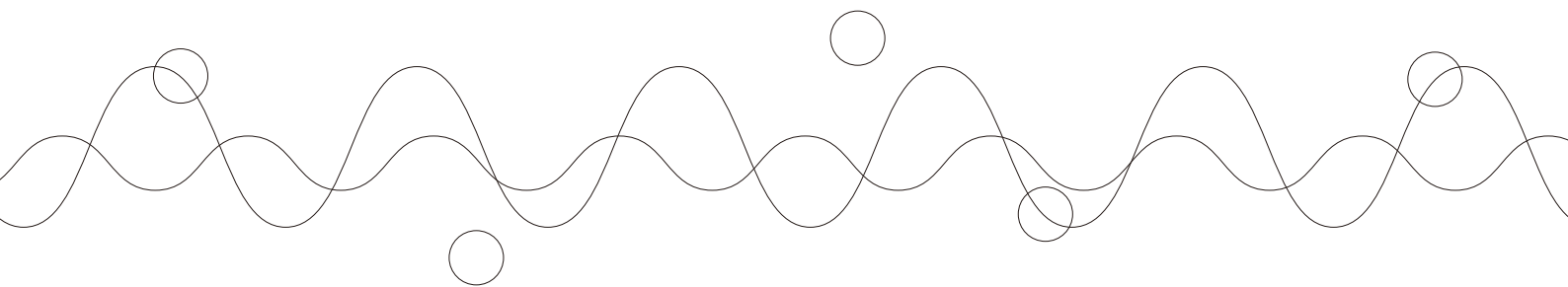


CRDS-FY2013-WR-01

俯瞰ワークショップ報告書
「グリーン・テクノロジー分野」



独立行政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

エグゼクティブサマリー

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する提言書の作成にあたり、対象とする研究分野の国内外の研究動向や研究開発の注目動向などの網羅的な調査（俯瞰調査）を行っている。本報告書は、その俯瞰調査に関し、平成24年度にJST-CRDSが実施した、グリーン・テクノロジーに関するワークショップの結果をまとめたものである。グリーン・テクノロジーとはバイオテクノロジーを中核技術とするグリーンイノベーションの創出に資する研究開発である。

検討した15の課題は、事前に開催した食料生産（統括責任者：佐々木卓治教授（東京農業大学））、物質・エネルギー生産（同：大竹久夫教授（大阪大学））、環境保全（同：矢原徹一教授（九州大学））の3つの分科会の検討結果をまとめ整理したものである。これらの分科会では、バイオテクノロジーの寄与が期待される課題を1) 社会的課題、2) 産業ニーズ、3) 科学技術的課題の3つに分けて、国が取り組むべき喫緊の課題を検討した。また、本会合では、有識者アンケートや研究開発の俯瞰的な動向調査などから国が優先的に取り組むべき課題の選定を行った。15の課題は、国土利用から環境ゲノムの活用まで多岐にわたるが、それぞれのレベルでニーズの高い重要課題が抽出されたと考えている。

以下、15の課題のワークショップでの検討結果と当該分野の研究開発の方向性について概観する。

1) の社会的課題では、国土利用、食料供給、資源循環の国の肝要なテーマにフォーカスを当てた。3つの課題は、いずれも科学技術だけでは解決できない課題である。本課題の解決では、研究開発の実施以外に法整備やステークホルダー間の合意形成などの多様な取り組みが必要となることである。このため、本ワークショップでは、各省共通の目標設定やそれに向けた学術および府省の横断的な取り組みの必要性が参加者間で共有された。

2) の産業ニーズは、生物多様性の定量評価、食品および農産物の輸出強化、バイオ医薬品の製造技術、そしてリンの安定供給、の日本の産業がかかえる4つの課題について検討した。これらのうち前者2課題については、生物や食品の機能の定量評価が研究開発の主要な要素である。ワークショップではそれらの評価指標等の策定、並びにそれらの社会への導入等における制度設計や合意形成の必要性の指摘があった。一方、後者の2課題については、技術的な課題は明らかなテーマが多ものの、コストや人材不足などに課題が多い。そのため、低コスト化に向けた技術開発や人材育成を含めた拠点整備の重要性などが指摘された。

3) の科学技術的課題は、生物や生態系の現象解明やそれらに基づく技術開発の科学的メリットについて検討した。いずれのテーマも統合化、システム化がキーワードとして抽出された。生物の現象解明を目的とした研究開発は、ゲノムの知見を分子から個体、集団へと統合する流れが形成されている。しかも、それらは単一の生物の階層を超え、多様な生物間の相互作用をも包含する。すなわち、これらの研究は膨大な情報を活用した複雑系生物学とも換言できる。このような潮流にあって、情報や知見の統合化、システム化は研究開発の主要な基盤と考えられる。また新たな生物情報の収集プロセスでは、新しい組換え技術や従来にない生物生産プロセスの活用が有効である。そのため、本ワークショップでは、そのような研究開発の実施についても検討した。

以上、ワークショップの検討結果を概観したが、本ワークショップでは、政府の研究開発の投資のあり方に対する多くの示唆もあった。例えば、この分野の抱える課題が複雑化しており、多くが単独の府省等で研究開発を実施するレベルではなくなっているということ、また、これまでは具体的な出口の設計なしに、研究開発投資が行われてきたということ（バイオ燃料の導入に関する制度設計など）、さらに、国が関わる意義が明確になされないままに投資が行われてきた事例があること、などである。これらの課題は、研究開発の目的および目標設定の明確化と、それに基づく体制の整備、そして達成度に基づく厳格な評価手法の導入によって解決されると考えられる。以上を踏まえ、JST CRDS ではこのような観点を今後も一層重視し、異分野、異業種、および省庁を横断した包括的な研究戦略を提案していく予定である。

目 次

エグゼクティブサマリー

第1章 開催概要

1-1. 概要	1
1-2. 趣旨説明	3

第2章 グリーン・テクノロジー分野 俯瞰ワークショップでの議論

2-1. セッション1 社会的課題	
2-1-1. 人口減少時代における国土利用のあり方（島谷幸宏：九大）	7
2-1-2. 食料の安定供給戦略（盛田清秀：東北大）	12
2-1-3. 資源効率の高い国づくり（資源の流れの循環閉鎖システム化） （長坂徹也：東北大）	18
2-2. セッション2 産業ニーズ	
2-2-1. 生物多様性の評価指標－企業にとって使い易い生態系評価指標とは （河野文子：日立製作所）	25
2-2-2. 食の安全・安心評価システム（福崎英一郎：阪大）	30
2-2-3. 食品（輸出米・輸出果実・畜産加工品）ブランド化戦略（CRDS）	35
2-2-4. バイオ医薬品の製造技術基盤（内田和久：協和発酵キリン）	39
2-2-5. リンの工業利用における重要性と安定供給戦略 （松永剛一：下関三井化学）	45
2-3. セッション3 科学技術的課題	
2-3-1. 生態系・生物多様性の保全や利用に関わる「科学技術的課題」としての 「植物の化学的側面と生態系機能」（伊藤元己：東京大学）	51
2-3-2. 遺伝子－生態系機能統合研究（高見英人：JAMSTEC）	55
2-3-3. NBT プラットフォーム（鎌田博：筑波大）	60
2-3-4. 持続農業基盤：根圏域生態系のモデル化研究（植物相互作用、物質循環、 下水、農業用水再利用）（林誠：生物研）	65
2-3-5. 複合酵素系の活用による次世代バイオプロセス基盤 （小川順：京大）	69
2-3-6. 沿岸域生態系（土壌、森林を含む）の統合解明 （松田裕之：横国大）	74
2-3-7. 微生物予報（服部正平：東大）	78
2-4. 総合討論	84

第3章 考察	88
第4章 おわりに	91
付録1 分科会 開催報告	
◆食料・バイオマス生産分科会	92
開催趣旨	92
「科学技術的課題」に関する検討の概要	92
「社会および産業の期待」に関する検討の概要	94
プログラム	95
参加有識者	95
◆物質・エネルギー生産分科会	96
開催趣旨	96
「科学技術的課題」に関する検討の概要	96
「社会および産業の期待」に関する検討の概要	98
プログラム	99
参加有識者	100
◆環境保全分科会	101
開催趣旨	101
「科学技術的課題」に関する検討の概要	101
「社会および産業の期待」に関する検討の概要	103
プログラム	105
参加有識者	106
付録2 重要研究領域調査協力者	107
付録3 提案された重要研究領域	108

第1章 開催概要

1-1. 概要

開催日 2013年1月25日

開催場所 独立行政法人科学技術振興機構 東京別館 4階 E会議室

プログラム

CRDS 挨拶および趣旨説明 13:00-13:15

主催者挨拶 浅島 誠 (CRDS 上席フェロー)

趣旨 川口 哲 (CRDS フェロー)

特任フェロー挨拶 矢原徹一 (九大)、大竹久夫 (阪大)、佐々木卓治 (農大)

セッション0 検討の経緯 (CRDS) 13:15-13:30

セッション1 社会的課題 13:30-14:15

- ① 人口減少時代における国土利用のあり方 (島谷幸宏: 九大)
- ② 食料の安定供給戦略 (盛田清秀: 東北大)
- ③ 資源効率の高い国づくり (資源の流れの循環閉鎖システム化) (長坂徹也: 東北大)

セッション2 産業ニーズ 14:15-15:30

- ① 生物多様性の評価指標・企業にとって使い易い態系評価指標とは? (河野文子: 日立製作所)
- ② 食品 (輸出米・輸出果実・畜産加工品) ブランド化戦略 (CRDS)
- ③ 食の安全・安心評価システム (福崎英一郎: 阪大)
- ④ バイオ医薬品の製造技術基盤 (内田和久: 協和発酵キリン)
- ⑤ リンの工業利用における重要性和安定供給戦略 (松永剛一: 下関三井化学)

セッション3 (1) 科学技術的課題 15:30-16:30

- ① 生態系・生物多様性の保全や利用に関わる「科学技術的課題」としての「植物の化学的側面と生態系機能」 (伊藤元己: 東大)
- ② 遺伝子・生態系機能統合研究 (高見英人: JAMSTEC)
- ③ NBT プラットフォーム (鎌田博: 筑波大)
- ④ 持続農業基盤: 根圏域生態系のモデル化研究 (植物相互作用、物質循環、下水、農業用水再利用) (林誠: 生物研)

セッション3 (2) 科学技術的課題 16:30-17:15

- ⑤ 複合酵素系の活用による次世代バイオプロセス基盤 (小川順: 京大)
- ⑥ 沿岸域生態系 (土壌・森林を含む) の統合解明 (松田裕之: 横国大)
- ⑦ 微生物予報 (服部正平: 東大)

セッション4 総合討論 17:15-17:55

参加有識者

氏名	所属
佐々木卓治	東京農業大学 /CRDS
矢原 徹一	九州大学 /CRDS
大竹 久夫	大阪大学 /CRDS
内田 和久	協和発酵キリン株式会社
松永 剛一	下関三井化学株式会社
林 誠	農業生物資源研究所
鎌田 博	筑波大学生物科学系
伊藤 元己	東京大学大学院総合文化研究科
島谷 幸宏	九州大学工学研究院
高見 英人	海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域
小川 順	京都大学大学院農学研究科
松田 裕之	横浜国立大学 環境情報研究院
服部 正平	東京大学 大学院新領域創成科学研究科
河野 文子	株式会社日立製作所
福崎英一郎	大阪大学工学研究科
長坂 徹也	東北大学大学院工学研究科
盛田 清秀	東北大学大学院農学研究科

順不同 敬称略

JST CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニット

浅島 誠	上席フェロー
川口 哲	フェロー
森 英郎	フェロー
辻 真博	フェロー
西村 佑介	フェロー
鈴木 響子	フェロー

その他の傍聴参加者

経済産業省、農林水産省から複数の参加者があつた

1-2. 趣旨説明

CRDS が作成したグリーン・テクノロジー分野の技術俯瞰図（図 1-2-1）を示す。生物や生物機能を活用した技術開発の寄与は医療、環境、エネルギーなど多岐にわたる。このため、一度の俯瞰ですべての分野を網羅的に調査することはできない。そこで本年度は、社会ニーズが大きくかつ技術の貢献度が高いと考えられる食料・バイオマス生産、物質・エネルギー生産、物質・エネルギー生産そして環境保全の3つの分野を調査対象とし、調査・分析をおこなった。

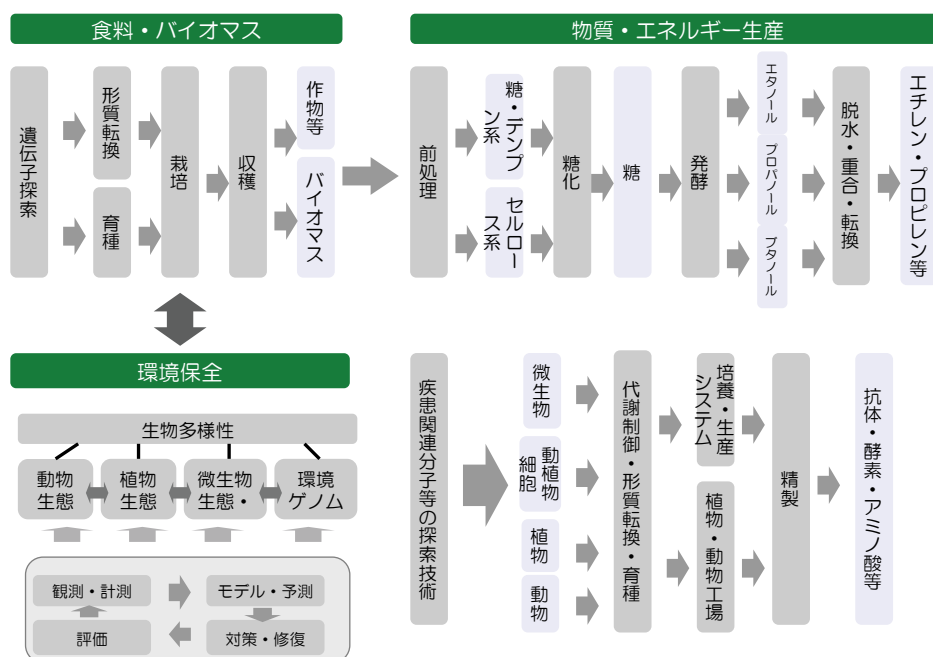


図 1-2-1 グリーン・テクノロジー分野の技術俯瞰図

本ワークショップに先立ち、3つの分野それぞれで分科会を開催している。分科会は産官学の10名程度の有識者の参加によって実施され、社会的課題、産業ニーズ、科学技術的課題の3つの課題に対する研究戦略の検討が行われた。なお、分科会では、食糧・バイオマス生産は東京農業大学の佐々木教授に、物質・エネルギー生産は大阪大学の太田教授に、そして環境保全は九州大学の矢原教授にコーディネーターを依頼している。

以下、それぞれ分科会の検討結果を開催順に簡単に報告する。

○ 環境保全分野（開催日 2012年10月3日）

環境保全分野では、「統合科学」がキーワードとなった。すなわち、社会的課題、産業ニーズ、科学技術的課題のそれぞれで分野融合や異業種連携の必要性が確認された。以下に主な論点を整理し、概説する。

（主な論点）

1. 科学者は社会的課題に真摯に向き合うべき
 - 社会ビジョンの提示
 - 学術の縦割りを打破、新たな評価手法の開発、社会の参画促進

2. 環境評価法の確立と発信
 - 企業の環境保全に対する評価法、認証法
3. ゲノム情報の積極活用
 - 環境ゲノム、共生ゲノム、ゲノム・生態系
4. 統合領域の思想
 - 負荷低減、環境管理、資源循環

まず、社会的課題については、科学者はそれらの課題に真摯に向き合うべきだという共通認識がなされた。その背景には、社会が抱える課題が複雑化していること、またこれに伴うステークホルダーが多様化していること、さらには、このために政治や行政だけの対応が困難であること、などが挙げられる。科学的な知見に基づき、中立的な立場で利害関係者との調整が可能な科学者への期待がこれまで以上に求められていることが明らかとなった。

産業ニーズについては、生物多様性のような複雑な概念に対する評価手法や認証制度に関するニーズが提案された。生物多様性などの環境保全に対する取り組みは、企業への直接的な利益が少ない。このため、消費者への訴求が容易で企業価値の向上に繋がり、かつ実質的な環境保全にも資する様々な環境指標のニーズが高いことが明らかになった。

科学技術的課題については、2つのテーマが挙げられた。まず1つめは、ゲノム情報を活用した研究開発である。本課題は、微生物や植物の遺伝子を個体または集団として解析し、生物間の相互作用を分子レベルで解明することが目的である。また、2つめは、環境保全に関する総合科学の推進である。植物学、微生物学、工学、そして情報科学といった学問を統合し、資源循環などの包括的な理解やそれに基づく管理手法を開発する研究提案である。

○ 物質・エネルギー生産分野（開催日 2012年10月17日）

物質・エネルギー分野では、研究開発への国の関わり方に関して活発な議論が行われた。その背景には、これまで多くの研究開発投資で、国の関与が必ずしも必要でない課題があり、その見直しを行うべきとの指摘があったからである。このため、本分科会では、国が投資する必然性や成果の社会実装の具体的な姿を念頭に置きつつ重要課題の抽出を行った。以下に主な論点を整理し、概説する。

（主な論点）

1. 社会的なソリューションと国家プロジェクトとの関係を明確にするべき
 - バイオ燃料、レアメタルの教訓
 - 資源循環の隘路と科学技術
 - 戦略立案における経済学の視点
2. 産業振興における国の役割を明確化するべき
 - 基質（糖）の確保が最も重要な国の役割
 - 発酵産業、医薬品産業はできるだけ自社で自己完結すべき
 - バイオ化成品の産業上の意義

3. オープンイノベーション

- 食品機能の定量化
- 発酵技術の異分野への展開

本分科会では研究開発の社会的なソリューションへの寄与を研究戦略立案の機軸とした。このため、アンケート等で提案された複数の課題に対し、国の実質的な関与の必要性を精査し、成果の社会実装の可能性が高い課題を抽出した。

また、対象とする課題とその他の課題の関係性を体系化し、本質的な課題の探索を行った。例えば資源循環の議論では、提案された課題の循環プロセスの全体像を描き、その課題の位置づけを明確にした。また、課題を克服した時の費用対効果についての科学的な分析も求めた。

以上の結果、産業振興における国の役割については、基質である糖の確保が最も重要な課題であり、バイオ産業、例えば発酵や医薬品産業は可能な限り自助努力をもって自社の競争力を高めるべきとの提案がなされた。

また、科学技術的課題については、オープンイノベーションの視点を積極的に取り入れ、異分野の視点を活用した新しい価値の創造を指向することが指摘された。具体的には、食品の機能解析研究における医学や工学の参画や、発酵機能の食品・エネルギー分野以外での展開などが例として挙げられた。

○ 食料・バイオマス生産分野（開催日 2012年10月22日）

食料生産分野では、食料危機の到来時期を見据えた複数の研究開発について検討が行われた。食料危機の回避は国の安全保障上、肝要なテーマであるが、到来時期や危機の内容によって対処方法は異なる。本分科会では、主要穀物の安定供給に関する短期的な危機への対策と、食料の輸出に関する中長期的な推進方策が議論の中心となった。

（主な論点）

1. 食料危機到来時期の科学的な見極め
 - 短期には来る、長期には来ない、日本はいつまでに何をやるのか？
 - 安定供給の戦略は？食物輸出の戦略は？
2. 植物研究における目標設定
 - 戦略作物、生産地域、収量、育種目標
 - 持続的な作物生産の視点、資源循環の中の農業
 - 高齢対応
3. 新しい組換え技術の活用戦略
 - 根圏域の統合研究
 - 雑種強勢
 - 環境適応植物

食料危機の到来については、危機が来るのか、来ないのか。来るとしたらいつ来るのか、どの程度の危機なのかについて識者の中で意見は分かれた。データからは、短期的には食糧危機が来る可能性が高いことが示唆された。これは、現在の食料価格の高騰や新興国の需要を見ても明らかである。一方、長期的には来ないという見方が参加者の共通的な認識であった。これは、新興国の人口が減少に転じることや、世界的には農地には余裕がある

ことなどが根拠となった。これらを踏まえ、本会議では、短期的な危機対策としての食料の安定供給についての検討を行い、また、中長期的には、食料の安定的な供給を前提とした上で、農作物の輸出の拡大方策について検討した。

また、植物や作物の研究についてはその目標設定に議論が集中した。これは、これまでの研究開発の多くが、植物の機能解明に軸足が置かれ、成果の社会実装に関する議論が不足していたからである。会議では、作物を増産する場合の育種目標を具体的な生産地と併せて検討することや、農業従事者の高齢化を見据えた栽培技術などが議論された。

さらに、組換え技術の活用については、技術開発、産業応用、社会需要の3つの視点で問題が提起された。特に社会受容については、国としての対応方策、すなわち審査基準の策定や組換えの認証等について早急な対応が必要との意見が出された。

以上の議論を踏まえ、本日のワークショップでは、15の研究開発領域を検討テーマとして設定した。これらの現状と課題を参加者で共有し、国が取り組む意義と具体的な研究戦略について検討を行う。

第2章 グリーン・テクノロジー分野 俯瞰ワークショップでの議論

2-1. セッション1 社会的課題

2-1-1. 人口減少時代における国土利用のあり方（島谷幸宏：九大）

（発表概要）

左と右は津波の前後の写真である（図 2-1-1-1）。津波によって海岸林や街が破棄されているのがわかる。このような状況の中で、地域を復興しなければならない。その中で、私は、津波の被害を受けた海岸堤防の復旧時に、環境にどう配慮すればいいかという委員会の座長となった。ガイドラインを作成するときに、街や海岸林のトータルな復旧が必要であると考えたが、災害復旧というのは原形復旧が基本で、結局のところ地域計画論まで全然発展しなかった。

日本の社会は重要な時期に入った

- 人口減少社会⇒高齢化 2050年 現在より3000万人減
- 巨大災害への対応



- 国土形成において、コンパクトで維持管理コストがかからない、持続的な社会の構築が必要
- 生態学はその時に重要な柱の一つとなる学問である。ぜひ、その国土再編にかかわって欲しい学問分野である。

図 2-1-1-1

学問的にも、生物多様性や、樹林帯の防災機能を配慮するような、総合的な科学としてこの問題に携わる必要があり、土木学会や海洋生物学者の支援は受けたが、生態学会との連携は果たせなかった。生態学は国土計画論の中に全く入ってきていない。生態学は都市計画学の中にも入ってきていないので、私は早く入って欲しいし、そういう学問領域ができればいいと思っている。

人口がこれから減ってくると、今、中山間地で起こっているイノシシやシカが出てきて困るという問題が、当然都市にも出てくると予想される。適切に都市域の人口をコントロールしながら、都市計画的にどういう場所からどういう形で自然を取り戻していくのかというようなことが課題となる。社会資本にしても、例えば下水道のように、管でつないでいるようなシステムが、人口が減少したときに、いつまでも維持できるとはとても思えない。

コンパクトで維持管理がかからないような持続的な国土構築というのが必要だが、右肩上がりのときの学術体系というのは持っている、下がるときの学術体系というのは世界にまだどこにもない、という問題を解決していかないといけないと思っている。

例えば、東京の人口が2分の1になったときの理想的な都市像を考えたい。

国土再構築のための総合科学の必要性

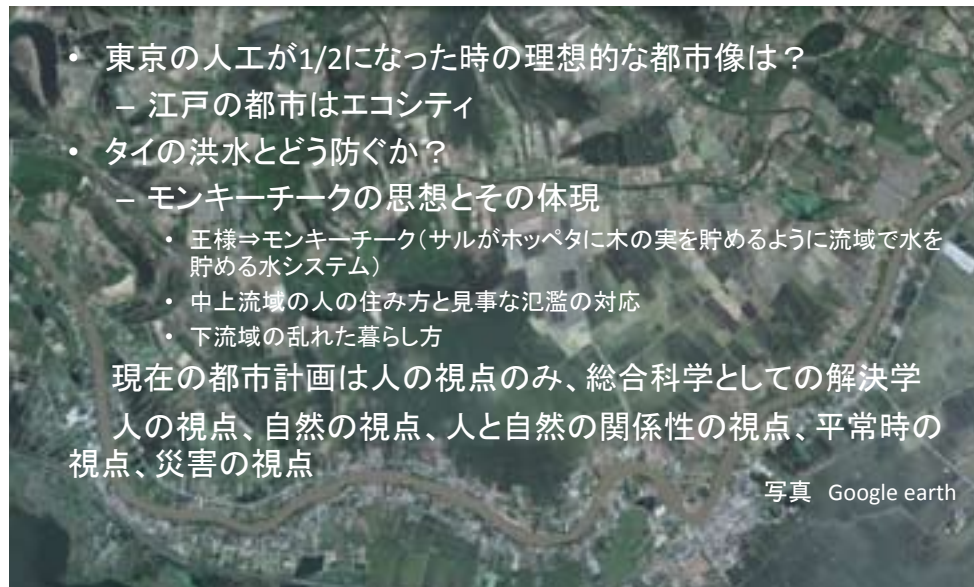


図 2-1-1-2

この図 2-1-1-2 はタイの国土で、バンコクよりも上流の地域である。タイの洪水の調査に行ったが、日本企業に被害があったのはずっと下流にあたる。タイはモンキーチークという思想がある。モンキーというのはサルで、チークは頬で、サルが頬に木の実をためるように流域全体で水をためよう、とタイでは王様が言っている。それに従って国土計画をしていて、高いところに人が住んで、それ以外のところは氾濫原として上流に水を貯留するというシステムをベースとしている。しかし、バンコクの近くでは、氾濫原に特に日本の企業を中心に工場を立地したために、水に浮かび孤立して、何カ月も輸送が途絶えた。

要するに人口が減ってくるときには、タイのように自然とマッチした形で、人口を維持するところと撤退するところを考えていけばいい。しかし、経済原理などにより、なかなかうまくいかないであろう。

現在の都市計画は、人の視点のみで、総合科学としての解決学にはなっていない。下水道部と対応して下水道工学があり、河川局に対応して河川工学があるというように、工学系の多くは役所に1対1対応で学問ができています。その垣根を超えた、一つの論理を超えた新しい展開というのは非常に難しくなっている。

そのため、総合科学として国土をどう形成するか、今までは人の視点だけだったが、当然、自然の視点とか、人と自然との関係性とか、それに平常時の視点、災害時の視点というさまざまな視点を包括したような国土再構築のための総合科学というのが必要となって

いる。これは、土木学会とか1つの学会ベースではできない。そこを我が国がどう突破するかというのは非常に重要で、世界の中で最初に人口が減っていく先進国であるので、世界の中でも模範となる人口減少時代の科学ができるのではないかと考えている。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 非常に重要なテーマだと思う。ただ、東京の人口が2分の1になるとは絶対思えない。過疎化してきても、多分、都市は都市で人口過密な状態が続く。現在、地方にいと、もう既に人口が減っていつている。そういうところは非常にいいケーススタディが既にあると思う。そういう視点も研究の中に入れられたら、非常に価値のある研究になると思う。

A: おっしゃるとおり。今の予測では東京の人口は2分の1にはなりません。しかし、大災害が起こったときに、若者が一気にその土地を去る可能性は、今の福島の実例を見ていると考えられる。

今、東京は1,000万人いるのが700万人まで、つまり3割ぐらい減ると予想される。3割というのは全国の平均かもしれないが、それぐらい減るのは当然考えられる。今、多摩ニュータウンとかは非常に高齢化が進んでいる。そのときに、ただそのまま放置しておくのか、それとも計画的に自然を戻すような場とするのか、政策がついていかないとなかなか難しい。老人対策だけで本当にいいのか、と思っている。

人口が減っているところは確かにあるが、今言ったように、計画的にはやっていない。全ての学問を合わせて包括的に将来の国土像の姿を描くというような形にはなっていない。これでは、そのまま放置していたらどういうことになるか、という研究は多分できると思うが、それを放置せず理想的なところはみんな議論してつくり上げないと、なかなか難しいのではないかと考えている。

Q: 都市部は別プロジェクトで、スマートシュリンクというのを聞いているが、今、一番人口減少に直面しているのは農村部だと思う。我々の分野で生物多様性をいかに保全するかというので、人間が関与していて保全されていたいわゆる里山の放棄された部分で劣化が激しい。シカもそういうところに入ってきてしまっている。生物多様性の観点からいくと、農村部をどうするか、というのが緊急で大きな問題となっているが、そういうところは入っているか。

A: それも入ると思う。そこにインフラが全部ついていて、今回、高速道路の天井が崩落した事故があり、そのような問題がいろいろ出てくる。しかし本当にそれを全部維持するのか、どこかを放棄しながらやるのか、そういう議論は国交省系ではできない。

Q: 放棄の仕方によっても、どういうふうに保たれるか違うので、その計画は必要だと思う。

A: 水処理の仕組みも、私は、管で全部繋ぐような仕組みでなくて、農村集落配水の都市版のような形で、分散してきっちり守るほうが災害にも強い。そういう方向性を提案しているが議論がなかなか難しい。それが一つの水システムとして議論されることはあっても、包括的なビジョンとしてどういう形が最適かというのを、生態学とか地理学とかまで含めた形で、さらに人文社会系も入った学問ができると楽しい、と思っている。

Q: 今の国の中では議論できないことがいっぱいある。だから、できないということよりも、どうしたらいいかということのほうが大切だと思う。

A: ええ。だから、こういうテーマをつくって人を糾合して、まずは議論するところ、非

常に萌芽的なところからこれはやったほうが良いと思っている。

Q: これは学会のテーマにならないか。

C: 学会では、議論に加わる人たちのコミュニティを委員長が組織できるかどうか非常に重要で、そこにどういう人がいて、どういう人がかかわってくるかが課題である。もしも学会に委ねるならば、特任連携会員があるので、そこに入って、ぜひそういうものはまとめていただきたいと思う。

C: 昔、集落移転という国の事業があつて、北海道の留萌だったか、住民がみんなまとめて移転するというだけだったが、今おっしゃるように、その地域自体の生態系をどうするかとか、あるいは制度的に言うと、ゾーニングのいろいろな指定があるから、そこをまたさらどうするかとか、そもそも人が移転するというのは、ばらばら移転しても余り効果がない。結局何人か残っていると、冬も道路を維持する必要がある。でも、そうすると、その合意形成をどうするかとか、本当に人間の移動を含めて考えると多様な問題が出てくる。だから、そういう意味で、人口減少は農村部で喫緊の課題にはなっている。しかし、秩序ある撤退とみんな言うが、秩序ある撤退方式をきちんと提言しているところはどこも見つからない。

Q: 私も撤退の農村計画というのに絡んで、まさに同じことを考えているグループがある。先ほど、国交省でそういう議論ができないと伺った。農水省が関係しているのに議論できないことを私は痛感しているが、なぜ国交省でできないのか。

A: 例えば下水道。下水道も、今はずっと流域下水道をつくっている。どこかでやめて集中的な下水道に変えないといけないときに、今向っている方向を変えるのは、外側で議論しないとなかなか難しい。変えたいと思っている人はたくさんいるとは思いますが、それは仕掛けの問題がある。土木の場合は、下水道部に対して下水道工学、厚労省の飲料水に対して上水道工学があつて、小さい部局に対応した学問が全部成立して運命共同体的学問になっているので、そこを取り払って総合化するというのは、土木の中だけでも難しい。

Q: ちょっと視点が違うかもしれないが、農水省に対して、今後の食料をどうするのかもっと明確にしてください、と言うと、だいたい答えが出てこない。自給率を高めますと言うけれども、本当に自給率が 50、60、70 と上がるのか。現実としては外からいろんな食料が入ってきて成り立っているこの社会の中で、日本は本当にこれから、産業立国なのか、農業をどこまでやるのか、そういう前提がないと、こういう国土の利用の全体のあり方はなかなか見えてこないと思う。

A: 昔、全国総合計画（全総）というのがあつたが、最近、そういう大きなプランというのは作っているか聞かない。

Q: 日本ではなかなか出てこないが、例えば南米などは、最近、農業国としてやるといって、国土の使い方をそういうふうに変えていく方法をとっている。将来、国がどういうふう生きるかによって、国土の利用の仕方というのかなり影響を受けると思う。

A: 今、東北では、堤防を作ろうとしたときに、生物がいっぱい帰ってきて非常に自然が豊かになって、自然保護運動とバッティングする、という問題が起きている。それは最初からプランニングの中で予想できることなのだが、できていない。現実には、すごい問題になって、自然と人間との間に大きなインパクトがある場合の考え方の整理だとか、そういうところがまだ社会的にも科学的にも十分できていないと思う。

C: 例えばある地域で、住む場所と農業生産する場所と、工業、産業のための場所みたいな、

そういう仕分けをある程度しながらでないと、できないのではないか、という気はする。

C: これは学者だけでできるのか。ステークホルダーがたくさんいて、学術会議では全然できないと思う。

C: ビジョンも含めて科学者が中心になって糾合するなり集めていかないと、右肩上がりの時代はよかったのですが、今はやる人がいない。

2-1-2. 食料の安定供給戦略（盛田清秀：東北大）

（発表概要）

5年ほど前に規制改革会議に参加して多様な議論をしたが、結局は政策実行の段階で、いくらこうやればよいというのがわかっているにもかかわらず、社会的に受け入れ可能ということになるとそれがなかなか政策化できないという経験をした。しかし、そこを突破しないとイケないのではないか。そのためにどうするかという視点が必要だと考えている。

私の今日の話は「食料の安定供給戦略」である。できるだけ短くポイントだけをかいつまんで紹介したいと思う。

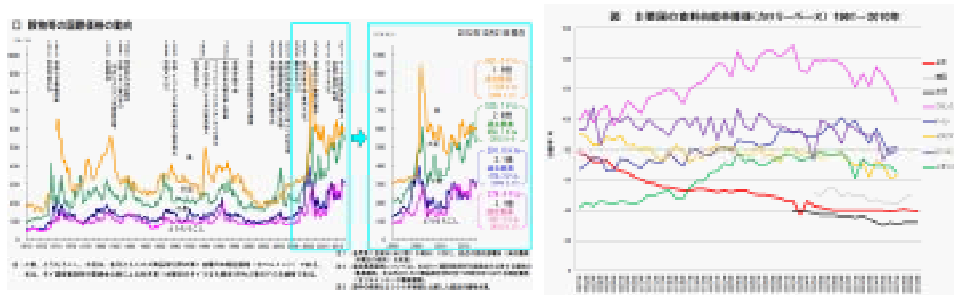
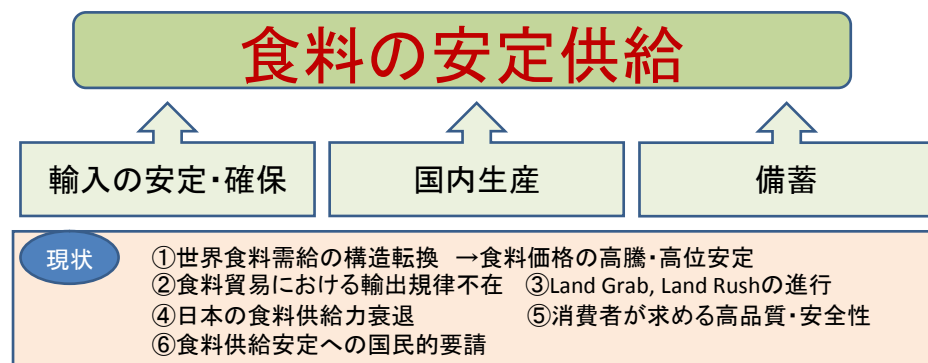


図 2-1-2-1

食料の安定供給は、どの範囲でとるかで見方が変わるが、ここでは地球規模で考えてみたい。現在の世界は国民国家である。要するにどこかの国が食料不足で痛んでいるときに、よその国が自国民を多少とも犠牲にして食料を提供できるかということ、それは不可能である。民主主義国家であれば次の選挙で負けてしまうし、また、独裁国家であれば食料暴動が起きてしまう。このため、国民国家を前提にすると、食料の安定供給というのは基本的には国をベースに考えないといけないこととなる（図 2-1-2-1）。

そこで食料の安定供給については3本柱、つまり輸入と国内生産と備蓄が重要になる。そこでの研究課題あるいは政策提言課題について紹介してみたい。

現状の捉え方にはいろいろあるが、私なりに次の6点に整理してみた。

- ① 世界食料需給事情の構造転換
- ② 食料・穀物貿易に関する輸出規律に関する合意（とくに罰則・強制的措置）の未確立
- ③ 世界的な Land Grab, Land Rush の進行
- ④ 日本の食料供給力の停滞と低下

⑤日本の消費者が求める品質・安全性をクリアする食料確保の困難

⑥食料関連産業の競争力強化・食料自給率の向上・農業の産業化という解決課題（国民的要請）

その1つは、世界食料需給の構造転換である。基本的には、世界食料需給事情は、20世紀的な状況と21世紀的な状況では、大転換している。

ちなみに、予想というのは大概外れる。20世紀には、食料はこれから余りに余って価格は下がる一方という予想だった。これは、あらゆる国際機関、あらゆる国のシンクタンクがみんなそのような予想をしていた。ところが、21世紀になると予想が一転している。その理由がここに書いてあるA、B、C、Dの4点である。これは既に定説化しているファクターである。

A 新興国（とくに中国・インドの人口大国）の経済成長による穀物需要拡大

B バイオ燃料需要の拡大（石油価格上昇を背景とするエネルギーと食料需給・市場の連結）

C 頻発する干ばつ等による穀物生産への打撃（地球温暖化の影響という評価も）

D 投機資金の穀物取引市場への流入（価格変動を増幅）

この中でも影響が大きいのはAとBである。Cの影響はまだよくわかっていない。Aというのは新興国における需要爆発である。それから、Bはバイオ燃料需要の出現であり、これはある意味で本当に影響が大きいと思う。なぜかという、より大きな、はるかに大きなマーケットであるエネルギー市場と食料市場がリンクしているからである。当然、小さいほうの食料市場は、より巨大なエネルギー市場の動向に影響を受けてしまう。

それから、Cは地球温暖化である。これはまだまだ科学的知見がはっきりしていない。農業生産、食料生産にどういう影響があるかというのは、まだ合意形成が得られていない。個別の研究があるだけだ。要するに不明な中でも、とにかくA、B、C、D（投機資金の流入）の要因があることを認識して欲しい。

それから、我が国から見ると、輸出規律に関する国際的な合意が一つもないことが問題となる。輸入国に対しては、市場開放しろとか、GATTあるいはWTOに違反したら、パネルに持ち込まれて場合によっては罰則、ペナルティーが課せられる。しかし、食料輸出国の輸出規制に対してはそういう強制的措置は一切ない。このところが重要な問題である。

また、世界的なランドグラブ、ランドラッシュというのが今進んでいる。これは何かというと、食料供給に不安がある国やその国の企業がアフリカとか中南米で農地とか農場を確保する動きである。ちなみに日本政府もこれを検討したことがある。しかしこれはビジネスとしては意味があるが、安全保障には意味がない。つまり食料不足が起きた時は進出先国の政府が食料輸出禁止をかけるのである。また、食料供給力がどんどん後退している、こういうような状況がある。さらに、食料関連産業の競争力強化・食料自給率の向上というようなどころあたりが、実は今、国民的な要請として農業分野に課せられていると思う。

食料安定供給戦略構築の視点

基本視点： 輸入＋備蓄＋国内生産

①資源賦存と食料供給力の推計

③食料需要見通しの精緻化

⑤国内生産力の向上・改善方策の検討

②食料供給をめぐるリスク評価、予防・緩和対策

④食料備蓄システムの検討

研究開発戦略

研究開発課題(例示)

- ①地球規模の食料生産能力の推計
生産要素別・地域別の資源賦存評価手法の開発と賦存量の推計、持続的利用可能性の評価手法開発(環境負荷の測定・影響評価)
 土地・労働生産性、技術革新・移転・普及を考慮した持続的食料生産力の推計、持続的食料生産力を最大化するための条件・コストの推計・計測
- ②食料供給リスクの評価と対策(世界・日本)
リスク発生の要因別確率的検討と推計値の解明、リスクの激甚度(直接・間接に失われる人命、健康被害、回復コスト)の測定方法の開発
 リスク予防手法の解明と予防コストの推計、リスク発生に伴う影響緩和・解消対策の解明と必要なコストの試算
- ③食料需要見通しの推計(世界・日本)
品目別・品質別の需要見直し・計測手法の開発、食料供給の公平・公正の視点を取り入れた需要・供給見直し手法の開発(飢餓人口の解消)
 食料危機下における需要調整方式と供給システムの解明(国家・地方・生活圏の各レベル)
- ④食料備蓄システムの評価とコスト推計
現在の国際備蓄システムの評価と課題整理、適正な備蓄水準の推計とシステム設計(国際的・日本独自)、そのコスト推計
 ASEAN+3(日中韓)によるAPTERR協定(緊急時に放出可能米数量を申告、日25・中30・韓15・ASEAN8.7万トン) →共同備蓄とは言えない
 日本では米100万トン、飼料(とうもろこし・こりゃん)40万トン備蓄(東日本大震災で35万トン放出実績)
 超長期・低コスト備蓄システムの可能性検証
- ⑤食料生産システムの革新による低コスト生産化の展望 —課題の明確化—
現行(最先端)農業技術の効率的適用が可能な農業経営体の育成方策・手法開発
 土地利用型農業の構造革新による高生産性経営の確立方策(米でいえば生産コスト半減)
 農地利用構造の革新による我が国農業構造の再編手法の開発と実行コストの推計、構造変革による社会的コスト低減効果の推計
 要点は、土地利用型農業における20ha以上経営(面的集積を伴う)の育成方策(平均経営面積tU並みを目標)、政策手法(大胆かつ実行可能)開発

図 2-1-2-2

いくつか大事な研究があるが(図 2-1-2-2)、1つはグローバルなレベルの食料生産力の評価。これは重要かつ必要である。

それから2つめに、どういうリスクがあるかというのを科学的に解明する必要がある。そして、そのリスク要因別に対応するとしたらどれぐらいコストがかかるかということ解明する必要がある。

それから、食料備蓄システムを充実させる方法である。どういうやり方がある、それには幾らのコストがかかるかということも改めて考えなければいけない。今現在、国際的な枠組みで実効性があるものはない。

それから5番めは、国内の食料生産力の強化といった場合、輸出産業化も大事だが、実は一番のポイントは、普段我々が食べるエネルギー源である穀物の生産性をいかに上げるかというのが最大のポイントとなる。

結局は農業も規模の経済というのが働くので、大規模生産するほどコストは下がる。ところが、それを実現する政策体系、政策手法がいまだにどこもきちんと提言していない。農水省もやってはいるが、それを具体的に実行可能な政策としてプログラム化するところほとんど提案されていない。そこを提言できるような形で研究開発をやるべきだと思っている。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 聞けば聞くほど、国は一体何をやっているのかなという感じだが、食料危機が来るかどうかという議論をしても意味がないと思う。最悪の場合どうなのかということからさかのぼって保障する必要がある。誰も将来のことを占うことはできない。そうすると、供給戦略の中で最悪のシナリオに対してどうするかというのは、どれくらい考えているのか。

A: これはリスク評価を実施し、そのリスク評価を踏まえてどの程度の対応が必要なのかというところがある程度論理的に出てこないといけないと思う。

実は今、農水省が、例えば輸入が全部ストップした場合、1人1日当たり2,000キロカロリーの食料を供給するにはどういう形をとったらいいかという、農業生産を転換した姿を示している。しかし、それを実際にどういうふうに行うか、またどういう法的な仕組みが必要か、さらには資材をどうするのか、コストがどれくらい必要かなどは全く行われていない。リスクについても例えばそれが100年に1回のリスクなのか、あるいは十数年に1回起きるリスクなのか、そのようなリスク別の評価をした上で、それぞれの対応を考える必要がある。

それと、今、先生がおっしゃったように、本当に危機が来るのか来ないのかという議論は、余り意味がないと私も思っている。それは、正しくリスク評価するということが第1点と、もう一つ、食料に関しては1回でも起こしてはだめだということ。ここのところをどう評価するかが難しい。

Q: 食料の話に水産が全く出てこないが、例えばイワシが450万トンとあったが、それが全部養殖の餌になっているのは、需給関係と経済問題の問題である。従って、経済的な視点で見るのか、飢餓という視点でみるのか、そこも十分に考える必要がある。

A: 水産資源は重要だと思っている。水産資源に関して私は専門外だが、基本的には、キャッチという部分は上限に来ていると言われている。漁獲をキャッチとアクアカルチャーにわけた場合、要するにキャッチというのは、言ってみれば狩猟採集時代がそのままずっと続いてきているわけである。これは生態系をコントロールして、今の状態を維持することしか考えられない。一方、アクアカルチャー、つまり養殖漁業というのはどんどん伸びている。これがこれから漁業の中心になっていって、それで本当に問題がないのかどうかというのは、ぜひ水産関係の分野の方で十分議論していただきたい。

Q: キャッチが上限に来ているというのは、僕は眉唾だといつも言ってる。オキアミだったら南氷洋だけで10億トンある。1億トンぐらいとって別に大したことはない。1億トンは世界の漁獲量です。つまり何をとるかによって決まると思う。

A: そのところは私も前提がある。研究開発の前提で4つぐらい書いているが、1つは革新的食料資源は存在しない。つまりステープルフードは変わらない、食の保守性を前提にするということである。これはどういうことかということ、昔は、将来はみんなクロレラを食べるようになる、だから人類の食料問題は解決するという話があった。だが食に関しては、ある程度所得水準が上がると、本物志向が強まり、新しい食料資源が、特にステープルフードが抜本的に変わるという見通しは、食文化あるいは人間の行動学からいって想定できないと思う。こういう前提を入れた。これが変わってしまえば私の戦略もまたがらっと変わってしまう。

Q: 2つ視点があると考えている。現在の日本の農業を見る場合と、長期的には世界の食料供給の中での物の見方というのがある。例えば穀物の世界の生産量は足りているかという議論をすると、必ず出てくるのは、穀物は家畜の餌に半分使われるということ。そのため日本で今の畜産業を成り立たせようとしたときに、トウモロコシは日本で栽培できるから自給率100%というのは絶対あり得ないということになる。そういう現在の我々の食生活を変える前提ならば、もっと変わった議論ができると思うが、食料危機という言葉になったときに、日本人は肉食をやめられるのか。その辺の前提をある程度しないと、食料供給

の問題というのは解決しないと思う。

A: おっしゃるように、危機のときは食べるものを変えるということしかない。農水省の1人2,000キロカロリーというのは3食芋ばかりである。

Q: だから、ある程度そういう前提があって、本当に非常時の場合と、でも日ごろ我々はこれからどうあるべきか、そこら辺の議論は、今のようなことを前提として残しておかないと、非常に難しい。

もう1点が、後で福崎先生の話にも出てくる日本人は安全な食でなければ嫌だということ。ただ安全は何かということに関する感覚が人それぞれで異なる。例えば、日本人はなぜか知らないが有機農作物を望む。必ずしも安全とは言えないのにも関わらず。そういう国民の理解というものもある程度前提にしないと、食料供給のあり方は、本当のところは議論できない。

Q: 国内の食料供給低下を防ぐために、具体的に、実際今の状況を把握してどのようにするのがベストだとお考えか。

A: 基本的には、農業経営、要するに農業を産業化できるような枠組みをつくらないとだめだと思う。

私の資料に基本計画で2020年目標ということで、数字が出ているが、すべて現状より、基本計画のベースより落ちている。この理由は、担い手がいないというか、生産主体が確保されていない。だから農地も減るし、生産力も落ちる。やっぱりそこを一番初めに手当てしなければ、幾ら対処的な、場当たりの対策をやっても難しい。

Q: それは国内だけの問題ではなくて世界的にも問題になる。例えば個人経営の視点というのはどうか。

A: 世界的には経営は家族経営が中心である。ただ、例えばアメリカも平均面積は169ヘクタール、オーストラリアは3,000ヘクタールを超える。それも大半が家族経営である。従って農業の場合は、家族経営だから効率が悪い、会社だから効率がいいとかということではなく、逆の場合が多い。要するに形態的には家族経営でいい。ただ、家族経営がきちんと生活できるような形の規模拡大は日本では必要だと思う。オーストラリア、アメリカではそれができている。

それから、ヨーロッパでは、日本よりは少しましな形となっている。日本より10倍程度面積が大きい。しかし、アメリカに比べると小さいので、そこは政策的な支援で支えている。日本が支えるよりもはるかに効率的な財政投入で、少ない金額で済む。私も試算したことがあるが、今のヨーロッパ並みに規模拡大すれば、今の投入金額より少なくとも3,000億円ぐらい減る。

Q: それは国土の利用形態の違いというのがすごく大きいと思う。それをどうやって解決するのか。

A: 日本は急峻で平野が少ないから経営面積が小さいのではない。それを言い出したら、中国はかなり経営面積が大きいはずである。今、中国はほとんど家族経営だが、東アジアというのは農業の生産性が歴史的に非常に高い。ヨーロッパに比べると土地生産性は10倍ぐらい高い。その結果、小さい面積で家族も養えるし、領主に年貢が払えるような、そういうような歴史があった。

当時はそれでよかったが、近代技術が開発される中で、機械化が進んで大きな面積を経営できるようになったときに、今までの歴史的な構造・農業経営規模と現代の生産力が対

応しなくなり、一旦そういう構造ができてしまうとこれを変えるのは難しいという問題に直面している。これはヨーロッパもアジアも共通だがヨーロッパで唯一社会的に対応しようとした国がイギリスである。それが有名なエンクロージャーである。従って、イギリスはヨーロッパの中でも経営面積が大きい。

2-1-3. 資源効率の高い国づくり（資源の流れの循環閉鎖システム化） （長坂徹也：東北大）

（発表概要）

私は主にレアメタルを研究対象にしているが、レアメタルの循環構造を絵にすると非常に簡単な絵が描ける。鉄鋼製品というと、製鉄所で主に鉄鉱石とコークスを使って製造しているが、実際は日本では、鉄鋼製品は 3,000 種類ぐらいを製造している（図 2-1-3-1）。3,000 種類は何が違うかというと組成が違う。その組成をどうやって変えているかというと、大部分はレアメタルの種類と添加量によって変えているのである。日本国内では毎年 200 万トンくらいレアメタルを輸入しているが、そのうちの 90%以上が鉄鋼製造部門で使われている（図 2-1-3-2）。

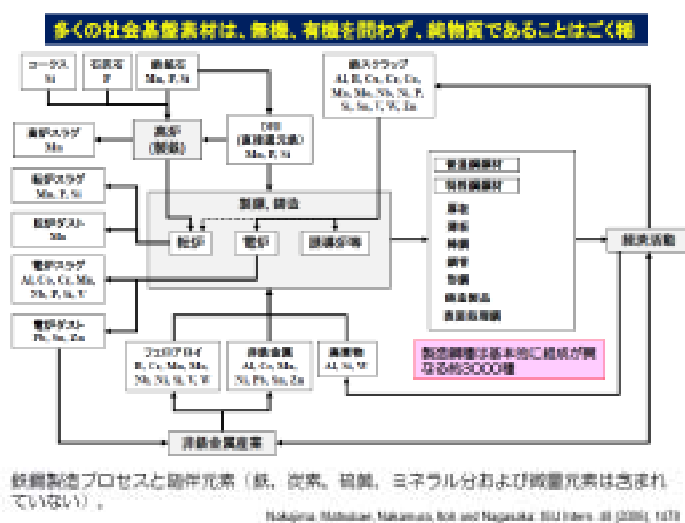


図 2-1-3-1

～鉄鋼はレアメタルの大量消費産業～

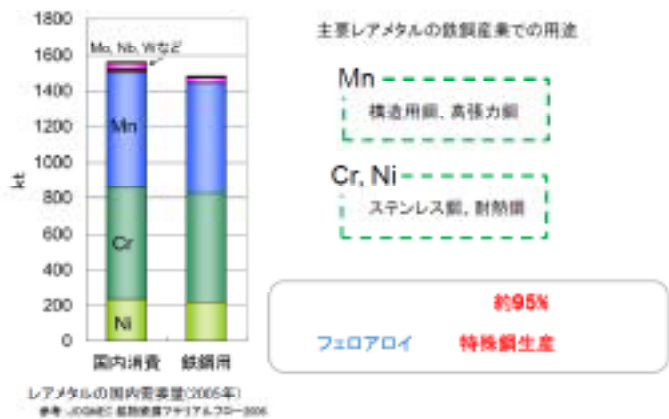


図 2-1-3-2

現状の金属類の循環システムでは、実は大部分では質の劣化が起こっている。つまり車を例にとると、車というのはいろんな鋼種を使って作られているが、これを鋼種を考慮せずに混ぜて溶かすと、リサイクルを繰り返している内に、様々な成分が混じった質の悪いブラックメタルになってしまう（図 2-1-3-3）。目指すべき資源循環というのは、要するに質の低下を起ささない本当の水平リサイクルである。つまり、ここで書いているように、鉄を水、色のついたインクをレアメタルとすると、鋼（スチール）は様々な色の水とみることが出来る。鋼の水平リサイクルとは、オレンジ色の水は多少濁っても、なるべくオレンジ色の水として使う、ピンクの水はピンクとして使う、ということであり、色の異なる水を混ぜると、必ず質の劣化が起こる。このことは鉄に限ったことではなく、アルミやマグネシウム、銅でも同じ状況である。ところが、世間一般の常識は、アルミ缶をぐしゃっと潰して混ぜて溶かしたらまたリサイクルできる、こういう理解になっている。



図 2-1-3-3

従って、まずリサイクルの在り方のコンセプトから変えてもらわないといけない。ただ、残念ながら、我々の分野だけだが、材料開発の研究をやっている人は、いかにブルーをきれいに出すか、そこしか見ない傾向が強い。使い終わった後どうなっていくかということほとんど考慮していない。ここは私は非常に大きな問題だと思っている。ゆえに、我々の研究グループでは、経済の専門家と協働して、計量経済に基づいた物質循環構造俯瞰モデルというのを作って、現状で何がどこへどう流れて行っているかということを定量的にわかるようにしようとしている。そういう意味では私は材料工学の中では極めて亜流である。

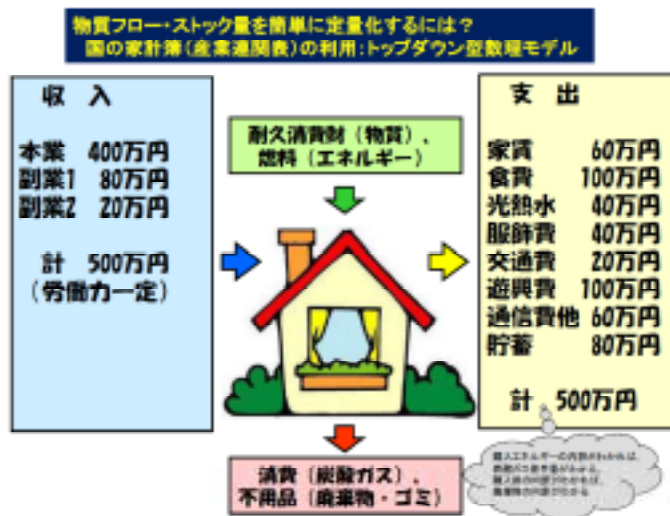


図 2-1-3-4

例えば、これ（図 2-1-3-4）が今、我々が使っているモデルの基本である産業連関分析の概念図である。要するに、国の家計簿でもある産業連関表から、国で何を幾ら、どこから持ってきてどういうふうに使っているかという内訳を知ることが出来る。この基本的な国家統計データを、あるモデルに適用して計算すると、例えばここにある車等の耐久消費財はどのような組成を持つかということ、定量的に計算することができるようになっている。

それだけではなくて、我々が志向しているのは、現状で様々な物質のフローの構造がどうなっているか（図 2-1-3-5）ということ、客観的に定量化したいということである。

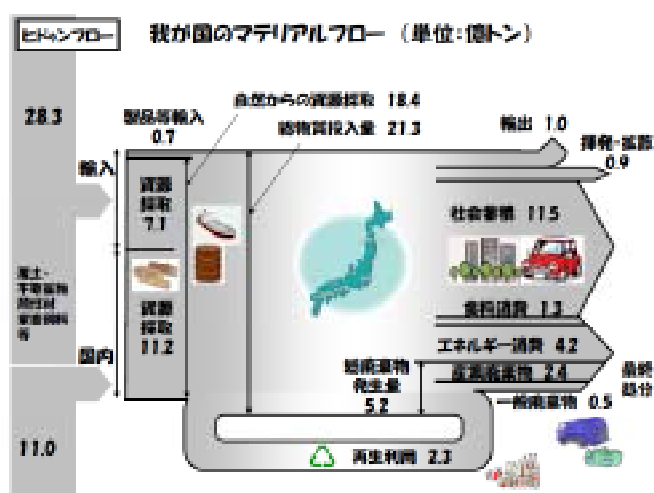


図 2-1-3-5

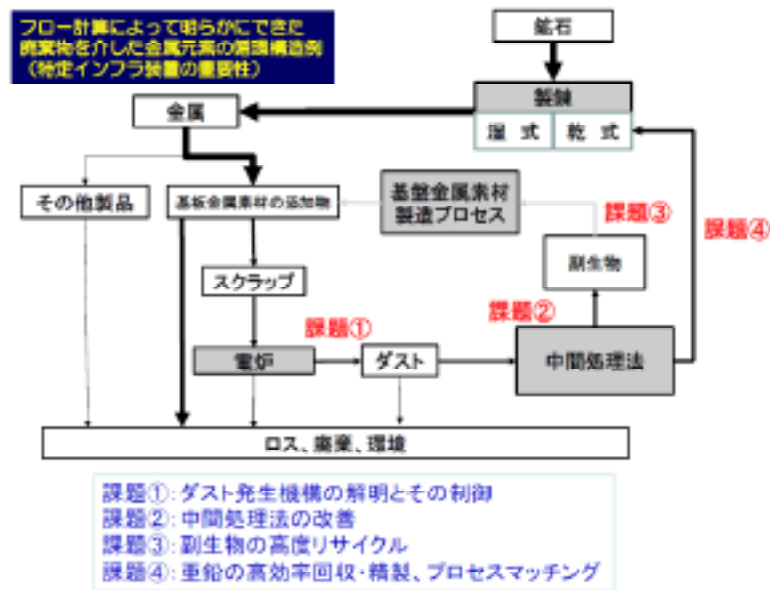


図 2-1-3-6

この図 2-1-3-6 は一例だが、亜鉛が現状でどのように我々の社会を回っているかというのを図に起こしたものである。我々のモデルでは、このような情報を出力結果として出すことができる。そうすると、亜鉛循環というのは本当にできるのか、どこが現状で問題になっていて、どこがボトルネックになっているか、ということをも、数値的、視覚的に理解することが出来る。本日の論点を図 2-1-3-7 にまとめる。

小 括

- 資源のほとんどすべてを海外に依存している我が国において、持続可能な資源循環を考えることは重要。
- 資源戦略、枯渇性資源の持続的な管理のためにも社会蓄積中の資源を有効利用するために、「どこに」「何が」「どんな状態で」「どれだけ」あるかのマテリアルフロー情報を整備することが必要
- 今日のストックは明日の資源
- 資源リサイクルを考える際、プロセスによって回収可能性が異なることを考慮する必要がある。
- 持続可能な資源循環、資源管理戦略を考える上で、素材産業の役割は大きく、循環利用の基本インフラとして機能する機会が多い。
- マテリアル・リソースリンケージを十分考慮し、何が、どれだけ回収可能で、何が拡散するのかを考えた上でのリサイクル政策、制度設計が必要である。

図 2-1-3-7

従って、我々はそういう情報をなるべく広く公開し、一人で現状での循環の問題を解こうとするのではなく、関係者が知恵を出し合い、どこにフォーカスすべきか、そのような現実的な議論をするための基本情報を与えるのが我々の使命だと思っている。

今日はバイオ系の方が多いので、あえて出さなかったが、現状で我々が今、一番興味を持っているのは、先ほど申し上げた基盤金属素材に使われるレアメタル類と、リン、窒素、カリ、の3大栄養素である。3大栄養素もやはり同じような、1カ所が非常に狭くなっているようなボトルネック構造を持っているので、クローズドループ化のために新技術を投入するにはどこが一番重要なのかということところが非常に明確に見える。私は定年まであと10年あるので、その間になるべくたくさんのクリティカルメタル、リン、窒素、カリ、この4つはきちっと定量化して、後世につないでいきたいというふうに考えている。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 非常に重要なテーマだが、ヨーロッパがEU 2020 というのを出して、成長戦略の一つに資源効率の高いヨーロッパというのをやった。その中でリンも非常に重視されている。彼らの言っているのは、資源効率の高いヨーロッパをつくることによって成長させたい、経済を大きくしたいという。今の経済システムではこれ以上成長できないから、仕組みを、ルールを変えてしまおうという発想。非常に社会科学的なマーケットを意識したコンセプトである。

従って、余り技術的などころの議論はかえってされていない。ヨーロッパを見ると議論ばかりしていて本当にできるのか疑問。先生の場合、こういうテーマの場合に、社会科学的な、あるいは社会システムを変えないと、技術的には可能なんだけれども実現できないという部分が多々あるんじゃないかと思う。その辺はこういう研究の中にどうやって入れていったらいいのかお聞きしたい。

A: 大変良い質問だと思うが、実効性のある成果を出すのはすぐには難しい。我々の活動舞台に、広範な分野の人が集まってやっている領域がある。産業エコロジーと言うが、技術屋、社会学者、法学者、たまには文化人類学者なんていう方もいる。そういう人達が入って、現状での社会問題、特に環境に特化した問題をどう解くかという議論をする。従っていろんな知恵や価値観が入ってくることは入ってくる。だが、やはりリーダーの根っこ(専門知識)にかなり引っ張られる部分がある。

例えば、ここに書いてある亜鉛の問題を考えよう。これを社会学者が見たら、未回収部分が問題だということかもしれない。私は冶金屋なので、全量回収は防食材としての亜鉛の用途の宿命上、絶対に無理だと思っているが、再生プロセスの効率の悪さは何とかしたいと考えている。他方、このような循環構造が明らかになった時、他国はどうなっているのかと考えたくなる。今、我々は我が国を対象とした物質循環のモデルを作っているが、貿易統計等を組み合わせたワールドモデルの作成も進めている。他国の物質フローを見ると、大部分はどこもみんな似たような構造である。ただ、循環に必要な産業インフラの一部が欠けていたり、弱かったりすることはある。例えばここは日本が強い、ここは韓国が強い、ここは中国が強いと、そういう強弱はあるが、基本的な循環構造はそれほど変わらない。

ということは、日本がほかの国と同じような循環構造のまましていると、将来的にはやはり不利になってしまう。レーバークスト、それから法整備、いろんなもので国際競争力が

劣ってしまう。技術屋の目で、今は存在しない静脈系循環パスをここに作るべきだ、という提案をしていきたい。社会学者にそのような発想を期待することはできない。すなわち、現状の循環構造を踏まえた上で、社会科学的な知見の助けを借りながら、技術的に最も効果的な持って行き方の開発に傾注すべきと考える。

こういう取り組みで、例えば亜鉛の循環に限っては、日本はほかの国と全然違うことをやっているということを他国が認知した瞬間に、日本はイニシアチブをとることができる。それは法制度とかではなく技術的なイニシアチブだと思う。我々としてはそういうことを志向している。ちょっと大それてはいるが、誰かがそういうコンセプトを出さないといけないと思う。

鉄鋼循環図については、もう少し現実的な図を描きたかったが、これは実は鉄鋼に限定しているものの、これの周りに農業だとか、非鉄だとか、紙だとか、ケミストリーだとか、いろんなものがくっついてくるのが現状であり、それらとの間の物質フローも膨大である。従って、外界とのリンクも当然考える必要がある。

我々が共同開発している計量経済モデルというのは非常によくできていて、基本である産業連関表でもある程度はわかるのだが、産業の間のリンケージというのは物すごくよく見える。例えば、鉄鉱石の中のリンを考えよう。リンが鉄鉱石と一緒に溶鉱炉に入って、そのまま製鋼スラグとして捨てられている。一方で、大竹先生が言われるように、資源としてのリン需要もある。これらのフローがある程度定量的にわかる。

これによって初めて、ここに未利用のリンがあったのかと気がついて、これを農業利用したとすると、リンの鉄鉱石からのリンのフローは鉄鋼から外へ出ていくことになる。まさに物すごく広大な産業間リンク、さらに海外まで行くと、よその国もつながるようなものである。それを、今日のワークショップのテーマではないが、俯瞰する手段を持っている、持っていないというのは、国の戦略として物すごく大きな違いだと思う。

