

Synthesiology

ナノテクノロジーから大容量・高出力型リチウム電池の実用化へ

ホタルの光の基礎研究から製品化研究へ

粘土膜の開発

土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法

光触媒技術の開発と応用展開

ロータリエンコーダに角度標準は必要か

シンセシオロジー編集委員会

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」 発刊の趣旨

研究者による科学的な発見や発明が実際の社会に役立つまでに長い時間がかかったり、忘れ去られ葬られたりしてしまうことを、悪夢の時代、死の谷、と呼び、研究活動とその社会寄与との間に大きなギャップがあることが認識されている^(注1)。これまで研究者は、優れた研究成果であれば誰かが拾い上げてくれて、いつか社会の中で花開くことを期待して研究を行ってきたが、300年あまりの近代科学の歴史を振り返れば分かるように、基礎研究の成果が社会に活かされるまでに時間を要したり、埋没してしまうことが少なくない。また科学技術の領域がますます細分化された今日の状況では、基礎研究の成果を社会につなげることは一層容易ではなくなっている。

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかせたままでは^(注1)、その成果の社会還元を実現することは難しい。そのため、社会の側から研究成果を汲み上げてもらうという受動的な態度ではなく、研究成果の可能性や限界を良く理解した研究者自身が研究側から積極的にこのギャップを埋める研究活動(すなわち本格研究^(注2))を行うべきであると考えます。

もちろん、これまでも研究者によって基礎研究の成果を社会に活かすための活動が行なわれてきた。しかし、そのプロセスはノウハウとして個々の研究者の中に残るだけで、系統立てて記録して論じられることがなかった。そのために、このような活動は社会における知として蓄積されずにきた。これまでの学術雑誌は、科学的発見といった基礎研究(すなわち第1種基礎研究^(注3))の成果としての事実的知識を集積してきた。これに対して、研究成果を社会に活かすために行うべきことを知として蓄積する、すなわち当為的知識を集積することを目的として、ここに新しい学術ジャーナルを発刊する。自然についての知の獲得というこれまでの科学に加えて、科学的知見や技術を統合して社会に有益なものを構成するための学問を確立することが、持続的発展可能な社会に科学技術が積極的に寄与するための車の両輪となる。

この「Synthesiology」と名付けたジャーナルにおいては、成果を社会に活かそうとする研究活動を基礎研究(すなわち第2種基礎研究^(注4))として捉え直し、その目標の設定と社会的価値を含めて、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスが記述された論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に活かす研究が実践できるのかを読者に伝え、共に議論するためのジャーナルである。そして、ジャーナルという媒体の上で研究活動事例を集積して、研究者が社会に役立つ研究を効果的にかつ効率よく実施するための方法論を確立することを目的とする。この論文をどのような観点で執筆するかについては、巻末の「編集の方針」に記載したので参照されたい。

ジャーナル名は、統合や構成を意味する Synthesis と学を意味する -logy をつなげた造語である。研究成果の社会還元を実現するためには、要素的技術をいかに統合して構成するかが重要であるという考えから Synthesis という語を基とした。そして、構成的・統合的な研究活動の成果を蓄積することによってその論理や共通原理を見いだす、という新しい学問の構築を目指していることを一語で表現するために、さらに今後の国際誌への展開も考慮して、あえて英語で造語を行ない、「Synthesiology - 構成学」とした。

このジャーナルが社会に広まることで、研究開発の成果を迅速に社会に還元する原動力が強まり、社会の持続的発展のための技術力の強化に資するとともに、社会における研究という営為の意義がより高まることを期待する。

シンセシオロジー編集委員会

- 注1 「悪夢の時代」は吉川弘之と歴史学者ヨセフ・ハトバニーが命名。「死の谷」は米国連邦議会 下院科学委員会副委員長であったバーノン・エーラーズが命名。ハーバード大学名誉教授のルイス・ブランスコムはこのギャップのことを「ダーウィンの海」と呼んだ。
- 注2 本格研究： 研究テーマを未来社会像に至るシナリオの中で位置づけて、そのシナリオから派生する具体的な課題に幅広く研究者が参画できる体制を確立し、第2種基礎研究^(注4)を軸に、第1種基礎研究^(注3)から製品化研究^(注5)を連続的・同時並行的に進める研究を「本格研究 (Full Research)」と呼ぶ。本格研究 http://www.aist.go.jp/aist_j/research/honkaku/about.html
- 注3 第1種基礎研究： 未知現象を観察、実験、理論計算により分析して、普遍的な法則や定理を構築するための研究をいう。
- 注4 第2種基礎研究： 複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究をいう。また、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。
- 注5 製品化研究： 第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。

Synthesiology 第1巻 第4号 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

研究論文

- ナノテクノロジーから大容量・高出力型リチウム電池の実用化へ — 異分野融合と産学官垂直連携によるイノベーションの“短距離化” — 247 (1)
 ……本間 格
- ホテルの光の基礎研究から製品化研究へ — 生物発光タンパク質に基づくマルチ遺伝子発現検出キット — 259 (13)
 ……近江谷 克裕、中島 芳浩
- 粘土膜の開発 — 出会いの側面から見た本格研究シナリオ — 267 (21)
 ……蛭名 武雄
- 土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法 — リスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチ — 276 (30)
 ……駒井 武、川辺 能成、原 淳子、坂本 靖英、杉田 創
- 光触媒技術の開発と応用展開 — 持続可能な環境浄化技術の産業化 — 287 (41)
 ……埜田 博史
- ロータリエンコーダに角度標準は必要か — 角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発 — 296 (50)
 ……渡部 司

論説

- 構成的研究の方法論と学問体系 — シンセシオロジーとはどういう学問か? — 305 (59)
 ……中島 秀之

編集委員会より

- 編集方針 314 (68)
 投稿規定 316 (70)

Synthesiology 1巻総目次(2008)

325 (79)

English pages

Messages from the editorial board 317 (71)

Abstracts of research papers

- Development of high power and high capacity lithium secondary battery based on the advanced nanotechnology — *The convergence innovation strategy employing the inter-disciplinary research and inter-organization straightforward technology transfer* — 319 (73)
 --- I. Honma
- From basic research on firefly bioluminescence to *Product Realization Research* — *Production of a multi-gene expression kit based on bioluminescent proteins* — 319 (73)
 --- Y. Ohmiya and Y. Nakajima
- Development of clay-based-film — *A Full Research scenario from a viewpoint of encounter* — 319 (73)
 --- T. Ebina
- Development of a risk assessment system for soil contamination and the application to the social system — *Processes in Synthesiology for practicing an advanced environmental risk management* — 319 (73)
 --- T. Komai, Y. Kawabe, J. Hara, Y. Sakamoto and H. Sugita
- Development and applications of photocatalytic technology — *Industrialization of sustainable eco-technology* — 320 (74)
 --- H. Taoda
- Is an angular standard necessary for rotary encoders? — *Development of a rotary encoder that enables visualization of angle deviation* — 320 (74)
 --- T. Watanabe

Editorial policy 321 (75)

Instructions for authors 323 (77)

Vol.1 table of contents (2008) 327 (81)

ナノテクノロジーから大容量・高出力型リチウム電池の実用化へ

—— 異分野融合と産学官垂直連携によるイノベーションの“短距離化” ——

本間 格

ナノテクノロジーとエネルギー技術の分野融合を図り、ナノ結晶電極をベースとした大容量・高出力型リチウム二次電池の研究開発を行った。また、基礎研究成果を迅速に実用化に結びつけるため垂直連携型の産学官プロジェクトを実施した。この産学官連携では大学、産総研、電池メーカーと自動車メーカーの川上から川下に至る4つの参画機関による垂直連携型のプロジェクトにより大学・産総研の革新的成果の最短距離での実用化を目指すことができた。電池メーカーの協力を得て、ナノ結晶活物質を用いた高出力(3kW/kg)・大容量型(30 Wh/kg)の高性能リチウム二次電池が試作できた。異分野融合と産学官垂直連携の組み合わせはイノベーションの“短距離化”を実践する有効な研究開発プロセスである。

1 研究の背景

現在、日本は先進各国とともに2つの大きなエネルギー問題に直面している。1つはBRICsを中心としたエネルギー需要の急激な増大と第三世界の経済成長による資源獲得をめぐる国際競争激化からエネルギー制約が構造的に高まりつつあること。2つ目は地球温暖化による大気環境の激変による食糧生産の減少、ならびに異常気象の増大により人間の生存可能空間が著しく脅かされ、これまで持続可能性を有していた生物圏が激しいリスクにさらされていることである。なかでも資源小国であるわが国は経済発展の土台であるエネルギー供給に多くの不安定要素を抱えており、国家のエネルギーセキュリティー向上のためのエネルギー技術のイノベーションが最重要課題として認識されている。

高出力型リチウム二次電池は温暖化対策効果が大きく、また同時に産業競争力の向上に貢献するプラグイン・ハイブリッド車や電気自動車の市場導入を加速するため、現在世界各国で熾烈な開発競争が繰り広げられている。そこで要求されている電池の高出力性能は、従来型材料技術では実現困難であるため、蓄電技術におけるイノベーションが期待されているところである。特に近年のナノサイエンス、ナノテクノロジーの進展を背景として、電気化学的活物質の精密なナノ構造制御に基づく大容量・高出力型電極材料の開発に多大な関心が持たれている。

筆者はこのような先端ナノテクノロジーに基づく革新的な活物質に興味を持ち、これまで高速充放電型電極の開発を行ってきた。イオンの拡散距離が極めて短くなるナノ結晶では電荷移動速度が飛躍的に大きくなるため、高速充放電型電池が設計可能であることが理論的には予想されてき

た。筆者の研究チームではナノテクノロジーの先端プロセスを応用し、従来型の材料技術では合成できなかったナノ結晶やナノポーラス構造電極を作製することにより、従来の性能を凌駕する高出力特性が可能であることを実験室レベルで明らかにしてきたが、実際、それらの新しい材料設計コンセプトが次世代ハイブリッド車用電源として用いることができるかどうかを電池メーカーや自動車メーカーと産学官連携開発プロジェクトを行うことにより検証してみることにした。本稿ではエネルギー貯蔵分野のイノベーションにおけるナノテクノロジーの有効性を議論し、実際の技術開発成果を紹介するだけでなく、イノベーションの迅速な産業化のための産学官垂直連携プロジェクトの有効性についても論証する。

2 ナノテクノロジーとエネルギー技術の分野融合による革新的電池技術の開発

図1に近年急速に実用化が進んできたリチウム二次電池の性能のラゴンプロットとそれを利用した革新的エネルギーデバイスおよび製品の例を示した。現在、既に実用化されているのは携帯電話やノートパソコンであるが、これらは小型・小容量のリチウム電池を用いており、高い出力密度を必要としないデバイスである。近年、リチウム電池の中型化と高出力化が可能となり、自転車補助電源や電動工具(パワーツール)に用いられ始めている。リチウム電池技術のフロントは小型から大型デバイスへと進んでおり、さらに自動車電源への応用を目標に大容量化・高出力化・低コスト化が重要な開発課題となっている。図1に示すように右下から左上に向かって電池技術応用のフロントが動いていくのが見

て取れる。これら中大型の高信頼性のリチウム電池は今後とも基幹的なエネルギー技術、すなわち、ロボット、ハイブリッド自動車、再生可能エネルギーに用いることが期待されているが、これらの用途のためには上述したように数 kW/kg レベルの高出力型セルの開発が必須であり、そのためにもナノテクノロジーを利用した革新的な電池技術開発に大きな期待と投資が集まっている状況である。

実際、温暖化対策のキーテクノロジーであるハイブリッド車や燃料電池自動車に代表されるクリーン自動車用補助電源を想定した場合、エネルギー密度と出力密度を同時に兼ね備えた電源が必要になる。国内自動車メーカー、あるいは米国エネルギー省 (DOE) のハイブリッド車用補助電源の性能目標値を図 2 のラゴンプロットに示した。一般乗用車のエネルギー回生をターゲットとする場合には電池セルのエネルギー密度として 30 Wh/kg 程度、出力密度として 3 kW/kg 程度が要求されるが、このような性能はリチウム二次電池と電気二重層キャパシター (EDLC) の中間的な性能である。この性能 (30 Wh/kg, 3 kW/kg) は 1 時間当たり 100 回 (僅か 36 秒で充電完了) の充放電速度に匹敵し、現在実用化されているバルクサイズのインターカレーション電極材料ではこのようなエネルギー密度と出力密度を兼ね備える蓄電デバイスを構成することは不可能である。仮に二次電池的な活物質へのイオンインターカレーションメカニズムを用いる場合は約 100 倍におよぶ電荷移動速度の向上が必要となる。すなわちエネルギー密度と出力密度の同時獲得を目指して二次電池と電気二重層キャパシターの中間的な蓄電メカニズムを用いる場合は、電極内のイオン拡散と活物質の電子伝導の飛躍的な高速化を同時に実現しなければならない。

本稿ではこのような電気エネルギーの高速入出力が可能になる電源の創製を目指してナノ空間とナノ結晶活物質により構成されるナノポーラス電極を開発し、通常のリチウム二次電池に比べて 100 倍程度高速に充放電可能な高出力型

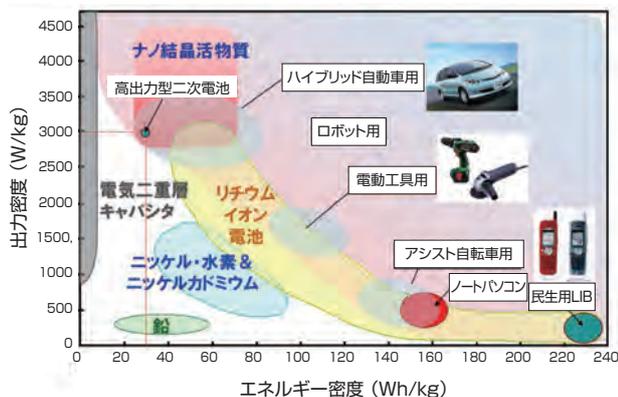


図 1 電池技術の革新が創生した工業製品

電池を目標とした産学官垂直連携プロジェクトの成果について報告する。特に基礎研究の成果であるナノ結晶電極材料の高出力型電池への積極的な応用展開を行った産総研のオリジナルなコンセプトを紹介し、ナノテクノロジーが電力貯蔵分野のイノベーションに多大に貢献できることを記述する。また、垂直連携による研究開発ではエンドユーザーの自動車メーカーにプロジェクト立案時から参画してもらい、数年後のプラグインハイブリッド車に要求される高出力電源性能 (図 2 の戦略目標値: 3 kW/kg 程度) を実現する電極材料開発に関して、その安全性や低コスト化など市場競争力も十分持てるよう大学・産総研の基礎研究に方向付けを行ってもらった。これにより、基盤技術開発の成果が大きな仕様を変更することも無く、最短距離で製品化に結びつくような垂直連携型研究開発の有効性を実証するため、4 機関の産学官連携プロジェクトを NEDO の支援を得て遂行した。

まず、ナノテクノロジーを利用して蓄電技術のイノベーションである高出力型電池がどのようにして実現するかについてその物理化学的根拠を記述したい。活物質中における蓄電メカニズムはイオン拡散と電子伝導による電荷授受を伴う電気化学反応が起因である。このとき、固体内のリチウムイオンの拡散係数を D_{Li} 、拡散時間を τ とすると、この時間内での拡散長 L は以下の式で記述される。

$$L = (D_{Li} \tau)^{1/2} \quad (1)$$

活物質内におけるリチウムイオンの拡散係数を $10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度と見積ると、厚さ 5 nm の活物質をイオンが拡散する時間 τ は高々 1 秒と計算される。また、ポア内の電解液中のイオン拡散係数を $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度と見積ると 10 μm の

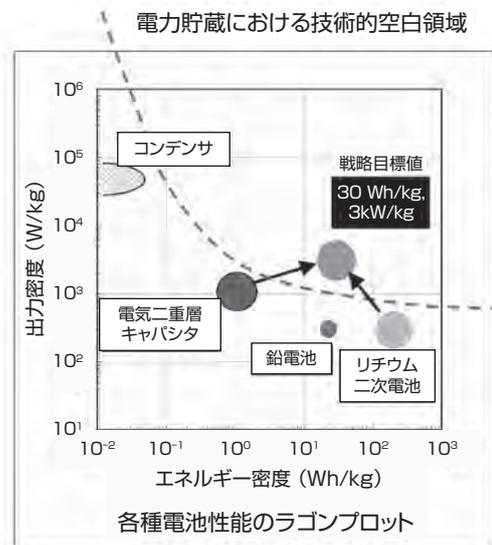


図 2 電池性能のフロンティア

長さのポアを拡散する時間も高々1秒と見積ることができる。したがって、図3に示したようにナノポア内に含まれる電解液中の速いイオン拡散 (k_1) と活物質内部のナノメートルレベルの固体内イオン拡散速度 (k_3) を利用すれば、ナノポーラス構造電極の粒子サイズが仮にマイクロメートル以上のサイズであっても、秒オーダーで充放電を実現することが可能である。ただし、図3に示した各律速過程の中でも活物質フレームワークの電子伝導 (k_4) や活物質の表面反応 (k_2) が十分速ければ、という条件付きの理論的考察である。他方、このようなナノポーラス電極では比表面積が大きいため、表面の電気化学的反応性に起因するリチウム貯蔵などナノ物質特有のエネルギー物性にも興味を持たれる。表面を利用すれば化学量論組成以上のリチウムを貯蔵する可能性もある。

産総研では移動速度論に基づく、このようなナノポーラス結晶活物質の高出力電極特性を確認するためさまざまなナノサイズの電極活物質を合成し、その高速充放電特性を評価してきた。原理的にはナノポーラス構造体電極を作製できればハイブリッド車電源に要求される36秒での充放電が可能になるはずであり、その実現のためにはナノテクノロジー分野のフロンティアである先端溶液プロセス、分子テンプレート合成技術、自己組織プロセス、ナノ結晶の量産化合成プロセスなどの要素技術を統合し、最終的には開発された革新的な電極活物質の有効性をメーカーとの共同により電池セルレベルで検証する必要がある。このような高出力型電池は産業界で広く要望されており、その市場規模も大きいことから近年世界中で開発競争が激化している状況である。

3 研究開発の実施と成果

実際にNEDOプロジェクトで行った異分野融合と産学官垂直連携による高出力型リチウム二次電池開発の概要を述べ、イノベーションの“短距離化”の戦略が有効であったか検討したい。本研究開発は2005～2007年度に実施

したナノテク・先端部材実用化研究開発制度の下に「低抵抗・高イオン拡散性ナノポーラス電極による高出力型2次電池の研究開発」として長崎大学、産総研、日立マクセル、富士重工の4つの参画機関で垂直連携プロジェクトとして行った。制度の趣旨にあるように先端的なナノテクノロジーを用いてハイブリッド車用の高出力型リチウム二次電池を開発するプロジェクトであり、ナノテクを効果的に用いたエネルギー技術であることが独創的なポイントである。また、プロジェクト開始当初からエンドユーザーである自動車メーカーを組み入れたことも特徴であり、大学・産総研の電極技術が短期間でハイブリッド車使用の電源に用いられることを研究開発の中心的課題として置いたことも特徴である。

川上側に位置する長崎大学には、基礎化学の観点から高出力特性が期待できるナノポーラス電極材料の無機化学合成プロセスを検討してもらい、実用型電極に応用可能な新しい合成法の開発を行った。界面活性剤のような分子テンプレートを用いたメソポーラス材料は、シリカのようなアモルファス構造では可能であってもリチウム二次電池正極材料である LiCoO_2 や LiFePO_4 などの結晶性活物質に応用するには困難が伴う。そこで、本研究では図4に示すようにコロイド状ポリスチレン(PS)を配列させたテンプレート構造を用いて逆オパール型の電極フレームワーク構造を作製するプロセスを開発した。

具体例としてチタニア系ナノポーラス電極の合成例を示す。チタンアルコキサイドのエタノール溶液をPSコロイド結晶に充填し、450℃焼成によりアナターゼ型結晶からなるチタニアナノ多孔体を、さらに同溶液にニオブアルコキサイドを混合することにより、 $\text{Ti}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_2$ ナノポーラス電極(図5)



図4 大学のシーズ：ナノポーラス電極の合成プロセス

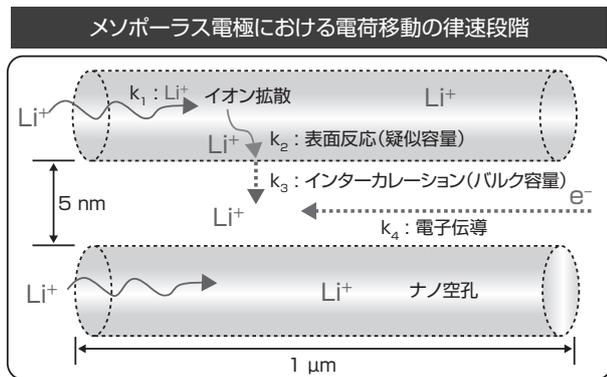


図3 電極中での電荷移動過程と律速段階

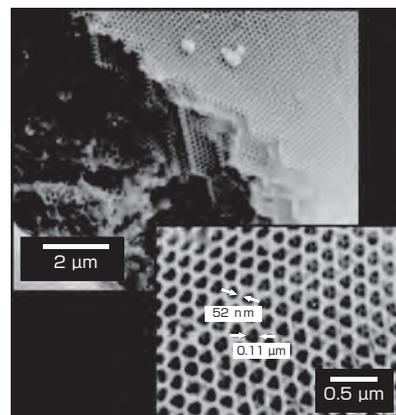


図5 チタニア系ナノポーラス電極

を得た。これらの電極では3次元的なフレームワーク型連続構造を取り、また規則正しいナノポアと活物質の配列を形成しているため高いイオン伝導性、電子導電性とリチウム貯蔵容量を得ることが可能となった。

次に産総研では、これらナノ結晶を用いた高出力電池電極材料の合成と構造評価、さらに電気化学特性の評価を行い、なぜこのようなナノ材料技術から革新的エネルギー特性が得られるのかについて高速電荷移動特性の物理化学的メカニズムの探求を行った^[1]。

実際の材料開発では電気化学的に活性なナノ結晶のチタニアを高出力型電極のモデル物質とし、アナターゼ構造とルチル構造のものをサイズ6 nm ~ 100 nm の範囲で用意し、リチウム電池電極特性のサイズ依存性の系統的な評価を行った^{[2][3]}。

ナノ結晶チタニアにおいては粒径がナノサイズ領域にあるためその比表面積が大きく、表面エネルギー貯蔵特性が現われやすいことから、リチウムとの電気化学反応を起こす領域としては、表面と固体内部の2つの相が共存すると考えられる。すなわち、前者はナノ結晶表面に電荷授受を伴いながら吸着される表面リチウムであり、後者はナノ結晶内部へのインターカレーションで貯蔵されるリチウムという2つの異なるリチウム貯蔵メカニズムである。表面吸着によるファラディックな容量は擬似容量として現われ、固体内部の貯蔵リチウムはインターカレーション容量として現われる。これらの2つの異なるリチウム貯蔵メカニズムは、実際に実験を行うと、図6に示したように充放電曲線に顕著に現われる。すなわちナノ結晶チタニアでは充放電曲線はバルク材料のものから大きく変化し、通常チタニア固体内部へのインターカレーション容量は、平衡組成 $\text{Li}_{0.5}\text{TiO}_2$ から 168 mAh/g の容量であるはずのものが、実験結果では 230 mAh/g 程度まで増大する。またこの容量は結晶サイズが小さいほど増大する。すなわち、容量の増大はインターカレーション容量に加えて表面の擬似容量としてナノ結晶

表面に貯蔵されたリチウムにより発現しているものと考えられる。

実際、充放電曲線に現われているようにリチウム組成として理論容量の $\text{Li}_{0.5}\text{TiO}_2$ までは一定のサイトポテンシャルでリチウムが貯蔵されるため約 1.75 V の一定電位で放電曲線が現われ、次にこのリチウム組成を超えたところから、容量増大とともにゆるやかに電位が降下する擬似容量的な放電曲線が出現する。この 1.75 V 以下の電位領域に現われる大きな擬似容量は明らかにチタニアの酸化還元容量であるため、活物質表面に電気化学的に吸着したリチウムの容量を現しているものと考えられる。これらは一定のサイトポテンシャルを有しておらず、チタニア表面でリチウム濃度が増大するにつれて表面が金属的になり電位が下がっていくものと考えられる。

一方、高出力型活物質を設計する上で、どのくらいどのナノサイズが最適なものは最も重要な課題である。図6のサイズ依存性の結果からチタニアの結晶サイズが 100 nm と 30 nm では電極特性が大きく異なり、30 nm サイズの活物質ではナノ化の効果が顕著に現れている。さらに 6 nm サイズの活物質ではもはやバルクと異なるナノ結晶物性が支配的になっている。この結果から革新的なナノ結晶特性を利用するならば数 10 nm 以下のサイズの活物質を用いることに大きな可能性があると考えられる。

これらのチタニア表面の擬似容量を用いた充放電メカニズムにおいては、固体内部への遅い拡散過程を伴わないため高速電荷移動が可能となろう。図7に示したようにナノ結晶内部へのインターカレーションは2相共存領域のプラトー電位を示す電池材料としては良好な電気化学特性であるが、一方、固体内拡散により遅い電荷移動過程を伴うために高速充放電には適さない蓄電メカニズムである。他方、表面へのイオンの吸着・脱着だけによる表面擬似容量メカニズムでは、拡散過程を伴わないためおそらく秒オーダーの電荷移動とリチウム貯蔵が可能となるであろう。実際、6 nm と 30 nm のアナターゼ構造のチタニア結晶の充放電電流密度を変えたときの放電容量の変化を図中に示した。どちらのケースにおいても電流密度を上げるにつれてインターカレーション容量は低下する傾向にあるが、30 nm 結晶サイズのチタニアでは容量低下が激しく起きている反面、6 nm 結晶サイズのチタニアでは 10 A/g の大きな電流密度の条件でも容量低下の度合いは小さく、結晶内部への高速インターカレーションが起きていることが判明した。

充放電曲線では特に 30 nm 結晶では電位平坦部の容量の低下が激しく起きている、結晶内部へのリチウムイオンのインターカレーションが大きな電流密度の条件下では抑制されていることが判明した。一方、ナノ結晶表面の擬似容

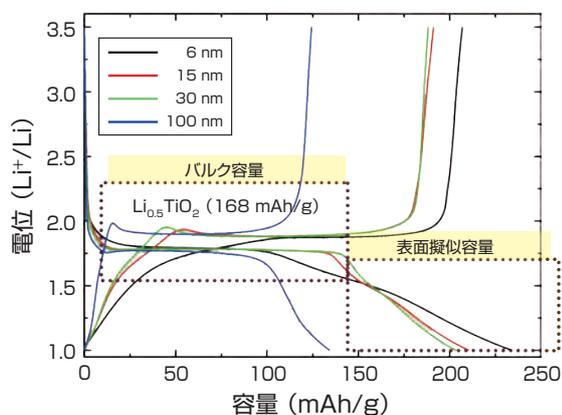


図6 ナノ結晶チタニアの充放電曲線

量メカニズムを用いた場合は、電流密度を増大させても表面の擬似容量はあまり減少していない。これは表面反応では電荷移動が極めて高速に起きていることを示している。6 nm のナノ結晶では実に 40 A/g までの高速充放電を行っても、この表面の擬似容量の成分は減少せず、リチウムイオンの可逆的な高速貯蔵特性を有していることを示唆している。すなわち、ナノ結晶活物質においてはその大きな比表面積に起因して擬似容量が発現するため、化学量論組成以上のリチウム貯蔵が可能となること、さらには固体内部へのインターカレーションを伴わない表面での高速リチウム貯蔵メカニズムが存在するという新しい電極物性が明らかとなった。このナノ結晶特有のエネルギー貯蔵物性を用いれば、大容量・高出力な革新的なりチウム電池電極材料を実現できる。

産学官垂直連携開発においては電池メーカー側が製品化を想定している活物質材料でナノ結晶を合成し、その高出力特性を検証することが必要になる。製品に使用される活物質を用いてそれらのナノ結晶を合成し、大容量・高出力・高サイクル特性を実証すれば直ちに実用化に結びつくはずである。本プロジェクトの参画機関である日立マクセル社のパワーツール用電池の製品開発にナノ結晶活物質のコンセプトを生かすため、チタン酸化物材料では高出力特性が期待されるチタン酸リチウム $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ のナノ結晶合成とナノポーラス構造の作製プロセスの開発を行った^{[4][5]}。 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 活物質はリチウムイオンの挿入 (insertion) と脱離 (extraction) 反応に対して無視できる程度の結晶構造変化が起きる電極活物質であるため、良好な充放電サイクル特性を有する電極材料として注目されている。そこで産総研では $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 活物質合成時にメソポーラス構造を導入する分散材としてポリマーを添加し、連続的な

メソポアとナノ結晶活物質のフレームワークから成るナノポーラス構造電極の作製と高出力特性の評価を行った。

高イオン拡散性のメソポアをナノ結晶電極体に導入するため $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 電極のゾルゲル合成時にテンプレートであるポリマー P123 (Pluronic; EO20PO70EO20) を添加しナノ結晶 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ の高分散化を図った。前駆体にポリマーを添加の後、400 °C で 6 時間、さらに 750 °C で 2 時間空気中焼成することにより約 60 nm 程度の大きさの $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 粒子が高分散で連結したナノポーラス構造電極を作製した。これらの電極特性を評価した結果、低抵抗・高イオン拡散性電極のコンセプトからも予想されるように、ナノポーラス構造 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 電極では大きな充放電電流密度でも十分な電極容量が得られ、またサイクル特性も良好であった。

産総研の研究により、高出力型負極として可能性の高い $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ で数 10 nm の活物質サイズでナノポーラス化を行うことにより、出力特性が向上することが判明した。また同様なチタン酸化物であるチタニア (TiO_2) においては 6 nm のサイズまで電極特性を調べ、高速充放電特性や擬似容量などナノサイズ物質特有のエネルギー貯蔵特性を基礎化学的観点で明らかにした。他方、現状の電池製品においてはバルク (μm レベル) サイズの電極を用いており、このような小さい活物質を用いた製品化例はなかったため、産業界・学会の双方で電池出力特性を最適化する活物質サイズの系統的研究例は存在しなかった。したがって、ナノテク電極を製品化フェーズに展開していくためにはどのようなナノサイズを目指すのか、すなわち高出力特性に最適な活物質サイズはどこにあるのかを常に意識して、産学官連携研究を進めていく必要がある。

またこれは大学・産総研と電池メーカーの研究開発を直線的に接続する意味でも重要な技術項目である。図 8 に示

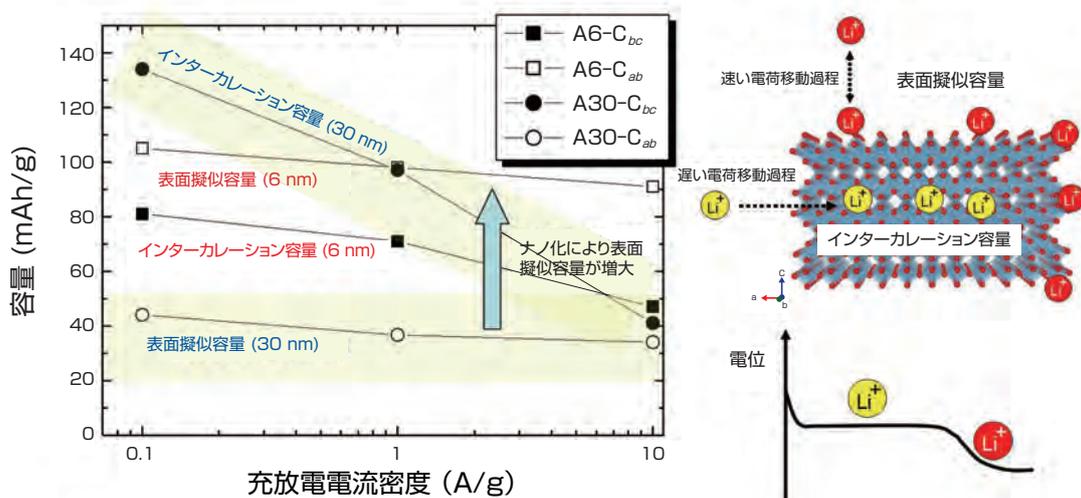


図7 ナノ結晶チタニアの表面擬似容量メカニズムとそれを用いた高速充放電特性

したように大学・産総研の基礎研究で探索する活物質サイズ領域と電池メーカーが製品レベルで探索するサイズ領域の間にはいわばミッシング領域とも言えるこれまで未探索のサイズ領域が存在し、このサイズのどこかに出力特性を最適化する値があると想像できる。垂直連携では、このサイズ領域を基礎と実用の両側から効果的に研究し、最適サイズをいち早く明らかにするとともに、電池セルにてその最適解を検証することが必須である。実際、数 10 nm ～ 数 100 nm のサイズの活物質はこれまで系統的な調査がなされてこなかった領域であり、今回の垂直連携では、このミッシング領域の探索をイノベーションの重要なマイルストーンとして重点的に研究開発を行った。実際、次のマクセル社の実施例にあるように、実用電極であるスピネル構造マンガ LiMn_2O_4 を用いて 55 nm ～ 200 nm までサイズの異なる活物質で電池を試作し、その出力特性を評価した。活物質サイズをバルク領域から段階的にナノサイズ領域にシフトさせ、インターカレーション電極ではこれらミッシング領域の中の、どのくらいのサイズで容量と出力を最適化できるか実際に探索した。単にナノサイズ活物質の合成と物性解明を行うだけでなく、製品化を目指して活物質サイズの最適化を行うため系統的な電極特性のサイズ依存性を調べたのは本研究開発プロジェクトが最初であろう。

次に垂直連携においては大学・産総研のイノベーションシーズの迅速な有効性の検証が必要であるが、基礎研究で明らかとなったナノ結晶活物質の優れた電極特性の製品への応用可能性を検討するため、電池セルの試作と性能評価を行った。電池セル試作試験は日立マクセル社に依頼し、標準的な仕様のラミネート型セルを作製して評価した。

まず試作電池の作製法について述べる。実験に用いた電極体はそれぞれ目標組成に秤量した電極活物質と導電

助剤、結着剤の PVDF 分散液を遊星型ボールミルで混合後、粘度を調整して塗料状電極ゾルを作製した。この塗料状電極ゾルをアプリケーターを用いて正極・負極ともに 15 μm 厚のアルミニウム фоль上、乾燥後の重量が 5.0 ～ 7.0 mg/cm^2 となるように塗布し、乾燥後にプレスして電極体を作製した。試作したラミネート型電池セルの構造と写真を図 9 に示す。

産総研におけるナノ結晶電極の高出力特性の結果を踏まえ、試験セルでは負極には 100 nm の $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 電極を用い、正極にはミッシング領域の中で最適な活物質サイズを見出すことを目的として、55 nm ～ 200 nm の異なるサイズの LiMn_2O_4 ナノ結晶活物質を用いて負極・正極ともナノサイズ電極からなる新型電池を作製した。

LiMn_2O_4 では若干ばらつきがあるものの 150 nm 以下の活物質サイズでは 2 A/g のレートまで顕著な放電容量の低下は起こらなかった。容量保持率の活物質サイズ依存性からは、粒子径が小さくなると 5 A/g 以上の高速充放電条件で特性が向上し、結果として 55 nm サイズの活物質が最も出力特性に優れている結果となった（図 10）。産総研が行った拡散理論に基づく計算では、100 nm 以下の粒子径であれば 1 時間当たり 100 回の充放電でも粒子内のリチウムイオン拡散はおおよそ間に合う計算になる。実際の試験セルのデータを見ると 150 nm 以下の活物質サイズの電極を用いた場合には高い電流密度でも充放電が可能であり、活物質サイズを小さくするに従って出力特性が向上することが判明した。活物質サイズをミッシング領域内で最適化した結果、スピネル構造を有するナノ結晶活物質 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ の負極 (100 nm) と LiMn_2O_4 の正極 (55 nm) を用いた電池セルで最も良好な出力特性が得られ、ナノ結晶電極の革新的なエネルギー貯蔵メカニズムを利用して電池セルレベルでも高出力特性を実証することができた。どのくらいのサイズのナノ結晶活物質を用いるのが高出力電池に最適なのかは今回のプロジェクト開始時から最重要な課題であった。世界的にナノサイズ活物質を用いた高出力電池開発が激化している中で、1 nm ～ 100 nm のサイズ領域のどこに最適解があるのかを見出すことは蓄電技術のイノベーションの

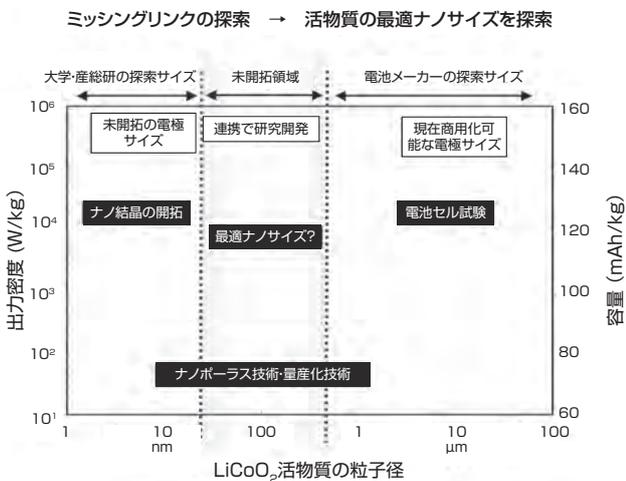


図 8 電極特性を最適化する活物質サイズをミッシング領域で探索する



図 9 試作したラミネート型電池セルの構造と写真

基点となる知見である。

今回の研究開発において産総研はナノサイズ活物質がその特徴的なリチウム貯蔵メカニズムにより大容量・高出力特性を実現するのに有効な活物質材料であることを実験的に解明し、さらに、その迅速な実用化のための垂直連携開発ではミッシング領域の系統的な探索を行って試作電池の出力特性とサイクル特性を評価した結果、活物質サイズ 50 nm 前後に最適解があることを実験的に明らかにした。現在、世界各国でナノサイズ活物質を用いた高出力型リチウム二次電池の研究開発が加速している中で、具体的にどのくらいの活物質サイズが電池製品の実用化に最適なのかを追求した研究開発は今回が初めてである。筆者が遂行した垂直連携プロジェクトでは、大学・産総研で見出したナノサイズ活物質の優れたリチウム貯蔵特性を利用していち早く革新的電池製品を生み出すべく、これまでの活物質サイズにおけるミッシング領域を系統的に探索した結果、製品仕様に最適な活物質サイズを見出した。さらに電池セルを試作し十分製品化に耐えうる高出力特性と高サイクル特性も確認した。

図 11 にプロジェクトで試作した電池性能をラゴンプロッ

トに記載した。既存リチウム二次電池製品の性能をはるかに超え、プロジェクト目標値を達成する大容量・高出力特性が得られた。また、製品化において最も重要な仕様である充放電サイクル特性も高出力条件で 10000 回まで調べたところ容量保持率約 60 %を示し、既存電池製品と比較してもその優位性が示され、製品化に十分耐えうる信頼性を有していることも判明した。現在、これらのナノ結晶活物質の革新的なエネルギー物性を生かした高出力型電池の製品開発が進行中である。このように革新的なエネルギー貯蔵材料であるナノ結晶電極というコンセプトを産総研が生み出し、基礎研究段階での高出力特性の実現、またサイズ効果と表面に起因する革新的なエネルギー貯蔵物性を学術的に明らかにし、さらに電池メーカーとの連携によりナノ結晶活物質の優れた電極特性を生かした高出力型のリチウム電池を実証した。

4 異分野融合と産学官垂直連携によるイノベーションの“短距離化”

本稿で述べるイノベーションの“短距離化”の戦略として、図 12 に示すような異分野融合と産学官垂直連携により本

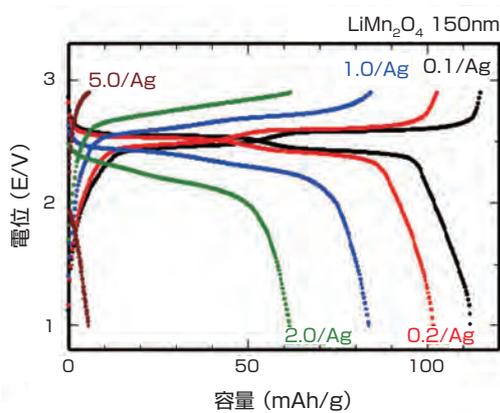


図 10 ナノ結晶電極を用いたリチウム電池の出力特性

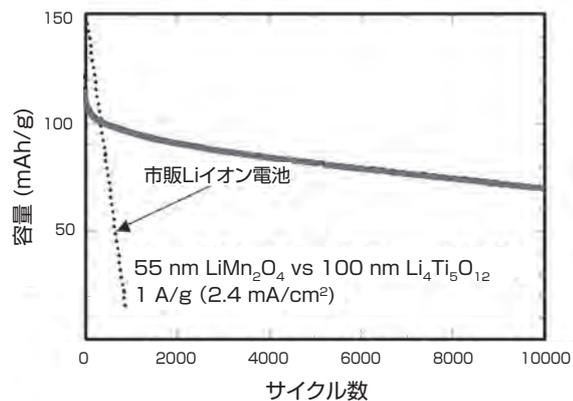
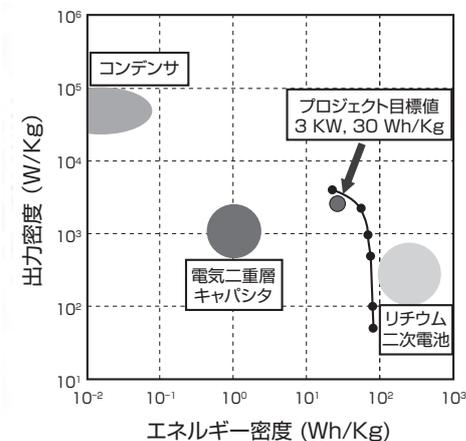
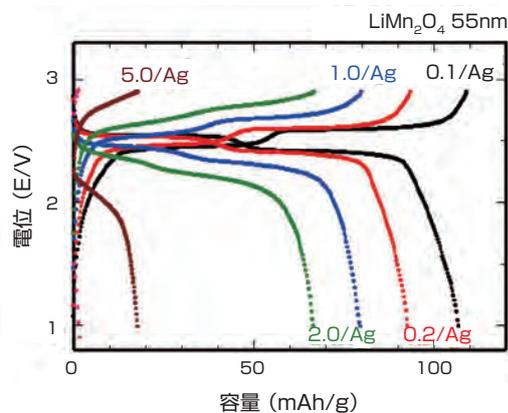


図 11 試作した電池性能のラゴンプロットと充放電サイクル特性（どちらも既存型電池より高性能が確認された）

格研究の加速を図った。まず、産総研の特徴として異分野融合によって革新的な新技術が生み出されやすい点を強調したい。研究者の数と密度が大きく、また標準・地質からバイオ・情報まで産業技術のほぼ全域をカバーする広い研究スペクトルを有しているため、容易に異分野との融合や要素技術のインテグレーション（総合化）が可能である。このことは従来にはない新技術やコンセプトを創出することに適した、いわゆるイノベーション密度の高い研究組織であることを意味している。この組織構造の特徴を生かせば、分野の境界領域で革新的な萌芽技術を生み出すことが容易であろう。すなわちバイオ+エネルギー、標準+ナノテク、エレクトロニクス+環境など多様な境界領域で、従来にはない新しい技術の芽を創出し、革新技術のプラットフォームとなるイノベーションシーズを高密度に産出することが可能である。

次に考えるべきは、いかにしてこのようなイノベーションシーズの有効性を短期間で検証するかという方法論、すなわちイノベーションの構成学である。そこで筆者が NEDO プロジェクトで実施した高出力型リチウム電池の研究開発を例として、産学官の垂直連携スキームによりイノベーションシーズの有効性を極めて短期間、例えば数年で検証できる研究開発プロセスについて述べたい。垂直連携は図 12 に示すように基礎研究を行う大学（川上側に位置する）から本格研究を行う産総研、さらに電池メーカーとエンドユーザーである自動車メーカー（川下側）までを 1つのプロジェクトにまとめて垂直的に連携させ、イノベーションシーズを迅速に実用化に持っていくスキームである。この連携スキームでは大学・産総研の新技術が迅速に自動車メーカーまで伝わり、有効性や信頼性を迅速に検討することが可能になる。また、バックキャスト的に自動車メーカーの技術的要

望が電池メーカーを通して産総研・大学に伝わり、その基礎研究に方向性を与えることが可能となる。この双方向性を参画機関で共有することにより、密度の濃い情報交換と製品仕様と合致した基礎研究を行うことが可能となり、数年の短期間でも実用化に結びつく効果的な研究開発プロセスになり得る。

では次に、このような新しい研究開発プロセスにおいて産総研の役割は何であろうか。結論から言えば、このような垂直連携において、産総研は中核的なイノベーションハブとして機能することが可能である。すなわち、研究者の数と密度が高く、さらに研究分野のスペクトルが広いいため、異分野融合により新しいイノベーションシーズを高密度かつ高効率に創生できる。このように異分野融合により創出される新技術の中から実際、製品まで応用できるものを迅速に見出すには本稿で記述しているような産学官垂直連携型のプロジェクトが有効であろう。図 12 に示したように異分野融合により創出した革新的技術を産学官垂直連携スキームを用いて、明確に目標化された製品に迅速に技術移転するプロセスはイノベーションの“短距離化”を可能にする有効な収束型 (Convergence) 研究開発プロセスである。このプロセスの中で産総研は、中核的なイノベーションハブとして機能する。

本稿では、ハイブリッド自動車電源のキーテクノロジーである大容量・高出力型リチウム二次電池の迅速なイノベーションに成功し、上記の収束型研究開発プロセスが有効であることを示した。連携を前提としたイノベーション構成学においては図 13 に示したように、①明確な製品目標を設定し、さまざまな要素技術を統合する収束型(Convergence) プロセスとしての垂直連携開発と、②明確な製品目標を設

