

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

社会および産業競争力を支える基盤としての 環境リスク評価研究

令和元年12月3日（火）開催



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

エグゼクティブサマリー

国立研究開発法人科学技術振興機構（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連する調査・分析・提案を中立的な立場に立つて行う組織として、今後わが国が取り組むべき重要な研究領域に関する提言を行っている。本報告書は、こうした活動の一環として2019年12月3日（火）に開催した科学技術未来戦略ワークショップ「社会および産業競争力を支える基盤としての環境リスク評価研究」の内容をとりまとめたものである。

欧州を中心に議論が活発化している海洋プラスチックごみの問題は基本的には廃棄物処理の問題である。一方、マイクロあるいはナノサイズにまで細分化したプラスチック片が生態系や人の健康に影響を及ぼす可能性も指摘されている。極小のプラスチック片に実際にどの程度の環境リスクがあるかは未だ不明だが、規制とも関連した議論が始まっており、科学的検討に基づき一定のリスク評価を行うことへの社会的期待は高まっていると考えられる。

また、プラスチックに限らず、多種多様な化成品や農薬、医薬品等、今日の社会において人工的に合成され、データベースに登録される化学物質の数は増加の一途をたどっている。これら化学物質のリスクに基づく管理は互いに協力して取り組むべき課題として国際社会で認識されている（参考：2002年のヨハネスブルク・サミットで合意された化学物質の製造と使用による環境や人の健康への悪影響の最小化を目指す国際的な目標「WSSD2020年目標」）。加えて、多種多様な化学物質の管理は各国・地域の規制とも深く関わり、リスク評価への対応力が産業競争力に直結しうる時代ともなっている。

以上の背景を踏まえ、本ワークショップでは、環境リスク評価研究を取り巻く我が国の現状と今後の課題について多様な専門家を交えて議論を行ない、今後国として向かうべき研究開発の方向性について示唆を得ることを目的とした。具体的には次の3点を主なテーマとして議論を行うこととした。

- ①海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究
- ②我が国の環境リスク評価研究体制の在り方
- ③化学物質の環境リスク評価に関連する挑戦的な基礎研究開発課題

ワークショップはこの3つのテーマに沿って三部構成とした。関連分野で研究や実務に携わる複数の専門家から各テーマを取り巻く現状や今後の課題等について発表ないしコメントをいただき、それらに基づき総合討論を行った。参加者の専門分野はリスク評価、生体毒性、環境毒性、ライフサイクルアセスメント（LCA）、高分子の構造解析や特性評価、環境分析、計測技術開発、海洋学、物理学、生物学、環境法学など多岐に亘った。

第一部では海洋プラスチックごみ問題への対応に係る国内外の研究動向ならびに関連動向について発表・議論が行われた。欧州を中心にマイクロプラスチックを規制する動きが進む一方、その根拠となるべき科学的知見、すなわちプラスチックが生態系や人の健康に与える影響に関する科学的知見が圧倒的に不足していること、それゆえ産業界と学界が協力してリスク評価のための標準的なフレームを作成する動きがあること等が共有された。また我が国では深海ならびに日本

周辺海域をフィールドとしたプラスチックごみの分布実態や環境中での運命、生態系や人への影響、深海における生分解性プラスチックの分解挙動等に関する先駆的研究が始まっているが、試験的な試みも含まれており、より本格的かつ体系的な取組みの必要性が確認された。具体的には、陸域や河川も含めた環境中でのプラスチックの動態や運命(微細化プロセス)のより詳細な解明、それらを進める上で欠かせない分析機器(特にナノ・マイクロスケールのプラスチック片を回収・分析するための機器や技術)開発、有害性評価手法の開発や生体影響のより詳細な解明などが挙げられた。また現有のデータや知見を総合したリスク評価やライフサイクルアセスメントの実施の必要性も指摘された。更に、生分解性プラスチック等の代替素材開発が進んでいるが、それらの実環境下での分解性を科学的に詳細に明らかにする必要性も指摘された。

第二部では我が国の環境リスク評価に係る研究体制を取り巻く現状や今後について発表・議論が行われた。まず、社会の中における環境リスク評価研究の役割を考えた際に、予防原則に基づく措置によって全てが止まってしまうのではなく、あくまでそれは暫定的なものであり、本来は順応的な管理が求められること、そのためにはリスク評価という科学的な営為とリスク管理との間に円環的な構造をつくり出す必要があること等が指摘された。また当該分野において大学はこれまで産業界や行政と一定の距離を置く傾向があったが、今後は産学官が問題を共有して解決に向けた議論を行うプラットフォームを構築していくことが、科学的な知見の蓄積のみならず、問題への迅速かつ体系的な対応や、企業における製品開発・市場化に向けた取組みの活性化にもつながるのではないかと提案があった。加えて、環境リスク評価に必要となる学問分野は極めて多岐に亘るため、様々な専門性を身に付けた人材の育成の必要性が指摘された。しかしその一方、例えば高分子科学、毒性学、化学工学など異分野に跨る多様な人材が集まり、連携して問題に取り組む体制を構築することによっても対応でき、むしろそれが現実的であるとの意見もあった。実際にドイツの大学でそうした研究組織が形成されている事例も紹介された。

第三部ではプラスチックを含む化学物質の環境リスク評価に係る中長期的観点からの研究開発テーマについての発表・議論が行われた。様々な化学物質が存在する複雑な野外環境においてそれらの複合的な影響の評価を可能にする手法や技術の必要性、その一例としての環境 DNA 等についての提案があった。欧州を中心に動物実験回避の方向にあるが、良質な動物実験データを体系的・戦略的に収集・蓄積することがむしろ日本の強みとなるのではないかと指摘があった。また動物実験では再現性の高いデータをとるために実験系の開発が重要になるとの指摘もあった。他方、データが十分に揃っていない状況下でも評価を実施できるよう、リードアクロスのような毒性予測のための研究開発の必要性も確認された。更に、毒性に限らず、難分解性および高い生体蓄積性に関する研究開発は産業界が直面する課題として重要性が高まっていることも指摘された。

以上を踏まえ、今後は、本ワークショップを通じて得られた各種の知見・情報や議論内容に関する考察を深めるため追加の調査や有識者インタビューを実施する。またそれらに基づき戦略プロポーザルのとりまとめにも取り組む予定である。

目 次

エグゼクティブサマリー

1	ワークショップ開催概要	1
2	趣旨説明	2
2.1	「趣旨説明」	2
3	第一部	10
3.1	「海洋プラスチック問題～JAMSTEC の取組～」	10
3.2	「海洋プラスチックの実態解明に関する課題」	18
3.3	「海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究 ー化学物質等の環境リスク評価研究からの視座ー」	25
3.4	「海洋プラスチックごみ課題に対する解決志向性レギュラトリーサイエンス ～リスク評価者の視点から～」	33
3.5	コメンテーターからのご意見	41
3.6	総合討論	54
4	第二部	56
4.1	「リスク評価・法・予防原則」	56
4.2	「環境毒性学とアカデミアの立場から」	60
4.3	総合討論	66
5	第三部	69
5.1	「グローバル化学物質法規制のレギュラトリーサイエンス ～リスク管理の目的に応じた環境リスク評価の価値～」	69
5.2	「新素材の毒性評価 工業的ナノマテリアルの高分散性小規模全身ばく露吸入装置 の開発 ” Taquann” System」	77
5.3	「生物多様性ビッグデータでマルチストレスの大海原に漕ぎ出そう！」	85
5.4	「環境データマネジメントの推進による環境リスク評価の透明化・迅速化・高度化」	89
5.5	総合討論	97

6	まとめ	98
付録 1	プログラム	100
付録 2	ワークショップ参加者リスト	101

1 ワークショップ開催概要

■ はじめに

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、国内外の社会や科学技術イノベーションの動向及びそれらに関する政策動向を把握・俯瞰し、調査・分析し、国として重要な研究開発領域や課題あるいはその推進方法等について戦略プロポーザルとしてとりまとめて発信している。今般、プラスチックを始めとする化学物質による環境影響、あるいはそのリスク評価に関する研究開発動向や今後の在り方についての検討を深めるためワークショップを開催した。

■ 背景

欧州を中心に議論が活発化している海洋プラスチックごみの問題は基本的には廃棄物処理の問題である。一方、マイクロあるいはナノサイズにまで細分化したプラスチック片が生態系や人の健康に影響を及ぼす可能性も指摘されている。極小のプラスチック片に実際にどの程度のリスクがあるかは未だ不明だが、規制とも関連した議論が始まっており、科学的検討に基づき一定のリスク評価を行うことへの社会的期待は高まっていると考えられる。

また、プラスチックに限らず、多種多様な化成品や農薬、医薬品等、今日の社会において人工的に合成され、データベースに登録される化学物質の数は増加の一途をたどっている。これら化学物質のリスクに基づく管理は互いに協力して取り組むべき課題として国際社会で認識されている（参考：2002年のヨハネスブルク・サミットで合意された化学物質の製造と使用による環境や人の健康への悪影響の最小化を目指す国際的な目標である「WSSD2020年目標」）。加えて、多種多様な化学物質の管理は各国・地域の規制とも深く関わり、リスク評価への対応力が産業競争力に直結しうる時代ともなっている。

■ 目的

以上の背景を踏まえ、本ワークショップでは、環境リスク評価研究を取り巻く我が国の現状と今後の課題について多様な専門家を交えて議論を行ない、今後国として向かうべき研究開発の方向性について示唆を得ることを目的とする。具体的には次の3点を主なテーマとして議論を行う：①海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究、②我が国の環境リスク評価研究体制の在り方、③化学物質の環境リスク評価に関連する挑戦的な基礎研究開発課題。

■ 開催日程

日時： 令和元年 12 月 3 日（火）13：00～18：05

場所： JST 東京本部 2 階共創スペース

2 趣旨説明

2.1 「趣旨説明」

中村亮二（科学技術振興機構 研究開発戦略センター（CRDS））

CRDS は我が国の科学技術イノベーション政策に関連する様々な調査、分析等を行い、得られた成果を各種報告書や戦略プロポーザルと呼ぶ提言書としてとりまとめ公開している。これらは関連府省の政策立案や各種委員会等での検討の際にエビデンスの一つとして参照・引用される等、様々な形でご活用いただいている。

本日のワークショップは、戦略プロポーザルを作成するための活動の一環として開催させていただいている。本日の議論の内容を戦略プロポーザルの内容検討に反映させていただき、ワークショップ報告書としてこの議論自体を記録させていただき予定である。

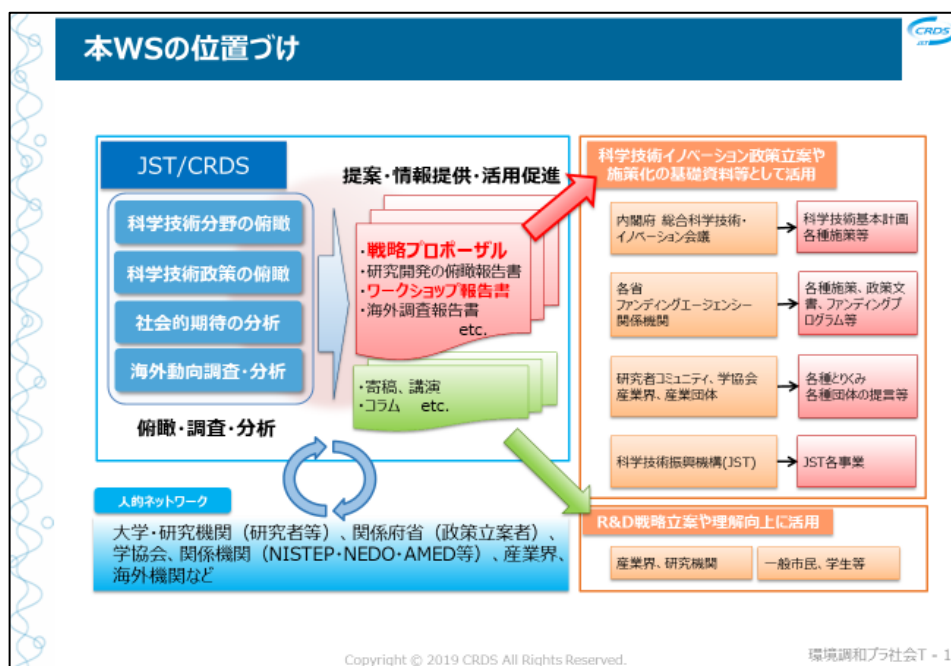


図 2-1-1

国内外で話題になっている海洋プラスチックごみの問題への対応を考える際にはプラスチックのライフサイクル全体を見る必要がある。その上で我々がフォーカスを当てたのは、環境中に放出され微細化したナノサイズ、マイクロサイズのプラスチック片が環境や人の健康に対して何らかの影響を及ぼす可能性があるのではないかという懸念が指摘されている点である。

日本政府をはじめ国際社会、例えばG20のような議論の場においても環境中に放出された微細なプラスチック片の環境影響や環境中での分布動態についての科学的知見がまだ十分に蓄積されていないとの認識があり、それらに取り組む必要性が指摘されている。

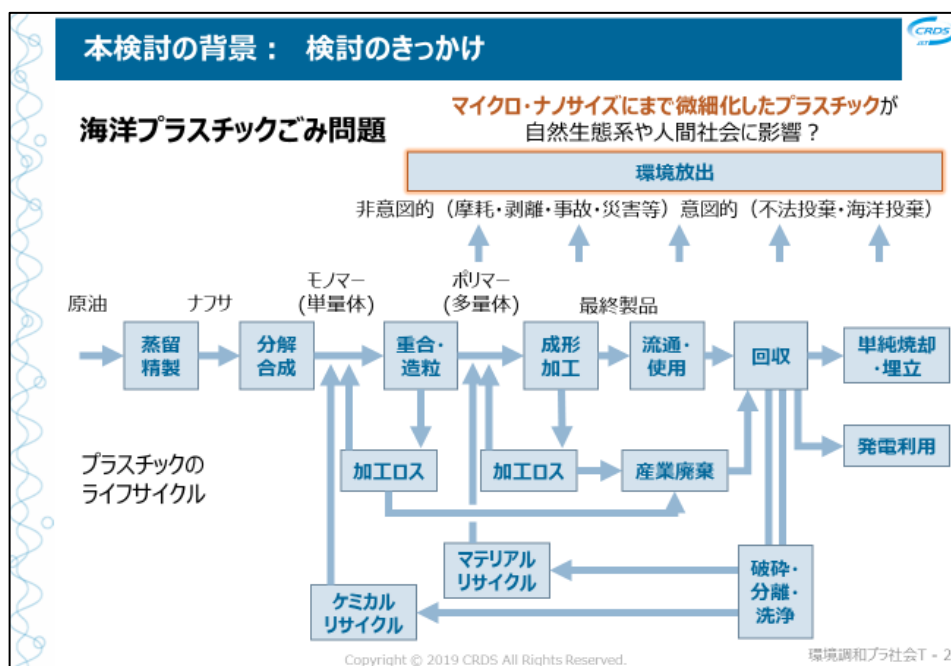


図 2-1-2

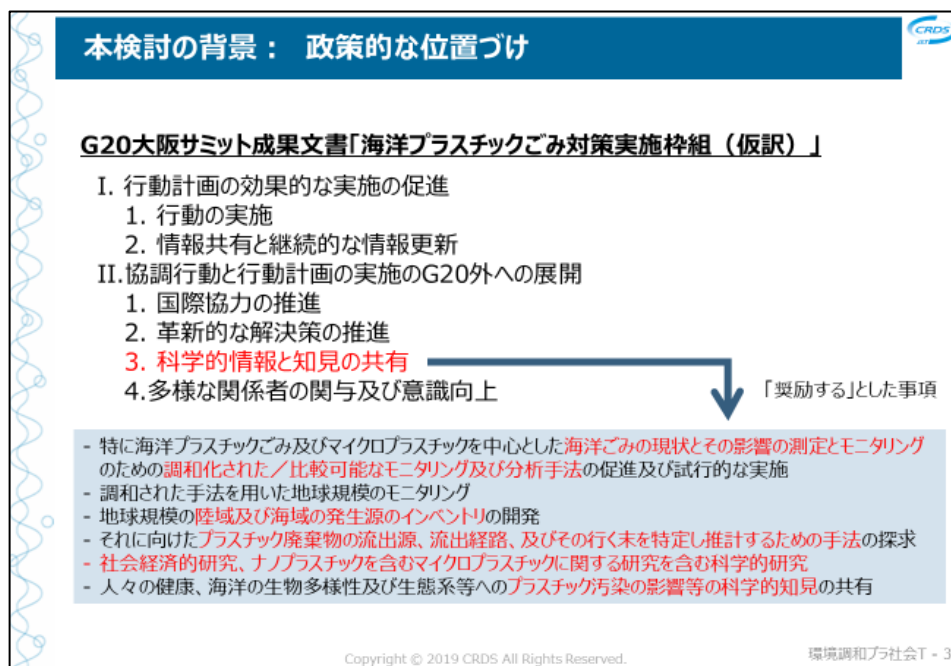


図 2-1-3

ところが、現状どういった取り組みがなされているかを俯瞰してみると、国内では代替素材の開発や実地調査等では比較的活発な取り組みが見られるが、リスク評価・環境影響評価に関するまとまった動きは見られない。

そこで本ワークショップでは、まず海洋プラスチックごみ問題という観点において、環境リスク評価に関してこれから何をやるべきか、既に取り組みとして始まっているものもあるが、それを踏まえて更に取り組む必要のあるところがどういうところにあるのかということ

論させていただきたい。

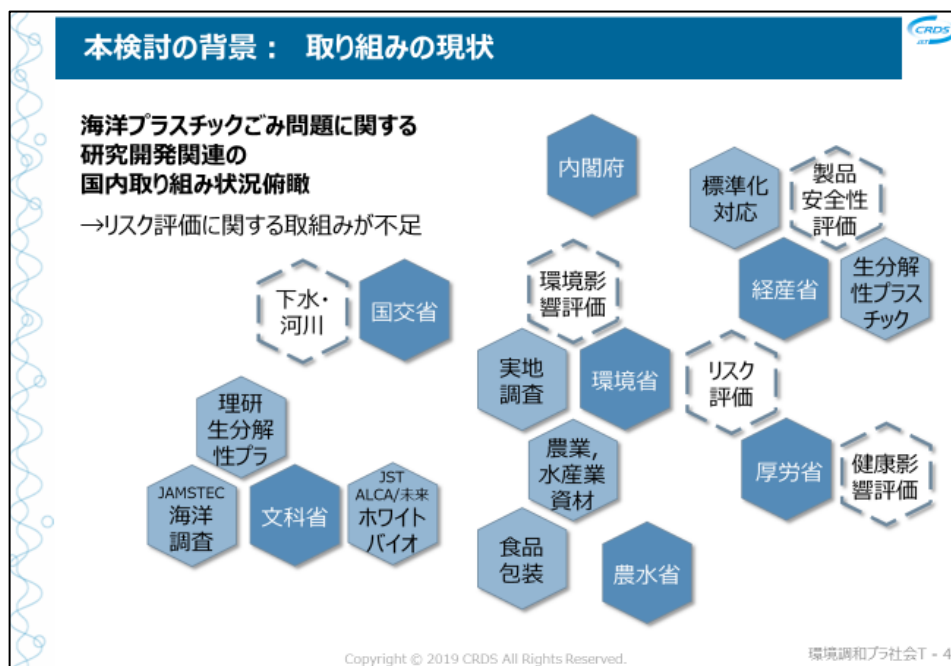


図 2-1-4

次に、プラスチックに限らずリスク評価に話を広げると、これは必ずしも環境の問題だけではない。すなわち、これは CRDS のナノテクノロジー・材料ユニットにおける検討の中から抽出された点だが、新しい素材の安全性評価とかリスク評価に関する研究力あるいはそれに基づく情報をしっかりと持つことは産業競争力に深く関係するにも関わらず、日本では必ずしもそこへの対応が十分でない、という問題意識がある。

海外に新しい素材なり製品を展開しようとしたときには、海外の規制あるいはルールの枠組みに対応する必要があるが、十分な研究力や科学的な知見や情報がないと十分に対応・対抗しきれず、最悪の場合には新しい製品を海外に展開することができず、結果としてそうした規制やルールが非関税障壁となる可能性すらあるという懸念が指摘されている。この観点に立つと、リスク評価というのは単に科学技術あるいは研究としての重要性だけではなく、産業競争力を支える一つの重要なピースでもあるのではないかと考えられる。

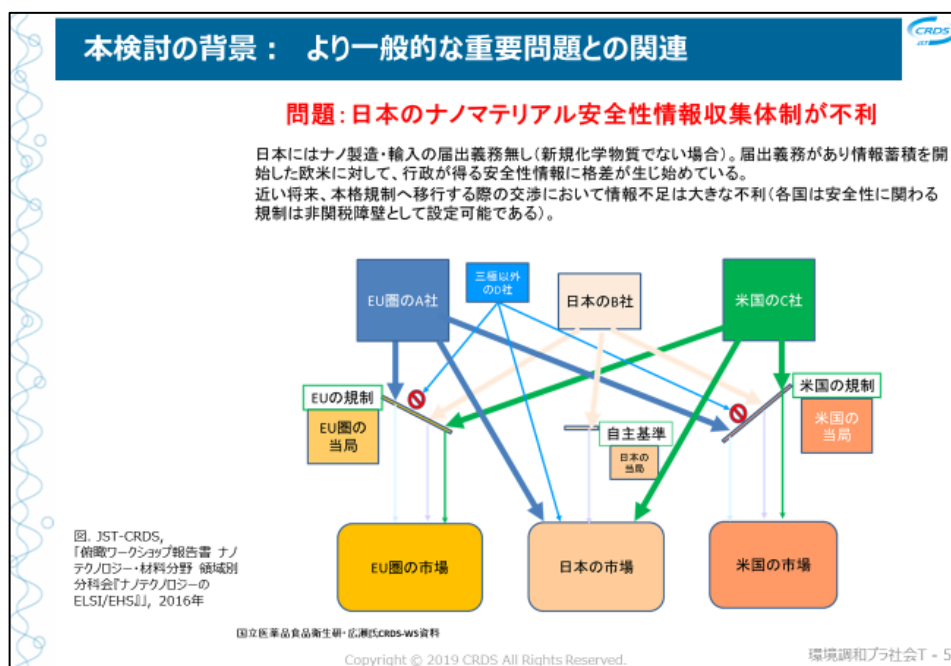


図 2-1-5

以上を踏まえ、本ワークショップでは、まず海洋プラスチックごみ問題にフォーカスを絞った際に環境リスク評価研究としてどういうものがあるかということの第一部で議論をさせていただきたい。第二部では対象を化学物質に広げ、化学物質の環境リスク評価と言った場合に、まず、我が国の研究のエコシステムがどういうふうにあるのか、またそのあるべき姿を考えたときに過不足はどういう状況なのかということの議論させていただきたい。更にそうしたあるべき姿を念頭に置いた上で、第三部では化学物質の環境リスク評価について、研究として取り組むべきものは非常にたくさんあると思うし、それぞれ何か一つに絞るべきということにはなり得ないと思うが、あえて一つあるいは二つ、そういう大きなテーマ立てを考えるとすればどういうところがあり得るのだろうかということの議論させていただきたい。

本WSの狙い： 何を議論したいのか？		
議論の視点	海洋プラスチックごみ問題	化学物質の環境リスク評価
大学や公的研究機関が取り組むべき研究開発の今後の方向性や具体テーマ	第一部 ⇒ 国内外の既存の動きを踏まえつつ、今後どのような研究が必要かを議論します。	第三部 ⇒ 研究力の維持・向上に資する挑戦的な基礎基盤研究として今後どのような研究が必要かについて議論します。
望ましい研究開発エコシステム像		第二部 ⇒ 科学技術と社会との関係性、その中で大学や公的研究機関が果たすべき役割等について議論します。

Copyright © 2019 CRDS All Rights Reserved.

環境調和プラ社会T-6

図 2-1-6

第一部では、議論のために幾つか前提条件を設定させていただいた。マイクロプラスチックと言った時に人によってサイズ感にばらつきがある。そこでここでは数マイクロからナノのサイズのプラスチックについて議論することとしたい。またプラスチックそのもの、あるいはそれらに付着する他の化学物質を対象とする。更にどういうリスクを考えるかについては、プラスチックに関しては急性リスクはあまり聞かないというお話をよく伺ったので、ここでは慢性リスクを念頭に置きたい。最後にリスク評価そのものの研究以外に、こういうことをやる上でのいろいろな手法や技術の開発も議論の対象に含めたい。

第一部の論点

第一部：海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究

- ・ 昨今の海洋プラスチックごみ問題で注目された新たな課題
 - ・ 環境およびヒト健康への影響リスク（とくに数マイクロ～ナノサイズのプラスチック）
- ・ 課題への取り組み現状
 - ・ 予防原則に従った対応が欧州を中心に行われている：リサイクルの推進、回避可能な使用の抑制（reduce）、代替材料開発（バイオ由来、生分解性）
 - ・ 研究としては世界中で報告が増えているものの、体系化された知識にはなっていない。
 - ・ 結果として、どの程度気にしなければいけないのが曖昧なままになっている。

↓

- ・ **WSでの論点**
 - ・ プラスチックの環境およびヒト健康への影響リスク評価について、今何ができるのか？何をやるべきか？

【議論のための前提条件】

- ① 数マイクロ～ナノサイズのプラスチックが対象
- ② プラスチックそのものおよびその周辺に付着する化学物質が対象
- ③ 主として慢性リスクが対象
- ④ リスク評価そのものの以外にもそれを支える技術や手法の研究開発も対象

Copyright © 2019 CRDS All Rights Reserved.

環境調和プラ社会T-7

図 2-1-7

今回のような論点整理に至る過程では、30名強の産業界やアカデミアの方にインタビューさせていただいた。その中では、SETAC（国際環境毒性学会）において ICCA（国際化学工業協会協議会）と SETAC が一緒になってマイクロプラスチックの環境リスク評価をどういうふうにするべきか、標準的な手法でやらないと比較もできないじゃないかということで、フレームを議論し始めているというお話を伺った。

例えばこういうフレームを使って、何か具体的な場を設定して、包括的に評価をやってみる、というのも一つのアイデアと考えられる。第一部の議論で予想される結論の一つと考えている。一方で、これら全部を一つ一つやるのは途方もないわけで、その一部、例えば毒性評価のところにフォーカスしてやる方がずっと妥当で考えやすいということであれば、そういう幾つかフォーカスを絞った研究というのものもあり得るのではないかと考えている。大きくはそういう2通りが考えられたが、当然それに限らず、様々なご提案や議論からの示唆をいただきたいというのが第一部の趣旨である。

第二部では、主には現在の研究体制の状況やあるべき姿について議論したい。

第二部の論点

第二部：我が国の環境リスク評価研究体制の在り方

- ・ **我が国の化学物質に関する環境リスク評価研究の現状**
 - ・ 環境化学分析：分析機器を製造する国内メーカーもあり、研究力のポテンシャルは大きい。
 - ・ 環境毒性評価：複数の公的研究機関に部門があるが、大学での研究は限定的。
- ・ **欧米の化学物質に関する環境リスク評価研究の現状**
 - ・ 産学官が集う国際的な場として SETAC（Society of Environmental Toxicology and Chemistry）が約30年の歴史を持つ。
 - ・ 欧州：EUフレームワーク下で環境リスク評価研究を継続的に支援するなど、着実に研究力が維持されている。
 - ・ 米国：環境保護庁（EPA）が環境リスク評価研究に中心的に取り組む。リスク評価は挑戦的な研究分野と捉え積極的に取り組んでいる。

- ・ **WSTでの論点**
 - ・ 現在の国内研究体制をどう見るか？ 本来あるべき姿／目指すべき姿はどのようなものか？

Copyright © 2019 CRDS All Rights Reserved.
環境調和プラ社会T - 10

図 2-1-8

図 2-1-9 では、研究のエコシステムのイメージ図を描いた。研究主体があって、そこで生まれた科学的知識を使ってリスク評価、あるいはそれに基づくリスクの管理を規制当局等が行う。その結果が、例えばルール形で、あるいはリスク評価の情報自体が社会の中で使われる。そうした社会では、リスクを踏まえたよりよい生き方、あるいは有限な資源の持続的な利用、あるいはつくる責任と使う責任の全うといったことが実践され、環境と経済の両立は実現される。こういうことが、持続的に回るエコシステムが一つの目指す方向性ではないかと考えた。

しかしながら現状は環境リスク評価の「研究」の部分の十分であるとは言い難い状況ではないか。そのため、もしもこのイメージ図が目指す方向性だとするならば、「研究」の部分の今後どうあるべきなのか、また「研究」あるいは「リスク評価」の成果がどう「管理」につなが

っていくかといった点を第二部で議論させていただきたい。

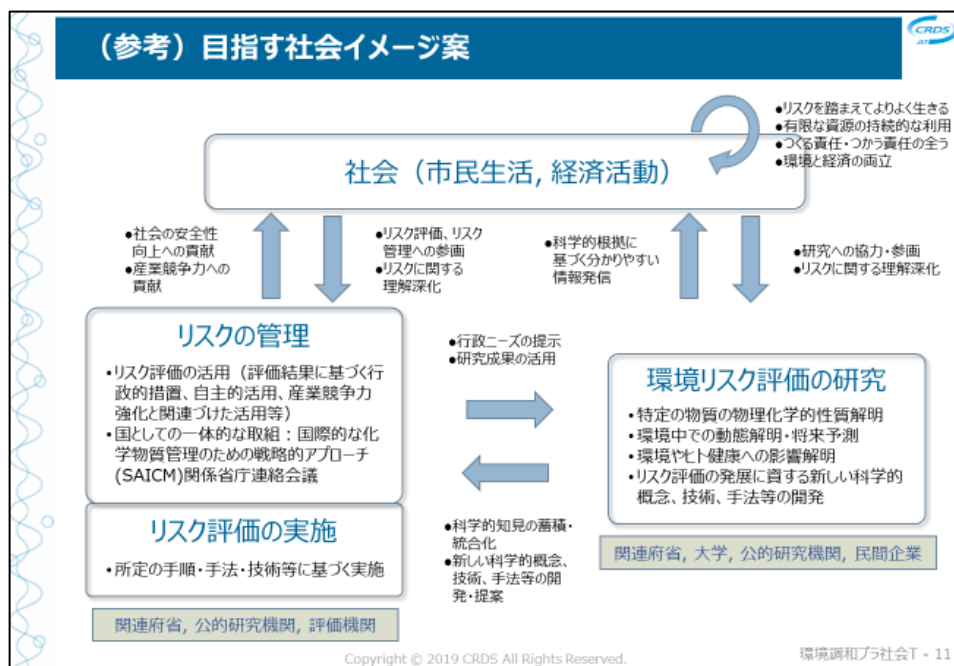


図 2-1-9

別の見方として、既存の公的な研究主体や研究制度のマッピングという形も考えられる。これらを俯瞰してみると、我が国のリスク評価関連研究体制は、目的志向型のプロジェクトが不在な状況にあると考えられる。そのため本ワークショップでは、プラスチックの環境リスク評価に関する目的志向型の研究プロジェクト、あるいは第三部で扱うようなより横断的なテーマ設定での目的志向型研究プロジェクトとしてどのようなイメージのテーマがあり得るか、必要かについても議論したい。

第三部に関しては、短期とか中長期という言葉遣いは使う主体によって感覚が異なるが、ここでは5年ぐらい先までを見通したようなタイムスパンを短期と呼ばせていただきたい。それよりももう少し先を見据えたものを中長期と呼ばせていただきたい。また、短期の場合には5年先にどういうところまでできていたら良いかということ、研究が完結するというような完璧を目指すのではなく、ある程度の成果が見込めるくらいと考えていただきたい。

また異分野連携とか異分野融合と書かせていただいたが、従来のコミュニティが従来の延長上で研究をやるだけではなく、新しいコミュニティが入ってきたり、今までは分断していたコミュニティが一緒になるような新しい展開というのがあり得るのであれば、ぜひご提案やご示唆をいただきたい。

欧州あるいはアメリカでは、環境リスク評価研究の分野は非常にしっかりやられているという印象を持っている。それに対して日本が追いつけるのか、追い越せるのかというような問題意識も持っている。

第三部の論点

**第三部：化学物質の環境リスク評価に関する
我が国の研究力向上に資する挑戦的な基礎基盤研究課題**

- ・ **研究力向上の必要性**
 - ・ 化学物質のリスク評価は幅広い産業にとって必須であり海外市場参入の障壁にもなりうる。
 - ・ 化学物質管理に係るSDGsのゴール12（ターゲット12.4）への対応は国際社会共通の課題でもある。
 - ・ 各種リソースが限られる中、当該分野の研究力を日本として今後どのように維持・向上させていくのか？
- ・ **世界の動き、科学技術上のホットトピック**
 - ・ 新しい研究者も当該分野に魅力を感じて積極的に参入してくるような、サイエンスとして注目すべきテーマや挑戦的なテーマにフォーカスし、分野を超えて統合的に取り組むことが、今必要ではないか？
 - ・ 関連する昨今の動きとして、分野に新たな進展や変化をもたらした技術的動向や研究動向はあるか？

- ・ **WSでの論点**
 - ・ 5年程度先までを見通した短期的視点から今後取り組むべきテーマは何か？
 - ・ 10～15年程度先を見通した中長期的視点から今後取り組むべきテーマは何か？

※特に、異分野の知見や技術を取り込む等の新しい切り口で、本分野に関ない広がりある横断的テーマとは？

Copyright © 2019 CRDS All Rights Reserved.
環境調和プラ社会T - 13

図 2-1-10

最後になるが、本日は話題提供者としてお願いしている先生とコメンテーターとしてお願いしている先生がいらっしゃる。非常に短時間のプログラムで大変恐縮だが、コメンテーターの先生方には、各自ご用意いただいた資料のご紹介に加え、全体の議論をお聞きになりながら、こういう観点はどうか、こういう点も必要だ、といったコメントをお願いできればと考えている。

本日の進行について

■ 短い時間となり恐縮ですが、簡潔なご発言等、限られた時間内での議論の深耕にご理解とご協力をお願いいたします。

	第一部（13:20～14:50、90min.）	第二部（15:00～15:50、50min.）
話題提供	JAMSTEC 島村調査役 ・JAMSTECでの取り組みについて等	名古屋大 赤淵准教授 ・法学の観点から等
ご発表 12分	東大・大気海洋研 道田教授 ・「日本財団・東京大学 海洋ごみ対策プロジェクト」について等	九州大 大嶋教授 ・環境毒性研究の観点から等
質疑応答 3分	AIST 内藤グループ長 ・今後に向けた取り組みについて等	第三部（16:00～18:00、120min.）
	花王(株) 藤井ディレクター ・国際社会における規制動向について等	話題提供 花王(株) 藤井ディレクター ・産業界の観点から等
	コメント AIST 島村副研究部門長 ・分析機器開発の観点から等	ご発表 NIHS 高橋室長 ・毒性評価（新素材ほか）の観点から等
	愛媛大 日向教授 ・実態把握・予測の観点から等	質疑応答 農研機構 永井上席研究員 ・農業の影響評価の観点から等
	東京都市大 伊坪教授 ・LCAの観点から等	3分 愛媛大 仲山助教 ・環境毒性評価研究の観点から等
	東大 平尾教授 ・LCAの観点から等	コメント 九州大 高原教授 ※15時過ぎにご到着予定 ・高分子化学の観点から等
		3分

Copyright © 2019 CRDS All Rights Reserved.
環境調和プラ社会T - 15

図 2-1-11

3 第一部

3.1 「海洋プラスチック問題～JAMSTEC の取組～」

島村道代（海洋研究開発機構（JAMSTEC） 調査役）

本日は、海洋プラスチック問題～JAMSTEC の取組～ということで、JAMSTEC が既存リソースを活用してどのような取組を現在行っているのかと、今後、どのように海洋プラスチック問題に貢献していくかを御紹介する。具体的には、大きく分けて5つ、JAMSTEC の取組の概要、取組事例について3件、まとめである。

最初に、JAMSTEC における取組の概要の説明である。JAMSTEC は、海洋に関するファシリティ、主に船舶や無人探査機（遠隔操作型無人探査機 ROV や自律型無人潜水機 AUV）のような浅海から深海、近海から外洋を調査できる設備を多数保有している。これらを活用し、外部資金や運営費交付金と合わせて事業推進しており、またアウトリーチ活動も行なっている。本日は、取組事例としてレガシーデータの活用ならびに外部資金によるファシリティの活用2件を紹介する。

