

Synthesiology

レーザー援用インクジェット技術の開発

研究戦略の形成とそれに基づいた構成的な研究評価

有機化合物のスペクトルデータベースの開発と公開サービス

マイクロ燃料電池製造技術開発への挑戦

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4巻第1号(2011.2) 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
レーザー援用インクジェット技術の開発 — 高スループットとファイン化の両立を目指した配線技術 — ・・・遠藤 聡人、明渡 純	1-10
研究戦略の形成とそれに基づいた構成的な研究評価 — 創造的営みとしての研究プログラム評価にむけて — ・・・小林 直人、中村 修、大井 健太	11-25
有機化合物のスペクトルデータベースの開発と公開サービス — 大規模データベースの運用の継続と成功の 秘訣 — ・・・齋藤 剛、衣笠 晋一	26-35
マイクロ燃料電池製造技術開発への挑戦 — 革新的セラミックス集積化プロセスを活用するコンパクト SOFC — ・・・藤代 芳伸、鈴木 俊男、山口 十志明、濱本 孝一、淡野 正信	36-45
座談会	
日本のものづくりとシンセシオロジー ・・・成合 英樹、柘植 綾夫、矢部 彰	46-51
報告	
シンセシオロジーワークショップ：オープンイノベーションハブに向けた技術統合の方法論	52-58
編集委員会より	
編集方針	59-60
投稿規定	61-62
編集後記	69
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Development of laser-assisted inkjet printing technology — Wiring technology to achieve high throughput and fine patterning simultaneously — - - - A. Endo and J. Akedo	1
Formation of research strategy and synthetic research evaluation based on the strategy — Toward research program evaluation as a creative activity — - - - N. Kobayashi, O. Nakamura and K. Ooi	11
Development and release of a spectral database for organic compounds — Key to the continual services and success of a large-scale database — - - - T. Saito and S. Kinugasa	26
Challenge for the development of micro SOFC manufacturing technology — Compact SOFC using innovative ceramics integration process — - - - Y. Fujishiro, T. Suzuki, T. Yamaguchi, K. Hamamoto and M. Awano	36
Messages from the editorial board	63-64
Editorial policy	65-66
Instructions for authors	67-68

レーザー援用インクジェット技術の開発

— 高スループットとファイン化の両立を目指した配線技術 —

遠藤 聡人*、明渡 純

次世代のエレクトロニクスデバイス製造技術において、多品種、小ロット生産および低コストかつ大面積化に対応できるフレキシブルな製造技術が求められている。この研究では、配線工程における高スループット化とファイン化を目指して、レーザー援用インクジェット技術を開発した。配線の微細化を実現するに当たり、外部からレーザーを照射して液滴を乾燥させ、基板上でのインクの濡れ広がりを抑制するという新たな着想に基づいて、これまでは困難であった高スループット化とファイン化を同時に実現し、配線幅10 μm以下でアスペクト比1以上の微細配線描画に成功した。この論文では、レーザー援用インクジェット技術開発に至る、ニーズに基づく技術開発課題設定、それを克服するための過程等、研究開発の流れと展開について報告する。

キーワード: インクジェット印刷、スループット、ファインパターン、配線技術、低コスト

Development of laser-assisted inkjet printing technology

– Wiring technology to achieve high throughput and fine patterning simultaneously –

Akito Endo* and Jun Akedo

A new processing technology that can be easily adapted to various circuit designs and production in small lots has been requested for implementation into electronic device manufacturing where low cost device fabrication on large area is required. We have developed a laser-assisted inkjet printing technology which can achieve high throughput and fine patterning simultaneously. To realize fine patterning with low resistivity, ejected ink-droplets have been dried by laser irradiation to suppress expansion on a substrate, a problem often observed in a conventional inkjet process. Drawing of fine wiring with aspect ratio of 1 or above with line width of 10 μm or less has been achieved using this new approach. This paper describes the flow of R&D from needs-driven target setting, process to overcome tasks, to achievement of the laser assisted inkjet printing technology.

Keywords: Ink-jet printing, throughput, fine pattern, wiring technology, low cost

1 背景

産業構造がグローバル化する現在、エレクトロニクス技術は、我が国の経済産業を支える根幹的な分野の一つであり、技術開発の進展と共に、多くの新たなエレクトロニクスデバイスが開発され生産されている。そのような中で、国内外における品質や性能への価値観の違いへの対応、これに伴う価格競争は一層厳しさを増しており、技術革新としてのイノベーションが必要とされている。

例えば、顧客から注文を受けてから製品を生産する方式であるBTO (Build To Order) のように、現在では消費者からの要求によって電子デバイスに対する個別化・差別化が進み、国境を越えてさまざまなユーザーニーズに対応したカスタムメイドの電子デバイス、電気製品作りが求められている。その結果、必然的に多品種少量、多品種変量生産や製造サイクルの短期化に対応できる製造技術の革新が重要となってきており、開発・製造現場ではそれぞれ

の機能を持つ電子デバイスの集積化による多機能化、小型化、さらには低コスト化と高スループット化や、製造工程の水平分業化により小ロット生産・短納期化が進められてきた^[1]。

他方、工業におけるサステナビリティという観点から、21世紀の“ものづくり”に対しては、最少の資源、最小のエネルギー消費でかつ低環境負荷型の製造技術を基本とすることが強く求められている。産総研では、このような「省エネ・省資源」、「高機能・新機能」、「高生産性・低コスト」という現実には多くのケースで相反する三つの要素を新技術で同時に解決する生産プロセスのコンセプトを「ミニマルマニュファクチャリング」と呼び、これを実現することにより、我が国の製造業の持続的発展、すなわち、環境調和と国際競争力に貢献することを目指している。

このような状況はエレクトロニクス実装の分野でも同様であり、エレクトロニクス製品製造の根幹をなす配線技術に

産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan * E-mail: aki-endou@aist.go.jp

Original manuscript received August 26, 2009, Revisions received November 9, 2010, Accepted November 18, 2010

関しても、電子回路や電子部品の実装の多品種化・カスタムメイドへの対応が求められている。ここでは、主に半導体微細加工技術を中心としたマスクプロセスによる製造技術が用いられているが、マスク作製工程には高い精度が求められる、高価になることから多品種化は難しいという問題がある。また、FPD (Flat Panel Display) 等の大面積ディスプレイの配線では、マスクの微細化、大面積化、多階調化が進み、マスクのアライメントが困難となり大面積化が問題となっている。さらに、マスクプロセスには、導体金属の成膜、レジストや余分な導体金属の除去、洗浄の工程が必要であり、貴金属や有害物質等が含まれる廃液が大量に排出されるため、省エネ・省資源化への対応が求められている^[1]。

私達が開発を進めているインクジェット印刷技術は、『必要ところに必要なだけフレキシブルに材料を供給することから、オンデマンド・省資源の特徴を持ち、産総研が掲げる「ミニマルマニファクチャリング」コンセプト実現の中核をなす技術である。また、製造工程で排出される多くの廃液が、環境負荷につながることから、マスク不要で廃棄物がほとんど出ないインクジェット印刷技術による配線実装プロセスが大きく期待されている^{[2][3]}。

しかし、これまで、インクジェット印刷技術を配線に応用するに際しては、インク内に含有している導体の抵抗が高い、配線微細化に伴ってスループットが低下する等の解決すべき問題点が多くあった。この論文では、ミニマルマニファクチャリングのコンセプトのもと、実用的な微細インクジェット配線の実現に挑戦した研究開発の過程を報告する。

2 多品種化生産に向けたそれぞれの製造技術の状況と開発技術の選択

2.1 デバイスの多機能化に伴うICチップの集積化とそれに伴う技術開発の流れ

これまで、電子デバイスの多種多様化に伴って、デバイスの機能に応じた IC パッケージが製造されてきた。その中で、IC チップの小型化、高機能化、低消費電力化を実現するために、1 チップ内にさまざまな機能を集積した SoC (System on a Chip) の開発が進められてきた。

SoC では、1 チップ内に機能を集積するため、新規なプロセス技術として単一のパッケージ内に IC チップを挿入した SiP (System in Package)、すなわち、パッケージ内に開発済みの IC チップを組み合わせることで多機能化を実現してきた。そして現在では、さらに電子製品の小型化・多機能化が進み、IC パッケージの実装面積を減らすため、IC パッケージ内の IC チップを IC スタック

クという積層化した形で 3 次元集積化する方法が行われてきた (図 1)。そして、ここでは、積層化された IC チップを接続する 3 次元実装技術が重要なキーテクノロジーとなっている。

これまででは、IC チップの 3 次元実装において、フリップチップ実装による電氣的接続が行われてきた。具体的には、IC チップ入出力端子上にハンダボールとハンダ付けパッドを設置し、リフロー炉で熱をかけてハンダを溶融して電極端子と接合する方式 (Ball Grid Array) や、メッキ加工によるバンプで IC チップ間を加熱加圧し、電気端子を接合する方法等が採用されている。

しかし、IC チップの多層化が進むにつれてバンプが小型化し、接合欠陥の検査が困難になる、バンプ搭載のコストが上昇する、層間接続に必要な微細 Si 貫通ビアの設置が困難になる、IC スタックの厚みを薄くするためには Si 基板の超薄加工が必要となる等、多くの課題が顕在化している。

一方、IC チップに段差を付けることによって入出力端子を表面に出し、ワイヤボンディングによって IC チップとインターポーザやリードフレーム間の電氣的接続をとる方法もある。しかし、ワイヤによる配線は、素子間の距離が長く、配線の高密度化が困難であり、ワイヤのインダクタンスの増加によって高速伝送に限界が生じる等、解決が困難な課題が残されている^[4]。

以上のように、積層化された IC チップ側面の配線や、チップ間の段差を乗り越えて電氣的接続が可能な 3 次元実装技術の開発が急務となっている。

2.2 各プロセス技術の特徴とインクジェット印刷技術の技術課題

近年の集積化によって IC チップ内のデザインルールが

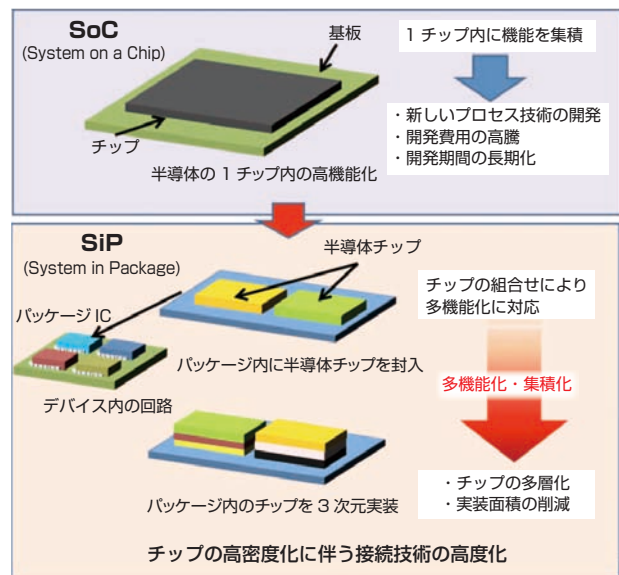


図 1 多機能化に伴う IC チップの高密度集積化の流れ

100 μm 程度からサブミクロンになり、それに伴って3次元実装技術における配線技術の微細化が重要となってきた。同時に、配線技術に対しては、高機能化、省エネ・省資源化、生産効率向上、そして低コスト化への対応が求められている。

この領域において、現時点で、実用もしくは実用化が期待されている配線技術として、マスクプロセス技術であるフォトリソグラフィ技術、μCP (Micro Contact Printing)・ナノインプリント技術、スクリーン印刷技術、および、マスクレスプロセス技術であるMIPTEC (Microchip Integrated Processing Technology)、インクジェット印刷技術を取り上げ、図2に比較して示す。

マスクプロセスにおけるフォトリソグラフィ技術は、感光性有機物質をパターン状に露光してレジストを作製し、基板上に成膜した金属膜をエッチングすることで所望のパターンを作製する。このため、露光に用いられる光の波長に依存するマスクの回折限界まで微細化が可能であり、半導体チップからPCB (Printed Circuit Board) 等までの幅広いデザインルールに対応可能となっている。μCP・ナノインプリント技術は、金型原板を樹脂基板等に転写することで微小な構造体の作成が簡易にでき、数ミクロンからサブミクロンで微細配線が可能な半導体チップ実装技術として開発が進められている。また、スクリーン印刷技術は、PCB等の基板上に孔版を用いて導電性ペーストを刷りつけることで所望のパターンの配線を描画する方法であり、50 μm程度の配線を描画することが可能となってきたことから、表面実装技術として用いられている^[2]。これらのプロセス技術は、マスクもしくは型版を用いることから、凹凸のある基板上での3次元実装への適用は、とても困難である。

一方、マスクレスプロセス技術として、プログラムを書き換えるだけで容易にパターン変更が可能であり、マスクレスで配線の描画ができるMIPTECは、YAGレーザーや

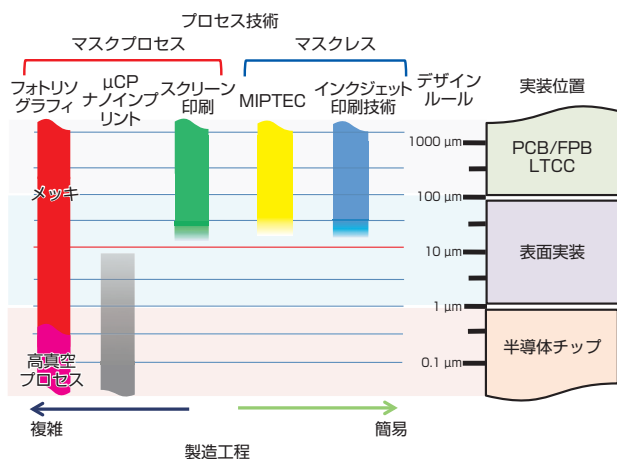


図2 実装位置に対応する配線幅と配線技術

YVO4レーザーにより無電解メッキによって成膜された金属膜配線をアブレーションすることで、3次元でのパターンングが可能のため、立体形状のコネクタ等多品種化に対応した生産が可能となる3次元実装技術として大きな期待が寄せられている。さらに、有機エレクトロニクス分野で開発が進んでいたインクジェット印刷技術^[5]は、導体となるナノサイズの金属粒子を溶媒に分散したインクを必要とときに必要な量だけ塗布するマスクレスプロセスであり、凹凸基板面への描画も可能である。近年では安定して配線幅50 μm程度の配線描画が可能となったことから、3次元実装技術への応用が期待されている。

次に、それぞれのプロセス技術と技術要素の特徴について比較を行った(図3)。現時点で最も実用的なプロセス技術となっているフォトリソグラフィ技術は、ファイン化、高スループット、歩留まりが高いという特徴を活かして技術開発、深化が進められてきた。また、μCP・ナノインプリント技術はファイン化、スクリーン印刷技術は高スループットを特徴として、MIPTECはマスクレスプロセスの優位点である多品種化を特徴として実装技術の開発が進められてきた。

一方、インクジェット印刷技術は、多品種化、低コスト化、省エネ・省資源化が可能という他のプロセス技術にない特徴をもち、ミニマルマニファクチャリングの要となる可能性をもっていることがわかる。しかし、これまでは、高い生産性を実現するために必要なスループットが低く、かつ歩留まりも低いという克服すべき技術課題があった。

3 技術課題と解決手段の選択

3.1 配線描画速度の低下の原因となるインクの濡れ広がり

配線を描画するインクジェット印刷技術は、ドットをつなぎ合わせることによって配線を描画するため、ドット形状を等間隔に並べるこれまでの家庭用インクジェット技術とは異なったプロセス因子の設定と選択が必要である。具体的には、配線描画速度と吐出周波数、インク粘度と表面張力、基板へのインクの濡れ性等の要因により、ドットのつなぎ合わせの状態は変化し、描画される配線パターン形状

	機能性		生産性		生産コスト		環境性	
	ファイン化	多品種化	高スループット	大面積化	製造コスト	製造工程の短縮	省エネ省資源	高い歩留まり
フォトリソグラフィ技術	◎	×	◎	△	×	×	×	◎
μCP・ナノインプリント	○	△	△	×	△	△	△	△
スクリーン印刷	△	△	◎	△	○	○	○	○
MIPTEC	△	○	○	○	△	△	△	○
インクジェット印刷技術	△	◎	×	◎	◎	○	◎	×

図3 各配線技術と技術要素の特徴

は大きく影響される。

これまでのインクジェット印刷技術では、着弾したインクが基板の面方向に濡れ広がるため、インクの表面張力や粘度、基板の濡れ性を制御したとしても、液滴径より配線幅が広がってしまう。例えばステージ速度 100 mm/s、吐出周波数 30 kHz の条件では、液滴直径 15 μm の液滴を接触角が 60° 程度の基板に着弾させた場合、配線幅が 50 μm 程度となり、液滴径の数倍に広がる⁶⁾。そのため、幅 10 ~ 20 μm 程度の微細な配線を行うためには、液滴径は 10 μm 以下に小径化する必要がある。

このことは、配線抵抗を一定に、すなわち、配線単位長さ当たりのインク供給量を一定としつつ、スループットを維持するためには、液滴径の減少分の逆数に対して吐出周波数を 3 乗倍と大幅に高くしなければならないことを意味する。

しかし、インクジェットヘッドの吐出周波数を高くするにしがたがって、①ノズルオリフィスに形成されるメニスカス（インクと空気の界面）が吐出により振動し、これが静止しないうちに次の吐出が起こると、吐出がとて不安定となる、②インクジェットヘッドのイジェクタ内のインクの加減圧に伴うさまざまな振動モードが発生する等、吐出が不安定となる等の問題が生じてくる。また、液滴径、オリフィス径、アクチュエータの変位量、インクの物性（表面張力や粘度等）等、多くのパラメータを同時に最適化する必要がある。このため、既存技術で限界となっている数十 kHz 程度の吐出周波数⁷⁾を大幅に高くすることはとても困難である。

すなわち、これまでのインクジェット配線技術では、配線の微細化とスループットの確保は相反するトレードオフの関係となっており、これを克服するためには液滴が基板に着弾した後の濡れ広がりを抑制するための技術開発のブレークスルーが必要となっていた。

3.2 これまでの濡れ広がり抑制手段

まず、私達は、着弾したインクの濡れ広がりというインクジェット印刷技術における本質的な問題の克服を開発課題と設定し、これまでの研究開発においてインクの濡れ広がりを抑制するためにどのような手段が検討されてきたか、またその結果としてなぜこれまでスループットの向上がなされなかったのかを以下に整理した（図 4）。

1) インクの改良による比抵抗の低減

インクの濡れ広がりの抑制方法を考える前に、そもそもインク材料をより低い比抵抗をもつ材料に置き換えれば配線抵抗を低くできる可能性がある。しかし、明らかにインクの比抵抗をその中に含まれる金属の比抵抗以下に下げることができない。具体的には、現在の市販インクのパナ粒子銀インクの比抵抗は $2 \sim 5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ であり、銀金属の 1.6×10^{-6}

$\Omega \cdot \text{cm}$ の数倍程度であることから、インク材料の改善による比抵抗低減の余地は数倍程度と少ない。したがって、インクの改良による配線抵抗の低減は、開発課題として設定しなかった。

2) 高粘度のインクの使用、液滴の小径化

高粘度インクを使用すると、前述したように、メニスカスの問題や吐出安定性を阻害する振動モードが起こることから、吐出周波数の低下すなわちスループットの低減につながる。また、ノズルが詰まりやすくなるという問題も生じてくる。液滴径を小さくする方法では、スループットの低下が避けられず、さらに、ノズルの小径化に伴うノズル詰まりの問題が生じてくる。

3) 着弾後の濡れ広がりを抑制するための基板表面処理

基板表面を処理する方法は、インクの濡れ広がりを抑制しつつ配線幅を減少できる可能性をもつが、表面処理剤によってインクと配線の密着性を下げることにつながる。例えば、はっ水性をもつポリイミドのようなフレキシブルな基板上に水性溶媒の導電性インクによって配線を描画した場合、密着力は低くなる⁸⁾。これを避けるためにインクの密着性向上を目指して、マスクを用いて親水面と疎水面のパターニングを行い、親水面のみにインクを塗布することが試みられているが⁹⁾、これは結局、製造工程数が多くなることを意味し、トータルでのスループットの向上は達成できない。

4) 基板加熱によるインクの乾燥速度向上

インクの乾燥速度を上げるためにエネルギーを援用する方法として、これまで、基板加熱が試みられたが、基板を加熱すると、基板からの熱放射によりノズルが乾燥し目詰まりを起こすこと、基板着弾時に突沸を起こし配線にクラックおよび空隙が発生する等、プロセス上本質的な問題点があり、実用化には至っていなかった。

このように、インクの濡れ広がりの抑制による配線幅の

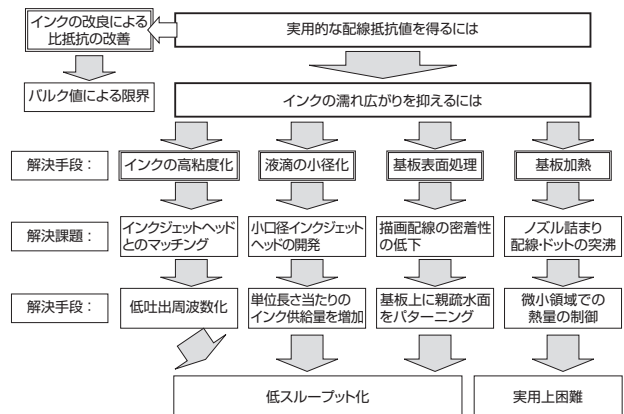


図 4 これまでのインクの濡れ広がりの抑制方法と最終的に得られた効果

ファイン化と配線工程の高スループット化は、まさにトレードオフの関係にあり、これまでの技術では克服できない技術課題であった。

3.3 レーザーエネルギーを用いたインクの乾燥方法の考案

そこで私達は、トレードオフの関係にあった配線幅のファイン化と高スループット化の関係を両立させるために全く新しいアプローチによるプロセス技術の開発に取り組んだ。すなわち、インクの濡れ広がりを抑える方法として、これまでの解決手段である高粘度インクの使用、ノズルの小口径化、基板の表面処理の延長線に取り組みを設定することなく、新たなパスとして、吐出された液滴にエネルギーを援用し、乾燥速度を上げる方法を選択した。

ノズルの乾燥や突沸現象を起こさないように、吐出された液滴に直接エネルギーを投入する方法として、私達は図5に示すように、レーザーを液滴に集光させることによって乾燥を促進し、インクの濡れ広がりを抑制する簡易な方法（以下レーザー援用インクジェット技術）を考案した。

このレーザー援用インクジェット技術は、インクジェットヘッドから吐出された液滴がガラス基板に着弾すると同時に集束レーザー光を液滴及び基板に照射して、熱エネルギーにより瞬時にインク溶媒を蒸発乾燥させる方法である。

このような局所的なレーザーエネルギーの援用によって、ノズル詰まりや基板へのダメージの軽減と、液滴の乾燥と高粘度化によるインク濡れ広がりの抑制が可能となった。

この研究では、シングルヘッドから液滴径 25 μm - 50 μm 程度の液滴を吐出し、波長 10.6 μm の炭酸ガスレーザーを CW (Continuous Wave) モードで吐出液滴の近傍に照射して配線描画を行っている。

3.4 技術開発目標の設定とその狙い

インクジェットによる配線描画技術において配線抵抗を下げられるためには、濡れ広がりを抑え、配線厚を向上する、

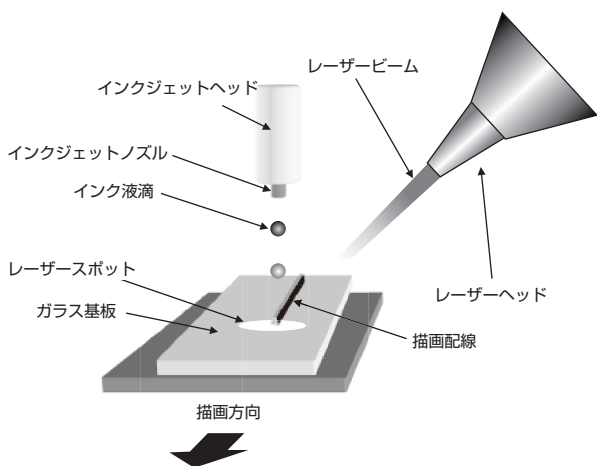


図5 レーザー援用インクジェット技術による配線描画方法

言い換えれば配線のアスペクト比を改善することが必要である。そこで、高いスループットと配線抵抗低減を同時に解決するために、重ね塗りすること無しに高いアスペクト比をもつ配線の描画が可能なプロセス技術の確立を目指して、技術開発目標を設定した（図6）。

インクジェットによる配線描画技術では、まず第一に、吐出される液滴径の設定が重要となる。これまでのインクジェット技術では、一般的に使用されている液滴 20 μm 程度で配線描画した場合は、インクが濡れ広がるために描画後の配線幅は、基板表面処理を行ったとしても 30 - 50 μm 程度が限界とされていた^[2]。また、配線抵抗を下げるために重ね塗りする場合は、描画したインクの乾燥を待たねばならず、描画速度の向上が困難となっていた。

液滴径 10 μm 以下で配線描画^[10]した場合は、液滴の微細化に伴って単位体積当たりの表面積の寄与が大きくなることから^[9]、インクジェットヘッドから吐出された液滴の飛翔中に非線形に蒸発速度が高まるために、着弾したインクの濡れ広がりが抑えられ、配線幅数 μm 以下の配線描画を実現できる。一方、描画速度が低く、配線厚が薄いために、配線抵抗を低くするためには多数回の重ね塗りが必要となり、スループットが低下してしまうという課題があった。

このようなこれまでの技術の限界を克服するものとして、レーザー援用インクジェット技術では、高いスループットを維持しつつ、これまでの技術では困難とされている配線幅 10 μm 以下を実現することを目標とした。

このことから設定した技術課題は、直径 25 μm ~ 50 μm 程度の液滴を使用し、エネルギー援用で乾燥を促すことによって、吐出された液滴径より配線幅を小さくすること

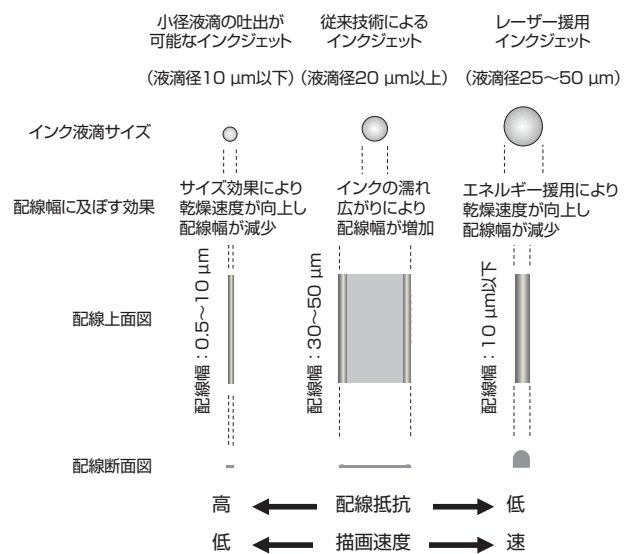


図6 レーザー援用インクジェットが目標とした液滴径と配線パターン

である。また、液滴径を大きくできれば現行のインクジェットヘッドを用いた吐出が可能となり、長期安定性、信頼性が得られ、液滴の運動エネルギーが増すために気流等の影響を受けにくくなり、飛翔した液滴が基板に着弾する精度の向上も期待される。さらに、着弾精度の向上によって、基板とノズル間の距離を広げることも可能となるため、大きな凹凸段差を持つ対象への適用も期待できる。

以上のように、これまでの産業用インクジェット技術の技術課題の整理を行い、本質的な課題を抽出することにより、レーザー援用インクジェット技術の方向性、技術課題、到達目標の設定を行った。

4 レーザー援用インクジェット技術の効果

4.1 レーザー援用による配線の高アスペクト比化

高アスペクト比をもち微細な配線の描画を目的として、レーザー援用の効果が配線幅に与える効果を、未表面処理のガラス基板上への描画によって調べた結果を図7に示す。

液滴径 25 μm 、吐出周波数 3 kHz、ステージ速度 60 cm/min の条件で描画を行ったところ、レーザー援用インクジェット技術で描画した配線の寸法は、配線幅 10 μm 、配線厚 11 μm となり、レーザー援用なしの描画配線と比較して、配線幅が 230 μm から 10 μm と 1/20 倍以下へと減少、配線厚が 0.8 μm から 10 μm と 12.5 倍以上増加、アスペクト比は約 250 倍以上に増加し、極めて大きな改善の効果が確認された。

次に、レーザー顕微鏡によって得られた 3 次元形状を図8に示す。レーザー援用によって描画された配線形状は、これまでのインクジェット印刷技術で報告されてきた配線とは大きく異なり、配線の両側面に淵ができるようなコーヒーステイン現象^{[9][11]}や配線幅が一部膨らむようなバルジ現象^[12]と

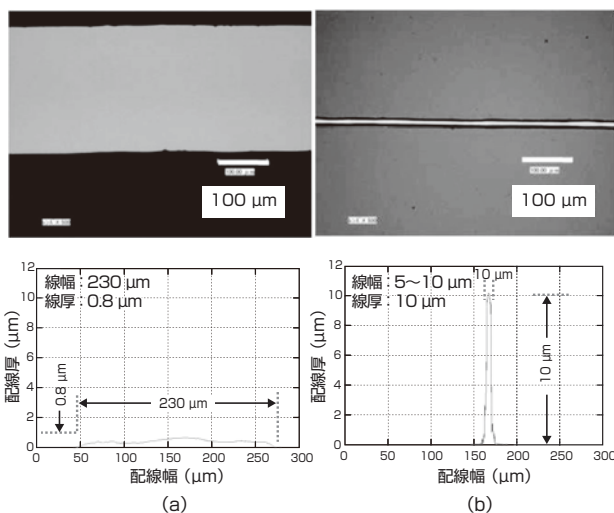


図7 レーザー援用の効果が配線幅に与える影響
(a) レーザー援用なし (b) レーザー援用あり

いう配線の不均一な形状が見られず、均一な滑面であり“半円柱のような構造”となっていることがわかる。

この結果から、レーザー援用インクジェット法によって、およそアスペクト比 1 という、従来法と比較して格段に高いアスペクト比をもつ配線を描画することが可能であること、および液滴直径以下の線幅の配線を未表面処理基板上に描画可能であることが確認できた。

これまでの技術では、基板表面処理を行ったとしても、計算上では、接触角 90° の基板に配線幅 10 μm の配線を描画した場合、一度の描画では配線厚が 290 nm^[6] 程度が限界となる。したがって、導体の比抵抗を 2.0 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ と仮定すると、描画配線の 1 cm 当たりの抵抗値は、表面処理を行ってこれまでの技術で描画した配線では約 70 Ω / cm 程度であるが、表面処理を施していない基板を用いてレーザー援用をした配線の抵抗値は、実測値で約 6 Ω / cm となった。この結果から、10 倍以上の配線抵抗の改善となった。

このことは、配線幅 10 μm の配線を描画する場合、これまでのインクジェット技術による配線描画では、レーザー援用インクジェット技術で描画した配線と同様の配線抵抗を得るには、単純計算で 13 回以上の重ね塗りが必要となることを意味しており、レーザー援用によってスループットが大幅に改善される可能性が示された。

さらに、これまでは重ね塗りのために高い位置決め精度や着弾精度が要求されたが、レーザー援用法ではこれらの課題も解消される可能性が示された。

4.2 配線の電気特性

次に、IC チップの引き出し配線を具体的な対象として、レーザー援用インクジェット技術を表面実装技術として展開するために、描画配線の高周波伝送線路としての特性を検討した。配線の高周波伝送特性は、配線の断面形状やパターン精度に大きく影響を受けることから、中心導体と

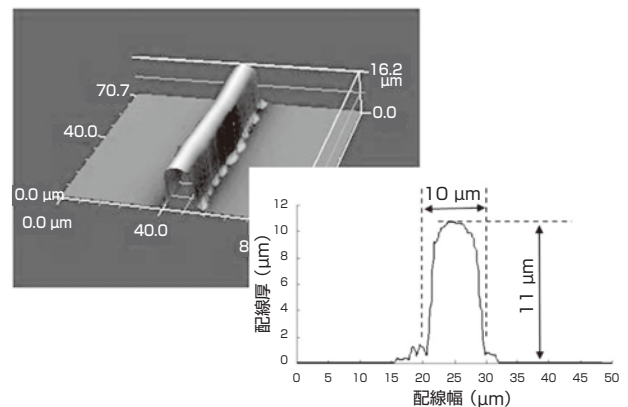


図8 レーザー援用インクジェット技術による描画配線の 3 次元形状と断面図

接地導体が同一平面内に配置しているコプレナ伝送線路のパターンをレーザー援用インクジェット技術のみでパターンニングし、高周波伝送特性の測定を行なった。

ネットワークアナライザによるTRL (Thru-Reflect-Line) 校正法による高周波数領域で伝送特性 (S21) と反射特性 (S11) のパラメータ測定によって、伝送線路やパッケージを考慮した場合、どの程度の周波数まで使用可能かを正確に把握することができる。

配線の比抵抗値を $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 、長さ 4 mm、配線幅 30 μm 程度の矩形形状の配線と設定して 1 GHz - 40 GHz までの高周波伝送特性のシミュレーションを行った結果と実験結果を併せて図 9 に示す。これまでのインクジェット法による配線は、ドット様の配線形状を持ち、配線の高周波伝送が困難であったが、レーザー援用インクジェット技術による配線では、理論計算値と実測値がよく一致しており、高周波伝送が可能な配線が実現されていることがわかる。

また、S11 の結果から、周波数が高くなるにつれて、計算値と実験値で利得の若干の隔たりが見られるが、これは、レーザー援用インクジェット技術で作製したコプレナ伝送線路パターンでの配線側面部分の乱れが、電磁界のインピーダンス整合に影響を与えているものと推察される。一方、S21 の結果から、レーザー援用インクジェット技術による描画配線は、40 GHz までの信号を送ることが可能であり、10 GHz 程度までは減衰が少ないことから、良好な伝送特性が得られていることがわかった。

以上の結果から、10 GHz 程度の高周波領域であれば、レーザー援用インクジェット技術によって、3次元実装におけるチップ間接続やワイヤボンディングで困難とされていた高速伝送実現の可能性が示された。

4.3 段差乗り越え

レーザー援用インクジェット技術の凹凸面への描画の適用可能性と、粗面基板上のインクの濡れ拡がりの抑制効果

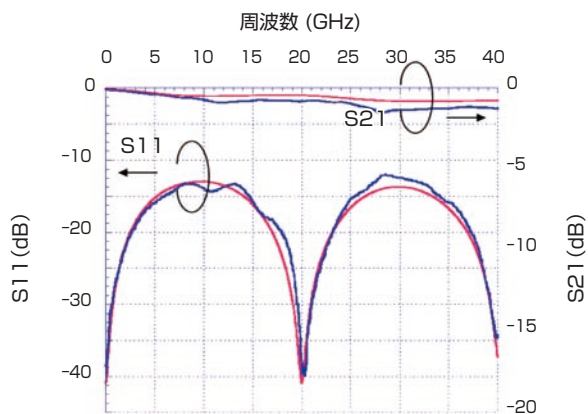


図 9 描画配線の高周波伝送特性 (< 40 GHz、青：実測値、ピンク：理論計算値)

の 2 点を確認するため、深さ 200 μm 程度の凹型に研磨したガラス基板上に配線を描画した。段差・粗面基板上で描画された配線パターンの電子顕微鏡像を図 10 に示す。レーザー援用をしない場合、基板表面粗さが大きいと、基板表面の微細凹凸の面内方向の毛細管力により、描画パターンは著しく広がっており、研磨溝の両端で配線抵抗を測定したが、導通が確認できなかった。

一方、レーザー援用を行った場合では、基板表面粗さの影響を受けず、段差部でも同様な配線幅で描画されており、研磨溝の両端で配線抵抗を測定したところ導通が確認された。以上の結果から、レーザー援用インクジェット技術が、IC チップ間接続において、バンパや微細貫通ビアを用いない側面接続や濡れ性が異なる基板間の配線へ適用可能であることが示された。

4.4 粗面基板による配線の密着力の向上

レーザー援用インクジェット技術によって鏡面基板と粗面基板を用いて配線を描画し、メッキの剥離試験 (JISH8504) と同様にセロハンテープによる剥離試験により配線の密着力を確認した。図 11 に鏡面基板と粗面基板上の配線のテープ剥離試験の結果を示す。

この結果、鏡面基板上の配線は、セロテープに密着し、配線全体が基板から剥離した。一方、粗面基板上の配線は、セロテープの密着力では剥離しなかった。この結果から、基板表面に粗面加工を施せば、物理的アンカーリング効果により基板との密着力向上が可能であることが示唆された。

しかし、配線幅、厚さが数十 μm 程度の微細配線の密着性を定量的に測定する方法は確立されておらず、配線の密着強度の評価方法について新たな開発が必要である。

5 レーザー援用インクジェット技術がもたらす技術的な可能性と今後の展開

この論文では、電子デバイスの多品種変量生産における配線工程においてレーザー援用インクジェット技術によってこれまでのインクジェット印刷技術では困難とされていた課題を解決する可能性を示した。

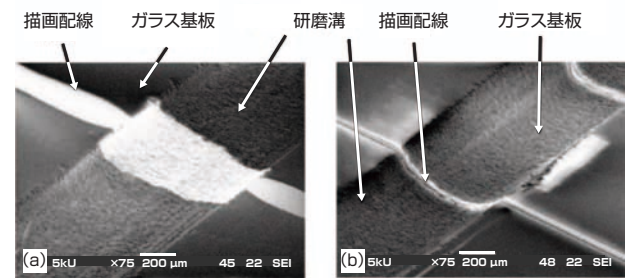


図 10 段差乗り越えと粗面基板上への配線 (a) レーザー援用なし (b) レーザー援用あり

インクの濡れ広がりを抑制する技術課題を設定して解決することにより、インクジェット印刷技術のスループットの向上と低配線抵抗化を実現できること、レーザー援用インクジェット技術によってインクの濡れ広がりが抑制され、3次元実装に必要である高周波伝送への対応や非平面基板上の配線描画、さらにはフレキシブルな基板への配線描画技術としての可能性をもつことを示した。

このような、レーザー援用インクジェット技術が実装技術に及ぼす位置付けと可能性は以下のとおりである。

- ①ICチップの高周波化：高周波伝送線路の作製と1 GHz-40 GHzの良好な高周波特性
 - ・素子間配線の短距離化をせずに高周波伝送できる可能性
- ②3次元配線技術：凹凸段差かつ粗面基板上への配線が可能
 - ・フリップチップ実装のみではなく電気的な接続の簡易化
- ③配線の耐久性：配線の密着強度の向上
 - ・耐環境性が求められるデバイスの配線への適応性

この結果を足掛かりとして実用的な3次元実装技術として確立するためには、まだ多くの技術課題を解決する必要がある。その基盤となるレーザー援用インクジェット法の基礎メカニズムや、配線を高アスペクト化する現象の解明も重要である。

すなわち、今後は、第2種基礎研究を入口として、第1種基礎研究と製品化研究への両面展開を図っていく必要があると考えている。

この論文で示した、液滴直径以下の配線幅をもつ配線が形成されるメカニズムや配線の高アスペクト化が実現される現象はまだその原理が解明されておらず、今後一層の高性能を目指すためには現象解明を目指す基礎研究、すなわち、第1種基礎研究が必要である。

一方、実用化までの時間を大きく短縮するために、インクジェット印刷技術の不得手とする分野である生産効率の

向上を開発課題の中心として、多機能化や歩留まりの向上を目指した技術開発は、製品化研究と位置づけられる。

生産効率の向上のための技術課題としては、マルチノズル化やポストアニール処理技術の高度化等があり、また多機能化の技術課題としては、機能性インクの開発や各種基板材料への適応性把握、描画条件の制御技術等が挙げられる。

このように、研究開発の進展に伴って、第1種基礎研究から製品化に至るまで技術開発課題は多様化していく。当然ながら、産総研のような単独の研究機関のみで実用化技術として進めるには、人的資源や資金面でも限界がある。第2種基礎研究で取り組んだ研究結果の技術コンセプトを効果的にアピールし、さまざまな分野の研究者や技術者の集積を図って産学官連携を進めていくことが必須である。

そして、このような研究開発の展開を通じてレーザー援用インクジェット技術を実用化の方向に進め、ミニマルマニュファクチャリングを実現するための基盤技術として確立していきたいと考えている。

6 まとめと将来展望

この論文では、インクジェット印刷技術による配線技術を発展させ、実用的な多品種変量生産方式のための基盤技術となる可能性をもつ、レーザー援用インクジェット技術の研究開発の過程を報告した。他の実用化されている配線技術と比較し、多品種変量生産のための課題抽出と解決手段を選択する過程と、それに伴う研究結果とその結果の位置付けについてとりまとめ、今後重要となる課題や進めていく技術展開の流れについて記載した。

今後は、さらに、多機能化の開発を進めて、ユーザーの欲しい機能を即座に提供するカスタムメイド生産に繋げていき、これまでの市場の拡大や新しい機能をもった電子機器新規市場の創出につなげていきたい。また、レーザー援用インクジェット技術のスループットをさらに向上させ、これまでのインクジェット印刷技術では不可能であった大面積デバイスに対応できる技術として発展させていく予定である。

謝辞

この研究の成果は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「高集積・複合 MEMS 製造技術開発事業 MEMS-半導体横方向配線技術 (高密度な低温積層一体化実装技術)」(2006 年度～2008 年度)によって得られたものであり、研究を進めるにあたり材料の評価に協力していただいた産総研先進製造プロセス研究部門の朴盈珪氏と電気特性の評価に協力していただいた津田弘樹氏に謝意を表します。

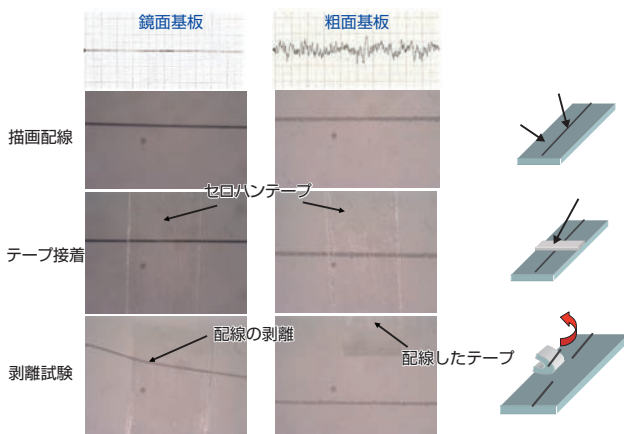


図 11 鏡面基板と粗面基板上の配線のテープ剥離試験

参考文献

[1] 明渡純, 中野禪, 朴載赫, 馬場創, 芦田極: エアロゾルデポジション法-高機能部品の低コスト化, 省エネ製造への取り組み-, *Synthesiology*, 1 (2), 130-138 (2008).

