結果が図8である。藻類を1個だけプラズマ中に入れて分析すると、単一細胞の微量元素分析が可能となっている。

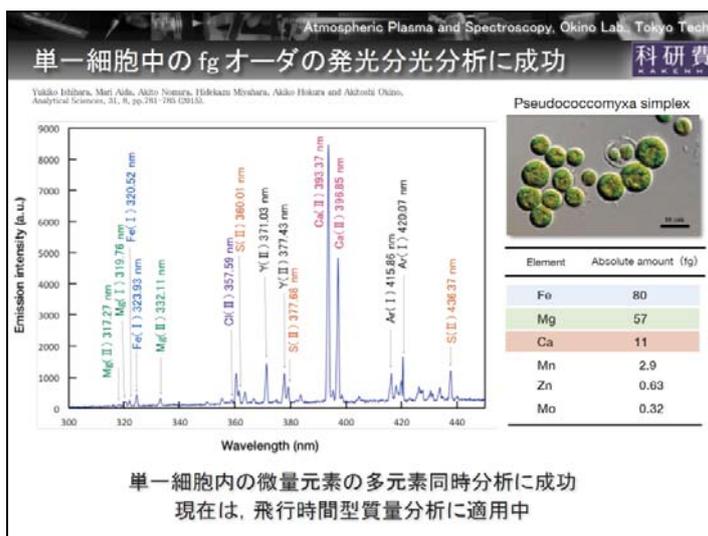


図8

同じ細胞や粒子は存在しないので、多数の情報を一回で測定しなければならない。これを実現するため、質量分析をする前に発光分析で量の多いところも測定する。さらに、プラズマに入れて破壊的に分解する前に、マイクロ流路やセルソーターを用いて測定できるものは、顕微鏡、ラマンや電気伝導度などで測定した後、破壊分析をしようと考えている。先ほど55zgという単位を言ったが、これでもまだ、1,500個程度の原子がないと測定できない。質量分析装置の改良は必須であると考えている。(図9)

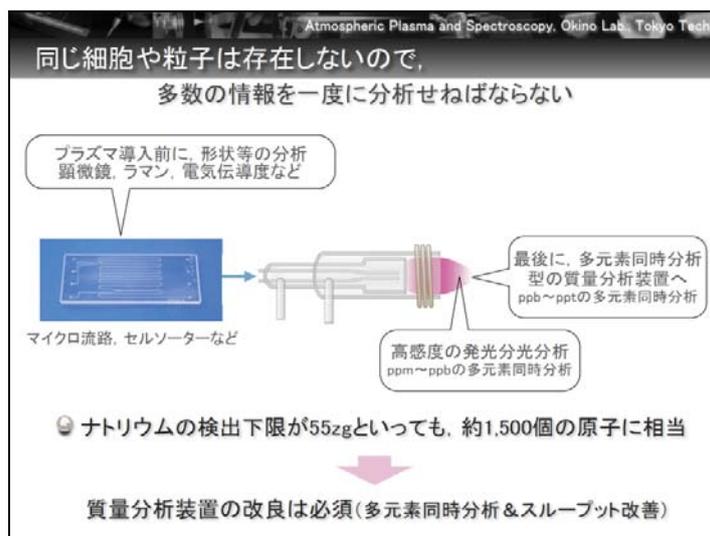


図9

以上をまとめると、現在、零下から数千度までの大気圧プラズマが開発され、熱だけではなくラジカル等も有効利用できるようになってきている。これにより、環境分析分野では、従来の原子化、励起、イオン化だけではなく、ソフトなイオン化や付着物の選択的脱離等への利用が始まっている。さらに、固体の局所分析やイメージング、液体・気体の希薄試料分析が非常に進展している。次の重要なターゲットは、単一の細胞、粒子、細菌等の中の微量元素の分析や、微量な表面付着物の分析であると考えている。

[質疑応答]

Q: プラズマソースにもいろいろあってもいいと思う。例えば、ヘリウムプラズマ、アルゴンプラズマなどは既に確立できていると思うが、もう少しプラズマになりにくいものを使って、ソフトケミカルイオン化を狙うことは、今後あり得るか。

A: 我々の研究室ではマルチガスプラズマと呼んでいるが、様々なガスでプラズマを作れる装置を開発しており、それを使うとイオン化や脱離の状態がかなり変わってくる。これまでヘリウムのプラズマをメインに使っていたが、これに水素を混ぜるとプロトン付与が上手くいくことがわかっている。ただ、水素をあまり混ぜ過ぎるとフラグメントが多くなる、つまり分子が破壊されることもわかってきている。ソフトイオン化の量を増やそうとするとフラグメントが増えるので、両立はなかなか難しい。よって、ガスを変えてちょうどよいプラズマの当て方やガスの種類を現在検討している段

階である。

Q: 最後の細胞、粒子、細菌などの個別分析ができれば夢のような話で大変興味を持っている。この例は、結構ハードなイオン化で1個の細胞を分析した例だと思うが、それはソフトイオン化も自在にできるのか。

A: この例に関しては元素分析をしているので、プラズマ中に入れてばらばらにしている。ソフトなイオン化は、高温プラズマで分解するのではなく、低温プラズマで脱離させて、プロトン付与して質量分析する。この場合だと分子の質量が測れる。このような使い分けになる。

Q: 最初にソフトイオン化で表面のものを取り払い、付着しているものを見てから、母材が何なのかという情報が1個の粒子から得られると素晴らしいと思っている。

A: 現在の分析感度はfmolレベルである。量が多いものなら分析できると思うが、かなり感度を改善しないといけないと感じている。

Q: 電子温度をある程度コントロールできると面白いと思う。電子温度の高いアークに近いような系統か、もっと低い系統か、同じ非平衡のプラズマで、ソースはヘリウムで電子温度だけを変えるようなことはどれぐらいコントロール可能なのか。

A: 大気圧で電子温度はほとんど変わらない。最高でも1eV~2eV程度。原理的にヘリウムの電子温度が高めになる。放電の方法を変えても電子温度はあまり変わらない。変えられるのはガスの温度で、それを零下から高温まで振って実験している。

3-5. 「環境化学物質のノンターゲットモニタリングとインフォマティクス」

橋本俊次（国立環境研究所 環境計測研究センター 有機計測研究室 室長）

我々は、環境汚染物質を網羅分析して、どのようにデータを処理するかということと、その課題についての研究をしている。私たちの身の周りには非常にたくさんの化学物質がある。今年、アメリカのCASに登録されている化学物質が1億件を突破した。この全ての物質が環境を汚染しているわけではないが、一部は環境中に流出し、問題を引き起こしている。しかし、どれくらいの割合が環境中に出ているのか、また、どれくらいの割合が問題を起しているのかについてはわからない。それを知ることが環境対策の第一歩と考え、環境中から化学物質を抽出し分析している。

代表的な汚染物質として、ダイオキシンやPCBなどがある。分析には、抽出から前処理、検出などについて、1物質に1つの分析法が決まっている。よって、このような物質が増えれば増えるほど、分析の数も方法も増えていくといった非常に効率の悪い状態になっている。これを解決するため、汚染物質を一度に測定する分析法について研究している。

また、1物質に注目すると、その他の物質は試料中から除去することになる。すると、着目した物質については測定できるが、それ以外の化学物質は測定できていないので、本当は他にも問題の物質があるのではないかといった漠然とした不安が残る。そこで、試料中の化学物質を網羅的に全て検出できるような方法についても研究を進めている。

我々は、多次元ガスクロマトグラフ（GC×GC）を使用している。これは、従来のカラムが二つつながっており、1本目のカラムを通して出てくる物質が、2本目のカラムでさらに分けられるといった超高分解能のガスクロである。これに高分解能飛行時間型質量分析計（HRTOFMS）、タンデム型質量分析計（MS×MS）などを接続し、同時に全体のデータを取得している。このように、未知物質の検索が可能な網羅分析法を開発してきた。（図1）

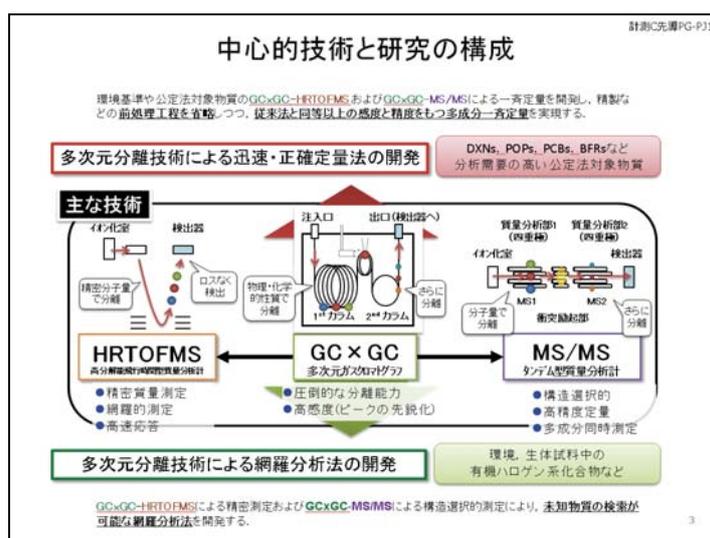


図1

まず、従来から問題になっているダイオキシンやPCBなどを一度に測定する方法を、GC×GCと飛行時間型質量分析計をつなげて開発した。高分離化による前処理の完全省略を実現し、試料をそのまま導入することで前処理での物質損失を防いだ。大気の場合は、Tenax捕集管に捕集して、これを加熱脱着装置に直接入れる。水の場合は、樹脂をコーティングしたスターバを回転させ、その樹脂を取り出し、加熱脱着装置に入れる。装置の組み立てだけではなく、データを読むソフトウェアも開発した。出てくるデータは、二次元に展開された画像のようなイメージである。そこから対象物質を探し、そのピーク強度を測り、自動定量するソフトである。自動でデータベースに設定したダイオキシンやPCBなど、様々な物質の質量数と保持時間情報を探し、そこから物質を定量する。(図2)



図2

さらに、もともとターゲットではない物質の情報を抜き出すような方法を考えている。GC×GCから出てくる情報を精密質量イオンクロマトグラムで描かせることにより、非常に膨大なデータが出てくる。1件の試料で10GB、多い場合では数百GBのデータになる。この中からいろいろな物質情報を抜き出す必要がある。つまり、従来は、まず測りたい物質を決め、その物質だけを残すように前処理で他の物質を除いてきた。しかし、この手法は、最初に全てのデータを取り、試料中にあるものを全てスペクトルデータ化する。その後、データの中から問題になった物質、これから問題になるかもしれない物質といったものを探し出すことが可能である。

そのための様々なソフトウェアを製作してきた。一番簡単な方法として、例えば、元素の同位体情報を利用して、同位体組成をまずスペクトルの中から見つける手法が考えられている。ハロゲンでは特に同位体組成が特徴的に出てくるので、そのような物質を質量スペクトルから探し、抜き出す。あるいは、通常は邪魔になる炭化水素を、質量のずれを利用することで炭化水素のスペクトルだけを消すソフトを製作することでハロゲンなどの目的の物質を同定することができる。抽出にもデータの除去にも使えるので、従来前処理でやってきたことをソフトウェアでのデータ処理で可能としている。(図3)

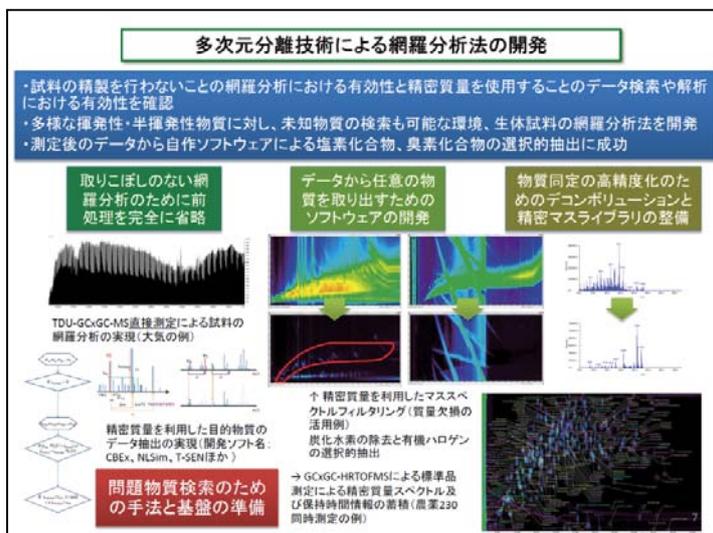


図3

例として、Tenax捕集管に大気を捕集してGC×GC-HRTOFMSで測ると、オリジナルのデータは二次元のクロマトグラフになる。色の暗い部分は何も無いことを示し、青や赤色の部分にはたくさん存在することを示す。そこから1点だけスペクトルを抜き出し、ソフトウェアで質量数を利用したデータ抽出あるいは除去を組み合わせると、例えばこの場合は、有機塩素系の化合物だけが残る。(図4)

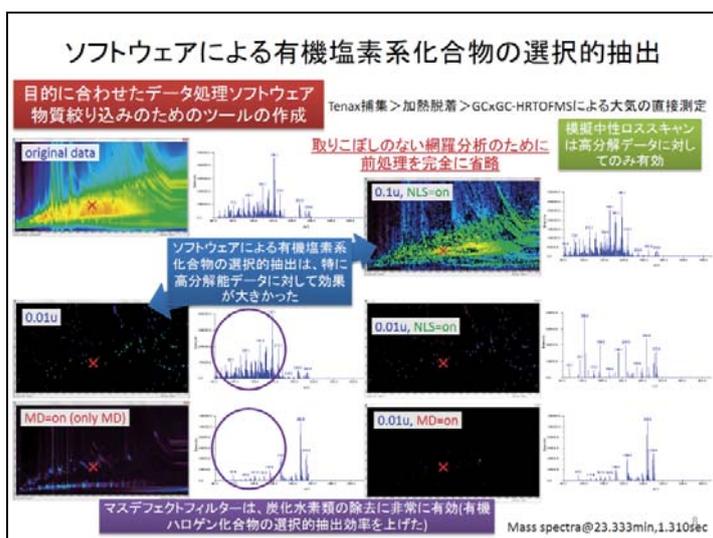


図4

今までは、まず、オリジナルのデータからその物質が何かということを質量ライブラリーと照合し、その物質が何かということを検索する。検索すると、大部分は炭化水素であり、我々が探している環境汚染物質は多分ここにはない。見なくていいデータだということになれば、除去する必要がある。ソフトウェアで炭化水素だけ選択的に除いてやると、もとのままではわからなかったものが見つかる。裏を返せば、GC×GCを使っても、まだ、溶出してくるものがたくさんあるということがわかる。(図5)

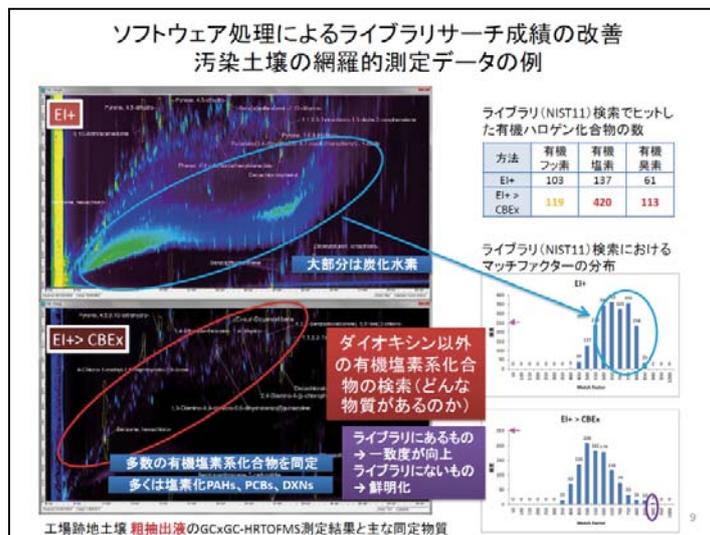


図5

図6は、余計な質量スペクトルを除いた後、ライブラリサーチの結果を比べたもので、同じ保持時間のものを横に並べている。ソフトウェア処理によってハロゲン化合物がたくさん見つかる。ソフトウェア処理をすると、ライブラリサーチの結果もより良くなる。(図6)

EI法とソフトウェア抽出による土壌測定データの
NISTライブラリ検索結果の比較(抜粋)

EI + CBEx				EI			
Peak ID	RT I (min)	RT II (sec)	Compound Name	Match Factor	Compound Name	Match Factor	
54	8.49	0.41	Benzene, tetrachloro-	772	Dichloro-1-oxa-2-sila-1,2-dihydronaphthalene	608	
196	10.16	0.98	Naphthalene, dichloro-	767	1-Chloro-6-phenylhexane	576	
232	10.56	1.14	Naphthalene, dichloro-	770	Fmoc-L-phenylalanine	584	
231	11.49	1.17	Benzene, pentachloromethyl-	762	(na)		
1	11.89	1.37	Benzene, hexachloro-	851	Benzene, hexachloro-	751	
314	14.03	2.19	Pentachloroaniline	790	Acetic acid, cyclopropyl-(1,1'-biphenyl-4-yl)methyl ester	542	ソフトウェア処理により塩素系化合物の含致率が向上
75	15.03	1.97	Naphthalene, tetrachloro-	777	Naphtho[2,3-b]norbornadiene	810	
293	16.23	2.41	Naphthalene, tetrachloro-	809	Benzene, 1,1'-(2-methyl-1-propenyldiene)bis-	595	
183	16.63	2.60	Naphthalene, tetrachloro-	822	1,4,9(11)-Pregnatriene-3,20-dione, 21-acetoxy-17-hydroxy-	668	
214	18.43	3.11	9H-Fluoren-9-one, dichloro-	745	2-Cyclohexen-1-one, 4,4-diphenyl-	604	
216	23.23	2.86	Tetrachlorodibenzofuran	828	2,6,10,14,18,22-Tetracosahexaene, 2,6,10,15,19,23-hexamethyl-, (all-E), didehydro deriv.	562	
238	24.36	3.97	1,2-Bis(2-chlorophenyl)-1,2-bis(3-chlorophenyl)ethane	725	11H-Benzo[a]fluoren-11-one	742	
281	27.63	2.76	Pentachlorodibenzofuran	755	Molybdenum, dicarbonylbis(4-2-methylenecycloheptanone)-agathic acid	546	
382	28.23	2.57	Biphenyl, octachloro-	782		522	

Data were extracted by using only mass defect filtering (as part of our original CBEx software) after measurement by EI. Compounds were estimated by a library search with NIST 11 (NIST mass spectra library 2011). na = not applicable; corresponding peak was not found at the same retention times

Hashimoto et al. ESPR submitted 10

図6

別の方法として、重なっている質量を分離するデコンボリューションという技術をソフトウェアで実施する研究している。これは、ノンネガティブ・マトリックス・ファクタリゼーションという方法でピークを分離する手法である。

このような手法開発を積み重ね、環境試料中の汚染物質を未知の汚染物質も含めて測りたいと考え、

そのための様々なソフトウェア類を製作してきた。

我々の中長期的な目標は、人の健康と環境の保全である。環境中にどれくらいの化学物質が我々に悪さをしているのか、なるべく全体を把握することを一つの目標にしているが、今後の具体的な課題としては、増加する化学物質の一斉高精度定量法を様々なものに対応できるように開発していきたいと考えている。現在使用しているのはGC×GCであり揮発性とか半揮発性の物質をターゲットにしているが、環境中にある化学物質で問題になりそうなものは、医薬品や化粧品など極性の高いものが多いと考えられる。そのような物質はGCで測るのは難しいため、GCだけではなくLCやそれ以外の方法も考えている。(図7)

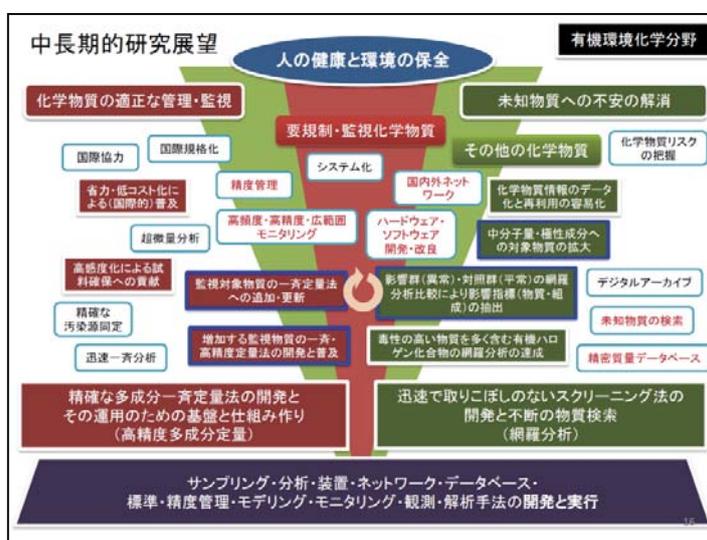


図7

環境中にある物質の網羅分析(ノンターゲット分析)は課題が多い。物質を測るだけでは問題は解決しない。同時に毒性や影響も網羅的に測らなければならない。化学分析で非常に多くの物質が測れるようになると同時に、生体影響、生物影響も網羅的な方法で迅速に測る方法が必要になる。それを組み合わせたときに両方のデータ、多変量と多変量の中から意味のあるデータを抜き出すといったことが必要になってくる。そのような解析法の開発を考えなければならない。

多変量を解析するためにはデータ量も多くないといけないので、毒性分析でも非常に多くのデータ数と、そのための解析法が必要になると思う。現在の質量分解能も分離という意味では、まだ全然足りない。質量分解能10万~20万の装置があると、物質の同定も迷わなくて済むのではないかと思う。また、マスマイブライリーが全く不足している。現在、二十数万物質のデータしかないが、環境中にはもっとたくさんの化学物質があるので、精密質量のライブラリーも充実させていかなければいけない。

我々は現在EI法を使用しているが、ソフトなイオン化といったことも一つ考えられる。マスフラグメントから構造式を推定するソフトはいろいろあるが、意外なことに化学構造式からスペクトルを予測するというのは精度がまだ悪い。このような課題を解決していかなければいけないと考えている。

同様の取り組みが既に欧米で始まっている。NORMANやSoutionといったものが欧米では始まってい

る。データベースの作成というの世界的な潮流にある。

先ほどのサンプリング方法も、アクティブサンプリングだけではなくてパッシブサンプリング、動力を使わないサンプリングの研究も増えてきている。また、GC×GCもマイクロデバイスのようなものが組み込まれてきており、技術開発がどんどん進んでいる。

[質疑応答]

Q：環境の状態を評価し、時系列できれいになったとか汚くなったとかのインフォマティクスの研究を行っているか。

A：化学分析の研究を中心に実施しており、そういった動態の解析は、別の部門でやっている。

Q：EIでマスフラグメントから構造推定はできないのはなぜか。親ピークから数えてパズルのピースを組み合わせていけば、今のマテリアルインフォマティクスを考えるとある程度の可能性は予測できそうである。それから、EI、CIにおいてソースの強度を変えることで、フラグメントの小さいものなるべく作らないようなイオン化などと組み合わせる方法論はあるか。

A：部品から物質の全体像はわからないけれども、おおよその物質を予想し、毒性まで予想するものが出つつある。また、研究も進みつつある。ただ、EIでたたくと分子イオンが出ないことがあり、そうすると、大体の推定はできるが本当は何かかわからないという問題がある。それを解決するため、ソフトイオン化と組み合わせる方法が一つとしてある。実際、そのようなイオン源もあるが、切りかえて測れないといけないといった問題もある。同時にソフトイオン化とハードイオン化ができるといいと思っているが、我々の装置では、イオン化を変えての測定を2回測定するとリテンションタイムが微妙に合わないなどの現実的な問題があり、できれば1回で済ませたいと考えている。ソフトイオン化と組み合わせるといえるのは一つの方法だと思う。EIの電圧を変えていくクーロメーターみたいなものもあるが、うまくコントロールができない。チャンバーの大きさにも依存しており、技術開発の余地はまだあると感じている。

Q：石油業界では、ペトロミクスという、GC×GCを使用してインフォマティクス解析を試みているが、このような網羅分析、ノンターゲット分析のようなものが入っていく可能性を非常に感じた。応用の広がり、環境や農薬などのニッチなところのみならず、もっと広い可能性があるのではないか。

A：もちろんいろいろなものに使えると思う。我々で開発している手法をメーカーも一緒になり応用面にシフトしたものを開発していけば、様々なものができてくると感じている。

3-6. 「環境、生体に対するナノパーティクルの影響を評価する超高感度・迅速分析システム」

平田岳史 (京都大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 教授)

レーザー分光を使ったプラズマ質量分析法の環境分析への応用を紹介する。プラズマ質量分析法は、大気圧プラズマを使い、イオン化効率が非常に高いことが特徴である。(図1)



図1

分析法には二通りある。一つは溶液を噴霧して分析する溶液導入法である。もう一つは本日紹介する分析法で、レーザーを固体試料に照射し、一部をエアロゾル化あるいは気化させ、イオン化したものを真空中に引き込んで分析する方法である。この手法は濡れたサンプルでも問題なく、大気圧なので心が心配や装置を壊すことも全くなく、安心して使える。

この手法は世界中でよく使われており、関連する最近の論文数を調査すると、Biochemical Samples という生体試料に関する分析が非常に増えており、生体試料への応用が非常に進んできたことがわかる。

最近、微小領域の分析ができるようになってきた。15年ぐらい前は、20 μm 程度の大きさまでの分析が可能だったが、2000年頃からは直径2 μm のサイズの分析が可能となってきた。

我々の研究の興味は、宇宙ができてから現在まで、どのように、何がいつ起こり、どのような順番でできたかを知る年代測定である。それには超微量分析が有効である。鉛の原子の個数を数える分析(ウラン鉛年代測定法)を行う。この分析法の応用範囲は非常に広い。その一つが生体分析あるいは環境分析への応用である。

まず、同位体分析による産地判別への応用がある。シイタケには、日本産、中国産、韓国産があるが、その産地は見た目では判別困難である。しかし、この中のストロンチウムの同位体量を測定すると、日本産、中国産、韓国産は非常に鮮明に判別できる。その理由は日本が非常に若い大陸で、中国、韓国は非常に古い大陸だからである。従って、同位体分析による報告により、シイタケの産地偽装が難しくなり、値段付けに抑止力に働き、結果的に価格が安定する。

最近、フェムト秒レーザーを用い、これまで分析が非常に難しかった金属も非常に鮮明に分析できるようになった。従来、金属に対してレーザーを照射すると、ニュートンリングが生成したり、盛り上がったって分析が容易ではなかったが、フェムト秒レーザーを使うことにより、きれいな穴があいてニュートンリングができず、周りに振り落ちなくなった。信号強度も安定して、正味で20倍ぐらいの感度が出るので、これまで分析が難しかった熱に弱いプラスチック、鉱物試料、金属試料など全ての物質に関して化学分析が安定にできるようになった。(図2)

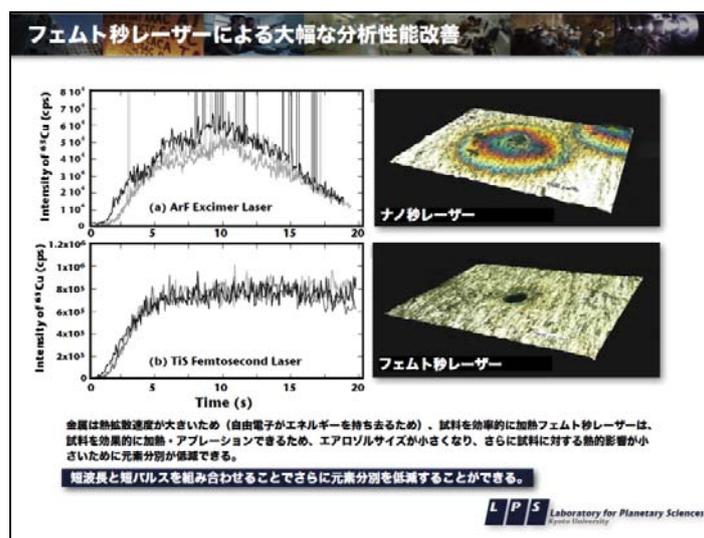


図2

この1年間の進歩は、新イオン検出器を開発したことで、分析誤差による年代測定の誤差が3分の1程度になり、分析時間は30秒から1秒に短縮できた。短時間での分析は非常に重要である。今後、サンプル全体を反映する大規模データ処理の時代に入るので、分析化学には、迅速に正確な結果を得ることが求められる。

超高感度・迅速分析技術を生体試料に応用している。ラットの脳について炭素、鉄、銅、亜鉛などの必須元素、およびヒ素、モリブデンなどの超微量の元素のマッピングが約2時間半で得られる。現在、それをさらに短縮できるよう検出器の改造を進めており、2cm程度の大きさのサンプルの場合、約2時間の分析で数十ppbレベルの元素が判別できる。濃度は、主成分の炭素から、数十ppb程度の微量成分であるセレン、ヒ素、ニッケル、モリブデンまで、1億個以上の元素を一度の分析で全部同時に分析することができる。

最近、それを使いイメージングでMALDI (Matrix Assisted Laser Desorption Ionization Mass Spectrometry) との組み合わせ分析も進めている。従来、MALDIでは、サンプルの前処理方法で結果が変わる、あるいは定量性がないという問題があったが、組み合わせ分析を用いると、例えばネズミの精巢のBiPG (鉄と非常に強い結合をつくるたんぱく質) と鉄の分布をとると見事に一致し、鉄とBiPGが同じところに分布していることがわかる。したがって、たんぱく質に入っている金属に着目することで、たんぱく質の検出ができる。(図3)

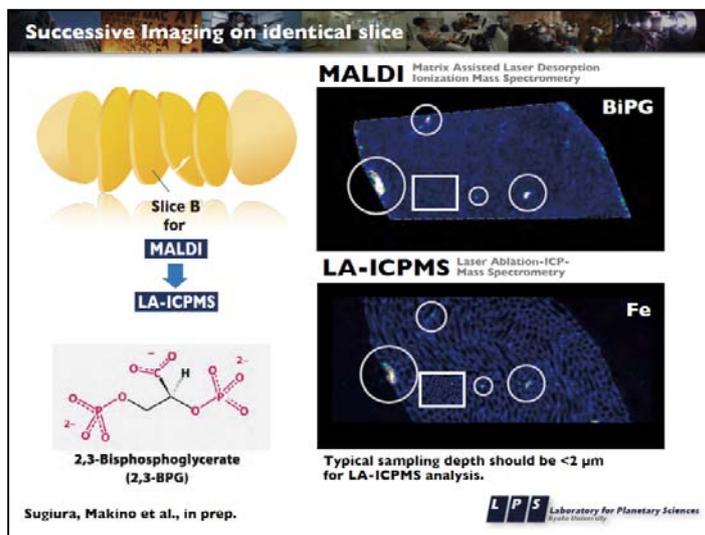


図3

ゾウリムシの細胞1個の中にどのような金属があるかを組み合わせ分析で調べた。その結果、リンは細胞質にも入っているが核に濃縮していること、亜鉛はドット状に存在していることがわかった。さらに、核には亜鉛が入っていないこともわかった。この分析は約30分で完了した。亜鉛がどのような機能で使われているかの研究がこれから進むと考える。なお、なぜ亜鉛がドット状に存在するかは専門家も判らないので、今後は生体の専門家と無機分析の専門家が共同研究する時代になると考える。

ナノパーティクルは細胞壁を通過して細胞の中に入るという学会発表があり、驚いて皮膚のサンプル分析を行った結果、実際に入っていくことを確認した。ナノパーティクルは様々な新機能を生み出す物質で、食べ物あるいは呼吸を介して体に入り、皮膚からも直接入ってくる。最終的には肝臓や腎臓に濃縮する可能性がある。そのような細胞を調べると、細胞の中にナノパーティクルが入っている。植物ではその細胞中にナノパーティクルが入ってくるところが実際に見えるだろう。(図4)



図4

分析では、1ピコグラム程度の量を使う。1スポットの分析時間は大体30秒で、鉛やウランの同位体比の分析も同時にできる。従来、ウランの同位体のモニタリングには非常に時間がかかっていたが、時間短縮できれば、福島原発事故の飛散放射性物質のモニタリングに使われる可能性があると思い、原子炉の廃炉措置に向けた応用分析として、研究に注力している。(図5)

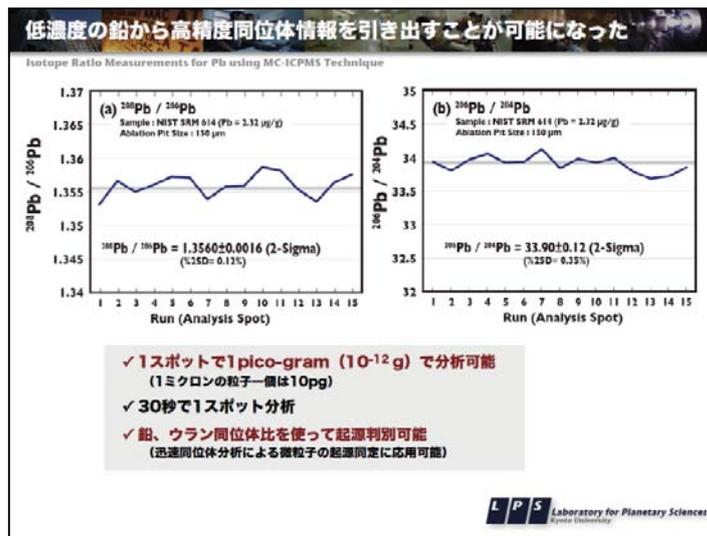


図5

現在の分析技術の限界として、10万個から100万個の原子が検出に必要である。ナノパーティクルは大きさが1ナノメートルでは、原子の個数としては1,000個程度のため検出できない。ところが、最近よく使われている10ナノ、100ナノの大きさでは、原子の個数としては100万個から10億個になるので、ナノパーティクル1個を検出することができる。(図6)

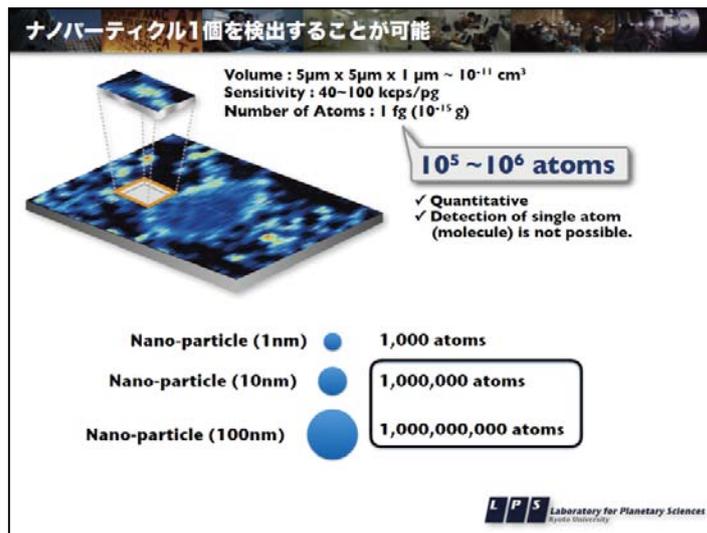


図6

さらにレーザーを使うことによって、ナノパーティクルが生体試料に入っている場合はそのサイズに応じた信号強度が得られるので、信号の高さから逆にナノパーティクルのサイズがわかる(図7)。レーザーを使うことで元素の分布がわかり、信号強度でナノパーティクルのサイズがわかることから、生体の中でのナノパーティクルの動態や挙動がわかると期待している。現在、ナノパーティクルをたんぱく質にタグ付けすることを考えている。ナノパーティクルをタグ付けすると、ナノパーティクル1個を検出できるので、たんぱく質1分子を検出できる。この技術は韓国が先行している。韓国では将来はたんぱく質にナノパーティクルをタグ付けすることも可能といわれている。我々の研究目標は、たんぱく質1分子の検出であるが、現在MALDI法では対応できない。

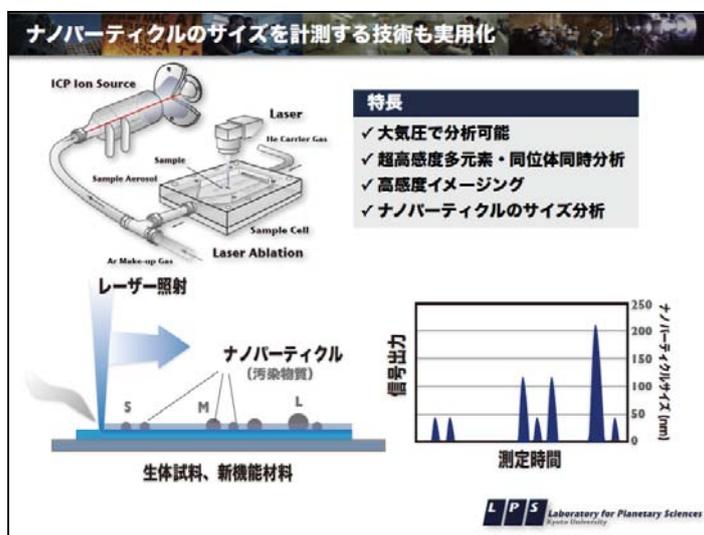


図7

今後は、本分析方法の実用化開発段階に入る。レーザーを使ってサンプルをエアロゾル化し、それをプラズマ質量分析計に入れて分析すると同時に、レーザーを照射するとサンプルが約1万度に加熱され発光するので、その光を分光する分析を行う。すなわち、レーザーを照射して出てきたエアロゾルはICP-MSでプラズマの質量計に導入し、同時に、出てきて光をLIBSという原子発光の技術を使って元素の組成の情報を得て、さらに分子振動を使ってLAMISという分子振動の技術を使って同位体情報まで得るという技術を開発する考えである。LIBSでは単に励起した電子が元に戻るときに出てくる固有の光を使い、LAMISでは原子の振動のスペクトルをとる。原子スペクトルは同位体による違いはほとんどないが、振動すると重さの影響が直接出るため、同位体間で波長が非常に広く違ってくる。例えば、 ^{12}C と ^{13}C の挙動や波長スペクトルは非常に広がりが出るので、これを使って同位体情報を得る。

この技術は質量分析計が持ち込めない場所あるいはサンプルを持ち帰れない場所、例えば惑星探査あるいは海底や福島原子力発電所の中には有効である。現在、こうした分光法による同位体分析技術は米国ローレンス・バークレイ国立研究所が先行しており、共同研究立ち上げの議論を始めている。(図8)

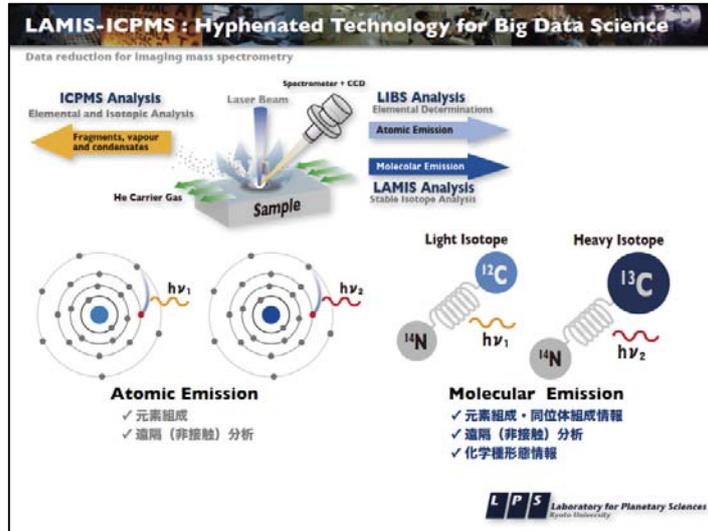


図8

発光原子を使うと分析が非常に早くなることが大変重要である。年代測定法の研究ではたかだか5万点データで議論をしている。しかし、イメージング分析では、分析点は約30万点になる。この30万点の情報を全て解析するとビッグデータの世界に入ってくる。さらに、たんぱく質の動態やたんぱく質の定量では、採取時間が1時間で1億点データになる。対策として、質量分析法だけでなく、発光法、分光法も使用するのが非常に重要になる。そして、データのクオリティを維持したまま、あるいはクオリティを高めつつ迅速に分析するという、この両方を達成することで大規模データ（ビッグデータ）に対応できる分析法になるものと考えている。（図9）

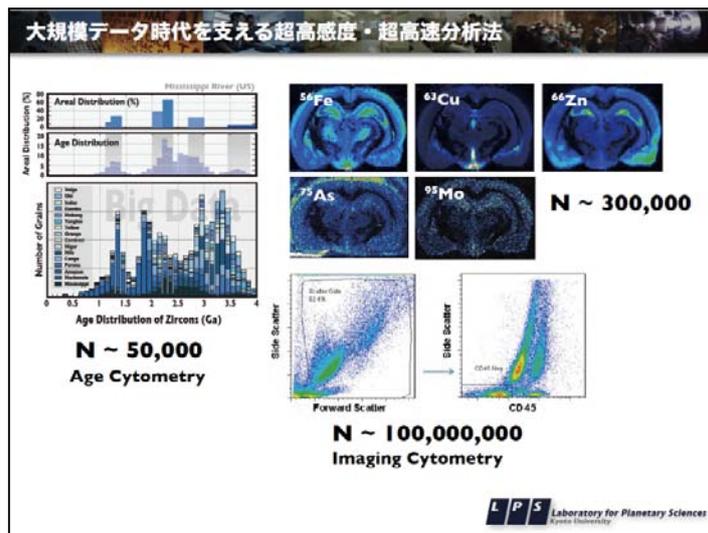


図9

今後の元素分析戦略では、四つのスケールで取り組む予定である。まず数年以内に、国民の食の安全に向けて現在の技術を応用することと、次に5年以内に、現在の技術をグリーンイノベーションに応用すること、そして10年以内に、ナノパーティクルの生体内挙動を迅速にかつ正確に測定する技術を実用化すること、最後の20年以内に、全地球規模での金属元素の循環の分析法を実用化することである。(図10)



図10

[質疑応答]

Q: ^{12}C と ^{13}C について、伸縮振動の波長の違いを同位体で見ると、この場合だと $14 \times 12 / (14 + 12)$ が左側で、右側は $14 \times 13 / (14 + 13)$ なので、比で言うと $12/26$ と $13/27$ の波長の違いと思う。あるものに対して $12/26$ と $13/27$ の違いを定量的に明瞭に評価するのは、技術的には簡単か。

A: 1つのピークで分けるのをやめて、種々のピークの全部マッチングをとり、デコンボリューションする技術が、パソコンの技術が向上したため可能となったおかげである。1つのピークではノイズが非常に乗ってしまいがちであったのが、50個から100個ぐらいのピークの山を一瞬でとり、それを同位体ごとの違いをデコンボリューションするため分析できる。

Q: それは内殻電子をたたき出して、結合距離を見る (SPring-8でのEXAFS) という手法に比べて簡便であり、はるかに使いやすい。

A: その通り。センサーとしても軽くできるので、惑星探査で使いたいと思っている。

Q: ナノパーティクルのサイズはボトムアップで化学屋が作ると数nmが多いように思うが、17 nmでぎりぎり100万原子となり検出限界とすると、ボトムアップで作るナノ粒子は検出限界を下回ってしまう。

A: その通りで、環境分析に対してはもっと高感度化が必要と思う。おそらくあと10倍程度の高感度化は難しくないが、100倍の感度向上が必要と考えている。

Q: MALDIとレーザーアブレーションのICPの重ね図は、どちらも破壊分析に見える。現実的にこうい

う像をとるのは難しいのか。

A：破壊分析である。MALDIも破壊分析であり、レーザーは表面を約1ミクロンだけほぎ取る。表面1ミクロンの破壊なので、半破壊分析と呼んでいる。実はMALDIをとった後にレーザーを打った場合も結果は同じであった。逆にレーザーを打った後にMALDIをとっても結果は同じであったので、どちらを先に行っても良い。この結果は実は同じ切片で分析を行った。これは初めての例で、これまでは似たような二つの部分から各々切片をとっていた。この実験では同じ切片を使うというのがポイントである。

3-7. 「微量元素・同位体に基づく海洋研究」

宗林由樹 (京都大学 化学研究所 教授)

微量元素・同位体に基づく海洋研究を紹介する。海水中の微量元素と同位体は、生物にとって栄養になり、海洋研究をする上で物質循環のトレーサーになり、堆積物中の同位体を測定すれば昔の海の研究の手がかりになる等、非常にポテンシャルがある。しかし、海洋学全体の中で微量元素や同位体の研究者はとても少なく、マイナーな存在である。

まず、国際的な動向では、微量元素、同位体に注目し、高解像度で現代の海洋の断面観測を行う動きがある。ゴールドシュミット国際会議¹では、発表の半分ぐらいが重元素の安定同位体を占めるようになってきた。GEOTRACESという国際プロジェクトがあり、世界の海の三次元の断層診断を行い、微量元素や同位体を使って断面観測をしている。これまでは分析技術がなくて対応できなかったが、2008年頃に国際相互較正を行い対応できるようになった。安定同位体は、プラズマ質量分析計ICP-MSを使うと、周期律表のほとんどの元素について安定同位体比を正確に測ることができる。そのような背景で、新規分析法(多元素の定量法、同位体比の分析法)を開発している。そして、開発した分析法を用い、海や琵琶湖の物質循環の研究を進めている。

日立ハイテックが製造したNOBIAS Chelate-PA1という優れたキレート樹脂がある(図1)。エチレンジアミン三酢酸基(EDTA)を鉄に配置すると、5配位する。これはEDTAに似ている形で、強い錯体をつくる。そして固相が化学的、物理的に非常に頑丈で、ブランクが低いので微量分析に向いている。我々は、それが9元素の一括分離濃縮に利用できることを2008年に発表し、大きな注目を得て、文献引用数が増えてきた。

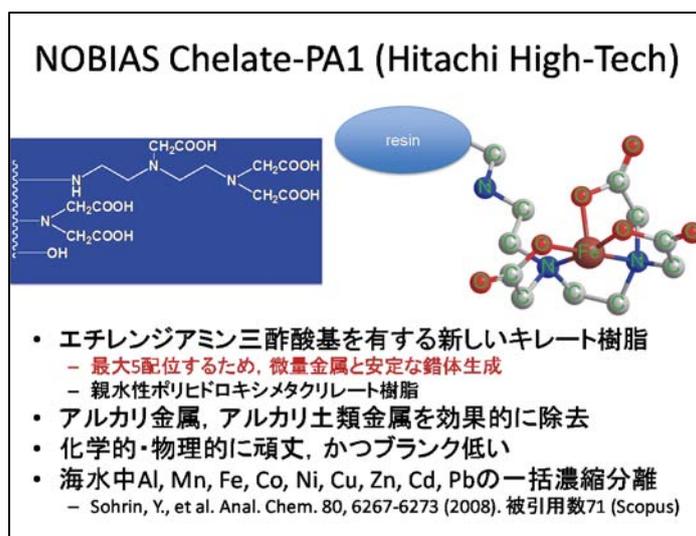


図1

¹ ゴールドシュミット国際会議: アメリカ地球化学会とヨーロッパ地球化学連合(ヨーロッパ各国の地球化学会の連合体)が主催する地球化学分野での唯一の国際会議

その方法を用いて、今、世界の海での9元素の分布を調べている。深さ方向の採水をして約1,100個の試料を測定した。例えば、インド洋での観測点で9元素を測った。9元素の鉛直分布は、アルミニウム、マンガン、コバルト、鉛ではスキヤベンジ型の分布形状を示し、ニッケル、銅、亜鉛、カドミウムではリサイクル型の分布形状を示す。鉄だけが違う分布形状を示す。(図2)

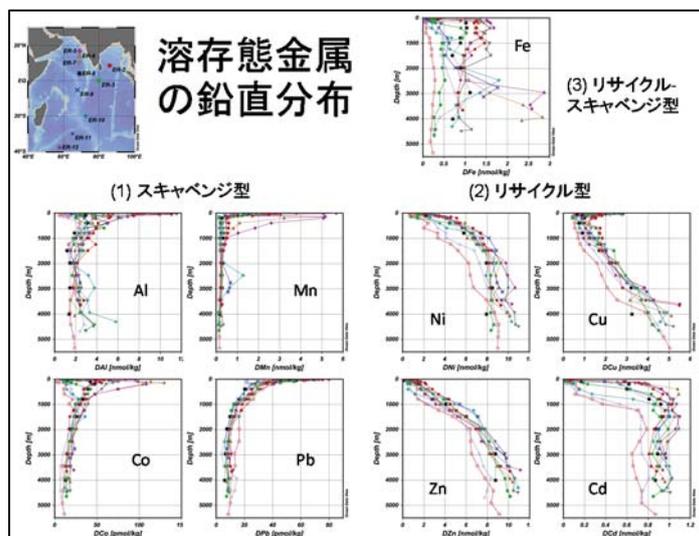


図2

マンガンとアルミニウムの断面分布の同時測定は難しかったが、その比を見ることができ、表面ではマンガンの比が非常に高く、熱水のプルームが漂っている部分もその比が高いことがわかる。これはマンガンだけが還元されて濃度が非常に高くなることを反映しており、酸化還元がどこで起こっているかがよくわかる。(図3)

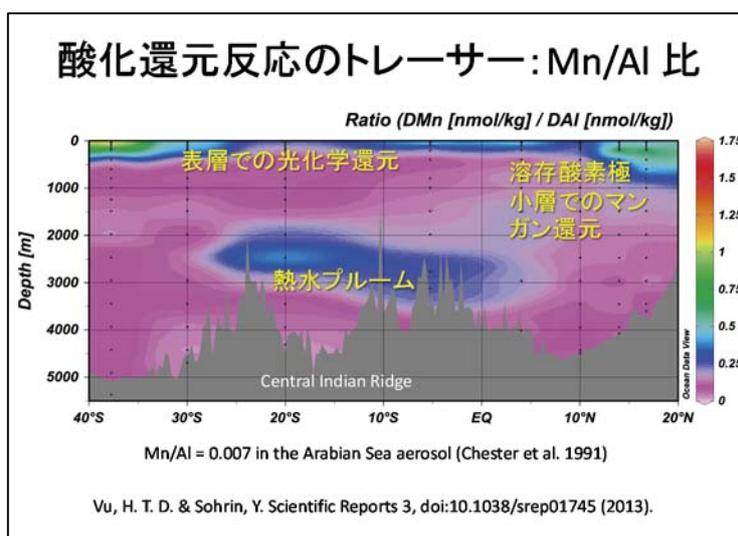


図3

ベーリング海で観測を行った（図4）。ベーリング海の東は大陸棚が広がり、非常に生物生産が高いところである。

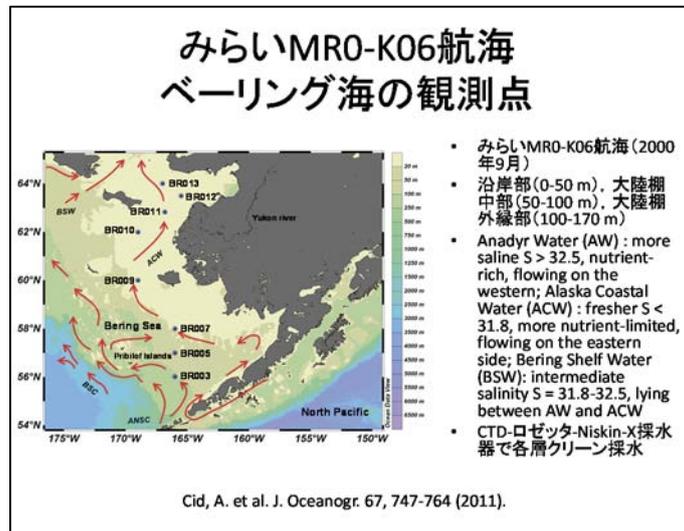


図4

その断面分布を測定すると、例えばアルミニウム、鉄、ニッケル、銅はユーコン川の全体にわたって濃度が高いこと、そして河口で非常に濃度が高いことがわかった（図5）。マンガン、コバルトは大陸棚の真ん中辺りで高い値が出ている。これは大陸棚の堆積物の中でマンガン還元が起こっている証拠である。

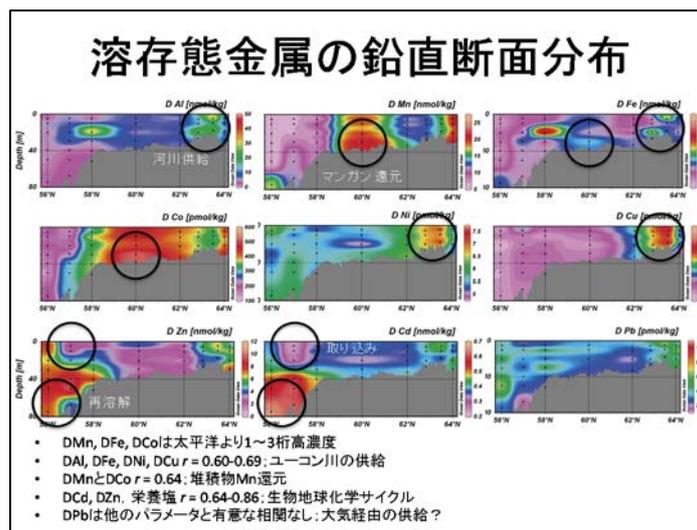


図5

北太平洋とベーリング海の鉄の濃度を比べると、北太平洋の表層と低層の濃度は小さいが、ベーリング海の粒子体は非常に濃度が高いことがわかった。ユーコン川から非常に高い濃度のマンガン、鉄、コバルトが供給されていることが、ベーリング海で生物生産が高い原因であることがわかった。(図6)

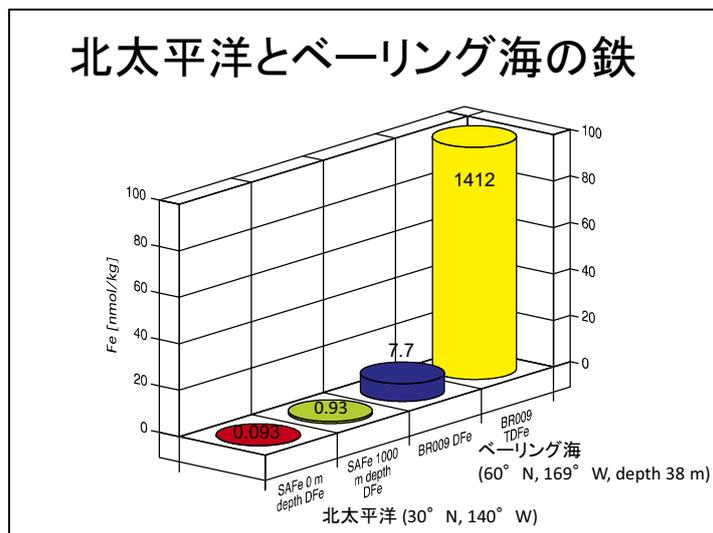


図6

また、キレート樹脂の分離とイオン交換樹脂との分離を組み合わせ、銅だけを精密に分離することで、同位体比を測ることができるようになった。インド洋、太平洋で鉛直分布を調査して、今までは濃度だけでモデルを作っていたが、濃度と同位体比の二つを使い、より制約を厳しくして、詳しい分布を調べている。(図7)

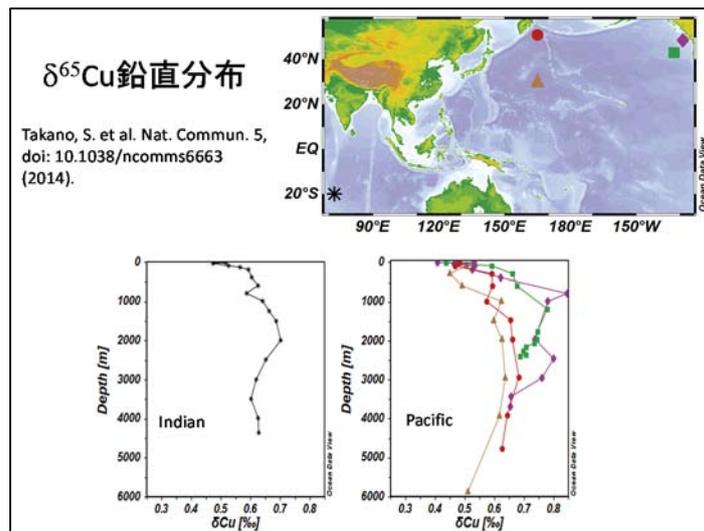


図7

克服すべき課題は、大学における人材育成である。研究室への志望者が減少していること、修士の卒業生の研究時間が減っていること、心の問題が多発していることである。そして、研究費と研究設備の不足である。設備として、同位体比の測定にはマルチコレクター型ICP-MS装置が絶対に必要だが、国内に海洋化学の専用機がなく、他機関の機器を借用している。

そして深海からの採水に問題がある。微量元素の場合はクリーン採水システムが必要で、学術研究船白鳳丸のチタン製アーマードケーブルが当初は1万メートルあり、太平洋の底まで届いたが、経年劣化した部分をカットしているうちに短くなり5,000メートルになってしまい、太平洋の海底まで届かず問題になっている。

もっと問題なのは船である。海洋観測をする船がなかったら、海洋学全体は成り立たない。白鳳丸はJAMSTECが管理している。1989年建造で26年経過して、出港時にプロペラが回らず、出航が一日遅れたなど、経年劣化の問題が頻発している。

今後、国として注目すべき方向性やテーマは、海洋の三次元観測が可能になってきたので、時間変化観測を行い、海洋の歴史を解明し、人間活動の影響評価をすることと考える。今まで海洋学は地球の海だけを見ていたが、今後は衛星や惑星の海も対象とする宇宙海洋学がおもしろいと考えている。

最後に、大西洋の定点で濃度と深さ方向の鉛の鉛直分布を測定したMITのエド・ボイルらの論文を示す(図8)。1979年には300メートルぐらいのところで濃度が高かったが、2008年までずっと減ってきている。鉛がガソリンのアンチノッキング材として使われていたのが外洋まで届き鉛の濃度が高かったが、近年、それが使われなくなり鉛濃度が低くなったことを示している。このように、海は人間活動の影響を大きく受けているので、今後どのように変化するかを観測し続ける必要がある。

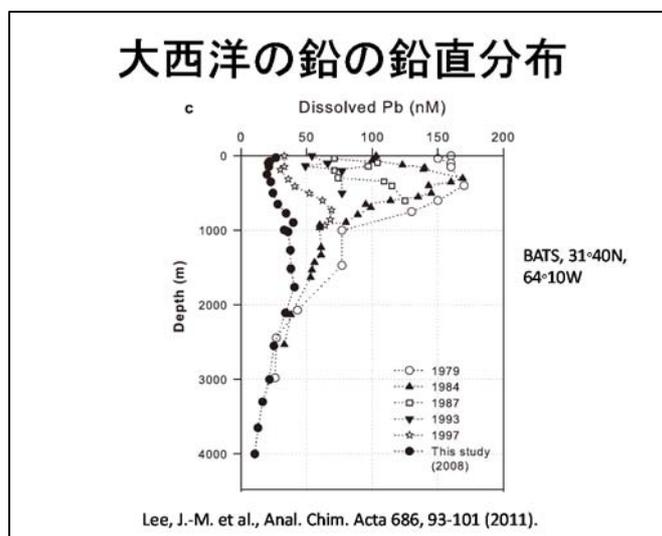


図8

[質疑応答]

Q: 溶存態の鉛直分布のカラーマッピングで、マンガンが表面で光還元を受けているが、なぜ青くなるのか。赤くなるのが妥当ではないか。赤いところにマンガンの還元のスペクトルが見える。また、

測定しているのはマンガンの3価、4価のカチオンではなく、マンガンのメタルを見ているのか。

A：これはフルスケールで、紫色は濃度が低く、黄緑は濃度が高いことを示す。マンガンの還元のスベクトルの赤いところは別の濃度である。フルスケールではもっと肌色になる。マンガンの2価のものを見ている。

Q：図の中央付近の赤い部分はマンガンが還元されているエリアか。

A：水は酸素を持つが、下の堆積物には有機物がたくさんあり、その分解で酸素がなくなりマンガン還元が起こる。そこからしみ出してきたマンガンである。

Q：還元体は2価になるのか。

A：2価である。2価は非常によく溶ける。

Q：人材育成の話と志望者不足の話で、大気や海洋のように地球全体を捉えて考える研究は、日本ではあまり人気がないが、北米では人気の高い講座が結構ある。これは幼少時の理科教育に起因するのか。

A：海洋も地球科学も、我々研究者のアピールが足りないのかもしれない。

Q：子どもが理科教育に興味を持つきっかけがないのかもしれない。

A：私は高校1年生で地学を勉強したが、地学の中で海洋の話は全く無かった。今は、例えば受験生に地学で受験する生徒が非常に少ないことも原因の一つかと思う。欧米は自然科学、博物学を尊重する教育ができていたり、趣味があるのかもしれない。

3-8. 「データ駆動型アプローチによる環境分析・状態評価」

菊地淳（理化学研究所 環境資源科学研究センター 環境代謝分析研究チーム チームリーダー）

本日は核磁気共鳴（NMR）と環境微生物学をテーマに話をします。環境微生物学では現在のシーケンサーなどを使うとかなり大きなビッグデータが出てくるため、研究室ではインフォマティクスを1つの柱にしている。環境分析というと汚染物質などある特定の物質を追跡し、この物質は体に毒性がある、汚いといった前提があり、これを分離精製して分析していくというターゲット分析が主であったと思われる。経時的に環境の物質にはある摂動があり変化していて、水が汚れる、大気が汚れるといった人間でいう不健康な状態は、決して一つの物質で定義されるものではない。たくさんの物質のバランスが変化し、状態が変化すると不健康な状態になっていくということである。そこで、私達はむしろ状態を評価しようと考えている。状態を評価する場合には、必ずしも高感度が重要というよりは、むしろ物質組成のバランス変化などを上手に捉えられることが重要であり、そのときにインフォマティクスが使われる（図1）。

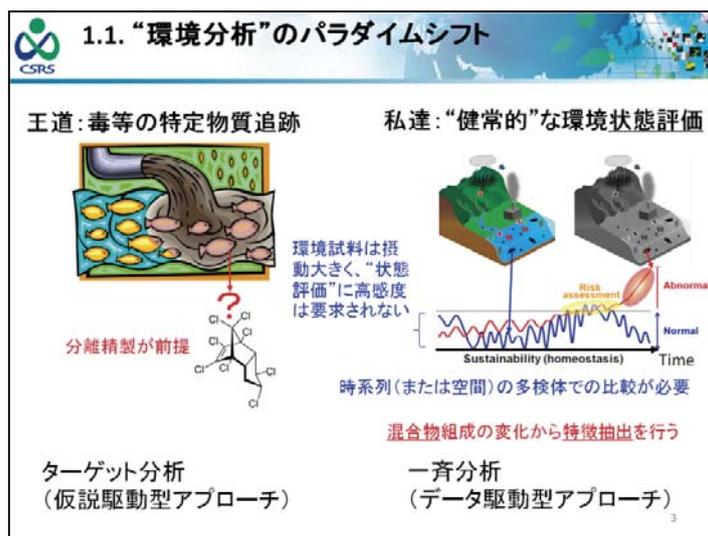


図 1

時系列的に、また、空間的に試料をたくさん採取すると、多検体で比較が必要であり、たくさんの物質あるいはスペクトルのデータ変化から特徴の抽出を行う一斉分析によりデータをドライブしてサイエンスしていく（Data Driven Approach、データ駆動型アプローチと呼んでいる）。これが多くのアプローチとフィロソフィが違う点である。データ駆動型アプローチでは、多くのデータを収集するため、できるだけ一つ当たりの試料分析を低価格化していく必要がある。この場合、試料を極力未処理のまま、あるいは簡易的な抽出で測定できる方がよいと思われる。各試料間の比較をするために相対的な定量性が必要である。1年前、10年前に採取したものが同じ土俵で比較ができること、機関（Institution）間の比較ができることが大切である。これにはデータベースを充実していくアプローチをとっている。あまり価値のない化学物質に関しては必ずしもファインな構造を同定する必要はないと思われるが、時に

は部分構造をしっかりと同定する目的で量子化学理論を利用している。有機物、無機物など様々な化学物質が環境に関わっている。我々は NMR だけではなく、ICP、場合によっては微生物の分析データ、ヘテロな分析データをインフォマティクスで統合していくことにチャレンジしている。

NMR は感度が低い日本では環境研究にはあまり使われていない。しかし、トロント大学のグループが NMR を環境の研究に使うという総説を EST に出している。段々スケールが大きくなるが、オングストロームの構造・組成から拡散、相互作用、レイヤーの状態、MRI による位置情報やケミカルとの相関を見る。試料としても土壌やその成分、水と固体とのインタラクション、状態の評価、エアロゾルのようなものもたくさん集めてくれば NMR がとられる場合もある。また、インタクトな生物の細胞組織というようなアプローチもある。(図 2)



図 2

図 3 はユーグレナという藻類をそのまま計測したものである。固体 NMR でよく使われている Magic-Angle-Spinning という手法は、計測するローターを静磁場に対して 54.7 度傾けると、異方性が消去されて様々な高分子を混合物のまま同時に計測していくことができるものである。それで、化学シフト軸で分離するとその成分が分離される。NMR の場合、分子のダイナミックな状態でも信号を分離することができる。例えば、細胞の中にあるパラミロンという結晶性の多糖やたんぱく質を強調するような測定手法、リピッドボディのようなより速い分子を強調する手法、さらには低分子だけを強調するような手法を、一つの装置あるいは一つのサンプルで並列、連続的に計測できる。この計測手法が NMR に特徴的な点であると思う。(図 3)

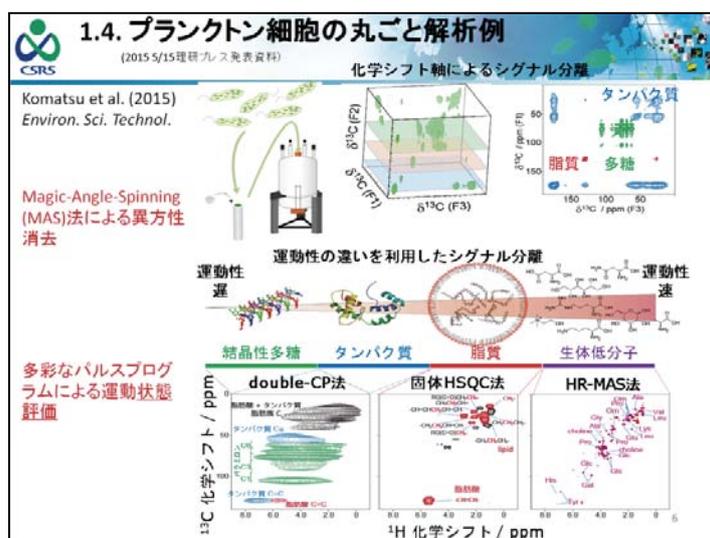


図 3

NMR は感度、分解能が低いという弱点がある。出たスペクトルからどのように分子を絞っていくか。環境中にある試料は普通プロトンで計測する。 ^{13}C 核を使うと幾分、信号の分離能が向上するが、存在量が少いためさらに感度が落ちる。多検体で計測することが一つのポイントで、横軸の化学シフトはある一定の物理量なので単純に多検体で計測したら、このピークを調整し足し合わせると SN が向上する。さらに多くのスペクトルを足し合わせていくと、同じ分子に関する相関が出て同じように信号が向上し情報がとれる。こうした断面情報と化学構造を *in silico* で組み合わせて量子化学計算すると、実測のものと同様に量子化学計算で得られた理論値が合うことで混合物中の構造解析が可能になる (図 4)。この化学シフトという情報は世界で共通の物理量であるため、低分子の代謝物あるいは高分子の多糖やリグニンの情報をデータベース化し、全世界でオープンに使えるウェブツールとして公開していく活動も行っている。藻類の多糖、土壌のフミン酸やフルボ酸といった腐食物質の情報もデータベース化し、幅広い試料に対応したウェブツールを現在作り上げているところである。

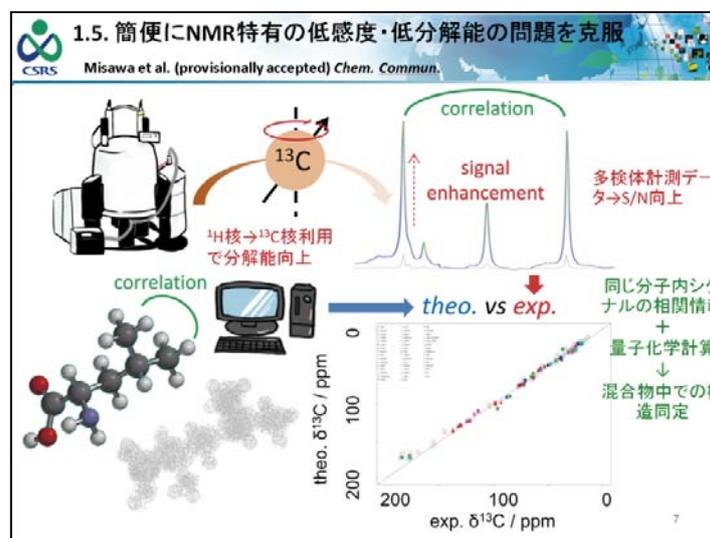


図 4

インフォマティクスに関して幾つかのフェーズでトライアルしている。ピークを分離していく目的のために、繰返し最小二乗多重スペクトル分解法、NMF (Non-negative Matrix Factorization) といった、データの高分解能化のために使うインフォマティクスを実施している。データが多く集まったときにその特徴を分類する手法が幾つもあり、k-means、MCR-ALS といったことも実施している。(図 5) 様々な分析データの統合も行っている。この場合には、自己組織化マッピング (Self Organization Mapping) や、単純に有機物と微生物の相関を取る、あるいは ICP で測った金属や次世代シーケンサーで測った微生物のビッグデータについて地域特性を可視化するためのネットワーク解析手法も検討している。データの特徴がわかったら、それを検証していくために、例えばボルケーノプロットという手法や、Structural Equation Modeling、すなわち構造方程式モデリングといったような手法を使って、その因果関係を証明していくようなアプローチになる。(図 5)

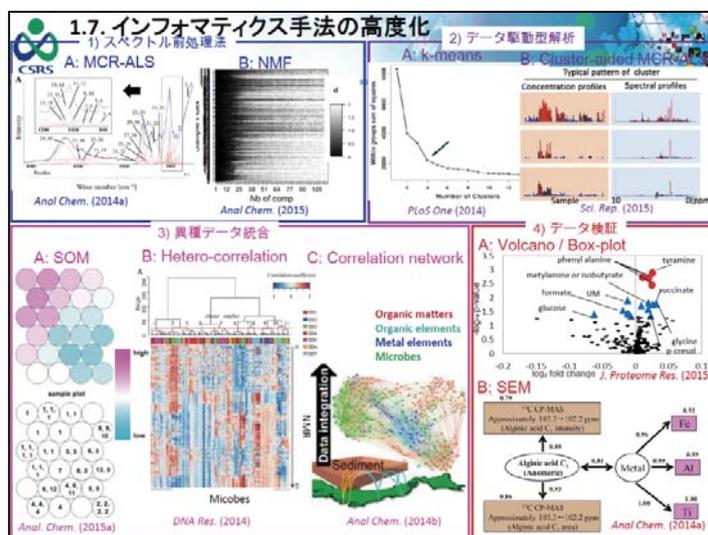


図 5

全体を一つのサンプル系で扱った例について具体例を紹介する。相模湾で天然の海草であるヒジキを時系列でサンプリングし、無機元素、様々な有機物、同位体比などのデータを全部足し合わせて、どのような特徴があるか解析した。特徴の抽出としては PCA (Principal Component Analysis) や、様々なデータから相関ネットワークを切り出し構造方程式モデリングにより要素と代謝物との関係性をモデル化するようなことを行った。ヒジキの様々な分析データ統合解析では、固体の高分子であるアルギン酸と、ICP-OES でとられた金属の吸着能のデータが因果関係として抜き出された。これは、ICP のみを使った無機元素分析だけでは情報はわからないし、または、固体 NMR のみを使ってアルギン酸だけを見てもわからない。多くのデータを統合してインフォマティクスを利用したからこそ、無機元素と高分子の吸着情報を抜き出してくることができた。(図 6)

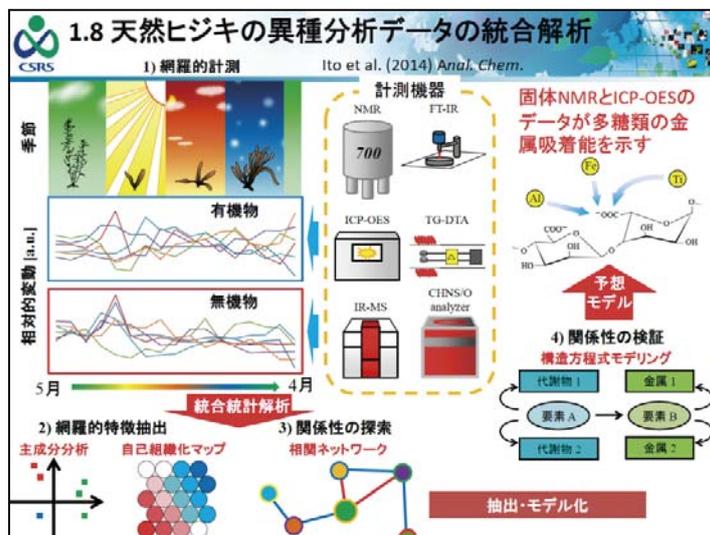


図 6

このようなアプローチを使って、バイオマス、リグノセルロースの構造、それを分解する動物の分解代謝系、土壌の分解代謝系、海洋のバイオマス、動物、泥、さらに、非常に狭い環境だが、人間の健康に関する腸内環境のような複雑系に対し、様々なレベルでの分析データを組み合わせることをしている。環境微生物群集の分析に次世代シーケンサーを使い、遺伝情報の流れから無機元素の計測結果を用い、高分子の代謝物に関し NMR を中心とした分析技術を組み合わせ、多検体の処理として時系列でデータを取っていくと、変動の中でどのように状態が変化していくかをインフォーマティクス的に特徴づけられるという立ち位置で研究を行っている。(図 7)

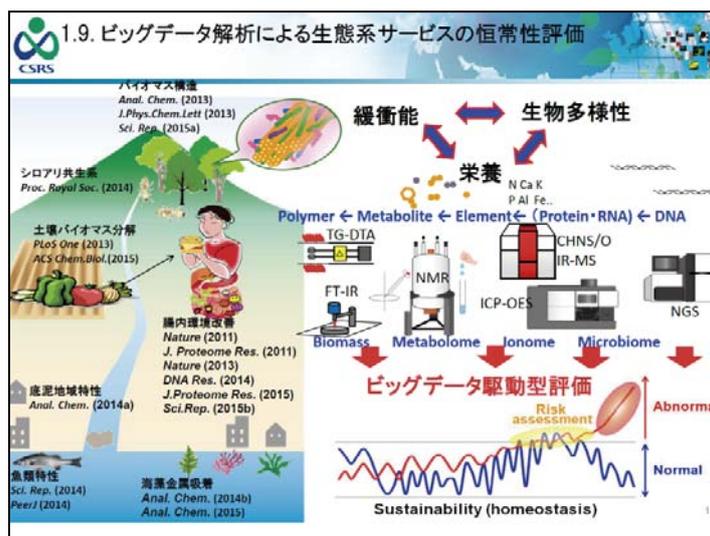


図 7

次の分野の鳥瞰として、エコロジーあるいはエコシステムを理解できるとどのようなベネフィットがあるのか。エコシステムの中で最も研究が進んでいるのは **Microbial ecosystem** であると思われる。シンセティックエコロジーというキーワードが出始めてきた。これはエコロジー、環境を制御しようという分野である。非常に狭いエコロジーだが、既にエコロジーを制御できている典型的な例が **Gut microflora** のエコロジーだと思われる。これは私たちに非常に身近なものだが、毎朝ヨーグルトやプロバイオティクスのある繊維質のものを食べることで腸内環境を整えていくと、おなかを壊しにくくなる、免疫力を上げていく、アレルギーや鬱などにならないようにする、いったものである。

あえて鬱という話をしたが、最近、マイクロバイアルエコロジーから作られる酢酸や酪酸のようなありふれた物質が、血液脳関門を通過して脳内に到着し、動物の行動を制御するということがわかり始めている。このような **Microbial origin** の酢酸や酪酸の生理機能を発見したのが、我々の **NMR** による代謝プロファイリングの技術である。つまり、代謝バランスの環境分析というものが非常に重要だと思われる。これを腸内のような限られた環境のみではなく、よりオープンな環境に適用していくという立ち位置がシンセティックエコロジーだと思われる。

