

Science & Technology Trends 科学技術動向

5
2009
No.98



■ レポート

p2.8

鉄鋼業の温暖化対策とセクトラル・アプローチ

p3.19

山地から河川、海域にわたる流砂系問題に対する実証的研究の推進

■ トピックス

ライフサイエンス分野

p4 米国景気対策法に基づく NIHの研究支援開始

環境分野

p6 製鋼スラグを用いた藻場造成による CO₂吸収効果確認試験

情報通信分野

p5 インタフェース規格見直しによる SSDデータ転送の高速化

社会基盤分野

p7 下水処理水の修景利用における藻類増殖抑制技術

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産学官から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々に読んでいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

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 センター長
奥和田 久美

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「科学技術動向・月報一覧」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】 〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】 03-3581-0605 【FAX】 03-3503-3996

【URL】 <http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】 stfc@nistep.go.jp

鉄鋼業の温暖化対策とセクトラル・アプローチ

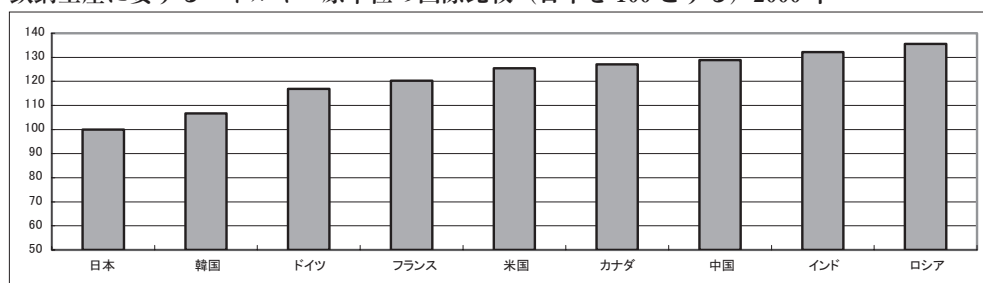
我が国の鉄鋼業は1970年代から省エネルギーに取り組み、鉄鋼生産単位当たりの温室効果ガス排出原単位は各国と比較して低くなっている。日本の鉄鋼業は、1996年から自主行動計画を作成して対策を実施し、鉄鋼生産工程における省エネルギーなどで着実な成果を挙げてきた。2010年に向けてさらなる排出削減に加え、京都議定書に基づくクリーン開発メカニズム（CDM：Clean Development Mechanism）も活用した目標の達成を考え、また、長期的視野から抜本的革新技術の開発にも着手している。

一方、世界の鉄鋼生産は、2000年以降、中国など新興国の生産が急増し、温室効果ガス排出が増大している。京都議定書が想定しているCAP&TRADE方式の規制では、競争条件の違いにより規制の緩い国で鉄鋼生産が増大するため、世界全体としては排出ガス量の増大を招くことが指摘されている。

そうした中、我が国では排出量の大きな産業セクターを中心として、利用できる最適な技術の世界全体へ広め、生産活動単位当たりの排出量を世界全体で削減し、排出総量を抑える方式（セクトラル・アプローチ）を提唱している。すでに国際協力によるCO₂排出削減は進められ、アジア太平洋地域の7カ国が国際協力を進め、セクトラル・アプローチがモデルとすべきものとされている。一方、世界鉄鋼協会ではGlobal Steel Sectoral Approach（GSSA）が推進されており、世界的な規模でセクトラル・アプローチが進められようとしている。

今後は、長期的な革新的技術開発促進という意味でもセクトラル・アプローチを実証的に分析していくことが求められよう。

鉄鋼生産に要するエネルギー原単位の国際比較（日本を100とする）2000年



参考文献⁸⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

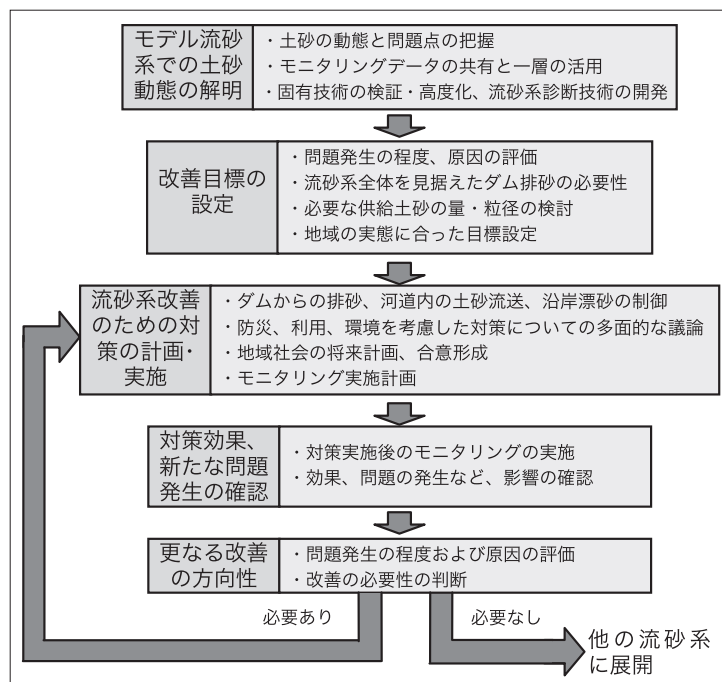
山地から河川、海域にわたる流砂系問題に対する 実証的研究の推進

我が国では、山地斜面の侵食などにより毎年大量の土砂が生産され、河川に流出している。高度成長時代以降、多数の大規模なダムが建設されたが、土砂流出が激しい流域では大量の土砂が貯水池に捕捉されて堆積している。また、河川や海域では大量の砂利が採取されて、海域への土砂の供給が減少し、さらに、港湾・漁港などの大型の海岸構造物が多数建設されて海岸に沿った漂砂を遮断する状況が生じている。これにより、ダムが本来有すべき機能が低下するとともに、ダム下流域では河床が低下し、河口や海岸では砂浜が侵食されるなど、流砂系のアンバランスによるさまざまな問題が顕在化している。

流砂系問題の解決には、流送土砂の連続性を確保し土砂がバランスよく供給されるメカニズムを取り戻すことが必要である。しかしながら、土砂の移動現象は広範囲にわたり、また土砂動態の複雑さ・測定の難しさなどから、流砂に関わる実態の把握は十分とはいえない。このため、土砂を流下させた場合に懸念される河床上昇による洪水氾濫のリスクの増大や生態系への影響を評価し制御する技術、さらに河川からの土砂の供給による海岸侵食の改善効果などを予測する技術がまだ確立されていない。

まずはモデル流砂系地域を特定し、これに対して土砂移動の実態をモニタリングによつて的確に把握し、生じている問題およびその箇所、因果関係、影響範囲などを流砂系全体の視点で改めて的確に診断することから始める必要がある。その上で、各領域で必要な流砂の量と粒径についての改善目標を明らかにし、適切な土砂の供給対策を防災、利用、環境の観点から一体的に考える、問題解決型の一貫した実証的研究が必要である。また、多岐にわたる行政や学問分野が連携して調査・研究活動を行い、流砂系に関わる学問分野が学術的に発展でき、さらに総合的土砂管理の制度構築への反映をも視野に入れた研究フォーラムを形成することが望まれる。

流砂系問題に対する一貫した実証的研究のフロー



科学技術動向研究センターにて作成

米国最大の生物医学系国立研究機関である NIH は、2009年2月に成立した米国景気対策法による104億ドルの予算配分を受けて研究グラントを創設し、翌3月から次々と研究課題の公募を開始した。米国民の長寿と生活の質の向上のための科学に資金支援を行い、経済を刺激することが狙いである。対象には、生物医学や行動学研究に対するブレイクスルーを目指す研究資金支援のほか、研究施設の建設・修繕・改良や装置の購入支援、自閉症研究支援、学生や科学教師への教育支援も含まれる。景気対策法のもとに急発進でイノベーションを創出しようとする動きとみられる。

トピックス / 米国景気対策法に基づく NIH の研究支援開始

米国最大の生物医学系国立研究機関である NIH は、2009年2月17日に成立した米国景気対策法（米国再生・再投資法）（American Recovery and Reinvestment Act）¹⁾による予算配分を受けて、あらたに研究グラントの創設²⁾・公募を、2009年3月以降、次々と発表している。NIH は、米国民の長寿と生活の質の向上のために最善と考えられる科学研究に対して資金の支援をし、そのインパクトによって経済を刺激することを狙っている³⁾。

米国景気対策法により NIH には、2010年9月までに104億ドルが配分される。その使用内訳は、82億ドルが科学研究の支援に、10億ドルが NIH 以外の研究施設の建設・修繕・改良に、3億ドルが共同利用の設備や装置に、5億ドルが NIH の建物や施設の建設・修繕・改良に、4億ドルが費用対効果の研究（Comparative Effectiveness Research）に充てるとされている³⁾。

2009年3月10日の発表では、上記の104億ドル中の15億ドル分についての研究資金支援の公募がなされた⁴⁾。その内の2億ドルは、新しく設立された「チャレンジングラント」で、これは特に2年間で進展が望めるような、生物医学や行動学研究で解決しうる健康や科学上の問題に焦点を絞っている。

2009年3月11日には、NIH 以外の研究施設の建設・修繕・改良に関する10億ドルの支援グラントの募集も開始された⁵⁾。

個別研究としては、2009年3月24日に自閉症研究

に対して0.6億ドルを支援することが、発表された⁶⁾。近年、重度に知的能力に遅滞を示す自閉症に加えて、言語によるコミュニケーション能力や知的能力の高いアスペルガー症候群、明らかな知的能力の遅れが無い高機能自閉症や、それらに含まれない自閉症などを加えた広い概念が、自閉症スペクトラム（autism spectrum disorders）と呼ばれている。今回の研究グラントは、自閉症スペクトラム内の不均質性の解明に資する研究成果が求められている。研究課題の例として、異なる集団に対する診断やスクリーニング手法の開発・試行、出生前や誕生後の早期におけるリスク査定、早期（治療）介入のための臨床試験の開始、既存の効果的な小児治療の十代の子供に対する適用などが挙げられている。

さらに、同日の2009年3月24日には、すでに NIH から研究支援を受けている研究者や研究機関に対して、サマースクールの学生や小中高レベルなどの科学の教師に短期の研究経験をさせるための資金の支援の公募も発表された⁷⁾。

2009年4月13日には、ブレイクスルー研究や特別で唯一のインフラの建設などを2年間で実施する、インパクトの高い大規模研究プロジェクトのためのグラントを新設し、これに2億ドルを投入すると発表した⁸⁾。

景気対策法のもとに、急発進でイノベーションを創出しようとする動きとみられる。

参 考

- 1) RECOVERY.GOV : <http://www.recovery.gov/>
- 2) Supported by the American Recovery & Reinvestment Act of 2009, Grant funding opportunities, NIH : <http://grants.nih.gov/recovery/>
- 3) NIH's role in the American Recovery and reinvestment Act ARRA) : http://www.nih.gov/about/director/02252009statement_arra.htm
- 4) Applications for \$1.5 billion in Recovery act funds now available, NIH News (March 10, 2009)
- 5) NIH announces American Recovery and Reinvestment Act funding opportunities, NIH News (March 11, 2009)
- 6) Rising to challenge: NIH will use \$60 million in recovery act funds to support strategic autism research, NIH News (March 24, 2009)
- 7) Students and science educators to get boost from NIH ARRA initiative, NIH News (March 24, 2009)
- 8) New NIH recovery act opportunity seeks to fund high impact, large-scale, accelerated research, NIH News (April 13, 2009)

2009年3月、米国 Fusion-io 社は、データ転送速度が一般従来品に比べ6～8倍になる SSD (Solid State Drive / Solid State Disk) を発表した。SSD は多数の NAND 型フラッシュメモリから構成され、機械的可動部を持たないことからデータアクセスまでの時間を短くでき、さらに高速データ転送・耐振性・静寂性・省エネルギーなどの点で HDD (Hard Disk Drive) より優位にあると考えられるデータストレージ機器である。今回の製品はインタフェースに PCI Express を用い、また、独自の並列処理技術を組み込むことで高速化を図り、最大データ転送速度は読み込みで 1.5 ギガバイト/秒、書き込みで 1.4 ギガバイト/秒を実現している。このような SSD 高速化技術は、現時点では対応コンピュータの種類が限られるものの、今後のストレージ機器の選択肢を大きく広げていくものと考えられる。

トピックス 2 インタフェース規格見直しによる SSD データ転送の高速化

SSD (Solid State Drive/ Solid State Disk) は多数の NAND 型フラッシュメモリから構成されており、HDD (Hard Disk Drive) に置き換わる使い方ができるデータストレージ機器である。機械的な可動部を持たないことからデータアクセスまでの時間を短くでき、さらに高速データ転送・耐振性・静寂性・省エネルギーなどの点で HDD より優位にあると考えられ、特にモバイル製品等のストレージ機器として注目されている。元来フラッシュメモリのデータ転送時間は HDD に比べて低速であるが、専用の並列処理アルゴリズムを用いてメモリを複数個束ね、同時に大量のデータを取り扱えるようにすることで高速化を図ってきた¹⁾。しかし現在までの SSD は、HDD の代替として製品化された経緯から、インタフェースとして HDD の規格である SATA (Serial ATA) 規格を採用しており、この規格に基づくデータ転送速度 (300 メガバイト/秒) がさらなる高速化のボトルネックになっていた。HDD 規格については、高速化した SATA 規格や SAS (Serial Attached SCSI) 規格も発表されているが、これらの規格に対応しても、当面は 600 メガバイト/秒程度がデータ転送速度の限界となってしまう。

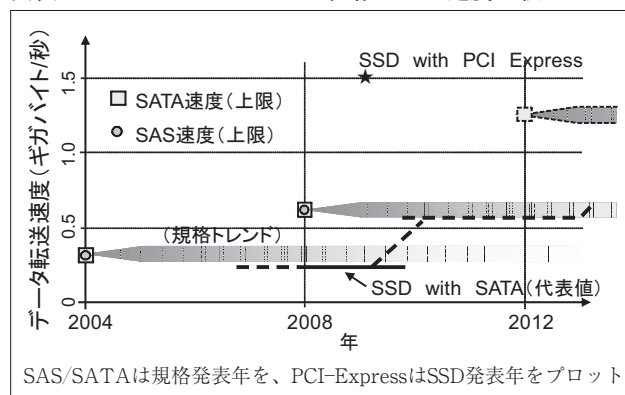
これに対し、米国 Fusion-io 社はインタフェースの見直しにより、データ転送速度が従来汎用製品に対して 6～8 倍程度になる SSD を 2009 年 3 月に発表した²⁾。

最大データ転送速度は読み込みで 1.5 ギガバイト/秒、書き込みで 1.4 ギガバイト/秒にも達している (右図表★印)。

今回発表の SSD は、グラフィックボード用として知られる PCI Express または PCI Express 2.0 というインタフェースを用いていることで高速化している。また、SSD 内部の高速化のための並列化アルゴリズムには HDD の並列処理技術として用いられてきた RAID^{注)} という技術を専用コントローラの中に組み込んでいる。

このような SSD 高速化技術は、現時点では対応コンピュータの種類が限られるものの、今後のストレージ機器の選択肢を大きく広げていくものと考えられる。

図表 SSD のインタフェース依存による速度比較



参考文献^{2), 3), 4)}を基に科学技術動向研究センターで作成

注：RAID (Redundant Arrays of Inexpensive (Independent) Disks) とは、複数台の HDD を組み合わせるが外部からは 1 台の HDD のように利用できる技術。

参考

- 1) 米国 Adtron 社ホームページ：<http://www.adtron.com/expertise/arraypro.html>
- 2) 米国 Fusion-io 社プレスリリース：http://www.fusionio.com/PDFs/Pressrelease_Pressrelease_ioDriveDuo.pdf
- 3) SCSI Trade Association ロードマップ (2007 年版)：http://www.scscita.org/aboutscsi/sas/SAS_roadmap2004.html
- 4) The Serial ATA International organization “SATA in the News”：http://www.serialata.org/news/sata_in_news.asp

2009年3月17日、川崎市は、地域企業・NPO法人、県内外の大学・研究機関と連携し、製鋼スラグを用いた藻場造成による温室効果ガスの固定化技術の開発と、同技術を活用した川崎港での実証試験を行うと発表した。計画によれば、研究期間は2009年度1年間で、製鉄所から発生する製鋼スラグと港湾の浚渫土を混合して海藻類の育成に効果的な基盤材料を開発し、川崎港内4箇所に敷設して実証試験を行う。海藻類育成効果・CO₂吸収量・海藻類を原料としたバイオガス生成量などを定量的に評価する。得られた成果は、国際フォーラムや国際展覧会等を通じて、国内だけでなく海外へも発信し、環境技術による低炭素社会の構築に貢献することを目指す。なお、この開発は、経済産業省「低炭素社会に向けた技術シーズ発掘・社会システム実証モデル事業」に採択されている。

トピックス 3 製鋼スラグを用いた藻場造成によるCO₂吸収効果確認試験

2009年3月17日、川崎市は、地域企業・NPO法人、県内外の大学・研究機関と連携し、製鋼スラグを用いた海域における藻場造成による温室効果ガスの固定化技術の開発と、同技術を活用した川崎港での実証試験を行うと発表した¹⁾。

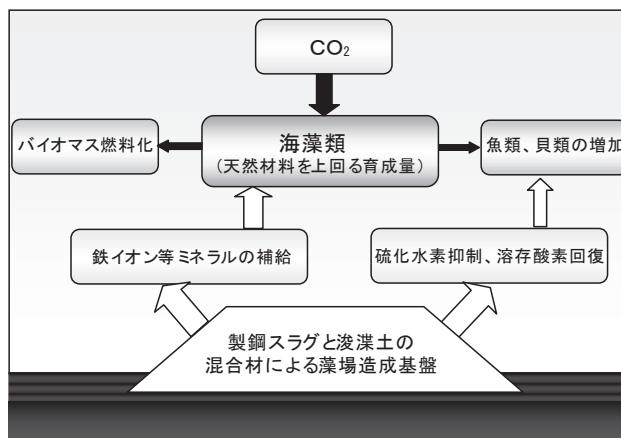
製鋼スラグ^{注)}は、光合成に必要な不可欠な鉄イオンをはじめ、植物の育成に必要なミネラル分を含んでいる。製鋼スラグを利用した藻場造成試験は、磯焼け対策などとして行われ、すでにその造成効果は確認されている²⁾が、藻場のCO₂吸収量などの定量的評価は行われていなかった。