[2] 菅沼克昭, 棚網宏: プリンテッド・エレクトロニクス技術, 工業調査会 (2009).

[3] J. Kolbe, A. Arp, F. Calderone, E. M. Meyer, W. Meyer, H. Schaefer and M. Stuve: Inkjettable conductive adhesive for use in microelectronics and microsystems technology, *Microelectronics Reliability*, 47, 331-334 (2007).

[4] (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構: 精密部材成形用材料創製・加工プロセス技術に関する調査成果報告書 (2005).

[5] H. Siringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu and E. P. Woo.: High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits, *Science*, 290 (5499), 2123-2126 (2000).

[6] P. J. Smith, D.-Y. Shin, J. E. Stringer, B. Derby and N. Reis: Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns, *J. Mater. Sci.*, 41, 4153-4158 (2006).

[7] 高橋恭介: インクジェットプリンターの応用と材料II, シーエムシー出版 (2007).

[8] コニカミノルタホールディングス株式会社, 導電膜パターンおよび導電膜パターンの形成方法, 特許公開2010-182775号 (2009).

[9] 森井克行, 下田達也: インクジェット成膜-微小液滴の挙動-, *表面科学*, 24 (2), 90-97 (2003).

[10] K. Murata, J. Matsumoto, A. Tezuka, Y. Matsuba and H. Yokoyama: Super-fine ink-jet printing: toward the minimal manufacturing system, *Microsyst Technol*, 12, 2-7 (2005).

[11] R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel and T. A. Witten: Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops, *Nature*, 389, 827-829 (1997).

[12] P. C. Duineveld: The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate, *J. Fluid Mechanics*, 477, 175-200 (2003).

執筆者略歴

遠藤 聡人 (えんどう あきと)

2007年 桐蔭横浜大学大学院修士、博士 (工学)。大学時代には、環境応用、超音波デバイス、医用超音波診断に関わる。企業時代には、プラズマ真空装置関連の開発に従事。産総研イノベーションスクール第1期卒業生。現在は、産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門の派遣職員。博士後期課程では、水熱合成法による医療用アレイ型高周波超音波プローブの研究開発を行う。企業との共同研究を通じ、微細配線のパターンニングや電子部品の実装技術に重要性を感じ、レーザー援用インクジェット技術の開発に従事。この論文では、レーザー援用インクジェット技術による高アスペクト比配線描画技術の研究開発を担当した。



明渡 純 (あけど じゅん)

1984年 早大理工学部応用物理学科卒、1988~1991年 同理工学部助手を経て、1991年 通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在は産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門 上席研究員。博士 (工学)。専門: 薄膜工学、微細加工、光応用計測。現在、エアロゾルデポジション法によるセラミックインテグレーション



ション技術と MEMS デバイス等を研究している。2002 年から5 年間、NEDO ナノレベル電子セラミックス材料低温成形・集積化技術プロジェクトリーダー。2007 年より NEDO「高集積・複合 MEMS 製造技術開発事業」プロジェクトに従事、MEMS・半導体積層方向配線技術の中でレーザー援用インクジェット技術を提案、同テーマの取りまとめを担当した。

査読者との議論

議論1 全体的なコメント

コメント (長谷川 裕夫: 産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門)

開発した技術は優れたものと思いますが、シンセシオロジーの論文にふさわしいものとするために、議論2以下の点について修正をお願いします。

議論2 技術課題の明示

コメント (長谷川 裕夫)

節の題名について、克服すべき技術課題が容易に分かるように工夫してください。

回答 (遠藤 聡人)

コメントに関して、節の要約を節の題名になるように変更しました。

議論3 吐出周波数の問題解決

コメント (長谷川 裕夫)

吐出周波数の問題が提示されていますが、著者らは結局どのようにして解決したのかを記述してください。

回答 (遠藤 聡人)

これまででは、描画する配線の配線幅と抵抗を下げるために、吐出する液滴サイズを小さくし、単位長さ当たりのインク供給量を少なくする、言い換えるならばインクジェットの吐出周波数の向上を目指していました。しかし、私達は液滴径が大きくなまま小さい線幅の配線を描画することにより、単位長さ当たりのインク供給量を多くすることができることから、吐出周波数の大幅な向上をせず解決に至りました。

議論4 これまでのアプローチとの比較

コメント (長谷川 裕夫)

この研究と対比しているこれまでのアプローチについて、論理的にこれらのアプローチが適当でないことを説明し、なぜ、どのようなブレークスルーが必要だったのか、それをどのように解決したのかを明らかにしてください。高粘度のインクの問題点は箇条書きにまとめると分かり易いと思います。

回答 (遠藤 聡人)

配線のパターンを均一にし、配線の抵抗値を低減するというこれまでの取り組みとして、大きくは、以下の4方法があげられます。

- ①インクの比抵抗の低減→低抵抗化の限界
- ②高粘度インクの吐出や液滴の小径化→ノズル詰まりや吐出周波数の限界
- ③表面処理による均一なパターン形成→プロセス複雑化によるスループットの低減
- ④加熱による乾燥速度向上→急激な乾燥によって起こる突沸による配線の断線

①、②は、線幅を狭くする際に大きく影響し、③、④は、均一のパターンを描画する際に大きく影響します。また、インクジェットを実用的なプロセス技術とするためには、解決が困難となる問題も発生していました。

この4方法は、インクジェットによって吐出された液滴が着弾と同時に濡れ広がり乾燥するという工程の中で、液滴の乾燥に対する本質的な問題に取り組む方法ではありませんでした。私達は、スループットの向上という視点から、この液滴の濡れ広がりの抑制を課題に設定しました。その結果、私達は乾燥に必要な熱エネルギーをレーザー照射により局所的にインク液滴に与えるというアイデアを用いて、乾燥速度を最適化し液滴径が大きくなると吐出周波数を大幅に向上せず、液滴径以下の配線幅で高アスペクト比の配線の描画を可能にしました。

議論5 液滴サイズと配線幅の値

コメント（長谷川 裕夫）

これまでのインクジェット方式では、液滴のサイズと配線幅がどのくらいを示してください。これはこの研究で設定した開発目標と関連しますので、明確に記述してください。

回答（遠藤 聡人）

これまでの産業用インクジェット方式で用いられている液滴サイズは、直径約 15 μm (1.8 pl) - 40 μm (33.5 pl) 程度です。そのため、

配線幅は、液滴サイズより大きくなることから、約 30 μm - 50 μm 程度であり、厚みは数十 nm から数百 nm が限界とされていました。また、配線を数 μm 程度に厚くするために数十回重ね塗りをするとバルジが発生し、均一な配線の描画が困難でした。

議論6 液滴サイズの設定理由

コメント（長谷川 裕夫）

液滴サイズを設定した論理を明確に記述してください。配線幅の目標設定と仕上がったときの比抵抗の目標から、厚みの目標が決まり、供給すべき液滴サイズが決まったということでしょうか。

回答（遠藤 聡人）

液滴サイズの設定は、これまでのインクジェット技術では、液滴径 10 μm 以下の吐出が困難でした。そのため、目標とした設定値は、配線幅 10 μm 以下かつ描画速度を 1 ノズル当たり数 mm/sec から数十 mm/sec でした。目標を達成するために必要な技術課題としては、液滴の直径より小さい配線幅を描画する必要がありました。よって、液滴径を 10 μm 以上に設定しました。

研究戦略の形成とそれに基づいた構成的な研究評価

— 創造的営みとしての研究プログラム評価にむけて —

小林 直人^{1*}、中村 修²、大井 健太³

この論文では研究戦略の形成とそれに基づく構成的な研究評価について考察した。特に研究遂行にあたっては、戦略形成の一環として研究プログラムの目標とそれを達成するためのシナリオの設定が大切であることを強調し、その研究戦略に沿った研究評価を行うことの重要性を指摘した。また研究評価にあたっては、研究の進展 (progress)、深さ (depth)、位相 (phase) の3側面から評価を行うとともに、それらを研究戦略と対比しつつ演繹・帰納・仮説形成 (アブダクション)¹⁾による推論を組みあわせて構成することの重要性や、最終的に総合的な評価を形成する際にも構成的な評価法が重要なことを述べた。さらに産総研における研究ユニット評価および長崎県における公的研究機関の研究プログラム形成と評価の実情を紹介して、構成的な評価法との対比を試みた。構成的な評価法は、研究の価値を引き出し、次の進化に向けてのために必要な創造的営みの一つとして捉えることができる。

キーワード: 研究戦略形成、研究プログラム構築、構成的な研究評価、仮説形成の推論、評価の反映と連環、ロジックモデル

Formation of research strategy and synthetic research evaluation based on the strategy

– Toward research program evaluation as a creative activity –

Naoto Kobayashi^{1*}, Osamu Nakamura² and Kenta Ooi³

Formation of research strategy, and synthetic research evaluation based on the proposed strategy have been considered. The importance of a setup of targets and a scenario of the research program to achieve the targets as a part of strategy formation, and the importance of research evaluation consistent with the research strategy are emphasized. Research evaluation should be performed in three aspects – the research progress, the research depth and the research phase. In the individual evaluation aspect, comparison of the research performance with the research strategy framework is essential and synthetic evaluation appropriately composed of deductive inference, inductive inference and abductive inference is recommended. To make the final integrated evaluation, the synthetic method is very crucial. Examples of research unit evaluation at AIST, and the research strategy formation and evaluation of public research organizations in Nagasaki prefecture are compared with the synthetic evaluation method. The method is thought to be a creative activity that can contribute to extract the value of research and accelerate the future evolution of research programs.

Keywords: Research strategy formation, research program construction, synthetic research evaluation, abductive inference, reflection and chain of evaluation, logic model

1 はじめに

21世紀に入り、地球および人類社会がおかれている環境は、20世紀と比較にならないほど切迫している。将来にわたって人類が生き延びて行くためには、科学技術によって現在解決しておかなければならない課題は極めて多い。そのために人類は、科学技術の進め方に関してこれまでに比べてより戦略的な取り組みを必要としていると言える。そのような研究戦略に沿って研究開発を行うとき、研究開発の評価が極めて重要である。特に、研究戦略との比較をしつつ分析と統合を踏まえてその研究開発の意義と方向性を的確に導きだす評価が望まれる。そのような研究評価は戦略

による想定を超えたところまで拡がり、創造的行為としての評価に繋がる可能性も有している。そのため、以下で述べるような構成的な評価の方法論を提起することは有益であると言えよう。また、このような評価法が技術をイノベーションに結びつけるために有効に活用できれば、さらに大きな意義がある。

研究開発の社会的意義が高まるにつれて、各国でその戦略に関する取り組みが活発化している。米国における今後のエネルギーに関する研究開発の戦略的方向性を示した「エネルギーイノベーション・ハブ」^{注1) [1]}、欧州におけるリスボン戦略での「知識ベースの欧州経済社会の構

1 早稲田大学 研究戦略センター 〒162-0041 新宿区早稲田鶴巻町 513 (120-1号館)、2 長崎県科学技術振興局 〒850-8570 長崎市江戸町 2-13、3 産業技術総合研究所 評価部 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

1. Center for Research Strategy, Waseda University 513 Wasedatsumaki-cho, Shinjuku-ku 162-0041, Japan * E-mail: naoto.kobayashi@waseda.jp, 2. Science and Technology Promotion Bureau, Nagasaki Prefectural Government 2-13 Edo-machi, Nagasaki 850-8570, Japan, 3. Evaluation Department, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan

Original manuscript received February 25, 2010, Revisions received December 24, 2010, Accepted December 24, 2010

築」^{注2)}^[2]、我が国における「新成長戦略」^{注3)}^[3]、等はその例である。しかし、研究戦略の学問的基礎を与える「研究戦略学」は、まだ確立されたものがあるわけではなく、これからの大きな課題である。

これまでの研究評価に関する研究では、この約20年間近くプログラム評価で行われてきたインプット、アウトプット、アウトカム、インパクト等の論理的連鎖を示す“ロジックモデル”^{用語2)}を適用する動きが盛んになってきており、研究活動もロジック・モデルに沿って評価を行う手法についての研究が近年進展してきた^{[4][5]}。これは米国やカナダにおける公的資金による研究プログラムの評価手法として効果を発揮してきていて、研究を取り巻く外形的な論理構造を明確に捉えるという点で優れた手法であるが、研究の内容まで踏み込んだ評価は行っていない。一方、研究そのものを評価する手法としてはピア・レビューおよび計量書誌学的手法がある。前者は研究の内容や成果を同じ分野の専門家（ピア）が評価する手法であり、後者は論文数やその被引用度、特許件数等の研究成果に関する計量可能な数値によって評価を行うものである。現在はこれらの手法を組み合わせる評価が行われている例が多い^{[6][7]}。しかし、これまで研究をどのような考え方で捉えて評価すべきなのかという基本的な観点からの研究は、必ずしも十分行われてこなかった。

この論文では、研究の特性と言う観点から考察を始めて、研究戦略形成とそれに基づく研究評価に関する要素からの論理的組み立てにより、研究評価をどのように構成していくべきかという考え方の概略を示す。特に研究評価に当たっては、基礎研究や応用研究あるいはまた分析的な研究や構成的な研究等の特性にかかわらず、「構成的な研究評価」が研究の本質を評価する上でまた研究を進化させる上で重要なことを示す。

2 研究の特性

研究には、本来有している固有特性 (Intrinsic Properties) があると考えられる。それは、①新規性 (Novelty)、②独自性 (Originality)、③論理完結性 (Logical Completeness)、④作用性 (Influence)、から構成されるということが可能であろう。①の新規性とは、特定の学術分野に限らず新たな学術的知見を付け加えることであり、②の独自性とは、研究そのものが独自の知見を提供し、新たな論旨を展開する特性である。すでに知られた現象に全く新しい解釈を与える研究は、新規性はやや低いかも知れないが独自性は高いと言えよう。③の論理完結性とは、一つの研究が明確な論理の積み重ねを経て完結した表現になっていることである。④の作用性とは、研究による作用がその学術分野(ディ

シプリン)の中で影響を及ぼすもの、ほかの学術分野へも影響を及ぼすもの(両者は少なくとも学術界の内部)、社会へ影響を及ぼすもの等に分けられるであろうが、研究の外部への影響・効果の強さを表す。後者の作用性を特に実際特性 (Practical Properties) と呼ぶこととする。

吉川の提唱した第1種基礎研究^{用語3)}は、ある学術領域で新しい知識を産み出す基礎研究であり、作用性が主としてディシプリンの中に留まっているものと考えられる。また第2種基礎研究は(さらに製品化研究も)作用性が社会への影響を与える実際特性を有する研究であるが、両者とも同じ固有特性の中で議論を行うことができよう^{[8][9]}。ただしこの2種類の基礎研究がいつも截然と分かれているのではなく、一つの研究プロジェクトの中に両方の要素が含まれている場合もある。また、固有特性の作用性が短期的には同一ディシプリンに留まっても、長期間の後には社会的な作用性をもつものがある。例えば現在GPS (Global Positioning System) 衛星からの信号を受信する装置ではさまざまな時間的空間的補正を行っているが、それらはA.アインシュタインが20世紀初頭に唱えた特殊および一般相対性理論に基づいているのは周知の事実である。

3 研究戦略と研究プログラム

3.1 研究戦略の意義とその形成

戦略とは「ある目的を設定し、その達成のために人材・資源・時間・情報等の諸要素を適切に割り当てると同時に、それらを有機的に結合・作用させて、全体として良好なシステムとして機能を発揮させる方策」と定義すれば、研究戦略とは、「研究の内容およびその作用性の目標を設定し、それを達成するために採用すべき戦略」ということができよう。

研究戦略の形成においては、その戦略の目的 (Goal) を達成するに当たっての具体的な研究プログラムを設定し、その目標 (Target) とそれに至るシナリオ (Scenario)、研究プログラムを構成する個々の研究プロジェクトの目標までを想定するのが望ましい。研究プログラムは、平澤によれば「政策と研究プロジェクトを繋ぐ、構造化・論理化された政策の実施・展開・管理の単位」と定義されるが^[6]、ここではより広く「研究戦略目的と研究プロジェクトを繋ぐ構造化・論理化された研究展開の単位」と定義しておく。したがって、実験素粒子研究のような第1種基礎研究においても研究プログラムが適用される場合があると考えられる。

どこまで厳密に研究プログラムの目標やシナリオを設定するかは、研究推進者と研究スポンサー(公的研究にあっては国・社会)との合意で決定することが不可欠で、そこであらかじめ契約を行うことが必要である。また研究戦略

は、研究プログラム進行途上の節目での見直しのプロセスを埋め込んでおくことも重要である。

さらに研究には予測不能な現象が起こることを前提に、この戦略の合意に基づく契約には相当程度の裕度を持たせなければならない。すなわちシナリオには幾つかの選択肢や時間的な柔軟性を含ませた設定しておく必要がある。例えば同一ディシプリン内の研究である第1種基礎研究にあっても研究戦略は立てられるが、結果の可能性の広がり非常に大きく、またその作用性が長期間にわたることが想定されるものとなろう。主な想定と異なった結果が得られても、その分野の科学知識体系の増加に結果的にどのように寄与したかによって、研究戦略の価値が問われることになる。

一例を挙げると、2002年に小柴昌俊博士がノーベル賞を受賞するきっかけとなったカミオカンデは、元々は陽子崩壊時に放出されるニュートリノの衝突を検出し陽子崩壊を実証することを主要な目的としていた。しかし、1987年2月小柴らは大マゼラン星雲でおきた超新星爆発で生じたニュートリノを偶然にカミオカンデにより世界で初めて検出することになった。これにより超新星爆発の理論モデルの正しさが検証され、ニュートリノ天文学の幕が開けたと言われている。宇宙からのニュートリノの観測の可能性も最初から小柴によって指摘されていたのであるが、一方でカミオカンデの後継であるスーパーカミオカンデにおいても陽子崩壊はまだ観測されていない。この例のように、科学においては必ずしも狙った結果そのものが得られるものではないことは通常起こるが、神岡鉱山の下に、3,000トンの超純水のタンクと1,000本もの光電子増倍管でニュートリノ検出装置を作るという研究戦略は物理学体系に新知識を加える戦略として非常に大きな意義があったと言えよう^[10]。

研究戦略の形成にあたっては、広い範囲において長期にわたる大局的（地球的・人類的）課題（Global Issues）、国・地域や学術領域において中期的な課題である社会的（ないし領域）課題（Social or Domain Issues）、特定の領域



図1 持続的発展性の重層的考え方

において比較的短期に行われる研究プログラム（Research Programs）等に構造化して考える必要がある。

大局的（地球的・人類的）課題の一例として「持続的発展可能な社会の実現」という課題を取り上げる。この考え方では、さまざまな課題を含んだ重層構造として描くことが可能である。簡単のために、図1に示すように「地球環境・エネルギー・天然資源」、「人間・生物・食」、「社会・経済・産業」、「情報・文化・教育」の持続性の四つに課題を大別してみる。この層では、下層から上層に行くにしたがって、持続性の対象が自然的なものから人為的なものに変化していることを示している。また下層の方が緊急度を有するものが多いとも言えるが、国・社会や国際的な施策としては、このすべてに関して総合的な取り組みをしていかなければならない。

研究戦略の形成上重要なことは、このような大局的課題に関してそれが現実の世界に投影された個別の社会的課題を明らかにし、その課題を解決するための研究プログラム、個別研究プロジェクトへとブレイクダウンして定義し、それらの関連性を可視化することである。図2にその試みの一例を示す。大局的課題として、上述の持続性の課題を4点挙げ、それに関連した社会的課題、研究プログラム例を示してある。この方法はトップダウン的な言わば演繹的な方法である。演繹的と述べたのは、戦略の前提となる事項、例えば上述の持続的社会的形成の中の地球環境の保全（低炭素社会の実現）等に代表される事項は、ほぼ社会的合意がとれている点で採用可能であり、それに基づいて必然的に採用すべき手段を選択していく方法をとっているからである。しかしその際、完全な演繹的推論ができるわけではなく、そこには必ず仮説形成推論（アブダクション（abduction））^{[11]-[13]}が働いていることになる^{注4}。

一方で研究戦略形成には、現場の研究者の経験・知見・将来展望から見たボトムアップ的な戦略形成があり得る。

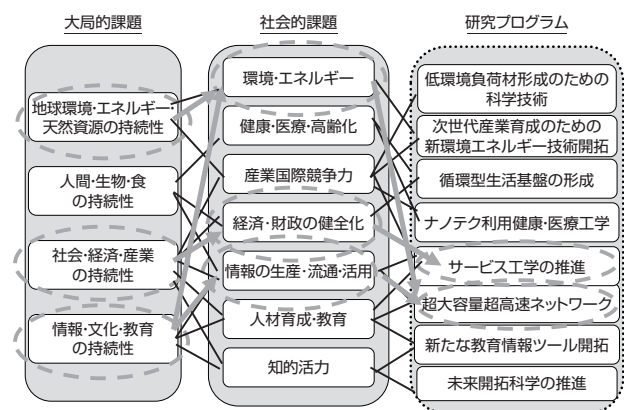


図2 戦略形成の考え方の一例

例えば、超低エネルギー消費の光スイッチ素子の開発とそれを用いた光バスを利用した通信ネットワークが構築できれば現状のインターネット通信の電力消費を3桁程度落とせるという推論ができたとして、それにより低炭素社会の実現に大きく貢献するというシナリオが描ける^[14]。これは一つの要素技術であるが、そのような要素技術群の実現をベースに研究プログラムの構成を行う方向がある。これらは個々の事実と特定の論理的推論から命題を形成する言わば帰納的な戦略形成と言えるが、ここにもやはりアブダクションによる推論が入っている。現状の技術を纏め上げて一つの具体的なシステムに創り上げるには多数の仮説が必要だからである。このように、演繹的なトップダウンの構成性と帰納的なボトムアップの構成性の結節点としての仮説形成的(アブダクティブ)な研究戦略形成が必要となろう。

3.2 研究プログラムの構成

研究プログラムの構成に当たっては、このような学術的枠組みの中でどの領域(Domain)に研究の主たる中心を設定するかを考察が必要となる。今後の地球的・人類的課題(例えば産業発展と環境問題)を解決するためには、単一のディシプリンに依存するだけでは不可能で、人文・社会科学の知識も含んだ多分野にわたる知識が必要になる。そのための領域はかなりの広がりをもつことになる。また研究プログラム設定にあたっては、研究戦略によって示された研究プログラムの目標とそれを達成するための具体的なシナリオを示す必要がある。それを時間軸上に逐次達成すべき里程碑(マイルストーン)とともに示したものがロードマップである。

そのためには、図3に示すようにこの研究プログラム α を構成する個々の研究プロジェクトの設定が必要となる。この場合は、幾つかの研究領域の課題である研究プロジェクト群(A、B、C)からプログラムが構成されていることを示している。

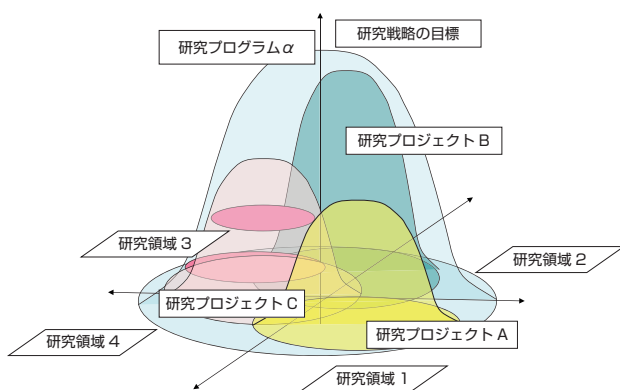


図3 研究プログラムを構成する研究プロジェクト群とその特性

4 研究評価の構成

4.1 研究評価について

研究評価を考えるに当たって、それが研究者の役に立ち研究を進化させるものとするのが望ましいが、その一方でたとえ基礎研究であっても社会の中できちんと研究の「価値」を見えるものにし、社会の理解と協力を得るための有効な手段として活用できることが重要である。そのため以下に基づく考え方で、研究評価を進めるのが相応しいと考えられる。

すなわち、(1) 研究評価の方法の基本的考え方として、①基礎研究、応用研究、開発研究^{用語4[15]}、あるいは第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究^{[8][9]}に限らず統一した考え方で研究とその評価を捉えること、②契約に基づいて研究評価を行うこと(研究の狙いを、戦略およびシナリオとして関係者(研究資金提供者、研究推進者、評価者)があらかじめ契約内容として共有しておき、それに基づいて評価を行うこと)、③評価者と被評価者が同じ地平で協力できること、等が挙げられ、また(2) 研究評価が目指すこととして、①研究の価値を引き出せること、②研究が進化すること、③研究者・研究推進者の意欲の源泉になること、④スポンサーやステークホルダーへの説明責任が果たせること、等が挙げられる。

以下では、研究評価の特質について考察を進めた上で「構成的な評価」の説明を行う。なお、「構成的な評価」とは、研究評価のいくつかの側面(これを要素評価と呼ぶ)の特性を明らかにした上で、それらの関係を構造的に明確に位置づけ、研究の総合的な評価を構成する評価法、と定義できる。なお、これまでの研究評価の方法について大谷による分かり易い論説が出されたので参照されたい^[16]。

4.2 研究プログラム・プロジェクトとその評価

研究開発の評価にあたっては、研究のそれぞれの過程での評価の特質を把握しておく必要がある。主なものとして①事前評価(Appraisal)、②プロセス評価(Process Evaluation)、③アウトプット評価(Output Evaluation)、④プログラム評価(Program Evaluation)、⑤アウトカム評価(Outcome Evaluation)等がある。図4に、戦略形成からプログラムの構築・実行、アウトプットの創出、プログラムの達成、直接的アウトカムの創出までの戦略に基づく一連の研究開発プロセスにおいて、どのような評価とそのフィードバックがなされるかを示してある。なおこれらの一連のプロセスは最近 ROAMEF^{用語5}というプログラム評価の方法論として推奨されているものにおよそ等しい^{[6][16]}。

研究評価に当たっては、初めに事前予測(Foresight)に基づく事前評価が特に重要である。事前評価では、戦略に沿った研究展開シナリオと研究プログラムの妥当性、

研究プログラムに沿った各研究プロジェクトの計画と内容、実行するための体制や研究資源、時間、場所等をきめ細かく検討する。特にその研究プログラムの狙いを明確化し、研究プログラムが含む複数の研究プロジェクトについて個々の計画・リソース・予想アウトプット、等とともにそれぞれの研究プロジェクトがどのように相互作用（プロジェクト成果の共有や活用）をするのか等のダイナミックな関連性が明らかにされることが重要である。

事前評価には蓋然性の高い推論に則って戦略を判断する帰納的かつ仮説形成的な評価の実施が必要になる。一例を挙げれば、ある有機材料を利用した新技術の開発により地球温暖化ガス低減・低コスト生産・高い輸出競争力に資するという研究戦略を作ったとして、現状の材料・デバイスの性能から判断して実現可能性が高いということが帰納的に推察されるものの、一方でその耐久性に問題があるという反論に対しては、水分や酸素との接触を極力避ける技術開発により耐久性を飛躍的に向上できるという仮説による推論のもとに戦略の事前評価を行うことが可能となる。

なお、一方で状況の変化に沿って適切に対応できるシナリオの柔軟性が重要になるであろう。ただし、戦略やシナリオ形成の厳密性と柔軟性の両立は必ずしも容易ではなく、その柔軟性をどのように埋め込んでいくかも課題の一つである。

プロセス評価では、個々のプロジェクトの進行状況を確認するとともに、問題があれば修正するというフィードバックや、他プロジェクトとの連携の推進を推奨する等ダイナミックな対応が必要である。アウトプット評価は、プログラムの達成によって具体的に出了成果が所期のプログラム目標と比べてどうであったかを確認する。ここでは第1種基礎研究にあっては後述するピアによる評価が第一に重要であるが、社会的な効果が主要になってくる場合は専門家やステークホルダーの評価が重要になってくる。

プログラム評価では、戦略で目指した研究プログラムの

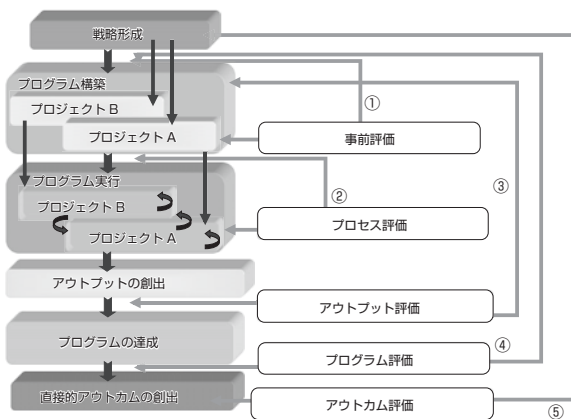


図4 戦略形成からアウトカムに至る過程での評価

目標とシナリオの実践が確実に行われたかどうかを検証する評価が行われる。また直接的アウトカム評価は、研究プログラムのアウトプットが外部に渡されて産まれる直接的アウトカムが戦略の目標と比べてどうであったかを検証する評価である。ただし、この直接的アウトカムの創出はプログラム終了後ある程度の時間がかかるのが普通である。

評価はフィードバック・ループ (Feedback Loop: FBL) が大切である。上記の過程で、FBL ①では事前評価で抽出された課題がプログラム構築に戻され反映される。FBL ②はプログラム実行の際に、プロジェクト・レベルで行われるいわゆるPDCA (Plan-Do-Check-Act) サイクル^{用語5}の一つである。ここでは個々のプロジェクトでの進行状況チェックがプロジェクトの軌道修正や投入リソースの見直し等に反映される。FBL ③④はプログラム評価およびアウトプット評価で評価された内容が次のステップのプログラム形成に反映されるループである。FBL ⑤は、直接的アウトカムの評価を研究戦略の修正や新たな戦略の形成に役立てるプロセスである。

なお、研究プロジェクトは研究プログラムに比べて単純な構造あるいは機能を有している。そこでは、研究目的、研究手法、研究成果、想定されるアウトカムが小さな範囲に留まっているが、研究プログラムとフラクタル構造を有していると言えるので上記の評価プロセスが適用可能である。ただし研究プロジェクトは、研究プログラムの一要素として位置付けられるために研究戦略の事前評価の部分は簡略化できると考えられる。

4.3 構成的な研究評価とその活用

4.3.1 俯瞰的概念図

図5に研究戦略形成に基づく研究プログラム実行に伴う研究評価の俯瞰的概念図を示す。まず研究評価を幾つかの要素評価に分けて分析的に考察する。

X軸に研究の進展 (Progress) を示す時間軸を示す。ここでは、図4のプログラム構築からアウトプット創出までの過程を単純化して計画 (Plan) ・研究実施 (Process) ・成果創出 (Results) という三つのブロックで一つのプログラムを示している。この評価軸での評価は、研究の進展 (Progress) が戦略で想定した過程に沿って研究の計画・実施・成果創出がなされているかを主として判断することになる。ここでは研究の内容もさることながら、研究の効果的な進展のためのマネジメントを主に評価することになる。ここではすでに合意された戦略という規範に則って演繹的に判断することが必要であるが、それのみではなく研究マネジメントのさまざまな試みや工夫のエンカレッジを行う評価が必要となる。ここにおける評価者は研究の進展に経験を有するピアおよびエキスパート (専門家) が相応しい

が、特に研究プログラム・リーダーの経験者がいることが望ましい。

Y 軸には、研究の深さ (Depth) を示す。ここで言う研究の深さとは、研究成果にあっては第 2 節で述べた研究の四つの特性、①新規性、②独自性、③論理完結性、④作用性、のそれぞれについての質の高さと言える。また計画やプロセスにあっては、同様の特性として高い予測が期待される計画の緻密さや展望の大きさ、重要な研究成果に繋がる良好な研究の進捗状況ということができよう。ここでの評価者は、同一ディシプリン内あるいは複数のディシプリンにまたがるピアが必要となる。次に述べる Z 軸(位相)の各段階では、異なった評価者が必要になる。純粋基礎研究の位相にある場合は、同一ディシプリン内のピアがよい評価者であるが、フェイズが社会的出口に近づくにつれて産業界やジャーナリズム界等の専門家が要とされる。また、その際の作用性は社会的な効果の大きさやそれに繋がる可能性の高さということになる。