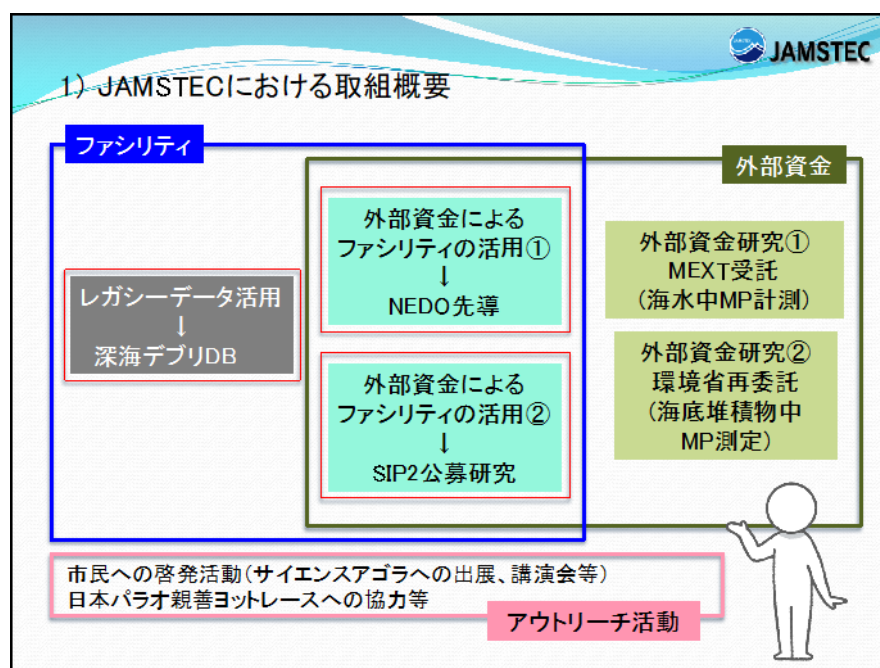


図 3-1-1

取組事例の1件目は、レガシーデータの活用である。ご存じの方も多いと思うが、JAMSTEC は「深海デブリデータベース」を2017年4月から公開している。JAMSTEC が保有する潜水調査船や無人探査機等による潜行調査で撮影された、映像や画像に映った深海に沈む人類起源のごみ情報のデータベースである。図 3-1-2 は、調査地点を紫、デブリが見られた場所をオレンジで表示しているマップである。同定した海底ごみの種類による分類や海底ごみの情報リスト、海底ごみが映っている映像・画像の撮影地点によってごみの内容を全部分類してあり、一般の方もアクセスできる。



図 3-1-2

図 3-1-3 が画像ギャラリーの例であり、ポリ袋や何かよくわからない人工物が落ちていて、これがいつ、どこかの海域の、どの水深で撮影されたかを表示している。プラスチックごみの上にイソギンチャクのような生き物が住み着いている様子がわかる。通常、イソギンチャクは、岩場にくっつき易く、このようなどろどろした泥質の足場になかなか根づかない。データベース内には、プラスチックごみの上で生き物が生息する画像が多数あり、プラスチック自体が海底で新たな生息域を与えているケースがみられる。

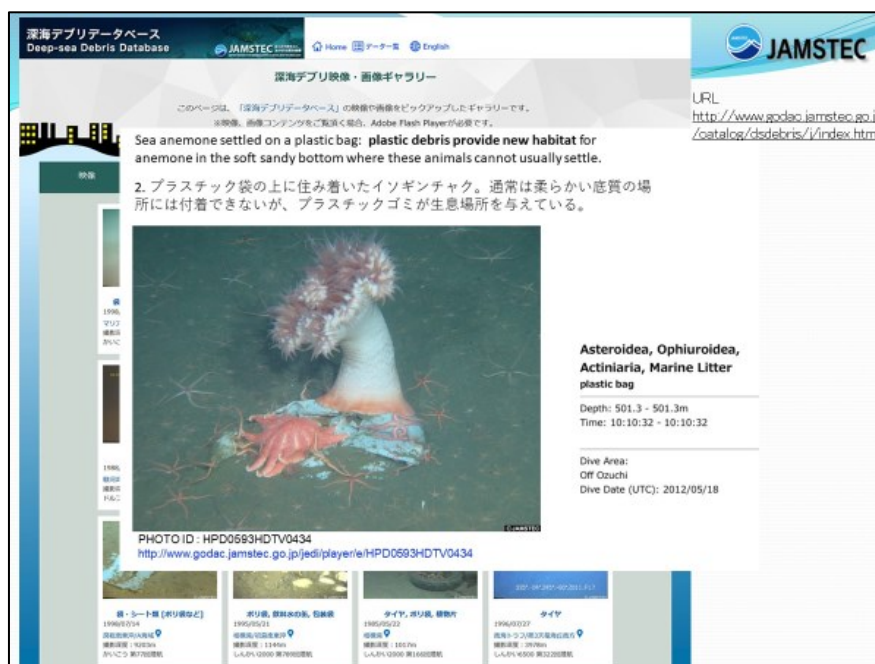


図 3-1-3

本深海デブリデータベースは、新たなデータを取得して構築したものではない。もともと JAMSTEC では「DARWIN」と呼ばれるデータやサンプルの検索システムを以前から構築・公開している。JAMSTEC が潜水艇による潜行能力や、船舶での調査能力を獲得してから、ほぼ全てのデータが DARWIN に入力されている。これはオープンデータ・オープンサイエンスの一環であり、どなたでもフリーでアクセスできる。このレガシーデータの中からごみのデータだけを切り出したものが、深海デブリデータベースである。



図 3-1-4

JAMSTEC には随分昔からのデータがあり、潜行調査に関しては 1982 年からある。「しんかい 2000」という有人潜水調査船が最初で、その潜行データから保存されている。現在の事象に関しては、今、潜ってデータを取得すればよいが、昔の状況は、こういったデータベースを活用することでしか知ることができない。したがって、ひとつの使い方として、レガシーデータを利活用することが考えられる。

次の取組事例 2 件は、NEDO 先導研究プログラムと SIP 第 2 期によるファシリティ活用の紹介である。これらは外部機関と共同で推進している研究である。まずは、NEDO の先導研究について紹介する。今年度、エネルギー・環境新技術先導研究プログラムの公募（課題番号 I-E1、海洋プラスチックごみ問題を解決する海洋分解性プラスチックの技術開発）があり、複数の研究課題が採択された。そのうちいくつかの研究に JAMSTEC は関わっている。JAMSTEC は、海洋に関する基盤的研究開発や学術研究に関する協力等を総合的に行うことにより、海洋科学技術水準の向上と学術研究の発展に資する研究所であり、新素材のような物質をつくることを主たる目的とした研究所ではないため、他機関で作られた素材について JAMSTEC のファシリティを活用し、実際の海洋で分解性をテストするという形で協力をしているケースが多い。

様々な生分解性プラスチックの海洋分解性を実際の海域で評価するという課題で、東京大学・京都大学・JAMSTEC が協力した共同研究を行っている。実際に「しんかい 6500」と呼ばれる

有人潜水調査船を使い、ある地点に設置してプラスチックが実際にどのくらい分解するのかを現場でテストしている。また、日清紡ケミカル・群馬大学との共同研究でも実際の海洋における分解をテストしている。

ファシリティ活用の2件目は、SIP 第2期で行っている。SIP 第2期は内閣府の事業で、JAMSTEC が管理法人として革新的深海資源調査技術の事業を進めている。このプロジェクトは、もともとは海洋プラスチックとは無関係で、海底資源の主にメタル、特にレアアース泥を海底から回収し、レアメタルとして採算ベースにのせるという研究開発である。

図 3-1-5 の通りテーマが4つあり、海洋鉱物資源の賦存量調査、深海資源調査技術開発、深海資源生産技術開発などを行っている。テーマ3 深海資源調査・開発システムの実証の中で、例えば実際に海底でマイニングを行った際、海底環境に与えるインパクトの評価をするチームがある。この中で、「江戸っ子1号」と呼ばれる係留装置を海底近くに設置し、環境にどういった変動があるのかを長期観測（1年間）するプロジェクトがある。これを利用して全く新しい、これまで共同研究をしてこなかった研究者たちと研究をしてみたら面白い発展があるとの期待のもと、研究の機会を広く一般に提供している。



図 3-1-5

フリーフォール型小型ランダー：「江戸っ子1号」365型

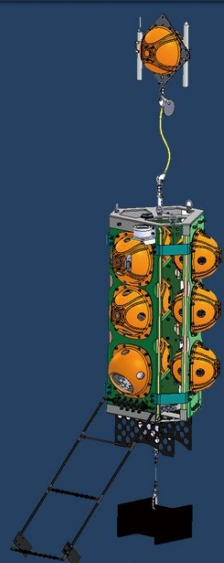
東京下町の中小企業を中心に開発されたフリーフォール型小型ランダー（深海探査機）。ガラス球を耐圧容器兼浮力体として用いる。

国際海底機構（ISA）が定めるガイドラインに沿った1年間の海底観測を可能とする365型が開発され、SIP「革新的深海資源調査技術」で6機を導入。2019年3月に3機を南鳥島周辺海域のレアアース泥開発のターゲットサイトへ設置し1年間の観測を実施中。

2020年3月に回収し、整備済みの3機を同サイトに再設置して長期観測の継続予定。

サイズ(mm)	H1,650×W600×D710
ガラス球	13インチ球×9個
空中重量(kg)	250
浮力	300N

「江戸っ子1号」365型仕様



「江戸っ子1号」365型CGモデル

13

図 3-1-6

図 3-1-7 は実際に江戸っ子 1 号を海に投入するところである。フリーフォール型で海の中に落ちていく。錘で海底に着底・固定されて、1 年後切り離し機で切り離すと浮いてくる仕掛けである。サンプル等を取付け、1 年間、その場で観測できる。カメラを取り付けることができるので、係留時の環境を撮影・観測することも可能である。

江戸っ子 1 号を利用したユニークな研究を公募した結果、これまでにセメント会社と酒造会社から応募があり採択された。2019 年 3 月に江戸っ子 1 号を南鳥島の沖合に設置し、1 年間、セメントを係留しておくとうなるかとか、酒造に使う酵母を係留しておいたらとうなるかという共同研究を行っており、2020 年 3 月に回収予定である。

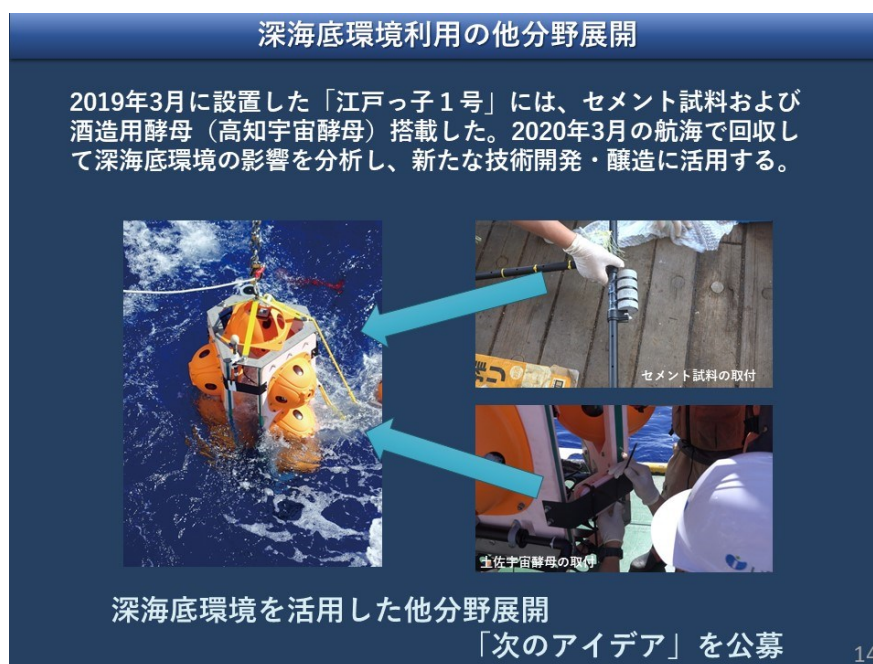


図 3-1-7

また 2019 年度、「自由な発想でご利用ください」という公募をかけたところ、日本バイオプラスチック協会が代表となり生分解性プラスチックの分解試験に関する応募があった。2020 年 2 月もしくは 3 月に江戸っ子 1 号を南鳥島の沖合に設置、1 年間係留する予定である。水深は 5,500 メートル程度を予定している。海洋の平均水深は 3,800 メートルであり、最深部のマリアナ海溝は約 1 万 1,000 メートルであるため、5,500 メートルは一般に深海と呼ばれる。そういった深海で実際に生分解性プラスチックが分解するか否かは、今のところ、諸説分かれている。ヨーロッパの研究チームはコンポスト分解性の生分解性プラスチックを念頭にしている場合が多く溶けないと主張している一方、海洋環境で溶けるものがあることが知られている。JAMSTEC では、生分解性プラスチックが本当に海洋で分解されるのか、深海由来の菌を用いて陸上でテストした研究がある。特殊な圧力装置を用いて深海と全く同じ環境を再現し実験したところ、きちんと分解された製品もあるという結果を得ている。そこで今度は、実際の深海域にて 1 年間係留し、どの程度溶けるのかをテストする。

このように、生分解性プラスチックを実際の海域に持っていき、今回は 5,500 メートルで試験をするが、ご希望があれば 300 メートル、1,000 メートル、1 万 1,000 メートルでも設置することが可能であり、こういった研究の機会を提供することは可能である。

本日の発表のポイントをまとめる。JAMSTEC は海洋の研究所であり、図 3-1-8 に示した 7 つの船舶を保有している。それらは海底の掘削船から観測船までさまざまな船である。また、しんかい 6500 のような有人で海底にアクセスする方法もある。図 3-1-9 に示しているが、それに加え、人が乗らないタイプの自動でプログラムに従って行って帰ってくる無人潜水機、もしくは人が船上でオペレーションし、映像を確認しながら遠隔操作するようなタイプの無人探査機も保有しており、地球シミュレータに代表されるようなモデル計算能力も備えている。例えば、プラスチックの拡散モデルのようなものを計算することが可能である。このようなファシリティをご活用いただいて、皆様と研究を推進することが JAMSTEC の使命と考える。



図 3-1-8

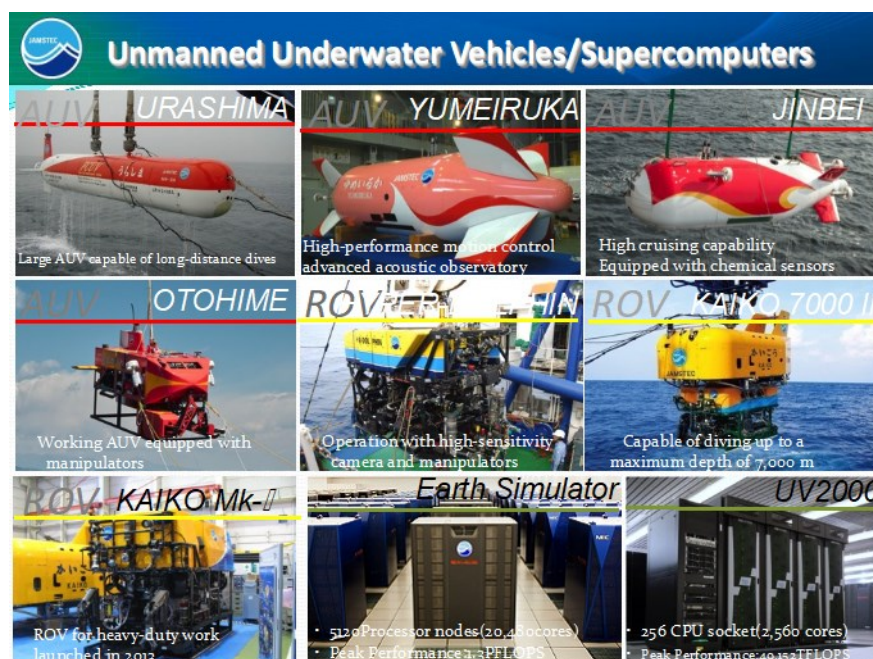


図 3-1-9

最後に、「実験場としての海洋」の場の提供ということで、JAMSTEC は海洋基礎科学に関する国の研究所として、既存のファシリティや人材を生かし、さまざまな海域へのアクセスの提供ならびに海洋特有の知見の提供も可能である。例えば、生分解性プラスチックの深海分解試験を実施する際、容器はどうするのか、係留はどうするのかということを、高分子化学の方が全て設計することはハードルが高すぎる。一方で、JAMSTEC はそういった海洋特有の知見の蓄積があるため、一緒に設計することで、より効率的なテストが実施可能になると考える。したがって、

JAMSTEC は、このような異分野協働を通じて課題の解決に貢献できる。

また、レガシーデータの活用という面では、既存データが多数ある。全てのデータは利用しやすいように整理されており、これを新しい切り口で再整理することで、新たな視点から時間を遡って課題を検証することが可能である。

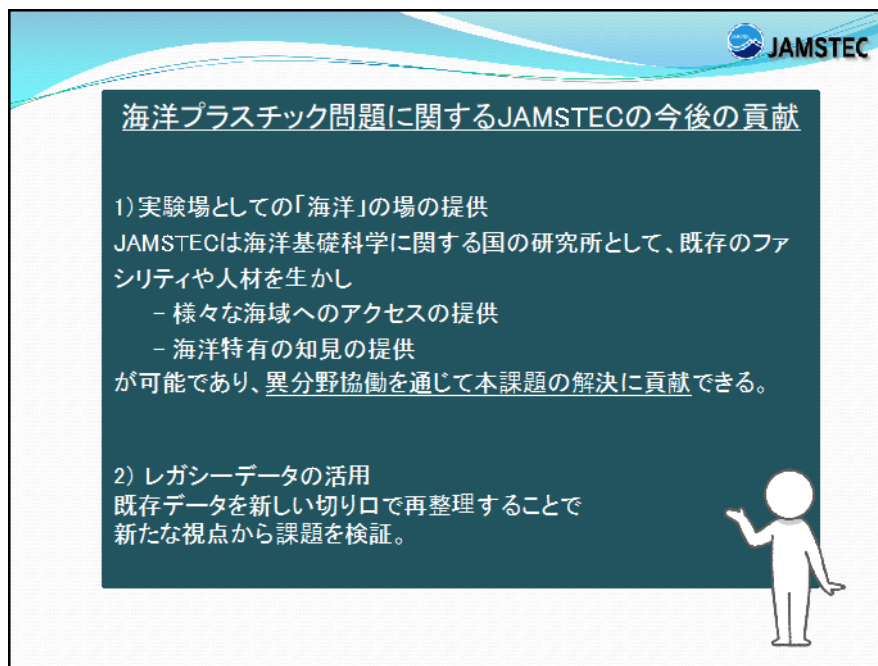


図 3-1-10

【質疑応答】

Q：レガシーデータに紐付けされている情報というのは、時間、水深、GPS 上の位置等が考えられるが、実際はどのようなものか。

A：基本情報として、位置情報、水深、水温、塩分等のデータは取っている。ただし全てが同じデータセットではなく、航海の目的に合致するデータをとっている。場合によっては海水自体を採取し、成分等を調べている場合もある。

Q：生分解性に限らずプラスチックのデブリが多い場所の場合、どのような要因かの解析はされているのか。例えば、海流の影響なのか、プラスチック自体の分解しやすさなのか、場所による分解のしやすさなのか考えられる。

A：現在、デブリの分布状況把握に努めているところである。ただし堆積物について地質学的な視点で考えると、堆積場と削剥場に分けられる、つまり物がたまりやすい場所とたまりにくい場所がある。プラスチックは、堆積場に濃縮されており、均質には存在していないという印象があるものの、未だ解析されていない。海面表層に関しては、基本的に海流が要因であると考えられる。

Q：生分解性の試験の場として深海で行う時に、国際的に標準的なやり方があるのか。

A：一般的な生分解はラボで実施しており基準がある。しかし、今回は完全に世界で初めての実験であるため、まずは本当に溶けるか否かに注力している。つまり国際的に標準的なやり方というところまではまだいない段階である。

3.2 「海洋プラスチックの実態解明に関する課題」

道田豊（東京大学大気海洋研究所 教授）

私自身の専門は海洋物理学である。最近、海洋のプラスチックごみの対策のプロジェクトの取りまとめを担当している。本日の主題は、日本財団の支援を今年から受けて東京大学が始めたプロジェクトの紹介である。

プラスチックはごくごく一部が海に漏れており、海に漏れたプラスチックは微小化し断片化される。今日の主題は、ナノスケールあるいはマイクロスケールのプラスチックであるが、ここでは5ミリメートル以下を微小プラスチックと呼ぶ。

70年代から次のような警告が出ている。海洋のサルガッソー海（大西洋の一部をなす海域で、アメリカ合衆国東部沖に位置するメキシコ湾流、北大西洋海流、カナリア海流、大西洋赤道海流に囲まれた海域）でレジンペレット（小粒のプラスチック）が見つかるという報告がある。一部にはかなり昔から警告がされている。例えば、ご存じの方もいるであろうが、小島あずさ氏（海岸の漂着ごみの清掃活動を30年近く前から継続的に行っているJEANという団体の代表）が2007年に海ごみに関する一般向けの本を執筆され、その中で大変困った状態だとの記載がある。このときは、海岸に漂着したごみをどうするかという問題だった。しかし当時から海洋に漏れ出たプラスチックが微小化していくと、それらは事実上回収不可能なので、大変なことになるとの話であった。また、キャプテンムーア氏のプラスチックオーシャンという本も出て警告されている。ここ数年、直接的なきっかけは2015年のエルマウサミットだろうが、特に大きな問題として国際的にも取り上げられている。

一体どこに海洋プラスチックが存在するかに関しては、幾つかの研究例がある。磯辺教授（九州大学）の数年前の論文では日本近海における分布が報告された（Isobe *et al.*, 2015, Mar. Poll. Bull.）。最近出た別の論文では、太平洋のごみベルトあたりに小さなプラスチック片が経年的にたまっていくことが報告されている（Isobe *et al.*, 2019, Nature Comm.）。このプラスチック片の集積は、物理的に説明が可能で、大小にかかわらず、浮いているプラスチックは中緯度の収束帯の辺りにたまっていく。今後プラスチック片は増えていく一方なので、対策が必要であると考ええる。

プラスチックは大きいものが徐々に壊れていく一方だと仮定すると、小さいものほど多くなると予想できる。しかし実際にはそうした証拠は報告されていない。海水を採取してプラスチック片のサイズ別の量を調べると、1ミリメートル以下のものはむしろ量的には、それより大きいものに比べて少ない。その理由には、いくつかの可能性が考えられる。例えば、そもそも小さいので計測できない、どこか別の場所に移行している、選択的に海水中から除去されている、あるいはプラスチックが作り始められて数十年だがまだ微小化の途中という可能性もある。どれが正しいか現時点では不明であるが、我々は海底に落ちていくという仮説を有力視し、その確認を目的とした研究を進めている。海底堆積物中を見ると、1960年代に堆積した泥にはすでにプラスチックがある。

堆積物だけに焦点を当てているわけではなく、海水中の鉛直分布にも関心を寄せている。つまり、海水表面に浮いているプラスチックは、波浪などによる海面混合の影響を受け、材質による密度の違いも反映して鉛直分布が決まる。水平分布の調査については今日の発表者でもある日向博文教授（愛媛大学）も参加されて、グローバルマップを描くという目標のもとに進めている。

それと並行して、我々は海面から海底堆積物まで、限られたポイントにはなるが、鉛直的分布の実態をまず第一歩として明らかにしたい（図 3-2-1）。

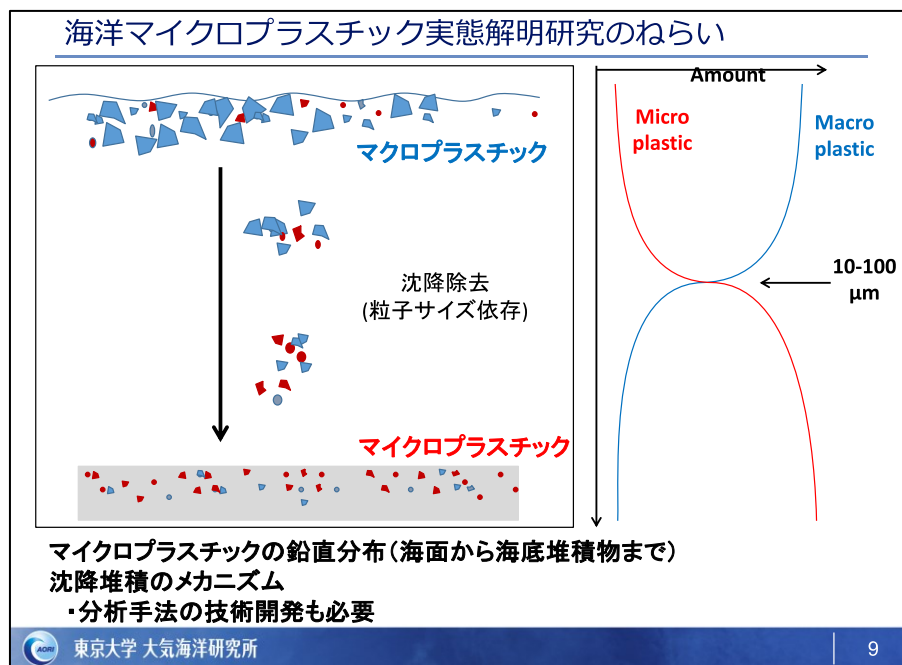


図 3-2-1

このような研究を企画立案していたときに、日本財団からご提案があった。昨年設立された東京大学の未来社会協創基金（Future Society Initiative Fund）は、SDGsのために学術としてできることを東京大学としても推進するための基金である。その事業において、Change for the Blue という日本財団のプロジェクトの一環として、我々の研究は支援される。今年から、まずは3年間、研究を推進する。

図 3-2-2 の通り、海洋ごみ対策プロジェクトには大きく二つの柱がある。Act II はアウトリーチ的要素が強く、国際的な議論の場の設定が含まれる。Act I は、研究要素の強いテーマである。ここでは、ナノを含む1ミリメートル以下の小さなプラスチックに関してのテーマが3つある。自然科学系のテーマ1とテーマ2では、小さいプラスチックがどこにあるのか、どう動いていくのかの実態把握と、懸念される生体影響の評価をできる範囲で行うものである。加えて、テーマ3では、あえてマイクロプラスチックではなく、マイクロプラスチックのもとになる海洋プラスチックを減らすにはどうしたらいいのかに焦点を当てる社会科学的なテーマである。発生フローの解明と記載があるが、マテリアルフローのことであり、生産からリサイクルの過程で、どこから漏れ出ているのか、またどこを押さえたらいいのか、制度設計も含めて検討する。

2

Act I 海洋プラスチックごみ問題に関する研究

日本財団との協力のもと、海洋プラスチックごみ問題対応の基盤となる科学的知見を充実させ、信頼できる科学的根拠に基づき正しく問題を伝える。このため、東京大学を中核とし、他大学・研究機関と連携することにより以下の取り組みを推進する。

- ・テーマ1 海洋マイクロプラスチックに関わる実態把握
- ・テーマ2 マイクロプラスチックの生体影響評価
- ・テーマ3 プラスチックごみ発生フローの解明と削減・管理方策の検討

Act II 海洋プラスチックごみ問題の対策

日本財団と東京大学の共催により、幅広い学術領域の国内外の専門家やステークホルダーと、海洋プラスチックごみ問題に関する意見交換、情報発信、削減・管理方策の提案等を行う。

1. 海洋プラスチックごみ問題の対策・研究プラットフォーム構築
2. 国際的ラウンドテーブルの設置
3. プラスチックごみの削減・管理方策の提案






東京大学 大気海洋研究所

図 3-2-2

マイクロプラスチックはどこにあってどのような影響があるのかが不明であるので、その解明をめざすことになるが、そうした研究の成果が出るまで待っている状況ではないと考えている。そこで、現時点からプラスチックごみの発生フローをできるだけ解明して、環境への排出量を極力減らしていくという努力は並行して行う。

図 3-2-3 の通り、研究テーマ 1 の実態把握の研究には複数のテーマがあるが、柱の一つは表層から海底まで限られたポイントにおいて実態把握を行うことである。具体的には、新青丸（JAMSTEC）の航海を計画中で、対馬海峡から日本海にかけて幾つかの調査点を設けて、海水と海底泥の採取をし、表層から海底までの分布についてサイズ別にデータを取る予定である。これと並行して、プランクトンの専門家である高橋一生教授（東京大学農学生命科学研究科）は、過去 70 年間におけるプラスチックゴミの時系列を明らかにする予定である。水産研究所では、過去 70 年間分ぐらいのプランクトンのサンプルを保存している。このサンプルをプラスチックという観点から見直すことにより、時系列的にどの年代からプラスチックが増えたかといったことを明らかにする取り組みである。

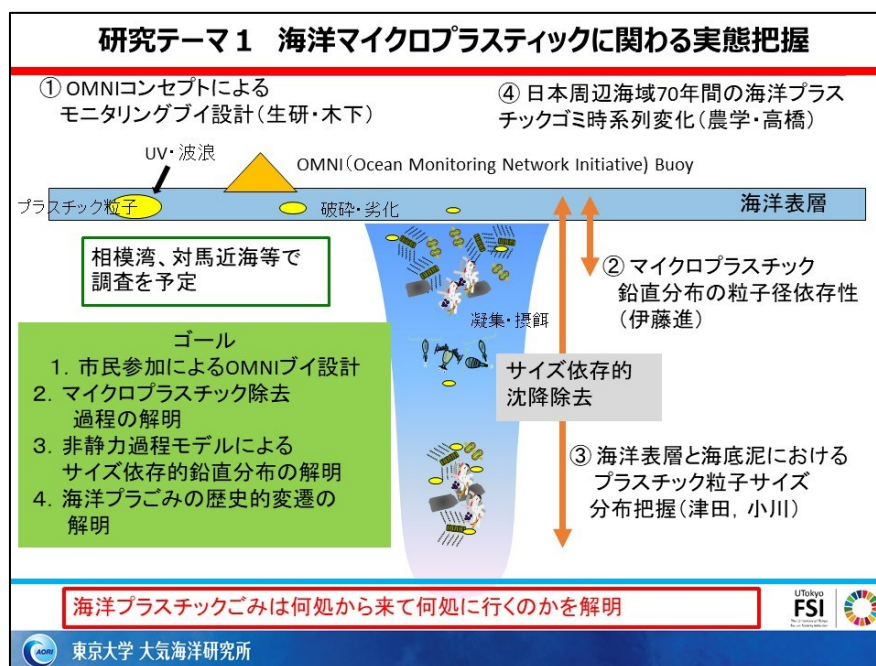


図 3-2-3

図 3-2-4 に示した通り、研究テーマ 2-1 では、マイクロプラスチックの生体影響評価を行う。海洋プラスチックに関連する化学物質の影響について研究されてきた高田秀重教授（東京農工大学農学研究院）と分子生物学者である井上広滋教授（東京大学大気海洋研究所）は、様々な地域でサンプルを採取し、例えばバックグラウンド汚染の少ない沖縄等で漂着物の多い海岸と少ない海岸を対比させ、プラスチックによる汚染の進展具合を定量的に明らかにする予定である。既に幾つか成果が出ており、研究チームの博士研究員が最近、**Marine Pollution Bulletin** という科学雑誌に論文を出した。これは、サイズの異なる小さなプラスチックをムラサキガイに吸収させて、どう排出されるのかを調べたものである。10 マイクロメートルぐらいのプラスチック粒子は、排出に時間がかかるものの最終的にはほぼすべて排出される。一方、1 マイクロメートル程度のプラスチックは、初期の段階から比較的速く排出されるものの長時間滞留するものが残った。これらの結果は、一言にマイクロプラスチックといっても、サイズによって生体内での振る舞いに違いがあることを示している。

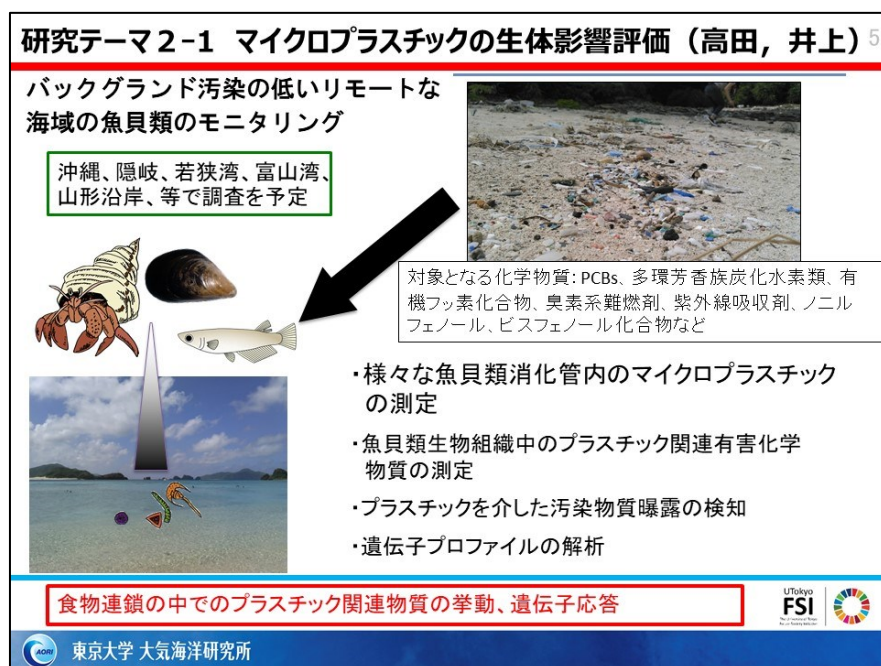


図 3-2-4

研究テーマ 2-2 は、酒井康行教授（東京大学工学系研究科）のグループが細胞モデルを利用してマイクロプラスチックの生体影響評価を行う。腸管の細胞モデルを作製し、ナノスケールのマイクロプラスチックが本当に吸収されるのかを試験する（図 3-2-5）。そのうえで、細胞がどのような反応をするのかといった点の解明も目指している。

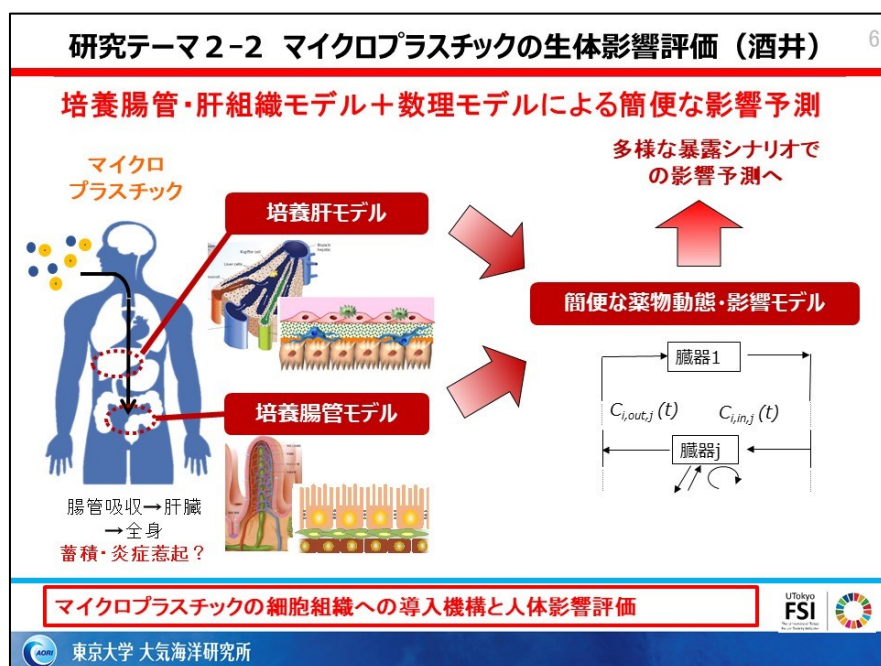


図 3-2-5

海洋研究を取り巻く情勢として、「持続可能な開発のための国連海洋科学の10年」というのが

2021 年から始まる。SDGs のために海洋研究は何をするべきかが課題である。その中で 6 つの社会的アウトカムというのが設定されている。トップがクリーンオーシャンであり、プラスチックもターゲットの一つである。つまり 2021 年からの 10 年間、国際的に海洋科学を進展させる中に海洋プラスチックも含まれているので、これを踏まえて、我々も研究プロジェクト推進の参考に必要があると考える。

最後は今後の方向についての説明である（図 3-2-6）。国際的な動きの中で、GESAMP はワーキンググループ 43（海洋起源のプラスチック）を設立した。海洋起源のプラスチック量はさほどではないというのが定説であるものの、ワーキンググループ 43 では船舶起源のプラスチックも含め海洋起源の海洋プラスチックの対策を検討する。また国連海洋科学の 10 年も始まる。これらの国際動向も踏まえ、特に強調しておきたい事は、微小プラスチックの生体影響に関しては他の自然系の粒子と何が違うのかが明確にならないと、本当の対策にはならないと考える。自然起源の微小粒子は、例えば火山灰や土壌起源のもの（黄砂など）が多種類ある。これらと何が違うのかということが、恐らく今後の極めて重要な研究課題になると考える。