今回の試験計画によれば、研究期間は2009年4月から2010年3月までの1年間である。4月から室内試験により、製鋼スラグと川崎港の浚渫土(粘性土)の混合材を用いて、天然材料に比べ海藻育成効果が高い藻場造成基盤材料を開発するとともに、海藻類を原料としたバイオガス(メタンガス)の生成可能性を把握する。室内試験の結果に基づき、7月より川崎港内の4箇所で大規模な実証試験を行い、開発した基盤材料の天然材料と比較した海藻類育成効果およびCO₂吸収効果に加えて、藻場育成による水質改善効果(製鋼スラグは、その組成から周辺海底を弱アルカリに保ち硫酸塩還元菌の活動を抑制することで、青潮の原因となる硫化水素の発生を抑制する効果があるとされる)についても検証する(図表参照)。これらの試験を通じて、藻場のCO₂吸収量およびバイオガス生成量を定量的に把握し、合わせて、広域に適用した場合のCO₂吸収効果、経済性等についても評価する。なお本計画は、外部有識者の委員会を設置し、適宜指導・評価を受けながら実施する。

得られた成果は、地域で活動するNPO法人と連携

し、地域住民・小中学生への環境学習や、臨海部企業等への普及PRに活用するとともに、川崎市が行うアジア太平洋エコビジネスフォーラム、川崎国際環境技術展、および国立環境研究所のアジア向け情報発信などを通じて、国内だけでなく海外へも発信し、他の地域に波及させて環境技術による低炭素社会の構築に貢献することを目指す。なお、この開発は、経済産業省「低炭素社会に向けた技術シーズ発掘・社会システム実証モデル事業」に採択されている。

図表 藻場造成によるCO₂吸収効果のイメージ



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターで作成

注：製鋼スラグとは、高炉で製造された銑鉄の成分調整を行う精錬工程で生じる酸化物や精錬材が溶融したものであり、CaO、SiO₂、FeOが主成分で、少量のMgO、MnO、P₂O₅等を含んでいる。適量の水分添加やCO₂吹込などによりブロックなどに成型できる。

参 考

- 1) 川崎市プレスリリース：http://www.city.kawasaki.jp/25/25koho/home/kisya/pdf/090317-2.pdf
- 2) 宇田川ほか、JFE 技報、No.19, pp18 (2008)

下水処理水の再利用は、都市における貴重な水資源確保の方策として重要性が高まっている。(独)土木研究所水環境グループ水質チームは、下水処理水を修景用水として利用する際に問題となる藻類増殖を抑制する新たな技術を開発した。試験水路で実証試験を行い、付着藻類量を蒸発残留物量で7分の1程度に抑制できたと2009年2月2日発表した。新技術は、微生物保持担体を添加した反応槽で下水処理水を曝気し、藻類の増殖に必要な微量必須元素のひとつであるマンガンを微生物により除去し、藻類増殖を抑制する方法である。また、魚類にメス化の影響をおよぼす女性ホルモンの除去効果もある。

トピックス 4 下水処理水の修景利用における藻類増殖抑制技術

下水処理水の再利用は、都市内における貴重な水資源確保の方策としてその重要性が高まっている。(独)土木研究所水環境グループ水質チームは、下水処理水を修景用水として利用する際に問題となる藻類増殖を抑制する新たな技術を2008年に発表した¹⁾。さらに、1年をかけて新技術の適用による付着藻類の抑制効果について、試験水路で実証試験を行った。その結果、付着藻類量を、蒸発残留物量で7分の1、クロロフィルa重量では3分の1程度に抑制することが可能であったことを2009年2月2日に発表した²⁾。

新技術は、活性汚泥法で処理後の下水処理水に対して微生物保持担体を添加し反応槽下部から2時間の曝気を行う。担体表面に自然発生的に微生物が付着し、藻類の増殖に必要な微量必須元素のひとつであるマンガンが酸化・不溶化される。次工程の砂ろ過装置にて粒子状となったマンガ酸化物が除去される。従来の工程では、藻類を増殖させる窒素・リンを凝集剤の大量使用や逆浸透膜等により除去する手法が試験的に適用されてきたが、設備費・運転費とも高価であり、普及していない。

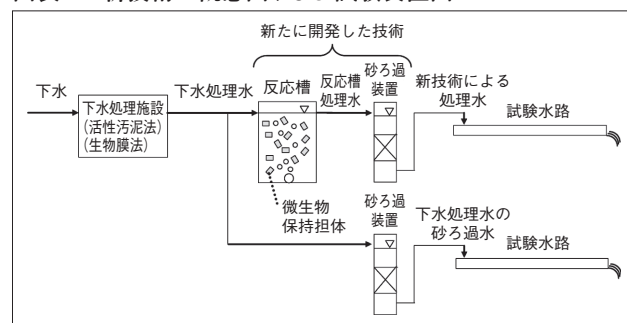
上記チームによる付着藻類増殖の抑制効果実験は、2008年6～9月の間で10週間にわたり行われた。試験水路は、長さ180cm、幅7cm、水深1.8cm、流速20cm/秒である。これに、新技術を適用した処理水と適用しない処理水とを連続的に流し、付着藻類の発生状況を比較した結果、新技術による付着藻類の大幅な増殖抑制が確認された。藻類の増殖には、十数種類の元素がそれぞれ適切な割合で必要であり、バランスが崩れると増殖に影響がある。その元素には多量必須元素として窒素・リンと微量必須元素としてマンガが含まれる。水質測定の結果では、新技術の有無により、窒素とリンに大きな違いは見られなかった。双方ともリン濃度は約0.4mg/Lであり、藻類増殖が抑制されるリン濃度0.01mg/Lを大きく超えていることから、新技

術の増殖抑制効果はリン量とは関係がない。新技術では、マンガンを減少させたため、マンガンの摂取阻害が藻類の増殖抑制因子になったと考えられる。

また、下水には人由来の女性ホルモン(エストロゲン)も含まれ、下水処理過程で十分な除去が行われないと、下水処理水放流先の魚類にメス化の影響をおよぼす懸念も指摘されている。新技術では、担体表面に付着したエストロゲン分解微生物によりエストロゲンの除去効果も期待できる。

前工程の下水処理の活性汚泥法では有機物分解微生物を利用する。新技術で利用する微生物は、活性汚泥法で利用する有機物分解微生物に比べて増殖速度が小さいため、下水処理の段階では増殖できず、マンガンの除去ができない。一方、後工程では下水処理水中の有機物がすでに除去されているため、有機物分解微生物が餌不足で増殖できずに新技術で利用する微生物が優先して増殖することから、この新技術が成立していると考えられている。

図表1 新技術の概念図および試験装置図



出典：参考文献²⁾

図表2 新技術による原処理水および下水処理水の砂ろ過処理水の水質(平均値)

水質項目	単位	新技術による処理水	下水処理水の砂ろ過水
T-N (全窒素)	mg/L	16.24	15.71
T-P (全リン)	mg/L	0.37	0.44
T-Mn (全マンガン)	mg/L	0.0008	0.0190
D-Mn (溶解性マンガン)	mg/L	0.0006	0.0159

出典：参考文献²⁾

参考

- (独)土木研究所プレスリリース「下水処理水修景利用における藻類増殖の抑制手法の開発」、2008年3月18日
- (独)土木研究所プレスリリース「下水処理水修景利用における藻類増殖抑制技術の付着藻類への効果について」、2009年2月2日

鉄鋼業の温暖化対策と セクトラル・アプローチ

小島 彰
客員研究官

1 はじめに

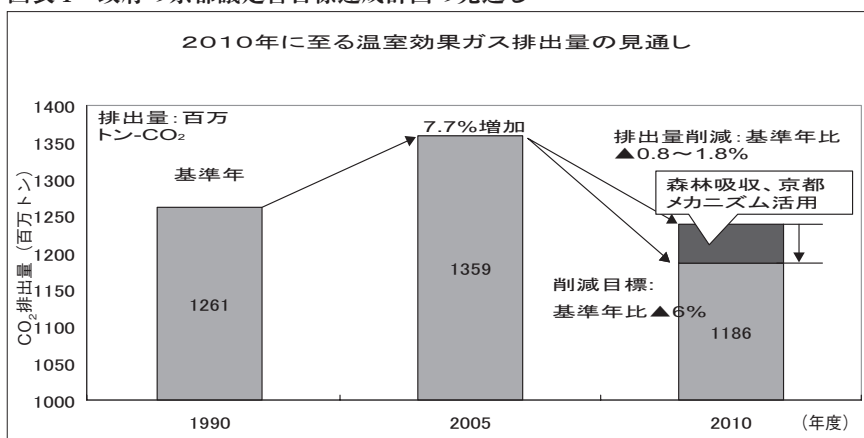
2008年から5年間にわたって、1996年に締結され2005年に発効した気候変動枠組み条約京都議定書に基づく第一約束期間に入った。2008年3月28日に全面改定されたわが国政府の京都議定書目標達成計画によると、我が国の温室効果ガスの排出は、基準年である1990年度に比べて2005年度には7.7%増加した¹⁾。このため、政府では、森林によるCO₂吸収や京都メカニズムによるCDM^{注1)}や共同実施を活用するとしても、2010年度に向けて排出量を基準年対比で0.8～1.8%削減する必要があるとしている(図表1)。

日本でのCO₂排出状況は図表2の通りであり、産業部門では減少しているものの、運輸、業務、民生部門で増加しており、全体としても増加している。日本としては増加している部門からの排出削減が大きな課題となっている。

産業部門(エネルギー転換部門および産業部門)における排出量は図表3のとおりであり、鉄鋼業からの温室効果ガス排出量は44%²⁾と大きなウェイトを占めている。従って鉄鋼業としての温室効果ガ

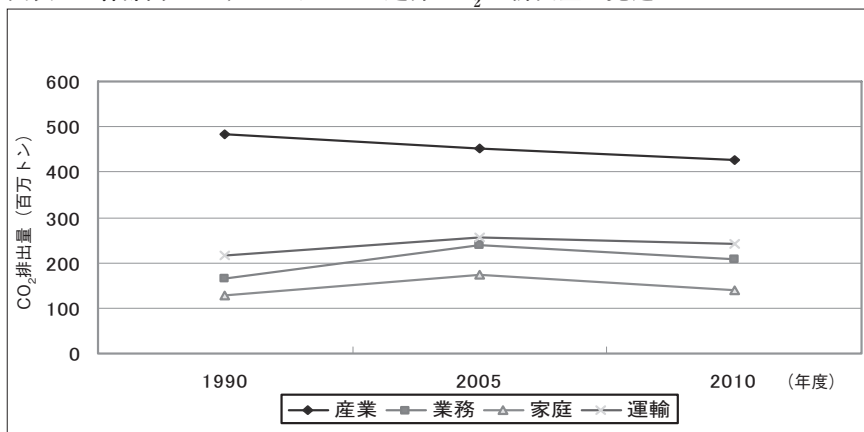
ス排出削減は我が国の温室効果が有する。ス対策を考える上で大きな意味を

図表1 政府の京都議定書目標達成計画の見通し

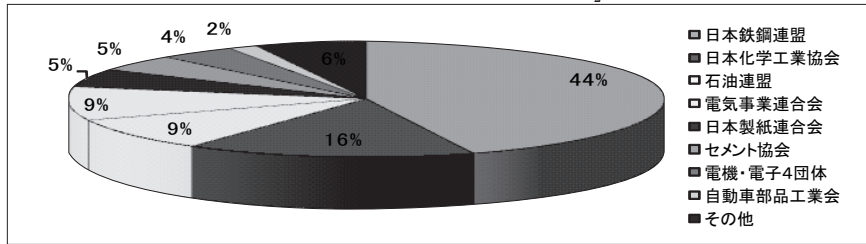


参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 各部門におけるエネルギー起源CO₂の排出量の見通し



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 エネルギー転換部門および産業部門からのCO₂排出比率

参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

2

鉄鋼生産と温室効果ガス排出

鉄鉱石から鉄鋼材料を生産する一貫製鉄プロセスは、還元反応により、金属鉄を生成し、圧延、熱処理等の加工を材料に加え、多様な特性を有する鉄鋼製品を生産するプロセスである。鉄鉱石の還元反応は、 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Fe} + 3\text{CO}_2$ で示され、還元反応に伴いCO₂を発生する。純粋に還元反応だけで発生するCO₂は鉄鋼1トン当たり0.59トンであるが、実際には鉱石中の鉄分は60%程度であるため、鉱石中の不純物成分も含めて溶融し、還元反応を推進させるための熱源が別途必要である。さらに鉄鋼製品を作り出すまでには、鉄鋼

材料の精製、加工など多くのプロセスが必要で、この間の加熱等に要する燃料消費などを加味すると、概ね鉄鋼製品1トン当たり2トン程度のCO₂を発生している。

実際の鉄鋼生産においては、原料として鉄スクラップが相当量利用されている。我が国全体としては、粗鋼生産に占めるスクラップ利用率は42% (2007年)である。鉄スクラップは還元済みの鉄源で貴重なものである。その利用割合を高めることは排出削減に有効な手段であるが、原料となるスクラップの発生量は地域における鉄鋼蓄積量や鉄鋼加工産業等の活動に依存し、また、スクラップに含有される不純物等のため、利用面での制約もある。特に、自動車用鋼板、継ぎ目なし鋼管など我が国が得意とする高級鉄鋼製品では、原料の

成分基準が厳しく、スクラップを使うとしても成分が明確なものでないと利用できないという事情がある。

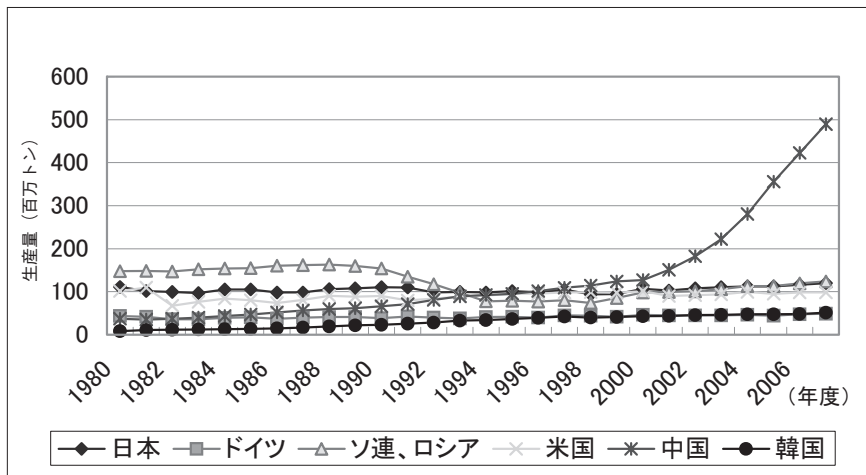
一方、鉄鋼は国民生活、経済活動を支える基盤的資材として我が国のみならず、各国において広範な分野で利用されており、鉄鋼なしでは近代的生活が機能しないと言われるほどポピュラーな材料であり、世界の経済活動と比例してその需要は増大してきた。

最近の主要国における鉄鋼生産の推移は図表4に示すとおりである³⁾。2000年以降、いわゆるBRICs諸国を中心とする経済発展の影響を受けて、世界的に生産が増加しているが、特に中国における爆発的な鉄鋼生産の増大は大きな注目を集めている。最近の中国における年間増大量5000万トンは、我が国における代表的な一貫製鉄所が1年に5カ所建設されるに等しい数量である。

3

京都議定書とセクトラル・アプローチ

図表4 主要国の鉄鋼生産の推移



参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

用語説明

注1 CDM：クリーン開発メカニズム (Clean Development Mechanism)：発展途上国の温室効果ガス排出削減に協力した主体に対してその排出削減効果に対応した排出権枠が与えられる仕組み

京都議定書締結以降、温室効果ガスをめぐる状況は大きく変わった。それは最大の排出国であった米国が1998年に京都議定書から離脱したことおよび中国をはじめとする新興国からの排出が急激に増大し、排出ガス削減の数値目標のかかった国とそうではない国との格差が大きくなったことである。図表5に示すとおり、気候枠組み条約を批准した192の国・地域において、京都議定書による数値約束の拘束を受けるのは、付属書Iに規定される39カ国である。

世界最大の排出国である米国や鉄鋼生産が急増している中国は上記の数値規制の枠外である。数値目標が課された国・地域のCO₂排

出量は、世界の28%（2005年）と推計されている⁵⁾。世界排出量の28%を数値規制しても残りの72%の排出量に当たる部分が規制を受けず、これらが増加するようでは、世界全体の排出削減は期待できない。影響力の大きい国を取り込まない数値規制は、効果が低いと指摘されており、公正でないとの意見も多い。

鉄鋼による排出量の場合、世界の鉄鋼生産に占める中国をはじめ温室効果ガスの規制を受けない国のシェアは急激に増大しており、これらの国々を抜きにした対策の有効性には限界があると考えられる。また、鉄鋼は図表6にも示すとおり、世界で幅広く貿易される製品である。特定の国における鉄鋼生産には排出削減のためのコストがかかり、他の国ではそれが不要であることは、鉄鋼の世界貿易全体を歪める恐れがある。また、競争条件の差異により規制の緩い国で相対的に排出ガス量の多い鉄