Z 軸には、研究の位相 (Phase) を示す。位相とは、基礎研究から社会的出口までのどの状態にその研究が位置するのかを示す指標である。例えばこれまでより研究は基礎研究、応用研究および開発研究に分けられて定義されている例や^[15]、前述の第 1 種基礎研究、第 2 種基礎研究、製品化研究という分類に対応させることが可能である。評価者はそれぞれの位相において、それぞれの位相に即した戦略の意義と研究の内容について知見を有し、アウトカムの実現可能性を考察できる評価者が望ましい。この軸の評価においては必ずしも研究成果のみで評価をするのではなく、研究成果とそこに至るプロセスや今後予想される研究成果活用の道筋が推論されて評価される。その意味で、戦略に表された目標とシナリオ、それを具体化したロードマップ等が評価の基礎となるものであり、それぞれの位相(第 1 種基礎研究、第 2 種基礎研究、製品化研究等)での研

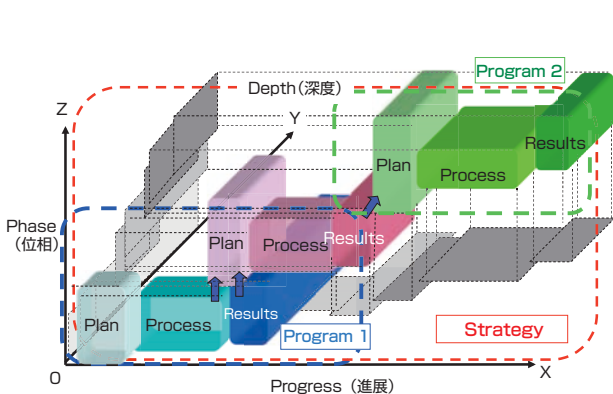


図 5 戦略形成および研究プログラム実行に伴う構成的研究評価の俯瞰図

究成果の意義を評価することとなる。なお研究成果の作用性が同一ないし異種のディシプリンに留まる場合は、作用性はZ軸の最下層にあると言えよう。その場合はピアにより深さ軸の中で評価される。以上をまとめると、この概観図は、その各軸が要素評価の軸を示しており、構成的評価の各要素評価の関係を構造的に位置付けて示していることになる。

一方、これに研究開発の様相を当てはめて考えると、研究の位置付けがさらに明確になる。図 6 には研究開発の XYZ 軸で作られた位相時空間配置を示す。各軸の評価を構成的に最終的な評価に結び付けるには、第一義的には戦略を参照する必要がある。戦略の形成段階において、研究成果が位相時空間の中でどの部分を占めることを意図していたかが明確に述べられていることが大切である。図 6 に透明のブロックで示された 3 次元構造は、戦略上構想された研究プログラムの研究成果の予測概念図を示す。この予測は前述のように演繹的・帰納的・仮説形成的推論が行われた結果として得られたものである。一方、同図で各色の実体のブロックとして示されているものは実際の研究の結果を示している。この透明ブロックと実体ブロック間の対比が最終的な評価に結び付けられることとなる。

4.3.2 構成的な研究評価の実際

個々の評価軸における評価は、その軸の戦略によって示された目標・シナリオとの比較によって行われる。X 軸における進展評価においては、すでに述べたとおり研究の進展が戦略上計画し意図された時間とどの程度一致ないし乖離しているかが、評価指標となる。例えば予測された時間内での進展に計画との乖離があった場合、マネジメントの工夫によって成果の集約化や研究資源の「選択と集中」等によって加速が期待される場合には、その効果を仮説形成的に予測しなければならないという意味で仮説形成の過程が求められる。

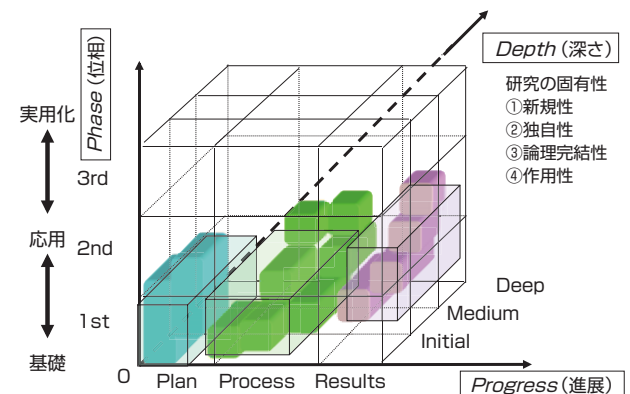


図 6 研究評価構成の概念図

Y軸の研究の深さにおいては、その研究の固有特性のそれぞれが評価されるが、個々の要素に関しては、その領域の専門家のさまざまな知識や経験に基づいた帰納的判断が大きな役割を果たす。総合的にはその研究の「卓越性」を判断することになるが、ここにおいても仮説形成的な推論が必要とされる。すなわち、研究の固有特性のうち新規性、独自性や論理的完結性は専門家によってかなり客観的に評価が行われるものの、それらに加えてその研究が有する作用性になると評価者の仮説的推論すなわちイメージネーションによる部分が大きい。それは、評価者がその作用性を含めた仮説形成的な推論を行うことによって、初めて研究の固有価値についての評価が成立するからである。

なお、研究には予期せぬ成果を活かすセレンディビティが極めて重要な役割を担っていることが多い。それは戦略的計画では予測がつかなかったものであり、第2節で述べた研究の四つの特性のうち、①新規性と④作用性が極めて大きい成果と言えるであろう。この評価は研究の深さにおいて計画された範囲を大幅に越えたということで大きな評価を得ることができる。

Z軸の研究位相の評価軸に関しては、社会的効果が評価指標（第一種基礎研究の場合では学术界でのインパクトであり、それはY軸での評価と重なっている）になるが、より仮説形成的な推論や評価が必要とされる。なぜなら社会的効果は、科学や技術の研究そのものがもつ固有の価値に加えて社会が受容する価値が必要とされるからである。その判断には、研究の進展(X軸)、研究の深さ(Y軸)の評価以上に仮説推論的な要素が多いと言えよう。

全体的な構成的評価を行うには、上記の各要素評価を総合的に捉えた上で、それから総合評価を構成しなければならない。その場合、すでに述べたように論理的帰結に依拠する演繹的推論、多くの具体的事例を基に結論を導き出す帰納的推論、および仮説形成を活用し、その研究成果の価値の可能性を検証する推論の組み合わせが重要である。

4.3.3 総合的な研究評価

構成的な評価に当たっては、研究の特性を十分に踏まえ、研究推進側と評価者が、到達すべきゴールを含む戦略や成果指標に関する共通認識の下、研究の進め方や成果に関する深い議論を行い、戦略で目指された成果目標と実際の研究成果の距離を確認しつつ最終的にその研究プログラムの実施の意義と効果を仮説推論的に議論・検証することが重要である。その過程をとおして“研究評価＝仮説形成とその表現”と考えることができる。これはまさに創造的な行為である研究そのものとも密接に関係しており、研究評価は創造的な営みの一つであると考えられるべきであろう。

なお構成的な評価を実際の評価に当てはめるには、適切な工夫が必要である。これこそ研究推進(者)・研究基金提供(者)・研究評価(者)の三つのサイドの合意で設計を行うものである。この論文の提案をそのまま適用したわけではないものの、産業技術総合研究所(産総研)の第2期中期研究目標期間(2005～2009年度)に行われた「アウトカムの視点からの評価」の例では、progress(X軸)、depth(Y軸)、phase(Z軸)にそれぞれ関連していたと考えられるマネジメント評価、アウトプット評価、ロードマップ評価という要素評価を導入して、最終的に総合的な評価を行うという設計を行った^[17]。しかし、これはこの論文で提案している、戦略との対比による要素評価には必ずしもなっていなかったことや、評価委員との議論には未だ深い議論が不足していたという点等があり、構成的な研究評価としては未だ発展途上にあったと言えることができよう。具体的には、要素評価とその適切な構成に加えて、研究推進側と評価委員側との発展的な深い議論の結果を組み込むことを含めて、総合的な評価システムを設計していくことが望ましい。

5 構成的な研究評価の例

5.1 産総研における研究評価の特徴と課題

5.1.1 アウトカムの視点からの評価

産総研の第2期中期目標期間(2005～2009年度)においては、研究評価検討委員会(委員長、平澤治)の提言(2004年)を受けて、研究開発活動をとおした産業、社会への貢献の観点を重視し、「アウトカムの視点からの評価」を進めてきた^[17]。その設計の過程で、①ロードマップ評価、②アウトプット評価、③マネジメント評価を、大きな要素評価の3本柱とした。この論文の構成的な評価の主要な部分は、これらの経験を基に考察を進めたものである。第4章にも記したが、結果的には、①ロードマップ評価はZ軸(位相)の評価に、②アウトプット評価はY軸(深さ)の評価に、③マネジメント評価はX軸(進展)に、対応していると考えられる。そして研究戦略形成に関連したロジックモデルとして、産総研における研究開発におけるインプット、アウトプット、アウトカム、インパクトの例によって示すと図7のようになる。

産総研における研究戦略はすでに述べたトップダウン的な視点とボトムアップ的な視点の両視点から形成を行っている^[18]。アウトカムはこの戦略との関連を踏まえて各研究ユニットで定義されたものである。アウトカムの視点から産総研の業務をとらえると、高度な知識や技術の創出に向けた研究開発活動がもちろん中心業務であるが、同時に成果を外部に橋渡しし、アウトカム創出に資する活動も重要

な業務と位置付けられる。産総研では後者をイノベーションハブ機能と呼び^[19]、研究戦略とともにイノベーションハブ戦略も立て活動している。

5.1.2 具体的事例

産総研では、戦略形成の結果として、達成目標を七つに大分類し、さらにそれぞれの達成目標の下にブレイクダウンした戦略目標、戦略課題、重点課題、を設定し研究開発を系統的に進める体制を整えている。戦略目標から研究ユニットの課題に至るプロセスは、社会的要請、市場性等の外部環境要因、技術ポートフォリオ、コア技術の強み等内部要因の分析に基づいてトップダウン的に設計される。一方、研究開発から期待される成果は、研究開発のアウトプットからアウトカムに至るプロセスを個々の研究課題から見てボトムアップ的に設計する中で設定される。

具体的な事例として脳神経情報研究部門の担当課題“脳神経細胞機能分子を対象とするバイオマーカーに関する研究”について紹介する。この研究は、脳神経疾患に関係する細胞情報伝達に関わるイオンチャネル、受容体、細胞内情報伝達分子の分子動態の解明とこれらの機能タンパク質を特異的に認識するバイオマーカーの探索・同定に特徴がある。この担当課題のロードマップを図8に示す。ロードマップ上には産総研で行われる研究開発（マーカーの探索と機能評価、センシング基盤技術）から、アウトカム創出に向け企業等との連携による脳疾患診断・予防システムの開発（センサー開発、脳疾患リスク診断技術）について技術要素の年次展開が示されている。

研究ユニット評価委員会は、大学、産業界、ジャーナリズム界等からの外部委員（5名程度）および内部委員（評価部首席評価役2名程度）から構成され、ロードマップやアウトプット成果、マネジメントの妥当性、適切性を審議し評価する。平成20年度（第2期中期目標期間5年間の4年目）の評価委員会では、このロードマップについて「明

解である」、「強みも明示されている」等肯定的な意見が多く適切と判断された。一方、一部の委員からは「全体ロードマップでの位置付けの明確化」、「マイルストーンの明確化」が望まれた^[20]。アウトプットについては「独自の分子進化技術による新規ペプチドの創生」、「アリ毒やクモ毒等ユニークな生理活性ペプチドに関する成果」、「伝達物質受容体リガンドセンサーの開発」等が、臨床応用や神経機能解析ツールとして活用が期待される新技術として高く評価された。

なお、本事例以外でもアウトカムの視点からの評価により、その研究ユニットの研究活動に有益な示唆や指針が得られたことを研究ユニット長が言及している研究ユニットが、界面ナノアーキテクニクス研究センター、強相関電子技術研究センター等いくつかある。詳細は、参考文献^[21]に記すが、前者の場合では、アウトカムの視点を意識することによって明確なシナリオを描くことができ、評価委員の適切な意見が戦略的研究開発計画策定に役立ったこと、後者では第1種基礎研究においてもロードマップを形成するという作業は研究進展の適切な論理的枠組みを組み立てる上で役立ち、また「新たな学理の構築」をアウトカムの一つとして設定することが適切であるという認識が得られたこと、等が述べられている。今後は構成的な研究評価により、さらに有益な結果が得られることが期待される。

5.1.3 研究開発の位相進化と構成的な研究評価の反映

上記の事例を研究開発の位相進化という観点からモデル化すると図9のようになる。実際には、“バイオマーカーの探索”、“センサーの開発”、“診断技術への応用”という位相の異なる研究開発が、異なる年次展開で並列的に進む。研究開発課題は、それぞれ“知識の蓄積”、“要素技術の蓄積”、“製品化技術の蓄積”のサイクルとしてモデル化できる。位相間の研究開発を繋ぐものがキーテクノロジーであり、この技術の質が新たな位相で展開する研究開発の

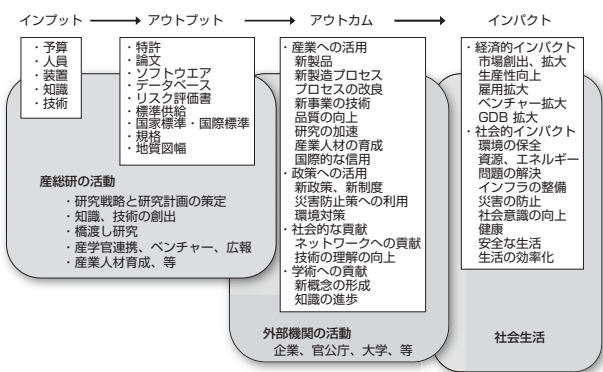


図7 産総研における研究開発と成果普及のモデル

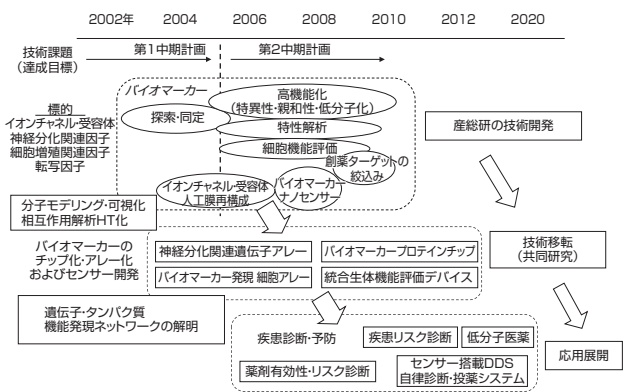


図8 脳神経細胞機能分子を対象とするバイオマーカーに関する研究のロードマップ

レベルに大きく影響する。位相間の移動においては外部との連携（外部の知識、要素技術、製品化技術の利用等）による技術の融合が、アウトカム創出にむけ重要なマネジメントとなってくる。

アウトカムの視点からの評価においては、研究開発および成果の全体像を的確に把握し、質の異なる成果を総合的に評価する必要がある。研究開発の全体構成の妥当性や有効性、異なる位相の研究開発サイクルを円滑に回すためのマネジメントの有効性、という観点からの評価も重要となる。

上述のように産総研の評価においては、結果的に構成的研究評価を取り入れていると考えられるが、その主要な特徴の一つである研究戦略に基づいた研究評価については、まだ課題が残っている。特に、産総研の研究開発を総体として今後評価するためにも、研究戦略のより緻密な形成およびそれとの対比に基づく構成的な評価が必要と考えられる。そのため、①研究戦略の最終ゴール、そこに至るシナリオの明確化とそれとの比較を基本とする評価軸（XYZ軸）の明確化、②ボトムアップ的な観点からの評価（担当課題の成果についてのアウトカムの視点からの帰納的な評価）とトップダウン的な観点からの評価（達成目標から担当課題に至る課題設定とロードマップの演繹的な評価）のマッチング、③異なる位相間の連関の明確化、④研究の性格（基礎、産業応用、政策対応、等）を考慮した位相軸（Z軸）上の評価方法の明確化、等の課題が残されていると言えよう。これらは上述した研究戦略の形成、研究プログラムの構成と実施、要素評価と構成評価等の課題と関連しているものであり、今後第3期における研究ユニット評価の中で充実していくことが望まれる^[22]。

5.2 長崎県の例—地域活性化のための科学技術振興の戦略形成と評価

5.2.1 戦略的ビジョンとロジックモデル

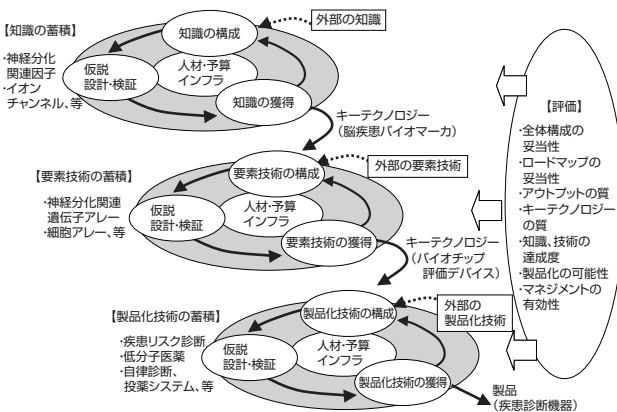


図9 研究開発の位相進化と構成的評価の反映

地方自治体における公的研究機関は地域の産業振興という重要なミッションの一翼を担っており、国や大学、企業等で行われている研究開発と多くの共通の課題と独自の課題を有している。ここでは、筆者の一人（中村）が最近赴任した長崎県の公的研究開発における研究戦略形成と評価の例を紹介する。

2008年のリーマンショックに端を発する世界的な経済危機からの回復が停滞する中で、人口減少や低県民所得等多くの課題を有する長崎県の企業や産地が厳しい競争に打ち勝ち、持続発展可能な社会を築いていくためには、ほかにない独自の地域資源を活用することが極めて有用であり、研究機関が社会ニーズを速やくにくみ取り、研究開発の課題設定に反映することが肝要である。そのためには、戦略的なビジョンを構築して、目指すべきゴールを明確に定め、それに至るシナリオを描く必要がある。ここでは、ロジックモデル^[4]を活用して戦略的研究開発の推進を促した事例について述べる^[23]。ロジックモデル活用の最大のポイントは、常に顧客を意識して、顧客に受け入れられる成果を創出するための研究開発を明確に設定することである。この一連の作業により、アウトカム創出のための戦略的研究開発のシナリオが完成されなければならない^[24]。

5.2.2 長崎県科学技術振興局^[25]のミッションと戦略形成

(1) 県の研究機関のあり方

長崎県科学技術振興局は五つの研究機関（環境保健研究センター、工業技術センター、窯業技術センター、総合水産試験場、および農林技術開発センター）を統轄する組織として編成されている^[26]。科学技術振興局のミッションは科学技術の活用により、①競争力のあるたくましい産業を育成し、②安心で快適な暮らしを実現することにより、将来に夢をもてる元気な長崎県にすることである。そのためには、長期アウトカムとして、産業構造の転換による長崎型新産業創造と集積が求められる。その要素として、新事業、新産業の創出とともに、既存産業が地域資源を活用した体力アップを成し遂げ、県内産業の生産高アップと雇用拡大を達成する施策を展開する必要がある。中期アウトカムとして、新分野進出や自社製品の開発、ブランド化、シェア拡大等による既存企業の一歩前進が求められ、短期アウトカムとして、県内企業の技術力の向上、省力化・コストダウン、マーケティング・デザイン能力の向上等が必要である。県の研究機関は大学等と連携しながら、基盤技術の高度化・高精度化、システム化のための研究開発、技術支援に加え、分野融合研究による技術開発、マーケティング・デザイン支援、企業ニーズに対応した支援等を展開する必要がある。以上の内容を、ロジックモデルを駆使して

整理し（図10）、関連部局と共有した。この整理図を一般形として、窯業技術センター^[27]の戦略形成へ適用した例を次に述べる。

(2) 窯業技術センターの戦略形成

昭和5年に東彼杵郡佐佐見町に設立された長崎県窯業技術センターは、県内窯業の発展・振興をその使命として、新材料や廃棄物の再資源化等の研究開発、新技術との融合による新分野の製品開発、陶磁器産業支援のためのモノ作り基盤技術の高度化等に取り組んでいる。今後の研究開発の戦略形成のために、陶磁器分野、無機材料分野、およびデザイン分野の産業支援について整理したロジックモデルのうち、陶磁器分野の整理図を紹介する（図11）。このロジックモデルでは「陶磁器の基盤技術と新製品の開発」が一つのプログラムであり、個々のアウトプット（例えば、「新たな軽量磁器素地開発技術」）に関する研究課題が個々の研究プロジェクトに該当する。また中長期アウトカムは中長期戦略に対応していると言える。

上記の窯業技術センターのミッションのうち、陶磁器分野の目指すところは陶磁器産業の活性化であり、ブランド力の向上、新機能をもつ陶磁器製品による新たな市場の開拓、他産地との競争を勝ち抜く国内市場シェアの獲得を中・長期アウトカムとして掲げている。また、短期アウトカムとしては、生産コスト低減、高品質・高付加価値の製品開発、新分野展開、生活様式の変化に対応した製品開発、高度化支援が必要であると整理している。これらの短期アウトカムを得るためには、顧客に渡すべき研究開発のアウトプットとしてどのようなものが求められるかを詳細に整理したのが図11である。これらのアウトプットを出すためには、陶磁器の基盤技術と新製品の開発に集中した研究開発と生産現場に対応した技術支援を戦略的に進めることが求められる。

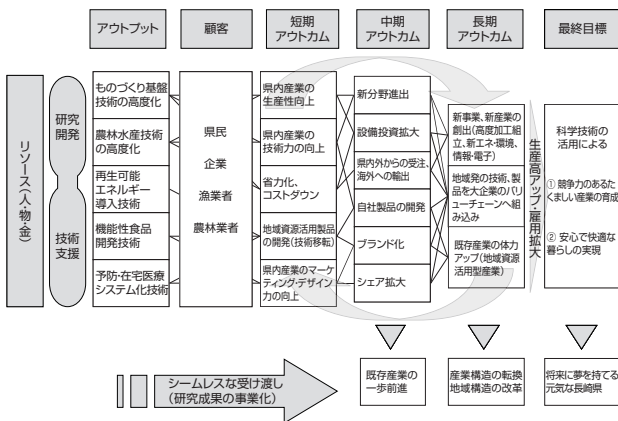


図10 研究機関のあり方構築のためのロジックモデル（長崎県科学技術振興課作成）

5.2.3 研究事業評価の反映^[28]と今後の課題

長崎県の研究事業評価には、この論文で必要性を述べた戦略形成を取り入れ始めたところであるが、構成的な研究評価で示された考え方の導入は今後の課題である。しかし現在では条例に基づき、外部委員による研究事業評価を行い、県民や産業界のニーズを反映し、市場を見据えた研究の徹底を図っている。またそれを職員の意識改革にも活用している。評価のスキームとしては、県の研究機関が行う個々の研究を対象に、それぞれ事前評価、途中評価、および事後評価を、必要性、効率性、および有効性の視点で評価している。研究機関ごとに設定される分野研究評価分科会（外部評価委員6名）で評価を行い、その報告を基に親委員会としての研究事業評価委員会（外部評価委員8名）でメタ評価（Meta-Evaluation：評価事業そのものの評価）を行っている。2009年度からは、ロジックモデルを活用して各研究機関で取り組んでいるすべてのプロジェクトの俯瞰図を作成し、各プロジェクトの各研究機関のミッションに照らした位置付けや、研究の成果が顧客に渡ってどのようなアウトカムを形成していくかのシナリオを明示して、研究機関の全体的なプログラムに照らして適切にプロジェクトが推進されているかについて説明を行い、それに対して的確な評価コメントを得るようにしている。

研究事業評価委員会の評価結果は、研究機関にフィードバックされてプロジェクトの改善に活かされるとともに、「長崎県科学技術振興ビジョン」に示された具体的施策の進捗管理、科学技術の振興に資する新たな施策の提案、戦略的振興分野の提案等の議論に活かされている。

幅広い視野から隠れたニーズを掘り起こし、市場が求める新たな技術を創出することは、長期的かつ持続的な経済効果を生み出すことに繋がり、雇用拡大も期待される。そ

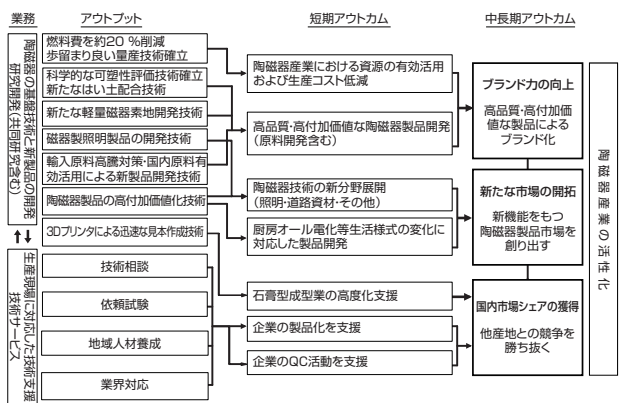


図11 窯業技術センターの戦略形成のためのロジックモデル（長崎県窯業技術センター作成）

のためには、関連部局との連携を強固に図りながら、目標に到達するためのシナリオを共に描いて戦略的な研究開発を分野横断的に進めることが強く求められる。研究機関が行う研究開発・技術支援の役割と将来像を整理するためには、各研究機関で展開されるべき研究開発の構成をプログラムとして最適化することが課題であり、長期的な戦略に基づいたプログラム構成になっているかという視点で今後構成的な研究評価を遂行することが肝要である。

6 構成的評価の反映と連環

戦略形成に基づいた構成的な研究評価の大きな責務の一つは、評価結果の反映である。産総研においては、前述のとおりこれまで隔年で研究ユニット評価を行ってきたが、その際(1)研究ユニットにおける研究のエンカレッジメント、(2)産総研経営へのフィードバック、(3)内外に対する説明責任の遂行、を目的として評価を行ってきた。これらのそれぞれのプロセスにおいて評価結果が有効に反映されることが重要である、

特に事前評価の反映にあっては、そのプロジェクト等の開始や研究ユニット創設に当って研究開発に必要なリソース、環境、条件を最適化するように評価が活かされなければならぬし、場合によっては大幅な目標の見直しも必要である。

進行途上での研究評価にあっては、そこでの評価を次のステップにどのように繋げるかが重要である。そのためPDCAモデルを基本的に回していく方法論を確立することが大切で、最終的には評価が戦略へと螺旋的にフィードバックされ、新たな戦略の形成へと引き継がれていくことが最も望ましい。さらに研究開発の推進に当っては、研究成果がどこに受け渡されて直接的アウトカムを産むかを考慮することが必要である。

また研究評価の課題として、プロジェクトレベルから政策レベルへのPDCAの連環が相互に有効に活かされ、全体として最適な戦略システムになっていることが必要である。連環が不十分なまま一部分のみのPDCAサイクルでは、戦略的な研究評価が十分意味を成しているとは言えない。公的研究機関であれば、期待されているミッションと投入リソースを含め、国として期待される機能を果たしているかという研究所レベルの評価から、国(あるいは地方自治体)としてそれを有効に活かす施策を行っているか、イノベーション政策の中で明確に位置付けているか等の政策レベルまで、評価が常に連環として繋がっていることが重要である^[28]。

7 おわりに

この論文では、研究の固有特性に立脚した研究戦略形成とそれを実現する研究開発プログラムに注目し、その研究評価を戦略形成とそれに基づく構成的評価の側面から見てきた。これまでの研究評価においても事前評価、中間評価、事後評価、追跡評価等が行われており、この論文で述べた構成的評価の要素もすでに取り入れられている。しかし、ここで改めて強調すべきことは、①研究評価にあっては、研究戦略が極めて重要であり、これとの対比による評価を基本に据えるべきであること、②また、研究の進展・深さ・位相の3側面からの評価が必要であること、③さらに、それらを全体としてまとめ仮説形成的推論を加えた構成的評価が重要であること、である。

この論文で論考を進めてきた研究の固有特性、研究戦略の形成およびそれに基づいた構成的な研究評価の関係とそれらが及ぼす研究評価のねらいを整理したものを図12に示す。研究戦略は研究開発によって達成すべき目標とそのシナリオを示すものであるが、それに基づいて構成的な研究評価を行うことにより、研究の価値の抽出、研究の進化、研究者の意欲の源泉の創出、説明責任の達成等が有効に行われると考えられる。

この論文で提示した研究戦略形成と構成的な評価をとおして、効果的に研究プログラムが進化しそれらが新たな発展に向かうことができれば、大きな意義を有すると考えられる。

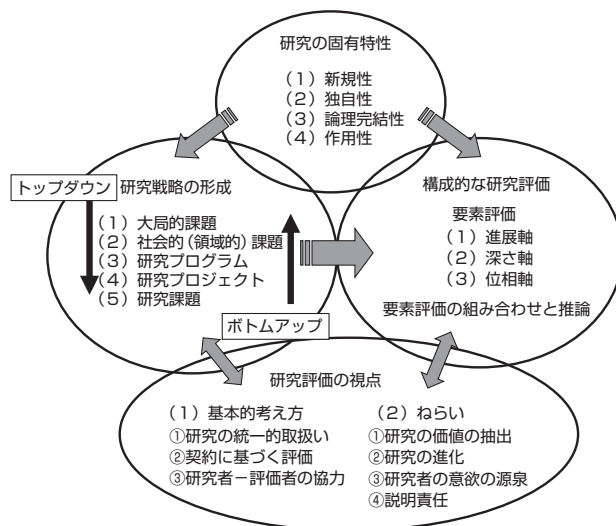


図12 研究の固有特性を念頭においた研究戦略形成と構成的な研究評価

謝辞

この研究の推進および論文作成に当たっては、独立行政法人 産業技術総合研究所評価部の皆様に色々な面で大変お世話になりました。この研究の中心的考えは、同研究所が旧工業技術院研究所を統合して新たに独立行政法人の研究所として発足して以来、評価部が中心となって行ってきた9年以上にわたる研究ユニット評価の経験と知見の上に成り立ったものです。また、吉川弘之産総研初代（前）理事長（現産総研最高顧問、（独）科学技術振興機構研究開発戦略センター長）からはアブダクションや構成的評価に関する重要な示唆とこの研究に関する変わらぬ励ましをいただきました。ここに深く感謝の意を表します。さらに、長崎県の公的研究機関のあり方に関するロジックモデル等の作成に尽力いただいた長崎県科学技術振興課並びに長崎県産業技術センターの関係各位に感謝いたします。

注1) 2009年12月エネルギー省 (DOE) のSteven Chu長官が主導したクリーンエネルギーの研究や開発、実用化にわたる一連の活動を支援するプロジェクト。

注2) 2007年開始のEU全体にわたる研究開発プログラム (FP7: Framework Program7) の策定に当たり目標とされた戦略。2000年リスボンの欧州閣僚理事会で宣言された。

注3) 2010年6月に閣議決定された我が国の戦略（基本方針）。強みを活かす成長分野としてグリーン・イノベーション、ライフ・イノベーション重視の方針を打ち出した。

注4) 演繹が、規則（りんごは美味しい）、事実（この果物はりんごである）から結果（この果物は美味しい）を導き出し、帰納が、事実（この果物はりんごである）、結果（この果物は美味しい）から規則（りんごは美味しい）を導き出すのに対して、アブダクションは規則（りんごは美味しい）、結果（この果物は美味しい）から事実（この果物はりんごである）を推論する方法である。演繹推論が内容に依存しない論理構造をもち、帰納推論が多くの具体性や経験に立脚した論理性をもつのに対し、アブダクションは論理性がより弱く、推論を進める条件に種々の制約が必要となるが、一方で演繹や帰納とは異なり、大きな推論可能性を有する方法である。歴史的には、ニュートンの万有引力の発見やケプラーの天体の楕円軌道説等はその典型と言われている^[11]。

用語説明

用語1: 演繹、帰納、アブダクション: 演繹 (deduction) あるいは演繹的推論 (deductive inference) とは、「推論の内容を考慮に入れずに推論の形式のみによって、真なる前提から必然的に真なる結論を導き出す」こと、帰納 (induction) あるいは帰納的推論 (inductive inference) とは「個々の具体的事実から一般的な命題ないし法則を導き出す」こと、である。一方、アブダクション (abduction) あるいは仮説形成的推論 (abductive inference) とは米国の哲学者C.S. パース (1839～914) が主張した第三の推論形式であり^{[11][13]}、「ある結果とそれを引き起こす可能性のある命題ないし法則から、個々の事例を導き出す」こと、である。

用語2: ロジックモデル: ロジックモデルは、研究プログラムがそ

の目的を達成するまでの論理的な繋がりを明確にする際に、戦略形成の重要な要素であるシナリオを可視化するために開発されたツールで、アメリカで各省庁がOMB (行政管理予算局) に対する予算申請の際に活用されてきた。シナリオ作成のためには、リソース、研究開発、アウトプット、顧客、短期アウトカム、中期アウトカム、長期アウトカムという要素にブレークダウンし、時代背景を把握しながら、プログラムの長期アウトカムからバックキャストして、研究開発の成果を受け取る顧客に渡って生み出されるべき直接的なアウトカムを明確にして、取り組む研究開発の成果目標を読み取る作業が必要で、それを一枚の絵に落とし込むためのツールがロジックモデルである^{[4][5][23][24]}。

用語3: 第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究: 吉川弘之の定義によれば、第1種基礎研究とは、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言う。また第2種基礎研究とは、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言い、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。さらに製品化研究とは、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を言う^{[8][9]}。

用語4: 基礎研究、応用研究、開発研究: OECDの定義によれば基礎研究とは、「特別な応用・用途を直接に考慮することなく、現象や観察可能な事実の基礎をなす新しい知識を得るために行われる実験的または理論的研究」を言う。応用研究とは、「主として第一義的には特定の実用的な目標や目的に向けられる新たな知識を獲得するための独創的な研究」、開発研究とは、「基礎研究、応用研究および実際の経験から得た知識の利用であり、新しい材料、装置、製品、システム、工程等の導入または既存のこれらのものの改良をねらいとする研究」を言う^[15]。

用語5: ROAMEF: R (Rationale: 設定の理由と位置づけ)、O (Objectives: 目的、目標、内容)、A (Appraisal: 事前評価)、M (Monitoring: 途上評価)、E (Evaluation: 事後評価)、F (Feedback: ROAMEFサイクルによる見直し) のこと^[16]。

用語6: PDCA (Plan-Do-Check-Act) サイクル: マネジメントサイクルの一つで、1950年代に米国のウォルター・シューハートとエドワーズ・デミングにより提唱された理論で、Plan (計画)・Do (実行)・Check (評価)・Act (改善) の頭文字を取ってPDCAサイクルと命名されたもの。このサイクルを一周したら最後のActを次のサイクルのPlanにつなげ螺旋状に事業の改善を行っていく。またPDCAサイクルは小さいグループから組織全体にわたるものまであり、それぞれのPDCAサイクルが上位のPDCAサイクルと連環としてつながって行くことが望ましい^{[24][28]}。

参考文献

- [1] 米国エネルギー省ウェブサイト: <http://www.energy.gov/hubs/index.htm>
- [2] 欧州委員会FP7ウェブサイト: http://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm
- [3] <http://www.kantei.go.jp/jp/sinseichousenryaku/sinseichou01.pdf>
- [4] J. A. McLaughlin and G. B. Jordan: Logic models: A tool for telling your programs performance story, *Evaluation and Program Planning*, 22 (1), 65-72 (1999).
- [5] G. B. Jordan: A theory-based logic model for innovation policy and evaluation, *Research Evaluation*, 19 (4), 263-273 (2010).
- [6] 平澤冷: 評価研究の総括, 平成20年度第3回文科省政策評価・相互研修会資料 (2009).
- [7] 産業技術総合研究所評価部: 平成17年度研究ユニット評価報告書 (2005).
- [8] 吉川弘之: 本格研究, 東京大学出版会 (2009).
- [9] 吉川弘之: 第2種基礎研究の原著論文誌, *Synthesiology*, 1 (1), 1-6 (2008).
- [10] 小柴昌俊: ニュートリノ天体物理学入門, 講談社 (2002).
- [11] 米盛裕二: パースの記号学, 勁草書房, 173-200 (1981).
- [12] 吉川弘之: 科学者の新しい役割, 岩波書店, 13-29 (2002).
- [13] 米盛裕二: アブダクション, 勁草書房 (2007).
- [14] H. Ishikawa: Technologies for all-optical path routing toward huge capacity and low power consumption networks, *International Symposium on Ultra-high Capacity Optical Communication and Related Optical Signal Processing and Devices*, Sept. (2010).
- [15] *OECD Frascati Manual*, Sixth edition (2002).
- [16] 大谷竜: “社会のための科学”と研究開発評価, *Synthesiology*, 3 (1), 264-274 (2010).
- [17] 小林直人: 産業技術総合研究所におけるアウトカムへの視点からの戦略的研究評価と産学官連携への課題, *産学連携学*, 4 (1), 14-24 (2007).
- [18] 産業技術総合研究所: 第2期研究戦略 平成17年度版 (2005), 同18年度版 (2006), 同19年度版 (2007), 同20年度版 (2008), 同21年度版 (2009).
- [19] 産業技術総合研究所: 産総研の経営と戦略 (2005).
- [20] 産業技術総合研究所評価部: 平成20年度研究ユニット評価報告書 (2008).
- [21] O. Nakamura, S. Ito, K. Matsuzaki, H. Adachi, T. Kado and S. Oka: Using roadmaps for evaluating strategic research and development: Lessons from Japan's Institute for Advanced Industrial Science and Technology, *Research Evaluation*, 17 (4), 265-271 (2008).
- [22] 産業技術総合研究所評価部: 第2期中期目標期間研究ユニット評価報告書 (2010).
- [23] 中村修: 今こそ戦略的プランニングに基づく研究開発を! -ロジックモデルの活用-, 長崎県工業技術センターだより *Challenge*, 145, 巻頭言 (2009).
- [24] 中村修: 研究開発評価, *研究所経営* (倉田健児, 川尻耕太郎編), (株)工業調査会, 311-336 (2010).
- [25] 長崎県科学技術振興局: <http://www.pref.nagasaki.jp/kagaku/>
- [26] 中村修, 岩井定彦, 西村一宏, 稲田雅厚: 地域活性化を目指した長崎版科学技術振興の実例と考察, *研究・技術計画学会第24回年次学術大会講演要旨集*, 442-445 (2009).
- [27] 長崎県産業技術センター: <http://www.pref.nagasaki.jp/yogyo/index.php>.
- [28] O. Nakamura, O. Nakamura, M. Takagi, T. Sawada, S. Kosaka, M. Koyanagi, I. Matsunaga, K. Mizuno and N. Kobayashi: Strategic Evaluation of Research and Development in a Japan's Public Research Institute, *New Directions for Evaluation*, 118, 25-36 (2008).

