

Synthesiology 論文における構成方法の分析

— 研究の成果を社会につなげるための構成学的方法論をめざして —

小林 直人^{1*}、赤松 幹之²、岡路 正博³、富樫 茂子⁴、原田 晃⁵、湯元 昇⁶

2008年に創刊された学術雑誌*Synthesiology* (構成学)に掲載された70編の研究論文を対象にして、構成の方法論を分析した。その結果、研究分野ごとに構成方法に特色があり、バイオテクノロジー分野やナノテクノロジー・材料・製造分野ではブレイクスルー型の構成に特徴があり、標準・計測分野で戦略的選択型が多いことが判明した。また、全体としては共通の構成方法として、本格研究においては「技術的な構成」と呼ぶべきものの方法論が重要であり、その研究成果を社会に導入させるためには、さらに「社会導入に向けた構成」と呼ぶべきものも連続して起こすことが特徴の一つであることが明らかになった。その際、前者においても後者においてもフィードバック・プロセスが見られるが、後者においては社会的試用によりフィードバック・プロセスを何回も回していくスパイラル・アップとも呼ぶべきダイナミックな構成方法が観察された。

キーワード: シンセシオロジー、構成学、本格研究、第2種基礎研究、技術的な構成、社会導入のための構成

Analysis of synthetic approaches described in papers of the journal *Synthesiology*

— Towards establishing synthesiological methodology for bridging the gap between scientific research results and society—

Naoto KOBAYASHI^{1*}, Motoyuki AKAMATSU², Masahiro OKAJI³, Shigeko TOGASHI⁴, Koh HARADA⁵ and Noboru YUMOTO⁶

The methodology of synthesis has been studied by analyzing 70 papers published in the academic journal, *Synthesiology*, launched in 2008. As a result, it has been found that each technological field has its distinctive features, e.g. there are many break-through type syntheses in biotechnology and nanotechnology, and the strategic selection types are commonly observed in the metrology and measurement field. In addition, we have found a common synthetic method as a whole. A kind of methodology called “technological synthesis” has been found to be important in the *Full Research*, and continuous follow-up process called “synthesis for social introduction” is also found to be one of the features to introduce the research results to society. Both the former and the latter involve feedback processes, and moreover, in the latter case, a dynamic synthetic method that can be called a spiral-up process is observed, where many feedback processes are repeated successively through social trials.

Keywords: *Synthesiology*, synthetic study, *Full Research*, *Type 2 Basic Research*, technological synthesis, synthesis for social introduction

1 はじめに

学術論文誌「*Synthesiology* (構成学)」^{用語1}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構成していくか、という科学的知の統合の実践に関する研究論文を掲載することを目的としている。具体的には、研究の目標とその社会的な価値の記述、そこに至るシナリオの明確化、そのための要素技術

の選択と統合、結果の評価と将来展開等を論文の中に記述することが求められている^[1]。これらの研究論文の蓄積によって得られる研究の方法についての知識がさらなる本格研究^{用語2 [2]}の実践につながり、それらの研究成果が社会に浸透してイノベーションに寄与することができれば、新しいスタイルの論文誌として大きな役割を果たすことができると考えられる。イノベーション創出には要素技術がそれ

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 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 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6、3 (株)チノー 〒173-8632 板橋区熊野町 32-8、4 産業技術総合研究所 評価部 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2、5 産業技術総合研究所 東北センター 〒983-8551 仙台市宮城野区苦竹 4-2、6 産業技術総合研究所 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6

1. Center for Research Strategy, Waseda University 513 Wasedatsurumaki-cho, Shinjuku-ku 162-0041, Japan * E-mail: naoto.kobayashi@waseda.jp, 2. Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan, 3. CHINO corporation 32-8, Kumano-cho, Itabashi-ku 173-8632, Japan, 4. Evaluation Department, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan, 5. AIST Tohoku 4-2-1 Nigatake, Miyagino, Sendai 983-8551, Japan, 6. AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan

Original manuscript received September 21, 2011, Revisions received November 7, 2011, Accepted December 28, 2011

だけで貢献するわけではなく、さまざまな領域の知識や要素が相互に関連して行われるものであり、社会に導入されるためにはこれらを統合して、具体的な技術として構成しなければならない。そのために研究開発における構成の方法論を明らかにしていくことは有益であると考え。

そこで、我々は、*Synthesiology* 1巻1号から3巻4号までの約70編の論文のうち、環境・エネルギー分野9編、ライフサイエンス(バイオテクノロジー)分野10編、ライフサイエンス(人間生活技術)分野7編、情報通信・エレクトロニクス分野12編、ナノテクノロジー・材料・製造分野14編、標準・計測分野12編、地質分野6編を対象として、それぞれの専門分野を背景として構成的研究の方法を分析し、さらに共通的な方法論の抽出を試みた。具体的には、第2章で要素技術の構成方法の基本型を、第3章で分野ごとの構成方法の分析を、第4章ではそれを基にした構成方法における分野の特性を示した。その上で、最後に第5章において、構成方法としての必要性が明らかになった「技術的な構成」と、それに続く「社会導入に向けた構成」の特徴を示した。

この論文は、このように既存論文の分析(アナリシス)という方法により、研究成果を社会につなげるための構成学という新しい“学”を創出(シンセシス)することに貢献することを目指している。

2 要素技術の構成の基本型

筆者の一人(小林)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、新概念を創出する方法)^{用語3}^[3]、②ブレークスルー型(重要要素技術に周辺技術を結合させ統合技術に成長させる方法)、③戦略的選択型(要素技術を戦略的に選択し構成を行う方法)を、まず要素技術の構成の基本型の例として紹介しておく^[4]。これは*Synthesiology*の発刊からごく初期の研究論文12編から抽出した基本型である。

①アウフヘーベン型の例としては、西井による「高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ」の研究で示されたガラスモールド法とインプリント法を組み合わせたものが挙げられる^[5]。この研究では、これまで両立が困難であると考えられていた両法の統合を行って新技術を産み出した。この例を基にして、この論文ではアウフヘーベン型は「これまで統合が困難であると考えられていた複数要素間の複雑な構成方法」としてやや広い意味で使用している。また、その概念には具体的には、“構造”、“機能”、“実体”等の統合・構成があると考えられる。

また、②ブレークスルー型の例としては舟橋らによる「熱発電を利用した小型コジェネシステムの開発」を挙げる

ことができる^[6]。ここでは良好な熱電材料であるコバルト系層状酸化物の発見が一つのブレークスルーとなって、それに周辺要素技術を付随させて統合技術が形成される例が示されている。

さらに、③戦略的選択型の例としては岸本による「異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略」を挙げることができる^[7]。この研究では、化学物質のリスク評価という研究の目標に至るために幾つかの技術要素をシリアルに選択していくというのが構成のプロセスである。図1にこれらの構成方法の基本型の概念図を示す。これらは構成方法の中の極めて基本的な素過程と言うべきものであり、これらを並列的あるいは多段に組み合わせたり、ニーズや実環境との相互作用の中で改良していく等のプロセスが見られるが、以下の論考では以上の素過程を念頭に置いて検討を進めた。なお、表1に分野ごとの構成の類型分類を示すが、単一の基本型だけではなく、それらを組み合わせた類型への分類も含まれる。詳細は以下で述べる。

3 技術分野ごとの構成的方法の分析

(1) 環境・エネルギー分野

環境・エネルギー分野に分類される研究は、環境アセスメントやリスク評価等の評価技術から、環境負荷物質の挙動と抑制、再生可能エネルギー、省エネルギー、生産効率化等極めて幅広い課題に及び、これまでの*Synthesiology*の論文で示された方法論もさまざまである。しかし、①環境負荷物質の低減、二酸化炭素の排出抑制への貢献、社会的・行政的な規制への貢献等、社会ニーズが明確である特徴をもっており、これを果たすため、②すり合わせ型や科学に裏打ちされた要素技術の多段的結合等の多面的な技術統合を行い、③要素技術の見直しやエンジニアリングの立場からの再構成によって既存技術をさらに高度化している、等の特徴をもっている。

例えば、「異なる種類の化学物質のリスクを比較する」と

1. アウフヘーベン型



2. ブレークスルー型



3. 戦略的選択型



図1 構成方法の基本型

表1 分野ごとの構成の類型分類

	アウフヘーベン	ブレークスルー	戦略的選択	螺旋	アウフヘーベン+戦略	ブレークスルー+戦略	ブレークスルー+螺旋	戦略的選択+螺旋	ブレークスルー+戦略+螺旋	
環境・エネルギー	2	1	3	0		3				9
ライフサイエンス(バイオテクノロジー)		4	2	2		1	1			10
ライフサイエンス(人間生活技術)	1		4			1		1		7
情報通信・エレクトロニクス	1	2	6				1	1	1	12
ナノテクノロジー・材料・製造	2	4	5		1	2				14
標準計測		1	11							12
地質			3			1		2		6
	6	12	34	2	1	8	2	4	1	70

いう社会ニーズに対しては、リスクの大きさを共通指標で表すことが必要になる。しかし、必要な要素データはこれまでのリスク評価で利用されてきたものでは不十分であることから、こういった新たな社会ニーズからブレークダウンして必要な要素データを決定し、これを既存データから推定する方法を検討した。このようにして得られた要素を再統合することによって共通指標を基にしたリスクの算出を可能にしている^[7]。したがって、社会ニーズに適した要素技術を戦略的に選択して統合する方法を採っており、前章で述べたように戦略的選択型の構成と言うことができる。

環境負荷物質の低減を図る技術開発の例としては、葭村らによる輸送用クリーン燃料の製造触媒の開発がある^[8]。ディーゼル排ガスの無害化のためには、原料である軽油中の硫黄成分の大幅な低減が必要という社会的ニーズがある。そのためには、脱硫触媒を高性能化する必要があるが、原著者らはこのためのブレークスルーポイントは触媒調製技術にあると同定し、この技術に必要な複数の要素課題にブレークダウンして共同研究者（機関）と分担を明確にしている。担当課題をさらにブレークダウンして、鍵となる要素技術を化学的側面とエンジニアリング的側面から検討し、

重要要素技術としてラボレベルの調製法を完成させ、触媒メーカーとの共同研究により工業化を実現した。したがって、社会ニーズからブレークダウンした必要な要素技術が、さらに細かな要素技術の集まりになった多段的構造をもっていると言える。下位の要素技術をブレークスルー型の研究で解決した上で統合化していくので、全体のシナリオとしては「戦略的選択型+ブレークスルー型」の構成であると言える（図2）。

この型に属する他の例としては、鈴木らによる「コンパクトプロセスの構築」^[9]がある。化学工程からの環境負荷物質の排出抑制という社会ニーズに対し、水や二酸化炭素の超臨界流体を有機溶媒の代わりに利用するという、理論的には可能であるはずだがなかなか実用化されていない技術を、個々の要素技術にブレークダウンして再検討を行い、緩慢な反応のため最適条件に達するまでに余計な反応が起こっていることを見出し、急速に最適条件に達するための急速加熱・加圧法を重要な要素技術として開発し、他の周辺要素技術とともにプロセスを構成したものである。また、デチューニングというあえて理想状態からずらすことをブレークスルーとして、最適状態を作り出すことができている。

