

3.2 環境汚染・健康区分

環境汚染・健康区分では、下記の6つの研究開発領域を設定した。

- 3.2.1 大気汚染
- 3.2.2 水質汚染
- 3.2.3 土壌・地下水汚染
- 3.2.4 物質循環・環境動態
- 3.2.5 健康・環境影響
- 3.2.6 化学物質リスク管理

区分の概要を以下にまとめる。

大気汚染の研究開発は欧米、特に米国が進んでいる。日欧米の大気汚染課題は、PM2.5と光化学オキシダント（オゾン）であり、生成機構が複雑なため、対策には大気モデルを用いた研究が重要である。日本では分析や機構に関する基礎研究は行われているが、固定発生源の測定に関する研究者が少なく排出インベントリの整備に課題がある。短寿命気候汚染物質（SLCPs：Short-Lived Climate Pollutants、メタン・対流圏オゾン・ブラックカーボン）のようなローカルな大気汚染と地球環境の両方に関わる物質の排出が開発途上国での課題として注目されはじめている。

水質汚染は、広域的かつ新たな汚染物質（医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs：Pharmaceuticals and Personal Care Products）やマイクロプラスチックなど）の出現により複合的な汚染現象へと変化している。欧州は問題自体の発掘に積極的に関与し、全体的に研究が盛んである。新たな問題の発見と規制の先導によるアドバンテージは大きく、日本は欧米の後追いとなっている点是否めない。日本はマイクロプラスチック中の化学物質測定など世界をリードする領域もあるが、全体的に縮小傾向にある。米国では、病原性微生物や微量物質の分析法などで優位に研究が進められている。先端的な課題だけでなく、気候変動や資源採掘、地域環境の保全に関連する研究も行われている。

土壌・地下水汚染に関して、サステイナブルレメディエーション（SR：Sustainable Remediation、環境面・経済面・社会面を考慮した対策）やリスク評価のように複数指標からの目標設定が検討されている。米国では生物を利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められ、また、ポリマーやゼオライト等を添加した高機能型遮水材の基礎研究が盛んである。実汚染サイトでの検証や実証が可能であり、応用研究の環境として非常に優れている。欧州では特に英国でSRの研究開発が加速されておりISO規格の提案が進められている。日本も多くの研究開発の推進やその成果があり、今後はリスク評価の導入とそれに基づく対策が求められる。

大気、水、土壌や地下水を横断する炭素や窒素、汚染物質の物質循環・環境動態の分野では、試料精製と測定技術が向上し、循環・動態の統合的モデルが開発され、原子・分子レベルからの現象理解が進んでいる。日本は温室効果ガス濃度や同位体比測定は最高水準を維持している。米国は観測ネットワーク構築と統合化を積極的に推し進め、特に衛星観測では世界をリードしている。物質循環モデル研究でも長い歴史をもつ。欧州も炭素および関連する物質循環研究を積極的に推進している。中国はモデル分野では独自開発はまだ少ないが、温室効果ガスなどの物質循環の観測研究を進め、論文数の伸びが非常に大きい。

健康・環境影響に関する研究開発は、代謝過程の知識の蓄積と分析技術の進展により、曝露から影響までの経路を把握する AOP（Adverse Outcome Pathway）が注目されている。地球環境問題による健康影響も重要性を増している。米国で基礎研究が多岐にわたり且つレベルが高い。新しいアプローチが絶え間なく提案され、ナノマテリアル廃棄物への評価など新しい研究も始まっている。中国では多くの資源が割かれ着実に実力をつけている。日本も基礎研究のレベルは高く、化学物質影響、気候変動影響などで報告数も増えている。

化学物質リスク管理に関しては、管理が必要な化学物質数が増大し、網羅的一斉分析や高分解能な分析が進展している。AOP による毒性試験の省力化や迅速化も期待される。日欧米のレベルが高く、特に欧州では分析から毒性までをカバーする国際プロジェクト Solutions などが進められている。北米（特にカナダ）では、超高分離技術と超高分解能質量分析計を合わせた装置開発が進むなど基礎レベルは高い。ToxCast、Tox21、FutureTox II など毒性予測に関する大規模プロジェクトが進められ基礎から応用への展開が進む。日本はノンターゲット分析の普及、薬物の体内動態予測、子供と環境に関する全国調査の実施、大規模モデル開発など基礎研究の水準は高い。

3.2.1 大気汚染

（1）研究開発領域の簡潔な説明

大気汚染は、工場等の固定発生源および自動車等の移動発生源からのガス、エアロゾル粒子（気体中に浮遊している固体・液体の微粒子状物質）などの汚染物質が健康被害や環境被害などをもたらす事象である。火山や森林火災などの自然発生源からの上記汚染物質も大気汚染物質に含めることがある。ここでは大気環境における汚染物質の観測・計測と予測・評価、ならびに排出源特定と排出源対策を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

日本では、大気汚染防止法による固定発生源（工場や事業場）からの排出規制、および移動発生源である自動車の排出ガス規制の段階的強化や自動車 NO_x・PM 法などの都市部を対象とした対策により、これまでに大気汚染物質の環境濃度は大幅に改善してきており、大気環境の残された課題は光化学オキシダントと PM_{2.5} とされている。いずれの大気汚染物質も大気中の反応が主要因と考えられているが、その生成メカニズムは多岐にわたり、いまだ十分解明されていない¹⁾。この大気環境対策を行うための生成メカニズムの解明、大気質予測シミュレーション（大気モデル）の高精度化、その入力データであるエミッションインベントリの整備・改善が喫緊の課題であり、これらの研究を進めることが必要となる。またこれらの対策については、東アジアからの越境大気汚染の影響も大きい²⁾ため、国際的な取り組みも必要とされている。加えて最近では、石綿（アスベスト）やナノ粒子のように形状やサイズに起因する有害性が問題となる物質、水銀や鉛等の重金属や残留性有機汚染物質（POPs：Persistent Organic Pollutants）による地球規模の汚染、さらにはブラックカーボンやフロンのように大気環境が気候変動に及ぼす影響という観点からの研究も必要とされている。

[動向（歴史）]

■ 大気汚染に係る物質

環境基準は、人の健康を保護し、生活環境を保全する上で「維持されることが望ましい基準」（環境基本法）であり、行政上の政策目標である。大気汚染に係る環境基準は、公害対策基本法（昭和42年法律第132号）第9条の規定に基づいて、二酸化硫黄（SO₂）、一酸化炭素（CO）、浮遊粒子状物質（SPM）、二酸化窒素（NO₂）、光化学オキシダントに対して基準値が定められている。1996年の大気汚染防止法の改正で、長期的暴露による発がん性等の観点から、有害大気汚染物質として、248物質（そのうち優先取り組み物質23物質、指定物質3物質）が指定された。現在、有害大気汚染物質の基準値はベンゼンなど4物質に関して定められており、その他8種類については指針値として定められている。また2009年には微小粒子状物質（PM_{2.5}）に係る環境基準が追加されている。2015年には水銀に関する水俣条約を踏まえて大気汚染防止法が改正され、水銀の大気排出規制が新たに設けられた。全国に約2,000の大気測定局があり、汚染物質のすべてあるいは一部について、連続的にモニター評価されている状況である。

なお大気汚染物質の環境基準はヒトの健康影響より導き出されるものであるが、今後は環

境汚染物質に過敏な人（子供、高齢者、心疾患等の患者）を対象とした研究が今まで以上に必要とされる。

■ 大気汚染の歴史²⁾

世界で最初の大気汚染による健康被害は、1930年ベルギー・ミューズ渓谷における呼吸器疾患での地域住民 60 人死亡の事件である。また都市部での大気汚染による最初の健康被害は、1952年のロンドン・スモッグ事件である。12月中の約1週間、先のミューズ渓谷と同様に冬場における大気の気温逆転（高度上昇にしたがって気温が通常とは逆に上昇する現象）で、大気汚染物質が滞留する状態となり、通常より約4千人も死亡者が増加した。この事件の原因は石炭燃焼による煤煙・煤塵、硫酸化物（SO_x）などによるものであった。当時ロンドン市役所の屋上で、浮遊粉塵やSO₂が測定されており、これらの大気汚染物質の曝露濃度と死亡率や罹患率などの健康影響との関係を評価することで大気汚染の医学研究を飛躍的に推進させることにもなった。

日本における大気汚染の歴史としては、1960年頃からのいわゆる四日市喘息問題があげられる。この原因は疫学調査よりSO_xを含む汚染物質の排出によるものであり、石炭使用に伴う煤煙・煤塵を規制するために1962年に煤煙規制法（煤煙の排出の規制等に関する法律）が制定された。総合的な汚染防止対策を進めるために1967年に公害対策基本法を制定し、翌年、大気汚染防止法が成立した。これにより、工場・事業所からの排出基準の強化、総量規制などの規制強化、それに対応して工場・事業所側の集塵装置、排煙脱硫・脱硝設備の導入や重油の低硫黄化対策などの産業型公害規制が行われ、環境基準達成が向上した。

一方、都市部における新たな問題として光化学スモッグが浮上してきた。1970年7月に東京・杉並の高校で運動中の高校生が目や咽喉の刺激症状、咳、呼吸困難、頭痛、しびれ感を訴え、一部の者は高度の呼吸困難、痙攣発作や意識障害などで病院に搬送される事件があった。後の研究で、これは光化学オキシダント（オゾン（O₃）や peroxyacetyl nitrate（PAN）など）が原因であることが分かった。国は、光化学オキシダント発生の一因となる窒素酸化物（NO_x）に対して、固定発生源には1973年の排出基準設定を順次強化した。さらに自動車排出ガスからのNO_xに対しても1978年から本格的な規制が開始された。炭化水素に対しても大気汚染防止法に基づいて規制された。一方、自動車台数の急増によりNO_xやSPMなどの沿道等の局地的汚染の問題も、大都市地域を中心として浮上してきた。自動車排出ガス規制は1966年以降順次排出ガス低減技術、特にガソリン車における電子制御式燃料噴射と三元触媒の組み合わせ、さらには燃料の無鉛化（ガソリン性能向上のための鉛系添加剤の廃止）などの燃料性状の進展を見極めながら強化されてきたが、首都圏などの大都市部については新車対策のみではNO_xやSPMなどで大気改善が進まない状況が続いた。さらにディーゼル車から排出されるPMの発がん性を指摘する研究例も出てきたため、1992年には東京都がいわゆる「ディーゼル車NO作戦」を独自に展開し、新車のみならず使用過程車も含めたディーゼル車への対策強化を行った³⁾。これを契機に自動車PM排出の対策技術であるフィルター装置（DPF: Diesel particulate filter）を装着したディーゼル車の市場導入の前倒し、既販車へのDPF装置の装着対応、およびDPF装着時に必要となる低硫黄軽油の早期導入などの対策が進んだ。2009年にはディーゼル車の新車すべてにDPF装着を前提とした排出ガス規制強化が行われ、それ以前のディーゼル車への早期対策も含めて、SPMは大きく改善している。なお現在では大型ディーゼル車へのNO_x排出規制強化の検討ならびに国際基準調和として自動車排出ガスの試験法統一の検討も行われている⁴⁾。

2012年度環境基本計画によると、大都市のNO₂、SPMは自動車単体規制、自動車NO_x・PM法、低公害車の普及により、一部の測定局を残し、環境基準をおおむね達成している。

日本の大気質の残された課題は光化学オキシダントと PM2.5 とされている。光化学オキシダントについては、原因物質である NO_x や揮発性有機化合物（VOC：Volatile Organic Compounds）の排出抑制対策を進めてきているが、環境基準が諸外国と比較して厳しいこともあり、達成率は 1%未満と低い状況にある。ただし光化学オキシダント濃度の長期的な傾向を評価するための指標（光化学オキシダント濃度 8 時間値の日最高値の年間 99 パーセントイル値の 3 年平均値）を用いて、関東地域や阪神地域などの域内最高値の経年変化をみると、近年は域内最高値が低下しており、高濃度域の光化学オキシダントの改善が示唆されている。2009 年に新たに環境基準が定められた PM2.5 は、粒子状物質の中で粒径 2.5μm 以下の粒子状物質である。SPM（10μm 以下）などと比較して粒子径の小さい PM2.5 は肺の奥にまで到達するため、疫学データでの健康被害との相関が高いとされ、1997 年に米国で初めて環境基準が設定されたものである⁴⁾。現在は常時監視体制が構築されつつあるが、測定データから全国的に環境基準を超える可能性が示唆されている。

なお欧米での大気環境の課題としても、米国ではオゾン（日本の光化学オキシダントに相当）と PM2.5 が問題、EU ではオゾン、窒素酸化物、一部の有機化合物についていまだに課題と認識されている。また特に都市部での PM、オゾン高濃度地域は 90%を越え、大きな懸念とされ、WHO のガイドライン指針値の達成を目標に対策が進められている⁵⁾。このように日欧米とも PM2.5 および光化学オキシダント／オゾンなど、複雑な生成機構をもつ大気汚染物質に対しての観測、予測、対策の課題がある。

光化学オキシダントは、前駆物質の VOC や NO_x が大気中の光化学反応により生成される物質である。しかし NO_x と VOC の排出量を減らした分だけ改善されるわけではなく、減らす比率によっては、光化学オキシダント濃度が増加してしまう場合もある。また、VOC は 1 つの物質ではなく様々な物質の総称であり、その中にはオキシダント生成に大きく寄与する物質もあればあまり寄与しない物質もある。一方、PM2.5 には、発生源から直接大気中に粒子として排出されるもの（一次生成粒子）と、ガス状の前駆物質（VOC/NO_x/SO_x）が大気中の化学反応を経て粒子化するもの（二次生成粒子）がある。これらのように前駆物質が大気中で光化学反応して出来る PM2.5 二次粒子やオキシダントについては、生成機構が複雑で未解明であり、原因物質と発生源が多岐にわたることから解明すべき課題が多く残されている。

図 3-1 は大気中の光化学反応などの二次生成反応メカニズムの概略を示したものである¹⁾。また、図 3-2 は PM2.5 の発生源・成分の内訳例であり、二次生成粒子が多いことが分かる。

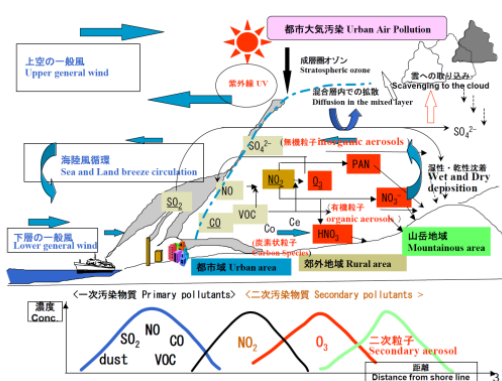


図 3-1 大気中の二次生成反応メカニズム

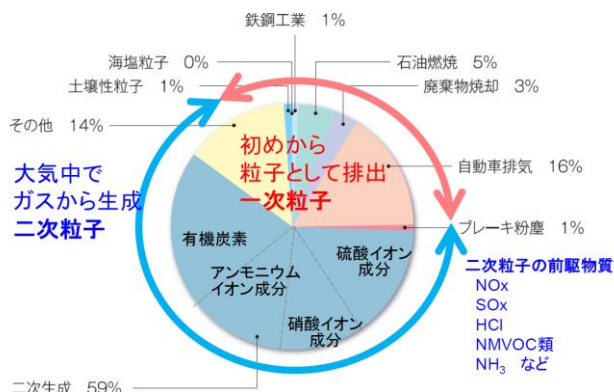


図 3-2 PM2.5 の発生源・成分の内訳例

（出典：JATOPI II 成果報告会資料）

また地球規模の問題として、汚染物質が国境を越えて長距離輸送されることによる広域大気汚染、地球規模大気汚染の問題もある。この問題は日本ではPM2.5が中国から飛来するなど最近になって特に注目されているが、この広域大気汚染の問題自体の歴史は古く、欧州や北米では1960年代から70年代にかけて顕在化した。当時は粒子状物質ではなく、SOxとNOxとその分解物である硫酸、硝酸エアロゾルといったような酸性物質の越境汚染による、湖沼の酸性化や森林の立ち枯れが問題であった。その後、1990年代に日本と中国を含む東アジアにおいても同様な越境汚染問題が取りざたされた。酸性物質の越境汚染については、欧州を中心とした数十ヶ国により長距離越境大気汚染条約（CLRTAP）が1979年に採択され、汚染状況の監視・評価、原因物質の排出削減対策などが進められている。東アジア地域では、日本のイニシアチブにより中国をはじめとする東アジアの13ヶ国が参加して「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）」が2001年から本格稼働している。

水銀や鉛等の重金属や、PCBのような残留性有機汚染物質（POPs）は、大気中寿命が非常に長いため、酸性物質の越境汚染よりもさらに広範囲に移動し、地球規模の汚染が懸念されている。そのため、「残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約」（POPs条約）が2004年5月に発効し、シミュレーション等による監視、評価、排出削減対策が進められている。

大気汚染、大気環境に係わる研究開発としては、対策手段を特定するために観測に加え、大気中の汚染物質の挙動を予測・解析するための大気モデルが重要な役割を担っている。特に光化学オキシダントとPM2.5のように複雑な大気中の化学反応メカニズムで発生する物質や、越境汚染など広域の大気汚染の影響を評価し解明するためには、大気濃度場の時空間構造とその変動、複雑な物理・化学過程を取り入れた大気モデルが重要であり、その果たすべき役割は増大している。以下には大気モデル研究について記す。

■ 大気モデル研究

大気モデル研究は、排出インベントリの整備、大気モデル開発、将来予測などの対策検討の3つの領域に分けられる。図3-3に大気モデルの概念図を示す¹⁾。

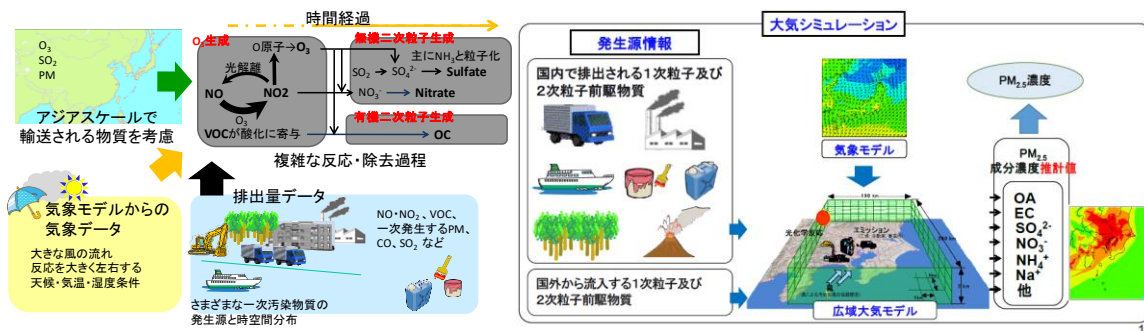


図 3-3 大気モデルの概念図（出典：JATOP II 成果報告会資料）

- 排出インベントリの整備

排出インベントリとは、大気汚染物質がどこからどれだけ排出されているかを示す目録（インベントリ）であり、通常は年間の排出量として示される。大気モデルへは入力データとして用いられ、排出量のリストにとどまらず、空間的、時間的な排出量が必要となる。日本では国としての排出インベントリ（ナショナルインベントリ）はいまだ整備されていない⁶⁾。排出インベントリはすべての発生源からの排出量を推計する必要があるが、ほとんどは燃料消費量や工業生産量、自動車走行量、人口、就業者人口などの活動量に排出係数（排出原単位、発生源種類毎の単位活動量あたりの汚染物質の平均排出量）を乗じることにより算出される。現在日本で唯一大気モデルの入力用として整備されたものに、JATOP インベントリ（JEI-DB）がある。排出インベントリには、発生源カテゴリで 110 程度、対象物質は PM、NO_x、SO_x、CO、NMVOC、NH₃ などがあり、個別成分の排出量だけでなく、VOC 組成や PM 組成・粒径区分も発生源別にデータ整備が必要となる⁶⁾。排出インベントリに関する研究の課題としては、排出量を求めるための測定法の整備、発生源から排出される過程、排出インベントリのための統計値の確保、オフィスビルのような業務部門や家庭などの民生部門からの排出量の把握、船舶や農業（主に NH₃、暖房用ボイラ）など推計方法のモデル化、農作物や草類などからの VOC 排出量などの課題がある。

- 大気モデル開発

大気汚染分野で主に利用されている大気モデルはレセプターモデル（観測地点モデル）とシミュレーションモデル（化学輸送モデル）である。

レセプターモデルは観測された濃度をもとに、その観測地点における発生源別の寄与濃度を統計的に推計するもので、統計モデルの一種と考えることができる。粒子状物質や VOC などの発生源解析に使用されており、代表例として CMB (Chemical Mass Balance) や PMF (Positive Matrix Factorization) があげられる。CMB モデルは観測された成分濃度から、想定される発生源の成分濃度パターン（発生源プロファイル）を用いた重回帰式より、それぞれの発生源の寄与濃度を計算するものである。現在、日本で使われている発生源プロファイルは、土壌性粒子、海塩粒子、鉄鋼工業、石油燃焼、廃棄物焼却、自動車排気、ブレーキ粉塵などがあるが、測定されたのが 2000 年以前のものが多く、排気対策が進んできた状況を踏まえた新しいプロファイルへの更新が課題である。石油燃焼など大気汚染対策を想定すると発生源が特定できないプロファイルもあり、プロファイルそのものの整備も課題である。PMF モデルは多数の成分測定データをいくつかの因子を想定して多重重回帰式より因子毎の成分プロファイルを求め、各因子プロファイルに近い発生源の寄与度を見積もるものである。観測結果の精度などにより計算上求められる因子数が限定されることや得られた因子と発生源を想定することが解析者の判断に依存するところが PMF モデルの課題である。解析手法の確立が求められている。

シミュレーションモデルには、一般に、解析解モデルと数値解モデルの 2 つのタイプがある。解析解モデルは、風向・風速は一定とするなどの仮定により解析解が得られるところまで簡略化した定常モデルであり、プルームモデルとパフモデルが代表的である。数値解モデルは、汚染物質の輸送過程を記述する基礎方程式（物質輸送方程式や拡散方程式、物質収支式などと呼ばれる）を解いて大気汚染濃度を計算する物質輸送モデルの基礎方程式に化学反応項を付加することにより、化学反応過程も考慮できるようにした非定常モデ

ルである。大気環境行政や発電所や工場の新設などの際の環境アセスメント等の実務で用いられるのは、ほとんどの場合がプルーム・パフ式を基本とした解析解モデルであり、数値解モデルが用いられることは稀である。解析解モデルは構造が簡単で分かりやすく計算時間や計算容量が少ないこと、長年にわたる運用実績があり一定の信頼性が担保されていること、現在の環境アセスメントに必要な項目は解析解モデルで得られる結果で間に合うことが多いこと、解析解モデルをベースとした評価ツール(日本の METI-LIS、ADMER、米国の AERMOD 等)が供給されていること等が理由である。ただし、解析解モデルは、現象を簡略化する様々な仮定のもとで成立するモデルであるため、複雑な気流場での現象、非定常現象、複雑な化学反応・沈着過程を伴う現象等に対しては基本的に適用できない。

一方、数値解モデルは、構造が複雑であり多くの計算時間と計算容量が必要であるが、上記で示したような解析解モデルでは考慮できない複雑な現象に対応することができる。米国の CMAQ (Community Multiscale Air Quality) と全球スケールの GEOS-Chem がよく使われている。数値解モデルでは、気象データと排出量データを入力として、移流、拡散、沈着、光化学反応、粒子化などの各過程の各格子における汚染物質濃度の時系列変化を計算するものである。光化学反応については大気中に存在するあらゆる物質と反応をモデルで明示的に表現するのは困難なため、物質と反応を集約的に表現する化学反応メカニズムが組み込まれている。これらの数値解モデルの多くは研究用であり、複雑な構造のモデルのため、運用にあたってはどうしても専門的な知識を要する。また各モデルはそれぞれ独自に信頼性の検証が行われているが、各モデル間の推定結果にはバラツキが見られる。このような理由から、行政目的などでの実務利用はあまり進んでいないが、現在の大気汚染問題では、光化学オキシダントや PM2.5 など数値解モデルが必要とされる場面が多いため、信頼性の向上と利便性の向上を行うことにより、実務での利用を促進する必要がある。

- 大気モデルによる将来予測・感度解析

大気汚染対策の効果等を予測するために大気モデルを用いた将来予測・感度解析が重要になる。将来予測の推計手法としては、基準年の気象場を気象モデルで計算し、基準年の排出量データを将来シナリオにしたがって変化させることで大気汚染物質の濃度を推計する。また感度解析では発生源の寄与度をモデルにより解析する方法であり、各種の原因物質の寄与度がモデル上で推定できる。なお大気モデルを使った大気汚染対策を進めるためには、将来推計の手法を統一化することが課題である¹⁾。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

- 衛星観測データを使った排出インベントリの整備が世界的に進んできているが、データの解像度が粗く日本ではそうした取り組みはいまだない。衛星観測データの地表面の大気汚染物質濃度の精度など解決すべき課題はあるが、観測点を多く設定できない地域の排出量の把握には有望である。
- 米国環境保護庁 (EPA) では環境問題・対策がより複雑化してきたことを受けて、2011年に分野構成の見直しを行い、大気研究については、大気・気候変動・エネルギーを統合さ

せた分野として取り扱っている。また共同研究として気候変動、土地利用、大気質、水質、経済の総合作用を考慮した“**One environment**”モデルの開発にも取り組んでいる⁷⁾。

- 中国からの黄砂中には微生物あるいは生物に由来する有機物でできた粒子、バイオエアロゾルが存在しており注目されている。これらが暴露されると、より炎症が進みやすく細胞へのダメージが大きいとされている⁸⁾。
- 石綿（アスベスト）やナノ粒子のように形状やサイズに起因した人への有害性が問題となる物質による大気汚染も注目されている。これらは当初は室内環境での暴露が問題であったが、大気汚染においても社会的な問題になっている。2005年に石綿含有製品を過去に生産していた工場近辺における住民の健康被害が明らかになった。ナノ粒子は細気管支を通り抜け肺胞に達し血液に移行するため、呼吸器系のほか、循環器系への影響も懸念されている。もっとも、カーボンナノチューブ（CNT）のような新素材のナノ物質のリスクが注目されているが、ナノ粒子自体は、自然界にも多く存在しており、燃焼等による人為起源も含め、昔から環境中に存在しているものである。

[注目すべきプロジェクト]

