

4 2006
No.61

科学技術動向

科学技術動向研究

廃棄物不法投棄による
汚染の修復と技術

P.3

P.9

微小重力利用の研究動向
—宇宙環境と地上環境での
研究の競争と協調—

P.4

P.21

トピックス

情報通信分野

P.5

1 2005 年のチューリング賞は Peter Naur 博士に授与

環境分野

P.6

2 難分解性の有機フッ素化合物の分解法

3 植物からのメタンガスの発生

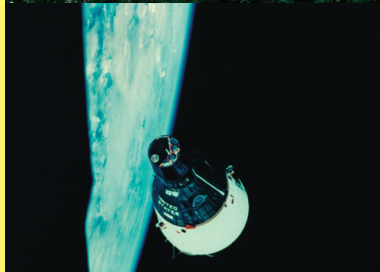
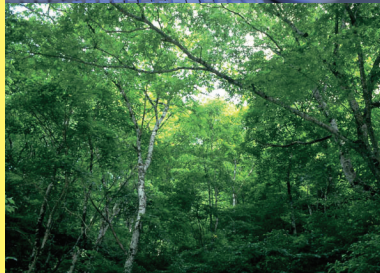
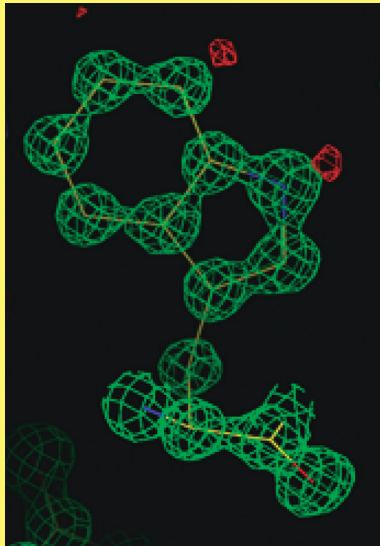
フロンティア分野

P.8

4 学生が製作する超小型衛星の打上げ

第 3 期科学技術基本計画が決定

P.1



第3期科学技術基本計画が決定

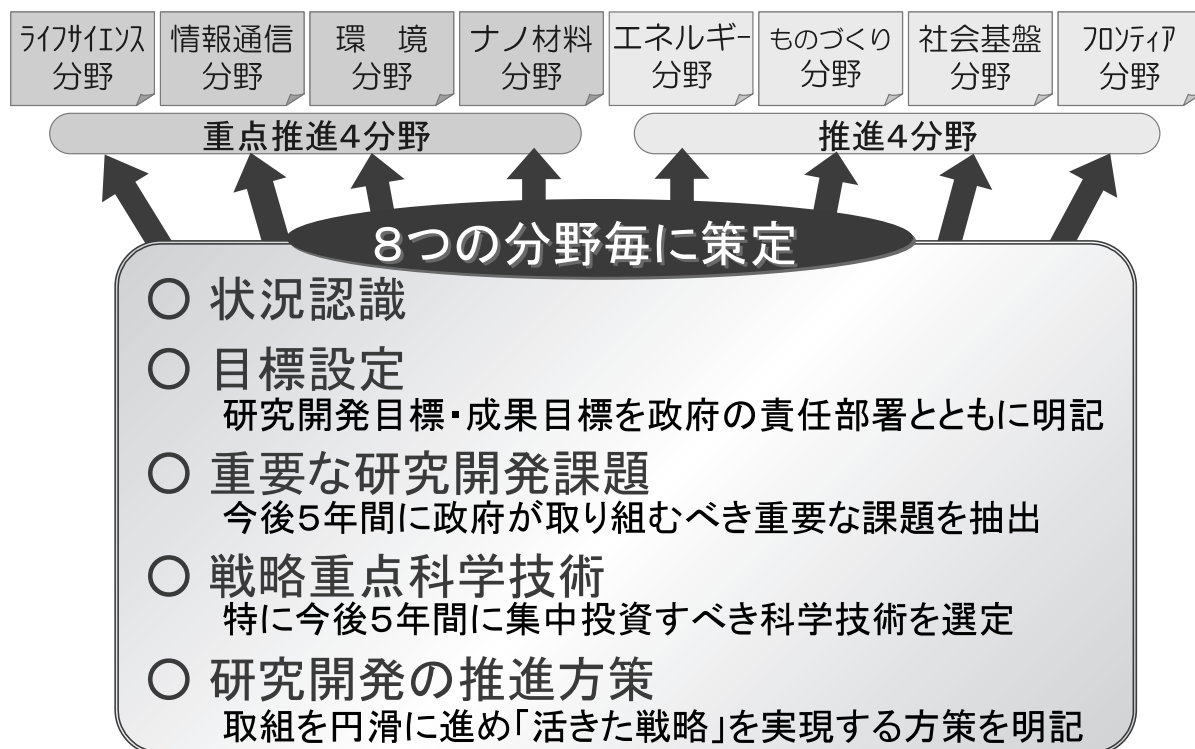
2006年3月28日、第3期科学技術基本計画が閣議決定された。2006年度から2010年度までの5年間、総額約25兆円（第2期実績比16%増）の政府研究開発投資の目標が提示され、第1期及び第2期基本計画の投資累積を活かし、様々な面で強まる社会的・経済的要請（6つの大政策目標、12の中政策目標）に応じていく姿勢が示された（図表1）。第3期科学技術基本計画では、科学技術の戦略的重点化については、第2期基本計画で進めた研究分野の重点化にとどまらず、分野内の重点化も進め「選択と集中」による戦略性の強化を図る。第2期基本計画で重点化された「ライフサイエンス」、「情報通信」、「環境」、「ナノテクノロジー・材料」の4分野については、引き続き重点推進4分野として位置付けるとともに、重点推進4分野以外の「エネルギー」、「ものづくり技術」（製造技術から名称変更）、「社会基盤」、「フロンティア」の4つの分野については、国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な推進4分野として位置づけられた（図表2）。さらに、選択と集中の徹底という考え方の下に、今回新たに「戦略重点科学技術」も設定され、各分野別推進戦略（3月22日決定）において今後5年間に予算を重点配分する研究開発課題が示された（図表3）。

図表1 第3期科学技術基本計画の政策目標の体系

理 念	大政策目標	中政策目標
〈理念1〉 人類の英知を生む	〈目標1〉 飛躍知の発見・発明 ～未来を切り拓く多様な知識の蓄積・創造	①新しい原理・現象の発見・解明
		②非連続な技術革新の源泉となる知識の創造
	〈目標2〉 科学技術の限界突破 ～人類の夢への挑戦と実現	③世界最高水準のプロジェクトによる科学技術の牽引
〈理念2〉 国力の源泉を創る	〈目標3〉 環境と経済の両立 ～環境と経済を両立し持続可能な発展を実現	④地球温暖化・エネルギー問題の克服
		⑤環境と調和する循環型社会の実現
	〈目標4〉 イノベーター日本 ～革新を続ける強靱な経済・産業を実現	⑥世界を魅了するユビキタスネット社会の実現
		⑦ものづくりナンバーワン国家の実現
〈理念3〉 健康と安全を守る	〈目標5〉 生涯はつらつ生活 ～子供から高齢者まで健康な日本を実現	⑧科学技術により世界を勝ち抜く産業競争力の強化
		⑨国民を悩ます病の克服
	〈目標6〉 安全が誇りとなる国 ～世界一安全な国・日本を実現	⑩誰もが元気に暮らせる社会の実現
		⑪国土と社会の安全確保
		⑫暮らしの安全確保

第53回総合科学技術会議配布資料より図表の一部を抜粋し作成。<http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/giji/giji-si53.htm>

図表2 分野別推進戦略の内容



第53回総合科学技術会議配布資料より

図表3 選択と集中の考え方



第53回総合科学技術会議配布資料より

廃棄物不法投棄による汚染の修復と技術

近年、安全・安心に対する社会的関心が高まるとともに、科学技術がこの課題に果たすべき役割についての国民の期待も大きくなっている。第3期科学技術基本計画にも盛り込まれたように、今後の科学技術政策には今まで以上に安全・安心に対し貢献することが求められ、安全・安心は新たな知の創造、経済への貢献と並んで、第3の基軸とされている。廃棄物の不法投棄は、このような社会の安全・安心を脅かす問題として取り組まなければならないテーマのひとつである。

不法投棄は循環型社会の構築を阻害するとともに、投棄される廃棄物に含まれる有害物質が周辺の環境を汚染し、重大な環境問題を引き起こす。影響を早期に把握し、対処することが、きわめて重要である。不法投棄による汚染は、種類や性状がきわめて多様な物質による汚染であること、汚染される環境媒体が土壌、水、底質など多岐にわたり、その量・体積も大きいことなど、通常の人為活動・産業活動などに起因する環境汚染とは異なる特徴をもつ。廃棄物の処理コストなど、社会的な要因と不法投棄の発生との間には密接な関連性があり、不法投棄の根本的解決のためには不法投棄が生じる社会・経済的な機構を十分に解明し、不法投棄が起こらない仕組みをつくることが本質である。本稿では、そのために必要な、不法投棄と環境汚染の実態、とられた技術的対策の有効性などについて整理・解析し、不法投棄に係る事前予防的技術および汚染修復技術に向けられるべき科学技術政策に言及する。

不法投棄によって破壊された環境の修復に対する技術適用の例としては、掘削した汚染土壌や投棄廃棄物を別の島まで海上輸送し、高温溶融による中間処理を行って無害化し、最終的に製造される溶融スラグなどについても資源化を図っている例がある。また不法投棄サイトからの流出水について、VOC除去や促進酸化法などによる高度な処理が適用された例もある。このように、土壌や水質の汚染の状況に応じて、もっとも効果的な技術の適用が必要である。不法投棄が顕在化するまでに長期間を経てしまったり、影響の範囲や強度が大きい場合もあり、緊急、応急、恒久対策それぞれについて適切な状況把握を行い、効果的な対応をとる必要がある。修復技術には物理化学的または生物学的技術、分離または分解技術、原位置浄化または掘削除去した上での浄化、といった技術をどう適用するかのが最適化が望まれる。また、環境リスクの特性に応じた、最適な汚染修復技術および適用方法の開発の推進も望まれる。

不法投棄の抑止や監視については、これらがより効果的に行われるためには、先端的な科学技術を応用した支援ツールの提供が必要である。不法投棄を早期に発見し、環境汚染への影響を含めてその拡大を防止するには、衛星監視システムが有効と考えられる。また防止対策の観点からは、不法投棄を迅速かつ体系的に発見する調査技術や、シミュレーションシステムの開発が望まれる。

微小重力利用の研究動向 —宇宙環境と地上環境での研究の競争と協調—

宇宙環境を利用した実験（宇宙実験）が我が国で行われるようになってから既に20年以上が経過し、基礎的なレベルでの新しい知見が多数得られている。代表的な実験成果には、半導体単結晶生成、タンパク質単結晶生成、宇宙育種、宇宙飛行士を被験者とする医学実験などがある。

国際的にも宇宙実験が活用され、スペースシャトルの本格運用の再開で、国際宇宙ステーション（ISS）の建設が進む見込みであり、日本実験モジュール「きぼう」（JEM）が2007年度にも打上げ開始となる見通しが出てきた。2005年12月からISSで生成実験が行われていた3次元フォトリソグラフィ結晶と高品質タンパク質結晶の試料が2006年4月9日に地上に無事帰還した。このように従来にない機能を持たせた製品の製造や新しい医薬品の開発につながる宇宙実験が行われており、産業応用及び民生利用が期待される段階に入ってきた。

「きぼう」の本格稼働に先立って、微小重力活用の実施環境整備には、未だ課題も多い。微小重力の利用で重要なのは、①品質、②コスト、③より短いターンアラウンドタイム（または研究者にとって適切なタイミングでの提供）、④支援体制、の4要素であり、ISS本格利用の時代においては、これらの各要素がバランスよく改善されていくことが望ましい。また、微小重力環境の利用機会は「きぼう」だけではなく、ISSで既に稼働している米国やロシアのモジュールの利用に加えて、落下実験施設、航空機や小型ロケットによる放物線飛行、回収型衛星、有人宇宙船などがある。今後、宇宙環境での研究と地上環境での研究とが競争あるいは協調しながら微小重力利用の実験を行っていく上で、以下を提案したい。

(1) 「きぼう」本格稼働までの微小重力研究の促進

微小重力実験環境を利用できる実験機会は増えてきているとはいえ依然として貴重であり、関係者は実験装置の開発や実験の実施のためにいっそう情熱を注ぐべきであるとともに、我が国全体として実験設備をフルに活用し、より多くの研究者が研究を行いやすい環境を整備すべきである。

(2) 微小重力の産業応用及び民生利用の促進

今後「きぼう」の運用開始に向けて、我が国が本格的に宇宙環境利用を意識した活動を行うようになる。従来以上に産業応用や民生利用を目指した実験機会の利用が促進されるべきである。

(3) 付随的な効果への期待

新たな実験手段を持たずに新しい知見を得ることは困難である。大学教育において微小重力利用実験のアイデア創出から実験実施までを一通り経験しておくことは、学生にとって貴重な経験であり、将来の多様な応用を創造する基盤的な技術能力を学生に与えると考えられる。本格的な宇宙実験の定常運用の時代を迎えるに先立ち、準備段階も含めての創意工夫を通じて、我が国の科学技術が誇りと感じられるような国民意識の芽生えにもつながるであろう。

2005年のチューリング賞は、デンマークのコペンハーゲン大学の名誉教授である Peter Naur 博士に授与されることが発表された。「チューリング賞」は、コンピュータサイエンス分野における最も権威のある賞とされており、ACM (Association for Computing Machinery) によって計算機科学の発展に関する功績が顕著な人物に対して毎年与えられている。今回の受賞につながった業績は、ALGOL60 というコンピュータ言語の定義とこれを翻訳するコンパイラの研究等を通じてコンピュータのプログラミング言語設計における本質的な貢献を行ったこと、また、プログラミングに関する技術と実践に関する貢献を行ったことである。この ALGOL60 に導入されたバックスナウア記法や「構造化プログラミング」および「再帰呼び出し」等の考え方は、後のコンピュータ言語に受け継がれ、現在あらゆるソフトウェアに影響を与えている。

トピックス 1 2005 年のチューリング賞は Peter Naur 博士に授与

2005 年のチューリング賞は、デンマークのコペンハーゲン大学の名誉教授である Peter Naur 博士に授与されることが 3 月 1 日に発表された。

「チューリング賞」は、コンピュータサイエンス分野における最も権威のある賞とされており、計算機科学の発展に関する功績が顕著な人物に対して、ACM (Association for Computing Machinery; 世界最古・最大の教育および科学コンピューティング協会) によって毎年与えられてきた。同賞は、計算機の原理を考案したチューリング (Alan M. Turing, 1912 - 1954) を称えて設立され、1966 年以来続いている。現在賞金の 10 万ドルは Intel 社が提供している。同賞の授与式は、今年 5 月にサンフランシスコで開催される ACM の年次会議において行われる予定である¹⁾。

今回の受賞につながった Naur 博士の業績は、以下に述べる ALGOL60 というコンピュータ言語の定義とこれを翻訳するコンパイラの研究等を通じてコンピュータのプログラミング言語設計における本質的な貢献を行ったこと、また、プログラミングに関する技術と実践に関する貢献を行ったことである。Naur 博士は、1986 年の IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers: 米国電気電子学会) のコンピュータ部門による「The Computer Pioneer Award (コンピュータの先駆者を称える賞)」の受賞者でもある²⁾。

博士は、1928 年生まれで、コペンハーゲン大学で天文学に関する修士課程を 1949 年に修めた後、英国ケンブリッジ大学の研究生となり、そこで黎明期のコンピュータである EDSAC システムに出会った。彼は、同計算機を利用し、小惑星の摂動(重い天体の重力に影響された楕円軌道からのずれ)などの研究に従事した後、米国の研究機関などを経て、1957 年に天文学において博士号を取得している。

1959 年、Naur 博士はデンマークで最初のコンピュータを開発する「Regnecentralen」という研究機関に加わった。そこでは、当時ヨーロッパの研究者を中心として、その時代における画期的なプログラミング言語の設計・開発が行われていた。1960 年に 13 カ国の研究者が執筆し同博士が統括・編集した「The Algorithmic Language ALGOL60」と題する報告書により、新しいコンピュータ言語が誕生した。

この ALGOL60 の設計には、その後のコンピュータ言語の発展にとって重要となる基本的な考え方が多く含まれていた。ケンブリッジ大学で同時期にコンピュータの研究に従事し、後に 1972 年のチューリング賞受賞者となった Edsger Dijkstra 博士、1977 年の同賞の受賞者でもある John Backus 博士もこの ALGOL60 の設計に多くの影響を与えたと言われている。

例えば、Naur 博士が Backus 博士と共に考案し、現在でもコンピュータサイエンスを学ぶ学生の必修項目となっているバックスナウア記法 (Backus-Naur Form) と呼ばれるものがある。これはもともと ALGOL60 の定義に利用されたが、一般的にプログラミング言語の定義のための基礎となる考え方を示すものである。また、ALGOL60 で言語仕様に入れられた「構造化プログラミング」や「再帰呼び出し」と呼ばれる考え方は、後の Pascal や C 言語といった主要なコンピュータ言語に受け継がれ、現在あらゆるソフトウェアに影響を与えていると言える。

1) 藤井章博、「計算機科学の研究動向と日本の課題——国際級学術賞から——」、科学技術動向月報、2004 年、4 月号

2) ACM Turing Award,
<http://awards.acm.org/turing/>

環境残留性と生体蓄積性が問題となっている極めて難分解性の化合物、PFOS（パーフルオロオクタンスルホン酸）を分解する方法が見出された。PFOSは有機フッ素化合物の一つであり、これまでは有効な分解方法が存在しなかった。今回、(独)産業技術総合研究所によって開発された方法では、PFOSを含む水に鉄粉を加え、250～350℃で高圧下の亜臨界水の状態にすることで、高効率な分解が可能になった。本法の実用化が期待される。