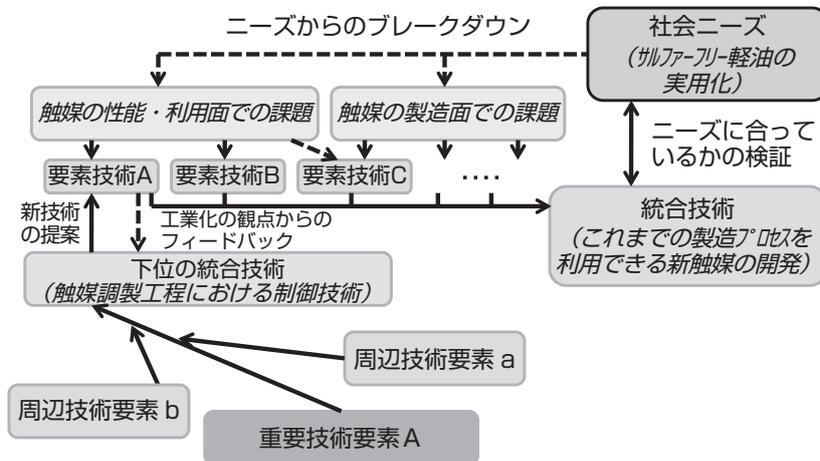


図2 環境・エネルギー分野の戦略的選択+ブレークスルー型の構成方法

環境エネルギー分野においては、必要な要素技術を統合して社会ニーズを満たすことを目指すことから、具体化されたニーズに対応するための構成が不可欠である。最初の段階で戦略的選択を行って要素技術を特定して、それがこれまでの研究開発の成果やそれを目的に合わせて改良して用いる場合には、全体として戦略的選択型のシナリオをとることができる。このタイプの構成が3件の論文にみられる。一方、低環境負荷技術を構築する場合のように、要素技術の中に実現に大きな課題があるものが含まれている場合には、それに対するブレークスルー技術が必要となり、それが実現できれば社会ニーズに応えられることになる。このような場合には、全体としては「戦略的選択型+ブレークスルー型」の構成というシナリオを進めることになり、このような例は3件あった。

この他、アウフヘーベン型が2件、ブレークスルー型が1件見られ、その分類結果を表1に示す。

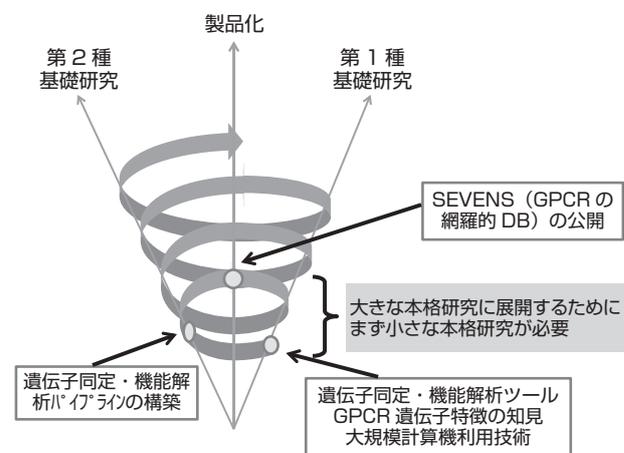
(2) ライフサイエンス分野

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構成の方法として、循環的発展が挙げられる。諏訪らはバイオインフォマティクスにより創薬ターゲット遺伝子の網羅的機能解析技術を開発した^[10]。2000年から始まった研究では、第1種基礎研究として遺伝子同定・機能解析ツール等の要素技術開発が、第2種基礎研究として要素技術の組み合わせによる遺伝子同定・機能解析パイプラインの構築が、製品化研究として細胞膜受容体GPCRの網羅的データベースの2003年の公開までが一連の本格研究となり、コア技術が構成された。一方でこのコア技術は次の発展のための第1種基礎研究となり、新たな機能予測プログラムの開発として結実した。さらに、この技術はヒト以外の生物への応用への第1種基礎研究として次の発展に寄与している。この間、コア技術に対しては、バイオインフォマティクス研究者、実験研究者の両面からのフィードバックがかかり、これによって社会への広まりが拡大して、循環的により大きな本格研究に順次発展するかたちで長期成熟されてきている。

同様の循環的発展は、近江谷らの生物発光蛋白質を用いた本格研究でも見られる^[11]。近江谷らは生物発光に関する知的好奇心から出発し、発色光の異なるホタルの発光蛋白質を発見した。そして、この発光蛋白質を生物機能検査のためのブレークスルー技術として展開することにした。そのために、哺乳類細胞でも発光するように遺伝子構造を改変して、細胞内の複数の遺伝子発現を同時に検出する技術を開発した。哺乳類細胞で使えることから、開発した技術は企業との共同研究により、化学物質等の人への影響を細胞レベルでスクリーニングするための遺伝子発現検出

キットとして製品化に結びついている。この過程は一見すると第1種基礎研究から直ちに製品化につながった比較的単純な本格研究のように見えるが、第2種基礎研究による新しいコンセプトの正しさの実証、企業との共同による製品化、製品の社会受容というそれぞれの段階での努力の賜物である。また、近江谷らはここから再び第1種基礎研究に回帰し、さらに多色化を目指す等、コンセプトをさらに大きく発展させることの重要性を強調している。全体としては、ブレークスルー型構成の後に循環的発展をとるといふシナリオと言える。

このような循環的発展は他分野でも見られるが、バイオ産業では、特に他の産業にはない特徴に由来していると考えられる。ハーバード大ビジネススクールのゲイリー・P・ピサノ教授は、バイオ産業をサイエンスに強く軸足を置くビジネスと位置付け、以下のような分析をしている^[12]。第一に、バイオ産業はサイエンスに軸足があるにも関わらず、基盤となる学問である生物学は物理学や化学に比べてはるかに成熟しておらず、基盤テクノロジーの不確実性が極めて高いことが特徴である。例えて言えば、使用環境のわからないCPUをつくるようなものということである。バイオ産業の第二の特徴としては、「すり合わせ型」である。パソコン等は問題をパーツに分解し、パーツごとの最適化が可能な「組み合わせ型」と言われる。これに対して自動車等は問題をパーツに分解不可能であり、問題領域を横断した同時最適化が必要な「すり合わせ型」と言われる。バイオ産業は後者の「すり合わせ型」であるが、第一の特徴と組み合わせると、つくってみるまで走るかどうかわからない自動車をつくるようなものと言えよう。バイオ産業では、このように製品化してみないと使えるかどうかかわからない、という不確実性が他分野よりも大きいため、まず市場で小さ



GPCR: Gタンパク質共役型受容体(細胞膜にある創薬ターゲットタンパク質)

図3 ライフサイエンス(バイオテクノロジー)分野における螺旋型の構成方法

いものでも製品化することが重要と考えられる。すなわち、大きな本格研究に展開するためには、まず小さな本格研究が必要と言える。筆者らは、このような構成方法を螺旋型と名付けた（図3）。

こういった螺旋型、およびブレークスルーと螺旋との組み合わせの型の構成は3件の論文で見られたが、こういった螺旋型だけでなく、バイオセンサーをコアとした4件の論文においては、コア技術によるブレークスルー型の構成をとっている。西宮らによる不凍蛋白質の大量精製^[13]や大串による再生医療の実用化^[14]の二つの研究においては、それぞれ実用化に必要な要素技術を選定し、それらを統合しており、戦略的選択のシナリオで進めている。この他家村らによる、リザーバを使って1系統のポンプを使うという全く新規の方法でクロマトグラフィーを高度化したブレークスルー型の構成もあった^[15]。（表1）

ライフサイエンス（人間生活技術）分野においては、最終的に製品を使う人の特性を考慮した製品設計を行うことが研究開発の目的である。そこでは、まずは人間の特性を科学的に理解・把握することが基本となる。それは第1種基礎研究になるが、このとき人間理解を過度に追求してしまうと、第2種基礎研究へのシフトがなかなかできなくなる。明らかにしようとしている人間特性がどのように使われるかを明確化して、そのために必要な研究シナリオを構成していく必要がある。

持丸らによる個人にふさわしいメガネフレームの研究開発の例では、個人個人にあった形のメガネフレームを提供することを目標とし、さらに客自身が自分の好みのフレームデ

ザインを選ぶのを助けるために必要な技術を開発した^[16]。第1種基礎研究としては、頭部形態に適合したメガネ枠の形状設計技術の開発であるが、さらにメガネを購入するユーザーにそれを適用するために必要となる要素技術を選定して、それを統合した。この研究の特徴は3次元形状モデル（頭部相同モデルと呼ぶ）を開発したことで、簡易計測にも、形状のパターン分類にも、また感性的評価にも使うことができ、効率よくこの全体のゴールを達成できたと言える。したがって、全体のシナリオとしては、「戦略的選択型+ブレークスルー型」による構成である。実際、ブレークスルー技術が得られないと構成の効率が悪くなり、途中で挫折しかねない。コア技術をブレークスルー技術として種々に展開できることは、第2種基礎研究の大きな力になる。

倉片らによる高齢者の聴覚特性に適合した報知音を設計するためのアクセシブルデザインの研究^[17]においては、高齢者の何割の人に聞こえるように設計するのが重要になる。したがって、人間の聴覚特性についても厳密な特性把握ではなく、むしろ人による違いすなわち特性値の分布の把握を行っている。そして、この考え方は、製品の報知音が実際に使われる家庭での条件（聴取条件）の把握にも適用されている。報知音の妨害となる台所での流しの音やテレビの音等の騒音レベルを計測して、その分布を知ることによって、高齢者でも聴き取れる音量を定めることができる。このように人間特性だけでなく、実際の生活場面に適用するために把握すべき生活環境の特性が何であるかをよく検討することが、こういった戦略的選択型の構成には必要である（図4）。

