

科学技術動向

2002
6

No.15

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

- ①脳による食塩摂取行動の制御メカニズムの解明
- ②HIV 感染はヘルパー T 細胞にアポトーシスではなく
ネクローシスを引き起こす

▶ 情報通信分野

- ①低消費電力 LSI の動向

▶ 環境分野

- ①ポリクロロフェノール類を室温で高速分解に成功

▶ ナノテク・材料分野

- ①有機分子と金属原子の自己組織化により
金属ナノ構造体の鋳型の作製に成功

▶ エネルギー分野

- ①欧米における高温水蒸気改質法による廃棄物からの水素製造技術

▶ 製造技術分野

- ①ポリエチレン原料用 1 - ヘキセンの選択的合成法の開発

▶ 社会基盤分野

- ①鉄道の自動運転に関する標準化の動向

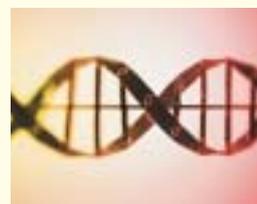
▶ フロンティア分野

- ①ユニークな観測衛星 GRACE 打ち上げられる
- ②火星隕石中に発見された生命の痕跡を巡る議論
— 第 33 回月惑星科学会議より —

特集 1 分子植物科学の動向

特集 2 ブロードバンド時代における デジタルコンテンツ流通と著作権保護技術

特集 3 CO₂ 地中貯留技術を中心とした 温暖化対策技術の開発動向



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

5

①脳による食塩摂取行動の制御メカニズムの解明

ヒトを含む哺乳動物は脳内で体液中の塩濃度を感知することで、水分と塩分の摂取行動を制御している。岡崎国立共同研究機構・基礎生物学研究所の野田昌晴教授らは、脳内の塩濃度感知にあずかる部位においてナトリウムイオン (Na^+) 濃度のセンサーの働きをする分子を明らかにした (Nature Neuroscience 2002年6月号)。この研究は、脳内の塩分濃度モニタリング及び塩分摂取行動の仕組みの解明に重要な一歩を示すもので、塩分の取り過ぎを防止する薬剤の開発に可能性を開くものである。

②HIV感染はヘルパーT細胞にアポトーシスではなくネクローシスを引き起こす

HIV (ヒト免疫不全ウイルス) はヘルパーT細胞に感染し、細胞死を誘導するが、これがAIDS発症の直接の原因と考えられている。従来、この細胞死はアポトーシス (自死) と信じられてきたが、米国国立衛生研究所 (NIH) のM.J.Lenardoらは、HIV感染によるヘルパーT細胞の死は通説であるアポトーシスではなくネクローシス (壊死) であることを明らかにした (Journal of Virology 2002年5月号)。この報告により、AIDS発症研究の方向を一部変更する必要があるかもしれない。

情報通信分野

6

①低消費電力LSIの研究動向

LSIの消費電力と発熱密度は高性能化、高集積化とともに増加し、限界に達する日も遠くない。そこで、性能を落とさずに消費電力をいかに低減するかが大きな問題である。4月に低消費電力・高性能LSIと、非同期回路に関する国際学会が各々開催されたが、従来からの低消費電力化の研究報告以外で、前者では画像描画に専門化したグラフィックチップの応用を目指す流れが出てきた点、後者では低消費電力が図れる非同期回路のセキュリティ面での優位性が議論された点が新しい動きである。

環境分野

7

①ポリクロロフェノール類を室温で高速分解に成功

米国カーネギーメロン大学 T.J.Collins教授らは、有機金属触媒の一種であるFe-テトラアミドキレート錯体触媒と過酸化水素を用い、室温にあたる25℃でポリクロロフェノール類を数分間で酸化させ、無毒な物質とCO、CO₂に分解する容易に方法を開発した。この方法は、これまでの微生物を用いる手法や化学的な手法に比べ、時間と温度条件の面で優位性があり、こうした触媒技術は、有毒化学物質の無毒化に向けて今後、ますます重要になると考えられる。

ナノテク・材料分野

7

①金属表面で有機分子を金属ナノ構造体の鋳型として用いることに成功

デンマークのAarhus大学 F. Roseiらは、有機分子 (芳香族化合物の一種) を金属表面 (銅) に吸着させ、それを走査型トンネル電子顕微鏡のプロブ操作により取り除くと、その金属表面に有機分子の形に合致するナノ構造が自ずから形成され、この分子が鋳型に成りうることを報告した (SCIENCE、2002年4月12日号)。今回の成果は、自己組織化を用いたナノスケールでの構造作製法として汎用性を有する可能性があり、新しいプロセスとして今後の展開が期待される。

エネルギー分野 8**①欧米における高温水蒸気改質法による廃棄物からの水素製造技術**

米国で開催された第21回 International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies 会議において、廃棄物やバイオマスなどの有機物を 1000℃ 程度以上の高い水蒸気と反応させる水蒸気改質技術を用いて、水素を効果的に製造可能な技術が発表された。こうした技術については、我が国が世界をリードしている高温空気燃焼技術で養ってきた高温熱交換の技術を適用することによって、経済性の問題を克服できる可能性が十分にある。

製造技術分野 9**①ポリエチレン原料用 1 - ヘキセンの選択的合成法の開発**

ポリエチレンは工業上、重要な原料である。ポリエチレンの中で低密度ポリエチレンはわが国でも年間 180 万 t も生産されており、この製造においては、安価でしかも高純度な原料である「1 - ヘキセン」の入手が重要な因子となっている。このほど、英国の BP 社の D. F. Wass 他は、改良を加えたクロム錯体触媒および活性化剤と、メチルアルミノキサンを添加した触媒系を用いることによって、選択的に純度がほぼ 100% の 1 - ヘキセンを与える合成法を開発した。

社会基盤分野 9**①鉄道の自動運転に関する標準化の動向**

国際電気標準会議において鉄道の自動運転に関する規格作成を担当する鉄道委員会 (IEC TC9 WG39 AUGT) が、去る 5 月東京で開催された。国際標準化に関しては、ヨーロッパ標準を国際標準にしようという動きが活発で、規格案の作成に当初から日本が参加している本委員会でも、ヨーロッパの積極的な提案で日本側は防戦一方であった。今後、欧米と日本の鉄道の安全に対する基本的な考え方に差を十分議論し、各々の自動運転システムの特徴に配慮した規格化への努力が必要である。

フロンティア分野 10**①ユニークな観測衛星 GRACE 打ち上げられる**

本年 3 月 17 日、米国 NASA と独 DLR が開発した科学調査衛星 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) がロシアの射場より打ち上げられた。この衛星は、双子の衛星で構成され、地球の重力による双方の距離の変化を精密に測ることで重力分布を観測する点や、打ち上げをロシアの大陸間弾道ミサイルを改良した小型ロケット「ロコト」により行ない、通常の大規模ロケットを利用した場合より大幅にコストを削減した点などがユニークである。

②火星隕石中に発見された生命の痕跡を巡る議論 — 第 33 回月惑星科学会議より —

惑星科学分野の世界最大の会合、月惑星科学会議 (第 33 回) が、3 月に米国 Houston で開催された。今回の会議では、火星に関するセッションが多くを占め、とりわけ火星隕石の生命の存在に関する特別のセッションが設けられるなど、このテーマへの関心の高さが伺えた。特筆すべきは火星隕石 (ALH84001) 中の生命の痕跡として残されていた磁鉄鉱が生物起源のものであるか否かで真っ向から見解を事にする報告があり、議論が盛り上がった点である。

特集—1 分子植物科学の動向 — 11

分子植物科学は、植物の遺伝子の機能に着目して、植物の形態や代謝の仕組みを理解することを目指した科学である。この領域は、総合科学技術会議が2001年9月に決定した分野別推進戦略において重点領域の一つに挙げられている。

近年、分子植物科学研究においては、シロイヌナズナやイネなどモデル植物のゲノム全塩基配列解読に伴い、遺伝子の機能解明に必要な研究基盤が格段に充実してきている。こうした研究基盤の充実に伴い、商用作物を含めた植物の遺伝子の機能解明が今後大幅に効率化し、有用遺伝子の機能解明に係る国際競争が一層厳しくなってくるのが推測できる。

したがって、今後の分子植物科学の推進にあたっては、我が国の植物・農業研究に関わる研究勢力を有効に活用しつつ、有用遺伝子の機能解明に向けた取組を一層強化することが重要であり、

- ①食料・環境問題など地球規模での課題解決に寄与するような植物を開発するには、植物の代謝やシグナル伝達などの基本的な機能に関わる多数の遺伝子を詳細に解析することが不可欠であり、モデル植物を活用して、高等植物の分子レベルでの理解を一層深めていく必要があること
- ②植物においては動物に比べて遺伝子操作した個体が容易に得られることなどから、遺伝子の機能解明に向けて、ヒトにおけるポストゲノム研究とは異なった研究アプローチが可能であり、この際、農業試験場等の生理・生態研究部門との連携により、有用遺伝子の機能解明を効率的に行うことが期待されること
- ③大規模研究プロジェクトにおいては、全ゲノム等を対象とした網羅的な研究から得られた情報・遺伝資源を、大学等の個々の研究者に円滑に提供することが求められることなどに十分配慮して、研究を推進していく必要がある。

特集—2 ブロードバンド時代における デジタルコンテンツ流通と著作権 — 20

デジタル技術の発達、パソコンの高性能化と急速な普及により、様々なコンテンツがデジタル化され、これらデジタルコンテンツがインターネットなどのネットワーク上で広く流通している。さらにADSLに代表されるインターネットアクセス回線のブロードバンド化により、従来より飛躍的に大データ量、高品質のデジタルコンテンツをネットワーク上で流通させることが現実になりつつある。その一方で、違法コピーがネットワーク上で大量に流通するようになり、これらデジタルコンテンツの著作権を保護する技術の重要性が高まっている。

このような要求に対応して、ネットワークでの配信からユーザ端末での再生、コピーまでを管理し、違法コピーの流通、利用の防止を行う、総合的な著作権保護技術が開発・実用化されつつある。このような技術はDRM（デジタル著作権管理システム）と呼ばれ、その主要な要素技術は、コンテンツの暗号化による保護と、電子透かしによるコンテンツへのID付与や違法コピーの識別である。しかし、各DRM間の互換性や標準化の点で問題も多い。同時に、デジタルコンテンツのネットワーク上での流通に対応した著作権法の整備も必要である。現在、WIPO（世界的著作権機関）で採択された「WIPO著作権条約」及び「WIPO実演・レコード条約」に対応した国内法の整備が各国で進められているが、国際的な協調という点ではまだ十分ではない。

これからも新しい技術の出現に伴い、コンテンツの流通、利用の形態は変化しつづけると考えられる。ユーザの利便性と著作権の保護が両立するようなバランスの取れた著作権保護技術が普及することを期待したい。また、流通・利用系他の変化に対応した新しい著作権のあり方を考える必要があるのかも知れない。

わが国は京都議定書を批准し、温室効果ガス削減の義務を負うことになった。しかしながら、わが国のエネルギー利用効率は既に世界最高水準であり、省エネルギー対策による温室効果ガスの削減には限度がある。また、自然エネルギーや原子力の利用の拡大が難しい現状では、向こう10～20年程度の期間を見越した場合、温室効果ガスを削減する手段として、火力発電所等の排ガス中のCO₂を回収し、これを地下帯水層等に貯留するCO₂地中貯留技術の研究開発に取り組むことが重要であると考えられる。

わが国においても本技術に関する各種の研究開発が実施されている。ただ、要素技術として優れたものが開発されているものの、環境影響・経済性に見合うシステムは見出せていない。しかしながら、最近では、炭層中にCO₂を圧入して、元来吸着していたメタンをCO₂と置換し、メタンガスを回収するといった新たな技術（CBM技術）も見出されている。この技術は、既存の石油生産技術の応用であり、技術的に比較的容易に実現可能である上、国内でのCO₂削減ポテンシャルと導入可能性の双方からも期待できる。さらに、世界的に見ても石炭はその埋蔵量の多さから、途上国を含め、本技術の適用の可能性は高い。

こうした状況を踏まえ、向こう10～20年程度の期間を見越した、排出されたCO₂の削減技術に関する研究開発は、以下の点を重視して研究を進めることが肝要であろう。

- ①研究開発プロジェクトの計画段階から、システムとしての実用性の評価を含む開発の道筋を明確にし、さらにエネルギー政策も勘案しながら研究開発を推進すること
- ②海外での適用も期待される研究開発（CBM技術等）は、関係諸国との積極的な研究交流を図り、技術の汎用性（国際標準化の先導や海外での適用）を視野に入れた総合的な研究開発を推進すること

科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（6月号は2002年5月11日より2002年6月7日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

ライフサイエンス分野

① 脳による食塩摂取行動の制御メカニズムの解明

2002年6月に Nature Neuroscience に報告された岡崎国立共同研究機構・基礎生物学研究所の野田昌晴教授らの報告「 Na_x channel involved in CNS sodium-level sensing」を紹介する。

ヒトを含む哺乳動物は脳内で体液中の塩濃度を感知することによって、水分と塩分の摂取行動を制御している。脳内で塩濃度感知にあずかる部位は脳室に面した脳弓下器官（SFO）と終板脈管器官（OVLT）と言われている。これらの部位は脳血液関門の欠損した場所で、脳脊髄液や血液中の物質濃度をモニターするのに適した場所である。

野田教授らは、この部位でナトリウムイオン濃度のセンサーの働きをしている分子が Na_x イオンチャンネルであることを明らかにした。

ナトリウムイオンチャンネル遺伝子は10個あり、そのうち9個は細胞膜電位の変化を感知して開口する電位依存性チャンネル（ Na_v ）であることが判っていたが、 Na_x イオンチャンネルだけは長くその働きが不明であった。野田教授らは、 Na_x イオンチャンネルがSFO、

OVLTの領域に発現すること、 Na_x 遺伝子を欠失させたマウスにおいて、これらの領域が正常マウスに較べて常に興奮した状態にあること、そして塩分の過剰摂取行動が見られることを報告していた（J. Neuroscience, 20 (20) : 7743-7751 (2000)）。

今回、遺伝子欠損マウスと正常マウスからSFOの神経細胞を取り出し、細胞外ナトリウムイオン濃度を正常値より約10%高い160mM（M：モル／リットル）前後に上げると正常マウスの細胞において選択的に細胞内へのナトリウムイオンの流入が起こり、欠損マウスの細胞では流入が起こらないことを見出した。正常マウスの細胞は、浸透圧や塩素イオンの上昇には反応せず、ナトリウムイオンの上昇を感知していることが明らかになった。また、 Na_x 遺伝子を欠損マウスの細胞に戻してやると、この反応活性を取り戻すことも示された。

以上の知見は、正常マウスでは、体内のナトリウムイオン濃度が一定以上に上昇すると Na_x イオンチャンネルが開き、ナトリウムイオンが抑制性神経細胞内に流入し、抑制性神経細胞が興奮状態になり、食塩摂取行動指令細胞の活動が抑えられるという仕組みがある

ことを示している。

この研究は Na_x がナトリウムイオン濃度の生理的範囲での上昇を検知して、開口する新しいタイプのイオンチャンネルであることを初めて証明するとともに、脳における塩分濃度モニタリング及び塩分摂取行動の制御の仕組みの解明に重要な一歩を示すものである。今後の展開と臨床への応用としては次の2つのことが考えられる。

- (1) Na_x イオンチャンネル活性化剤の開発により、食塩過剰摂取を抑制し、過剰摂取による潜在的疾病リスクの低減が可能となる。
- (2) Na_x イオンチャンネルの信号が行動につながるまでの情報処理過程を解明することで、塩分摂取制御の精密な理解と治療への応用が期待される。

② HIV感染はヘルパーT細胞にアポトーシスではなくネクロシスを引き起こす

2002年5月号の Journal of Virology に掲載された、M. J. Lenardo（米国国立衛生研究所（NIH））他の報告「Cytopathic Killing of Peripheral Blood CD4⁺ T Lymphocytes by Human Immunodeficiency Virus Type 1 Appears

Necrotic rather than Apoptotic and Does Not Require env」を紹介する。

HIV（ヒト免疫不全ウイルス）は、CD4と呼ばれる受容体を表面に持つヘルパーT細胞に感染し、細胞死を誘導する。このウイルス感染に依存したヘルパーT細胞の死が、AIDS発症の直接の原因と考えられている。これまでに、この細胞死はアポトーシス^①であるとする多くの論文が提出されており、HIV感染によるアポトーシス誘導経路の解析も進められつつある。しかし、この論文の著者は、HIV感染によるヘルパーT細胞の死は、アポトーシスではなくネクローシス^②だと主張している。

HIV-1を感染させたヒト末梢血CD4陽性T細胞、あるいはそれ由来の培養細胞株は、数日の間に半数以上が細胞死を起こした。しかし、複数の試験を行ってもそのよ

用語説明

①アポトーシス

「細胞の自殺」的な細胞死の形態であり、自殺遺伝子と呼ばれる遺伝子により誘導される。アポトーシスは、個体発生における形態形成の過程や生体の恒常性の維持など生命維持に欠かせない重要な役割を果たしている。

②ネクローシス

細胞が外部から何らかの障害を受けることによって壊死する細胞死の形態。火傷や薬物などによる傷害、脳梗塞や心筋梗塞のような血流障害により細胞への酸素の供給が途絶えたような場合などに起こる。

うな細胞はアポトーシスの特徴を示さなかった。そればかりでなく、電子顕微鏡による観察では、ウイルス感染細胞の多くはネクローシスの像を呈した。

これらの結果より、HIV-1感染はCD4陽性T細胞にネクローシスを誘導すると結論された。著者は、過去の報告との食い違いについて、死細胞数算定法及び細胞死検定法の正確さから、自分達の結果の方が正しいと主張している。なお同誌においては、別の研究グループによる同様の実験結果を報告