トピックス 2 難分解性の有機フッ素化合物の分解法

2006年2月、(独)産業技術総合研究所の環境管理技術部門・未規制物質研究グループは、地球規模での環境残留性と生体蓄積性が問題となる有機フッ素化合物の一つであるPFOS（パーフルオロオクタンスルホン酸）を分解する方法を開発したと発表した。

有機フッ素化合物は、耐熱性や耐薬品性に優れているため、撥水剤、表面処理剤、乳化剤、消火剤、コーティング剤等に広く用いられている。しかし、有機フッ素化合物の一部の物質は環境中に残留し、生物にも蓄積しているという研究結果が、数年前から報告されている。有機フッ素化合物のうち、その代表的な物質がPFOSである。PFOSについては、地球規模での環境残留性と生体蓄積性が明らかとなったため、2002年4月に米国環境保護庁(EPA)が用途を限定する規制を行った。2002年12月には日本でも、化審法^(注1)の指定物質となっている。また、2005年6月には「残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約^(注2)」締約国会議においても、13番目の残留性有機汚染物質として追加することが提案され、本格的な規制が国際的に検討され始めている。

PFOS等の有機フッ素化合物の環境や生物への悪影響を根本的に除去するには、その廃棄物を無害化する必要がある。しかし、これらの化合物は非常に安定であるため、熱分解するには多くのエネルギーを必要とする。特にPFOSは極端に安定であり、これまでに有効な分解処理方法が存在しなかった。このため、PFOSおよび関連する残留性有機汚染物質を低コストで効果的に分解する方法の開発が望まれていた。

今回開発された新しい分解方法は、PFOSを含む水に鉄粉を加え、250～350℃の亜臨界水^(注3)の状態をつくることにより、鉄の表面でPFOSをフッ化物イオンにまで高効率に分解することができる。実験では、初期濃度186ppmのPFOS含有水を、反応温度350℃、圧力23.3MPaの状態に保つと、6時間後にPFOSが水中から消失することが確認

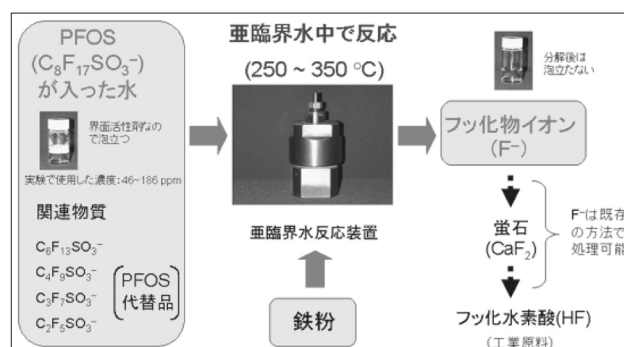
された。なお、分解によって生成するフッ化物イオンの処理方法はすでに確立されており、需要が増加して貴重となりつつあるフッ素資源としての再利用も可能である。また、PFOSの関連物質（炭素数2～6：炭素数が小さい場合は生体蓄積性が低い）についても、本手法により分解が可能であることが確認された。今後は、本手法の実用化が期待される。

(注1)「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」の略であり、難分解性で人の健康を損なうおそれがある化学物質による環境汚染を防止することを目的としている。現在、PFOSは第二種監視化学物質（高蓄積性ではないが難分解性で、人への長期毒性の疑いを有する化学物質）に指定されているが、規制はされていない。

(注2) 通称、POPs条約と呼ばれている。PFOSは附属書A物質（製造、使用、輸出入の原則禁止）に指定するよう提案されている。

(注3) 水は臨界点と言われる温度374℃、圧力22.1MPa以上の状態では液体でも気体でもない超臨界水という状態となる。臨界点よりもやや低い領域にある水（液体）を亜臨界水といい、無極性の有機化合物を溶解したり、有機化合物を加水分解することができる。

有機フッ素化合物「PFOS」及びその関連物質の分解



(独)産業技術総合研究所ホームページ：http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2006/pr20060221/pr20060221.html より

メタンガスは二酸化炭素同様の温室効果ガスであり、温室効果は二酸化炭素の21倍と高いため、地球温暖化の主要な原因物質の一つとされている。これまで、大気中に存在するメタンのほとんどは、酸素がない条件下でしか生きられないメタン菌という生物が生成していると考えられていた。ところが、ドイツのマックスプランク研究所のFrank Kepplerらは、酸素がある通常の大気下で、さまざまな植物がメタンガスを放出していることを見出した。Kepplerらの見積りによれば、植物のメタンガス排出量は地球全体で年間0.6～2.4億トンであり、これは地球上に存在するメタンの10～30%に相当し、植物も温暖化に関与している可能性がある。今回の発表では、熱帯雨林上空に見られる大規模なメタン上昇流との関連や、地球上の急速な森林破壊と大気中のメタン蓄積速度抑制効果も議論されている。しかし、まだ、植物のメタン生成過程は解明されていない。今回の研究成果が正しいものであるならば、地球温暖化の原因に関して再考し緑化戦略も見直す必要が生じる。

トピックス 3 植物からのメタンガスの発生

メタンガス(CH_4)は二酸化炭素(CO_2)同様温室効果ガスであり、温室効果は二酸化炭素の21倍と高いため、地球温暖化の主要な原因物質の一つとされている。これまで、地球の大気中に存在するメタンのほとんどは、メタン菌という酸素のない世界でしか生きられない生物(古細菌)が作っていると考えられていた。ところが、ドイツのマックスプランク研究所のFrank Kepplerらは、酸素が存在する通常大気下で、さまざまな植物がメタンを放出しているという発表を行なった(Nature, Vol. 439, 12 January (2006))。

Kepplerらは、枯れ葉や新鮮な葉を使って植物から空気中へ放出されるガスを分析している際に、今回の事実を見出した。さらに、実験室内でメタンが無い状況下にトウモロコシや芝を置き、炭素の安定同位体である ^{13}C を含む有機物を植物に与えて、その呼吸活動によって気中成分がどう変化するかを分析したところ、メタンガスが検出された。屋外の植物および枯死した植物からも同様な実験でメタンガスが検出された。

今回の測定値から見積ると、植物は、地球上全体で年間0.6～2.4億トンのメタンガスを大気中に放出していることになる。これは地球上に存在するメタンの10～30%に相当し、植物も温暖化に関与している可能性があるということを意味している。この成果によって、別の研究者による衛星を使ったメタン濃度の測定において、熱帯雨林上空に見られる大規模なメタン上昇流の理由を説明できる可能性がある。また、Kepplerたちは、地球上の急速な森林破壊が、むしろ大気中のメタン蓄積速度を抑制しているとも考えている。

しかし、植物がどのようにメタンを生成しているのか、まだ解明されていない。メタン菌の場合は、特殊な補酵素を用いて二酸化炭素と水素からメタンを生成するが、現在までに植物にこのような補酵素が検出されたという報告はない。植物とメタン菌が共生している可能性は、特に枯れ葉などでは考えられるが、メタン菌は酸素があると死んでしまう。

今回の研究成果の発表に対して、National Institute of Water and Atmospheric ResearchのDavid C. Lowe博士はNature誌において「新たなメタンガスの発生源が見つかったことで地球のメタン収支を再検討する必要が出てきた」と論評している。また、Lowe博士は「我々は新たに発生する森林は、二酸化炭素の吸収源として地球温暖化を抑止するのではなく、メタン放出によってかえって温暖化を促進するのではないかという不安を抱えることとなった」ともコメントしている。

近年の地球温暖化の原因に関しては多くの議論があるが、これまでは、植物は二酸化炭素を吸収することにより温暖化を防ぐと考えられて、緑化戦略が練られてきた。もし今回の発表が正しいものであるならば、これらの考え方を再考する必要性もあり、環境政策的にも極めて重要な意味をもつ。

Advanced Synthesis & Catalysis Research (ASC 化研) 藤原 祐三 氏及び京都大学大学院 阪井 康能 氏のご投稿をもとに科学技術動向研究センターにて作成

我が国で初めて学生が製作した衛星は、2003年に打ち上げられた東京大学と東京工業大学の1辺10cmの立方体の衛星であり、東京大学の2機目の衛星も2005年に打ち上げに成功した。このたび、2006年2月22日には、4機目となる東京工業大学の超小型衛星「Cute - 1.7 + APD」が、M-Vロケットで軌道投入された。搭載されたAPD (Avalanche Photo Diode) は、放射線検出器として初めて軌道上実証を行うものである。今回の成功に続いて、2006年中に、日本大学、北海道工業大学、九州大学などからも、学生が製作した衛星の打上げが予定されている。このような活動は、NPO法人「大学宇宙工学コンソーシアム」(UNISEC)によって支援されており、大学における超小型衛星開発は、今後さらに活発化すると予想される。

トピックス 4 学生が製作する超小型衛星の打上げ

全国の大学で、学生による超小型衛星の製作と打上げが活発になってきている。約30大学が加盟し、340人を超える学生が参加しているNPO法人「大学宇宙工学コンソーシアム」(UNISEC)は、このような活動に対し、技術交流や情報交換などの支援を行っている。

2006年2月22日にM-V(ミューファイブ)ロケットで赤外線天文観測衛星「あかり」(ASTRO-F)が打ち上げられ、そのサブペイロードとして、東京工業大学の「Cute - 1.7 + APD」という超小型衛星が打ち上げられた。この衛星は日本の大学の学生が製作した衛星として4機目となるもので、外観は写真に示すように20cm×10cm×10cmの直方体で、重量は3kgである。搭載されたAPD (Avalanche Photo Diode) は、放射線検出器としては初めて軌道上実証を行うものである。APDは、今後、次世代X線天文衛星への搭載も計画されている。

我が国の学生製作の衛星は1993年から始まった「衛星設計コンテスト」(社)日本航空宇宙学会などが主催)に、全国の主要大学や高専が参加して、設計技術やミッションのアイデアなどを競うという形で発展してきた。また、「日米科学・技術・宇宙応用プログラム」(JUSTSAP)のワーキンググループ(WG)の1つに小型衛星・打上げWGがあり、その中に含まれる「大学宇宙システムシンポジウム」(USSS)において、米国と共同で学生衛星の打上げを目指す共同研究が行われてきた。

USSSの一つの成果として、「カンサット」(CANSAT)がある。これは350mlのジュース缶に通信機能などを搭載した飛翔体を、米国のアマチュアロケットを利用して高度約5kmまで打ち上げるもので、人工衛星にはならないが、通信、姿勢制御、GPSなど、実際の衛星でも必要となる機能を盛り込んでいる。

カンサットのレベルを超えて、どうしても人工衛星を打ち上げたいという願いを実現するために開発されたのが「キューブサット」である。この名称は、衛星の形状が1辺10cmの立方体(キューブ)であることによる。2003年6月に、東京大学の衛星「XI-IV(サイフォー)」と東京工業大学の衛星「CUTE-I(キュートワン)」がユーロコットの「ロコット」というロケットで同時打上げに成功し、日本の学生が製作した衛星が同時に2機誕生した。両者とも、アマチュア無線愛好者に地球画像の受信などの利用を呼びかけ、現在も運用されている。また、東京大学は2005年10月に2機目の衛星となる「XI-V」をロシアのコスモス3Mロケットで打ち上げた。このロケットには、欧州やアジア諸国の学生が製作した衛星が合計8個搭載されていた。

今回の東京工業大学の「Cute - 1.7 + APD」に続いて、日本大学の「SEEDS」、北海道工業大学の「HITSAT」などが2006年中に打ち上げられる予定である。また、九州大学のテザー試験衛星「QTEX-PR」も2006年中の完成を目指している。大学における超小型衛星開発がさらに活発化すると予想される。

Cute - 1.7 + APDの外観 (20cm × 10cm × 10cm)



写真提供：東京工業大学 松永研究室

廃棄物不法投棄による 汚染の修復と技術

川本 克也
客員研究官

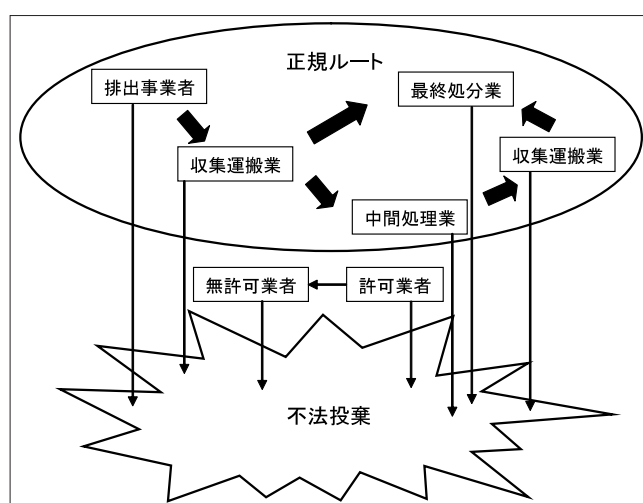
浦島 邦子
環境・エネルギーユニット

1 はじめに

近年、安全・安心に対する社会的関心が高まるとともに、科学技術がこの課題に果たすべき役割についての国民の期待も大きくなっている。今後の科学技術政策には今まで以上に安全・安心に対し貢献することが求められる¹⁾。

廃棄物の不法投棄は、このような社会の安全・安心を脅かす問題として改善しなければならないテーマのひとつである。図表1に示されるように²⁾、本来ならば再利用または資源として再生利用される、あるいは適正に処理・処分されるはずの廃棄物を不法に投棄する行為が後を絶たない。不法投棄は、循環型社会の構築を阻害するだけでなく、投棄される廃棄物に含まれる有害物質が周辺の環境を汚染することにより、重大な環境問題を引き起こす要因となる。不法投棄による汚染には、通常の人為活動・産業活動などに起因する環境汚染とは異なる特徴がある。また不法投棄された場所の原状回復のためには、技術的課題に加え、

図表1 不法投棄の流れ



参考文献²⁾を基に一部改変

巨額の経済的損失の問題や周辺社会への影響などさまざまな課題がある。

不法投棄の背景となる要因および対策には社会的要素と技術的要素とがあり、別の観点では、事前の回避的要素と事後の対策的要素とがある。廃棄物の処理コストなど社会的な要因と不法投棄の発生との間には密接な関連性があり、不法投棄の根本的解決のためには不法投棄が生じる社会・経済的な

機構を十分に解明し、不法投棄が起こらない仕組みをつくることが本質である。本稿では科学技術動向の観点から、事前から事後にわたる技術的要素に関する事項に焦点を絞る。そして、不法投棄と環境汚染の実態、とられた技術的対策などについて整理・解析することにより、不法投棄に係る事前の予防的技術と汚染修復技術に向けられるべき科学技術政策に言及する。

2 不法投棄の現状と環境汚染の特徴

2 - 1

日本全国の実態^{2,3)}

産業廃棄物の不法投棄に関する

過去12年間の動向を図表2に示す。不法投棄の発生件数は、平成5年度から10年度まで年を追うごとに増加し、10年度には1,000件を大きく超えた。13年度まで

1,000件以上で推移し、14年度からは減少に転じている。一方で、投棄された廃棄物の量は、件数に呼応する結果にはなっていない。これは、不法投棄となった事案の

量に大きな違いがあり、大規模な事案が発覚するような場合にはそれだけで全投棄量のうちのかなりの割合を占めることがあるためと思われる。たとえば、図表2で15年度の投棄量74.5万tのうち、岐阜市（椿洞地区）で起こった事案だけで56.7万tを占め、15年度内の76%に相当する量である。

図表3は、投棄される産業廃棄物の種類の観点から、件数と投棄量とを平成16年度について整理した結果である。件数では、がれき、木くず、建設混合廃棄物の順に多く、これら3者で約64%を占めるほか、その他の建設系の種類を含めると建設廃棄物が約71%にのぼる。量については、建設系の

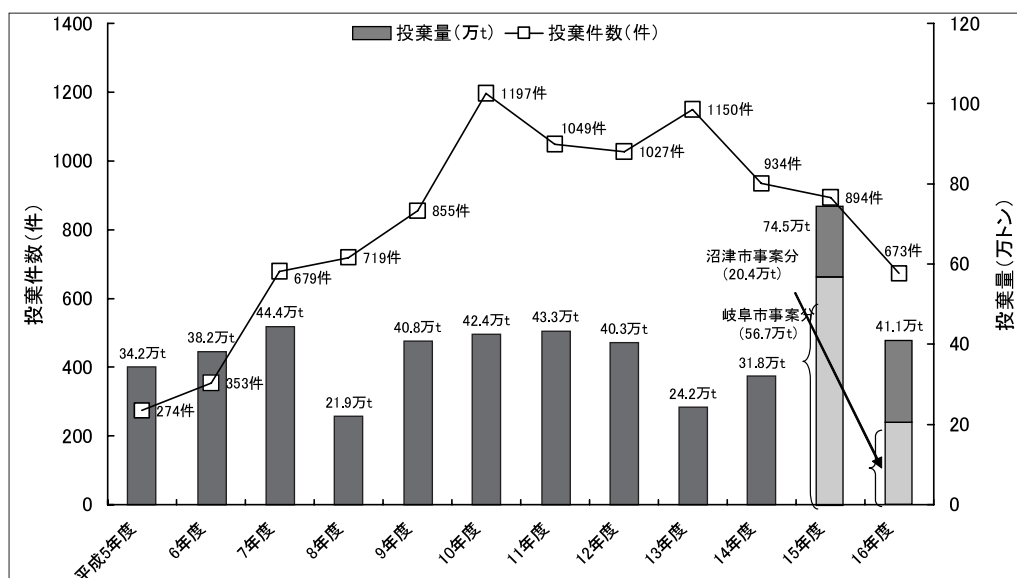
廃プラスチック類だけで56%を占め、建設廃棄物合計が全体の86%に達する。また過去の年度統計からは、件数では廃棄物種類の構成別にあまり変化はないが、量ではがれき、木くず、建設混合廃棄物が20%前後ずつを占める場合と、15、16年度のように大規模な事案のため、特定の廃棄物が極端に多くなった場合がある。