執筆者略歴

小林 直人 (こばやし なおと)

1978年京都大学工学研究科博士課程修了、同年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。1997年より企画室長、量子放射部長を経て、2001年産業技術総合研究所光技術研究部門長、2003年より同理事、評価部長兼務、2007年より同理事、環境安全管理部長・業務推進本部長等兼務、2009年4月より早稲田大学研究戦略センター教授。専門は光デバイス工学、半導体材料工学、量子ビーム工学、研究戦略・評価論等。この論文では、基本的なコンセプトを構築し、全体的に戦略形成ならびに構成的研究評価について考察・論述を進めた。



中村 修 (なかむら おさむ)

1979年九州大学大学院農学研究科修士課程終了後、鹿児島大学歯学部口腔生化学講座助手として、研究と教育に従事。1987年歯学博士(大阪大学)。その後、ケース・ウエスタン・リザーブ大学(米オハイオ州クリーブランド)客員研究員、九州工業技術研究所主任研究官、福岡県工業技術センター生物食品研究所参事兼生物資源課長、産総研評価部シニアリサーチャー、経済産業省技術評価調査課産業技術総括調査官を経て、2007年産総研評価部次長に就任し、研究開発マネジメントの評価に携わるとともに、国内外の評価関連人脈を構築してきた。2009年4月より、長崎県科学技術振興局長。専門は、生化学、研究開発マネジメント評価等。この論文では、構成的な研究評価の体系構築に貢献するとともに、地域活性化のための科学技術振興の戦略形成と評価について執筆した。



大井 健太 (おおい けんた)

1976年名古屋大学大学院理学研究科修士課程終了後、1977年四国工業技術研究所入所。室長、企画課長を経て、2001年産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門総括研究員。技術情報部門技術政策調査室長、四国センター産学官連携コーディネータ、同所長代理、四国経済産業局産業技術総括調査官(兼務)を経て2008年より同評価部次長。専門は無機化学、海洋資源工学、技術評価論等。この論文では、主に産業技術総合研究所における研究評価を執筆した。



査読者との議論

議論1 構成的評価vs分析的評価

質問 (赤松 幹之: 産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門)

構成的評価という言葉を使うとすると、その対義語として分析的評価という言葉が思い浮かびます。例えば図6のように要素に分解して評価をすることは分析的評価のように感じられます。構成的 vs 分析的という対比でみたときの構成的評価の特徴はどこにあるのでしょうか。

回答 (小林 直人)

ご指摘のとおり、図6のように要素に分解して評価をすることは、まさに分析的評価といえると思います。特にこの論文でいう要素評価(進展(Progress)、深さ(Depth)、位相(Phase))が分析的評価に該当します。例えば、深さの評価について、新規性、独自性、論理完結性、作用性等に沿って評価をしていくのは分析的であるといえます。一方、構成的評価の特徴は、これらの分析的評価の結果を、

①（戦略では何をとも重視していたのかという）戦略に示される方向性に沿って構成し、②評価側と被評価側の深い議論（ここでは仮説形成的推論が重要）を通して発展的な評価にまとめ上げていくこと、という対比をすることができると思います。

議論2 構成的評価におけるアブダクションについて

コメント（赤松 幹之）

研究戦略形成においてアブダクションが重要であること、そして評価においても選択と集中が求められている場合にはアブダクションが必要になると主張されていますが、アブダクションは戦略形成において最も重要になると理解しました。ただ、おそらくそのことに対して、これまでしっかりと議論がなされていないと思います。したがって、実際に仮説形成がどのように行われるものであるかが読者には分からないと推察します。具体的事例での戦略形成において、どのような仮説が導入されたのか明記できると、読者の理解が進むと思います。また、仮説形成に関して、Y軸の研究の深さの評価においても、仮説形成的推論が必要になるとしてありますが、具体的にはどのようなことでしょうか。

回答（小林 直人）

この論文のまさにポイントとなる点のご指摘を有難うございます。戦略形成に必要な仮説形成は事実的な仮説ではなく、こうあるべきという当為的な仮説であると思います。課題はそのような仮説をどのように形成していくことができるかにかかっていると思います。その仮説形成を実際にどのように行うかについて、記述を追加しました。また具体的事例での仮説形成についても記述を追加しました。なお、Y軸の研究の深さの評価においても、仮説形成的推論が必要になる点に関しては記述を追加しました。

議論3 評価者の関与のタイミング

質問（中村 和憲：産業技術総合研究所バイオメディカル研究部門）

研究戦略形成に基づく研究評価という点では、事前評価が重要になることから、評価の主体は研究戦略形成時から関わっている必要があるということになるのでしょうか。

回答（小林 直人）

基本的には戦略形成と研究評価は表裏一体の関係にあると思いますので、評価の主体は研究戦略形成時から関わっているのが望ましいと思います。ただし、研究戦略形成と評価は多少視点異なりますし、PDCAサイクルの中でPとCが全く同じ主体で行うというの望ましくないで、研究戦略形成と研究評価は一部委員が重なっているのが望ましいと思います。

議論4 評価におけるフィードバック

コメント（赤松 幹之）

4.2節にてフィードバックの重要性を論じていますが、図式的には誰からも合意される主張だと思えます。しかし、このフィードバックを書面を用いたオフライン的なフィードバックにしてしまうと、研究実施者と評価者との間での議論に基づく仮説形成の機会を失っているように思います。できれば、このフィードバックをどのように行うべきかの議論もあることを期待します。

また、プログラムは5～7年と想定されているので、フィードバックループは5年のオーダのループを指していると推察します。しかし一般的には5年前のプログラムのレビューの結果を実際に反映させることは容易ではないと推察します。なぜなら、5～7年のスケールのプログラムにおいては、最終的に目標を達成したかを判断することはプログラム終了直後には困難なことから、すぐには次のステップへのフィードバックは難しいと思います。

回答（小林 直人）

ご指摘のとおりで、評価者と研究推進者は向き合うものではなく、

「共に歩む」べきものであると思います。研究という行為そのものがまさに仮説形成とその実証の作業を繰り返すわけですから、仮説形成に関しての議論がないところでのフィードバックは意味が希薄になります。

フィードバックサイクルについては、ご指摘のとおり、プログラムは終了後3年くらいたないと評価が定まらないと思います。ただ、社会の中で研究開発や技術開発さらには制度開発等を行う場合、社会の要請から必然的に連続にならざるを得ないと思われれます。具体的には欧州のFP7という枠組みは、7年間（2007年～2013年）のプログラムであり、2010年秋に中間評価が出た所ですが、これを踏まえて2011年には次の枠組みであるFP8（2013年～2019年）の事前評価を始めるということです。このようにプログラムは実際には連続しており、フィードバックも極めて短期間で行われているのが実情です。

議論5 研究プログラムの評価と研究プロジェクトの評価

コメント（中村 和憲）

この研究評価手法を適用するためには、研究プログラムの戦略形成時にあらかじめ構成的研究評価を想定しておく必要があることから、これを想定していない一般的な研究プロジェクトへの適用が、必ずしも容易ではないと思います。

回答（小林 直人）

研究プロジェクトは、研究プログラムに比べてある意味で単純な構造をしています。そこでは、研究目的、研究手法、研究成果、想定されるアウトカムが小さな範囲に留まっていますが、研究プログラムとフラクタル構造を有しているとも言えます。例えば上記で述べた(1)進展、(2)深さ、(3)位相での3側面で評価は可能ですし、それらを構成した評価の方法も適用が可能だと考えられます。ただ、その推進は研究戦略中の研究プログラムの一要素として位置づけられるために研究戦略の事前評価の部分が簡略化できると思います。

議論6 研究評価の事例についての検証

コメント（赤松 幹之）

研究評価についての論文ですので、実際にされた研究評価に対する評価があることが望まれます。具体例について、評価委員サイド、評価部サイド、被評価者サイドそれぞれからの検討・考察があると、論文自体が仮説検証型になって良いと思います。

回答（大井 健太）

2010年5月に刊行した「第2期中期目標期間研究ユニット評価報告書」の中で、外部評価委員、研究ユニット長、コーディネータからの評価制度についての意見等を分析し、第2期の評価システムの特徴と課題をとりまとめ、改善課題を整理しました。評価制度については、「外部評価委員を中心とする評価」、「産業・社会等出口を意識したアウトカム視点の導入」等、現行の制度を高く評価する意見が多く寄せられました。一方、今後改善すべき課題として、例えば、「ボトムアップ型研究、長期間にわたる研究等、さまざまな性格の研究開発への柔軟な対応」、「評価の負荷の軽減」、「評価結果のさらなる活用」等が指摘されています。これらの改善課題を踏まえ、第3期の評価システムとしてはアウトカムの視点からの評価を継続しつつ、さらに実効性を上げる方向で検討しました。産総研では研究評価を開始してからまだ10年も経っていません。ご指摘のように、よりよい評価制度に向け仮説検証をふまえて改善を図っていくことが重要と考えます。

なお、今回の論文の産総研具体例の部分については、研究戦略に基づく構成的な評価のあり方という観点から現行の産総研の評価システムの課題を論じています。構成的な評価システムを実際に適用するためには、評価システムだけを切り出すのではなく研究戦略の策定、戦略的な研究推進と一体として制度設計する必要があり、より大きな枠組みでの産総研制度のモデル化と仮説検証の作業が必要と考えます。

議論7 ロジックモデルと構成的研究評価

コメント(中村 和憲)

長崎県の例は、戦略的研究開発を推進するためにロジックモデルを活用し、これに基づいて分野研究評価分科会、研究事業評価委員会を実施した事例について述べられています。本事例におけるロジックモデルに基づいた評価と、この論文で取り上げられた構成的研究評価の基本的な違い、特徴等を明確にする必要があるのではないのでしょうか。

回答(中村 修)

「構成的な研究評価の考えを試行的に取り込んだと考えられる研究開発評価」の事例の一つとして紹介したもので、基本的な違いはありません。

この論文で述べたように、長崎県科学技術振興局のミッションは、科学技術を活用して将来に夢の持てる元気な長崎県づくりに貢献することであり、各研究機関が地場企業・産地のニーズを速やかにくみ取り、求められる研究成果を得るための研究課題を設定しているかを評価していただくために、まず走っているすべてのプロジェクトを整理してロジックモデルに纏めてもらいました。シナリオの戦略性のロジックを問うには、ロジックモデルの適用が有効であるからです。

各評価委員会では、そのロジックモデルを基に各研究課題の立ち位置を確認してもらいながら、各研究機関のミッションに照らして戦略的な研究開発が行われているかについて評価していただき、全体のプロジェクトの構成が戦略的であるか、すなわち戦略的なプログラムになっているかを確認していただくとともに、個々のプロジェクトが長期的視点に立ち、明確な目標をたてているか、目標に向けて妥当な成果が着実に出つつあるかについて評価していただきました。もっとも、この試みはまだ緒についたばかりであり、今後さらに進化させる必要があります。

議論8 総合的評価の具体的内容

コメント(赤松 幹之)

評価を「総合」することが構成的評価であることが書かれていますが、どういったことが総合的に評価することなのか、例示がないために理解がしにくいと感じます。三つの軸を足し算するので良いのか、ある軸上の位置によって、他の軸での重みを変えて評価するのか、等が想定されますが、具体例があることが望まれます。

回答(小林 直人)

まさにこれが評価の設計の眼目となります。産総研の場合は重みを付けて足したり、幾何平均をとったりして工夫をしましたが、これ

こそが評価を推進する組織の知恵の出し所だと思います。その点も含めて、「4.3.3 総合的な研究評価」に以下の記述を追加しました。

「構成的な評価にあたっては、研究の特性を十分に踏まえ、研究推進側と評価者が、到達すべきゴールを含む戦略や成果指標に関する共通認識の下、研究の進め方や成果に関する深い議論を行い、戦略で目指された成果目標と実際の研究成果の距離を確認しつつ最終的にその研究プログラムの実施の意義と効果を仮説推論的に議論・検証することが重要である。その過程を通して“研究評価＝仮説形成とその表現”と考えることができる。これはまさに創造的な行為である研究そのものとも密接に関係しており、研究評価は創造的な営みの一つであると考えられるであろう。

(中略) 具体的には、要素評価とその適切な構成に加えて、研究推進側と評価委員側との発展的な深い議論の結果を組み込むことを含めて、総合的な評価システムを設計して行くことが望ましい。」

議論9 結論

コメント(赤松 幹之)

研究評価について、(1) 第1種、第2種、製品化で統一、(2) 契約に基づく、(3) 評価者と被評価者が同じ地平、(4) 研究の価値を引き出せること、(5) 研究が進化すること、(6) 意欲の源泉になること、(7) 説明責任、を要件として掲げていますが、これらと第3章以降で論じられた研究戦略形成と構成的評価がどのようにつながるのか、結論等で記載できませんでしょうか。おそらく、戦略形成は(1)から(3)および(7)を満足させるためのものですが、(4)から(6)については構成的評価で実現できるものと期待するという位置付けだと思います。研究の固有特性の四つの視点、研究評価の7つの視点、研究戦略形成、構成的評価の四つの関係をサマライズした記述と、それを図示したものとがあると、論文内容も整理されて分かり易くなると思います。

回答(小林 直人)

とても重要な示唆を有難うございました。新たな図12を最後に追加し、下記の表現を追加しました。

「この論文で論考を進めてきた研究の固有特性、研究戦略の形成およびそれに基づいた構成的な研究評価の関係とそれらが及ぼす研究評価のねらいを整理したものを図12に示す。研究戦略は研究開発によって達成すべき目標とそのシナリオを示すものであるが、それに基づいて構成的な研究評価を行うことにより、研究の価値の抽出、研究の進化、研究者の意欲の源泉の創出、説明責任の達成等が有効に行われると考えられる。」

有機化合物のスペクトルデータベースの開発と公開サービス

— 大規模データベースの運用の継続と成功の秘訣 —

齋藤 剛*、衣笠 晋一

産業技術総合研究所の有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) は1982年に開発を開始し、以来30年間変わらない部分と大きな変化を遂げた部分を混在させつつ高度化されてきた。標準スペクトルとして信頼性の高いものを収録すること、1種類の化合物に複数種類のスペクトルを収録することの二つの基本コンセプトと、汎用化合物を対象とする点は、開発当初から現在まで変わらず引き継がれている。一方、データベースを収集するプラットフォームと公開形式は大きく変わった。データのウェブ公開に伴ってユーザーからの声を取り上げ、各種の依頼や指摘に対応するようになったことも、大きく変わった点である。長期間にわたって開発と公開サービスを継続し、現在ウェブを通して多くの研究者、技術者、教育者、学生らによって利用されるにいたった。データベースの全体構想から、構造の設定、データの収集方法、データの公開方法等主要なプロセスを統合的、構造的に記述する。

キーワード: スペクトル、データベース、核磁気共鳴、赤外分光、質量分析、化合物情報、ウェブ

Development and release of a spectral database for organic compounds

– Key to the continual services and success of a large-scale database –

Takeshi Saito* and Shinich Kinugasa

The research activities of spectral database for organic compounds (SDBS) in AIST started in 1982. Since then, many parts of research activities have changed while the other parts have remained unchanged for almost 30 years. The unchanged parts since the start of this project are the two principles that the spectral data with high authenticity should be compiled in the database as the standard data and that several kinds of different spectra should be compiled for each compound, and the concept that compounds used commonly in industries and societies are object of compilation. On the other hand, the computer system used for database management and the ways for data release have changed completely over time. After the data have come to be opened to the public through the Internet, we have started to take considerations of comments, requests and indications from users. SDBS has had innumerable Internet accesses from many researchers, engineers, educators and students from all over the world. In this paper, the total framework, the structure of the database, the method for its data compilation and the ways to release the data to the public are described with analysis and clues of long time continuance and success of SDBS activities.

Keywords: Spectrum, database, nuclear magnetic resonance, infrared, mass, chemical information, web

1 はじめに

化学物質の信頼性の高い分析が、産業界をはじめ社会のいろいろな場面で要求されている。とりわけ化学分析の中で核磁気共鳴スペクトル、赤外分光スペクトル、あるいは質量スペクトル等は有機化合物を同定するための有力で基本的な情報である。新規化合物の開発や材料中の未知化合物の分析等化合物を同定する必要がある現場で多くのスペクトルの測定と解析が行われている。一般に、測定して得たスペクトルデータを標準スペクトルデータと照合することによる同定は、最も信頼性が高い分析方法の一つである。この方法は広く用いられており、このような標準データおよびそのデータベースの果たす役割は大きい。

産業技術総合研究所(産総研)における有機化合物のスペクトルデータベース(Spectral DataBase System for

organic compounds, SDBS)の開発は1982年に旧工業技術院のプロジェクトとして、①標準スペクトルデータとして信頼性の高いデータを収録すること、②1種類の化合物に対して複数種類のスペクトルデータを収録すること、の二つを基本コンセプトとして開始された。最大6種類のスペクトル、すなわちMS(質量スペクトル)、¹³C NMR(炭素13核磁気共鳴スペクトル)、¹H NMR(水素核磁気共鳴スペクトル)、IR(赤外分光スペクトル)、Raman(ラマン分光スペクトル)とESR(電子スピン共鳴スペクトル)のデータを研究所自らが取得することと、その化合物の情報管理をすることが基本的な内容である^[1]。研究活動を開始してから30年近くが経過する中でRamanとESRはデータの収集を中止し、現在では、MS、IR、¹H NMRと¹³C NMRの4種のスペクトルの収集を継続し、あわせて化合物情報管理と公開の活動を行っている^[2]。

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園1-1-1 中央第3

National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan * E-mail: takeshi.saito@aist.go.jp

Original manuscript received August 10, 2010, Revisions received October 12, 2010, Accepted November 2, 2010

1997年に旧工業技術院のプロジェクト^[3]により、インターネットを通じたウェブでのデータ公開^[4]を開始した。2010年4月現在で公開しているデータは、化合物数の総数が33,000あまり、それぞれのスペクトルの数と割合は図1に示すとおりであるが、スペクトルの総数は約10万である。現在の有機化合物スペクトルデータベースはウェブでアクセスしてくるユーザーが主たる利用者である。データ公開を開始して以来、インターネットで多くのアクセスを得ており、過去3年間は1日の平均ページビューが10万件を越え、産総研が公開している「研究情報公開データベース (RIO-DB)」の中で、アクセス数が群を抜いて高く、2009年度末に公開以来延べ3億ページビューを記録した。年度別アクセス数の推移を図2に、公開しているスペクトル数の推移を図3に、それぞれ示した。社会におけるインターネットの利用の拡大と、このデータベースの認知度の向上により、アクセス数はこの10年間毎年著しい伸びを示している。これらのスペクトルデータを、教科書^[5]、参考書^[6]、テスト問題等へ利用したいという要望は絶えず届き、データベー

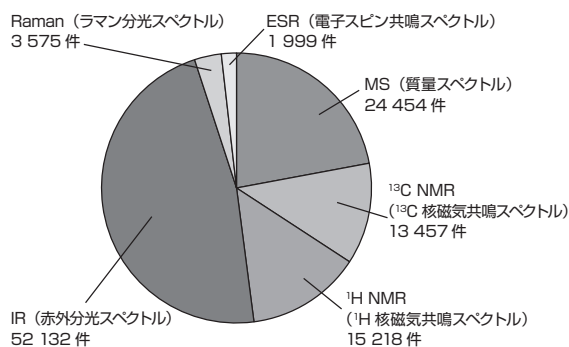


図1 2010年4月現在で産総研有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) においてウェブ公開しているスペクトルの割合と公開数

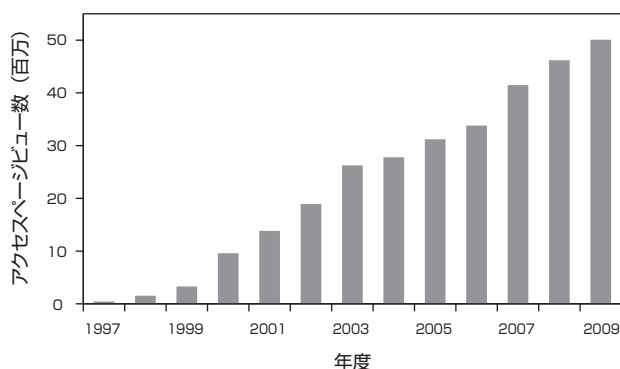


図2 産総研の有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) のウェブ公開以来の年度別アクセスページビュー数の推移

スの中にある誤りを指摘してくれるユーザーもいる。

このデータベースの開発のシナリオを図4に示す。ここでは、データベースを構成する種々の要素を列挙し、それらがデータベースの主要な特性である基本構造、網羅性、信頼性、利便性とどのような関係にあるかを示した。あわせてデータベースの運用に当たって重要となる要素も示した。それらの要素をどのように統合したか、そのプロセスを以降の章で記述する。

2 データベースの構造

2.1 データベースの基本構造の重要性

このデータベースは一つの化合物に対して複数の種類のスペクトルデータが閲覧できる構造をとった。これを実現するために、図5に示すように化合物情報と6種類のスペクトル情報を収録したデータベースを独立に作成し、化合物情報データベースを中心にして全体を統合した。

この作業を円滑に行うために、データベース構築の現場ではいくつかの種類の管理番号を準備した。すなわち、各

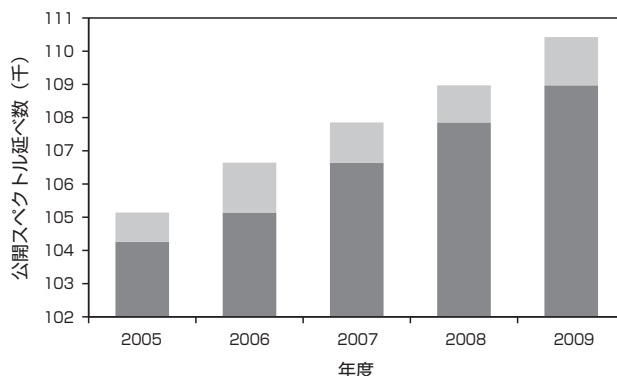


図3 産総研の有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) の過去5年間のスペクトル数の推移
各年度の新規公開分は薄い色で示した。

図2 産総研の有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) のウェブ公開以来の年度別アクセスページビュー数の推移

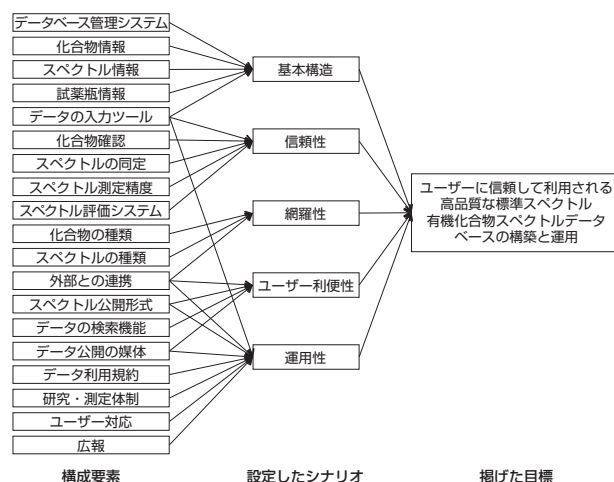


図4 有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) の構築と公開のためのシナリオ

試薬瓶に対して与えられるビン番号、取得した各スペクトルに対して与えられるスペクトル管理番号と、そのうちデータベースに登録されたものに与えられるスペクトルコード、各化合物に対して与えられる SDBS 化合物番号（このデータベース内では単に SDBS 番号と呼ばれている）である。スペクトルコードは、MS、IR、 ^{13}C NMR と ^1H NMR で別々に管理しており、それぞれの化合物情報やスペクトルデータは独立したデータベースとして切り出すことも可能である。これらの番号に対応した化合物情報やスペクトル情報はリレーショナルデータベースの形態で管理しており、現場での作業が円滑に行えるようにした。

特に化合物に固有な SDBS 化合物番号を採用したことは、このデータベースの特徴である。この番号は単なる化合物の管理番号ではなく、この採用によって、データベースの中で化合物辞書をつ一つのデータベースとしてスペクトルデータベースから独立させたので、柔軟な変更が可能となり、現在でも有用な化合物情報としてこのデータベースの運営を可能としている。この画期的な SDBS 化合物番号を採用した背景には、旧工業技術院時代に先行的な研究を行っていたガスクロマトグラフィーデータ委員会、赤外データ委員会、NMR データ小委員会等でのさまざまな成果があり、またこのデータベースの基本構造の設計時に多くの知見の蓄積があり、そのことが 30 年近くたった現在でも機能するデータベースを可能としたと考えられる。

このデータベースではすべて産総研が入手した化合物に対して実際にスペクトル測定をしてデータを取得することを原則とした。入手した化合物の試薬瓶ごとに固有の番号であるビン番号を付与した。一方、SDBS 化合物番号は化合

物に対する固有の番号であることから、ある新たな試薬瓶に入っている化合物がすでに登録された化合物と同じ化合物であるかどうかの判断を行う必要があり、既登録の化合物と一致しなかった場合にのみ新しい SDBS 化合物番号を付与した。化合物数が多くなかった初期の時点ではこの作業はさほど困難なものではなかったと思われるが、これらの確認作業には疑問や問題が生じることもしばしばあった。3 万件に及ぶ化合物を対象とし、しかも開発当初とは異なり化合物の名称やその構造がより複雑になった現在においては、化合物に対して固有の番号を付与することはより労力と時間を要する作業となり、専門化学者がこれらを行う必要性があるために、スペクトル収集そのものよりも労力と時間を費やすようになっていった。この問題を解決し、専門家のリソースをスペクトル測定、収集、評価により多く確保するために、SDBS 化合物番号の確認方法として、多くの化合物情報項目の一致検索を行った結果、データベースにすでに登録されている可能性があるという判定が示されたときのみ、複数の専門化学者が疑問点を重点的に確認する方式を確立した。これにより、作業の質を落とすことなく、SDBS 化合物番号を付与するために専属の専門家が不要となっただけでなく、データベースの化合物登録作業が円滑になり、化合物番号の重複が起きにくくなった。

2.2 データベースの運用とプラットフォーム変更に際しての判断

開発当初の 1980 年代はこのデータベースの運用を大型コンピュータで開始した。この時期が日本の Windows PC の源流である NEC PC-9800 シリーズの発売開始時期と変わらないことからみても、大型コンピュータで運用を開始したことは当然であろう。しかし、この大型コンピュータ (FACOM MSP) は旧工業技術院の方針により運用が 1999 年 3 月末で終了したため、他の大型コンピュータへ移行するか、あるいはパソコンへ移行してデータベースを継続するか、あるいは活動を終了するか選択を迫られた。この時点で私達はデータの管理を行うシステムに Windows PC を採用することに決定し、新たにパソコンを利用したデータ入力ツールを開発することにより活動を継続した^[7]。多くのソフトウェアで MS-DOS から Windows への移行がうまくいかずに再構築しなければならない等の困難に遭遇したが、このデータベースを全く異なる環境のプラットフォームに移すことに成功した。このときに大型コンピュータにこだわっていたら、現在のデータベースのようなデータの入力や管理を助ける様々なツールを利用することに支障を来したであろう。データ収集を Windows PC で行うようにしたことでデータの管理が格段に容易になった。

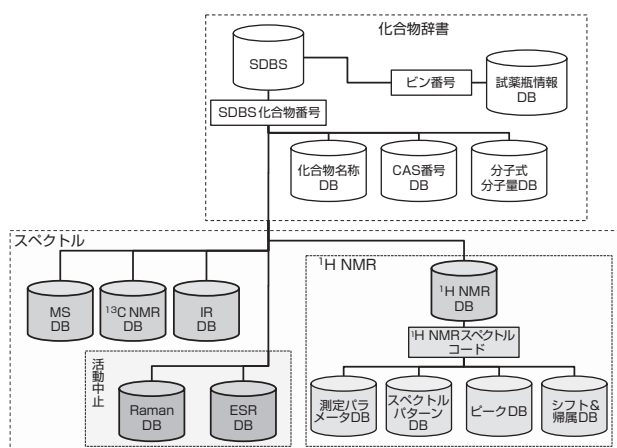


図5 有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) の構造
図中の SDBS には、化合物番号である SDBS 化合物番号と、その化合物の元素数等が記録されている。それぞれのスペクトルデータベースを代表して ^1H NMR データベースの構造を示した。すべての情報は、SDBS 化合物番号を利用したリレーショナルデータベースで関係づけられている。

3 収集するデータの選択

3.1 化合物の選択の戦略

このデータベースは、広い分野で化合物同等の分析に利用することを念頭に構築したものであるため、多くの人が頻繁に使用する市販試薬を中心にスペクトルデータを収集することとした。ウェブで公開しているデータ数は図1に示したが、公開にいたらなかったスペクトルデータも数多くあり、測定に供した化合物は試薬瓶でのべ39,000本以上になる。

このうち、10,000本以上の試薬は東京化成工業株式会社から無償で提供されたものであり、収集した試薬数のうちでは、同社から提供されたものが最も多い。したがって、試薬選定は同社の新規試薬開発方針に沿った部分があるが、それは間接的にユーザーの現行のニーズを反映したものと見える。研究開発現場で化学合成等を行って種々の化合物を調製する場合も、その原料は市販試薬であることが多く、化学工業における基盤的な試薬を同社から多く入手することができたことは貴重な支援であった。

2001年以降はこれとは別に農薬や劇物を中心とした化合物のスペクトル収集を開始した。すなわち法規制があるもの等危険物のスペクトル情報を多く収集し発信することは公的研究機関の重要な役割であり、最近まで徐々にその数を増やしている。食の安全への関心も高まっており、その後も農薬等重点的に収集する化合物を選択する戦略は重要と考えている。

3.2 データ形態（デジタルデータ）選択の先見性

データ収集の形態にかかわる最も重要な選択が開発当初に行われた。それは今となっては当然のことであるが、このデータベースはすべての情報が座標データとしてコンピュータ上でデジタル化して収録されたことである。1970年代にはスペクトルデータ集として冊子体のデータ集が活用されていた。測定データはデジタル化により取り扱いが容易になることは認識されていたが、コンピュータの容量の制限等からデジタル化によって情報の一部が失われる等の問題もあり、紙媒体等に記録するアナログデータの取り扱いが主流であった^[1]。データのデジタル化には、NMRの測定を例にとると、その当時でも一つのスペクトル当たり数万のデータポイントで構成されており、30年前のコンピュータのディスクやメモリ容量等の条件を考えると、デジタルデータでのデータベース化は大きな決断だったはずである。当時の工業技術院の大型コンピュータがなければ実現がむずかしかったと考えられる。このような条件では、個々のスペクトルの測定だけでなく、それをデータベース化するためには多くの困難があり、収録するデータ量を最小限に抑える工夫を合わせて行うことで実現できた。実際に、¹H NMR

のスペクトルパターンの座標データをデジタル化して収録したのは世界初^[8]であり、取得したデータの必要な部分のみを切り出して収録する方法を取ることでデータ容量を圧縮した。¹³C NMRの測定データは、ピーク値を規格化した強度と半値幅の値を収録し、ピーク形状をローレンツ関数で仮定してシミュレートして表示した。IRとRamanは得られたスペクトルの各点の座標データを収録し、MSは質量数とその強度を収録した。ESRもスペクトルをデジタル化したが、論文のデータをカーブリーダーで読み取って、座標をデジタル化したものもあった。¹H NMRには、化学シフトとスピン結合定数を利用したスペクトルシミュレーション機能を備えた^[9]。産総研になってからは、NMRは¹³C NMRも¹H NMRも不純物由来のピークやノイズを含めたすべてのデジタルデータをスペクトルデータとして収録したことで、ユーザーはピークの信号強度やその時のノイズレベルまで確認することができるようになった。1997年に旧工業技術院からウェブ公開を行ったことはすでに述べたが、開発当初にもしもスペクトルのデジタルデータを収録していなければ、予想されるスペクトルデータのデジタル化に対して、アナログ収録した化合物に対しては再測定せざるを得ない状況になったと思われる。

3.3 質と量のバランスにおける高品質へのこだわり

このデータベースのスペクトルデータは、ESRと¹H NMRの一部に論文の情報から作成したスペクトル情報があるのを除き、開発当初からすべて当所で測定、評価したデータを収集する方式をとった。すべてのスペクトルデータに対して、品質に責任を持って公開していくためにはこの方式が最も信頼性が高い方法である。この方式は、公開するデータの品質の確実性に利点がある一方、公開できるデータ量は限られてしまう。多くのスペクトルデータを公開すること、すなわち網羅性を高めることはデータベースの重要な要素の一つである。この質と量という異なる二つの価値をどのように調和させていくか、また、データベースをこれら二つの価値軸のどの位置に設定するか、データベースの存在意義にもかかわる大きな問題である。このデータベースではまず標準データとして一定の質を確保し、その上で時間をかけて量的な要求に応えるという方針をとった。

データベース構築に当たってスペクトルデータの信頼性確保のために評価基準を定めたが、その例を以下に示す。¹H NMRではテトラメチルシラン（TMS）を化学シフトの基準として利用するだけでなく、スペクトルの分解能の判断基準にも利用した。TMSのピークが鋭鋭化していれば、化合物のピークの分解能が悪く見えても、それは測定の不備のためではなく、その試料が示す特性であると判断できる。IRスペクトルの場合には干渉ノイズが無いことや水ピー

クが無いこと、あるいはベースラインが大きくうねらないことをスペクトル評価の基準とした。このような基準を、それぞれのスペクトル測定を担当した研究者が独自に設定してきた。

3.4 データ登録の方針

同じ条件で測定されたスペクトルは、最も信頼性が高いと評価されたもののみ公開した。MS スペクトルは直接導入法を採用したので、化合物に対する測定条件が一つに決まるため、最も良いと判断されたスペクトルを化合物に対して一つだけ登録した。IR は、例えば固体試料の KBr 錠剤法とスジョール法等、同じ化合物でも異なる条件でスペクトルを測定したため、それぞれの条件で最も信頼性の高いものを登録した。¹³C NMR スペクトルは ¹H 核とのスピン結合がなくなる条件で測定したため、一つの化合物に対してスペクトルを一つ登録した。

¹H NMR は同じ試料と溶媒の組み合わせでも、得られるスペクトルのパターンは測定する周波数に依存する。活動当初からスペクトル収集に最も利用された測定共鳴周波数は 90 MHz であるが、この周波数でのスペクトルが複雑で解析が困難な化合物については、より単純なスペクトルが得られる 400 MHz で測定した。実際のデータから抽出した化学シフトとスピン結合定数を利用して、異なる周波数でシミュレートしたスペクトルを示すことも重要であったことから、スペクトルとは独立に化学シフトとスピン結合定数を収集し、シミュレートスペクトルを示せるようにした。

NMR はスペクトル自身に加えて、それぞれのスペクトルを解析して帰属情報を付与した。特に ¹H NMR は測定する共鳴周波数によってスペクトルのパターンが変わることから、普遍的な値である化学シフトと帰属情報を付けることが不可欠であった。これらの情報がなくては、異なる共鳴周波数で測定したスペクトルとの比較が困難であり、化学シフトと帰属情報は ¹H NMR のスペクトルデータベースとして最も価値の高い情報といえる。

測定に供した化合物に関する情報は可能な限り多くを収集し登録した。化合物の構造が複雑であればあるほど、ある一つの化合物に対して異なる複数の名称が使われるのが普通である。データベースの利用者がどの名称で検索しても対応できるように、化合物自身に関する情報は網羅的に登録した。

3.5 収集するスペクトルの種類

スペクトルの収集は開発当初 6 種類について行い、現在は 4 種類について継続している (図 5)。開発当初の 1980 年代に汎用的に利用されていた分析法は他にもあったはずだが、例えば紫外可視分光法等のスペクトルデータはデータベースに採用しなかった。採用した 6 種類のスペクトルは

当時の研究所の測定装置や研究者に依存した選択であったと考えられる。その後 Raman と ESR のデータ収集を継続しなくなった原因は、担当する研究者や稼働できる装置の問題も一部あるが、潜在的な需要が活動中止の大きな要因であったと推察する。ところが現在は学術的にも産業的にも Raman スペクトルデータの需要が拡大しており、その点でこのデータベースは十分な対応ができていない状況にある。一方、MS、¹³C NMR、¹H NMR と IR は 1980 年代から現在に至るまで大きな需要がある。この点は、特にこのデータベースがウェブで公開されたあとはユーザーからのアクセス数によって直接的に需要が確認されている(図 2)。