図 8 は今年の生物工学会シンポジウムのスライドである。たんぱく質の狙った部位を改変していくのは遺伝子工学である。この場合、精製したたんぱく質のバイオケミストリーを行う。一方、オミックスと呼ばれる技術は必ずしもたんぱく質精製を前提とせず、代謝経路をことごとく変えていき、バイオマスから何か有用物質を作るもので、シンセティックバイオロジーと言われてきている。シンセティックエコロジーは既に腸内細菌などででき始めている。汚れた沿岸の泥や農場の土のような複合系は様々な微生物が反応を伴って入力され、バイオマスから様々な物質を作っている。つまり、微生物を単離しなくてもこの中のプレーヤーやこの中の反応でどんな物質が出てくるかということがわかればその環境を制御できる、シンセティックエコロジーという時代がもうすぐ来るであろうと考えている。

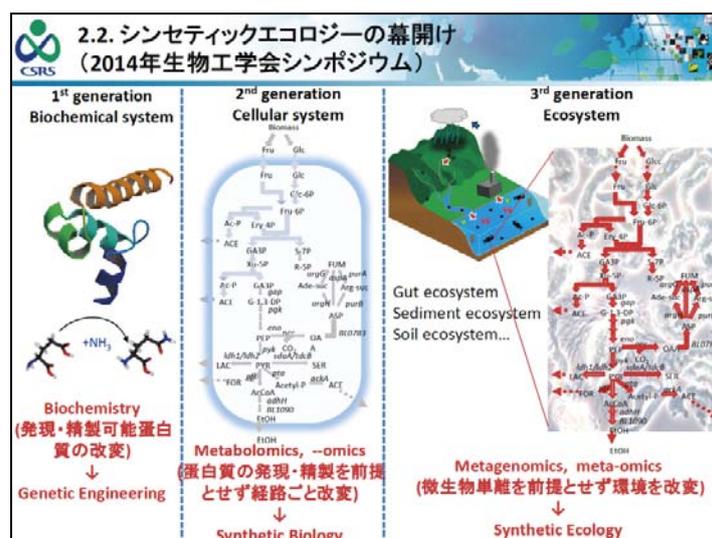


図 8

時系列でサンプルをとる話をしたが、高分解能の超高磁場の NMR をあちこちに置くことは経済的に不可能である。最近この分野では、卓上型の NMR のような非常に小さな装置が作られ始めている。理研でも、卓上よりはもう少し大きいのが、小型装置の技術開発が進んでいる。我々もこのような小さな装置を使い、油の分析のデータ取得を始めている。またアメリカの例であるが、2mm 四方の半導体に溶液を垂らし、二次元の測定ではプロトンと炭素にそれぞれの核観測用の半導体コイルを使えば関連スペクトルが得られるという小さな装置の開発も進んでいる。

フランスでは1匹の線虫で A1 スペクトルを取得するような開発が始まっている。仏 Alan Wong 博士、理研 JEOL 連携センターの西山リーダーが共同研究をしている。最近、ミリメートルサイズのマスローターを使った少量のインタクト試料計測を始めている。今後共同研究をしようとしている。(図 9)



図 9

共同研究で、海は大きな環境分析のターゲットであると思う。日本は世界第 6 位の海洋面積を持っており豊富な試料がある。そこには水、DOM (Dissolved Organic Matter、溶存有機物)、魚、海藻、微細藻類、様々な分析試料がある。そのビッグデータから環境特性を把握し、機械学習のアルゴリズムなどを使って将来を予測し、バイオマーカーがあればその変動因子を使って制御することで、将来的に環境を予測し、浄化あるいは改善していく、シンセティックエコロジーを目指した環境分析を立上げていくべきだと思っている。(図 10)

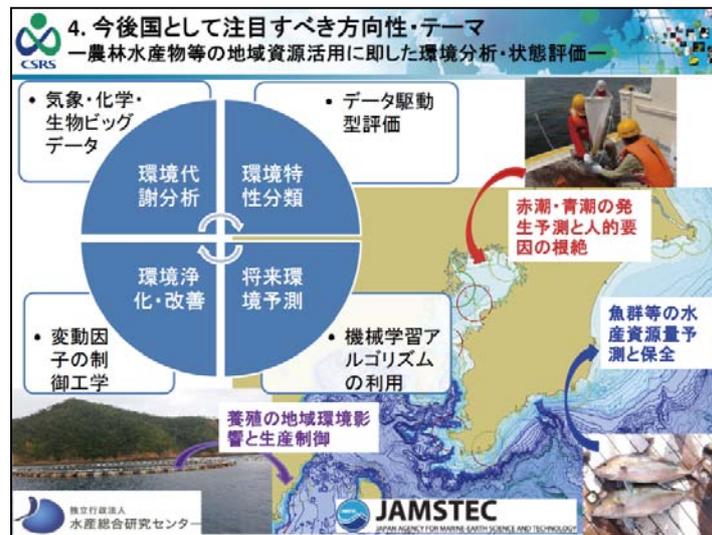


図 10

[質疑応答]

Q: 方法論としてよく理解できが、ブレイクダウンしていったときに一番困る科学技術はどの辺りにあると思われるか。多元的な解析結果の分析、いろいろなデータベースとのマッチング、インフォマティクスと *in silico* での解析など、いろいろやるのが重要になってくると思う。最終的に一番ボトルネックになってくるのはどの辺りと思うか。

A: 一番かどうかはわからないが、環境分析で私が置かれている立場で問題と思っているのがサンプリングである。我が国の海洋面積が世界第 6 位であるといって海洋を網羅的にサンプリングするわけにはいかない。JAMSTEC や水産研といった海洋に関係する機関と我々が三機関連携を組み、近海については必ずしも JAMSTEC の船に頼らず水産研の船でサンプリングするといった動きがあり、サンプリングのウイークポイントを克服しようとしている。

Q: 化学物質の代謝を追われることは理解できる。仮説として何が毒性であるかを捉えようとするのか、その状態をどのように定義しようとしているのかを伺いたい。

A: 我々のアプローチは仮説からスタートするのではなく、データをとってから変化していく状態を区別するというデータ駆動型アプローチが大きな特徴である。水産の場合は、生産性が高い、低いというある程度の指標があると線引きがしやすく、取得したデータの動向の線引きができるのではないかと考えている。

3-9. 「循環型水利用における計測技術」

鳥村政基（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）

我々の活動は、水ビジネスにつながる技術という基本があり、環境の評価というより、水ビジネスに資する環境センシング技術、水センシング技術が主体となっている。

日本に住んでいると水の問題はあまり深刻になっていないと思われるだろうが、最近、物理的および経済的な渇水地域や周辺の人々と意見交換をすると、想像できないくらい切迫している状況がある。エネルギーの場合は代替エネルギーという発想があるが、水の量がそもそも1日に絶対何リットルが必要というように、水の場合には代替するものがなく量を確保しなければならない。目的に応じた安全な水を確保しなければならないということで、水ビジネスという話が当然出てきて、アジア地区に特化した日本の技術戦略を検討している。

水研究の世界でパラダイムシフトが起きている。2050年には10億人に水や食料問題が生じるとわかっているが、再利用すると考え始めて間もないのが現状である。しかし、パラダイムシフトが起きようとしているのは、今まで通りの発想ではなくて、水処理で食料に必要な有用成分も回収するし、エネルギーも同時に作成するということである。要するに、従来の水処理場が全て、全く新たなプラントに生まれ変わらなければいけないということが、水に切迫しているエリアで特に議論され始めている。(図1)

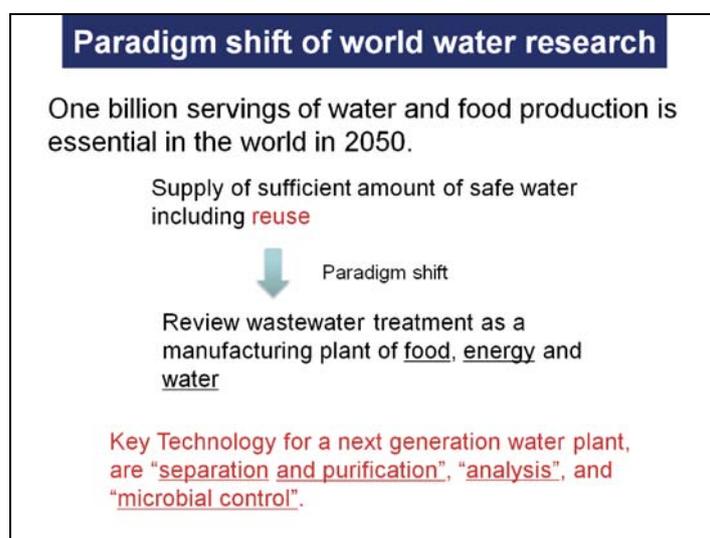


図1

そこで、水の再利用を想定したセンサー技術を作ろうと取組んでいるが、近い将来、このようなプラントになった場合に必要なセンシング技術は何かという議論が求められる。重要な技術としては、物を分離・精製する技術や分析する技術に加え、特に微生物の制御が必要になってくると思っている。

社会的な背景として、これまで水の再利用では、国際標準の部分でイスラエル一国が世界を席巻しようとする状況の中、中国が都市利用、日本がリスクと性能評価で幹事国として入り込めたことは水の分野では重要なことである (図2)。

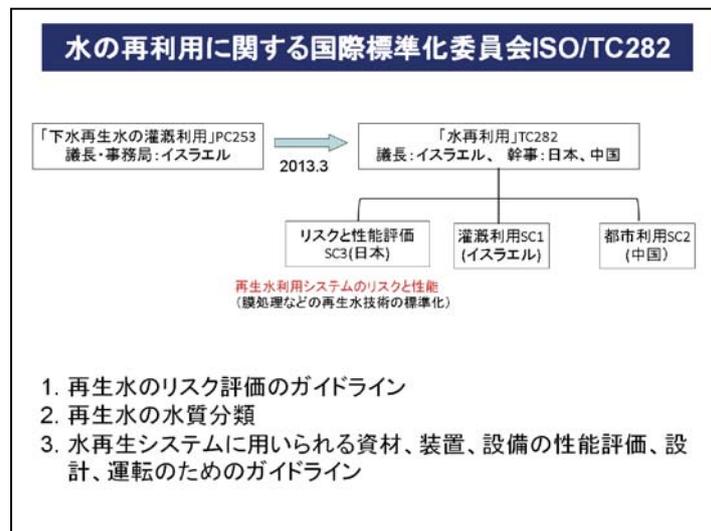


図2

水技術の中で膜技術が極めて重要なものであるが、日本の膜を作る技術が世界トップである状況を守るためにも、日本が幹事国としてリスクと性能評価で国際標準化に係わることが非常に重要である。また、もう一つの社会的背景として重要なことは水循環基本法である。水循環基本法は施工されたばかりであり認知されていないようである。水というと日本は結構難しい。河川は国交省、河川の水質は環境省、経産省は工業排水と所掌がある。地下水は誰が見るのか、災害が起きたときにはどうするのか、非常に重要で真剣に議論されており、我々研究者の立場からしっかり見ていかないといけないが、あまり伝わっていない気がする。内閣府に水循環政策本部を置いて一元的に水循環基本法の内容を管理するという状況になっているのは、大きな救いではあるかもしれない。

水のセンシングに関して、水道水のリスクや工場排水のリスクなど、図3に示す項目が重要視されてきている。すでに計っている項目もあるが、新たに発生した水の問題やリスクという意味で、生理活性物質としてPPCPs (Pharmaceutical and Personal Care Products) と呼ばれる新しい医薬品あるいは日用品、PPCPsの代謝物、すなわち環境で代謝されるものや我々の体内に一回投与された後に代謝されて出てくるものなどがたくさんあり、個々に対応できないというのが現状である。最終的に水道水にまで入り込んできているといった報告も結構出てきている。



図3

センシング技術では、微生物やウイルスの簡易センシング技術など、いろいろな人が取組んでいるにも関わらず、我々の立場から見るとほとんど使えるものがない。本来、真剣に日本の研究者が取り組むべき分野ではないかと考えている。さらに、多剤耐性遺伝子は新たな問題で、今後もこのような問題が起き続けると思う。このような意味で、多剤耐性遺伝子への対応は重要である。水道水は52の検査項目を年に1回あるいは最大で4回程度計ることが求められている。我々は日本の水道局を信頼し年に1回だけ担保された水を飲んでいるが、他国では水道から出てくる水をほとんど飲んでいない。しかも、試しに水質を1年に1回ではなく毎日計り続けると、毎日大きな水質の変動が起きている。そこで、モニタリングに対してリアルタイムに計れる技術がますます必要になってくる。ただし、高価なモニタリング技術は全く必要とされず、安価で安全を担保できるモニタリング技術が必要とされる。生理活性物質や多剤耐性遺伝子のような、問題になり得る化合物が増加し、その水が安全なのか否かを示す総排出毒性WET (Whole Effluent Toxicity) という一つの技術としてまとめられつつある。このような概念で、水がそもそも安全なのか否かという指標がセンサーとして求めており、この部分はかなり力を入れて研究している。

常時管理や監視のメリットを図4に示す。当然のことだが、今の水処理現場を見ると、化学薬剤、UV処理、塩素処理を過剰に使っている。さらに、注意しなければならないのは、アメリカなどで国の消費エネルギーの中の水処理のエネルギーの割合が信じられないほど大きなことである。もし0.1%でもエネルギー消費を削減できると大きな効果が得られるということで、水の計測技術は重要であり、計測技術によってかなり最適化され、ますます再利用の社会になっていくと思う。

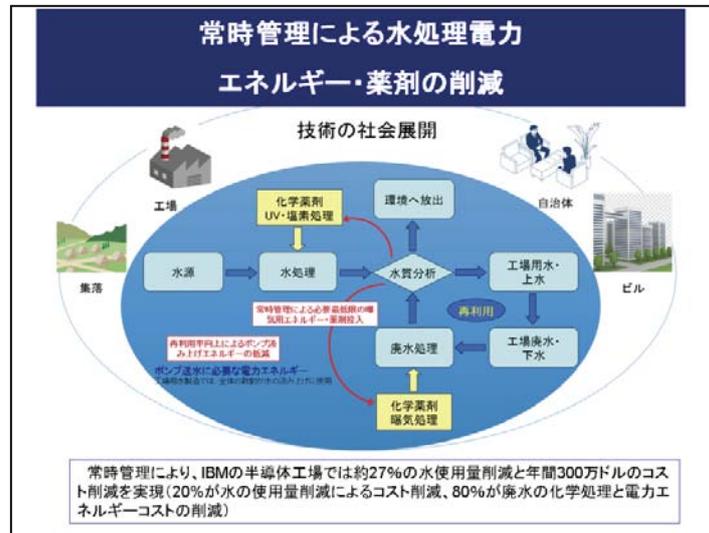


図4

常時監視技術に求められる仕様を図5に示す。産総研では図6の水プロジェクトを2012年から始めている。来年までに1つの形を作ろうということで35人位の研究者を集め、ユニークなセンシング技術を本当に必要な技術に展開できないかを検討している。

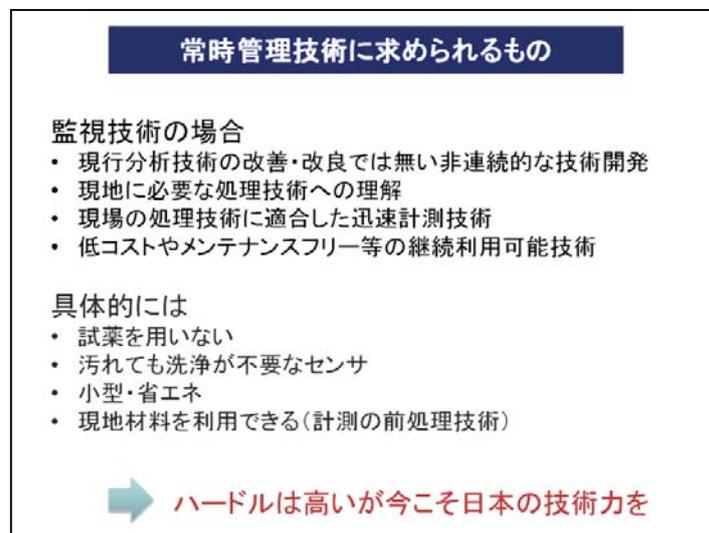


図5



図6

例えば、全く試薬を使わないTOC (Total Organic Carbon) 計や、コンパクトディスクやDVD技術を使って高速に微生物をカウントする技術がある。また、アジアではヒ素の問題が深刻で、日本でも温泉ではヒ素が多く含まれ、飲む前にチェックしたいというニーズがあるが、ヒ素の定量法には様々な問題がある。JISのモリブデンブルー法ではリンが共存しているとリンと反応してヒ素が計れない。現実的な課題を克服する簡易センサーや、アジアの地域ですぐに使える技術、微生物の処理技術を使った水処理技術が諸外国で増えている。また、膜分離バイオリアクター (MBR : Membrane Bio Reactor、膜分離活性汚泥法) の中には1万種程度の微生物が存在し、微生物が処理プロセスでどのように変遷するかを解析する技術、その他、材料研究など、いろいろな技術が1つにまとまって新しいものができるという思いもあり、プロジェクト化して進めている。産総研では情報関係の研究者も多く在籍しており、作成したセンサーのデータを集積し次にフィードバックし、現場の水処理の条件を簡単に変える技術開発も行っている。(図7)



図7

アジア連携の一つとして、1月にタイでメトロロジーというテーマのシンポジウムを行う予定である(図8)。様々なセンサーや分析機器を作っても、最も重要なものは標準物質である。したがって、標準物質とタイアップしていろいろな戦略をアジアに展開するというので、このような会議にも積極的に参加している。タイ+1ということで、タイを中心として日本の技術展開をするところである。

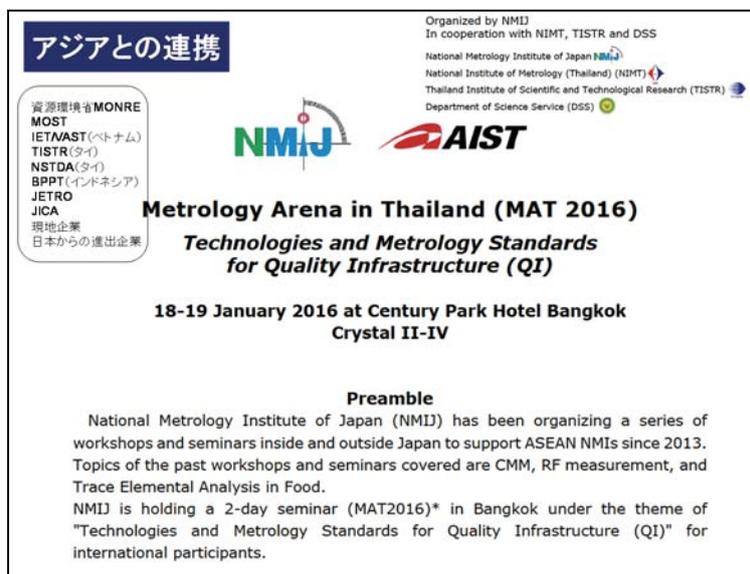


図8

2050年には10億人分の水や食料の不足が生じる。日本よりも、本当に深刻な地域の人々が真剣に考えているという印象だが、日本もいろいろと考えていかなければならない。特に水が豊富な日本は、それを資産として捉え直さなければならぬという意見が出てきている。水は代替できない。言い方を変えたと、例えば、水を何千トンと使って牛肉を作るといった水の代替技術として食料に変換できるといった技術も、今後日本で真剣に議論されていくと思う。その際に、環境計測の概念からは離れるかもしれないが、新たなプラントになったときに必要な計測技術は何かを考える必要がある。具体的に絵を描いてみると、必要な計測技術は現在の技術で出来ないものがたくさんある。また、例えばICP-MSの技術を始めた非常に高額かつ高性能な装置を、現場のセンサーとして同じスペックや原理で小さく安くという戦略はまず不可能なので、発想を変えて現場のニーズに基づくセンシング技術を考える必要があると思う。

安心、安全という言葉があるが、我々自身が飲む水も考えてみると、毎回飲む前に計っていない。信頼しているわけである。ペットボトルの水が大丈夫か否かというのは、直接的なセンシング技術も重要だが、その安全を担保、保証する技術やセンシング技術が重要だと思う。

[質疑応答]

Q: リアルタイムに安価に水をモニタリングする必要性は良く理解でき、10億人という新しく水を必要とする市場に技術として入っていけると思う。水道水の歴史を見ると、中空糸を含め日本の水処理技術はトップレベルにあり、3,000億円位の市場だと思う。しかし、水メジャーの市場は30兆円位で

ある。技術を作るだけで利用の部分まで手をつけず、モニタリング機器をつけるだけで終わりといったように、同じ轍を踏まないかと心配になる。発展途上国の支援の中に水のシステムを技術と一緒にパッケージで持っていくことがすごく重要な気がする。

A：その通り。アジアのいろいろな国に毎月行って現地の人と情報交換だけではなく視察も含めて回っている。愕然とするのはあれだけ日本のセンサーメーカーの名前が現地で知られているのに、現地の水処理場あるいは浄水場に日本のメーカーのセンサーが1個も入っていない。この前やつと何十件目に堀場のセンサーを見つけてほっとした。戦略だと思う。例えば、ある日本メーカーがTOCだけを計るすごい技術を持っていても、現場の人たちはTOCだけを計りたいわけではなく、他のあらゆるセンシングをパッケージにしてデータを一括管理したいと思っている。そんなに複雑な話ではないが日本メーカーは対応し切れていない。日本の水技術に対するブランドイメージが高いことを痛感しているので、今こそどんどん利用した方がいいと強く感じている。

Q：水の工場は将来、水と食料とエネルギーの工場になるというのは非常にリーズナブルでよくわかる。食料では植物工場のようなイメージが浮かんでくる。未来の水処理プラントとリンクした食料、エネルギープラントという具体的な姿のイメージはあるか。

A：一つはエネルギーにはいろいろな形があると思う。メタン発酵や、海水処理塩分濃度の差を利用しその圧力のエネルギーを電気エネルギーに変えるなどが思いつく。エネルギー獲得プラントにするには、今の水処理イメージからすると有機物の濃度が少々薄過ぎる。もっと汚れたものを集積化することで、次世代のプラントにつながるだろう。食料につながるスキームとしては窒素とリンである。窒素とリンを濃縮したものから効率よく回収し、食糧生産の現場に持ち込みやすい形で転送する。そのようなイメージが現実に近いと思っている。

Q：リスク評価のための測定項目に対する分析技術はあると思うが、リアルタイムのモニタリングとしていろいろな技術開発課題があると思う。その観点で特に研究要素が残っていると思われるところを教えてください。

A：まず言えることは、未だ本当に現場で実用化できる技術にまで成長していないことである。また、全然そこに適用できるレベルにも達していない。生理活性物質、総排水毒性も厳しい状況である。微生物・ウイルス、多剤耐性遺伝子も厳しい。有機汚濁物質の指標 (BOD, COD, TOC) のBODやCODは非常に時間がかかるので、汚れている指標はTOCで読みかえるという大きな流れもある。重金属センサーは金属種は限定されるが使えるレベルのものが産総研でもできつつある。生理活性物質、総排水毒性、微生物・ウイルス、多剤耐性遺伝子はいろいろ方法論がある。産総研でもいろいろ技術を開発している。例えば、iPS細胞を使った影響技術、光る細胞を作って内分泌攪乱物質の多くものに反応するといった非常にブロードバンドなものを作っている。そのような技術は未だ遺伝子組換えをベースにした技術で、研究室から外に出そうとすると大きな課題がある。安定的に生物を使って物を計る技術には克服すべき課題が多くあると思う。

3-10. 総合討論

モデレーター 関根泰（早稲田大学 先進理工学部 教授

／JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー）

- [関根] 従来は精密な抽出、前処理、濃縮を単一成分について丁寧に長い時間をかけて分析しており、これは機器の能力の問題でそうになっていた。しかし、速くたくさん精密に、生きたまま細かいものを同時に見たいというニーズがある。そこで、二つの大きな流れを紹介いただいた。一つは、抽出せず生きたまま見るとか、あとはダイレクトにin vivoやin situで見るという考え方である。地域やサンプル数などをどんどん増やし、まずは大きなデータとして拾い後でデータ処理をするというインフォマティクスの世界である。データベースとリンクさせて検証し、スペクトルを有意なものにタグづけしていく。もう一つは、単一分子や細胞のレベルで取り出して、直接、濃縮あるいは圧縮されたデータを取り出し、Operandoで直接分析をするというような考え方である。また、定常状態でどのようなことが起こっているか、あるいは非定常や特定のもののターゲットに選んだ際の毒性についての指摘があった。

ファンダメンタルな原理として幾つかキーワードが挙がった。例えば、ナノ流路を利用して表面張力を使う、層流になるような環境下での制御ができるもの、コールドプラズマによるアブレーション、制御されたイオン化などがあった。計算科学では、さらに解析技術を分析とリンクさせて進めていく、あるいは量子化学とのリンクというのもあり得るという指摘をいただいた。

今後、さらなる改善が期待されるものの一つに、サンプリング技術をどうするか、パッシブでいいのかなど様々な話が出た。分析限界の向上についてはテクニカルな話として挙げられた。その他、ニーズとシーズをうまくリンクさせていくと新しい分析の世界が見えるのではないかという話があった。

二極化

- 高いNMR装置を使っている身として、卓上の安いものが最近出始めているという話をしたが、ただでさえ感度の悪い装置がもっと悪くなったり、あるいは分解能がもっと悪くなってしまう。実験室の研究は現場で知りたいマーカーをあぶり出す。これはファインな高い装置を使ってやってもいい研究である。現場で使えるマーカーは安い装置でとれるものがないのではないかと考えている。それから、後半の機械学習について。学習というからには時系列でデータをとって特徴をつかむ、教師アリの学習ができる必要があると思うが、これは先ほどの安い云々とかなり関係しており、マーカーがあぶり出されてくればサンプリングサイトに応じて、教師アリの学習ができるので、さまざまな機械学習のアルゴリズムが分析のデータとカップルして利用できるようになってくる。そうすると、予測や制御が将来的に可能になってくるのではないか。
- 我々の使っている装置は比較的高額でしかも特殊なものなので、これを全てに普及させようとは今のところ考えていない。モニタリングでは地方や、海外のインフラの整備されていない現場で測ることになるが、場合によっては、普通のガスクロでさえ使えず、比較的汎用性のあるもので測る必要がある。しかし、何か事故などが起きたときには、発生した物質を正確に同定するため、リファ

レンズ装置で精密に測るといったことをすればよい。また、環境中の全ての物質を絶えず全部測る必要はなく、ある期間を決めて様々な物質を精密に測ったときに影響も一緒に見て、この物質だけ見ておけばよさそうというマーカーが見つければ、あとはマーカーだけを追うというモニタリングに切り替えていくというようなことが考えられる。そのためにはサンプリングを含めたモニタリングのための技術開発と、精密な分離とノンターゲット分析は二極化していくと予想する。

- 二極化という話は私も感じている。超先進的な分析技術で研究を進めていく側面と、全世界で統一されたデータを集めなければいけないという側面があるので、いかにこれを簡便化してコストを抑えて、広く普及させていくかという二つのベクトルで仕事がある。装置が安くなったら気球にくくりつけて飛ばしたい。空気は高いところで動いているので、安くなれば使い捨てにして蛍光カウンターを飛ばして上空のものはかるとか、南極、北極に置いてくるとか、そういう使い方をしていきたい。ドローン革命と合わせて、極力小型化、安価にできるほど見えてくるものが大きくなってくる。OPCゾンデというのがあり、結構日本のメーカーは頑張っている。
- エアロゾルの散乱を利用したカウンターのゾンデは、国内では山梨技術工房がつくっている。それから、微量ガスなどは国立極地研究所が開発したり、あと、無人飛行機を気球につけて成層圏まで上げて、そこで物をとって飛行機で帰ってくるというものも九州大と福岡大の方が開発している。
- 装置の二極化は同感である。最先端の研究者に使ってもらうような装置と、モニタリングの方向性に分かれていく。今は同じようなものをどちらでも使おうとして無理がある感じがするが、マイクロ流路のようなもので小さくする方向性と最先端の装置をつくる方向性に、もっと明確に分かれていくのではないか。自分はどちらかという珍しい装置をつくっているが、メーカーや共同研究をしようとしても、何台ぐらい売れるかという話になり協力できないとなったり、装置開発をやろうとしても科研費ではなかなかつくれる、科研費の大きいタイプをとっても、質量分析装置などはそう簡単に買えない問題があって苦労している。
- 分析で得られるデータが随分増えてきている。科学技術の発達、コンピュータの発達に伴って、計測機器から出てくるデータも膨大なものになってきたので、効率よく処理できるようなものが必要である。ディープラーニングの活用もあり得る。我々が用意できるデータ数はまだ少ないがそれを多数集めることが可能になれば、今後ビッグデータ解析ができるようになるかもしれない、全然違うブレークスルーがあるという気はする。

分析技術・産業の日本の立ち位置

- [関根] 自動車の排気ガスの分析は世界中堀場の装置を使っている。どこの自動車会社へ行っても青いマシンがある。イニシアチブをとって一度標準化できると、世界中の分析マーケットを押さえられるが、一方で、バイオ系のように全くイニシアチブがとれず、全て海外にとられている分野もある。環境分野の分析はそういう意味で日本の立ち位置はどうか。
- 気候に関していうと、特に大気エアロゾルに関する測器は一部を除き、ほとんどコントリビューションはないに等しい。例えば、大気ではなく海洋分野ではあるが、先ほど紹介した海色リモートセンシングに関する現場観測用測器は欧米のメーカーに押さえられており、ある程度までシェアを占めたところがそのまま伸びていき、あとは淘汰される方向だ。

- 日本でも大気エアロゾルの先端的な分析技術を開発している先生もいて、レーザーアブレーションのイオン化で単一のエアロゾル粒子をオンラインで分析するような装置も研究レベルではつくられている。それをいざ商品化して世界に打って出ようとなったときに、企業とフィージビリティについて相談すると、コストの点で成功せず、結局エアロゾルの質量分析計はアメリカのベンチャーライクなエアロダインという会社が世界の標準をとってしまっている。逆に、その装置を使わないとせっかく自分で苦勞して同等以上の装置をつくっても、論文で一からその装置について説明して、アメリカのあの装置と比べてどうだという説明をしなければいけないので、結局アメリカの装置を買ったほうが早いということになってしまう。
- 日本は、分離技術は優れた要素技術を持っている。私の紹介したキレート樹脂も従来のものより段違いに優れていて、おそらく海洋学の分野ではほぼスタンダードになりつつある。しかし、検出の観点で元素分析では日本の企業は負けつつある。ICPの発光装置や質量分析装置はほとんど外国製品になりつつあるし、特にマルチコレクター型のICP-MSは世界でも2社ぐらいしかつくっていない。有機の質量分析装置は日本の会社が優れたものをつくっているが、金属や元素を分析するための270程度までの範囲の電荷比をはかるようなものは、マーケットで完全に負けている。
- ICPはアジレントが世界で一番売れているが、実は昔の横河アナリティカルシステムズでつくっていて、買収されてしまいアメリカの企業となっている。

標準化

- 気候モニタリング研究では全球的にデータを集めなければならない。そこには最先端の技術も必要だが、標準化というか、同じ質のデータを集めないといけないため、どこかが一人勝ちする世界である。いくら良い技術をつくったとしても、それを使ってもらえないと気候の分野では全く評価されない。日本で開発したものをいかに世界で標準的に使ってもらうかまで戦略的に考えないといけないのかなと感じている。
- 細胞や粒子を分析しようと装置をつくっているが、分析装置の評価のための標準物質という重要な問題がある。細胞や大気粉じんを模したような標準物質がないので、何かを代用してやっている。今、細胞1個ずつの微量元素をはかっているが、標準物質らしきものはあるが、それを分析してばらつきが見えても、それが本当に個性なのか、装置の特性なのかを切り分けられない状態にあるので、ぜひ国研でつくっていただけるとありがたい。
- 大気粉じんに関して、国境研が大気粉じんの標準粒子をつくっているが、バルクとして保証しているだけで、1個1個の保証はされていない。
- 逆に標準物質をつくることでそれを打ち破るとか、あるいはソフト面で様々なデータを一般的につなげる技術により多様なものを受け入れるような計測システムは可能か。
- 最後は結局使ってもらえるかどうかだと思う。こちらがよい標準物質を用意して、いいデータを供給したとしても、何か使いづらいところがあると使ってもらえない。いいデータを出して、どんどん引用してもらって目立つことで、あのデータは信用できるという国際的なお墨つきを得るなど、地道な側面がある。

データベース

- 我々が関係するデータとして、汚染物質の質量分析のスペクトルデータやクロマトグラムのデータがある。今は任意の協力者のサーバに置いて管理しているが、多くは分散している。学会あるいはマスバンクなどの非営利団体等があり、そこが運用するなどの形態が普及しつつある。あるいは、どこかの大学で一括で持つなど並存して動いている。多くはオープンになっており、その分野の方なら大体知っていてアクセスしている。メーカーの装置も最近はそのようなオープンネットワークのデータベースにアクセスして、データをとってくるというような形が普通になってきている。
- 本日紹介したような我々のツールは研究室で作って管理しているような状態なので、作った人がいなくなると途端に更新できないというのが正直なところである。コアなものは、センタライズして上手に国で企画・運営していただくのとよいのではないか。もう一つは、ランダムまたは汎用的な分析データがたくさん出てきたら、それをデータベースにするのは非常に難しい。携帯などから人々が発するメッセージに近いもので、まさに人工知能、AIが勝手にデータを収集して、上手にノイズを処理するようなアルゴリズムを誰かつくってくれたらよいといった想像はしている。
- [関根] 分析ではNISTが非常に大事な位置にあると思うが、どのようなファンディングのサポートで成り立っているか。NISTのライブラリーのお金の流れがどうで、面倒を見ている職員がどれぐらいいるか。
- 標準局の職員がメンテナンスしていると思うが、データの供給はほぼボランティアで集めていると思う。
- [関根] ある意味、国が運営しているウィキペディアデータベースのようなイメージで、ありとあらゆるものが出てくるようなものは日本では難しいか。例えば、MSのスペクトルのフラグメンテーションのパターンもまだまだ数が足りないという話があったが。
- 環境汚染物質のデータベースに関しては、一度国環研が中心になってつくったことはあるが、紙ベースでつくったもので、なかなか再利用が難しい。今、本当に欲しいのは、精密質量スペクトルのデータベースである。NISTの整数質量スペクトルデータベースでは、100や200の候補物質が普通に出てくる。データ収集では、質量分析計の質量精度や分解能が依然として足りないため、普通の汎用機で計測してもどのようなデータベースになるかわからない。そうしたときにデータを標準化していくような仕組みを盛り込めるとよい。

その他

- この会に参加して、最先端の分析装置の話聞き、その応用について夢が広がった。例えばレーザーアブレーションの質量分析計という話をしたが、プラズマを使って非常にソフトなイオン化ができるとか、単一粒子での微生物の質量分析が実現できるかもしれないというのは、ブレイクスルーになると思う。今、もともとあるような顕微鏡技術をいろいろ組み合わせて、何とか1個1個の粒子を識別しようとしているが、労働集約的とか時間もかかる。究極的にはオンラインで空気中に浮かんでいるものを手を加えずに捕集し手を加えず分析することが必要である。自家蛍光を発する粒子がバイオエアロゾルだと謳って海外のメーカーが市販化しているが、どうも染色してカウントしてみると、大きさや数も違ったりして、一体、あの自家蛍光粒子は何かというところである。セ

ンサーを通過させて自家蛍光を出させた後に、オンラインの質量分析計で単一粒子の分析ができれば、飛躍的にキャラクタライゼーションが進むと感じた。それから、マイクロ流路の件に関しても、例えば微生物の細胞壁に含まれているような多糖類のようなものが、疾患の原因と言われている中で、エアロゾルの微量に含まれているものを精緻に長時間分解能で分析できるようになれば、これも強力なツールになるという感覚も持った。

- 海洋観測の船について、新しい船をつくるためには非常にお金がかかるので、日本の観測船はほぼ全てJAMSTECに集約されており、全体での予算が決まっている。10年程前に東大の海洋研から白鳳丸などがJAMSTECに移管されたときには、管理のために300日程度は海に出る約束であったが、実際は油の値段も高まり、JAMSTECの中で運航に使える予算が限られてきているらしく、だんだん運航できる日数が減っている。持っていては運航できないというような問題も生まれている。
- 例えばデータ同化を使って衛星でとった物理的なデータによりゲリラ豪雨を予測するなどは、日本でも進んでいるのではないかと思う。最も時系列のデータがよくとれているのは、気象衛星のようなデータで、そのようなデータと自分がサンプリングしたデータをいかに組み合わせていくかが大事である。気象予報でさえ70%程度しか当たらないので、もう少し化学や生き物のデータを使って将来の崩れゆく環境あるいはよくなる環境を予報できればありがたいのではないか。予報ができた次には対策で、例えばリサイクルなどでは微生物は非常に重要な役割を担っており、個別に分析した情報や微生物が作り出す発酵産物などのケミカルな情報が対策にも有効なはずなので、それに即したデータの解析法と分析の手法が組み合わせることで、三つの領域が有機的にカップルして優れた環境研究ができるのではないか。環境は、生態系サービスということ考えると高価なものであると言われている。例えばサンゴは生き物の揺りかごであるので、サンゴ礁がなくなると例えば漁業あるいは観光などに相当な影響が出る。値段が高くて守らなければいけない、あるいは生産性をよくさせなければいけないということは、環境分析に関わる人々が日頃から強く訴えるべきである。
- 長期間、どれだけ見続けるのかは非常に重要だということも痛感した。また、時間分解能を高めることで初めて見えてくる情報があるということも非常に印象的で、空間分解能の解像度を上げる話も印象的であった。一方で、現実として私は毎日アジアの水のことばかり考えているので、多くの課題があるが、そういったテクノロジーを考えている方の知恵を現実に呼び込めたらいいと考えている。
- ディープラーニングはもともと微小な変化を見逃さないようにするための手法論として人工知能学会では開発をしており、異分野をつないでいくことが重要かと思う。疫学的な研究でも、どの地域にどのような病気が多いかコホート研究なども行われており、もしかすると黄砂に付着した生物学的なものの影響なども見えるかもしれない。

4. 環境予測・評価技術

4-1. 「気候変化に対する全球植生の応答を予測するシミュレーター（動的全球植生モデル）の俯瞰と課題」

佐藤永（海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野 研究員）

海洋研究開発機構は地球シミュレータを用いて、気候変動の予測研究を行っている。私は、その中において、陸面が温暖化に従ってどのように変わり、それがいかに気候変化にフィードバックしていくのかという研究をしている。

最初に研究分野の背景についてお話ししたい。植生は、周囲の気象環境に大きな影響を与える。図 1 左はその例で、これは仙台市でヘリコプターからつり下げた赤外線温度計で地表面の温度を測り、仙台の中心地から郊外まで観測した結果である。夏の晴れた日の観測結果だが、町が広がりコンクリートやアスファルトに覆われている場所は、地表面の温度が 45℃、場合によっては 50℃近くまで上がるが、緑が多い地域では一気に 20℃位まで下がるといった観測結果である。植物が地面から水を吸い上げ、それを大気に拡散し、そのときに熱を奪ってくれるのと、葉や幹によって地表面の構造が複雑になり表面積が増えることによって、地表面の熱を大気に放散する効率が高いといった事情がある。

これまでは、水循環や熱交換についてのみ話した。図 1 右はある熱帯地域で大規模な森林伐採を行ったときに、大気と地表面の間の働きかけがどのように変わるかといったものを模式的に示したもので、水循環・熱交換に加えて放射収支や炭素循環も変わってくる様子が示されている。気候変動のレベル、すなわち 30 年以上といった時間スケールにおける気候環境変化をシミュレーションしようとする際には、植生被覆の変化に伴った大気陸面相互作用の変化までも考慮に含める必要がある。

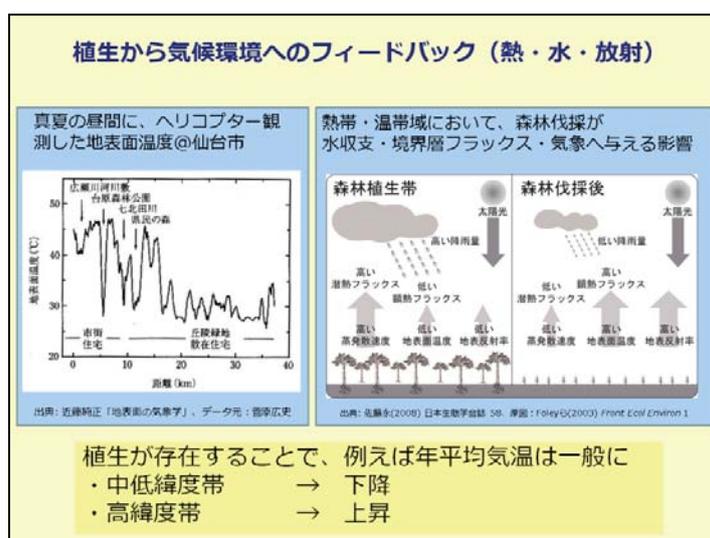
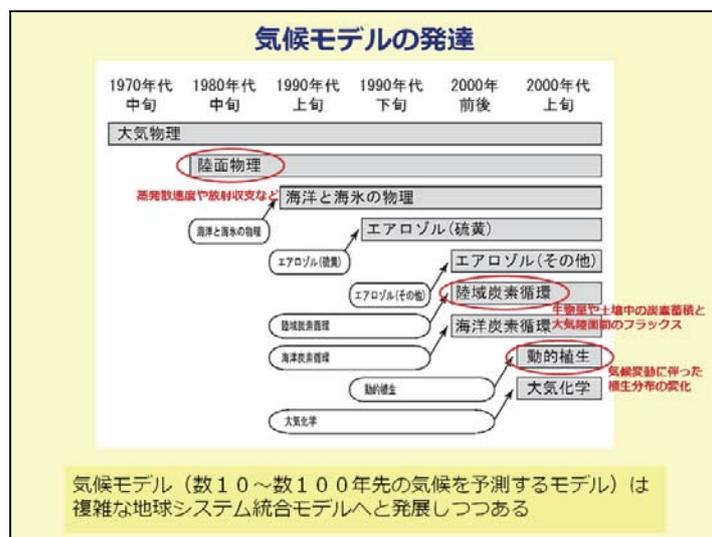


図 1

もう一つの例を挙げる。葉には無数の小孔（気孔）があいており、葉が光合成するとき CO₂ が必要になるため、この小さな穴から CO₂ を取り込む。そのときに CO₂ が葉の中を拡散していくが、葉の中

では細胞がむき出しであるため、基本的に湿度が 100%、外気の湿度が 100%ということはほとんど無く、よって CO₂ を取り込むと同時に水蒸気が葉の内部から抜けていってしまう。CO₂ の濃度はたかだか大気中分子の 0.04%程度のレベルであり、水蒸気の方が圧倒的に多く大気中に存在する。そのため、1 分子の CO₂ を取り込むのに 200 分子くらいの水蒸気が葉から抜けていくという状況が生じる。いささか過大推定しているような話だが、地面から大気へ水分が戻る蒸発散のうち 8~9 割が気孔を介して出ていくというような推計もある。水蒸気が出ていくと気化熱を奪いエネルギー収支も変わってくる。よって、植生は大気陸面間の水循環やエネルギー循環において主役として扱わなければいけないコンポーネントである。

図 2 は気候モデルの発達を示したものである。まずコアとなる大気循環モデルが整備され、その後のごく早い段階で陸面物理過程が入ってきて、地面から大気へ戻る水の量やそれに伴って動くエネルギーの量などを制御させるようになってきた。そして気候変化予測における、大気中 CO₂ 濃度変化の重要性が広く認識されるにしたがって、ここに炭素循環を予測するコンポーネントも結合されてきた。このように、気候モデル（数 10~数 100 年先の気候を予測するモデル）は複雑な地球システム統合モデルへと発展しつつある。



原図「IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC」

図 2

図 3 は産業革命以前の 100 年位前から現在までの間の大気の放出量と放出した CO₂ の行き先を累積で示したものである。灰色の部分で化石燃料を燃焼させたことに伴って大気に放出された CO₂ 量を示している。こげ茶の部分で土地利用、人が植生を切り開いて農地などに変えたことに伴って、大気に放出されたバイオマスや土壌由来の炭素量を示している。これら人間活動に伴って放出された炭素のうち、大気に留まっているのはせいぜい半分から 1/3 程度と推定され、残りのかなりの部分は海洋や陸域に蓄積されている。

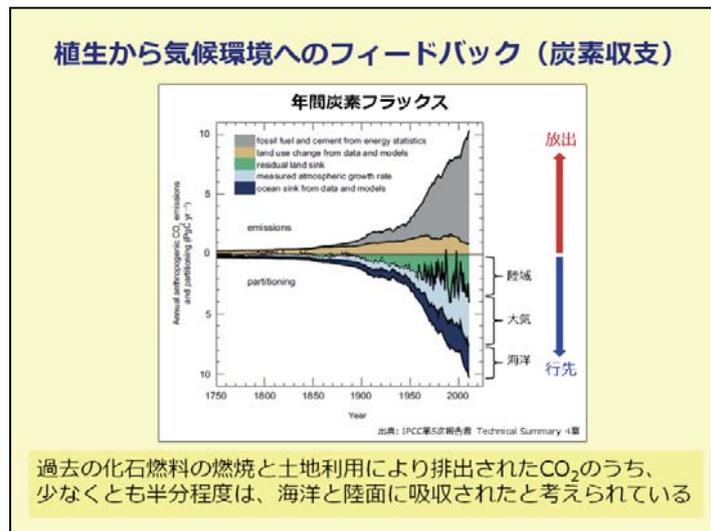


図 3

温暖化を予測する際に人間がこの先どのくらい CO₂ を発生させるのだろうかといったシナリオに基づいて予測を行うわけだが、今後発生する CO₂ のどれ位の割合を海洋や陸域が吸い続けてくれるのかといった見積もりが大事になってくる。そのため、気候モデルに前世紀の終わりぐらいから陸域の炭素循環が組み入れられるようになった。その後、かなりの規模と速度で温暖化が進むといった認識が一般に広がり、そのように気候分布の変化が激しいのならば、それにとまって植生の分布そのものも大きく変化するだろうという考えに当然行き着く。そこで、気候の分布が変わったときに植生の分布が変わるといった状況を考慮したら何が起こるかといったことが検討された。

図 4 は初期の検討例である。青の線はどれだけ気候分布が変わっても植生の分布は変化しないと仮定した場合、赤の分布は気候の分布に伴って植生も動的に変わるとした計算結果である。植生動態の有無を考慮することにより今世紀末の大気中の二酸化炭素濃度は 250ppm も差が付き、これは全球にならずと平均気温で大体 2°C 程度の温暖化に相当する濃度である。この研究は、気候変動予測における植生変動の重要性の認識を、一気に広げた。

また、図 4 には、今世紀頭から今世紀終わりまで同じシミュレーションを行い生物量がどれだけ変わったかを世界地図で示している。赤はバイオマスが大幅に失われ大気に戻っていったエリアで、アマゾンが真っ赤で気候変動に伴って植生も変動させるとアマゾンの森林がほぼ壊滅したことになる。アマゾンのように内陸に大森林帯があると、地面から大気に戻っていった水のかなりの部分が陸に戻り、水が循環しているという事情がある。暖まって一度乾燥化が進むと植生が少なくなり、水の循環が弱まって乾燥化が進むといった、乾燥化に対して正のフィードバックが起こるようになっている。乾燥に対してアマゾン盆地の植生はそこまで弱くないことが最近の研究でわかっており、これはかなり過大に推定した結果であると広く認識されているが、植生の変動を入れるか入れないかでポテンシャルとしてこれだけ気候予測に差が出てくるということで、IPCC の第五次レポートのシミュレーションを出す頃から、世界の主要グループがこのような動的植生も入れるようになってきたというのが現状である。

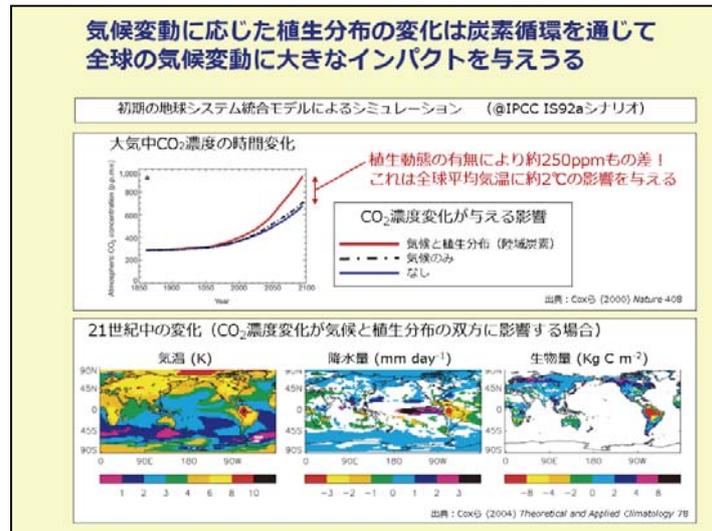


図 4

気候変動を与えたときに陸面植生がどのように変化し、その結果大気と陸との間の相互作用がどのように変化するのかといったシミュレーションモデルを動的全球植生モデル (DGVM : Dynamic Global Vegetation Model) と呼んでいる。この中には物理モジュール、植物生理を扱う生理モジュール (光合成や呼吸など) に加え、植生の分布変化を起こさせる植生動態モジュール等が含まれている (図 5)。

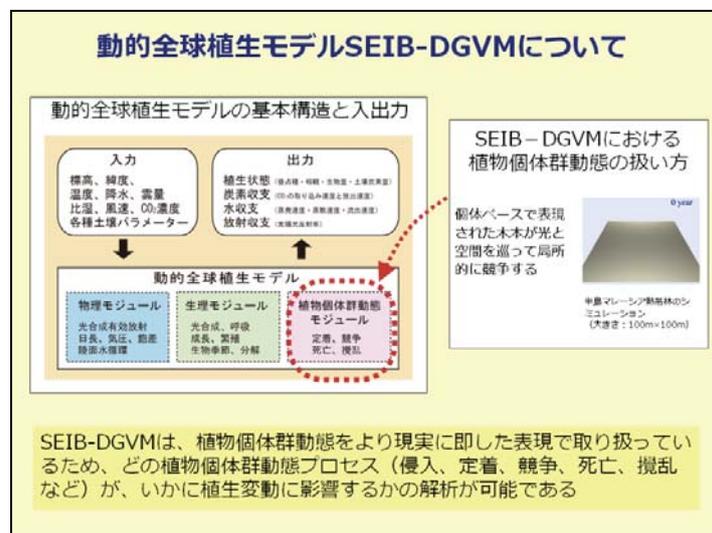


図 5

植生分布変化の予測は、実はかなり難しい。年平均気温と年平均降水量を与えれば、何処にどのような植生が出てくるかが全球スケールで大ざっぱに決まる。しかし、実際に気候の分布が一気に変わったときに、植生の分布変化が直ちに追いつかずかなりの時間遅れ、場合によっては数千年スケールの時間遅れがあるということが知られている。その理由は、一つには、気候が変わっても種子が新しい生息適

地に飛んで行き発芽し繁殖して種子をまくようになるのに、木本の場合には数十年を要すること。二つ目には、種子が拡散した先に、既存の植生が発達している場合には、これら既存植生が退かなければ、新たに侵入した木本種が優占できないことである（図 6）。このような時間遅れを扱うために、動的全球植生モデルには植生動態コンポネントが入っている。私どものモデルの特徴は、植生動態の扱い方がより現実に即していることである。一例として、マレーシアの熱帯森林のシミュレーション結果を説明する。森林帯を切り開くと、最初に黄色いパイオニア種といったものが入り、徐々に寿命の長いような樹種にとってかわる。このような植生動態に応じて、炭素収支と水収支が連動して、さらに、放射収支も連動する（図 7）。

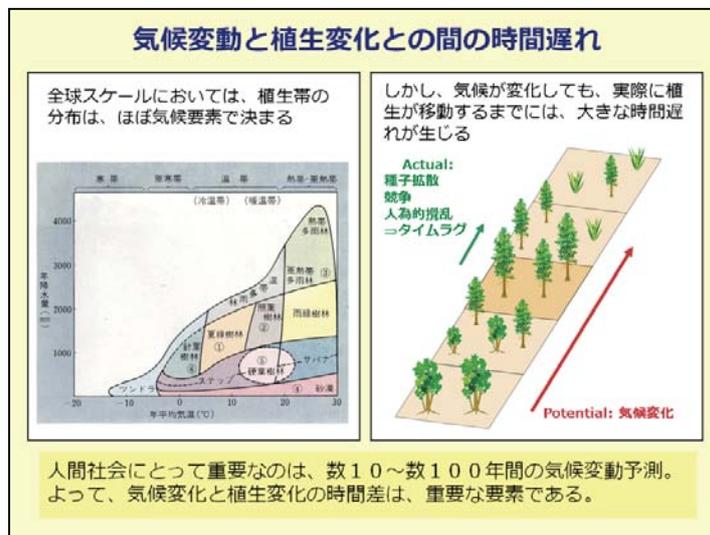


図 6

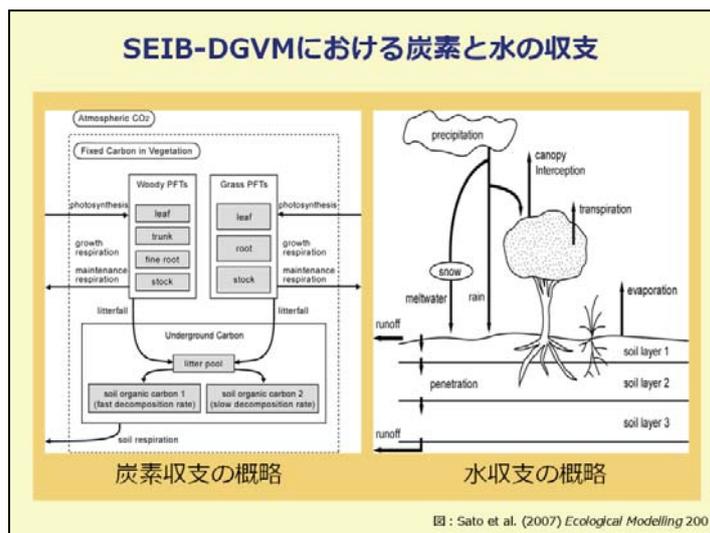


図 7

このモデルは、日本が地球シミュレータで運用する地球システム統合モデル（温暖化予測モデル）を作るために、陸面の植生を扱うコンポーネントが必要だということで開発され、実際に IPCC の第五次レポートに我が国から報告されたシミュレーションモデルに採用され、実際に使われている（図 8）。

このように、我々のモデルは、全球の気候変動といった大きなスケールを扱うために開発された。そのような研究と平衡して、我々のモデルをより身近な問題、すなわち短い時間スケールと限定された場所において実用的に適用する例を作るべく、東南アジアで急速に広がっているゴム林が長期的に存続できるのかどうかを扱うシミュレータを開発中である。また、モデルをなるべく多くの方に使っていただき、私共が考えつかないようなアイデアなどを提供していただくことを考え、ウェブ上でダウンロードできるようにし、必要な技術資料、技術サービスを提供する活動も行っている。

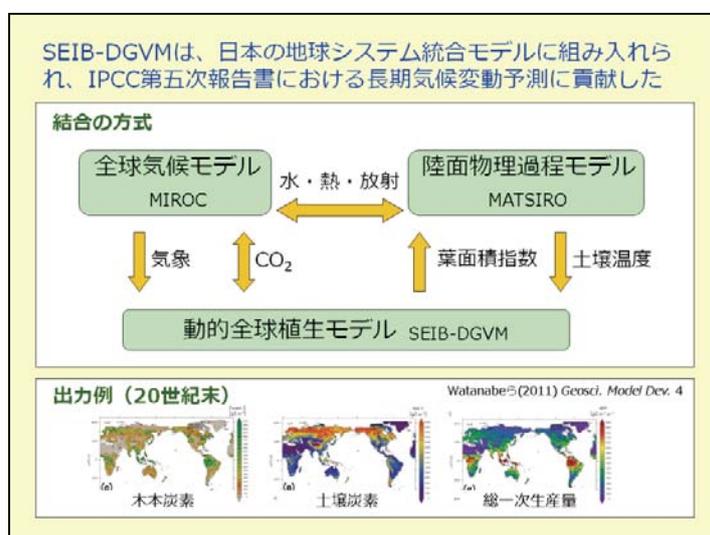


図 8

気候が変わったときに植生がどのように変動するかといったモデルは、IPCC にシミュレーション結果を出している世界の主要な国はどこも持っている。それぞれの国の動的全球植生モデルの性能比較なども行われている（MIPs; Model Inter-comparison Projects）。図 9 左はその一例である。縦軸が南北方向（緯度帯、上が北、下が南）、横軸は炭素の回転速度を示している。光合成によって陸に取り込まれた炭素が平均何年間対流して大気に戻っていくかを、実測ベースと ICPP の第五次レポートに参加したモデルのシミュレーション結果を比較したものである。実測ベースのデータをよく再現している。ただし、全球のバイオマスと植物生産性の分布については、既存のデータセットがあり、それを再現するように全球植生モデルを調整すると、件の緯度分布は自動的に再現される性質のものである。この再現性を生み出しているモデルの構造が、実際にどの程度まで、実際に働いている機構を的確にモデリングしているのかを調べるため、気候感度を調べた。実測ベースデータにおける気象分布と植物生産力の年々変化を利用して、気温と降水量に対する陸面炭素回転率の感度を推定し、モデルにおいても同じ検討を行って比較した（図 9 右）。すると、気温感受性、降水量感受性の実測とシミュレーション結果が全く合わない。当然、このようなモデルを使って気候変化に伴った植生炭素の増減を予測したとしても、

その信頼性は高くはないことが容易に推察される。

何故、モデルと実測の間で結果が離れてしまうのか検討されているが、その理由として挙げられている要素の一つが土壌炭素である。図 10 は縦軸が南北方向で、横軸が土壌地下 1 メートルまでにどの程度土壌炭素が貯まっているかを示したものである。青系統の実測ベースでの推定値、赤系統が植生モデルで再現したものである。モデルの土壌炭素量は実測ベース推定値の 1/3～1/2 に留まっている。

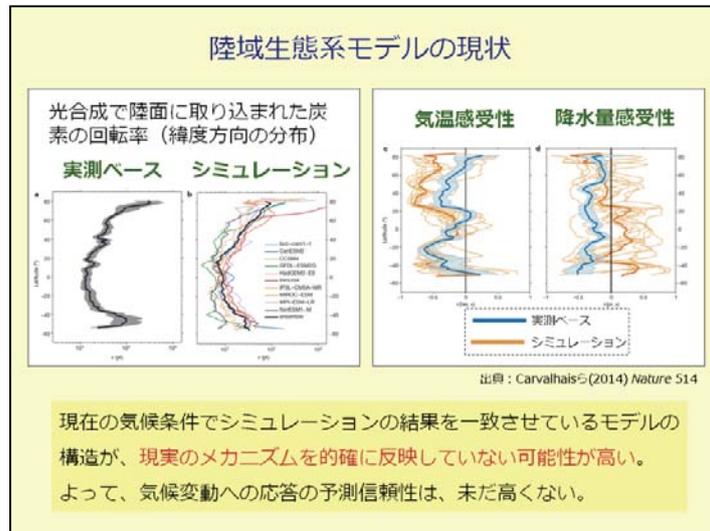


図 9

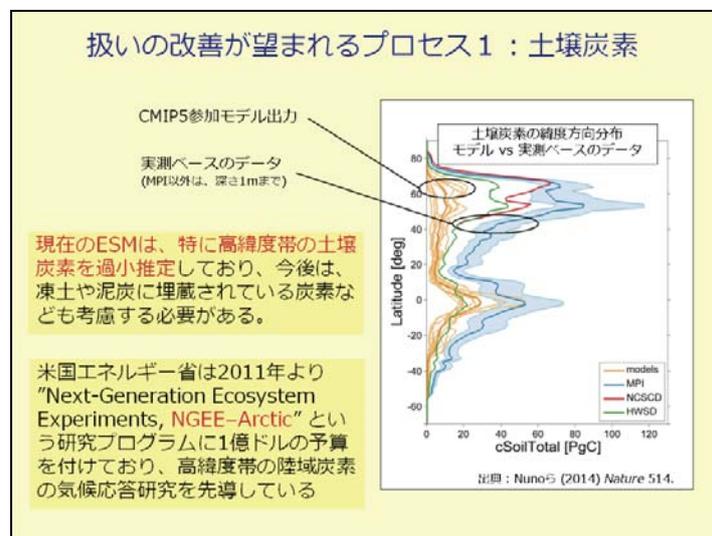


図 10

この不一致の主な原因は、永久凍土、特に高緯度帯の凍った地面にかなりの土壌炭素が蓄えられていることが再現できていないことである。永久凍土中の炭素は最終間氷期、あるいはヒブシサーマル期のように、地球が今よりも随分暖かかった時期に全部蓄えられたものだと知られている。植生炭素のシミュレーションでは、産業革命以前の気候条件を与えて 1,000 年、2,000 年の単位でシミュレーションす

る処理（スピナップ）を行う事で、土壤炭素プールを平衡値にもっていきが、この処理では永久凍土中に炭素は溜まりようがない。また、三角州地形に枯死物が厚く堆積し、これが高い土壤炭素プールに寄与していることが知られているが、これも全球モデルでは取り扱えていない。高緯度帯の土壤炭素が気候変動予測において重要であると強く認識されていることもあり、アメリカのエネルギー省では一億ドルもの予算をつけ、その予測精度を高める試みを進めている（NGEE-Arcs プロジェクト）。

もう一つの問題は、木本の乾燥枯死の過程を植生モデルで再現するのが難しいことである。例えば、高木ほど乾燥にされされたときに死にやすいという傾向が広く知られている。これは高木ほど光合成量が高いため、より多くの水を必要とすることと、風が通りやすいところに葉を持つことで水が奪われやすいためである。さらに、高所にまで水を運ぶために土壤-植物間の水ポテンシャル差をより高い状態に保っていなければならないという生理的な制約も受ける。高木ほど根を深く張る事が出来るため、水を集めやすいというメリットを享受できるものの、水を奪われやすいというデメリットの方が大きいという条件が広く生じている。高木が枯死すると、地域のバイオマス密度は大幅に低下する。しかしながら、その地域の葉の量には、さほど大きく影響は現れない。森林地帯に乾燥が進んだ場合に広く生じるであろう、このような状況を再現できる全球植生モデルは、まだ存在しない。

また、土地利用の問題も非常に悩ましく、生態学者は人為が関与しない系を扱いがちであるが、これもどうかしなければいけない問題と認識されている。さらに、生物多様性、種子の拡散、CO₂ 濃度変化が植物生産性に与える影響など、各論的な研究が熱心に行われる一方で、そのような研究から得られた知見を、統一的なモデルに取りまとめているとする努力は不十分だと感じている。

最後に、まとめにかえて、研究環境や実用に向けて克服すべき課題、そして、今後、国として注目すべき方向性、テーマ等を図 11 にまとめた。

まとめにかえて

研究環境（現場）や実用に向けて克服すべき課題

- (1) 植生モデルに様々な拡張が行われているが、それらを取りまとめる努力が不十分
- (2) 比較的ホットな分野であるため、競争的研究資金を得る機会が多い。しかし、優秀な若い（ポストドククラス）研究者の確保が困難。また、そのような研究者を確保しても、論文が書けるテーマを与える必要があり、そのようなテーマは必ずしもモデルの改善・実用化に結びつかない。研究者のマインドや、研究者の評価基準の転換も必要では
- (3) 植生モデルは、論文数を最大の評価基準とする理学分野で発展した。応用事例なども重視する工学系の文化も交えながら発展するのの一法か。そのためには、より身近な事例への適応例を積み上げていくことも重要と考える。

今後国として注目すべき方向性・テーマ(環境・資源・エネルギーとの関連において)

この種の分野が発展するためには、野外データが重要。そのためには、過去の研究により蓄積されたデータが、使用しやすい状態で整備されていることが望ましい。地球科学分野ではNASAのDAACs、植物生理学分野ではヨーロッパのTRYデータベースなど、欧米諸国が先行。日本のDIASは潜在力は素晴らしいが、課題として、①継続性の担保、②より広い分野の取り込み、③インターフェースを分かりやすくする、事を挙げたい。また、このようなデータベースへの貢献も、研究者の評価として大いに用いられるべきである。

図 11

[質疑応答]

- Q: 例えば森林火災という問題は重要な問題としてある。人為的に燃やしてしまうインドネシアのような例もある。シベリアの森林火災は人為的か自然的かはっきりはわからないが、毎年、多くの森林火災が起き森林面積が消失し、かなりの炭素が大気に戻ると思うが、これらの扱いはどうなるか。
- A: 森林火災に関しては、ほぼ全てのモデルが扱っている。人為的問題、自然の問題があるが、山火事の原因は圧倒的に人間の影響が高い。山火事が植生に与える影響は大きく、たとえば東シベリアのカラマツ林帯では平均 200 年に一度大きな山火事が発生し、一斉に植生がなくなる。植生がなくなるとカラマツが更新できないような、山火事に適応した植生帯であったりする。メカニカルベースでそういった植生帯を再現しようと思うと、どうしても山火事を扱わなければならない。どのモデルも山火事の問題性はかなり重視して入れてはあるが、簡単なサブモデルで扱っていることが多い。例えば、人口密度が多いほど明らかに山火事の頻度は増えるがこのような要素までは入れていないのが現状である。
- Q: 陸上の生態系のモデルを現実に合わせてるのは難しい問題であると思う。複雑で要素がたくさんあり、非線形性が入っていて生態系のようなそれぞれの生物の特徴まで同時に変わってしまうような系は、メカニスティックなモデルで本当にどこまで可能かといった疑問を最近持っている。メカニスティックなモデルではないアプローチで植生を扱うという試みはされているか。
- A: 全球を扱うような植生モデルの第一段階として、陸面の例えば 1 ヘクタールあたりに葉のバイオマスや幹のバイオマスがどれだけあるといったことを面で近似し、バイオマスとその構造を面で近似するモデルから発達してきた。その方法では、入れることのできるプロセスがかなり限られ、無視しているプロセスがかなり大事だということわかってくるにつれ、木 1 本 1 本を扱うモデルがでてきているが、まだ、実用性のあるものとして扱うには心もとない状態が現状であると思う。例えば、乾燥枯死の問題で大きな木ほど枯れやすいという状況は、1 ヘクタールあたりに葉がどれだけあるかといった扱い方では絶対に再現できない。また、植物種の違いも重要で、アマゾン盆地に優占する木本種は乾燥に比較的強いが、東南アジアの高木種を構成している木本種は結構弱いといった違いがある。このような状況を、モデルが複雑になりすぎることを避けながら、取り込んでいくかが、今後は大事になってくる。
- Q: メカニズムのことを考えなくても、機械学習のような方法を使うと、メカニズムに直接アクセスしなくても予測はできるというようなモデルも可能と思うが。
- A: 観測データ豊富にあり、今後の気候変動程度が小さいような状況であれば、そのようなパラメタライズは可能であろう。しかし、今世紀末もしくはそれ以降に起きる温暖化の気候変化の速度は、パラメタライズで扱える範囲を大きく逸脱するものである。多少なりとも、メカニズムは考慮しなければならない。

4-2. 「長期・複合的観測に基づいた森林生態系の光合成能力の時空間変動の解明と予測」

村岡裕由（岐阜大学 流域圏科学研究センター シニア教授）

フィールド研究と衛星観測とモデル解析を組み合わせることによって森林生態系の機能を測り、変化を予測する研究と、今後の展望についてお話ししたい。

岐阜大学流域圏科学研究センターは、20年ぐらい前に立ち上がった本部直轄の研究センターで、山地から平野に至る河川を中心とした森林や農地、都市域の環境に関する研究を、生物系、工学系、土木系、気象系の様々な研究者によって進めている（図1）。私のグループは主に山地、具体的には岐阜県飛騨山を対象とし、標高1,400メートルの冷温帯の森林生態系炭素循環について、植物生理生態学的方法と、産業技術総合研究所による気象学的方法を組み合わせ研究を進めている。光合成の環境応答によって葉、植物個体、植物の生死、成長などの森林生態系の振る舞い、環境応答までを、流域、地域、国土スケール、アジアスケールのCO₂循環を光合成で説明してみようと、森林を中心とした研究を行ってきた。生態学会、日本長期生態学研究ネットワーク（JaLTER）、日本フラックス研究ネットワーク（JapanFlux）、生物多様性観測ネットワーク（J-BON）等々の日本及びアジア太平洋地域の研究ネットワークと研究を進めている。

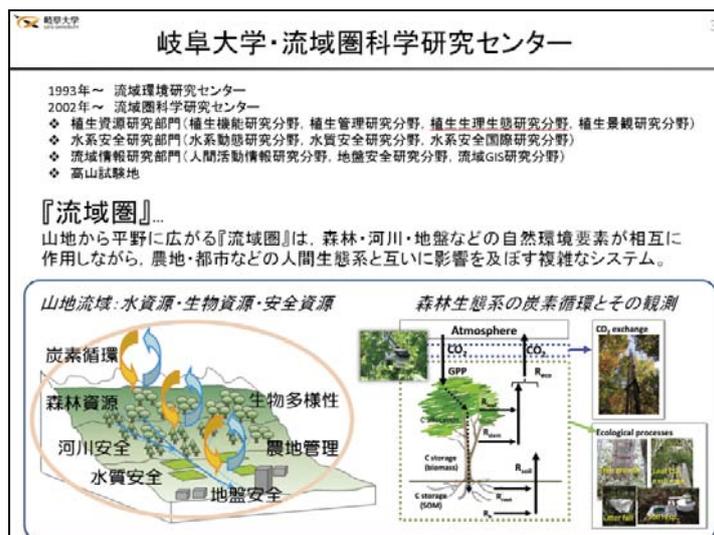


図1

岐阜大学は試験林を持っており、20年前に産業技術総合研究所と岐阜大学の共同で炭素循環の長期観測サイトを立ち上げ連続観測をしている。日本の森林の40%程度をスギ・ヒノキ人工林が占めるので、10年前にスギ林にも観測サイトを立て、森林によるCO₂の吸収と放出やそのメカニズムである樹木の成長や葉の光合成や、土壌からのCO₂の放出等々を調べたり、あるいは衛生リモートセンシングとのリンクを想定して、分光反射観測をしたり、カメラ等を用いて森林の季節性あるいは経年変動のモニタリングをしている。

産総研のグループが1993年の冬から20年以上にわたって、日本の典型的な森林であるミズナラ、ダケカンバ、落葉広葉樹のCO₂の吸収を観測している（図2）。オレンジの線の上で吸収で下で放出である。

1年365日、CO₂の移動を図り続けると、明瞭な季節変化を示す。山になっている部分は夏で、最も森林がCO₂を吸収している季節である。このように季節変化があると同時に、年によって山の高さが随分異なる。森林生態系のCO₂吸収量は明瞭な経年変動を示す。どのような仕組みによって成り立っているのか。気象学的な観点からCO₂の吸収量の年変動を統計的に説明することもできるが、私共は森林のCO₂の吸収・放出を担っている樹木の葉の光合成能力の季節性と経年変動、または、森林の葉の量の季節変化と経年変動を現場で同時に調べ、メカニスティック炭素循環モデルに入れて森林全体の光合成量の季節変化を考慮した生理生態学的解析を行っている。気象条件の影響を受けて葉の春の展開・成長、秋の紅葉・落葉が年によって少しずつタイミングが変わっている(図2)。また、夏は梅雨の状況によって天気がいい年、悪い年とあるが、夏の葉がたくさんついていて高い光合成能力を持っていても、日射、気温、湿度のあり方によって光合成の活性が年によって随分異なる。このような葉の季節性(フェノロジーという)と年による気象条件の変動が、森林のCO₂の吸収量にかなり細かい変動を与えていることがわかってきている。

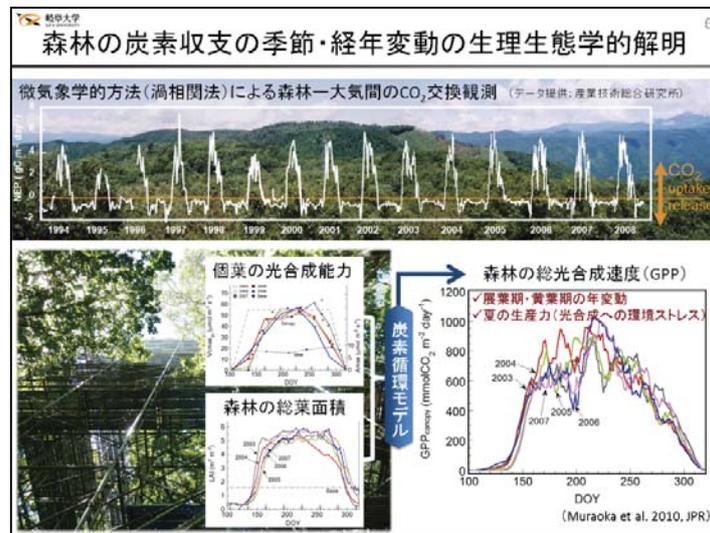


図2

我々はこうしたプロットでの観測を広域に広めなければいけない。例えば、地域レベルでの気候変動が生態系サービスにどんな影響を及ぼすか。流域生態系を見たときに様々な生態系がモザイク状に並んでいるが、モザイク上の環境がどのようにお互いに関係を持っているかを調べる必要がある。そのためには点観測だけではなく、衛星リモートセンシングを用いて生態学的、気象学的な観点をきちんと入れた解析手法を開発して、広域観測をすることが必要であり、衛星生態学というイニシアチブを10年前に立ち上げた(図3)。

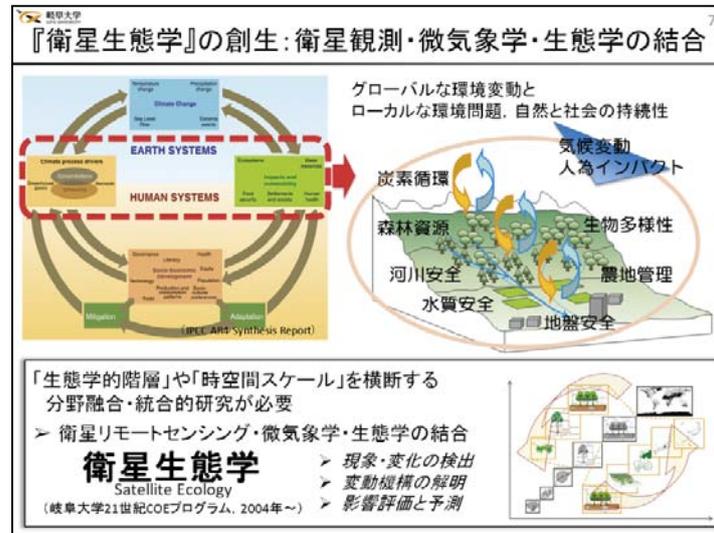


図3

一例として、我々は観測現場でタワーを建設しCO₂フラックスを測り、生理生態学的方法で葉の光合成からモデルを回し、同時に分光反射計で森林のスペクトル情報を収集することにより、森林の機能とスペクトル情報の関係を検証し、さらに衛星リモートセンシングで経年変動を調べ、広域評価を行うということを実施してきた。森林の光合成能力の現場観測、現場での分光スペクトルなど様々な植生指標があるが、これら対応関係を調べることによってある特定の植生指標が光合成能力の指標として適しているということを検証する。そして、MODISのEVIという植生指標を使って、中部日本地域の植生指標から光合成能力のマッピング、季節変化、経年変動を推定した(図4)。また、今後、数十年にわたって気候変動が進んだ場合に、我々の身近な生活環境である生態系(例えば森林生態系)がどのように変化するのか。大きなスケールで生態系サービスとしての地球環境調節機能の変化をもたらす。多くの将来予測モデルで光合成呼吸の予測を計算するが、現在得られている光合成の温度関数や呼吸の温度曲線などが将来も使えるかどうか誰もわからない。