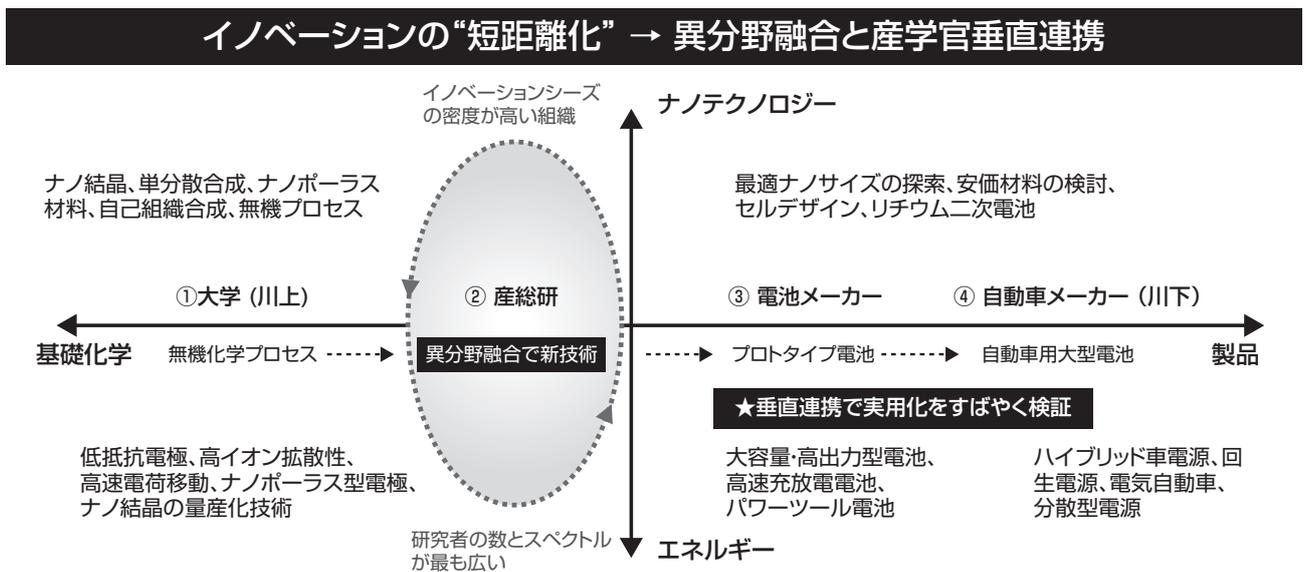


図 12 産学官垂直連携によるイノベーション構成手法

定せず、多様な新技術を生み出す協創（Co-Creation）型プロセスとしての水平連携開発、の2つの構成手法が存在する。実際に筆者が研究開発責任者となったNEDOプロジェクトではハイブリッド車用の高出力・大容量型リチウム二次電池という明確な製品をいかに短期間で開発するか、という目標があったため、前者の収束型プロセスを採用し、大学から企業に至る産学官垂直連携スキームによる研究開発を行い、ナノテクとエネルギー分野の融合によるイノベーションシーズの迅速な実用化を試みた。明確な製品目標を“最短距離”で完遂するには要素技術を効果的に統合する収束型メカニズムが最も適しており、実際に行った開発では短期間で革新的な高出力型電池を生み出すことが可能であった。

従来型の連携開発プロセスでは、まず大学の基礎研究の種が産総研に移転され、そこで、電池デバイスとしての性能実証や量産化プロセスなどの産業界へバトンタッチする直前までの技術開発が行われ、順次電池メーカーから自動車メーカーへと技術移転していくシナリオが普通であった。しかしながら、この逐次的連携開発は各機関の研究者の趣向により研究開発のベクトルが振れる場合には、エンドユーザーの求める技術と大きく異なった形で川下の機関に届いてしまう可能性がある。今回の産学官垂直連携では、このような時間がかかる川下への技術移転のスピードアップと製品が要求する適確な技術の移転のため、プロジェクト開始から全ての機関が参加し自動車メーカーの要求する技術開発項目をバックキャスト的に大学、産総研に伝えて基礎研究の方向付けを行った。このように技術の流れを直線化することによって川上と川下の“短距離化”を図っ

たわけであるが、3年の開発期間でナノ結晶電極という極めて有望な革新的材料を生み出すことに成功し、一般に融合が難しいとされているナノテクノロジー分野とエネルギー技術分野の橋渡しと革新技術開発が行えたことは幸運であった。今回のプロジェクトではハイブリッド車電源として十分な性能を達成しつつも、最初は小型セルで市場投入できるパワーツールの数年後の実用化を目指して、ナノ結晶電極を用いた製品開発が進捗中である。

図13は研究開発プロセスとして類型化されたイノベーションの構成手法を示しているが、最終目標が明確にイメージされるような製品がある場合は本稿で紹介したように垂直連携型の収束（Convergence）メカニズムが有効であろう。短期間での実用化を図るのならさまざまな要素技術を統合して最終製品に技術を収束させるのがもっとも効率が良いし、また垂直連携体制を取ればそれがもっとも短時間で技術移転できる。他方、現存しない革新的な萌芽技術や多様で汎用性の高い技術標準を生み出すことを目的とするなら、水平連携型の協創（Co-Creation）メカニズムの方が良いであろう。これは多様なイノベーションシーズを生み出し、スペクトルの広い産業界に文字通り水平的に貢献するからである。本稿では収束メカニズムに関して実施例を述べたが、産総研のイノベーション構成手法としてはどちらも重要であり、今後ともその方法論を深めていく必要があることは言うまでもないことである。

5 将来への課題

図1に電池分野の産業鳥瞰図を示したが、自動車電源に応用する場合は容量特性、サイクル特性に加えて大型化

研究開発プロセスにおけるイノベーション構成手法

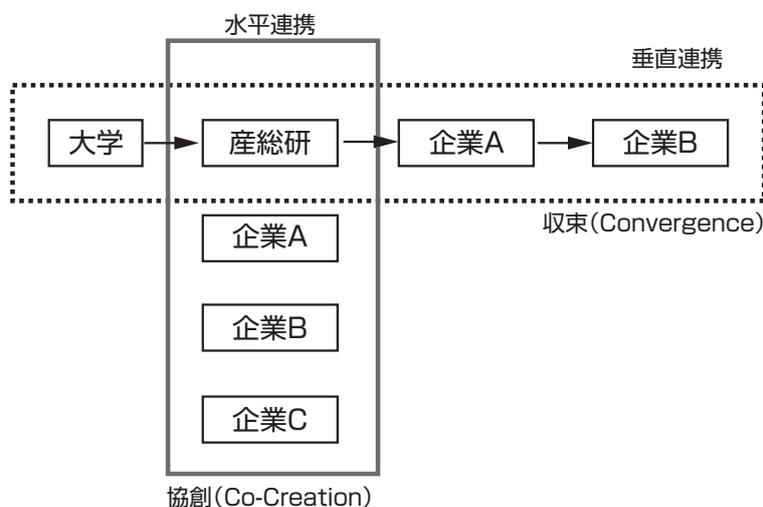


図13 イノベーションの2次元的構成法
協創（Co-Creation）と収束（Convergence）

のプロセス、安全性とコスト性がさらに高いレベルで要求される。本研究の開発期間は3年間という短期間であったので、自動車電源の実用化にまでは至らなかった。垂直連携スキームは全ての連携機関に迅速に十分な技術移転が可能となるメカニズムである。一方、自動車メーカーから大学・産総研へのバックキャスト的な研究の方向付けや大学の基礎研究から自動車メーカーへの直接的な技術移転は、実際には、まだ相当に高いハードルがあったと言える。電池の大型化に関しても携帯電話、ノートパソコンなどの小型レベルの段階から、自動車搭載の大型電池まで技術的に一気に進展するわけではなく、中間段階を幾つか経由して完成されるであろう。そういう意味ではイノベーションを生み出すために、限られた時間と予算、さらに参画企業の市場戦略と技術ポテンシャルなど現実的な境界条件を十分考慮した産学官垂直連携を行う必要がある。

6 要約

イノベーションの多様性とスピード化が要求され、さまざまな連携型研究開発が模索されているなかで、本稿では異分野融合と産学官垂直連携による収束型イノベーション構成法が有効な研究開発プロセスになり得ることを、高出力型電池開発を実施例として述べた。大学で生み出された化学的合成プロセスをベースに、産総研がナノ結晶電極という大容量・高出力特性が実現する高性能活物質の開発に成功し、その活物質コンセプトを製品に応用すべく電池メーカーと連携開発を行った結果、ハイブリッド車の回生電源などに要求される電池セル性能で 30 Wh/kg、3 kW/kg の高性能リチウム電池の試作に成功し、さらに製品化に重要なサイクル特性も既存製品に比べて優れている大変良好な結果が得られた。現在、参画した電池メーカーでは今回の垂直連携開発の結果を生かして、パワーツール用電池として数年後に市場投入する製品の研究開発が進捗中である。ナノ結晶電極はナノテクノロジーとエネルギー技術の融合領域に発生した蓄電技術におけるイノベーションであるが、産学官垂直連携はこのようなイノベーションシーズの迅速な有効性の検証とプロジェクト化による短期間での戦略目標の達成に適したスキームであった。

本稿で紹介したように、大学や産業界単独では不可能なイノベーションシーズの創出も総合研究所である産総研では容易であり、連携研究では中核的な研究機関となる資格がある。この理由は研究者密度が高いのと広い研究スペクトルを1つの組織内に有しているからであり、産総研では異分野の融合により多様なイノベーションシーズを高効率に産出できる。また、シーズの目標製品への応用可能性を迅速に検証するためには、エンドユーザーの企業も参画した

垂直連携型での研究開発が有効であることを示した。この（異分野融合+垂直連携）の新しいイノベーション構成手法は研究開発のスピード化を目指す上で極めて有効なシナリオであると言える。ナノテクを用いた高出力型リチウム二次電池の研究開発においては、ナノ結晶電極という革新的な材料技術を短期間（3年）の間に製品化フェーズにまで展開することが可能であった。このシナリオは最終製品目標が決まっている短期決戦型の開発ではバイオ、情報、ナノテク・製造、環境・エネルギーなど他の産業分野でも有効な研究開発プロセスであると言える。

7 謝辞

今回の高出力型リチウム二次電池を目標とした産学官垂直連携開発に協力していただいた全ての関係者に厚く感謝いたします。特にチタン酸化物系ナノ結晶材料を電極材料としたときの特性データは、産総研エネルギー界面技術グループの周豪慎グループ長に多大な貢献をいただきました。活物質内の高速電荷移動のコンセプトに関しては工藤徹一東京大学名誉教授に本質的なアイデアをいただきました。ラミネート型電池の試作と電池特性試験を行っていただいた日立マクセル社の方々に感謝いたします。ポーラス電極構造の合成プロセスに関しては長崎大森口教授にご教示いただきました。また、プロジェクト遂行に多くのアドバイスをいただいた NEDO ナノテク室、産総研産学官連携推進部門の方々にもお礼申し上げます。

キーワード

リチウム二次電池、ナノ結晶、大容量・高出力型電極、プラグイン・ハイブリッド車

参考文献

- [1] M. Okubo, J. Kim, M. Enomoto, N. Kojima, T. Kudo, H. Zhou and I. Honma: Nanosize effect on high-rate Li-ion intercalation in LiCoO₂ electrode, *J. American Chemical Society*, 129, 7444 (2007).
- [2] C. Jiang, M. Wei, Z. Qi, T. Kudo, I. Honma and H. Zhou: Particle size dependence of the lithium storage capability and high rate performance of nanocrystalline anatase TiO₂ electrode, *J. Power Sources*, 166, 239 (2007).
- [3] C. Jiang, I. Honma, T. Kudo and H. Zhou: Nanocrystalline rutile TiO₂ electrode for high-capacity and high-rate lithium storage, *Electrochemical and Solid State Letters*, 10, A127 (2007).
- [4] C. Jiang, Y. Zhou, T. Kudo, I. Honma and H. Zhou: Preparation and rate capability of Li₄Ti₅O₁₂ hollow-sphere anode materials, *J. Power Sources*, 166, 514 (2007).
- [5] C. Jiang, M. Ichihara, I. Honma and H. Zhou: Effect of particle dispersion on high rate performance of nano-sized Li₄Ti₅O₁₂ anode, *Electrochimica Acta*, 52, 6470 (2007).

(受付日 2008.6.23, 改訂受理日 2008.10.27)

執筆者略歴

本間 格（ほんま いたる）

1984年東京大学工学部金属材料学科卒業、1985-1991年同大学工学部助手、1991-1995年同講師を経て1995年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年から独立行政法人産業技術総合研究所電力エネルギー研究部門エネルギー材料研究グループ長。現在、エネルギー技術研究部門ナノエネルギー材料研究グループ長。工学博士。大学時代はアモルファスシリコン太陽電池の新材料研究や機能材料プロセスの研究に広く従事し、電総研入所後は固体高分子形燃料電池、スーパーキャパシタの研究などナノテクノロジーをベースとした革新的電源デバイスの研究開発に従事した。現在は主にリチウム二次電池の大容量化・高出力化の材料開発を行っている。2005-2007年にNEDOナノテク・先端部材実用化研究開発制度の下に「低抵抗・高イオン拡散性ナノポーラス電極による高出力型2次電池の研究開発」として長崎大学、産総研、日立マクセル、富士重工の4つの参画機関で垂直連携プロジェクトの研究開発リーダーを任った。

査読者との議論**議論1 垂直連携の流れについて**

質問・コメント（水野 光一）

垂直連携型の共同研究はこれまでも頻度の高い方法論です。本研究の場合、基礎的な成果が産総研→相手企業（電池メーカー）へ伝達される一方向の流れだけではなく、研究開発の内容について相手企業→産総研という逆方向の伝達があれば明示できますか？もちろん、相手企業から開発項目が提起されたことは理解できますが、これ以外で技術的な内容について双方向での交流があれば垂直連携の理解がもっと深まります。

回答（本間 格）

産総研では電極材料のナノサイズ効果を学術的に解明するため各種サイズの揃って基礎研究に適した物質であるチタニア TiO_2 を選び、この酸化物に対する電極特性を系統的に調べました。この基礎研究フェーズではナノ化に伴う表面容量の出現や、それらが高速充放電に適したナノ結晶活物質であることを明らかにしつつ最適なナノサイズの探索も行いました。このようなナノサイズ活物質の優れた大容量・高出力特性は実用的な活物質材料でも利用できることを今回の産学官プロジェクトで相手企業側にも紹介し、共同開発を進めました。

実際、相手企業の日立マクセル社では製品に用いる負極材料は産総研が研究を進めたチタニアと類似のチタン酸化物である $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ でしたが、この材料をナノ化し容量・出力特性を最適化するためには図8にあるような活物質サイズのミッシング領域を探索し、どのようなサイズの $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ を市販電池に用いるのが最適なのかを明確化する必要性が産総研と企業の間で提起されました。

このようにチタニアのサイズ効果（産総研⇒日立マクセルのforecast）の技術移転と $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ のナノサイズ活物質の実用性探索（日立マクセル⇒産総研のbackcast）の双方向の情報交換・開発計画により事業化プランに上げられる実用電極材料でナノサイズの最適化を行いました。試験セルデータに使われた55 nm- LiMn_2O_4 、100 nm- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ は今回の連携開発において最適なナノサイズを見出した成果であり、従来型電池性能を凌駕する出力特性が得られていることを論文に記載してあります。

議論2 表面擬似容量について

質問・コメント（水野 光一）

電極固体内部でのインターカレーションよりも表面における“擬似容量”が充放電容量を広げるキーポイントであり、活物質のナノサイズ化が適用される好例であると判断します。表面擬似容量では「リチウム濃度が増大するにつれて表面が金属的になり電位が下がっていくもの」としてはいますが、反応機構や具体的な表面のイメージを説明でき

ますか？

回答（本間 格）

簡単に説明すると図7に示したようにバルクの反応はリチウムイオンが固体内部までインターカレーション（イオンの挿入）を起こし、同時に構成する金属の酸化還元が起きることにより電気エネルギーを貯蔵する、いわばその材料の本質的な（標準的な？）電気化学反応に起因するものです。したがって、世界中で誰が実験を行っても化学量論組成の同一物質を用いれば、その平衡電位では必ず同じ量のリチウムイオンが貯蔵されます。ところが、表面での貯蔵機構はその物質固有の本質的な（バルク的な）特性とは異なり、あくまで表面が存在することにより顕在化する非固有の特性です。したがって、比表面積の違い、面方位（結晶モルフォロジー）の違いにより容量特性に差異が出てきます（すなわち実験グループによってデータが異なってきます）。

図7においては速い電荷移動過程においてリチウムイオンの表面への吸着と同時に電子が表面層チタニアに入り $\text{Ti}^{4+}/\text{Ti}^{3+}$ の1電子還元反応を起こす表面反応として記述しておきました。すなわち結晶構造に関係なく表面反応が擬似容量の起源と考えています。さらに、例えばバルクでは起きない $\text{Ti}^{4+}/\text{Ti}^{2+}$ の2電子還元反応もリチウムイオンにとっては特殊な化学的結合状態であるナノ結晶表面では可能となり、大きな容量が発現するものと考えています。図7の赤色で示したリチウムイオンはこのような特殊な表面反応を示しており、バルクよりリチウムが高濃度に貯蔵されている様子を示しています。2電子還元まで起こせば Ti^{2+} まで存在するため下の図にあるように電位は下がり表面はより金属的になります。

追記ですが、ナノ結晶では格子膨張が起きたり、バルクと異なる結晶構造（相）が安定化したりして、その表面はバルクの表面とも必ずしも同じでなく大変興味深い研究対象です。また逆に言えば新しい貯蔵メカニズムも発現する可能性があり、その基礎研究は今後も進展させていくつもりです。

議論3 産総研と電池メーカー、自動車メーカーとの連携について

質問・コメント（小野 晃）

産学官の垂直連携のメリットが良く活かされた研究と思います。そこでプロジェクトリーダーであった著者に連携に関して質問します。本プロジェクトの中で産総研は電池メーカーから具体的にどのようなサジェスションを受け、それをどのようにプロジェクトに反映させましたか？また産総研あるいは電池メーカーは自動車メーカーから具体的にどのようなサジェスションを受け、それをどのようにプロジェクトに反映させましたか？プロジェクトリーダーの立場から、差し支えない範囲で結構ですのでご回答願います。

回答（本間 格）

現在、ナノサイズ活物質を利用して高出力化が図られることが明らかとなり基礎研究が加速している反面、実用的電極材料である LiMn_2O_4 や $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ でどのくらいのナノサイズの材料が最適なのかに関して、これまでまったく研究例がないことが驚きでした。図8に示したように活物質サイズにはミッシングリンクがあり、この未開拓領域を探索してナノサイズ効果に関する物理化学的知見を深め、かつ最高の容量・出力特性が得られるサイズを見出すことを最重要開発項目にすることを電池メーカーから提案されました。活物質のサイズ効果をナノ領域で系統的に調べることは基礎研究の観点からも重要であり、またその過程で明らかになる表面効果やイオン・電子の電荷移動過程のサイズ効果は、高出力型電極を開発する上でも大変貴重な材料設計指針となります。産総研ではこのような電池メーカーからの期待に答えるべく基礎研究の方向付けを行い、具体的には論文で記載したようにチタニアなどの金属酸化物材料のナノサイズ効果に関して研究を進めました。また、自動車メーカーからは実際の商品化には低コスト化や生産性が重要な課題であることを指摘され、このサジェスションに基づきナノサイズ活物質の量産化プロセスの開発も同時進行させました。論文には記載していませんが、溶融塩法など

を用いてキログラムレベルでナノ結晶活物質を量産できる新しい活物質合成プロセスの開発も行いました。

議論4 産総研と大学との連携について

質問・コメント（小野 晃）

長崎大学と産総研の間での連携の状況は具体的にどのようなものだったのでしょうか？単純に長崎大学の技術シーズを産総研に移転しただけというよりも、両者の間で行われたいろいろな相互作用や擦り合わせを、プロジェクトリーダーの立場から差し支えない範囲で結構ですのでご回答願います。

回答（本問 格）

長崎大学は基礎化学プロセスを開発する上で重要な貢献をしていただきました。産総研では活物質のナノサイズ効果を研究したわけですが、それらの材料合成に適した反応プロセスの選定などもしてい

たきました。具体的にはプロジェクトで用いた水熱合成法、熔融塩合成法に関して反応速度論的な検討を行っていただき、出発原料や溶媒の種類など基礎的ですが大変重要なアドバイスをいただきました。さらには自動車メーカーからの要望である低コスト合成プロセスの基礎研究も行っていただき、特にカーボン系高容量電極材料の開発では一段階の焼成プロセスで合成できる実用的プロセスの検討も行っていただき、その成果は自動車メーカーの電池開発に生かしてもらっています。

また、産総研と長崎大学の連携の面では3年間という極めて短期間でお互いの研究ポテンシャルを最大限に発揮するため、金属酸化物系のナノ結晶活物質の開発は産総研で分担し、また実際の電池電極では導電補助材として必須のカーボン系材料のナノポーラス化と高出力化の開発は長崎大学に分担してもらうことにより、プロジェクト期間中に両者を組み合わせた革新的な大容量・高出力電極の設計を行うことができました。

ホタルの光の基礎研究から製品化研究へ

—— 生物発光タンパク質に基づくマルチ遺伝子発現検出キット ——

近江谷 克裕*、中島 芳浩

ヒトを含めた生き物の生命現象は、細胞内の多くの分子とその複雑な化学反応のネットワークにより制御されており、近年、このネットワークを解析する技術の開発が望まれていた。我々は発光色の異なるホタル(甲虫)の発光タンパク質(ルシフェラーゼ)に着目し、細胞内の複数の遺伝子発現を同時に検出する技術を開発した。開発した技術は実用化研究を経て、企業による製品化に結びついた。現在、本研究成果は、第1種基礎研究などへの回帰を経て、新たな実用化研究へと進展中である。

1 はじめに

生物発光はホタルなどの発光生物が生み出す光であり、光る生物の体内には「光の素」と「光の素の発光を触媒する酵素」がある。前者をルシフェリン(Luciferin、光るものの意)、後者をルシフェラーゼ(Luciferase)と呼んでいる。このルシフェリン、ルシフェラーゼの言葉を生み出したのが19世紀のフランス人研究者Duboisであり、発光生物学は先人達の弛まぬ努力が支えてきた学問である。欧米の研究者が中心になって先導してきた学問かというところではなく、日本人の貢献が非常に大きい、例えば第二の熊楠とも言われた神田左京は戦前に「ホタル」という国内外に知られた名著を著し、また横須賀博物館初代館長の羽根田弥太は世界的な発光生物学者、そしてウッズホール研究所の下村脩博士は細胞標識技術を変えた緑色蛍光タンパク質GFPの発見者であるなど、輝かしい足跡をたどることができる^{[1][2]}。

1990年代より生物発光を利用したバイオツールが日米欧の企業から製品化されたが、学問分野として生物学、化学、物理学、生化学や工学の幅広い研究領域の上に成り立つ複合領域であるがゆえ、広い分野の知・技・人・資金の結集が進まず、革新的な技術開発は十分に行われてはいなかったのが現状である。これは広い学問分野の上に成り立つ複合分野であるにも関わらず、個々の学問分野間の融合が不十分だった点もあるが、基礎研究における「死の谷」を超える道筋が明確でなかった点に起因する。また、既に生物発光に関わるバイオツールの製品化を達成した企業に対して、明確に製品を差別化し、新たな製品を生み出し、市場に対する明確なメッセージを発する基礎研究の成

果も不十分であったためである。

一方、生命科学の分野では90年代に始まったゲノムプロジェクトは知・技・人・資金の結集により著しい進展を遂げ、10年も経たずにヒトゲノムの解読に成功した。しかし、この進展は、次なる学問分野の登場を待つというジレンマに陥ることになる。それは、科学者たちは、当初、ゲノムの解読は革新的な基盤情報となり、それによって大きなイノベーションが起きると信じたのであるが、それまで信じていたヒトゲノム上には10万種以上のタンパク情報があり、それは「ヒトと他の動物たち」との明確な違いを示してくれるとの淡い期待があったためである。しかしながら、脊椎動物の直系である脊索動物ナメジウオの遺伝子はおおよそ2万1600種であり、ヒトも2万数千種程度の遺伝子情報しかないという現実である。また、ヒトとサルでさえ遺伝子の違いは2%以下なのである。では、どうして生物間に違いがあるのか?ヒトは高度に発達したのか?ポストゲノム時代の今、多くの課題が突きつけられている。現在、この答えを見つける手法の1つとして、生命を織りなす生体分子群の動態解析やイメージングが注目され始めた。

筆者の1人である近江谷は90年代より生物発光に興味を持ち、科学技術振興機構のさががけ研究21プロジェクトでホタルの発光色決定機構の研究を行った。その後、静岡大学教育学部において、発光甲虫やウミホタルの発光メカニズムを生物学、生化学の視点から研究を続けた。その結果、ブラジル産の鉄道虫の赤色及び緑色ルシフェラーゼ遺伝子のクローン化に成功、また、ホタルルシフェラーゼ中の216番目のアミノ酸が発光色の決定に大きく関わることを見出した^{[3][4]}。特に、鉄道虫は南米ブラジルにしか生息しな

い発光甲虫であり、地上で最も強い赤色の光を発するルシフェラーゼを発現していた。これらの研究成果は、生物発光システムよりバイオツールを生み出す新しい研究成果へのスポットではあるが、明確にこれらのスポットを結びつけ展開できる方策はなかった。大学の中の研究と教育の挟間の中では、明確に第2種基礎研究を行うことができないのが現状であった。そのような背景のもと、産業技術総合研究所の誕生と同時に、近江谷と中島は産総研で研究を開始することになった。第1種基礎研究というスポットを第2種基礎研究で展開するチャンスが与えられたのである。おぼろげながら、発する光の色に着目したバイオツールの開発がアウトカムとして浮かび、それを21世紀のバイオサイエンスが模索していた生体分子群の動態観察やイメージングに結びつけるという明確な目標が設定できた。

2 何を開発するのか

ゲノムプロジェクトが一段落した21世紀の生命科学では、1つの生体分子を追跡する手法に限界があることが理解されていた。また、これまでの延長線の計測装置の開発だけではバイオサイエンスの革新が行われなことも認識されていた。その背景の元、2002年、経済産業省、NEDOが母体となり「細胞内ネットワークのダイナミズム解析技術開発」プロジェクトが始動した。本プロジェクトでは生体組織の構築・機能発現の基となる細胞内生体分子のネットワークの時間的・空間的な動態変化を細胞が生きている状態で効率的に計測し、機能解析を可能とする技術の確立を目的とし、複数の生体分子が作り出す情報伝達ネ

ットワークの解明を目標とした。我々は本プロジェクトに複数種生体分子の細胞内識別技術の開発として発光タンパク質の利用を提案して、参加した。

我々の研究コンセプトは単純で、従来、ホタルの発光の利用では、その光の量しか注目されていなかったことに対し、ホタルの発光の持つ多色性に注目して、細胞内の複数の情報を発信することを模索した。つまり、従来の生物発光を応用したツールが白黒テレビの延長線であったものを、光の色の違いというキーワードでカラーテレビ化、細胞内の複数種生体分子の動きをリポートしようと考えた。これは90年代の大学における基盤研究で得た研究成果のスポットを結びつける作業でもある。図1は提案において用いたスライドの1枚を修正したものであり、研究コンセプトのストラテジーが描かれている。つまり多種多様な生物発光のルシフェラーゼを活用することである。我々の有力な武器は世界に先駆けて特定した頭が赤色、身体が緑色の光を放つ鉄道虫のルシフェラーゼという第1種基礎研究の成果である。

目標設定は従来技術との明確な差別化を狙い、その実用化の絵姿としてマルチ薬剤スクリーニングシステムとした(図2)。最終的に、2006年4月には東洋紡績より「TripLuc」、東洋ビーネット社から「マルチカラールク」として販売され、提案時の出口としてイメージしていたキットを企業から販売することができた。企業が最終的に販売するか否かの判断は、それが世の中のニーズに合致し、ある技術に関して改良なりを欲求するユーザー、及び新たな技術の導入を期待する潜在的なユーザーの存在が重要である。日本人バイオ研究者の一つの習癖だが、自分で判断

研究開発のストラテジー
異なる発光色の発光タンパクを取得・特許化（7色の発光を目指す）

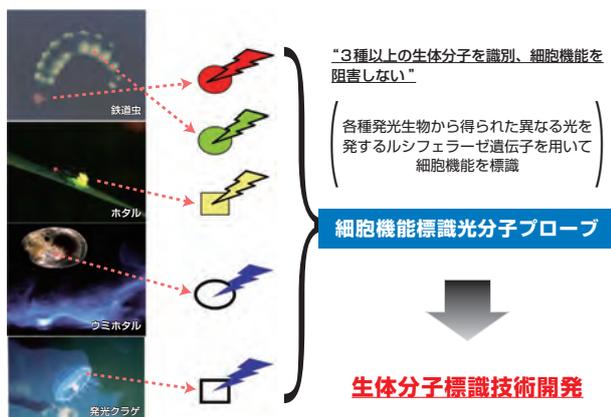


図1 研究開発のストラテジーを表したもの。NEDO「細胞内ダイナミズム解析」のヒアリングに用いたスライドの一部を修正。左の写真は上から鉄道虫、ゲンジボタル、ウミホタル、発光クラゲである。我々が目指した細胞機能標識技術は、各種発光生物から得られた発光色の異なるルシフェラーゼ群（発光のための酵素、触媒）をもとに、“3種以上生体分子を識別、細胞機能を阻害しない”ことを可能にする細胞機能標識光分子プローブによるものである。

想定する製品化の姿と現状

“目標：より細胞機能に即した創薬システムの開発”

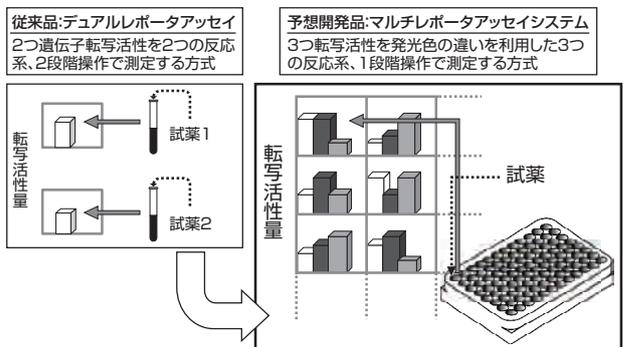


図2 研究開発のアウトカムの一例を表したもの。NEDO「細胞内ダイナミズム解析」のヒアリングに用いたスライドの一部を修正。従来技術では2つの遺伝子転写活性を2段階で2つの試薬を用いて行ったが、開発を目指したマルチレポーターアッセイシステムは3つの遺伝子転写活性を1段階で1つの試薬で可能にする方法である。これによって、一度に多くのサンプルの解析を行うことを目指した（ハイスループット解析）。

し新しい技術を導入するより、外国の雑誌等に掲載された技術を導入する傾向が多いように思える。この点に注意すべきであり、新しいバイオ技術を生み出した者は、技術の素晴らしさを多くのチャンネルを使って発信すべきである。つまり特許でスタートする第2種基礎研究、実用化研究を行うだけでは真の製品化には至らず、アフターケアをする一連の流れが重要である。何を持ってアフターケアとするのか、1つの答えは、研究者自らが生み出した技術をもとに第1種基礎研究で堅実な成果を上げることであろう。

さて、我々の目指した細胞内の複数種生体分子の標識技術は、細胞内で起きている複数の遺伝子発現をモニターするものである。細胞内では外的刺激に対して速やかに、あるいはゆっくりと応答し、複数の遺伝子発現が調節される結果、各種のタンパク質が作られる。例えば、環境ホルモンが細胞内に到達すれば、細胞はそれに応答して、女性ホルモンといわれる物質を生産するのである。そこで特定遺伝子の発現量を検出する手段としてホタル発光酵素（ルシフェラーゼ）を用いたレポーターアッセイが製品化されていたのである。レポーターアッセイでは遺伝子の発現を調節する遺伝子配列をホタルルシフェラーゼ上流に挿入、細胞導入する。もし細胞内で遺伝子の発現が誘導されれば、それに応じてルシフェラーゼが合成される。ルシフェラーゼにルシフェリンを加えれば発光するので、発光量で遺伝子発現量を評価できる。この手法はバイオ・メディカル領域で活用され、たとえば創薬分野における薬剤スクリーニングや環境分野における化学物質評価（環境省では公定法として認めている）として、市場に定着しており、02年の段階でも国内市場5億円、世界的には200億円産業であった。

では、この分野で、新たに企業が製品化に動く可能性はあるのだろうか？ 02年まで、市場で支持されていたレポーターアッセイはP社の販売するデュアルレポーターである。この方法は2遺伝子-2基質による2ステップの測定法であり、米国で成立した特許を持つP社が、ほぼ独占的な状態にあった。よって、この独占状態を打破したい企業にとっては、レポーターアッセイに関わるシーズの探索が重要であった。また、ユーザーサイドは2つの遺伝子の発現しか評価できない点、また、2基質2ステップというコストと工程に関する不満があった。また、レポーターアッセイがさらに汎用性の広い手法であるなら、使ってみたいという潜在的なユーザーの存在もあった。ここでレポーターアッセイでの明確な目標設定が可能になった。我々は発光色の多様性を活用した「3遺伝子-1基質による1ステップレポーターアッセイ」の開発を目指した。

3 第2種基礎研究から製品化を目指すための特許構築

ホタルの発する光はホタルルシフェリンの酸化をホタルルシフェラーゼが触媒する酵素反応である。我々が着目した甲虫の発光システムのユニークな点は、発光甲虫はホタル科、ヒカリコメツキ科、ホタルモドキ科、イリオモテボタル科があり、同じルシフェリンを使っているが、少しずつ異なる発光色を持つ点、さらに、このルシフェリン・ルシフェラーゼ反応が反応環境のpHに連動して発光色が変わる場合と変化しない場合がある点である。我々はpH変化に影響を受けないが異なる色の光を持つルシフェラーゼを用いて複数の遺伝子発現を検出しようと考えた。既に、南米産の鉄道虫（頭部の発光色は橙色から真紅色まで、腹側部は緑色から黄緑色と多彩な発光色の甲虫）から赤色と緑色の光を発するルシフェラーゼ遺伝子を取り出し、大腸菌レベルでこのルシフェラーゼを発現させることに、さらにはこれらの遺伝子情報を用いて、オレンジ色の発光を生み出すことに成功していた^{[3][4]}。

しかしながら、2002年にマルチ遺伝子発現検出キットの実用化を目指した段階では、哺乳類細胞でルシフェラーゼを安定に発現することに成功していなかった。つまり、コンセプトとして新規のキットのイメージはあったが、特許実施例を書くことはできなかったのである。中島らは鉄道虫ルシフェラーゼの細胞内で合成される際の転写及び翻訳過程の効率の向上がキーであると考え、遺伝子配列の並びの改変等を行い、03年に哺乳類細胞で使えるレベルの酵

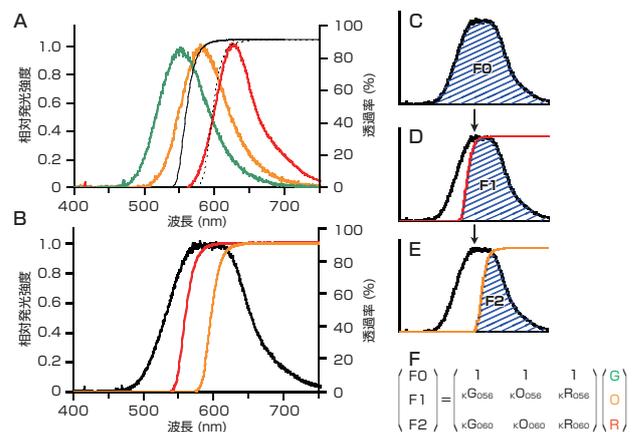


図3 3つの発光色を2枚のフィルターで色分割し計測する技術の概略。
 A) 緑、橙、赤色ルシフェラーゼの発光スペクトル群
 B) 3つの発光色が混じり合った場合の発光スペクトル及び用いる2枚のフィルターの光吸収効率
 C) フィルターなしで全光を測定した場合の光の量をF0
 D) 1枚目のフィルターを透過することで緑色光の大部分は吸収、計測されない光の量をF1
 E) 2枚目のフィルターを透過することで緑、橙色光の大部分は吸収、計測されない光の量をF2
 F) 予め決定した2つの光学フィルター毎の透過係数とF0、F1、F2を演算することで元の各発光量を算出する式。

素の遺伝子構造の改変に成功した^[5]。次の段階の問題は、pHに連動せず安定なスペクトルとはいえ、重なるスペクトルをどのように分割し定量するかという点である。当たり前に考えれば、重ならない部分だけをフィルターで分けて定量すれば良いことになるが、これでは緑と赤色の両端を取ることになり2つの発光色しか相手にできないし、発光量の大部分は無駄になる。そこで、産総研が中心となり、共同研究先のアトー社の技術者と共同で、さらには東大物性研秋山准教授と協力して光を無駄にすることなく、フィルター2枚で3つの発光色を分割、定量する技術を開発した^[6]。新しく開発した技術は、あらかじめ各ルシフェラーゼをフィルターの非存在下、および複数の光学フィルター存在下でそれぞれ測定、ルシフェラーゼごとに各フィルターを用いた際の透過係数を決定しておき、試料に対する複数のフィルターの測定値から透過係数をもとに各ルシフェラーゼ量を算出する方式である（図3）。これら一連の研究がまさに第2種基礎研究の成果である。大きな発想の転換で生まれる部分もあるが、現状の技術レベルを正確に把握、その段階の「最高の知」を活用することが重要である。つまり最高の知を生み出すのではなく、適切に利用することが第2種基礎研究のアプローチであろう。

このような記載は2005年当時、商品化が成功した際の説明であり、一見、簡単に実用化に成功できたようにみえるが、内実は違っている。早くコンセプトを特許化したかったので、赤、緑色鉄道虫由来ルシフェラーゼと既存のウミシイタケルシフェラーゼを用いた3遺伝子-2基質が成功した段階で特許を構築、「同一の発光基質で異なる色を発光する少なくとも2つの発光タンパク遺伝子のいずれかを哺乳類細胞で安定発現可能なように組み込んでなる遺伝子構築物。」という要約で03年度に出願^[7]、誌上発表した^[8]。その段階で1年間の猶予を得たわけで、落ち着いて他のルシフェラーゼを検討、当時もう1つの素材であったイリオモテボタル由来の緑色ルシフェラーゼとその橙色変異体を組み合わせることで、最終的に3遺伝子-1基質を書き加えることができた^[6]。

このような特許構築戦略において、弁理士のアドバイスにより、1) 特許出願後の1年間を有効に活用する、2) 特許に関わる根幹はなるべく少人数で実施例をまとめ単独で出願する、などの点を注意した。また、特許はコンセプトを重視し、いろいろな用途の範囲やそれを証明する実施例は書き込んだが、企業に対しての自由な研究活動や製品化を妨げるような細部にわたる書き込みは避けた。具体的には、マルチ遺伝子発現検出キットにおける試薬の要件などは書き込まず、企業が独自にキット用の試薬を作るなどの研究活動を阻害しない方向で、研究の余地を設けることに

した。つまり、技術全体の幹となるコンセプトは産総研が単独で押さえるが、実際に用いる場合の用途特許は企業との共同研究による共同出願や、企業単独出願を優先させ、特許の全体像を構築することにした。その結果、前述した2社の企業が製品化を実施、独自ブランドで販売可能となった。また、2つの企業はバイオ関連であるが、ソフト面に強い一方、ハード面は弱いことから、計測機器メーカーA社を紹介、製品化全体がスムーズに進むための橋渡しも行った。ただし、企業は各々の風土があることから、無理強いせず、個々の企業の活動に深く立ち入らないことも研究者の要諦であろう。

4 マルチ遺伝子発現検出キットは何ができるか

東洋紡績より販売した商品名：MultiReporter Assay System -Tripluc[®]-を例に、我々の開発したシステムの現状を探る。まず名前だが、Triplucは“Triple color (3色のルシフェラーゼの意)”と“Trip (従来品を超え、別次元を旅するの意)”を掛けたものである。全体のイメージを良く現わしており、企業ならではのセンスである。命名は決して研究者が提案してはいけないというのが持論で、提案しても大体において陳腐である。

東洋紡績のキットはイリオモテボタル由来の緑色ルシフェラーゼ (λ_{\max} 550 nm)、その部位特異的変異体である橙色ルシフェラーゼ (λ_{\max} 580 nm)、及び鉄道虫由来赤色ルシフェラーゼ (λ_{\max} 630 nm) の遺伝子群がパッケージされ、それぞれにコントロールとなるプロモータ配列が含まれたものである。最終的には試薬は自社開発したものが販売されている。3色の発光スペクトルを光学フィルターによって分割・定量化し、2つもしくは3つの転写活性を同時に測定するシステムである。これらのルシフェラーゼはいずれもD-ルシフェリンを発光基質として利用するため、検出反応は1ステップで行われ、測定は光学フィルターを備えたルミノメーターで行われる。

遺伝子の発現は、遺伝子の転写開始点近傍に存在するプロモータやシスエレメントに転写因子が結合することによって調節される。ルシフェラーゼを用いたレポーターアッセイでは、プロモータなどの遺伝子の発現を調整する配列をルシフェラーゼ遺伝子に繋げ、試験細胞に導入し、発現したルシフェラーゼの活性を測定することで遺伝子発現を評価する手法である。このレポーターアッセイによって、対象遺伝子の転写調節領域の機能や転写因子による調節機構の解析、逆に、ある事象で発現変動する遺伝子の転写調節領域にルシフェラーゼ遺伝子を繋げ、その事象に関わるシグナル伝達や受容体・リガンドの作用機構を解析することができる。

我々の開発したマルチ遺伝子発現検出キットは複数の遺伝子発現を同時に解析するシステムである。キットは転写調節領域を挿入可能にした3色のルシフェラーゼ遺伝子の各々のベクターによって構成される。使用者は、何らかの方法で計測対象となる遺伝子の転写調節領域を取り出し、これをキットのベクターの中に挿入する。この挿入された遺伝子群を細胞や動物の個体の中に、化学的に、あるいは電気的に導入する。例えば、細胞に導入した場合、ここに化学物質を加えると、その刺激によって細胞内では対象となる遺伝子の発現が調整され、合成されるルシフェラーゼの量は変化する。細胞を破碎し、これに測定条件が最適化されたルシフェリン溶液を加え、それぞれの色の発光量を測定、遺伝子の発現量の変化を評価するのである。我々の特許がカバーするのは3色で3つの遺伝子発現を解析するコンセプトと3色のルシフェラーゼである。最適化されたルシフェリン溶液は企業の特許がカバーする。

図4に測定したモデル実験の結果を示す^[6]。モデル実験では哺乳類細胞に存在する時計遺伝子 *Bmal1* プロモータ配列内の転写活性因子結合部位 (RORE 配列) とその周辺配列の役割について検討した。*Bmal1* プロモータ配列中には遺伝子転写活性因子 ROR α 4 が結合できる配列として RORE 配列が1つ及び類似した配列が2か所存在、*Bmal1* プロモータ配列と単独の RORE 配列の役割の比較検討を試みた(図4A)。そこで赤色ルシフェラーゼには RORE 配列とその配列の役割をサポートできる SV40 配列を、橙色ルシフェラーゼには RORE 配列を含むプロモータ配列全体を、そして緑色ルシフェラーゼにはコントロール

となる SV40 配列を、それぞれ配置した遺伝子ベクターを作り、細胞内に遺伝子導入した(図4B上)。転写活性因子 ROR α 4 を細胞内に加えた場合、ROR α 4 量に依存的に *Bmal1* プロモータは活性化し遺伝子の発現が促進されるのに対して、RORE 配列の転写活性を表す赤色ルシフェラーゼの発光量は増加せず、十分に遺伝子発現が促進されない(図4B)。つまり、予想されてはいたが、RORE 配列の類似配列にも全体の転写を制御する大きな役割を担っていることが明らかになった。このように、マルチ遺伝子発現解析システムは従来難しかった3つの遺伝子の遺伝子発現情報を同時に得ることを可能にした。また、生きた細胞において細胞内で複数の遺伝子発現をほぼ同時に長時間解析することにも世界で初めて成功した^[9]。その応用範囲は我々の検証した体内時計の解析に留まることなく、細胞生物学、薬理学、分子生理学など大いに広がっていくものと思われる。

本研究成果であるマルチ遺伝子発現検出キットによって、3つ以上の遺伝子の応答性の違いを比較できるため、例えば、動物実験の代替法として化学物質の毒性を評価する場合や薬剤スクリーニング系として薬効を評価する場合など、信頼度の高い生体情報を得ることができる。現在、NEDO「高機能簡易型有害性評価手法の開発／培養細胞を用いた有害性評価手法の開発／高機能毒性予測試験法基盤技術の開発」にて、毒性評価マルチカラーレポート細胞を構築し、技術の普及を目指している。また、今後、化学物質の毒性評価などでは、多サンプルを計測し、計測データ間の互換性も重要となることから、我々は新しい光計測装置の開発を「高感度化」と「光計測の標準化」という観点で進めている。前者は先端ガラス集光技術が、後者は光校正技術が重要であり、新規光計測技術の活用はマルチ遺伝子発現検出キットの普及には大変重要である。

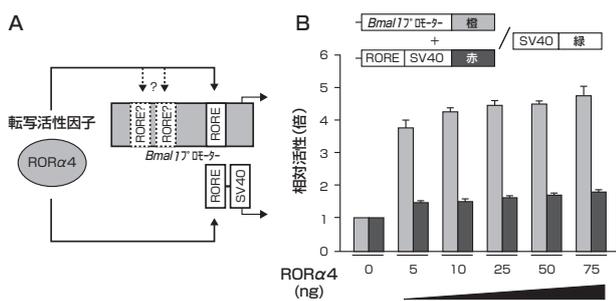


図4 マルチ遺伝子発現キットで解析した遺伝子発現の解析例。A) 哺乳類細胞にある時計遺伝子 *Bmal1* プロモータ配列内には遺伝子転写活性因子 ROR α 4 が結合し発現量を変化させる転写活性因子結合部位 (RORE 配列) が1箇所、その類似配列が2か所存在する。RORE 配列単独を抜き出しコントロールプロモータ SV40 配列に挿入することで、RORE 配列の遺伝子転写活性を評価できる。B) 赤色ルシフェラーゼには RORE 配列とその配列の役割をサポートできる SV40 配列を、橙色ルシフェラーゼには RORE 配列を含むプロモータ配列全体を、そして緑色ルシフェラーゼにはコントロールとなる SV40 配列を、それぞれ配置した遺伝子ベクターをつくり、細胞内に遺伝子導入、転写活性因子 ROR α 4 を細胞内に加えた場合、ROR α 4 量に依存的に *Bmal1* の発現が促進されるのに対して、RORE 配列のみの場合、十分に遺伝子発現が促進されない。

5 製品化のシナリオに決して終わりはない

これまでマルチ遺伝子発現検出キットの基本コンセプト、つまり「発光色の異なるルシフェラーゼによる3遺伝子-1基質のレポートアッセイ」は実用化、最終的に製品化され、シナリオ通りに進んでいるが、我々のシナリオはなお道半ばにあり、達成されてはいない。これまでの点を含めシナリオを達成する上で3つの課題と我々なりの解答がある。1) 本当にコンセプトは正しいのか?これは、第2種基礎研究の研究を通じて解決する、2) 企業が本当に製品化できるのか?これは、実現可能な企業と対話の中で解決する、3) コンセプトは社会に受け入れられるか?この答えは「努力」、研究者、企業ともにアトラクティブな情報を発信する、ことがそれぞれ肝要であろう。具体的には、

1) 本当にコンセプトは正しいのか?→当初正しいと思っても、アイデア倒れは往々にある。我々を含めて多くの研究者が経験しているかもしれない（ただし、公表されないのだから）。第2種基礎研究の重要性はここにある。我々自身は、論文を探ることもあったが、多くのセミナーや研究討議の場を増やすことで、多くの研究者の持つ情報収集に努めた。これは、それまでの研究者としての人脈が生きるものであり、その時代の最高の「知・技術」を知ることによって、コンセプトを実用化する方法である。大事なことは自らの発想で最高の知を生み出すことではなく、最高の知を活用することにより最適な（あるいはより適切な）知を生み出すことである。また、分野の違いを超えることも重要である。我々のキットでは3色ルシフェラーゼの混じった光、発光スペクトルが得られるため、これから個々の光を定量する方法を生み出す必要がある。これは、物理の領域の研究者なら解決可能な問題ではあったが、我々が悩んでも解決しない問題でもある。分野融合が第2種基礎研究推進のキーであろう。

2) 企業が本当に製品化できるのか?→企業サイドが魅力を感じるコンセプトと成果、企業サイドが安心して使える特許、そして企業サイドが予感できるユーザーの存在が重要であり、それを満足できれば、技術力のある企業により製品化は達成される。その場合、相手企業サイドの研究者だけを相手にするのではなく、後ろにいる企業の知財部、法務部、営業部、そして当然、経営者らを納得させる必要がある。従来技術の差別化と優位性（技術、コスト、ユーザー層など）および技術の正当性を明確に示せれば良く、これ自体が第2種基礎研究の成果にあたる。ただし、研究者サイドは他の企業との製品化の道を閉ざすべきでなく、特許は単独出願を心掛け、

また、契約書に則った冷静な判断と決断が必要であろう。
3) コンセプトは社会に受け入れられるか?→研究者サイドは2つの点を実践せねばならない。第一に、企業サイドと連携して情報発信に努める。企業主催のセミナーの講演や総説等の執筆を行うことが重要であろう。これには節度が求められている点を忘れてはいけない。第二に第1種基礎研究に回帰、自ら生み出した技術を最大限活用した知を生み出さなければならない点である。これらによって技術の価値を高め、社会的に認知されなければならない。よって、これは終わりのない作業であり、シナリオには完結がないはずである。

図5はこれらをまとめたものである。第1種基礎研究の第2種基礎研究へと展開、具体的に企業と製品化する過程で、再び第1種基礎研究に回帰することが重要であり、各々のステップの中で、研究者間の、さらには企業との双方向的な連携が重要であろう。

6 夢を現実にする戦いのために

光を通じて生命情報を引き出す。当然のこのように、我々の得る情報は光がもたらす影であるが、上手に光で情報を引き出せば有用な情報を手に入れることが可能である。そのような観点で「健康を光で支える、光で守る」技術の開発を夢見ている。マルチ遺伝子発現検出キットの実用化は1つステップであり、生物発光の持つ光の多様性によって信頼度の高い生体情報を得ることが可能になった。これによって、たとえば高機能簡易型有害性評価手法などに応用、細胞レベルから得られる生体情報の信頼度を向上させることで動物実験の代替法に発展できればと考えている。これにより「健康を光で守る」技術に結実させることが可能であろう。また、生体情報を同時に複数見ることによって、細胞内のダイナミズムを、光を通じてあらわすことが可能になり、今までわからなかった生命の側面を垣間見ることができ、「健康を光で支える」ための情報収集に役立ち、新たな知を生み出すことになろう。前者は新たな製品を生み出すための第2種基礎研究への回帰であり、企業との連携、共生がテーマである。後者は第1種基礎研究への回帰であり、自らの知的好奇心との戦いであろう。ただし、これらは平面的な研究の回転の輪ではなく、立体的な回転の輪になろう。決して始点に回帰することのない戦いを続けなくてはならないはずである。

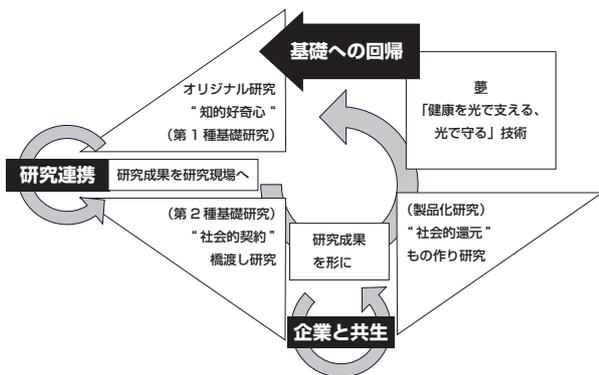


図5 筆者らの考える第1種基礎研究、第2種基礎研究そして製品化研究の永続性。

第1種基礎研究から第2種基礎研究へと展開する場合、第2種基礎研究から第1種基礎研究への回帰が重要。また具体的に企業と製品化する第2種基礎研究から製品化研究へと展開する場合、研究成果を形にするため、時には第2種基礎研究への回帰することが重要。さらに製品化された場合でも研究は終わることがなく、第1種基礎研究へと回帰、但し新たな位置の基礎研究に回帰しなければならない。

謝辞

本マルチ遺伝子発現検出キットの開発の第2種基礎研究は、セルエンジニアリング研究部門セルダイナミクス研究グループスタッフの皆さんによって達成されたものである。製品化は東洋ビーネット株式会社：龍福正行氏、鈴木知恵

氏、竹内利行氏ら、東洋紡績株式会社：浅井友実氏、西井重明氏の協力によるものである。マルチカラーのスペクトルの解析法は東京大学物性研究所秋山英文准教授やアト株式会社久保田英博氏、榎本敏照氏、関口修司氏らの協力で解決した。また、研究資金はNEDO細胞内ダイナミズム解析プロジェクトの支援による。

キーワード

製品化研究、生命科学、バイオツール、光技術、遺伝子解析

参考文献

- [1] O. Shimomura: *Bioluminescence*, World Scientific publishing Co. Ltd. (2006).
- [2] 今井一洋, 近江谷克裕編: バイオ・ケミルミネセンスハンドブック, 丸善 (2006).
- [3] V.R. Viviani, E.J. Bechara and Y. Ohmiya: Cloning, sequence analysis, and expression of active *Phrixothrix* railroad-worms luciferases: Relationships between bioluminescence spectra and primary structure, *Biochemistry*, 38, 8271-8279 (1999).
- [4] V.R. Viviani, A. Uchida, N. Suenaga, M. Ryufuku and Y. Ohmiya: Thr-226 is a key-residue for bioluminescence spectra determination in beetle luciferases, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 280, 1286-1291 (2001).
- [5] Y. Nakajima, T. Kimura, C. Suzuki and Y. Ohmiya: Improved expression of novel red- and green-emitting luciferases of *Phrixothrix* railroad worms in mammalian cells, *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 68, 948-951 (2004).
- [6] Y. Nakajima, T. Kimura, K. Sugata, T. Enomoto, T. Asakawa, H. Kubota, M. Ikeda and Y. Ohmiya: A multicolor luciferase assay system: One-step monitoring of multiple gene expressions with a single substrate, *Biotechniques*, 38, 891-894 (2005).
- [7] 近江谷克裕, 中島芳浩 特願2005-506020 (H16/04/30) マルチ遺伝子転写活性測定システム.
- [8] Y. Nakajima, M. Ikeda, T. Kimura, S. Honma, Y. Ohmiya and K. Honma: Role of orphan nuclear receptor ROR α in clock gene transcriptions demonstrated by a novel reporter assay system, *FEBS Lett.*, 565, 122-126 (2004).
- [9] T. Noguchi, M. Ikeda, Y. Ohmiya and Y. Nakajima: Simultaneous monitoring of independent gene expression patterns in two types of cocultured fibroblasts with different color-emitting luciferases, *BMC Biotechnol.*, 8, 40 (2008).