4 データ公開の方針

4.1 ウェブによるデータの公開

1997 年に産総研のウェブサイトから MS、¹³C NMR と ¹H NMR のスペクトルデータの公開を行い、1 年遅れて IR と ESR を公開した¹⁰⁾。現在は Raman を含めて 6 種類のスペクトルデータを公開している。このデータベースのウェブ公開を開始したときは NCSA Mosaic や Netscape Navigator のようなウェブブラウザが開発され、多くの人がウェブを利用するようになっていたものの、ウェブ回線が現在に比べてまだ整備されておらず、またブラウザの表示能力も不十分だった。ウェブでデータを公開するに当たっては、スペクトルをより効率的に表示することが重要な課題であった。このことからスペクトルや化合物の構造を表示するために最も小さいサイズの画像表示形式であり、インターネット回線に負担の少ない GIF ファイル形式を選択した。日本国内でのウェブアクセスは高速化しているが、必ずしも高速化に対応できていない世界のユーザーを考慮し、現在もまだこの形式を継承している。

画像表示形式である GIF 形式でデータを公開するもう一つの理由はデータの保護にあった。すなわち、このデータベースの知的財産である座標データを不正に取られてしまうことを防ぐ対策であった。座標データからは、高品質のスペクトルの再構成等が容易に可能であるが、画像表示形式からは、それを超す品質の情報を作ることができない。これまでに短時間に系統的かつ網羅的にデータを取得することを目的としたアクセスが数回あったことが分かっているので、データを公開するために取った保護策は有益であった。今後は、このような不正アクセスへの対策を講じた上で、座標データを利用したウェブ上でのスペクトル拡大機能等を装備することも可能となろう。

ウェブサイトからのデータ公開にあたって、公開ページの言語情報は英語表記とした。これは、収集した化合物名称が英語であり、その他の情報は言語に依存しなかったこ

とから可能であった。現在は、国内ユーザーへのサービスとして、アクセスするコンピュータの言語設定が日本語の場合には、フレームに日本語で説明が表示される仕組みにした。

重要な情報であってもこのデータベースで整備しきれないものに対しては、積極的に他の利用可能なデータベースとリンクを張ってユーザーへの便宜を図った。2006年からは東京化成工業株式会社のオンラインカタログとこのデータベースのリンクならびに、科学技術振興機構の化学物質リンクセンター^[11]とこのデータベース間のリンクを張った^[12]。日本語を利用した化合物検索や構造式検索等、現在このデータベースで独自に整備し切れていない部分を補完するようにした。

ウェブでデータ公開したメリットの一つとして、公開データを一括管理できることが挙げられる。公開用サーバのデータを更新することで、すべてのユーザーに対して同時に同等のサービスを提供することが可能となった。ウェブを介してユーザーからのコメントが直接開発者に寄せられることも、ほかの研究と異なる特徴である。

ウェブ公開以前は、1989年からオンライン^[13]で、1991年からはCD-ROM媒体にデータと検索プログラムを入れたデータベースソフトウェア^[14]として販売した。このCD-ROM媒体を利用できたのは国内数十件程度の特定制ユーザーのみであった。この形態では、提供されるデータはある時点までに収集されたものに限られ、長期間にわたって保存できるが、データの更新やソフトウェア改修等への対応は難しい。また、CD-ROMでは所有する一部のユーザーに対してのみのサービスに限定される。しかし、MS-DOSで動くCD-ROMで検索、表示可能にしたことで、現在のウェブ公開に必要な要件をあらかじめ検討できた。このこ

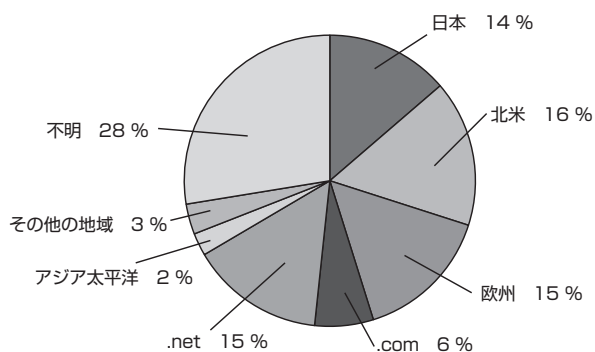


図6 2009年度1年間にデータベースへアクセスしたユーザーの地域ドメインの割合

地域を特定しないドメインのうち、「.com」と「.net」は独立に集計した。不明は、アクセス元にIPアドレスを利用する等、ドメイン名が特定できなかったアクセス元である。

とは、開発前に先導的研究を行ったことによりこのデータベースを適切に設計できたことと類似している。CD-ROMでの公開は、このデータベースをウェブで公開するための重要な先導研究であったと考えられる。

4.2 ユーザーの解析と公共財としての役割

このデータベースのユーザーを解析するために、2009年度のアクセスログを国別認識記号で集計解析した結果を図6に示した。延べ5千万件超のページビューのうち国内からのアクセスは約14%であり、一方最もアクセスが多かったのは北米地域であった。商用を表す「.com」、ネットワークを表す「.net」等、特定地域に限定されないドメインは、国別識別コードとは別に集計した。日本国内からのアクセスに関してアクセス元のドメインを集計したところ、図7に示したように大学等の学術機関である「.ac.jp」からのアクセスが最も多く、ネットサービスやインターネットサービスプロバイダ等に発行される「.ne.jp」、一般企業のための「.co.jp」がそれに続いた。これらの中で学術機関とネットワークプロバイダー等のドメインからのアクセスは、一年の中でも3月と8月は、最もアクセスの多かった6月の半分以下と、季節変動が激しかった。一方、一般企業からのアクセスは、多少の変動はあるものの一年を通しておおむね同じ程度のアクセス量があった。このことから、学生の夏休みと学期末と重なる時期にアクセス数が低下する傾向にあることがわかる。ネットワークプロバイダー経由のユーザーのアクセス傾向が、学術機関からのユーザーのアクセス傾向と類似していることから、ネットワークプロバイダー経由のユーザーも多くは学生であることが示唆され、全体として多くの学生に利用されていることがわかった。

このようにこのデータベースは多様なユーザーに使用され、産総研のような公的研究機関が提供する公共財の役

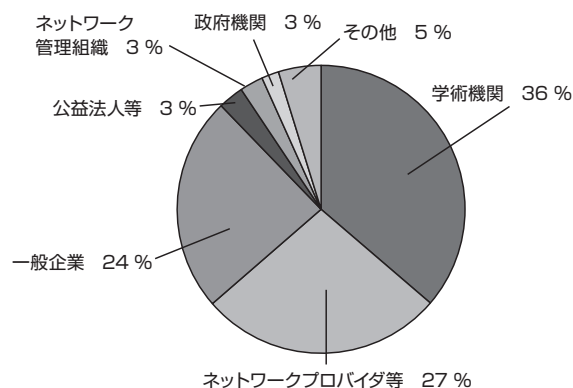


図7 2009年度1年間にデータベースに国内からアクセスしたユーザーのドメインごとの集計

学術機関、ネットワークプロバイダー等、一般企業、公益法人等、ネットワーク管理組織、政府機関は、それぞれ「.ac.jp」、「.ne.jp」、「.co.jp」、「.or.jp」、「.ad.jp」、「.go.jp」ドメインに対応しており、これ以外の「.jp」ドメインからのアクセスはそのほかにまとめた。

割を果たしている。一般にデータベースは多くの情報を蓄え、その中から必要な情報を効率的に検索することでその力を発揮する。このようなデータベースの構築と維持には、多くの資源と時間が必要となり、このデータベースも例外ではない。しかし、データベースの利用者に対して、この開発維持の対価を要求すると、利用することができるユーザーは限定されてしまう。このデータベースは、公共財として無料で公開することで、産業界はもとより、スペクトルデータの利用法を学習する人も含む多くの人々に機会を与える役割を担っている。無料で公開することで、数多くの企業がデータベース構築に付随するコストをかけずにスペクトル情報を化学分析の現場で利用することができ、これによって化学分析のコストが低減される。すなわち、このデータベースは、産業を支える知的基盤としての役割を果たしている。さらに、実際に大学からの利用が国内では全体の36%あることや、教科書や研修資料にスペクトルを利用したい旨の依頼が数多く寄せられるように、国内外でスペクトル利用法の教育にも広く使われており、社会全体に大きく貢献していることがわかる。

4.3 ユーザーからのコメントへの対応

データベースを公開したことによりユーザーからは多くのコメントがメールで寄せられる。研究の多くは論文の形で世に問われて評価されるが、このデータベースは世界中にいるウェブユーザーに直接問われており、ユーザーから得られる評価の表れの一つがコメントである。ユーザーからのコメントを真摯に受け止め、それを活用していくことはデータベースの今後の方向性を見極め、さらに発展させるために重要だと考えている。

コメントは利用許諾の申請、そして技術的な質問や指摘に分類される。感謝のメールも多く届き、私達もそれを見ると勇気付けられる。

技術的な指摘はNMRの帰属の間違い、測定条件の問題等がある。技術的な間違いの指摘を受けたときには、すぐにそのデータの精査をする。この段階でユーザーからの指摘に対する判断ができない場合には、スペクトルを再測定することもある。スペクトルデータを再精査した結果、ユーザーのコメントが正しいと考えられる場合には、すぐに修正を行う。ウェブで公開しているデータベースの情報が正しいと判断した場合には、指摘してくれたユーザーに対して説明を行った上でその情報の公開を継続する。再測定には同じ化合物を可能な限り入手して対応しているが、それができない場合にはそのデータを取り下げることもある。

ユーザーからの、ウェブで公開しているスペクトルの画像、すなわちGIFファイルの他の資料への利用許諾に関する申請には可能な限り利用してもらえるように対応してい

る。いずれのコメントも、このデータベースで公開しているデータの質が確保されていることの一つの現れと考えており、今後ともこのようなコメントに対して迅速に対応できる体制を維持していくことが重要と考える。

アクセスログの解析から教育機関からのアクセスが多いことを示したが、教科書に頻繁に現れる化合物のスペクトル、特に ^1H NMRに関する問い合わせが届くことがある。これらの化合物には共鳴周波数が90 MHzで測定された ^1H NMRが多いが、現状により即した400 MHzの情報も加えることが今後必要であろう。

5 まとめ

1982年に構築を開始して以来、産総研の有機化合物のスペクトルデータベースはこれまでに3回の大きな世代交代を伴った。直接開発に中心的に携わった第1世代はプロジェクトを立ち上げ、その後のこのデータベースにとって重要な方向付けを行った。第2世代はウェブ公開を実現し、大型コンピュータが利用できなくなった際のデータマネージメントシステムの原型を完成した。大型コンピュータでは利用できなかった小文字への対応も開始され、化合物名称や分子式等の表記上の問題の解決が行われた。

著者らは第3世代にあたる。2001年に工業技術院物質工学工業技術研究所から産総研に組織が変わった頃、ちょうど現在のスタッフを中心とした活動が始まった。前後してこのデータベースのためのMS、NMRやIRの装置を更新した。スペクトル毎に別々に活動してきたスペクトル担当のスタッフが、化合物辞書を整備するスタッフと活動拠点を同じにした。このような環境を手に入れたことにより、測定スペクトルに疑義があった化合物や辞書情報の内容について確認や議論を円滑に行うことが可能となり、公開前のスペクトル情報の管理や、そこから公開用のデータを作るための内部データ管理ツールを充実させることができた。ウェブでは検索等の機能拡張を行ってきており、産業界のユーザーに留まらず、ウェブ公開によって教育への利用が多くなったことで、これまでと異なるデータ収集の方針を検討することも必要になってきた。一例がスペクトル、特に ^1H NMR情報の更新である。

データベースに真剣に取り組む研究者がいなければ、データベースの活動は成り立たないの言うまでもない。加えて、この研究者の取り組みに対する組織からの支援があったことが、継続的な活動を可能とした。このデータベースはウェブで多くのユーザーに支持されており、需要があることも組織的な支援を受けられた要因である。これら研究者と組織が両輪となり、ユーザーに必要とされるデータベースを構築したことが、このデータベースが長期間にわたる

活動を継続することができた要因の一つである。限られた資源の中で、信頼性の高いデータベースの情報を発信し続けることはたやすいことではない。NMR を例にとると、化合物が分解しない条件下で速やかに測定を行うこと、測定を自動化すること、帰属作業の簡便さと正確さ向上のために、2次元スペクトルを測定して、結合している¹Hと¹³Cの骨格を確認すること等、信頼性の高い情報を効率的に収集する工夫をしているが、評価の最終確認は研究者の目が必要である。これを自動的かつ効率的に行えるような評価方法を確立することができれば、このデータベースも次の大きな変換点を迎えることとなろうと考える。

6 謝辞

研究活動を開始して以来、多くのスタッフが産総研有機化合物スペクトルデータベース (SDBS) の発展に寄与してきた。このデータベースにかかわった方々に、この場を借りて感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] O. Yamamoto, K. Someno, N. Wasada, J. Hiraiishi, K. Hayamizu, K. Tanabe, T. Tamaru and M. Yanagisawa: An integrated spectral data base system including IR, MS, ¹H-NMR, ¹³C-NMR, ESR and raman spectra, *Anal. Sci.*, 4, 233-239 (1988).
- [2] 齋藤剛: 有機化合物のスペクトルデータベース, *産総研 Today*, 7 (1), 36-37 (2007).
- [3] <http://riodb.ibase.aist.go.jp/index.html>(2010年7月30日現在)
- [4] <http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/>(2010年7月30日現在)
- [5] 陳勝智: *Fragmentation and Interpretation of Mass Spectra*, 中国医薬大学, 台湾 (2010).
- [6] 小川圭一郎, 榊原和久, 村田滋: *基礎から学ぶ有機化合物のスペクトル解析*, 東京化学同人, 東京 (2008).
- [7] K. Hayamizu: An input tool by a personal computer for the NMR Spectral Database (SDBS-NMR), *Journal of Computer Aided Chemistry*, 2, 1-10 (2001).
- [8] O. Yamamoto, K. Hayamizu and M. Yanagisawa: Construction of proton nuclear magnetic resonance database system with full spectral patterns, *Anal. Sci.*, 4, 347-352 (1988).
- [9] O. Yamamoto, K. Hayamizu and M. Yanagisawa: Construction of proton nuclear magnetic resonance parameter database system, *Anal. Sci.*, 4, 455-459 (1988).
- [10] 早水紀久子: インターネット上のスペクトルデータベース (SDBS), *物質研NEWS*, 37, 3 (1995).
- [11] 中村徹: 化学物質リクセンター 様々な化学物質データをワンストップで, *CICSJ Bulletin*, 25 (4), 88 (2007).
- [12] 齋藤剛: 有機化合物のスペクトルデータベース SDBS, *CICSJ Bulletin*, 25 (4), 99-102 (2007).
- [13] 早水紀久子, 和佐田宣英, 田辺和俊, 田村禎夫, 柳沢勝, 小野修一郎: 化合物スペクトルデータベースシステム(SDBS)のオンラインサービス, *化技研ニュース*, 6 (1), 2 (1988).
- [14] 早水紀久子, 田辺和俊, 田村禎夫, 柳沢勝, 小野修一郎: 化合物スペクトルデータベースシステム(SDBS)のCD-ROM版, *物質研NEWS*, 9, 6 (1994).

執筆者略歴

齋藤 剛 (さいとう たけし)

2000年工業技術院物質工学工業技術研究所入所、現在は産総研計測標準研究部門計量標準システム科主任研究員。有機化合物のスペクトルデータベース (SDBS) の高度化研究に従事し、現在はSDBSを統括している。NMRを利用した研究を行っており、NEDO委託事業「ナノ計測基盤」では、NMRを利用した液中粒径計測の研究に従事、現在は、NMRを用いた定量技術の高精度化とこれを利用したSIトレーサブルな標準物質供給に関する研究に取り組んでいる。この論文では全体を統括した。



衣笠 晋一 (きぬがさ しんいち)

1987年工業技術院化学技術研究所入所、現在は産総研計測標準研究部門先端材料科高分子標準研究室長。高分子の分子特性解析をベースに、高分子標準物質、ナノ粒子標準物質の研究開発に従事している。2001年より有機化合物のスペクトルデータベース (SDBS) の高度化研究に従事、主に赤外吸収スペクトルを担当している。この論文では全体を齋藤と共に担当した。



査読者との議論

議論1 全体的コメント

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所評価部)

産総研が公開しているデータベースの中で、外部からのアクセス数が最も多い有機化合物のスペクトルデータベース (SDBS) に関して、データベース構造、データ集積、データ公開の方法論が述べられており、本誌にふさわしい研究論文と考えます。

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

30年間にわたる長期のプロジェクトに対して、その基本構想から開発、維持、公開に至るコンセプトとプロセスが分かりやすくまとめられています。この研究は第2種基礎研究から製品化研究にわたる広範な研究業務で、産総研のような公的研究機関にふさわしい研究成果だと思います。また世界中から大量のアクセスがあることも、このプロジェクトの成功を示すものと言えます。

議論2 アクセスログの解析と公共財

コメント (富樫 茂子)

アクセスログの解析をすることでユーザーの情報がかなり得られるはずですが、外国・国内の別や、大学・公的研究機関・企業・一般等のおよその分類ができるはずですので、加えてはいかがでしょうか。

また、文中で「無料の公開」が頻繁に強調されています。公的研究機関が公共財として社会に幅広く活用される情報を無料で公開することは極めて重要な役割と考えます。独立の章をたてて、この点を十分に議論していただけると、シンセシオロジーの論文として深められると思います。

回答 (齋藤 剛)

アクセスログについては、アクセスするユーザーの国や、国内ユーザーの (ac や co のような) ドメインに関するアクセス状況について図を追加し説明を加えました。

「無料の公開」に関しては、私達も独立の章を設けて議論することが望ましいと考え、4.2節の中に新しい段落を起こして無料サービスの意義に言及しました。

議論3 データベースにかかる人と経費

質問（小野 晃）

産総研の有機化合物スペクトルデータベースの構築と公開に要するコストについて伺います。データベースシステムの構築（ハードウェアとソフトウェア）、試料の入手、測定の実施、データの管理と品質の確保、ユーザー対応等にかかるマンパワーと経費は大まかにどの程度のものでしょうか。

回答（齋藤 剛）

産総研発足から2007年度までは研究者が全体のデータベースの方針等の策定、スペクトル評価等を行い、MS、IR、NMRと、化合物辞書を担当する契約職員4名の体制でデータベース構築を行い、構築したデータの公開は産総研の研究情報公開データベース（RIO-DB）のシステムエンジニア（SE）に多くの作業を依頼しています。

私達がスペクトルデータベースの作業にかかわった期間では、研究者は一年あたりの延べ作業量として、データベースシステム構築0.25名、測定0.25名、データの品質確保に0.8名、データ管理とユーザー対応を合わせて0.25名程度のマンパワーを費やし、経費は概算で年間当たりデータベースのハードウェアシステムの構築に20万円、ソフトウェアシステム構築に150万円、試薬の入手に25万円、装置の購入費を除く測定にかかわる消耗品や装置のメンテナンス費用として180万円、データ管理に70万円程度を要しています。このほかに、データベースの公開を担当するSEに多くの作業を依頼していますが、これに関しては私達は把握できておりません。

議論4 網羅性、信頼性、緊急性のバランス

質問（小野 晃）

①データベースの構築では常に網羅性と信頼性のバランスが問題になることはこの論文でも述べられています。このデータベースの目的を、汎用の化合物を同定するための標準スペクトルデータの提供とし、データの信頼性を第一に考え、試料に関する情報と測定はすべて自己（産総研）が把握・管理できる範囲に限定するという方針を採ったと理解しました。このためデータベースの網羅性は、その達成が後回しになってもやむを得ないとし（すなわち時間が解決するという方針をとり）、開始30年後の現在では十分な量（3万種類の化合物）に達した、という理解でよろしいでしょうか。

②一方、汎用の化合物だけでなく、最近ではこの論文でも指摘されているように農薬や劇物等、社会が緊急に求めている特殊な化合物のスペクトルデータも求められているように思います。これらのスペクトルデータベースを構築して公開することは重要だと思われませんが、現在世界のどこかの機関から公開されているのでしょうか。これらのデータベースはユーザーから見て十分な状況にあるのかどうかお尋ねします。

③もし十分な状況でない場合、緊急かつ大量にスペクトルデータが必要ならば、これまでの産総研の対応方針ではニーズに対して間に合わない恐れがあります。農薬や劇物等のスペクトルデータベースに関しては、その信頼性をやや落としてまでも、網羅性と緊急性を最優先にしたデータベース構築が求められるように思いますが、この点に関して著者の方々はどのような見解をもっておられるか伺います。

回答（齋藤 剛）

①基本的には、データベースの網羅性より信頼性を優先した結果、データ量を急激に増加することができなかった点も、活動を長期にわたって継続した結果、化合物数で3万件、スペクトル数で10万件と大規模になったことも、ご指摘のとおりです。汎用性の高い化合物は網羅できたと考えられます。

NMRに限定すると、スペクトルデータの公開にはスペクト

ルを測定するだけでなく、帰属も行うこととしたので、活動を行っている人的、装置的な時間制約でこれ以上データ量を増やすことが困難でした。また、ほかのスペクトルについても研究所内やほかの機関から試薬の調達を試みましたが、十分な試薬を集めるための予算が不足していた点も網羅性を達成する妨げの一因であったと考えられます。

②医薬品、毒物、農薬、汚染物質のマススペクトル・データベースがJohn Wiley & Sons社からCDと本のセットで、農薬等の環境関連IRデータベースがBio-Rad社から提供されています。劇物については、国内法にのっとった分類であり、このような形で分類されたスペクトル集はないと思います。このような分類を明示していませんが、農薬や劇物に分類される化合物のスペクトルデータは他にもあると考えていますが、ユーザーから見て十分な状況にあるとは言い切れないと考えているため、このデータベースでもこれらのスペクトルデータの整備を行っています。

③現在の体制では、スペクトルの信頼性を落とすだけでは限界があり、網羅性と緊急性に対応しきれない面もあります。これを達成するためには、緊急性の高い化合物のスペクトル情報を優先的に測定、評価して、これらのデータ公開をしていくプロジェクトを立ち上げる方法が良いと考えています。一つの選択肢として、産総研外のデータを収集する方法やスペクトル評価基準を構築して、将来的に公募形式のスペクトルデータベースへ発展させることがあります。こうすれば一定水準の品質を確保した上で、より網羅性を備えたスペクトルデータベースへ発展させることが可能ではないかと考えています。

議論5 デジタルデータと著作権

質問（小野 晃）

このデータベースの中ではデータはデジタル化して管理されていますが、ウェブに公開するときにはアナログ化し、ユーザーはデジタルデータにはアクセスできないようになっていると理解しましたが、それでよろしいでしょうか。

ユーザーがデジタルデータにアクセスできない理由には、産総研が取得したスペクトルデータには著作権があり、第三者がデジタルデータを使用したいときには著作権料を支払うことになるという理解でよろしいでしょうか。

回答（齋藤 剛）

ご質問にある、「デジタルデータ」が「スペクトルを構成するポイントが座標情報として示されたデータ」、「アナログデータ」が公開に用いている「gif画像データ」という意味で、ご指摘のとおりです。

ユーザーがデジタルデータにアクセスできないようになっている理由は、著作権や著作権料自体の観点からではなく、著作権保護の観点からです。つまり、SDBSを不当な模倣から守り、また、模倣によって第三者が不当な利益を上げるのを未然に防ぐためです。デジタルデータは加工性が高いため商業的価値が高く、もしデータが大量にコピーされればSDBSと同等、あるいはそれ以上のデータベースを簡単に作られてしまう可能性があります。これはSDBSにとっては非常に脅威です。仮に著作権侵害が認められ裁判所に訴えることができて、そのためにかなりの労力を費やさなければならぬと考えます。ところで、現在公開しているアナログデータも大量にコピーされれば著作権侵害でありSDBSに脅威を与えるので、SDBS防御の立場からアクセス状況を絶えず監視しています。

一方、アナログデータであれデジタルデータであれ、第三者がデータを利用したい場合には産総研からの使用許可が必要であり、特に第三者がデータを販売したいときは著作権料を産総研に支払うことになります。これはウェブの公開における著作権の問題とは別の話になると考えます。保守義務の関係上会社名を挙げ

られませんが、産総研発足後、大量のデータをまとめて提供したことが数件あり、いずれも契約に基づいて著作権料の支払いを受けています。また、現在でも IR スペクトルについては新規公開するごとに提供し、著作権料の支払いを受けている案件があります。ちなみに、米国の某データベースにはアナログデータ (gif 画像データ) を提供した経験があります。

議論6 ほかのスペクトルデータベースとの比較

質問（小野 晃）

世界にはこのデータベースのほかにも公開されているスペクトルデータベースがあるのではないかと思います。特に有料でデジタルのスペクトルデータを企業等に頒布するサービスをしている企業はあるのではないのでしょうか。それらを紹介していただき、このデータベースとの役割や特徴の違いに関してご教示願います。

回答（齋藤 剛）

まず、ウェブ公開しているスペクトルデータベースはそれほど多くありません。このデータベースのように無料で多くのスペクトルデータを閲覧可能なものは限定されます。特にこれだけ¹H NMR のスペクトルパターンとその化合物への帰属情報を無料で閲覧することができるスペクトルデータベースは、このデータベース以外には著者が調べた範囲ではありません。

数少ないウェブ公開のデータベースの中でまず挙げられるのは、米国国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) が提供する NIST Chemistry WebBook (<http://webbook.nist.gov/>) です。物理化学情報やスペクトル情報等、さまざまな情報をウェブを通して無料で利用することができます。これは産総研の研究情報公開データベース (RIO-DB) と類似しており、NIST で得られた成果を中心にそのデータを公開しているもので、公開されているスペクトルは MS が 1.5 万件、IR が 1.6 万件のほか紫外可視吸収スペクトルやテラヘルツスペクトルがあります。ウェブを通じた利用は、NIST WebBook を閲覧するために特別なソフトウェアをインストールする必要はありません。化合物を検索した結果から、スペクトルやそのほかの情報を参照する形で構成されています。化合物リストを把握しておらず推測ですが、一般的な試薬は多く収録されており、本スペクトルデータベースと同様公的機関としての役割を担っていると考えます。この一方で、MS データは NIST で評価したスペクトルを中心に、米国国立衛生研究所 (NIH) と米国環境保護庁 (EPA) のデータを合わせて NIST 08 Mass Spectral Library (2008 年に発表されたもので、旧バージョンは 2005 年に発表された) としてパソコン単体で利用するよう販売されています。データはウェブで公開されているデータ数よりはるかに多く、約 19 万の化合物に対して 22 万件のスペクトルが収録されています。旧工業技術院の時代に共同研究を行った際に、このデータベースの MS データも数多く登録されており、このデータもこのライブラリのデータの一部になっていると思われます。このデータベースは有償で配布されており、多くの質量分析装置に搭載して、質量ピークのパターン検索に利用されています。

SpecInfo は¹H NMR が 9 万件以上、¹³C NMR が 30 万件以上、このほかの核種の NMR や IR や MS も収録されているスペクトルデータベースで、ウェブをとおして有料公開を行っています。NMR スペクトルが 2006 年に更新されたのを最後に、データの更新がされていないようです。

国内では、分散型データベースで基礎代謝、植物二次代謝標準物質の高精度精密質量スペクトルを対象として、ウェブでデータ公開を行っている MassBank (<http://www.massbank.jp/>) があります。2010 年 12 月 1 日の時点で、19 研究機関から約 3 万スペクトルがウェブで無料公開されています。登録されるデータが、このデータベース (SBDS) とは異なり植物二次代謝物質と専門性の高い領域をターゲットに高分解能 MS スペクトルを集積しており、検索等に利用するツールをクライアントパソコンにインストールする事で、データベースの検索や、スペクトルの拡大等を含めたデータ参照、そしてデータ登録を行うことができるようになっています。2006 年度から、(独) 科学技術振興機構バイオインフォマティクス推進事業の研究課題「メタボローム・マススペクトル統合データベースの構築」で構築を行っているもので、このデータベースも開発当初はこのようなプロジェクトで基礎を固めたことにかがみると、このプロジェクトが修了した後どの様な形に MassBank が発展して行くか期待しています。

ウェブ公開ではない形で提供しているものに Bio-Rad 社のスペクトルデータベースがあります。かつての Sadtler 社のデータを中心に、SpecInfo、NIST の MS やこのデータベースの NMR 等のデータを収録しており、検索したり物質の同定に活用したりする独自の検索ソフトウェアである「KnowItAll」と合わせてパソコン単体にデータをインストールして利用する形で販売されています。登録されているスペクトル概数は、¹H NMR が 5 万件、¹³C が 43 万件、MS が 19 万件、Raman が 7 千件、IR が 23 万件です。¹H と ¹³C NMR にはこのデータベースのスペクトルのデータがそれぞれ約 1.3 万件と 1.1 万件登録されています。それぞれのスペクトルのパターン検索を利用することが可能で混合物のスペクトルマッチング等、複雑な検索も行うことが可能なソフトウェアを搭載しています。

一方、試薬会社の Sigma-Aldrich 社が、「Aldrich スペクトルライブラリー」を販売しています。これには NMR、IR と Raman を合わせて延べ 5 万物質以上が登録されており、パソコン単体で利用する形態と、スペクトル集の書籍としての形態で販売されています。

ウェブ公開するデータベースとパソコン単体で駆動されるデータベースとを比較すると、それぞれ一長一短があります。例えば、ウェブで公開するデータベースの利点としては即時性が挙げられます。このデータベースはデータの追加、更新作業を比較的簡易に行うことが可能であり、年に 2 回のデータ更新を行っており、常に最新のデータをユーザーへ供給しています。ただ、上に示した多くのデータベースは、スペクトルの追加、更新作業をこのような頻度で行っていないようです。一方、パソコン上で単独に駆動されるデータベースは利便性に勝り、例えばスペクトルのパターン一致検索ができる等、ユーザーへの利便性が高いものとなっているようです。

マイクロ燃料電池製造技術開発への挑戦

— 革新的セラミックス集積化プロセスを活用するコンパクトSOFC —

藤代 芳伸*、鈴木 俊男、山口 十志明、濱本 孝一、淡野 正信

コンパクトで急速な起動と停止が可能な、高出力かつ高効率の発電モジュール製品の実現が望まれている。新規エネルギー製造産業市場での新たなアウトカム創出を目指して、セラミックス集積化製造技術のプラットフォームを活用し、独創的アイデアから試作および評価へ連続的に直結する開発を行なった。その結果、世界的にも新しいコンセプトに基づく独創的なコンパクトで高出力な低温作動型集積SOFCモジュールをセラミックスの機能から構造融合技術の高度化により実現しており、独創的な技術として関心を集めている。この論文では、下記の構成で、産業ニーズとその製品化に向けた課題を克服するための産学官連携研究でのアプローチや手法等を示す。

キーワード: セラミックス製造プロセス技術、セラミックス集積化技術、エネルギー変換、燃料電池、マイクロ SOFC、エネルギーモジュール

Challenge for the development of micro SOFC manufacturing technology

– Compact SOFC using innovative ceramics integration process –

Yoshinobu Fujishiro*, Toshio Suzuki, Toshiaki Yamaguchi, Kouichi Hamamoto and Masanobu Awano

Realization of highly efficient SOFC(solid oxide fuel cell) modules which are compact and capable of quick start-up and shut-down operation, is strongly expected because it would be useful to solve environmental problems. In order to yield new outcomes in new energy production industry market, we have carried out continuous R&D directly linked with the original idea, trial production, and evaluation by using the ceramics integration manufacturing platform. In consequence, original, compact and high-power SOFC modules operable at low temperature have been realized by upgrading of function-structure integration technology. These are drawing attention as products of ingenious technology. This paper presents, in addition to industrial needs, approaches and methods in industry-academia-government collaborative research to overcome tasks toward productization.

Keywords: Ceramics processing, ceramic integration technology, energy conversion, fuel cell, micro SOFC, energy module

1 はじめに

化石燃料からクリーンなエネルギー利用へのシフト等により、低炭素社会に向けた技術発展を進めることは、グローバルな人類の課題である。我が国のエネルギー統計にも示されるように、生活基盤を支えるエネルギーの需要(使用量)は年々増加し、化石燃料等を使用しない太陽電池等の再生可能エネルギーや廃熱等の未利用エネルギーを利用する技術の重要性が高まりつつある^[1]。特に、使用時にCO₂を排出しない電気化学エネルギー変換によるエネルギーマネジメント技術として、水素エネルギーを活用できる燃料電池技術が注目されている。燃料電池技術の原理は1839年英国のGrove卿により提唱され、電気化学反応を進める電極やイオン伝導性電解質材料技術の進歩と共に、

20世紀の初頭には、プラントを初めとする発電技術として燃料電池技術の具体化が行われてきた。さらに、家庭用コジェネレーションや自動車等の発電機等への活用も商業的に検討が始まっている。燃料電池設備の普及と導入により、2030年には、500万KWレベルのコジェネレーション活用での大幅なCO₂排出低減が期待されている^[1]。

燃料電池技術の開発では、表1に示すような電解質材料をコア技術とした種々の研究開発が進んでおり、現在はより使い易い高分子形燃料電池(PEFC)と発電効率の高い固体酸化物形燃料電池(SOFC)の開発が主に行われている^[2]。

セラミックス材料を利用するSOFCの材料開発における歴史では、高温域での酸化物イオン伝導機能を活用し、

産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST 2266-98 Anagahora, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan
* E-mail: y-fujishiro@aist.go.jp

Original manuscript received October 29, 2010, Revisions received December 14, 2010, Accepted December 14, 2010

表1 燃料電池の種類と特徴

	電解質材料	作動温度	特徴	発電効率
固体電解質形 (SOFC)	酸化物イオン伝導性セラミックス	500-1000 °C (低温域での高性能化が課題)	高温で作動するため、電極抵抗が低く、高いセル性能を有する。また、排熱を利用した燃料改質によって大幅な効率向上が可能。将来の分散電源として期待されている。	40-70 %
固体高分子形 (PEFC)	プロトン伝導性高分子膜	常温-約90 °C	作動温度が低く、取扱が容易。家庭用、自動車、携帯用等に向けて研究が進み、一部商用化も進む。	~38 %
熔融炭酸塩形 (MCFC)	熔融炭酸塩	600-700 °C	大型化が容易。燃料にこみや木材を利用し生成するバイオガスが利用可能。二酸化炭素の分離も可能。	45-60 %
リン酸形 (PAFC)	リン酸	160-220 °C	市販されている燃料電池の中で業務用として開発。工場での分散電源等へも利用実績がある。	35-42 %

参考) 解説 燃料電池システム、J. Larminie, A. Dicks (穂屋治紀 訳)、オーム社 (2004年) 等

ジルコニア (酸化ジルコニウム) 等の電解質材料開発、および種々の混合導電性のセラミックス電極や触媒材料と組み合わせ合わせたサーメット電極材料の開発が進められてきた。一方では、平板型や円筒型等のセラミックスセル製造やスタックとしてのモジュール製造技術の開発が日本を初めとして進められてきており^{[3]-[5]}、材料開発と両軸を成している。これまでは、高温域での炭化水素等の直接改質反応を利用でき、水素以外の燃料で高いエネルギー変換が達成可能であるという SOFC の特徴があることから、ニッケル系電極では 700 °C 以上の温度領域で開発が行われてきた。そのため、低温型の PEFC と比較して、これまでの各種 SOFC モジュールでは、高い出力性能を得るために運転温度を高くし、セル抵抗を下げた発電面積を増やす必要がある。それにより、発電面積の増加と共にモジュールが大きくなり、熱機械的ストレスを避けるために急速な起動や停止を繰り返す運転を行えない等の技術課題があった。一方、電力負荷に合わせて起動停止をすることにより無駄な発電が抑えられるため、低温作動化や急速な起動および停止が可能な SOFC モジュールの実現が強く求められていた^[2]。モジュールの小型高出力化や発電温度の低温化の

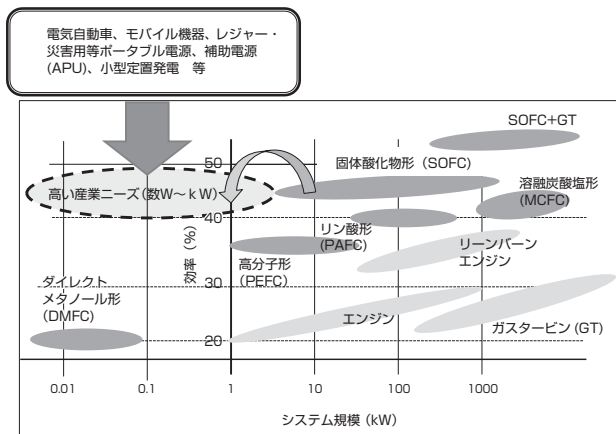


図1 マイクロ SOFC の産業展開

技術課題を乗り越え、このフレキシブルな運転が可能となれば CO₂ 排出のさらなる削減に繋がり、また、モジュール作動温度の低温化が進めば低コストの金属材料が利用できるメリットもある。

この論文では、セラミックス集積化プロセス技術を活用する革新的マイクロ SOFC 製造技術への挑戦として、種々の研究開発における課題解決の取組みを示す。

2 エネルギーモジュール技術の開発状況～低温作動が可能な高出力密度のコンパクト燃料電池への産業界の期待

図1に示すように、SOFC の各種産業での利用用途の多様化で、数 W ～数 kW 級の高効率エネルギー変換を必要とする産業ニーズも増え、省スペースで使い易いコンパクトサイズの SOFC 技術の利用が強く期待されている。