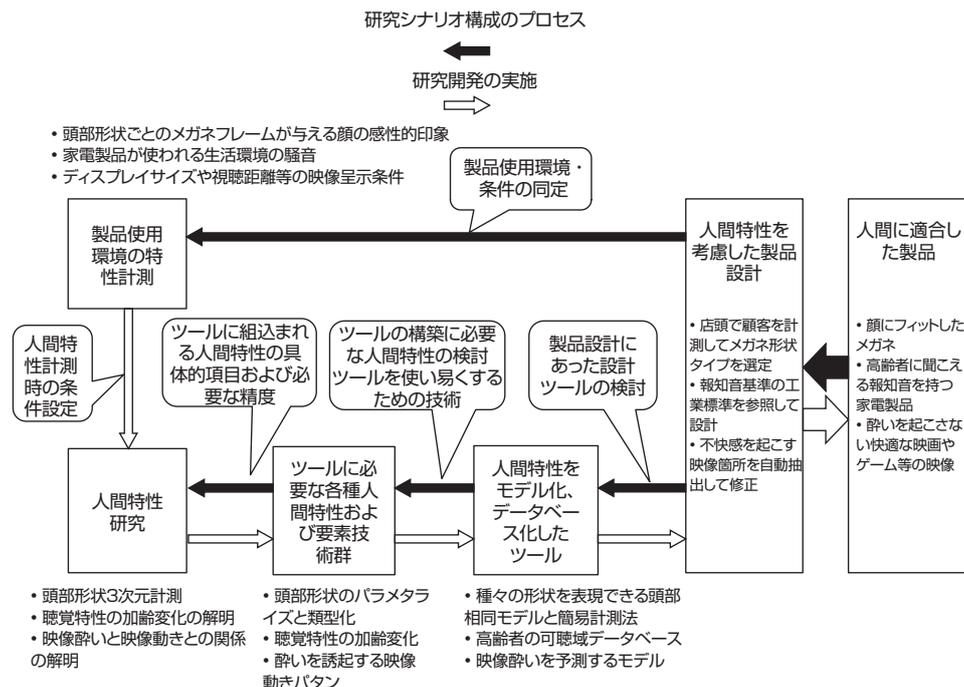


図4 ライフサイエンス（人間生活技術）分野における戦略的選択型の構成プロセス

理解された人間特性をどのようにして製品設計につなげるかについても、研究シナリオの設定が必要である。メガネフレームの研究例では、簡易な形状計測と感性的評価ができる装置を店頭に置くことで、個人に適合するメガネ枠を選定するというシナリオを採用している。一方、アクセシブルデザインの例では、製品設計に反映されるためのツールとして工業標準を採用するシナリオがある。この工業標準を参照すれば容易に高齢者対応の製品設計ができるようにしている。また、氏家らによる映像酔いが起きない動画を提供するための研究^[18]においては、工業標準化を最初は目指したが、それだけではなく第1種基礎研究で明らかにした映像酔い特性を組み込んだ映像評価システムを構成した。これを映像制作者が利用して、制作した映像が視聴者に与える影響を知ってもらって、必要ならば修正してもらうこととした。こういった制作者が使えるツールを構築するために必要な要素研究を実施しており、戦略的選択による構成と言える。池田らによるカーナビゲーションシステム（カーナビ）の開発^[19]も同様であり、最終的に人に使ってもらうものを構成するこの分野においては、最終的にどのようにしてユーザー（エンドユーザーあるいは製品設計者）に使われるかを想定して、それをゴールとして設定する。そのために必要な要素技術を事前に考えて、それを戦略的に選択して全体を構成することが基本的な方法となっている。この他、久保らによるIH調理器に対して感性的リードユーザーが製造者の観点とは異なる価値を作り出したというアウフヘーベン型の構成^[20]、そして万博の場等でユーザーに試用を行ってもらって、戦略的選択型に螺旋型を加えたサイバーアシスト^[21]があった（表1）。なお、サービス工学の理論化を扱った論文についてはここでは含めなかった。

(3) 情報通信・エレクトロニクス分野

情報通信・エレクトロニクス分野では、エレクトロニクスやフォトリソグラフィ等のデバイス技術分野と、ソフトウェア分野では構成方法がやや異なる。デバイス分野の構成の方法論は、個々の要素技術が他の要素技術と独立しておよそ明確であり、その中に特に全体のブレークスルーとなる主要要素技術があり、それが幾つか組み合わせさせて技術が構成されていくという型が見られる。

特徴的な例として、湯浅らによる「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」の研究が挙げられる^[22]。ここではMgO（酸化マグネシウム）結晶のトンネル障壁による巨大TMR（トンネル磁気抵抗効果）が実現されたという非常に大きなブレークスルー技術に加えて、極めて特殊な結晶成長様式を用いたCoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ（磁気トンネル接合）素子の実現による量産技術の達成という二つのブレークスルー技術が重なって実

用化に成功しており、これらの連続した大きなブレークスルー技術が効果を発揮した。これは図5に記したように、科学的ブレークスルーと革新的製造技術が重なった、連続的ブレークスルー型と言える。こういったブレークスルー型の構成は佐藤（証）らによる暗号モジュールの研究開発でも見られる^[23]。また前述の西井らによる高機能光学素子作成では、これまでガラスの加工に用いられていたガラスモールド法に、高温での加工が困難であったインプリント法を組み合わせ、極めて高精度な高機能光学素子を実現したものであり、今まで両立が困難で二つの方法を組み合わせたアウフヘーベン型の典型であると言える^[4]。また荒井によるSiC（炭化ケイ素）半導体のパワーデバイス開発^[24]では、実用化するための要素技術と課題を抽出し、それらを個々に実現して統合し実用技術にまで至らせるプロセスが記されていて興味深い。構成の型としては、戦略的選択型と言えるであろう。

一方、ソフトウェア分野やシステム分野の論文では、要素技術の選択とその統合が行われる過程で実社会との相互作用が大きな鍵となる。田中のGridシステムのようなミドルウェア活用のシステム構築^[25]にあたっては戦略的選択的な要素技術の選別と組み合わせが示されており、ハードウェアシステムとも共通して比較的システム構築が明確である。このような戦略的選択型の構成は6件の研究開発で行われていた。本村の研究^[26]では、ベイジアンネットを人間行動のモデル化に用い、それを中核技術としてさらにセンシング技術やインタビュー技術を付け加えていくという意味でブレークスルー型ではあるものの、ユーザーとの相互作用が「社会循環」（持丸の指摘^[26]、図6）として大きな意義をもっているという点で、ブレークスルー型と螺旋型の組み合わせによる構成と言うことができよう。

佐藤（雄）らによるインテリジェント車椅子の研究開発においては、全方向ステレオカメラがブレークスルー技術であるが、これをコアにして他の技術を戦略的に選択して電動車椅子を構成するとともに、ユーザーに試用してもらった結果を開発にフィードバックするという3つの構成の組み

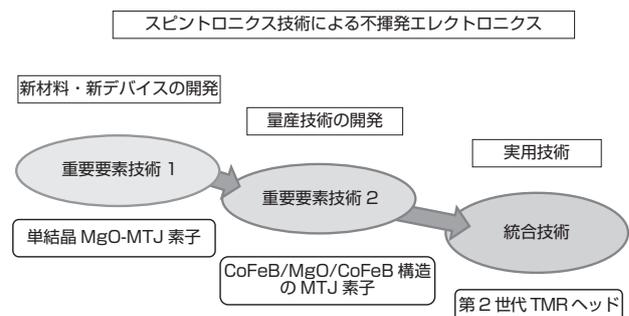


図5 情報通信エレクトロニクス分野におけるブレークスルー型の構成方法

合わせが論文に記載されている^[27]（表1）。

ハードウェア分野では要素技術の定義と選択とそれらを用いた構成方法が比較的シンプルで明確であり、ミドルウェアの構成においてもおよそ似通っているものの、人間や実環境との相互作用が増えて大きな意味をもつソフトウェアやアプリケーション分野では、定義され選択された要素技術が一方的に統合されていくのではなく、社会環境との相互作用の中で進化（深化）していくことが特徴とすることができる。

(4) ナノテクノロジー・材料・製造分野

ナノテクノロジー・材料・製造分野では、浅川らによる有機ナノチューブの大量合成方法を構成例の一つとして挙げることができる^[28]。これは内部にナノ微粒子やタンパク質等を包摂することにより広い分野への応用が期待されている有機ナノチューブの大量合成技術の開発に関するものである。その技術はシーズ主導ブレークスルー型の典型例の一つであると言えるが、さらにこれを作るためにとても詳細な分子設計とその統合技術でこの量産化に至って、その後さらに用途開拓をいろいろな企業と共同して行い実用化に向けて進んでいる（図7）。こういったブレークスルー型は坂本らによる難燃性マグネシウムの研究^[29]等、合わせて4件の研究開発で見られた。

一方、茶屋原らによる大型単結晶ダイヤモンド・ウェハの技術開発^[30]では、マイクロ波プラズマCVD法、異常成長粒子発生の抑制、大型化等の要素技術を戦略的に選択して統合している。要素技術の一つであるウェハの大型化については「繰り返し側面成長」というブレークスルー技術も含まれているが、全体としては戦略的選択によって構成が進められている。こういった戦略的選択型の構成は、光触媒技術等5件の研究開発で見られた。また小林（慶）らは、鑄造と粉末冶金の技術を組み合わせたプロセスでFe-Al金属間化合物を利用した高硬度、高強度の材料を開発した^[31]。これは乾式の新しい粉末冶金合成とこれまでの鑄造法を組み合わせる新たな方法を作り上げたアウフ

ヘーベン型の構成の例であり、高尾らによる紫外線防御化粧品の研究開発^[32]にもアウフヘーベンが行われている。

他方、製造分野での特徴的な例として、明渡らによるAD（エアロゾルデポジション）法によりさまざまな製品を開発した製造技術がある。ここではセラミック粒子を常温で固化・緻密化できるAD法が大きなブレークスルーとなって、それをコアに戦略的選択型の構成によって静電チャックやMEMS スキャナー等の製造に適用し、低コスト、低環境負荷、高機能、低資源消費の「ミニマルマニファクチャリング」の概念にあたる製造法を構成している^[33]。中村らを取り上げたPAN系炭素繊維に関する研究開発^[34]もこういった「ブレークスルー型と戦略的選択型」の組み合わせと言える。

また、渡利らによるセラミックス製造の省エネプロセスの研究^[35]では、省エネのために開発すべき技術を精緻に検討した上でバインダー技術の改良に注目し、その評価と改良のための優れた技術を確認している。これは明確な目的に向けて戦略的に要素技術を選択した上で、科学的なアプローチで改良技術を確認したという意味で、「戦略的選択型+ブレークスルー型」の組み合わせと見えよう。さらに、北らによる製造の全行程を考慮した資源およびエネルギーの使用合理化に関する研究^[36]ではアルミニウム製造の全行程におけるエクセルギー（環境を基準としたGibbsの自由エネルギー）の解析を行い、省資源・省エネルギーに資する鑄造プロセスの重要な指針を得ている。これは明確な目標に向けて評価すべき要素を逐次抽出して分析を行ったという意味で戦略的選択型構成方法と言えるであろう。

ナノテクノロジー・材料分野の構成方法の特徴は、電子デバイス等のハードウェア技術の構成方法と大きく異なることはない。材料等はその研究成果がそのまま市場に完成品として出るという面が少なく、後の要素技術として使われる場面が多いため、ある性能仕様を満たすことが主として要請される場合は、比較的構成法が明確である。ただし、種々のニーズ側との相互作用がある場合は、そのフィー

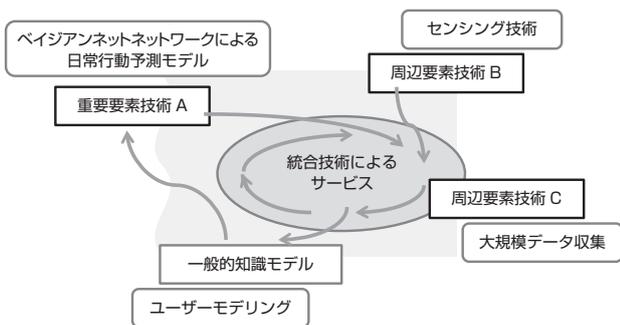


図6 社会循環型の構成方法（文献 [26] の図6を改訂）

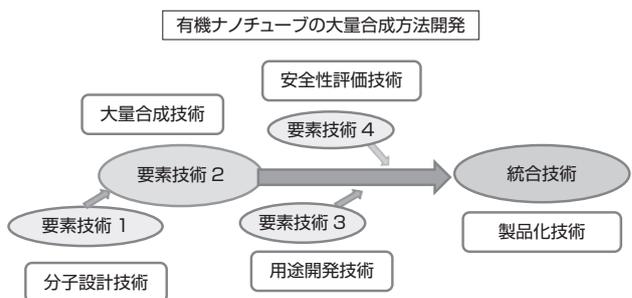


図7 ナノテクノロジー・材料・製造分野におけるブレークスルー型の構成方法

ドバックがそのまま構成法にも反映される可能性が高い。一方、製造技術の場合も構成法に大きな変化はないが、一つの革新的な要素技術が全体の構成法を大きく変えてしまう場合があり得るのは特徴の一つであろう。この分野の分類結果も表1に示す。