- タイヤ・ブレーキの摩耗粉塵の研究

排出ガスからのPM2.5が低減されるに伴い、相対的に排出ガス以外のPM2.5が欧州を中心に着目されて始めた。欧州のPMP (Particle Measurement Programme) ではタイヤ・ブレーキの摩耗粉塵の計測法の検討も始まった⁹⁾¹⁰⁾。並行して日本でも計測法や排出係数の研究が始まった¹¹⁾¹³⁾。

- 粒子数濃度の研究

欧州の粒子数規制の導入に伴い、大気汚染物質としての粒子数濃度の将来予測¹⁴⁾や粒子数濃度の健康影響評価のための疫学研究が注目される。またガソリン直噴エンジンの排気粒子数濃度も注目されている。23nm以下の超微小粒子を含めた粒子数濃度の計測法の研究も盛んになっていきている。

計測法では、半揮発性粒子をどう計測していくか等が注目される課題である

- 短寿命気候汚染物質（SLCPs : Short-Lived Climate Pollutants）¹⁴⁾

SLCPsとは、大気中での化学的な寿命が数日から数十年程度と比較的短く、気候を温暖化する作用をもつ物質である。具体的にはメタン、対流圏のオゾン、ブラックカーボン（BC：化石燃料やバイオマスを燃焼させた時に発生する黒色炭素粒子）の3物質である。

SLCPsについては、環境省環境研究総合推進費 S-12「SLCPの環境影響評価と削減パスの探索による気候変動対策の推進」でも研究開発が実施されている。

SLCPsの概念そのものは日が浅いため確固たるものではないが、開発途上国におけるブラックカーボン排出抑止策などで今後注目される可能性がある。ローカルな大気汚染と地球環境の両面に関わる物質であるため、その削減には身近な健康影響の低減にも結びつくという点で、省エネルギーなど生活レベルの低下につながる可能性のあるCO₂対策に比較して、一般市民からの協力が得られやすいのではないかという観点から注目されている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 大気観測による汚染物質の動態研究
 - PM2.5の動態を把握する研究の課題
 - CMB（Chemical Mass Balance）法に使う発生源プロファイルデータが限られ古い。発生源の種類も限定的。
 - 近年の大気中PM2.5濃度が小さいため、高分解能の計測器の開発が求められる。
 - 二次粒子の発生源を特定するためには、時間分解能の高い計測器も求められる。
 - 光化学オキシダントの動態を把握する研究の課題
 - VOC排出量の実態把握が困難であるため、測定法の確立が求められる。
- 大気モデル研究
 - 排出インベントリに関する研究の課題
 - 国としての排出インベントリ（ナショナルインベントリ）の整備。すべての発生源で排出量を求めるための測定法の整備。発生源から排出される過程の解明。
 - 煙突から大気に放出される際のVOC凝縮過程の解明。日本ではその研究がほとんど実施されていない。大規模煙源を模擬した実験炉がなく、発生源の企業協力体制がない。
 - 道路交通センサス一般交通量調査と自動車燃料消費統計の走行量の統計調査において、年度により調査項目やデータが変更される。排出インベントリのための統計値の確保や、大規模なプローブデータ等のビッグデータ活用。
 - オフィスビルのような業務部門や家庭など民生部門からの排出量の正確な把握。
 - 船舶や農業（主にNH₃、暖房用ボイラー）などの推計方法のモデル化の研究が進んでいない。
 - 日本独自の植生を考慮する植物起源VOCの推計モデルがいまだ研究開発されていない。
 - 地域スケールの大気モデル（CMAQ）の研究の課題
 - PM2.5に関してはサルフェート成分の過少、ナイトレート成分の過大、有機二次粒子（SOA：Secondary Organic Aerosol）の過少等の再現性。
 - O_xに関しては、経年変動を含む長期的変動や日内変動、長期間の低～高パーセントイル値の再現性。
 - VOCの成分濃度や全NMHC（非メタン炭化水素）濃度の再現は極めて不十分である。
 - 二次生成機構解明に関する実験・観測・モデル研究の統合的推進と二次有機粒子モデルの開発を同時に進めることが求められる。
 - O_xについては、排出インベントリの改良、未把握VOCの把握、NMHC測定濃度の解析、VOC成分の多地点連続測定が求められる。
 - 大気モデルの再現性検証に使える大気汚染物質の時系列の観測データが少ない。
- 大気汚染分野の研究における体制面での課題
 - インベントリ・シミュレーション精度向上を継続的に研究する仕組み構築。
 - 大気汚染分野の研究者の慢性的な不足。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 大気モデル
 - インベントリ整備
 - 固定発生源からの PM2.5 などの大気汚染物質の測定法の研究；最優先の研究課題としては煙源の凝縮性粒子評価法の研究
 - 大気放出を想定した固定発生源・移動発生源の排出インベントリの整備・更新体制の構築
 - 蒸発起源 VOC の測定法の研究
 - 排出インベントリのための活動量の抽出手法と統計データの収集に関する研究統計法との関連や GHG インベントリなどと連携を含めた枠組み構築
 - 大気モデル開発
 - 粒子成分の再現性向上のための研究；VBS 法、チャンバー実験による粒子収率の整備、NH₃ の発生動態の解明など
 - VOC 再現性向上のための研究；植物起源 VOC の排出予測法、VOC 成分の蒸発性の解明など
 - レセプターモデルのための発生源プロファイルの研究：粒子成分や VOC 成分プロファイルの最新データの収集・整備
 - 大陸～地域～都市～街区～沿道～室内環境など異なる空間スケールの現象を統一的に把握評価出来るモデルシステムの構築
 - 粒径別の粒子個数や化学組成の予測モデルの構築
 - 不断のモニタリングデータおよび集中観測データによるモデルの検証と改善
- SLCPs に関する知見の集積・整備
- ナノ粒子のような形状やサイズが問題となる物質の環境中動態、人や生態系への暴露とリスクの評価手法開発
- 水銀、POPs など環境中に長期間存在する物質の環境中動態、人や生態系への暴露とリスクの評価手法開発

(5) 政策的課題

- モデルとデータベースの継続的な運用・サポート体制が不十分である。
- PM2.5 については越境汚染の課題もあり、中国等の東アジア地域における大気汚染対策を推進するための技術協力に、さらに取り組むことが求められる。
- ナノ粒子については、新規に開発が進められている高機能材料の普及の阻害要因とならないため、大気環境を経由した人への暴露についても、政策的な取り組みが要請される。
- 水銀、POPs については、条約への対応として取り組むことが求められる。

(6) キーワード

SO₂、CO、SPM、NO₂、光化学オキシダント、PM2.5、粒子数、タイヤ・ブレーキ、疫学知見充実、リアル・リアルワールドエミッション、ビックデータ活用、アジア諸国での大気改善、SLCPs、ナノ粒子、重金属、水銀、POPs

（7）国際比較表

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------|---------|----|------|--|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↘ | <ul style="list-style-type: none"> ● インベントリ整備に使う固定発生源の測定法の研究者がほとんどいない。研究のための実験設備や協力体制がほとんどない。行政を含めた体制作りから始める必要がある。 ● 科研費、環境省推進費などの公的資金を原資として、大気汚染に関連する多様な研究が行われており、研究レベルは高い。ただし、同分野の論文数、大気モデル開発の独自性などの点からみると、欧米の大学や研究機関と比較して層が薄いことは否めない。 ● 日本の大気汚染状況は従来と比べてかなり改善してきていることもあり、研究費や研究者の数は減少傾向にある。研究者はリスク評価や放射性物質など他の分野の研究にシフトしている。 ● 大気汚染の分析や発生の機構に関する基礎的な研究は十分発展している。エアロゾルの物理や工学については十分といえるが化学についてはまだ不十分¹⁵⁾。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 米国大気モデルを使い、日本にない排出係数を文献データから作成した排出インベントリを使い、日本用に構築した研究が進んできた。 ● ADMER や METI-LIS のような実務で使えるツールが開発、公開され、行政機関や企業などで広く活用されている。ただし、ツールについては米国と比べると少ない。 ● オリジナルなモデル開発は少なく、米国を中心とした海外製モデルを用いた適用研究が中心である。 ● モニタリング技術、分析技術、排出削減技術などは、企業が積極的に開発を行っている。 ● モニタリングや対策技術は、国内より途上国が大きな市場となるだろう。 ● 大気汚染対策技術などは十分に発展している。しかし測定技術などは新たなものを開発する力が十分とはいえず、外国のものに頼っている面がある。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 環境保護庁（EPA）は反応モデルの基礎研究からインベントリ測定法の改良研究まで独自の研究者を擁して研究を進めている。 ● 研究者の層、研究費の額、研究レベルともに、圧倒的に優位である。 ● EPA、海洋大気局（NOAA）、エネルギー省（DOE）などの政府系研究機関、大学、州政府など様々なところで大気汚染の研究が進められている。EPA とカリフォルニア州が伝統的に強い。 ● 米国においても国内の大気汚染状況はよくなってきていることもあり、他の分野や途上国の研究にシフトしている。 ● あらゆる面で先進的に研究が進められている。エアロゾルの物理化学が応用研究だけではなく基礎研究として進められている点に注目すべきである¹⁶⁾。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 行政的に SIP（州の大気改善政策）の策定には大気モデルでの評価結果が必要な体制が整備されている。 ● CMAQ（大気モデル）や NEI（国の排出インベントリ）を定期的に更新する枠組みが出来ている。 ● 民間の研究機関でも大気モデルを使った研究が出来ている。 ● モデル開発とツール化などソフトウェア研究の分野は、特に圧倒的に優位である。CMAQ 等様々なモデルが無償で公開され、世界中で利用されている¹⁷⁾。 ● サンプルングや分析技術についても、最先端の研究が行われている。 ● 政府系研究機関や大学からスピニングアウトしたコンサルティング企業が、政府からモデル開発や環境影響評価を請け負って実施している。 ● 対策技術は特に群を抜いているという感じはしないが、測定技術開発などは常にトップを走るケースが多い。大学と民間の結びつきが強いことが推察される。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● UFP（超微小粒子、50nm以下の粒子）の生成メカニズム、粒子数に関わる研究（含むインベントリ）などの基礎研究は充実している。しかし、米国ほど広範囲な研究は実施されていない。 ● 伝統的に環境問題に取り組むことに熱心な国が多く、研究者の層、研究費の額、研究レベルともに、米国には及ばないが高い水準にある。 ● 大気汚染の状況は国によってかなり異なる。北欧、オランダ、英国では、以前から大気モデル開発の研究が行われており、研究レベルが高い。東欧や南欧では、まだまだ大気汚染が酷い都市があるため、モニタリングを中心とした研究が多く行われている。 |

| | | | | |
|----|---------|---|---|---|
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 大気環境基準達成に向けて、大気動態の観測解析や大気モデルを使った大気質評価が実施されている。 ● 大気拡散モデルのツール化では、オランダ国立公衆衛生環境研究所（RIVM）、オーストリアの国際応用システム分析研究所（IIASA）などが有名である。 ● 多くの国が隣接しているため、国境を超えた越境汚染について敏感である。越境汚染については、The European Monitoring and Evaluation Programme（EMEP）を中心として、様々な研究が進められている。研究の深度はバラツキがあるが平均点としては高いといえる。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 中国環境科学研究院、大学、各省の研究機関などで、積極的に取り組まれている。 ● 大気汚染問題が深刻であるため、近年、同分野の研究には、予算と人員はある程度割いているようである。 ● 欧米諸国や日本に留学した研究者が帰国し、研究と教育に従事している。研究レベルには幅があるが、高くなってきている。 ● 表論文数は非常に増えているが、解析内容が不十分に感じる。研究予算が飛躍的に伸びているようなので、今後の発展が注目される¹⁸⁾。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● PM2.5のモニタリング調査のような事例研究は、多く行われている。 ● 大気モデルについては、独自のモデル開発はあまり行われず、CMAQやWRFのような米国を中心とした海外製モデルを用いた適用研究が中心である。 ● モニタリングやシミュレーションは行われているが、実際の環境政策に生かされている例は少ないと思われる。 ● モニタリング技術や測定機器、排出防止対策技術などは、欧米や日本からの輸入が多いと思われる。 ● 新型の測定機器類の導入がめざましい。今後の応用への展開が期待される。2017年からEURO6に相当する規制を開始することになっているが技術的にそれに追いつけるのかは未知数¹⁹⁾。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 大気汚染は改善されつつあるものの、都市部ではまだ問題であるため、大学や行政機関などで研究が行われている。 ● 中国と同様に、欧米諸国や日本に留学した研究者が帰国し、研究と教育に従事している。研究レベルには幅があるが、高くなってきている。 ● 以前はモニタリングをベースとした研究が多くを占めていたが、近年はモデルによるシミュレーション研究も多くなってきている。着実に研究を進めているが、広がりが少ない印象。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 大気モデルについては、独自のモデル開発はあまり行われず、CMAQやWRFのような米国を中心とした海外製モデルを用いた適用研究が中心である。 ● モニタリング技術や測定機器、排出防止対策技術などは、欧米や日本からの輸入が多いと思われる。 ● SO₂の削減が短期間で強力に進められたことから、技術的裏付けがあることが推察される。 |

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考資料（●は全体的に参考とした文献）

- 水・大気環境行政のご案内 ―日本の公害克服経験― 環境省水・大気環境局

https://www.env.go.jp/air/air_pamph/air_pamph01.pdf

- 環境省 HP (大気環境・自動車対策) <https://www.env.go.jp/seisaku/list/air.html>

- 1) 石油エネルギー技術センター JATOPII 成果発表会
http://www.pecj.or.jp/japanese/jcap/jatop2/index_jatop2_01.html
- 2) 国際環境経済研究所 ゼロからわかる PM2.5 のはなし
<http://ieei.or.jp/category/special201307/>
- 3) 東京都環境局「ディーゼル車走行規制」の開始にあたって
<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/vehicle/attachement/all.pdf>
- 4) 自動車工業会 微小粒子状物質 SPM から PM2.5 へ
<http://www.jama.or.jp/eco/PM25/pdf/PM25.pdf>
- 5) 板野泰之(2006) 都市大気における光化学オキシダント問題の新展開
- 6) 大気環境学会関東支部講演会 大気汚染モデルの現状と課題
- 7) Science for a Sustainable Future (EPA Research program overview 2012-2016)
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/strap-overview.pdf>
- 8) JST CRDS 俯瞰ワークショップ報告書 平成 27 年度環境科学技術分野 最新研究開発動向
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/WR/CRDS-FY2015-WR-13.pdf>
- 9) UNECE ; Working Party on Pollution and Energy (GRPE) /Particle Measurement Programme (PMP) <https://www2.unece.org/wiki/pages/viewpage.action?pageId=2523173>
- 10) Hugo A.C.Denier van der Gon, et al, The Policy Relevance of Wear Emission from Road Transport, Now and in Future-An International Workshop Report and Consensus Statement Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S.: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles, Atmospheric Environment, 131, 269-278 (2016)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101630125X>
- 11) Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S.: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles, Atmospheric Environment, 131, 269-278 (2016)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101630125X>
- 12) Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S.: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating, Wear, 334, 44-48 (2015)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164815002100>
- 13) Y.Tonegawa, T. Fujikawa, S. Sasaki, Development of Tire Dust Emission Measurement for Passenger Vehicle, 19th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles(2015)
http://www.nanoparticles.ch/2015_ETH-NPC-19/Poster/44_Tonegawa.pdf
- 14) L. Ahlm, et al, Particle number concentrations over Europe in 2030: the role of emissions and new particle formation, Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 10271-10283.
- 15) エアロゾル研究 Vol. 29 (2014) No. S1 (特別号)
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jar/29/S1/_contents/-char/ja/
- 16) Pacifichem 2015, Symposium #56: Chemistry of Atmospheric Aerosols
- 17) 米国環境保護庁 (EPA) , Models, Tools and Databases for Air Research
<https://www.epa.gov/air-research/models-tools-and-databases-air-research>
- 18) Chan and Yao, Atmospheric Environment 42 (2008) 1-42., Lu et al., Atmos. Chem. Phys., 10, 6311-6331, 2010.
- 19) 日本経済新聞, 「中国、欧州並みの排ガス規制 汚染物質 5 割削減 17 年から前倒し導入」 2016 年 4 月 24 日 http://www.nikkei.com/article/DGXLASGM23H4D_T20C16A4FF8000/

3.2.2 水質汚染

（1）研究開発領域の簡潔な説明

水質汚染は、人間活動由来または自然由来の汚染物質などが、河川や港湾などの都市水域や湖沼、海洋に排出され、健康被害や環境被害などをもたらす事象である。ここでは、水域における汚染物質の観測・計測と予測・評価、ならびに排出源特定と浄化・回復技術を対象とする。（水処理等については研究開発領域「3.4.1 水循環」で扱う。）

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

日本では、高度経済成長によって水質汚濁の問題が顕在化した。水質汚濁防止法に基づく対策によって、河川における水質は大きく改善された。しかし、汚染物質が蓄積・滞留しやすい湖沼では、富栄養化現象による着臭やマイクロキスチンなど藻類産生毒物による水道水質問題が現在もあり、海城内湾では、底層に無酸素水塊が広がり、それにとまらぬ漁業被害も報告されている。また、医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs: Pharmaceuticals and Personal Care Products）やマイクロプラスチック（5mm以下のプラスチック）など、新規汚染物質への懸念が国際的に高まっている。陸域からの化学物質の排出は、水生生物の内分泌かく乱を誘引するなど、水域生態系への懸念が指摘されている。マイクロプラスチックとそれに含まれる有害化学物質による水環境の汚染とその影響の把握は、生物多様性と食の安全性という点で国際的にも重要視されている課題である。こうした広域的かつ新たな環境汚染物質の出現により、水質汚染は複合的な汚染現象へと変化している。また、人間活動の多様化や生産活動の高度化等に伴い、水域環境へのインパクトも変貌しつつある。気候変動への対応や生態系の保全、国際連携等の様々な取り組みとも関連した、現状の把握と対策が求められている。

[動向（歴史）]

水質に関する初期の取り組みとして公衆衛生があげられる。1890年に明治政府はコレラなどの伝染病対策の一環として水道条例を制定し、1900年に下水道法を制定した。戦後の復興とともに、産業活動により排出された重金属による公害が問題となった。こうした問題に対処するため、1967年に公害対策基本法が制定され、1970年の公害国会で可決成立した水質汚濁防止法に基づき、排水基準が定められ、水環境保全施策が進められた。また、生活排水対策として、下水道や浄化槽の普及が進められた。現在では河川水質は代表的河川汚濁指標である生物化学的酸素要求量（BOD: Biochemical oxygen demand）で見る限りは、1960年以前の工業化や都市化が進む前の状況にまで、大きく回復した。

富栄養化が懸念される湖沼では窒素規制およびリン規制が実施され、さらに湖沼水質保全特別措置法によって水質改善が図られた。しかし、湖沼や閉鎖海域には現在も貧酸素水塊が広がる場所があり、また、異常に増殖するシアノバクテリアによって臭気物質や毒素が産生される問題がある。

有機物、溶存酸素、重金属や窒素・リンなどは古典的な汚染物質ということが出来るが、

様々な化学物質による汚染が社会問題となってきた。PCBs や DDTs、ダイオキシン類、有機スズ化合物、内分泌かく乱物質、近年では臭素系難燃剤、有機フッ素化合物、医薬品および日用品等由来化学物質 (PPCPs)、ナノ物質などがあげられる。最近では、微小なプラスチック粒子であるマイクロプラスチックによる海洋汚染、ヒ素などの自然由来物質による飲料水汚染も国際的に関心が高まっている (自然由来物質による地下水汚染は「土壌・地下水汚染」領域で扱う)。こうした物質群の処理の面からの技術開発が進められると同時に、これらの物質の分析技術の開発、環境動態や毒性の把握の努力が続けられている。さらにはこうした物質の特性をマーカーとして利用した排出源特定の技術も開発されている。

水質汚濁を測定するための機器については、ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析計 (GC/HRMS) などがダイオキシンなどの分析に用いられ、医薬品などの測定には、高速液体クロマトグラフ/タンデム質量分析 (LC/MS/MS) などの技術が汎用されるようになった。また、従来指標の分析においても、例えば、溶存酸素計が従来の隔膜式に加えて、光学式が開発されるなど、より安定的に測定できる方法が開発されてきており、現場測定においても、水質を常時モニターし、データを蓄積あるいは携帯電話回線で送信する機器が開発されてきた。人工衛星からの光合成速度の推定などを行うリモートセンシング技術も進展した。

水質を原位置で浄化する技術として、水生植物の定着による水質浄化や、曝気による貧酸素水塊の解消技術などが開発、実証されてきた。また、水質変化と流体モデルを組み合わせた生態系モデルがさまざまな水圏に適用され、水質汚濁のメカニズムの解明や対策効果の推定に用いられてきた。

汚水と雨水を同一の管で排除する合流式下水道によって日本の大都市の下水道は整備されてきたが、処理場で処理できる下水量には限度があるため、雨天時に未処理のまま下水が水域へ放流される越流水問題 (CSO : Combined Sewer Overflow) があり、病原微生物リスクなどが懸念され、その実態の把握や評価が課題とされている。

2010 年以降世界的に問題となっているマイクロプラスチックに関しては、1972 年に海洋のプラスチック汚染の報告があり、1973 年に生物によるプラスチックの取込が²⁾初めて報告された。その後、先駆的な研究者により継続して報告されてきたが³⁾⁻⁹⁾、20 世紀後半の研究はまだ限定的なものであった。21 世紀に入り、海洋プラスチックが有害化学物質の海洋生態系での運び屋になることが明らかになってきた点¹⁰⁾⁻¹³⁾、微細なプラスチックが海洋表層水中を漂い外洋の環流 (Gyre) に集積し (いわゆるプラスチックスープの海)¹⁴⁾、さらには生態系に侵入する可能性が示された¹⁵⁾¹⁶⁾点の 2 つの面で新たな展開を迎えた¹⁷⁾。この頃から関連の研究者の関心が高くなり、2009 年以降このテーマの論文は年間 5 報以上出るようになり、論文数は急激に増加している。欧米の政策立案者もマイクロプラスチックには大きな関心を寄せはじめ、2010 年 7 月にパリで UNESCO-IOC (ユネスコ政府間海洋学委員会) の主催で国際ワークショップが開催され、結果が国連の海洋環境保護の科学的事項に関する専門家会合グループ (GESAMP) のレポートとして出版された¹⁸⁾。GESAMP は第 1 次のアセスメント¹⁹⁾を 2015 年に報告し、第二次のアセスメントも本年報告予定である。

海洋環境中で観測されるマイクロプラスチックの起源は一次マイクロプラスチックと二次マイクロプラスチックに大別される。一次マイクロプラスチックは、もともと 5mm 以下の粒子状に製造されたプラスチック粒で、レジンペレット、また、洗顔料、化粧品、などに含まれるマイクロビーズ (プラスチック製スクラブ ; 主にポリエチレン製) も含まれる。使用

後のマイクロビーズは家庭排水として下水処理場へ運ばれるが、下水処理場での観測から一次処理と二次処理を経ることにより 99%以上除去されることが報告されている²⁰⁾²¹⁾。しかし、合流式の下水処理区では雨天時に家庭排水が下水処理場へ運ばれず雨水とともに放流され海へ運ばれると考えられるが²²⁾、雨天時越流水自体の実態把握が遅れており、公共用水域へ放出されるマイクロビーズの量は定量的に把握されてない。

二次マイクロプラスチックは、使用後に海洋へ流入したプラスチック製品が紫外線、熱、風波などの物理的な力により破砕、細片化したものである。破片となっている製品の特定、破片化速度など定量的な事項はほとんどわかっておらず、破片と製品を結びつける化学的アプローチの開発が求められている。また、合成繊維の服を洗濯した時に発生するポリエステルやアクリルの繊維も含まれ²³⁾、化学繊維の寄与の特定も意識する必要がある。

マイクロプラスチックの生物への影響に関しては3つの側面から考えられている。プラスチック自体が物理的異物であることによる影響、酸化防止剤や難燃剤などの添加剤の影響、プラスチックに吸着した化学物質による影響である。物理的な影響について、大型生物では摂食したプラスチックの物理的な作用により生理学的な影響が観測されている²⁴⁾。マイクロプラスチックの曝露による牡蠣の再生産能力の低下²⁵⁾、淡水魚の卵の孵化率の低下²⁶⁾、ワムシの抗酸化酵素の誘導²⁷⁾などが報告されている。ナノサイズ (20nm) のプラスチックが細胞膜を通過して、生物組織へダメージを与えることも、室内実験のレベルであるが示唆されている²⁸⁾。マイクロプラスチックの生物影響の室内実験結果の解釈の際には、プラスチック自体の粒子毒性とともに、添加剤やプラスチックを構成するモノマーやオリゴマーによる影響も考える必要がある。吸着している化学物質については室内実験で、化学物質を吸着させたマイクロプラスチックを魚やゴカイ²⁹⁾³⁰⁾に曝露すると、肝機能障害や腫瘍の生成などの影響がでることが報告されている (影響が観測されている室内実験におけるプラスチックチックの暴露量は環境中よりもかなり (一桁以上) 多い量である³¹⁾)。

日本最大の水質汚濁に関する学会である水環境学会について、2016年3月に開催された年会での水質汚濁に関連する研究発表を分析すると³²⁾、溶存酸素や栄養塩などの古典的な汚染物質についての研究例は依然として多い。底層溶存酸素濃度が環境基準として新規に設定されたり、従来の除去を中心とした栄養塩管理から漁業振興のための栄養塩管理へ環境管理手法が変更されつつあるなど、古典的でありながら常に新しい話題がある。地域再生に関連した課題に関する研究も多くみられる。その他、農薬、医薬品および日用品等由来化学物質 (PPCPs)、1,4-ジオキサンのような産業関連の物質、ビスフェノール A などのプラスチックからの溶出物、地下水を中心とした塩素系揮発性有機化学物質、多環芳香族炭化水素 (PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)、ダイオキシン類などが研究対象物質である。こうした個別の有機化合物による水質汚濁問題に対して、分解生成物や分析法、環境中での挙動、地域の汚染状況を報告などの研究が行われている。重金属については自然由来のヒ素やマンガンなども含めて相当数の研究がある。2011年の原子力発電所の事故以来、放射性物質 (主としてセシウム) に関する研究も多い。また、分析法や固相抽出などの分析前処理法にかかわる研究もなされている。水環境における微生物に関連した研究はほとんどが大腸菌、腸球菌、腸管系ウイルスなど衛生指標に関するものであり、糞便指標としての有効性やウイルスの回収方法などの研究が見られる。また、バイオテクノロジーや高分解能質量分析器を用いた特定微生物の検出法についての発表や、貯水池の水環境に関連したシアノバクテリア関連の研