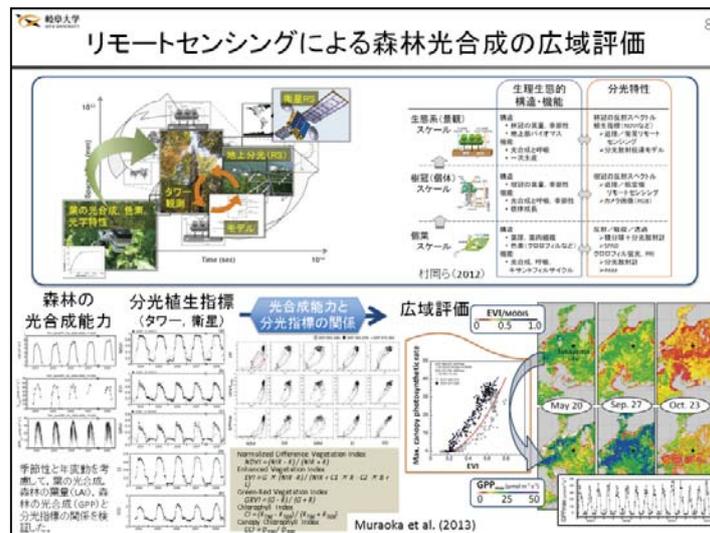


図4

実際に30~40年後の日中の平均気温が2℃上がった場合に、植物はどのように応答するかを野外で調べてみた。この20年、小さな実生（発芽したばかりの植物）を使った温室実験が世界中で行われているが、我々はオープンフィールドの現場で行った。例えば、樹高15メートルほどの樹木の枝に大きな温室をかけ枝を温める。そうすると、葉が出てくる日数が3日~4日早まる。葉の成長も早くなる。秋、紅葉・落葉が1週間ほど遅くなる。同時に、夏の光合成能力が1割ほど上昇する。このようなことがミズナラの例だがこの現場で見られた。温暖化が進んだ場合に土壌からのCO₂の放出が増えるのではないかという心配もある。森林の中で電熱線を土壌の表層に埋め込み地温を2℃~3℃上げてみた。温度が上がることで一時的にCO₂の放出速度は速くなる。いろいろなモデルでも地温と土壌呼吸速度の関係を指数関数で近似する。実は温めてやることで土壌中の生き物の呼吸活性が温度順化というものを起こし温度への依存性がやや鈍るということがわかってきた。将来の土壌呼吸速度を推定するとき、温度順化をきちんと入れなければならないことが見えてきた。

このように、これまで様々な観測・実験を行い統合的に解析・理解する、時空間的な研究を実施した。同時にメカニズムの解明、これからの衛星センサーのあるべき姿の検討を行ってきた。

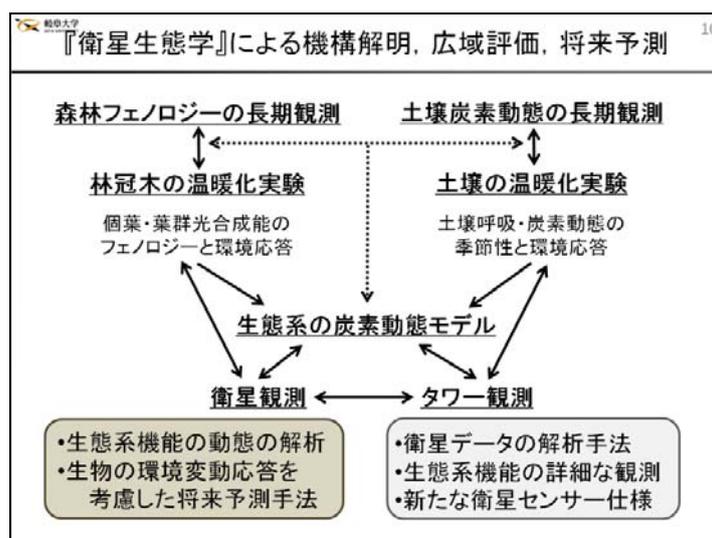


図5

国内外の動向と生態系観測の課題について。今年3月から地球環境研究に関する国際的アジェンダがたくさん発出されている。例えば、2016年からは地球観測に関する政府間会合の第2期戦略計画が進められ、地球観測、地球環境研究のデータを人類の福祉に使うという取り組みが進んでいる。日本国内では科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会の地球観測推進部会が「今後10年の我が国の地球観測の実施方針」を2015年8月に公開した。9月には国連の持続可能な開発目標（SDGs）が示された。このような国内外のアジェンダの中で環境に関するものとして、炭素の監視と管理、水の監視と管理、生態系・生物多様性の保全が重要視されている。これらにコミットする研究として、長期・複合的な観測と衛星とフィールドの連携観測を進めることで、長期的（気候変動）・短期的（極端現象）な環境変動に対する生態系の構造・機能（炭素・水循環）の応答幅の解明・予測、地球温暖化に対する生態系機能の

脆弱性の評価・予測、それに基づいて緩和策・適応策を作り検証することが必要と考えられる。

例えば、日本の環境を考えると、山地・流域圏は水を含めて生態系サービスの源であるため、その分野の研究ニーズとユーザーニーズをすり合わせて研究を展開することが必要になるだろう。生態系、生物多様性に関する課題としては、気候変動が森林の炭素・水循環あるいは生物生態にどのような影響をもたらすのか、日本での環境変化がアジアスケールでの環境変化どのようにリンクしているのか、それを介して生態系、生物多様性の現場で、気候の分野でいう「テレコネクション」があると考えられる。これらを衛星リモートセンシング、フィールド研究、評価・予測モデルを組み合わせることで検討を進めていくことが大事である（図6）。

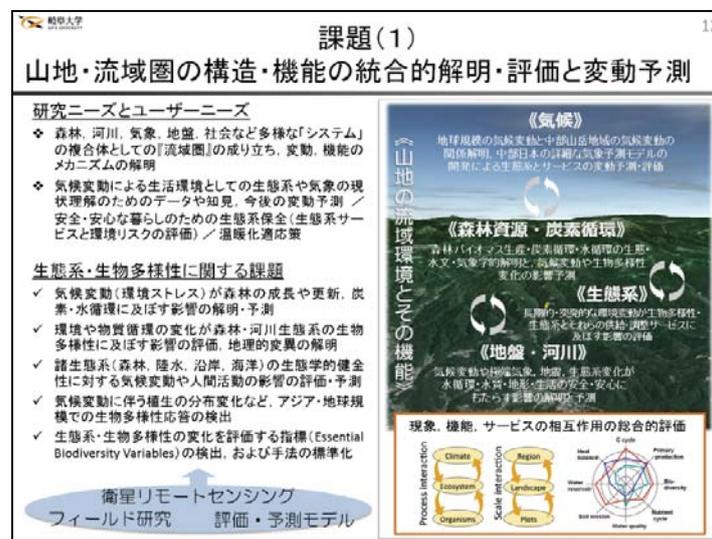


図6

グローバル、ローカルな気候変動と生態系や生物多様性の問題、地域社会の問題を組み合わせるためには、小さな一つの研究グループで進めていくだけではなく、いろいろな研究グループや分野の人がネットワークを作り、様々な視点で取り組んでいくことが大事となる。生態系の地理的な分布、時間的な変化の監視、光合成活性の衛星リモートセンシングが必要になると考えられる。今までの衛星リモートセンシングによる光合成観測はポテンシャルの観測が主であった。しかし、これから気候変動が進み、降水量が増え、天気が悪くなり、あるいは高温ストレスや乾燥ストレスが増えるときに、光合成の生理活性を測れる衛星リモートセンシング技術の開発が必要となる。もう一つは、炭素の吸収・放出源と生態系状態の同時観測を進められるようにすることが大切になってくる。分野融合的な研究を進めることで、10～20年のスケールでの連続的な衛星観測を実現すること、生態系の生物物理学的特性の衛星観測技術をフィールド研究に基づいて展開するようなことが必要になる（図7）。

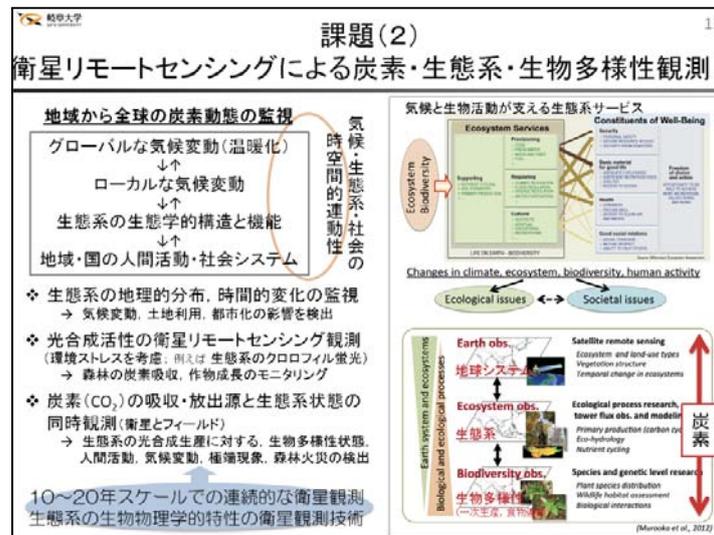


図7

様々な観測プラットフォームや研究プラットフォームを連携させてクロスカuttingな課題を抽出し、データや知見を出して意思決定まで持っていく。さらに、観測研究にニーズをフィードバックするといった研究と現場のコミュニティ形成がこれから非常に重要になってくると思う。Future Earth はこのようなことを進めているわけだが、さらに進めていく必要がある (図8)。

日本でこういった研究は勿論のこと、広域性と詳細性を兼ね備えた分野横断的な観測とモデル解析による研究を展開することが重要である。日本は様々な研究、技術開発が進んでいるため、研究成果をアジア太平洋地域の観測研究コミュニティの醸成に繋ぎ、アジア太平洋地域の環境変動とそれに対する生態系の応答、生態系サービスへの影響を評価していく。

「スーパーサイト」という考え方がある。岐阜大学の高山試験地をスーパーサイトと言っているが、様々な分野融合型の研究を集中的に展開し、それを日本、アジアに幾つか設置することで分野融合を進めることが重要だと我々のコミュニティでは考えている。

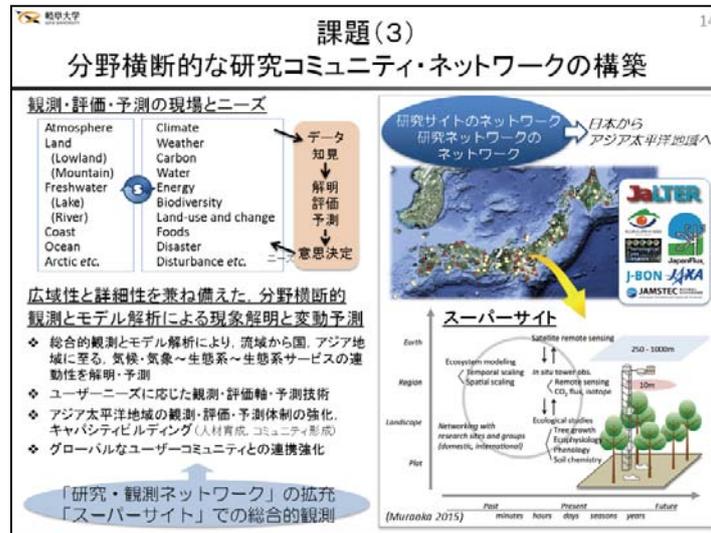


図8

国内外の動向としては、緊急に進めなければいけない研究を5年、10年の間にきちんと進め、10年、20年後の地球の様子と生態系、生物多様性の様子をモニタリングし、適応につなげなければならないという喫緊のニーズがある。これは日本だけの問題ではない。アメリカやヨーロッパにはそれぞれ大きなコミュニティがあるため、日本はアジア太平洋地域でリーダーシップをとり協力関係を築きながら進めていくことが必要であろう。それには、炭素のモニタリング、衛星観測技術の開発、現場での生態系、生物多様性の様子と社会システムの変化の把握が必要であり、キャパシティビルディングと研究プロジェクトをタイアップさせて進めていくことが重要だと思う。(図9)

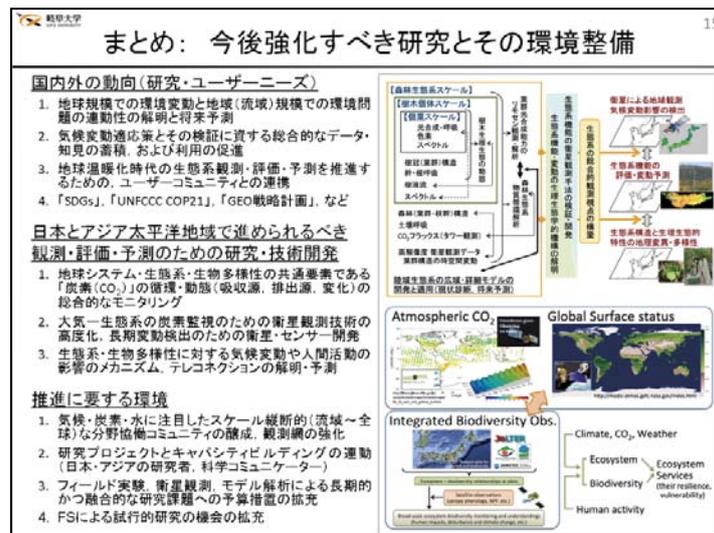


図9

[質疑応答]

- Q：データの公開についてはどのように考えているか。環境系の仕事が世界中、また日本で多く行われている。収集した貴重なデータは論文という形では公開されるが、論文の元となったデータが公開されていないケースもかなり多い状況である。日本でもこれは問題であるということでDIASというプロジェクトを立ち上げデータの公開に予算がついているが、まだ、生態学グループのコミットが弱いと思っており、考えを聞かせて欲しい。
- A：例えば生態学のある分野、日本長期生態学研究ネットワークでは、様々な種類のデータがあり、これをデータベース化して広く研究に使ってもらえるように環境の整備を進めているところである。フラックス観測グループでもFluxNetで、AsiaFluxなどのデータベース化が進められている。予算措置、人的リソースの問題があるが、データを共有していかなければいけないという認識がある。また、データを収集しデータベースに提供しても業績になりにくいという問題がある。それを克服する一つの取り組みとして、日本生態学会では、データペーパーというカテゴリーを作り、データに関する情報をペーパー上にあげて、データそのものはJaLTERのデータベースに登録してもらうというような取り組みを進めている。
- Q：いろいろなモニタリングの技術を駆使したフィールドでの観測が、世界的に様々なコントロール環境で行われている。高山のようなスーパーサイトをセレクトして、いろいろな環境応答、生態応答を見てこられたとのことであるが、結果は整合し同じトレンドになっているのだろうか。
- A：地域が違えば全くトレンドが違ったりする。私は光合成の季節性、フェノロジーのを中心に研究してきたが、最近、国内の学会やAGU (The American Geophysical Union アメリカ地球物理学連合) でもフェノロジーのセッションが盛んになり、いろいろな研究サイトから生物の季節性に関する情報を集め、どこで何が起きているのか改めて理解しようという動きが始まったところである。ただ、CO₂フラックスデータについてはフラックスネットのグループが国際比較をしている。多角的な視点で生態系と機構の環形を見るとどうなるのか、他のグループへサンプルとして提供しようと考えている。
- Q：グローバルな気候変動から、地域・国の人間活動、社会システムまでつながっているため、インターディシプリン、トランスディシプリンというように、学術的に議論したものをどのように社会に取り入れていくかが必要と思う。高山市では、例えば自治体、森林組合と、気候変動や生態系を解析した結果を、森林管理、森林計画に役立てる必要があるといった議論はされているのか。
- A：大事なご指摘だと思うが、実はそこまでは進んでいない。私は1-2年に1回、高山市で講演をする機会をいただいて、こういうことが起きている、それは世の中の気候変動とどういう関係があるという話をしており、興味を持ってくださる方がたくさんいる。高山の場合はスギ・ヒノキ人工林が多く管理が行き渡っていない場合もあり、森林の状況をきちんと理解した上で地主さんたちと話し合い、どのような管理が適正かなどを議論する体制が必要であると、我々のセンターでも議論を始めたところである。

4-3. 「生態系動態予測・制御に向けた生態複合モニタリング・モデリング技術の開発」

近藤倫生（龍谷大学 工学部 教授）

生態系は非常に多くの種類の生物の相互作用システムである。地球上には約900万種位の生物種が存在していて、それらが互いに関係しながら生態系を形成しており、その働きによって人間に様々なサービスを提供している。例えば、水の浄化や、食物やさまざまな財の提供、気象の調整作用などである。この生態系の適切な管理方法の技術開発が急務である。理由の一つとして、生物多様性が急激に減少していることがあげられる。人間がいなくても生物の自然絶滅は生じるが、現在、そのおおよそ100倍から1,000倍程度のスピードで生物種が失われている。人間活動がその主な原因である。失われつつある生物多様性をいかに保全するかという生物多様性保全の問題となる。二つ目に、人間は水産資源などいろいろな生物資源を使っており、適切に管理する必要がある。実際に、この60年ぐらいの間に世界の漁場の大体4分の1程度が崩壊したという見積もりもある。生物資源管理の問題である。三つ目は、生態系による悪さ、例えば病害虫の発生などがいつ起きるかを予測したり、どのような状態にあるかを観測したりすることが非常に重要である。しかし、これらの実現は決して簡単ではない。特に、特定の種の増減あるいは生物多様性の増減を観測したり、推測したりするのは非常に難しい。その理由はモニタリングとモデリングの従来法の限界のためである。（図1）



図1

生態系モニタリングで、例えば何種類生物がいるか、あるいはこの水域にはマアジが何トンぐらいいるかを推定することは簡単ではない。これまででは、水産資源に関しては直接捕獲して調べたり、水中に潜って直接観察したり、あるいは漁業のデータをうまく活用したりして推定してきたが、このような方法には非常にコストがかかったり、魚の種類によってバイアスがかかったり、定性的であるという問題がある。

生態系の動態を予測することはさらに難しい。例えばフィールドに野ウサギが住んでいたとして、今

年は何匹いたか分かっていても、来年何匹になるかを推定することは決して簡単ではない。実際、トレンドや因果関係の相関などの方法も、古典的な生態学的手法としてはやられてきたが、あまりうまくいかない。例えば、カナダで野ウサギの数が70年の間にどう個体数変動したかということ調べたデータがあるが、これをみても明確なトレンドはみつからない。一見、振動しているように見えるが、一定の振動でなく、早まったり、遅くなったり、ピークが高くなったり、低くなったりなどといった非線形な挙動が入る。生態学者は、この理由の一つは生物間の相互作用にあると考えてきた。たとえば、ヤマネコのようなウサギの天敵が存在すると、ウサギの個体数は振動する可能性があることが知られている。そうであるならば、野ウサギとヤマネコの調査をすれば、この場所での来年の野ウサギの数が分かるかもしれないと思われるかもしれないが、それもうまくいかない。実際の生態系は、野ウサギとヤマネコだけでなく、非常にたくさんの種類の生物種が相互作用しているためである。

図2はある海の生き物の相互作用を描いたネットワークである。一本一本の線がひとつの食う・食われる関係を表している。これを食物網と呼ぶが、この図をみると、生態系の中に、振動を生じさせ得る種間関係がたくさんあることがわかる。この中に含まれる、ある生物の来年の動態を知るにはどうしたらいいか。楽観的な生態学者は1個1個の部品を全部ピックアップして、それらの関係を全部調べ上げることで、完璧なモデルをつくることでできると思うかもしれないが、簡単ではない。

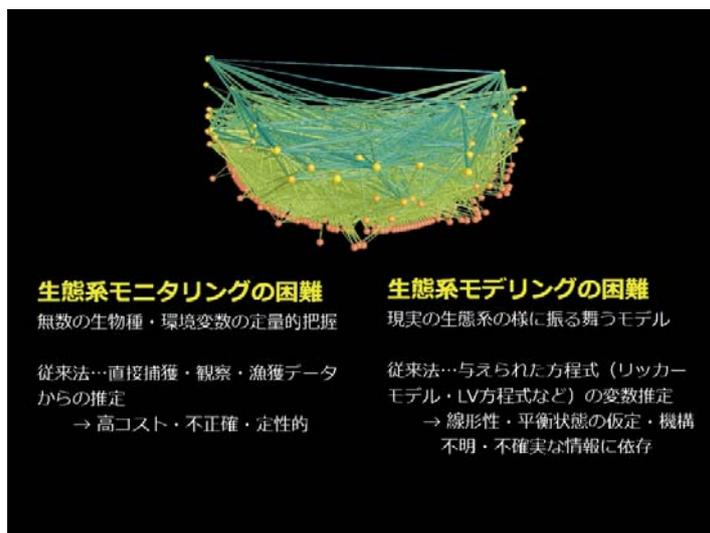


図2

問題の一つはモニタリングである。ある生態系にどんな生き物がどの程度いるかを把握するのは、それだけで非常に困難な仕事である。もう一つの問題はモデリングである。生態系で来年何が起きるか。これを予測するためには適切なモデルをつくるのが重要である。しかし、このモデルをつくることは容易ではない。例えば、気象予報は物理過程を仮定して詳細なメカニズムを考慮してモデリングをおこなうことで、気象予報を成功させてきたが、同様の方法を生態学でやるのは簡単ではない。

今まで生態学では、リッカーモデルやロトカボルテラ方程式などの方程式を仮定し、このモデルが現実と同じ振る舞いをするようになるまでチューニングした後で予測をしようとするが、うまくいかない

ことも多い。うまくいかない理由の一つは、最初に仮定されたリッカーモデルやロトカボルテラ方程式などといった基礎となるモデルが、生物個体群の動態を表すのに適切ではないかもしれないことと、もう一つは、このモデルをチューニングするときに使う十分なデータがそもそも得られないということである。

生態系の管理や保全を成功させるためには、もっとよいモデリングの手法を考えないといけない。モニタリングについては、より多くの種数をカバーし、生物量や分布まで分かるようにしたい。かつ、もっと簡単にできて低コストで、特別な訓練が不要な技術が欲しい。モデリングについては、方程式があることはメカニズムが分かっているということであるが、生態系を駆動するメカニズムを知らない。かつ、大抵の生態系は強い非線形性を持っている。また、同じ状況でも全く違う結果が起きるなど、状況依存性がある。このようなことも扱えるモデリングが必要であり、この両方について、現在、日本で少数ではあるが、応えられると思う技術が出てきているので紹介する。

まず、モニタリングの分野では、環境DNAを使ったモニタリングが出てきている（図3）。DNAは全ての生物が体の中に持っている化学物質であるが、基本的にATGCという四つの部品からできており、その部品の並び方が、生物の種類や個体によって異なる。これをうまく利用すると、モニタリングが今までよりずっと簡単にできるようになる可能性が、この1~2年で分かってきている。具体的には、例えば、我々がJST-CRESTで取り組んでいる研究では、現地（たとえば海）に行って水をバケツに1杯程度汲み、それをろ過する。ろ紙上のDNAを抽出し、その量を測定したりやシーケンスを読むことで、生物のモニタリングができそうなことがわかってきた（図4）。

これにより、例えばマアジならマアジのDNAだけの量を測ることで生物の量が分かる。今年、池の水を汲んで、DNAの量を調べることでコイが何匹いるか分かるということ報告した。同じように、野外の河川でアユの量とDNAの量にもよい相関があることが分かってきている。あるいは生物の分布を調べることもできる。環境DNAの定量に基づいて生物量を推定する研究は、今年の例ばかりであり、日本人が最先端を走っている。

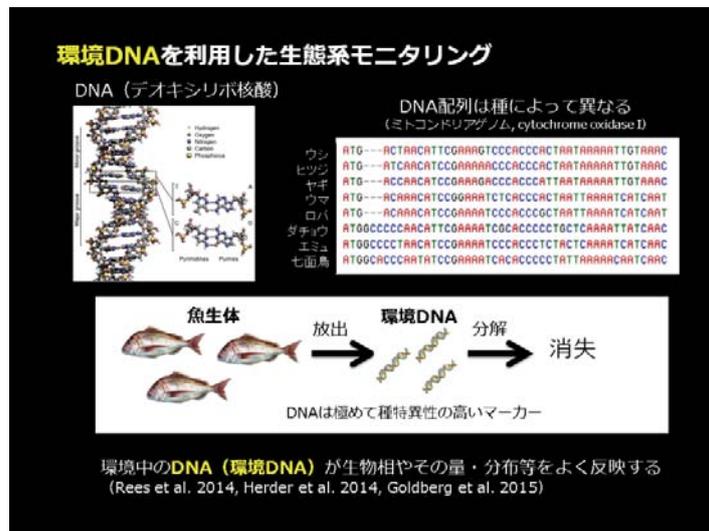


図3



図4

オオサンショウウオとチュウゴクオオサンショウウオの2種類のオオサンショウウオが桂川に住んでいるが、今までの調査で2種ともいる水域と、日本産のオオサンショウウオしかない水域が分かっている。これらの水域から水を汲んできてそのなかに含まれるDNAを調べると、両種ともいると言われている場所では水から両方のDNAが検出され、日本産しかないというところでは日本産のDNAしか検出されない。サンショウウオの分布把握は過去何年もかけたフィールド調査の結果得られた成果であるが、環境DNAを利用すれば水を汲んで分析するだけで同様の結果が得られるばかりか、ずっと広い範囲の調査もできるようになる。

また環境DNAを利用すれば、どこにいるかだけでなく、何がいるということも分かる。今年の実験であるが、美ら海水族館で水を数リットルとってきて、そこから美ら海水族館にいる魚を何種、特定できるかという研究を行った。例えば、黒潮水槽には63種類の魚がいるが、そのうちの61種類はバケツ1杯の水のDNA分析から特定できた。他の水槽も含め、全部で59科123属168種のうちの93.3%を1回の水のサンプルだけから推定することができる。これは今までの方法と比べて簡単で、かつ労力が少なくてすむ、種レベルのモニタリング方法である。

このような技術はまだ始まったばかりの研究分野であり、この後、うまく進むと生態系の状況把握が容易にできるようになるだろう。湾にイワシが入ってくるとDNAが出るので、定期的に水を汲んで分析することで、イワシが入ってくる時期や分布が分かる。早期検出として、少ない量でも生物を検出できる。非常に少ない外来種が今入ってきたばかりだとか、病害虫が発生したばかりのところでも検出できる可能性がある。さらにこれをもっと進めていくと、非常に短い時間間隔でモニタリングできるようになる、あるいは多地点、日本中の河川で同時にモニタリングを行うことで、多種の同時モニタリングも可能になる。このようなデータを生態学者はまだ手に入れたことがないので、生態学の基礎分野にも大きい貢献ができると思う。ただ、このような技術が出来てきた時、これまでに得られたことの無いような新しいデータなので、その解析法を同時に研究していくことが肝要だ。(図5)

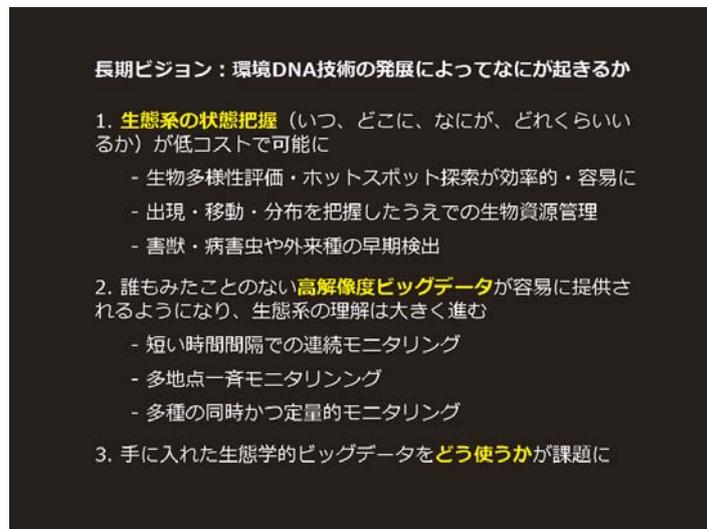


図5

次の話題として、モデリングにEDM (Empirical Dynamic Modeling) を持ち込むことを考えている。これはメカニズムは考えないで、平たく言うと、過去の経験だけに基づいてシステムの動態を予測するモデリング手法である。例えば、三種類の生物の個体数変化を表す時系列データがあったとして、これをうまく分析すると、X軸、Y軸、Z軸上にシステムの動態を表すアトラクター（軌道）を描くことができる。このアトラクターが一旦描けてしまえば、例えば今、システムがどのような状態にあるかさえ把握できれば、次にどのような変化が生じるかが予測できることになる。システムの動態を駆動している仕組みの理解は要らない。アトラクターの形さえあれば、そこから未来予測ができ、何と何が相互作用していることが推定できる。（図6）

このようなアトラクターの形を使ったモデリングが注目されるようになってきたきたのもここ数年である。この方法のよいところは、生態系のような非線形システムにうまく使えるということだ。例えば、これを具体的な2種類の生物の個体群動態に応用すると、片方は片方にいい影響、つまり、餌は天敵を増やしているとか、天敵は餌を減らしているということが予測できる。あるいは自然生態系で、過去10年間の舞鶴湾のいろいろな魚の動態データに今の方法を適用すると、例えば、このシステムではどの生き物とどの生き物に相互作用があるか、それがどう時間変動しているかが推定できる、あるいはベニザケの過去の時系列データから次に何が起るかが、アトラクター上の位置が推定できる。これにより、来年ベニザケがこの川にどれくらい上がってくるかを予測することができる。

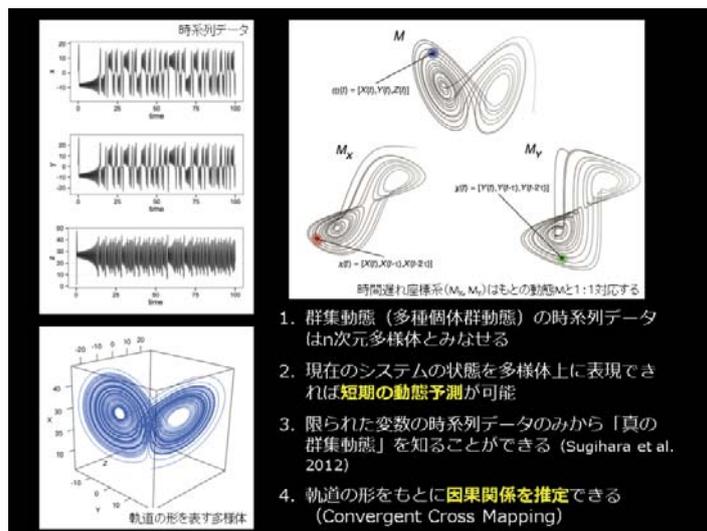


図6

EDMのように過去の経験に基づいたモデリングは、詳細な時系列データがないとできないことが弱点であるが、環境DNAのように非常によく時系列のデータがとれる方法と組み合わせることで、この両方がかみ合った歯車のように進んでいく。このようなアイデアを基盤とした新しい群集生態学をやったかどうかということを考えている。今まで限られた生態系情報に基づいたパターンの研究はたくさんされてきたが、それはメカニズムを知るにはよいが、そこから一旦離れて、高解像のビッグデータをとり、その過去の経験を使って将来の予測や制御をするという提案である。(図7,8)

モデリング手法の転換
(不十分な)メカニスティックモデルからEDMへ

	伝統的 メカニスティックモデル	経験主義的モデリング (EDM; 非線形予測)
主要なツール	時間発展を記述した 数式セット	過去の時系列データ (equation-free)
メカニズム	特定の少数のメカニズム	あらかじめ特定しない
動態の特性	線形・平衡状態	非線形・非平衡状態
得意分野	特定の仕組みが生み 出しているパターンの予測	因果関係推定・近未来予測

図7

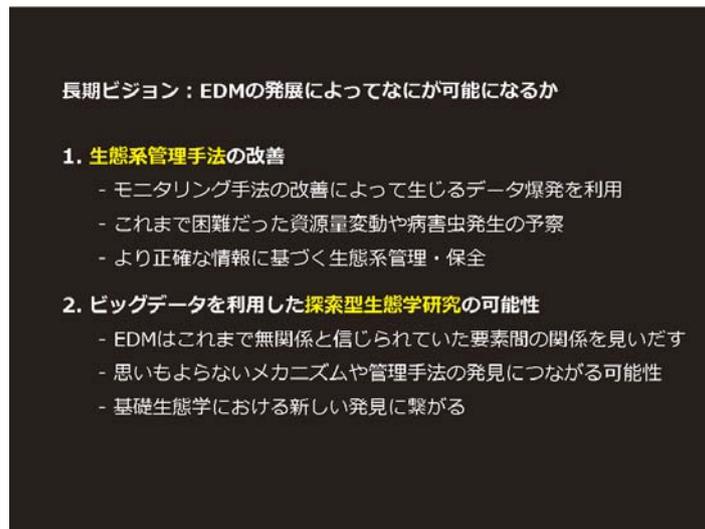


図8

[質疑応答]

Q：環境DNAは生きている生物、死んでいる生物の両方を区別することはできるか。

A：今はできない。しかし、死んだ生物を使った実験すると、実はそれほど環境中にDNAを放出していないという知見もあるので、死んでいる生物から放出されるDNAはそれほど気にしなくてもよいのかもしれない。

Q：水が動いている湾、湖、海洋からの水サンプルの考え方は。

A：水中に放出された環境DNAは水の動きに伴って流れ、また拡散する。したがって、水がよく動くような生態系では、水の動きのモデリングと組み合わせた研究を進めていく必要があるだろう。

C (コメント)：生態学でのビッグデータへのトライは、やられてこなかったのが重要である。ただ、ビッグデータなどの数字をもとにした議論とメカニズムをもとにした議論とモニタリングの議論は全て必要であり、この先どこを連携して役割分担をするのかが重要である。

4-4. 「宇宙線生成核種等の同位体を用いた環境復元研究」

横山祐典（東京大学 大気海洋研究所 教授）

私は気候変動と環境研究について、主に地球化学的な方法を使ったモニタリングをしながら、同じ研究所の気候モデルのグループなどと一緒に研究を進めている。

基本的にはIPCCのワーキンググループ1、自然科学的な現象について気候のグループのモデルがあるので、実証的知見、例えば、南極のサンプリング、サンゴ、あとは飼育実験などをしながら、それに残されている同位体記録などを検証し、それをサンプリングして過去の時系列のデータとして、モデルで予測される現象について、バリデーションを行うような形をとっている。IPCCや、サンプリングでは国際深海掘削プロジェクト、IGBP（地球圏生物圏国際協同研究計画）の中にあるPAST GLOBAL CHANGESでの国際の委員などの活動を行っている。（図1）



図1

宇宙線生成核種は、宇宙線によってつくられる核種である（図2）。太陽系の磁場を通過して、さらに地球の磁場も通過してくるような高エネルギーの宇宙線が、地球大気と上層大気でインタラクションを起こすことで、例えば、酸素の場合はベリリウム10、アルゴンの場合は塩素36、最もポピュラーなものとして、窒素からできる放射性炭素となる。これらは、放射性炭素の場合でも10マイナス12乗から10マイナス13乗や14乗レベルである。ベリリウムでは15乗ぐらいのレベルの存在量しかないので、加速器、質量分析装置という特殊な装置を使って定量していくことになる。しかし、それらは放射性元素なので時計を持った元素であり、核種ということで地球表層の動態を復元することが可能となる。

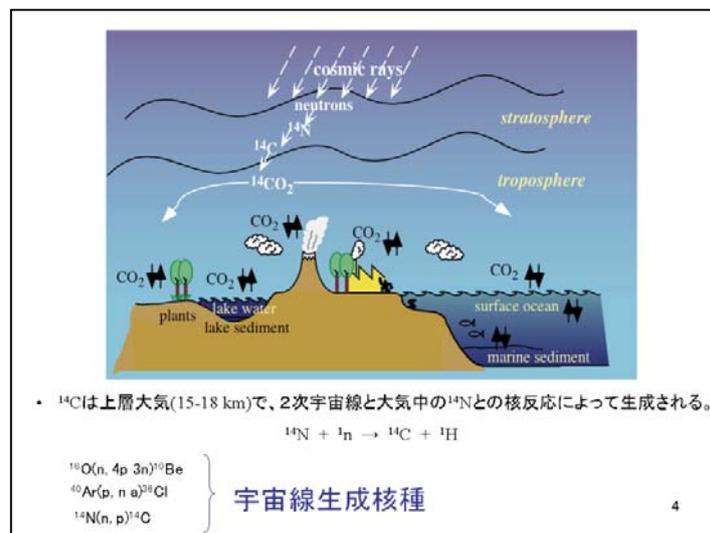


図2

地球表層の環境システムというのは、いろいろなものから成り立っているが、大気、海洋、そして固体地球、それぞれが異なった時間スケールを持っているので、より複雑である。それらを代表するようなサンプルをとってきて、モデリングと組み合わせて調べていく。

我々は古環境、古気候復元を行っているので、まず時間を決める必要があり、放射性同位体を使う。あとは、同位体分別が温度変化でも起こるために温度の変化や、物理量を決めるための代替指標（プロキシ）など他の情報も必要である。さまざまな時間スケールを持ったサンプル、例えば木材コアの年輪を使った酸素同位体比により、昔の相対湿度の量が分かるとか、あとはサンゴコアを使うことによって海洋酸性化がどの程度、進んできているかということも調べたりする。ターゲットによって異なるサンプルを採取するため、サンプリングも非常に重要な研究要素となっている。

特に宇宙線生成核種の中の放射性炭素だけに絞って話をする。日本にまだ1台しかない、一番新しいタイプの加速器質量分析装置（シングルステージ質量分析装置）により、安定して先多点測定、放射性炭素をたくさん測ることができるようになってきている。過去3,000年間の大気中の放射性炭素濃度の変化は、ほとんどの期間で、放射性炭素濃度のベースラインのところを行ったり来たりしている（図3右上）。これは放射改変に伴う変化なので、半減期によって減少している。考古学などで年代測定を行うときはこの改変を使うが、非常に緩いスロープでも、1パーミル以下の誤差で年代決定できるという特徴がある。

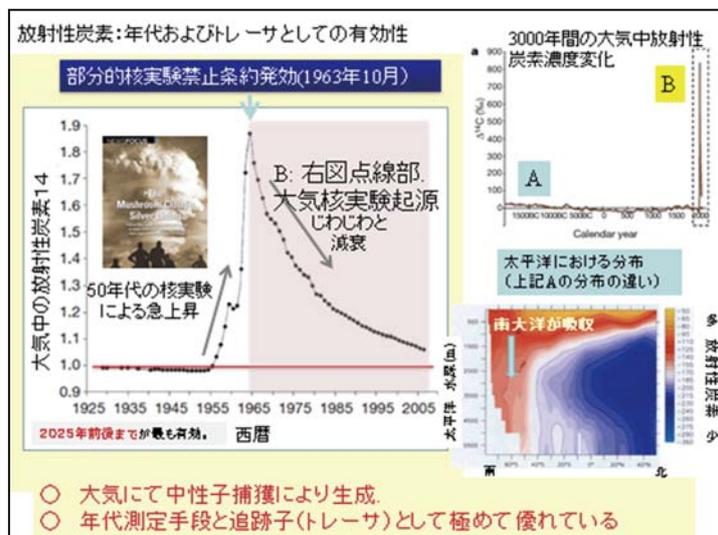


図3

ただ、もう一つ、大きなピークがあるが、これは核実験起源の放射性炭素である。熱中性子線の捕獲により¹⁴Cがつくられ、自然界の倍のレベルまで¹⁴Cが上がり、その後、主に海洋に吸収されることによって大気から¹⁴Cが減ってきている。そうすると、この勾配は非常にきついで、年代測定では、例えば歯の1年1年の年齢を非常に正確に決めることができる。また体の中の代謝スピードも非常に細かく決めることができる。このため、この二つを使うことでいろいろな幅のスペクトルの研究ができ、それらを使った研究を進めている。その他の核種についても古いところのベリリウム10とか、アルミニウム26というのは半減期が長いので、より古い現象を追いかけることができる。

例えば、11月にNASAが東南極氷床という南極氷床が2008年まで増えていたという発表を行い、温暖化しているのになぜという話が出てきた。

500万年前、現在の二酸化炭素と同じレベルであり、そのときの海水準の値は、AR5で20±10メートルがベストのエスティメートであることが述べられているが、実際にどうだったかということも研究を進めた。ベリリウム10を使って南極の氷の形を復元すると、西南極氷床は完全に全部溶けていて、グリーンランドも溶けている。そうするとグリーンランドで大体6メートル分、西南極で5メートルぐらい説明できるが、東南極氷床は実は増大していたということが、過去のデータを定量的に直接的なデータとして検証することができた。似たようなこととして、温暖化によって水蒸気の移送が強まり、南極が太るということは実際に地球上でも起こっていた。東南極の一部は西南極のように氷が直接、海底に着底している部分もあり、その部分は完全に溶けているということが分かっており、そこが±0になって、東南極のコントリーブューションはなかったので、大体10~11メートルぐらいの海水準上昇量であったろうということまで分かってきた。

また、現在の温暖化に伴う海面上昇が、1個前の氷期のなごりではないかということが言われたりするが、長期的な海水準のデータをとることで、実はそうではないということが分かる。一旦、氷期が終わって海水準が上昇したときに、海水量として固体地球の変形などを考慮すると、6,000年前から4,000年前までに一回、溶け終わっていることが分かった。海水準の上昇スピードの再加速は、最近になって

起きてきたことも分かったので、長期的なモニタリングをしっかりとっていく必要がある。

分野・コミュニティの国際的な動向に入っていきたい。Future Earthがスタートしているが、これは基礎科学的な仕事に加え、気候変動、環境変動が起こっている前提のもとで、どのような施策をとることが必要かを、いろいろなステークホルダーとの話し合いをするためにつくられたものである。我々が関連しているPAGES、PAST GLOBAL CHANGESというIGBPの一つのグループも、Future Earthとも密接に協力をしながら、ステークホルダーとの話し合いをしっかりとって研究を進めていくべきということで、我々のコミュニティのトレンドとしてある。

課題として、我々が研究していく中で二つ大事なものがある。一つは分析装置の開発で、もう一つはサンプリング技術向上である。研究例として出したものは、全て微量な元素や、非常にレアな同位体の分布などをいかに高精度で、たくさん測っていくことができるかということであり、これにより定量的な環境のモニタリングを行うことができる。

例えば ^{14}C を測定する専用機であるが、今まで4階建ての建物の中に入れたマシンで電流などを徹夜でコントロールしながら、測る必要があったが、このマシンが開発されたことによって、1日に40サンプルぐらいは測定できる(図4)。さらに、電圧、電流が安定しているので微量化、特に特定有機化合物を環境や生体から抽出して、その動態を、環境中に既にあるレベルでドーピングされた放射性同位体を追いかけることまでできるようになってきた。このため、生態系の研究などにも応用していくことができる。これだけに限らず、さまざまな技術的な開発によって例えばレーザーだったり、その他の技術を組み合わせることで微量であったり局所分析ということができるようになってくる。

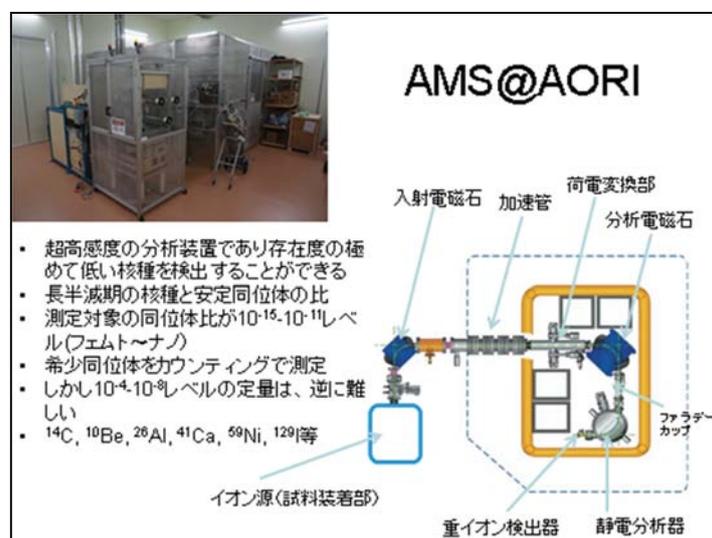


図4

サンプリング技術について。実際に手で掘っているサンプリングがあるが、船でサンプリングする手法は、ここ10年間で行われるようになってきたもので、その両方がサポートし合いながら発展していくことが非常に重要であると思う。特に質量分析装置などは、日本は最初のスタートの部分では大阪大学を中心に発展してきたが、その後の商業的な部分にうまくつなげていけなかったもので、今ではイ

ギリス、ヨーロッパ、アメリカの企業がオーバーテイクしている現状がある。このあたりをどう広げていくかということが課題として挙げられると思う。

今後のテーマとして考えている幾つかを挙げると、一つは海水準変動を考えていく必要がある。これは非常に古くて新しいテーマであるが、人口が多いところでの現象として影響が大きい、また津波などの防災の面でも重要であり、このベースラインが今どこにあるのか、温暖化に伴ってどうかなども含めてやる必要がある。

あとは水循環、暖かくなって雨が多くなったことによる地形変遷、いわゆる地球表層プロセス研究を広げていく必要がある。AGUとかアメリカのいろんな研究、国際研究組織でもアースサーフィスプロセスというのは最近出てきた研究領域にも関わらず、非常に早いスピードでコミュニティが広がっている。あとは生物適応、防災、水産資源などについて、大事などころと思われる。

海水準変動はタイドゲージや衛星観測などによって、海面が上昇しているということは分かっているが、どこからどの程度の水がきているのか、南極なのか、グリーンランドなのか、あとは山岳氷河なのか、陸水なのかを決める必要がある。それには、衛星を使った地球の回転速度の変化をモニタリングによって観測をして、重力の測定により観測する必要がある。

地球表層プロセス研究として、地球表層をモニタリングする方法が宇宙線生成核種でできるようになってきた。宇宙線は地表まで届いているが、地球の上層大気でできるよりもオーダーで非常に弱いものが来るので、いかにこの中に保存された核種を精度良く測るかは、技術的な開発によってくる。核種のなくなるスピード、なくなった場所のサンプルを調べることで復元することができる。

気候変化との関係では、降水量と侵食速度、あとは傾斜角で、どのぐらい山がきついかということと侵食速度を詰めていく必要がある。これは防災と関係し、日本などの中低緯度の一番大事な地域でデータが少ない。

生物適応で例を挙げると、氷期から現在にかけて実際に二酸化炭素が100ppm程度は上がっているが、タヒチのサンゴをとってきて、海に100ppm入った二酸化炭素が主にどこから出てきたかということをしてホウ素の同位体で調べた。そうすると、南極のコアで観測された二酸化炭素の放出と同期して海洋酸性化が起こり、海の低緯度からも出ていたことが分かった。このときにはタヒチのサンゴ礁は死んでいないため、この程度のスピードでの酸性化にはサンゴ礁はついていけることが初めて分かった。同時期に温度の上昇も復元できたが、それについてもサンゴ礁の温度適応、時間スケールとして氷期から間氷期についての5度上昇については、適応できるであろうということが分かってきた。今後、このようなものを進めていく必要がある。

防災として津波の研究も、進めていく必要がある。あとは生態情報、海水の化学的な同位体情報などを取り込んでいる生体部分を追いかけることで魚の生態についても分かる。その例を挙げると、駿河湾からとってきたヒウチダイの耳石の放射性炭素量は、濃度として小さいときから大きくなるまでに ^{14}C が明らかに変化し、濃くなってきている。そうすると、水産資源をキープするために重要な部分はどこの海域を保全する必要があるかなどの情報についても、時系列で復元することによってわかるのではないかと思う。

[質疑応答]

- Q：水爆実験でトレーサーが地球上にまかれたので、それでもって測定されているわけであり、今後いつまで測定できるか。
- A：話した部分は過去50年間であり、恐らくあと40年程度でフラットになってくるので、それまではトレーサーとしては使えると思う。また、化石燃料は ^{14}C デッド、ゼロの炭素がどんどん出てくるので、それが別のドーピングとしてある意味、環境モニタリングできる。カーボンがユビキタスなのでそういうことができる。
- C (コメント)：大気中の微粒子の有機エアロゾルの発生源を調べるために ^{14}C を使う。ここ数百年ぐらいの植物体が燃えて、あるいは分解してできたものなのか、または化石燃料から出たものなのかというのはクリアに分かる。非常に有用なツールだが、10サンプルを測定するのに半年ぐらいかかる状況であった。しかし、一晩で40サンプルというのは恐るべき進化と思う。もっとこの分野が広まるといった印象を持った。

4-5. 「長期湖沼モニタリングと関連研究—定性から定量へ—」

今井章雄 (国立環境研究所 地域環境研究センター センター長)

我々は、霞ヶ浦を対象に約40年間弱にわたり水質、水量、藻類などの水質・生物モニタリングを実施している (図1)。最近では、底泥間隙水の栄養塩等の深さ方向データを約20年にわたり収集し、長期トレンドや溶出フラックスを求めている。また、MRIやCT撮影を用いて底泥の物理構造を解析している。

霞ヶ浦は非常に浅く、平均4メートル、最大7.3メートルであり、流域には約100万人が居住している。富栄養湖であるが、湖水は飲料水、農業用水、かんがい用水および工業用水として非常に活発に使われている。長期モニタリングは1976年に開始され、1996年からはUNEP GEMS/Water Lake Kasumigaura Trend Monitoringと称して行われている。このデータベースはオープン化されている。

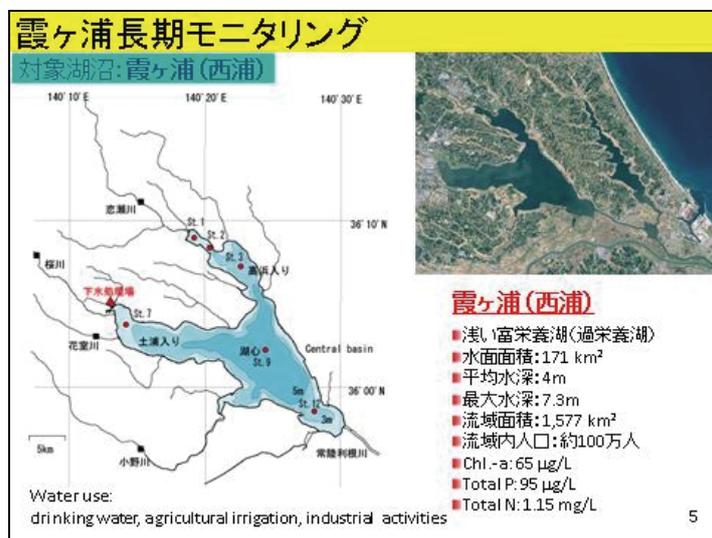


図1

霞ヶ浦のアオコ発生とクロロフィルaの長期トレンドをみると、1987年以降のアオコの発生は、最近の2007年まで報告されていない。ところが、藻類の量を示すクロロフィルaは比較的安定な値を呈している。この結果は、クロロフィルaはアオコ発生に対して余り敏感ではないことを示している。透明度については、アオコが発生した時の方が透明度は高く、特に冬には3メートル程度まで透明度が上昇した。

全化学的酸素要求量 (COD) については、ジグザグがあるものの2005年までは減少傾向、アオコが発生した2007年以降は若干増えているものの、2010年からは減少に転じている。溶存態CODについては、30年間ほとんど変化がない。霞ヶ浦の環境基準は3mg/Lなので、現状ではまだ環境基準の背中も見えていない状況にあり、先の長い話と言える。

次は栄養の話。窒素とリンは藻類等の増殖にとって非常に重要な栄養塩である。まず、窒素であるが、環境基準400µg/Lに対して3倍位の濃度、リンについても同様で、環境基準50µg/Lに対して2倍くらいの濃度であり、栄養塩濃度の高さが問題となっている。

湖沼学関連の教科書には栄養塩が高いとアオコが発生し、透明度が下がると書いてある。しかしながら、霞ヶ浦については、このような知見は当てはまらないようである。自ら長期モニタリングを継続実施して、湖沼での物質循環や生態系との関係を明らかにするしかないと考えている。

次に霞ヶ浦の底泥環境研究について報告する。底泥の間隙水中の栄養塩、溶存有機物の濃度と溶出フラックス、加えて、MRIとCTを使用した底泥物理構造の解析についてお話しする。

研究の背景を図2に示す。総務省行政評価や中央環境審議会では、湖沼環境が改善しない一つの原因として、湖沼での汚濁機構、特に底泥溶出、これに関する解明や実態の把握が非常に不十分であるとの意見が出されている。つまり、モニタリングデータに基づいた汚濁メカニズムの実証的かつ定量的な解明が強く求められている。しかしながら、底泥溶出現象は非常にブラックボックス的であり、かつ定量性がとても低い。特に浅い湖では底泥溶出がとても重要と考えられるため、霞ヶ浦において窒素、リンおよび溶存有機物に係る底泥溶出を定量評価する研究を始めたわけである。

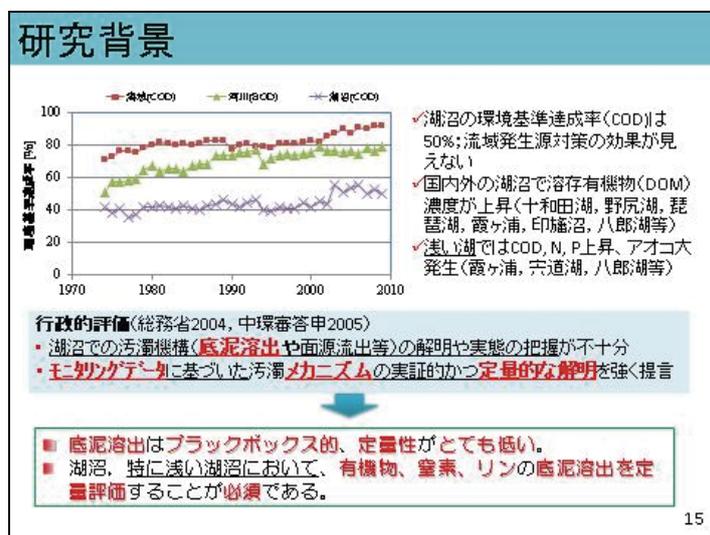


図2

図3のように、湖沼における物質循環と生態系の連動関係は、いろいろな現象・反応が混在しており非常に難しい。しかし、モデル解析に活用するために、溶出フラックスの確からしい値が必要であり、そのため定量的なフラックス測定を実施した。加えて、泥の中の物理構造が全くわからない。それを何とか見ようということで、底泥物理構造の定量的な評価を目指した。

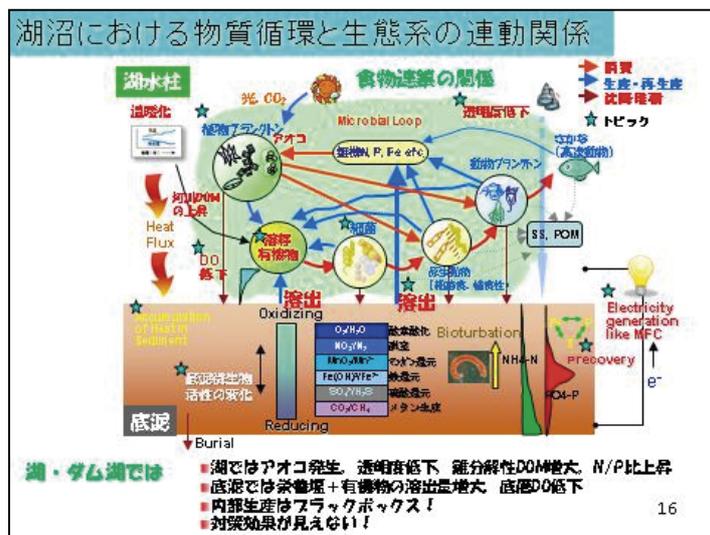


図3

底泥溶出フラックスの算定は、採取したコアサンプルを窒素ガスでパージしながらスライスした後、各サンプルをやはり窒素ガスでパージしながら遠心分離し、深さ別に採取した間隙水中の物質濃度を測定して、フィックの拡散法則に基づき算出する。

霞ヶ浦の湖心において、間隙水中のアンモニア性窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) は2006年に、突然、急激に上昇して、それ以降、そのまま高い濃度に留まった。間隙水リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) に関しては、2005年まで上昇傾向であったが、2005年～2008年では減少傾向、2009年以降は上昇傾向に転じた。溶存有機物 (DOM) に関しては、2005年まで下降気味だったが、2006年頃から増大し、その後は減少傾向にあった。すなわち、間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および DOM 濃度は各々トレンドが顕著に違うことがわかった。間隙水濃度を等高線表示で見ると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と DOM に関しては深くなるにつれ濃度が高くなった。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は $\text{NH}_4\text{-N}$ や DOM とは異なり、底泥深さ 2cm～4cm で濃度ピークが出現した。従って、鉛直方向において、 $\text{PO}_4\text{-P}$ に関与する異なる反応が起きていると考えられる。溶出フラックスを計算すると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ フラックスは、1997年～2011年まで単調増加するが、その後急速に減少した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ のフラックスは、2005年まで減少したが、2006年から2011年まで急激に上昇して、その後急速に減少した。DOM フラックスは1997年から2002年まで減少して、その後低い値に留まっていた。溶出フラックスのトレンドも各々特徴的と言える。

底泥で生起している現象に係るメカニズムを図4に示す。2006年の春 (3月) に、珪藻の大ブルームが過去最大の規模で起きた。これが沈降・堆積して底泥が嫌気性化したと考えられる。その結果、底泥中では *Firmicutes* 科の *Bacillus* 属が底泥細菌として優占することになる。*Bacillus* 属は *npr* (中性メタロプロテアーゼ) 遺伝子を持っており、底泥中のたんぱく質を分解して $\text{NH}_4\text{-N}$ を間隙水中に放出し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が卓越することになる。すると、湖水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度も上昇し、結果として、窒素制限下にある藍藻類が急激に増殖してアオコが発生すると推察される。もしこの推察が正しいのであるならば、夏、秋でのアオコの発生を防ぐには、春の珪藻の増殖を抑制することは効果的なアオコ対策といえる。

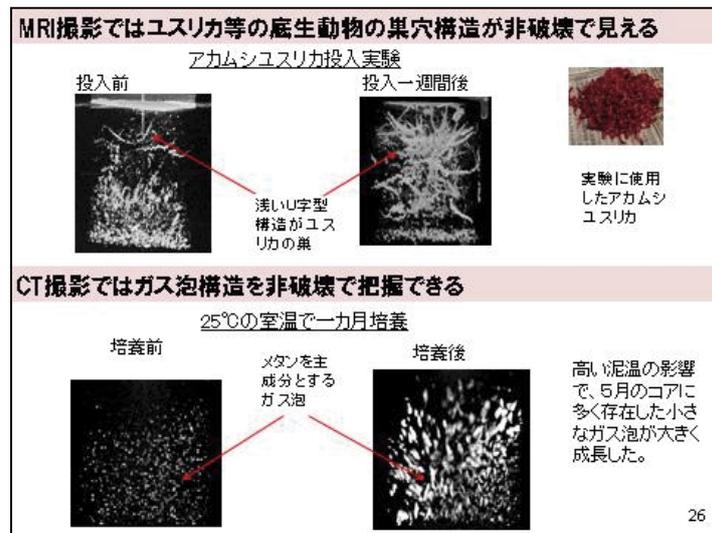


図5

研究分野・コミュニティの国際的な動向について。まず湖沼研究の国際的な学会としては、SIL (Society of International Limnology) が挙げられる。湖沼研究については、世界的に手詰まり感があったが、地球温暖化で陸水に影響が出る、特に北ヨーロッパに出るのがわかってから、The Impact of Climate Change on European Lakesがヨーロッパでまとめられ、研究予算が増大した結果、研究は非常に活発になってきている。SILの2013年の学会ではこの話一色であった。

そこではCDOM (Colored Dissolved Organic Matters) の長期モニタリングをしようという動きと、湖沼環境、生態系への影響を見る動きがあった。これらの研究を実施することはとても大変なので、モニタリングシステムの自動化推進が話題となっていた。

なぜ、長期モニタリングが重要なのか。50年間程にわたる長期モニタリングの結果がヨーロッパでたくさん報告され、いずれの研究も湖沼・河川においてDOM (溶存有機物) 濃度が上昇していると報告された。これが研究推進の引き金となった。加えて、Porcalが2009年この現象に対する有力な原因の一つは地球温暖化であるとしたことで、研究はさらにスパークした。長期モニタリング結果に基づいた新たな研究展開が生まれたと言える。

日本国内も手詰まり感がある。その中の一つの問題としてCOD問題がある。我が国CODは過マンガン酸カリウム法によるCODであり、何を測っているか良く分からない。長期モニタリングしてデータを蓄積しても定性的な話に留まざるを得ない。アオコが出てくるメカニズムや栄養塩の溶出フラックスもよくわかっていない状況では研究予算は小さくなってゆく。

我々は、今後、底泥溶出、レジームシフト、環境DNA等に係る研究を実施していかなければならないだろう。近々に、新たな水環境基準、底層DOが導入される。その測定は必須となる。加えて、環境省では気候変動の水環境への影響を検討しているが、温暖化の影響が最も出てくるのは湖沼であると結論されている(「気候変動による水質等の影響解明調査報告書」(環境省、2013))。また、国立環境研究所では、外国人有力研究者による国際アドバイザリーボードという研究評価を実施したが、生態系機能から生態系サービスの方への大転換を強く推薦された。そうすると、水質保全と水産業のどちらをとるの

かというような話になる。複数のステークホルダーによるトレードオフの観点が必要となるのかもしれない。

研究環境や成果の実用化に向けて克服すべき課題は、定性から定量へ、とにかく定量データが少ないので何とかしなくてはいけないということだと思ふ。加えて、新しい独創的な分析、測定、評価法を開発しなくてはいけない。国内研究レベルが徐々に下がっているので、何とかするためには国際協力も重要だが、オリジナルで色々なものを積極的に開発・国内展開する必要がある。その後、国外展開を検討する必要があるだろう。また、国外機関との共同研究を進展させるためにサンプルの長距離、長時間輸送する方法を開発する必要もある。さらに、モデル解析に担うモデラーがいないことも課題である。モデル研究者が非常に少ないため、コンサル頼りであることが現状である。利用可能なモデルもとても少ない。よって、モデルが不得意な人がモデルを利用することがほぼできない。

今後、国内で新規性の高い研究を実施して、その知見を国外へ積極的に知らせ、それをまたフィードバックするようなスキームがないと国内研究は本当に落ちていくだけなのではないかと危惧する。生態系機能や生態系サービスは量的なものであり定量性を増さなくてはいけない。分野横断も必要だが、ある程度時間が経過したら、自らの出身分野に戻って自分の技術・知見を磨いてまた戻ってくるような持続的なルートの在り方を考えたほうが良いと思ふ。

我々が、現在、注目しているテーマは、生物生産に関するものである。藻類の一次生産速度や細菌の二次生産速度は、国外では放射性同位体を使用して測定されている。放射性同位体の使用が厳しく制限されている我が国において生物生産に係るデータが極めて少ないことの原因である。我々の研究グループは、最近、放射性同位体を全く使用しない測定法を開発した。これからデータを積み重ねて新規性の高い成果を挙げていきたい。(図6)

今後国として注目すべきテーマ

- **生態系機能・サービスの定量**→農業・水産、浄水・下水、景観、災害関係等
- **生物生産速度測定法の開発**→藻類一次生産、細菌二次生産→我が国でのデータの蓄積と国外展開へ
- **新環境基準、底層DOへの対応**→堆積物酸素要求量(SOD)測定法→国内外へ展開
- **湖沼水・物質循環(地下水?)**→モデル解析、水循環法への対応、対策効果の評価
- **長期モニタリング研究**→地道だが継続は必須、COD(過マンガン酸COD)は×
- **直接処理、資源・エネルギー回収**→堆積物微生物電池(SMFC)による浄化、リンの回収、等
- **膜処理の閉塞に関する研究**→溶存有機物(DOM)、分子サイズ測定等
- **抗生物質の環境への影響**→微生物群集構造の変化

36

図6

[質疑応答]

- Q:** EDMの中の一つの分野にコンバージョンとクロスマッピングという方法があり、これは相関を使わずに検出するよい方法である。今回、栄養塩とアオコと透明度の関係とか、あるいは珪藻とアオコのアバダンスの間、このような時系列解析に適切な方法と思う。
- A:** これらデータから長期トレンドを解析してレジームシフトが起きていることを算定している。加えて、三次元の湖沼流動モデル、生態系モデルなどを利用して現象解明を図っている。例えば、溶存鉄の存在形態は藻類増殖にとって重要な因子と考えられるが、もしも溶存鉄の存在形態が春の珪藻増殖に顕著な影響を与えているとしたら、EDMでは解は出ないと思う。

1. サマリー

2. 趣旨

3. 環境分析技術

4. 環境予測・評価技術

5. 環境対策技術(環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術)

6. 各話題提供のハイライト

付録
ワークショップ
プログラム

4-6. 「大気エアロゾルによる環境影響と微物理化学特性」

兼保直樹（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 大気環境動態評価研究グループ グループ長）

大気エアロゾルの影響で最初に気になるのは、人が呼吸することによる健康影響の問題だと思っている。もう一つは、植生への沈着であり、これは、広義には酸性沈着問題であるが、日本では下火になっている研究課題ではある。これ以外に、気候への影響として、大気エアロゾルが太陽光を反射すること、あるいは雲になることによる直接効果や間接効果があるが、こちらは割愛させていただく。

大気エアロゾルの微物理化学特性とは、図1のように、3つある。まずサイズ、つまり大きさの粒径分布情報のことである。もう一つは化学特性であるが、これは、どのような化学物質からできているのかということになる。特に重要なのが水溶性と吸湿特性である。これは、水に溶けるかどうか、溶けるならどの程度溶けるかということである。加えて、混合状態が問題になる。混合状態とは、ある組成が単独で浮いているのか、あるいは、ほかの物質と一緒にになっている状態（内部混合）になって浮いているのか、あるいは内部混合の中でも、物質で表面に付着しているのかということである。

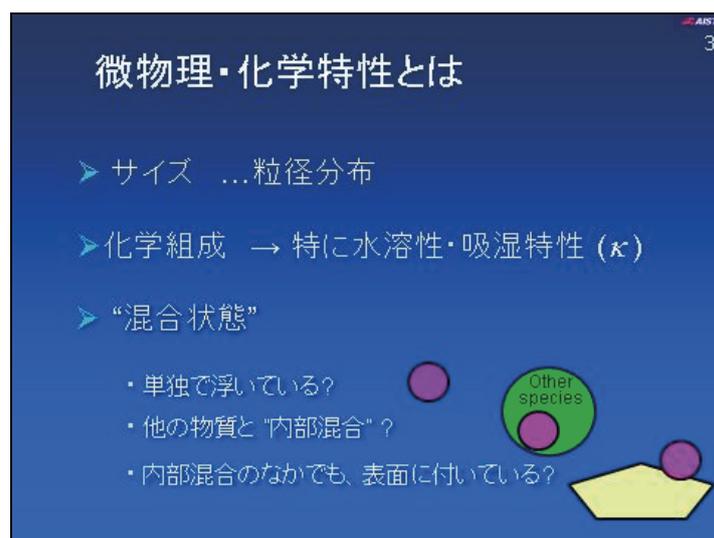


図1

1991年に、エアロゾルの組成のうち、硫酸塩の全球分布の計算結果を使い、対流圏上端での放射強制力（どれだけ対流圏を温めるかという指標）が全球で初めて計算された。その時点では、ブラックカーボンが都市大気汚染物質として問題になっていたのだが、都市大気汚染の枠を越えて全球的に輸送され、放射強制力に寄与している可能性もあると考え、太平洋の中心部で1993年、1994年、1995年に測定した。ほとんど検出されないと考えていたが、1994年、南北に太平洋の中心付近、日付変更線を船で走ったときに、中緯度帯付近で $300\text{ngC}/\text{m}^3$ という当初の予想以上の結果が出てきた。ほかの緯度帯では $10\text{ngC}/\text{m}^3$ 、 $20\text{ngC}/\text{m}^3$ 程度であった。ほかの年も中緯度帯付近だけは大きく出ており、これは明らかにアジア大陸から輸送されたブラックカーボンが原因で濃度が上がっていると考えられる。

当然、硫酸塩も測定しており、濃度的には比例している。一般的には内部混合していると考えればい

と思うが、それだけでは説明できないことがある。それはサイズの情報である。サイズを測定すると、先ほどの中緯度付近ではサイズが0.1 μm 、1 μm あたりが非常に多い。これはブラックカーボンの粒径分布である。硫酸塩の分布と極めて近い感じはするが、3 μm 付近が違っている。これは、大部分は内部混合しているが、一部分は別のものが運んできていて効果と考えている。ただし、量的に、ブラックカーボンはng、硫酸塩は μg なので、オーダーとしては硫酸塩のほうが遙かに多い。なので、ブラックカーボンが単独で来ているというよりは、何かに付着して、あるいは含まれて飛来してきたと考えられるが、それが硫酸塩だけではないことが判明している (図2)。

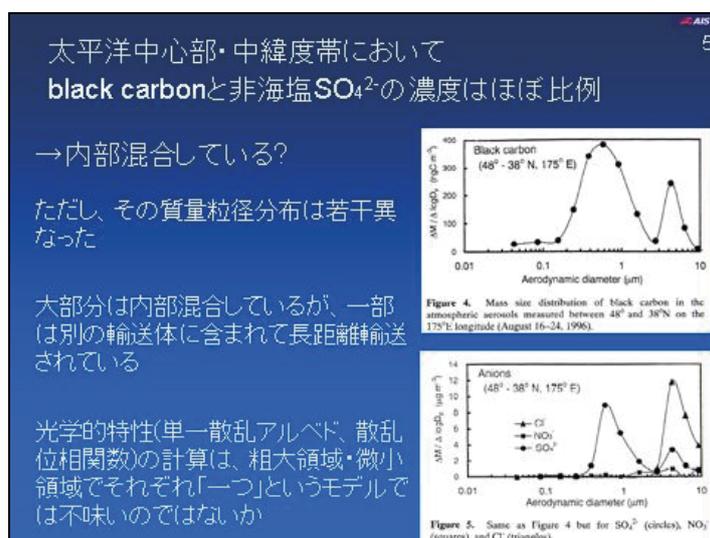


図2

2011年3月に福島原発事故の際、原発から飛び出したものが、風に乗って粒子が移流・拡散し、乾性沈着や湿性沈着を経て地面に落ちてくるイメージ図が多く出た。ただ、イメージ図で表される移流・拡散の粒子である「点々」について、それは何なのか、誰かが実際に確かめたのかというのが大変気になった。飛来したものがエアロゾルだったとしたら、そのサイズについては、実際、よくわかっていない。大きな粒子や小さな粒子を仮定して拡散計算をしているが、実際のデータはなかった。あるいは混合状態についても、例えば、Cs-137だとしたら、単独で浮いていたのか、何かに含まれていたのか、などはわかっていなかった。

そこで、原発事故発生から1カ月以上たった4月下旬につくばにて放射能粒径分布を測定してみた。結果、粒径はPM2.5領域にほとんど入っていて、大体、放射能濃度が一番高いところで直径約0.5 μm であった。

放射能から計算すると、Cs-137としては、3fg/m³程度になる。この程度だと物質単独ではこの粒径分布を形成することはできず、何か別の物質に付着もとくは含まれてもいないと浮いていられない。その粒径部分を形成している別の物質は何であるかを調査すると、アンモニウムサルフェートと一緒にあった。そこから、比較的初期の福島からつくばまで放射性セシウムを運んできたメディア(担体)は、硫酸エアロゾルと考えた (図3)。

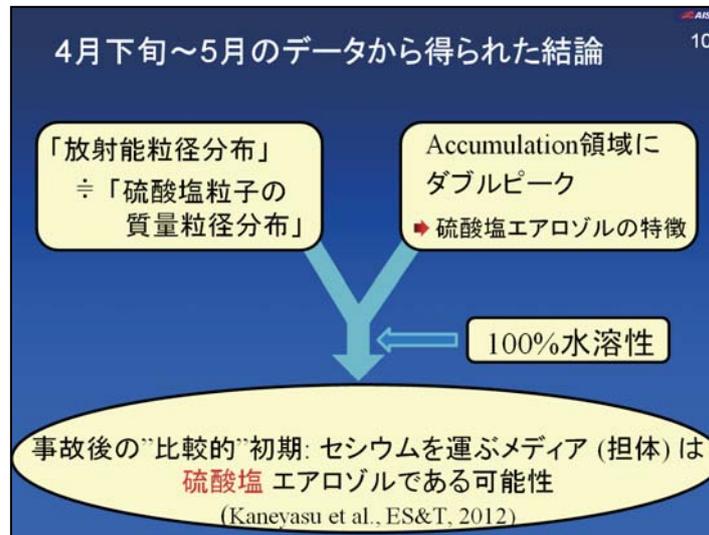


図3

ところが、最初に高濃度の放射性物質がつくばに飛来したのは3月15日であるが、気象研究所による研究から、その放射性プルーム中に「セシウムボール」と呼ばれる放射性物質を含む粒子が見つかった。このサイズはかなり大きく直径約2.6 μm である。ただし数量的には多くなく、確認されたのは2個である。そのときの抽出実験では、フィルター上の放射性セシウムのうち3/4程度が水で抽出でき、残りの1/4程度が水に不溶であった。

そこで、先ほどの水溶性、非水溶性がどうして問題になるのかということだが、当然、人が吸入したときに水溶性のものは代謝系に入って、最終的には体の外に出るので体内での滞留時間は比較的短いが、非水溶性だと長く肺の中に存在する。これは、当然、内部被曝に絡んでくる。もう一つは、地理的な二次元分布的、あるいは空間分布の面で沈着に影響を及ぼすということである。例えば、 γ 線空間線量率分布をよく見ると、山岳域のうち顕著に汚染されている地域がある。特に日光付近が汚染されている。そこで小型の検出器を担いで測定すると、ある高度域だけが汚染されているということがわかる。

この結果は、放射性物質が雨に入って落ちてくる湿性沈着とか、ドライのまま落ちてくる乾性沈着では説明がつかない。この点について、例えば、メカニズムとしては雲沈着というのが第三の沈着メカニズムとして考えられる。雲沈着というのは、雲粒の中に含まれている放射性物質がそのまま植生や地面にぶつかるメカニズムである。雲粒の粒径は数 μm ～数十 μm であり、PM2.5領域のエアロゾルより1桁、2桁大きなものであり、イナーシャでの沈着が重要になる。

ここで図4のような仮説が考えられる。例えば、ECMWFという気象データセットから、雲水量 (Liquid Water Content) の東西断面を見ると、ちょうど3月15日午後3時頃 (プルームが到達したと思われる時刻) に男体山の上空約1,000m以上で雲水量があったことがわかる。つまり、放射性エアロゾルの輸送は、担体として硫酸塩などの水溶性物質によるものであれば、相対湿度100%以上で活性化して雲となることで、特定の高度域に集中して沈着が生じたことになる。このように、水溶性の有無といった担体の特性は放射性物質の空間分布に影響を与えるという面からも重要である。

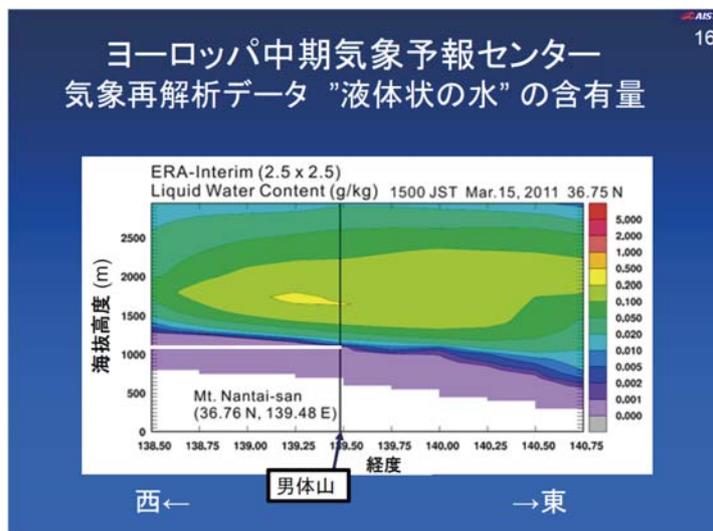


図4

分野・コミュニティの動向やテーマについて。全球エアロゾルモデルの気候影響を扱っているもので、雪氷面アルベドを扱っているものは少ないと思う。雪氷面アルベドの問題は、北極域や南極域のような氷や雪のあるところに、ブラックカーボンのような非常に光吸収性の強いものが落ち、反射率が下がることにより融解を早め、雪氷域の面積を下げ、正のフィードバックがかかることである。

雪氷面アルベドについては、全球気候モデルの中では今まであまり真面目に考えられてこなかった。しかし、北極航路が現実的になると、北極海を黒煙を出しながら大型船が通ることになるので、これからは考えなければいけないのかもしれない。

エアロゾルの空間分布を扱うモデルは、気候影響を評価する目的のものとしては現状のものは全球モデルであるが、より地域的な影響を計算する目的ではリージョナルモデルというくり方がある。例えば、東アジア域あるいは小さく見れば関東地方ぐらいの空間スケールでのモデルがリージョナルモデルであるが、これらのモデルは「詳細化」に向かっている。粒径分布や混合状態は以前のモデルでは外から与えていたが、新しいモデルのなかには、モデル中で計算していこうとしているものもある。もし、それがうまくいけば、例えば今後、気候変動が起こったときに粒径分布が変わるとか混合状態が変わるといふことに対応した、本当に未来を予測するモデルになると言えると思う。ただ、先ほどの二次生成有機エアロゾル (SOA) が問題になっている。現状ではモデル的にはうまく計算できない。SOAの定量的な再現には研究者が苦労している。