する論文がこれに続いて掲載されている。

これまで信じられてきた細胞死の様式が間違いであったとしても、AIDS発症がHIV感染によるヘルパーT細胞の死に起因する可能性は揺らがない。しかし、AIDS発症の意味を宿主とウイルスの相互作用という観点から理解しようとする場合、研究方向の転換が迫られるかもしれない。

（金沢大学大学院医学系研究科 中西義信氏）

情報通信分野

①低消費電力LSIの研究動向

LSIの高性能化・高集積化に伴ってチップ当たりの消費電力と発熱は急速に増加しており、現在の傾向のままでは2020年頃にはパソコン用CPUの発熱密度は太陽の表面並になるという。その点で、性能を落とさずに消費電力をいかに低減するかは大きな問題になりつつある。東京大学先端科学技術研究センター 中村 宏氏から低消費電力LSIの動向に関する学会の報告があったので紹介する。

毎年開催されている低消費電力高性能チップに関する国際会議（COOLCHIPS）の第5回が今年も4月18～20日に東京で開催された。COOLCHIPSと言う名は、夏に米国で開催される最先端のチ

ップに関する国際会議（HOTCHIPS）に対抗するコンセプトから来ており、低消費電力が重要なテーマである。セッション構成は、通信システム、グラフィックチップ、Audioチップ、といった家庭でのマルチメディア応用

を指向したものが例年と比しても多かったようである。無論この分野だからこそ低消費電力が必須である、という背景もある。プロセッサ一般のセッションもあったがそれもマルチメディア応用を指向したものが多かった。またパネル

用語説明

①グラフィックチップ

パソコン・ゲーム機等で使用される画像描画に専門化したLSI。通常のマイクロプロセッサに比べると機能が限定されるが、画像描画に関する計算については性能が高い。

②クラスタシステム

ワークステーションやパソコン程度のマイクロプロセッサを多数並列化する事で、スーパーコンピュータ並の計算速度を実現しようという計算機システム。

③クロック分配

通常のLSIではクロックという一定間隔の信号に従って、全体の回路が作動する（これを同期回路という）。このクロックを発振器からLSI全体に時間差なく分配するのがクロック分配。

④非同期回路

上記のクロックに従ってLSI全体が動作する同期回路（通常のLSI）に対して、必要なときに必要な回路だけを動かそうと言うのが非同期回路。同期回路に比べて設計が難しい。

ディスカッションでは、高性能だけが第一目標であるHPC (High Performance Computing) 分野において、廉価で電力消費も小さいグラフィックチップ^①が貢献できるか、という興味深い議論がなされた。理化学研究所の姫野氏からは、ゲーム機であるPlayStation2のクラスタシステム^②で流体力学を解いた実例が示され、また米nVIDIA社のKirk氏からは、同社のグラフィックチップを使ってHPC問題を解く研究が米国でいくつかなされている、との報告もあり驚かされた。演算処理能力的には、グラフィックチップは、現在HPC応用に用いられている構成の

マイクロプロセッサに遜色ないが、ソフトウェア開発環境の未整備と、狭いメモリバンド幅が技術的な困難であろう、ということであった。

一方、電力を消費するクロック分配^③が不要、必要な回路しか動作しない、という低消費電力化で2つの利点を持つ非同期回路^④とシステムに関する国際会議 (Asynchronous Circuits and Systems) の第8回が、4月8～11日に英国マンチェスターで開催された。今年も、低消費電力化、同期・非同期混在LSIの設計手法 (従来の同期回路で構成されるLSIを、適材適所に応じて徐々に非同

同期回路で置き換えるために必要となる、非同期回路が広く使われるためにはきわめて重要で現実的なアプローチ) が、去年までと同様に議論された。

今年新たに出てきたテーマはSecurityである。同期回路では、クロックと同じ周期で情報が伝達されるため、信号線を観測することで、情報を傍聴することが可能である。それに対し、非同期回路では、いつ大事な情報が流れるかの時間情報がないため、Securityに強いというもので、このテーマは今後も重要になると思われる。

環境分野

① ポリクロロフェノール類を室温で高速分解に成功

有毒なポリクロロフェノールを室温で高速分解に成功したとする研究成果が、Scienceの2002年4月12日号に発表された。この成果について、Advanced Synthesis and Catalysis Research (ASC化研) の藤原祐三氏が次のように報告した。

化学産業では製品を高収率で合成し、なるべく廃棄物の少ない、つまり原子効率の高い合成法が望まれている。しかし、廃棄物をゼロにすることは困難であり環境問題を起こしている。例えば、塩素置換フェノール類は分解されにく

いので地球上に蓄積されつつある。このポリクロロフェノールは消毒剤や殺虫剤として使用され、また製紙工業におけるリグニンの分解過程で副生しており、特にペンタクロロフェノール (PCP) と2, 4, 6-トリクロロフェノール (TCP) は米国や欧州環境防災局により有毒物質に指定されておりその無毒化が問題になっている。

米国カーネギーメロン大学のT. J. Collins教授らは、有機金属触媒の一種であるFe-テトラアミドキレート錯体触媒と過酸化水素を用い、25℃でPCPやTCPを数分間で酸化させ、容易に無毒な物質に変換できるクロロマレイン酸、マロン酸誘導体、修酸、ギ酸とCO、CO₂に分解する方法を開発

した。実験では、過酸化水素水に溶かし込んだPCPあるいはTCPの濃度はmilli mol/liter程度であるが、PCPとTCPの99%以上が分解されると同時に、微生物分解法で報告されているようなダイオキシン類の生成は測定されなかった。

この研究成果のポイントは、これまでの微生物法や化学的手法に比べて短時間に室温で分解できるという点にある。有機金属触媒は一般に不安定なものが多いが、配位子を工夫することにより、安定で水を含む溶媒にもよく溶けるものを調製できるため、選択的高分子合成などの有機合成はもとより、有害化学物質の分解・解毒を目的とした環境触媒として益々重要になると期待される。

ナノテク・材料分野

① 金属表面で有機分子を金属ナノ構造体の鋳型として用いることに成功

デンマークのAarhus大学のF. Roseiらは、走査型トンネル電子顕微鏡 (STM) の操作により金属表面で有機分子を金属ナノ構造体の鋳型として用いることに成功

し、分子ナノエレクトロニクス分野における単分子を表面上のナノ電極に電気的に接合するという問題解決に光をあてた。(SCIENCE、2002年4月12日号)。

「脚」を持つ芳香族化合物Lander ($C_{90}H_{98}$) 分子を清浄なCu (110) 面のステップエッジ (原子面の段差の端部) に単分子層以下の量だけ室温で吸着させる。これを100-200Kに冷却して銅原子の動きを凍結した後、STMのプロブを操作して分子をステップエッジから移動して取り除くと、銅原子が自己集合して幅が2銅原子、長さが8銅原子のナノ構造が分子の下に形成されている様子が観察された。

Lander分子が吸着していないステップエッジで同様のSTMプロブ操作を行っても、このようなナノ構造体はできなかったこと、この構造体のサイズは、幅が0.75nm長さが1.85nmであり、Lander分子の脚の幅と分子の長さにはほぼ一致していることから、銅原子のナノ構造体の形成がLander分子によるものであることを明らかにした。

Cu (110) 面の銅原子は、室温では動き回っていることが知られ

ており、Lander分子を室温で吸着した際に、銅原子も動き、Lander分子との「自己組織化」を行って安定構造を形成するものと考えられる。

金属表面のナノ構造を分子の鋳型を用いて作製することができるという知見は、自己組織化によるナノ構造作製法として汎用性を有する可能性があり、ナノエレクトロニクスにおけるナノスケールの新しい自己組織化プロセスとして今後の展開が期待される。

エネルギー分野

①欧米における高温水蒸気改質法による廃棄物からの水素製造技術

燃料電池の普及にあたっては、水素を安価かつ大量に製造する方法の開発が課題となる。廃棄物やバイオマスなど、未利用の有機固体燃料からの水素製造技術が確立できれば、エネルギー資源の確保の観点からも極めて有効である。その水素製造技術のひとつである水蒸気改質技術は、有機物を1000℃程度以上の高い水蒸気と反応させて水素や一酸化炭素などの有価ガスに改質させるものである。ダイオキシシンや窒素酸化物の発生がほとんどない、修理後の廃棄物容積が焼却処理と同程度に減量出来るなどの利点もあって、廃棄物処理技術としても注目されている。

今年の5月13-17日、米国ルイジアナ州ニューオリンズ市で開催された第21回International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologiesの会議で、高温水蒸気を用いるこ

とで、廃棄物から効果的に水素が製造できる技術が発表された。

1件目が、米国Intellergy社のTerry Galloway氏が発表した、“Energy Resource Recovery Application Using Gasification and Steam Reforming”と題された論文である。この技術では、電気ヒーターによって1040℃まで加熱された水蒸気を用いて、ロータリーキルン内で廃棄物を水蒸気改質して、水素と一酸化炭素の混合気を生成しており、Westinghouse社や日本企業にもライセンスしていて、これまで、医療廃棄物や放射性廃棄物の処理に実績がある。従来の焼却とは全く異なる概念の廃棄物処理法であり、例えば、ダイオキシシン濃度が0.0013ng/m³ (規制値は0.1ng/m³) と極めて少なく、新たな廃棄物処理法として、住民の合意が得やすいという特長がある。

2件目が、英国のF. Michael Lewis社のF. Michael Lewis氏が発表した、“Gasification and Steam Reforming of Coal, Biomass, and Polymeric Materials with an Ultra-superheated Steam

Flame”と題された論文である。水蒸気温度が1000℃程度では改質反応に相当な時間を要して設備が大型になるため、小型化のためには水蒸気の温度を高くすることが必要になる。本技術では、21%の酸素と79%の水蒸気を混ぜ合わせた混合気の中にほぼ当量比1になるような量の燃料ガスを入れて燃焼させることによって、大部分が水蒸気で若干二酸化炭素が含まれる最高2000℃といった超高温の流体を簡単に生成することができる。この高温水蒸気を利用すれば、小さなガス化炉で水蒸気改質反応を進めることができる。

これらの技術の実用化には、高温の水蒸気の生成に要する電力や酸素の利用といった経済性の点で問題がある。しかしながら、我が国が世界をリードしている、高温空気燃焼技術で養ってきた高温熱交換の技術を適用すれば、水蒸気の加熱に必要な電力や酸素を大幅に削減でき、経済性の問題を克服できる可能性が十分にある。今後、高温水蒸気改質技術は、より一層魅力的な廃棄物処理法として発展すると考えられる。

製造技術分野

① ポリエチレン原料用 1-ヘキセンの選択的合成法の開発

PE（ポリエチレン）は一般に密度を基準にして高密度PEと低密度PEに分類される。低密度PEは各種包装用フィルム、包装用中空容器、軟質成型品などに使用され、我が国で年間約180万トン生産されている重要なプラスチックである。

低密度PEの中で、製造コストおよび性能の面から、エチレンと1-ヘキセン^①を共重合させて製造する線状低密度PE（L-LDPE）の比率が高くなってきているが、

このL-LDPEの製造には、安価で高純度な1-ヘキセンの入手が重要な因子となっている。

BP社（英国石油会社）のD. F. Wass他は、配位子を工夫したクロム錯体触媒および活性化剤としてメチルアルミノキサンを添加した触媒系が、エチレンを3量化することにより、選択的に純度ほぼ100%の1-ヘキセンを与えることを見出したと報告した（Chem. Commun., 2002, 858, C&E News, April 22, 29, 2002）。Wassによれば

本触媒系は従来のものと比較して2桁程度生産性が高いとの事である。

従来の方法では1-ヘキセン以外の副生物が生成するので蒸留により分離精製する必要があるが、コストが高くなる上に純度99.9%以上の1-ヘキセンを得るのは技術的に困難であった。純度ほぼ100%の1-ヘキセンが高生産性で得られる本合成法は重要であり、今後の展開が注目される。

用語説明

① 1-ヘキセン

炭素数6個、二重結合1個の直鎖状炭化水素（ヘキセン）の異性体の一種で、末端に二重結合を有するもの。

社会基盤分野

① 鉄道の自動運転に関する標準化の動向

鉄道の自動運転に関する規格を作成するIEC TC9 WG39 AUGT委員会（国際電気標準会議－IEC鉄道関係委員会－WG39 AUGT－自動運転に関する標準化）が、本年5月23日～24日に東京で開催された。

この委員会は昨年10月に設置され、座長はフランス、委員はドイツ、フランス、イタリア、イギリス、アメリカ、カナダ、日本、韓国等13か国21名で構成されている。第1回はロンドン、第2回がベルリンで開催され、今回で第3回となる。

このWGは、無人自動運転

（UTO：Unattended Train Operation）、操縦者のいない自動運転（DTO：Driverless Train Operation）に関する安全性についての要件を規格化することが要求されており、現在、安全に関するハザードを整理している段階である。

国際標準化に関しては、ヨーロッパの攻勢が激しく、ヨーロッパ標準を国際会議において国際標準としようという動きが活発であるが、このWG39は、規格案の作成に日本が当初から参加している貴重なWGである。

しかしながら、こうした規格案作成においてドイツ、フランスの鉄道メーカーが主導で提案を続けており、日本側は防戦一方となって、無人運転に関わる日本の性能規定要件を入れることが精一杯であった。

今回は日本で開催されるということで、国土交通省を始め、日本側のメーカー、事業者が一丸となってわが国の無人運転システムをアピールした。その結果、ホームゲートドア（新幹線や都営・三田線、目黒線で採用されている簡易式プラットホームドア）も標準として認められそうな状況となり、日本側の意見も十分採り入れられる動きとなってきている。

欧米と日本の鉄道の安全に関する考え方の違いに関して十分議論し、各々の自動運転システムの特徴に配慮した規格ができるような努力が必要である。

（（独）交通安全環境研究所 水間毅氏）

フロンティア分野

①ユニークな観測衛星 GRACE打ち上げられる

米 (NASA) ・独 (DLR) が開発した科学調査衛星 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) が、本年3月17日にロシア プレスツェク発射場から打ち上げられた。

この衛星がユニークなのは、従来のような光や電磁波を利用して観測する単体の衛星ではなく、「トムとジェリー」と呼ばれる双子の衛星で構成され、両方が追い掛けっこをしながら双方の距離を計測することで重力を測定する点である。

高度300～500kmのほぼ同じ極軌道上を220km離れて飛行し、マイクロ波 (Kバンド) の波長を用い、その間の距離を精度10 μ m/sで測る。GRACEが密度の大きな山塊などに差し掛かると、重力 (万有引力) で山塊に引っ張られるから距離は開き、遠ざかる時には距離が縮む。すなわち、双子衛星の距離の変化を精密に測ることによって重力分布がわかる。また当然ながら、GPSやレーザー反射器、加速度計、恒星カメラなど衛星の運動や姿勢を精密計測するシステムも搭載しており、30日ごとに地球全体の精密重力分布が把握される。

ところで、名前に気候実験「Climate Experiment」とある。これは冬になって陸に雪が降り積もれば、そこには大きな物質の塊ができたことになり重力が増すという変化を観測することで、雪や

氷など水の分布変化の把握を目指しているからである。本衛星の予定寿命は5年以上あり、季節変化だけでなく、南極氷床やグリーンランド氷河の変動など、地球環境の長期変化の把握も期待されている。

いま一つGRACEがユニークなのは、ロシアの大陸間弾道ミサイル (SS19) を改良した小型ロケット「ロコト」による商業打ち上げにより、打ち上げ費用が大型ロケットを使用する場合の十分の一程度であった点である。

②火星隕石中に発見された 生命の痕跡を巡る議論

—第33回月惑星科学会議より—

惑星科学分野の世界最大の会合である月惑星科学会議 (第33回) が、平成14年3月10～15日に、米国Houstonで開催され世界各国から約1,100人が出席した。

「惑星地質学 (火星：12、小惑星：2、外惑星の衛星：2、金星：1)」、「隕石 (始源的隕石：8、火星隕石：2、分化した隕石：1)」、「月 (4)」、「宇宙塵 (2)」の4セッションが同時進行し、この他に「月初期のcrater形成と地球型惑星のcrater年代学」と「Mars Odyssey Missionの予備的結果報告」の2つの特別セッションがあった。

内訳からも判るように、現時点で最も盛んな研究対象は火星である。また、始源的な隕石も多くの研究者にとって興味の対象となっている。

とりわけ興味を集めていたのは、火星隕石の生命の存在に関する論争であり、「宇宙生物学」と

いうセッションが設けられていた。それとは別に生命の痕跡が報告された火星隕石についても1セッションが割り当てられた。このセッションは「ALH84001の炭酸塩と磁鉄鉱」という名称で、ALH84001隕石中の生命の痕跡について肯定的なグループ、否定的なグループに分かれ議論が交わされた。

この議論のハイライトは、Thomas-KeprtaらによるALH84001中の磁鉄鉱についての発表と、Goldenらによる無機的に合成した炭酸塩と磁鉄鉱についての発表であった。Thomas-Keprtaらは、ALH84001中の炭酸塩に含まれる磁鉄鉱の形態を透過型電子顕微鏡で観察し、3次元像を合成して、生物起源の磁鉄鉱と形態・サイズ分布が全く同じであるものが含まれることを報告した。これに対し、Goldenらは、水溶液から水熱合成により、ALH84001中に含まれる炭酸塩と酷似した組織・組成の炭酸塩を合成することに成功し、さらにこれを加熱することにより鉄に富んだ炭酸塩の部分が分解して磁鉄鉱が形成されること、またその磁鉄鉱の形態がこれまで生物起源でしかできないと考えられていた磁鉄鉱の形態と一致することを示し、ALH84001中の炭酸塩と磁鉄鉱が非生物起源であることを提唱した。これら両者の研究とも、議論の対象は磁鉄鉱の形態であるが、現時点ではどちらが正しいかを結論づけるのは難しい。