Q: そういうデータはどこにあるのか。

A: 様々な所から探してくる。いろんなデータの寄せ集めである。

Q: そうすると、そのデータの正当性というか、どれだけ正しいかは誰が評価するのか。

A: そこは一種の弱点である。しかし戦略的に利用する場合には、精度は過度には必要としないだろう。

Q: 間違った根拠のデータのもとで戦略を作ると、間違ったフローができるおそれがある。元となるデータは誰がまとめて、誰が管理するなど、そういうことをする必要はないのか。

A: 例えばウェブサイトなどを見ると怪しいデータがいっぱい出ている。出典がハッキリしないデータは我々は使わない。まず一番信用できるは国家統計データである。その次は論文や公的機関の報告書等、ある程度オーソライズされているデータでクロスチェックをやる。例えば国が100トンしか輸入していないものを、国内のある会社が200トン作っているとすれば、これは矛盾である。そうやって精査していく。

ただ、工学の世界でこういう話をすると、データの精度についての指摘は必ずある。ただ精度には限界があるので、これはこの程度の精度しかないと思ってくれと言うしかない。要は何のために使うのかであって、元素戦略の場合、過度な精度は必要ないと思っている。

Q: 生物の世界も一緒である。

Q: 工学的に終える部分と、例えばこんなインセンティブを作ったらこのようなリサイクルがあり得るとか、社会経済的なものとか、それを組み合わせるといふのに興味があるが、

そういうところのアイデアについて教えて欲しい。

A: 産業エコロジーの国際会議などではそのような議論ばかりである。ただ、未だ議論の域を出切らないのが大部分なのは残念である。

最近、国連や EU の会議では政策関係者が参加しており、話をきいてもらう機会がある。従って、そういう場を通じて、それが近い将来、どこかに反映されるのではないかと期待している。政治家に來られて論文とか褒められても、引用してくれないから成果になりにくく、大学の研究者としてはいささか残念である。

Q: 日本は、資源循環に関する政府の意識というのはどれぐらいあるのか。

A: 例えば少し前、インジウム、タングステン、レアアースなどの緊急性を擁する者への対応は素早くやって頂いていたが、他にももっと大事なものもあるだろうというのは常々思う。

Q: 物質の優先順位づけはできないかもしれないが、先生方の研究の中で考えたりはしないのか。

A: 恐らくこういう会議で決まるのではないかと思う。そこで誰かがタングステンはだめだと言うと、そこで決まる気がする。

Q: どういうふうに使っていったらいいかわからないが、鉄鉱石の中からリンが出てきても、それを捨てていると。それは捨てている人たちは理解しているとしたら、現在捨てられているリンを使ってくれる人はいませんかと社会に対して訴求する仕組みはないのか。

A: それは、今、大竹先生が率いている協議会で実施している。

Q: やっぱり資源を持っている側が提供できる可能性というのを提示するというのが、社会的には一つの手段だと思うが。

A: 歩み寄りが必要である。

Q: スラグとして捨てられているリンがビジュアルに見えると、使いたいと思う人たちが出てくる。それと同時に、リンを鉄鉱石の中からうまく取り出そうとすると、今の高炉・転炉法では難しいので新しい技術開発が必要になるということもありそうだが、そういうことは逆に鉄鋼メーカーの人間はやっているのか。

A: 非常に歯がゆいことに、鉄鋼マンは鉄をつくるのが忙しい。リンは鉄にとったら天敵。だから一生懸命リンを鋼から除去する。除去されたリンを振り返る余裕は、残念ながら現状ではあまりない。

Q: リンを有効にとりながらうまく鉄鋼製品をつくるという技術ができ上がれば、ベストだと思う。

A: それは理想だが、製鉄マンがその方向に行くように仕向けるのが我々の仕事ではある。

Q: リンの廃棄物が環境に負荷をかけているということはないのか。

A: 鉄鉱石中のリンか？

Q: 鉄鉱石から取り除いたもの。

A: スラグからはリンはなかなか溶け出さない。

Q: 環境に悪影響は今のところ出ていない。

A: 余りない。逆に、ほんのわずか、徐々に海水中に溶けるため、それを使ってプランクトンを育てようというプロジェクトはある。

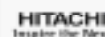
2-2. セッション2 産業ニーズ

2-2-1. 生物多様性の評価指標－企業にとって使い易い生態系評価指標とは (河野文子：日立製作所)

(発表概要)

「生物多様性の評価指標」のタイトルで「企業にとって使い易い生態系評価指標とは」ということを考えてみた。具体的には、科学技術を中心とした研究開発が後の社会に役立つ、ひいては企業にも使いやすいような指標に役立つことを全体に、エンドプロダクト、つまりどういった指標だったらそれが広まるのかというところを考察したいと思う。まず初めに、企業が必要とする生態系の評価指標とは一体どんなものなのだろうかというのを4つほどの観点から考えてみた(図2-2-1-1)。

1-1. 企業が必要とする生態系の評価指標とは？



1. **企業が評価を行う理由：**
生態系保全を事業活動の中に盛り込む為に参考となる情報として評価結果を活用する為。〈活動促進ツール〉
2. **企業が生態系評価を行う目的：**
事業活動と生態系の変化(劣化or復元)の関連性を定量的に評価することにより、自社が直面する問題の有無や度合を把握する 〈見える化〉
3. **評価方法に望む条件：**
ライフサイクル(LCA: 原材料調達⇒設計⇒製造⇒使用⇒廃棄)に沿って評価できる手法が望ましい
(=企業にとって、使い易い) 〈評価の容易性〉
4. **評価の対象範囲：**
①各社の個別案件毎、②サプライチェーン全体
〈バウンダリー(スコープ)の設定〉

© Hitachi, Ltd. 2009. All rights reserved. 3

図 2-2-1-1

1つめは、企業がこのような評価を行う理由だが、生態系保全という概念を事業活動の中にいかに盛り込んでいくか、そのために参考となるような情報としての評価結果というのがうまく出れば、それが活用されて促進されるという動きに広まっていく。いわゆる活動促進ツールとして評価指標の結果を使っていくということが、企業にとっての一番のインセンティブになる。

2つめに、企業が生態系評価を行う目的だが、これも、大きな要因は、事業活動において生態系の変化、劣化という傾向が背景にある。あるいは何かプラスアルファの活動を行えば、生態系保全につながる、復元につながるということが目に見えてわかる場合、それが企業が生態系評価を行う目的となる。例えば、定量的というのが企業にとっては一番わかりやすい物差しだが、何らかの形で可視化、見える化ができることによって、自社が直面する問題がどの程度なのか、あるかないのかというところがわかる。そのような指標があれば、それは企業にとってはすごくありがたい。

3つめは、評価方法に望む条件である。これはものづくり企業という視点での前提となるが、ライフサイクルアセスメントという手法の中で、原材料調達から設計、製造、使用、廃棄までのプロセス全体を見たときに、全てのプロセスにおいてどういうふうに生態系保全もしくは影響を与えるということにつながっているのかというのが見えるような手法であれば、それは企業にとって使いやすい。

最後に、評価指標の対象範囲というのも考えてみた。企業というのは、あたかも1つの人間というか、1社単体のように語られる場合が多いが、多くの場合、グローバル企業になればなるほど、事業活動を行う拠点は複数存在する。また、扱う製品、事業なども多岐にわたる。それをいっぺんに全部同じ評価を行うというのは到底無理な話である。土地であるとか製品であるとか、個別の案件ごとの評価というふうにならざるを得ない。もしそれが評価を実施して、正しい結果を何かに有効活用したいというのであれば、案件ごとという評価の仕方が一番実質的である。

もしくは、これは実現可能性がどうかというのは別問題だが、サプライチェーン全体を通じた評価というのは、そういう手法ができ上がったら、我々は、自社活動だけではなく、原材料調達から顧客に製品を届けたときまでのスコープというのが見えてくる。その意味では、非常にありがたい指標になる。

そのような指標を考える場合に、盛り込んだほうが良いと思われる観点をさらに3つ考えてみた(図 2-2-1-2)。1つのトレンドとしては、最近、自然資本(natural capital)という概念の考え方がいرونなどところから聞かれるようになった。

2-1. 産業界からのニーズ

HITACHI
Inspire the World

以下3つの観点を踏まえた指標ができれば、産業界での活用が進むと思われる。

1. Natural Capital(自然資本)の概念

企業を支える資本としての生態系の捉え方および金銭換算化の動き
キーワード: TEEB, Rio+20, 統合レポート

2. 企業責任および問題解決の範囲の把握/問題解決に向けた連携

企業1社単独で生態系劣化を防止する活動を大規模に行う事は困難。
企業間の連携を可能とする、共通のツール(標準?)があれば、活用が進む? キーワード: PPP(Public-Private Partnership)

3. サプライチェーン・原材料調達におけるリスク回避

生態系由来の原材料(石油、鉱物、森林資源、食糧、その他、あらゆる生態系サービス)の調達における将来のリスクを回避し、同時に生態系破壊も妨ぐには、企業はどの様に自社の活動の事業計画を立て、管理すれば良いか? キーワード: リスク管理

© Hitachi, Ltd. 2009. All rights reserved. 5

図 2-2-1-2

生態系保全、生物多様性というのもこれに似たような概念だが、特に企業にとっては、社会資本や経済資本と同等のレベルで扱う、それが企業活動にとっても重要でかつ不可欠なものであることをより身近に感じてもらうためには、自然資本という考え方で、かつ、それが何らかの形で金銭換算化できるものであれば、そういったものへの注目度というのが高まるのではないかと思う。

そういった流れというのは、TEEBと呼ばれる生物多様性の経済学や、昨年6月に開催されたRio+20と言われるような会議でも議論されている。また、最近、統合レポートが注目されているが、企業の財務的状況を報告するような報告書で、あわせて企業活動と関連する自然資本がどれくらいの価値があるのかというのを一緒に紹介していこうという試みであり、それらの手法というのは、今まさに議論されている途中である。

2つめは、企業の責任と問題解決の範囲の把握のための連携である。これも1社で何かを取り組む、生態系保全の活動に取り組むというのは非常に困難なため、企業間の連携を可能とするようなツール、それが指標なのか標準なのかわからないが、そういったものができ上がってくれば、また、科学的にも実証された指標であると使われる可能性は高い。

3点目は、サプライチェーンや原材料調達におけるリスク回避である。これも企業が使っている原材料の中に生態系由来のものというのは多くあるが、そういったものの調達における将来のリスクを回避するような指標というか、何か考え方というのができれば、それが活用される動きが加速すると思う。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 企業にとって、生物多様性の問題を取り上げようというのは非常にタイムリーで、非常に興味深い。産業界のニーズを見ると、CSRだとかサプライチェーンだとか、これはあくまで企業にとってのニーズと思われる。一步進んで、それが社会のニーズにどうつながるのか、そこが非常に重要なところだと思う。そうでないなら、企業の中でやってくださいということになる。そこはどういうふうに考えているか。

A: おっしゃるように、企業というのは、いろんな活動をやる中でCSRとか社会貢献活動という活動も行っている。CSR活動としての生物多様性とか生態系保全という分野も近年活発になりつつあるが、それを何かプロジェクトとして行う場合には、社会への効果や影響を最優先しながら実施するということだと思う。しかし、それにかかるコストはどうかと考えたときに、ある程度企業の負担すべきコストとして、寄附金であったり活動にかかる費用の負担というのは企業負担で行っているという認識だが、それとはまた別に、サステナビリティとか事業継続性という観点で、長期的視点で見た場合には、社会貢献的側面だけではなく、事業活動を継続するために、それは本業の一部として取り組むことが必要であり、そのように考え始めている企業も中にはあると思う。その場合には、事業としての採算性もとりながら、同時に社会への貢献度、生態系保全の効果というのも検証しながら、両立させてやるということ、今まさに議論しているところである。

Q: 今日は生物多様性オフセットという言葉が聞こえなかったが、カーボンの中からオフセットのように、言ってみれば数値目標を決めて、これ以上になったら、お金を払うインセンティブとしてそういう制度を強制的に導入していくというやり方と、もう一つは、FSC (Forest Stewardship Council: 森林管理協議会) とかMSC (Marine Stewardship Council: 海洋管理協議会) のような認証制度を使って、より環境に優しい、負荷の少ないものを推奨していくというようなやり方と比較して、今、生物多様性を守る上でこういう評価の方法はどういうふうにお考えか、どちらが有効かということも含めてコメントを頂きたい。

FSC 参照サイト : http://www.env.go.jp/policy/hozen/green/ecolabel/a04_14.html

MSC 参照サイト : http://www.env.go.jp/policy/hozen/green/ecolabel/a04_27.html

A: オフセットも勉強はしてはいるが、例えばアメリカとかオーストラリアとか、一部の国では既にそういった制度が、復元した土地に対する支払を制度として成り立っており、それを保全活動の一環として売買するというような枠組みが、法律も含めて成り立っている国がある。ただ、日本はまだまだそれに対する制度もできていない。また、法律もないという意味では、それをどう取り入れていくのかということころは、私もまだ予測し切れていない。特に日本という地理的な土地も限られている状況の中で、どういうふうにその制度が適用されるのかということころが、まだ見えていないというのが率直な感想である。

Q: こういう考え方というのは、会社の中で全社員にどのぐらい浸透しているものなのか。最近、企業が多様性のことをきちんと考えることが、かえって企業にはメリットがあるという報告書（ESR、CEV）が出されて、それはたしか日立の会社の方が日本語に訳されて、今、ウェブでも見えるようになってきているが、こういうことに取り組むことが、一見ネガティブのように見えるけれども、最終的に会社の利益につながるんだということが綿々と書いてある。

ESR 参照サイト：http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/csr/report_esr.html

CEV 参照サイト：http://www.hitachi.co.jp/environment/vision/ecosystem_cev.html

日本語のほうしか読んだことはないが、一般的な社員の意識としては、どのぐらい定着しつつあるものなのか。やはり一人一人の意識というのが高まってきて動きが大きくなるような気がするが。

A: 1つのターニングポイントとして、日本では COP10 という生物多様性条約締約国会議が 2010 年にあつたので、その前と後を比べると、例えば「生物多様性という言葉を知っている」とか、「生物多様性は企業活動にとって重要だ」ということをより意識する従業員の割合は、一般的にふえたとは思ふ。ただ、まだまだ主流ではないというのが正直な印象で、中には、そういった活動というのは理解はするけれども、採算がとれないビジネスは企業ではできないという、ビジネス性の優先順位が高いと考える人は、多いと思う。

Q: 従来の環境影響評価とどこが違うのか。

A: (今回議論している生態系評価は) 従来の環境影響評価で議論されているテーマへの付加的視点を提示することだと思ふ。環境影響評価は、例えば水質への影響や、CO₂の影響など、個別の切り口でしか見ないような傾向があつたところに、生態系保全では、土地をベースにしたり、そこにすむ動植物を考えたりまたは相互関係性も理解しながら、将来予測も含めた複雑な評価を行っていくべきだという新たな視点が求められていると考える。

Q: しかし、環境省で組換え体の野外放出の生態系評価というガイドラインづくりに十年以上も昔から関わつたが、生態系の評価は非常に難しい。個別にそういうもので議論していくしかなかつた。だから、その辺の環境影響評価との違いをもうちょっと鮮明にすることは非常に重要な気がする。

Q: 研究として個別の種の評価は有益だと思ふが、例えば企業の工場立地で、環境影響評価のような視点を意思決定の中に入れ込むことが可能なのか。評価の反映が見られなければ、企業は評価はするけれども、いくら評価しても、生物多様性を保全する適切な対策をとらなければ評価しないことと変わらない。例えば、生産システムそのものも、環境評価をした結果このやり方でなくてこっちのほうがいいのか、そのように変わる可能性が企業活動としてあるのか。

A: 実際、今、企業が新しく工場を設置するとしたら、日本というよりは海外の場合が、特に新興国という場合が多いと思う。だが、意外と新興国のほうが環境規制が厳しい。水関連とか、各種の環境規制の条件が厳しい場合がよくある。その点は、企業の中でもある程度は配慮されつつあるというのが私の認識である。それ以外は、既にそこでオペレーションを行う際に、事業活動の影響をいかに最小化するかという活動だと思う。

2-2-2. 食の安全・安心評価システム（福崎英一郎：阪大）

（発表概要）

食の安全・安心評価システムについて話をする。日本の食の評価システム、安心で安全であるというのは、ヨーロッパに行っても、アメリカに行っても、中国に行っても、よく言われている。ただ、何が安心で何が安全であるかというのは、実はよくわかっていない。人々がぼんやり感じているのは、どうやら非常にオーバースペックになっているということにはわかっている。しかしこのままでは、日本の食の品質管理システムは、今は秀逸であると言われているが、これを何か科学的に担保するものがないとだめだということは、多くの食品企業は考えている。

「食の安全・安心評価システム」

- 必要性
 - 日本の食品品質管理システムの秀逸性の担
 - 日本ブランド力の維持強化のために必須.
 - 管理スペックのコントロールが必要.
- 現状の問題点
 - 食品企業の個別スペック/独自ノウハウ
 - 一般性, 拡張性, 堅牢性の欠如
 - 二次機能(嗜好特性)の定量化の標準化技術が無い.

図 2-2-2-1

今は食品というのは輸入超過になっているが、将来的にASEANや中国が経済発展すると、日本の食がこれまで以上に輸出できるというのは、異論はないと思う。そのために、日本のブランド力を維持・強化する基準は必要だが、経済的に戦うためにはオーバースペックにならないような、スペックのコントロールが必要だと思う。

現状どうなっているかということ（図 2-2-2-1）、食品企業が個別のスペックで独自のノウハウとして持っている。いろいろな食品を、不良品率とかで言えば世界最高スペックだが、それはそれぞれが企業ノウハウとして秘匿している。

私も食品の研究をやっていて、30社程度の企業と共同研究があるが、A社との共同研究によって生まれた技術はB社、C社には水平伝播はしない。これはそれぞれが競争関係にあるからである。従って、各社都合による限定的な技術開発が散在している状況であり、基盤技術として必須の一般性とか拡張性、堅牢性というのは欠如していると思う。

食の機能についてももう少し言及する。戦後の食糧難の時期には国民の問題はカロリー不足であった。十分なカロリーと必須栄養素を低コストで供給する食の一次機能増強が最も重要であった。高度成長を遂げ、国民の懸案はカロリー過剰による生活習慣病の蔓延となった。応じて、生活習慣病予防やQOL向上のために三次機能増強が食の機能研究の中心となった。21世紀となり安定成長の時期を迎え、エレクトロニクス、家電、自動車等の輸

出産業が陰りを見せるとともに、輸出産業としての食品産業に期待があつまりつつある。輸出競争力に必須の二次機能を担保するために二次機能の定量化、計測システムの開発が強く求められつつある。加えて、三次機能が非常に高いが、味が悪い物を食べられるようにするための二次機能強化というのは、これから必要になってくると思う。

「食の安全・安心評価システム」

- 国が実施すべき研究開発
 - 食品の構成成分と機能の相関解析・モデル化による品質判別標準化技術・メタボロミクス技術の応用展開
 - 食品製造原料の判別技術(原料の成分プロファイルと加工後食品の性能プロファイルの相関解析・モデル化)
 - ロジスティックス(保管, 流通)の最適化(暗黒・無酸素・低温流通のオーバースペック解消)
 - 農産物の品種, 産地, 収穫後処理の判別技術(DNA判断では, 品種しかわからない)

図 2-2-2-2

そこで、実施すべき研究というのは(図 2-2-2-2)、食品の構成成分と機能の相関解析である。多成分から成る多機能の科学的な解析は実は余りやられていない。

また、食品の製造原料の判別技術も重要と考える。実際、食品の機能研究になると、製造技術とすぐ考えられるが、これはなかなか各社とも手を出しにくい。食品製造原料の判別技術、ロジスティックス、つまり保管・流通の工程の最適化というのは、すぐにでも実用化する技術だと思う。

今日、食品企業において、とにかく暗黒・無酸素・低温流通を心がけるのが日本の特徴であるが、これで質は担保されているものの、もしかすると、空気をシャットアウトすると常温流通でも全く品質は落ちず、かえっていいという物もあるかもしれない。しかし、それは各社ともノウハウで秘匿しているというふうな状況で、これを何とかどこかがやらなければいけないと思う。

農産物の品種、産地、収穫後処理というのは、ほぼ目視での確認となりDNA判断では品種しかわかりません。微量金属プロファイルを見たら産地はわかるが、収穫後処理のオペレーションがどういう履歴かというのがわからない。これをできるだけコストをかけずにやるというふうなシステムづくりは重要だと思う。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 食の安全と安心は分けて考えないといけない。理由は、安心については、寝た子を起こさないという部分がある。ヨーロッパだと、今、下水の汚泥にしても家畜の糞尿にしても大半は農地に戻している。これはイギリスとか北欧も同じである。日本で考えたら、とてもじゃないけど食の安心というところからいくと難しい。

リン鉱石などの肥料には、放射性物質やカドミウムが入っている。これを畑にまき続けている。こんなのを科学的にはっきり出したら安全は得られても安心は得られない。だから、そこをどう区別して研究していくか、そこはちょっと工夫が必要だと思う。

A: 同感である。従って、実際に安心というのは、人によってどのレベルで安心かというのも変わってくるため、これは先生がおっしゃるように、どこまでやるのかは難しい。いろいろやったから寝た子を起こすというのもあると思う。重要な指摘である。

Q: 先ほどから出ている、どこまで国がやるかという問題だが、企業がやる問題と国がやる問題。こういう国がやって画一化すると、これは中国、韓国に持っていかれて日本が負けてしまうという典型的なものになると思う。従って、イノベーションが起こるような仕組みが必要。画一化したらイノベーションは起きない。そこで競争があるからイノベーションが起きるのであって、このままだと、日本で蓄えた技術が海外へ流出して終わりというような感じがする。

A: それぞれが自社ブランドで、最高スペックな技術というのは絶対出さない。しかし、例えば10年前の最新技術というのは出せる。発展途上国と戦うときでも、10年前の最新技術を供与して、そこでOEMで持っていくというので成功している企業はある。従って、最新技術は出さなくても、10年前の最新技術をシェアすることによって一般性と拡張性は担保できる部分もある。

おそらく、日本の食の、特に二次機能の均一性とかいうのは、世界でも群を抜いている部分がある。それを達成している技術を集約し、一般性と拡張性を担保した基盤技術を国策研究として開発することにより、各社ノウハウがつながりを持つてくると考える。各社が現在開発途上の最新のノウハウを共有することは不可能だが、各社とも公開できる一般技術は持っている。複数社からそれらを集約して、お互い欠けているところを相補することによって、日本国全体としての基盤技術レベルが上がってくるというのはあると私は思う。

Q: しかし、共通化したものというのは海外に流出する。それにより他も同じ水準になるということではないか。

A: 技術というものは公開すると同時に流出していくものであり、食の技術だけが流出するわけではない。別に食に限らずに、エレクトロニクスであっても何でも、国が関与して何らかしたら全て流出するというふうな論理であれば、全てが同じことではないか。食に限らないのでは。

Q: 解析技術の場合イノベーションはたくさんある。これまで測らないといけないとい規定を設けると、それは盗まれたって、その技術は盗まれないわけだから。

Q: 今、野生の鹿肉を利用している人は困っている。誰がつくったかわからないものを売るときの食品技術と、例えば民宿で誰がとったかわかって売るときとが同じ安全基準だと、これは売れない。自家消費なら配れるというところを、もうちょっと何かうまいことをやれば、流通が可能になると期待している。そういう知恵はないか。

A: こう言うてしまうと無責任だが、私は、エンジニアリングで食の機能と成分の相関は解析できるが、そういうポリティカルなところというのは、重要だとは思いますが、どうしたらいいのかというのは逆に教えていただきたい。それは、先生の言われていることはよくローカルには感じる。ただ、なかなか難しい。

Q: 食の安全をやっている人間は安全と安心は全く違うものであると考える。それを一緒

には議論しないほうがいい。少なくとも安心の部分をやろうとしたら、多分これは企業がやっても難しい。それはやっぱり国が教育などからやらない限り、何事も進まない。

その上で、安全という言葉になったときに、今、先生が示された、例えば農作物はすでにブランド化はされている。要するに日本が高度なものとしての食の安全を形にしている。世界的には食の安全の確保は CODEX が基本的にやっていて、CODEX の基準は世界基準である。ベースのところはもう国も企業も基本的には関係ないと思う。

その上で、今、国が何かをやるか考えると、やっぱりブランド的に示すためのデータを出すことに一体どれだけの意義があるのか。逆に言うとこれは本当はどこかで議論しなければいけない。農産物も消費者を意識するから、どこでつくったかという意識があるが、いわゆる安全という意味から言えば、標準の基準の中で動いている。消費者が望むから、売れるからというだけのために、新しい技術開発が本当に必要なのか。

A: 「食の安全」は科学的に定義できるはずのものであり倫理は感情とは分離できる。「食の安心」は、機能を充足しているから安心という面と安全だから安心という面があり、場合によっては倫理と感情が関与する心の問題である。「食の安全」と「食の安心」を混同しているつもりは全くない。二次機能をきっちりと解析して表現する技術は基礎技術として必要だと考える。

Q: それはわかる。だから、食品としての安全性というよりも、健康に対する機能とかという意味で新しいものがあるとか、この食品とこの食品はこういうふうにとったほうがいいのか、それは多分研究としても成り立つ。

A: 三次機能研究はそれなりに実施されている。

Q: だから、今では日本では非常にたくさんやっているし、世界でもやっている。

Q: メタボロミクスで、この食品とこの食品があったからおいしいと感じるかについては、今までのデータを見ていると全然意味がない。人によって感覚が違い過ぎる。

A: 理解している。ただ、定量的な分析官能データと代謝物のプロファイルというのは、しっかりとモデルをつくれればできると考える。従って、そのやり方を間違えると、何をやっているか分からなくなるため、余り先入観を持たずに、代謝物のプロファイルと嗜好官能とをリンクさせようとするのが難しい。しかし、嗜好官能と定量的分析官能のモデル化というのは別にやれば可能である。嗜好官能が難しいのは認識している。

Q: やはり技術のできる限界がどこかというのはある程度意識していないと、難しい問題だろう。

A: その通りである。

Q: 人間の発がんリスクの2割ぐらいは食事からきていると言われている。どういう食品がどのくらい発がんリスクに影響しているとか、そういうところをむしろ私は国でしっかりとやるべきではないかと思う。嗜好性とかそういうのは企業に任せておけばいいという気がする。

A: そういうご意見もある。それに、例えば通常摂取では安全な食べ物でも、過剰摂取すると具合が悪い食品もたくさんある。エキスポ可能技術、濃縮技術、そこからナノフードテクノロジーなどで、腸管の吸収フラックスの向上技術は目を見張るものがある。これらを組み合わせれば有効成分の100倍とかを摂取することもできる。これにより、食履歴があっても安全でも安全ではなくなる。しかし、それをどう研究していくかというのは、今日は提案できていないが、やらなければいけない技術だと思う。

Q: 今の議論にも関連するが、スペックを決めると、それに対して責任の所在というのが分かれていく。国が責任を負うのか、生産者が責任を負うのか、消費者が責任を負うのか。そこで我々が担保しなければいけない、保護しないといけない責任をとる側に立てば、どういう技術が見えてくるのかというのが見えてくる。また、最低限の国の責任を担保するような技術にするのか、あるいはそれを飛び越して、多少危なくてもおいしいから食べるというような消費者の好みのところをアップするのか、それに企業側のメリットというのはどう関係してくるかというところをうまく分けてしまえば、幾つかの方向性が出てくると思う。

A: どうお答えしたらいいかわからないが、規制を前提の技術開発というのでなくてもいいと思う。特に二次機能の場合は規制というのとは関係ない。ただ、食べられるから、おいしくてもおいしくなくてもカロリーがあればいいという考え方もある。やはり日本の食であると言われる二次機能について、きちんとして守っていく、規格をつくっていくというのは大事だと思う。

Q: どちらかという文化とか嗜好をうまく定量的なものを使って表現しようという話か。

A: それに近い。全てが嗜好ではないが、ある程度傾向というのはある。

2-2-3. 食品（輸出米・輸出果実・畜産加工品）ブランド化戦略（CRDS） （発表概要）

食品の輸出をこれまで以上に増やしていくためにブランド化戦略本部の設置を提案したい。この本部は、会社の経営企画部門を想定している。今後国がどの分野のどのような案件に対しどの程度の規模の投資を行うかを企画する部門である。マーケティング、商品開発、ブランド化、営業戦略等の全ての情報をここに集約させる。

日本食は幸いにも安全で健康に良いというイメージが浸透している。すなわち日本食そのものが既にブランド化している。しかし、ブランド化しているからといって即売上につながるとは限らない。ブランドを武器に国ごとの緻密な販売戦略が必要である。具体的には、付加価値の高い食品を各国のニーズに合わせて提供していく戦略が求められる。このためにはまずは戦略を練るための基盤が必要だ。戦略本部はこのような基盤の役割を期待している（図 2-2-3-1）。

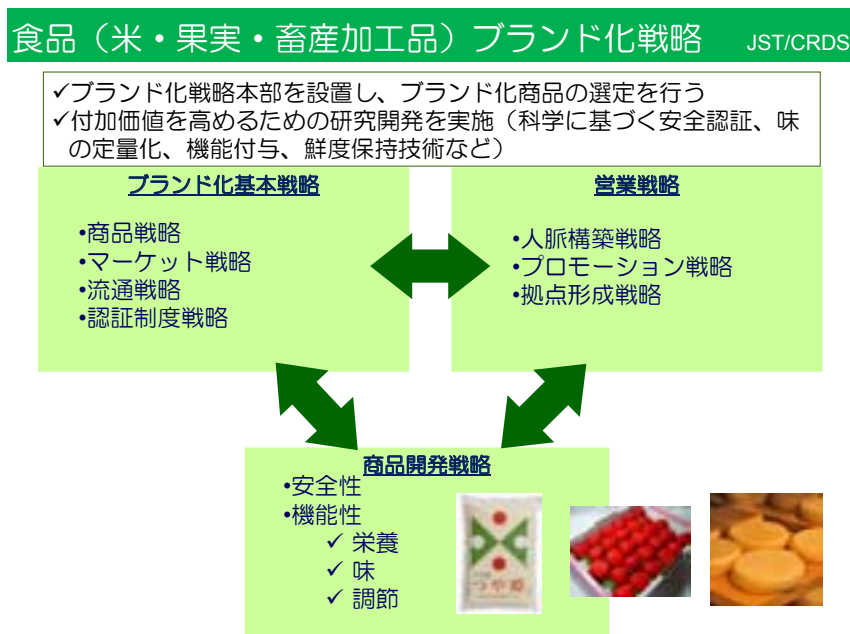


図 2-2-3-1

具体的な取り組みについて述べたい。まず取り組むべきは、トップダウンによるマーケティング戦略である。食文化や日本食の浸透度は国ごとに異なる。それらを緻密に分析し、何をどうやって売るとの戦略を考える必要がある。そしてこの戦略に基づき農家や企業を糾合させる。国によるトップセールスなども必要だ。我が国では現在、日本の農林水産省の主導の下で、「ブランドジャパン」戦略が進められている。ここでは、輸出額 1 兆円を目的に国内の農家の海外展開を後押ししている。ボトムアップ型の極めて魅力的な戦略である。一方、農家からの提案を待つのと併せて、国から食材を指定して海外に発信する取り組みも効果的である。ボトムアップ的な取り組みは、将来の海外展開を考えている農家には有効だが、全ての農家にそのような気概があるとは限らない。また食材の潜在的な魅力に気付いていない農家もある。本ブランド化戦略では、そういった農家のポテンシャルを最大限に高め、販売の強力な後押しを行う。

ターゲットとする食品についても考えてみたい。これまでの分科会でも議論があったが、お米、果実そして畜産加工品などが有望である。日本の米は味、形、機能、いずれも高く評価されている。2011年の輸出量は15万トン。震災前の20万トンには及ばないが、世界16位の輸出量である。アジアを中心にブランド米としての地位を確立している商品もある。果実はすでに評価の高いりんごに加え、いちご、もも、ぶどう、などが有望である。我が国での果実の輸出の大半はりんごであり、平成23年度の輸出額では60億円を計上している。これは果実全体75%にも及ぶ。震災後の風評でピーク時より2割程度輸出額は減少しているものの、アジアを中心に評価は高い。高級果実は富裕層が好んで食べる食材で、経済発展が著しい新興国の市場まで品質や味を現地まで維持できれば、今後の輸出量の増大も期待できる。畜産加工品は、北欧での実績が参考になる。デンマークなどの小国は、チーズやハムなどをブランド化し、世界の主要国で高い利益を挙げている。日本よりも国土面積が小さい国のそのような取り組みは参考になる。畜産品の付加価値化やブランド化は歴史や実績のない日本では困難が予測されるが、何もしないリスクの方が大きい。効果的な戦略と地道の努力が求められる。

以上、あくまでもこれまでの検討結果と私見を交えて述べたが、これらの食品で数千億の売り上げをすぐに稼げるほど甘い世界でないのは認識している。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 戦略食品の中に水産物を入れていただきたい。今、水産の需要は世界中に広がっている。日本の水産会社は、マルハニチロや日水などが代表的だが、加工技術に強みを持つ。これは大学にも言える。例えば日本の東大農学部に行っても、水産資源の人は自信なさげだが、食品をつくる人たちは自信を持っている。技術の蓄積もある。まだ最先端と言えると思う。こういった技術を含めブランド化というのをやって欲しい。

Q: これは経産省のクールジャパンと一緒にやってやったほうがよい。クールジャパンの食品版でやると相乗効果があると思う。

A: この分野が企業として成り立つのか疑問がある。特に農産物そのものを扱う企業。加工品は欧米とは比肩しないまでも大きな企業は存在する。しかし、農作物そのものは零細化している。彼らが自発的に何かを起こすという感じはしない。そこが経産省のクールジャパン戦略とは少し違うと思う。

Q: 環境による戦略も有効だと思う。例えば、健康及び日本食とを結びつけて、セットで売る。日本食は海外でブームになっており、健康にいいという妙な意識を持った人達は多い。そういった側面を科学的で裏付けしつつセットで売り出す。医療ではテーラーメイド医療が盛んだが、今後、食事も個人に合わせてもよい。嗜好性だけでなく、例えば糖尿病のリスクがある人の食事と高血圧のリスクがある人の食事と分けて提供してもよい。今後、中国なども健康色が強まる可能性があるので体質合わせて食事を提供するブランド化は有効と考える。

A: 農水の方針もまさに日本の文化と一緒にあわせて売ろうとする志向で実施している。ただ、そこにテーラーメイドの視点はない。面白いかもしれない。

Q: 実際に輸出するときの担い手は何をどう作るのか？例えばJAが主体的にできるのか？できないなら商社などを経由するのか？

A: 非常に重要な指摘である。担い手も含めて戦略本部で検討するべきだと考える。ただ

現在すでに 5,000 億円程度は輸出している。既存の基盤の活用も効果的と考える。

C: 補足だが実輸出額は一旦 2008 年から 2009 年に落ちている。震災後に復活したがまた下落している。今、4,500 億円程度だと思う。しかも半分以上は水産物。結局、その水産物は中国輸出されている。日本でとれた鮭などはヨーロッパで加工されたりしている。日本で直接やらない理由は加工賃がかかるから。また、ヨーロッパ向け輸出の基準を工場が認証取得するのに手間がかかるからである。繰り返すが水産物の輸出が半分以上で農産物はグロスしては小さいと思う。規模としては 10 数億程度だろう。結局、やはり担い手の問題にどうしてもぶつかる。本来は JA がやるべきだと思うが、その議論は産業政策なため、いまこの場で議論する必要があるのかは疑問。

A: この会のご指摘の通り研究開発戦略である。しかし、産業政策だけで完結できない部分もある。例えば、付加価値を付けるためのエビデンスの収集は産業とセットで考えてもよい。

C: 基本的には余り必要性はない。

A: そういう意見もあると思う。

C: 競争力の意味では、日本の果実やお茶など複数の食品にある。これは今、農水省が実施している枠組みで検討されており、全体的な認知度を高めるとか、ルートを開拓するなどしてうまくいっている。1 兆円が厳しいと思うのは、先ほど言及したリーマンショックでの落ち込みと震災の風評被害が主な要因。あのまま順調に伸びていけば、今でも 7,000 億円は達成していたと考える。

C: 今、五ヶ瀬町とかブランド化を検討しているが、社会システムの問題が大きいと感じている。例えば今までは五ヶ瀬町の小さい農協が中規模の高千穂農協になると、五ヶ瀬ブランドがなくなってしまう。農協の規模が大きくなると逆にブランド力が落ちる。そのような社会的な仕組みの問題は深刻で、むしろそのシステムに関する研究が必要な気がする。

A: ご指摘のとおり社会的システムの構築や合意形成なども研究としてあると思う。

C: ポイントは今の JA と農水の関係性をどう変えるか。商品緑のある農産物は沢山ある。しかし売ることができないのも現実だ。

C: 肥料を減らすなどして環境に負荷をかけない畜産を行っても、酪連で一括して売られるため、個々の農家にとってはインセンティブが働かない。

C: そのとおりである。一括でまとめられるとブランド力が急激に落ちる。

C: やはり誰がそれをやるのかというところがポイントである。結局、零細な生産者が主体なため輸出と一言でいってもリスクが高い。輸出したいけれども、相手もよくわからない。代金回収にも懸念がある。今は米などは非常に高く売っているが、長続きはしない。理由は、今は輸出が考えられないくらい低レベルにあり、先駆者利潤が得られているから。日本で今、目標が 1 兆円ぐらいになってくると、米もそこそこ輸出するようになる。そうすると非常に希少性が薄れる。

しかも今、海外で何が進んでいるかというところ、日本の米の品種をどんどん使って、いいものを作っている。しかも自分のところで品種開発をやっていて、コモディティの格差はどんどん縮まってきている。さっき映したイチゴなどは、絶対的に強みを持つがイチゴを輸出するのは簡単じゃない。だから、二十世紀梨みたいに日持ちするものは伝統的に昔から輸出している。農産物は何でも輸出できるものではない。

C: 研究開発ができることがあるとすれば、それは既存商品かもしれない。日本食が健康

に優れていると認知されているところをもっとサポートすべきである。これらの学術的情報を提供することでニーズも得られると思う。日本ではよくわからないが、外国で竹輪がよく売れるようになってきた。そしたら日本の中で竹輪のブランド化が進むかもしれない。

実際、私は栄養学の会議でヨーロッパへ行くが、驚くのは日本食あるいは全体像というのが健康にいい食事のコントロール、基準として出てくる。ところが、なぜか科学的な背景というのは全くもってわかっていない。いろんな興味深い化合物が抽出されて、これが入っているからいいというのはある。しかし、それにしっかりした学術的担保がついているわけでもない。現在進行形でそれがどんどん蓄積されていっている状態で、そこをうまく企画して、情報をうまく出していくということが、もしかしたらニーズを引っ張ってブランド化を促す一助になるかもしれない。

C: あとと言えることは、完全に私の私見だが、日本食の特徴は、素材を活かす料理が多いということ。フランス料理も日本食のそういういい面をどんどん取り入れて革新している。

でも逆に言うと、日本食の特性を海外で生かすというのは非常に難しい。つまり、中国料理みたいに加工度が高いと、世界中どこでも同じようなものがつくれる。しかし、海外で本当にいい日本食を食べようとするのが難しい。やるとしたら、そういうシステムを後押しするようなことが考えられるかもしれない。

C: 実際にニーズはどれくらいあるのか？例えば、さっきどなたかがおっしゃったように、日本食がファッションとかブームなのは確かですけれども、日本から来た食材が売れるかという、それはまた全然別な問題。こういう議論で、日本のものもいいからどうのこうのと言うが、議論としては井の中の蛙な気がする。

2-2-4. バイオ医薬品の製造技術基盤（内田和久：協和発酵キリン） （発表概要）

これからバイオ医薬品に関して話をする。日本における、バイオ医薬品の技術開発や生産には種々の問題があると考えている。今日は、それらの問題を簡単に紹介したい。

バイオ医薬品はタンパク質でできているが、低分子医薬品との違いは、まず分子量とその複雑さにある。図 2-2-4-1 は抗体を模式的に示したものであるが、低分子のアスピリンと比べるとその違いが良く分かる。また、当然、製造法に関しても低分子のアスピリンなどと比べると複雑であることが容易に理解できる。

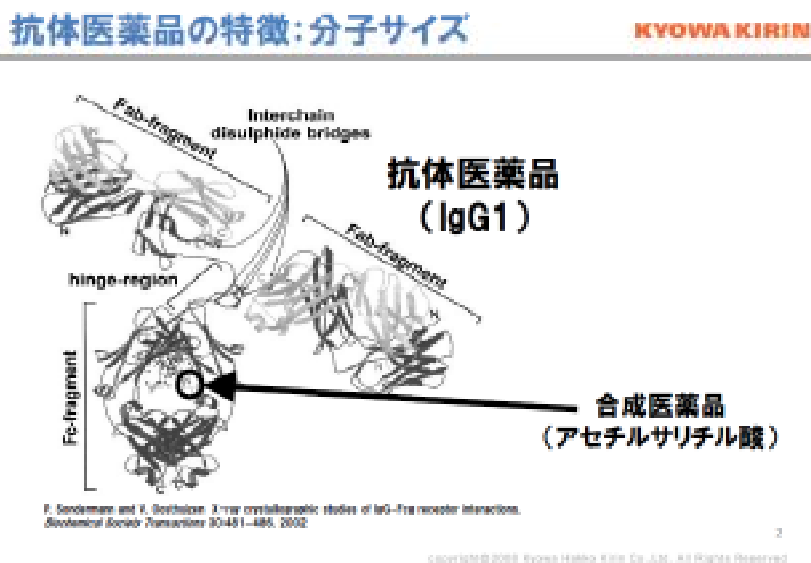


図 2-2-4-1

世界ではバイオ医薬品市場が伸びている

2011年現在

順位	商品名	一般名	薬効群	メーカー	2011年売上高(億円)	前年比
1	リビトーール	アトモリスチキサン	薬理作用:アトモキサン	ファイザー/アステルゼネコ	18,888	+10%
2	ゾラドックス	ゾラドキシフェル	抗血小板薬	サノシ/武田薬品	8,238	0%
3	シムバード	インジメタズマブ	インテグラーゼ阻害薬	武田薬品工業/武田薬品	8,018	+13%
4	カヌーラ	アザチオプリン	免疫抑制薬	アストラゼネカ/アステルゼネコ	8,000	+23%
5	タリスチール	タリスチン	薬理作用:タリスチン	武田薬品工業/アステルゼネコ	7,918	+5%
6	エムベラ	エムベラマブ	抗がん剤	アムリシ/ファイザー/武田薬品	7,800	0%
7	アトラス/カシラ	アトラス/カシラ	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	7,800	+13%
8	リタモリン	リタモリン	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	7,500	+13%
9	デキサメタゾン	デキサメタゾン	ステロイド薬	アストラゼネカ/アステルゼネコ	6,984	-1%
10	セロクエル	アモキシシリン	抗生物質	アストラゼネカ/アステルゼネコ	6,183	100%
11	シムバード	インジメタズマブ	抗がん剤	武田薬品工業/武田薬品	6,018	100%
12	アトラス	アトラス	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	+13%
13	エムベラ	エムベラ	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	0%
14	エムベラ	エムベラ	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	0%
15	エムベラ	エムベラ	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	+13%
16	アトラス	アトラス	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	0%
17	アトラス	アトラス	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	0%
18	アトラス	アトラス	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	+13%
19	アトラス	アトラス	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	+13%
20	アトラス	アトラス	抗がん剤	武田薬品工業/アステルゼネコ	6,018	0%

・ 低分子のブランド品は減少傾向

図 2-2-4-2

図 2-2-4-2 では医薬品の売上高を示す。濃い青で示したのがバイオ医薬品の代表である抗体医薬である。近年拡大基調にあるため、今後もバイオ系の医薬品は日本としても取り組まないわけにはいかない。

これだけある医薬品の中で、国内起源の抗体医薬品薬というのは、中外製薬が上市したアクテムラと協和発酵キリンが出したポテリジオの 2 品目しかない。しかもこれに続いてすぐに発売されるような抗体医薬品はないというのが現状である。

この問題には、バイオ医薬品を創出する製薬会社の数の少なさや現時点で製造技術自身も非常に限られた会社しか持っていないことが挙げられる。海外ではバイオ医薬品を製造できる製薬企業が多いのに加え、それを支える周辺産業も充実している。これに対し、我々を含めて国内企業はほとんどが、ベンダー企業を通じて輸入した原材料、製造機器を用いて製造していると言っている。これは構造的な大きな問題だと感じている。この課題は製薬企業とベンダー企業といった産業側の課題が大きい部分もあるが、大学等の研究者の方々も関係する課題であり、是非、日本全体として産学で対応を考えていきたい。

さて、製造プロセスについて概説する（図 2-2-4-3）。簡単に言ってしまえば、わずかに最初の 1cc の小さなバイアルの中に保存してある CHO 細胞（抗体の生産細胞）をスケールアップを重ねて増やし、最後に 10 トン程度のスケールで生産培養する。そして、得られた抗体を含む培養した上澄みから目的の抗体を精製して抗体医薬品とする。しかし、ラボ実験のようにこれがそんなに簡単にはできない。

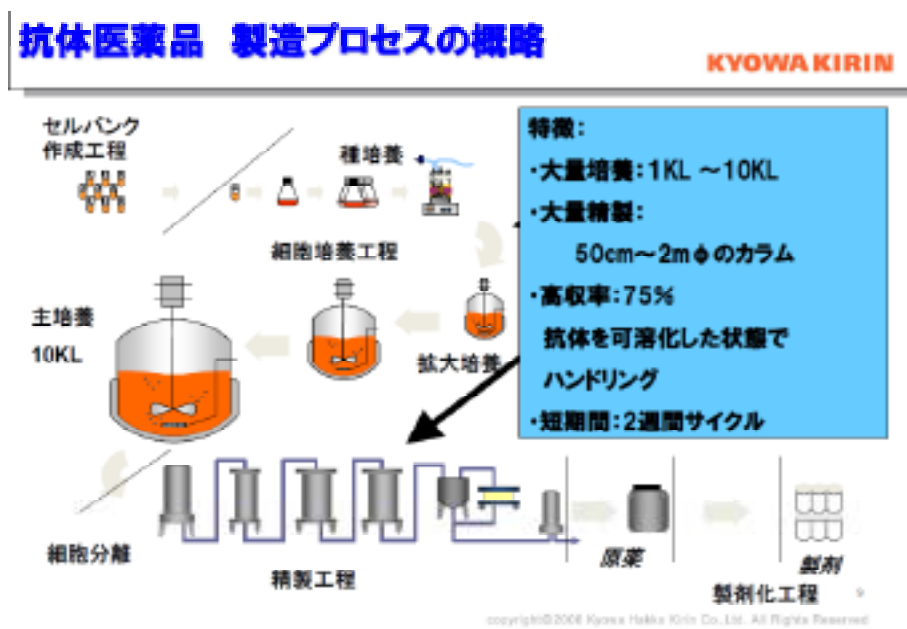


図 2-2-4-3

この一連の製造プロセスには、培養、精製、分析に関する各種のサイエンスとスケールアップや医薬品として安定で安心できる品質を確保する製造技術やノウハウ、そしてそれらに基づいて設定されたレギュレーション（規制）の3つの要素が必要になる。そして、これらの3つの領域がきちっとわかっている人材が必要である。この人材が今の日本では非常に少ない。現在は企業内で人材育成するしか方法がなく、大学において、これをきちっと教育できる機関は存在しない。

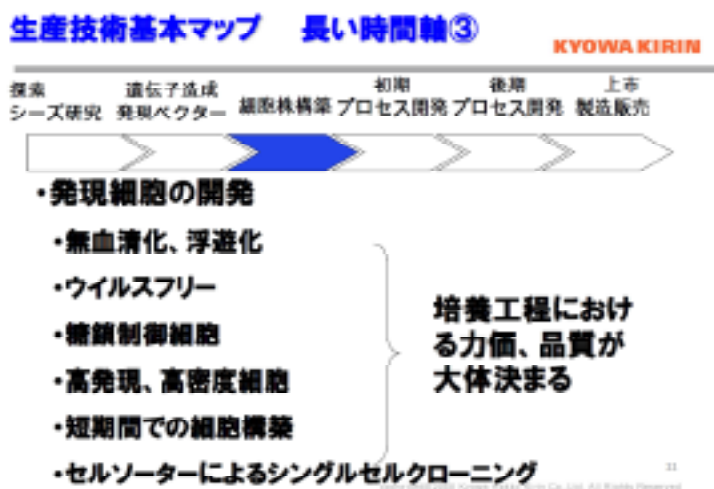


図 2-2-4-4

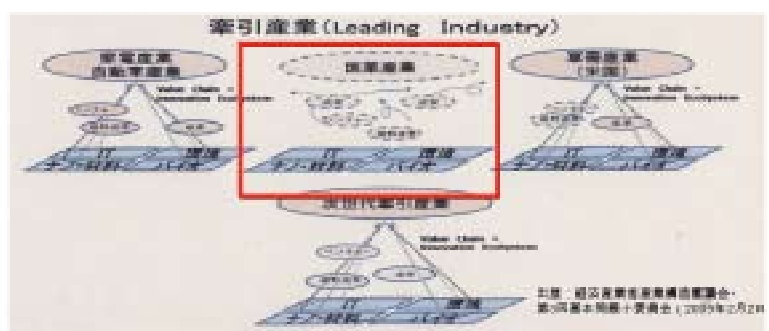
また、培養、精製、分析に関する各種のサイエンスとスケールアップや、医薬品として安定で安心できる品質を確保する製造技術やノウハウに関しては、要素技術（細胞株構築の例 図 2-2-4-4）が様々なプロセスに存在しているが、それが日本の中できちっと整理されておらず、情報発信も正確になされていない。例えば、シーズの探索から開発のプロセス、商業生産までにはいろいろ産業側からのニーズがある。しかし、それに対応する技術（シーズ）がきちっとマッピングできていないし、各研究者がばらばらに研究を行っており、適正な配分になっていないのではないだろうか。これも日本の弱点である。

さらに探索的なシーズの問題について述べる。とある研究を行っている医師から、あるたんぱく性の因子が薬になるかもしれないので、治験薬を製造するのにどうすればよいかという相談を受けたことがある。製薬会社が興味をもたなければ、それを開発するための費用は捻出できない。これまでの例では初期の開発段階で数億円の費用が必要である。これをは科研費で賄うのは難しい。こういった可能性のある芽に対して、初期の治験薬程度は提供できる支援する仕組みが欲しいところである。

以上で課題について述べてきたが、ここから、それらを今後どうやってクリアしていくかを考えたい。今述べたのは抗体医薬についてだけだが、今後、抗体医薬と低分子を混合した薬剤、あるいは細胞を使った細胞医薬、そういった新しいタイプの医薬品に対する技術が求められる。今、抗体医薬の技術マップを示したが、他の対象についても同様のニーズとシーズを記載したマップを作成し、必要な要素技術を開発していく必要がある。これらは1社または1研究機関でできる課題ではない。どういう人たちが参画できるのかというのを含めて検討してほしい。

バイオ医薬品関連産業が育っていない

KYOWA KIRIN



**日本では医薬品開発の研究開発投資はバリューチェーンとしてつながっていない。
=創薬、製造の周辺産業が育っていない**

図 2-2-4-5

次にこれらの技術開発を統括する全体のマネジメントについて述べる。抗体医薬のバリューチェーンを構成する技術、全体をコントロールする司令塔が必要だと考える。技術の全体が見えた時に、どこにどのような研究をやらせるのか、また自律的に進めてよいテーマはなにか？そういった司令塔の機能が重要である。産官学での連携が必要である。繰り返すが、日本のバイオ医薬は世界から3周ぐらい遅れている（図 2-2-4-5）。このまま差を詰められれば医薬品産業全体が打撃を受ける。その差を少しでも縮めるためのマネジメントシステムを考えることが急務である。

最後に人材育成について触れたい。今後このような分野の技術者をどのように確保していくか。いまは、企業に技術者はいるが、開発品がなければ、いずれノウハウを持った人々は高齢化していく。また、各企業の技術者が人材を育成する機会もない。日本の研究者の流動性が低いのも懸念される。従って、教育を含めたバイオの人材育成ができる GMP（医薬品及び医薬部外品の製造管理及び品質管理の基準に適合した）製造設備を含む製造ノウハウに触れられる機関が必要と考える。大規模なものでなくてもよい。もし機関が設立されたら、学生だけではなくて、社会人、PMDA（独立行政法人 医薬品医療機器総合機構）の審査官、厚生省の政策担当者などの教育も行うべきである。いまの日本の審査官は多くの方が、実際の製造装置に触れたり、分析したりしたことのない、バイオ医薬品の開発に携わったことのない方達だ。そういうような方々にこういう機関で教育を受ける機会が提供できれば、日本のバイオ医薬品分野全体の底上げにつながると考えている。

（質疑応答）（Q: 質問 A: 回答 C: コメント）

Q: 以前中外の担当者にも尋ねたが、結局、こういう問題はどの産業分野でも見受けられる。つまり人材が足りない、バリューチェーンがきちんと整備されていない、法的な問題がある、といのはどこも同じである。結局国に関わるかどうかは産業の選択の問題である。日本が自動車をやめてバイオ医薬品をやるのか。それなら投資してもよい。しかしそう簡単に決められることではない。だから、国に求める部分と自分たちでできる部分というのが

整理されないと、一般的なチョイスの問題になってしまう。

A: それは分かるが、ではどういう業界が国として肝要なのか俯瞰はできていない。そういう中で、特に医薬品は、うまく特許と生産技術が確立すると、非常に少量の投資でハイリターンが得られる、比較的投資しやすい分野だと思う。例えば石油開発などに比べると、投資の額が10分の1のスケールで兆円規模の売り上げが見込める。そういう可能性がある。そういうことを考えると、投資する価値がある産業ではないかと思う。

Q: しかし現に投資されていないというのは、その理由があるはずだ。

A: 今まで国費の投入なく、バイオ医薬品を含め医薬品産業は自立してきた。バイオ医薬品に関して具体的には、例えばある生産設備をつくるというような場合、それはまず、投資が軽いCMO（医薬品製造受託機関）に出して済ませることが多かった。そうすると日本の製薬企業は、もともと技術がない日本のCMOに頼まない。特に世界で製品を売るためには欧米のCMOに頼むことになり、日本の中で人や技術が根づかない。また、日本では先行技術を持っている会社は、自主技術として社外には出さない。従って、それが普遍化しない。今までオープンに技術がうまく蓄積してこなかったのは、そういうところも一因と考えられる。

また、アメリカなどが、バイオ医薬品の製造技術などをうまく普遍化する仕組みをすでに構築している。従って日本は後から追いかけることになる。しかしそうすると、日本国内でそういうことを立ち上げるより、海外にあるものを使った方がよいという話になる。本当は日本で使うべきお金が海外で使われてしまう。こういった問題を解決するためにも何とかして国内でサイクルを回したい。

Q: 逆の質問だが、遅れているならその次の技術を目指したほうがいいのではないか？

A: その通りである。これは基本的に普遍的で、さっき言ったように、細胞医薬も同じである。そのため、次世代を担う人材が必要である。例えばiPSで細胞をつくって、それを医薬品として使おうとする場合、培養細胞を適正にハンドリングする技術が必要である。つまり、細胞も培養医薬品の一部なので、再生医療では多分同じような問題が発生すると思う。

C: つまり、スタンダードを日本が提供できればかなり強みになるということか。そのためにはどういう技術が必要か。そんな簡単には答えられないと思うが、科学としては次のイノベーションを目指す方向に力を入れたほうが、既存の技術で、既にあるスタンダードに切り込んでいくよりは戦略的な気がする。

A: スタンダードが強みになるのは、その通りである。しかし、結局のところ、既存の技術と先端的技術の、両方をやらないとサイクルは回らない。先端的な部分をやるには、既存の技術がきちんと機能していなければ上手く行かない。いずれにしても、生産技術にかかわる仕事をやる人たちがいないと、成果には結びつかない。

Q: 今の質問に関係するが、アメリカでは大学の先生がベースをつくり、それがベンチャーとして立ち上がる。そして、それがどこかの会社と組むなりして製品化されるというルートがあると思う。日本では、いい種はたくさんあると思う。一時期、ベンチャーの起業が盛んに言われたが、大学発ベンチャーは全然うまくいかない。このあたりのテコ入れが必要なのではないか？

A: 医薬品を買収する製薬メーカーの大きさというのにも問題がある。アメリカとかヨーロッパの会社は非常に大きい。資本力も潤沢。簡単にベンチャーを買うこともできる。し

かし日本の企業はそれほど大きくないので簡単に買収できない。一方、シーズについては例えば日本のシーズをアメリカの会社を買っていくことも考えられる。しかしそういう状況にも余りになっていない。発掘し切れていないのかもしれないが、本当に日本に良い種があるのかを含め、正直わかりかねる。

C: 今の人材の問題について、補足する。つい先日、私の所属する大学で准教授を公募した。動物分野の募集に100人を超える応募があった。その中の3分の1ぐらいが、がんと免疫関係の研究をしている人で、その中の3分の1ぐらいが海外へ出て研究している人。職を求めている人はいるのに、日本には受け入れる先がない。それが一番大きなミスマッチとなっている。研究者は、研究の場がなくて困っている。産業のほうは人材が欲しいという。そこのマッチングがうまくいっていないのが大きな問題だと思う。

A: 本当にマッチングが上手くいっていないのかを確認する必要がある。何となく表面的に似ているかもしれないが、実は求めているものが産業側と大学側で違うことはあると思う。

C: 生物化学工学のような分野ではバイオテクノロジーの人材がほとんどいない。日本は多くが分子生物学者で片寄っている。

A: 確かにその通りで、バイオ医薬品の製造に関する化学工学的な人材は少ないと思う。

Q: 教育機関が必要だと言っているが、例えば新しい技術をつくるというときには、多様性が必要だと思う。例えば化学工学的な教育を他の分野の研究者に行う。その方が合理的ではないか？そもそも、どういうことを教育機関として期待しているのか。

A: 一番狭い意味で言えば、例えば抗体の生産技術。周辺領域については先ほどあったように、今後に向けた施策を並行で走らせるのがよい。そして様々な大学の先生と共同研究を行いながら、実際に産業に落とす課題に取り組む。ここで産業界との連携も生まれる。

Q: 仕組みとしては、リーディング大学院は使えるかもしれない。これは、産官学で7年間大学で教育できる仕組みである。カウンターパートになりそうな、例えば分子生物学と工学とかの先生とが組んで、大学院を立ち上げるということが可能ではないか。

2-2-5. リンの工業利用における重要性と安定供給戦略 (松永剛一：下関三井化学)

(発表概要)

弊社はリン酸及びリン製品を製造している一企業である。今日はこれまで、我々が経験した中の実例を話題提供という形で紹介したい。

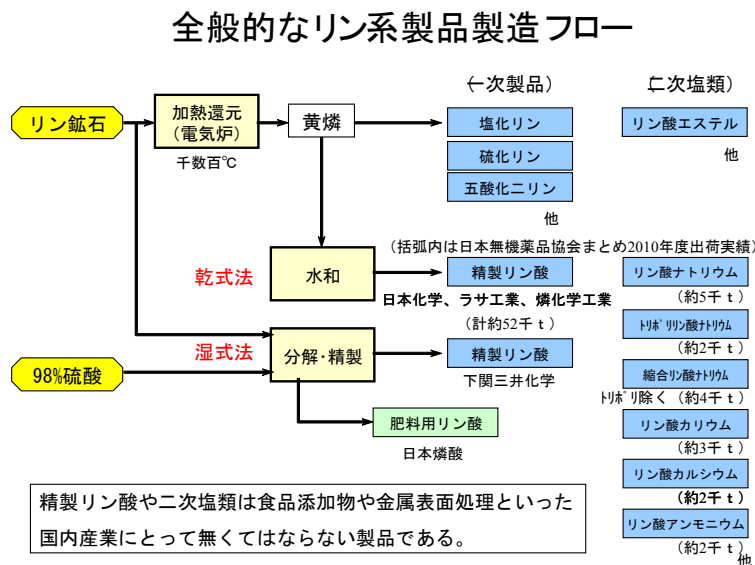


図 2-2-5-1

もうご存じの方も多いと思うが、工業用のリン系製品のフローをみると、基本的には全てのリンの出発点はリン鉱石となっている。リン鉱石を千数百度の電気炉で焼いて黄燐をつくり、黄燐から塩化リンなどが作られる。あるいは黄燐を水和させて精製リン酸をつくる（乾式法）。それから、弊社あるいは肥料用の日本燐酸社のように、リン鉱石を硫酸で分解してリン酸をとる。我々の場合は、さらにリン酸を精製して工業用のグレードまで高める（湿式法）。このように大きく2つの方法がある（図 2-2-5-1）。いずれにしても起源は全て天然のリン鉱石である。

次に示す表（図 2-2-5-2）は、リンの工業用の用途をまとめたものである。これは大竹先生から以前いただいた、三國製薬工業社が作成した資料である。このようにリンは非常に重要な資源であることがこの表から分かると思う。

リンが輸入出来なくなれば日本の産業界への影響は必至！

黄燐輸入費様が輸入できない場合の日本産業界への影響										
原料	一次製品	費率/Y	%	二次製品	最終製品(例)	最終メーカー(例)	黄燐輸入が出来ない場合の影響度	代替可否		
黄燐輸入 30,000 t/Y	乾式リン酸	14,000	47%	食品添加物	ハム、ソーセージ類の酸化防止剤	ラサ、下関三井他	日本の食品添加物基準に適合する海外品の輸入システムを整備する必要がある。	代替不可		
				半導体エッチング	パソコン、携帯電話	エルピーダ、東芝他	日本製高精度リン酸は、sub-μmレベルの不純物除去ができる。品質維持の観点から、半導体生産に多大の影響が懸念される。	代替不可		
				LCDパネルエッチング	液晶テレビ	シャープ、ソニー他	同上	シランガス法		
				金属表面処理	鋼板の表面処理	新日鐵、JFE他	量的に大量なので、切り替えが大がかりになる。	湿式リン酸		
	三塩化リン オキシ塩化リン	8,740	29%	リン系燃焼剤、可塑剤	プリンター、DVDディスク、自動車(インパネ、シート)	帝人化成 テクノポリマー他	PC/ABSアロイのプラスチック製品用燃焼剤は、リン系が主流であり、切替と配合変更に時間が掛かる。	代替不可		
				リン系燃焼剤、可塑剤	プリント基板 車、家電、ゲーム機	トヨタ、ソニー他	ソニーは業界に先立って欧州規格のリン系燃焼剤HCAIに全面的に切替えたが、その他の電機メーカーも追随する模様	代替不可		
				繊維	TACフィルム(液晶偏光膜)	富士フィルム コニカミルタ	日本の技術の特を結集した液晶部品であり、外部流出を防止する防波堤	代替不可		
				リン系イオン電池	ハイブリッド車、電気自動車、携帯電話、パソコンのバッテリー	関東電化工業 セントラル硝子他	中国品、ベトナム品に切替る	輸入品で代替		
				医薬品	抗生物質	塩野義、アステラス他	セフェム系抗生物質	不明		
				化粧品、トイレタリー	洗剤、保湿クリーム シャンプー他	資生堂他	不明	不明		
				食品	香味調味料	キリン塩和フーズ他	中国品に切替る	輸入品で代替		
				農薬、肥料	リン系農薬	住友化学、日本曹達他	中国品に切替る	輸入品で代替		
				半導体配線	パソコン、携帯電話	エルピーダ、東芝他	半導体生産に即座に影響がでる	不明		
				次亜リン酸曹達	4,200	14%	メッキ、電極	メッキ製品	中小メッキ工場	代替不可
				無水リン酸	2,000	7%	食用油精製剤	食用油	J-オイルミルズ 日清オイロイ他	量的に多く食用油の品質にも影響するため切替に時間がかかる
燐銅	800	3%	エアコン、ハイブ	ルームエアコン	大阪合資工業所	世界で欧州と米国、日本に各一社しかこの品質レベルでの生産ができないため、世界全体のエアコン生産に悪影響が出る	代替不可			
赤リン	150	1%	リチウムイオン電池	携帯電話、パソコンのバッテリー	関東電化工業他	日本でのバッテリー生産が出来なくなる	不明			
五二硫化リン	60	>1%	農薬、肥料	リン系農薬	住友化学他	中国品に切替る	不明			
五硫化リン	50	>1%	リチウムイオン電池	ハイブリッド車、電気自動車、携帯電話、パソコンのバッテリー	ステラケミア 森田化学他	日本でのバッテリー生産が出来なくなる	不明			
2008年 合計	30,000									

三國製薬工業株式会社 國貞真司氏より

図 2-2-5-2

現在、日本にはリンがどのように入ってきているかということ、大きく分けて3種類ある。まずは黄燐として入ってくるもの、そしてリン鉱石として入ってくるもの、さらに、リン酸液あるいはリン系の製品になっているもの、である(図 2-2-5-3)。

日本のリン確保状況(2011年度)