鋼生産が増大する懸念もあり、世界全体としては排出ガス量が増大する結果を招くと予想されている。こうした現象は炭素リーケージと呼ばれている。

このような問題の存在は、京都議定書が想定しているCAP & TRADE方式^{注2)}の課題である。とりわけ、数量規制を受ける国の排出量割合が世界全体の一部にとどまる場合、この点は大きな制度面での課題である。

これを是正する方策として、鉄鋼をはじめ、火力発電、セメントなど排出量の大きな産業セクターが国際的に協力し、現在でも利用できる最適な技術(Best Available Technology : BAT)を世界全体へ広めることにより、生産活動などに伴う単位当たり排出量を世界全体で削減し、地球規模での排出を抑える方式(セクトラル・アプローチ)の関心が高まっている。

セクトラル・アプローチは、対象となる産業分野において先進的

な省エネルギー・環境技術を世界的に採用することで当該産業からの排出量を削減し、炭素リーケージを回避しつつ、世界全体の温室効果ガスの排出削減を目指すものである。2008年の洞爺湖サミットで当時の福田総理大臣から主要国に提案されたほか、地球温暖化問題にかかる世界的な協議の中でも我が国代表から提案されている。セクトラル・アプローチは利用可能な技術の普及を中心に据えた現実的なアプローチである。利用可能な環境技術・省エネルギー技術が世界に広く普及することは、先進国はもとより世界全体の技術進歩をも促進させる。鉄鋼業の場合、世界の主要鉄鋼企業が加盟する世界鉄鋼協会(World Steel Association)でセクトラル・アプローチが進められており、他の業種の参考となろう。

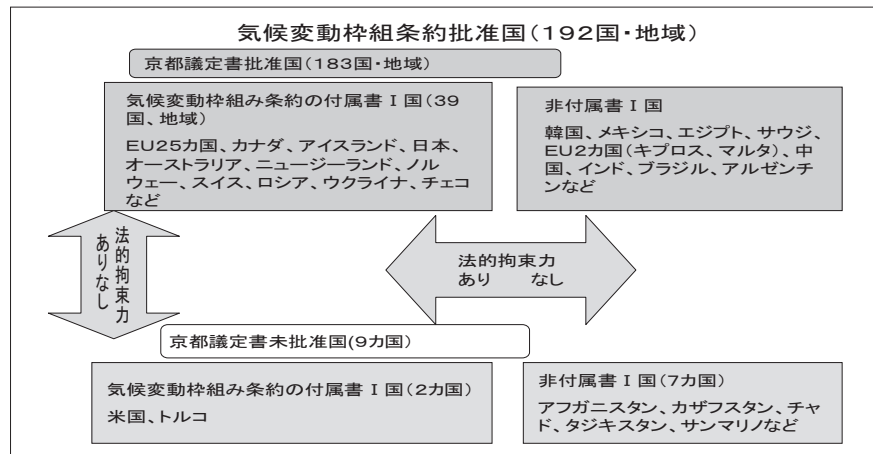
セクトラル・アプローチの議論の前に、次章では我が国の鉄鋼業のこれまでの取り組みを紹介する。

4

CO₂ 排出削減に向けた日本の鉄鋼業の取り組み

1996年、産業部門における排出削減に向けて、(社)日本経済団体連合会が主だった29の業種(現在では36)の参加を得て、環境自主行動計画を作成した。鉄鋼業については(社)日本鉄鋼連盟が自主行動計画を作成し、それに従い、加盟企

図表5 京都議定書の構造



参考文献⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表6 主要国・地域の鉄鋼輸出量 (2007年)

単位：百万トン									
国・地域	中国	日本	EU25国	ロシア	ウクライナ	ドイツ	ベルギー*	フランス	韓国
輸出量	51.7	34.6	32.4 **	31.5	30.6	29.2	24.6	18.8	18.0

* ベルギーおよびルクセンブルグの合計 **EU25カ国内での域内輸出量を除く

参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

業が対策を実施している。各産業界の自主行動計画は政府の京都議定書目標達成計画でも重要な項目として位置づけられ、各産業の進捗状況が毎年、政府の審議会の場で検証されている。

我が国鉄鋼業の自主行動計画の内容は以下のとおりである⁶⁾。

①鉄鋼生産工程における省エネルギーへの取り組み

- ・粗鋼生産量1億トンを前提として、2010年度の鉄鋼生産工程におけるエネルギー消費量を、基準年の1990年度に対し、10%削減する。
- ・ただし、粗鋼生産が1億トンを上回る状況においても京都メカニズムの活用等も含め目標達成に最大限努力する。
- ・上記目標は、2008～2012年度の5年間の平均値として達成する。

②社会における省エネルギーへの貢献

- ・集荷システムの確立を前提に、廃プラスチック等を100万トン活用する。
- ・製品・副産物による社会での省エネルギーに貢献する。
- ・国際技術協力により省エネルギーに貢献する。
- ・未利用エネルギーを近隣地域で活用する。
- ・民生・業務・運輸における取り組みを強化する。

③革新的技術開発への取り組み

- ・高炉ガスからのCO₂分離回収技術に取り組む。
- ・コークス炉ガス改質水素による鉄鉱石の還元技術に取り組む。

(社)日本鉄鋼連盟のエネルギー消費量削減目標値10%は、CO₂ガス排出削減目標値9%に概ね相当する。2008年10月に発表された当連盟資料によると、2007年度(2007年4月～2008年3月)は実績として、CO₂排出量が1990年度

対比で1.8%の削減となっている。この数値は、粗鋼生産量が112百万トンから122百万トンへ増加した(8.9%)にもかかわらず、エネルギー原単位(単位当たりの鉄鋼生産に投入されたエネルギー)の削減で達成したものである。

日本の鉄鋼業は、今後、一層の省エネルギー化を図ることにより、2010年度の10%エネルギー削減を達成することを目標としている。また、CO₂排出量の削減については、生産工程からの排出削減に加えて、京都議定書に基づくCDMも活用し、目標を達成することを考えている。

図表7 要因別エネルギー増減項目

1990年度エネルギー消費量 (PJ: ペタジュール)		2,527	変化率
2006年度エネルギー消費量		2,394	
2006年度(1990年度比)		-133	-5.2%
減少	排エネルギー回収	-47	-1.9%
	設備高効率化	-101	-4.0%
	省工程・連続化	-25	-1.0%
	操業改善	-111	-4.4%
	廃プラスチック有効利用	-14	-0.6%
	その他省エネ対策	-80	-3.2%
	小計	-377	-14.9%
増大	高付加価値化	50	2.0%
	環境対応措置の強化	14	0.6%
	副生物・資源リサイクル	8	0.3%
	鉱石等原料品位の低下	95	3.8%
	設備の老朽化	18	0.7%
	その他増エネ要因	16	0.6%
	小計	201	8.0%
条件差(粗鋼変動、生産構成等)		43	1.7%

参考文献⁷⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

■用語説明■

注2 CAP&TRADE方式: 国ごとに排出削減量を定め、こうした枠組みをベースとして、割り当てられた削減量を達成するため、排出権の取引や発展途上国との協力や共同実施による排出削減量を加えることができる方式

それによると、省エネルギーは各工程における地道な努力の積み重ねにより、改善が達成されている。

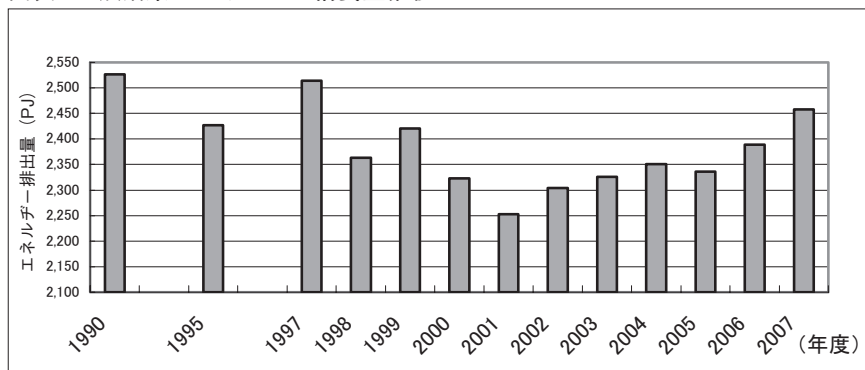
具体的には、2006年度は1990年度との比較で、電力・高圧空気・蒸気・燃料の消費削減のための操業改善で111PJ(29.4%)、高効率バーナーの設置、自家発電設備の効率化、酸素圧縮機の効率化など設備のエネルギー効率向上で101PJ(26.8%)、CDQ注3)・TRT注4)・副生ガス回収強化・蒸気回収強化など排エネルギー回収で47PJ(12.5%)、直送圧延など工程の省略や連続化で25PJ(6.6%)が削減されている。さらに廃プラスチックの有効活用による効果として、14PJ(3.7%)のエネルギー削減が図られている(図表7)。

日本の鉄鋼生産のエネルギー消費量の推移は図表8の通りである。なお、エネルギー消費量は鉄鋼生産量により大きく変動するため、鉄鋼生産単位当たりの数量(原単位)で見ると、その推移がよくわかる。鉄鋼業のエネルギー消費原単位を1990年度を100として示すと図表9の通りであり、2007年度には89.5と大幅に低下している。

この期間に細かな努力の積み重ねでこれだけの結果を出したことは注目に値する。なぜならば、日本鉄鋼業の1990年のエネルギー原単位は、すでに世界の最先端にあったからである。

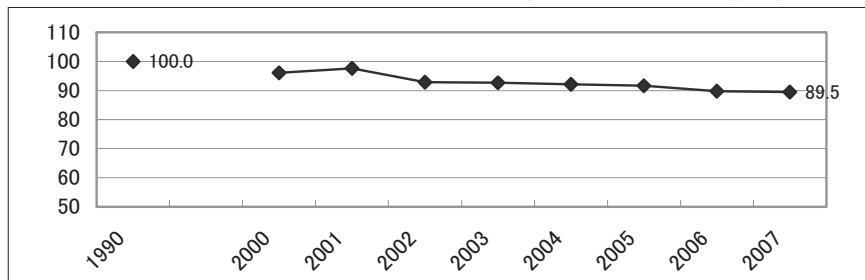
日本の鉄鋼業は資源エネルギーを最大限活用することを特質としている。第二次世界大戦後、川崎製鉄(株)(現JFEスチール(株))の初代社長西山弥太郎が千葉に臨海一貫製鉄所を企画し、これを成功させて以来、多くの臨海製鉄所が建設され、日本の鉄鋼業は発展した。そのキーワードは、国内資源に乏しい日本の鉄鋼業が発展するために海外からの貴重な原料を最大限有効に使うことであった。日本の鉄鋼業が資源制約をさらに強く意識したのは1973年の石油危機

図表8 鉄鋼業のエネルギー消費量推移



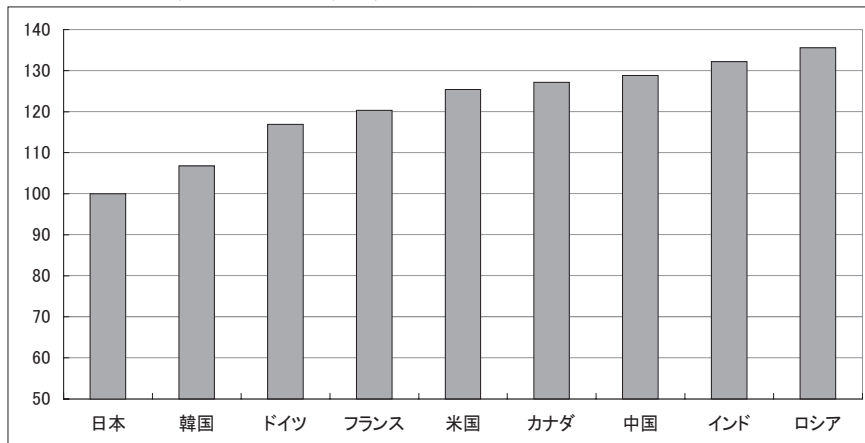
参考文献⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表9 鉄鋼生産のエネルギー消費原単位推移(1990年度を100とする)



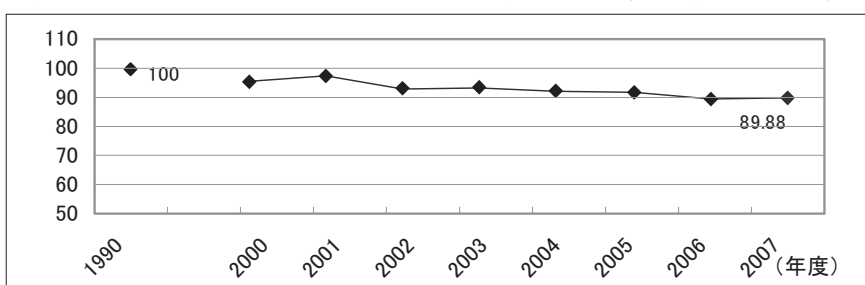
参考文献⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表10 主要国の鉄鋼生産(高炉一貫製鉄プロセス)エネルギー消費原単位量の比較(日本を100とする) 2000年



参考文献⁸⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表11 鉄鋼生産のエネルギー起源CO₂排出原単位の推移(1990年度を100とする)



参考文献⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

であり、1980年の二度目の石油危機に資源価格が急上昇した時、省エネルギーにより体質改善を図る

活動がいつそう強化された。省エネルギーと温室効果ガス排出対策とは表裏の関係であり、その意味

で、日本の鉄鋼業は1970年代から温室効果ガス問題に取り組んできたと言える。種々の努力の結果、図表10に示すように、海外各国に比べて日本の鉄鋼業のエネルギー消費原単位は低い⁸⁾。

鉄鋼生産のエネルギー消費量の低減に伴い、日本の鉄鋼生産のエネルギー起源CO₂排出原単位も低減している。その推移は図表11に示すとおりである。

6

今後の日本の鉄鋼業の対策

日本の鉄鋼業界は2010年に向けて引き続き省エネ対策、排出削減対策を検討している。前記の(社)日本鉄鋼連盟の資料によると、高炉における還元材比低減、鋼材温度管理の強化などプロセスの操業改善、TRT増強、CDQ新設、ガス回収強化、転炉顕熱回収など排エネルギー回収の強化、高効率酸素設備、自家発電設備の効率化、モーターの効率向上、焼結炉、高炉および熱風炉などの改修による設備効率の効率化、さらには廃プラスチック活用設備の増強などが検討されている。2007年3月時点でTRTについては普及率100%である。CDQについては普及率85%で、2010年3月時点で93%に達すると予想されている。

現在検討されている諸対策の効果は、2010年で1990年対比3.2%のエネルギー消費削減効果があると計算されている。これらのうち、2007年10月時点で約65%の案件が予算の裏付けがされている。

また、日本の鉄鋼業界は、京都

メカニズムに基づくクレジットの取得を補助的手段と位置付け、中国でのCDQ排熱回収、フィリピンでの焼結炉からの排熱回収など海外の鉄鋼業への省エネ技術協力、中国でのフロン処理プロジェクトなどCDMプロジェクトを推進している⁶⁾。これまで、日本の鉄鋼業界は5,900万t(1,180万t/年)のクレジットを購入契約済みであり、このうち国連CDM理事会に登録されたクレジット数量は4,100万t(820万t/年)に達している。購入済みの5,900万tは、1990年のCO₂排出量の5.7%に相当し、4,100万tは4.0%に相当する。

このように鉄鋼業では省エネルギー技術の適用により大幅な原単位削減を図っており、今後もさらなる努力を続ける。しかし、生産量により変動する排出量に対しては、京都メカニズムの最大限活用なども含めて、京都約束期間における自主行動計画の達成へ向けて努力を継続することとなる。

7

さらなる排出削減に向けた革新的技術開発

鉄鋼業においてCO₂排出削減の短期的な対策としては、BAT(Best Available Technology)の改善、改良、普及が実効性を期待できる。ただ、これらによる効果は次第に限界的に近づくことから、長期的には鉄鋼生産プロセスの抜本的革新技術の開発が必要とされる。

日本の鉄鋼業の自主行動計画においては、①高炉ガスからのCO₂分離回収技術、②コークス炉ガス

改質水素による鉄鉱石の還元技術、が記述されている。最近の動向を踏まえ、2008年度から着手された革新的鉄鋼生産プロセス技術開発(COURSE50)計画および2008年に実機開発された次世代コークス製造技術(SCOPE21)の2つの事例を取り上げて、以下に紹介する。

鉄鋼業は、他産業と比べると概して既存プロセスを代替するのに慎重である。製品についてユーザーから高い信頼性を要請されることなどにより、代替には時間を要するのが一般的である。したがって、革新技術開発は息の長い計画になる。日本の鉄鋼業界は以下のSCOPE21を実用化させた実績を持ち、世界から注目されている。

①革新的鉄鋼生産プロセス技術開発(COURSE50)計画

これは政府のCool Earth 50計画のひとつにも位置づけられた計画で、2008年度から開始されたCO₂排出削減を図る革新的鉄鋼生産プロセス技術開発である(図表12)。コークス炉ガスの水素増量改質、鉄鉱石還元プロセスでの水素利用、CO₂分離技術などが主な内容である。CCS(Carbon Dioxide Capture & Storage: CO₂の分離貯留)技術と組み合わせ、製鉄プロセスからのCO₂排出を削減する。第1フェーズとして5カ年計画の研究が始められた。第2フェーズ以後の研究開発を経て、2030年までに工業規模での技術確立を目指す。2030年以降の実用化段階では30%のCO₂削減が期待されている。