リージョナルモデルに関わる問題としては、特に日本やアジアでは、非常に少ない種類のモデルしか使われていないことである。具体的に言うと、CMAQというアメリカのEPAが配っているモデルは、非常にユーザーインターフェースがよくできており、使いやすいので非常に多くの人が使っているが、そのために論文誌がCMAQによる計算結果だらけになってしまう。また、多くの人ブラックボックス的に使ってしまったという問題もある。

また、リセプターモデルというタイプのモデルがある。これは、ある需要点で測定された成分について、発生源を推定するモデルである。1970年代からCMB (Chemical Mass Balance) 法というものがあるが、これを用いた日本における計算例は、あまりうまくいっていない。というのは、このモデルは、発生源での組成データベースが必要であるが、現在の日本に適用可能な発生源での組成データベースがほぼないためである。最近、リセプターモデルとしてPMF (Positive Matrix Factorization) 法というものが普及してきている。こちらでは、統計的な扱いを洗練させることで発生源情報が全くなくてもよく、測定地点のデータだけで発生源推定することができる。これもCMAQと全く同じ状況で、国際・国内とも論文誌はPMFによる計算結果だらけになっており、利用者にとってブラックボックス化していることも懸念される。

PM2.5については、恐らく社会心理学的な問題だったということだと思う。大きな騒ぎとなった2013年にも濃度的には増えておらず、より長期的にみても、濃度は日本全体では経年的に下がってきている。ただし、九州地域のような日本の西側で測定されている質量濃度は、中国からの長距離輸送の影響が非常に大きいというのは事実だと思う。ただ、中国からのPM2.5の主成分である硫酸塩は、今後下がってくるはずである。私の測定データでも経年的に下がってきており、硫酸塩の原料である二酸化硫黄の発生源データも中国では経年的に低下している。今後、問題となるのは恐らく有機エアロゾルだと思う。

PM2.5に対してサイエンスとしてやるべきことは、「何が悪いのか」ということを明らかにすることだと思う。年平均濃度が高くなると死亡率が上がるというハーバード6都市研究の疫学データから全ての話が始まっているが、実際には非常に小さい粒子なら組成は何であれ悪いのか、あるいは小さい粒子に多く含まれている何らかの化学組成が悪いのかという部分が実はわかっていない。わかっていないのに疫学データだけで話が進んでいる。その点を追求するためには医学系、生物系と我々のような人たちが一緒に研究しないと、どうにも手がつかない問題である。

観測的研究については、日本の観測網は、残念ながらほぼ資金が尽きつつある (図5)。

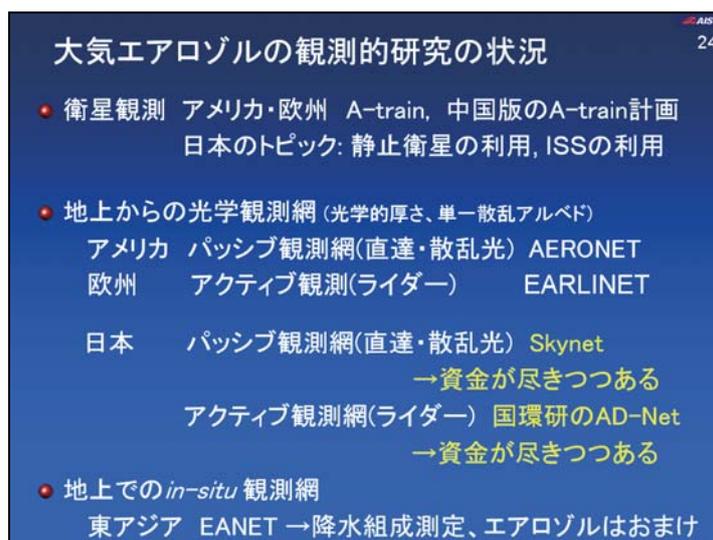


図5

装置開発について、日本ではアメリカ製を「買ってきて」動かしているという状況が支配的である。日本で独自に作っている人もたまにいるが、使い勝手が悪いとか本人しか使えないとかでユーザーが少なく、ベンチャー的に製品化して売ろうという意欲もない。アメリカ製に席卷されてしまっているという状況である。一点豪華主義的にやって世界の中で優位点を出していくのはあり得ると思う(図6)。

測定装置の開発にまつわる問題 25

- *in-situ* 測定装置の大半は米国製を「購入」
 - 買ってきて日本で測定してみました、でも最初の2~3報までは書ける
 - あまり本質的な発見を行うことは難しいだろう
- 日本にも自力で高度な測定装置を開発する研究者は存在する
 - ただし、本人しか使えない、使い勝手が悪い等で、ユーザーが広がらない
 - 潜在ユーザー数が少ないので、ベンチャー的に製品化して売ろうという意欲がない →米国製に席卷される

カミオカンデ方式で、ユーザー数は求めないが一点豪華主義でいくという手もあるだろう

図6

[質疑応答]

Q: 最近、山で研究していて気になるのは、積雪の表面がかなり黒く汚れることがあり、もしかするとそのことが融雪を早めていく可能性があるのではないかと考えている。融雪のタイミングはその山地森林、河川流域の水循環や生態系に影響を及ぼしかねない。そういった観点での日本の山岳地帯でのエアロゾル観測について、何か現状と問題をご存じでしたら教えていただきたい。

A: 実際に、果樹園で春先にすす(ブラックカーボン)をまいており、農業で融雪剤として使われている。ただ、日本にきているブラックカーボンは、1998年以降のデータからは増えていない。中国が発展していた時期は増えていたが、今はさほど増えていない。よって、これが原因で今後の融雪が増えるかどうかについては、多分日本ではあまり変わらないと考えている。北極圏航路のようところで船が通るようになると、また話は少し違うかもしれないと思う。

Q: 当研究所でもCMAQを結構使っているが、CMAQはあまりよくないのか。

A: 悪いというわけではなく、CMAQがほとんど日本を席卷してしまって、たとえばCMAQでの計算結果を盲信する、あるいはほかの選択肢を考慮しない状況である。モデルにより一長一短があると思うが、ユーザーインターフェースが良いものが勝つということである。

Q: 例えば、CMAQがそれほどいいなら、日本人は、CMAQアドバンスバージョンみたいなものを誰かにつくらないのか。

A: 日本人はあまりやりたがらない。モジュールとして何かを付け加えることはあっても、少なくとも

現状のモデルに対して骨格に手を加えることを日本人はあまりやらない。CMAQを使うことを悪いと言っているのではなく、ほかがなくなることが問題と思っている。

4-7. 「PM2.5 が引き起こす気候変動の定量的評価と予測」

竹村俊彦（九州大学 応用力学研究所 教授）

全球エアロゾル数値モデルを紹介する。これは気候変動を定量的に評価するためのエアロゾルモデルであるが、そのためには大気中のエアロゾルの濃度を定量的に計算できることが前提となる。結果的には社会的に関心を持たれているPM2.5がどう飛んでくるかということ予測する。その予測システムは完全に自動化しているが、8年ぐらい毎日、私自身がボランティアで提供している。ところが、ここ3年ぐらい急に関心を持たれて、報道機関からの問い合わせが殺到している。特に、中国北京の大気汚染がひどくなる頃は、連日のように電話問い合わせがある。報道機関に正しく情報を伝えてほしいという願いと、一般の方々にも興味を持ってほしいと考え、Yahoo! ニュースの中で、大気汚染と気候変動科学的解説というコーナーで、時々記事を掲載している。

大気中に浮かんでいる微粒子はさまざまな化学組成があり、発生源もいろいろある。どのように大気中の微粒子が気候に影響を与えるかというのは、大まかに分けると二つ種類がある。直接効果と間接効果である。(図1)

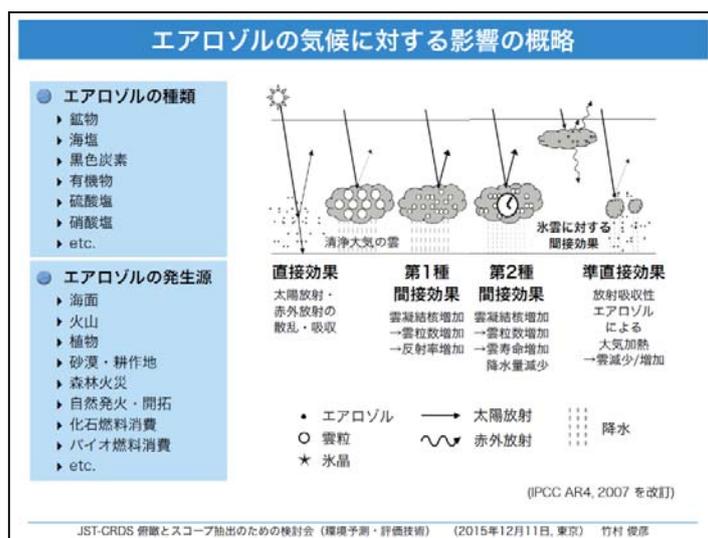


図1

直接効果とは、PM2.5が多いと大気がかすんで見えるように、太陽の光を余分に反射してしまい、宇宙空間にはね返すことである。つまり、エネルギー収支がバランスを崩している。気候は大局的にはエネルギーバランスで決まるが、それが崩れれば気候変動が起こり得る。

間接効果とは、微粒子と雲との相互作用に伴う気候変動である。大気中に浮かんでいる雲は微粒子がないと絶対に地球上では存在しない。湿度が400%ぐらいあると雲は微粒子なしで水滴になるが、現実には地球大気ではそういう環境には絶対になり得ないから、微粒子がないと雲はできない。大気中の微粒子の量や化学組成が変化すると雲の性質を変えてしまう。雲はもともと太陽の光を効率的に反射する物質だから、その物理的な特性が変わってしまうと、地球大気のエネルギーバランスが崩れて気候変動を

引き起こすと言われている。

これらを解明するために、東大の気候システム研究センター（現在：大気海洋研究所）で、院生のころから大気中の微粒子のエアロゾルをシミュレーションするための全球モデルSPRINTARSを開発してきた（図2）。主なエアロゾル組成の1つは硫黄であり、化学反応を起こしてエアロゾルができる。そして、1次粒子という形で発生源から微粒子として発生する砂粒、黄砂、海塩の粒子、ブラックカーボンがどのように発生して、輸送され、どこに落ちるか、雨や乱流で落ちるかを計算する数値モデルを開発してきた。もともとの私自身の科学技術的な興味は気候影響であるので、基盤の全球気候モデル（MIROC）の大気放射を計算する部分や、雲と雨を計算する部分とSPRINTARSを結合する形で開発してきた。このMIROCは、東大の大気海洋研究所、国立環境研究所、JAMSTECが共同開発しており、地球シミュレータを使ってIPCCの第3次評価報告書あたりから継続的に貢献している日本製のモデルである。そのエアロゾルのコンポーネントについて私が当初から開発のリーダーを務めている。

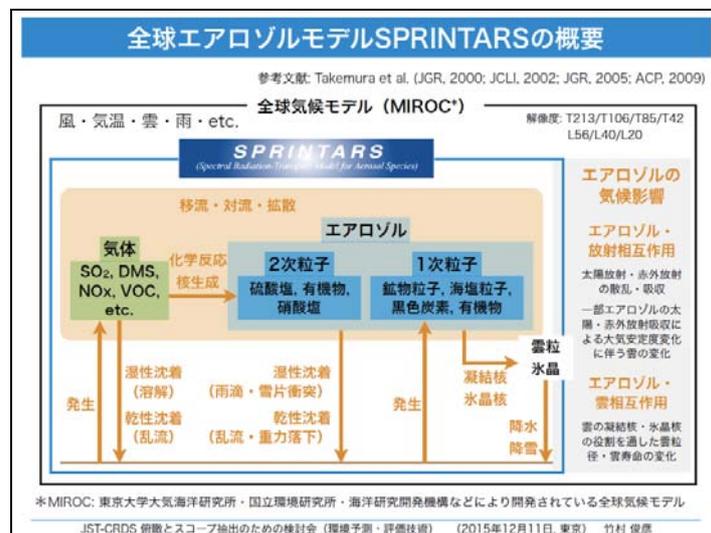


図2

種々な組成のエアロゾルの地球規模動態を図3に示す。中国やアジア域からの発生や、それが偏西風で東に流されていく様子、南大洋の低圧帯で、舞い上がった海の波しぶきで海塩のエアロゾルができる様子、サハラ砂漠から砂嵐が起こって大西洋を流れていく様子がSPRINTARSでは計算できる。

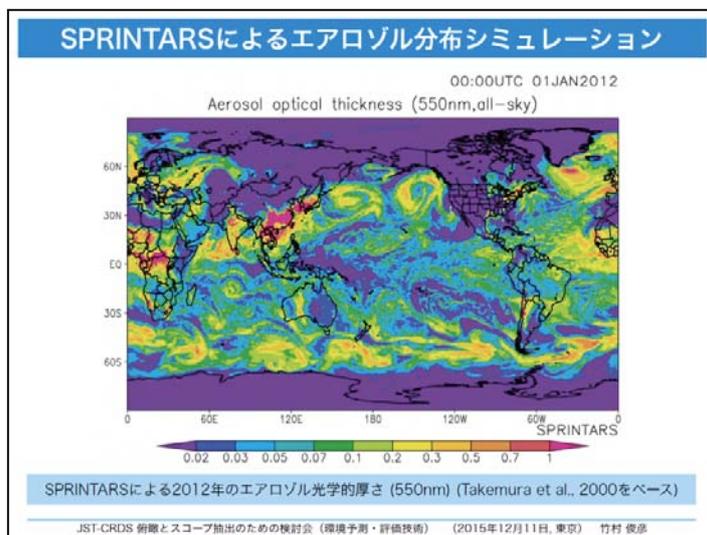


図3

例えば氷期、間氷期で砂漠から舞い上がる砂の量が明らかに違ったことは、アイスコアのデータや、海底のコアのデータから判明しており、それをうまく再現できるかを実験している。図4の左側は現在気候で、どれぐらい砂が舞い上がって、大気中にどれだけ存在しているかを示す。右側は一番最近の氷期の一番寒かった2万1000年ぐらい前で、どれぐらいの量のダストが舞い上がったのかを推定している。その結果、観測データと比べて、比較的妥当な量を再現することができた。氷期のほうが風の強い場所が多かったこと、乾燥域が今よりも面積が広がったという、二つの理由からダスト量が多かったであろうと考える。砂漠の砂も気候変動に対して影響があると言われていていることから、気候変動の議論にも活用されつつある。つまり、氷期、間氷期スケールの話にもなってくる。

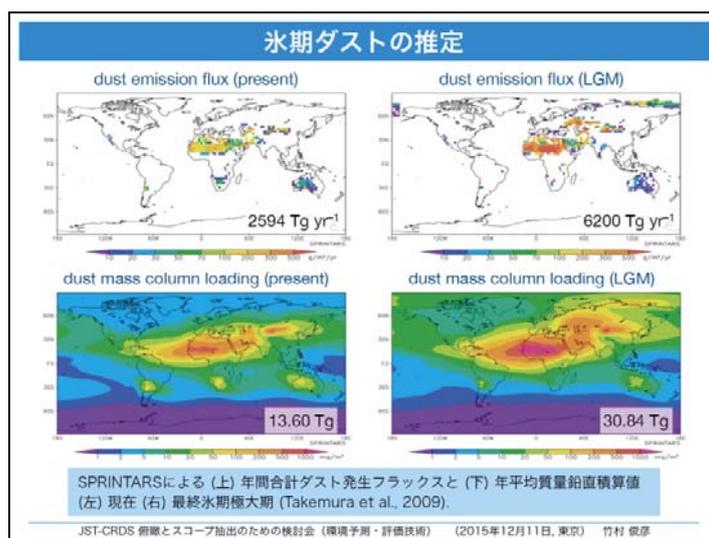


図4

1. サマリー

2. 趣旨

3. 環境分析技術

4. 環境予測・評価技術

5. 環境対策技術(環境修復浄化、資源回収・リサイクル技術)

6. 各話題提供のハイライト

付録
ワークショップ
プログラム

次に、放射強制力はエネルギーバランスがその物質によってどれくらい崩れているかという数値であるが、対流圏の中でどれくらいエネルギーバランスを崩しているかを1850年から最近まで、因子ごとに推定したものを図5左に示す。赤い線がCO₂等々の長寿命の温室効果気体によって、現在よりも大体2ワット程度のエネルギーが地球大気に溜まり過ぎている状態という推定をした。エアロゾルはオレンジや紫であり（オレンジは見えないが）、例えば雲とエアロゾルの相互作用によって冷却効果があることが推定できた。

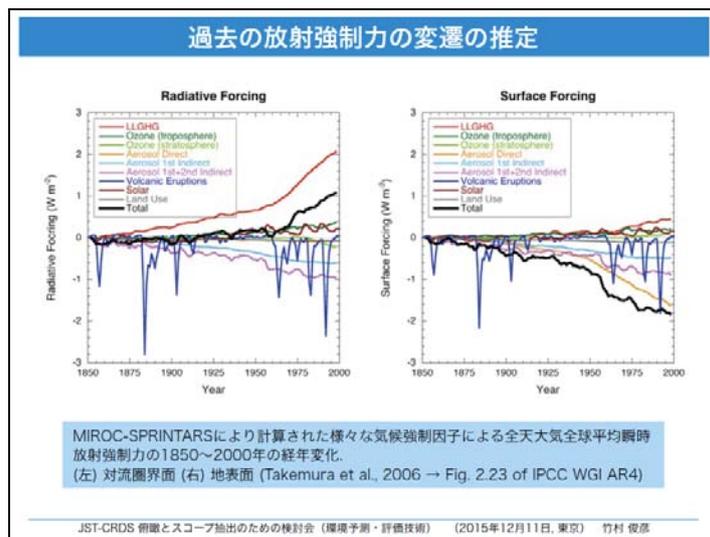


図5

最近のIPCC報告書では、産業革命から現在まで大体、実際に観測データとして気温は0.8度ぐらい上昇していると言われているが、仮にPM2.5のようなエアロゾルがなく大気がきれいな状態のままであれば、さらに0.5度も温暖化していたと推定される。つまり、PM2.5のように人間活動から出したエアロゾルは、健康には影響があるが、逆に気候の温暖化をある程度、抑制する役割があった。

現在、温暖化の議論では、炭素をどうするかだけに着目しているが、実は大気汚染対策だけ行くとエアロゾルだけ先に減ってしまう。それは、温度上昇の加速につながる。やはり温暖化と大気環境の問題は同時に解決する必要があると考える。

IPCCの第5次評価報告書で標準的に使われた将来シナリオを使って、エアロゾルの濃度がどうなるか、放射強制力、エネルギーのバランスをどう崩すかの将来予測計算も行っている。エアロゾルによって気温や降水量がどう変化するかも最近、研究を進めている。まだ、初期解析の段階だが、硫酸塩のような透明の粒子は基本的に大気を冷却する効果があり、濃度が高い緯度帯で冷却効果がある。ブラックカーボンという黒っぽいすすの場合は、太陽放射を吸収する効果があるので、プラスのほうに働くということが確認できた。降水量に対しては、エアロゾルの効果により減ったり増えたりするところが入り乱れており、今後解析が必要である。

IPCC第5次評価報告書（2013年）で、私は放射強制力の章を担当したが、先ほど説明したエアロゾルの直接効果を図6青枠の上部に、エアロゾルと雲の間接効果を下部に示す。すすのようなものはプラス

の効果があり、エネルギーが入り過ぎている状態の方向に働く。それ以外の白や透明の粒子である硫酸、硝酸、有機エアロゾルはマイナスの効果がある。人間活動によって増えたエアロゾルによる効果である。エアロゾル間接効果には基本的に冷却効果があり、エネルギーとしてマイナスの効果である。

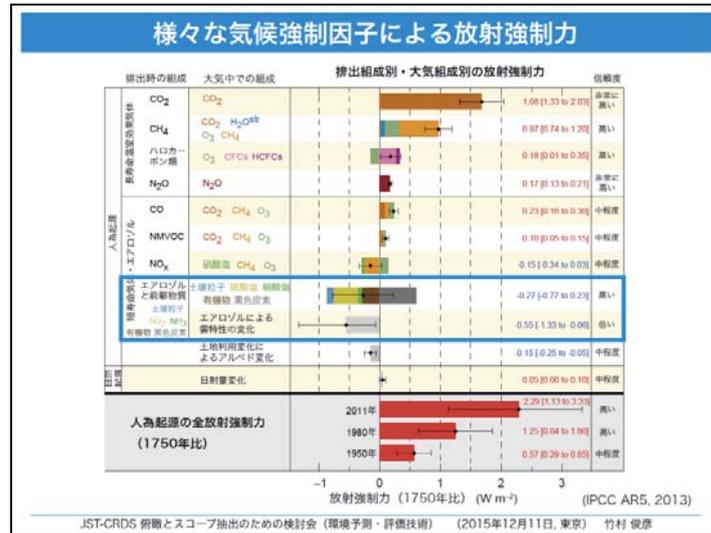


図6

図6が示す通り、CO₂のよう長寿命の温室効果気体は放射強制力の推定誤差がかなり小さいが、エアロゾルでは非常に大きく、まだ推定が難しい。そこで国際的な共同研究プロジェクトで進めていく形になりつつあり、その一つがモデルの相互比較である(図7)。各国のモデルでエアロゾルを相互比較して、まずどれ程度不確実性があるかを把握する。それを踏まえて、どこのプロセスで不確実性が多いかを確認する研究を進めている。例えば、図7中のグラフでは、多くのモデルでエアロゾルの変化に対する雲への効果は感度が高過ぎる傾向があることを示している。一方、私のモデルでは、感度がそれほど高くなく、結構、衛星観測と近い値を示している。実はこれぐらいの感度で、気候モデルがうまく過去の気温が再現できることがわかっている。

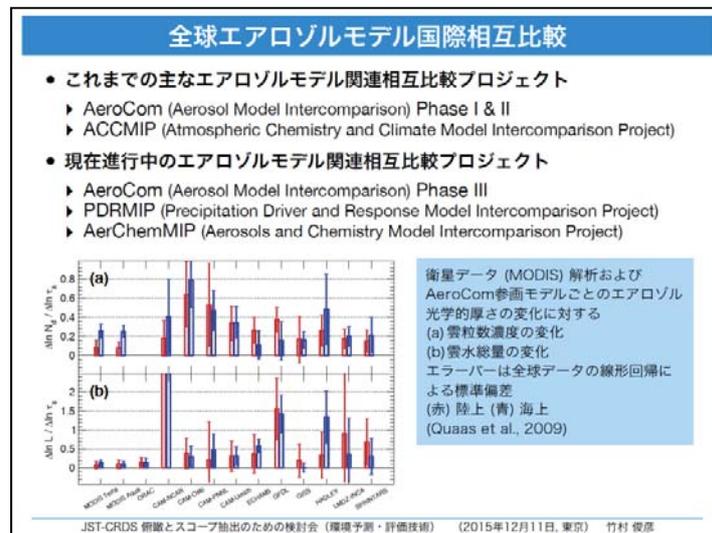


図7

気候モデルの不確実性が大きいのは雲の計算部分である。今は、3.5キロの分解能の精度まで計算できる。その不確実性が減らせれば、あとはエアロゾルと雲の相互作用、雲の原料となるエアロゾルのところだけを解明することで、気候モデルの不確実性もより減少すると考える。さらに人工衛星のデータが最近充実してきた。雲の細かい情報も得られるようになってきたため、それと比較評価することも可能になりつつある。ホットトピックスとして、日本ではNICAMという非常に細かい分解能で計算できる全球の気候モデルが現在精力的に開発されている。その中にSPRINTARSも組み込まれており、エアロゾルは全球で3.5キロメートルという分解能で計算できる。これは「京」の資源をかなり使っており、計算としては非常に重たく、まだ短時間しかシミュレーションできないが、基本的にソフトウェアとしてはでき上がりつつある。

この分野では国際的にはCCAC (Climate and Clean Air Coalition) の活動があり、日本もそれに参加している。短寿命の気候汚染物質であるエアロゾルやオゾン、メタンについて、健康影響や大気汚染、気候変動を総合的に考えながら国際的に解決するものである。

画期的なこととして気象衛星「ひまわり」が最近更新された。2015年7月から新しい装置が運用され始めた。今まではエアロゾル、微粒子の情報を静止衛星から見ることは、波長が足らずかなり難しい状況で、1日に1回、極軌道の地球観測衛星から同じローカルタイムしか観測できなかったが、今回は10分に1回のエアロゾルの情報が得られるようになった。つまり、中国からどのようにPM2.5が日本へ流れてくるかを衛星観測から把握できるようになってきた。(図8)

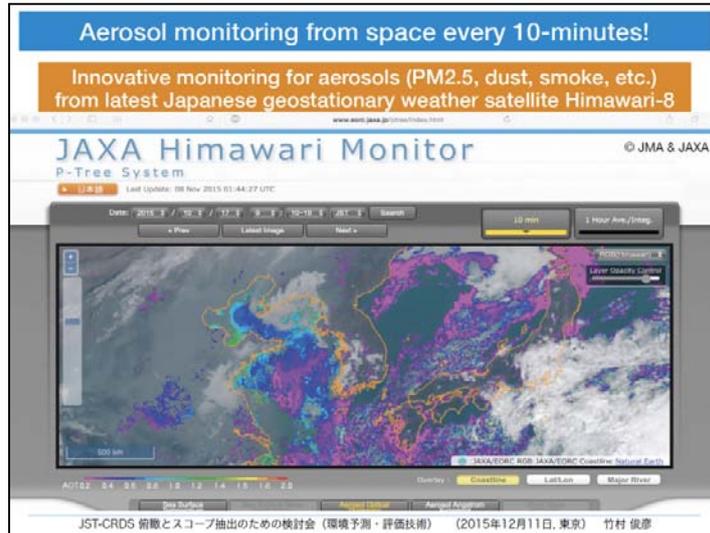


図8

これを活用しようと考え、JAXA、九大、気象研、国環研で共同研究を始めた。しかし、予算措置がなく、有志で集まって作業している状態である。大きな問題は、若手の人材不足である。今は、多くの研究者がアメリカの数値モデルを使うだけになってしまっている。これにはかなり危機感を持っている。(図9)。日本でも優れた人工衛星や気候モデルがあるので、それらが広く使われるためには、人材の確保と育成が必須である。

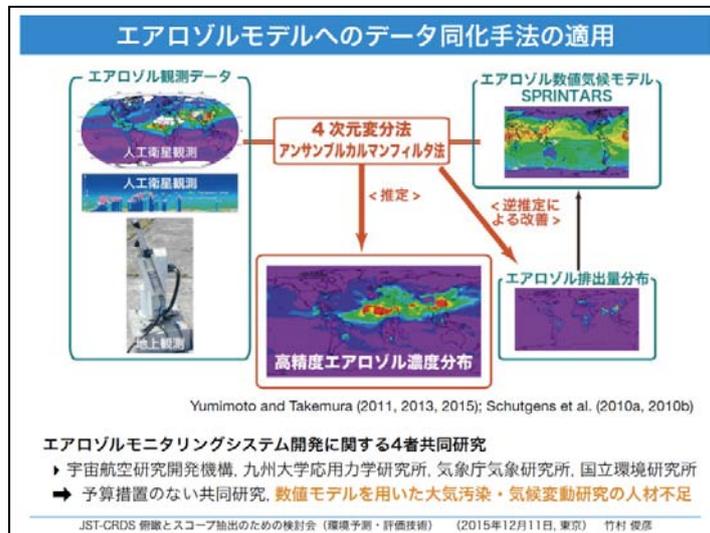


図9

最後に、地球温暖化と大気汚染の両者にかかわるエアロゾルはかなりキーファクターであり、気候変動においてもわからない部分が多い。特に途上国で問題になっている大気汚染のメインの物質であることから、より研究を進めていく必要がある。日本では「ひまわり」、「GOSAT」をはじめ、いろい

るな衛星が打ち上がっており、データが多数得られるので、そのデータを活用すべきである。日本はこれまでハード、ソフトはそれなりに質の高いものをつくってきたが、それを活用するのが下手である。このような分野でモデル開発を進める人材がなかなか育ちにくい。高校、大学の初年度の頃から興味を持つように教育をしていかないと、長期的には衰退していく可能性がある。私自身も大学の一教員でもあるので、それを意識しながら今後、研究活動を進めようと考えている。

[質疑応答]

Q：広く日本で活用されているSPRINTARSが大学の自前のサーバーで運用されていて、毎朝、手元のiPadで先生自身が動作確認されるという話を聞き、良いシステムがあるのにしかるべき機関なり組織なりで定期運用するような体制のサポートが弱いと感じた。新しい「ひまわり」のデータを使って、さらに精度を上げることができるような状況になったにもかかわらず、人も予算もついていないという。今後はどのように事態を打開するのか、ビジョンはお持ちか。

A：ビジョンはあまりない。科研費を適用しようと共同研究のメンバーでは話し合っている。サポート体制があると実は非常に助かる。日本が持っているハードウェアをうまく活用できる方策を考える必要がある。

Q：開発したシステムを定期的にパーマネントに利用するための担保するような仕組みがまるでないと聞いて、そこはかなり日本の共通した問題点と思う。

A：既に8年程度運用している。最近システムは安定しており、基本的には全自動化されているので、問題なく運用できており、発信情報は更新されている。

C (コメント)：データベースの維持管理は難しい。例えば、衛星を上げたときに非常に新しい技術があり、早くそのリソースを使ってほしいときに、どこが管轄するのか日本の場合はよくわからないところがある。そこを交通整理してファンディングをつけると、システムをしっかり維持管理していると思う。

4-8. 「人間活動を考慮した統合水循環・水資源モデル」

花崎直太（国立環境研究所 地球環境研究センター 主任研究員）

人間活動を考慮した統合水循環・水資源モデルH08を紹介する。地球の水循環と世界の水利用を扱っている。研究の背景は、地球規模の自然の水循環である。図1に模式図を示す。雨が降って土にしみこみ川になって流れて、また蒸発するという自然の水循環がある。その中に70億人近くが住んでおり、農業や工業に使っている。陸の人間活動を含んだ水循環というものをモデル化するという研究に10年ほど取り組んでいる。

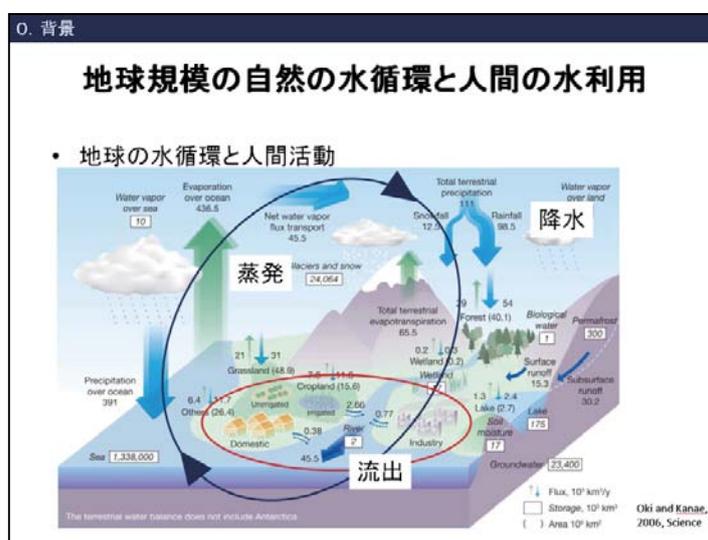


図1

この研究に取り組むのは、世界の多くで水が不足するという問題が起き、なぜそれが起こるのかを知るためである。世界の水不足には、基本的に三つの大きな理由がある。一つは流出の地理的偏在である。川の流れが基本的な人間の水資源だが、これが非常に地理的に偏っている。例えばアマゾンには水が豊富であるが、人はほとんど住んでいない。中国の北方は世界的に見ても水資源量が少ないが、非常に人口が多い。

次に、流出の時間的な偏りである。例えばタイの場合、明瞭な雨季と乾季があり、雨季には水が豊富だが、乾季には水が不足する。さらにタイは気温が高く農業が盛んで、いつでも米が収穫できる。雨季には水が豊富だが、乾季では、川の水が少なくなり、そこから取水しようとするので常に水不足の問題を抱えている。定常的な問題だが、特に異常な渇水の年ではもっと問題は大きくなる。

三つ目は人間活動の影響である。特に人口の増加と経済発展によって水利用が世界的に増加しており大きな問題となっている。20世紀後半の1950年以降、急に灌漑が広がることによって農業用水が増加している。工業用水や生活用水も増加しており、今後も増加し続けると考えられている。また、地球温暖化によって水循環が変化する問題もある。

人間が使う水の観測データまたは水利用の統計データは不足している。それは、水の量をはかる手段

は確立しているが、コストと人手がかかるからである。人工衛星等を使った定期的・面的・正確な測定は困難である。さまざまな要素が絡んでいて複雑であり、特に人間に焦点を当てると将来の見通しは難しいので、モデルを用いた切り口での研究に取り組んでいる。

全球水資源モデルH08の開発では、世界の水問題や人間活動の影響を扱うために、三つの要素が必要である。まず地理的偏在があるので十分な空間解像度があること、時間的な偏在があるので日単位で扱えること、そして、自然の水循環と人間活動の相互作用が扱えることである。(図2)

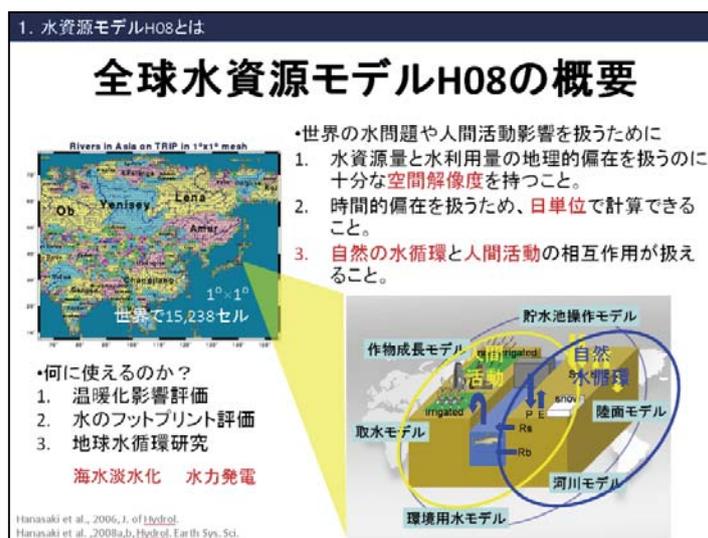


図2

モデルは地球の陸を扱い、標準的な解像度は1度、大体100キロぐらいの格子か、0.5度の50キロぐらいの格子で運用している。それぞれの格子の中で、上述の要素に関して計算を行う。まず、陸面モデルと河川モデルでは、雨が降りどれだけ蒸発して川に流れるかという自然の水循環を計算する。次に最も利用量の多い農業用水を日単位・格子単位で推定する。それには作物がどう成長するのかというモデルが含まれる。世界中のダムが水をコントロールする要素も入っている。こうして自然の循環と人間活動を両方とも扱えるモデルを開発してきた。このモデルの利用先は、温暖化の影響評価（温暖化で雨の降り方や気温が変わったときの影響を見る）や、水のフットプリント検討（人間がどれぐらい水を使っているのかを指標化する方法）、あるいは地球の学術的な水循環研究などである。最近では海水淡水化や水力発電にも取り組み始めた。

モデルの主な入力データは気象に関するデータと土地利用に関するデータである。気象データは3時間あるいは1日単位のデータである。土地利用のデータは農地の面積、灌漑している面積、何を植えているか、など多種多様な情報が必要である。これらを入力して、主な水資源に関する情報をモデルで計算する。(図3)

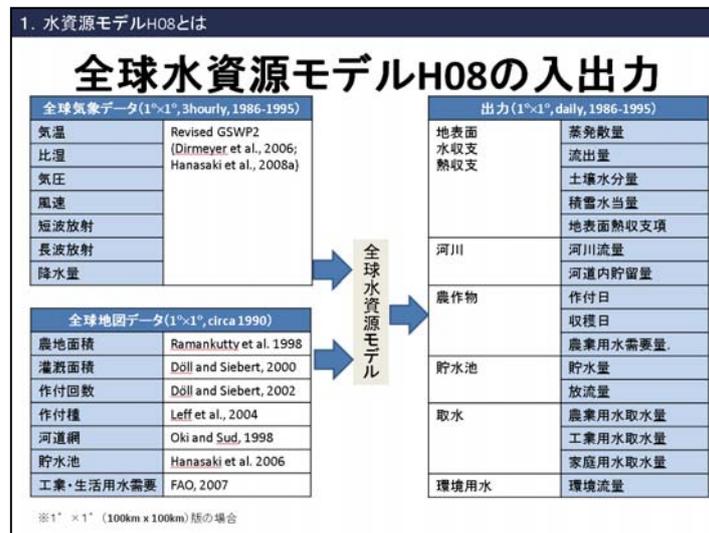


図3

例えば降水量や気温などの気象データをモデルに入力すると、どこでどれだけ川が流れるかといった、自然の水循環のシミュレーションができる。ここで、20世紀は継続的に人口が増加し、農地が拡大し、水の需要がどんどん増加していった世紀である。そういった人間社会の変化を考慮して20世紀の再現シミュレーションを実施した。このシミュレーションからは、どの地域でどれくらい安定的に水が取れるか評価することができる（簡単のため、地下水や遠隔地からの導水、ダムの貯水がなく、自然の河川水だけに水源を頼ったケースを紹介）(図4)。

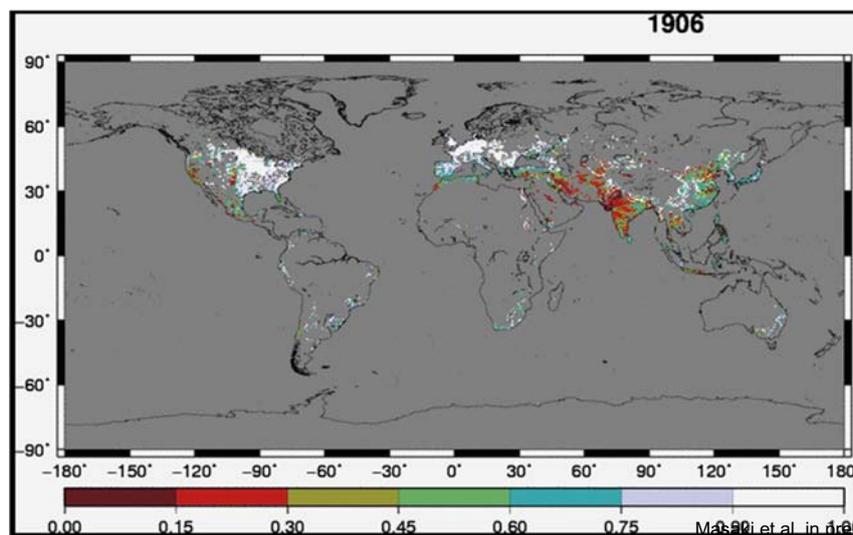


図4

ヨーロッパやアメリカ東部はシミュレーション結果で白く見える。これは欲しい水を川からずっと安定的に取水できることを示す。逆に赤いところ、例えばインド西部やパキスタン付近では、それだけの

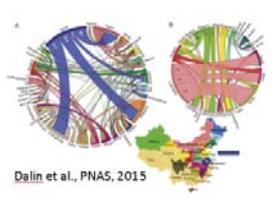
需要を川からのみ取水しようとする、どうしても不足することを示している。現実にはそのような場所では地下水をかなりたくさんくみ上げている。アメリカ中西部も赤くなるが、ここでも地下水をたくさん使っている。中国やインドを見ると、1950年以降、急に赤が強くなっていく。これは、その頃に灌漑農地が急に開発されたからである。このように、人間と自然の両方を扱うシミュレーションを行っている。

その他、ダム操作は地球の水循環にどのような影響を及ぼしているか、食料貿易を通じた仮想的な水の輸出入（日本がアメリカから小麦を輸入するときに、アメリカで水が使われる。それは仮想的にアメリカの水を使っているということになる）に関する研究などを行っている。（図5）

2. 水資源モデルH08の応用例

応用例

- ・ ダム操作は地球水循環にどのような影響を及ぼしているか？
- ・ 食料貿易を通じた仮想的な水の輸出入：
我々はどれくらい持続可能性の低い水に依存しているか？
- ・ 食料貿易は水利用を抑制するか？
- ・ 将来の地球水資源の展望
- ・ ソースコード・入力データの公開
- ・ タイへの適用（JST/JICA SATREPS）



Dalin et al., PNAS, 2015

<https://sites.google.com/site/naotahanasaki/>

図5

世界の動向や研究の方向性に関して5点紹介する。

まず、1つ目は、水に対する世界の関心は高いということである。日本は基本的に水が豊富なので、特に水資源・水不足に関するモデリングを行っている人がそれほど多くない。しかし世界の関心は非常に高い。持続可能性に関する報告書では必ず水が含まれ、場合によってはさらに大きな問題として捉えられることがある。The National Intelligence Council（アメリカの機関）が2012年にGLOBAL TRENDS 2030を発刊した。その中に挙げられた世界を駆動する四つのメガトレンドの一つが食料、水、エネルギー問題の連鎖である。地球規模の水のモデルは、研究の競争相手が多く論文出版が比較的早く、研究者には厳しいテーマになっている。（図6）

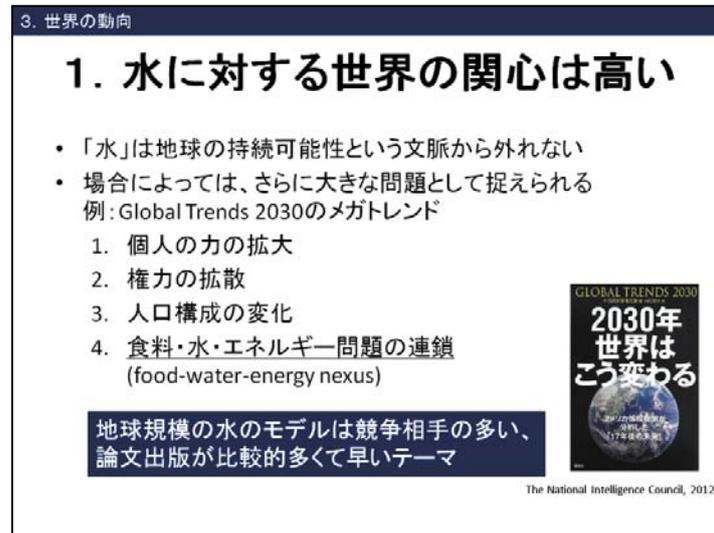


図6

2つ目として、世界の先進国では、全球水循環モデルが精力的に開発されていることである。現時点で12～13個の有力なモデルがあり、国際相互比較プロジェクトも行われている。H08のように主要な人間要素が含まれているモデルは四つある。WaterGAP（ドイツの大学）、PCR-GLOBWB（オランダの大学）、LPJmL（ポツダム気候影響研究所）、H08である。WaterGAPは一番古くから開発に取り組んだモデルで、世界的によく使われている。特に水利用に関する基礎データの整備から徹底して行っており、世界中から尊敬を集めている。例えば灌漑農地の分布データなどもしっかりつくるといふ開発方針である。PCR-GLOBWBは、河川（表層水）だけでなく、地下水に着目した最初のモデルである。LPJmLは、植生モデルをベースにしている。この機能を活かし、温暖化対策における土地利用と水資源の競合、食料生産と水資源の競合、バイオマス燃料生産と水の競合など複合的なテーマに力を発揮している。それに対して、H08は、開発規模で他国に劣るので、新しいテーマやモデルを提案するところに重点を置いている（H08はダム操作を扱うモデルを最初に提案している）（図7）。

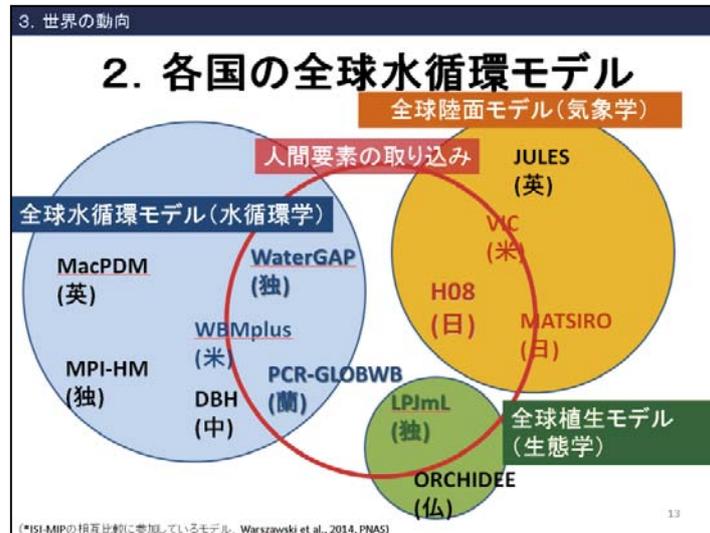


図7

そこで、3つ目として、モデルコミュニティの組織化が挙げられる。これまでは世界各地の全球モデルがそれぞれ個別に研究していたが、それでは評価対象となる要素、期間、地域が発散し、計算結果も共有されないという問題があった。こうした中、特に世界の温暖化影響評価においては共通の想定に基づく複数の影響評価モデルに基づく評価が大事ということになり、ドイツのポツダム気候影響研究所(PIK)が、Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)を立ち上げ、モデルコミュニティを組織化する動きが作られた。ISI-MIPでは水循環、農業、農業影響、陸域生態系、マラリアの5分野のモデルに対し、共通の条件を入れて、影響評価が実施された。ここで計算されたデータは一般公開されることも従来からの大きな変化である。(図8)

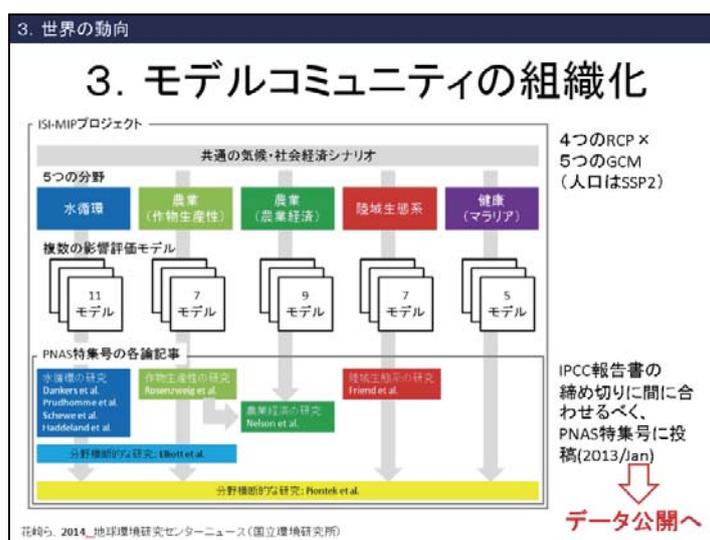


図8

4番目は、社会経済的側面との連動という方向性である。例えば、温暖化による水力発電への影響を評価することを考えたい。これまでは、水循環の研究者は21世紀の気候の想定を水循環モデルに入力して、に基づき将来の水力発電の変化を見積もる研究を実施してきた。これとは別に、統合評価モデルの研究者たちは、21世紀は人口がどの程度増えるか、産業はどうなるかを想定して、経済モデルを用いて、水力発電の必要量やGDPを計算し、温室効果ガス排出量を計算してきた。ところが、両者が連携することは稀であった。

現在、これらのモデルを統合する動きがある。例えば21世紀の水力発電の増減に関する情報を入れ、経済モデルで計算すると、水力発電量が低下し、電力価格が上昇し、結果的にGDPが下がる、といった自然から社会まで通じる一連の動きを追うことができる。また石油価格の高騰がシェールガス開発を後押ししたようなフィードバックも入れた水力発電の研究にも取り組んでいる。(図9)

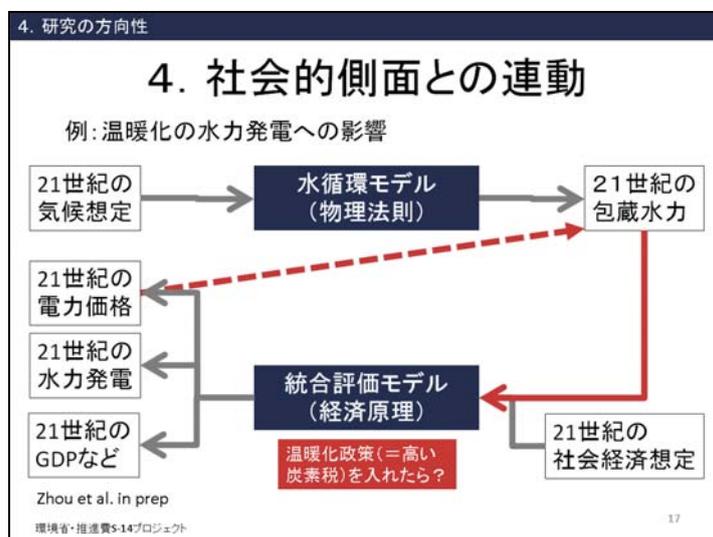


図9

5番目は、要素の統合と超高解像度化という研究の方向性である。かつて国連の事務総長だったコフィ・アナンが、持続可能性のキーワードとしてWEHABという造語を提唱した。これはWater、Energy、Health、Agriculture、Biodiversityの頭文字をとったものであるが、環境を考えるときに基本となる要素である。それぞれが相互作用するもので、これらなるべく統合したモデルをつくらうという大きな流れである。環境省のプロジェクトでは陸域統合モデル開発が進んでいる。これは水資源と生態系、土地利用、農作物の収量モデル、気候モデルも統合する構想である。このような統合型のモデリングは今後どんどん進んでいく。

次に、超高解像度化というのは将来的な全球モデルの解像度として1kmを目指すというものである。2011年ごろ、アメリカの研究者がこれからの水循環のモデルは全球1 kmの解像度を目指そうと提唱した。1 kmという解像度では、全球と地域モデルの区別がなくなることになる。現在、全球雲解像度モデルNICAMは少なくとも解像度3.5 kmのモデルまで開発済みで、近い将来、解像度1 kmも可能になると考えられる。しかし、実現に当たっては計算負荷の問題、気象データや雨のデータの取り扱いなどの問題が山積みである。(図10)

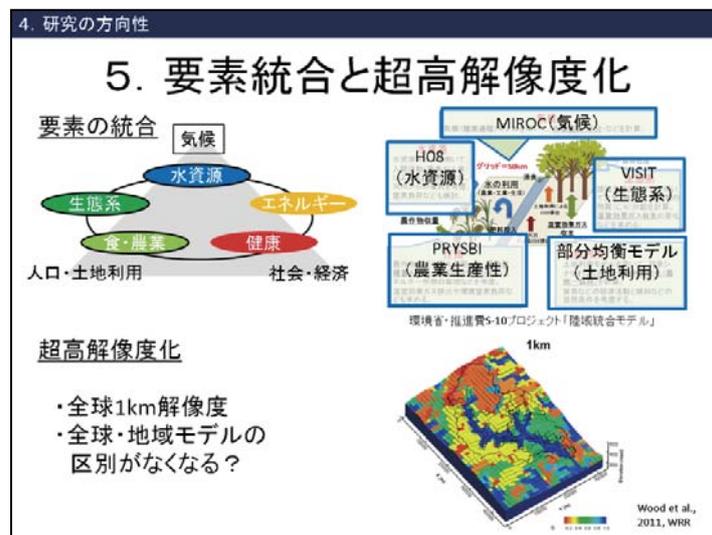


図10

[質疑応答]

Q：全球的に水の量を正確に測定するのは難しいが、そのときにプローブとしてアイソトープは結構使えると思う。H08のモデルにはそのようなものを組み込んでいるか。

A：同位体を利用したモデルの検証は、H08では全く行っていない。実際、H08が検証に使っている河川流量の観測データは圧倒的に不足している。それを延長するのに同位体の技術が使えるかは、知見があれば逆にぜひ教えていただきたい。

Q：H08は地下水を考慮しているか。

A：現在のH08では考慮していない。現在は表層水のみを扱い、川から取水できるか否かという評価をしている。今年度に入って地下水のモデル開発にも取り組んでいる。地下水の涵養と地下水からの取水は限られたデータしかなく、モデル開発には苦労している。地下水の涵養量の推定は1地点の観測ベースでも難しいが、最近幾つかの研究グループがアルゴリズムを提案し、IGRACという国際機関が国別の地下水の涵養量に関するデータを公開している。こうした知見を活かしつつ、今、研究に取り組んでいる。

4-9. 「これからの社会に求められる洪水予測警報技術～鬼怒川洪水を教訓として～」

芳村圭 (東京大学 大気海洋研究所 准教授)

最近発生した鬼怒川の洪水を教訓とする洪水予測の話を紹介する。2015年9月、台風18号から変わった温帯低気圧と17号の両方の影響で、豪雨が発生した。9月10日午前6時過ぎ、越水が起きて、その後破堤が起きた。常総市にて約40平方キロメートルが浸水し、非常に大きな被害となった。鬼怒川は、南北に長い流域を持ち (図1)、それが今回、降水のバンドと非常に一致したため、この災害をもたらした。

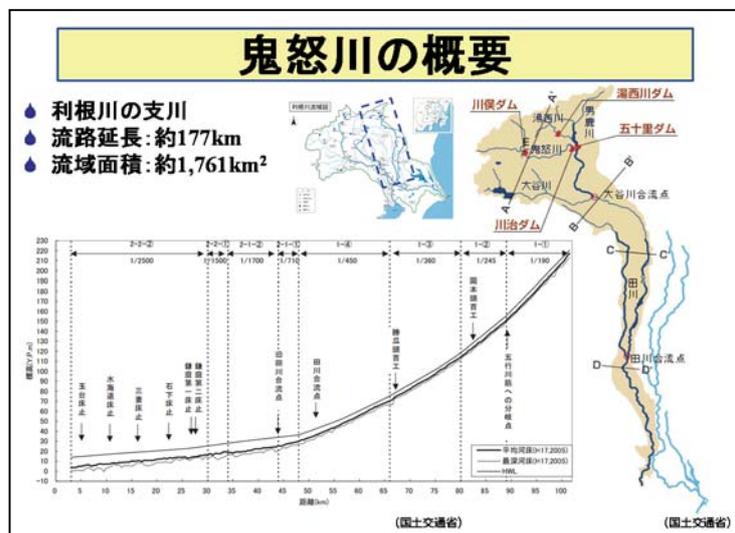


図1

治水は国の根幹であるので、国交省が土木側の設計思想をまとめている。鬼怒川は利根川の支川の一つであるが、利根川には全く影響を与えない設計になっている。基本高水を治水計画で設定し、ピーク流量が毎秒8,800トンとは、100年に1回の規模の洪水対応という設計思想である。(図2)

毎秒8,800トンダムをカットして、毎秒5,400トン鬼怒川へ流すが、利根川のピーク合流時の流量がゼロになっている。つまり、利根川での洪水発生時には、鬼怒川は絶対に影響を与えないという思想になっている。これはピークカットの基本高水の考え方であり、ダムや遊水地で貯留するという思想である。

結局、二つの台風に挟まれたところで大量降水帯が大規模に発生した。それがたまたま鬼怒川の形とぴったり合い、鬼怒川流域で大雨になった。これ自体、気象的には極めて珍しいケースである。結果的には、特に栃木県で大雨が降り、土呂部、五十里、今市では記録的な大雨になった。

ところが、茨城県では、記録的な大雨ではなかったために、避難が遅れたと言われている。流域平均積算3日降水量が384mmという数字がある。これは土木工学的にはどれぐらい珍しいものなのか、どれぐらいの被害を生み出すものなのかと検証する。

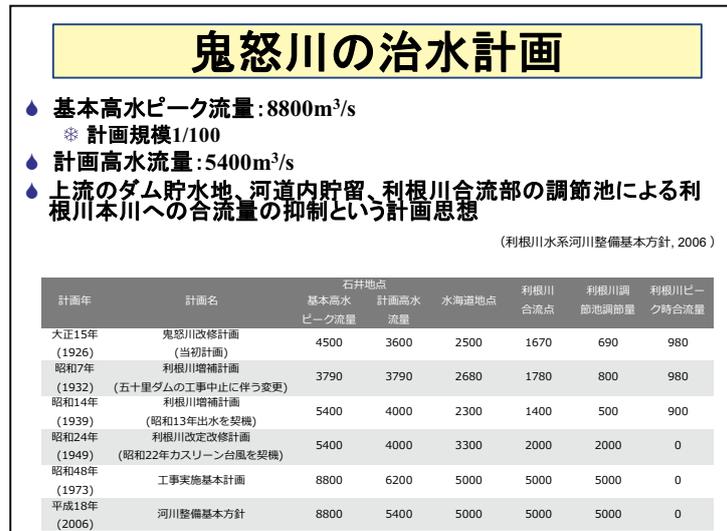


図2

50年に1度、100年に1度という表現の仕方はあるが、それはその地点の観測データが蓄積されているか否かによって非常に大きく左右される。したがって、簡単に事象を比較することはできない。最近、国交省から浸水想定のための想定最大外力の設定が提示された。これは観測データに基づいており、面積と降雨量と持続時間のいわゆるDDA解析の三つの観点を一つにまとめたものである。図3の青い線が3日間降水量である。利根川では3日間降水量を通常使うことになっているので鬼怒川でも適用するが、これは実は大きな間違いで、鬼怒川ぐらいの規模では1日や2日間降水量を見るべきである。鬼怒川の最大降水量はこれまでの全ての観測データによると582ミリであった。今回は384ミリだったので、それに対しては66%になる。

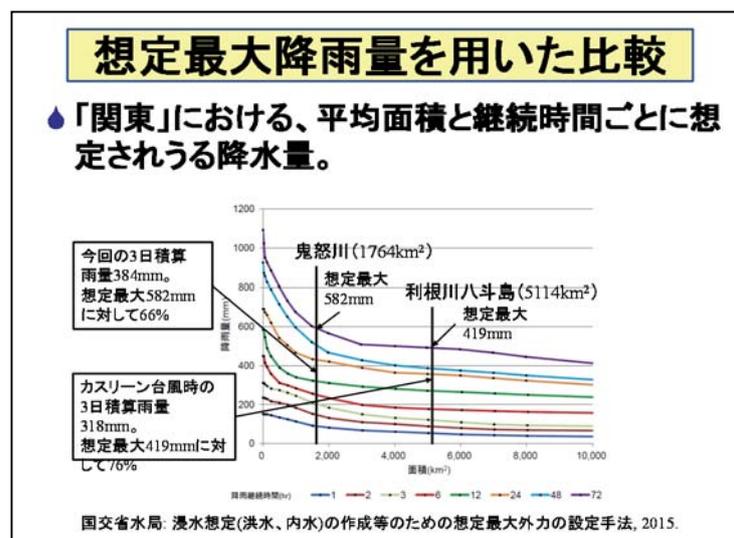


図3

戦後間もないころ、日本の治水計画を大幅に変えたカスリーン台風があったが、これは利根川の非常に広い流域で318ミリ降った。それに対しては76%、今回に匹敵するようなレベルであった。河川の整備が行き届いていないため溢水になり、最終的に決壊が起き、破堤も起きた。(図4)



図4

このように最大積算降雨量のピークを追うと、結局、ダムが有用だったのか否かの議論になるが、ダムはそれなりに有用だったと考える。図5右上のように、台風18号と17号の両方による二つの山(ダブルピーク)のような降水の入力波があったが、それは上流の4つのダムでカットされて、石井の地点まではダブルピークがあったが、結局減水して下流域では消滅している。もしダムがなければ、ここのダブルピークの一番初めのピークがおそらく常総市まできていたと推定される。そうすると、夜中に堤防決壊が起きていただろう。

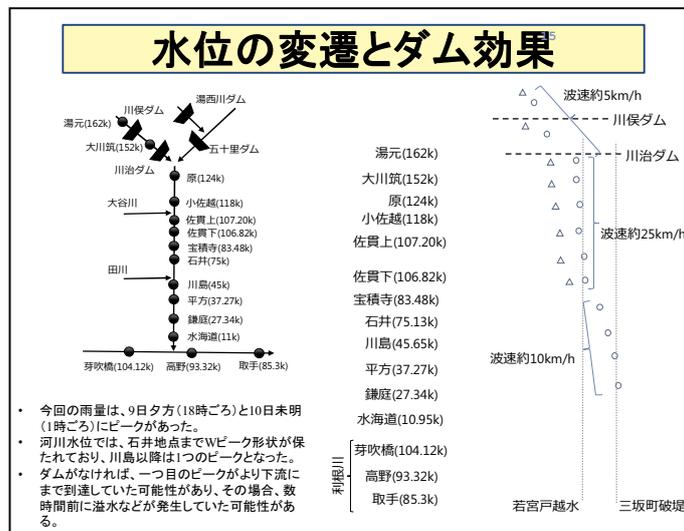


図5

今回、東北地方でも同じような被害があったが、そのときには背水効果があったといわれている。背水効果は、支川が流れ込むところの合流地点で逆に水位が高くなって、川が流ることができなくなり、上流側に洪水が伝搬していく現象である。今回は利根川があふれたため鬼怒川があふれたのか。それは発生しなかったと考える。鬼怒川は水海道のあたりで河川幅が非常に狭くなっており、利根川ではなく鬼怒川自体がそもそもバックウォーターを起こし、水海道から上流に向かって背水効果を起こしていたため、常総市で洪水が発生した。(図6)

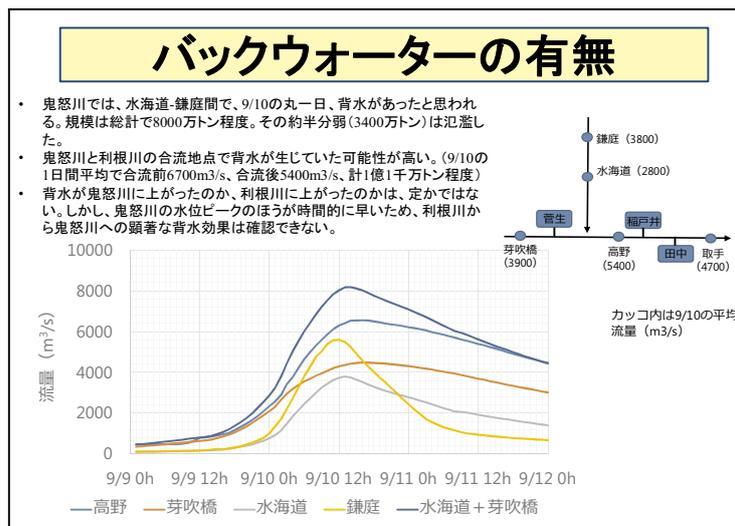


図6

破堤も調査した結果、パイピング現象が起こっていたということもわかっている。パイピング現象は、砂がぼんと吹き出すようなものである。堤防があると堤防の下のあたりで水が出てくる。破堤や水位が上がることによって水位差が発生し、一旦、堤防周囲に水の道ができてしまうと、次第に水量が大きくなり、ついには非常に大きな水の通り道になってしまうものである。それは決壊の主原因ではないが、否定できないという結論に至っている。(図7)

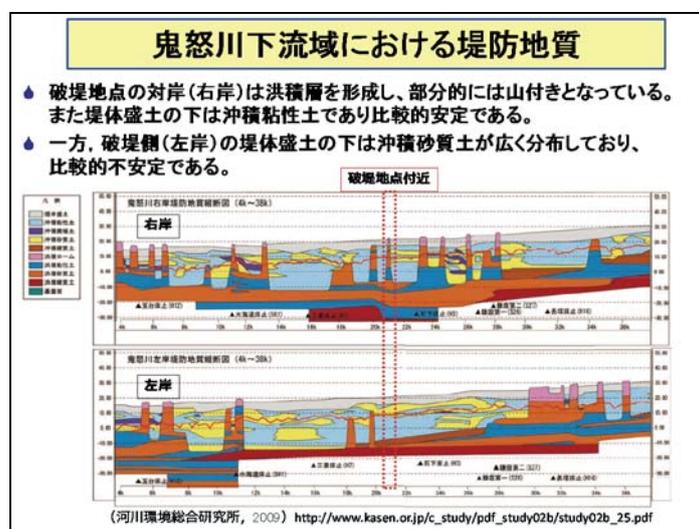


図7

その原因は何か。鬼怒川には小貝川が隣にある。その距離は数キロメートルである。小貝川と鬼怒川は古来より合流と分岐を繰り返し、ほとんど一つの川とみてよい。この地域を一つの谷として形成していた。古い河川の情報(758年)を見ると、例えば今回の破堤地点は昔の河川が蛇行していたところで、非常に砂層が発達している。砂の地盤の上に堤防をつくったので、地盤は非常にもろく、浸透に対しては余り強さがない土地だと推測している。

小貝川には蛇行があった。蛇行すると河川の脇には、自然堤防(サンドデューン)という小高い丘ができる。人間は古くから河川の洪水を知っていたので、そのような小高い場所に住む。そうして集落ができ街道ができる。小高いところでは被害が軽微ですんだ。今回の鬼怒川洪水で最大の被害は、幹線道路である新しくできた国道294号線や、真っすぐに作られた道路周辺の商業施設であり4メートルの浸水被害を受けた。

今回、鬼怒川洪水時の気象庁の雨予報はかなり正確だった。鬼怒川沿いに線状の降水帯ができるところまで予報されていた。我々のモデルでの洪水予測では、河川流量を9日15時、破堤の前からどれぐらい予報できていたかを図8に示すが、残念ながらずれていた。しかし、定性的には危険という情報は出せていたと考える。今後は、定量的に精度検証する必要がある。

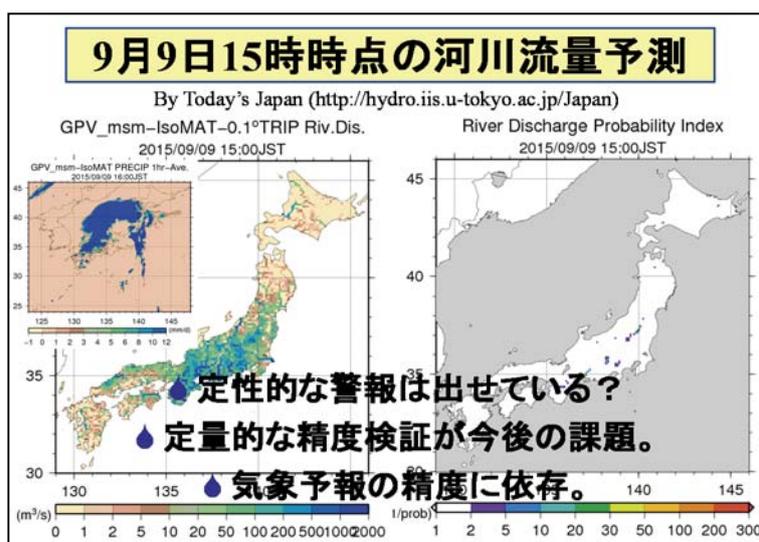


図8

最近、河川モデルは超高解像度、500メートルぐらいまで解明できるようになっている。

現在、JAXAと共同で、全球1キロ単位のリアルタイムな予報システムを開発している。ローカルスケールの水災害、洪水、渇水、生態系への影響など情報を発信できるようにしたい。

洪水は河川流量を予測するが、氾濫のシミュレーションもとても重要である。かなりの高精度、高解像度、25メートルで計算する二次元の流体力学モデルを開発しているが、地点と時間さえわかれば、浸水域をシミュレートすることだけは、かなりの高精度で解が得られる。大ざっぱに見ればかなり良い精度であり、洪水流量の予測よりも高い精度になる。

結局、洪水予測警報技術をきちんと開発すべきと考える。今回、鬼怒川洪水で反省したのが、自分た

ちがリアルタイムの予報モデルを持ちつつも、検証をしていなかったことである。天気予報から洪水予測への変換が日本では未発展である。アメリカではNOAAが実際に現業機関として洪水予測まで行っている。しかし、日本では気象庁や国交省が極めて単純なモデルをいまだに使っている。今回、我々が使っている全球リアルタイム予報が必要である。アンサンブルな気象予報データを適用し、幅を持たせた洪水のピーク予測ができればよいと考える。日本の気象庁も予測は出すが、アンサンブル予報のデータは公開されていない。氾濫計算は河川水の流量予測に依存するので、流量予測を進めるべきである。氾濫計算は東日本大震災以降、非常に計算技術が発展している。現業機関、国交省、気象庁、JAXAと協力して開発していきたい。

[質疑応答]

Q：洪水予測警報技術に関して、国交省の協力が必要というのは流量データが必要であるためか。

A：その通り。研究機関でリアルタイムにずっと情報を配信し続けるというのが難しいので、将来は現業で行うところへ移転させ、大学では先端的な研究に特化すべきである。

Q：氾濫予測警報を出すのに河川の実測流量が必要であるが、国交省の河川局から出ている検証つきの河川流量は2011年で全部とまっている。

A：国交省の河川局は水位情報を出している。

Q：検証されていないので使えない。

A：水文水質データベースがある。

Q：そこからは水量曲線は出せるが、認証していないデータを使ってはまずいと考える。

A：認証していないのは流量データであろう。モデルでは流量ではなく水位を予報すればダイレクトに比較できる。我々のモデルは水位で予測する。当然、流量も合わせるが、それには検証が必要になる。

Q：水位水量曲線は年度ごとに変わっていく。ということは、それを国交省が出さない限り、自分で設定する必要がある。モデル開発者ができるとは思えない。

A：最新データではなく、昔の水位水量関係を使う必要はあるだろう。

4-10. 総合討論

モデレーター 菊池康紀 (東京大学 総括プロジェクト機構 特任准教授)

／JST CRDS 環境・エネルギーユニット 特任フェロー)

- [菊池] 今後、日本でどのような研究を進めていく必要があるのか、どのような体制が必要なのかに焦点を絞り議論を深めていきたい。持続可能性や環境問題というと、あまりにも広い分野が絡んでくる。インターディシプリン、基本的には学際統合とかいうが、それぞれの分野がつながった先にサステナビリティや環境がある。そもそも、環境学とは何かを考えた時、土木や生物、農業など、様々な専門が元にあったと思う。治水や気候変動モデルなどでは、一つのディシプリンだけでなく、もう少し様々なものが結合したマルチなところで実施されているのではないか。さらに進むと、インターディシプリンのような世界まで到達し、その先に何かがあるかを考えたとき、環境学の俯瞰では、学問体系の連関の中でどのような整理ができるのかを頭の隅に置いていただきながら意見交換を進めたい。一つ一つの分野のお話というより、環境分野で研究を進めていくときに、どのような課題やキーワードがあるのか。資金なのか、人材なのか、時間がないのか、組織がないのか。どこに問題があるかを整理していく必要がある。それを打開するにはどんな活動、どんな施策ができるのか。また、もっとこのような開発をしなければいけないというトピックスがあればご意見をいただきたい。

研究から社会への橋渡し (モデルやデータベースの運用)

- 私が強調したいのは人材である。ハードやソフトの開発は、少人数であってもできる人がいればできる。そこまでは持っていけるが、それを実際に活用する時や実用化する時には人数が必要である。それなりのクオリティまでは持っていけるが、運用ができていない。そのようなシステムを構築する制度を整えていくことが必要ではないか。
- [菊池] ある意味やりやすいところは、新しいものを開発し、新しいものができ上がると特許や論文ができ上がっていく。そこである一定の到達点にはなる。一方で、環境のモデルなどは維持することが非常に重要な役割でもある。測定し続ける、測定した結果をちゃんと使い続ける、そこにかなり重点が置かれている分野だと思う。そういったところにうまく合うような資金がないと、モデルをつくっただけでは意味がない。
- 観測データでいうと、例えばNASAが展開しているAERONETでは、NASAがきちんと人数をかけて整備し、持続的に観測し、それをホームページでデータ提供をしているので皆が使う。そこが日本は非常に弱い。世界的にも立場が低いままではいるのは明らかである。CMAQやRAMSというリージョナルモデルは、大気汚染分野でほとんどの人が使っているが、インターフェースがきちんとしているからである。インターフェースはモデル屋から言うと本質の部分ではない。日本の場合、コアな部分は結構取り組んでいるが、インターフェースというユーザーを増やすための部分がきちんとできない。しかしそこにはある程度の人数をかけないと難しい。雇用するなどして組織を整え整備していくところである。
- とがった分析方法や新しい装置の開発はしているが、そこから先を展開する人材を雇用できない、

時間がない、または資金がない。そして、モデルと組み合わせる時、せっかく開発した非常に微量で計測できる手法についても展開する時間も資金もないので、飛び抜けて世界的にリードできるタイミングを逃してしまうことが結構ある。外国でのワークショップなどに参加すると、技術者が非常に充実しているので、素案を持っていき、そこで膝を詰めて議論していくと新しいものがその場でできる。プロトタイプができた後にはある程度の資金がついているので、そこから雇用を広げてチーム展開ができ、一気にリードできるようなことを目の当たりにできた。その辺のフレキシビリティを、おそらく民間も含めてやらなければならない。

- [菊池] データベースや装置などを全研究所が使えるような形に実装する資金はとりにくい。どうしても何らかの手弁当で実施したりするなど、普及や促進系が活動しにくいということが実際にある。一方で、先ほどの高山市や霞ヶ浦など、自治体と実施するようなプロジェクトの立ち上げは可能性としてあるか。
- 岐阜大学では今年4月に岐阜県と共同で清流の国岐阜防災減災センターを立ち上げた。これは岐阜県での防災減災の取り組みと、岐阜大学が持っているさまざまな分野での研究や知見をつないで、防災減災に役立てようというシンクタンク機構のようなものである。最近研究プロジェクトも立ち上げ、防災減災という割と土木系のグループが多い中で、特徴として環境モニタリングを入れるようにした。先ほど鬼怒川の例もあったが、これから気候変動が進んで極端現象が増えると、岐阜は山地が多いので、洪水の問題、土砂崩れの問題が結構多く、地域レベルでの細かい気象の問題と生態系のあり方の問題と防災減災を組み合わせようということをしている。これは自治体と大学の取り組みであるが、地域の民間企業などと組んでいこうという取り組みを始めた。
- [菊池] 地域と研究を結びつけた取り組みを大学で実施しているところはある。ただ、そのようなわけにもいかない大きな気候のモデル、水のモデル、エアロゾルの話などには、どのように資金、人材、時間、組織を工夫していけるか。
- 例えば、ソースコードやデータに課金をすれば、具体的には、月に100円を払わないと見られないとすれば、それなりのお金は集まり、公開に必要なサーバーなどの維持もできるかもしれない。しかし、そのような方向にいかないのは、国立大学や国立研究所では基本的に公金を使って研究しており、どこまでが研究で、どこからが情報提供事業なのかという切り分けの問題が難しいからだ。うまく考えないと、データ等の研究成果の利用が広がれば広がるほど、研究者に負担がくることになる。そこにこそ仕組みづくりが必要と思う。
- まさにそこに直面している。ユーザーが増えればそれなりに問い合わせなどがたくさんあり、広がるほど負担がかかる。負のフィードバックがかかっている。必要としている人がいるからやっているという状況である。環境に関する例えば洪水予測の情報や大気汚染の情報について、市民への還元、受益者への情報提供は、国の機関がやるべきだと思う。我々は開発の途上という形で情報提供し続けて、私自身ホームページで、この情報を使って何かが起こっても責任は負わないという免責をつけて提供している。黄砂というのは気象現象だから気象庁の管轄、PM2.5は環境省である。気象庁の中で同じようなモデルでPM2.5の予測も動かしている。しかし、気象庁はPM2.5の情報は管轄外だから出していない。特定の分野はしっかり省庁が横の連携をとり、国民が必要としている情報は出さなければならないと思う。そのような仕組みづくりをまずやる。我々研究者はあくまでそ

ここに到達するまでのモデルの開発をして、そのまま運用してもらえばよいというところまで作り上げる役割だと思っている。その後の運用は、当然大学で育った人材、モデルがわかる人がそこに行くという仕組みをつくる。