(5) 標準・計測分野

標準・計測分野の特徴として、特に計量標準においては、エンドユーザーの手に確実に高い信頼性を有する計量標準（物理標準、化学標準・標準物質）が到達することが大前提である。また、それらの標準は国際的にも相互に承認されていることが基本である。そのため、3つの必須要件、①SI（国際単位系）トレーサブルな国家計量標準の確立、②国際整合性の確保（国際的に認知された測定方法、国際比較）、③産総研、認定事業者、エンドユーザーを結ぶトレーサビリティ体系の構築、のもとにシナリオが組み立てられて研究開発が実施されている。要件①は「技術的な構成」に、要件③は「社会導入に向けた構成」に対応し、要件②は両者を結ぶ役割を担っていると言える。以下、物理標準、化学標準の研究開発にかかわる二つの例を示す（図8）。

物理標準の例では、新井らによる1000℃～1550℃付近の温度範囲での熱電対校正のための温度標準のトレーサビリティ体系の構築に関する研究がある^[37]。この領域での温度計測は、特に鉄鋼業をはじめとする素材産業、熱処理等に関係する部品製造業、半導体プロセス産業等温度管理が重要となる各種産業で重要となる。熱電対はこれらのさまざまな産業現場において最もよく使われる温度計の一つであるが、測定の信頼性はそれほど高いとは言えず、計量標準の確立とトレーサビリティ体系の整備が急務だった。この温度領域での国家計量標準は純金属の温

度定点群である。具体的には銀の凝固点（961.78℃）、銅の凝固点（1084.62℃）、パラジウムの融解点（1553.5℃）であり、これらの定点の温度値は熱力学的な温度目盛りを基にしてメートル条約加盟各国の代表が集まる国際度量衡総会で合意、決定されたものである〔要件①〕。国際的に認知されるために、諸外国の標準研究所との国際比較（APMP-T-SI-4）が行われ、産総研の校正値および不確かさの小ささは参加機関のトップレベルという高い信頼性を達成した〔要件②〕。また、トレーサビリティ体系の構築には、産総研と校正事業者間で精密な標準値を受け渡す仲介標準器が必要であり、この仲介器には安定性と堅牢性が求められた。このため、これらの条件を満たす高い信頼性を有する白金パラジウム熱電対とR型熱電対が開発された〔要件③〕が、その過程において適切な熱処理が熱電対の安定性に大きく寄与することが新たな知見として発見された。また、産総研オリジナルの技術であり世界の計量標準研究機関に普及しつつある共晶点の温度定点への適用性も示され、近い将来さらに高い信頼性をもつ温度目盛りの供給も期待される。

化学標準の例では、井原らによる国民の日常生活の安全に直結する食品・環境中の有害成分（残留有害物質や残留農薬）の試験検査機関における分析の信頼性を保証するための標準物質の開発にかかわる研究がある^[38]。食品・環境中有害物質の数は法規制として取り上げられたものだけでも1千種類以上におよぶため、迅速に多数の標準物質を開発・評価する必要があり、そのための定量NMR法を開発した。これは、化学物質ごとに標準物質を準備するというこれまでの手法ではなく、多種類の実用標準物質の校正を最小限の種類の上位標準で行うという革新的な手法である。

出口（エンドユーザーの手に確実に高い信頼性を有する計量標準が到達する事）が明確であり、それを達成するため、シナリオを作り必要な要素技術を選択・構成

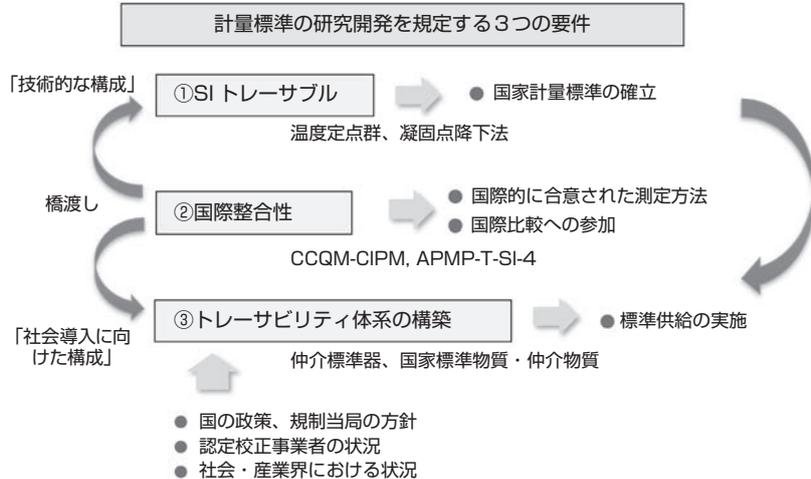


図8 標準・計測分野における戦略的選択型構成方法

NMR という測定法は、通常は未知成分検出や分子構造等の決定に用いられるが、この場合は既知の成分の定量的な分析に用いるという発想を逆にした考え方を採用しており、通常の NMR の使い方と全く異なる測定条件（照射パルスの遅延時間調整、オーディオフィルターの最適化、等）の探索・選択が重要な要素技術となった。また、国家標準物質の選定や、多種類の物質を校正できる仲介物質の選択が効率的なトレーサビリティ体系を構築する上での重要なポイントとなった [要件③]。一方、SIトレーサビリティについては一次測定法である凝固点降下法を妥当性検証に用いることにより担保された [要件①]。国際的には、国際度量衡委員会(CIPM) の物質質量諮問委員会(CCQM) の場で標準的な測定法の一つとしての採用を働きかけ、世界的な合意が得られつつある [要件②]。供給体制としては、産総研と国立研や民間事業者（試薬、臨床検査薬メーカー）との連携（共同研究、受託研究等）によりこの手法で値付けされた標準物質のユーザーへの頒布が 2008 年度から開始されており、その総数もすでに 100 種類以上に達している。なお、この研究の全体構成は井原等の原論文^[38]の図 6 によくまとめられている。

以上の二つの例に示したように、3 要件を境界条件として研究開発のシナリオと実行プロセスが組み立てられており、典型的な戦略的選択型に分類されると言える。これまでに *Synthesiology* に掲載された標準・計測分野の論文のなかで、鈴木による計測技術にかかわる乾電池駆動の X 線発生装置の研究^[39] はブレークスルー型に対応するが、多数を占める計量標準にかかわる 11 件の論文はすべてこ

れらの 3 要件を踏まえており、戦略的選択型に分類されると言えよう (表 1)。

(6) 地質分野

地質分野の研究の特徴は、地質現象の総体としての理解を進展させる観点から、総合的な戦略が構成され、変化するさまざまな社会のニーズへの対応による相互作用を通じて、螺旋的に展開していくという特徴がある (図 9)。過去にさかのぼる自然への理解の深さがどこまで進んだかが、産業立地、資源・環境、防災等に関する社会の対応を律速していると言っても過言ではない。

長期的地震予測の例 (図 9 中の個別戦略 A) として、寒川は遺跡における液状化堆積物の発見という地質学上の「ブレークスルー」により古地震学を創設し^[40]、さらに研究ユニットの個別戦略として、地質学・考古学に加え、地球物理学や工学等の異なる分野の融合により展開しており、ブレークスルー型と戦略的選択型の組み合わせと言える。こういった成果を基に、日本の活断層の履歴解明とその発生の物理モデルや強振動モデルの研究が進展し、吉岡の研究^[41]に見られるように、これらの研究を戦略的に選択して組み合わせ、立地や防災に活用されつつある。このような手法は研究ユニットにより過去の津波堆積物の研究としても応用展開されており、長期的な地震発生や影響予測精度の向上に貢献している。また、土壌と地下水の汚染リスク評価では (図 9 中の個別戦略 B)、駒井らの研究^[42]に見られるように地質分野の要素技術に加え、環境科学や安全科学までを分野融合し、評価法の進展の段階に応じて社会での利用によるフィードバックをかけて、より

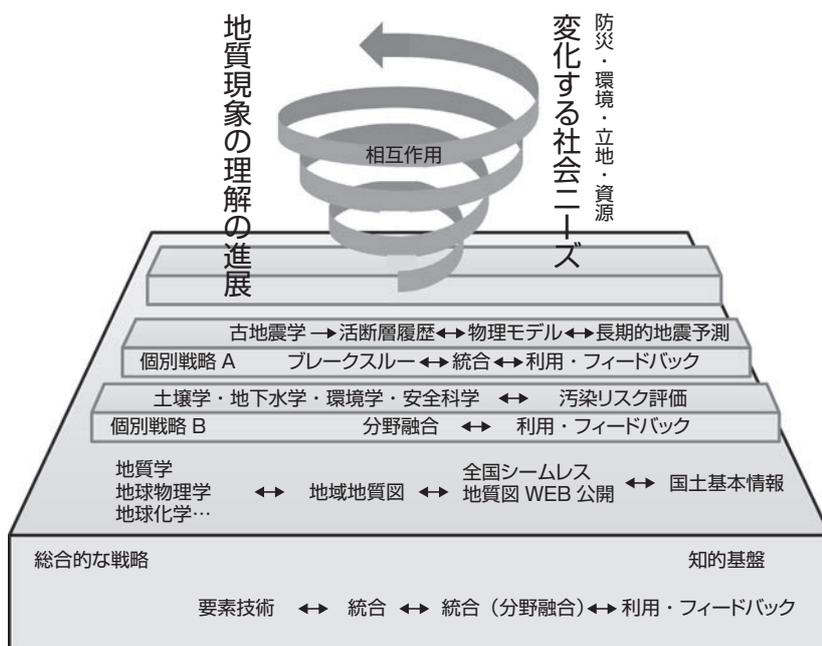


図 9 地質分野における個別戦略と総合的戦略からなる構成方法

詳細な評価モデルを構築している。

これらの個別の戦略は、変化する社会の特定のニーズに対応して、ターゲットを絞って取り組むことが多く、その基盤として国土の基本情報や技術に関する総合的な戦略に基づく研究が不可欠である。国土の基本情報である地質図については、斎藤の研究^[43]に見られるように、防災・環境・産業立地・資源等さまざまな用途に対応できる知的基盤として、地質分野としての総合的な戦略に基づき、さまざまな要素技術(地質学、地球物理学、地球化学等)を統合することにより、地質現象の理解を深めつつ、その成果は地域地質図等の公共財として社会に提供されている。さらに、脇田の研究^[44]に見られるように、社会のニーズに応じて情報技術等の要素技術も駆使して地質情報を統合し、全国のシームレス地質図としてインターネット上で常に最新のデータを利用しやすく社会に提供し、そのフィードバックにより改善を図っており、螺旋型の構成が用いられている。