(東京大学大学院理学系研究科宮本正道氏)

特集①

分子植物科学の動向

ライフサイエンス・医療ユニット 長谷川明宏*、茂木 伸一



はじめに

分子植物科学は、植物の遺伝子の機能に着目して、植物の形態や代謝を制御する仕組みを解明したり、植物の進化の過程を解明することを主な目的とした科学であり、将来の食料・環境・エネルギー問題の解決に必要な革新的な植物の開発などにつながるものとして、世界的に大きな期待が寄せられている。また、本研究は、総合科学技術会議が2001年9月に決定した分野別推進戦略においても、重点領域の一つに挙げられている。

シロイヌナズナやイネなどのいわゆるモデル植物については、古くからの遺伝学・生理学上の研究成果の蓄積に加え、ゲノムサイズ

が小さく、交配や遺伝子導入等の操作も容易で遺伝子の機能解明に供すべき生物資源が得やすいことなどから、1980年代中頃より遺伝子の機能解析が世界的に進展してきた。

2000年12月には、高等植物で初めてシロイヌナズナゲノムの全塩基配列の解読が日米欧の共同プロジェクトにより達成された。穀物のイネについても、2002年4月にスイスのシンジェンタ社及び中国の北京ゲノム研究所がゲノム全塩基配列解読をそれぞれ達成し、我が国を中心とする国際コンソーシアムにおいても2002年中により高精度な配列解読を完了する見込みである。イネとシロイヌナズ

ナのゲノム全塩基配列の決定等に伴い、植物の遺伝子の機能解明に必要な研究基盤が格段に充実してきている。

一方で、ゲノムの全塩基配列情報や生物資源などの研究基盤の充実に伴い、遺伝子機能解明に関する国際的な競争は一段と厳しくなっていることから、我が国においても、食料・環境・エネルギー問題の解決に寄与する研究成果をいち早く得ることが求められている。

本稿では、近年における国内外の分子植物科学研究の動向を概観し、我が国における本研究領域の推進方策について検討する。

分子植物科学研究の経緯

遺伝子の解析が進んでいる植物種

分子植物科学において、どのような植物種が主として研究対象とされてきているかを概観するため、DDBJ/EMBL/GenBank 国際塩基配列データベースに登録された植物種ごとの塩基配列データの量を図表1に示した。

本データベースに登録された塩基配列データについて、植物種ごとの登録塩基数を見た場合、イネ・トウモロコシ・コムギなど農

業上の有用植物が多いイネ科作物のモデルとして、イネが第1位、これに次いで、高等植物のモデルとして1980年代中頃よりゲノム解析が世界的に進められてきたシロイヌナズナが第2位となっている。この2種のモデル植物は、他の植物と比較して登録塩基配列が圧倒的に多く、現在もなお、遺伝子の機能解明のための中心的な素材として、国際的に研究されている。

また、第3位にはシロイヌナズナと同じアブラナ科に属する *Brassica oleracea* (キャベツ、ブロッコリー)が入っており、シロ

イヌナズナとの遺伝子構造の相同性を利用して、遺伝子の機能解析が進展してきている。

第4位にはタンパク源や油糧作物として世界各国で栽培され、窒素固定などの機能が特徴的なダイズが入っているが、第7位、第15位には、マメ科のモデル植物として、タルウマゴヤシ、ミヤコグサがそれぞれ入っている。

シロイヌナズナ

シロイヌナズナ研究についての、主な歴史的な経緯は、図表2

のとおりである。

シロイヌナズナは、北半球のほぼ全域に分布する野草である。1965年頃にドイツで遺伝学の研究素材として、シロイヌナズナを用いた基本的な研究が行われ始めた。シロイヌナズナは、ゲノムサイズが約125Mbと小さいながらも、成長、開花、環境応答、耐病虫性など高等植物が持つ基本的な遺伝子の機能を備えていること、世代時間が約2ヶ月と短いこと、遺伝子操作が比較的容易であることなどから、分子植物科学の主要な研究素材として国際的に普及した。

1990年に日米欧の研究者によって国際的な共同研究組織が発足した。1995年にはゲノム全塩基配列決定プロジェクトへと発展し、2000年12月にはゲノム全塩基配列決定の決定に至っている。ゲノム全塩基配列決定のための国際プロジェクトには、日本からは、千葉県からの研究資金の提供によって運営されるかずさDNA研究所が単独で参加し、参加6グループ中最大の全ゲノムの約30%を担当し、世界的に高い評価を受けた。

イネ

イネについては、イネ自体が農業上の有用植物であることに加え、トウモロコシ、コムギなどのイネ科作物共通の遺伝子の機能を解明する上でのモデルとなることから、我が国が1991年より世界に先駆けてイネゲノム解析プロジェクトに着手し、高密度遺伝子連鎖地図^③の作成、大量のcDNA^①解析、染色体地図の作成を行い、イネゲノム研究の基礎を築いた。

1998年より第2期イネゲノム解析プロジェクトとして、我が国をリーディングカントリーとする国際イネゲノム配列プロジェクト（IRGSP：International Rice Genome Sequencing Project）が発足して、ゲノム全塩基配列決

図表1 DDBJ/EMBL/GenBank 国際塩基配列データベースへの植物の登録塩基数（2002年4月）

順位	植物種名（一般名）	登録塩基数※1 (単位：b (ベース))	ゲノムサイズ (単位：Mb) ※2
1	Oryza sativa (イネ)	397,636,312	430
2	Arabidopsis thaliana (シロイヌナズナ)	313,816,117	125
3	Brassica oleracea (キャベツ、ブロッコリー)	195,244,865	1,200
4	Glycine max (ダイズ)	116,211,613	1,290～1,810
5	Zea mays (トウモロコシ)	102,365,381	2,300
6	Lycopersicon esculentum (トマト)	84,099,550	950
7	Medicago truncatula (タルウマゴヤシ)	73,695,194	450
8	Hordeum vulgare (オオムギ)	70,306,697	4,800
9	Chlamydomonas reinhardtii (コナミドリムシ)	64,781,512	100
10	Sorghum bicolor (ソルガム)	42,412,607	750
11	Triticum aestivum (コムギ)	37,072,790	16,000
12	Solanum tuberosum (ジャガイモ)	36,961,099	—
13	Physcomitrella patens (ヒメツリガネゴケ)	25,834,542	400
14	Pinus taeda (マツ)	18,645,322	—
15	Lotus japonicus (ミヤコグサ)	17,707,239	440～490

※1 登録塩基数にはゲノムだけでなく、cDNA^①なども含まれる。

※2 Mb (メガベース) は、1×10⁶bである。

(DDBJ統計をもとに科学技術動向研究センターにて作成)

図表2 シロイヌナズナ研究の歴史的経緯

1965年	ドイツで突然変異体の単離など基本的な研究がおこなわれる。
1985年	アメリカ、ヨーロッパ、日本、オーストラリアなどで分子遺伝学の本格的な応用が始まる。
1990年	シロイヌナズナ国際共同研究の推進委員会が組織される。遺伝子導入法が一般化し、タグライン ^② の作成などが始まって遺伝子クローニングが始まる。
1995年	国際的な協力関係の下にゲノムの塩基配列決定プロジェクトが始められる。
2000年	ゲノムの塩基配列が決定される。2010年プロジェクトが制定される。遺伝子機能と遺伝子相互作用ネットワークの解析が始まる。多種植物ゲノムとの比較解析によって多様化や進化の機構の解析が始まる。

(京都大学大学院理学研究科岡田清孝教授作成資料より引用)

定に着手した。2002年5月現在で317Mb、イネゲノム全体(430Mb)の74%まで解読が進んでおり、解読した塩基配列の約6割は我が国の農業生物資源研究所及び農林水産先端技術産業振興センターが共同で解析したものである。2002年内には重要部分の高精度解読を完了する予定となっている。

一方で、イネゲノムについては、2002年4月にスイスのシンジェンタ社(農薬分野で世界第1位、高付加価値種子分野で世界第3位の多国籍企業)と中国の北京ゲノム研究所が、解読精度は劣るものの、

それぞれ全塩基配列解読を達成した(Science、2002年4月5日号)。

国内外のイネを扱う研究者からは、以前より「IRGSPは精度が低くともゲノム全体をカバーする塩基配列情報を、誰もが利用できるよういち早く公開すべき」との意見も聞かれていた。これに対してIRGSPは、99.99%の精度でDNA鎖の塩基配列を完全に解読した後、データを公開する進め方を2001年に見直し、少々解読できていない隙間が残された状態から早期にデータを公開するという対応を図った。

用語説明

① cDNA

タンパク質のアミノ酸配列情報を担うメッセンジャーRNAのDNAコピー。

② タグライン

配列が既知のDNA断片を、ゲノムに無作為に挿入することによって作成した変異体をタグラインという。目的の表現型を示す変異体から、挿入した既知配列を指標（タグ）として、隣接配列を分析することで、変異の原因遺伝子を同定できる。

③ 高密度遺伝子連鎖地図

遺伝子間の距離を自然組換えの頻度から算出し、ゲノム上に遺伝子の位置を高密度に示したもの。

④ 発現配列タグ (EST)

cDNAの部分塩基配列。

なお、最終的に99.99%の精度（1万塩基対の中で誤りを1塩基以下に押さえた正確さ）でイネゲノム全塩基配列の解読が必要ということについては、国際的にも合意がある。例えば、先に全塩基配列解読を達成したシンジェンタ社は、IRGSPによる高精度解析達成の一助となるよう、シンジェンタ社が解読したイネゲノム概要塩基配列データをIRGSPに対して無償で提供することに合意している。また、食料・環境問題の解決のため植物科学研究に対して資金のサポートを続けてきたロックフェラー財団の会長ゴードン・コンウェイ博士も、「イネゲノムの高精度

な配列解読における日本のリーダーシップと努力により、発展途上の国々全域の食料安定供給性を高めることができる」と日本のイニシアチブを賞賛し、「プロジェクトが完結されることを強く希望している」とコメントしていることが、同財団より5月6日にプレスリリースされている。

マメ科植物

世界の食糧生産においては、デンプン源としてイネ、コムギ、トウモロコシなどの単子葉植物が栽培され、タンパク源としてダイズなどのマメ科植物が栽培されてい

る。マメ科植物は種子タンパクの蓄積や、根粒菌の共生により窒素固定能を持つという特徴を有することから、分子植物科学の重要な研究対象である。

世界的には、アルファルファの近縁種であるタルウマゴヤシと、我が国の自生種であるミヤコグサの2つのモデル植物を中心に、遺伝子の機能解明が進行している。

タルウマゴヤシについては、米国及びフランスが研究資金を充実させており、遺伝地図の作成、タグライン^②の作出、根粒菌ゲノム解析等においてミヤコグサより進んでおり、欧米の研究者グループがイニシアチブを執っている。

我が国では、ミヤコグサが我が国の自生種であり、遺伝的に多様な系統が各種確保できていることから、かずさDNA研究所が中心となって、ミヤコグサの発現配列タグ (EST) ^④の解析などを進めている。なお、同研究所は2000年12月にミヤコグサに共生して窒素固定に寄与する根粒菌 *Mesorhizobium loti* のゲノムの全塩基配列 (ゲノムサイズ 7.6Mb) を決定している。

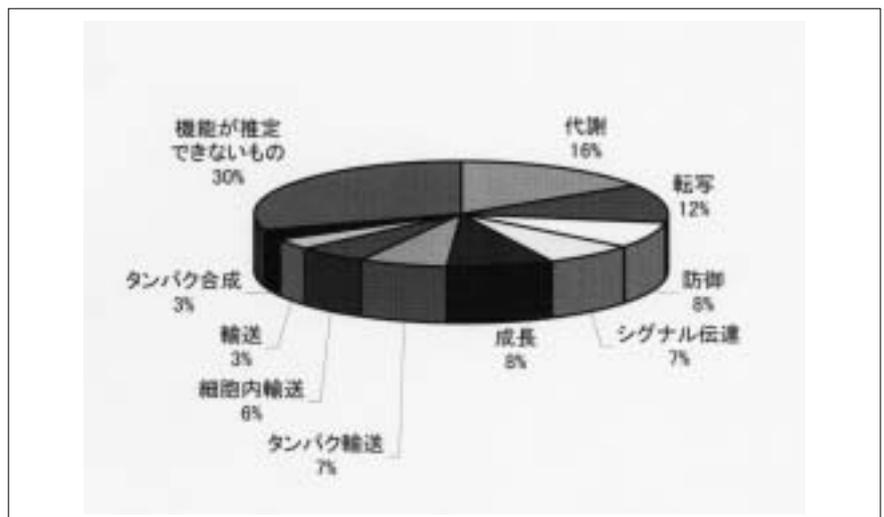
分子植物科学の近年の研究成果

遺伝子の機能予測

ゲノム全塩基配列が解読されたシロイヌナズナやイネでは、これまでに機能が解明された既知の遺伝子の塩基配列との相同等をもとに、ゲノム全塩基配列情報から、ゲノムに含まれる遺伝子の総数、遺伝子の機能を予測することが可能となっている (図表3)。

既知の遺伝子の塩基配列との相同等性などから、シロイヌナズナゲノムには約25,500個の遺伝子が存在することが予測されている。代謝に関連する遺伝子、遺伝子の

図表3 シロイヌナズナゲノムから存在が予測された約25,500個の遺伝子の機能



(京都大学大学院理学研究科岡田清孝教授作成資料より引用)

発現を調節する遺伝子が占める割合が多いことが明らかとなっているが、全塩基配列の解読時点では、遺伝子の機能が推定できないものが30%程度あった。

形態の形成に関与する遺伝子

シロイヌナズナゲノムの全塩基配列が明らかとなり、遺伝子の機能解析が進んできた中で、植物の遺伝子の機能のうち、特に植物の形態の形成に関与する遺伝子(形を決める遺伝子)については、

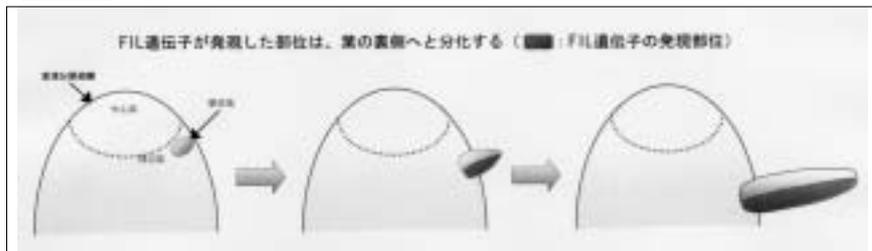
- 1) 少数の遺伝子の機能の変化が大きな形態変化をもたらす。
- 2) 茎の先端部の分裂組織で発現する遺伝子の機能の変化が、植物体の大きな形態変化をもたらす。
- 3) 細胞間の位置情報伝達システムに関わる遺伝子が、細胞の増殖や分化に重要な役割を果たす。
- 4) 複数の遺伝子が同一の機能を持つことが多い。

などの特徴を持つことが明らかとなってきている。植物の形態の形成に関与する遺伝子は、農作物等の商用作物の収量・品質等の形質に直接的に関与するものも多いことから、基礎研究の対象として重要なものである。

葉の表と裏を決める遺伝子

植物の茎の先端部では、細胞分裂が盛んに行われ、植物の器官である葉や花のもととなる組織(原基)が作られている。葉原基の裏表は分裂組織との相対的な位置関係で決定されることが予想され、最終的に形成された葉の表と裏では構造も異なることから、表裏それぞれの部位において相異なる遺伝子が発現していることが予想される。

図表4 FIL 遺伝子の発現の様子



(京都大学大学院理学研究科岡田清孝教授作成資料より引用)

京都大学大学院理学研究科の岡田清孝教授のグループは、シロイヌナズナの葉の表と裏がうまく形成されない突然変異体を利用して、その原因に関わる遺伝子としてFIL遺伝子を単離した(図表4)。FIL遺伝子が発現した部位は、葉の裏側へと分化することが明らかにし、さらに、FIL遺伝子の詳細な構造解析によって、FIL遺伝子の1745塩基対から1795塩基対の間の50塩基対の中に、裏側で発現するように制御する領域があることを明らかにした。

現在では、FIL遺伝子の発現を調節する遺伝子(上記50塩基対の領域に結合するタンパク質をコードすると推測される)を同定する研究が進められているところである。即ち、分裂組織の中央から葉原基の方向に位置情報となるシグナルが出され、葉原基の裏表では分裂組織との距離の違いからシグナルの強度が異なり、FIL遺伝子の発現が調節されるものと推測し、位置情報となるシグナルの本体が何であるかを解明しているところである。

こうした葉の表裏の決定に関わるシグナル伝達のほかにも、花芽の分化や受精の機構など、植物の形態形成に関わる重要な段階において、さまざまなシグナル伝達に関与していることが明らかとなってきている。栽培作物を含めたほとんど全ての植物が、シグナル伝達に関する共通したメカニズムを持つ可能性が高いと考えられていることから、シロイヌナズナ等のモデル植物を用いてそのメカニズム

を明らかにすることは、分子植物科学研究として重要と考えられる。

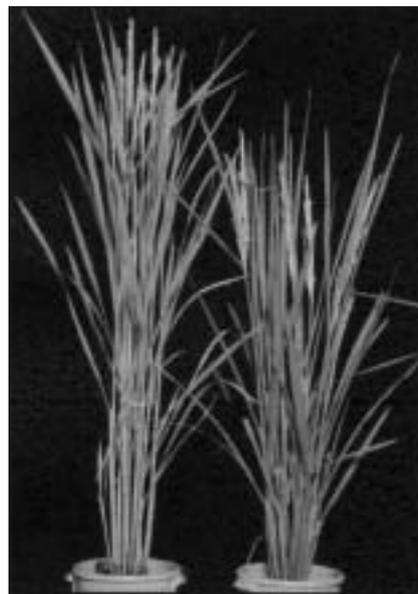
イネの草丈に関与する遺伝子

フィリピンの国際イネ研究所(IRRI)が1960年代に育種により選抜した多収穫品種「IR8」は、草丈が低く倒れにくい性質を持ち、アジア諸国での食料増産に大きく寄与した。このことは「緑の革命」として、知られている。