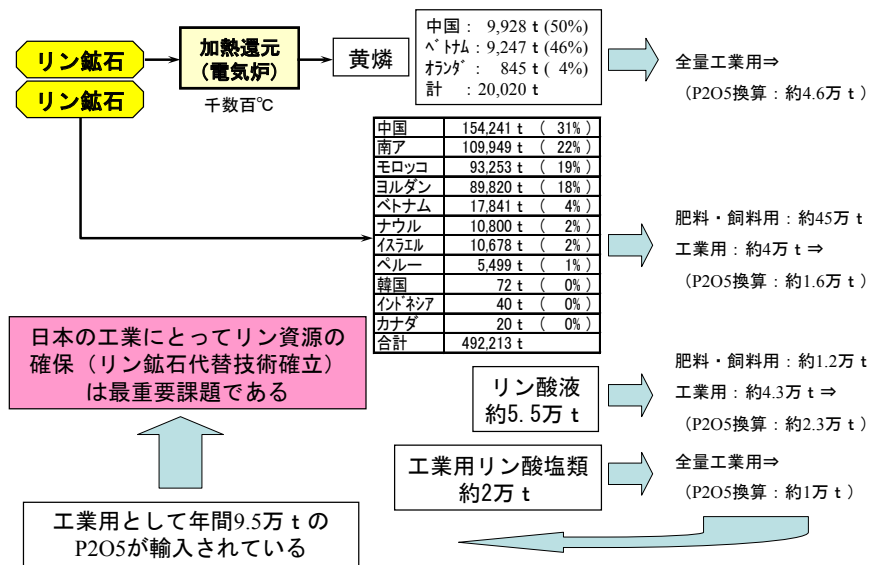


図 2-2-5-3

先ほど長坂先生から示されたように、鉄鉱石に付随して入ってくるものや既に食品として入ってくるというものはカウントしていない。特徴としては、黄燐は全て輸入となっている。日本では1980年代初頭にリンの生産をやめている。世界の生産量を見るとベトナムと中国がほぼ全量を占める。一部オランダも確認される。手前みそだが、南アフリカの石は全て下関に揚がっている。

主に中国、一部ヨーロッパもあるが、近年、日本に入ってくるリン資源という意味では、既に製品になったものが増えている。P₂O₅換算で年間約10万トンぐらいのリンが入ってきている。私どもリン系製品を製造して生計を立てている企業としては、日本の工業にとってリン資源の確保は最重要課題であると言わざるを得ない。

ただ、リンの確保の方法としては、当然いろんな確保の方法がある。その1つがリン鉱石の代替技術。全ての出発点であるリン鉱石の代わりになるものを使いこなしていこうという技術が重要である。

実際、我々が、大竹先生ともう10年来検討しているが、リンリサイクルについてどういう課題があるかということ（図2-2-5-4）、これはあくまでも弊社、湿式リン酸の製造メーカーから見た課題だが、例えば下水処理場から出る焼却灰、これは今、既に世の中にある。しかしほぼ全量が埋め立てに回っている。これはどういう課題があるかということ、弊社にとってみれば品質上の問題が非常に大きい。あるいは現在、1カ所に集約されていないためインフラの整備といった問題もある。

また、下水処理場のリンを意図的に回収資源としてつくる人工リン鉱石、これが大竹先生がコーディネートされたコンソーシアムで我々が回収検討をやっているが、問題としては経済性が挙げられる。つまり人工リン鉱石をつくるということは、天然リン鉱石に比べて数倍のコストがかかる。

さらに、実際にリン酸を工場で使い、その工場の排水に含まれるリンをリン酸カルシウムにして回収する取り組みもある。排水処理されていた混合物からリン系の排水だけで分別してやれば、高純度なリン酸カルシウムがとれる。ここは最近注目を集めており、まだ発表できる段階ではないが取り組みを始めている。

そのほかには、畜産系の焼却灰や家畜の骨などがある。ご存じのとおり、哺乳類の体のリンは重要元素なため、そういったものからの回収という可能性もあると考えている。

他方、資源を使う側の制約について述べたい。問題にはどういうものがあるかということ（図2-2-5-4）、まずは黄燐。黄燐は日本でつくられていないため、これはやはり日本として確保する重要な資源である。しかし、残念ながら日本には製造設備がない。もう30年以上つくっていないため、技術伝承もなく、新しく設備をつくる時に、民間企業で経済的に成り立つかということ、これは完全に成り立たない。

また、我々がやっている湿式リン酸でこれらを回収する技術。湿式法は硫酸で全てを分解して製品とする。ここに含まれる不純物が製品に移行するため、これらを現状並みの品質まで高める技術が必要である。

リンリサイクルの状況・課題(工業用)

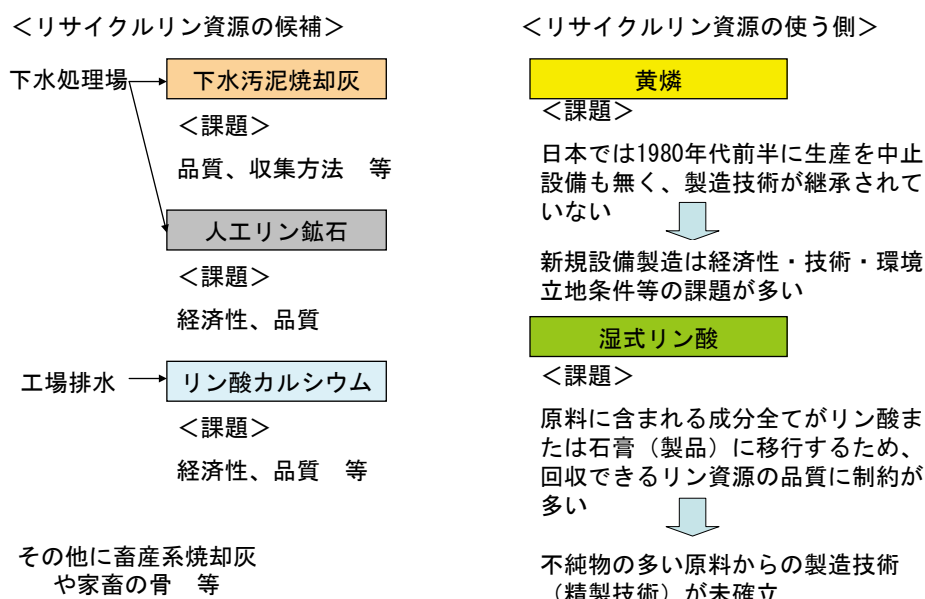


図 2-2-5-4

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

C: 廃棄物は全部リンだけでは出てこない。だから、いかに分けるかが課題。そういう研究はほとんどされていない。

A: ご指摘のとおり。工業用の日本のリンを補えるだけのものが目の前にある。しかしそれらを使いこなしていない今、日本水環境学会などで日本燐酸社の用山徳美氏らがリン回収に関して発表されているが、下水汚泥焼却灰がやっと肥料用になったところである。トータルで使われるリン鉱石の2、3%ぐらいか。

C: いや、まだ1%。

A: リサイクルの必要性もさることながら、目の前にある資源を何とか有効に使いたいと考えている。しかし、先ほどの精製技術や焼却灰の製造法などでも可能性はある。

C: リンを分けるのは、リンを使いたい人がリンを分けようとすると思うが、そのリンと一緒にまじっているほうの物質を使いたいという人はいないのか。もしそういう人がいれば、そっちの人が分けてくれる。そうすれば最初から分けるよりは分けやすくなる。

C: 製鉄がある。

A: 例えば、天然のリン鉱石の中に一部レアアースが含まれるということがある。そのレアアースをとりたいという話は何年か前にあった。今は南米で確保できたので、その話は頓挫したが。

C: 製鉄でリンを分ければ原料に戻せる。CO₂の発生も減るし、非常にいい。しかし、それは分けているだけで、出てきたリンは捨てられる。

A: そのつながりが残念ながら今、非常に惜しいところである。

C: 製鉄業界はプライドが高い。だから、捨てたものなんか使えるかと言う。

Q: リンのような重要な元素については、政策的に例えば技術開発や確保のための制度設計が検討されていないのか？

C: まともにはされていない。

Q: 一部はされているのか。

C: 国交省が一部やっている。それから経産省も。

Q: 今、これは工業用の話だと思うが、農業用のほうが多いという話があった。だから、農業用のほうが減らせれば、それを工業用に回せるということではないのか？農業用のほうが純度は求められないので、そちらのほうに回して、その余った分を工業用に回すのはどうか。それからもう一つ。私は全然わからないが、生物を使ってリンを抽出するというようなことは、できないのか？

A: 下水処理場の水の中から生物にポリリン酸を蓄える技術。まさに大竹先生が開発した技術である。

Q: 生物にとっては非常に重要な元素なので、うまく使えばそれで回収できるのではないのか。

A: 農水省系のコンソーシアムで5年間検討している。こちらだと弊社は既に2割ぐらいは使えるという結論を出しているが、残念ながら、これをつくるのに天然のリン鉱石の何倍ものコストがかかってしまう。

Q: それは具体的にはどんな生物を使ってつくるのか。

C: 微生物はポリリン酸をつくる。だから、細胞の乾燥重量で50%ぐらいリン酸になる。だから、10年ぐらい前にもうその技術は我々は確立して、むしろ今、生物を使おうとしたら、農地にまいたリンがたまっていて、それが不活性化している。そのため、いかにそれを植物にうまく取り込ませるか、そのために微生物と植物の相互作用が重要となっている。そのあたりの研究が必要である。

C: だから、植物のほうではその研究は相当進んでいる。だからそこをうまくやれると。

Q: 林先生が発表してくれると思うが、全体を俯瞰したフローの中で最適化するような取り組みというのはないのか？

C: もうリンはされている。

Q: それでも全然大きく配布されていないというのは、システムの最適化を優先したほうがよいのではないのか。技術開発よりも早い可能性はないのか？

C: それは今、ヨーロッパで、今年3月に第1回のリンの持続的利用の会が開かれる。ヨーロッパは政策的にいこうと考えている。しかしそれにはものすごい時間がかかる。

Q: 日本はまだなのか。

C: 環境に負荷をかけている部分があるので、環境を再生するということから、リンを回収するというのは非常に重要な課題だと思う。もう少し広く見ると、ここで経済性がとれなくても、全体から見たら経済性がとれるような解決があるようなほうに進む可能性もあると思う。

C: 先ほども話したように、日本の下水道の普及率からすれば、ほぼリンは規制以内ではキャッチされている。もう少しだと思う。あと、長坂先生が言われたような鉄鉱石などの中にリン資源が含まれている。これも何とかしたい。

Q: 農地の活性肥料が雨水とかで流れて、霞ヶ浦などに溜まっている。アオコとかが山ほど発生している。そういうメカニズムをうまく利用する方法はないのか？

A: 生活排水系はほぼ対応できるが、農地は声高に言われると、私も何も言えない。

C: 環境に蓄積されているものは利用すべきである。

C: リンは、資源であると同時に環境を汚染する物質。従って、管理が非常に重要。一度湖などに入ると問題となる。例えば日本で使っているリンの10%を1年間で回収しようとする、琵琶湖の湖水の35倍、毎年水をとらないと間に合わない。だから、1回拡がると集めるのが大変。

Q: 霞ヶ浦の例だと、農作物よりは家畜のほうが大きいのではないか。

C: 家畜はヨーロッパも日本も一番多い。というのは外から餌で入ってくるため、国内でも増加している。従って、肥料をまかなくてもリンは過剰にある。管理ができないだけである。

2-3. セッション3 科学技術的課題

2-3-1. 生態系・生物多様性の保全や利用に関わる「科学技術的課題」としての「植物の化学的側面と生態系機能」（伊藤元己：東京大学）

（発表概要）

植物とその共生生態系が作り出す生態的機能の解明とその活用について話す。いろいろな生態系と生物多様性の劣化というのが地球規模の問題になり、生物多様性条約をはじめとして国連中心にさまざまな活動がおこなわれている。その中で現在、最重要課題の1つとして挙がってくるのが生態系サービスである。生態系サービス、言い換えれば「自然の恵み」に、過去と比べて現在どのような劣化が起きているか、あるいはまだ劣化は起きていないのかということの評価して、それを改善して持続的な自然の恵みを受けられるようにする課題である。国際パネル IPBES という組織が作られて、今まさに国際的な評価をしようとしている。

最終的には、自然の恵みがどの程度受けられているかということの評価して、その劣化を防ぎたい。しかし実際には、まだそれぞれの生態系が持つ機能がよくわかっていない。これまで物質循環について最近の技術でかなり押さえられてきているが、実際それがどのような仕組みで作り出されているかということについてはほぼブラックボックスとなっている。特に土には非常に重要な機能があるが、生態系機能に関する重要な情報が欠損している。

そのような状況ではあるが、次世代シーケンサーとバイオインフォマティクスの解析技術が進むことによって、生態系機能をつくり出すブラックボックスの、生物の部分の解析というものができるようになってきた。遺伝子の機能、ゲノムと生態系機能がリンクできる。これらの新技术を利用して、陸上の生態系における、物質循環を初めとするさまざまな生態系の機能を遺伝子、ゲノムレベルで解明していく課題をここで提案したいと思う（図 2-3-1-1）。

1. 国が実施すべき研究開発

植物とその共生生態系が作り出す生態的機能の解明と活用

目標：陸上生態系内の物質循環など、植物を中心とする生態系内における生物間相互作用の遺伝子・ゲノムレベルでの機能解明と利用

- ・モデル生態系での植物を取り巻く生物相（特に微生物）の解明
- ・モデル生態系内および植物体内での物質循環・生物間相互作用の解明（シグナル伝達・化学物質産生を含む）
- ・各生物のゲノム解析（機能遺伝子の網羅的解析）
- ・ゲノムレベルでの生物間相互作用の解明

→生態系機能を遺伝子・ゲノムレベルで理解する
→生態系機能劣化時の適応策・機能の産業利用

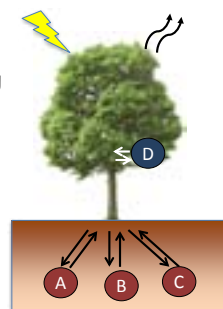


図 2-3-1-1

2. 背景

- 生物多様性と生態系機能の劣化が**地球規模の環境問題**(生物多様性条約)
→ 生態系サービス(自然の恵み)が劣化(国際パネルIPBESで評価準備中)
- これまで植物とそれを取り巻く生物が作り出す生態系がいかに機能しているかはブラックボックス(特に土壌)
→ 生態系機能の重要な情報が欠損していた
- 次世代シーケンサーとバイオインフォマティクスにより上記ブラックボックスの解析が可能に
→ 遺伝子機能と生態系機能のリンク

予想されるアウトプット

- 植物を中心とする陸上生態系機能の総合的理解
- 劣化する生態系機能の保全・適応策の策定
- 生物の作り出す生態系機能の産業への応用
- 植物を中心とする生態系の作り出す有用化学物質の探索

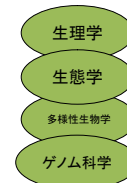


図 2-3-1-2

複雑な生態系を対象にすると解析は困難であるが、複数のモデル生態系、単純化したものにして、特に植物とそれを取り巻く微生物、菌類から細菌類までを合わせて解明をする。それとともに、植物の中でこれらの生物がどのような相互作用を行い、その結果、生物系システムとして何が起きているかということを知り解明していく。

その基盤として、生物のゲノム解析、機能の遺伝子がどのように働いているか、相互作用の上でどう変わっていくかということを知り解明し、生態系の機能を遺伝子・ゲノムレベルで理解する。あるいは、生態系機能が劣化したときには、生態系のどこに手を入れればいいのかについても機能解明により明らかにでき、それは生態系復元や産業への利用も可能性がでてくる(図 2-3-1-2)。

こういう研究は、学術的には植物を中心とした生態系の総合的な理解だが、社会的には、劣化している機能への保全・適応策をどうするかということになる。先ほど言ったように、それをベースにした産業というものも可能かもしれない。その過程で有用な化学物質、さまざまな生物由来の物質の発見と応用にもつながるかもしれないということで、提案させていただいた。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 大変重要な課題だが、非常に難しいところがある。2つほどお聞きしたい。具体的なモデル系として、どういうものが考えられるか。さらに、土壌は非常に解析しにくい対象で、物質の流れを分析しようとしても固体系は非常に難しい。大体の分析技術が液体系で組み上がっているの、物理的な環境のモデルというのをどういうふうに変えられるか。

A: モデル系として一番単純なのは、1本のモデル植物と、それを野外に植えたときの周りに関係する生物、だと思ふ。もう少し複雑になると、いろいろな生態系である区画をとって、その生態系の中で、という形になると思ふ。ただし、単純な生態系を選ばないとモデル系とはならない。

物理的な環境のモデルのほうは、測定する方法はあると思ふ。むしろ生物の側で、例えば微生物相がどうなっているか、が一番難しい。

Q: 2つめの質問にリンクするが、生物のモデルをフィックスしてゲノムの解析ができた

とすると、それはスタティックな情報と考えてよいか。

A: それでよいと思う。

Q: 最近、メタボローム等々あるが、実際の生物は非常に動的なものであって、それをモデルの話にリンクさせると、ゲノムと現実の動的な世界とをいかにリンクさせていくかというところ、それを生態系という観点からどうやって見るかというところが鍵になると思うが、どのようにお考えか。

A: 多分そこが一番難しいところで、生態系の機能の目的のパラメータというのは幾つもあり、そこにどうつながっていくか、それぞれの物質の状態の変化というものをトレースする必要があるが、それを自然の中でやるのは難しい。いろいろコントロールした条件下で、どのように環境が変わった場合にどこがどう変わるか、ということきちんと測定していくということ積み重ねて、モデルといってもかなり複雑なモデル系をつかって、そこで実際の動態とシミュレーションした動態というのが合っているのか違っているのかということを見ていく、ということが必要になるのではないかと思う。その辺は生物学的なアプローチになるのではないかと思う。

Q: そういう発想は、環境科学特別研究というのが昔あって、非常に古くて難しい問題だからずっと解決できずにいた。だから、今の時点でどういう切り口が新しくて、どこに焦点を特に置かないといけないか、というところがポイントになる。

A: 昔と一番大きく違うのは、ゲノムレベルの解析と、網羅的なゲノムレベルあるいはメタボロームレベルの網羅的な解析が可能になっていることで、それを切り口にして、今までブラックボックスとするしかなかった部分を解明しようとしている。たくさんブラックボックスがあるので、それを少しでも潰していくという、そういうアプローチで全体の解明を目指して、できないものは新たな科学技術が進んだところでそれを利用して、さらに解決していく、というようなことが必要ではないかと思っている。

Q: 自然環境、野生のものをモデル系にすると、先ほど言われたようにかなり難しいと思う。私はこの考え方を変えて人工の環境をつくるか、例えば東京ドームぐらいの大きさのミニ地球をつかって、温度とか全てをコントロールしたような、バイオーム計画というものを聞いたことがある。

A: アメリカでやっている。

Q: そのぐらいしないと、環境全体の理論的裏づけみたいなものがわからない。自然というのは日々、嵐も来れば雨も降るし、なかなか理論的な研究にそぐわない。いろんなデータや、何らかの環境因子との相関は出るが、その根底にある、全体的なシステムを見ようと思うと、やはりコントロールできるような環境をつかって、そこに木を植え、土を置き、鳥を飛ばし、そういうものをもうそろそろ考えてもいいのではないか。

A: 膨大な予算がかかる。

Q: だから国がやるべきことなる。

A: もう一つ、最後に言いたかったのは、1個の生物だけで見ていてもだめで、生物間の関係をきちんとやる必要がある。

Q: それをやり出すとデータがたまる一方で、結局何だかよくわからなくなる。データが出ていたときはいい。次世代シーケンサーからいっぱいデータが出る時は嬉しいが、そのデータが出た後、結局、多過ぎてまとまらない。自然を相手にしているからいろんなことが出てくる。そうすると、やっぱり何かモデルが必要だなと、今度は逆に戻っていく。

それは恐らくみんなやっているはず。

A: データが多いのは日々実感している。

C: これは本当に深刻な問題で、やるのはいいが、途中で息が切れるのは一番つらいところで敗北感も高い。すぐに後戻りできる研究はいいが、次世代シークエンサーを使って国家レベルでやる、と言ったら、始めたら絶対成功させなければならない。成功というか、次に進むようなビジョンを持つ必要がある。

実際、次世代シークエンサーがあれば、モデルを使って実験をすることは誰もが考えられる。でも問題は、1 ラボがやるようなレベルではないから、何十人とか国レベルで共同研究するなら、それは後戻りできないような協力体制を作らないといけないし、本当に自然環境の生態系を分子領域で理解できるのか、ということを実詰めて考える必要がある。だから私は、それならばドームをつくってやるべきだ、という方が説得力があるような気がする。

2-3-2. 遺伝子-生態系機能統合研究 (高見英人: JAMSTEC) (発表概要)

社会環境は自然環境をもとに成り立っているため、その自然環境を私たちが今後どのように守り、維持、利用していくかを考えることは、今後予想される様々な環境変動に対応した社会環境を整備するという意味で非常に重要である。したがって、自然環境には、微生物、植物、動物からなる様々な生態系が存在するが、それがどのようにかかわり合うことによって自然が保たれているか、また、自然環境の大きな変化には、これらの生態系がどのように変化し、そして回復しうるのかということを考えることが必要となる。

高校の教科書で紹介される生態系の図(図 2-3-2-1)では、微生物は最終分解者であるとのみ記載されているが、実は微生物は分解者としてだけでなく、生産者としても働いている。こういった生産者と分解者がいることによって様々な物質が循環し、生態系を取り巻く環境がバランスよく維持されているということを改めて考える必要がある。

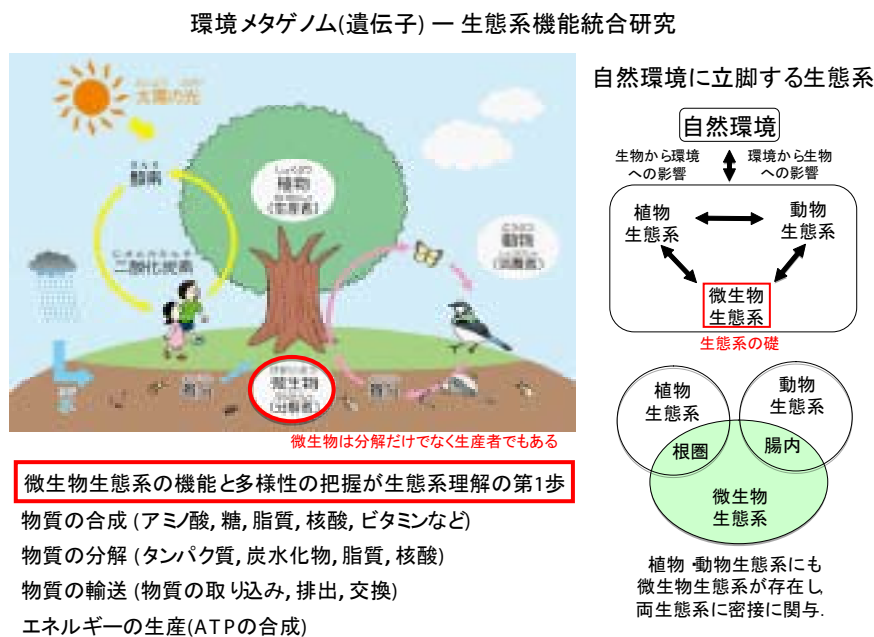


図 2-3-2-1

今までのゲノム、特にメタゲノム研究は、微生物生態系が持つ種の多様性の解明を主にしてきたが、これからは、それだけでは不十分で、微生物生態系がどのような機能を持つことで自然環境が保たれ、そのために必要な機能の多様性がどうあるかということ明らかにしなくてはならない。これをまず把握することが生態系理解のための第一歩であると考えている。

実際、微生物生態系を基盤として、植物と動物の生態系がつながっており、植物や動物にも微生物生態系が存在し、動・植物の生態にも微生物生態系が大きく関与していることがわかっている。

微生物の生き様は極めて複雑であるため、現在の技術では、環境中に生息する微生物の

9割以上は培養できない。そのため、どのような微生物がいて何をしているかよくわからないのが現状である。これまでよく用いられてきた16S rDNAの解析からは、種の多様性は分かっても、微生物機能情報が得られないため、培養できない微生物については、16S rDNAを調べても有益な情報が得られないという状況にある。したがって、微生物生態系が持つ見えない機能を可視化することが今後の環境メタゲノム解析研究(環境メタゲノミクス)の重要な方向性で、これまで微生物の関与はわかっているにもかかわらず何をしているかわからないという、いわゆるブラックボックスをどうこじ開けるかが課題である。

環境メタゲノミクスは、3つの方向性からのアプローチが考えられるが、一つは、1980年代から始まった遺伝子資源発掘のためのメタゲノム解析で、培養できない微生物の遺伝子をうまく利用するという概念に基づいたものである。

第2は、シーケンシング技術の飛躍的な発展によって、微生物群集を単に個別の微生物が集まったものと考えるのではなく、個々の単細胞が集まり連携することにより機能する多細胞生物(微生物集団が環境中で秩序をもって振る舞うことで一つの生命体のように機能する)として捉える新しいアプローチである。

第3は、微生物を環境に応答して変化する環境インデックスとして捉える新しいアプローチである。つまりこれまでの環境インデックスには、環境中の物理・化学的要因が用いられてきたが、これら物理・化学的要因のほかに、環境に生息する微生物の機能や挙動から捉えることが可能であるということに基づく。なぜなら、微生物はごく微量の環境因子の変化に応答して変化し、増殖も早いので、これを先に調べることによって、環境変動による生物への影響を大型生物で顕在化する前に、いち早く知ることができると考えられるからである。

環境メタゲノム(遺伝子) — 生態系機能統合研究の方向性

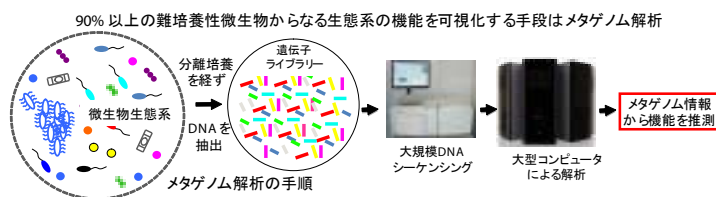
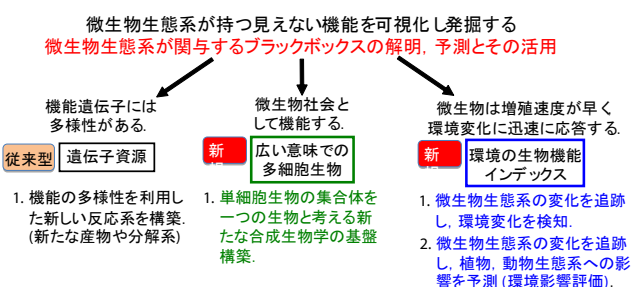


図 2-3-2-2

実際には、図 2-3-2-2 に示した流れでメタゲノムを解析しているが、環境メタゲノミクスの専門家であればあるほど、ゲノム情報だけから環境要因と生態系との因果関係を見出そうとしても、結局何もわからないということを実感する。なぜなら、環境メタゲノミクスはあくまでも環境における生物のポテンシャルを示唆するにすぎないからである。実際に微生物生態系の機能ポテンシャルを解析するためには、微生物生態系が形成されている現場環境の様々な物理・化学的要因をモニタリングするための技術開発と精度の向上が必要で、それに用いられるセンサーの開発などを推進していかなければならない。また、生態系機能の可視化という意味では、コンピュータのインフラやバイオインフォマティクスのウェイトがかなり高く、私の研究室でも少しずつインフラ整備や方法論の開発を進めてはいるが、まだまだ満足できるものではない。

加えて、いろいろな環境因子の変遷を追跡する必要があるが、これについては、近年安定同位体を用いた方法論が開発され、パワフルなツールの一つとなっている。また、生体工学あるいは代謝工学の分野も取り入れ、それらをうまく組み合わせ、最終的にはいろいろな次元の異なる様々なデータを統合して、環境と生態系機能情報に基づく生態系モデルの構築や環境要因の変化にともなう生態系機能のシミュレーションが生態系の変化や回復を予測する意味で重要となる。しかし、これに必要な方法論やこれに必要なデータ自身もまだ十分ではない。ここに述べた「環境メタゲノム(遺伝子)-生態系機能統合研究」に必要な個別の要素技術のレベルは、少しずつ向上しているが、それぞれの技術や方法をつなぐインターフェースがなく、統合的な研究の推進にはこれらインターフェースの開発とそれを担う研究者の育成がもっとも重要な課題である。1つ1つの技術や方法論の開発については、科研費レベルで可能と考えられるが、幅広い技術や方法論を相互につなぐことで達成される本提案のような統合型研究は、やはり国単位の予算立てが必要と考えられる。

上記の統合型研究の推進に当たっては、早急に解決しなくてはならない科学技術的な課題が多々あるが、メタゲノミクスに関しては、遺伝子から代謝機能情報に翻訳する方法論がまだ余り確立していないことが最も大きな問題である。また、環境微生物群の機能を類推するのに必要な様々な環境微生物のゲノム配列情報も圧倒的に不足している。さらには、未知な機能の遺伝子については相変わらず未知なままで、これについては今のところ解決策がない。これらの要因の一つには、実際にこれらの問題に取り組むバイオインフォマティクスの数と彼らを養成する教育・研究機関が我が国には圧倒的に少ないことが原因と考えられる。

また、生物の機能情報などを取り込んだ新しいシミュレーションが重要であることは既に述べたが、シミュレーションは基本的に数値シミュレーションなので、生物機能情報をどう数値化し、既存あるいは新しい理論式、経験式などを用いて行うかを数学、物理、確立・統計、コンピュータサイエンスなどの様々な専門家と議論することが極めて重要となってくる。

環境メタゲノム(遺伝子)－生態系機能統合研究

環境メタゲノム解析を中心として異分野との連携が不可欠

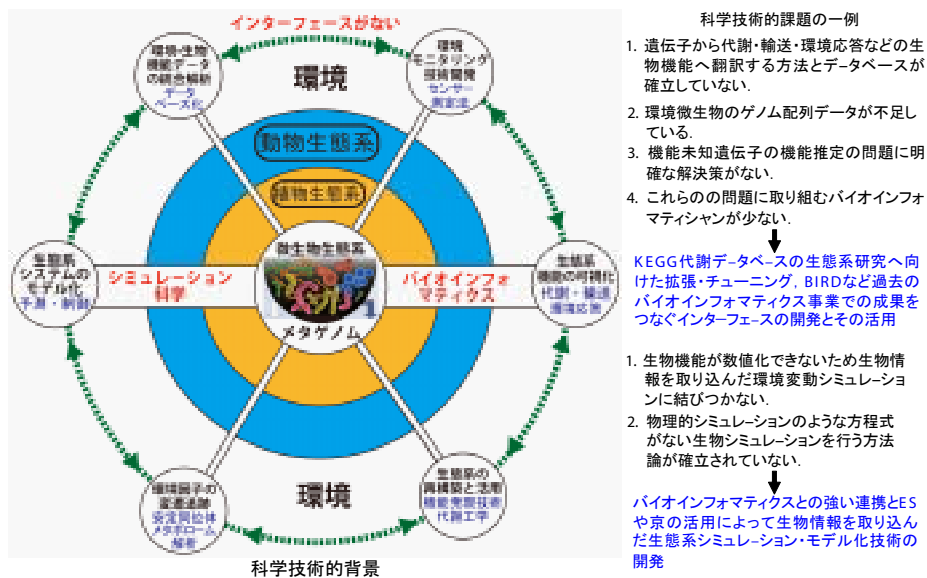


図 2-3-2-3

私のテーマは「環境メタゲノム(遺伝子)－生態系機能統合研究」であるため、図 2-3-2-3 に示す生態系機能を理解するという命題を共通項として異なる分野からのアプローチを相互に連携し、統合型研究を推進していくことになる。このように、統合型の研究がだんだんできるようになってくると、例えば、地球温暖化問題にも関係する海洋の CO₂ 固定に関する微生物のかかわりのメカニズムはよく分かっていないとか、あるいは、すでにオーストラリアでは実施されているが、環境影響評価をやらないと資源開発ができないという問題などにも対峙できる。それから、大きな震災などによって環境が破壊された時に、どの程度のスピードで生態系とそれを取り巻く環境が回復するのかといった予測やそれに伴った政策提言などができていくのではないかと。あるいは前出のリンの問題もあったが、新しい分解系とか新しい生産系をつくることにつながるのではないかと考えている。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: これは社会的などという問題を解くことになるのか。

A: 実際には、微生物がどの程度、どう寄与していて、何をしているのかということが解けてくる。あるいは、環境変化に最初に応答するのは微生物のはずなので、それをいち早く突き止めることによって、大型生物に影響が出てくる前に環境変化を知ることができる。

それからもう一つ、この前の東北の震災のときに、津波でカキのいかだが全部流されたが、そのようなことになると、次の年からむこう 5 年間は、カキがよく採れるようである。しかし、なぜ 5 年間だけカキが採れるようになるのかについてのメカニズムは全く分かっていない。単純に海底がかき回されて、餌となるプランクトンが増えたということでは説明できないようであるが、そういうメカニズムをメタゲノムや環境因子の変化に基づく情報から可視化できると考えられる。

C: もう少し社会的課題を明確にしたい。私の理解では、都市と農地と、それから富栄養化した水系の生態系はものすごく不安定である。それが、例えば外来生物の発生とか、病気の発生とか、経済的にもものすごいコストがかさんでいる。その不安定になった生態系に微生物の不安定さがかかっているというのが大きな仮説で、それをどうやったらより安定な、経済的なコストもかからない生態系にするかというのが基本的な課題だと思っている。

A: 分かりやすい例で話したが、実際は今言われたようなことを解く基礎となる。もう1つ重要なのは、これらをつなぐことによって、これまで全くできなかったことがかなりできてくる。要するに1つの分野の方法論だけでは解決できないことを、多くの分野との技術的インターフェースや、そのインターフェースとなる人材を育てていくことによって、新しいサイエンスの創成、あるいは技術的な底上げ、あるいは厚みを増すかという、そういうことに大きくかかわるのではないかと思う。

Q: インフォマティクスとかいろいろやると言われているが、どのくらいの期間で、幾らぐらいかけてやるのか。大まかな感じでいいのだが。

A: 実際、シーケンスをどのぐらいやるかという問題が1つあると思う。どのぐらいシーケンスすれば生態系の全体像を見ることができるか、というのは、試算は難しいが、かといって、シーケンスすればわかるかという、そういう問題でもない、結局、どのようにうまくプランニングするかということになる。

インフォマティクスをやるときには計算資源というのがかなり大きくかかわるので、この計算資源は単純に「京」を使えばいいのかわからないが、国家的にやるとすると、「京」を柔軟に運用できる制度設計や地球シミュレーターの活用など、そういった国に配備されたインフラの運用や拡張なども視野に入れた国家プロジェクト的研究計画を考えていく必要があるのではないかと思う。

C: 今の、どのぐらいの規模がどのぐらいでできるかという話は難しいが、我々はクルマエビの養殖場で春から1年間、養殖場の人とかうちの研究室の技術員とか、リーダーを含めて10人で菌叢の変化を見た。そのときの天候も全部記録しておいて、今言ったような菌叢の変化とリンクする温度とかpHとか、何が相関するかとか、そういう研究までする。あくまで一例である。金額は、今、次世代シーケンサーとか安くなっている、初めから全部備品を入れ直すという話は別にして、おそらく数百万円でできる。

Q: それは安い。人件費は入っていないのか。

C: 人件費を入れると、合計10人分となる。しかし、その10人は、養殖場1つではなくて、当然並行していろんなことができる。

2-3-3. NBT プラットフォーム (鎌田博：筑波大)

(発表概要)

ほとんどの方は、NBT という言葉そのものの意味をご存じないと思う。正確には New plant Breeding Techniques の頭文字をとって NBT と認識されている。そもそも NBT という言葉が出てきたのは、実は EU が 2007 年から、世界中の遺伝子操作に関する様々な技術、それから文献、特許、全部調べ上げて 2011 年に網羅的なレポートを書いた。その中で出てきたのが NBT だった。それ以降、世界中で NBT という言葉を使い始めた。基本的には、このレポートが出て、何人かの主要な関係者が集まって国際議論をして、私もそこに参加した (図 2-3-3-1)。

N B T の 経 緯

- ・EUでは、2007年から、NBTに関する議論を進め、2011年、JRC-IPTSとJRC-IHCPの共同で、報告書(**New plant breeding techniques : State-of-the-art and prospects for commercial development**)を公表。
- ・その過程では、世界中で発表されている論文や特許を調べるとともに、関係会社への聞き取り調査等を行ってきた。
- ・この問題は、一つの国や地域で解決できるものではなく、**世界で議論する必要がある**との結論となった。
- ・特定の国の関係者に集まってもらい、**科学的議論のみをする**(規制そのものに関する議論はしない)こととなった。
- ・日本に対しては、JRCから、日本からの参加者の招聘依頼があり、鎌田と橋田が参加することとなった。
- ・状況を政府関係者に説明し、協議をした上で、鎌田と橋田がスペインのセビリヤで開催されたワークショップ(2011年9月)に参加した。

JRC (the European Commission's Joint Research Center)
 IPTS (Institute for Prospective Technological Studies)
 IHCP (Institute for Health and Consumer Prospection)

図 2-3-3-1

EU報告書にあるNew Plant Breeding Techniques

- (1) Zinc finger nuclease technology (ゲノム編集)
 - (広く、人工ヌクレアーゼとして対応)(塩基配列を変化させる)
 - 1) ZFN-1 (修復用配列を導入せず、ZFN遺伝子のみを導入する場合)
 - 2) ZFN-2 (修復用配列とZFN遺伝子を導入し、数塩基置換する場合)
 - 3) ZFN-3 (数キロの塩基配列を含む修復用配列とZFN遺伝子を導入し、数キロの塩基配列が部位特異的に導入される場合)
- (2) Oligonucleotide directed mutagenesis (ODM) (ZFN-2やZFN-3と類似)
- (3) CisgenesisとIntragenesis
 - (同種・遺伝子交換可能種由来遺伝子のみを導入する)
 - 1) Cisgenesis (プロモーターやターミネーター等も変更しない)
 - 2) Intragenesis (プロモーターやターミネーター等を組み合わせて変更する)
- (4) RNA-dependent DNA methylation (RdDM) (エピゲノム編集)
 - (塩基配列を変化させず、DNAのメチル化状態のみを変化させる)
- (5) 穂換え体を用いた接ぎ木 (grafting on GM rootstock)
- (6) Reverse Breeding (外来遺伝子によって染色体相同組換え等を抑制した上で、花粉増量等によって目的遺伝子のみを持つ穂体を選択する場合等)
 - (育種を効率化させるが、育成した品種中に、外来遺伝子を残さない)
- (7) Agro-infiltration
 - 1) agro-infiltration "sensu stricto" (体細胞組織で局所的に非増殖性核酸を導入)
 - 2) agro-inoculation (agro-infection) (体細胞組織にウイルス等を導入)
 - 3) floral dip (Agrobacteriumの接種) (次世代で穂換え体を選択)
- (8) Synthetic Genomics

図 2-3-3-2

そのときの EU のレポートの中には、上記の 8 つの技術が述べられた (図 2-3-3-2)。それぞれすごく違う技術なので、一括しての議論はなかなかできない。例えばシンセティッ

クゲノミクスは、まだ世の中ではほとんど現実化していない。しかし、将来を見据えている。今日は、紫で書いてあるところだけごく簡単に説明する。赤で書いたのは、後で出てくる規制とのかかわりで言及したい。

これは、私が会議に参加したときに日本の技術の紹介に使った図である。例えば感染しても病徴が出ないようなタイプの RNA ウイルスベクターで、FT という遺伝子を入れた構築体を作成する。これを例えばリンゴの芽生えに接種すると、2、3 カ月で花が咲いて、すぐに次の世代の種子が採れる。リンゴはご存じのように、種子をまいてから、普通は 5 年から 10 年かかると花が咲かないので、品種改良そのものが 50 年とか 100 年という状況の中で、これができ上がると、多分、5 年とかで品種改良が行われてしまう (図 2-3-3-3)。このように、技術革新としてはものすごく新しいことができるだろうと言われている。

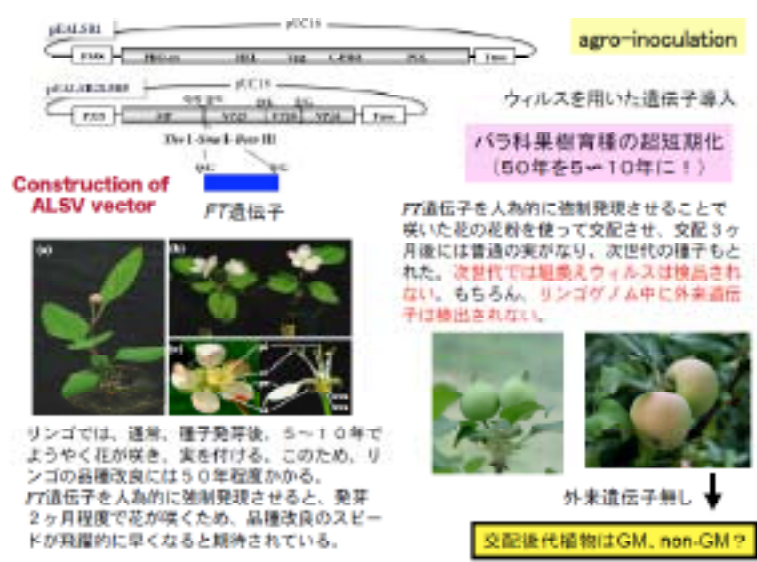


図 2-3-3-3 (資料提供 吉川 信幸 (岩手大学))

それ以外にも、リバーズ・ブリーディングというのは、一過的に外来遺伝子を入れて、例えば前出の FT もそうだが、雄性不稔を起こす、などが育種でよく出てくる。遺伝的にホモの個体を効率よく選ぶ技術などを使って、目的のゲノムを持った植物を選ぶ。ただし、この交配の過程で外来遺伝子は抜いてしまうため、規制の上で外来遺伝子がないのは組換えなのか組換えでないのかという、そういう議論がどうしても起こってしまう。

また、この図 2-3-3-4 は医学領域でも今よく話題になっている人工ヌクレアーゼである。最近の技術革新で、塩基配列を認識するようなペプチドが合成できるようになった。それに DNA 分解酵素を連結した、いわゆる融合タンパク質である。これを細胞の中に導入すると、狙った位置でゲノムが切れる。切れた後、修復の過程で元に戻るものもあれば、欠失変異が起きたりアミノ酸置換が起きたり、いろんなことをする。もっとすごいのは、切った上で、ここの配列に一定の長さの望みの配列をつなげたヌクレオチド断片を一緒に入れておくと、修復の過程で入れ替わる。要するにゲノムの狙った位置で狙ったことができるという、技術である。

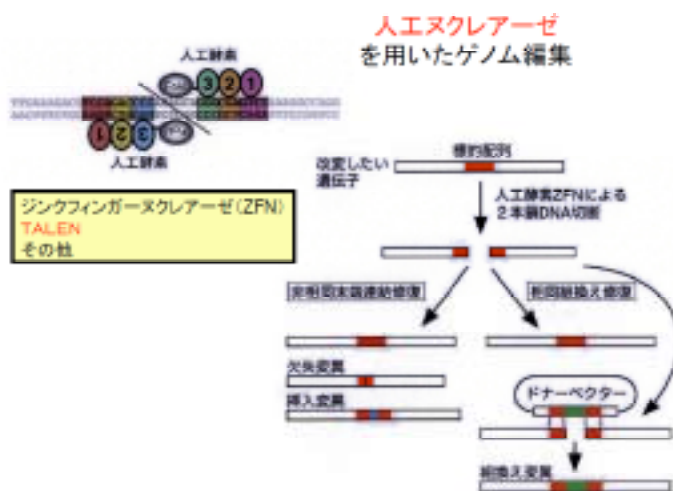


図 2-3-3-4 (資料提供 山本 卓：広島大学)

その中で、最近よく話題になっているのが TALEN という技術で、動物でものすごい勢いで使われていて、技術としてはかなりいいものができる。ただ、世界的にはさらに新しい人工ヌクレアーゼを作ろうという動きがある。

やっていることは極めて単純で、植物分野だと、TALEN の遺伝子を一時的に入れて、狙った位置でゲノム編集し、交配によって除く。基本的には一過的に外来遺伝子を導入する技術として作成されている。



図 2-3-3-5 (写真提供 <http://www.glofish.com>)

おもしろいことに、アメリカでは、TALEN の技術を使ってつくったゼブラフィッシュの特定の系統は規制の対象外で、鑑賞用にペットとして売られている (図 2-3-3-5)。規制にかかるかどうかというのは、実はこの分野の一つの大きな課題である。これはよく議論することであるが、例えば遺伝子組換えで土壌病害に強いリンゴの苗木を作り、優良なリンゴを接ぎ木した。だから、上は外来遺伝子が無い。これは組換えなのか組換えでないのか、規制がかかるのか、かからないのかによって、全く使い道が変わってしまう。技術は

あっても、規制がかかるかどうかは極めて大きな問題で、こういうことについて議論のレポートも出た。その後、昨年は *Nature Biotechnology* にいろんな記事が出て、世界中の研究者がどうしようかということを考えている。

それに対してアメリカは、幾つかの技術によってつくられたものは規制の対象外だと、勝手にやれと言っている。ところがEUは極めて慎重な発言をしていて、規制の対象になるかならないか何の表明もしないという現状に今はなっている。

そういう中で、1つは、途中で遺伝子操作をやっても、外来遺伝子がなかったら検出できない。ゲノム編集をやって塩基配列置換とかは起きても、それを検出できないのは、自然突然変異と区別できないのではないかと、というような議論をしている。そうすると、こういうものに規制をかけるのか、かけないのか、によって開発コストが全然違う。

例えばモンサントが除草剤耐性の大豆をつくる。その1件の開発が幾らかという試算が出ていて、一般的に言うと、組換えの作物は数十億円から百数十億円と言われている。そのうち規制にかかるコストが半分だと言われている。ということは、規制にかかるだけで50億円余計なお金が必要となる。どんないい技術があっても民間の種苗会社は使えないという事態が起きて、規制がかかるかどうかは最も大きな課題ということになってくる。

それとは別に、新しい技術が次々と開発されつつあるので、例えば中国ではどうなっているか、実は誰も知らない。動物も含めてこういう技術開発がどこまで進んでいて、それがこれからどうあるべきかという議論をどこもしていない。私が大変困ったのは、なぜか私はこれに巻き込まれてしまったので、日本で規制をどうするのか、と関係省庁全部に投げたが、いまだに答えはない。ということは、どんなにいい技術があっても、こちら辺は規制がかかるか、かからないかの結論を誰かが出さない限り、民間もやらないし、大学の先生方も使いたくない。要するに規制がかかるのならやりたくない、新しい技術があっても進まないという、そういう事態が今起こっており、その辺をこれから我々はどこかで議論する必要があると思う。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

C: 今の規制がかかるかどうかというのは、実際に申請しないと議論ができないので、文科省に申請書を出せば、それは議論せざるを得ないということになると思う。それがどういう過程で審査されるかは分からないが、実際に申請が出てこない議論は多分、役所のほうとしては始めたくないというのが、農水も文科も現状のようである。

A: そういうこともあろうかと思い、いろんな手を打っている。最近、厚生労働省の薬事・食品衛生審議会の部会があって、そこで、リバーズ・ブリーディングの1例については、組換えとは考えないという結論が出た。誰かが申請すると審査されるだろうけれども、例えば大学の先生方が個別の事例ごとに出してくるか、私は危惧していて、特に民間の種苗会社と話していて、彼らが言うのは、規制から外れるということならばやるけれども、外れるかどうか分からないものを、今、会社として取り組むだけの余裕はないという話となる。

Q: つまり、規制されるかもしれないじゃなくて、これは規制されない、ということを知りたい、ということか。

A: そのような保証がないと、技術を会社の中で使っていけないと言われている。どちらが先かという議論になるが。

ただ困るのは、アメリカなどでどんどん規制が緩くなっている。基礎研究でも、アメリカで組換えではないと言って入ってきたものが、大学の先生が手に入れて、実は組換えでしたとなったら、また日本中違反だらけという事態が起こるのも困る。世界を相手にしながら、科学技術をどのように発展させるかという、ブレイン的なところが日本はどこにもないというのが一番大きな問題だと思う。

C: これは食料の安全保障ともかかわる問題で、本当に考えないと、大豆、トウモロコシが輸入できなくなってしまうという、本当に困った問題である。

A: 全く同感だ。日本の種を研究している身近な人たちもすごく気にしていて、世界で使っている技術に置いていかれたくはないけれど、規制がかかるのだったら 50 億円なんか出せないという辺でなかなか使ってもらえないという事態にもなっている。

C: 言われたとおり、iPS とか ES で遺伝子をノックアウトしたときにどうするかという厚労省で普段やっている議論と全く一緒で、そのとおりだと思う。場合によっては規制をうまく使って相手を入れないようにするとか、全く国策だと思う。

A: だから、ブレインがまず必要となると思う。そのブレインも含めて、例えば欠けている技術はここら辺だから、ここら辺をもっときちんとやろうとか、そういう議論がないといけな。8つ技術を並べたが、シンセティックバイオロジーを今やれというような指令が出ることであると思う。

事務局: 学術コミュニティか、省庁か、どこが中心となるか分からないが、そういう司令塔みたいな機能を国の中できちんとすべきだということか。

A: そのとおりである。大学の先生だけでは本来できるものではなくて、国が省庁の壁を崩してでもやる必要がある。

Q: 総合科学技術会議でやるのではないか。

A: だが、総合科学技術会議はこういうところになかなか踏み込まない。

事務局: どこかが何か手を入れるなり働きかけをしないと、今の日本の組織というのは動かないという気もする。研究戦略とはちょっとかけ離れるかもしれないが、重要な課題として今回取り上げた。

A: それと、実は組換えの事例があるので、社会との対話みたいなことが極めて大事だと言われている。今回もいろんなところがかかわっているマスメディアからも、技術をどうやって社会に理解してもらおうとか、そこら辺の努力を同時にやらないと、多分難しいだろうと言われている。

2-3-4. 持続農業基盤：根圏域生態系のモデル化研究（植物相互作用、物質循環、下水、農業用水再利用）（林誠：生物研）

（発表概要）

私が担当しているのは、農地での養分吸収だが、生態学的に見ると、農地では物質を（肥料として）大量にインプットしている。生態系も乱れているが、さらに育種として考えても、この50年ぐらいの間に農業形態がすごく変わっていて、肥料をどんどん与えているために、物質循環は安定している状態ではないと考えている。

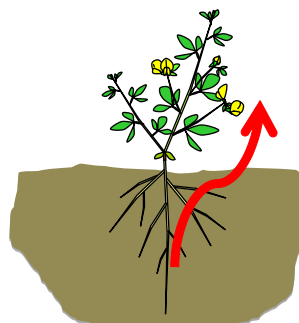
そういう環境の問題に加え別に2つ問題がある。1つは肥料を輸入に頼っていることで、例えば、平成20年にリン鉱石レベルで価格が10倍ぐらい上がって、穀物価格が上がったという点。これには投機的なところもあったが、結局のところ肥料の値段はある程度抑えられた。しかし、今後どうなるかわからない。埋蔵資源の問題、可採年数の問題もある。私が個人的に一番気にしているのは、日本の農業では肥料の問題（輸入依存および環境への影響）と、なるべく楽に農業をしたいという担い手の問題が解決されていないこと。楽をするとしたら、1つには肥料を少なくして必要な量を収穫するにはどうしたらいいかということで、幾つかの研究課題があると考えている（図2-3-4-1）。

国が推進すべき研究開発

資料3-4

限られた養分を効率よく利用して作物生産を維持するには？

- 根系の改変(表面積・伸張範囲の増大)
- 輸送系の改変(吸収効率の増大)
- 共生微生物の利用(窒素:根粒菌、リン:菌根菌)
- 根圏微生物(+根圏滲出物)の利用(PGPR)
- 養分利用効率の改変(NUEの増大)
- 転流の改変(子実への蓄積促進)



土壤微生物の動態を把握し、根圏環境を養分吸収に最適に。
養分吸収と養分利用効率を高め、より少ない肥料で収量の担保を。

土壤から子実への養分の流れをシステムとして理解する。

図 2-3-4-1

養分は根から吸収するので、まずはよく吸収できる形の根をつくることである。これはまだ研究が始まったばかり。それから、トランスポーターを効率よく働かせるのも可能性の一つ。

それから、先ほどから話題になっている微生物、土壤微生物を有効利用しようということで、微生物資材として、1つは窒素を固定する根粒菌である。それから、リンを供給するような菌根菌をうまく利用しようと考えている。これも基礎的な研究はだんだん始まっ

ている。さらに、もっと難しいのが根粒菌や菌根菌も含めたもっと広い範囲での根圏微生物である。微生物単体の効果は限定的でも、全体としてどの程度植物の成長に寄与しているかは、まだ評価が難しく、きちんと理解するためにはどういう研究対象が適しているのかも課題である。

また、根圏微生物を養っているのは、根から出てくる物質であるが、実際にどのような成分プロファイルになっていて、それがどのように役立っているか、というのは、まだ分かっていない。ただ、特に東南アジアでは肥料の値段が高いので、微生物資材を使おうという動きはかなり前からあり、一定の効果を上げている。

以上が地下部の問題で、次に地下部から地上部に移るときに、より効率よく上がるとか、あるいは少ない養分でも効率よく生産できて——NUE と言うが——バイオマスを得るような条件はどうするか、ということもある。農業という意味では、最終的に主に種子の部分を食べるが、そこにより多くの養分を転流する、という研究も必要だと思う。

背景

作物生産は化学肥料(=埋蔵資源)に依存してきた。養分は循環していない。

埋蔵資源 ⇨ 肥料 ⇨ 作物 ⇨ 家畜・人間 ⇨ 排出

化学肥料の投入を減少し、作物による養分吸収とその利用効率を増大させることが必要。

埋蔵資源 ⇔ 肥料 ⇔ 作物 ⇨ 家畜・人間 ⇨ 排出

- 作物生産の主要栄養素(三要素)は窒素、リン、カリウムである(補足資料1)。
- 世界人口増大に伴い、作物生産を増大させるためには、現状の農業形態ではより多くの施肥が必要となる(補足資料2)。
- 植物の窒素(硝酸)応答(補足資料3)やリン酸応答については、分子メカニズムが明らかになりつつある。
- 根粒菌・菌根菌との共生については、感染初期におけるシグナル経路の概略が得られている(資料4)が、それらによる養分吸収メカニズムについては理解が足りない。
- 根圏微生物、特にエンドファイトについては従来から資材として応用の試みは一部あるものの、基礎的な理解はこれからである(補足資料5)。
- 窒素の利用効率や転流(同化)については多くの知見が得られている(補足資料6)が、システムとしての理解が不十分である。

図 2-3-4-2

全体としては、土の中から吸収した養分を、どうやって食べる部分あるいは収穫する部分に効率よく動かせるか、というのを理解するような研究が必要だというふうに考えている。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 今の話は、いかに養分吸収を効率よくするかという話だが、農業の大きな問題は、土壤生態系というのをちゃんと理解せずに土壤改良をやって、いや地ができれば土を入れ替えて、というやり方をしてきている。その結果として、逆に病気が発生しやすくなって薬を使う。経験科学的には、土をうまく作ると、農薬を使わずにリンゴを作る人がいたりす

るが、どういう仕組みでそういう土壤だと病気が余り発生しないか、そこが理解されていない。

だから、敵対的な微生物のほうが共生微生物よりもずっと多くて、輪作していると輪作障害とか起きてしまう。もう少し土壤生態系を安定化させれば、そんなに薬を使わなくても、植物自体が持っている耐病性とか耐虫性とかを高めることで、薬を使う量を減らして収量を上げるという道があるのではないかと思うが、その辺はどう思うか。

A: あると思う。今日は長くなるので詳しく話せないが、もちろん病気対策もかなりコストがかかる。ただ基本的には、収量を上げるために肥料を大量に投入するとそれだけ「おいしく」なるので、病気にもかかりやすいというのが問題である。また、地上部の病気に比べて地下部の病気は研究が遅れている、ということもある。

Q: その辺は環境ゲノムの研究ともリンクする部分か。

A: そう考えてよい。リンクするどころか、科学的に非常に重要な点である。

Q: 全体として非常に重要な研究だと思うが、研究要素あるいは技術開発要素が何なのか見えなかった。たくさんある中で優先順位をつけたときに、この要素過程を解明しないといけないとか、この技術的要素をブレイクスルーしないといけない、という要素があるはずだ。それが指定されないと、何を重要と考えていいのかわからない、漠然としている。

A: 私の理解では、例えば1番目の図に挙げた6つの中のどれが一番重要かという評価は、今はできない。ただ、少し手前味噌だが、肥料に関して言えば、窒素が一番ニーズが大きい。1つは共生を利用する、そして吸収をよくするのが課題である。

Q: 共生を利用しようというときに、共生の何を解明したら有効に利用できるようになるのかという、そういうところを聞きたい。

A: それは短期的ですか、長期的な話ですか。

Q: 短期的でもどちらでもいい。科学的課題のセッションなので。

A: 例えば共生に関して、10年ぐらいのスパンで言えば、ダイズの窒素固定の能力を環境に左右されないようにする。例えば北海道に行くと、低温になるところは根粒がつかない。低温でも根粒をつけて窒素固定をすれば肥料は少なくて済むし、収量は安定する。あと、湿害の問題とかそういうものもある。共生に限って言えば、長期的に見れば、例えば稲で根粒をつくらせれば、窒素肥料を与えなくてもよくなる。

Q: 微生物と植物の科学的なインタラクションの解明というのは、ある程度できているのか。そこがわかってこないとか、それぞれの育種につながらない。

A: 根圏微生物のレベルでは、基本的にはメタゲノムをやって微生物相のプロファイルを明らかにしつつあるという段階。

Q: そのときに、根圏って根からどのぐらい離れたまですべてを根圏と言うとか、そういう問題が実際出てくるのか。また、植物にいる共生微生物というのはどんな種類で、土壤とどれだけ違うとか、その辺の科学技術的要求はどのぐらいあるのか。

A: 基本的には、根圏微生物といったときに、根っこの表面にいる微生物と根っこの中にいる微生物を分けて考える人もいる。それはどうやって分けるかということ、単にテクニカルに、洗った後で根っこに残っている微生物と、洗ったときに洗浄液中にいる微生物で分けている。実際に単離した微生物あるいはシーケンズでも、OTUでも何でもいいが、同定したものがどこにいるかというのは、本当に最近になってCARD-FISHという方法で、実際どこにいるかというのを見ている。ただ、それを全体的にやった研究はまだない

と思う。

Q: そうすると、共生微生物を利用したくても、共生微生物がそもそもどうなっているか分からないと利用できない。

A: その通りである。ただ、それは全体像の理解というのはまだまだということであって、例えばサトウキビから窒素固定菌を単離してきて、その寄与率がどれぐらいであったとか、そういう研究は昔からある。

C: 手前みそで申しわけないが、有機水耕栽培系というモデル系を使ってそういう解析をしている。そこは計画された有機物と限定された微生物しか持ち込まないような系で、病害虫菌の影響であったり、あるいは作物の生育であったりというのを解析し始めているようなところがあるが、そういう、実際の作物を生産するという方向性でベクトルを伸ばしたときに、限られた集団を使って解析するというのは、こういうものにリンクしてくると思うか。何をしたいのかということと、その目的を達成するために持ち込む役者を限定すると、いい研究の枠組みができると思うが。

A: 役者を限定するというのは、例えば資材として限られた微生物を使った場合にということか。

Q: そういう方向に向く作物生産もある。

A: それは、微生物資材で研究は行われているが、トライ・アンド・エラーのところもある。例えば十勝農協が根粒菌をまぶしている例もある。基本的には経験的にやられてきているため、それを実際のシステムとしてちゃんと、科学として理解するのは時期尚早と考える。

2-3-5. 複合酵素系の活用による次世代バイオプロセス基盤 (小川順：京大)

(発表概要)

まず、前提として3つ述べる。地球というのは空間的に閉じた物質循環の場である。例えば水、炭素、二酸化炭素の形態から我々の体になったり、あるいは化成品になったりしている。この物質循環、すなわち、物質が姿を変える、あるいは移動するという点に関してはエネルギーが絶対必要だが、そのエネルギーは究極的には太陽エネルギーからしか来ない、というのをまず理解いただく。

その物質循環において、微生物は主役を担っている。様々な動植物を分解してエネルギーを得ることを一例に、その多様さゆえにいろいろな物質変換を担っている。それが2点目。

3点目は、その微生物の分布というのが多岐にわたっていて、いろんな局面でいろんな物質変換をやっている。だから、微生物の機能をクローズアップし、抽出して使っていくという方法論は、多方面にその利益を還元できる。すなわち食料、エネルギー、環境に関して広く問題解決につながる。したがって、微生物機能を活用して循環型未来社会に貢献するというのには意味がある(図2-3-5-1)。

では、微生物の機能を利用していく具体的な切り口だが、我々は、化学工業の場で微生物の物質変換機能、すなわち、物質を分解し合成する機能を活用している。

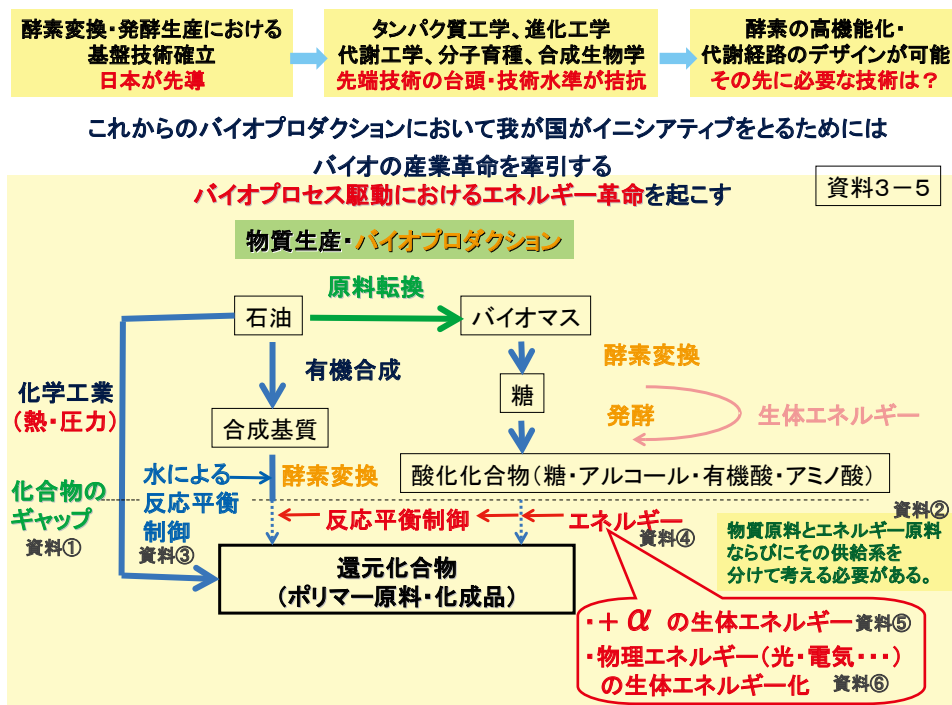


図 2-3-5-1

微生物機能利用の環境あるいはエネルギー分野への貢献について、例えば環境負荷に関して、ある化学工業のプロセスをバイオ化する、すなわち酵素反応を導入する、あるいは微生物変換反応を導入することによって、3割ぐらいの二酸化炭素排出削減ができることが実証されている。だから、現状の化学工業をバイオの力を利用したプロセスに置き換えていくと環境負荷の低減につながり、二酸化炭素の排出削減にもつながる。

もう1つの大きな貢献は、エネルギー原料の転換である。今、エネルギー原料は石油からバイオマスに移ろうとしている。これに関し、バイオマスを原料とする化学工業を考えた場合に、微生物反応というのは適合性が高いと思われる。しかし、技術的には未成熟である。その辺りを解決していく技術に関して、最終的には、より広い分野において、たとえば、植物をどう効率的に育てるかとか、腸内環境をどうコントロールするかというような技術にもつながる、複合的な微生物機能利用に関する基盤技術を作っていきたいと思っている。

さて、これまでの微生物機能開発を振り返ると、化学工業におけるバイオプロセス（古くは発酵工業と呼ばれていた）開発に関して、2000年以前は、日本がかなり先行していたことは間違いない。ただし、2000年以降はどうかというと、新たな要素技術となるタンパク質工学、進化工学、代謝工学、分子育種、合成生物学等々が出てきて、各国の技術が刷新され拮抗してきている。それにともない、技術的にはバイオプロセスの素子である酵素や微生物代謝をある程度自由にデザインできるようになってきた、あるいはできるであろうとされている。このような現状の中、今後日本がバイオプロセス開発を先導していくためには何が必要なのか、あるいは未だに解決されていないことは何なのかと考えた。

そこで、バイオプロセスを駆動するためのエネルギーの獲得にフォーカスを当てた。これは、最終的には太陽光から受け取るクリーンエネルギーをどのようにしてバイオプロセスに活用するかという技術となろう。物を作るには絶対エネルギーが要る。だから、バイオプロセスを題材に、物質生産にいかにか効率的にエネルギーを供給していくかということを考えることは、様々な産業に波及する基盤技術の構築につながる。

現状では、例えば石油化学工業では原料に石油を使い、熱・圧力などのエネルギーに変換してポリマー生産等へ活用している。一方、酵素反応を利用するバイオプロセスでは、化学合成された中間原料を、反応系に大量に存在する水を基質あるいは反応制御に活用する技術、例えば加水分解等を使って変換している。ここでは、外部エネルギーの注入はない。また、発酵工業では、バイオマスを物質原料ならびにエネルギー原料として併用しており、物質生産に必要なエネルギーを効率的に獲得できないと、アルコール等の生産量が目減りする。したがって、生産に還元力などの生体エネルギーを多量に必要とする炭化水素などの高還元物質の生産は、生体エネルギーであるNAD(P)HやATPを効率的に供給する系が並存しないと成立しえない(図2-3-5-2)。これを何とか克服して、バイオプロセスの活躍の場を広げていこうと考えた。そのためには外部エネルギーの注入あるいはプロセスにおけるエネルギー獲得の効率化が絶対必要となる。エネルギーの変動はダイナミックなものである、いかにゲノム情報あるいはメタボローム情報が充実してきてもそれらはスタティックなものであり見えないものが多い。新たな技術、概念を持って、バイオプロセス駆動におけるエネルギー革命を起こすことで、先陣を切れるのではないかと考えている。

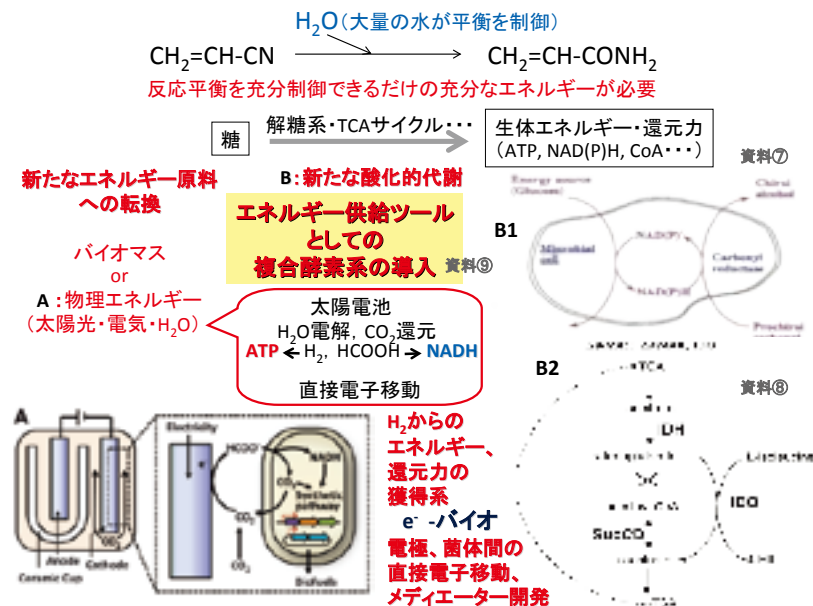


図 2-3-5-2

具体的な研究要素としては、解糖系・TCA サイクルをどう効率的に回すか、という古典的な学問を含め、新しいエネルギー原料をバイオプロセスに取り入れる研究、例えば、糖以外のバイオマスからどのように生体エネルギーを獲得するか、という取り組みがあげられる。また、太陽光からエネルギーを得る方法論に関して、光合成以外の方法論によって二酸化炭素を固定する微生物の利用も研究対象と考えている。さらには、電気の注入をどう還元力あるいは ATP 生産まで波及させていくかなど、物理エネルギーの生体エネルギーへの変換を代謝工学的研究とリンクさせて構築してゆく取り組みが必要であると考えられる。これらには非常にたくさんのタンパク質素子に関係するため、複合酵素系とも言える複雑系の制御技術が必要となってくる。これらの技術を導入していくことによって、エネルギーの観点から物づくりを見る、そして、必要な生物学的要素を、バイオプロセス開発を例に開発し、その成果を微生物がかかわる様々な産業あるいは科学技術領域に利用していきたい。ひいては、ゲノム情報・メタボローム情報ともリンクさせ、土壌や腸内環境等の複合生物系を制御する技術の開発に発展させていきたい。これらの技術開発を通して、エネルギー、食料、環境に貢献できる研究を推進していければよいのではないかと思います。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 生体エネルギーである NADH あるいは NADPH は、買ったらすごく高い。代謝系が動いていないと、手に入らない。酵素を使わなくて安く作れないか。

A: NADH とか NADPH を安く作るというよりも、それらは循環させておいたらいと思う。循環させるためにはエネルギーが必要で、今はそのエネルギーを糖から獲得している。だから、大量の還元力イコール大量の糖という形で、最終的プロセスに糖を投入することで、コスト面の解決を図っている。

Q: ただ、温度が上がると壊れる。

A: NADH あるいは NADPH の形態としては瞬間にしか存在せず循環しているため、壊

れる壊れないの問題はクリアーしていると思う。

還元力のもとをたどっていくと、今は糖しか使われていない。しかしエネルギー基質としてのバイオマスの利用をいかに多様化するかということと合わせて、究極的なエネルギー源として太陽光の利用を視野に入れたい。光合成に似たものにどうやって持っていくかということに関し、ギ酸と二酸化炭素の平衡、水素とプロトンの平衡、NADとNADHの平衡などを電子の注入により制御することによって、エネルギー生産の効率化を生物的にはかる観点から取り組みたい。その基盤技術は何かというのを物づくりの観点から見たい。そうやって見ると、いろんな局面で利用できる生物の仕組みが見えてくるのではないかと思う。

Q: 光エネルギーを使うということ、結局、カルビンサイクルみたいなものと何かをカップリングさせるようなことを人工的につくっていくというイメージか。

A: 光合成を使いたいのはやまやまだが、すごく難しい問題であると思う。今、直接的に考えている例は、太陽光を一旦電気に変えて、電気を使って二酸化炭素をギ酸に還元して、ギ酸の還元力を生物的に使うことである。光合成というのは非常に良いシステムで、太陽光を直接エネルギーにしているが、実際、物づくりのオーダーで使うとなかなか難しい。そこを何とか物理エネルギーを経由する形で生体エネルギーにリンクさせたいというのが1つの取り組みの例である。

Q: バクテリオロドプシンとかというのは、候補にならないのか。

A: なるかと思うが、出力の大きさには疑問がある。物づくりにおいては、絶対量の動きが単位時間当たり多い状況下が必要となる。その観点から、どういう生物素子が有効なのかを知りたい。

Q: あと、糖などのバイオマスをグルコースまで分解するというステップをもう1ステップ置くということか。それとも、もっと多糖を直接使えるようなシステムをつくるということか。

A: 原料の多様化において後者だと思うが、前者に関しては、代謝全体というよりも、物づくりに応じて何がエネルギーとして必要なのかを見定めて、その上に必要なステップだけを強化するというような切り口になってくるかと思う。例えばグルコースのグルコン酸への酸化だけでNADHを獲得することができる。従って、そういったツール、ポイントをフォーカスしたツールを、しっかり開発しておく。

Q: それらを代謝工学的にダイレクトにつないだり、間を飛ばしたりというような、そういう現実的な方法は検討されたか。

A: 最終的にツールができれば、あとは既存の技術で導入できると思う。

Q: James C. Liao がやっている。光合成だと電子収率が非常に低いので、結局、彼はギブアップした。だから、そういう発想を入れていかないと、物づくりからいくと、光合成だけでこだわってやろうというのは無理だと思う。

A: 光合成一本では無理だと思う。だから、何か物理化学的、電気化学的な情報をお持ちの方との共同研究で、物理エネルギーの生体エネルギー化へ新しい切り口で取り組みたいと思っている。

Q: それをどのぐらい上げると、例えば資料⑨に書いてあるような酵素群が動かせるようになるのか、定量的な感じというのは感覚的にあるか。

次世代微生物酵素の開発

資料⑨

酵素：

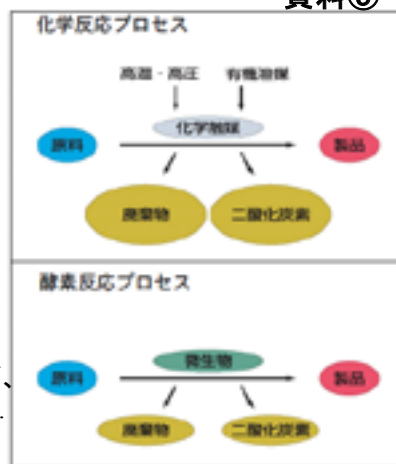
- EC1：酸化還元酵素 (oxidoreductase)
- EC2：転移酵素 (transferase)
- EC3：加水分解酵素 (hydrolase)
- EC4：脱離酵素 (lyase)
- EC5：異性化酵素 (isomerase)
- EC6：合成酵素 (synthetase)

既存産業用酵素：

ほとんどが加水分解酵素である。
ex) プロテアーゼ、リパーゼ、セルラーゼ、
アミラーゼ、アミノアシラーゼ、etc.