究も多く、臭気物質や毒素の産生の研究報告が多い。水生植物、水生昆虫や魚介類についての生態学的研究も多い。日本では、排水の毒性の管理手法として、ミジンコ、メダカ、緑藻の生物応答を用いた排水試験方法の導入を環境省が目指しており、それに関連した研究がかなりの数見られる。

世界最大の水環境に関する学会である国際水協会 (IWA) が 2 年に一度開催する World Water Congress and Exhibition における水質汚濁に関する発表テーマを見ると、2014 年会議でのセッション (口頭発表としておおむね 4 件以上ある話題) では、気候変動による水質への影響、湖沼や貯水池の水質管理、沿岸環境や井戸の塩水化、微生物のモニタリング手法、健康関連微生物指標、地下水汚染、環境中医薬品、マイクロプラスチック、シアノバクテリア、ナノ粒子である³³⁾。2016 年会議では、病原性微生物、湖沼の汚染解析とシアノバクテリア、地下貯留や人工湿地による下水処理水再利用、医薬品などの微量物質、流域管理と気候変動対応であった³⁴⁾。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

- ダイオキシン類や臭素系難燃剤など GC/HRMS (ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析) を用いた分析技術に加えて、LC/MS/MS (液体クロマトグラフ/タンデム質量分析) による環境汚染物質の分析技術の環境分析への適用例が大幅に増加した。このことにより、医薬品、洗剤、有機フッ素化合物 (PFOS、PFOA など) などを環境中に存在する低濃度まで LC/MS/MS によって分析することが可能になり、研究室や各種検査機関でルーチンで行うことのできる分析法として定着した。こうした微量物質の分析技術を適用し、様々な新興汚染物質の挙動研究がこれからも行われると考えられる。
- 環境中の遺伝子を混合状態のまま解析できるメタゲノム解析に基づいた環境解析技術が進展し、環境分野への適用例が増加するものと考えられる。バイオテクノロジーに加えて、ナノテクノロジー、質量分析技術を用いた病原微生物同定の新技術も進展している。硝化細菌など特定の機能をもつ細菌に注目し、属レベルで新しい微生物の発見や未知の代謝様式をもつ微生物が発見される可能性もある。
- 水質汚濁の現場計測では、光学式溶存酸素計など、より信頼性の高い測定技術が普及し、また、連続計測器のデータを携帯電話回線で転送するなど、情報関連技術と融合した計測手法も広範囲の現場調査に使用されるようになってきている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 医薬品および日用品等由来化学物質 (PPCPs) による汚染にスポットライトを当てたのは、EU による POSEIDON プログラム (2001-2004) が最初である³⁵⁾。POSEIDON プログラムの後継プログラムのひとつとして、European Research Council は、Designing new technical wastewater treatment solutions targeted for organic micropollutant biodegradation, by understanding enzymatic pathways and assessing detoxification (ATHENE) という研究課題に対して 350 万ユーロ (2011-2017) を助成している³⁶⁾。EU は環境中の医薬品問題に対して、問題の発見、現場調査、処理実態の解明の時期から、対

処技術の開発といった応用面や生物分解メカニズムの解明といった基礎科学の面まで、医薬品の環境影響について総合的、かつ、継続的に支援している。

- EUの Solutions は、ヨーロッパ、ブラジル、中国およびオーストラリアから 39 機関が参加するプロジェクトである。河川における有害化学物質を現在の科学技術を結集して評価し直すために、化学分析から影響分析にわたる広範な領域をカバーしている。ライン川やドナウ川流域の生態系と人の健康における化学物質リスクの問題解決のための総合的な取り組みとして 2013 年より（5 年計画）開始された³⁷⁾。
- 北欧を中心とする MARS プロジェクトは、16 の河川流域のケーススタディによって各流域における生態系の状態と化学物質およびその他の抑圧因子の解明を目指している³⁸⁾。
- 米国環境保護庁(EPA)は、Human and Ecological Health Impacts Associated with Water Reuse and Conservation Practices と題したプログラムで下水処理水などの再利用による健康や生態系影響の研究（2015-2018）に総額 330 万ドルを助成しており、医薬品などを含めた新興汚染物質の処理水灌漑植物への移行を調べるプログラムもその中に含まれている³⁹⁾。
- 米国環境保護庁（EPA）は、先端的な課題だけでなく、水に関する総合的な課題や気候変動などの目的に対応した水管理について研究助成をしている。例えば、気候変動による水資源問題について、Systems-Based Strategies to Improve The Nation's Ability to Plan And Respond to Water Scarcity and Drought Due to Climate Change プログラムの中で飲料水の水質、湖沼の水質・生態系などに 2015-2018 に総額 510 万ドルを研究助成している³⁹⁾。また、栄養塩の管理についての総合的研究拠点形成として Centers for Water Research on National Priorities Related to a Systems View of Nutrient Management と題して、880 万ドルを支出している（2013-2017）³⁹⁾。
- ドイツ連邦教育研究省（BMBF）の提唱による欧州レベルの研究プログラム「海洋環境におけるマイクロプラスチック」が、欧州の共同研究イニシアチブ Healthy and Productive Seas and Oceans (JPI OCEANS) の枠組みの中で行われる。公募の合計助成額は 2018 年までに 700 万ユーロ強となる。マイクロプラスチックの分析および測定方法に関する統一的标准に関する作業をドイツのアルフレド・ヴェーゲナー研究所ヘルムホルツ極地海洋研究センターが統括し、ヘルムホルツ環境研究センターがプラスチック廃棄物の分散経路、分解および有毒性等に関する研究を統括する。その他の海洋生物および生態系に対するマイクロプラスチックの環境毒性学的影響に関するテーマについてはスペインとノルウェーが主導する。4 件の研究アライアンスで合計 51 の欧州の研究所が関与し、2015 年末に作業を開始する予定である⁴⁰⁾。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 閉鎖性水域での栄養塩の管理などの問題は、古くから知られた問題だが、多方面からのアプローチが継続的に必要な課題である。例えば、従来は栄養塩の除去のみを目指していたが、現在では、漁業の振興の観点から、季節によっては栄養塩を積極的に水域に排出した方がよいという考え方も支持されはじめており⁴¹⁾、水環境の分野に加えて、水産漁業、政

策、水の流動シミュレーション、生態系モデルなど、多方面の研究者が共同で特定の地域の栄養塩管理の事例研究に取り組む意義は依然として大きい。

- マイクロプラスチックに関しては、微細マイクロプラスチックの定量法と生物影響があげられる。まず、海洋へ流入するプラスチックとその行方の定量的把握は極めて不十分である。その背景には、通常の計測下限である 300 μm 以下のマイクロプラスチック、ナノプラスチックの計測法が確立されていないことがある。ここがブレイクスルーされると物質収支・動的な理解が飛躍的に進む。生物影響については、対象生物、発現する影響の多様性に対して、この問題にとり組んでいる化学、生物、毒性学の研究者が圧倒的に少なく、マイクロプラスチックとそこに含まれている化学物質による生物影響の解明が遅れている。
- 欧州は基礎研究によって新しい問題を発見し、それに基づき EU 内で販売する商品に環境配慮を要求し、環境規制を先導してきた。世界的に問題が認知された場合、その問題を先行して研究対象としていたアドバンテージは極めて大きく、日本は欧米の後追い研究となっている点は否めない。
- 水質現象のなかには、化学工場や原子力発電所の事故、タンカーや製油所からの油の流出、2012年の利根川でのホルムアルデヒドによる取水停止など、突発的な事故で問題が露見することがある。欧州においても、米国においても、石油採掘や石油輸送事故による油汚染は重要な水質汚濁研究テーマであり³⁴⁾、研究助成も行われている。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- バイオテクノロジーやナノテクノロジーを用いた汚染物質や病原微生物の測定方法の開発が求められる。ナノテクノロジーを用いたデバイス、メタゲノム解析や質量分析による微生物同定など、分析機器の性能向上によりこれまでにない検出手法が一般化していく可能性が高く、こうした高度分析機器を用いた環境測定技術の開発を進める意義は大きい。また、検査培地や検査機器、分析前処理のための消耗品などの形で産業の新興につながる。
- 特定の閉鎖性水域での栄養塩の管理、貧酸素水塊などの問題を解決する事例研究が求められる。学問的に新味はないものではあるが、先端的な課題が水環境で重要な問題とは限らない。地域の環境を理解し再生することを、水環境、水理シミュレーション、水産漁業、環境政策などの多面的観点から研究するプロジェクトに対して、欧米諸国も継続的に支援している³⁹⁾⁴²⁾。
- マイクロプラスチックに関しては、1) マイクロプラスチックとそこに含まれる化学物質による生物影響の多角的な解明や、2) 破片化、微細化したマイクロプラスチックの起源となっている製品の推定・特定を行うための化学的手法の開発が求められる。さらに、3) ある特定の水域・流域について、プラスチック廃棄物量、水域への流入量、破片化・細片化速度、堆積速度などを実測・推定し、プラスチック廃棄物のマスバランスを求める研究も対策上重要な課題である。2)の化学的手法とマスバランス的手法の組み合わせが有効である。また、4) マイクロプラスチックが海底堆積物中に蓄積しているレガシー汚染物質 (PCBs のように過去に使用・放出された化学物質で都市沿岸堆積物に蓄積されているもの) の水中への再懸濁・再輸送、分配、拡散に寄与しているのではないかという視点がこれまでの評価で見落とされている。より広い生態系影響という視点でこのプロセスを学際的に評価することが要請される。最後に 5) プラスチック汚染の進行速度の解明があげられる。マ

マイクロプラスチックの測定が近年始まったため経時的な測定データは海水中に関しては存在しない。それに代わるものとして、柱状堆積物を用いた汚染史の復元手法が適用できる可能性がある⁴³⁾。

（５）政策的課題

- 水域における栄養塩の管理や貧酸素水塊の問題に関しては、水環境の研究者にモデルシミュレーション、水産漁業、農業畜産業、環境政策などの分野が連携し、研究を推進する環境の整備が求められる。また、うなぎの生育できる水環境の創成といった目的先行型研究も望まれる。先端的な科学技術ではない分野であっても、長期的なモニタリングの継続が新たな実用的知見の蓄積に寄与するため、長期的モニタリングを可能とする資金や人材、観測基盤やデータベースの整備が求められる。
- 特定微生物や特定汚染物質の検出、検査機器、消耗品などは国際的に標準法として認められれば、産業的な意義の大きい分野であり、新規検出法や標準的な検査方法に関して、日本が国際的に主導権を確保するための研究が求められる。
- これまでの理化学指標に加えて、臭気、透明度などの感覚指標が今後、水環境の評価には重要となる可能性がある。「沿岸透明度」の目標設定には、水生植物の保全の観点と親水利用の場の保全が掲げられ、それぞれ対象水域での水生生物種とその生育環境、水域の利水状況と地域住民のニーズ等に配慮した設定が望ましいとしている⁴⁴⁾。科学的評価として常にその基準の信頼性を担保するためのモニタリングが求められる。
- マイクロプラスチックに関しては、化粧品等に配合されているマイクロビーズなどの一次マイクロプラスチック、並びに環境中で劣化しやすいプラスチック製品や化学繊維に対して予防原則的な観点から規制を行うことが世界的に進んできており、日本でも予防原則的な対応が求められる。また、欧米を中心にプラスチック廃棄物対策との組み合わせでマイクロプラスチック対策が進められている。発生源特定により対策への貢献が可能になる。石油ベースのプラスチックの消費量自体を抑える対策やバイオマスベースの素材の開発と積極的な利用が望まれる。
- 健康関連では、国際的な取り組みに対して、応分の貢献を日本が進めることが望まれる。例えば、WHOの薬剤耐性菌の制御の取り組みに対して、医療、農業畜産業、環境を横断する総合的研究推進体制の構築が望まれる。

（６）キーワード

栄養塩管理、溶存酸素、重金属、窒素、リン、PCBs、DDTs、ダイオキシン類、有機フッ素化合物、医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs）、添加剤、マイクロ粒子、マイクロプラスチック、ナノ粒子、粒子毒性、病原微生物、薬剤耐性菌、低濃度分析、レガシー汚染

（7）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------|---------|----|------|---|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● Water Research 論文掲載件数はこの5年間現状維持の状態である。生物応答を用いた水質評価技術などの研究が環境省の政策動向に関連し増加しているが、欧米の後追い研究である点是否めない。 ● マイクロプラスチック中の化学物質の測定やデータベースの構築という点では世界をリードしている。生物影響の研究も海鳥については世界的な水準であり、世界をリードする成果を上げてきている。海水中のマイクロプラスチック量の測定としては西部太平洋の汚染状況をはじめて明らかにしてきた。しかし、生物影響の研究者を中心に、全体に研究者層が薄く、研究が頭打ちになる可能性がある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↘ | <ul style="list-style-type: none"> ● 地方大学や地方自治体の研究所の弱体化に伴い、地域の水環境問題への総合的アプローチが弱体化している。 ● マイクロプラスチックに関して、環境省が東アジアや東南アジアも巻き込んだ研究プロジェクトを開始した。民間部門や自治体等での研究開発の動きが出てきた。欧州に比べると遅れている。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | ↘ | <ul style="list-style-type: none"> ● 病原性微生物や微量物質の分析法などで優位に研究が進められている。論文数からは、依然として研究大国であるが、Water Research 掲載論文数は徐々に減少している。 ● マイクロプラスチックに関して、多くの分野の研究者が参画し、研究を進めている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 天然ガスや石油採掘に伴う水環境汚染、地域の富栄養化問題への総合的対応、気候変動への水環境面からの対応など、目的を気候変動や資源採掘、地域環境の保全においた研究が行われている。 ● 海洋大気局（NOAA）、環境保護庁（EPA）、州の研究機関、NGOがプラスチック汚染低減のための研究を進めている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 医薬品・日用品による水環境汚染など問題自体の発掘に積極的に関与してきた。農薬や硝化反応阻害物質、アナモックス細菌などの研究も盛んである。ナノテクノロジーを用いた病原微生物同定に関する研究をEUが後押ししている。Water Research 論文掲載数は増加傾向。 ● マイクロプラスチックに関して、多くの分野の研究者が参画し、研究を進めている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 環境ラベルによる環境性能主張などの制度を用いて、新興汚染物質への規制を実施し貿易管理に利用している。気候変動への対応、漁業資源や生態系の保全などを目的とした水環境研究も盛んである。 ● 各国の研究機関、政府、NGOがプラスチック汚染低減のための研究を進めている。 |
| 中国 | 基礎研究 | △ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 様々な環境分野の研究に後追いで参加しているため、論文数は多いがインパクトの高い研究は少ない。 ● 中国科学院、中国環境研究科学院がマイクロプラスチックを重点課題と位置づけ、いくつかの研究室で研究が開始された。日本の大学との共同研究も開始されようとしている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 水環境の調査事例など旧来からの水環境研究の分野だけでなく、新興汚染物質に関連した比較的新しい分野の研究まで、発表論文数で日本はもちろん、米国よりも多くなっている。 ● 中国のマイクロプラスチック研究で使われている手法は基本的に他国でこれまで使われてきた手法である。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↘ | <ul style="list-style-type: none"> ● 水環境に関する基礎研究は論文掲載数などで見る限り、低下している。薬剤耐性菌の検討など、分野を限ると、ある程度の研究蓄積が見られる。 ● 韓国政府がマイクロプラスチックを重点課題と位置づけ韓国海洋科学技術院（KIOST）を中心に研究を推進している。これまででも、世界のマイクロプラスチック研究に貢献している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 水ビジネスへの参画が見られ、雨水利用による水資源の獲得などの分野で研究が行われている。 ● NGOと連携しプラスチック汚染低減のための対策を進めている。 |

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、 →: 現状維持、 ↓: 下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Carpenter, E. J.; Smith, K. L. J., Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science* **1972**, *175*, 1240-1241.
- 2) Rothstein, S. I., Plastic particle pollution of the surface of the Atlantic Ocean: evidence from a seabird. *Condor* **1973**, *75*, (344), 5.
- 3) Colton, J. B.; Knapp, F. D.; Burns, B. R., Plastic particles in surface waters of the north-western Atlantic. *Science* **1974**, *185*, (4150), 491-497.
- 4) Morris, R. J., Plastic debris in the surface waters of the South Atlantic. *Mar. Pollut. Bull.* **1980**, *11*, (6), 164-166.
- 5) Ryan, P. G., The characteristics and distribution of plastic particles at the sea-surface off the southwestern Cape Province, South Africa. *Marine Environmental Research* **1988**, *25*, (4), 249-273.
- 6) Day, R. H.; Shaw, D. G.; Ignell, S. E. *The Quantitative Distribution and Characteristics of Marine Debris in The North Pacific Ocean, 1984-88*, Hawaii, 1990.
- 7) Ryan, P. G., The effects of ingested plastic on seabirds: correlations between plastic load and body condition. *Environ. Pollut.* **1987**, *46*, (2), 119-25.
- 8) Ogi, H. *Ingestion of plastic particles by sooty and short-tailed shearwater in the north pacific*; Hawaii, 1990.
- 9) Day, R. H.; Wehle, D. H.; Coleman, F. C. In *Ingestion of plastic pollutants by marine birds*, Proceedings of the workshop on the fate and impact of marine debris, 1985; 1985; pp 344-386.
- 10) Mato, Y.; Isobe, T.; Takada, H.; Kanehiro, H.; Ohtake, C.; Kaminuma, T., Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment. *Environ. Sci. Technol.* **2001**, *35*, (2), 318-324.
- 11) Takada, H., Call for pellets! International Pellet Watch Global Monitoring of POPs using beached plastic resin pellets. *Mar. Pollut. Bull.* **2006**, *52*, (12), 1547-1548.
- 12) Ogata, Y.; Takada, H.; Mizukawa, K.; Hirai, H.; Iwasa, S.; Endo, S.; Mato, Y.; Saha, M.; Okuda, K.; Nakashima, A.; Murakami, M.; Zurcher, N.; Booyatumanondo, R.; Zakaria, M. P.; Dung, L. Q.; Gordon, M.; Miguez, C.; Suzuki, S.; Moore, C.; Karapanagioti, H. K.; Weerts, S.; McClurg, T.; Burren, E.; Smith, W.; Van Velkenburg, M.; Lang, J. S.; Lang, R. C.; Laursen, D.; Danner, B.; Stewardson, N.; Thompson, R. C., International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal Waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs. *Mar. Pollut. Bull.* **2009**, *58*, (10), 1437-1446.
- 13) Hirai, H.; Takada, H.; Ogata, Y.; Yamashita, R.; Mizukawa, K.; Saha, M.; Kwan, C.; Moore, C.; Gray, H.; Laursen, D.; Zettler, E. R.; Farrington, J. W.; Reddy, C. M.; Peacock, E. E.; Ward,

- M. W., Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Mar. Pollut. Bull.* **2011**, *62*, (8), 1683-1692.
- 14) Moore, C. J.; Moore, S. L.; Leecaster, M. K.; Weisberg, S. B., A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Mar. Pollut. Bull.* **2001**, *42*, (12), 1297-1300.
- 15) Thompson, R. C.; Olsen, Y.; Mitchell, R. P.; Davis, A.; Rowland, S. J.; John, A. W. G.; McGonigle, D.; Russell, A. E., Lost at sea: Where is all the plastic? . *Science* **2004**, *304*, 838.
- 16) Browne, M. A.; Dissanayake, A.; Galloway, T. S.; Lowe, D. M.; Thompson, R. C., Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environ. Sci. Technol.* **2008**, *42*, (13), 5026-5031.
- 17) Thompson, R.; Moore, C.; Andrady, A.; Gregory, M.; Takada, H.; Weisberg, S., New directions in plastic debris. *Science* **2005**, *310*, 1117.
- 18) Bowmer, T.; Kershaw, P., *Proceedings of the GESAMP International Workshop on Microplastic Particles as a Vector in Transporting Persistent, Bio-accumulating and Toxic Substances in the Ocean, 28-30th June 2010, UNESCO-IOC, Paris*. GESAMP: 2010.
- 19) GESAMP, Assessment of microplastics and associated chemicals in marine environments. **2015**.
- 20) Murphy, F.; Ewins, C.; Carbonnier, F.; Quinn, B., Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50*, (11), 5800-5808.
- 21) Carr, S. A.; Liu, J.; Tesoro, A. G., Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research* **2016**, *91*, 174-182.
- 22) Eriksen, M.; Mason, S.; Wilson, S.; Box, C.; Zellers, A.; Edwards, W.; Farley, H.; Amato, S., Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Mar. Pollut. Bull.* **2013**, *77*, (1-2), 177-182.
- 23) Browne, M. A.; Crump, P.; Niven, S. J.; Teuten, E.; Tonkin, A.; Galloway, T.; Thompson, R., Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45*, (21), 9175-9179.
- 24) Wright, S. L.; Thompson, R. C.; Galloway, T. S., The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environ. Pollut.* **2013**, *178*, (0), 483-492.
- 25) Sussarellu, R.; Suquet, M.; Thomas, Y.; Lambert, C.; Fabioux, C.; Pernet, M. E. J.; Le Goïc, N.; Quillien, V.; Mingant, C.; Epelboin, Y.; Corporeau, C.; Guyomarch, J.; Robbens, J.; Paul-Pont, I.; Soudant, P.; Huvet, A., Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2016**, *113*, (9), 2430-2435.
- 26) Lönnstedt, O. M.; Eklöv, P., Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology. *Science* **2016**, *352*, (6290), 1213-1216.
- 27) Jeong, C.-B.; Won, E.-J.; Kang, H.-M.; Lee, M.-C.; Hwang, D.-S.; Hwang, U.-K.; Zhou, B.; Souissi, S.; Lee, S.-J.; Lee, J.-S., Microplastic Size-Dependent Toxicity, Oxidative Stress Induction, and p-JNK and p-p38 Activation in the Monogonont Rotifer (*Brachionus koreanus*). *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50*, (16), 8849-8857.

- 28) Frohlich, E.; Samberger, C.; Kueznik, T.; Absenger, M.; Roblegg, E.; Zimmer, A.; Pieber, T. R., Cytotoxicity of nanoparticles independent from oxidative stress. *The Journal of Toxicological Sciences* **2009**, *34*, (4), 363-375.
- 29) Browne, M. A.; Niven, S. J.; Galloway, T. S.; Rowland, S. J.; Thompson, R. C., Microplastic Moves Pollutants and Additives to Worms, Reducing Functions Linked to Health and Biodiversity. *Current Biology* **2013**, *23*, (23), 2388-2392.
- 30) Rochman, C. M.; Hoh, E.; Kurobe, T.; Teh, S. J., Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports* **2013**, *3*, 3263.
- 31) Lenz, R.; Enders, K.; Nielsen, T. G., Microplastic exposure studies should be environmentally realistic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2016**, *113*, (29), E4121-E4122.
- 32) 第50回日本水環境学会年会講演要旨集 (2016)
- 33) IWA world water congress and exhibition 2014, Lisbon プログラム
<http://www.iwa2014lisbon.org/>
- 34) IWA world water congress and exhibition 2016, Brisbane プログラム
<http://www.iwa-network.org/event/world-water-congress-exhibition-2016/programme/>
- 35) European Commission, Poseidon プロジェクトウェブサイト
http://cordis.europa.eu/project/rcn/53072_en.html
- 36) European Research Council, Athene プロジェクトウェブサイト
<https://erc.europa.eu/projects-and-results/erc-funded-projects/project/athene>
- 37) SOLUTIONS プロジェクトサイト <http://www.solutions-project.eu/>
- 38) MARS プロジェクトサイト <http://mars-project.eu/index.php>
- 39) US Environmental Protection Agency 水分野への助成ウェブサイト
<https://www.epa.gov/research-grants/water-research-grants>
- 40) JST CRDS デイリーウォッチャー「海洋マイクロプラスチック汚染に関する研究」
<http://crds.jst.go.jp/dw/20150930/201509306862/>
- 41) 山本民次、花里孝幸；海と湖の貧栄養化問題、地人書館(2015). ISBN 978-4-8052-0885-4
- 42) The EU Framework Programme for Research and Innovation
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020> (水質汚濁系のテーマを検索)
- 43) Zettler, E. R.; Mincer, T. J.; Amaral-Zettler, L. A., Life in the "Plastisphere": Microbial Communities on Plastic Marine Debris. *Environ. Sci. Technol.* **2013**, *47*, (13), 7137-7146.
- 44) 環境省 (2015) 水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直しについて (平成 27 年 12 月中央環境審議会). <http://www.env.go.jp/press/101764/28679.pdf>

3.2.3 土壌・地下水汚染

（1）研究開発領域の簡潔な説明

土壌・地下水汚染は、人為（人間活動）由来または自然由来の汚染物質などが、土壌さらには地下水を汚染し、健康被害や環境影響などをもたらす事象である。ここでは、土壌・地下水における汚染物質の観測・計測と予測・評価、ならびに浄化・修復技術に関する様々な技術およびシステムを対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

土壌汚染物質には、多くの重金属のように比較的水に溶けにくく土壌に吸着しやすい物質もあれば、揮発性有機化合物（VOC）のように比重が水より重く帯水層に深く浸透して土壌や地下水に残留する物質もあり、地下水の流れに沿って汚染が広域化してしまうことがある¹⁾。よって、本領域では土壌汚染とそれに伴う地下水汚染の両者を扱う。

土壌・地下水汚染の調査や対策には、すでに多くの調査技術や修復浄化技術が開発され、実際に利用されている。しかし、掘削除去（汚染土壌を掘削してオンサイトあるいはオフサイトで浄化処理や埋立処分する方法）による対応では費用負担が大きいこと、また一般に土壌・地下水汚染の調査や対策には多くの時間とエネルギーを要するなどの課題がある。そこで、様々な手法で、特に原位置での処理を目指した新技術の開発や環境負荷低減を目指したグリーンレメディエーションが、大学や企業ともに行われている。

自然由来の重金属等による土壌や地下水の汚染も国内外で課題となっている。また、2011年の東日本大震災で発生した福島第一原子力発電所事故に伴う放射性セシウムによる汚染土壌への対応など、現行法の枠組みでは捉えられない新たな土壌環境問題が発生し、解決が求められている²⁾。

[動向（歴史）]

日本の土壌汚染の歴史は、1870年代後半の渡良瀬川流域の銅汚染をはじめとする、鉱山廃水を原因とする農用地の汚染に始まった。1970年代からは東京都江東区の鉱さい埋立跡地の六価クロム汚染など都市部の土壌汚染がクローズアップされ、1991年には重金属等10項目について土壌環境基準が設定され、その後対象が拡大されていった。1997年には23項目を対象とした地下水の環境基準が設定され、2001年にふっ素およびほう素が土壌環境基準項目に追加された²⁾。