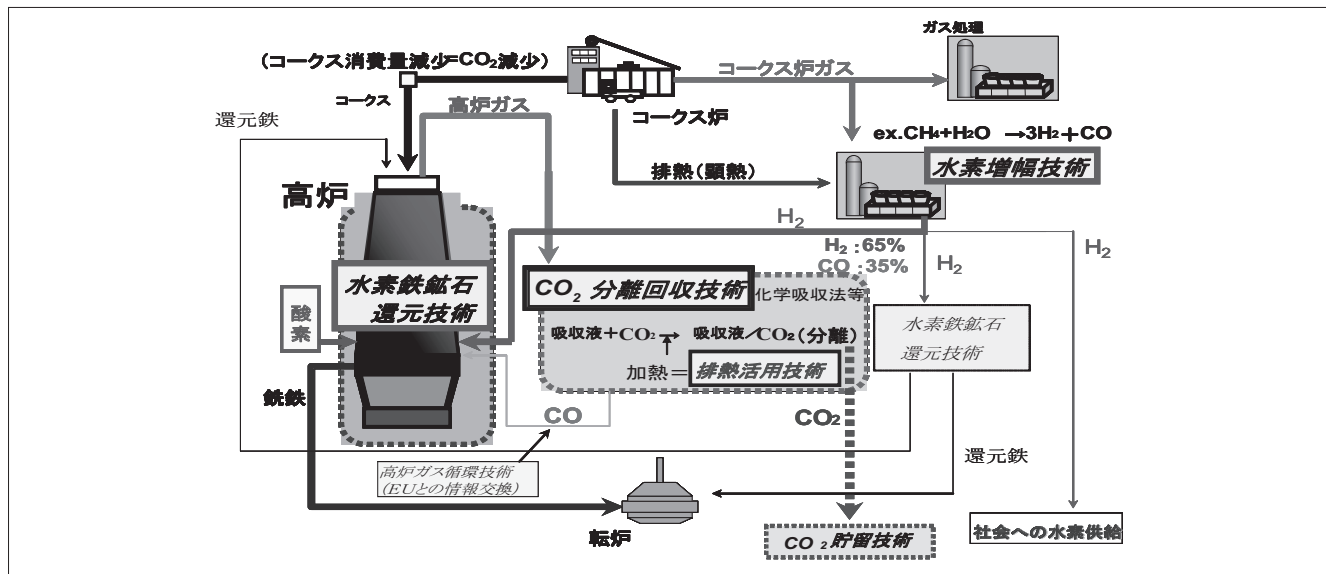
製鉄プロセスにおける革新的技術開発はわが国のみならず、世界各地域の鉄鋼業により取り

■用語説明■

注3 CDQ: コークス乾式消火設備(Coke Dry Quenching): 不活性ガスで赤熱コークスを消火し、高温のガスで蒸気回収、発電を行う装置

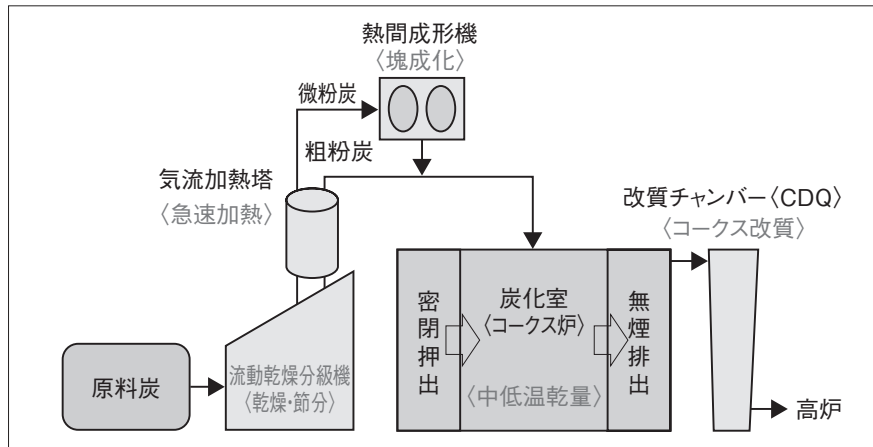
注4 TRT: 高炉炉頂圧回収タービン(Top-pressure Recovery Turbine): 高炉に掛けられた圧力を炉頂部で減圧し、その際の圧力差で発電する装置

図表12 革新的鉄鋼生産プロセス技術開発 (COURSE50) 計画概念図



出典：参考文献⁹⁾

図表13 次世代コークス製造技術 (SCOPE21) プロセス概念図



出典：参考文献¹⁰⁾

8

間接的なCO₂排出削減

産業の基礎資材として鉄鋼製品は幅広い領域で利用されている。高性能な鋼材を利用することにより、間接的に社会においてCO₂排出の削減を図ることが可能となる。

(財)日本エネルギー経済研究所および(社)日本鉄鋼連盟の試算によると、1990～2007年度までに生産された高機能鋼材^{注5)}が我が国社会で利用されることにより、2007年度において812万トンのCO₂排出削減が達成されたとしている。

また、鉄鋼業の副産物であるスラグを原料とする高炉セメントは、セメント生産に必要な焼成プロセス(石灰石CaCO₃を焼成するとCO₂が発生する)を省略できる。したがって高炉セメントの活用により、セメント製造プロセスからのCO₂排出削減効果が期待できる。2007年度における効果を試算すると、国内セメント産業で4,390千トン、

組まれている。それらについて世界鉄鋼協会の場合を通じて情報交換、技術交流が図られ、世界的に効率的な開発が企画されている。

② 次世代コークス製造技術 (SCOPE21)

1996年から2005年まで経済産業省からの支援を得て実施したプロジェクトで、石炭を急速加熱することにより原料の軟化溶解性を向上させ、設備のコンパ

クト化、生産性の向上(24倍)、省エネルギー化、非微粘結炭の混合比率向上(20%→50%)を狙った技術開発である(図表13)。10年間の技術開発の成果により、実機プラントが2008年5月新日本製鐵(株)大分製鉄所に完成し、稼働した。この設備により、従来より21%の省エネルギー化、年間のCO₂排出削減40万トンが図れるものと期待されている。

注5：高機能鋼材

ボイラ用耐熱鋼板：蒸気温度向上による発電効率向上、自動車用高強度鋼板：自動車軽量化による燃費向上、船舶用高張力鋼板：船舶の軽量化、トランス用電磁鋼板：電磁変換効率の向上、電車用ステンレス鋼板：塗装のメンテナンス・フリー化および軽量化

輸出されている高炉セメントによる削減効果(4,720千トン)も加えると、9,110千トンのCO₂排出削減に寄与したと考えられる。

さらに鉄鋼業では、廃プラスチックおよび廃タイヤを受け入れ、還元材の代替材料として活用している。これらにより、石炭由来の還元材消費量を減らし、エネルギー消費量、CO₂排出削減を図ることができる。しかし、廃プラスチック等の利用実績は、2005年度は450万トン、2007年度は370千トンにとどまっている。このうち容器包装リサイクル法による廃プラスチック等の利用については400千トンの処理能力に対して、自治体による集荷システムが未確立であることや集荷された廃プラスチックがマテリアルリサイクルに廻されるため、処理能力を大幅に下回る200千トン程度の量しか鉄鋼業に供給されていない。このような国内での制度設計の問題が残っている。この点は今後の環境問題を考える上で重要な点である。

2003年頃から、鉄鋼業で排出される低温排熱を化学産業や食品産業などの他産業が利用し、他産業からの排出物を鉄鋼業が引き受ける産業間連携により社会全体としてのエネルギー有効活用を図り、CO₂排出削減を図る構想(エコ・コンビナート)が検討されてきた。しかし、現時点ではエネルギーのセーフティーネットなどの問題があり、この構想は十分機能を発揮していない。製鉄所発生蒸気を酒造企業が活用するなど小規模なもののみが実現されている。今後は熱の輸送・貯蔵技術等の技術開発に加え、社会システム上の制約を解決してこのような構想を実現していくことが望ましい。

9

国際協力による排出削減

日本の鉄鋼業は自ら蓄積した省エネ技術やそのノウハウを世界へ普及することにより、世界全体での鉄鋼業からのCO₂排出削減を図るための国際協力を進めている。

二国間の協力としては、例えば中国との間で、2005年7月に「日中鉄鋼環境保全・省エネ先進技術交流会」が開催され、その合意を受けて、技術協力を推進するためのワークショップがその後開催されている。

APP^{注6)}はアジア太平洋地域におけるCO₂削減に関する技術協力を効果的に進めるため、日本・中国・

インド・韓国・米国・オーストラリア・カナダの7カ国の官民代表の参加を得て、活動を進めている。APPでは鉄鋼を含む7分野が対象領域として選定され(鉄鋼分野は日本が議長国)、技術協力を進めるための現実的な取り組みが進められている。

APP参加国の鉄鋼生産は世界の60%を占め(京都議定書付属書I国の鉄鋼生産は世界の40%)、これらの国における省エネ環境技術利用による削減効果は極めて大きい。

日本が議長国を務める鉄鋼タスクフォースでは、参加国が協力し、CO₂削減に資する鉄鋼技術を網羅する“State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) Handbook”をとりまとめ、技術応用のための境界条件、技術協力により可能とされ

図表14 SOACT Handbook で取り上げられた日本提案の技術一覧

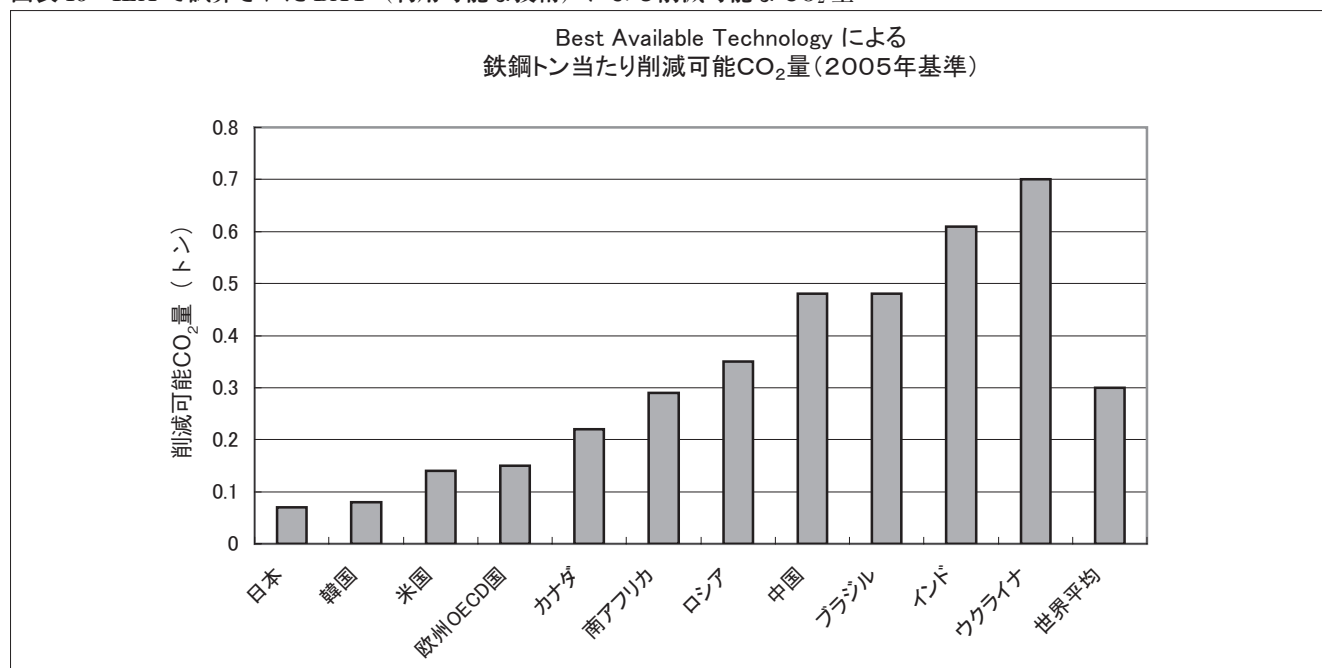
1 原料予備処理(焼結)技術 焼結排熱熱回収技術、焼結主排ガス集塵、活性コークス充填層(主排ガス脱硫、脱硝) 改良原料供給、原料調整、マルチスリット・バーナー、造粒装置
2 コークス製造技術 新コークス製造技術(SCOPE21)、コークス乾式消火(CDQ)、石炭調湿(CMC)
3 製鉄(高炉・直接還元)技術 炉頂圧回収タービン(TRT)、微粉炭吹き込み(PCI)、高炉ガス(BFG)集塵、 鑄床集塵、スラグ脱臭、直接還元
4 製鋼技術 転炉操業自動化、転炉ガス冷却システム、転炉ガス熱回収
5 リサイクル、廃棄物削減 スラグ・リサイクル、回転路床法によるダストリサイクル
6 共通利用技術 リジェネ(熱回収)バーナー
7 一般的省エネ・環境計測技術 エネルギーモニタリングと管理システム、コジェネレーション、 スラグ効率利用技術、水素製造、製鋼スラグ炭酸化

参考文献¹¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

用語説明

注6 APP：クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ(Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate)

図表 15 IEA で試算された BAT (利用可能な技術) による削減可能な CO₂ 量



出典：参考文献¹²⁾ を基に科学技術動向研究センターにて作成

る潜在的 CO₂ 削減量を算定し、今後の協力の指針としている。また、日本の専門家による他の参加国の工場への設備診断も実施されている。SOACT Handbook では、鉄鋼生産の各プロセスにわたる広汎な技術が取り上げられている。環境、エネルギー関連技術で 64 技術のうち 27 技術は我が国から提案されたものである(我が国からの提案技術は図表 14 表参照)¹¹⁾。

鉄鋼分野における BAT を活用した場合の削減可能な CO₂ の量は前述の APP の場で討議され、年間 1.27 億トンと試算されている。APP の検討の方法はセクトラル・アプローチの 1 つのモデルになると考えられている。

また、IEA (世界エネルギー機関) では、世界全体の鉄鋼分野における BAT 活用による国別の鉄鋼生産トン当たりの削減可能 CO₂ 量を試算している。世界全体で鉄鋼トン当たり 0.3 トンの CO₂ 排出削減が可能としている¹²⁾。単純に生産量による比例計算をすれば、2005 年レベルの世界鉄鋼生産量を 11.4 億トンとして、34 億トンの CO₂ 排出削減が可能だったことになる。2007 年の世界鉄鋼生産量は 13.4 億

トンであるので、2007 年の生産技術レベルが 2005 年と同一の技術レベルと考えると、BAT 活用により 2007 年には、4 億トンの削減可能性があることとなる(図表 15)。

なお、IEA では BAT についても分析しているが、特に効果のある鉄鋼生産技術は、高炉操業技術の改善、コークス炉ガスの回収、CDQ、高炉ガス回収の改善、高炉ガスによる発電効率の向上、圧延工程の改善等の技術であると分析している。

10

世界鉄鋼協会 (World Steel Association) による取り組み

世界の主要製鉄企業約 180 社が加盟する世界鉄鋼協会(加盟企業の鉄鋼生産シェアは中国を除く世界全体では 75%、中国国内では 20%)では、地球温暖化問題に積極的に取り組んでいる。世界鉄鋼協会は、鉄鋼生産における排出量原単位の改善が現実的な方策であるとし、グローバルなセクトラル・アプローチを提唱している。

2007 年 9 月に世界鉄鋼協会が出したコメント概要は以下のとおりである¹³⁾。

- ・世界の鉄鋼業の経営者は、地球温暖化対策の推進にはグローバルなアプローチが最善と考え、世界共通の方法論を確立し、世界主要製鉄所の CO₂ 排出量のデータ収集・報告を行う。
- ・CAP&TRADE 政策は、CO₂ 排出量削減には効果的でない。排出原単位の低い、優れた製鉄所での生産抑制は、世界で競争している鉄鋼産業にとっての解決策とはならない。
- ・鉄鋼業にとって有効な方法は、世界の全主要鉄鋼生産国の参加と、生産量当たりの排出原単位の改善であり、このため、短期的には、現在の最善の操業技術を世界的に適用し、長期的には、革新的な鉄鋼生産技術を開発していくことである。

こうした方針により、世界鉄鋼協会では、Global Steel Sectoral Approach (GSSA) による鉄鋼業からの CO₂ 排出量削減を目指し、2008 年 4 月からデータ収集作業を開始している。

11 今後の地球温暖化問題の議論とセクトラル・アプローチ

2009年は地球温暖化問題の京都議定書後の枠組みを決める重要な年である。6月のボンでの関係国会合、夏のイタリアでの先進国サミット会合、12月のコペンハーゲンでのCOP14会合など重要な会合が予定されている。そうした中で、2008年の洞爺湖サミットでの福田総理(当時)による議長総括でも「セクター別アプローチは、各国の排出削減目標を達成する上で、とりわけ有益な手法である¹⁴⁾。」とされた。我が国が世界に提唱しているセクトラル・アプローチの有用性は世界にもっと認識される必要がある。

鉄鋼業における内外の取り組み状況は前述の通りであるが、鉄鋼業は大量のCO₂を排出するがゆえに、この問題に真剣に取り組まざるを得ない。一方で世界鉄鋼協会も指摘するように、鉄鋼は世界で幅広く取引される商品であり、公

平な世界貿易を歪めない配慮が必要である。

進んだ技術の普及により主要セクターでのCO₂排出を削減させるというセクトラル・アプローチは現実的かつ有効な方法である。特に、温暖化対策に果たす技術の役割が重要になる局面において、今後の排出削減のための制度設計においては、技術の開発、向上に努力した者が報われるということが世界共通の原則の1つであるべきだろう。また、そのことが今後のさらなる技術向上を促すことになる。このような枠組みのもとであれば世界の鉄鋼研究者、技術者による世界鉄鋼業からのCO₂排出削減を図るための今後の取り組みも活性化されよう。短期的なBATによるCO₂排出削減だけでなく、長期的な革新的鉄鋼生産技術の開発は究極的な解決策として全世界の鉄鋼技術の総力を挙げて取り組

むべき課題である。鉄鋼先進国として特に日本の役割は大きい。

本稿では鉄鋼業における地球温室効果ガス排出削減への取り組みの状況、セクトラル・アプローチとりわけ世界鉄鋼協会が提唱している「グローバルなセクトラル・アプローチ(Global Sector Specific Approaches)」を紹介した。今後、技術開発促進の枠組みという意味でもセクトラル・アプローチを実証的に分析していくことが求められよう。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、環境省、経済産業省、外務省、(社)日本鉄鋼連盟、世界鉄鋼協会のホームページに掲載された資料を多数活用させていただいた。改めて感謝する。