地質分野は戦略的選択型の構成をとることが多いが(表1)、これらの研究活動を通じて、地質現象の経験的モデルの深化とともに、決定論的モデルに関連付けることにより地質現象の理解を深めることができ、社会の期待に応えることのできる予測精度向上を実現できる。このように、地質分野の研究は、複雑系としての地質現象の理解が、変化するさまざまな社会ニーズと対応して、螺旋構造の相互作用を取り込みながら進展している。

4 構成方法における分野の特性

前章で示した分野での構成的研究の分析から、この章ではそれぞれの分野の特性を述べ、構成に共通の方法論については次章で述べる。表1では、アウフヘーベン型、ブレークスルー型、戦略的選択型、の3類型とその組み合わせ

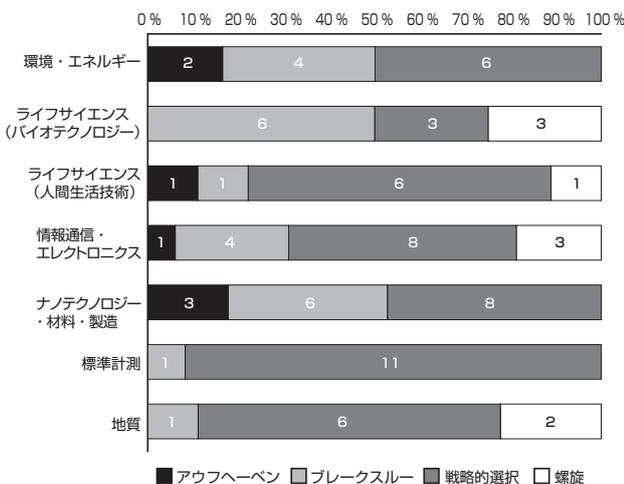


図10 分野ごとに4類型に分類した結果(組み合わせ型を各類型に重複して計数)

わせとして分類したが、組み合わせ型が数的には多くはないことと、分野の特徴を見るために、組み合わせ型については3類型のうち2つまたは3つからなるとして、それぞれを重複して数え直した結果を図10に示す。定量的な議論をするには十分な数ではないが、分野による違いがみられる。ブレークスルー型の占める比率が高いのは、ライフサイエンスのバイオテクノロジー分野とナノテクノロジー・材料・製造分野、そして環境・エネルギー分野の中でも低環境負荷技術の研究開発である。いずれも、良いコア技術があるとブレークスルーがおきる分野であると言える。一方、ライフサイエンスでも人間生活技術分野では戦略的選択型が多く、また地質分野も同様であるが、これらは一つのブレークスルー技術では課題が解決できない分野であることが分かる。さらに、1例を除くすべての研究において戦略的選択による構成が行われているのは標準・計測分野であり、トレーサビリティ体系を構築するためには、多くの要素を考慮する必要があることが分かる。一方、螺旋型が見られるのは、バイオテクノロジー、人間生活技術、情報通信エレクトロニクスそして地質分野である。

材料、電子・光デバイスや製造技術の分野、化学的・物理的な標準・計測分野等では、要素技術が明確に定義され構成方法も比較的明快なものが多いが、地質分野、バイオテクノロジー、情報分野や人間生活技術分野では要素技術において複雑性が増してだけでなく、構成方法においても人間や実社会・実環境との相互作用が大きな比重を示してくることが分かった。図11に、一つの考え方として、構成要素の数と規模と、分野間の関連性を示した配置図を示す。

図の下部の基盤的部分には、技術分野の基礎となる代表的な学術的分野を示してある。物理や化学の分野は構成要素というものが明確に定義しやすく、最も基盤的な部分を形成すると考えられる。物理学では構成要素を細かく突き詰めていくとクォークやレプトンに至るが、それらが相互作用を媒介して原子核、原子・分子へと上の階層に向かっ

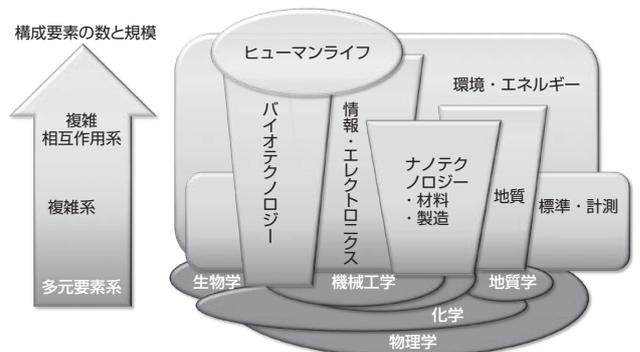


図11 構成方法における分野的特性

て構成的に物質を作り上げている。化学では、電子間の複雑な相互作用がさまざまな反応とそれによるさまざまな物質を作り出していくのが特色である。工学の中で代表の一つの機械工学では、相互作用は力学的または電磁的相互作用が主となるが、その要素は巨視的であり要素数は限られたものになる。さらに地質学や生物学になると構成要素の数が飛躍的に増大し、複雑性も上昇し、その記述は多様性を増すこととなる。

これらの学術分野の上に成り立つ技術分野は、ナノテクノロジー・材料・エレクトロニクス等の比較的構成要素が少ない多元要素系から、地質や環境・エネルギー等構成要素が飛躍的に増大するものの要素間の相互作用は基本的に物理・化学的におよそ明確に定義されている複雑系、さらには情報やバイオロジー、人間生活技術等構成要素間の相互作用そのものに多様性がある複雑相互作用系等と特徴付けていくことができる。

構成要素の数と規模が増加することにより、構成方法もさまざまなものになっていくが、これはシナリオの作り方やその特性とも関係している。構成要素が少ない多元要素系では、構成要素や構成方法がより明確なために、そのシナリオも比較的分かりやすく作ることができる。すなわち、技術的な構成方法が明確であるために、それだけシナリオの論理的な展開が行いやすいという特性と関連している。また技術の展開としてマイルストーンやロードマップが比較的描きやすいと言えるであろう。それに比較して複雑系、複雑相互作用系になるにしたがって、構成要素の数や相互作用がさまざまなものになり、構成の範囲も広がってくる。またシナリオの描き方も一律ではなく、実社会やユーザーとの相互作用によりその展開も変化していくことが特徴であると考えられる。

なお、ここで示された技術分野は、明治時代以来の産

業振興の要請にしたがって旧商工省、旧逓信省、旧通産省工業技術院等が順次研究開発体制を整備してきた分野であり、かなり広い分野を含んでいるが、必ずしもすべての技術分野を網羅しているわけではない。そのためこの章で示した分野の特性は限定的であることを付記しておきたい。

5 シンセシオロジーにおける構成方法

(1) 技術的な構成の方法

70編の論文の分析を踏まえ、構成方法の共通の特徴の抽出を行った。シンセシオロジーが考えている構成の方法論として、戦略の構築とシナリオの設定⇒要素選択と組み合わせ⇒技術的構成の実現⇒社会での試用という一連のプロセスが考えられるが、このように線型なプロセスに加えて、「フィードバック」が特徴的なプロセスとなっているものがあることが明らかになった。

個別の要素選択と組み合わせの例として、前述のアウフヘーベン型、ブレイクスルー型、戦略的選択型等の幾つかの類型で代表的に表現することができるが、表1に示したように、これらの3つの型は、実際にはそれぞれが単独で存在するというよりは、それらが直列的や並列的に複数組み合わせられていくことが現実的な考え方である。また、構成としては何段かにわたって行われることが普通であり、その意味では技術の構成にはフラクタル構造が見られるということが出来る。多段構成の例として、第3章(1)の環境・エネルギー分野の構成例が挙げられる。ここでは、社会ニーズからブレイクダウンした戦略的選択型方法と重要要素技術によるブレイクスルー型方法が組み合わせられている(図12)。

一方で、この構成方法は戦略性に立脚して進められる。要素選択と組み合わせが行われるとそれらは戦略性およびシナリオにフィードバックされ、さらに要素選択と組み合わ

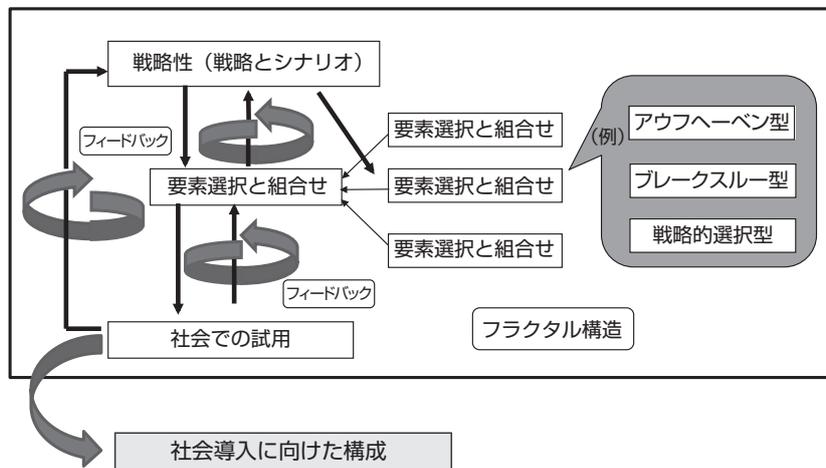


図12 シンセシオロジーにおける技術的な構成

せの方法に再びフィードバックされ、その組み合わせ方法の変更や進化が行われる場合もあれば、要素の構成方法の進展に伴って戦略性が進化し、より明確な目標になっていく場合もある。後者の例としては大場による「実時間全焦点顕微鏡」の研究開発が挙げられる^[45]。ここでは要素技術が統合されて上位の要素へと構成されていくにしたがい、それまでやや曖昧であった目標がより明確にされ、最終的に3次元実時間全焦点顕微鏡に統合され、商品化されていくというプロセスが示されている。初期においては、「高性能の光学顕微鏡の実現」というやや漠然とした仮説形成で出発したが、幾つかの企業と出会うことで試作品を完成した後に、仮説をさらに高度にしてそれを実現する戦略やシナリオを明確にするという過程を繰り返し、最後に商品化が実現した。その際、多くの企業との出会いが仮説の検証と高度化を導いたということは特筆すべきことである。

構成が進むにしたがって、構成物が研究成果として社会との接点をもつようになり、そこで「社会での試用」が行われる。ここでスムーズに社会導入が始まることは極めて稀である。ここに次のフィードバックループがある。すなわち「社会での試用」が行われることによって、さまざまなステークホルダーからの反響がフィードバックとしてかかり、新たな戦略性が持ち込まれる。あるいは、戦略そのものよりも要素の選択と組み合わせにフィードバックがかかることもある。第3章(2)のライフサイエンス分野で示された諏訪らによるバイオインフォマティクスの例は、研究成果を利用する研究者から有効なフィードバックがかかり、それが戦略やシナリオ構築に繋がり、そのループが何回も回っていくという螺旋構造を示すことはすでに述べたとおりである。また第3章(6)で示した地質の例では、社会のニーズが次第に変化していくにつれて、地質現象の理解もそれによるモデル構築も進展していき、戦略や構成方法へのフィードバックが連続的に起こることを示している。

