

Synthesiology

高品質なプロジェクトマネジメントを実現する
トレーサビリティ・マトリックスの構築

モノピポット遠心血液ポンプの実用化開発

マグネシウムおよびその合金中の不純物酸素分析手法

Synthesiology 論文における構成方法の分析

家庭用固体高分子形燃料電池の実用的耐久性確保
のための技術開発

シンセシオロジー編集委員会

「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。

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に基づく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、すなわち実証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5巻第1号(2012.2) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
高品質なプロジェクトマネジメントを実現するトレーサビリティ・マトリックスの構築 — プロセス中心から情報中心のプロジェクトマネジメントへの変革に向けた基礎理論の提案 — ・・・榮谷 昭宏、狼 嘉彰、神武 直彦	1-15
モノピボット遠心血液ポンプの実用化開発 — 製品につながる医工連携とは — ・・・山根 隆志、丸山 修、西田 正浩、小阪 亮	16-24
マグネシウムおよびその合金中の不純物酸素分析手法 — 研究開発と併行した国際標準化への取り組み — ・・・柘植 明、兼松 涉	25-35
<i>Synthesiology</i> 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、赤松 幹之、岡路 正博、富樫 茂子、原田 晃、湯元 昇	36-52
家庭用固体高分子形燃料電池の実用的耐久性確保のための技術開発 — 固体高分子形燃料電池の劣化加速試験法のための劣化要因解明 — ・・・谷本 一美、安田 和明、城間 純、秋田 知樹、小林 哲彦	53-61
報告	
研究・技術計画学会構成学ワークショップ—シンセシオロジー（構成学）：知の統合からイノベーションへ—	62-68
編集委員会より	
編集方針	69-70
投稿規定	71-72
編集後記	79
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Construction of a traceability matrix for high quality project management — A proposal of a basic theory toward a change from process-centric management to information-centric project management — --- A. SAKAEDANI, Y. OHKAMI and N. KOHTAKE	1
Research and development of a monopivot centrifugal blood pump for clinical use — Collaboration between a medical team and an engineering team toward a product — --- T. YAMANE, O. MARUYAMA, M. NISHIDA and R. KOSAKA	16
An analysis method for oxygen impurity in magnesium and its alloys — International standardization activity in parallel with R&D — --- A. TSUGE and W. KANEMATSU	25
Analysis of synthetic approaches described in papers of the journal <i>Synthesiology</i> — Towards establishing synthesiological methodology for bridging the gap between scientific research results and society — --- N. KOBAYASHI, M. AKAMATSU, M. OKAJI, S. TOGASHI, K. HARADA and N. YUMOTO	36
Durable polymer electrolyte fuel cells (PEFC) for residential co-generation application — Elucidation of degradation mechanism to establish an accelerated aging test method of PEFC — --- K. TANIMOTO, K. YASUDA, Z. SIROMA, T. AKITA and T. KOBAYASHI	53
Messages from the editorial board	73-74
Editorial policy	75-76
Instructions for authors	77-78

高品質なプロジェクトマネジメントを実現する トレーサビリティ・マトリックスの構築

— プロセス中心から情報中心のプロジェクトマネジメントへの 変革に向けた基礎理論の提案 —

榮谷 昭宏^{1,2*}、狼 嘉彰¹、神武 直彦¹

ソフトウェア開発プロジェクトにおいて、設計に関する情報は予算や品質を左右する重要なものである。そこで、この研究ではプロセス中心のプロジェクトマネジメント技術では見え難い情報に着目し、情報がプロジェクト内でどのように移転していくのかをトレースを可能とするモデルを構築した。そのモデルにより、トレースの複雑性を定量化するトレーサビリティ・マトリックス手法を構築した。そして、ソフトウェア開発プロジェクトにそのモデルと手法を適用することで高品質な情報中心のプロジェクトマネジメントを実現する手法を示した。

キーワード：トレーサビリティ・マトリックス、複雑性、定量化、情報中心、プロジェクトマネジメント

Construction of a traceability matrix for high quality project management

– A proposal of a basic theory toward a change from process-centric management to information-centric project management–

Akihiro SAKAEDANI^{1,2*}, Yoshiaki OHKAMI¹ and Naohiko KOHTAKE¹

Design information is important for software development projects because it determines their cost and product. In this research, a model has been made which can trace how information moves in a project by paying attention to the design information which is hard to trace by process-centric project management. On the basis of the model, a traceability matrix method has been constructed which quantifies the complexity of the traceability. It has been confirmed that high quality information-centric project management is realized by applying the model and the method to software development projects.

Keywords: Traceability matrix, complexity, quantitation, information centric, project management

1 はじめに

PMBOK^[1]によると“プロジェクトとは独自のプロダクト、サービス、所産を創造するために実施する有機性の業務である。”と定義されている。独自の製品やサービス等を創造するためには、テクノロジー、ヒューマンリソース等さまざまな要素を構成していくことが必要である。つまり、プロジェクトとは構成そのものなのである。そのような構成学の対象となるプロジェクトを高品質にマネジメントするために、現在までも多くの取り組みがなされ先行研究も多い。Visualizing Project Management^[2]、PMBOKはもとより、ソフトウェア開発ではSWEBOK^[3]、Rational Unified Process^{[4][5]}等がプロジェクトマネジメント手法、開発プロセス手法としてそのノウハウを整理している。しかし、このよ

うな手法が整理されているにも関わらず、特にソフトウェア開発においては、いまだにプロジェクトの成功率は向上していない。例えば日本情報システム・ユーザー協会のレポート^[6]によると2004年から2008年まで、500人月以上のプロジェクトでは予算超過案件が半数を占めており、その傾向は毎年一定している。またFrank^[7]は上記と同様にStandish Groupが指摘している「プロジェクトの現状として68%のプロジェクトが失敗」というレポート^[8]を取り上げ、既存のマネジメント技術の有効性について問題提起をしている。具体的には、プロジェクトマネジメント、システムエンジニアリングに関する標準類(ISO15288, IEEE 1220, EIA632, CMMI, INCOSE Handbook, and PMBOK Guide等)をレビューし、それらすべてがプロセス中心であることを指摘

1 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 〒223-8526 横浜市港北区日吉4-1-1, 2 NTTコムウェア株式会社 〒108-8019 港区港南1-9-1 NTT品川TWINSアネックスビル

1. Graduate School of System Design and Management, Keio University 4-1-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8526, Japan,

2. NTT COMWARE CORPORATION NTT Shinagawa TWINS Annex Bldg. 1-9-1 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8019, Japan

* E-mail: a.sakaedani@sdm.keio.ac.jp

Original manuscript received July 26, 2011, Revisions received November 7, 2011, Accepted December 28, 2011

している。そして「既存のプロジェクトマネジメント技術、システムエンジニアリング技術は、さらにより良くマネジメントするための方法論を求めている」と述べ、既存のプロセス中心のマネジメントの限界を指摘している。