これからの産業用酵素 (次世代微生物酵素)

これまで制御困難であったmulti-component系からなる酵素
ex) 電子伝達系が必要な酸化還元反応
エネルギー供給が必要な反応
→ 微生物複合酵素系の活用



反応平衡を制御するほどの
大量のエネルギーを効率よく
バイオマス、物理エネルギー
から得る

資料⑨

A: 一応ある。例えばモリブデン含有型のギ酸脱水素酵素を使う際、電極からの効率的な電子移動のために、メディエーターの最適化研究が行われている。このように、目的に合ったエネルギー順位のことをデザインすること、それと、何をどれだけつくるかという目標値が明確になると、そのために必要なツールの目標能力というのが定量化できると思う。
Q: では、それはリストにしようと思えばある程度のイメージはできると、そういうことか。
A: その通りである。ないものについては、タンパク質工学的なアプローチで創生する。

2-3-6. 沿岸域生態系（土壌、森林を含む）の統合解明（松田裕之：横国大） （発表概要）

今、生物多様性条約で生態系管理あるいは生態系アプローチと呼ばれているものを詰めてやってみたい。その基本になる資源管理は、個体群管理、つまり1つの対象種をうまく管理することだった。20年前は、サバが乱獲されて、イワシが乱獲されて、もちろんマングロも乱獲されて、ということがいっぱいあった。今は、少なくとも先進国においては、そんなに乱獲の例はなくなりつつある。

その理由の1つは、我々の資源管理のモデルが不確実性を十分に入れ込むことによって、漁業者の感覚に合ってきたのだと思う。つまり、前は決定論モデルに基づくMSY理論というのを使っていたが、それは漁業者の感覚に合わなかった。今は、リスク管理あるいは非定常系であるというところを十分組み込んだ説明をしてきたところが1つ大きかったと思う。あとは、もちろん漁業者のコンプライアンスが増している。増していない日本はいまだに問題が多いということになる。

また、対象とする資源だけ守るのではなくて、自然の恵みというのは生態系全体を守るという話になった。では生態系アプローチだという話になった途端に、そのときに資源管理で使っていた数学的あるいは理論的ツールがほとんど使われていないという問題がある。つまり、我々は、例えばシカが何頭いるかわからないといったら、ベイズ推計を使いましょうとか、捕りながらだんだん推計精度を上げていくという意味でのアダプティブマネジメントをやっている、と言っているが、例えば生態系のモデルにいった瞬間に、そういう不確実性は全部飛ばして、しかも、プロセスエラーと我々は言っているが、環境変動もほとんど入れていない。その意味では、気候変動モデルよりずっと生態系モデルは稚拙であるところの中で、実はサバを守ればクジラが増えますよとか減りますよとかの推定をしている、というところがある（図2-3-6-1）。そこを何とかしたいと考えている。

生態系・生物多様性の保全や利用にかかわる「科学技術的課題」
沿岸域生態系（土壌・森林を含む）の統合解明 - 松田裕之（横浜国大）

- Eco-Innovation: 生態系管理の具体的工夫
 - 防潮堤減災技術・Mangrove植林効果・湖沼の生物操作
- Eco-Incentive: 自然保護を誘導する経済
- Eco-Complexity: 不確実・非定常な複雑系を制御する数学
 - ベイズ推計・Feedback制御
- Risk-Regulation: リスクと不確実性とFifth Branchの統合
 - 2種類の「リスク管理の失敗」から学ぶ
- Bio-culture: 生物資源とそれを利用する文化の関係
 - 分類学・民俗学と知財データベースの統合
- Sustainable-Governance: 合意形成と管理実践の教訓
 - 行政規制と地域振興から学ぶ

図 2-3-6-1

ただ、単純にモデルを入れてうまくいかないということはわかっている。つまり、一次元の一変数系だから、フィードバック制御みたいのがうまくいくわけで、多変数になればなるほどうまくいかない。そういうときに、一体どうやったら管理できるのかということを入れたい。

それからもう1つ、生態系管理と言っているものの中で何があるかということ、生態系アプローチと言われているものは、実は順応的管理なんかよりも、社会経済的合法だとか、生物文化多様性とか、結構、社会科学用語が散りばめられているところがある。

それは、もちろん単純に冗長的なわけではなくてももちろん意味がある。それを結びつけるような統合的な理屈をつくった上で、一体どうやってこれから自然を守っていくのかということを考えていかなければいけないと思っている。

そういう意味では、生態系アプローチと言った途端に、私はリスクの考え方が非常に弱くなってしまっているというふうに思うので、そのリスク管理をやりたいというところがある。それには、先ほどから私が何度も申し上げているように、例えば狩猟者がいなくてシカが増え過ぎて困っているのであれば、シカ肉の流通の方法を考える。それには法律のいろんな制約もあるし、本当は狩猟者がいないなら自衛隊を使えばいいとか言ってもできないとか、そういう問題を一步一步全部解決する方法がある。そういうものを全部やるという意味では、実証される実証科学とは別の意味でのサイエンスが必要だということで、私はレギュラトリー科学という言葉、生態系管理には必須用語ではないかということで使っている。これは当然、リスク管理を考えれば、その延長線上にある。

背景: 鍵となる新たな概念

生態系=非定常、不確実、複雑+人間の生存・福利・幸福・社会に不可欠
∴ リスク管理が必須 ⇒ 生態リスク学 の提唱
科学技術、法制度、価値観、衣食住エネルギー(生活)が時代に合わない
新たな時代の姿の芽はある。それを体系化することが重要

- 持続的利用 Sustainable...
- Risk tradeoff
- LCA (life cycle assess.)
- ベイズ推計 Bayes
- 外挿 Extrapolation
- 順応的管理 Adaptive management
- 実現可能性 Feasibility
- 回復力 Resilience
- 脱集権主義 Decentralization
- 共有地の悲劇 The tragedy of the commons
- 生物文化多様性 Biocultural diversity
- 自然の恵み Ecosystem services
- 自然への畏敬
□ Respect to nature
- レギュラトリー科学 Regulatory Science

図 2-3-6-2

そういう意味で、私が一番思い入れるのは複雑系の順応的管理をやるしっかりしたモデルの理論的なベースを構築していく、ということである。そしてそこにはリスクと不確実性をしっかり入れて、合意形成のプロセスの中にそれを盛り込んでいくような実例を幾つもつくりたい (図 2-3-6-2)。

そのときに、エコシステムアプローチと呼ばれているものも、結局は担い手がどう納得していくかという問題がある。その過程では、単にその資源だけの価値というような経済だけでなく、文化的な問題をちゃんと考えなければいけない。ということで、今、世界自然遺産などいろいろな活動にかかわっているが、ユネスコの活動はそういう面が非常に強く出ている。この考え方と、単に自然保護と言っていることとのギャップを埋めるという意味で、生物文化多様性という概念がここで使えるのではないかと思っている。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: レギュラトリーサイエンスというのを、もうちょっと素人にわかりやすく説明していただきたい。

A: レギュラトリー科学と言いついたのは日本の方で、今、薬学の分野で結構研究されているが、それと別に、**Fifth Branch** という著作では、要するに合意形成過程をしっかりと考えていくという意味もある。科学者が実証科学でない、つまり実証されていない部分の意思決定に科学者がどうかかわっていくか、というところを分析したものは多々ある。私の言い分では、順応的管理はまさにそれが一番いい例で、実証されていないうちに、例えば、本当は魚のことはよくわかっていないけれども、こんなに捕ったらいけない、というところをやる。そこで重要なのは資源管理あるいは個体群管理では、ベイズ推計のところには実は事前分布という形で、主観を体系的に入れていく。つまり、証明されていないけれども、こんなものだろうというふうに言って、後からデータが来たときにそれを見直していくプロセスそのものがベイズ推計学である。推計を入れていくというところで、意思決定をしていくというところをレギュラトリー科学と私は言っている。

Q: 関連した質問だが、例えばシカを管理するとか絶滅危惧種を守るとかいうときには、目標は明確だが、それが、シカも、人間生活も、ということになると、途端に目標設定まで出てくる。レギュラトリー科学というのは、どれだけ規制をするかというのを決めるルールを発展させるということだと思うが、目標が曖昧になると途端に、心理も含めた人間的要素というのがかかわってくる。典型的には遺伝子組換えだが、実際にリスクはほとんどないのに、心理的な抵抗でなかなか合意が得られずに、すごく強い規制をかけている。不合理な規制をかけていると思うが、そういう目標設定と人間の心理的な要素というのはどのように扱われているのか。

A: レギュラトリー科学もそうだが、どこまで科学者が決めて、どこは社会が決めるというところの仕分け、これが一番重要なことになってくる。例えば、今の話だと、いかにも科学的知見によって、それはもう少し規制しなければいけない、と科学者が発言するような場面が出てきている。でもそれは本当ではなくて、もし規制しなかったらこういうリスクの可能性があると発言すべきである。その後は社会が決めることというところの仕分けがきちんとできていけば、遺伝子組換え作物のようにはならないはずだ。で、結局、その場合、日本とヨーロッパで実際に合意される目標が違ってしまうということはある。そこまでいったら、その間の軋轢はどうするかといったら、これは国際関係論の知恵まで借りなければいけない。

ただ、先ほどの話だと、目標が曖昧になってしまうと言うが、やっぱり曖昧ではいけない。ただ、それは科学者が決めるのではなくて社会に決めてもらう。その論点整理を科学者がやるというのが重要なことだと思う。

Q: レギュラトリーサイエンスは、食品は大きく進んでいる。ただ、食品の場合、安全性確保という意味でレギュラトリーサイエンスをやろうとして、社会が決めるという結局決まらない。

なぜかという、安全というものに対する価値観なりが、社会とサイエンティストでは全然違う。それで、基準になるべきものを我々は定めなければいけない。食品の場合には、これは変な話だけれども、これまで食べてきたものは安全だと、それ以上危険性が、リスクが上がらないものは基本認めるという、そういう合意がないと、落としどころがなくなる。

A: 今言われたようなところまでは科学者として言いたい。我々もそういう意味では、例えば1個体でも鳥が風車に当たったらだめだという基準ではなくて、基本は個体群の存続ですというところまでは言う。しかし、それ以上に、100%捕っても個体が絶滅しなければいいのか、という、そこは社会の合意になってくる。

Q: ただその場合に、食品は、社会として、全体として見たときと個で見たときが全然感覚が違う。だから、そこを最後にどうやって合意をとるかというのはかなり難しい問題だと思う。

A: それに比べれば、私は生態系管理のほうが、GMよりは成功例が見つかると思う。

Q: 最後に、具体的な研究開発を考えたときに、例えばこういったレギュラトリーサイエンスを含めて管理をどこに適用してやっていくのが、最も実証というか、結論が出やすそうかとか、そういうターゲットはあるか。

A: そういう意味では、新たに問題を作ってやるよりは、現に解決ができかかっている、あるいはもうちょっとというような事例が山ほどあるので、そういうところに持っていく。知床だったら、環境省はシカ捕獲柵をつくるのに7,000万円かけていると。7,000万円もかけたら、我々はサイエンス、ネイチャーに論文を書くということになる。そういうような場面は必ずいろいろある。

Q: 事例はいっぱいあるということか。

A: その通りである。

Q: そのときには、普遍的なメソッドがそこから出てきているか。

A: 今の例はこれから検討していくテーマだが、要するにそれまでは自然保護派の市民も含めて、通年、シカは放っておいてもいいという考えのほうが実は多数派だった。でも、今は自然保護区内も含めてシカは捕らなければいけないというふうにほとんどの人が思うようになってきた。そういう意味では、シカをとったことによってどれだけ実際の自然植生が回復しているかというデータが欠けている。先ほどのサバの資源管理もそうだが、漁業管理でもそういう実際の評価によって、漁業者もそういう資源管理はある程度必要だねというふうに変ってきている。

Q: それは分かるが、サステナビリティサイエンスでも、サステナビリティ・アナリシスとか、ストラクチャル・アナリシスとか、いろいろな科学的方法が提示されてきている。今のレギュラトリーサイエンスの中で、科学的なメソッドは提示されてきているのか。

A: そういう意味ではアダプティブマネジメント、個体群管理はまさにそれであって、ベイズ統計学とフィードバックによって体系付けられている。

2-3-7. 微生物予報（服部正平：東大）

（発表概要）

「微生物予報」というのは私が決めた名前ではないが、予報ということは当たっていると思う。早い話が、「ヒトを取り巻く内部・外部環境微生物叢の解明と活用」ということで、ヒトと微生物間相互作用から健康と生活環境を予測・改善する。すなわち、環境と言ったときに、環境の成分の1つにヒトは入り、ヒトが発信する微生物も環境微生物の1つであるということで、分ける必要はないと考えることができる。ただし、ヒトはご存じのように病気や健康への微生物の関与は、極めて具体的にわかりやすい話になる。

これは私の提案となるが、疫学にゲノム情報をつけるメタゲノム疫学による個人差、健康・病気、あと日本人の特徴の解明とかは、1万人規模とかコホート規模で解析する必要がある。これは欧州人と日本人のスニップが違うように、向こうの生活環境のスニップ情報が必ずしも日本の同じ病気に当てはまらない。それが常在菌叢においてはもっと違う。

それと、人間はなかなか実験対象にできない。宿主と常在菌叢の間の相互作用には、モデル動物を用いた研究が必要になる。分子やいろいろなレベルでモデルを作るところに技術開発が含まれる。

それと、当然のことながら、ヒトの常在菌そのものも、周りの環境の影響を受けている。ヒトの生活空間は、自然環境と少し違う。家の中などが自然環境とどう違うか、そういう微生物群の実態を見る必要がある。

一方で、ゲノムを読むことで膨大なデータが出る。ただし、そのデータをどう解釈するかというときに、とりかかりが何もない。我々が痛感したのは、事あるごとにそこらにある菌を採ってきて、それをとにかくデータベース化しておく必要性。そうすると、膨大なメタゲノムデータの中から、このデータはこの菌からきているとか、そういうことが極めてわかりやすくなる。これは国際レベルでやる必要がある。一学問では絶対できない。

それと、もう1つ大事なことは、このデータが出たときに、このメカニズム、例えばヒトの常在菌叢の形成原理。とにかく我々は無菌で生まれるが、生まれてから何年もかけてヒトの常在菌叢ができる。自然環境もそうだと思うが、一体どんな原理でできているのか。確かに環境の要因とか、そういうのは当然あるが、もっとシステムとして、必ず我々は常在菌叢ができるわけで、そこには普遍的なものがあると考えられる。その研究には、当然ながら細菌間相互作用もあり、その解析には、絶対的に数理モデルのような理論研究が必要になる。つまり、理論研究をする人材が必要になる。生態系とか微生物叢の理解に、そういう人が必要になるという認識である。

それで、常在菌とか周りの菌をターゲットにしたり、それを利用したりして、食習慣・生活環境が及ぼすヒトの健康と病気への影響を細菌、遺伝子、ゲノムレベルで理解する。それと、少子高齢化時代における疾病予防・寛解を目指す応用研究と産業創生へのリソース基盤を構築する（図 2-3-7-1）。

現状は、2007年ぐらいから、ヒト常在菌叢に関しては国際コンソーシアムができた。5年間たってかなりのことがわかってきた。日本は2005年から、これは大事だということでコンソーシアムを作って、スタートダッシュはよかったが、資金が続かずに後追いで抜かれた。そういう意味ではプレゼンスはすごく示していて、かなり評価もされている。この領域も、当然のことながらメタゲノムとか次世代シーケンサー、バイオインフォマティクスなどの進歩により、今まで手が出なかった解析ができるようになった。

ヒトを取り巻く内部・外部環境微生物叢の解明と活用

～ヒトと微生物間相互作用から健康と生活環境を予測・改善する～

1. 国が実施すべき研究開発

- 日本人常在菌叢のメタゲノム疫学(個人差、健康・病気、日本人の特徴の解明)
- モデル動物を用いた宿主と常在菌叢の相互作用の分子・細胞レベルでの解明(オーミクス技術開発を含む)
- ヒト(生活空間)を取り巻く微生物群の実体(常在菌、病原菌、ウイルス等の生態系)解明
- 常在菌・生活環境細菌のゲノム・遺伝子データベースの構築
- 微生物叢の形成原理や細菌間ネットワークを数理モデル化する理論研究の構築

⇒食習慣・生活環境が及ぼすヒトの健康と病気への影響を細菌、遺伝子、ゲノムレベルで理解する。

⇒少子高齢化時代における疾病予防・寛解をめざす応用研究と産業創成へのリソース基盤を構築する。



図 2-3-7-1

国際プロジェクトを置くことによって、病態とか食事との関連、そういうものの全体が調べられるようになって、常在菌は病態とか生理状態に関係しているというのが明確になった。しかしながら、どの菌が関係しているとか、どの食事がどう関係しているかというのはわかっていない。そのような解析を始めようとしている。それから、常在菌叢の成立・維持、ゆらぎ、伝達等の原理を表現する数理モデルが今後必要になるであろう。

最近では、常在菌は、いるだけではなくて宿主と主体的に関係していることが分かってきた。マウスにおいて宿主の細胞・遺伝子を制御する常在菌が存在することが明らかになった。すなわち日和見ではなくて、その細菌がいることによって宿主側の遺伝子・細胞が分化したりしているという、そういう能動的に働く菌がある。これは今までと全然違う。

少し離れるが、こういう大気中や、我々の部屋とか生活空間の中とか、我々が日ごろ触っている PC にはどんな菌叢が付着しているのか、というようなものも解析され始めてきている。これを個人識別に使うような応用が広がっている。

そういう状況の中において、日本人の常在菌叢に関しては全体像や特徴がほとんど不明である。まだ人数が足りない。今、50人ほど調べているが、日本人というくくりでいくと欧米に比べたら少ない。やはりヒトの生活空間、こういう大気中にある微生物系の実体や特徴もほとんどわかっていないし、解析されていない。それと、食習慣・生活環境と健康と病気の関係、日本食の食事成分の効果の知見がよくわからない。しかし、これは腸内細菌により解明することができるのではないかと考えている。欧米との比較で、日本食では、明確に示せるデータが幾つかある。

それと、治療が困難な病気、例えば炎症性腸疾患、多発性硬化症、若年性 I 型糖尿病等はこういう腸内細菌、常在菌を研究することによって突破口につながる可能性がある。

2. 現状・背景

- ・ ヒト常在菌叢(腸、口腔、皮膚等)に関する研究が、欧米でのヒト常在菌叢の国家プロジェクトの推進と国際コンソーシアム(IHMC)の発足により大きく前進した(日本はHMGJコンソーシアムを2005年に発足)。
- ・ 近年のメタゲノム解析、次世代シーケンサー、バイオインフォマティクスの進歩は、これまで難攻不落であったヒト常在菌叢や他の環境細菌叢の遺伝子・ゲノムレベルでの解明を可能にしている。
- ・ 各種病態・食事と常在菌(叢)の関連(疾病に関連する菌種の特定)を詳細に調べる研究が開始されようとしている(第2期の国際プロジェクトの開始)。
- ・ 細菌叢の成立・維持、ゆらぎ、伝達等の原理を表現する数理モデルの構築等の理論研究が必須になる。
- ・ マウスにおいて宿主の細胞・遺伝子を制御する常在菌が存在することが明らかになった(特に免疫系)。
- ・ スーパーマーケット内の大気中細菌やPCIに付着している細菌叢のメタゲノム解析等、ヒトを取り巻く微生物叢の実体解明とその応用研究が開始されようとしている。

3. 必要性

- ・ 日本人の常在菌叢生態系の全体像や特徴はほとんど不明。
- ・ ヒトの生活空間の微生物生態系の実体や特徴、常在菌叢との関連性はほとんど未知。
- ・ 食習慣・生活環境と健康と病気の関係、食事成分(日本食)の効能の知見不足。
- ・ 炎症性腸疾患、多発性硬化症、I型糖尿病等の若年層に多い疾病との関連性への知見不足。

4. 予想されるアウトプット

- ・ ヒトを取り巻く微生物生態系の総合的理解とその健全性評価法の開発
- ・ ヒト内部・外部環境の評価法の確立とその保全策の策定
- ・ 高齢者の予防医学や若年性疾病(現代病)医療の発展に貢献
- ・ 高齢者の介護食、乳幼児の適正食品、疾患患者の寛解促進食の開発

図 2-3-7-2

それから、予想されるアウトプットは下に書いたとおりである。特に少子高齢化ということで、高齢者の介護食、乳幼児の適正食品、疾患患者の寛解促進食、この辺が1つのプラスの方向である(図 2-3-7-2)。普通の健康な人については、健康をさらに健康にすることはできない。

菌が直接宿主を制御しているという論文もある。ごく最近、常在菌のクロストリジウム属 46 種のセットにより、Treg という自己免疫疾患や感染症への抵抗性に関係している細胞が制御されているということが報告された。あともう1つは、ビフィズス菌が生産する酢酸が O157 による感染症を防御するとか、今まで根拠なくビフィズス菌がいいとか、免疫学的にいいと言われているものを、もっと分子レベルで次世代シーケンサー、メタボローム、そういうものを含めて解析すると、その理由が実際見えてくる。このような背景があり、常在菌叢を解析するが、そこからのアウトカムとして、どういう菌が実際どういう健康とか病気に関与しているか、について分子レベルで理解につながる。

それで、これはレダーバーグというノーベル賞をとった方が既に 2000 年に、ヒトというのは超有機体であると言っている。今までヒトゲノムで病気とか健康を考えてきたけれども、食とか環境が病気に関係していると実際我々は知っているが、サイエンスできなかった。ところが、マイクロバイーム(微生物叢)の変化として、代謝物を含めて、環境要因を遺伝的要因と合わせることで総合的にこの評価ができるんじゃないかと考えている。

日本食を食べている日本人の細菌叢は、今、50 人ほどで解析しているが、欧州人と菌種が有意に違う。向こうは 124 人である。

日本人は、属レベルで言うとビフィドバクテリウム、いわゆるビフィズス菌というのが一番多い最優占菌種である。欧州人の腸内細菌はバクテロイデスが一番多かった。我々の精度の高い定量法とか技術的开发も影響するが、それでもやっぱり日本人はビフィズス菌が多い。昔から日本人にはビフィズス菌が多いということは言われていたが、測定数値から間違いなく多いというのが分かった。遺伝子レベルでどのぐらい似ているか調べたと

ころ、日本人の細菌叢に 330 万の遺伝子を見つけているが、欧州人とは何とわずか 27% しか合致しなかった。4 分の 3 が欧州人と違う。これはスニップどころではない。それで 80 万の共通するような遺伝子、基礎的な遺伝子があった。アメリカ人のデータは 510 万ほどあり、アメリカ人と欧州人は 50% 以上共通している。あとこれに日本人を足して、トータルでどのぐらいの遺伝子になるかという、1,000 万ぐらいになるが、このデータから何がわかるか、というようなことを現在やっている。

おもしろい例では、欧州人と日本人を比べて、明確に P 値が 0.001 になるような、日本人に多い機能と欧州人に多い機能をピックアップした。そうすると、日本人には炭水化物代謝系の遺伝子が欧州人よりも多い。欧州人のほうは DNA 複製・修復と、膜合成系というのが日本人よりも多い、という違いが出た。日本人はオリゴ糖を取り込み代謝することが多く見られるので、これは食事とも関連する代謝系の遺伝子が多いというわけだ。

一方、欧州人にはグリカン、脂肪代謝系が日本人よりも多い。これは、欧州人には炭水化物以外のエネルギー代謝に係る酵素が多く見られている。すなわち、彼らの食事の中には炭水化物が基本的に少ない。そうすると、彼らの炭水化物源は、自分の上皮細胞が分泌するムチンであり、グリカンの代謝が多いということがここで推定できる。

あと、ブチレート（酪酸）のような短鎖脂肪酸は栄養素となるが、短鎖脂肪酸の代謝に関係する遺伝子は圧倒的に日本人が多い。これは我々にとってはすごくいいことである。

おもしろいことに、ビタミンであるビオチンとか葉酸とかリボフラビンの合成系は欧州人に多い。欧州人は食事に含まれているこのようなビタミンが少ないから自分で作る必要があるということで、逆に言うと、日本食にはこのようなビタミンが多く含まれている可能性がある。これは栄養学の先生に調べてもらっている。

あと水素の代謝系。2 種類の違う水素の代謝系がある。日本人はアセテート（酢酸）ジェネスと言って、最終的にはアセテート（酢酸）ができる。ところが外国人はメタンを生成するような代謝系を使っている。これは不思議なことで、欧州人と日本人で違う代謝系を持っている。

この興味深いところは、水素の代謝系でメタンをつくるのは、実は古細菌がしている。遺伝子は 1 つ 1 つが古細菌由来の遺伝子である。なぜか知らないけれども、欧州人の 3 割から 5 割に古細菌が昔から見つかっている。日本人はほとんどない。これも、どちらかという我々にとって健康に有利な代謝系である。

最後に、DNA 複製・修復系について述べる。これは欧州人のほうが圧倒的に多くて日本人は少ない。修復・複製系は DNA が損傷すると必要になる。すなわちこれは、欧州人の DNA のほうが日本人の DNA よりも傷つくことが多いことを示唆している。大腸がんの起こる頻度は、デンマーク人やアメリカ人は多いが、それとの相関が大きい。要するに腸内細菌により DNA を傷つける発がん物質が圧倒的に外国人のほうが多いといえる。このデータを外国に出せば、日本食は健康食といえるのではないか。ここまで技術として裏付けできるようになってきた。

そういうことで、環境や、地球全体のメタゲノムが調べられたら、もっといろんな予測にもつながっていく非常に大きな将来の科学的課題ができるのではないかと思っている。

(質疑応答) (Q: 質問 A: 回答 C: コメント)

Q: 腸内微生物のどのくらいが環境との関係で入れ替わっているか。

A: そういうことを調べたい。

Q: 微生物予報と名づけたのは私だが、それは発想として、もちろん医学分野としてこういう研究はどんどん進んでいくと思うが、実はかなり比率が変動するとか入れ替わっている可能性がないか。

A: それは測っている。2週間ごとに測っていると、4割ぐらいずつオーバーラップしている。

Q: つまり6割は入れ替わっている。

A: 入れ替わっていても、例えば1年後に見たときに、1年後のその人の腸内細菌と多くの人を見たときに、一番近い腸内細菌はどれかというとな本人である。

あるレベルで変化はするが、他人間の違いよりも圧倒的に少ない。そういうような変わり方をする。だから基本的に我々は、物差しによるが、自分の腸内細菌は一生変わらない。それは下痢をしたとか、そういうのでは変わるが、基本的に一定の、自分のでき上がった腸内細菌叢で一生を送っているという、そんな認識に今なっている。

Q: 例えば、1年アメリカに住んで洋食ばかり食べたら、どのくらい変わるのか。

A: おそらく普通に戻る。アメリカ在住中は変わっているかもしれないが、例えば肉食を食べるとクロストロジウムが増える。あと普通の食事になると、変わっても、その変わり方が他人に近いほど変わるわけではなく、自分に最も近いような変わり方をする。

Q: 生まれた赤ん坊の最初の細菌叢というのはどこから引き継ぐのか。

A: 離乳前の赤ちゃんはいろんなものに暴露される。大人どころではない。ところが離乳を始めると、そこに入っている炭水化物や多糖類によって、いわゆる大人タイプという、それに間違いなく変わっていく。

これは全く違う話だが、パンダとか、ゴリラとかオランウータンとかの腸内細菌を解析しているときに、オランウータンはオランウータンの腸内細菌ができる。ヒトはヒト。そのくらい差があり、クラスターができる。マウスにはマウスのクラスターができる。これをやっていたら、30頭ほどのオランウータンの中に1頭だけがヒトのクラスターの中に入った。ヒトと同じような菌叢を持っているオランウータンに驚いて動物園に問い合わせの電話をしたところ、そのオランウータンは実は育児放棄を受けて、生まれたときから人間が育てていた。

やっぱりこういう腸内細菌とか身につくものは、周りの環境の中で、常在菌として選ばれたものが最終的に身につくと分かった。今、日本で1頭、またもう1頭、同じような状況で、それもやはりヒトのクラスターの中に入った。それがそのままずっと変わらずに続いている。彼らはリンゴなどしか食べない。ヒトのようなものは食べないが、腸内細菌はヒトに保護されたときについて、基本的にヒトのような菌叢ができている。ひょっとしたらそういうやり方で我々は代々菌叢を受け継いで形成しているのかと考える。

Q: ということは、子どもも、小さいときにでき上がったものでずっと束縛されているのか。

A: その通りである。離乳前までは適当だが、離乳のときに大体できて、その後は自分の細菌叢となる。

Q: 後で幾ら努力しても、もうだめか。

A: しかし、炎症性腸疾患 (IBD) 等は腸内細菌叢の改善のため、総替えを考えている。

要するに、抗生物質でとにかく減らして、我々が健康細菌叢を組み合わせ、それを飲んでもらって、そうすると強制的に入れ替えはできるのではないかと考えている。

Q: ヒトのうんちを飲むという感じか。

A: そういう感じである。形成された細菌叢にプロバイオティクスを飲んでも細菌叢を有意に変化させるほどの効果はないというデータもある。要するに、我々の腸内細菌はロバストで、毎日1年間市販のプロバイオティクスを飲んでも、変わるものではないとか、そういうデータも実は出ている。

Q: では、インドでプロバイオティクスを売っても、日本人みたいにはならないということか。

A: おそらくならない。日本人も別に、プロバイオティクスを飲んでいるからその腸内細菌叢が何か良くなっているわけではない。なぜなら、プロバイオティクスに含まれるラクトバチルス何々という菌は誰も持っていない。プロバイオティクスに使われている菌株の多くはそもそもヒト由来ではない。

2-4. 総合討論

事務局：これまでの議論を踏まえ、今後国費として研究投資が急がれると思われる課題について検討したい。本会のアウトプットはあくまでも研究開発戦略の立案である。このため、重要な課題であっても研究開発の要素が少ない課題は議論を後回しにしたいと思う。これまでの議論では、食の安全性とブランド化に関しては、科学技術的な課題は少ないという印象を受けた。識者からの意見を伺いたい。

有識者：本会が研究戦略の立案であることは理解しているが、それらの要素が薄いために提案を行わないというのは納得できない。科学技術の要素が少なく、この場での優先順位は低くなっても、食品の安全性は国が取り組む重要な課題である。これは国民のニーズだけでなく、レギュラトリーサイエンスの観点でも重要な課題である。そういった枠組みでの取り組みを含め、他の課題と等価で議論頂きたい。

有識者：レギュラトリーサイエンスは、平成23年度から科研費Sの食品安全性のテーマでファンディングが実施されている。

有識者：一方、我が国では単一物質に対する規制というのはかなり進んでいるが、食事によるがんのリスクのように複合的な健康リスクに対する規制というのほとんどできていない。第4期科学技術基本計画の中にも薬学の文脈でレギュラトリーサイエンスが取り上げられており、今後注目が集まると思う。食品の安全・安心については、レギュラトリーサイエンスの中で扱っていくべきである。

事務局：科学的な要素が少ないから重要ではないと言っているのではない。研究開発の戦略を目的に議論を行う上で、その要素が少ないと戦略を検討しようがないと申し上げたまでだ。科学技術の要素が少ない課題であっても、国として取り組む必要性については、報告書の中では取り上げる。

さて、では、今日議論された社会的な課題から、再度整理、議論をしていきたい。

- ①人口減少時代における国土利用のあり方
- ②食料の安定供給戦略
- ③資源効率の高い国づくり（資源の流れの循環閉鎖システム化）

識者からの発表にもあったが、社会的課題は単一分野や単一省庁で対応できる課題ではない。今日の議論であった国土利用について、具体的にどのような枠組みで検討していけばよいか？

有識者：土木分野では、計画系、水系、地理系、それから生態系の科学者の参加が必要である。また、文系はある程度話が進んでからでもよいが、全体のシステム論や合意形成手法の開発などでは必要になるだろう。国土形成に関しては、現在はほとんど検討が行われていない。そのため、上記のような分野をベースにしつつ、少人数のコアメンバーから議論を始めるのかよい。時間をかけた議論になると予想されるが、震災後の復興問題などを考えると、検討を始めるいい機会と考える。

事務局：我が国の国土全体を今後どのように整備し、活用していくのか。その大綱を科学者が提言として政治や行政に訴求すべきでないか。

有識者：これまでも単発のシンポジウムは開催されている。しかし、施策への反映を踏まえたプラクティカルな議論はほとんどない。こういったテーマは、唐突に助成を行うと、

まとまりのないプロジェクトになり、成果が社会に活かされない。最初に概念構築を行い、参画分野を検討する。そして並行して施策への反映方策を考えるべきである。

事務局：食料安定供給はどのような方策が考えられるか？

有識者：例えば地球規模の食料生産量の推計やリスク評価は、環境科学、栽培学、気象学、リスク科学、それから栄養学、医学などの知見が必要である。また、備蓄に関しては、国際関係論、食品の流通・保管技術など食料に関する実態をよく把握している経済学者に参加をお願いすべきである。食料生産システムの抜本的再編の問題は、なかなか厄介な問題であり、プランの作成にあたっては、例えば金融論、不動産学の専門家、要するに農地の集積方法の実際を熟している専門家が政策提言では必要である。ただ、実際に実行可能な政策へ落とし込むことまで考慮すると政治学、社会学などの専門家の参画が望ましい。

認識が必要だと思うのは、農業の構造改革を提言としてまとめた事例は世界的にもないということである。その理由は、農業の構造問題はシビアであり、日本、韓国、中国のような生産力の高い国では、抜本的な転換まで含めての検討は難しい。まず、ある程度限られた形で十分検討した上で、かつ実行するときは、政治的に受け入れられる可能性があるものを織り込んだパッケージにする必要がある。前のセッションで、この分野に必要な課題を挙げたので、それぞれ個別に検討して欲しい。

有識者：このテーマは生態系の保全や持続に深くかかわっている。それは、世界の森林減少の主たる要因が農地転換であることから容易に類推できるだろう。特にバイオ燃料がビジネスとして浸透しはじめてからブラジルなどでは猛烈な勢いで森林が減っている。ブラジル政府は鋭意歯止めをかけていて、それが功を奏している面もあるが、今後、どういう形でどの国で食料生産が進み農地開発が進むかというのは、森林減少を予測する上でも非常に重要である。単に安定的に食料を供給するというだけでなく、日本の国際的なカーボンや生物多様性保全への貢献という点で、環境に負荷をかけない形での食料の確保という点がもう1つ重要なテーマになる。

また一方で、例えばアメリカから、あるいはオーストラリアから、水が少ないところで地下水を大量に汲み上げて牛肉を作り、それを莫大な炭酸ガスを放出して冷やし日本に運んで食べているという実態がある。食肉として水も窒素もリンも大量に輸入しているのが日本の現状だ。そういう海外に対するフットプリント管理をいかにやっていくかということも農地転換とセットに考えるべきである。いきなり一緒にすると話は噛み合わないが、食料輸入を通じての海外への環境負荷をどうやって管理していくか、というフットプリンティングプロジェクトとうまく繋いでいく必要がある。

事務局：食料安定供給の国家戦略は、農水省で具体的な方策が検討されていないのか？

有識者：これは1省庁の政策立案だけでは無理がある。食料の自給率をどうするかというのは、今の基本計画自体も政権として出している。自民党政権時代は45%、民主党政権になって50%、また2年後には改定する。しかし、こういった議論は多様な要素が含まれるため、1つの省庁で対応できるものではない。

有識者：今日議論した3つの社会的課題は、それぞれ対応する省庁はあるが、対策を実施する段となると、とても1つの省庁ではできない。例えば資源効率を高くしようとする、ステークホルダーが日本中にいる。それを経産省なら経産省だけで動かせるかといったら、そんなことは絶対ない。例えばリンであれば、使うのは農水省で、回収するのは経産省と国交省、輸入しているのはまた別の省庁である。このように大きな問題は、単独の省庁で

解決できないから残っている。

事務局：次に産業のニーズに話を移したい。

- ①生物多様性の評価指標－企業にとって使い易い生態系評価指標とは
- ②食の安全・安心評価システム
- ③食品（輸出米・輸出果実・畜産加工品）ブランド化戦略
- ④バイオ医薬品の製造技術基盤
- ⑤リンの工業利用における重要性和安定供給戦略

本日明らかになった生物多様性に関する産業ニーズ（生物多様性の定量指標）は、未だ科学者側からの解決策の提示がないと認識している。生物多様性の概念浸透や制度の導入は今後、科学者や企業関係者のみならず、地域住民や行政担当者を巻き込んだ議論が必要だと思う。

また、バイオ医薬については、国としての関わり方をもう少し考えるべきであろう。技術や人材の不足はあらゆる産業セクターで共通の課題であり、特定の産業を支援するには相応の理由が必要である。

リンのリサイクルについては、一企業のニーズとしてではなく、国が取り組む課題として異論はない。一方で、国が取り組む具体的な研究開発は、社会的課題でも提案のあったリンのリサイクルの俯瞰に基づいて検討されるべきである。つまりリンの全体の循環の中での本質的なボトルネックの探索が必要で、それなしにリサイクル技術へ投資するのは、意味をなさない。

事務局：最後に科学技術的課題について検討したい。

- ①生態系・生物多様性の保全や利用に関わる「科学技術的課題」としての「植物の化学的側面と生態系機能」
- ②遺伝子－生態系機能統合研究
- ③ NBT プラットフォーム
- ④持続農業基盤：根圏域生態系のモデル化研究（植物相互作用、物質循環、下水、農業用水再利用）
- ⑤複合酵素系の活用による次世代バイオプロセス基盤
- ⑥沿岸域生態系（土壌、森林を含む）の統合解明
- ⑦微生物予報

科学技術的課題の①から③は、内容が類似している。すなわち、生物機能と環境との相関を統合モデルとして解析する研究である。これは、セッションの中でも議論されたが、理想は巨大なドームに人工生態系を構築することでいくつかは解決できる。しかし、そのような施設を構築する余裕は今の国にはないだろう。やはり、少し小さなスケールを個別に構築し、それらの結果を最終的には統合するアプローチが現実的である。

③はこういったモデル研究の中核技術に位置づけられるが、この技術を活用して育種研究を行う場合は新たな法整備が必要である。これについては、日本の場合、海外での取り決めに準拠する消極的な姿勢が見られるが、こういった革新的な技術については国が積極的に活用を促す方策を検討してもよい。

⑤、⑥、⑦のうち⑦のマイクロバイオームは、自然環境の中の動態だけでなく、ライフサイエンス、特に医療の分野で注目が高まっている。この会と並行して開催されているライフサイエンス・テクノロジー分野でも議論をしているため、それぞれの出口を想定した

包括的な戦略を検討したい。

⑥はレギュラトリーサイエンスの中で議論できると考えている。レギュラトリーサイエンスは対象が広範にわたるため、今後対象の絞込みが必要だが、現在進行中の科研費 S を分析しながら考えたい。ちなみに議論にもあったが、食品研究の一部もこの枠組みに入ると思う。

最後に⑤は非常に重要なテーマであるが、研究者層が十分確保できないのではないかと懸念がある。エネルギーの視点を物質生産に入れる試みは、海外では潮流が生まれつつあり、その萌芽を感じるが、日本ではほとんど取り組まれていない。しかも、技術開発では物理化学的な複数の障壁を超える必要があり、異分野融合が求められる。この点についてはどう考えるか？

有識者：問題意識をともにする人たちが集まり、議論をはじめている。もう 2 年か 3 年が経過しただろうか。このテーマでは、日本バイオインダストリー協会（JBA）や生物工学会からもバックアップを受けている。e-Bio である。これが核となり中核的な研究者が 7 人程度いる。また、ものづくり企業、電気会社、エネルギー会社からの参画もあり、年間 2 回ぐらいのシンポジウムを開催しながら検討している。非常に難しい問題であったが、アメリカから実例が出てきたことにも刺激されて、この方向性でここをしっかりとやるという共通認識が見えてきたところだ。したがって研究集団、産業的な背景はあると思っている。

以上

第3章 考察

本ワークショップではバイオテクノロジー関連技術が寄与する課題について「社会」、「産業」、「科学技術」の3つの側面から検討を行った。全体を通して言えることは、検討した15の課題はいずれも複雑な問題を内包し、科学技術で解決できる課題は少ないということである。とりわけ、社会的な課題は、目標設定はおろかアプローチの方法すら見出すことは困難である。このような課題に対して我が国は今度どのような対応を行っていくべきであろうか。課題ごとに考察してみたい。

1. 社会的課題

我が国は、今後急速に高齢社会を迎え、同時に本格的な人口減少時代へと突入する。この人口構造の変化は、食糧、エネルギー、環境、社会保障などあらゆる分野にひずみを来し、日本社会の持続性への影響も懸念される。しかもそれらは相互に関係しており、1つの解が他の新たな課題を生む構造となっている。わが国は今後これまでに経験したことの無い困難に直面することが予測される。

このような状況にあって、まず認識すべきことは、こういった多様かつ複雑な問題は科学技術の寄与が極めて少ないということである。とりわけ、食料やエネルギーの問題は人間の行動様式や供給体制等で改善される場合が多い。このため、新たな法律の制定や規制緩和など社会構造の変化を促す対応が肝要である。ただ一方で、科学技術の関与なしにはほとんどの問題が解決しえないのも事実である。特に需給予測や制度導入後の社会変化については、エビデンスに基づいた科学的な予測がこれまで以上に求められるだろう。

では具体的にどのような取り組みが必要だろうか。まず着手すべきは「あるべき姿」の創造である。たとえば、30年後の望ましい社会とはどのような社会か。都市が高齢化し、人口が減少する社会では人と自然とはどのように共存するのか。エネルギー供給、水インフラ、災害に強い土地をどのように設計するのか。居住地やレクリエーションなどのスペースのあり方はどう考えるべきか。それぞれの具体像を「あるべき姿」として創造する必要がある。

次に「そのあるべき姿」とこのまま放置した場合とのギャップの分析が必要である。上記事例で示した人口減少時代の都市像はこのまま何もしなければ理想の姿とは乖離していく。そのため、放置によりどのような社会が到来するのか、その予測を行う必要がある。そして、その社会とあるべき社会とのギャップを分析し、その差分を政策課題とする。こういった課題の定量分析に基づき、その対策を科学技術や制度で埋めていくことが求められる。

このようなあるべき姿の創造や放置した場合の社会像は簡単には創造できない。あるべき姿の統一的な考えはなく、放置した場合の社会像の予測も不確実性をともなう。しかし、これまでに蓄積された情報を分析することで、ある程度の予測は可能である。そしてこの予測そのものが研究対象となるだろう。

2. 経済ニーズ

環境や食料の分野は今後の成長産業としての期待が大きい。しかし、その産業をビジネスチャンスとして捉え、新たな市場を形成しシェアを獲得していくことは容易ではない。ここには企業の自助努力と国の相応のコミットメントのそれぞれが必要である。

本ワークショップで国の関与が必要と思われた課題は、リンの循環と食料の安定供給である。リンは国内の自給が困難でそのほとんどを海外に依存し、多くが化学肥料として農地へ供給されている。つまりリンは作物の増産には欠かせない資源といえる。したがって国内にリンが供給されない事態が起こると、我が国の農業は成立しない。

また、リンの需給とも関係するが、食料の安定確保も国の役割である。ワークショップでは増産、備蓄、外交の3つの要素と、それらの具体的な取り組みについて言及があった。しかし、今回のワークショップではこのようなマネジメントシステムが十分に機能していないことが明らかとなった。食料の供給は農林水産省だけの課題ではなく、農地の転用、国土の形成、外交、そして生産技術など、生産体系と流通、消費を日本のみならず世界全体で考える必要がある。

では、具体的にはどのような対応が考えられるだろうか。まずリンなどの重要な資源については、その循環の全体像を正確に把握する必要がある。そして、この全体像の把握から、隘路を明らかにし、その対応策を検討する。地道な作業だが、こういったデータに基づいた物質循環の可視化は重要である。

食料については、輸入品のすべてについて分析を行い、今後の需給予測をできるだけ正確に行うことが重要である。その上で、輸入品の国内での自給限界、代替産物の可能性、そしてそのコストの算出を行う。コストや供給の面で対応が困難な場合は、食生活の変化や改善のための方策の検討も必要である。

以上のように、国として肝要な資源や食料の供給は、最悪の事態を想定し、多様なアプローチによるリスクヘッジを行う必要がある。今後はそれらのポートフォリオを具体的に形成し、国の供給マネジメントを継続して行うことが求められる。

3. 科学技術的課題

科学技術分野の研究のトレンドは情報解析である。つまり、観察や分析から得られた大規模情報（ビッグデータ）をいかに活用するかが新たな潮流形成の鍵を握る。

本ワークショップが対象とした、食料生産、物質・エネルギー生産、環境保全のすべての分野では、関連する情報が蓄積され、統合されつつある。食料生産の分野では、植物や作物の遺伝情報の解読が進み、それらの機能が次々と明らかになっている。また、生育環境の物理化学的な知見の蓄積も進み、特定の環境下での作物の生育状況が解析できる状況にある。環境保全の分野でも同様に関連情報の収集・蓄積が進んでいる。例えば、生物多様性に関する生物学的な知見を把握する拠点が整備され、それらが統合されつつある。また生物多様性から人々が享受する社会的価値の定量化の取り組みも行われている。

このような膨大な生物情報を解析する情報を活用したビッグデータ研究は、ゲノムシーケンサーの高度化や計算機の処理速度の高速化などで今後もますます活発になるだろう。

このような状況にあって我が国の課題を考えると主に3つの点が挙げられる。

まず、第一にデータを創出する計測技術の開発に課題がある。データ駆動型の成果はそのデータの質に依存するが、生物の形態や機能の正確な計測は容易ではない。日本はこういった先端的な計測技術の開発を積極的に実施すべきである。

次にデータを処理したり解析したりする情報科学者の不足が挙げられる。これは当該分野だけの課題ではないが、特に生物情報を解析する数学者や統計学者の絶対人数が不足している。

3つめが異分野融合の問題である。多様な情報解析に基づく新たな知の創出では、それぞれの知の価値を共有し、新たな科学の価値を発見する必要がある。例えば、物質・エネルギー生産の研究では、環境科学、生物化学、生物工学、そしてシステム工学などの融合で、イノベーションのシーズが創出されている。しかし、我が国ではこのような推進体制が構築され、成果を挙げた事例は少ない。

以上、3つの研究フェーズの課題について考察したが、今後は、このような課題の政策上の位置付けや取り組む優先順位を検討する必要がある。また、課題に対する具体的な対応策（研究戦略）の検討も求められるだろう。特に社会的課題は、喫緊の対応が求められるものが多く、研究開発だけでは解決しないことは述べたとおりである。政策立案者や地域住民などを巻き込んだ包括的な取り組みの検討や実施を考える時期にあると言える。

第4章 おわりに

本ワークショップでは、グリーン・テクノロジー分野の俯瞰的な検討を踏まえ、社会の抱える課題解決につながる研究開発戦略を抽出することができた。本ワークショップおよびそれに先立って実施した分科会で行われた議論の結果については、具体的な研究課題の検討、期待される研究成果、国際競争力等の分析を加えた上で更なる検討を行う。またそれらをより実効性の高い研究開発戦略の提案につなげ、関連府省へ発信していく予定である。

付録1 分科会開催報告

◆食料・バイオマス生産分科会

○開催趣旨

政府が掲げるグリーンイノベーションに関する政策課題に対する研究戦略の検討を産学の有識者の参加により行う。本分科会では、特に食料の生産と安定供給に関する研究開発、またそれらの制度設計にする研究戦略にフォーカスを当てる。具体的な検討事項は「科学技術」と「社会および経済」の当該分野での課題とし、植物学および農学の科学者および種苗、穀物、農業インフラに関する有識者に参加頂く。検討方法は、JST-CRDS が実施した政策および研究開発の動向調査および有識者アンケートに基づく議論とする。結果は2013年1月に開催する俯瞰WSで報告し、グリーン・テクノロジー分野全体の中での当該分野の位置づけと他の施策との関係を整理し、包括的な研究戦略を検討する。

○「科学技術的課題」に関する検討の概要

●作物増産技術

作物増産の技術的側面では、多様な遺伝子組換え技術の開発が特筆される。これらは近年、NBTという言葉で整理され、欧米のみならずアジア諸国でも戦略的な取り組みが実施されている。NBTの特徴は、高い組換え効率が挙げられるが、組換えに用いた外来遺伝子の消失特性（組換えに用いたウイルス等の遺伝子の痕跡が残らない）も注目されている。中長期的には多様な野生種を活用した有用遺伝子の探索と併せて、国としての包括的な研究基盤の整備が求められるだろう。

また、QTLを中核とした分子育種技術のさらなる進展も期待されている。特にこの分野では次世代ゲノムシーケンサーの登場により雑種強勢のシミュレーションが可能となっている。このような植物や作物のビッグデータからの知識獲得技術は新品種作出と標準化に向けた国の農業戦略上極めて重要と考えられる。

わが国の課題としては、上記のような次世代作物研究の基盤整備の展望が見えないことと作出した作物を圃場で展開する育種家・栽培家の不足が挙げられる。とりわけ育種家や栽培家の高齢化と後継者不足は深刻である。作物の育種研究は環境と遺伝子によって形成される表現型評価が基本であり、圃場での経験が新規作物開発の鍵を握る。国としてそのような人材をいかに確保し、また育成していくかの対応が求められる。

また、上にも関係するが、我が国の作物研究の基礎と応用の断絶も課題となっている。これまで当該分野では、「育種目標」と「技術目標」の双方のベクトルが異なる方向を向いていた。これは大学および農林水産省などの研究機関内でも同様の問題を抱えており、学科の編成や機関の再編などの構造改革と並行して検討すべき重要な課題である。

●持続農業

農業の持続性は、増え続ける世界の人口を支えるという観点から極めて重要な課題である。とりわけ収量のみを追求し、化学肥料を大量に消費してきた農地へは喫緊の対策が求められる。このまま土壌の劣化が進むと、継続的な農業生産が維持できず、これが

飢餓や国際取引などの多様な問題を生むからである。

具体的な対応策としては、土壌の科学的評価が挙げられる。現在、多くの農家では経験と勘によって土壌の状態を把握し、播種や散水、肥料の散布等を行っている。そこに科学的な根拠はない。今後持続的な農業を実践していくためには、土壌の状態を正確に把握し、経験だけに依存しない緻密な農業を進める必要がある。とりわけ、わが国のように農業従事者の高齢化が進む国においては、後継者への知識や技術の伝承という観点からも科学的な情報の蓄積は重要である。

土壌評価の課題としてはまず土壌が可視化出来ないことがある。土壌は土、水、空気の基盤に、様々な化学物質や物理的要因が働き複雑な機能を発揮する。ここに微生物や植物が入り込むことで、多様な機能を持つ生態系となる。科学として取り組む課題には、まずこのような土壌環境を間接的に可視化するモデルの構築がある。生物、物理、そして化学的な情報を統合し、複雑な生態系をモデル化することで土壌の理解が進む。

また、農業生産における作物側の改変技術も重要な課題である。特に植物の機能を高め、化学肥料の低減を可能とする栽培技術の確立が急がれる。具体的には植物の窒素固定能を高めたり、リンの利用効率を改善するような植物の開発が求められる。特にリンは供給されたリンの90%以上が土壌に流出しているとの報告がある。今後のリンの供給や環境汚染等を踏まえると早急な対応が必要である。

●機能性作物

機能性作物は遺伝子組換え技術などによって新たな機能が付与された作物である。近年、ダイズ等を中心に農薬との併用による高生産性組換え大豆が市場を席巻している。このような組換え作物は米国を中心に生産が拡大しており、今後は欧州などでも浸透すると考えられる。

一方、我が国は、技術の有用性は認識されてはいるものの、社会の理解が進まないために、この技術を活用した商品開発は行われていない。それどころか組換えの研究を実施することによる企業イメージの低下の恐れなどから、研究開発の積極展開すら自重する傾向にある。

そのような中、近年の特筆すべき成果としては、農林水産省の関連法人で実施された、花粉症緩和米の開発がある。これは、コメの中にワクチン様物質を導入し、普段の食事を通じて免疫機能の調整を行う食品である。現在、国内の企業と連携して臨床試験を実施する段階にあるが、薬事法等の国の基準への適合が課題となり、上市への見通しは立っていない。

以上のような動向を踏まえると、今後の研究開発のポイントは2点あると考えられる。1点目は、上に述べた技術の国民の理解を深める取り組みをこれまで以上に行うことである。NBT技術の進展により、組換え技術の考え方は今後大きく変わることが予想される。このような技術パラダイムが転換する時期に、国はそれらの技術の明確な対応方針を提示するとともに、科学的に安全性が担保された作物については、国民の理解を促すような積極的な取り組みを行う必要がある。

また、2点目としてはそのような組換え技術を使った機能性作物研究の具体的な目標設定が挙げられる。これまでの機能性作物の研究開発の多くは、成果の効果や社会への還元を明確にした説明がほとんどなされてこなかった。国民にとって真に有用な作物(医

薬品との差異など) についての定量的な育種目標を設定し、具体的な生産地域などを含めた包括的な研究戦略の提案が求められる。

○「社会および産業の期待」に関する検討の概要

●食料の安定供給に対する短期的な対応

食の安全保障の手段には穀物等の生産力の向上、備蓄技術および備蓄基盤の構築、そして食料の輸入に関する制度設計の3つの戦略が必要である。このポートフォリオを国としていかに形成し将来にわたりいかにマネジメントするかが基本戦略となる。

近年、穀物市場では主要作物の価格の高騰が続いている。これは2000年前後からの供給不足が影響しているといわれており、この背景には中国等の新興国の需要の増大とバイオエタノールの世界的な増産が考えられる。具体的な価格を見ると価格が3倍以上に高騰したものもあり、これにより餓死などの国際問題に発展した国もある。

このような動向を踏まえ我が国が取り組むべき課題は、作物の国内での生産性の向上と食の多様化の推進が挙げられる。生産性の向上については、輸入超過となっている主要穀物の単収を上げる育種技術の開発が必要である。この際、機能性作物の項にも挙げたように生産地や収量などの目標設定を行い、関連する技術者を結集させることによる包括的な実施体制の整備が肝要である。

食の多様化はリスクヘッジのための一つの方策といえる。現在日本はトウモロコシ、ダイズ、小麦などの主要穀物の多くを海外に依存している。食の多様化を進めることは、これらの海外依存度を低減させることに他ならない。この際、米に代表される自給率の高い食品への回帰も有効な方策の一つとなろう。

●同中長期的な対応

化学肥料の普及により1950年から穀物の生産性は飛躍的に向上している。一方、発展途上国を中心とした人口の増加により世界の食糧供給は未だ世界的な課題となっている。食糧の需給予測には、単収(単位面積あたりの生産性)、農地面積、人口動態の3つの要素分析が求められる。この観点で中長期的な需給予測を行うと、今後の食糧の大幅な枯渇は考えにくいと思われる。すなわち、組換え作物等の技術の向上により単収のこれまで以上の向上が期待される。また、農地面積についても、ロシア、アメリカ、カナダ、南米で相応の農地が確保可能と考えられる。人口については、アフリカ諸国は今後も増加するだろう。しかし、アフリカ以外のその他の国々の人口は減少していく。