名古屋大学生物分子応答研究センターの松岡信教授の研究グループは、イネの草丈に関与する遺伝子として、「緑の革命」に深く関わったsd1遺伝子の単離に成功した(2002年4月18日Nature)。

IR8では、植物生長ホルモンで

図表5 ジベレリン合成に関わる遺伝子sd1を欠失すると草丈が短くなる(左側: sd1正常イネ、右側: sd1欠失イネ)



(名古屋大学生物分子応答研究センターホームページより引用)

あるジベレリンの生合成に関係する酵素の1つGA20ox-2酵素をコードする遺伝子sd1が壊れており、この品種ではジベレリンの合成量が減少することにより草丈が低くなるというものである(図表5)。

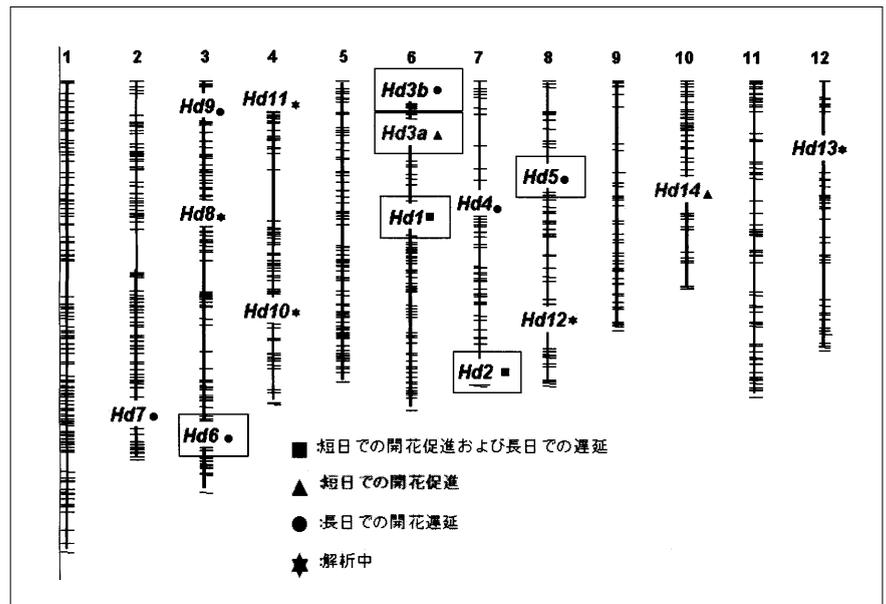
単離されたsd1遺伝子という一つの遺伝子の変異によりイネの理想的な草丈をもたらすことが可能であることから、今後他の品種のイネにおいても、この遺伝子を用いた分子育種的手法による品種改良が可能となることが予想される。

イネの開花期の制御に関わる遺伝子

開花期などの量的な形質の多くについては、複数の遺伝子により制御されるため解析が困難で、これまで遺伝研究の対象となりにくかった。近年、イネゲノム研究により得られたDNAマーカー^⑤、塩基配列情報等の研究成果を活用して、複数の遺伝子座(Quantitative trait loci (QTL))により決定される形質の分子遺伝学的解析が可能となってきた。

(独)農業生物資源研究所の矢野昌裕応用遺伝研究チーム長らの研究グループは、イネの品種ニホンバレ及びKasalathの特定の染色体を置換するなどの交雑方法により、遺伝解析実験用の雑種集団を人為的に作出し、これに対しDNAマーカーを指標とした遺伝解析を行うという手法により、イネの開花期に関わるQTLの染色体上の領域を15カ所発見した(図表6)。

図表6 イネの開花期決定に関与するQTLの染色体上の位置と作用



※検出されたQTLのうち感光性に関与する遺伝子座を四角で囲んでいる。

((独)農業生物資源研究所作成資料より引用)

そのうちの3領域からマップベースクローニング法^⑥により開花期に関わる遺伝子(Hd1、Hd3a、Hd6)を単離し、遺伝子の構造を解析した。その結果、遺伝子Hd1及びHd3aはシロイヌナズナの開花関連遺伝子と類似する構造を持っており、また遺伝子Hd6はショウジョウバエやシロイヌナズナにおいて生物時計に関連する遺伝子に類似する構造を持つことが明らかとなった。これらの結果から、日長に対する開花反応が逆である短日植物(日長が短くなると開花する植物)のイネと、長日植物のシロイヌナズナで、開花反応に関与する類似した構造の遺伝子を持つという興味深い知見が得られた(2000年12月Plant Cell、2001年7月3日PNAS)。

なお、矢野チーム長らが確立し

たDNAマーカーを指標としたイネのQTLの解析手法は、開花期以外の形質の解析にも応用できることから、これまで解析が困難であった有用形質の遺伝的調節機構の解明に大きく寄与するものと期待されている。

環境ストレス耐性に関わる遺伝子

温度(高温、低温)、乾燥、塩ストレスなどの環境ストレスに対する植物の耐性を向上させる技術は、食料・環境問題の解決に寄与する技術として待望されてきた。しかしながら、耐性機構が複雑であることから、近年になるまで研究開発は進展しなかった。

近年、シロイヌナズナやタバコなどから、乾燥や塩ストレスによって誘導され、ストレス耐性の獲得に関わるタンパク質を合成する遺伝子群が単離され、併せて、これらの遺伝子の発現を調節する転写因子^⑦が数多く単離されてきた。

(独)国際農林水産業研究センターの篠崎和子主任研究官らの研究グループは、シロイヌナズナの耐性機構に関与する多数の遺伝子

用語説明

⑤ DNAマーカー

ゲノム上の位置が明らかになっている特徴的な塩基配列。

⑥ マップベースクローニング

単離をしようとする遺伝子の近傍に位置するDNAマーカーを利用して、遺伝子が存在するゲノム領域を絞り込む方法。

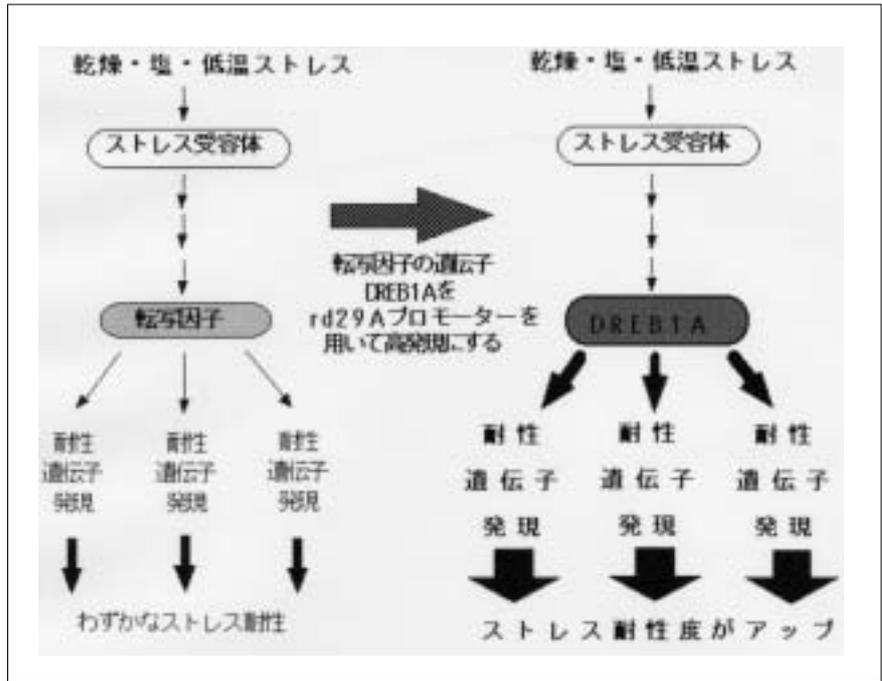
⑦ 転写因子

遺伝子の発現を制御する因子。

の解析から、乾燥、塩分、低温に
応答する遺伝子発現を制御する転
写因子の遺伝子 (DREB1A) を単
離した。さらに、ストレス付与時
に遺伝子を発現させるrd29Aプロ
モーターにDREB1A遺伝子を結
合してシロイヌナズナに導入した
ところ、高レベルの乾燥・塩・凍
結耐性を示した (図表7)。

DREB1A遺伝子が転写因子とし
て働く環境応答機構は、植物が共
通に持っている耐性機構と考えら
れることから、DREB1A遺伝子と
rd29Aプロモーターの組み合わせ
は、イネ、小麦、トウモロコシ等
の環境ストレス耐性作物の他、環
境ストレスに強い樹木などの開発
への応用も期待されている。

図表7 環境ストレス耐性増大のメカニズム



※ 図中では、DREB1Aによって発現する耐性遺伝子を模式的に3個描いているが、実際には多様な遺伝子が発現して、ストレス耐性が増大している。

(独) 国際農林水産業研究センター作成資料より引用)

現在進行している2010年プロジェクト

2000年にシロイヌナズナゲノム
の全塩基配列決定が達成されたの
と同時期に、米国NSFの支援の
もとで、日米欧の分子植物科学研
究者が共同で「2010年プロジェ
クト」を策定・公表している (図表

8)。
2010年プロジェクトの中では、
日米欧を中心とする研究者が、
個々の遺伝子の機能の詳細な解析
を行っているところである。2010
年までの10年間で、シロイヌナ

ズナを中心に、遺伝子・タンパ
ク・代謝について網羅的に解析を
すすめることとしており、モデル
植物を用いた高等植物の分子レ
ベルでの理解が一層深まること
が見込まれる。

図表8 2010年プロジェクトの内容

「2010年プロジェクト」の目標						
1	2	3	4	5	6	
遺伝子の解析を 進める研究手法の 開発と確立	遺伝子発現の 大規模解析	タンパク質の挙動 (合成・輸送・分解など) の大規模解析	代謝の動的な 変化と 生成産物の解析	分子の相互作用の 全体像を記述する	植物種間の 比較解析	
2001	1-3年の目標 突然変異体のすべての遺伝子変異をデータベース化する。	1年の目標 各遺伝子に特異的なDNAプローブを制作する。	1-3年の目標 すべてのタンパク質に対する抗体またはエピトープタグ*を制作する。			
2002	ゲノムマッピングのためのチップを制作する。突然変異体スクリーニングの確実な方法を開発する。	1-3年の目標 タンパク質合成を種間でのための全長cDNAを準備する。	外環境の条件が変化した際の各種遺伝子発現を種間領域で合成されるタンパク質のパターンを調べる。			
2003					3年の目標 系統発生学にもとづいてシロイヌナズナとゲノム配列を比較する種を特定する。	
2004						
2005	3-6年の目標 汎用系を用いた自然変異の確率解析方法を開発する。重複遺伝子領域のさまざまな欠損様を制作する。新たな遺伝子を確立する方法を開発する。	3-6年の目標 外環境の条件が変化した際の各種遺伝子発現を種間領域で発見するmRNAのパターンを調べる。	3-6年の目標 翻訳後のタンパク質の挙動について大規模解析をおこなう。	3-6年の目標 外環境の条件が変化した際の各種遺伝子発現を種間領域における代謝の動的な変化と生成産物を調べる。		
2006						
2007				10年の目標 外環境の条件が変化した際のタンパク質とタンパク質、核酸とタンパク質、タンパク質と金属イオン、タンパク質と小さな分子、などの相互作用のパターンの変化を調べ、遺伝子発現、タンパク質の動態、代謝物の合成について全体像を理解する。	10年の目標 系統発生的に重要な種についてゲノム配列を比較し、cDNAのクローニングを比較する。	
2008						
2009	10年の目標 すべての遺伝子の発現制御領域を特定する。各転写因子による制御システムを調べる。	10年の目標 すべてのタンパク質について生化学的な機能を特定する。	10年の目標 イオンや代謝産物の取り込み、移動、貯蔵についての全体像を理解する。			
2010	10年の目標 人工染色体を作る。	すべてのタンパク質ファミリーについて3次元構造を調べる。			10年の目標 全ゲノム配列にもとづいた数種生物学のための材料をそろえる。	

(京都大学大学院理学研究科岡田清孝教授作成資料より引用)

分子植物科学の推進上の諸課題

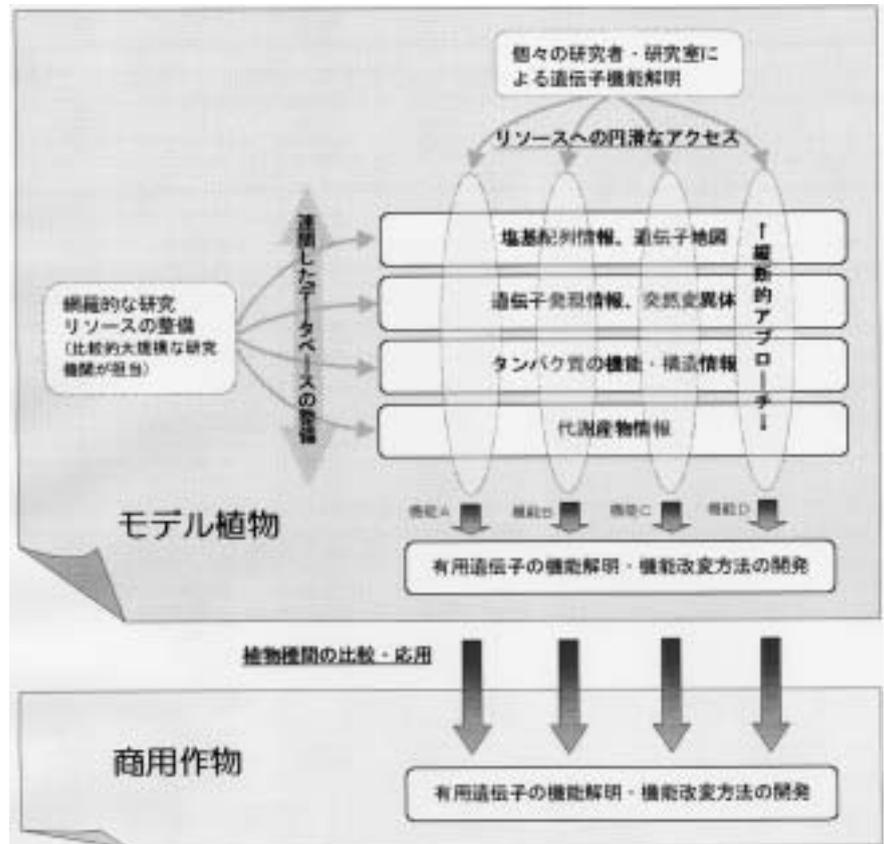
分子植物科学と 大規模解析プロジェクト

分子植物科学は、シロイヌナズナを用いた研究に代表されるように、各種の実験手法が確立した植物において、特に大規模で網羅的な解析プロジェクトが先行し、個々の遺伝子の機能の詳細な解析が続くかたちで、研究が進行していくという特徴を持っている。

また、大規模で網羅的な解析プロジェクトでは、ゲノム全塩基配列の決定と並行して、T-DNA^⑧やトランスポゾン^⑨による各種遺伝子変異体の作成など、遺伝子の機能解明に不可欠な研究素材（バイオリソース）の網羅的整備が行われる。この際、少数の大規模な研究機関（若しくは研究グループ）が国際分業のもとに、ゲノム全塩基配列の決定から各種研究素材の整備までを行うケースが多い状況である。特にイネ科、マメ科のモデル植物などは、遺伝子の機能解明に係る研究成果が、農作物の品種開発等の応用研究に直接的に結びつくことが多いため、研究情報の公開と研究素材の外部への提供を巡って、各研究機関の対応が慎重にならざるを得ない状況になっている。

一方で、個々の遺伝子の詳細な機能については、大学等の個々の

図表9 分子植物科学の研究推進のイメージ



(科学技術動向研究センターにて作成)

研究室、研究者レベルで行う塩基配列情報や各種遺伝資源を利用した研究によっても、数多く解明されており、植物の遺伝子の機能解明においては、研究対象となる機能の遺伝子に変異を持つ個体のスクリーニングを基点に研究が進行していくものも多いことから、大規模解析プロジェクトにおいては、国内の個々の研究者が自らの研究を

進行させるために必要なデータや遺伝資源に、円滑にアクセスできるよう管理・運営することが重要である（図表9）。

さらに、網羅的解析においては、塩基配列情報のみならず、マイクロアレイ^⑩を利用して得られた遺伝子発現プロファイル^⑪などに代表されるように、データ形式が多様化している。遺伝子の詳細な機能解析を行う大学等の個々の研究室・研究者は、これらの多様なデータや遺伝資源のうちから、目的とする遺伝子機能に関連したものに縦断的にアプローチする必要性があることから、データの公開等に関して、大学等の個々の研究室など外部のグループからも意見を聞くとともに、バイオインフォマティクスの専門家が中心となって、利用しやすい連関したデータベースの構築を目指す必要がある。

用語説明

⑧ T-DNA

植物に感染する微生物のアグロバクテリウムは、Tiプラスミドという環状DNAを持っており、T-DNAはTiプラスミド上に存在するDNAの領域である。アグロバクテリウムが植物に感染すると、T-DNAが植物の染色体に挿入されるため、植物への遺伝子導入に利用される。