一方、構成の結果を社会的な接触や現場での試用等とおしてフィードバックをする際、時間を意識したダイナミックな構成の動きも大切である。それを示す象徴的な例として、近年の我が国の半導体産業の国際競争力低下に関する中馬による分析があげられる^[46]。半導体チップ上に必要な機能をシステムとして集積する設計手法として、SoC（システム・オン・チップ）があるが、そのクロック速度が極めて早くなるにしたがって、各要素間の応答遅延速度、転送速度、各種作業を連繫させるコミュニケーション構造の3つがシステム設計の中心課題になる。すなわち要素技術の関係を極めて動的に捉えることが必要となる。中馬によれば、日本企業の開発システムがそのダイナミックな動きにつ

いて行けなかったことが、製品の国際競争力低下の原因である、としている。この論文におけるさまざまな事例の検討から、どの構成方法においても各要素技術間の関係が厳密に関連付けられて構成されていることが明らかになったが、それらの関係は時間的に連続しており、並列性や相互交換性のようなダイナミックな動きがまだ多くは現れてきていない。今後、研究開発の競争が熾烈さを加えるにつれて、要素間の連繫のよりダイナミック動きや早いフィードバック、それによる研究開発のスピードアップも必要となるであろう。

(2) 社会導入に向けた構成の方法

最後に大きな課題として「社会導入に向けた構成」がある。石井^[47]、藤井^[48]、大澤ら^[49]による研究で述べられているように、計量標準のようにトレーサビリティを確保することが社会導入のポイントとなる場合には、校正事業者等によって作られる社会体系を構築する必要があり、実現できるトレーサビリティ体系に応じた計測技術を見極める必要がある。また、社会の側にニーズが、例えば記憶容量のように具体的な性能指標として明確化されている場合には、そのニーズに応えられる技術であれば比較的迅速に技術が導入されることになる。湯浅らによる研究^[22]に見られるように、このときの社会導入の課題としては生産技術も重要になる。しかし、多くの場合、社会導入には技術開発とは独立・並立的に社会的な行為が要素に入ってくる。例えば、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等が社会導入を促進する。また短期的に社会導入を推し進めるのではなく、必要な要素の種を蒔いて自律的に構成していくことを促すことも求められよう。そして、技術を一方的に提供するだけでなく、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る。

実際に使える技術になっているかを評価してもらう方法としては、サンプルを提供したり、展示会での展示等による試用が多く行われる。例えば浅川らの研究^[28]に見られるように、有機ナノチューブ等も使ってみることでその技術の価値をはじめて理解してもらえることも多い。それとともに佐藤（雄）らの電動車いすの研究^[27]で見られるように、開発者とユーザーが同一でない時には、開発サイドでは想定していなかったニーズの吸い上げも行われる。また中島^[21]、江渡^[50]の研究に見られるように、ソフトウェアはフィールドでの長期に渡る試用が製品としての信頼性等の技術課題の抽出に有効である。こういった試用によるフィードバックは、製品化を実現するために必要な技術開発を定めるステップとなる。主な技術課題が解決しておよそ製品として使える物ができても、それが社会に広まっていくためにはさまざまな要因が関わってくる。そのきっかけの一つになりう

表2 社会導入のためのシナリオ例

産業界でニーズが明確化されている場合	<ul style="list-style-type: none"> 計量標準のトレーサビリティ体系の構築 新技術に適合した製造技術の開発
産業界でニーズが明確化されていない場合	要素技術の展示やサンプル提供 <ul style="list-style-type: none"> サンプルで機能をみせて新技術のインパクトを呈示 サンプル試用からのフィードバックで技術課題・研究課題を抽出
	試作品の幅広い試用機会の提供 <ul style="list-style-type: none"> 試作製品のターゲットユーザーへの貸出し、公開試用版による不具合抽出、必要機能の抽出。 製品の形にして、実現機能のインパクトを表現
	ステークホルダーへの技術導入促進 <ul style="list-style-type: none"> 時間をかけた新技術の価値の理解 現場に入って共同して課題発見を行なって理解を促進
産業としての確立・拡大	<ul style="list-style-type: none"> 感性的リードユーザーによる製品の使用価値の付加 異業種との連携と、競合他社との連携・標準化による競争と共同関係の構築

るのは、こんなことができるか、といった技術的なインパクトが一目で分かることである。石川^[51]や大場^[45]の研究に見られるように、持ち運びができる長さ標準器や実時間全焦点顕微鏡等はその例である。

展示会に参加する人やサンプル提供を希望する人は、新しい技術を探索している人であり、積極的に技術を取り込む態度で臨んでいる。その一方で、現場では大きな変革を望まない場合等、課題を理解しながらも必ずしもその解決には積極的になっていない場合もある。例えば木下による研究^[52]で見られるように、システム検証のための技術移転では、技術の提供側が積極的にフィールドの中に入って行って、現場を巻き込みながら一緒になって進めるという方法も行われる。また、技術として優れていることは分かっているが、製造技術の問題等で、その技術の導入を躊躇してしまうこともある。このようなときには性急に導入を推進するのではなく、むしろ時間をおいて、その技術の価値をじっくりと理解してもらって、自律的に導入が進むようにした方がよいと、セラミックス粉体技術を用いて紫外線防御化粧品を開発した高尾らは主張している^[32]。

コンシューマプロダクトのように普及させる規模が大きい場合には、性能的なインパクトだけではなく、感性的なインパクトも必要になる。このとき、久保らによるIH調理器の研究^[20]で述べられているように、開発メーカーだけが機能するのではなく、マスメディアや感性的リードユーザーと呼ばれる消費者に先行した感性をもった人達が製品の新しい使い方を提案することで価値向上を牽引することがある。

また、インフラも含めた総合的なシステムによって構成されている場合には、性能向上とコスト削減を両立させるための産業界内での連携も有効である。池田らの研究^[19]が示すように、カーナビの実用化のプロセスにおいては、各社の競争部分と共同開発や標準化する共通部分とを戦略的に明確化して推進した。これによって社会への導入が進

んだと言える。

製品に組み込んでもらう要素技術開発のフェーズ、要素技術から製品に組み上げるフェーズ、ある程度製品化が済んだ後に産業として確立していくフェーズ、消費者に製品を浸透させていくフェーズ等、何段階かの構成のフェーズがあるが、産業界で技術ニーズが明確になっている場合と明確になっていない場合では取り組みが異なってくる。後者の場合にはより困難が伴うことから、試用の提供だけでなく、製品としてのインパクトを見せたり、積極的にステークホルダーの中に入っていきことも行われるが、機が熟すまであえて待つという戦略もある(表2)。

6 おわりに

Synthesiology の論文を対象に、構成方法を分析し、その特徴抽出を行った。*Synthesiology* の研究論文の特徴は、まず研究者自身が社会的な目標を明確にしたうえでそこに至るために克服すべき課題を設定して、それらをどのように解決するかシナリオを設定し、それに沿って実践していくことによって研究成果に結実していった過程を構成学の論文として記すことである。70編の論文を小林による3類型を基本として論文への掲載内容から分析したが、不明瞭な場合には筆者に問い合わせることも行った。戦略的選択型であるかブレークスルー型やアウフヘーベン型であるかは、コアとなる技術の実現の困難さによることになるが、ブレークスルーやアウフヘーベンと呼べるかの判断は我々の主観によらざるを得なかった。また、論文では、全体の戦略が強調されている場合と、要素技術のブレークスルーが強調されている場合があると思われるが、ほとんどの論文が研究実施者によって書かれていることから、研究実施者の視点から見ての構成の重要なポイントが記載されていると判断した。

研究成果を社会に活かしていくことを指向して行われる第2種基礎研究においては、「技術的な構成」とも呼ぶべきものがあり、幾つかの構成の基本形というものが見られた。また分野ごとの特色としては、構成要素の数や規模によって多様性の違いや、出口との擦り合わせの方法の違いがあるものの、戦略に基づく要素技術の組み合わせと社会での試用との対比によるフィードバック・プロセスが必要であることが明確となった。特に後者においては社会での実際のニーズとの相互作用により、フィードバック・プロセスを何回も回していくスパイラル・アップとも呼ぶべきダイナミックな構成方法が極めて重要であることが認識された。

一方、研究成果を社会に導入させていくためには、さらに「社会導入に向けた構成」と呼ぶべきものを連続して起こすことが必要であることが分かった。その際何段階かの

構成のフェーズがあるが、社会ニーズが明確になっている場合とそうでない場合、産業としての拡大を図る場合でも、それぞれ異なったアプローチが求められる。まだ事例としては十分多いとは言えないが、今後、「社会導入からイノベーションの創出」を考えた場合、このような構成例の分析を積み重ねて、そのダイナミズムを分析していくことが重要であろう。

7 謝辞

この論文の作成にあたり、対象とした論文の筆者の方々に深甚の謝意を表したい。限られた時間の中で、それぞれの研究をどの程度まで理解できたかは課題であるが、できるだけ筆者の研究のシナリオや方法論を捉えることに努力を傾注した。しかし、必ずしも筆者の意図を正しく汲み取っていない部分もあると思われるので、その点をご指摘いただければ幸いである。また、この論文の作成を進めるにあたって、ワークショップ等でのご意見も含め多くの方からいただいた貴重な示唆に対して感謝の意を表したい。

用語説明

用語1: *Synthesiology* (構成学) : 研究成果を社会に活かすために行なうべきことを知として蓄積することを目的として、2008年に発刊された学術ジャーナル。このジャーナルでは、研究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、また要素技術の統合のプロセスが記述された論文が掲載されている。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^[1]。

用語2: 本格研究、第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究: 研究テーマを未来社会像に至るシナリオの中で位置付けて、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種基礎研究を軸に、第1種基礎研究から製品化研究を連続的・同時並行的に進める研究を「本格研究 (*Full Research*)」と呼ぶ。

なお、第1種基礎研究は未知現象を観察、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指す。第2種基礎研究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う。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指す。

用語3: アウフヘーベン: アウフヘーベンとは、ヘーゲルが弁証法の中で提唱した概念で、ある一つの命題(テーゼ)と、それとは矛盾する別の命題(アンチテーゼ)との二つの相反する命題を統合し、より高次元の段階である総合命題(ジンテーゼ)を導くこと、とされ日本語では「止揚」と訳される^{[3][4]}。