セラミックス材料からなる電気化学モジュールとしての SOFC 作動条件の幅を広げて利用用途を拡大していくためには、より低温域の 650 °C 以下でもこれまでの運転温度 (700 °C ～ 1000 °C) と同等の性能を有し、急速起動および停止が可能なマイクロ SOFC 技術が不可欠となる。マイクロ SOFC とは、手のひらサイズのように、これまでに比べてサイズが小さいセルでの発電技術であり、それにより省スペース化に対応するコンパクトなモジュール設計が可能となる。そこで、種々の SOFC での技術課題を解決すべく、マイクロ SOFC 技術開発への取り組みが始められた。図2にマイクロ SOFC の利点を示す。一般的に、酸化物セラミックス材料は金属に比べて熱伝導性が小さいため、セラミックス電気化学セルおよび集積モジュールの容積が大きくなると昇温時 (特に急速昇温時) にセル全体に急峻な温度勾配が発生し、セルやモジュール部材の破壊に至ってしまうことが問題となっていた。その解決技術の一つは、図2に示

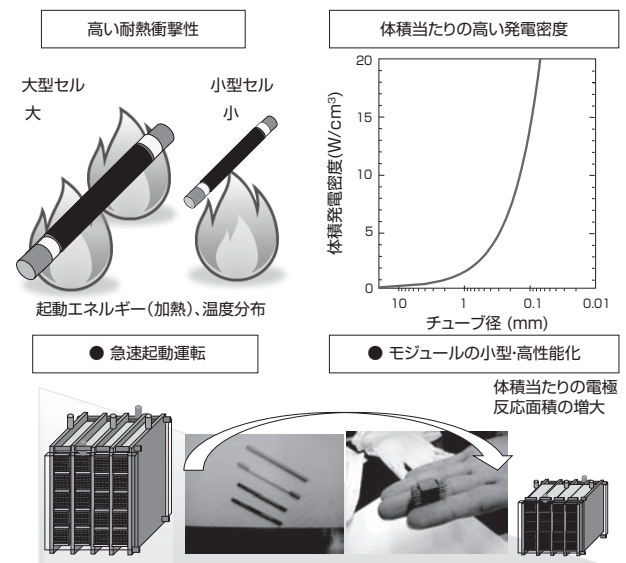


図2 マイクロ SOFC モジュールの利点と集積化技術

すようにセルやモジュール部材の体積を小さくし、相対的な温度勾配を小さくする設計を採用することである。これにより、起動エネルギーを減少させると同時に SOFC の温度分布を制御し易くなる。その結果、セルおよびモジュールの高い耐熱衝撃性が得られる。また、平板セルのモジュールではセル容積の減少によりユニットの体積当たりの発電密度も減少するので、発電効率や電力密度等の性能を向上させる必要がある。その対策として、図 2 に示すような小型の管状セルにて直径等の単位構造の制御で電極面積を増やし、体積当たりの発電性能を向上させる量産可能な新たな高集積化製造技術が不可欠になる。また、要求される出力容量として数 W ～数 kW 級のモジュールでの大きさをターゲットとして、高分子型燃料電池の性能を越える 2 kW 級でも 1 L 以内の大きさに収まるモジュールの構築技術が重要となる。出力容量が大きくなると共にモジュール温度制御が困難となるので、この開発では集積化技術での低温作動化や起動停止の制御が容易なセル集積モジュール化技術が求められる。

SOFC モジュールは、緻密な酸化物イオン伝導性セラミックス電解質と電気化学反応を進める電極（燃料極、空気極）、および燃料や酸素（空気）で構成されている。通常の SOFC はセラミックス部材としてそれぞれの機能を発現するセラミックス粉末を用いて目的形状に成型、塗布積層し、焼成過程により単位構造を作製する。そのためセルや集積モジュールの形状や大きさにより、さまざまなセラミックス製造プロセス技術を活用する分野である。さらに、熱膨張特性、電気的特性ならびに強度の異なる種々の機能性材料を多層積層してセルや集積モジュールを作製するために、ナノ～マイクロ～マクロサイズレベルの各材料の設計や作製過程での構造制御が最終的な発電性能に強く関わる。

今回の新しいマイクロ SOFC からなる集積モジュール実現への挑戦は、すなわち、セラミックス製造プロセス技術への挑戦であり、セラミックス部材としてセルおよび集積モジュール製造技術に立ち返った技術開発が不可欠となる。しかし、個別の要素技術の構築を待っているのは開発期間が長期となる。セラミックス部材として、サーマルマネジメント特性や低温での発電性能を向上させる電気化学的構造をもつセラミックス材料や、部材の革新的なものづくり技術開発が求められる。

このような背景の中、高集積マイクロ SOFC 製造技術の課題解決と新たな製品化技術の実現のため、“機能性セラミックス製造技術の開発拠点”を活用し、「セラミックリアクター開発 (NEDO 委託 2005-2010 年)」の中で“セラミック集積化製造プロセス技術”を柱に研究開発を行った^{[6][7]}。

図 3 に示すように、機能性セラミックス製造技術の開発

拠点で設計～製造～解析の PDCA 機能を実行させ、製造基盤技術と製品化技術を同時に開発した。その結果、セラミックス製造企業やユーザー企業の技術者と研究者が連携するオープンイノベーション体制が実現し、プロトタイプモジュール製造での技術開発の拠点として研究を推進することができた。このアウトプットとしては、研究成果のみならず、学術的な体系化による学位取得といった産業人材育成の機能も果たした。具体的には、低温化、集積化、高性能化、量産性等の高機能 SOFC の実現といった新概念に基づく高集積型セラミックス電気化学モジュールの開発に向け、機能性セラミック製造技術開発拠点において、材料選択セルデザイン（構造・寸法等の製造設計）からセルやモジュール試作技術（杯土設計、塗布、焼成条件等での機能制御プロセス）への展開、新構造セルやモジュールの独自の評価と解析技術（熱挙動、電気化学特性、発電特性）の確立、および、セルとモジュールの総合評価（構造改善 / 製造プロセス改善）を製造メーカーやユーザーメーカーの技術者と研究者が直接議論し、新たな独創的プロセス技術の提案や新現象の発見での構造制御技術の提案と、産業界へ新規技術活用の提案を進めてきた。このような研究者と企業技術者との連携の中から、新たな集積化モジュール試作課題の解決と材料およびプロセス要素技術の開発での一連の流れが構築できている。

私達が進めてきた拠点での研究開発では、歴史的に中部地域のセラミックス産業等と連携して行われたファインセラミックス製造プロセス開発体制が、ものづくり技術としての構築と蓄積がなされ、これまで成形技術に適さない高性能燃料電池材料等においても量産可能な手法で試作と評価と解析の最適なサイクルが機能した。さらには、最適条件を決める構造制御等の検討が試作評価と並行して確実に具体化できたため、これまでにない新規高性能マイクロ SOFC と高集積コンパクトモジュール製造技術の開発を短期間に達成できた。

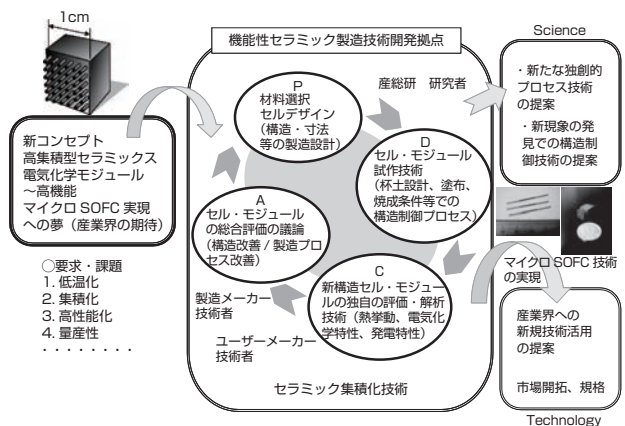


図 3 新規マイクロ SOFC モジュール製造技術の研究開発モデル

3 高効率コンパクトエネルギーモジュールとしてのマイクロSOFC製造での課題～製品化への死の谷とその解決法

これまでになかったマイクロ SOFC の集積モジュール製造技術として、工業的に量産可能なセラミックス製造プロセスと、マイクロ SOFC の高集積化におけるモジュールの電気化学的設計や性能向上技術の実現が必要となる。新たな製造プロセス技術として機能と構造融合をコンセプトに、図3の研究開発モデルの中での製造設計と新規構造制御プロセス技術開発の検証事例を説明する。

i) 高集積マイクロSOFC製造設計技術

SOFC モジュールの高性能化のためには、単位モジュール体積当たりの電極面積を向上させ、セルの集積度を上げ、さらに、機械的強度を向上させる必要がある。このような要求を満たす構造として、単位セル部材を組み合わせて高集積したボトムアップ的製造、あるいは規則配列するマイクロチャンネルを活用し、後から内部へセル構造を構築するトップダウン的製造での両者の高集積化が有利となる。これまでのチューブ型 SOFC の製造技術を活かしたマイクロ SOFC の高性能化では、チューブ型 SOFC の高集積化でのボトムアップ的構造での開発が有効である。一方、モジュール製造での低コスト化やより高度なセル集積構造を達成するためには、ボトムアップ的製造で得られた性能に匹敵するモジュールをトップダウン的製造で作製する新たな技術も求められる。この研究開発では、高性能化と低コスト化への展開を意識し、チューブ集積型モジュールとハニカム型マイクロ SOFC といった2種類のモジュール製造技術の研究開発を行った。

SOFC 発電がもつ高効率および高出力密度化のメリットを引き出すためには、供給される燃料の電気化学反応が有効に進むような電極反応面積の向上技術、およびガスの流れや電流の集積が行えるモジュール構造を考慮しなければならない。最終的には、高集積化でのセル数を想定して、量産可能な形状での製造プロセス技術の選択が必須となる。低温域での高性能化に繋がるセルの低抵抗化においては、図4に示す燃料極支持型、空気極支持型および電解質支持型構造の内、燃料極支持型構造が重要となる。これは、還元により部分的に金属化したサーメット燃料極での抵抗設計が最も小さくなるためである。また、集積度を上げて多

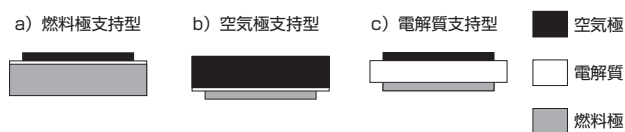


図4 各種燃料電池構造

孔質電極の比表面積を向上させ、かつ機械的強度も満たす単位構造としては、平板構造での積層に比べて、応力分布等の対称性が高い管状構造の集積体が優れている。

これまで、同様なマイクロチューブ型 SOFC 研究として、主に熱機械的強度が高い2～5 mm φ径レベルのYSZ系電解質支持型 SOFC を用いた急速起動への検証事例がある^{[8][9]}。しかし、650℃以下の低温域での高性能化や、小型集積モジュール等への展開等、高性能化を目指した製造技術の開発は進んでいない。私達の挑戦として、これまでにない高性能 SOFC や集積モジュールの製造を目指して、燃料極支持型のマイクロ SOFC からなる集積モジュールの製造技術を検討した。さらに、材料としての機械的強度が小さくて成型が困難であるため検討実績は少ないが、低温での高い酸化イオン伝導性を有するセリア系電解質を利用した製造プロセスを開発した。

2 mm φ以下の燃料ガス流通孔を有するマイクロチューブ型 SOFC や集積モジュールの製造と設計技術として、最終的なモジュール発電能力に影響するセル形状（電解質、電極の厚さや、最適なセル長さ等）の最適化が重要となる。燃料極支持型セルでは、電極が電気化学反応における三相界面としての反応場と、発電により生じた電流を取り出す集電の役割をもつため、その形状設計はセルと集積モジュールの発電性能に大きな影響をもたらす。図5には、燃料極支持型でのマイクロチューブ型の SOFC と、その集積モジュールの高性能化に向け、セル形状および異なる集電方法による検討結果を示す。これによりセル集電長さ等を設計した。単セル構造の電極面積を長くするためにセルを長く設計すると集電抵抗が増加し、発電出力の低下（集電ロス）へ繋がる。

外径2 mm φ（内径1.6 mm φ、電極膜厚0.2 mm）のマイクロチューブ型 SOFC 製造に必要な寸法の設計技術を説明する。発電性能を0.5 W/cm² @ 550℃と想定し、図5の片端集電および両端集電モデルにて等価回路での

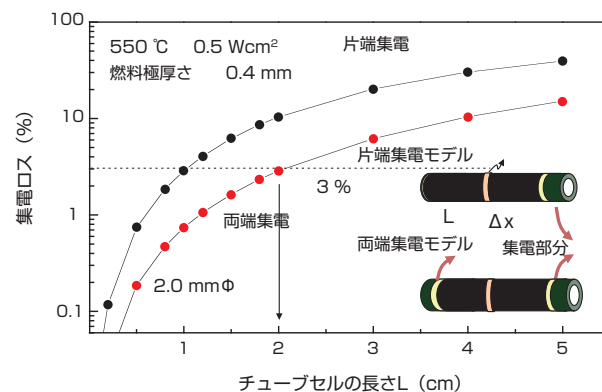


図5 集積化に向けたマイクロチューブ型 SOFC の設計技術での設計モデルと集電ロスの計算結果

集電ロスの計算を行った。集電抵抗成分に起因する集電ロスとセル長さの関係を図5に示す。このとき発電での集電ロスが3%以下になる長さを試算すると、両端集電では長さ2.0 cm、片端集電では1.0 cmのセル長さでの集積モジュール設計が必要であることが分かる。これは、セルを長くすることで発電電極面積を増加させるためには、両端集電と燃料極の厚さを厚くする必要があることを示している^[10]。逆に、セル性能の向上においては、電極厚さを薄くすることが必要であることから、セル長の最適化が低温運転条件での集積モジュール発電性能の向上技術として重要となる。このような設計指針をもとに、ボトムアップ的設計での集積モジュール製造技術を発展させ、押出成型技術の成型精度向上と薄膜塗布技術により、量産可能なセル製造技術を開発した^[11]。その結果、2.0 mm φのセラ系電解質を用いた燃料極支持型マイクロ SOFC として、570 °Cで1.0 W/cm²の高い出力密度を達成している^[11]。さらに、この高性能セル（マイクロチューブセル）を組合せ、多孔質セラミックス内に集積したモジュール構造の作製においても、同様な等価回路シミュレーション設計によってモジュール内の最適なセル配置を検討した。図6に示すような集積モジュールモデルでの集電ロスの計算により、構成する集電部材（セル間）としてセル間隔1.0 mmでは100 S/cmを越える導電性が必要なものを見出した。これにより、角砂糖サイズの大きさのスペースで2.0 mm φ外径以下のマイクロチューブ型 SOFC を数個集積した2W級の発電ユニットを実現した。この検討によって、550 °Cで2 W/cm³を越える発電性能を有する集積モジュール（キューブモジュール）の設計および製造技術を開発し、直列接続等さまざまな集積モジュール構造の作製が可能となった^[12]。

ii) 高度塗布プロセスでのセル構造制御技術

SOFC とその集積モジュールの高性能化において、電気

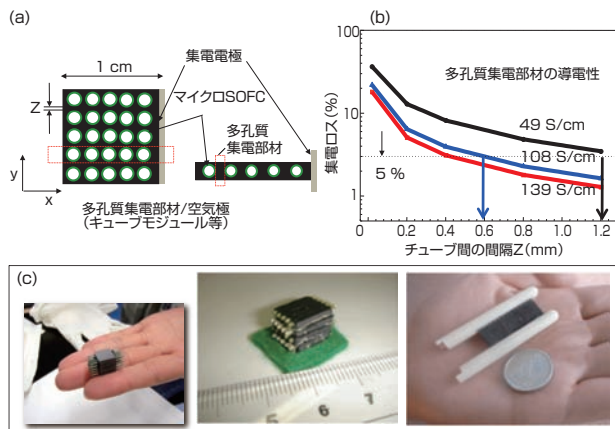


図6 キューブモジュール設計と開発集積モジュール
a: 集積モジュール設計モデル、b: 集電ロスの計算結果 @650 °C、
c: 開発モジュール例

化学的な構造設計に基づくセラミックス電極や電解質等の異種材料の多層構造をナノ～マイクロサイズでの構造制御で作り込み、マクロな接続等に展開できる製造プロセス技術を開発しなければならない。さらには、セル等を配置する基材の組織に影響されずそのセル集積度を効果的に制御可能な簡単、かつ量産性に優れた湿式コーティング等の製造技術が求められる。SOFC等セラミックス電気化学デバイスでの電極作製においては、多様なセル形状、組成制御および積層構造の新規開発が必要であり、機能性セラミックスでの形状自由度の高いコーティング技術と3次元空間への高度塗布技術の両立が求められる。このとき、構築する電解質膜の緻密化および薄膜化や、セル構造形成での構造制御性を高めなくてはならない。私達は、性能向上に必要な膜構造を形成する目的で、新たな湿式塗布製造プロセス技術を高度化し、スラリー塗布をサブミリ径の3次元空間へ均質に行う製造プロセス技術の開発を進めた。

図7に、種々の湿式セラミックス塗布プロセスの特徴を示す。セラミックス基材への湿式ペースト塗布プロセスとして、主にチューブ形状のセルではディップコート法でシングルμm厚レベルの緻密な電解質を形成する制御技術を実現している^[11]。一般的なディップコート法は、チューブ部材等の基材外周への薄膜形成では有効であるが、微細空間の内壁に電気化学的な機能層の形成が必要となる場合、粘性抵抗と毛細管力とのバランスによりスラリーが奥まで染み込まず全面への均一な塗布が容易ではない。また、スラリーアスピレーション法等で内壁を浸すようにスラリーを充填して吐き出す手法もあるが、内壁への塗布膜が厚く不均質になり、配列孔数が増加すると塗布量が制御できない問題がある。これらの塗布プロセス法の問題を解決するために、新たにスラリーインジェクション法という、塗布ペースト材料へ毛細管力を打ち消す外力を付加し、塗布するペースト材料を流動させ塗布量を制御するユニークな塗布プロセスを開発した^[13]。この技術により、新たに、トップダウン的製造としてのサブミリ径の3次元規則配列孔を有するハニカム構造体等への微細空間を利用し、膜厚制御

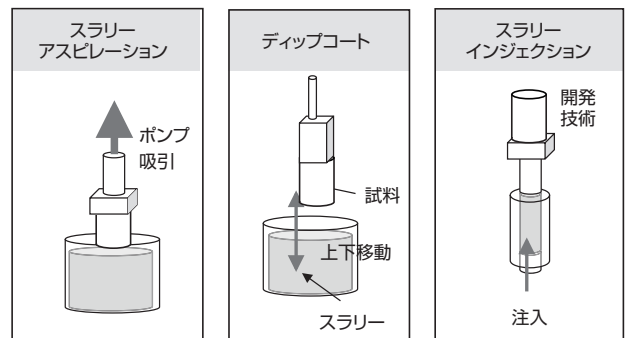


図7 湿式セラミックス塗布技術

された均質な多層薄膜を形成することが可能となる。この手法は、集積モジュール構造の作製での高集積化や、部品点数の低下での低コスト化のために重要となる。開発したプロセスでは、塗布過程でコーナー等の液剤が溜まり易い部分でも、制御条件により均質な塗布膜が基材に形成できるため、簡単な塗布製膜でセラミックス基材中のサブミリ径の微細孔へ孔の形状に関わらず制御された機能性層を形成できるようになった。この開発プロセス技術を電解質層や電極層のセラミックス電気化学構造の多層塗布へ適応し、サブミリ径の規則配列構造体へのセル形成に利用することで、ハニカム押出技術でサブミリ空間の孔が規則配列した電極ユニットを作製し、後から緻密な電解質薄膜や多孔質電極等の多層セル構造を塗布技術の組合せで形成できるトップダウン的製造法を実現した。この技術では、0.5 - 1.0 mm φ径の空間が数百個配列したバルク体（これまでの平板型 SOFC の約 20 倍の体積当たりの比表面積である 40 cm²/cm³）に 10 μm の厚みの緻密電解質と数十 μm 厚の電極を形成することに成功し、新コンセプトのハニカム型マイクロ SOFC を開発している^[13]。

以上のように、トップダウン的およびボトムアップ的製造技術でのマイクロ SOFC モジュールの集積化に重要な設計～製造プロセス技術を構築し、セラミックス電気化学デバイス製造における 3 次元での集積構造の新たな製造技術を提案している。

4 革新的なセラミックス製造技術による新規コンセプトの低温作動型マイクロSOFC製造技術の実現～本格的集積モジュールへの転換

以上、紹介した開発技術により新たな高性能マイクロ SOFC 設計と製造技術をベースとして、これまで事例のな

表 2 開発マイクロ SOFC 技術の技術指標

	セル直径 (mmφ)	電解質材料	起動温度 (°C)	出力密度 (W/cm ²) @0.7 V	起動速度 (°C/min)
開発マイクロ SOFC 技術	外径:0.8-2.0 (内径:0.4-1.6)	ScSZ, GDC	550 - 650	0.5 - 0.8* @ 650 °C	65 - 217**
Korea Institute of Energy Research (韓国)	外径:10.0	YSZ	750	0.45	20
Adelan Ltd. (英国)	外径:2.0	YSZ	850	0.3	200

ScSZ: 10 mol%スカンジウム固溶ジルコニア, YSZ: 8 mol%イットリウム固溶ジルコニア, GDC: 10 mol%ガドリニウム固溶セリア
 参考) V. Lawlor, S. Griesser, G. Buchinger, A.G. Olabi, S. Cordiner, D. Meissner "Review of the micro-tubular solid oxide fuel cell Part I. Stack design issues and research activities", Journal of Power Sources 193 (2009) 387-399. を元にデータをアップデート。
 * 2.0 mmφScSZ系電解質マイクロチューブ型SOFCでのデータ。
 ** ハニカム型SOFCでの実証データ。

い独自のマイクロ SOFC が作製できるようになった。その結果、表 2 に示すようにサイズ、出力、低温化技術、起動時間の短さ等の技術指標にて、マイクロ SOFC 技術として高性能化を実現した^[14]。

マイクロ SOFC の低温での発電性能の向上では、セルと集積モジュールのオーミック抵抗成分および反応拡散の抵抗成分等の構造的な抵抗因子の削減が不可欠となる。特に、抵抗因子の削減に関わる電解質層の薄膜化技術に取り組み、前述したスラリーディップコート工程と積層材の共焼成過程での材料収縮挙動等を解析し、図 3 に示した研究開発モデルのサイクルの中でシングル μm 級の厚さで、欠陥のない固体電解質膜の形成に成功した。また、前例の少ない 650 °C 以下でのジルコニア系電解質 (ScSZ: スカンジウム固溶ジルコニア) を用いたマイクロ SOFC 試作と独自の評価および解析検討により、電気化学反応抵抗成分および反応拡散の抵抗成分を詳細に確認した。低温域では、燃

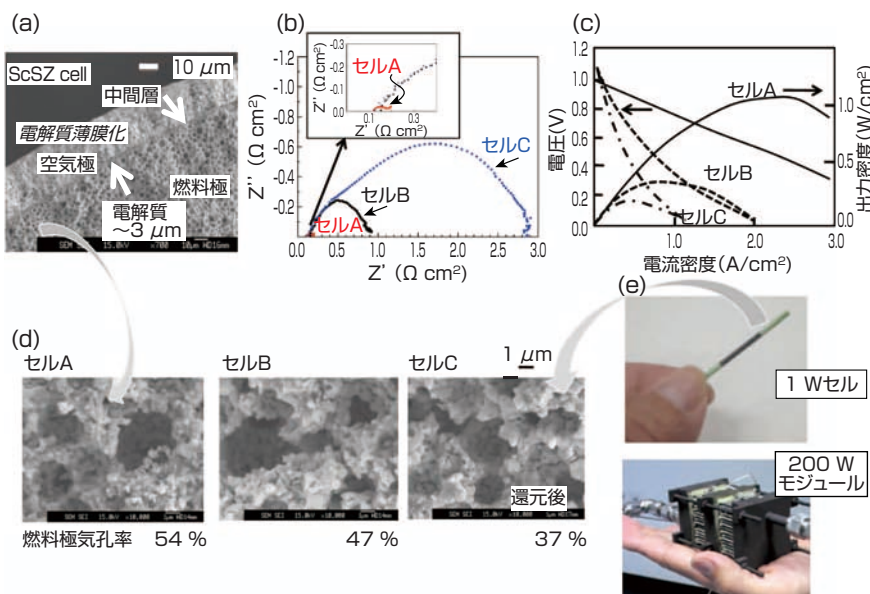


図 8 ジルコニア系低温型マイクロ SOFC モジュールの実現

a: セル断面写真、
 b: 電極空隙率と電極抵抗の関係 (600 °C)、
 c: 発電性能 (600 °C、加湿水素)、
 d: 開発多孔質燃料極構造、
 e: 開発セルと集積モジュール例

料極のこれら抵抗成分が運転条件によって変化し、発電性能向上に大きく寄与することが新たに分かった。図8に示すように一連のセラミックス製造プロセスの最適化により、燃料極の50%を越える高气孔化を実現し、低温域での発電の反応抵抗成分が大きく低下することを発見した。図8bに燃料極の気孔率と600℃でのセルインピーダンス抵抗値の関係を示す。図8bのように燃料極の気孔率の増加に関して、抵抗値を示す円弧が小さくなり抵抗値の減少が確認できた。その結果、600℃という低温域においても図8cに示すように、 1 W/cm^2 を超える出力性能を実現している。これは、高气孔率を有する電極構造内において還元したニッケルがナノ粒子化し、その高分散構造が形成され、活性サイトとなる三相界面数の増加に繋がったことが反応後の電極構造の観察から考えられる^[15]。この技術の実現には、セラミックス製造企業等が量産・低コスト化の可能な押出製法や湿式塗布プロセスによりセル製造レベルで高い特性を実現できたことも重要な因子である。すなわち、図3のような研究開発モデルでのPDCAサイクルを考慮した製造プロセス技術の検討により、これまで700-800℃レベルで 1 W/cm^2 の出力密度を示すジルコニア系電解質のSOFCで、600℃といった低い温度域でその性能を達成するマイクロSOFC製造技術を確認した^[16]。

マイクロSOFC製造技術として、発電部材としての集積モジュール製造技術への展開が必要であるが、これまでのエネルギーモジュールのイメージを越えた指先サイズや手のひらサイズのインパクトの高い高集積モジュールも開発し、国内外より大きな注目を得ている。これらのセルは数百W級の集積モジュール製造が可能なおよび、燃料電池として40%を越える効率も実現できることも、一連の製造～評価でのユーザー企業等との連携の中で検証できてい

る^[17]。開発したマイクロチューブ型SOFCからなる集積モジュールを用いたkW級モジュールへの展開と、その低コスト製造技術が今後の課題となる。

さらに、前述した図9aのような新コンセプトのハニカム型マイクロSOFC開発でも、ハニカムSOFC間のガスシール性と集積セルの電気化学的モジュール化が必要となる。図9bに示すようにインターコネクトとして銀-シリカ系ペースト等を用い、金属とペーストで容易に接合構造を形成し、ハニカム構造の得意とする熱機械的特性を生かした急速な熱履歴に対応する新たな集積モジュール化技術も開発した。本SOFCモジュール技術を用い数百セル/cm³の高集積構造を組み合わせて、任意の直列構造ユニットを製造することが可能となった。また、高比表面積、かつ低い比熱容量のマイクロSOFC構造の温まり易さを活用し、図9c、dに示すように起電力や電流値を確認することにより、要求される技術課題の一つである3-5分といった数分レベルの急速起動に耐える使い易いマイクロSOFCモジュール製造技術を提案した^[18]。また、650℃ではその単位体積当たりの出力性能も 2.8 W/cm^3 とチューブ集積型モジュールと同等であり、SOFCとしての高い変換効率が期待できる。ハニカム型マイクロSOFCの高いセル集積性や急速起動性のメリットを活かし、より使い易く安価なSOFCモジュールとして開発を進めると共に、さらなる低温化を含めた課題解決でのモジュール発電性能向上を目指す。

以上の開発セルおよび集積モジュール技術は、これまで例のない小さな押出部材からなる新コンセプトのセラミックス集積構造であったため、開発当初より既存技術との比較の中、さまざまな反響があった。特に、発電密度や発電モジュール構造が既存のセルや集積モジュールと同等の性能では、発電モジュールとしての実用化に疑問の声もあった。そ

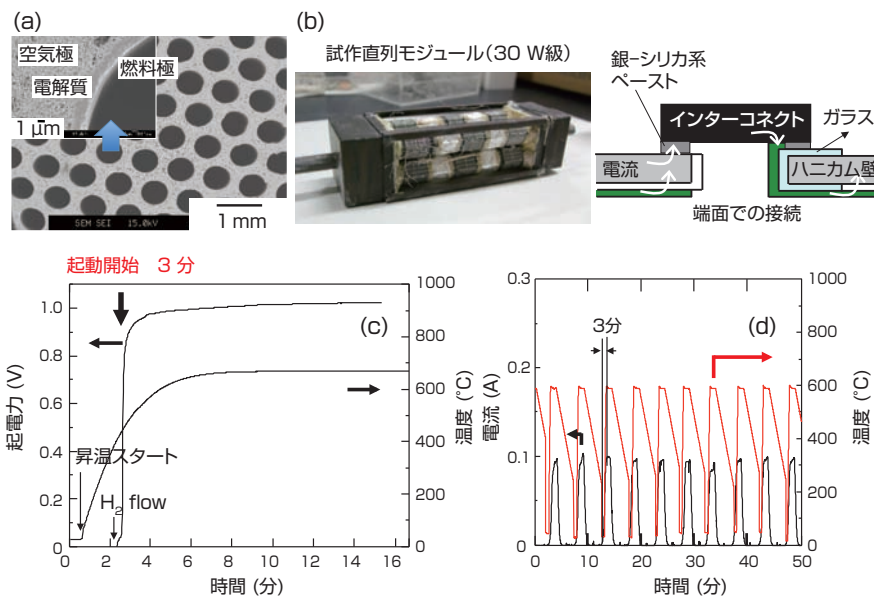


図9 急速起動が可能なハニカム型マイクロSOFCモジュール
 a: ハニカム構造を利用した集積セル、
 b: 試作モジュールと接続構造例、
 c、d: 急速起動および熱履歴での発電特性

の一方、マイクロ SOFC により 500-650 °C の低い温度域で、800 °C レベルの高い出力密度等を実現し、学術的にもセル設計とそれを実現する戦略的な設計～材料・製造プロセス技術～評価技術を再構築したため、インパクトの高い実験成果が積み上がった。この技術では、電気的な直列構造や角砂糖サイズの 2 W/cm³ モジュールといった低温域の発電でのモジュール構造が実現されると共に、使い易い新たなコンパクト SOFC モジュールの実現への期待も大きい。

5 まとめ～新市場創出に向けた製品化展開

マイクロ SOFC とその集積モジュール技術は、これからのエネルギー産業分野では、日本の強みとするナノ～マイクロ～マクロサイズレベルでの高度なセラミックス材料および製造技術を活用する重要な技術である。その一方で SOFC 技術は、定置型発電設備としての展開が大きな流れとなっている。私達のマイクロ SOFC 製造開発は、発電設備から次世代自動車や可搬型のポータブル発電技術等での発電モジュールとして、新たな製品展開のイノベーションに必要な低温化や急速起動性、ならびに出力とコンパクト性を具体化している。現時点で、モジュール構築が可能な数十 W 級～数百 W 級の発電モジュール作製の実証はできているが、現在、幅広い適用へ展開するために用途に応じた技術課題を整理すると共に、多燃料での高性能化や kW 級のモジュール製造実証を目指した開発を進めている。製品用途に合わせて、これらマイクロ SOFC の特徴を活かした用途等を産業界へ提案することも可能である。その一つとして、現在、開発が進む電気自動車の航続距離を伸ばす技術として内燃機関を利用するハイブリッド技術や車搭載発電機を利用したレンジエクステンダ技術等が検討されている^[19]。私達の開発するコンパクト発電モジュールは、内燃機関での限界を超えるエネルギー変換効率 50 % (Well-to-Wheel) 以上を達成できる高効率発電モジュール技術として、これら電源技術への活用が期待できる^[19]。SOFC の多燃料利用の利点を活かして、水素インフラ整備に頼らない燃料電池利用の展開も注目される。今後、コンパクト SOFC 発電技術において急速起動停止特性のさらなる向上や、多燃料利用での性能信頼性、並びに移動体発電モジュールでの必要仕様の技術課題を抽出し、その課題を解決していく。このような安全かつ安心な低コストモジュールへ開発展開することが、今後のナノテクノロジー～材料・製造技術開発として取組むべき重要な対象であろう。また、資源やエネルギーの有効利用および低炭素社会の実現に向け、より多くの産業分野で使い易い低コストの燃料電池技術を世の中に届けることが優先課題と考える。そのためには、機能性セラミックス製造技術拠点での課題解決での挑

戦により蓄積してきた新たなマイクロ SOFC とその集積モジュール技術を、多くの産業分野での適応性技術開発を継続して進めることが必要である。そして、マイクロ SOFC 製造技術での標準化技術を含め、セラミックス製造技術を軸として世界をリードする独創的技術の展開を目指す。

謝辞

マイクロ SOFC 製造技術開発では「セラミックリアクター開発」において、NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の多大なるご支援へ感謝致しますと共に、連携企業の皆様、特に集中拠点で連携させて頂きましたファインセラミックス技術研究組合、(株)日本特殊陶業、(株)日本ガイシ、(株)東邦ガスの皆様へ深く感謝致します。

参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会: 長期エネルギー需要見通し, 資源エネルギー庁 (2010).
- [2] J. Larmine and A. Dicks (槌屋治紀訳): 解説 燃料電池システム, オーム社 (2004).
- [3] J.Weissbart and R.Ruka: A solid electrolyte fuel cell, *J. Electrochem. Soc.*, 109, 723-726 (1962).
- [4] C.S.Tedmon, Jr., H.S.Spacil and S.P.Mitoff: Cathode materials and performance in high-temperature zirconia electrolyte fuel cells, *J. Electrochem. Soc.*, 116, 1170-1175 (1969).
- [5] O.Yamamoto, Y.Takeda, R.Kanno and M.Noda: Perovskite-type oxides as oxygen electrodes for high temperature oxide fuel cells, *Solid State Ionics*, 22, 241-246 (1987).
- [6] 藤代芳伸, 鈴木俊男, 山口十志明, 濱本孝一, 舟橋佳宏, 清水壮太, 淡野正信: マイクロ固体酸化燃料電池の研究開発, *セラミックス誌*, 44 (4), 308-312 (2009).
- [7] 藤代芳伸, 鈴木俊男, 山口十志明, 舟橋佳宏, 清水壮太, 淡野正信: 低温作動を目指したSOFCの開発, *燃料電池*, 9 (3), 83-87 (2009).
- [8] K.Kendall and M.Palin: A small solid oxide fuel cell demonstrator for microelectronic applications, *J. Power Sources*, 71, 268-270 (1998).
- [9] K.Yashiro, N.Yamada, T.Kawada, J.Hong, A.Kaimai, Y.Nigara and J.Mizusaki: Demonstration and stack concept of quick startup / shutdown SOFC (qSOFC), *Electrochemistry*, 70, 958-960 (2002).
- [10] T. Suzuki, T. Yamaguchi, Y. Fujishiro and M. Awano: Current collecting efficiency of micro tubular SOFCs, *J. Power Sources* 163, 737-742 (2007).
- [11] T. Suzuki, T. Yamaguchi, Y. Fujishiro and M. Awano: Fabrication and characterization of micro tubular SOFCs for operation in the intermediate temperature, *J. Power Sources* 160, 73-77 (2006).
- [12] T. Suzuki, Y. Funahashi, T. Yamaguchi, Y. Fujishiro and M. Awano: Development of cube-type SOFC stacks using anode-supported tubular cells, *J. Power Sources* 175, 68-74 (2008).
- [13] T. Yamaguchi, T. Suzuki, S. Shimizu, Y. Fujishiro and M. Awano: Examination of wet coating and co-sintering technologies for micro SOFCs fabrication, *J. Membr. Sci.*, 300, 45-50 (2007).

- [14] V. Lawlor, S. Griessera, G. Buchingerd, A.G. Olabib, S. Cordinere and D. Meissnera: Review of the micro-tubular solid oxide fuel cell Part I. Stack design issues and research activities, *J. Power Sources* 193, 387-399 (2009).
- [15] H. Iwai, N. Shikazono, T. Matsui, H. Teshima, M. Kishimoto, R. Kishida, D. Hayashi, K. Matsuzaki, D. Kanno, M. Saito, H. Muroyama, K. Eguchi, N. Kasagi and H. Yoshida: Quantification of SOFC anode microstructure based on dual beam FIB-SEM technique, *J. Power Sources*, 195 (4), 955-961 (2010).
- [16] T. Suzuki, Z. Hasan, Y. Funahashi, T. Yamaguchi, Y. Fujishiro and M. Awano: Impact of anode microstructure on solid oxide fuel cells, *Science*, 325, 852-855 (2009).
- [17] 産総研, 日本特殊陶業, 東邦ガス共同プレス発表: マイクロチューブ型固体酸化物燃料電池(SOFC)を集積したコンパクトで低温運転可能な燃料電池モジュールを開発 (2009).
<http://www.ngkntk.co.jp/news/2009/pdf/20090910b.pdf#search= 'マイクロチューブ型SOFCを集積したコンパクトで低温運転可能な燃料電池モジュールの発電に成功'>
- [18] 低温動作型SOFCモジュール, *日経エレクトロニクス*(2010年4月5日), 24, *日経ものづくり*(2010年4月), 21, (2010).
- [19] 生駒圭子, 三輪博通: 日産自動車における車載用SOFCシステムの開発, *燃料電池*, 10 (1), 70-74 (2010).