⑨ トランスポゾン

ゲノムDNA上のある位置から、別のある位置へ動くことができる可動因子。

⑩ マイクロアレイ

スライドガラス上に多種のcDNA等を高密度に固定した装置。数多くの遺伝子の発現を一度に検出することができる。

用語説明

ヒトゲノムにおける
ポストゲノム研究との違い

3章で解説した植物の形態形成の研究成果からも分かる通り、分子植物科学において行われる遺伝子の機能解明は、突然変異体等の研究素材を網羅的に蓄積し、単離を目的とする遺伝子に変異を有していそうな個体（突然変異体）を植物の表現型などをもとにスクリーニングし、その個体のゲノムから特徴的な遺伝子を同定し、その遺伝子の機能を推定するための対照実験（遺伝子導入等による機能修復など）等を行うというアプローチによって達成されることが、現在もなお主な流れとなっている（図表10）。

この際、植物の場合には、突然変異体を人為的に作成しようとする場合に、個々の細胞が全能性を持つため、遺伝子破壊などの遺伝子操作から個体の作成までが、動物と比較して格段に容易である。

①遺伝子発現プロファイル

個々の遺伝子について、生物体のどの場所でどの時期に発現するかを、網羅的に調べたもの。

②プロテオーム

細胞や組織で発現するタンパク質の総体。

また、交配によって多数の次世代が得られることから、染色体の自然組換えを利用して、大規模集団からDNAマーカーを利用して、候補遺伝子の絞り込みを行うマップベースクローニングのような方法が現時点でも有効である。

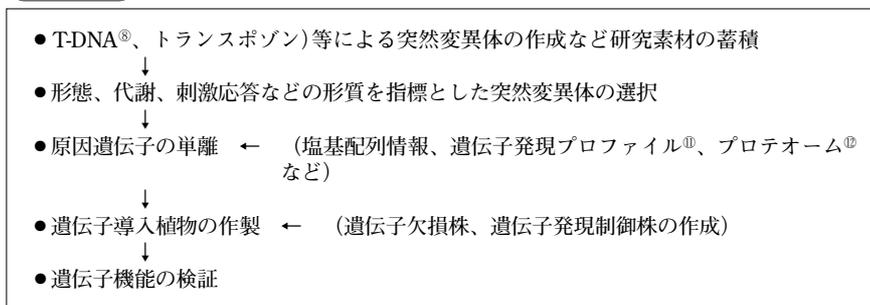
なお、ヒトゲノム研究におけるポストゲノム研究では、ヒトに対して直接遺伝子操作するような研究は不可能であるほか、例えば遺伝子の機能解析を目的としてノックアウトマウスを作成しようとする場合に、現在でも、ノックアウトマウスはごく一般的な技術レベルの研究室では作成不可能であり、植物の場合と違って個体レベルで遺伝子に変異を持つものを網羅的に作成することが非常に困難

である。したがって、タンパク質の立体構造の解析からタンパク質の機能を推定し、これにより生物の仕組みを理解するような研究の必要性が、植物と比較して高くなるものと考えられる。

全塩基配列が明らかとなった植物種が複数でてきたとはいえ、遺伝子の詳細な機能が明らかとなったものはまだ僅かであることから、植物のポストゲノム研究においては、さまざまな突然変異体を起点とした遺伝子の機能解明を今後も進めていくことになる想定される。この際、ヒトゲノムにおけるポストゲノム研究とは、遺伝子の機能解明に向けてとりうる研究アプローチに相違があることから、植物独自の研究方法の有利な点に着目して、研究推進することが重要である。

なお、図表8で示した分子植物科学研究の流れのうち、「形態、代謝、刺激応答などの形質を指標とした突然変異体の選択」や、「遺伝子導入植物の作製～遺伝子機能の検証」の行程には、農作物の育種等を行ってきている農業試験場などの研究機関が持つ植物の形態・生理に関する知見及び研究人材が、極めて重要な役割を果たすものと期待される。

図表10 分子植物科学研究の主な流れ



(科学技術動向研究センターにて作成)

図表11 目的別に見た遺伝子組換え植物の種類

植物の種類	付加した特性
生産者にとって メリットが大きい植物	●除草剤耐性植物 ●耐虫性植物 ●ウイルス耐性植物 ●高生産性植物 ●耐塩性植物 ●耐乾性植物 など
消費者にとって メリットが大きい植物	●高品質植物（高オレイン酸等） ●味の良い植物 ●価格の安い植物 など
発展途上国向けの 健康維持・病気治療の ための植物	●ビタミンA強化植物 ●感染症を予防する植物 ●医療診断薬を作る植物 など
環境修復用の植物	●重金属吸収植物 ●NOx・SOx吸収・分解植物 など
その他	●クリーンエネルギー生産植物 など

(筑波大学生物科学系 鎌田博教授作成資料より引用)

分子植物科学において
将来達成すべき目標と
現在の研究水準

分子植物科学は、人口の増加、農耕地の減少・砂漠化などに伴う食料問題、また、地球温暖化、各種化学物質による環境汚染などの環境問題の解決に寄与する科学と

して大いに期待されており、分子植物科学の研究成果を応用して開発すべき植物としては、図表11に示した植物が現在考案されている。

非営利国際団体のISA A A (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications) の調べでは、2001年の世界の遺伝子組換え植物の栽培面積は、初めて5千万ヘクタールを超え、前年比19%増の5,260万ヘクタール(世界の全耕地面積約13.8億ヘクタールの3.8%)に達した。しかしながら、その面積の77%が除草剤耐性のダイズ、トウモロコシ、ワタであり、15%がBt植物(殺虫性タンパクを導入した耐虫性植物)であるように、実際に普及した植物の種類は現時点ではごく限られたものとなっている。

これらの除草剤耐性植物、Bt植物は、植物のゲノム上に存在する遺伝子の機能を利用したのではなく、いずれも微生物から単離した単一の遺伝子を植物に導入して、新たな機能を付与した植物である。

第3章で紹介した乾燥ストレス耐性の付与に関する研究成果のように、植物の遺伝子の機能を解明して、植物に目的とする機能を付与する技術は、シロイヌナズナに関するゲノム研究が進展した近年になって初めて開発が進んできた技術であり、今後フィールドテストを経て種々の改良を加えながら、技術の有効性が評価できる段階にようやくたどり着いたところである。同様に、食料・環境問題のような地球規模の課題解決に寄

与する植物(例えば、高生産性植物、耐塩性植物、耐乾燥性植物、重金属吸収植物、NO_x・SO_x吸収・分解植物)の多くについては、植物の代謝やシグナル伝達などの基本的な機能に関わる多数の遺伝子を詳細に解析し、その機能を十分に活用して、目的とする特性を付与する必要があるものが多いと考えられている。

したがって、分子植物科学の将来において、食料・環境問題のような地球規模での課題解決に寄与するような高い目標を達成するためには、イネやシロイヌナズナなどのモデル植物を活用し、目標とする植物の特性に関与する遺伝子の機能解明を中心に、高等植物の分子レベルでの理解を一層深めていくことが不可欠といえる。

おわりに

2000年12月、日米英の国際コンソーシアムが、高等植物としては初めて、シロイヌナズナゲノムの全塩基配列解読を達成したことをNatureに報告した。また、2002年4月にはシンジェンタ社及び中国の北京ゲノム研究所が、それぞれイネゲノムの全塩基配列解読を達成したことをScienceに報告した。遺伝子の機能解明に必要な研究基盤が整ってきたことに伴い、商用作物を含めた植物の遺伝子の機能解明が今後大幅に効率化し、有用遺伝子の機能解明に係る国際競争が一層厳しくなってくるのが推測できる。

また、分子植物科学の成果を食料問題・環境問題など地球規模での課題解決に結びつけていくため、遺伝子組換え植物の安全性・信頼性を高めつつ、人類の生存に有効な植物を開発していくことも求められるところである。

したがって、植物の有する研究上の特性(遺伝子組換えなどにより、遺伝子の機能解析に必要な研究素材を容易に作成できること)を十分に認識し、国内の農業・植物研究に関わる全ての研究勢力を有効に活用し、分子植物科学の研究成果をいち早く人類の共通財産としていくことが重要である。

謝辞

本稿は、科学技術政策研究所において、2002年4月23日に行われた京都大学大学院理学研究科岡田清孝教授による講演会「分子植物科学の現状と将来」の講演内容をもとに、我々の調査を加えてまとめたものである。

本稿をまとめるにあたって、岡田教授には、御指導をいただくとともに、関連資料を快く御提供いただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の意を表します。

.....

特集②

ブロードバンド時代における
デジタルコンテンツ流通と著作権保護技術

情報通信ユニット 山崎 哲也

はじめに

デジタル技術の発達、パソコンの高性能化と急速な普及により、ソフトウェア、文章、写真、絵画、音楽、映像など様々なコンテンツがデジタル化され、これらデジタルコンテンツがインターネットなどのネットワーク上で広く流通している。さらにADSLに代表されるインターネットアクセス回線のブロードバンド化により、従来より飛躍的に大データ量、高品質のデジタルコンテンツをネットワーク上で流通させることが現実になりつつなる。特に音楽、映画、TVドラマなどのエンターテインメント系コンテンツの流通は、ブロードバンドネットワーク普及への推進役として重要であり、ビジネス的にもB2C（Business To Consumer）分野の大きな市場となる

と予想されている。また、デジタル放送とネットワーク通信を組み合わせた新しいサービスや、それに対応した新しいハードウェアの普及も期待される。

その一方で、デジタルコンテンツにはコピーが容易で、かつコピーの際の劣化がほとんどない、ネットワーク上での流通が容易という特徴がある。そのため違法コピー・海賊版は従来から大きな問題であったが、違法コピーがネットワーク上で大量に流通するようになり問題が深刻になっている。

ネットワーク上におけるデジタルコンテンツ市場を拡大するには、このような違法コピーの作成と流通を抑制する、著作権保護技術が重要となる。一方、著作権保護が行き過ぎると、消費者にとっ

て魅力のないサービスとなりかねない。

同時に著作権に関してブロードバンド時代にふさわしい法体系及び社会システムも必要とされるだろう。

本論文では、B2C分野におけるエンターテインメント系コンテンツ（書籍、音楽、映画等）の著作権保護技術を中心に、著作権法の動向についても考察する。なお、著作権には楽曲や小説などを創作した者が持つ狭義の著作権と、編曲、脚本化、編集など著作物の翻案者、演奏者や俳優などの実演家、レコードや映画などの作成者に与えられる著作隣接権があり、さらに細分化した定義があるが、ここでは著作権、著作隣接権を含む広義の著作権を対象にする。

デジタルコンテンツ流通の現状

ブロードバンドの普及と実力

ISDN（64kbps/128kbps）より速い通信速度を持つブロードバンド接続サービスではCATV、ADSLが順調に増加しており、特にADSLは2001年半ばから急速にユーザを増やしている（図表1）。一方、10Mbpsを越える光接続は、サービスの提供地域が限定されていることもあり、ユーザは2002年3月末で2.6万加入者（総

務省速報値）とまだ少数であるが、今後提供地域の拡大とともに急速に増加することが予想される。

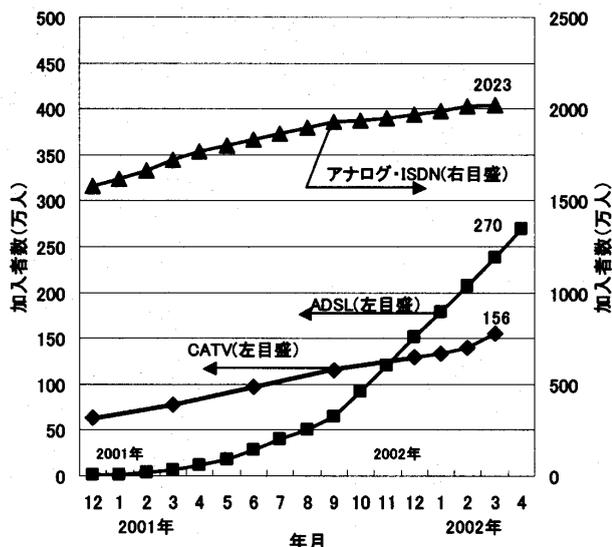
現在中心となっているADSL、CATVでの接続サービスは数百kbps～数Mbps程度の通信速度であるが、画像圧縮技術などと組み合わせると、TVに近い動画の配信が可能である。より高速な光接続が普及すれば、HDTV並の動画配信も可能になる（図表2）。

このような状況を受けて、ISP（Internet Service Provider）やコ

ンテンツホルダー（映画会社、TV会社、レコード会社など、コンテンツの作成、保有者）は音楽、映像、書籍などのデジタルコンテンツを配信するサービスを開始している（図表3）。ブロードバンド用に作成されたインタラクティブ性を持つコンテンツや数分のショートドラマ、韓国映画のようなニッチ分野のコンテンツの配信も始まっている。

元々映画や音楽、ソフトウェアといったコンテンツは、ネットワ

図表1 インターネット接続サービス利用者の推移



ータを簡単にインターネット上で公開、交換できるようになる。

米国では、RIAA（全米レコード協会）が中心となってナップスターなどのP2Pサービス会社を訴え、著作権料の支払い、違法コピーのサーバからの排除などを要求している。日本でも最近ナップスターと同様なサービスを行おうとした日本MMO社がレコード会社などの提訴によりサービス停止の判決を受けている。なお、オンラ

インでの違法コピー流通がどの程度かは不明であるが、RIAAは裁判において、ナップスターには一日当たり30万回のアクセスが行われていると述べている。また、コンピュータソフトウェア著作権協会（ACCS）及び日本レコード協会（RIAJ）の調査では、2002年1月までのP2Pサービスによる音楽ファイルの累計ダウンロード数を7500万と推定している。

ただし、P2Pサービス自体は違

法ではなく、むしろ注目されている技術であり、違法コピー問題で規制が行われるようなことがあると、インターネット自体の発展にも悪影響があると考えられる。一方コピーした著作物をインターネット上に公開することは、後述するようにWIPO（世界知的所有権機関）の条約で規制されており、日本のようにこの条約に対応した法律を持つ国では違法である。

著作権保護技術

DRM (Digital Right Management system)

従来の著作権保護技術は家庭用録画・録音機器に対するコピープロテクション技術が主流であった(図表4)。一方、ブロードバンド時代におけるネットワークでのデジタルコンテンツ流通においては、コピープロテクションに加えて、ネットワーク上での流通時、エンドユーザでの使用時、記録媒体へのコピーなどのいずれの段階においてもコンテンツのデジタルデータが露出しないようにする必要がある。なぜなら、一度デジタルデータが露出し、記録されてしまえば、それを複製し、ネットワーク上で流通させるのはたやすい

ことだからである。さらに、保護が破られた場合の対応や違法コピー流通を防止することも必要である。そのためには、配信元からユーザ端末、さらに出力機器や記録メディアまで含めた保護システムが必要になる。このような一連のシステムはDRM (Digital Right Management system デジタル著作権管理システム) と呼ばれる(図表5)。図表6に代表的なDRM技術を示す。

ただし、メモリーカードなどハードウェア側の対応が必要な部分と、ネットワーク・ユーザ端末間の部分での連携が十分でなく、使用するメモリーカードごとに別ライセンスが要求される場合が出ている。

また、デジタルディスプレイな

どへの出力に関しては、DRMとは別に出力に使われるコネクタ(USBやIEEE1394)の仕様として、コネクタ間の認証や暗号化技術の標準化が進められている。

DRMが破られた場合の対策

どのように強固なDRMでも破られる可能性はある。DRMが破られ、違法コンテンツがネットワーク上に流出した場合、以下のような対策が必要となる。

- ①違法コンテンツをネットワーク上で検出
- ②サーバ等での違法コンテンツフィルタリング、ブロッキング
- ③利用者端末での違法コンテンツフィルタリング、ブロッキ

図表4 従来の主なコピープロテクション技術

名称	対象	概要	規格団体
マクロビジョン	VHSビデオ、DVD	アナログビデオに付加した信号により、コピーを認識し、その再生時に画像に乱れを発生させる。	米 Macrovision
SCMS (Serial Copy Management System)	MD, DAT, CD-RAM, DVD等	デジタル音楽においてデジタル→デジタルのコピーを一世代に限定。	ソニー他
CSS (Content Scrambling System)	DVD-Video	コンテンツを暗号化し、直接のデジタルコピーを作成できなくする。	DVD Copy Control Association
CPPM (Content Protection for Pre-recorded Media)	DVD-Audio	CSSを強化した物。	同上
CDS	CCCD (Copy Control CD)	PCでのリッピング(音楽データの抜き取り)を防止するため、ファイルデータの一部を変更した物。CDプレーヤーでは演奏可能。	米 Midbar-Tech