参考文献

- [1] 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, *Synthesiology*, 1 (1), i (2008).
- [2] 吉川弘之: 本格研究, 東京大学出版会 (2009).
- [3] ルネ・セロー: ヘーゲル哲学, 白水社 (1973).
- [4] R. K. レスター, 小林直人: シンセシオロジーへの期待, *Synthesiology*, 1 (2), 139-143 (2008).
- [5] 西井準治: 高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ, *Synthesiology*, 1 (1), 24-30 (2008).
- [6] 舟橋良次, 浦田さおり: 熱電発電を利用した小型コジェネシステムの開発, *Synthesiology*, 1 (2), 94-100 (2008).
- [7] 岸本充生: 異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略, *Synthesiology*, 1 (1), 31-37 (2008).
- [8] 葭村雄二, 鳥羽誠: 輸送用クリーン燃料の製造触媒の研究と開発, *Synthesiology*, 1 (3), 176-182 (2008).
- [9] 鈴木明, 川波肇, 川崎慎一郎, 畑田清隆: コンパクトプロセスの構築, *Synthesiology*, 3 (2), 137-146 (2010).
- [10] 諏訪牧子, 小野幸輝: 循環発展的なプロジェクト構造を生むバイオインフォマティクス戦略, *Synthesiology*, 2 (4), 299-309 (2009).
- [11] 近江谷克裕, 中島芳浩: ホタルの光の基礎研究から製品化研究へ, *Synthesiology*, 1 (4), 259-266 (2008).
- [12] ゲイリー P. ピサノ: サイエンス・ビジネスの挑戦, 日経BP社 (2008).
- [13] 西宮佳志, 三重安弘, 平野悠, 近藤英昌, 三浦愛, 津田栄: 不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓, *Synthesiology*, 1 (1), 7-14 (2008).
- [14] 大串始: 実用化をめざしての再生医療技術開発, *Synthesiology*, 1 (3), 170-175 (2008).
- [15] 家村俊一郎, 夏目徹: タンパク質のネットワーク解析から創薬へ, *Synthesiology*, 1 (2), 123-129 (2008).
- [16] 持丸正明, 河内まき子: 個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術, *Synthesiology*, 1 (1), 38-46 (2008).
- [17] 倉片憲治, 佐川賢: 高齢者に配慮したアクセシブルデザイン技術の開発と標準化, *Synthesiology*, 1 (1), 15-23 (2008).
- [18] 氏家弘裕: 映像の安心な利用を可能にする映像酔い評価システムの開発, *Synthesiology*, 3 (3), 180-189 (2010).
- [19] 池田博榮, 小林祥延, 平野和夫: いかにしてカーナビゲーションシステムは実用化されたか, *Synthesiology*, 3 (4), 292-300 (2010).
- [20] 久保友香, 馬場靖憲: 2タイプのリード・ユーザーによる先端技術の家庭への導入モデルの提案, *Synthesiology*, 2 (3), 201-210 (2009).
- [21] 中島秀之, 橋田浩一: サービス工学としてのサイバーアシスト, *Synthesiology*, 3 (2), 96-111 (2009).
- [22] 湯浅新治, 久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 長浜太郎, 鈴木義茂, 安藤功児: 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, *Synthesiology*, 2 (3), 211-222 (2009).
- [23] 佐藤証, 片下敏宏, 坂根広史: 暗号モジュールの安全な実装を目指して, *Synthesiology*, 3 (1), 56-65 (2010).
- [24] 荒井和雄: SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略, *Synthesiology*, 3 (4), 259-271 (2010).
- [25] 田中良夫: グリッドが実現するE-サイエンス, *Synthesiology*, 2 (1), 32-41 (2009).

- [26] 本村陽一: 大規模データからの日常生活行動予測モデリング, *Synthesiology*, 2 (1), 1-11 (2009).
- [27] 佐藤雄隆, 坂上勝彦: 安心・安全な次世代モビリティを指して, *Synthesiology*, 2 (2), 113-126 (2010).
- [28] 浅川真澄, 青柳将, 亀田直弘, 小木曾真樹, 増田光俊, 南川博之, 清水敏美: 実用化へ向けた有機ナノチューブの大量合成方法開発, *Synthesiology*, 1 (3), 183-189 (2008).
- [29] 坂本満, 上野英俊: 部材の軽量化による輸送機器の省エネ化, *Synthesiology*, 2 (2), 127-136 (2009).
- [30] 茶谷原昭義, 空野由明, 坪内信輝, 山田英明: 単結晶ダイヤモンド・ウェハの開発, *Synthesiology*, 3 (4), 272-280 (2010).
- [31] 小林慶三, 尾崎公洋, 松本章宏, 中山博行: 鋳造技術と粉末冶金技術の融合による新材料開発, *Synthesiology*, 3 (4), 301-308 (2010).
- [32] 高尾泰正, 山東睦夫: 紫外線防御化粧品と評価装置の製品化, *Synthesiology*, 3 (2), 127-136 (2010).
- [33] 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, *Synthesiology*, 1 (2), 130-138 (2008).
- [34] 中村治, 大花継頼, 田澤真人, 横田慎二, 篠田渉, 中村修, 伊藤順司: PAN系炭素繊維のイノベーションモデル, *Synthesiology*, 2 (2), 159-169 (2009).
- [35] 渡利広司, 長岡孝明, 佐藤公泰, 堀田裕司: セラミックス製造の省エネプロセスの確立を目指して, *Synthesiology*, 2 (2), 137-146 (2009).
- [36] 北英紀, 日向秀樹, 近藤直樹: 製造の全行程を考慮した資源及びエネルギー利用の合理化指針, *Synthesiology*, 1 (3), 212-221 (2008).
- [37] 新井優, 小倉秀樹, 井土正也: 1550°Cに至る高温度の計測の信頼性向上, *Synthesiology*, 3 (1), 1-15 (2010).
- [38] 井原俊英, 齋藤剛, 杉本直樹: 食品・環境中の有害成分分析のための有機標準物質の拡充, *Synthesiology*, 2 (1), 12-22 (2009).
- [39] 鈴木良一: 乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発, *Synthesiology*, 2 (3), 237-243 (2009).
- [40] 寒川旭: 遺跡が語る巨大地震の過去と未来, *Synthesiology*, 2 (2), 91-100 (2009).
- [41] 吉岡敏和: 活断層からの地震発生予測, *Synthesiology*, 2 (3), 194-200 (2009).
- [42] 駒井武, 川辺能成, 原淳子, 坂本靖英, 杉田創: 土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法, *Synthesiology*, 1 (4), 276-286 (2008).
- [43] 斎藤眞: 最先端の地質研究と国土の基礎情報, *Synthesiology*, 2 (4), 321-331 (2009).
- [44] 脇田浩二, 井川敏恵, 宝田晋治, 伏島裕一郎: シームレスな20万分の1日本地質図の作成とウェブ配信, *Synthesiology*, 1 (2), 82-93 (2008).
- [45] 大場光太郎: 実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化, *Synthesiology*, 2 (4), 264-275 (2009).
- [46] 中馬宏之: サイエンス型産業における国際競争力低下原因を探る, *生産性とイノベーションシステム* (藤田昌久, 長岡真男編著), 317-360, 日本評論社 (2011).
- [47] 石井順太郎: 耳式赤外線体温計の表示温度の信頼性向上, *Synthesiology*, 1 (1), 47-58 (2008).
- [48] 藤井賢一: 水に代わる密度標準の確立, *Synthesiology*, 1 (3), 201-211 (2008).
- [49] 大澤尊光, 高辻利之, 佐藤理: ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定, *Synthesiology*, 2 (2), 101-112 (2009).
- [50] 江渡浩一郎, 濱崎雅弘, 西村拓一: だれでも構築運営できるコラボレーションシステムの実現, *Synthesiology*, 1 (2), 101-110 (2008).
- [51] 石川純: 誰でも作れて携帯できる長さの国家標準器, *Synthesiology*, 2 (4), 276-287 (2009).
- [52] 木下佳樹, 高井利憲: 臨床情報学のための野外科学的方法, *Synthesiology*, 3 (1), 36-46 (2010).

執筆者略歴

小林 直人 (こばやし なおと)

1973年京都大学理学部物理学科卒業、1978年京都大学工学研究科博士課程修了、同年通商産業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年同研究所理事、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、情報通信エレクトロニクス分野やナノテクノロジー・材料・製造分野の論文の分析を行い、要素的および全体的な構成の方法論について考察・論述を行った。



赤松 幹之 (あかまつ もとゆき)

1984年慶応義塾大学大学院工学研究科管理工学専攻博士課程修了。工学博士。1986年通商産業省工業技術院製品科学研究所入所。生命工学工業技術研究所生体情報部神経情報研究室研究室長等を経て、2001年産業技術総合研究所人間福祉工学研究部門行動モデリンググループグループ長。2002年より筑波大学大学院システム情報工学研究科連携大学院教授を兼務。2005年産業技術総合研究所人間福祉工学研究部門研究部門長。2008年同所サービス工学研究センター兼務。2010年同所ヒューマンライフテクノロジー研究部門研究部門長、現在に至る。専門は人間工学、サービス工学、科学論等。この論文では、ライフサイエンス(人間生活技術)分野に関する論文および社会導入に向けた方法論の分析を行うとともに、全体的な構成方法論について論考を進めた。



岡路 正博 (おかじ まさひろ)

1977年北海道大学大学院理学研究科博士課程修了。1977年通商産業省工業技術院計量研究所入所。材料計測技術の研究開発に従事。1983年～1984年NPL(英国物理学研究所)で熱物性計測用レーザー干渉測長システムの開発に従事。1988年より計量研究所熱物性部低温計測研究室長として高温超電導材料の基礎物性・材料物性評価、ならびに熱物性標準物質の開発に従事。2000年計量研究所研究企画官。2001年産業技術総合研究所評価部次長。2003年同所国際部門国際研究協力室長。2006年新エネルギー・産業技術総合開発機構研究開発推進部プログラムディレクター。2008年産業技術総合研究所計測標準研究部門研究部門長。その後、同所評価部首席評価役、標準・計測分野研究企画室を経て2011年10月から(株)チノー。この論文では、標準・計測分野に関する部分を担当。



富樫 茂子 (とがし しげこ)

1978年東北大学理学研究科博士課程修了、同年通産省工業技術院地質調査所に入所し、同位体地学課長等を経て1999年より地殻化学部長。その後、2002年より産業技術総合研究所能力開発コーディネーター、地球科学情報研究部門長、地質情報研究部門長を経て、2008年より現職の評価部首席評価役。専門は火山岩や地殻の地球化学。この論文では地質分野に関する部分を担当。



原田 晃（はらだ こう）

1978年北海道大学大学院水産学研究所修士課程修了。北海道大学水産学部助手、フロリダ州立大学特別研究員を経て、1991年資源環境技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所環境管理研究部門地球環境評価研究グループ長。2003年経済産業省産業技術環境局評価企画調査官。2006年産業技術総合研究所環境管理技術研究部門長。2009年からは東北センター所長。専門は、地球化学・環境科学で、人為活動が自然界の物質循環に与える影響評価の研究に従事。この論文では、環境・エネルギー分野に関する部分を担当。



湯元 昇（ゆもと のぼる）

1983年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。日本学術振興会奨励研究員（京都大学医学部）、新技術開発事業団早石生物情報伝達プロジェクト研究員、京都大学理学部助手（化学教室）を経て1992年大阪工業技術試験所入所。その後、産業技術総合研究所セルエンジニアリング研究部門長、研究コーディネータを経て2008年理事に就任。専門は生化学。この論文では、ライフサイエンス（バイオテクノロジー）分野に関する部分を担当。