不法投棄の実行者については、件数では排出事業者が約48%でもっとも多く、投棄量からは同じく排出事業者か無許可業者が大部分を占める。不法投棄の場所（地目別）については、山林と農地で約半分を占め、人目につきにくい場所が選ばれている。都道府県別に

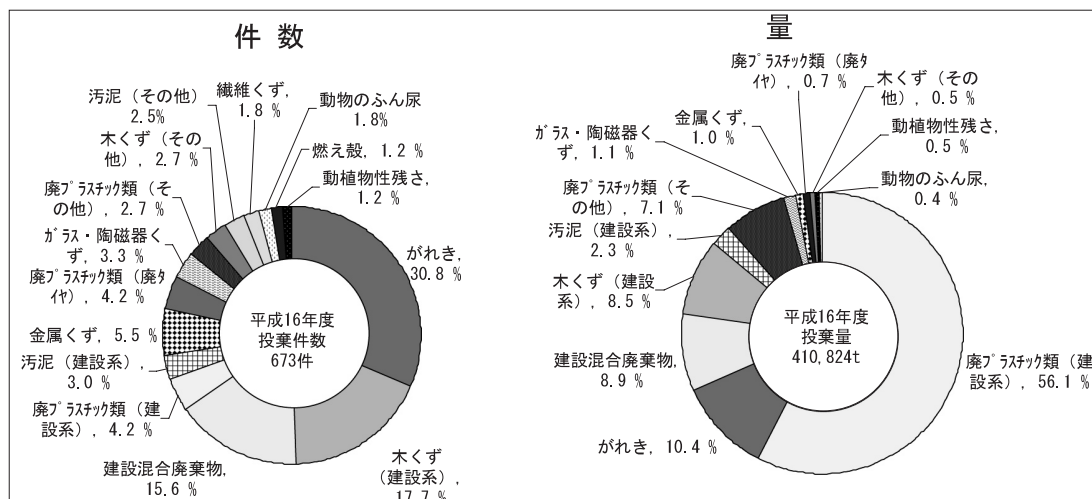
は、茨城県と千葉県が非常に多くなっており、大都市圏で排出された廃棄物とその周辺地域に運ばれるという構造が読み取れるほか、青森県、長崎県など地方で不法投棄の多い自治体も目立つ。

また図表4は、最近の不法投棄による支障の除去状況である。件数に関しては、30～35%が未着手となっている。一方、量に関しては、大規模な事案の影響（15年度）があると、一部着手と未着手の割合に大きな差が出る。しかし対策に時間を要するため、除去が完了する割合は10%に満たない点では共通している。

図表2 産業廃棄物の不法投棄件数及び投棄量の推移³⁾



図表3 不法投棄廃棄物の件数別・量別内訳³⁾



大規模事例の特徴と対策

不法投棄に起因する環境汚染の特徴として、以下の点があげられる⁴⁾。

- 埋められている廃棄物の種類が多岐にわたり、含有汚染物質も多種類である。
- 対策をとる場合、緊急対策、応急対策次いで恒久対策というように多段階的に適用することが必要となる。
- 汚染された場の地形が複雑な場合が多く、正確な調査や修復対策が一般に容易でない。
- 汚染に関する情報量が少ない。
- 汚染原因者の特定が通常困難である。

また、汚染物質の種類や不法投棄の規模および場所の地理的な特性などにより、環境影響の生じ方やその程度も異なる。図表5に全国で発生した不法投棄の大規模な事例と特徴を示す^{5~8)}。

このように現在、豊島、青森・岩手県境においてとくに問題解決のための対策がとられているが、図表4に示すようにいずれも修復には時間を要する。

(1)香川県豊島の事案

香川県豊島は、小豆島の西側に

図表4 不法投棄による支障除去の状況（各年度内にとられた対応）³⁾

状況	16年度		15年度	
	件数（件）	量（t）	件数（件）	量（t）
完了	387（57.5）* ¹	37,081（9.0）	463（51.8）	62,990（8.5）
一部着手	71（10.5）	279,370（68.0）	75（8.4）	65,225（8.8）
未着手	215（31.9）	94,373（23.0）	298（33.3）	613,125（82.3）
その他* ²	0	0	58（6.5）	3,639（0.5）
合計	673（100）	410,824（100）	894（100）	744,978（100）

*¹ 括弧内の数値は合計に対する割合（％）

*² 調査に対する自治体からの回答がなかったもの

位置する瀬戸内海の小島である。ここで汚泥などを利用してミミズを養殖し土壌改良剤をつくるという中間処理業をはじめた業者が、1977年に事業変更の申請を行い、1983年ごろからはシュレッダーダスト、廃油、汚泥などを大量に搬入して埋め立て処分を行い、一部を野焼きするようになった。生活環境上の被害を受けた住民からの苦情や県に対する訴えなどが続き、1990年になって兵庫県警が廃棄物処理法違反の容疑でこの場所の強制捜査を行った。そしてこの業者による廃棄物の不法投棄などは終了したが、広大で重篤な環境汚染が残った。現在、豊島における廃棄物等処理事業は、環境と安全への配慮、循環の実現および情報の公開の3つを基本的な理念に掲げて行われている。豊島に投棄された60万tを越える量の廃棄

物等（廃棄物や汚染土壌の混合物）は、5km離れた直島に専用船「太陽」で輸送され、中間処理される。年間6万tを処理し、10年で完了予定である⁹⁾。

図表6に、両島における廃棄物等の処理の流れを示す¹⁰⁾。中間処理での主たる工程は熔融処理である。豊島では、廃棄物層から浸出する有害物質を含む水が海域へ流出するのを防ぐために海岸線に沿って遮水壁を設置した。さらに、汚染の拡大防止と施設建設のため散在した廃棄物等の場所を移動し、また廃棄物等の飛散防止、雨水流入の排除を目的とした透気・遮水シートを敷設する、という暫定的な環境保全措置が施された。浸出水および地下水は、高度排水処理施設で処理される。廃棄物等は掘削されたときの性状の変動が大きい。そこで、中間処理での溶

図表5 大規模不法投棄の事例

発覚時期と場所	範囲	投棄廃棄物	汚染状況または主な汚染物質
平成2年、香川県豊島	広さ69,000m ² 、体積約56万m ³ 、湿重量で約60万トンに及ぶと推定	シュレッダーダストが主体で、製紙汚泥、鋸屑、脱水ケーキ、燃え殻など	鉛、PCG、1、2-ジクロロエタン、シス-1、2-ジクロロエチレン、1、1、2-トリクロロエタン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、1、3-ジクロロプロペンおよびベンゼン
平成14年、青森・岩手県境	岩手県側15ha、15万m ³ 、青森県側12ha、67万m ³ 、合計82万m ³	パーク堆肥、RDF様のもの、燃え殻、焼却灰、汚泥などを主に多岐にわたり、土砂とともにかなり混合された状態で埋められている	ジクロロメタン、1、2-ジクロロエタン、シス-1、2-ジクロロエチレン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンおよびベンゼン、ダイオキシン類、四塩化炭素、賞賛性窒素および亜硝酸性窒素
平成16年、岐阜県椿洞	130×200m×深さ20m以上、容積約75.3万m ³ 、うち混合物60.5万m ³ 、コンクリートガラ14.8万m ³ に達すると推定	建設廃棄物が主。土砂類37%、陶磁器・医師・コンクリートガラ30%、木くず21%、プラスチック類7%など	鉛、六価クロム、メタン47vol%、硫化水素15,000ppm。投棄場内の水質調査の結果、CODおよび窒素濃度が高く検出

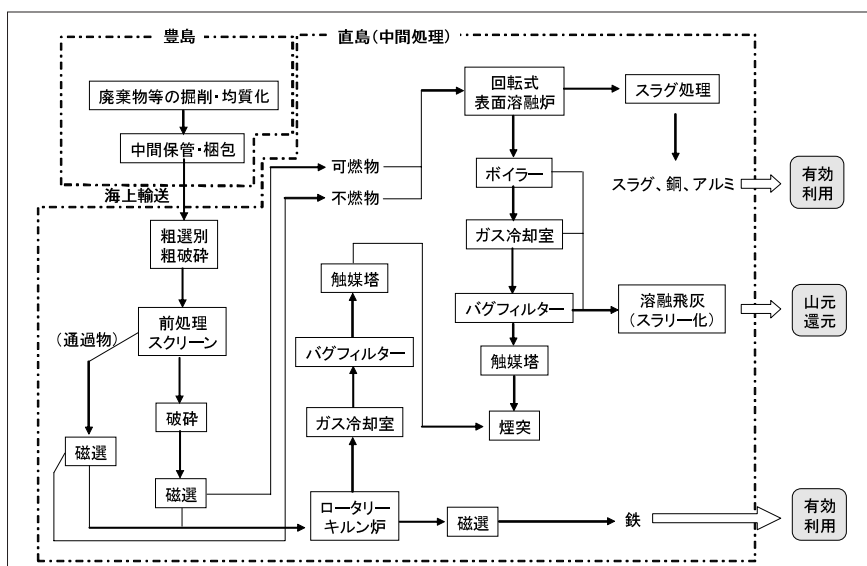
参考文献^{5~8)}を基に作成

融炉の運転を安定に行い、また溶融によって得られる資源化物を安定に得るために、処理をする廃棄物の均質化が必要となる。とくに水分量、主成分の組成および可燃物量の3項目が重要とされる。含水率が高いと、処理設備での取り扱いに問題が生じやすくなるほか溶融処理での燃料使用量の増加を招くことになる。そこで、1,300℃程度での溶融処理を安定に行うため、溶融温度に大きな影響を与えるCaO/SiO₂比を適切に調整する必要がある。また、溶融対象物の発熱量の変動を抑えることが重要である。このように処理対象廃棄物を均質化するために、生石灰を溶融助剤として混合し、発熱反応を利用して水分の調整を行う。こうして養生を行った後に、処理事業のために開発された専用トラックで直島へ輸送される。

中間処理施設では、輸送された廃棄物等とともに一般廃棄物が溶融処理される。溶融炉は、100t/日の処理能力の炉が2基設けられており、廃棄物等の全量を処理するのに10年を要すると予定されている。溶融処理においては一般に溶融スラグと溶融飛灰が生成し、通常は、溶融スラグがそのままコンクリート骨材などに有効利用される。しかし、豊島の廃棄物等にはシュレッダダストが多く自動車部品に由来する銅線、アルミニウム部品、ステンレス鋼部品などが多く含まれるので、これらが金属の粒子となってスラグに混入する。このため、とくにこの金属分を分離・精製することでスラグの品質を高めるとともに、分離した金属の有効利用が可能となる。それは、特別な破碎と選別、さらに比重差による分離手法を用いて行われる。

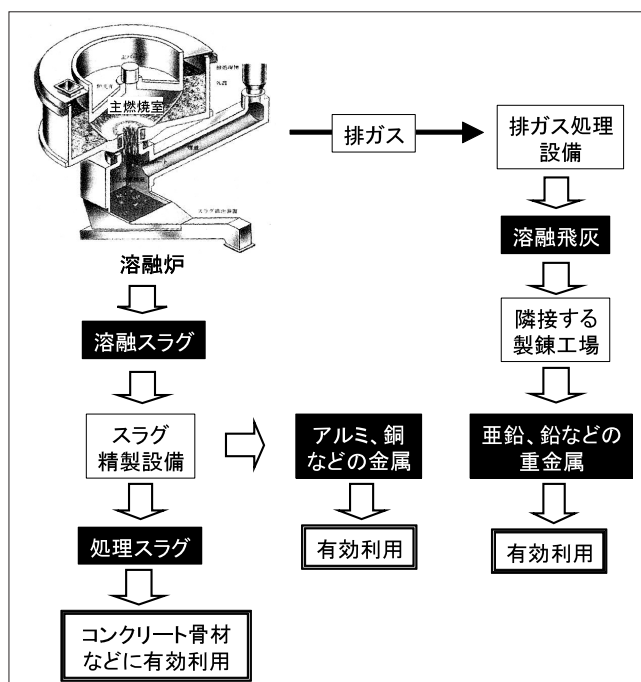
図表7は、溶融処理と副成物生成の流れを示している¹¹⁾。スラグは品質管理を行った後に、土木用

図表6 豊島・直島における廃棄物等の処理の流れ



参考文献¹⁰⁾を基に作成

図表7 溶融処理と副成物生成の流れ



参考文献¹¹⁾を基に一部改変

資材として香川県内の公共事業などで利用される。溶融飛灰については、亜鉛や鉛などの金属が多く含有されているので、直島で従来から操業する銅精錬工場へ輸送され、重金属原料として利用される。なお、鉄の塊や岩石などの溶融不適物を処理するためにロータリーキルン炉が別途設けられ、ここからの排ガスは溶融炉の系統と同じ処理が行われている。

(2)青森・岩手県境の事案

青森・岩手県境での不法投棄事案は、1990年代初期、青森県八戸市の産業廃棄物処理業者が、埼玉県産業廃棄物処理業者から引き受けた産業廃棄物を不法投棄したことに始まり、1994年から保健所による立入調査と指導がなされ、2000年から汚染の詳しい実態調査が行われた。この場所に関与した排出事業者は首都圏を中心に、北

海道から九州まで広がっていった。

この場所では、それぞれの県ごとに修復対策が実施されている。青森県では雨水や地下水の流れにともなう有害物質の流出への対応策として遮水壁を設け、また、複合的な汚染に対処可能な高度な排水処理による水の浄化対策を実施している。有害廃棄物と定義された埋め立て廃棄物を撤去し、青森市内の産業廃棄物処理（ガス化溶融炉による高温溶融処理）施設に持ち込んで処理を行っている。

図表 8 は、上記高度排水処理施設のフローである。この汚染場所からの浸出水には、ジクロロメタンやベンゼンなどの揮発性有機化合物（VOC）が含有されるため、原水はまず VOC 処理設備で曝気法によって気相へ移行させた後に活性炭吸着によってこれを除去する。この後、生物処理法によって生物化学的酸素要求量（BOD）^①成分を主体に除去し、凝集膜ろ過法によって微細な粒子状物質を除去する。そして、オゾン・紫外線方式の促進酸化法（化学的分解処理設備）によって水に溶存するダイオキシン類などの難分解性物質および色度成分を除去する。活性炭処理設備によって残存するわずかな有機成分を除去し、さらにキレート吸着設備において重金属を選択的に除去する。この複合的な処理システムにおける処理の実績は、運転開始からまだあまり時間がたっておらず汚染度の高い範囲からの浸出が少なくと考えられ、

図表 8 県境不法投棄の青森県側での排水高度処理施設のフローと水質値の例

浸出水	ばっ気方式VOC処理工程	浸出水貯留池	原水	凝集沈殿処理工程	生物処理工程	凝集膜ろ過処理工程	化学的分解処理工程	活性炭吸着処理工程	重金属キレート吸着処理工程	消毒処理工程	放流
				BOD	COD	SS	ジクロロメタン	ダイオキシン類	ハウ素		
原水（VOC 原水槽）				59	57	22	< 0.02	3.3	1.0		
処理水（放流設備サンプリングタンク）				< 0.5	5.3	< 1	< 0.02	< 0.0001	0.82		
計画処理水質				60 以下	90 以下	10 以下	0.2 以下	1 以下	10 以下		

水質の単位はダイオキシン類（pg - TEQ/l）を除いてすべて mg/l

青森県技術資料を参考に作成

原水の汚濁度が想定されたほど高くないために、処理水質もかなり良好である。今後、汚染物質を多く含む領域を掘削する段階になると、高濃度の汚染水が浸出する可能性がある。

岩手県の側では、廃棄物の全量を撤去することをとるべき対策とし、掘削の後選別を行い、県内の大手セメント工場を中核的な施設としてその他産業廃棄物処理施設などに輸送し、焼却、焼成、溶融のいずれかの方法による処理対策を行っている。2005 年 12 月 10 日現在の撤去済みの累積量は 23,600 t であり、全体計画に対する進捗率は 20.7%と報告されている。平成 17 年度の最終的な撤去量は、30,108t となった。

(3)岐阜市椿洞の事案

岐阜市椿洞では、市内の産業廃棄物処理業者が所有の処理施設に隣接する谷地に建築廃材を投棄したことから始まった。生活環境への詳細調査の結果から、廃棄物層の一部で六価クロムが土壤環境基準を超過し、鉛が土壌含有量基準を超過していたが、全体的には有害物質によるリスクは小さいと判

断されている。また、応急対策の後とるべき恒久的対策案として残置、一部撤去、全量撤去の 3 方法についてそれぞれ具体的対策と生じ得る課題が整理された段階である。

2 - 3

不法投棄に関する法制度

不法投棄による環境破壊の回復については、平成 9（1997）年の廃棄物処理法改正で排出事業者の責任強化、不適正処理の厳罰化などの施策が施行された。しかしすでにこの施行前から残存する事案は、長期間にわたって支障を生じ、産業廃棄物に関する不信感の象徴として取り扱われ、循環型社会形成を阻害する大きな要因となっていた。そこで、上記法改正前に実施された不法投棄に関しては、平成 15 から 24 年度までという期限を区切った上で、生活環境保全上の支障の除去または発生の防止（以下「支障の除去等」という）を計画的かつ着実に行うため、都道府県等が自ら支障の除去等の事業を行う場合に必要な経費に関する「特定産業廃棄物に起因する支障の除去等に関する特別措置