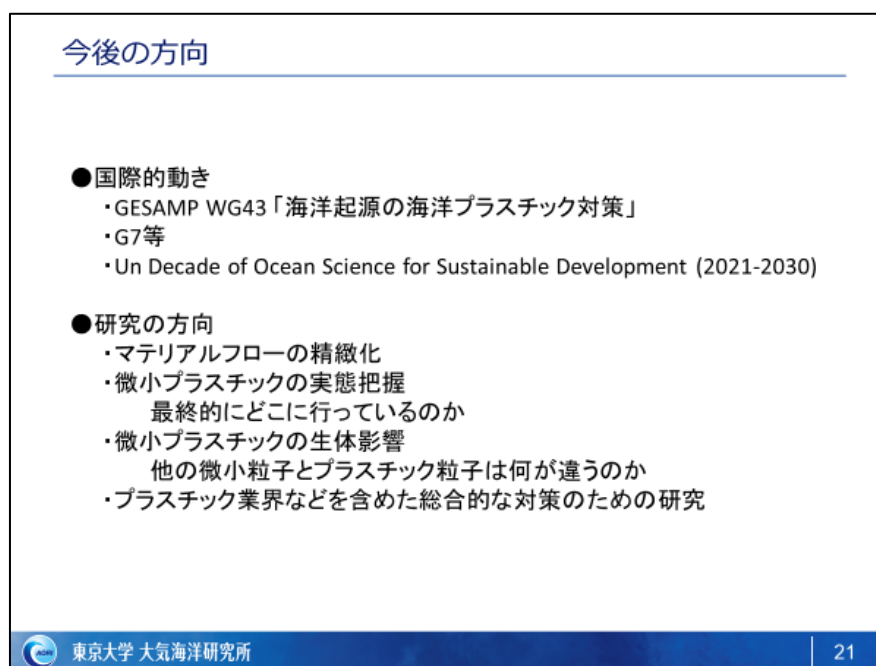


図 3-2-6

【質疑応答】

Q：海洋プラスチックに関するストックとフラックスのどちらが知りたいのか。物理の専門家から見るとストックだけでは不十分と考える。

A：ご意見はよく理解しているが、今の段階では、海洋プラスチックのスナップショットの結果を出すこととする。まずは存在しそうな場所や存在しなさそうな場所でどのくらい海洋プラスチックが存在するかということからスタートさせる。フローが大事になってくるステージはあると予想するが、今はまだその段階でないと考える。

Q：生体影響の評価は何を指標にするのか。例えば健康影響は、実際に臓器で炎症が起こるか否か、並びに、どの程度のリスクで何件ぐらい症例が出るのかを議論するのか。

A：今のところ健康に影響が出るような量が生体には入っていないと個人的には考えている。ただ、場合によってはリンパ系の中に入りうるという報告もある。そこで、我々の研究では実際にどのくらいの量が生体内に入り得るのかをまず明らかにする。このテーマの担当は工学部の所属であるが、結果如何によっては将来は医学系の研究者と共同研究することも視野に入れている。

Q：プラスチックが断片化され小さくなると、なぜ海底に沈むのか。

A：海洋中では、いろんな生物系の排泄物が沈んでいく。また、もともとは浮いているが、プラスチックが断片化され小さくなると周りに様々なものが吸着し、あるいは他の粒子に吸着して、凝集して沈んでいくといったプロセスが考えられる。

3.3 「海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究

ー化学物質等の環境リスク評価研究からの視座ー

内藤航（産業技術総合研究所安全科学研究部門 リスク評価戦略グループ長）

我々はまだマイクロプラスチック、海洋プラスチックの研究には着手しておらず、これまで研究を行ってきた化学物質の環境リスク評価の観点からどんなことができるか、こういうことが必要ではないかというようなことを本日はお話ししたい。

まず、産総研において、我々が所属する安全科学研究部門は 2008 年に設置された部門である。産総研の中で LCA 研究センターや化学物質リスク管理研究センターといった評価研究をしているグループがかなり関わっており、その中でも図 3-3-1 の青い部分が化学物質のリスク評価にかかわるグループで、緑の部分が LCA やエネルギー、環境負荷の評価に関わっている。合わせると約 30 人ぐらいの研究体制になる。

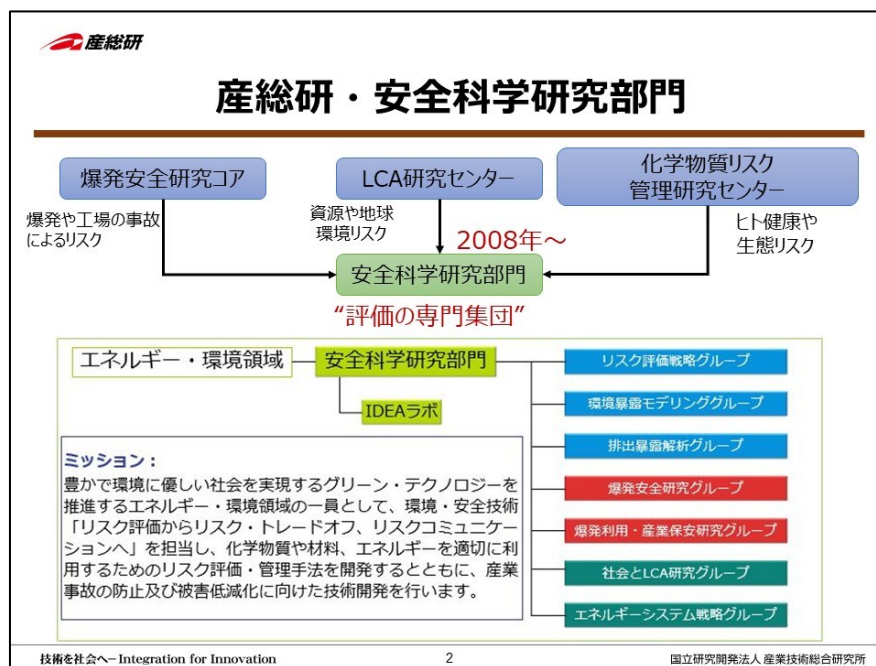


図 3-3-1

化学物質のリスク評価については、産総研において 2001 年に化学物質リスク評価研究センターが設置された。その頃から詳細なリスク評価書の作成や、それに必要なモデルの開発を進めてきた。2007 年頃からは、ある化学物質に対策をとったときにその代替物質の評価をどうするかという課題に取り組むフレームワークの構築や実際の評価なども行ってきた。その他には新規技術のリスク、ナノ材料やナノセルロースなどのリスク評価にも取り組んでいる。最近では、データがない場合にどのように有害性を推論するかといったことや、ビッグデータ等を活用した有害性推論の研究なども行っているところである。



図 3-3-2

我々のリスク評価研究を語る上で、一番大事なのが詳細リスク評価書の作成である。約 25 ぐらいの化学物質の詳細リスク評価書を出版しているが、それぞれに何人かの研究者が関わって、実際に発生源から対策の費用対効果に至るまで、全て定量的に結びつけるということを行った。うまくいった物質もあれば、評価する中で課題が出てきた物質もあり、このような経験の中でどの部分に着目する必要があるかということや、リスク評価研究をする上でどのような部分について技術開発が必要であるかなどをつかむことができた。



図 3-3-3

その評価の中で我々が特にこだわっていた部分は、対策に使えるデータを提供することである。まず、発生源からヒト、生態への化学物質の主たる暴露経路の把握と定量化をできるだけやるということ。また、測定データがあったとして、それがどこからきているかということをしちんと解明する努力をするということ。そして、リスクの定量化では、できるだけ同じ指標で評価ができるようなリスク指標に持っていくということもこだわった部分である。費用や便益ということも念頭においた。

それから、全体と地域のリスクを把握するために、日本全体の評価をすることと、日本の各地、地域ごとにリスクの大きさは異なるので、そういう部分もきちんと把握するというところを行った。また、実際にリスク評価に必要なデータがない場合、そのデータギャップを埋めるような手法の開発を、我々だけでできなければ、外の研究者とも協力しながら行った。さらに最近、特に意識しているのは、リスク評価の結果は完全ではないので、不完全な状態でも、このように使えばよいのではないかと、意思決定につなげるようなことを意識して例示していることである。

一例として、自身も関わったリスク評価書の中でフタル酸、可塑剤の一部のリスク評価を行った際、排出源から排出量を把握する、寄与率を把握するという研究を行った。プラスチックがどこでどのように使われているかということと、社会でのストック量をそこからどれぐらい環境中に出てくるかということを押さえて、この結果をさらにモデルにインプットして、寄与率を求めたということを行った。

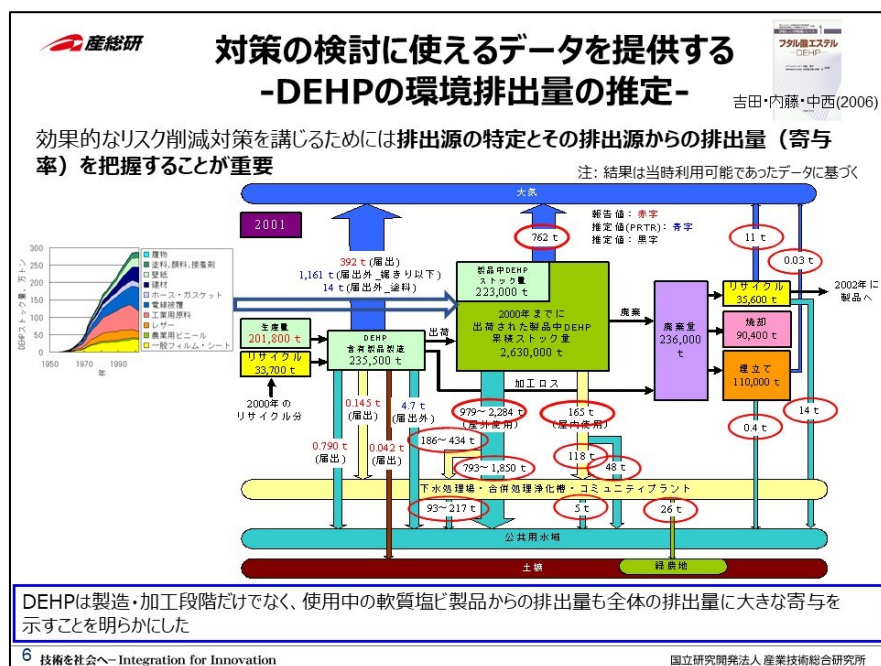


図 3-3-4

図 3-3-5 はその一つの結果であるが、例えばフタル酸について、大体ヒトはこのぐらいの量を摂取しているという結果が出ている。モデルで構築した結果から見ると、水産物経由あるいは畜産物経由でこのぐらいの寄与率があるだろうという計算をした。あるいは発生源別に見るとこのぐらいの寄与ではないかと、こういう流れを定量化することによって、対策の効果や、物質が代替したときにどのぐらいリスクが低減されるかといったことが明らかになった。これはリスク評

価の中にライフサイクル的な思考を入れたような評価で、今でもこういう意識は常に持っている。

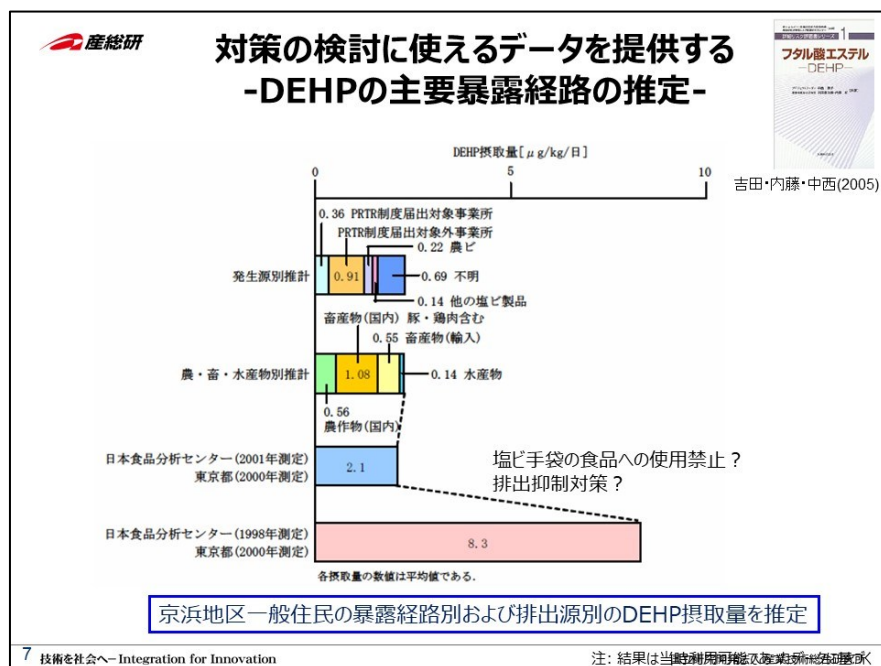


図 3-3-5

また、ナノ材料の安全性評価研究を 2006 年頃から開始し、一つの軸としては行政の管理や意思決定を支援するような研究の枠組み、もう一つは、ナノ粒子は企業によってそれぞれ修飾の仕方が異なるため、そのような部分の評価をできるだけ簡便にできるような手法の開発ということで、事業者による自主管理を進めるような研究と両方を行っている。

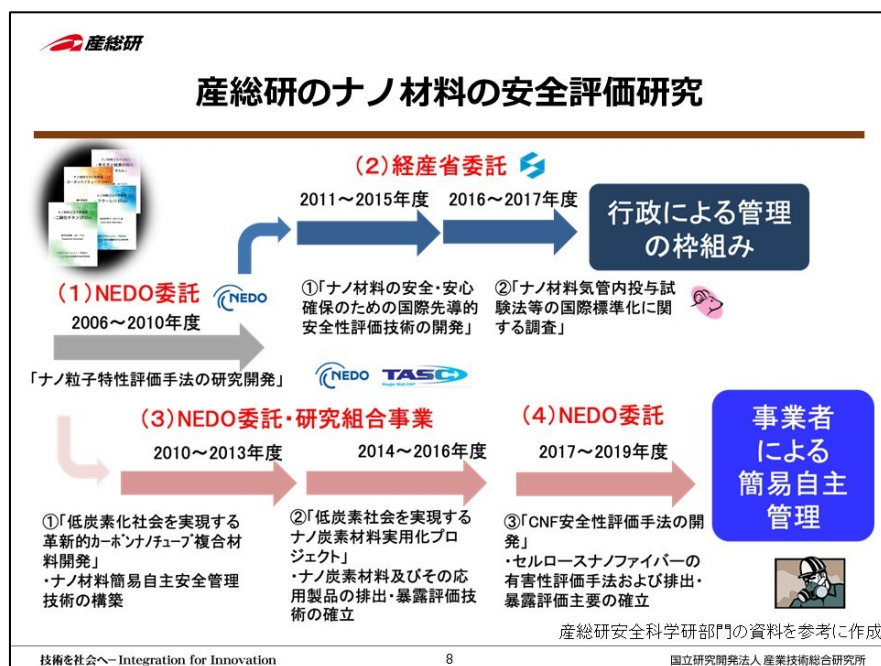


図 3-3-6

ナノ材料はご存じのとおり多様であり、分子式が同じでも異なる特性を持つ。社会の変化によって、わからないものはとりあえず危険とみなすという時代や、ナノだから危険という風評が起きるといったことがあった。そのような中でも、我々の中では同じ化学組成でも多様なサイズ、形状、表面処理といった部分が重要になるということに注目して、全てをやらなくてもある程度、このぐらいの単位で評価すれば、全体としての管理に使えるのではないかとという視点で一つの評価方法を示した部分や、法規制にまだなっていない部分では、できるだけつなぎで評価ができるようなデータを提供しようということで、手法開発を行ってきた経緯がある。

その最初のきっかけ、ナノ材料の安全性評価の際にこだわった部分としては、有害性試験において供された試料がいかげんに調製されていたり、状態が確認されていないケースが多々あり、有害性試験に用いられる試験試料のサイズや、キャラクタリゼーションというのがなかなか分かっていないような状況だったので、この部分を特にきちんとしてほしいということ、それから試料調製と計測の技術開発にもこだわった。これは産総研の中の他の部門と協力して進めていった。そうしながら、完璧なリスク評価ができないのであれば、リスクガバナンスとしてはどういうことができるのかということもあわせて考えた。

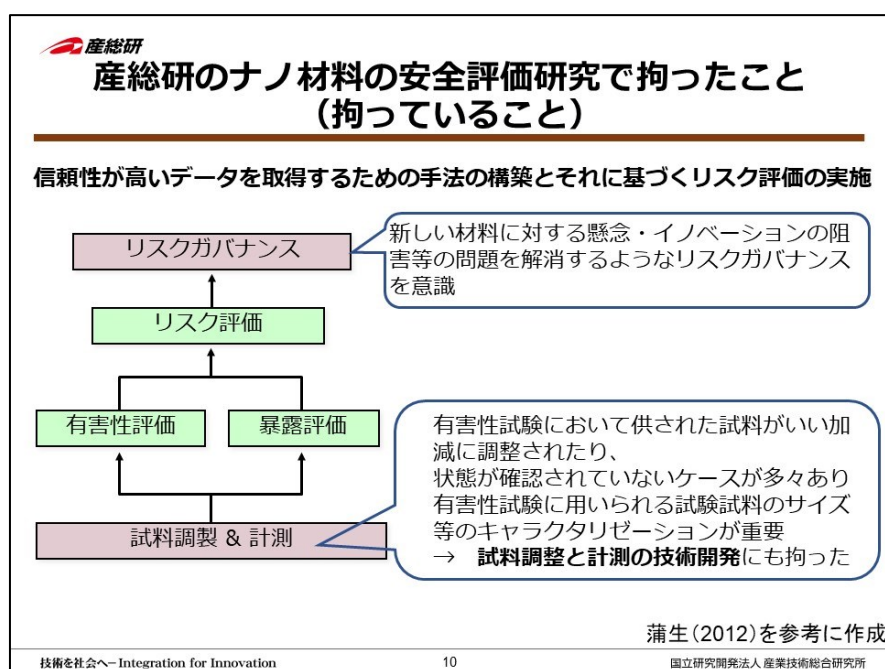


図 3-3-7

このような経験の中で、我々がこれから海洋ナノ／マイクロプラスチックの問題への対応として、環境リスク評価研究をどう考えていくかということや、どのようにしていくことができるかということで、その経験から幾つか示唆できるようなことをお話ししたい。

一つ目は、主要発生源はどこか、あるいは海洋中の運命はという部分で、これは先ほど道田先生がお話しされた部分にもかなり関係してくる部分かと思われる。Jambeck の推計値というものがいろんなところで使われるが、この仮定が本当に正しいのか、結果の妥当性はどうかというのは気になるところである。それから、海洋プラスチックの負荷源というのは、グローバル、国、海域、湾レベルでも異なる。結局、対策もそれによって異なってくるはずなので、そういう部分

に注目していくことも重要ではないかと考えている。

先ほどリスク評価の研究で発生源から暴露に至る経路の定量化という話があったが、これも完璧な部分を目指すということはなかなかできないので、少なくとも半定量的でも評価モデルの構築や問題の構造化が大事だと考えている。そういう中で、既存情報に基づくリスク評価をまずは実施してみて、その中で明らかになってくる課題や詰めなければいけない説明力がない部分というものが出てくるのではないかと考えている。

それから、モデリング、そして、モニタリングのずれの解明という部分、ここは合理的な説明ができるようなデータのとり方というものが需要ではないかと考えている。また、こういう流れをきちんと押さえることが代替物のリスクトレードオフの評価やリスクベネフィットの解析にも使える、そこに繋がってくるのではないかと考えている。

日本は、個人的にはプラスチックの循環のこのようなマテリアルフローが比較的きちんとできていると理解しているが、こういう情報もあるし、それぞれからの排出量の計算に関しても化学物質の PRTR の推定手法や、幾つかの排出係数のデータベースもある。さらにヨーロッパのほうで行われているようなプライマリーなものからの排出量の計算というものも、今の状況でもやろうと思えば可能なので、そういう部分もきちんと押さえる必要があるのではないかと考えている。



図 3-3-8

それから、計測、有害性評価手法の開発、標準化というのは大事であると思われる。これは計測結果を比較できない問題があるということである。現実的にあり得る暴露経路や、量による評価が重要であるし、キャラクター化の重要性というものがある。環境リスク評価に資する有害性評価というの、標準化は必要だが、標準化の目的が問題解決志向にあるべきというのは、標準化によって何が評価できるか、それによって本当に海のものが評価できるか、そういうところも意識した設計が重要ではないかと感じている。


海洋ナノマイクロプラスチック問題への対応としての環境リスク評価研究

NMPの計測および有害性評価手法の開発・標準化 (社会・環境問題への対応に資する)

曝露と有害性の単位の整合化

- 計測結果の比較ができない問題
- 現実的にあり得る曝露経路や量による評価
- 整合的な単位による評価（キャラクタリゼーションの重要性）
- 環境リスクの評価に資する計測や有害性評価手法の開発・標準化が必要。標準化の目的は問題解決志向であるべき。標準化により何が評価できるのか？ユーザーとのコミュニケーションが必要

(省略)

(省略)

Burns and Boxall (2018)
技術を社会へ Integration for Innovation

Lambert et al. (2017)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

図 3-3-9

また、代替物の環境影響評価ということでは、例えば海洋生分解性プラスチックの場合は、新素材、代替素材の環境影響評価手法の開発を同時に進める必要がある。CO₂などの環境負荷や、生分解性、有害性など、従来の方法ではできない可能性もあるし、できないなら、その部分の開発も同時に進めていく必要がある。一方で、海洋プラスチックごみ低減の効果が図られるような評価であるべきであり、従来品と代替素材とのリスクトレードオフの問題も考える必要がある。


海洋ナノマイクロプラスチック問題への対応としての環境リスク評価研究

代替物（例えば海洋生分解性プラスチック）の環境影響評価

- 新素材・代替素材の環境影響評価手法
- CO₂などの環境負荷、生分解性、有害性など
- 海洋プラスチックごみ低減効果
- 従来品と代替素材とのリスクトレードオフの評価

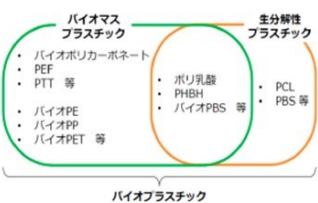


図1 バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックの定義

出典：「プラスチックを改めよう（国内外の状況）」（平成31年2月22日第5回中央環境審議会資源部会プラスチック資源部
環境部小委員会）

技術を社会へ Integration for Innovation

14

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

図 3-3-10

また、海洋プラスチック対策の社会経済的影響という部分で、規制影響評価というところまでできるかどうかかわからないが、それぞれの対策がどの程度、効果があるのかということはあらかじめ評価していくことが重要であると思われる。その対策による社会経済的な影響というものは国によって異なるであろうし、例えば欧州にとっては規制の影響は小さくても、日本にとっては社会経済的な影響は大きいということもある。

この部分について、確かなエビデンスがなくても、規制を求める声が大きく、予防的な対策を講じる必要があるなら、どのような枠組みや優先順位がよいかということを議論する必要があるのではと、国際社会に納得してもらえるような合理的な対策の提案が求められており、そのためにも評価が必要ではないかと感じている。

【質疑応答】

Q：実際にプラスチックにどのような生体影響があるかというようなことをどう調べていったらよいのか。今、影響はわかっていないと認識しているが。

A：何が本当に影響しているのか、濃度レベルでも現実により得る濃度試験なのか、また例えばマイクロビーズなどで試験をしているが、それが本当に環境であり得るのかなど、そういうところから一つ一つ考えなければいけないと感じている。このぐらいの破片の数で1リットル当たり粒子の数が幾つだったら影響がないとかあるとか、そういう研究になっているので、今の段階では大ざっぱな評価はできても、確実に比較可能ではないと思うので、そういう部分はきちんと整理していく必要があるかと考えている。

Q：現在、海洋の生態系はまだわかっていないことがあまりにも多い。どのサイズのものがどこに影響するか、1対1でわかればよいが、これをバルクで評価する良い方法がもし知見としてあるのであれば、教えていただきたい。

A：それはないと思うが、ヒトの場合はヒトの健康というエンドポイントが非常にわかりやすいが、生態の場合は種の数も膨大であり、守りたい生態系というのも人によって異なる。例えば日本であれば、この部分の生態系で、この種は守りたいとか、こういう生態系でありたいとか、そういうところから逆算していくような評価を考えていくほうがよいのではないかと思う。

3.4 「海洋プラスチックごみ課題に対する解決志向性レギュラトリーサイエンス ～リスク評価者の視点から～」

藤井健吉（花王株式会社研究開発部門安全性科学研究所 ディレクター）

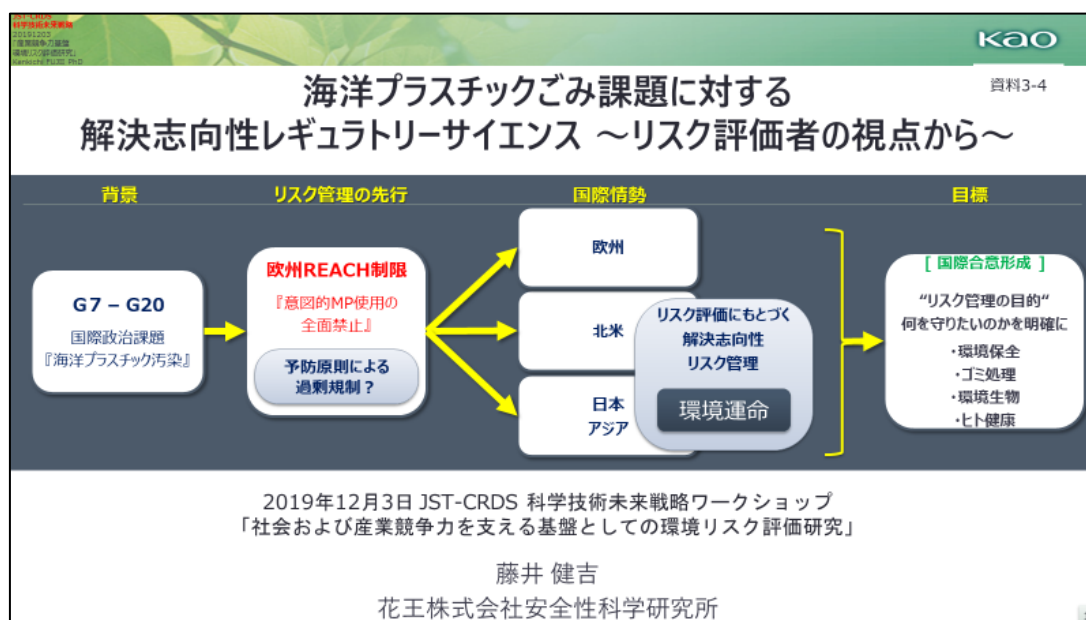


図 3-4-1

私たちの安全性科学研究所は、産業のリスク評価機関である。約 100 名のリスクアセッサー、トキシコロジスト、環境リスク専門家、防腐防黴専門家を揃え、リスク評価技法の体系化、化学物質の用途用法に応じたリスク評価、消費者製品の安全設計のためのリスク評価、リスク評価とリスク管理の連携のための制度設計など、リスク学をベースにした安全性の深化で“よきものづくり”を支えている。本日のテーマのプラスチックは、優れた可塑性の軽量素材であり、安定性、コスト、省エネ、低資源性、衛生面などの有用性から、建材、容器や各種原料など現代社会の基盤的価値を有している。昨今の海洋プラスチックごみ問題を踏まえて、プラスチックの適切な使用とリスク管理について、国際的な観点から再構築が必要と考えられる。資源管理、ゴミ回収システムとリサイクル、環境負荷、品質保証など、様々な指標があり、製造者、流通、使用者、廃棄物管理までステークホルダー横断の責任問題でもある。特に、事業者は、国際規制に対しても事業展開国全てに対応しなければならない。たとえば米国の TSCA（有害物質規制法）、欧州の REACH（化学品の登録、評価、認可及び制限に関する規則）が動けば、それぞれにコンプライアンスが発生する。プラスチックの環境汚染をどのようにリスク管理するか、この問題を世界中が考える中、今回の課題に対してどの国がどのような順番で動いたのかを追跡し、リスク評価の課題とあるべきリスク管理について概説したい。

直近 5 年間のマイクロプラスチック国際規制を振り返る。まず米国で、ある意味で実験的な規制がなされた。定量的リスク評価のない段階で、環境プラスチック汚染問題の全体像がまだ把握されていない中、洗い流す化粧品に意図的に配合したプラスチックマイクロビーズ（洗顔料のスクラブなど）用途に対し、環境中で分解されず回収困難（リサイクル不可能性）であるとの理由から用途制限規制が施行された。この頃のマイクロビーズ制限は、まだ海洋プラスチック汚染の

全体像とは切り離され、できるところから始めましょう、という規制だったのではない。海洋プラスチック汚染の全体量に対する特定用途の寄与率、といったリスク評価は考慮されないまま、リスク管理措置が進んだケースであり、海洋プラ汚染の総量に対して 0.01%未満の寄与率にすぎない特定用途のプラスチックマイクロビーズのみを最優先で禁止した経緯は、海洋汚染をリスク管理して海をきれいにしたいという本来の目的に対する解決手段としてずれていたのではない。同時に、より優先順位の高いリスク管理対象（途上国におけるごみ管理の失敗や主要マイクロプラスチック排出源）が見過ごされる、というモラトリアム状況を生んだとも言える。新たなリスク課題に対するリスク管理対象（規制対象）の優先順位付けの教訓として、将来、歴史的に検証されることになるだろう。

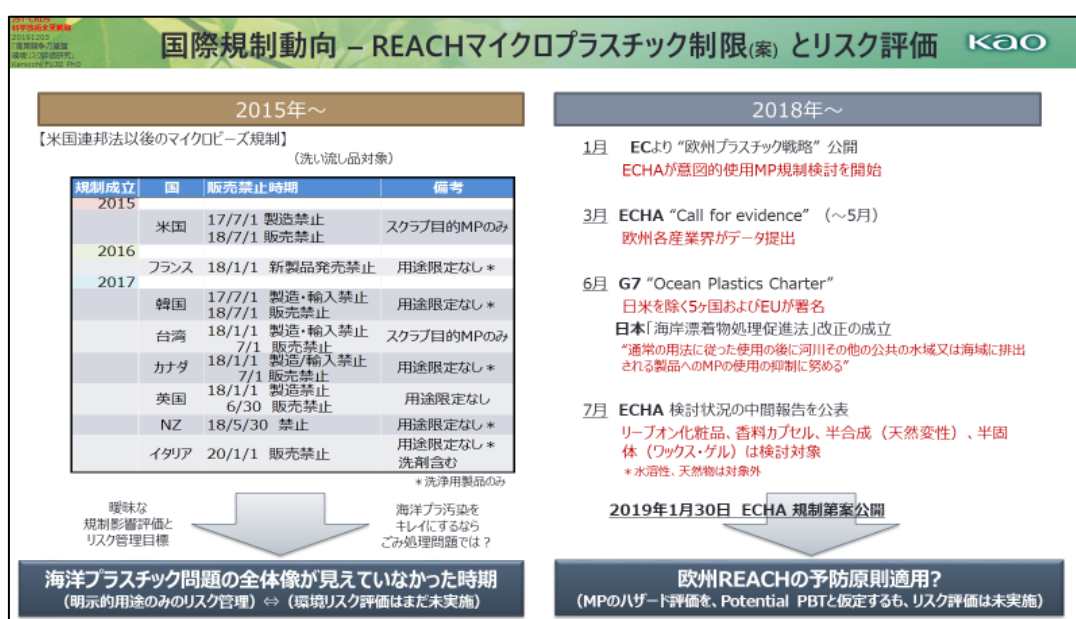


図 3-4-2

欧州では、2019年1月に REACH のマイクロプラスチック制限案が出され、マイクロプラスチックの包括的な用途制限が検討されている。その規制根拠は、プラスチックは難分解性 (Persistent)、生物蓄積性 (Bioaccumulative) および毒性 (Toxic) を有する潜在的な PBT 物質との仮定にもとづくが、仮定の科学的妥当性については議論がある。REACH マイクロプラスチック制限案に対する世界中からの多種多様なパブリックコメントでは、プラスチックの環境影響及び生物影響、環境運命に関する指摘も多い。例えば、消化管からの吸収性のないプラスチックに対して生物に対する高蓄積性を当てはめるべきなのか、固体プラスチックが規制の根拠となるレベルの毒性を有すると言えるのか、など、ハザード評価としても Potential PBT 仮定を疑問視する意見が有識者から出されている。また、今回の REACH 規制案は、マイクロプラスチックのリスク評価が添えられないまま進んでいる点も、指摘事項となっている。今後、REACH マイクロプラスチック制限に向けた規制プロセスとして、欧州化学品庁 ECHA から科学的評価答申 (RAC opinion) と社会経済影響評価答申 (SEAC opinion) が準備される見込みだ。どのような形でリスク評価が扱われ、リスク管理措置が正当化され、リスク管理により損失する社会的価値がトレードオフされるのか、EU を注視している。日本の立場から見ると、EU のマイクロプラ

スティック用途制限規制は、国際的な産業障壁となる。化学物質規制の変化は、産業に対して多様な影響を与える。産業界としても、新たなリスク管理措置としての規制が選択される場合には、より根拠のある規制、目的に対して合理的な規制であってほしいという願いを常にもっている。環境・ヒト健康・労働安全のいずれの目的であっても、リスク管理措置として妥当性のある規制であれば、産業界も全力で協働・支援する。まだ不確実な要素のおおい新興課題に対して、どのような予防的な立場で妥当な規制を模索するのかは、実学的にも極めて重要なポイントだ。



図 3-4-3

REACH の経緯からも、マイクロプラスチック環境リスク管理を考えるためには、そもそもマイクロプラスチックリスク評価の考え方のコンセンサス形成は最重要課題と言える。この問題について、リスク評価専門家として国際的な専門家会議に幾つか出席した (図 3-4-3)。その一つに、ICCA (International Council of Chemical Associations ; 国際化学工業協会協議会) のマイクロプラスチックタスクフォースによる環境リスク評価シンポジウムがある。ここでは、SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry ; 国際環境毒性学会) らと連携しつつ国際的な専門家・有識者が集いマイクロプラスチック環境リスク評価フローが検討された。マイクロプラスチックの評価では、特有の環境運命などを考慮できるような新たな評価の枠組みが必要となる。PEC/PNEC (Predicted Environmental Concentration ; 予測環境中濃度、Predicted No Effect Concentration ; 予測無影響濃度) によるリスク評価に軸を置きつつ、長期的視点で環境影響を加味して評価できるリスク評価枠組みを考える、というリスク評価フローそのものの拡張が吟味された。よくわからないで済まらず、リスク評価の質を上げるという試みは、ある意味で予防原則へのアンチテーゼである。

また、マイクロプラスチックのヒト健康影響に対しては、公衆衛生の観点から WHO が動いた。魚貝や飲料水を介してヒトがマイクロプラスチックを経口摂取しうる懸念に対して、2019 年 8 月に WHO レポートを発行した。内容として、様々なサイズのマイクロプラスチックは、いずれも体内に吸収されないという見解が示された。サイズの大小にかかわらず、基本的に経口ルート

ではマイクロプラスチックは吸収されず排泄されるとの知見を簡潔に説明し、ヒト健康影響についてマイクロプラスチック有害事象は報告されておらず、基本的にヒト健康での公衆衛生問題は起きていない、これが WHO レポートの骨子になっている。ただし、新興課題であるため、まだ科学的には不明な部分があるという冷静な見解である。このレポートをまとめた WHO の専門官に見解を聞いたところ、ペットボトルを短絡的に禁止して別の問題が起きることを懸念していた。ペットボトルを禁止すると、衛生面で安全な水を世界の各地に行き渡らせることが難しくなる。ガラス瓶にすると、簡便な輸送が難しい。人々の生命と健康を守る観点から、WHO は安全な水を世界各地に行き渡らせることの優先順位を高く考えている。公衆衛生の観点からは、プラスチック規制の短絡的な流れに WHO は懸念を持っている様子が伺えた。