査読者との議論

議論1 全体評価

コメント（上田 完次：産業技術総合研究所）

シンセシスの科学としての構成学の確立を、実践を通して目指した論文であり大変興味深く意義のある論文と考えます。

議論2 論文のタイトルと目的

質問・コメント（上田 完次）

この論文の目的は、研究成果を社会につなげるための構成学を目指す（副タイトル）ために、*Synthesiology* の掲載論文における構成方法の分析（主タイトル）を行うと理解できます。既存論文のアナリシス（という方法）により、構成学という新しい“学”をシンセシス（創出という目的）する、すなわち、この論文のポジショニングは、「シンセシス by アナリシス」であると理解してよろしいでしょうか。もし、そうであれば、そのように言及するのがよいと思われます。

回答（小林 直人）

とても明確な示唆を有難うございます。ご指摘のとおりで、この論文の目標は副タイトルにある「新たな構成学を目指す」ことにありますが、そのために主タイトルの「構成方法の分析」を行ったと理解いただければと思います。その意味では、まさに「シンセシス by アナリシス」であると言うことができます。その趣旨を、第1章の最後に付け加えました。

議論3 「統合」と「構成」：用語の定義と使い方

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

シンセシオロジーでは「統合」と「構成」は中心的な概念となっています。これら二つの用語はこの論文でも多く用いられていますので、定義と使い分けについてコメントします。

「統合」と言うときは、もともと別々であった要素を統べて一つにまとめ合わせる過程とその事実の主たる関心があります。まとめ合わせた結果どのようなものができ上がったかへの関心は従たるものように思えます。なお「統合する」という動詞の直接目的語には要素がきます。

一方、「構成」と言うときは、結果としてでき上がったものの方に視点があり、それがどのような構えをしており、どのような要素から成り

立っているかに主たる関心があります。他方、要素をまとめ合わせる過程への関心は従たるもののように思えます。なお「構成する」という動詞の目的語にはでき上がったものがきます。

以上のような用語の定義でよければ、この論文の「統合」と「構成」の用語の使い方を見直していただければと思います。

回答（小林 直人）

興味深いご指摘ありがとうございました。確かに「統合」は要素を合わせていく「過程」に中心があり、一方、「構成」は、「ある目的に向けて」「統合」と並行しつつ各要素の相互作用をより「精密に調節」していくことと考えられます。その観点から語の使い方を見直すとともに「構成・統合」と言う時は順序を逆に、「統合・構成」という言葉に改めました。

議論4 構成要素間の関係とフラクタル構造

コメント（小野 晃）

シンセシオロジーの構成方法の3つの基本型が図1に提示されています。要素技術と統合技術とを関係付けるこれらの図式は、互いの論理的関係を示しているものであり、必ずしも時間軸上の前後関係（矢印の方向に時間が経過すること）を示しているものではないようにも見えます。一方、図3の「螺旋」、図6の「循環」、図9と図12の「フィードバック」は、時間軸上の前後関係を示す概念に見えます。

また図2に示されているように、技術体系は一般に多層構造になっており、下位の階層での統合技術は、上位の階層にいくと改めて要素技術として位置付けられることがあります。図12の「フラクタル構造」とは、このような要素技術と統合技術の関係が事象の大小によらず互いに相似形で、同じ論理構造をもっていることが、また図3では小さな本格研究が螺旋的に展開して上位の階層でのより大きな本格研究に展開することが主張されているように見えます。

筆者も以上のような見解と考えてよろしいでしょうか。

回答（小林 直人）

およそご指摘のとおりだと思います。図1の関係図も、時間軸上の前後関係を表していないわけではなく、例えばブレークスルー型の場合は、ある重要要素技術ができた後に、それに周辺技術を付け加えて統合技術になります。ただし、その場合でも周辺技術がすでに存在している場合もあり、「フィードバック」ほどの明確な時間的な流れの構造を示しているわけではありません。また、フラクタル構造はまさにご指摘のとおりで、下位の階層での統合技術は、上位の階層にいくと改めて要素技術として位置付けられることを示しています。さらに本格研究の場合でも同様の構造を示していると言えましょう。

議論5 アウフヘーベン型の内容

コメント（上田 完次）

第2章においてアウフヘーベン型とは、二つの命題が正と反の関係にあるとき、それを止揚する新概念を創出(合)するとされています。しかし、科学技術での同種の課題としては、ヘーゲル哲学における厳密な対立的矛盾の止揚というよりは、複要素（二つに限らない）間のコンフリクトやトレードオフ問題、全体最適化問題として扱われる場合も多いと思われます。基本型について、概念だけでなく、「構造」、「要素」、「要求」、「機能」、「実体」等で説明していただければ、読者は理解しやすいと思います。基本型について、筆者らがすでに論じた論文があれば、文献の引用をお願いします。

回答（小林 直人）

ご指摘のとおり、ここでいうアウフヘーベン型は厳密な対立的矛盾の止揚というよりは、複要素間のコンフリクトやトレードオフ問題、全体最適化問題等を含んでいます。ここで、アウフヘーベンという言葉を使用してよいかどうか、やや迷いましたが、かなり性質が異なり、場合によっては共存できない二つの技術の組み合わせが高度な統合技術になった例を検討している間に思いあたりました。この論文の例

例えば、[5] 西井準治：高性能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ, *Synthesiology*, 1 (1), 24-30 (2008) がそれにあたります。これはガラスモールド法とインプリント法により「構造」の統合を行ったと考えられます。そして、この考えを発展させて、「これまで統合や構成が困難であると考えられていた複数要素間の複雑な構成方法」としてやや広い意味で使用しました。また、単なる概念ではなく「構造」、「要素」、「要求」、「機能」、「実体」等があるという意味の記述も含めて、第2章に追記しました。

なお、基本型については論文としては過去に発表してはませんが、文献 [4] のレスター教授との議論の中で、筆者の一人 (小林) が示したのが始まりになっています。

議論6 実際の研究における基本類型の活用

質問・コメント (小野 晃)

この論文で提示された研究の構成方法 (3 類型への分類) は、実際に研究を遂行する際に役立ってほしいと思います。その意味で、この論文の 3 類型が妥当であるかどうかは、実際の研究遂行の場で有効に活用できるかどうかで検証されるべきものと思います。図 1 から図 9 までに示されたいろいろなスキームが、研究プロジェクトの企画、提案、体制作り、運営、評価等にどのように役に立てられそうか、お考えがあればお聞かせください。

特に、筆者の一人である小林氏の *Synthesiology* の論文「研究戦略の形成とそれに基づいた構成的な研究評価」(4 巻 1 号) を参照した場合、この構成方法を研究評価へ活用できる可能性はいかがでしょうか。

回答 (小林 直人)

とても有益な示唆を有難うございます。まさに、ここで提示した構成方法の 3 類型やその発展型が最適なものかどうかは、今後さらに実際の研究遂行の場で有効に活用できるかどうかで検証されるべきだと思います。一方で、これらを研究プロジェクトの企画、提案、体制作り、運営、評価等に役立てることは可能であると考えられます。

例えば、近年イノベーションの創出を始めから意識した研究プロジェクトの企画・設計が求められています。そこでの要点は、①研究で開発すべき要素技術や使用すべき要素技術の特性と、それらの関係を明確にして上位の要素技術を構成し、それがさらに上位の要素技術や統合技術に構成していくという「論理的発展構造」をあらかじめ明確にしておくこと、②構成される統合技術を社会での試用を含む実際の応用に供して、その結果を迅速にフィードバックして次の構成にもっていくという「フィードバック・プロセス」の方法をあらかじめ組み込んでおくこと、であるとされます。その際、まさに図 1 から図 9 までに示されたいろいろなスキームを念頭に活用していくことが可能ですし、全体的には図 12 に示された発展構造を応用することができます。また研究提案や研究体制の場合は、要素技術の代わりにそれぞれ「要素概念」「要素グループ」等を考えることができます。

さらに、研究評価では、研究プロジェクトを評価する際の一連の評価プロセスへの応用が考えられます。その場合、研究成果を産み出した構成要素群 (例えば技術的な要素群やマネジメントの要素群) を抽出して、それら自身の特性を評価するいわゆる「要素評価」を行うこと、次にそれらの要素群の関係や時間的発展関係を分析して、ある一定のまとまりの研究成果が産み出された過程を評価する「統合評価」を行うこと、さらにそれらの研究成果が将来どのようなアウトカムとして結実するか実際の応用からフィードバックして予想する「ア

ウトカムの視点からの (フィードバック) 評価」を行うこと、が可能だと思います。今回の論文の分析の過程では、企画や評価にも今回の構成方法が応用できるかどうかまでは考えませんでした。査読者のご指摘によりとても大きな可能性を秘めていることが分かりました。

議論7 技術分野ごとの構成方法の特徴

質問・コメント (上田 完次)

第3章において技術分野ごとの分析がなされ、興味深い特徴が抽出されていますが、2点伺います。

一つ目は、産総研の6つの研究分野は、一般の学問分野の定義とは異なり、社会的 (ないしは政策的) 要請に特徴付けられていますので、外部の読者にも分かるように、また、一般的議論に展開するためにも、分野の定義ないしは由来を説明する必要があるのではないのでしょうか。

二つ目は、そのような分野のそもそもの特徴が、構成方法の特徴を裏付けているのではないかと、すなわち、例えば、戦略的特徴の強い分野が戦略的選択型構成方法になっているというような、自己撞着的な説明に陥ってはいないのでしょうか。

回答 (小林 直人)

第1点目ですが、ご指摘のとおりですので、分野の定義については、第4章の終わりに記述を追加しました。

また、第2点目ですが、ご指摘のとおり、標準・計測分野においては、戦略的目標が明確であるために結果的に戦略的選択型構成方法が多く採用されていることが分かりました。ただし、この方法はむしろ他分野 (環境・エネルギー分野) の論文をいくつか検討している間に見出したものであり、それが標準・計測分野でも結果的に多く見られたということだと思います。また、戦略的選択型構成の中にも技術のブレイクスルーになるものが多く含まれていることもご理解いただければと思います。

議論8 シナリオの仮説形成に関する事例

コメント (上田 完次)

構成学の本質の一つは、解が一意的ではないため、ありうる解候補の提示、または有効な解に至るシナリオの仮説形成です。分析した各論文では、どのような仮説形成がなされたのかを論じる必要があるのではないのでしょうか。

回答 (小林 直人)

仮説形成をしてそれを実現し、それをもとにシナリオを明確化し、さらに次の仮説形成によりシナリオを高度化するということを繰り返すことによって製品化・商品化が示された例として、大場氏による「大場光太郎：実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化, *Synthesiology*, 2 (4), 264-275 (2009).」[45] が挙げられると思います。ここでは、初期において開発した幾つかの有望な要素技術をもとに製品化を目指しました。初期においては、仮説形成として「高性能の光学顕微鏡の実現」というやや漠然としたものでしたが、幾つかの企業と出会うことでフィジビリティを実行して試作品を完成した後に、仮説をさらに高度にしてそれを実現するシナリオを明確にするという過程を繰り返しました。その過程で戦略もより明確になり、最後に商品化が実現しました。ここで、有効な解に至るまでに数々の企業との出会いがあったことがとても大きな意味があったと筆者が述べていますが、仮説形成に基づく構成学の好例であると思います。この論文第5章であらためて言及しました。