■用語説明■

① BOD

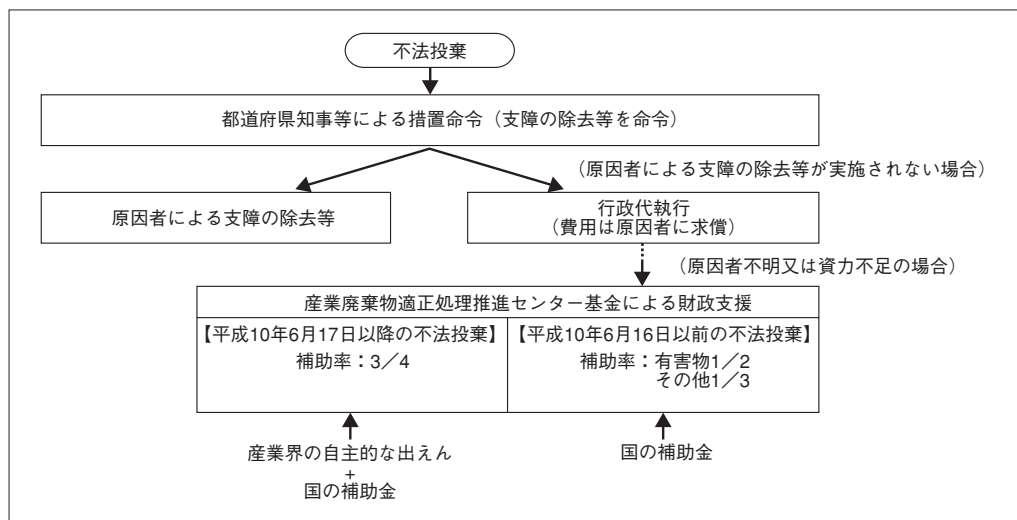
好気性バクテリアが、水中の有機物を酸化分解するのに必要な酸素量のこと。水質汚濁の指標の 1 つ。普通 20℃において 5 日間に消費する量を、mg/l または ppm で示す。化学的酸素要求量（COD）が海域や湖沼で用いられるのに対し、BOD は河川の汚濁指標として用いられている。

法」が平成15年6月に制定・施行された。この法によると環境大臣は、支障の除去等を計画的かつ着実に推進するための基本的方針を策定し、都道府県または保健所

設置市は、この基本方針に即して具体的な実施計画を策定しなければならない。これを実施するために、特定支障除去等の事業に要する費用については国庫補助を行う

こと、都道府県等の負担分については地方債の起債特例を可能にすること、とされている。支障除去に関する全体像を図表9に示す。

図表9 不法投棄された産業廃棄物に係る支障除去の流れ



出典：環境省

3 汚染修復技術とその特徴

3 - 1

修復の一般的方法

不法投棄による汚染の修復では、まず汚染すなわち環境の破壊が見出された時点で、何を優先的に実施すべきかに判断を要する。それは対策に関する緊急性の度合いに対応し、以下のように分類される⁴⁾。

- ①緊急対策：ヒトの健康リスクなどがかなり高いと判断される場合に、迅速な試験・調査などに基づいて、すぐに実施できる対策。住民の避難、地下水飲用の禁止、汚染源の撤去など。
- ②応急対策：汚染場所の詳細な調査に基づき、場所周辺の環境に汚染が拡散することを防ぐことにより、被害を最小化することを目的とした汚染範囲の覆がい、遮水壁設置などの対策。

- ③恒久対策：ボーリング調査や修復技術の適用性試験などに基づき、恒久的な安全性の確保可能な適正技術の適用による対策。

不法投棄の場所およびその周辺において浄化対象となる汚染物は、廃棄物そのものと土壌および水である。これらを浄化する恒久対策としての技術的手段には大別して浄化と封じ込め（隔離・管理）がある。浄化としては、汚染場所その場で汚染物質を除去する原位浄化と、掘削除去を行って場所を移した後に汚染物質の処理を行う方法がある。ここでいう除去とは、分離または分解の機構を利用した場所の移動または物質の消滅を指す。

3 - 2

固形物を主対象とする技術

「不法投棄による汚染に対する修

復技術」という定まった技術的体系は、明確に存在しない。基本的には、土壌および地下水汚染の修復に使用される技術が、具体的な対象物の特性に適合するように修正されて適用される。土壌・地下水汚染物質として事例が多いVOC、重金属およびダイオキシン類やPCBなどの難揮発性有機汚染物質に対する修復技術を図表10に示す。

(1)物理化学・熱化学的処理

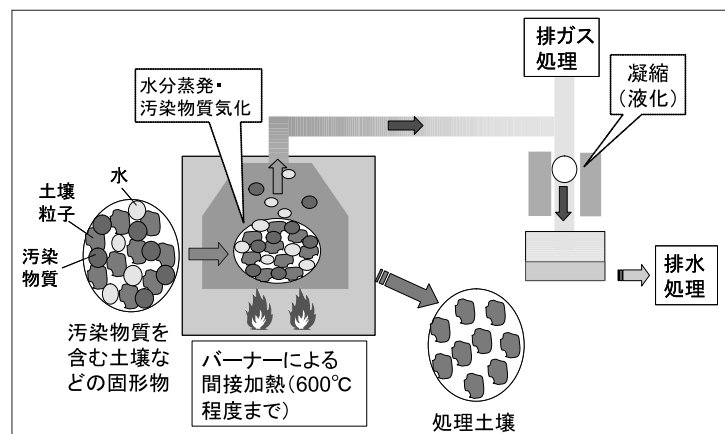
図表11は、処理対象物を設備外部から加熱する間接加熱方式による分離技術の例である。加熱により追い出された水分と汚染物質および粒子状物質は、排ガスの冷却・凝縮によって排水となるので、これら排ガスおよび排水の処理が必要となる。一般に分離技術は、分離後の汚染物質処理について別設備を設けて行う必要がある。

図表 10 VOC、難揮発性物質、重金属などの有害物質汚染に対する修復技術

対象物	処理実施場所からの分類	技術の原理		修復技術の例		対象物質の例
固形物（土壌）、液状物（地下水）	原位置浄化処理	分離	揮発をはじめとする固相または水相から気相への相間の移行などによる汚染物質の分離	物理化学的技術	●揚水法、揚水曝気法 ●土壌ガス吸引法（土壌ガス・地下水の同時吸引） ●エアースパーキング法（バイオレメディエーション法としての機能も備える）	トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなどの有機塩素系溶剤およびベンゼンなどの VOC
					●ソイルフラッシング法 ●固化・不溶化	重金属
		分解	化学的（脱塩素）または熱化学的手段による分解	物理化学的技術	●酸化還元法（鉄粉を利用した透過性反応浄化壁法などの利用）	有機塩素系 VOC
				生物学的技術	●バイオレメディエーション法 ●バイオスティミュレーション法 ●バイオオーグメンテーション法	有機塩素系溶剤およびベンゼンなどの VOC
固形物	掘削除去・浄化処理	分離		物理化学・熱化学的技術	●生石灰処理法 ●加熱処理法（間接加熱脱着法など）	有機塩素系溶剤などの VOC およびシアン化合物
		分解		物理化学・熱化学的技術	●加熱処理法 ●焼却法 ●溶融固化法 ●アルカリ触媒化学分解法	ダイオキシン類（溶融固化法） 石油系 VOC（油類）、重金属、PCB
				生物学的技術	●バイオレメディエーション法	有機塩素系溶剤、石油系 VOC

難揮発性の有機汚染物質は難分解性でもあり、これらに対しては焼却法、溶融固化法あるいは水熱酸化法などの高温または高温・高圧併用処理技術が適用される。多くは掘削を行った上で処理を行うことになる。焼却法は 800 ～ 900℃ 程度での燃焼、溶融固化法は溶融炉内での 1,300 ～ 1,400℃ 程度での高温燃焼と固形物の溶融スラグ化を行う技術である。溶融固化法は、灯油などの燃料または電気を用いることで多くの投入エネルギーを必要とするが、高温操作であるため難分解性有機物を完全に分解させることができる。主な方式には表面溶融式、コークスベッド式、ロータリーキルン式、電気式がある。二酸化ケイ素や酸化アルミニウムなどの無機成分が溶融して生成するスラグは、その網目状構造内に重金属類を封じ込めるため、溶出の可能性がほとんどなく、建築物の骨材などに有効利用される。溶融固化法に分類される技術で、電気抵抗式溶融技術の一種であり装入した電極ジュール熱によって溶融を行う方式（ジオ

図表 11 間接加熱方式による汚染物質脱着処理システムの例



（株）鴻池組技術資料を参考に一部改変

メルト工法）が、産業廃棄物焼却施設に起因するダイオキシン類高濃度汚染物および汚染土壌に対し、実際に適用されている¹²⁾。

(2)生物学的処理

微生物はさまざまな有機化合物を分解する能力をもっており、不法投棄によって汚染された開放環境を対象とした、生物機能応用型の修復技術であるバイオレメディエーションが研究開発されている。これには、メタンなどの微生物の増殖に必要な有機物、窒素やリンなどの栄養塩および空気など

を汚染土壌に導入し、現場の土着微生物の活性を高めて浄化を進めるバイオスティミュレーション法と、対象とする汚染物質に浄化活性の高い培養微生物を導入して浄化を進めるバイオオーグメンテーション法とがある。また、受動的な方法ではあるが、ナチュラルアテニューションがあり、これは、物理化学的な方法などで高濃度の汚染をできる限り浄化した後、土着微生物を利用することによって自然に濃度が減衰するのを待つという方法である。バイオレメディエーションとして適用例が多いの

は、低沸点有機塩素系溶剤（トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなど）やベンゼンを主とする石油成分による土壌・地下水汚染を浄化する事例である。バイオレメディエーションは、一般的には他の物理化学的処理技術より低コストで実施できるが、処理に要する期間が比較的長い、高濃度汚染には適用がむずかしい、温度や共存物質による影響があり得る、といった留意点がある。また、微生物の利用が周辺環境に与える影響も十分に評価する必要がある、外部から新たな微生物を導入する場合の環境安全性に関する考慮などが求められる。

3 - 3

水を対象とする技術

不法投棄場所で水を対象とする浄化の多くは、投棄廃棄物および投棄範囲からの浸出水の処理である。この浸出水は、不法投棄の大きな特徴である多様な汚染物質が共存するという特徴がある。した

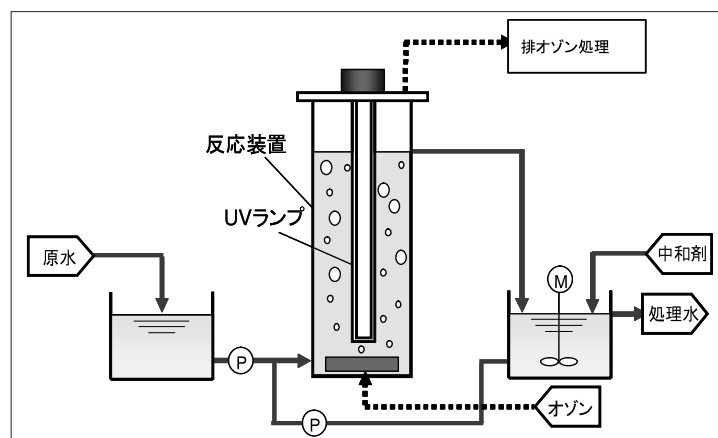
がって、このような汚染水に適用すべき処理技術は、複合的な機能をもつ単位操作かまたは複数の単位操作の組み合わせとなり、これは排水の高度処理技術となる。

近年、難分解性物質の高度処理技術として適用されるようになった技術に促進酸化法がある。これは、オゾン、過酸化水素、紫外線などの酸化力の強い物質または物理的手段を用いて、水中の難分解性物質を酸化分解する方法である。図表 12 は、オゾンと紫外線

照射を併用した高度処理設備の例である¹³⁾。

高度処理技術としては、上記のほか、疎水性の有機化合物除去に効果の高い活性炭吸着法が従来から適用されている。また $\mu\text{m} \sim \text{nm}$ の大きさまで、すなわち分子の大きさまで篩い分けが可能な膜分離法が、高分子などの新素材の開発を背景に発展している。また、重金属類の除去には、特異的な結合能をもつキレート樹脂によるキレート吸着法が多く適用される。

図表 12 オゾン／紫外線併用促進酸化法による高度水処理装置の例



参考文献¹³⁾を基に作成

4 修復の安全・安心と資源循環へ向けた動向

4 - 1

修復による環境リスクの低減

不法投棄による汚染に対する技術的修復の目標は、汚染を排除し、汚染に起因する環境リスクを低減し、汚染地の原状を回復することである。

課題として、以下の点があげられる。

- 修復技術の選択を合理的に進める方法を確認すること
- 修復による環境リスクの低減を適切に表現すること

このうち、修復技術選択の最適な手順は、図表 13 に例示するように、各技術が汚染物質および媒体にどのように適用されるかという情報を蓄積・整備し、その上に立って選定を進めるための手順に必要な基準を明確にすることによって確立することができる¹⁴⁾。従来は、図表中に記された定性的な適用性の判断基準や経験などに基づいて行われてきたが、今後はこれをできるだけ定量的な方法で行うことが重要である。これに関する研究開発は、例えば北海道大学の研究グループと民間企業との共同研究などによって行われている⁴⁾。

不法投棄が発覚した後は、現地および周辺の環境がどのような

状況におかれているかを把握することが求められる。人の健康へのリスクや生態系へのリスクにおいて起こり得る影響を知ることは非常に重要である。一方、平面的にも立体的にも広がりのある空間にわたって汚染の状況を迅速に把握する必要もある。現状では、土壌汚染や地下水汚染、大気汚染などに関する既存の調査・測定方法を用いてこのようなモニタリングが行われている。しかし、経費を要し、施工上の制約もあるボーリングなどに頼らねばならないこと、高密度電気探査法といった外部からの診断手法が開発されているものに精度の課題があること、簡易で迅速に多種類の汚染物質を検出・同

図表 13 修復技術の適用性評価と選択

技 術	汚染物質			対象媒体	
	VOC	重金属類	油類	土壌	水
拡散防止技術					
遮水壁	○	○	○	△	○
バリア井戸	○	○	○	△	○
反応壁	○	△	×	△	○
固化・不溶化	△	○	△	○	○
原位置処理技術					
揚水処理法	○	○	○	○	○
ソイルフラッシング	○	○	○	○	○
固化・不溶化	△	×	△	○	○
土壌ガス吸引法	○	×	△	○	○
原位置溶融固化法	○	○	○	○	○
電気分離法	×	○	○	○	○
エアースパーキング	○	×	○	○	○
バイオレメディエーション	○	×	○	○	○

○:適用性大, △:適用性小, ×:適用性なし

初期調査 → 浄化目標の設定 → 修復方法の選択 → 条件検討 → 代替案 (原位置外処理処分, 拡散防止, 原位置処理) → 修復技術の決定

参考文献¹⁴⁾を基に一部改変

定・定量する信頼性のある分析手段が未だ確立されていないこと、さらにこれらの限られた範囲の汚染状況データをもとに、汚染の全体像や周辺を含めて状況を把握する手段と手順も未確立である。

4 - 2

技術の安全性

産業分野ごとの安全に関連するデータによると、従来から廃棄物処理分野は事故の起きる確率が高い。また、技術的に比較的新しい方式の施設で事故事例が多い。

例えばガス化溶融炉の導入初期においてこのような事例がみられた。

豊島の中間処理施設内の溶融炉施設において、運転を開始して約4か月を経過した時点で小爆発事故が発生した¹⁵⁾。この原因は、対象処理物から発生した水素ガスを主とする可燃性ガスが輸送コンベヤ上部の空間にたまり、何らかのきっかけ（静電気と推測されている。）で発火・爆発したと結論づけられた。水素ガスは、豊島の場所において、掘削した廃棄物等の含有水分の除去と溶融性を良好にするために生石灰を混合する際

に金属などとの反応の結果生成する。そのため水素ガスの一定の放散期間が設けられている。しかし、かなりの時間経過後も溶融炉関連設備内で高温になると水素発生量が増す現象がみられた。さらに、設備内は負圧に保たれているが、質量の軽い水素は徐々にコンベヤ頂部付近にたまったと推測されている。再発を防止するために、中間処理施設での処理前の十分なガス放散と処理設備内での十分な換気、温度調整などが徹底されることとなった。

このような事故に起因するリスクを含めて、安全を確保するための基本的な方策、すなわちプロセスの異常を発生させない予防措置をとっておくこと、異常が発生しても事故にまで至らせない予防措置、そして万一事故が発生しても影響を最小限に抑える措置を含めた多重的な構造をとることが重要と考えられる。

前述の豊島では、現在施設の運転上の環境保全データをはじめ環境のモニタリング結果などについて、インターネットをはじめとしたさまざまな手段によって一般に公開している⁹⁾。このような情報の公開は、最近の環境保全施設においては積極的に行われるように

図表 14 不法投棄に対する防止対策事例

対策	実施内容	自治体
携帯情報端末現場監視システムの導入	GPS（全地球測位システム）・デジタルカメラに対応した PDA（携帯情報端末）の活用により画像や文字情報をリアルタイムで広域的に収集し、ネットワークシステムへの適用によって不法投棄の監視・指導体制を強化	栃木県、千葉県、静岡県
適正処理過程追跡実証実験委託	廃棄物運搬車両に GPS を取り付け、運搬車両が適正なルートをたどり、適正に廃棄物が処理されているかを画像で確認するシステムの実証実験を実施中	香川県
GPS 端末の産業廃棄物への投げ込み追跡実験	耐水・耐衝撃性のある GPS 端末を産業廃棄物に投入し、運搬車両の経路をインターネット上で確認できるシステムの実証実験を実施中	栃木県
不法投棄監視カメラの設置	廃棄物を投棄しようとする不審車両などを常時監視カメラにより自動的に検知・撮影し、リアルタイムで行政のパソコンに送信、情報が記録される	仙台市
収集運搬登録車両へのステッカー表示の義務付け	収集運搬許可車両等と違法に運搬処分を受託する車両を外見上容易に見分けるため、収集運搬登録車両へのステッカー表示を条例により義務付け	千葉県
不法投棄通報報奨金制度	情報提供により不法投棄者が判明した場合に情報提供者に報奨金を支給	群馬県桐生市など
産業廃棄物処理業者の格付け及び保証金制度	産業廃棄物処理業者の申請に基づき優良業者の格付け審査を行い公表。支障除去等の措置が必要となった場合の対応のため、産業廃棄物処理業者から保証金預り制度を実施	岩手県