- PM2.5についてはVENUS（大気汚染予測システム）のことだと思うが、研究者が作るというよりは、一般の方のために作ったような感じで、それを研究者が面倒を見ているという状況である。国環研は、そのような世のため人のため、環境行政のためにやっているというのが題目であるが、研究ではない。GOSAT（温室効果ガス観測技術衛星）で非常に多くのデータを出して、論文にたくさん引用されている。GOSATは世界の皆様にデータをたくさん提供しているということで認められているが、国環研は研究としては何もやっていないになってしまう。
- [菊池] 環境学ではある意味では継続が重要な話が多い中で、誰が継続的にやるのか。例えば最新のモデルを作り気象庁に渡しても、気象庁の中で消化し切れないモデルもたくさんあり、学術の成果と実用・運用の間を誰が持っていくのかというときに、学術側の主導によって、しっかりと社会に入っていくところまでのパイプ役として世話をするという仕組みができ上がってくるとかなり変わってくる。国環研も産総研も基本的には研究者であり、国の研究機関であり、運用過程の部分である中間領域またはミッシングリンクの部分を誰もケアしないまま国研に全部しわ寄せがいつている感じがある。
- コーディネーターが必要だという話はいろいろなところで聞く。橋渡しをする人がいて、その人がプロフェッショナルになる。ドクターを持っている人が一番よいが、そのようなポジションにつける人材がたくさんできる。
- [菊池] 大学側も少し大きい研究資金として、環境関連の様々なモデルを結合していくことによって、社会に対して発信できるような仕組みを提案するといった研究プロジェクトが組まれるようになれば、そこに学生をつけることができる。そこで学生が学ぶと、その学生は後でそういうことができる人材として社会に出ていくことができると思う。

環境分野の研究の社会実装の方法（駆動力）

- 社会や国などの科学界以外からのニーズについて、もしかしたら日本ではもっと議論が大事ではないかという気がしている。GEOは第1期10年計画を今年終えて、昨年4月から第2期10年計画のために作業部会を立ち上げ、日本では東大の小池先生と私の2人が入り、国際的に25人の委員会で1年半にわたり議論してきた。GEOでは、第1期10年計画では、気候、天気、水、災害、農業、生態系、健康などの9つのソシエタル・ベネフィットエリアを定義した。次の10年はどうするということになり、9月にSDGs（持続可能な開発目標）の議論、3月には仙台で防災会議があり、そろそろ様々な観測やモデル等々を具体的に社会のために利用できるような仕組みと、その中で人材育成をしなければいけないだろうという議論があり、8つのアプリケーションオリエンテッドなソシエタル・ベネフィットエリアに組みかえた。社会といっても地域であったり、国であったり、世界であったり、人類の持続的な発展のためであったりする。どのような知見、データ、情報が必要かという視点から、様々な観測やモデルなどの科学活動を再整理するという作業をこの1年ほど行った。その中でいろいろなプライベートセクターや世界銀行、国連などのグループとのフォーラムを開き、社

会のエンゲージ、もちろん、市民の皆さんもエンゲージするような取り組みをしてきた。この分野は科学としての発展と同時に、これがどう利用されるのか、今本当に喫緊に必要なものは何なのかという視点でも議論があるといいのではないかという気がして、そのような意味では、ステークホルダーを組み込んだ議論や科学をきちんと実装すること、それから、コーディネーターである人材育成にも関わってくる。

- [菊池] 先日、日本学術会議の環境学分科会でも議論をしたが、環境学は実は市民に近い。ある意味では、人文社会科学に一番近いサイエンスで、そことのつながりがもしかすると一番強く持てる分野が環境学なのかと思う。
- どうやって研究成果を社会に伝搬していくか、その駆動力は何か、というところがとても大事だと思う。環境学の扱う内容は確かに市民生活に近いが、従来通り、研究者の倫理観や社会の意識だけに駆動力を頼れば、伝搬は限られてしまう。やはり、お金になる、お金が動くということが伝搬のための一つの大きな駆動力になる。例えば、モデルに関しては、研究者自身が手弁当で社会へ実装しようとしてもできることは限られてしまう。先ほど実費をとるという話をしたが、持ち出しにさええなければ、例えばコンサルがうまく入りこむという余地も出てくるのではないか。さらに、このモデルを使うと新しいビジネスになるということになれば、関わる人と対象の裾野が広がっていくと思う。駆動力としてお金に着目することも社会実装の実現には重要ではないか。
- 全球植生モデルをゴム林に適用するという話を紹介したが、まさにそういったことを考えて実施している活動である。全球の植生が今後の気候変動に伴ってどのように変わるかは、環境分野の研究者からのニーズはあるがお金にならない。ただ、今あるゴム林が今後持続できるか、もしくはここにゴム林をつくったらこの先10年くらいしか使えないといった、スペシフィックな対象まで持ち込むと、人間の経済ベースにのることができる。そのように、社会と密接にリンクするような形にモデルを展開すると、そのモデルを学んだ人の就職先にもなるし、その分野も盛り上がると思う。実際に現業に使われることは強みと思うので、そういった仕組みづくりも大事かと思い始めている。
- 受益者やユーザーという話がキーワードとして出ていて、一般市民の方に一番近いのではないかというお話もあったが、受益者の見えにくい研究分野でもあると思う。もしくは非常に広く浅い受益者だから、やや経済原理に乗りにくい部分があると思う。なので、お金が入ってくるということがある種の推進力になるという部分もあっていいと思うが、その方向に一気に流れたら大変危険な気がしている。特に先端的な研究では、最初は何になるかわからないというところから始まることが多いと思う。役に立つか立たないか、できるかできないかもわからないというのも多い。そこは切り分けたほうがいい気がする。
- 全く同意見である。SPRINTARSはやろうと思えば事業化できてお金もうけができるがしていない。それは自身の研究者としてのポリシーでもあるが、商売に始まって違う方向に流れてしまう危惧が何となくある。また、情報を有償化すると、公開する情報に対して明確な責任を負うこととなり、研究教育が仕事である大学教員にはなじまないという側面もある。あくまでもこれは無償で提供するという形をとっている。だから、基本的には我々の役割としては、使えるところまで持っていく、研究者としてそういうものをつくる。そのためには国として、ファンディングとしてそのような資金を提供し、人材育成をきちんと行い、運用のところは外に出すという形がベストチョイスと思う。

- [菊池] 使い方や対象によって変わってくることもある。国のセキュリティとして、例えばPM2.5などは有償よりは何らかの機関がしっかり継続しなければいけないところもちろんあるし、先ほどのゴム林の話は、それを使って事業化をしようとしている企業があれば有償にすべきである。両方あり得る気がしている。その辺の整理すら学術的に全然やっていない側面もある。
- モデルにしてもモニタリングにしても、ある程度長く続けるのは非常に重要である。一方で、「これはちゃんとお金を払ってやるべきものなのだ」という意識が入ると、一般の方も見方が変わるのではないか。ナショナルセキュリティと言われると関係ないと思ってしまうが、これだけのお金を払いこのようにやっているというものがあれば、何か重要なことなのだから守ろうという感じになるような気もする。
- 事業化できるものについてはしたほうが良いと私が考えているのは、もちろん、資金の問題もあるが、人材育成の面のほうが強い。それは今、ポスドクを雇っても3年や5年で次を探さなければいけないので、論文を書けるようなテーマを与える必要がある。モデル開発に必要なテーマが必ずしも論文の生産力が高いとも限らないし、低いほうが多い。ある程度複雑なモデルになってくると、その中身を一々全部理解して使うのに非常に時間がかかる。なので、アカデミアで職を探そうという人が意識を向けないこともある。実用化してお金になるという事例があり、そこで職を探せる状況があると、モデルを理解しつつ使ってくれるユーザーも増えるだろう。現在では研究室に来てアカデミアでしか雇ってくれないからどうしようと若い人は当然考えるので、その枠の中で活動しなければいけない。インターフェースの整備などが進まない理由として、一つにはそこもある。
- モニタリングでは、お話しした鬼怒川のような非常時に有用度が出て、オンラインで公開されているデータが非常に重要になるので、そのメンテナンスが非常時のための準備として需要であると、今回の事例をもとにアピールしていくべきである。そのような資源の投下は必要だと実感した。もう一つ、結局キャリアパスが日本の場合一つしかない。教授なるかどうかというところがある。しかし、アメリカではシニアのポスドク、テクニシャン、リサーチアソシエイトがたくさんいて、そのような人たちが研究を支えている。トップの教授はお金をとってくる政治家のようなサイエンティストだったりする。学生には研究者には向いているが教授には向いていない人材がたくさんいて、そのような人が実は日本を支えているのに、アカデミアに残れないことが非常に大きな問題ではないかと思う。
- 気象分野のモデリング・予測の話聞いて、生態学分野のモデリング・予測の現状との大きな開きを感じた。生態学分野とあまりにステージが違う。気象モデリングでは、モニタリングのサイトがあちこちにあって、データは探せばどこかに落ちていて、すごく緻密なモデリングができて、それこそ、3キロメッシュで予測することが可能な状況にある。このような状況は、生態学が細々と個人がカウンターを持って虫の数を数えている世界と全く異なる。生態学分野のモニタリングをもっと高いレベルにまで引き上げる必要がある。二つ目に事業化の話が出てきたが、ここにも両者の間の開きを感じた。気象研究の分野では開発したツールを利用者に渡せばある程度の予測ができるころまで技術が成熟している。成熟しているからこそ、事業化への道筋を考えることもできるのだろう。しかし、生態学における動態予測はその必要性がますます明らかになってきているにもかかわらず、まだまだ発展の余地が多い。例えば水産資源となるような魚の数がどう変動するか予測するには、基

盤となる技術や解析がやっと現れてきたところで、「これから」発展させていくべき分野というように感じる。

- [菊池] フェーズやステージの違いがある。生態学ではセンサリングができない、モニタリングがしっかりとできていないところほど、技術開発が必要である。環境学でどのようなトピックスを設定していく必要があるかについて、環境学自体が学問分野として一つではないので難しい話をしているのは確かであるが、一方で生態学や気象学でも、環境をしっかりとモニタリングして発信することやイノベーションが起きる場をどう整備するかというところだと思う。そもそも、全く異なる場所に、自分のところと同じような情報があるからこそ結合される。
- モニタリングは非常に重要である。環境を見るときにベースラインはどこかをしっかり提示することが大事だと思う。それは現在のモデリングと衛星観測もあるし、竹村先生のモデルなども、2万年前も予測できたりする。その知見は非常に重要で、自然のレベルでどの程度まで変えることができるかをわかっていないといけない。実際に津波の災害もそうだが、100年ぐらいしか見ていなかったから想定外だったわけで、もっと長い時間スケールでのモデルや観測事実も持つことで、モニタリングができていくような状況が普通であれば、どこまでがベースラインでどこまでが想定内であるということが言える。長期スケールといったときに、IPCCでも500万年間前のことを言っているのは、そういうところでCO₂が現在と同じなのは自然のレベルでいくとそこなので、それだったら少なくともこういうことが起きますよということはある程度言える。
- 最先端次世代研究開発支援プログラムという3年2カ月のプロジェクトで、フィールド研究により野外温暖化実験を行い、3年でイノベーションを起こせというチャレンジで、毎年評価の報告書を出すというようなことをやってきた。それはそれでペースメーカーにはなったが、環境分野では日々刻々状況は変わるからわからなかったことも起きてくる。また、新たな横串を通すようなチャレンジなことも出てきた場合に、FS的な試行的研究課題があるといい。科研費でも萌芽という枠があるが、例えば1年、2年、チャレンジをしてもう一回計画を練り直して新たな本課題にいくなど、本当にできるかわからないがチャレンジできるような機会があると、若手研究者も挑戦しようと思ってもいいし、自分の分野はこういうところに新たな発展があるのかもしれない、と考えるようになっていく。

5. 環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）

5-1. 「コベネフィット型水環境保全技術の開発に向けた取り組み」

珠坪一晃（国立環境研究所 地域環境研究センター 地域環境技術システム研究室 室長）

私が所属している国立環境研究所の地域環境研究センターは、もともと水・土壌・大気環境研究領域と大気・土壌汚染を扱っている。専門は微生物を用いた省エネ型の処理・浄化技術、主として排水処理技術の開発である。

まず、コベネフィット・アプローチとは、温室効果ガスの発生抑制などの気候変動対策を実施して、同時に開発途上国における環境汚染対策等に資する取組や技術的な解決策を提示することである。タイトルの「コベネフィット型の水環境保全技術」とは、排水処理や底質改善などの水環境保全に貢献しつつ、処理に伴うエネルギー、温室効果ガスの削減を達成するような技術のことを示している。

研究の背景について。先進国共通の課題として、我々の生活や産業活動の結果、非常に大量の有機物を含んだ排水が排出されている。その量は生活排水、産業排水合わせて250億t程度であり、これは琵琶湖の容積程度になる。有機物濃度は非常にバラエティに富んでいるが、量的に多いのは有機物濃度が比較的希薄で、かつ常温、気温の変化に応じて低い温度で出るものである。基本的に日本や先進国では、下水処理場や工場などで好気性の微生物を使った処理システムである活性汚泥法が使われている。これは間違いなく日本の水環境保全に大きく貢献している。しかしながら、東京湾などの人口密集地域ではまだ富栄養化などの問題はあ

実はこの技術は、空気を水の中に送る曝気の動力が非常に大きく、例えば、生活排水処理では国内総電力消費の0.6~0.7%を消費している。また、処理の結果微生物菌体である余剰汚泥が大量に発生する。こういった電力や汚泥の削減は非常に重要な課題になっている。

2004年の下水からの温室効果ガス発生量は700万tになっており、その半分が電力である。次いで緑色の部分が下水余剰汚泥の焼却に伴う亜酸化窒素ガスの排出である。この2つをいかに削減するかが重要になっている（図1）。

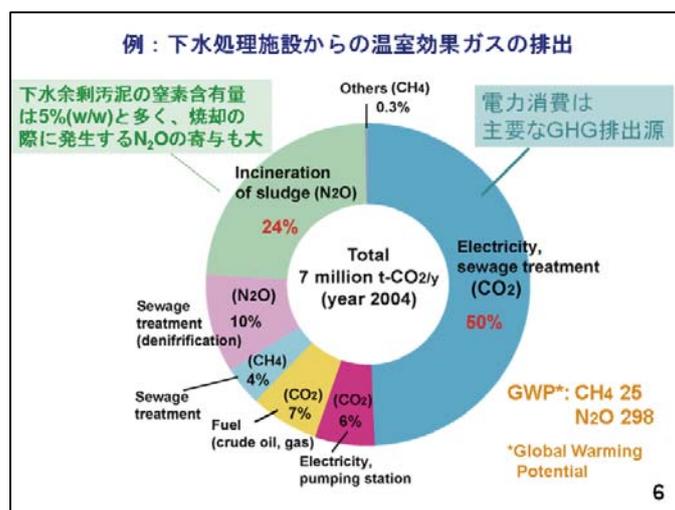


図1

一方、開発途上国、特に東南アジア地域では、人口増加、経済成長が続いており、公共の排水処理設備の導入は非常に遅れている。また、温暖な気候で人件費が安いことから、砂糖や天然ゴム、パーム油などの資源作物の生産地が集中している。

公共の排水処理設備の導入が遅れている理由はいろいろある。図2左にインドの下水処理場の写真を示す。おそらく、欧米の先進国の支援によって活性汚泥法を導入したのだが、消費電力量が多く動いていない。こういったものが東南アジア、アジア地域では散見される。

一方、資源作物の排水は、非常に有機物濃度が高いことが知られている（下水の数百倍程度の有機物濃度）。図2右は、マレーシアのパーム油工場の排水処理設備であるが、そのまま解放型の池（ラグーン）で処理を行っている。その結果、有機物の嫌気条件での分解が生じ温室効果ガスであるメタンが大気放散するという問題がある。途上国に関しては、現地の社会経済環境なども含めた解析を行い、適切な技術開発が必要となってきた。

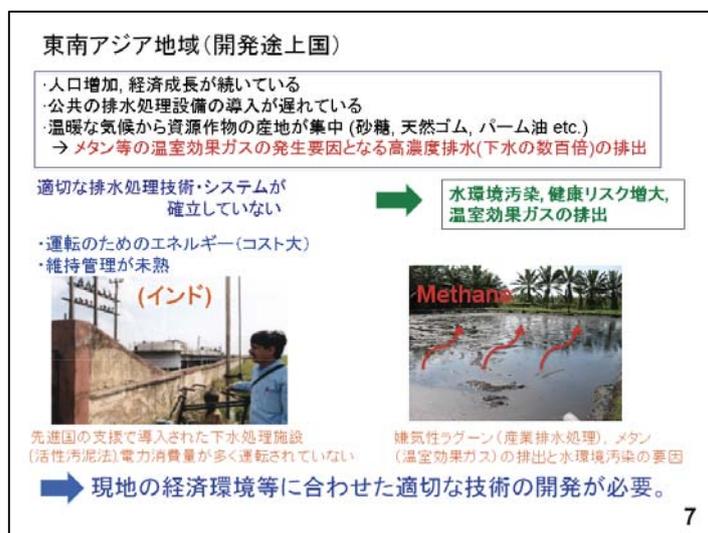


図2

では、そのコベネ型の排出処理のキーテクノロジーは何かということであるが、私は、一つは嫌気性排水処理であると考えている。ここでは主にメタン発酵の話をしているが、メタン発酵は酸素を必要としないため曝気の電力が不要という特徴がある。また、有機物からメタンをエネルギーとして回収できる。さらに、汚泥発生量も削減でき、非常に優れた長所を有している。曝気がないだけで7割から8割の省エネ化ができ、メタンを回収すれば創エネもできる。一方、技術の適用範囲は非常に限定されている。メタン生成細菌は中温で維持しなければならないということと、嫌気状況を保つのに必要十分量の有機物が必要であるため、ある程度濃い排水であればよいが薄い（有機物濃度が低い）と難しい。加えて、嫌気性処理ではアンモニア性窒素を酸化できないので処理水質が満足にできないし、安定まで時間がかかるというデメリットもある（図3）。

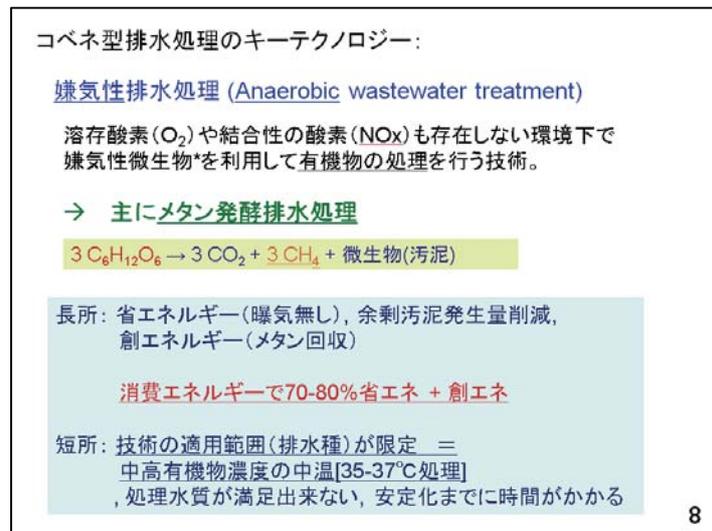


図3

我々はこれまで、国内外の研究機関、大学、自治体、民間企業との連携によって、主に嫌気性排水処理技術を中心としたコベネ型の技術の開発、実証を行ってきた。製糖排水や都市下水、バイオエタノール排水、天然ゴムの排水などを対象として、さまざまな競争的資金を使い東南アジア、国内を中心に連携してきた。本日は研究事例として、メタン発酵排水処理技術の適用範囲拡大と、微生物燃料電池の排水処理への応用について紹介させていただく。メタン発酵については、一つは低温（常温）かつ低濃度の排水について、もう一つは、阻害物質等を含む超高有機物濃度排水としてバイオメタノールの蒸留排水について説明する。

まず、低温・低濃度排水のメタン発酵処理技術であるが、ここでは中温35°Cに比べて低温という意味である。温度が低かったり有機物濃度が低いと嫌気性細菌が活性を失いやすく、増殖速度が非常に落ちてくる。そのような環境で、メタン生成反応の主役であるメタン生成細菌を如何にうまく利用するかということで、図4のように、グラニューール状生物膜、バイオフィルムを使ったシステム（グラニューール汚泥床法）を開発してきた。嫌気性細菌群をバイオフィルム化し、この中に低温耐性を持つメタン生成細菌を保持し、非常に長い時間、例えば100日程度装置の中に保持する。こうする事で、排水と菌体（バイオフィルム）の効率的な分離が可能になり、メタン発酵に不適な排水（低有機物濃度、低温）に対しても高効率な処理が可能になった。

さらに、有機物濃度が低い場合、メタン発酵で一番重要な酢酸からメタンを生成するメタン生成細菌の基質親和性を考えると、活性が非常に低下してしまう。そこで、排水の供給方法を工夫した装置を開発した。その結果、メタン発酵処理技術の適用下限を中温から常温のレベルまで、また、有機物濃度に関しても都市下水から少し濃いくらいまでのところまでに拡大することができた。現在、これに関しては実用化研究が進行中である。



図4

阻害物質を多量に含む超高濃度有機物排水として、糖蜜系のバイオエタノール蒸留排水に対するメタン発酵処理技術の開発を行っている。タイは世界の中でもバイオエタノールの生産量が4位に上がっており、年間二百数十万KLに達している。ここ10年で生産量は数十倍に増えているが、それに伴って排水も数十倍増えている。エタノールの場合には、その容量の1割程度しかエタノールにならず、9割は排水になってしまう。この排水は有機物濃度が非常に高く、120gCOD程度である。都市下水のCODは0.3～0.5gであるので、数百倍高いと言える。加えて、さまざまな無機物の中で特に問題なのが硫酸塩である。硫酸塩から嫌気条件下で容易に毒性物質である硫化水素が生成され、メタン発酵が阻害されてしまう。さらに、有機物濃度が非常に高いということはバイオガスの生産量が非常に多いということである。そうすると装置の中にいる微生物がバイオガスによって系外に放出されてしまう問題が起きる。これを解決するために、図5の装置 (USSB法) では、高さ方向に固液分離、気固液分離槽を多層に設置している。これによって、バイオガスが生成したと同時にバイオガスを系外へ排出できるので、流失を防止できるということと、発生した硫化水素をすぐに系外へ排出し、硫化物による阻害も回避できる。

これに関しては、国内にはエタノール蒸留排水があまりないので、タイにおいて実証試験を行った。結果、40～120gと非常に超高濃度、かつ阻害物を含む排水に対するメタン発酵技術の基礎が確立できた。しかしながら、処理水質が維持できていないので、後段処理についても検討を行っている。前処理の後に低濃度対応のメタン発酵処理装置をもう一段導入し、その後に好気性ろ床型の装置を使っている。いくら前段でエネルギーを回収しても後段がエネルギーを多量に消費する活性汚泥ではトータルとしてエネルギーが削減できないので、嫌気性処理と好気性ろ床をうまく組み合わせることで、さらに省エネ化を図っている。

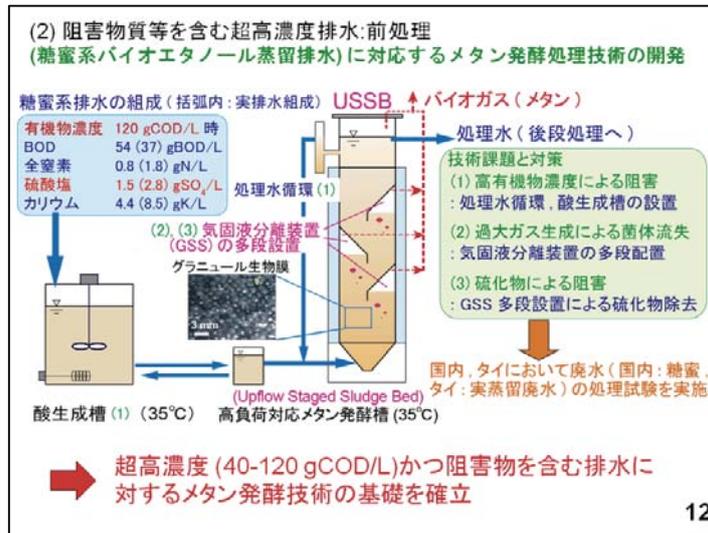


図5

この好気性ろ床の特徴は、スポンジを担体として用いていることである。通常は水分を含む事の出来ない石やプラスチックなどの素材を用いるが、それだと保水性が少なく微生物との接触性(=時間)が非常に低い。そこで、スポンジ担体を用いることで微生物を担体に高濃度に保持しつつ、排水と十分に接触させる。加えて、位置エネルギーを利用して滴下するだけで空気中の酸素を自然に取り込ませる方式なので、曝気の電力が全く必要ない。この後処理をうまく付けることで残存有機物やアンモニア性窒素の酸化が進む。バイオエタノール蒸留排水には、高分子の有機物も含まれているため、全てを生物処理だけで行うことは難しいが、コストの点で物理化学処理の適用も困難なので、この処理水に関してはサトウキビの灌漑用水もしくは液肥として利用することも検討しており、水循環を意識した研究を行っている。このような、処理水質の確保、エネルギー削減、水循環等を達成可能なシステムを開発している(図6)。

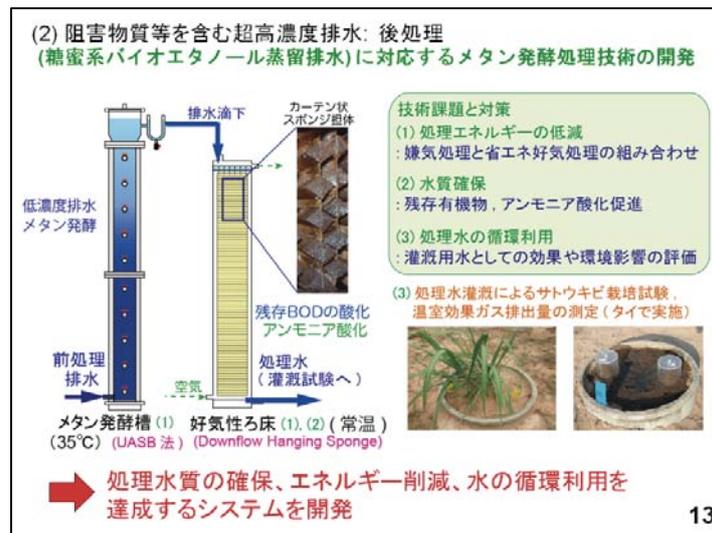


図6

本日紹介した排水処理の位置づけを示したものが図7である。横軸は排水の有機物濃度、縦軸はエネルギーの生産であり、上が生産、下がエネルギーの消費になる。都市下水は非常に有機物濃度が低く、おおよそ0.5gCOD/L以下である。産業排水はある程度有機物濃度が高ければ既存のメタン発酵排水処理法であるUASB法が使える。もっと有機物濃度の高い固形物である生ごみなどでは嫌気性消化が適用されている。この様に既存の嫌気性処理技術だけでは、全ての濃度範囲の排水を網羅することが出来ないが、紹介した無加温の排水処理技術（グラニュール汚泥床法）は、今まで技術が未適用であった体有機物濃度排水（下水より少し高い有機物濃度まで）に対しても適用できるため、エネルギー消費から生産へもっていきける。超高濃度の排水に対しては、USSB法の適用により、より高いエネルギー収率を得ることが出来るし、下水に対しては好気性ろ床を適用すれば、活性汚泥よりも省エネの処理も達成できる。

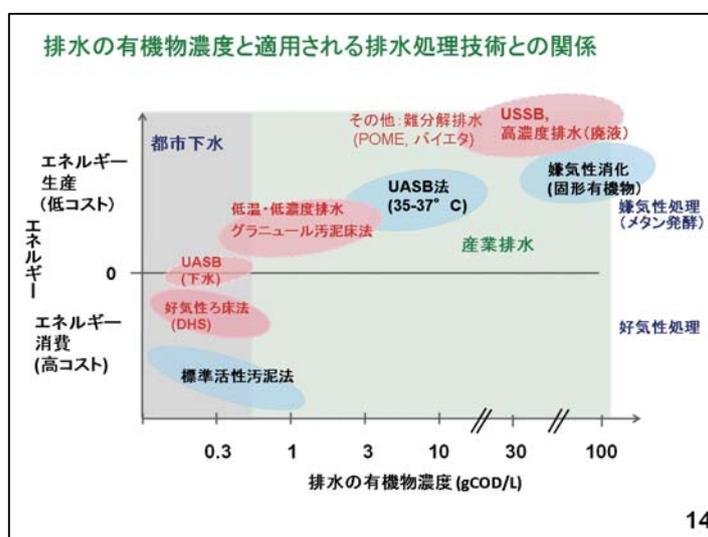


図7

微生物燃料電池の排水処理への応用だが、微生物燃料電池は図8に示すように、嫌気性処理と好気性処理を組み合わせた様な構造となっている。嫌気槽の中、好気槽の中にそれぞれ電極を置き、線でつなぐ。すると、アノード電極で嫌気槽の中で嫌気性細菌によって有機物が分解され、そこから出る電子を電極でとらえて回路に流すことにより電気エネルギーを直接回収する技術である。メタン発酵は非常に良い排水処理技術であるが、メタンを電気に転換する際の効率は二十数%なので、排水処理において直接電気を回収した方が、効率が良いのではないかという発想で開発を進めている。しかし、好気槽には酸素を供給しなければならないので、ここで曝気を使ってしまうとエネルギーを使うということで余り意味がない。なので、曝気をしなくてよい一槽型の微生物燃料電池の開発を行っている。このような装置を複数スタック化、直列並列で接続することで排水処理性能維持と発電性能を達成している。

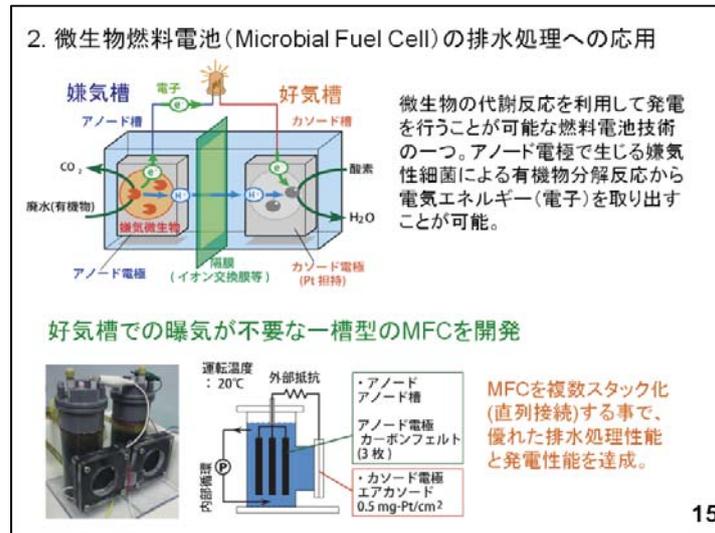


図8

研究動向、実用化に向けた課題を紹介する。現在のトレンドは、やはり省エネである。汚泥や電力削減はコストに関わってくるところなので注目度は高い。加えて、温室効果ガスの削減である。これはメタン、亜酸化窒素の抑制が非常に重要な課題になっている。さらに、難分解性物質、高リスク物質、化学物質などである。また、それと同等にエネルギーの回収がある。資源回収 (リン、レアメタル回収) に関して非常に重要だと考えている (図9)。

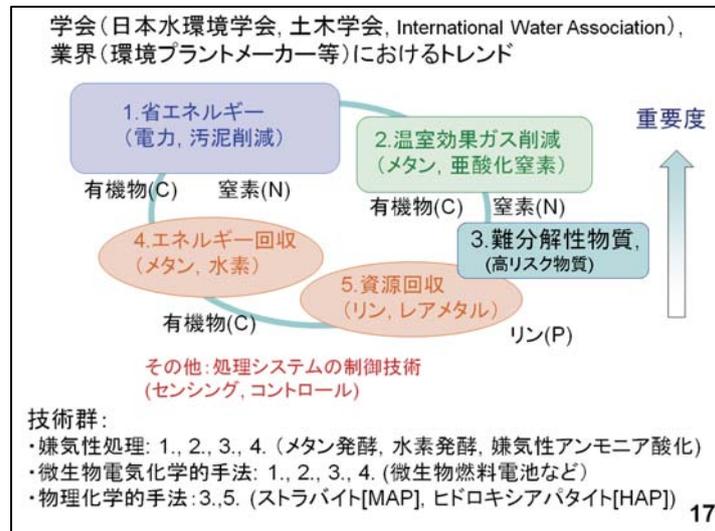


図9

今後の方向性は、一つは複数の学際分野、業界融合による開発がある程度必要と考えている。私のバックグラウンドは環境工学、微生物工学、プロセス工学だが、これに加えて、システムをうまく動かすためのセンシングや制御、あるいはガスの利用などまで考えた総合的な開発が必要と考えている。微生物

物燃料電池や微生物電解槽などの開発に関しても、構成部材であるイオン交換膜やカーボン電極、触媒などに関する検討が必要なので、このような材料開発分野などとも融合することでより研究が進展すると考えている。

課題としては、嫌気性微生物の増殖に時間がかかるので、ある程度長期の支援やプロジェクト実施が必要になる。今後、国として注目すべきテーマとしては、省エネ、温室効果ガスなどを考慮したコベネ型の技術開発研究が必要だと思う。また、日本の環境技術を新興国に展開することが重要である。新興国の発展に起因する水圏汚染対策技術あるいは適地技術の展開である。

新しい技術として、内湾や湖沼の底質改善への微生物燃料電池の応用なども考えられると思う。東京湾では夏場になると酸素がほとんどなく硫化水素が多量に発生して貝などの底生生物がほとんど死滅してしまうような状況である。底質は嫌気、海水は好気なので、それぞれに電極を設置し、底泥の改質（有機物分解、硫化水素の発生抑制など）を行うことにより環境改善ができると考えている。

[質疑応答]

Q：下水処理に関して、藻類系でやっている方々、実際分離をやっている方々、さらに生物燃料電池などをやっている方々など、他の方法との関係性や得手不得手などの整理についてどうか。

A：ある。藻類を水処理に使うという考えは当然あると思うが、やはりマスとしてなかなか藻類は増えにくいということと光の問題がある。そして、生産物も付加価値の高いものなどであればいいが、光の強い東南アジア地域でコストを抑えないと正直なところ成り立たない。全く注視しないわけではないが、少なくとも国内については向かないと考えている。

Q：廃棄物利用の観点からは、可能な限り高付加価値化するのがよいのではないかとされている。例えば、廃糖蜜も糖蜜をエタノールに代えて燃料にするよりは、食品の添加物などの高付加価値製品への製品化の動きもある。そのような選択肢に関することについてなんらかの取組みをしているか。

A：両方必要だと考えている。というのは、製糖工業に関しては、収穫時期が冬の二、三ヶ月と決まっている。つまりそれ以外は工場は動いていない。そういった高付加価値のものを取り出そうとするとエネルギーは必要である。一方、高分子のものはある程度最初に膜処理等で分離や抽出することはできるので、電力を得るためにまず付加価値のある部分は取り、残渣はメタン発酵などをしてエネルギーをつくれれば、製糖期以外の部分でも産業を回せると思うので、両方を同時に考えていかないと成り立つものではないと考えている。

Q：微生物燃料電池について。結局、微生物の反応速度が律速になると思うが、活性化を上げる方法があるか。

A：一つはメディエーターのようなものを使うことが考えられる。微生物と電極間の電子のやりとりが重要であるため、排水の組成（電気伝導度）を調整したり、あるいは電極表面の加工で、より微生物を付着させるというような工夫が考えられる。電子を取られてしまうので微生物がなかなか増えないし汚泥が出ないというのが特徴だが、逆に言えば発電する微生物が増えず性能が出ない。例えば、最大負荷や処理速度でいえばメタン発酵の10分の1程度しか性能は出ない。そのようなデメリットはあり、まだまだ開発段階だと考えている。

5-2. 「発生土の有効利用と環境安全性」

勝見武 (京都大学 大学院地球環境学堂 教授)

私は、主に土木学会と地盤工学会で活動しており、現在、京都大学の地球環境学堂という分野融合の組織に所属している。土木出身ということでハードのインフラストラクチャを意識しているが、中でも地球親和型インフラストラクチャを意識しながら研究を行っている (図1)。主に廃棄物処分場、土壌・地下水汚染、社会基盤整備における廃棄物・副産物の利用ということテーマとしている。

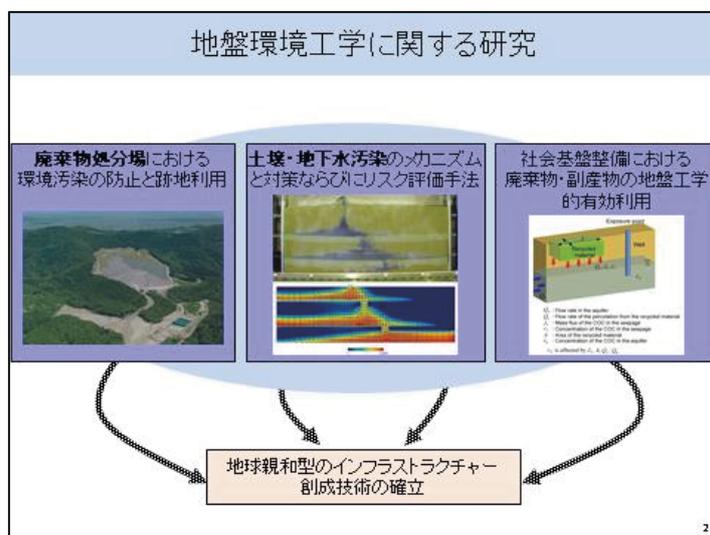


図1

処分場について、我々が主に注目しているものの一つは遮水工である。1998年に当時の厚生省と環境庁の共同命令で遮水工の要件が定量的に示されたこともあり、それ以来、粘土ライナーと遮水シートが使われている。しかし、日本では粘土ライナーを使うということについての認知度が低かった。我々は、それ以前から粘土ライナーの性能評価 (遮水性能、力学的な安定性など) を行ってきた。粘土の物性や改質、浸出性能などへの影響も見てきた (図2)。特に遮水性能に関しては、もともと水が流れにくいものに対しての水の流れ度合いを試験するので、その方法の確立が必要となる。現在、我々の学会ではこの試験方法の基準化に関して、ようやく一つの方向性を出せるかなという状況である。

また、処分場には跡地利用の問題もある。東京ゲートブリッジのアプローチの部分は廃棄物の地盤につくられている。廃棄物の上にもものをつくることになると、その重さに下の地盤が耐えないといけない。それが耐えられないので杭を打つことになるが、この海面処分場では廃棄物層の下に粘土層があり、この粘土層が遮水層になっており、その粘土層を突き抜けて杭を打たなければならない。これが環境上いいのかどうかということがもう10年以上議論になっている。東京ゲートブリッジの場合は非常に手間とお金をかけて杭を打ったが、ほかの現場ではなかなかできないので、いろいろな工法の検討もしている (図3)。

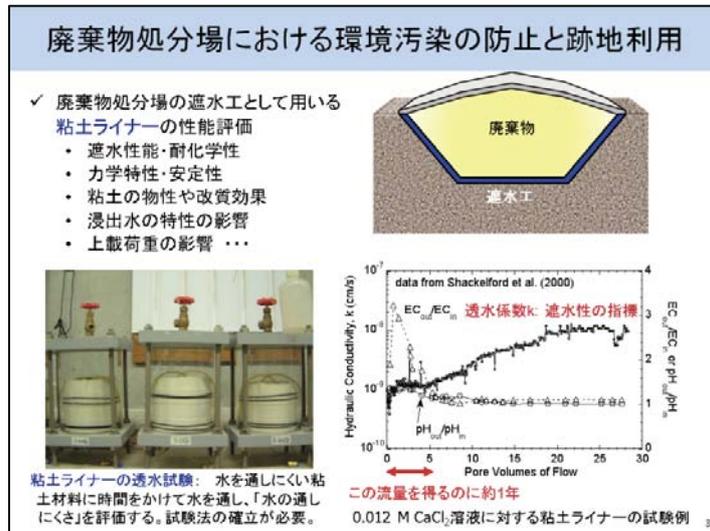


図2

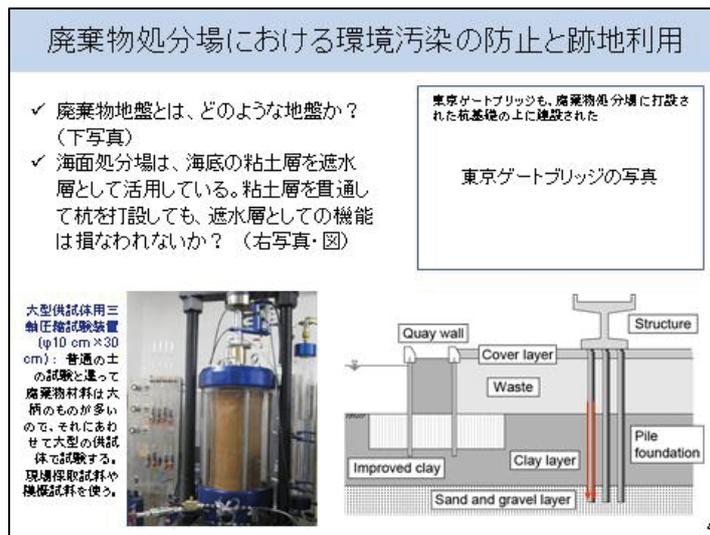


図3

あるいは、廃棄物自体に強度があればよいということで廃棄物の強度試験を行う取り組みもある。しかし、普通の土の試験だと3cm×5cmや5cm×10cmの比較的小さいものでよいが、廃棄物ではそうはいかない。我々は10cm×30cmの試験装置や、あるいは現場に大きな装置を持ち込んで強度を調べている。

また、土壌地下水汚染に関しては、特に非水溶性流体NAPLに注目をしている。画像解析手法によってこのNAPLと水の挙動を求めてモデル化を行う研究もしている。現場での対策技術としては、汚染を封じ込め、跡地利用をする技術や遮水壁の技術にも取り組んでいる (図4)。

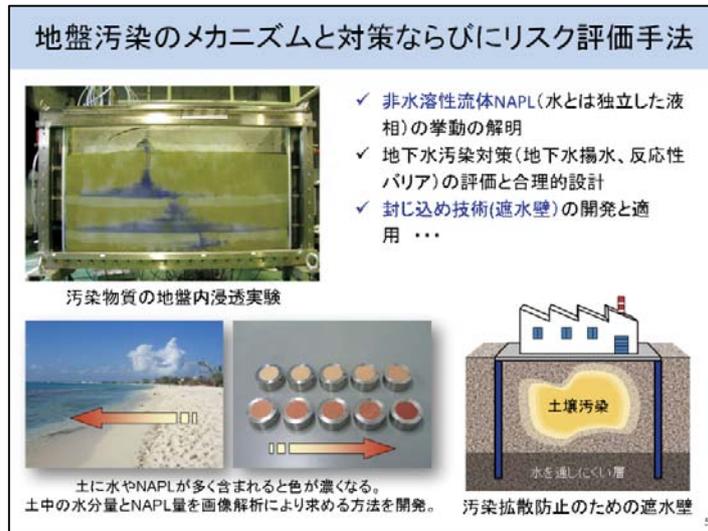


図4

遮水壁の技術の一つとしては、ソイルベントナイト遮水壁の構築技術開発をしている。普通遮水壁をつくる場合、一般の方はセメントで固められる方が多いかもしれない。この場合は、ベントナイトという粘土の一種を現地の土と混ぜることで、固まらない柔軟性のある遮水壁をつくるということである。多分、日本初だと思うが、実際に現地でも使ってもらっている。

地面の下の問題は、最近では横浜のマンション杭基礎偽装の問題などもあり、地面の下でちゃんと施工できているかどうかを評価するのは難しい。なので、遮水壁もなかなか理解してもらいにくい。最近では図5のようなコーンにセンサーが付いているものを使用して、そのセンサーから出てくる反応から遮水壁がきちんとできているかを把握できないかということにも取り組んでいる。

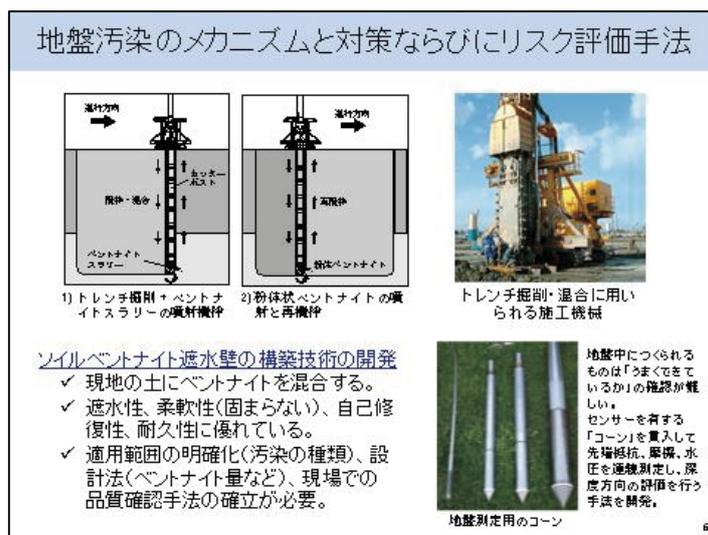


図5

3つ目のテーマとして、廃棄物や副産物の受け皿としての土木工事がある。もちろん土が出てくる量が多いので、まず土を使うということになるが、それ以外にも産業副産物を使うことも行ってきた。その中で数年前から、リサイクルをしていく中でトレーサビリティを確保していくことが重要だと感じていた。私は、大阪のトンネルから出てきた土を貯木場の埋め立てに使用するプロジェクトに関わったことがある。大量の土について複数の関係者がいる。その情報を一元管理して世の中に示す、あるいは我々がその情報を持っていることが必要だと考えた。これは、この分野に要求されることだと思っている。

このプロジェクトでは、ETCつまり高速道路の料金システムが利用された。掘削現場を出るときにETC認証で manifests が発行されて土を積んでいる重量もわかるようにした。さらに、運搬中はGPSでモニターされていて、埋め立ての現場到着、運搬終了などのデータが自動的に吸い上げ、このデータを逐次送信・更新し、関係者間でリアルタイムに把握できるシステムである。このため、人為ミスや交通問題渋滞などにも対応できるようになっていた（図6）。

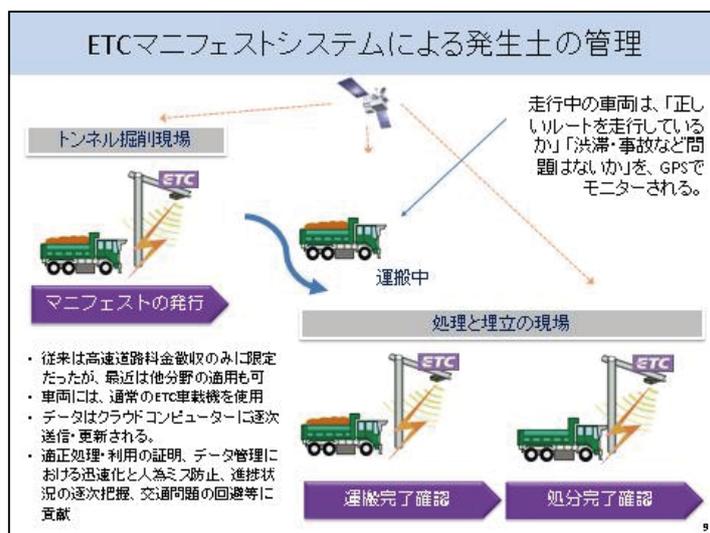


図6

最近、このようなトンネル工事で問題になるのは、自然由来の重金属の問題である。特にヒ素、鉛、それから重金属ではないが、フッ素、ホウ素を一定程度含む土が非常に広く存在している。その場合、環境基準を超えることになると何らかの対応が必要になる。このような土は、もともとは別の現場で盛土に使っていたが、最近は遮水シートで被覆したり、あるいは吸着層と組み合わせて処分している。このため、多くの研究者、技術者がこのような土に対しての施工方法や適応環境を考慮した対策工法、メカニズム、設計方法に関わっている。

それから、東日本大震災の災害廃棄物処理が重要なテーマとなっている。約3,000万tの混合廃棄物のうち3分の1以上が土であり、この土を復興資材として活用することが求められた。現場では、きれいに土が分別できたもの、あるいは木くずを残したままのものもあったので、基準化も必要であった。そこで、災害廃棄物由来の分別土の特性化と有効利用に関する研究も行っている。これについては、分別した土の供給体制や品質、土木的な沈下や安定性、将来の維持管理、有害物質や環境への影響などが重要

になる。

図7は、岩手県での災害廃棄物分別土砂のデータの例である。最初に測定するのは土粒子密度である。それから強熱減量である。これは、廃棄物等が残っていないかを見るデータである。全体的に見て普通の土と変わらないものであるということ、データを比較することにより明らかにしている。ただ、改質剤を使っている地区によっては若干違ったデータも出ているので、分別土の品質に及ぼす影響因子を整理している。

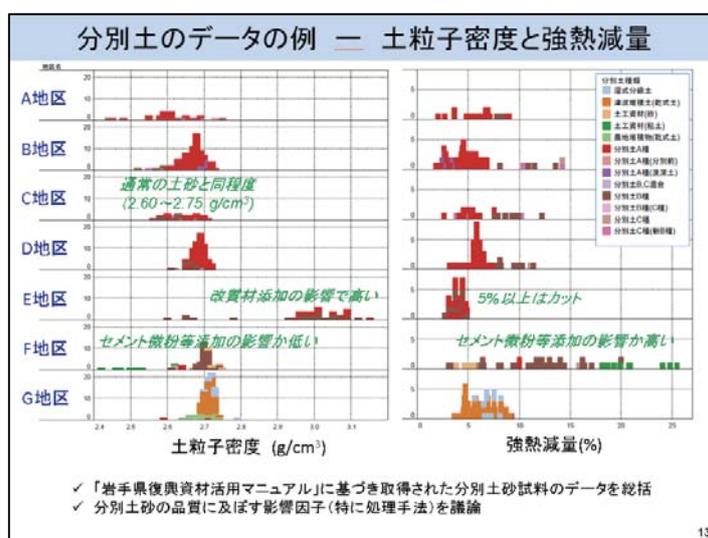


図7

机上や実験室でこのようなデータが出てきても、実際に現場で廃棄物由来のものは使いにくい。どのようにして技術を社会に浸透させるかであるが、この復興資材の活用を促進する取組について学会から提言を出したり、あるいは90ページほどの技術指針を出したりした。この技術指針では、災害廃棄物由来の土で復興材料として使われるものには、当然低濃度の重金属を含む土があるが、これを処分せずに管理しながら復興工事に利用するスキームをこのガイドラインの中で提案をさせていただいた(図8)。

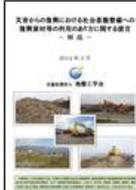
このような自然由来の重金属を含有している土の対応は(以前は余り自然由来の重金属等を気にしなくてもよかったのだが)、例えば、これまではトンネルを掘って出てきた土などは別の現場で利用したり、タイミングが合わなければ仮置き場やストックヤードに置いていた。土の中に含まれる重金属などを考えることになると、全てが基準超過をしているわけではないので、基準超過の土とそうでないものとを分けて、基準超過してないものについては通常的环境下で使う。基準超過しているものについては、先ほどの遮水シートで被覆するか吸着層を設けて管理型盛土にする。ただ、現場ではできるだけこの量を減らして、かつトンネル掘削工事にも影響なく進めていくことが求められているので、自然由来の重金属等の問題を考えると、このプロジェクト自体が複雑になってくる。

復興資材活用促進に関する取り組み・マニュアル化

1. 災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言 (2014年3月)
 災害廃棄物再生資材の利用の促進とそのため課題・取り組みを整理

2. 災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン (2014年10月)

- ✓ 分別土砂の利用方法を技術的に整理
- ✓ 低濃度重金属等含有土について、管理しながら利用するスキームを提案
 → 建設発生土の問題にも展開可能
- ✓ 上記いずれも国立環境研究所受託の地盤工学会「復興資材提言委員会」による。
 - 本研究チームが主力メンバーとして参画
 - 岩手県、宮城県、福島県、復興庁、国土交通省、農林水産省、環境省等が参画
 - 学会HPにて無料公開
 - 「放射性汚染土壌」にも展開できないか



上記1の表紙



左記2の表紙

14

図8

また、この掘ってきた土の有害性の判定をどのように行うのかということについても、実は試行錯誤によって行われている。判定結果が出るまでストックヤードに置いておかなければいけないが、保管場所や運搬による交通渋滞の問題などが出てくる。さらに、管理手法、モニタリング手法、安全性の担保も重要で、それらも含めて土を安全に回して、かつ安く処理していくことも重要だと考えている。それが社会的のニーズでもあると考えている。

この発生土だが、比較的低濃度の自然由来の汚染物が多いということが問題である。その汚染判定の基準自体はバッチ試験で行っており（もちろん研究的にはいろいろな試験方法が行われているが）、この有害性の判定、評価は単一試験、単一値による白黒判定になっている。

この試験は、材料がどのような環境に置かれるかということを考慮した試験になっていないという課題がある。地下水より上の盛土として使われる場合と、地下水より下の埋め戻しで使われる場合とではやはり地下水への影響、あるいは周りへの影響も違う。このようなことが考慮されていないことも問題で、もう少し科学的に説明できないかと考えている。さらに、それを科学的に説明するための試験自体が難しくなっていくので、簡単な現場的な試験方法も開発しないといけない。これらのことを、学会のメンバーも実施している。現在、その学会のメンバーを中心にISOのTC190（地盤環境）で、土の有害性判定やプロト試験方法に貢献している。基準から判断して低濃度の汚染土壌（といっても基準は超過してる）使用の合理性が科学的に説明はできても、そのことが社会的に受容されるかということも非常に重要である。それは盛土をつくる施工者、管理者側の問題でもある。そういう社会受容性についてもブレイクスルーをしていかないといけないと感じている（図9）。

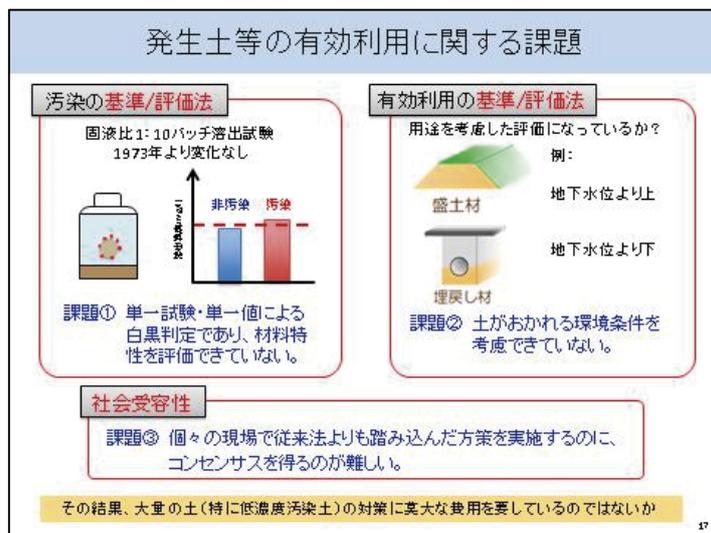


図9

もちろん、そのような土があれば浄化をすればいいとか、有効利用の技術を進めていけばいいなどの意見はある。そのような浄化試験、有効利用の技術開発や低コスト化は実施されており、さらに行われていく必要はあると思うが、どのように評価するのか、汚染自体の評価あるいは有効利用環境での評価も重要である。さらに、社会との関わりについても学会のメンバーでは議論している（図10）。

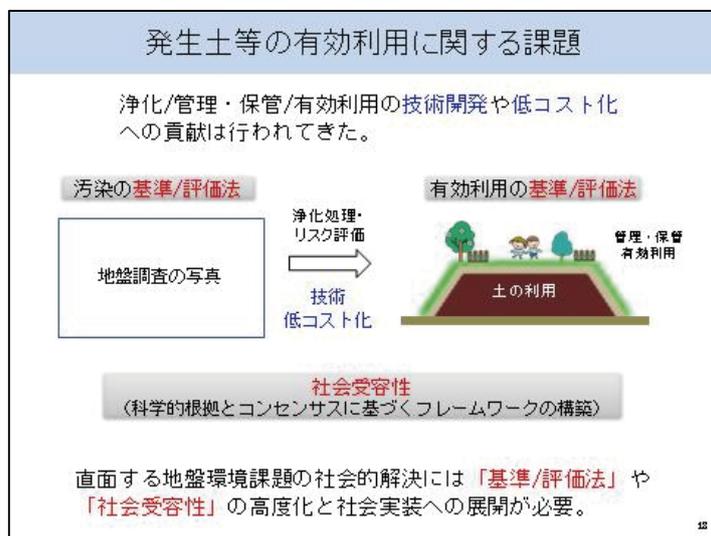


図10

もともと建設後の土や土以外の材料のリサイクルは、メリットのある材料の使用を現場レベルでやっていたが、少し広がって地域レベルで廃棄物の量を減らす、そしてもっと全体を見て国土整備のあり方の中でリサイクルを建設技術そのものの中に入れていくというような動きに変化していったと感じている。

環境規制、技術、意識が発展はしてきた。今後は、汚染物質を管理しつつ土や土地を使うというような方向性、そういった技術あるいはシステムの開発が必要だと考えている。

[質疑応答]

Q：地盤の中に入ってしまった杭の評価の仕方が難しいという話があったと思うが、それは方法がないのか。それとも、装置が高いなどの別の理由なのか。もう一点。最近IoTの利用を考えたときに、マテリアルにセンサーを埋め込んで測ろうという技術開発はかなりしているわけだが、例えば、ビッグデータからわかるようなことがないのか。それとも、そういった研究開発は全然されていないのか。

A：まずなぜ難しいかということだが、地面の中なので見えないということである。もう一つは、私の認識ではおそらく建設工事は規模が大きいので余りお金をかけたくない、できるだけ安くやりたいというところがあると思う。それがクリアできればいいが、地面の下の問題は、最初の地層の図が正しいかどうかということも問題で、それは、点のデータから面を埋めているので、その情報をどうやって正しいものに見える化していくかということが大事である。

環境エネルギー分野とは少し関係ないかもしれないが、今、大都市圏では地盤の地質のデータをデータベース化して共有財産にする動きがある。よって、ある程度大都市圏では地層構造は大きな視点では見えるようになってきている。ただ、狭いところで作ることになると限界がある。

Q：トレーサビリティが確立しているとリスクコミュニケーションがしやすかったり、どこからきたものでどのようなものなのかを伝えやすいと感じる。先ほど1973年から変わってないとの話があったが、結局、方法論としてニーズは現場にはあるということなのか。その段階で研究開発が進まない理由は、コストを気にして、実はあまり必要とされていないのではないか。どのような原因で研究開発が進まないのかについても、考えがあればお聞かせ願いたい。

A：まず規制の問題だと思う。1973年以来と言っているのは、あのような形で規制が始まったので、それを新しいものに変えていくということが非常に難しい。多分それを突破するだけのデータも必要だし、法制上のロジックも必要になってくる。かつ、社会にも受け入れられないといけないというところがあると思う。それから、当初の1973年は、土の人為汚染についての方法論から始まったと理解しているが、自然由来の重金属は岩種や土の種類、置かれる環境によっても違うので、そのようなことをあまり考慮できる試験ではないと、多くの方は認識している。データもある程度集まってきているので、そろそろ次の展開ができるのではないかと考えている。

5-3. 「分子認識材料を活用した環境対策技術」

木田敏之（大阪大学 大学院工学研究科 准教授）

有機化学の面から分子認識材料、簡単に言えば吸着剤、精密な吸着剤をつくることによって環境対策に貢献しようという研究について発表する。分子認識材料を用いた2つの有害物質、特に有機フッ素系の化合物とPCBを除去して回収する技術である。

私が最初に吸着剤、分子認識材料として着目したのは、シクロデキストリンという化合物である。この化合物の構造は図1のとおりである。ブドウ糖が環状につながっており、この輪のサイズは大体1nm以下で、この輪の中に形に合うもの、特に有機物質をいろいろ取り込むという性質がある。

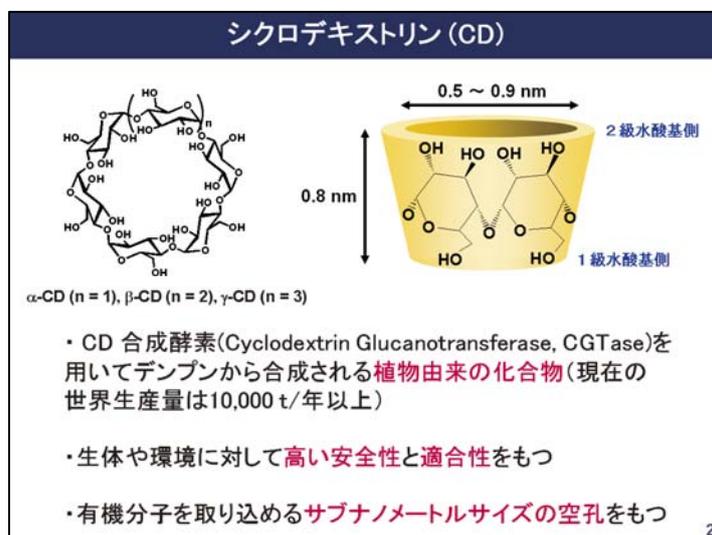


図1

このシクロデキストリンが非常に良いのは、我々が食べることができることである。そして環境に対しても安全性がある。つまりカーボンニュートラルな化合物である。このシクロデキストリンは、これまでさまざまな分野で応用されてきた。特に馴染みがあるのは、チューブ入りのわさびである。このわさびの辛みの成分であるアリルイソチオシアネートは揮発し易い。通常、わさびはしばらくするとツーンとする成分が揮発してしまい辛みを感じなくなるが、これをシクロデキストリンの穴の中に入れておくと揮発が抑えられ、このまま保存できる。そしてもう一つのシクロデキストリンの特徴として、口の中に入れると、唾液と交換してわさびのツーンとする成分が出てくる。これによって揮発性の高いものなどを長期保有することが可能となっている。

また、消臭剤にもこのシクロデキストリンは使われている。匂いの物質をこの中に閉じ込める。匂いは、我々の鼻腔最上部の粘膜に溶け込むことによって感知するが、それを鼻腔ではなくシクロデキストリンの穴の中に入れて床の上に落とす。匂いのもと（悪臭物質）を中に入れて匂わなくするというような役目もしている。このように食品や医薬品あるいは化粧品分野で非常に幅広く用いられている。

シクロデキストリンが環境分野でどのように役に立つのか。シクロデキストリンは水によく溶けるの

で、水の中に入れて分離するのは非常に大変だが、合成化学の力でシクロデキストリン自身を水に不溶化する。方法は2つあり、一つは架橋型と呼ばれるもので、シクロデキストリンを図2のように架橋剤と反応させることでポリマー化する方法である。もう一つは、ポリスチレンのような粒子の上にシクロデキストリンを担持する方法である。このような手法によってシクロデキストリンを水に不溶化する。不溶化によって、例えば、水の中の有害物質を捕まえた後、濾過などの簡単な操作で除くことができるようになる。

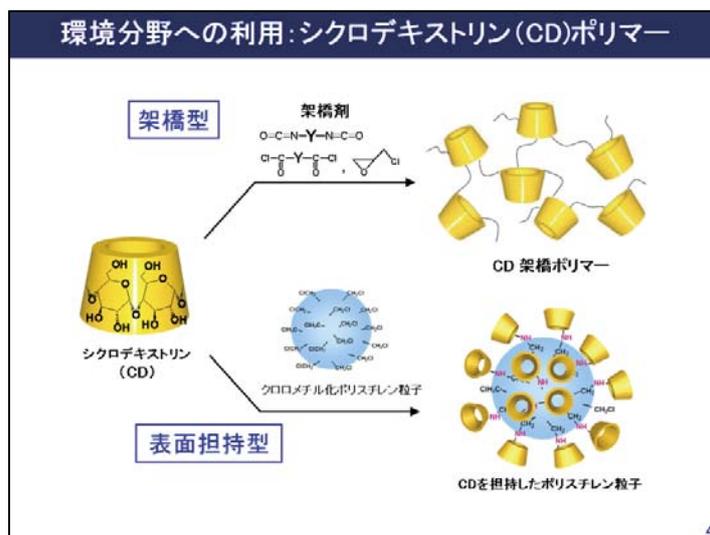


図2

このシクロデキストリンのポリマーを用いた研究を紹介する。有機フッ素化合物であるパーフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) やパーフルオロオクタン酸 (PFOA) は、フッ素系乳化剤である。この乳化剤は非常に性能が高く、まず分解しないし揮発もしない。そして水や油をはじく効果が非常に高い。例えば、スキーに行くときにこれが入ったスプレーを吹き付けておくとまず水を通さない。あるいは、絨毯などにコーヒーこぼしてもすぐふき取るだけで絨毯が汚れない。つまり、撥水撥油があるということによって非常によく使われてきた。しかし、人間がつくった化合物であり、環境中に排出すると微生物の力では分解できない。環境中への残留性が危惧されることから、1999年にこのPFOSとPFOAの製造がメーカーによって自主的に中止された。

それ以後は、これらの化合物の代替物として、アルキル鎖を少し短くした有機フッ素化合物が用いられるようになった。これらの有機フッ素化合物もまた環境中への残留性が懸念されることから、排水中から完璧に取り除く手法が求められている。

そこで、我々が使ったのが先ほどのシクロデキストリンである。これをポリマー化したものや粒子の上に担持させたものを使用する。非常に簡単なモデル実験ではあるが、1000 ppmのフッ素系界面活性剤を含む水から6割以上は確実に除去できた。つまり、入れて攪拌して濾過するだけで除去できることがわかった (図3)。

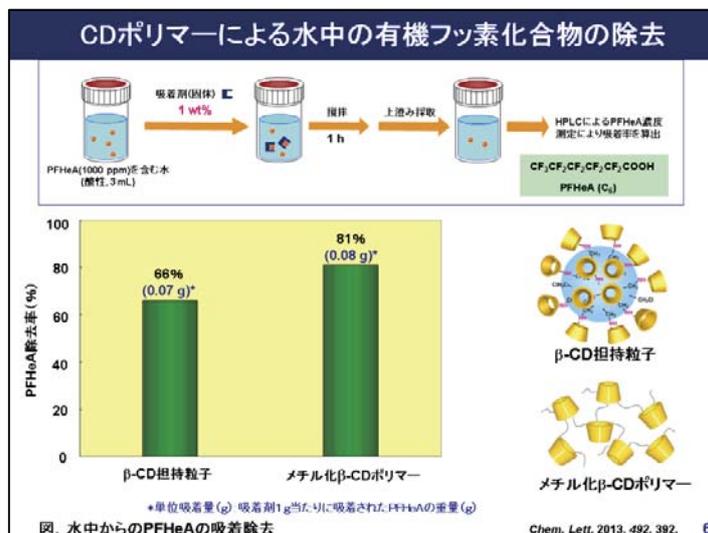


図3

予備実験でここまでわかったが、単純にこのフッ素系界面活性剤だけを排水中から除くのであれば、今までのイオン交換樹脂や活性炭といった安価な吸着剤に実用上勝てない。そこで、シクロデキストリンの放出能を利用するため、シクロデキストリンをポリマー化した。

まず、排水中のフッ素系界面活性剤をシクロデキストリンの穴の中に入れて水から除く。その後、このポリマーをアセトンなどの有機溶剤、あるいはアルカリの水溶液などで洗ってやれば簡単にこのフッ素系界面活性剤が穴から出てくる。アセトンを留去することでフッ素系界面活性剤が再利用可能となる。フッ素系界面活性剤を取り出した後のシクロデキストリンの穴も空になり、ポリマーが再利用可能となる。このようなことができれば高効率、かつ低コストでフッ素系界面活性剤を処理できる。すなわち、従来の活性炭やイオン交換樹脂に代わる新しい排水処理剤として、シクロデキストリンポリマーが利用できると考えた。

実際に約200ppmのフッ素系界面活性剤を含む排水を使用して、このシクロデキストリンポリマーにどのくらいの除去性能があるか、またシクロデキストリンポリマーをリサイクルできるかを調べる実験を行った。1回目はフッ素系界面活性剤をほぼ100%除去できた。次に、アセトンで洗うことによってまたこの吸着剤の穴の中を空にし、フッ素系界面活性剤を回収する。これを繰り返すと、2回目もほぼ100%、15回やっても性能の低下なくシクロデキストリンポリマーを再利用できることがわかった。

また、吸着剤の中に入っているフッ素系界面活性剤を何%回収できるかについても調べた。1サイクル目の回収率は3%であったが、この回収サイクルを何回か繰り返していくうちにだんだん回収率100%に近づき、7サイクル以降では100%回収することができた。フッ素系界面活性剤は非常に高価であるので、回収することによって処理コストを下げるができる。

さらに、有害物質の除去として、油の中に混入している厄介な化合物であるPCBの除去についても紹介する。PCBは50年ほど前には夢の化合物とされていた。電気絶縁性が優れている、燃えない、化学的に安定であるということで、例えば、電信柱の銅線の中にこれを入れておけば長持ちする、分解もしない絶縁媒体として使われていたが、1968年にカネミ油症事件が起こり、夢の化合物から一転して悪の根

源になってしまった。そこから製造中止となり、このPCB自身低温で燃やすとダイオキシンを発生するというので、30年間このPCBは未処理のままで電力会社を中心に保管されてきた。

しかし、2001年にPCB特別措置法ができ、現在はいろいろな処理法が確立されている。その一つとして化学処理技術が確立されているが、処理に多大な時間とエネルギーが必要であり、なかなか進まない。一方で、日本では2027年までにPCB全廃が義務付けられた。特に低濃度のPCBが入った油は、まだ大量に保管されており、これを何とか処理することができないかということである。また、世界的なレベルでもストックホルム条約により2028年までにPCBの処理を終えることが決められている。

このPCBの除去にシクロデキストリンを使用することを考えた。油の中の微量のPCBだけをうまくシクロデキストリンの中に入れて除いてやれば、残りの油は無害になり再利用も可能となる。合成化学の力を駆使してチャレンジし、シクロデキストリンをポリマー化することでPCBを確実に除くことができるようになった(図4)。

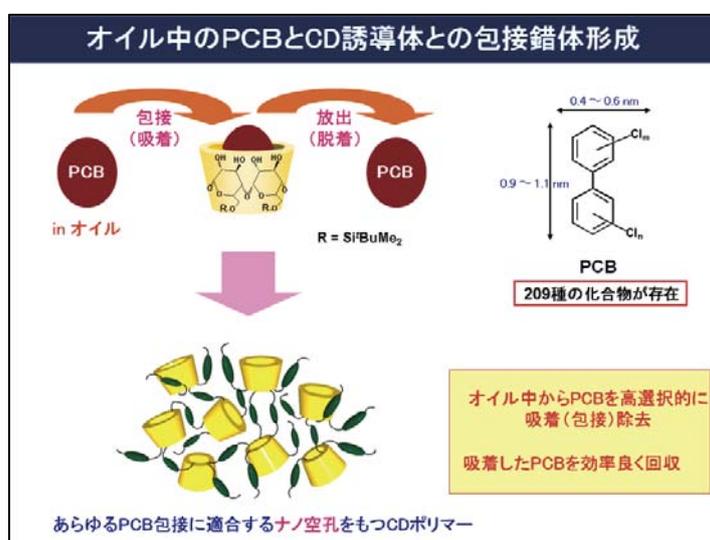


図4

簡単なバッチ試験を行った。PCBが入った油の中に、ポリマー化していないシクロデキストリンとポリマー化したもの別々に加えて攪拌・分離し、油中のPCB濃度を測定した。すると、ポリマー化したシクロデキストリンの方は100%PCBを除去できた。低分子の段階ではなかなか除去できないが、ポリマー化することによって確実にPCBを除けることがわかった。

この結果を利用して、カラムの中にシクロデキストリンのポリマーを入れ、ここに低濃度のPCBで汚染された油を流すと、PCBだけがうまくシクロデキストリンの穴の中に入り連続的にPCBを除去できる。カラムから出てくるのはPCBを含まない油なので、再利用したり安全に燃やすことができる。

もう一つのシクロデキストリンの特徴として、除去したPCBを少量の溶剤、例えばアセトンなどで洗ってやれば高度に濃縮された液としてPCBをシクロデキストリンの穴から取り出すことができる。低濃度PCBで汚染された油は50万t以上と言われているが、本技術を用いることで、その100分の1ぐらいに減量化することができる。これは現行の処理法で処理するしかないが、量が大幅に減っているので省エネルギーにつながる(図5)。

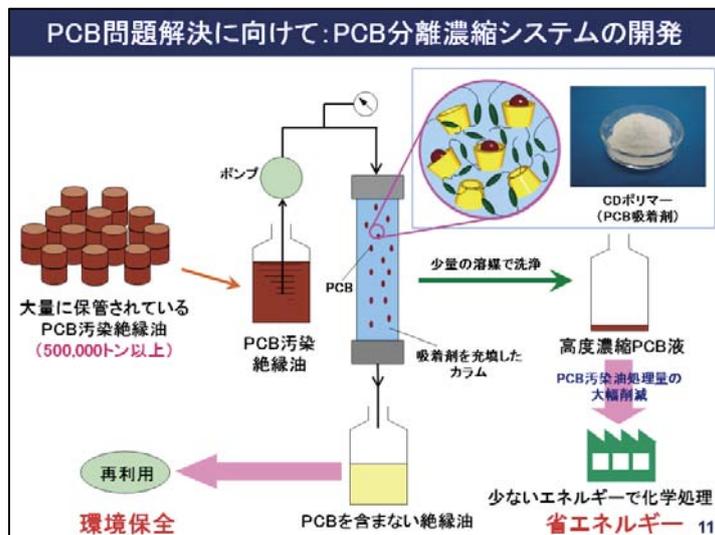


図5

このようなPCBの分離濃縮システムを早期実用化するために、いろいろ検討してきた。図6は2年前に行った実験である。実際にPCBが混入した油からのPCB除去も重要であるが、PCBが付着した筐体を有機溶剤で洗うことにより出てきた溶剤からのPCBの除去も重要になってくる。両方の場合においてシクロデキストリンのカラムを用いることでPCBを確実に除けるということがわかった。2～3年後の実用化を目指している。

PCB除去技術の実証試験 (株)ネオストとの共同研究

試験日: 2013年7月～9月 試験場所: 東京電力(株)川崎リサイクルセンター

● **PCB汚染絶縁油中からのPCB除去試験**
PCB (3.3 ppm) で汚染された絶縁油 (18 kg) からのPCB除去試験を実施

除去装置 恒温槽内部(カラム3本)

2015年2月 環境省の技術認定取得
2015年10月 JST委託開発成功認定

2～3年後に実用化予定

● **PCB汚染溶剤中からのPCB除去試験**
PCB (0.78 ppm) で汚染された溶剤 (37.5 kg) からのPCB除去試験を実施

除去装置 恒温槽内部(カラム3本)

処理前 (PCB濃度: 0.78 ppm) 処理後 (PCB濃度: <5 ppb)

13

図6

分野の動向としては、高分子を使った吸着材として一般には膜が知られている。特に水処理用の膜としては4種類ある。よく知られているのは海水の淡水化などを行うための逆浸透膜 (RO膜) である。操

作が簡便であり、かつ装置を小型化することができる、そして連続的に分離ができるということで、環境負荷が少なく省エネルギー型であると言われている。

このような膜は、二次元で膜に空いている孔のサイズによって有害物質を分離する役目をしている。それに対して、三次元的に孔を持たせた例がある。よく知られているのは、活性炭、シリカゲル、アルミナである。三次元的な孔によりバラエティに富む有害物質を除去しようとする研究がより進んでおり、現在は主流となっている。例えば、シリカゲルを空間的に均一化あるいは精密制御することによってつくったメソポーラスシリカや、多孔性の金属錯体を使うことでより高度な分離性能をもつ吸着材を使う研究が最近の主流となっている（図7）。

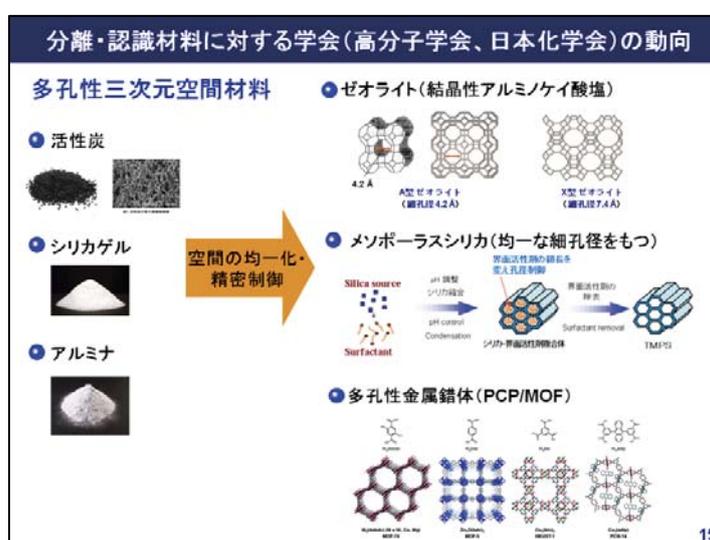


図7

このように、有害物質を取り込む空間を均一化し、そして精密制御によって分離・認識材料、吸着材を開発することで、例えば、蒸留操作などに置き換わるような物質分離あるいは除去技術が開発できるのではないかと考えている。これによって装置がかなりコンパクトになり、加熱の必要もなくなり、省エネルギーにつながるということである。