(受付日 2008.7.7, 改訂受理日 2008.9.10)

追記

本論文を執筆後、2008年ノーベル化学賞を下村脩博士が受賞する知らせが来た。受賞理由はGFP(緑色蛍光タンパク質)の発見であるが、下村博士は1960年代に発光するオワンクラゲの発光機構の解明を目指す中、発光するタンパク質イクオリンとGFPを発見した。この研究成果のうち、発光タンパク質イクオリンはカルシウムの検出試薬として当初から製品化が行われていたが、GFPは単にきれいなタンパク質という認識以外、応用研究に給されると

は誰もが信じていなかった。これは、タンパク質が自ら蛍光を発するとは誰も信じていなかったからである。発見から30年を経た90年代に、ノーベル賞の受賞者ではないPrasher博士がGFPの遺伝子を取り出し(1992年)、自らが蛍光を発するタンパク質であることが判明した後、これを動物細胞に応用したのが今回のノーベル化学賞を同時に受賞したChalfie博士(1994年)であり、蛍光色の異なるGFPを作成、普及に努めたのがTsien博士(1998年)である。本ノーベル賞における研究者たちの役割を位置づけてみると、下村博士及びPrasher博士は第1種基礎研究を、Chalfie博士が第2種基礎研究を、そしてTsien博士が製品化研究を行っていたことになる。本格研究の重要性をあらためて認識できるし、第2種基礎研究及び製品化研究が時代を変革できる力があることが十分に理解できる。

近江谷は下村博士とは旧知の間柄であり、研究について相談できる関係にある。下村博士は第2種基礎研究に取り組む我々に対して、第1種基礎研究の重要性を指摘、未解明の発光メカニズムの研究に取り組むよう促すことが多い。しかしながら、その理由は発光メカニズムが解明されることで、新たな応用の道が開かれることを意識したものである。例えば、下村博士は発光具の一種では発光のために銅イオンが必要な可能性が高く、発光メカニズムが解明されれば、新たな金属イオンセンサーを作ることが可能であろうと指摘している。第1種基礎研究がなければ第2種基礎研究が生まれず、逆に第2種基礎研究、製品化研究が行われなければ、第1種基礎研究が光輝かないことを下村博士は十分に理解されている。

今回のノーベル化学賞は本格研究の重要性を再認識させるものであり、我々の研究グループでは下村博士が最初に手がけたウミホタルの発光に関わる第2種基礎・製品化研究、及び未解明な発光現象の第1種基礎研究を推進することで、下村博士の期待に答えたいと考えている。(近江谷)

執筆者略歴

近江谷 克裕 (おおみや よしひろ)

1990年群馬大学大学院医学研究科内分泌学専攻修了。(財)大阪バイオサイエンス研究所特別研究員、新技術事業団独創的個人研究事業「さきがけ研究21光と物質」研究員、静岡大学教育学部助教授を経て2001年より産業技術総合研究所、2006年10月より北海道大学医学研究科先端医学講座光生物学分野教授に就任。セルエン지니어リング研究部門セルダイナミクス研究グループ・グループ長を兼業、NEDO「高機能簡易型有害性評価手法の開発」の一部を担当。日本生化学会評議員、生物発光化学発光世話人、国際学術雑誌Luminescence編集長を担当した。本論文では研究の全体統括を担当した。本論文では研究の全体統括を担当。

中島 芳浩 (なかじま よしひろ)

1996年埼玉大学大学院理工学研究科生産情報科学専攻修了。理

化学研究所基礎特別科学研究員、日本学術振興会未来開拓研究員（奈良先端科学技術大学院大学）を経て2001年産業技術総合研究所入所。2007年内閣府総合科学技術会議事務局に外向。本論文ではルシフェラーゼおよび測定システムの構築と最適化を主に担当した。

査読者との議論

議論1 製品化を目指すための特許構築について

質問・コメント（栗山 博）

「3. 第2種基礎研究から製品化を目指すための特許構築」で東大物性研の秋山准教授と協力して、「光を無駄にすることなく発光色を分割・定量する方法を開発した」とありますが、その内容は第2種基礎研究の中身として重要な点に思われます。具体的に記述していただけないでしょうか。

回答（近江谷 克裕）

わかりにくい表現でしたので、図3を加え、さらに「新しく開発した技術は、あらかじめ各ルシフェラーゼをフィルターの非存在下、及び複数の光学フィルター存在下でそれぞれ測定、ルシフェラーゼごとに各フィルターを用いた際の透過係数を決定しておき、試料に対する複数のフィルターの測定値から透過係数をもとに各ルシフェラーゼ量を算出する方式である（図3）。」と追記いたしました。

議論2 マルチ遺伝子発現検出技術への構築について

質問・コメント（小林 直人）

著者がマルチ遺伝子発現検出キット実現と言う目標に向けて、そのためのシナリオを明確に描き、それに沿って研究開発を実施してきたことは極めてよく理解できます。その意味で、世界初の3遺伝子発現の同時検出という成果の実用化への戦略的取り組みがよく分かり、本論文は大きな価値があると考えられます。その一方で、肝心の本研究の中心となった「生物発光現象を利用したマルチ遺伝子発現検出技術」の構成学的記述が不足しているように見受けられます。本技術の詳細については、すでに他の論文で発表してあるでしょうが、それらからどのようにしてマルチ遺伝子発現検出技術へと構築できたのかの詳細を述べて頂ければと思います。

回答（近江谷 克裕）

我々の開発したマルチ遺伝子発現検出キットは、複数の遺伝子発現を同時に解析するシステムです。キットは、転写調節領域を挿入可能にした3色のルシフェラーゼ遺伝子の各々のベクターによって構成されます。使用者は、何らかの方法で研究対象となる遺伝子の転写調節領域を取り出し、これをキットのベクターの中に挿入します。これを細胞に導入した場合、例えばここに化学物質を加えると、その刺激によって細胞内では対象となる遺伝子の発現が調整され、合成されるルシフェラーゼの量は変化します。細胞を破碎し、これに測定条件が最適化されたルシフェリン溶液を加え、それぞれの色の発光量を測定、遺伝子の発現量の変化を評価するわけです。我々の特許がカバーするのは、3色で3つの遺伝子発現を解析するコンセプトと3色のルシフェラーゼです。最適化されたルシフェリン溶液は企業の特許がカバーすることになっています。このようなマルチ遺伝子発現検出技術の技術的構成方法を、4章を補強する形で追記いたしました。

議論3 光計測技術の改善点について

質問・コメント（小林 直人）

本手法の光計測技術の側面についてお伺いします。光計測技術としては光学フィルターを備えたルミノメーターを利用しているとのこと

ですが、その測定感度や測定範囲、SN性能等も含めて技術的にはすでに完成されたと考えてよいでしょうか、特に今後の光計測技術の改善点等があれば記載して頂ければよいと考えられます。

回答（近江谷 克裕）

光計測技術の活用が我々の技術の普及には必須であり、その観点で次のとおり追記いたしました。「また、今後、化学物質の毒性評価などでは、多サンプルの計測、計測データ間の互換性も重要となることから、我々は新しい光計測装置の開発を“高感度化”と“光計測の標準化”という観点で進めている。前者は先端ガラス集光技術が、後者は光校正技術が重要であり、新規光計測技術の活用はマルチ遺伝子発現検出キットの普及には大変重要である。」

議論4 動物実験の代替と将来的な展望について

質問・コメント（小林 直人）

本研究成果は実用化において大きな意義があったと考えられますが、今後本手法が実際に動物実験を代替できるのかどうかという問題や、細胞内のダイナミクスを観察するのに本手法による観察が生体内反応をそのまま表現していると考えてよいのか等について、将来的展望も含めて説明して頂けるとよいと思います。

回答（近江谷 克裕）

光によって生体情報を得る技術は、当然のことながら決して万能ではありません。それ以上に光を読み取ることを間違えれば間違えた結論を導くこととなります。生命情報を光を通じて引き出した場合、当然のことのように、我々の得る情報は光をもたらし影であるので、上手に光を計測しなければ有用な情報を手に入れることはできません。そのような観点で本文にも追記をしました。「また、将来的な展望の1つは動物実験の代替であり、光技術をうまく活用すれば細胞レベルから得られる生体情報の信頼度を向上させることで、動物実験の代替法に発展できればと考えています。さらには、細胞内のダイナミクスを光を通じてあらわすことが可能になり、今までわからなかった生命の側面を垣間見ることができ、「健康を光で支える」ための情報収集に役立ち、新たな知を生み出すことになる」と考えられます。」この点も本文に書き加えました。

議論5 精度の向上について

質問・コメント（小林 直人）

「生物発光現象を利用して同時に3つの遺伝子の発現を検出する手法」は極めて有効であると理解しましたが、今後精度の向上に向けては3色以上のより多色化が必須でしょうか。それとも基本的な手法としては3色で十分と考えられるのでしょうか？

回答（近江谷 克裕）

精度の向上という意味では3色以上の光で同時に解析することも重要だと思います。しかしながら、ホタルの光で作れる光は緑から赤色の発光ピーク540-430 nmの光です。人間の目なら微妙な色の違いを認識できるのですが、カメラを通じてみる微弱な光では限界があります。しかも生物発光の光はブロードな光です。よって我々が用いた検出法では30 nm以上離れたブロードな光でのみ対応可能であり、よって、現時点では3色が限界と考えられます。更なる第2種基礎研究の必要性はまさにこの点であり、計測系の進歩が次の可能性を広げます。また、3色以上の遺伝子の発現解析では細胞への遺伝子の導入法も課題となります。これもまた重要な課題となります。よって、第2種基礎研究は更なる第2種基礎研究を生み出すことになると思います。

粘土膜の開発

—— 出会いの側面から見た本格研究シナリオ ——

蛭名 武雄

粘土を主成分にした膜の本格研究事例を紹介する。粘土は環境にやさしく、国内でも豊富に採れる資源である。これを膜化することにより耐熱ガスバリア材料として利用することができ、持続可能な産業に寄与できると期待される。粘土膜の発明から実用化にいたる過程の技術開発、広報、知的財産、技術移転の方法を述べるとともに、人あるいはグループの出会いが開発にどのように生かされてきたか分析する。さらに統合開発型イノベーションモデルによってコンソーシアムの有効性を議論する。

1 粘土を用いた膜

これまでガスバリアフィルムは、主にプラスチックをベースとして製造されてきた。そのガスバリア性は完璧なものとはいえず、耐熱性及びガスバリア性能の向上のため、粘土などがフィラーとして少量添加された「粘土プラスチックナノコンポジット材料」が研究されてきた。この材料は一般的に少量の粘土の添加で明確なガスバリア性の向上が得られる。そこで、従来フィラーとして少量使われてきた粘土を添加物としてではなく、主材料とした緻密な膜にすると、飛躍的に耐熱性およびガスバリア性が向上するのではないかとの逆転の発想に基づき、2003年に粘土からなる耐熱性ガスバリア膜の開発を始めた^{[1][3]}。

粘土の結晶は厚み約1 nm (100万分の1 mm) の薄い板状のものである。この薄い結晶を何万枚も緻密に重ね合わせて取り扱い可能な厚みの膜に成形したものが、「クレースト Claist[®]」と名づけた粘土膜である。クレーストは、高温条件下で、酸素や水素ガスに対する高いガスバリア性を有して曲げることができる。作り方はキャスト法と呼ばれ、粘土の分散液をトレーなどの中で乾燥させ、乾燥後トレーの底から剥がすという簡単な方法である。粘土の製膜性を調べるため、種々の粘土を用いた成膜実験を行った。その結果、水に分散しやすく、水をゲル化させやすい「スメクタイト」と呼ばれる粘土が製膜性に優れていることが分かった^[4]。スメクタイトは天然にはベントナイトと呼ばれる鉱物に30から70%程度含まれている。ベントナイトはそのままで鑄物砂の粘結材、建設現場における掘削泥水、ダムや廃棄物処分場の遮水層などとして用いられている。国内の産出量は約45万トン/年であ

り、バージンPETの国内企業生産量にほぼ等しい。このうちの半分以上が東北地方の鉱山から産出している。ベントナイトからスメクタイトの分離・精製は、水に分散し、沈降しない分散液部分を過熱乾燥する、水簸という方法で行われる。

粘土が膜になるということは粘土を対象に研究を行っている者にとっては新しい知見ではない。粘土の結晶構造をエックス線回折法によって解析する場合、ガラス板上に粘土分散液をキャストした配向試料を用いることは一般的な手法である^[5]。粘土膜をガラス板から剥離することはできず自立膜^[6]にはならないが、マサチューセッツ工科大学のアーネスト・ハウザー教授は1938年に粘土による自立膜を報告している^[6]。想定される用途としては包装材料など、つまり紙の代替のようなものであった。このように粘土の膜材料としての潜在的な可能性が示されていたが、どうやらほとんど製品化には至らなかったようである。それは競合材料としての紙の性能と経済性に対して、優位性を認めるような用途が見つからなかったためと推察する。

それから70年を経た今日、ガス遮断を要求する製品は非常に多くなった。食品の包装や電気製品などが代表的なものである。さらにロケット、航空機、水素自動車、燃料電池車などのように、高圧で水素を保存し、しかも移動体に載せるために軽量のシステムにしなければならないという特殊なニーズが出てきた。揮発性有機化合物ガス低減のために石油化学プラントでは少しでもリークを低減しなければならない。これらの新しいニーズに対して、粘土を使った新材料で対応することとなった。

2 粘土膜の発明とコンセプトの確立

2.1 粘土膜のガスバリア性の発見

筆者はもともと廃棄物処分場における人工バリアの評価をする目的で、粘土圧密体を研究していた^[7]。粘土圧密体の水の透過は非常に遅いものであり、測定は長時間を必要とし、最長 500 日間の測定を行ったことがある。このような測定を短時間で行うための工夫として、当時 16 mm ほどあった圧密体を薄くすることを考えた。薄いほど測定時間は短くなったが、同時に膜の均一性が測定精度に大きな影響を及ぼすことになった。厚みの均一性を達成するために、当時はろ紙上への膜の試作を繰り返した。つまりこの段階では水バリアという特性の面から粘土膜の作りこみを行っていた。この知見についてはプロジェクトの成果報告などを行っていたが、多くの方の興味を引くには至らなかった。

2001 年に産総研東北センターが発足し、2004 年に研究ユニット「コンパクト化学プロセス研究センター」が設立されてからまもなく、この膜を上司に見せたところ、水素ガスを用いるマイクロリアクターのシール材として使える、との意見をもらい、ガスバリア材としての研究を始めた。

自立のセラミックスフィルムは空気分子が通過可能な小さなクラックが多く存在する。したがって高いガスバリア性を期待することはできず、セラミックス系フィルムでガスバリアを実現するという発想には至らない。確かに粘土膜は水に対しては高いバリア性を発現するが、それは粘土が吸水膨張してクラックを埋め、バリア性を発現するためである。したがってやはりセラミックスフィルムを作る人間だけではガスバリア材としての利用を思いつかなかったと思われる。粘土膜がガスバリア材に使えるのではないかという発想が生まれたのは、外観がテフロンテープというシール材に似ていることから得られた発想であると考えられる。テフロンテープは実際にマイクロリアクターのシールにも用いられるが、250℃程度までしか使用できない。そこでテフロンテープ的な強さと柔らかさを実現するための改良を行うとともに、気泡などに起因する空隙を少なくするなどの工夫がなされた。まず素材が存在し、見る、触るなど人間の五感を通して、用途展開のアイデアが生まれたと考えられる。

2.2 粘土膜のガスバリア性能の実証

当初は粘土膜の強度が不足であったが、上司とのディスカッションに基づき改良を繰り返し、数ヶ月でマイクロリアクターのシール材として使用可能なものができた。このマイクロリアクター実験においては 300℃程度の温度条件下で水素をシールしなければならず、従来のシール材では適当なものが見つからなかった。評価をしてもらったところ、シール性は良好との結果を得た。原理的には粘土は水素を

透過しないと考えられたが、バインダーの添加によりその水素シール性が失われないかどうか不明であった。後に迷路モデル^[8]によって、粘土が大過剰であれば高いガスバリア性を発揮する、具体的には粘土重量比が 94% であれば、バインダー成分の 1000 倍のガスバリア性を発揮することを導びき、原理的にも実験で得られたハイバリア性が支持され、粘土膜の基本コンセプトを確立させた^[9]。

3 粘土膜応用開発

3.1 ニーズの分析

2004 年 8 月 11 日に粘土膜のプレスリリースを行った。報道のポイントは最高 1000℃という耐熱性と検出限界値未満というガスバリア性である。また積極的に展示会などに出展を行った。さらに専門誌への簡単な紹介記事なども多く執筆した。

短期間での集中的な広報活動の結果、延べ 300 以上の問い合わせがあり、内約 150 社と技術相談をした。その結果、この材料が非常に多くの用途に使える可能性を持った材料であることが分かった。用途としては、耐熱柔軟フィルム、ディスプレイ用フィルム^{[10][11]}、黒鉛複合材、電磁波遮蔽材、コンデンサー用シール、包装材料（ハイバリア紙容器、ハイバリア軟包材）、水素シール材等が主なものである。

3.2 知的財産強化

出願した特許の公開、学会発表や専門誌などでの印刷物での公開時期をにらんで、応用特許の出願など知的財産部門、産総研イノベーションズと研究ユニットとの特許の強化について検討する会議に基づく特許群の強化が図られた。具体的には、先行技術調査などを 2004 年 8 月、同 12 月、2005 年 2 月に行っており、知財戦略強化チーム（特許強化会議よりも少人数で、特定の知的財産に対しての強化を図るための組織）による集中的知財強化を 2004 年 12 月、2005 年 6 月、2006 年 3 月、同 5 月、同 9 月に行っている。産総研の内部で伸ばすことが適当な分野および研究開発内容、企業との共同研究で伸ばしていくべき分野および研究開発内容の選択を行った。具体的には、材料特許、製造特許の一部、応用特許の中で産総研内部のマッチングで伸ばせる部分を集中的に出願することにした。ここで出願された応用特許としては、フレキシブル基板、太陽電池、燃料電池用材料などがあげられる。これらは産総研内部で粘土膜を提供し、予備試験でよい結果が得られた案件である。もちろん検討した結果うまくいわず出願に至らなかった例もある。この時期までに約 40 件の特許出願を行った。知的財産の十分な質・量の確保を実行し、本技術に関する産総研の単独特許出願は 2003 年から始まり

2004-5年でピークを迎えた。

3.3 技術移転と共同研究ポリシー

技術移転は研究試料提供契約および研究情報開示契約によって行った。前者は約70件、後者は約20件を数える。技術移転では粘土膜の製造ノウハウの十分な蓄積と、そのノウハウの正確かつ詳細な情報伝達をすることに努めた。

研究情報開示契約の際は、単なる未公開特許およびノウハウブックの開示だけではなく、ラボ内に立ち入っただけの見学を積極的に受け入れた。未公開特許およびノウハウブックの開示はそれほど詳細なものとなっておらず、その情報だけで開示先が完全な再現ができるとは限らないためである。結果としてほとんどの場合、開示先は産総研のサンプルと同程度かそれ以上の品質の膜を製作することに成功していることから、この研究情報開示契約のスタイルは技術移転に有効と考えられる。

2004年より研究情報開示契約を前提とした用途別の共同研究を開始した。これらの共同研究は2005年あたりから増加し、粘土膜の開発ステージは徐々に実用化研究へ移行していった。結果的に同じ製品に用いられる場合でも、川上・川下に仕分けが可能である場合には共同研究を開始することを可能とした。研究開発段階が進めば、川上・川下企業に渡る垂直連携が研究開発を加速する場合もあると考えられたためである。同時にビジネスの衝突が起る可能性があり、適切な時期に友好的に開発を進めるための措置を講じる必要が出てくる。このとき産総研職員は守秘義務のために踏み込んだ内容はなかなか難しく、後述のような主要研究先を含めたコンソーシアムを利用することが有効な手段である。コンパクト化学プロセス研究センターはグリーンプロセスインキュベーションコンソーシアム（GIC）を主宰しており、この場で企業間の水平連携および垂直連携を支援している。

企業などとの共同出願特許件数は2006年から多くなり、2007年には総出願数の8割程度にまでなっている。共同出願をしている相手企業が10社以上と多いことも粘土膜開発の特徴である。

4 アスベスト代替ガスケットの開発

多くの技術相談を受けた企業の中で、J社とともに高温条件下で用いられるシール材の開発を2005年度の経済産業省地域中小企業支援事業として行うことになった。この研究成果を基礎として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトによって、膨張黒鉛と耐熱粘土膜を複合化させた、既存の非アスベスト製品よりも耐熱性、耐久性、耐薬品性に優れ、さらにアスベスト製品並みの優れた取扱性を実現したガスケット製品を

開発した。開発したガスケットは、製油所などの化学プラント、火力発電所など広範に適用可能である。

4.1 従来のアスベスト代替ガスケットの問題点

多くの化学産業分野では、高温条件下での生産プロセスにおいて、その配管連結部などで、液体や気体のリークを防止するために、ガスケットが用いられている。高温部に対してはアスベスト製品が広く用いられてきた。昨今アスベストの健康被害に対する緊急の対応が迫られていたが、代替品の開発が途上であり、安全性・信頼性の評価も進んでいなかった。膨張黒鉛製ガスケットは、シール性に優れ、長期保存が可能であり、加工が容易であるなどの長所があることから、非アスベスト製品として最も有力だが、黒鉛粉同士の結合が強くないことから、製品表面から粉が剥がれる「粉落ち」、使用後ガスケットに接している金属面に黒鉛が付着して剥がれにくくなる「固着」などの問題点があった。さらに400℃以上の高温で酸素雰囲気下では酸化劣化が進みガスケットが痩せていくため、シール性能が保たれず、使用できないという問題点があった。

4.2 シナリオの設定

4.2.1 膨張黒鉛と粘土の複合化によるガスケットの耐熱性の向上

黒鉛は400℃以上で酸素が存在すると燃焼してしまう現象は根本的な解決が困難である。しかし粘土は酸化物であり、耐熱性に優れている。粘土膜に用いられている粘土は600℃程度までは安定で、これを混合・複合化させて全体の耐熱性を向上させることが考えられた。また、粘土膜は酸素に対する高い遮蔽性を有するため、粘土膜でコーティングすることで酸素の内部への移動を遅延させ、ガスケットの寿命を延ばすことに役立つと考えられた。

4.2.2 粘土層の付与による粉落ち・焼付きの防止

膨張黒鉛表面からの粉落ちについては、現行のフッ素樹脂コーティング品がそうであるように表面に均一な粘土膜コーティングを行うことで解決できると考えられた。また、焼付き防止についても粘土膜コーティングによってフランジの金属面と黒鉛が接しないようにすることができ、焼付き防止に有効と考えた。

4.2.3 ガスケットの表面平坦化によるシール性の向上

ガスケットのコーティングした粘土膜の表面を平坦にし、膨張黒鉛ガスケットと金属フランジ間から漏れる流体の量を低減させることが可能であると考えた。

4.3 要素技術

4.3.1 ナノ複合化技術

粘土はプラスチックよりも耐熱性が高い。さらに、緻密に成型することによりガスバリア性を発揮する。しかしながら、粘土の膜をガスバリア材料として応用する場合に重大

な3つの問題があった。1つ目はクラックの存在である。粘土だけの膜は見た目に均一にできていてもガス分子が透過するような小さなクラックを完全に排除することが簡単ではなかった。しかしガスバリア材料はたった1つのクラックが性能を維持できない原因となる。2つ目は機械的強度の低さである。粘土膜は曲げられるといってもプラスチックほど柔軟ではなく、また膜強度も弱く、さらに一旦亀裂が入ると破断しやすいという問題点がある。3つ目は水に弱いことである。前述したように水によく分散することが自立膜を得るための粘土の条件になるが、これは同時に粘土膜が水に溶けやすいということの意味する。このような材料はガスバリア材料として多くの場合要求される水蒸気バリア性に劣るという問題点がある。ガスバリア材料としては以上の3つの問題をクリアしなければ、なかなか汎用材料としての未来は見えてこない。これまでこの問題点を解決できずギブアップしたエンジニアが少なからずいたのではないかと推察する。

これらの問題点を解決するために投入された技術として、ナノコンポジット技術がある。粘土原料とバインダーとなる有機材料を微視的なレベルで均一に混合し成膜する。多くの場合、粘土表面の帯電状態を利用した粘土の前処理に基づく分散技術が取り入れられる。ナノコンポジット化により、粘土膜のクラックを排除し、機械的強度と耐水性を向上させることが可能である。一般的なナノコンポジットは有機物中に微量の無機物を加えるのに対し、粘土膜は粘土の中に少量の有機物が含まれていることから、両者は全く逆転した組成になっている。

4.3.2 粘土膜製造技術

最適な成膜方法を知るために、数千枚の試作を必要とした。結果的に5年間に渡り毎日粘土膜を作り続けることによって成膜ノウハウを蓄積することができた。その結果、厚みが10 μm 程度の粘土膜についても再現性よくできるようになった。同時にコーティング法についても検討を行い、ディップコーティング、スプレーコーティング、キャスト法、バーコーターを用いる方法などが適用可能であることを知るに至った。前述の研究試料提供契約の際は、ラボレベルではあっても最低限のクオリティコントロールを行うことに努めた。試料の作りこみを行い、再現性を確認し、外部に委託し主要特性値をできる限り多く取得し、特性値表を作成した。また、出荷前チェック項目として明確な仕様を内部で設定した。それらは具体的にはサイズ、厚みムラの程度、ダマなど肉眼で確認できる不均一性の程度などである。このようなクオリティコントロールが粘土膜の製造ノウハウの蓄積に役立った。

4.3.3 粘土ライブラリ

粘土膜に適した粘土を探索する過程で、国内外の130種程度の粘土試料を収集した。これらは天然あるいは合成の粘土で、そのほとんどが市場に流通しているものである。また精製を行っていない安価な粘土試料も含まれている。これらの試料に関する成膜性の評価結果などは現在データ収集の過程であるが、粘土-膨張黒鉛複合材に適した粘土はこのライブラリの中から選定した。

4.4 統合プロセス

4.4.1 膨張黒鉛への密着性のよいコーティング方法の選択

本ガasketは最低でも400 $^{\circ}\text{C}$ の耐熱性を要求される。そのため有機系接着剤を使うことができない。当初は貼付法をとっていた。一定の密着性が得られたが、膨張黒鉛と粘土膜の間に空気が入ってしまうという問題点があった。そこでディップコーティング法を採用した。ディップコーティング法は側面にもコーティング層を付与できる利点がある。試作を行った結果、膨張黒鉛に厚さ約20 μm の粘土膜のコーティングができることがわかった。溶剤としては、水を採用した。

4.4.2 幅広い原料から適切な組み合わせを選択（粘土および添加物、粘土のブレンド）

粘土ライブラリから膨張黒鉛表面への密着性に優れた粘土の種類を選択する作業を行った。今回、粘土膜に透明性を要求されないため、コストの面からこのスクリーニングは天然粘土を中心に行った。その結果、スメクタイトという鉱物を多く含む粘土で成膜性・密着性などが優れていることが分かった。さらに添加物としてエポキシ樹脂、フェノール樹脂、ポリアミド樹脂などが選択され最終仕様ではその中で最も適したものが選ばれた。耐熱性を確保するため、添加量については機械的強度を保てる範囲で最小限に抑えることにした。さらにコーティング液の固液比を高め、乾燥にかかる時間を短縮し、製造性に優れた膜とするために粘土のブレンドを検討した。その結果性状の異なる粘土を混合して用いることで、膜特性に優れさらに製造性にも優れたコーティング膜ができた。

4.4.3 要素試験、実プラント試験の評価結果を改善に生かすフィードバック体制

要素試験については、ガasketメーカーであるJ社が行い、シール性、焼付き試験、取扱性評価などで良好な結果を得た。

開発品の実用化過程においては、GICの会員であるユーザー企業M社の協力を得られることになり、使用実績のないガasketであるにも関わらず、実際の石油化学プラントにバイパスを設置しテストしてもらうことになった。この垂直連携の取り組みがNEDO緊急アスベスト代替開発プ

プロジェクトに採択され、要素試験、実プラント試験の評価結果を改善に生かすフィードバック体制が確立し、安全性・信頼性に関する基礎データが得られ、2007年高温条件下で用いられるアスベスト代替ガスケット製品を実用化した^{[12][14]}。同年9月に大阪に専用工場が竣工し、2008年7月現在全国約40箇所の事業所で用いられている。このガスケットの導入でアスベストフリーを実現した事業所が生まれた。そのような成果が評価され、開発したガスケット製品は2007年第2回ものづくり日本大賞優秀賞を受賞した。

この実用化が短期間で達成された理由は、第一に従来から用いられてきた膨張黒鉛製ガスケットの短所である表面からの粉落ちや焼付きといった問題を、粘土膜のシーズ技術で解決できるのではないかとJ社社長の的確な発案である。他の理由としては、第二にスムーズな技術移転、第三にJ社の技術者の地道な努力、第四にGICによって得られたユーザーの協力と英断、第五にJ社の迅速な経営判断と全国津々浦々に渡る技術営業サービスの実践、第六にNEDO、産総研との緊密なネットワーク、第七に単一企業で生産が可能であったこと、などがあげられる。

また外部要因として、2008年までのアスベスト製品の全廃目標があり、市場が代替製品を必要としていたことがあげられる。現在の開発品はアスベストガスケット製品の約7割を代替可能であり、さらに広範な性能評価試験を行うと同時に、長期信頼性向上などに取り組み、化学プラント産業用に加え、自動車産業用、電力産業用へと展開していく予定である。同時にさらに高温対応の製品等の開発に取り組んでいる。

この他にも、産総研内部のプロジェクトとして、産総研の特許を実用化するための産総研独自の研究開発プロジェクトを2006年度と2007年度に行っており、また多くの資金提供型共同研究も進行中であり、第二第三の実用化に向けて着実に進んでいる。

実用化例を早く作り、この過程で基礎技術、製品化技術を蓄積することも開発を成功させるポイントと考えている。大量生産薄利多売のものは、サプライヤーの生産技術の開発と、ユーザーの製品開発の研究の両者がバランスよく進んでいかなければならないため、市場の形成に少し時間がかかる。一方ガスケットの製品化は単独の民間企業で行うことが可能であったことで、企業連携の形成を待つ必要がなく、短期間で実用化に至った。このような実用化例があると、他の用途に関係する研究者、エンジニア、経営者の実用化意欲が一層高まり、この点においても先行例を作ることが重要と考えている。

5 本格研究における出会いと研究展開

ここでは上に述べたような粘土膜の開発過程を通して本格研究における出会いを分析してみる。

具体的には、発明の形成過程、本格研究に至る過程等での出会いを類型化する。

第1種基礎研究ステージにおいては、人類が粘土膜に出会ってから約70年、筆者が粘土膜の研究を開始してから約5年の時間が経過している。その間、工業製品の種類や素材に対する要求性能が変化したために古いシーズに潜在的な可能性が生まれた。高レベル放射性廃棄物や産業廃棄物の処分場用のバリア層としての基礎研究の過程で粘土膜の製造ノウハウなどの蓄積が行われたが、このシーズ技術はある程度完成され論文や報告書としてまとめられていた。新研究ユニットの設立によって、異なるバックグラウンドを持つ研究者が出会うことになり、マイクロリアクターのシールの問題に直面していた筆者の上司からシール材開発の依頼がされた^{[3][15]}。この出会いのポイントは2つあると考えられる。第一にシーズとニーズのマッチングである。第二に先入観のない提案である。

第一の点については図1を用いて少し詳細な説明を試みる。個人あるいはグループAとBの出会いによって発見や発明などのブレイクスルーが生まれるために、少なくともAに問題解決方法への渴望があるとよい。具体的にはAは専従度の高い研究開発Iの達成のため、足りない技術開発要素Xを強く要求している。Bは研究開発IIの成果である技術 α を有しており、 α はXに寄与するものである。 α のXへの寄与は100%に近い場合もあり、50%程度である場合もある。AとBの出会いのときにBからAの α に関する技術紹介が行われる。特に α のXの寄与率が高くない場合でも、強い渴望が積極的な可能性探求をして α のXへの寄与の可能性を見出す。 α のXへの寄与率が高い場合は、研究開発Iにかかる時間と研究資源(人、予算、設備)が揃っていることから、短期間で発見・発明に至る。 α のXの寄与率が高くない場合は、AからのBフィードバックなどでさらに α を展開し、Xの寄与率が高いものとする必要がある。この場合AとBの協力の合意が必要になる。協力は共同研究IIIという形で行われる場合もある。この段

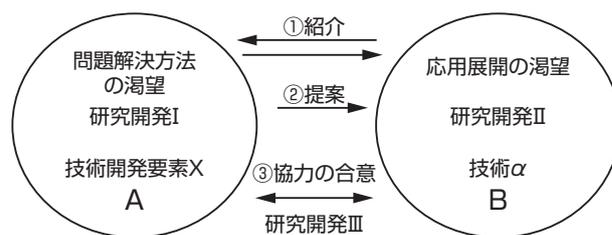


図1 本格研究における出会いと相互の関係

表1 ガasket開発における出会いの形態

| ステージ | A | B | X | α | 研究開発I | 研究開発II | 研究開発III | 研究内容 | 出会いをもたらした機会 |
|---------|---------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|--------------|
| 第1種基礎研究 | 上司 | 粘土研究者 | マイクロアクター用水素ガスシール材 | 粘土膜による均一なフィルム | マイクロアクター開発 | 粘土圧密体による水バリアー研究 | 産総研内部グラント | ハイバリア性の確認、ハイバリア性発現機構の検討 | 新ユニット立ち上げ |
| 第2種基礎研究 | 企業J | 産総研研究ユニット | ガasketの耐熱性向上 | 耐熱ガスシール材 | 産総研内部グラント | | 経済産業省地域中小企業支援事業 | 粘土膨張黒鉛ガasketトバッキングの開発 | 技術相談 |
| 実用化研究 | ユーザー企業M | 企業J+産総研研究ユニット | アスベスト代替ガasket製品 | 高性能ガasket | 経済産業省地域中小企業支援事業 | | NEDO緊急アスベスト代替開発PJ | 非アスベストガasketの開発 | コンソーシアム(GIC) |
| イノベーション | ユーザー企業群 | 企業J+産総研研究ユニット | 高性能ガスシール製品 | 高性能ガスシール製品開発技術 | NEDO緊急アスベスト代替開発PJ | | NEDO大学発事業創出実用化研究開発事業 | 汎用高性能ガスシール製品の開発、標準化に向けたデータ収集 | 製品広告など |

階は産総研内、あるいは同じ研究グループ内では単なる依頼・命令になる場合がある。このとき、Bの技術 α については研究IIが終了しており、活用先を探している状況であると両者の思惑が一致し、合意が得られやすいと考えられる。研究IIが継続中の場合は、すべての情報を開示できない場合もあり、協力も限定的にせざるをえない場合がある。

このとき、Aに期待されることとして、柔軟に可能性探求をすることである。例えば技術 α について、他の技術との複合活用の可能性を含めて想像力を高めることなどである。また、研究計画の柔軟な変更も必要になることがある。次に、Bに期待されることとして、オリジナリティに関する適切な説明がある。Aは技術 α をよく知っていないため、オリジナリティについて間違った理解をする可能性があるからである。また同様の理由で関連技術のうち、 α の採用が最も適切な選択であるかどうかについて客観的な助言をすることが求められる。

このモデルを今回の粘土膜の開発に当てはめてみたのが表1である。第1種基礎研究ステージにおいては粘土研究者がBであり、上司がAとなる。また、第2種基礎研究ステージにおいては、コンパクト化学プロセス研究センターがBであり、J社がAである。いずれの場合も出会いの理想的なパターンに近いと考えられる。さらに実用化研究ステージにおいては、コンパクト化学プロセス研究センターとJ社がBであり、ユーザーM社がAと考えられる。

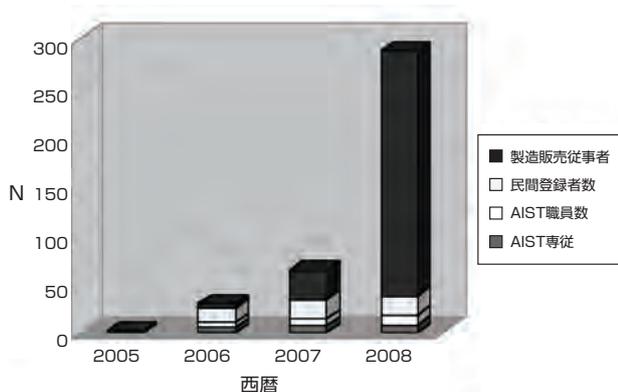


図2 粘土膜研究における関係者の広がり (Nは関係者数)

このモデルのポイントは、本格研究のステージ毎の分析に用いられる点と、出会いにタイミングがあることを含んでいる点である。第1種基礎研究から実用化研究に至る過程で、出会いはより組織内部から外部へと広がっていく。具体的には、粘土膜をもっぱら研究している専従度の高い職員から、専従度の低い職員へ、産総研にID登録している外部研究員へ、そして産総研にID登録していない製造販売従事者へと広がっていく。

図2は粘土膜に関してそのような関係者の広がりを示したものである。関係者の数が増え、ユーザーとして恩恵にあずかる人口が増えることもイノベーション進捗の評価軸の1つと考えられる。

6 統合開発モデル

これまでは粘土膜における個別の製品化開発の議論であったが、粘土膜の製品化研究は製品毎に仕分けされており、それぞれ別の企業等と行われている。また、川上と川下の関係になっている例もある。具体的には、粘土生産の企業と、それを用いた粘土膜の製造企業、さらに粘土膜を用いた製品を製造する企業などである。また、上記のような垂直展開とともに、製品は別であるが技術開発要素を共有する企業がある。それは例えば耐水性の高さ、膜の透明度の向上、ガスバリア性の高さ、などである。これらの企業を含んだ開発全体でバランスされた成果を上げるためには、個別の開発を行う時期から、情報交換によって開発を加速する時期へと移行することが好ましい。守秘義務のために他社との共同研究の内容や進捗について伝えることができないため、産総研が仲立ちになった企業連携を進める方法を工夫しなければならないが、前述のGICの場を利用することによって少しずつ企業間の壁を下げていき連携を進めていきたいと考えている。実用化例を生み出し、企業との共同出願特許が開示され始めている2008年が技術の融合を始める好適な時期と考える。上述の出会いのモデルでは独自技術の確立という点で先行企業をBとし、それに続く企業をAと考えることができる。この連携に産総研が直接関与する必要はない。

このような連携を基にした複数の開発スタイルを「統合開発」と呼び、特に連携を行わない場合「個別開発」のケースと比較する。図3では、粘土膜関連の製品開発A、B、Cのそれぞれが統合開発されている場合、個別開発されていた場合の進捗をそれぞれ実線と破線で描いてある。個別開発のケースでは粘土膜全体の開発はそれぞれの製品A、B、Cの総和と等しい(Ⅱ)。ここで製品開発Aが達成された時点Tで、統合開発型に移行したと考える。製品Aの開発過程で蓄積された技術とノウハウの一部を提供することにより、製品Bの開発が加速される。さらにAとBの開発によって蓄積された技術とノウハウが製品Cの開発に生かされる。統合開発型でなければ生まれなかった製品開発Dが統合開発型の場合に生まれることもありうると考えられる。結果として粘土膜全体の開発は加速的に行われる(Ⅰ)。悪いシナリオとしては、企業間の連携が失敗し、お互いの技術を使うことができなくなり、単独開発よりも製品化が遅れてしまうこともありうる(Ⅲ)。この場合、特許の権利が消滅するまで製品化が遅延することもある(Ⅲ)。

統合開発により生み出されたDに対応する事例としては、高圧水素ガス容器用水素ガスバリア素材の開発がある^{[16][17]}。これは炭素繊維強化プラスチックシートの中に粘土膜を挟み込んだ素材であり、粘土膜メーカー、炭素材料粘土膜複合材料のシーズ技術を有するメーカーなどとの協力で進めている。

7 クレースト連絡会

上述の統合開発を具現化するために、2008年8月にクレースト連絡会を発足させた。上述のように産総研東北センターの産学官連携の研究会であるGICがクレーストの実用化に大きな役割を果たしてきたが、この分科会として作

られたものである。2008年7月現在民間企業30社程度が入会しており、さらに企業間連携を密にしながら粘土膜技術の実用化を推進していく予定である(図4)。

具体的活動内容としては、特許や論文などの最新技術動向提供、粘土ライブラリの管理、連絡会会合の運営、共通基盤技術の提供などである。幹事は産総研の研究者が含まれているが、ほとんどは企業側の会員によって構成されている。統合開発に支障をきたさないよう、細心の注意を払って運営することが肝要であるとの意識からである。

8 まとめ

粘土膜の開発においては、時系列的な意識を強く持ちながら広報・知的財産・技術要素研究・技術移転のそれぞれの連携により戦略的な知財確保(質・量)を行うとともに、粘土膜製造ノウハウの確立と、実用化ロードマップの策定を行った。

第1種基礎研究から実用化研究に至るそれぞれのステージでの出会いが重要であった。このような出会いは、研究グループの融合、広報活動、研究会設立などによって生み出すことができる。これらのアクションを戦略的に開発過程に組み込むことが本格研究の加速的展開に対して有効であると考えられる。粘土膜のケースではアスベスト代替ガスケットという実用化例を生み出すことができた。コントロールされた情報開示によって、産総研が技術・知的財産・情報の中心となり、開発のイニシアチブを取っている。このことは同時に産総研が、企業間の調整役を果たさなければならないことを意味する。コンソーシアム活動は個別の製品開発を効率的に調整し統合するために有効な手段であると考えられる。

最後に、時系列的に単純化したストーリーとするため後

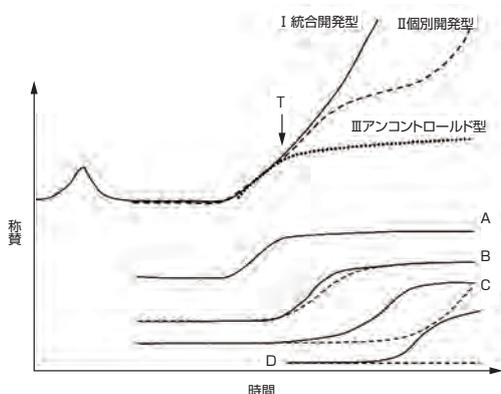


図3 統合開発の概念
A-Dは個別の製品開発展開、実線は統合開発の場合、破線は個別研究の場合

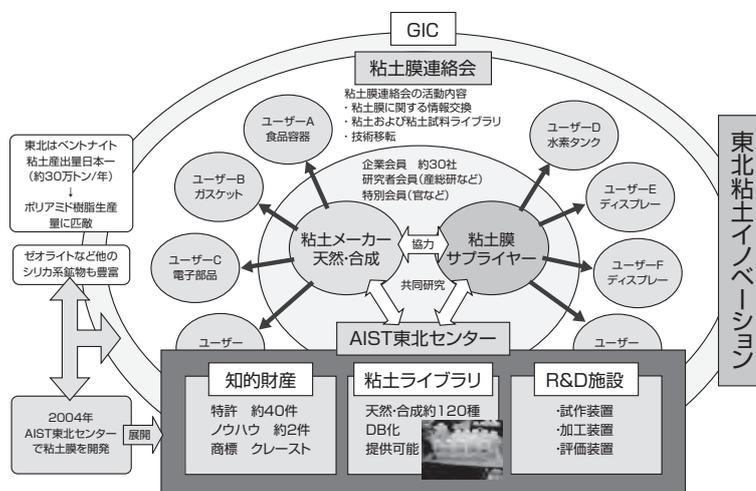


図4 クレースト連絡会-会員間の相互関係

半は製品化研究に偏った論文になったが、製品化研究のみに没頭して、公的研究機関としてすべき基礎研究がおざなりにならないよう留意すべきであり、そのためのマンパワーは常に確保しておくことが必要である。現在は粘土の成膜メカニズムの詳細、柔軟性の発現についての基礎研究を行っている。その成果として天然粘土に匹敵する製膜性を有する合成粘土が生み出されつつある。

謝辞

本成果の一部は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の緊急アスベスト削減実用化基盤技術開発プロジェクト（「高温用非アスベストガスケット・パッキンの開発」）による成果である。塚本勝朗氏、佐倉俊治氏、中村雄三氏（以上ジャパンマテックス株式会社）、米本浩一先生（九州工業大学）、奥山圭一先生（津山工業高等専門学校）、長谷川泰久博士、水上富士夫博士、手塚裕之博士、ナムヒョンジョン博士、川崎加瑞範博士、手島暢彦氏、鈴木麻実氏、増田和美氏（産総研コンパクト化学プロセス研究センター）をはじめ粘土膜開発に関わった多くの方々に謝意を表したい。

用語説明

用語1: 他部材の上にコーティングされる膜とは異なり、サポートする部材なしで取扱可能な膜。

キーワード

粘土、本格研究、第1種基礎研究、第2種基礎研究、実用化研究、出会い、コンソーシアム

参考文献

- [1] 蛭名武雄：柔軟な自立耐熱性フィルムクレーストClait, *FC Report*, 23, (3), 109-112 (2005).
- [2] 蛭名武雄：新規耐熱フィルム「クレーストClait」の開発, *未来材料*, (6), 22-25 (2006).
- [3] 蛭名武雄：粘土を主成分とする耐熱性ガスバリア膜の開発, *AIST Today*, 7 (10), 17-19 (2007).
- [4] H-J. Nam, T. Ebina, R. Ishii, H. Nanzyo and F. Mizukami: Formability of self-standing films using various clays, *Clay Science*, 13, 159-165 (2007).
- [5] 白水晴雄：粘土鉱物学－粘土科学の基礎－, 朝倉書店, 57 (1988).
- [6] E. A. Hauser and D.S. Le Beau: Gelation and film formation of colloidal clays. I, *J. Phys. Chem.*, 42, 961-969 (1938).
- [7] 蛭名武雄：スメクタイトとチタン酸化物の複合体, *AIST Today*, 7 (8), 22(2007).
- [8] L.E. Nielsen: Models for the permeability of filled polymer systems, *J. Macromol. Sci. (chem.)*, A 1, 929 (1967).
- [9] T. Ebina and F. Mizukami: Flexible transparent clay film with heat resistant and high gas barrier properties, *Adv. Mater.*, 19, 2450-2453 (2007).
- [10] H. Tetsuka, T. Ebina and F. Mizukami: Highly luminescent flexible quantum dot-clay films, *Adv. Mater.*, in press.
- [11] T. Ebina, Colorful Clay, *Nature (Research Highlights)*, 454, 140 (2008).
- [12] 中村雄三, 蛭名武雄, 手島暢彦: 新非アスベストガスケットの紹介, *配管技術*, (8), 88-92 (2007).
- [13] 蛭名武雄:アスベスト代替ガスケットを開発, *AIST Today*, 7 (4), 22 (2007).
- [14] 蛭名武雄: 最新機械機器要素技術 4.4.4. アスベスト代替ガスケット, *エヌティージー*, 479-481 (2008).
- [15] 蛭名武雄:セラミックス系新素材“クレースト”の可能性, *デントルダイヤモンド*, 31 (435), 170-173 (2006).
- [16] K. Yonemoto, Y. Yamamoto, T. Ebina and K. Okuyama: High hydrogen gas barrier performance of carbon fiber reinforced plastic with non-metallic crystal layer, “SAMPE” 08, CD-ROM, Long Beach Convention Center, Long Beach, CA, USA, May 18-22, (2008).
- [17] 蛭名武雄: 水素ガスバリア性の高い複合材料を開発, *AIST Today*, 8 (8), 19 (2008).