従って、わが国は短期的には安定供給への対策を行い、中長期的には、食糧の輸出などにも目を向ける必要がある。食糧の安定的な供給が達成された世界では、付加価値の高い食品が市場の獲得に大きく寄与する。このため、畜産加工品や果物などの高級食材が輸出のターゲットになると思われる。北欧の例をあげると、例えばデンマークなどはチーズなどの乳製品をブランド化することで外貨獲得に成功している。また、我が国でもりんごの「富士」が新興国での売り上げを飛躍的に伸ばしている。このように加工食品や果実の品質向上やブランド化は、輸出の促進に寄与することが期待され、市場の獲得に繋がると考えられる。

○プログラム

開催日時：2012年10月22日（月）13：00 ～ 18：00

13:00-13:15 CRDS 挨拶および趣旨説明

主催者挨拶 浅島 誠（CRDS 上席フェロー）

監修者挨拶 佐々木卓治（CRDS 特任フェロー）

趣旨 川口 哲（CRDS フェロー）

13:15-14:45 セッション1

技術俯瞰から見た重要研究領域

俯瞰対象領域；

1. 「作物増産」
2. 「持続農業」
3. 「機能性作物」

15:00-18:00 セッション2

社会（経済）シナリオを踏まえた研究戦略

1. 食料安全保障戦略
2. 食料輸出戦略
3. 産業育成戦略
4. 将来の国土利用と農業のあり方

18：00 閉会挨拶

佐々木卓治（CRDS 特任フェロー）

浅島 誠（CRDS 上席フェロー）

○参加有識者（敬称略）

氏名	所属
佐々木 卓治	東京農業大学総合研究所、特任フェロー
江面 浩	筑波大学生命環境系
西谷 和彦	東北大学大学院生命科学研究科
福田 裕穂	東京大学大学院理学系研究科
藤原 徹	東京大学大学院農学生命科学研究科
山根 精一郎	日本モンサント株式会社
加々美 勉	株式会社サカタのタネ
大屋 滋	住友化学株式会社アグロ事業部開発
川島 博之	東京大学大学院農学生命科学研究科
柴田 明夫	資源・食糧問題研究所

◆物質・エネルギー生産分科会 開催報告

○開催趣旨

政府が掲げるグリーンイノベーションに関する政策課題に対する研究戦略の検討を産学の有識者の参画により行う。本分科会では、特にバイオ化成品やバイオエネルギーの生産と安定供給に関する研究開発、またそれらの制度設計にする研究戦略にフォーカスを当てる。具体的な検討項目は「科学技術」と「社会および経済」のそれぞれの課題とし、応用微生物学、発酵生産およびバイオプロセスの研究者、農業経済、製薬企業、農薬産業の有識者に参加いただく。検討方法は、JST-CRDS が実施した政策および研究開発の動向調査および有識者アンケートに基づく議論とする。結果は2013年1月に開催する俯瞰WSで報告し、グリーン・テクノロジー分野全体の中での当該分野の位置づけと他の施策との関係を整理し、包括的な研究戦略を検討する。

○「科学技術的課題」に関する検討の概要

●バイオ燃料

バイオ燃料の研究開発の推進では、生産する燃料の社会への実装システムの検討が肝要である。研究の結果、構築された技術によって生産した燃料を、どの地域でどの程度の消費するのか。またそのための制度設計をいかに考えるか。このような検討がないままに研究を実施しても成果は社会へは還元されない。バイオ燃料は製造コストと輸送コストが主たるボトルネックであり、消費地やそこでの導入制度を踏まえた議論なしには市場への導入が難しい。しかしこれまでのわが国のバイオ燃料研究は、この観点がほとんど考慮されていなかった。

燃料生産において改良が必要な技術的課題は複数あるが、まず挙げられるのは、第2世代のバイオエタノール生産におけるセルラーゼの開発だろう。セルラーゼは酵素自体が高価なために、産業応用には適していない。これが、第2世代セルラーゼの普及の足かせとなっている。この酵素の比活性の向上や低コスト化のための生産技術の開発は今後も投資の対象となるだろう。

また、パームオイルからのBDFの生産については、廃棄物の収集や処理に課題がある。これはコストを考慮したトータルシステムの課題ともいえる。

メタン生産では、ガス化の技術に課題が残る。これも高効率かつコスト低減に関する技術開発が中心である。

藻類を活用した油脂生産もコストの問題が大きい。光エネルギーの利用効率のための菌種の探索や育種の技術向上が求められる。

以上のような技術開発により生産した再生可能エネルギーを将来にわたり定着させるためには、エネルギーの総合評価の視点が必要である。ここでは、既存のエネルギーを含めた多様なエネルギーのベストミックスの構築とその評価手法の開発が研究課題となる。

●化成品原料

バイオプロセスを活用した化成品原料に関する研究開発では、まずその実施意義を明確にすることが求められる。つまり、いま当該分野でどのような社会的課題があり、そ

これはバイオプロセスの技術で解決すべき課題であるのか。もしそうであるなら、その技術がどの程度寄与するのか。以上のような観点から、当該研究開発の課題解決の全体の中での位置づけを明確にする必要がある。本分野では、こういった観点がこれまで十分に議論されないままに研究開発投資が行われたきたという経緯がある。

一方で、環境政策という大きな括りの中で、政府は、2050年頃を目途に、化石資源の35～75%を再生可能資源へ転換することを掲げている。これは、大気中の二酸化炭素の削減目標が基本にあると考えられる。このような政策誘導等から、当該分野では、ポリ乳酸等のバイオプラスチックの開発が実用化され商業化されてきた。市場も現在、拡大基調にある。一方で、これらのプラスチックは、既存の樹脂に比し柔軟性等に関わる物性に課題がある。つまり、既存樹脂との置換が困難であり、使用用途も自ずと限定されている。従って、各モノマー原料の物性変換に関する研究を進める必要がある。

また、将来にわたりバイオマス原料を輸入に頼る場合、製品の経済的優位性を確保していくためには製造プロセスの徹底的な効率化と製品の高付加価値化を行っていく必要がある。そのためには、バイオマス由来の汎用化成品原料を石油化学原料から誘導される合成中間体と同等のものへと変換する技術の開発が必要である。また、そのような課題を国として実施する際には、他国の研究開発動向の注視が不可欠で、とりわけ大手化学会社の誘導体の合成に関する戦略的な取組みには注視する必要がある。こういった動向等から日本の強みと弱みを見極め、国として実施する課題を選定しなれば、投資が無駄に終わる可能性がある。

●医薬品・食品原料

生物機能を活用した医薬品・食品原料の生産に関する研究開発では、製造法をシステムとして捉え、全体の最適化と低コスト化のボトルネックを明らかにする必要がある。特にアミノ酸に代表される食品原料の製造は、新興国での生産が主流となり、トータルコストの低減が喫緊の課題となっている。そのような技術開発は本来、企業の中で実施される課題であるが、多様な遺伝子の機能改変をとまなう研究開発は、一企業で行うには限界があり、大学等の先端的な知見の活用が大きく寄与する。

また、機能分子の新たな価値の発見も重要である。これにより、新たな市場が生まれ当該産業が活性化する可能性があるからである。例えば、D-アミノ酸は、その生体内での機能は不明と考えられていたが、最近新たな機能が見出されつつある。L-グルタミン酸の機能がうま味成分として証明され、それが製品として半世紀以上にわたり日本の企業による市場を創成、先導してきた事例がある。このように未知の機能の解明による経済的なインパクトは計り知れない。

さらに、食のおいしさに関する研究開発の萌芽も見られる。「おいしさ」はこれまで、主観的なもので、その定量化は困難とされていた。しかし、近年、食品の付加価値化の重要な要素として企業等でも注目されている。現在、メタボロミクス的手法を用いて、安全性と併せた高品質な食品の評価が実施されている。

●資源・リサイクル

無機資源の安定供給で最も懸念されている元素はリンである。リン鉱石は世界的に枯渇する傾向にあり、2008年にはリン鉱石の価格がそれまでの8倍にまで高騰した。

Nature 誌や Science 誌もこの問題を取りあげ、世界各地でこの問題の解決策が検討されている。

例えば、国際的な取り組みとして、国際リン資源管理研究プロジェクト (Global TraPs) が始まっている。また、ドイツやスウェーデンでは、排水からのリンの回収を国の戦略目標に掲げている。一方、わが国は欧州等に比べるとその意識は希薄である。リンは農業や工業に欠かせない資源であり、日本はそのほとんどを海外に依存している。にもかかわらず社会全体がその重要性を認識するには至っていない。

リンの循環を考えた時、国内では利活用の視点が欠かせない。例えば農場で肥料として散布されるリンは土壌中で拡散し、一部は農業用水として排出される。また、鉄の製造工程でも多量のリンが副産物として生成される。そのようなリンを効率的に回収し、再利用するための技術開発が求められる。リンの回収法は、化学的に分離する方法や生物に取り込ませた後に精製する方法などがあるが、いずれもそのコストが課題である。そのため今後はコストの低減を目的とした技術開発が必要になると考えられる。

○「社会および産業の期待」に関する検討の概要

●バイオ医薬品

わが国の医薬品産業の課題の1つにバイオ医薬の枯渇の問題がある。特に世界の主要な企業が多様な抗体医薬を開発し、市場を席卷している中で、わが国のこの分野での存在感はないに等しい。これまで日本の製薬企業で開発された抗体医薬は2剤に過ぎない。

このような状況はここ10年以上続いており、これが、医薬品の輸入超過を招いたと考えられている。企業がこの分野での競争力を持たないと仮定すると、今後、当該産業の活性化や競争力の強化を政策課題として考える必要がある。

では、どのような対応が考えられるだろうか。製造技術に関する拠点の整備が対策として挙げられる。バイオ医薬品は、低分子の合成医薬品と異なり、その製造工程は複雑である。具体的には、細胞の構築、培養、精製、製剤化に至るまで多様なステップが存在し、それぞれで高度な技術が求められる。またそれらの技術はシステムとして統合する必要があるため、全体の最適化に関する工学的な課題もある。

わが国は、歴史的に発酵技術に強みを持ち、細胞培養や精製技術に長けた技術者が数多く存在している。一方、そのような技術を集積する基盤はなく、技術者の高齢化も著しい。個々の技術の先鋭化やシステム化、そして人材育成を目的とした拠点の整備はそれらの課題の解決に寄与し、当該分野の競争力の強化につながる可能性はある。

●発酵生産

世界的に発酵製品市場は拡大基調にあり、新興国を中心に今後も需要は拡大すると予測されている。資材としては、特に、アミノ酸と酵素の伸びが著しく、新興国の食の多様化とともに生産量は増加している。一方で、そのような状況に反して、国内での生産量は減少傾向にある。これは、生産コストの低下にともない、生産拠点を海外に移す企業が多くなっているからと考えられる。

このような状況下で、今後の当該産業の活性化を考慮すると、3つの戦略シナリオが考えられる。すなわちそれらは、発酵産物の基盤技術の強化、新しい製造方法の開発、

そして新たな有用化合物の創製である。

基盤技術の強化については、既存の大型発酵バルク製品の国際競争力の強化を急ぐ必要がある。これは、製造法が汎用化する中で、製造コストの低減や高効率化に資する発酵生産プロセスの高度化およびプロセスの最適化が求められているからである。

また、製造方法については、微生物の徹底利用が挙げられる。そのため、微生物の遺伝子機能の解明を進めるとともに、培養法の確立や最適化などを実践する必要がある。微生物の活用も一遺伝子の機能改変から多遺伝子の制御へと移行しつつあり、ここではインフォマティクスの活用が主流となっている。

新規有用物質の創製には2つのアプローチがある。1つ目は、従来の生産プロセスを発酵生産に置換する方法で、具体例としては、ポリ乳酸などの化成品素材の生産などが挙げられる。また、2つ目としては、代謝物の網羅的な解析から新規有用物質を同定する手法がある。メタボロミクスを活用した、代謝経路の解析とこれに基づく有用物質の探索がここでの主流である。

発酵産業は、わが国が世界を先導してきた分野であるが、近年は新興国の台頭により、その競争力は低下している。今後は上記のアプローチ等から新たな価値を提供し、これにより新市場を形成することが求められる。

○プログラム

開催日時：2012年10月17日（水）13：00 ～ 18：00

13:00-13:15 CRDS 挨拶および趣旨説明

主催者挨拶 浅島 誠（CRDS 上席フェロー）

監修者挨拶 大竹久夫（CRDS 特任フェロー）

趣旨 川口 哲（CRDS フェロー）

13:15-14:45 セッション1

技術俯瞰から見た重要研究領域

俯瞰対象領域；

1. 「バイオ燃料」
2. 「化成品原料」
3. 「医薬品・食品原料」
4. 「資源・リサイクル」

15:00-18:00 セッション2

社会（経済）的課題を踏まえた研究戦略

1. バイオ医薬品
2. 発酵生産
3. レアメタルの回収

18：00

閉会挨拶

大竹久夫（CRDS 特任フェロー）

浅島 誠（CRDS 上席フェロー）

○参加有識者（敬称略）

氏名	所属
大竹 久夫	大阪大学大学院工学研究科、特任フェロー
五十嵐 泰夫	東京大学生物生産工学研究センター 大学院農学生命科学研究科
片岡 道彦	大阪府立大学大学院生命環境科学研究科
小川 順	京都大学大学院農学研究科
黒田 章夫	広島大学大学院先端物質科学研究科
福崎 英一郎	大阪大学大学院工学研究科
大政 健史	徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
横山 伸也	鳥取環境大学環境学部環境学科
鎗目 雅	東京大学大学院新領域創成科学研究科
大屋 滋	住友化学株式会社アグロ事業部開発
川島 博之	東京大学大学院農学生命科学研究科
松崎 淳一	中外製薬株式会社

◆環境保全分科会

○開催趣旨

政府が掲げるグリーンイノベーションおよび生物多様性条約締結国会議の愛知目標の達成に向けて必要となる研究開発戦略の検討を産学の有識者の参画により行う。本分科会では、微生物生態・環境ゲノミクス、動物生態、植物生理・生態、生物多様性の4領域に関する研究開発と、その制度設計に関する研究戦略にフォーカスを当てる。具体的な検討事項は「科学技術」と「社会および経済」のそれぞれで設定した課題とし、生物、土地利用、災害対策、環境保全およびグリーン成長の動向に詳しい有識者に参加いただく。検討方法は、JST-CRDSが実施した政策および研究開発の動向調査および有識者アンケートに基づく議論とする。結果は2013年1月に開催する俯瞰WSで報告し、グリーン・テクノロジー分野全体の中での当該分野の位置づけと他の施策との関係を整理し、包括的な研究戦略を検討する。

○「科学技術的課題」に関する検討の概要

●微生物生態・環境ゲノミクス

ヒトの常在菌を含む環境微生物に関わる研究開発は、次世代シーケンサーの普及により、研究のパラダイムが大きく変わりつつある。当該分野では、とりわけ、腸内の菌叢のメタゲノム解析（菌を分離培養しないで、混合状態のまま遺伝子配列を解析する）が注目されており、国際的なプロジェクトの推進も見られる。それらには、2010年に始まったEarth Microbiome Project、NIHにより創設されたHuman Microbiome Projectなどがあり、現在も精力的にゲノム解読が進められている。

メタゲノム研究の課題は、その解析結果と機能との相関が十分に明らかになっていないことである。特にわが国では、ゲノム解読が先行し、それらを解析する体制が十分に整備されていない。データ間の相関解析では、それらの対応付けや相関解析など計算科学の手法が不可欠である。しかし、こういった人材もわが国では絶対的に不足している。

解読そのものの技術的な課題としては、サンプリングの手法が挙げられる。また、継続的なモニタリングの基盤がないなどの課題もある。

今後の研究開発の方向性としては、KEGGのような代謝関連データベースとの接合、および、それらの生物機能との相関解析が主流になると考えられる。特にヒトの腸内細菌のゲノム解析は、健康状態を把握する指標としてそのプロファイリング解析がこれまで以上に重要になると思われる。

我が国のメタゲノム解析の取り組みは早く、これまでに複数の先導的な成果を生み出してきた。しかし、近年は各国にキャッチアップされ、国際的に主導的とする研究も少ない。

環境中のメタゲノム解析は、ヒトの健康状態の把握だけでなく、生物の分布や多様性の把握、さらには環境評価指標の策定などへも有用情報を提供する。諸外国の動向を踏まえた国の戦略的な投資方策が必要であろう。

●動物生態

本領域では、野生動物の管理技術に主眼を置いた研究開発が活発である。特に、諸外国では GPS を利用したモニタリングや調査研究が効率よく進められている。このような動向等から、OIE（国際獣疫事務局）は、ヒトや家畜へのリスクが懸念されている野生動物のサーベイランスを構築している。

一方、水産資源の管理、再生については、生物多様性条約に基づいたプロジェクトが進められている。海洋の生物多様性は近年、調査・解明が精力的に進められ、定量的な分析が可能となりつつある。このような中、環境保全型の漁業研究も進行しており、栽培漁業が天然魚に与える遺伝的多様性の影響についての検討が行われている。

以上のような取組みにおける管理技術の課題としては、まず、それらの生息密度情報と植生への影響に関する基礎データの蓄積の不足が挙げられる。それらの情報に基づいた影響予測の確立なしに、課題に関する対応策の検討は困難である。

また、害獣等の防除については、日本は世界的に高い技術を有するが、多くが実践には繋がっていない。特に、野生動物管理においては、プロジェクトごとの細切れのデータの統合や、省庁の単年度予算の弊害があり、継続的データの蓄積も停滞している。さらに、野生動物モニタリング用の通信技術利用ツールについても、製品開発と運用に関する取り組みがなく、安定して利用できるマスコ製品が少ない。

以上を踏まえ、国が取り組むべき研究開発を考えると、今後も生態系管理や野生動物管理に対する継続的な投資が必要と思われる。特にデータを永続的に収集できる基盤と関連府省との情報共有、関連する技術の開発が求められる。

海洋については、その生物資源の持続利用の観点から、統合的海洋管理、とりわけ沿岸域管理のための海洋生態系サービスの予測・評価手法の開発が必要である。このような取り組みを継続して実施することで、資源量の適切な予測管理技術の確立が可能となると考えられる。

●植物生理・生態

生態管理や保全の分野では、温暖化による CO₂ の濃度上昇に適応した有用遺伝子の探索が行われている。これは、同定した遺伝子を活用して、温度上昇に耐えうる植物、すなわち環境適応型植物の作出が狙いとしてある。

また、CO₂ の濃度測定では、生態系の生産力の測定を目的にフラクスタワーが整備されている。現在、気象データと併せた生態系の生産力の環境依存度の解明が進みつつある。安定同位体測定に対する TDLAS（レーザー吸光分析）などの分光器の活用も可能となり、濃度計測と併せた研究開発が加速している。

一方、森林の管理手法においては、その指標の開発が求められている。これは森林の持続利用に有効な評価基準がないことが背景にある。そのため、森林生態系モデルと、それによる予測技術が活発になりつつある。

森林管理における国際動向としては REDD プロジェクトが特筆される。これは、開発途上国における森林の破壊や劣化を回避しながら地球全体の温室効果ガス（二酸化炭素）の排出を削減しようとする試みである。

このように近年、環境問題を経済システムを利用して解決する取組みが実践されつつある。こういった動きは TEEB などの報告書を契機として進展し、多様な生態系サー

ビスについても科学的根拠のある評価ツールを求めるような流れが生まれつつある。

土地利用に関しても、生態系の機能を維持するための様々な動きがある。例えば、開発する際にその土地の生態系と同等の自然環境を別の地域に構築する取り組みなどが実施されている。しかし、都市生態系においては、市街緑地整備技術は散見されるものの、生態系サービスを発揮する包括的な景観をデザイン技術はない。特にわが国はこれらの視点が希薄であり今後の対応が求められている。

●生物多様性

当該分野でも前項と同様に生態系サービスの社会・経済評価および指標の開発が求められている。特に観測ネットワークを大規模に整備し、生態系の状態把握とその機能を定量的に評価する試みが欧米を中心に実施されている。例えば、米国の NEON（米国生態系観察ネットワーク）は 20 の地域区分の生態系の変化を 30 年間にわたり観測するプロジェクトである（2011 年発足）。また、CoML（Census of Marine Life）は海洋を対象とした調査で、生息する生物の多様性の情報収集が精力的に行われている。これらのプロジェクトでは、市民などのボランティアが参加していることが特徴である。

当該分野では、生物多様性に関する情報の蓄積・統合が進みつつあるが、これらの膨大な情報の解析技術が課題として挙げられている。生態系・生物多様性は複雑で変化も大きい。そのため、生態系の正確な把握や機能の解析は困難となっている。特に種レベルでのインベントリ調査による多様性の解明に比べ、遺伝子レベル、生態系レベルでの解明に遅れが見られる。

一方、大規模なインベントリ調査については、調査地域の網羅性に関する指摘がある。この点については、調査費用の不足や自治体および住民等の協力を得られていないことが課題である。

以上を踏まえると、研究開発としては、短時間で効率的に広域情報を得る低コストなツール開発が求められる。種の同定や新種の登録には DNA バーコーディングが利用できることから、これらのツールの活用や改変は有用と考えられる。

また、生態系サービスの評価に関しては、特に、調節サービスや文化サービスが困難であり、今後の開発が急がれる。

わが国では、多くの生物調査データが集約されていない現状があり、これまで蓄積された情報の整理、統合にも取り組む必要がある。

○「社会および産業の期待」に関する検討の概要

●国土利用における生態系保全

日本は今後急速な人口減少社会に突入する。このような状況にあって考慮すべき重要な視点の 1 つに国土利用が挙げられる。人口の減少は自然の増加を誘発する。このため、今後の国土形成では、人と自然との共存の有り方を軸とした戦略的な整備が求められる。

わが国はこれまで、人口増加、経済成長を前提に国土の整備が行われてきた。特に都市部は戦後の急速な経済成長に対応するために、欧米の都市インフラを移植する形で整備が進められてきた。このため、現在の都市の多くは、自然災害に脆弱な構造となっており、自然との共生にも十分に対応しているとは言いがたい。今後の人口減少社会を見据えた場合、国土利用の将来計画を真剣に議論する時期にあるといえる。

しかし、土地利用の将来計画の策定は容易ではない。対象とする地域内で行政および学問分野が縦割りで存在しているからである。例えば、山間部から下流域までの国土利用を考えると、山間部は林野庁、農村部は農林水産省、河川は国土交通省といったように、それぞれで担当省庁や担当課が異なる。さらに、学問分野もそれにぶら下がる形で形成されている。そのため、土地利用の計画策定では、それらの関係者間の議論と調整が必要である。

以上のように、国土利用に関する計画策定は容易ではないが、人口減少社会の到来を踏まえると当該検討を早急に開始すべきと思われる。検討にあたっては、科学者が主体となって組織を構築し、利害関係者へも参画を呼びかけることが有効である。科学者は、対象地域における利害が少なく、公平かつ公正な評価を客観的なデータに基づきで論じることが可能である。また、利害調整や合意形成に長けた専門家も存在し、議論の集約や推進への寄与も期待されるからである。

●グリーン成長への期待と課題

2008年の金融破綻を受けたグリーン成長に関する経済危機対応が先進国で脚光を浴びた。本施策は、金融と租税の再構築、および再生可能エネルギー資源に対する積極的な財政出動により、公共事業の増加と新技術の創出による新市場の形成および雇用の創出を目的としたものである。

本施策は、経済対策として一定の効果があつたと考えられるが、これによりグリーン成長関連の投資は、環境問題と経済成長を同時に満足させる方策ではないことも明らかとなった。近年、この概念は、エネルギーや食料の問題ともに対立する概念として捉えられ、それらのバランスのとれた解が模索されている。

有効な方策としては、様々なモデルの活用がある。たとえば、食料やエネルギーの需給モデル、CO₂や生物資源の動態モデル、そしてGDPや市場動向を予測する経済モデルの活用などである。ポイントはそれらの予測から、あるべき社会を描写し、そこへの隘路を明らかにすることである。隘路があきらかになれば、それに対応した施策や研究開発の検討が可能となる。

このような取り組みはこれまでも各種施策立案で行われてきたが、それぞれの要素を総合し検討した事例は少ない。環境や経済の問題は、一国で完結するものではなく、諸外国の経済状態や環境問題の影響を受ける。つまり究極的には地球レベルでの統合モデルの構築とその活用が求められることになるだろう。

●企業における生物多様性への取り組み

企業では生産活動における環境への配慮をこれまで以上に考慮した事業活動を展開している。これは、持続可能な社会の構築へ貢献するとともに、このような姿勢を内外に示すことによる顧客への企業イメージの向上を狙いとしている。特に近年は、低炭素、省資源とならび生態系・生物多様性の保全などが企業の関心事項となっている。

収益に直結する活動としては、生態系等の計測・観測技術の開発が挙げられる。例えば、陸域の観測衛星、水観測衛星などの開発では、各種センサーや動力源となる電池、または衛星を軌道に乗せるためのシステムの開発などが電気・電子企業を中心に行われている。

一方、社会活動としては、市民参加による生態系・生物多様性保全に関する取組みがある。例えば、NECでは、「生物多様性貢献活動ガイドライン」の策定と展開を目的とした保全活動を実施し、2011年には8000人強の市民の参加があった。ここでは、河川や沿岸での清掃活動、また植物や動物などの生物調査などが行われている。

このように生態系や生物多様性の保全に対する企業の取組みが増加する一方で、その効果を高めるための指標の開発ニーズも増大している。例えば、それらの中には、生物多様性の継続的なデータ集計・管理・分析方法の確立、保全に対する定量評価、そして第三者からの活動評価、成果の認証制度の確立などが挙げられる。それらは保全活動が客観的に評価されることにより、企業の価値を高める効果があると考えられる。また、そのような客観的な指標は、企業の生産活動や活動計画の策定への寄与も期待されると考えられる。

○プログラム

開催日時：2012年10月3日（水）13:00～18:00

13:00-13:15 CRDS 挨拶および趣旨説明 13:00-13:15

挨拶 矢原 徹一（CRDS 特任フェロー）

趣旨 鈴木 響子（CRDS フェロー）

13:15-14:45 セッション1

技術俯瞰から見た重要研究領域

俯瞰対象領域；

1. 「微生物生態・環境ゲノミクス」
2. 「動物生態」
3. 「植物生理・生態」
4. 「生物多様性」

セッション2 15:00-18:00

社会的課題（期待）から見た重要研究領域

1. これからの国土と生態学への期待 島谷 幸宏（九州大学）
2. グリーン成長の基本課題－水・エネルギー・食料安全保障ネクサス－
生田 孝史（富士通総研）
3. NECグループにおける生物多様性への取り組み
稲垣 孝一（日本電気）

閉会挨拶 18:00

挨拶 矢原 徹一（CRDS 特任フェロー）

浅島 誠（CRDS 上席フェロー）

○参加有識者（敬称略）

氏名	所属
矢原 徹一	九州大学大学院理学研究院、CRDS 特任フェロー
服部 正平	東京大学大学院新領域創成科学研究科
高見 英人	海洋研究開発機構海洋・極限環境生物圏領域
松田 裕之	横浜国立大学環境情報研究院自然環境と情報部門
梶 光一	東京農工大学野生動物管理学研究室
寺島 一郎	東京大学大学院理学系研究科
伊藤 元己	東京大学大学院総合文化研究科
島谷 幸宏	九州大学大学院工学研究院
生田 孝史	富士通総研 経済研究所
稲垣 孝一	NEC CSR・環境推進本部

付録2 重要研究領域アンケート

◆重要研究領域調査協力者（敬称略）

2013年3月現在

氏名	所属
赤間 一仁	島根大学生物資源科学部
五十嵐 泰夫	東京大学大学院農学生命科学研究科
伊藤 元己	東京大学大学院総合文化研究科
江面 浩	筑波大学生命環境系
大政 健史	徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
小川 順	京都大学農学研究科応用生命科学専攻
梶 光一	東京農工大学野生動物管理学研究室
黒田 章夫	広島大学先端物質科学研究科 分子生命機能科学専攻
河内 孝之	京都大学大学院生命科学研究科
五箇 公一	国立環境研究所生物・生態系環境研究センター
高見 英人	海洋研究開発機構海洋・極限環境生物圏領域
寺島 一郎	東京大学大学院理学系研究科
東樹 宏和	京都大学大学院人間・環境学研究科 (4月より)
中崎 清彦	東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻
中静 透	東北大学大学院生命科学研究科
中園 幹生	名古屋大学大学院植物遺伝育種学研究分野
中野 伸一	京都大学生態学研究センター
中村 太士	北海道大学大学院農学研究院森林生態系管理学
奈良 一秀	東京大学大学院新領域創成科学研究科
西谷 和彦	東北大学大学院生命科学研究科
服部 正平	東京大学大学院新領域創成科学研究科
福崎 英一郎	大阪大学工学研究科生命先端工学専攻
福田 裕穂	東京大学大学院理学系研究科
松浦 啓一	国立科学博物館動物研究部
松岡 健	九州大学農学研究院生命機能科学部門
松田 裕之	横浜国立大学環境情報研究院自然環境と情報部門
山下 光雄	芝浦工業大学工学部
吉田 丈人	東京大学大学院総合文化研究科
和田 英太郎	京都大学名誉教授, JAMSTEC フェロー

付録3

◆提案された重要研究領域

- 提案1 太陽光エネルギーを高効率で有機エネルギーに変換する技術の開発
- 提案2 レアメタルバイオテクノロジー開発と実用化プロジェクト
- 提案3 再生可能資源への原料転換を可能とするバイオリピッドプラットフォームの構築
- 提案4 効率的窒素循環を実現する生物機能・化学変換技術の開発
- 提案5 有限かつ代替不可能なリン資源の持続的利用を可能とするためのクローズドループリサイクル技術に関する研究
- 提案6 安定的な食糧生産に資するリンの濃縮・回収のための複合微生物系制御技術の開発
- 提案7 サステナブル食糧生産技術開発領域
- 提案8 **New Plant Breeding Technology** による環境ストレス耐性作物の開発
- 提案9 フード・セキュリティ（食料安全保障）確立を目指した持続的食料生産利用技術
- 提案10 生物資源としての植物の高度利用と利用拡大に向けた代謝と進化の統合的理解
- 提案11 食品/生薬の機能・安全
- 提案12 予防医学に資する次世代型機能性食品の研究開発
- 提案13 有効成分蓄積機構の解明・ゲノム育種と新規制御栽培法の開発による主要生薬原料供給系の構築
- 提案14 バイオ医薬品生産におけるゲノムスケールデザイン技術の確立と実用化
- 提案15 生活史スケジュールとカタチの動的制御による植物生産のテーラーメイド最適化
- 提案16 国産新規植物バイオマス資源探索のための戦略的データベースシステム
- 提案17 常在菌叢メタゲノムの統合的理解
- 提案18 環境メタゲノミクスによる生態系の変動解析と環境影響評価
- 提案19 陸上生態系における微生物の生態、多様性、および機能
- 提案20 陸域・水域生態系のブラックボックスに挑むゲノム生態学
- 提案21 生物多様性と生態系機能を支える微生物機能の統合的解明
- 提案22 ゲノム情報を活用した生態系の構造と機能の解明
- 提案23 生態系管理・野生動物管理（ニホンジカ）・生物多様性保全
- 提案24 外来種管理システム構築
- 提案25 海洋保全・管理
- 提案26 森林保全・管理
- 提案27 統合的海洋管理・沿岸域管理のための海洋生態系サービスの予測・評価手法の開発
- 提案28 湖沼を用いた大規模地球環境変化観測網の構築
- 提案29 人口減少社会における国土保全と生物多様性
- 提案30 生物多様性（動物系統多様性・絶滅危惧種保全）
- 提案31 **Stable-Isotope** 自然存在比測定による生理生態学のはじめー 食物連鎖と生体内アミノ酸代謝系の C/N 同位体に関する研究

提案 1

1. 研究領域名称

太陽光エネルギーを高効率で有機エネルギーに変換する技術の開発

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

我が国、諸外国に、生物炭酸固定（明反応・暗反応）の研究、農産物の収量増加、微細藻類の効率的培養、さらには最近では生物によらない炭酸ガスの有機資源化、光エネルギーの有機物へのトラップなどの研究は多いが、このような太陽電池の開発では当たり前の、光エネルギー（太陽光エネルギー）の変換効率の面から論じられることは殆どなかった。従って、潜在的シーズは多いが、この問題に直接関わる過去の実験データは目立ったものはない。ただし、水素をエネルギー源とすれば、水素エネルギーの炭酸固定産物へのエネルギー変換率は40%には達することが知られている。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

現在、農業における太陽光のエネルギー収率（照射された光エネルギーが炭酸固定によって生じた有機化合物の化学エネルギーとして固定される割合）は1%を大きく下回ると考えられる。これは、太陽光発電などで議論されているエネルギー効率、20-30%を大きく下回る数字である。この炭酸固定のエネルギー効率を10%程度まで大きく引き上げることなしに、バイオマスをこれからの資源・エネルギー問題に貢献させようというのほぼ不可能である。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

どこから始めたらよいのか良くわからないが、過去の植物や藻類の炭酸固定をエネルギー効率の面から見直すことが最初。また非生物的炭酸固定の実験計画、理論構築をエネルギー効率の面から設計しなおすことが必要。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：恐らくこの技術の開発なしにはバイオマスが未来の資源・エネルギーの中心に戻ることはない。

研究シーズ：エネルギー作物や微愛藻類の栽培が話題になっている現在、太陽光のバイオマスへの変換効率の議論は必須となっている。

5. 参画が見込まれる研究者層

- (1) 植物光合成研究者
- (2) 農業の品種改良または栽培法の研究者
- (3) 微細藻類の研究者
- (4) 海洋生物学者
- (5) 人工光合成の研究者
- (6) 触媒研究者

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

- (1) 基本的に基盤研究なので、全て公的資金で調達することが前提。
- (2) できれば、光合成、藻類、人工光合成の触媒等の研究者を一箇所に集めることを考える。ただし、現在有力優秀の研究者を集めるならば、バーチャル研究所でも良い。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

今まで、あまり考えてこなかったことなので、これまでの研究の継続以上に何を始めたらよいか、殆ど解らないこと。最初はともかく若い人に勝手にやらせる集中研究と実績ある研究者間の交流（バーチャル研究所）の組み合わせか。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：

社会経済的効果：

ともかく、人口の急増した地球上で、食糧はともかく、資源・エネルギーを再びバイオマスに頼ろうというならこの方しかないのではと考える。

9. 備考

基本的にありませんが、JSTの微細藻類培養の関わる研究等で基礎データは取れつつあります。

どうやってエネルギー効率を上げるかについても、直接この問題を意識していなくてもアイデアは出始めていると思います。

植物工場のエネルギーデータや過去のアリゾナのBIOSPHERE IIなどのデータは、ネガティブな意味で参考になるのではと思います。

提案 2

1. 研究領域名称

レアメタルバイオテクノロジー開発と実用化プロジェクト

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

我が国では、国際競争力維持のために、先端産業に不可欠な希少金属（レアメタル）の安定供給を確保する必要がある。その方策の一つとして、省エネ・省資源に適しているリサイクルが推進されているが、回収インフラの整備や低濃度物質からの回収効率の向上、リサイクルコストの低減が課題である。

一般的に生物作用は専ら、有機物の分解や合成に関わるものと考えられがちであるが、無機物である金属類に対しても、多岐に渡る反応を触媒し、地球化学的な循環に大きく関与していることが明らかとなっている。このような生物と金属との代謝作用を利用するのが“メタルバイオテクノロジー”である。近年、我々の研究から、このメタルバイオテクノロジーによる排水や廃棄物からの金属除去・回収や有用金属の自然界からの濃縮や回収、その他金属類の変換・加工や新規材料開発などの生産プロセスにも応用可能な技術が生まれつつある。

本提案は、我が国の重点的課題を解決するためには必須となる「社会・産業への実装が見える革新的研究」である。

(参考文献：メタルバイオテクノロジーによる環境保全と資源回収～新元素戦略の新しいキーテクノロジー～シーエムシー出版)

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

レアメタルとは、①地球上の存在量が希である、②技術的、経済的な理由で抽出困難な金属で、現状の需要が高い、③今後の技術革新に伴い新たな需要が予想されるなどの希少金属の総称である。経済産業省はこれらを47元素（31種とレアアース17種）に定めている。レアメタルは自動車、液晶テレビ、携帯電話などの様々なハイテク製品に不可欠な原料であり、我が国の経済活動において不可欠である。しかし、レアメタルの偏在性が高いために、特定の国からの輸入に依存しており、現代社会ではその供給構造が極

めて脆弱である。特に中国の資源の囲い込みから、レアメタルの価格が乱高下し、一時は2、3年で10倍もの価格に跳ね上がった元素も存在するなど、価格は世界情勢に大きく影響される。ハイテク製品に不可欠なレアメタルの高騰による供給不安定は、世界の科学技術発展にとって、もはや死活問題ともなっている。

一方、我が国では、リサイクル技術の対象となる都市ごみとして大量に投廃棄される家電製品等を「都市鉱山」と呼んでいる。この再生資源は金属含有量が高く、我が国は資源大国として有効な再生活用を求められている。同時に、廃棄されたハイテク製品や製造工程からの廃棄・排水などにより、知らず知らずの内に金属汚染が増してきており、環境浄化や水資源の確保の重要性は遍く浸透している。

このような背景から、レアメタルを自然界から集める技術だけでなく、排水や廃棄物中などから効率よく分離・選択的回収する技術を開発する事が必要である。その中で“メタルバイオテクノロジー”の研究推進は、生物の特徴を生かし、従来の技術では特に手に負えない、濃縮回収と選択的・特異的な個別回収において革新的開発であり、環境負荷を抑えた持続可能な社会の実現にむけて非常に期待される。

3. 研究内容（具体的方策）

本提案では、微生物や植物による金属代謝機能の解明に向けて研究を推進すると共に、人類と金属との関わりをサポートする総合技術を体系化し、応用していく。「メタルバイオテクノロジー」から生まれた資源循環社会の仕組みづくりを実用化段階まで到達させることを目的とする。「メタルバイオテクノロジー」の研究内容を大きく5つの分野に区分する。

(1) メタルバイオテクノロジーによる排水処理・環境修復

環境汚染問題をメタルバイオテクノロジーによって解決する研究内容

(2) メタルバイオテクノロジーによる元素回収リサイクル

資源供給問題をメタルバイオテクノロジーによって解決する研究内容

(3) 未来に向けた持続産業を産み出すメタルバイオテクノロジー

金属微粒子合成、微細加工、金属センサーなど応用分野への活用をメタルバイオテクノロジーによって広げる研究内容

(4) メタルバイオテクノロジー・ゲノムインフォマティクスとその応用

ゲノム工学、タンパク質工学、反応メカニズム解明など基礎から応用へメタルバイオテクノロジーによって広げる研究内容

(5) メタルバイオテクノロジーをサポートする金属類に分析技術

メタルバイオテクノロジーをサポートする金属を定性定量する分析技術を開発する研究内容

4. 提案の適時性

(1) 社会ニーズ

レアメタルは、地殻中の存在量が比較的少なく、現状では採掘・製錬等が技術的・経済的に困難な金属の総称である。ゆえに資源としての枯渇が懸念され、国家レベルでの確保・備蓄等の施策が採られるようになった。この一環として、レアメタルを比較的豊富な金属で代替する技術や、携帯電話基板からの貴金属回収に代表されるような廃棄製品・部品等からの金属類リサイクル技術の開発が進められている。しかし、少なからぬ量が混入されているにも関わらず、資源フローの最下流にある排水や無分別廃棄物中からの金属類回収・リサイクル技術の開発は進んでいない。産業の持続性という意味でも、レアメタル枯渇の問題は今後深刻さを増すことが想定され、リサイクル回収の技術的課題解決が急務である。

(2) 研究シーズ

金属類のリサイクルは、物理・化学的技術による付加価値の高い貴金属の回収が行われているが、レアメタルのリサイクルはほとんどなされていない。それは、回収ターゲットとなる物質が低濃度・低含量で

あり、複雑な物質が混入している排水・廃棄物の場合には、コストやエネルギー消費の問題から実用的な技術さえ確立されていないためである。この現状から、十分に経済性があり、エネルギーや資源の利用を最小限に抑えた新しい環境負荷低減型の資源回収技術の登場が熱望されている。

“メタルバイオテクノロジー”は、生物技術の持つ省資源・省エネルギー性、高い経済性と環境適合性を活かし、物理・化学的手法では困難な、安全安心で豊かな循環型社会を構築するための技術体系の一つとしての期待は大きい。

5. 参画が見込まれる研究者層

生物学、環境工学、金属材料工学、無機化学、分析化学、応用微生物学、植物工学、生物化学工学、結晶工学、デザイン工学、機械工学、設計工学、地質工学、地球化学者、海洋生物学など多種多様な分野から構成される。将来、社会や産業への貢献を考慮し、研究者以外の弁理士、産学コーディネーター、弁護士など法律家、ベンチャー企業人なども参画していただく必要がある。

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

基礎研究者のみならず、支援体制の橋渡しに適した人材や、実証試験を担うことのできる人材を含め、目的を持った組織や研究チームを構成して研究開発を推進する。チーム研究においては、以下の三グループのうち、生物反応グループがコアとなり、それに実証準備調査グループないし評価支援グループを合わせ、少なくとも三グループで構成することを想定している。

- ・生物反応グループ（開発する大学や国研、あるいは企業の研究者が主体）
- ・実証準備調査等グループ（開発大学や企業経営者・研究者、ファンドマネージャー、廃棄物処理業者や鉱山会社等が主体）
- ・評価支援グループ（関係省庁・機関（施策グループ）、開発する大学や国研、あるいは企業の研究者、ファンドマネージャー、廃棄物処理業者や鉱山会社等が主体）

メタルバイオテクノロジーにおける、微生物制御・安定的な回収基盤技術が確立できるか否かを見極めるのに5年ほどかかることを想定する。並行して、関連する多様な要素技術・基盤技術の研究開発を、各研究グループが独自に行いながら、その成果を共有し、既存技術開発の適切な融合や活用も可能な「プラットフォーム型」もしくは「コンソーシアム型」などの体制を想定する。これを具体的に組織化し、万全な研究体制（装置設置、人材配置、各組織連携等）を組むために、メタルバイオテクノロジー分野のセンター化（戦略室）を行う必要がある。また、開発プロセスにおいて、それらの技術が安全で恒久的に機能するための安全性評価やプラント設計確立にかかる期間が計5年ほどになることを想定する。さらに、それらを効率的に作製する製造工程の確立認可に至るまでを含めた提案の総開発期間は10年間と想定する。本開発の後のメタルバイオテクノロジーセンターは、レアメタル回収・浄化技術にとどまらず、引き続き、社会に貢献できる革新的技術探究のための継続的な運営を行う必要がある。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

本提案の実現可能性や将来的な社会インパクトを見据え、適切な連携共同体を組織し、研究開発のリスクや開発効果を適時管理する必要がある。また、研究開発人材の配置のみならず、開発された技術や研究の成果を産業化に繋げるためには統合的マネジメント人材の配置も必要不可欠である。研究成果の評価方法については、実施計画毎にマイルストーンを設定し、現場や産業界からの適正な視点によって推進することが重要と考える。

また特許取得とともに、日本国内外での実用展開を視野に入れ、それに伴う設備環境を整えるための制約・法的措置についても並行して準備をする。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

(1) 科学技術上の効果：

本研究の推進により、バイオ精錬プロセス、新規微生物の発見とライブラリー化、酵素遺伝子レベルでの解析応用戦略、メタルバイオテクノロジーデータベース構築（微生物、遺伝子）を行うことができる。また、これまでに我が国で蓄積された、遺伝子や生命の機能についての幅広い知識を融合的に活用し、ターゲットとするメタルを代謝するための技術基盤を形成するものであり、学術研究としても産業技術としても多様な効果が期待できる。

(2) 社会・経済的効果：

本開発の推進により、環境浄化技術の発展、レアメタルの安定的供給確保、省エネルギー環境調和型資源回収システムの構築、新規産業分野への展開（ナノマテリアル生産の可能性、酵素・人工触媒デザインなど）、有用性確立後の事業化における新規雇用枠の拡大が見込まれる。これにより、国内外産業競争力の強化や産業活性化等における社会・経済的効果が期待できる。

9. 備考

平成 21 年度 経済産業省産業技術研究開発委託費（レアメタル抽出技術開発プロジェクト）

提案 3

1. 研究領域名称

再生可能資源への原料転換を可能とするバイオリピッドプラットフォームの構築

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

全産業の基幹となる化学品を持続的に生産、供給していくためには、石油由来原料を石油以外の原料へ転換・多様化していくことが必要である。そのためには、汎用的に入手可能な再生可能原料である非食性植物由来原料等のバイオマスから有用な化合物を省エネルギー・高効率に製造する化成品製造プロセスの創出が必須である。しかし、現状のバイオマスから供給される化合物は、酸化度の高い高酸素含有化合物であり、現在の化学工業で利用される石油由来の還元度が高い低酸素含有化合物群とは構造上大きなギャップがあるとともに、高酸素含有化合物から低酸素含有化合物を誘導する化学変換プロセスにおいて非常に大きなエネルギーが必要となることが大きな問題となっている。

(2) 社会・経済的背景（ニーズ）

現在、植物バイオマスから主に発酵生産的手法により有機酸類、アルコール類、糖類、アミノ酸類を一次化成品原料として生産するバイオリファイナリープロセスの構築が盛んに試みられている。しかし、これらのバイオリファイナリープロセスにより生産される一次化成品原料は、現在の化学工業において利用されている基幹合成原料と分子構造上の特性を異にするものである。化学工業における基幹合成原料とは、主にポリマー合成に有用なモノマー原料であり、還元度の高い炭化水素構造を骨格に、重合に必要な分子構造である炭素-炭素不飽和結合、水酸基、カルボキシル基、アミノ基などを有する化合物群である。したがって、バイオリファイナリーと現在の化学工業をうまく連結させるためのキーテクノロジーは、バイオマスから発酵生産的に誘導される高酸化化合物をモノマー原料などの高還元化合物へと変換する技術にある。

本研究領域では、このニーズに応えるべく、高酸化化合物と高還元化合物を連結しうる物質として高還元バイオマスである油脂に着目する。特に、バイオマスから得られる発酵原料糖を活用し、これを油脂発酵により油脂に変換し、これを一次化成品原料として供給する。さらに、様々な油脂変換技術（バイオプロセスならびに化学プロセス）を開発することにする。ひいては、再生可能原料（高酸化化合物）の基幹

合成原料（高還元化合物）への変換を可能とする油脂生産・油脂変換技術を核とするバイオリピッドプラットフォームの基盤技術を構築する。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

- ①発酵生産による糖類などの高酸化化合物からの油脂生産
- ②発酵生産油脂あるいは植物油脂の生物変換・化学変換による高還元度化合物（水酸化脂肪酸、ジカルボン酸、ジオール、ジアミン、オレフィンなど）の生産
- ③高酸化化合物の高還元化合物への変換に必要なとなる生物エネルギー（NAD(P)H、ATP など）ならびに化学エネルギーの効率的供給技術の開発
- ④バイオマス由来の高還元化合物群からの化成品・新規素材の生産（ポリマーなど）とその物性評価

4. 提案の適時性

社会ニーズ：循環型社会・持続的社会的形成に向け、再生可能資源の利用が重要となっている。

研究シーズ：現在、バイオマスから供給される化成品と実際に化学工業で利用される化合物群に大きなギャップ（高酸化化合物と高還元化合物とのエネルギーギャップ）がある。このギャップと埋めうる高還元バイオマスとして油脂が期待されるが、その効率生産、効率的変換技術はさらなる技術開発が必要である。

5. 参画が見込まれる研究者層

バイオテクノロジー全般、発酵学、応用微生物学、応用植物学、脂質工学、酵素工学、化学工学、高分子化学

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

ERATO、CREST、さきがけ、など。5～10年の長期企画

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など） 記入なし

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：バイオマス油脂を起点とするこれまでにない物質生産体系を世界に先駆けて創出する。これまで達成されなかった、バイオマスと石油資源との化合物特性のギャップを初めて埋めうる技術なる。

社会経済的効果：再生可能資源利用、持続的社会的構築への貢献。油脂基盤の新規産業分野の創出。

9. 備考

バイオリファイナリー研究は多いが、油脂を基軸とするものは少ない。藻類による燃料生産研究は散見されるが、化成品生産に向けた油脂の効率生産・変換技術開発は独自性が発揮でき、基盤技術を確保できる研究領域である。我が国の、現時点での技術力（油脂発酵・油脂変換研究技術）も高いレベルにある。

10. 自由記述

これからの国家的課題である低炭素社会の実現と経済的優位性の確保に関しての政策が不明確であるが故に、バイオ化成品研究も骨太なものとは成り得ていない。低炭素化に向けては、化石資源からバイオマスへの原料転換が必須であるが、我が国が自国で十分なバイオマス量を確保することは難しい。バイオマス原料を輸入に頼らざるを得ないのであれば、経済的優位性の確保には製造プロセスの徹底的な効率化と製品の高付加価値化を図る他ない。これらの我が国特有の課題の解決に、バイオ化成品製造技術をいかに

活用するかを政策的に明確化する必要がある。

提案 4

1. 研究領域名称

効率的窒素循環を実現する生物機能・化学変換技術の開発

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

低炭素社会、再生可能資源利用の実現に向け、二酸化炭素排出削減技術、二酸化炭素固定技術を中心とした炭素循環の効率化に関する研究開発が積極的に進められている。その中核をなすのが、太陽エネルギーを活用して二酸化炭素を固定しうる植物の光合成活性であるが、この光合成活性を高めるためには、炭素循環のみならず、窒素循環をあわせて効率化することが必須である。なぜなら、光合成活性の本体は蛋白質であり、その生成に窒素は必須である。また、植物の生育そのものにも当然栄養素としての窒素が必要である。しかし、炭素循環に関する研究に比べ、窒素循環に関する研究開発は、これまで見逃されてきた研究領域であると言える。

(2) 社会・経済的背景（ニーズ）

窒素の循環はこれまで環境の富栄養化の観点から議論されてきた経緯があり、主に、下水処理などにおける脱窒（N₂生成）に関する研究が多く成されてきた。他には、植物の窒素固定に関与する根粒菌（窒素固定菌）の機能に関する研究、窒素肥料の化学合成研究などが見られるが、炭素循環研究のように、俯瞰的な立場から全体の流速・流量を見渡すとともに、固定する形態、ならびに固定したものの有効利用についての研究が充分であるとは言えない。特に、これからの持続的社会的形成において重要となる食料・エネルギーの安定確保を鑑みると、食料作物・エネルギー作物の生育促進を軸とする窒素循環の俯瞰的研究が非常に重要であると考えられる。すなわち、環境に排出された窒素含有化合物を如何に作物が効率よく利用できる形態に変換するかがこれからの社会におけるキーテクノロジーの一つになると考えられる。現在、作物の生育促進に関する微生物と植物との相互作用研究が、次世代シーケンサーの登場もあり、ようやく本格化してきており、つい最近も Nature 誌にこれに関する発表がなされ（Nature 488,86–90(02 August 2012)、Nature 488,91–95(02 August 2012))、関連研究領域の幕開け的発表となった。我が国でも、有機質肥料の効率的硝酸化に関する微生物群の研究、ウキクサ共生微生物による植物生育促進に関する研究などが、開始されており、これまでの廃棄物中の窒素化合物の処理・無機化研究、植物の窒素固定研究とあいまって、持続的社会的形成のための食料・エネルギー生産の効率化に向けた、新たな学際的研究領域が胎動している機運がある。これらに加えさらに広角的に、含窒素化合物の化成品利用・燃料利用等の技術開発が融合し、新たな窒素循環の概念が、炭素循環の概念と関連しながら展開される必要がある。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

- ①有機態窒素を植物の生育促進に資する窒素形態に変換する微生物機能の開発（硝酸体窒素の生産に有用な微生物の開発）
- ②植物と微生物の相互作用による窒素利用効率の向上に関する研究（窒素固定共生菌、硝化菌群バイオフィームなどの安定形成・維持要因に関する生理学的・生化学的・有機化学的・分子生物学的研究）
- ③廃棄物中・排水中の窒素含有化合物の脱窒、アナモックス変換、硝酸化成に関する処理技術の開発。
- ④含窒素化合物・窒素含有化成品の効率生産に資する、微生物触媒、化学触媒の開発
- ⑤含窒素系燃料化合物（ヒドラジンなど）の生産と利用に関する研究
- ⑥窒素循環を俯瞰的に、自然科学、社会科学、経済学的見地から評価するための総合的学際研究

4. 提案の適時性

社会ニーズ：循環型社会・持続的社会的形成に向け、食料・エネルギー問題の解決が重要となっている。
研究シーズ：有機質肥料の効率的硝酸化に関する微生物群の研究、ウキクサ共生微生物による植物生育促進に関する研究などが、これまでの廃棄物中の窒素化合物の処理・無機化研究、植物の窒素固定研究などとあいまって、さらに、含窒素化合物の化成品としての生産研究、含窒素系燃料の生産・利用研究などを巻き込み、新たな窒素循環の概念が、炭素循環の概念と関連しながら展開されはじめている。

5. 参画が見込まれる研究者層

バイオテクノロジー全般、発酵学、応用微生物学、応用植物学、酵素工学、化学工学、高分子化学、有機化学、生態学、社会学、経済学

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

ERATO、CREST、さきがけ、など。5～10年の長期企画

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など） 記入なし

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：これまでにない、新たな窒素循環概念、技術の構築。生物間相互作用（主に微生物と植物、微生物間など）に関する新たな知見と応用への展開。含窒素化合物有機化学の新たな展開。
社会経済的効果：再生可能資源利用、持続的社会的構築への貢献。食料、エネルギーの安定供給。

9. 備考

バイオリファイナリー研究は多く、その多くが炭素循環に関わるものである一方、窒素循環を基軸とする研究は少ない。排水中の窒素化合物の処理、植物と窒素固定微生物との相互作用に関する研究などが散見されるが、俯瞰的な立場から全体の窒素流速流量を見渡すとともに、固定する形態、ならびに固定したものの有効利用と循環についての研究開発が充分であるとは言えない。そのような中、我が国の、含窒素化合物変換に関する生物機能開発研究、化学工学研究、環境工学研究は、ある程度の基盤技術を確保できおり技術的に高いレベルにあると言え、そのさらなる展開により国際的にも独自性が発揮できる。

10. 自由記述

これからの国家的課題である持続的社会的実現と経済的優位性の確保に関しての政策が不明確であるが故に、グリーンバイオ領域の研究開発も骨太なものとは成り得ていない。また、我が国が自国で十分な食料・エネルギーを確保することは難しく、その多くを輸入に頼らざるを得ないなら、その見返りとして食料・エネルギー作物生産に関する基盤技術を食料・エネルギー作物提供国に対して還元することが、フード・セキュリティ、エネルギー・セキュリティの観点からも極めて重要であろう。この観点からも、効率的窒素循環技術を政策的に推進する必要がある。

提案 5

1. 研究領域名称

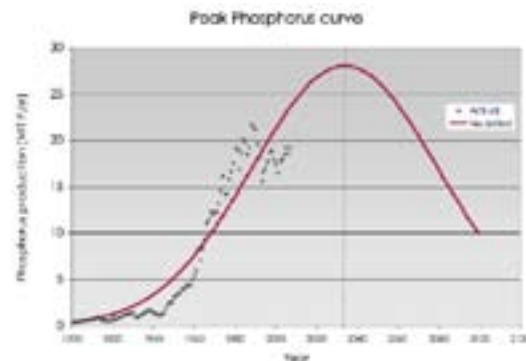
有限かつ代替不可能なリン資源の持続的利用を可能とするためのクローズドループリサイクル技術に関する研究

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

「緑の革命」によって、世界人口は約 42 億人増加したが、リン肥料がなければ決して実現し得なかったと言われている *1。逆に言えば、リン資源の枯渇は、地球全体の食料安全保障にとって深刻な脅威となる。気候変動は我々の生活に様々な影響を与えるが、食料問題からするとリン資源の問題は気候変動よりもはるかに深刻であるとされる *1。現在、その重要なリン鉱石が地球的規模で枯渇を始めており、2030 年前後がリン鉱石採掘のピーク（ピークリン）になると予測されている *2。その後 IFDC（食料安全保障に関する国際的な団体）がピークリンに関してそれほど早く到来することはないが、リン資源のリサイクルと安価な未利用リン資源の活用が重要と発表した *3。雑誌 Nature においてリン資源リサイクルの必要性が度々強調されている *4。世界のリン鉱石埋蔵量の 80%は、モロッコ、中国、米国および南アフリカの 4ヶ国に集中しており、さらに将来的にはモロッコ一国に依存すると言われている。もし米国に続いて他の産出国もリン資源の囲い込みに動けば、世界のリン需給はたちまち逼迫すると考えられる。

一方、リンは湖沼や内湾の富栄養化を引き起こし、赤潮やアオコなど水利用や栽培漁業等に甚大な被害を与える原因物質の一つでもある。欧州や我が国は、閉鎖性水域の富栄養化防止のために、厳しいリンの排水規制を課しており、工場・事業所等排水からの脱リン技術の開発が進んでいる。また、我が国はリン鉱石を産出せず、リンの全量を海外からの輸入に頼っていることもあり、リン回収・リサイクル技術の基礎研究が進んでいる。プロセスを最適化し、良質で低価格のリサイクル品も作り出されているが、社会全体がリンのリサイクルの重要性を認識するに至っていないこともあり、従来のリン肥料の流通経路を劇的に変えるに至っていない。

国際的にも、リン資源の確保と管理は、持続可能な人類社会の実現に関わる大問題であり、すでに問題解決のための技術開発や取組みも始まっている。例えば、国際的な取り組みとして、国際リン資源管理研究プロジェクト Global TraPs 国際会議などが始まっている。我が国も積極的にこういった国際的な取り組みを構築し、国レベルで関与すべきであるが、現在のところ十分に対応できていない。



図、Cordell らの提唱するリン鉱石採掘のピーク *2。点は実際の採掘量。赤線は埋蔵量から予測されるリンの採掘量。

*1 James Elser and Stuart White, Peak Phosphorus, 2010:http://www.foreignpolicy.com/articles/2010/04/20/peak_phosphorus

*2 Cordell et al., Global Environmental Change, 19, 292–305, 2009

*3 Phosphorus & "peak phosphate": <http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/SUSTAINABILITY/Phosphorus-peak-phosphate>

*4 James Elser, Elena Bennett, A broken biogeochemical cycle, Nature, 478, 29-31, 2011.