そこでこの研究では、より高品質なプロジェクトマネジメントを実現するための方法論を構築することを目的とし、その実現のために、プロジェクトの全体と細部を的確に把握し“木も見て森も見る”方法論を構築する。具体的な手段として、プロジェクトのアーキテクチャ（＝システムを構成する要素とその要素間の関係性を整理したもの）を明らかにする。そしてプロジェクトのアーキテクチャの複雑性を指標として全体を俯瞰し、また個々の要素の難しさ・要素間の関係性も指標化することで、プロジェクトの状況を定量的にマネジメントすることを可能にする（図1）。最後に、そのアーキテクチャを示したプロジェクトのモデルを用いて高品質なプロジェクトマネジメントを実現する方法論を検討していくこととする。

2 プロジェクトマネジメントの現状とその問題点の分析

2.1 移転コストの観点から考える情報とモノの違い

移転コストの観点から情報とモノとは異なる特性をもつ。以降では、情報とは人のもつ知識やノウハウ、製品や文書等で形式化された知識やノウハウ等を指し、モノとは物理的に有形なモノと定義する。そのように考えると、例えばモノを受け渡して組み立てる自動車工場のような場合は、担当者がある作業を終え次の作業者に渡せば一つの作業は完了する。しかしソフトウェア開発のプロジェクト内では、情報が主たる移転物でありその移転コストにはモノと異なる特徴がある。情報移転コストとは、情報の探し手（受け手）に利用可能な形で情報を移転するためにかかる総費用と定義される^[9]。情報移転コストをコントロールするには暗黙知の移転の難しさ、情報の受け手と送り手の能力差による移転の難しさ、情報量が多い場合の移転の難しさ

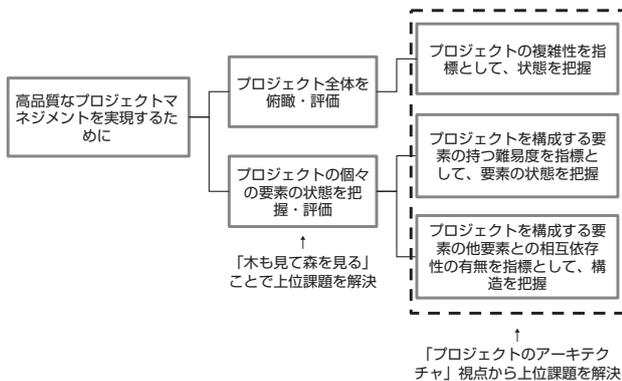


図1 この研究の構成

表1 情報とモノの移転コストの違い

移転コストの決定要因	情報	モノ
移転対象の性質	情報内容の暗黙性（ノウハウなど）により、その移転に大きなコストがかかる。	モノ自体の性質に依存して移転コストは変化しない。（移転速度や量など、移転条件に依存）
移転対象の送り手と受け手の属性	受け手と送り手の能力によって、情報の移転コストが変化する。	送受信者の属性には依存しない。（受け手から送り手に渡してしまえば、移転は完了）
移転されなければならない移転対象物の量	複雑で情報量が多いほど多くの情報交換が必要となり、移転コストが増加する。	量が多いと移転コストは増す。（量が多くても運んでしまえば1回で移転作業は完了）

を考慮しなければならない（表1）。

ある作業員から移転される情報を次の作業員が元の情報を確認することなく、その情報の精度と詳細さを保つことは難しい。情報はモノとは異なり、モノを移転する場合のようにプロセスを明確に区切り、情報移転を進めることは難しく、その移転のために何度も同じプロセスを繰り返させる特性をもっている。

2.2 プロセス中心から情報中心のプロジェクトマネジメントの必要性

ソフトウェア開発のプロジェクトでは、物理的なモノではない情報の移転が主体となっている。つまり、情報中心であるソフトウェア開発プロジェクトの生産効率を向上させるには、決められた手順どおりの作業を円滑に進めることを追及したプロセス中心の改善だけでは限界がある。プロセス中心だけでは情報移転に関する特性（暗黙知の移転の難しさ、情報の受け手と送り手の能力差による移転の難しさ、情報量が多い場合の移転の難しさ）から生じる問題は解決しない。プロセス中心から情報中心への変革が必要なのである。

2.3 情報の特性：多義性と情報粘着性

情報中心で考える上で、情報移転コストについて再考する。そこで、情報に関する以下の二つの概念に着目した。以降では情報移転コストとこの二つの概念の関係を説明する。

情報粘着性：情報移転の難しさ^[9]

多義性：情報が多様な意味に解釈されてしまう性質

情報粘着性とは情報を移転する場合、情報のもつ性質である粘着性のため、送り手から受け手に対して情報を移転することの難しさを意味する用語である。粘着性とは要素とそれがもつ情報が不可分なことを指し、この粘着性が原因で情報移転コストが生じる。粘着性の要因としては表1に上げたような3つの決定要因がある。情報の送り手と受け手が1:1の関係の場合はその3つの要因に起因する情報粘着性によって情報移転コストが規定される。例えば、暗黙知の形式化は多くの企業で推進されていることである

が、それは暗黙知のままでは情報粘着性が高くその情報移転コスト、つまり社内のある社員のもっているノウハウを他の社員に習熟させるためのコストがとて大きくなってしまふ。ノウハウを引き出す、または学ぶために何度も情報のやり取りをする必要が生じることが考えられる。またはそもそも他の社員に移転することすらできないかもしれない。その結果、企業全体の能力を底上げするための障壁になってしまう。そのため、社員のもっているノウハウを形式化（見える化）することで、情報をやり取りする回数を削減し、情報移転コストの低減を図ることが必要なのである。

一方、プロジェクト等組織の中の1:nの関係において、情報移転コストを説明するには情報粘着性だけでは不十分であると考へた。なぜならば、送り手が別々ならば、受け手との関係も一意に決まり、その送り手のもつ情報粘着性を合計することで情報移転コストは得られる。しかし、送り手が同じ場合は、送り手のもつ情報粘着性を個々の受け手に合わせるためのコストも加味しなければならない。言い換えれば、ある受け手から別の受け手に情報移転先を変えるときに準備を行うためのコストを考慮しなければならないと考へたからである。そのコストを加味するために多義性という概念の導入を考へる。