科学技術動向研究センターにて作成

なった。

4 - 3

不法投棄の防止

不法投棄の根本的な問題点は、排出事業者が適正な料金を払わない場合があり、処理事業者の収益が十分確保されていないことにある。まずは、適正な事業性の確保が重要であり、そのためには処理事業者が優良事業者としての信頼性を高め、排出事業者が安心して委託できるように処理事業者の差別化を図っていくことが政策として必要と思われる。不法投棄を直

接に監視する立場にある地方自治体を中心に、不法投棄の事前防止に向けた新しい行政施策または試験的取り組みが実施されている。図表 14 にそのいくつかの例を示す。また環境省および(株) 国立環境研究所などによって、早期発見と影響の大規模化阻止のため人工衛星を利用した監視システムが開発され、実地的な適用性が検討されている^{16, 17)}。

4 - 4

資源循環

豊島における溶融スラグと飛灰

の有効利用(図表 6 および 7)にみられるように、単に汚染を修復し、環境浄化を図るだけでなく、修復処置対策を通じて資源の循環利用を実現することも重要である。

原状の回復という大きな命題のもとで資源の循環利用をどう位置づけ、どのように具体的にすることが課題である。その際、現地の地域特性に注目すべきである。豊島の場合には、既存の銅製錬工場の敷地内に中間処理施設を整備することで、溶融飛灰の有効利用の条件を高めている。

5 日本の環境保全技術の水準と共通基盤として進めるべき課題

環境保全に適用されるわが国の科学技術は、全般的には世界でも先端を行く技術を有している。例えば、科学技術政策研究所を中心に 2004 年度に実施されたデルファイ調査¹⁸⁾によると、環境分野の技術課題において、日本が優位である技術のトップに「レアメタルの国内供給源としての溶融飛灰からの効率的な金属回収技術」が挙げられている。また、「逆浸透

膜などによる経済的・実用的な海水淡水化、汚染水浄化技術」や「再生材(プラスチック、金属)のトレーサビリティ・ID 手法」も優位にあるとされている。

今後は、生活環境への科学技術のよりいっそうの貢献が望まれるようになる。環境保全を安全・安心な社会につなげるために、共通基盤として取り組むべき重点課題としては、次の項目が挙げられる。

- ①被害予測・影響評価・脆弱性発見のための解析手法・シミュレーション技術の研究開発
- ②異常を迅速に検知するための計測・センシング技術の研究開発
- ③耐災害性、信頼性の高い情報提供システムおよび情報ネットワークの構築
- ④リスクの総合的マネジメント

6 今後の不法投棄の予防・進行阻止と事後対策

不法投棄は決して短時日に起こるのでなく、むしろ従来の例から見ると、さまざまな兆候があり、かなり長い期間を経た後に顕在化する。不法投棄によって引き起こされる環境の破壊は、定常的な人為活動による場合とは異なる形態で発生し、通常とは異なる範囲と強度で影響を及ぼす。そして関連する既存の分野の方法論で対応可能な対象および内容もあるが、反面、特殊な条件を考慮した対応をとらなければならない場合もある。本課題については、予防・進

行阻止と事後対策を分けて考えていくべきである。

6 - 1

不法投棄の予防 または 進行阻止の観点から

これまでの経緯から見て、不法投棄に至りやすい社会的・経済的構造があり、また、不法投棄の場にされやすい地域や地形が存在する。これに対し、不法投棄の抑止や監視がより効果的に行われるよう支援するツールの提供が必要で

ある。例えば、関連運搬車両への GPS の適用、衛星監視および GIS などを用いた不法投棄の早期監視システムは、すでに実証試験段階に至っている。

衛星監視システムには、不法投棄が起こっても早期に発見し環境汚染への影響を含めたその拡大を防止する役割がある。現状で可能なシステムは比較的規模の大きい不法投棄に対しては十分な能力を備えているが、小規模の地域まで監視するためにはさらに分解能の向上が必要であり、雲量に影響

されやすいという大きな課題も残されている。さらに、現在利用可能な商用衛星周期では高頻度での監視がむずかしく、技術的課題以上にコストの問題がある。自治体を利用するためには、衛星画像情報の多目的利用により情報当たりのコスト性能をあげることが有効で、森林管理や防災などとの共通利用を図っていくことも一案である。このように、技術面の進展を図るとともに、多領域での連携・協力を重視する必要がある。

6 - 2

事後対策の観点から

(1) 環境への影響の迅速かつ

体系的な調査ツールの開発

不幸にも起こってしまった不法投棄の場合、採るべき対策の優先度を判断するうえで、環境に対してどれだけの影響があるのかという汚染状況の把握を迅速にかつ俯瞰的に行うことが非常に重要である。例えば、土壌と混合して堆積している廃棄物の種類・性状および含まれる有害な物質を、正確かつ迅速に知るためのツールの開発が必要で、しかも、それらは自治体など調査の主体が利用しやすいものであることが望まれる。今後、汚染地域で用いることのできる非破壊方式による分析装置の開発では、物質の検出精度の向上とともに測定時間の短縮が期待される。これらの開発では、研究機関と機器開発メーカーとの連携が必須であり、従来以上に技術交流促進の場を設ける必要がある。

(2) 環境リスクの特性に応じた

最適な汚染修復技術および適用方法の開発

不法投棄による環境リスクの態様は、汚染地域に存在する汚染物質と環境媒体の特性に依存する。修復技術の開発とともに、短期か

ら長期にわたるさまざまな時間範囲で起こる可能性のあるリスクを予測し、それに対し最適な修復技術あるいは各技術の組み合わせを選定するための適切な手順をシミュレーションできることが望ましい。コストの削減を図るために、汚染状況に応じて適用する単位技術や組み合わせを随時最適化する方法論の形成も必要である。

また、組成が複雑な廃棄物と土壌などとの混合物について、処理効率に優れ、環境への二次的な負荷を極力低減できる技術、あるいは最大限の資源化を可能とする技術開発を目指すべきである。発生した状況に応じて効率よく技術的対応を進めるためには、先行する汚染修復の事例、例えば本稿で紹介した香川県豊島などの事例情報を、共有化することが有効である。不法投棄への技術の適用は事案ごとに内容が異なるが、類似の土壌・地下水汚染地域が潜在的に多数存在することを考慮すると、修復技術のデータベース化を図り、問題が生じたときに対策をとるべき原因者や行政などが的確に利用できるようにしておく準備が必要である。これらの情報をもとに、行政・研究機関・民間企業が連携し、過去の経験のうえに新たな修復や事故を研究・解析し、技術的な基盤を確立していくことが望ましい。

謝 辞

本稿を執筆するに当たり、種々ご協力いただいた㈱クボタ環境リサイクル事業部 寺尾 康氏、田村 明彦氏、香川県環境森林部廃棄物対策課 滝本課長、香川県資源化・処理事業推進室 合田室長、香川県直島環境センター 森所長、三菱マテリアル㈱環境リサイクル課 辰亥課長、(独) 国立環境研究所循環型社会・廃棄物研究センター 大迫 政浩室長、川畑 隆常氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 文部科学省：「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」報告書：
http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/anzen/houkoku/04042302/all.pdf (2004)
- 2) 環境省編：循環型社会白書（平成16年版）、pp.3～41、(株)ぎょうせい (2004)
- 3) 環境省：産業廃棄物の不法投棄の状況について：http://www.env.go.jp/recycle/ill_dum/santouki/index.html (2005)
- 4) 古市徹監修／CDR研究会編著、有害廃棄物による土壌・地下水汚染の診断、pp.119～177、環境産業新聞社 (2002)
- 5) 花嶋正孝、高月紘、中杉修身：廃棄物の不法投棄による環境汚染—豊島の事例—、廃棄物学会誌、Vol.7、208～219 (1996)
- 6) 佐藤雄也、端二三彦：豊島産業廃棄物事件の公害調停成立—その経過と合意内容—、同上、Vol.12、106～116 (2001)
- 7) 青森・岩手県境不法投棄事案に係る合同検討委員会：技術部会報告書、平成15年6月28日 (2003)
- 8) 岐阜市産業廃棄物不法投棄対策検討委員会技術部会報告書 (2005)
- 9) 香川県：豊島問題ホームページ：<http://www.pref.kagawa.jp/haitai/teshima/>
- 10) 阿部清一、佐藤淳、岡田正治、後藤謙治、加納弘也、松浦幹郎：豊島廃棄物等の溶融処理～副成物の再資源化～、第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集、1522～1524 (2004)
- 11) 佐藤淳、岡田正治、後藤謙治、坂中一敦：豊島廃棄物の溶融処理と副成物の有効利用、クボタ技報、No.39、75～82 (2005)
- 12) 安福敏明、寺田隆彦、木川田一弥：ジオメルト工法によるダイオキシン類汚染土壌の無害化、日本機械学会誌、Vol.107、84～88 (2004)

- 13) 堀井安雄、塩山昌彦、吉崎耕大：紫外線技術の水中難分解性物質処理への適用、水環境学会誌、Vol.28、242～245（2005）
- 14) 峠和男、佐々木哲男、古市徹、石井一英：土壌・地下水汚染の修復技術選択方法のシステム化、第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集、1207～1209（2003）
- 15) 佐藤淳、後藤謙治、釜田陽介、榊原孝志、西原幸一：豊島廃棄物等の溶融処理～小爆発事故の原因と再発防止対策～、第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集、1519～1521（2004）
- 16) 大迫政浩、田崎智宏、川畑隆常：不法投棄等衛星監視システムの開発 不法投棄の早期発見のために、かんきょう、2004年8月号、42～43（2004）
- 17) 独 国立環境研究所：平成13、14、15年度環境省受託業務報告書、不法投棄等衛星監視システム開発調査（2002、2003、2004）
- 18) 文部科学省：科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査デルファイ調査報告書：<http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/rep097j/idx097j.html>（2005）

執筆者



客員研究官

川本 克也

独立行政法人 国立環境研究所
循環型社会・廃棄物研究センター
資源化・処理処分技術研究室 室長



工学博士。民間企業勤務、大学教員などを経て現職。化学物質の環境挙動評価、廃棄物焼却処理などに伴い排出される有害物質の測定と処理性の評価などに加え、現在ではガス化・改質による廃棄物からの水素製造を主とする資源化技術開発に取り組んでいる。



環境・エネルギーユニット

浦島 邦子

科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>



工学博士。環境に影響を与える物質（排ガス、排水、廃棄物など）を無害化する研究に主に従事後、現職。

微小重力利用の研究動向

—宇宙環境と地上環境での研究の競争と協調—

辻野 照久
推進分野ユニット

1 はじめに

1957年に世界で最初に打ち上げられた人工衛星は旧ソ連のスプートニク1号であるが、同じ年に打ち上げられたスプートニク2号には早くも1頭の雌犬が搭載され、宇宙における初めての動物実験が行われた。この犬は、世界初の軌道周回生物となり、宇宙におけるライフサイエンスの先駆的成果となった。その後、多くの人工衛星による宇宙探査により、宇宙空間の強い放射線や高真空などの特殊な環境が徐々に明らかになり、特に衛星内で得られる長時間の微小重力環境を積極的に利用した科学実験が行われるようになった。

我が国でも、宇宙環境を利用した実験を行うようになってから既に20年以上が経過し、基礎的な

レベルで新しい知見が多数得られている。今後は微小重力を利用して従来にない機能を持たせた製品の製造や新しい医薬品の開発など産業応用及び民生利用が期待される段階に移る。既に稼動している国際宇宙ステーション（ISS）の米国やロシアのモジュールを利用して、高品質なタンパク質結晶の生成や3次元フォトニック結晶の生成など我が国独自の技術開発を含む宇宙実験が行われており、将来的には宇宙で継続的に製品生産が行われるようになる可能性もある。また、我が国が本格的に宇宙環境を利用するためには、ISSにおいて、日本実験モジュール「きぼう」（JEM）の運用が待望されている。「きぼう」の完成までま

だ2～3年を要すると見込まれるが、それまでの間にも種々の実験機会を活用して、高品質なタンパク質結晶や3次元フォトニック結晶に続く付加価値の高い新物質の創製など新しい実験テーマの発掘も行っていく必要がある。

本稿では、微小重力環境を利用した実験の主なテーマ、実験機会の概要、これから進展が期待される応用化の動向などを紹介する。ISS／きぼうの利用だけでなく、宇宙と地上でさまざまな方法を活用して、微小重力環境を利用した実験（重力加速度依存現象の科学的解明）を推進すべきであると考えられる。

2 微小重力環境と実験テーマ

地球上のあらゆる物体は、その内部構造も含めて、地球の中心との間に働く万有引力の支配を受ける。重力の元となる重力加速度の大きさは「1G」で表わされ、およそ 9.8m/s^2 である。しかし、地球を周回する人工衛星の内部では、衛星に働く地球の重力と遠心力が釣り合うことにより、 $1\mu\text{G}=10^{-6}\text{G}$ （ 0.000001G ）という極めて微小な重力しかない状態になる。自由落下するカプセルの内部でも、物体が空中を浮遊するような状態にな

る。これを微小重力（マイクロ重力）環境といい、このような特殊環境を利用して微小重力実験が行われている。

これまでの世界各国の微小重力実験は、ライフサイエンス実験と物質科学実験が多く行われた。我が国の宇宙実験の成果と教訓については、(株)宇宙航空研究開発機構（JAXA）が2005年3月に発表した資料¹⁾にまとめられており、宇宙実験の件名ごとに、研究者や実験目的、結果などを知

ることができる。

2 - 1

ライフサイエンス実験

ライフサイエンス（生命科学）は、独立行政法人科学技術振興機構（JST）が作成している編別分類表²⁾によれば、①生物科学、②生化学、③生物の育種と防疫、④培養工学と微生物などの利用、⑤薬学、⑥医学、⑦生体工学、の7つに分類される。微小重力

実験では①、②、③及び⑥について、これまでに実際に実験が行われている。

①生物科学

生物科学はさらに遺伝学、細胞学、微生物学、植物学、動物学、生態学、放射線生物学などに分類されるが、このうち次のような実験が行われている。

- 細胞培養実験（幹細胞の分化、3次元細胞培養、重力感受性遺伝子の網羅的解析）
- 植物実験（ライフサイクルの完結、重力屈性実験）
- 閉鎖生態系生命維持システム（ECLSS）（生物循環系の確立、微生物の安全性評価）
- 小動物実験（両生類や魚類、マウスを用いた生殖、骨・筋への影響、放射線影響実験）

②生化学

高品質なタンパク質、酵素の結晶生成実験

③生物の育種

植物の種子や動物の精子などを搭載し、微小重力と強い放射線が同時に作用する宇宙環境において生物の品種改良を図る

④宇宙医学

宇宙飛行士自身が被験者となって宇宙環境による人体各部の機能変化や、帰還後に備えた対策などの研究が幅広く行われており、宇宙環境医学として発展してきた。

2 - 2

物質科学実験

物質科学に関する実験には、結晶成長、流体物理、燃焼などがある。

り、それぞれ特有の実験装置を用いて行われている。今後、高品質かつ高機能のナノ材料を創成する有力な手段として、研究者が微小重力環境をごく普通に利用する時代となる可能性もある。

(1)結晶成長

溶液からの結晶成長など、特殊な装置により、高品質な単結晶生成と、結晶成長メカニズム解明の研究が行われている。溶液から結晶を析出する実験だけでなく、複数の材料を均質に混合する実験などで微小重力環境利用の有効性が示されている。現在、2005年12月から開始された宇宙での3次元フォトリソグラフィ結晶生成実験³⁾の成果が注目されている。

宇宙環境医学

①宇宙環境が人体に及ぼす影響の研究動向

ISSが完成すると、我が国の宇宙飛行士が半年間程度の長期滞在を行うようになる。また、民間の商業ベースの宇宙旅行の機会が拡大しつつあり、一般人でも宇宙に行けるようになる時代もそう遠くないといわれている。そのような活動を円滑に行うために、宇宙環境が人体に及ぼす影響について研究が行われている。

- ①骨格：長期間の宇宙飛行で、骨量が減少する。この対策としては、宇宙機内での運動や骨粗しょう症の治療剤の投与などがある。
- ②筋：宇宙環境では重いものを持つということがなく、自身の運動も体重の制約がなく自由に動けるため、長期間宇宙飛行すると筋力が低下するといわれる。
- ③循環系：長期間の宇宙飛行では心肺機能が低下する。宇宙環境では赤血球量が減少し、血液やリンパ液などの体液が上半身にシフトし、尿の排泄が促進されて体液が2ℓほど減少する。このため、帰還直前にスポーツドリンクなどを飲んで体液を補っている。
- ④感覚器：短期間の宇宙飛行では、人によって宇宙酔いが見られる。宇宙酔いにより胃部に不快感を覚え、嘔吐やめまいを起こす。その発生メカニズムは諸説あるが、上下を検知する感覚器官が目と耳で異なった情報を出すために感覚混乱が起きるためとする説が一般に支持されている。
- ⑤精神面：宇宙船という閉鎖環境での長期間に亘る滞在で、宇宙飛行士には南極観測隊員や潜水艦乗務員などと同様

の精神的ストレスがある。この対策として、長期閉鎖環境滞在のストレスに強い宇宙飛行士の選抜、ストレス耐性を高める地上での訓練、地上との交信による支援などが行われている。

②宇宙における健康管理

もし宇宙船の中で宇宙飛行士が突然病気になった場合、他の搭乗者には十分な医学的知識があるとは限らず、搭載された医療機器も充分ではなく、地上との交信可能伝送量に限りがあるなど、本格的な遠隔医療（テレメディシン）を行うには非常に悪い条件にある。そのため、病気の予防や早期発見を行うべく、宇宙飛行士の健康管理が重要な課題になっている。