執筆者略歴

藤代 芳伸 (ふじしろ よしのぶ)

1995年東北大学大学院工学研究科応用化学専攻修了後、反応化学研究所(現東北大学多元物質科学研究所)助手、英国インペリアルカレッジ留学を経て、1999年に名古屋工業技術研究所に入所。機能性セラミックス材料化学と無機プロセス化学が専門。2009年より先進製造プロセス研究部門機能集積モジュール化研究グループ長。この論文では、主に低温型コンパクトSOFCモジュール設計および集積プロセス技術の研究開発を担当した。



鈴木 俊男 (すずき としお)

1995年東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻修了(修士)後、ユニチカ(株)に入社。2001年米国ミズーリ大学ローラ校(現ミズーリ科学技術大学)にてPh.D.(セラミック工学)取得後、同大学にてポスドク、リサーチアシスタントプロフェッサーを経て、2005年に産業技術総合研究所に入所。入所後はセラミックリアクター開発プロジェクトに従事。現在、先進製造プロセス研究部門機能集積モジュール化研究グループ主任研究員。この論文では、主にセル設計およびナノ電極等の製造技術研究開発を担当した。



山口 十志明 (やまぐち としあき)

2002年名古屋大学大学院修了、2004年まで同大学工学研究科助手、2005年より産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門機能集積モジュール化研究グループ研究員。無機化学、固体酸化物型燃料電池等の機能材料・デバイスに関する湿式プロセス技術を専門。2010年米国コロラド鉱山大学で在外研究。この論文では、主にハニカム型SOFCでのセラミックス電極等の塗布技術の研究開発を担当した。



濱本 孝一 (はまもと こういち)

2001年東京大学大学院工学系研究科材料科学専攻博士課程修了、博士(工学)。同年日本学術振興会特別研究員、2002年産業技術総合研究所シナジーマテリアル研究センター特別研究員、2008年先進製造プロセス研究部門機能集積モジュール化研究グループ研究員。電子セラミックス等の機能性材料化学と電気化学が専門。この論文では、主にセラミック集積プロセスにおける電極積層技術を担当した。



淡野 正信 (あわの まさのぶ)

1983年北海道大学博士課程修了。名古屋工業技術研究所、産業技術総合研究所シナジーマテリアル研究センター、先進製造プロセス研究部門を経て、2009年より、同部門副研究部門長。セラミックス材料科学が専門。この論文では、主に、高集積セラミックリアクター製造技術の研究開発を担当した。



査読者との議論

議論1 論文の全体的な評価

コメント (清水 敏美: 産業技術総合研究所ナノテクノロジー・材料・製造分野)

この論文は、独創的なセラミックスの集積化製造技術を駆使することにより実現した、コンパクトで高出力かつ高効率な発電モジュール製品に関するアイデア、試作、評価結果に関して記述したものです。まさに現在、大きな社会問題となっているエネルギー問題の課題解決に資する内容であり、シンセシオロジー誌にふさわしい論文と考えます。

しかし、全体的にプロジェクト報告書や技術解説書に類似する論理構成や表現記述となっています。したがって、燃料電池技術や関連技術に造詣が深い読者にとっては理解されても、その他の読者にとっては用語や図面構成を含めてかなり読みにくい内容となっています。査読者が議論2以降に示す気がついたポイント等を改善することによりさらに読みやすい、充実した論文になると思います。

議論2 研究開発の基本的な位置づけ

コメント (立石 裕: 新エネルギー・産業技術総合開発機構)

全体として技術開発のポイントや流れは適切にまとめられていると思いますが、シンセシオロジーの論文としては研究開発の戦略の記述が弱いと思います。構成的に次の3点が問題かと思うので、ご検討願います。

(1) そもそもこの開発はどのような社会的意義があるのか、という記述が不足していると思います。セラミックリアクター技術としての開発であれば、いまの内容でもよいかもしれませんが、SOFCの開発と明言している以上、それなりの説明が必要です。これまでのSOFCになかった特性を実現するという技術的な目標は明確なのですが、成果により何を実現しようとしているのかがあまりはっきりしません。「AやBやCというこれまでのSOFCでは対応できない応用があり、それぞれに必要なスペックから、このような性能やコストを目標とする」という説明が最初に必要だと思います。時系列的には後から応用が見えてきているというのが実態かもしれませんが、論文としては、最初に開発の具体的な目的を明記するべきだと思います。

(2) SOFCの課題として、低温動作化と起動・停止の高速化をターゲットとして挙げられていますが、これらの課題は本来は出力容量とリンクしたのではなく、求められるパラメータは別と

して、大容量機でも求められている課題のはずです。すなわちこの論文でターゲットとされている容量に限定される課題ではないはず。これらの課題を解決する上で、「マイクロモジュール化」が有効であるのは明確ですが、この論文では、上記2課題と出力容量の関係の整理が不完全です。マイクロSOFC技術は10~100W級機のみをターゲットとするのか、それとも長期的には大容量機への拡張も狙うのか、現時点で技術的に対応できなくてもかまいませんが、戦略としてどう考えるのか、そこを明確にしないと電力ユーザーからは評価されないのではないのでしょうか？

(3) マイクロチューブ型モジュールとハニカム型モジュールの関係が、論文の中で整理されていないように思われます。時系列的にはチューブ型→ハニカム型となっているように思われますが、両者はそれぞれに特徴があって今後も用途に応じて使い分けるのか、それとも実用的にはどちらか一方に集約されるのか。それぞれの今後の課題は何なのか等々、説明が必要と思います。

回答（藤代 芳伸）

社会的意義としては、高効率のSOFCを特に家庭等で使用する場合、使用電力負荷に合わせてDSS（デイリー・スタート・アンド・ストップ）運転ができれば、より大きなCO₂排出低減が可能であり、そのためには熱マネジメントが容易な低温での高性能化や急速作動停止が可能な高性能なコンパクトSOFCの実現が求められていると考えます。これまではセラミックス材料の抵抗の問題や体積当たりの電極面積を向上させる高性能化と高度集積化製造技術がありませんでした。高性能なコンパクトSOFCの実現に向け、AISTの有するセラミックス集積化技術により、これまでできなかった低温での高性能化とモジュールの高集積化を実現し、高効率SOFC普及によるCO₂排出削減へ繋げることが大きな研究の意義であり、その機能的セラミックス部材製造技術の開発と（使いやすいモジュールの提示での）技術普及が研究戦略と考えています。

具体的には次のとおり社会的意義を考え、修正した記述を致しました。

(1) 出力容量での課題と低温作動化および起動停止の高速化での課題解決の関係の整理について再考致しました。

ターゲットは発電モジュールとして、民生での電源ニーズが多い、KW級モジュールを想定しております。モジュール容量が大きくなるとモジュール容積も大きくなり、熱の出入りも多いため、熱制御での解決の面から、マイクロモジュールSOFCでの低温化や急な起動停止でも大丈夫なモジュール製造技術が有効となると考えます。

48ページ上段に、開発出力容量のターゲットと低温作動化および起動停止制御での課題解決の考えを記述致しました。

(2) マイクロチューブ型とハニカムSOFC型の開発での流れが整理されていないのご指摘と今後の課題については、再考し修正いたしました。

議論3 マイクロSOFC技術の現状と課題、および課題解決のための戦略に関して

コメント（清水 敏美）

論文前半における記述から、産業ニーズや社会の要請に合わせて、コンパクトで高出力な低温型燃料電池の開発が重要性を帯びていることは理解できます。しかし、その根幹となるマイクロSOFC技術の開発動向、性能比較、問題点等が記述されていません。ところが、論文後半において、さりげなく性能比較表を参照させてこれまでにない独自のマイクロSOFCを実現したと結論付けています。読者が知りたいのは、まさにその表の詳細であり、それを踏まえた上での当該研究の戦略とその構成学です。表はもっと最初の方で有効活用すべきと思います。

回答（藤代 芳伸）

ご意見のとおり文章構成の流れにおいて、マイクロSOFC技術の開発動向、性能比較、問題点等の記述が薄く、その解決に向けた研究戦略の議論が弱いことを理解しました。一方、SOFC分野の中でマイクロSOFC技術は、残念ながら国内外でもこれまでモジュール開発が進まず、一般的に大きな技術フィールドではなく、産総研の強みを活かして具体化を進めているもので、これまでなかった分野について課題を明確にし、これから技術展開を進めるべき分野と考えております。技術戦略ロードマップ等に沿って、SOFC技術全般の中でのコンパクトで高出力な低温型燃料電池へ向けた技術実現の課題解決の一つが、マイクロSOFCでのコンパクトモジュール技術の実現であることを強調し、読者へ理解していただければと考えております。マイクロSOFCの技術指標はまだまだないのですが、世界的なベンチマークを示す必要性から、私達の技術の位置付けを明確にするために表での比較を示しております。上記の理由において、構成を再検討する必要があるれば再考させていただきます。SOFCとしての技術課題が、低コストで使いやすい高出力な低温型燃料電池の実現であり、それによるCO₂削減技術に向けた戦略であることを示すために47ページへ技術課題と解決での考えの説明を追記いたしました。

コメント（立石 裕）

議論2と関連しますが51ページの表2で、ここに示されている技術指標の意味の説明がないので、開発された技術がどのように「高性能」なのか読み取ることができません。またここに示されている結果が、マイクロチューブ集積型の成果なのか、それともハニカム型の成果なのかが不明です。

回答（藤代 芳伸）

技術指標としては、セル形状、材料、作動温度はマイクロチューブ型SOFCおよびハニカム型SOFCそれぞれで達成していた数値です。発電密度はハニカムでは燃料極電極厚さがマイクロチューブ型SOFCより薄いので、最高値はマイクロチューブ型SOFCの値です。ハニカム型SOFCの出力密度を追記し、注釈を入れました。3分での急速起動(217℃/min)はハニカム型SOFCでの実証データなので、注釈にて記述を致します。マイクロチューブ型SOFCでも単セルでは数分で起動しますが、モジュールでは現時点では200Wレベルでパーナード起動にて10分(65℃/min)程です。

日本のものづくりとシンセシオロジー

日本が優位を保ってきたものづくりに、新たな強みを付加することが求められています。そのためには、研究開発における新たな仕組みを構築する必要があります。日本においてものづくりを主導してこられた方々に、新たなものづくりの戦略とその中でのシンセシスの重要性、また、産総研の目指す本格研究の役割を語っていただきました。

シンセシオロジー編集委員会



座談会出席者

- | | |
|--------------|---------------------------------------|
| 成合 英樹 | 筑波大学名誉教授、前原子力安全基盤機構理事長 |
| 柘植 綾夫 | 芝浦工業大学学長、前綜合科学技術会議議員、元三菱重工業(株)代表取締役常務 |
| 矢部 彰 | 産総研理事(シンセシオロジー編集委員:司会) |

矢部 「シンセシオロジー」は「ものをつくりあげる」重要性を日本、そして世界に訴え、その方法論を多くの方と共有したいということを発刊の大きな目的にしています。

さて、研究開発の成果が実用化するまでには、その間の「死の谷」を越えるための克服すべき技術的な課題があります。幾つか事例を申し上げますと、私が関わったスーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム研究開発は、1993年までの約10年間がヒートポンプの性能を倍に上げるという国のプロジェクトでした。プロジェクトの終了時に東京工業大学の故片山先生が「レーシングカーができましたが、高級乗用車にはなっていませんね」と言われました。その後、世の中に出るまでにさらに十数年かかりました。まさにそこが「死の谷」と言えるのですが、この間にさまざまな技術が補強され、経済性と性能向上の両立に十数年かかったと言うことでしょう。今は国内販売や海外展開もされています。また、エコ・エネルギー都市システムでは水和物スラリーによる冷熱蓄熱輸送を開発しましたが、これは実用化されるまでに6年かかりました。エネルギー技術の場合、経済性は重要なファクターであり、この6年は経済性へのチャレンジだったと言えます。もう一つは、中小企業と一緒にいった自動車の製品検査工程の自動化です。レーザーの反射回折を使った自動検査装置で、原理は5年ほどでできたのですが、実際に自動車会社に売り込んでから実用化するまでに7年かかりました。これは信頼性、耐久性、高速性へのチャレンジでした。

一方、ニューサンシャイン、ムーンライトというエネルギープロジェクトの中には死の谷から抜け出していない技術がたくさんあります。そこでお尋ねします。死の谷を越えるための有効な方法はあるのか、また、死の谷を越えるために技術の統合の視点、つまりシンセシスほどの程度重要なのでしょうか、さらに、世界をリードすべき日本のものづくりの持つべき特徴は何があるのかということについて議論していきたいと思います。

ものづくりにおけるシンセシスの重要性

柘植 「世界をリードする日本のものづくり」とはフロントランナー型のイノベーション創出であり、巨大複雑系社会経済システムの個別先端科学技術創造と、その統合化能力の両方が不可欠です。巨大複雑系社会経済システムとは、例えばインターネットに代表されるような人工物の社会ネットワーク、高速



柘植 綾夫 氏

交通システム、原子力発電プラント、宇宙システムなどのように空間的、物理的あるいは社会的広がりが巨大であり、そこに内包される多数の要素の相互作用が複雑で、その性能と信頼性が社会と経済に多大な影響を与えるシステムを表していますが、ライフイノベーションやグリーンイノベーションの創出は、まさに巨大複雑系社会経済システムの創成と言えます。そして、世界をリードする高付加価値ものづくりの命題とは、図1に示すように認識科学「あるものの探求」と設計科学「あるべきものの探求」の相互作用、およびそれぞれの知の統合をしていくことであり、シンセシオロジーの重要性はここにありと私は思います。

矢部 巨大複雑系社会経済システムは、知の統合がないとつくりあげられない。統合にまさにシンセシスが関わってくるわけですね。成合先生、同じ論点でいかがでしょうか。

成合 私は機械工学科を1962年に卒業しましたが、当時の授業では機械、材料、流体、熱の4力学とともに設計製図や実験が重視され、実際の機械システムについての授業も多く、これは明治以来の外国からの導入技術をさらに日本流に進めるということが教育の基本にあったのだと思います。実験や設計をするにしても、強度や回転機械の振動などを自分で全部計算するという、ある意味でシンセシス的な授業が残っていました。

ところが、1960年代後半くらいから工学部は基礎工学重視になり、大学では基礎を教え、専門は企業に行ってからということもあったかと思いますが、各専門分野の細分化が進みました。1977年に新構想として設置された筑波大学の工学分野では、基礎工学を大切にしつつそれを統合する設計を重視するとしていました。しかし、実際は研究も教育も基礎のほうに進んだ気がします。

明治以来の海外技術導入から自主技術開発、そして現在のグローバル化の中で、日本の特性を発揮した技術開発をしなければならず、シンセシスは技術開発を進める上で大変重要だと思っています。



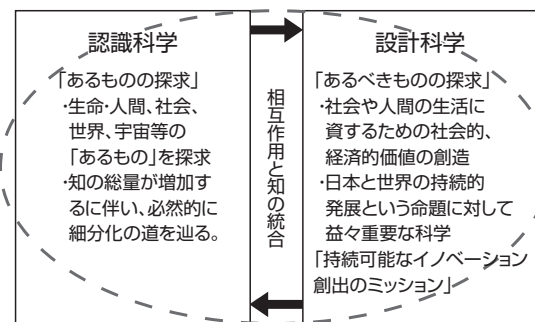
成合 英樹 氏

日本のものづくりの特徴としては、機器・システムを開発する大企業とそれを支える個別技術を有する中小企業があるということです。日本が技術による本格的な発展を開始した1960年代、中小企業に地方から優秀な若者が金の卵として集まり、技術の基盤形成にかなり寄与しました。ところが、1980年代には地方からの若者も少なくなり、コンピュータ化、IT活用も進み、技術が高度化しました。しかし、苦しい中、中小企業が日本のものづくりの高度化に対応しているのはすばらしいと思います。柘植先生はこのような日本的技術の継承を「日本型テクノゲノム」と呼んでいます。私の現在の心配は、産業がグローバル化し、激しい競争下において、日本独自の技術的な遺伝子情報が今後とも持続できるのかということです。いずれにしても日本の技術基盤をしっかりとさせるために、広い分野の統合化、シンセシスが重要だと考えています。

柘植 シンセシスの質は大きく分けると二つあると思います。世界の優れた個別の先端科学技術をオープンイノベーションで集めて統合化する「モジュラー型アーキテクチャー」と、個別の先端科学技術を複雑に組み合わせて社会経済的な価値を生み出す「インテグラル型アーキテクチャー」です。時間と、人と人・組織との間のコラボレーションも含めて価値を創造していくプロセスを考慮するならば、単にオープンイノベーションの時代だという一言では済ませてならないと思います。

技術の持つゲノム性を意味する“テクノゲノム”というコンセプトは石井威望先生の言葉です。日本のものづくりは発展途上国に追い上げられ、活路はないのかという話題になったときに、石井威望先生は「資金と度胸さえあれば短時間で技術が移転できるものもあるだろうし、時間がかかる技術もある」と述べられました。

生命体は環境の変化に対応し何万年という時間をかけてゲノム（遺伝情報）が変わります。技術には10年、20年



シンセシオロジー：構成学的重要性はここに在る

図1 「巨大複雑系社会経済システムの創成力」世界をリードする高付加価値ものづくりの命題

の時間フレームですが、時間軸上でゲノムのように進化する資質があります。常に10年、20年のアドバンテージを保てるように科学と技術を革新し続けて、それを絶えず社会価値化していけば日本のものづくりはそんなに悲観的に考える必要はない。これがテクノゲノムのルーツです。

死の谷を越える技術開発における汎用的な方法論について

矢部 死の谷を越える技術開発において、日本の持っているものづくりの特徴を出すことが大事だと思いますが、どのような方法論があるでしょうか。それがシンセシスの一つの醍醐味という感じもしますが、いかがでしょうか。

柘植 死の谷を越えるためには、私はイノベーション牽引エンジンの再構築が一つの解になるのではないかと思います。

アメリカではかつてイノベーション牽引エンジンであった企業の中央研究所は10年以上前に崩壊し、今の牽引エンジンは、大学、大学を取り巻くベンチャー企業、それをサポートするベンチャーキャピタルです。教育と研究開発とイノベーションが三位一体となり種を生み出して育み、アーリーステージが終わった段階で大企業が投資してイノベーションを起こすというエンジン構造がアメリカでは根付いています。

一方、日本も企業の中央研究所は崩壊し、NTTなどの国研も民営化されて、中央研究所時代は終わっています。研究開発法人や企業の研究所、大学も頑張っているけれども、三つの研究組織の知の創造と結合機能が脆弱な状況にあり、教育と研究開発の連携も脆弱になっています。したがって、日本のイノベーション・パイプライン・ネットワークを強くすることが死の谷を越える汎用的な方法論になるだろうと考えます。イノベーションは、もし彼がいなかったら、あるいは、もしあの組織がこうしなかったらイノベーションは起きなかったというくらい、非線形であり、確率的です。ですから、汎用的な強化策としては、大学・研究開発法人・産業の三位一体的な連携強化が必要であり、教育・研究開発・イノベーションの三位一体推進構造の構築が必要です。教育も研究開発もイノベーションも、参加する人たちがUnder One Roofであることが大切ですし、こういう視点で日本型のイノベーション牽引エンジンの再構築をすべきだと思います。

矢部 大学、企業、研究開発法人の間のインターフェースの機能がまだ十分できていない、それをUnder One Roofで実現するのが必要条件であるという理解でよろしいでしょうか。

柘植 そうです。例えば大学から研究開発法人、あるいは研究開発法人から産業への価値のフローなりインターフェースも重視すべきです。平たく言えば論文にはならない

が、社会経済的価値創造への貢献としては大変な価値がある。この価値も学術的な価値があるのだということを学術界が納得すること、それがシンセシオロジーのミッションだと思います。それが不十分であるために、学生も研究者もそこに情熱を燃やすことがなかなかできません。

産業界は人事考課のときにその成果を認めているのです。彼はA事業とB研究所のあのニーズとシーズを結び合わせて、Xという新製品を生み出す原動力を作ったということ、企業では高く評価します。学術界もその価値を学術のテーブルで認め合うことがないと、産業と学術界との間の溝は埋まらないと思います。

成合 昔、産業界の人から「基礎研究成果を得る努力やお金を1とするならば、実際の機械などの製品にするには10倍の努力やお金が必要であり、それを売れる製品にするには、さらにその10倍の努力が必要である」と言われて、ものをつくるのは大変だなと納得したことを印象深く覚えています。これが死の谷だと思いますが、死の谷には、基礎研究成果を実際のものとして作り上げるまでの谷と、それを売れる製品にするまでの谷の二つありますが、それぞれ対象によって違いがあるような感じがします。第一の谷は、専門的知見をうまく組み合わせたり、統合したりするようのもので、第二の谷は、社会的受容性に関わるものであろうということで、広い統合化が必要です。

先ほど柘植先生が、三位一体の連携、特に大学との連携が日本では脆弱だと言われましたが、昔は大学の研究は真理の探求を目的とし、その成果は広く一般に向けて公開されるべきと言われ、企業のための研究は限られた歴史がありました。この20年間、実際に役立つ研究重視と言われるようになったのですが、まだ省庁間の壁を含めたやりにくさがあります。こういう壁を破って、うまく連携ができれば良いと思います。

シンセシスのレベルを上げる有効な方法

矢部 壁をどうやって打ち破るか、あるいはどうやって連



矢部 彰氏

携を深めるかという論点になるかと思いますが、シンセシスのレベルを上げるために有効な方法にはどのようなものがあるでしょうか。

柘植 シンセシスのレベルを上げるためには、図2に示すように知の創造と社会経済的価値創造を結合するパイプラインが分断されている現状の大改革が必要だと思います。忘れてならないのは、教育、すなわち人材育成政策との一体化です。政府が融合場と拠点の提供や、府省間の垂直連携強化、イノベーション政策を進めるとき、そこに必ず教育政策を一体化すべきだと思いますし、そういう仕組みの構築が重要です。政府の目指す「強い経済、強い財政、強い社会保障の実現」、それは持続可能でないといけません。持続可能なイノベーション創出能力強化には、教育と研究開発とイノベーションの三位一体振興が不可欠です。この構造を持つイノベーション牽引エンジンを回せば、シンセシスのレベルも自然と上がってくると思います。

成合 レベルを上げる有効な方法として、私は「地域におけるヒューマンネットワークの活用」「会社の技術開発の伝統」「助け合う国民性」を挙げたいと思います。

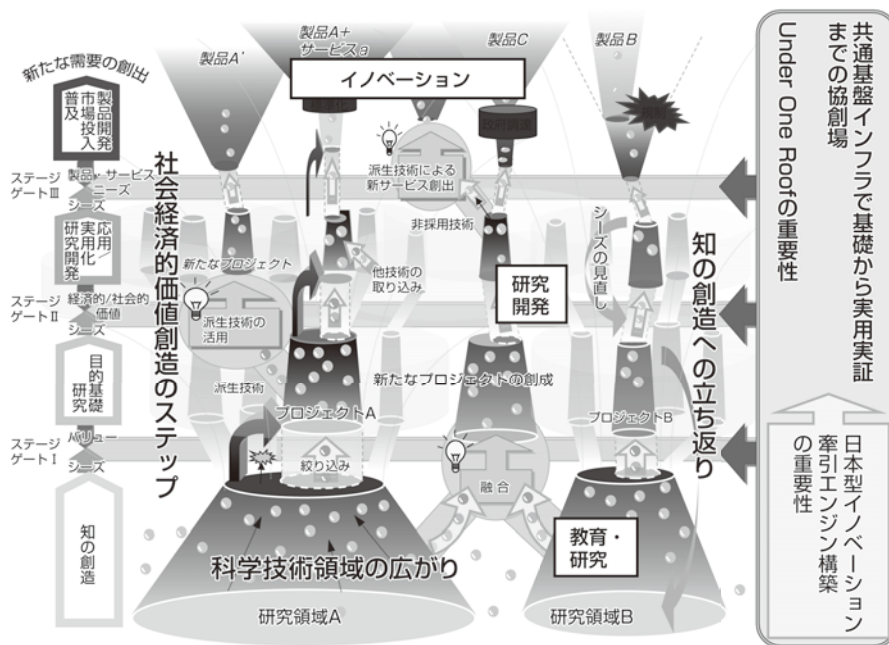
例えば、地域におけるヒューマンネットワークの活用では、1980年代に国立研究機関や企業が集まり、筑波研究学園都市が概成されました。そこで伝熱や熱工学の研究者が集まって情報交換を主目的とする研究会を始めたのですが、学会報告書だけでなく『次世代技術と熱』という形で本を出版しました。基礎研究を進める人、課題解決型の研究を進め

る人など多様な研究者が集まり、研究会における議論から各自の研究レベルが上がったと思います。現在は情報化時代が進み、30年前とは異なる情報交換手段もあると思います。つくばの研究会では頻繁に見学会を行い、実際にものを見せてもらい、大変有益であったと思いますし、地域におけるヒューマンネットワークはシンセシスのレベル向上に活用できると思います。

矢部 つくばに大学、企業や国立研究所の人達が集まり、ニーズやシーズ、そして社会全体にどう見えるかを全員で議論した一つの Under One Roof だと思うのですが、三者が集まったということが一つの大きな特徴だと思います。今、「つくばイノベーションアリーナ」をつくりつつありますが、研究組合がそのきっかけになっています。大学、企業、研究所が1か所に集まるのは、日本にとってはすごくいい方法ではないかと思っています。

柘植 まさにそうで、私の主張は大学院生がメインテーブルに座らなくても、先生が「夕方、おもしろい会があるから一緒に来い」と言って大学院生も参加する、これをもっと意識的にしたい。私自身の大学時代を振り返ってみますと、成合先生が博士課程におられて工学部で勉強会をされていたのですね。ああいう勉強会に行って、社会を支えているエネルギーを肌で感じることができました。

持続可能な社会をつくる上でシンセシスはどのように発揮されるか



出典：柘植 綾夫、イノベーター日本、オーム社刊

図2 教育・研究・イノベーションの三位一体推進が必要

矢部 シンセシスのレベルを上げるにはみんなが情報を交換し合い、知恵を出し合う制度としてつくっていくことが一つの有用な方法だというお話をいただきました。

さて、我々にとって「持続可能な社会をつくる」ことは非常に重要です。シンセシスの中に持続可能という目的指向をどのように入れていくか。それは個人のレベルなのか、組織のレベルなのかを含めて、いかがでしょうか。

柘植 持続可能な社会をつくりあげるための方法論で一番大事なことは、持続可能なイノベーション牽引エンジン構造をつくる、これに尽きるわけです。その中で一番重要なのは「人材の育成」です。図3に示すようにフロントランナー型イノベーション構造を担う育成すべき人材像は、大きく分けると4タイプあります。一つはタイプD型、Differentiator 科学技術を創造する人材。ひょっとしたらノーベル賞をとれるかもしれない人材です。タイプE型は、Enabler 技術創造人材。忘れられがちなのがイノベーション構造を本当に支えているタイプB型、Base という意味ですが、幅広い基礎技術と基盤技術・技能を有する人材。どちらかというと工学教育のかなりの部分はタイプB型の人材を育てる役目だと思います。さらに、私は今の科学技術教育政策で忘れられているのではないかと危惧しているのが、いわゆるタイプΣ型人材。イノベーション構造の縦・横統合により社会経済的価値創造を担う人材です。このΣ型人材は、まさにシンセシオロジーを支えている人材でもあり、持続可能な社会をつくりあげるために非常に大切だと思います。

成合 持続可能な社会をつくるということを、私は高度な科学技術を利用するこの社会が続いていくという観点で捉え

ています。私自身は原子力の安全に関わる研究や規制関係の仕事をしました。原子力プラントは基本的には米国を中心とする海外で開発が進められ、我が国はその導入とプラントの製造・建設、運転することをやってきました。研究者は、たとえ故障が起こっても住民や従事者の安全を守るための研究や検討を、一生懸命やったわけです。原子力プラントでは冷却水がなくなると発熱している燃料が溶融し、放射性物質が放出される心配があるということで、冷却配管が破断して冷却水がなくなっても非常用冷却水の注入により燃料溶融を防止するための大変複雑な現象の解析や実験を含めて研究しました。故内田秀雄先生はこのような研究を「原子力安全の開発」と言われましたが、目的を達成するために色々な知見を総動員して研究を行う、いわゆる目的指向型の研究開発のおかげで「安全の論理」と言われるほど抜けのない構成ができたわけですが、基本的な点はシンセシスということですね。

食品や医薬品分野でレギュラトリーサイエンスが提唱されていますが、リスク評価、リスク管理、リスクコミュニケーション全体にわたる研究であり、人文社会科学を含む関連科学が必要ということで、従来の基礎応用科学の範疇ではなく、目的指向型なものということです。原子力でも、リスク評価やリスクコミュニケーション、行政のあり方を含むリスク管理の問題が指摘されつつありますが、高度技術依存社会において社会的受容性を考えると、安全と安心を確保する方法論、科学が必要であり、これにはシンセシスの発想が重要だと考えます。

柘植 成合先生の目的指向的のものには人文社会科学も含めた視点が不可欠というお話は、設計科学、つまりあるべ

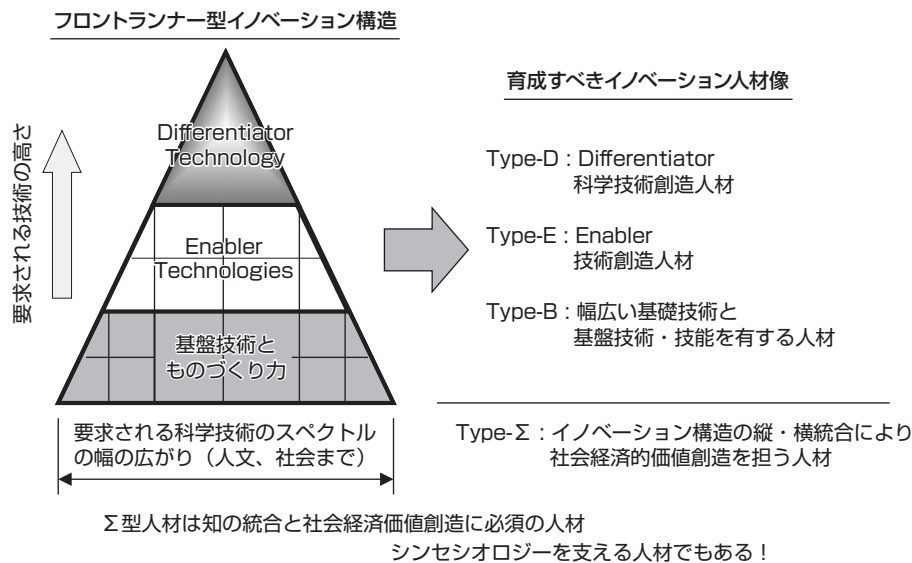


図3 持続可能な社会を上げるために必要な人材像

きものを追求する科学ということですね。私は持続可能な社会をつくりあげていくには設計科学をもっと意識すること、かつそれは認識科学があつての設計科学になりますので、この連携を可能とする俯瞰型人材育成プログラムを設置し、国はきちんとそれを支えるべきだと思います。日本学術会議が公表した「日本の展望-学術からの提言」でも同じ提言がされています。

矢部 設計科学の重要性と、そのシンセシスの部分をいかに社会に認めてもらうか。この分野は論文が書きにくいと思うのですが。

柘植 社会のために科学技術を実践するには、設計科学人材を育てないといけません。俯瞰力、シンセシス力、共創力を持つ人材の養成です。ですから、認識科学と設計科学では評価基準が違うのです。それぞれの評価基準を明確にし、「社会のための科学技術」の国民的理解を深めていく活動がベースだと思います。

技術イノベーションのためにシンセシスができること

矢部 私たちも設計科学の重要性を認識してもらいたいがために、“社会技術”という、社会との接点の技術という言い方もさせていただいています。技術イノベーション、まさにグリーンイノベーション、ライフイノベーションの創出というお話が柘植先生の最初のご議論にありましたが、シンセシスができること、またシンセシオロジーに期待されることはありますでしょうか。

柘植 シンセシオロジーは巨大複雑系社会経済システムの創出力、日本のものづくり力、フロントランナー型のイノベーションの創出力を支える基盤的な学問であり、同時に実学でもあると思います。シンセシオロジーには、学術としての評価基準を確立し、かつ現場で実学としての役割を果たしてほしい。

私は、設計科学、あるいはシンセシオロジーは学術的な意味付けができると思うのです。そこが学術としての評価基準という意味になりますし、例えばファンディングするときの基準も、設計科学の中で価値があるかないかということで議論できます。学術界の挑戦課題だと思います。

矢部 これを「シンセシオロジー」にあてはめて言えば、これまで産総研がシンセシオロジーとして発信したものを、設計科学の視点から見て大事な点をもっと整理してさらに発信していくことが必要だということですね。

成合 シンセシオロジーを拝見して、産総研は役立つ研究

を随分進めていると思いました。社会ニーズを把握するという場合、グローバル化した今後の社会、発展途上国を含めて、世界を考えるとという視点が重要になってきます。各国で競い合い、優れた技術が勝つことになるわけですが、それに備えるには、日本のこれまでのシステムの改革、場合によっては国民の意識改革が必要となるでしょう。

シンセシオロジーへの期待ですが、第2種基礎研究や本格研究は初めて聞く言葉でしたが、技術開発におけるこのような問題意識は漠然と持っていたので大変関心を持って毎回読んでおります。今日の高度な技術社会において重要な方法論を提案しておられますし、これが産総研の研究範囲だけでなく、広い分野に広がることを期待したいし、研究者が実用的な研究を広く深く考えることは、柘植先生のおっしゃった人材育成になります。特に討論は大変貴重で参考になります。これを継承していく編集者が育つことによって、真の意味での日本におけるプログラスマネージャーや研究コーディネータの育成にうまくつなげていただければと期待します。

矢部 シンセシスからいかに日本の特徴を出し、世界を引っ張っていく方向性まで出せるか、これもまさにシンセシオロジーの役割だと思います。今までシンセシオロジーとして発信していたものを体系化し、設計科学の観点からまとめ直し、その重要性を発信することで、世界をまさにリードしていきたいし、それが日本の将来にとっても大事だと思います。きょうは本当にありがとうございました。

本座談会は、2010年9月6日、東京都千代田区にある産総研秋葉原事業所において行われました。

略歴

成合 英樹 (なりあい ひでき)

1938年東京生まれ。1962年東京大学工学部機械工科学卒業。1967年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士。同年4月運輸省船舶技術研究所入所、研究員を経て主任研究官。1980年4月筑波大学構造工学系助教授。1987年11月教授。2002年3月定年退職、名誉教授。2002年～2003年日本原子力学会会長。2003年10月独立行政法人原子力安全基盤機構理事長。2009年3月理事長退任、同年4月特別顧問、2010年3月特別顧問退任。日本学術会議連携会員。専門分野は熱工学、原子力安全工学。

柘植 綾夫 (つげ あやお)

1943年東京生まれ。1967年東京大学工学部卒、1973年同博士課程修了、工学博士。1987年Harvard Business School AMP101修了。1969年三菱重工業(株)入社、原子力発電の研究開発に従事。原子力研究推進室長、高砂研究所長を経て同社取締役技術本部長、代表取締役・常務取締役技術本部長。2005年1月内閣府総合科学技術会議常勤議員、2007年1月三菱重工業(株)特別顧問、2007年12月芝浦工業大学学長。日本学術会議会員、日本工学アカデミー副会長。

シンセシオロジーワークショップ オープンイノベーションハブに向けた技術統合の方法論

2010年10月に産業技術総合研究所が主催する「産総研オープンラボ」の講演会の一つとしてシンセシオロジーワークショップを開催しましたので、その概要を報告いたします。

このワークショップでは、シンセシオロジー誌にこれまで掲載された学術論文を題材として構成的研究の類型化を試みるとともに、イノベーション推進の方法論について構成的研究開発を自ら推し進め、多くの実績を挙げてきた産業界の研究者とともに議論しました。

シンセシオロジー編集委員会



(開会挨拶)

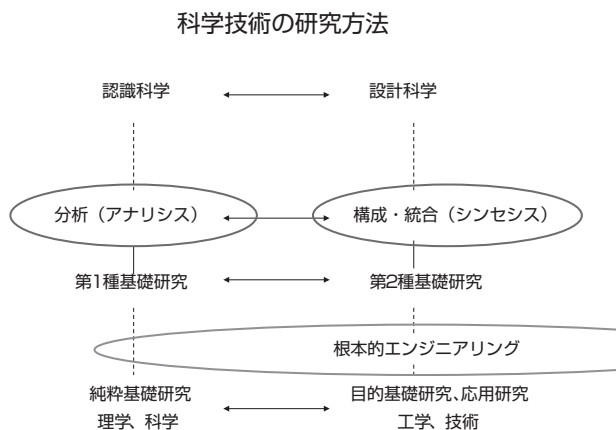
小野 晃 (シンセシオロジー編集委員長、産業技術総合研究所) イノベーションを目指す国際的な競争が激化しています。我が国においても、“オープンイノベーション”や“産学官連携”が熱く語られていますが、私達はその実態をどのようにとらえればいいのか、大学等アカデミアと私達のような公的研究機関、そして産業界が、それぞれ違うセクターであってもお互いを理解しつつ、連携を深めていくために、研究者や技術者のマインド、目的、共有する部分は何なのか、という議論が重要だと思っています。



科学技術の研究方法を俯瞰しますと、伝統的な科学は17世紀にヨーロッパから始まり、要素還元論で成功を収めました。成功は現在も続いています。要素還元論だけでは昨今の地球環境の問題やエネルギー、安全・安心等々の複合化した問題を解決できないということに多くの人が気づいています。その中で要素還元論とは異なった、新たな科学の方法論の提案がさまざまになされています。例えば認識科学を伝統的な科学とすると、設計科学と

いった新たな科学があるべきではないか。複合的な問題を取り扱うときには、一つの技術分野にとどまらない構成や統合といったアプローチが必要ではないか。産総研でいうところの第1種基礎研究と第2種基礎研究といったような対比も行われておりますし、純粋基礎研究と目的基礎研究・応用研究の対比、あるいは理学対工学、科学対技術という対比もしばしばなされています。