(受付日 2008.7.22, 改訂受理日 2008.9.1)

執筆者略歴

蛭名 武雄 (えびな たけお)

1993年東北大学大学院工学研究科博士課程を修了し、通商産業省工業技術院東北工業技術試験所に入所、2度カリフォルニア大学サンタバーバラ校で在外研究して粘土を含む機能性材料の研究を行う。現在、コンパクト化学プロセス研究センター材料プロセッシングチーム長。2004年以降粘土を主成分とする膜材料の開発に従事する。原料粘土の合成から応用製品の大量生産方法まで幅広く研究する。粘土膜の用途としては合成粘土を用いた透明フィルムとそれを用いた電子デバイスなどがある。

査読者との議論

議論1 論文の全体構成について

質問・コメント (立石 裕)

本格研究全体をまんべんなく記述したため、焦点が不明確になり、シンセシオロジーの主眼である、第2種基礎研究の部分が不十分であるとともに、特に、前半がクレースト開発の「解説」になってしまっているように思います。論文の焦点が、「クレーストの実用展開」の記述にあると思われるので、構成を工夫した方がよいと思います。

たとえば、「研究の夢」が「粘土膜の実用化、具体的な事例としては、アスベスト代替ガスケットの開発」であり、「研究の社会的価値」が「耐熱性ガスバリア膜による、新規ニーズへの対応」であるとして、それに応じたシナリオの設定、要素技術の記述とその統合プロセスの記述ができるのではないかと思います。論文としては、時系列的にすべての経緯を網羅する必要はないので、もう少し取捨選択された方がよいと思います。

回答 (蛭名 武雄)

確かに本格研究の全ての要素の記述を省かないようにした結果、焦点が不明確になっております。指摘いただいた点につきまして、構成を再検討しました。「研究の夢」が「粘土膜の実用化、具体的な事例としては、アスベスト代替ガスケットの開発」であり、「研究の社会的価値」が「耐熱性ガスバリア膜による、新規ニーズへの対応」であるとして、それに応じたシナリオの設定、要素技術の記述とその統合プロセスの記述としました。

議論2 発想の転換に至る過程の加筆について

質問・コメント（立石 裕）

粘土膜のガスバリア性の発見において、「逆転の発想」になぜ到達したのか、の記述があるとインパクトが強くなると思います。現状の記述では、単なる思いつきととれなくもありません。

回答（蛭名 武雄）

「逆転の発想」の部分についてどのように発明に行き着いたのか議論が不十分でした。この点について、ルーチンの研究からどのように過度の努力をし、同業者が単独では容易に想到しえない発明にたどり着いたかについて中身の記述をいたしました。

議論3 本格研究における出会いの相互関係について

質問・コメント（五十嵐 一男）

図1中でAがニーズへの渴望、Bが応用展開の渴望とありますが、この2つは、文字は異なるものの同じ内容を言っているように見えます。差異があるのでしょうか。また、AとBの関係において図からは常にAがイニシアティブをとるように受け取れますが、そのような理解でいいのでしょうか。

回答（蛭名 武雄）

ご質問のとおり、Aのニーズへの渴望とBの応用展開の渴望は同じ内容を言っているように見えます。この点改めて整理して考えますと、Aは問題解決方法の渴望ということがいえます。Bの方が、時系列的に研究が進んでいますので、問題解決方法というよりは、得られている研究成果の応用展開の渴望といえると思います。この点、Aについては問題解決方法の渴望と訂正いたしました。

AとBの関係において常にAがイニシアティブをとっているように受け取られます。この解釈は強引な類型化であり、どれほどの事例がこのパターンに当てはまるかは議論が必要と思います。それでもあえてAとBに異なった位置づけを行ったのには、2つの理由があります。1つ目ですが、このような分析が出会いの機会を意識的に作る場合に有用と考えたからです。現在自己のステータスがAであるのか、それともBであるのかを判断し、実りのある出会いをするためにどのような相手

を探ることが効率的か方針が立てられる利点があると考えました。2つ目として、AとBを同じ位置づけにして議論をするパターンも考えられますが、この場合出会いの内容についてそれぞれの立場に立った議論ができず、AとBにざっくりとした特徴が必要でした。一見同じような立場の二者間でも、技術の内容が詳細になっていけばAとBへの特徴付けは可能と思います。たとえば、1つのプロジェクトにおいて技術開発要素X1とX2があり、技術開発要素X1に関しては、Aの立場であったとしても技術開発要素X2に関しては、Bの立場になるということはあることです。このとき二人は総体としてはほとんどイーブンの位置づけとなります。また、出会いから短時間はどちらかがイニシアティブを取り、すぐに共同開発に移行する場合も当然あると考えています。

議論4 統合開発の概念の整理について

質問・コメント（五十嵐 一男）

図3において、Dは統合開発が行われた結果として生まれることもありうるとされていますが、時系列でみるとT時点よりもだいぶ前から線が引かれています。その理由は何でしょうか。また、フラットな線は何を意味するのでしょうか。

キャプションではDも個別開発と記載されていますが、統合開発の結果生まれたものは個別開発することを意味するのでしょうか。

回答（蛭名 武雄）

確かに図3につきましては、このままでは誤解を生み出す形になっており、より分かりやすく訂正が必要と存じます。まず、Dはご指摘の通り、T時点から線が引かれるべきと存じます。また、また引かれている実線はⅡ個別研究型の場合の推移であり、これがⅠ統合開発型の場合にはBからDはより早い時期にブレークスルーが起こります。この線を追加することにいたしました。その結果として粘土膜関連の製品開発A、B、C、Dのそれぞれが統合開発されている場合、個別開発されていた場合の進捗をそれぞれ実線と破線で描きました。

土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法

—— リスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチ ——

駒井 武*、川辺 能成、原 淳子、坂本 靖英、杉田 創

土壌と地下水の汚染が人の健康に与えるリスクを評価するための手法を開発した。種々の要素研究を基盤として、評価システム全体を最適に構成した。このため、分野融合型の研究計画を立案して、要素研究の実施からリスク評価システムの開発までを行い、さらに産業や社会で利用可能な形にした。本報告では、研究開発において採用した要素技術の統合と構成のシナリオ、リスク評価の実践におけるスパイラル的な研究展開を中心に、目標達成に至るまでのプロセスについて論じる。

1 はじめに

わが国の土壌汚染対策のパラダイムは、一律に環境基準や指定基準を与える法規制から、土地用途の状況や環境条件に応じた自主的なリスク管理に大きく転換しようとしている。その基礎となったのが科学的な曝露・リスクの解析に基づいた合理的なリスク管理とガバナンス（自主的な取り組み）の考え方である。地圏環境媒体である土壌や地下水は、地表水や大気とは違い、有害化学物質の人への曝露のコントロールが比較的容易である。地表水や大気が生活に必須で、日常的に人が接するものであるのに対して、土壌や地下水は、人がそれらに接する機会（曝露機会）が比較的少ないことが主な理由である。このような地圏環境のリスク評価では、環境を経由した曝露評価に関する普遍的な要素と、地圏環境に特有な土壌物性や地下水流動のような個別の要素についての包括的な関連性を構築することがきわめて重要である。

本研究では、土壌や地下水など複雑な構成要素をもつ地圏環境に関して、それらの汚染が人の健康に与えるリスクを評価する技術を開発した。関連するそれぞれの学術分野の要素技術を個別に開発しただけでは評価システム全体の完成には至らないため、地質学と環境科学を中核とした分野融合型の研究計画を立案して、6カ年の長期間にわたって研究開発を展開した。この中で、これまでの土壌・地下水汚染の諸課題を解決するためのパラダイムを転換して、わが国独自のリスク評価手法とデータベースを構築し、リスク評価の実践においてスパイラル的な研究展開という新たな試みを行い、研究開発を成功に導いた。

本報告では、土壌・地下水汚染のリスク評価に関して、

要素技術に関する研究開発の成果、技術の融合と構成、研究成果の公開と普及、さらには管理規格など社会システムへの組み込みについて述べる。また、それぞれの学術分野における要素技術の成果とともに、第2種基礎研究^{用語1}から製品化研究^{用語2}に至るまでの構成学的なシナリオおよび研究プロセスについて論じる。

2 土壌汚染対策の現状と本研究の社会的意義

2003年の土壌汚染対策法の施行以降、わが国の土壌・地下水汚染への対応は増加の一途をたどっている。最近の統計では、法規制の下で調査・対策が実施された件数だけで年間約1200件、企業などの自主対策を含めると数千件にものぼっている¹⁾。この背景として、環境汚染問題に対する意識の高まり、土地取引の活発化などがあげられる。また、図1に示すように最近では法規制（ガバメント）

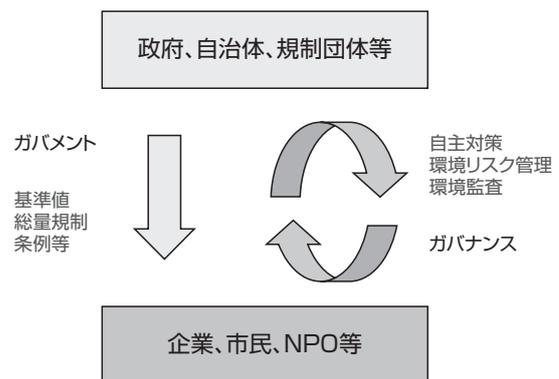


図1 ガバナンスの構造と環境改善への取り組み
環境施策の社会システムとして法規制（ガバメント）と自主統制（ガバナンス）のアプローチの違いを示しており、リスク評価・管理は主にガバナンスの方法論として適用される。

に加えて、企業や自治体における自主対策を含む重層的な取り組み（ガバナンス）の必要性が指摘され、自ら実施するリスク管理がますます重要となっている^[2]。実効性の高い環境施策を行うためには、ガバメントとガバナンスの両者を組み合わせた新たな枠組みとすることが肝要であるため、最近では自主的なリスク管理への移行を視野に入れた法改正の検討も行われている^[3]。

最近の経済産業省の調査によれば、わが国の土壌汚染対策の90%は自主的な取り組みの中で行われ、事業者や自治体自らリスク管理をして調査・対策を行うことが多い^[4]。このような現状をみると、リスク管理に基づく土壌汚染対策を重点的に推進する必要性が理解できるが、現実にはその枠組みやリスク評価の方法論に関して統一的な考え方は存在していなかった。特に、個々の土地用途ごとに異なる環境や曝露の条件に対応したリスク評価の方法が確立されておらず、現実に居住する人が受ける曝露とリスクの大きさについての科学的な情報が不足していた^[5]。

このような背景から、本研究では土壌・地下水汚染に適用可能なリスク評価の方法論を確立することを目的として、分野融合型の研究を実施した。上述のように、リスク評価手法の開発については自治体や企業などからの社会的な要請が強く、環境政策や産業環境管理などの行政的な役割への期待も大きい。この研究開発では、リスク評価手法の開発から地質調査、データ取得、数値解析、システム開発、技術の公開・普及までを一貫して実施する総合的な取り組みを行った。特筆すべき点は、これまでの研究で不足していた分野間の融合、各構成要素の統合、さらには製品化や社会システムへの組み込みまでを目指したことである。最終的な目標は、わが国の土壌汚染対策において標準的なリスク評価手法を確立することであり、その基盤となる要素技術やデータベースを開発・公開することにある。ま

た、国際的にもさまざまな土地用途の特性を考慮したリスク評価システムは研究例がなく^[6]、研究成果を広く世界に発信する意義が大きい。特に、アジア諸国の土壌・地下水汚染は深刻度を増しており、研究成果を普及して環境リスクを軽減・回避できれば国際的な貢献となる。

3 本研究の構成学的な意義と展開

本研究における構成学的な意義とその展開を図2に示す。基本的な要素技術を集積するだけでなく、要素間の関連性を重視するシナリオを採用し、リスク評価システムとしての完成を目指した。以下、さまざまな要素技術を統合するため、本研究開発で採用した基本シナリオや研究目標を達成するために導入した構成学的なプロセスについて述べる。

これまでの環境関連の法制度では、一律に基準値や指定値などを与える規制が多く行われており、ガバメントの考え方を基本としている。一方、最近の環境問題では、トップダウン型の規制では不十分であることが認識されて、企業や自治体の自主的な取り組みを基本とするガバナンスへと転換しつつある（図1）。ガバナンスの考え方は、多様な利害関係者の参加を前提としているので、近未来の環境リスク管理や持続的発展可能な産業構造を考える上できわめて有効な手段といえる^[7]。本研究では、環境施策におけるパラダイムの転換を目的に、統一的な指標による要素技術の統合化や双方向のコミュニケーションなど従来の研究とは異なるシナリオを採用した。

地圏環境を取り扱う研究では、表1に示すような地質学や環境科学などの基礎科学の知見が不可欠である。特に、わが国に特有な土壌や地質の構造や地下水の流動特性、有害化学物質の化学形態や存在形態、曝露解析に必要な各種パラメータなどは、リスク評価を行う上で欠かせないものである。このような要素研究は相互補完的な特徴を有しているが、共通の尺度による研究分野の融合が必要である。具体的には、各研究分野で使用するデータ、パラメー

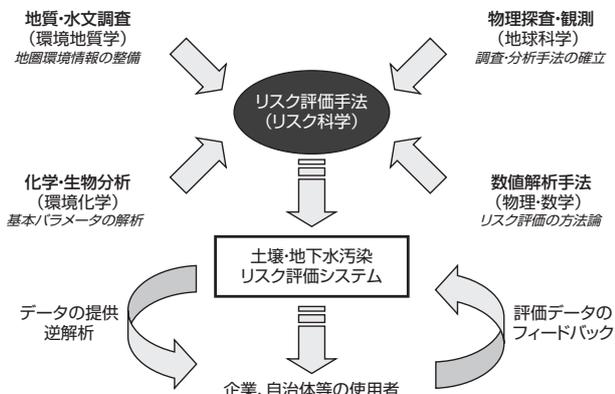


図2 本研究開発における構成学的な特徴
土壌汚染リスク評価システムの研究開発に必要な要素技術と統合化のシナリオを示しており、システム開発およびデータ構築に伴うスパイラルの構成が特徴的である。

表1 本研究に関する学術分野と要素技術

| | | |
|----------------|-------------------|----------------|
| 曝露・リスク解析手法 | リスク科学(リスク解析、情報科学) | リスク解析 曝露解析 |
| 曝露シナリオ、曝露ファクター | 安全科学(薬学、毒性学) | |
| 地質構造データベース | 地質学(地質情報、都市地質) | 地質調査 地下水調査 |
| 土壌・地下水パラメータ | 環境地質学(地圏情報、水文学) | |
| 環境中物質移行パラメータ | 地球科学(物質循環、物理探査) | 物理探査 モニタリング |
| 土壌-生体移行パラメータ | 環境化学(土壌物理、生物地球化学) | |
| 化学物質パラメータ | 物理化学(平衡論、速度論) | 化学分析 生物・生態 |
| 環境汚染に関する諸データ | 環境科学(分析化学、地圏微生物) | |
| 移流・分散解析手法 | 計算科学(流体工学、数値解析学) | 数値解析 システム化 |
| システム化・可視化 | システム工学 | |

タ類などに十分な整合性をもたせることが重要であり、そのための研究調整と方法論の統一化をはかった。

一方、これらの基礎研究の成果を活用するリスク解析では、曝露・リスク評価を行うためのシナリオや数式の確立、地圏環境における汚染物質の移動を把握するための数値解析手法、地下の地質構造を3次元的に把握するための物理探査などの応用的な研究開発も重要である。これらを「環境リスク」という統一的な指標でもって構成し、それぞれの要素技術を有機的に関連づけることにした。また、リスク評価システムを「製品」として完成させるためには、使用する方法論やデータの妥当性を検証することが必要である。そのため、開発したリスク評価システムをいくつかの汚染現場に適用して、得られた評価結果をフィードバック(図2)するとともに、専門家による技術的な評価結果を反映させた。

4 リスク評価の要素技術と方法論の研究

土壌・地下水汚染のリスク評価に関わる要素技術は多岐にわたっている。この中には、表1に示したように地質調査、汚染評価、分析技術、解析技術、モニタリング、およびリスク評価などの要素技術が含まれ、土壌汚染のリスク評価技術を中心とした総合的な研究開発を立案、実施した。

4.1 曝露・リスク評価の方法論の開発

本研究では、まず土壌や地下水などの地圏環境におけるハザードを特定し、そのリスクを定量化するための基本的コンセプトを提示した¹⁸⁾。主要な曝露の経路としては、表層土壌の直接摂取(摂食など)、地下水経由の間接摂取(飲用)、揮散および飛散による大気経由の間接摂取、農作物を経由した間接摂取など、想定されるすべての経路を考慮した(図3)。リスク評価のエンドポイント^{用語3}は、化学物質

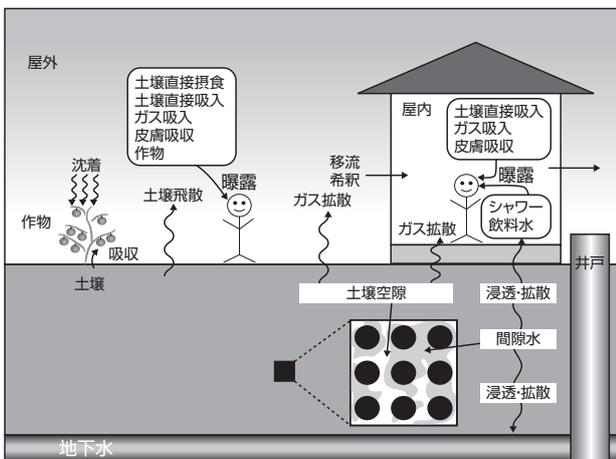


図3 リスク評価における曝露シナリオと曝露経路
土壌汚染リスク評価における曝露シナリオを概念的に示したものである。曝露経路として、直接摂取、地下水経由の経口摂取、大気経由の吸入曝露、作物経由の摂取など経路設定が必要である。

により異なるが、発ガンリスク(経口、経気道)、非発ガンリスクの両者を想定した。また、曝露のシナリオとして、曝露機会や頻度、曝露ファクター(平均体重、水摂取率、土壌摂取率など)を設定し、わが国のデフォルト値とした。これらのデータは、人の行動パターンや医学的な知見から求めた。さらに曝露評価のモデリングを行い、曝露経路およびエンドポイントごとに曝露量およびリスクの計算式を与えた。この他、環境汚染物質の移動性や反応性を予測するための2次元および3次元の数値解析プログラムを与えた。

4.2 化学物質の特性と未規制物質への対応

曝露・リスク評価では、化学物質の基本的特性、土壌との相互作用などのデータ類の集積が欠かせない。本評価システムで対象とする化学物質としては、土壌汚染対策法で規定されている重金属等、揮発性有機化合物、農薬のほか、ダイオキシン類、PCB、鉱物油および未規制化学物質(例えば、亜鉛、アンチモン、ホルムアルデヒドなど)も評価できるようにした¹⁹⁾。これまで約120物質の物性値や環境パラメータ(ヘンリー定数、水-オクタノール分配係数、土壌-水分配係数等)に関する文献や資料を精査し、データベースを作成した。鉱物油に含有する多様な炭化水素やPAHs(多環芳香族炭化水素)については、室内実験において揮発速度、土壌吸着特性および地下水中の移動パラメータをあらたに測定した。さらに、複合的な汚染問題にも対応できるように、評価システムに改良を加えた¹⁰⁾。

4.3 土壌汚染の調査と分析手法の確立

地圏環境のリスク評価では、土壌の特性や表層から地下水に至る地層、3次元的な地質構造、さらには地下水の挙動に関する情報が重要である。表層土壌の特性を調べるため、独自に実施した地質や土質の調査結果により従来の農用地の分類法を修正し、地域ごとに表層土壌基本図を作成した。また、土壌に含まれる環境汚染物質の含有量や溶出量を定量的に得るための試験分析法を確立し、土壌の種類ごとに全含有量、含有量および溶出量のデータベースを作成した¹¹⁾。さらに、曝露評価の精度に大きな影響を与える化学物質の存在形態に関して、逐次抽出法の標準分析手法を確立し、各種の土壌や岩石に関するデータを集積した。

土壌や地下水中の汚染物質の濃度や分布を明らかにするための現場調査に簡易ボーリングによる低コスト、低環境負荷の汚染調査法を採用し、日本全国の汚染サイトへの適用を容易にした。その結果、従来よりも短時間かつ安価な汚染調査法が確立され、土壌コアの効率的な現場観察や迅速なサンプリングが可能となった。また、油汚染サイトに対して電磁波や比抵抗を用いた物理探査手法を適用し、地層の3次元的な構造や地下水理特性の基礎データ

を集積した^[12]。

4.4 土壌・地下水の基本パラメータの解析

地下水の流動特性および汚染物質の移流・分散特性に関して、モデル地域のモニタリングを行い、不飽和土壌および地下水層における透水係数、分散係数などのパラメータを集積した。さらに、複数の化学物質から成る鉱物油については既存のデータが皆無であったため、カラム試験などの室内実験においてガス-油-水の3相の流動パラメータをあらたに取得した^[13]。

土壌や地下水の内部では、粘土鉱物や微生物の作用により環境汚染物質は吸着・脱着、化学反応、生物分解などの多様な変換を受けている。これらの現象は、リスク評価の結果に大きな影響を与えるため、現場調査および室内試験を通じて分解速度パラメータを収集した^[14]。土壌汚染では、国内数カ所の地域を選定して、土壌の物性、表面の吸着特性、環境汚染物質との相互作用に関する調査を行った。また、採取した土壌を化学分析し、粘土鉱物の種類や組成、吸着・脱着特性に関するデータベースを作成した。地下水汚染では、VOCs（揮発性有機化合物）の汚染サイトのモニタリングを長期間行い、主に微生物分解による環境汚染物質の自然減衰に関する各種データを集積した。

4.5 地圏環境情報の整備

リスク評価手法およびデータベースの作成と併せて、市街地や産業用地のリスク評価に適用される地圏環境情報を整備した。筆者らは、これまで特定地域の地質・土壌基本調査に基づいて、主に自然的原因による表層土壌評価基本図を作成してきた。これらの評価基本図は、曝露・リスク評価にもきわめて有効に活用されることが考えられたため、これまでの調査項目に加えて土壌中の有害化学物質の含有量や溶出量なども調査して、基本図に取り入れた。また、一般的な環境条件においてリスク評価を実施し、重金属類を対象とした曝露量の空間分布を示すリスクマップを作成した^[15]。わが国では、リスクマップの作成は初の試みであり、土壌環境リスク管理の基礎資料として十分に活用できると考えられる。さらに、日本全体の様々な地圏環境の情報をGIS上に統合する研究開発を進め、東北大学と共同で「地圏環境インフォマティクス」を開発した^[16]。この中には、土壌や地質の各種情報に加えて、全国規模の地下水汚染の状況を示すマップが含まれており、リスク管理に広く活用できる。

5 リスク評価のシステム開発

土壌・地下水汚染のリスク評価の要素技術を統合・構成して、「地圏環境リスク評価システム」GERAS（ゲラス）（Geo-environmental Risk Assessment System）を開発

した^[17]。このシステム開発では、4章で示した多様な要素技術の最適な構成に加えて、曝露モデルの作成やプログラムコーディング、数値解析手法の開発、さらには各要素の統合化および解析結果の可視化などの工学的な研究開発を実施した。

5.1 要素技術の統合とシステム開発

要素技術の統合・構成を進めるにあたり、最終的にリスク評価システムを完成させるという観点から導入した構成のプロセスは以下のとおりである。まず、個々の要素技術を適切に組み立てる上での方法論の確立や土壌を起点とした曝露シナリオの設定などに関して、リスク評価手法の開発者としてのリーダーシップが重要であった。その上で個別の研究開発では、事前検討に従ってリスク評価システムを構築するための基礎データの提供と解析作業を実施した。

次に、曝露とリスクの評価に必要なデータ類やパラメータを選択し、パラメータ間の相関や最適な組み合わせを検討した。そのため、試験方法や条件の設定を十分に検討し、目的に応じたデータベースを作成した。さらに、要素研究により取得されたデータは、実際の汚染サイトにおけるリスク評価の実施により検証され、補正や修正を加えた後にデフォルト設定とした。例えば、確実なリスク評価を実施するためには新規に取得すべきデータ類も多く、各要素

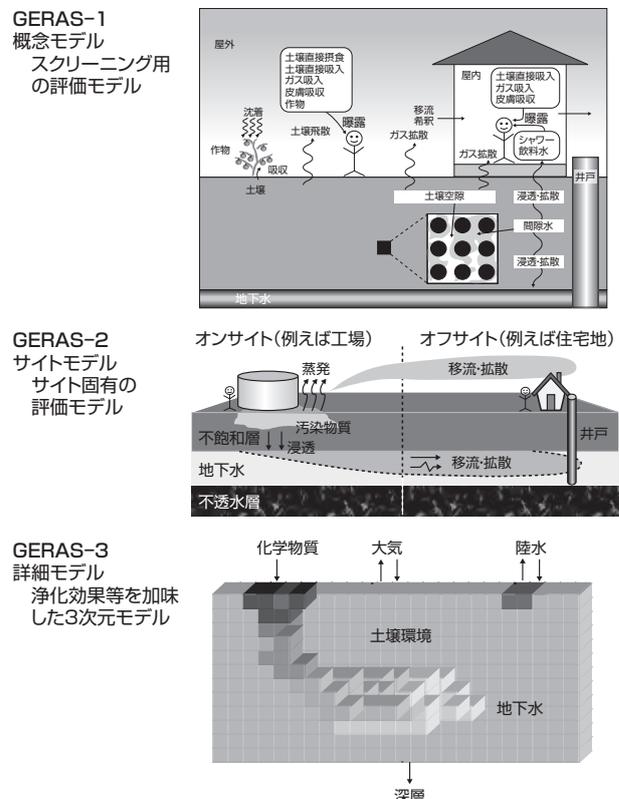


図4 地圏環境リスク評価システム (GERAS) の階層構造
本研究の成果物である地圏環境リスク評価システム (GERAS) の3つの階層構造を示している。リスク評価のレベルと用途に応じて、スクリーニングモデル、サイトモデルおよび詳細モデルから構成されている。

研究にフィードバックするケースが多かった。それに加えて評価システムの使用者の要望に応じて、入力や出力などのシステムの改良を行い、より活用しやすいシステムへと発展させていった。以上のようなフィードバックとスパイラル構成（図2）により、信頼性の高いリスク評価システムの開発に向けての統合的な取り組みを行った。

5.2 評価システムの概要と基本機能

開発した GERAS の基本構造を図4に示す。様々な現場状況や用途に活用することを想定し、スクリーニングモデル（GERAS-1）、サイトモデル（GERAS-2）、詳細モデル（GERAS-3）の3層構造とした。システム開発では、上述の基礎的、基盤的研究の成果をベースにして、要素技術の統合および新たな構成のプロセスを導入した。ここではGERASの開発における技術的な克服やその特徴的な構成を中心に、重金属類や有機化合物を対象とした曝露・リスク評価を行った事例について述べる。

GERASは図5のようなWindows上で動作するシステムである。有機炭素含有量が多いなどのわが国特有の土壌特性や曝露ファクターを考慮し、また有機化合物については、土壌溶出値を入力することにより評価が可能である。実際の評価作業では、まず対象化学物質を選択し、基礎パラメータの設定を行う（図5のAの部分）。その後、サイト特有の土壌（図5のCの部分）、地下水（図5のDの部分）、曝露経路（図5のBの部分）ならびにレセプター（曝露対象：たとえばヒト）に関するパラメータ設定（図5のE-Gの部分）を行う。図5中のH-Iの項目は、土壌摂取量、地下水摂取量、呼吸量などの主要な曝露ファクターである。GERASにおいて考慮した曝露経路は、土壌の直接

摂取、飲用水や農作物を摂取する経口曝露（口から摂取する曝露）、土壌から大気へ揮散した化学物質や飛散した土壌粒子を呼吸する吸入曝露および土壌との接触や飲用水との接触による皮膚吸収曝露とした。

これらのパラメータの設定が完了すると計算が行われる。本評価システムでは、はじめに土壌における固体、液体（間隙水）および気体（土壌空気）を対象として化学物質のフガシティー容量（大気、水、土壌などの環境の各相における分配容量）の計算を行う。初期条件として居住地域における土壌からの有機塩素化合物の溶出値を与えることにより、土壌空気および土壌間隙水中の化学物質の濃度を算出する。この計算では土壌中の有機炭素量やpHおよび吸着などのファクターにより、それぞれの化学物質に対して異なった値が得られる。次に土壌の各相から大気や地下水への移動過程の計算を行い、各種曝露媒体（大気、作物、地下水など）中の曝露濃度が決定される。最後に曝露シナリオに基づいて、各環境媒体からヒトへの曝露量が算出される。その結果から有害化学物質の毒性によりリスクが計算される。リスクの計算には、発ガン性物質の発ガンリスク 10^{-5} あるいは 10^{-6} （10万人あるいは100万人に1人がガンになる確率）や非発ガン性物質では許容摂取量（1日当たり許容できる摂取量）に対する比率を曝露基準値とした。

5.3 評価システムの適用事例

GERASを用いて重金属類（ヒ素）および有機化合物（トリクロロエチレン：TCE）のリスク評価を行った¹⁸⁾。これらの化学物質はそれぞれ、人にとって発ガン、および肝障害といった重篤な健康被害を与える代表的な汚染物質である。

適用した事例では、それぞれの汚染物質の濃度として、現行の土壌汚染対策法による指定基準値（ヒ素：含有量150 mg/kg、TCE：溶出値0.03 mg/l）を与え、土質は関東ロームとした。曝露シナリオは住宅地とし、土壌の直接摂取、土壌の直接吸入、大気吸入（屋内・屋外）、地下水摂取、農作物摂取および皮膚吸収からの曝露を考慮した。また、曝露期間を生涯70年（小人6年、大人64年）とし、生涯の平均曝露量を算出した。世界保健機構（WHO）では、これらの化学物質の耐容1日摂取量（TDI：ヒ素=2.1 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ 、TCE=24 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ ）を定めているが、食品経由など従来考慮していない曝露経路からの曝露も想定されるため、耐容1日摂取量の10%（ヒ素：0.21 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ 、TCE：2.4 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ ）を曝露基準値とした。土壌および地下水のパラメータは、実際の汚染サイトで取得されたものを使用した。

図6および図7にヒ素およびトリクロロエチレンの曝露評価の結果を示す。ヒ素の場合では主要経路が土壌の直

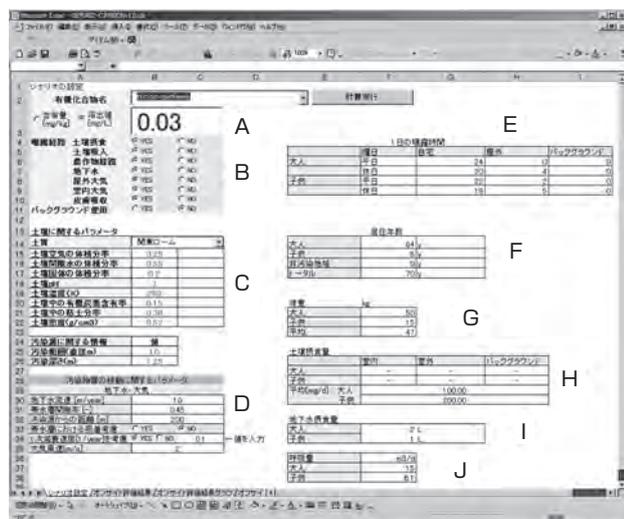


図5 GERASのシステム入力画面とパラメータ
リスク評価システムGERAS1,2のコンピュータ画面と入力パラメータである。リスク評価には、土壌と地下水のパラメータ、物質輸送に関するパラメータ、曝露経路や曝露ファクターの情報が必要である。

接摂食および地下水摂取であるのに対して、トリクロロエチレンでは、大気吸入および地下水摂取が主要経路となっていることが分かる。また、それぞれの化学物質の全曝露量はヒ素で $0.85 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ 、トリクロロエチレンで $0.76 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ と算出された。曝露基準値と比較するとヒ素の場合で4倍高くなっており、リスクが大きいと判断される。一方、トリクロロエチレンの場合ではリスク基準値より小さくなったことから、この程度の汚染では、リスクは許容される範囲と判断される。

本曝露評価モデルでは、各曝露経路からの曝露量やその割合およびリスクが評価できる一方で、逆に、目標リスクから浄化目標を設定することも可能である。この適用事例ではヒ素による土壌汚染のリスクがあると判断されたが、何らかの浄化手法により土壌含有量を $37 \text{mg}/\text{kg}$ 以下まで浄化できれば曝露量は基準値以下となる。また、主要経路からの曝露を遮断することにより、リスクを低減することも可能である。ヒ素の場合では主要経路が土壌の直接摂食および地下水摂取となっている。したがって、これらの曝露経路からの曝露を遮断できれば（例えば、飛散対策

や地下水飲用の指導）、リスクを大幅に軽減させることができる。

5.4 評価システムの公開と普及

GERASのうち、スクリーニングモデル GERAS-1 とサイトモデル GERAS-2 をまず開発し、専門家のレビューを受けた後、2006年2月に一般公開した。公開にあたっては、リスク評価システムおよびデータベースをCD-ROMにインストールし、シリアル番号を付けて使用者に配布している。また、汚染現場での活用を考慮して詳細マニュアルを作成し、評価システムとともに提供している。これまでに、国内では800件を超える事業所、工場、自治体、浄化企業、地質コンサルタント、大学関係者などに配布し、産業や社会で広く活用されている（図8）。その主な用途は、事業所や自治体における土壌・地下水汚染の自主管理であり、全体の60%程度を占めている。また、海外用に英語版のGERAS-Eバージョンを開発し、英国、中国、韓国、タイ、ベトナムなどに配付している^[19]。また、鉱物油（ガソリン、軽油、灯油等の石油系燃料）に特化した評価システムの開発も進めており、2009年までに公開と普及を目指している。

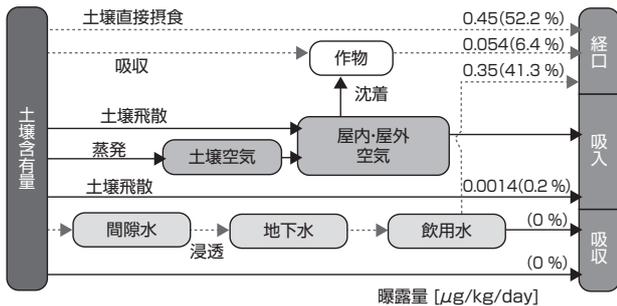


図6 汚染土壌からの曝露量と割合の推定結果（ヒ素）
リスク評価システム GERAS-1 の解析結果として、ヒ素で汚染された土壌からの曝露経路ごとの曝露量とその割合を示している。ヒ素の場合、直接摂食および地下水経由の曝露が最も多いことが分かった。

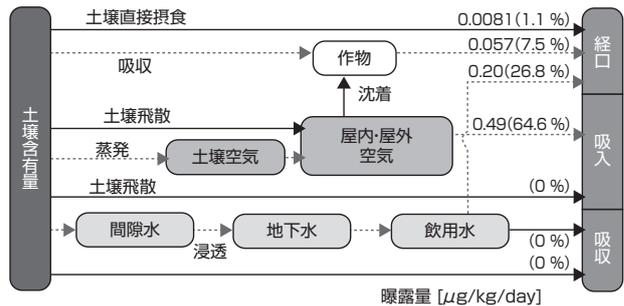


図7 汚染土壌からの曝露量と割合の推定結果（トリクロロエチレン）
リスク評価システム GERAS-1 の解析結果として、トリクロロエチレンで汚染された土壌からの曝露経路ごとの曝露量とその割合を示している。トリクロロエチレンの場合、屋内・屋外空気（大気）および地下水経由の曝露が最も多いことが分かった。

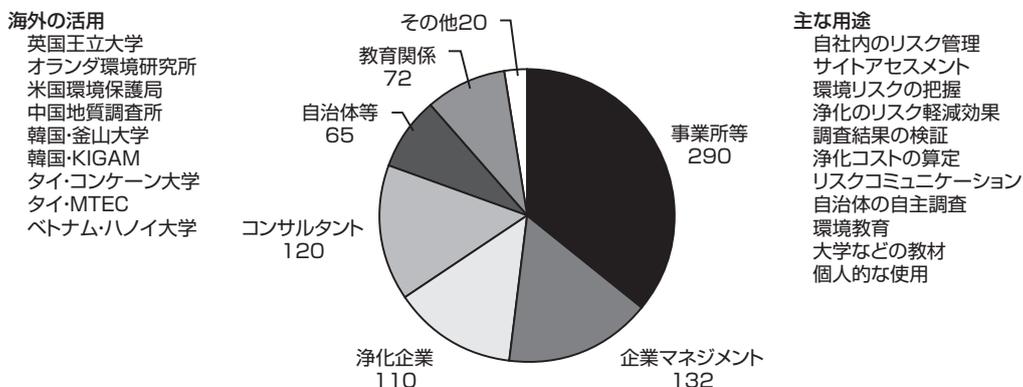


図8 GERASを配布した業種の割合と主な用途
これまでに配布・活用されているGERASの業種別の件数とその割合を示している。約800件のうち、事業所や企業におけるリスク評価の実績が多く、浄化企業やコンサルタントの実務にも多数使用されている。

今後、環境汚染物質の移流・分散解析や浄化によるリスク軽減を評価するための詳細モデル GERAS-3 の開発を行い、GERAS の全体バージョンとして仕上げていきたい。

評価システムの開発と並行して、多くの使用者から汚染サイトにおける実際の評価データを集約し、その結果をフィードバックして GERAS の改良に反映させている。土壌・地下水汚染の特性はサイトごとに多様であり、また評価結果には時間的、空間的な差異もあることから、使用者が行ったリスク評価の結果はきわめて貴重なものである。このような評価データを集積・解析することによりシステムの有効性の検証を行うとともに、システムの改良やデータベースの追加などのバージョンアップを逐次行っている。これまでに、土壌・地下水データベースの改良、対象化学物質の追加（鉱物油等、バイオ燃料（MTBE、ETBE）、PAHs、ふっ素、ほう素）、溶出値による評価手法の改善などを行い、数回のバージョンアップを行っている。

6 今後の技術的課題と社会への適用

地圏環境リスク評価システムを環境汚染問題に適用し、技術を社会に普及・定着させていくまでの課題やプロセスについて、産業や社会への貢献や社会システムへの反映を中心に述べる。

6.1 今後の技術的課題

すでに5章で述べたように、開発した GERAS には多様な要素技術やデータベースが組み込まれている。これらの

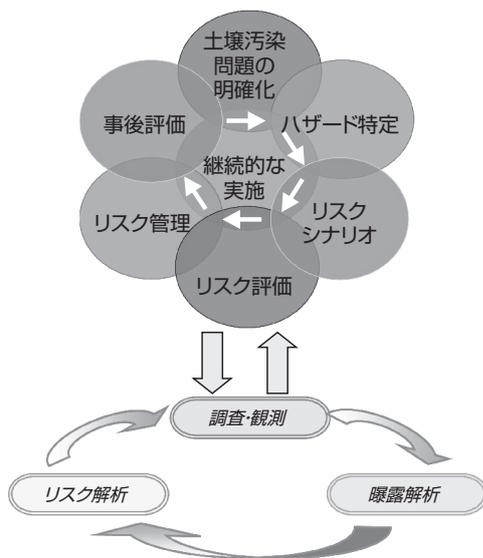


図9 環境リスク管理におけるループ構造および重層のスパイラル構成

土壌・地下水汚染に関わる環境リスク評価および管理に有効なループ構造とスパイラル構成を示している。リスク評価システム GERAS を活用した実践においても、このような重層の構成による環境改善の考え方が重要である。

最適な構成や使用するデータ類の信頼性については、これまでの研究開発でも十分に検証されているが、リスク評価技術の高度化については更なる検討が必要である。このため、リスク評価結果の不確実性や統計学的な解析に関して、基礎的な研究開発を継続する予定である。これらの研究は、環境汚染問題に対するリスク評価技術が公的に認知されるために必須であり、円滑なリスクコミュニケーションを推進する上できわめて重要な事項である。また、技術の社会的な受容性を高めるためには、評価事例を増やしてリスク評価やデータベースの信頼性を向上させることも重要であろう。すなわち、リスク評価技術の普及にあたっては、出口側の評価結果から入口側の方法論や基礎データに立ち返って、図9に図示するようなループ的な改善の継続を行うことが本研究開発の最も重要なプロセスといえる。すなわち、土壌汚染に起因するリスクを回避するためのシナリオを検討し、リスク評価の結果として許容できるレベルを超過する場合にはリスクの処理あるいは管理を実施する必要がある。また、リスク評価の実施に際しては、図9の下部に示すように適切な調査や分析による信頼性の高いデータの取得・蓄積が重要であり、このような重層のスパイラル構成に基づいてリスクの軽減とコストの低減が図られる。