また、宇宙飛行士の健康を維持するため、栄養や代謝を考慮し、宇宙環境で食べやすい宇宙食の開発が行われている。2005年7月のスペースシャトルミッションでは、塊状のインスタントラーメンが宇宙食として採用された。2005年10月の中国の有人宇宙飛行では高価な食材を用いた中華料理が宇宙食に加えられた。

③宇宙からの帰還に備えたトレーニング

旧ソ連の宇宙ステーションでは、搭乗中に室内トレーニングを行い、帰還時の身体能力の保持を図った。もしこのようなトレーニングを行わないで長期間宇宙飛行すると、帰還後自力で立てなかったり、不用意な運動で骨折したり、筋肉を傷めたりすることになる。

(2)流体物理

微小重力環境では温度差や比重差による対流は生じないが、温度差等による表面張力の差に起因する対流が顕在化する。この現象をマランゴニ対流といい、地上では分離できないこの効果を応用した実験や気液相変化等に関する実験が行われている。

(3)燃焼

微小重力環境では地上とは異なる燃焼の状況が見られる。例えば炎が球形になることが知られている。燃料の一部を細かい霧状にして、火炎伝播を詳細に観察する実験などが行われている。

(4)熱物性の測定など

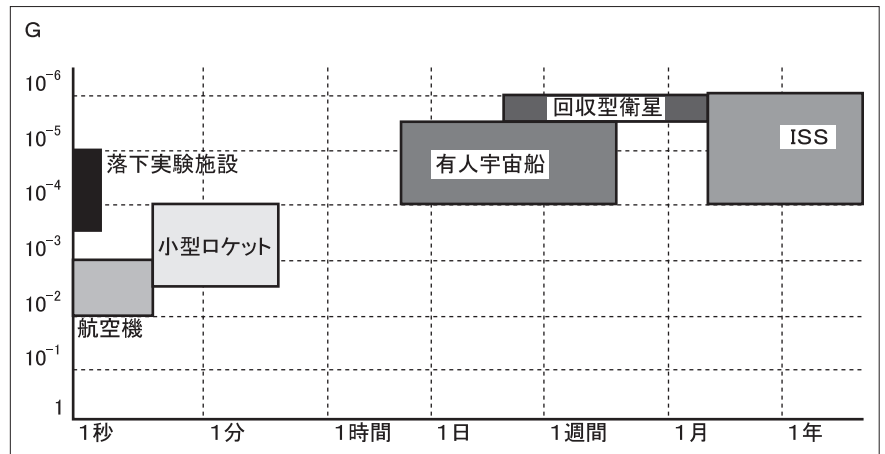
微小重力環境では無容器で高温

融体を扱うことが可能となることから、半導体や金属融体の熱導率測定、拡散定数の測定などが行われた。これにより結晶成長などの物性値が得られると同時に、過冷却高温融体という新しい科学技術分野が生まれつつある。容器からのコンタミネーションがない結晶成長も注目されている。

3 微小重力環境の利用機会

微小重力環境の利用機会としては、落下実験施設、航空機、小型ロケット、回収型衛星、スペースシャトル、国際宇宙ステーションなどがあり、それらの特徴を微小重力のレベルと時間の範囲として図表1に示す。

図表1 各種の微小重力実験手段の重力レベルと時間の範囲



3 - 1 落下実験施設

落下実験施設とは、落下カプセルに実験装置を搭載し、塔や縦坑の最上部から自由落下させて、最下部の制動部に到達するまでのごく短時間、カプセル内を微小重力環境にする施設である。実験時間がごく短いために分野によって向き不向きはあるが、落下実験施設において微小重力環境を得ることは最も安全、簡便かつ安価な方法であり、微小重力レベルも比較的良好で、多数回の安定した繰り返し実験が可能である。米国と欧州では主要な落下実験施設は公的な機関で運営されているのに対し、日本では民間企業として運営されている。

岐阜県土岐市にある落下実験施設は(株)日本無重量総合研究所(MGLAB)⁴⁾が運営しており、(独)日本原子力研究開発機構が保有する東濃鉾山の縦坑の1つを実験施設に利用したものである。縦坑の深さは約150mあり、その中に

設置された真空チューブ内でカプセルを自由落下させる。上部の100mが自由落下区間、下部の50mがゴム管による制動区間である。真空チューブ内は約4Pa程度の真空にしてあり、空気抵抗による微小重力レベルの劣化を防止している。得られる微小重力レベルはおよそ $10^{-5}G$ で、45秒間の実験を行うことができる。利用者は直径720mm、高さ885mmの円柱形の空間内に納まるように落下カプセルに搭載する実験装置を設計する必要がある。最近では年間300～400回程度の落下実験が行われている。平成7年の運用開始以来、累計の落下回数は6,000回以上に達する。その大部分は基礎的研究であり、主にJAXAの公募地上研究制度の助成を受けた国・公立大学などの実験や公的機

関の実験が行われている。実験分野は、流体実験、燃焼実験、材料実験、ライフサイエンス実験のほか、新規開発の宇宙用装置の技術実証実験などが行われている。小惑星探査機「はやぶさ」の弾丸打込みによる試料採取システムの動作確認実験もMGLABにおいて行われた。

欧州ではドイツのブレーメン大学応用宇宙技術・微小重力センター(ZARM)に高さ146mの落下塔があり、欧州宇宙機関(ESA)や欧州各国の落下実験を一手に引き受けている。また、米国では米国航空宇宙局(NASA)のルイス研究センター(LeRC)に145mの落下塔があり、中国では北京市中関村地区にある中国科学院力学研究所の国家微小重力実験室(NMLC)に高さ110mの落下塔がある。

3 - 2

航空機による放物線飛行

航空機による微小重力実験は、米国、欧州、日本などで国の機関や民間企業により行われている。地上での微小重力実験手段の中で、唯一有人で実験が行えることが大きな特徴である。わが国では、愛知県豊山町にあるダイヤモンドエア サービス(株) (DAS)⁵⁾ がガルフストリーム 2 (図表 2) や MU-300 などの航空機を用いて 1 回約 20 秒の微小重力状態が得られるような放物線飛行 (パラボリックフライト) を繰り返し行うサービスを提供している。例えば、DAS は 2006 年 4 月に簡易実験飛行を計画しており、1 人約 30 ～ 40 万円で 100 秒間 (20 秒×5 回) の微小重力実験を行える。微小重力環境のレベルは落下実験施設より低く、 $10^{-2}G$ 程度である。航空機の機体が十分大きいと、比較的大きな実験装置を搭載することが可能である。一方、微小重力の前後に機内が $1.5 \sim 2G$ となることは搭乗者にとって肉体的な負担となる。

米国では、NASA が DC-9 を保有し、スペースシャトルを利用して実験を行う各国の科学者に利用機会を提供している。また、民間では Zero-G 社が一般人の無重力体験飛行も含めて営業を行っている。

欧州ではフランス国立宇宙研究センター (CNES) 等が、1988 年からカラベル航空機、1997 年か

図表 2 DAS のガルフストリーム 2 (全長約 24m)



らエアバス・ゼロ G (A300-0G) 機を用いて微小重力実験を行っている。

3 - 3

小型ロケット

小型ロケットを弾道飛行させて微小重力環境を得る方法は、かつて日本では繰り返し行われ、また今後も新たなロケットにより利用機会が提供されるようになる可能性がある。小型ロケットにより微小重力環境を得る方法は、打上げ及び回収時の大きな加速度環境と落下時の衝撃への配慮が必要であり、分単位の短時間ではあるが、主に物質科学に関するさまざまな微小重力実験を行うことができる。欧州ではドイツやスウェーデンが独自の小型ロケットを用いて微小重力実験を行っている。

我が国では、旧宇宙開発事業団 (現 JAXA) が、1991 年から 1998 年にかけて TR-IA ロケットにより計 7 回の微小重力実験を行った。打上げ後、空気抵抗が非常に小さくなる高度 100km から弾道飛行に入り、高度 270km くらいまで到達して再び高度 100km に落下するまでの約 6 分間、 $10^{-4}G$ 以下の比較的良好な微小重力環境が得られた。実施された実験は物質科学実験が中心で、主な実験テーマとしては①溶液からの結晶成長実験、②コロイド結晶実験、③流体物理実験、④沸騰実験、⑤半導体材料創製、⑥拡散実験、⑦燃焼実験などがあった。

我が国では現在、特定非営利活動法人 (NPO) 北海道宇宙科学技術創成センター (HASTIC) が固体燃料・液体酸化剤を推進剤とするカムイ型ハイブリッドロケットの性能を向上させて微小重力実験機会を提供するための開発を進めている⁶⁾。目標高度は 110km で、約 3 分間の微小重力環境を目指している。北海道赤平市にある

HASTIC 赤平実験場において燃焼試験が繰り返し行われている。

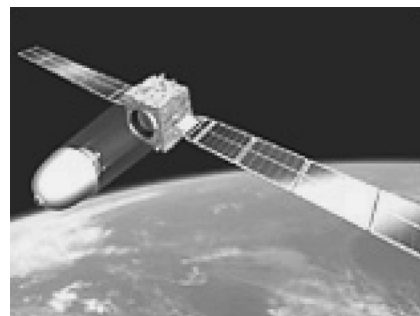
欧州ではドイツが 1977 年から Texus ロケット、1991 年から Maxus ロケットによる微小重力実験を行っている。また、スウェーデンは 1987 年から MASER ロケットで欧州宇宙機関の微小重力実験を 10 回行っており、今後も継続される予定である。

3 - 4

回収型衛星

以上に述べた地上付近での実験では、実現できる微小重力環境は数秒間から数分間である。衛星の内部で無人実験を行い、地上に無事帰還させることができれば、飛躍的に長時間の微小重力環境を得ることができる。衛星の大きさや太陽電池パネルの有無などにもよるが、数日から数ヶ月あるいは 1 年以上の周回飛行の全期間にわたって、同時に複数の実験を行うことが可能である。このような回収型衛星による微小重力実験は、日本、中国、欧州、ロシアで行われており、今後も引き続き利用することができる。我が国では過去に宇宙実験・観測フリーフライヤ (SFU) や EXPRESS などの回収型衛星が打ち上げられたが、今後利用可能な回収型衛星としては、次世代型無人宇宙実験システム (USERS) がある。図表 3 に USERS 衛星の外観と、カプセル分離の概念を示す。

図表 3 USERS 衛星



USERS は、長期間にわたる宇宙環境を利用した実験を実施した後、自ら帰還することが可能なシステムとして、経済産業省並びに(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて1995年より(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)が開発を進めて来たプロジェクトである。その初号機は2002年9月10日にH-IIA3号機により打ち上げられ、約半年にわたって良好な微小重力環境下で超電導材料製造実験を実施し、目的とする場所への帰還に必要な軌道制御と調整を行って、2003年5月30日に小笠原東方沖の計画された場所に着水帰還し、無事宇宙実験の成果物を回収した。この成功により、大気圏再突入に必要な熱防護技術とともに、予定した着水場所に帰還する軌道制御技術を確立することができ、無人宇宙実験システムを実利用する技術を確立することができた。現在このシステムの利用ガイド⁷⁾が整備され、USERS衛星の利用推進が図られている。しかし、現状では打上げ計画はなく、国がアンカーテナントとなって一定の実験機会を確保しない限り、民間の発意だけで2号機の打上げが実現することは難しいと思われる。

3 - 5

有人宇宙船 (スペースシャトルなど)

米国のスペースシャトルは、2005年までに114回打ち上げられ、主に衛星放出、宇宙実験、ISS建設などのミッションを行ってきた。その内訳を図表4に示す。

114回のうち、主に宇宙実験が目的であったミッションとしては、米国の微小重力実験USML及びUSMP、ドイツのD-1及びD-2、国際微小重力研究室IML-1、IML-2及びニュー

ロラブ、日本の第1次材料実験(FMPT、「ふわっと'92」)などがあつた。なお、最近ほとんど連続して行われているISS建設ミッションにおいては、余剰空間及び重量余力を利用して学生による小規模な実験なども行われている。

日本初の本格的な宇宙実験であつたFMPTは、43テーマ中34テーマが日本の実験、2件が日米共同、7件が米国の実験であつた。日本の実験には21種類の実験装置が製作され、毛利衛宇宙飛行士がペイロード・スペシャリスト(PS)として実験実施の中心となった。スペースシャトルでは最大2週間にわたる微小重力環境を連続的に得ることができ、多様な実験を搭乗宇宙飛行士の支援を得て同時に実施することができる。しかし、米国では、長期的な宇宙実験を行いうる国際宇宙ステーションの建設に手間取る一方、スペースシャトルの退役が5年後に迫り、残された飛行機会が少なくなっている。もはやスペースシャトルで宇宙実験だけを行うミッションを設定する余裕は全くない状況である。

中国では独自の有人宇宙船「神舟5号」(2003年)及び「同6号」(2005年)において、宇宙飛行士席と隣接して微小重力実験用のラックが搭載され、実験が行われた。

3 - 6

国際宇宙ステーション (ISS)

(1)ISSの最近の状況

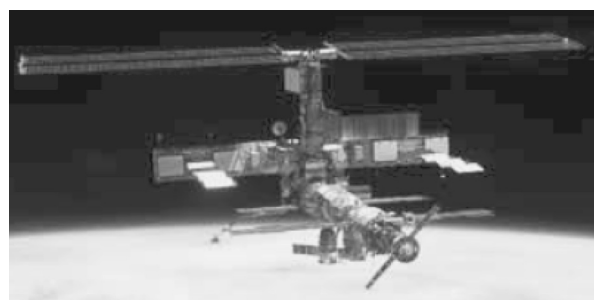
宇宙ステーションは長期にわたり継続的に有人宇宙飛行を行うための施設であり、定常的な宇宙実験室あるいは宇宙工場ともなりうる。しかし、旧ソ連のミールや米国のスカイラブなどの過去の宇宙ステーションでは、長期滞在のための医学研究、天文観測、地球観測、偵察などのミッションが比較的多数を占め、微小重力実験の占める割合は相対的に小さかった。

国際宇宙ステーション (ISS)計画は、1984年に米国のレーガン大統領が提唱し、1985年に欧州・カナダ・日本が参加して開始された。当初の計画では1990年代初頭には建設が始まり、20世紀のうちに完成する予定であつたが、スペースシャトル事故などにより建

図表4 スペースシャトル主要ミッションの内訳

ミッション		回数
主に衛星放出、回収または修理		45回
主に宇宙実験	主にライフサイエンス実験	15回
	主に物質科学実験	7回
	主に地球観測や天文観測などの実験	8回
主にISSの部品や補給物資の輸送(シャトル・ミール計画を含む)		27回
その他(試験飛行、ミッション不明など)		10回
失敗(事故)		2回

図表5 2005年時点でのISSの外観



設作業が停滞しており、完成が10年以上遅延する見込みである。

1993年からロシアがISS計画に参加し、ロシアの宇宙ステーション「ミール」と同様の機能を持つ基本機能モジュール「ザーリャ」(Zarya= 暁、ロシア製で米国が保有)が1998年11月に打ち上げられ、その後2000年7月にロシアのサービスモジュール「ズヴェズダ」(Zvezda = 星)、2001年2月に米国の実験モジュール「デスティニー」(運命)、同年4月にカナダのロボットアームなどが取り付けられて、宇宙飛行士が常時2名滞在する初期のISSの体裁を成すに至っている。図表5に2005年時点でのISSの外観を示す。

現在はISSに米露各1名、計2名の搭乗員が常時搭乗しており、米国にとっては過去に経験のない、長期間の宇宙滞在に伴う宇宙環境医学のデータ取得や参加各国の宇宙実験がいくつか行われている。

今後、欧州実験モジュール(コ

ロンバス)や日本の実験モジュール「きぼう」の取付けが予定されており、2006年3月2日の宇宙機関長会議(HOA)において、2010年までに18回(予備2回を含む)のスペースシャトル打上げが合意された。この中で、「きぼう」の打上げは8回目、9回目及び12回目の3回に分けて打ち上げられる予定となった。時期はまだ明確ではないが、2006年3月のHOAでの合意により、「きぼう」の打上げ開始が2007年度にも実現する見通しが出てきた。復活2号機が2006年7月に無事に打ち上げられるかどうか、その後の計画の成否を左右するというぎりぎりの状況である。米国・欧州・日本・ロシアの実験モジュールがすべて稼働し始め、日本人を含む数名の宇宙飛行士が常時滞在することになることで、本格的な宇宙実験開始となる。

(2)ISSへのアクセス

現在、ISSへの搭乗員輸送や物

資補給をロシアのソユーズ宇宙船(3人乗り)やプログレス補給船が一手に引き受けている。

ロシアは2000年4月に宇宙ステーション・ミールへ向けてソユーズ宇宙船を打ち上げ、最後の搭乗員輸送を行った後、同年10月以降、専らISSへの搭乗員輸送のために毎年4月と10月にソユーズ宇宙船を打ち上げている。搭乗員交代に伴って8日間ほどの引継ぎ期間があり、ソユーズ宇宙船の座席が1つ余っていることを利用して一般旅行者を短期間ISSに搭乗させる場合もある。2006年10月の打上げでは、日本人旅行者が搭乗する可能性がある。

一方、物資補給については、2000年2月から2005年12月までの約6年間で、プログレス打上げ回数は25回に及び、このようなロシアの確実性の高い輸送能力は、ISSの国際パートナーから高く評価されている。

4 微小重力環境利用研究の動向 —高品質なタンパク質結晶生成の場合—

4-1

タンパク質研究の概要

生物は自らの生命を維持するために、食物消化、エネルギー供給、神経、免疫等の生体機能を持っているが、そのような働きは2万種類以上のタンパク質によって生み出されていると言われる。タンパク質の種類とその機能はアミノ酸の配列の仕方と立体構造で決まる。タンパク質の構造と機能のデータベースが整備されれば、複雑な生命現象が定性的・定量的に理解できるようになる。また、疾病の原因となる標的タンパク質の構造・機能から、治療薬品の設計を合理的かつ効率的に進めることも