参考文献

- 1) 日本政府の京都議定書目標達成計画 (2008年3月28日全面改定)
- 2) 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会 (2008年12月16日)配布資料
- 3) Steel in figures in 2008, World Steel Association
- 4) 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop.html>
- 5) CO₂ Emission from Fuel Combustion, IEA 2005
- 6) 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会鉄鋼ワーキンググループ (2008年10月27日開催)配布資料
- 7) 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会鉄鋼ワーキンググループ (2008年度第1回、2008年7月1日開催)配布資料
- 8) エネルギー効率の国際比較 (発電、鉄鋼、セメント部門) (財)地球環境産業技術研究所 2008
- 9) (社)日本鉄鋼連盟ホームページ
<http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/joukyo/index.html>
- 10) 経済産業省プレスリリース (2008年5月23日)
- 11) State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) Handbook
- 12) エネルギー技術展望 2008, IEA
- 13) Media Release: International Iron and Steel Institute, 8 October 2007
- 14) 外務省ホームページ: 洞爺湖サミット議長総括仮訳 (2008年7月9日)
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/summit/toyako08/doc/doc080709_09_ka.html

執筆者プロフィール



小島 彰

客員研究官
社団法人日本鉄鋼協会 専務理事
<http://www.isij.or.jp/>

1915年に産学連携による鉄鋼技術の発展を目的に設立された日本鉄鋼協会専務理事。
鉄鋼行政や中小企業技術行政に携わる。
人材育成、技術研究の双方について産と学の連携協力が日本の発展のために不可欠。
地味だが日本の産業を支える世界トップの日本鉄鋼業の技術力をアピールしたい。

山地から河川、海域にわたる 流砂系問題に対する実証的研究の推進

井上 素行
客員研究官

1 はじめに

我が国は国土の約7割が山地からなっており、斜面の侵食や崩壊などにより、毎年大量の土砂が生産されている。これらの土砂は河川の流水によって運ばれ、河川流域では洪水時に氾濫と堆積を繰り返し、また河口や海岸域では、波浪や潮流などの影響を受けて堆積と侵食を繰り返して、現在の平野や河口デルタ、砂礫浜を形成してきた。かつては如何に河床の上昇を抑えて洪水氾濫を防ぐかが大きな課題であったが、一方で、豊富な土砂の供給が白砂青松の自然豊かな国土と多彩な生態系を維持してきたのである。

我が国では高度成長時代を迎えた1960年頃から、河川の上流域に治水、発電、用水確保などを目的として多数のダムが建設された。大規模なダムは、土砂の流下経路を遮断して、土砂流出が激しい流域では大量の土砂がダム貯水池に堆積している。また、河川や海域では大量の砂利が採取されて、海域への土砂の供給が減少す

るとともに、港湾・漁港などの大型の海岸構造物が多数建設されて海岸に沿った漂砂^{注1)}を遮断する状況が生じている。

これにより、ダムが本来有すべき機能が低下するとともに、ダム下流域では河床が低下し、河口や海岸では砂浜が侵食されるなど、流砂系^{注2)}のアンバランスによる様々な問題(ここでは流砂系問題と呼ぶ)が顕在化している。

このような状況を踏まえ、1998年7月に当時の建設省河川審議会総合土砂管理小委員会は、流砂系の総合的な土砂管理に向けた取り組みを求める報告書を提出した。また、2006年からスタートした第3期科学技術基本計画では、「流砂系全体の土砂動態予測技術、土砂対策およびそれが流砂系全体に及ぼす影響を評価する技術」を社会基盤分野の戦略重点科学技術として取り上げている。

流砂系問題の解決には、ダムからの排砂を含め、流砂系全体にわたる治水、利水および環境面の調

和がとれた土砂取支のバランスを図る取り組みが必要である。しかしながら、これまで災害防止のために河川上流域で土砂の流出を防止する考え方はあっても、下流に必要な土砂を計画的に供給するという考え方はなかった。そのため、山地から河川、海域までを含む流砂系を一貫した検討体制は存在していない。また、土砂の移動現象は広範囲にわたり、かつ現象の複雑さ、測定の難しさから、流砂に関わる実態の把握が十分とはいえない状況にある。このため、土砂を流下させた場合の河川下流域や海域への影響を評価し問題の改善効果を評価する技術、さらには制御する技術が確立できていない状況である。

本稿では、ますます深刻化する流砂系に関わる土砂問題の実情および対策技術・研究の動向を概観するとともに、流砂系を一貫した土砂管理の展開に向けて今後は何が必要なのかを述べる。

注1) 漂砂：波あるいは流れによって底質の砂が移動する現象、または移動する砂をいう。

注2) 流砂系：流域の源頭部から海岸の漂砂域までの土砂の運動領域をいう。

2 我が国における流砂系問題の実情

2-1

山地からの土砂流出の特徴

我が国は、環太平洋火山帯に位置し、地震や火山活動が活発であり、急峻な地形に脆弱な地質が分布している。火山岩類の貫入による破碎作用や熱水変質作用を受けた岩盤は、雨水の浸透や凍結・融解の繰り返し作用、岩盤のクリープなどによって崩れやすくなっている。加えて、台風や前線、低気圧によって激しい降雨が発生するなどの厳しい気象条件を有していることから、山地では活発な土砂の生産が行われている。年間の平均生産土砂量はおよそ2億m³と見積もられているが¹⁾、土砂の生産量には地域差があり、糸魚川・静岡構造線や中央構造線沿いの地域など、地質的に脆弱な地域で多く、中部・北陸地方で全体の約半分を占めている。

日本列島は脊梁山脈が国土を貫き、急勾配の短い河川が平野や海域に直結している。山地で生産された大小さまざまな粒径からなる土砂は、間歇的に生ずる洪水によって大量に、また平常時の流水によって持続的に河川を流下し、その過程で、各所で氾濫と堆積、そして再移動を繰り返してきた。河川が急勾配の山間地から平地に流れ出る場所では比較的粒径の大きな礫や砂が堆積して扇状地ができ、勾配が緩い平地では粒径が小さい砂や微粒の土粒子に含まれる栄養塩などが堆積して肥沃な平野や河口

デルタが形成されている。また、海域では河川などからの土砂の供給によって、干潟や砂浜海岸を形成してきた。

このように、山地からの土砂は国土の形成と維持のための血流としての役割を果たし、地域固有の風土と生態系を育むとともに、人間の生活に脅威を与えてきたのである。

2-2

流砂系の歴史的変遷

2-2-1 高度成長期以前

我が国では、江戸時代以前にあっては、建築用あるいは燃料となる木材の切り出しなどのために山林が荒廃し、そのため、土砂流出が大量で河床が高いために洪水氾濫が頻発した。明治には外国人技師が、植林その他の砂防工事による土砂流出軽減に乗り出した。また、新田開発が積極的に進められた。沖積平野における農地開発では、霞堤^{注3)}を廃止して連続堤にしたために、遊水機能を果たしていた低湿地を減少させた。そのような場所は必然的に水害に弱いため、災害の多発につながった。大量土砂流出の傾向は、1960年代まで続き、戦後の大洪水頻発の一原因をなしていた²⁾。

2-2-2 高度成長期以降

第二次世界大戦後、河川の氾濫原であった領域にまで住宅が数多く建てられるようになったことか

ら、台風や前線性の豪雨によって多数の死者を出す災害が相次いで発生し、水害に強い河川を造ることは、当時の国民の悲願であった³⁾。このため、河川堤防の強化とともに、山地緑化に力が入られ、砂防工事が土砂流出を抑制することを目的として行われてきた。また、食糧の増産を支えるための農業用水の確保や、コレラ・赤痢などの疫病の蔓延から都市の住民を守るための清潔な水道水の確保、エネルギー需要の急激な増加に対応するための大規模水力発電の建設が必要とされた⁴⁾。

このような背景があつて、高度成長時代を迎えた1960年頃から、洪水調節、水力発電、水道、工業用水の確保などを目的として、多数の大規模なダムが築造された。これらのダムは洪水の危険を軽減して住民の生命と資産を守り、下流域の土地の高度利用を拡大して、産業を発展させることに大きく貢献している。水力発電量は2006年時点において年間約950億kwhで、我が国の総電力需要の1割弱を担っており、CO₂を排出しない貴重な純国産資源となっている⁵⁾。一方、大規模ダムは、貯水池計画において通常100年間分の堆砂容量を確保し、流水とともに土砂を貯水池にため込む前提で設計されている。このため、ダムからの放流水に含まれる微粒の土粒子を除いて、上流域から流入する土砂の大部分を貯水池で捕捉し堆積させている。また、砂防工事として数多くの砂防堰堤が設置されて、荒廃した山地や溪流から流出する土

注3) 霞堤：比較的急勾配の河川において、堤防に開口部を設けて不連続にしたもの。洪水時に、河川水の一部を一時的に堤防の外側に逃がして洪水の勢いを弱めるとともに、田畑に肥土を沈殿させて地力の衰えを防止する役割を持っている。また、堤防からの氾濫水や支川からの洪水を河川に排水する機能もある。

砂をためている。

図表1に、我が国全体の、山地から河川、海域に至る土砂流出の模式図を示す。ダム等の河川を横断する構造物への堆砂量は年間約1億 m^3 となっており、年平均生産量の約半分の土砂が下流域への供給を遮断されている。高さ15m以上の約2700ダムのうち、堆砂量の報告が義務付けられている総貯水容量100万 m^3 以上の877ダムについてみると、2005年現在で約13億 m^3 の土砂が貯留されている¹⁾。土砂流出が激しい流域では、洪水時に一気に流出する大量の土砂がダム貯水池に捕捉されることにより、かつて暴れ川と呼ばれた河川の中・下流域で、近年、河床上昇が抑制されて、洪水の疎通能力が向上し、洪水氾濫を大幅に抑制している面もある。

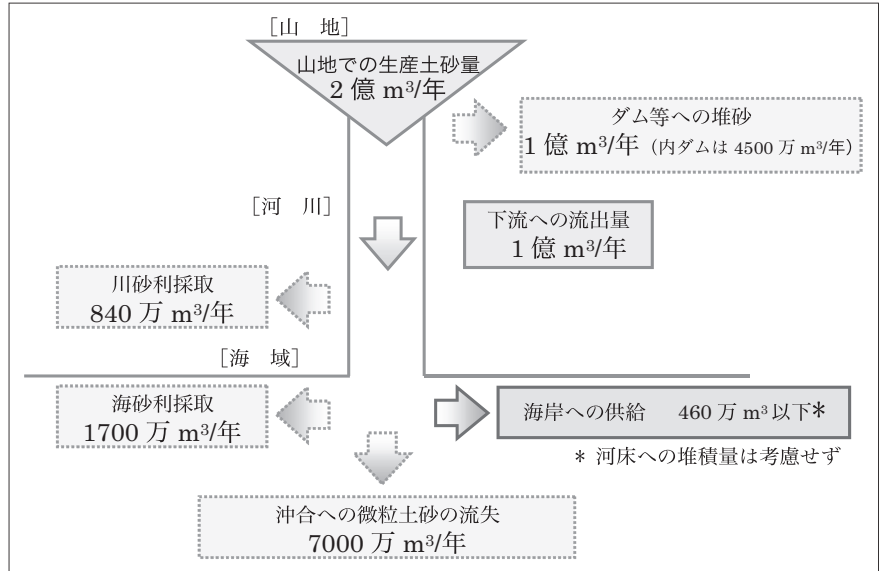
さらに、高度成長期以降、コンクリート骨材の需要に応じるため、河川および海域において大量の砂利採取が行われてきたことも流砂環境の大きな変化要因である。川砂利の採取量は1966年には年間1.3億 m^3 にも及んだが、その後厳しく規制されて、1989年には2200万 m^3 、2004年には840万 m^3 に減っている。海砂利の採取についても禁止される傾向にあるが、2004年時点では1700万 m^3 の採取量となっている。また、海域では港湾・漁港などの大型の海岸構造物が多数建設されているが、これが海域の沿岸方向の漂砂の移動に大きな影響を及ぼしている。航路や泊地に堆積した土砂の大部分は砂浜に戻されることなく、沖合や陸域に処分されている。

2-3

流砂系のアンバランスによる問題の発生状況

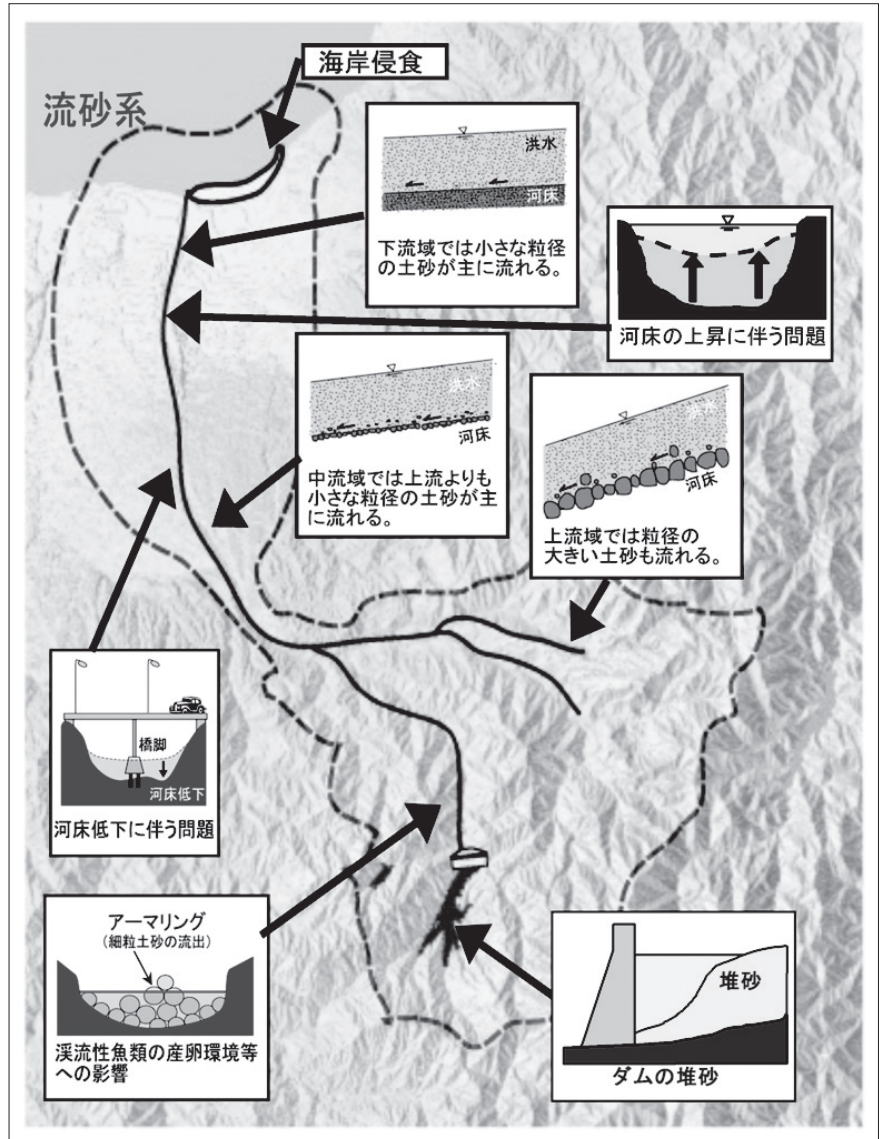
河川における土砂移動の特徴と、

図表1 日本全体の土砂の生産および流出量の概要



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 河川における土砂移動の特徴と問題発生概要



出典：参考文献⁶⁾

ダム貯水池での土砂貯留、ダム下流域での河床表層砂礫の粗粒化(アーミング現象)や河床の低下、下流域での河床上昇、海岸侵食など、発生している土砂問題の全体概要を図表2に示す。問題の発生内容や程度は、流砂系の自然特性と人為作用の組み合わせによって大きく異なる点に留意する必要がある。

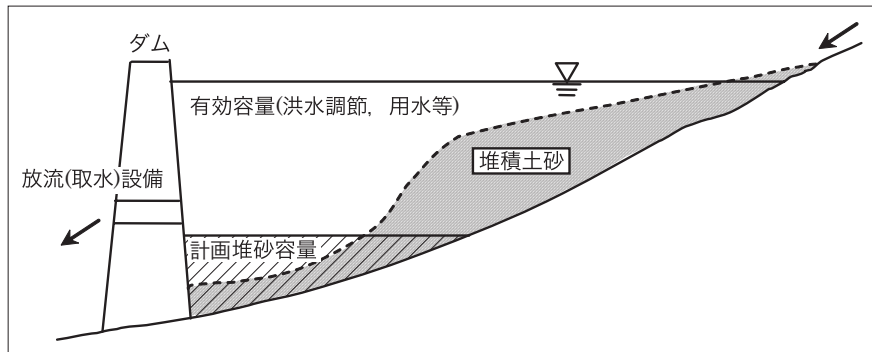
2-3-1 ダム貯水池における土砂の貯留

ダム貯水池の建設にあたっては、一般に、100年分の堆砂容量をダム近傍の貯水池の深い部分に確保しているが、上流からの流砂は貯水池への流入部付近の有効容量の領域内に堆積することが多い(図表3)。このため、堆積土砂は貯水池計画で目論まれている有効容量を減少させて、洪水調節、水道用水、発電等の貯水池の機能を低下させるとともに、貯水池流入部の河床を上昇させて、洪水時の氾濫危険度を増大させるケースが生じている。堆砂が進行すると、放流設備や取水設備などのダム付帯設備の機能に影響を及ぼすことも懸念される。