3. 研究内容（成果の達成時期と具体的方策）

リンの危機を回避する唯一の方法は、3R（リデュース、リユーズ、リサイクル）に取り組んで、クローズドループリサイクル（リン循環を閉じる）を達成することであろう。またリン資源の管理を実現する政策（例えば、法律によるリン資源リサイクルの義務化など）が今後必要となると考えられる。リンは代替不可能で、新しく作り出すことが出来ない。しかし石油とは異なり、使った後でリンは回収できるので、リユースやリサイクルが可能である。具体的な研究例としては、以下のような研究が考えられる。

- (1) 画期的なリンリサイクル技術開発：排水や廃棄物に含まれるリンを効率的にリサイクルする技術の開発。また、工業分野から排出されるリンをバイオ分野で利用できるような技術開発を行う。
 - (2) 未利用リン資源の利用技術開発：例えば、製鉄所で副産物として生産される製鋼スラグには部分的にリンが濃縮されている。製鋼スラグからリンを多く含む部分とそうでない部分を分ける技術を開発したり、バイオリーチングによってリンを回収したりする。
 - (3) リンの投入が少なくても機能する農業システムの開発：リンは土壌に固定される場合が多く、過剰に施肥する傾向にある。土壌改良や、省リン技術により、リンの投入が少なくても機能する農業システムを開発する。また、リンを最大限利用させる植物工場システムの開発も課題である。
 - (4) リンを効率よく土壌から吸収できる品種の育成：遺伝子工学を利用して、リンを効率よく土壌から吸収できる品種を育成したり、微生物を利用して、効率よく植物に利用させる技術開発も課題である。
- いずれも集中的な研究で、5年程度で成果が出せると考えられる。

4. 提案の適時性

(社会ニーズ) 2008年リン鉱石の国際価格が5倍超に高騰し、リン資源の危機が明るみになった。その後、価格は落ち着いたものの、リン鉱石の産出国がリン資源の囲い込みに動けば、世界のリン市場は大混乱に陥ると考えられる。

(研究シーズ) ・リンが枯渇すれば、温暖化ガス排出量削減への貢献が期待されるバイオ燃料も生産できない。バイオ燃料生産におけるリン回収再利用技術の開発も重要な課題になっている。

5. 参画が見込まれる研究者層

環境分野のバイオおよび材料分野の工学者、食料・植物分野の農学者、吸着体を開発するような化学者、科学技術政策および経済学を専門とする社会学者

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

関連する多様な要素技術・基盤技術の研究開発を個々の研究者、研究グループが独自に行いつつ、その成果を共有し、既存技術開発の適切な融合や活用も可能な「プラットフォーム型」もしくは「コンソーシアム型」などが想定される。また、学際・総合的視野から、リン資源を長期的かつ安定的に確保し、循環再利用して持続可能な資源・環境管理を実現するための戦略を考究・討議して政策提言を行う拠点も必要となる。拠点形成にまで必要な期間は約10年と考えられる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

地球全体の食料安全保障にとって、エネルギー、水、リンが重要な課題であるにも関わらず、多くのグローバルな政策議論からリン資源問題がなぜか抜け落ちている。Cordellらは、その一つの原因は、リンが水やオイルに比べて日常目にする機会のない存在形態（食料や我々の中に存在する）であるからだと指摘する。社会全体がリンのリサイクルの重要性を認識する啓蒙活動が重要である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

リンは産業上も重要であり、金属の表面処理、各種の触媒や化成品等の原料として大量にかつ幅広く利用されている。特に黄リンは高品質の工業用リン酸の原料として重要である。黄リンから製造される各種リン化合物は、自動車産業、電子部品産業や製薬・化学産業などにおいて、工業用原料として広く利用される。回収したリンを黄リン製造の原料として再利用できれば、経済効果は大きい。

提案 6

1. 研究領域名称

安定的な食糧生産に資するリンの濃縮・回収のための複合微生物系制御技術の開発

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

家畜ふん中のリンを濃縮する原位置コンポスト化を開発し、鶏ふんを例に検討をすすめている。従来、鶏ふんは鶏舎内に堆積させ、適宜、鶏舎の外に搬出してコンポスト化するか、乾燥工場に運んで乾燥鶏ふんに加工されていた。鶏ふんは、特にリンの含有量が乾燥重量基準で5%程度と高く、優れた肥料の原料とすることができるが、従来の方法では強い悪臭とバイオハザード、衛生害虫の発生など多くの問題を抱えていた。鶏舎の中におがくずで菌床を形成し、排出される鶏ふんをその場でコンポスト化する原位置コンポスト化で、それらの問題を解決することができるようになった。また、この場合のリン濃縮はコンポスト化にともなって、菌床と鶏ふん中の有機物は微生物分解するがリンは、分解も揮散もしないことを原理としているので、長期間に渡って安定的な有機物分解を継続できればより高濃度のリン蓄積が可能である。

なお、原位置コンポスト化の方法で蓄積されたリンは、そのままコンポストとして利用可能であるが、植物が直ちに利用できる形態、すなわち可給態リンに変換し、ハンドリングのよい液肥やリン酸アンモニウムマグネシウム（MAP）として回収することを考えると、嫌気条件下でリンを溶出するバイオガス化プロセスを利用することができる。なお、バイオガス化プロセスでは副次的にメタンガスとしてエネルギー回収も可能である。

長期間に渡って安定な原位置コンポスト化、およびリンの溶解を促進するバイオガス化のためには複数の微生物が複雑な相互作用を示しながら共存する複合微生物系を解析し、それを制御する方法論を見いだして行く必要があるが、複合微生物系で目的の微生物を選択的に増殖させるための制御についてはすでに検討が始まっている（中崎ら：PCT/JP2008/06169）。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

農業生産のために植物の三大栄養素の一つであるリンの安定的な供給に関心が高まっている。リンの枯渇予測の中には、わずか40年程度という極めて短期間でリンが枯渇するとしたものもある。また、リン資源は地球上で偏在しているために、存在はしていても入手できないという戦略物資としての側面を持つに至っている。

一方、畜産業で排出される家畜ふんは、深刻な環境問題を引き起こしており、悪臭の発生も含めて都市近郊での畜産業の成立を危うくしている。従来、畜ふんはリンを多量に含むためにコンポスト化して農地に還元し、農作物の生産に使用することでリサイクルすることがおこなわれてきたが、作業者や住民の臭気に対する許容のレベルが低下したことに加えて、コンポストは化学肥料に比べてリンの濃度が低いため、植物が必要とする量を供給するには大量のコンポストを農地に散布する必要がありハンドリングが厄介であることもあって、コンポストの利用は必ずしも普及しているとはいえない状況にある。このことが、農作物の生産、畜産のいずれにも大きな障害となっており、畜産の現場で悪臭をさせずに植物の栄養素であるリンを濃縮し、濃縮されたリンを農作業に利用しやすい形態に変化させて供給する技術の開発が求められている。

3. 研究内容（成果の達成時期と具体的方策）

本プロポーザルでは複合微生物系を利用したリンの濃縮・回収システムの構築を目的とした研究を推進する。研究期間は5年間、実証実験は2年間で社会実装に繋げることを目標とする。

1) 長期間安定な半回分操作の原位置コンポスト化の開発

コンポスト化において有機物の分解を良好に維持するためには嫌気状態にしないことが重要であり、その

ために易分解有機物を蓄積させない、水分を高くしすぎない、通気を確保することを念頭においた操作、中でも高温のコンポスト化が有利であることがわかっている。しかしながら、一方では、コンポスト化の温度が高すぎるとアンモニアが大量に揮散し、深刻な悪臭問題に繋がることが指摘されている。本研究では、長期間に渡って悪臭が低減された良好な有機物分解を達成するための操作条件を見いだすことをめざしている。このために、微生物叢の解析と制御のための方法論を開発する。

コンポスト化においては、菌床の高さ、通気の有無、微生物叢の種類が菌床の温度、水分や、pHに影響を与え、それが、原因となって微生物叢が変化すると、さらに温度、水分、pHに影響が及んで、微生物にとっての環境が極めて複雑に変化する。通常の回分操作によるコンポスト化ではコンポスト層内部の有機物濃度が時々刻々変化するために、微生物にとっての環境はさらに複雑に変化するが、半回分操作による原位置コンポスト化では、新たな有機物が日々供給されるので、疑定常状態を達成することも可能と期待される。現在、鶏ふん処理においては160日程度の良好な状態が維持できているが、400日程度（採卵期間）の長期運転が可能になれば、リン濃度を最大化できる。なお、畜種によって操作条件は異なると考えられるが、同様の手法で最適化が可能と考えている。

2) リンの可給態化と回収に優れたバイオガス化の開発

バイオガス化のプロセスでリンが可溶化し、植物に利用できる形態、可給態に変化することが知られており、可溶化したリンは液肥として、また晶析、液体サイクロンによる回収、水洗、乾燥させてMAPとして回収しようとする試みも始まっているが、可溶化のための最適条件、そのときの微生物叢を如何に速く達成し、安定的に制御するのかについては明らかになっていない。効率的な可溶化のための微生物叢の制御を開発する。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：安定的な食糧生産の視点から、悪臭をさせない畜産業と農作物生産へのリン供給が求められている。そして、それを支える技術は、古い技術が古いままでなく新しい解析方法の適用と操作で革新的な技術として蘇ってほしいという期待がある。

研究シーズ：複合微生物系の取り扱いについては、近年、特にその解析に大きな成果が得られてきているが、解析情報を制御にまで繋げる試みはまだ始まったばかりである。コンポスト化、バイオガス化はいずれも古い技術であり、例えば、コンポスト化については家庭の主婦でさえ、一家言持つ人が多い。しかしながら、家庭用のコンポスト装置では1日に一度攪拌（切り返し）するが、大型の積み山では1週間に一度の切り返しが多い理由を微生物学の視点から説明できるものは、研究者の中にもまれである。また、再現性のあるコンポスト化、バイオガス化は、専門のオペレータでさえ困難である。これらは古い技術ではあるが、その操作は最適化からほど遠いのが現状であり、分子生物学の最近の進歩でようやく研究の環境が整ったところと考えられる。また、新しい方法論の開発と適用で古い技術の革新的な効率化が可能と期待される。

5. 参画が見込まれる研究者層

複合微生物学の研究者、プロセス工学、畜産、農産、生化学、制御、センサー、装置開発

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

自分自身の経験から、学際領域研究では、それぞれの分野の専門家の単なる寄せ集めでは、うまくいかないのではないかとと思われる。少なくともリーダーは、二つの分野、どちらでも専門家として通用する実力を持つ研究者か、あるいはできたら参画するメンバーの複数人がそうであれば学際領域の研究は格段に進捗すると思われる。実際にその体制は難しいとしても、成果の共有と本質的な理解の仕組みは不可欠であり、拠点としてPC上でバーチャル研究室を運営するとともに、スカイプなどを用いたテレビ会議システムを多用して、密接な研究打ち合わせを実施することが有効と考える。5年間の研究期間に、基礎から

応用に向けて準備を進め、その後、2年程度のパイロット試験をはさんで、社会実装に結びつけることができると考える。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

廃棄物の移動に関して廃棄物の処理および清掃に関する法律（廃掃法）を遵守する必要があるが通常の手続きで規制をクリアすることは可能である。畜産業の臭気低減については社会受容を得やすい試みと考える。アンケート回答者にも自治体からの畜産業の臭気低減についての相談が複数件あり、パイロットの運転場所の提供は依頼できると思われる。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：複合微生物系の解析は進んできているが、現時点で複合微生物系の制御の考え方は一般的でない。複合微生物系はコンポストやバイオガスに限らない。バイオレメディエーションや水処理、環境水質の管理、発酵食品、腸内細菌叢制御による長寿の研究などに広く応用が可能である。複合微生物系の制御は、日本がリーダーシップをとることがきできる分野の一つと考えている。

社会経済的効果：直接的には畜産業の振興とリン資源の確保によって食糧の安全保障を助けることができる。波及的には、バイオレメディエーションを始めとして複合微生物を利用した産業に効率の高い方法を開発することで雇用の創出も可能である。また、アンケート回答者自身は、残念ながらコアな部分を担当できない（腸内細菌叢の解析はできるとしても）が長寿の研究で日本が世界をリードできる可能性があり、新産業の育成に資する成果が得られるものと期待される。

9. 備考 記入なし

10. 自由記述

複合微生物系の解析から制御へー複合微生物学の新展開ー

複合微生物系についての解析が進んでおり、大きな成果が得られてきているが、今後は解析情報に基づいてプロセスの制御に結びつける研究が必要と考えている。コンポストを例に挙げるとすれば以下のようになると思われる。

コンポストは複数の微生物が複雑な相互作用を及ぼしながら共存する、典型的な複合微生物の系であり、コンポスト中に存在する微生物の種類とその働きを明らかにするための微生物学的な研究が古くからおこなわれてきた。従来の研究は培地を用いて微生物を培養することによって、その種類や濃度を測定したり、微生物による特定の酵素の生産を確かめたりすることでコンポスト中での微生物の役割を明らかにしようとするものであった。しかしながら、培養に用いる培地はどれも程度の差こそあれ選択的であり、コンポストのような複合微生物系における微生物の全てを把握することは困難であること、また、自然界には存在していても培養できない微生物が多く存在することが指摘されるようになり、培養法に代わって、微生物の遺伝子を解析することでコンポスト中微生物についての知見を得ようとする試みが数多くおこなわれるようになってきている。SciFinderを用いた文献調査によると“compost”というキーワードを含み“DNA analysis”、“community”、“consortium”のいずれかと密接にかかわる概念を含んだ学術論文数は近年際だって増加していることがわかる（図1参照）。最初にコンポスト中の微生物に由来するDNAのパターン解析から始まった分子生物学の方法は、微生物の種類そのものを特定するに足る解析法にまで進展し、微生物叢を構成する個々の微生物に関する知見についても多くが明らかになってきている。しかしながら、ここ数年に限れば、学術論文数は頭打ちになっているようにも見える。アンケート回答者は、この理由を解析情報だけであれば研究の視点から見ると新しさに乏しくなったためではないかと推測している。微生物の遺伝子を解析することで得られた微生物叢の情報は、コンポスト中に存在する微生物を培養によらず網羅的に把握する優れた情報ではあるが、それだけでは微生物の存在を確認することはできても、

存在する微生物がコンポスト中で果たす役割を明らかにすることは困難である。解析情報を次の制御に繋げて、積極的に複合微生物の系に人工的に介入することができれば、解析情報はさらに有意義なものとなると考えている。

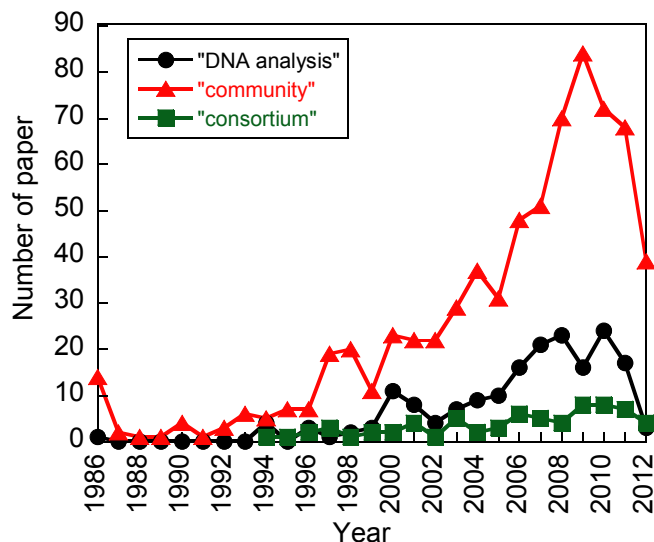


図1 Scifinder で調べた”compost”とそれぞれのキーワードに密接にかかわる概念を含んだ学術論文数の経年変化（1986年の値はそれ以前のすべての総和、2012年は7月現在まで）

提案 7

1. 研究領域名称

サステナブル食糧生産技術開発領域

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

現状の低肥料食糧増産を目指した試みとして、根粒菌研究、菌根菌研究、土壌の脱窒素研究などが個別に行われている。また、生態学的な研究としては窒素と炭素の分配に関する研究が古くから行われており、多くの知見が蓄積されている。しかしながら、これまでの農業が大量の肥料を使って生産性を上げることを目指していたために、循環型の農業を目指す統合的な研究は立ち後れている。21世紀後半に向けて、窒素肥料やリン肥料の高騰化が予測される中で、また地球規模での農業を考えると、限られた資源の中で効率よく農業を行っていくためには、循環型農業を支えるサステナブル食糧生産技術開発が必要不可欠である。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

これまでの農業は集約農業として、多量の肥料導入による生産量の増大を目指してきた。しかし、この結果として周辺環境の汚染を引き起こしてきた。一方で、肥料用のリンに使われるリン鉱石の不足のために、費用は増大している。また、窒素肥料生産にかかるコストも、その生産にかかるエネルギー消費量も莫大なものがある（窒素肥料の生産には世界のエネルギーの1.5%が使われているといわれている）。実際、2008年には国内農家の化学肥料購入価格は1.5倍になり、その価格は高止まっている。この現状を打破するためには、植物の肥料の吸収能力を上げるとともに、土壌からの有機窒素等の流出の減少など多くの新規の技術開発が望まれる。一方で、デンプンなどの生産においては、窒素、リンは多くの場合、食糧に含まれることなく循環する。したがって、窒素やリンなどを土に戻し、炭素由来の食糧をできるだけ食糧と

して利用できれば、持続可能な食糧生産が可能になると考えられる。しかしながら、これまでに持続可能な農業生産に導く技術革新は行われてきていない。たとえば窒素利用に有効な、窒素固定の根粒菌や菌根菌の基礎研究は行われているものの、これらが圃場においてどの程度有効であるかは、現在明らかになっていない。このような中で、個体レベルでの植物の窒素・リン循環、圃場における窒素・リン動態、生態系における窒素・リン循環を理解した上での循環型食糧増産技術創出が強く求められている。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

菌根菌による土壌窒素およびリンの有効利用技術開発

土壌細菌のスクリーニングと農業利用

作物における窒素の利用効率向上技術開発

作物における窒素、リン、カリウムの代謝研究

シンク・ソース相互作用研究とシンク・ソース間の輸送制御研究

窒素のシグナル研究

4. 提案の適時性

社会ニーズ：

窒素肥料の高騰、リン鉱石の欠乏のために、農業のコストは近年著しく上昇している。一方で、大量施肥による環境汚染も進んでいる。こうした中で、持続可能な農業技術が強く求められている。

研究シーズ：

近年、菌根菌研究、脱窒素菌などのゲノム研究や生理学的な研究が進み、土壌環境におけるこれらの微生物の重要性が明らかになりつつある。また、栄養分子の輸送システムについても明らかになりつつある。しかしながら、これらの知見を作物育成の現場で実践するまでには至っておらず、戦略的な取り組みが必要となっている。

5. 参画が見込まれる研究者層

育種学、ゲノム生物学、植物生態学、植物生理学、土壌微生物学、農学、メタボローム研究

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

我が国でこれまで進められてきたシロイヌナズナとイネをベースにした栄養輸送、代謝研究は、個々の基礎研究としては世界的な水準にある。しかし作物を対象として、既存の学問分野を統合し、持続可能な土壌環境と植物個体の生育を一体化するような技術開発の基盤となる包括的な研究の推進方策はとられてこなかった。そのため、基礎研究を充実させるインフラ整備（実験植物・作物のメタボロームデータベース、組換え圃場整備、土壌微生物ゲノムデータベースなど）、基礎研究の成果を作物研究に効率的につなげるための橋渡し事業の推進、圃場レベルでの研究の支援など、研究成果を農業につなげ迅速に社会還元できる仕組みづくりが望まれている。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

植物の機能向上技術開発の上で、組換え技術の使用は避けては通れない。近年、この組換え技術に関しては、新たな手法が開発されてきた。この手法は、従来型の組換え規制の法律では対応ができない。したがって、本研究を進めるにあたっては、新規の組換え技術の利用推進とともに、その法的規制についても検討する場を設けることが必要である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：窒素の個体内、生態系での循環の理解は、植物科学の最も大きな課題の1つであり、

これを明らかにすることは、植物の基礎科学に与えるインパクトがきわめて大きい。また、土壌の理解とその変化は農業の根本であり、この技術開発を、基礎科学から圃場科学へと統合することにより実施することは、農業技術に大きなインパクトを与える。

社会経済的効果：肥料大量消費型の農業から循環型農業への移行により、コスト上昇を続けている化学肥料の使用を少なくできる。これにより農家の収益改善につながる。さらには、化学肥料汚染による環境負荷を軽減できるという経済効果も大きい。

提案 8

1. 研究領域名称

New Plant Breeding Technology による環境ストレス耐性作物の開発

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

環境ストレス耐性作物の品種開発は、従来、交雑育種によって進められているが、環境ストレスは様々な要因が複雑に絡み合って生じる上に、作物によってはストレス耐性の高い遺伝資源が少ないことから、画期的な耐性品種の開発には至っていない。一方で、様々な環境ストレスに対する植物の応答・適応機構は徐々に解明されてきており、ストレス耐性付与に重要な因子の同定等も進んでいる。これらのストレス耐性の重要因子を作物の実用品種に導入するためには、交雑育種に加え、作物への遺伝子導入も有効な手段となるが、遺伝子組換え作物は依然として忌避感が強いのが現状である。

近年、脚光を浴びている New Plant Breeding Technology (NBT) では、単一世代のみでの外来遺伝子発現を可能とし、後代世代において外来遺伝子を除去することによって、新品種を開発することが可能になってきた。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

温暖化をはじめとする地球規模の気候変動は、気温の上昇、降水強度および降水量の変化をもたらすと予測されており、農作物の収量の変動、品質の低下、病害虫被害の増加などが懸念されている。近年の世界規模での干ばつまたは洪水による穀物（コムギ、トウモロコシ、ダイズ等）の大幅な収量低下は、穀物価格の高騰を招き、我が国では食品や飼料の値上がりなどの様々な形で国民生活を脅かしている。さらにこれらの問題は、世界的にも、人口増加と相まって大規模な食料不足を引き起こす可能性が高い。したがって、これらの食料問題を解決するためには、温暖化の原因となる温室効果ガスの排出を抑制する努力に加えて、ストレス耐性品種の開発、栽培手法や作期の変更などの農作物生産における対応策の構築が早急の課題となっている。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

(1) 作物における環境ストレス耐性機構の解明

今後想定される具体的な環境ストレス条件に対して、耐性の向上が必要な作物の耐性機構の解明を進める。その際、ストレス耐性の異なる多数の系統を用い、次世代シーケンサーによる迅速な遺伝子発現の比較解析、アソシエーション解析等を駆使して、重要なストレス耐性遺伝子の同定を行う。

(2) NBT の手法確立

ターゲットとなる作物に合わせた NBT について、遺伝子改変法の効率化を目指す。さらに、NBT は後代世代において外来遺伝子を確実に除去することが重要であるので、その評価法の確立も進める。

(3) NBT による環境ストレス耐性作物の作出

課題 (2) によって確立された NBT の手法を用いて、課題 (1) によって同定された環境ストレス耐性遺伝子を改善すべき作物に導入・改変して、環境ストレス耐性作物の作出を行うとともに安全性の検証を行う。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：今後深刻化すると予想される気候変動に対して順応できる作物の品種開発は、食料の安定供給のために重要である。NBTによる新品种の育成は従来の交雑育種を補完できることから、品種開発を加速化するためにNBTの手法確立は急務の課題である。

研究シーズ：欧米諸国ではすでにNBTに関連する技術開発、特許の取得状況、品種開発に向けた取り組みなどの調査が進められており、我が国においても独自のNBTの技術開発が望まれている。

5. 参画が見込まれる研究者層

植物遺伝学者、植物分子生物学者、植物生理学者

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

まずはターゲットとする作物を複数定め、それらの作物で今後問題となる環境ストレスを絞り込む。作物別に各環境ストレスの耐性機構を解明するグループ、および対象の作物に合わせたNBTの手法を開発し、その手法の評価法を確立させるグループに分け、お互いに連携しながら研究開発を推進する。それぞれの課題に対して5年はかかると想定され、最終課題のNBTによる環境ストレス耐性作物の作出および安全性の検証のためにさらに最低5年はかかると想定される。これらの研究推進を加速化するために、戦略的なファンドの投下および中核となる研究拠点の構築が必要となる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

これまでの植物の環境ストレス応答機構の研究は、モデル植物を用い、実際問題となる農業現場の条件とは必ずしも一致しない条件で進められているケースが多かった。しかし、近い将来深刻化することが懸念される気候変動による作物の減収の問題を早急に解決するためには、品種開発の必要性の高い作物を絞り、実際の農業現場に近い条件で研究を推進することが不可欠である。

NBTによって育成された植物は外来遺伝子が除去されていることになるが、外来遺伝子の導入時に外来遺伝子を発現させることから、遺伝子組換え体としての規制の対象になるかどうか、また、社会的コンセンサスが得られるかどうかの議論を進めることが重要である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的效果など）

科学技術上の効果：NBTによって育成された作物は外来遺伝子が除去されていることから、消費者の忌避感は低くなると予想されるので、この技術により作物の品種開発が加速化することが期待される。それに伴い、この技術開発に参入する研究者が増え、より効率的かつ安全性の高いNBTの技術が確立されると考えられる。

社会経済的效果：農業現場の状況に応じた環境ストレス耐性作物の品種開発は、食料供給および価格の安定化につながり、社会経済への波及効果は高いといえる。

提案 9

1. 研究領域名称

フード・セキュリティ（食料安全保障）確立を目指した持続的食料生産利用技術

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

国民が健康で健全な生活を送る上で必要な食料を持続的に供給する仕組み作りは、如何なる国においても最重要課題である。そのためには、急速に変化する世界情勢の中にあっても消費に見合った食料を持続的

に供給する生産利用技術を構築していくことが世界中で喫緊の課題となっている。この課題解決には、少子高齢化などの人口動態や食料輸出入国間の相互関係など社会情勢の変化に裏打ちされた、作物の品種開発や栽培利用技術の開発が必要である。品種開発には遺伝資源とその遺伝情報が必要になるが、近年の次世代シーケンサー (NGS) の目覚ましい進歩により、遺伝資源の遺伝情報解析速度及び評価精度が飛躍的に向上した。近年、遺伝資源を巡る国際情勢の変化から、国を超えた遺伝資源の利用が非常にタイトになっている。このような背景のなか、遺伝資源情報を最大限に活用した次世代変異体 (次世代生物資源) 育種技術、TILLING 技術の作物育種への有効性が立証されつつあり、それらの次世代生物資源と技術の品種開発利用への期待が高まっている。

(2) 社会・経済的な背景 (ニーズ)

我が国は、食料自給率を現在のレベル(40%)から 50%まで高める目標を掲げている。この目標達成には、急速に進展する将来の少子高齢化社会を見据えて、国内自給率 50%を達成するための食料戦略と食料生産利用技術の開発、海外から 50%の食料を持続的に調達するための戦略とそれを支援する食料生産利用技術の開発・普及が必要である。

少子高齢化社会の中で国内自給率 50%を達成するには、少ない労力で収量性の高い作物の品種開発とその栽培管理技術の開発が必要である。穀類は保存性もよく海外からの輸入も比較的容易であるため、海外生産に依存することは可能であるが、野菜などそれ以外の作物にあっては、そのような能力の品種開発やその栽培管理技術の開発が大きな課題である。

海外から 50%の食料を持続的に調達するには、輸出国の食料生産の安定化に貢献することで、結果として我が国への食料輸出を安定化させることも重要である。我が国が輸入をしている国々の食料生産を安定化する品種開発や食料生産技術を当該国と共同開発し、それらの品種や技術を普及することが必要である。

3. 研究内容 (成果の達成達成時期と具体的方策)

(1) フード・セキュリティ・ポリシーの構築と社会的涵養：社会科学的解析に基づいて、食料を持続的に確保する戦略を構築すると共に、その戦略を国民に涵養するシステムの構築と実践を行う。

(2) 持続的食料増産のための TILLING センターとネットワーク構築：実用的な品種開発のプラットフォームとして期待されている TILLING 技術を主要作物で確立し、既存の TILLING プラットホームも併せてネットワーク化を諮り、有効利用のシステム構築を行う。併せて、NGS を使った遺伝情報整備が遅れている作物についても情報整備を行う。

(3) 次世代生物資源を活用した食料増産技術の開発：(2) で確立した TILLING センターを活用して、フードセキュリティ確立に向け、国内生産向けには省力品種の開発や輸出国向けには超日持ち性品種など次世代作物開発を産業界と連携して実施する。

(4) 次世代作物の栽培・流通・利用技術の開発：(3) で開発した品種の栽培技術、流通技術、加工技術を含めた有効利用技術を産学連携で開発する。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：

・食料の流通が世界規模で行われている中で、気候変動や政治情勢の変化 (例えば、TPP や FTA) などの要因で、食料生産や輸出入の問題が顕在化しており、世界レベルの食料安定確保が喫緊の課題となっている。

・我が国に目を向けると、少子高齢化へと邁進する社会構造の変化の中で、内の 50%、外の 50%の食料確保に秘策が必要である

研究シーズ：

・生物多様性条約 (COP10) の締結により、生物遺伝 (子) 資源の活用が世界的にタイトになる中、変異体の新規遺伝子資源 (次世代生物資源) としての期待が高まっている。

- ・ NGS 技術の進歩により、次世代生物資源の遺伝子レベルでの解析が加速している。
- ・ 次世代遺伝子資源の利用技術として TILLING の有効性が実証されつつある。既に、トマトなど一部の作物では、TILLING プラットホームが構築され、有効性が立証されつつある。

5. 参画が見込まれる研究者層

社会経済学者、人口問題研究者、食料問題研究者、気象学者、作物育種学者、作物栽培学者、作物栄養学者、作物防疫学者、作物流通利用学者

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

- ・ 研究推進期間を 15 年間で設定する。
- ・ 第 1 期 5 年間に拠点（仮称：TILLING センター）を設置し、主要な作物（トマト、コムギ、オオムギ、ダイズ、メロン、ソバ、イネ、ナタネ、ダイコン、ナス、テンサイ、サトウキビ、トウモロコシなど）の TILLING プラットホームを構築する。同時に、既に TILLING プラットホームの構築が進んでいる品目（イネ、ムギ、ダイズ、トマト）については、その強化と拠点とのネットワーク化を推進する。併せて、社会科学研究者と自然科学研究者が連携し、フード・セキュリティ・ポリシーに裏打ちされた次世代作物品種や開発技術のイメージを確立する。
- ・ 第 2 期 5 年で TILLING センターを中心に、産学連携でフード・セキュリティ確立に資する次世代作物の品種開発を推進する。
- ・ 第 3 期 5 年は、開発された品種の効果的な栽培技術、流通技術、加工利用技術の開発を推進する。なお、本課題は、第 2 期の課題の推進に併せて、繰り上げ実施する。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

本研究で開発されてくる次世代作物品種群は、従来の突然変異育種技術を基盤に、最新の次世代シーケンサーの活用で整備される遺伝子資源情報や次世代生物資源を活用して開発される。一方、これらの品種群は、あくまで従来技術の範疇であるため、GM 作物開発で課題となっている法規制、倫理、社会受容などの推進上の課題はなく、基盤開発から実用利用までスムーズに推進されると期待される。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的效果など）

科学技術上の効果：本研究により得られた成果が活用されるに従って、植物科学の実用技術としての側面を確実に社会に発信することができ、それらの科学技術に対する社会の信頼を大幅に回復することができる。

社会経済的效果：少子高齢化など我が国・世界が抱える共通の課題を見据えた食料問題解決の糸口がつかめると共に、我が国が将来的に食料を持続的に確保できる戦略の構築とそれに向けた道筋ができる。これらは、国内外の社会経済の安定に寄与する。

9. 備考

2000 年代前半から次世代突然変異育種技術として TILLING 技術が注目され、いくつかの植物種で TILLING プラットホームが構築され、基礎研究及び開発研究のツールとして有効性が立証されつつある。近年、次世代シーケンサーを使用したゲノム解読が迅速・比較的低コストで行えるようになり、多様な作物でゲノム情報が集積するに従って、益々、TILLING プラットホームの次世代育種ツールとしての期待は高まっている。しかし、そのプラットホーム構築には一時的に多大な労力が必要になり、オープンソースとしてのプラットホームはない。

提案 10

1. 研究領域名称

生物資源としての植物の高度利用と利用拡大に向けた代謝と進化の統合的理解

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

生物資源の高度利用に代謝の理解は必須である。歴史的に生化学分野を中心に発展してきた代謝経路と調節機構の研究に加えて、さまざまな分析技術の発展により代謝フローを器官レベルや個体レベルで理解する研究が急速に展開してきた。また、近年、次世代シーケンサーに代表される革新的技術開発により、研究対象は少数のモデル生物からユニークな生物種へ大きな広がりを見せている。植物の特徴である種の多様性を対象とした代謝研究の実現への技術的な基盤が整ってきた。

(2) 社会・経済的背景（ニーズ）

植物は地球生態系の一次生産者であり、光合成による炭素固定とエネルギー貯蔵および物質変換を利用して人類は生存してきた。持続可能社会の構築において、生物資源なかでも植物の高度利用は中心的な役割を果たすことが期待される。近年、代替エネルギーの確保では太陽光や地熱などの自然エネルギーの直接的な貯蔵が注目されているが、生物である人間は、自然エネルギー問題とは次元が異なる基本的な課題として、農産物に代表される有機物利用は必須である。従来型の衣食住に加えて、環境へ配慮した物質生産や医薬品のリード化合物といった点からも植物は期待されている。ただし、国内の農林水産業にはコストやスペースという大きな問題があり、海外の安価な大量生産と競合するには圧倒的に不利な状況にある。現在、国内で新たな生物生産のスタイルとして植物工場が注目されている。植物工場は人工的に制御した環境のもと、安定した栽培環境で計画的な生産が可能となる。新たな産業として発展するためには、高付加価値作物の開発による有用性の実証が求められている。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

シロイヌナズナを中心に大きく進んだ植物をリファレンスとして、有用な成分を生産することが知られている薬草植物や、分析が十分にされてこなかった野生植物、進化的に利用されてこなかったコケ植物やシダ植物などの生物資源としての多様性を求めて、代謝研究を展開する。

これらの植物に関して応用展開を視野に代謝研究を展開する。そして、モデリングやシミュレーションを出口として、将来の植物科学の基盤となる成果を蓄積する。

(1) 生物遺伝子資源の開発（初期）

- ・植物の進化軸に基づいた多様な遺伝資源の収集と情報データベースの構築
- ・発生遺伝子の進化的起源と変遷に関する研究
- ・薬用植物や特殊化合物蓄積植物のゲノム情報解析
- ・多様な有用植物の空間的（組織・器官）遺伝子発現プロファイルの収集
- ・多様な有用植物の時間的（発生ステージによる）遺伝子発現プロファイルの収集
- ・有用植物の発生制御カスケードと代謝遺伝子発現の相関

(2) 統合的メタボロミクス（初期から中期）

- ・非モデル植物の代謝フローと遺伝子発現を俯瞰的に解析する分析技術開発
- ・1細胞代謝フロー分析技術開発
- ・代謝計測と遺伝子発現可視化技術の融合技術開発

(3) 代謝制御の分子ネットワーク（中期から後期）

- ・遺伝子発現と代謝集積のモデリング
- ・器官分化と代謝集積のシミュレーション
- ・集積器官における分子ネットワークの解明

- ・単純な体制をもつ植物における分子ネットワークと物質蓄積の完全理解

4. 提案の適時性

社会ニーズ：エネルギー消費を抑えて、物質生産や食料生産を安定化させることは、社会的要請である。また、生態系を乱さず、持続的であることは前提条件である。安定した生物生産が可能な植物工場は、国土が狭く集約的利用が求められる我が国に必要な分野である。

研究シーズ：次世代シーケンサーに代表される遺伝子解析技術や質量分析技術に代表される代謝分析技術に支えられて、研究対象が従来のモデル生物から多種多様な材料に広がった。これまで細分化されていた発生・進化・代謝の総合的研究が可能となり、急速に植物科学の基礎と応用展開が連携できる体制が整ってきた。モデル生物の知見を有用植物や進化的に離れて利用されてこなかった植物に応用する基盤が整ってきた。

5. 参画が見込まれる研究者層

基礎植物科学者（植物生理学、植物遺伝学、植物発生学）、植物育種研究者、生化学・分析化学・酵素化学研究者、種苗・食品企業研究者

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

拠点整備の重要性：本プロポーザルでは、最先端の機器を駆使した高度な解析技術が基盤となっている。機器の設置や操作のみならず、生み出すデータの分析やデータベースの整備のために、拠点施設の選定と整備が必要である。研究費の配分は解析拠点に集中し、データを必要とする研究者にタイムリーに提供する分業体制が望ましい。研究経費は配分されなくても、材料を供給するとデータが戻る仕組みも必要である。

チーム型研究の推進：研究材料の多様性を支えるのは、多様な視点をもつ研究者の層の厚さである。個人やコミュニティの発想を実現するため、個々の研究者を一定のチームとして組織し、代謝と進化の統合的理解にむけた目的意識の高い組織を形成する。

推進期間：米国のシロイヌナズナ研究は、ゲノム解読後10年という単位で目標を設定し、ゲノム情報の徹底的利用と遺伝子機能解明を目指した。この戦略は枠組みで捉えた時には大きな成功を収めた。継続的な研究を支援するには、10年程度の長期的な視点が求められる。その一方で、短期的な成果の積み上げも重要である。全体の流れのなかで3-5年程度の小目標を多数設定し、推進することが望ましい。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

我が国の植物科学の基礎研究レベルは極めて高い水準にある。その一方で、分野の細分化や縦割りの状況は大きい。例えば、栽培学と植物生理学、育種学と分子遺伝学、食品工業と農業といった分野の壁は大きい。このような学問体系を超えた施策を実施することが望まれる。法的な規制や制度は農業の政策とも大きく関連する。倫理や社会受容においては、遺伝子組換えを正確に理解して判断する社会が形成されていない。この状況の打破のためには、植物工場のような管理された環境で、高度な植物栽培を実践して、技術の受容を進めることが重要である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：代謝生化学、植物分子生物学、植物生理学などの研究分野の基礎研究成果を推進することによって医療に偏りがちな生命科学研究の分野が拡大し、相乗的に科学技術を発展させる効果が見込まれる。さまざまな生物材料に微量分析技術、遺伝子解析技術を適用することで、現在の技術の問題点も明らかにでき、それを乗り越えた時には科学技術の前進が期待される。

社会経済的効果：新たな代謝経路の発見によって新規な代謝産物の高度利用が可能となる。また、生物生

産基盤の構築は、安定した植物資源の生産と供給が可能となるだけでなく、我が国が植物工場といった分野で国際的な競争力を確保することにつながる。

提案 11

1. 研究領域名称

食品 / 生薬の機能・安全

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

食品に含まれる代謝物データ行列（メタボローム）と分析対象食品の二次機能性能のデータ行列との相関関係を解析し、モデル化することにより、メタボロームを説明変数として食品の二次機能や、生薬の商品価値等が推定予測可能であることが、近年、報告されている。本技術は食品一般に対して汎用性があると思われるが、網羅的な検証は実施されていない。ナノフーズ技術は、欧州を中心に研究されており、種々の応用展開が期待されているが、日本においては、表立って研究が盛んなわけではない。企業内で秘密裏に進行していると思われる。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

日本の食品の高い安全性は世界的にも最高レベルにあり、各国の信頼を勝ち得ていると言える。日本食の独自性（すなわち二次性能）も高く評価されていると言える。これらの認識は日本食のブランドイメージ形成に貢献しており、成長輸出産業としての可能性を秘めている。したがって、今後も当該状況は死守することが国是とおもわれる。そのためには、徹底的に社会実装（産業実用化）を念頭にいった高いレベルの技術開発研究に集中的に支援することが国策として求められる。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

食品と生薬の機能と安全を担保するための基礎技術を社会実装を念頭において研究 / 開発することを目的とする国策研究。以下の項目を含む。

- 1) 食品ならびに生薬の性能の定量的表現方法の開発。
- 2) 上記 1) で開発した定量的表現方法による食品 / 生薬性能の数値化ならびに、品質保証への応用。
- 3) 食品 / 生薬に含まれる有害物質（生産土壌由来重金属、残留農薬、製造工程由来化学物質等）のハイスループット網羅分析系の開発と食品安全規制科学への応用
- 4) 食品加工技術の進歩に伴う、機能性、安全性の変動を検証する。食品安全規制科学へフィードバックする。

4. 提案の適時性

（食品の第三次機能研究支援は厳選すべき）

これまで、食品の第三次機能解明研究に対して多額の国策研究支援がなされてきた。その結果として、数億円規模の研究支援では、動物実験レベルで学術論文がいくつか出のみであり、真の機能解明には 10 倍以上の多額の研究費支援が必要であることが示唆された。すべての食品の第三次機能研究が無意味との判断を下すことは出来ないが一般的には費用対効果は極めて不透明である。社会実装を考えた国策研究として第三次研究を支援する場合、実用化を決定している企業の実用化研究（増産研究や、品質保証研究）を厳選してマッチングファンド形式で企業支援すべきであり、実験室スケールの基礎科学に無作為に支援することは慎むべきと思われる。もちろん、研究者独自の発案による草の根研究は重要であるので、それらのボトムアップ研究は科研費等で支援すべきであることは言うまでも無い。

（食品の第一次機能研究と植物科学研究のグリーゾーンの明確化）

食品の一次機能研究として、農産物の増産や、特定成分増強を謳った植物基礎科学研究に研究支援され

てきた傾向がある。実用作物の食品として第一次機能増強は、生産物代謝能と貯蔵能のバランスが重要であるとともに、加える摂動は、植物にストレスを与えて成長が阻害されない範囲に限定される。したがって、実際の実用作物のボディプランや代謝、ストレス耐性能、成長性に大きく依存する。それらの性能の植物間の差異は大きく、シロイヌナズナをはじめとしたモデル実験植物を材料とした学術研究成果は一般性、拡張性は担保されておらず、直接、食品の一次機能増強に繋がることがほとんどありえない。このような研究支援は、前世紀末までは、許された状況かもしれないが、社会実装を念頭においた場合は、問題がある。

今後は、「一次機能研究」として植物研究に限って言えば、モデル実験植物で検証が完了し、実用植物での予備実験結果を元にした出口が明確な応用研究を中心に支援することが妥当と思われる。もちろん、モデル実験植物を材料とした植物基礎科学も重要であるので、研究者独自の発案によるボトムアップ研究は科研費等で支援すべきであることは言うまでも無い。

(食品の第二次機能の定量的表現技術の開発と応用)

日本食は国際的にも評価が高く、今後、輸出産業として有望である。そのためには、二次機能の担保が必要である。一般に、食品の第二次機能（おいしさ）の完全解明は現段階では極めて困難であるが、食品を対象とした定量的分析型官能試験（QDA等）結果と食品中に含まれる多成分との相関関係解析を行うことにより、食品成分の種類と相対量を説明変数とした二次機能の性能評価を行うことは技術的に可能であることがわかってきた。輸出品目として有望な食品の二次機能の定量的表現と応用に係わる研究にファンディングすることは、次世代の食品工学の発展に寄与するとともに、国内食品産業を輸出産業として育成することにも繋がる。本研究は出口を明確にするために、大学等と民間企業との共同研究にファンディングすることが望ましいとおもわれる。

(食品/生薬に含まれる有害物質（生産土壌由来重金属、残留農薬、製造工程由来化学物質等）のハイスループット網羅分析系の開発と食品安全規制科学への応用)

前述したように、日本の食品の機能と安全のレベルは高く、海外における日本食のブランドイメージの向上にもつながっている。これは、厳しい安全規制と、それを遵守する企業文化、加えて企業の自主的な厳しい品質保証のなせる技である。今後、さらに本特質に磨きをかけることにより、国際的競争力の向上を図ることは輸出産業をさらに育成することに繋がる。技術開発と応用展開にバランスよく研究支援すべきである。

(食品加工技術の進歩に伴う、機能性、安全性の変動を検証する。食品安全規制科学へフィードバックする。)

前述のように、ナノフード技術等の次世代食品加工技術が一般化するとともに、食品成分の過剰摂取のリスクが発生する。食履歴がある食品に対しても、ナノフード技術や、高濃度エキシ化技術等を適用している場合、どのようなリスクが考えられるかについて、研究を行う必要がある。このような研究は、大学単独では困難であり、農水省の独法研究所等が中心となることが肝要である。

5. 参画が見込まれる研究者層

1) 食品/生薬に含まれる多成分と食品の有する多機能の相関関係を解析し、モデル化するための基盤的研究を行う研究者：大学工学系、大学情報系、大学薬学系を中心とした食品工学研究者、生薬研究者、農水食品総合研究所、産総研の研究者、国立食品医薬品衛生研究所の研究者、および一部の食品企業研究者等

2) 上記1)の基盤研究で確立された方法論にもとづく具体的な食品/生薬機能解析を応用した研究へ参画することが考えられる研究者：

2-1) 食品第三次機能の定量的評価、製品品質管理への応用：大学保健学系、大学栄養系、大学薬学系を中心とした食品第三次機能研究者、各県の公設試等の食品工学研究者、食品加工企業の研究者等

2-2) 食品第二次機能（おいしさ）の定量化、原料選抜、製造工程管理、製品品質管理等への応用を試みる食品企業研究者

2-3) 生薬の品質評価、製造、保管、流通工程管理へ応用を試みる研究者、生薬流通業者、生薬製剤企業等

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

当該研究領域は黎明期にあるため、まずは、JST-CREST や生研機構等の基盤技術開発型のファンド形態での支援が望ましい。研究グループは、食品機能解析基盤技術を開発する川上の研究者と、当該技術を利用して具体的に食品製造現場での応用を提示できる川下研究者との共同研究を厳選して支援することが肝要である。応用を騙った基礎研究への支援は科研費にまかせて、真に出口を見据えた高度な実用化研究の加速に国策研究としての方向性をセットすべきと考える。

基盤技術開発には、高度な技術とノウハウが必要であり、人材の確保が難しい。質量分析等の設備整備は資金を投入すれば、容易に達成されるが、実際の研究者の質によってアウトプットの質は大きくかわる。しがたって、研究拠点を考えた場合、メタボロミクス研究を本格的に実施している研究拠点が全国に数カ所存在するので当該インフラとの有効利用を手始めに考え、成功例を作ってからミラー研究拠点を展開するといったスキームが安全である。これらの研究支援を6年～7年実施することにより基盤技術の確立が可能である。続いて、全国のローカル食品企業への技術移転を考える。技術移転のハブ拠点として、全国の県立公設試等が適当である。ファンド形態としては、実用化ファンド（JST-A-Step や、経産省のサポイン等）が適当である。推進期間は、6年～7年を目処にして、一旦総括すべきと思われる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

食品の第二次機能解析研究に関しては、特段の制度上の制約は存在しない。また、倫理的問題も想定できない。社会受容の問題も考慮不要とおもわれる。食品の第三次機能解析研究は、大規模ヒト介入試験が必要になる段階において、関連法規制等の整備が必要になるかもしれない。既存の生薬製剤の機能解析研究の範囲では社会受容にかかわる問題は少ないとおもわれるが、新規な生理活性食品やサプリメント研究は注意深く社会受容を確認しながら進める慎重さが求められる。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：

本研究の成功により、これまで曖昧だった食品第二次機能、第三次機能の定量的表現が可能になり、より高度な有効成分の探索研究、機能解明研究が可能となる。食品の加工技術（エキシ化、ナノフーズ技術等）の進歩に対応した食品の安全性評価基準制定に資する技術を提供できる。

社会経済的効果：

食品製造現場において、原料選抜、製造工程管理のコストが低減し、不良品率が低下し、製品歩留まりが向上する。さらに、流通保管工程の最適化が容易となり、コストダウンに繋がる。日本食の総合的定量評価が可能になり、輸出品目として高品質を担保することが可能になる。

9. 備考 記入なし

10. 自由記述

(はじめに)

食品の機能は、第一次機能（栄養機能）、第二次機能（嗜好、食感機能）、第三次機能（健康性機能・生体調節機能）に大別され、すべての食品が上記を有している。一方、生薬は我が国の法律では、日本薬局方収載されている列記とした医薬品であり、一線が画されている。しかしながら、全容未解明の多成分から構成される多機能コモディティである生薬は含有成分と薬効の相関関係解析が極めて困難であり、低分子純品から構成される通常の医薬品の薬効解析戦術は全く通用しない。現時点において、生薬の機能解析は、食品の第三次機能解析戦術を踏襲する以外の良策は無い。中国・日本では、古くから「医食同源」という言葉が伝承されてきたが、これは、生薬機能と食品の第三次機能の区別していないことを表現している。上記の状況を鑑みて、本項では生薬を取って食品機能解析研究の対象として取り上げる。

(食品の機能解析研究の経緯)

食品の機能解析研究のこれまでの経緯を振り返ると、戦後の食糧難の時代には、国民のカロリー不足による健康障害が深刻であり、食品の第一次機能増強が国是として研究開発の主対象となった時期があった。その時期には、おいしさ（第二次機能）は、後回しにされ、第三次機能は考慮されてこなかった。その後、高度成長期を経て飽食の時代を迎え、国民の食の健康問題はカロリー不足からカロリー過剰に移行するとともに、より美味しいもの、より健康に良いものを求めて第二次機能、第三次機能の増強が研究課題として浮上してきた。第一次機能研究が食品中の主成分である蛋白質、脂質、糖質等の質と量の向上が主題であり、研究戦略立案は比較的容易であった。対して、食品の第二次機能、第三次機能は食品中に含まれる複数の微量成分主成分が相乗的に作用することで形成されることが多く、性能評価も困難だった。そのような理由から、長い間、進捗が遅かった。

(食品の第三次機能研究)

近年、技術の進展に伴い、主として食品の第三次機能研究は進展を遂げている。食品の第三次機能研究はいわゆる「健康食品ブーム」からさかんになり、特定保健食品（とくほ）の認証を受けることが市場価値を担保することに繋がるという雰囲気形成と呼応し、大手食品企業研究所を中心としてさかんに研究された。その中で、効能を担う成分がある程度特定され、容量依存性が確認された一部の食品については第三次機能研究は一定の成果を挙げている。しかしながら、研究の多くが培養細胞や実験動物を用いたシステムにおける要素還元型研究であり、ヒトが経口摂取した場合における機能発現との相関関係は担保されていない。その理由を簡単に述べる。食品に含まれる多成分が、消化管から分泌される酵素や腸内に生息する無数の微生物コンソーシアムによる変換を受け、腸管から吸収され、肝臓の初回通過時に変換を受けて全身作用するはずであるが、培養細胞や実験動物を用いた系ではヒトでの作用様式は再現不可能であるからである。問題解決のためには、大規模ヒト介入試験の実施が必要だが費用対効果を鑑みてほとんど実施されない現状がある。生薬の機能研究も実は類似の状況にある。日中国交正常化以降、生薬に含まれる薬効成分研究がさかんとなり、日本薬局方収載された生薬に含まれる多くの生理活性物質が分離同定された。1980年代以降の急速なバイオテクノロジーの技術革新に伴い、前記の食品の第三次機能研究と同様な戦術により、生薬中の薬効成分の要素還元的研究がさかんとなり、一定の成果を示したと言えるが、生薬の機能が解明された状況からは程遠い。日本国内において生薬は漢方方剤として複数の生薬の混合状態で処方し、経口投与されることが一般的である。したがって、食品と同じように複数成分が消化管、腸管吸収、肝臓初回通過といったプロセスを経て全身作用にいたるわけであり、培養細胞や動物実験を用いた要素還元型研究ではよほどの幸運に恵まれない限り機能解析は困難であることは容易に類推できる。

日本薬局方改正16局（2011年）において、216種の生薬が収載されているが、それらのなかで、定量的薬効成分マーカーが規定されているのは、わずかに52種のみであり、残りの4分の3の生薬については、薬効を担う成分に関する化合物記載が全く無い。すなわち、生薬全体としては薬効を有することが経験的にわかっているので薬として認められているが、薬効を担う成分は不明ということである。それらの生薬については、薬局方の生薬の性状に記載されているスペックは、色、形、特有の味、匂い等であり、その評価は生薬取扱業者の善意の官能試験に依存しているのが現状である。当該官能試験は、食品の定量的分析官能試験と技術基盤は全く同一である。すなわち、日本薬局方に収載されている生薬の市場における品質評価は食品の第二次機能解析と同一の方法論によってなされていると言っても過言では無い。

(食品の第二次機能研究)

食品の第二次機能（おいしさ）は、嗜好・官能に係わる性能であり、コモディティーとしての商品価値に直結する重要な性能であるが、その定量的比較が極めて難しい性能といえる。これまでは、食品製造会社が独自の尺度で二次機能を規定し、熟練者による官能試験によって性能評価を行ってきた。各社の技術は公表されること無くノウハウとして秘匿され、技術の一般性、拡張性を検証されること無く現在にい

たっている。微妙な二次機能の差異を定量的に官能するためには、熟練が必要であるが、各社とも、熟練官能試験者は高齢化が進んでおり、技術の伝承に不安を抱えている。最近、熟練官能試験者からの技術移転を念頭に置いて、定量的分析型官能試験（QDA 試験）等による食品官能性能の客観的定量的記述をする試みが各社において徐々に行われるようになってきた。さらに、メタボロミクス（網羅的代謝物解析）の技術を食品解析に応用することにより、食品の二次機能と食品含有多成分間の網羅的相関解析の可能性が示された。食品企業を中心にして、食品製造原料入荷分析、食品製造工程管理、製品の嗜好性能鑑定、保管流通工程の最適化等への応用が各社がノウハウとして秘密裏に研究着手している状況にある。日本薬局方に収載される生薬の市場における品質評価は流通業者の官能試験に依存していると述べたが、当該官能試験者も熟練者の高齢化に伴う技術移転問題が表面化している。

（食品に付随する有害物質の分析と規制科学）

食品/生薬には、生産・流通のプロセスにおいて種々の有害物質が暴露する危険性をはらんでいる。健康被害を及ぼす可能性要因として、土壌由来の重金属や微生物汚染に加えて、残留農薬、抗生物質、防腐剤、安定剤等が考えられる。それらの含有量は厚生労働省、農林水産省の法律等によって規定されており、善良な業者による国内生産についてはかなりの高レベルで安全・安心が担保されていると考えられている。しかしながら、海外からの輸入品については、国産レベルでの品質がかならずしも期待できないといわれている。付加価値が比較的低い食品を対象として、ハイスループットかつ堅牢な検査システムを安価に構築する必要性が急上昇しているのが現状である。

（食品加工に係わる新技術）

食品の二次機能を長期間保つために、缶詰、レトルト、凍結乾燥、真空包装等の技術は古くから実用化されてきた。近年、重要成分の簡易大量摂取を目的とした成分抽出濃縮技術が各論として展開されている。巷でよく見る「レモン〇〇個分のビタミンC」とか、「野菜〇〇個分の植物繊維」といった表現は濃縮エキス技術が用いられている場合が多い。また、近年進歩が著しいナノフーズ技術を用いて、食品の粒径を制御することにより、二次機能（食味、のどこし、その他）の向上をはかるとともに、腸管からの吸収効率を高めることは可能になってきた。これらの技術は、食品の付加価値向上に寄与し、消費者にとって安価に高性能食品が手に入る可能性を提供する可能性が高い。しかしながら、濃縮エキス技術や、ナノフーズ技術を組み合わせることにより、通常食品からの摂取量の数十倍から100倍超の高容量摂取が可能になった場合、新たな懸念材料が生じてくる。すなわち、長年の食履歴がある食品は、基本的には安全とみなされているが、上記技術によって有効成分の過剰摂取を実施した場合、通常食品では想定できない作用を及ぼす可能性は否定出来ない。

提案 12

1. 研究領域名称

予防医学に資する次世代型機能性食品の研究開発

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

動物ウイルス感染の懸念がなく、低コストで大量生産が可能なことから、遺伝子組換え植物を用いた医薬品の商業生産は近年海外で盛んに行われている。国内では圃場栽培への規制が厳しいために植物工場と連携し、医薬品成分を発現させた遺伝子組換え作物の試験栽培が始まっている。一方、国主導の研究開発により、可食部に健康機能性成分や医薬品的な成分を含んだ遺伝子組換え作物の開発（次世代型機能性食品と呼ぶ）はイネを中心として重点的に進められてきており、実用化が進めば予防医学的な観点から画期

的な成果をもたらすものと期待される。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

厚生労働省が発表した「平成 22 年度医療費の動向」を見ると、ガンや心疾患・脳血管疾患による疾病、アレルギー疾患など、医療費の総額は 36 兆円を超えている。また、70 歳以上の高齢者に対する医療費は全体の実に 44% を占める。今後、団塊世代の高齢化に伴い、医療費は更に増大するものと危惧される。

治療ではなく、病気の発症前、すなわち未病の状態です予防医学的な処置により進行を食い止めることができれば、重篤な疾病に罹るリスクは大幅に減少する。「医食同源」の考えは洋の東西を問わず古くから受入れられているが、日々の食生活の中で、健康機能性成分や医薬品的な成分を適切に食品から摂取することで、予防効果は最大限に発揮される。テラーメイド医療と同様に、食品科学の分野でも、個人差を考慮に入れた食事設計（テラーメイド食品）の必要性が叫ばれており、より積極的な食品利用のあり方に注目が集まっている。

花粉症などのアレルギー疾患は大きな社会問題となっており、医療費のみならず、これが元となる労働損失は計り知れない。また、「認知症」や「寝たきり状態」に伴う介護サービス費用だけで年間 6 兆円にのぼる。高齢者の生活の質（QOL）を維持し、介護負担を減らすためにも次世代型機能性食品の開発とその活用は大きな意味を持つ。

3. 研究内容（成果の達成時期と具体的方策）

(1) 疾患に応じた予防効果が期待できる機能性成分の選定と高発現系の検討：

①生理活性ペプチドの網羅的なスクリーニングによる創薬：既存のものを含めて、生活習慣病などに予防効果が認められる生理活性ペプチドを網羅的に抽出し、対象とする疾患別に候補を絞り込む。

②アミノ酸やビタミン、健康油（DHA、EPA、オレイン酸）、機能性タンパク質など、有効な生理活性成分の検討：既存の臨床試験成果を元にして、有効性からターゲットを絞りこむ。

③導入遺伝子の検討：ペプチドに対応した人工遺伝子の設計、タンパク質コード遺伝子の至適発現系、代謝系関連遺伝子群カセットの導入など、植物細胞内での最適な発現のための検討。

(2) 機能性作物の開発：導入遺伝子、導入技術、植物種の選定、発現組織の検討。

①社会的な受容（PA）に配慮した技術の検討と組換え体の作出：安全性を担保した組換え作物を作出するために、現在までに確立した手法（植物内生遺伝子を選抜マーカーにしたものやピンポイントのゲノム改変を可能にする New Plant Breeding Techniques の活用など）を積極的に導入する。

②コメを中心として、改変の対象とする作物を検討する（遺伝子導入が可能であり、日常的に利用頻度が高い作物を抽出）

(3) 植物工場での栽培条件の検討：研究開発を円滑に進めるために、圃場栽培を回避し、完全制御型の植物工場で作物を栽培する。目的の成分を高含有させるために栽培環境（光条件、肥料成分など）の最適化を図る。

(4) 食品の機能性試験：作出された作物（食品）の成分分析、食品安全性試験、各種疾患モデル動物を用いた臨床試験の実施。

(5) テラーメイドな食事設計のシミュレーション：開発された食品を日常の食生活の中で、個々人の体質や症状に合わせてどのように摂取すれば最も効果が発揮できるのか、ニュートリノゲノミクス（栄養ゲノム学）の知見を取り入れ、コンピューター・シミュレーションによって望ましい食事設計をデザインする。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：対象とする生活習慣病や認知症は、その予備群を加えれば国民の二人に一人が該当する。その進行を抑えない限りやがて重篤化する。アレルギー疾患は一旦発病すれば、対症的な治療しか残されていない。今までに食を通じたこれら疾患予防のために、厚生労働省は 2003 年に「健康日本 21（21 世紀における国民健康づくり運動）」を始めた。その中の「栄養と食生活」では機能性食品が取り上げられており、

国民の間でもその効能が浸透している。しかし、残念ながら、予防医学的な観点からその対策が深化したとは言えない。提案する研究開発が実現すれば、革新的な先制医療のモデルになりうると確信する。先制医療の理念は第4期科学技術基本計画（平成23年）・ライフサイエンス領域のイノベーション「革新的な予防法の開発」とも合致しており、社会ニーズに十分に適うものである。これが実現することで、高齢者の健康と高いQOLが到達できるだけでなく、医療費の削減、経験を積んだ高齢者労働人口減少の歯止めにもつながる。

研究シーズ：我が国は以下の研究分野は世界的に見てもトップクラスと言っても過言ではない：薬理学における生理活性成分としての機能性ペプチドの発見、その創薬への応用。植物科学における可食部への物質集積機構の解明。食品機能性成分の科学。環境工学分野での植物工場の実用化。これら基盤的な技術を相互に連携されることで、社会問題の解決に貢献する画期的な成果が期待される。

5. 参画が見込まれる研究者層

植物関係（育種、分子生物、遺伝子工学）、機能性ペプチド（薬学、有機合成、基礎医学、ドラッグデリバリー）、食品機能性（食品科学、実験病理学、栄養ゲノム学）、植物工場（農業環境工学、制御工学）、医用システム（モデル化とシミュレーション）

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

(1) 推進体制：研究推進するための研究チームを構成。それぞれ以下の5つの研究分野を担当。

- ① 様々な疾病・症状に応じた生理活性ペプチド、低分子化合物（アミノ酸、ビタミン、健康油など）を検索しシーズを抽出。
- ② これらシーズを特定の作物（植物や組織の検討）の可食部に効率よく発現。
- ③ 植物工場での栽培条件の検討。
- ④ 作物の食品としての安全性、及び疾患モデル動物を用いた機能性評価。
- ⑤ 開発した各種機能性食品を元にして個人ベースの食事設計のシミュレーション。

(2) 推進機関（達成までの時間）

最も律速になると思われるのが②の植物を作出するプロセスである。この期間は世代の充進を含めて最低4年は必要。それ以外はオーバーラップする期間を考慮して、全体で6～7年の期間で完了すると見込まれる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

我が国で進められてきた生理活性ペプチド、植物細胞内での物質集積などの基礎研究レベルは高い。また、遺伝子操作を用いた特定の機能性成分を含有する植物の開発も世界レベルである。しかし、現在まで国民の健康向上に、これら研究成果が活かされていないのは、時間軸に沿って個々の研究を配置したときに、異分野間の連携がほとんどないために、有望なシーズがあるにも関わらず研究開発が途中で中断されてしまうためである。これに加えて、機能性作物の開発のような高度なイノベーションを含有する製品開発を従来の規制の枠内で安全性審査を行う傾向がある（必然的に複雑なプロセスを経るために長い時間が掛かる）。制度面の改善・弾力的な運用により研究開発の成果を迅速に社会還元する仕組みを確立する必要がある。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的效果など）

科学技術上の効果：本来高い研究水準にある我が国の基礎研究の成果を基盤として学際的な研究を図ることで、より社会貢献を果たすことができる。また、日本が「機能性作物の開発と実用化」の分野で国際的に先導的な役割を果たすことができる。

社会経済的效果：生活習慣病、アレルギー疾患、認知症など、今や国民病とも言える疾患の予防を積極的

に進めることができる。新しい予防医学が定着するだけでなく、経済的な側面、労働人口の実質的な底上げなど社会経済全体に大きなプラス効果をもたらすものと期待される。また、従来の健康食品を高度化させた、次世代型機能性食品はより付加価値を持つ作物を元にするために、従来の農業とは一線を画する新たな産業として今後成長することも期待できる。

提案 13

1. 研究領域名称

有効成分蓄積機構の解明・ゲノム育種と新規制御栽培法の開発による主要生薬原料供給系の構築

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

植物科学の一分野である生薬の薬効成分の植物培養系を用いた生産に関する研究は、1970～80年代に我が国が世界をリードし、一部成分の生産系が確立した。しかし、その後はモデル植物が植物科学の主要研究対象となり、生薬原料植物を用いた研究は1980年代以降殆ど進展していない。一方、大規模遺伝子解析に始まるオミックス解析の進展により、現在では遺伝子から低分子化合物までの一斉解析とそれらの発現・蓄積の関連性の一体的解析が可能となり、この一体的解析により近年生薬由来の低分子薬効成分の生合成関連遺伝子の同定が開始されている。但し、多糖性薬効成分に関しては、それらの属する多糖種についてモデル植物を用いた生合成系の解析が緒についたところである。なお、ここ近年のDNA塩基配列解析技術の進展により、実用植物のゲノム解析が簡便かつ安価に行えるようになり、植物科学における解析対象がモデル植物から実用植物に移りつつある。

一方、植物の組織培養や人工栽培に関しては、近年植物工場を用いた実用生産が開始され、更にLED等の人工光源の開発と利用の進展により、その生産コストを以前より低く抑えることが可能となりつつある。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

超高齢化社会に突入した我が国において、国民医療費の増大防止は急務であり、そのためには予防医療の充実が求められる。そのためには、日本の伝統医療である漢方の活用と共に、医薬品や特定保健用品中の有効成分の安定供給が必要とされる。漢方薬原料である生薬や、多くの医薬品成分の前駆物質、また特定保健用品中の有効成分の多くは植物由来のものである。

日本においては、これら原料等の植物資源の大部分を輸入に頼っているが、最大の輸国である中華人民共和国が、国内需要の増大及び／または戦略的物質として位置づけることにより、その輸出規制を開始している。またその他の国においても生物多様性条約名古屋議定書（COP10）の締結に伴い、国内天然資源の確保と持続的利用を図ることが促進され、そのため天然由来の外国産植物性有用物質原料の供給量が減少することが予測される。

これらの背景の下、厚生労働省特別事業として平成21年度には「漢方・鍼灸を活用した日本型医療創成のための調査研究」が行われ、厚生労働大臣への提言が行われており（文献1）、その中にも今回の提案に関連する内容が記載されている。従って、今回の提案内容に沿った研究開発の成果は、今後の我が国の安定的な高齢化社会の構築に大きく寄与するものと考えられる。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

本プロポーザルの研究開発では、主要生薬原料等の国内供給系の確立に向けて、植物による物質生産機構の研究とそのための植物生産に関する研究を推進する。以下に記す項目で実施される研究開発を通じて、生薬原料及び植物性有用物質の国内安定供給体勢の構築と、新規植物性有用物質供給産業の構築という実用段階まで到達させることを目的とする。

(1) 主要生薬原料における有用物質合成・蓄積関連遺伝子群の同定と簡便定量系の開発

- ・生薬原料における有用物質の生合成と蓄積機構の解明
 - ・生薬原料における有用物質の生合成と蓄積関連遺伝子の同定と有用物質簡便定量系の開発
- (2) 完全制御による主要生薬原料の低エネルギー高効率安定品質生産システムの構築
- ・制御下栽培条件における有用物質高蓄積系統の分子育種
 - ・完全制御下における低エネルギー高効率安定生産システムの開発

研究開発課題(1)では、主要生薬原料である複数種の植物のそれぞれが含有する有用物質の生合成と蓄積に関して、未解明の機構の解明を進める。ここで得られる新知見と既存の知見を基に、分子育種を行う為に対象とする遺伝子を同定すると共に、有用物質簡便定量系を開発する。対象とする生薬原料植物は、半夏等の使用量が大きい研究開発が遅れている複数の植物(原料生薬使用量等調査報告書:文献2を参照)とし、この研究開発の主要部分は開始から5年以内に完結させることが望まれる。

研究開発課題(2)では、甘草等の研究が進んでいる生薬原料植物と(1)の対象植物において、人工制御栽培下における栽培系を確立し、その条件下における有用物質生産能の高い系統の選抜・開発と育成を遺伝子情報を有効利用しながら進める。温帯～寒帯に分布する生薬原料植物が主な対象となるため、これら植物の生育には光の量と質の制御とともに温度制御が非常に重要となる。そこで植物工場への利用が進みつつあるLED光源よりも更に低発熱で、また幅広い波長での照明と波長毎の強度の調節が容易であると期待されている有機EL発光体等の植物工場への利用法の開発と、個々の植物の栽培に適した有機EL発光体開発により、各生薬原料に適した低コスト栽培系を開発する。

上記(1)、(2)の研究開発から得られる成果により、品質の保証された主要な生薬原料の国内供給系の基盤が確立し、国内での予防医学の安定的な発展に寄与出来ると共に、生薬原料栽培産業という新たな産業の振興につながってゆくことが期待される。また、保証された品質の原料が恒常的に供給されることから、それをもって世界標準とする流れを構築することが可能となる。

4. 提案の適時性

社会ニーズ:漢方薬原料の生薬のみならず多くの薬の有効成分は植物由来物質を原料とする。これらの原料の植物は殆ど中国を始めとする外国からの輸入に頼っているが、今後の供給に不安材料が多い。そこで生薬原料及び植物性有用物質作出植物の国内安定供給体勢の構築が必要である。

研究シーズ:わが国は、植物の生化学、細胞生物学、オミックス生物学において、世界トップクラスの研究水準にある。また生薬の研究においては中国と共に、植物工場関連の研究ではオランダと共に世界をリードしている。更に電気光化学に関しても世界をリードする研究が為されている。従って、これらを有機的に結びつける本提案の研究開発に直ちに取りかかれる状況にある。

5. 参画が見込まれる研究者層

- ・植物科学(植物生化学、植物細胞生物学、植物分子生物学、植物オミックス生物学)
- ・生薬学
- ・生物環境工学
- ・電気光化学

6. 研究領域の支援体制(ファンド形態・拠点施設の必要性等)、推進期間

植物科学、生薬学、生物環境工学、電気光化学の、何れかの組合せからなるチームを組織し、研究を進める。研究開発課題(1)に対応する植物科学と生薬学、(2)に対応する生物環境工学と電気光化学の組合せは比較的容易であるので、(1)に対応するチームを対象の植物毎に組織し、それらと(2)に対応するチームを有機的に組み合わせることにより、主要生薬原料植物を網羅する研究開発を進める。その際に、上記4分野全体をカバー出来る研究組織をコア組織とし、プロジェクト全体の調整にも当らせる。なお、植物科学、生薬学、生物環境工学、電気光化学の、4分野の参画機関は、それぞれ以下のものが望ましい。植物科学:大学、

国研。生薬学：大学、国研、民間研究所、製薬関連企業。 生物環境工学：大学、植物工場関連企業。電気化学：大学、国研、電気・電子・化学関連企業。

植物の生育には、1年以上の期間を必要とするものもあることから、研究に時間を要するものも多い。そこで研究期間は原則7年とし、(1)に関しては初年度から、(2)に関しては初年度からのものと研究期間途中に開始するものの2パターンで研究開発を進める。なお、この研究期間においては、次世代の研究者やこの成果の実用化を図ることの出来る人材の育成にも配慮して研究及び関連の活動を進めて行く。また、この研究期間の終了後に、産業化の可能性が見出せたものについては、更に3年間の実用化に向けた研究開発の為にサポートを行う。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

植物工場での高生産性が植物系統の選抜のためには、遺伝的に多様な背景の系統、すなわち広汎な自生地から採取された系統の利用が望ましい。一方、多くの生薬原料植物は外国産であり、中国のように生きた遺伝子源の海外への移動を禁止している国や、COP10名古屋議定書の批准を行った国からは、生きた植物の獲得が困難となっている。また、国内の栽培農家や薬草園等で栽培される生薬原料植物だけでは、一部の原料植物については十分な多様性を持った集団を確保出来ない恐れがある。