1990年の土壌環境基準の施行以降は、基準値を超過する事例が多く見られた。また、典型七公害の中で土壌汚染のみに法規制が無かった³⁾。そこで、土壌汚染による人の健康への影響の懸念および対策の確立に対する社会的要請が強まり、それに応えるものとして土壌汚染対策法が2002年に成立、2003年に施行された。土壌汚染対策法は2010年に改正され、自然由来の重金属等含有土が規制対象とされるなどの大きな変更があった²⁾。

こうした社会的動向を受け、環境庁は1993年度から5カ年計画で「地下水汚染対策調査」と「土壌汚染浄化新技術確立・実証調査」を実施した（1994年以降「土壌・地下水汚染対策

事例等調査)。民間が開発提案した新技術について、ラボスケール試験や実際のフィールドで実証試験を実施するもので、サンプリング、分析、原位置封じ込め、原位置浄化技術、原位置抽出分離および分解技術、掘削除去後の分離・分解技術について、32の新技術が提案された。その後1999年まで継続され、これらの技術の中には現在も有効な対策技術として利用されている嫌気性微生物による原位置TCE（トリクロロエチレン）分解技術（バイオレメディエーション）や鉄粉によるTCE分解技術が含まれる。

1990年代後半、ダイオキシン類による土壤汚染が社会問題となると、2000年度以降、環境省はダイオキシン類汚染土壤浄化技術等調査などで技術開発を実施した。実際のダイオキシン類汚染土壤に適用された商業用分解技術は、ジオメルト法（ガラス固化）、TPS（間接加熱による熱脱着）とジオメルト法の組み合わせ、ジオスチーム工法（間接熱脱着＋水蒸気分解法）、減圧還元間接加熱分解法（ダイオ・スーパ）、パイル方式加熱脱着・分解によるダイオキシン類汚染土壤浄化技術である。これらの技術は確立されたと言ってもよいが、国内で継続して商業運転しているダイオキシン類分解施設は現時点では存在しない。代わって、850℃以上の燃焼温度としたロータリキルン炉によるダイオキシン類分解と排ガスの二次燃焼炉（850℃で2秒間以上の滞留時間）での分解とその排ガス処理設備からなる焼却施設が稼働している。

2002年度以降は、土壌・地下水を対象として、簡易で低コスト・低負荷型の土壤汚染調査手法や対策技術を実用化して普及させることを目的に、低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査を実施している。

2011年の福島第一原子力発電所事故の発生後は、放射性物質の除染・減容化に関する様々な取り組みがなされている。内閣府では、平成23年度の科学技術戦略推進費において「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」を実施し、放射性物質の分布状況等に関する調査研究および農地土壌等における放射性物質除去技術の開発を行った。また、同年度には「除染モデル実証事業」を日本原子力研究開発機構（JAEA）に委託して実施した。除染や廃炉に関連したセシウムやストロンチウム等の放射性物質を対象とする技術開発の件数が増加しており、放射性物質の挙動の把握⁴⁵⁾や、放射線遮蔽技術、吸着・洗浄に関する技術開発が多い⁶⁾。

比較的低濃度で広く分布している自然由来重金属等による土壤環境への負荷の軽減も重要な環境課題となっている。日本では、砒素、鉛、カドミウムなどのバックグラウンドでの濃度が比較的多いとされ、また平均的な曝露量も欧米と比べて高くなっている。最近では、リニア新幹線の建設工事などのトンネル工事に伴う土砂や岩石に含まれる重金属等の問題がクローズアップされ、その適切な対策と管理が求められている。これらは、従来のように人為的な高濃度の汚染ではないため、低コストかつ周辺環境に配慮した環境対策を実現することが重要である。そのため、土砂から重金属等の溶出を低減する技術、吸着マットなどによる重金属等の除去技術などが活発に研究開発されている。

従来の土壤汚染に対する要素技術としては、生物を用いた浄化・修復技術であるバイオレメディエーションや植物を用いるファイトレメディエーション等の生物的処理⁷⁾、固化・不溶化処理⁸⁾に関する研究が盛んであるが、処理技術は、処理を行う場所に違いから掘削除去と原位置浄化に分けられ、特に原位置での浄化が目指した技術開発が進められている。原位置浄化技術のうち化学的処理としては、フェントン法や鉄粉を用いた還元処理法、薬剤によ

る吸着処理および透過性浄化壁を用いた化学処理などがあげられる。いずれも、土壤汚染および土壤から溶出した重金属、揮発性有機化合物 (VOC) および鉱物油、さらには地下水の汚染に適用される。国内外ともに適用事例は多くあり、特にフェントン法と鉄粉法の適用範囲は広い。新規の技術開発としては、マグネシウム化合物を用いた砒素やセレンの化学形態の変換や吸着処理、プラズマを用いた VOC の分解処理などが考案され、実用化されている。物理的処理としては、土壤洗浄やスパージングによる重金属や VOC の浄化・修復が行われている。土壤洗浄では、土壤粒径により汚染物質の存在割合が大きく異なることから、分級処理と選別処理のプロセスが重要となっている。スパージングは主に地下水汚染に適用され、空気や蒸気、さらには反応性のガスなどを利用した種々のスパージング技術が開発され、土壤汚染現場で実践されている。最近では、マイクロバブルの長期にわたる機能性や選択性を用いた効率的な洗浄やスパージング技術も研究開発されている。

微生物や植物を利用して土壤や地下水の汚染を修復するバイオレメディエーションは、1970年代に米国で石油の分解に微生物を利用したのが始まりである。バイオレメディエーションは、汚染土壤にもともと生育している微生物に水、酸素、栄養物質を供給して汚染物質の分解を促進させる方法 (バイオスティミュレーション) と、汚染物質の分解菌を新たに導入する方法 (バイオオーグメンテーション) の2種類に大別される。処理に時間がかかるが、温和な条件のもと低コストで汚染を処理できるメリットがある。しかし、バイオオーグメンテーションは社会受容性の確保が必要となり、遺伝子組換え改良菌を利用する場合は一定の規制がかかる。日本では、環境省と経済産業省の共管として、バイオレメディエーション指針が運用されている。現在、主に、ガソリン等の燃料油やその成分であるベンゼン、トルエン、その他の石油系炭化水素、トリクロロエチレン等の炭化水素系溶剤などの浄化に実用化されている。このほか、ダイオキシンや塩素系の残留農薬などへの応用研究も活発に行われている⁹⁾¹⁰⁾。

地下水汚染に注目すると、1997年の環境基本法により23項目について環境基準が制定され、その後、項目の追加や基準値の変更が行われてきた。1990年代は揮発性有機化合物を対象とした地下水汚染対策が始められたが、当初は土壤ガス吸引法と地下水揚水処理の組合せがほとんどであった。2000年代からバイオレメディエーションが一般的に行われるようになり、帯水層中に生息している *Dehalococcoides* 族細菌を活性化させるバイオスティミュレーション技術の適用事例が増えている。1990年頃からは、汚染拡散防止対策として自然の地下水の流れを妨げることなく地下水中の汚染物質を浄化・安定化する透過性地下水浄化壁も用いられている。米国では1990年代半ばより科学的自然減衰 (MNA: Monitored Natural Attenuation) が地下水汚染対策に取り入れられており、日本でもリスク評価に基づく対策が今後取り入れられる可能性がある。硝酸性窒素は、地下水環境基準の超過率が最も高く、地下水汚染への対応が大きな課題となっている。長期的に硝酸性窒素を低減するためには、土壤浸透水や地下水の脱窒処理を含めた浄化技術が必要と考えられ、2000年代に入り透過性浄化壁などの技術開発が行われている。硝酸性窒素による地下水汚染では、窒素安定同位体組成 ($\delta^{15}\text{N}$) を指標として窒素の起源が化学肥料由来か動植物由来であるかの推定が行われている²⁾。

土壤・地下水汚染対策では、上記の技術開発に加えて、健康リスクに応じた合理的なリスクマネジメントが求められる。土壤汚染による健康リスクを科学的に評価するためのモデル

開発が行われている。例えば、(社) 土壤環境センターのサイト環境リスク評価モデル (SERAM) や、産業技術総合研究所の地圏環境リスク評価システム (GERAS) がある。また、重金属類の含有量や溶出量、形態などの情報を地理情報システム (GIS) 上で統合化し活用するための環境情報システムである地圏環境インフォマティクスシステム (GENIUS) が東北大学、産業技術総合研究所、DOWA ホールディングス (株) により開発されている¹¹⁾。

リスク評価モデルの活用事例として、汚染地から離れたオフサイトでの土壤汚染のリスクマネジメント、汚染物質の地下水に沿った移動距離の推定、さらには各種の浄化技術の有効性や残存リスクの将来的な予測など、多岐にわたっている。最近では、建設発生土のリスク評価や土地利用用途に応じた浄化目標の設定などの環境政策にも活用されている。今後、法制度の中にリスク評価の枠組みを導入することにより、リスク低減とコスト軽減を同時に達成する合理的なサステナブルレメディエーション (下記) を達成する基礎となることが期待される。

様々な個別の浄化技術が開発、適用されてきたが、対策の意思決定に関わるアプローチ手法は、時代とともに変化してきた。具体的には、対策費用や浄化期間等に基づき、どの技術を用いて基準値以下に低減するか選択するコストベースアプローチが当初は主流であったが、その後浄化目標を汚染サイトや汚染土壌の利用形態に基づくリスクで評価するリスクベースアプローチが採用されるようになった。近年では、環境面だけでなく経済面や社会面を考慮したサステナブルレメディエーションといわれる考え方も取り入れられつつあり、サステナブルアプローチとして土壤汚染対策の多様化につながっている¹²⁾。

土壤・地下水汚染の社会情勢と技術の経緯を地盤工学会が図 3-4 の通りまとめている。

| 西暦 | 1950 | 1970 | 1990 | 2010 | 2030 | 2050 |
|------|--------------------|---|--|--|--|---------------------------------------|
| 社会情勢 | 都市部の地盤沈下 (地下水過剰揚水) | 工場・鉱山由来の重金属汚染 (イタイタイ病・土豆久藍山) | 都市部の汚染量減少 ハイテク(VOC)汚染 (シリコハレー 太子町) ラフカナル汚染(米国) レッカーケルク事件(オランダ) ブラウンフィールドの顕在化(米国) | 都市部の水位上昇 (地下構造物の漏水・浮上り) ダイオキシン問題 (能勢町ゴミ焼却施設) 東日本大震災 (塩害・放射性物質) 豊洲新市場予定地土壌汚染 神栖町地下水有機塩素汚染 | 気候変動による環境変化 世界的な水危機 米軍基地返還に伴う土壌汚染対応 | 広域な地下水利用障害 (硝酸性窒素汚染等) 汚染された土地の有効活用 |
| 地下水 | 地下水量 (地下水位・涵養) | 1956年 工業用水法 1962年 建築物用地下水の採取の規制に関する法律(ビル用水法) | 地盤沈下防止等対策要綱 | 2012年 森林法一部改正 2014年 水循環基本法 | 水循環を考慮した地下水資源マネジメント | 都市部の地下水の適正利用 (地下水位の適正化) |
| | 地下水質 (地下水汚染) | 1967年 公害対策基本法(1993年廃止) 1970年 水質汚濁防止法 | 1993年 環境基本法 1994年 特定水道利水障害の防止のための水道水源地域の水質の保全に関する特別措置法 水道原水水質保全事業の実施の促進に関する法律 | 1997年 地下水環境基準 2009年 地下水環境基準追加(計29項目) | 新たな環境基準の追加 | |
| | 調査測定 | 放射同位元素の利用 | 土壌ガス調査法 地下水汚染機構解明調査 | 遺伝子診断技術 シミュレーション技術 化合物別同位体分析(CSIA) | 非掘削調査技術の高度化 | |
| | 対策技術 | 揚水処理法 | 土壌ガス吸引法 透過性浄化壁 酸化分解法 | 脱塩素化細菌の発見 バイオオグメンテーション バイオスティミュレーション | 低コスト・低環境負荷型の浄化技術の普及 物理・化学的浄化手法からバイオレメディエーションへ | |
| | リスク評価 | | Monitored Natural Attenuation(米国) Risk based corrective actionの普及(米国) | Green & Sustainable remediationの概念の登場(米国・欧州) | リスク評価の普及・ブラウンフィールドの有効利用 | |
| 土壌 | 地盤環境 (土壌汚染) | 1971年 農用地の土壌の汚染防止等に関する法律 1980年 スーパーfund法(米国) | 1991年 土壌環境基準 2000年 ダイオキシン類の基準 | 2003年 土壌汚染対策法 2013年 放射性物質の環境法への追加 | 新たな環境基準の追加 | |
| | 調査測定 | | 土壌ガス調査法 TPH測定(油汚染対策ガイドライン) 土壌・地下水汚染指針 自走式ボーリングマシンの日本導入 現地分析法の開発 | 放射性物質の測定(除染発生土壌等) ダイレクトセンシング 地盤調査-Phase-I調査普及 | 現地分析技術の精度向上 リスク評価を含めた自然由来重金属の適切管理 | |
| | 対策技術 | 汚染土壌の掘削搬出 | 土壌洗浄 熱処理 化学分解 汚染土壌の不溶化処理 | バイオバイル バイオオグメンテーション 熱処理 化学分解 震災廃棄物の有効利用 | 地盤施工技術の活用・融合(自在ボーリング技術など) 放射性核種の除去技術 | |

図 3-4 地下水地盤環境における社会情勢と技術の経緯

(出典：地盤工学会²⁾)

（3）注目動向

[新たな技術動向]

- 新規対象物質

1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマーといった、新たに土壤環境基準が設定された項目について、従来技術の適用性と併せて技術開発が進められている¹³⁾¹⁴⁾。このような新規物質の中には発ガン性が懸念されるものもあり、早急な環境汚染対策の実現が望まれる。これらの物質は、産業活動の人為由来によるもののほか、自然界の反応プロセスで副生成物として生じるものもあり、そのメカニズムの解明も重要な課題である。また、1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマーは、それらの分配特性や環境中の挙動にも不明な点が多く、環境動態を考慮した簡易調査法の開発やシミュレーション技術の確立が求められている。

- 調査・評価技術

室内試験については、主流のバッチ溶出試験に加え、より実現象を再現しうるカラム通水試験の適用事例が、国際標準化（ISO）への取り組みも相まって増えている¹⁵⁾。自然由来汚染についての研究も多く、存在形態や存在範囲、溶出メカニズムの解明、基準超過情報のデータベース化等の基礎的研究が数多くなされている¹⁶⁾。

- 対策技術

土壤環境基準のみを考慮して画一的に浄化目標を定めるのではなく、リスク評価やサステイナブルレメディエーションのように複数の指標から目標を設定するためのモデル化やフレームワークの確立に向けた検討も多く行われている¹⁷⁾¹⁸⁾。

サステイナブルレメディエーション（SR: Sustainable Remediation）とは、土壤汚染対策において、リスクやコストだけでなく、外部環境負荷（環境面）を低減しつつ、社会面、経済面を含めた浄化の意思決定を推進する考え方であり、技術ベース思考、リスクベース思考と進んできた土壤汚染対策において、さらに広範な概念として持続可能性（環境・社会・経済）を取り込んでいく考え方である¹⁸⁾。

対策技術では、科学的自然減衰（MNA）の適用も注目される。地下水汚染では長期間にわたる対策に多大なコストと労力を要するため、自然的な機能を活用してモニタリングを実施しながら浄化の進行を科学的に判断するプロトコル MNA が提案され、鉱物油などの一部の汚染状況で実際に適用されている。欧米では数多くの実証事例が報告されているが、日本では山形県、熊本県での VOC 汚染のモニタリングとその科学的な検証結果が報告されている。微生物分解が活発な状況や移流・拡散により汚染物質が急速に減衰するような環境では、MNA の導入を促進するための社会システムやガイドラインの整備が必要である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 日本国内における Sustainable Remediation の必要性、あり方を議論する国内研究会の必要性、さらには国際的な組織への参画について議論をする場として、Sustainable Remediation コンソーシアムが産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門に設立された（2016年）¹⁸⁾。
- 国家課題対応型研究開発事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（平成27年度採択）において、「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉ま

でを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」が実施されている。①地下水および地下の広域環境評価・将来予測技術、②放射線遮蔽特性を有する土質材料開発とデブリ取り出し補助技術、③構内除染廃棄物・解体廃棄物の処分、デコミッショニング技術の開発推進とともに、人材育成を行うものである⁶⁾。

- 欧州では、1995年から2年ないし3年ごとに土壤・地下水汚染問題をテーマとした「ConSoil」が開催されてきた。2013年からは会議名称が水資源管理も含めた「AquaConSoil」となっている。2017年には14回目の国際会議「AquaConSoil」がフランスのリヨンで開催予定となっており、土壤、底質、水資源の持続可能な利用と管理がテーマとされている。したがって、当初のテーマであった土壤・地下水汚染の調査対策技術とリスク評価に底質環境も加わり、さらに水資源の利用と管理にまで展開されようとしている。

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

- 調査・分析技術
 - 安価で正確な公定法分析
土壤汚染の規制対象物質は30種類におよび、その分析コストは膨大である。効率的かつ低コストで実施できる一斉分析による公定法の手法や分析プロトコルの開発が求められる。
 - 現場で簡易に測定可能なオンサイト技術
公定法分析以外でも現場で簡易に汚染物質の判定や濃度レベルの検査はメリットが大きい。VOCや重金属等を対象とした現場型オンサイト測定・検査技術の開発が求められる。
 - 溶出試験を代替する試験法 (カラム試験など)
重金属等の溶出試験法には多くの技術的な課題 (再現性、ばらつき) があり、これを代替、補完する、ISOに準拠したカラム試験法などの公的試験法の開発が期待される。
- 浄化・修復対策技術
 - 複雑な汚染現場の状況と多様なエンジニアリング条件
汚染物質の溶出メカニズムには種々の要因が影響しており、実環境下での汚染物質の長期的挙動を高精度で予測することが難しい。また、土壤汚染の現場では、土質や地質の違い、土地の形態や利用条件などが様々であり、汚染サイトごとの個別対応が必要である。建設工事 (土木) や地盤調査 (地質) との連携による対策の効率化、建物直下における汚染の調査対策として水平ボーリング技術が求められる。
さらに、効率性、コスト、土地の特徴や広さ、土地利用形態、社会的側面などの多様な制約条件があり、個々の技術で適用可能性が異なるため、それらの関連性を総合的に評価できる仕組みが存在しない。エンジニアリングマニュアルの整備が臨まれる。
- リスク評価技術
 - リスク評価手法の社会実装
国際的な土壤汚染対策は、リスクベースの合理的なリスクマネジメントが主流であ

る。日本では技術的に成熟していない理由から導入されていないが、近い将来はリスク評価に基づく合理的な対策が実現する可能性が高い。

- モデリング技術の高度化

リスク評価モデルの高度化に加えて、現場の高次元データを用いた順逆双方向の解析などの信頼性の高いリスクモデリング技術の開発が求められる。データ駆動による数理統計的な解析技術の開発、現場での実証試験によるデータベースの蓄積が求められる。

- 地圏環境情報の整備

- 地球化学図、土壤環境基本図の整備

土壤汚染対策では、重金属等の地域特性やバックグラウンドの把握など、もっとも基本となる土壤環境に関する各種情報の整備が遅れている。地域ごとの地質情報を反映した地球化学図、土壤環境基本図の整備、リスクマップの作成および公開が求められる。

- リスク情報の公開と情報伝達

地球化学情報やリスク情報などをいかに正しく理解し、市民に伝えていくかの仕組みが存在しない。土壤汚染リスク情報の整備およびコミュニケーションツールを開発することが望まれる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 調査・評価技術

- 現在の汚染状況調査や浄化確認等においては、限られたサンプリング試料の濃度が 100m^3 や 3000m^3 の相当量の土壤を代表し、汚染の有無あるいは浄化の完了が判断されることから、低コストで空間的な汚染分布を精度良く、かつある程度迅速に把握しうるセンシング技術を確立することが求められる。

- 地下水は土壤に比べると移動および混合速度が速く、土壤の直接摂取リスクより地下水の飲用リスクの方が高いため、地下水のモニタリング強化を目指した簡易かつ低コストな地下水採取方法の開発が求められる。

- 移動という点では地下水よりも土壤ガスの方が注目されるが、土壤ガスを通じた汚染物質の移動に関する研究は少なく、吸入による健康影響の観点からも重要と考えられる。土壤ガス分析の高感度化により汚染状況を的確に把握することが求められる。

- 得られたボーリング試料、土壤や地下水試料から、地下の 3 次元的な空間を推定し、表現する「見える化」を図ることが求められる。

- 対策技術

- 廃熱や太陽熱等の再生可能エネルギーを活用したり、上部構造物での事業を停止させずに浄化できるなど、単に濃度を基準値以下に低減させるだけでなく、浄化によりインセンティブを与えうるサステイナブルな技術の確立、高度化が求められる。このような技術が普及することで、都市部でのブラウンフィールド問題の解決にも貢献できると考えられる。

- 低濃度基準超過土の地盤材料化は重要な課題であり、浄化せずにオンサイトで管理しつつ利用を図る工法が今後普及すると考えられるが、利用後のトレーサビリティを確

保するためのツール、制度の確立、モニタリング技術の開発に積極的に取り組むことが求められる。

- 遮水等の物理的処理は、長期に渡る安全性、確実性が求められるため、品質管理手法、維持補修技術についての研究開発推進が必要とされる。
- バイオ（ファイト）レメディエーションは、現状では浄化効果の持続性や完全な浄化といった観点で多くの技術的な課題をかかえている。地質や環境の諸条件の制約が極めて大きく、対象物質や汚染サイトごとに現象が異なるなどの問題がある。従来別々に行われていた、微生物の改変や耐性を中心とした基礎生物学や遺伝子情報の研究と、地質環境における微生物の生態や挙動に関する研究を融合させ、現場の条件に適合した効率的な技術とすることが肝要である。近年では、汚染サイトで採取した微生物を汚染物質に適合させ、さらに現場の環境条件に応じた微生物群の改変を可能にする新規の研究開発が進んでいる。
- グリーナー・クリーンアップの社会実装も求められる。グリーナー・クリーンアップ（greener cleanup）は、米国環境保護庁（EPA）で実践されているスーパンファンド法に基づく実行計画である。土壤汚染対策を他事業との連携で実施し、環境負荷を最小限に抑えた汚染対策を実現するための取り組みを提唱している。土壤環境に限定せず、広く地球環境問題を見据えた将来的な枠組みを構築して、大気、水質、地球環境（温暖化ガス）のトータルの環境保全を目標として、エネルギーの最小化、コストの軽減を図る技術体系である。汚染対策の資材を最小化し、廃棄物の循環を促進するため、公共事業や建設工事などと連携して総合的な設計を実現し、長期スパンにわたり生態系を配慮したトータルな環境改善を実践することが可能である。

（5）政策的課題

- 法制度と技術開発のギャップ、リスク評価に基づく対策

土壤汚染対策法で問題となるのは、国際的に主流のリスクベースの対応をとっていないこと、溶出量と含有量の両者を採用していることなどである。これらは日本独自の考え方なので、国内外で開発した新規の対策技術を導入する際に、技術と法制度のギャップが課題となる場合が多い。例えば、バイオ（ファイト）レメディエーションのように、合理的で高度な技術であっても法制度に合わないために導入が困難な技術や手法が少なくない。

リスク評価については、例えば対策工として採用されることが多い掘削除去は、コストが高く汚染土壌の受入先（土壤浄化処理施設を含む）が必要となる等の問題があるが、適切な管理を行えば原位置浄化や封じ込め等の対策工でも十分に適用可能な現場もあり、その採用の増加が期待される。採用の際は、対策工の性能評価を精度よく行うこと、リスク評価の考え方を採り入れた対策目標の設定とそのため具体設計を行うことが求められる。そのため、特にリスク評価に基づいた対策の実施を後押しするような政策の実現が期待される。

- 土壤汚染と地下水汚染で異なる規制

日本の環境法は分野別に制定されるものがほとんどであり、土壤環境と他の環境（大気、水質、地球環境など）を一体ととらえていない。土壤汚染は土壤汚染対策法のもとで規制

されており、汚染調査は土地の所有者責任となっているため、汚染状況を把握するための常時監視が実施されない。一方、地下水汚染は水濁法により規制されており、都道府県による地下水の常時監視が実施されている。このため、地下水の汚染については見落としが少ないと考えられる。土壌汚染と地下水汚染とは関連した事象であることが多いので、土壌汚染対策法と水濁法との組み合わせによる効果的な対策につながる制度改革が求められる。

- ダイオキシシン類、PCB、硝酸性窒素

ダイオキシシン類対策特別措置法で規定されているのは誰も出入りできる公共的な土地のみで、民間の事業所などの土地には適用されない。土壌汚染対策法における特定有害物質としてダイオキシシン類の追加検討が求められる。

PCBには含有量基準が設定されておらず、高濃度でも溶出量基準は満足する事例が認められている。PCBは直接摂取のリスクも十分考えられるので、PCBの含有量基準を設定することが望まれる。

地下水の環境基準を超過する割合が最も高い硝酸性窒素については、肥料や家畜ふん尿の影響が大きいと考えられているが、水濁法の有害物質使用特定施設に該当しないため、地下水汚染の未然防止のための構造基準の適用や定期点検などの遵守義務が課されないなどの課題がある。

- 地域特性と人材育成

日本は、もともと地質が複雑で鉱山活動が盛んな地域が多く、地域により重金属のバックグラウンド値の差異が大きい地質的な条件がある。このような地域特性は、居住する住民活動や農業活動、生態系を保全するための基盤となることから、対策において地域特性を反映することが重要である。また、土壌汚染対策法は、他の法体系と比べて新しい体系なので、社会システムの整備や人材育成が追いついていない。特に、現状では土壌汚染の分野で専門的な知識を有する人材が極めて少ないため、調査・評価、対策技術の現場適用の進捗が遅れている。

- アジア諸国との国際的共同事業

ごく最近では、中国やタイ国において土壌汚染対策に関して新たな環境規制となる法制度が制定されつつある。中国では2016年度以降に「土壌污染防治法」の制定が計画されており、予防措置を中心とした科学的なリスク管理の枠組みが提案されている。これらのアジア諸国と連携して土壌汚染対策を共同で実践していくことは、国家や企業や環境対策のみならず、国際的なセキュリティの観点からも重要な施策である。

（6）キーワード

土壌汚染、地下水汚染、ブラウンフィールド、自然由来、重金属等、VOC、鉱油、硝酸性窒素、POPs、ダイオキシシン類、調査技術、浄化技術、修復技術、封じ込め、吸着、リスク評価、バイオレメディエーション、ファイトレメディエーション、グリーンレメディエーション、サステイナブルレメディエーション