土砂の生産が活発な中部地方で見ると、2005年現在、総貯水容量が100万m³以上のダムでは、総容量の30%以上が土砂で埋まっているダム数が27ダムで全体の34%となっている¹⁾。全国のダムで見た場合、貯水池の計画堆砂量をすでに上回っているダムは140ダムで全体の16%となっている。近年、中山間部の過疎化が進展しており、山林の管理が十分でなく、土砂崩壊の抑止力が低下していることも今後の不安要因となっている。

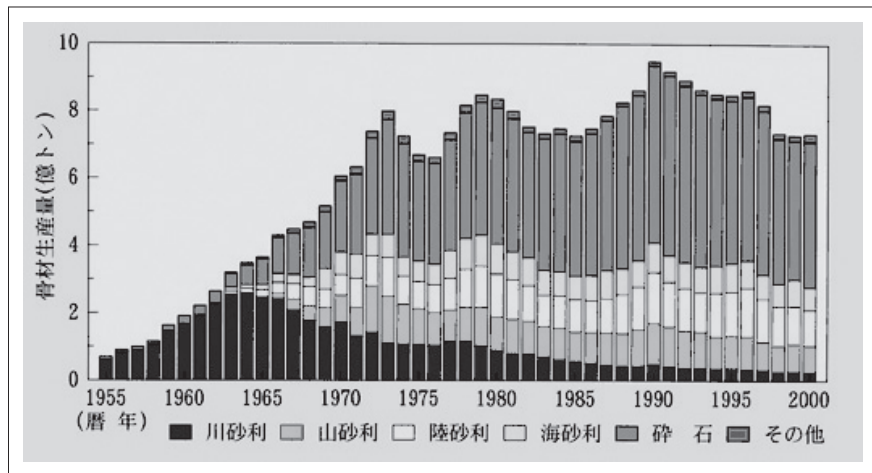
貯水池の規模が大きく貯留水の回転率が低いダムでは、出水時に流入した粒径10μm程度以下の大量の微粒土粒子が懸濁質となって長期間にわたって貯水池内に滞留し、下流河川に濁水の長期化をも

図表3 ダム貯水池の堆砂容量と堆砂形状の関係



科学技術動向研究センターにて作成

図表4 日本の骨材生産量の推移(1955-2000年)



出典：参考文献⁹⁾

たらず現象や⁷⁾、流入した窒素、リン等の栄養塩類が高濃度で長時間滞留することにより、藻類が異常繁殖してアオコや水の華などが生じる、いわゆる富栄養化による水質悪化をもたらす現象も発生している⁷⁾。

2-3-2 河川中・下流域における河床の低下

河川の中・下流域では、ダム等による流砂遮断と過度の砂利採取の影響により河床が低下して、護岸や橋脚基礎が洗掘されたり、農業用水や水道などの取水堰が機能麻痺に陥る例が生じている。また、上流域からの砂礫の供給が減少したために、細かい砂分が流されて河床材料が粗粒化するとともに、出水時の河床砂礫への研磨作用が低下して付着藻類の更新が滞るなど、魚類を始めとした水生生物の生息環境に影響を及ぼしているこ

とが指摘されている⁸⁾。さらに、ダムの運用によって洪水の頻度と規模が減少したと相俟って、下流河川の洲が移動できなくなることによって植生が固定化する状況が生じている。これによって植物層の分布に影響を与えているとともに、ヤナギ類などが樹林化して大洪水時の疎通能力を阻害している状況も生じている¹⁾。

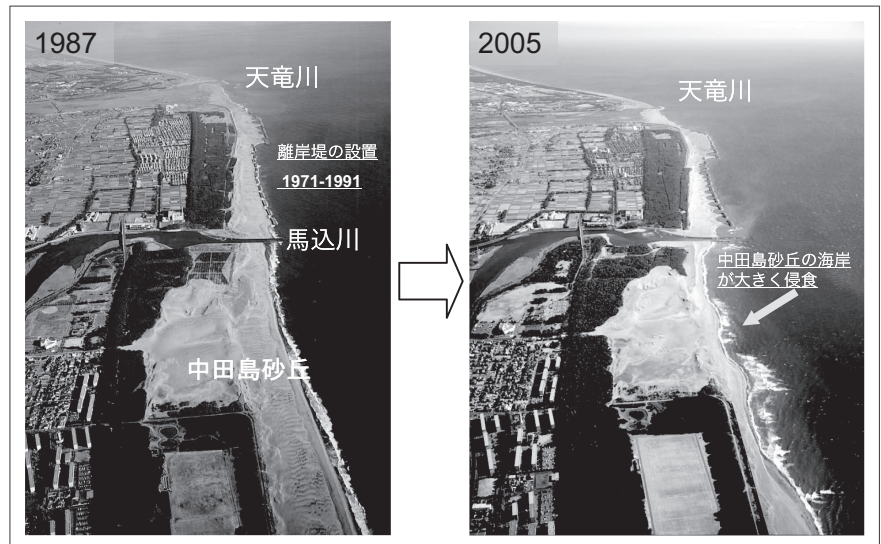
また、川砂利採取の影響に対する反省から、近年、河床での砂利採取が大幅に規制されているが、大規模なダムがない流域などでは河川下流域で局所的に河床上昇が生じて洪水の危険度が増大したり、規制がダム等における砂利採取にまでおよび砂利資源の不足をきたす状況が生じている。このため、山を切り崩しての大量の砕石生産が行われており(図表4)、山紫水明の自然景観を損なう状況が生じている。

2-3-3 河口域および砂礫海岸の侵食

河川上流域からの供給土砂の減少や、河床や海域における砂利採取、さらに港湾・漁港などの海岸構造物の設置による沿岸方向の漂砂の遮断などにより、河口域や砂礫浜での侵食が進行している¹⁰⁾。昭和から平成にかけて、年平均で約160haの砂礫浜が消失しており¹¹⁾、高波を減衰させる防災機能や、海水の浄化作用、仔稚魚の成育環境、ウミガメの産卵場への影響などの問題が指摘されている。

海岸の侵食を食い止めるために消波ブロックや離岸堤などのコンクリート構造物がいたるところで見られるようになってきているが、これらの対症療法的な侵食防止対策工法は、他の領域の侵食を促進することがあるなどの問題を有している¹²⁾。また自然豊かな美しい砂浜海岸の景観を大きく損ねている。図表5に、遠州灘における1987年と2005年の海岸の状況を比較して示す。天竜川からの土砂供給の減

図表5 遠州灘における海岸侵食の事例



参考文献¹³⁾を基に科学技術動向研究センターにて一部加筆修正

少に伴う砂浜の侵食防止対策として、左側の1987年の写真において、天竜川と写真中央の馬込川の間で離岸堤が設置された。この対策によって当該部では沿岸方向の漂砂が捕捉されて侵食防止の効果が見られたが、漂砂の下手側にあたる写真下方の中田島砂丘では砂の供給が減少し、2005年の写真では中田島砂丘の海岸が大きく侵食され

ている様子が見られる。

2005年現在、我が国の海岸延長3万5000kmのうち、すでに延長約9500kmにおよぶ海岸保全のための施設が設置されているが、これらの構造物の耐用年数を50年と考えた場合、将来、年間200kmの区間について毎年補修または更新が必要となり、次世代に大きな負担を強いることになる。

3 流砂系問題に対応する技術とその研究の動向

3-1

総合土砂管理への方針の転換

河川や海岸などの資源を高度に利用し、また、災害から身を守るために、自然現象を何とか制御しようと各種の砂防構造物、貯水池、堤防・護岸、堰、海岸堤防・防波堤等を建設してきた結果、それぞれの事業目的に対しては成果が得られた。しかし、その反面、流砂系に対してはそれぞれの負の影響が他の領域におよび、また時間の経過を経て様々な問題が顕在化するようになった。このような背景を踏まえて、当時の建設省河川審

議会総合土砂管理小委員会は、「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」と題した報告書(1998年7月)を提出した。報告書では、流域の源頭部から海岸までを含めた「流砂系」という新たな概念が導入され、土砂を止める対策に重点を置いてきた従来の土砂管理の考え方を改めて、適切な土砂移動を図ることが重要であることが強調された。これを受けて、建設省は、それぞれの河川・海岸の特性を踏まえて、土砂の移動による災害の防止、生態系・景観等の環境の保全、河川・海岸の適正な利活用を図ることを目標とした、河川流域および海域を包括したスケールの総合的な土砂管理に向けた取り組みを進める

ことになった¹⁴⁾。

河川法は、1997年に、従来の治水・利水に加えて、環境を考慮した総合的な河川管理を目指すように改正された。海岸法も、1999年に従来の海岸背後の人命・資産の防護から、海岸の環境や利用まで含めて調和のとれた海岸保全を目指すように法改正が行われている。

3-2

流砂系の各領域における固有技術の研究動向

3-2-1 土砂の動態調査

流砂系の総合土砂管理技術の高

度化へ向けた取り組みの一環として、近年、流砂の影響が顕著に現れている地点で土砂の動態に関する調査が行われている。

(1) 河川における土砂の動態調査

天竜川においては、佐久間ダム貯水池堆砂、下流河道部および海岸部の土砂の粒径分布を比較して、ダムから土砂を流した場合に、そのまま海域の沖合まで流出する粒径成分、砂浜の形成に寄与する成分、下流河床に堆積する恐れがあり治水上の十分な管理が必要な成分などの評価が行われている¹⁵⁾。安倍川においては、流砂量の観測結果を河川の流量と関係づけて、洪水時の粒径集団ごとの土砂の移動量が推定されている。流域最下流での洪水時の流砂量のうち海浜変形に寄与する成分(0.1～10mm)が約72%を占めていて、海浜形成に有効であること、洪水時に途中の河床で堆積が生じるために治水安全上、土砂の継続的な排除が必要であることなどが明らかにされている¹⁶⁾。河川の流砂の観測技術については、地形の変化や浮遊砂の観測は可能となっているが、河床への堆積により氾濫につながる恐れがある粒径が大きい土砂の流れについては、いまだ測定が困難な状況である¹⁶⁾。

一方、矢作川においては、ダムからの土砂供給量の変化が底生生物相に及ぼす影響についての調査が行われている。ダム直下流では流砂量が少なく、河床は砂や小礫の割合が少ない。一方、貯水池で増殖した流下動物プランクトンが多くなっている。このような生息環境の変化により、底生生物相に明瞭な変化が現れるが、ダム下流域では、支川の合流によって緩和傾向にある¹⁷⁾。

(2) 海域における土砂の動態調査

安倍川河口部では、河口テラスの地形の変化が現地の測量データ

に基づいて調べられている。洪水時の河川からの流入土砂によって河口テラスがどのように発達するか、また、その後、波浪の影響を受けてテラスが変形することによって海岸に土砂が供給される状況について検討が行われている¹⁸⁾。

また、天竜川が注ぐ遠州灘周辺においては、古地図や空中写真、地中レーダのデータを組み合わせた長期にわたる海岸変形の歴史の変遷の調査、山地や河川、砂浜の土砂の鉱物分析によって海浜土砂の供給起源を広域的に解明するための調査が行われている。また、海域での土砂の移動を長期的かつ広域的に把握するために、超音波を用いた新たな観測技術の開発や、漁協と協力してシラス漁船の魚探データを用いて広域・高頻度で海底地形の変化をモニタリングするなど、浮遊砂や海底地形の観測技術の開発などが進められている。大学、民間、国土交通省、自治体が協力して、科学技術振興調整費重点課題解決型研究である「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災(通称、遠州灘プロジェクト)」として行われており、流砂系関係の研究者から注目されている¹³⁾。

また、手取川が注ぐ金沢海岸や宮崎県東部の日向灘海岸においては蛍光砂によるトレーサー調査や鉱物分析、深淺測量による土砂の動態調査が行われ、沖合への損失土砂や岬を越えての土砂の移動の実態が明らかにされつつある¹⁹⁾。

3-2-2 山地における土砂の流出予測技術

信濃川水系高瀬ダムは流域面積あたりの年間堆積土砂量が我が国第一位のダムである。ダムの管理を行っている電力会社は、長年月にわたる空中写真による上流域の地形変化計測、崩壊斜面における侵食・堆積変化の現地観測データなどに基づいて、斜面の崩壊・侵食による土砂の生産と斜面や浜床で

の堆積による一時貯留の特徴を把握し、どのような降雨条件で土砂が流出するかを大学と共同で研究し²⁰⁾、溪流からの混合粒径土砂の流出予測モデルを作成している²¹⁾。

3-2-3 ダムからの排砂技術

従来は、大規模なダム貯水池における排砂は、掘削や浚渫によるものが主であったが、近年、ダムの流域や設備の特性に応じて、図表6に示すような様々な排砂技術の適用性の検討が行われている²²⁾。高度成長期に建設された多くのダムにおいて、今後、機能維持のための堆砂対策が想定される中で、排砂に着目したライフサイクルコストとサービス水準の関係についてのダムのアセットマネジメントに関する研究が始まっている²³⁾。このような中で、大規模なダムや砂防堰堤において、流入土砂を下流域に流す試みがスタートしている。

(1) 排砂バイパス

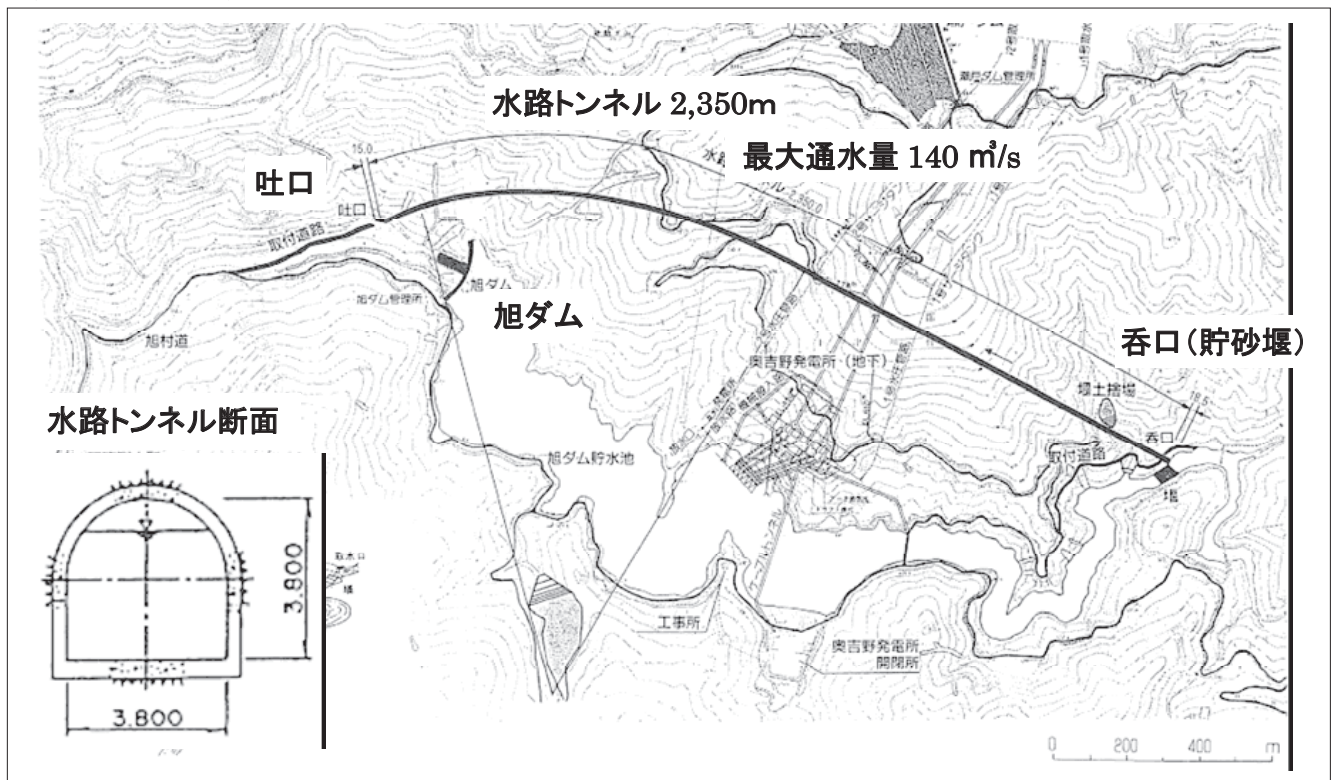
新宮川水系旭ダム²⁴⁾、および天竜川水系美和ダム²⁵⁾では、貯水池の上流からダムの下流をつなぐ水路トンネルを設置して、洪水時に貯水池に流入する土砂を迂回させて流下させるシステムを整備して運用する試みが行われている。図表7の旭ダムでは、貯水池の上流部に貯砂堰を設置し、土砂を含んだ洪水をトンネルでダム下流に導いている。従来から問題になっていた貯水池の濁水の長期化現象が大きく改善し、貯水池の堆砂の増加を抑制した。ダム下流では河床にきれいな砂が蘇り、地元からは好評を得ている。ただし、ダムからの流下土砂は下流のダムに流入して堆積しており、河川を連続した排砂には至っていない。また、流砂によってトンネル設備が洗掘されるため、毎年補修が必要になっている。

図表6 ダムの排砂技術の種類

対応時期	排砂手段	排砂工法	概要
平常時対応	機械的土砂移動	掘削・浚渫	堆積土砂をバックホウや浚渫船で除去しダンプやポンプ圧送によって輸送
		下流河川土砂還元	掘削した堆積土砂をダム下流河川に置き、洪水時に流下
		(水圧吸引工法)	水位差を利用してサイフォンの原理で吸引した土砂を下流に放流
洪水時対応	ダムを迂回して排砂	水圧吸引工法	水位差を利用してサイフォンの原理で吸引した土砂を下流に放流
		排砂バイパス	貯水池上流で分流した洪水をバイパストンネルを通じて下流に流下
	ダム低位部より排砂	フラッシング排砂	貯水池を空にして、堆積した土砂を洪水の掃流力を利用してゲートから排砂
		スルーシング排砂	貯水位を下げて貯水池内流速を高め、貯水池に流入する土砂を掃流力を利用してゲートから排砂
		密度流排出	貯水池底沿いの密度流の発生に合わせて流入する濁水や細粒の土砂を低標高部のゲートから放流