多義性とはある情報は受け手の観点により多くの意味をもってしまふことを言う。例えば一人の受け手に情報を移転するときの一つの情報が意味A、Bの2種類の意味付けがなされるかもしれない。しかし、複数人の場合はその意味付けがA、Bだけでなく、他の人からはC、Dとして捉えられるかもしれない。そのように情報移転先が増えれば、その分多義性も増す。情報の送り手は、複数の受け手に正しい意味付けをしてもらうために、例えば説明用の資料に複数の受け手からも正しく理解されるような情報をあらかじめ盛り込んだり、または受け手に応じて説明用資料を作り直す等を行う。受け手が特定され情報移転が始まれば情報粘着性の問題で処理できるが、受け手が特定されなかったり、情報移転が始まる前には、情報粘着性ではなくこのような多義性による移転コストを考へる必要があると考へた。以上のように、1:nの関係で生じる多義性によるコストは、その受け手の数に依存している。多義性を抑えるためには受け手の数も低減することが必要なのである。また次に、n:1の場合は移転されたn個の多義的な情報を統合して、一つの意味付けにするという思考の整理が必要になる。n個の情報の意味について整合性をとり、一つの意味をもった情報として統合するのである。その統合作業もnに依存して情報移転コストも変わってくると考へられ、1:nと同様にnの数は少なくすることが望ましい。

さらに、限られた予算や時間のもとで行うプロジェクトで

は、情報移転コストが高くなればその制約上、情報移転が完全に終わらないまま作業を進めてしまふケースが考へられる。そのような状況を避けるためには、極力移転コストを下げた状態をプロジェクト内に作り出し、それをマネジメントしていくことが必要になってくる。したがって、情報中心であるソフトウェア開発プロジェクトにおいては、情報粘着性と多義性をマネジメントすることが、送り手と受け手でやり取りされる情報の正確な移転を促し、より高品質なプロジェクトマネジメントを実現する上で重要であると考へた。

3 プロジェクトのアーキテクチャ（トレーサビリティ・マトリックス）の構築

情報中心のプロジェクトにおいて、情報粘着性と多義性をマネジメントするには、プロジェクトを構成する要素にどのようなものがあり、それぞれの要素がどのような関係性にあるのか整理する必要がある。そのためのモデルを構築する。

3.1 構成要素の抽出を実現する概念

オブジェクト指向によるビジネスモデリングにより要素を抽出する。特にオブジェクト指向を概念に取り入れた要求工学^[10]によるとプロジェクトというシステムを構成する要素として、ニーズ (Needs)^{用語1}、基本要件 (Feature)^{用語2}、要求条件 (Requirement)^{用語3}が抽出される。ニーズは基本要件と、基本要件は要求条件と関係する。機能(Function)^{用語4}、実体または部品 (Component)^{用語5}は「全てのものは機能をもつ」^[11]により、要素として抽出される。部品は機能と関係する。そして、プロセスフローから、成果物(Artifact)^{用語6}、作業 (Activity)^{用語7}、担当 (Team)^{用語8}を要素として抽出する。担当は作業と、作業は成果物と関係する。

3.2 要素間の関係性整理を実現する概念と関係性の事例

プロジェクトというシステム全体のアーキテクチャを定義する上で、機械工学の「公理的設計」^{[12][13]}と、組織科学の「ビジネスアーキテクチャ」^{[14][15]}という概念の二つに着目した。組織活動を設計する上ではEA (エンタープライズアーキテクチャ) が類似したものと考へられるが、EA手法では参照アーキテクチャ^{用語9}までは示してはいない^[16]。そのため、自分でシステムを構成する要素とその関係性を定義する必要がある。しかし、この二つの概念ではものづくりのプロセスからものづくりに携わる組織、そしてそもそもどのようなものを作るべきなのかという顧客要求までも考へし、その要素間の関係性について指針まで示しているものであることに大きな特徴がある。

公理的設計の考へ方は、顧客領域・機能領域・実体領域・プロセス領域の各領域間で情報が写像され設計活動

がなされるという概念である。例えば顧客領域にある要求条件という設計にかかわる情報が、機能領域における機能に対する仕様として写像され、機能を実現するという考え方である。他も同様に各領域を同じ情報が写像され、各領域で最適な形に翻訳されて処理されているのである。また、その情報の写像は双方向に発生すると考えられている。そして、この概念に3.1で抽出した要素を当てはめると次のようになる。顧客領域は顧客の要件等を指すことから、ニーズ、基本要件、要求条件という要素で構成される。機能領域は文字どおり、機能という要素で構成する。また実体領域は設計解、つまり製品自体を示すので、部品および実体という要素で構成される。そして、プロセス領域は生産条件を指すので、成果物、作業、担当という要素が構成することとなる。以上により、開発プロジェクトという組織システムのアーキテクチャが規定された。つまり、開発プロジェクトの構成要素とその関係性を明らかにすることができた。

3.3 情報移転のトレースを実現する概念

オブジェクト指向で分析し、抽出した要素の関係を、公理的設計の理論に基づいて関連性を整理すると図2のようになる。

要求を把握するために、はじめにニーズを把握し、それを基本要件として整理し（図2では簡略化のため、この2項目は省いている）、最後に要求条件として定義する。また要求条件を実現するための機能を実装している実体が必要であり、その実体を作るためには設計内容をまとめた成果物が存在する。そして、成果物を作るための開発作業は、各担当で実行される。

ソフトウェア開発プロジェクト内で写像される情報の移転は例えば以下のようなケースが挙げられる。「ユーザー ID（以下 UID と記述）とパスワード（以下 PW と記述）を入力時にそれぞれの入力桁数チェックする」機能を実現する場合、各機能をどのような部品にどう実装するか設計しなければならない。例えば UID と PW に対して、それぞれ個別に桁数チェックの機能を部品として実装するのか、それとも桁数チェックは一つの部品として実装し、個々の ID チェックは同じ部品を共用するように実装するのか、どちらかの構造が選択される。それにより部品に対する設計も当然異なる。また、桁数チェック機能を共通化するならば、UID の体系、PW の体系が明確になるまでそのチェック機能の開発に着手できない。しかし個別に実装するならば片方の ID 体系が明確になれば、その設計は着手可能である。このように機能や部品、作業という要素が設計情報を必要な形に翻訳し移転し、影響を及ぼしあっており、その情報の移転コストは、プロジェクトの品質にも影響を及ぼす。

次にその情報移転コストについて考える。図2の左図は各要素が直線的に相互依存しているのみであるが、右図ではメッシュ構造となっている。メッシュ構造の方が複数の要素と情報をやり取りするため、多義性の例で説明したように情報移転コストもかかると考える。また図2の右図のような場合、例えば作業という要素について、その難易度が高いと情報粘着性も高まるため情報移転コストが増加する。設計書の内容をまとめるにあたって独自の表記法を用いている場合、その表記法では設計情報として表現しきれない内容があるかもしれない。その結果、設計情報が漏