（7）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|-------------|---------|----|------|--|
| 日本 1)2) | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 福島第一原子力発電所事故以降、放射性物質、特に放射性セシウムの吸・脱着やモニタリングなどに関する基礎研究が加速されたものの、土壌・地下水汚染研究領域において依然として非常に重要である重金属類や揮発性有機化合物などに係る研究は予算枠の相対的な減少などにより影響を受けており、国際的イニシアティブを確保するためには、今後更なる加速が必要である。 ● 封じ込め等の物理的な対策技術に関する研究は国内ではそれほど多くないが、吸着層工法等の研究は、基礎研究を中心に近年増加傾向にある。また、汚染物質の溶出機構等に関する研究は、これまで同様に多い。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 基礎研究と同様、放射性物質による汚染の浄化や汚染水のモニタリング技術および処理技術などの応用研究開発が加速され、復興支援に貢献したものの、自然由来の重金属類や揮発性有機化合物による土壌汚染に係る低コスト・低環境負荷対策技術の開発は関連研究予算と提案数の減少に伴い減速傾向になり、今後加速する必要がある。 ● 封じ込めや盛土の実証試験、モニタリング等の応用研究は数件見られるが、過去と比較して顕著な増加は見られない。 |
| 米国 3)19) | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 米国国立科学財団（NSF）や環境保護庁（EPA）などのファンドによる土壌汚染に係る基礎研究が進められている。環境微生物や植物などを利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められている。 ● ポリマーやゼオライト等を添加した高機能型遮水材を対象とした基礎研究が盛んであり、学術雑誌への投稿も多いが、ここ数年で論文件数は大きく増加していない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● EPA や米国エネルギー省（DOE）などにより管理されている実汚染サイトで、開発技術の検証や実証試験ができ、応用研究の環境としては非常に優れている。 ● 汚染土利用時のモニタリング方法や地盤内浸透、溶出挙動についての技術開発、研究が進められている。 |
| 欧州 9)10) | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 欧州、特に英国においては、環境的側面のみならず、社会的側面および経済的側面も統合的に考慮したサステナブルレメディエーションの研究開発が加速されている。 ● 米国同様、ポリマー系材料を混合した遮水材の基礎的研究が盛んであり、特にフランスやベルギー、イタリアからの学術雑誌への投稿が多いが、論文件数は大きく増加していない。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 土壌・地下水汚染対策の新しい取り組みとして、英国を中心に提案されたサステナブルレメディエーションに関する ISO 規格の提案が進められている。また、ドイツを中心に、PCB や多環芳香族炭化水素（PAH）およびダイオキシンなどの汚染物質に係る ISO 規格の提案が進められており、科学技術の国際的な競争は一段と激しくなっている。 ● 汚染土利用盛土での降雨浸透現象やリサイクル材を利用した地盤の挙動評価等が積極的に行われており、学術論文への投稿も増加傾向にある。 |
| 中国 11) | 基礎研究 | ○ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 環境に対する国民の関心が高まり、環境に対する投資も年々増加し、現時点では GDP の 2% 近くまで増加してきている。特に改正環境保護法の施行（2015 年 1 月 1 日より）や土壌污染防治法（仮称）の制定（2016 年内に予定）の動きに伴い、土壌・地下水汚染に係る基礎研究の予算が増大し、中国科学院傘下の研究所や各地の大学で認定された「国家重点実験室」研究が盛んに進められている。 ● J-STAGE に相当する中国の電子ジャーナル検索ツール CNKI.net では、封じ込め等の物理的対策について数編の基礎的論文が存在するのみである。ただし政府系資金による物理的対策に関する研究プロジェクト数は、近年増加傾向にある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 中国では、土地が 100% 国有であるため、現場または原位置実証研究が行われやすい。現在国内で開発技術した技術のほか、欧米などで開発した技術の検証やクロスチェックが複数の大型プロジェクトで行われている。 ● 法整備が進められているところであり、現状では応用研究まで進展していない。現状では、この数年で飛躍的に応用研究が進展する見込みもない。 |

| | | | | |
|----|---------|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 韓国国内において、特に目立った動きはないが、留学生や研究者の海外派遣は目立つようになってきている。 ● 現場適用技術の進展を目指した GAIA プロジェクトが、2008 年から国家主導で進んでいる。利用形態に応じた浄化レベルの設定、モニタリング・トレース技術の開発研究にも注力している。基礎研究は 2008-2011 年に重点的に実施されており、現在は現場適用性の検証等にシフトしている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 海外技術の導入や外国との連携により、今後応用研究が加速される可能性が極めて高い。 ● Country Report of Korea (Soils and Groundwater contamination) によると、Gangwon 地区、済州島、ソウル等の都市部で地盤汚染が顕在化しており、GAIA プロジェクトと併せて応用技術の開発とその適用が進められている。 |

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 国立環境研究所, 環境技術解説, 土壌・地下水汚染対策
<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=52>
- 2) 地盤工学会, アカデミックロードマップ, 8-3 地下水地盤環境
https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/8-3AR.pdf
- 3) 国立環境研究所, 環境技術解説, 土壌汚染調査
<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=51>
- 4) 例えば、Inui, T., Katsumi, T., and Takai, A. (2015): Cesium sorption/desorption characteristics of sodium bentonite affected by major cations in leachate from MSW incinerator ash, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol.2, No.53, pp.1841-1844.
- 5) 例えば、池上麻衣子, 高瀬雄平, 米谷達成, 米田 稔, 島田洋子, 松井康人, 福谷 哲 (2014): 土壌の熱処理による Cs, Sr の溶出特性の変化, 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No. 7, pp.III_203-III_208.
- 6) 国家課題対応型研究開発事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, 福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的の新技術開発と人材育成プログラム (事業代表者: 東畑郁夫)
http://www.jst.go.jp/nuclear//training/adoption/jiban_intro.pdf
- 7) 例えば、山崎祐二, 長谷川愛, 稲葉 薫, 清水孝昭, 田 小維, 小林 剛 (2016): 嫌気性バイオレメディエーションの加温による促進効果及びそのモデル化に関する検討第 22 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.264-267.
- 8) 例えば、鈴木祐麻, 中原史也, 縫部俊晴, 新苗正和 (2016): 酸化マグネシウムによるヒ素(V)汚染土壌の不溶化にフミン物質が与える影響およびそのメカニズム, *Journal of MMIJ*, Vol.132, No.8, pp.137-143.

- 9) 国立環境研究所, 環境技術解説, バイオレメディエーション
<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=51>
- 10) JST CRDS, 研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2015年）, 研究開発領域「環境浄化」
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-03.pdf>
- 11) 地圏環境インフォマティクス (GENIUS) ホームページ
<http://geoserv.kankyotohoku.ac.jp/genius/>
- 12) 産業技術総合研究所 Sustainable Remediation コンソーシアム,
https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/SRConsortium_sokai.html
- 13) 例えば、大橋貴志, 菊池 毅, 山本哲史, 黒澤典明, 未規制物質による土壤汚染調査・対策手法検討部会 (2016) : 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーによる土壤・地下水汚染に係わる対策・処理技術の検討と対策上の留意点, 第 22 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.369-374.
- 14) 例えば、石森洋行, 遠藤和人, 中川美加子, 石垣智基, 山田正人 (2013) : 廃棄物処分場浸出水中の有機化合物成分に対する合成樹脂系遮水シートの遮蔽性能評価, ジオシンセティックス論文集, Vol.28, pp.99-102.
- 15) 例えば、Naka, A., Yasutaka, Y., Sakanakura, H., Kalbe, U., Watanabe, Y., Inoba, S., Takeo, M., Inui, T., Katsumi, T., Fujikawa, T., Sato, K., Higashino, K., and Someya, M. (2016): Column percolation test for contaminated soils: Key factors for standardization, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.320, pp.326-340.
- 16) 例えば、張 銘, 吉川美穂, 杉田創 (2015) : 自然由来重金属類の長期溶出特性評価, 第 21 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.217-220.
- 17) 土壤環境センター, サステイナブル・アプローチ部会 サステイナブル・レメディエーション (SR) に関する調査ワーキンググループ,
<https://www.gepc.or.jp/engineer/sa-remediation/index.html>
- 18) 産総研コンソーシアム Sustainable Remediation,
https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/SRConsortium_index.html
- 19) 特許庁, 平成 19 年度特許出願技術動向調査報告書, 固体廃棄物および土壤汚染の処理技術 (要約版) , https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/kotai_youyaku.pdf

3.2.4 物質循環・環境動態

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

地球上の物質が、化学的・生物化学的作用を受けながら気圏-水圏-土壌圏-生物圏-岩石圏(多圏)を移動し循環していく際の物質やエネルギーの収支、物理化学素過程、その環境への影響などを明らかにする研究開発領域である。例えば、地球温暖化予測の基礎となる炭素、肥料など食糧問題や汚染問題に関係する窒素、その他の有害物質の挙動予測、資源となる物質の濃集現象などを対象とする。こうした物質循環を解析するために、物質の濃度、同位体比、化学形態を計測する技術の開発、現地観測、リモートセンシング、モデル研究などが進められている。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

気候変動や窒素による環境負荷、汚染物質の動態や曝露など、様々な課題を理解し対応するための基盤として本領域の研究開発が必要とされている。大気や水などの流体の流れとそれに伴う影響を扱う地球物理的分野に対し、そこに含まれる物質は化学的・生物化学的作用を受けて化学種を変えながら循環する。そのため、その物質の物理化学的特徴や他の物質との相互作用を解明することが、物質循環や環境動態を正しく知る上で不可欠となる。

最も主要な温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)を構成する炭素の循環・動態を把握し予測することは気候変動問題において根本的な重要性をもつ。窒素は温室効果ガスである一酸化二窒素(N₂O)を構成するが、むしろ工業起源の窒素酸化物(NO_x)の排出と輸送拡散、農耕地での大量の化学肥料投入とその流出による富栄養化、さらに成層圏オゾン層の破壊物質として注目度が高く、環境問題と食糧問題など横断的な性質がある。窒素循環の人為改変は持続可能な範囲を超えており、特に活性の高い反応性窒素(N_r)の動態を把握し予測することも課題である¹⁾。炭素や窒素は生物体を構成する主要元素であり、炭水化物やタンパク質などの有機物、二酸化炭素や二酸化炭素などの無機物で様々な形態を取りつつ環境中を循環している。そのため、特定物質の動態を単体で論じることは難しく、元素動態の少なくとも主要なプロセスはカバーしつつ全体像を把握することが求められる。これら元素の循環・動態を扱う研究手法として、実験室でのプロセス解明、野外での現地観測による実態把握、数値モデルによるシミュレーション、人工衛星などを用いた広域観測、があげられる。

[動向(歴史)]

物質循環・環境動態の研究や手法開発の基礎は、1930年代に Goldschmidt が始めた地球化学の領域にあり、地球上の様々な系での物質の濃度や化学反応を系統的に理解する学問的な基礎ができた。その後、1950年代以降、同位体地球化学が大きく発展し、物質循環解析に広く利用されるようになった。最近20年間の大きな進歩として、濃度分析では、ICP質量分析計(ICPMS)などに代表される様々な分析法の高感度化が進められるとともに、ミクロンあるいはサブミクロンオーダーの局所領域での分析技術(例:各種電子顕微鏡、レーザーブレイション-ICPMS、マイクロビーム蛍光X線法など)が大きく発展し、微量成分も含め

て、物質の濃度分析や分配・分布が解明されるようになった。一方で、天然で起きる現象は非常に複雑であり、これらを解析する上では、各物質の濃度分析に加えて、同位体比の変動を利用することが有効であり、同位体地球化学分野は大きく発展している。同位体地球化学分野では、(i) ICP 質量分析の発展による重元素まで含めた様々な元素の同位体比の研究、(ii) 分子中の異なる部位の同位体比を用いた物質の起源や化学反応の理解、(iii) 質量に依存しない同位体分別 (Mass Independent Fractionation: MIF) に関する研究、などが進展し、物質循環・環境動態研究に広く応用されている。さらに近年では、放射光を用いた X 線分光や高分解能の電子顕微鏡などの発展により、対象とする元素の化学種を原子・分子レベルで明らかにし、濃度や同位体比の変動のメカニズムをミクロなレベルから明らかにできるようになってきた。これらにより原子・分子レベルの物理化学的なメカニズムを基に物質循環を捉えるようになると、環境科学・資源科学の基礎が深化するとともに、これらの情報を統合したモデルやシミュレーション技術の開発により、さらに正確な物質循環・環境動態の予測が可能になると期待される。

炭素や窒素の循環は、生物地球化学的循環とも呼ばれ、生物が関与する非線形性や空間的不均質性が極めて高いという特徴がある。そのため、現地観測で得られるデータは断片的なものに限られ、全体像を把握するためのモデルや衛星観測を組み合わせた手法が必要となる。これらの研究により、グローバルな二酸化炭素の放出・吸収の現状が徐々に解明されて温暖化の予測と対策に寄与している。また、環境中に放出された窒素などの栄養塩や酸性物質が輸送拡散される状況が明らかとなり、それがもたらす環境汚染さらには生物多様性喪失といった影響に関する理解が進んでいる。

環境中での炭素や窒素の循環・動態に関しては、その研究史は比較的浅く、酸性雨問題に関連して流域スケールの研究が開始されたのは 1950 年代以降である。また、温室効果ガスである二酸化炭素や一酸化窒素のグローバル循環が解明され始めたのは 1980 年代以降である。それ以前にも生態系における物質やエネルギーの流れに注目する生態系生態学などの学問分野は存在していたが、環境問題の観点から物質循環の変動に着目し始めたのは比較的近年のことである。大気中の二酸化炭素濃度に関する観測は 1950 年代から行われていたが、それが温暖化問題との関係で注目を集め始めたのはやはり 1980 年代以降である。炭素などの物質循環を表現する数値モデルは、極めて単純化されたものは 1970 年代に開発されていたが、本格的に広域を対象としたモデルが現れ始めたのは 1990 年代以降である (主に欧米の研究機関による)。この時期には気象モデルによるグローバルな数値計算が可能となるほど計算機能力が向上し、物質循環に関する基礎的な理解が形成されてきた。観測面で特筆すべきは、1960 年代から 1970 年代にかけて国際生物学事業計画が実施された事であり、主要な生態系タイプに関する基礎データが網羅的に収集され、そこでは国内研究者も大きな貢献を果たしていた。1990 年代以降には、実験室や野外での操作実験も行われ、変動環境下での物質循環の応答や、その制御メカニズムに関する理解も向上した。地球全域を対象とした衛星観測は 1980 年代から実施され、陸上植物の機能や人間活動による影響に関する継続観測が可能となった。現在までに衛星から観測可能な情報は質・量・種類の面で飛躍的に向上している。

環境中の物質循環を把握する場合、一見相反する 2 つの問題がある。1 つは、物質の濃度やフローが微量なことによる測定の困難さであり、もう 1 つは物質が広域・大量に存在する

ことによる定量化の難しさである。試料精製と測定技術の向上により、大気中の二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガス、揮発性有機化合物（BVOC）などの化学反応性に富む微量物質の測定精度は大幅に向上している。また、コンパクトな質量分析機器により同位体測定のスปีドや精度も向上しており、物質の発生起源や移動経路、平均滞留時間などに関する情報が得られるようになった。特に温室効果ガスの主要な発生源である陸域生態系については、二酸化炭素やメタンの交換量測定において渦相関法などの微気象学的方法が開発されて標準的に使用されるようになってきている²⁾。その他のより大気中濃度が低いガスについても簡易渦集積法などが開発されて継続観測が可能となった。一方、陸域生態系や海洋における炭素や窒素のストックは、大量である上で空間分布が不均質で定量化には大きな誤差が伴っていたが、近年、衛星観測やモデル予測、同位体研究などの進展により向上している（(3)注目動向 [新たな技術動向] 参照）。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

大量かつ空間分布が不均質なため定量化には大きな誤差が伴っていた陸域生態系や海洋における炭素や窒素のストックについて、近年では、衛星からのライダー観測により植生バイオマス量（約半分が炭素）の測定が可能となり、またハイパースペクトルなどの先進的な光学観測によって植生の窒素濃度を測定することが可能となりつつある³⁾。近年、炭素や窒素の循環・動態をシミュレートする統合的モデルが開発されて、相互作用（例えば葉の窒素濃度が光合成能力に与える影響）を考慮した予測が行われている。モデル研究におけるプロセス数式化や検証においては、野外で観測されたフローやストックに関するデータが利用されており、異分野の学際的研究が活発化している。

特に、物質循環研究において重要な技術である同位体分析の分野では、軽元素から重元素に至るまで、様々な技術開発が進んでいる。軽元素では、分子内の部位別の同位体比を区別しながら測定する技術が発展し、物質の起源・生成過程の解明⁴⁾や同位体温度計の開発⁵⁾が発展している。有機物に関しては、腐植物質などの天然の無定形有機物の分子式まで確定できる超高分解能フーリエ変換イオンサイクロトロン型質量分析器（FT-ICRMS）の発展が著しく、炭素循環の研究などで重要な役割を果たしている⁶⁾。同位体比の非質量依存の分別（MIF）を用いた研究は、軽元素ばかりでなく水銀などの重元素の研究にも展開されており、例えば世界的な課題になっている水銀の水圏-大気圏での循環研究においても重要な位置を占めている。一方、放射光を用いた X 線による元素状態分析研究は、nm レベルでの炭素の官能基マッピングなどに利用され、多くの成果をあげている⁷⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 国際的動向として、炭素循環の解明を目指した Global Carbon Project (GCP) が進められており、ほぼ毎年、二酸化炭素収支に関する統合解析のレポート⁸⁾が出版されている。その成果は IPCC 報告書における温室効果ガス動態に関する記述のベースとなっており、国際的な注目度や政策的重要性が高い。モデル研究分野では、GCP による統合解析の一環として行われているものを含め、多くのモデル相互比較研究が行われている⁹⁾。窒素に関

しては International Nitrogen Initiative (INI) が設立され、さらに 2015 年からはより実践的な International Nitrogen Management System (INMS: 国際窒素管理システム) に向けた準備活動が進められている。物質循環を含む地球観測の推進を目的として Group on Earth Observation (GEO) が設立されており、二酸化炭素の吸収源となっている森林監視を含むイニシアティブが推進されている。

- 現在の地球の気候変動の影響が最も顕著に表れている地域である北極域について、気候変動の解明と環境変化や社会への影響を明らかにし、精度の高い将来予測・環境影響評価等を行うことを目的とした北極域研究推進プロジェクト (ArCS: Arctic Challenge for Sustainability) が進められている。これは、文部科学省の補助事業として、国立極地研究所、海洋研究開発機構および北海道大学の 3 機関が中心となって実施されている (2015 年 9 月～2020 年 3 月)。
- 文部科学省科学研究費の新学術領域研究 (研究領域提案型) では、物質循環に関連した分野として「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」(代表者：安田一郎・東京大学教授、2015～2019 年度) や、「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」(代表者：恩田裕一・筑波大学教授、2012～2016 年度) などの分野の研究が展開されている。
- 資源関係では、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「次世代海洋資源調査技術 (海のジパング計画)」が進められている。これは、主に海洋資源の成因、資源調査、資源開発を目指したプログラムである。

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

環境中で物質は様々な媒体によって輸送され、形態を変えつつ滞留しており、その複雑性や空間的不均質性が理解を困難にしている。炭素や窒素のような主要元素ですら反応プロセスの全容は解明されておらず、それが温室効果ガス収支の定量化とその予測における不確実性の原因となっている。そのため、生物地球化学的プロセスを解明する基礎研究が必要であり、空間的分布を把握するための観測ネットワークの拡充が求められる。近年の気候変動予測研究では、陸域生態系によるフィードバック効果の推定に不確実性が大きいことが問題となっている。具体的には、多くの炭素循環モデルには、大気二酸化炭素濃度の上昇に伴う成長促進 (施肥効果) が考慮されているが、その感度には大きな差があることが指摘されている¹⁰⁾。その差を生む原因の一つとして植生の窒素利用可能性における制限の強さが未解明である点が指摘されており、炭素・窒素の循環とその相互作用に関する理解深化が求められている。

また、物質循環研究の出口として、物質循環のメカニズムをよりミクロな視点から理解していくベクトルと、得られた成果をモデル化し、それを特定の系、よりグローバルな系、より多圏間の相互作用を含む系に拡張していくベクトルの 2 つがある。これらは相補的な研究であり、新たな本質的発見はミクロなメカニズム解明から生まれる場合が多い一方で、全体への影響を考察する上でモデル化は不可欠な要素である。特に前者のボトルネックとして、様々な混合物を含む天然試料から、目的とする物質の濃度・同位体比・化学種を選択性よく

測定する技術がよりいっそう必要になっている。そのために、個々の目的物質それぞれについて多くの技術的革新が進められており、特に不安定であるが物質循環において重要な物質や、微量であるが人間にとって重要な物質などに対する新たな分析法の開発が今後求められるであろう。また自然起源と人為起源の双方に起源をもつ物質については、人為的影響を定量的に考察していくことが期待される。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 地球温暖化・炭素循環における有機物や不安定化合物（例：海洋生物起源の硫化ジメチルなど）の分析とその影響の考察

土壌や根系に代表される地下部の寄与が非常に大きいことは共通認識になりつつあるが、地下部は直接観測が困難でプロセス解明やデータ集積が進んでいない。ライゾトロンなどによる観察や、同位体をトレーサに用いる研究も行われて来たが、さらに簡便で精度の高い測定手法の開発が望まれる。また、永久凍土中には大気中の炭素量の約2倍に相当する量が蓄積されていると見積もられているが不確実性の幅が大きい。極域を通じた炭素循環には重要性が指摘されながらも未知の要素が多く、科学的知見が不足している。

- 地上観測ネットワークや衛星観測によるデータの利活用

近年は大量かつヘテロなデータを扱うビッグデータに関する研究が各分野で進んでいるが、物質循環分野にどうそれらに応用するかが課題である。最近の動向として、数値モデルのパラメータを観測データで逐次的に更新するデータ同化が注目されているが、物質循環分野でも推定不確実性低減のために同様の試みを進めることが求められる。

- レアメタル（白金族元素など）やレアアースの濃集機構の解明に基づく資源開発
- 鉄などのように自然起源と人為起源の双方に起源をもつ物質での人為的影響の定量化
- 海洋-大気間、土壌-大気間、地下水-岩石間のような多圏間の物質移動とその環境影響

（5）政策的課題

2015年のパリ協定において気候変動抑制に向けた国際的合意が形成され、日本もよりいっそうの温室効果ガス排出削減が求められている。国内から排出される二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素などの温室効果ガスの量を精確に定量化することはもちろん、その輸送や吸収までの循環を把握することが適切な緩和策検討に必要である。最近のシナリオでは21世紀後半の大気中温暖化濃度抑制のため、大規模なバイオ燃料栽培が必要とされているが、それが環境に与える負荷については十分に評価されていない。それは温暖化だけでなく、生物多様性にも影響を与える可能性があり、生物多様性条約との関係からも注目される。

体制面では、基盤的予算の確保や国際的・学際的な研究の推進、汎用性の高い最先端分析装置の共同利用拠点の効率的な運用が求められる。

（6）キーワード

炭素循環、窒素循環、元素循環、多圏相互作用、地球温暖化、有害物質、化学種解析、同位体比、質量分析、放射光、シミュレーション、生物地球化学、下方調節、CO₂施肥効果、炭素循環フィードバック、純一次生産、メタ分析、地球システムモデル、衛星観測、ネクサス

（7）国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------|---------|----|------|--|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 大気中の温室効果ガス濃度や同位体比測定は最高水準を維持している。地表のガスフラックス測定は、技術的には高いがデータ解析においてやや立ち遅れている感がある。炭素循環と窒素循環を含め、温室効果ガスを統合的に扱う陸域モデルが開発されている¹¹⁾。文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムでは、炭素循環だけでなく窒素循環も取り入れた地球システムモデルを開発している。2009年にはJAXA・環境省・国環研による温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）の打ち上げを成功させ、衛星からの物質循環観測研究を先駆ける成果をあげている。 ● しかし、同位体分野等も含め論文数のシェアは低下しており、2010年代ではいずれも分野も中国に圧倒されている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 温暖化緩和策の立案と評価のための応用研究が実施されており、IPCC報告書への貢献度も向上している。農地における一酸化二窒素放出の削減技術（農研機構）や、森林破壊からのCO₂放出を監視するシステム（森林総研）などの研究開発が行われている。最近では福島第一原発から放出された放射性物質の動態を把握するための研究も重点化して行われている。 ● 有害物質や金属資源の分野では、福島第一原発事故に伴う放射性核種の挙動や資源のリサイクル分野では論文が多く発表されているが、国際的なシェアを押し上げるほどではない。 |
| 米国 | 基礎研究 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 米国大気海洋局（NOAA）やエネルギー省（DOE）による観測ネットワークだけでなく、North American Carbon Program（NACP）による統合化も積極的に推し進めている。特に航空宇宙局（NASA）や地質調査得所（USGS）による衛星観測では世界をリードする位置にある。物質循環モデル研究でも長い歴史をもつが、近年では淘汰が進んで少数のモデルに集約されつつある（例えば大気研究センター（NCAR）によるCommunity Land ModelやDynamic Land Ecosystem Modelなど）。 ● いずれの分野も論文数は順調に増加しているが、中国の伸びが大きい分、相対的なシェアは減少している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 酸性雨研究や温暖化研究にいち早く取り組んでおり、応用面でも先端的研究を行っている。温暖化対策として注目されているバイオ燃料栽培に関しても、温室効果ガス収支など物質循環の面から多数の研究が行われてい¹²⁾。OCO-2衛星による温室効果ガスの監視や、国際宇宙ステーションに搭載予定のライダにより森林の監視でも取り組みを進めている。 ● 有害物質の動態分野では論文数の伸びが小さいが、米国で有害物質の問題の多くが解決されつつあるためと思われる。同様の傾向は日本でもみられる。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● International Carbon Observation System（ICOS）を推進して炭素および関連する物質循環研究を積極的に推進している。欧州宇宙機関（ESA）はSCIAMACHYなどの先端の衛星ミッションを成功させて物質循環の広域観測に取り組んできた。欧州全土にCarboEuropeFluxサイトが展開され、微気象学的手法による二酸化炭素等の観測が継続されている。 ● いずれの分野も論文数は増加している。多くの分野で、論文数が中国に抜かれているが、同位体地球・環境科学の分野ではまだ優位性がある。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 国レベルのコミュニティーで統合的モデルを開発し物質循環研究に応用している（例えばドイツのLPJmLや英国のJULESモデル）。英国の研究者が主導して窒素管理システムINMSを推進している。 ● 有害物質の動態分野で論文数の伸びがやや小さい。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 中国全土にChinaFluxを設立して急速に観測点数を増やし、温室効果ガスなどの物質循環の観測研究を進め、同時にデータ解析分野でも国際的に存在感を高めている。モデル分野では独自開発されたものはまだ少ない。INMSの東アジアセクションでは南京土壤研究所などの研究者が主導的な役割を果たしている。 ● いずれの分野でも論文数の伸びが非常に大きい。論文数のシェアに比べて被引用数のシェアが小さい傾向がある。 |

| | | | | |
|----|---------|---|---|---|
| 中国 | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> ● 中国全土の炭素収支に関する統合解析などが行われている¹³⁾。窒素循環に関する事例研究は多いが、全体の収支を定量化する統合化には至っていない。 ● 有害物質の挙動や除去に関する研究、金属資源の開発やリサイクルの分野で特に優位性が高い。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 国内における炭素・窒素の現地観測研究は高麗大学などで行われている。広域的な解析やモデル研究例はまだ少なく人材育成の段階にある。 ● 多くの分野で論文数の絶対数は日本より小さいが、経年変化の傾向は日本と類似している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> ● 近年、GCP (Global Carbon Project) 韓国オフィスや国立生態学研究所が設立されるなど、物質循環分野の研究開発により多くのリソースを割り当てている。ソウル国立大学は韓国内のフラックス研究をリードしているだけでなく、気候変動への適応の観点からも研究を進めている。 ● 有害物質の挙動分野では、日本と比べると研究が増えている。 |