しかし、伝統的な科学の方法論に比べ、もう一方の新たな



な科学について、私達は現場でこういう研究を多く実践しているにもかかわらず、その方法論やアプローチについてはあまり関心を払わずにきたのではないかと。あるいは各研究者の中にノウハウとしては蓄積されても、社会全体の財産として共有し、継承されるには至っていないのではないかと、ということが私達の問題意識です。「シンセシオロジー」の趣旨が議論のポイントになるのではないかと考えています。

本日は、「オープンイノベーションに向けた技術統合の方法論」というタイトルで、豊かな見識と経験をお持ちの方々をお招きしました。新しい科学の方法論をより深いところから議論できれば幸いです。

(講演)イノベーション創出に向けた構成的研究の類型化

小林 直人 (シンセシオロジー編集副委員長、早稲田大学、元産業技術総合研究所) 「シンセシオロジー」は、研究成果の製品化あるいは社会浸透を実現した社会技術としてのシナリオを意識した論文を掲載しています。これらが



本格研究の実践につながり、さらにイノベーションを加速することができれば論文誌として大きな役割を果たすことができます。イノベーション創出は簡単なことではありませんが、イノベーションに向けた統合の方法論の一端が見えてくれば有益であるということで、1巻1号から3巻2号までの60編のうち、環境・エネルギー分野8編、ライフサイエンス(バイオテクノロジー)分野9編、ライフサイエンス(ヒューマンライフ)6編、情報通信・エレクトロニクス分野、ナノテク・材料・製造分野10編、標準・計測分野12編、地質分野5編の計50編を対象とし、シンセシオロジー編集委員会の構成的方法論WGにおいて検討しました。なお、その際私が以前提案した①アウフヘーベン型(二つの相反する命題を止揚し、新概念を創出)、②ブレークスルー型(重要基幹技術に周辺技術を結合させ統合技術に成長させる)、③戦略的選択型(要素技術を戦略的に選択・構成)を構成方法の基本タイプ例として考慮しました。

全体的にはシンセシオロジーの論文はかなり学際的であることが分かりましたが、それぞれの分野固有の特徴もあります。まず(1)環境・エネルギー分野では、明確な社会ニーズからブレークダウンして課題を戦略的に選択しつつ、要素技術が鍵となって重要技術を生み出し周辺技術との結合によりブレークスルーして統合された技術が生み出されるという「戦略的選択型+ブレークスルー型」の構成が主として見られました。

また(2)ライフサイエンス(バイオテクノロジー)分野における特徴的な方法論として、循環的發展ということが挙げ

られます。例えばバイオインフォマティクスではコア技術が構成され、それが次の発展段階のホップ、ステップ、ジャンプとしてつながり、さらに、この本格研究が次の段階のホップとして循環的に発展します。バイオ産業は、製品化してみないと使えるかどうか分からないという不確実性が他分野よりも大きいため、小さいものでも製品化することが重要となります。第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化がスパイラルに上がっていく、螺旋(ヘリカル)型が特徴と言えます。さらに(3)ライフサイエンス(ヒューマンライフ)分野では、個人にふさわしいメガネフレームの開発が特徴的でしたが、要素技術の統合と、コア技術を分類して新知見に持っていく、顧客の満足度に応じて製品を提供するシステムをつくったことが特色となっていました。

(4)情報通信・エレクトロニクス分野では、スピントロニクス技術による不揮発エレクトロニクスの創成がとても特徴的な例で、新材料・新デバイスの開発と、実用化・商品化の鍵となる量産技術という二つの連続したブレークスルー技術が効果を発揮したタンデム形式ブレークスルー型と言えます。また(5)ナノテク・材料・製造分野では、有機ナノチューブの大量合成方法がよい例の一つです。これは完全なシーズ主導ブレークスルー型ですが、同時にこれを作るために非常に詳細な分子設計とその統合技術でこの量産化に至って、さらに用途開拓を今いろいろな企業と共同して実用化に向けて進んでいるという特徴があります。

(6)標準・計測分野には、国の標準を確立しそれをSI(国際単位系)トレーサブルとすること、国際的に認知された測定方法で国際整合性の担保をすること、標準供給により社会の末端までトレーサブルな体系をつくるというミッションがあります。そこでの技術開発は主として「戦略的選択型-S(スタンダード)」と名付けることができますが、それは出口が明確であり、その達成のために必要な要素技術を選択・構成していくというのが特徴的です。最後に(7)地質分野では、全体として「総合戦略型」ということができますが、ほかにも個別戦略型、個別戦略・分野融合型、また時間と共に型が変化して発展するブレークスルー型から分野融合型にいくもの等があります。変化する社会ニーズによって研究が進展し、複雑系としての地質現象が理解され、螺旋構造の相互作用をしていくという特徴があります。

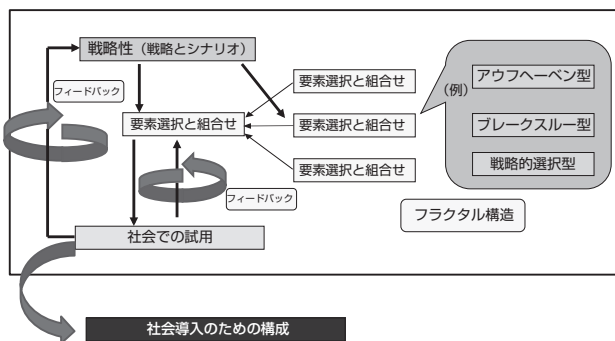
最後に50編の分析を踏まえ、構成方法の課題を抽出してみました。一つ目は、「シンセシオロジーでの構成方法」です(図参照)。戦略とシナリオ→要素選択と組み合わせ→社会での試用というプロセスが考えられますが、これに加えてもう一つ重要な要素として「フィードバック」があることがわかりました。また要素選択と組み合わせの例としては、前述のアウフヘーベン型、ブレークスルー型、戦略的選択

型等の幾つかの類型に分けることができます。

二つ目は、「研究分野と構成の特性」です。物理や化学、機械、デバイス技術や計測標準のように要素技術がおよそ明確に定義され、構成方法も比較的シンプルなものから、環境・エネルギー、地質のような複雑系、さらにはバイオテクノロジー、ヒューマンライフ、情報のように複雑相互作用になると、構成方法が変化し、複雑性が増していきます。

最後に大きな課題として「社会導入に向けて」があります。社会導入には、技術開発とは独立・並立的な社会的な行為が要素に入ってくることで、機能性以外の感性等の別の価値の付与やインパクトあるコンセプトの必要性等が挙げられます。また短期的利益を断念して必要な要素の種をまいて自律的構成を促すことも求められるでしょう。そして、技術だけの問題ではなく、社会からのフィードバックにどう応えるかということが重要になります。以上、私の問題提起とさせていただきます。

シンセシオロジー（構成学）における構成



(パネル討論)

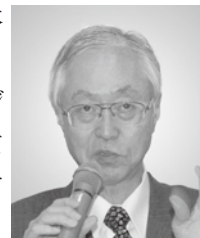
赤松 幹之（シンセシオロジー編集幹事、産業技術総合研究所）『シンセシオロジー』は社会で使われる技術になるためのシナリオを意識して行った構成的な研究を記述する論文を掲載することを目的としていることから、イノベーション創出に向けた構成の方法論が見えてくるのではないかと期待しています。



問題提起をいただいた小林さん、日本工学アカデミーにおいて根本的エンジニアリングの考えを提唱されている鈴木さん、北山さんから光ネットワークの研究開発のご経験や、伊藤さんからカーナビ機能をつくられた経緯をお話いただき、製品や社会への導入のための構成の方法論について幅広い議論を展開していただきたいと思います。

根本的エンジニアリングの提唱

鈴木 浩（GE エナジー 技監、日本工学アカデミー政策委員会 TF 幹事）



日本工学アカデミーは、個人がエンジニアとして社会やイノベーションにどう貢献できるかを目的としてできた組織ですが、そこで「根本的エンジニアリング」を提唱しています。最近、与えられた制約の中でのみ最適な答えを求めることがエンジニアリングの定義として固定化されているのではないかと感じています。一つの問題は、その制約が所与となり、これを解除できないという前提になっていること、もう一つは最適化に関してです。最適化には全体最適と部分最適とがありますが、どうも部分最適に陥っているのではないかと。その二つのネックが今の日本にイノベーションが連続的に起きてこない原因になっているのではないかと。もう一度、エンジニアリングを見直してみようというところから、「根本的」という名前を付けました。

提言に至る動機ですが、私達は与えられた制約の中でいかに最適な答えを得るかを考えるとき、Howばかり考えているのではないかと。しかし、Howの前にはWhatが必ずあるだろうということです。日本のものづくりを生かしたイノベーションを起こせばいい、という人がいますが、ものづくりといったときに、ほとんどの方が思い浮かべるのは「ものづくりの作り方」です。Howのほうに視点がいつの間にか移ってしまっている。What、「何を作るのか」ということ、そして、その背景のWhy、「なぜ作るのか」ということが大きなポイントなのです。

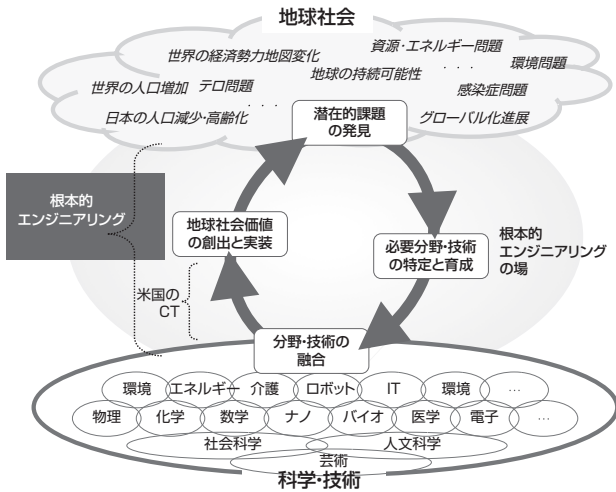
第3期科学技術基本計画によって科学技術の成果が上がっています。一つ一つの成果は素晴らしいものがあるのですが、最近、日本の中で起こったイノベーションは何か、というと、これがなかなか思い当たらないわけです。個々の技術や科学の素晴らしいものは日本の中で出てくるのですが、これらがいわゆる“得点”に結びつかないというイメージを私は持ったわけです。

根本的エンジニアリングを英語では meta-engineering という名前をつけました。

エンジニアリングの基本に戻ったとき、まず課題があります。ただ、私達は、目に見えている課題、目の前にある課題に飛びついていたのではないかと。その課題の裏には、もっと根本的な、しかも私達の見えていない課題があるのではないかと。それを対象にしましょうということです。これらの課題に対して科学技術をうまく用いて社会実装していくためには、俯瞰的にとらえることが重要です。

潜在的な課題をうまくピックアップし、どういう技術が必要なのか、どういう科学が必要なのかというアプローチをする。そして、すでにある技術や科学の中でその問題が解決でき

るかどうかを検証してみる。しかし、最近の課題は複雑化し、困難化しており、一つの科学技術の分野でなかなか解決できないので、個々の科学・技術分野を統合・融合し、実際に社会に実装していく。そこでまた新しい課題が見えてくるので、それをよりの確な次への社会価値創出へ、というプロセスを動的かつスパイラルに推進し、これを深化につなげる、あるいはイノベーションにつなげるが必要ではないかと考えています。



パッシブ光ネットワークとFiber To The Home

北山 忠善 (三菱プレジジョン株式会社取締役社長、元三菱電機株式会社役員理事、通信システム事業本部副本部長)



皆さん方は光ファイバーをご自宅まで引かれてインターネットを活用されておられると思いますが、私達、これを「Fiber To The Home (FTTH)」と呼んでおります。パッシブ光ネットワークでできておまして、最初に思いついたのが80年代、二十数年もかかってやっと目の目を見たシステムです。

パッシブ光ネットワーク (Passive Optical Network: PON) の原点は、光ファイバーと光カプラと端末で構成される光ネットワークです。静止衛星と地上局で構成される衛星通信にヒントを得たものです。光応用計測制御システムプロジェクト (光大プロ) では衛星通信方式と類似の方式をリニアバスのネットワーク形態で試し、ローカルエリアネットワークの光化では Ethernet と類似の方式をスター型のネットワークで実現しました。その後、1990年代に入り、通信キャリアによる光加入者系の方式研究で生き残ったのがスター型を2段階重ねたダブルスター型とよばれる形態のPONです。

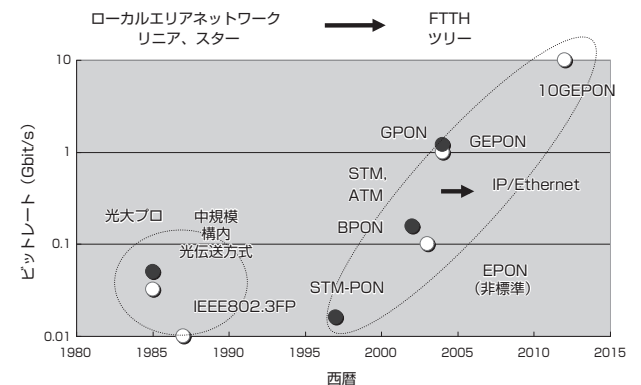
PONの商用化の過程では、既存の電話等のサービスとインターネットを ATM (Asynchronous Transfer Mode) 方式で効率良く収容する公衆通信 (ITU-T) の動きと、ロー

カルエリアネットワークで採用されている Ethernet を広域収容するコンピュータ通信 (IEEE) の考えがありましたが、日本では Ethernet を広域収容するほうが安く、かつ高速化を図れば、電話等も容易に多重化できるだろうということになり主流となりました。電話は平均的・連続的に信号が流れますが、情報量は非常に少ない。インターネットは、情報量のピークレベルは高いが、瞬間的にしか信号が流れないということで、高速 Ethernet を効率よく多重化する GEPON (Gigabit Ethernet-Passive Optical Network) が選択されました。電話は Voice over IP 方式により収容されています。

このように、PON のアイデアは衛星通信から得て、光大プロ、ローカルエリアネットワークで試して、光加入者系で広く普及することとなりました。光加入者系においては ISDN や B-ISDN の時代がありましたが、更にそれを乗り越えて Ethernet ベースの世界に突入し、今日の GEPON の時代を迎えています。あと5、6年するとそれが10ギガになるだろうと言われていました。この間、およそ25年かかっています。なぜ25年間も要したのか。その理由としては、デバイスのイノベーションを待たなければいけなかった、インターネットが登場するまでの需要の成長が必要だった、標準化の推進が必要だった、通信キャリアさんが電話サービスから電話サービス以外のサービスビジネスモデルを組むという変化が現れるのを待っていたということが挙げられます。

25年の長きにわたるイノベーションの継続は、とても一企業でマネージできるものではありません。光大プロで技術の種播き支援、光 Ethernet のローカルネットワークでの実用化や、初期の FTTH 開発における通信キャリア、通信機器メーカー垂直統合型開発モデルを経て、特殊技術と設備を要する光回路、技術者集約型のシステム LSI、IEEE 標準化活動等のオープンな連携により、パッシブ光ネットワークが短期間で FTTH 本格導入レベルに成長できたのです。今後も開発に必要なリソースやリスク増大にしたがって、国家プロジェクトによる技術の種まき、支援、オープンな連携のイノベーションの重要性がますます高まるのではないかと思います。

パッシブ光ネットワークの進展



カーナビゲーションの場合

伊藤 肇（元矢崎計器株式会社常務取締役、元トヨタ自動車株式会社ボデー設計部室長） ナビゲーションの先達としては、船舶航海用の六分儀を使った天測航法や航空機の電波航法がありますが、現在地を測る、そしてどちらの方向に向かうかということを考える上で、カーナビゲーションの発展において非常に参考となる技術だと思えます。



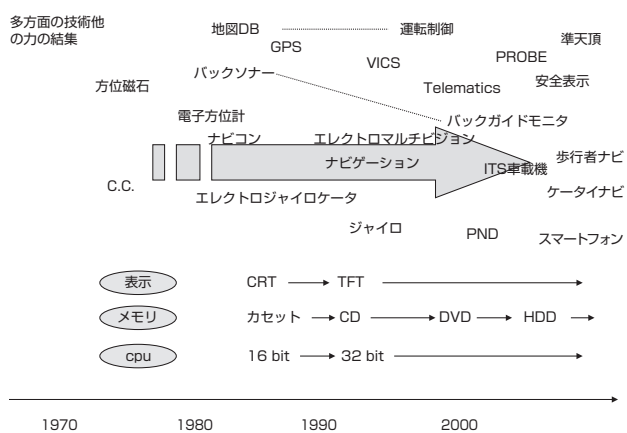
カーナビには30年の歴史があります。初期のカーナビは、推測航法という、「現在地入力」を入れて、方位センサーをもって現在地からどういう方向にたどって目的地に行くかというものです。この技術を1980年ごろ、日本の三つのカーメーカーがおよそ同時期に同じような技術・商品を出したことは非常に驚きです。企業の皆さんは世の中にどんな技術があるかということを探して、この技術を使えばこういうことができるのではないかと気がついて一斉に作り出した。私は20年間くらい設計に携わっていましたが、1年以内に同じような製品が出るということを過去何度も経験しています。“企業の競争”は大きなキーワードだといえます。1970年代後半から当時の通産省初めいろいろな省庁で行った今のナビゲーションの機能を一部持ったような研究や、表示、メモリ、CPU等の多方面な技術力の結集の賜物として1980年にカーナビが出てきた、ということが出来ます。その後、カーナビの商品力が向上し、多機能化し、車にとって大事な商品になっていきました。車に搭載するためには、車の作り方から考えなくては行けませんから、車側では標準装備化を準備するようになりました。

技術分野では、ナビをITS（Intelligent Transport Systems）の一分野と言っていますが、このITSを推進する部隊と、それを標準化する部隊の両方が並行して、ものを開発しながら標準化を行って世界同一の基準で進むというふうに進んでいます。ITS推進協議会は官学民共同でITSについて議論する日本の機関ですが、こういう機関が必ず全体を統括しながら動いているということで、メーカー単独で動いているということではありません。ここも大事なポイントです。

ヒューマンファクタについては、ヨーロッパでHARDIEガイドラインが作られました。日本が1980年以降、ナビを多く作ったため、日本の自動車工業会のガイドラインが世界標準の基礎のガイドラインというか、ヒューマンファクタの要件になりました。例えば、走行中に目的地設定できなかつたり、生活道路に入るとナビの地図の表示が消えたり、ルートガイドは県道優先で指示したり、走行中はテレビが見られない等というものですが、日本のこういう要件が世界の検討要件

になって、それがISO検討要件になり、結果的に国交省のガイドラインにもなりました。ナビは、運転そのものの要件ではありませんから、車の中では視線中央から少し離れたところに、しかし走行中に見ても事故が起きないようにということで、わりあい見やすいところに位置しています。先ほど表示する要件を言いましたが、メーカーは要件を守らなくては行けません、それ以外の競争領域で商品性を出して競争することがナビメーカーに課せられます。走行中に安全に見ることができ、運転者の役に立つ、こういう商品がカーナビの今後の姿だろうと思っています。

カーナビの進化の系譜



(総合討論)

80年代のWhatと現在のWhatはどう違うのか

小林 直人 鈴木さんから、根本的エンジニアリングということで俯瞰して一番重要なのはWhat、何をするかだということお話をしました。1980年ごろに光大プロがあったわけですが、その当時の状況と、今のWhatとはどう違うのでしょうか。

鈴木 浩 WhatはWhy、なぜ必要か、ということから出てきます。電気技術史の中で、技術が社会的背景、社会的ニーズからどのように生まれてきたかを分析したことがあるのですが、エアコンは初め冷房専用機だったものがインバータとヒートポンプの開発により冷暖房兼用機となり、最近健康志向やヒューマンファクタのようなことが出てきています。社会が何を必要としているかという社会的背景、あるいは私達の生活にとって何が大切なのか、Whatをどう作るかということに私達は力を発揮してきました。しかし、ここに来て、その辺がまたおろそかになってしまっていてHowばかり考えている気がする、根本に戻って議論ができればと思っています。

赤松 幹之 光における What は大量の通信を一発で実現することが狙いでしょうか。

北山 忠善 当初、鉄鋼プラントや化学プラント等でコンピュータをプロセスに導入して生産コントロールをするためのネットワークを張る媒体がなく、光が一番電磁誘導に強くて、ポイント・ツー・ポイント接続型ネットワークが普及しました。将来更にコンピュータ数、端末数が増加した場合のシステムにはポイント・ツー・ポイント接続型ネットワークは、装置が大きくコストも高くなることから、光レベルでネットワーク化をやってみようというのがパッシブ光ネットワークを選んだ理由です。光ネットワーク化し多重アクセスを可能にするにより装置の小型、低コスト化を図ることが必要と考えました。

伊藤 肇 1980年代はモータリゼーションが爆発したときです。道路は整備されていないし、道路標識もメチャクチャの時代。地図帳といっても簡単なものしかなく、自分がどこにいるのか、どっちを向いているのか分かる技術によってかなりの問題が解決できる時代だった。現在、ナビは表示器の中の一つの機能になっていますが、いろいろな機能を持っています。安全と環境だけが本命か、ナビは完成したのかというと、そんなことはありません。人間のフィーリングに合った、人間工学的にも良い、交通渋滞を広い目で見て緩和できるようなルートガイダンスについて研究の余地があると思います。

国の研究開発プロジェクトのサポートは機能したか

赤松 幹之 カーナビを実現するとき、そこでは国の研究開発プロジェクトのサポートも機能していたと理解しているのでしょうか。

伊藤 肇 そうだと思います。昔は省庁間の対立が非常にあったと思うのですが、ITS分野は良好かつ密接な関係があり、それを統括する内閣府もいます。ITS ジャパンは民と官と学を結びつける役割をして、民間180社が参加しています。これだけの会社が勝手にやれるなどということはありません。全体を調整し、キー競争領域が進んでいく、今はそういう状況だと思います。

北山 忠善 基幹通信網の光化という意味では、光ファイバー通信がやるべきことは極めて明確で、高速化すれば必ず安くなる。ただ、マーケットはそう大きくはありません。究極的に、将来はどの家からも高速データがくるだろうと思っても、そういう将来の大規模ネットワーク化を企業の中の開発投資だけで試そうとはなかなか思えませんでした。当時、

光大プロのインパクトがあった点は、光ネットワークのトライアルができたことだと思います。

鈴木 浩 課題を見つける、どういう科学技術が必要になるかを見極める、あるいはそれを融合させる、社会にインプリメントするというのは必ずしも一人の人、一つの組織ではできません。そのためにエコシステムという形でいろいろな企業が参加できる「場」をどうつくるか。国プロが今回の場合はかなりのコントリビューションをしたのかなという気がします。

伊藤 肇 国等の機関の協力があつたからうまくいったというお話はそのとおりなのですが、今、VICSは警察の車両感知器等から上がってくる情報です。次世代の渋滞情報で走行中の車両からの情報を使うプローブ化は、まだテストが始まった段階ですから、そういう機関を巻き込んでやらなければいけないということが一つ。もう一つ、日本のナビゲーションは地図がベースになっていると思いますが、地図をナビの表示だけではもったいないという話が総務省や国土交通省から出ています。「場」の中でそういうことを皆さんと協力して検討していけたらと思っています。

北山 忠善 かつてはメーカー同士が競争して、半導体のチップセット、光デバイスからASIC、ソフトウェア全部をその会社が持って戦っていたわけですが、今はそういう戦い方をするには時間もないし、投資する力もない。一企業がリソースとリスクをマネジメントできる範囲には限界があります。私はあまり“オープンイノベーション”という言葉を使ったことはありませんが、オープンな環境でうまくチームングできるかどうかで勝負が決まると思うのです。ベンチャーと組んだとして、必ずスペック通り最後まで仕上がるかどうか保証はありません。お互いにギランティされていない関係の中で、成功するまでやり遂げるプロジェクト運用、信頼関係、風土の醸成が成功には必要不可欠だと思います。

成功する要素選択と組み合わせをつくり、普遍化する方法について

フロア 議論が各論にいつているように思うのですが、小林さんが報告された「シンセシオロジーにおける構成」の「要素選択と組み合わせ」は非常に大事だと思っています。アウフヘーベン型、ブレークスルー型、戦略的選択型とありますが、どういうものが生き残っていくのか。発明的問題解決技法（TRIZ）、あるいは『創造工学』を書かれた市川亀久彌さんは、技術の進化のパターンがあり、それを外れたものは失敗しているといっていますが、成功するための思考プロセスをきちんとやっていく、その辺がシンセシオ

ロジーの中であってほしい。今ボトムアップでいっているのがちょっと気になったのですが、仮説からスタートしてもいいと思うのです。

小林 直人 ねらいとしてはそこまで行きたかったのですが、現在はまだ事例が集積していないことがあります。技術を構成するという考え方には解釈があり、選択と組み合わせには仮説が入っていると思いますし、最終的に社会実装にいくまでにループを回していかなければいけないということは、今までの分析でもかなり見えてきています。

鈴木 浩 シンセシオロジーの1巻2号で小林さんがリチャード・レスター教授にインタビューされて非常に興味深かったのですが、レスター教授は『Innovation』の中で、これからは解釈が大事だと言っています。いろいろなものをうまく解釈していく中でいろいろなイノベーションが起きてくるが、しかし、すべて解釈ではイノベーションは起きないとも言っています。分析的な部分と解釈的な部分のバランスをとりながらイノベーションを起こしていくべきだと。私は、そこはシンセシオロジーが力を発揮できる分野ではないかと思って、ぜひ期待したいと思っています。

小野 晃 フロアからのご意見は非常に高い理想であると思います。私達もそれを掲げてはいますが、雑誌としての『シンセシオロジー』は枠組みであり、議論し、学説を提示する「場」であると考えています。そこには二つ目的があります。一つは、純粋基礎研究は科学の方法論として確立していますが、応用研究や統合的な研究は、何がオリジナリティなのかということもよく分かっていないし、ある結論が真実かどうかを見極める確たる方法もまだない。『シンセシオロジー』はそういうものを開発する場であると思っています。これが第1の目的です。他方で、いろいろな技術分野の人たちが自分たちのシナリオや戦略、統合の方法を提示し合って、まずは交流しようというのが第2の目的です。統合的な研究や学問として確立していないところをみんなで提示し合って、ボトムアップで解を探っていこうというものです。『シンセシオロジー』はそういう議論の場を提供しているので、ぜひお考えの点に関して論文の投稿をお願いします、という雑誌の宣伝になってしまっていますが、そういう現状でございます。

Whyを考える環境をつくり、そのための障害を克服するために

フロア Whyを考えなくなった原因として、多くの人が教育問題を指摘しています。戦後、日本は目の前のことだけ一生懸命やれという教育をしてきた。キャッチアップの時代はそれで良かったが、今はそういうわけにはいかない。どうすればよいかということが一つ。

もう一つ、Whyを考えると、いろいろなブレイクスルーなことをトライ&エラーでやっていくしかないと思うのですが、今の日本の状況で何か新しいことをやろうと思うと、常に障害、規制が出てくる。失敗こそ多く学ぶべきことはあるのに、今の日本は口が裂けても「失敗」などとは言えない。そんな障害を乗り越えるためにサジェスションがあればいただきたいと思います。

鈴木 浩 答えがあればぜひ私もお聞きしたいテーマなのですが、Mark Stefik が書いた『ブレイクスルー』という本があります。私が訳したのですが、彼は「これから必要なリサーチは“ラディカルリサーチ”」だと言っています。これまでの基礎研究は、ある研究テーマを与えられて、それを解いて、障害にぶつかったら障害をどう乗り越えるかというテーマで研究する。応用研究は、あることを実現しようとして障害に当たると、それをバイパスするような別の手段で製品化する。これから必要なラディカルリサーチは、ある問題にぶつかったらその問題をテーマにするというように、テーマは変わっていくけれども、その中で広がりを持っていく。そこで他の技術や分野、社会技術的なものを一緒に入れて問題解決していくことが必要だと思います。

それから、Whyを考えるときに障害を乗り越えるサジェスションということですが、どうも日本人の悪い癖で、Howからどうしても入ってしまう。もう一度 Why を見られるようなタイミングを、この『シンセシオロジー』はそういった分野ではおもしろい場だと思いますので、ぜひこの場を活用していただければと、これは私の希望です。

赤松 幹之 私達は研究をいかに社会に生かしていくかに対していろいろな方法論を考え、その一つとして構成学を組み立てようと努力しています。今後ともご支援をいただきたいと思っています。

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いるか、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（すなわち事実に知識）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	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、すなわち社会的価値を記述する。	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	研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）を科学技術の言葉で記述する。	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	研究目標を実現するために選択した要素技術（群）を記述する。 また、それらの要素技術（群）を選択した理由を記述する。	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	選択した要素が相互にどう関係しているか、またそれらの要素をどのように構成・統合して研究目標を実現していったかを科学技術の言葉で記述する。	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を自己評価する。 本研究をベースとして将来の研究展開を示唆する。	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をしない。	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

改正 2009年3月23日

改正 2010年8月5日

1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿、および読者フォーラムへの原稿を受け付ける。なお、原稿の受付後、編集委員会の判断により査読者と著者とで、査読票の交換とは別に、直接面談（電話を含む）で意見交換を行う場合がある。

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

3.1.1 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、著者はオリジナル版の発行後2ヶ月以内に英語翻訳原稿を提出すること。

3.1.2 研究論文については、下記の研究論文の構成および書式にしたがうものとし、論説については、構成・書式は研究論文に準拠するものとするが、サブタイトルおよび要約はなくても良い。読者フォーラムへの原稿は、シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また読者への有益な情報提供などとし、1,200文字以内で自由書式とする。論説および読者フォーラムへの原稿については、編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

3.2.1 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。

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

3.2.3 原稿等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。図・表・写真を含め、原則として刷り上り6頁程度とする。

3.2.4 研究論文または論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文か論説）を明記する。

3.2.5 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。

3.2.6 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。

3.2.7 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。

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

3.2.9 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。

3.2.10 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。

3.2.11 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、執筆者が予め使用許可をとったうえで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。なお、使用許可書のコピーを1部事務局まで提出すること。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

3.3.1 見出しは、大見出しである「章」が1、2、3、…、中見出しである「節」が1.1、1.2、1.3…、小見出しである「項」が1.1.1、1.1.2、1.1.3…とする。

3.3.2 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。

3.3.3 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。）を記載のうえ、本文中における挿入位置を記入する。

3.3.4 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350 dpi以上）を提出する。原則

は刷り上りで左右15 cm以下、白黒印刷とする。

3.3.5 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350 dpi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7.2 cmの白黒印刷とする。

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

雑誌：[番号] 著者名：表題, 雑誌名(イタリック), 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(イタリック), 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

原稿の提出は紙媒体で1部および原稿提出チェックシートも含め電子媒体も下記宛に提出する。

〒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 広報部広報制作室内

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 広報部広報制作室内

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

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 4) to *Product Realization Research*^(Note 5), centered by *Type 2 Basic Research*^(Note 2).
- 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, M.Seto

Executive Editors: M.Akamatsu, K.Naito, T.Ishii

Editors: S. Abe, K. Igarashi, H. Ichijo, K. Ueda, A. Etori, K. Ohmaki, Y. Owadano, M. Okaji
A. Kageyama, T. Kubo, T. Shimizu, Y. Jigami, H. Tateishi, M. Tanaka, E. Tsukuda,
S. Togashi, H. Nakashima, K. Nakamura, Y. Hasegawa, J. Hama, K. Harada,
N. Matsuki, K. Mizuno, N. Murayama, M. Mochimaru, A. Yabe, H. Yoshikawa

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Website and 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.

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

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

1 Types of contributions

Research papers or editorials and manuscripts to the “Readers’ Forum” should be submitted to the Editorial Board. After receiving the manuscript, if the editorial board judges it necessary, the reviewers may give an interview to the author(s) in person or by phone to clarify points in addition to the exchange of the reviewers’ reports.

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*, except 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

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

Accepted articles will be published in *Synthesiology* (ISSN 1882-6229) in the language they were submitted. 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 within 2 months after the original edition is published.

3.1.2 Research papers should comply with the structure and format stated below, and editorials should also comply with the same structure and format except subtitles and abstracts are unnecessary. Manuscripts for “Readers’ Forum” shall be comments on or impressions of articles in *Synthesiology*, or beneficial information for the readers, and should be written in a free style of no more than 1,200 words. Editorials and manuscripts for “Readers’ Forum”

will be reviewed by the Editorial Board prior to being approved for publication.

3.1.3 Research papers should only be original papers (new literary work).

3.1.4 Research papers should comply with various guidelines of research ethics.

3.2 Structure

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

3.2.2 Title, abstract, name of author(s), keywords, and institution/contact shall be provided in Japanese and English.

3.2.3 The manuscript shall be prepared using word processors or similar devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheets of paper. The length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.

3.2.4 Research papers and editorials shall have front covers and the category of the articles (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheets.

3.2.5 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.

3.2.6 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 society.

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

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

3.2.9 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 contributions to the paper are included.

3.2.10 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 part of the article.

3.2.11 If there are reprinted figures, graphs or citations from other papers, prior permission for citation must be obtained and should be clearly stated in the paper, and the sources should be listed in the reference list. A copy of the permission should be sent to the Publishing Secretariat. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

3.3 Format

3.3.1 The headings for chapters should be 1, 2, 3..., for subchapters, 1.1, 1.2, 1.3..., for sections, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3.

3.3.2 The text should be in formal style. The chapters, subchapters, and sections should be enumerated. There should be one line space before each paragraph.

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

3.3.4 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.

3.3.5 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.

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

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title*

of journal (italic), Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

Book – [No.] Author(s): *Title of book* (italic), 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 Website and Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Industrial 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 Website and Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Industrial 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

この号の論文で取り上げた研究成果は、いずれも独創性に優れ、実用化が期待される技術ですが、技術がどのように進化して新しい技術として確立されるか、また、技術開発の実用化までの死の谷をどのように乗り越えるかという観点からは、異なる解釈になります。

技術の進化という観点に立てば、「レーザー援用インクジェット技術の開発」では、新しい表面加工法であるエアロゾルデポジション法を成功裏に研究開発した経験に基づき、インクジェット技術の高度化に課せられた信頼性や、これまでの技術との差別化という課題を解決するソリューションとして、レーザー援用法を考案し実証試験を通じて微細配線技術として確立しています。また、「マイクロ燃料電池製造技術開発への挑戦」は、応用可能性の大きいセラミック集積化プロセスのアイデアで、燃料電池のコンパクト化を推進・実証する研究であり、別の技術との融合により技術が進化する例となっており、技術がどのように進化していくかを示す好例となっています。

一方、死の谷を乗り越えるうえで、社会との接点を持ち、社会に受け入れられるように研究開発している例として、「有機化合物のスペクトルデータベース」が挙げられます。データベースが広く利用されるようになるプロセスは、社会に受容されていくプロセスとして汎用的なものであり、その方法論を分析した好例となります。

また、「研究戦略の形成とそれに基づいた構成的な研究評価」では、戦略形成の一環として研究プログラムの目標とそれを達成するためのシナリオの設定が大切であることを強調し、その研究戦略に沿った研究評価を行うことの重要性を指摘しています。さらに研究評価をするにあたっては研究戦略と対比しつつ演繹・帰納・仮説形成による推論をもとに要素評価を組み合わせた構成的な評価法が重要なことを述べ、全体として死の谷を越える戦略とその評価の重要性を示しています。

さらに、二つの討論会は、死の谷を越える汎用的な方法論に対して、技術シーズ側から技術の進化がどのようにイノベーションに結びつくかを議論している「オープンイノベーションハブに向けた技術統合の方法論」と、社会技術の出口としての社会との接点から、競争力の強化、シンセシスのレベルを上げる体制、出口を循環型社会に向ける設計科学の推進を議論している「日本のものづくりとシンセシオロジー」です。二つの議論が死の谷を越えるための方法論として、死の谷の入口側としての技術開発の進化の視点と出口側の社会技術としての確立の視点の二つの逆方向からの視点の議論であり、死の谷を越える汎用的な議論の両面をみることができます。今後、死の谷越えの方法論のシンセシスについて、議論の体系化を進めることの重要性が再認識されます。

(編集委員 矢部 彰)

Synthesiology 4巻1号 2011年2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、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：石井 武政

委員：阿部 修治、五十嵐 一男、一條 久夫、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、大和田野 芳郎、岡路 正博、景山 晃、久保 泰、清水 敏美、地神 芳文、立石 裕、田中 充、佃 栄吉、富樫 茂子、中島 秀之、中村 和憲、長谷川 裕夫、濱 純、原田 晃、松木 則夫、水野 光一、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

事務局：独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部広報制作室内 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

〒305-8568 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広報制作室内

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。



Messages from the editorial board

Research papers

Development of laser-assisted inkjet printing technology

-Wiring technology to achieve high throughput and fine patterning simultaneously-

A.Endo and J.Akedo

Formation of research strategy and synthetic research evaluation based on the strategy

-Toward research program evaluation as a creative activity-

N.Kobayashi, O.Nakamura and K.Ooi

Development and release of a spectral database for organic compounds

-Key to the continual services and success of a large-scale database-

T.Saito and S.Kinugasa

Challenge for the development of micro SOFC manufacturing technology

-Compact SOFC using innovative ceramics integration process-

Y.Fujishiro, T.Suzuki, T.Yamaguchi, K.Hamamoto and M.Awano

Talk

“Monozukuri” (manufacturing) of Japan and synthesiology

H.Nariai, A.Tsuge and A.Yabe

Report

Synthesiology workshop

-Methodology of technology integration toward establishing an open innovation hub-

Editorial policy

Instructions for authors