出所：ホームネットワーク(松下温 他、裳華堂)、その他から動向センタ作成

ング

- ④流出元の確定
- ⑤鍵・ライセンスの使用停止と更新

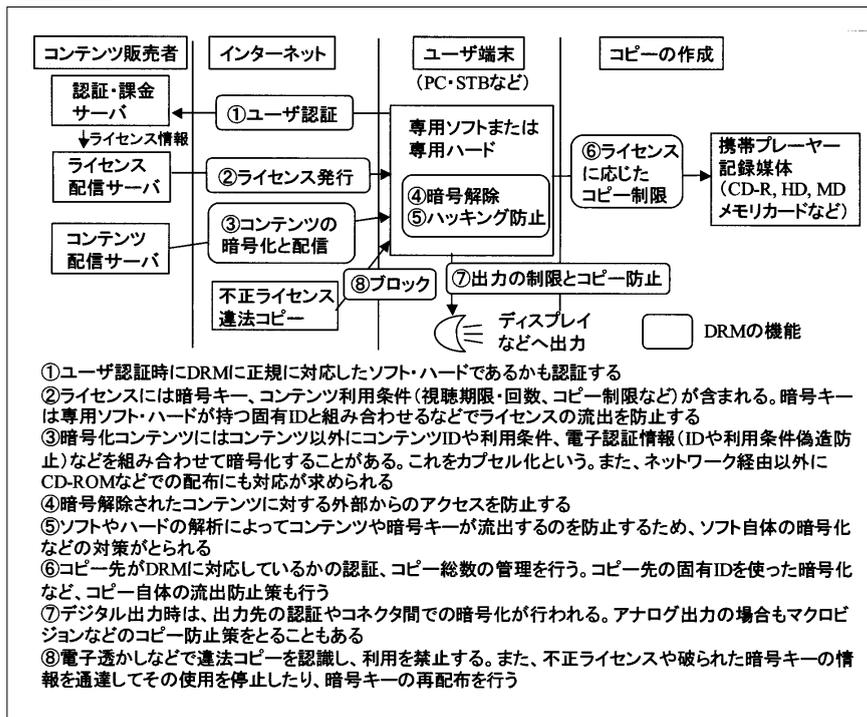
①は自動巡回ソフトによる検出が中心になるが、ファイル名、拡張子などが変更されると検出は困難である。②は①で発見されたファイルをISPなどのサーバ上で監視、ブロックを行うが、これもファイル名などを変更されると検出は困難である。③はコンテンツ内に何らかの制御信号・IDを埋め込み、それを検出する必要がある。④は鍵、またはコンテンツにユーザや再生システムのIDを埋め込むことが必要である。

最も望ましいのは、あらかじめ何らかのIDや制御信号をコンテンツに埋め込み、これを元に検出やブロックを行うことである。IDにユーザ情報が含まれていれば流出先の確定も容易である。コンテンツに埋め込んだIDなどを容易に除去されないようにするため、後述する電子透かし技術が用いられる。

⑤では不正流出したコンテンツや対応する鍵に対して失効リストの発行、鍵の更新を行い、不正流出を行ったユーザ（システム）に対しても利用禁止処置などが必要である。これらは自動的に行われることが望ましい。多くのDRMではライセンス配信サーバなどに接続するとともにこれらの失効リストを更新するシステムになっている。

全体として携帯電話やSTBなどの専用ハードに基づいたDRMは比較的破られにくいだが、機器が普及しなくては意味がない。また、破られた場合に、改良・世代交代が難しいという問題がある。一方、PCなどのソフトウェアを中心としたDRMは比較的破られやすいが、改良・世代交代したソフトをインターネットで配布するなど、

図表5 著作権保護システム（DRM）の概要



出所：出所：（社）日本レコード協会HP（www.riaj.or.jp/sdmi/sdmi2.html）等から動向センタ作成

図表6 主な DRM 技術

企業名（技術名）	概要
Microsoft (WDRM ; Windows Media Rights Manager)	Windows Media Technology (WMT) の一部。コンテンツの再生には、復号鍵や利用条件を含むライセンスをコンテンツとは別に入手することが必要。ライセンスを他の端末にコピーしコンテンツを再生することは不可。
InterTrust (MetaTrust Utility)	米国のベンチャー企業。Real Networks が採用。アクセス管理および課金分配を示す情報をコンテンツと共に暗号化して配信。使用時にアクセス条件を調べると共に、課金情報をセンタに送信・処理。
IBM (EMMS ; Electronic Media Management System)	コンテンツのマスタリング機能、コンテンツを EMMS フォーマットで保存・配信するためのホストツール、オンラインショップの販売支援ツールなど 5 つのソフトウェアにより構成。
ソニー (Open MG/Magic gate)	ソニーが開発した著作権保護技術。MD やメモリースティックとの連携が可能。IBM の EMMS との互換性あり。
富士通、日立他 (UDAC ; Universal Distribution with Access Control)	超流通（コンテンツとライセンスを独立して流通する）に対応。PC 向けソリューションのほか、セキュア MMC（マルチメディアカード）を記録媒体に使用。
Intel、IBM、松下、東芝 (CPRM ; Content Protection for Recordable Media)	ハードディスクやメモリーカードなどのハードウェアに組み込む著作権保護技術。SDAir として SD メモリーカードに使用されている

出所：経産省デジタルコンテンツのネットワーク流通市場形成に向けた研究会報告書、各団体HPなどより動向センタ作成

対策は比較的容易である。

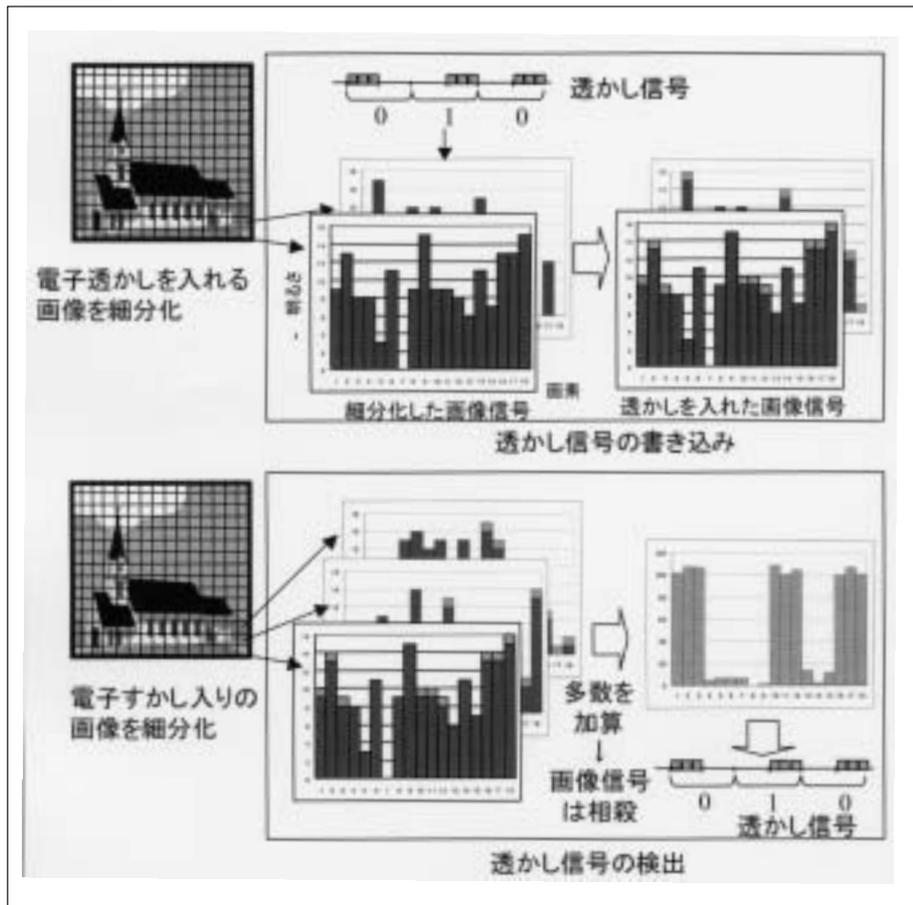
DRMの主要な目的は、専門知識をもたない一般ユーザが手軽に違法コピーを行うこと（カジュアルコピーと呼ばれる）を防止することである。完全なDRMを求めるとコストが高くなりすぎる、ユーザにとっての使い勝手が悪くな

るなどの問題が発生する。そのため、DRMが破られた場合に被害を拡大しないようにする対策が重要になる。

電子透かし技術

電子透かし技術は、コンテンツ

図表7 電子透かしの原理



出所：日立製作所へのインタビューなどから動向センタ作成

と不可分の形で何らかの信号を埋め込む技術で、上述のようなコピー制御信号や違法コピー検出信号、コンテンツのユニークID、著作者、使用者などのIDを埋め込むことができ、違法コピー流通の対策に有効な技術である。不可視透かし（人間の感覚ではわからないもの）と、「サンプル」表示や著作者表示をする可視透かしがある。著作権保護には不可視透かしが主に使用されている。

図表7に電子透かしの原理を示す。不可視透かしの透かし信号は、コンテンツ信号を時間や平面に細かく分割し、各断片に書き込まれる。透かし信号は絶対値ではなく、たとえば連続する2つの区画を比較した場合にどちらが高い信号を持っているかと言った、相対的な形で書き込まれる。読みとる場合は分割周期で信号を重ねると、元のコンテンツの信号はランダム信

号となつてうち消しあうが、透かしの信号は強めあうので、これを検出することができる（これ以外にも様々な方法がある）。

データ圧縮や拡大・縮小、切り取りなどの画像処理が行われた場合でも透かしが失われないような耐久性が重要で、同時に正規使用時にユーザが感じ取れないようにする必要がある。この二つの要求は相反する物であるため、信号を加える方法や強度（たとえば元データの変化が激しい所では強い信号を、変化が少ないところでは弱い信号を入れる）など、各メーカーが技術的な工夫を行っている。それでも画像の部分部分を少しずつ歪める処理（ランダムベンディング）等には、まだ十分な耐性がない。また、書き込める信号量は通常数百バイト程度である。

現時点では、コストの問題やDVDのようなパッケージ商品へ

適用するための標準化問題など解決すべき点が多いが、違法コピーの流通を防止するのに効果的な技術であり、早急な実用化が期待されている。また違法コピー配布者が不正を否認できないよう、デジタル署名との組合せや信頼できる第三者機関の保証等の仕組みも必要である。

DRMの標準化動向

DRMは完全な標準化か互換性が確保されていることがユーザの利便性からもコンテンツサービス業者からも望ましいが、実際にはコンテンツやプラットフォーム別に複数のDRMが存在している。図表4にも示したように、PCを中心としたプラットフォームでは複数DRMがデファクトスタンダードを競っている。また、今後、ホームネットワーク（ホームサー

バを中心にした家庭用ネットワーク、AV系と白物家電系がある)の普及に向けて、PCのDRMベンダー各社は自己のDRM技術を他の流通経路に採用するよう働きかけたり、コンテンツ間や流通経路間の互換性を高めたりしている。

音楽についてはRIAAを中心にしたSDMI (Secure Digital Music Initiative) がインターネットを通じた音楽配信および録音・再生機器への仕様をまとめていた。SDMIは1999年にPhase 1としてコピー回数の制限や電子透かしの

採用を含む仕様を発表し、多くのDRMがPhase 1仕様に準拠している。続いてSDMIは、違法コピーされた音楽を電子透かしによって検出し、再生を禁止するPhase 2仕様について検討していたが、とりまとめに失敗し、2001年に解散した。しかし、SDMIの仕様自体は権利者側が要求する一つの基準として今後も引き継がれて行くものと思われる。なお、音楽コンテンツの電子透かしについてはJAS-RAC (日本音楽著作権協会) が2000年にStep2000、2001年に

Step2001のプロジェクト名で推奨技術の選定を進めている。

一方映画などについてはCPTWG (Copy Protection Technical Working Group、コンテンツ事業者、IT企業、家電企業によるコピー管理技術の国際標準化検討の場)やDVD CCA (DVD Copy Control Association、DVDのコピー管理技術の標準化団体)がコピー防止、暗号化について、Video Watermark Group (CPTWGとDVD CCAの合同組織)が電子透かしについての標準化を行っている。

法律面での整備

デジタル化やネットワーク化等に対応した新しい著作権保護に対する著作権所有者の強い要求を反映して、1996年12月にWIPO (世界知的所有権機関)で「WIPO著作権条約」(ソフトウェアへの著作権、コピープロテクション回避の規制、レコードなどのネットワーク上で著作物を送信可能にする権利他)及び「WIPO実演・レコード条約」(実演家へのネットワーク上で著作物を送信可能にする権利他)が採択された。

これを踏まえて日本では図表8のように著作権法が改正された。これにより、日本は世界でも進んだ著作権法を持つことになった。

一方、米国ではデジタルミレニアム著作権法が1998年に制定され、コピープロテクション回避の規制や、違法コピーをネットワーク上から除去するための手続き(ノーティスアンドテイクダウン)などが決められた。ただし、送信可能化権などは制定されていない。この点については私的コピーに関する社会的な合意 (Fair Use)の範囲内かどうかで議論されている。なお、ノーティスアンドテイクダウンについては我が国でも

「特定電気通信役務提供者の損害賠償責任の制限及び発信者情報の開示に関する法律」(2001年11月30日公布)で同様の手続きが定められている。

このほか、違法コピーが多いとBSA (Business Software Alliance)などから指摘されている中国は、WTO加盟に伴って著作権法を2001年10月に改正し、日本の公衆送信権や送信可能化権に相当するネットワーク上での著作権規定や被害者救済のための手続き(侵害行為の停止、証拠押収を裁判所に求める)、国外からの賠償についての規定などを制定している

(著作権情報センター、人民網/Nikkei Biz-Tech)。

しかし、インターネットは国境を越えて情報を伝えるため、国内法では違法コピーを規制できない可能性がある。実際P2Pサービス会社の中には規制が厳しい欧米から離れて第三国での存続を目指す会社もある。「WIPO著作権条約」及び「WIPO実演・レコード条約」の加盟国は2002年3月時点でそれぞれ34、30カ国であり、我が国も後者にはまだ加盟していない(著作権情報センター資料)など、国際間の協調はまだ十分とはいえない。

図表8 | デジタルコンテンツに関連する日本の著作権法

1997年改正	<ul style="list-style-type: none"> 無線・有線のインタラクティブ送信を「自動公衆送信」と定義し、これを含む公衆への送信全体を「公衆送信」と定義。著作物を公衆送信する権利を著作権者に認めた。公衆送信権には前段階として著作物を送信可能な状態におく送信可能化権も含む 実演家・レコード製作者の送信可能化権を新設
1999年改正	<ul style="list-style-type: none"> コピープロテクション等著作権の技術的保護手段を回避する装置等の製造、頒布を規制 著作権管理情報の不正な改変・除去を規制 映画のみに認められてきた頒布権、上映権を他の著作物に拡大
2000年改正	<ul style="list-style-type: none"> 視聴覚障害者のための著作物の利用について、著作権者の許諾を得なくても利用できる場合を規定 権利侵害に対する裁判手続に関する規定を整備し、侵害抑止力強化のために罰金刑の上限を引上げ(現行300万円→1億円)

出所：著作権情報センターHP、文化庁HPなどから動向センタ作成

おわりに

現在、DRMなどの著作権保護技術は一部実用化されており、これを使った音楽等のコンテンツ配信も複数始められている。しかし3章で述べたように、DRM間やハードウェア間で互換性がないなど、ユーザにとって必ずしも使い勝手のよいものではない。DRMベンダー間の競争が激しく標準化が難しいことから、何らかの方法で互換性を高める対策が必要である。

従来のコンテンツ流通機構は、書籍、CD、DVDなどの「物」と不可分の形か、放送などの集中管理可能な形でのデータ流通に限られていた。家庭用テープレコーダやビデオの普及は、コンテンツを商品としての「物」からの分離を

可能にし、放送時間や上映期間という管理からも自由にした。ブロードバンドネットワーク、デジタル放送など新しい流通経路の出現と、PCをはじめとするネットワークにつながったデジタルコンテンツの記録・再生機器の普及は、コンテンツの情報としての流通を実現しつつある。第三世代携帯電話や高速無線LANの普及が進み、携帯型デジタル機器の性能が向上すれば、いつでもどこでも、ほしいコンテンツを利用できる環境が実現することになる。しかし、現在の多くのDRMは、コンテンツホルダーの要求を反映して、コンテンツを物（特定の機器や記録媒体）に結びつけることで、著作権保護を行う傾向が強い。この点が

前述したようにユーザの利便性を損なう原因となっている。筑波大学 森名誉教授が提唱した超流通（コンテンツは自由に流通させ、その利用に対して課金を自動的に行う）に基づいたDRMもあるが、広く普及するにはいたっていない。

一方、インターネットの普及により、誰にでも自分の著作物を世界に公開する機会が与えられるようになった。その点において著作権保護は出版社やレコード会社といった従来のコンテンツホルダーだけの問題ではなくなっているといえる。ユーザの利便性と著作権の保護のバランスが取れた、誰でも利用できる著作権保護技術が普及することを期待したい。



特集3

CO₂地中貯留技術を中心とした
温暖化対策技術の開発動向

環境・エネルギーユニット 宮本 和明

はじめに

地球温暖化の原因物質である温室効果ガスは、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄) 等、6種類存在する。この中でも、CO₂は約94%の排出割合を占めており、CO₂排出量を抑制することが重要な課題となっている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第3次評価報告書では、地球全体の平均気温上昇の結果、異常気象の発生、農業生産性の低下、生態系への影響、また、海面上昇による人間居住環境への影響等多くの弊害が生じることを指摘している。こうした技術的検討に加え、政策面では、気候変動に関する国際連合枠組み条約第7回締約国会議 (COP7、2001年) において京都議定書 (1997年) の運用規則での合意が成立し、これを受けて関係各国は議定書の発効に向けて動き始めている。わが国は、2008～2012年時点での温室効果ガスの総排出量を1990年基準比で6%削減することを目標としている。しかしながら、わが国の1999年における温室効果ガス総排出量は13億1400

万トン-CO₂と、1990年の同排出量から既に6.9%程度増加して、実質13%程度の削減が必要であり、各界各層のさらなる取組みが重要となっている。

こうした世界的な地球温暖化対策の流れを受けて、わが国は、地球温暖化対策推進大綱 (2002年) の中で、わが国における具体的な温暖化対策として、森林吸収、省エネルギーの推進や革新的技術開発の推進、また、京都メカニズム^①の活用等を挙げている。また、総合科学技術会議は、環境分野推

進戦略 (2001年) の重点課題の中で、ゴミゼロ型・資源循環型技術開発研究等と共に地球温暖化研究を掲げ、温室効果ガスの排出削減・固定化等の技術開発を国として推進することを打ち出している。本稿では、世界的にも重要課題として認識され、さまざまな方策が進められている地球温暖化対策のうち、排出されたCO₂の削減対策であるCO₂分離回収・貯留・固定化技術を分析し、技術面を中心とした解決すべき課題を取り上げ、提言を試みる。