遺伝子組み換え体を用いて生産性の高い系統を作出することも、本提案の結果として想定され得る。そのような系統の栽培品を漢方薬のようにそのまま抽出材料としたり粉末として摂取する場合には、社会的に未だ十分な理解が得られていないという問題点がある。

また、本提案で研究開発を行う栽培法について、その生産過程を医薬品製造過程と捉えてGMP管理が必要と考えるか、それとも原料生産過程と捉えて、現在の漢方薬原料の栽培・輸入過程と同様にGMP管理の対象とする必要が無いかなど、産物の法的地位についての整備が必要である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果： 現在未知であり解析の進んでいない複数の生薬原料植物の持つ多種多様で低分子から高分子に及ぶ有用物質の生合成と蓄積機構が解明される。各種の波長分布を示す有機ELの開発系が確立する。

社会経済的効果： 品質が一定した主要生薬原料の国内安定供給系の基盤が構築され、このことは、海外に依存しない形での医薬品（漢方薬を含む）の国内供給系の確立、ひいては国内での予防医学の安定的な発展に寄与出来ると共に、生薬・医薬原料植物栽培産業の勃興に繋がる。

9. 備考

参考文献等：

1) <http://kampo.tr-networks.org/sr2009/wp-content/uploads/2010/03/proposal-100225.pdf>

2) <http://www.nikkankyo.org/topix/news/111001/shiyouryou-chousa.pdf>

関連施設

遺伝子組み換え植物を持ちいて、植物工場で有用医療用蛋白質等の生産を行う為の基盤を確立することを目指した経済産業省プロジェクト「植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発/植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発」(平成18-22年度)において、産業技術総合研究所に建設された完全閉鎖系植物工場(下アドレスに紹介)。この工場での植物栽培の光源は、従来型のメタルハライドランプを用いているため、エネルギー効率は余り良く無い。

http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H23/120306_youka43/43hyoukasyoui-5.pdf

提案 14

1. 研究領域名称

バイオ医薬品生産におけるゲノムスケールデザイン技術の確立と実用化

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

抗体やサイトカインに代表される機能性蛋白質は世界各国における創薬シーズとして多数研究されており、ここ数年我が国においても多数の製薬企業において研究が加速されている。一方、これらバイオ医薬品の基盤を支える複雑な機能性蛋白質の産業レベルでの高度生産法は未だ経験的な手法に頼っており、最も汎用されている宿主であるチャイニーズハムスター卵巣（CHO）細胞のゲノム配列も 2011 年に解析されたばかりである。動物細胞を用いた機能性蛋白質の高度生産においては、これまで我が国にて培われた発酵技術、生物化学工学、糖鎖工学、蛋白質科学、さらにはゲノム解析、細胞生物学等の高度集積により、医薬品製造に適した工業用動物細胞の論理的なデザイン（人工細胞構築に関連するゲノムスケールデザイン）とそれを用いた生産システムの構築が早急に求められている。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

バイオ医薬品と呼ばれるバイオテクノロジー応用医薬品は、現在、世界のトップ 10 の医薬品のうち、既に半分近くを占めている。さらに代表格である抗体医薬、ワクチンは年 10 数 % の伸びを示し、バイオ医薬品は 2015 年には世界で 15 兆円の市場規模になると推定され、製薬産業を支える重要な基盤医薬品となりつつある。バイオ医薬品は、単純な化合物医薬品と異なり、糖タンパク質に代表される複数の機能部位が組合された複雑な構造をしている場合が多い。これまで、我が国では、分子標的薬を始めとする多数のバイオ医薬品シーズを生み出すことに重点が置かれてきており、一定の成果を示しつつある。一方、医薬品産業政策研究所「製薬産業の将来像－2015 年に向けた産業の使命と課題」にも示されている様に、バイオ医薬品の創薬プロセスにおいては、蛋白質の調製（製造プロセス確立）の部分が大きなボトルネックとなっている。現在上市しているバイオ医薬品の 1/3 は動物細胞株を用いて生産され、現在のボトルネックは、この動物細胞株を用いた高度かつロバスタな産業規模での生産系が迅速に構築可能かどうかであり、本分野の早急な研究開発が望まれている。

3. 研究内容（成果の達成時期と具体的方策）

まず、本提案では、対象細胞を実際にバイオ医薬品生産のための宿主として認可され、上市実績のある宿主細胞と限定する。これまで様々な期待を込めて、植物や昆虫など多数の生産系の開発が開発されているものの、実際に市販される医薬品の製造では全く用いられていない。これは医薬品の製造プロセスにおいては上市実績の無い宿主については、安全面からの許認可のハードルが大変高く、事実上利用不可能であるためである。また、現在の生産系の構築には細胞に発現遺伝子を組み込んだ後、大量の選抜と経験的なバイオプロセス構築の手法が用いられている。これをデザインされた系に変えることにより、現在の創薬プロセスにおける実際のボトルネックの解消がはかれる。

設定されたばかりの医薬品規制の国際調和ガイドライン ICH Q11 においてもプラットフォーム製造の概念が提唱されており、生産系構築の基盤化は本分野での大きな課題を解決できる。

(1) 生体機能を模倣した / 生体機能を超越する細胞のデザイン（創製）

現在生産に用いられている CHO 細胞は、既に上市されている多数のバイオ医薬品の宿主としての実績があり、産業用の大規模培養法やスケールアップ法、さらには医薬品生産に適した無血清培地などが発達し、最大 10g/L の組換え蛋白質生産が可能であるものの、元々は分泌に特化した組織由来ではない。一方、生体内には多数の分泌に特化した細胞が存在する。これら生体内の分泌細胞における小胞体ストレス応答や細胞内小胞輸送、さらには最も重要な翻訳後修飾である糖鎖修飾等、これら細胞における品質管理機構の基礎研究は我が国が世界に先駆けてリードする分野である。

そこで、これらの基礎研究を工業用生産に適した細胞である CHO 細胞に応用することにより生体機能を模倣した / 生体機能を超越する様な細胞をデザイン（創製）する。

(2) 安全かつロバストな工業動物細胞のデザイン（創製）

物質生産に用いる細胞は、数百から数千 L にもなる大量培養が必要とされる。品質を一定に保ってこの規模の生産を行うためには、生体内に存在する有限寿命の初代細胞ではなくて、無限増殖能を得た株化細胞を用いる必要がある。一方、無限増殖能を得るために、株化細胞のゲノム・染色体は正常な組織とは異なった姿となっており、ゲノムの不安定性、分布や、変動が生じている。さらに、生産に用いられている細胞はエピジェネティックな影響を受け、その生産性が世代を経るによって低下していくことが知られている。現在物質生産に用いられている細胞は、構築された後に、これらの不安定性や変動を解析し、非常に多数のクローンの中から生産性の変動しない細胞が試行錯誤的に選抜されており、多大な労力と時間が割かれているのが現状である。

我が国がリードする人工染色体や CHO 細胞の染色体解析技術や、また、iPS 細胞でも実証されている細胞の初期化技術を用いることにより、これらの株化細胞特有のゲノム不安定性や変動、さらには生産性低下を解明・制御することにより、安全かつロバスト生産が可能な工業動物細胞をデザイン（創製）する。

(3) 次々世代バイオ医薬品生産技術の開発

サイトカイン・抗体医薬を始めとする第一世代の機能性蛋白質は、糖鎖修飾された糖蛋白質であり、いくつもの機能ドメインからなる複雑な構造をしている。現在開発が多数されている次世代のバイオ医薬品は、生体内に存在する分子そのものではなくて、そのフォーマットを利用して開発した天然には存在しない人工分子となっている。

さらに、次々世代のバイオ医薬品は細胞培養によるワクチン生産に代表されるように、より複雑な生命体を対象としたもの、もしくは、糖蛋白質と化学合成糖鎖、核酸とのハイブリッドによる、より複雑な人工高分子になることは間違いない。我が国では糖鎖化学合成や糖転移酵素等の糖鎖関連修飾酵素の研究において世界をリードしているが、これらを融合させて、実際の機能性人工蛋白質を生産する研究は全く行われていない。そこで、世界に先がけて、これらの次々世代のバイオ医薬品の生産技術を開発する。

さらに同時に重要なことは、これらの 3 つの研究開発を通じて、実際にバイオ医薬品の製造に関わることのできる人材育成である。バイオ医薬品の製造には、目的物である糖蛋白質自身についての理解のみならず、生産する細胞の理解、これらを産業規模において、大量に、かつ安定に生産し、精製する技術、さらには生産された医薬品は高濃度の糖蛋白質溶液であり、糖蛋白質の品質や蛋白質自身の安定性解析など、様々な研究分野の集大成となっている。我が国において高度生産を担いうる人材の育成も急務である。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：世界的なバイオ医薬品の高まりと個別化医療の推進による多数の創薬シーズの開発状況。我が国では、世界史上、例を見ない高齢化社会の到来による医療費高騰、これらにより、安全かつロバストで、低コストな生産系の迅速構築の必要性。

研究シーズ：我が国は世界トップクラスのバイオプロセス工学、発酵技術があり、さらに基礎研究では蛋白質科学、細胞生物学、糖鎖工学も世界トップクラスの研究水準にある。これらの技術が動物細胞を用いた医薬品製造に応用可能。

5. 参画が見込まれる研究者層

バイオプロセス工学、発酵工学、細胞工学、蛋白質科学、糖鎖工学、糖質化学、細胞生物学、など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

本研究領域を推進するためには、大学の基礎研究者のみならず、実際の医薬品の品質評価に携わる国研研究者、橋渡しに適した人材や、さらに企業の現場での研究者を含め、産官学連携による研究チームを構

成して、研究開発を推進する必要がある。

また、創製された細胞については、実際の大規模スケールで本当に安定に生産可能かについても検討が必要である。そのため、これを実証する拠点形成が必要とされる。また、動物細胞の細胞分裂は1日1回程度が限界であり、開発した技術の実証に時間がかかるため、大規模スケールでの検討を含めた全研究期間を原則10年とする。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

元来、微生物を用いたバイオ産業においては、我が国は一日の長がある。さらに、蛋白質科学、糖鎖科学、細胞生物学など個々の基礎研究は世界をリードする水準にある。一方、これらの学術的成果を統合して、動物細胞を用いたバイオ医薬品産業への展開はこれまでほとんど行われていない。現在、欧米では、手法はそのままに対象生物を広げて様々な研究開発が行われているが、我が国では、対象分野を超えたアプローチがなされる場合が非常に少ない。本分野においても既存の個々の高いレベルの基礎研究が対象を移して展開される必要がある。さらに、医薬品に関しては、省庁横断的な取り組みが必要であり、強力なリーダーシップの下に集約的に研究開発を行い、その成果を迅速に産業へと還元する仕組みづくりが求められている。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：人類は微生物を産業応用するための様々な手段を施し、社会に役立てている。動物細胞についても微生物で培った様々な技術と高等真核生物特有の現象を踏まえた産業応用が可能となる。また無限増殖能を得た株化細胞は人類が構築したいわば人工細胞であり、学術的にもより多様な分野に広がっていくと期待される。

社会経済的効果：世界に例をみない速度で進む少子高齢化社会の我が国において、高度技術の集大成でかつ高付加価値が可能なバイオ医薬品産業の推進は、非常に大きな社会経済的効果を生み出すことができる。また、個別化かつ高度化することによって高騰する医療費抑制にも、本研究成果は大いに貢献可能である。

9. 備考

世界中で最も使われて最もたくさん培養されている CHO 細胞のゲノム解明においては、2011年の米国・北京ゲノムセンターに引き続き、ドイツ・オーストリア、さらにシンガポール・ミネソタ大のグループのプロジェクトによって解析がなされている。これらの成果の出口の目指すものは、全て CHO 細胞を元にしたゲノムスケールでのデザイン（リモデリング）である。

10. 自由記述

動物細胞株の産業応用は、サイトカインから始まり、抗体医薬の発展に後押しされ、年々飛躍的に増大している。これに携わっている産業側からはアカデミアに基盤的に解明してもらいたい課題が多数あるにも関わらず、アカデミア側からは課題に対してアプローチされることがなかった。

大きな原因として、動物細胞株は微生物でもなく、植物・動物個体でもなく、正常な生物でもない点があげられる。すなわち純粋の基礎サイエンスからみると、株化細胞に関する課題を解明してもヒトやマウスの様な正常個体の問題に直接還元されることはない。一方で、産業側からは、細胞を使って如何にものをたくさんつくるか、が直接の関心事であり、その背景にある科学的課題について解かれることは無い。産業からみると基礎研究であり、アカデミアからみると応用研究にあるという株化細胞特有の点がこれまで進んでいなかった一因と思われる。

暗黙知を提唱した化学工学者・哲学者であるマイケル・ポランニーはその著書「暗黙知の次元」の中で物理学と工学が全く違う学問であることを明確に述べている。生物学と生物工学は、これまで明確に区別されては来なかったが学問の成熟と共に明確に区別される時代が来たように思う。産業に実際に応用可能

という点ももちろん重要であるが、その背景に隠れた基盤的な科学的な問題点を解明するという観点からもプロジェクトが立案される必要がある。

提案 15

1. 研究領域名称

生活史スケジュールとかたちの動的制御による植物生産のテーラメイド最適化

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

植物の発生に関する特定領域研究が継続してきたこともあり、特に分裂組織、葉の形態形成などの研究が進んでいる。また、2005年に花成ホルモン、フロリゲンが同定され、花成の研究が展開している。また花成ホルモンが、ジャガイモの太りはじめの制御や、気孔の制御にも主要な役割を果たしていることも明らかになってきた。イネなどの穂の分枝、分蘖（枝分かれ）、内外穎の形態形成、サイズ決定などに関する知見も集積している。一方、1960～80年代までの植物の物質生産研究で、光合成産物の分配の視点から、植物の成長、繁殖の最適化の研究が進み、制御理論の技法なども援用され、精緻な理論が組み立てられている。このように、成長や繁殖の生活史スケジュールに関する研究のベースには確固たるものがあり、日本の研究者の貢献は著しい。また、地球環境変化、特に高CO₂や高温、に対する植物の応答に関する研究も進められている。しかし、これらを包括的に統合するようなプロジェクトはない。

(2) 社会・経済的背景（ニーズ）

地球環境の変化に伴い、植物による光合成生産力も変化する。100億人の食糧を確保し、地球環境変化速度を緩和するためにも、植物の生産力を飛躍的に上昇させる必要がある。これは、単に高CO₂や高温で光合成能力の高い植物を創出するだけでは果たせない。栄養成長期から繁殖期への最適な切り替えと、果実や、イモなどの栄養繁殖器官の成長制御によって、収穫部の最大化を目指す必要がある。これらのファインチューニングのメカニズムを明らかにし、地域や用途に応じた、テーラメイドの植物生産最適化を行う。収穫量で20%程度の増産は可能である。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

- ・花成制御メカニズムの環境依存性の研究推進：ベースは確固としているので、5年で可能。
- ・栄養繁殖器官（イモなど）や材の成長スケジュール制御メカニズムの精査：花成ホルモン関与が示唆されているので、花成制御のベースを利用した研究展開が可能。5～10年。
- ・光合成系、呼吸系の高CO₂・高温耐性、好CO₂・好高温化：律速要因は既に明らかなので、ファインチューニングは7年で可能。
- ・最適草型、最適樹形、最適繁殖形の開発：光合成のダウンレギュレーションが起こらない草型、樹形、高い光合成産物受け入れ能をもつ繁殖器官（穂など）の開発。研究は古くから行われているので基礎はある。5年～10年

4. 提案の適時性

社会ニーズ：地球環境の激変により植物の生産力が変化する事は明らかであり、それに適した植物の改変が、100億人の食糧確保ならびに地球環境変化の緩和に必須。とくにCO₂濃度上昇と温暖化は、100年は続くと思われるので、早い時期の対応が必要である。

研究シーズ：植物の形態形成・発生物理学、光合成、花成や繁殖の分子生理学、物質分配は、日本の研究者が大きな貢献をしている分野である。研究の進展は個別である。分野を越えたコンソーシアムを形成することによって、応用を見据えた包括的な研究推進をしなければ、個別の研究成果は全て他国によって生

かされることになるだろう。

5. 参画が見込まれる研究者層

植物分子生理学、生態学、作物学、育種学、土壌肥科学、栽培学、農業気象学などの研究者によるコンソーシアム形成が有効である。

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

- ・CREST 程度の規模のファンドがあればよい。
- ・現在の研究総括+アドバイザー制度ではなく、実際に研究を推進するチームのリーダーが コアとなる実質的コンソーシアムを作ってステアリングの方が実質的。
- ・出口まで見据えるためには、10 年程度は必要。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

- ・いくつかのチームがコンソーシアムを作ることにより、情報の流れがよくなれば相乗的に研究が発展するだろう。非常に重要なテーマなので、研究所の設置が望ましい。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：植物の生活史スケジュールが自由に制御できるようになり、テラーメイド最適植物が栽培されるようになる。この手法は植物を栽培する全ての局面で生きる。

社会経済的効果：植物の生産力の無駄を削り、テラーメイド化することにより、生産力が 20%程度は上昇する。100 億人が食糧を得、CO2 濃度の上昇が緩和される。植生による CO2 固定量が増えるので、排出制限にも有効。

9. 備考

- ・コンソーシアム研究の場をつくることは大切である。Biofuel 研究のためではあるが、British Petrol がアメリカに 10 年の年限でつくった Energy Biosciences Institute などは参考になる。

<http://www.energybiosciencesinstitute.org/>

- ・植物機能を公正に評価する機関があるとよい。現在までに、優れた機能をもつという形質転換植物が多数報告されているが、追試が効かない場合も多い。植物機能間にはトレードオフがあり、全てが良くなるような植物が存在しない事は自明であるが、そのような新聞報告が後を絶たない。この用途に用いられているわけではないが、The Australian Plant Phenomics Facility などが参考になる。

<http://www.plantphenomics.org.au/>

提案 16

1. 研究領域名称

国産新規植物バイオマス資源探索のための戦略的データベースシステム

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

植物細胞壁は植物の基礎科学としての重要性に加え、バイオマスとしての有用性を併せもつ特異な細胞装置である。この理由から、植物細胞壁に関する研究は、近年、植物科学の中核的研究領域として重要視され、現在、国内外で大規模な研究プロジェクトが複数進行している。我が国では、2011 年よりバイオマス生産と利用の革新的技術開発を目指す「植物 CO2 資源化研究拠点ネットワーク」が開始し、2012

年には細胞壁の情報処理機能の解明を目指す新学術領域研究「植物細胞壁機能」が発足した。海外では、2007年に米国エネルギー省が三つの生物エネルギー研究センター(BRCs)を設置し、BPが産学連携によりEnergy Biosciences Institute (EBI)を設置し、欧州連合が「RENEWALL」プロジェクトを開始し、いずれも、バイオマスである植物細胞壁の包括的な研究を進めている。しかし、これらの研究は既存の植物種を研究対象としたものである点で真の意味における新規なバイオマス利用のための細胞壁研究とは言えない。

(2) 社会・経済的な背景 (ニーズ)

世界の急激な人口増と化石炭素の将来的な枯渇に対処する上で循環型炭素資源であるバイオマスの生産と利用に関する技術革新は人類の喫緊の課題である、と同時に未来へのチャレンジでもある。光合成により毎年56 Gt (ギガトン)の炭素がバイオマスとして陸上で固定されるが、その内、食料や燃料、資材として現在人類が利用しているのは2 Gtに過ぎず、残りの54 Gtはそのまま土壌微生物により分解されCO₂となり大気に還る。この未利用バイオマスを効率的に利用できれば、現下の資源問題の多くは解決できる。その革新的技術開発には、しかし、次のような障壁が存在する。(1) 既知の栽培植物を用いた従来型バイオマス利用は少なくとも我が国では産業として成立し難く、産業界には事業化のインセンティブがない。(2) 未知の野生植物を用いた新規な炭素資源探索を行うには、植物の生育環境、細胞壁の代謝、構造、機能に関する包括的データベースが必要であるが整備されていない。(3) 2010年のCOP10で採択されたABS (Access and Benefit Sharing)の新議定書により、海外の植物資源の商業利用が実質的に不可能となっている。これらの社会・経済的な制約の中で、我が国がこの課題の解決に貢献するには、我が国の固有種を対象にして、植物の進化系譜、生態学的機能、遺伝子産物のオミクスやバイオマス資源としてのポテンシャルなどを検索可能な包括的データベースを整備し、国内の産業界に提供し、その研究手法そのものを新しい開発モデルとして世界に発信することが現実的で効果的な戦略である。

3. 研究内容 (成果の達成達成時期と具体的方策)

我が国の全陸上植物資源約7,000種を視野に入れて、下記の三つのステップにより、(a) 進化系譜と生態学的特性の調査、(b) オミクス解析 (c) バイオマス (食料・生薬をふくむ) 特性の包括的評価を行い、バイオマスに焦点を当てた種横断型の多次元機能モジュールデータベースを構築し、国内の産業界に公開し、企業に、新規の有用バイオマス開発を低リスク、高効率で行うためのプラットフォームを提供し、我が国独自の次世代型バイオマス産業の育成を図る。それと同時に、次世代型新規バイオマス研究モデルを確立して世界に発信し、バイオマス研究の方法論において我が国が世界をリードする事を目指す。

ステップ I: ゲノム情報が整備され、栽培や基礎研究の対象とされてきた陸上植物群の中より、(車軸藻類、イワヒバ、ヒメツリガネゴケ、ゼニゴケ、イヌカタヒバ、シダ、マツ、スギ、ポプラ、シロイヌナズナ、ダイズ、トマト、ヤトロファ、イネ) をふくむ代表的な25種の植物種を選定し、進化系譜、生態学的特性、トランスクリプトーム、プロテオーム、グライコーム、メタボローム、バイオマス (食料・生薬をふくむ) 特性、タンパク質機能、物性などに関する植物種横断型の多次元の機能モジュールデータベースを構築する。

ステップ II: ステップ I で構築した多次元機能モジュールデータベースを基本フレームとして、ゲノム情報を持たない約500種の植物について、拡張多次元機能モジュールデータベースを構築する。そのために、進化系譜と生育環境、生理生態学的機能に関する新たな調査、RNA シクエンシングによるトランスクリプトーム解析、MALDI-TOF/TOFによるプロテオーム解析、バイオマス (食料・生薬をふくむ) 特性やタンパク質機能、物性などの解析を包括的に進める。

ステップ III: 拡張した500種の植物種横断型多次元機能モジュールデータベースを核として、更に、バイオマスに関連する項目に関して、日本国内の全陸上植物7,000種に関するフロラ網羅型多次元の機能モジュールデータベースを完成させる。データベースは構築の段階から公開して、産業界でのシード探索プラットフォームとしての利用を促す。これにより任意の視点から、新規バイオマスのポテンシャルをも

つ植物種の探索および、新規な栽培法や形質転換による植物デザインが開発リスク無しに可能となり、バイオマス利用の革新的技術開発が期待される。

4. 提案の適時性

社会ニーズ： 世界の人口増と化石炭素の枯渇に対処する上でバイオマスの生産と利用に関する技術革新は人類の喫緊の課題である。また、ABS (Access and Benefit Sharing) の新議定書に鑑み、本邦の生物資源を基にする技術革新が、将来の本邦の産業育成にとって必須の要件である。

研究シーズ： 植物細胞壁は、それに関わる遺伝子がゲノムの 20% 近くを占める複雑系である。その包括的な解析を進めるには、次世代 RNA シクエンシングやタンパク質や糖質の質量分析技術などによるオミクス解析が不可能である。この点で、本計画はその社会的ニーズと研究シーズの両面で、時宜を得たものであると言ってよい。

5. 参画が見込まれる研究者層

以下の分野の専門家：植物系統分類、植生学、植物生態学、形態学、植物生理学、植物病理学、農産利用学、林産化学、糖質化学、タンパク質工学、酵素化学、分子遺伝学、細胞生物学、顕微分光学、材料科学、ゲノム科学、オミクス、情報生物学、コンピューター処理、データベース構築、シミュレーション

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

研究組織： 一つのハブ拠点施設と、大学を中心として約 25 の研究チームのネットワークからなるコンソーシアムを組織して研究を推進する。研究推進に当たっては、バイオリソースセンターや植物関連のゲノムデータベースを運営する国内研究機関、更に長年、系統維持を継続してきた大学や研究所の参画を仰ぐ。

拠点施設： 統括部門と解析部門から構成する。

統括部門は 10 名程度のチームにより構成し、研究戦略の策定と解析部門による研究を統括する。

解析部門は三つの役割を分担する。

- ① オミクス解析： RNA シクエンシング、タンパク質及び糖質の質量分析、低分子化合物を対象とするメタボローム解析の設備と専任の解析スタッフを備える。
- ② バイオマス評価： 植物種の栽培と種子保存、器官や組織の解析、細胞壁高次機能・構造の顕微分光学による分析、などを行い、バイオマスポテンシャル評価に必要なデータを集める。
- ③ データベース構築： 植物の進化系譜、生態学機能からオミクス、バイオマス評価データを統合し、植物種間横断型の多次元機能モジュールデータベースを構築・維持管理する。

推進期間： ステップ I は 1 年次から 3 年次までの 3 年間、ステップ II は 3 年次から 7 年時までの 5 年間、ステップ III は 7 年次から 10 年次までの 4 年、全体で 10 年程度の研究期間が必要と考えられる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

植物多様性の視点からみた環境保全への影響には、十分な調査を行う必要がある。野生植物の利用を実施する事に対する社会受容についても、周到な準備が必要であるが、いずれも、根本的な問題ではない。一方、2010 年の COP10 で採択された ABS (Access and Benefit Sharing) の新議定書による制約は、本プロジェクトでは全てクリアできるところから計画しているので、我が国の植物資源を元にして開発したバイオマス知財は国際的には保護されることになる。

最後に、デザイン植物を形質転換植物として作製し、広くバイオマスとして栽培することに対して、我が国には、まだ社会受容が十分でない状況がある。この点については、デザイン植物を設計する段階から、その対策を立てる必要がある。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：多数の植物のゲノムから表現型までのデータベースを、植物界横断的に一元化し、バイオマスという植物機能を軸にして検索することにより、これまで知られていない新規な有用機能を抽出することを目指したプロジェクトである。このプロジェクトが上手く動き出せば、この研究方法そのものが次世代のオミクスを用いた植物科学の方法論になると期待され、科学技術上の波及効果は測り知れない。

社会経済的効果：

バイオマスを植物の全炭素化合物として捉え、その中核となる細胞壁の中より、付加価値を持った成分を抽出利用するためのプラットフォームの構築が本計画の目標である。これが達成できれば、利用者である産業界は低リスク、高効率で研究開発が可能となり、新しい産業モデルの開拓が期待される。

9. 備考

冒頭にも記した通り、バイオマスは今、いろいろな視点から注目されている。我が国では、2011年に「植物CO₂資源化研究拠点ネットワーク」が、2012年には新学術領域研究「植物細胞壁機能」が、それぞれ発足した。海外では、2007年に米国エネルギー省の三つの生物エネルギー研究センター(BRCs)、BPが産学連携により設置したEnergy Biosciences Institute (EBI)が立ち上がり、欧州連合も2007年に「RENEWALL」プロジェクトを開始している。しかし、これらの研究はいずれも特定の栽培種や既知の植物種を研究対象としたもので、新規な有用植物を探索するための植物界を横断した多次元の機能モジュールデータベースの構築のような発想は含まれていない。この点で、今回の提案は、国内外においてもこれまでに無い視点からの計画で、そのアプローチそのものが新規であると考えている。

提案 17

1. 研究領域名称

常在菌叢メタゲノムの統合的理解

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

人体には膨大な数の常在細菌が生息している。メタゲノムなどの近年の最新技術を用いた研究から、常在菌叢には個人差があり、その菌叢構造が年齢、病態を含む宿主の様々な生理状態、食事などによって大きくゆらぐことが明らかになりつつある。この常在菌叢のゆらぎは健康の維持（恒常性の維持）ならびに消化器疾患や肥満、糖尿病、がん、動脈硬化症、感染症などの社会的に大きな問題となっている数々の疾病（恒常性の破綻）と関係することが示唆されている。このような常在菌叢の生態と宿主への生理作用には個々の細菌の機能にくわえて細菌-宿主間や細菌間の複雑に絡み合った相互作用が存在すると考えられている。しかし、健康維持や疾病の発症につながる細菌叢の役割やメカニズム、また細菌叢の生態そのものも十分に理解されておらず、その実用化はいまだ困難な状況になっている。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

我が国に近々到来しつつある少子高齢化社会において、健康な中高年・高齢者の増大並びに若年層の健康増進は社会・経済的に克服すべき近々の課題である。このような背景において、我が国は健康志向がきわめて高い国民性であり、健康の維持増進や病気の予防策を日常生活の中に取り入れることは多くの国民が望むところである。たとえば、食事のカロリーやバランスのある食事内容、清潔感、ヨーグルト等のプロバイオティクス、サプリメント、機能性食品などへの興味と依存度は総じて外国よりも高い傾向にある。しかし、これらの効果を実証する科学的根拠は乏しい。病気に関しては、肥満やアレルギー、若年層に多い炎症性腸疾患（クローン病等）、I型糖尿病、多発性硬化症等の疾病患者数はこの30年間で顕著な増加が我が国において認められる。その原因として食生活の欧米化が示唆されているが、そのメカニズムには不明な点が多い。近年の研究から、食が関与する健康と疾病には常在菌叢が大きく関わることが明らかに

なっている。よって、本提案である常在菌叢メタゲノムの研究は健康管理や疾病予防等への実用化に道を開くとともに、食の効果や常在菌叢の意義を国民が正しく理解することに結びつき、ひいては医療技術の発展を両輪とした健康長寿立国の創成につながると期待される。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

(1) 日本人常在菌叢に関する研究課題（～3年）。

日本人の常在菌叢メタゲノムには欧米人には存在しない特徴的な遺伝子や代謝系が多数存在することが示唆されている。しかし、日本人常在菌叢メタゲノムデータは欧米人に比べ圧倒的に不足している。そのため、様々な日本人常在菌叢メタゲノムを疫学的に解明することが必要である。

- ・様々な健康な日本人の常在菌叢メタゲノムの収集と疫学的解明
- ・日本人と欧米人常在菌叢メタゲノムの比較研究

(2) 外的要因が及ぼす効果に関する研究課題（～4年）

宿主への食事のもつ具体的な効果を知るには、その摂取による常在菌叢メタゲノムのゆらぎとそのゆらぎによる宿主細胞の応答機構を解明することが必要と考えられる。

- ・オーミクスデータを活用した食の効果の評価方法の開発
- ・高脂質や低タンパク質摂取等の食ストレスの解明
- ・プロバイオティクス等の食の有効性の解明

(3) 病態常在菌叢とその制御に関する研究課題（～5年）。

病気の発症機構や進行過程を分子・細胞レベルで正確に捉えかつ制御するには、病態細菌叢メタゲノムの把握と病態に関与する細菌叢または細菌種の特異性、ならびにその作用機序を解明することが必要と考えられる。また、この裏返しとして健康維持に関係する細菌種やその生理機能の解明も必要となる。

- ・病態細菌叢メタゲノムの収集とそれを特徴づけるバイオマーカーの開発
- ・病態常在菌叢またはモデル動物メタゲノムに特徴的な菌叢または菌種、遺伝子等の同定とそれらと宿主細胞間の相互作用機構の解明と制御
- ・宿主遺伝子多型と常在菌叢タイプの相関解析

(4) 常在細菌叢の生態形成に関する研究課題（～3年）

常在菌叢の形成原理を解明するにはメタゲノムの数理モデル等を用いた理論的考察と進化の観点からの解明が必要だと考えられる。

- ・菌叢構造や細菌間ネットワークを表現する数理モデルの開発
- ・ヒトを含む各種動物の常在細菌叢メタゲノムの多様性と進化の解明

4. 提案の適時性

社会ニーズ：日々の食習慣等が健康維持・増進および病気の発症に常在菌叢を介してどのように関係するのかを明らかにする本提案は、間近に到来する少子高齢化社会での罹患率や医療費の削減等に向けた先駆的対策として重要である。

研究シーズ：欧米の大型プロジェクトによりヒト常在菌叢の研究はこの5年間で飛躍的に進んだ。しかし、世界的には欧米人に偏ったデータが蓄積されており、日本人のデータは根本的に不足している。一方、我が国の常在菌叢メタゲノム研究及び機能研究は世界トップクラスの水準にあり、本提案を我が国で総合的に進めることが現在急がれる。

5. 参画が見込まれる研究者層

ゲノム・インフォマティクス、細菌学、免疫学、栄養学、代謝学、統計物理学、生態学など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

様々な専門分野の研究者から構成される以下の3チームをコアとした体制が望ましい。3チームの強固な連携のもとで本提案を推進するが、大学病院や企業等も含めた様々な外部研究者との共同研究も積極的に進め、本分野全体の底上げと研究者の裾野の拡大をはかる。

- ・常在細菌叢メタゲノム情報研究チーム：メタゲノムデータ等の収集と解析並びにその技術開発を担当（ゲノム・インフォマティクス、細菌学、統計物理学、生態学などの研究者）
- ・病態常在細菌叢研究チーム：病態またはそのモデル動物の細菌叢・細菌種の解析を担当（細菌学、免疫学、代謝学などの研究者）
- ・食と常在細菌叢研究チーム：食事成分と細菌叢の変動を主眼にした解析を担当（免疫学、栄養学、代謝学などの研究者）

本提案では、糞便や唾液等の細菌叢サンプルの収集、シーケンサーを用いたメタゲノム・遺伝子発現データの収集、NMRや質量分析機を用いたメタボロームデータの収集等、専門性の高い様々な測定機器の使用と多種多様で大量のデータを解析する必要がある。そのため、ポストドクや技術員の充当、まとまった測定機器の整備が必要である。

様々な細菌叢サンプルの収集から基礎・応用研究を通して目的とする実用化等の成果を得るには少なくとも3年はかかることを想定し、チームあたりの全推進期間は5年間で妥当と考える。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

- ・ヒト常在菌叢は個人を特定できるDNA情報を含んでおり、それを扱う研究は匿名化等のヒトゲノム生命倫理指針に従う必要がある。このことは既に多くの研究従事者に認識されていると考えるが、周知徹底させる必要がある。
- ・常在菌叢はこれまで個人レベルの研究がすべてであり、また専門分野によって細菌側だけ、宿主側だけを研究する傾向にあり、それぞれのデータを連結する体制がほとんどない。よって、効率的に研究成果を共有し産業化等の社会還元につなげる仕組みづくりが望まれる。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：本提案の推進は、プロバイオティクス等の機能性食品や食に関する研究分野と様々な生活習慣病を対象とする医学系研究分野の発展に大きく貢献するとともに、ヒト生理を理解する上での新たな概念と幅広い学際研究を創出させる契機となる。

社会経済的効果：本提案から得られる成果は、多くの国民が願望する健康長寿と疾患の寛解と予防等に役立つものであり、日々の生活に密着した健康管理や予防医療に有用な知識・技術を提供できる。

9. 備考

- ・米国の Human Microbiome Project（\$130M：104億円）2008～2012
- ・EUの MetaHIT Project（€123M：124億円）2008～2012
- ・国際コンソーシアム IHMC（IHMC: International Human Microbiome Consortium）：上記の米国の HMP、EUの MetaHIT、日本、中国、カナダ、オーストラリア、韓国等の研究者等が参加するコンソーシアム（<http://www.human-microbiome.org/>）。2007年末に設立され（Mullard, A., The inside story. Nature 453: 578-580 (2008).）、その運営委員会は国際学会の開催、データ・技術の共有や開示等の研究推進に関わる様々な取り決めを行っている。

提案 18

1. 研究領域名称

環境メタゲノミクスによる生態系の変動解析と環境影響評価

(海洋、河川、一般土壌、農耕地、森林など全ての環境を串刺しにする共通研究領域)

2. 背景、現状と課題 (科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など)

(1) 研究開発の現状 (シーズ)

ハイスループットな新型 DNA シーケンサーの登場により、これまで調べられなかった様々な環境におけるメタゲノム情報を一気に手に入れることができるようになった。また、これまで分離・培養された微生物(環境微生物を中心に)のゲノム解析も継続的に行われ、ゲノムデータベースが充実しつつある。難培養性微生物のゲノムについても、シングルセルゲノミクスをいう方法論を用いることで、単細胞からのゲノム配列決定が可能となってきた。これらに加え、環境をモニタリングする技術やリモートセンシングによる環境情報の蓄積、多くの事象を対象としたシミュレーション技術などが確立されてきた。これらの背景から、ゲノム情報を中心とした生物、様々な環境情報など、大量でかつ複雑な情報を統合的に扱うことで環境を包括的に評価し、異常気象や人為的環境破壊などによる環境生物への影響評価や生態系が持つ自然回復力の把握と予測などが可能なフェーズに入り、異なる分野の研究者の意識にも統一的理解が生まれるようになってきた。

(2) 社会・経済的背景 (ニーズ)

地球温暖化に伴う異常気象や地震、また原発の倒壊や海洋汚染などによる生物への影響評価は、事後断片的に短期間しか行われておらず、様々な環境情報を網羅する評価方法自体確立していないため、実際にいつ、どのぐらいの影響がどのような生物(環境中に最も多く生息する微生物から植物、家畜、ヒトまで)までに及ぶか評価、予測する手だては全くない。また、海洋、海底資源開発などの産業活動、地中への放射性物質の投棄などについては、これらが生態系に及ぼす影響などを事前に調べ、将来予測することなしに実行できないはずである。したがって、我が国全土を取り巻く海洋、河川、森林、農耕地などを包括的な科学的知見(一部の偏った知見ではなく)に基づいて評価する方法と将来予測方法の確立は、国、自治体、農業、水産業団体、企業にとっても重要でニーズが高く、地球環境を長く維持し、子孫へ受け渡していくという現人類の責任としても地球レベルでのニーズがある。

3. 研究内容 (成果の達成達成時期と具体的方策)

(1) 国内の主要地域の調査とモニタリング

今後の環境変動や、産業活動による影響を評価するために、現状の環境把握を行う。我が国は、海に囲まれた海洋国家であるため、南北、東西の主要な沿岸域からの海水、底泥等の採取、環境因子の測定、計測などを行う(国内に多数ある臨海実験場などを利用する)。我が国のおもだった、森林、農耕地(演習林や圃場などを利用する)、河川から海洋と同様に水や土壌などを採取、それぞれの環境を特徴づける環境因子測定、計測を行う。水、土壌サンプルなどから DNA を抽出し、環境メタゲノム解析を行う。

(2) 環境メタゲノムが持つ潜在的機能評価法

環境中における菌叢解析だけでなく、環境が有する潜在的機能解析を正確に迅速に行う必要があるが、現在のところ世界的に見ても確立した方法論がない。そこで、まず、環境生物と環境との相互関係を考える意味で最も重要な、環境中の潜在的機能解析法の開発が急務で、これらを汎用的に用い、自動化するためのシステム開発が必要である。

具体的には、国内に配備されている世界的代謝データベース(KEGG)などと環境メタゲノム解析を行う研究グループとの連携をはかり、方法論の開発とシステム化、それを用いた実践的運用を行うことが重要。

(3) データ統合解析とデータベース化手法

環境中の生物が持つ機能の基盤情報となるメタゲノム情報、環境を特徴付ける様々な環境情報、上位の植物、動物の種類や分布情報等、異なる次元の情報を連携させ、統合的に取り扱うためのデータ統合解析とそれに基づく階層的データベース化のための手法開発とデータベースの作成を行う。その際、現在進められている国際的なゲノム情報を中心とした環境情報のデータベースとの連携も念頭において行う。

(4) シミュレーション技術による環境影響評価予測法

これまでの数式に基づくシミュレーションだけでなく、数式化が困難な生物学的因子による因果推論的手法等との組み合わせを考えた新しいシミュレーション技法の開発とその実践的運用を行う。

(5) 総合的環境モニタリングシステムの基本設計と要素技術開発

(1) で行う海洋、河川、森林や農耕地等における主要環境因子のセンシング、モニタリング、カメラシステムなどによる観測、分光イメージングなどが継続的に可能なモニタリングシステムの基本設計とそれに必要な要素技術の開発。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：

生物多様性を守り遺伝子資源を持続的に利用するための国際的枠組みを決める生物多様性条約締結国際会議 (COP10) が一昨年名古屋で開かれ、生物多様性の重要性が再確認されたが、その中には微生物という概念は殆ど含まれていなかった。実際、植物、動物生態系と微生物生態系には重要な関係性があることは認知されていたが、その関係性を知る術がなかった。しかし、ここ数年の急速な環境メタゲノミクスの進展により、その関係性の解明にメスを入れることが可能となり、一挙に期待が高まっている。また、近年の異常気象や地震、原発事故などによる環境破壊やそれに伴う生物への影響評価に関心が高まっており、多面的な要素を取り入れた総合的環境影響評価法の開発が強く望まれている。

研究シーズ：

植物、動物、微生物の各生態学者が環境メタゲノミクスの進展と相まって、微生物生態系-植物生態系-動物生態系全体を一つのシステムとして捉える俯瞰的、統合的考え方と新たなシステム生態学の必要性を認識し始めている。この3つの生態学分野を結ぶ共通項である環境メタゲノミクスの技術レベルが年々向上していることで、世界的にも地球全土の微生物叢の解析と全地球遺伝子マップの作成プロジェクトが進展しつつある。世界レベルで、地球環境の生物学的潜在能力の把握とそれらを活用した地球環境の維持を考える気運が高まっている。

5. 参画が見込まれる研究者層

ゲノム科学、バイオインフォマティクス、微生物生態学、植物生態学、動物生態学、統計学、計算科学、シミュレーション技術、環境科学、生物学、海洋学、海洋工学、農学、農業工学、分析化学、同位体化学 など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

本研究提案の特徴は、3.の研究内容で5つの項目を設けているが、各項目ごとに研究グループが必要で、1-5の内容を含んだ個別の研究グループを、例えば、海洋、森林、農耕地、河川などの分野でそれぞれに立てるわけではなく、ターゲットとする環境は海洋なら海洋、森林なら森林に絞って、まず、環境の包括的な環境影響評価と環境変動に伴う生態系のシミュレーション、総合的環境モニタリングシステムを開発し、最終的に5つの研究グループの成果を統合して、様々な環境の環境影響評価とシミュレーションが可能となる基盤システムを作り上げることにある。したがって、ファンド形態としては、前期5年はそれぞれの研究グループに特化した研究開発に必要なファンディングを行い、後期5年で、5つの研究分野の成果を寄せ集めた統合的研究開発にファンディングを行う。なぜなら、前期の5年で出た研究成果は、5つそれぞれ研究成果ではあるが、それらを有機的につなぎ一つの大きなシステムとするためのインターフェースがまだできていないからである。つまり、後期5年はそれぞれの分野の研究成果を効率的に統合し、環境影響評価、シミュレーションシステムとして機能するように互いに足りないものを認識し、必要な物の開発、更なる方法論の開発を行うためのフェーズである。後期についてはインターフェース構築のため、各研究グループのコアメンバーが集まって研究するための拠点研究施設が必要。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

本研究は行政的には全ての分野をまたがった環境に関わる根幹をなす新たな環境影響評価の開発を行うものである。したがって、各省庁の利害が絡むことなくフェアなサイエンス、技術開発として実施されるべきものである。この研究を推進するためには、色々な利害に煩わされることなく、方法論の開発に必要な、サンプルの収集やそれらから得られた解析、分析結果を広く開示することが必要となる。そのための支援体制が必要となる。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：異なる分野の研究者が同じ目的のために、各々のフィールドから参加し、各研究分野だけではなし得なかった新しい研究領域、技術的基盤が確立され、環境と生き物をキーワードとした科学技術の分野が大きく広がることが期待される。また、具体的にはこれまで、ブラックボックスとされてきた環境、植物、動物と微生物生態系との関わりが明らかとなることで、新たな生物学的な機能や関係性の発見につながる。

社会経済的効果：一つの科学的分野の知見ではなく、生物と環境を理解するに必要な多くの分野からの知見を統合した、総合的環境影響評価法と将来予測が可能となることで、国、自治体、各種団体、企業活動などの環境に対する重要な指針を作ることが可能となる。また、環境影響評価を行うコンサルタントビジネスや新たな環境関連ビジネスの創世にもつながる。

9. 備考

1. 2010年に「地球と人類の利益のためにをスローガンに、系統的な地球規模の微生物の分類学的、機能的多様性の解明を目指した Earth Microbiome Project (EMP) が米国を中心として走り出した。このプロジェクトは、それぞれの微生物叢におけるタンパク質空間、環境代謝モデル、およそ50万の再構築ゲノム、地球規模の代謝モデル、全ての情報解析への入り口が記載された地球規模の微生物遺伝子地図（アトラス）を作成するために約20万のサンプルを解析することが最終目的である。これまでのところ、20万サンプルのうち5万サンプルが確保され、プロジェクトを以下の4つに分け、それぞれにリーダーを置いて進められている。1. 遺伝子アトラス、2. 地球微生物叢のゲノム再構築、3. 地球微生物叢可視化ソフトの開発、4. 地球微生物叢の代謝再構築。このプロジェクトは、BOREAL Genomics、Luca technologies、Eppendorf、PACIFIC BIOSCIENCES、MO BIO、Illuminaの各社の協力のもと行われており、現在大型ファンドに申請中のようなものである。残念ながら我が国の関与は皆無。2012年8月末に行われた国際微生物生態シンポジウム (ISME14) でもEMPに関するトピックが3件報告されている。

2. フランスのTara財団やagnès b等の出資や一般からの寄付などによって、国連の環境プログラムとも連携するTara Ocean航海が2010年からヨーロッパ、アフリカ、南北アメリカ周辺海域と太平洋を調査地域として3年計画で始まっている。科学者は、フランス中心とした10ヶ国のバイオインフォマティクス、海洋生物学、流動細胞分析、ゲノミクス、海洋学、イメージング、モデリング、珊瑚礁の専門家等で構成されている。我が国の研究機関からの参加者はない。本航海は、全世界の海洋に浮遊する生物の生態系を明らかにし、浮遊生物間や環境との相互作用の理解を目的として行われているが、予算規模は不明。

提案 19

1. 研究領域名称

陸上生態系における微生物の生態、多様性、および機能

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

私たち人間の生活は農業生態系で生産される植物資源に直接的および間接的に依存している。また、森林生態系は木質資源の供給だけでなく、空気浄化や水源涵養などの人類社会を営む上で重要な機能を果たしている。こうした陸上生態系の中心になっているのは植物であるが、全ての植物は微生物に依存して生育していることについてはあまり知られていない。とくに、菌根菌はほとんどの植物の根にみられる共生微生物で植物が必要とする養分の大部分を供給しているため、適合する菌根菌が無いと植物は全く成長しない。また、発達した森林では数百種にも及ぶ菌根菌が異なる樹木に共生しており、植物の定着や生存の決定要因となっていることも一部で明らかにされているが、その詳細な機構についてはよく分かっていない。動物についても腸内細菌などが成長や健康に影響することが近年明らかにされつつあるが、その知見の多くは人間や家畜を対象にしたもので、野生動物と微生物の関係についてはほとんど分かっていない。このように、生態系などの環境中の微生物に関する知見は極めて限定的で、どれくらい多様で、どのような機能と役割を持っているのかなど、基本的な微生物の生態についても不明な点が多い。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

人類社会は食料、水、安定した環境など、陸上生態系から提供される様々なサービスの上に成立している。こうした生態系が健全に機能するためには、植物や動物だけでなく、微生物の機能が不可欠なのは明白である。ある微生物の絶滅が、生態系全体に不可逆的な変化をもたらす可能性すらある。しかし、植物や動物の保全対策などと比べると、微生物への対策は皆無といっても過言ではない。例えば、国際自然保護連合（IUCN）のレッドリスト（絶滅のおそれのある生物のリスト）には、数万種の植物と動物が記載されているが、同じ真核多細胞生物である菌類については1種（地衣類を除く）にとどまり、細菌にいたってはそもそもリストに含まれていない。これは、絶滅に瀕した微生物が少ないとか、微生物は多様性保全の上で重要では無いということでは無く、単に必要な科学的データが少ないからである。

現在、経済発展とともに世界中の多くの地域で生態系が破壊され、貴重な生物資源が失われている。何の注意を払われること無く、人類によって絶滅に追い込まれる微生物は植物や動物より多い可能性が高い。多くの植物は適合する菌根菌がいないと生育できないように、ある微生物が失われればももとの生態系は決して蘇ることは無いであろう。生態系から見れば、ある1種の微生物がパンダと同じくらい重要な存在なのである。動物や植物だけでなく、微生物の生態に関して基礎的な研究を進めていくことで、生態系を健全に保つ現実的手段や破壊された生態系の修復もできることであろう。それは自然を破壊してきた人類の責務であると同時に、私たちの子孫が安定した社会を維持していく上でも必要不可欠なものであると考える。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

1. 微生物の多様性の現状と多様性決定機構（いろいろな生態系から DNA 情報により微生物を同定、インベントリーの作成、環境要因や進化的要因と微生物群集構造の解析）
2. 環境微生物の機能と役割（分離培養と接種試験、ゲノム解析など）
3. 生態系の保全や再生への微生物資源の利用（微生物の耐性育種などを含む）
4. 微生物株保管機関の充実と利用促進
5. 環境中の新規微生物機能遺伝子の発掘と利用（メタゲノム、スクリーニング）

4. 提案の適時性

社会ニーズ：生態系の破壊は人類が原因であり、残された希少な生態系の保護や、破壊された生態系の再生は人類の危急の課題である。これを実行するためには、動物や植物と同様に、微生物に関する基礎的な知見が必要不可欠である。現在の自然破壊の現状を考えると早急に課題化すべきで研究分野であると考えられる。

研究ニーズ：目には見えない微生物を識別するには DNA 解析が必要不可欠である。現在、目覚ましい勢いで進歩した DNA 解析技術を応用することで、動物や植物で培われた生態的調査方法が微生物でも可能

になってきており、国際的な観点から新規性のある知見が得られる絶好のチャンスと考えられる。

5. 参画が見込まれる研究者層

微生物学、生態学、動物学、植物学、分子生物学、進化学、森林科学、農学、医学

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

生態系のサービスは既存の経済システムに含められないため、上述したような微生物の生態に関する研究に企業や営利団体の支援は望めない。そこで、公的機関による研究ファンドが中心となるであろう。上記で提案した内容を早期に実現するためには、科研であれば新学術領域や特定領域として大型予算の措置が望ましいであろう。研究内容の性格上、環境省や農林水産省での研究予算化も視野に入れるべきである。途上国における研究では JICA・JST の研究事業も候補となる。もちろん拠点施設があれば望ましいであろうが、現状の政府系研究予算を考えると難しいかもしれない。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

他国との微生物株や遺伝資源（機能遺伝子など）のやり取りについては、名古屋議定書を遵守する必要がある。既存の菌株保存センターは利用率も低く、活用されているとは言い難いが、これを有効活用する制度を作ることで微生物の記載や生態研究の推進にも貢献できるであろう。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的效果など）

科学技術上の効果：数多くの新規微生物が記載され、微生物の種の多様性とそれを規程している要因が解明される。動物や植物に比べて遥かに多様な機能をもっている微生物の貴重な遺伝子を発見できるであろう。また、生態系が健全であるために、どんな微生物がどのような役割を果たしているのかについても多くの新しい発見があるであろう。こうした知見は生態系の保護や再生に必要な不可欠なものである。

社会経済的效果：直接的な効果を実感し難いかもしれないが、健全な生態系サービスは人間の社会活動の根幹にかかわるものであり、その重要な要素である微生物について知ることは重要である。生態系の再生に微生物を応用できれば、生物多様性保全や環境保護などにも大きく貢献できる。また、新規微生物やその機能遺伝子は、新薬やバイオ燃料生産など、医学や工学などの他分野へも波及効果が見込めるであろう。

提案 20

1. 研究領域名称

陸域・水域生態系のブラックボックスに挑むゲノム生態学

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

個々の研究者や研究グループが解明できる生態系の複雑さ（種多様性、生物間相互作用網、物質循環動態）には限界がある。しかし、近年導入されつつあるゲノム科学の先端技術によって、生態学者が手にできるデータの種類が多様化し、分量も指数関数的に増大してきている。すべての生物は DNA を持つ。これは、DNA バーコーディング（短い DNA 配列を用いた生物の同定システム）を土台として、あらゆる生物の多様性とその群集組成を解明することが可能であることを意味する。次世代シーケンサーを用いたメタゲノム（環境ゲノム）研究が近年盛んに行われて来ているが、その大半は、「一つの生物群（例：細菌）」の「大まかな群集組成（例：細菌門の組成）の解明や比較」を目的としたものである。しかし、環境サンプル中の多様な生物群を同時に DNA バーコーディングするシステムを構築すれば、生物種間の相互作用について、これまでに生態学が想像もしなかったスケールで食物網や共生ネットワークに関する情報を取得する

ことが可能となる。特に、微生物群集と動物・植物群集との関連性について統合的に理解できるようになると期待され、管理対象の生態系内で起こる生物現象の全体像を追跡する方法論の構築が求められている。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

自然生態系を健全な状態で維持・管理することは、食糧資源の安定供給や治山治水、大気中の二酸化炭素の固定等の生態系サービスの保全に直結し、我々の健康と安全に関わる根本的な部分でその重要性を増して来ている。世界人口が 70 億人を越えるなか、食糧やエネルギーを持続的かつ安定的に供給していくためには、人の生活が立脚する生態系の構造とその動態を本質的に理解し、生態系の管理技術や再生技術を革新していく必要がある。

生態系内では無数の生物種が互いに関わって複雑なシステムを構成しており、人為的な改変や環境ストレスによって、従来の科学的知見では予測し得ない反応がしばしば起こる。これまでの生態系管理では、有害生物種の駆除や絶滅種／希少種の再導入などがしばしば行われて来たが、こうしたアプローチは生物群集の一部に関する知見に基づいていることが多く、施策後の生物群集全体の挙動はブラックボックスとされてきた。有害生物の駆除も希少種の導入も、施策後に安定した生物群集が成立してはじめて意味を持つ。生物群集の動態を考慮した生態系管理を行うには、生物間相互作用ネットワークの全体像を膨大なデータとともに解明する必要がある。その上で、生物群集を複雑系として理論的に捉え、個別の問題に対する対処法を見出し、その効果の予測を行い、検証する枠組みが必要となる。日本近海における海洋食物網の全体像が未知であることや、森林・農地生態系の土壌における微生物と植物（作物）の相互作用ネットワークがブラックボックスとされていることを考慮すると、生態系内の動態の全体像を把握した上で資源管理や生態系管理を行っていく戦略を、今こそ展開すべきであると言える。

3. 研究内容（成果の達成時期と具体的方策）

(1) 大規模 DNA バーコーディングを利用した種間相互作用ネットワークの解明

寄生や捕食、相利共生のすべての相互作用において、生物どうしは物理的に接触している。野外で採集された生物個体の体内には、その個体の餌となった被食者や、寄生者、体内共生者の DNA が含まれ、小規模の環境サンプル（ひとつまみの土や 1 滴の水）の中でも、寄生・相利共生する複数の生物種に由来するゲノムが混在している。そのため、ある生態系において十分な数の環境（個体）サンプルを採取してその中の複数生物群の DNA バーコーディングを同時に行えば、食物網や寄生・相利共生ネットワークに関する大規模かつ規格化された情報がもたらされると期待される。

次世代シーケンサーが吐き出すデータから DNA バーコーディングを自動化して行うプログラムの開発が国内外で行われており、生態系研究における利用が待たれている。上記の基盤技術を用いれば、森林をはじめとする様々な生態系を支える植物と菌根菌の複雑ネットワークの構造解明や、水域の食物網構造の解明を大規模に進めることができると期待される。多様な生態系や生物間相互作用におけるこうした実証研究は、従来の肉眼観察では想像すらできなかった規模で生態系の構造に関する知見をもたらし、また、生態系間での構造や動態の比較を可能にすると期待される。研究支援開始から 7 年ほどの期間で、地球上の様々な生態系の構造が大規模かつ規格化されたかたちで明らかになると期待される。

(2) ゲノム情報と遺伝子発現情報の利用による生態系動態の解明

DNA バーコーディングの大規模化による種間相互作用ネットワークの解明 (1) は、食物網や寄生・相利共生ネットワークの構造に関する基礎的な情報を飛躍的に増大させる。一方で、そのネットワークの中で実際にどういったやり取りが生物種間でなされているのか、物質循環の観点から定量的に評価するしくみを構築する必要がある。ここで、(i) ショットガン・ゲノミクスによる各生物の機能推定と、(ii) 生物間の物質輸送に関わる遺伝子の発現解析の 2 つの方向性で、(1) のネットワーク情報を補完していくことが可能であると考えられる。

(i) 環境中の微生物（細菌、真菌など）の多くは、その生態機能が未知である。一方で、ゲノムサイズが小さいことから、ショットガン法によるゲノム解読によって、ゲノム中の遺伝子の組成を推定することが、

今後ますます容易になってくると期待される。そこで、(1) のネットワーク上で機能は未知だが重要な働きをしていると考えられる生物種のショットガン・シーケンスを得て、生態系内で要となる種間相互作用の機能を遺伝子の組成などの情報をもとに推定する。

(ii) 一方で、野外で採集されたサンプルの遺伝子発現解析を行うことによって、どの生物とどの生物の関係（寄生や相利共生）において、どういった機能遺伝子が発現し、どういった物質がやり取りされているか解明できると考えられる。寄生や相利共生をつうじて、生物種間で様々な物質がやりとりされる。この物質のやりとりにおいて働く遺伝子を遺伝マーカー化すれば、野外の生物間相互作用をつうじてやり取りされる物質を定量化できる可能性がある。(1) では、生態系内の物質循環における「配管構造」が明らかになるが、この配管の各所に「水道メーター」としての遺伝発現解析を組み込むことで、複雑な種間相互作用を通じて生態系内でやり取りされる物質の流れを大規模に解明することが可能になると期待される。

(i) については、今後の次世代シーケンサーとゲノム・アセンブラの性能向上に依存して進展すると考えられるが、研究支援開始から4～5年ほどで先駆的な研究成果が得られると期待される。(ii) については、(1) の先駆的な研究の進展と歩調を合わせて、今後5年ほどでいくつかの重要な物質循環過程に関する知見が得られ始めると予想される。

(3) 構成的アプローチによる経験知の統合：生態系管理に向けた検証実験

陸域においても水域においても、微生物の群集構造によって、動物や植物の群集構造やさまざまな生態系サービスの質がかわってくると予想される。しかし、微生物群集の群集を直接管理するのは極めて困難である。これまでも、培養した特定の有用微生物の導入が盛んに行われて来たが、効果が現れるだけの量を生産するコストが高過ぎるか、そもそも野外環境への定着に失敗している例が多い。また、在来種でない微生物の利用は外来種や遺伝子汚染に関わる問題を引き起こす恐れがある。そのため、微生物の宿主となる動物や植物など、人間が管理しやすい生物群の群集構造を操作することで、社会が求めるサービスを提供する微生物群集と生態系の設計・管理を行っていくべきである。

そこで、動物や植物と微生物群集の関わりを(1)と(2)の研究で大規模に解明しつつ、動物や植物の群集構造を操作することで微生物群集の構造を間接的に操作する野外実験が必要となるであろう。例えば、森林生態系の管理を考える際、処理区ごとに異なる組み合わせで植物種を導入する。その上で、地下の微生物群集（菌根菌など）の形成過程を時系列で追いながら、植物群集の構造の変化や純一次生産速度、植食性昆虫や上位捕食者の群集構造等を指標として、植物群集操作 → 微生物群集構造 → 生態系サービス という流れの中での因果関係について、知見を集積することができると期待される。(1)と(2)の成果が出始める支援3年目頃に実験をデザインし、最低5年間実験を継続しながら、追跡調査を行う体制が求められる。

4. 提案の適時性

社会ニーズ： 近年、地球レベルの気候変化がもたらす温暖化ストレスや多雨・旱魃によって、直接的・間接的に自然・農地生態系がダメージを受ける事例が増えている。また、水産資源の枯渇が問題となるなか、日本近海の海洋食物網の構造さえ、その全体像が統合的に理解されていない。生態系を維持・管理するための技術は、今後、世界中でその需要を増していくことが確実である。生態系生態学を軸とした基礎研究の革新は、こうした需要に応える環境科学を世界に向けて発信していく道を拓くものである。国際的な競争が始まる前に、今後の潜在的な成長分野として我が国で推進すべきである。

さらに、生物間相互作用の包括的理解に関わる生態学は、国際的に競争が激化する植物育種とも関わっている。育種された作物を植える場合でも、近隣の自然／半自然生態系から、送粉者や植食者、菌根菌、病原微生物の影響を受ける。こうした過程を理解し、育種された植物を効率的に利用していくためには、高度な生態学的知見を育種学と統合していく必要がある。生態系内の相互作用を包括的に理解する環境科学は、他にもさまざまな応用面において本質的な解決策や技術を提供すると期待され、我が国においてそうした次世代生態学の中核を構成することが望まれる。

研究シーズ： 2013年中には、手のひらサイズで安価な、使い捨て型のDNAシーケンサーが発売される

と予想される。フィールド調査にも携帯できるこのシーケンサーを用いて大規模な DNA バーコーディングのシステムを構築すれば、従来の研究手法では想像もできなかったスケールで、種多様性や群集構造に関する情報を得ることができる。一方で、こうした技術革新を活かすためには、野外での生態調査、理論生態学、ゲノム科学の手法のすべてを俯瞰する強固な学際的研究ネットワークの構築が必須であり、今後、支援体制を整える必要がある。

5. 参画が見込まれる研究者層

群集生態学者、進化生態学者、土壌学者、生理生態学者、数理生態学者、分子系統学者、DNA バーコーディングの専門家、集団遺伝学者、陸水・海洋生態学者、植物分子遺伝学者

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

この研究領域は、対象となる生態系の面でも連携し合う研究分野の面でも広範な専門分野が関連する。基本構成としては、5名ほどのコア研究者で構成される機動的なチームを、1) 陸域（森林・草原など）、2) 攪乱・半自然生態系（陸水・農地）、3) 海洋、といった対象生態系の種類で区分し、個別の研究プロジェクトを展開することが望まれる。一方で、最低1年に1度全チームが集合して研究会を開催し、適宜共同研究を立ち上げる体制を整える必要がある。様々な生態系における野外調査とともに、遺伝子解析やメタゲノム解析の実験技術の試行錯誤、バイオインフォマティクスのツール（プログラム開発）等、息の長い支援が必要となる要素が多いため、10年程度の支援期間が必要である。特に、(3)の野外実験は短期間の支援では成果の意義が半減するため、この点でも10年程度の支援期間が望ましい。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

構成的アプローチによる野外実験(3)では、長期にわたる圃場の確保が必須である。しかし、ほとんどの研究機関において、実験圃場等を貸与できる期間は極めて短いため（1～3年ほど）、土地の貸与について、休耕地の利用を自治体等と協議して実現することも視野に入れる必要がある。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果： 機能的に極めて多様な無数の生物種で構成される生態系は、科学の対象として最も複雑な系である。最先端のゲノム科学を導入して生態系の動態の本質に迫るこの研究領域は、物理学、コンピュータ科学、社会科学が対象とする複雑系の動態理解に還元される知見をもたらすと期待される。

社会経済的効果： 生態系管理に関わる技術の需要は、今後、多様化しつつ世界中で拡大することが予想される。この研究領域で推進される、生物間相互作用ネットワークの包括的理解に基づいた環境科学は、世界的にみてもまだ競争さえ始まっていない。フロントランナーとして世界をリードできる環境科学の柱を国内に立ち上げることは、科学技術立国としての我が国の戦略を多岐化させる上で重要な意味を持ってくると期待される。

提案 21

1. 研究領域名称

生物多様性と生態系機能を支える微生物機能の統合的解明

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

微生物（真正細菌・古細菌・菌類・藻類・原生動物など微小な生物）は、地球上でもっとも古くから存在し、膨大な多様性を進化させてきた。微生物の生物機能は多種多様であり、物質の代謝・寄生（感染）・共生

などを通して、さまざまな生物や生態系において極めて重要な役割を持つ。しかし、微生物の多様性や機能に関する知見は、これまでごく一部の微生物（モデル生物や病原体など）に限られていた。分子生物学的手法・培養技術・数理モデルなど、近年の研究手法の発展により、陸域と水域を含むさまざまな環境中に生息する微生物の系統・遺伝子・表現型・相互作用・生態系機能などを、これまでになく視点や解像度で評価できるようになっている。これまでブラックボックスとされていた微生物の相互作用や機能を解明することにより、生物群集の多様性や、物質循環などの生態系機能の理解が、飛躍的に進むことが期待される。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