このように基本的にまだわからない不確実性については、国際的に英知を結集してファクトにもとづくコンセンサスを取りつけていくことが重要である。潮流の一つとして、陸上で発生するマイクロプラスチックの発生源の公平な見える化がある。現時点では独国ブラウンホーファー研究所による 2019 年の排出量評価書が、定量化シナリオが精緻で優れた報告である。地上での発生シナリオを定量的にシミュレーションし、1 次マイクロプラスチック発生量をトップ 30 まで網羅的にリスト化している（図 3-4-4）。マイクロプラスチック発生量は、多い順に自動車タイヤ、廃棄物漏えい、摩耗アスファルト、プラスチックペレット損失との報告だ。マイクロプラスチック排出量上位は、すべからず非意図的な排出であり、磨耗などで発生する 1 次マイクロプラスチックが、陸上でのマイクロプラスチック発生源の 95%以上を占めている。それに対して、意図的な添加による発生量は 5%未満と集計されている。マイクロプラスチック問題を地上からどう制御するかという視点に立てば、非意図的なマイクロプラスチック排出をどう制御していくのが本質的な課題となる。



図 3-4-4

もう一つの潮流は、そもそも海洋プラスチック汚染の増加量をいかに制御するかだ。G7/G20 の政治主導枠組みで、こちらも世界中の英知が結集されつつある。人口の多い開発途上国の中の、

ごみ処理に失敗している国々で、プラスチックごみの海洋流出量が桁違いに多い（図 3-4-5）。先進国はごみ処理で大部分は制御できており、途上国と比較すると排出量は限定的と言える。海洋プラスチック汚染は、プラスチックごみ（及び 2 次マイクロプラスチック）、非意図的 1 次マイクロプラスチック（タイプ B）、意図的 1 次マイクロプラスチック（タイプ A）の 3 つに大別できるが、3 つの海洋排出量を比較すると、結局ごみ由来が圧倒的に多い。次に磨耗系の非意図的マイクロプラスチックがあり、意図的な用途のマイクロプラスチックというのは量的にはマイナード。海洋プラ汚染の解決がリスク管理の本質的な目的であるならば、焦点はごみ処理問題の解決に各国がどう取り組むかにかかってくる。人口が多い開発途上国でのごみ処理システムを適正化できない限り、グローバルな海洋プラスチック汚染量の増加は抑止できない。同時に、意図的 1 次マイクロプラスチック（タイプ A）のみを制限する REACH マイクロプラスチック規制案は、海洋プラスチック汚染量低減には寄与がほとんど無い。

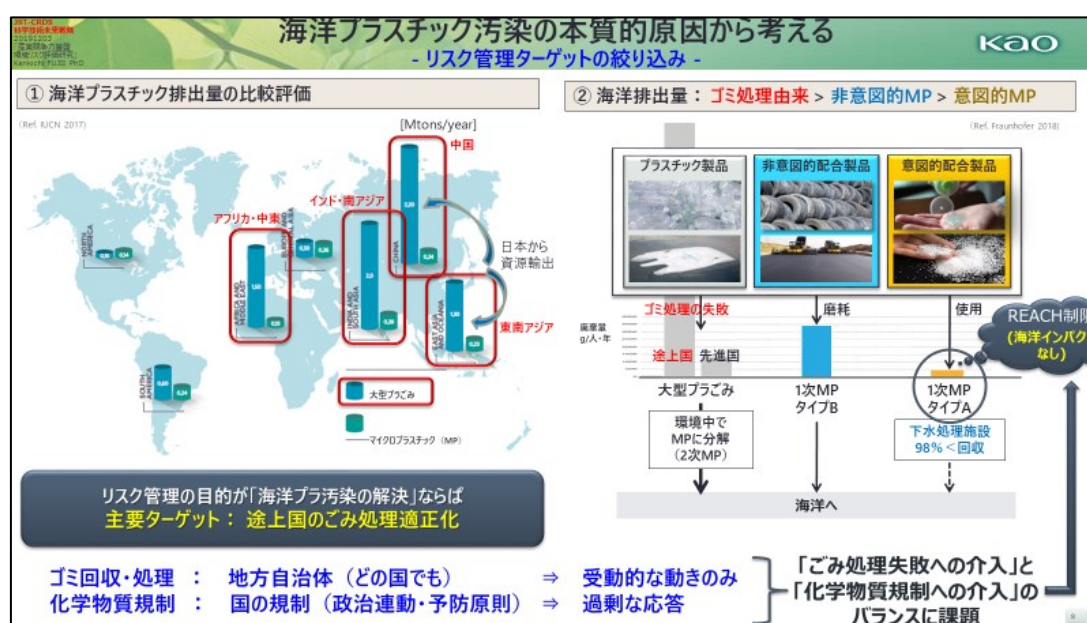


図 3-4-5

次に、下水処理場でのマイクロプラスチックリスク管理の有効性について、現在の知見を概説したい。実は、マイクロプラスチックは形状のいかに依らず、下水処理工程で捕捉される、との結論だ。既に 10 報以上の論文で共通の結論になっており、ほぼコンセンサスになっているが、世界諸国に比べて、日本では余り周知されていないのが課題かもしれない。図示のとおり、下水処理場へのマイクロプラスチック流入量と処理後の流出量とを比較すると 98%以上が捕捉されている。様々な下水処理の方法があるが、特に優れている膜バイオリアクター処理は 99.98%の捕捉率という水準だ。マイクロプラスチック環境排出を制御する、というリスク管理手法として、下水処理工程は極めて有効であり、この点は WHO の 2019 年マイクロプラスチック評価書でも言及されている。下水処理の人口カバー率の高い日本では、家庭排水や工場排水由来の微量なマイクロプラスチックは下水処理場のおかげでほとんどを捕捉できており、環境排出は制御されていると考えられる。リスク管理者の視点から見ると極めて有用な情報で、制御していく視点から見ても下水処理こそが重要なのではないかな。

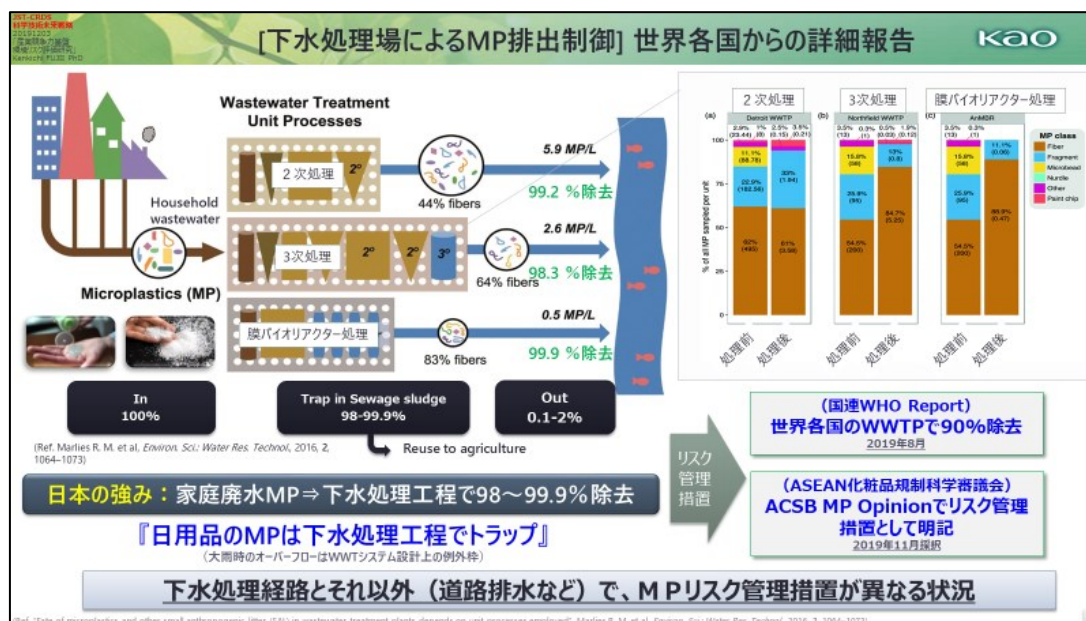


図 3-4-6

食物連鎖の懸念についても、冷静な理解が必要だ。経口ルートでマイクロプラスチックは消化管に入る。ただし、消化管は解剖学的には体外であり、消化管から吸収され脂肪組織や骨などの臓器に濃縮された場合に生物蓄積性があるとみなされる。ナノサイズのものを除くと、固形マイクロプラスチックは消化管吸収はなく、基本的には口から入り排泄されるまで消化管に滞留するだけだ。食物連鎖の中で、上位捕食動物へ消化管から消化管へ捕食移行があっても、生物濃縮性（Bioaccumulation）とは定義が異なっており、区別すべきである。消化管を詰まらせるような大型プラスチックはマイクロプラスチックというよりプラスチックごみのカテゴリーであり、リスク管理手段が異なってくるはずだ。



図 3-4-7

マイクロプラスチックの環境リスク評価を PEC/PNEC に落とす手法については、2019 年に Burns という若い研究者が優れたシステマティックレビューを出した。マイクロプラスチックの水生生態系に対する予測無影響濃度 PNEC は、サイズごとに分類され包括的に見積もられている。環境中での予測環境濃度 PEC と予測無影響濃度 PNEC があれば、マイクロプラスチックの定量的環境リスク評価も可能となる。Burns は、SSD (Species Sensitivity Distribution ; 種の感受性分布) も、既に評価しており、現行の水環境に流出したマイクロプラスチックは、水生生態系に対して影響を示す濃度レベルではない、とのリスク評価結果であった。このシステマティックレビューは、2018 年までのマイクロプラスチックに関する種々の研究報告を網羅的に組み込んだ挑戦的な研究で、先駆的な報告と言えよう。

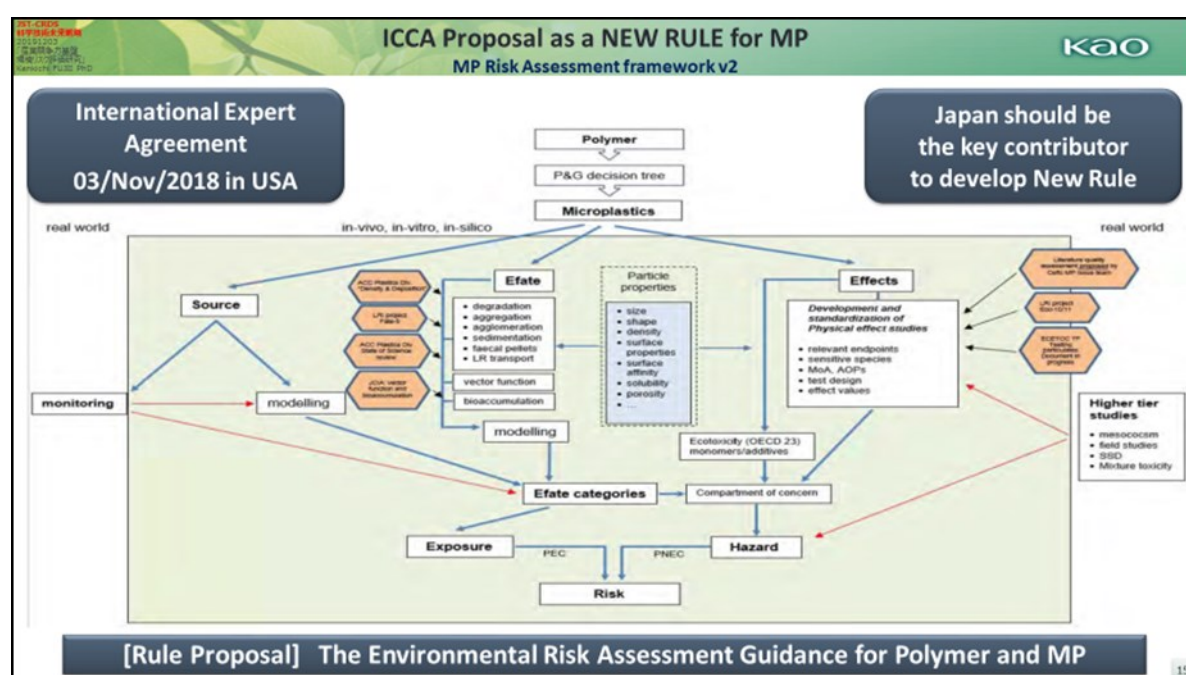


図 3-4-8

私の研究チームも参加した ICCA 専門家会議で検討されたマイクロプラスチック環境運命を考慮したリスク評価樹を示す (図 3-4-8)。マイクロプラスチックの複雑な環境影響を全体で組み込みつつ、中長期的な時間軸での環境運命を無視せずに、マイクロプラスチックの環境懸念をリスク評価するべく、既存の環境リスク評価を拡張しており、強い挑戦意欲があらわれた内容になっている。わからないことの多い課題ほど、定量的なリスク評価にチャレンジするべきである。

【質疑応答】

Q: ストローはしっかりとごみ処理できていれば素材の問題ではないはずで、言及された通りだ。別の観点でのコメントだが、脱プラスチック化の流れは、CO₂ 排出にも関係している。ほかの物質にすれば CO₂ 排出が総量で減るかどうかわからない、輸送するときの製品重量が重くなって CO₂ を増やすことにならないか、そういった全体の視点での評価が必要だという問題意識がある。また、非意図的な排出の指摘も非常に重要だ。日常状態での非意図的な排出だけでなく、非日常状態での非意図的な排出もある。我が国では、東日本大震災にともなう津波で大量の

れきが海洋流出した。非意図的な発生は日本だけではなく、世界のどの国でも起きる。自然災害発生時には、ごみ収集などができなくなるので、代替選択肢の検討が重要となる。日本の下水処理は非常に優れているが、災害時や豪雨時に処理できず、放流せざるを得ず、マイクロプラスチックも捕捉できず環境に流れてしまう課題がある。定常状態と災害時の二段構えの対応が重要だと考えている。

A：海洋プラスチック汚染の低減と、CO₂ 排出抑制は、2 つの独立したリスク管理の目標であるため、解決に向けたリスク管理措置も異なる。今後のプラスチック政策が、どちらの目標のためのリスク管理措置なのかは、意識的に区別した方がよいと思う。目的と手段の合致している時に、そのリスク管理は妥当とみなされるので。

Q：図 3-4-8 の評価モデルはどこまで開発できているのか、枠組みの段階か、実際に手法として具体的なモデル化まで進んでいるかといった点を、さらに詳しく教えてほしい。

A：この図はコンセプトを示している。リスク評価する場合、どこまでをスコープにするのかはコンセプトとして最初にあったほうがよい。その上で、具体的にどのあたりに流出していくのか、海にいくのかに合わせてシミュレーションの中で焦点が変わってくる。このスコープのポイントは、環境運命をしっかりと包括的に見るということ。最後の PEC/PNEC に至るための取舍選択を、非常に幅広いスコープで見ている。マイクロプラスチックやプラスチック全体の複雑な部分もカバーできる評価をすべきだという考え方が埋め込まれている。

3.5 コメンテーターからのご意見

鳥村政基（産業技術総合研究所環境管理研究部門 副研究部門長）

マイクロプラスチックの分析機器開発の観点からコメントさせていただく。本分野の大きな問題はマイクロプラスチックを計測する方法である。具体的には、図 3-5-1 にて赤枠で示した μm オーダーでのハイスループットスクリーニングや、生体影響評価に関連する nm オーダーに良い計測技術がないという点が挙げられる。この二つのオーダーでの計測技術開発がポイントであり、産総研でも注力して研究開発を実施しているところである。

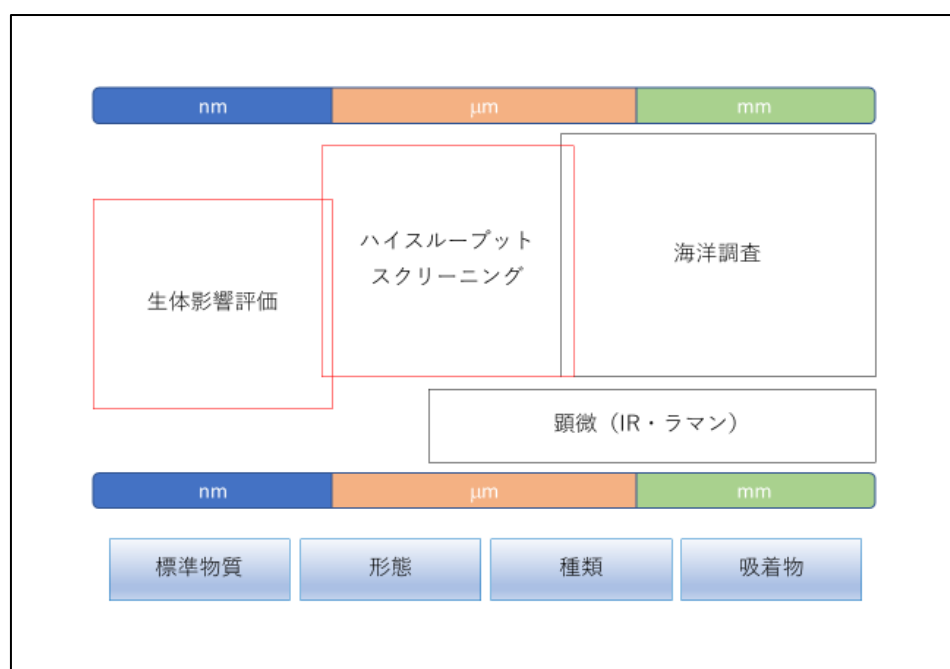


図 3-5-1

しかしながら、技術開発において注視しなければならない点がある。一つは計測するに当たっての標準物質であるが、標準物質が準備されなければ計測がスピーディーに進まない点である。もう一つはマイクロプラスチックの形態（凝集している／していないのか）と種類について、 μm オーダーや nm オーダーまで分析するかという点である。特にマイクロプラスチックのサイズが小さくなると吸着物の体積比が小さくなることから、これらの点も非常に重要ではないかと考える。現在、IR 顕微鏡やラマン顕微鏡でプラスチックの種類の特定が可能となっているが、さらに小さなオーダーでの分析は今後、日本が総力を挙げて技術開発を進めなければならないと考える。

日向博文（愛媛大学大学院理工学研究科 教授）

マイクロプラスチックの実態把握・予測の観点からコメントさせていただく。マイクロプラスチックの将来影響予測のためには、海洋プラスチック輸送モデルの開発と、モデル検証のための長期データの整備が重要であると考えている。

まず、海洋プラスチック輸送モデルについてである。図 3-5-2 に示したように、輸送モデルには複数のプロセスが複雑に関与している。先ほど津波の話が出たが、津波が起これば海底に沈んだマイクロプラスチックが再び浮遊するという話もある一方で、「Sinking-resuspending（沈降・再浮遊）」のモデリングはまだ十分に出来ていないのが現状である。赤で示した部分（「Degradation process（劣化プロセス）」、「POPs Absorption-desorption（POPs の吸脱着）」、「Additives Leaking（添加物の海中への溶解）」）は海洋学者と化学者とが、緑で示した部分（「沈降・再浮遊」、「Ingestion（摂取）」）は海洋学者と生物学者とがそれぞれ共同し、白で示した部分（「Sources Micro to Macro（供給源（マイクロ～マクロ）」）、「Beaching-Backwashing（海岸への打ち上げ・逆洗）」）は海洋物理学者が取り組まなければならない部分である。

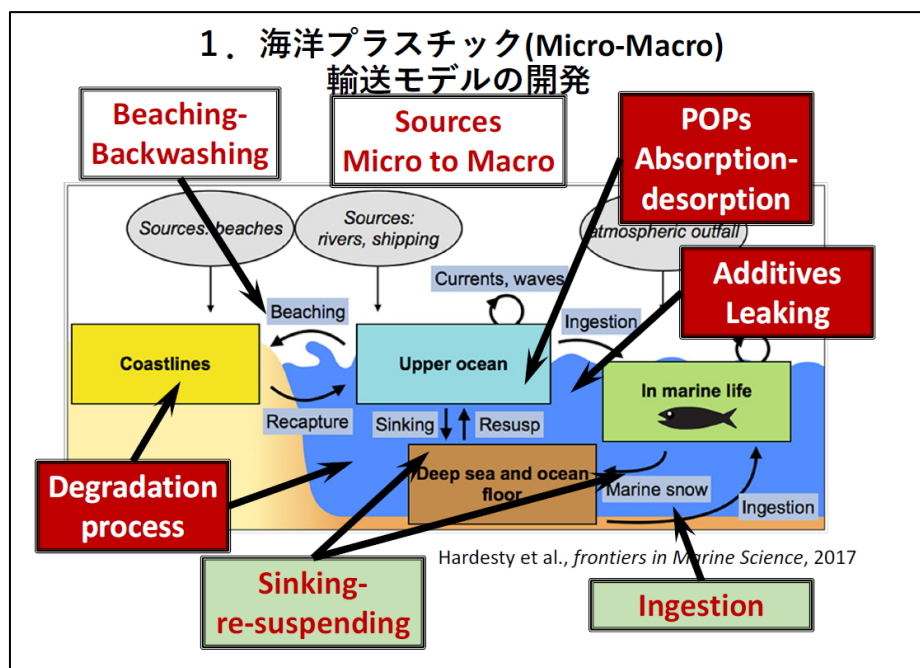


図 3-5-2

次にモデル検証のための長期的データの整備についてである。特に「長期的」であることが非常に重要であるため、過去データの発掘と、連続データ取得の必要性からどのような観測体制を構築すべきかに分けて説明したい。

過去データの発掘について、温暖化問題を例に挙げると、例えば過去の氷床のコアサンプリングやキーリング曲線を用いて、モデルの過去の再現性を検討した上で将来予測を行っており、演繹的に推論することが一般的である。一方、海洋プラスチックの場合は、演繹的に将来予測するための過去データがないため、現在は渦の影響を受けているスナップショットを測り、バリデーションを行った上で将来予測を行おうと試みられている。しかし、スナップショットは時空間的

変動が大きく、それに基づいた将来予測には難しい側面もあり、やはり過去からの長期連続データが必要であると考えます。

過去データをどのように発掘するか、いくつかアイデアがある中で、私は2つ有効であろうと考えています。一つは海底質のサンプリング・分析である。同時に年代測定も行う必要があるため、生物が生存せず、海底が乱されていない貧酸素水塊が安定して存在する海域での採取が必要である。このような場所で測定すると、年代測定結果と合わせて、堆積フラックスが経年的にどのように変化してきたかも再現可能となる。もう一つは世界に16カ所ある国際環境試料バンク (IESB; International Environment Specimen Bank) である。日本では愛媛大学と国立環境研究所にあり、愛媛大学では1960年代以降の鳥類・魚類等の試料が冷凍保存されている。これらの分析によって過去の再現が可能ではないかと考える。

加えて、今後、海面における連続観測体制も整備していく必要があると考えています。プラスチックは大きさによらず中緯度帯のエクマン収束帯に集まることが海洋物理学で明らかとなっている。そのため、このエクマン収束帯付近の島嶼で長期連続モニタリングを実施すれば、二酸化炭素というキーリング曲線に対応するデータが得られ、トレンドが分かるのではないかと思います。

特定離島に指定されている南鳥島や沖ノ鳥島は、北太平洋亜熱帯循環のエクマン収束帯内に位置している。これらの特定離島は国土交通省によって港湾が整備されており、海洋観測も港湾整備のひとつの目的となっている。これらを有効に活用し、連続観測体制を整備していくことが必要であると考えています。

伊坪徳宏（東京都市大学環境学部 教授）

ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点からコメントさせていただく。まず、2019 年 6 月に開催された G20 大阪サミットにおいて、「包括的なライフサイクルアプローチを通じて、2050 年までに海洋プラスチックごみによる追加的な汚染をゼロにまで削減すること」が大阪ブルー・オーシャン・ビジョンとして宣言された。包括的なライフサイクルに注目し、ゴミ問題についてしっかりと対策を取っていきましょう、と政策的合意がなされたことが一つの前提であると認識している。

プラスチックの問題においてライフサイクルというキーワードが出てきたのは、2018 年に国連環境計画から発行された報告書（Mapping of global plastics value chain and plastics losses to the environment）以降である。横軸にライフサイクルを取り、各段階の排出量を見たときに、廃棄段階の排出のみではなく、使用段階における排出が非常に多いことが指摘された。つまりライフサイクルベースでもって取り組む重要性が指摘されたという背景である。

LCA において、既にバイオプラスチック等では CO₂ の LCA 分析が実施されている。図 3-5-3 はバイオプラスチックの LCA メタ分析結果である。縦軸は CO₂ 排出量、横軸に沿って、ポリエチレン（PE）の石油由来とバイオマス由来、ペット樹脂（PET）の石油系とバイオマス由来、ポリ乳酸（PLA）についていくつかの材料の種類（キャッサバ、サトウキビ、トウモロコシ、ミックス）に分けた結果が出ている。PE は同程度、PET はバイオマス由来が若干少なく、PLA は材料の種類によって傾向が異なることが分かる。しかし、これらは廃棄部分、特に燃焼が含まれるか含まれないかという部分で大きく変わってくる。

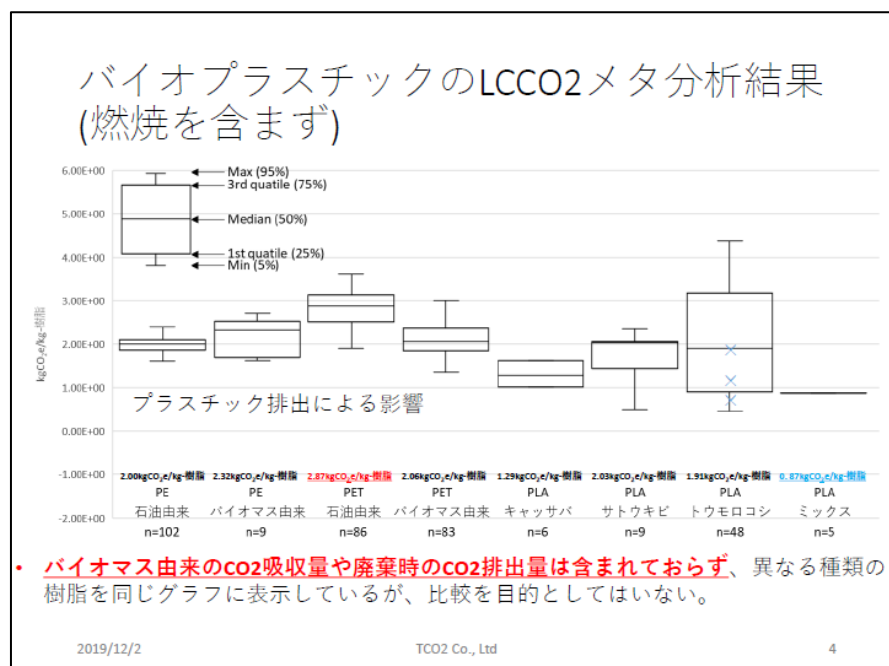


図 3-5-3

燃焼を含んだ結果が図 3-5-4 である。燃焼を含むと石油系の部分が排出量として多くなる。バイオマス由来 PET についても 3 割はバイオマス由来であるが、残りの 7 割は石油系なので、排

出量が増える結果となる。

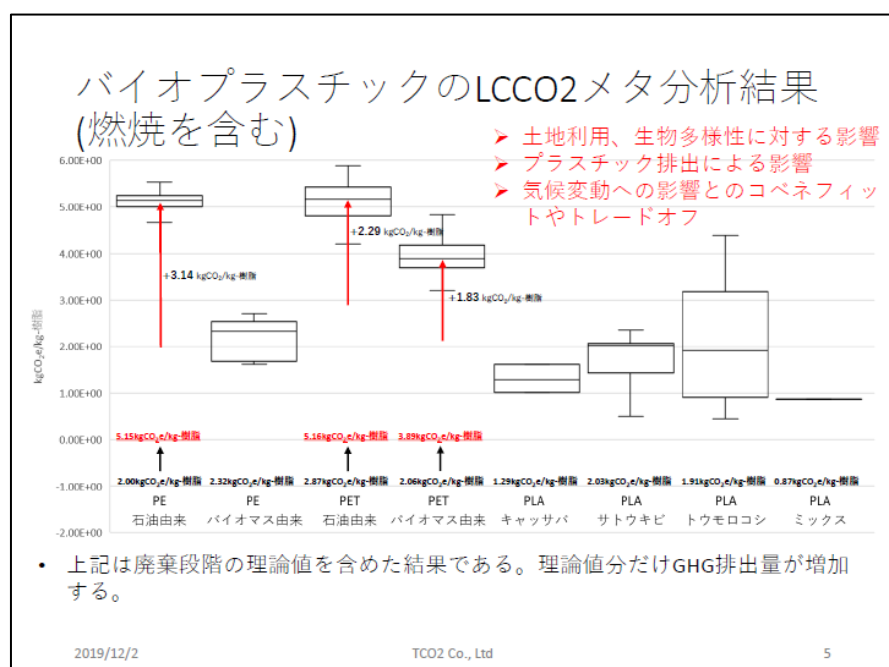


図 3-5-4

CO₂ に関してはある程度、認識が出来てきたが、LCA 分析の中で、土地利用や生物多様性に対する影響についてはまだ十分な分析が行われていない。生分解性プラスチックを使用すれば、恐らく影響は増えるであろうと言われている。また、プラスチックそのものの排出による影響についても、まだ、評価手法自体がない。さらには、気候変動への影響とのコベネフィットやトレードオフについては、LCA 分析がまだ行われていないのが現状である。

我々としては、このようなものを包括的に分析できるような評価手法を作りたいと考えている。複数の影響を包括的に分析しながら環境影響を測定し、さらに可能であれば統合していく評価手法をモデル化したものが LIME3 である。このモデルの様々な評価への活用が始まっているが、ここにプラスチック排出による影響を取り入れたいと考えている。

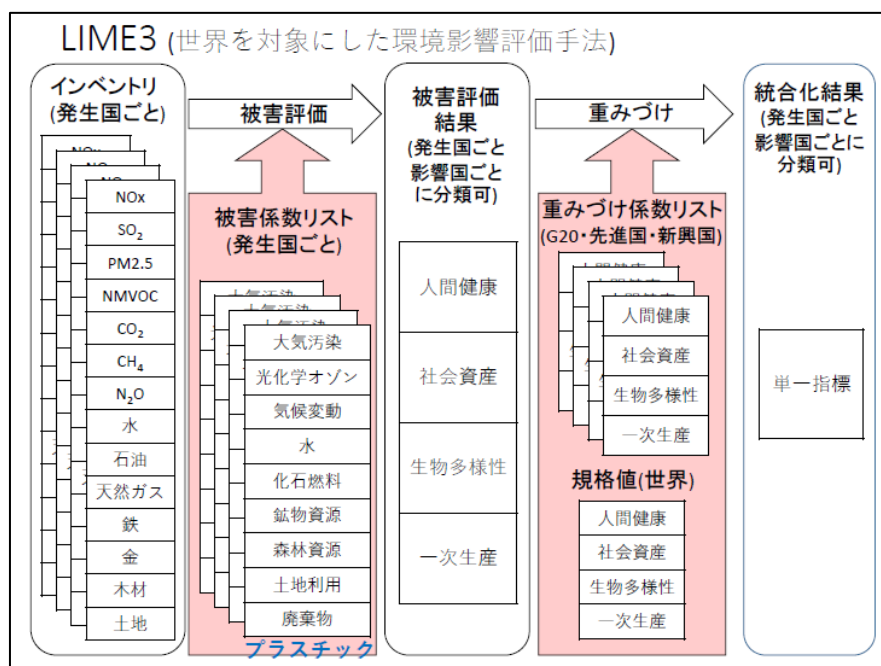


図 3-5-5

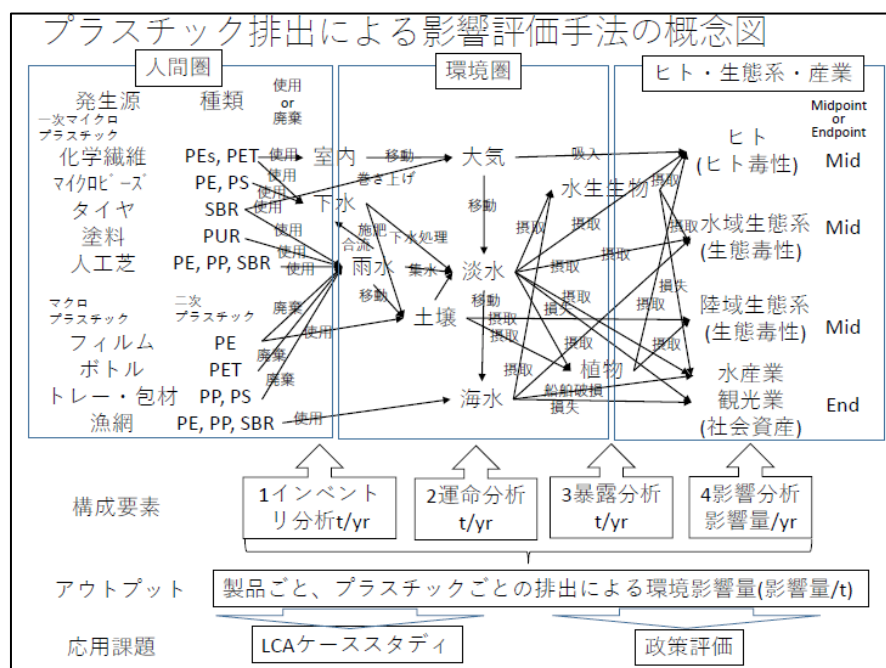


図 3-5-6

しかし、これは簡単にできないことは認識している。プラスチックの排出による環境影響を測る一つのモデルとして、運命分析、暴露分析、影響分析を開発、統合することが求められる。そうすれば、少なくともミッドポイントベースの評価であれば、トレードオフやコベネフィットが検討できる。また、エンドポイントに関する評価を、それぞれ行うことができるならば、これらの間の比較もできるようになる。

LCA の研究については、欧州では既に始まっている。こういった評価手法が、恐らく 2～3 年

程度で具体的に提案されるという状況にある。逆に言うと、これに対応するような評価手法ができていなければ、せっかく新しい素材ができて環境優位性を示すことができないということであり、急いで開発をする必要があると考えている。

その中で、特に排出から環境中の運命の影響と、この一連のプロセスをつなげる評価手法を、まずはハザードベースでもいいので、開発する必要があることを認識している。もう一つはグローバルサプライチェーンをいかにして網羅するかである。その部分の評価手法ができれば、LCAの中でも順次、採用されるであろう。それをもとに、グリーン購入やグリーン調達、最新の新素材の環境優位性が定量的に分析評価できたり、アピールすることができたりすると思う。

平尾雅彦（東京大学大学院工学系研究科 教授）

ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点からコメントさせていただく。海洋プラスチック問題は Jambeck の論文（Jambeck *et al.*, 2015, Science）が非常に強いインパクトを与え、社会的にも関心が高まった。本問題について、神戸大学・石川雅紀名誉教授が「もつれたマリンプラスチックごみ問題を解きほぐす」というタイトルで、一般向けに丁寧に書かれた解説がウェブページ（国際環境経済研究所 <http://ieei.or.jp/2019/06/expl190607/>）に掲載されている。その中で Jambeck の論文にて推計されているプラスチックごみの量の不確実性と、それに基づいてどのような対策が本当は重要なのか書かれており、一読の価値がある。

本日、他の先生方からも話題提供があったように、ヒト健康影響を減らすことが課題であるならば、マイクロプラスチックでヒト健康影響が生じるのか、影響が生じるのであればその程度がどの程度であるのかという点を科学的に理解する必要があると考える。一方で、度々メディアで取り上げられる写真のようなプラスチックの誤飲・絡まりから野生海洋生物を助けたいのか、湾岸に集積するプラスチックは景観として好ましくないことを解決したいのか、解決すべき課題ははっきりしなければならないと思っている。

先程から話題に出ている SETAC の 5 月に開催された欧州会合のプログラムを示す。赤で囲った部分が全てプラスチックに関連するセッションであった。ミジンコなどにマイクロプラスチックを摂取させた結果がどのようになった、マイクロプラスチックがここでも見つかった、といったような内容が多く、私にはほとんど生体毒性はないように見える発表が多かった。無理に、生体毒性があるように解釈しようとする報告も散見し、環境問題に過敏なヨーロッパ的な状況に学術界も置かれているのかとも感じた。

また、SETAC 欧州会合では LCA に関しても議論があった。先程、伊坪教授からも話があったように、これまでプラスチックに関する LCA 分析は多く研究されてきたが、プラスチックそのものの環境排出物としてのインベントリー分析はされてこなかった。これは LCA 研究全体の反省点という点が、SETAC のセッション中でも指摘されていた。しかし、プラスチックがどのくらい陸地に行くのか、どのくらい海洋に行くのかというモデリングの報告は多かったが、そのモデルで分析するためのデータをどのように取得するのかは全く示されていないように思われた。