用語説明

①国内の対策だけでなく、他国で削減したものを自国で削減したものとしてカウントしたり、他国から排出権を買うことにより、削減目標を達成しても良しとする制度で、以下の3つの制度から成る。

- 共同実施 (JI) : 先進国間で温室効果ガス削減プロジェクトを共同で行い削減量 (CO₂クレジット) を移転・取得
- クリーン開発メカニズム (CDM) : 先進国と途上国で温室効果ガス削減プロジェクトを共同で行い削減量 (CO₂クレジット) を移転・取得
- 排出量取引 (ET) : 先進国間で目標と実際の排出量の差を排出権として売買

この制度により、各国は自国の温暖化対策費用より安い場所で対策を講じたり、より安い排出権を購入したりすることによって、経済的に削減目標を達成することができると考えられている。

地球温暖化問題を取り巻く現状

地球温暖化の現状

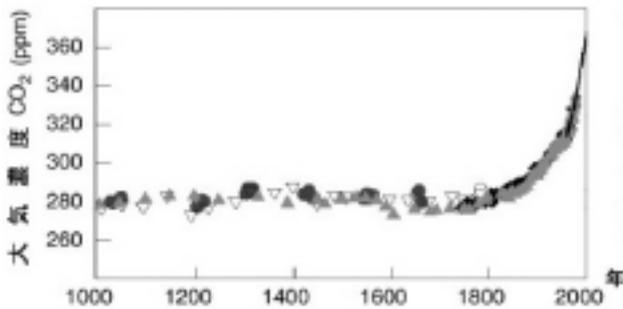
大気は、太陽光による昇温や放射冷却による急激な気温変化を緩和する役割を持つ。この中でも

CO₂は、地球の平均気温を約15℃に保つ重要な役割を果たしている。しかしながら、産業革命以前において280ppm (0.0280%) であった大気中のCO₂濃度は、現在までに約368ppm (0.0368%) ま

で増加し、地球の平均気温とともに現在も増加傾向にある (図表1、2参照)。

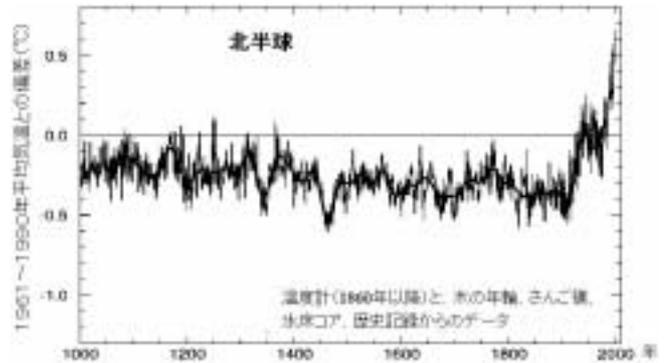
IPCCによる将来予測では、経済発展等のシナリオの違いにより、排出されるCO₂の量は大きく

図表1 地球の大気中CO₂濃度の経年変化



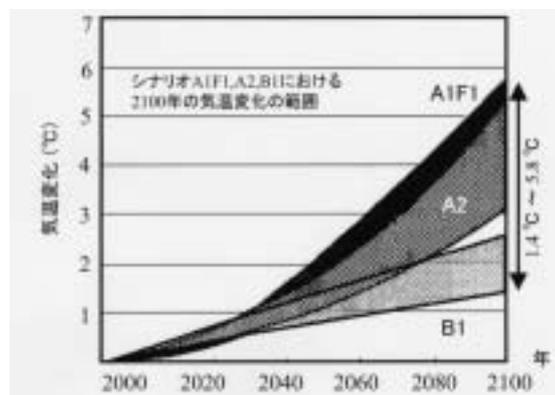
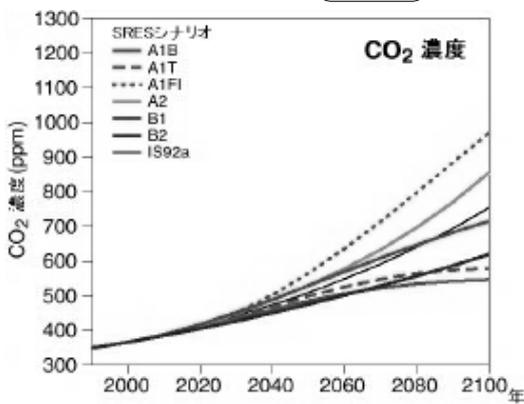
出典：IPCC 第3次報告書 (WG1-SPM Fig2、2001年)

図表2 地球の年平均気温の平年差の経年変化



出典：IPCC 第3次報告書 (WG1-SPM Fig1、2001年)

図表3 大気中CO₂濃度と全球平均気温上昇の予測



出典：IPCC 第3次報告書 (WG1-SPM Fig5、2001年) より科学技術動向研究センターにて作成

異なるという結果が示されているが、化石エネルギー源重視シナリオ^②の場合、2100年時点での世界の平均気温は1990年比で1.4～

5.8℃程度上昇すると予測してい

る(図表3参照)。気候変動に関する国際連合枠組み条約 (UNFCCC) で掲げている究極の目標は、「気候システムに対して、危険な人為的干渉を与

えないレベルで温室効果ガス濃度を安定化させること」である。しかしながら、地球環境にあまり害を及ぼさない許容範囲がどの程度なのかといった科学的な見解は明確には定まっていない。ただ、地球温暖化の問題は、有効な防止対策を講ぜず放置したままですと、その影響が顕在化した時の対策費用が膨大になるばかりか、原状回復が困難となり、手遅れになるといった危険性を秘めている。したがって、不確定要素は多いながらも、地球温暖化対策は出来るだけ早期の対処が必要と言えよう。

用語説明

②IPCC 第3次評価報告書で示された化石エネルギー源重視したA1FIのシナリオのこと。高度経済成長が続き、世界人口が21世紀半ばにピークに達した後に減少し、新技術や高効率化技術が急速に導入される未来社会を描いたシナリオがあり、これをエネルギー源の重点の置き方によって3つに区別している。

A1FI：化石エネルギー源重視、A1B：全てのエネルギー源のバランス重視、A1T：非化石エネルギー源重視

※参考 A2. 地域的経済発展が中心で、1人あたりの経済成長や技術変化は他の筋書きに比べ緩やかなシナリオ。

B1. 経済、社会及び環境の持続可能性のための世界的な対策に重点が置かれるシナリオ。

B2. 経済、社会及び環境の持続可能性を確保するための地域的対策に重点が置かれるシナリオ。世界の人口はA2よりも緩やかな速度で増加を続け、経済発展は中間的なレベルに止まり、B1とA1の筋書きよりも緩慢なもの、より広範囲な技術変化が起こるというもの。

なお、SRES (排出シナリオに関する特別報告) の各シナリオ (A1FI、A1B、A1T、A2、B1、B2) については、どれも同等の根拠を持っていると考えべきとされており、いずれのシナリオも気候変動枠組み条約や京都議定書の削減目標が履行されると仮定していない。

地球温暖化対策技術の概要

国内外で研究開発の取組みが行われている、地球温暖化対策技術の概要について図表4に示す。

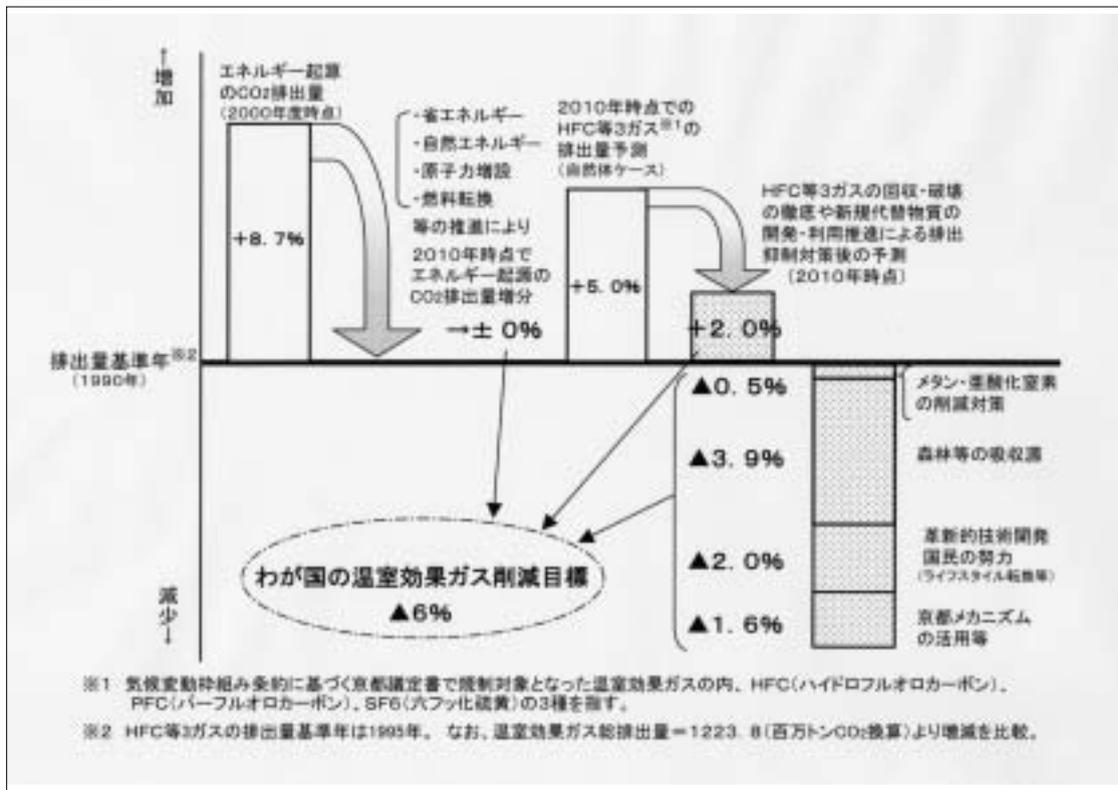
冒頭でふれたように、わが国の地球温暖化対策推進大綱におい

図表4 地球温暖化対策技術の概要

分類		技術名		概要		
CO ₂ の排出抑制 (事前対応)	省エネルギー		エネルギー利用効率向上、エネルギー需要の抑制			
	燃料転換		天然ガス			
	非化石燃料転換	自然エネルギー (太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、海洋エネルギー)				
		原子力				
新しいエネルギー利用技術 (電気自動車、燃料電池、水素エンジン・タービン等)						
排出されたCO ₂ の削減 (事後対応)	排ガス中のCO ₂ 削減	分離回収	吸収法	アミン吸収 炭酸カリウム吸収	●アルカリ性の吸収液にCO ₂ を吸収	
			吸着法	物理吸着	●固体吸着剤にCO ₂ を吸着	
			ガス分離法	高分子膜分離 深冷分離法	●膜に対するガスの透過速度の違いを利用 ●ガス成分の凝縮温度の違いを利用	
		貯留	地中貯留	帯水層貯留 油田・ガス田貯留 炭層貯留	●地下1,000m程度の帯水層にCO ₂ を圧入 ●CO ₂ を圧入し、石油、メタンガス等を回収しつつCO ₂ を処理 ●採炭の見込みのない炭層等でCO ₂ を吸収	
			海洋貯留	深海貯留	●水深3,000m以上の深海底に貯留(液体CO ₂ の密度が海水密度より大きい点を利用)	
		固定化	化学的固定	電気・光化学的反応 接触水素化反応	●光の照射や電極反応によりCO ₂ を電気化学的に還元 ●触媒下でCO ₂ と水素からメタン等の有機化合物を生成	
	生物的固定		植林、再植林 菌類	●植林(マングロープ等の海洋生態類も含む)等でCO ₂ を光合成により植物体として固定 ●藻等にCaCO ₃ として固定		
	大気中のCO ₂ 削減					

出典：科学技術動向研究センターにて作成

図表5 地球温暖化対策推進大綱における温室効果ガス削減シナリオ



出典：科学技術動向研究センターにて作成

て、省エネルギーの推進を始めとするCO₂排出抑制策は、温室効果ガス削減に向けて大いに期待されている技術である（図表5参照）。

しかしながら、エネルギー利用効率が既に世界最高水準にあるわが国にとって、省エネルギー対策での大幅な改善は容易ではない。また、発電に使用する燃料源を天然ガスへシフトしても、化石燃料依存という点で変わりなく、抜本的な地球温暖化対策技術とは成り難い。さらに、自然エネルギーは、現在の技術水準や設備投資が大きいこと、さらに立地条件といった課題から、革新的な技術開発が進

まない限り、向こう10年程度の期間で見てもエネルギー源の主力としての利用は難しいと考えられる。また、CO₂排出抑制策の主力と目される原子力についても、向こう10年程度の期間では、新規増設の見通しが極めて難しい状況である。

一方で、排出されたCO₂を削減する技術（以降、排出CO₂削減技術と表記）は、燃焼ガス等から排出されるCO₂を技術的に削減することを目的として、研究が進められている。こうした排出CO₂削減技術は、図表5のように多岐にわたり、技術レベルも実験室段階か

ら実用化段階まで幅広い。現状は、企業等における地球温暖化対策の具体的な実施義務等がなく、地球温暖化対策技術の導入インセンティブが働きにくい状況にある。このため、現在のところ実用化されている事例は、排ガスから吸収法によりCO₂を回収して尿素製造を行うプラント（日量160トン規模）、また、CO₂を地下の油層に圧入して原油回収率を向上させる石油増進回収法（EOR：Enhanced Oil Recovery）のような副次的に地球温暖化対策が行われる技術に限定されている。

CO₂分離回収・貯留・固定化技術開発の現状

冒頭で触れたように、近年国内では、総合科学技術会議は、環境分野推進戦略（2001年）の重点課題の中で、ゴミゼロ型・資源循環型技術開発研究等と共に地球温暖化研究を掲げ、温室効果ガスの排出削減・固定化等の技術開発を国として推進することを打ち出している。特に2002年度からは、効率的・効果的な研究の推進を目指して各府省を統合した地球温暖化イニシアティブの研究体制がとられている。

一方で、海外を見ると、米国エネルギー省（DOE）は、1999年に、21世紀のエネルギープラントが必要とする5つのキーテクノロジーの1つとして排出CO₂削減技術（米国はCarbon Sequestration技術と呼ぶ）を掲げ¹⁾、また、2000年には、本技術を重点的に推

進する計画を発表²⁾し、多くの研究プロジェクトを立ち上げている。さらにブッシュ大統領は、2001年6月の演説³⁾の中で、温室効果ガス削減について排出CO₂削減技術の重要性を明確に打ち出している。そこで本章は、2章で触れた地球温暖化対策技術の中でも、近年、このように国内外で重要技術として認識され、さまざまな方策が進められているCO₂分離回収・貯留・固定化技術について、国内外の技術開発動向ならびに今後の展望を記す。

国内における排出CO₂削減技術開発の動向

わが国は、地球温暖化問題の解決にむけて、国を主体とした研究開発を進めている。図表6は、こ

れまでに経済産業省で行われた研究プロジェクトを示したものである。

このように、これまでに終了した国家プロジェクト研究は、要素技術として優れた成果を納めているものの、実用化に向けたトータルシステムとしての性能が不十分と評価されている。また、図表7は、現在、経済産業省で行われている研究プロジェクトである。

図表6、7をみると、国内では、図表4で示したほぼ全ての排出CO₂対策技術についての研究が行われていることがわかる。わが国の本研究分野に関する水準は、図表6で触れたように、個々の研究プロジェクトでみると要素技術として高い評価があるなど、優れた成果を挙げている。また、最近では、イギリスやノルウェー等のEU諸国の一部において、温暖化対策税や排出権取引制度といった、排出CO₂削減技術にインセンティブを与える制度の導入も始まっている。さらに、わが国の他にも欧州連合（EU）諸国は、京都議定書を批准しており、こうした排出CO₂削減技術に対する開発の必要性は今後一層高まるものといえよう。

用語説明

③ "America's the leader in technology and innovation. We all believe technology offers great promise to significantly reduce emissions - especially carbon capture, storage and sequestration technologies", REMARKS BY THE PRESIDENT ON GLOBAL CLIMATE CHANGE, THE WHITE HOUSE, June 11, 2001.