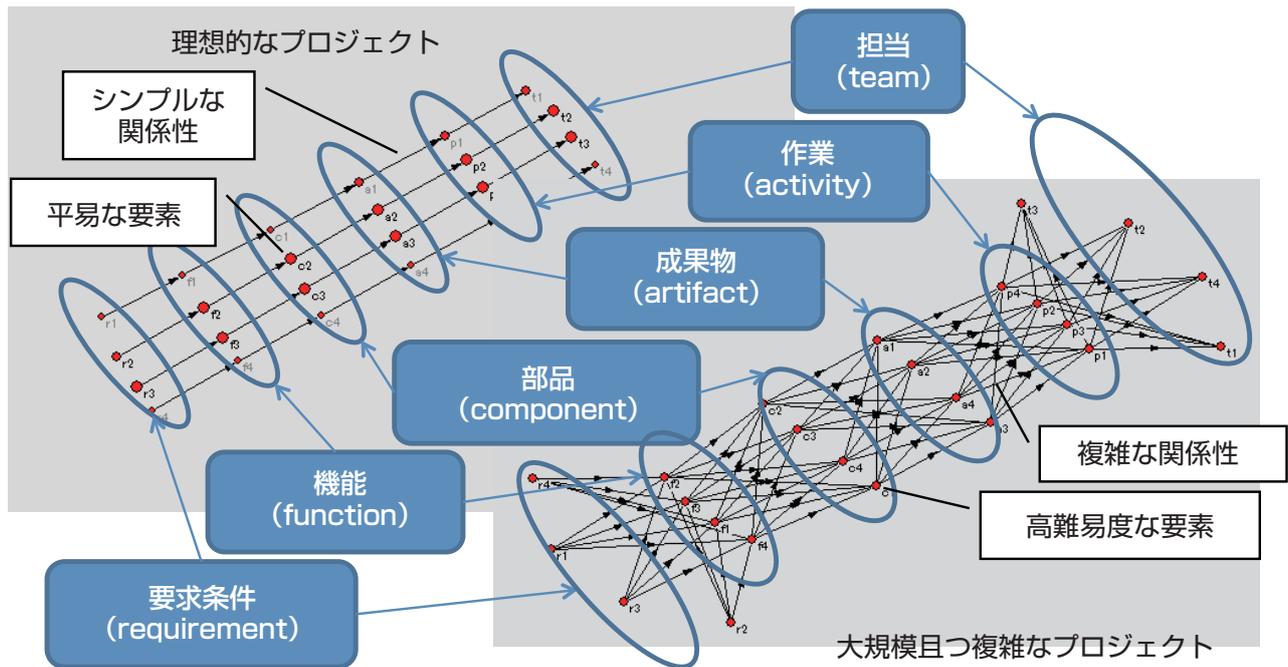


図2 理想的なプロジェクトと大規模且つ複雑なプロジェクトのネットワークモデル

れ、設計ミスを生発してしまう。独自の表記方法という情報移転を難しくする要因により、高い移転コストを生じてしまう事例である。したがって、要素間の関係は、極力独立性を保つこと、具体的には行列を用いて二つの要素間の関係を整理した場合、一番独立性の高い対角行列に近づけること、また要素自体の難易度（例えば前述のように作業の難しさを意味する概念。詳細は後述）を低減することが情報移転コストを低減するために必要である。言い換えると、プロジェクトのアーキテクチャにおいて情報移転コストを低減し正確に情報を移転するためには、情報粘着性と多義性という概念を要素間の相互依存性と要素自体のもつ難易度で制御することが必要である。

3.4 プロジェクトのアーキテクチャ

基礎概念で示した図2の関係性をマトリックスで表現すると図3のようになる。

この関係性はベクトルを用いると以下のような行列計算(式1)と同意である。

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Requirement} \\ \text{Function} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Function} \\ \text{Component} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Component} \\ \text{Artifact} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Artifact} \\ \text{Activity} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Activity} \\ \text{Team} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{pmatrix}$$

$$\vec{r} = A\vec{t}$$

・・・(式1)

\vec{r} : 要求条件ベクトル、 \vec{t} : チームベクトル、 A : システムマトリックス

その結果得られたトレーサビリティ・マトリックスはこの研究ではシステム全体の特性を示すという意味でシステムマトリックスと呼ぶこととする。このように行列を掛け算することで、担当と要求条件との関係を明示するトレーサビリティ・マトリックス(システムマトリックス)を得ることができる。

4 木も見て森も見るための指標

要素間で正確な情報移転を促し、より高品質なプロジェクトマネジメントを実現するためには、前述のとおり情報粘

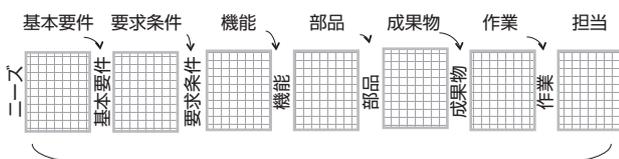


図3 プロジェクトのトレーサビリティ・マトリックス

着性と多義性をマネジメントすることが必要である。多義性をマネジメントするためには、担当、作業、成果物等の領域間または領域内での要素間の関係性（以下、相互依存性と定義）を制御する必要がある。関係性のある要素数の増加に伴って情報移転を誤る確率は高まるからである。つまり、相互依存性が高まれば多義性も増加する。多義性により生じるコストを無理に低減してしまうと、複数の受け手が誤った意味付けを行う可能性も増加する。また、情報粘着性をマネジメントするには要素自体が抱える正確な情報移転を阻む要因（以下、難易度と定義）を制御する必要がある。要素自体の特性によっては、情報を移転する際に理解すべき本質的な情報までたどり着かず、情報移転を誤る確率が高まる。つまり、難易度が高まれば情報粘着性も高まり、剥ぎ取るべき情報を剥ぎ取りきれずに移転を終えてしまうことも考えられる。

以上から、情報移転の正確性は相互依存性と難易度で決まる。プロジェクト全体の視点から見ると、相互依存性を抑制して正しく情報移転する確率と難易度を下げて正しく情報移転する確率の積によって、プロジェクト全体で情報が正確に移転される確率も決まる。したがって、プロジェクト全体としては、相互依存性と難易度の積を複雑性と定義し、その複雑性を指標として制御する必要がある。

4.1 相互依存性の定量化

対角行列に近い方が全体の見通しも良くなる。また情報移転の観点からも多義性が低くなる。そのため、多義性の要因となる要素間の“相互依存性”の評価にはシステムマトリックスと単位行列との距離を測ればよい。単位行列と比較するにあたり、非対角成分の数が多いほど多義性が高くなることが表現できる必要がある。そのため、線形性のあるユークリッドノルムを用いて距離を測ることとした。つまり、評価するシステムマトリックスから単位行列を引き、そのマトリックスのユークリッドノルムが相互依存性となる。ただし、相互依存性に対するシステムマトリックスの成分値は、要素間の関係性がある場合は1を、関係性がない場合は0を設定することとする。以降はこれをシステムマトリックスsと呼ぶ。