SETAC Helsinki – SETAC Europe 29th Annual Meeting のプログラム

	Monday 27 May		Tuesday 28 May		Wednesday 29 May		Thursday 30 May	
	AM1 8:30 – 10:00	AM2 10:00 – 12:25	PM 13:00 – 15:30	AM1 8:30 – 10:00	AM2 10:00 – 12:25	PM 13:00 – 15:30	AM1 8:30 – 10:00	AM2 10:00 – 12:25
Session 103 AB	3.09 - Micro/NanoPlastics: Sources, Fate & Analysis		3.09 - Micro/NanoPlastics: Sources, Fate & Analysis	1.06 - Nanoplastics: Ecotoxicology	3.16 - Nano-Materials Fate & Toxicity	3.16 - Nano-Materials Fate & Toxicity		3.02 - Chemical Exposure via Plastics
Session 103 CD	4.07 - Effect Modeling		4.08 - Fate & Effects of Metals	4.01 - Soil Ecology & ERA	4.01 - Soil Ecology & ERA	2.07 - Behavioural Toxicology		3.15 - PFASs
Session 103 JA	1.07 - Endocrine Disruption in Invertebrates		1.09 - Fish Model Species		1.10 - Endocrine Disruption Testing Developments		2.09 - Individual Variation in Ecotoxicology	
Session 218	8.02 - Hazards & Risks of UVCBs		4.03 - Identify Chemicals of Greatest Concern	3.03 - Complex Mixtures: Monitoring & Assessment	1.08 - Epigenetic & Endocrine Effects	4.09 - Chemical Mixtures		8.04 - One Health
Session 112	4.13 - Regulation of Biocides, Pesticides & Pharmaceuticals		4.10 - Antibiotic Resistance	3.10 - Pesticides Fate & Exposure	2.03 - Bees, Bugs & Beneficials in ERA	1.01 - Chemicals & Microbiomes		1.03 - Bio-transformation & Excretion Rate
Session 203	8.01 - Ecosystem Services		8.07 - Impact of Values in Science	8.06 - Substitution of Chemicals of Concern	8.02 - Advancing Chemical Substitution	3.13 - Organic Micro Pollutants in Urban Waters		8.03 - Equal Opportunities in Science
Session 204/205	3.01 - Organic Pollutants in Aquatic Systems		3.05 - Trophic Ecotoxicology	1.11 - Wildlife Ecotoxicology	2.04 - Climate Impacts on Polar & Alpine Ecosyst.	3.12 - Chem Exposure over Spatial & Temporal Scales	3.05 - Dumped Munition Sites	4.15 - Oil Spills
Session 103 JB	5.06 - Sustainability of Circular Economies		5.02 - Natural Resources in LCA	5.05 - LCA	5.01 - Bio-Based Industries	5.03 - Improve Decision Support Beyond Standard LCA		5.07 - LCI Data Collection & Modeling
Session 201	3.08 - Env Analytical Chemistry		4.06 - Difficult to Test Substances & Wastes	3.19 - Sustainable Development of River Sea Systems & Coastal Areas	2.10 - Aquatic Environment Under Global Change	4.17 - Wastewater	6.01 - Assessment of Social Impacts	Closed Meeting
Session 206	4.11 - Remediation of Contam. Environments		8.05 - Socio-Economic Analysis in Policy Regulation	2.02 - Plants	6.04 - EFSA Guidance Doc on Bees & Materials	4.16 - Statistical Science & Ecology	6.03 - Balancing Social Equity, Ecology & Economics	4.02 - Bayesian Network Models for ERA
								3.17 - Emerging Contam. Prioritizing in Env Quality Exposure
								2.08 - Ecosystem Functioning in Env Quality Assessment
								7.01 - Coastal Ecosystems of Northern Europe

東京大学 THE UNIVERSITY OF TOKYO 平尾雅彦

図 3-5-7

これまでの LCA 分析では、確かにプラスチックそのものが環境に出ていく、LCA 分析のシステムバウンダリーの外に出ていくということは考えていなかった。私もリサイクルの評価を行う際に、リサイクルされないプラスチックは燃焼しているか、安定的に陸地上に残っていると判断していた。環境流出フローを定量化する研究が必要であると考えた。

また、どのようなプラスチックのフローを定量化すべきかの検討を行うべきである。欧州では容器包装プラスチックが非難されているが、一方で、SETAC の中でも洗濯機の排水からの繊維状マイクロプラスチック排出量を計測したり、マイクロビーズやタイヤからの粉塵を計測したりしている。タイヤに関しては、WBCSD (World Business Council for Sustainable Development ; 持続可能な開発のための世界経済人会議) の中にタイヤ製造企業によるタイヤインダストリープロジェクトがある。その中で、具体的にどのくらい、どういうところにタイヤ由来微粒子が流れ出ているかを実測する研究がなされている。研究を実施していること自体は公表されており、一部の成果は論文やレポートとして公表されている。プラスチックの問題は、各産業分野に大きな影響を与える割には、実測することでどのくらい消費者や社会に理解を得られるかは分かっていない。

影響評価の話は本日多くの議論があった通りで、リスクの話と類似的であり、どのように進めていくべきかが明確になっていない。また、マイクロプラスチックに有害化学物質が吸着し、それが生物濃縮を経て生体毒性になるという話をされる方もたくさんいる。これも科学的な事実を明らかにする必要がある。このような分野も研究として必要ではないかと考える。

これも話題に挙がったが、プラスチックを他の素材へ代替した場合の影響も検討する必要がある。様々な視点があるが、例えば、LCA 分析をすれば、同等な袋の製造であれば紙製の方がプラスチック製より温室効果ガス排出などの環境負荷が高い。プラスチックを紙にすることや、先ほど話に出たガラス瓶に変えることはどうなのだろう、と LCA 的な立場としては考える。

また、生分解性プラスチックについても先ほど話題に出たが、製造にともなう温室効果ガス排

出はそれほど高くない。しかし、海洋に流出してからの分解過程、分解速度、分解生成物の研究はまだ発展途上で、ライフサイクル全体からの影響としての総合的な計算は難しい。先ほど伊坪教授が話されたように、手法としてどのように研究していくのかという問題がある。さらに、生分解性プラスチックは土壌中では一部はメタン発酵して温暖化係数が高いメタンを生成するために、環境負荷が高い。そのため、ヨーロッパにおいてコンポスト化していることは、環境負荷は相当高いと考えるが、ヨーロッパ的発想で焼却は敬遠されている。コンポストならばよいであろうという考えだが、きちんと科学的に判断すれば、温暖化に関して環境負荷が高い処理を実施していることになる。

植物由来プラスチックについても、原料としての植物をどうやって確保するかなど、ライフサイクル全体で様々な課題がある。このような課題を整理して、どういう研究をやっていくかという議論をまさに今日のような場で進めていく必要があると考える。

高原 淳（九州大学先端物質化学研究所 教授）

先日ロンドンで開催された Chemical Sciences and Society Summit、通称 CS3（国際化学サミット）で議論された内容について共有したい。

CS3 は化学の領域で最先端の化学者が集まり、世界が直面する重要課題を取り上げて、少人数で解決に資する糸口を探り、その成果を広く公表することを目的とした会議体である。日本の他、英国、ドイツ、中国、米国の主要化学会と各国のファンディングエージェンシーの全 10 機関で構成されている。今回、諸事情により米国は不参加となったが、日英独中の 4 ヶ国が参加、重要課題として「Science to Enable Sustainable Plastics」が取り上げられた。サブテーマとして「New plastics」「Recyclability of plastics」「Degradation of plastics」「Measuring the impact of plastics」の 4 つが設定され、サブテーマ毎にキーノートとポジショントークが 3～4 件という構成である。総勢 35 名くらいで 3 日間にわたる議論が行われた。

私自身の専門が高分子化学で、高分子の力学的劣化や高分子表面界面の研究を行っていることから、今回の CS3 の日本メンバーのリーダーを務めさせていただいた。

最初の「New plastics（新規高分子）」では、二酸化炭素を固定化した高分子やバイオベースの新規高分子などの新しい高分子について議論が行われ、日本からは、東工大の佐藤浩太郎先生にバイオベースの新規高分子について講演していただいた。

2 つ目の「Recyclability of plastics（リサイクル）」では、東北大の吉岡敏明先生から動脈と静脈の産業のインテグレーションと、ケミカルリサイクルのプロモーションについて発表いただいた。ドイツの研究者からは紙の接着剤や紙のコーティングがリサイクルを非常に難しくしているという話があった。

3 つ目のセッションは「Degradation of plastics（分解性）」ということで、生分解性ポリマー全般に関して中国の Wang 先生が発表された後、理研の沼田圭司先生が高分子特有の階層構造の影響、高分子は均一層ではなく、結晶、非晶などいろいろな構造がたくさんあり、通常は非晶のほうが分解しやすいことや分子量の効果によって分子量が小さいものと大きいものでは全く性質が異なること、成型条件でも性質が異なるといった講演をされた。このセッションでは特に生分解性についての議論が多かった印象である。

最後のセッションは本日のワークショップのテーマとも関係が深く、「Measuring the impact of plastics（プラスチックの環境負荷への影響）」ということで、英国の Galloway 先生がいろいろな生物的な影響について講演された。その後、ドイツのバイロイト大学の Laforsch 先生から、マイクロプラスチックは海だけではなく、河川や湖、土壌にもかなりの量が存在するというお話があった。その後、日本からは愛媛大の日向博文先生から海洋プラスチックの動態シミュレーションのお話と、私からマイクロプラスチックの物性評価とそれに伴う問題点について発表した。

特にこのセッションの中で注目すべき点として、中国では農業用マルチシートがないと農業の効率がよくならない状況で、その廃棄問題をどうやって解決していくべきかという発表があった。現状では、ポリエチレンの薄いものを大規模な農業でも実際に使っており、廃棄する際には現場で燃やしている、ということであった。

最終日にはサブテーマ毎に提言のような形でまとめた結果を発表し合った。

「New plastics（新規高分子）」に関しては環境負荷、リサイクルを考慮した高分子設計が重要ではないか、ということと、オンデマンドの分解、つまり、分解したいときに分解させるために

必要なサイエンスを構築すべき、という内容であった。

「Recyclability of plastics (リサイクル)」では、サステイナブルあるいはエネルギー消費の少ない高分子のリサイクル法を3段階で開発してはどうか、ということが提案された。1段階目は物理的な手法によって単一成分高分子にまで分離したものをリサイクルする。2段階目は単一成分高分子をさまざまな高付加価値化学物質へ転換したりモノマー化する、3段階目はポリマー複合材料の連続的、選択的化学リサイクルによる有用物質生産のための化学を開発する。ただし、3段階目に限っては単一成分ではないため、どうやってリサイクルしていくかという課題が残っている。さらに、ここでもオンデマンド分解、つまり必要でなくなったら分解する高分子の開発が挙げられている。前提としては、シングルユースのプラスチックはここでは対象には含めていない。

「Degradation of plastics (分解性)」に関しては、生分解性という呼び方を環境分解性高分子(EDP; Environmentally Degradable Polymers)と呼ぶようにしましょう、という提案があった。これは、分解には生分解だけではなく、pHによる分解や光分解なども含まれ、結果的に低分子になって環境負荷がなければそれでいいのではないかと、という考えに由来している。現状、一般的に生分解性と呼ばれる高分子は分解能がよくなく、通常のポリエチレンなどのレベルまで達していないため、まずは分解能を向上させて使えるレベルにするための研究から始めることが必要である。また、EDPの基礎化学の必要性、分解生成物の安全性確保なども提案された。安全性に関しては、ポリエチレンも含めたポリプロピレンなどには酸化防止剤などの添加物が多く含まれているため、添加物の安全性も含めた議論が必要ではないかということにも言及されていた。

「Measuring the impact of plastics (プラスチックの環境負荷への影響)」では、ミリメートルからナノメートルまでの異なるサイズのマイクロプラスチックの分離技術とハイスループットの先端分析法の開発が必要である、との提案がなされた。例えば1立方メートル当たりにおそらく100万個以上あると思うが、そういったものをどうやって解析するのか。小さいものを分析する方法が現状では存在しない。単一成分であれば回収すれば分析可能であるが、多成分系になるとどうやって分析するかを考えなければならない。不純物も含まれるため、マイクロプラスチックのデータを集めて大規模なデータ解析が必要になるであろう。そもそも、さまざまなサイズのマイクロプラスチックが異なる環境でどう振舞うかの解析や、さまざまなマイクロプラスチックと分解生成物の化学的毒性の評価、特に粒子そのものの硬さや形状などが毒性にどう影響しているのかといった直接的/間接的評価のための基盤的知見が集まっていない。また、マイクロプラスチックの環境分布経時変化のモデル化とシミュレーションのためのデータ集積も必要である。例えば光分解して力を受けるとどのくらい小さくなるのかというデータも集まっていない。そのようなデータがないとシミュレーション自体もできず、その意味でもデータ集積は急務である。さらに、学際的な領域の研究者の育成と社会への啓蒙、すなわち、社会へ現状をきちんと伝える機会を化学者として持つことも必要ではないか、との提案があった。

4つのサブテーマに共通する課題としては、背景となる基礎科学が余りにも貧しく、確立されていないことと人材育成が必要である点である。このあたりをうまくまとめたホワイトペーパーを来年5月ぐらいに公表する予定である。

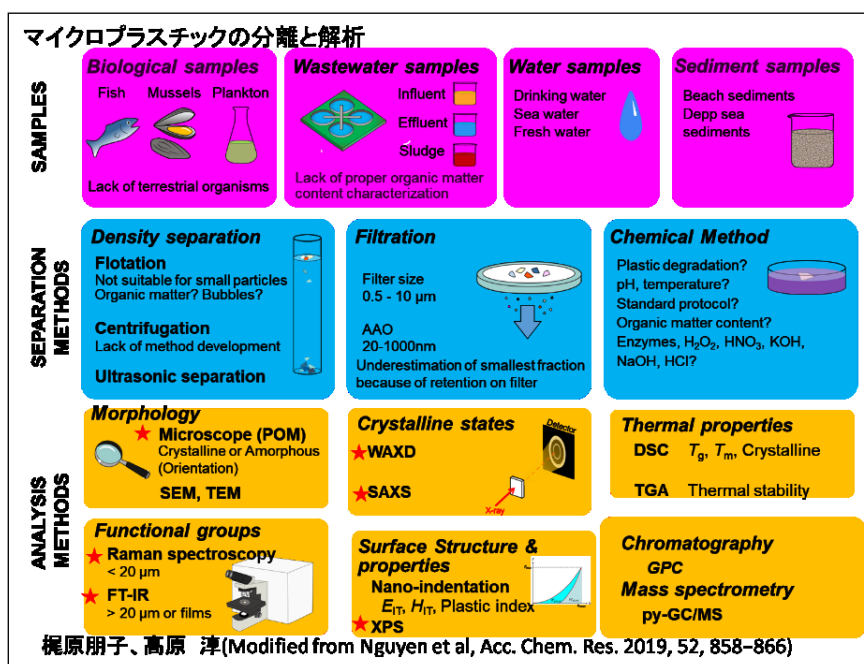


図 3-5-8

3.6 総合討論

- 3点についてコメントをいただきたい。

まず ICCA Proposal as a NEW RULE for MP のフレームで、我が国でもプロジェクトを実施することがありうるのか、それよりもパーツを徹底的に実施するということがありうるのか。

次にハイスループットスクリーニングが一つのボトルネックになって生体影響評価に到達できないのではないかと指摘に対しては、例えばある種のモデルなどを使うという方法もありうるのではないかと。実地での生体影響評価も重要であるが、研究室でもモデルを使用するなどやれる部分があるのではないかと。本当にボトルネックであり全くできないということなのかについてご意見を伺いたい。

3点目は影響評価について、一連のプロセスを繋げた評価が必要とお話があったが、これについてこれからどういう知識が必要なのか、あるいは今あるのかというところをお伺いしたい。

- ICCA がリスク評価のガイダンスコンセプトをつくったのは、リスク評価者及びリスク管理者の視点から見たとき、新興リスクが評価のフェーズに入らない段階から、さまざまなハザードが乱立するということが歴史的に繰り返されているからである。

マイクロプラスチックに関しては、既存のリスク評価の枠組みで太刀打ちできないのであれば、その評価がふさわしいものになるように新しいものをつくらなければいけない。試行錯誤でもまずプロトタイプをつくって走らせてみて、足りない部分が明らかになれば改定していけばよいという形で枠組みが作られた。私が関わっている中でも4～5回改定されている。

大枠ではほぼコンセンサスができていたところ、この案件は PEC/PNEC にきちんと落とせるはずだとプロとしての感覚を持っている。環境影響として懸念されて、環境運命としてずっと残ることが問題視されていて、環境中で分解しないために止まってしまうと、出してはいけないということにしかない。結局、ゼロを求めてひたすら排出を削減していくという話にしかない。

しかし、それは国際的な解答でも着地でもなく、時代が求めている答えでもないはずである。従って、どの程度だったら許容できるのかという本来のリスクの世界に立ち戻るためには、PEC/PNEC に落としこむ必要があり、化学物質の特殊形であるのでできるはずである。コアコンセプトとしてこの部分がすごく大事な部分ではないか。

いろいろな PEC、PNEC が出てきてもよいと考えている。添加物に関心の高い人から見た場合の PNEC、ポリマーの形状を見た場合の PNEC 等、いろいろなシナリオで世界中から出てくることは大変結構である。その中で最も高感受性のシナリオというのも、コンセンサスベースでいずれ出てくると思う。枠組みとコンセプトを共有して、それぞれの視点からフローを回してみればよいというのが、一番使っていただきたい使われ方である。

- 道田先生のご発表で、スナップショットで海洋表層からどれくらいのところにどんなサイズがあるかというのをまず知りたいというのが大変わかりやすい例である。つい最近、紅茶のティーバッグをお湯につけると 10 億個のナノパーティクルが出るという報告が注目されたが、どう計測しているのかというと、SEM によって何億分の 1 のパートを見て、そこから掛け算して 10 億個と出している。あるいは、現状、プラスチックかそれ以外の粒子かを見分ける技術としてエック

ス線を使った方法がある。

ただし、道田先生の発表に戻ると、ダイナミクスをそれらの技術で追いかけるのは無理であり、まして海洋の様々な粒子が混在している中で、プラスチックだけを選択的に追跡する技術は新たにつくらざるを得ないという状況であるが、それが将来的な技術かという、そうではないと思う。今の技術をより発展させる形でできると考えており、今、日本の計測機器メーカーと検討を進めている状況である。

- 認識としては LCA の影響評価手法は、ミッドポイントとエンドポイントと二つあり、ミッドポイントのほうは例えばヒト毒性、生体毒性についてはハザード比で出すのが主である。従って、その枠組みをプラスチック構成の評価に入れ込めば、恐らくできるであろう。先ほどの藤井ディレクターの話に出てきたモデルは大変近いと認識しており、ここを具体的に進めていけば LCA のプラスチック汚染に関するミッドポイントレベルの評価は可能であると思う。

エンドポイントは、例えば生態系の個体数にどう影響するかであるとか、絶滅リスクに対してどう影響するかというのは、LCA 研究では一つの重要な研究課題になっているが、どの部分にどんな具体的な被害があるのかという話になるので、ここはまだ乖離があると認識している。

従って、まずはミッドポイントレベルについての分析方法をつくる。そのモデルについては、水の場合は水文学の循環モデルなどを利用して評価するのがよいと思う。LCA の毒性のモデルは、シンプルボックスモデルのようなラフな感じでハザード比を求めるということが採用されているので、まずはファーストステップとして結果を出すというのが重要である。その後、より詳細なモデル、エンドポイントについての検討に踏み込んでいけば、次の新しい知見が得られると思うが、現在はファーストステップの部分についても何もない状況のため、そこに早く取り組むことが重要である。

4 第二部

4.1 「リスク評価・法・予防原則」

赤淵芳宏（名古屋大学大学院環境学研究科 准教授）

本日は、法と（環境）リスク評価のかかわりについて、および、予防原則とリスク評価とのかかわりについてお話しする。

まず、法とリスク評価とのかかわりについてである。前提として、政府（国家）は、社会全体のリスク管理主体として、社会に現存する（またはそのおそれがある）リスクに付随する科学的な不確実性を可能な限り縮減するべく、リスク情報の生成あるいは収集を行うが、その全てまたは一部が、いわゆるリスク評価と呼ばれる科学的な営為であると理解している。

国家法を念頭に置いて、法とリスク評価のかかわりを考える。両者のかかわりにはいくつかの側面があるだろうが、そのうちの1つに、リスク評価の実施に関するものがある。例えば、リスク評価を実施するための組織の設置は、例えば国立大学法人であれば国立大学法人法という法律に基づいて行われている。そうした組織に対するリスク評価の実施に関する事務の配分も、こうした組織法と呼ばれる法律に基づいて行われる。人員や金銭（予算）といった資源の配分についても同様である。補助金の交付には法律は必ずしも必要とされないというのが、行政法学における通説的な考え方であるが、実際には法律に基づいて補助金が配分されることもある。

リスク評価の実施と法とのかかわりのうち、中心となるのは、リスク評価の実施の指示である。違反に対してさまざまなサンクション（とりわけ行政刑罰）が用意される強行的義務としてそうした指示が行われる場合もあれば、サンクションが附帯されていない努力義務として指図されることもある。

このほかに、法とリスク評価のかかわりとしては、実施されるリスク評価が何らかの科学的な妥当性を確保するために、法がそれなりの役割を果たしていることがある。例えば、リスク評価の内容、あるいは手続の設定に、法が関わっていることがありうる。また、リスク評価を実施するに当たっての条件の設定にも法との関連が考えられる。

先に挙げた、法によるリスク評価の実施の指示に関する具体例としては、化審法に基づく新規化学物質の事前審査制度における、製造者・輸入者によるリスク情報の提供義務がある。このなかには、法律上は提供が義務づけられていないが、運用上、義務づけられている情報もある。なぜ新規化学物質について事前審査制度を設けることが正当化されるのかについては、いわゆる所管3省（経済産業省、厚生労働省、環境省）の解説によると、化審法という法律はもともとPCBの汚染、いわゆるカネミ油症の汚染を直接の原因として制定されたと言われており、PCBあるいはそれ様の化学物質をいわゆる第一種化学物質として指定して、その製造・輸入等に関しさまざまな規制を行うということであった。

この解説では、さらに、現実的な問題としては、こうした事前審査制度の導入が企業の技術開発意欲をそぐのではないか、我が国の今後の発展の阻害要因とならないかといった懸念があったが、これに対しては、安全性の確認を含めた企業化意欲が事業者に求められ、企業にこうした理解が深まれば、開発意欲を喪失することにはならないのだといったことが、この法律の制定段階において言われていたことが紹介されている。

事後的な対応とは、法的には、問題が発生した後における民事法的な損害賠償や差止めなどが

考えられるが、一度発生した問題に対し、このような事後的な対応をとることは極めて困難である。このことは化審法の制定の契機になった PCB 問題、あるいは現在環境省が対応している PCB 含有廃棄物や石綿などにおいて強く認識されており、オゾン層の破壊物質、温暖化の原因物質などについても同様のことが言えると考えている。オゾン層破壊物質については、知る限りでは訴訟というのは提起されていないが、温室効果ガスである二酸化炭素の排出については我が国でも訴訟が起きている。事後的対応が困難であることは、民事法的な対応のもとでは、そうした物質の使用・排出行為と損害の発生との因果関係を、ある程度の蓋然性（法的には高度の蓋然性）をもって原告側が立証しないとならないが、恐らくそれは事実上不可能であることに由来している。

ひるがえって、リスク評価の実施に当たって法は常に必要なかを考えてみると、一方では必ずしもそうではないようであり、実際にも、これまでに日本でも諸外国でも非法的な試みが進められている。これまでに見られた行政実践の経験から言えそうなことは、私人（事業者）の自発的な提供が一定程度機能した事例もなくはないということである。ただし、これは自己評価であることには留意が必要である。こうした事例としては、アメリカ連邦環境保護庁（EPA）による「高生産量化学物質チャレンジプログラム」、あるいはそれを受けて日本でも行われた「Japan チャレンジプログラム」などがある。

ただ、他方で、私人の自発的な提供のみによっては、政府がリスク管理を行うために必要となる全てのリスク情報を入手することは恐らく困難であって、仮にそれのみによれば、そのための仕掛けはよほど巧妙なものでなければならない。例えば、Japan チャレンジプログラムでも、事業者による情報収集が期待された化学物質のうち、実際に情報収集が行われたのは6割程度である。この6割をどう評価するかというのは立場によって異なり得るであろうと考えられる。ナノマテリアル関連では、EPA による「ナノ材料スチュワードシップ・プログラム」は、ほとんど機能しなかったという評価が EPA 自身でなされている。それは恐らく当たり前といえれば当たり前である。アメリカの環境法学者である Wagner の 2004 年の論文では、調査費用が高く、調査したところで明確な結論が出てくるか不明であり、調査したことによって当該市場で優位に立つかどうか不明であるなどの理由から、事業者の多くは、自らの製品や活動の否定的影響に係る情報を進んで生成しようとはしないと言われている。もし危険であることが判明すると、正直者が損をする話になってしまいかねないともいえる。そうした意味で、法がリスク評価の実施に係る外発的な動機を提供することを期待するのは、それなりに意味のあることであると考えられる。

さて、次に、予防原則とリスク評価とのかかわりについて述べる。予防原則とは、科学的な知見が十分に備わっていなくても、深刻かつ不可逆的な被害が発生する場合には、何もしないのではなく、必要な対策をとるべきであるといった法原則である。すなわち、リスク管理者たる政府が、一方ではリスク情報の収集を継続しながら、他方である時点までにおいて収集されたリスク情報に基づいてリスク管理措置を講じなければならないということである。

予防原則に対しては、警戒感を示す人が少なくない。だが、その理解にあたっては、たとえば損害（被害）要件には、通常、それが深刻なものでなければならないとか、あるいは不可逆的なものでなければならないという限定が付されるのが一般的である、といったことに留意する必要がある。また、科学的不確実性要件は、全ての予防原則の定式に組み込まれているが、それは単なる憶測とか仮定であってはならず、相応の科学的根拠が求められている。さらに、個別化、具体化に当たっては法制化が必要になることや、あるいは比例原則による統制が働くことにも留意

が必要である。

予防原則とリスク評価とのかかわりに関しては、予防的措置の暫定性という考え方を強調したい。最近では、順応的な管理、あるいは順応的な統御といった考え方も示されているが、個人的にはわざわざ順応性という言葉を使う必要はなく、それらの多くは従来から論じられてきた予防原則の中で対応することができるのではないかと理解している。予防的措置の暫定性とは、すなわち、それがその後のリスクに係る科学的知見の展開に開かれているという意味であり、一度、予防的な措置が導入されたらそこで終わりというわけではないということである。ただ、こうしたことを理念的に語ろうとしても、実際に機能しなければ意味がなく、そのためには、リスク評価という科学的な営為とリスク管理との間に円環的な構造をつくり出す必要があるのではないかと考えている。それは、リスク評価からリスク管理の継続的な知見の提供、リスク管理措置のフォローアップ、および必要な場合におけるリスク管理措置の見直し（強化、拡大、緩和、廃止）からなるものである。こうした構造のもとでは、予防原則に基づくリスク管理措置が、リスク評価を促進する可能性をもたらすのではないかというのが、私の現時点における試論的な結論である。ただ、別の考え方として、円環的などといわなくても、予防原則それ自体が、リスク評価の実施の責務を私人に課し、また、そのための制度構築の責務を政府に課すのだ、といったことも主張されている。

【質疑応答】

Q：人の健康被害の因果関係が判明することは余りないが、法的にはどの程度までのことがわかれば、科学的な根拠といえるのか。

A：実は、私にもわからない。果たして誰が決めるのかということも難しい。研究者が決めてよいのか。あるいは実際の行政実践の中から各事例を集めることによって、帰納的に何か一定の水準が得られるのかもしれない。

Q：アスベストと中皮腫の関係は判明しており、訴訟にもなっている。さらに、アスベストと肺がんの関連も肺の研究者の見解として聞いたことがあるが、肺の場合はたばこの影響もあり詳細が判明していない。このように、多分関連があるだろうと思っている人が大勢いても、疫学で切り分けるとするのは難しいというのが現実と感じている。

A：訴訟では、いわゆる高度の蓋然性があればよいとされている。裁判官の心証としては大体7割から8割程度確からしいと考えれば、原告の主張は真実だとみなされるが、行政の規制についても同様なのかは結論が出ていない。判決によれば、行政の規制においても、民事訴訟と同様に高度の蓋然性が必要であるというものもある。だが、果たして高度の蓋然性、あるいは裁判官の心証における8割の確からしさというのが、どのような情報、データがあれば、そうだと言えるのかはよくわからない。

Q：環境学的な予防原則はおそらく1992年のリオ宣言で初めて出てきた概念である。ヨーロッパは、マーストリヒト条約で、環境政策に関する基本条件として予防原則をとると決めた。ネオニコチノイドの問題は科学的に後から知見が得られて、予防原則をとっておいてよかったと考えられている。ミツバチの生態の変化との関連が指摘されている問題で、まだ科学的には確定はしておらず、ここ1～2年論文が出続けている状態である。日本でマイクロプラスチックの問題を法的に規制していくときに、誰が、どの省庁がどういうところを分担して、予防原則とうまく調和をとりながらやっていけばよいかという考えがあれば聞かせてほしい。

- A：国際的な予防原則が一気に広まったのはリオであるが、環境法学的には、1986年に西ドイツの政府文書によって公表されたドイツの事前配慮原則という考え方を出発点としているという見方が有力である。マイクロプラスチックについて、現時点では海洋であれば環境省、人の健康であれば厚生労働省というようなことしか言えないが、今後考えてみたい。
- Q：プラスチック戦略は、一つの社会課題としてバランスを取りながら省庁連携で推進することができるのではないか。イニシアティブをとる省庁は法務省がふさわしいのか。
- A：環境問題という観点からは環境省ということになるのかもしれないが、複数の関係省庁の調整や連携を図るという観点からは内閣府ということも考えられるかもしれない。プラスチック戦略が省庁連携で進んでいくかは注視したい。

4.2 「環境毒性学とアカデミアの立場から」

大嶋雄治（九州大学大学院農学研究院資源生物科学部門 教授）

日本の化学物質行政というのは、水俣等の深刻な化学物質の汚染を発端に始まり、化審法やPRTR等の法制が整備された。大学は産業界や行政と一定の距離を置く傾向があった。その後、環境ホルモン問題以降も環境毒性学的知見に基づく研究が続けられてきているが、昨今のマイクロプラスチック問題に対して、研究者コミュニティの反応は薄い。何とか対応しなければならないと思っているが、一つの大きな問題は高分子難分解性物質の管理である。

我が国における環境毒性学の歩み（私見）

- ・ 人類史上に残る深刻な化学物質の汚染を発端に始まった
- ・ 化審法やPRTR等法制が整備
- ・ 大学はやや産業界や行政と一定の距離を置く傾向
- ・ 環境毒性学的知見に基づく化学物質のリスク評価の研究が進行中
（例：複合毒性、内分泌かく乱作用、ナノ物質等）
- ・ マイクロプラスチック問題
（大量に生産された難分解性物質の管理）

図 4-2-1

不正確かもしれないが、通常、化学物質は分解性や毒性などを調べて管理しているが、高分子に関しては「高分子フロースキーム」に従って調べればよいという形になっている。ただ、市場が大きく、社会に必要不可欠な化学物質であるので、賢く使っていかなければならない。そこで環境影響評価がきちんと機能しなければいけないが、余りにもわからないことが多いという問題がある。生態系での運命、影響、分解、相互作用、ナノプラスチック、生分解性プラスチックの生態リスク評価などがきちんとできなければ、本来は管理ができないと考える。従って、知見の可及的な充実と評価法の確立が必要である。ただ、この分野の人材が非常に少なくなっていることは大きな問題である。

プラスチック問題 ー環境毒性学的評価の欠如

現在の化審法：使用量の大きい高分子ー難分解性物質に規制はない
(しかしプラスチックの使用は必要不可欠)

問題点：プラスチックの環境影響リスク評価ができていない！
(知見、評価方法の欠如)

- ・ 生態系での運命？
- ・ 影響？
- ・ 分解？
- ・ 化学物質との相互作用？
- ・ ナノプラスチック
- ・ 生分解性プラスチックの生態リスク評価

知見の可急的充実と評価方法の確立が必要

人材の欠如

図 4-2-2

ここからマイクロプラスチックの生体影響研究について紹介する。メダカに大小のマイクロプラスチックを食べさせると、食べてすぐに蓄積するが、大きいものはすぐに排出される。ただ、 $2\mu\text{m}$ のものは消化管にごく一部が残る可能性が高い。消化管における遺伝子発現も調べてみている。

プラスチック研究の例：マイクロプラスチックの体内動態が不明 ー各種マイクロプラスチックを2週間暴露したメダカにおける体内濃度

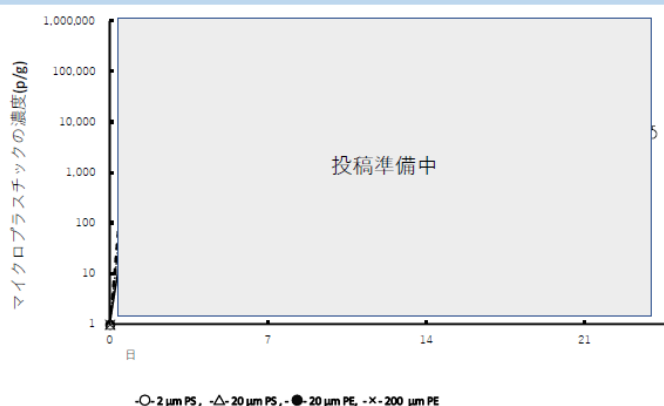


図 4-2-3

また、魚がプラスチックを食べると消化管に取り込まれるが、どういう経路で入っていくのか

をモデルで計算するというのもやっている。飲水を通じて取り込んでいるとも考えられるが、まだ実態は分かっていない。その他にも化学物質がマイクロプラスチックに付着して体内に取り込まれる、取り込まれないという議論があり、それについてもモデルでの計算を試みている。

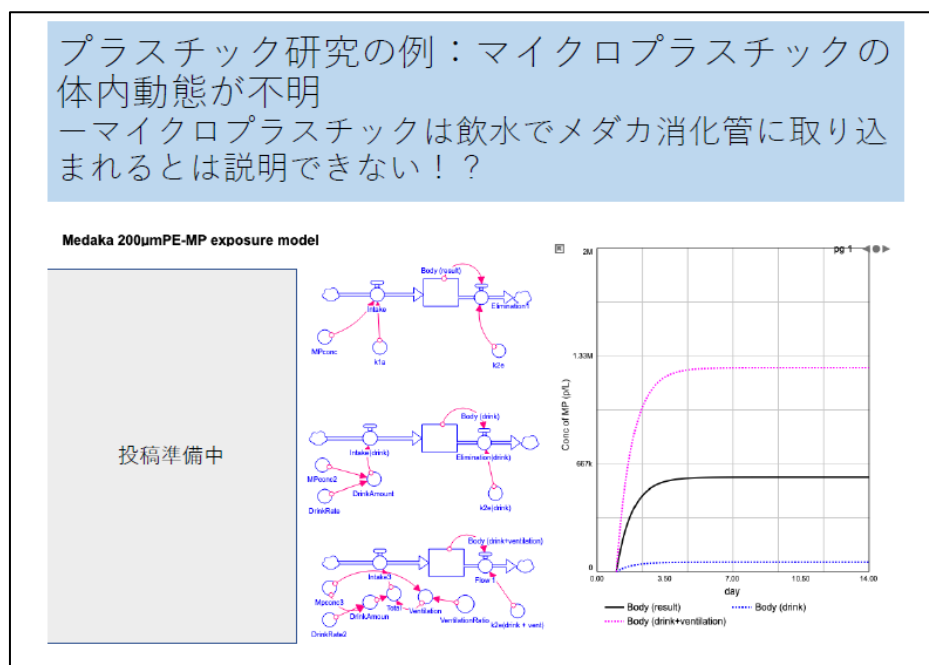


図 4-2-4

その他にも他の化学物質との相互作用や食物連鎖による濃縮についても調べ始めている。今のところ食物連鎖でプラスチックは濃縮しないのではと考えている。

また、あまり指摘されていないが劣化プラスチックの問題を指摘したい。通常、多くの実験ではバージンプラスチックが使用されている。しかし劣化すると表面が相当変化し、官能基が出てくる。こうした劣化プラスチックで行った実験例はほとんどない。従ってどのように実験をすべきかについても本来考えなければいけない。