GERAS は土壌や地下水の地圏環境を対象にしたリスク評価システムであるが、生態系や地球規模の環境問題に対しても拡張できる可能性がある。すでに、水生生物や地中微生物などの生態系に及ぼす有害金属元素の影響に関して基礎的な検討を進めており、多くの要素技術はそのまま適用できる。また、最近の火急の課題である二酸化炭素地中貯留や核廃棄物地層処分におけるリスク評価においても、同様の手続きや基礎データが活用できる可能性があり、具体的な検討を開始した段階である。

6.2 土壌・地下水汚染対策への貢献

本評価システムの活用によって得られる最大の効果は、科学的なリスク評価に基づく自主的な環境改善である。汚染状況や用地ごとの曝露とリスクを把握し、対策の前後でリスクの大きさを比較できることは効果的なリスク管理を行う上で意義が大きい。例えば、曝露経路ごとのリスクを知ることができるので、主要な曝露の回避や曝露経路の遮断といった具体的なリスクの低減措置に反映できる。これらの曝露やリスクの基本情報は、これまでの一律の環境基準を与える規制に比べて、対策コストの削減にも大きく寄与する。

図10は、本評価システムの導入によるリスク軽減とコスト削減の予測結果を示したものである。今後、産業界を中心としてリスクベースの取り組みが普及していくことが予想され、2025年までに50%以上のリスク軽減とコスト削減が期待される^[20]。本研究で開発したリスク評価技術の効

果として、システムの普及および法制度への適用によるコストの軽減が期待できる。また、曝露経路の遮断やコントロールによるリスクの軽減、さらには微生物活用などの新浄化手法の普及によるリスクの軽減も期待できる。すでに産業界の自主管理に本評価システムが広く活用されており、環境改善を実現すると同時に経済的な（すなわちコスト／ベネフィットを考慮した）土壌汚染対策が可能となり、環境と経済の両面からの社会貢献が大きい。

一方、リスクコミュニケーションの観点からは、本評価システムの導入により透明性の高い情報伝達と意思決定に寄与できると考えられる。実際に受ける曝露とリスクの大小、対策の前後のリスクの軽減効果、対策コストとリスク軽減の費用対効果などを明らかにすることにより、合理的かつ科学的なリスク管理が可能になる。さらに、リスク評価により未利用産業用地（ブラウンフィールド）の円滑な活用に向けての指針を得ることも大きな利点である。

6.3 社会システムの構築に向けての展望

研究レベルで開発したリスク評価技術を実社会に適用できるように確立するには、いくつかの克服すべき課題がある。その1つが、技術の信頼性および透明性であろう。本評価システムの開発では、開発者と使用者の間で双方向のコミュニケーションを行うことにより、産業や社会への円滑な適用を図った。また、環境マネジメントシステム EMS など具体的な社会システムに組み込むことも普及の重要な契機となる。環境マネジメントシステムの中には、事業所などが自主対策を行う際のサイトアセスメントの手法と手続きが示されている。これまでにわが国では統一的なリスク評価手法がなかったことから、筆者らが開発した GERAS を活用することにより汚染評価や浄化対策などの自主管理が行われている^[21]。（財）産業環境管理協会が運営している土

壌汚染評価者の認定制度「環境サイトアセッサー」において、ここで述べたリスク評価の方法論と評価システムが採用され、GERAS は産業環境管理の実務に広く活用されている^[22]。

現在、土壌汚染対策法の改正に向けた検討が行われている。2008年3月に環境省より提出された「土壌環境施策に関するあり方懇談会報告」^[23]の中で、今後の土壌汚染対策において、サイトごとの汚染状況に応じた合理的かつ適切な対策の実施、法制度と自主対策の関係のあり方に関して一定の考え方が提示された。すなわち、土地用途ごとのリスク管理の重要性が指摘され、法改正に向けて大きな転換時期となっている。これらの検討の基礎となったのが、筆者らの提案したリスク評価手法およびガバナンスの考え方である。サイトごとのリスクを適切に評価し、そのリスクを合理的に管理していくことの重要性が社会的にも認知され、リスク評価手法が社会システムに導入されようとしている。

海外では、2008年4月に開催されたドイツ・ハノーバーメッセに GERAS を出展したところ、欧州の産業界や研究者から大きな反響があった。米国で開発された RBCA システム^[24]と比較して、ユーザー指向のシステム開発、データ類のフィードバックによる逆解析の実現、土壌や地下水データの豊富さなどに優位性があり^[25]、欧米の研究機関などからも多数の問い合わせが届いている。今後、さらにシステムの改良と機能追加を行い、国内のみならず世界に向けての研究成果の発信と普及に努めていきたい。

7 結論

土壌・地下水汚染のリスク評価技術を開発するため、様々な研究分野の要素技術を統合して、統一的な方法論およびデータベースの構築に基づいてリスク評価システムとして完成させた。この研究開発では、土壌汚染対策におけるリスクベースの対応やガバナンスなどの新たな方法論を導入し、要素技術の最適な選択と統合、リスク評価の実践におけるスパイラル構成などの特徴的な研究開発を行った。その結果、わが国初の土壌・地下水汚染のリスク評価システムを開発し、数多くの事業所や自治体などに普及・導入させることができた。本評価システムは、環境マネジメントシステムや法制度への組み込みが予定されており、本格的なリスク管理施策の確立に向けての社会的な貢献は大きい。また、諸外国における同様の評価システムに対する優位性も高く、今後世界に向けての成果発信を行う予定である。さらに、評価システムの運用に必要な土壌・地質関連の地圏環境情報の整備を進め、公共財としての活用を図っていく。

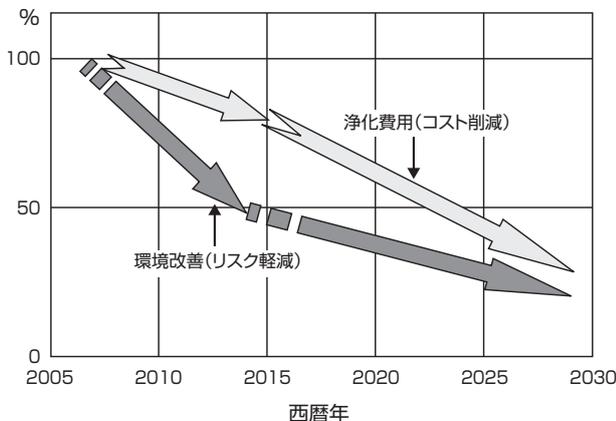


図 10 リスク管理施策によるリスク軽減とコスト削減の推算^[20]
GERAS 等を活用したリスク管理施策の導入により改善されるリスク軽減とコスト削減の年度展開を予測したものである。2025 年までに、リスク軽減とコスト削減のいずれも 50 % 以上の効果が期待できる^[20]。

用語説明

- 用語1：第2種基礎研究：本格研究における研究の1つで、複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究。本号の裏表紙にある定義を参照のこと。
- 用語2：製品化研究：本格研究における研究の1つで、第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。本号の裏表紙にある定義を参照のこと。
- 用語3：エンドポイント：リスクを評価する場合に、評価対象の状態のこと。人の健康リスクの評価では、例えば経気道摂取による発ガン、経口摂取による腎臓疾患のような具体的な対象を意味する。

キーワード

土壌汚染、地下水汚染、リスク評価システム、リスク管理

参考文献

- [1] 環境省土壌環境課：平成17年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果(2007)。
- [2] 松下和夫：環境ガバナンス論，京都大学学術出版会，(2007)。
- [3] 中央環境審議会土壌農薬部会：サイトごとの汚染状況に応じた合理的かつ適切な対策の促進方策(2008)。
- [4] 経済産業省：事業者の土壌汚染対策等実態調査報告書(2008)。
- [5] 駒井武：土壌汚染対策の課題と環境地質学の役割，*地学雑誌*，116，853-863(2007)。
- [6] 土壌環境センター：海外アセスメントの検討 ISO-10381-5報告書，J03-06-01(2005)。
- [7] 平川秀幸：リスクガバナンス/科学技術ガバナンスと予防原則，*第7回公共哲学研究会+科学技術社会論合同研究会資料*(2003)。
- [8] 駒井武：土壌汚染対策とリスク管理手法の提案，*新政策*，19，21-30(2004)。
- [9] 川辺能成：地圏環境評価システムGERAS-1&2(重金属、有機化合物) ver.1.2，産業技術総合研究所ソフトウェア(2006)。
- [10] T. Shoji and T. Komai: Responsibility sharing and explicit and implicit indication of risks caused by interaction among pollutants, *Geoinformatica*, 17, 219-221(2007)。
- [11] J. Hara: The effect of solubility and mobility of harmful metals in subsurface soils on human health risk, *Proceedings of International Symposium on Aqua Science, Water Resource and Innovation Development*(2007)。
- [12] 光畑裕司，横田俊之ほか：油分土壌汚染調査における物理探査法およびダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測の適用研究，*日本地下水学会秋季講演会予稿集*(2007)。
- [13] 坂本靖英：鉍物油に起因する土壌汚染のリスク評価を目的とした油-水混相流動挙動，*資源・素材学会春季大会講演集*(2008)。
- [14] Y. Kawabe: Natural attenuation pattern of chlorinated solvent at Yamagata site in Japan, *Proceedings of Water Resources Management*(2007)。
- [15] 原淳子：表層土壌評価基本図～宮城県地域～，E-3，産業技術総合研究所(2007)。
- [16] 狩野真吾ほか：地圏環境インフォマティクスのデータベース構築とその応用例，*資源と素材*，157，148-153(2008)。
- [17] 松永烈ほか：産業技術総合研究所における土壌汚染に関わる分野融合研究の成果，*地質ニュース*，23，6-13(2006)。
- [18] 川辺能成：地圏環境評価システムGERASの開発と土壌汚染問題への適用，*地質ニュース*，23，35-42(2006)。
- [19] 川辺能成：GERAS-英語版の出版，産業技術総合研究所ソフトウェア(2007)。
- [20] 保高徹生：土壌汚染の社会・経済影響の定量化とその解決方法に関する研究，*横浜国立大学博士論文*(2007)。
- [21] 産業環境管理協会：*サイトアセスメント実務と法規*，丸善(2003)。
- [22] 産業環境管理協会：*環境サイトアセッサー*，丸善(2007)。
- [23] 環境省：*土壌環境施策に関するあり方懇談会報告書*(2008)。
- [24] 住友海上リスク総合研究所：RBCA リスク評価に基づく修復措置のための標準ガイド，E-1739-95(2001)。
- [25] 土壌環境センター：*リスク評価適用性検討事業報告書*，リスク評価のわが国における活用に向けて，J06-06-01(2008)。

(受付日 2008.7.23, 改訂受理日 2008.10.6)

執筆者略歴

駒井 武 (こまい たけし)

1979年東北大学工学部資源工学科卒業、1997年より資源環境技術総合研究所安全工学部化学物質安全研究室長。2004年より産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門研究グループ長、後に同部門副研究部門長。2007年より東北大学大学院環境科学研究科連携講座教授を兼任。産業保安や安全工学に関わる研究開発を実施し、1995年に資源・素材学会論文賞、2001年に日本エネルギー学会論文賞を受賞。最近では、土壌・地下水汚染のリスク評価技術や環境リスク管理の研究開発に従事している。本論文では、リスク評価手法開発の総括、土壌・地質学的な研究を担当した。

川辺 能成 (かわべ よししげ)

1997年東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。秋田県立大学システム科学技術学部流動研究員、産業技術総合研究所特別研究員を経て、2004年より産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門に勤務。地圏環境におけるリスク管理および汚染修復に関する研究に従事している。資源素材学会、日本水環境学会、日本生物工学会、各会員。本論文では、リスク評価システムの開発および物性データ取得の研究を担当した。

原 淳子 (はら じゅんこ)

2003年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了、2005年4月産業技術総合研究所入所。現在、地圏資源環境研究部門地圏環境評価研究グループに所属。これまで地下における水-岩石相互反応機構の評価および土壌・地下水汚染に関する研究に携わっている。本論文では、土壌パラメータ解析および地圏環境情報の整備の研究を担当した。

坂本 靖英 (さかもと やすひで)

2002年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了。産業技術総合研究所特別研究員(PD)を経て、2004年4月より地圏資源環境研究部門に勤務。2006年に資源・素材学会論文賞を受賞。これまで、汚染物質の土壌・地下水環境における移動現象を対象とした実験ならびに数値モデル化の研究開発に従事している。本論文では、数値解析手法および移動パラメータの取得の研究を担当した。

杉田 創 (すぎた はじめ)

1998年10月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程満了、同年10月工学博士取得。1999年1月資源環境技術総合研究所(現・

産業技術総合研究所) 科学技術特別研究員、2001年4月産業技術総合研究所入所。シリカの重合技術・析出メカニズムや土壌汚染評価等の研究に携わっている。本論文では、土壌の吸着および溶出特性の研究を担当した。

査読者との議論

議論1 本研究の第2種基礎研究、製品化研究としての意義について 質問・コメント(小野 晃)

本研究は、さまざまな要素が複合的に絡んでいる環境やリスクに関する課題を、第2種基礎研究の構成的アプローチによって解決した優れたものと思います。また社会で直接使うことができる評価システムにまで仕上げたことは、製品化研究としての意義も大きいと思います。

質問・コメント富樫 茂子

全体として、構成学を意識した仕上がりになっており、アウトカムを強く意識した研究戦略のシナリオが明確に示されており、構成学としての試みの良い例を提供していると評価できます。将来への展望も記述されています。

議論2 曝露、リスク、毒性の関係について

質問・コメント(小野 晃)

本文中に「曝露」、「リスク」、「毒性」という用語が出てきますが、それぞれの意味と相互の関係はどのようなものでしょうか。

また、どのような経路で人は土壌を摂取したり吸入したりするのでしょうか。本文中に「土壌の直接摂取」と「土壌の直接吸入」が出てきますが、人が土壌を「食べる」、ないしは「吸う」という行為が実際にどのような状況と経路で起こるのでしょうか。またその量はリスクの観点から無視しえないほど大きなものになるのでしょうか。

回答(駒井 武)

本文の第3図に概念を示しました。環境を経由して人が有害化学物質を摂取することを「曝露」と呼びます。その結果、健康障害や悪い影響を与えるのですが、その確率および影響の大きさのことを「リスク」と言います。「リスク」は、「曝露」の量と「毒性」の値から算定されます。発ガン性のある化学物質の場合では、「リスク」の大きさは、「曝露」の量と「毒性」の値の積として求めることができます。

「土壌の直接摂取」とは、有害化学物質を含む土壌が手や皮膚に触れることにより取り込むことを言います。主として子供の時期に、砂遊びなどにより土壌に直接触れ、摂取する量が多いとされています。ダイオキシン類の土壌環境基準を検討した環境省のデータによると、子供の時期の平均摂取量は200 mg/日とされています。また、「土壌の直接吸入」は農作業や庭の手入れなどにおいて、粒子状の土壌を摂取することを言います。重金属の汚染土壌におけるリスク評価の算定では、汚染土壌からの全摂取量のうち、「土壌の直接摂取」は約50%、「土壌の直接吸入」は約5%であり、相当な割合を占めていることが分かります。

議論3 統一的な指標(あるいは共通の尺度)として採用したものについて

質問・コメント(小野 晃)

3章に「統一的な指標」ないしは「共通の尺度」が論じられています。異なる複数の技術領域から要素技術を抽出して、それらを統合・構成する第2種基礎研究の場合、統一的な指標あるいは共通の尺度をあらかじめ設定することが重要なポイントだと思います。

本研究で、統一的な指標(あるいは共通の尺度)は具体的にどのようなものでしょうか。またそれを設定するときの考え方や背景も合わせてご説明下さい。

回答(駒井 武)

これまでに環境施策において採用されている指標は、主として環

境基準(人の健康を守る上で維持することが望ましい値)です。しかし、土壌や地下水のような媒体では、汚染があったとしても十分に管理された状況では、必ずしも人への健康影響がないケースもあり得ます。そこで、より現実的な環境や人の状況に応じた「統一的な指標」として、本研究では「環境リスク」を採用しました。「曝露」の量や分布は、土地の状況、表層土壌や地下水の状況、人の生活形態などによって大きく変わります。また、本研究で採用した「共通の尺度」は、有害化学物質の曝露に基づく健康影響です。「曝露」の量を正しく評価する手法は、健康や環境への影響を判断する上で普遍的な尺度と考えられます。

議論4 リスク評価の信頼性について

質問・コメント(小野 晃)

6.1節で述べられていますように、本研究で開発した手法(方法論)やデータベースに基づいてリスク評価を行った場合、その評価結果がどの程度の信頼性を持っているかは、この評価システムを利用するユーザーにとって関心事だと思います。リスク評価の結果には常に不確かさがつきまとうと思いますが、不確かさの主要な要因にはどのようなものがあると考えておられますか。評価手法とデータベースのそれぞれについてお答えいただければと思います。

また、5.3節で述べられたヒ素とトリクロロエチレンの評価事例では、最終結果の不確かさは何%くらいになると見積もられますか。およびその値で結構ですのでお答え願えればと思います。

回答(駒井 武)

リスク評価における評価結果の信頼性はきわめて重要であり、これを高めるためには曝露モデルの精緻化と使用するデータベースの質・量を高めていくことが必要です。本研究では、産業技術総合研究所が独自で開発したリスク評価の方法論とデータベースをもとに、多数の専門家の検証を受けており、十分な信頼性を有する手法と考えています。また、ユーザーが評価した結果も評価システムにフィードバックして、信頼性を高める工夫もしています。リスク評価の不確かさは、データのもつ不確か性(知識の欠如に由来する)と変動性(固有の多様性)に依存します。本評価では、主に土壌と地下水のパラメータが不確か性の要因になります。地質の調査を十分に実施することにより、パラメータの不確か性を低減させることが可能です。また、本評価では変動性の要因は考慮していませんので、ヒ素およびトリクロロエチレンの評価事例では、最終評価結果の不確かさは5%未満であると推定されます。

議論5 本評価システムの生態系への拡張について

質問・コメント(小野 晃)

6.1節で述べられていますように、本評価システムは土壌と地下水の汚染以外にも適用範囲を拡張することが可能なように思えます。生物を含む生態系へこの評価システムを拡張する場合には、新たにどのような課題を解決しなければならぬと考えますか。

回答(駒井 武)

曝露・リスク評価の方法論は、土壌や地下水の汚染問題だけでなく、水質や大気質、さらには生態系のようなグローバルな環境問題にも適用可能な汎用性の高いものです。例えば、植物や水生生物への環境影響といった多様な課題にも適用範囲を拡大することを考えています。このためには、生物への有害化学物質の取り込みのメカニズム、生物の多様性に対する応答(エンドポイント)などを明らかにし、評価システムに反映させていくことが必要です。また、河川や海洋における化学物質の移動や反応などを含む曝露評価モデルの開発も重要な課題となりますので、産業技術総合研究所内で開発が進められている様々な曝露評価モデルとのリンクを考えています。

議論6 構成学的な特徴(図2)と関連する学術分野と検討項目(表1)について

質問・コメント（富樫 茂子）

図2は構成学の試みとして良い図だと思いますが、表1との関係を明確にさせていただいたほうがよいのではないのでしょうか。

回答（駒井 武）

図2に示した構成学的な特徴をより分かりやすく表現できるようにし、様々な学術分野の融合とそれぞれの役割を明記しました。また、図2と表1の関係を明確にできるように、表1のカラムを増やして学術分野と研究目的の関係を示しました。また、図2中に学術分野と研究目的の関わりを分かりやすく記載しました。

議論7 リスク管理とリスク評価との関係と全体のスパイラル構造について

質問・コメント（富樫 茂子）

リスク管理という言葉とリスク評価ということばの定義と関係が明瞭にされないまま議論がされているように思います。また、図9において、全体のスパイラル構造をうまく表現する必要があると思います。

回答（駒井 武）

リスク管理とリスク評価の言葉の関係があいまいというご指摘ですが、一部で関連が不明確なところがありましたので、修正しました。全体の構成が複雑で分かりにくいところがありましたので、図中の表現を簡素化して、本文中に構成の意味する解説を加筆しました。

図9の上部の図は継続的なリスク管理のあり方をループ構造として示したものです。また、下の図はリスク評価のプロセスとしてスパイラル構成の考え方を示したものであり、各プロセス内で多層の構成になっています。全体のスパイラル構造が分かるように図を簡素化しました。

光触媒技術の開発と応用展開

—— 持続可能な環境浄化技術の産業化 ——

埤田 博史

光触媒は光の照射によって難分解性の有害有機化学物質を水や二酸化炭素などに分解・無害化し環境を浄化することができる。実際の用途や経済性、法規制などを考慮しながら高性能光触媒の開発を行い、それを用いて環境分野へのさまざまな応用展開を行った。その結果、現在さまざまな製品が市場に出ている。

1 光触媒技術開発の背景

近年、焼却場で発生するダイオキシンや船底塗料に使用されている有機スズ化合物、PCB、農薬、溶剤、洗浄剤などさまざまな有害化学物質による環境汚染が地球規模で進行しており、人類の生存を脅かす深刻な問題となっている。これらの有害化学物質の中には ppb 程度の極めて低い濃度でも有害なものもあり、水や大気、土壌などを地球規模で汚染しているため、処理が大変困難である。

従来、環境汚染物質の処理は捕集して濃縮し、焼却するという熱分解による方法で行われてきた。しかし、この方法で環境を浄化しようとすれば、汚染が広範囲に広がっているため、膨大な量の水や大気、土壌を処理しなければならず、そのためには、化石燃料などの大量のエネルギーが必要となり、その使用に伴って多量の二酸化炭素が発生し、さらに焼却処理に伴いダイオキシンなどの有害物質を生成する恐れがある。したがって、従来の技術で環境中に低濃度で広範囲に広がっている環境汚染物質を除去しようとすれば、エネルギー危機と地球温暖化とさらなる環境汚染を招くことになる。

これまで環境汚染の計測技術や分析技術は進歩して環境汚染の実態が明らかになってきているが、地球規模で環境汚染を修復・浄化する技術の開発は遅々として進んでいなかった。そのため、化石燃料や有害な化学薬品を使用しないで環境を浄化することができる持続可能な環境浄化技術が切望されていた。

こうした持続可能な環境浄化技術の開発は、これまで多量の環境汚染物質を排出してきた先進国の責務であり、科学技術立国を標榜している日本で開発すべき産業技術であ

る。そして、その開発及び実用化と製品の普及によりわが国の産業の発展に貢献するとともに、世界の環境改善に貢献することができる。

光触媒は光の照射により、有害有機化学物質を二酸化炭素や水などに分解・無害化することができる。そのため、本開発の光触媒技術を使用すれば、化石燃料や有害な化学薬品を使用しないで地球環境を浄化することができ、水処理、脱臭、VOC 処理、大気浄化、防汚、防曇、抗菌防かび、鮮度保持、ダイオキシン処理など、環境分野における幅広い応用を行うことができる。

このように光触媒はさまざまな環境汚染に対応でき、地球環境浄化の有力な手段であるが、実際の使用を考えた場合、反応速度が遅いことや取り扱いにくく繊維やプラスチックへの適用が難しいなどの技術的課題や、経済性、信頼性の問題など、解決すべき多くの問題点があった。

2 光触媒技術開発の目的と目標

光触媒は光を吸収してエネルギーの高い状態となり、そのエネルギーを反応物質に与えて化学反応を起こさせる物質のことである。光触媒として用いられるのは半導体や金属錯体などであるが、その中で最もよく使用されているのが酸化チタンである。酸化チタンは顔料として広く使用されており、歯磨き粉や化粧品にも使われ、食品添加物としても認められている安全無毒で安価で耐久性に優れた物質である。

この酸化チタンに光を当てると、図 1 に示すように、太陽電池に使われているシリコンなどと同様、マイナスの電荷を持った電子とプラスの電荷を持った正孔が生成する。この

電子と正孔は非常に強い還元力、酸化力を持っており、水と溶存酸素などとの反応により、OH ラジカルやスーパーオキシドアニオン (O_2^-) などの活性酸素を生じる。この正孔や OH ラジカルは特に酸化力が強く、有機物を構成する分子中の炭素-炭素結合、炭素-水素結合、炭素-窒素結合、炭素-酸素結合、酸素-水素結合、窒素-水素結合の結合エネルギーは、それぞれ 83 kcal/mol、99 kcal/mol、73 kcal/mol、84 kcal/mol、111 kcal/mol、93 kcal/mol であるのに対し、正孔や OH ラジカルのエネルギーは 120 kcal/mol 相当以上とはるかに大きいため、これらの結合を簡単に切断して分解することができる。

この作用により、水中に溶け込んでいる種々の有害な化学物質や悪臭物質のような空気中の化学物質など、さまざまな有害有機物質を光の照射によって、簡単に分解・無害化することができる。しかも、有毒な薬品や化石燃料などを使用せずに、クリーンで無尽蔵の太陽光を利用して、拡散した環境汚染物質を安全にかつ効率良く半永久的に処理でき、環境分野の幅広い応用が可能であるなど、数多くの利点を持っている。

本研究では、水処理や空気浄化、抗菌防かび、防汚などの実際の使用・用途に応じた低コストで高性能の光触媒の開発を行うとともに、それを用いて環境分野へのさまざまな応用展開と実用化を行い、光触媒製品の普及を通して地球環境浄化を目指そうとするものである。

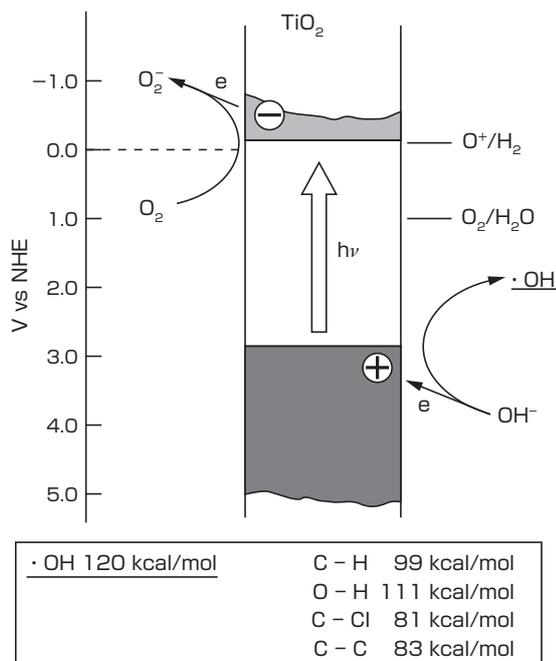


図1 酸化チタンのエネルギー準位と光触媒反応
V = 電位、NHE = 標準水素電極。V vs NHE は標準水素電極に対する電位、つまり、標準水素電極を基準に用いたときの電位。hv = 光のエネルギー。

3 目標実現に向けた研究シナリオ

新技術の産業化を実現するためには、超えなければならぬ死の谷があるといわれている。これまで、死の谷は技術的な面のみ、つまり、技術的なブレークスルーのみが強調されてきたが、実際にはそれだけでなく経済的な面と社会的な面も存在する。

すなわち、実用化を実現するためには、性能向上などの技術的な死の谷だけでなく、同じ用途の既存技術と比べてときのコストパフォーマンスの改善などの経済的な死の谷と、実際に消費者に使用され受容されるための信頼性や安全性の確保などの社会的な死の谷が存在すると考えられる。

そのため、光触媒技術を実用化し、製品化・産業化するためには、この技術的な死の谷と経済的な死の谷と社会的な死の谷という3つの死の谷を超える必要があると考えた。

3.1 技術的な死の谷

光触媒反応は元々、白色顔料である酸化チタンなどを含んだ塗料に太陽光を当てておくと塗料がぼろぼろになっていく塗料の劣化などとして第二次世界大戦以前から知られており、長い間やっかいもの扱いであった。そのため、酸化チタンなどを製造している顔料メーカーはこの光触媒反応を抑えるため、光触媒反応を起こさないセラミックスで酸化チタンなどの顔料の表面を被覆するなどの劣化防止の研究に力を注いできた。

ところが、この光触媒反応を逆に環境の浄化や有用物質の合成に積極的に利用しようという研究が1950年代に京都工芸繊維大学の増尾富士雄・加藤真市らによって行われた^{[1]-[3]}。この光触媒を用いた有害有機化学物質の分解・無害化の研究はその後、世界中で行われ、これまでに炭化水素や、有機塩素化合物、農薬、合成洗剤など、さまざまな環境汚染物質に対して実験が行われ、分解・無害化が可能なが報告されてきた。

しかし、これらの実験では光触媒として微粉末のものが用いられており、水処理において処理後の水と触媒の分離が困難なことや、脱臭処理の場合に粉末の空中への飛散が起こるなど取扱いが難しく、バッチ処理しかできないなどの欠点があり、実用化が進んでいなかった。そのため、光触媒の実用化を進めるためには光触媒を基材に固定化することが必要不可欠であった。

また、光触媒は対象物質が表面に来なければ分解することができないという制約があり、さらに光触媒の反応速度はかなり遅く、高濃度の汚染物質の除去や短時間で処理することが難しいなどの問題があった。加えて、光触媒を繊維やプラスチックに付着させて使用すると光触媒作用でそれらが分解されてしまうため、繊維やプラスチックへの適用が不可能であった。そして、光触媒は環境分野へのさ

さまざまな応用が可能であるが、用途に応じてそれに適合した形態（例えば、防汚では表面が平滑な方が良く、脱臭などでは表面がでこぼこで表面積が大きなものの方が良い）があり、実用化・製品化を行うためには実際の使用に即した光触媒を開発する必要があった。

このように、実際の使用に対して有効な光触媒及び光触媒製品の開発が技術的な死の谷となっていた。

3.2 経済的な死の谷

光触媒技術は上記のように適用範囲が広いが、それぞれの用途において既存技術がある場合には、既存技術と比較した場合のコストパフォーマンスが問題となる。

チタンは地殻中に9番目に多い元素であり、その酸化物の酸化チタンは顔料などとして使われており、資源的に豊富で安価であるが、光触媒として使われている酸化チタンは一般的にナノサイズの超微粒子で、粒子の大きな顔料の酸化チタンと比べると10倍ほど高価である。また、夜間の使用や装置化の場合には人工光源を用いる必要がある。新技術である光触媒技術を実用化するためには、既存技術よりも安くあるいはそれに近くなるように低コスト化することや、既存技術にない利点を持たせることが必要である。さらに、光触媒技術を普及させるためには、土木の現場などで大量に使用できるようにする必要がある。

そのための既存技術に取って代わるようなコストパフォーマンスを持った光触媒及び光触媒製品の開発や大量かつ安価に提供できる光触媒及び光触媒製品の開発が経済的な死の谷となっていた。

3.3 社会的な死の谷

どんなに優れた技術を開発しても、社会で使われなければ意味がない。光触媒を用いた製品は、例えば、セルフクリーニング効果について目に見える形で効果が分かるようになるためには施工後、数ヶ月かかるなど、その効果が直ぐには分かりにくいという特徴を持っている。そのため、まがい物や偽物が出やすく、消費者の信頼を得られにくいという問題があった。また、光触媒の性能を評価するための信頼性のある統一した試験法がないため、光触媒の性能の比較ができず、高性能光触媒の開発の障害となっていた。そのため、光触媒の性能評価試験法の標準化や光触媒技術の啓蒙が必要であった。その際、光触媒は用途によって性能が異なるため、用途別の性能評価試験法を開発する必要があった。光触媒性能評価試験法は高性能光触媒を開発する上でも「ものさし」として必要不可欠である。

このように消費者の信頼を得て社会に受け入れられるようにすることと、さらに、光触媒を製造・販売するためには安全性や、電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限に関する欧州議会及び理事会指令（RoHS）、廃

電気・電子製品指令（WEEE）などの環境規制、薬事法、公害関連法、特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律（PRTR法）などの法規制に適合しなければならないが、それが社会的な死の谷となっていた。

3.4 目標達成のためのシナリオ

開発した光触媒技術が社会で使われるようにするためには、上に挙げた3つの死の谷を越える必要があると考えた。そのために以下のシナリオを考えた。

まず、技術的な死の谷であるが、一般的に技術開発は第1種基礎研究から第2種基礎研究を経て開発・実用化へと直線的に進んで行くというふう考えられている。しかしながら、光触媒技術の場合、研究を始めた25年ほど前には第1種基礎研究の成果というものがほとんどなかった。

光触媒の原理としては本多-藤嶋効果が非常に有名であるが、これは実際には酸化チタンの光電極反応による水の分解であり、光触媒を用いて行ったものではなかった。また、光触媒のメカニズムについても光の照射により電子と正孔が生成して光触媒反応を起こすということ以外、ほとんど分かっていなかった。そして、光触媒の性能を上げ、反応速度を上げるための方法としては、電子と正孔の再結合による消滅を防ぐということが知られていただけで、実際にどうすればよいのかが分かっていなかった。

そこで、実際の使用を念頭に置きながら、用途に応じた高性能光触媒の開発を試行錯誤で行わざるを得なかった。つまり、酸化チタンをベースにしてそれを高性能光触媒にするためには何を添加すればよいのか、試行錯誤で探し出すことにした。そして、その添加要素の発見により用途に応じた高性能の光触媒を開発し、その用途への応用を行い、その結果をフィードバックしてさらに高性能の光触媒の開発を進め、それを用いてさらに新しい応用展開を図ることにした。

その際、光触媒の研究開発は学際研究であり、光触媒技術の開発を迅速かつ効率的に行うためには、さまざまな分野の専門家や優れた技術を持った技術者や企業との連携が必要であり、その参入を促すとともに、連携して研究開発を戦略的に進めることにした。

次に経済的な死の谷については、安価かつ安全で大量供給可能な酸化チタンをベースに、産業廃棄物を基材に利用して低コストの光触媒や光触媒製品を開発するとともに、既存技術にはない利点を持った応用展開を進めることにした。これにより、産業廃棄物から環境浄化材料を作製することができて産業廃棄物のリサイクルにも貢献することができるとともに、これまでになく応用展開が可能となる。

さらに、社会的な死の谷については、光触媒に関する研

究会や業界団体を組織し、高性能光触媒の開発に不可欠な光触媒性能評価試験法の標準化を行うとともに、展示会の開催・出展、講演会の開催などを通じて社会への光触媒技術の啓蒙を組織的に進めることにした。そして、安全性や、RoHS、WEEEなどの環境規制、薬事法、公害関連法、PRTR法などの法規制を考慮して光触媒の開発を進めることにした。

これらの戦略により、技術的な死の谷と経済的な死の谷と社会的な死の谷という3つの死の谷を超えることを意図した。

4 光触媒の実用化に向けた研究開発等の実行

4.1 高機能光触媒の開発と応用

実際に行ってきた研究開発と応用について時系列に沿って述べる。

4.1.1 酸化チタン透明薄膜光触媒の開発^[4]

光触媒は光が当たるとともに対象物質が接触して来なければ分解できないという制約があり、光触媒反応は表面で反応が起こるため、表面積が大きいほど、効率が向上する。そこで、粒子径が小さくて表面積の大きな超微粒子の高活性化チタン光触媒が開発されてきた。しかし、粉末の光触媒は風で飛ばされたりして取り扱いや回収の難しさなどの欠点があり、実用化を進めるためには酸化チタン光触媒を基材に固定化することが必要不可欠であるため、これまでいろいろな方法が試みられてきた。

酸化チタンの粉末を有機バインダーに混ぜて固定化する方法では、光触媒作用によって接着剤の有機物が分解されてしまうため、酸化チタン粉末がしだいに脱落してしまい、耐久性に問題があった。また、セメントなどの無機のバインダーや釉薬に酸化チタンの粉末を混ぜるという方法では、酸化チタンがその中に埋もれて光が当たらなくなり、対象の化学物質が酸化チタンに接触しにくくなってしまったため、光触媒性能の低いものしかできないという問題があっ

た。また、CVDやPVD、スパッタリングなどの方法もあるが、真空容器が必要で大表面積のものを作製しにくく、多量のエネルギーを必要とするなどの問題があった。

そこで、低コストで簡単に行えるゾルーゲル法を用いて、基材に固定化した酸化チタンのみから成る膜状の光触媒を開発した(写真1)。チタンのアルコキシドからチタニアゾルをつくり、ディップコーティング法によってガラス基板の上にコーティングした後、乾燥、焼成し、これを繰り返すことにより、透明で耐久性に優れた高性能の酸化チタン薄膜光触媒を作製することができた。

この酸化チタン固定化光触媒は、表面が全て酸化チタン光触媒となっているため、接触してくる化学物質を効率良く分解することができる。そして、透明なガラス基板の上にこの酸化チタン薄膜光触媒を固定化した場合には、基板を透過してくる光を利用することができ、水処理などを連続的にかつメンテナンスフリーで行うことができる。しかも、抗菌作用や超親水性も有している。

この透明で耐久性に優れた高性能の酸化チタン薄膜光触媒を作製するためには基板の上にチタニアゾルを薄く均一にコーティングすることが必要である。刷毛塗りでは刷毛目が付いて薄いところと厚いところができ、白濁した膜になってしまうため、ディップコーティング法を用いた。しかし、ディップコーティングの際、引き上げ速度が速すぎると膜が厚くなって白濁したろい膜になってしまい、引き上げが滑らかでないと膜厚が不均一となって焼成の際に歪みが掛かって剥離してしまうため、ゆっくりと滑らかに引き上げることが必要であった。市販品でそのようなディップコーティング装置がなかったため、愛知県の企業とその装置を共同開発することにより、酸化チタン透明薄膜光触媒の作製に成功した。

この酸化チタン透明薄膜光触媒の応用についてさらに検討を行い、水を浄化する光触媒ガラスウェアや光触媒ペレット、汚れがつきにくく脱臭抗菌機能を持つ光触媒蛍光灯



写真1 酸化チタン透明薄膜をコートした光触媒機能性ガラスウェア



写真2 光触媒シリカゲル（右、左：シリカゲル）とダイオキシン分解装置

などを開発した。

4.1.2 酸化チタン透明多孔質光触媒の開発

光触媒は表面反応であるため、光触媒を吸着剤のように表面積の大きな多孔体に固定化すると、対象物質を吸着によって吸い寄せ、それを光触媒で効率良く分解することができる。しかし、通常の多孔体は光を透過しないため、光触媒が多孔体の陰にあると反応が起こらないという欠点があった。そこで光触媒の性能を上げるため、安価で透明で多孔質のシリカゲルを基材に用いることを考え、それに酸化チタン透明薄膜光触媒をコートした光触媒を開発した。

この光触媒シリカゲルはシリカゲル内部の細孔の表面にも酸化チタン膜がコートされており、450 m²/gもの比表面積を持ち、光が細孔内まで透過するため、悪臭の分解や水処理を効果的に行うことができ、しかも吸着された有害化学物質は二酸化炭素などに安全に分解される。そのため、この多孔質光触媒は自己再生型の吸着剤ということもできる。

この光触媒シリカゲルは企業によって特許実施され製品化されており、それを用いて産業廃棄物の焼却炉から排出される排ガス中あるいは廃水中のダイオキシン類を99%以上と効率良く分解・除去できる排ガス浄化装置や水処理装置を開発した(写真2)^{[5][6]}。そして、これを用いた着色廃水脱色システムや光触媒し尿処理システムなども開発した^[7]。

さらに、多孔質のコンクリートブロックの表面に光触媒を付けた光触媒透水ブロックを開発した^[8](写真3)。これは抗菌防かび作用と防汚作用を持つだけでなく、大気中のNO_xやSO_xを吸着・分解除去し、雨水を保水してその蒸発により表面温度が低下するため、ヒートアイランド対策の効果も有する。これは低コスト化のため、基材に石炭灰などの廃棄物を利用しており、吸音ブロックとして防音壁などに施工され、排ガス浄化やヒートアイランド対策として駐車場にも施工されてきている。

4.1.3 繊維やプラスチックに使用可能な光触媒の開発^[9]

光触媒を繊維やプラスチックに練り込むと繊維やプラスチックが光触媒作用で分解されてしまうため、これまで繊維やプラスチックへの適用が不可能であった。そこで、そ

のような使用を可能とするため、光触媒活性を持たないセラミックスで酸化チタンの表面を部分的に被覆することを考え、マスクメロン型や金平糖型の酸化チタン光触媒粒子を開発した(図2)。

マスクメロン型の粒子は、酸化チタンの表面に光触媒活性を持たないシリカをマスクメロンのマスクのように被覆したもので、繊維やプラスチックに練り込んでも、表面にある光触媒作用を持たないシリカによって酸化チタンが繊維やプラスチックと接触せず、分解が抑えられる。この粒子は、酸化チタン粒子表面に均一な細孔を有するシリカの薄膜をコートすることによって調製されている。

また、金平糖型の粒子は酸化チタンの表面に光触媒活性を持たないアパタイトを金平糖の角のように付けて被覆したものである。アパタイトは骨や歯を構成している物質で生体親和性に優れている。この金平糖型の粒子は、カルシウムイオンやリン酸イオンなどを含む溶液に酸化チタン粒子を浸漬しておくことにより、省エネルギーで酸化チタンの表面に骨や歯ができるようにアパタイトが自然に生成して調製される。マスクメロン型の粒子と同様に繊維やプラスチックに練り込んでも、表面にある光触媒作用を持たないアパタイトが酸化チタンによる繊維やプラスチックの分解を防ぐ。しかも、アパタイトは菌やかびを吸着することができるため、酸化チタン光触媒で効率良く抗菌防かび効果を発揮できる。さらに生成したアパタイトはバラの花のような形をしており、表面積が大きいため、大きな脱臭効果を持っている。

どちらの酸化チタン光触媒粒子も企業によって特許実施されて製品化されている。また、それらを用いてカーテンやスーツ、学生服、靴下、マットレス、タオル、シーツ、シューズ、ぬいぐるみ、造花(写真4)、人工観葉植物、壁紙など、さまざまな繊維製品やプラスチック製品が国内外で製造販売されており、これにより光触媒の実用化が飛躍的に進んだ。

さらにこの金平糖型の酸化チタン光触媒粒子を活性炭に付けることにより、繰り返し使用できる機能性吸着剤を開発した。活性炭は有害化学物質や悪臭、VOCなどを吸着して環境を浄化することができるが、吸着して飽和すると



写真3 光触媒透水ブロックの表面の防汚効果 (右)

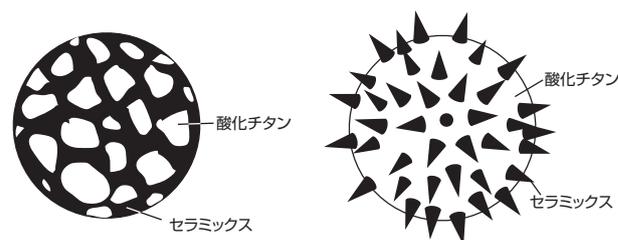


図2 マスクメロン型及び金平糖型酸化チタン光触媒粒子

うそれ以上吸着することができない。そこで、活性炭に光触媒を付けると、光がなくても活性炭が有害化学物質や悪臭、VOCなどを吸着し、光が当たれば光触媒がそれらを分解してくれるため、効率よく環境を浄化することができるが、活性炭も光触媒によって一酸化炭素や二酸化炭素などに酸化分解されてしまう。そこで、金平糖型の酸化チタン光触媒粒子を用いることにより分解を抑え、繰り返し使用できる機能性吸着剤を開発した。これは外観が青く美しい活性炭になっており、環境浄化機能を持った美しいインテリアとして使うこともできる(写真5)。

この機能性吸着剤を用いてさまざまな応用を進めており、温室の畝に敷設することによりトマトの無農薬栽培にも成功している^{[10][11]}。これは、機能性吸着剤を用いたことにより温室内の浮遊菌やかびの孢子などが減少し、病気やかびの発生が抑えられたためと考えられる。

4.1.4 光触媒と酸化剤との複合化^[12]

光触媒を用いて廃水処理を行うと、最初は反応速度が大きいが、だんだん遅くなり、ついには反応が止まってしまう。この原因を調べていくと、水中の有害物質を酸化分解するために溶存酸素が消費されてなくなるためであり、光触媒反応により有害物質を分解するには酸素が必要なことが分かった。そこで、光触媒反応が止まってしまうまいように、曝気して溶存酸素を増やすように工夫したが、これをさらに進めて、光触媒と酸化剤との複合化を行った。過酸化水素やオゾンなどの酸化剤を光触媒と一緒に用いると、溶存酸素がなくても光触媒反応によって酸化剤が活性酸素に効率よく変換され、酸化分解が加速される。

これを利用した応用を考え、歯を白くする歯牙漂白剤を開発した。これは酸化チタンと低濃度の過酸化水素を組

み合わせたもので、歯に塗って光を照射することにより、歯の汚れを分解して歯を白くすることができる。過酸化水素を組み合わせることにより、短時間での処理が可能になり、また、これまで歯のホワイトニングには劇薬が使用されていたが、これにより安全に処理できるようになった。この光触媒歯牙漂白剤を製品化する際、薬事法の壁があり、安全性データなどをそろえて厚生労働省の認可を得るのに3年間かかり、2006年の12月に市販された。

このように医薬品や医薬部外品、医療器具などを実用化するには薬事法などの社会的な死の谷があり、安全性などの基準に適合する必要がある。

この光触媒歯牙漂白剤をさらに発展させて屋外の外壁などを洗浄する光触媒洗浄剤を開発した。光触媒を外壁にコーティングすると防汚・セルフクリーニングなどの機能が得られるが、汚れた外壁の上に光触媒をコーティングすると、汚れが光触媒によって分解され、光触媒が剥離してくる。そのため、光触媒施工を行う際、下地の洗浄が非常に重要であるが、一般に行われている高压洗浄水を用いる方法では大量の水が必要で外壁を傷める場合もあり、簡単に行うことが難しい。そこで、光触媒と酸化剤を複合化した水溶液を開発し、外壁に塗布してしばらく置いた後、水を染み込ませたスポンジで洗ったところ、汚れをきれいに落とすことができた(写真6)。

この光触媒洗浄剤は、使用した後に、ごく少量の酸化チタンと無機イオンが残るだけであり、安全無害である。しかも、光触媒洗浄剤に30万個の鳥インフルエンザウィルスを混合した結果、30分後にはその99%が不活性化されるという鳥インフルエンザに対する優れた効果も得られ、さらに抗菌効果と同時に脱臭効果も得られおり、これを用いた脱臭抗菌装置・システムも開発した。現在、生ゴミ処理施設や介護施設などの脱臭抗菌などに使用され始めており、エビや魚の養殖場での病気の予防などへの応用も進んでいる。

この光触媒洗浄剤を多孔体に染み込ませて用いることに



写真4 金平糖型酸化チタン光触媒粒子を付けた光触媒環境浄化造花



写真5 インテリアとしても美しい光触媒機能性吸着剤

より、水処理への応用を行った。河川や海洋の水質浄化を行うためには、大量の浄化剤が必要となるため、そのコストが問題となる。愛知県は三州瓦の大生産地で年間約 38 万トンの瓦の廃棄物が排出されている。そこで、この瓦の廃棄物を浄化剤の基材に利用して低コストの光触媒水環境浄化剤を開発した。これは瓦を砕いてつくった安全無害なペレットに光触媒洗浄剤を染み込ませて乾燥することにより作製したもので、河川や海洋のヘドロに散布するとヘドロが分解されてきれいになる。この光触媒水環境浄化剤は 1 kg 当たり 100 円以下という低コストを実現しており、開発途上国などでの使用も期待される。

4.1.5 可視光光触媒や新規材料の開発

酸化チタン光触媒は上に述べたように多くの利点を持っているが、エネルギーの大きな紫外線を当てなければ働かないという制約がある。紫外線は太陽光には 3～4 %しか含まれず、蛍光灯にはわずしか含まれていない。したがって、室内用途で光触媒を効率良く利用するためには、可視光で働く光触媒の実用化が不可欠である。現在、可視光で働く光触媒として酸素欠陥型や窒素ドーピング型の酸化チタン光触媒やレアメタルなどを使用したものが開発されているが、高価なため、使用しにくかった。