4.2 難易度の定量化

要素の情報粘着性により生じる要素の“難易度”については、システムマトリックスの成分値で表現することとし、難易度を成分値とするシステムマトリックスをシステムマトリックスnと呼ぶ。このシステムマトリックスn全体の大きさを評価することで難易度の定量化が可能になる。そのため、単位行列の何倍の大きさをもった行列であるか、つまりシステムマトリックスnのユークリッドノルムによって評価する。ただし、難易度に対するシステムマトリックスnの成

分値は、要素間の難易度を評価して決める（難易度の設定指針：参考資料1）。基準値は1であり、難易度が高いほど1より大きな値をとり、低ければ1より小さな値をとる。

4.3 複雑性の定義

前述のとおり情報移転の複雑性は以下のように定義する。

「複雑性=難易度×相互依存性」

とする。ただし、難易度=“システムマトリックス n”のユークリッドノルム、そして、相互依存性=“システムマトリックス s - 単位行列”のユークリッドノルム、とする（計算事例：参考資料2）。

難易度・相互依存性は共にプロジェクトの個々の要素と要素間の状態を反映した変数である。したがって、それらの指標を捉えることで各行列の要素と要素間の関係性を捉えることができる。同時に、それを掛け合わせた複雑性の変化を捉えることでプロジェクト全体を捉えることができる。

4.4 正方行列化について

要素間の関係は必ずしも正方行列にはならない場合もある。その時には、相互依存性の算出に必要な対角化をするために正方行列化する必要が生じる。正方行列化するには成分値0を付与することで正方化する。成分値0であるので、正方行列化によって相互依存性は追加した次数分その値は変化する（なぜならば、正方行列化で追加した行または列の分の対角成分を引くため、追加分の対角成分が-1になるからである）。しかし完全な独立性は単位行列という正方行列で表されることを考えると、非正方行列における成分値0の付与による相互依存性の値の変化はその非正方行列の独立性を示す指標であると解釈される。以上のことから、成分値0の付与により正方行列化することをルールとする。

5 トレーサビリティ・マトリックスを活用したプロジェクトマネジメントのPDCAサイクル

この章ではプロジェクトの全体と細部を的確に把握し“木も見て森も見る”方法論を説明する。説明にあたってはPDCAサイクル（計画→実行→評価→改善のサイクル）をシナリオに用いる（図4）。

はじめに、トレーサビリティ・マトリックスを作成するために具体的に要素を整理し、マトリックスを構成する。そして出来上がったトレーサビリティ・マトリックスの難易度や相互依存性を改善してプロジェクト全体としての複雑性を低減する。そのプロジェクトで実際に開発作業を進め、その進捗状況をチェックする。進捗指標としてプロジェクトの複雑性を用い、その変化を見ることでプロジェクトの状況を俯瞰する。複雑性の変化が増加傾向にあるならば、それはプロジェクトの状況になんらかの問題が生じているため、その原因となっている要素を洗い出す。シミュレーションにより、要素の難易度や相互依存性を変化させ、プロジェクト全体の複雑性を低減することに一番効果的な要素を洗い出し、プロジェクトの状況を改善する。以降ではPDCAサイクルに沿って詳細に説明する。

5.1 PLAN（計画）

5.1.1 要素の洗い出しとその関係性の整理

図4に示したようにプロジェクトの現状分析を行い、システムマトリックスの作成に必要な要素の洗い出し、その関係性の整理を行う。しかし、要素の粒度がまちまち、または関係性が分からない等の理由からシステムマトリックスを作成できないことも想定される。そういった場合は、そもそもプロジェクト計画になんらかの問題があると考えられるため、その解決を行う。

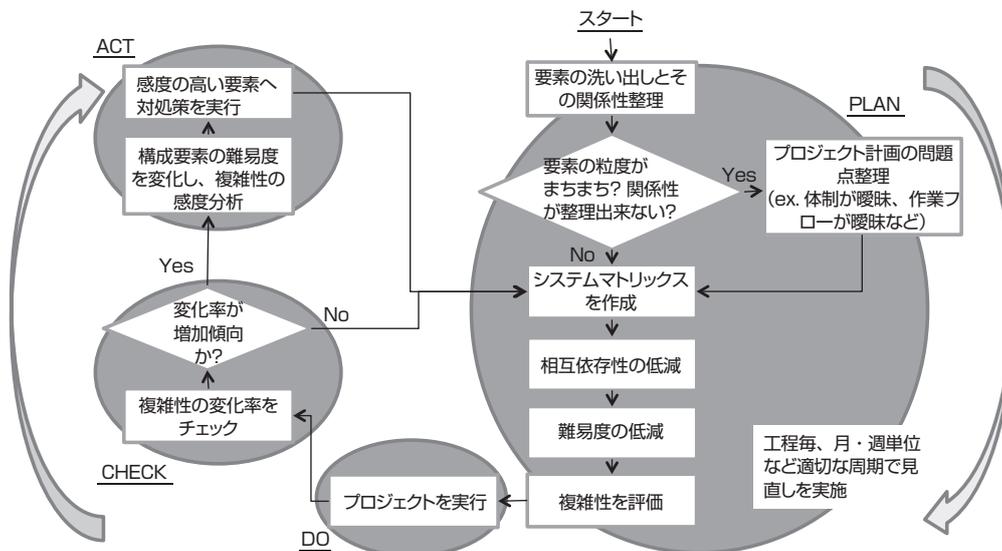


図4 プロジェクトマネジメントのPDCAサイクル

5.1.2 プロジェクト計画の問題整理

例えば体制が曖昧で他と比べて大きな粒度しか書けない担当があるならば、その整理を行うことが必要である。また他の例では、上流工程において要素を洗い出すとき、下流工程で明確になる部品や機能がはっきりしないことも想定される。その場合、見積もり根拠を確認する必要がある。見積もり時にはそれなりの根拠をもっているはずで、もし根拠がはっきりとしない場合は、プロジェクト計画立案時の課題として、早急な計画の再検証を行う必要がある。

以上を整理し、システムマトリックス s とシステムマトリックス n を作成する。

5.1.3 個々のマトリックスの相互依存性・難易度の低減と複雑性の評価

個々のマトリックスに対して対角化を目指した改善を行う。しかし、その結果、要素の難易度を上げてしまうケースが想定される。しかも、対角化した以外のマトリックスの要素の難易度を増大させてしまうケースも想定される。そのため、必ずプロジェクトを俯瞰的にみるために複雑性を算出してプロジェクト全体への影響度を確認することが必要である。

プロジェクトの構造を示すシステムマトリックスは図3で示したとおり、7つの行列の掛け算で導かれる。行列の掛け算の特性から、全行列または三角行列が組み込まれた計算の解は必ず全行列または三角行列となる。対角行列を解として得るには各行列を対角行列にする必要がある。

ステップ1として、システムマトリックス s を構成する7つの各行列それぞれの関係性を整理し、対角行列に近づけることによって相互依存性を低減する。ステップ2として、システムマトリックス n を構成する各行列で整理された関係性の中で成分値の高い関係、つまり難易度の高い関係を低減することによって、行列の難易度を低減する。以上によって、システムマトリックス全体の複雑性（＝相互依存性×難易度）の低減を実現する。