プラスチック研究の例：今実施されている研究の大半は新品のプラスチックを使っており、影響評価はできていない

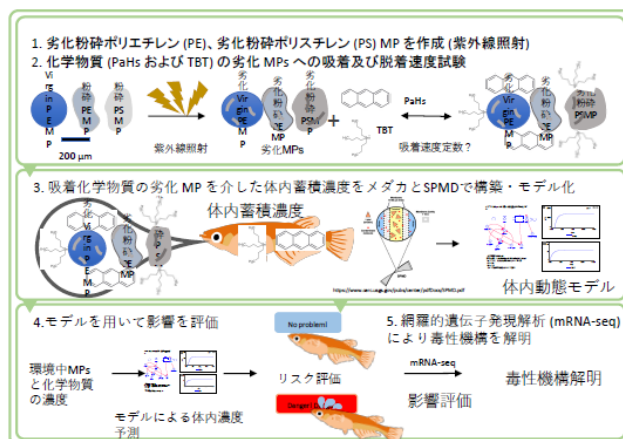


図 4-2-5

このように問題山積だが、我々大学研究者の現状を言うと、多くの研究者は、自由な研究を実施するのが経済的に非常に困難になっており、例えばマイクロプラスチック問題が出てきてもすぐに取り組むことができない状況。そうすると若手の優秀な人材が大学に残らず、企業からいくら人材が欲しいと言われても、出すことが難しいという悪循環に陥っている。

これは我が国の問題であり、ヨーロッパの場合は非常に熱気があり若手の人材も多く、うまく回っている。どこが違うのかを考えると、SETAC（国際環境毒性学会）のような場で、産業界、行政だけではなく、学会も協力してプラットフォームをきちんと作り、その中で一丸となってやっている。SETAC が必ず良いかというとは別問題だが、こうしたことができないと、日本のプラスチックを含む化学物質のワイズユージングは加速されず、科学的な知見もたまらず、人材の育成もできず、研究費もなかなか回らないのではないかと考えている。

大学、行政、産業界によるプラットフォームの形成

やるべきこと

- 学会：行政および産業界と大学の出会う場所(プラットフォーム)の構築、知識の集積、交流と連携を誘導
- 大学：問題（プラスチック問題）の調査・研究会を立ち上げ学会レベルで対応する（専門知識の供与）、人材の育成供給
- 行政や産業界：プラットフォームに参画、研究費だけでなく、成果の活用、共同研究、社会への還元、人材の採用

成果

- プラスチック等難分解性化学物質の環境リスク評価の研究体制の構築
- 知見の集積による開発・審査・市場化の加速

図 4-2-6

環境リスク評価研究のプラットフォーム（学会）

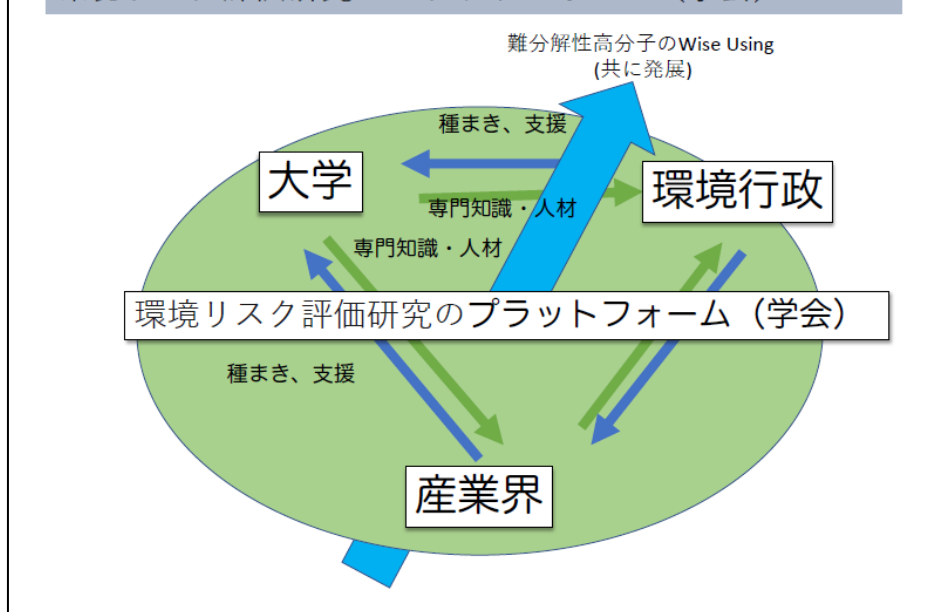


図 4-2-7

【質疑応答】

Q：ワイズユースを考えるというのは重要な指摘。プラスチックの問題解決には、先進国は冷静にプラスチックがどれくらいのレベルで使われていて、どれくらい時代が変わってきたのかということをつらねにかけながら着地点を模索しなければならない。それをやれる国というのは世界でも本当に限られている。ヨーロッパはそれをやらない状況まで突入しているので、アメリカか日本がやらなければならないのではないかな。プラスチックウィズアウトになると、

50年くらい時代が逆行するというイメージだと思う。プラスチックから明らかに恩恵があり、我々の今の現代がある。

今求められているガバナンスは、工学的な観点からも正しく使いこなし、適切に管理して海に行かないようにする、もしくはCO₂のバランスも含めてきちんと説明できる使い方をすることなのではないか。その核としてのリスク評価であり、そこからの選択肢としてのリスク管理である。そこに法規性が必要であれば規制をする、法規性ではなく適切な産業界の使いこなしで着地できるのであれば我が国は全力でそこを目指せばよいのではないか。

大嶋先生の発表でも、表面が劣化することを無視して評価することには無理があり、不確実な部分が無視できないものなのか、実は大枠では許容できるものなのかといったことを一つずつ棚卸していくようなディスカッションが今、本当に先進国でこそ求められているのではないか。

A：問題点は多数あるが、フレームワークを作って取り組むことが必要。大事な点は、必ず見直しをすること。

Q：環境ホルモン、内分泌攪乱物質、ダイオキシンの問題が起こった時、その問題を解決したい、勉強したいという学生が増え、それが研究者になるということがあったのではないか。そういう意味で、マイクロプラスチックの問題について研究を進めたいという大学院生は増えているのか。

A：今、プラスチックをやりたいという学生はすごく多い。海外からも大勢来日する。関心を持って入ってきてくれるため、我々も大学としていろいろ回せて、その中から人材を出せるということは非常に大事で、それが科学の底支えになるのではないか。

Q：プラスチックは光劣化が結構大きいと思うが、同じ浜辺でも沖縄と北海道では環境が異なり、劣化の速度が全く違っていると思う。こういうことを考慮した評価はできるのか、できないのであれば、今後どうしたらいいのかというのを教えていただきたい。

A：私も高分子の評価機関に依頼をしたことがあるが、紫外線を当てるしかないと言われた。また、実験では普通にはあり得ない、すごくやわらかいプラスチックで実験している。

Q：実際の自然の環境からずれている可能性があるということか。

A：できるだけ自然に近づけた標準品をつくるというのが、まず我が国の寄与として必要ではないか。

4.3 総合討論

- プラットフォームの議論に関連して、例えば現在は毒性関連の学会が幾つかあるが、そういったところが、このようなプラットフォームを担っていくのか。それとも、この分野に限らず人が減っていく中で学会同士が連携していくという大きな流れがあるが、そのような学会間の連携が進むのか。どういう方向性があるべきなのかということについて皆様からご意見をいただきたい。
- 自分は環境科学に関する大学院を出ているが、環境毒性については学ぶ機会がなかった。環境学は学際領域なので、在籍する教員の専門分野で授業が決まってしまうっており、全体を包括するということがない。最先端の分野というのは新しくできていくので、研究の分野はそれで構わないのだが、一方で、教育という観点から考えるとバックグラウンドがばらばらなまま卒業していくので問題だと感じていた。本来は、どういう教育をするべきかという、つくるべき人材像が先にあって、それに対してカリキュラムがあるべきである。環境学全体として、こういった課題に対応できるような人を育てるための基礎として何が必要なのかということを考え直して、最先端の研究と教育と両輪で考えていかなければいけないと感じた。
- 大学での教育の後に、そのエキスパートとしてのキャリアパスの一つが国研で、もう一つは企業に入って専門の部門に入っていくということがありうる。そういうところでの人材像や海外の事例などについて参考情報やご意見いただけることがあればお願いしたい。
- 毒性学とほかの学問との分界点は網羅性。毒性試験は、仮説検証型の学問ではなくて診断学に近いと思う。そういう意味では、最終的には生体影響となると解剖学が分かっているほうがよい。ただ、化学物質のことも分かっていないといけないし、分子レベルや生体の *in vivo* のレベルも網羅できるような人が必要。現状は、そういう全てが備わるような人材形成が難しい。最初はまず大学で携わってきたことをやりながら、そこからどれだけ幅を広げられるかというのは、その人次第である。
- その人次第というのはとても共感できるところである。環境関係の仕事をメインにしている中で、例えばリサイクルというのが一つの大きな課題になっているが、大学ではリサイクル関係の講座がない。そうすると国の研究所と大学との関係性という意味ではマッチングがよくないケースとなる。こうした事態を特に最近、強く感じている。日本人の育成に注力すべきなのかどうかという問題もある。
- 先日イギリスで開催された国際化学サミット（CS3）でも人材育成が全体の共通した課題として出てきていた。高分子科学も毒性学も分かっている、ケミカルエンジニアリングもある程度分かるといった人材を育成しないと、この問題は解決しないのではないかという提言をする予定である。これに関して、独バイロイト大学は既に、こういったマイクロプラスチックのバーチャルな研究組織をドイツ全体でつくっていて、PIが20数人いて、学生も90人ほどいると聞いた。この問題に古くから取り組んでいた方々を中心に、環境毒性学の方と連携が進んでお

り、非常にすばらしい成果を多数上げられていた。

- 比較的網羅的な評価を行う部門の場合は入ってから身につけてもらうことになるが、それまでに一通り、科学的な手順で研究した経験や、何か問題を発見するとか、問題、課題を解くとか、そういう部分が育っていくような人材であることが望ましい。同じグループでもひたすら実験して論文をたくさん書くタイプもいれば、全体をまとめたタイプもいて、何となく全体でバランスがとれるような、全員が同じ能力でなくても、チームでうまくバランスがとれればよいというようなことは最近考えている。ノルウェーやベルギーに行ったときの経験からお話すると、国研と大学が組んで社会課題解決のためのドクターを育て、その生活費などは研究費から補助するようなプログラムを実施しており、3人～5人ぐらい育てた中から1人か2人が国研に入ってくればよく、それ以外の人たちはほかのところで活躍してくればよいというような余裕を持った方法でやっているところもあった。
- 生物学をバックグラウンドとしていればよく、毒性などは例えば OECD のテストガイドラインなどで決まったものがあるので、そういうところから勉強してもらおうと、わりと入っていきやすいところではある。一番難しいのは化学物質そのものを理解するということ、とても大事なところ。それが実社会でどういうふうに使われて、どんな意味を持つのかといったところまで考えられる人になってもらわないと、ちゃんとしたリスク評価や管理といったことにつなげられないので、そこはとても難しいところであると感じている。また行政との人事交流も実施されており、実際、行政でレギュレーションにかかわっている人が博士号を取得して戻っていくというようなことも行われている。その際にはそういう考え方などをたたき込んで役立ててもらいたいと考えている。
- 実践的な実学を担える人材を育成するためには、大学を出ていきなりそういう仕事ができるわけではないので、まずはトキシコロジストとして特定の分野にフォーカスを当てながら、ハザードの見方を認識していく。ある程度、キャリアを上げた段階で暴露の問題がちゃんと用途・用法ごとに理解できるというフェーズに入っていってもらって、その両方が見られるようになるとある程度、スモールサイクルのリスクアセスメントを一通り回せる若者が育っていくという形で中堅になっていく。ある程度、シニアになっていくと、ある物質の用途・用法全体に対しての包括的なレビューをして、本当にこの用途・用法で今の時代に対してふさわしいと言えるのかといったような物の見方をしてくる。その段階に入るとある意味、自分が所属する組織だけではなくて社会全体としてその受容性が妥当なのかという時代性を問うような評価をしていく。この考え方までいくときのポイントは、いわゆる論文の総説を書くような仕事である。自分たちが知っているデータだけではなくて、公知情報として世の中に出ているものはほぼ全て網羅する、システマティックにレビューしたときに抜けがないかを見た上で、確かにこれが科学的なファクトである、リスク評価として問題ない扱い方であるといったところまで絞り上げて、使い込んでいくということができるプロを育てていく。

また日本では産業界のプロが外に出ていく機会が少ない。米国などでは産業界のプロが政府にいたりして、人材がローテートする。その強さは間違いなくあると思う。本来は日本の国研でも必要で、人材交流はあるべきだと思う。

アカデミックな場への参加も比較的少ない。学会には行くが発表が必ずしもミッションにはならない。またアカデミアだと論文を 10 本、20 本、50 本と出していったシニアになっていくと思うが、リスクアセスメントも同様であるもののそれらは多くの場合に社内文書であり、外に出すわけではない。

- 製薬企業もいろんな実験をしても外に出せることはまずない。ただ、日本毒性学会に関しては今とても発展している。おそらくその一番の理由は企業の方が入ってきているところだと思われる。学会にお金が集まらなくなかなかうまくいかないところがあると思うが、毒性学会は色々な分野の方が入ってきて、どんどん発展していった。発表できる、できないは別だが、そこは一応、情報共有がされているというような状況である。

5 第三部

5.1 「グローバル化学物質法規制のレギュラトリーサイエンス

～リスク管理の目的に応じた環境リスク評価の価値～」

藤井健吉（花王株式会社安全性科学研究所 ディレクター）

環境リスク評価が法規制とどのくらいの近さで、実際に世界中で運用されているのか、化学物質法規制の話を変え、レギュラトリーサイエンスの枠組みでご紹介する。レギュラトリーサイエンスという言葉がいろいろな定義で使われているが、伝統的な科学とルールの世界をつなぐ橋渡しの役割がレギュラトリーサイエンスの本質だと理解している。

レギュラトリーサイエンスの概念は規制当局側が最初に使い始めた。規制当局側としては、規制をつくる根拠は、科学的にしっかりと裏打ちされている必要がある。それこそが科学的評価の存在意義であり、レギュラトリーサイエンスが必要になってきた理由と思われる。本日の環境リスク評価の議論も、実はレギュラトリーサイエンスの枠組みにあるといえる。なぜ環境リスク評価が必要なのか、研究としても実学としても必要なのかといえ、環境リスク評価によって守りたい何かがあるからである。リスク評価する側の人たちは、必ずリスク管理者との対話が鍵になる。どういう目的のリスク管理をしたいがゆえにその評価をするのかで、その評価の方法も変わる。

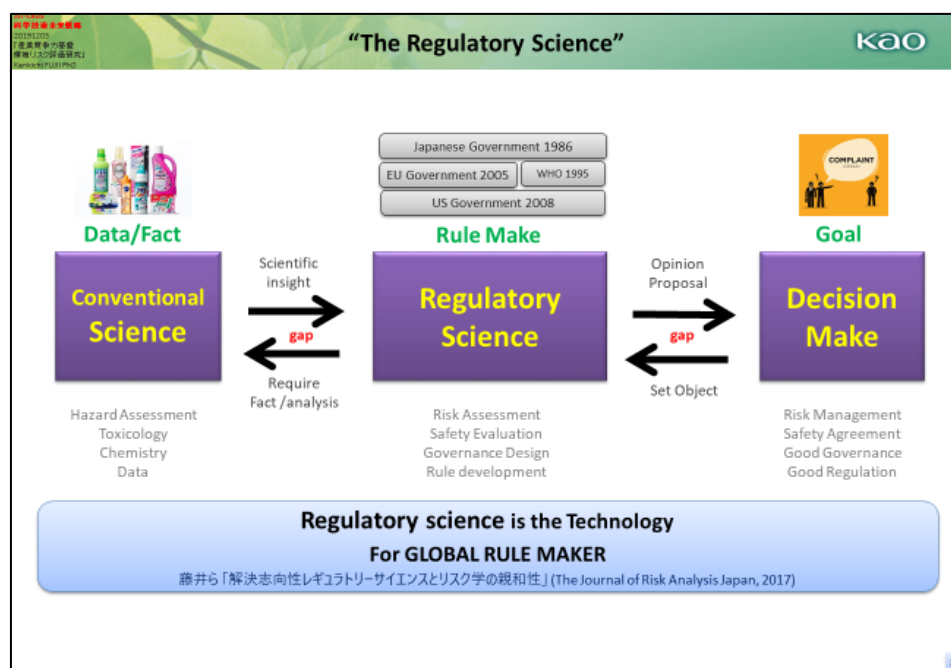


図 5-1-1

化学物質規制の話題を取り上げる。化学物質規制は国ごとにある。産業界は世界中でものづくりをせざるを得ないため、各国の化学物質登録に対して規制遵守を行っている。実務として、まずハザードデータを一式提出するカタログ登録のようなものがある。その上で、意図する用途・用法が問題ないかのリスク評価の対応がある。環境リスク評価も、その中に含まれている。その

国・地域ごとに使われる用途が、環境リスクの懸念されない用途用法になっているか問われる。実学上の要請として、すぐれた環境リスク評価があると、実は世界的にグローバルな訴求力を持つ。化学物質を正しく使いたいという想いはグローバルコンセンサスである。とても重要な物質だが、環境中への負荷がハザードとして懸念されるものについて、適正に使われていることを説明するため、しっかりと環境リスク評価を作り上げる必要が生まれる。

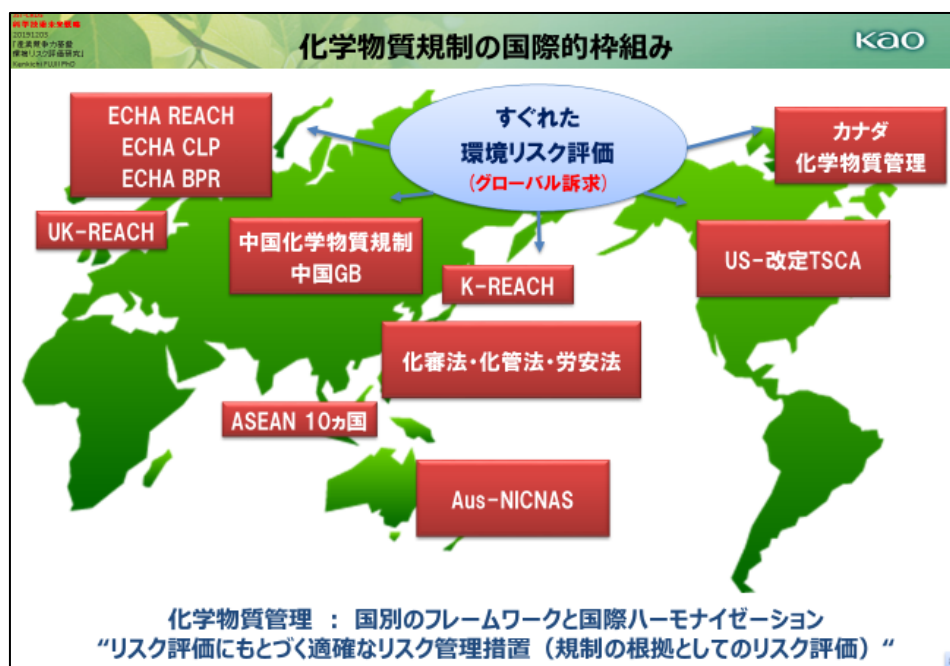


図 5-1-2

化学物質管理にはグローバルな枠組みとして、ストックホルム条約、水俣条約など、多くの国際条約がある。批准国が百何十カ国というレベルの国際条約は大きな枠組みである。国際条約は批准国の国内法規に落とし込みがなされる。例えば、日本ではストックホルム条約は化審法で扱っている。

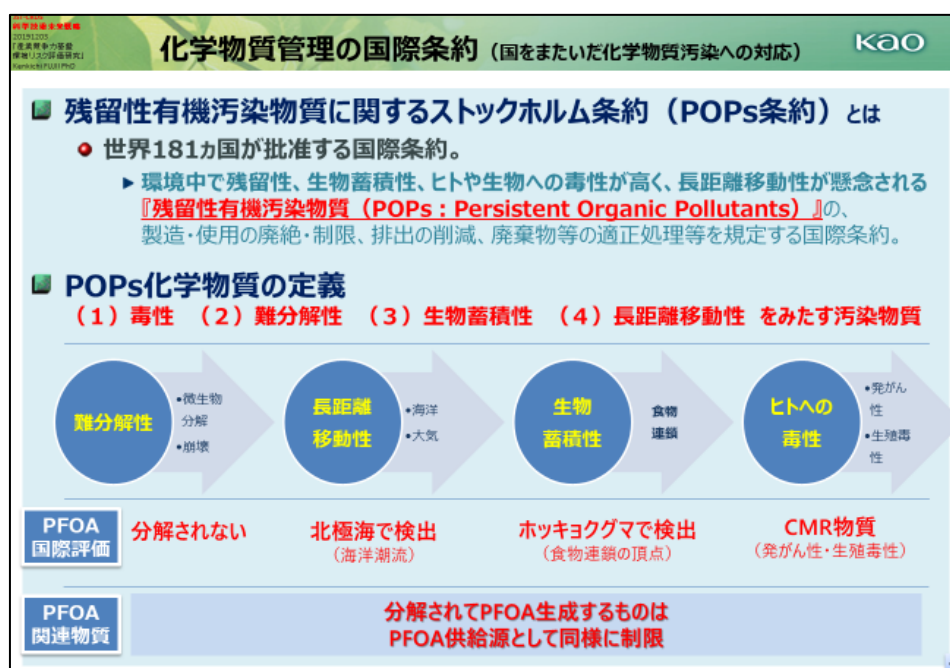


図 5-1-3

危ないものを危ないまま使うと、公害を起こす。そのような事態を起こさない取り組みが進み、今の時代がある。その流れで、現在は、生態系への毒性、難分解性、生物蓄積性、長距離移動性の四つの関心が大きい。環境リスク評価の本質的な課題を国際的視点から考えると、この四つのどれかにあたる。

具体例を挙げる。2019年5月、ストックホルム条約でペルフルオロオクタン酸 (PFOA) の包括的な用途制限が決定した。化学品としては、PFOA 自体の使われ方は限定的だ。しかし、PFOA の部分構造が環境中での難分解及び高蓄積性が疑われたため、この化学物質の関連物質含めて全て包括的に禁止する規制が決定した。これだけの関連物質を包括的に禁止するタイプの化学物質規制は過去に前例がない。

実際にどのような影響があるかという、例えば、ゴアテックス系のテフロン繊維など織物用途なども、定義からは関連物質となりうる。製品回収まではしないが、原料供給がなくなるため今後の新規の使用は制限される、という流れだ。化学物質管理の側から見ると繊維のトン数が多く、撥水用途などでいかに汎用に使われてきたのかが伺える。

PFOA、PFOA関連物質の用途 [POPROC12]		
有用性・特性 ● 撥水性、撥油性、防汚性、高い摩擦性能、誘電特性、耐熱性、耐薬品性、低い表面エネルギー 使用分野 ● 衣類・繊維・革製品・塗料・自動車・電気工学・建築・航空宇宙産業、消費者製品		
区分	用途・産業	欧州ECHAに報告された 年間使用量 [ton]
PFOA およびその塩	フッ素重合体の製造（モノマー）	< 20
	写真産業	1.0
	半導体産業	< 0.05
	その他	0.5 – 1.5
PFOA関連物質 	織物・革加工（撥水加工）	1,000～
	紙処理（ベーキングペーパー、食品包装、など）	> 150 – 200
	消火剤（1960年代～）	> 50 – 100
	建材・塗料・インク（撥水/撥油/耐熱/耐汚）	> 50 – 100
	その他（医療機器、スキーワックス、フライパンなど）	< 20
国際社会の使用量はPFOA < PFOA関連物質 特に服飾用化学繊維（テフロン系）と撥水加工用途が量的にメジャー （全世界の使用量は上表より多い※日本欧中）		

図 5-1-4

このような化学物質を一つの物質として見てリスク評価すると、環境中で難分解で、高蓄積性、毒性も特殊だから、この物質は禁止されるべきだと誰もが思うものであっても、用途を丁寧に見たとき、世の中から無くせるかという、そう簡単な話ではない。皆様の家庭にあるゴアテックスの洋服を全部処分してくださいなどとは言えない。ケーキやパンを焼くときに使うベーキングペーパーの表面にべたべたくっつかないのは、この特殊コーティングのおかげだったはずである。化学物質を禁止するというのは簡単なようで、実はたいへん多方面への影響がある。

これに関してアメリカの考え方が参考になる。アメリカはストックホルム条約の PFOA の規制は批准しなかった。彼らは、PFOA は管理されるべきという考え方には賛成している。しかし、包括的に製造・輸出を全部禁止することには賛同しなかった。現在の用途用法で、必要不可欠な用途があり、かつ性能面で代替困難である場合、それを担保する用途は残すべきという考えのようだ。2019 年の米国毒性フォーラムで例として挙げられたのは、例えば消防士の防火服だ。化学技術として興味深いのが、PFOA 関連物質で鎧のように全面コーティングすることで耐熱性、耐油性が最強クラスになる。アメリカは、消防士の命を守ることに最高性能を投入しないのはおかしい、環境流出を制御し使いこなせばよいという主張だ。

この事例の様に、ある化学物質にハザードがあっても、そのリスク管理手法は多くから選べる。化学物質の環境リスク評価をするからには、その先のどのような管理がふさわしいのかまで踏み込むことが大切だ。プラスチックについてもいえることだが、そこに全力で叡智を投入して、国家レベルのコンセンサスをつくることにこそ価値がある。単純にやめるという議論は、大抵の場合、余りよく考えていないことが見受けられる。簡単にやめて済むようなものは、そこまで大した物ではないと思われる。

研究テーマをピンポイントで挙げるとしたら、難分解、高蓄積性の二つが大切だ。高い難分解性（vP）と高い生体蓄積性（vB）を有する vPvB 物質は、リスク評価がまさしく扱うべきカテゴリーだ。難分解性で高蓄積性および毒性を有する PBT 物質や vPvB 物質だから単純にやめまし

ようという規制の議論になりやすい。ただ、難分解性の傾向が強いけれども、実際は少しずつ環境で分解されることがある。生物蓄積性の潜在的可能性はあっても、その環境中の濃度で本当に生物蓄積が起きるかは別の問題となる。したがって、選ぶということに実は価値があるし、そこはまさしく定量的なリスク評価がされたときに洗練された判断ができ得るものだと考える。高次の環境リスク管理は高度産業国が主導することだ。

例として、環状シロキサンの五量体（D5）を挙げる。シリコン樹脂の原料であり、広範な用途で使われている。揮発性が高く、常温ですぐに蒸発する。オイルのような液体状だが、皮膚くらの温度の熱が少ししかかっただけで全部ガスになる。したがって、基本的に気体として存在している。気体として大気層にいくと UV で次々と分解される。安定な物質ではないため、気化された後はそのように消失していく。D5 は vPvB の典型例だが、唯一、vP であるのは水中の底質のみ。大気中でも分解されるし、水質中에서도加水分解で分解される。環境運命を考慮すると、vPvB の化学物質管理対象は、底質にいくシナリオだけに絞れる。しかし、揮発性が高過ぎて、実は水質に入っても気化する。気液界面から常温で抜けていく。ここまで揮発性が高い物質だと、沈んで底質にいくことは希少で、ほとんどガスとなって抜けていく。これがいわゆる定量的な環境リスク評価における環境運命評価だ。このように環境運命全体を見ると、実はこの化学物質の環境リスクは限定的な管理措置で過不足なくできそうだ、といった判断が可能となる。

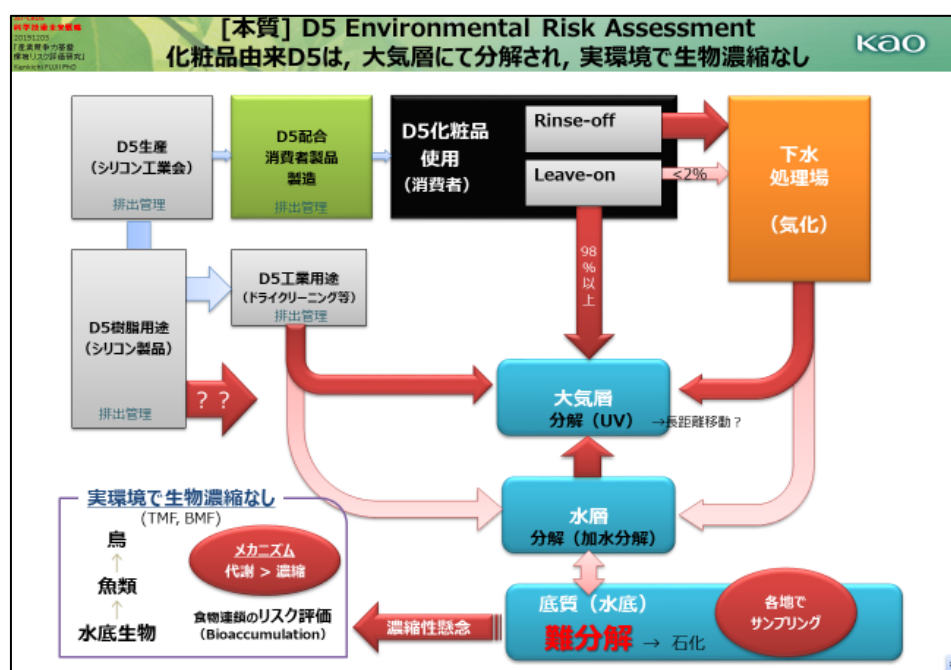


図 5-1-5

ここで例示した環状シロキサン D5 の環境リスク評価を実際に行ったのは、カナダの環境化学物質の規制審議会のレビューメンバーだった。2015 年に環境フルアセスメントの評価結果にもとづき、カナダでは D4、D5、D6 規制は不要という結論になった。その後、規制判断の根拠となった環境リスク評価は全て論文として公表された。規制判断の透明性も高く、リスク管理の要不要判断の優れた事例といえる。他方、欧州の REACH 規制では、環状シロキサンは vPvB 扱いで用途制限の規制強化が検討されている。リスク評価の専門家から見ると、徹底的に環境リスク評価

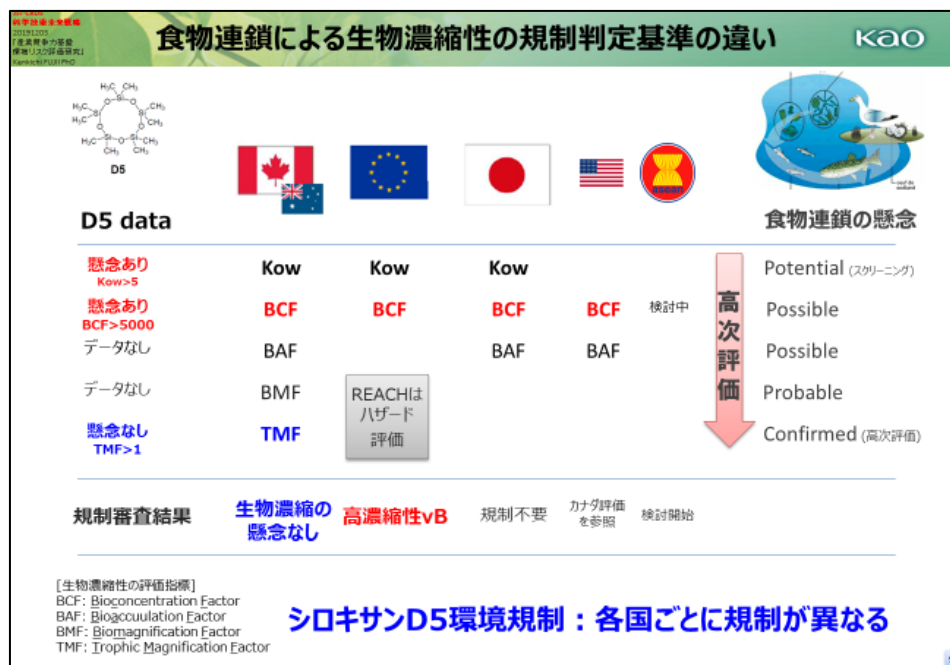


图 5-1-6

この様に、化学物質の環境リスク管理の目的と手段を考えると、リスク管理の目標（ゴール）は環境を保全するという点で共通するが、そのための手段（管理アクション）は多種多様だ。しばしば、ヨーロッパが非常に保守的な態度をとるし、米国、カナダ、豪州の様にリスク評価をきっちりやる国は、その中でウェイト・オブ・エビデンス（Weight of Evidence）の考え方を取り込みつつ、適切な使い方を追究しようとする。

これが現在、世界で起きていることで、環境リスク評価の扱い方と咀嚼の仕方で本当に規制の姿が変わり得る。日本は解決志向、客観的に環境リスク評価を行い、どんな管理が必要なのかを本質的に考える評価書を多く出し、産業国として世界への発信力をより強めていくことが大切だと考えている。

【質疑応答】

Q：PFOA 関連物質はどこまでをグレーと考えればよいか。PFOA が入っているポリマーや、少し短い構造など様々あるが、その仕切りはどのような状況か。

A: PFOA は、日本はストックホルム条約に批准し、化審法一特（第一種特定化学物質）で対応しているところだ。部分構造を持つものは禁止だが、ポリマーの扱いなど調整されている模様だ。当初は、巨大な高分子の中の側鎖 1 個だったとしても禁止物質という建付けだったが、包括的に禁止という整理は、わかりやすいものの注意が必要だろう。

科学的にグレーと言われる領域については、環境負荷の観点から管理対象の取捨選択がされていないはずだ。たとえば、関連物質だけでも、環境中に無作為な排出はされない。部分構造として入っているけれども、それはしっかりとした強結合で遊離されるわけでもない。懸念さ

れる PFOA の遊離が、実際には起こり得ない用途であれば、本当は問題ないという説明になり得る。

Q：環状シロキサンの五量体（D5）はシリコンゴム合成にも用いるモノマーだったと思う。各国の議論はどのようなものなのか。

A：D5 を禁止しようとしているのは世界中でヨーロッパだけで、ヨーロッパ以外のどの国も事実上、リスク評価やハザード評価から規制上の白判定を出しているのではない。日本においても化審法で D5 は白物質、一般物質になっていたと思う。カナダの評価書の影響が高かった。あそこまで環境運命を一通り説明できているので、そこまで禁止する必然性が見当たらないのではない。

Q：毒性試験にしても EU の立場は独特で、たとえば動物実験に対する考え方も全く違う。企業としては欧州への対応は、いろいろ困ることはあるが、それなりに労力をかけざるを得ないのか。

A：REACH を含めて、膨大なコストと人的エネルギーを投入した上で今に至っている。皆、かなり残念な気持ちに満ちているのではないと思う。理性的な規制であってほしいと思うが、なぜこのようなことになるのだろうと欧州以外の先進国のほぼ全員が感じるような段階に突入しつつある。わたしとしても、REACH がリスク評価をきちんとせずに規制案を出してくる現状は疑問と言わざるを得ない。RAC はハザードしか説明しておらず、プラスチック規制でも如実にあらわれている。

Q：第一部の内藤先生の、産総研の化学物質リスク評価研究の歩み紹介で、最近のデータがない中で有毒性をどう評価するかというトレンドの話題があった。新しい研究手法や、リスク評価に入りつつあるような研究動向で、何か期待の高いものはあるか。

A：実は、データがなくても一次判断はしなければならない。データがない中で、そのまま過去のデータ等を含めて使っていいののかも、責任が発生するので、データがない中でリスク評価に対してはすごく注力する。その結果、当然、類推（リードアクロス）や、QSAR 的なアプローチが必要になる。最終結論というより、データがなくて、かつ今まで普通に使ってきたが、実は見落としていないだろうかというフラグを立てるにはかなりいい判定基準になり得ると考えている。

QSAR で何かしら特殊な問題があれば、示されてくる。その場合は、その用途への適用が不適切だったかもしれないということも含め、データをとればよい。問題であれば見直す形になる。類推や、代替手法から見えてくるデータが最終結論であるかという以上に、見過ごしていた問題が見つかるのではないかと、プラスでエキスパートジャッジメントをできるのではないかと、実学的に使われていると思う。

Q：データがない状況で評価しないとしないときには類推や QSAR といった手法は必要だと思う。動物実験を減らすということにもつながるので、類推である程度まで進めていけばよいと期待はされる。一方でデータがないのだったらしっかりとしたデータをつくる努力も必要だろうと考えている。

欧州はどんどん動物実験をしないという方向に進んでいる。日本がもしもこういう中で良質なデータで世界と戦えるとしたら、動物実験のデータがあると思う。それを例えば国レベルで類推などに必要なもので、もし 1 万の化合物のデータをとるようなプロジェクトがあったとしたら、やったほうが良いと考えている。もちろん、未来永劫、動物実験をやろうとい

うわけではなく、必要なデータであるならばという前提だが。それを類推にフィードバックしていくと、もっと焦点を絞った評価ができるのではないかと思う。

A：毒性データの母集団を集積することは価値がある。遺産的価値なので、毒性学的にも間違いなく必要だ。ただし、REACH でも大量に集めているし、医薬品審査などでもデータが一通りある。集めるだけ集めていて、今の QSAR ツールボックスなどになっていると思われるので、まだ漏れている母集団カテゴリーがポイントになると思われる。