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Steffen, W., et al. (2015), Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*, 347, 1259855, doi:10.1126/science.1259855.
- 2) Baldocchi, D., et al. (2001), FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415–2434.
- 3) Saatchi, S. S., et al. (2011), Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents, *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 108, 9899–9904, doi: 10.1073/pnas.1019576108.
- 4) P. Wunderlin, M.F. Lehmann, H. Siegrist, B. Tuzson, A. Joss, L. Emmenegger, and J. Mohn, Isotope signatures of N₂O in a mixed microbial population system: constraints on N₂O producing pathways in wastewater treatment, *Environmental Science and Technology*, 47, 1339-1348, 2013.
- 5) D.A. Stolper, M. Lawson, C.L. Davis, A.A. Ferreira, E.V. Santos Neto, G.S. Ellis, M.D. Lewan, A.M. Martini, Y. Tang, M. Schoell, A.L. Sessions, and J.M. Eiler, Formation temperatures of thermogenic and biogenic methane, *Science*, 344, 1500-1503, 2014.
- 6) S.B. Hodgkins, M.M. Tfaily, C.K. McCalley, T.A. Logan, P.M. Crill, S.R. Saleska, V.I. Rich, and J.P. Chanton, Changes in peat chemistry associated with permafrost thaw increase greenhouse gas production, *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, 111, 5819-5824, 2014.
- 7) T. W. Wilson et al., A marine biogenic source of atmospheric ice-nucleating particles, *Nature*,

- 525, 234-238, 2015.
- 8) Le Quéré, C., et al. (2015), Global carbon budget 2015, *Earth System Science Data*, 7, 349–396, doi:10.5194/essd-7-349-2015.
 - 9) Tian, H., et al. (2015), Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: current status and future directions, *Global Biogeochem. Cycles*, 29, doi:10.1002/2014GB005021.
 - 10) Hajima, T., A. Ito, K. Tachiiri, and M. Kawamiya (2014), Uncertainty of concentration – terrestrial carbon feedback in the Earth System Models, *Journal of Climate*, 27, 3425–3445, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00177.1.
 - 11) Ito, A., and M. Inatomi (2012), Use and uncertainty evaluation of a process-based model for assessing the methane budget of global terrestrial ecosystems, *Biogeosciences*, 9, 759–773, doi: 10.5194/bg-9-759-2012.
 - 12) Melillo, J. M., J. M. Reilly, D. W. Kicklighter, A. C. Gurgel, T. W. Cronin, S. Paltsev, B. S. Felzer, X. Wang, A. P. Sokolov, and C. A. Schlosser (2009), Indirect emissions from biofuels: how important?, *Science*, 326, 1397–1399, doi: 10.1126/science.1180251.
 - 13) Piao, S., J. Fang, P. Ciais, P. Peylin, Huang.Y., S. Sitch, and T. Wang (2009), The carbon balance of terrestrial ecosystems in China, *Nature*, 458, 1009–1013, doi: 10.1038/nature07944.

3.2.5 健康・環境影響

（１）研究開発領域の簡潔な説明

都市化、産業化による局所的な環境汚染、近隣国からの越境汚染、また、温暖化や海洋汚染をはじめとする地球規模の環境汚染・環境劣化は、人の健康や生物に影響をもたらすことが危惧されている。このような社会的要因や地球環境・地域環境要因による健康や生物への影響を把握あるいは予測し、対策につながる科学的知見を提供するための研究開発領域である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

環境は人類、生物種繁栄の基盤であり、健康は個人・個体生存の礎である。過去の公害事例では、強毒性の少数の汚染物質による健康や生物への影響が問題となった。昨今、先進国においては、以前見られたような強毒性物質の大量曝露やそれによる健康影響（毒性影響）発現の可能性は減じている。しかし、残留性有機汚染物質（POPs：Persistent Organic Pollutants）による健康・生物影響、特に長期影響や継世代影響の問題をはじめ、多くの未解決課題が残存している。例えば、弱毒性物質の少量曝露によるかく乱影響（脳・神経系、免疫・アレルギー系、生殖・内分泌系への影響）の問題や日々増加する環境汚染物質の複合曝露による健康・生物影響の問題、ナノマテリアル等、新規素材による健康・生物影響はその代表といえる。また、生活習慣病やアレルギー疾患などのいわゆる「現代病」の激増・悪化と環境要因の関連も指摘され、そのメカニズムも明らかにされつつある。しかし、これらに係る研究の集積は十分とはいえない。一方、進行しつつある地球温暖化に関連し、地表オゾンの増加による健康影響や水系感染症の増加、節足動物媒介感染症の分布変動、ヒートアイランド現象とも関連した熱中症増加等の問題が、また、オゾン層破壊に関連し、紫外線増加による皮膚ガン増加といった問題も危惧されている。このように、気候変動、オゾン層破壊、資源循環などの地球レベルの環境問題が健康に与える影響の把握も重要性を増している。

本領域は、種々の環境の変容による人の健康や生物への影響を把握あるいは予測し、対策、軽減、未然防止に結びつけることを目標とし、人類・生物の持続可能な繁栄・生存に直結する重要な意義をもつ。従来と異なるアプローチが必要とされている領域でもある。

[動向（歴史）]

欧米では1930～40年代に大気汚染の問題が発生した。日本でも1950年代の公害に始まり、産業に起因する重金属やコンビナートの排煙が健康被害をもたらした。これらは、カドミウム、水銀、硫酸化物等の大量曝露による毒性が健康影響をきたした事例であった。こうした典型的な公害問題に対しては、1967年の公害対策基本法を皮切りに、排気ガス、工場排水の法的規制（質・量の両側面から）が行われるとともに、工場廃水・排気・自動車排気の処理技術の進歩などにより汚染の軽減が行われた結果、無制限に汚染が激化・拡散する状況を防ぐことができた。ただし、大気汚染における窒素酸化物のように、軽減まで長期間を要し

た例もある。こうした公害の問題を受け、現在も実施されている化学物質の影響評価は、単一物質の大量曝露時に、死亡や臓器障害を代表とする毒性影響を指標として実践されているのが実状である。

一方、1962年に『沈黙の春』が出版され、DDT等が母乳から排泄されていることも報告された。1980年代半ばから、内分泌かく乱化学物質（EDCs、環境ホルモン）の問題が認識されるようになり、1996年には『奪われし未来』が出版された。強毒性物質の禁止・削減後も生物個体数が回復しないことから、少量でも悪影響をきたす物質がある可能性が示された。これらの物質は、従来の「毒性」とは異なり、ホルモン受容体等を介した生体内シグナルの「かく乱」により影響を及ぼしているのではないかと考えられるようになった。1996年、欧州委員会が内分泌かく乱化学物質に関する初の国際会議を英国ウェブリッジで開催した。米国では、1997年に環境保護庁（EPA）が内分泌かく乱化学物質に関するワークショップ（スミソニアン会議）を開催した。日本では、1998年に「内分泌攪乱化学物質の健康影響検討会」発足し（厚生省）、「環境ホルモン戦略計画 SPEED'98」が発表（環境庁）され、省庁での取り組みが本格化した。同年、科学技術新興機構（JST）のCRESTでは内分泌かく乱化学物質問題の本質的な理解と解決をめざした研究を対象とする「内分泌かく乱物質」研究領域が発足した。2012年のWHO/UNEPによる報告書である「State-of-the-Science of Endocrine Disrupting Chemicals—2012」では、複数の内分泌かく乱化学物質が協同して相加的効果を発揮する可能性があることが述べられた。生涯にわたり様々な疾病に対する脆弱性を増大させる可能性¹⁾や、影響が継代的に伝搬する現象も報告された²⁾³⁾。

このように、かつてはDDTやダイオキシンなど、少数の物質のみを影響評価の対象としていたが、現在汎用されている難燃剤や可塑剤、界面活性剤、食品添加物など、多種多様な毒性の弱い物質をも対象とし、内分泌系のみならず、神経系や免疫系も含めたかく乱影響を評価すべきであるという考え方も提唱されるようになってきている。

いわゆる環境汚染ではないが、環境と健康との関係を扱う研究で、1990年代中頃からの注目すべき動向として、社会疫学があげられる。個人や地域の持つ社会的特性が当人や住民の健康レベルを左右するという、直感的には当然と思われる仮定を綿密な調査で実証した分野であり、多くの成果をあげた。物理化学的要因と社会要因は、ある意味では互いにノイズの関係にあるともいえるが、現在に至っても両者をバランスよく組み合わせた研究はそれほど多いとはいえない。

また、近年の動向として、環境疫学に限らず疫学研究一般が大型化してきていることがあげられる。環境疫学では、世界各国で10万人を超える規模で長期間にわたり追跡調査を行い、得られた情報や試料を解析する疫学研究が、多数実施されるようになってきた。50カ国300機関の共同研究として2004年と13年の2回実施された世界の疾病負荷研究（Global Burden of Disease Study）では、死亡と疾病への罹患を同一の尺度（DALYs；障害調整生命年と訳されている）で表現し、問題のある国・地域や、負荷の大きな疾病をわかりやすく表現し、特に精神疾患のようなただちに人命を奪わない疾患の重要性を明らかにするなど成果を上げた。環境中の様々な疾病リスク因子についての分析⁴⁾も行っている。

局所的な環境汚染のみならず、近隣国からの越境汚染、また、地球温暖化やそれによる異常気象、海洋を広く汚染するマイクロプラスチックやPOPs、オゾン層破壊をはじめとする地球規模の環境汚染・環境劣化が、人の健康や生物に影響をもたらすことも危惧されてきた。

リオ・サミット (1992) や京都議定書を採択した COP3 (1997) のあった 1990 年代以降、地球規模課題の中でも化学物質のインパクトがとりあげられている。その健康影響メカニズムは複雑であり、従来の化学物質の毒性影響という図式だけでは捉えきれない。例えば、CO₂ 発生→温暖化→媒介動物の生息域のシフト→感染症分布の変化、あるいは過剰の化学肥料投入・生活排水→N、P による閉鎖的水系の富栄養化→生態系破壊→環境の劣化・漁業の衰退、農薬→pollinator (送粉者) の衰退→作物収量の減少→栄養状態悪化などである。課題と対策が国境を越えはじめたことを受け、化学物質関連の様々な国際的取り組みが増えた。主要なものをあげると、CFC の規制に関するモントリオール議定書 (1989)、化学物質管理のための戦略的アプローチ (SAICM、2002)、POPs を規制したストックホルム条約 (2004)、欧州の化学物質に関する包括的な取り決めである REACH 規制 (2007)、水銀の使用・国際的流通に関して定めた水俣条約 (2013) などがある。

また、2009 年にスウェーデンの研究者グループが提唱した Planetary boundaries (PB)⁵⁾ では、超えるべきでないものとしてあげられた 8 つの boundary (境界) に、化学物質による汚染、大気中のエアロゾルの 2 つが記載された。しかし、その境界値 (それを超えると不可逆的なフェーズに入るような値) はいずれも不明とされている。2015 年夏には、Lancet とロックフェラー財団の共同研究により、Planetary Health (人間とその文明は健全な自然環境とその賢明な管理の上に成立するもの) という概念が提唱され、その中にも化学物質についての言及が見られる。同年終盤に採択された持続可能な開発目標 (SDGs) の第 3 目標は健康と福利であるが、その下位目標の一つに、化学物質による健康被害の軽減がうたわれている。

局所・地域に留まらず、広域かつ地球規模の視野を持って研究や取り組みを推進することが不可欠であることも認識されてきている。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

- オミクスの発展、AOP (Adverse Outcome Pathway)

多くのオミクス (Genomics, proteomics, lipidomics, metabolomics など) やオーム (transcriptome, proteome など) が考案されている。試料に含まれる微量で多種類の (ただし一定の性質は共有する) 化学物質群を分離・同定し、さらには定量する技術であり、生体内で生じている物質代謝にかかわる出来事を網羅的に定量化・可視化する手段として広く活用されており、実験的な毒性学、環境疫学のいずれの研究にも応用可能である。環境汚染の生体影響に関する分野では、従来、リスク評価を最優先し、量-反応関係として出入口のみの関連が解析の中心であった。その途中のブラックボックスであった過程を明らかにすることにより、化学物質の生体影響の本質に迫る手法が AOP (Adverse Outcome Pathway)⁶⁾ であり、生体内の様々な代謝過程に関する知識の蓄積と、分析技術の進展によって実現されるようになった。

- in vitro アッセイ評価

米国環境保護庁 (EPA) が開発した ToxCast のように、数多くの化学物質における活性・pathway データを迅速に導き出すことのできる手法に焦点が当てられている。また、ヒト

や実験動物由来の細胞系だけでなく、遺伝子配列の解析から野生動物の遺伝子を組み込んだレポーター遺伝子アッセイも種間の感受性評価に有用である。

• ビッグデータ、地球観測・衛星観測データの活用

様々な領域のデータベースが整備され、公開も進み（入手可能性が増し）、衛星や地上のステーションによるモニタリングのデータが健康の研究に利用できるようになってきた。こうしたデータの活用により、世界の大気汚染による死亡者がマラリアとエイズを合わせた死者より多いとの研究報告⁷⁾や、熱波の夜の最低温度が高い地域で高齢者の死亡率が高かったとの報告⁸⁾、さらには人間活動のデータも活用して、マラリアやデング熱の伝播に人間の移動がどの程度寄与するかといった分析⁹⁾¹⁰⁾が行われている。こうした環境データと健康データの組み合わせは、空間分解能の優れた（衛星）画像撮影・分析の技術発展、いわゆるダウンスケーリングと呼ばれる広範囲のデータから小地域の詳細データを構築する手法の開発によって可能¹¹⁾となってきた。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 小児を対象とする大規模なコホート研究として、日本ではエコチル調査（環境省）や東北メディカル・メガバンク（文部科学省）などが実施されている。米国でも 10 万人の子どもを成人まで追跡する National Children's Study が計画され 2013 年までに予備調査を終了したが、本調査開始前に、プロジェクトの目標達成は困難であるとの判断のもとに中止された¹²⁾。ヨーロッパの 8 カ国が参加する HELIX (Human Early-Life Exposome) は 28,000 組の母子ペアを追跡する事業で、exposome という概念を看板に現在進行形である¹³⁾。Exposome とは、従来の様々な omics/ome が生体反応の包括的情報であるのに対して、多様な環境要因への曝露の包括的情報を目指すものである。
- EU の Solutions は、ヨーロッパ、ブラジル、中国およびオーストラリアから 39 機関が参加するプロジェクトである。河川における有害化学物質を現在の科学技術を結集して評価し直すために、化学分析から影響分析にわたる広範な領域をカバーしている。ライン川やドナウ川流域の生態系と人の健康における化学物質リスクの問題解決のための総合的な取り組みとして 2013 年より（5 年計画）開始された。
- 北欧を中心とする EU の MARS プロジェクトも注目される。16 の河川流域のケーススタディによって各流域における生態系の状態と化学物質およびその他の抑圧因子の解明を目指している。
- カナダ環境・気候変動省と保健省は、有害な化学物質を特定し、適切に管理するための包括的統合戦略「化学物質管理計画（CMP）」に投資すると発表した¹⁴⁾。これまでに、優先物質のうち、約 2750 種類の化学物質のリスク評価が終了した。継続により、CMP の次期段階で残る 1550 物質の評価を完結し、次世代の人々と環境を有害化学物質のリスクから守るとともに、科学的根拠のある健全な化学物質管理で引き続き世界をリードしていくとしている。
- 米国環境保護庁（EPA）は、水の再利用や保全策が人と生態系の健全性に与える影響に関する研究に助成すると発表した¹⁵⁾。水の持続可能な再利用を促進するため、飲用水への再利用や地下水補充などが人や生態系の健康にどう影響するかを評価する。
- 持続可能な消費生産センター（CSCP）など欧州の機関が、健康と環境を守るためにライ

フスタイルをどのように変えていけばよいかを探る新プロジェクト「INHERIT」に着手した¹⁶⁾。住環境、移動、消費（食品、食習慣等）の3つに絞り、健康と環境を守る生活につながる分野横断的な施策を探る。

- ドイツ連邦環境省（BMUB）とドイツ化学工業会は、人体中の化学物質の分析方法を開発し測定するヒト・バイオモニタリング・プロジェクトを実施している¹⁷⁾。人における曝露が増加傾向にあり、人体に影響をおよぼす可能性がある50物質（群）の分析方法を開発しようとするものである。新分析方法是、ドイツ研究振興協会によって検証されたのち、第5次ドイツ健康環境調査と環境試料バンクのサンプルとして利用される。
- 米国環境保護庁（EPA）は、人のホルモン機能をかく乱する可能性のある化学物質を自動でスクリーニングする新検査方法を発表した¹⁸⁾。この手法は、数千もの化学物質を同時に検査し、計算モデルを利用して活性を予測するもので、従来の検査に比べ、時間も動物実験もコストも少なくて済むという。
- ドイツ BMUB と連邦環境庁（UBA）のバンクでは1980年代から人と環境の標本を収集しており、これにより国民の化学物質への曝露状況やその変遷、環境政策の有効性を示すデータが得られるという。新調査は、子どもと若者に重点を置き、重金属、多環芳香族炭化水素、プラスチックの可塑剤や溶剤などを対象としている¹⁹⁾。

（4）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 1990年代終盤には環境・健康をめぐる多くの国内外の取り組みが行われたにも関わらず、当時提起された多くの問題—いわゆる低用量効果（low-dose effect）、複合曝露、継世代影響などの問題—には、今なお答えが出ていないといえる。端的にいえば、我々の多くが日常接する化学物質の中から曝露量の多い10種類を選んで、総体としての健康へのインパクトはどの程度のものか、という質問には極めて曖昧な答えしかできないのが現状である。ほぼ単一の物質の影響のみを標的とし、さらに量-反応関係（入口と出口）を出発点としてきた従来のアプローチでは限界がある²⁰⁾²¹⁾。
上記の原因としては、細かい実験の手法の違いが大きな結果の違いを生む、再現性が得難い、時間・資金・労力が嵩むなどといった点があげられる。古くから指摘があったが、その背景には、動物実験における通常あまり注意が払われないような条件の違い等の要素がある（参考文献22など参照）。例えば、腸内細菌のパターンが栄養素や化学物質の代謝・毒性に影響を及ぼすという知見が増えてきている²³⁾。
- 環境要因、健康・生物影響のいずれも多岐にわたるが、一部の環境要因による一部の健康・生物影響が研究対象となっているに過ぎない。高感受性（脆弱性）集団を対象とした研究、リアルワールドで想定される「環境要因の複合曝露による健康影響」の問題は、端緒についたばかりという状況にある。
- 曝露は本来、対象となる集団の個々の構成員について時間的な変化を含めて評価されるべきものだが、これを得ることは技術的に困難であった。多くの曝露情報は（対象とする環境要因の地理的な分布に基づく）集団の平均的な推定や、長時間の平均的な推定値に過ぎない場合が多い。

- 現在市場に出回っている化学物質の数百種が内分泌かく乱性を有するとされているが、生態系への影響を評価している物質は限定されている。また、内分泌かく乱化学物質（EDCs：Endocrine Disrupting Chemicals）の代謝産物や分解物、製造工程および廃棄処理過程で生じる不純物や非意図的生成物についての調査や毒性影響に関する研究も極めて少ない。
- EDCs を添加された製品の中には他国へ輸出されるものもあり、開発途上国などでは不適切な処理により環境汚染や曝露が深刻化する可能性がある。これまで得られた研究データは先進地域のものが主であり、アジア、アフリカ、中南米の開発途上国のデータは依然として欠落している。
- 実験的研究において、人への外挿手法が未確立である。
- ヒトと同様に、野生動物も EDCs 曝露のみによる影響を評価するのはほぼ不可能である。汚染地帯と非汚染地帯に生息する個体群間で観察される生体影響の相違などから予想はされるが、他の人為もしくは自然由来のストレスの寄与が存在するため解釈を複雑にしている。さらに、classical POPs を除く EDCs による野生動物の調査研究は、魚類を除き依然として少ない。
- 対象集団が大規模になること、多くの環境要因の情報を得て解析するということが、再現性の検証を難しくするというジレンマがある。また、例えば気候変動の影響について、現実の観測データから再現性を得ることは不可能であるし、過去に前例がない現象を追っているため、実験室的あるいは繰り返し観察による再現性を検証すること自体が困難である。
- ミレニアム生態系評価ですでに指摘されていたように、環境の劣化による健康被害には、例えば生態系の破壊による食料生産の変化、感染症分布の変化など間接的影響も多く、その規模が無視できない²⁴⁾。こうした複雑な影響についても、AOP と同様の考え方を適用して、将来的に定量的予測を可能とするモデル構築に向け、モジュール開発を行うことが期待される。
- 既存疾患の悪化や「現代病」の増加・悪化における環境要因の寄与率推計は未確定である。

[今後取組むべき研究テーマ]

- 環境要因の作用メカニズムの解明
多くの研究は健康インパクト（毒性を含む）に至る経路のごく一部を点の形で見ていたといえる。今後は、AOP のように曝露から影響が出るまでの一連の経路を把握する線としてのアプローチ、さらには複数の経路の相対的な寄与を視野にいたした面としてのアプローチが必要になると考えられる。面的な解析が可能になれば、複合曝露（物理的要因と化学的要因のようなモードの異なるものを含む）や低用量効果などの問題の突破口となる可能性がある。
- 複合曝露を評価できるアプローチ法の検討
例えばダイオキシンの TEF（毒性等価係数）や有機リン系農薬で用いられている既存のアプローチに加え、すでに提唱あるいは試行されている、共通のエンドポイントに焦点を当てたアプローチ、エクスポゾーム（exposome、生涯の全曝露量）のような考え方も含めたアプローチも並行して試す必要があると考えられる。

- ノイズやブラックボックスを積極的に検討対象とする研究
ブラックボックスであった遺伝的要因と環境因子の相互作用についてはすでに多くの研究が進んでいるが、これを体系的に進める仕組みづくりが必要と思われる。また、腸内細菌のパターンや飼育条件のように、従来あまり注意を払われていない環境変数について、明確な論拠のもとに研究を行っていく必要がある。例えば、単一の化学物質の影響が欧米とアジアで異なる原因は、遺伝的・生理的・環境的要因のいずれにも求めることが可能である。
- 一般的な非伝染性疾患（NCDs）のリスクと化学物質曝露との関係に関する研究
がんを中心に古くから研究はあるが、糖尿病、肥満、変性性の神経疾患など、多くの環境・遺伝的要因が関わり罹患率も高い疾患の発症に、化学物質への曝露がどの程度量的に関わるのかは難問であり、ブラックボックスの中身を含めた影響メカニズムの解明、ビッグデータの活用、複合曝露の解析方法などの解決が求められる²⁵⁾²⁶⁾。
- かく乱影響の評価
内分泌かく乱以外にも、神経・行動のかく乱や免疫のかく乱についても、いっそうの研究の推進が望まれる。
- 分析法の改良および開発
低濃度で存在する様々な物質を把握するための、高精度分析や同時測定法の改良や開発は依然として優先度が高い。
- 構造活性相関研究の向上
化学物質の構造と生物学的な活性の間関係である構造活性相関に関する研究の、さらなる推進・向上が望まれる。
- ICTの活用により環境要因を同定する研究
近年のICTの進歩により、様々な環境要因についての個人曝露情報を時空間的に追跡する手段が整備されてきており、これを活用したあらたな曝露評価により、解析の精度を格段に向上できる可能性がある。
- 健康影響に関する予測力の高いモデルの構築
地球規模環境問題による健康影響については、再現性に基づく判断を待つわけにはいかない（手遅れになる）ため、予測力の高いモデルの構築が必要となる。環境要因の健康インパクト予測は、上述の諸問題が解決できないと原理的に困難であろうから、不十分な情報に基づきながら「それほど間違えることのない予測モデルの開発が望まれる。
- PB（Planetary Boundary）の健康影響の観点からの検証
PBの境界値は、健康影響ではなく、気候システムと生態系への影響に基づいて決められているため、健康影響という点から見直す必要がある。化学物質やエアロゾルのPBは未確定であり、健康インパクトに基づいて決める必要性は高いと思われる。
- 物質の越境移動と開発途上国の汚染実態
輸出入される製品中の含有量、大気・水経路による移動拡散（日本の場合であれば黄砂など）、そして開発途上国を対象とした環境汚染（発生源と曝露源）とヒト・野生動物への曝露・毒性に関する包括的・長期的（経年変動）調査が求められる。
- 代替物質の調査
ある化学物質の生産・使用が規制された場合、代替物質が使用されることになるが、そ