④1992年のIPCC第2次評価報告書で示された6つのシナリオの内、エネルギー需要（CO₂排出量）の増加が中程度のシナリオ。

図表6 研究終了した国内における排出CO₂削減技術開発

プロジェクト名	実施概要	成果および評価	期間
接触水素化反応利用 CO ₂ 固定化有効利用技術	●固定発生源からの高濃度のCO ₂ を、分離膜を用いて大量かつ連続的に回収、さらに回収したCO ₂ に水素を添加し、メタノール等の有用化学物質を合成するプロセスを開発。	●水素化触媒研究の分野、分離膜や電解層の要素技術開発で優れた成果。 ●システム技術として未完成。	1990年 ～ 1999年
細菌・藻類等利用 CO ₂ 固定化有効利用技術	●細菌・藻類等を工業的に高密度で大量に培養し、自然界での光合成以上の効率でCO ₂ を固定化するとともに、再資源化する技術を開発。	●細菌・藻類利用の探索と培養過程で獲得された知識は世界最高水準。 ●規模的にみて実用化の見通しは厳しい。	1990年 ～ 1999年
CO ₂ 高温分離・回収 再利用技術	●セラミックス分離膜等を利用した二酸化炭素高温分離・回収再利用技術開発および、開発システムの市場適応性等の調査研究。	●高温下で動作する分離膜の開発は世界的にも先進的分野であり、成型技術の確立は評価。 ●近い将来におけるプロジェクト目標の実現が難しく、実用化の見通しは厳しい。	1992年 ～ 1999年
CO ₂ 海洋貯留に伴う 環境影響予測技術	●海洋に投入されたCO ₂ の挙動やCO ₂ を投入することによる環境影響といった、CO ₂ 海洋隔離に伴う環境影響の予測技術開発。	●海洋生態系に関する研究成果を海洋環境基礎資料として評価。 ●海洋環境への影響評価等にかなり年限が必要であり、実用化の見通しは厳しい。	1997年 ～ 2001年

出典：経済産業省 産業構造審議会 環境分野における分野別評価報告書（2001年）をもとに科学技術動向研究センターにて作成

図表7 現在実施中の国内における排出CO₂削減技術開発

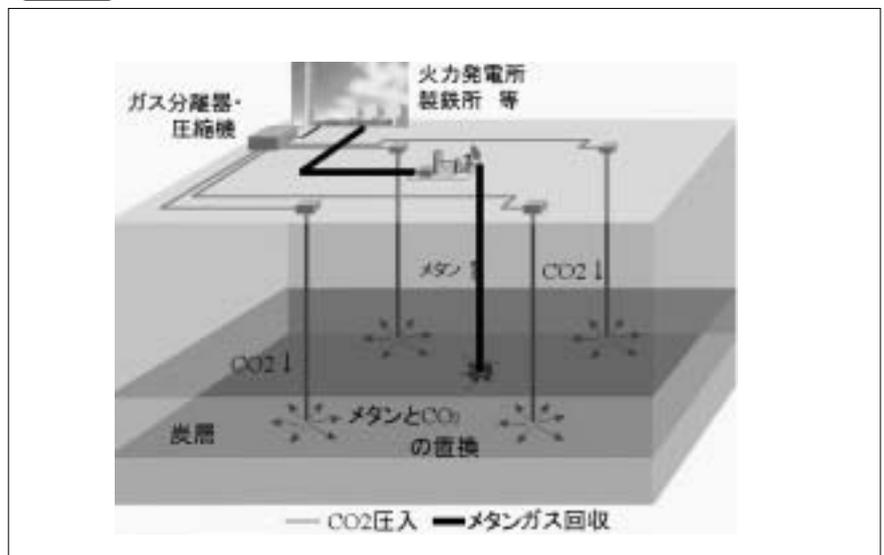
プロジェクト名	実施概要	期間
CO ₂ 地中貯留技術 (帯水層貯留技術)	●火力発電所等の大規模発生源から分離回収したCO ₂ を地中帯水層へ貯留する技術や最適な貯留地点を求める評価ツールの開発や、圧入中のCO ₂ の挙動を評価するモデルを作成する。	2000年 ～ 2004年
石炭・天然ガス活用型 CO ₂ 回収・利用技術	●太陽光から得た熱を石炭・天然ガスの燃料改質に利用し、改質されたCOと水素ガスに、再生可能エネルギーより得た（水の電気分解）水素を付加することで、CO ₂ の発生を伴わずにメタノール合成するプロセス技術を確立する。	2000年 ～ 2004年
生物的CO ₂ 固定化・ 有効利用技術	●乾燥や強い日射の下でも生育可能な植物を遺伝子組み換え技術により開発する。	1993年 ～ 2002年
エネルギー使用合理化古紙等 有効利用CO ₂ 固定化技術	●微生物等の機能を活用し、バイオマスである古紙等を糖化し、得られた糖類を有機酸類に変換する過程でCO ₂ を固定する技術を開発する。	2000年 ～ 2004年
CO ₂ 海洋隔離に伴う 環境影響予測技術	●1997年から実施された「海洋中炭素循環メカニズムの研究」の第2フェーズ。 ●海洋に投入されたCO ₂ の海洋環境への影響を評価する技術を開発し、CO ₂ 海洋隔離技術に対する国際的・社会的な合意形成の獲得に資する。	2002年 ～ 2006年

出典：NEDO事業原簿をもとに科学技術動向研究センターにて作成

図表8 CBM概念図

海外の技術開発の動向

EU等の諸外国は、国際エネルギー機関における温室効果ガス研究開発（IEA/GHG R&D）プログラムでの国際的な共同研究を中心に研究を進めている。日本国内で実施が地理的条件から困難なため行われていないEOR技術を除けば、わが国で行われている研究内容と差異は見られない。ただし、EU等で行われているEOR技術の開発は、石油増産が目的であり、CO₂対策はあくまでも副次的効果としての意味合いが強い。



出典：科学技術動向研究センターにて作成

図表9 海外における地中貯留技術開発プロジェクト

国	プロジェクト名	実施主体	概要	実施時期
ノルウェー	SACS (Saline Aquifer CO ₂ Storage)	Stat Oil社 (ノルウェー 国営石油会社)	ノルウェーの沖合約240kmの北海中央部のスライブナー鉱区石油ガス田から生産される天然ガス中に9%含まれるCO ₂ をアミン吸収法で分離し、海底1000mの砂岩帯水層に貯留。年間100万トンのCO ₂ を海底帯水層に圧入。これによりノルウェーのCO ₂ 年間総排出量の3%を削減。実施のインセンティブはノルウェー政府が近海油田に対して課した炭素税。事業計画当時の税額はCO ₂ 排出量1トンあたり350クローネ(1クローネ=約12円)。	1996年～
米国	Carbon Sequestration R&D Program	DOE (Department of Energy)	CO ₂ の分離回収・貯留・固定化技術に関する研究開発プログラム San Juan 盆地におけるCBMパイロットテスト等を実施。目標は100～300ドル/トン-Cとされる現在のCarbon Sequestrationコストを10ドル/トン-Cに低減すること等。2015年までに計画されている分離回収・貯留・固定化技術に関する予算総額は約922百万ドル。	1999年～
オーストラリア	GEODISC (Geological Disposal of Carbon Dioxide)	APCRC (Australian Petroleum Cooperation Research Center)	オーストラリアにおけるCO ₂ 地中貯留技術の技術的、経済的評価およびリスク評価に関する研究プロジェクト。APCRCは、4ヵ年で1,000万ドルを投入し北西部の開発ガス田のCO ₂ 対策として、帯水層、枯渇油田、CBM等6つのオプションを計画している。CBMを有力な候補としている。オーストラリア政府の他、BP, Amoco, Chevron, Shell等7社が出資。	1999年～ (4年間の予定)
カナダ	Weyburn CO ₂ Monitoring Project	PTRC (Petroleum Technology Research Center)	サスカチュワン州にあるWeyburn油田で実施されているCO ₂ モニタリングプロジェクト(プロジェクト総額:1,530万カナダドル)。エンバイロメント・カナダとアルバータ研究委員会(ARC)が中心となり、カナダ、米国、オーストラリア、オランダの各国政府と15以上の石油生産業者、公益事業体により実施。EOR(原油増進回収法)用途で、注入用のCO ₂ は米ノースダコタ州にある石炭ガス化炉からパイプラインで輸送。貯留されたCO ₂ の挙動、貯留のメカニズムや長期の安全性の問題に関する知見を集めることが目的。	2000年7月～ (4年間の予定)
オランダ	The RECOPOL project	VROM (The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment)	CO ₂ に関する新たなヨーロッパ間のネットワーク作りと、ヨーロッパの炭層におけるCO ₂ 貯留の実現可能性を評価することが目的。2000年のIEA報告書でCBM最適地とされたポーランドのSilesian炭田で実施(プロジェクト総額350万ユーロ。内EUが50%を出資、1ユーロ=約115円)。オランダ、ポーランド、ドイツ、フランス、オーストラリアの大学、研究所等9機関が参画。	2001年11月～ (3年間の予定)

出典：各種資料^{2, 4, 5, 6, 7)}より科学技術動向研究センターにて作成

米国は、わが国と同様に、図表4に記したほぼ全ての技術について研究を進めている。近年のDOEにおける排出CO₂削減技術に関する研究開発予算³⁾は、2000年度は約18.4百万ドル、2001年度は約32.4百万ドルと増加し、さらに2003年度は、予算要求の段階ながら約54.0百万ドルと急増している。こうした研究予算の状況を見ると、化石燃料を使いつつ、CO₂の排出削減が出来る可能性を

秘めた本技術に対して、米国は大いに期待しているといえよう。また、本研究予算の中でも、CBM(Coal Bed Methane)技術は、個別研究課題として最も多くの予算を投じられている。CBM技術は、メタンよりも数倍高い能力でCO₂を吸着する石炭の性質を利用したもので、地下深部の炭層へCO₂を注入し、炭層中にもともと吸着していたメタンを圧入したCO₂と置換して固定化し、メタンガスを回

収する技術である(図表8参照)。米国やEU等の国々では、EOR技術と同様にCBM技術の研究開発を進めている(図表9参照)。

このように、CBMやEOR技術は、これまでの対策技術と異なり、CO₂を新たなエネルギー源獲得の手段として用いることができ、さらに、地球温暖化対策としての機能も兼ね備えている。

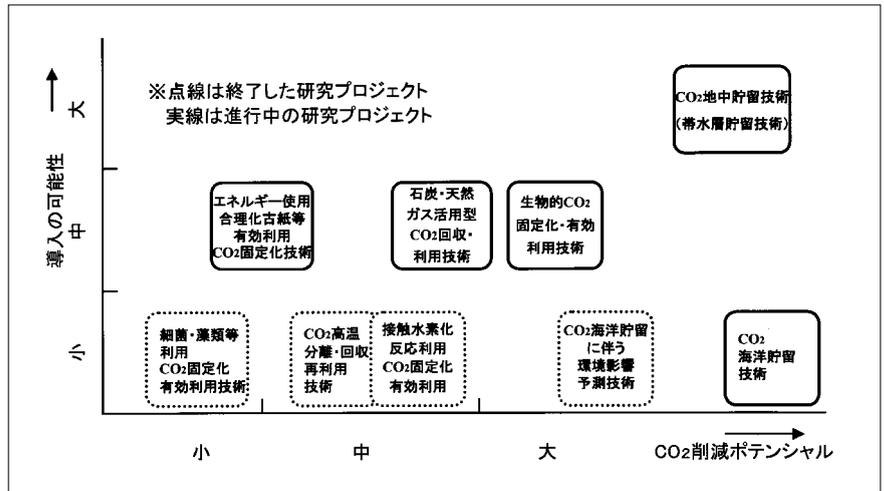
今後の排出CO₂削減技術の展望

図表10に、排出CO₂削減技術について、導入可能性やCO₂の削減ポテンシャルを評価した報告事例を示す。

ここで、CO₂削減ポテンシャルと導入可能性の双方が高く評価されている帯水層貯留技術（図表11参照）について見ると、

- 1) 石油増進回収法等で海外を中心に実績を有し、既存の石油・天然ガス生産技術の応用であることから、技術的に比較的容易に実現可能であると考えられている
- 2) 地中に圧入されたCO₂が大気中に放出される可能性はほとんどなく、安全面での問題は少ない
- 3) 生態系等への十分な影響評価を必要とする海洋貯留の場合に比べ、環境への2次的影響はほとんどないと考えられている
- 4) 日本近海の沖合帯水層におけるCO₂貯留量に関する試算⁸⁾では約900億トン（国内の年間CO₂総排出量の約70～80年分）と膨大な貯留量である

図表10 排出CO₂削減技術の評価例



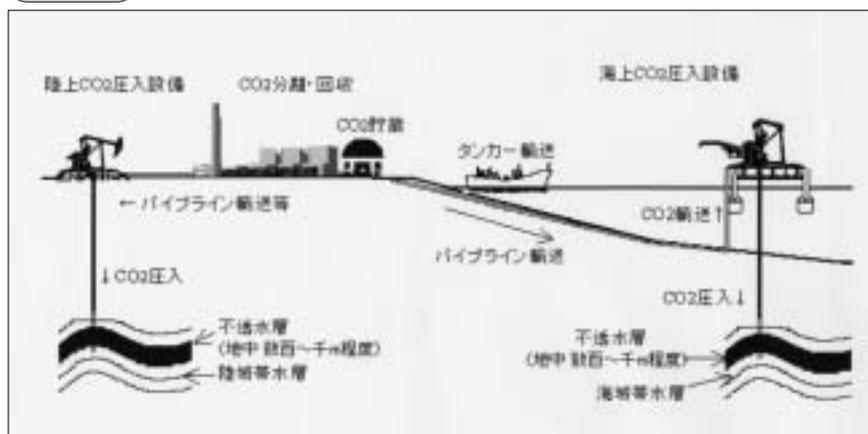
出典：経済産業省 産業構造審議会 環境分野における分野別評価報告書（2001年）をもとに 科学技術動向研究センターにて作成

といった特長があり、開発の必要性が高いことが理解される。

また、欧米等で排出CO₂削減技術として大きな期待のかかるCBM技術は、帯水層貯留技術と同じ地中貯留技術に含まれながらも、現在、国内で研究されていない。しかしながら、国内の炭層は、メタンガスを多く含有していることが知られており、経済的に採掘対象とならない深部の炭層や採掘跡の鉱山でも、炭層中のメタンガスを採取できる大きな可能性を秘めている⁹⁾。また、CBM技術は、低品位炭でも利用できること等の理由から、国内の炭層は約100億

トンのCO₂固定能力を有するとして報告⁹⁾が行われている（なお、資源エネルギー庁は新たなプロジェクトとして炭層貯留に関する研究を2002年度から開始する予定¹⁰⁾。また、本技術は、石炭資源が豊富かつエネルギー需要の増大に伴うCO₂排出増が予想される、中国等での技術展開も期待できると考えられる。こうした技術が、クリーン開発メカニズム（CDM）や共同実施（JI）といった制度で活用されれば、その有効性は一層高まるといえよう。

図表11 帯水層貯留技術の概念図



出典：科学技術動向研究センターにて作成

おわりに

省エネルギーを初めとするCO₂排出抑制策は、CO₂の排出そのものを抑制することから、地球温暖化対策として効果的な対策と言える。しかしながら、技術的に可能であるということと、実際に各階各層が省エネルギーを実行することのギャップは依然として大きい。したがって、まず国は、いかなる対策・制度であれ、各界各層による経済的・実質的行動への関与が温暖化問題の解決に不可欠であることを、各界各層に対して十分に周知し、温暖化対策の実践を強く求めていく必要があると考えられる。こうした活動に加えて、国が地球温暖化対策に対して経済的インセンティブを与える温暖化対策税等の制度を導入すれば、各界各層における地球温暖化対策に対する認識が変わり、必然的に地球温暖化対策の実行も促進されると考えられる。しかしながら、CO₂排出抑制策の組み合わせだけでは、CO₂排出の抑制に大きく寄与するものの、大気中のCO₂濃度が増加することには変わりはない。したがって、2.2節で述べたように、自然エネルギーや原子力の利用見通しが極めて難しい状況等の理由から、向こう10～20年程度の期間を見越した場合、温室効果ガスを削減する手段としては、技術的にCO₂削減が可能な、排出されたCO₂の削減技術の開発に取り組むことが必要であると考えられる。

わが国は、これまでに排出されたCO₂を削減する技術について数多く取り組んでおり、要素技術としては優れた成果がある一方で、トータルシステムとして十分でない

とする評価が多くみられる。また、世界中が化石燃料に依存した現在のエネルギー事情に加えて、中国やインドといった途上国では、今後のエネルギー需要の増加に伴う大幅なCO₂排出増が予想されている。したがって、化石燃料を利用しながらCO₂増加を抑制できるCO₂地中貯留技術は、わが国を含め、途上国においても有用性は高いと考えられる。さらに、京都議定書を批准する動きが進んでいる昨今においては、温室効果ガスの削減義務化に伴う外部要因（温暖化対策税等）によって本技術の有用性は一層高まることも考えられる。

こうした状況を踏まえると、今後の排出されたCO₂の削減技術に関する研究開発は、以下の点を重視して研究を進めることが肝要であろう。

- 1) 向こう10～20年程度の期間を見越した地球温暖化対策技術について、排出されたCO₂の削減技術の必要性が高まることから、CO₂削減ポテンシャルと導入可能性の双方が高いCO₂地中貯留技術の研究開発を重点的に推進すること
- 2) 研究開発プロジェクトの計画段階から、システムとしての実用性の評価を含む開発の道筋を明確にし、さらにエネルギー政策も勘案しながら研究開発を推進すること
- 3) 海外での適用も期待される研究開発（CBM技術等）は、関係諸国との積極的な

研究交流を図り、技術の汎用性（国際標準化の先導や海外での適用）を視野に入れた総合的な研究開発を推進すること

参考文献

- 01) DOE, Vision 21 Program Plan - Clean Energy Plants for the 21st Century, 1999.
- 02) DOE, CARBON SEQUESTRATION - Overview and Summary of Program Plans -, 2000.
- 03) DOE, FY2003 Budget in Brief, The President's Coal Research Initiative, Sequestration R&D, 2002.
- 04) S A C S ホームページ, <http://www.ieagreen.org.uk/sacs2.htm#latest>
- 05) K. Alarcon, GEOLOGICAL DISPOSAL OF CARBON DIOXIDE, 1999.
- 06) Government of Alberta, Request for Funding for the Weyburn CO₂ Monitoring Project Submitted to "Climate Change Central", 2000.
- 07) Netherlands Agency for Energy and the Environment, Potential for CO₂ sequestration and Enhanced Coalbed Methane production in the Netherlands, 2001.
- 08) エンジニアリング振興協会, 平成5年度報告書, 283, 1994.
- 09) 山口伸次・山崎豊彦, 第12回エネルギーシンポジウム, 1, 1999.
- 10) 資源エネルギー庁, 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業費補助金（二酸化炭素炭層固定化技術開発）公募要領, 2002.

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

June 2002
(NO.15)

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：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-3-2
電話 03-3581-0605 FAX 03-3503-3996
URL <http://www.nistep.go.jp>
Email stfc@nistep.go.jp