そこで、酸化チタンと安価で安全無害な鉄を組み合わせることで、低コストの可視光光触媒を開発した^[13]。これはこれまでの可視光光触媒の 3 分の 1 以下と低コストであり、今後、室内用途を中心に、利用が大きく伸びると期待される。

また、光触媒は抗菌防かびや鮮度保持などの応用が可能であるが、脱酸素機能を持たせると、さらに鮮度保持や品質保持の機能を向上させることができる。そこで、酸素欠陥型の酸化チタン光触媒をさらに進めて、酸化チタンから酸素を抜いた酸化チタン脱酸素剤を開発した^[14]。

これは写真 7 に示すように青い色をしており、酸素を吸うとまた元の白い酸化チタンに戻るため、酸素のインジケータとしても利用できる。そして、従来の鉄系の脱酸素剤と異なり、食品に混入しても赤くなったりせず、磁性を持たないため、電子レンジにかけても発火せず、不燃性であ



洗浄前

洗浄中

洗浄後

写真 6 光触媒洗浄剤を用いた建物の外壁の洗浄結果

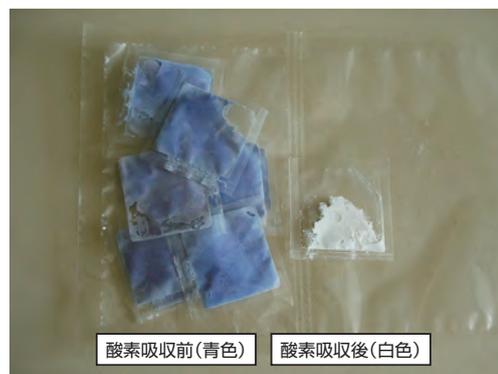
り、金属探知器にも反応しないなど、いくつもの利点を持っている。この脱酸素剤は酸化チタンのまったく新しい応用であり、これまでの脱酸素剤にない利点を持っている。

4.2 産学官の連携と光触媒性能試験法の標準化

高機能光触媒の開発を試行錯誤で進めていく際に、それを迅速にかつ効率的に行うためには、触媒科学、材料工学、合成化学、分析化学、応用化学、化学工学、反応工学など、さまざまな分野の研究者、技術者の協力が必要であり、光触媒を実用化するためには優れた生産技術を持つ企業の協力も必要である。

中部地方は我が国の産業首都として研究開発力に優れたさまざまな企業や大学、公設試験研究機関が集積している。そこで、その高度の生産技術や研究開発力などを活用し連携しながら、高機能光触媒の開発について戦略的に取り組むことにした。そのために、展示会や講演会、新聞、雑誌、テレビなどを通じて積極的に情報発信するとともに、光触媒についての産学官連携の研究会を主宰することによってさまざまな企業や大学、公設試験研究機関の研究者や技術者に参加してもらい、光触媒の研究開発を連携して行った。

この研究会は約 350 人の会員を擁する我が国初の光触媒業界団体でかつ我が国最大の光触媒に関する産学官連携組織である光触媒製品技術協議会に発展し、光触媒工業会へと引き継がれていった。そして、そこで粗悪品の横行を防ぎ、光触媒製品の信頼性を高め、光触媒産業の健全な発展を図るため、光触媒製品の品質規格の策定や光触媒性能の評価試験法の標準化、光触媒マーク (SITPA マーク) の策定、表示・用語等に関する基準の策定などを行い、さらに光触媒性能評価試験法の国内規格化 (JIS 化) 及び国際規格化 (ISO 化) を推進するとともに、光触媒の国際展示会などを開催・出展し、光触媒技術の啓蒙・普及に努めてきた。これによって研究者や技術者、企業、消費者などの関心を集め、新規参入を促し、連携してくれる



酸素吸収前 (青色)

酸素吸収後 (白色)

写真 7 酸化チタン脱酸素剤 (酸素吸収前 (青) と吸収後 (白))

研究者や技術者、企業を増やしていき、さまざまな企業と光触媒に関する共同研究や技術指導を年間4、50件行ってきた。

光触媒性能評価試験法としてはこれまでに光触媒材料の空気浄化性能試験方法-第1部 窒素酸化物の除去性能 (JIS R1701-1) や照射下での光触媒抗菌加工製品の抗菌性能試験方法・効果 (JIS R1702)、光触媒材料のセルフクリーニング性能試験方法-第1部：水接触角の測定 (JIS R1703-1) と第2部：湿式分解性能 (JIS R1703-2)、活性酸素生成能力測定による光触媒材料の水質浄化性能試験方法 (JIS R1704)、光触媒試験用光源-第1部：紫外線励起型光触媒用光源 (JIS R1709) などがJISとして制定され、そのうちの窒素酸化物の除去性能の試験法がISOとして制定されている。

5 結果と考察

以上のように、それまでにはなかった高機能光触媒の開発を行い、それを用いて新しいさまざまな応用を展開してきた。その結果、これまで光触媒に関して国内外で約200件の特許出願を行い、そのうちの約半分が既に特許登録されている。そして、のべ40件の特許および知財が実施されており、現在さまざまな製品が製造販売されている^[15]。

光触媒はさまざまな応用が可能であるが、製品化のレベルにまで持って行くためには応用分野ごとに最適な形状やデザインを見つけ出すことが必要である。例えば、セルフクリーニングや防汚の場合には、光触媒表面が平滑な方が汚れが落ちやすく良いし、水処理や脱臭の場合には光触媒表面がでこぼこした多孔質の方が有害化学物質が吸着されるために、好ましい。また、脱臭においても酸性、中性、アルカリ性など、いろいろな悪臭があり、それに対応した光触媒が必要である。

このように実際の使用を念頭に置くことにより、用途に応じたさまざまな高機能光触媒とそれを用いた光触媒製品の開発に成功し、水処理、脱臭、大気浄化、セルフクリーニング、防汚、防曇、抗菌防かび、ダイオキシン処理など、光触媒による環境浄化技術を開発した。また、実用化する上でコストの問題が最も大きいため、廃棄物の利用による低コスト化や省エネルギーでの製造を進めた。その結果、光触媒の実用化・産業化とそれを用いた環境浄化についてはある程度実現したが、地球環境浄化という目標の実現についてはこれからであり、研究のさらなる発展と製品の普及が必要である。

6 将来への課題

光触媒技術は簡単に安全に使用することができ、光が

あれば世界中どこでも利用できる。そのため、先進国だけでなく開発途上国にも適した技術でもあり、世界に貢献できる科学技術である。

地球環境浄化を実現するためには、世界各国での光触媒の普及が必要である。そのためには世界各国、特に成長著しく環境汚染が深刻化している東アジアや東南アジアの国の研究機関や企業との連携が必要であり、個々の国の状況に応じた光触媒技術の開発が必要である。例えば、環境汚染物質の濃度が高いところでは光触媒の性能や施工面積を上げたり、他の技術と組み合わせたりする必要がある。また、光触媒の普及のためには低コスト化が必要であり、それを進めるためには、その国にある廃棄物や未利用資源を活用することが必要不可欠である。こうして現地に適した光触媒が開発されるとさらにそれを用いた新たな応用が進んでいき、光触媒技術が発展していく。

現在、中国や台湾、韓国などでも光触媒の協会が設立されており、光触媒技術の産業化と普及が進んでいるが、これを世界中に広げるためには各国の技術者とのさらなる連携が必要であり、中国や台湾、韓国、タイ、フィリピン、ベトナム、ヨーロッパなど、さまざまな国の研究機関や企業との協力や指導を精力的に進めている。

謝辞

本研究開発において国内外のさまざまな研究者や技術者、企業、大学、公設試験研究機関など、多くの関係者の皆様のご協力・ご支援をいただいたことに感謝致します。

キーワード

環境浄化技術、光触媒技術、酸化チタン、水質浄化、空気浄化、抗菌防かび、防汚

参考文献

- [1] 増尾富士雄, 加藤真市: 過酸化水素の製造法, 特許公報 昭34-511 (1959).
- [2] F.Mashio and S.Kato: Method for the simultaneous production of hydrogen peroxide and carbonyl compounds, *US PATENT* 2, 910, 415 (1959).
- [3] 増尾富士雄, 加藤真市: 酸化チタンを光触媒とする酸化反応に関する研究 (第1報) 酸化チタンを光触媒とするテトラリンの液相酸化, *工業化学雑誌*, 67, 1136-1140 (1959).
- [4] 埴田博史: 二酸化チタン透明薄膜光触媒の作製と応用, *環境管理*, 32-8, 943-949 (1996).
- [5] 埴田博史, 山田善市, 相沢和宇: 光触媒シリカゲルを用いたダイオキシン類分解装置の開発, *環境研究*, 2001 No.123,10-15 (2001).
- [6] 埴田博史: 光触媒を活用したダイオキシン除去技術, *産業と環境*, 376, 35-38 (2004).
- [7] 埴田博史: 光触媒による水処理への応用, *産業と環境*, 394, 27-30 (2005).
- [8] 埴田博史: 企画特集 進化する光触媒, *月刊地球環境*, 450,

- 104-105 (2007).
 [9] 埜田博史：セラミックス光触媒を用いた環境浄化技術，*太陽エネルギー*，26-2, 13 (2000).
 [10] 埜田博史：企画特集 用途開発進む光触媒，*月刊地球環境*，439, 96-97 (2006).
 [11] 埜田博史：光触媒の農業への応用，*オプトロニクス*，305, 110-115 (2007).
 [12] 埜田博史：企画特集 光触媒，*月刊地球環境*，463, 98-99 (2008).
 [13] 光触媒粒子及びその製造方法，特許第2945926号。
 [14] 埜田博史：光触媒の農林水産・食品分野への応用，*Techno Innovation*，61, 38-43 (2006).
 [15] 埜田博史：トコトンやさしい光触媒の本，102-133, 日刊工業新聞社，東京 (2002).

(受付日 2008.7.25, 改訂受理日 2008.9.19)

執筆者略歴

埜田 博史 (たおだ ひろし)

1977年京大工学部卒。同年、通商産業省工業技術院名古屋工業技術試験所入所。93年名古屋工業技術研究所融合材料部環境技術研究室長、2001年独立行政法人産業技術総合研究所セラミックス研究部門環境材料化学研究グループ長、2004年4月から現職(サステナブルマテリアル研究部門環境セラミックス研究グループ長)。2000年科学技術庁長官賞、01年永井科学技術財団賞、および環境賞受賞。入所以来、太陽エネルギー利用技術の研究に従事、特に、太陽エネルギーの貯蔵(蓄熱技術)、二酸化炭素の還元、光触媒の研究を行ってきた。博士(工学)。

査読者との議論

議論1 研究開発が進展するプロセスについて

質問・コメント (一條 久夫)

要素技術の選択・統合が分かり難いように思います。第1種基礎研究と第2種基礎研究の間を往き来しつつ研究開発が進展するそのプロセスが重要だと思います。専門外の読者でも第1種基礎研究に該当する部分分かるように、該当する原著論文を引用しつつ簡潔に説明された方が理解が深まるのではないのでしょうか。

回答 (埜田 博史)

触媒や新しい医薬を開発する場合、何を加えて性能や薬効を上げるかということについては、確率を上げるための支援システムなどがあるにしても、基本的には試行錯誤(トライエンドエラー)だと思います。そして、それは発見のための研究であり、第1種基礎研究だ

と思います。一般的に技術開発は第1種基礎研究から第2種基礎研究を経て開発・実用化へと直線的に進んで行くというふうには考えられています。しかし、第1種基礎研究の結果の知識(要素技術)が料理しやすいように台所の流し台の上に並べられていて、それを選択してまな板の上のせて料理(第2種基礎研究)すればよいというのは、通常なかなかないと思います。試行錯誤で第1種基礎研究を行い、その結果を用いて第2種基礎研究、開発・実用化を行い、それをフィードバックさせて第1種基礎研究を行うというふうには、第1種基礎研究、第2種基礎研究、開発・実用化を連環させて進めることが必要不可欠であり、それが本格研究ではないかと思えます。どのように考えて研究を進めていったかは、4.光触媒の実用化に向けた研究開発等の実行の個別の項目のところにてできるだけ書き入れました。また、第1種基礎研究に該当する部分が分かり易いようにして参考文献に特許を加えました。

議論2 3つの「死の谷」について

質問・コメント (大和田野 芳郎)

光触媒技術が社会に普及するまでに、技術的、経済的、社会的、と3つの「死の谷」があったと分類しているのは優れた見方です。これに沿って記述する構成にすると全体が理解しやすくなると思います。

具体的には、(1)「技術的な死の谷」はどこにあり、どうやって乗り越えたか、(2)「経済的な死の谷」はどこにあり、どう乗り越えたか、(3)「社会的な死の谷」はどこにあり、どう乗り越えたか、について記述していただきたい。

これによって、他のテーマにも適用できる一般的な知見に昇華することができ、価値の高い内容になると思います。

回答 (埜田 博史)

(1) 技術的な死の谷は、粉末状のため取扱いが困難で、光触媒の性能も低かったことです。これらの課題を、透明多孔質基材などに固定して有効面積を拡大し、使用中にも基材を劣化させない方法を考案したこと、可視光領域にまで感度を広げ性能を向上させたこと、等により克服しました。これにより、光触媒の機能は大幅に向上し、取り扱いや利用が容易になりました。

(2) 経済的な死の谷は、コストが高く、既存技術に対して競争力が低かったことです。これを、廃棄物など安価な基材を用いること、透明基材や繊維などに固定する方法の考案などにより、コスト削減や、独自の用途拡大を実現して克服しました。

(3) 社会的な死の谷は、法的規制や、社会受容性の低さでした。これらを、時間をかけて認可を受けること、産学官の協力により技術協会を組織し、性能評価法の確立、JIS化、ISO化などを行うこと、光触媒の適切な使用法など、光触媒技術の啓蒙と普及を図ること、等により克服しました。

ロータリエンコーダに角度標準は必要か

—— 角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発 ——

渡部 司

ロータリエンコーダは360度の分度器のように円周上に目盛スケールが刻まれ、それを検出することにより角度位置情報を出力する装置である。しかし、ロータリエンコーダの目盛スケールのずれや、回転軸の偏心の影響により理想的な角度位置から偏差が存在するため、ユーザーはエンコーダから得られる角度情報の信頼性をどのように確保して良いのか困っていた。この問題を解決するべく、さまざまな角度偏差の要因を、自分自身で検出し角度校正値として出力することができる自己校正機能付きロータリエンコーダ (Self A: Self-calibratable Angle device) を開発した。このエンコーダはこれまでブラックボックス化していた角度偏差要因を検出、分離し、そしてそれら要因を定量的に評価できる「見える化」を実現した。

1 はじめに

ロータリエンコーダは角度計測器の1つであり、その用途は機械産業分野では工作機械や半導体製造装置あるいは産業ロボットの角度計測や制御に用いられ、「長さ」で構成される直交座標に、「角度」の極座標の自由度を与えることで、より複雑で精巧な製造を可能としている。またオフィスにあるプリンターには、正確な紙送りロールのためにロータリエンコーダが内蔵され、精密な印刷を可能としている。このように先端科学の測定装置から身近な電化製品にいたる幅広い分野において、ロータリエンコーダは「角度」の計測装置として利用されている。そのため、ユーザーはロータリエンコーダに対して更なる高分解能化、小型化、高機能化への要求を高めており、企業側もアプリケーションとインクリメントエンコーダ、磁気式と光学式、モジュラー型とホロウシャフト型とシャフト型、ベアリングの有無といったさまざまな形状と機能を持った製品や、0.1秒(1秒=1度/3600=約5 μ rad)を超えた高分解能な製品を開発し市場に送り出すことで、ユーザーの要求に応じてきた。

しかし、近年、ユーザーが要求し始めたのがロータリ

エンコーダから出力される角度情報の正確さの信頼性である。ロボットの腕を滑らかに制御するためには一周360度内に刻まれる目盛スケールの数を増やし分解能を高めることで達成することができるが、腕の位置を正確に制御するためにはロータリエンコーダから出力される角度情報と理想的な角度位置とのずれ(偏差)量の大きさを評価し、その角度偏差を補正することで正確な角度位置制御を達成することができる。そのためには図1、図2に示すロータリエンコーダが出力する角度情報の偏差の要因を検出しなければならない。しかし、これまでエンコーダメーカーは、目盛スケール数10本の偏差を検出する技術は持ち合わせていたが、数千から数10万本の全目盛スケールを検出する技術を持ち合わせていなかったため、さまざまな角度偏差要因を総合的に、そして定量的に評価することができなっていた。その結果、エンコーダの製品カタログに記された「精度」は図3に示された角度偏差を示した校正曲線ではなく、角度偏差を0とし、それを2つの上下の線で挟んだ大きな安全許容幅を「精度」と称して載せている場合が

- 先天的偏差要因(エンコーダ内部構造に起因する要因)
 - 目盛スケールの偏差
 - エンコーダ軸と目盛盤との偏心
- 後天的偏差要因(ユーザーの使用状況に起因する要因)
 - 機械構造要因
 - エンコーダ軸と装置軸の偏心
 - 取付け時のゆがみ
 - 軸ぶれ、ベアリング等
 - 測定環境要因
 - 温度変化、経年変化等

図1 角度情報の偏差要因

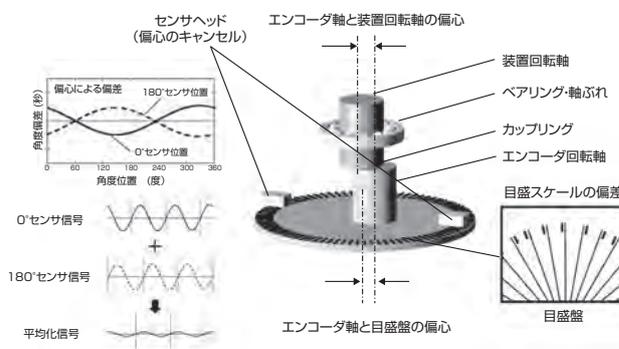


図2 ロータリエンコーダの角度偏差要因の概念

多いのである。このため、各メーカーが独自に定義した「精度」は、どの角度偏差要因をどこまで含んだ値を示しているかわからないブラックボックスと化した値となっており、ユーザーはこの「精度」を信用してエンコーダを使うことを強いられ、実際に使用状態で角度情報に含まれる角度偏差をどのように検証し、その信頼性をどのように確保して良いのかわからずに困っていた。

このように、ユーザーが要求する角度計測の信頼性の確保を行うためには、これまでエンコーダメーカーが行ってきた部品の高精度化や高剛性化等の技術開発による角度偏差の低減への取り組み以外に、ユーザー自身が利用できる角度偏差の検出とその信頼性の向上へと導く新しい技術要素へのブレークスルーが必要となってきた。そして本稿で説明する角度偏差の「見える化」こそが、そのブレークスルーに他ならない。

産業技術総合研究所では、これまで計量標準供給のためのトレーサビリティ体系の確立のために、より高精度な計測機器の研究開発を行っている。角度標準においても1997年より角度の国家標準器^[1]の開発に着手し、現在、独自に開発した角度校正装置は、ロータリエンコーダの数10万本の全ての目盛スケールの角度偏差を校正値として短時間に検出することができる。その校正値の不確かさは、0.01秒であり世界最高精度の国家標準器である。本稿では、その中で培ってきた自己校正法による角度偏差の校正技術と開発された自己校正機能付きロータリエンコーダ「SelfA」^{[2][3]}の実用化を目指した取り組みについて触れつつ、研究の方法論を紹介する。

2 角度偏差と現状

まず、ロータリエンコーダが出力する角度信号にはどのような角度偏差が含まれているのであろうか。ロータリエンコーダが角度偏差を生ずる要因には、図1、図2に示すように大きく分類して先天的偏差要因と後天的偏差要因とがある。

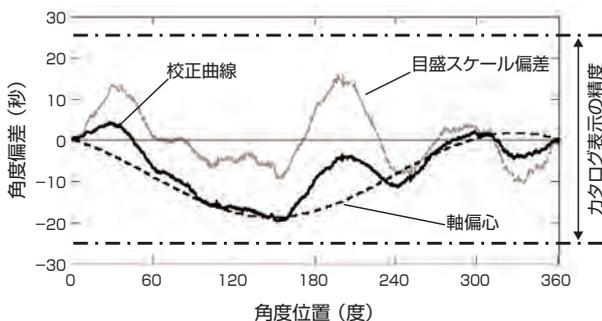


図3 校正曲線に含まれる偏差要因の例

先天的偏差要因は、主にロータリエンコーダ自身の構造的欠陥が要因となるものであり、メーカーの製造時に決まってしまう要因である。これには目盛スケールの偏差要因とエンコーダ軸と目盛盤との偏心要因がある。目盛スケール偏差要因は、図2（右下図枠内）に示すように等角度間隔の理想的な目盛スケール位置に対して実際目盛スケールがずれているために起こる角度偏差である。エンコーダ軸と目盛盤との偏心要因は、ロータリエンコーダの回転軸中心と目盛盤の中心とがずれている偏心が起因する角度偏差である。

後天的偏差要因は、ユーザーが使用装置にロータリエンコーダを取り付けた時、またはその後の使用時に起こる角度偏差の要因である。これにはエンコーダ軸と装置回転軸との取り付け偏心によるものや、取り付け時のエンコーダのゆがみや、使用時の温度変化による装置筐体のゆがみの伝播によるエンコーダのゆがみや、さらに、装置回転軸のベアリングの品質に依存した軸ぶれなども動的な偏心のように振舞い、角度偏差の要因となる。

先天的、後天的偏差要因に挙げられている軸と目盛盤、軸と軸の偏心誤差は、図3のように1周期のサイン関数で示される偏差として出力される。

これまで高精度化の方法

これまでロータリエンコーダの高精度化のためには、先天的偏差要因と後天的偏差要因をできるだけ小さくする技術として以下の方法が採られてきた。

- ① 目盛スケールの線の品質向上（等角度間隔、目盛り線の直線度等）
- ② 取り付け治具やカップリングの機能向上による偏心の低減
- ③ 温度変化にロバストな部材、剛性が高い部材を用いたゆがみの低減
- ④ 2つのセンサヘッドを用いた軸偏心のキャンセル技術

①～③はロータリエンコーダの部品の加工精度を上げることで、根本的に角度偏差要因を低減する方法である。しかし、④の2つのセンサヘッドを用いた軸偏心のキャンセル技術とは、たとえば図2に示すように目盛スケールの180度対抗した位置に2つのセンサヘッドを正確に配置し、それぞれのセンサヘッドが検出した信号を平均することにより、図2（左中図）のように偏心による偏差をリアルタイムにキャンセルするという方法論による偏差の低減技術である。センサヘッドは図2（左下図）に示すように目盛スケールの目盛間隔ごとにサインの電圧信号を出力する。偏心があると0度と180度位置にあるセンサヘッドが検出し出力するサイン電圧信号に位相差が出るため、2つの電圧の和を求めることにより偏心をキャンセルすることができる。し

かし、偏心の大きさが目盛りの間隔の1/4を超えたり、またはセンサヘッドの配置精度が目盛りの間隔の1/4を超えたりすると、出力される電圧強度が減少し信号が出力されない可能性がある。例えば目盛り間隔を20 μm とすると、軸偏心やセンサヘッドの配置精度を約5 μm 以内にする必要があることから、①～③と同様に部品の高精密化であるともいえる。したがって複数個のセンサヘッドを配置する案^[4]もあるが、このセンサヘッドの配置精度の問題から実質的に4個以上のセンサヘッドを配置するのは難しい。

3 研究シナリオ

ブラックボックス化したカタログ「精度」の情報しか得られないため、ユーザーは、装置に組み込んだエンコーダが取付けの軸偏心や使用環境の変化により、その角度偏差がカタログ「精度」の許容範囲内に収まっているかが不明なまま、いつも不安視しながら利用している。しかし、もし図3に示すロータリエンコーダの校正值(曲線)を求め、角度偏差の「見える化」ができれば、その校正值を用いて角度信号を補正することで、カタログの「精度」に比べてさらに数倍から数10倍の精度向上を達成し、高精度な計測と制御が可能になる。

産業技術総合研究所が開発した角度の国家標準器は、ロータリエンコーダの数10万本の目盛スケールの角度偏差を検出することが可能である。これにより図1に示す先天的偏差要因と、後天的偏差要因の測定環境要因などを、定量的に評価することが可能となった。しかし、後天的偏差要因の他のほとんどの要因は、エンコーダの個体差や取り付け状況や使用環境により一定ではなく変化してしまう。したがって、実際に使用する装置に組み込んだ状態で校正值を検出し、ユーザー自らが「見る」ことが重要となる。そこで、ロータリエンコーダ自身に角度偏差を自ら検出し校正值として出力できる自己校正機能を付加することで角度偏差の「見える化」を実現することにした。

4 自己校正機能付きロータリエンコーダ「SelfA」

表1に示すように、ロータリエンコーダの角度偏差を検出する自己校正法の原理^{[5]-[7]}は、これまでにいくつか考案されている。角度の国家標準器では等分割平均法^[8]を用

いて、国家標準器内部の参照用ロータリエンコーダと校正器物であるユーザーのロータリエンコーダとの2個のエンコーダ間で自己校正法を行うことで、両エンコーダの角度偏差を同時に検出する方法を採用してきた。そこで、ユーザーが使用するロータリエンコーダに、国家標準器と同様に別のエンコーダを取り付け2つのエンコーダ間で等分割平均法の自己校正を可能とする国家標準器型小型校正装置^[9]の開発を検討した。しかし、すでにユーザーが使用機器に組み込んでいるロータリエンコーダの周りに、小型の国家標準器を設置する空間の確保は難しく、サイズダウンには限界があるであろうという観点からこの開発は断念した。

次に、1個のロータリエンコーダ単体で自己校正法が適用できる原理について検討した。マルチ再生ヘッド法^{[10][11]}、3点法^[12]は複数個のセンサヘッドを目盛盤の周りに配置し、図3に示す角度偏差を連続的な360度の周期曲線と考えて、そのフーリエ成分を検出する方法である。複数個配置したセンサヘッドの1つを基準とし、マルチ再生ヘッド法の場合には180度、90度、45度、22.5度・・・と配置し、3点法の場合には、例えばマルチ再生ヘッド法の配置の中から2箇所を選び配置させる。基準センサヘッドに対して他のセンサヘッドの配置により検出できるフーリエ成分が求まり、逆フーリエ変換により校正曲線を求める方法である。そのため、センサヘッドの個体差や設置精度により検出されるフーリエ成分の精度に大きく影響する。したがって開発においても、また実用化する場合においても、多くの労力が必要と考えられる。そのためこの方法も開発には及ばなかった。

そこで、これまで国家標準器に採用してきた等分割平均法を拡張し、ユーザーの1個のロータリエンコーダだけ等分割平均法を実現する方法を考案することにした。図4(a)は等分割平均法の原理図である。下部に示している目盛盤の周りに複数個のセンサヘッドが等角度間隔に配置された装置内部の参照用ロータリエンコーダと上部の校正したいユーザーのロータリエンコーダとの間で自己校正を行う。図4(b)は等角度間隔に配置されたセンサヘッドの中に基準となるセンサヘッドを配置することで1個のエンコーダで等分割平均法を可能にしている。図4(c)は図4(b)の基

表1 ロータリエンコーダの校正原理

| 校正方法 | クロスキャリブレーション法 | 等分割平均法 | マルチ再生ヘッド法 | 2,3点法 | デバイダ法 |
|---------|---------------|-----------|-----------|----------------------|---------|
| エンコーダ個数 | 2 | | 1 | | |
| 特徴 | 総当り比較法 | フーリエ成分検出法 | | | 逐次検出法 |
| 長所 | 高精度 | 高精度・短時間 | 高精度・短時間 | 短時間 | 短時間 |
| 短所 | 長時間・作業量大 | エンコーダ2個 | ヘッド個体差の影響 | ヘッド個性的影響 ヘッド間隔が厳密 | 不確かさの累積 |

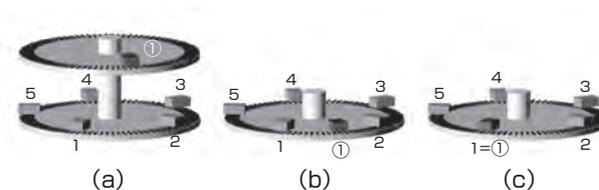


図4 等分割平均法の変化

準センサヘッドを等角度間隔に配置したセンサヘッドの1つに代用させることで、等分割平均法を可能にしている。

4.1 SelfAの原理

ここで1個のロータリエンコーダで自己校正が可能な等分割平均法について簡単に解説する。図4(c)のようにロータリエンコーダの目盛盤の周りに5個のセンサヘッドを配置した場合、それぞれのセンサヘッドが出力する角度信号には、角度偏差 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 が含まれているとする。ただし各センサヘッドは同一目盛盤を検出しているため、 A_2, A_3, A_4, A_5 はそれぞれ A_1 に対して72度間隔ずつ位相がずれているだけである。直接には各角度信号から角度偏差を分離することはできないため、基準とする一番のセンサヘッドの角度信号との差 δ を計算すると、差 δ は式(1)のように角度偏差だけで表現することができる。一周360度の δ の計測値例を図5に示す。

$$\begin{aligned} \delta_1 &= A_1 - A_1 \\ \delta_2 &= A_1 - A_2 \\ \delta_3 &= A_1 - A_3 \\ \delta_4 &= A_1 - A_4 \\ \delta_5 &= A_1 - A_5 \end{aligned} \quad (1)$$

次に、この5個の δ の平均値 μ を求めると次式のようになる。平均値 μ を図5の5個の δ から求めると図6のようになる。

$$\mu = \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$

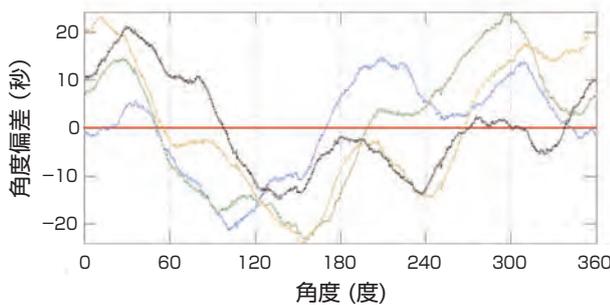


図5 SelfAからの出力データ

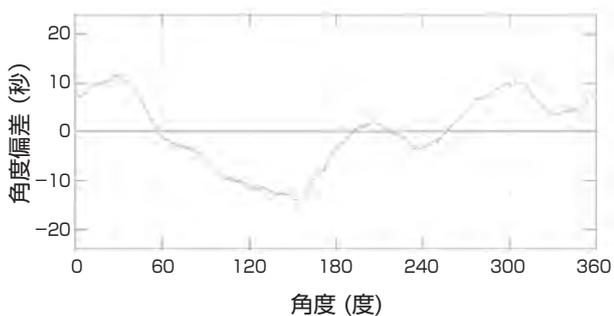


図6 SelfAの解析結果

右辺第1項は、このロータリエンコーダの角度偏差つまり校正値であるが、第2項があるため解析値の平均値 μ はそのままでは校正値とはいえない。ここで第1項と第2項の関係を調べるために、仮に A_1 の校正値が求まり、その値を72度位相ずつずらした A_2, A_3, A_4, A_5 を作成し、それらから第2項を計算すると、そのフーリエ成分は図7のような関係になる。右辺第2項は A_1 のフーリエ成分の5の倍数次成分と同じであることがわかる。つまり5個のセンサヘッドを配置した場合には、平均値 μ は第2項により5の倍数次成分を含んでいない A_1 の校正値となる。5の倍数次成分の校正値への影響が大きい場合には、異なる数たとえば7個のセンサヘッドを配置することで、より高精度に校正値を得ることができる。このように得られた校正値は、特定のフーリエ成分を検出していることになるため、本原理は表1に示されるようにフーリエ成分検出法に分類されている。

この原理の特徴は、先に紹介したマルチ再生ヘッド法や3点法が、1つの基準センサヘッドとその他センサヘッドといった関係ではなく、等角度間隔に並んだ各センサヘッドをそれぞれ基準として計算できることにより統計精度を上げることができるため、多少のセンサヘッドの配置にずれがあっても、角度偏差に影響が少ない点である。また、解析はフーリエ変換や逆フーリエ変換を用いずに四則演算のみで計算できる点である。

4.2 SelfAの応用例

図8に示すように、下部に10個のセンサヘッドを配置した自己校正機能付きロータリエンコーダを備えた回転テーブルを開発した。図9はテーブルの上部に何も載せないで自己校正を行った場合と、5kgの重量物を置いて再校正した場合の校正値である。明らかに校正値が変化していることがわかる。これはテーブルへの加重がテーブルの筐体をゆがませ、結果的にロータリエンコーダを変形させてしま

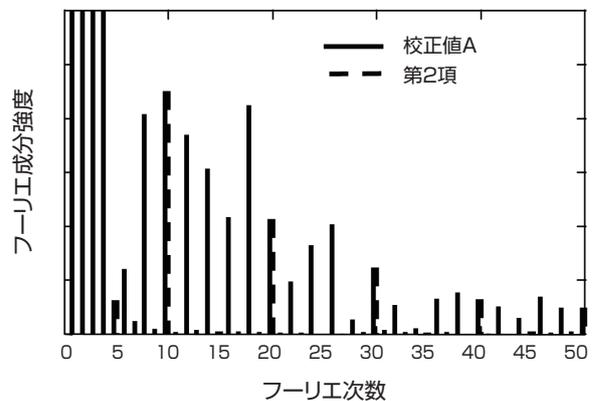


図7 解析結果とそのフーリエ成分の関係

っているためである。新しい校正値を得ることで高精度な角度偏差の補正が可能になる。

図10は回転テーブルを10回転させ、各回転の校正値を求めたデータを図示したものである。校正値が求められなければ、カタログの「精度」としては±10秒としか表現できないが、校正値を用いることで校正値自体の再現性である±0.3秒の高精度な角度位置を検出できることがわかる。図11は図10で示した10本の校正値の平均値からの再現性（ばらつき）を示した図である。実はこの±0.3秒のばらつきの原因は、回転テーブルのボールベアリングの内部ボールの回転の非再現性が原因であることがわかっている。

このように、この自己校正機能付きロータリエンコーダ（SelfA）は、装置に取り付けた後に、先天的偏差要因の目盛スケール偏差要因とエンコーダ軸と目盛盤の偏心要因ばかりでなく、これまで検出が不可能であったエンコーダ軸と装置軸の偏心要因、取付け時のゆがみ要因、測定環境要因を検出し校正値として出力できることがわかった。

5 今後のシナリオ

前節で述べた自己校正機能付きロータリエンコーダ（SelfA）は、これまでの部品の精密化と異なり、自己校正という方法論により高精度化とその角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダと呼ぶことができる。

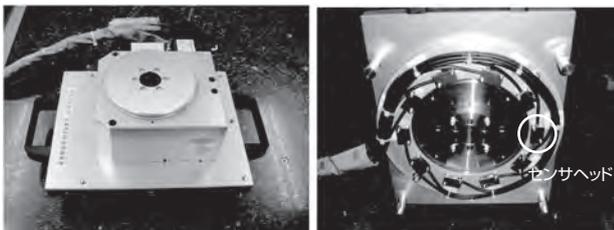


図8 自己校正機能付きロータリエンコーダ（SelfA）内臓の回転テーブル

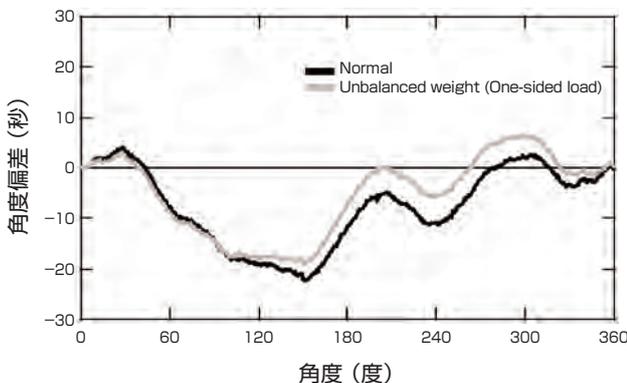


図9 加重による内部ロータリエンコーダの校正値の変化

現在、市販されているロータリエンコーダの中で、最も高精度とされる製品の精度は約±0.2秒である。しかし、SelfAは図11に示すようにボールベアリングの性能評価ができる能力を持ち、取付け偏差要因、測定環境要因、機械構造要因等を検出した上で±0.3秒の再現性を定量的に確保している。もし、ボールベアリングよりも軸ぶれの小さいエアベアリングを用いていたならば再現性が±0.1秒を超える角度偏差を検出することが可能である。また応用例で明らかなように、SelfAは単純にロータリエンコーダ自身の角度偏差を検出するだけでなく角度偏差の「見える化」の特性により、装置の耐荷重に対する装置筐体の剛性、軸ぶれ評価やベアリングの品質評価など、角度以外の新たなセンサとしての応用も考えられる。つまり、この方法論はさらに高精度なハードウェア技術へ適用して、より高い信頼性をユーザーに提供できるであろう。

例えば、SelfAの持つさまざまな角度偏差要因を検出できる機能を応用すると、野外の温度差が激しい現場で行う測量機器（トータルステーションやセオドライト^{用語1}）や電波望遠鏡の角度制御、偏加重がかかるX線装置やエリプソメータ^{用語2}等のゴニオテーブル、加工加圧やトルク変動等の外力がかかる工作機械や産業ロボットのアーム角度制

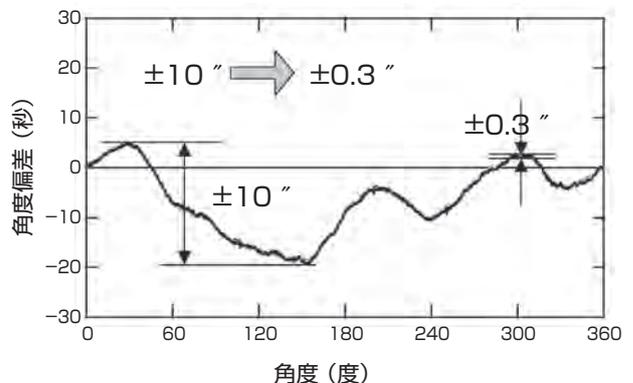


図10 回転テーブルの校正値（静的角度偏差）

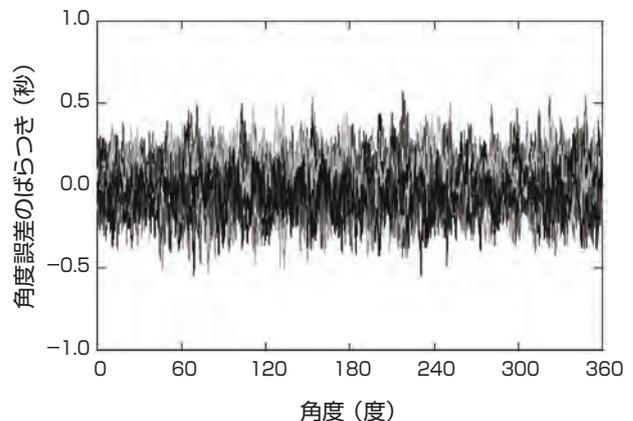


図11 回転テーブルの校正値の再現性（動的角度偏差）

御、そして使用しているベアリングの精度評価など、これまでのロータリエンコーダと交換することにより、さまざまな現場でさらに高精度な計測と制御が可能になる。

そのためには、ユーザーがすでに使用している装置を改造することなしに、内蔵しているロータリエンコーダをここで紹介した SelfA に交換するだけで良いように、さまざまなサイズの SelfA の開発が必要である。

6 実施のためのノウハウ

ここでは、自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) を活用するに当たって必要な技術的ノウハウを紹介する。

6.1 センサヘッドの数

SelfA の原理により求めた角度偏差は図 7 に示したように、センサヘッドの数に依存したフーリエ成分が求まらない。例えば 5 個のセンサヘッドを配置した場合は、5、10、15・・・と 5 の倍数次のフーリエ成分が求まらない。6 個の場合は、6、12、18・・・の成分が求まらない。また角度偏差のフーリエ成分は一般的に高次になるほど小さくなる傾向がある。したがって配置するセンサヘッドの数を増やせば、それだけ影響の大きい低次成分項を検出し、高次の項までフーリエ成分の抜けない校正値を求めることができる。図 12 は、センサヘッド数と到達精度の関係を示している。例えば、到達精度が 0.1 秒の場合は 10～15 個のセンサヘッドが必要であるが、1 秒の場合は 5 個で十分である。したがって、ユーザーが目指す精度により、むやみに多くのセンサヘッドを用いる必要はなく、最低限必要なセンサヘッド数を選択すれば良いことがわかる。

6.2 センサヘッドの配置精度

従来のロータリエンコーダが偏心による角度偏差をキャンセルするために、目盛り間隔の 1/4 以下という厳しい制限の中で 2 つのセンサヘッドを配置しなくてはならなかった。さらに述べれば軸偏心や目盛りスケールの偏差のばらつきも同様に目盛り間隔の 1/4 以下という制限があるのであ

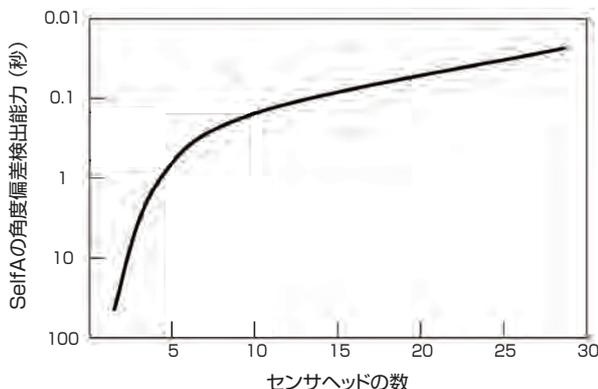


図 12 SelfA のセンサヘッドの数と到達精度の関係

る。これに対して SelfA は、2 個ではなくさらに多い複数個のセンサヘッドを等角度間隔に目盛盤に配置する必要があるため、本当に SelfA は実用化が可能なのであろうかといった疑問が出てくる。その答えは「可能」である。SelfA にはリアルタイム性は必要なく、各センサヘッドが検出した目盛スケール位置の角度信号をまずはコンピュータに収納し、測定終了後に式 (1)、(2) の差を計算するため、たとえ偏心による角度偏差が目盛り間隔を超えた大きさであっても計算することができる。またセンサヘッドはそもそも目盛り線 1 本 1 本に対して角度信号を出力しているのではなく、図 13 のように数 10 から数 100 本の目盛り線の平均値として角度信号を出力している。そのため近接した角度信号間の角度偏差の変化量は小さいため、たとえ数目盛りずれた位置に配置しても、校正値に特大大きな影響を与えないのである。

7 まとめ

これまでメーカーが行ってきたロータリエンコーダの開発は、部品の精密化により角度偏差を小さくし、さらにキャンセル技術で見えなくするといった方法論であった。しかし、本研究における開発は、これとは異なり、全ての角度偏差を積極的に出力することで見える状態にするといった方法論である。より角度偏差が小さい製品開発を目標とするメーカーと、角度の国家標準器開発により角度偏差を評価することを目標とした本研究との立場の違いが、新しい自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) の開発を可能にしたと考えられる。

角度の国家標準器は、最高精度の角度標準ではなく等分割平均法という自己校正法の 1 つによる方法論によりロータリエンコーダを校正している。これはユーザーやメーカーの誰もが国家標準器と同等な「角度標準器」を持つことを意味している。さらに、自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) は校正装置が無くとも角度偏差を自ら検出できる機能を持っている。これはユーザーやメーカーがもはや「角度標準器」を持つ必要がない状態が到来してい

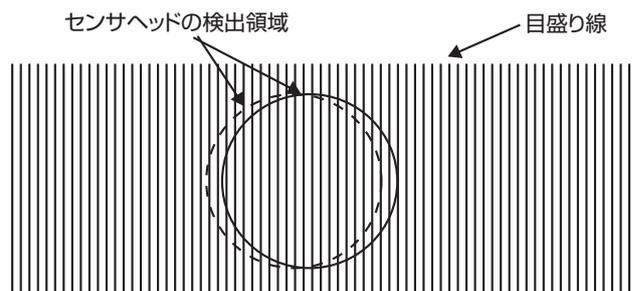


図 13 ロータリエンコーダの目盛り検出サイズ

ることを意味している。しかし、不要になるのは上位標準となる「角度標準器」であり、『角度標準』は自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) とともにさらに身近なものになると考えられる。

「計れないものは作れない」というように、ものづくりの分野において高精度な計測技術の確立は必要不可欠である。さらにその高精度化された状況の「見える化」は、これまで手探りだった精度評価の信頼性をさらに高め、これまで以上に高度なものづくりに貢献できると考えられる。

用語説明

用語1: トータルステーション・セオドライト: セオドライトは角度を計測する測量機器の1つで、三角測量において水平方向と垂直方向の回転角を測定する光学機器。トータルステーションはセオドライトにさらに対象物までの距離を計測する機構が付いている。

用語2: エリプソメータ: エリプソメータは光を試料に照射し、試料から反射される光の楕円偏光状態を測定することで、薄膜の厚さ、屈折率や吸収係数などの光学定数などを解析する装置。反射角度を計測するためにロータリエンコーダが使われている。

キーワード

ロータリエンコーダ、角度標準、偏差評価、自己校正

参考文献

- [1] 渡部司, 益田正, 梶谷誠, 藤本弘之, 中山貫: ロータリエンコーダの高精度校正装置の開発 (第一報) - 校正システムと基礎実験 -, *精密工学会誌*, 67 (7), 1091-1095(2001).
- [2] T. Watanabe, H. Fujimoto and T. Masuda: Self-calibratable rotary encoder, *J. Physics: Conference Series*, 13, 240-245 (2005).
- [3] 特許3826207: 自己校正機能付き角度検出器.
- [4] 特開平6-313719: ロータリエンコーダ.
- [5] X.-D. Lu, D.L. Trumper: Self-calibration of on-axis rotary encoders, *Annals of the CIRP*, 56 (1), 499-504 (2007).
- [6] K. Štěpánek: Messung der Genauigkeit von Getrieben und Winkeln mit magnetischen Maßstäben, *acta IMEKO, Proc. Int. Meas. Conf., Ist*, 258 (1958).
- [7] E.W. Palmer: High-accuracy angle measurement, *NPL, Teddington, U.K.* (1984).
- [8] T. Masuda and M. Kajitani: High accuracy calibration system for angular encoders, *J. Robotics and Mechatronics*, 5 (5), 448-452 (1993).
- [9] 特開2000-258186: 自己校正型角度検出装置及び検出精度校正方法.
- [10] 特開2003-262518: 自己校正型角度検出器.
- [11] 益田正, 梶谷誠: 角度検出器の精密自動校正システムの開発, *精密工学会誌*, 52 (10), 1732-1738 (1986).
- [12] 特開平6-317431: エンコーダの校正方法.