しかし、現実のプロジェクトではシステムマトリックス s の7つすべての行列を対角化することは困難である。したがって、例えば各行列を三角行列化することを目的にプロジェクトの設計を改善する（相互依存性の低減）。そして、各要素間の関係性を例えば開発ツール等の導入によって平易なものとし、システムマトリックス n の行列成分値の値を低減する（難易度の低減）。それにより全体としての複雑性を低減する案もある。また別案として、システムマトリックス s の7つの行列の中で全行列は一つまたは二つの行列に絞り込み、他の5つか6つの行列は対角化し、システムマトリックス n の成分値を極力低いものにするような改善も有効である。全行列である箇所の複雑性は高いかもしれない

いが、対角化した箇所の複雑性を低減することにより、全体の複雑性を下げるという考え方である。ただし、どちらの場合も必ずしも複雑性の低減に有効でないケースも有り得るため、プロジェクトの設計段階でのシミュレーションによる比較検証は必要である。

例えば、ソフトウェアをすべて手作りするスクラッチ開発^{用語10}で計画を立てていたが、その複雑性を軽減するために、ソースコードを自動生成するツール（以下ジェネレータと記述）の利用、またはパッケージソフト（以下PKGと記述）を利用するケースを検討する。その検討の流れを説明する（図5）。スクラッチで開発をする場合の要素全体の関連は参考資料3に示した。特にその中で着目した要素のみを図6に切り出した。画面遷移部分のみ（いわゆる3層モデルのプレゼンテーション層）を対象としている。作業要素として画面設計、成果物要素として画面仕様書・画面遷移図、そしてそのソースコード、また部品としてログイン画面、メニュー画面等を、そして機能としてはUID入力機能、PW入力機能等を挙げた。

このように要素の数が多く、相互依存性も高いことから、その改善を試みることにした。PKGでは、その製品内に機能もすべて実装されていることから、設計者やプログラマーが個々の部品や機能を意識することがないと考え、部品として画面制御PKG、機能として画面制御機能のみを要素として挙げた（図7）。

また、ジェネレータは部品や機能の構造はスクラッチの場合と同じとした。しかし設計書からソースコードが自動生成されるので、設計者やプログラマーがソースコードを意識することは無い。そのためスクラッチとの構成要素の違いはソースコードの有無だけである（図8）。

以上の3種類を比較評価した場合、一番相互依存性が低いPKGを選択することが適切と考えられた。しかし、その選択をした場合の周辺要素の影響を再考してみる。つまり、PKGに関する習熟度等を考慮したときに別の要素の難易度を増大させている可能性を考慮する。それぞれのシ

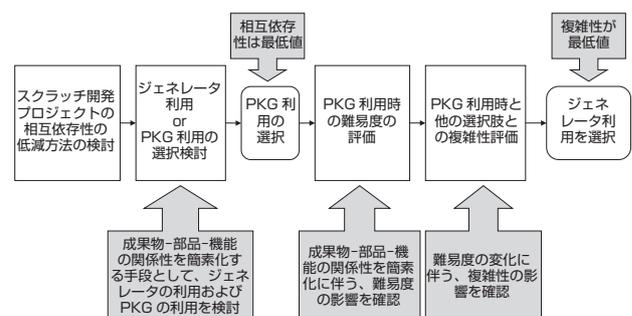


図5 相互依存性・難易度を考慮した複雑性の評価フロー

表2 担当 (team) – 作業 (activity) マトリックス

		担当 (Team)				
		要求管理担当	アーキテクチャ設計担当	詳細設計担当	実装担当	テスト担当
作業 (Activity) 作業	画面設計	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
	業務ロジック設計	1.5	2.25	1.5	1.5	1.5
	DB 設計	1.5	2.25	1	1	1

システムマトリックス n の成分値は基準となる 1 に設定していたが、この PKG の習熟度を考慮するのに伴い、表 2 のように成分値を定めた (機能と部品の関係等他のマトリックスの成分値は 1 のまま)。なお、表 2 では、担当 (team) と作業 (activity) の各要素に難易度 (1 または 1.5) を設定し、マトリックスの成分値は行と列の難易度の掛け算によって設定した。

その結果、表 3 に示したようにプロジェクト全体として 104.89 の難易度を示すことが分かった。これはスクラッチ開発時の 78.18 という値を上回っており、また同時に他の選択案としてジェネレータを利用した場合の難易度 (64.75) よりも大きい値を示した。

以上のデータを基に、PKG、ジェネレータおよびスクラッチのそれぞれを活用した場合のプロジェクトの複雑性を再評価した。その結果が表 3 であり、ジェネレータの選択が最適であると最終的に結論付けた。

5.2 DO (実行)

計画したとおりの形でプロジェクトを実行し、開発を進める。例えば上記の例ならばジェネレータを利用して開発

表3 各案の最終評価

	相互依存性	難易度	複雑性
スクラッチ開発	77.79	78.18	6081.42
ジェネレータ	64.40	64.75	4169.44
PKG 利用 (未習熟時)	57.16	104.89	5995.12

を進める。

5.3 CHECK (評価)

前節まではある時点で複数のプロジェクトを比較した議論であったが、この節では一つのプロジェクトに閉じて、その時間的变化に対して議論を行う。

複雑性は開発が進むにつれて低減する。なぜならば、完全に情報移転が終わった要素間ではその相互依存性が無くなっていくためであり、最終的には相互依存性を示すマトリックスの要素値 = 0 となる。同時に、習熟効果等により難易度も時間軸の変化に伴って低減する。ただし、難易度は必ずしも最終的に要素値 = 0 になるとは限らない。例えば、限られた開発期間の中でパッケージソフトの全仕様を把握し、どのような場合でも対処可能なスキルを習熟することは通常は難しい。しかし、相互依存性は情報移転が完全に終われば 0 になるので、難易度を表すシステムマトリックスを S_n 、システムマトリックスの次数を N とすると、システムマトリックス s から単位行列を引いた行列成分はすべて対角成分が -1 になる。したがって、そのノルムは \sqrt{N} になり、複雑性は以下の値に収束する (式 2)。