課題としては、高性能の分離材料が捕まえたものを放さないということである。実際に廃棄物をなくすことは可能なのであるが、リサイクルあるいはリユースという面がまだまだ不足している。また、原料がカーボンニュートラルな植物資源からはまだできていない。これらを果たしてどのようにして実現するかが課題となっている。このすべてを満たすような材料を開発することによって、環境保全に大きく貢献できると思っている（図8）。

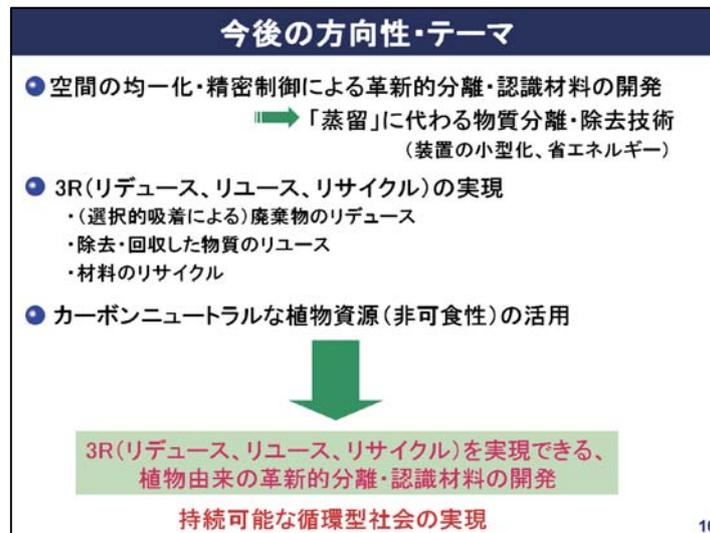


図8

[質疑応答]

Q: フッ素系界面活性剤で最初7回程度まで性能が出なかった理由と、シクロデキストリンはどれぐらい特異性を出せるのかをお聞かせ願いたい。

A: 回収の性能についてだが、シクロデキストリンをポリマー粒子上に担持させるのはアミノ基をベースにしている。フッ素系界面活性剤がシクロデキストリンのポケットに入る力は、水をはじく力である疎水性相互作用、フッ素系界面活性剤とシクロデキストリン間のファンデルワールス相互作用、のアミノ基とカルボキシル基間の静電相互作用という、3つの相互作用が考えられるが、この静電相互作用が強く効いているところは、溶剤による洗浄だけではフッ素系界面活性剤をなかなか回収できにくい。静電相互作用があまり効かないようなところでは回収性能が良いと考えている。よって、静電相互作用が強く働くポケットが埋まるまではなかなか取り出すことができないということである。シクロデキストリンの特異性だが、シクロデキストリンの空孔サイズはグルコースの数を変えることによって、 α 、 β 、 γ という構造があり、2Åレベルで直径を変えられるため、かなり特異性は高い。また、もう少しシクロデキストリンの孔のサイズを精密に制御するために、シクロデキストリン環を構成するグルコシド結合を1個切って、そこにいろいろな連結基を入れてつなげることに成功している。これによって除きたい化合物に構造を合わせてシクロデキストリンの輪を決めることができる。非常に選択性が上がる可能性がある。

Q: 異性体などを分離することは可能か。

A: 例えば、シスとトランスは基本的には構造はかなり変わっている。二重結合周りはかなりできている。シクロデキストリンもD体、L体の識別ができるようになっている。

Q: α 、 β 、 γ の3種類は、酵素を使ってシクロデキストリンをつくらうと言っていたが、きちんとコントロールできるのか。つくり分けできるのか。

A: つくり分けは既に工業化されている。会社から買うだけである。非常に安価である。 β は最も安くキロ1,500円程度から、 α 、 γ は少し高いが、3,000~4,000円程度である。

Q：シクロデキストリン学会での最先端の研究にはどのようなものがあるか。

A：私が実施していることが最先端だと認識している。例えば、シクロデキストリンという物質は水中でしか使えなかったのだが、油の中で使えるようにした。これがまさに油の中のPCBの吸着である。シクロデキストリンだけであれば油の中では作用しないが、適切に化学修飾することによって油の中でも働くようになった。あとは接着作用がある。シクロデキストリンの孔と相互作用しやすいものを表面に接着するのに役に立つということで使われている。それらが最先端である。

5-4. 「植物機能の多様性を利用した重金属回収と浄化技術の研究開発」

榎原均（名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授

／理化学研究所 環境資源科学研究センター 生産機能研究グループ グループディレクター）

理化学研究所の環境資源科学研究センター（CSRS）が掲げる研究プロジェクトの1つに金属元素の循環的利活用研究がある。そこでは、ケミストリーやバイオロジーなどのさまざまなアプローチで研究プロジェクトを行っている。その一つとして高機能触媒がある。例えば、ユビキタスな金属を使った高機能触媒を開発するものもある。もう一つが、資源回収・浄化技術である。中でも生物機能の多様性を活用した資源回収・環境浄化技術を研究している。

生物機能を利用した環境修復技術はバイオレメディエーションと言われている。その中でも植物機能を利用した方法を特にファイトレメディエーションと言う。ファイトレメディエーションの研究の歴史は古い。その起源は鉱山である。鉱山には通常とは違う植物相がある。それは、土壤中の金属イオン濃度が高く、そのようなところに耐性の低い植物は繁茂しないので、自然淘汰的に耐性を持つ植物のみが生き残っているからである。

さらに、その重金属耐性植物の中には排除型と蓄積型があり、排除型はとにかく排除して生き残っている。一方、蓄積型は生体内に金属を隔離するという手法で生き残っている。これを環境修復に利用しようということである。

これまでの研究対象は主に維管束植物であり、通常の植物を用いた研究や利用がされてきた。代表的なものにヒ素を蓄積するモエジマシダや、カドミウムを蓄積するヘビノネゴザがある。これらは有名ないわゆるハイパーアキュムレータと呼ばれるファイトレメディエーションに使える植物であるが、加えて、育種の過程で偶然見つかったカドミウムを蓄積するイネや、最近の分子生物学的、遺伝子工学的な手法を用いて遺伝子改変をすることによって有効な植物を創出する研究が行われてきた。これが世界の研究動向だが、余りその利用が広がっていないのが現実である。

一つ問題点としては、汚染土壌の回収・修復に非常に時間がかかることが挙げられる。根を張ってそこから地道に吸収させるため、数年～数十年という非常に気の長い話になるということと、もう一つは、やはり回収効率が低いことである。ハイパーアキュムレータは選択的に重金属を吸収濃縮することから実際に一部では利用されているものの、その後の処理が大変だということで広がっていかない。また、遺伝子改変植物になるとGMOに対してパブリックアクセプタンスもあり、なかなか進んでいかない。そこで、私たちは、コケの原糸体を用いて汚染水からの金属資源回収と汚染除去に焦点を当てようと考えた（図1）。

**植物機能の多様性を利用した金属資源回収と汚染除去
—ファイトレメディエーション—**

重金属耐性植物: 排除型 と 蓄積型

維管束植物

Pteris vittata (モエジマシダ)

Athyrium yokoscense (ヘビノネゴザ)

Cd-蓄積イネ

種々の遺伝子改変植物…

問題点:

回収・修復に時間がかかる (数年~数十年)

回収効率が低い (ただし低コスト)

GMOに対するパブリックアクセプタンス

我々の戦略:

コケ原系体を用いて産業廃水・汚染水からの金属資源の回収と汚染除去に焦点を当てる



Pteris vittata (As)



Athyrium yokoscense (Cd)

図1

なぜコケなのかというと、コケは通常の土壌に生えずに岩肌などに生育するという事実と、植物の中では地球の進化の中で一番最初に陸上に上がってきた植物種ということで、さまざまな変わった性質を持っていることに着目したからである。非常に過酷な条件で成育できる種が幾つか知られている。図2に代表的なものを幾つか挙げる。ヒョウタンゴケは鉛に対して非常に耐性を持つ。ホンモンジゴケは銅や鉛である。そういったものが通常の植物では死んでしまうようなところで生きることができる。ホンモンジゴケなどは銅ぶき屋根の下でしか生きられない。このようなものを何か利用できないかと考えた。

**-注目される生物群(コケ植物)と報告されている蓄積及び耐性金属種-
重金属蓄積・耐性を有するコケ植物(蘚類および苔類)の概要一覧**

	種名	蓄積金属種	
蘚類	ヒョウタンゴケ <i>Funaria hygrometrica</i>	鉛、金	 ホンモンジゴケ
	ホンモンジゴケ <i>Scopelophila cataractae</i>	銅、鉛	
	イワマセンボンゴケ <i>Scopelophila ligulata</i>	鉄、銅	
	フサゴケ <i>Rhyidiadelphus squarrosus</i>	カドミウム	 チャツボミゴケ
苔類	チャツボミゴケ <i>Jungermannia vulcanicola</i>	水銀、ヒ素	
	ムラサキヒシヤクゴケ <i>Scapania undulata</i>	水銀、ヒ素	

ポイント: コケ植物の植物機能の多様性は、未開拓なバイオリーソース・遺伝子資源

図2

通常、コケはなかなか成長しない、成長が遅いというイメージがある。ただ、そのコケの生活環を見ると、茎葉体が胞子をつくり、胞子が発芽し原系体、糸状の状態になる。これは藻類と一緒にある。よ

って、液体培養ができるし、藻類ほどではないが藻類に決して劣らない増殖速度を持っている。このような液体大量培養系の開発にも成功しており、藻類と同じように扱える生物材料だといえる。

10年程前にヒョウタンゴケ（これは廃棄物処理場の焼却灰等が捨ててあるようなところに繁茂しているコケである）を採取して、いろいろな性質を調べていくと、このヒョウタンゴケが鉛に対してものすごい蓄積能力を持っていることを発見した。このコケは、0.5mMの鉛を含む土でも生き残る。また、乾物重量で70%分は鉛であるというような蓄積能力がある（図3）。

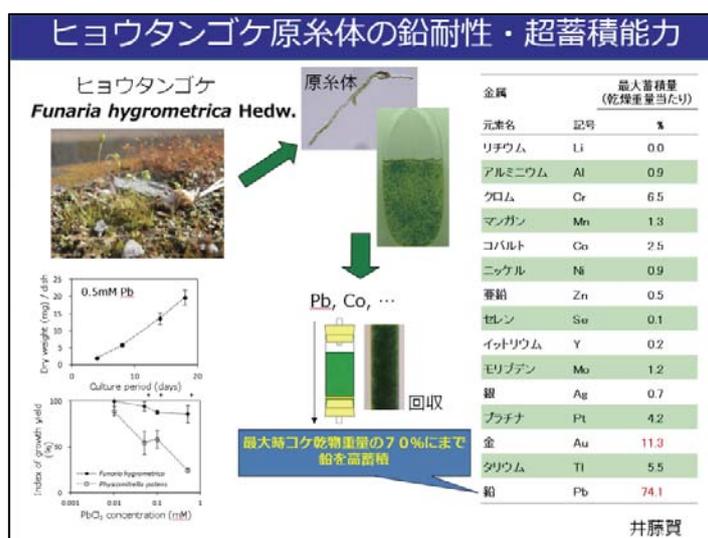


図3

蓄積は細胞壁で起こっており、細胞壁に吸着能力がある。つまり、細胞壁だけを取り出しても鉛は吸着される。ヒョウタンゴケは鉛を細胞の中に取り込んで排出し、細胞壁でトラップされて蓄積をしているということがわかってきた。

その蓄積能力は桁違いだったので、企業と連携して性質を調べた。例えば、様々なpHでどれぐらい回収能力があるかを調べた。結果、鉛以外でも白金族の金属イオンを幅広いpHで捕捉する性質を持つということがわかった。

性質としては面白いが、金属回収に関しては従来技術が確立されているのでアドバンテージがないと単に面白いだけで終わってしまう。ただ、例えば、キレート剤と比較しても、鉛、金などに対する吸着性能は決して負けてはいない。幅広いpHで吸着する能力をヒョウタンゴケの細胞壁成分が持っているということがわかっている。また、吸着速度についても、キレート樹脂やイオン交換樹脂に比べてコケ由来の材料の方が優れている。pHやイオン強度の与える影響について調べた。pHの影響に関してはキレート樹脂よりも優れている。また、塩類の影響に関してはイオン交換樹脂よりも優れている。これらから、決してこれまでの既存の材料に対しても劣るものではないということがわかってきた。

さらに、複数の混合液中や強酸性の条件においても、スカンジウムや水銀イオンを特異的に吸着するということがわかった（図4）。

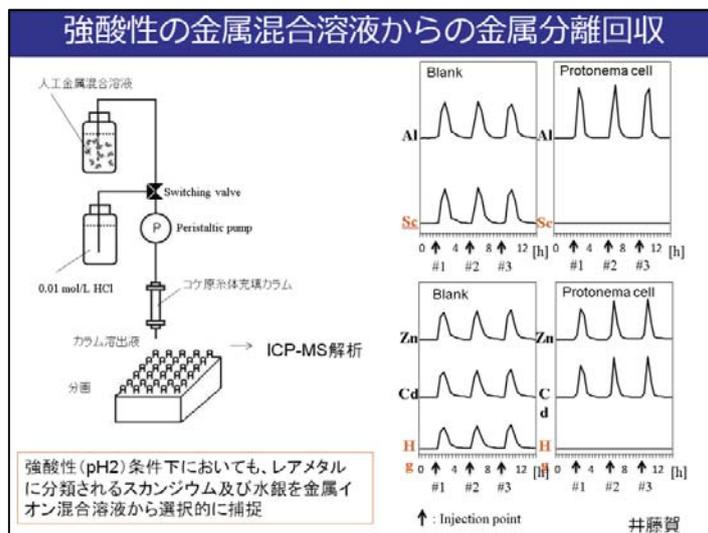


図4

理化学研究所は重イオンビームの照射技術を持っているため、金属特異性を変えようと人為的に変異を導入したライブラリをつくり、その中から有用なミュータントを得ようとしたが、金属特異性に関するものは得られなかった。しかし、非常に沈殿が早く遠心分離をしなくても置いておくだけで簡単に固液分離ができるものも取れた。ということで、これは生物由来の環境除去技術に資する材料になるのではないかと考えた。

金イオンについて。自然界で金がイオン状態で存在することはほとんどないと思うが、例えば、産業廃棄物の金メッキ廃液などではイオン状態で存在することもある。これはかなり人工的な例だが、コケにイオン溶液をさらすと色がグリーンからワインレッドに変わる。何が起きているかという、これは葉緑体がワインレッドになっており、葉緑体で金イオンが凝集してナノコロイド状になっていることがわかった。そこから、コケを燃やして金が製錬できることもわかった。実際どれぐらいの径の金粒子があるのか調べてみると、大体径が10nm程度であった。そうすると、例えば、化学触媒として利用可能と考えており、これも少し実験を始めている。

また、先ほどお話したハウモンジゴケに関して。このコケは通常の植物ではとても生きられない濃度の銅イオン下で元気に生育するが、非常に高濃度の銅を細胞壁に蓄積することがわかっており、その耐性の原因となる遺伝子をゲノム情報の解析から最近同定することができた。そのうちの1つはトランスポーターであった。これを高等植物に導入すると、これを導入した植物は銅イオンに対して耐性を示すこともわかってきている。つまり、遺伝子解析の研究からも、このような変わった植物の耐性に関わる原因遺伝子がわかる局面になってきている。

ここまでコケの性質を示してきたが、これを実際に応用に使えないと学術研究の域を出ないので、現在のところ企業などとも共同して、実際にこの原糸体が環境浄化技術に使えないかという実証試験を少しずつ始めている。鉱山の排水地で鉱排水を採取し、コケ原糸体を用いて作製したプロトタイプの除去装置にかけると、銅や鉛などがかなり選択的に除去できる。これは実際の実坑排水を使っているので、このようなものに対しての除去材料として役に立つということを少しずつ証明している。

化学触媒への応用に関しては、収量が低いのでいろいろ検討中ではあるが、ホモカップリング反応の触媒として、コケそのものを反応液の中に入れて化学触媒の役割を果たすというようなことがわかってきている。

結論として、重金属蓄積植物を選び、一つは基礎研究を行うことで重金属耐性や蓄積機構の解明、どういった遺伝子の変化でこのような機能を獲得したかというようなアウトプットが出せる。また、実際に産業界と連携をして環境浄化の材料として応用的なアウトプットも期待できると考えている（図5）。

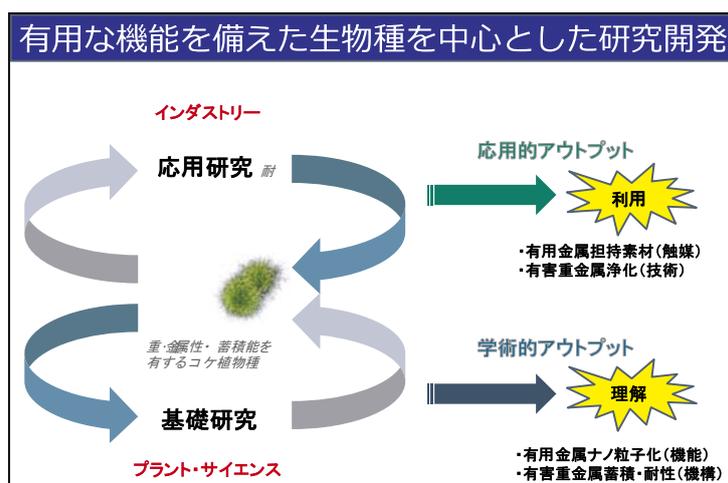


図5

最後に、この分野の研究動向を紹介する。今はほとんどが維管束植物の研究が中心で、汚染土壌を対象にしている。工学系の人とのコラボレーションが必須であるが、工学系の方は根も葉もあるような複雑な形をしている植物だとどうしても相手にしにくい。藻類などと同等の生き物であれば、工学や産業系の人も興味を示してもらえる。我々はかなり変わった研究をしているが、そのためこれまでブレイクスルーができなかった植物を用いた環境浄化技術を発展させていけるのではないかと考えている。

今のところ学術研究ではやはりトランスポーターそのものの基礎研究が中心で、なかなか産業界とのインタラクションがないのが現状である。一部のものは比較ゲノミクスなどで原因となる重要遺伝子もとられてきているが、これもやはり基礎研究の領域を出ていない。ファイトレメディエーションの大型プロジェクトも今のところ世界を見ても行われていない。

いかに生物の材料を植物科学研究者が創出して提供できるか、そして、実際にそれが役に立つか、しかも、研究に発展させることができるかがポイントだと思う。

ここでは細胞壁成分が蓄積、吸着をしていると説明したが、実はその細胞壁の構造は非常に多様かつ複雑で、セルロースとヘミセルロースが入り組んだような、しかも生物によってそれが違うといった状況である。細胞壁の研究は非常に難しいし、いろいろなアプローチが必要である。だから、様々な研究分野の方が入ってくることがこの蓄積メカニズムを解明するためには重要であると思う。遺伝子改変技術に関しては、もし利用するのであれば社会の理解が必要であろう。また、生物学と工学・化学との融合研究をさらに進める必要がある。

今後の方向性としては、これまではモデル生物が中心であったが、これから変った生物の研究へ発展させることが重要である。いわゆる進化の選択圧で有用遺伝子の宝庫だと思われるので、このような研究がこれから発展していくと思われる。

今後のテーマとしては、工業排水のみならず、海洋中だと非常に薄い濃度ではあるが、このようなところから有用資源を回収する技術というのも可能性があるのかもしれない。また、実際に役に立つ場面は、アジアや南米などこれからインフラをつくるようなところであれば、このような技術は安価になるので、役に立っていけるのではないかと考えている。

[質疑応答]

Q: コケの場合は問題ないと思うが、一般的なファイトレメディエーションについて少し疑問があるのは、生物濃縮で問題がないかということである。虫が食べて鳥が食べてということで高次の生物へ移行してしまう。

A: 花を咲かせて種をつける維管束植物であると、植物類は管理していてもそれがあある期間に濃縮されて他の生き物が食べてしまえばそこからまた広がってしまう。そういう点では、ファイトレメディエーションには様々なケアしなければいけない点はあると思うが、このコケの原糸体の場合は、かなりコントロールできる環境下で除去を行うことを視野に置いて研究を進めている。

Q: 蓄積させた後の回収の際に固液分離性はすごく重要だと思う。また、蓄積した金属を脱離するのは容易か。

A: 固液分離のところは、変異体で放っておいても沈殿するようなコケも一応は取れている。5分置いておくと普通の原糸体はそのままなのであるが、ほぼ沈殿するようなものも取れている。脱離に関しては、やろうと思えば非常に低いpHにすることで割合は脱離してくることはわかっている。ただ、コケ原糸体中にかなり高い含量で蓄積するので、そのまま燃やしてしまえば回収できるという話になっている。

Q: このコケは日本でないと育たないのか、海外でも育つのか。そして、この性能は何か一般解まで落とし込まれていて、その解を海外のコケに移植できる可能性はあるのか。

A: コケのうちの多くものはコスモポリタン種であり、あらゆる大陸に共通したコケが自生している。ここで紹介したヒョウタンゴケもそうであるし、ホンモンジゴケも日本の名前がついているが、海外でも同じ種のコケは存在する。ただ、本当に同じような性質を持つかどうかに関しては、生きている生態系が違うので、まだ検証されていない状態である。こういった視点でコケを研究している人口は非常に少ないので、これがコケ植物全体にわたる性質なのか、本日紹介したほんの数種のコケにだけ見られることなのかということに関しては、まだまだ研究を進めていかないといけないということになる。

5-5. 「界面微生物工学によるゲームチェンジング環境バイオテクノロジー」

堀克敏（名古屋大学 大学院工学研究科 教授）

私の専門は微生物である。微生物とヒトとの関わりでは、感染症がある。昨年の大村先生のノーベル賞で地道な微生物の研究も再評価されたことで非常に喜んでいる。私自身も微生物の研究者ということで、一般向けの講演を依頼される件数が増えており、少し追い風になっていると思う。

薬の生産はもちろん、昔から日本は微生物と発酵が強い。最近では、プロバイオティクスが盛んに研究されていると思う。一方、大問題が出てきたのは、抗生物質耐性細菌が環境に広がっていることである。耐性菌に感染した重篤患者の致死率は欧州先進国でも25%を超えていて、微生物学者は非常に危機感を持っている。耐性菌問題に関するアジア・太平洋地域の関係閣僚会議を、2016年4月に日本で開くと、厚生労働相が表明しており、やっと認識がそこまで来たかという感がある。抗生物質を人間に使うのは、使いすぎだといっても命に関わるのでやむを得ないところはある。問題なのは畜産や養殖に多量に使われていて、それが環境中に広がっているということであるが、直ちに無くしたら食料高騰の危機などが問題になる。しかし、いつまでも続けられないので、代替技術が非常に重要であると思っている。このため、私の専門分野であるバイオフィルムを使って、人間でいうプロバイオティクスの動物や魚類版のようなものがないかと研究構想を練っている。

従来からの問題として、地球温暖化がある。シェールガス革命、昨今の原油安、また、日本の原発事故は温暖化問題にとって向かい風になっている。一方、中国やインドの大気汚染、それが越境汚染していくことも非常に問題になっている。また、東南アジアの排水処理施設の多くはオープンポンドで、メタンが多量に発生している。このメタン発酵によってエネルギーを回収したいが、現地にお金がありませんため、そこで排出権取引を使ったらいいのではないかと思います。ただ、向こうの排水はパームオイル生産施設が多いため油の含有率が非常に高い。これはメタン発酵を阻害するため、このような油を分解、利用する技術が必要になってくる。後ろで詳細を述べるが、私のところでは、画期的な油分解技術を発明、既に試験販売も行っており、JSTのA-STEP（起業挑戦）にて普及と起業の準備をしている。

それから、生物多様性の急激な消失が問題となっている。2014年、エリザベス・コルバートという方が書いた「The sixth extinction」という書籍が、ニューヨーク・タイムズのブックレビューでベストブック10冊に選ばれて非常に話題に上っている。その中で、現在は地球史上6回目の大量絶滅ということを行っている。白亜紀の恐竜絶滅が1年に100種だったのだが、現在の絶滅スピードは1年に4万種だという。桁が2桁違うというとんでもない状況になっている。何千年後に地球人類がいるかどうかよくわからないが、あのとき人類が第6回目の絶滅をさせたのだということが地球史上でわかってしまう状況になっているとのことである。当然温暖化とも密接に関係しており、温暖化の速度に生物の移動や進化が追いついていないわけである。いろいろな対策はあると思うが、ある程度遺伝子資源の確保（これは根本的な解決ではないが）が必要である。失われていく生物資源は、このような観点での研究、保護も重要と考えている。

環境浄化と排水処理問題における企業の本音は、捨てるものにできる限りコストをかけたくないということである。だから、廃棄物処理・排水処理は低コストの技術でなければならない。付加価値を創造しないとイケない。エネルギーや資源を回収したり、余剰汚泥を減量したり有効利用したり、再生水を

利用したりすることは重要であるが、アンバランスが起きることが多いことも留意すべきである。例えば、水素を取れば炭素が残るし、メタン発酵で炭素を取ったら窒素が残る。結局、副産物あるいは廃棄物が出る。そこを考えないといけない。

オーストリアのStrass処理場の例がある。ここでは、完全にエネルギーの自給自足を達成しているだけでなく、余剰電力を売電している。今まで排水処理場ではエネルギーを使っていたが、もはや発電所が変わっている。この根幹の技術は、汚泥のメタン発酵とアナモックス菌という新しい窒素処理法(アンバランス解消のため窒素の処理は必須)、それから、化学工学的な分離技術であるサイクロン、加えてコージェネである。これらの要素技術で達成できた。既にヨーロッパではやっているのだから、技術的にできないことはない。

一方の水処理技術のインフラ輸出については、中国、東南アジアでは低コストでないと売れない。例えば、MBR膜の高機能化はコストがかかりすぎる。

バイオエタノール、これも非常に研究が盛んでかなり国費が投入されてきたと思う。確かにバイオ部分の研究、生体触媒の研究は進んだ。例えば、アーミング酵母(細胞表面提示)、メタボリックエンジニアリング、オミックス解析など、今でも盛んに研究されている。しかし、触媒はよくなっても、前処理と後処理とのインテグレーションの問題がある。つまり、これは化学工学の問題で、バイオでは解決困難だと思う。なので、米国ではほとんどのバイオエタノールのプロジェクトが終了または中止になっている。これはもちろんシェールガスがこの傾向に拍車をかけている面もある。日本でも補助金なしでは成り立たないということがわかっている。

最近では、バイオエタノールがバイオオイルへだいぶシフトしてきた。特に藻類を使った研究である。これはコンセプトとしてはCO₂から燃料をつくる、すなわちカーボンニュートラルで非常にいいわけだが、光合成の利用に限界がある。例えば、油を多くつくる微生物はMixotrophといって光エネルギーだけでやっているのではない。有機物を使っている。現に太陽電池の光エネルギー変換効率は、植物の光合成を超えており、二十数%ある。ということは、植物を超えていてもだめで、薄く広く供給される太陽エネルギーの利用が難しいということである。宇宙軌道に集光板でも上げなければだめだという話になる。それから、遮光の問題もある。例えば、光合成の光捕集アンテナの改良という研究もあるが、これで飛躍的に解決するとは到底思えない。

それで、私の専門のホワイトバイオテクノロジーというのは、微生物や酵素などの生体触媒によって化学物質を生産しようというものである。常温・常圧の反応プロセスなので、省エネであり、反応特異性が高く無駄がなく、副産物が減少し、通常の人工触媒では難しい反応、部位・立体特異的反応が可能であるため工程が簡略化できる。欠点としては、まずコストがかかることである。触媒の生産コストがかかる。また、反応効率・速度が遅い。常温・常圧がかえって不利になる。それから、脆弱性があり、変動に弱く、何か少し原料が変動するとすぐ失活してしまう。さらに、攪拌や曝気・滅菌・冷却で意外とエネルギーを使っている。ということで実は汎用化学品ではアクリルアミドぐらいしか成功例がない。

ではどのような方向にいくかということ、今後はバイオマテリアルすなわちエコマテリアルといった方向性があるかと思う。生分解性ポリマー、バイオサーファクタント、多糖類の利用などがある。好例としては、最近、スパイバーというベンチャー企業が、蜘蛛の糸を蛋白質材料として実用化することに成功したが、これを可能にしたのは、蜘蛛ではなく組換え微生物に糸をつくらせるようにしたこと

ある。そのほか、有機・無機ハイブリッド材料がある。結晶性を制御することによって生分解性を制御することが可能である。適度な強度をもったいろいろな材料をつくる時に利用することができる。

米国では、シェールガスが出てきてからバイオエタノールをやめてシェールガスを何とか使用しようということになっており、今日の原油安も引き起こしている。シェールガス、つまりメタンだが、これを化学的にどうするか。いろいろな方法があるのだが、Gas to Liquid (GTL) といった液化技術が必須である。これは高温・高圧反応で、設備投資に非常にコストがかかる。そこで、米国ではメタンをメタノールにする技術が盛んに検討されており、バイオ関連だけで200億円程度使っている。巨大な国費を投入してアメリカは全力で取り組んでいるが、日本は少ない。CREST、さきがけで少しやっているが、果たしてアメリカに勝てるような、国際競争力で勝てるだけのお金を投じているかというところ少し疑問がある。私のところでの新しい取り組みは後述する。

では、環境バイオはどう進めばよいか。やはりバイオの特性をよく理解することが重要で、バイオを農業的視点で捉えるべきだと考える。大量生産には不向きなので、エネルギーや汎用化学品の生産は難しい。これをやるならゲームチェンジングが必要となる。バイオ利用で成功している典型例は農業と発酵食品であるためこれを見習うべきである。排水処理は確かに成り立っているが、よく考えると経済的な自立は難しく、税金や規制という形で社会がコストを負担している。よって、大量生産というよりはオンサイト・小規模生産、例えば、バイオエネルギーをつくるのであれば地産地消あるいは災害時のバックアップといった限られた用途ならばあり得る。

もちろん付加価値の高いものには使える。医薬品や健康食品などを生産するということである。また、安全・安心、リスク回避のためならば、多少高くても売れる。品質管理・資源管理のためのバイオ技術を適用すればよい。

廃棄物と排水処理とのインテグレーションが一つ要だと思う。エネルギーと資源回収を合わせる。また、高付加価値のプロダクトの生産で副産物や廃棄物が出るのでそれを利用する。これは、バイオエタノールなどが生き残る道だと思う。

重要なのが、プロセスの観点からの研究である。あまりに多くの研究が酵素や細胞の改良に集中しているので、前段階と後段階との連結がうまくいかない。つまり、前処理、後処理技術とどのように融合するかを考えていかないとバイオエタノールの二の舞になる。分離精製には脆弱な酵素よりは全細胞触媒を使った方が良く、連続・反復使用が可能な固定化技術は必須である。酵素も固定化すれば、バイオセンサーに利用できるのも、そのような視点が必要である。バイオと化学工業が融合させて、例えば、乳酸発酵で生産した乳酸を化学的に重合してポリ乳酸をつくるというようなことを増やしていくべきである。

他分野との融合である合成生物学が、非常に脚光を浴びている。ただ、言葉が先行して従来の遺伝子工学と全然変わらないことをやっている人も多い。ゲノム編集技術を利用して代謝経路を遮断するような、いわゆるメタボリックエンジニアとも区別すべきと思う。次世代シーケンサーでゲノム解析が容易になったので、ピンポイント破壊するよりもランダムにやっ全部読んでしまうという方向も出てきている。合成生物学というからには、宿主が本来有していない全く違う代謝経路を導入しなければならないと思う。もちろん単なる組換え蛋白質生産とは異なる。最終的には人工細胞の構築を目指すのが合成生物学だと思う。

それから、人工共生系とハイブリッド技術、これは人工生態系や野菜工場はそれに近い。宇宙居住なども少しずつ脚光を浴びてきている。水素社会へのバイオの貢献では、供給源としてのバイオマス、水素の貯蔵・運搬が重要課題として挙げられる。

新しいものも出てきている。MITのMedia Labで、Dr.Oxmanという方がつくったものを例としてあげる。キトサンを材料に3Dプリンターにより作った衣装やパビリオンなどがある。衣装は、大腸の形状を模倣しており、中に光合成細菌を入れ、光合成をする服となっている。

ここから私の研究内容を紹介する。接着蛋白質AtaAというものを発見し、X線結晶構造などの基礎的な研究をしている(図1)。これを使うと、ポリスチレンやプラスチック、ガラス、ステンレスなどにも微生物を固定することができる。ファイバーの分泌メカニズムを分子レベルで調べ、それを利用する。

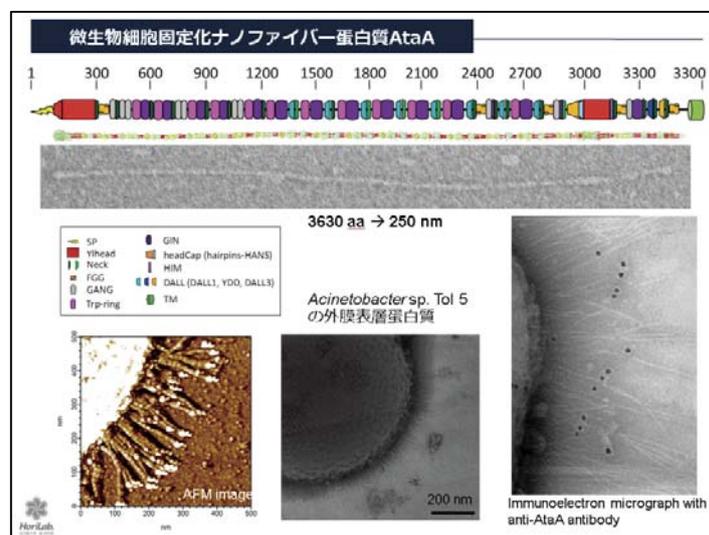


図1

今までの微生物の固定化は、包括固定法といってゲルに閉じ込めることぐらいしかできなかった。そのため、物質輸送リスクやゲルの破壊による微生物細胞の漏れがあったのだが、このファイバー蛋白質AtaAは何にでも接着するので、強度や操作性のよい好きな材料表面に簡便に微生物細胞を固定化でき、物質輸送律速もない。剥離した細胞も自動的に再固定化される(図2)。現にスチールウール、ヘチマ、ポリウレタン、ガラスウールに微生物を乾燥重量で100g/L程度接着させることに成功している。

これを使って微生物を担体に固定し、反応液に入れると、自然に化学反応が起きて化学物質ができる。繰り返し反応や連続反応も容易で、たとえばカラムに詰めて反応液をポンプで上から流すだけで下から生産物を得ることができる。こんなことがバイオでもできるようになってきている。

また、JST ALCAでは廃棄メタン(温暖化係数は二酸化炭素の20倍程)をメタノールに変換する研究も行っている。計算上、有機性廃棄物を日本で全部かき集めて変換すると、おおよそLNGの輸入量の9分の1程度がまかなえる。先述の固定化微生物を使ったゲームチェンジングなバイオプロセスを設計中であり、2035年ぐらいまでの実用化を目指している。米国のシェールガスのGTL技術を凌駕する技術になるであろう。

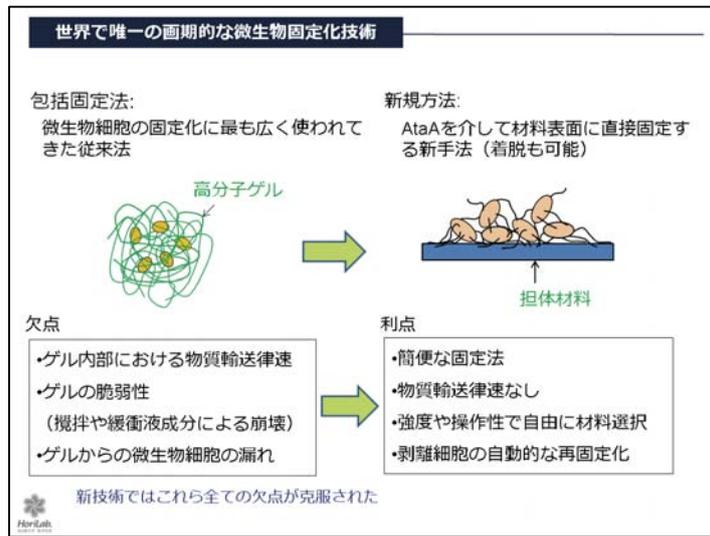


図2

最後に排水処理、油処理について紹介する。今までにない分解メカニズムに基づいた微生物製剤を使って油を分解するものである (図3,4)。今まで市販されていたもののほとんどは分解能力が低く、実用化は困難であったが、私の発明では、従来の物理的除去技術を代替できるほど、処理速度と効率が飛躍的に向上した。実際に、1年間にわたって試験販売したら非常に好評であった。油分解は安定的に75%達成していた。JSTのA-STEP事業で、実証試験用デモ機も製作した。これを、ユーザーの工場に設置して、現場にて効果を確認してもらっている。来年には起業して、2年目に黒字達成、7年目には市場の10%のシェア獲得、年間売り上げ20億円を目指すという事業計画を立てている。さらに、油を分解した後、メタン発酵してメタノールにすれば、東南アジアのオープンポンドにも適用可能である。

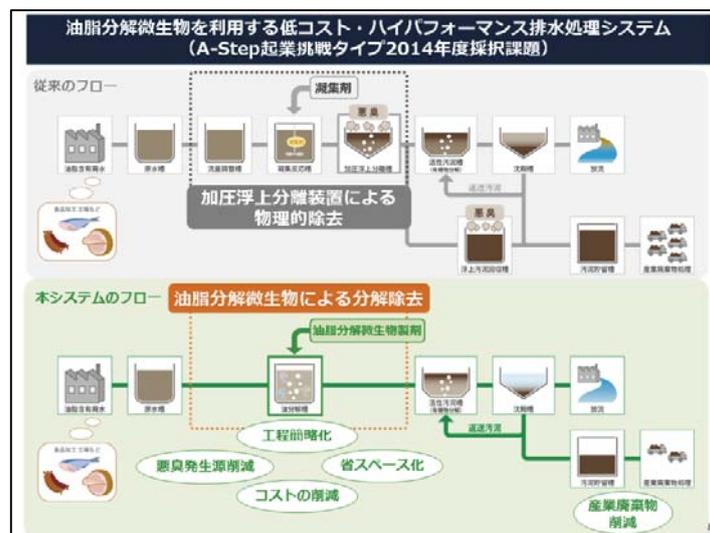


図3

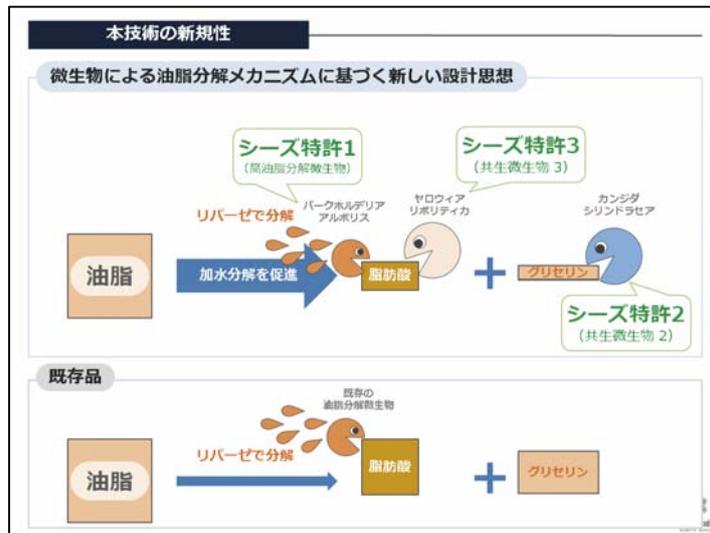


図4

複合微生物や微生物コミュニティ制御（前述の油分解も一種の微生物コミュニティ制御である）も、重要な微生物技術である。AtaAは細胞凝集機能を持っているので、微生物を凝集させることも可能である。これに、3Dプリンターの技術を融合して、複雑なデザインの微生物コミュニティ・共生系をつくる。

[質疑応答]

Q：微生物を固定化させる蛋白質を見出されたということであるが、いろいろな表面に接着している。実際のメインの相互作用は何か。

A：実はそこはまだ完全に解明できていない。蛋白質の相互作用の表現として、かぎとかぎ穴のようなものがあるが、あのような特異的な相互作用ではなく物理的な吸着メカニズムだと思っている。物理的な吸着というのは、例えば、ヤモリの足のナノファイバーなどである。そのようなものに近いのではないか。

Q：主に親水性の表面に接着するのか。

A：疎水性にも接着する。

5-6. 「微生物の振る舞いの理解と環境対策技術」

野尻秀昭（東京大学 生物生産工学研究センター 教授）

微生物を使って環境をどう浄化するかに興味を持っている。いろいろな化学物質によって汚染されるものの分解を考えると、対象が重金属の場合、微生物は使えないが、有機物では微生物が代謝して CO₂ まで分解するため、①有機物質の汚染に対して微生物をどう使うかの研究、②実際に菌を取り、それをキャラクタライズしていく研究、③そこから派生して、どう分解し、どのように分解菌が振る舞うのかの研究を進めている（図 1）。

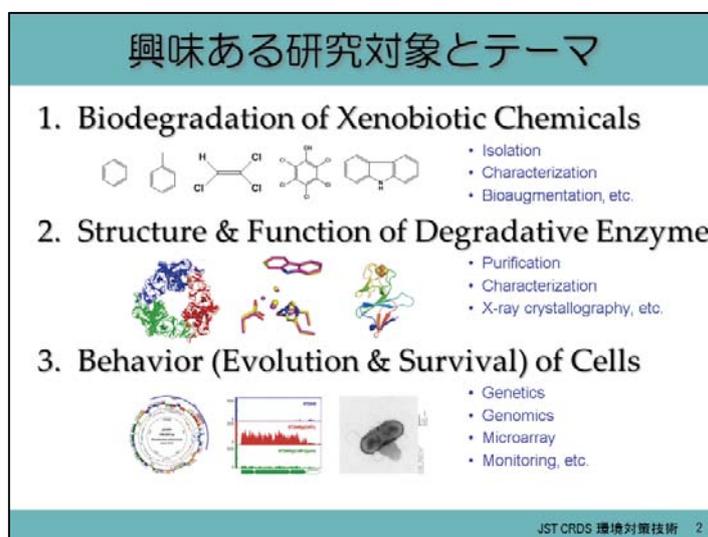


図 1

分解微生物の単離や機能解析をする必要性は、厳然として汚染浄化対象が増加しているからである。例えば、沖縄の基地が返還された場合、基地の跡地は基本的にジェット燃料等で汚染されているので、汚染が顕在化する。非先進国では汚染は現在もどんどん深刻化している。

そして、微生物を使う安価な汚染浄化手法が期待されている。浄化能力は物理化学的な手法に比べて生物は劣ると言われていたが、最近はプロセスをうまく制御することで高い浄化能力が実現できる。ただし、栄養添加のみでは浄化能力は低いので、実際には分解菌を添加するようなこともある。

分解菌を添加するときはやはり高活性の分解菌が必要である。微生物は単なる触媒として使われ、現場では微生物の菌体の取扱いを知らないことが多く、化学的な取扱い方と高活性分解菌の関連を知ることが重要である。微生物の内容を理解することでその微生物を使うことができるので、社会受容性の向上の観点からも菌の機能解析は非常に重要である。

分解菌の振る舞いの解明のニーズについて述べる。分解菌は様々な環境条件下で分解力を発揮する必要があり、特に重要なのは、普通の発酵と違い、さまざまな細菌や動植物が共存する中で働く必要がある。通常培養器の中で微生物を働かせるのは比較的簡単だが、さまざまな生物が存在する環境条件下で微生物をうまく働かせるのは非常に難しい。人間が持つ分解菌でも、内因性の因子や外因性の影響で分

分解菌の消滅や生存が決まる。それら因子がわからず、現状は単純に触媒として使っている。

最近の人為起源の物質に対して、微生物は分解力を持ち、CO₂分解にまで能力を進化させているので、分解菌がどのように生まれたかが研究対象になる。この情報は、環境の中でどう生き残らせるかや、どうやって死滅させるかに使える。

分解菌はプラスミドという染色体とは異なる DNA 因子で分解能力を持っている。プラスミドは他の細胞から移ってきて、プラスミドが染色体と出会うことで上流の代謝系と下流の代謝系が合わさり分解菌が生まれる。その後、いろいろな遺伝子の変換が起こり強力な分解菌が進化してくると言われている。このような遺伝子が移動する乗り物が、分解菌の進化や創製に重要だと考えられる。

染色体以外にある DNA 因子は染色体から制御を受けていると昔から考えられていたが、我々は、この因子が染色体も制御するという仮説を立てて、染色体に加えてプラスミドがある場合とない場合を精力的に比較する研究を行った。プラスミドがない場合は、ある遺伝子が発現して細胞の機能が決まったが、プラスミドが入ってくるとプラスミド側からの機能が発現する。以前は、この細胞機能とプラスミド側機能の和が分解菌の力だと考えられていたが、我々の研究から、プラスミドが入ることによって染色体の機能も大きく変化して、細胞機能とプラスミド側機能の和が分解菌の機能になることがわかった (図 2)。

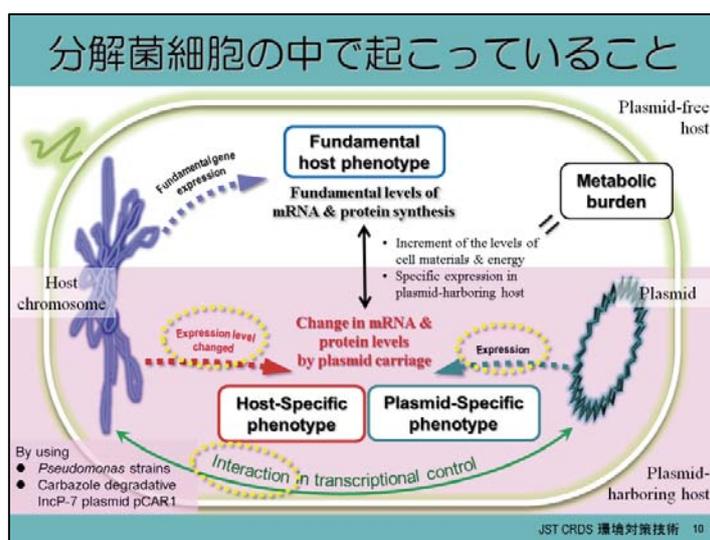


図 2

最初の能力とこの和の能力の差がどうして生まれてくるのか。この差が Metabolic burden であり、分解菌が分解菌として機能したときにどれぐらい負荷を受けて消滅するのか、それとも優占化するのか、それに効果をもたらす実態やそれを生み出すメカニズム等を解析した。

我々は、同じプラスミドでホストが違った場合や、同じホストでプラスミドが違った場合等々、いろいろな組合せでメカニズムや起こる現象の実態を解明して、新しいプラスミド学をつくりたいと考えている。一例として、図 3 に示す緑の菌、青の菌、赤の菌で遺伝子が、左側に分解プラスミドを持たせない場合、右側が分解プラスミドを持たせたときの遺伝子の発現形態を示す。遺伝子が大きく変化するのをプロファイリングシクレーター分けして示している。

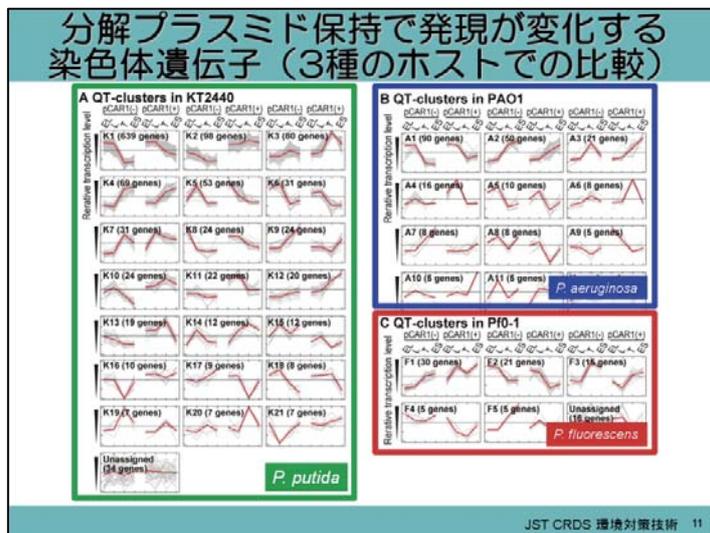


図 3

最初にプラスミドを持つ菌と持たない菌を混合して培養すると、Metabolic burden で説明したようにプラスミドは負荷になり、プラスミドを落としていく。集団の中ではプラスミドを持つ菌はどんどん減っていく。この減り方に差はあるが、違う宿主でも同じようにプラスミドが減る。すなわち、集団、環境の中で分解菌が分解菌でなくなっていく。

このメカニズムを解析して、減らないミュータントが得られないか解析した結果、緑の菌での実験結果では、図 3 の K2 (98 genes) のクラスターだけが環境の中で減っていく原因の遺伝子であることを確認した。

次に、分解菌研究の開発動向を紹介する (図 4)。

日本の分解菌研究、微生物研究は発酵 (昔バイオコンバージョンと称した) から始まった。バイオコンバージョンしたい物質があり、それから分解菌を単離して分解能 (バイオデグラデーション) の研究を行った。汚染に対しては分解能を利用して環境浄化を行うバイオレメディエーションの研究が進んでいる。

バイオデグラデーションの研究の中には、分解能の解析、遺伝子の解析、酵素機能の解析、ゲノムの解析などが入る。バイオレメディエーションではモニタリング手法の開発が大きく行われてきた。私の場合、小規模だが汚染現場という研究対象があり、汚染浄化のニーズがあったので、新規分解菌の単離、開発が研究ターゲットになった。単離された分解菌の分解能を解析してバイオレメディエーションを進めるのが一つの研究の流れである。

最近の 10 年ほどは、分子生態学が非常に発展した。最近の研究のトピックは、分解菌はさまざまな菌が共存する中でどのように分解力を出し、群集 (コンソーシャ) の中でどういう振る舞いをするのか、一つ一つの細胞 (シングルセル) がどういう働きをしているのか、それが集まってどんな群集ができていのかである。今までは単独の菌がどのような分解力を持っているかが研究されてきたが、最近では、微生物進化や生残性が研究され、バイオレメディエーションの現場やバイオデグラデーションを考える上で、集団としてどういう振る舞いをするかに研究の焦点が移っている。

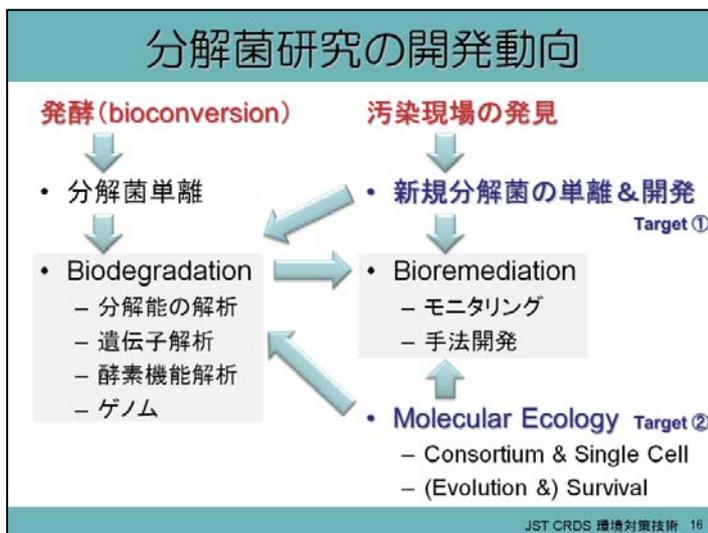


図 4

分解菌研究では、さまざまな微生物が存在する環境の中で分解菌を使う。微生物による燃料電池、排水処理、農業現場、医学などがあるが、微生物はさまざまな微生物と一緒に生活をしているので、群集の機能を理解しないと、正しく微生物が使えない。言い換えると、現場は今までたくさんあり、ずっと研究されてきたが、現場の中で微生物の機能は正しく使われず、ただ単に触媒として使っていた。私は微生物研究者としてそこを変えたい。環境で微生物が群集として機能して、微生物機能をコントロールすることはメンバーごとの機能をコントロールすることでもあり、群集全体をコントロールすることでもある。これは非常に難しいことだが、もしもこれができるれば、大きなブレークスルーになる（図 5）。



図 5

群集機能を知る困難さは、そもそも役者が多いため複雑になることである。大事なことは、一つの微生物の機能が容易に変化してしまい適応や進化が早いことである。分解菌が非常に早く進化して人間がつくった物質を分解できるようになったのと全く同じことがいろいろな現場で起きて、一つ一つの微生物の機能が容易に変化している。例えば、ある分解菌を使って環境浄化を行う過程で分解菌添加後すぐに分解力が検出できなくなることがある。それは、分解菌が変化してしまうからである。このようなことが容易に起こる。

そして、群集の構成メンバーの構成比は容易に変化する。環境刺激で容易に変わり、周りにどんな微生物がいるかによって大きく変化する。さらに、個別メンバーの生き残りやすさも変化するから、極めてあいまいとなり、制御するのが非常に難しい。

個の機能の変化について紹介する。遺伝的に全く同一のセルがあったと仮定すると、3つのメカニズムで機能が変化する。①遺伝子が外部から入ってきて、遺伝子を受け取ることにより、菌自身が変化する。②遺伝子は頻繁に変容を起こしているため、ジェネティックな不均一性が生まれる。③全く同じ細胞で、ゲノムが全く同じであっても細胞の機能が、ある幅を持って変化し、ヘテロになる。(図6)

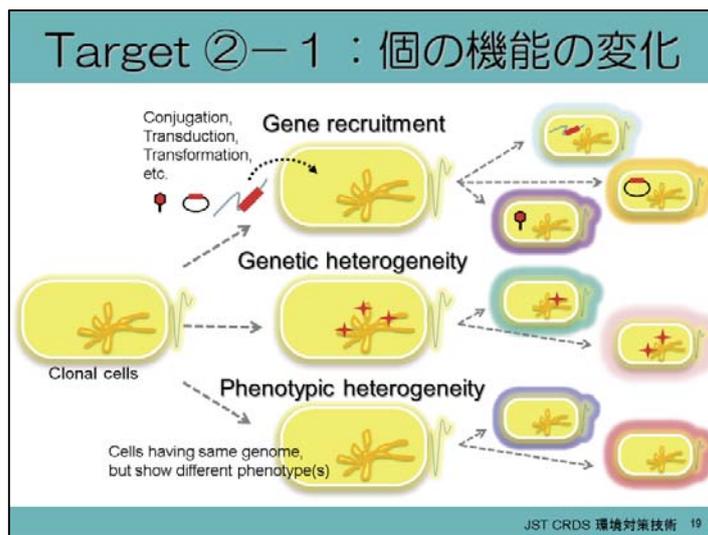


図 6

機能が変化した細胞の周りには、様々な微生物がいる。ナチュラルなコンディションから、ある選択圧がかかると、その選択圧の中でこれらの細胞が生存競争を行う。人間の社会では大規模絶滅は滅多に起きないが、微生物の世界では大規模な絶滅が起きて、ほとんど死に絶え、生き残ったものだけが子孫を増やす。このメカニズムは非常に複雑で、人間がなかなか関与できない。

ここにバイオフィームのような特別な構造があると、様々な物質の濃度が変化するので、生存競争に大きな影響を及ぼす。幾つかのステップを踏んである環境の中での微生物の生き残りが決まる。このステップがよくわかると、外から加えた微生物を上手に使うことができる(図7)。

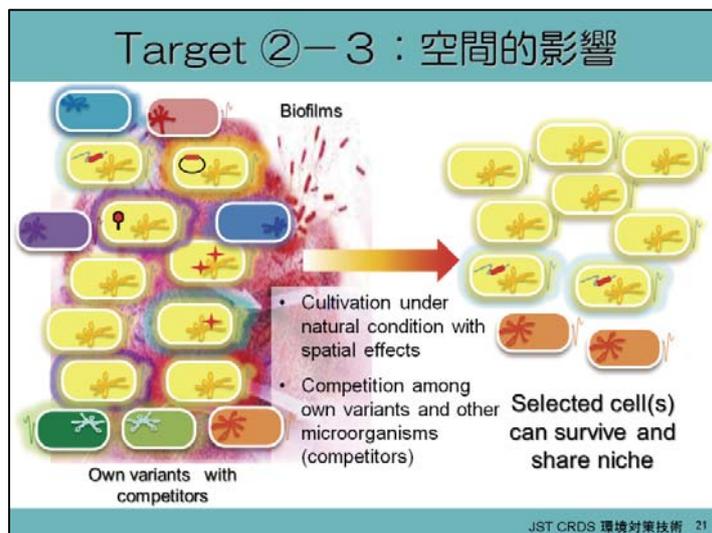


図 7

シングルセルの解析を紹介する。今までの微生物学はある幅を持って派生した集団の平均値だけを解析してきた。それはゲノム解析、トランスクリプトーム解析、プロテオーム解析、メタボローム解析などオーム解析と呼ばれる解析でも同じだった。しかし、微生物が何らかの選択圧や生存競争でほとんど死に絶えて、少しが生き残った場合は、生き残った集団が示す機能は従来の平均値とは大きく異なる。シングルセルの解析とは微生物の集団を人間の統計をとるように 1 匹ずつ測定し、それを集団化すると統計処理ができるというイメージである。さまざまな集団の機能解析ができれば、生き残ったときに、なぜ生存できたのか、なぜ他者が絶滅したのかに答えるヒントを与えてくれる研究が進んでいる (図 8)。

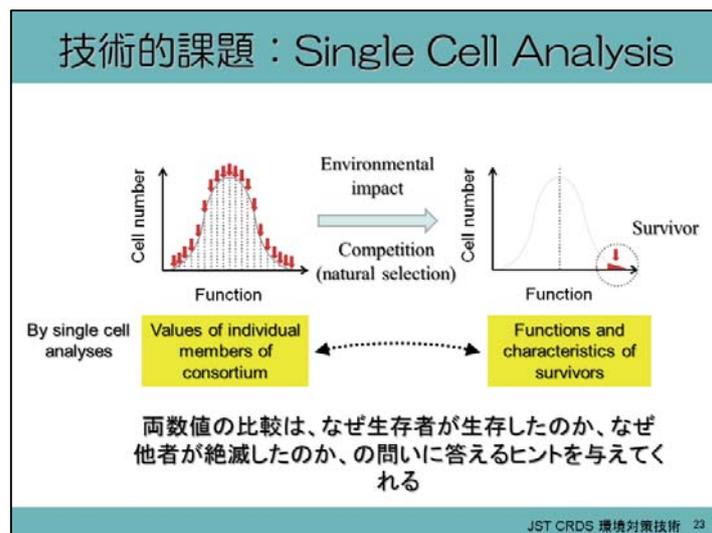


図 8

シングルセル解析の技術的な課題は、1つはそもそも微生物が小さいことである。正確な単離やハンドリングが非常に難しく、1匹の微生物を上手に解析する技術がもっと発展する必要がある。また、同時に情報を解析する情報科学とうまくコラボレーションする必要もある。今までシングルセルの解析は大腸菌などの幾つかのモデルの微生物で行われて来たが、分解菌のように実際に使える細菌を対象とする研究は始まったばかりである。微生物ゲノムは非常に可塑性があり、遺伝子の変異や優占化がよく起こる。そもそも環境中で競合する微生物が非常に多様であることから、なかなか解析が進まない。しかし、最近これらを研究する環境微生物学者が増えてきた。

海外動向では、アメリカの微生物学会 (ASM) で去年から ASM Conference on Experimental Microbial Evolution が作られ、2016年に2回目が開かれる。ASM Conference の一つである Individual Microbe の2016年のテーマは Single-cell Analysis and Agent-based Modeling である。本年度 ASM の年会 (General Meeting) は感染症関連の学会 (ICAAC) と共に ASM Microbe という合同大会として開催されるが、本日紹介した分野に関する2つのシンポジウム (Single Cell Behavior と Evolution of Microbial Consortia) が企画されている。アメリカよりはヨーロッパのほうが環境微生物学は強いが、環境微生物学の分野では heterogeneity や single cell が現在トピックになりつつあり、モデルから実際の働く微生物の解析に応用されつつある。

[質疑応答]

Q: 淘汰のときに働いた遺伝子は具体的に何をやっているのか非常に興味深い。もともとプラスミド自体はどうやって誕生したと考えられるのか。最近バイオオーグメンテーションに代わるものとしてプラスミド自体を撒いてしまおうというが、その可能性を知りたい。

A: どんな遺伝子が生残性を低下させていたのかについては、概して発現量が大きく、恒常的に発現することが負荷になる可能性が高い。また、トランスポーターの高発現がマイナスに働く例もある。プラスミドの起源はよくわからない。大きなプラスミドでは染色体とプラスミドの区別がつかなくなるので、サイズが小さいものはプラスミドという名前をつけて研究されてきたが、実際にはプラスミドは小さなものから染色体と同じぐらいのサイズまでシームレスにあるので、染色体の一部がいろいろな変異を受けながらできたと思われている。プラスミド自体を撒くことはあり得ると思うが、細胞外 DNA であるので取り込まれて機能を発揮する効率が非常に悪いと思う。DNA 自体を試薬と考えるなら、DNA をどれぐらい準備すればよいか重要で、実現は難しいと考えられる。社会受容性の問題が出てくるので、やはり細胞の中に入っている状態で撒くことが一番安全で確実と思う。

5-7. 「ジオミメティクスによる環境材料の創出」

笹木圭子（九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 教授）

ジオサイエンスをベースとした環境材料の創出について紹介する。ジオマテリアルやそれから派生した物質を中心として新しい環境材料をつくっている。

ジオミメティクスとは、鉱物そのものだけではなく、産業廃棄物で鉱物質を持つもの、動物の骨材、微生物がつくる生体鉱物などに少し手を加えて非常に効率の高いものを作るものである。日本には限られた国産資源、地下資源しかないこと、資源国による資源ナショナリズムの台頭などを背景にして、この研究の必要性が出てきた。

難吸着性の陰イオンの吸着体を開発することに注力してきた。また、吸着だけではなく、有害イオンを除去する際には沈殿、共沈の原理も利用するので、それを加速化する研究も行っている（図1）。



図1

現在、ジオミメティクスとして粘土を使っている。粘土は層状鉱物で自然界の多くのpH条件のものとは表面が陰イオンにチャージしているため、陽イオン交換性を持っている。本来陰イオン交換体とはなり得ないが、陽イオン界面活性剤で修飾することでチャージを反転させ、しかも機能性を付与した新しい吸着材をつくることのできる。特にサイズが大きくてチャージが小さい過塩素酸や、図2内で下線で示すものは放射性核種を持つ過テクネチウム酸の吸着体をつくることのできる。

粘土とは逆に層状複水酸化物は、陰イオン交換体であり、もともと表面がプラスに荷電を持ち、陰イオンを交換できる鉱物で天然存在量としては少ないが、非常に再生がしやすく、合成することもかなり容易である。これを機能化し柱状に層状鉱物をつなげ、ピラー型LDHsの合成と集積化を行う。また、これをナノシート化することにより反応性を増すことができる。対象イオンは、ホウ酸、ヒ酸、リン酸、フミン酸などの大きな陰イオンである。

また、日本の唯一自給可能な国産地下資源と言われる石灰資源を使い、動的な振る舞いをするイオン

を安定な沈殿に取り込む技術として、アパタイトやエトリンガイトという構造を持つ沈殿物によって共沈させ閉じ込める研究もしている。これは天然石灰を原料としているので不純物が入る。この不純物の影響がターゲットによってポジティブに働き、逆にネガティブに働くこともあるので、おもしろい研究テーマである。

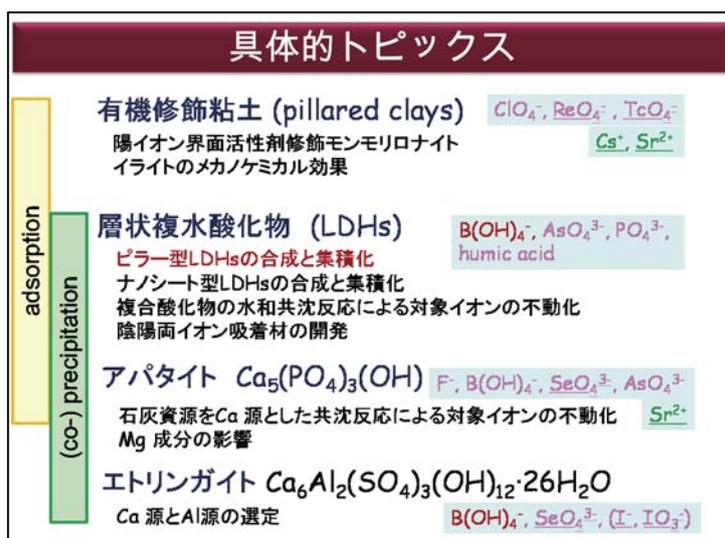


図2

一例として、ホウ酸除去のためのピラー型LDHsの合成と集積化について紹介する。そもそもホウ酸は重金属ではなく、一般には毒性や有害性は認識されていないが、自然汚染の汚染源として、天然鉱物でも250種類を超えるホウ素を含む鉱物がある。トルコは世界全体の70%以上のホウ素生産量があり、ホウ素汚染が非常に深刻で研究も盛んである。人為汚染は、日本では、ガラス産業や半導体産業、製薬関係などからホウ素を含む産業排水が出てくる。ホウ素は、植物の葉が黄色に変色する、根がコルク状になるなど、殺虫剤にも用いられるぐらい有害性が明らかになっている。生物にとってホウ素はある程度は必須なものだが、あるレベルを超えると有害となり、適正な摂取濃度範囲が非常に狭いことで知られている。WHOや日本もその基準を持っている (図3)。

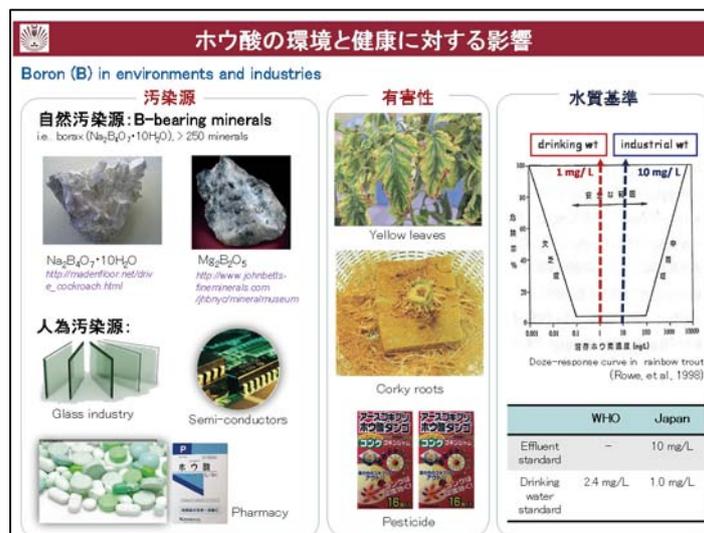


図3

ホウ素の除去剤として、企業ではホウ素特異性樹脂が使われている。日本の化学メーカーでも製造しているが、構造はN-methyl glucamine基を持っている。世界で数社がホウ素特異性樹脂を開発しているが、N-methyl glucamine基の部分は1957年以来、全く変わっていない。ポリオール基がホウ素をとらえるのに非常に有効であることで使われているが、最近では、LDHの修飾をグルコン酸 (pKa3.35) で行う開発がある。これは、中性領域ではマイナスにチャージするはずだから、陰イオン交換体であるLDHを取り込むことができる。そのようなLDHはホウ酸とN-methyl glucamine基で見られるような錯形成反応を起こすと考えられたものである。

LDHはマグネシウム、アルミニウム型が非常に安定な形として知られており、天然鉱物であるカルシウムマグネシウム炭酸塩（ドロマイト）が石灰石の中に混ざっている。これを焼成すると、酸化カルシウムと酸化マグネシウムができる。酸化カルシウムはアルカリ化剤として利用し、マグネシウム成分だけを構造の中に取り込む。アルミニウム源を添加することで通常のMgAl型のLDHが形成される。そのままでもある程度のホウ酸の吸着容量は持つが、選択性が低く、吸着容量も低いので、よりホウ酸を取り込む吸着体とするために、グルコン酸を取り込むと、ピラー状のLDHができ、ホウ酸に対する選択性、吸着容量を向上できる。

これはパウダー状でハンドリング性がよくないので、二次元状のフィルターに集積化し、取り扱いやすい吸着イオン交換材料としてつくった。こうしてできた吸着体は市販のホウ素特異性樹脂の吸着容量に匹敵し、その吸着速度は、市販の樹脂よりも速い（図4）。

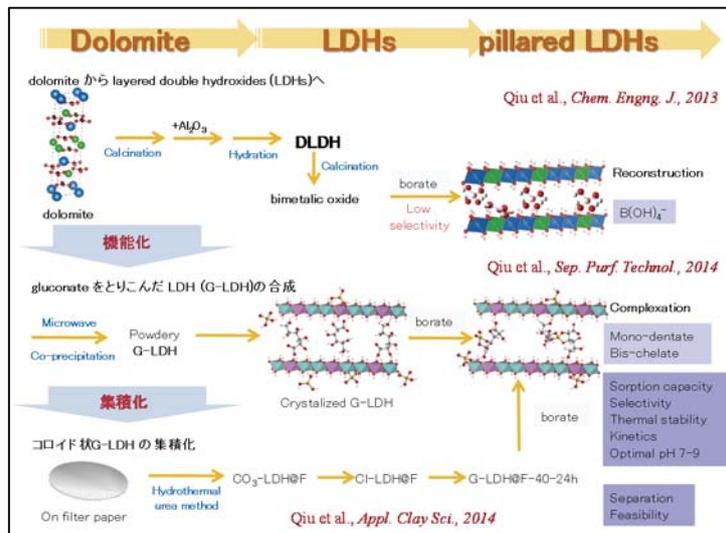


図4

研究動向について。日本は、レメディエーションにはあまり経済性がないので、同時に生産活動が伴っている分野でないと研究資金がつかない。とにかくコストを抑えた技術や材料が必要とされている。例えば、鉱山廃水や温泉水が、大量に汚染水として排出されると、これには重金属や有害なヒ素、セレンなどの元素が含まれるので、これらを不溶化して除去することが必要になる。そして、福島第一原発事故による核種のリーク対策である。日本列島は活断層がたくさんあるので、そこに立地する原子力発電所の廃炉問題が今後発生してくる可能性がある。廃炉になると、核種を地下埋設する技術を別に確立していかなければならない。一つ廃炉するのに30年から40年かかると言われているので、長期にわたって我が国に課せられた課題になる。このようにニーズに基づく課題解決型環境研究の性格を持つ。

諸外国の研究は、論文数で見ると中国、インドが非常に多い。人口が多くて環境対策が経済活動に追いついていない国や、自然汚染が著しい国で一般人が使用している水を井戸水に依存している地域、資源国で鉱山廃水が大量に排出される南アメリカ、豪州などである。トルコの例に見られるように、特殊な地質構造から汚染がある地域では研究数が多い。

過去10年の国際ジャーナル論文数を調べた(図5)。薄いブルーがトータル論文数、濃いブルーが重金属のキーワードに該当する論文である。左上のグラフ、*J.Hazard.Mater.*で、2009年に大きなピークがあるのは解釈が難しく、このときチーフエディターが交代したことが理由かもしれない。放射性核種に関する論文は重金属全体の1割ぐらいである。左下のグラフ、*Chem.Engng.J.*では、近年5年で論文数が非常に増加している。図5にはないが、2013年に*Journal of Environmental Chemical Engineering*という新しいジャーナルが発刊され、年間300件ぐらいの論文を掲載しており、最近の論文数は伸びている。

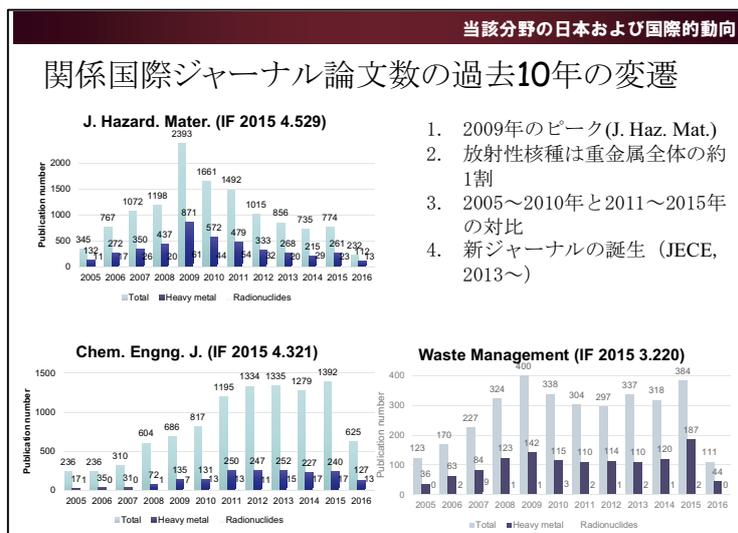


図5

このようなジャーナルの中で、吸着材や共沈技術の研究開発にはさまざまな視点がある。例えば吸着容量、吸着速度、対象の選択性、材料の安定性、熱的pH安定性、今までにない機能（磁気分離性やpH応答型）の付加、材料のリサイクル、ハンドリング性、放射性核種の場合に廃棄物の最終処理方法、コスト、メカニズムなどさまざまな視点がある。これらを単一ではなくて2つ以上組み合わせた内容の論文が多く出されている。

吸着容量のチャンピオンデータを追い求めている論文は、現実的ではないのでおもしろみがない。それよりも実際に必要なのは速度や、目的を達成するためにどれほどの選択性があるかや、メカニズムなどである。メカニズムがわかると研究に広がりが出て、次の開発のヒントが得られる。

よりインパクトの高い対象に絞った環境材料の開発に興味がある。例えば放射性核種で、福島の問題ではセシウムやストロンチウムが非常に重要である。この吸着材にはzeolite AやHAp、chabaziteが使われている。但し、非常にコストが高く、この陽イオン性核種の半減期はおよそ30年という長さである。

一方、陰イオン核種の半減期は、桁違いに長く、10⁵年～10⁷年である。図6に、ある地殻の代表的鉱物の等電点を示すグラフを示す。地殻の構成成分は主にシリケートである。シリケートは非常に低い等電点を持つ鉱物で、中性領域の水環境の中では、ほとんどの地殻の表面はネガティブチャージになり、陰イオン性核種は反発して動的に振る舞わざるを得ない。しかも半減期は非常に長いことから、陰イオン性核種が非常に重要な研究対象になる。

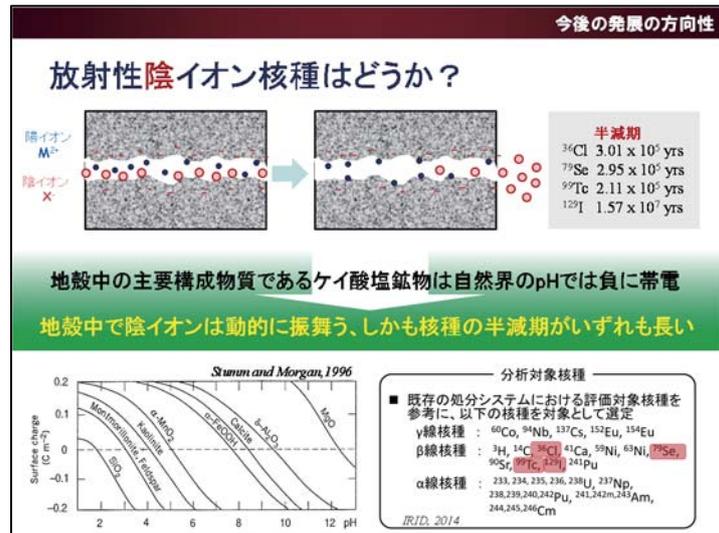


図6

国として克服すべき課題を図7に示す。福島第一原発の廃炉に関して分析対象核種として挙げられている中に陰イオン核種が4種類ある。現在、核種はALPSという多核種除去設備の中に分別されて濃縮されている。これは異なる吸着材の中に核種ごとに分類されていて、ターゲットを定めて吸着材が選定されて順番も決めてアレンジされている。

廃炉の際に、このまま地下埋設には不適なものがある。図7の表に示す緑部分が陰イオン性核種である。例えばヨウ素は活性炭に付いている。負電荷コロイドはテクネチウム酸なども入るが、樹脂に吸着されている。地下埋設されると有機物を持つので分解するおそれがあり、緩衝剤であるベントナイトと一緒に保持材としてカバーされて埋設されるが、将来どうなるか保持段階の問題がある。