の環境汚染と毒性影響の調査が求められる。また、環境分解産物や生体内代謝物などの実態も把握することが求められる。

（５）政策的課題

- 政策決定者に科学的な情報を適切に伝えるしくみ・人材の養成が必要である。本領域では再現性が難しい課題が増えると考えられ、evidence-basedによる意思決定では手遅れになる可能性がある。予測に基礎をおく意思決定（予防原則の考え方も援用されるべき）が必要な局面も増えると思われる。科学的情報の不確定性を減らす努力とともに、不確定性をもった情報をどのように理解し、政策に活用するかは科学的・政策的両側面をもつ課題である。ステークホルダー間で、evidenceにも不確定性が伴うという認識が共有されることや、当事者による時機を得た情報共有が必要であり、そのための制度づくりも求められる。
- 研究開発で健康データを積極的に活用できることが必要であり、個人のプライバシーに抵触しかねない情報について、技術的工夫とともに政策的判断も求められる。
- ヨーロッパを中心とする動物愛護の観点から動物実験が徐々に難しくなりつつある。また、ヨーロッパでは、ある化学物質に有害性の懸念が生じると、時間をかけたリスク評価よりも物質を代替・禁止する方向性へ移りつつあり、管理対象とされる化学物質が増大し負担も大きくなっている。
- 越境汚染や地球環境問題の解決には、多国間にわたる対策、政策が不可欠であるが、その枠組みの作成や取り組みの進展は容易とはいえない。
- 経済的発展、技術開発が政策的に優先、あるいは、先行し、環境問題、健康・生物影響が後発的に発生・進展することが多く、早期診断、早期治療が困難な場合が多い。
- 広範囲にわたる環境要因による健康・生物影響にかかる研究を、民間企業が限定的資金によって推進することは困難であり、また、収益性も少なくとも短期的には乏しいと考えられる。加えて、国民、人類の健康、生物種の未来を左右する公益性が最優先されるべき課題であることから、公的資金による戦略的かつ長期的な研究開発推進が望まれる。

（６）キーワード

残留性有機汚染物質（POPs）、内分泌かく乱化学物質（EDCs）、新規素材、ナノマテリアル、マイクロプラスチック、難燃剤、可塑剤、界面活性剤、食品添加物、健康影響、高感受性（脆弱性）要因、継世代影響、毒性影響、かく乱影響、内分泌系、神経系、免疫系、現代病、生活習慣病、アレルギー、複合曝露、複合影響、低用量曝露、現代病、構造活性相関、in vitro アッセイ、オミクス（オーム）、AOP（Adverse Outcome Pathway）、一斉多種分析、ビッグデータ、地球観測・衛星観測データ、ダウンスケーリング、疾病負荷研究、大規模コホート、大規模疫学調査、影響予測モデル、公害、社会疫学、環境疫学、地球温暖化、海洋汚染、熱中症、越境汚染、Planetary boundary（PB）、実験動物、動物愛護、野生生物、SAICM、水俣条約

(7) 国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------------------------|---------|----|------|--|
| 日本 27-47) | 基礎研究 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 基礎研究のレベルは高い。化学物質影響、気候変動影響などで報告数も増え、レベルの高い研究成果も出ている。革新的な研究成果の発信もあるが、チャレンジングな課題への取り組みにやや不足が感じられる。 ● 内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の試験法について、メダカを対象とした <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験、そして <i>in vivo</i> 確定試験が開発され、アフリカツメガエルとミジンコについても検討が進んでいる。また、低用量・複合曝露影響やエピジェネティックな世代を超えた影響についての基礎研究も展開されている。 ● 内分泌かく乱化学物質 (EDCs) について、下水処理過程における挙動や除去効率の調査研究、下水処理水の流入河川に棲息する野生魚の汚染実態調査、鳥類や海棲哺乳類の蓄積特性に関する研究が実施されているが、陸棲動物の調査が乏しいことに加え、高等野生動物の場合、POPsを除くEDCsデータは極めて少ない。 ● 予算面、人材面 (特に若手の人材面) では、他領域や欧米、中国に比較し、十分とはいえない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● ビッグデータの利用をはじめとして、斬新な手法を取り入れた研究はまだ少ない。一方で大規模コホートが確実に運営されており、将来的に多くの知見を産み出すことが期待できる。 ● 日米二国間協力による魚類 (メダカ) および無脊椎動物 (ミジンコ) の多世代繁殖試験の開発がおこなわれており、トランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発や分子メカニズムの解析も進んでいる。高等動物に関しては、一部鳥類や鰭脚類 (ききゃくろい) について種固有の遺伝子を組み込んだレポーター遺伝子アッセイによるEDCs作用の感受性が評価されている。 ● 下水処理技術の開発研究と副生成物の影響評価、未知物質の測定技術に関する開発もおこなわれている。 ● 学際的研究開発、例えば化学分析と毒性分野の研究者による共同研究成果が、欧米と比べ乏しい。 |
| 米国 33)34) 48)54) | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 基礎研究は、多岐にわたり、かつレベルが高い。新しいアプローチが絶え間なく提案されている。大気汚染に関しても、大規模な疫学研究が複数、長期にわたって実施されている。健康影響に関する疫学的な研究も実験的な研究も複数の機関で取り組みが進展してきている。ナノマテリアル廃棄物への評価など、新しい研究も始まっている。 ● 日本と同様に (一部共同で)、内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験、そして <i>in vivo</i> 確定試験が開発されており、低用量・複合曝露影響やエピジェネティックな世代を超えた影響についての基礎研究も展開されている。 ● EDCsの下水処理過程における挙動や除去効率の調査、そして下水処理水の流入河川に棲息する野生魚のNational studyも実施されている。野生高等動物についても以前は、classical POPsの蓄積特性に関する研究が実施されていたが、現在はカナダのPOPs関連物質調査を除き、ほとんど実施されていない。 ● 予算面、人材面で日本を凌駕している。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 他分野との連携が活発になってきている。大規模コホート/大規模モニタリングも盛んで、総合的に環境インパクトを捉えようとする姿勢が目立つ。(NCSは中止) ● 米加共同研究にて、実環境の池を調査域とした大規模なエチニルエストラジオールの長期生態影響調査が実施され、個体群への影響のみならず種間の相互作用や生態系全体への影響が明らかとなった (学際研究)。 ● 日米二国間協力による多世代繁殖試験の開発がおこなわれており、トランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発も進んでいる。鳥類種固有の遺伝子を組み込んだレポーター遺伝子アッセイによるEDCs作用の感受性が評価されているが、高等動物の感受性に関する研究は少ない。 ● 下水処理技術の開発研究と副生成物の影響評価、未知物質の測定技術に関する開発もおこなわれている。 ● 日本に比較し、大きな予算が配分されている。 |

| | | | | |
|-------------------------|---------|---|---|--|
| 欧州 33)34) 55)-66) | 基礎研究 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● EU機関のみならず、オランダやスイス、英国やドイツなど、研究所や大学における研究レベルは高い。質の高い研究成果が発表されており、EU内を中心に多国間共同研究も多い点が特徴である。北欧からの報告が近年増加している。 ● 日本と同様に（一部共同で）、内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験、そして <i>in vivo</i> 確定試験が開発されており、低用量・複合曝露影響やエピジェネティックな世代を超えた影響についての基礎研究も展開されている。 ● EDCsの下水処理過程における挙動や除去効率の調査、そして下水処理水の流入河川に棲息する野生魚のNational studyも実施されている。高等野生動物の蓄積特性に関する研究が実施されているが、POPsを除くEDCsデータは乏しい。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● オランダ、英国、フランス、ドイツなどの企業や研究所で研究・開発が進められている。EUにおけるREACH規制が存在し、それに関連する研究計画、化学物質評価計画、管理計画も提案されている。HELIXなどのユニークな試みが実施されている。 ● 導入することが好ましいとのエビデンスが得られた場合、速やかに実用化が図られる傾向が認められることが、日本との大きな差とも考えられる。 ● 日英共同研究において、下水処理水中に残留するエストロゲン類似物質が魚類の性発達に与える長期的影響を調査し、エチニルエストラジオール 4 ng/Lに2年間曝露された全オス個体のメス化を報告した。 ● 欧州近海に棲息する鯨類の大規模調査が実施され、PCBsによる繁殖影響が強く示唆される結果を、学際研究の成果として2016年に報告している。 ● トランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発は進んでいるが、高等動物のEDCsによる感受性の種差に関する研究は乏しい。 ● 下水処理技術の開発研究と副生成物の影響評価、未知物質の測定技術に関する開発も行われている。 |
| 中国 34) 67)-70) | 基礎研究 | ○ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 環境問題が深刻であるだけに、研究に多くの資源が割かれており、トップレベルの国際学術誌に掲載される論文が増え、着実に実力をつけている様子が伺える。教員や学生、研究者の陣容が急速に拡大しており、研究レベルは上がっている。研究論文の事前チェック体制が整備されており、今後、国際誌におけるシェアがさらに高まることに寄与するとも予想される。 ● 日中韓三カ国間協力による野生魚オス個体のビテログニン生成に関する調査が実施されており、東シナ海沿岸域の大都市部周辺海域や工業・港湾地域において魚類の繁殖異常を報告している。 ● 2015年、中国農業省が“NY/T2873-2015 Evaluation Method of the Endocrine Disruption Effects of Pesticides”を発表し、農薬の内分泌かく乱作用について調査を開始している。 ● 内分泌かく乱作用が疑われる物質について、下水処理過程における挙動や除去効率の調査、下水処理水の流入河川に棲息する野生魚の汚染実態調査、そして高等野生動物の曝露実態調査が近年増加している。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↑ | <ul style="list-style-type: none"> ● 海外技術に依存している状況だが、これに追従する研究開発が活発に行われており、やがて独自技術として定着していくものと考えられる。 ● 欧米との共同実施体制を組んだ多数の社会実験的プロジェクトが稼働している。特に都市計画プロジェクトの中に健康を組み入れたような研究が多く、急成長している。 ● 内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験およびトランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発が急速に進んでいる。 |

| | | | | |
|--------------|---------|---|---|--|
| 韓国 34)71) | 基礎研究 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 国家レベルでの大型プロジェクトが進められ、研究と実務の連携が重視されている。基礎研究レベルの向上にも寄与している。 ● 大気汚染・温暖化については意欲的な取り組みもみられるが、全体として量感に欠ける。 ● 日中韓三カ国間協力による野生魚オス個体のピテログニン生成に関する調査が実施されており、東シナ海沿岸域の大都市部周辺海域や工業・港湾地域において魚類の繁殖異常を報告している。 ● 内分泌かく乱作用が疑われる物質について、下水処理過程における挙動や除去効率の調査、そして河川水や底質など環境試料のモニタリング事例は報告されているが、野生生物を対象としたEDCsによる汚染実態調査は、日米欧中と比べ少ない。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> ● 国家プロジェクトが推進され、温室効果ガス排出量評価、ライフサイクルアセスメントなどの領域の研究も包括した総合的な最適化も志向されている。 ● 内分泌かく乱作用が疑われる化学物質のin vitroおよびin vivoスクリーニング試験およびトランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発はおこなわれているが、応用研究や開発の報告事例も日米欧中と比べ少ない。 |

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献（●は全体的に参考とした文献）

- JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>

- 1) WHO/UNEP、内分泌攪乱化学物質の科学の現状 2012年版 意志決定者向け要約

http://www.nihs.go.jp/edc/files/EDCs_Summary_for_DMs_Jpn.pdf

- 2) Jirtle, R.L., Skinner, M.K., Environmental epigenomics and disease susceptibility, Nature Reviews Genetics, Volume 8, Issue 4, April 2007, Pages 253-262.

- 3) Chamorro-García, R., Sahu, M., Abbey, R.J., Laude, J., Pham, N., Blumberg, B., Transgenerational inheritance of increased fat depot size, stem cell reprogramming, and hepatic steatosis elicited by prenatal exposure to the obesogen tributyltin in mice, Environmental Health Perspectives, Volume 121, Issue 3, 2013, Pages 359-366.

- 4) Lim, S. (2012). "A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010." Lancet 380: 2224-2260.

- 5) Rockstrom, J. (2009). "A safe operating space for humanity." Nature 461: 472-475.

- 6) Villeneuve, DL. (2015). "Adverse Outcome Pathways." from

https://www.toxicology.org/groups/ss/rass/docs/RASSwebinar_040815.pdf.

- 7) Lelieveld, J (2015). "The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale." Nature 525: 367-371.

- 8) Laaidi, K. (2011). "The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave." *Environmental Health Perspectives* 120: 254-259.
- 9) Wesolowski, A. (2014). "Quantifying travel behavior for infectious disease research: a comparison of data from surveys and mobile phones." *Scientific Reports* 4.
- 10) Wesolowski, A. (2012). "Quantifying the impact of human mobility on Malaria." *science* 338: 267-270.
- 11) Cooney, C. (2012). "Downscaling Climate Models." *Environmental Health Perspectives* 120: A22-28.
- 12) http://acd.od.nih.gov/reports/NCS_WG_FINAL_REPORT.pdf
- 13) Vrijheid, M. (2014). "The Human Early-Life Exposome (HELIX): Project Rationale and Design." *Environmental Health Perspectives* 122: 535-544.
- 14) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「カナダ、化学物質管理計画に約4億9000万ドルを投資」(2016年5月30日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=19123>
- 15) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「アメリカ環境保護庁、水資源の再利用が健康に及ぼす影響についての研究を助成」(2016年3月22日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=18407>
- 16) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「持続可能な消費生産センター、健康と環境により暮らし方を探る学際プロジェクト INHERIT を開始」(2016年3月2日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=18263>
- 17) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「ドイツ連邦環境省、ヒト・バイオモニタリングに新たな評価対象物質4種を追加」(2015年8月13日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=16935>
- 18) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「アメリカ環境保護庁、化学物質の内分泌かく乱作用を計算モデルによって評価する新検査方法を発表」(2015年6月18日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=16533>
- 19) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「ドイツ、環境汚染物質への人間の曝露を示すデータ収集を推進」(2015年1月23日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=15371>
- 20) Kortenkamp, A. (2007). "Ten Years of Mixing Cocktails: A Review of Combination Effects of Endocrine-Disrupting Chemicals." *Environmental Health Perspectives* 115: 98-105.
- 21) Vandenberg, LN (2012). "Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses." *Endocrine Rev* 33: 378-455.
- 22) Reardon, S. (2016). "A mouse's house may ruin studies (News)." *Nature* 530: 2264.
- 23) Betts, K. (2011). "A study in balance: how microbiomes are changing the shape of environmental health." *Environmental Health Perspectives* 119: A341-346.
- 24) Corvalan, C., S. Hales and A. McMichael (2005). *Ecosystems and human well-being: Health Synthesis*, WHO.
- 25) Barouki, R. "Developmental origins of non-communicable disease: Implications for research and public health." *Environmental Health* 11: 42.
- 26) Mostafalou, S. (2013). "Pesticides and human chronic diseases: Evidences, mechanisms, and perspectives." *Toxicology and Applied Pharmacology* 268: 157-177.

- 27) WHO/UNEP、内分泌攪乱化学物質の科学の現状 2012年版 意志決定者向け要約
http://www.nihs.go.jp/edc/files/EDCs_Summary_for_DMs_Jpn.pdf
- 28) WHO, Endocrine disruptors and child health: Possible developmental early effects of endocrine disruptors on child health
http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/75342/1/9789241503761_eng.pdf
- 29) 環境省, 第3回国際化学物質管理会議 (ICCM3) の結果について
<http://www.env.go.jp/press/15736.html>
- 30) Jirtle, R.L., Skinner, M.K., Environmental epigenomics and disease susceptibility, *Nature Reviews Genetics*, Volume 8, Issue 4, April 2007, Pages 253-262.
- 31) Chamorro-García, R., Sahu, M., Abbey, R.J., Laude, J., Pham, N., Blumberg, B., Transgenerational inheritance of increased fat depot size, stem cell reprogramming, and hepatic steatosis elicited by prenatal exposure to the obesogen tributyltin in mice, *Environmental Health Perspectives*, Volume 121, Issue 3, 2013, Pages 359-366.
- 32) Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*, Volume 347, Issue 6223, 2015, Pages 1259855-1259855-10.
- 33) Hecker, M., Hollert, H., Endocrine disruptor screening: regulatory perspectives and needs. *Environmental Sciences Europe*, Volume 23, Issue 1, 2011, Pages 1-14.
- 34) Bhandari, R.K., Deem, S.L., Holliday, D.K., Jandegian, C.M., Kassotis, C.D., Nagel, S.C., Tillitt, D.E., vom Saal, F.S., Rosenfeld, C.S., 2015. Effects of the environmental estrogenic contaminants bisphenol A and 17 α -ethinyl estradiol on sexual development and adult behaviors in aquatic wildlife species. *General and Comparative Endocrinology*, Volume 214, 2015, Pages 195-219.
- 35) Miyagawa, S., Lange, A., Hirakawa, I., Tohyama, S., Ogino, Y., Mizutani, T., Kagami, Y., Kusano, T., Ihara, M., Tanaka, H., Tatarazako, N., Ohta, Y., Katsu, Y., Tyler, C.R., Iguchi, T., Differing species responsiveness of estrogenic contaminants in fish is conferred by the ligand binding domain of the estrogen receptor. *Environmental Science & Technology*, Volume 48, Issue 9, 2014, Pages 5254-5263.
- 36) Ihara, M., Ihara, M.O., Kumar, V., Narumiya, M., Hanamoto, S., Nakada, N., Yamashita, N., Miyagawa, S., Iguchi, T., Tanaka, H., Co-occurrence of estrogenic and antiestrogenic activities in wastewater: quantitative evaluation of balance by in vitro ER α reporter gene assay and chemical analysis. *Environmental Science & Technology*, Volume 48, Issue 11, 2014, Pages 6366-6373.
- 37) Ihara, M., Kitamura, T., Kumar, V., Park, C., Ihara, M.O., Lee, S., Yamashita, N., Miyagawa, S., Iguchi, T., Okamoto, S., Suzuki, Y., Tanaka, H., Evaluation of estrogenic activity of wastewater: comparison among in vitro ER α reporter gene assay, in vivo vitellogenin induction, and chemical analysis. *Environmental Science & Technology*, Volume 49, Issue 10, 2015, Pages 6319-6326.

- 38) Tohyama, S., Miyagawa, S., Lange, A., Ogino, Y., Mizutani, T., Tatarazako, N., Katsu, Y., Ihara, M., Tanaka, H., Ishibashi, H., Kobayashi, T., Tyler, C.R., Iguchi, T., Understanding the Molecular Basis for Differences in Responses of Fish Estrogen Receptor Subtypes to Environmental Estrogens. *Environmental Science & Technology*, Volume 49, Issue 12, 2015, Pages 7439–7447.
- 39) Tohyama, S., Miyagawa, S., Lange, A., Ogino, Y., Mizutani, T., Ihara, M., Tanaka, H., Tatarazako, N., Kobayashi, T., Tyler, C.R., Iguchi, T., Evolution of estrogen receptors in ray-finned fish and their comparative responses to estrogenic substances. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, Volume 158, 2015, Pages 189–197.
- 40) Tanoue, R., Nomiya, K., Nakamura, H., Kim, J.-W., Isobe, T., Shinohara, R., Kunisue, T., Tanabe, S., 2015. Uptake and tissue distribution of pharmaceuticals and personal care products in wild fish from treated-wastewater-impacted streams. *Environmental Science & Technology*, Volume 49, Issue 19, 2015, Pages 11649–11658.
- 41) Suzuki, G., Sato, K., Isobe, T., Takigami, H., Brouwer, A., Nakayama, K., Detection of glucocorticoid receptor agonists in effluents from sewage treatment plants in Japan. *Science of The Total Environment*, Volume 527–528, 2015, Pages 328–334.
- 42) Kunisue, T., Higaki, Y., Isobe, T., Takahashi, S., Subramanian, A., Tanabe, S., Spatial trends of polybrominated diphenyl ethers in avian species: Utilization of stored samples in the Environmental Specimen Bank of Ehime University (*es*-Bank). *Environmental Pollution*, Volume 154, Issue 2, 2009, Pages 272–273.
- 43) Kunisue, T., Takayanagi, N., Isobe, T., Takahashi, S., Nakatsu, S., Tsubota, T., Okumoto, K., Bushisue, S., Shindo, K., Tanabe, S., Regional trend and tissue distribution of brominated flame retardants and persistent organochlorines in raccoon dogs (*Nyctereutes procyonoides*) from Japan. *Environmental Science & Technology*, Volume 42, Issue 3, 2008, Pages 685–691.
- 44) Tanabe, S., Ramu, K., Monitoring temporal and spatial trends of legacy and emerging contaminants in marine environment: Results from the environmental specimen bank (*es*-BANK) of Ehime University, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 64, Issue 7, 2012, Pages 1459–1474.
- 45) Kim, E.-Y., Suda, T., Tanabe, S., Batoev, V.B., Petrov, E.A., Iwata, H., Evaluation of relative potencies for in vitro transactivation of the Baikal Seal aryl hydrocarbon receptor by dioxin-like compounds. *Environmental Science & Technology*, Volume 45, Issue 4, 2011, Pages 1652–1658.
- 46) Mol, T.L., Kim, E.-Y., Ishibashi, H., Iwata, H., In vitro transactivation potencies of black-footed albatross (*Phoebastria nigripes*) AHR1 and AHR2 by dioxins to predict CYP1A expression in the wild population. *Environmental Science & Technology*, Volume 46, Issue 1, 2012, Pages 525–533.
- 47) Zushi, Y., Hashimoto, S., Tanabe, K., Nontarget approach for environmental monitoring by GC × GC-HRTOFMS in the Tokyo Bay basin. *Chemosphere*, Volume 156, 2016, Pages 398–406.
- 48) Kidd, K. a, Blanchfield, P.J., Mills, K.H., Palace, V.P., Evans, R.E., Lazorchak, J.M., Flick,

- R.W., Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Volume 104, Issue 21, 2007, Pages 8897–8901.
- 49) Ankley, G.T., Bencic, D.C., Breen, M.S., Collette, T.W., Conolly, R.B., Denslow, N.D., Edwards, S.W., Ekman, D.R., Garcia-Reyero, N., Jensen, K.M., Lazorchak, J.M., Martinović, D., Miller, D.H., Perkins, E.J., Orlando, E.F., Villeneuve, D.L., Wang, R.-L., Watanabe, K.H., Endocrine disrupting chemicals in fish: developing exposure indicators and predictive models of effects based on mechanism of action. *Aquatic toxicology*, Volume 92, 2009, Pages 168–178.
- 50) Hecker, M., Hollert, H., Endocrine disruptor screening: regulatory perspectives and needs. *Environmental Sciences Europe*, Volume 23, Issue 1, 2011, Pages 1–14.
- 51) Du, B., Haddad, S.P., Luek, A., Scott, W.C., Saari, G.N., Kristofco, L.A., Connors, K.A., Rash, C., Rasmussen, J.B., Chambliss, C.K., Brooks, B.W., 2014. Bioaccumulation and trophic dilution of human pharmaceuticals across trophic positions of an effluent-dependent wadeable stream. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Volume 369, Issue 1656, 2014, Pages 20140058.
- 52) Letcher, R.J., Bustnes, J.O., Dietz, R., Jenssen, B.M., Jørgensen, E.H., Sonne, C., Verreault, J., Vijayan, M.M., Gabrielsen, G.W., Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants in arctic wildlife and fish. *Science of The Total Environment*, Volume 408, Issue 15, 2010, Pages 2995–3043.
- 53) Karchner, S.I., Franks, D.G., Sean W. Kennedy, S.W., Hahn, M.E., The molecular basis for differential dioxin sensitivity in birds: Role of the aryl hydrocarbon receptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Volume 103, Issue 16, 2006, Pages 6252–6257.
- 54) Richardson, S.D., Kimura, S.Y., Water analysis: Emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, Volume 86, Issue 6, 2014, Pages 2813–2848.
- 55) Vulliet, E., Cren-Olivé, C., Screening of pharmaceuticals and hormones at the regional scale, in surface and groundwaters intended to human consumption. *Environmental pollution*, Volume 159, 2011, Pages 2929–2934.
- 56) Harris, C.A., Hamilton, P.B., Runnalls, T.J., Vinciotti, V., Henshaw, A., Hodgson, D., Coe, T.S., Jobling, S., Tyler, C.R., Sumpter, J.P., The consequences of feminization in breeding groups of wild fish. *Environmental health perspectives*, Volume 119, Issue 3, 2011, Pages 306–311.
- 57) Brion, F., Le Page, Y., Piccini, B., Cardoso, O., Tong, S.K., Chung, B. chu, Kah, O., Screening estrogenic activities of chemicals or mixtures in vivo using transgenic (cyp19a1b-GFP) zebrafish embryos. *PLoS ONE*, Volume 7, Issue 5, 2012, Pages e36069.
- 58) Stuart, M., Lapworth, D., Crane, E., Hart, A., Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *The Science of the total environment*, Volume 416, 2012, Pages 1–21.
- 59) Petersen, K., Fetter, E., Kah, O., Brion, F., Scholz, S., Tollefsen, K.E., Transgenic

- (cyp19a1b-GFP) zebrafish embryos as a tool for assessing combined effects of oestrogenic chemicals. *Aquatic Toxicology*, Volume 138–139, 2013, Pages 88–97.
- 60) Gaw, S., Thomas, K. V., Hutchinson, T.H., Gaw, S., Sources, impacts and trends of pharmaceuticals in the marine and coastal environment. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, Volume 369, Issue 1656, 2014, Pages 20130572.
- 61) Álvarez-Muñoz, D., Rodríguez-Mozaz, S., Maulvault, A.L., Tediosi, A., Fernández-Tejedor, M., Van den Heuvel, F., Kotterman, M., Marques, A., Barceló, D., Occurrence of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in macroalgae, bivalves, and fish from coastal areas in Europe. *Environmental Research*, Volume 143, 2015, Pages 56–64.
- 62) Ruhí, A., Acuña, V., Barceló, D., Huerta, B., Mor, J.-R., Rodríguez-Mozaz, S., Sabater, S., Bioaccumulation and trophic magnification of pharmaceuticals and endocrine disruptors in a Mediterranean river food web. *The Science of the total environment*, Volume 540, 2015, Pages 250–259.
- 63) Jepson, P.D., Deaville, R., Barber, J.L., Aguilar, À., Borrell, A., Murphy, S., Barry, J., Brownlow, A., Barnett, J., Berrow, S., Cunningham, A.A., Davison, N.J., Doeschate, M., Esteban, R., Penrose, R., Perkins, M.W., Smith, B., Stephanis, R. De, Tregenza, N., Verborgh, P., Fernández, A., Law, R.J., PCB pollution continues to impact populations of orcas and other dolphins in European waters. *Scientific Reports*, Volume 6, Issue 18573, 2016, Pages 1–17.
- 64) Weijs, L., Das, K., Siebert, U., van Elk, N., Jauniaux, T., Neels, H., Blust, R., Covaci, A., Concentrations of chlorinated and brominated contaminants and their metabolites in serum of harbour seals and harbour porpoises. *Environment International*, Volume 35, Issue 6, 2009, Pages 842–850.
- 65) Jaspers, V.L.B., Dirtu, A.C., MARCEL Eens, M., Neels, H., Blust, R., Covaci, A., Predatory bird species show different patterns of hydroxylated polychlorinated biphenyls (HO-PCBs) and polychlorinated biphenyls (PCBs). *Environmental Science & Technology*, Volume 42, Issue 9, 2008, Pages 3465–3471.
- 66) Schymanski, E.L., Singer, H.P., Slobodnik, J., Ipolyi, I.M., Oswald, P., Krauss, M., Schulze, T., Haglund, P., Letzel, T., Grosse, S., Thomaidis, N.S., Bletsou, A., Zwiener, C., Ibáñez, M., Portolés, T., de Boer, R., Reid, M.J., Onghena, M., Kunkel, U., Schulz, W., Guillon, A., Noyon, N., Leroy, G., Bados, P., Bogialli, S., Stipaničev, D., Rostkowski, P., Hollender, J., Non-target screening with high-resolution mass spectrometry: Critical review using a collaborative trial on water analysis, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Volume 407, Issue 21, 2015, Pages 6237–6255.
- 67) Liu, J.-L., Wong, M.-H., Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a review on environmental contamination in China. *Environment international*, Volume 59, 2013, Pages 208–24.
- 68) Liu, J., Lu, G., Xie, Z., Zhang, Z., Li, S., Yan, Z., Occurrence, bioaccumulation and risk assessment of lipophilic pharmaceutically active compounds in the downstream rivers of

- sewage treatment plants. *Science of The Total Environment*, Volume 511, 2015, Pages 54–62.
- 69) Xie, Z., Lu, G., Liu, J., Yan, Z., Ma, B., Zhang, Z., Chen, W., Occurrence, bioaccumulation, and trophic magnification of pharmaceutically active compounds in Taihu Lake, China. *Chemosphere*, Volume 138, 2015, Pages 140–147.
- 70) Wu, J., Zhang, Y., Luo, X., She, Y., Yu, L., Chen, S., Mai, B., A review of polybrominated di-phenyl ethers and alternative brominated flame retardants in wildlife from China: Levels, trends, and bioaccumulation characteristics, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 24, Issue 2, 2012, Pages 183-194.
- 71) Aoki, J. ya, Nagae, M., Takao, Y., Hara, A., Lee, Y.D., Yeo, I.K., Lim, B.S., Park, C.B., Soyano, K., Survey of contamination of estrogenic chemicals in Japanese and Korean coastal waters using the wild grey mullet (*Mugil cephalus*). *Science of the Total Environment*, Volume 408, 2010, Pages660–665.