可能となる。このようなタンパク質の構造・機能の解析を通じて、創薬やテイラーメイド医療などの革新的予防・診断・治療技術へ応用する研究、新しい食品の開発などが大学、研究機関及び企業で行われている。

タンパク質の構造を研究するためには、目的とするタンパク質を分離して分析用の試料を調製する必要がある。タンパク質工学の研究は主に地上で調製された試料を用いていたが、良質な試料の入手は極めて困難である。ある研究者によれば、研究開始後最初の5年間で1個しか結晶を作れなかったという例もある。

宇宙で微小重力環境を利用して結晶を作製する方法は宇宙実験が

開始された当初から考えられており、既に20年以上の技術開発期間が経過している。これまでに行われたいくつかの微小重力実験の中で、高品質なタンパク質結晶生成は現在のところ技術的に最も成熟した段階にある研究である。地球の重力と遠心力が釣り合う宇宙船内では、重力が $10^{-6}G$ 程度となり、タンパク質結晶周辺で溶媒との密度差により対流が生じることがなく、結晶の成長速度が均一となって結晶構造の欠陥が減少する。同時に結晶核の形成数が抑制され、数は少ないが大型の結晶を生成できる。

(株)宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、タンパク質結晶試料を得るため、数回のシャトル実験やISSを

利用した「高品質タンパク質結晶生成プロジェクト」などの一連の宇宙実験を実施し、宇宙での高品質なタンパク質結晶生成を可能とする段階まで到達した。その成果は「微小重力環境を利用した高品質蛋白質結晶生成技術の進展と課題」⁸⁾などで公表されている。

一方、欧米などでは、宇宙実験で高品質な結晶を得ることの合理性に対して懐疑的な意見があり、またスペースシャトルの空中分解事故で実験成果が失われるというトラブルもあって、宇宙でのタンパク質結晶作製の実験はなかなか進展しなかった。

4 - 2

タンパク質の構造解析

タンパク質の構造を知るための計測手段として、X線回折法がよく利用されている。この場合、タンパク質は結晶化している必要があり、しかもできるだけ大型の方が望ましい。兵庫県佐用町にある(財)高輝度光科学研究センター(JASRI)内に設置された(独)理化学研究所播磨研究所では、JASRIの大型放射光施設であるSPring-8を使用して、小さな結晶から高精度の構造画像を1日で数十個分得られるような自動実験システムを確立している。

地上で調製された試料の構造解析をより簡便に行う方法として、理化学研究所横浜研究所においては、分子量が60,000以下の比較的小さい構造のタンパク質について、核磁気共鳴装置(NMR)を用いることで、結晶化を行うことなく構造解析を行っている。

また、磁性をもつ特殊なタンパク質に対しては、(独)産業技術総合研究所(AIST)や(独)物質・材料研究機構(NIMS)などで超電導磁石による磁気浮上により擬似的に低重力環境を作り出し、高品質な結晶を作りやすくする試みがな

されている。

将来的にはピーク輝度がSPring-8の1億倍にもなるX線自由電子レーザー(X-FEL)により、分子量の大きいタンパク質もそのままX線分光分析ができるようになる可能性がある。この装置の実現時期は2010年以降と見込まれる。X-FELが実現すれば宇宙でのタンパク質結晶製造は必要なくなるかどうかは、現時点では断言できない。地上と宇宙のさまざまな手段で構造解析を行ってみて、最も優れた解析結果を採用するという考え方が妥当であると考えられる。

4 - 3

宇宙環境における
タンパク質結晶作製の
4つの課題

宇宙でのタンパク質結晶生成を実現する上での課題は、①地上で得られないような高品質の実現、②コスト低減、③ターンアラウンドタイム(研究者の手元に返ってくるまでの所要時間)の短縮、④支援体制の充実、などである。以下にこれら4つの課題について、これまでの到達状況と今後の目標について述べる。

(1)タンパク質結晶の品質の評価尺度

タンパク質結晶の品質は結晶構造の分解能を用いて表わされてい

る。分解能はオングストローム(Å、0.1ナノメートル)単位で表わされ、値が小さいほど分解能が高く、結晶が高品質であることを表わす。例えば、分解能が2Å程度の場合はタンパク質分子の側鎖の構造を正確に決めることができ、1Åであれば水素原子まで識別できる。宇宙で作製された結晶と地上で作製された結晶の品質を比較するため、アルファアミラーゼとリゾチームについて対照試験が行われた。宇宙で作製されたアルファアミラーゼ結晶は、SPring-8の12B2ビームラインでX線回折が行われ、0.89Åの過去最高分解能が得られた。一方、地上で作製されたアルファアミラーゼ結晶の分解能は同じ装置で1.12Åであった。これらの結晶の電子密度図を図表6に示す。リゾチームの場合には、宇宙で作成された結晶の分解能は0.88Å、地上で作製された結晶の分解能は1.08Åであった。

地上での結晶調製において、さまざまな工夫や試行錯誤により3Åの分解能の結晶を1.5Å程度まで改善できたケースもあるが、分解能1Å以上(<1Å)が得られる結晶の実現は極めて困難である。世界最高水準と考えられる0.6Å台の分解能の画像を取得した欧州の研究者は、今後も宇宙で作製するタンパク質結晶に対して非常に強い期待を持っており、コ

地上における反磁性タンパク質単結晶作製の例

タンパク質結晶の作製には数日間から数週間という長時間がかかるが、タンパク質の種類によっては、必ずしも微小重力環境でなくても、それに近い環境であれば結晶を作製しやすくなることもある。例えば、反磁性のタンパク質(フルクトース・ビス・ホスファターゼ、リゾチームなど)を強磁場内に置いたときに得られる0.7G程度の低重力でも結晶生成の効果が現われる。また、(独)物質・材料研究機構(NIMS)と広島大学の共同研究では、超電導マグネットによる10T(テスラ)程度の強磁場の中で擬似微小重力環境($10^{-3}G$ 程度)を作り、反磁性タンパク質の高品質結晶を得ることができた。一方、NASAは回転槽型の実験装置を用いて地上で擬似微小重力環境を得ることに成功した。これらは、地上で比較的容易に実現可能な低重力環境や擬似微小重力環境を長時間継続するという応用例である。

ストや所要時間、乏しい打上げ機会などのデメリットを超越して、例えば日本の装置でも宇宙環境を利用した結晶作製の機会が得られるならば有料で利用したいと述べている。コストや利用機会の制限などの条件を勘案して、どのようなタンパク質試料をどのようなタイミングで宇宙へ送ることが有効なのかを見極められるようになることも必要と思われる。

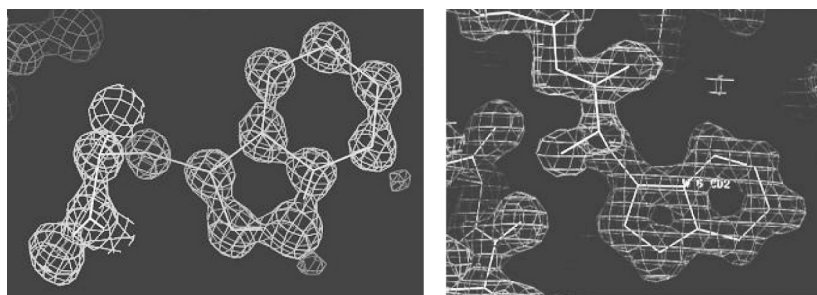
(2)タンパク質結晶生成コストの低減

2003年から2005年にかけてISSを利用して行われた宇宙実験により、宇宙船内の長時間微小重力環境を利用すれば、高品質のタンパク質結晶が得られることが確認されるようになってきた。これらの実験過程で、次のような技術開発が行われたことが注目される。

①温度制御：装置の温度環境を20℃に保つことが重要である。初期の実験では、船内の温度上昇などでせっかく作製された結晶が一部溶解してしまうという失敗があった。温度を20℃程度に安定に保つため、融点21℃のアルカン（ヘプタデカン）を試料と一緒に搭載すること、真空断熱材を使用すること、回収時に結晶が搭載されるソユーズ宇宙船の室内温度を低めにするなどの措置がとられた。これらの対策により、高品質タンパク質結晶を一定の温度環境で作製し、確実に地上に回収する技術が確立された。

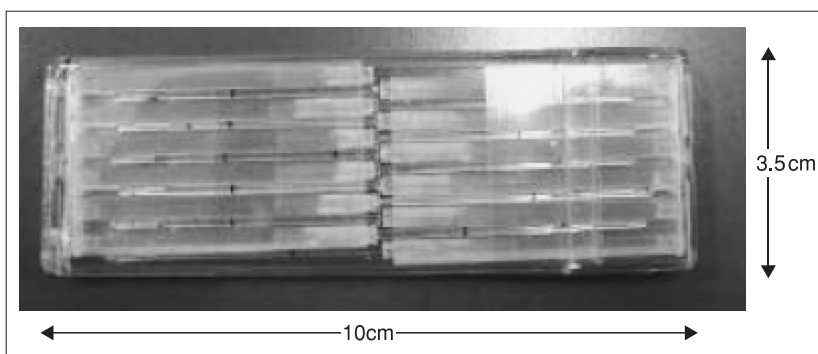
②タンパク質結晶作製装置の改良：欧州宇宙機関（ESA）とスペイン・グラナダ大学が共同で開発した装置であるタンパク質結晶作製装置「GCB」（Granada Crystallization Box）は、溶液漏出などの不具合が見られた。これに対して、JAXAはゲルチュ

図表6 アルファアミラーゼ結晶の電子密度図



左：宇宙で作製、右：地上で作製。表紙カラー写真参照（SPRING - 8 BL12B2 で取得）

図表7 JAXAのタンパク質結晶作製装置（JCB）の外観



ーブ（GT）法を適用することで確実に結晶成長が行われるように改良した。改良された装置はGCB-GTと呼ばれる。

さらに、JAXAはGCBよりも10倍程度実装密度を高くすることができるタンパク質結晶作製装置「JCB」（JAXA Crystallization Box）を開発した。図表7にJCBの外観を示す。GCB-GTはガラス細管6本でタンパク質1種類だけであるのに対し、JCBは12本のガラス細管で最大12種類のタンパク質または同一タンパク質で12条件の試料を搭載できる。これは結晶作製コストの引き下げに寄与する改良である。

2005年12月22日にロシアのプログレス補給船により、我が国のタンパク質結晶作製実験装置が高度400kmの軌道にあるISSへ向けて打ち上げられ、2006年4月9日にソユーズ宇宙船で帰還するまで、ロシアのサービスモジュール「ズヴェズダ」において3ヶ月間に及ぶ実験が行われた。この実験

は、我が国の高品質タンパク質結晶作製技術の開発の最終段階に位置づけられる。この実験では、11個のJCB及び34個のGCB-GTからなる装置一式に42種類のタンパク質が搭載されている。今後、JCBの採用により低コストでの実験機会を増やし、民間企業や海外の研究者から見ても宇宙環境を利用しやすくなることが望ましい。

(3)タンパク質結晶作製の

ターンアラウンドタイム短縮

これまでに各国で行われてきたタンパク質に関する実験の実施状況の一部を図表8に示す。

これまで、宇宙でのタンパク質関係の実験は米欧が先行し、我が国はキャッチアップ型で追従してきたと言える。

図表8に示す各種の実験のうち、インシュリンの分離とは、高純度のインシュリンを分離製造することを目指したもので、結晶試料の作製には相当しない。品質やコストの面から、宇宙でインシュリンなどの製造が行われるよう

図表8 タンパク質関係の実験の主な経緯

実施年月	実験機会	実施国	実施内容、件数など
1983～2002	スペースシャトル	米国	インシュリン分離など 54 件
1983～2002	スペースシャトル	欧州	13 件
1992.1	スペースシャトル	国際	IML - 1
1992.9	スペースシャトル	日本	FMPT (酵素など)
1993～2000	スペースシャトル	米国他	スペースハブ (民間)
2003.1 帰還失敗	スペースシャトル (STS - 107)	日本	酵素・病因タンパク質・動物レクチンなど 10 件
2003.2～2006.4	ISS ディスティニー・ズヴェズダ	日本	高品質タンパク質結晶生成プロジェクト (6 回実施)

になる可能性はないと見られている。一方、タンパク質結晶生成は、地上での困難性から依然として有望であるが、作製された結晶が研究者の手元に戻ってくるまでの時間が非常に長いことが実験のモチベーションを高める上で障害になっている。

NASA のジョンソン宇宙センターでスペースシャトルのパイロードを担当する職員によれば、初期のタンパク質生成実験では、試料をスペースシャトルに搭載するために出荷してから、研究者の手元に返ってくるまでに 44 ヶ月間を要したが、最近では 14 ヶ月まで短縮されたという。ロシアのモジュールを利用した実験では試料の出荷・送還に要する時間と宇宙飛行期間の合計で 7 ヶ月程度に短縮された。しかし多くの研究者は、宇宙で結晶作製を行うのであれば、さらにターンアラウンドタイムを短くすることを切望している。

ターンアラウンドタイムを短くするためには、ISS へのアクセスの頻度を多くして、適切なタイミングで地上に回収できるように打上げ時期を選べるようにすることが必要である。スペースシャトルが退役した後は、我が国の宇宙ステーション補給機 HTV、欧州の自動輸送機 ATV、米国及びロシアの新しい輸送システムなどの手段を活用して、国際協力で遅れの生じない輸送ダイヤを設定するこ

とが必要になるであろう。試料の輸送に要する時間や実験期間を合計して、試料を送り出してから 3～4 ヶ月で手元に回収できるようになることが望ましい。

(4) 支援体制の充実

これまで、我が国で「高品質タンパク質結晶生成プロジェクト」を遂行する上で、(財)日本宇宙フォーラム (JSF) が JAXA からの委託により装置への組み込みや宇宙機への搭載・試料回収などの実務を通じて研究者を支援してきた。

宇宙実験に限らずどのような研究においても、実験装置の開発自体は研究者の目的ではなく、目的とするデータの取得や機能確認のための手段や道具に過ぎない。しかし、手段を実現できなければデータを得ることはできないので、当然ながら資金やマンパワーの一部は実験装置の開発や実験実施に充てられる。ライフサイエンス実験や物質科学実験を行おうとする科学者や研究者は、微小重力環境での実験装置の開発や実験実施業務を得意とするとは限らないため、これらを共通的に支援する機能を充実することが必要である。現在その役割を担っている JAXA などの宇宙関連機関において、微小重力利用研究を支援する人材の確保や実験装置の試験・開発のノウハウの蓄積などを長期的な視点で行っていく必要がある。

4 - 4

商業的なタンパク質結晶生成の計画

前述したように、地上で高品質な結晶生成が困難なタンパク質を、宇宙の微小重力環境で生成できることは、かなり明確になってきた。良質な研究試料入手がタンパク質研究のボトルネックとなっており、宇宙での微小重力環境利用はそのようなネックを解消するため、今後頻繁に行われるべき重要な手段になっていくと考えられる。

このような状況を踏まえて、これまで JCB などタンパク質結晶生成装置の開発を行ってきた JAXA は、2006 年からこれらの技術を民間機関へ技術移転することを計画している。その後は国際宇宙ステーションを利用した高品質タンパク質結晶生成が継続的に行われるようになる見通しである。

従来の計画では 2006 年には「きぼう」の完成が目前になっており、本格的な実験を行う段階まで到達していてもよい時期であった。しかし、スペースシャトル事故による運航スケジュールの遅延により「きぼう」完成にまだ 2～3 年かかる状況にある。この間に少しでも微小重力環境を利用できる機会を見つけて宇宙実証を行っておくべきである。さらに、2007 年頃に「きぼう」が完成した後に、我が国専用の実験ラックを用いて結晶生成が大量に行われるようになると考えられる。

米国では、アラバマ大学バーミングハム校 (UAB) のデルーカス博士 (スペースシャトル STS - 50 でパイロード・スペシャリストとして搭乗) が ISS の米国モジュール「ディスティニー」を利用してタンパク質結晶生成実験を行った。現時点ではスペースシャト

ルが本格的に運航されていないため、この実験は回収が困難な状況である。

商業的なタンパク質結晶生成を

進める上で重要なことは、①高品質、②低コスト、③より短いターンアラウンドタイム（または研究者にとって適切なタイミングでの

提供）、④支援体制である。今後のISS本格利用の時代において、これらの各要素がバランスよく改善されていくことが望ましい。

5 微小重力環境における製品製造のための実験機会

5 - 1

ISSの既設モジュールの利用

ISS計画参加国が個人の宇宙旅行者に対して軌道上のステーション滞在に同意したことで、ソユーズ宇宙船に民間人が同乗し、約1週間のISS滞在が可能になった。2006年10月頃には日本人が搭乗する計画があり、現在訓練を受けているところである。JAXAはこの日本人の搭乗を前提として、「宇宙オープンラボ」⁹⁾の一環として、この搭乗者がISS滞在中に実施する科学実験、応用実験、教育実験、文化的実験などの提案を受け付けている。実験装置の製作や試料を搭載するための費用は応募者が負担する。

5 - 2

日本実験モジュール「きぼう」における微小重力実験

現在はロシアのサービスモジュールなどを用いてごく限られた規模で行われているタンパク質結晶生成も、「きぼう」に移行すれば規模が拡大され、実験試料の作製にとどまらず医薬品の原料など製品の試験製造も行なえるようになる可能性がある。

我が国がISSを利用して本格的に宇宙環境利用を行うためには、現在打上げを待っている「きぼう」の各要素が打ち上げられ、軌道上で組み立てられて、日本の宇宙実験室として運用が開始されること

が必須である。

初期利用段階の「きぼう」には次のような実験装置が搭載されることになっている¹⁰⁾。

- ①ライフサイエンス実験系：タンパク質結晶生成装置・細胞培養装置・クリーンベンチ・冷凍冷蔵庫
- ②物質科学実験系：温度勾配炉・流体物理実験装置・溶液結晶成長観察装置