A：おそらく、化審法で出てくるデータなども多くある。ただ、新規の化学物質は、企業の著作権の問題にかかわるので、使っていない。もしも、新規のデータを企業側が提供して、使ってよいとなって、類推や QSAR ボックスに入れてよいとなれば、今の QSAR のあり方が変わってくる。

A：そういう意味では、REACH は一通りデータベース化できているが、化審法の場合は登録上の仕組みの違いがあるのかもしれない。

5.2 「新素材の毒性評価 工業的ナノマテリアルの高分散性小規模全身ばく露吸入装置の開発 “*Taquann*” System」

高橋祐次（国立医薬品食品衛生研究所安全性生物試験研究センター毒性部 室長）

国立医薬品食品衛生研究所では戦前より医薬品の品質確保を目的とした検定を実施している。しかしサリドマイド等の化学物質によるヒト健康影響が大きな社会問題となったことを契機に、これら物質の生体影響を評価するバイオアッセイの必要性が議論され、当研究所内に安全性生物試験研究センターが設立された。なお、サリドマイドのウサギを用いた催奇形性評価は当研究所の毒性部で実施されたものであり、私は現在、その毒性部に所属している。

一般的な化学物質は OECD のガイドライン、医薬品であれば ICH（医薬品規制調和国際会議；International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use）のガイドライン等に従って評価が行われている。本講演では、新しい物質の評価方法という観点から、工業的ナノマテリアルを例として取り上げ、新素材の毒性評価というタイトルで話をする。工業的ナノマテリアルの概要、毒性評価に関する背景、毒性評価手法の開発、最後に毒性評価において考慮すべきことの 4 つの観点から説明する。

工業的ナノマテリアル（ENM；Engineered Nano Materials）とは、粒子の縦・横・高さのいずれかが 100nm 以下の物質で特定の目的のために人工的に作られたものである。化学的な組成が同じであっても、バルク状物質とは異なる物理化学的性質を示すため、次世代の有用な基盤技術として期待されている。その一方で、ヒト健康影響が懸念されており、基礎的定量的な毒性情報を得る評価法の確立が急がれている。

カーボンナノチューブは基本的にグラフェン構造を一次構造とした筒状で、一層のものを単層カーボンナノチューブ（SWCNT；Single-walled carbon nanotube）、二層のものを二層カーボンナノチューブ（DWCNT；Double-walled carbon nanotube）、複数層のものを多層カーボンナノチューブ（MWCNT；Multi-walled carbon nanotube）と呼ぶ。このカーボンナノチューブは飯島澄男氏（現 産業技術総合研究所 名誉フェロー）の発見と遠藤守信氏（現 信州大学 特別特任教授）の量産化技術によるもので、日本が大きく貢献した技術である。

次に工業的ナノマテリアルの毒性評価において、毒性医学的な背景を説明する。過去に革新的物質と評価されて大量に使用され、その後に市場から撤退した物質がいくつかある。例えば、アスベスト、PCB、カドミウム、DDT などである。これらの物質の共通点は物理化学的安定性が高く、急性毒性が弱いという特徴があり、深刻な慢性影響が認知されるまで健康被害が見過ごされてしまった物質である。

アスベストを例に挙げると、後になってから中皮腫という深刻な慢性毒性を引き起こすことが認知された。アスベストの使用量と中皮腫の発生状況の関係をみると、アスベストの使用量は 1965 年頃をピークに減少するが、中皮腫はその後に増加している。両者のピーク幅がおおよそ 30 年あることから、慢性影響を調べるには非常に時間がかかるということが分かる。

多層カーボンナノチューブの走査型電子顕微鏡（SEM）画像を見ると、アスベストとサイズ・形が類似していることが分かる。図 5-2-1 の左側の写真はアスベストの中でも最も発がん性が高いと言われるクロシドライトである。右側は多層カーボンナノチューブの MWNT-7 であり、両者はサイズや様態が類似している。

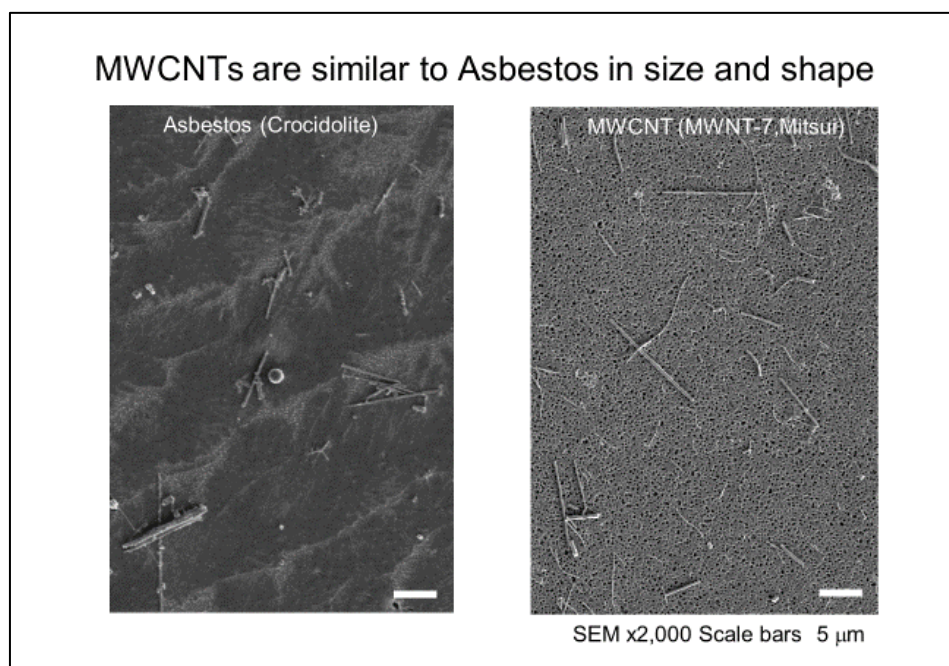


図 5-2-1

以前より粒子と繊維は毒性学的に異なることが指摘されている。1970年代にアスベスト及びその代替品となる人工繊維の発がん性がラット腹腔内投与によって評価された。その実験結果、繊維長が約10～20μm、直径が約100nmの形状の繊維が最も発がん性が高いことが示されている。

この知見を基盤に、当研究部ではがん抑制遺伝子 p53 の片側アレルを欠損させたノックアウトモデル (p53^{-/-}マウス) を用いた MWCNT の腹腔内投与実験を実施した。6ヶ月程度観察した結果、世界で初めて中皮腫を誘発することを明らかにし、用量依存性も示した。

その後、Nature Nanotechnology に「The asbestos analogy revisited (アスベストの類似物質の再訪)」というタイトルの記事が掲載された。その記事では、カーボンナノチューブや他のナノマテリアルの生体影響が少しずつ解明されており、本格的な商業化が進む前の今こそが、将来的な健康被害を及ぼさないマテリアルデザインや製造戦略ができる絶好の機会 (window of opportunity) だと説かれた。

もう一つの毒性医学的背景としては、粒子状物質を扱う毒性学が相対的に遅れていることが挙げられる。その理由として、エアロゾルの発生と濃度コントロールが検体毎に異なり技術的に困難であること、吸入ばく露実験を実施できる施設が世界的にも少ないこと、特殊な試験装置が必要で、検体量も多く、費用がかかること、そして、試験を実施する熟練した技術者が必要であることがあげられる。

人がナノマテリアルを非意図的に体内に取り込む形態 (ばく露経路) として、吸入による可能性が高く、そして有害作用が最も懸念される。実際、MWCNT の原末 (原料として用いられる個々の物質の粉末) は凝集体であるが、人の現実的なばく露形態での評価のためには、次の二つの理由から高分散のエアロゾルとしなければならない。

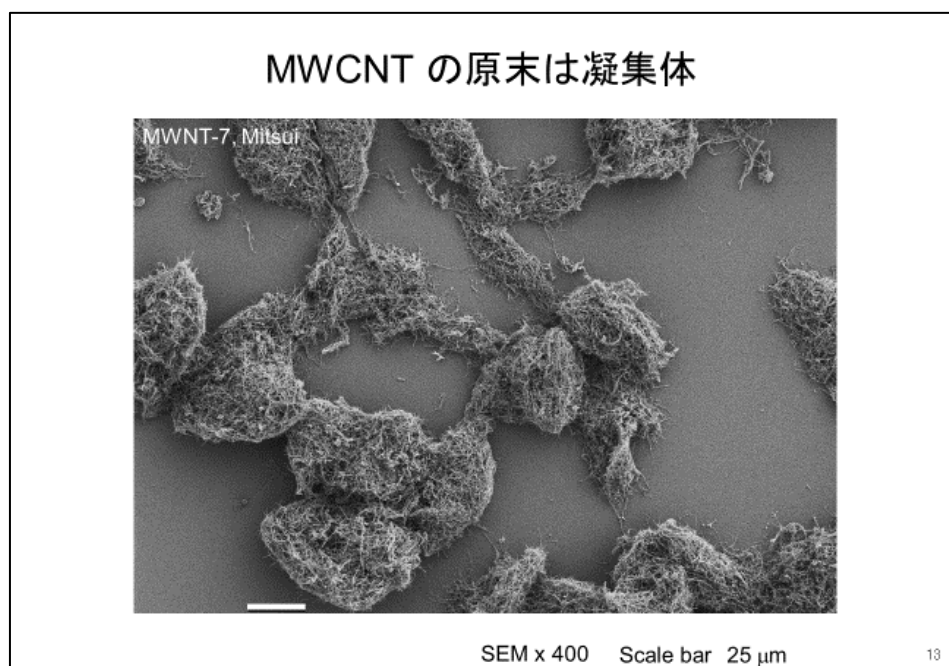


図 5-2-2

一つは、凝集検体と分散検体では生体反応が異なる点である。MWCNT を腹腔内投与したマウスの実験結果では、MWCNT の単繊維では中皮腫が、凝集塊では肉芽腫が観察された。すなわち、前者は繊維状物質に対する特異的反応を示し、後者は外来異物に対する一般的な反応を示すということである。つまり、凝集検体のままでは本来誘発される毒性を正しく評価できないのである。

もう一つは、人が実際にばく露される環境においては、風速が遅く、かつ比較的広い空間であることから滞留時間が長く、凝集体が先に落下し、高度に分散されたものが優先的に吸入されることが想定される点である。つまり人が非意図的に吸引する場合、MWCNT は高分散状態にある。すなわち、図 5-2-3 の右下のように、比較的単離しているファイバーだけが吸引されて肺に到達し、毒性が発現する。よって、このシナリオを動物実験で模倣するためには分散検体を使用する必要がある。

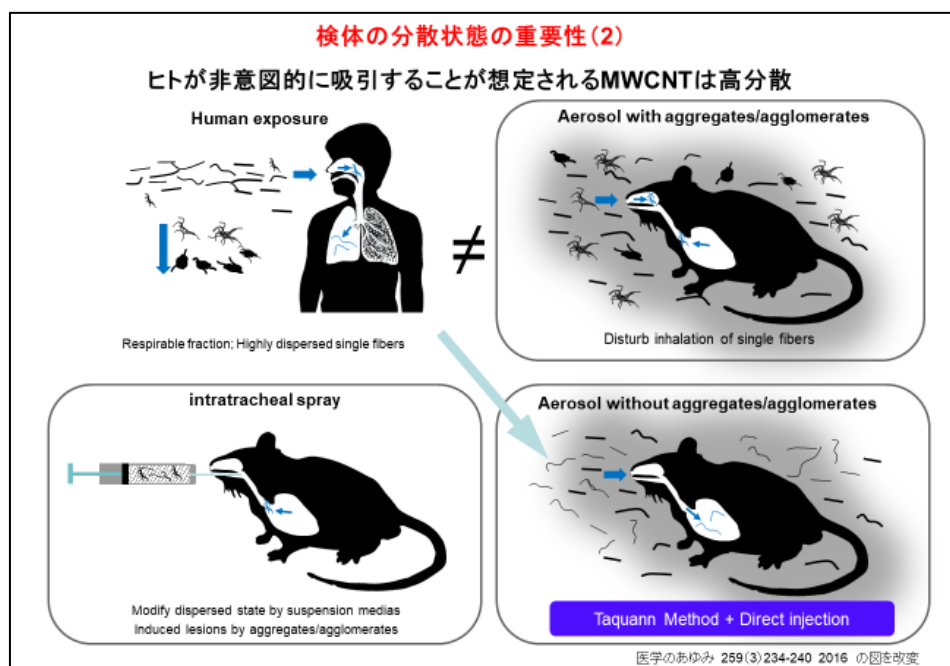


図 5-2-3

そこでまず、図 5-2-4 のように高分散検体の調整方法を開発した。繊維状物質の毒性評価を適切に行うため、繊維を破壊せずに、繊維長が原末と同等に維持されるマイルドな分散の方法を検討した。図 5-2-5 に示すのが高分散検体と原末を肉眼および光学顕微鏡レベルで比較したものである。

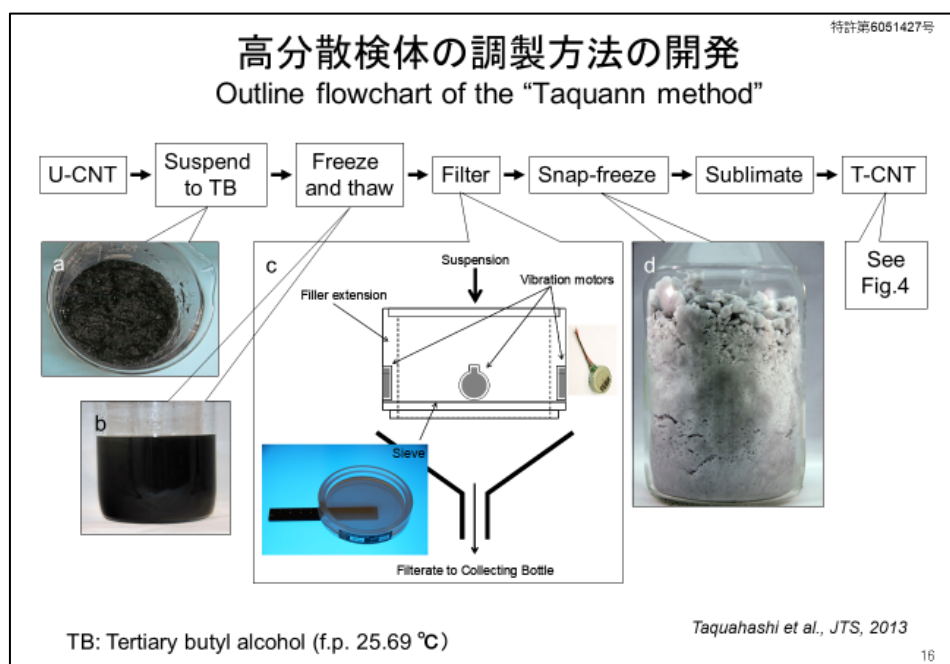


図 5-2-4

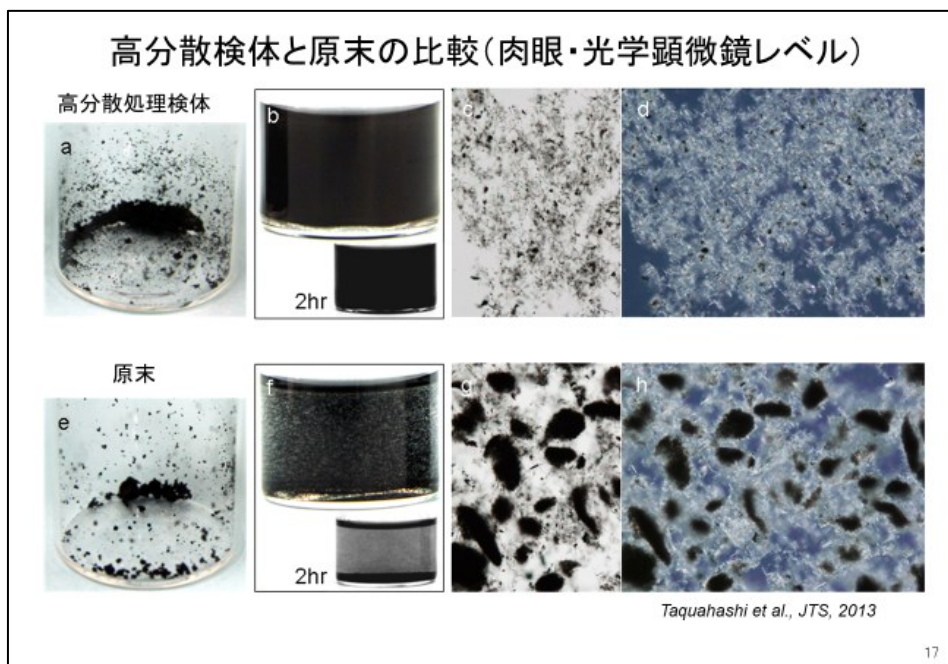


図 5-2-5

高分散検体エアロゾル発生装置も独自に開発し、特許も取得した（柴田科学株式会社と共同開発）。金属製のカートリッジの中に入れ、圧縮空気（0.4MPa）で乱流を発生させて分散しエアロゾル化する点がポイントである。

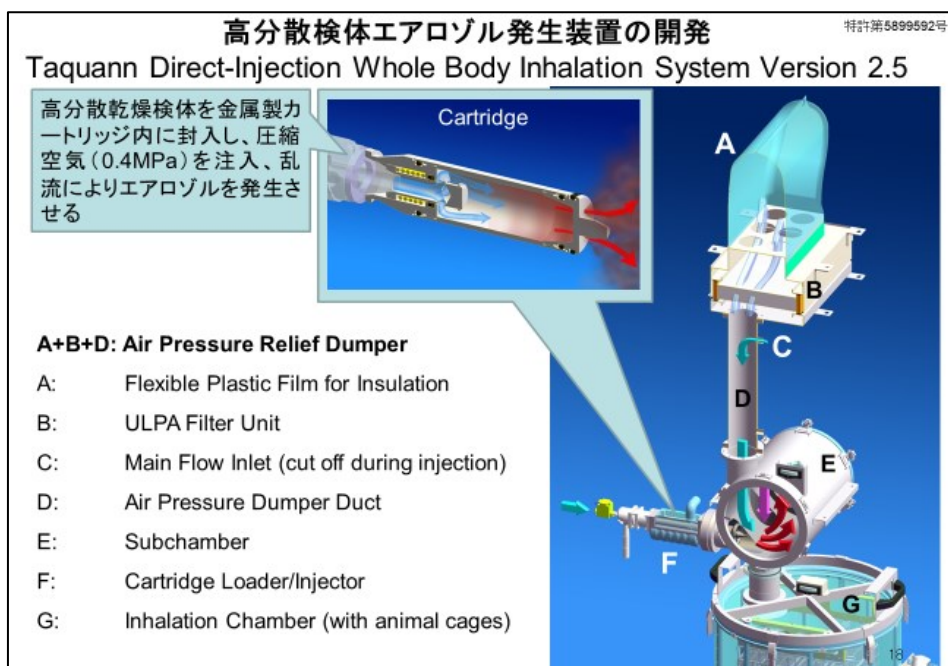


図 5-2-6

本システムで発生させたエアロゾルは分散性が高く、実際にマウスに吸入させると、単離した繊維が肺に到達していることが確認できている。現在、慢性影響を評価するために、この装置を

使った2年程度の長期的な試験を実施している。

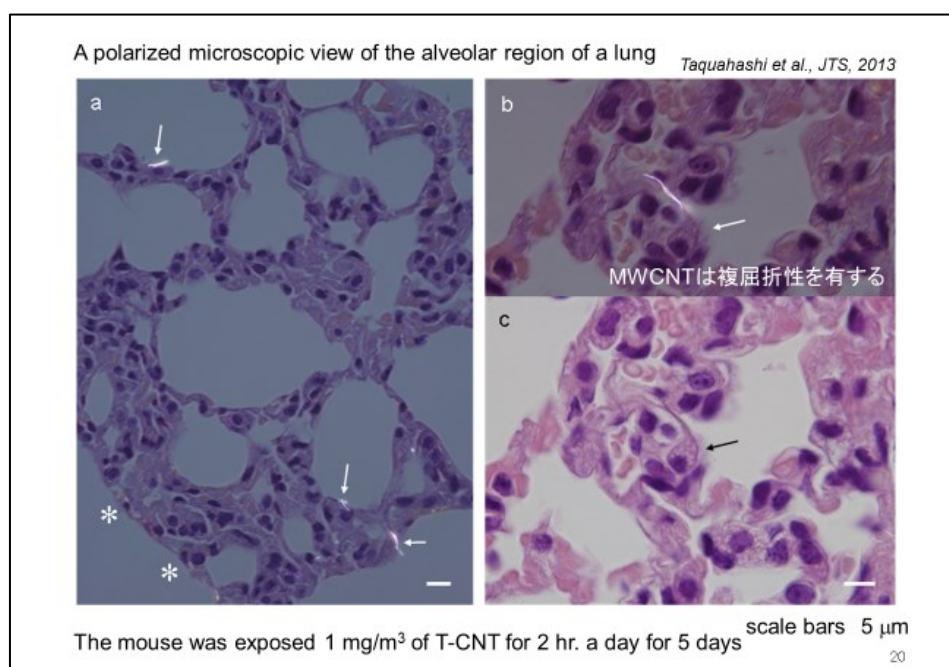


図 5-2-7



図 5-2-8

以上が、ナノマテリアルのような新規物質について、ヒトのばく露シナリオに沿った評価方法を検討した事例の紹介である。新規の物質であっても、過去の知見から想定される毒性影響を基盤とした試験方法開発と評価は有効であろうと考える。例えば、MWCNTの場合は、繊維状物質のアスベストを手本とし、腹腔内投与系の構築が可能であった。

しかし、全く知見がない場合、実際にヒトで想定されるばく露経路を想定し、その条件を満たすような試験系を開発するしか方法がない。そして毒性学的に重要な点は、網羅的に生体影響を解析するという点である。興味のあるところだけを見るのではなく、全ての生体影響を見ることが重要であり、網羅性は他の分野と毒性学の分界点とも言える。

また対象とする検体に最適化された実験系を構築することが必要であり、実験系のバリデーションは不可欠である。OECD ガイドラインとなるレベルでは、実験施設が異なっても再現性の高いデータが取れるような試験系の構築がより重要である。

その上で、ハザード同定、メカニズム同定（推定）、実験動物における用量作用関係を行い、ヒトに対する毒性と用量作用関係を想定していくことになる。

以上がナノマテリアルを例にした、評価系の構築の紹介となる。

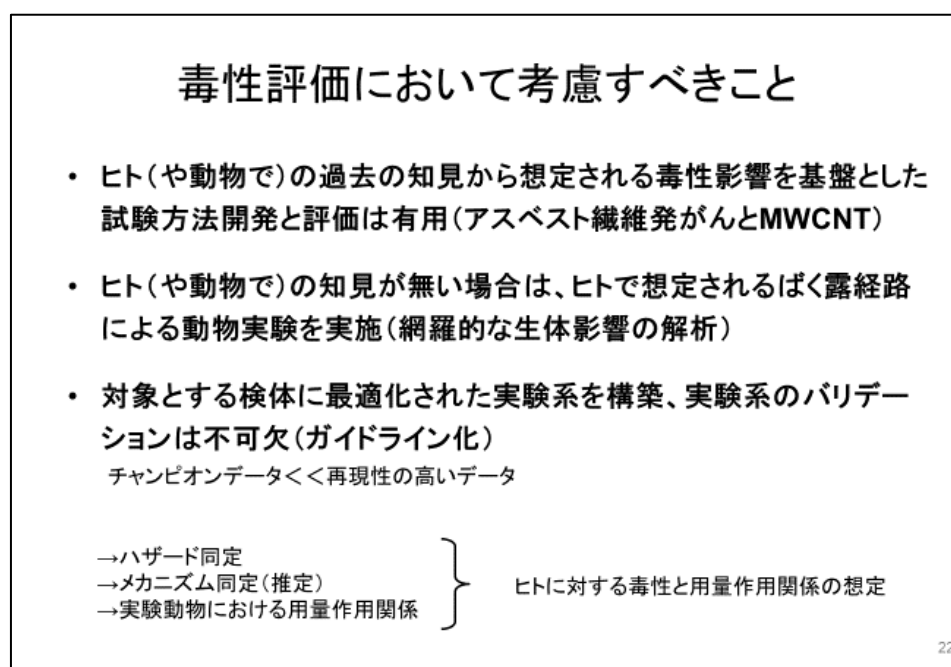


図 5-2-9

【質疑応答】

Q：他の繊維が摂取された場合の影響について、どれくらい応用可能性があるか教えていただきたい。例えば、セルロースナノファイバーや化学繊維を摂取した場合はどうなのか。

A：セルロースナノファイバーに関しては、内藤先生のところで実施されているのではないかと。MWCNT の吸入ばく露のがん原性試験で、GLP（Good Laboratory Practice; 優良試験所規範、試験実施適正基準）で実施されたのは日本バイオアッセイ研究センターにて実施された MWNT-7 しかなく、それぐらい難しい。短い試験期間であれば実施例があるが、慢性影響評価のための長期的ながん原性試験を実施しているところはほとんどないのが現状である。

粉体の吸入ばく露において一つ難しいことは、蓄積していくという点である。一般的な化学物質（低分子の気体、液体、固体）の吸入ばく露では肺から吸入され、体内で代謝され体外へ排出されていく。しかし、ナノマテリアルのように粉体の場合はどんどん肺に蓄積してしまうため、肺は過負荷に陥り、ある一定レベル以上のばく露は、検体特異的な毒性である

のかどうかはまだわかっていない。負荷量が多すぎるために非特異的な反応になっている可能性もある。この点を明らかにするために、我々はある一定の肺負荷量にとどめる^{かんげつ}間歇ばく露方法により評価を行っている。他の繊維はどうかと言ったら、分からないと言うのが私の答えである。

Q：ナノ材料について、OECDの方でも代表的なナノ材料というのを今も挙げていることをホームページで見た。二酸化チタンや多層カーボンナノチューブなどのナノ材料のリスク評価あるいはリスク評価のための研究は、2008年頃から現在にかけてどのようなトレンドになっているか。研究分野としての注目度や実施状況についてお伺いしたい。

A：ナノマテリアルとしてMEDLINE（メドライン、医学を中心とする文献情報データベース）を検索すると論文が多く出てきている。しかし、環境影響評価ではなく、ヒト影響評価がきちんとできているか、という点に関しては、私は多分、出来ていないと考える。先程、藤井先生とも話をしたが、欧州は動物実験をしない方向に進んでおり、*in vitro*の試験が選択されている。*In vitro*の試験で慢性影響を評価できるかという点、私はできないと思う。慢性影響評価を評価するためには、きちんと動物実験を行う必要がある。しかし、技術的なハードルが高く、しかも吸入ばく露可能な施設は非常に限定的で、ヒト影響評価に役立つ試験結果はまだ豊富ではないというのが私の結論である。

Q：ナノマテリアルの毒性試験全般に関しては、2020年1月から、欧州REACHがナノ物質に関して追加の登録を要求するというフェーズに入る。そのような法律体系になってしまっているため、既存の化学物質についてもナノサイズのものに関しては、追加で吸入試験を中心に補足的にGLP試験でデータを取り直し、REACHのために登録するということが今後、世界的に必要となってくる。そのため、評価試験自体は増えると思うが、いかがか。

A：論文レベルであれば、*in vitro*の試験は多く実施されており、それらの試験結果を用いたQSARのようなことを実施している論文を見かけることがある。しかし、よく見ると、チャンバーをよく振ったか、振らないかの違いが一番のポイントになっているのではないかと考えられる論文があり、実際にマテリアル自体の評価ではないように私には見えるものがある。

Q：これから厳密な方法での評価というのが求められるようになっていくのか。あるいは代替法で行うように、という方向になるのか。

A：代替法で登録してみて、REACHが承認するかどうかという話が出てくるように思う。また、やむなくOECDの動物試験を用いた吸入試験を、というのは、恐らく、非常に多くなってくるのではないかと。この話の本質は、ナノ物質は物質の形態によって毒性の顔つきも違い得る、という仮説のもとで話が進んでしまっていることである。同じCAS登録番号でREACH登録したひとつの化学物質が、原料の作られ方によって数百の異なる物質と分類され、個別に毒性評価をしなければならないことが起きてしまう。本当にそれが必要なのか、みんなが思っている状況である。

5.3 「生物多様性ビッグデータでマルチストレスの大海原に漕ぎ出そう！」

永井孝志（農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター生物多様性研究領域 上級研究員）

これまで農薬の生態リスク評価を研究してきたが、ここ数年は研究だけではなく実際のレギュレーションや制度設計のような実際の運用にも大きく関わってきた。今回はそういう話は一切せず、そもそも論に立ち返って考えてみませんかという話をしてみたい。

健康リスク評価では動物実験より疫学が重視される。マウスを使った毒性試験が動物実験としてやられ、徐々に投与量を大きくしていくと影響を受けるものが増えていくというような実験がされる。一方、疫学調査というのは、低暴露集団、高暴露集団、何段階でも良いが人々の健康調査をして影響を調べるようなものである。動物実験だと遺伝的にも同じマウスを使って、飼育条件も全く同じ、つまり化学物質の影響だけを見るシングルスストレスのきれいな世界になる。一方、疫学調査というのは、生活習慣も全然異なるし遺伝的な性質も全然違うような集団を比べて化学物質の影響を見るという、マルチストレスの大海原のような世界になっている。

動物実験はマウスの結果であって、ヒトの結果ではないので、これを不確実係数というのを用いて人に外挿するのがリスク評価の運用として行われている。具体的には影響が出ない用量をさらに種差 10、個人差 10 とかで 100 で割って、これを人間の安全性の目安とするとか、そういうような操作が行われる。ただ、疫学調査で信頼できるものがある場合には、実際に知りたいのはヒトの影響であるので、当然、そちらのほうを優先的にリスク評価に使用する。動物実験は実際の運用としてはそうした扱いになっている。

一方、生態リスク評価において、単一種を用いた室内毒性試験は藻類、ミジンコ、魚類を使った OECD のテストガイドラインが決まっており国際標準化が行われている。当然、日本もこれに従って試験を行うが、そのデータを実際にどういうふうにもリスク評価に活用するかというと、これは化審法の一つの例だが、農薬でも基本的な考え方はそれほど変わらない。データがどれくらいそろっているかによって、さきほど述べたような生態影響に外挿する際の不確実係数が出てきて、最終的に評価に使われる。

ある物質の毒性データの一覧を示す。藻類、ミジンコ、魚類の無影響濃度データがあった場合、一番低い濃度を採用し、しかしそれが室内毒性試験であれば実際の野外とは異なるということで安全性を見て 10 で割るというような考え方になる。結果として一番低い毒性値が 66 $\mu\text{g/L}$ であれば 10 で割って PNEC（予測無影響濃度）は 6.6、これを超えたらダメという評価になる。

一方で、そもそも生態リスク管理というのは何なのか、どの程度、守れば十分なのかと見ていくと、そのゴールは生物 1 個体ごとの保護ではなくて、生態系の持続的な維持である。例えば環境省の日本の水生生物の保全に係る環境基準値の設定の考え方を見ていくと、個体群レベルでの存続の影響を防止することが必要であると書かれている。特に感受性の高い生物個体の保護までは考慮せず、集団の維持を可能とするレベルで設定する。つまり、ミジンコが 1 匹死んではだめですよというものではないということ。

ただ、一方、やっていることはミジンコ 1 匹が死なない濃度どころか、さらにずっと低い濃度で管理レベルを設定しているというのが現実である。これは要するに実際の野外レベルでの影響というのがよく分からないので、結局は室内毒性試験から野外へ外挿するときに、より安全性を見ようという考え方に基づいている。結果的に実際にやろうとしていることと実際にやっている

ことが合っていないという大きなギャップが生じている。その根本には、結局、室内から野外への外挿というものがどうしても必要になってくるが、室内毒性試験では、実際の野外の影響というのは分からないというところが一番のネックになっている。ところが、実際の野外における生態影響を調べるようなリスク評価の制度は少なくとも日本国内には無く、ヒトの健康リスク評価で活用されるような疫学調査に相当する部分が無い。

農薬、化学物質でもマイクロプラスチックでも全部同じだが、実際にやることは暴露させて藻類とかミジンコとか魚類で毒性試験をして影響を見るということ。しかし実は河川水中の農薬のモニタリングデータ、我々が採ったデータで見ても、田植えの時期に色々な数十種類の農薬が一気に出てくることが分かる。こういうのを見ると、シングルスストレスのきれいな世界で農薬の影響だけを見ても、現場の評価にはすぐには適用できないことが分かる。

さらに農薬以外の化学物質でも影響がある。水質の影響もある。あるいは地形や気象、流水などの物理的な要因というのでも出てくる。さらに環境中は当然、この3種の生き物だけではなく、藻類でも色々な珪藻や、水生昆虫やカエル、それ以外にも沢山いる。それらは生物間相互作用、食ったり、食われたりの作用もありどんどん複雑な世界になる。これがここでいうマルチストレスの大海原である。

では、こういう世界における評価というのは、今はどういう扱いになっているかということを見ると、環境省が整理した「我が国における農薬生態影響評価の当面の在り方について」という文書によれば、野外で観察される人間活動による生態影響は農薬によるものばかりでなく、色々あると書いてある。多様な要因が同時に関与するため、これらの要因の中から農薬による影響のみを分離して評価することは困難であるとある。また、対照区の設定が困難であったことから農薬の影響を区別・評価することが難しい。こういう整理になっている。つまり、本来、守りたい汚い世界（マルチストレスの大海原）での影響は今のところ、ブラックボックス化している。それにも関わらず、きれいなシングルスストレスの世界の評価だけで進めようというのが今の運用になっているわけである。

ところが、近年になって野外での生態影響を評価する手法というのは急速に発展している。一つだけ紹介する。野外生物調査から重金属の影響を評価した事例で、横軸に銅、亜鉛、カドミウム、マンガンの濃度をとって、縦軸にトビケラ、カゲロウ、カワゲラという水生昆虫の種数の相対値をとる。その結果を見てみると、値は大きくばらけているが、濃度が上がるにつれて頭が抑えられてくるような傾向が見られる。頭が抑えられた中での変動になってくる。そしてその頭の部分、抑えられ始めたあたりを見てみると、ここから頭打ちになるというところの数値が見えてくる。これが実際に野外で影響を受け出す濃度だと分かる。このようにやっていくと実際の汚い世界でもどの辺から影響を受け出すかということを見ることができる。

当然、これをやるにはたくさんのデータがあって初めて分かってくることである。そのためこうしたことをやるには生物多様性のビッグデータが必要だということになる。毒性や暴露、生物多様性のデータベースはこれまでいろいろある。生態毒性に関しても米 EPA の ECOTOX データベースという巨大なものがある。暴露については、ここでは ChemTHEATRE を例に出している。生物多様性については、例えば GBIF というフリーでオープンな生物多様性データがある。これは陸上の植物とか昆虫とかのデータが多く、水生生物のデータは全然ない状況である。

水生生物の調査は私も結構やってきたが大変である。ここでは川の話になるが、まず、川でアプローチできる場所というのはそんなに多くなく、ほどよい深さが必要である。生き物を集め

てきて、それを川の横にテーブルを出して、泥の中から水生昆虫を1匹ずつピックアップして移していくというような作業を何時間か続けることになる。1日にせいぜい2カ所やれば精いっぱいである。

そこで出てきたのが環境 DNA という革命である。環境 DNA というのは環境水中に溶け出している生物由来の DNA のことだが、わざわざ川に入らなくても水だけをとってきて、その中に含まれる DNA の配列を解析すると多様性の評価ができるというもの。今のところ、種の在、不在ぐらいが実用化しているところである。これまで、主に絶滅危惧種が存在するかどうかというような単独種の調査で使われてきたが、近年ではメタバーコーディング手法によって網羅的に種を解析するという方法がかなり実用レベルに達してきたというような状況である。

こういうことができるようになると、環境モニタリングのあり方というのも劇的に変わってくるのではないかと考えられる。現在、環境基準点で様々な化学物質の分析モニタリングがなされている。水をとってきて濃度分析して PEC とし、室内毒性試験由来の PNEC と比較するというのが標準的なリスク評価 (PEC/PNEC の世界) だが、環境 DNA 解析ができるようになると、水をとってきて濃度分析すると同時に水中 DNA の配列を解析して生物多様性も評価できるようになる。