(受付日 2008.8.21, 改訂受理日 2008.10.28)

執筆者略歴

渡部 司(わたなべつかさ)

1993年東北大学大学院理学研究科物理学科博士課程修了。博士(理学)。米国標準技術研究所(NIST)の客員研究員を経て、1998年に工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所。角度の国家標準器の開発などに従事。現在、自己校正機能付きロータリエンコーダを用いた新しい角度標準器の普及とともに角度の世界標準を目指している。市村学術賞、つくば奨励賞などを受賞。

査読者との議論

議論1 研究の狙いとタイトルについて

質問・コメント(赤松 幹之)

角度標準のための角度校正技術を、製品としてのロータリエンコーダの信頼性を確保するための技術として展開した本研究は、基礎研究を社会に活かした良い研究例だと思います。製品として組付けられた状態のエンコーダの精度が随時校正できることで、その時点での精度を確保することができる、というのが信頼性向上というこの開発の狙いですが、一般読者には「信頼性向上」が研究成果の社会導入によるインパクトであることがわかりにくいように思います。少し説明を加えて、社会インパクトの強さを強調されたいかがでしょうか? また、同様に、これによる社会的インパクトを少し強調したタイトル/サブタイトルもご検討下さい。

回答(渡部 司)

長さの標準には約100年以上の歴史があり、世界が同歩調で同じ原理を用いて国家標準器を開発してきた状況に対して、角度標準は約20年の歴史しかありません。産業技術総合研究所も10年前からようやく国家標準器の開発が始まるなど、諸外国の国家標準器の原理も今もってばらばらでまとまっていない状態です。さらに加えますと、諸外国は国家標準器の精度を向上させるために部品の精度を上げ、その結果、高価で複雑な機構を持った装置と化してきました。これが今もって共通の原理を共有できない原因となっています。しかし、産業技術総合研究所の国家標準器は、本文でも述べましたが、等分割平均法という方法論です。この原理に基づけば誰でも国家標準器と同じ装置を持てることになります。

本研究は、この原理をもっとコンパクトにして、誰でも簡単に安く使える装置にできないかというところが始まりです。標準器を作るかわら、標準器を必要としない装置も作っているという矛盾と葛藤があったのも事実です。

角度標準の歴史がまだ浅く、角度計測器にはどのような角度偏差を引き起こす要因があるのか、さらに、どのようにすればその要因を推定できるのか、まだまだブラックボックスとなっている部分が多いのです。「信頼性向上」とは、このブラックボックスの蓋を開ける手がかりが得られることにより、これまでカタログに記載されていた「精度」とは異なる定量的な評価を可能とすることで、メーカーもユーザーも安心して角度偏差を引き起こす要因を同じ土俵で議論できる場を設けることができることを示しています。それこそが角度にとっての標準ではないかと考えています。

そこで思い切って次のタイトルとサブタイトルに変更してみました。

自己校正機能付きロータリエンコーダの開発

— 誤差要因の「見える化」により角度精度と信頼性向上の実現 —

↓

ロータリエンコーダに角度標準は必要か

— 角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発 —

質問・コメント(田中 充)

「はじめに」の部分、第2パラグラフで、近年のユーザーがなぜ精度の信頼性が無いので困っているかがわかりません。エンコーダの

ユーザーが求めるべき機能が、従来の分解能ではなく本来何であるべきだったかを示すことが重要です。また、ユーザーにとって重要な「取り付け後」に着目した表現は大変良いと思います。ただ、取り付け後の角度値の信頼性を顧客に対して保証するのはユーザーの仕事ですから、「ユーザーは取り付け後のエンコーダから得られる角度情報の信頼性をどのように保証して良いかできないで困っている。」とした方が良くないでしょうか？

回答（渡部 司）

「1.はじめに」の中盤でロボットの腕の制御を例に、分解能、角度偏差とそのブラックボックス化した理由等の説明を加えました。また、「2.角度偏差と現状」に述べたように、ロータリエンコーダの製造時に決まる先天的角度偏差と、ユーザーがロータリエンコーダを使用するときに決まる後天的角度偏差とに分類しました。これにより現在市販されているロータリエンコーダが持つ角度偏差とカタログの「精度」の隔たりを説明することができました。これにより、ユーザーが困っている内容を特定できるようになり、ご指摘の文面に導入が可能になりました。

したがって、次の文章に変更しました。「ユーザーはこの「精度」を信用してエンコーダを使うことを強いられ、実際に使用状態での角度情報に含まれる角度偏差をどのように検証し、その信頼性をどのように確保して良いのかわからずに困っていた。」

議論2 ブレークスルーとしての「見える化」について

質問・コメント（赤松 幹之）

第1章の第3段落で、信頼性向上のための新しい技術導入の必要性がうたわれ、そのブレークスルーとして「見える化」が必要であると書かれています。信頼性向上に「見える化」が必須のことであるか、それとも他にも選択肢がある中で「見える化」を導入したのか、など技術の選択のシナリオを記述できませんでしょうか？

回答（渡部 司）

ロータリエンコーダから出力される角度信号には角度偏差を引き起こすさまざまな要因があります。その分類を静的、動的角度誤差要因と分けてきましたが、これは本稿の内容には適さない分類方法であったと考えました。つまりメーカー（作る現場）とユーザー（使う現場）の異なる状況で発生する角度偏差が、最終的には合成され分離不可能な角度偏差として出力されます。したがって分類方法を先天的・後天的角度偏差要因と変えました。しかし、もっとも問題となるのはメーカーもユーザーも、これまで角度偏差を定量的に評価するすべを持ち合わせていなかったことが角度偏差のブラックボックス化を招き、角度の信頼性を低下させていた原因といえます。

メーカーとしてはこのブラックボックスの部分でできるだけ小さくすべく、「部品の精密化」と「(偏心)偏差のキャンセル」の2枚のカードを使ってきました。この2つの技術は今後も重要な技術であることは間違いありません。しかし、本論文では3枚目のカードとして「自己校正機能」＝「見える化」を提案しました。

「2.角度偏差と状況」の内容を膨らませることで、「見える化」の導入意図を示してみました。

先天的・後天的角度偏差要因の名前については、もっと良い分類名が欲しいところです。

質問・コメント（田中 充）

このパラグラフにある、静的角度誤差要因と動的角度誤差要因とを分けることは方法論記述の上では、要素論に含まれます。しかし、この区別を明確に述べれば述べるほど、「これまで」と「見える化」との関係を理解しようと苦慮する事態に陥ります。何か工夫はないでしょうか？静的＝メーカー・他力校正＝これまで、動的＝ユーザー・自力校正＝見える化の図式のどこがどうなっているのかをはっきりするのが良いと思います。

回答（渡部 司）

「静的角度誤差要因・動的角度誤差要因」の分類から「先天的角度偏差要因・後天的角度偏差要因」に変更し、さらに先天的角度偏差要因の低減に対するメーカーの取り組みである①～④を説明しました。

質問・コメント（田中 充）

研究シナリオについてこの記述が方法論の本質と言えますが、ユーザー自らが「見る」ことが大切であればそのように書くべきではないでしょうか？「見える化」といっても誰が見るのかがはっきりしていませんか。さらに、「見る」ためには、これまでは、時間も人もコストもかかっていたのが簡単になった（つまり、自己校正）ことが方法論の展開ではないでしょうか？

回答（渡部 司）

メーカーには先天的角度偏差を出荷前に評価する装置がない、ましてやユーザーには全ての角度偏差がブラックボックス化しているため、どのような方法でカタログの「精度」と本来の角度偏差の対応付けを行ってよいかわからない、このことが問題となっています。メーカーもですがユーザー自ら角度偏差を検出し、角度偏差の「見える化」を行える技術の導入が必要です。そのためには、装置内部に取り付けられたロータリエンコーダを外部につけた装置で評価するのではなく、ロータリエンコーダ自身が角度偏差を出力することで、他の装置を必要とせずに簡単に、そして短時間に角度偏差の「見える化」を実行することができました。

質問・コメント（田中 充）

研究シナリオ部分でさらに、国家標準とメーカーの「作る」エンコーダ、ユーザーの「使う」エンコーダ、校正してもらった「エンコーダ」の関係をあらかじめ説明しておかないと読者は混乱します。その中で、なぜサイズダウンが必要なかわかりません。

回答（渡部 司）

「ロータリエンコーダ」の前に「ユーザー」、「国家標準器、参照用」などの言葉を付け加え、どのロータリエンコーダについて述べているかを明確にしました。角度偏差を「見える化」できる技術が複雑で、その装置が巨大になるとメーカーもユーザーも導入に対して及び腰になります。したがって、実用化と普及を目指すならば、現在使用しているロータリエンコーダの体積容量とほぼ同じサイズでありながら角度偏差の「見える化」が可能な技術が必要となります。本文の内容を次のとおりもう少し具体的にしました。「しかし、すでにユーザーが使用機器に組み込んでいるロータリエンコーダの周りに、小型の国家標準器を設置する空間の確保は難しく、サイズダウンには限界があるであろうという観点からこの開発は断念した。」

議論3 「見える化」技術について

質問・コメント（赤松 幹之）

この技術開発は「見える化」がポイントとなっている、という論旨になっていますが、一般に使われている「見える化」すなわちデータのビジュアライズによって状態を把握する、という意味と若干異なるように思います。本論文の記載内容から、平均値を求めたものを校正データとして使えば精度が求まるというのが開発技術であると理解したのですが、もしそうだとするとビジュアライズする必要がないように思われます。もし「見える化」をビジュアライズを元にした分析、とは異なる意味で使われているのでしたら、それを説明する記述を記載してください。

回答（渡部 司）

これまでも、センサヘッドを2個、4個と配置したロータリエンコーダが市販されています。しかし、これらは軸偏心など一部の角度偏差のキャンセルに用いられてきました。これは式(1)の右辺第1項

が無く、第2項のみの平均操作になります。実はこの式のちょっとした違いが、「キャンセル」から「見える化」への実現を担っています。したがって平均は統計精度を上げるための計算ではなく、何も基準が無いロータリエンコーダ自身から校正值を導き出すために用いられています。しかしながらこの効果は絶大であり、図3の2つの線で挟まれた「カタログ精度」に対して、まさに校正曲線として角度偏差のビジュアライズに成功したことになります。

質問・コメント（田中 充）

見える化技術についての記述で、「センサヘッドの個体差や設置精度」は致命的な死の谷で、「温度変化や取り付けのゆがみ」などは乗り越えられた死の谷だという判断を説明する必要はないでしょうか？さもないと、乗り越えられたという結果論になってしまいますが・・・

回答（渡部 司）

「国家標準器（2個のロータリエンコーダで自己校正）」「マルチ再生ヘッド法、3点法」「偏心のキャンセル法」の方法は、「センサヘッドの個体差や設置精度」「温度変化や取り付けのゆがみ」など角度偏差検出に対して致命的な死の谷を持っていました。「国家標準器の小型化」は致命的な死の谷ではありませんでしたが、サイズが死の谷でした。したがって、等分割平均法を1つのロータリエンコーダでできるかどうかが鍵でした。

議論4 自己校正機能の内容について

質問・コメント（赤松 幹之）

第4章第3段落の記述から、SelfAの特徴は、等間隔に複数のセンサヘッドをロータリエンコーダ内に配置し、そのうちの1つを基準とするセンサヘッドとするものであると理解しました。しかし、見かけ上からは、国家標準器で使われている等分割平均法のための標準器（図4aの下側の部分）と同じものように見えます。すなわち図4cの方法は、第2段落に書かれている「複数のセンサヘッドを目盛り盤の周りに配置することと同じように見えます。第2段落のその次の文章で、複数のセンサヘッドを付けることの困難性が説明されていますが、このSelfAでは、複数のセンサヘッドを付ける困難性は問題にならなかったのでしょうか？それは例えば(2)式の方法をとることで回避できたのでしょうか？このことも含めて、SelfAに導入した方法を見出したプロセス（思考のプロセスかもしれません）を記載していただけますでしょうか。また、それと表1に示す校正原理の表とを関連させて導入された方法の比較などを記載していただくと、表1の位置付けが明確になります。

回答（渡部 司）

図4で示す国家標準器（図4aの下側の部分）は、実はセンサヘッドが5個並んでいるのではなく、図では省略されておりますが、さらに下部にもう1つのロータリエンコーダがあり、それをういて1つのセンサヘッドを5箇所（1, 2, 3, 4, 5の順番に制御しながら式(1)の測定を別々に行っています。また最下部のロータリエンコーダは目

盛りの間隔の1/4の位置制御が可能なのが選定されており、理想的な測定ができるようになっております。その結果不確かさ0.01秒の世界最高精度を達成しています。

しかし、この理想的な装置を開発したため「等分割平均法は2個のロータリエンコーダで行うものである」、「理想的なセンサヘッド配置」という概念が固定し、図4のa→d→cの発想の展開ができずにいました。しかし、目標とする不確かさを1秒と設定しなおすことで、さまざまな発想が可能になったのではないかと思います。目標を不確かさ1秒程度にしますと、多少センサヘッドがずれていても、校正曲線に大きくは影響しないとか、国家標準器とは異なった解析アルゴリズムが考えられるようになりました。キャンセル技術では「目盛りの間隔の1/4」は必須です。

マルチ再生ヘッド法、3点法は、基準センサヘッドに対して他のセンサヘッドの位置により検出できるフーリエ成分が決まります。それだけに基準センサヘッドと他の個々のセンサヘッドの位置関係は重要です。しかし等分割平均法は等角度に等方的に配置されているため、ある程度の平均化効果が働きます。さらに定量的に表現することは極めて難しいものとなっています。

質問・コメント（田中 充）

校正技術の内容について、図7が添えられているものと本文での説明が「センサーヘッドの数に依存したフーリエ成分が求まらない」では不十分なので、肝心の技術内容を読者は想像できません。

回答（渡部 司）

図7を参照し、具体的な説明を加えました。「例えば5個のセンサヘッドを配置した場合は、5, 10, 15・・・と5の倍数次のフーリエ成分が求まらない。6個の場合は、6, 12, 18・・・の成分が求まらない。また角度偏差のフーリエ成分は一般的に高次になるほど小さくなる傾向がある。したがって配置するセンサヘッドの数を増やせば、それだけ影響の大きい低次成分項を検出し、高次の項までフーリエ成分の抜けのない校正值を求めることができる。」

議論5 用語説明・表現の改善について

質問・コメント（赤松 幹之・田中 充）

トータルステーション、セオドライト、エリプソメータ、校正など専門外の人にはなじみのない用語が出てきますので、用語説明を加えていただけませんか。特に、校正という言葉は角度誤差の見える化という本題と密接な関係があるのできちんと説明してはどうでしょうか？その他、誤差や精度という言葉の使い方が、標準専門家として偏っているので訂正してはどうでしょうか？

回答（渡部 司）

トータルステーション、セオドライト、エリプソメータの用語説明を加えました。また、角度の偏差を校正值として求めることが校正の意味であることが分かるように改訂しました。さらに、誤差や精度については、それぞれ偏差、カタログの「精度」として是正しました。

訂正（2巻2号にて）

1巻4号の研究論文「ロータリエンコーダに角度標準は必要か」の中の式に誤りがありましたので訂正いたします。

ロータリエンコーダに角度標準は必要か 一角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発—（渡部 司 著）
299頁 左段 23行目

誤

$$\mu = \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$

正

$$\mu = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$

構成的研究の方法論と学問体系

— シンセシオロジーとはどういう学問か? —

中島 秀之

分析的科学に関してはデカルトの方法序説、クーンのパラダイム論、ポパーの反証可能性の議論など様々な定式化がなされているが、Synthesiology (構成的な学問体系) に関してはいまだにそういったものが存在しない。ほぼ唯一の例外は吉川による一連の取り組みであろう。ここでは吉川が第2種基礎研究と呼んでいるものを中心に、それは構成的な研究のことであるという主張をし、その学問体系としての方法論の定式化を試みる。

1 はじめに

自然科学というのはデカルトの方法序説^[1]以来様々な機会にその方法論が論じられてきた。自然科学が要求するのは客観性であり、その客観性を担保するためにポパーは「反証可能性」^[2]を要求し、実験による反証が可能なものだけを科学的命題の対象と規定している。そのためには誰が実行しても同じ結果が得られるという、観測者を抜きにした系の設定が必要条件となる。すなわち、対象システムを観測者から分離できるという前提条件が無いと科学は成立しない。

クーンのパラダイム論^[3]は、そのような枠組みが固定ではなくパラダイムシフトとして変遷していることを指摘しているし、ポラーニイの暗黙知の理論^[4]は自然科学が社会的営みであることに言及している。これらが、自然科学の絶対的地位に、ある意味の疑問を提示しているにもかかわらず、他の方法論、特に工学に関してはこれまでそういった議論は少なかった。ほぼ唯一の例外は吉川による一連の取り組み^{[5][6]}であろう。

筆者も高校・大学では自然科学の方法論を学んできたが、実は万能ではないと気づいたのは最近のことである^[9]。自然科学の方法論の適用できる問題だけを研究するというのは、落し物をしたときに明かりの下しか探さないようなものである。世の中には科学の方法論に乗らない課題は多く、そういう部分をどのような方法論で研究していくかということを考えたい。それがSynthesiologyの主テーマであろう。工芸の世界では作家と作品を切り離すことはできない(自然科学の前提条件を満たさない)が、工学の分野でも、そこまで人には依存しないにしても、科学のように完全に

分離できない面がある。

ここでは吉川が第2種基礎研究と呼んでいるものを中心に、それは構成的な研究のことであるという主張をし、その学問体系としての方法論の定式化を試みる。

2 言語と思考

情報処理の研究者という立場から、その研究手法を基に構成学の方法論を考察したい。その際、言葉の問題が結構本質的であると考えているので、言葉にこだわって議論を進めたい。

まず、「科学」について。英語では「science」という言葉があるが、これは日本語の「科学」には1対1に対応していない。英語のscienceとartは図1に示すようにオーバーラップした部分がある概念である。Scienceはscientia (=知識)を語源としており、対象に関する分類学のようなものが始まりである。一方artはars (=わざ・(職人的な)技術)を語源としており、日本語の技術に近いニュアンスがあるが、同時に芸術も包含する概念である。日本語では科学と芸術はオーバーラップしないだけでなく、ほぼ反義語のように使われることすらある。つまり、日本語では、

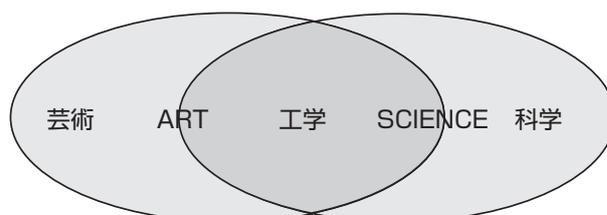


図1 科学と工学

scienceのうちartでない部分だけが一般に科学と呼ばれている。吉川の「第1種基礎研究」はこの部分を指していると考えている。scienceとartのオーバーラップする部分が科学と技術の接点、すなわち「工学」ということになろう。あるいは吉川のいう第2種基礎研究もここに対応する。そして、artからscienceを抜いた部分が「芸術」と呼ばれる。ただ、一般には「工学」という言葉はここで定義したような意味で使われている場合は少なく、むしろ吉川のいうところの製品化研究に近い部分を指すことが多い。本稿で述べる構成の学はscienceとartの直交部分のための方法論である。

本題に入る前にその準備として言語と思考の問題についてもう少し掘り下げておきたい。

文化が認知に与える影響に関しては様々な研究がある^{[10][11]}が、その言語版というべきものに、Sapir-Whorfの言語相対性仮説^{[12][13]}がある。

- ・Whorfの強い仮説（言語決定論）：人間の思考は言語に規定される

- ・Whorfの弱い仮説（言語相対論）：概念の範疇化は言語・文化によって異なる

これらは検証されたわけではないものの、私は結構（少なくとも言語相対論は）正しいと思っている。

時空間の切り方まで言語によって規定されているというのがWhorfの主張である^[13]。

習慣的な思考および行動と言語との関係「時間」、「空間」、「質量」といった我々の概念は、実質的に同一の形の経験を通じてすべての人間に与えられているのだろうか。（参考文献[13]のp.102）

哲学者や一部の科学者の中には、一元論的、全体論的、相対論的に現実を見ることに魅力を感じる人もいるが、…自然そのものがそのような考え方を受け入れないということではなくて…それらを語るためには新しい言語といってもよい位のものが必要になる（参考文献[13]のpp.126-127）

ニュートン力学の空間、時間、物質というのは決して直観ではない。それらは文化と言語からの「類像」（recepts）である。ニュートンはそこからそれらを得たのである。（参考文献[13]のp.127）

我々が赤ん坊で生まれたときに空間認識ができ上がっているわけではなくて、日本語あるいは英語の母語を覚える過程で区切りができてくるという主張である。最も有名なの

は色の識別で、色をどこで分節化するかというのは、母国語にどういう色の名前があるかに依存するというのが心理学的に検証されている。それをニュートン力学の空間の概念まで広げようというのがWhorfの仮説である。

Whorfほど過激でなくとも、言語の持つ構造が認知、特に科学的なものの見方に影響を与えていることは想像に難くない。本論と特に関係するのは、世界を「もの」として対象化して観るのか、あるいは「こと」として経験化するのかわである。木村敏^[14]はりんごを対象物、つまりりんごという「もの」として見るときには、自分と離れた存在として客体化するが、りんごが落ちる「こと」という言い方をするときには、自分がそれを経験しているということを含むと述べている。おそらくこれと関係するのだが、英語というのは名詞＝体言中心の構文を持っており、日本語は動詞＝用言中心の構文を持っている^[15]。また、欧米においては名詞の獲得が動詞の獲得に先行するが、アジアの国々（中国）ではこのような傾向が見られない、あるいは逆転することが報告されている^[16]。

3 視点

言語記述は世界を見る観点（自分の位置づけ）に密接に関係しているのだが、それを端的に表す例を紹介しておきたい。金谷は日本語と英語の視点の差に注目しており、

- ・英語は神の視点
- ・日本語は虫の視点

から、それぞれ情景を記述していると主張している。

金谷^[17]はNHK教育テレビ「シリーズ日本語」で池上嘉彦が紹介した実験について触れている。川端康成の「雪国」は

(1) 国境の長いトンネルを抜けると雪国であった。

という文で始まるが、これを川端の翻訳を多く手掛けている翻訳家 E.G. Seidensticker が英訳した文は以下のとおりである。



図2 虫の視点

(2) The train came out of the long tunnel into the snow country.

これらを読んだ人達に情景を絵にさせると、日本語 (1) の場合は汽車に乗っている乗客の視点から描いた絵 (図2) になるのに対し、英語 (2) の場合は汽車がトンネルから出てくるのを上空から描いた絵 (図3) になるそうである。決して英語訳がまずいのではない。日本語のような視点からの記述も不可能ではないが、それでは自然な英語にならないのだ。

続いて研究における視点の問題を扱いたい。あるシステムを研究するときに、その研究者はどこに位置しているかという問題である。自然科学の場合は明らかにシステムとは隔離されたところに研究者を置く (図4左)。システムの外にいて、外から観測をするという外部観測者の視点である。観測によってシステムの動作が影響を受けない、あるいは観測結果から観測行為の影響を除去する方法がわかっていることが理想である。それに対して図4右のように研究者がシステムの一部となっているのが内部観測者の視点である。

市川^[18]によれば、西洋では世界全体が無矛盾な規則で記述できる無矛盾世界観を持ち、その場合には神や憲法のようなシステムを超越した存在 (図4左) を前提としている。それに対し、日本では集団ごとに異なる規則を容認する容矛盾世界観^[19]を前提としている。ここでも英語と日本語の違いと同じものが観測されるのが面白い。言葉から思考が規定されているとしたら、我々日本人というのは構成学 (Synthesiology) を世界に発信するには非常にふさわしい民族だということにならないだろうか。

自然科学の守備範囲をまとめておく：

- ・分析的方法論が適用できること
- －観測が対象に影響を与えないこと
- －あるいはその影響が計算可能であること (量子力学の不確定性原理を含む)



図3 鳥の視点

- ・客観性が保てること
- －外部観測者の視点をとれること
- －世界の無矛盾性が保てること

内部観測者の視点というのは科学的には望ましくない状況ではあるが、そうならざるを得ない分野がある。構成的にシステムを造るというのはどうしても内部視点にならざるを得ない。後で触れるが、新しいシステムを構築する場合に、仕様をまず決め、それから設計図を書いて、最後にそれを実装すればよいという風には行かない。造ったシステムを使い、評価するというフェーズが必須であり、ここには研究者がシステムのユーザという形で含まれる。その意味で科学と工学は方法論が異なるのである。これを正しく認識することから構成的方法論の議論が始まる。

構成的方法論を必要とする (後述するように、分析的方法論が不要という意味ではない) 分野には以下のようなものが含まれる：

- ・複雑系
- ・ (経済のような) マクロ・ミクロの相互作用の起こる系
- ・ (人間のよう) 多層システム
- ・アモルファス。局所的には結晶に近いが、大局的に見ると不均質な系
- ・ (宇宙論、地質、進化論、歴史、考古学のように) 実験不可能な1回限りの現象

案外多くの分野がこういう構成的な方法論を必要としているというのがわかる。

4 構成のループ

一般的には分析と構成は逆方向の行為だと考えられている。全体を部分に分割して、個々の部品と、部品どうしの関係を調べるのが分析である。逆に部品から全体を組上げるのが構成というわけである。これは機械を分解、再構築するという図式が念頭にあるように思うが、実際には構成的手法の出発点として部品が過不足なく揃っているということはありえない。部品の同定から始めなければならないのが構成である。しかも、構成したいものから部品を同定する作業は非常に困難であり、アルゴリズム的手法は存在しない。

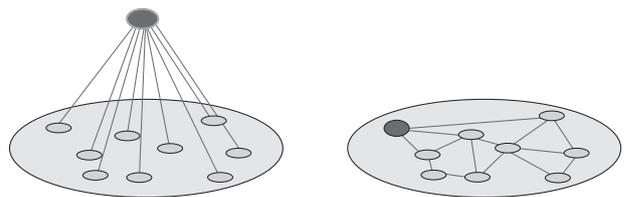


図4 システム外視点 (左) とシステム内視点 (右)

我々は構成的手法の一部に分析的手法が使われていると考えている（図5）。たとえば建築の場合を考えよう。建築物に対して仕様記述が与えられたときに、それに合致する機能を持つ建物を直接デザインできれば良いのだが、既に定型化しているような建築様式でない限りそういうことは難しい。普通は仕様を満たしていると思われるものをとりあえず構築（生成）してみる（この部分については5節で述べる）。これは模型かもしれないし、実物の家かもしれないが、とりあえず生成して試みるのが重要である。実際に生成することによって、必ず求めたもの以上の細部が加わる（具体化される）し、環境との予期せぬ相互作用も発生しうる。したがって、でき上がったものを分析し、その性質を明らかにする必要がある。この分析手法もあらかじめ決まったものとは限らず、生成して試みることによって新しい分析手法が決まるかもしれない。分析の結果が定まると、それを元の仕様と比べて、必要なフィードバックをかける。この過程によって仕様が変わるかもしれない。この構成のループは1回では終わらなくて、仕様が変わり続ける限り繰り返される。これが構成的方法論の中心となるループである。

注意していただきたいのは、構成のループでは仕様（＝目標）が変化していくということである。また、分析の方法は実物を生成した後でないと定まらないという意味で、前述のように、分析と構成は単純な逆方向の行為ではなく、強いて言うなら直交したものではないかと考えている。

このように定式化すると、自然科学における分析のための仮説形成という行為は、理論というメタレベルにおいて構成的方法論を実践するループになる。仮説を生成し、それから演繹できる事象に対してそれを検証するための実験（あるいは思考実験）を考えていくことになる。分析的科学においてはこの仮説検証のための方法論（つまり実験）が確立しているが、構成的方法論においては生成されたものの評価・検証方式は確立していない。物語を評価するのと同等の手法（後述）しかないのではないかと考えている。

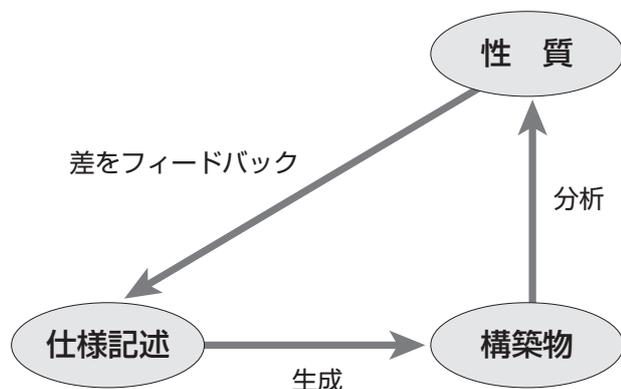


図5 構成のループ

実際、（メタレベルの構成の結果である）仮説の評価に関しても、現象を無矛盾に説明できる仮説が複数ある場合、単純なものが良いという「オッカムの剃刀」基準が用いられることがある。これなども物語的评价の一例であろう。

したがって、構成のループはラフには吉川^[8]のいう「第2種基礎研究」の過程に対応させることができ、上記の仮説形成の部分は「アブダクション」に対応すると考えてよい。

例えば理論研究における法則の導出は構成であるが、その正当性は従来の理論との整合性に関する演繹的分析や実験によって帰納的に検証される。人工物ではこのことは社会的使用によって行われる。このことからいって第1種基礎研究と第2種基礎研究とは全く違う。そして論理的構造を考えるといずれもアブダクションを含むが、アブダクションの全過程における重要性は第2種基礎研究においてより大きい。しかも、第1種基礎研究ではこの検証の過程が、研究者自身か、そうでなくても同じ領域の研究者によって行われるのに対し、第2種基礎研究の場合は研究が行われる世界とは関係のない一般社会で行われる。

吉川は製品研究を想定しているため、一般社会のみが検証の場として想定されているが、任意の構成的科学を対象とした場合には「環境」一般を検証の場とする方が妥当であろう。

5 進化論的方法論

構成のループのうち、「生成」の部分の方法論は何であろうか？ 私はこれには進化論的方法論しか存在しないと考えている。別名 trial and error と呼ばれる探索手法である。単純化すると以下のプロセスを繰り返すものである（図6）。

1. 現存の種 (seed) から様々な候補を生成する
2. 候補を評価し、良いものだけを残す

候補の生成は機械的に行うことも可能だが、評価の方が一般的には困難である。ただし、生成も様々な可能性を必ずしもランダムに生成するだけではない。効率的探索手法が必要であり、遺伝的アルゴリズムはその例である。局所的には最急降下法や方程式による解析と最適化も用いることができるだろうが、それは対象の分析がかなり進んだ部分に限られる。

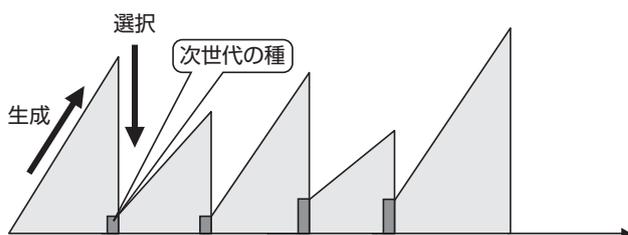


図6 進化の図式

前出の市川^[18]は進化システムの要件として以下のものを措定している：

- ・(恒常性を維持する) 自己複製子 (ゲノム) の存在
- ・自己複製子のシステム構造 (要素と、要素を結合したシステムが存在する)
- ・システム構造の変異の可能性
- ・(複製の頻度に関する) 複製子システム間相互作用 (競争)
- ・外部環境の存在

ちなみに市川は科学の方法を以下のように定義している。

1. 仮説および定数で構成されるモデルから演繹的推論によって予測を行う。
2. この予測を確認できる観察・測定 (以下観測という) を計画し実施する。
3. 観測により得られる事例と予測が一致すれば仮説は実証されたという。
4. 予測と反する事例 (反例) が得られたならば、その仮説は偽であるとして棄てる。その事例を取り込んで帰納的推論を行い仮説を作り直す。1に戻る。

市川は現代の科学技術というのが進化システムを構成していると主張している。したがって、進化論的方法論が構成的方法論の1つであることの裏付けにもなる。一方で、方法論がこれしか存在しないということを論証するのは至難である。しかし、状況証拠は豊富にある。

まず第一に、自然界の進化すなわち生物進化がそういう方法を採用して成功している。

第二に、千年オーダーの歴史を持つ将棋や囲碁でもそうになっている。研究者と同じかそれよりも頭が良く、研究者より遥かに多人数の人達が、長年にわたって研究を続けたものでも進化論的方法論しか存在しないのである。

将棋や囲碁に必勝の方程式はない。一部の良く分析された手筋だけが定石という形になっているが、それ以外の部分はある意味で創発あるいは、将来の様々な場面を順に評価して行く「先読み」という形のトライアル・アンド・エラーになっている。また、定石の説明も先読み形式で行われることが多い。事実上先読み以外の方法が存在しないと言ってもよいだろう。

ここで問題にしている生成というプロセスは、全体の持つべき性質 (将棋であれば、勝つというゴールや、相手の駒を取るというゴール) を実現するための細部 (将棋であれば具体的手筋) を生成するという意味で、分析科学の要素還元と同じ方向であることに注意されたい。そのような観点から、多層システムを生成するための構成的方法論に議論を移したい。

6 多層システムの生成

本節では多層システムの生成に焦点を当てて構成的方法論の精緻化を行う。

まずはここで問題としている多層システムの定義をしたい。

たとえば人間という生物を理解するためには様々な層を理解する必要がある。

- ・社会
- ・個体
- ・内蔵器官
- ・細胞
- ・分子

これらすべてを合わせて理解していかなければいけないのだが、分析的科学には1つの層で切って説明するという方法論はあっても、幾つかの層をまとめて理解するという方法論がない。還元論的に、分子生物学のみで人間社会を理解するのは不可能である。上記の各々の層に個別の法則性があり、下位層は上位層の分解ではない。つまり多層の実在性をそのまま認める必要がある。

多層のシステムを扱う方法論に入りたい。まずは分析的方法論に則り、対象を単純化して2層システムを考えよう。例として木村^[19]による音楽の演奏の記述を扱う (図7)。音楽の演奏には、奏でたい音楽という層と、実際の演奏という2つの層が存在する。2層の中にはではあるが、3つの要素が入ってくる。

1. 未来ノエマ^{用語2}。奏でたい音楽の設計図あるいは楽譜のようなもの。
2. ノエシス。実際の演奏、実際に奏でられた音。
3. 現在ノエマ。奏でられた音を聴いた結果の音楽。

ここで一番重要なのは、ノエシスと環境との相互作用である。音楽の例でいうと、その日の気温とか湿度、ホールの反響率とか、観客の反応とか、それらのものがすべて音楽に反映される。演奏者が直接には制御できない要素が

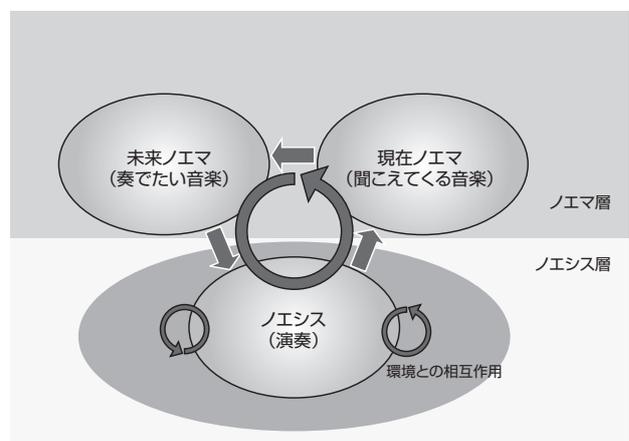


図7 音楽演奏のノエマとノエシス

含まれているという点が肝要である。ほとんどすべての生成という行為にはこういった、制御不能の相互作用が絡んでくる。従来、このことはあまり重要視されてこなかったように思うが、環境との相互作用があることによって、構成が非常に困難になる。企業で製品をつくる場合には、ユーザが思わぬ使い方をすることがある。ポケベルのメッセージ伝達機としての使用や、携帯電話利用の普及などはそういった例である。ただし、芸術などではこの相互作用を積極的に応用している例も少なくない。書道における滲みや墨の掠れ、陶芸（萩焼など）における火のまわり具合や灰の付着などはその好例である。

できたものを、環境との相互作用の後で分析し、今自分がどういう音楽を奏でているかを認識し、最初に構想したものとの差分を次の瞬間の演奏にフィードバックして行く。このループを回すというのが音楽の演奏における構成の手法となるが、この場合は非常に周期の短い、速いループになる。研究の場合にはもっと時定数の大きなループになる。ただし、いずれのループもフラクタル構造を持っており、各遷移をより詳細に見ると、また同様のループになっていることが多い。

このノエマとノエシスのループは前述の構成のループ（図5）と同型であることに気付かれたかもしれない。実際、これを時系列で展開したものが図8であり、我々の考える構成的手法のFNSダイアグラム^{用語 3[20][21]}になっている。

図8における矢印の意味は以下の通りである。

(C1) 未来ノエマを実現すべく行われる行為。

(C1.5) 生成されたノエシスは環境との相互作用を起こす。

(C2) その結果、上層では、期待された未来ノエマとは異なる現在ノエマが生まれる。

(C3) 未来ノエマへとフィードバックする行為。制御変数を増やしたり、プランを変更したりすることが含まれる。

ノエマとノエシスの図式は自然科学を行う科学者の行為（分析科学）にも当てはまる（図9）。未来ノエマとしての

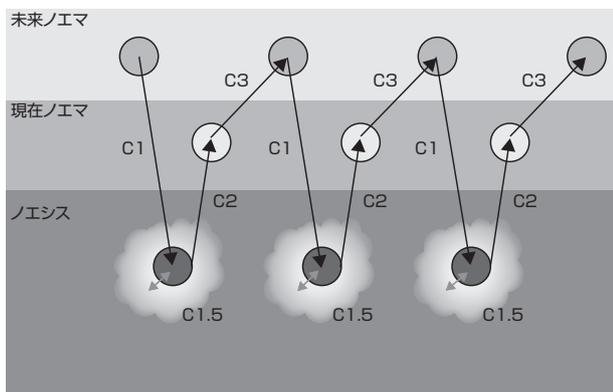


図8 構成的手法のFNSダイアグラム

理論（あるいは仮説）が存在し、それを検証すべく外在化したものが実験の道具立てである。実際に実験を行うと、それは環境中の様々な要素と相互作用し、特定の現象を引き起こす（これが、演奏に相当する）。その現象を観測・分析し、理論へのフィードバック（修正あるいは検証）が行われる。

多層システムを扱うときにはFNSがノエシス層において多層化される（図10）^[22]。図は3層を示しており、左に行くほど上位の層になる。下位の層（右側）では環境の要素となっていたものが上位層（左側）ではノエシスに含まれる。つまり、右側では中心にあるノエシスと、それを取り巻く環境中の要素に分離して表示されているシステムが、左側では中心のノエシス、あるいは環境中の要素1つに対応する。音楽の例でいえば、演奏家のレベルで見た時には環境に含まれていた観客が、より上位の、演奏全体という層ではシステムの一部となる。また、逆に上位で観客や演奏者という1つのシステムとして扱われるものは、下位の層では更なるサブシステム（たとえば目や耳や手）へと分解される。

下位層ではノエシスはPART-OF関係で分解されると考えてよい。一方ノエマは別の記述体系を採る。たとえば個

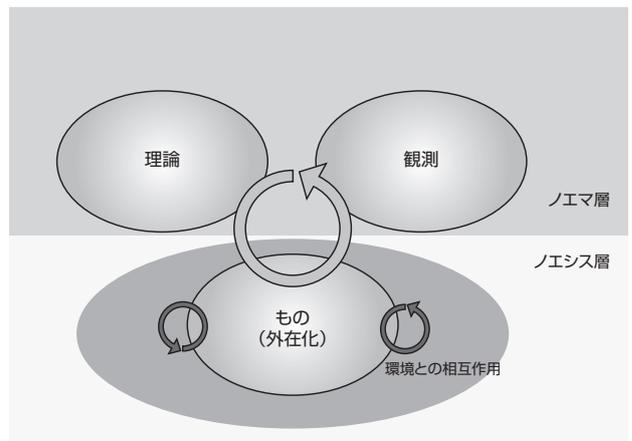


図9 科学という行為におけるノエマとノエシス

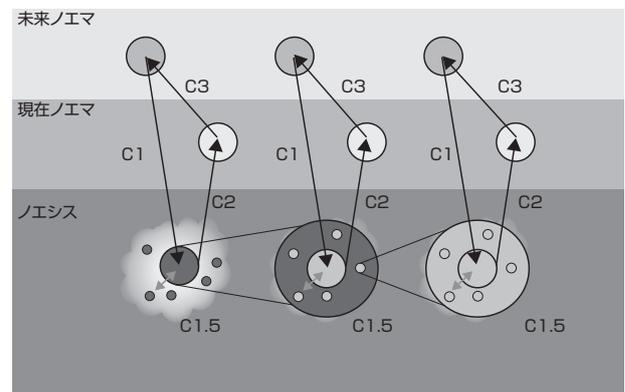


図10 多層システムのFNSダイアグラム

人レベルのノエマと細胞レベルのノエマは別ものとなる。ただし、これらの関連が分析可能な場合もある。熱力学における、温度（上位）は分子の運動エネルギー（下位）の平均値であるというのはその典型例であるが、このような関係がわかっていることは希であろう。

7 物語

構成されたものの評価あるいは実証には物語的手法しか存在しないという仮説を述べた。

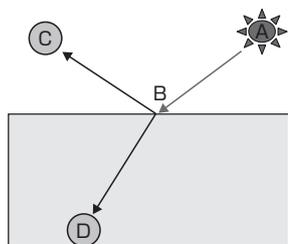
物語を客観的に評価する指標は無い。物語の良し悪しの判定は属人的であるし、それらが一致するとは限らない。しかしながら、良い物語は多くの人には受け入れられるし、賞も多数存在する。そのような意味では構成を評価することは可能であろう。

良い物語は概ね以下のような条件を備えている：

- ・物語の構成要素間に強い関係（因果関係）が存在する。
- ・1つの要素はできるだけ多くの他の要素と関係するのが良い（他の要素と関連しない孤立要素は存在しない）。
- ・要素間の関係は自明でない方が良い。

物理学においても物語的説明が用いられることがある。光の反射・屈折を説明するのに実は2通りの方法がある（図11）。入射角と反射角が等しいという法則を用いるものが1つ、もう1つは、A地点からC地点へ時間的に最短の経路を光が通るのだという目的論的な説明。屈折の場合も同じで、屈折角と最短時間の両方がある。

到達点が先にわかっていると最短時間経路は決まらない。したがって、光の身になってみればそういう経路は計算できない。つまり、時間を捨象し、空間的問題として展開する場合には分析的説明は可能であるが、時間に沿った構成的考え方では局所メカニズムを問題とする反射角と入射角の法則（実際には波としての光のより詳細なメカニズムがあるのだが、本質は変わらないのでここでは割愛する）を採用するしかない^[23]。



| 分析的 / 目的論的説明 | 構成的説明 |
|--------------------|-----------------|
| AC(AD)間の「最短経路」 | 入射角と反射角(屈折率)の法則 |
| C(D)の位置が分かった後でない不可 | 経路(およびC/D)の予測 |

図11 分析的（過去）説明と構成的（未来）予測

8 サービス工学

産総研にサービス工学研究センターが設立されたことは大変喜ばしいことだが、サービス工学というのも構成的な学問体系である。

「service」という単語は、ある英和辞書を引くと23個の日本語訳が並んでいる。要するに、日本語に対応する概念（言葉）がないので、使用例23通りを全部並べたわけである。そのため「サービス工学」の「サービス」という用語も人によって解釈が違うと思うが、私は無料奉仕のことでなく、実際に「使用すること」と規定している。また、工学は本稿の主旨である構成的方法論のことである。したがってサービス工学はいわゆる第三次産業としてのサービス業にかかわる学問ではなく、構成的学問体系の実証に関連するものとして捉えるべきである。そしてこのプロセスはFNSダイアグラム上にマップすることができる。

図12は、私も参加した科学技術振興機構主催のワークショップ^[24]でまとめられた、今後の研究の在り方の図である。従来型の研究開発では、右下のモノを創る部分ばかり注目されてきたが、その開発されたモノを実際に使用する、サービスに供する部分が重要である。使用し、それを評価し、必要ならば新しい価値観を創造し、また研究開発に戻すというループを回していくというのが、私の理解する「本格研究」であるし、構成的な方法論はこの図の上に乗ってくる。実際、図12を左へ120度回転させればFNSの1サイクルと同型になる。

Peter Druckerは既に1960年代に使用（サービス）の重要性を予見していたらしく、「断絶の時代」^[25]には以下の記述が見られる：

知識の探究と教育は、その利用から切り離されていた。知識は研究対象ごとに、いわば知識の論理と思われるものに従って組織されていた。大学の学部、学科、科目、学位にいたるまで、高等教育全体が専門別に組織さ

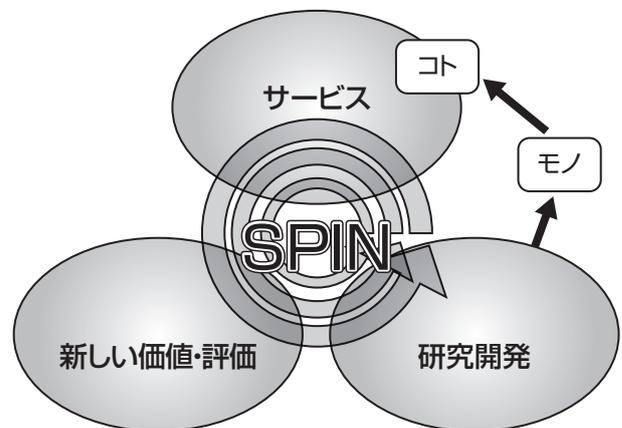


図12 サービスをループに含む新しい研究開発の実体像

れていた。マネジメントにいうところの市場志向、用途志向ではなく、製品志向だった。

今日ようやく、知識とその探究が、専門分野別ではなく利用分野別に組織されるようになった。学際研究が急速に進みつつある。知識が自らを最終目的とするものから、何らかの成果をもたらすための手段に移行したことの結果だった。

現代社会の動力源としての知識は、仕事に使われてはじめて意味をもつ。仕事は専門分野によって定義することはできない。仕事の成果は学際的たらざるをえない。

9 まとめ

研究・開発において自然科学の方法論が通用しない部分が多い。そのことを世の研究コミュニティに訴えて行きたい。そのような領域をカバーするのが *Synthesiology* の役目であろう。本稿では構成的学問領域の方法論について述べた。

我々の使う日本語という言語の構造、それが要請する視点、そして我々の世界観が構成的方法論に近いということ述べ、構成的方法論の定式化を試みた。最後にそのような世界観の違いについてまとめておく。

| 無矛盾世界観 | 容矛盾世界観 |
|-----------|-----------|
| 一神教 | 多神教 |
| デカルト的二分世界 | 未分離「色即是空」 |
| 分析的手法＝科学 | 構成的手法 |
| 客観主義（もの） | 主体概念（こと） |

構成的方法論の定式化は日本の貢献が期待できる分野であるし、そのために *Synthesiology* が担う役割は大きいと考えている。

用語説明

用語1：これは市川用語ではなく、筆者の造語。

用語2：「ノエマ」と「ノエシス」という用語は元々フッサールによるものであるが、木村はこれらを若干異なる意味で用いている。これらを簡単に説明するのは至難であるので、原典に当たっていただくか、あるいは単なる記号だと思っただけでも構わない。一応の読み替えを提示しておくが、あくまで定義ではないということで理解いただきたい。ノエマとは概念あるいは設計図の様なものである。図5の「仕様記述」はノエマの一例。これに対しノエシスとはノエマの具体化である。図5の「構築物」はノエシスの一例。

用語3：歴史的には Fujii-Nakashima-Suwa ダイアグラムであっ

たが、最近、Future Noema Synthesis ダイアグラムと改名した。

キーワード

構成的方法論、視点、世界観、言語、科学、工学

参考文献

- [1] R. DesCartes: *Discourse de la methode* (1637) (谷川多佳子訳：方法序説、岩波書店 (1997)).
- [2] K. R. Popper: *The logic of scientific discovery*, Harper and Row (1962) (大内義一、森博訳：科学的発見の論理、恒星社厚生閣 (1971)).
- [3] T. S. Kuhn: *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago Press (1962). (中山茂訳：科学革命の構造、みすず書房 (1971)).
- [4] M. Polanyi: *The tacit dimension* (1966) (佐藤敬三訳：暗黙知の次元、紀伊国屋書店 (1980)).
- [5] 吉川弘之：一般設計学序説、*精密機械*, 45, 22-26 (1979).
- [6] 吉川弘之、内藤耕(編著): *第2種基礎研究*, 日経BP社, (2004).
- [7] 吉川弘之：イノベーションの行動理論, *産総研 TODAY* 2007 (1), 8-15 (2007).
- [8] 吉川弘之：サービス工学序説－サービスを理論的に扱うための枠組み－, *Synthesiology*, 1 (2), 111-122 (2008).
- [9] 中島秀之：構成的情報学とai, *人工知能学会論文誌*, 21 (6), 502-513 (2001).
- [10] 北山忍：*自己と感情－文化心理学による問いかけ－*, 認知科学モノグラフ, 共立出版 (1998).
- [11] R. E. Nisbett: *The geography of thought, How asians and westerners think differently...and why*, Free Press (2003) (村本由紀子訳：木を見る西洋人 森を見る東洋人 -思考の違いはいかにして生まれるか、ダイヤモンド社 (2004)).
- [12] E. S. Language: *An introduction to the study of speech*. Harcourt, Brace and Company (1921) (安藤貞雄訳：言語：ことばの研究序説、岩波文庫 (1998)).
- [13] B. L. Whorf: *言語・思考・現実*, 講談社学術文庫 (1993).
- [14] 木村敏：心の病理を考える, 岩波新書 (1994).
- [15] 金谷武洋：*日本語文法の謎を解く－「ある」日本語と「する」英語*, ちくま新書 (2003).
- [16] T. Tardif: Nouns are not always learned before verbs: Evidence from mandarin speakers' early vocabularies, *Developmental Psychology*, 32, 492-504 (1996).
- [17] 金谷武洋：*英語にも主語はなかった*, 講談社選書メチエ, (2004).
- [18] 市川惇信：*暴走する科学技術文明*, 岩波書店 (2000).
- [19] 木村敏：*あいだ*, 弘文堂 (1988).
- [20] 中島秀之、諏訪正樹、藤井晴行：縦の因果関係, *日本認知科学会第24回大会予稿集*, 42-47 (2007).
- [21] 中島秀之、諏訪正樹、藤井晴行：構成的情報学の方法論からみたイノベーション, *情報処理学会論文誌*, 49 (4), 1508-1514 (2008).
- [22] 諏訪正樹、中島秀之、藤井晴行：個人スキルのメタ認知と社会デザインの循環構造の考察, *人工知能学会全国大会 2008*, 1B2-10 (2008).
- [23] T. Taura and Y. Nagai: Design insight-A key to studying design creativity, In John Gero, editor, *Studying Design Creativity*, Springer, to appear.
- [24] 科学技術振興事業団：科学技術未来戦略ワークショップ（電子情報通信系俯瞰WSII）報告書 (2007).
- [25] P. F. Drucker: *Age of discontinuity*, Butterworth-Heinemann Ltd.(1969) (上田惇生訳：断絶の時代、ダイヤモンド社 (1999)).