物質循環を支える微生物

温暖化などの気候変動に影響を与える炭素の物質循環モデルや、生物生産や富栄養化問題に重要な窒素やリンの物質循環モデルにおいて、微生物による物質代謝はブラックボックスで扱われている。微生物の多様性や機能によって物質代謝は改変されると予想されるが、その実態はほとんど未解明である。気候変動や富栄養化など、社会経済に直結する物質循環の問題を理解するためには、微生物のブラックボックスを深く理解することが求められる。

新規物質ソースとしての微生物

微生物のもつ生体物質には、膨大な数の未知物質が含まれており、これまでに知られていない機能をもった物質が潜在している。例えばタンパク質では、哺乳類ではその新規発見はほとんどないが、微生物での新規タンパク質の発見数は、新しい研究ごとに増えていると言われる。また、新規の抗生物質の発見は医薬学的にも重要な課題であるが、微生物には未知の抗生物質が数多く存在すると予想されている。新規物質の発見は、社会経済のさまざまな面に大きな貢献をする。

微生物との共生

陸上植物のほとんどが微生物と共生関係をもつ根圏をもち、それが植物の生存を助け、ひいては植物群集の多様性を実現している。共生関係は、陸上動物や水生生物にも数多く存在すると考えられるが、その実態はほとんど解明されていない。生物多様性を維持するメカニズムとして、あるいは外来種の定着を決めるメカニズムとして、微生物の共生関係を深く理解することは大きな意義がある。

感染症＝微生物の寄生

微生物のなかには、人間や人間活動に密接に関係する動植物に感染し、病気などの問題を引き起こすものがある。病原微生物と宿主、あるいは病原微生物と非病原微生物の相互作用は、病原微生物の増減に大きく影響し宿主の発病動態を決めるため、その理解が求められる。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

近年の研究技術の発展を十分に活用することで、微生物と環境の相互作用や、微生物と他の生物との相互作用を、複雑適応システム（個々の要素の特性が可変・適応可能であり、要素間の相互作用のネットワークが複雑な構造）の枠組みで捉え、分子から生態系の異なる生物学的レベルを横断的に理解するなど、過去になく視点や解像度で現象を評価することが求められる。特に、微生物の多様性を評価するだけにとどまることなく、微生物の相互作用をその分子基盤（オミクスやメタオミクスを含む）から評価し、環境変化などに対する相互作用の可変性や、相互作用から成り立つシステム全体の機能やダイナミクスを明らかにすることが重要である。その際、数理モデルをもちいて、異種データの統合的理解・観測できないプロセスの推定・環境変化への応答予測などを進める必要もある。

下に挙げるのは、具体的な研究内容として想定できるものであるが、これに限るものではない。

1) 微生物と動植物の関係の新たな理解

・植物群集の多様性と土壌微生物の関係の解明（陸上植物と水生植物を含む）

個々の植物と微生物の関係ではなく、植物群集と微生物群集の関係にせまる必要がある

・植物表在微生物の評価とその機能の解明（分子基盤を含む）

- ・動物の腸内微生物がもたらす機能の解明（分子基盤を含む）
- ・農業生態系・森林・水産資源などにおける微生物の機能の解明（分子基盤を含む）など

2) 野生生物と病原微生物の新たな理解（陸域と水域を含む）

- ・野生生物感染症の相互作用の解明（分子基盤を含む）
- ・メカニズムに基づく感染症流行（エピデミクス）の解明
- ・病原微生物の薬剤耐性獲得の分子メカニズムとその影響の解明など

3) 物質循環を駆動する微生物（陸域と水域を含む）

- ・物質循環を駆動する微生物群の特定

特定の機能がどのような別の特性をもつ微生物によって担われているか、など

- ・環境変化（気候変動、富栄養化、土地利用改変、外来種など）に伴う微生物を介した物質循環の改変など

4) 実験系や数理モデルを用いたメカニズムの解明

上記について、自然環境中の微生物群集を対象にするだけでは、その相互作用や機能の実態には迫りきれない可能性がある。そのため、モデル生物をもちいた実験系や、数理モデルによる理論的解析により、相互作用や機能のメカニズムを理解する必要がある。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：多種多様な微生物の機能を解明することで、気候変動をもたらす物質循環モデルの深化、医薬や産業のシーズとなりうる新規生体物質の発見、微生物共生という生物多様性の新しい視点、人間や野生生物の感染症の理解など、現代社会が抱える課題の理解が飛躍的に進むことが期待される。

研究シーズ：微生物の生物機能は重要だと考えられているが、その実態解明は進んでいない。分子生物学的手法・培養技術・数理モデルなど、近年の研究手法の発展により、微生物の系統・遺伝子・表現型・相互作用・生態系機能などを、過去にない視点や解像度で評価できるようになっている。

5. 参画が見込まれる研究者層

微生物学・分子生物学・生態学・進化学・動物学・植物学・ゲノミクス・オミクス・メタオミクス・数理生物学などに関わる、基礎研究と応用研究の研究者

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

微生物学の研究者だけではなく、分子生物学・生態学・数理生物学などを横断する研究者からなるチームが、個々の特色ある研究を推進する。分子から相互作用やシステムまで、生物学的レベルを横断するようなチーム編成とすることが、飛躍的な研究成果を導くために重要である。また、それらのチーム間で情報共有し、研究領域全体の目標に向かうことを促進するようなコンソーシアムを設ける。基礎的知見を成果とする研究課題については基礎研究者のみで構成されることもあるが、研究成果を医薬分野や産業分野などに応用することを旨とする研究課題については、民間企業を含めた応用研究者の参画が望ましい。

研究推進期間については、分野横断の研究で成果を目指すことから、一研究チームあたり5年を基準とするのが適切であろう。また、コンソーシアム全体では10年以内程度の期間とし、微生物研究の新しい地平を開拓して、その後の研究を加速させるための助走期間と位置づける。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

個々の研究の具体的課題によっては、病原微生物の管理や生物多様性資源の管理などに関する法を遵守することが求められる。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：微生物の機能は多種多様であり、物質循環などの生態系機能や生物多様性の維持に大きな役割を担うとされるが、その実態はブラックボックスにされている。微生物の系統・遺伝子・表現型・相互作用・生態系機能をこれまでにない視点や解像度で解明することにより、微生物学のみならず、生物多様性や生命現象そのものの理解が深化することが期待される。

社会経済的効果：感染症・物質循環・生物多様性・新規物質など、人間社会と密接に関係する現象や実態が明らかになることは、これらの課題に対応する政策立案や新たな産業のシーズにつながると期待される。

提案 22

1. 研究領域名称

ゲノム情報を活用した生態系の構造と機能の解明

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

生態系は、物理化学的環境と生物の間、および生物間の相互作用で成り立っている複雑なシステムであり、その理解には、その生態系の構成する生物およびそれらの相互作用の詳細を解明することが不可欠である。しかし、生態系内部での相互作用については、大型の生物間の関係の研究は進んでいるが、微生物との相互作用や生態系における働きについては、その重要性は認識されているがまだ解明が進んでいない。そして現実には生態系内ではほぼブラックボックスとして扱われており、これらの組成や機能は重要な課題であり、その解明は生態学のみならず、保全生物学や地球環境科学などの周辺分野に大きなインパクトを与え得る。

最近の技術的発達により、分子情報を用いた生物の同定技術（DNA バーコーディング）や、環境からのDNAなどの検出により、これまで研究手法の限られていた微生物などの生物群の研究が可能となり、生態学分野での応用が期待される。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

近年、地球環境問題として生物多様性の保全と持続的利用が大きな国際的課題となっているが、その研究や政策の推進基盤としてそれぞれの生態系についての科学的理解は欠くことのできないものである。生態系・生物多様性に関しては、その重要性は認識されてきたが、複雑なシステムであるが故、その理解と劣化に対する対策は、もう1つの重要な課題である「地球の気候変動」に比べて進んでいなかった。

最近、生物多様性から人類が受けている恩恵としての「生態系サービス」という観点から、数値化・指標化して、過去・現在・未来の状況を把握がされようとしている（このための国際組織として国連主導でIPBESが設立された）。このような数値化・指標化を行うには、科学的研究基盤が不可欠であるが、上で述べたように、多様な生態系の機能に関しては、まだ未解明な部分が多く残っている。本課題はそのギャップを埋め、生物多様性と生態系が地球環境に及ぼす影響について明らかにしていくことにより、その保全と持続的利用を進める。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

本研究課題は、多様な分野の専門家が同一の調査地を対象にして研究を行い、対象生態系の構造と機能を解明するのが特徴である。さまざまな分野の研究者が協力し手研究成果を統合することにより、創発的成果によりこれまでブラックボックスとして扱われていた部分の解明が狙いである。これにより、どのような生物あるいは生物間相互作用の効果が、周辺の環境にどのような影響を与えるかを解析する。対象生態系としては、森林生態系地域（常緑広葉樹林、落葉広葉樹林）を対象に、1地域で環境や生態系組成の異なる5カ所ほどにおいて、以下の様な研究を行う。

1) 生態系・生物多様性の理解には、何処に、どのような特性を持った生物が、どのくらい生息している

かの把握が不可欠となる。このような情報の基盤として、調査対象地について、全生物群を網羅した生物種リストの作成を行う。その際、DNA バーコーディング技術の開発とその活用を行う。土壌や、植物内、動物体内の環境 DNA 解析を行い、このリストに加える。可能な限り、実際の種との関連をとる。DNA 配列情報はデータベース化して、本プロジェクト内外で共有する。

2) 1) において検出された生物種間の相互作用について調査する。また、それぞれの生物種の物質・エネルギーのインプット・アウトプットについて調査する。

3) 1) において検出された重要種（量的および機能的）について、発現遺伝子プロファイル解析を行う。この情報は 1) の環境 DNA 情報と共にデータベース化し、両者の関連を解析する。その結果に基づき、生態系におけるそれぞれの生物種の機能についての考察を行う。特にそれぞれの森林の優先種について、その周囲の土壌に生育する微生物との相互作用の解明を試みる。

4) 以上の情報を総合し、異なる場所における生態系の構造と機能を、環境に与える効果などと比較し、どのような関係があるかを考察する。

5) 以上の情報から、生態系モデルを作り上げ、環境の変化や一部生物種の欠損が生態系や環境に与える影響についてシミュレーション解析を行う。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：自然環境や生態系の保全と持続的利用は、21 世紀の地球環境問題の中心課題の 1 つである。本研究は、このような国際的ニーズにおける施策の科学的基盤となるものである。たとえば、自然再生事業を行う際には、個々の種ではなく、システムとして稼働する生態系を構築しないと行けない。生物多様性の喪失が加速している現在、このような研究は緊急性の高いものである。

研究シーズ：次世代シーケンサーや分析機器の高度化により、これまで検出不可能であった生物や物質の移動などが観察できるようになった。このような新しい技術を生態学や多様性生物学分野に取り入れることにより、生態系の詳細な組成や機能までに踏み込んだ研究が可能となる。

5. 参画が見込まれる研究者層

多様性生物学、分類学、群集生態学、生理生態学、微生物生態学、数理生態学、保全生物学、システム生物学、地球環境科学

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

本課題は、これまであまり接点のなかった学問分野の知識や手法を統合し、生態系の構造と機能の理解を進めるものである。そのため、課題を推進するには、研究の統括を行う組織が必要となる。また、参画研究者のそれぞれの手法や成果などの理解を相互に深めるため、頻度の高いワークショップでの研究成果発表と議論を行っていく必要がある。

それぞれの研究者の収集・解析した情報の統合と共有化は課題のキーとなるものであり、データベースなど情報科学的インフラストラクチャーのサポートが必須である。

本課題では、DNA バーコード取得や遺伝子発現解析などが必要であり、これらは、課題全体で施設や機器等が共同利用できるような形が望ましい。

推進期間は 5 年をめどとするが、対象生態系の変化（特に地球気候変動に対する反応）を継続観測するために、さらに 5 年間のフォローアップが望まれる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

特に制度上の制約はないが、研究対象地域（森林の場合は演習林などが考えられる）の所有者の協力が不可欠である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：本研究成果によって開発される技術（DNA バーコーディングによる同定、環境 DNA からの生態系機能推定）は、生態学だけでなく、保全生物学や農学などの応用科学分野を含む多くの研究基盤として利用が望まれているものであり、それらの分野の発展に寄与する。

社会経済的効果：地球環境問題への対応は、21 世紀国際社会の重要な課題であり、地球環境変動や生物多様性の保全と持続的利用などの施策を行う際に、本研究の成果は科学的基盤として利用可能となる。また、効果的な自然再生の実行などにも利用でき、経済的な効果も見込める。

9. 備考

DNA バーコードを使用した同定技術・DNA バーコーディングに関しては、国際組織である iBOL が設立され、その主導のもと、国際的な DNA バーコード・リファレンス・データベースが構築されつつある。

10. 自由記述

日本の科学技術政策は、科学者の合意形成に基づくことが多い。そのため、特に国際研究コンソーシアムに参画しての研究推進が進まない状況にある。日本の研究者の多くは、個人としてこのような研究コンソーシアムに参加している例がほとんどであり、国や機関として参加することが少ない。生命科学分野でも、いくつかの国際的な大規模ゲノムプロジェクトなどは、MOU にサインしての参加するスタイルをとるが（上記の iBOL を含む）、予算的裏付けを素早くクリアして参画することが不可能であり、いくつかの国際プロジェクトにおいて中国や韓国に水を空けられている。

提案 23

1. 研究領域名称

生態系管理・野生動物管理（ニホンジカ）・生物多様性保全

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

北半球を中心にシカの分布拡大と生息数増加がこの数十年で生じており、増えすぎたシカが生態系へ与える影響が深刻な問題となっている。ニホンジカは全国的規模で分布が拡大し、生息数が増加し、全国自然公園 89 のうち過半数で自然植生被害が発生している。日本各地で、森林情報、植生情報、ニホンジカの生息密度（指標）や植生への影響などの生態学的情報が蓄積されつつある。また、植生へ与えるシカの影響評価のため、シカ柵が日本各地に設置され、柵内外の植生比較が実施されている。これらに、調査地の履歴（森林管理、土壌、地形、気候条件）やシカの個体数管理を統合化することで、シカが生態系へ与える影響についてのシナリオ分析、シカ管理や植生保護を優先すべき地域の選択条件、およびシカ密度を低減させた場合の生態的指標の提示や、気候変動を考慮した将来のシナリオ予測へと発展させることができる。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

地域ならびに全球までのさまざまなスケールで、生物多様性の保全とシカの管理に関するシナリオ分析が、管理目標設定の政策ツールとして期待できる。地域レベルで保全すべき優先地域を抽出することにより生物多様性地域戦略のなかにシカ管理を位置づけることが可能となる。また、国・地方自治体における自然公園におけるシカの個体数管理を実施するうえで、管理目標となる生態的指標の利用が期待できる。さらには、個々の森林施業計画にシカの個体数管理を位置づけることも可能となる。これまでニホンジカの空白地域であった東北地方に急速に分布域が拡大しているが、生物多様性保全のための優先地域を抽出することにより、予防原則に基づいた対応が期待できる。グローバルには、北半球で生じているシカの爆発的

増加と生態的影響のモニタリングと評価に寄与する。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

箇条書きなど、研究・技術開発の内容が、専門外の方にも読みやすいようにお書きください。列挙いただく研究課題の数に上限はございませんが、多すぎると提案内容の焦点ぼやけてしまいますので、ご注意ください。

(1) シカの高密度化がシカの生活史特性に与える影響の地域間比較

シカの高密度化がシカ自身の体サイズ、体重、栄養状態、初産年齢、妊娠率、増加率などに与える影響について、積雪があり季節性の明瞭な東日本と温暖な西日本では異なる可能性が高いが、これらの情報が整理されていない。これらの情報を整理することにより、密度上昇にともなう生活史特性のパターンを地域ごとに明らかにし、個体数のトレンド把握の生態的指標として用いることが可能となる。

- ・シカの体重と体サイズ（下顎）、生活史パラメータの収集
- ・代替餌（落葉）の量的・栄養学的評価

(2) シカの高密度化が植物群落に与える影響の地理情報化と予測モデル

シカの高密度化が草本、灌木、樹木、植物群落の動態、植生遷移、シカの管理状況などの地理情報を統合化し、シカの高密度化が植生に及ぼす影響を可視化する手法を確立する。さらにこれらの情報はGISで統合するモデルを構築する。

- ・密度上昇にともないどのような植生がどのような影響を受けたのかについて、定量的に評価を実施して植生指標を確立する。
- ・柵内外の植生群落の長期モニタリングデータをもとに、シカの採食の持続期間ならびに柵の設置年数から、植生回復の有無を決定づける許容限界密度指標を確立する。

(3) 統合的分析

・シカの密度上昇にともなう生態系への影響およびそれがシカ個体群に与えるフィードバック効果、シカの管理の実施状況を統合化することによって、統合的な分析を行う。

- ・生態学的許容限界密度指標の開発。
- ・生物多様性保全のための持続的シカ管理システムの構築

4. 提案の適時性

社会ニーズ：高密度となったシカは、森林下層植生に高い採食圧をかけ、希少植物の生育や森林の更新を阻害している。下層植生の被覆率の低下は土壌流出をもたらす、長期的に見た場合、山林の水源涵養機能を脅かす国土保全上の課題となっている。しかし、世界的にみても生態系への影響を定量化する手法はまだ開発途上にあるため、シカの管理上、生態的指標の開発が重要である。

研究シーズ：シカの個体群情報やシカが与える植生への影響について情報蓄積量が増加している。これらの情報に加えて、各地域の自然情報やシカの個体数管理の実行状況を加え、GISやリモートセンシングを用いて統合することが可能となり、シカが与える生態系への影響評価および将来シナリオの提示が期待できるため。

5. 参画が見込まれる研究者層

生態学、森林学、野生動物管理学、植生管理学、畜産学、リモートセンシング

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

- ・シカと植生モニタリングを長期に実施している拠点サイトの抽出し、特に柵を用いた調査地を選定し、それに関わる研究者のネットワークを作る。
- ・分野横断型で全国的な規模の研究なるので、各地域ごとにリーダーを配置する必要がある。

- ・生活史特性調査では、新たにシカの捕獲が必要になる地域もあるため、関連する自治体ならびに地元猟友会からの試料提供が必要となる。
- ・GIS解析や現地調査にはポストクの配置が重要となる。
- ・5年くらいのファウンディングが必要である。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

野生動物管理についての社会的理解が進んだのは、1999年に鳥獣保護法が改正されて、従来の保護から管理へと大きな方針転換がなされた以降である。しかし、銃刀法や鳥獣保護法は基本的には狩猟事故防止や狩猟獣の保護増殖を目的としているために、個体数管理を実施するうえではさまざまな制約が多い。また、管理の担い手である狩猟者の高齢化が進んでいる。日本の生物多様性や国土保全上の観点からシカ管理を考えるべきであるが、法的にも体制的にも未整備な段階にある。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：シカの高密度化がおよぼす植生およびそれによるシカ個体群、シカ管理の情報が全国規模で整備されるために、これらの大量のデータをもとに、生態学、植生学、野生動物管理学が発展することが期待される。

社会経済的効果：シカが生態系に与える影響を定量的に評価することが可能となるため、シカ管理を生態系管理や森林管理計画に位置付けることが可能となる。生物多様性を保全するためには、シカの管理が必要であることの理解が進み、狩猟の果たす社会的役割が認識されるようになる。

9. 備考

参考文献

- Côté, S.D., T.P. Rooney, J.-P. Tremblay, C. Dussault et D.M. Waller. 2004. Ecological impacts of deer overabundance. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 35: 113-147.
- Tremblay, J.-P., I. Thibault, C. Dussault, J. Huot and S.D. Côté. 2005. Long-term decline in white-tailed deer browse supply: can lichens and litterfall act as alternative food sources that preclude density-dependent feedbacks. *Canadian Journal of Zoology* 83: 1087-1096.
- McCullough, D.R., Takatsuki, S. and Kaji, K (Eds.) (2009) *Sika deer: Biology and Management of Native and Introduced Populations*. Springer.

提案 24

1. 研究領域名称

外来種管理システム構築

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

国内においては、2006年に環境省外来生物法が施行されて以降、個別に外来種のリスク評価研究および防除技術開発研究が推進されてきている。これらの技術を統合するとともに、アジア地域における情報共有を図ることで、国際的な外来種管理を達成可能と考えられる。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

10-15行を目安にお書きください。具体的な数値を盛り込んでいただいてもかまいません。

環境省、農水省、厚労省、国土交通省、経産省など関連する省庁および所属研究機関の間での連携は、ほとんどとられておらず、検疫から根絶に至るまでの一貫した外来種管理のためのシステムが存在しない。

オーストラリアでは、CSIRO オーストラリア連邦科学産業研究機構という総合的研究開発機構が、省庁のセクトを超えて外来種の管理にもあたっている。こうした総合的管理システムを我が国にも構築し、同時にアジア全体の Capacity building を推進することで、アジア生物多様性保全に貢献することができる。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

- ・外来種の検疫手法の開発・マニュアル化（DNA-Barcoding の活用、普及、分類学情報の整備）
- ・外来種のリスク評価手法の開発・マニュアル化
- ・外来種防除技術の開発・マニュアル化
- ・国際的外来種情報ネットワーク構築
- ・アジア地域における外来種管理キャパシティ・ビルディング

4. 提案の適時性

社会ニーズ：COP10 で採択された愛知ターゲットのターゲット 9 においても、外来種の侵入ルートを特定し、防除の優先順位を決定して、速やかにその脅威を除去することが定められている。外来種問題は、国境を越えた環境問題であり、人とモノの移動に連動してその影響は拡大する。WTO や OECD という国際貿易機構が自由化を推し進める中で、外来種の移動を制限し、防除するシステムを構築することは、世界共通の課題となる。

研究シーズ：個別の外来種リスク研究および防除技術開発研究は、国内でも急速に進展を見せている。個体群生態学・進化生態学理論の導入とともに、GIS 分析による外来種の空間分布の把握と予測など、理論と技術の発展も目覚ましい。

5. 参画が見込まれる研究者層

生態学、遺伝学、社会学、環境経済学、情報分析学、リスク学

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

環境省環境研究総合推進費、JST 新学術領域、経産省・農水省受託事業など、大型の研究プロジェクトとして推進する。また国際的な研究ファンドも視野に入れる。拠点施設は国立環境研究所

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

WTO-SPS Agreement など、国際貿易の自由化に係る国際規約をクリアしなくてはならない。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的效果など）

科学技術上の効果：バイオセキュリティにかかる技術革新

社会経済的效果：人とモノの移送形態に革新的な防除システムが導入される。

9. 備考 記載なし

10. 自由記述

グローバリゼーションの波に対抗して、生物の多様性と地域固有性を守るためには頑強な科学的根拠が求められる。特に外来種管理に関しては、国際的に Authorize された科学知見の蓄積と発信が急務。学者自身も NPO 的な国内プロパガンダにのみ奔走するのではなく、国際社会という舞台上、外来種の専門家 Dr として強力な意見発信者になる必要がある。

提案 25

1. 研究領域名称

海洋保全・管理

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

さまざまな空間スケールの海洋生態系の状態、機能量、生物多様性などの生態的情報が蓄積され、従来の水産資源量の推定手法に加えて環境要因や空間情報を考慮した評価手法が開発されつつある。気候変動影響のシナリオ予測も試みられている。大量かつ多重な情報を集約することで、海洋生態系の資源や生態系サービスの評価、生態系ベースの漁業管理などにおけるモデル化が可能となり、精度の高いシナリオ分析へ発展できる。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

地域から全球までのさまざまなスケールで、生態系サービスを考慮した海洋生態系の保全・利用に関するシナリオ分析が、政策や意思決定のツールとして期待される。地域においては、種別の国別および国際的な水産資源管理計画、資源評価、統合的沿岸域管理などで大きなニーズがある。自治体・国レベルでは、保護・開発計画における政策決定、IQ 制度導入などの経済的インセンティブのある漁業管理計画の導入、グローバルには、全球レベルでの監視・評価、国際流域や国境をまたがる保護地域の管理などに大きなニーズがある。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

(1) 生態系サービスの評価手法

供給サービスの多くは経済評価手法の確立したものが多いが、調節サービスの一部や文化サービスの評価は、経済評価方法が初歩的段階にある。逆に、伝統知や在来知の集積を通じた民俗学的社会的調査研究が進んでおり、その知識がユネスコ MAB（人間と生物圏）などを通じた国際ネットワークによって共有され、生物多様性条約事務局の見解にも反映されつつある。

(2) 生態系サービスの地理情報化と予測モデル

気候条件、森林状態、土地利用、社会インフラ、経済活動などの地理情報を統合し、多様な生態系サービスに関する地理情報として可視化する手法を確立する。さらに、それらの条件を空間情報モデルモデルとして構築する。

- ・海洋栄養段階指数の見直し
- ・海洋認証制度（エコラベル）の高度化
- ・海洋健康指数（Ocean Health Index）の開発
- ・PES のシステム設計と導入手法

(3) 統合的シナリオ分析

経済メカニズムや社会システムをモデルに組み込み、統合的シナリオ分析を行う。

- ・生態系サービスを考慮した気候変動適応策の策定
- ・持続的社会形成シナリオ

4. 提案の適時性

社会ニーズ：生物多様性条約では、地球規模生物多様性概況（GBO）を定期的に出版しており、この中で生物多様性や生態系変化の地理情報が望まれている。2000 年から 2010 年に実施された海洋生物センサス（Census of Marine Life）は、日本の排他的経済水域が世界で最も既知の生物の多様性が高いことをデータによって示すなど、全球的な海洋生物多様性データの蓄積を進めた。また、IPBES が 2012 年に設立され、全世界の生態系サービスの評価がさまざまな空間スケールで行われることになっているが、その手法はま

だ十分発達しているとは言えない。地域では、伝統知や在来知を生かした零細漁業の共同管理の価値の普遍化を目指す「統合的地域環境知 (Integrated Environmental Knowledge)」の集積が重要であり、企業体漁業の国際管理とともに零細漁業の地域共同管理の両立を図るとともに、漁業以外の利用を含めた統合的海域管理に向けた理論的枠組み作りが必要である。

研究シーズ：CRESTによって海洋生態系の動態に関する観測プロットが充実し、生物多様性情報もGBIFなどを中心にデータベースが確立されてきた。また、これらの情報と社会経済情報の統合に成功した研究も現れてきた。これらに加えて、リモートセンシング技術の発達やGISモデリングなどが発達し、さまざまなテーマの地理情報化が急速に進みつつある。さらにbig dataなどの情報学上の進歩もあり、こうした統合的分野の進展が大きく期待できる。

5. 参画が見込まれる研究者層

生態学、水産学、生物学、地理学、環境化学、社会学、法学、文化人類学、経済学、情報学、リモートセンシング など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

計算機、GISシステム、次世代DNAシーケンサなどが必要であり、調査に必要な船舶の確保が必須である。現地調査やリモートセンシングデータの購入、場合によっては電子化されていない情報の電子化などが必要になるため、そうした点で使いやすい予算が良い。また、情報学、GISなどは、ポスドクなどの雇用で対応する方が効率的な場合もあるだろう。アウトプットを明確な形にして、3-5年のファンディングが望ましい。

また、分野複合的な課題が多くなるため、そうした体制の組めるリーダーと研究者グループが必要である。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

水産物以外の海洋生態系サービスの多くは、これまでその効果や社会経済的つながりが、高く評価されてきたとはいえ、そのため、水産資源管理や、海洋生物多様性保全が重要視されてこなかった。これらに対する評価を進めることは、こうした問題に対する理解を深めるという点でも重要である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

生態系サービスの評価が適正にできることに伴い、水産資源以外の生態系サービスが適正に評価されることによって、海洋生物多様性の価値に対する認識が高まる。そのことにより、生態系サービスを考慮した持続性の高い水産業や地域管理が大きく発展する可能性がある。また、これまで経済で外部化されていた生態系サービスの内部化が進み、適正な経済システムの同級が加速するだろう。

科学的には、多くの海洋生態系、生物多様性情報が地理情報化され、さらに大きな空間情報が多量に利用できるようになり、研究が大きく進展するだろう。

提案 26

1. 研究領域名称

森林保全・管理

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

さまざまな空間スケールの森林の状態、機能量、生物多様性などの生態的情報が蓄積され、推定手法や補完手法が確立されてきた。これらに、気候条件やその変動シナリオ、土地利用や社会経済的情報、および

それらのシナリオ予測などがともに空間的情報として提供できる状況が進みつつある。こうした大量かつ多重な情報をもとにすることで、森林の資源や生態系サービスの評価、持続的森林管理などにおけるモデル化が可能となり、制度の高いシナリオ分析へ発展できる。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

地域から全球までのさまざまなスケールで、生態系サービスを考慮した森林の保全・利用に関するシナリオ分析が、政策や意思決定のツールとして期待される。地域においては、個々の森林経営者の森林計画、認証制度の評価、アセスメント、生物多様性オフセットなどで大きなニーズがある。自治体・国レベルでは、保護・開発計画における政策決定、PES や REDD のシステム設計と MRV、グローバルには、全球レベルでの監視・評価、国際流域や国境をまたがる保護地域の管理などに大きなニーズがある。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

(1) 生態系サービスの評価手法

供給サービスの多くは経済評価手法の確立したものが多いが、調節サービスの一部や文化サービスの評価には、まだ経済評価方法の確立されていないものがあり、こうしたサービスの定量化、経済評価手法を早急に確立させる。

- ・送粉・病害虫制御サービスの定量化と経済評価
- ・生物多様性と精神生活の健全さの関係解明
- ・生物多様性と文化の固有性関係解明

(2) 生態系サービスの地理情報化と予測モデル

気候条件、森林状態、土地利用、社会インフラ、経済活動などの地理情報を統合し、多様な生態系サービスに関する地理情報として可視化する手法を確立する。さらに、それらの条件を GIS モデルとして構築する。

- ・地域の生態系サービスの評価と地域計画手法の確立
- ・森林認証制度の高度化
- ・生物多様性オフセット制度の設計と確立
- ・REDD および REDD + のシステム設計と MRV
- ・PES のシステム設計と導入手法

(3) 統合的シナリオ分析

経済メカニズムや社会システムをモデルに組み込み、統合的シナリオ分析を行う。

- ・生態系サービスを考慮した気候変動適応策の策定
- ・持続的社会形成シナリオ

4. 提案の適時性

社会ニーズ：生物多様性条約では、地球規模生物多様性概況（GBO）を定期的に出版しており、この中で生物多様性や生態系変化の地理情報が望まれている。また、iPBES が 2012 年に設立され、全世界の生態系サービスの評価がさまざまな空間スケールで行われることになっているが、その手法はまだ十分発達しているとは言えない。また気候変動枠組条約と生物多様性条約の協働として、REDD あるいは REDD + が注目されており、監視・報告・検証の技術的確立が急務となっている。地域では、生態系サービスや生物多様性の価値評価がこれらを経済メカニズムに組み込み、持続的に利用するうえで必要であり、その手法開発が望まれている。

研究シーズ：森林の組成や動態に関する観測プロットが充実し、生物多様性情報も GBIF などを中心にデータベースが確立されてきた。また、これらの情報と社会経済情報の統合に成功した研究も現れてきた。これらに加えて、リモートセンシング技術の発達や GIS モデリングなどが発達し、さまざまなテーマの地理情報化が急速に進みつつある。さらに big data などの情報学上の進歩もあり、こうした統合的分野の進展

が大きく期待できる。

5. 参画が見込まれる研究者層

生態学、森林学、生物学、地理学、社会学、法学、文化人類学、環境経済学、情報学、リモートセンシング など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

計算機、GIS システムなどは必要であるが、備品としてほかに大きなものはないと考えられるが、現地調査やリモートセンシングデータの購入、場合によっては電子化されていない情報の電子化などが必要になるため、そうした点で使いやすい予算が良い。また、情報学、GISなどは、ポスドクなどの雇用で対応する方が効率的な場合もあるだろう。アウトプットを明確な形にして、3－5年のファンディングが望ましい。

また、分野複合的な課題が多くなるため、そうした体制の組めるリーダーと研究者グループが必要である。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

木材供給以外の森林生態系サービスの多くは、これまでその効果や社会経済的つながりが、高く評価されてきたとはいえ、そのため、持続的森林管理や、森林の生物多様性保全が重要視されてこなかった。これらに対する評価を進めることは、こうした問題に対する理解を深めるという点でも重要である。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

生態系サービスの評価が適正にできることに伴い、木材生産以外の生態系サービスが適正に評価されることによって、森林や生物多様性の価値に対する認識が高まる。そのことにより、生態系サービスを考慮した持続性の高い林業や地域管理が大きく発展する可能性がある。また、これまで経済で外部化されていた生態系サービスの内部化が進み、適正な経済システムの同級が加速するだろう。

科学的には、多くの森林生態系、生物多様性情報が地理情報化され、さらに大きな空間情報がタオ量に利用できるようになり、研究が大きく進展するだろう。

提案 27

1. 研究領域名称

統合的海洋管理・沿岸域管理のための海洋生態系サービスの予測・評価手法の開発

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

藤倉ら(2010 PLoS ONE 5(8): e11836.)の日本の海洋生物多様性調査結果、牧野(2012 Fisheries Management in Japan, Springer)、秋道智弥(1995「海洋民族学」)を統合するような文理融合の取り組みがある。海の生物多様性は無脊椎動物やプランクトン・ベントスを含めて解明が急速に進みつつあり、定量的評価も可能になりつつある。地域の生態系サービスを総合的に活用するための漁業の共同管理（ボトムアップ管理）、自主的禁漁区などの効果を探り、その民族学的起源を解明することで、「里海」論に通じる沿岸域管理の新たな理念を実証的に体系化する素地ができつつある。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

海洋生態系については、陸域に比べて保全の取り組みが遅れ、Pew財団やCoMLのような民間主導で保護活動への資金提供が行われてきた。そのため、以前は反捕鯨運動のような漁業を敵視する研究が主流だった

た。近年は、途上国における零細漁業の価値の見直し（生物多様性条約における生物文化多様性という概念の定着）、水産物需要のグローバル化、世界最先端である日本の養殖・種苗育成技術のグローバル化、それらに伴い日本の水産企業の多国籍企業化と国際環境団体との関係強化、漁業以外の海洋生態系サービスの価値の評価、漁業以外の海面利用との調整を目指す統合的海洋管理の必要性、河川改修による影響を含めた沿岸域管理の重要性が広く認識されるようになり、上記領域の必要性は極めて重要になりつつある。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

- ・ 零細漁業と沿岸生態系サービスの関係の生態学、水産学、経済学、社会学的視点からの研究
- ・ 河川改修・陸域土地利用が沿岸生態系・生物多様性・生物生産に及ぼす影響と修復技術（生態学、土木工学、経済学、水産学）
- ・ 海洋生態系サービスの社会経済評価（多種多様な自然資産を利用し、認識してきた歴史的価値、内外の各地における伝統知や在来知のデータベース化と生物多様性の関係）。さらにこの全球評価ならびに将来予測には、生態学的知見と産業連関表など LCA の技法の両方が必須である。
- ・ 持続可能な水産資源供給量の評価と予測（マグロのような上位捕食者の乱獲は持続不可能だが、イワシやサンマ、オキアミのような栄養段階の低い生物資源の持続可能な供給量は膨大である。ハダカイワシのような中深層性の生物資源も膨大である。これらの持続可能な供給量を評価するとともに、その効率的利用の方途を探る。現時点では需要がないため、利用されていないのである）
- ・ これらを支えるために、海洋生物多様性観測技術の確立。漁船からの情報（VMS）、一般船舶を利用した海洋観測（JAL の飛行機で大気観測をするのと同じ発想）、定点ソナー、野生生物自体に装着したデータロガー（その生物の行動圏内の観測が可能）など、様々な手法がある。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：沿岸域の自然資産の価値を見直すことで、陸域の河川改修や土地利用なども見直し、真に持続可能な社会への舵を切る。科学技術と経済だけでなく、伝統知や在来知を科学的に評価することで、グローバル化に対する地域の視点と生物と文化の多様性の双方を評価する（パンダやクジラを守ることだけが自然保護ではない）ことを再認識する。

研究シーズ：生態的負荷（Ecological Footprint）は LCA 解析を持ち込んだ。これに絶滅リスク評価、生態系管理の技法と融合し、生物多様性負荷を含めたより包括的な評価・予測・管理指標を開発する（最近公表された生物多様性 Footprint は、生態学的評価が原始的）

5. 参画が見込まれる研究者層

レッドデータブック編纂にかかわる生物学者（プランクトン、ベントス、魚類から哺乳類、植物まで）、バイオインフォマティクス、数理生物学（データマイニング、生態系モデル、個体群生態学など）、Life Cycle Assessment 及び環境経済学、環境社会学・文化人類学、歴史学、土木工学（流域沿岸管理及び防災の専門家）など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

総合地球環境学研究所の文理融合型のプロジェクト

CREST による海洋生態系課題

調査船が必要（JAMSTEC との連携が必須）

5 年程度でできる具体的課題を 10 程度置くとともに、文科系の研究者にはより長期的な視点で、諸課題にかかわり続けていただくのが適切。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

・データの共有にあたり、水産庁との折衝が必要。漁業ベースのデータが日本だけ開示されないというような残念な事態を避けねばならない。そのためには、水産庁の発想の転換が必要（ヨーロッパウナギのワシントン条約付属書掲載に反対しないなど、だいぶ良くなってきた。しかし、まだ知床世界遺産の海域管理にさえ参画していない）。都道府県の水産行政から先に帰るほうが早いだろう。うかうかすれば、水産庁不要論が巻き起こるようになればよい。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：適時性を書いたとおり

社会経済的効果：

9. 備考

Census of Marine Life

総合地球環境学研究所の文理融合型のプロジェクト

10. 自由記述

気候変動は環境問題を世界的に取り組む必要性を周知した。しかし、真に重要なことは地域の自然を守り、その恵みに依存する持続可能な社会を作り、文化や価値観の多様性を認め合う互恵的な社会を作ることである。人類全体で環境を考えると、互いの違いを認め合って地域の持続性を目指すことは矛盾しない。気候変動は前者を促し、生物多様性は後者を促す。

提案 28

1. 研究領域名称

湖沼を用いた大規模地球環境変化観測網の構築

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

地球温暖化が今後の地球環境にどのような影響を及ぼすかは、現段階では不透明である。我々にはできるだけ頻度高く、詳細な、高い現代科学のレベルを駆使した、高度なシステムでもって、さまざまな環境・生態系のモニタリングを継続し、我々が住む地球環境の現状を精確に把握し、これまでに培ってきた知恵を加えて、温暖化により変化する環境に人間生活を適応させていかねばならない。

地球温暖化の影響は、世界の各気候帯によって現れ方が異なる。また、環境の状態変化は検出限界に近い微少・微量・微細なケースが多く、環境の現状把握には最先端科学の知識と技術を使わなければならない。しかし、地球環境の全体像把握といった大きな規模について、極めて微小な変化を継続してモニタリングするシステムは、多額の費用と大きな労力を要するため、世界的にも体系的なデータがほとんど取られていない。

水中環境は、物理・化学・生物のいずれの反応も陸上と比べて格段に速く、変化しつつある環境変化をリアルタイムでとらえることができる。湖沼は、閉鎖性が強く、海洋に比べて規模が小さいゆえに、個々の反応が鋭敏かつ迅速に進むだけでなく、湖沼における環境応答はヒステリシス的であるために検知し易い。これらのことから、湖沼は環境変化を捉える優秀なセンサーとして利用しうる。しかしながら、森林や海洋の生態系に比べ、湖沼生態系を用いた観測システムは未だ限られており、また湖沼観測システム間での連携も十分ではなく、今後の発展が望まれている。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

地球温暖化の進行にともない、地球規模での環境モニタリングや生物多様性保全に多くの関心が集まって

いる。最近の10年間では、文科省が主導して進めている全球地球観測システム（GEOSS）や環境省が主導で進めている生物多様性国際研究プログラム（DIVERSITAS）に代表されるように、国際的、広域的かつ長期的環境・生物多様性モニタリングの必要性が、世界の研究者の共通認識となっている。これらのトピックでは、広域かつ長期にわたる環境・生物多様性データの収集と解析が最重要項目であり、国際的なネットワークが構築され、国内外の多くの研究者がこれらのトピックに関わっている。すでにマスコミ等で多くが報じられているように、地球温暖化は我々人間にさまざまな影響を与え、それらは必ずしも良い影響ばかりではない。今回提案の件は、このように諸人間活動にとって極めてニーズの高い案件である。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

本提案では、熱帯、温帯、寒帯等の地球上の異なる気候区分に位置する複数の湖沼に観測ステーションを設置（あるいは、既存の施設を利用）して、物理・化学・生物情報を頻度高く詳細に最先端の科学技術でもって継続的にモニタリングすることにより、温暖化による地球環境の変化をより正確に、より迅速に把握する。また、得られたデータの湖沼間比較を行い、地球規模で何が起きているか、従来よりも迅速、的確かつ詳細に地球環境の変化を把握する。

極地から赤道地域まで、異なる緯度に位置する複数の湖沼に高度にハイテク化された湖沼環境ステーション（船舶も必要）を設置し、各ステーションで湖沼環境観測を行う。各ステーションは、観測体制、試料収集システム、試料分析システム、データ解析システムについて同じ機能を有しており、全てのステーションにおいて質的量的に同じデータが取られる。このことにより、地球規模でのデータ比較が可能となり、温暖化による地球環境の変化をより精確かつ詳細に捉えることができる。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：

近年、地球規模での環境モニタリングや生物多様性保全に多くの関心が集まっている。たとえば、2010年10月に名古屋で開催された生物多様性条約第10回締約国会議（CBD-COP10）がそれであり、日本のリーダーシップにより環境・生物多様性保全の重要案件がまとまり、日本の国際的プレゼンスが高まったことは記憶に新しい。また、最近の10年間では、文科省が主導して進めている全球地球観測システム（GEOSS）や環境省が主導で進めている生物多様性国際研究プログラム（DIVERSITAS）に代表されるように、国際的、広域的かつ長期的環境・生物多様性モニタリングの必要性が、世界の研究者の共通認識となっている。また、これらのシステムで得られた情報は、ILTERやGEO-BON等のインターネットを利用したシステムによって、誰でも簡単に利用できる環境を整備することが進められつつある。

地球温暖化に代表される地球規模での環境変化は、直接的間接的に人間社会に影響を及ぼすことが、すでに人類共通の認識として定着している。先述のように、湖沼生態系は環境変化を鋭敏に捉えることのできる優秀なセンサーであり、人間活動に影響を及ぼす諸環境問題をより迅速に的確に検知しうる意味で、今回提案する案件は社会的ニーズに十分応えうるものである。

研究シーズ：

湖沼生態系を用いた観測システムは未だ限られてはいるが、琵琶湖（日本）、バイカル湖（ロシア）、スペリオル湖（アメリカ）、キンネレット湖（イスラエル）、コンスタンツ湖（ドイツ）のように、すでに多くの長期モニタリングデータが蓄積されている湖沼は存在し、それらにおいては良質かつ大量のデータベースが確立されてきている。また、これらの社会的重要性の高い湖沼では、学術情報と社会経済情報の統合が進められている。さらに、リモートセンシング技術の発達やGISモデリングなどが発達し、さまざまなテーマの地理情報化が急速に進みつつある。また、環境変化への生物学的応答としては、微小な物理・化学環境の変化であっても、バクテリアは種組成や遺伝子発現が変化するなど、鋭敏に反応する。近年は、次世代シーケンサー技術が発展しており、バクテリアのこれらの変化を経時的にモニタリングできる。

これらの状況を受けて、2005年には湖沼観測ネットワークGLEON（Global Lake Ecological

Observatory Network, <http://www.gleon.org/>) が設立され、学問的かつ社会的重要性について研究者及び研究サイトの国際的な協力体制形成の活動を行っており、日本の湖沼研究サイトも参画して研究交流を広めることができる。

5. 参画が見込まれる研究者層

生態学、陸水学、海洋学、地球化学、微生物生態学、地学、生物学、環境社会学、環境経済学、情報学、リモートセンシング技術者など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

必要施設・設備：

・湖沼観測ステーション:分析機器として、オートアナライザー、蛍光光度計、炭素窒素量測定器（CN コーダー）、光学顕微鏡、蛍光顕微鏡、実体顕微鏡、フローサイトメーター、次世代シークエンサー、安定同位体分析機器を含む。また、インターネットも必要。

・船舶:魚群探知機、ディファレンシャル GPS システム、深度・温度・蛍光強度・pH・溶存酸素測定プロファイラー、流向・流速計を含む。

・研究員および事務員:物理学、化学、生物学のそれぞれを担当する研究員が、それぞれ、2名、2名、3名必要。以上の仕様のステーションを、地球上にできるだけ多く設置することを考えている。特に熱帯には、そのようなステーションが皆無と考えられており、ケニア・ビクトリア湖のステーション（ケニア海洋水産研究所・キスム観測ステーションなど）のような熱帯のステーションが重要である。

プロジェクトは、3年ないし5年で一区切りとする。しかし、地球環境の変化はその後も続くので、モニタリングはさらに継続する必要があると思われる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

海洋との比較になるが、海洋の場合、地球規模のレベルや国際（政治）レベルを想定しやすく、大規模観測・研究体制が提案され易かった。これに対して湖沼については、地域性が強く、国益に関わる事案が海洋と比べて少ないことから、観測や研究の予算規模が小さく、大がかりな研究体制は実現しにくい。このことは、国際的に共通している。しかし、先述のように、湖沼生態系の数々の特性は環境の小さな変化を検知する優秀なセンサーの役割を果たすので、「湖沼の問題は、ローカルなもの」として扱うのではなく、世界中の湖沼をグローバルにとらえるものとして考え直されるべきである。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的效果など）

本提案では、熱帯、温帯、寒帯等の地球上の異なる気候区分にまたがった広域・大規模な環境情報が収集される。また、各観測ステーションでは、質的に同等のデータが得られるので、環境間比較を行いやすく、従来よりも適切なデータ解釈が得られる。従来は、研究グループごとに質的に異なるデータが蓄積され、分析・分類の精度や正確性が問題となって、地域間比較等が行いにくかった。本提案では、こういった問題が解決される。

本提案の社会経済的な貢献は、主に気象変化の早期予測と考えている。すなわち、各地域あるいは世界の環境・生態系で何が起こっており、近い将来どうなるかを迅速かつ精確に知ることは、たとえば人類の食物生産の年ごとの変動をあらかじめ知ることとなり、世界各地域の食糧生産の早期予測や魚類資源の地域・世界分布変動について、社会経済への貢献が大きいと考えている。

また、本提案に関連した国際的組織として、2005年から GLEON が動いているため、比較的短時間で国際的に活動ができ、かつ成果も出せるものと期待できる。

提案 29

1. 研究領域名称

人口減少社会における国土保全と生物多様性

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

地殻変動の活発化や地球温暖化による豪雨頻度の拡大など、日本をとりまく自然環境のレジームシフトは、国土保全上の脅威となっている。これに対して、ダウンスケーリングも含めた様々な物理・気象モデルが開発されている。こうした物理系モデルと生態系モデルを合体させること、さらに急激な人口減少という社会レジームシフトを統合的に考えることにより、未来の日本の国土保全と生物多様性・生態系サービスの維持を検討する。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

東日本大震災の猛威は、地震・津波被害国、日本の脆弱性と課題を浮き彫りにした。過去の堆積物調査からも、こうした1000年オーダーの地殻変動痕跡は、日本の海岸線に数多く残されている。さらに、こうした海岸線には原子力発電所が多数設置されており、その安全性も含めて、議論は絶えない。一方で、こうした歴史的に大きな「攪乱」を経て、日本の生物多様性、生態系の複雑性が保たれてきたのも事実であり、国土保全と生物多様性や生態系サービスの維持は、同時に検討されなければならない。

一方で、日本は急激な人口減少社会を迎える。震災地域として例外ではなく、災害によって土地を離れる人も含めれば、減少スピードは加速化するであろう。そうしたなか、これまで通りの復興・復旧工事を実施していて良いのか、誰もが疑問に思うところである。津波防波堤ができたが住む人が居ない、という状況にならないためにも、社会レジームシフトを見据えた対策が必要である。土地利用の集約化の流れを生かしながら、災害危険区域からの人の撤退が可能になれば、その場所は、現在急激に姿を消している攪乱依存種（攪乱がなくなると絶滅する種）を保全できる自然再生区域になるだろう。そして同時に、地球温暖化に伴う洪水被害等を防ぐ緩衝空間として、防災的にも機能すると思われる。

また、こうした人口減少は、世界の多くの国、特に欧米の発展国、アジアの新興国で起こる。韓国や中国もいずれ同様の道を歩む。日本の国土管理と多様性保全の新たな取り組みは、世界的にも注目を浴びると考える。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

(1) 人口減少に伴う土地利用変化シナリオの作成

人口減少に伴い耕作地、水田などが放棄され、森林や湿地などの自然生態系に戻る可能性がある。一方、放棄人工林や竹林の拡大など、全く異なる生態系に遷移する可能性もある。また、同時に野生動物の行動圏は変化し、様々な軋轢を生む。これらを人口予測に基づき放棄発生ポテンシャルを予測（1年）、放棄条件による空間明示型生態系遷移モデルを構築し、現地調査により検証する（2年）。野生動物の行動圏変化は種ベースでモデル化する（1年）。計4年の期間を要する。

(2) 災害予測モデル、地球温暖化モデルと生態系モデルの融合

他分野で開発中の災害予測モデル、地球温暖化モデルから、洪水等の災害頻度と規模の変化を予測する（1年）。さらに、シミュレートされた攪乱強度と頻度をもとに、再生する生態系を予測する（2年）。

(3) 社会・自然レジームシフトを見据えた生態系回復ポテンシャルとシナリオの作成

人口動態を加味した自然回復ポテンシャルを評価する。トキ、コウノトリ、シマフクロウ、タンチョウなど、地域を象徴する種を定めて、災害の軽減、国土保全のために確保した地域が、自然豊かな再生地域になることをシナリオ分析する（3年）。将来シナリオは複数用意する。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：人口減少、災害多発など、日本における将来不安は拡大するばかり。しかし、人口減少という社会レジームシフトは、安全な国土と自然豊かな地域が蘇るチャンスを提供する。同様な問題で苦しむ世界各国にとっても良いモデルになる。

研究シーズ：精度の高い人口動態予測が可能になっている。マクロスケールの生物データも徐々に整備されつつあり、様々な生物、生態系モデルが提案されている。また、日本が強い気象や災害モデルを利用することができる。

5. 参画が見込まれる研究者層

温暖化気象学、防災学、生態学、人口動態学、空間解析学など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

人口動態予測は、国立社会保障・人口問題研究所の成果から、相当な精度をもって予測が可能である。したがって、まず人口動態にもとづく土地利用変化を精度よく予測するモデルを、日本の地域性を考慮しながら構築する必要がある。さらに、温暖化による気候変動、災害危険地からの撤退と生態系の回復を予測するため、戦略的なファンドの投下が必要となる。研究開発には地域性を考慮するために、各地域に問題解決のための基幹大学をおき、文理融合的なプロジェクトを立ち上げる必要がある。

研究推進期間は、3. の(1)と(2)および(3)のオーバーラップする期間を考慮しても、空間明示型の国土保全、自然再生計画、具体的なシナリオ提言までには、6、7年必要となる。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

土地利用変化を精度よく予測するためには、市町村単位ではなく、個人所有地単位で、年齢や収益、生業継続の意思など、ある程度の個人情報が必要になる。残念ながら、こうした詳細な空間情報を得る手段がない。

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的效果など）

科学技術上の効果：物理系と生物・生態系、さらに社会動態も踏まえた、本来の意味での文理融合型研究の推進が可能になる。これらのモデル研究やシナリオ分析は、同じ人口減少を経験する先進国や新興国において、国土形成に対する新たな基軸を提案できる。

社会経済的效果：人口減少、災害多発など、どちらかというマイナス面ばかりが強調される日本の現状に対して、将来に対するあらたな「希望」を描くことができる。また、高度経済成長期にはなかった新たな環境ビジネス（生物多様性オフセットやバンキングも含めて）を生むことできる。

提案 30

1. 研究領域名称

生物多様性（動物系統多様性・絶滅危惧種保全）

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

2010年に名古屋で開催された生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）において、2010年目標（生物多様性の損失速度を顕著に減少させる）を達成できなかったことが明らかにされた。その原因については様々な議論が成されているが、その一つとして生物多様性には未解明な点がおおいことを挙げることができる。

名前が付けられている生物の総数は約175万種と言われているが、動物の種数は100万種を超える。動物

の中では系統的に人類に近い脊椎動物（哺乳類、鳥類、爬虫類、両生類、魚類）については、系統的多様性に関する研究や絶滅危惧種の保全に関する研究が進んでいるが、脊椎動物の総種数はわずか5万種に過ぎない。圧倒的多数の動物たちは昆虫や甲殻類（エビやカニ）、軟体動物（貝やイカ・タコ）、棘皮動物（ヒトデやウニ、ナマコ）などの脊椎骨をもたない無脊椎動物である。脊椎動物では、魚類の新種が1年間に数百種報告されているが、哺乳類や鳥類、爬虫類、両生類では新種の報告数は少ない。一方、無脊椎動物では1年間に数千種の新種が報告されている。つまり、地球上の動物の多様性には未知の部分が多く、無脊椎動物の系統関係は未だに不明確なままである。

一方、動物の系統関係をDNA解析によって明らかにする研究は米国や欧州、日本において進展している。また、過去10年間に生物多様性に関するデータベース構築が進み、生物多様性を大量の標本情報や観察情報に基づいて解析する研究も行われるようになった。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

生物多様性と地球環境を保全することは人類の生存に関わる問題である。世界の総人口は70億人に達し、2050年までに90億人になると予測されていることを考慮すると、動物を含む生物の系統的多様性を保全し、人類のために生物を持続的に利用するための方策を探求することが強く求められている。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

(1) 動物系統の多様性と絶滅危惧種保全に関する研究課題

課題としては以下のものが挙げられる。

- ・動物系統を研究するための基礎となる日本及び近隣地域における動物分類学の促進
- ・DNA解析を中心とする動物系統学の促進
- ・絶滅危惧種の分布域について大量の標本情報と観察情報に基づく、分布地域と生息環境に関する研究

4. 提案の適時性

社会ニーズ：動物を含む生物多様性の研究を推進しなければ、生物を人類のために持続的に利用することは困難である。生物多様性が高い熱帯域の発展途上国が遺伝資源の研究や利用を制限する傾向にあることを考慮すると、早急に研究を促進し、関係国との協力体制を構築する必要がある。

研究シーズ：我が国は生物多様性に関する基礎研究において、欧米には及ばないものの高いレベルにある。特にDNAを用いた系統解析に関する優れた研究成果が出ている。しかし、省庁を超えた研究体制が存在しないため、横断的性格を有する生物多様性研究を推進する際の障害となっている。

5. 参画が見込まれる研究者層

動物分類学、動物系統学、生物多様性情報学、遺伝学、生態学 など

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

日本には国立の自然史系博物館が一つしかない。また、地方自治体の自然史系博物館は欧米の州立博物館に比べると、研究員の数や施設も圧倒的に少なく、研究施設も極めて不十分である。大学博物館も同様であり、標本や資料に基づいた動物系統学や動物分類学を推進する研究機関や研究体制を早急に整える必要がある。

米国ではNSFが自然史系博物館に継続的に支援を行うと同時に、動物を含む生物多様性研究を柱とする大きなプロジェクトを推進している。日本でも総合的な生物多様性研究プロジェクトを開始する必要がある。また、国立科学博物館の充実を図ると同時に、もう一つの国立自然史博物館を構築する必要がある。東日本大震災を教訓として、新設の国立自然史博物館は国立科学博物館が存在する関東から離れた地域に作り、動物系統学や生物多様性研究の研究資料を離れた場所にある二つの国立博物館によって安全に保管する必要がある。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）
記入なし

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：動物の多様性研究は動物に関する他の研究分野に活用できる情報を提供する。また、動物の系統解析を行うことによって飼育技術や資源管理に貢献することができる。

社会経済効果：動物の多様性を理解し、資源として動物を持続的に利用するための基礎的データが得られる。

提案 31

1. 研究領域名称

Stable-Isotope 自然存在比測定による生体生態学のはじめ — 食物連鎖と生体内アミノ酸代謝系の C/N 同位体に関する研究

2. 背景、現状と課題（科学技術的課題、経済的課題、社会的課題など）

(1) 研究開発の現状（シーズ）

近年、生態学にはDNA法と安定同位体精密測定法が導入された。前者は生物界を遺伝情報で透視する方法であり、後者は物質や生命活動を分子振動の反応速度論（同位体効果）で透視する方法である。前者は研究者人口も多く、極めて生物、生命現象に直結しており其の学問領域はすさまじい発展を遂げている。後者をここでは Stable-Isotope:SI 法と呼ぶことにするが、ある物質の生成経路や生態系におけるある動物の食物連鎖網の中における位置付けに関する知見を与える。近年分子レベルで炭素・窒素同位体を測定する技術も進み (Tikaraishi et al.,2007), アミノ酸の窒素同位体比を測定することにより一義的に目的とする動物の栄養段階を知ることが可能となった。

*Chikaraishi, Y., Kashiyama, Y., Ogawa, N.O., Kitazato, H. and Ohkouchi, N. (2007) metabolic control of nitrogen isotope composition of amino acids in macroalgae and gastropods: implications for aquatic food web studies. Mar. Ecol. Prog. Ser. 342, 85-90.

一方バルクの筋肉を試料とするこれまでの方法も一段と進歩した。それは摂食過程において、生き物の種類に関わらず、炭素・窒素同位体効果の比 ($\Delta \delta^{15}\text{N} / \Delta \delta^{13}\text{C}$) が動物の種類に関わらず、ほぼ一定であることを見出した。すなわち 酵素反応論における炭素・窒素同位体効果の研究：「食う—食われる」の過程における炭素・窒素同位体効果が生物に関わらず普遍的に $\Delta \delta^{15}\text{N} / \Delta \delta^{13}\text{C} = 1.5$ の値を示す。この定数のゆらぎは、成長速度の関数であり、また Anabolic/Catabolic 比が関係すると思われる。

*Aita, M.N., Tadokoro, K., Ogawa, N.O., Hyodo, F., Ishii, R., Smith, S.L., Saino, T., Kishi, M.J., Saitoh, S. and Wada, E. (2011) Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments, J. Plankton Res.,33(11),1629-1642. doi:10.1093/plankt/fbr070

*E.Wada, R.Ishii, M. N. Aita, N. O. Ogawa, A. Kohzu, F. Hyodo, and Y. Yamada(2013). Possible ideas on carbon and nitrogen trophic fractionation of food chains: A new aspect of food-chain stable isotope analysis in Lake Biwa, Lake Baikal and the Mongolian grasslands. Ecol. Res. 28:173-181.

上記二つの論文は、食物連鎖の経験則を以下のように纏めることが出来る事を示唆する。

経験則 1

栄養段階 (TL) が 1 段階上がるごとに $\Delta \delta^{15}\text{N} / \text{TL}$ は約 3 ‰、 $\Delta \delta^{13}\text{C} / \text{TL}$ は約 1 ‰高くなる事が過去の研究で示されているが、 $\delta^{13}\text{C} / \text{TL}$ はバラつきが大きく充分検討されていない。

これまでの式 $\delta^{15}\text{N} (\text{動物}) = 3.3 (\text{T} - 1) + \delta^{15}\text{N} (\text{植物})$

経験則 2

バイカル湖、琵琶湖、モンゴル草原、北西太平洋、南極海の食物連鎖で共通して見られた式
新しい式 $\delta 15N = 1.53 [\pm 0.25] \delta 13C + 40.9 [\pm 5.6] + \text{各生態系の定数} (p < 0.05)$ 、

経験則 3 派生する経験則

$\Delta \delta 15N / \Delta \delta 13C$ 比のゆらぎは成長速度の関数であり、また Anabolic/Catabolic 比が重要な因子となる事が示唆されている。

付録 1) ここでは経験則 2 は以下の原理のため多くの生物で成立すると考えられる。

「食物連鎖に於ける代謝系の機能的適応戦略の原理：必要最小限の材料を使って、最大の効果（連鎖の持続的維持）が得られるように形作られる。」

食物連鎖に於ける代謝系の機能的適応戦略の原理：必要最小限の材料を使って、最大の効果（連鎖の持続的維持）が得られるように形作られる。

付録 2) 自然界の食物連鎖は Reduce, Reuse, Recycle の枠組みの中で、贅肉を切り落として、「食物連鎖に於ける代謝系の機能的適応戦略の原理」を保持しながらその持続的存続を保っている。

この流れの研究を検証し発展させることにより生体内代謝系の動態の中で C/N ISOTOPICALLY ORDERED WORLD の姿を描き出せる可能性がより現実的なものとなりつつある。ここで提案する ISOTOPICALLY ORDERED WORLD は C3 植物を出発点とする生態系では器官（各種臓器、毛、など）や各アミノ酸、各アミノ酸の分子内炭素・窒素同位体分布が相対的に相似形になっておることを強く予想させる。この仮説を検証することがこの分野の新しい方向となる。

また SI 比 (Stable Isotope ratio) の生体内の変動を切り口として、遺伝情報や発現機構の生物学を包括した SI から透視したメタボリックマップのダイナミクスの研究を進め新しい SI 生理生態学を拓けることが期待される。

特にアミノ酸合成系や低分子有機化合物の分子内同位体分布の研究開発などは生態系食物網の研究ばかりでなく健康診断に関連した医療診断への応用も将来には期待される。この方法の応用範囲は極めて広く医学、生物学、考古学にまで広がると期待される。

(2) 社会・経済的な背景（ニーズ）

今のところこの C/N の生体内 SI 分布研究分野は開花期にあり社会的ニーズを引き起こしていない。これからの発展を期待したい。

3. 研究内容（成果の達成達成時期と具体的方策）

上記経験則や仮説の解明。そのための飼育モデル動物の確立。より手近には食物連鎖に沿った炭素窒素同位体分別に関する研究。生体内低分子化合物の分子内同位体分布を測定する手法の開発と、C/N ISOTOPICALLY ORDERED WORLD の解明。成果の達成には 10 年掛かると思われるが、低分子化合物の分子内同位体分布の測定には機器の開発がボトルネックとなる。

4. 提案の適時性

社会ニーズ：メタボリックマップの動態を視野に入れた SI 生理生態学の展開、SI の分布変動による代謝系の動態の診断法の開発。

研究シーズ：SI 生理生態学の展開、自然界の物質動態と生き物の代謝に関して新しい切り口、見方を提示する。

5. 参画が見込まれる研究者層

同位体生物地球化学者、同位体生理・生態学者、質量分析計製作関連企業。

6. 研究領域の支援体制（ファンド形態・拠点施設の必要性等）、推進期間

今のところ特になし。

7. 推進上の課題（支援体制の施策化に伴う制度上の制約、法規制、倫理、社会受容など）

分子内同位体分布測定技術の開発

8. 研究成果によって期待される効果（科学技術上の効果、社会経済的効果など）

科学技術上の効果：同位体化学。生化学の発展

社会経済的効果：分からない

9. 備考

参考文献

*Aita, M.N., Tadokoro, K., Ogawa, N.O., Hyodo, F., Ishii, R., Smith, S.L., Saino, T., Kishi, M.J., Saitoh, S. and Wada, E. (2011) Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments, *J. Plankton Res.*, 33(11), 1629-1642. doi:10.1093/plankt/fbr070

*E.Wada, R.Ishii, M. N. Aita, N. O. Ogawa, A. Kohzu, F. Hyodo, and Y. Yamada(2013). Possible ideas on carbon and nitrogen trophic fractionation of food chains: A new aspect of food-chain stable isotope analysis in Lake Biwa, Lake Baikal and the Mongolian grasslands. *Ecol. Res.* 28:173-181. DOI 10.1007/s11284-012-1024-7

*Chikaraishi, Y., Kashiyama, Y., Ogawa, N.O., Kitazato, H. and Ohkouchi, N. (2007b) metabolic control of nitrogen isotope composition of amino acids in macroalgae and gastropods: implications for aquatic food web studies. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 342, 85-90.

■報告書作成メンバー■

浅島 誠	上席フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット)
川口 哲	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット) (2013年3月まで)
鈴木 響子	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット)
矢倉 信之	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット)
辻 真博	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット)
西村 佑介	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット)
大嶽 浩司	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット)
飛田 浩之	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット)
森 英郎	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット) (2013年3月まで)
福士 珠美	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット) (2013年1月まで)
及川 智博	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学 ユニット) (2012年9月まで)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2013-WR-01

俯瞰ワークショップ報告書

「グリーン・テクノロジー分野」

平成 25 年 5 月 May, 2013

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
ライフサイエンス・臨床医学ユニット

Life Science / Clinical Research 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 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

© 2013 JST/CRDS

許可無く複写／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.