これらの装置は国際標準実験ラック（ISPR）に組み込まれ、「きぼう」本体打上げに先立って与圧保管室に搭載して打ち上げられるが、「きぼう」取付け後与圧部に移設され、実験が行えるようになる。また運用開始後に、必要に応じて別のラックと交換することもできる。実験装置の開発と研究テーマの発掘は車の両輪のような関係にあり、両方の連携を考慮する必要がある。また、「きぼう」の船内でのISPRの設置可能数には限りがあるので、ある時点で行われている実験が永続するとは限らないことにも留意する必要がある。

5 - 3

ISS以外の利用機会

今後の微小重力環境の利用機会はISSに限られるものではない。

- ①人の支援を必要としない場合の長時間微小重力実験の機会としては、USERS衛星が利用可能である。ただし、USERS衛星

の打上げや回収のスケジュール設定上には種々の困難な要素があり、自在性には限界がある。

- ②実験中に人の支援を必要とする場合は、短時間であれば3 - 2で示したような航空機利用で迅速に結果を得ることができる。
- ③ISS、回収型衛星、航空機などに搭載するさまざまな実験装置を開発する上で、構造や動作の確認を行ったり、各種パラメータのおよその見当をつけたりするために、3 - 1で示したような最も簡便な微小重力実験手段である落下実験施設の利用は今後も引き続き有効な方法である。
- ④3 - 3で示したような増強型ハイブリッドロケットが実現すれば航空機よりも長時間持続する微小重力環境を利用できるようになる。北海道では北海道大学とHASTICなどが赤平実験場において燃焼試験を行って開発を進めているところである。
- ⑤シリコン単結晶の製造などごく短時間の微小重力環境でプロセスが完了できる場合には、工場設備の一部に落下施設を組み込むことで量産体制を実現することができる。北海道恵庭市にある京セミ株式会社の無重力研究所では、量産のための新たな落下管を新設し、高付加価値の球状太陽電池を製造する体制を整えつつある¹¹⁾。

高品質タンパク質結晶生成のように現在ではISSを利用した宇宙実験が本格的に行われるようにな

ったテーマにおいても、初期の実験装置の開発段階では、落下実験施設や航空機を用いた機能確認実

験が頻繁に行われてきた。宇宙実験に備えた地上での研究に莫大な時間を要することに鑑み、地上で

の微小重力実験がより幅広いテーマで、できるだけ簡便に行われるようになることが望ましい。

6 微小重力利用研究を通じて科学技術創造立国のコンテンツを充実するために ●●●

微小重力利用の研究においては、宇宙実験機会の利用と地上での代替的な研究の間で競争状態あるいは品質やコストのトレードオフの関係があり、必ずしも宇宙実験だけが微小重力研究の唯一の手段ではない。しかし、地上研究と協調することによって宇宙実験の成果がよりよいものになる可能性もある。タンパク質研究の例では、最適な試料を得るために、宇宙と地上で適度な競争状態を続ける中で、互いに工夫・努力してレベルを高めていくことが重要ではないかと考えられる。

タンパク質に限らず、我が国が初歩的な宇宙実験技術を習得する時代を終えて、「きぼう」完成という次のスタート地点を迎えるまでに、新規の実験テーマの提案、その実施のための装置の研究開発、成果の応用まで考慮して、長期展望を持った宇宙実験実施能力を確保することが必要である。

以下に、当該分野において今後望ましい方向性をまとめる。

(1) 「きぼう」本格稼働に向けた微小重力研究の促進

スペースシャトルの復活及びフル活用への見通しがでてきたこと、また長らく待望された「きぼう」の打上げが2007年度にも実現する可能性があること、などからこれまで足踏み状態にあった宇宙での微小重力環境の利用を本格的に進められる段階に来ている。「きぼう」で行われる実験は実験内容の絞り込みや実験装置の開発、成果の活用方策などの観点から、地上での実験を繰り返して洗練されたものとすべきである。現

在、落下実験施設や航空機による実験機会を活用して、大学や企業などが新しい知見を得るべく装置の改良や実験実施に当たっている。地上では通常実現できないような実験環境を利用することに対し、実験関係者は惜しみなく情熱を注いでいる。しかし、我が国全体として見たときに、国の予算制度や公的補助資金の枠不足などで設備をフルに活用できない状況も見られる。微小重力研究が単に宇宙ステーションの利用という意味ではなく、重力加速度依存現象の貴重な実験の機会であるという認識を持ち、既にある我が国全体の実験機会も有効に利用して微小重力の研究を促進すべきである。

(2) 微小重力利用の産業応用の促進

これまで20年以上にわたって行われてきた宇宙実験の成果として、地上の通常の重力環境では得られない材料や応用製品の製造が実現しつつあり、現在は我が国が本格的に宇宙環境利用を意識した活動を行えるようになる準備の時期ではないかと思われる。現在地道に進められている準備段階から、今後はようやく産業応用や民生利用への動きが感じられる時代に入り、より一層の利用拡大が図られることを期待する。

特に注目される実験機会としては、

- ① ISS を利用した高品質タンパク質結晶生成や3次元フォトリソグラフィ結晶生成など
 - ② USEF の USERS 衛星を利用した長時間の宇宙実験
 - ③ 地上での落下実験施設、航空機利用、小型ロケット利用など
- があり、それぞれの微小重力のレ

ベル、コスト、アクセス性、公的支援の有無などを勘案して、公的機関や民間企業が材料作製や開発実験などに積極的に参加することを促したい。

もちろん、本格的な産業応用及び民生利用を実現するためには、「きぼう」が稼働し始め、わが国独自の宇宙ステーション補給船HTVが実用化するなど、宇宙環境利用全体を見通した技術開発の進展が必要である。また、産業応用の新しいシーズを生み出すための基礎的研究については、宇宙に限らず地上実験でも成果が得られる研究分野があり、こうした基礎的研究に対しては引き続き微小重力実験機会の確保が必要である。

(3) 付随的な効果への期待

科学技術創造立国を標榜する我が国において、科学技術人材を育成することはもちろん重要なことであるが、新たな実験手段を持たずに新しい知見を得ることは困難である。科学技術人材の育成の一つの方策として、特殊な環境である微小重力を利用した実験のアイデア創出から実験実施（放物線飛行体験なども含め）や応用化研究までを一通り経験することは、若い研究者にとって将来の多様な応用を可能にする基盤的な技術能力となると考える。地上や無人衛星などの微小重力実験機会をフルに活用した若手人材育成戦略を確立することも考えてはどうだろうか。

少子高齢化と人口減少が同時に進む時代に入って、国民がどのように生活することが幸せかを考えるべき時期に来ている。最近宇宙

機器の製造を行うようになったある企業では、それまでの収益分野の仕事に加えて、宇宙関係の仕事も従業員にやらせてみたところ、宇宙関係の仕事で成功体験を得たことで従来の仕事にも懸命に取り組むようになったという。「科学技術創造立国」というスローガンだけでは何も得るものはなく、民間や個人の自発的な活動こそが新たな価値を生み出す可能性を有するものである。

本格的な宇宙実験の定常運用の時代を迎えるに先立ち、準備段階も含めての創意工夫を通じて、我が国の科学技術が誇りと感じられるような国民意識の芽生えにもつながるであろう。

謝 辞

本稿を執筆するに当たり、大同工業大学 澤岡昭 学長、JAXA 宇宙基幹システム本部 小林智之 主幹開発員・立花正一 宇宙医学グループ長、JAXA 宇宙科学研究本部 木下恭一 主幹研究員、ダイヤモンドエアサービス 塚川利雄 技

術部長、日本無重量総合研究所 岩上敏男 主任研究員、日本宇宙フォーラム 嶋津徹 氏・田仲広明 氏、無人宇宙実験システム研究開発機構 伊地智幸一 部長、東京大学大学院農学生命科学研究科 田之倉優 教授、北海道大学 永田晴紀 助教授、理化学研究所 田仲昭子 氏・国島直樹 氏、物質・材料研究機構 若山信子 研究員、浜松ホトニクス 瀧口義浩 主任部員、京セミ 辻川義信 氏、NASA ジョンソン宇宙センター ISS ペイロード室 John J.Uri 首席科学者らに資料提供や討議を頂いたことに對し、深く感謝します。

参考文献

- 1) 我が国の宇宙実験—成果と教訓—、JAXA 2005 年 3 月：
<http://idb.exst.jaxa.jp/jdata/02494/200509J02494000.html>
- 2) JST の編別分類表（ライフサイエンス）：<http://pr.jst.go.jp/pub/pdf/life.pdf>
- 3) 宇宙で 3 次元フォトニック結晶の生成実験を開始、科学技術動向、2006 年 1 月号
- 4) MGLAB のホームページ：
<http://www.mglab.co.jp/jpn/topics/topics.html>
- 5) ダイヤモンドエアサービス(株)：
http://www.das.co.jp/new_html/index-static.html
- 6) 成層圏観測や微小重力実験を目指す北海道 NPO のハイブリッドロケット、科学技術動向、2004 年 11 月号
- 7) USEF の USERS ガイドブック：
http://www.usef.or.jp/preport/main/USERS_UseresGuideHP.pdf
- 8) 微小重力環境を利用した高品質蛋白質結晶生成技術の進展と課題、平成 16 年度「宇宙環境利用の展望」第 4 章、佐藤勝ら
- 9) JAXA 「宇宙オープンラボ」：
<http://www.openlab-jaxa.jp>
- 10) 「きぼう」 船内実験室実験装置、JAXA ホームページより
<http://iss.sfo.jaxa.jp/kibo/kibomefc/index.html>
- 11) 微小重力環境で製造する球状の太陽電池、科学技術動向、2005 年 12 月号

執 筆 者



推進分野ユニットリーダー

辻野 照久

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/nistep/prof/tsujino.html>



専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理、旧宇宙開発事業団で世界の宇宙開発動向調査などに従事。現在は推進分野ユニット（ものづくり技術・社会基盤・フロンティア）で主に宇宙技術領域の動向調査を担当。

■ 略語のフルスベル ■

DAS : Diamond Air Service 「ダイヤモンド エア サービス(株)」
ECLSS : Environmental Control and Life Support System 「宇宙船用環境制御・生命維持システム」
FMPT : First Material Processing Test 「第一次材料実験」
GCB - GT : Granada Crystallization Box - Gel Tube Method 「タンパク質結晶作製装置ーゲルチューブ法」(GCB の改良版)
HASTIC : Hokkaido Aerospace Science and Technology Incubation Center 「北海道宇宙科学技術創成センター (NPO 法人)」
HOA : Heads of Agency 「宇宙機関長会議」
ISPR : International Standard Payload Rack 「国際標準実験ラック」
ISS : International Space Station 「国際宇宙ステーション」
JASRI : Japan Synchrotron Radiation Research Institute 「(財)高輝度光科学研究センター」
JCB : JAXA Crystallization Box 「JAXA タンパク質結晶作製装置」
JEM : Japanese Experimental Module 「国際宇宙ステーションの日本実験モジュール」
JSF : Japan Space Forum 「(財)日本宇宙フォーラム」
MGLAB : Micro-Gravity Laboratory of Japan 「(株)日本無重量総合研究所」
NMLC : National Microgravity Laboratory, China Academy of Science 「国家微重力研究室 (中国科学院)」
S : Starboard 「右舷」
UAB : University of Alabama at Birmingham 「アラバマ大学バーミングハム校」
USEF : Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer 「(財)無人宇宙実験システム研究開発機構」
USERS : Unmanned Space Experiment Recovery System 「次世代型無人宇宙実験システム」
USML : United States Microgravity Laboratory 「米国微小重力実験室」
USMP : United States Microgravity Payload 「米国微小重力実験ペイロード」
X - FEL : X - ray Free - Electron Laser 「X線自由電子レーザー」
ZARM : Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (Center of Applied Space Technology and Microgravity) 「応用宇宙技術・微小重力センター」(ブレーメン大学)

| 昨年度レポート一覧

科学技術動向 2005年4月号 (No.49) ～ 2006年3月号 (No.60) に掲載した 29本のレポートです。
バックナンバーは <http://www.nistep.go.jp/index-j.html> でご覧いただけます。

ライフサイエンス分野

- ▶ 米国における数学と生命科学の研究協力促進のための科学技術政策：伊藤裕子（2005年4月 No.49）
- ▶ テーラーメイド医療の進展の現状—国民への情報提供システム整備の重要性—：曾和義弘（2005年8月、No.53）
- ▶ 人間を理解するための認知ロボティクス：石井加代子（2006年3月、No.60）

情報通信分野

- ▶ サービス記述と知識処理を行うセマンティックウェブ関連技術：藤井章博（2005年4月、No.49）
- ▶ 国際標準を担う人材育成について：黒川利明（2005年6月、No.51）
- ▶ 欧州の情報化社会技術に関する予測調査：藤井章博（2005年7月、No.52）
- ▶ デジタルカメラとカメラ付携帯電話の動向：立野公男（2005年7月、No.52）
- ▶ PC グリッド・コンピューティング—普及・向上するPCの有効活用による豊富な計算資源の社会的供給—：刀川眞（2005年9月、No.54）
- ▶ 情報通信分野における特許の活用—ライセンスして市場をリードする—：山田肇（2005年10月、No.55）
- ▶ 人道的地雷探知・除去技術と国際貢献への道：佐藤源之（2005年10月、No.55）
- ▶ サービス・サイエンスにまつわる国内外の動向：日高一義（2005年12月、No.57）
- ▶ LSI の配線設計の課題と設計自動化ツール開発の重要性：野村稔（2005年12月、No.57）
- ▶ 光インターコネクション技術動向—「京速計算機システム」への適用を目指して—：竹内寛爾（2006年1月、No.58）

環境・エネルギー分野

- ▶ 東アジアにおける大気汚染物質モニタリングについて—アジアの環境先進国としての我が国の展開—：福島宏和（2005年7月、No.52）
- ▶ 都市におけるヒートアイランド現象の緩和対策：山本桂香（2005年9月、No.54）
- ▶ 窒素酸化物排出低減用触媒技術の開発動向：小沢靖、浦島邦子（2005年11月、No.56）

- ▶ 我が国における花粉症対策の展望：新田裕史（2006年2月、No.59）
- ▶ 合成液体燃料開発の現状と今後の展開—天然ガスやバイオマスからの液体燃料—：大平竜也（2005年5月、No.50）
- ▶ 再生可能エネルギーの普及促進策と技術課題：大平竜也（2005年8月、No.53）
- ▶ 京都メカニズムにおける原子力技術利用への動き—京都議定書の将来枠組みでの注目点—：大平竜也、持田勲（2005年11月、No.56）
- ▶ 石油・天然ガス資源の探査・開発・生産に関する技術開発の動向：持田勲、大平竜也（2006年2月、No.59）

ナノテク・材料分野

- ▶ マグネシウム合金の研究開発動向—自動車用構造材料の軽量化の視点から—：渡井久男（2005年8月、No.53）
- ▶ 無機材料研究におけるマテリアルインフォマティクスの動向：知京豊裕（2006年1月、No.58）
- ▶ ナノテクノロジー開発の促進に向けたナノシミュレーション技術の普及：館山佳尚（2006年2月、No.59）

フロンティア分野

- ▶ 各国の宇宙輸送システム開発動向—スペースシャトル退役がもたらす変化—：辻野照久（2005年6月、No.51）
- ▶ 利用ニーズ主導の統合された地球観測システムの構築：辻野照久（2005年9月、No.54）

社会基盤分野

- ▶ わが国における地震防災の最近の動向：菅沼克敏（2005年10月、No.55）

科学技術政策分野

- ▶ 大学におけるシニア研究者の現状とこれからの役割：浦島邦子、伊藤泰郎（2005年5月、No.50）
- ▶ 中国における技術予測：辻野照久、横尾淑子（2006年3月、No.60）

科学技術動向研究センターとは

2001年1月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため2001年1月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。当センターでは、「科学技術基本計画」の策定に資する最新の科学技術動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供しております。

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1 「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

わが国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱し、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加え、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布しています。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> においても公開しています。

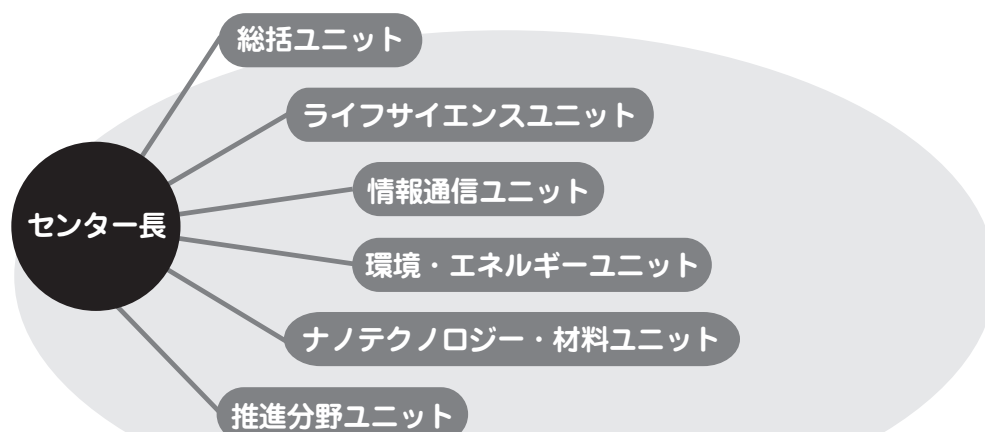
2 重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

さらに、重要な科学技術分野・領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、わが国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3 技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法を中心とする科学技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。2005年には2年間にわたった「科学技術の中長期的発展に係る俯瞰的予測調査」を報告しました。



*それぞれのユニットには、職員の他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

（2006年4月現在）

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS



Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレス
または電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき
「報告書一覧科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター

【連絡先】 〒 100 - 0005 東京都千代田区丸の内 2 - 5 - 1
【電 話】 03 - 3581 - 0605 【FAX】 03 - 3503 - 3996
【URL】 <http://www.nistep.go.jp>
【E-mail】 stfc@nistep.go.jp



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター

科学技術動向2006年4月