これを同時にやっておくと、例えばリスク評価で少しだけ影響濃度を超えていたようなときに、実際の現場の生物相はどうなっているかを見ることで、生態学的意義というものちゃんと考察できるようになる。また、先ほど例で出したような環境濃度と多様性というものを突き合わせて環境疫学調査をすることで、実際に現場で本当に化学物質の影響が起きているのかどうかに答えを出すことができるようになる。今すぐできるわけではないが、そういうことをやっていってはどうかと思う。

環境 DNA というのは日本がリードしている数少ない分野である。日本としてリソースを継続的に投入するべきである。プロジェクトでやってそれで終わりというものではなく、継続的に投入していくべき。もちろん、まだまだ、やるべきことはあり、データベースの拡充や調査法、定量的評価、この辺は短期的課題、大体5年ぐらいでかなりのところまでいくのではないかなと思う。

挑戦的な分野であるということも考慮すべきで、これまで困難だった野外の生態影響が評価できるようになる。濃度と生物のデータベースを構築・活用する。ビッグデータを読み解く手法を開発する。これらが10年スパンの中長期的な課題になる。当然、これは分野横断的に取り組む必要性があり、生態学、遺伝子解析という生き物関連の分野だけではなく、化学物質の環境動態、ビッグデータ解析 (AI も含む)、それから化学物質の影響を判断する因果推論、また当然行政施策と絡むので行政との連携などが一堂に会す、というよりはこれらが全部わかる人材を育てることが、本当に社会に受け入れられるリスク評価をつくっていくという意味では、重要ではないか。

【質疑応答】

Q: 環境 DNA のことについて教えていただきたい。最近、海の魚でもデータが出始めているところだが、完全にわかっている群集に対してやっても正解率が100%にならなかったり、海の中でも上のほう、中層、下のほうと棲んでいるところで全く生物種が異なる中で上のほうはうまくいくが下では全然うまくいかない等、そういうことが結構出てきている。河川では知見がたまってきて、環境 DNA がかなり正解に近いところまで分かるようになっている等

のことがあるか。

A：海のほうのデータがわからないため比較はできないが、河川でも外れやすい生き物と当たりやすい生き物という差はある。当然、まだまだ課題というのがあって、すぐに実用できるというレベルではないが、それは今後、研究によって解決できるところではないかと考えている。

Q：どれくらいの種に対して存在する、しないとかというのがわかるのかを教えていただきたい。例えば IUCN のほうで特定されている種の何割ぐらいは同定できるとか、そういったところについて教えていただきたい。

A：配列を比較するデータベースがどれだけ豊富かということに依存してくるので、それがとにかく沢山出てくればそれに対応する種は特定できる。ただ、これはもともと微生物から出てきた考え方で、微生物の世界でこれまでやられてきて、その結果、まだ、知られていない種ばかり大量に出てくる状況。まだ培養されたこともない、種の名前もつけられていない、そういう配列が大量に出てきてどうしようもなかったようなところから、もう少し種を拡張して、こういう生態系の生き物に適用できないかというところで発展してきたという経緯がある。まだまだ、色々やらなければいけないことがある状況。

Q：環境 DNA は非常に強力だが、何が標準なのかというのをつくるのが大変ではないか。今、データをとっても、今、とったデータは本当に正しいのか、本当にあるべき姿はひょっとしたら過去のものかもしれないし、それはどういうふうにして作っていくのかというのが、結構難しい問題ではないかと思う。

A：後づけではあるが、そもそも今とったデータはいつからいつまでの生物相を反映しているのか、どのくらいの距離までの生物相を反映しているのかといったような、DNA そのものの環境動態の研究というのが今進みつつある。

5.4 「環境データマネジメントの推進による環境リスク評価の透明化・迅速化・高度化」 仲山慶（愛媛大学沿岸環境科学研究センター 助教）

魚類を対象にした化学物質の毒性影響評価やリスク評価が本来の私の専門だが、愛媛大学にて生物環境試料バンクの設立にあたり、保存試料のデータベースを作成することを契機にしてデータベース業務に携わり、そこから環境モニタリングデータを登録・閲覧するデータベース、ChemTHEATRE を構築するプロジェクトを立ち上げるに至った。今回はデータマネジメントに関して、その推進が環境リスクの透明化、迅速化、高度化に繋がられるという研究に関して紹介したい。

最初に、こちらは 2019 年 5 月にスプリングネイチャーから出たレポートだが、日本人研究者を対象にしたデータシェアリングに関する調査結果である。個々の共同研究でプライベートにデータを共有しているというものも含めると 95%の日本人研究者がデータを共有しているとのこと。これはとくに驚くべき数字でもないが、プライベートだけでなくパブリックにデータを共有している割合は 62%にまで減少する。データ共有の方法については、半数程度は論文の公開時にサブリメントとして公開しているとのことである。一方、特定のリポジトリやデータアーカイブにデータを登録している人になると 25%程度であり、研究分野による違いはあると思われるが、あまり高くないのが現状である。環境化学や環境毒性学ではおそらくもっと低いのではないかと個人的には感じている。

関連分野の国際学会の動向についてだが、SETAC では最近、パブリックなデータを使ったデータ解析に関するセッションが開かれている。2019 年 11 月にトロントで開催された北米 SETAC でも、パブリックにアクセスできるデータを使ったツールの開発のセッションが持たれた（「Publicly Accessible Data Analytic Tools for Environmental Toxicology, Chemistry and Risk Assessment」、SETAC North America 40th Annual Meeting, Nov. 3-7, 2019, Toronto, Canada）。このセッションでは、ライトニング形式でツールを紹介した後に、個々にモニターを使ってデモンストレーションするというスタイルであり、非常に画期的な取り組みだと感じた。

紹介されたツールは図 5-4-1 に挙げるような総合情報サイトであったり、QSAR とか毒性情報、オミックスデータや AOP、種の感受性を予測するものなど様々だった。2020 年にシンガポールで開催される SETAC の世界会議があるが、ここでも同様のセッションが予定されており、興味のある方には是非ご参加いただきたい。

SETAC in Toronto (2019) でのSpecial Forumで紹介されたツール等		
カテゴリ	名称	開発者
Hub (cross-search)	The U.S. Environmental Protection Agency Computational Toxicology Program [EPA CompTox] (https://comptox.epa.gov/dashboard)	US EPA
QSAR	QSAR-INSubria [QSARINS] (http://www.qsar.it)	University of Insubria
Toxicity	toxEval R-package [toxEval] (https://github.com/USGS-R/toxEval)	USGS US EPA
Microbiome	Web-based tool for comprehensive statistical, visual and metaanalysis of microbiome data [MicrobiomeAnalyst] (https://www.microbiomeanalyst.ca)	McGill University
Metabolomics	Statistical, functional and integrative analysis of metabolomics data [MetaboAnalyst] (https://www.metaboanalyst.ca)	McGill University
Toxicogenomics	Visual analytics for comprehensive toxicogenomics profiling [EcoToxExplorer] (https://www.ecotoxplorer.ca)	McGill University University of Saskatchewan Environment and Climate Change Canada
AOP	The Adverse Outcome Pathway-Wiki [AOP-Wiki] (https://aopwiki.org)	SAAOP OECD
Species Sensitivity	Sequence Alignment to Predict Across Species Susceptibility [SeqAPASS] (https://seqapass.epa.gov/seqapass/)	US EPA
Toxicity	EnviroTox Database (https://envirotoxdatabase.org)	HESI

図 5-4-1

2017年にミネアポリスで開催されたSETACでもパブリックなデータを活用したデータ解析に関するセッションが持たれたが、このときの座長の言葉を借りると、データマイニングが進まないのは必要なデータが最適な形式で整理されていないからである。このようなことがよく言われているが、実際にこれまでに得られている多量のデータを使って解析する場合、まずデータ起こしから始めるというような状況が今でも続いている。この現状を少しでも改善したいという思いから、我々はモニタリングデータを一元的に管理するシステム（ChemTHEATRE）を開発し、今では以下のサイトから（<https://chem-theatre.com>）登録データが閲覧でき、環境媒体や化合物種、試料の採取地点や採取時などから絞り込んで検索することも可能としている。

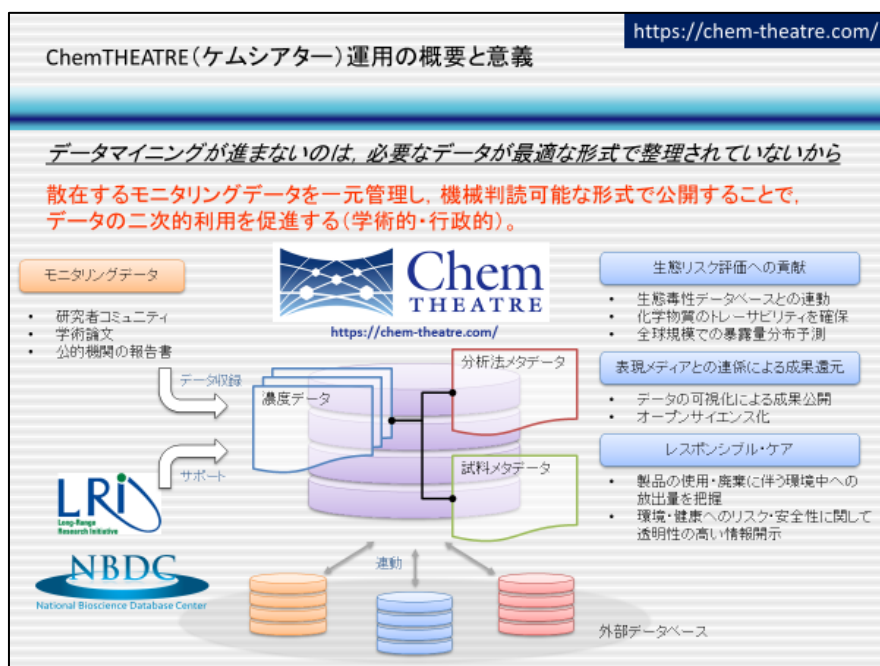


図 5-4-2

ChemTHEATRE トップページ (<https://chem-theatre.com/>)

<https://chem-theatre.com/>

ChemTHEATRE

Welcome to ChemTHEATRE

ChemTHEATRE: Chemicals in the THEATRE (Traceable and Accountable for Toxicity and Responsible care Engagement) is the platform to deposit and visualize monitoring data of environmental contaminants more effectively than ever. You can currently see so many monitoring data of environmental contaminants in scientific journals or reports by public organizations, but unfortunately in a variety of forms such as texts or excel files. That leads to poor use of such valuable data, which can be input data for the modeling and materials for validation.

To tackle this problem and make use of such data, we first put together such scattered data in one database: ChemTHEATRE, properly and well organized. It will ensure traceability of chemicals and help you simulate the environmental behavior and fate, or assess the risk. Moreover, ChemTHEATRE will make the prediction of global chemical pollution easier in cooperation with external database or other tools.

ChemTHEATRE was supported through a GrantData of Long-range Research Initiative (LRI) by Japan Chemical Industry Association (JCIA).

Released Entries

Sample Type	#Samples	Chemical substance Type	#Data	Contributor Type	#Project
Human samples	915	Organochlorine PCBs	4867	Chine University	36
Water	677	Flame retardants PBDEs	4506	National Institute for Environmental Studies	4
Sediment	404	PCBs	3524	Kagoshima University	4
Neoplasms placemodules	216	Organochlorine Co-PCBs	3082	Fisheries Research and Education Agency	3
Soil	153	Phenols	2408	Yokohama National University	1
Air	135	Organochlorine PCBs	2252	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)	1
Mykiss gallapropionals	127	Metals/Elements	2130	Chinese Academy of Sciences	1
Katzenstein proteins	87	Perfluorinated and polyfluorinated substances	2023	Health Research, Inc. (New York State Department of Health)	1
Nucleosides propanolides	86	Organochlorine PCBs	1739	University of Shizuoka	1
Mykiss acids	75	Flame retardants	5851	Center for Environmental Science in Sakuma	1

図 5-4-3

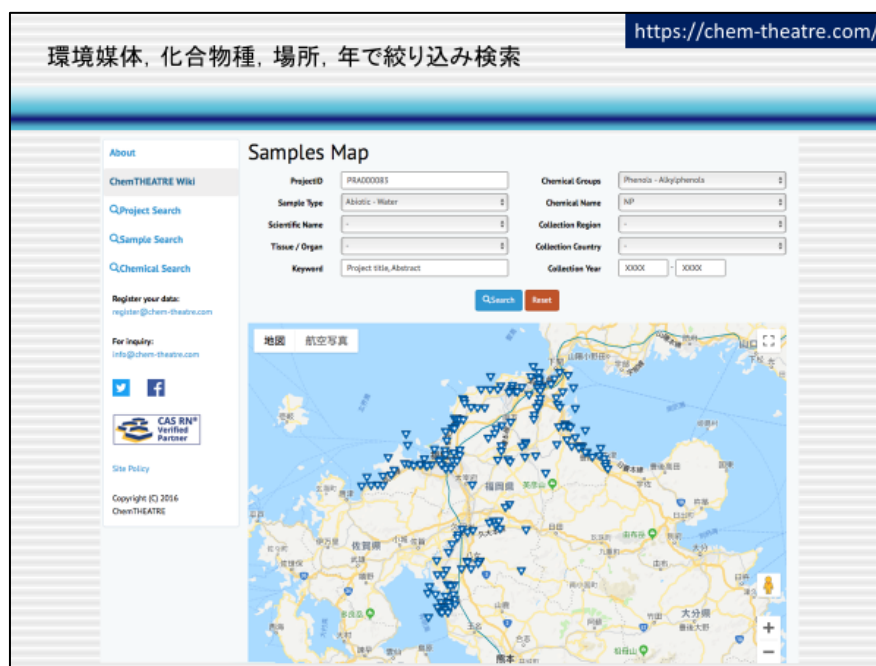


図 5-4-4

ChemTHEATRE 以外にも、国内発の様々なデータベースがある。例えば国立環境研究所でつくられている Webkis-Plus では化学物質の法規制情報や暴露情報、分析法などを含む総合情報が提供されている。他にも、NITE（製品評価技術基盤機構）が運営されている NITE-CHRIP をはじめとし、モニタリング情報、リスク評価ツール、QSAR や法規制に関する下記に示すようなサイトが存在する。

このようなデータベースやツールは、単体でももちろん意義はあるが、ユーザーの使いやすさを考えると可能な限りつないで使えるようにした方が良い。現状では、草の根運動的ではあるが、管理者同士で意見交換しながら連携を進めている。例えば、化学物質の識別子として CAS 登録番号（CAS RN[®]）を使って、ChemTHEATRE と Webkis-Plus を相互リンクさせた。また、産業技術総合研究所が開発したリスク評価ツール（AIST-MeRAM）は単体でも環境中予測濃度を用いて暴露評価の実行が可能なツールだが、外部データを読み込むことも可能なため、ChemTHEATRE からエクスポートした実測値を、AIST-MeRAM にインポートして暴露評価およびリスク評価を実施することも可能となっている。このような連携により、例えば評価対象の化学物質が PNEC を超過していたケースがあった場合、その情報を時空間情報とともに提示することができるというメリットがある。

日本発の主な化学物質の有害性、曝露、リスク評価に関するツール等		
カテゴリ	名称	開発者
総合情報	化学物質データベース [Webkis-Plus] (https://www.nies.go.jp/kisplus/)	国立環境研究所
モニタリング	水環境総合情報サイト (https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/)	環境省
モニタリング	Chemicals in the Theatre [ChemTHEATRE] (https://github.com/USGS-R/toxEval)	愛媛大学 (その他5機関)
総合情報	化学物質総合情報提供システム [NITE-CHRIIP] (https://www.nite.go.jp/chem/chrip/chrip_search/systemTop)	製品評価技術基盤機構
リスク評価	汎用生態リスク評価管理ツール [AIST-MeRAM] (https://meram.aist-riss.jp)	産業技術総合研究所
リスク評価	化学物質リスク評価支援ポータルサイト [JCIA BIGDr] (https://www.jcia-bigdr.jp/jcia-bigdr/top)	日本化学工業協会
QSAR	生態毒性予測システム [KATE] (https://kate.nies.go.jp/index.html)	国立環境研究所
法規制等	化学物質情報検索支援システム [chemiCOCO] (http://www.chemicoco.go.jp)	環境省

図 5-4-5

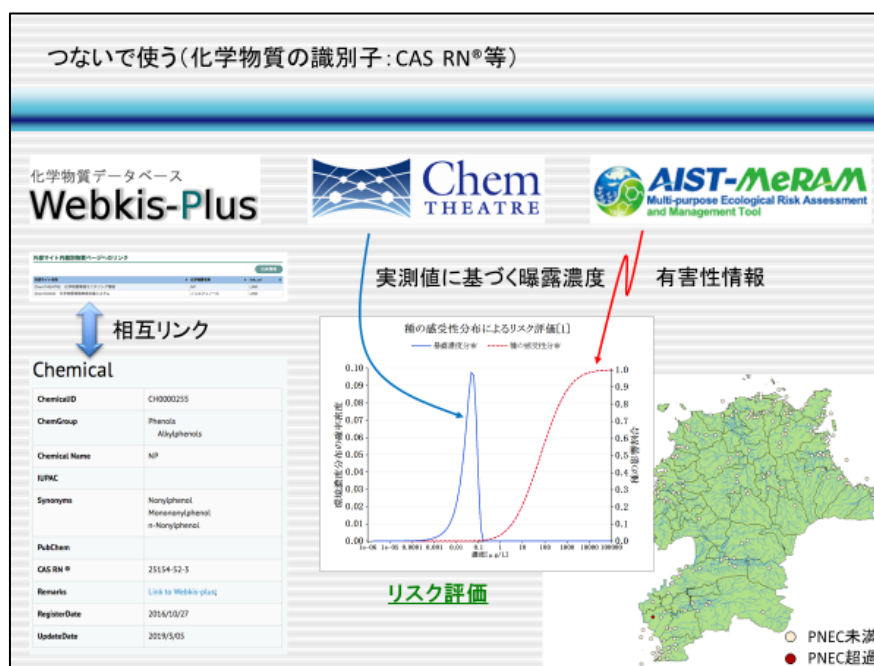


図 5-4-6

メタデータとして時空間情報をもつデータ同士は親和性が高いため、環境 DNA データともつないで解析することが可能だと思われる。例えば舞鶴湾でとられた海水中に含まれる DNA を解析して、どのような魚種がいたかを図 5-4-7 の Yamamoto *et al.* (2016) のように地図上にプロットすることができ、時空間情報で化学物質のモニタリング情報や排出量情報、あるいは予測濃度でも良いが、併せて解析することで環境 DNA 情報も将来的に化学物質のリスク評価に使えるかもしれないと考えている。ただし、現状では検出できる生物種が限定されているとか、定量的

な議論が困難であるなどの問題点があり、解決すべき課題は残っている。

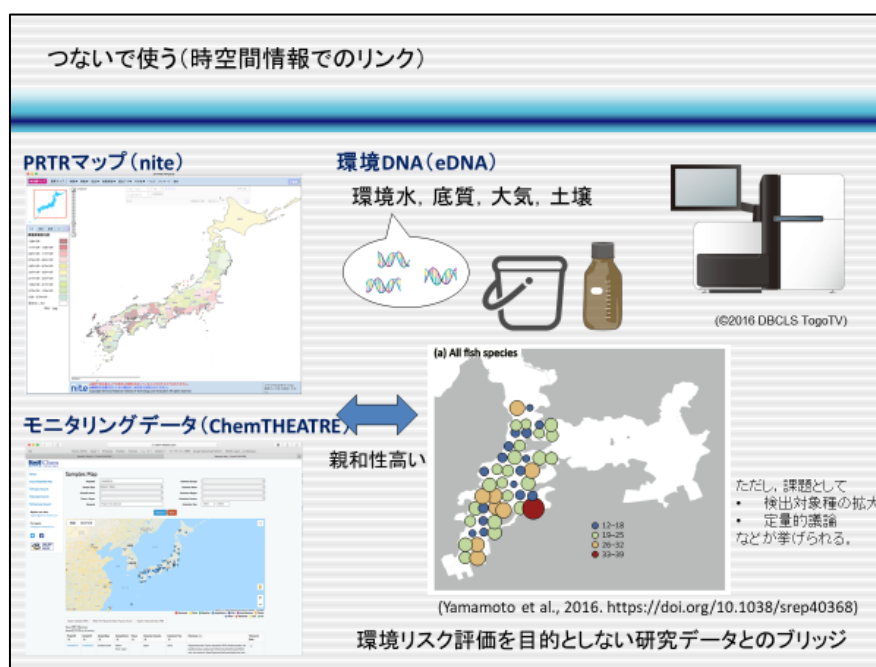


図 5-4-7

最近、データ駆動型サイエンスと呼ばれる研究手法が多様な学問領域で取り入れられているが、化学物質のリスク評価においてもデータ駆動型サイエンスを推進するためには、必要なデータをメタデータとともに蓄積しておくことが重要だと考えている。

近年、次世代シーケンシングなど、きわめてハイスループットな実験系が多数使用されるようになったが、出力されるデータを十分に活かしているかという点、多少なりともデータが手に余るという状況はあると思われる。また、データを取得した当人が意図しなかった方法や分野で二次的に利用されることも考えると、パブリックにデータを共有しておくことが重要だと思っている。

それから、データは活用されてこそ価値を生み出すため、モニタリング情報をはじめ化学物質に関するデータが整理されていないという状況はとにかく改善すべきである。データマイニングをするにあたってその第一段階としてデータ起こしから始めるという状況から脱却して、必要なデータが集約されている状況を作っておくべきだと思う。

難しいのは、それをどのように継続していくかということである。特定の個人や小規模団体での維持は困難という点、ほぼ無理である。データの特性として、多くの情報とリンクさせて様々な分野で活用できるがゆえに管理を押しつけ合うような問題も生じ得る。そのためプロジェクトが終了すると直ちに資金難となり、結局、アーカイブに頼るというような結論に陥っていることがよくあると聞く。JSTのバイオサイエンスデータベースセンターにデータベースアーカイブがあり、そちらでデータベースのデータをアーカイブしていただけるが、本体のデータベースが継続が困難になり、JSTのデータベースアーカイブにしかデータがないというケースも少なからずあるようである。このような状況を考慮した上で、データシェアのための中枢機関があつて、データベースの維持や管理だけでなく、効果的なデータ整理の方法など、トップダウン的なやり方でも構わないのでその役割を担ってくれるとよいのではと思っている。

もうひとつ克服すべき課題として挙げられるのは、個々の研究者の意識改革である。データベースの利便性は多くの研究者が認めるところではあるが、実際に構築してもなかなか成果として認められにくい現状がある。ひどい場合には他人のふんどしで相撲を取っていると言われたこともある。また、データを生み出す側の研究者にデータベースへの登録をお願いしても、その対応には著しい個人差があり、直ちに登録してくれる人もいれば、論文による公開だけで十分だと考える人もいる。データを登録しても登録者には直接のメリットが無いとの考えからか、能動的に動こうとしないという状況があり、これを変えるにはある程度時間がかかるだろうと思っている。このような状況を改善するために、データの二次利用に関するベストプラクティスをひとつでも多く提示したいと思っている。例えば、ChemTHEATRE を活用することで、同一地点の同時期に存在していた複数の化学物質の情報が検索可能なので、現実には即した形での複合的な生態毒性評価に取り組むための根拠を提示することができる。

以上の問題を克服するためにも人材育成が重要である。現在、データサイエンス教育は各大学が力を入れつつあるが、データリテラシーの向上によりデータシェアリングに対する考え方も変わっていくことを期待している。

現状と課題	
意義	データ駆動型サイエンス 法則性、特異性を見出す強み（種間共通、地域特異的など） 高スループットな実験系（→データが手に余る） 意図しなかった分野での応用が可能（経済活動、教育にも） Society5.0のために データ起こしからの脱却
継続性	特定の個人や小規模団体での維持は困難 分野横断的に応用が可能（→誰がやるべき？） プロジェクト終了とともに資金難（→アーカイブに頼る） トップダウンでデータ整備していく（中枢機関が必要）
意識改革	成果として認められにくい（→他人のふんどしとか言われる） データ登録者へのメリット薄（→能動的に動かない） ベストプラクティスを提示 人材育成

図 5-4-8

【質疑応答】（C：コメント）

C：データの蓄積が重要であるという点について、海のデータに関してはどういうふうにコントロールしていくかということについての政府の方針がそろそろ決まりつつある。MDA、Marine Domain Awareness といって、安全保障上の問題が出てくる物理的、科学的なデータもあるため、アメリカでは軍隊主導でコントロールしている。日本の場合は海保主導でやるということになっている。海保が一括して判断して公開していくという流れになっており、網羅的なデータは海保に全部コントロールをお願いする形になっている。

また採れたデータに関して、我々のところでは DOI をつけて公開することとしている。オー

ブンサイエンスの議論のところで最近議論されているが、DOIがあればどうやって引用されて、どこで使われているかというのがわかってくる。研究としてというよりはベーシックなデータのプロバイダーとして、どれだけの価値があるかというのを定量的に見ることができるため、データの DOI をつけるというのがデータを出す人のほうのインセンティブにつながってくる。将来的にこれだけの研究にこのデータは使われたということが分かれば、プロバイダーのモチベーションも上がるというふうに考えている。

C：継続性というところがデータベースが一番大変だと思う。おっしゃられるとおり、プロジェクト終了とともになくなってしまうということもあるためデータ整備が必要というのは本当にそう思う。

もう一つ大変だなと思うのはセキュリティ対応である。中でサーバーを立ててデータベースを作っているとサーバー管理者が大変な思いをして管理しなければいけない。外に投げてしまえばそれでいいかもしれないが、そうすると今度は使い勝手の問題が出てくる。

C：それほど規模が大きいので、現在は外にお願いしている。

C：セキュリティの問題は公的機関の場合には交付金減少との関係もある。データをオープン化するのではなくデータを使って収入を得る方向に向かっているところもあり危惧される。

C：海外研究者と同時期に始めても気がついたらあっという間に追い抜かれて周回遅れみたいな状況になるということがよく見られる。海外のデータはほぼほぼオープンになっているため、クローズ化しているうちに置いていかれてしまう。有料化したところで収益が出るかは使い手がどれぐらいいるのか次第である。

Q：自分たちのデータが出されることで、その地域の生活に影響が及ぶかもしれないという場合がある。得られたデータの倫理的側面というか、そういうものの使用に対する行動コンダクトというのは環境データについてはどういう状況か。

A：同じようなことがあると思う。論文データにもよるが、例えば黒本（化学物質環境実態調査）のデータは、そもそも採水地がピンポイントで表示されているためそのまま表示しているが、配慮が必要なものについてはデータ提供者とも話をし、大きく囲むなどピンポイントでは提示しない。そういう配慮は今のところやっている。

5.5 総合討論

- 時間の関係で総合討論は難しい状況だが、第三部でも色々な示唆をいただくことができた。例として挙げると、様々な化学物質が存在する複雑な野外環境における影響評価を可能にする手法や技術の必要性、その一例としての環境 DNA 等についてご提案いただいた。動物実験に関しては再現性の高いデータをとるための実験系の開発が重要になること、また欧州を中心に動物実験をなくす方向にある中であって、良質な動物実験データを体系的・戦略的にとることがむしろ日本の強みとなるのではないかとのご意見もいただいた。更にデータがない状況で評価するためのリードアクロスのような毒性予測のための研究の必要性や、難分解性・生物蓄積性に関する研究の必要性についてもお話をいただいた。

6 まとめ

本ワークショップでは、環境リスク評価研究を取り巻く我が国の現状および今後に向けた課題について次の3点をテーマとして議論を行った。

- ①海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究
- ②我が国の環境リスク評価研究体制の在り方
- ③化学物質の環境リスク評価に関連する挑戦的な基礎研究開発課題

第一部では海洋プラスチックごみ問題への対応に係る国内外の研究動向ならびに関連動向について発表・議論が行われた。欧州を中心にマイクロプラスチックを規制する動きが進む一方、その根拠となるべき科学的知見、すなわちプラスチックが生態系や人の健康に与える影響に関する科学的知見が圧倒的に不足していること、それゆえ産業界と学界が協力してリスク評価のための標準的なフレームを作成する動きがあること等が共有された。また我が国では深海ならびに日本周辺海域をフィールドとしたプラスチックごみの分布実態や環境中での運命、生態系や人への影響、深海における生分解性プラスチックの分解挙動等に関する先駆的研究が始まっているが、試験的な試みも含まれており、より本格的かつ体系的な取組みの必要性が確認された。具体的には、陸域や河川も含めた環境中でのプラスチックの動態や運命(微細化プロセス)のより詳細な解明、それらを進める上で欠かせない分析機器(特にナノ・マイクロスケールのプラスチック片を回収・分析するための機器や技術)開発、有害性評価手法の開発や生体影響のより詳細な解明などが挙げられた。また現有のデータや知見を総合したリスク評価やライフサイクルアセスメントの実施の必要性も指摘された。更に、生分解性プラスチック等の代替素材開発が進んでいるが、それらの実環境下での分解性を科学的に詳細に明らかにする必要性も指摘された。

第二部では我が国の環境リスク評価に係る研究体制を取り巻く現状や今後について発表・議論が行われた。まず、社会の中における環境リスク評価研究の役割を考えた際に、予防原則に基づく措置によって全てが止まってしまうのではなく、あくまでそれは暫定的なものであり、本来は順応的な管理が求められること、そのためにはリスク評価という科学的な営為とリスク管理との間に円環的な構造をつくり出す必要があること等が指摘された。また当該分野において大学はこれまで産業界や行政と一定の距離を置く傾向があったが、今後は産学官が問題を共有して解決に向けた議論を行うプラットフォームを構築していくことが、科学的な知見の蓄積のみならず、問題への迅速かつ体系的な対応や、企業における製品開発・市場化に向けた取組みの活性化にもつながるのではないかと提案があった。加えて、環境リスク評価に必要な学問分野は極めて多岐に亘るため、様々な専門性を身に付けた人材の育成の必要性が指摘された。しかしその一方、例えば高分子科学、毒性学、化学工学など異分野に跨る多様な人材が集まり、連携して問題に取り組む体制を構築することによっても対応でき、むしろそれが現実的であるとの意見もあった。実際にドイツの大学でそうした研究組織が形成されいる事例も紹介された。

第三部ではプラスチックを含む化学物質の環境リスク評価に係る中長期的観点からの研究開発テーマについての発表・議論が行われた。様々な化学物質が存在する複雑な野外環境においてそ

これらの複合的な影響の評価を可能にする手法や技術の必要性、その一例としての環境 DNA 等についての提案があった。欧州を中心に動物実験回避の方向にあるが、良質な動物実験データを体系的・戦略的に収集・蓄積することがむしろ日本の強みとなるのではないかとの指摘があった。また動物実験においては再現性の高いデータをとるために実験系の開発が重要になるとの指摘もあった。他方、データが十分に揃っていない状況下でも評価を実施できるよう、リードアクロスのような毒性予測のための研究開発の必要性も確認された。更に、毒性に限らず、難分解性および高い生体蓄積性に関する研究開発は産業界が直面する課題として重要性が高まっていることも指摘された。

以上、本ワークショップを通じて得られた各種の知見・情報や議論内容については、戦略提言を目指す今後の調査活動の参考にするとともに、その他の CRDS の各種活動にも最大限活用していく予定である。

付録1 プログラム

(敬称略)

時間	内容
13:00-13:20	開会挨拶、趣旨説明 JST-CRDS
13:20-14:50 (90min.)	<第一部： 海洋プラスチックごみ問題への対応としての環境リスク評価研究> ● テーマ：今後 5 年程度の期間で国として取り組むべき研究開発課題とその実施方策 ● 話題提供者（ご発表 12 分＋質疑応答 3 分）： 1) 海洋研究開発機構 島村道代 調査役 2) 東京大学 道田豊 センター長・教授 3) 産業技術総合研究所 内藤航 グループ長 4) 花王株式会社 藤井健吉 ディレクター ● コメンテータ（コメント 3 分）： 1) 産業技術総合研究所 鳥村政基 副研究部門長 2) 愛媛大学 日向博文 教授 3) 東京都市大学 伊坪徳宏 教授 4) 東京大学 平尾雅彦 教授
14:50-15:00	<休憩>
15:00-15:50 (50min.)	<第二部：我が国の環境リスク評価研究体制の在り方> ● テーマ：目指すべき理想像、大学や資金配分機関の役割、何が欠けているか？ ● 話題提供者（ご発表 10 分＋質疑応答 5 分）： 1) 名古屋大学 赤渕芳宏 准教授 2) 九州大学 大嶋雄治 教授
15:50-16:00	<休憩>
16:00-18:00 (120min.)	<第三部： 化学物質の環境リスク評価に関連する挑戦的な基礎研究開発課題> ● テーマ：国として取り組むべき挑戦的な研究開発テーマ（短期、中長期）※1 ● 話題提供者（ご発表 12 分＋質疑応答 3 分）： 1) 花王株式会社 藤井健吉 ディレクター 2) 国立医薬品食品衛生研究所 高橋祐次 室長 3) 農研機構 永井孝志 上級研究員 4) 愛媛大学 仲山慶 助教 ● コメンテータ（コメント 3 分）： 1) 九州大学 高原淳 教授※2
18:00-18:05	閉会挨拶 JST-CRDS

※1 ここでは「短期」は 5 年程度先まで、「中長期」はそれ以降の想定とした。

※2 諸事情により第三部の時間帯にご発表いただいたが第一部に関連するコメントをいただいた。

付録2 ワークショップ参加者リスト

＜WS 参加者＞ （敬称略、五十音順）

赤渕 芳宏	名古屋大学 大学院環境学研究科 社会環境学専攻 准教授
伊坪 徳宏	東京都市大学 環境学部 環境マネジメント学科 教授
大嶋 雄治	九州大学 大学院農学研究院 資源生物科学部門 動物・海洋生物科学 教授
島村 道代	海洋研究開発機構 経営企画部 調査役
高橋 祐次	国立医薬品食品衛生研究所 安全性生物試験研究センター 毒性部 第3室室長
高原 淳	九州大学 先端物質化学研究所分子集積化学部門 教授
鳥村 政基	産業技術総合研究所 環境管理研究部門 副研究部門長
内藤 航	産業技術総合研究所 安全科学研究部門 リスク評価戦略グループ 研究グループ長
仲山 慶	愛媛大学 沿岸環境科学研究センター 化学汚染・毒性解析部門 助教（特任講師）
永井 孝志	農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター 生物多様性研究領域 化学物質影響評価ユニット 上級研究員
日向 博文	愛媛大学 大学院理工学研究科 生産環境工学専攻 教授
平尾 雅彦	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム専攻 教授
藤井 健吉	花王株式会社 研究開発部門 安全性科学研究所 ディレクター
道田 豊	東京大学 大気海洋研究所 国際連携研究センター センター長／教授

＜JST-CRDS 検討チームメンバー＞

佐藤 順一	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット 上席フェロー ※チーム総括責任者
中村 亮二	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー／ユニットリーダー ※チームリーダー
有本 建男	JST-CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット 上席フェロー
小林 恵	JST プログラム戦略推進部 主査
二歩 裕	JST プログラム・マネージャーの育成・活躍推進プログラム 研修生 ※東京農工大
長谷川景子	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
原田千夏子	JST 未来創造研究開発推進部 副調査役
前川 智美	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
松村 郷史	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
宮下 哲	JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー／ユニットリーダー
吉田 有希	JST-CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット フェロー

＜傍聴登録＞ ※2019年12月2日時点 （敬称略、順不同）

菅野 普	内閣府 政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付 上席政策調査員
鈴木 悟司	文部科学省 研究開発局 海洋地球課 課長補佐
日比野 祥	文部科学省 研究開発局 海洋地球課 係長
村上 泰紀	文部科学省 研究開発局 海洋地球課
中田 希衣	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 行政調査員
橋本 成俊	環境省 大臣官房 総合政策課 環境研究技術室 係員
原島 省	独立行政法人環境再生保全機構 環境研究総合推進費プログラムオフィサー

■ワークショップ報告書 編纂メンバー■

総括責任者：佐藤 順一	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
チームリーダー：中村 亮二	フェロー／ユニットリーダー	(環境・エネルギーユニット)
メンバー：有本 建男	上席フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)
小林 恵	主査	(JST プログラム戦略推進部)
二歩 裕	JST PM 育成・活躍推進プログラム研修生	
長谷川景子	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
原田千夏子	副調査役	(JST 未来創造研究開発推進部)
前川 智美	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
松村 郷史	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
宮下 哲	フェロー／ユニットリーダー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
吉田 有希	フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2019-WR-05

俯瞰ワークショップ報告書

社会および産業競争力を支える基盤としての 環境リスク評価研究

令和元年 12 月 3 日 (火) 開催

令和 2 年 3 月 March 2020

ISBN 978-4-88890-666-1

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit,

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電 話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

©2020 JST/CRDS

許可無く複写／複製を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.