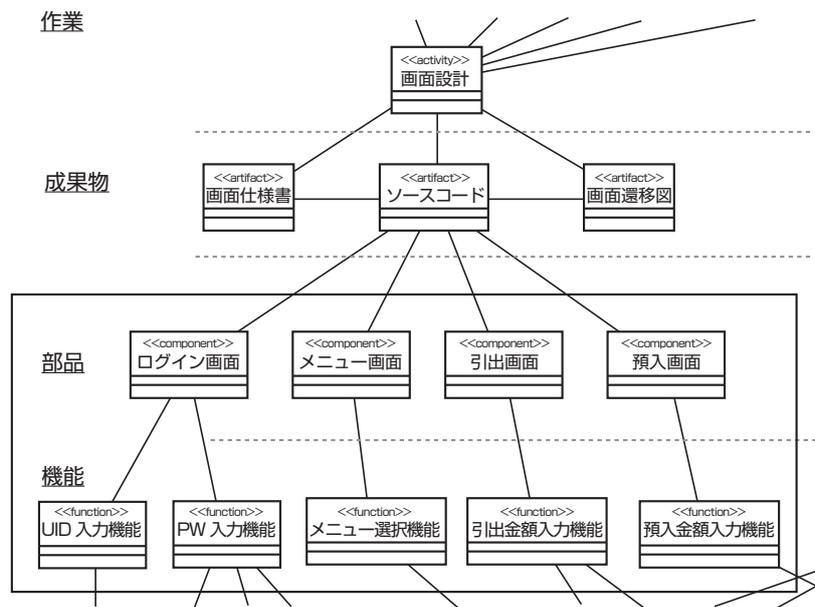


図6 スクラッチ開発のネットワークモデル (画面遷移関連のみ)

$$\text{複雑性} = \sqrt{N} \times \|Sn\| \dots (\text{式 2})$$

なお、完全に対角化されているシステムマトリックスは特異点と考え、式2の対象としない。完全に対角化されたシステムマトリックスとは図2における理想的なプロジェクトであり、そもそも複雑性を議論する対象にならないためである。

したがってプロジェクト全体の進捗状況を管理する方法として二つの観点が考えられる。

一つはプロジェクト全体を俯瞰する視点（森を見る）から、複雑性を管理指標として進捗管理を行う。複雑性の変化率が減少傾向にあるならば順調に開発が進行していることを示し、変化率が増加傾向にあるならばプロジェクトで何か問題が生じている可能性があることを示している（図9）。

また、プロジェクトの個々の要素をマネジメントする観点（木を見る）からは、相互依存性を管理指標として進捗管理を行う。例えば、担当ごとに割り振られた要素を決め、その要素間の相互依存性を管理する。相互依存性の数とその変化率を進捗指標とすることも一つの場合である。

5.4 ACT (改善)

次にプロジェクトの“木を見る”という観点から、先ほどの複雑性の変化率が増加傾向にあるならば、何が問題なのかをモデルから俯瞰し、その問題点を洗い出す。そして直接的にその問題を解決し、難易度や相互依存性を低減できるならば、その対処を行う。もし直接的に対処できないならば、その他の要素によってシミュレーションを行い、その感度分析を行う（図10）。この例では要素aの方が要素bよりも複雑性低減に効くことが分かる。

このように要素の難易度軽減によって複雑性の低減に効

く要素を洗い出し、対処すべき要素を絞り込む。要素が決まれば、その要素の難易度低減に必要な対処を行う。

5.5 PDCAサイクル実行にあたっての留意点

プロジェクトマネジメント作業稼働の観点からPDCA実行にあたって、以下の点に留意する必要がある。

まず、システムマトリックスの単位とマトリックスを構成する要素の粒度について検討する必要がある。プロジェクト全体を俯瞰するシステムマトリックス、またその中のグループやさらにその配下のサブグループでシステムマトリックス

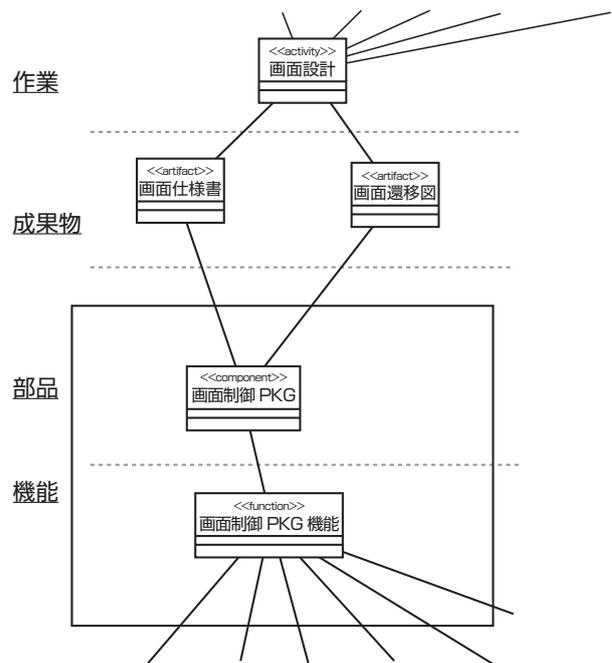


図7 PKG 開発のネットワークモデル（画面遷移関連のみ）

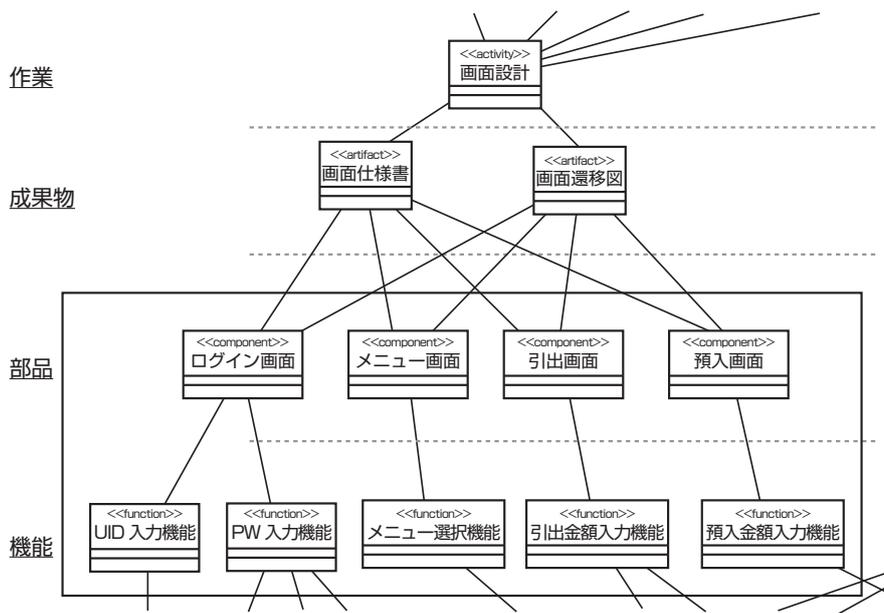


図8 ジェネレータ開発のネットワークモデル(画面遷移関連のみ)

を作成するのか決める必要がある。そのマトリックス単位にあった要素の粒度を検討する必要がある。その構成要素が詳細過ぎると、マトリックスの維持管理のみで作業稼働が逼迫し、マネジメントがしきれない。そして次に、PDCAを回す周期を検討する必要がある。上記にも関連するが、システムマトリックスの単位または要素の粒度が大きすぎると、その周期は長くすべきである。また粒度が小さければ周期は短くすべきである（図11）。