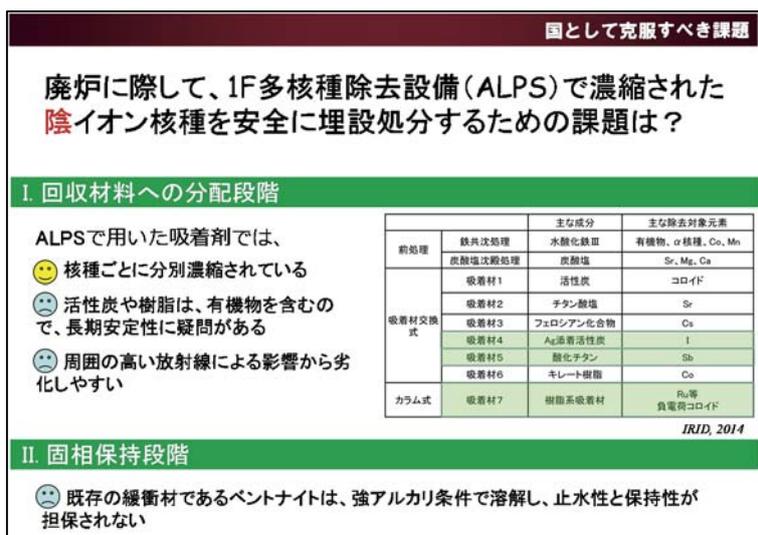


図7

そこで、国産資源である石灰資源を使い、リン酸源あるいは硫酸源を加えることでハロゲン核種、電荷の高い陰イオン種はハイドロキシアパタイトやエトリンガイトなどによって核種を不動化できると考えた。このときにコストの安い石灰石を大量に焼いて酸化物にし、酸化物は発火のリスクを持っているために水酸化物にして取り扱う。しかし、このように固体から固体へ相変化させ、溶解と析出を伴う反応であるので、反応にばらつきが多く、速度のばらつきも出てくる。天然鉱物が持つ微量元素からの影響も検討事項である。

カルシウム鉱物による共沈反応ではカバーしきれないものも残っている。その代表がテクネチウム酸である。これはイオンサイズが大きく電荷が1価なので、先ほどの反応では難しい。一方、粘土は非常に安定な鉱物で酸化物であるので、この陽イオン化界面活性剤で修飾し、テクネチウム酸と高い親和性を持つ官能基をつけることで新しい吸着材をつくる。

このように安定な吸着材に移し替えた核種を埋設に先立ち固化しなければいけない。これはハイドロキシアパタイトなどの使用済み吸着材をジオポリマーの中に閉じ込める。この閉じ込め方は、物理的にミキシングして閉じ込める方法と、ジオポリマーと吸着材の間に何らかの化学結合を形成する方法が考えられる (図8)。

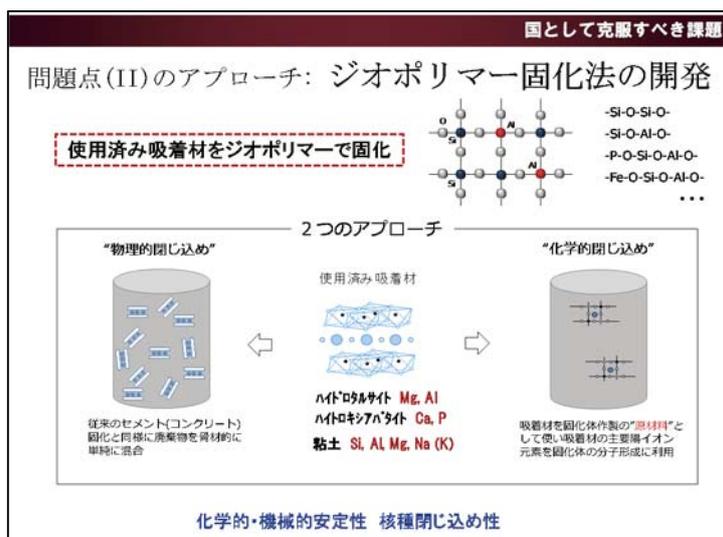


図8

ジオポリマーの合成法はコンクリート工学の分野では古くから研究されており、シリケートの鉱物とアルカリ化材と水を混ぜることによって水和、ゲル化、ポリマライゼーションという3段階でジオポリマーはつくられる。

微視的に見ると、元素マッピングされ、ジオポリマーのナノ構造は全然均一ではなく、不均一なものである。これに対してナノジオサイエンスは行われてこなかった。しかし、放射性核種の長期安定化戦略として、ナノジオサイエンスは貢献できると考える。こういう不均一なものに対して局所分析や分光解析、界面解析、量子計算なども活用できる。

まとめると、ナノジオサイエンスはマクロやマイクロスケールでは説明できない原子レベルでの環境

物質の動態を解き明かす学問領域である。これは環境修復学により、もっと貢献できる可能性を持つ。

日本固有の廃炉事業に伴う環境対策として、放射性核種は非常に微量でありながら環境インパクトは極めて高く、放射能の問題や半減期が非常に長い問題である。地下に埋設したときには土壌微生物の反応を無視できないので、逆にこれをポジティブに捉え低エネルギー消費プロセスである微生物反応を活用する考え方も生まれてくる。

また、ジオミメティクス（日本は石灰系資源）をもっと高効率利用するための新原理を追及し、固体から固体への相変化を伴う反応で核種を捕捉する反応や、界面での可視化などナノジオサイエンスは研究領域がたくさん残っていると考えている。

[質疑応答]

Q：放射性核種をとる際に、放射性そのものは多分スタッキングの影響はないと思うが、その辺はどのように考えるか。要するにイオンのサイズ、その電子の行動、その相互作用は決まってくると思っているが、放射性というターゲットをシフトしたときに、そこで何かしら新たな相互作用が発現するのか。

A：放射性核種にターゲットをシフトして環境材料を対象とするときは、研究として最初から全て放射性核種を取り扱う必要はないと思う。普通の安定同位体でやればよい。そして、最後に例えばジオポリマーの中で固化して放射能漏れをテストする。やはりホットスピーシーズの試験が必要になってくると思う。

Q：そうすると吸着機構そのものは違うメカニズムが働くことはないと考えて良いか。

A：その通り。

5-8. 「戦略的都市鉱山開発に向けた取り組み」

大木達也（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）

戦略的都市鉱山開発に向けた全体的な取り組みを紹介する。

リサイクルという言葉は、廃棄物処理という側面が非常に強いが、我々が目指しているのはごみの処理ではなく、ごみから金属資源を回収するものである。従来、リサイクルの大きなターゲットは、埋立処分場のひっ迫に対して、ゴミの減容化の観点から、ゴミを捨てずに再資源化するものであった。その多くはカスケードリサイクルである。これをリサイクル率と呼ぶが、一般の人は「もうリサイクル（資源循環）が90%達成している」と誤解される方も多い。90%という数値はほとんどがカスケードであり、水平リサイクルして製品として資源循環されるわけではない。したがって、天然資源の供給不安はリサイクル率が向上しても解消されない。

このように大量に処理できるが質は問わない「量のリサイクル」が進む中で、2010年頃から優先5鉱種としてレアメタルなどのリサイクルの検討を始めたが、水平リサイクルの社会基盤が未整備であるため、リサイクルプラントに新技術を導入しても資源価格に柔軟に対応した資源循環は実現しないことが現実として見えてきた。

我々が今、目指しているのは、資源自給率を向上させるための「戦略的都市鉱山開発」である。ごみを減らすのではなく、天然資源に匹敵する生産的な都市鉱山開発を目指している（図1）。

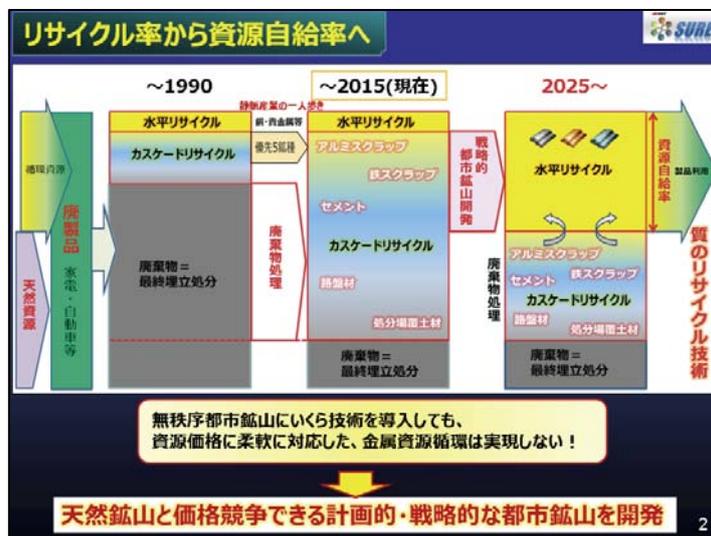


図1

天然資源の場合には濃縮された鉱脈を選択的に掘ることができるが、人工資源の場合は何でも集まってきたてしまい、良いものと悪いものをスクリーニングする機能が、現状では完成されていない。

その要因の1つは、既存の装置の多くはリサイクル向きに作られたわけではなく、多用途から転用してきたものを、組み合わせている点にある。そして、さらに、これらを組み合わせるシステムを最適化できる業者・研究者が、残念ながら日本にはほとんどいない点である。一般に、リサイクル選別プロセ

スはドイツが強いという印象があるが、これはドイツ製の個別装置が優れているからではなく、システムを組むプレーヤーがいるからである。

このような状況下で、無理をしてレアメタルリサイクルを実施すると、技術不足を手作業で補わざるを得ず、コストが増大してしまう。非常に資源価格が高いときはリサイクルが成立するが、一旦、資源価格が下がると採算が合わずやめてしまう。日本は、世界的に見ても個々のリサイクル技術は優れているといえるが、量のリサイクルを基準にしているので、「質のリサイクル」を目指す都市鉱山を考えた場合には極めて未成熟な状態にある（図2）。

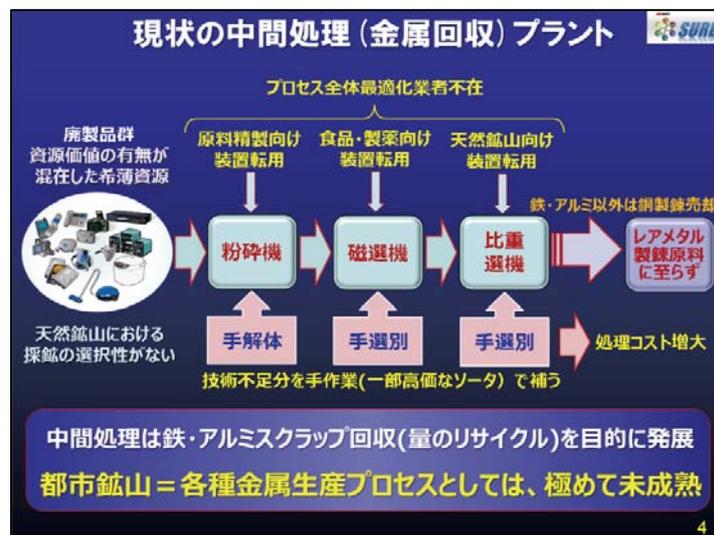


図2

「質のリサイクル」すなわち都市鉱山開発を行うには、現在のように、リサイクルプラントだけに新技術を導入するのでは限界がある。残念ながら、リサイクルプラントに持ち込まれたレアメタルのほとんどは覆土材等になり、製錬所では路盤材等になり、ほとんど循環利用ができていない。これは資源循環の各プレーヤーの連携が不足しているからで、現状のような資源安下では、物流が停滞してしまい、せっかく新しい技術を導入しても、リサイクル業者が孤立してしまう。しかも、新技術には前述のように手作業が介入するので、人件費の安い海外に買い負けてしまい、国内の金属資源循環が進まず、依然として輸入依存が解消されない。この状況をして、「都市鉱山は資源調達手段として期待できない」という声も聞かれるが、それは、進め方が未だ不適切であるだけで、技術とシステム、特に動脈と静脈を密に連携する都市鉱山基盤を築くことで、克服することが可能であり、産業界全体で資源循環をコントロールする機能の整備が、非常に重要だと考える（図3）。

我々は戦略的年鉱山研究拠点SUREという組織を立ち上げた。産総研の環境管理研究部門でリサイクルを研究しているが研究者はただか11人、ポスドク、テクニカルスタッフを入れても40～50人であり、日本の産業構造を動脈－静脈連携型に変革するには十分ではない。そこで、2013年に、産総研内の都市鉱山関連研究者を束ねたバーチャルな拠点を設置した。研究者38名、ポスドクテクニカルスタッフを入れると100名以上になり、都市鉱山に関して網羅的な研究ができる体制となった。

さらに、翌年、2014年11月に民間と連携するSUREコンソーシアムを設立した。民間61社、経産省、NEDO、JOGMEC、業界団体、24課室法人、91会員で構成される官民連携組織である。コンソーシアムは、2つの分科会組織で構成される。SURE FORUMは非鉄金属・家電・自動車などの大手のサプライチェーンの代表企業18社から成り、将来の循環型の社会構造を検討する。また、その実現に対応できるリサイクル技術の向上を目指すのがSURE CLUBであり、リサイクル業者や関連装置メーカー34社が参加している（図4）。

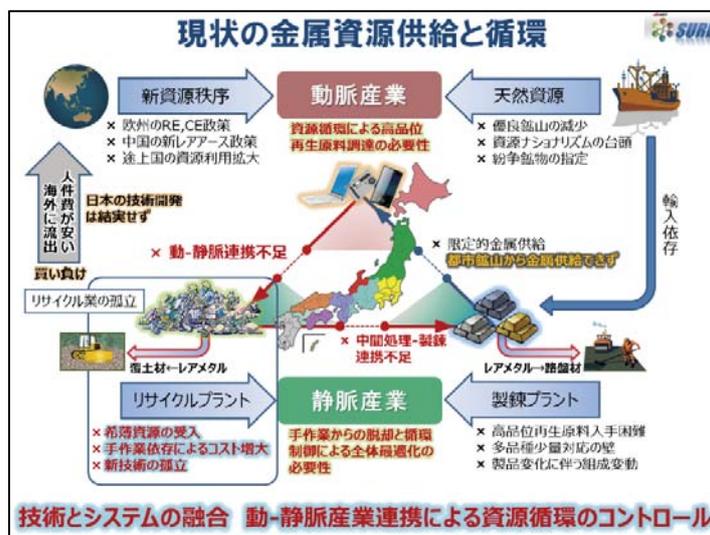


図3



図4

ここでは、学術的な基礎研究、共同研究も行うが、経済的な都市鉱山を確立して、資源循環率の向上、リサイクル業者の技術向上、都市鉱山の市場拡大、輸入品が多いリサイクル装置を国産化することなど

を目標として掲げている。また、会員が集う場所として、産総研内に分離技術実証ラボ (SURE LATEST) を設置した。一つの建屋の中に世界中のさまざまな物理選別装置を60基集めた。そのうち20基は産総研のオリジナル開発装置で、既に10個の装置や技術は特許実用化して製品化されている (図5)。



図5

SURE CLUBでは、会員向けにセミナーを開催している。単に座学だけではなく、ラボ内のいろいろな装置を使ってデモを行ったり、あるいは会員に課題を与えてディスカッションを行っている。

我々が開発し、SUREの中で扱う選別装置の特徴は、精度が高く、大量処理ができ、安価に処理でき、エネルギー消費量が少ないものである。この4条件が揃うものだけが、対象となる。例えば、精度は非常に良いが、処理量はごく少量という類の装置は、所詮、実用化の見込みがないため、我々が扱う技術ではない。SURE FORUMでは、9つのプログラム (研究会組織) があり、このうち5つの共通課題プログラムには、それぞれ10社程度の企業と連携して、将来どのような資源にリスクがあるのか、製品データの付与方法や、化学プロセスの合理的探索法などの課題を共同で検討している (図6)。

一方、動脈産業側には、ぜひ製品データを開示してほしいと考えており、そのデータ開示要領の議論が進んでいる。また、会員企業には、製品の資源配慮設計も進めて欲しいと言っている。製品メーカーはある程度のデータを提供し、資源配慮がなされた製品を作る。リサイクル業はそのデータを制御するプラントを構築する。金属製錬業は多品種少量製錬ではなかなかコストが合わないが、それを実現する技術を確立する。このように3者が連携して資源循環を促進することが重要と考えており、各研究会はその実現に向けてコンソーシアム型で議論をしている (図7)。

SURE FORUM			SURE CONSORTIUM	
共通課題プログラム				
名称	テーマ名	提案機関		
共通課題プログラム1	日本の資源リスクの構成要素の検討	産総研SURE WG 1	NEDO プロ化	→
共通課題プログラム2	廃製品データベース利用・ソーティング技術の検証	産総研SURE WG 2		
共通課題プログラム3	化学分離精製技術における共通課題の検討	産総研SURE WG 3		
共通課題プログラム4	戦略メタル備蓄の可能性に関する検討	産総研SURE WG 4		
共通課題プログラム5	戦略メタル含有部品の識別手段の検討及びその規格化	東芝環境ソリューション株式会社		
個別課題プログラム				
名称	テーマ名	提案機関		
個別課題プログラム1	物理選別の革新による製錬技術前処理の改善	三井金属鉱業株式会社	JOGMECプロ 民間受託	→
個別課題プログラム2	都市鉱山の一貫リサイクルプラント	株式会社リーテム	つくば国際特区 都市鉱山PJ	→
個別課題プログラム3	廃蛍光灯から再生利用可能なレアース蛍光体回収システムの検討	野村貿易株式会社	NEDO助成事業 H27実用化	→
個別課題プログラム4	貴金属粉末と各種不純物混合物からの効率的な物理選別手法の開発	株式会社フルヤ金属	GNT支援 民間受託	→

図6

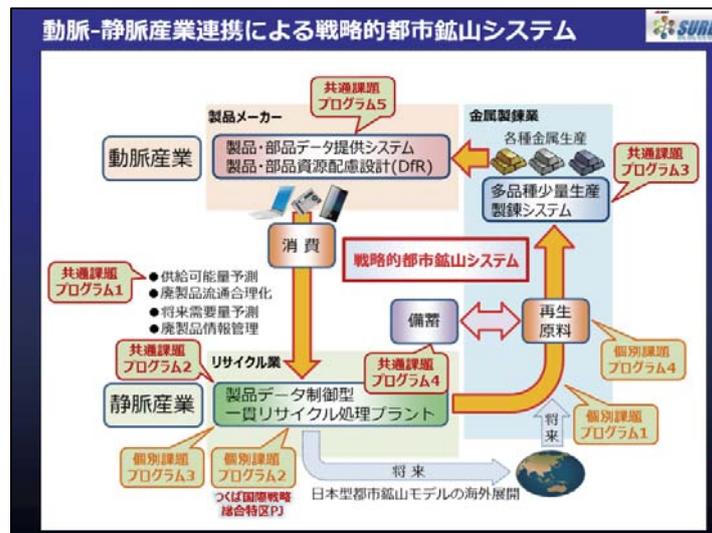


図7

また、戦略的都市鉱山の思想を単純化すれば、天然鉱山では鉱物特性に関するデータが豊富にあり、元素特性と鉱物特性の両者の性質を巧みに利用して金属を経済的に取り出している。天然鉱山の選鉱・製錬技術をそのまま都市鉱山に移転しても、人工物に対するデータベースがないため、単純な元素特性だけを利用した鉄、アルミと、製錬での銅、貴金属などの回収しかできない。この方法では大量処理はできるが、レアメタル回収などの緻密な処理はできない。我々が目指すのは、この人工物の特性（製品情報）をきちんと把握し、それによって天然鉱山に匹敵する精密さで選別・製錬を実施できるようにすることである。

一方、天然鉱物は必ずしも人間の都合に合わせて出来ているわけではないが、人工物はリサイクルしやすいように予め仕込むこともできる。つまり、製品の資源配慮設計を強化すると、天然鉱物に匹敵す

るあるいは凌駕する生産コストで資源回収ができる可能性がある。資源循環における動静脈の連携が実現すれば、都市鉱山を経済的に回収可能な資源とすることも可能であると考えられる。

NEDOの支援で行った成功例をひとつ紹介する。ある企業がプリント基板から電子素子をはがすことに成功した。政府の主導で、これらの電素子群からタンタルコンデンサの回収を目指したが、これまでの研究機関のアプローチでは色々な選別装置をかけ、様々にパラメータを振って最適化をすることを何回も繰り返すことが唯一の方法論だった。しかし、我々は、まず、対象とした基板中の電子素子約40万点すべてをデータベース化した。サイズ、重さ、導電性、磁性、比重選別特性などをデータベース化し、さらにそれを選別結果に変換するシステムを作り、シミュレーションソフト(AESS)を開発した。さらにこのソフトで、考え得る2,000兆通り以上の選別パターンを全て計算し、その中で最も分離効率の良いパターンを求めたところ、意外と単純なプロセスで実現できることを突き止めた。これにより、計算上、タンタルコンデンサ純度95%、収率90%以上で回収できる選別プロセスが実在することがわかったが、残念ながらこれを実現する装置が現存しなかったため、そのスペックを実現できる装置を開発した。これは、2013年に完成し、既に実用化している。タンタルコンデンサの高純度回収を達成したこともさることながら、最適な選別条件を計算によって求め、これによる未知の選別の実現を、我々が世界で初めて実施したことである(図8)。



図8

これを契機に、動脈産業が一定の情報提供をし、分解しやすい製品配慮設計が進めば、静脈側がそれを利用する完全自動化システムができる道が開けた。現在、想定しているのは無人運転リサイクルプラントなので、人件費は不要で、電気代のみとなる。そして、回収産物を予め製錬原料条件に設定すれば、回収する産物に関係なく再生処理コストは不変となり、今売れる再生原料は製錬に売り、そうではない物は備蓄しておくことも可能となる。このような資源循環全体をコントロールするシステムの研究開発も、現在、始めている(図9)。

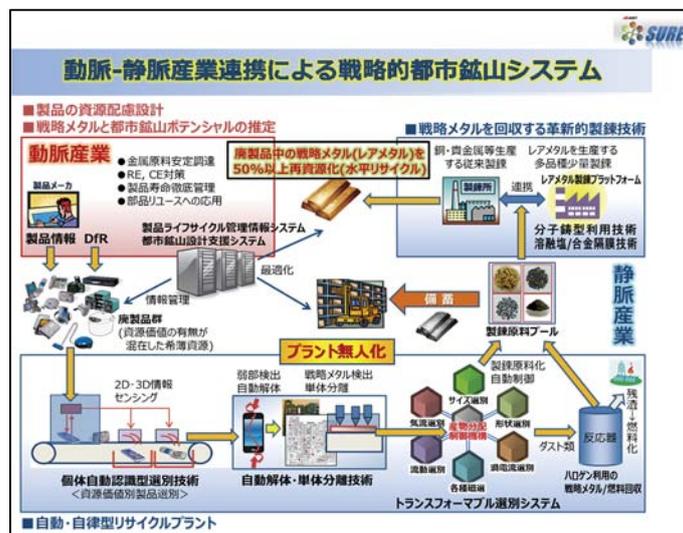


図9

海外動向について。アメリカは2013年からCritical Materials Institute(CMI)を作り、150億円投資した。ここは材料開発がメインで、リサイクルについては、日本の後追いの印象がある。EUはCircular Economy Packageが2015年12月2日に発表されて、870億円程度の研究費を投資して、かなり本気である。日本の考え方に近く、流通をコントロールする、情報をコントロールする、あるいはリユース、リファクタリングなどを進めている。

今後は、リサイクル無人化プラント、製錬技術、動脈側からの情報提供、動脈側が得るメリット、社会を循環型にどう変えていくか、将来の資源リスクの回避などを総合的に考えたい。日本は人口1億2,000万人に過ぎず、国内の資源循環量では供給は賅えない。できれば海外展開をして、日本式のリサイクルプラントで処理すると現地に金銀銅がたくさん回収できる、余ったレアメタルはぜひ日本に送って欲しいという国際資源循環システムを将来構築したい。

[質疑応答]

Q：物理選別はタンタルでは良くできることはわかったが、湿式の方はいかがか。湿式で金属を分離する取組みはどうか。

A：質問中の「湿式」を物理的な湿式法と解釈すると、大きな粒子は乾式でやるというのが常套手段である。細かい粒子、おおよそ100～500ミクロンより小さな粒子は湿式法が適している。ここでは、事前の粒子サイズを揃えることが課題である。材料関係の人たちからサブミクロンやナノ粒子をうまく選別できないかという話を受けるが、研究的アプローチはいろいろあるが、実用化技術はまだない。

Q：ターゲットの金属の順番は経産省が提示しているように概ね決まっているが、そういうものを主に対象としているのか。

A：レアメタルはあまり意味がないくりであるが、今までは重要視されてきた。一方、クリティカルメタルと言われる資源枯渇性の高い銅、亜鉛、鉛、錫などは、近い将来、日本の産業にとって重要

なメタルとなる。しかし、これらの優先順位を決めるのはなかなか難しいので、我々は今、グルーピングしようと考えている。レアメタル、ベースメタルにこだわらず、日本にとって戦略的に重要な10~15種を、戦略メタルという括りで整理しようとしている。経産省が発表する優先する鉱種も、基本的には我々の思考と類似するので、我々が戦略メタルを決めるまでは、現状の優先鉱種を信じてよいと思う。

Q: この技術を展開、普及していく観点は、技術開発の中でも重要な最終フェーズだと思う。クリティカルメタルは、どの元素が日本にとって今、貯蔵しにくいのかを解析している他省庁の所管の研究機関もあると思う。経産省以外の他組織、他省庁の研究機関との協力体制までも含めた枠組みは考えているのか。

A: 我々は経済産業省所轄の研究機関だが、他省庁の研究機関とも交流はある。これは、役割分担だと思う。廃棄物処理と都市鉱山は違うと言ったが、実は表裏一体であり、集まってくるものが有価であれば、我々が対象とする都市鉱山となるが、有害物の適正廃棄処理や、それをどうコントロールするかは、国環研の役割と考える。一方で、都市鉱山は、いろいろな学問分野が少しずつ関係する複合領域で、主軸が決まらず、関係者がそれぞれの立場からそれぞれのことを言うので話がまとまらない。ぜひ日本として統一した戦略を持って、それに基づいて各省庁なり各研究機関が協力できる体制のコアを築きたい。

5-9. 「泡によるレアメタルの選択濃縮分離」

二井晋（鹿児島大学 大学院理工学研究科 教授）

泡によるレアメタルの選択濃縮分離を紹介する。

現在よく言われるファインバブルよりもっと大きい2mm程度の泡を使う。濃縮分離塔の直径は6cm、高さは80cm程度である。この塔を使いレアメタルの選択濃縮を連続的に実現する研究を行っている（図1）。



図1

この研究は環境省のプログラムで3年間行ったもので、開発した手法を起泡クロマト法と命名した。泡の層を使うことで、レアメタルの分離の選択性を飛躍的に向上することを目指した。レアメタルのターゲットはガリウムである。ガリウムはLEDや太陽電池パネルなどに使われ、日本の成長にとっては必須資源である。経産省によるとガリウムの国内リサイクルは十分行われていると位置付けられているが、我々は廃棄物からの高効率分離を考え、そのためのプロセス開発を目指した。

レアメタルの回収では分離コストが最も大きな割合を占めるので、分離コストの圧縮や低品位からの濃縮が課題である。そして、代表的な湿式技術である溶媒抽出法の環境負荷低減を目指した（図2）。

従来の技術は溶媒抽出法であり、非常によく使われている。この手法は金属を酸で溶出して、その金属を溶媒で抽出する。溶媒抽出法にはミキサーセトラーという装置があり、ミキサー部分で混合し、セトラー部分で水相と油相を分けて、次の段に送る装置である。希土類等の分離装置では、これを100段から200段設置するので、とても大きな床面積と有機溶媒量を要する。

従来、電子、電気機器からのレアメタル回収は、物理回収法、化学的抽出法、溶媒抽出法が主要な技術だった。モーター類や自動車にも入っている希土類磁石であるレアメタルの回収プロセスでは、溶媒抽出法を使いプラセオジウム、ネオジウム、ディスプロシウムの分離が一般に行われている。比較的リサイクルが容易と言われている脱硫触媒でも必ず溶媒抽出法という工程があり、バナジウムやモリブデンが回収されている。

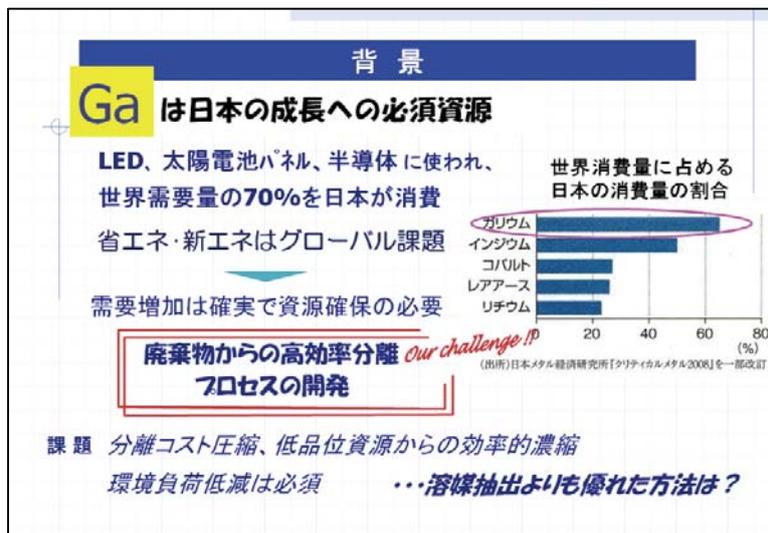


図2

研究のアイデアとして、従来から泡沫分離法が化学工業にあるので、ガリウムと選択的に親和する界面活性剤を泡立てて、その後、泡を回収すれば、ガリウムは簡単に分離できると考えた。その界面活性剤は、普通の家庭用洗剤の成分として使われていた化学品 PolyOxyethylene Nonyl Phenyl Ether (PONPE)である。現在はこの物質は環境ホルモンという理由で洗剤への利用は禁止されているが、PONPEは既存で非常に安価である。ガリウムは、このPONPEという物質に親和する (図3)。

PONPEの金属分離特性については、塩酸濃度が少し高いものの金とガリウムを選択的に分離できる。この範囲でガリウムと鉄を分離してやればガリウムが分離できる。実はこの研究に先だって金の分離を系統的に研究し、非常にうまくいった (図4)。

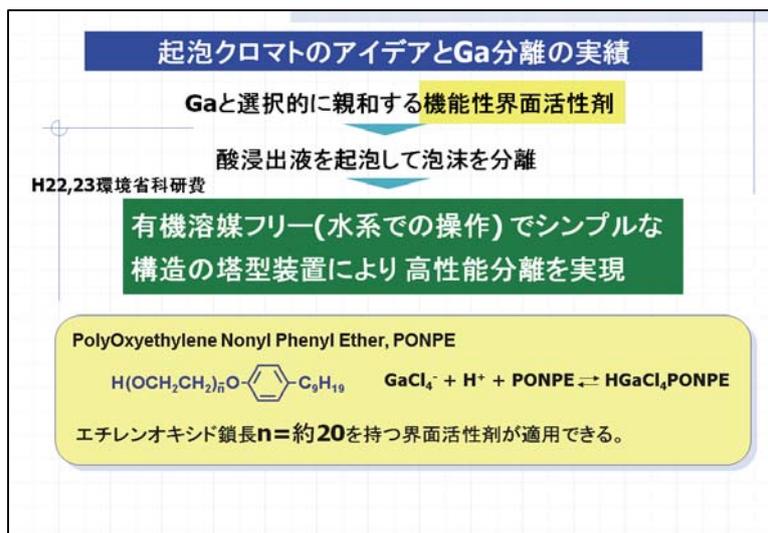


図3

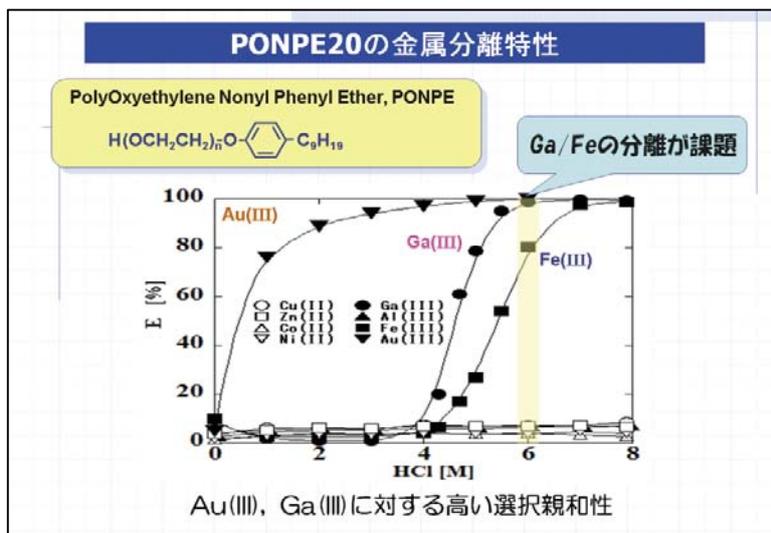


図4

開発した泡沫分離法では、塔に洗浄液を入れ、下方から空気を送ると泡が立ち、塔の中程からこの泡の中に金属溶液、夾雑液を導入することに特徴がある。目的金属を吸着した泡が上に上がっていく間に、塔の上方からPONPEを含む洗浄液を流すと、泡と泡の間隙部分に存在している非目的成分、すなわち夾雑物は、洗浄液とともに流下する。この場合、ガリウムの非目的成分は鉄だが、鉄や他の金属の混合物を、この簡単な洗浄液によって洗い流し、このPONPEという界面活性剤にくっついたガリウムのみを上方に上げることができる (図5)。

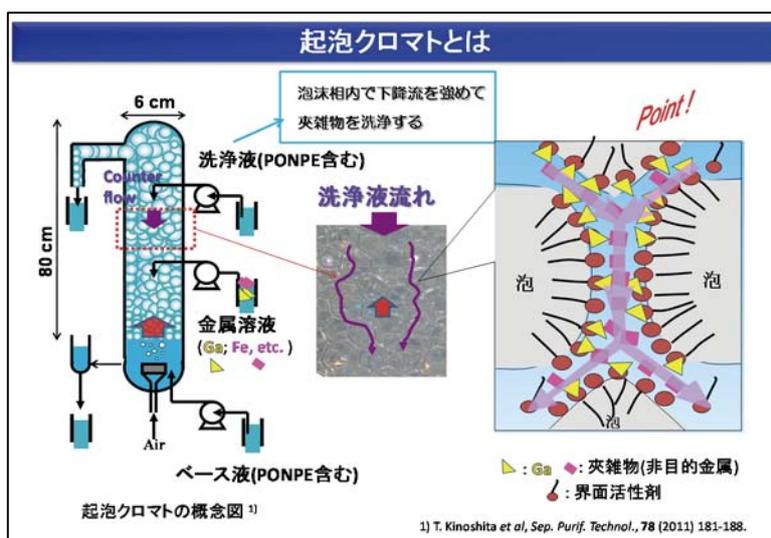


図5

従来の溶媒抽出法にPONPEを使うことは可能だが、起泡クロマト法の方がより高い分離性能が得られる。一つの塔を用いる操作で回収率100%が達成できた (図6)。

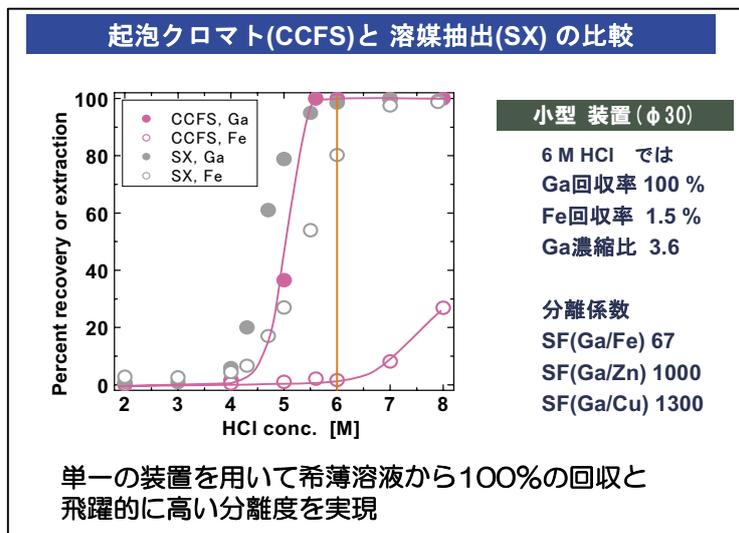


図6

そして、スケールを大きくすると分離性能が上がるという非常に興味深い結果を得た。実験室では、塔径3cmを始め、これを6cmに上げると分離性能は回収率100%を保ったままガリウム・鉄の分離濃縮比は3倍となり、他の金属でも全て上がった。

分離濃縮比が向上するのは、この泡沫相の中の液の流動状態が、塔径3cmよりも6cmのほうが泡の層での液の流動が分離に好ましい状態になるからで、このことをシミュレーションでも確認した (図7)。

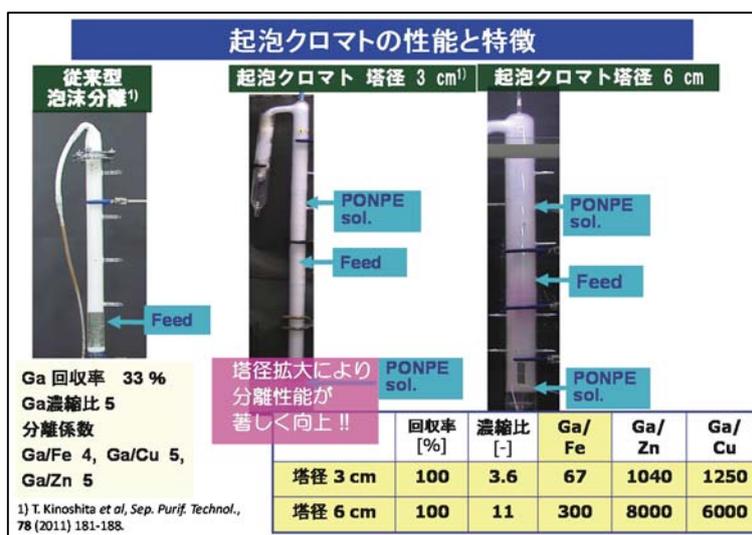


図7

この分離手法を亜鉛精錬残渣（亜鉛精錬残渣は多成分金属混合物でありながらガリウムの供給源でもある）に適用したところ、多様な組成を持つ製錬残渣の浸出液から非常に高い分離度を達成できた。ま

た、ガリウムヒ素の基板スクラップから、ヒ素も共存した状態の溶液からガリウムを回収分離できた。このように、既存の技術であっても簡単な工夫により分離度を大きくできる。また、非常に簡単な手法で連続的な分離が達成できる。

この手法の適用により、有機溶媒を大量に要していたプロセスから有機溶媒ゼロのプロセスが可能になり、装置が小型でシンプルになるのでオンサイトで分散型の処理が可能となる。また、この手法は金属イオンだけにとどまらず、固体粒子が含まれる系でも界面活性剤との親和性を使うことで対象にとらわれずに分離できる可能性があり、このような新規分野の開拓を通じて大きな社会的波及効果が期待できる。

レアメタルに関する背景として、産業構造上、レアメタルの重要性は国内で広く認識されているが、この認知の高さにも関わらず、リサイクルはあまり進んでいない。その理由は、経済性の問題、法規制、製錬施設の不足などのためである。企業が回収しても、その処理・回収事業が経済性に合わず、回収物が隣国に流れて行く可能性が十分にある。個別の技術開発は広く行われているが、資源の経済性に大きく依存しているので、少し価格が下がったら研究の推進力が落ちることが往々にしてある。

国内のレアメタルの戦略をどう立てるかが課題である。経済産業省が示すように、重要鉱種として23種、検討を要する14種、重点鉱種5種がある。しかし、重要度や緊急度は経済状況に強く影響を受けるので、5年10年前と、現在の状況は大きく変わっている。

研究動向について。分離の研究は、特に湿式で材料開発研究が非常に活発であるが、生産技術的な研究は非常に少ない。また、資金的なサポートも非常に少ないと思う。レアメタルの回収、再資源化は、学術分野が多岐にわたり、古い技術も多い。一方、真の課題がなかなか外に見えてこず、再利用を前提としたレアメタル利用のシステム化、サプライチェーンを考えた研究を展開すべきだが、こういう例は少ない。個別技術の研究開発は進められているが、企業研究への成果のアクセスには制限があり、新規参入したい企業が相談できるチャンネルがないので、産総研のSUREの活動に期待する。

ところで、研究提案書をよく書くが、これまでは個別技術の強みを最初に書き、これがどのように展開できるかという順番で書くことが多い。この順番を逆にして、あるべき社会、どのような未来を描いているのかを書き、そしてだんだん自分の技術に絞り込んでいくという順番にすることによって、現時点の問題点をより明確にでき、解決するための組織をどうしたら良いかとする出口志向の研究提案ができると思う。レアメタルというキーワードで考えると、環境省、経産省、文科省のプロジェクトがあり、我々はどこに提案したらよいか非常にわかりにくい。提案書の書き順を逆にして出口を明確にして考えた方がよいと思う。

研究として取り組む課題は、小型電子機器におけるリサイクルである。回収はなされているが、海外への流出や、最終処分されているものもある。この量をなるべくリサイクルに回したいのが我々リサイクルに関わる研究者の願いだが、実態は、重点的に行うべき鉱種が少なく、経済性の良いリサイクル技術がない。

まとめとして、1)レアメタルの分離は、希薄な原料から選択的に分離濃縮することがカギである。それを個別技術として行うのか、プロセスシステムとして行うかは目的に応じたすみ分けがあり、それに応じたアプローチが必要になると思う。2)大学側からの生産技術研究は、技術の厚みを増すという意味で、とても重要と思う。これは成果のアクセスの向上と、成果の社会還元で、学は社会との接点になり

得ると考える。3)望ましい研究は、あるべき姿が示されていて、システムが設計され、その中で必要な研究として位置付けられたものと思う。4)多様な研究への支援が望ましい。古い技術である金属精錬や装置工学はサポートを必要としており、イノベーションは古い技術から生まれてくるのではないか。

[質疑応答]

Q: 例えば溶媒抽出法だけで濃縮しようとする150段も必要だが、起泡クロマトプロセスの後だと溶媒抽出法の段数は3段で済むという使い方を考えているのか、それとも溶媒抽出の代わりに起泡クロマトプロセスを使えば出口は同じものが出てくるというイメージで考えられているのか。

A: 全く同じではないが、起泡クロマトプロセスの技術は溶媒抽出法の代替と考えている。

C (コメント): 工程内のインプラントリサイクリングが多いが、それは生産性を改善しているだけで何も世の中に生み出していない。ポストコンシューマーリサイクリングを都市鉱山と呼んでいるので、まさにこういう一回使用されたものを回収する技術の研究が今後重要になってくると思う。

Q: このような技術は単位操作化はできないか。レアメタルの回収における課題をもう少し一般概念化、無次元化することで、様々な特徴を持ったレアメタルに対してそれぞれの回収技術を単位操作化して設計できるような形のデータベース化はできないか。

A: そこがなかなか難しい。レアメタルは個の性質がかなり違う。例えば界面活性剤を入れてほかの金属をつかまえるものがあれば、そういう技術に関して定式化はできる。しかし、メタルごとに定式化するのがよいのか、技術でまとめるのがよいのかは不明である。データベース化、単位操作化は目指すべき道と思う。

Q: 出てくる抽出溶液の速度はどれぐらいか。

A: 泡をどれだけスピードで送り出すかだが、その速度は濃縮率と相反しており、速度を落とすと濃縮率が上がり、その兼ね合いで決まる。スケールアップ、塔径を大きくすることで性能が上がるのは、塔径が小さいと塔壁の影響を受けてしまい、塔壁のほうに液が引っ張られる。でも、塔径を大きくしすぎるとうまくいかないという結果も得ている。

5-10. 「化学プロセッシングを用いた資源循環技術」

吉岡敏明（東北大学 大学院環境科学研究科 研究科長／教授）

化学プロセッシングを用いた資源循環技術というタイトルで、プラスチックのリサイクルを中心に、そこから発生する金属の回収までをどうつなげるかという点に重きを置いて紹介させていただく。

さまざまな分野でプラスチックが使われているが、日本国内ではおおよそ年間1,000万t程度排出される。生産はそれよりも少し多い。法的な枠組みで、産業系と一廃系に分けられる。どのように有効利用されているかをプラスチック循環利用協会が毎年まとめているが、何らかの形で有効利用されているものが約8割、全く有効利用されず、焼却あるいは埋め立て処分場に行くものが約2割である。この比率はここ10年程度変わらない。廃棄されるプラスチックもここ十何年の間900万t～1,000万t程度である。リサイクルされる中身を見ると、マテリアル（メカニカル）リサイクルと言われる部分とフィードストック（ケミカル）リサイクルと言われる部分があるが、それほど多くはない。燃焼して電力転換するものや、あるいはそのスチームを熱回収するものが圧倒的に多い。よって、実質的に何らかの形で市場にもう一度戻ってくるものは2割程度と見ている。

金属の場合はどのようなリサイクルの仕方をしていても金属は金属で変わらないため、リサイクルという言葉でくくることができる。しかし、プラスチックの場合はその手法で全く異なるものが出てきてしまうため、手法としてメカニカル（日本ではマテリアルと言う）リサイクル、フィードストック（ケミカル）リサイクル、エネルギーリカバリー（サーマルリサイクル）に分かれている。特に、容器包装リサイクル法などに絡めると、これにどのようにプライオリティをつけるのかというさまざまな議論がなされているのが実情である。

プラスチックリサイクルの難しさについて。世間一般的には3P、すなわち、PP（ポリプロピレン）、PS（ポリスチレン）、あるいは塩ビやPET等であるが、PPやPSという種類を分けていくと、樹脂だけで153種類程度が市場に存在する。さらに、使いやすくするため、あるいはニーズに合わせるために、添加剤が使われている。柔軟性を与えるための可塑剤や、壊れにくくするための安定剤、燃えにくくするための難燃剤等が入っており、添加剤だけで230種類程度が工業的に作られている。市場ではこれらをうまく混ぜ込んで使っているため、例えばマテリアルリサイクルでもう一度同じ原料として使おうとしても、どこかでひずみが出てきてしまう。スペック的にもたない。よって、水平リサイクルはある程度のところまでは可能だと思うが、長くは続かず最終的にカスケードになってしまうのは仕方ない。そのとき、フィードストックリサイクルがソリューションの一つであると認識している。

プラスチック樹脂生産の内訳は、年毎に大きく変わらない。ただ、最近ではPETというポリエステル系のものが少し増えつつある。塩ビが嫌われた時期があるが、化学産業にとって塩素の循環あるいは固定に重要な役割を果たしている製品であるため、その数字はなかなか変わらないのが実情である。

プラスチックはいろいろなところで使われ製品に組み込まれている。プラスチックとして混合物がほとんどないものはペットボトルぐらいしかない。これだけは純粋な樹脂として見てよいので、うまく回収さえできれば水平リサイクルも可能と思うが、他のものはなかなか厳しいのが実情である。金属の方がどちらかという点が高いため、リサイクルではそちらをターゲットにしてしまうが、プラスチックをどうするかを考えなければならない。いずれにしても両方考えることが重要だと思っている（図1）。

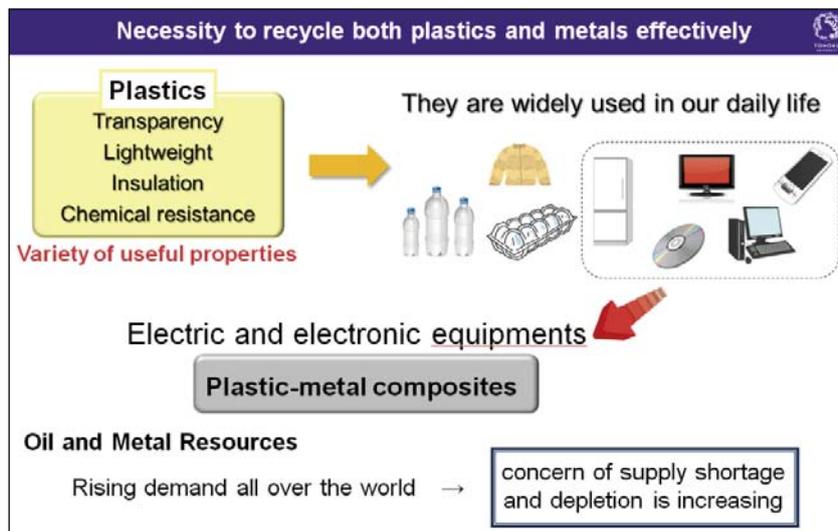


図1

塩ビとPETがリサイクルにとって非常に困難な物質である。塩ビには塩素が入っている。さらにはいろいろな添加剤が非常に多く含まれている。少し処理を間違えると、例えばダイオキシンが出たり、それよりも塩化水素が発生して装置を腐食するというのが一番の問題である。PETの場合、ペットボトルはよいが、他の製品にも様々な形で使われており、熱分解やリサイクルをしようとして化学変化を起こそうとすると、テレフタル酸が出てくる。これは昇華性の物質で、さらに有機酸であるので、装置に非常にダメージを与える。それを発生させないようにするためにどうするか。この2点が大きなポイントである。

塩ビでは、塩化水素の発生を逆手にとって塩化水素だけ回収しようという話もあるが、処理前に塩素をうまく取り出す事前処理のプロセスがないかということで、私はアルカリの水溶液を用いていわゆる圧力釜の中で煮るような処理を行った(図2)。250°C程度で処理すると非常に効率的でほぼ100%近く塩素が取れるが、圧力釜で水を用いるためやりにくい。そこで、もう少し温度を下げ、不凍液でよく用いられるエチレングリコールを溶媒にすると、水を使う場合の250倍程度速度が速くなり非常に効率的に塩素が取れる。塩ビ以外で、もっと塩素が取れにくいビニリデンがある。通常の熱分解では60%程度しか取れないが、90%以上取れるようになる。以上より、湿式処理は一つの方法としてあるだろうと思っている。また、自動車のシュレッダーダストの中には塩ビ製品が多く含まれるが、臭素あるいは亜塩素が190°C程度で、圧力釜を用いずに100%近く除去できる。ハロゲンの除去により、燃料やさまざまな利用方法が出てくるだろうと思っている。実はデンマークで年間2万t程度のプラントが動き出した。十数年前なので今は動いていないかもしれないが、一応ここまで成果が生かされたと思っている。

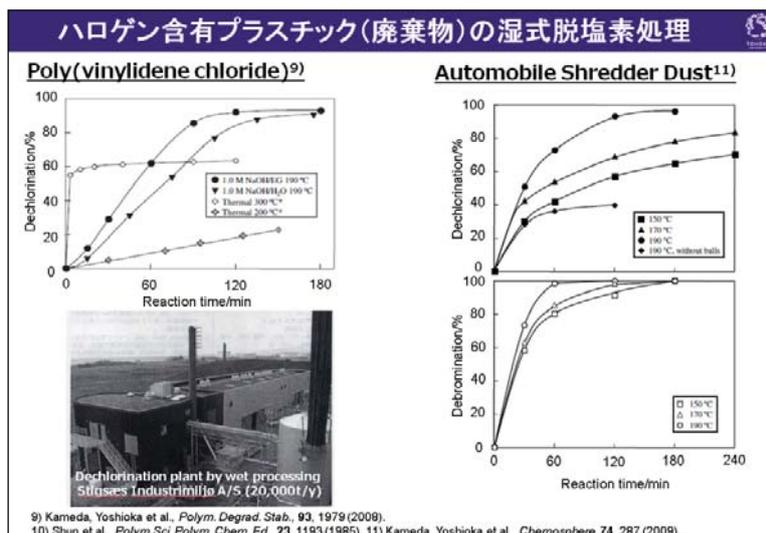


図2

湿式は場合によっては嫌われるプロセスでもあるため、乾式で検討した例が図3である。塩ビの熱分解の挙動を示しているものであるが、他のプラスチックが分解する前に塩素だけが低い温度で非常によく抜けてくれる。しかし、その処理が難しいという点もある。ここで出てきた塩化水素をうまく使えないかということで、ブラウン管のパネルや液晶パネルに含まれる鉛やヒ素をこの塩素を使って回収する試みをしている。ただ、廃棄物が溶ける温度と塩ビが分解する温度が異なるため、出てきた塩素をカルシウムなどに固定し、カルシウムと一緒に廃棄物を分解すると重金属が非常によく取れることがわかってきた。自動車のスクラップも同様に処理すると、含まれる微量の銅なども十分に回収することが可能となってきている。

その際にポイントとなる脱塩素について、通常は塩素処理を考えるが、実は300℃あるいは250℃より低いところでは、活性化エネルギーが125kJ程度で塩素が抜けている。これは反応律速を示している。通常のプロセスは300℃や400℃という高い温度で行う。その条件は、実は熱移動律速の状況で処理をしているということになる。すなわち、反応をいじってもどうしようもないので、この熱移動をうまく行うための装置開発やプロセス開発が必要となる。いろいろな装置を組むが、結局これが実現されない限りはうまくいかない。偶然合ったものについて、うちのプロセスはいいという話になってしまう。

さらに、塩素を他のものに変えられないかということも検討している。先程、湿式プロセスで塩素が非常によく抜けるという説明をしたが、実は塩素は他のものに置換している。先程の場合は水酸基に置換することで塩素が効率的に抜けてくれた。では、水酸基を他の基に変えたらどうかということで、チオシアン酸で塩素のほんの一部を置換した。例えば、とても長いカーボン鎖長のものを少しでも交換できれば、可塑剤を使わずに塩ビに可塑性を持たせることができる。芳香環では撥水性や親水性など、新たに添加剤を加えなくても、塩ビそのものに機能を持たせることができる (図4)。

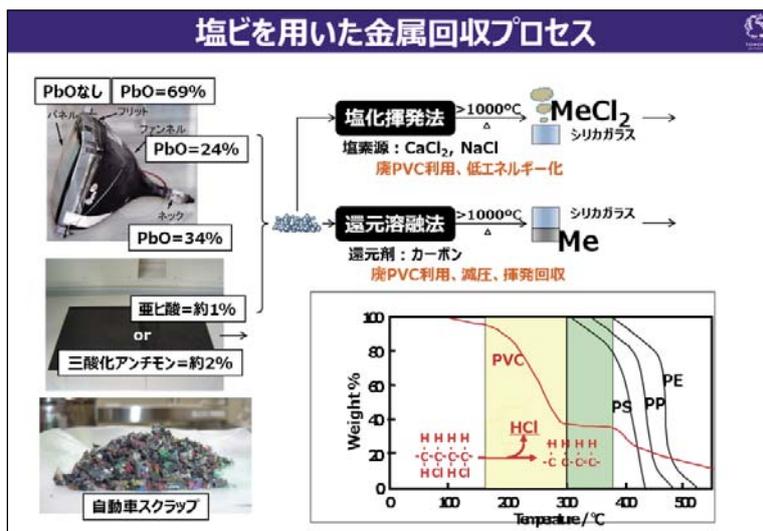


図3

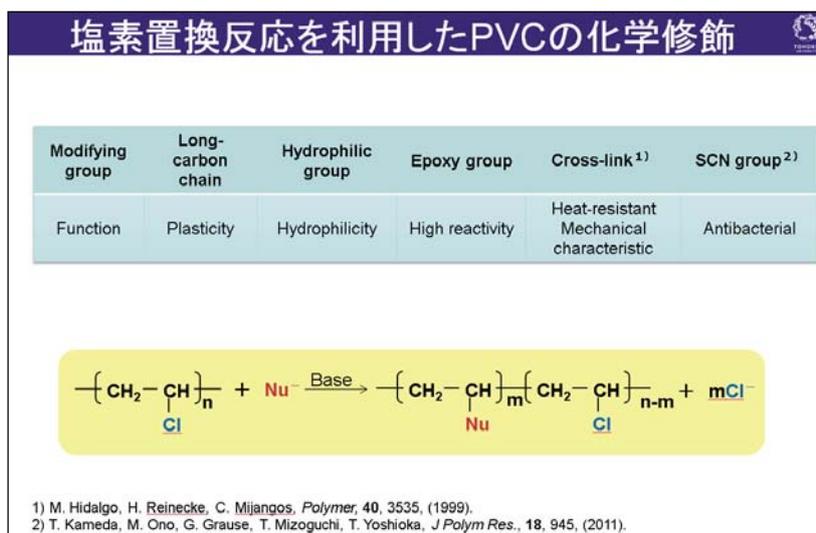


図4

チオシアン酸はワサビの成分であるので抗菌性があるかを検証した (図5)。ほんの3~4%程度、塩ビの塩素を置換すると、黄色ブドウ球菌の数を抑制することができる。ということは、例えば塩ビ管である水道管のパイプの内側をほんの少し置換できれば、抗菌性を持った水道パイプができる。壁紙で使っている塩ビにこのような作用を持たせれば、銀を塗布しなくても済むような抗菌材料が作れる可能性はあるのではないかと期待している。リサイクルした製品に少し機能を加えることで、カスケードではなく、しかも水平ではなく、アップグレードな材料開発を期待したい。

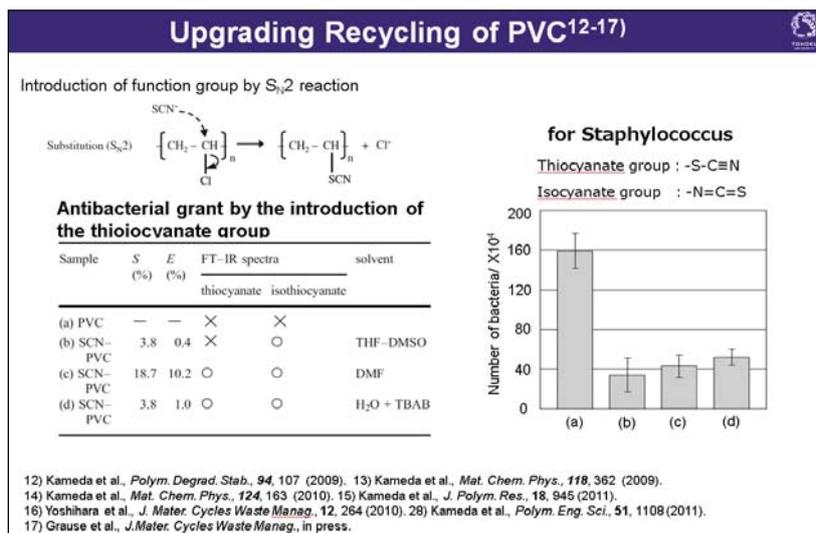


図5

次に、PETについて。先程、有機酸が出るのでプロセス上非常に問題があると説明した。実はこれにカルシウムを触媒的にあるいは反応材的に加えると、カルボキシル基をうまく取って、ベンゼンが優先的に生成することがわかった。これは特許化している（図6）。

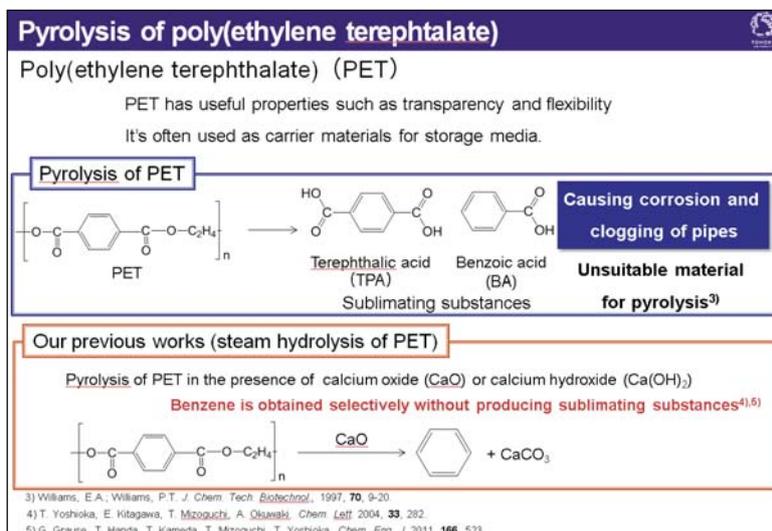


図6

すなわち、他のアルカリ土類でもよいが、カルシウム系のものを加えることで油に絶対ならないと言われていたポリエステルも油に転換できることになる。さらには、うまく利用すると金属の回収も同時にできるだろう。例えば、X線フィルムなどではPETに金属が混ざっており、ベースの樹脂はほぼポリエステルである。上記のプロセスを使うと、油あるいは化学原料として非常に有用なベンゼンが出てくる。一部では発がん性があると懸念されるが、化学原料としては基礎製品として重要なものである。さ

らに、このカルシウム系のもは循環的に利用することができる。加えるものは原料と水だけであり、原料回収もできる。残るのはメタルだけである（図7）。金属は燃焼すると酸化物になってしまう。他の金属が混ざっていると焼結して使えなくなる。そのような意味では熱分解も一つの方法として考えられる。X線フィルムからのベンゼンや銀の回収が実際にできている。他の製品についても、金属回収と同時に油分回収ができることもわかっている。プリペイドカードでは、残渣に酸化鉄と酸化チタンが入っている。これは実はイルメナイト鉱石とほぼ同じ成分である。酸化チタンを作っている工場で、イルメナイト鉱石の原料の一部に置き換えてしまえば、新しい処理プロセスを作らなくても既存のプロセスで十分に資源回収できる。

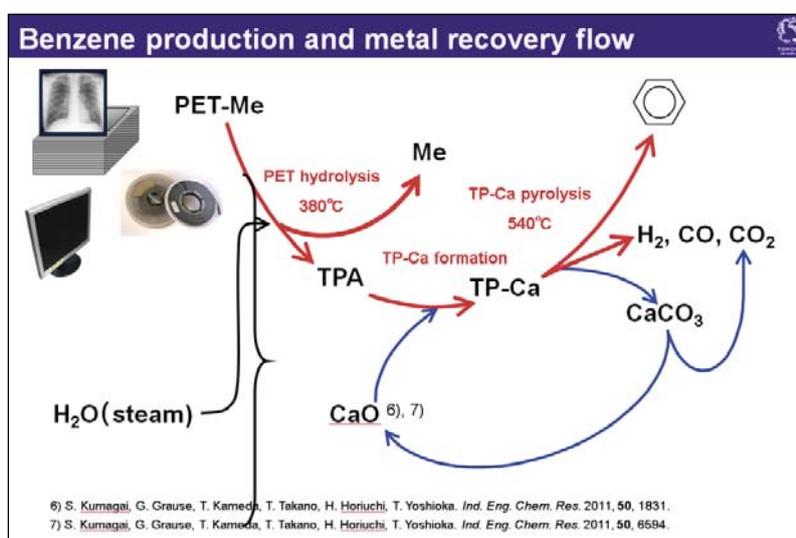


図7

このようなプロセスの基幹産業になるところは日本全国あちこちにある。軽いプラスチックをあちこちに運ばなくても、その地域の特性や手法に合わせることで様々なリサイクルの手法が生きてくるのではないかと思っている。

トランステクノロジーと言っているが、新しい技術は、実は違う分野で使えることがある。しかし、そのままでは使えないため、うまく組み合わせながら適用することでこういった技術は進歩するのだろう。社会で受け入れられなかった技術はそこで終わるが、実はその技術はまた次のところで使えるのではないのか。そのような考え方も必要ではないかと思っている。

3Rについては、先進国だけでなくアジア諸国や太平洋でも非常に注視している。今年で6回目となるアジア太平洋3R推進フォーラムでは、33カ国の政府代表が参加して真剣に取り組んでいる。そこでは3Rによる経済機会ということで、都市部門、建築・解体廃棄物、バイオマス廃棄物、電気電子機器廃棄物（WEEE）といったテーマ別円卓会議が設けられた。先進国あるいは開発途上国だけでなく、世界的に小さな国、大きな国も含めて重要になってきている。

将来的に重要な課題として災害廃棄物がある。非常に多くの廃棄物が発生する。特に大規模災害に備えて重要な視点として、技術的な検討の必要性が謳われている。災害も視野に入れた技術開発に平時か

ら取り組む必要がある。平時からの取り組みは、実は災害時以外での技術にもつながるのだらうと思っている。

グローバルな研究開発や、技術的な部分だけではなくリスク予測も含めたところとうまくマッチングさせながら、企業や社会、国民に対する情報提供や、要望を受け入れて進めていく。日本の倫理学も必要なのだらうと思いつながりながら研究を進めている。

[質疑応答]

- Q：金属は元素自体に価値があるので失われたい。しかし、有機物は分子構造に価値を持つため、混合や劣化により水平リサイクルは難しいと思っているが、アップグレードできることはとても面白い。仮にカスケードであったとしても、真に社会が要求する形でもう一度利用できる可能性がどこにあるか。
- シュレッターダストなどから金属を抜いてしまうとプラスチックは逆有償になってしまい、金属の売却額を食われてしまうため、一緒に考えていかなければならない。もし徹底した分離ができたとしたら、ここまではできそうだというプラスチック利用の将来性についてご意見を伺いたい。
- A：プラスチックを使うユーザー側がどこまで分別したものが使えるかで決まると思う。ただ、最低限のラインは決めておいた方が選別側も楽だと思つるので、どこかで決める必要があると思っている。少量での選別は難しいと思う。地域である程度の量を集め、それを大きな選別にかける。そして、ここまでのスペックができるので、誰がこのスペックなら使えるのか手を挙げてください、といったことがあるだらうと思っている。おそらくそれで合わなかったものは、水平リサイクルやマテリアルリサイクルは難しいと思うので、フィードストックのような形で資源の価値を持続させながらどこかで使っていくことを考えなければいけないのだらう。しかし、優先順位をつけるのは問題があると思うので、ある程度のラインはあってもいいと思っている。ラインがどこかについては、多分これからやっていかなければならないと思う。そのための技術のデータベースも必要だと思つたが、実はそれを使い回しできる人のデータベースも必要と思っている。

5-11. 「輸入依存から脱却した次世代リチウム資源循環型社会への挑戦」
 星野毅 (日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 研究主幹)

核融合炉は重水素と三重水素（トリチウム）を燃料として核融合反応を発生させてエネルギーをつくる炉である。トリチウムは自然界に存在せず、人工的に作成するしかない。その人工的作成手法はリチウムがポイントであり、リチウムに中性子が当たると核反応によりトリチウムとヘリウムに分かれる。このトリチウムを核融合炉内で循環させるのが核融合炉の燃料循環のシステムである。リチウムには質量の異なるリチウム6 (${}^6\text{Li}$) とリチウム7 (${}^7\text{Li}$) があるが、核融合炉燃料のトリチウム製造では自然界に7.8%しか存在しない希少な ${}^6\text{Li}$ が必要であり、 ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ の分離、さらに分離には多くのリチウムが必要のため、海水や使用済みリチウムイオン電池からのリチウム資源回収を行っている。

核融合発電を実証する原型炉は2030年代に実現すると言われているが、より早期に大量のリチウムが必要になるのはリチウムイオン電池産業である。これまでは電気自動車での利用とされてきたが、ハイブリッド自動車も大型のリチウムイオン電池を積む時代が見えてきた。そこで、そのリチウム資源の回収というテーマも重要になってくる。

リチウム資源は南米から回収しているが、回収方法が非常にオーソドックスで、南米の塩湖の水を1年程度かけて蒸発させている。電池市場が成長しても供給に1年かかる。地上のリチウム埋蔵量は結構あるが、供給に時間を要するため、需要と供給のバランスが崩れてしまう。そこで、直接海から回収できればいいのではないかとこのところから研究開発を始めた。MITの文献では、リチウムは技術革新があれば海水から回収してもコスト的に概ね合うとの記載がある。吸着材によるリチウム回収は多くの研究者が取り組んでいるが、吸着材の劣化や高いコストという課題がある。そこで、競争的資金を使って研究を行った (図1)。

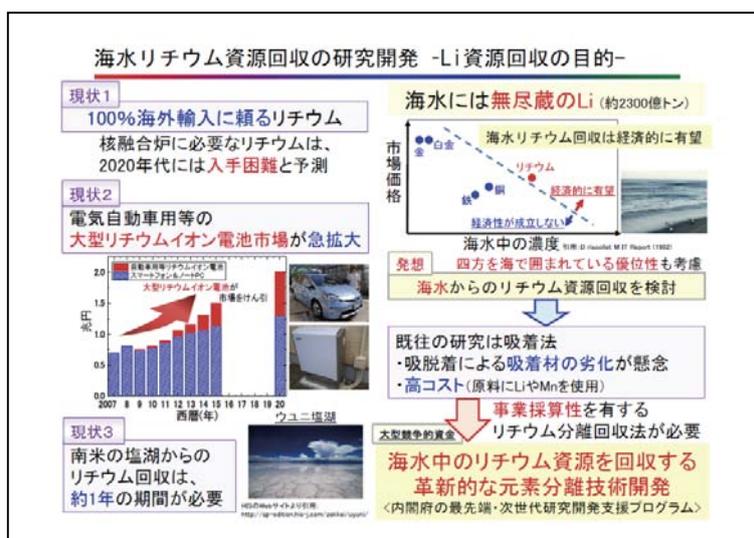


図1

まず、膜を使った分離技術を考えて。リチウムを多く通すような膜により、海水に含まれる多量のナトリウムの中からリチウムを電気力で移動させることを試みた。25Lの海水から2時間かけて22%回

収できた（図2）。しかし、これは回収率であり量ではない。例えばナトリウムは海水中に1万ppmあるが、リチウムは0.17ppmであり、約5万倍ナトリウムの方が多い。よって、ナトリウム1%回収とリチウム22%回収では、量的に圧倒的にナトリウムの方が多い。

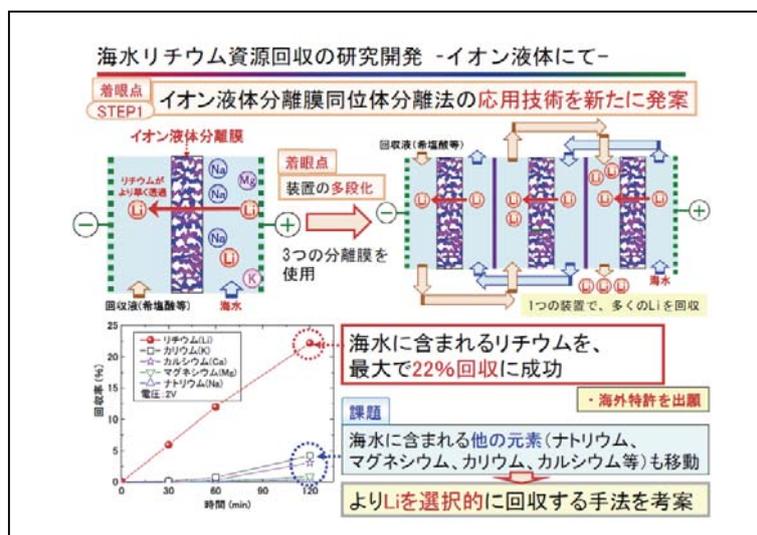


図2

そこで、完全にリチウムだけをとる手法としてセラミックス製のリチウムイオン伝導体に着目した。セラミックスの結晶構造中に面白い伝導パス（リチウムイオンだけが流れる道路）ができています。ナトリウム等は流れない。最初はうまくいかず、表面にリチウムやナトリウムの堆積物ができて最終的に割れるという結果となった（図3左）。その原因としては、リチウムは水分子を囲んだ水和イオンの形で存在するため、この水和イオンが移動してしまい透過しないと推察した。そこで、イオン伝導体と電極を完全接触させ、リチウムの濃度勾配があるものを伝導体につけると、濃淡電池になるという面白い現象が起きた。例えば、右側に海水、左側にリチウムがない液体（回収液）を入れると、右から左へ自然とイオン濃度差でリチウムが移動するという仕組みである（図3右）。装置も非常にシンプルにできるようになった。イオン伝導体のセラミックスは5cm角である。海水と回収液が混ざらないようにシリコンシートでパッキンし、ねじを締めるだけである。ねじ締めにかかるため、大型の装置を作る際は1年程度の耐久性がある膜でないと交換の手間がかかり、課題である。

研究開発課題はその膜の部分にあり、リチウムが流れるスピードが遅いことである。よって小さなセルでは難しく、イオン伝導体6枚を1つの装置に入れ、それを3台使うというイオン伝導体の大面積化で、海水25Lから約3日間でリチウム7%を回収することができた（図4）。

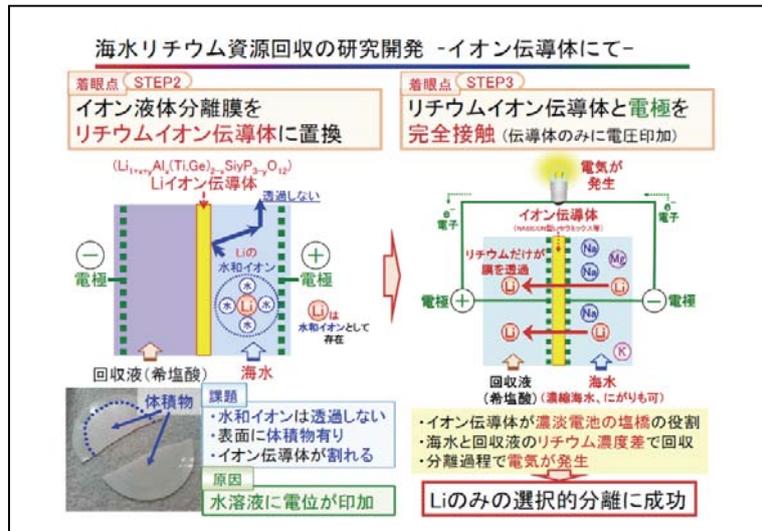


図3

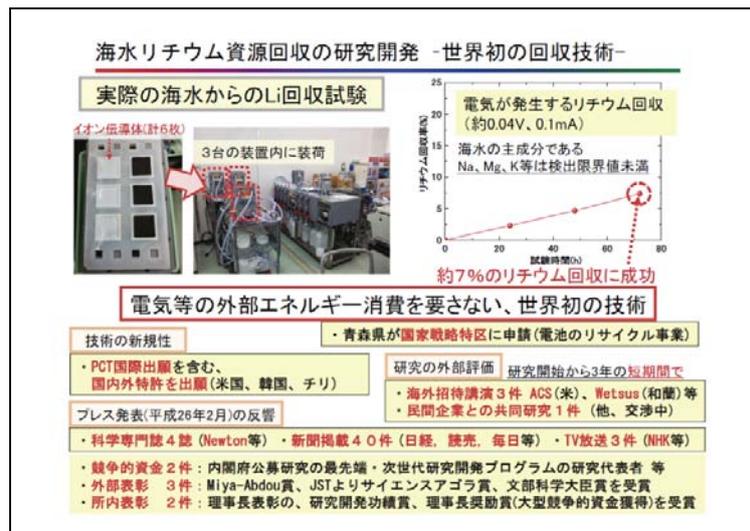


図4

次に、分野・コミュニティの動向について俯瞰した立場から説明したい。当然ながらレアメタルやレアアースはものづくり日本の象徴である自動車、白物家電、電子機器に使われるが、日本の製造業の営業利益率は3%台と海外と比較して低い。アメリカなどは10%台ある。常に何かの外部変化に影響され、為替変動があれば一気に赤字になる。為替変動と同様に、レアメタルの輸入制限により一気に赤字になってしまい、それが日本の製造業の弱さと考える。資源が乏しい現状は変えられないため、この仕方がない部分はどうにかしなければならない。我々のような研究開発機関がそのようなところをサポートできればと思っている。

海水にはリチウム、マグネシウム、ウランなど、都市鉱山には、電池の場合はリチウム、ニッケル、コバルトなどがたくさんある。そこから分離回収するチャレンジングな研究があってもいいと思ってい

る。すぐに出口につながらなくても、出口は見るとして、回収時に水素や農業用のリンなどの副産物が得られたらよいと思っている（図5）。例えば、関西大学では、ハードディスクのリサイクル時に有機リン系の抽出剤を使いニッケルを回収するが、回収と同時に亜リン酸の肥料ができる。通常はニッケル回収の部分で終わり、次にコスト計算となるが、副産物ができて売ることができる。トータルのコストは目的とする資源のみを回収するより安価になることは自明のため、ブレークスルー（技術革新）は確率論ではあるが、挑戦的なところがあってもいいのではないか。太陽電池であればガリウム、セレン、インジウム、自動車であればジスプロシウム、ネオジウムなど、いろいろなものが含まれている。課題としては、分離膜、分離剤、回収プロセスなど、さらに挑戦的な排CO₂ガス利用などがある。ワンスルーではなくて、その中で非連続イノベーションが1つあればいいと思っている（図6）。