(受付日 2008.7.16)

執筆者略歴

中島 秀之（なかしま ひでゆき）

公立ほこだて未来大学理事長・学長。1983年、東京大学大学院情報工学専門課程修了(工学博士)。同年電子技術総合研究所入所。同情報科学部長、同企画室長、産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター長などを経て2004年より現職。産総研サービス工学

研究センター研究顧問。人工知能を状況依存性の観点から研究。マルチエージェントならびに複雑系の情報処理とその応用に興味を持っている。情報処理学会元副会長、認知科学会元会長、ソフトウェア科学会元理事、人工知能学会元理事、マルチエージェントシステム国際財団(IFMAS)元理事。主要編著書：知能の謎（講談社ブルーバックス）、知的エージェントのための集合と論理（共立出版）、思考（岩波講座認知科学8）、記号の世界（岩波書店）、Prolog（産業図書）。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

本ジャーナルは、個別要素的な技術や科学的知見をいかに統合して、研究開発の成果を社会で使われる形にしておくか、という科学的知の統合に関する論文を掲載することを目的とする。この論文の執筆者としては、科学技術系の研究者や技術者を想定しており、研究成果の社会導入を目指した研究プロセスと成果を、科学技術の言葉で記述したものを論文とする。従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実的知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行なえば良いかについての知見（すなわち当為的知識）を記載したものを論文とする。これをジャーナルの上で蓄積することによって、研究開発を社会に活かすための方法論を確立し、そしてその一般原理を明らかにすることを目指す。さらに、このジャーナルの読者が自分たちの研究開発を社会に活かすための方法や指針を獲得することを期待する。

研究論文の記載内容について

研究論文の内容としては、社会に活かすことを目的として進めて来た研究開発の成果とプロセスを記載するものとする。研究開発の目標が何であるか、そしてその目標が社会的にどのような価値があるかを記述する（次ページに記載した執筆要件の項目1および2）。そして、目標を達成するために必要となる要素技術をどのように選定し、統合しようと考えたか、またある社会問題を解決するためには、どのような新しい要素技術が必要であり、それをどのように選定・統合しようとしたか、そのプロセス（これをシナリオと呼ぶ）を詳述する（項目3）。このとき、実際の研究に携わったものでなければ分からない内容であることを期待する。すなわち、結果としての要素技術の組合せの記載をするのではなく、どのような理由によって要素技術を選定したのか、どのような理由で新しい方法を導入したのか、について論理的に記述されているものとする（項目4）。例えば、社会導入のためには実験室的製造方法では対応できないため、社会の要請は精度向上よりも適用範囲の広さにあるため、また現状の社会制度上の制約があるため、などの理由を記載する。この時、個別の要素技術の内容の学術的詳細は既に発表済みの論文を引用する形として、重要なポイントを記載するだけで良いものとする。そして、これらの要素技術は互いにどのような関係にあり、それらを統合

するプロセスにおいて解決すべき問題は何であったか、そしてどのようにそれを解決していったか、などを記載する（項目5）。さらに、これらの研究開発の結果として得られた成果により目標にどれだけ近づけたか、またやり残したことは何であるかを記載するものとする（項目6）。

対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはしない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の実験者にも内容が理解できるように記述することが必要であるとともに、その専門分野の実験者に対しても学術論文としての価値を示す内容でなければならない。

論文となる研究開発としては、その成果が既に社会に導入されたものに限定することなく、社会に活かすことを念頭において実施している研究開発も対象とする。また、既に社会に導入されているものの場合、ビジネス的に成功しているものである必要はないが、単に製品化した過程を記述するのではなく、社会への導入を考慮してどのように技術を統合していったのか、その研究プロセスを記載するものとする。

査読について

本ジャーナルにおいても、これまでの学術ジャーナルと同様に査読プロセスを設ける。しかし、本ジャーナルの査読はこれまでの学術雑誌の査読方法とは異なる。これまでの学術ジャーナルでは事実の正しさや結果の再現性など記載内容の事実性についての観点が重要視されているのに対して、本ジャーナルでは要素技術の組合せの論理性や、要素技術の選択における基準の明確さ、またその有効性や妥当性を重要視する（次ページに査読基準を記載）。

一般に学術ジャーナルに掲載されている論文の質は査読の項目や採録基準によって決まる。本ジャーナルの査読においては、研究開発の成果を社会に活かすために必要なプロセスや考え方が過不足なく書かれているかを評価する。換言すれば、研究開発の成果を社会に活かすためのプロセスを知るために必要なことが書かれているかを見るのが査読者の役割であり、論文の読者の代弁者として読者の知りたいことの記載の有無を判定するものとする。

通常の学術ジャーナルでは、公平性を保証するという理由により、査読者は匿名であり、また査読プロセスは秘匿される。確立された学術ジャーナルにおいては、その質を維持するために公平性は重要であると考えられているからである。しかし、科学者集団によって確立されてきた事実的知識を記載する論文形式に対して、なすべきことは何であるかという当為的知識を記載する論文のあり方については、論文に記載すべき内容、書き方、またその基準などを模索していかなければならない。そのためには査読プロセスを秘匿するのではなく、公開していく方法をとる。すなわち、査読者とのやり取り中で、論文の内容に関して重要な議論については、そのやり取りを掲載することにする。さらには、論文の本文には記載できなかった著者の考えなども、査読者とのやり取りを通して公開する。このように査読プロセスに透明性を持たせ、どのような査読プロセスを経て掲載に至ったかを開示することで、ジャーナルの質を担保する。また同時に、査読プロセスを開示することによって、投稿者がこのジャーナルの論文を執筆するときの注意点を理解する助けとする。なお、本ジャーナルのように新しい論文形式を確立するためには、著者と査読者との共同作業によって論文を完成させていく必要があり、掲載された論文は著者と査読者の共同作業の結果ともいえることから、査読者氏名も公表する。

参考文献について

前述したように、本ジャーナルの論文においては、個別の要素技術については他の学術ジャーナルで公表済みの論文を引用するものとする。また、統合的な組合せを行う要素技術について、それぞれの要素技術の利点欠点について記載されている論文なども参考文献となる。さらに、本ジャーナルの発行が蓄積されてきたのちには、本ジャーナルの掲載論文の中から、要素技術の選択の考え方や問題点の捉え方が類似していると思われる論文を引用することを推奨する。これによって、方法論の一般原理の構築に寄与することになる。

掲載記事の種類について

巻頭言などの総論、研究論文、そして論説などから本ジャーナルは構成される。巻頭言などの総論については原則的には編集委員会からの依頼とする。研究論文は、研究実施者自身が行った社会に活かすための研究開発の内容とプロセスを記載したもので、上記の査読プロセスを経て掲載とする。論説は、科学技術の研究開発のなかで社会に活かすことを目指したものを概説するなど、内容を限定することなく研究開発の成果を社会に活かすために有益な知識となる内容であれば良い。総論や論説は編集委員会が、内容が本ジャーナルに適しているか確認した上で掲載の可否を判断し、査読は行わない。研究論文および論説は、国内外からの投稿を受け付ける。なお、原稿については日本語、英語いずれも可とする。

執筆要件と査読基準

(2008.01)

| 項目 | 執筆要件 | 査読基準 |
|----|----------------------------------|---|
| 1 | 研究目標 (「製品」、あるいは研究者の夢) を設定し、記述する。 | 研究目標が明確に記述されていること。 |
| 2 | 研究目標と社会とのつながり | 研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。 |
| 3 | シナリオ | 道筋 (シナリオ・仮説) が合理的に記述されていること。 |
| 4 | 要素の選択 | 要素技術 (群) が明確に記述されていること。要素技術 (群) の選択の理由が合理的に記述されていること。 |
| 5 | 要素間の関係と統合 | 要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。 |
| 6 | 結果の評価と将来の展開 | 研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。 |
| 7 | オリジナリティ | 既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。 |

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿を受け付ける。

2 投稿資格

投稿原稿の著者は、本ジャーナルの編集方針にかなう内容が記載されていれば、所属機関による制限並びに科学技術の特定分野による制限も行わない。ただし、オーサーシップについて記載があること（著者全員が、本論文についてそれぞれ本質的な寄与をしていることを明記していること）。

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

1) 投稿原稿は日本語あるいは英語で受け付ける。査読により掲載可となった論文または記事は Synthesiology (ISSN1882-6229) に掲載されるとともに、このオリジナル版の約4ヶ月後に発行される予定の英語版の Synthesiology - English edition (ISSN1883-0978) にも掲載される。このとき、原稿が英語の場合にはオリジナル版と同一のものを英語版に掲載するが、日本語で書かれている場合には、著者に英語版への掲載のための翻訳版の作成を依頼し、翻訳されたものを英語版に掲載する。

2) 原稿はワープロ等を用いて作成し、A4判縦長の用紙に印字する。表紙には記事の種類(研究論文か論説)を明記する。

3.2 原稿の構成

1) タイトル(含サブタイトル)、要旨、著者名、所属・連絡先、本文、キーワード(5つ程度)とする。

2) タイトル、要旨、著者名、所属・連絡先については日本語および英語で記載する。

3) 原稿は、図・表・写真を含め、原則として刷り上り6頁程度とする。

4) タイトルは和文で10～20文字(英文では5～10ワード)前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究論文には和文で15～25文字(英文では7～15ワード)前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

5) 要約には、社会への導入のためのシナリオ、構成した技術要素とそれを選択した理由などの構成方法の考え方も記載する。

6) 和文要約は300文字以内とし、英文要約(125ワード程度)は和文要約の内容とする。英語論文の場合には、和文要約は省略することができる。

7) 本文は、和文の場合は9,000文字程度とし、英文の場合は刷り上りで同程度(3,400ワード程度)とする。

8) 掲載記事には著者全員の執筆者履歴(各自200文字程度。英文の場合は75ワード程度。)及びその後、本質的な寄与が何であったかを記載する。なお、その際本質的な寄与をした他の人が抜けていないかも確認のこと。

9) 研究論文における査読者との議論は査読者名を公開して行い、査読プロセスで行われた主な論点について3,000文字程度(2ページ以内)で編集委員会が編集して掲載する。

10) 原稿中に他から転載している図表等や、他の論文等からの引用がある場合には、転載許可等の明示や、参考文献リスト中へ引用元の記載等、適切な措置を行う。また、直接的な引用の場合には引用部分を本文中に記載する。

3.3 書式

1) 和文原稿の場合には以下のようにする。本文は「である調」で記述し、章の表題に通し番号をつける。段落の書き出しは1字あけ、句読点は「。」および「、」を使う。アルファベット・数字・記号は半角とする。また年号は西暦で表記する。

2) 図・表・写真についてはそれぞれ通し番号をつけ、適切な表題・説明文(20～40文字程度。英文の場合は10～20ワード程度。)を記載のうへ、本文中における挿入位置を記入する。

3) 図についてはそのまま印刷できる鮮明な原図、または画像ファイル(掲載サイズで350dpi以上)を提出する。原則は刷り上りで左右15cm以下、白黒印刷とする。

4) 写真については鮮明なプリント版(カラー可)または画像ファイル(掲載サイズで350dpi以上)で提出する。ファイルタイプ(tiff, jpeg, pdfなど)を明記する。原則は左右7.2cmの白黒印刷とする。

5) 参考文献リストは論文の参照順に記載する。

雑誌：[番号] 著者名：表題、雑誌名、巻(号)、開始ページ～終了ページ(発行年)。

書籍(単著または共著)：[番号] 著者名：書名、開始ページ～終了ページ、発行所、出版地(発行年)。

4 原稿の提出

原稿の提出は段刷文書1部および電子媒体に原稿提出チェックシートを添付のうへ、下記宛に提出する。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

著者校正は1回行うこととする。この際、印刷上の誤り以外の修正・訂正は原則として認められない。

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

Synthesiology 1 巻総目次 (2008)

1巻1号

発刊に寄せて

第2種基礎研究の原著論文誌 ……吉川 弘之 1-6

研究論文

不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓

–実用化を指向する蛋白質研究– ……西宮 佳志、三重 安弘、平野 悠、近藤 英昌、三浦 愛、津田 栄 7-14

高齢者に配慮したアクセシブルデザイン技術の開発と標準化

–聴覚特性と生活環境音の計測に基づく製品設計手法の提供– ……倉片 憲治、佐川 賢 15-23

高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ

–ガラスインプリント法によるサブ波長周期構造の実現– ……西井 準治 24-30

異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略

–質調整生存年数を用いたトルエンの詳細リスク評価– ……岸本 充生 31-37

個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術

–あなただけの製品をだれにでも提供できるビジネス創成を目指して– ……持丸 正明、河内 まき子 38-46

耳式赤外線体温計の表示温度の信頼性向上

–国家標準にトレーサブルな新しい標準体系の設計と導入– ……石井 順太郎 47-58

論説

科学と社会、あるいは研究機関と学術雑誌：歴史的回顧 ……赤松 幹之、井山 弘幸 59-65

座談会

創刊号著者座談会：新しい形式の論文を執筆して …… 66-73

1巻2号

研究論文

シームレスな20万分の1日本地質図の作成とウェブ配信

–地質図情報の利便性向上と有用性拡大を目指して– ……脇田 浩二、井川 敏恵、宝田 晋治、伏島 裕一郎 82-93 (1-12)

熱電発電を利用した小型コジェネシステムの開発

–新たな酸化物材料が拓く高温廃熱回収システム– ……舟橋 良次、浦田 さおり 94-100 (13-19)

だれでも構築運営できるコラボレーションシステムの実現

–qwikWebを用いたコミュニケーション・パターンの実践– ……江渡 浩一郎、濱崎 雅弘、西村 拓一 101-110 (20-29)

サービス工学序説

–サービスを理論的に扱うための枠組み– ……吉川 弘之 111-122 (30-41)

タンパク質のネットワーク解析から創薬へ

–超高感度質量分析システムをどのように実現したか– ……家村 俊一郎、夏目 徹 123-129 (42-48)

エアロゾルデポジション法

–高機能部品の低コスト、省エネ製造への取り組み– ……明渡 純、中野 禪、朴 載赫、馬場 創、芦田 極 130-138 (49-57)

インタビュー

シンセシオロジーへの期待：MITレスター教授へのインタビュー ……リチャード レスター、小林 直人 139-143 (58-62)

トヨタ自動車グループにおける基礎研究から製品化への流れについて：技術統括部 梅山部長へのインタビュー

……梅山 光広、赤松 幹之 144-148 (63-67)

座談会

新ジャーナル査読者座談会：新しい形式の論文を査読して …… 149-156 (68-75)

1巻3号

研究論文

実用化をめざしての再生医療技術開発

–安全を担保したヒト細胞操作プロセス構築と臨床応用– ……大串 始 170-175 (1-6)

輸送用クリーン燃料の製造触媒の研究と開発

–触媒の基盤研究から製品化に向けた触媒共同開発へ– ……葭村 雄二、鳥羽 誠 176-182 (7-13)

実用化へ向けた有機ナノチューブの大量合成方法開発

–分子設計・合成技術と安全性評価の統合により市場競争力のある材料へ–
 ……浅川 真澄、青柳 将、亀田 直弘、小木曾 真樹、増田 光俊、南川 博之、清水 敏美 183-189 (14-20)

フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発

–「どこでもデバイス、だれでもデバイス」の実現に向けて–
 ……鎌田 俊英、吉田 学、小笹 健仁、植村 聖、星野 聡、高田 徳幸 190-200 (21-31)

水に代わる密度標準の確立

–シリコン単結晶を頂点とする密度のトレーサビリティ体系– ……藤井 賢一 201-211 (32-42)

製造の全工程を考慮した資源及びエネルギー利用の合理化指針

–アルミニウム鑄造工程のエクセルギー解析– ……北 英紀、日向 秀樹、近藤 直樹 212-221 (43-52)

論説

シンセシオロジー発刊について

–イリノイ大学日本人研究者らとの討論を通じて– ……大崎 人士、佐藤 裕二 222-228 (53-59)

「シンセシオロジー」創刊記念シンポジウム

–個の「知」から全の「知」へ–そのシナリオの共有と蓄積について– …… 229-234 (60-65)

1巻4号

研究論文

ナノテクノロジーから大容量・高出力型リチウム電池の実用化へ

–異分野融合と産学官垂直連携によるイノベーションの“短距離化”– ……本間 格 247-258 (1-12)

ホテルの光の基礎研究から製品化研究へ

–生物発光タンパク質に基づくマルチ遺伝子発現検出キット– ……近江谷 克裕、中島 芳浩 259-266 (13-20)

粘土膜の開発

–出会いの側面から見た本格研究シナリオ– ……蛭名 武雄 267-275 (21-29)

土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法

–リスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチ–
 ……駒井 武、川辺 能成、原 淳子、坂本 靖英、杉田 創 276-286 (30-40)

光触媒技術の開発と応用展開

–持続可能な環境浄化技術の産業化– ……埜田 博史 287-295 (41-49)

ロータリエンコーダに角度標準は必要か

–角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発– ……渡部 司 296-304 (50-58)

論説

構成的研究の方法論と学問体系

–シンセシオロジーとはどういう学問か?– ……中島 秀之 305-313 (59-67)

Vol.1 table of contents (2008)

Vol.1 No.1

Preface

A journal of original papers of *Type Two Basic Research* - - - H. Yoshikawa 1-6

Research papers

Mass preparation and technological development of an antifreeze protein
—*Toward the practical use of biomolecules*— - - - Y. Nishimiya, Y. Mie, Y. Hirano, H. Kondo, A. Miura and S. Tsuda 7-14

Development and standardization of accessible design technologies that address the needs of senior citizens
—*Product design methodology based on measurements of domestic sounds and hearing characteristics*—
- - - K. Kurakata and K. Sagawa 15-23

A challenge to the low-cost production of highly functional optical elements
—*Fabrication of sub-wavelength periodic structures via glass-imprinting process*— - - - J. Nishii 24-30

A strategic approach for comparing different types of health risks
—*A risk assessment of toluene exposure using quality-adjusted life years*— - - - A. Kishimoto 31-37

Technologies for the design and retail service of well-fitting eyeglass frames
—*Toward the mass customization business*— - - - M. Mochimaru and M. Kouchi 38-46

Improving the reliability of temperature measurements taken with clinical infrared thermometers
—*Design and establishment of a new calibration system traceable to the national standards*— - - - J. Ishii 47-60

Article

Science and society, or research institution and journal: A historical retrospection - - - M. Akamatsu and H. Iyama 61-67

Vol.1 No.2

Research papers

Creation of seamless geological map of Japan at the scale of 1:200,000 and its distribution through the web
—*For maximum accessibility and utilization of geological information*—
- - - K. Wakita, T. Igawa, S. Takarada and Y. Fusejima 73-84(1-12)

Development of a small-size cogeneration system using thermoelectric power generation
—*Recovery system of high-temperature waste heat by new thermoelectric oxides*— - - - R. Funahashi and S. Urata 85-92(13-20)

Realization of a collaboration system for everyone to develop and manage
—*Practices of communication patterns using qwikWeb*— - - - K. Eto, M. Hamasaki and T. Nishimura 93-102(21-30)

Introduction to service engineering
—*A framework for theoretical study of the service engineering*— - - - H. Yoshikawa 103-113(31-41)

A systematic analysis of protein interaction networks leading to the drug discovery
—*Development of ultra sensitive mass spectrometry analytical platform*— - - - S. Iemura and T. Natsume 114-120(42-48)

The aerosol deposition method
—*For production of high performance micro devices with low cost and low energy consumption*—
- - - J. Akedo, S. Nakano, J. Park, S. Baba and K. Ashida 121-130(49-58)

Interviews

Hope for *Synthesiology*: Discussion with Prof. Lester - - - R. K. Lester and N. Kobayashi 131-137(59-65)

The Toyota Motor approach from basic research to product realization: Interview with Dr. Umeyama,
General Manager, R&D Management Division - - - M. Umeyama and M. Akamatsu 138-142(66-70)

Round-table talk

Round table talk by reviewers of the new journal: Reviewing papers in the new style - - - 143-149(71-77)

Vol.1 No.3

Research papers

Development of regenerative medical technology working toward practical application

— *Construction of human cell processing system in view of safety for the purpose of clinical application* —
 - - - H. Ohgushi

Development of highly-active hydrodesulfurization catalyst for sulfur-free diesel production

— *Full research from in-house laboratory catalyst to commercial catalyst* — - - - Y. Yoshimura and M. Toba

Development of massive synthesis method of organic nanotube toward practical use

— *Integration of molecular design, molecular synthesis and safety assessment for materials having market competitiveness* —
 - - - M. Asakawa, M. Aoyagi, N. Kameta, M. Kogiso, M. Masuda, H. Minamikawa and T. Shimizu

Development of flexible-printable device processing technology

— *For achievement of prosumer electronics* —
 - - - T. Kamata, M. Yoshida, T. Kodzasa, S. Uemura, S. Hoshino and N. Takada

A new density standard replaced from water

— *Using silicon single-crystals as the top of traceability in density measurement* — - - - K. Fujii

A rationalization guideline for the utilization of energy and resources considering total manufacturing processes

— *An exergy analysis of aluminum casting processes* — - - - H. Kita, H. Hyuga and N. Kondo

Articles

On the launch of AIST journal *Synthesiology*: Discussion with Japanese researchers at the University of

Illinois at Urbana-Champaign - - - H. Ohsaki and Y. Sato

Vol.1 No.4

Research papers

Development of high power and high capacity lithium secondary battery based on the advanced nanotechnology

— *The convergence innovation strategy employing the inter-disciplinary research and inter-organization straightforward technology transfer* — - - - I. Honma

From basic research on firefly bioluminescence to *Product Realization Research*

— *Production of a multi-gene expression kit based on bioluminescent proteins* — - - - Y. Ohmiya and Y. Nakajima

Development of clay-based-film

— *A Full Research scenario from a viewpoint of encounter* — - - - T. Ebina

Development of a risk assessment system for soil contamination and the application to the social system

— *Processes in Synthesiology for practicing an advanced environmental risk management* —
 - - - T. Komai, Y. Kawabe, J. Hara, Y. Sakamoto and H. Sugita

Development and applications of photocatalytic technology

— *Industrialization of sustainable eco-technology* — - - - H. Taoda

Is an angular standard necessary for rotary encoders?

— *Development of a rotary encoder that enables visualization of angle deviation* — - - - T. Watanabe

Article

Discipline of constructive research fields

— *Toward formalization of "Synthesiology"* — - - - H. Nakashima

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

There has been a wide gap between science and society. The last three hundred years of the history of modern science indicates to us that many research results disappeared or took a long time to become useful to society. Due to the difficulties of bridging this gap, it has been recently called the valley of death or the nightmare stage ^(Note 1). Rather than passively waiting, therefore, researchers and engineers who understand the potential of the research should be active.

To bridge the gap, technology integration ^(i.e. Type 2 Basic Research – Note 2) of scientific findings for utilizing them in society, in addition to analytical research, has been one of the wheels of progress ^(i.e. Full Research – Note 3). Traditional journals, have been collecting much analytical type knowledge that is factual knowledge and establishing many scientific disciplines ^(i.e. Type 1 Basic Research – Note 4). Technology integration research activities, on the other hand, have been kept as personal know-how. They have not been formalized as universal knowledge of what ought to be done.

As there must be common theories, principles, and practices in the methodologies of technology integration, we regard it as basic research. This is the reason why we have decided to publish “*Synthesiology*”, a new academic journal. *Synthesiology* is a coined word combining “synthesis” and “ology”. Synthesis which has its origin in Greek means integration. Ology is a suffix attached to scientific disciplines.

Each paper in this journal will present scenarios selected for their societal value, identify elemental knowledge and/or technologies to be integrated, and describe the procedures and processes to achieve this goal. Through the publishing of papers in this journal, researchers and engineers can enhance the transformation of scientific outputs into the societal prosperity and make technical contributions to sustainable development. Efforts such as this will serve to increase the significance of research activities to society.

We look forward to your active contributions of papers on technology integration to the journal.

“*Synthesiology*” Editorial Board

- Note 1** The period was named “nightmare stage” by Hiroyuki Yoshikawa, President of AIST, and historical scientist Joseph Hatvany. The “valley of death” was by Vernon Ehlers in 1998 when he was Vice Chairman of US Congress, Science and Technology Committee. Lewis Branscomb, Professor emeritus of Harvard University, called this gap as “Darwinian sea” where natural selection takes place.
- Note 2** Type 2 Basic Research
This is a research type where various known and new knowledge is combined and integrated in order to achieve the specific goal that has social value. It also includes research activities that develop common theories or principles in technology integration.
- Note 3** Full Research
This is a research type where the theme is placed within the scenario toward the future society, and where framework is developed in which researchers from wide range of research fields can participate in studying actual issues. This research is done continuously and concurrently from Type 1 Basic Research^(Note 3) to Product Realization Research^(Note 5), centered by Type 2 Basic Research^(Note 4).
- Note 4** Type 1 Basic Research
This is an analytical research type where unknown phenomena are analyzed, by observation, experimentation, and theoretical calculation, to establish universal principles and theories.
- Note 5** Product Realization Research
This is a research where the results and knowledge from Type 1 Basic Research and Type 2 Basic Research are applied to embody use of a new technology in the society.

Edited by *Synthesiology* Editorial Board
Published by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi, A.Yabe

Executive Editors: M.Akamatsu, K.Naito, H.Taya

Editors: A.Kageyama, K.Ohmaki, K.Igarashi, E.Tsukuda, M.Tanaka,

H.kuriyama, Y.Owadano, T.Shimizu, H.Tateishi, M.Mochimaru,

N.Murayama, S.Togashi, K.Mizuno, H.Ichijo, A.Etori, H.Nakashima,

K.Ueda, P. Fons

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST

Tsukuba Central 2, Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212

E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

URL: <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

*Reproduction in whole or in part without written permission is prohibited.

Abstract of Research Papers

Development of high power and high capacity lithium secondary battery based on the advanced nanotechnology

– The convergence innovation strategy employing the inter-disciplinary research and inter-organization straightforward technology transfer –

Itaru Honma

Energy Technology Research Institute, AIST
Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan
E-mail: i.homma@aist.go.jp

The development of high power and high capacity lithium secondary battery has been executed in a new strategic innovation scheme. This paper reports the significance of adopting the idea of interdisciplinary research to straightforward technology transfer from university, through AIST and battery company down to automobile company. A joint project of these organizations covering the upper stream science (at a university) and the down stream battery products (at a company) has been found a good scheme for rapid R&D when the university or AIST has innovative seeds. AIST has superiority in producing new technological seeds because of the interdisciplinary research between energy and nanotechnology as well as a wide spectrum of research fields covered by the institute. In this paper, an application of nanocrystalline electrode materials to high power battery is reported where the technology was successfully transferred to the commercial development of superior battery products.

From basic research on firefly bioluminescence to *Product Realization Research*

– Production of a multi-gene expression kit based on bioluminescent proteins –

Yoshihiro Ohmiya and Yoshihiro Nakajima

Research Institute for Cell Engineering, AIST
Midorigaoka 1-8-31, Ikeda 563-8577, Japan
E-mail: y-ohmiya@aist.go.jp

In the postgenomic era, biological network analysis has become essential for elucidating animal physiology. We have developed a revolutionary tricolor reporter in vitro assay system that can be

utilized for detailed analysis of a biological network. Bioluminescence has the potential for visualizing the dynamics of living systems. To accomplish our vision, we are realizing new technologies via *Type I Basic Research*.

Development of clay-based-film

– A *Full Research* scenario from a viewpoint of encounter –

Takeo Ebina

Research Center for Compact Chemical Process, AIST
Nigatake 4-2-1, Miyaginoku, Sendai 983-8551, Japan
E-mail: takeo-ebina@aist.go.jp

An example of *Full Research* in the development of clay-based-film is introduced. Clay is eco-friendly, and it exists abundantly in Japan. Clay-based-films can be used as heat resistant gas barrier materials that in turn contribute to the realization of a sustainable industry. Details of the technical development, public information, intellectual property, and technology transfer occurring during the process from the initial invention to practical application are discussed. At the same time, the interactions of people and research groups related to the development process are analyzed. In addition, the effectiveness of a consortium is discussed in the context of an innovation model based on development integration.

Development of a risk assessment system for soil contamination and the application to the social system

– Processes in *Synthesiology* for practicing an advanced environmental risk management –

Takeshi Komai, Yoshishige Kawabe, Junko Hara, Yasuhide Sakamoto and Hajime Sugita

Research Institute for Geo-resources and Environment, AIST
Onogawa 16-1, Tsukuba 305-8569, Japan
E-mail: takeshi-komai@aist.go.jp

In developing risk assessment technology for soil contamination, it is essential to carry out a wide range of fundamental research and to synthesize the results into a single system. We have carried out an

integrated research project for a comprehensive risk assessment system; this project includes fundamental knowledge, database formulation, commercialization of technology, and introduction of the research results to a social system. This paper presents a scenario in *Synthesiology*, the integration of each part of the research results, and discusses the spiral processes involved in the implementation of risk assessment.

Development and applications of photocatalytic technology

– Industrialization of sustainable eco - technology –

Hiroshi Taoda

Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST

110 Nishiibara-cho, Seto, 489-0884, Japan

E-mail: h-taoda@aist.go.jp

Photocatalysts are capable of decomposing organic compounds such as toxic and bioresistant pollutants into non toxic gases in the presence of light. Material development and application of a number of photocatalysts have been carried out taking into consideration many factors including application, cost, as well as applicable regulations. As a result of these efforts, a variety of new photocatalytic products are now on the market.

Is an angular standard necessary for rotary encoders?

– Development of a rotary encoder that enables visualization of angle deviation –

Tsukasa Watanabe

Planning Headquarters, AIST

National Metrology Institute of Japan, AIST

Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8563, Japan

E-mail: t.watanabe@aist.go.jp

A rotary encoder is an angular readout device that reads an optical pattern written on the circumference of a shaft similar to a 360 degrees protractor and outputs angle position information. Since the output of a rotary encoder deviates from the true angle position due to optical pattern errors or eccentricity of the shaft about the rotation axis, users have encountered difficulty in ensuring the reliability of the angle information derived from an encoder. In order to solve this problem, “SelfA: A Self-calibratable Angle device” was developed. The SelfA can detect a variety of angle deviation sources by itself, and has the ability to output an angular calibration value. This SelfA can detect the angle deviation value from an optical encoder which has been a black box until now and enables “visualization” of these factors quantitatively.

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

The objective of *Synthesiology* is to publish papers that address the integration of scientific knowledge or how to combine individual elemental technologies and scientific findings to enable the utilization in society of research and development efforts. The authors of the papers are researchers and engineers, and the papers are documents that describe, using “scientific words”, the process and the product of research which tries to introduce the results of research to society. In conventional academic journals, papers describe scientific findings and technological results as facts (i.e. factual knowledge), but in *Synthesiology*, papers are the description of “the knowledge of what ought to be done” to make use of the findings and results for society. Our aim is to establish methodology for utilizing scientific research result and to seek general principles for this activity by accumulating this knowledge in a journal form. Also, we hope that the readers of *Synthesiology* will obtain ways and directions to transfer their research results to society.

Content of paper

The content of the research paper should be the description of the result and the process of research and development aimed to be delivered to society. The paper should state the goal of research, and what values the goal will create for society (Items 1 and 2, described in the Table). Then, the process (the scenario) of how to select the elemental technologies, necessary to achieve the goal, how to integrate them, should be described. There should also be a description of what new elemental technologies are required to solve a certain social issue, and how these technologies are selected and integrated (Item 3). We expect that the contents will reveal specific knowledge only available to researchers actually involved in the research. That is, rather than describing the combination of elemental technologies as consequences, the description should include the reasons why the elemental technologies are selected, and the reasons why new methods are introduced (Item 4). For example, the reasons may be: because the manufacturing method in the laboratory was insufficient for industrial application; applicability was not broad enough to stimulate sufficient user demand rather than improved accuracy; or because there are limits due to current regulations. The academic details of the individual elemental technology should be provided by citing published papers, and only the important points can be described. There should be description of how these elemental technologies

are related to each other, what are the problems that must be resolved in the integration process, and how they are solved (Item 5). Finally, there should be descriptions of how closely the goals are achieved by the products and the results obtained in research and development, and what subjects are left to be accomplished in the future (Item 6).

Subject of research and development

Since the journal aims to seek methodology for utilizing the products of research and development, there are no limitations on the field of research and development. Rather, the aim is to discover general principles regardless of field, by gathering papers on wide-ranging fields of science and technology. Therefore, it is necessary for authors to offer description that can be understood by researchers who are not specialists, but the content should be of sufficient quality that is acceptable to fellow researchers.

Research and development are not limited to those areas for which the products have already been introduced into society, but research and development conducted for the purpose of future delivery to society should also be included.

For innovations that have been introduced to society, commercial success is not a requirement. Notwithstanding there should be descriptions of the process of how the technologies are integrated taking into account the introduction to society, rather than describing merely the practical realization process.

Peer review

There shall be a peer review process for *Synthesiology*, as in other conventional academic journals. However, peer review process of *Synthesiology* is different from other journals. While conventional academic journals emphasize evidential matters such as correctness of proof or the reproducibility of results, this journal emphasizes the rationality of integration of elemental technologies, the clarity of criteria for selecting elemental technologies, and overall efficacy and adequacy (peer review criteria is described in the Table).

In general, the quality of papers published in academic journals is determined by a peer review process. The peer review of this journal evaluates whether the process and rationale necessary for introducing the product of research and development to society are described sufficiently well .

In other words, the role of the peer reviewers is to see whether the facts necessary to be known to understand the process of introducing the research finding to society are written out; peer reviewers will judge the adequacy of the description of what readers want to know as reader representatives.

In ordinary academic journals, peer reviewers are anonymous for reasons of fairness and the process is kept secret. That is because fairness is considered important in maintaining the quality in established academic journals that describe factual knowledge. On the other hand, the format, content, manner of text, and criteria have not been established for papers that describe the knowledge of “what ought to be done.” Therefore, the peer review process for this journal will not be kept secret but will be open. Important discussions pertaining to the content of a paper, may arise in the process of exchanges with the peer reviewers and they will also be published. Moreover, the vision or desires of the author that cannot be included in the main text will be presented in the exchanges. The quality of the journal will be guaranteed by making the peer review process transparent and by disclosing the review process that leads to publication.

Disclosure of the peer review process is expected to indicate what points authors should focus upon when they contribute to this journal. The names of peer reviewers will be published since the papers are completed by the joint effort of the authors and reviewers in the establishment of the new paper format for *Synthesiology*.

References

As mentioned before, the description of individual elemental technology should be presented as citation of papers published in other academic journals. Also, for elemental technologies that are comprehensively combined, papers that describe advantages and disadvantages of each elemental technology can be used as references. After many papers are accumulated through this journal, authors are recommended to cite papers published in this journal that present similar procedure about the selection of elemental technologies and the introduction to society. This will contribute in establishing a general principle of methodology.

Types of articles published

Synthesiology should be composed of general overviews such as opening statements, research papers, and editorials. The Editorial Board, in principle, should commission overviews. Research papers are description of content and the process of research and development conducted by the researchers themselves, and will be published after the peer review process is complete. Editorials are expository articles for science and technology that aim to increase utilization by society, and can be any content that will be useful to readers of *Synthesiology*. Overviews and editorials will be examined by the Editorial Board as to whether their content is suitable for the journal. Entries of research papers and editorials are accepted from Japan and overseas. Manuscripts may be written in Japanese or English.

Required items and peer review criteria (January 2008)

| | Item | Requirement | Peer Review Criteria |
|---|--|---|---|
| 1 | Research goal | Describe research goal (“product” or researcher's vision). | Research goal is described clearly. |
| 2 | Relationship of research goal and the society | Describe relationship of research goal and the society, or its value for the society. | Relationship of research goal and the society is rationally described. |
| 3 | Scenario | Describe the scenario or hypothesis to achieve research goal with “scientific words” . | Scenario or hypothesis is rationally described. |
| 4 | Selection of elemental technology(ies) | Describe the elemental technology(ies) selected to achieve the research goal. Also describe why the particular elemental technology(ies) was/were selected. | Elemental technology(ies) is/are clearly described. Reason for selecting the elemental technology(ies) is rationally described. |
| 5 | Relationship and integration of elemental technologies | Describe how the selected elemental technologies are related to each other, and how the research goal was achieved by composing and integrating the elements, with “scientific words” . | Mutual relationship and integration of elemental technologies are rationally described with “scientific words” . |
| 6 | Evaluation of result and future development | Provide self-evaluation on the degree of achievement of research goal. Indicate future research development based on the presented research. | Degree of achievement of research goal and future research direction are objectively and rationally described. |
| 7 | Originality | Do not describe the same content published previously in other research papers. | There is no description of the same content published in other research papers. |

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

1. Types of contributions

Research papers or editorials should be submitted to the Editorial Board.

2. Qualification of contributors

There are no limitations regarding author affiliation or discipline as long as the content of the submitted article meets the editorial policy of *Synthesiology*, however, authorship should be clearly stated. (It should be clearly stated that all authors have made essential contributions to the paper.)

3. Manuscripts

3.1 General

1) Articles may be submitted in Japanese or English. Accepted articles will be published in *Synthesiology* (ISSN 1882-6229) in the language they were submitted in. All articles will also be published in *Synthesiology - English edition* (ISSN 1883-0978). The English edition will be distributed throughout the world approximately four months after the original *Synthesiology* issue is published. Articles written in English will be published in English in both the original *Synthesiology* as well as the English edition. Authors who write articles for *Synthesiology* in Japanese will be asked to provide English translations for the English edition of the journal.

2) The manuscript shall be prepared using word processors or similar devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheets of paper. The category of article (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheet.

3.2 Structure

1) The manuscript should include a title (including subtitle), abstract, the name(s) of author(s), institution/contact, main text, and keywords (about 5 words).

2) Title, abstract, name of author(s), and institution/contact shall be provided.

3) The length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.

4) The title should be about 10-20 Japanese characters (5-10 English words), and readily understandable for a diverse readership background. Research papers shall have subtitles of about 15-25 Japanese characters (7-15 English words) to help recognition by specialists.

5) The abstract should include the thoughts behind the integration of technological elements and the reason for their selection as well as the scenario for utilizing the research results in the society.

6) The abstract should be 300 Japanese characters or less (125 English words). The Japanese abstract may be omitted in the English edition.

7) The main text should be about 9,000 Japanese characters (3,400 English words).

8) The article submitted should be accompanied by profiles of all authors, of about 200 Japanese characters (75 English words) for each author. The essential contribution of each author to the paper should also be included. Confirm that all persons who have made essential contribution to the paper are included.

9) Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly with names of reviewers disclosed, and the Editorial Board will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or a maximum of 2 pages. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as a part of the article.

10) If there are reprinted figures, graphs or citations from other papers, permission for citation, if needed, should be clearly stated and the sources should be listed in the reference list. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

3.3 Format

1) The text should be in formal style. The section and subsection chapters should be enumerated. There should be one line space at the start of paragraph.

2) Figures, tables, and photographs should be enumerated. They should have a title and an explanation (about 20-40 Japanese characters or 10-20 English words), and the position in the text should be clearly indicated.

3) For figures, clear originals that can be used for printing or image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be 15 cm x 15 cm or smaller, in black and white.

4) For photographs, clear prints (color accepted) or image files should be submitted. Image files should specify file types: tiff, jpeg, pdf, etc. explicitly

(resolution 350 dpi or higher) . In principle, the final print will be 7.2 cm x 7.2 cm or smaller, in black and white.

5) References should be listed in order of citation in the main text.

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title of journal*, Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

Book – [No.] Author(s): *Title of book*, Starting page-Ending page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

4. Submission

One printed copy or electronic file of manuscript with a checklist attached should be submitted to the following address:

Synthesiology Editorial Board
c/o Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 2 , 1-1-1 Umezono, Tsukuba
305-8568
E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

5. Proofreading

Proofreading by author(s) of articles after typesetting is complete will be done once. In principle, only correction of printing errors are allowed in the proofreading stage.

6. Responsibility

The author(s) will be solely responsible for the content of the contributed article.

7. Copyright

The copyright of the articles published in “*Synthesiology*” and “*Synthesiology English Edition*” shall belong to the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST).

Inquiries:

Synthesiology Editorial Board
c/o Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Science and Technology(AIST)
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212
E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp

編集後記

シンセシオロジー第1巻第4号をお届けいたします。今回も広い分野からの多彩な論文を掲載することができました。関係された方々に心から感謝いたします。

さて、今回特筆すべきことの1つは、2008年度のノーベル化学賞受賞となった下村脩博士の研究成果との関係です。ご存知のように下村博士はオワンクラゲが光る謎を解明し、緑色の蛍光タンパク質(GFP)を発見されました。この研究は後に今回共同受賞された他の研究者による第2種基礎研究、製品化研究を通して実用化された本格研究の典型であることを、今回論文を執筆された近江谷克裕氏が追記で述べています。同様に近江谷氏らの研究は、ホタルの発光メカニズムに興味を持ち、それを明らかにする過程から発光タンパク質(ルシフェラーゼ)を利用して細胞内の複数の遺伝子発現を検出する技術を実用化したものです。こちらも、ノーベル賞として評価された生物発光メカニズムの基礎研究と実用化研究を一貫して結びつけた好例であり、新たな第2種基礎研究-構成的研究の1つと言えましょう。

また、今回は中島秀之氏から構成的研究の方法論と学問体系について論説を寄せていただきました。その中で言語と思考について大変興味ある指摘があり、構成的方法論の中で言葉の持つ意味の重要性が述べられています。特に、「英語は神の視点、日本語は虫の視点」「言葉から思考が規定されているとしたら、我々日本人というのは構成学(Synthesiology)を世界に発信するには非常にふさわしい」と言う指摘も、非常にユニークだと思います。

ここでは中島氏の論考に関連して、シンセシオロジーの論文の言葉について別の視点で二点述べてみます。まず第一点目は、術語(ターム)としての言葉です。研究分野や技術分野が異なれば当然異なる術語を使います。ある専門分野(ディシプリン)特有の術語は、いわばその分野特有の知識の蓄積と体系化の証(あかし)でもあり、むしろ他分野の術語と区別があることに意義があります。

一方、シンセシオロジーの論文では個別分野のそれぞれの研究方法論を超えて、第2種基礎研究の構成的方法論で研究が記述されています。したがって、その方法論に相応しい新たな術語の出現が今後予想される場所です。それにはまだ時間がかかるかも知れませんが、構成的方法論共通の術語が少しずつでも形を現してくることを大いに期待したいと思います。それはまた構成的方法論の概念が少しずつ明瞭になることを意味すると思います。

二点目の言葉の課題は、言語(ランゲージ)です。シンセシオロジーを発刊するに当たり、論文の言語を日本語にするか英語にするかについて白熱した議論がありました。国際的な場で広く読んでもらい高い認知度を得るためには、当然英語で論文を発表すべきという意見がありました。その一方で、第2種基礎研究の論文というこれまで他に類を見ない論文を記述するには、日本人の場合はまず母国語である日本語で表現することが重要であり、その内容もまず国内の研究者・技術者に日本語で読んでもらう必要がある、との意見がありました。

編集委員会としては、後者の観点の重要性を重視し、まず日本語で論文誌を発行(英語で投稿された論文はそのまま英語で発行)することといたしました。他方、前者の観点も重視して別途英語版(Synthesiology - English edition)を発行することとしました。お蔭様で、英語版も第2号まで無事発行することができました。日本語版に比べて数ヶ月遅れの発行になりますが、今後日本語版と同様に英語版も広く読まれることを期待しております。

その上で、海外の研究者・技術者からの積極的な投稿があれば非常に嬉しいことです。英語版もご覧になり、折に触れて内外における外国人研究者・技術者の方へも積極的に宣伝をしていただければ誠に幸いです。

(編集副委員長 小林 直人)

Synthesiology 1巻 4号 2008年12月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、矢部 彰

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：景山 晃、大蒔 和仁、五十嵐 一男、佃 栄吉、田中 充、栗山 博、大和田野 芳郎、清水 敏美、立石 裕、持丸 正明、
村山 宣光、富樫 茂子、水野 光一、一條 久夫、餌取 章男、中島 秀之、上田 完次、Paul Fons

事務局：独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部出版室内シンセシオロジー編集委員会事務局

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒308-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 産業技術総合研究所広報部出版室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp ホームページ <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。