参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表7 旭ダムにおける排砂バイパス平面図



参考文献²⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて一部加筆

(2) フラッシング排砂

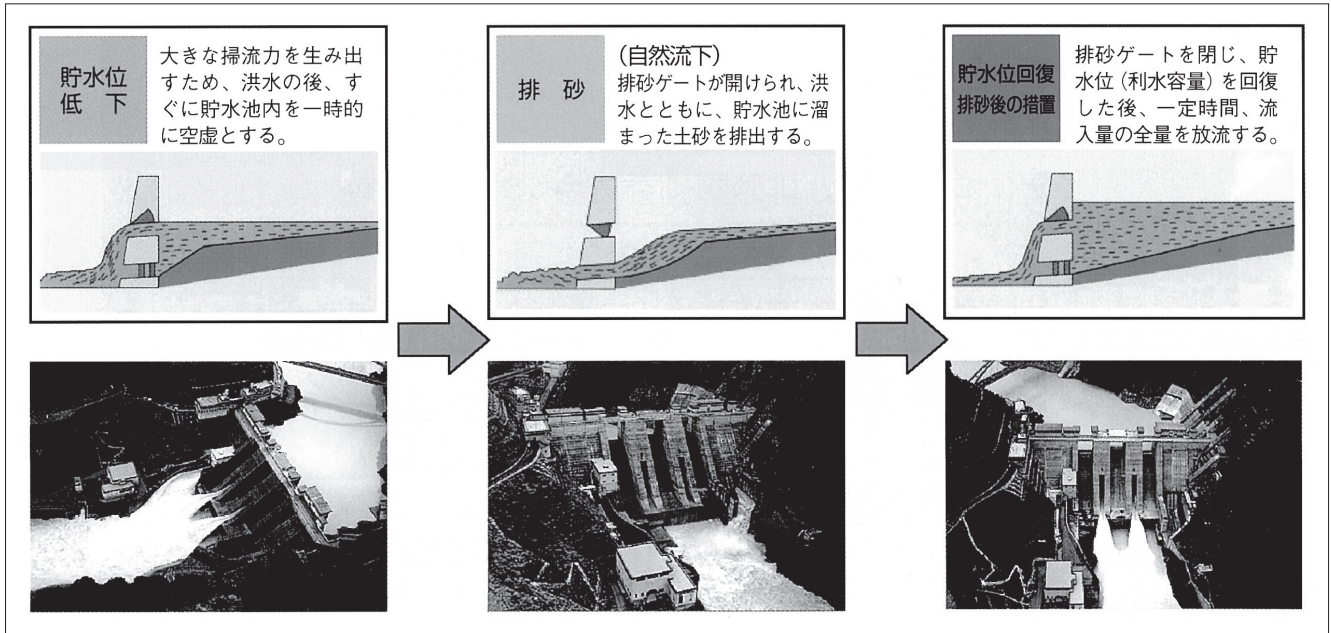
黒部川水系出し平ダムと宇奈月ダムでは、連携して貯水池を空にして、河川の流水の力で貯水池内に堆積している土砂をゲートから排出する試みが始まっている(図表8)。1回あたりの排砂量は2万 m³ ~ 172万 m³となっている。このような排砂の方法は小規模な

ダムではこれまでも実施されてきたが、大規模なダムでは排砂後の貯水池の再湛水に時間がかかり、発電などの機能の確保ができないことなどから実施されなかった。しかし、本事例では、貯水池容量に比して河川の流量が大きいため排砂後の再湛水のリスクが小さいこと、またダム下流が急流河川

となっていて、わずか数十 km で日本海に流入しており、土砂排出による下流域の河床変動への影響が比較的小さいことから、大規模なダムでも導入しやすい地点条件であったといえる。

長年月間土砂を貯水池にため込むと排砂時の水質が悪化するなどの影響が出るため洪水時に合わせ

図表8 出し平ダムにおけるフラッシング排砂



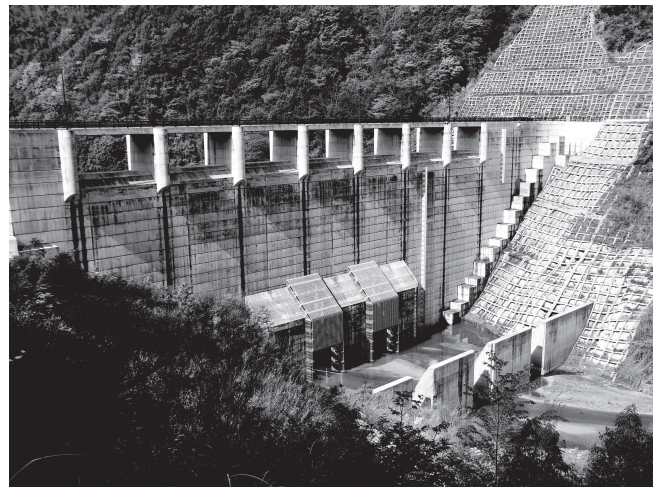
出典：ダム水源地環境整備センター提供

図表9 鋼管型砂防堰堤



出典：参考文献²⁷⁾

図表10 洪水調節専用の流水型ダム (ダム上流側)



出典：参考文献²⁸⁾

て排砂するとともに、河川および海域における濁質濃度や溶存酸素濃度などのモニタリングを行うなど、土砂の排出に伴う下流域への影響に配慮しながら実施されている²⁶⁾。

(3) 土砂を流す砂防堰堤、洪水調節専用の流水型ダム

砂防堰堤は土砂を堰き止めて災害を防止することを目的としている。近年、大規模な土砂流出時には土砂を堰き止めるが小規模な出水時には下流域に土砂を流下させる鋼管型やスリット型の砂防堰堤

が設置され始めている(図表9)。

また、一部で洪水調節専用の流水型のダムも設置され始めている。常時は流水を全く貯留せずに、洪水時には流入水を一部通過させながら貯水して流量調節し、その後速やかに排水する。洪水時に上流から流入した土砂の自然排砂が可能であり、堆砂量の抑制と流砂の連続性を確保することを狙いとしている(図表10)。

(4) 河川土砂還元

近年、ダムの機能維持や下流河川の生態系に対する環境改善など

を目的として、ダム貯水池の堆積土砂の一部をダムの下流の河床に置き土し、洪水時に下流域に流下させる試みが始まっている(図表11)。2008年現在、全国21箇所のダムで実施され、さらに他のダムでも実施に向けての検討が行われている。大規模な施設の整備を必要としない点に特徴がある。しかし、1回あたりの置き土量は数百 m^3 ～数万 m^3 程度であり、まだそれほど多量の流下は実施されていない。実施にあたっては、下流域で生じている環境上の問題点や、置き土に伴う濁水の発生、流下後の下流

河床への堆積による治水上のリスクなどを考慮して、置き土の粒径や安全に流下させるための対象洪水規模、河床への土砂の置き方などが検討されている²⁹⁾。濁水の発生などに対してまだ地元からは抵抗感が示されるケースも多い。しかし、実施前後のモニタリングによって下流域での河床地形や河床材料、底生生物、藻類などについての改善効果が確認されて、むしろ地元から歓迎されている事例もある。

3-2-4 堆積土砂の有効利用技術

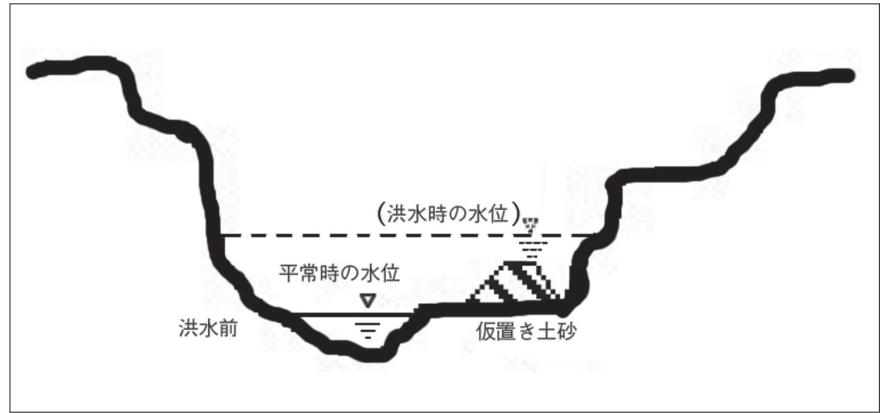
従来から、主に貯水池流入部における堆積土砂を採取し、コンクリート用骨材などに利用している。しかし、消費地までの輸送コストや質の安定性、法規制などの問題があって、必ずしも十分利用されているとはいえない。

貯水池内の堆積土砂は、位置別に概ね図表 12 に示すような特徴を持っている。近年、従来の堆積土砂の利用方法に加えて、ダム直近の湖底に堆積している高濃度の腐植酸鉄を海岸の磯焼け回復に活用し、海藻類の増殖を促進するための実証試験³¹⁾や、貯水池内の各領域において混在している種々の粒径の土砂を簡易な方法でサイズ分けして河川土砂へ還元させるフィールド研究³²⁾などが行われている。

3-2-5 河床変動予測技術

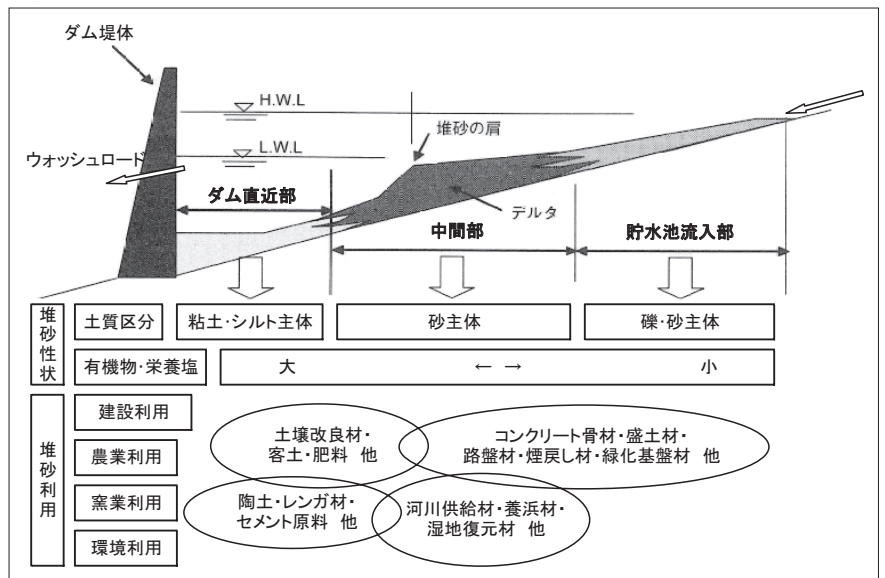
大小さまざまな混合粒径から成る土砂が、河床において侵食あるいは堆積する量を推定するための数値解析モデルの開発が必要である。流砂の変化を考慮した河川の維持管理を適切に行えるようにするには、洪水中に河床が大きく変化することを十分考慮する必要があるが、現状はまだそのような解析ができていない。現在、現地実験データに基づいて、洪水流と河

図表 11 置き土による貯水池堆砂の河川還元



出典：京都大学角哲也教授提供

図表 12 貯水池内堆積土砂の場所別の性状



参考文献³⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

床変動の時間変化の相互作用を考慮することにより、洪水中に生じる河床変動や水面形状の解析の信頼度を高めるための研究が行われている³³⁾。

3-2-6 海岸変形予測技術

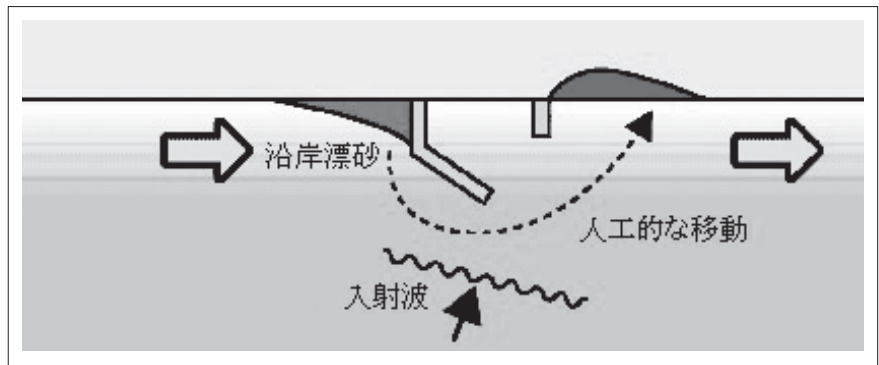
河口域や海岸部での地形変化データや堆積物の粒径調査結果、波浪データなどから、混合粒径土砂の堆積・侵食過程を地形や海岸構造物の影響も含めて解明する研究も進められている。前述した「遠州灘プロジェクト」では、広域の土砂動態の調査結果に基づいて、河口から海浜形成にいたる土砂輸送機構の解明と高精度地形変化予測モデルの開発が進められている。土砂動態の把握技術と地形変化予

測技術を組み合わせることによって、土砂動態や地形の変化に対して柔軟かつ継続的に対応できる、順応的な土砂管理技術の構築を目指している¹³⁾。また、鹿島灘の波崎海岸では、固定観測施設による20年間にわたる波、流速、土砂濃度、海底地形変化などの連続観測データを用いて、岸沖方向の沿岸漂砂量の分布や海底地形の変化を求めるシミュレーションモデルの開発が進められている³⁴⁾。また、室内実験に基づいて火力・原子力発電専用港湾を対象とした混合粒径による三次元海浜変形モデルの開発が行われている³⁵⁾。

3-2-7 サンドバイパス・サンドリサイクル

海岸構造物の影響によって侵食が発生している海岸への対策として、沿岸漂砂の上手側に堆積した土砂を構造物の下手側に人工的に移動させて流砂の連続性を回復するサンドバイパス(図表13)や、侵食海岸の下手側に堆積している土砂を侵食域に戻すサンドリサイクルによる養浜の試みが一部でスタートしている。千代川流砂系では鳥取砂丘や白兎海岸の侵食の拡大を防止するために、河川管理者や港湾・漁業管理者、海岸管理者などが協力して、河口や航路・泊地などの浚渫土砂を侵食海岸に投入する試みが行われている³⁶⁾。また、天竜川の東側に位置する福田漁港では、天竜川からの沿岸漂砂の大量堆積による漁港機能の低下と漂砂の下手側の浅羽海岸の侵食を防止するため、パイプラインによる恒久的な砂輸送システムを整備したサンドバイパスが試みられている。海岸地形や底質粒径の変化、水質、底生動物やプランクトンなど生物環境への影響、アカウミガメ・シラスへの影響など周辺環境への影響や、また砂輸送システムの耐摩耗性などを調査しながら実施されている³⁷⁾。

図表13 サンドバイパスの概念図



出典：参考文献³⁷⁾

環境への影響に配慮して実施されている^{38~40)}。スイスでは、フラッシング排砂作業の計画や運営の指針として連邦ガイドラインを発行するとともに、実施時期や方法については州の認可を必要とするなど、制度として明確化している。また、フランスでは上流のスイスのダムと排砂のタイミングを合わせて下流域の水質の環境基準を満たすための検討が行われている。

(2) 中国

中国では、かつてはダムに100年分の堆砂容量を確保して対処する設計が行われていたが、黄河の三门峡ダム(1957年完成、高さ106m)において短期間に大量の土砂が堆積した経験などを踏まえて、現在ではダムへの流入土砂は下流域に流下させることを基本としている。黄河や揚子江においては微粒の土砂が多いことから、出水期は貯水位を低下し貯水池内の流速を増大させて運用し、貯水池への流入土砂の通過促進を図っている。これにより、水力発電量は減少するが、「蓄清排砂」「静水舟航、動水流砂」という考え方で、自然の営力を利用したダムからの排砂を行っている。

(3) 米国

米国のほとんどのダムは貯水池規模が非常に大きいため、ダムの堆砂はあまり問題にされていない。

下流の河川についても、河床の洗掘が起こっている箇所については、土砂を重機で移動させて対処している⁴¹⁾。

3-3-2 海岸侵食への対応

(1) 欧州

オランダでは、地球温暖化にもなう海面上昇に対する海岸保全対策の検討が行われたが、構造物対策ではなく養浜によって現状の海岸線を防護する考えが政策決定されている⁴²⁾。

(2) 米国

沿岸域管理法における政策宣言において、「現在とこれに続く世代のために、沿岸域の資源を保存、保護、開発、そして可能ならば修復、増強する」ことが掲げられている。沿岸域管理の目的を広く捉え、開発と保全の調和を目標にしている。州法において、海岸の価値を保護するためのさらに踏み込んだ内容が定められている。たとえばフロリダ州法では、港湾設備は漂砂の沿岸方向の移動を遮断してしまうことがあるので、維持管理のために浚渫する土砂は、漂砂の流れの下手側に供給し、年間の沿岸漂砂量を確保すべきと記述している。

米国でも海岸侵食の問題は深刻であり、1960年代以前は構造物による対策がかなり実施されていたが、1970年代以降は養浜による侵食対策が主流になっている⁴²⁾。

3-3

海外動向

3-3-1 ダム貯水池の排砂の実施

(1) 欧州

欧州委員会は水管理指令(2000年)の中で、総合土砂管理の観点で、域内の国際河川を対象に河川を連続した流砂の質と量の保全を政策課題として打ち出している。代表的な排砂方法として、フラッシング排砂が用いられており、下流域の人命・財産および生態系などの

4 流砂系問題解決に向けた課題と手段

4-1

日本における流砂系問題の課題

我が国は、山地において大量の土砂が生産されて、河川から海域へと供給されることで国土のバランスが保たれ、生態系が維持されている特徴を有している。黄河や揚子江などで対象としている貯水池の堆砂の大部分は非常に細粒であるが、我が国においては大小さまざまな粒径の土砂に対する防災・環境面の特段の配慮が必要である。