図5



図6

研究環境や実用への克服すべき課題について、若手や女性の挑戦的な研究を推進し、長期的な目線で研究者を育てることが必要と思っている。これから研究者になる学生やポスドクの方は、給与がよく、安定した採用条件を提示する民間企業に当然行く。それでも公的機関等にて研究を継続したいという気持ちもあり、特に若手や女性に研究に専念できる場を設けたらいいのではないかと。一方、シニアな研究者は、研究開発でのPDCAサイクルを意識させる体制をつくるなど、研究現場をサポートするようところで活躍する取り組みも面白いと考える(図7)。

若手の人材研修も必要ではないか。若手育成というと雇用資金を得るところだけに目がいてしまい、人材(能力)育成になっていないのではないかと危惧している。経営大学院などと融合した研究開発も有りではないか。シニア研究者はプロジェクトマネージャー、我々のような世代は研究部門の長、あとは若手にどんどんやらせてもらう。しかし、普通にやるのではなく、PDCAサイクルという経営的な側面や出口も意識させることを考えている。現場の予算配分も研究チーム内部で柔軟に配分してもいい。成果を出しているところには当然研究費を出して促進させる。短期間ではなく中期的、なおかつ高額な研究費を充ててはどうかと思っている(図8)。

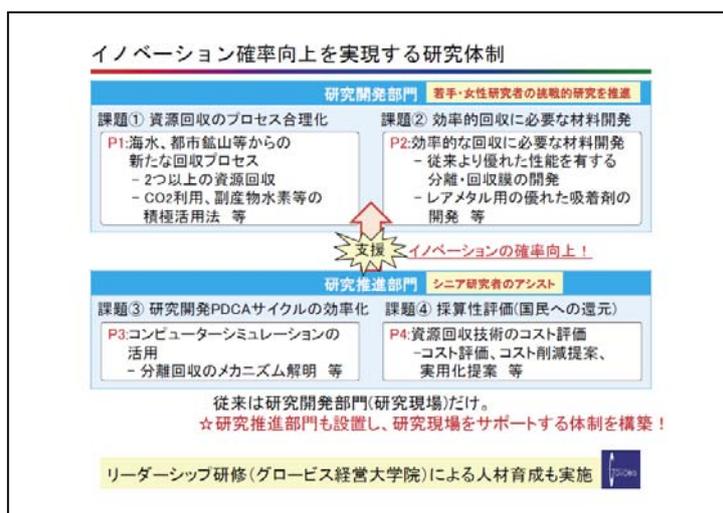


図7

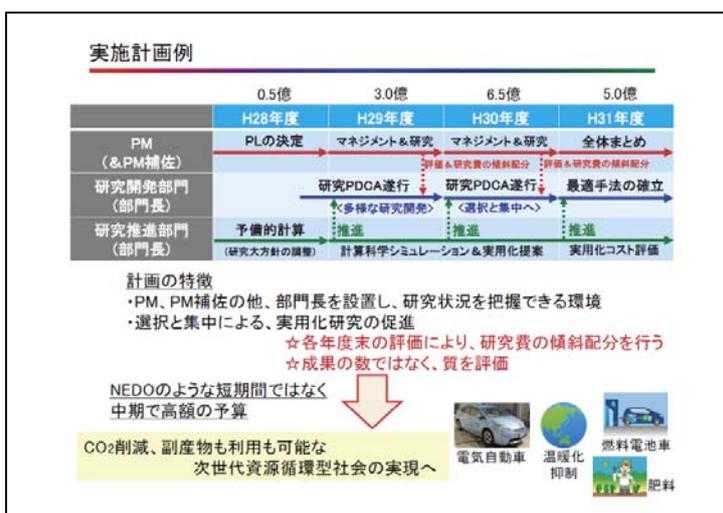


図8

最後に、今後国として注目すべき方向性としては、先程説明したとおりである。海外輸入と同等コストの技術で非連続イノベーションを目指し、新たなマネジメント体制を作り、目標に向かっていく。最近の競争的資金が出口に偏りすぎていることに危惧している（図9）。

私が実行するとしたら、このようなことをやりますという例として、海水からの回収だけでなく、リチウム電池をリサイクルするリチウム分離回収プロセスを紹介する。最終的に生成する炭酸リチウムは電池の原料となるが、それを作るときに排CO₂ガスを使う。また、この技術は水素が発生するので、水素を燃料電池に使う。このような研究開発を促進したらどうかと思い提案させていただく（図10）。

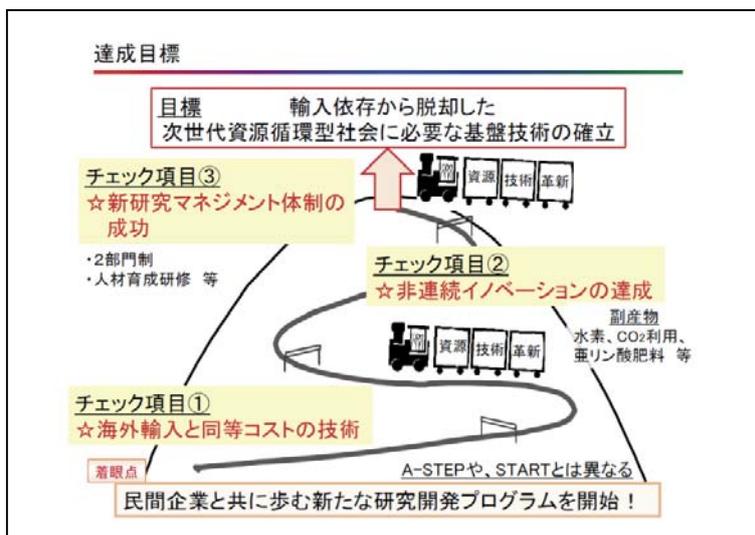


図9



図10

[質疑応答]

Q：2～3年のプロジェクトでのポスドク確保が非常に難しい。ポスドク獲得競争になっており、プロジェクトに採択されてもポスドクがいないという状況である。中間評価があれば1年目で切ることも発生し得る。会社のような形で戦略的に研究開発ができない。

A：新しいプログラム、もしくは既存のプログラムを変えていくことなどを考えなければいけないのではないか。

1. サマリー

2. 趣旨

3. 環境分析技術

4. 環境予測・評価技術

5. 環境対策技術(環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術)

6. 各話題提供のハイライト

付録
ワークショップ
プログラム

5-12. 総合討論

モデレーター 菊池康紀（東京大学 総括プロジェクト機構 特任准教授

／JST CRDS 環境・エネルギーユニット 特任フェロー）

- [菊池] Web of Scienceを使い、10万本程度の論文を対象に環境をキーワードに俯瞰を試みた。Environmental Ecosystemといった環境そのものを捉えようという話もあれば、生態学を対象とするもの、土壌・水質汚染、汚染を解決する技術、廃棄物をどう扱うかなど、いろいろな議論がある。環境学という言葉自体は最近議論されるようになったものである。もともとは農学や資源工学、地球惑星科学など他の名前で議論されていたものが、Environmentという単語で統合していくと徐々にクラスターを形成するようになってきたというのが最近の傾向である。さらに、特徴的なものだけを抜き出していくと、気候変動や生態系、遺伝子解析、製剤、有機物、ナノカーボン、ナノテク、エネルギーなど、最近の社会課題の話に関連づけられた分野が成長してきているという特徴がある。

本日伺った内容をライフサイクルアセスメント（LCA）という分野から見ると、製品のライフサイクル全体から見たときの一つ一つのプロセスである、分離や副生物の処理、廃棄といったところにかかなり近い。LCAは大きく2段階ある。1段階目はライフサイクルインベントリ分析というもので、製品のライフサイクル全体から環境負荷物質がどれくらい出るかを定量化する。定量化されたものを使って環境影響評価をしていくのが2段階目となる。

環境対策技術を見たときに、一連のライフサイクルと環境影響の評価があるが、環境負荷物質がどれくらい出てしまうのか、それがライフサイクルの中できちんと回ることができるのか、そういったところに関連性が強い。要は、無価値物または逆有償で流れているようなものを有価値物に変える、または、有害物を無害物にする、そういった観点のものがいわゆる環境対策技術と言える。

どのようなプロセスがあるか。法律的な言い方であると、産業廃棄物を処理するのか、一般廃棄物を処理するのか、その後の廃棄物埋立や焼却後の廃棄物を処理するのか、どう処理して無害化したり社会システムの中で機能するような形に技術的に変えていくかが目的かと思う。溶存物、温度や濃度など、対象とするものがいろいろある。要求している浄化レベルも様々であり、法規制も関わるようなものが多い。目的としては、ある物質の除去や回収や再生、さらなる製品化があると思うが、課題としては低温や低濃度であること、高付加価値化が難しいこと、処理のメカニズムがまだわかっていないことなどがある。

コベネフィット型の水環境保全技術が紹介された。排水など水に関する話は多かったかと思う。水環境の保全技術を開発する。しかし、現地のニーズや現地の状態、社会経済性なども考慮しながら、そこに合うような形で入れていく必要があるというお話であった。

発生土を有効利用して環境安全型にするお話や、その評価の仕方に関する話題提供もあった。一概に廃棄物と言えないものであるが、副産的に発生してしまうようなものをどう適材適所に、適切な形に処理していくかというものであった。

また、分子認識材料で除去や回収、有効利用を行うという環境対策技術についても議論があった。ゼオライトなど様々なものがあるが、その中でもシクロデキストリンに関して深く議論いただき、液相系の水や油に対する議論もあった。当然気相系のものも他にあるかと思う。様々な形で分子認

識材料の応用展開先がある。

植物機能の多様性をうまく使った分離についても議論いただいた。相手が植物であるので、もしかするとまだ把握していない様々な可能性があるのかもしれない。そこをうまく利用していくと、さらに我々ができなかったようなことができるようになってくるのではないかな。

同じように、微生物にも経営的や工学的な感覚が少しあるが、目的を変えていく、新しい高付加価値に変えていくことができると、さらにバイオテクノロジーが進展するのではないかなというお話などもいただきながら、微生物工学の可能性について紹介いただいた。

さらに、微生物の振る舞いをさらに細かく詳しく見ることによる様々な可能性があるのではないかなという議論もあった。微生物の振る舞い、プラスミド、成分レベルで見えていくことにより新たな可能性、新たな機能が発現するのではないかな。

ジオミメティクスによる分離や除去への貢献のお話もあった。

戦略的都市鉱山の開発では、廃棄物として既に出てしまっているものをどう扱っていくのか。早く技術の展開や実用化が進まなければいけない分野において、どう取り組んでいくのかという大きなフレームワークである。

また、レアメタルを泡により選択的に濃縮分離する新たな方法についても紹介があった。

さらには、プラスチックのリサイクルでは、化学プロセッシングによりカスケードやクローズドループ、オープンループというのがあるが、アップグレードリサイクルという可能性についても議論いただき、リサイクルが単にリサイクルだけではなく、さらに違う用途も考えられるという可能性がある。

リチウムは今非常に重要な物質の一つとしてカウントされているが、リチウムの回収と分離と再利用に関しては新しく大きな可能性がある。

このような内容を受けて、環境対策技術をどうまとめていくのか。例えば、対象物には、産業排水、生活排水、発生土、廃油、産廃、一廃などいろいろなものがあるが、どれを対象にすべきなのか。特に重点的に見なければいけないものは何か。また、特定の元素についても議論いただいたが、他にはどんな元素を回収しなければいけないのか、再利用できなければいけないのか。金属以外にも高付加価値の物質としての可能性はどれくらいあるのか。もちろん、燃料やエネルギーとして回収できる仕組みをつくっていくことが重要なので、燃料エネルギーはこれだけ大量に回収しなければいけないのではないかなといった議論もいただきたい。

論点と開発の方向性について7つ挙げさせていただく。

1. 特定物質の処理効率の向上

効率には選択性、コスト・利益、環境負荷、資源消費、速度、量的・質的な効率などいろいろあるが、処理効率の向上がやはり必要なのではないかな。

2. 処理メカニズムの解明と応用

処理メカニズムの解明と応用にもっと着眼点を当てて研究を進めていくべきである。

3. 異分野との融合

3Dプリンター、IoT、人工知能など他にもいろいろあると思う。特に情報系では既に実用化さ

れているような製品が出てきた。そういったものを利用すると一体何ができるのか、そういったものの製品や考え方の普及によって発生する新たな問題が何なのか。

4. 課題の具体的解決に向けた実装の取組

例えば、自治体との連携や、企業との製品化・商品化・マーケティングなど、実際に技術を入れていく、活動していくというところについて。

5. 技術・製品・廃棄物・成功（失敗）事例のデータベース化

データベース化という議論も少しあったが、技術や製品、廃棄物、成功事例、失敗事例など、いろいろある。今後技術を体系にしていくため、実際に使えるような形にしていくためには、様々なデータベース化が必要になるのか、情報化が必要なのではないかといった観点について。

6. 関連法案・社会システムと組み合わせた分析・設計

廃棄物が出発点だと、どうしても関連法案や社会システムと組み合わせた分析や設計も必要になる。ペットボトルは自主的取組により、日本で売られているものは全部透明であり直接印刷をしないなど、生産者側の努力もかなりあって回収率が上がりリサイクルできるようになった。最近の例では、液晶テレビの導光板であるポリメチルメタクリレート（PMMA）も単一の物質であるが、表面に酸化チタンが塗ってあるのでうまく表面だけ研磨して取り除けばそのままリサイクルできる。家電リサイクルの工場は家電メーカーが出資者でつくっているのだから、自分たちの製品を自分たちで回収して自分たちでリサイクルすることを彼らは行っている。プラスチックはいろいろな種類があるが、製品の中身は生産者であればわかるので、わかっているものを回収してわかっている用途に使うといった社会システムをうまく構築すれば、回収してうまく利用できるのではないか。そのような廃棄物における法制度やシステムの工夫もある。そこにも技術としてどのような対応ができるのかという議論も必要かと思う。

7. イノベーションを起こす研究（教育）体制の構築

最後に、やはり人材の話で、イノベーションを起こすための研究教育体制の構築が必要かと思う。やはりここが一番重要なのではないかということであれば、意見や議論をいただきたい。

データベース化

- 技術などのデータベースはある意味必要だが、逆にそこがきちんとしすぎるとマニュアル的に使われてしまい、実は本当の技術が生きないのではないかと思っている。これまで日本の産業が頑張ってきたというのは、職人的な隠れたノウハウのようなものがかなりあり、そこはおそらくデータベースの中に組み込めない。そこをどこまでデータベース化するかとなると、相当ハードルが高い仕事になり、結果的にデータベースすら作れないというようなことになってくるともったいない。よって、ある程度のデータがそろった段階で、今度はそれをうまく使える人を育てる。技術と人を表裏一体として育てていくようなことをしなければならない。これは学側ではなく産側のほうに要求する話かもしれない。
- [菊池] コンピュータは反復性が得意で覚えておくことが得意である。人間は反復も覚えておくことも苦手だが、判断力がある。複数のものを見ながら新しいものを考えることができるのは人間の得意なところであるので、人が得意なところとデータベースが得意なものをきちんと切り分けた開

発が必要であり、全てデータベース化ということは多分あり得ない。

- 廃棄物の場合では、廃棄物がどこで出てきたかによっておそらく素性が異なり地域性が相当あると思う。海外も含めて異なる。そうすると、そこに適合する技術と、そこに従来から根付いていた産業をうまくマッチングさせるようなことができる、その地域で生きた環境技術になるのだろうと思っている。そのようなアプリケーションを日本側としては用意しておく必要はある。
- 確かにマニュアルに走ると発想がなくなったり弊害もあると思うが、一方で異分野融合のような場合はなかなか一から他分野を勉強する時間もない。データベースがあれば、例えば微生物であれば、こんな材料があるというようなものがすぐにアクセスできてすぐに引き出せると非常に進む。その辺りは、イノベーションが速いという意味でアメリカなどが得意と感じている。

異分野融合

- 例えば実験屋としてリチウム分離膜を開発するとき、材料シミュレーションを得意とするスパコンの先生と一緒に研究開発を実施している。ただ、異分野融合の最初の段階では成果を挙げるのが困難で、競争的資金に応募しようにも、せいぜい科研費の挑戦的萌芽研究程度であり、結構悩ましい。とりあえず今はお互い持ち出しでやっている。融合と簡単に言うが、実際に融合できた時はブレイクスルーという目的を達成した時であり、目的達成までのサポートが結構難しいのが現状である。
- インターネットが発達して大分情報をとれるようになってきているが、やはり基本は人と人の出会いでありネットワークである。逆に言うとそれに頼っていて、それで何とかなっている。もっと網羅的に情報を集めてすぐにアクセスできると本当はいいのかもしれない。どうしても日常の人的ネットワークの中でやっているようなイメージがまだある。
- 理研のセンターの場合は、生物と化学によるケミカルバイオロジーといった融合研究を行うということで、5年の期間のプロジェクトにアサインされ、成果を出さないといけないという使命を背負うと、その中で研究員はそのミッションでもって取り組む。そのようなしくみであると成果も上がってはくる。異分野融合は重要だとは思いますが、それ以外では結構むずかしい。資金を得たら人を育てながら成果を出していかなければいけないとなると、やはり尻込みしてしまうこともある。ただ、今まで自分たちが持っている技術や知見だけでは、面白いけれどそれで終わりというネタは結構あるので、JSTなどで融合により新しい研究に取り組むという、呼び水になるようなグラントをつくらせてもらえるとよい。
- 災害廃棄物の処理は非常に大きなターゲットと言った。ところが、災害廃棄物の処理やリサイクルでは、土との絡み、それをどうやって機械的に分離して、さらにはそれに対しての化学物質の安全性をどのように見るのか、関連する人たちが集まらないと議論できない。例えば、最初に発生したときに、その量をどう推算するのか、それに基づいてどう処理の計画を立てていくのかとなったときに、例えばリモートセンシングでどう見るか。あるいは、積み上げられたごみに対しての発火性について、温度管理のためのセンサーをどうやってそこに導入するか。ターゲットが一つ決まるとそこにいろいろな分野の方々が絡む話になってくる。そうすると、議論によって求めているニーズと、その人たちが持っているシーズの足りる部分と足りない部分が見えてくる。では、そこを研究

開発の次のターゲットにしようといったことが出てくる。社会的に必要とされる枠組みをまず決めておいて、そこに関連するものが何かというのが見えてくると、自然とそこへ異分野融合ができてくるようなことが経験としてあるし、いわゆるバックキャストで考えていかないと、異分野融合というのはなかなか難しいのではないかと。フォアキャストで考えるとおそらく融合は難しいので、考え方を逆から見るとするのは必要だろう。

- SUREもある意味、異分野融合という視点から始まってはいる。例えば、リサイクルプラントから人手を排して人工知能などを使う件について。産総研に人工知能センターができたので一緒にやったらどうだという話は所内でも上がったりはする。しかし、リサイクルで何が必要なのかは彼らが考えるのは無理なので、まずは我々が考えなければいけない。手選別、手解体を機械化するところに何らかの人工知能が入り込む。初期的なものは我々でもできて、我々では手に負えないレベルの領域に入ったときに、初めて人工知能センターが活躍するフィールドが得られる。さて、みんなで集まって考えましようと言っても、初めから同じスタンスで、異分野の人たちが同時に潤いながら研究するというのはおそらく無理だろう。SUREも38人研究者がいるが、38人常に活動しているわけではない。あくまでSUREは航空母艦で、必要に応じて役割分担をして飛び立つ。その代わり、やることになったらいつでも飛び立てる準備しておいてくれ、という組織になっている。そのような関係性が必要ではないか。
- 例えば、排水処理であると、日本はインフラ輸出がそんなに得意でないが、個別の材料などは強い。研究者個人に任せたり、企業の自主的な取組ではなかなか難しいのかもしれない。例えば完全自給型の排水処理では、そのために必要なのはこのような技術が考えられるので、バイオや化学工学、分離、エネルギー系、計算の人が集まるというようなプロジェクトはないのではないかと。
- [菊池] 具体的な問題に付き合うとどうしても異分野が必要になってくる。私も社会システムといったところでエネルギーなどを扱おうとすると、一番懇意に付き合っているのは実は人文学者の皆様である。経済学や社会科学者の皆様と一緒にどうコンセンサスをとるか、コミュニケーションをとるかということが実は一番の肝になっている。アンケート調査1個つくるのもものすごく大変で、調査票作成に2週間かかったというようなことがよくある。具体的な課題に向き合うと異分野融合が進むというのはおっしゃるとおりかと思う。そういったときに、環境対策技術ではどのようなテーマを具体的な課題として取り組むべきか。都市鉱山が一つ重要な課題かと思っているが、ほかに例えばこのような物質をとれるとよいとか、この物質については未着手だとかはあるか。個別の技術に関するようなご意見やご議論などはあるか。
- 例えばメタンハイドレードがある。実用化するにはいろいろな人が入らないと難しいと思う。もちろんどうやれば採算がとれるかという機械的なところもある。しかし、本当に採って大丈夫なのか、地震は誘発しないのかなど、いろいろな観点で大きな国家プロジェクトがあり得るのではないかなと思う。

環境浄化、資源リサイクルと安全性・コスト負担

- プラスチックのリサイクルに対して、社会的な印象があまりよくないのは、それに携わる人たちがプラスチックのことをよく知らないでリサイクルできますよといって集めてしまったがゆえに最

最終的にできなくなり、社会的な問題を引き起こしていることがあり、非常にマイナスだと思っている。困っているものの一つにハロゲンがある。ハロゲンをどう処理するのか。結果的にはハロゲンをどこかによけておいて、ハロゲンのないものをどこかで使う。結局ハロゲンがどんどんあるところに押し込められていき、結果的にそれがどうしようもなくなり、さあ困ったという状況になっていく。そのような本当に困る対象物を決めて、それを社会の中でどう循環できたらいいのかをトータルで考えるようなプロセスやシステムは重要だろう。リサイクルは欲しいものだけをとってしまうので、いらぬものをきちんと循環できるような対策技術、あるいは社会システムが必要だと思う。

- [菊池] プラスチックにはハロゲン、難燃剤にはブロモ、冷媒ではフッ素、また、PCBの話ももちろん出てくる。そんなに大量にあるものではないが、ただそれがあるだけで大問題になるような物質は、まさに環境対策としてうまくコントロールできるようにならなければいけない。そのような物質をうまく除去、回収、分離できるような技術の開発がある。元素レベルのものもあればPCBといった物質レベルのものもあろうかと思う。どのような戦略で、どのような研究開発を学術的にやっていったらいいのか。
- 有機性の排水や有機性の廃棄物を、微生物を使ってどう浄化するかという話では、個々の汚染源現場によって様々な状況があり得て、物質の構成比や物質そのものの違いなど、だんだん細かい話になっていく。その場に合った議論が必要である。大規模なプロジェクトはゼネコンがやるが、個別の、例えばガソリンスタンドの下の浄化などは中小の小さな零細のゼネコンがやる。要するに、国全体が旗を振って何かをやる時とは異なる雰囲気が出てくる。現場で何が行われているかという、微生物を使ってはいるが、ただ単に触媒として扱っているだけで、明らかに上手に使われていない。排水処理でも微生物が使われているが、排水はかなり上手に使われ尽くしているところがあり、現場に即してどう変えればいいのかという議論が行われていると思っている。
- 遺伝子組換えは社会受容性の観点でいろいろな問題が起きる。iPS細胞のようにベネフィットが大きければ遺伝子組換えでも大丈夫という話になる。要するにそのようなメリットをまだ出せていない。我々の分野で遺伝子組換え微生物を使うときにどこが一番問題になるかという、微生物は危ないのではないかという不安である。それは我々が考える必要があり、学会でもそのような話をしている。まず、高校や中学の教育を変えていかなければいけない。高校の先生を教育していかなければいけない。社会的にはそのようなところから変えていく。例えば、微生物研究者が微生物は危ないものではないということをいかに伝えるかという研究をしていく。下支えする科学が今希薄になってきている。場当たりのことだけをやっていてはサイエンスを使うということまでたどり着かない。
- 何が一番いけないかという、日本人が下手なのはリスク計算をしないことである。例えば遺伝子組換え植物と農薬を大量に使うのとどちらが安全かを科学的に示す。ただ単に研究者は遺伝子組換え微生物を入れても大丈夫だと言ってもなかなか信じてくれないだろうが。リスクを示す研究があってもいい。
- [菊池] 処理メカニズムの解明が、正しいことをわかりやすく伝えていくために必要かと思う。一方で、いくらわかってもらってもそれを伝えるというところでうまくいかないところもある。先ほど

発生土の発表でトレーサビリティの議論があったが、そういったところも関連性のあるリスクの評価のために必要な情報としてきちんととっておくところかと思う。

- トレーサビリティについて、工事で出てきた土の中に自然由来の重金属であるヒ素や鉛が多く、それが含まれているという問題で、工事のときにきちんと対応しているという話で済む場合と、でき上がった道路や河川の堤防をだれが管理するのかという問題がある。社会実装や社会受容性の取組という話が出てきているが、リスクをどう評価するかというところまでまだいけないというのが実情である。しかし、しっかり取り組む必要がある。受容性が低いものについてはリスク評価をうまく使うことが必要である。放射性物質で汚染されている土壌が大量に集められ、それをどうするかは国家的な課題になると思うが、多くのものが低い濃度レベルであり土に割としっかり吸着されている状態なので動きにくい。動きにくければまたリスクも低いということもあるので、そのようなことも科学的に説明していかなければいけない。ヒ素というと猛毒のヒ素と思われてしまうが、有害性は濃度レベルや存在形態によって異なることをいろいろな方に理解いただく必要がある。
- [菊池] コミュニケーションの中でとらなければいけない対策は、それぞれの分野によって違ってくる。例えば分子認識材料については、NO_xやSO_xの吸着材としてゼオライトが自動車触媒に使われたときに新聞に取り上げてもらった。その段階でゼオライトはいいものだというイメージを持ってもらい、ある意味ではよかった。例えば、シクロデキストリンもそうで、分子認識材料などを選ぶときに、もちろん植物由来、再生可能資源からというのは非常に重要な観点かと思うが、液相なのか気相なのか、温度でも低温でいくのか高温が必要なのかといったマッピングが必要だと思う。技術マッピングの中できちんと使ってもらえるか、選択してもらえるかどうか。
- 廃棄物対策は基本的にはプラスを生まない。特にPCBなどは負の遺産であって、別に除く必要はない、そのまま置いておいても問題ないのではないかとたまに言われる。しかし、体に悪いものはしっかり取り除くのが普通の考え方であり、科学者が作った悪の根源の物質なので科学者の力できれいに除くのも大切かと思い頑張って取り組んでいる。今のキーワードはカーボンニュートラルである。例えば、いろいろな分子のサイズの空孔をつくれる有機と金属のフレームワークであるMOFは、基本的には金属を使っており、環境にいかどうかということで、私が着目している植物由来のシクロデキストリン、そしてセルロースが材料設計をする上では究極の目標と思っている。ただ、それを例えば企業と一緒に取り組む場合に、必ずコストのことを言われる。シクロデキストリンで一番安いものは1 kgでおおよそ1,500円である。イオン交換樹脂は1 kgで500円程度である。どうするかというと、やはりリサイクルを重ねる。そして、リサイクルして付加価値の高い乳化剤を何回も使うことによって、1年間でこれだけもうかる、と伝える。実際にもうけになるという話を聞くとやはりうれしい。よって、基本的にはその最初の吸着材は無害なものを使い、それである程度リサイクルさえすればお金をかけても問題ないと思う。
- それにかかるコストをどのような形で集めているかによると思う。環境技術といっても排煙脱硫とや脱硝といったものは、実は電力価格の中に全部内部化されている。あるいはプラント価格に全部内部化されている。よって、環境技術はそこで立ち位置を持って動いている。今リサイクルで問題になっているのは何かかというところ、その価格がそのシステムの中に内部化されていないものを出してしまったときに大変であることである。ただし、容器包装などを見ると、出した側からお金を集めて

それを別の形でリサイクル費用に上乗せするようなことをしている。ある意味システムとしては製品の中にリサイクルにかかる費用を内部化し始めている。今、その分捕り合戦をしていて、もうかるところともうからないところが出ている。もうかるもうからない話は、技術もさることながら、それにかかる費用をどのようにシステムの中に内部化していくのかということを考えないと、新しい環境産業は起こっていかない。もうかるためのシステムを考える必要はあろう。

- [菊池] 法関連だと、議論は難しいかもしれないが、リサイクル費用の負担者の違いなども考慮しなければならない。プラスチックでは生産者が、家電では消費者が負担しているという構造の違いがある。家電の方がうまく回っているのは、家電リサイクル工場と家電メーカーのつながりがあり、必要なリサイクル費用を消費者が支払ってくれる、という構造がうまく働いているともいえる。一方、プラスチックの方は一般廃棄物等に混入してしまうため、分離回収も容易ではなく、生産者が費用を負担しているが、生産者に戻ることは少ない。近年は複合材も増え、プラスチックと紙が混ざった状態で排出されたりもしている。リサイクルの中で費用をだれが負担するのかということと同時に、実行可能で有効な技術が組み合わさっていかねばいけないが、そういった議論はできていない。技術だけでなく社会経済性との接点をもたねばならないところで、LCAをやっている研究者も苦労しながら研究している。

もう一つ、リスクという観点で、ジオミメティクスという言葉は初めて聞いたが、まさにそういった地球環境にある物質を使おうと発想された最初のポイントの中に、環境への影響や持続可能性の観点がある。ジオミメティクスによる環境材料の創出が、どのようなきっかけでなぜ注目したのか、また、これからどのような可能性があるのか。他の分子認識材料など様々な環境材料があると思うが、その中でどの立ち位置や考え、観点などはあるか。

- 根本的には希少元素の分離濃縮技術という考え方からであり、対象は様々である。発想は低いコストで新しい分離濃縮技術をつくれないうところから始めた。企業の方は材料開発の際に絶えずマーケットを見ている。例えば、自動車に搭載するリチウムイオン電池であれば、これから車社会はどうなっていくのかというように、自分の研究テーマからかなり遠いところを見ている。マーケットを見る目を知らなければいけないのではないかと強く感じた。また、将来のシナリオがどうなるのかは何通りもあり誰も予測できないが、先ほどのコストの試算に基づいた裏づけや、可能性はこういう理由であり得るのだという道筋を立てて、法規制や将来の向かうべき方向を見ながら研究開発を進めなければいけないと思っている。

その他

- これから水素社会になるとの話だが、マスバランスからしておかしいことになる。水からとるなら一番よいが、今はおそらく有機物からとるとしている。科学者はどうするのか考えておかなければならない。また、水素のキャリアはどうするのかや、どこで水素をつくるのかという部分を含めて、議論が抜けているような気がしている。
- 今は化石燃料から直接水素をつくっているのだから、結局CO₂を排出するし、燃料効率としても、化石燃料をガソリンで燃やして回生エネルギーでハイブリッドにしたほうがよい。本当は、原子力発電所の夜間電力で余った電気を水の電気分解に使って水素をつくるというストーリーがあったのが、

今崩壊している。リチウム回収をしながら水素をつくるというような、副産物もしくは化石燃料由来ではない、CO₂を発生しない水素社会をつくっていかねばいけない。

- [菊池] 水素をつくる様々な方法がある中で、バイオマス分解、電気分解、原子力の高温ガス炉からつくる話もなくなったわけでない。ただ、環境への配慮といったときに、CO₂以外のものに関する議論も余りされていない。バイオディーゼルやバイオエタノールをつくると必ず排水の問題があるが、カーボンの話が多い。地球温暖化はLCAで定量化する数十個の環境影響の中の1個でしかないが、ほかの環境影響を見る方があまりいない。そういった中で、環境材料が戦略的に開発されていかねばいけないという中に、もう既に動き始めてしまっている水素社会やIoTによる環境への影響はどのようなものなのかや、受け身型の環境材料開発ではなく、攻め型の環境材料開発のようなものが本来はつくられていくべきで、先制的なものが必要かと感じる。一方で、既に問題を顕在化しているようなところをしっかりと押さえる科学技術の開発などもあるので、そういったところを組み合わせていくというようなことが必要になってくるのではないかと。新しい社会の動きへの対応をどう戦略的に練っていくかは必要かと思う。

6. 各話題提供のハイライト

6-1. 環境分析技術

■ 「現場観測データのネットワーク化」

小林拓（山梨大学 生命環境学部 環境科学科 准教授）

光、特に散乱を利用した環境計測が得意な分野であり、大気中や海洋中の粒子状物質の光学特性に興味がある。気候研究は、時系列データを含む現場観測、空間的な広がりを得るためのリモートセンシング、これらの観測データを利用したモデルシミュレーションの三つに分かれるが、最初の現場観測が非常に重要となる。エアロゾルの大きさと形状情報を得るために散乱光とその偏光を利用した偏光 OPC や雲を観測するための雲粒子顕微鏡 CPM の開発を行ってきた。

モデル計算には観測拠点をネットワーク化し標準化したデータにすることが重要であるが、一方で独自の装置は、標準化まで至らせないと淘汰されてしまう問題がある。

今後の注目すべきテーマとしては、アジアの環境監視が、また、衛星観測ではハイパースペクトルセンサーや高分解能センサーが重要になってくる。

■ 「バイオエアロゾルの定量および個別粒子観察法の必要性」

松木篤（金沢大学 環日本海域環境研究センター 准教授）

主に空気中のエアロゾルや雲のフィールドでの観測を行っている。近年、黄砂と共に運ばれてくる微生物や生物由来の有機物であるバイオエアロゾルが注目されており、健康被害への増悪作用が指摘されている。このため、これらの定量および個別粒子観察法を含めた研究を行っている。バイオエアロゾル測定装置は、OPC に特定の波長領域のみの蛍光の検出を付加したものである。これで検出された自家蛍光を持つ粒子の正体を明らかにする課題が残っている。このため、極力大気中の条件に近い状態で、原子間力顕微鏡や顕微レーザーラマン分光装置などを用いた非破壊、非接触の個別粒子観測法の開発が必要と考えられる。また、観測のネットワークを構築していく必要もある。

バイオエアロゾルの拡散予測に向けた今後の課題としては、遺伝学的な解析手法により微生物の群集構造を遺伝子レベルで系統分類学的に解析すること、実際に未知の微生物を集積、培養することで病原性の有無の確認、疫学調査による微生物の健康影響評価が必要となる。

■ 「マイクロ・ナノ分析デバイスと環境科学」

火原彰秀（東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授）

マイクロ流体、ナノ流体と呼ばれるような、リソグラフィ技術を用いて集積化した分析機器を作製する研究を実施している。分析におけるサンプリング、前処理、検出などをスライドガラス程度の大きさに集積化する。狙いは操作の自動化、高速化、省資源化であり、分析概念の革新も期待できる。現状ではバイオ分析、診断技術など人を対象にした分野で進んでいる。拡散距離が短い、比界面積が大きい、低レイノルズ数で層流となる、慣性力より表面張力が強いなどの特徴をうまく使う必要がある。この方法は環境分析、工業分析、食品分析、基礎分析化学でも適用できる。従来の分析化学は統計平均が前提

であったが、微量にすることで分子一つ一つを分析し、個数を数えてヒストグラムとすることができる。ただし、微量のため、検出の感度が課題になる。

このツールの革新により分析機器が現場に行き、簡便に測ることができる。例えば、海底での海中ロボットによるその場分析が可能になる、あるいは、テレビや自動車に化学分析を載せることで、環境モニターとして日常活動の中で多くのデータをとることなどが考えられる。

■ 「大気圧プラズマを用いた新しい分析装置」

沖野晃俊（東京工業大学 大学院総合理工学研究科 准教授）

低温プラズマの開発により、プラスチック、繊維、紙、生体などにプラズマを当てられるようになり、プラズマの応用が表面処理や医療の分野で始まっている。高温プラズマに関しては、ドロレットネブライザを開発し、液滴 1 個という微量試料中の超微量元素分析を可能にした。検出下限の絶対量は zg のオーダーである。低温プラズマでは、励起したヘリウムで試料をイオン化する GC 用ヘリウムプラズマイオン化検出器を開発し、水素や酸素、窒素、メタンの一括高感度測定を実現した。さらに、低温プラズマによる表面付着物の高感度同定を可能とした。プラズマの温度が低いため分子が分解されず、そのままの分子状での質量分析が可能である。微量の低濃度な試料の元素分析については、パルス的に固体のまま導入することで時間と濃度を圧縮し、単一細胞の fg オーダーの発光分光分析に成功している。

環境分析機器開発について、日本の環境関係の計測機器は世界でもトップレベルであるが、機器メーカーの開発余力不足、大学等での装置開発者の不足、海外製分析機器への依存が問題である。また、次の重要なターゲットは微量または微量領域の希薄試料の分析と考えている。

■ 「環境化学物質のノンターゲットモニタリングとインフォマティクス」

橋本俊次（国立環境研究所 環境計測研究センター 有機計測研究室 室長）

アメリカの CAS に登録されている化学物質は 1 億以上ある。その一部は環境中に流出し、問題を引き起こしている。物質の分析は 1 物質に 1 つの分析法が普通であり効率が悪い。また、前処理で目的以外の物質を除去してしまい、リスクを見逃している可能性がある。このため、汚染物質を一度に測定する分析法として多次元ガスクロマトグラフ (GC×GC) と高分解能飛行時間型質量分析計 (HRTOFMS)、タンデム型質量分析計 (MS×MS) などをつなげた装置開発を行った。さらに、データから物質を抜き出し自動定量するような様々なソフトウェアも開発した。これにより、多くの汚染物質と未知物質の検索と定量を一度に行う網羅分析が可能となった。さらなる多変量を解析するためには、データが多量に必要である。このため、データベースの充実が、世界的な潮流にある。

我々の目標は、人の健康と環境の保全である。環境中にある化学物質の全体を把握したいと考えている。しかし、網羅分析にはまだ多くの課題がある。特に、分析と同時に毒性や影響も迅速、網羅的に測る方法とデータの蓄積、解析法の開発が必要になる。

■ 「環境、生体に対するナノパーティクルの影響を評価する超高感度・迅速分析システム」

平田岳史（京都大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 教授）

レーザー分光を使ったプラズマ質量分析計を用いた超微量分析技術を、生体分析や環境分析（年代測

定など)へ適用する研究を行っている。フェムト秒レーザーを利用して高感度化することで分析が難しくなかったプラスチックや鉱物試料、金属試料等の安定な分析が可能となった。また、昨年、新イオン検出器を開発したことで、分析誤差による年代測定の誤差が3分の1程度に下がり、分析時間も30秒から1秒に短縮できた。さらに、MALDIとの組み合わせで金属を含むたんぱく質の検出が可能となる。

ナノパーティクルについては、10nm以上のサイズの粒子1個を検出したり、レーザーの利用により信号強度からサイズを把握することが出来る。また、たんぱく質に粒子をタグ付けすることでたんぱく質1分子の検出が可能となるが、この技術は韓国が先行している。たんぱく質の動態や定量ではデータが膨大となるため、データの質を維持あるいは下げながら迅速に分析するという両方が必要である。

今後は、レーザーでサンプルをエアロゾル化しプラズマ質量分析計で分析すると同時に、レーザー照射によるサンプルの発光からLIBSを使って元素の組成の情報を得て、さらにサンプルの分子振動からLAMISを使って同位体情報まで得るという技術を実用化開発する考えである。

■ 「微量元素・同位体に基づく海洋研究」

宗林由樹 (京都大学 化学研究所 教授)

微量元素・同位体に基づく新規分析法(多元素の定量法、同位体比の分析法)を用い、世界の海の三次元の断面観測を行い、物質循環の研究を進めている。2008年、既存の優れたキレート樹脂を応用した9元素の一括分離濃縮技術を開発したことで、微量元素の海洋断面観測ができるようになった。そこからMn/Al比をみることで、海洋中の酸化還元を把握できる。

海洋研究の課題は、大学における人材育成、研究費と研究設備の不足や深海からの採水に必要な船の老朽化、採取ケーブルの老朽化である。海は人間活動の影響を大きく受けるため、今後どのように変化するかを継続的に観察し続ける必要がある。国際的な動向では、微量元素や同位体に注目し、高解像度で現代の海洋の断面観測を行う動きがある。国際会議では、発表の半分ぐらいが重元素の安定同位体の測定分析が占める。

■ 「データ駆動型アプローチによる環境分析・状態評価」

菊地淳 (理化学研究所 環境資源科学研究センター 環境代謝分析研究チーム チームリーダー)

環境分析は、汚染物質など特定の物質を追跡するターゲット分析(仮説駆動型アプローチ)が主であった。経時的に環境の物質にはある摂動があり変化していて、決して一つの物質で定義されるものではなく多くの物質のバランスや状態が変化する。そこで、環境状態を評価する一斉分析(データ駆動型アプローチ)とインフォマティクス利用の研究を行っている。データ駆動型アプローチの課題は、多検体処理・低価格化、相対定量性・機関間互換性、構造同定能、化学的多様性などで、その解決策は、未処理・固体計測・簡易抽出、データ加算、データベース利用、量子化学理論の利用、異種分析データの統合である。NMR特有の低感度・低分解能の問題の克服やインフォマティクスの高度化、ビッグデータ解析による生態系サービスの恒常性評価を実施している。海は大きな環境分析のターゲットであり様々な分析試料がある。これをビッグデータや機械学習のアルゴリズムなどを使い、将来的に環境を予測し、変動因子を使って制御することで、浄化あるいは改善していくシンセティックエコロジーを目指した環境分析を立ち上げるべきだと思っている。

■ 「循環型水利用における計測技術」

鳥村政基（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）

物理的および経済的な渇水地域は非常に切迫している。2050 年には 10 億人に水や食料問題が生じるが、水は代替できず量の確保が必要である。現在、水研究の世界ではパラダイムシフトが起きており、今後は水処理と同時に食料とエネルギーを生産する新たなプラントに生まれかわらなければならないとされている。新しいプラントに必要な計測技術は何かを考える必要がある。重要な技術としては、物を分離、精製する技術、分析する技術に加え、微生物の制御が必要になる。

産総研の水プロジェクトではアジアの地区に特化した日本の水ビジネスの技術戦略を検討している。現場のニーズに基づくセンシング技術が必要であり、安価で総合的な安全を担保できるリアルタイムのモニタリング技術が求められる。リアルタイム管理には薬剤や処理エネルギーの過剰消費を大きく削減できる効果が期待できる。また、様々なセンサーや分析機器を作っても、最も重要なものは標準物質であり、標準物質を考慮した戦略の展開を目指している。

今後は直接的なセンシング技術だけでなく、安全を担保、保障する技術が重要であると考えている。

6-2. 環境予測・評価技術

■ 「気候変化に対する全球植生の応答を予測するシミュレーター（動的全球植生モデル）の俯瞰と課題」 佐藤永（海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野 研究員）

日本が地球シミュレータで運用する地球システム統合モデル（温暖化予測モデル）を作るために、陸面の植生を扱うコンポーネントが必要だということで、気候変動を与えたときに陸面植生がどのように変化し、その結果大気と陸との間の相互作用がどのように変化するかといったシミュレーションモデルである動的全球植生モデル（SEIB-DGVM）を開発した。IPCC の第五次レポートに我が国から報告されたシミュレーションモデルに採用されている。

しかし、複雑な生態系である現実のメカニズムを的確に反映する必要があり、土壌炭素、乾燥枯死、土地利用、生物多様性、種子拡散、CO₂濃度変化が植物生産性に与える影響など、多様なデータ収集とモデルの高度化が必要である。

■ 「長期・複合的観測に基づいた森林生態系の光合成能力の時空間変動の解明と予測」 村岡裕由（岐阜大学 流域圏科学研究センター シニア教授）

森林の CO₂ の吸収・放出を担っている樹木の葉の光合成能力の季節性と経年変動、または、森林の葉の量の季節変化と経年変動を現場で同時に調べ、メカニスティック炭素循環モデルに入れて森林全体の光合成量の季節変化を考慮した生理生態学的解析を行っている。葉の季節性（フェノロジー）と気象条件の年変動が森林の CO₂ 吸収量に変動を与えていることが分かってきている。今後は、地域レベルでの気候変動が生態系サービスにどんな影響を及ぼすか、様々な生態系がお互いどのような関係を持っているかを調べる必要がある。そのために、点観測だけでなく衛星リモートセンシングを用いて生態学的、気象学的な観測を取り入れた解析手法を開発し広域観測を行う「衛星生態学」のアプローチが有用である。広域性と詳細性を兼ね備えた分野横断的な観測とモデル解析による研究を展開することが重要で、このためには多様な観測ネットワークの連携が鍵となる。ただし観測ネットワークの活動は研究者のボランティアな活動に支えられていることも多く、環境モニタリングや生態系機能解明や生態系サービスの評価に関する研究の基盤となっているこれらの取り組みをどのように持続可能なものとするかは日本の環境科学技術の発展に重要な課題である。また日本だけではなく研究成果をアジア太平洋地域の観測研究コミュニティの醸成に繋ぎ、アジア太平洋地域の環境変動とそれに対する生態系の応答、生態系サービスへの影響を評価していくことが強く期待されており、国際協力を支援する研究資金の充実も課題である。

■ 「生態系動態予測・制御に向けた生態複合モニタリング・モデリング技術の開発」 近藤倫生（龍谷大学 理工学部 教授）

地球上の約 900 万種の生物種が相互作用しながら生態系を構成しているが、その生態系を適切に管理するためには生態系の観測と予測が重要になる。新しいモニタリング方法として、環境 DNA を使った研究を実施している。海洋生態系の場合、現地の水から DNA を抽出し、量やシーケンスを読むことで、簡便かつ広範囲な生態系の情報が得られる。また、新しいモデリング方法としては、EDM (Empirical

Dynamic Modeling) の利用を考えている。これは生態系のメカニズムは考えないで、時系列の観察情報などの過去の経験だけに基づいて予測をする方法であり、生態系のような非線形システムに有効である。環境 DNA 技術と EDM の両者を組み合わせることで、高解像度の生態系モニタリングと動態予測を可能にする新しい群集生態学を立ち上げたい。限られた生態系情報に基づいたパターンの把握によるメカニズム研究を一旦離れ、高解像のビッグデータをとり、その過去の経験をうまく利用することで生態系の将来予測や制御が可能になるだろう。

■ 「宇宙線生成核種等の同位体を用いた環境復元研究」

横山祐典（東京大学 大気海洋研究所 教授）

気候変動と環境研究について、モデルで予測される現象の実証的知見として、サンゴ、岩石等における宇宙線生成核種等の同位体記録などを検証する研究を行っている。宇宙線でつくられる核種である放射性炭素などを加速器、質量分析装置を使って定量することで年代計測手段や地球表層の動態、あるいは生態系などを調べるトレーサとして利用できる。これによりモデリングと組み合わせることで古環境、古気候復元、あるいは生態系の動態の追跡などが可能となる。研究で重要なものは、高精度で多数を計測できる分析装置の開発とサンプリング技術の向上である。

今後の国として注目すべき方向性やテーマとしては海水準変動、水循環、地形変遷（地球表層プロセス研究）を広げていく必要がある。また、生物適応、防災、水産資源が大事である。

■ 「長期湖沼モニタリングと関連研究—定性から定量へ—」

今井章雄（国立環境研究所 地域環境研究センター センター長）

霞ヶ浦を対象に長期モニタリングを実施している。底泥溶出フラックスを定量的に測定した結果、湖水中のアンモニア濃度の上昇は、春に生育する珪藻が原因と推察される結果が得られ、春の珪藻を抑制することで夏や秋のアオコ発生を抑制できる可能性が示された。また、底泥物理構造に関する研究では、MRI 撮影にて単穴構造が、CT 撮影ではガス泡構造が、非破壊で観察することが可能となった。これにより、巣穴は長さ、ガス泡はピクセルで定量化することに成功した。現在は、その値と底泥溶出、その速度の比較を行っている。

湖沼の国際的研究については、地球温暖化で陸水に影響が出る（特に北ヨーロッパ）ことが判明し The Impact of Climate Change on European Lakes がまとめられたのを受け、非常に活発になっている。2013 年も SIL (Society of International Limnology) においても同様であった。そこでは長期モニタリングの重要性が認識され、モニタリングシステムの自動推進が議論されている。

問題としては、国内研究レベルが徐々に下がっているので、オリジナルの研究を展開する必要がある。また、試料の長距離、長時間輸送方法の開発により、国外機関との共同研究が発展すると思う。

■ 「大気エアロゾルによる環境影響と微物理化学特性」

兼保直樹（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 大気環境動態評価研究グループ グループ長）

大気エアロゾルの影響には、人の健康影響、酸性沈着、気候影響の問題などがある。微物理・化学特性として、粒径分布情報、化学特性（特に水溶性と吸湿特性）、混合状態（外部混合、内部混合、内部

混合のうちでも表面付着かどうか) が重要となる。

かつては主に都市大気汚染物質として認識されていたブラックカーボンが、太平洋中心部の中緯度帯付近で濃度が高いことを 1990 年代前半につきとめた。これは、粒径分布データにより、硫酸塩を含む輸送体に付着あるいは内包されてアジア大陸から輸送されたとも考えられる。それから 20 年の後、福島原発事故から放出された放射性物質の輸送に関する研究で同様の手法を用いたところ、事故後の比較的初期に福島からつくばまで放射性セシウムを運んできたメディア(担体)は硫酸エアロゾルであると考えられた。放射性物質を運ぶ担体としてのエアロゾルが水溶性である場合、相対湿度 100%以上で活性化して雲粒を形成し、雲沈着として山岳の特定の高度域を汚染するメカニズムにも関与する。

今後は、北極圏航路の実用化と関連して雪氷面アルベドの研究も重要となる。また、エアロゾルのモデルのうち、リージョナル・モデルの開発においては、これまで外から与えられていた微物理特性を内部で計算できるようにするなど詳細化の方向に向かっているものの、日本においては、現在のところ極めて少ない種類のモデルしか使われておらず、また、ユーザーにとってブラックボックス化していることが問題である。リセプターモデルについても同様である。

■ 「PM2.5 が引き起こす気候変動の定量的評価と予測」

竹村俊彦 (九州大学 応用力学研究所 教授)

大気中の微粒子であるエアロゾルをシミュレーションする全球モデル SPRINTARS を開発し、エアロゾルによる気候変動の定量化を進めている。IPCC 報告書に貢献している日本の全球気候モデル MIROC へ組み込まれ、エアロゾルのコンポーネントの開発リーダーを当初から務めている。また、SPRINTARS を利用した PM2.5 予測システムを自身で運用し、予測結果を公開している。

硫酸塩、硝酸塩、有機エアロゾルなどの白や透明の粒子には冷却効果があり、仮に PM2.5 のようなエアロゾルがなく大気がきれいな状態であれば、さらに 0.5 度も温暖化していたと推定される。すなわち、温暖化と大気環境の問題は同時に解決する必要がある。

エアロゾルは放射強制力の誤差が非常に大きく推定が難しいため、国際的な共同研究プロジェクトで各国のモデルを相互比較し、その不確実性を確認する研究を進めている。SPRINTARS は他のモデルと比較してエアロゾルの雲に対する感度は高くないが、衛星観測と近い値を示している。

気候モデルの不確実性が大きいのは雲の計算部分であり、日本では非常に細かい分解能で計算できる全球の気候モデル NICAM が精力的に開発されている。その中に SPRINTARS も組み込まれており、エアロゾルは全球で 3.5 キロメートルという分解能で計算できる。

日本では「ひまわり」など衛星データから PM2.5 や黄砂などのエアロゾルの情報が多数得られるが、日本はその活用をするのが下手である。社会的に関心の高い気候変動と大気汚染の両方に密接に関わるエアロゾルの研究を進めることは必然であるが、一方で、この分野でモデル開発を進める人材が育ちにくい状況にある。

■ 「人間活動を考慮した統合水循環・水資源モデル」

花崎直太 (国立環境研究所 地球環境研究センター 主任研究員)

人間活動を考慮した統合水循環・水資源モデル H08 を開発している。H08 はダム操作や灌漑取水と

いった人間の主要な水利用を含めて、地球の水循環をシミュレーションできるところが特徴であり、温暖化影響評価や水のフットプリント評価などに利用されている。

トレンドとして5つを紹介する。1つ目は世界が水に対して大きな関心を寄せていることである。特に、食料・水・エネルギーの連鎖に注目している。2つ目は先進国が全球水循環モデルの開発に継続的・精力的に取り組み、分野的な進展が急速に進んでいることである。人間活動を考慮できる有力なモデルは4つあり、H08はその一角を占めているが、他国とモデル開発規模では劣り、アイデアを研ぎ澄ませて勝負をしている状況である。3つ目は全球規模の影響評価モデルコミュニティの組織化が進みつつあることである。世界の動きに疎いと孤立し、淘汰される恐れがある。4つ目は生物物理的な影響評価モデルの社会経済的側面との連動が実施・強化され始めていることである。そして5つ目は影響評価モデルにおける要素の統合と超高解像度化の流れである。

■ 「これからの社会に求められる洪水予測警報技術～鬼怒川洪水を教訓として～」

芳村圭（東京大学 大気海洋研究所 准教授）

2015年9月に発生した鬼怒川洪水を教訓とする洪水予測について紹介する。2つの台風に挟まれた大量降水帯が鬼怒川と重なるという気象的には極めて珍しいケースであった。ダムが有用だったか否かの議論になるが、それなりに機能していたと考えられ、もしダムがなければ夜中に堤防決壊が起きていたと予測される。また、鬼怒川は河川幅が狭くなる地点があり、それにより背水効果が現れたことも考えられる。さらに、パイピング現象が堤防決壊の主原因として否定できないという結論に至っている。我々のモデルで洪水予測を行うと、定性的には危険を予測できても、定量的な精度の検証が必要であった。

洪水は河川流量を予測するが氾濫のシミュレーションが重要である。地点と時間さえ分かれば浸水域はかなりの精度で予測できる。また、日本は天気予報から洪水予測への変換が未発展のままであり、全球リアルタイム予測が必要である。アンサンブルな気象予報データを適用し、幅を持たせた洪水のピーク予測ができればよい。現業機関との協力と開発が重要であり、全球1キロ単位でリアルタイムな予報システムをJAXAと共同開発している。ローカルスケールの水災害、洪水、渇水、生態系への影響など情報を発信できるようにしたい。

6-3. 環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）

■ 「コベネフィット型水環境保全技術の開発に向けた取り組み」

珠坪一晃（国立環境研究所 地域環境研究センター 地域環境技術システム研究室 室長）

「コベネフィット型の水環境保全技術」とは、排水処理や底質改善などの水環境保全に貢献しつつ、処理に伴うエネルギー、温室効果ガスの削減を達成するような技術のことを指す。

先進国共通の問題の一つとして、排水処理にともなう多量のエネルギー消費、人口密集地域での排水による富栄養化がある。また、開発途上国（特に東南アジア地域）では、人口増加、経済成長に加えて資源作物の排水も問題となっている。

コベネ型の排出処理のキーテクノロジーの一つはメタン発酵である。曝気の必要がないものの適用範囲が限定されているのが欠点である。そこで、このメタン発酵に関して、一つの条件は低温（常温）でかつ低濃度の排水、もう一つは阻害物質を含む超高有機物濃度排水からのバイオメタノールの蒸留排水の研究を行い、メタン発酵処理技術の適用下限を中温から常温のレベルまで、また、有機物濃度に関しても都市下水程度にまで拡大することができた。

今後は、省エネルギー、温室効果ガスなどを考慮したコベネ型の技術開発研究が必要である。

■ 「発生土の有効利用と環境安全性」

勝見武（京都大学 大学院地球環境学堂 教授）

地球親和型インフラストラクチャを意識しつつ、廃棄物処分場、土壌・地下水汚染、建設分野、社会基盤整備における廃棄物副産物の利用などをテーマとして研究している。

この観点から注目しているものの一つは遮水工であり、その中で遮水性能に関しては、評価手法の確立が必要となっている。現在、学会において試験方法の基準化の目処が立っている。また、処分場跡地利用では、地盤強度、廃棄物強度の評価や色々な工法の検討も行っている。さらに、廃棄物や副産物の受け皿としての土木工事では、トレーサビリティ確保が重要である。

最近では、土木工事における発生土中の自然由来重金属等の問題が出てきている。特にヒ素、鉛、フッ素、ホウ素を一定程度含む土が非常に広く存在しており、環境基準を超えると対応が必要になる。汚染土壌使用の合理性が科学的に説明はできても、そのことが社会的に受容されるかということを検討しないといけない。

今後は、汚染物質を管理しつつ土や土地を使う方向性での技術やシステムの開発が必要である。

■ 「分子認識材料を活用した環境対策技術」

木田敏之（大阪大学 大学院工学研究科 准教授）

この技術は、有機化学の面から分子認識材料である精密な吸着剤を用いて排水中の有機フッ素系の化合物ならびに廃油中の PCB を除去、回収するものである。

分子認識材料として着目したのは、シクロデキストリンという化合物である。この化合物の特徴は、食べることができ、環境に対しても安全性があり、カーボンニュートラルであることである。これを架橋して高分子化したものや粒子の上に担持させたものを使用する。実験では、高濃度のフッ素系界面活

性剤を含む排水を用いた場合でも 6 割以上は確実に除去できている。また、ポリマー化したシクロデキストリンにも除去性能があり、性能の低下なく再利用可能なことが確認できた。ポリマー化したものは廃油中の PCB に対しても高い除去性能があり、溶剤洗浄により分離濃縮も可能となった。

今後は、有害物質を取り込む空間を均一化し、精密制御することによって、高性能分離・認識材料、吸着材を開発することで、より高度な物質分離・除去技術が確立可能となる。また、分離材料のリサイクル、リユース技術も環境保全に貢献する上で重要である。

■ 「植物機能の多様性を利用した重金属回収と浄化技術の研究開発」

榊原均（名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授

／理化学研究所 環境資源科学研究センター 生産機能研究グループ グループディレクター）

生物機能を利用した環境修復技術をバイオレメディエーションと言い、その中でも植物機能を利用した方法を特にファイトレメディエーションと言う。

ここで着目した植物は、重金属耐性植物である。これには排除型と蓄積型があるが、蓄積型を環境修復に利用しようということである。ただ、汚染土壌の回収・修復に非常に時間がかかり回収効率が低い。これを克服すべく、コケの原糸体を用いて汚染水からの金属資源回収と汚染除去について研究した。結果、ヒョウタンゴケは鉛や白金族の金属を捕捉すること、ホウモンジゴケは銅を特異的に蓄積することが確認できている。現在、企業と共同して、この原糸体を環境浄化技術に適用する実証試験を始めている。

今後は、遺伝子改変技術も必要になると思うが、利用には社会の理解が不可欠である。また、融合研究をさらに進める必要がある。

■ 「界面微生物工学によるゲームチェンジング環境バイオテクノロジー」

堀克敏（名古屋大学 大学院工学研究科 教授）

地球温暖化、新興国の環境問題、生物多様性の急激な消失など、地球環境に関する難課題がある。その解決策の一つとして、ホワイトバイオテクノロジーを提案する。

ホワイトバイオテクノロジーは、微生物や酵素などの生体触媒によって化学物質を生産するものである。常温・常圧の反応プロセスなので、省エネであり、工程が簡略化できるが、コストがかかる。また、反応効率・速度が遅い。そのため、汎用化学品ではアクリルアミドぐらいしか成功例がない。しかし、オンサイト・小規模生産や高付加価値物生産の用途としては実現可能である。

これらの問題意識から、接着性ファイバータンパク質 *AtaA* を用いた簡便な手法での微生物固定化技術を開発し、連続反応プロセスを可能とした。これを用いて、超高効率のメタン→メタノール変換や排水処理が可能となりつつある。

将来的には、この固定化技術を用いて人工微生物共生体のようなものをつくりたい。例えば、微生物細胞や共生体を 3D プリンタで設計した複雑な多孔質体表面に固定化して並べ、人工ストロマトライトのようなものをつくることも考えている。植物細胞や動物細胞との融合も可能かもしれない。

■ 「微生物の振る舞いの理解と環境対策技術」

野尻秀昭（東京大学 生物生産工学研究センター 教授）

微生物による環境浄化を目指し、有機物質汚染への微生物利用、微生物のキャラクタライズ、分解機構と振る舞いの解明について研究している。社会受容性の向上の観点からも分解菌の機能解析は非常に重要である。分解菌は他の微生物との関わりなど様々な環境条件下で分解力を発揮する必要がある、内因性と外因性の影響を受けて消滅や生存が決まる。

分解菌はプラスミドが入ることで染色体の機能が大きく変化し、その細胞機能とプラスミド側の機能の和が分解菌の機能になることがわかった。最初の能力とその和の能力の差が代謝負荷となり、その負荷を受けて導入機能が消滅または優占化するが、メカニズムを解析して消滅する原因遺伝子を確認した。

分解菌の開発では、環境中で群集として機能する微生物の把握とコントロールを目指している。そのために、個の機能の変化や多様化後の生存競争、空間的影響を対象に取り組んでいる。

現在は1つ1つの微生物を解析し集団化することで統計処理を行い生存や絶滅を理解するような研究が進んでいる。しかし、こうしたシングルセル解析はサイズの観点でまだ課題が残る。

以上のように、分解菌研究では、微生物が集団としてどう振る舞うかの理解やシングルセル解析が最近の方向性である。

■ 「ジオミメティクスによる環境材料の創出」

笹木圭子（九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 教授）

ジオミメティクスとは、鉱物そのものだけでなく、産業廃棄物で鉱物質を持つもの、動物の骨材、微生物がつくる生体鉱物などに少し手を加えて非常に効率の高いものを作るものである。ジオミメティクスによる環境材料の創出、特に難吸着性の陰イオン吸着剤の開発に取り組んできた。

その一例として、ホウ酸除去のためのピラー型 LDHs（層状複水酸化物）の合成と集積化がある。生物にとってホウ素はある程度は必須だが、あるレベルを超えると有害となる。グルコン酸を取り込むことで選択性と吸着容量を向上させ、パウダー状のものを二次元のフィルターに集積化することで、市販のホウ素特異性樹脂の吸着容量に匹敵し、市販の樹脂よりも速い吸着速度が得られた。

鉱山廃水や温泉水などの大量の汚染水に含まれる有毒元素の不溶化と除去が必要である。特に福島第一原発事故による核種のリーク対策が日本として課題である。福島の問題ではセシウムやストロンチウムが非常に重要である。また、陰イオン核種の半減期は非常に長く、吸着剤や保持性の検討が求められる。

■ 「戦略的都市鉱山開発に向けた取り組み」

大木達也（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）

我が国の資源自給率の向上を目的として戦略的都市鉱山開発に取り組んでいる。ここでは天然資源に匹敵する資源生産性を目指している。構成するシステムを最適化するプレーヤーが必要であり、リサイクル業者だけでなく製錬や動脈産業を巻き込んで全体を最適化する必要がある。すなわち、技術とシステム、特に動脈と静脈の連携が非常に重要だと考える。そこで産総研では動脈-静脈連携による都市鉱山開発を目指し、戦略的年鉱山研究拠点（SURE）と SURE コンソーシアムを設立し、都市鉱山に関する

る網羅的な研究と、分離技術のオープンイノベーションラボを整備し、セミナーの開催や多数の研究会組織を設置するなど官民連携の総合的な活動を行っている。

NEDO 事業において、プリント基板からのタンタル回収プロセスを構築した。電子素子をデータベース化した上、選別結果に変換するシステムを作り、シミュレーションソフト AESS を開発することで、最も分離効率のよい単純なプロセスを導き出した。また、計算によって必要な装置スペックを割り出し、それを実現できる装置を速やかに開発して、既に実用化稼働している。これを契機に、完全自動化・自律制御化を実現する、無人化リサイクルプラント構築に向け、装置及びシステムの研究開発を始めている。

今後は、リサイクル無人化プラント、製錬技術、動脈側からの情報提供、動脈側が得るメリット、社会を循環型にどう変えていくか、将来の資源リスクの回避などを総合的に考えていきたい。

■ 「泡によるレアメタルの選択濃縮分離」

二井晋（鹿児島大学 大学院理工学研究科 教授）

2mm 程度のサイズの泡の層からなる分離塔によるレアメタルの選択濃縮分離技術を開発し、起泡クロマト法と命名した。塔にガリウムと選択的に親和する界面活性剤 PONPE を含む液を入れ下方から空気を送ると泡が立ち、泡の層の中程に金属溶液を導入すると、目的金属を吸着した泡が上に上がる。塔の上方から PONPE を含む洗浄液を流すと、非目的金属は泡と泡の間隙部分の水に含まれるため、洗浄液とともに流下し、PONPE に付いたガリウムのみを上方に上げるしくみである。この装置で希薄溶液からの 100%回収と濃縮を同時に実現している。さらに、塔径を 3cm から 6cm にスケールアップすると分離性能すなわち分離度と濃縮度が上がるという興味深い結果も得た。

従来の溶媒抽出法は多段操作が必要で非常に大きな床面積と有機溶媒量を要するが、本手法により有機溶媒ゼロのプロセスが可能になり、装置が小型でシンプルのためオンサイトで分散型の処理が可能となる。また、この手法は金属イオンだけにとどまらず、固体粒子が含まれる系でも界面活性剤との親和性を使うことで対象にとらわれない分離を展開できる可能性がある。

レアメタルの重要性は広く認識されているがリサイクルはあまり進んでいない。個別の技術開発は広く行われているが、資源の経済性に大きく依存し、価格が下がると研究推進力が落ちることが往々にしてある。国内のレアメタルの戦略をどう立てるかが課題である。分離の研究は、特に湿式で材料開発研究が非常に活発であるが、生産技術的な研究は非常に少ない。

■ 「化学プロセッシングを用いた資源循環技術」

吉岡敏明（東北大学 大学院環境科学研究科 研究科長／教授）

金属と共に多くの製品に利用され、様々な添加剤を含むプラスチックの化学プロセッシングによるリサイクル技術である。プラスチックリサイクルでは塩ビと PET が課題である。処理の際、塩ビでは塩化水素、PET ではテレフタル酸が発生し装置を腐食する。そこで、塩ビについては、事前にアルカリ水溶液を用いてハロゲンを除去する効率的な湿式処理技術を開発した。本手法では塩素が他構造と置換している。この特徴を生かすことで添加物を用いずに機能を導入するアップグレードリサイクリングが可能となる。乾式処理も検討し、プラスチック分解前に低温で抜ける塩素を用いてブラウン管や液晶のパ

ネルに含まれる鉛やヒ素を回収する技術を開発した。一方 PET では、カルシウム系のものを加えることで基礎物質として重要なベンゼンが優先的に生成することが判明した。加えたカルシウム系物質を循環利用することも可能で、金属回収も期待できる。

新技術は違う分野で使えることがあり、そこに上手く適用することで進歩するようなトランステクノロジーの考え方が必要と考える。将来的に重要な課題としては災害廃棄物への備えが挙げられる。災害時を視野に入れた平時からの技術開発は、実は災害時以外での技術にもつながるのではないかと。

■ 「輸入依存から脱却した次世代リチウム資源循環型社会への挑戦」

星野毅（日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 研究主幹）

核融合炉やリチウムイオン電池に必要なリチウム資源は輸入に依存している。そこで、直接海水からリチウムを回収する技術に取り組んでいる。リチウムイオンのみを透過するセラミックス製のリチウムイオン伝導体に電極を完全接触させ、左右にリチウムイオン濃度が異なる溶液（海水と回収液）を入れ、濃淡電池と同様のイオンの濃度勾配によるリチウムのみを選択的な分離に成功した。装置開発も進捗しており、非常にシンプルな構造で出来るようになった。今後はイオンの透過速度や大型装置を想定した膜の耐久性が課題である。

海水にはリチウム、マグネシウム、ウランなど、都市鉱山には、電池の場合、リチウム、ニッケル、コバルトなどが多く含まれる。その分離回収と同時に水素や農業用のリンなどの副産物も得るというチャレンジングな研究により、副産物を有効利用した非連続イノベーションが起こるとよい。若手や女性の挑戦的な研究を長期的に支援し、研究開発における PDCA を意識させるような経営的視点も含めた人材育成を行う。その一方で、シニア研究者はそのサポートで活躍する、非連続イノベーションの確率向上を目指した新たなマネジメント体制の構築も重要である。

付録 ワークショッププログラム

環境分析技術

- 名称：俯瞰とスコープ抽出のための検討会（環境分析技術）
- 日時：2015 年 12 月 15 日（火）12:30-18:10
- 場所：TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター カンファレンスルーム 9B
- プログラム（敬称略）：

12:30-12:50	開会挨拶・趣旨説明
開会挨拶 倉持隆雄（JST-CRDS センター長代理／環境・エネルギーユニット 上席フェロー） 趣旨説明 松本麻奈美（JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー）【司会】	
12:50-13:15	話題提供①
現場観測データのネットワーク化 小林拓（山梨大学 生命環境学部 環境科学科 准教授）	
13:15-13:40	話題提供②
バイオエアロゾルの定量および個別粒子観察法の必要性 松木篤（金沢大学 環日本海域環境研究センター 准教授）	
13:40-14:05	話題提供③
マイクロ・ナノ分析デバイスと環境科学 火原彰秀（東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授）	
14:05-14:30	話題提供④
大気圧プラズマを用いた新しい分析装置 沖野晃俊（東京工業大学 大学院総合理工学研究科 准教授）	
14:30-14:55	話題提供⑤
環境化学物質のノンターゲットモニタリングとインフォマティクス 橋本俊次（国立環境研究所 環境計測研究センター 有機計測研究室 室長）	
14:55-15:10	休憩
15:10-15:35	話題提供⑥
環境、生体に対するナノパーティクルの影響を評価する超高感度・迅速分析システム 平田岳史（京都大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 教授）	
15:35-16:00	話題提供⑦
微量元素・同位体に基づく海洋研究 宗林由樹（京都大学 化学研究所 教授）	
16:00-16:25	話題提供⑧
データ駆動型アプローチによる環境分析・状態評価 菊地淳（理化学研究所 環境資源科学研究センター 環境代謝分析研究チーム チームリーダー）	
16:25-16:50	話題提供⑨
循環型水利用における計測技術 鳥村政基（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）	
16:50-17:05	休憩
17:05-18:10	総合討論
モデレーター 関根泰（早稲田大学 先進理工学部 教授 ／JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー）	

環境予測・評価技術

- 名称：俯瞰とスコープ抽出のための検討会（環境予測・評価技術）
- 日時：2015 年 12 月 11 日（金）12:30-18:10
- 場所：TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター カンファレンスルーム 9B
- プログラム（敬称略）：

12:30-12:50	開会挨拶・趣旨説明
開会挨拶 倉持隆雄（JST-CRDS センター長代理／ 環境・エネルギーユニット 上席フェロー） 趣旨説明 松本麻奈美（JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー）【司会】	
12:50-13:15	話題提供①
気候変化に対する全球植生の応答を予測するシミュレーター（動的全球植生モデル）の俯瞰と課題 佐藤永（海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野 研究員）	
13:15-13:40	話題提供②
長期・複合的観測に基づいた森林生態系の光合成能力の時空間変動の解明と予測 村岡裕由（岐阜大学 流域圏科学研究センター シニア教授）	
13:40-14:05	話題提供③
生態系動態予測・制御に向けた生態複合モニタリング・モデリング技術の開発 近藤倫生（龍谷大学 理工学部 教授）	
14:05-14:30	話題提供④
宇宙線生成核種等の同位体を用いた環境復元研究 横山祐典（東京大学 大気海洋研究所 教授）	
14:30-14:55	話題提供⑤
長期湖沼モニタリングと関連研究—定性から定量へ— 今井章雄（国立環境研究所 地域環境研究センター センター長）	
14:55-15:10	休憩
15:10-15:35	話題提供⑥
大気エアロゾルによる環境影響と微物理化学特性 兼保直樹（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 大気環境動態評価研究グループ グループ長）	
15:35-16:00	話題提供⑦
PM2.5 が引き起こす気候変動の定量的評価と予測 竹村俊彦（九州大学 応用力学研究所 教授）	
16:00-16:25	話題提供⑧
人間活動を考慮した統合水循環・水資源モデル 花崎直太（国立環境研究所 地球環境研究センター 主任研究員）	
16:25-16:50	話題提供⑨
これからの社会に求められる洪水予測警報技術～鬼怒川洪水を教訓として～ 芳村圭（東京大学 大気海洋研究所 准教授）	
16:50-17:05	休憩
17:05-18:10	総合討論
モデレーター 菊池康紀（東京大学 総括プロジェクト機構 特任准教授 ／JST CRDS 環境・エネルギーユニット 特任フェロー）	

1. サマリー

2. 趣旨

3. 環境分析技術

4. 環境予測・評価技術

5. 環境対策技術（環境修復浄化、資源回収・リサイクル技術）

6. 各話題提供のハイライト

付録
ワークショップ
プログラム

環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術）

- 名称：俯瞰とスコープ抽出のための検討会
（環境対策技術（環境修復・浄化、資源回収・リサイクル技術））
- 日時：2016 年 1 月 19 日（火）10:30-18:00
- 場所：TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター カンファレンスルーム B1A
- プログラム（敬称略）：

10:30-10:45	趣旨説明
趣旨説明 松本麻奈美（JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー）【司会】	
10:45-11:10	話題提供①
コベネフィット型水環境保全技術の開発に向けた取り組み 珠坪一晃（国立環境研究所 地域環境研究センター 地域環境技術システム研究室 室長）	
11:10-11:35	話題提供②
発生土の有効利用と環境安全性 勝見武（京都大学 大学院地球環境学 教授）	
11:35-12:00	話題提供③
分子認識材料を活用した環境対策技術 木田敏之（大阪大学 大学院工学研究科 准教授）	
12:00-13:00	昼食（意見交換会）
13:00-13:05	挨拶
挨拶 倉持隆雄（JST CRDS センター長代理／環境・エネルギーユニット 上席フェロー）	
13:05-13:30	話題提供④
植物機能の多様性を利用した重金属回収と浄化技術の研究開発 榊原均（名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授／ 理化学研究所 環境資源科学研究センター 生産機能研究グループ グループディレクター）	
13:30-13:55	話題提供⑤
界面微生物工学によるゲームチェンジング環境バイオテクノロジー 堀克敏（名古屋大学 大学院工学研究科 教授）	
13:55-14:20	話題提供⑥
微生物の振る舞いの理解と環境対策技術 野尻秀昭（東京大学 生物生産工学研究センター 教授）	
14:20-14:45	話題提供⑦
ジオミメティクスによる環境材料の創出 笹木圭子（九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 教授）	
14:45-15:00	休憩
15:00-15:25	話題提供⑧
戦略的都市鉱山開発に向けた取り組み 大木達也（産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹）	
15:25-15:50	話題提供⑨
泡によるレアメタルの選択濃縮分離 二井晋（鹿児島大学 大学院理工学研究科 教授）	

15:50-16:15	話題提供⑩
化学プロセッシングを用いた資源循環技術 吉岡敏明 (東北大学 大学院環境科学研究科 研究科長/教授)	
16:15-16:40	話題提供⑪
輸入依存から脱却した次世代リチウム資源循環型社会への挑戦 星野毅 (日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 研究主幹)	
16:40-16:55	休憩
16:55-17:55	総合討論
モデレーター 菊池康紀 (東京大学 総括プロジェクト機構 特任准教授 /JST CRDS 環境・エネルギーユニット 特任フェロー)	
17:55-18:00	閉会挨拶 (JST)

1. サマリー

2. 趣旨

3. 環境分析技術

4. 環境予測・評価技術

5. 環境対策技術(環境修復・浄化・資源回収・リサイクル技術)

6. 各話題提供のハイライト

付録
ワークショップ
プログラム

■ワークショップ報告書 編集メンバー■

倉持 隆雄	センター長代理／環境・エネルギーユニット	上席フェロー（～2016年2月）
佐藤 順一	環境・エネルギーユニット	上席フェロー（2016年3月～）
緒方 寛	環境・エネルギーユニット	フェロー
尾山 宏次	環境・エネルギーユニット	フェロー
菊池 康紀	環境・エネルギーユニット	特任フェロー
斎藤 広明	環境・エネルギーユニット	フェロー（～2015年12月）
鹿園 直毅	環境・エネルギーユニット	フェロー
島津 博基	環境・エネルギーユニット	フェロー
鈴木 康史	環境・エネルギーユニット	フェロー
関根 泰	環境・エネルギーユニット	フェロー
松田 一夫	環境・エネルギーユニット	フェロー
松本麻奈美	環境・エネルギーユニット	フェロー

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2015-WR-13

俯瞰ワークショップ報告書

平成 27 年度 環境科学技術分野 最新研究開発動向

平成 28 年 3 月 March 2016

ISBN 978-4-88890-511-4

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481（代表）

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/>

©2016 JST/CRDS

許可なく複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