3.2.6 化学物質リスク管理

（1）研究開発領域の簡潔な説明

化学物質リスク管理に関する研究開発領域には多様な研究課題が含まれる。特に、環境分析、毒性研究、理論・予測研究、および観察的研究が大きなテーマとなる。リスク管理自体に関する研究開発も重要である。本研究開発領域では、これらのうち、主に環境分析、毒性研究、予測研究および観察的研究について、現状と将来の見込みをまとめる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

化学物質リスク管理では、古くは公害問題への対処として、排出規制、環境規制のための基準値の設定と環境監視が課題となり、これらに毒性学や環境分析の分野が展開されてきたところであった。しかしながら、近年、化学産業技術の進歩とともに、国際的な、またより包括的な化学物質の管理が指向されつつある。

国際的な化学物質リスク管理の枠組みとしては、2002年ヨハネスブルグサミット(WSSD)で定められた実施計画で2020年までに化学物質の製造と使用による人の健康と環境への悪影響の最小化を目指すこととされ、そのための行動の一つとして、「国際的な化学物質管理のための戦略的アプローチ」(SAICM : Strategic Approach to International Chemicals Management)が2006年に定められた。より具体的には、化学物質管理に関連の深い、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約、ロッテルダム条約、バーゼル条約や、新たに締結された水銀に関する水俣条約など、さまざまな国際条約による取り組みが進められている。

一方、化学産業・技術の進歩は社会に大きな利便をもたらしているが、同時に、少量多品種にわたる機能性物質の展開により、潜在的に管理が必要な可能性のある化学物質数が飛躍的に増大しており、多数の化学物質や多様な用途、また、人から生物まで多様な影響範囲に対応する包括的なリスク管理が求められている。

化学物質リスク管理に関する研究開発領域では、このような国内外の背景を踏まえて、近年さまざまな新たな展開が行われている。

[動向（歴史）]

化学物質リスク管理における課題を踏まえて、従来から環境化学物質・汚染物質の化学分析と毒性影響、生態影響に関する多くの研究が実施されてきた。特に、汚染物質の環境における存在や動態を把握する基礎となる分析化学を中心として研究開発が進められてきたと理解される。

しかしながら、近年は対処すべき物質数の継続的な増加、環境規制の強化とともに物質の機能性の向上にも関連してさらなる微量分析の必要性、対応すべき試料と媒体の増加、対象物質の物性範囲の拡大などの新たな課題に直面しており、これらに対処するための研究開発が必要とされている。

また、近年の化学物質リスク管理は、個々の排出規制等の単純な集合体ではなく、社会全

体での化学物質管理の枠組みとして捉えられることが一般的になっていることから、分析化学や影響研究のみならず、化学物質の環境排出量の推定、マテリアル/サブスタンスフローの把握、これらの将来予測やシナリオ予測のための環境動態モデルや理論毒性学などより体系的、包括的な研究の必要性が意識されている。これらの概念を図 3-5 に示す。

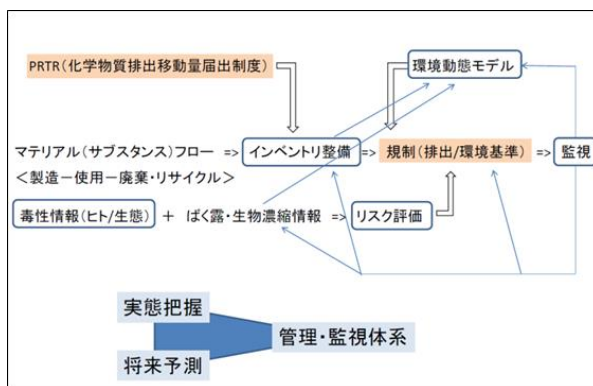


図 3-5 化学物質リスク管理の概念

(出典：JST-CRDS 俯瞰ワークショップ 報告書 国立環境研究所柴田フェロー資料¹⁾)

本領域稿では、上記のような背景を踏まえて展開されている研究課題のうち、特に近年着目すべき取り組みの見られる環境分析技術（有機、無機および影響分析）、理論毒性学、大規模研究（大規模モデル技術、大規模疫学）を中心に注目動向をまとめる。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

■ 環境分析技術

環境分析技術のうち、有機化合物の分析については、サンプリング手法および分析技術の双方において、より広域・他地点・高頻度および同時多数の物質の網羅的一斉分析の技術開発が進められている。

広域・多地点・高頻度の普遍的モニタリングに対応するためのサンプリング技術としてパッシブサンプラーの開発が増えつつある²⁾。特に水質モニタリング技術の遅れから、水中パッシブサンプラーの開発が進められ、海洋モニタリングに有効とみられている。大気については Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS) Network (カナダ主体、北極圏を中心に 7 か国、50 地点) が精力的に手法開発と応用展開を図っている。

採取した試料から可能な限り多くの情報を収集し、同時に個々の物質の同定を試みるために、GCxGC、LCxLC、LCxCE のような多次元分離技術³⁾や汚染源解析や未知汚染物質同定への ICR-FTMS や OrbitrapMS のような超高分解能質量分析技術の導入がトレンドの一つになっている。

その他には、リアルタイム計測やフィールドでの質量分析⁴⁾やマイクロデバイスの開発⁵⁾、バイオセンサのような生物応答の工学的実装⁶⁾、化学物質の毒性機構や生体中動態の解明のための質量イメージング分析⁷⁾が最新の動向といえよう。

無機分析については、従来の元素分析だけでなく、安定同位体比分析による有害金属元素

の研究が注目されている。環境中に遍在する有害金属のリスク管理を意図して、マルチコレクター型 ICP 質量分析装置を用いた高精度な安定同位体比分析による有害金属の発生源の推定と化学反応の機構解析がある。特に水銀は全球レベルで管理強化が求められている金属であり、水銀の同位体比計測技術は注目されている（例：参考文献 8）。分析技術に関しては、前処理手法の開発、ガスクロマトグラフ等の通常とは異なる試料導入系と接続した分析、さらに計測値の精度管理手法の確立に関する進歩がめざましい。

生体・生態影響を直接的に計測し、また網羅的的化学分析により影響要因を探索する影響分析の課題も近年注目される。新たな潮流を生むような顕著な新技術等は近年特に創出しておらず、環境試料の影響測定と網羅的的化学分析による影響要因の探索は 1980 年代から提唱されてきたにも関わらず飛躍的な進歩を遂げてはいない。しかしここ数年、飛行時間型質量分析計による質量分解能・物質分別能の向上、PC 性能の向上による解析の簡易化等の周辺技術の進歩により、ようやく実現可能な段階に近づいている。ハイスループットバイオアッセイ（High-Throughput Bioassay）については豪・日・独・仏・米・チェコ・瑞（スイス）・蘭・中・香の研究者・機関が参加してベンチマーキングが実施され⁹⁾、環境試料の生体・生態影響を直接的に計測する手法の共通化が図られている。

■ 理論毒性学

影響研究については、従来の実験毒性学的課題は引き続き重要であるが、近年、影響を理論的に解析し、新規の物質や影響の予測等に応用を目指す試みが進められている¹⁰⁾。

人健康への影響に関して、計算毒性学の技術は、因果関係解析と機械学習、そして、機械学習を発展させた AI（人工知能）による作用機構の提示が今後、大きな発展が期待される。医療・ヘルスケア分野における IBM の Watson、理化学研究所で開発された SiGN: 大規模遺伝子ネットワーク推定ソフトウェアなどの発展を毒性学分野に活用できれば、理論毒性分野においても大いなる発展が見込まれる。

近年、リスク評価手法のパラダイムシフトが提案され、作用機構にもとづく、有害性の確認、標的分子レベルにおける有害物質の用量反応関係の解析など、化学物質の一次作用点から最終的な毒性の表現型にいたる全体の一環した手法が提示され、その概念を AOP (Adverse Outcome Pathway) とよび、その解析手法全体は IATA (Integrated Approaches to Testing and Assessment) と呼ばれている¹¹⁾。これらには、既知の見本となる化学物質に関する情報と基盤としたいわゆるリードアクロス手法が有用と考えられており、精緻な構造活性相関の手法が求められている。この点に関しても Deep Learning やランダムフォレストのみならず新たな機械学習の技術が求められている。同時に、化学物質の曝露による毒性作用経路の詳細な予測、量反応関係についてシステムトキシコロジーもしくは毒性学におけるシステムバイオロジーという手法・概念の重要性と活用が期待されている¹²⁾。

生態影響についても、AOP のアプローチが生態毒性研究の新たな流れとして注目されている。生態毒性の評価において、ブラックボックスとして扱ってきた生物をできる限りシースルーボックスにすることによって化学物質の生態毒性のメカニズムを類型化しようという考え方である。生物試験で観察される有害な毒性影響の起点は分子、生物と物理化学的反応のほずであり、それらが生理学、生化学、遺伝学等でいずれ説明されるようになる生物体内でのカスケード反応を経て、最終的な有害性の顕在化へ繋がると考えられる。つまりある反応の条件が揃っていれば、得られる結論は同じになると予想できる。AOPs は毒性試験の省力

化、迅速化および動物愛護の観点から注目されているが、現在は確実な毒性発現のパスウェイを世界中から集めているところである¹³⁾。AOP Wiki は、インタラクティブな仮想プラットフォームを AOP の発展に提供して、提案された AOPs についての国際的なコンセンサスを促進することを目的としている。まだ AOP Wiki で承認された生態毒性関連の AOP は少ないが、将来的には増加していくと予想される。

■ 大規模研究

化学物質リスクのよりシステム的な管理を進めるためには、いわゆるエンドオブパイプ技術的な化学分析と管理から、より大きな人間集団、広域あるいは地球規模での大規模研究が必要とされる領域が課題となる。

このうち、環境排出から実際の環境媒体中への移行や蓄積を評価可能な環境動態モデル、数理モデルについて、地球規模動態を示す残留性有機汚染物質 (POPs : Persistent Organic Pollutants) や水銀を対象とする大規模モデルの課題が近年特に注目されている。例えば、水銀の全球動態モデルは米国、カナダ、欧州また日本等において開発が進められている¹⁴⁾¹⁵⁾。

一方、より大きな人間集団を直接対象とする大規模疫学のうち、特に出生コホートといわれる子供の出生から成長過程を追跡する大規模疫学が近年各国で進められている。主な大規模出生コホート疫学プロジェクトとして、日本における子どもの健康と環境に関する全国調査 (エコチル調査)、ノルウェーの MoBa、デンマークの DNBC、フランスの Elfe、韓国の Ko-CHENS などの研究において、胎児期や小児期の化学物質曝露の影響が調査されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- EU の Solutions は、ヨーロッパ、ブラジル、中国およびオーストラリアから 39 機関が参加するプロジェクトである。河川における有害化学物質を現在の科学技術を結集して評価し直すために、化学分析から影響分析にわたる広範な領域をカバーしている。ライン川やドナウ川流域の生態系と人の健康における化学物質リスクの問題解決のための総合的な取り組みとして 2013 年より (5 年計画) 開始された¹⁶⁾。
- 北欧を中心とする EU の MARS プロジェクトも注目される。16 の河川流域のケーススタディによって各流域における生態系の状態と化学物質およびその他の抑圧因子の解明を目指している¹⁷⁾。
- Tox21 プロジェクトは、米国環境健康科学研究所、環境保護庁 (EPA)、食品医薬品局など複数の政府機関の共同プロジェクトである¹⁸⁾。毒性評価方法や化学物質に対する迅速試験法などの開発を目指して進めているものであるが、本稿であげた課題のうち特に理論毒性学に関連して、かつ多くの関連する分野も含めて進められている。
- 米国環境保護庁 (EPA) の ToxCast プログラムでは、多数の化学物質のハイスループットスクリーニングによるデータを蓄積し、成果は Toxicity forecaster として公開され、理論毒性学的アプローチの重要な成果を生み出しつつある¹⁹⁾。
- 欧州で実施された水銀に関する GMOS プロジェクト²⁰⁾は、水銀の環境モニタリングから大規模全球モデルの検証までを含めたプロジェクトであった。水銀の環境動態を中心とする大規模プロジェクトとして注目されてきた。
- 大規模全球モデルについては、国連欧州事務局による越境大気汚染条約下での北半球タスクフォースが実施してきた、水銀に関するモデルレビューあるいは比較研究等が注目され

るところである²¹⁾。

- 大規模疫学については、すでに掲載した複数の注目すべき研究プロジェクトが進められているところであるが、関連して **Exposome**：エクスポゾーム（ヒトの生涯の全曝露）プロジェクトが進められており²²⁾、GPS、リモートセンシング、omics などによる化学物質曝露測定技術開発を通じて大規模疫学での応用に向けた研究が進められている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 環境分析技術に関しては、有機化合物に関するパッシブサンプリングは定量性に欠ける、捕集容量が少ないといったことが問題である。リアルタイム計測のためには現在の装置感度は低すぎ、イオン化法や検出器の開発・改良が求められる。LC を用いた極性成分の分析では、万能な移動相・固定相が無いため、一度に測定する手段がない。また、試料間の高精度（微妙）な差の検出のためには再現性の高い測定技術が必要である。他にも、環境分野では大量のデータ解析のための情報科学のノウハウが著しく不足している。他の分野に比べ環境化学分野の立ち遅れが目立つ。
- 無機化合物分析については、高精度な金属同位体分析を実現する質量分析装置や周辺を試料導入装置等も海外製が多く、国内での装置維持単価が上昇しがちであることに加え、例えば装置仕様の改良などの研究がより困難な状況である。当該分野に取り組む大学の研究室が限定されており、慢性的な人的資源不足であることも重要な課題である。
- 影響分析については、多検体の測定に適用可能なハイスループットのバイオアッセイが限定的であり、様々なエンドポイントに対するハイスループットバイオアッセイが種類、精度ともに不足している。このほか、ノンターゲット分析を志向する研究が増加している一方で前処理法の検討など、有機化合物分析と共通の課題がある。
- これらいずれにも関連して、環境汚染状況を把握するための資料収集が系統的あるいは継続的でなく、系統的なデータ蓄積を図れていないこともあげられる。
- 理論毒性学的研究においては、数理統計学分野で認知されている手法をいかに化学物質リスク管理における研究に応用していくかが課題である。遺伝子発現量、タンパク質発現量、DNA 配列、エピジェネティック情報などの分子レベルと化学物質の応答性に関するデータが国内には少なく、海外の情報に頼らざるをえない。一方、化学物質リスク管理とは異なる各業界の立場によって個々にデータベースが作られているため、統合された細胞レベルでの物質応答性のカタログ化が進まないと、環境分野における理論毒性学が発展しない。
- 大規模モデル化研究では、大気質モデル、大気大循環モデルが開発の土台として国内外とも用いられているが、準揮発性の POPs、揮発性の高い水銀などでは、海陸面のフラックスをより積極的に結合する必要がある、大気あるいは大循環モデルを超えた多媒体的な取り組みがもっと着目される必要がある。大規模疫学研究では、疫学自体の課題とともに、個人のエクスポゾームの測定において、衛星観測から、リモートセンシング、GPS、パッシブサンプラー、高度分析機器まで、多種多様の技術を扱う必要があるが、その展開が不足している。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 環境分析技術においては、網羅的な分析手法を達成するための、サンプリング技術、計測技術の高感度化、高極性有機化合物も可能となるより広範な極性成分の分析技術の開発などが必要である。また、モニタリング現場においてメンテナンスフリーで計測が可能な耐候性、堅牢性、再現性、感度の高い計測装置の開発も重要である。
- 多検体測定、網羅的分析データなどを解析するための情報解析技術の開発も重要である。特に精密質量スペクトル情報データベースの整備は、基盤研究として国際的にも貢献できるテーマである。情報解析技術は、健康・生態影響と環境中の化学物質を結びつけるための研究にも必須であり、理論毒性学にも密接な関連のある分野横断的なテーマとして取り組むことが必要である。また、多様化する化学物質と毒性データの急増に対応し、また複数の物質による複合生体影響の解明を目指した分析と理論毒性学的な有害性予測を複合したアプローチによる研究が考えられる。膨大なデータの解析処理への人工知能の応用といった研究となれば世界の先駆けとなる課題と考えられる。測定データからの未知物質の検索や同定、同定された物質の毒性推定を精度良く行うための手法（ソフトウェア）開発も取り組むべき課題としてあげられる。
- 有害元素のリスク管理のためには、天然資源や製品、そして食品等に含まれている極微量の有害金属のトレーサビリティの向上や曝露経路の特定につながる分析技術の高度化、同時に、発展途上国等でも活用できる分析技術の確立が地球レベルの環境汚染問題の解決には欠かせない。
- 理論毒性学あるいは大規模疫学に関連しては、化学的、物理的、生物学的、精神的、社会的環境ストレスへの生涯曝露（エクスポーズ）測定技術の開発、また、併せて、化学物質と生体応答の基本に立ち返って、人についても生態影響についても、物質レベルから見た健康・生態の状況を記述可能とするような蓄積が求められる。大規模疫学調査なども関連するところがある。
- 大規模モデル研究については、従来のモデルが概して無機的環境における物質循環の記述にとどまってきたのに対して、海産生物や陸生の各種生物など、曝露リスクに関連するより多様な媒体を含むモデル化研究が必要である。また、Planetary boundaries (PBs) の提案²³⁾の中で未定義となっている化学物質の限界のように、大規模モデルを活用するシステムの考察を現実のリスク管理に結びつける研究も重要である。

(5) 政策的課題

本研究開発領域における課題が、従来までの大気、水、土壌、また食品、廃棄物、農作物などの媒体ごとに、あるいは健康影響、生態影響などの影響によって作られてきた既存の区分を超えて意識されつつあることを反映して、政策的課題としては、このような従来の視点からすると分野横断的となる枠組みの必要性が指摘される。国内では経産省、環境省、農林水産省、厚労省、内閣府食品安全委員会などが含まれ、省庁の枠組みを超えた研究実施体制やファンディング制度が求められる。

また、おそらく上記とも関連して、化学物質リスク管理に係わる大学等の研究活動が枯渇しつつあり、基礎力と応用展開力をともにそなえた優秀な人材の育成とそのキャリアパスの確立が求められる。

このほか、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約、水銀に関する水俣条約など国際条約に基づく管理への即応または戦略的な関与、近年 REACH 規則を始め積極的な展開の目立つ欧州に対する日本としての的確な対応など、国内のみでなく国際的な動向の中で政策を構成することも重要となっている。

なお、近年、動物愛護の視点から in vivo 試験は最小限に留めるか、代替法へ移行する方向にある。その意味でもハイスループット (in vitro) バイオアッセイの開発は重要な課題である。一方で、研究開発において動物実験は最も重要な実験手法であって、代替法がすべてを取って代わることは全くあり得ない。さまざまな主体の意見を踏まえつつ、健全な科学技術の発展を可能とする政策的対応も求められる。

(6) キーワード

ノンターゲット分析、リアルタイム計測、人工知能、国際ネットワーク、安定同位体、マルチコレクターICP 質量分析装置、effect-directed analysis (EDA)、whole effluent toxicity (WET)、構造活性相関学、システムトキシコロジー、多変量解析、遺伝子ネットワーク、エクスポゾーム (exposome)、大規模疫学、Planetary boundaries、水銀に関する水俣条約

(7) 国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------|---------|----|------|--|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | ● 現状では、高分解の質量スペクトルデータベース MassBank が運用され、ノンターゲット分析の普及も進む。PBPK モデル中心に薬物の体内動態予測が行われ、子供と環境に関する全国調査の実施、大規模モデル開発など高い水準にある。ただし、安定同位体研究では、装置開発や研究室が不足している。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | ● 各課題とも基礎研究のレベルは高いものの、毒性予測ソフトウェアの公開遅れ、同位体分析では層の薄さも関連して不正確な同位体比が提出されるなど、改善すべき課題が見られる。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | ● (北米全体では、特にカナダで) 超高分離技術と超高分解能質量分析計を合わせた装置開発が進む。同位体比分析の高度装置多数を有している。ハイスループットスクリーニング研究、理論毒性学的研究ともに基礎レベルは高いが、革新的な計算技術は出ていない。エクスポゾーム研究が進む。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | ● 毒性予測では ToxCast, Tox21, FutureToxII など大規模プロジェクトが進められ、基礎から応用への展開が進む。同位体比研究、大規模疫学研究とも展開される。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↑ | ● ノンターゲット分析の手法開発、ソフトウェア・データベース整備、高分解能質量スペクトルデータベースなどでトップクラスの研究機関がある ¹⁶⁾ 。マルチコレクター質量分析装置はいずれも欧州に本拠を有し、英国の大学等との新たな開発が進む ²⁴⁾ 。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↑ | ● Solutions や MARS プロジェクトなど世界に先駆けた国際的な取り組みが行われており、これは分析から毒性までカバーする研究として進む。有害金属の挙動や安定同位体比の活用が活発。大規模疫学研究も進む。欧州越境大気汚染条約の活動を基礎としたモデル研究が進む。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | → | ● 欧米からの技術指導を受けながらではあるが、多数の分析装置を有して研究を実施。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↑ | ● 毒性学分野での活動はほとんどない。大規模疫学は事例がある。環境汚染が著しい地域があり、鉱山資源や製品、農作物などの金属、同位体比を明らかにする複数のプロジェクトが進む。 |

| | | | | |
|----|---------|---|---|---|
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↑ | ●すべての分野での情報はない。マルチコレクター質量分析装置など最新装置は整備数が少なく、研究者も少ないが、研究は開始されている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | ●WETの適用が行われる。大規模疫学 (KoCHENS) が開始予定との情報があるが未確認。環境分析は着実に実施されていると思われる。 |

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

(8) 参考文献

- 1) JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>
- 2) ScienceDirect による 2015 年論文数 (AS+PS)
- 3) ScienceDirect による 検索数 (GCxGC)
- 4) D.T.Snyder et al., Miniature and Fieldable Mass Spectrometers: Recent Advances. *Anal. Chem.* 2016, 88, 2-29.
- 5) D.M.Cate et al., Recent Developments in Paper-Based Microfluidic Devices. *Anal. Chem.* 2015, 87, 19-41.
- 6) C.Zhu et al., Electrochemical Sensors and Biosensors Based on Nanomaterials and Nanostructures. *Anal. Chem.* 2015, 87, 230-249.
- 7) Spengler, B., Mass Spectrometry Imaging of Biomolecular Information. *Anal. Chem.* 2015, 87, 64-82.
- 8) A. Yamakawa et al., Determination of Hg isotopic compositions in certified reference material NIES No.13 Human Hair by cold vapor generation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Accred. Qual. Assur.* 2016, 21, 197.
- 9) Beate I. Escher et al., *Environ. Sci. & Technol.* 2014, 48, 1940-1956.
- 10) AM, Richard. et al., ToxCast Chemical Landscape: Paving the Road to 21st Century Toxicology. *Chem Res Toxicol.* 2016, 29, (8), 1225-51.
- 11) OECD Adverse Outcome Pathways, Molecular Screening and Toxicogenomics
<http://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/adverse-outcome-pathways-molecular-screening-and-toxicogenomics.htm>
- 12) I, Cote, et al., The Next Generation of Risk Assessment Multiyear Study- Highlights of Findings, Applications to Risk Assessment and Future Directions. *Environ Health Perspect.* 2016, DOI:10.1289/EHP233.
- 13) AOP Wiki https://aopwiki.org/wiki/index.php/Main_Page (8/29/2016),
- 14) Programme, U. N. E., Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. 2013.

- 15) Kawai, T.; Jagiello, K.; Sosnowska, A.; Odziomek, K.; Gajewicz, A.; Handoh, I. C.; Puzyn, T.; Suzuki, N., A New Metric for Long-Range Transport Potential of Chemicals. *Environmental Science & Technology* 2014, 48, (6), 3245-3252.
- 16) SOLUTIONS. <http://www.solutions-project.eu/>
- 17) MARS project. <http://mars-project.eu/index.php>
- 18) The Toxicity in the 21st Century (Tox21) program <http://www.ncats.nih.gov/tox21/about>
- 19) US Environmental Protection Agency Toxicity Forecasting.
<https://www.epa.gov/chemical-research/toxicity-forecasting>
- 20) Global Mercury Observation System (GMOS) <http://www.gmos.eu/>
- 21) Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution <http://www.htap.org/>
- 22) The Human Exposome Project <http://humanexposomeproject.com/>
- 23) Rockstrom, J., et al., A safe operating space for humanity. *Nature* 2009, 461, (7263), 472-475.
- 24) T. Elliot et al., Collision Cell MC-ICPMS. *Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan* 2016.