流砂系問題の解決には、流送土砂の連続性を確保し土砂がバランスよく供給されるメカニズムを取り戻すことが必要であるが、流砂系の各領域においてさまざまな構造物が存在し、その機能を前提として社会が成り立っている我が国においては、全く元の自然状態に戻そうとすることは現実的ではない。例えば、大規模貯水池の除去などは下流域に悪影響を及ぼす危険性を十分考える必要がある。したがって、将来の流砂系のあるべき姿は、流出土砂の全てを流すということではなく、地域の特性を踏まえ、地域住民の生命・財産の安全を保障したうえで、資源の持続的な利用を可能にし、さらには多様な生態系などの豊かな自然環境が維持されるものでなければならない。

しかしながら、土砂の移動現象は広範囲にわたり、かつ台風や豪雨などが多い我が国で異常気象時を含めた土砂動態の複雑さ、測定の高難度などから、流砂に関わる実態の把握は十分とはいえない。特に、地域や行政の関係部署および科学技術の専門分野が多岐にわ

たっていることもあって、流砂系全体を俯瞰する連続的あるいは広域的なフィールドデータが非常に不足している。このことは、固有技術の信頼度を高めることを難しくしている。土砂を流下させた場合に懸念される河床上昇による洪水氾濫のリスクの増大や生態系への影響などを適切に評価し制御する技術、さらに河川からの土砂の供給による海岸侵食の改善効果などを予測する技術がまだ確立できていない。連続性がある流砂系の問題は、個々の行政の関係部署や各専門分野による局所的・対症療法的な取り組みでは、安全、利用、環境面で調和のとれた根本的な解決を見出せない^{12) 43)}。総合的な土砂管理の取り組みが提唱されてから10年を経た現在に至っても、流砂系全体にわたる管理技術の体系化や流砂系スケールでの対策の実現には程遠いものがある。

4-2

問題解決に向けて

(1) 実態の把握

まずは、流域の源頭部から海岸の漂砂までの土砂移動の実態をモニタリングによつて的確に把握し、生じている問題およびその箇所、因果関係、影響範囲などを、流砂系全体の視点で、改めて的確に診断することから始める必要がある。そのうえで、各領域で必要な流砂の量と粒径についての改善目標を明らかにし、問題の解消・緩和に向けた適切な土砂の供給対策を、防災、利用、環境の観点から一体的に考えることが必要である。このようなフィールドデータに基づいて、流砂系問題に関わる固有技

術の検証・高度化を行うことが必要である。土砂の移動現象を対象とする土砂水理学は、これまで主に実験室での研究に基づいて作り上げられてきている。そのため、上流域からどのように土砂が供給されるかの予測技術、土砂の粒径分布が地形変化に及ぼす影響の評価などが十分わかっていない。フィールドデータの充実によって既存技術の検証と改良が進められ、信頼度が向上することを期待する。また、研究者間でデータを共同有効活用できる仕組みの充実が必要である。山地における土砂の生産と流出現象は流域の地形・地質条件や気象・水文条件によって大きな差が生じる。また、河川や海域における土砂の動態は時間的・空間的に大きく変化し、地形や水文・気象条件、土砂の粒径などが相互に関連し合う。先端技術を用いた新たな土砂の動態観測技術を開発し、観測システムを改善・充実させるとともに異常気象時を含めた継続的な実態把握に取り組む必要がある。

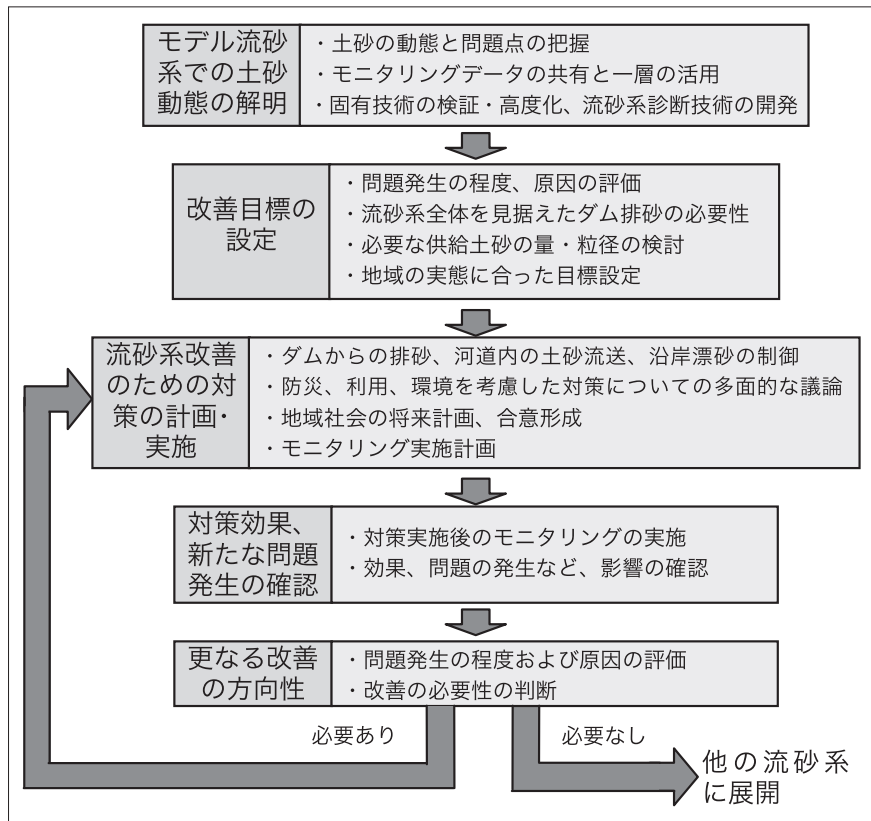
(2) 一貫した実証的研究のフロー

流砂系の各領域において管理部署が異なり、それぞれの管理システムが既に存在している中で、それらを貫いて全体最適の考え方を構築することは決して容易なことではない。山地から海域に至る行政の関係部署や地域関係者、流砂系に関わる専門分野の研究者等が参加し、これまで各領域で培ってきた知見を結集して、一貫した実証的研究を実施する必要がある(図表14)。

(3) モデル流砂系と各改善目標の設定

流砂系問題が顕在化し、改善の

図表14 流砂系問題に対する一貫した実証的研究のフロー



科学技術動向研究センターにて作成

必要性が認識されつつあるモデル流砂系地域を特定し、これに対して集中的に研究資源を投入して、問題解決型の研究を推進することが有効であろう。

モデル流砂系における各改善目標設定については、問題の因果関係を評価して、地形の変化と生態系への影響を改善する必要がある。特に、土砂の「粒径」に着目した評価と供給管理が重要である。また、山地からの流出土砂はそのまま流下させると災害につながる恐れがあることから、貯水池や中・下流域の河床での堆積土砂の有効活用にも十分配慮することが必要である。山地、河川、海を結んだ地域全体を見据えて目標を設定し、地域内では、情報の公開と多様な分野を巻き込んだオープンな議論が進められることを期待する。

(4) 新たな土砂流送の考え方の構築

ダムからの排砂を含めた土砂の

流送については、下流域河床への堆積による氾濫リスクや、利水、および生態系を含めた環境面への影響などを十分確認し、持続可能な技術を模索していく必要がある。流砂系ごとに土砂流出の量や粒径、流送の特性は大きく異なっている。土砂をダムで止めることのプラス面、マイナス面を流砂系ごとにきちんと評価し、ダム貯水池、下流河川、海岸など地域の特性に見合った、土砂流送の制御技術の構築が必要である。また、ダムからの排砂方法についても地点条件をふまえて、スルーシグ排砂など各種の排砂技術を組み合わせた新たな手法についての検討が必要である。

このような一連の検討の過程で、自然の営力を活用して流砂対策を実施する視点も大切であると考えられる。たとえば、ダムと堤防で守られた窮屈な河川を、河川勾配の変化点や支川との合流点など、出水時に土砂が大量に堆積する場所については、ある程度氾濫を許

容する余裕を持つなど、自然に近い土砂動態に戻して、景観や生態系の復元を目指す取り組みも考えられる。このためには河川区域の拡大が必要であり、当該箇所については湿地や田畑に戻すことが必要になるが、来世紀に向けて我が国の人口が大幅に減少して行く中で、堆積土砂の有効利用や食料自給率の向上を図り、自然豊かな環境を大切な資源としてとらえ、将来の地域社会の再生と関係付けて検討が進められることを期待する。このような考え方は、極端に激しい異常気象時の災害リスクの分散対策にも通じる。

(5) 研究フォーラムの形成

流砂系の諸問題の解決にあたっては、個別部署による局所的・対症療法的な対策では限界があることはすでに述べてきたとおりである。地域や行政の関係部署、さらに、科学・技術の専門分野が多岐にわたっていることから、流砂系全体の実態についての共通認識と問題解決に向けた連携した調査・研究活動、さらには関係者間の合意形成が必要である。まず、環境や生態系をも含めた流砂系に関わる学問分野が学術的に発展できるような研究フォーラムを形成することが望まれる。問題解決に向けて、山地から河川、海域にわたる行政や専門分野を超えた全体的な活動を推進し、さらに総合的土砂管理の制度構築への反映をも視野に入れたフォーラムであることが望ましい。

現状からのブレイクスルーのためには研究の推進に必要な資金の確保とともに、大学院生などの若い人材をフィールド調査に積極的に参加させ、長期にわたる多面的な実証的研究のために人材の厚みを増すことが必要である。そして研究者が強い意志のもとで関係部署を横断した人智を結集することが望まれる。

5 おわりに

今後、地球温暖化によって、異常降雨の増大や海水面の上昇など、これまで経験しなかった自然現象の大きな変化により、土砂の激しい流出や大規模な海岸侵食の発生が危惧されている。本稿で論じている山地からの土砂の流出現象は将来にわたって継続するものであり、我々、および我々の子孫の生活に密接に関係する問題である。土砂問題への対応にあたっては、流砂のメカニズムに基づいて長期的な視点に立って社会基盤のありかた、その保全に係わるコストを再評価し、自然と共生するための持続可能な対策を検討することが大切である。

我が国は、先進国の中では、地質変化が激しいという稀有な環境

にある。また、脊梁山脈が国土を貫き、急勾配の短い河川が、人口が密集している氾濫平野や海域に直結しており、流砂による恵みと脅威にさらされている。将来の国土的確な保全に向けて、流砂系に係る技術・総合管理を確立するとともに、これらの取り組みで得られた国土保全の総合管理技術を、類似の自然条件を有するアジア諸国等への国際貢献に活かすことが望まれる。

謝辞

本レポートを作成するにあたり、京都大学 高橋保名誉教授(元総合土砂管理小委員会委員長)、角哲也教授、立命館大学 里深好文教授、九州大学 島谷幸宏教授、東京大

学 磯部雅彦教授、佐藤慎司教授、土木研究センター 宇多高明理事に貴重なご意見をいただきました。また、ダム水源地環境整備センター 棚橋通雄理事、末次忠司研究第一部長、国土技術政策総合研究所 布村明彦所長、藤田光一環境研究官、小山内信智砂防研究室長、諏訪義雄海岸研究室長、小田勝也沿岸海洋研究部長、港湾空港技術研究所 栗山善昭沿岸土砂管理研究チームリーダー、電力中央研究所 宮永洋一環境科学研究所長、清水隆夫物理環境領域リーダー、池野正明 上席研究員をはじめ、各所の関係者の皆様には貴重なご意見と資料を提供していただきました。ここに、深く感謝申し上げます。(所属は2009年3月現在)

参考文献

- 1) (財)ダム水源地環境整備センター、ダムの堆砂対策技術ノート、2008年3月
- 2) 高橋保、土砂流出現象と土砂害対策、近未来社、2006年4月
- 3) 高橋裕、河川にもっと自由を、山海堂、1998年8月
- 4) 岡野真久、日本におけるダムの役割、ダムの役割を考える国際セミナー、2008年4月
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁 HP、エネルギー白書2008：<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2008/index.htm>
- 6) 国土技術政策総合研究所 HP、健全な水循環系・流砂系の構築に関する研究：<http://www.nilim.go.jp/japanese/project/ppdf/p06.pdf#search>
- 7) 松尾直規、ダム貯水池の水質問題、電力土木 No.238、1992年5月
- 8) 竹門康弘、貯水ダム下流の生態系影響とその伝播距離、シンポジウム貯水池土砂管理の現状と将来、2006年12月
- 9) 独立行政法人産業技術総合研究所 HP、日本の骨材資源：<http://staff.aist.go.jp/sudo-gsj/kotsuzai0212/kotsu0212-1.html>
- 10) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 編集代表 河田恵昭・芝山知也、漂砂環境の創造に向けて、1998年7月
- 11) 磯部雅彦、国土管理の基本となる流砂系土砂管理、学術の動向、2008年3月
- 12) 宇多高明、大災害来襲 第6章深刻化する海岸侵食の要因を探る、丸善、2000年11月
- 13) Shinji SATO, A comprehensive study on regional sediment movement in the Tenryu River watershed and the Enshuunada Coast, PARI Seminar, Dec 17, 2008
- 14) 建設省河川局砂防課、河川審議会「総合土砂管理小委員会」報告と今後の取り組み、河川11月号、1998年
- 15) 岡野真久、粒径集団別流砂技術による貯水池土砂管理の提案、ダム水源地環境技術研究所報、2006年11月
- 16) 国土技術政策総合研究所、健全な水循環系・流砂系の構築に関する研究、2007年2月
- 17) 萱場祐一、皆川朋子、土砂供給量が底生動物相に及ぼす影響、土木技術資料50-10、2008年
- 18) 山田浩次、河口域における海浜変形評価手法、土木技術資料50-10、2008年

- 19) 国土技術政策総合研究所 HP、漂砂系における流砂量モニタリングに関する調査：
<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h16giken/pdf/0405.pdf#search>
- 20) Motoyuki Inoue, Haruo Senga, Tamotsu Takahahi, Sedimentation Process in a Steep and High Mountain River Basin, Civil & Environmental Engineering Conference, Proceedings Vol.5, 1999.11
- 21) 高橋保、井上素行、中川一、里深好文、山岳地域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測、水工学論文集 45 巻、2001 年 2 月
- 22) 角哲也、土砂管理で「千年ダム」の実現を、河川レビュー No.131、2005 年 8 月
- 23) 小林潔司、角哲也、森川一郎、堆砂対策に着目したダムにおけるアセットマネジメントの適用性研究、河川技術論文集 第 13 巻、2007 年 6 月
- 24) 原田稔、森本浩、小久保鉄也、バイパス排砂システムの運用実績と効果、大ダム No.173、2000 年 10 月
- 25) 竹田正彦、矢澤聖一、美和ダム再開発事業・洪水バイパス施設の概要、ダム技術、2007 年 7 月
- 26) 南雲克彦、黒部川における連携排砂について、シンポジウム貯水池土砂管理の現状と将来、2006 年 12 月
- 27) 京都大学防災研究所 HP：<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/~rcfcd/sabo/index.html>
- 28) 島根県 HP、益田川ダム、：<http://www.pref.shimane.jp/section/mizube/dam/masudagawa-dam.htm>
- 29) 土木学会水工学委員会環境水理部会、置き土シンポジウム講演集、2008 年 12 月
- 30) 大矢通弘、角哲也、嘉門雅史、ダム堆砂の性状把握とその利用法、ダム工学 Vol.12 No.3、2002 年
- 31) Takashi TOYODA, Takeshi KOMAI, Masami FUKUSHIMA, et al., CHARACTERIZATION OF HUMIC SUBSTANCES DEPOSITED ON THE BOTTOM OF DAM RESERVOIR AND THEIR EFFECTIVE UTILIZATION, ICOLD, 2009
- 32) 角哲也、久保田明、瀧上吾郎他、ダム堆砂の河川還元利用における簡易処理手法に関する研究、河川技術論文集、2008 年 6 月
- 33) 福岡捷二、土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術、2008 年度・河川技術に関するシンポジウム 河川技術論文集、2008 年 6 月
- 34) 栗山善昭、坂本光、長期間平均の沿岸漂砂量の岸沖分布、海岸工学論文集第 54 巻、2007 年 11 月
- 35) 池野正明、清水隆夫、石井敏雅他、露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の海浜変形モデルの適用、電力中央研究所報告、2001 年 10 月
- 36) 鳥取県 HP、千代川流砂系の土砂管理計画：<http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/222627/no3.pdf>
- 37) 静岡県 HP、サンドバイパス事業：<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-430/040427HTML/sandobaipas.htm>
- 38) Jean-Louis Boillat, STATE OF THE SEDIMENT MANAGEMENT IN SWITZERLAND, 貯水池土砂管理国際シンポジウム、2000 年 10 月
- 39) Jean-Pierre Bouchard, EDF の貯水池における土砂管理、貯水池土砂管理国際シンポジウム、2000 年 10 月
- 40) Candido Avendano-Salas、スペインにおける貯水池土砂管理の現状、貯水池土砂管理国際シンポジウム、2000 年 10 月
- 41) 末次忠司、今本博臣、菊池英明、米国におけるダム堆砂及び設備の異常作動に関する調査、ダム水源環境技術研究所年報、2007 年
- 42) 磯部雅彦、海岸環境と流砂系土砂管理、河川 11 月号、1998 年
- 43) 辻本哲郎、藤田光一、流砂系管理に向けての学術・技術の展開の方向、河川技術論文集第 10 巻、2004 年 6 月

執筆者プロフィール



井上 素行

客員研究官
株式会社間組 技術顧問
首都大学東京大学院非常勤講師
博士（工学）
東京電力で水力発電所の建設・保守運用管理、火力発電所の計画、安全管理などの技術・研究業務に従事した後、現職。大学、労働科学研究所、JAPIC、JABEEなどで活動中。
趣味は山歩きと海水浴、菜園作りなど。

Science & Technology Trends
科学技術動向 5/2009



2009年5月号 第9巻第5号/毎月26日発行 通巻98号 ISSN 1349-3663



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