具体的には担当や作業、成果物といった各領域単位に10から20程度の要素数に抑えられるようにシステムマトリックスの単位も検討すべきである。それ以上の要素数では、システムマトリックスはむしろ、ネットワークモデルにおいても現状理解が困難で改善策も検討し難い。また、各領域の要素数を10から20程度にするにはマトリックスの作成単位だけでなくPDCAサイクルの周期も限定する必要がある。例えばサブグループレベルで全開発工程に対する要素を洗い出そうとしたら、その量は莫大であり10から20には到底納まらない。そのような観点からも周期を限定する必要がある。

以上を考慮することで、情報中心のプロジェクトマネジメントが実行可能となる。

6 結論

ソフトウェア開発プロジェクトのアーキテクチャとしてトレーサビリティ・マトリックスを構築した。そして、情報中心であるソフトウェア開発プロジェクトにおけるマネジメントのPDCAサイクルをシナリオとして、そのトレーサビリティ・マトリックスの活用方法を説明した。そして、プロジェクト全体を俯瞰的にかつ詳細に状況を把握できることを説明し、この手法が高品質なプロジェクトマネジメントを実現するための情報管理手法であることを示した。

謝辞

この研究は文部科学省グローバル COE プログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」の一環として実施された。この研究の概念に関してディスカッションを頂戴した慶應義塾大学大学院手嶋龍一教授、保井俊之特任教授に深く感謝申し上げます。

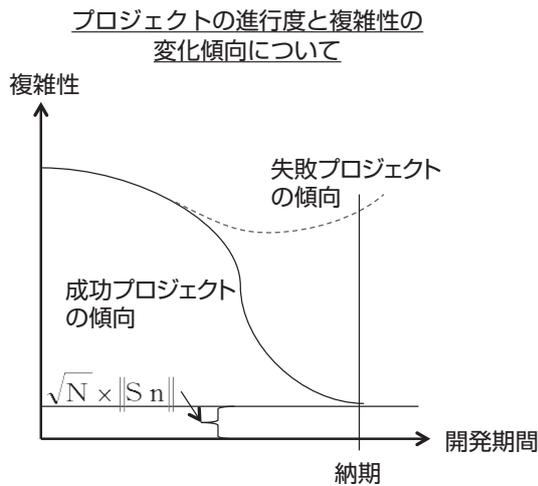


図9 複雑性の経時変化とプロジェクト状態

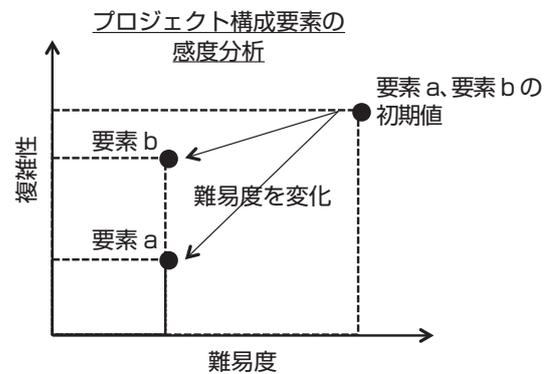


図10 プロジェクトの複雑性のための感度分析例

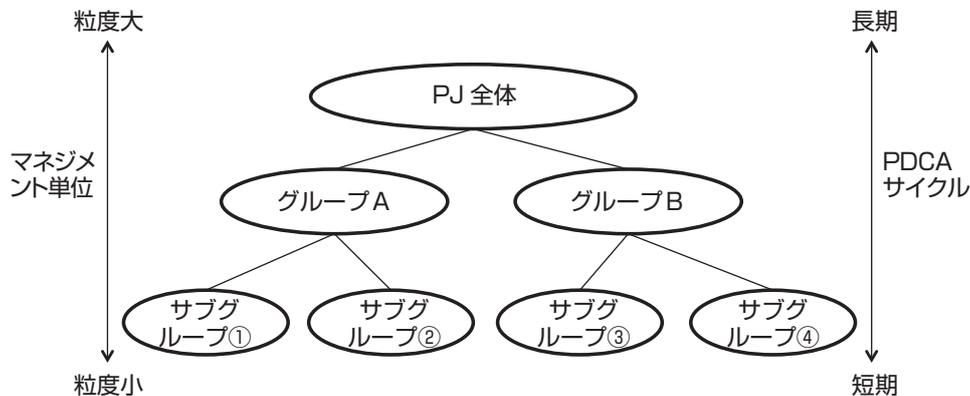


図11 マネジメント単位と周期について

参考資料

参考資料1：難易度の設定指針

◆要素の「難易度」を“1”を基準として、以下の指標によりランク付けを行う。

項番	調査対象とする要素	測定対象	測定指標（例）	難易度ランク付け方針
1	組織 (team)	各作業チームまたは担当者のスキル	経験年数、熟練度（スキル） 役割（リーダー？アシスタント？等）	高スキル技術者 (Team) →難易度低
2	作業 (activity)	各作業の重要性	クリティカルポイントとなる作業か否か（補完的な作業か否か） 定型作業か否か	重要な作業 (Activity)→難易度高 定型作業→難易度低
3	成果物 (artifact)	各成果物の重要性	成果物作成にあたって特殊な技術が必要か否か（独自行語等の習得が必要等） 他の作業実施時に参照される数が多いか否か（重要な成果物なら参照数が多いと想定） 測定対象となる成果物のページ数、行数等が他と比較して多いか否か 再利用性（他案件の成果物を再利用したもののか否か）、またはプロトタイプング等によるベースの拡張度	重要な成果物 (Artifact) →難易度高 (特殊技術要→難易度高、参照性高→難易度高、成果物の量が多い→難易度高、再利用性高→難易度低)
4	部品 (component)	各部品の重要性（根幹となる機能、利用頻度等）	優先度の高い要求条件を実現するために欠かせない部品か否か 要求条件を実現するために、対象部品が利用される数が多いか否か（主要部品ならば他の部品とのインタフェース数は多いと想定） 再利用性（他案件の成果物を再利用したもののか否か）、またはプロトタイプング等によるベースの拡張度	重要な部品 (Component) →難易度高 (優先度高→難易度高、利用回数大→難易度高、再利用性高→難易度低)
5	機能 (function)	各機能の重要性（根幹となる機能、利用頻度等）	優先度の高い要求条件を実現するために欠かせない機能が否か 要求条件を実現するために、対象機能が利用される数が多いか否か（主要機能ならば、稼働頻度も高いと想定） 再利用性（他案件の成果物を再利用したもののか否か）、またはプロトタイプング等によるベースの拡張度	重要な機能 (Function) →難易度高 (優先度高→難易度高、利用回数大→難易度高、再利用性高→難易度低)
6	要求条件 (requirement) 基本要件 (feature) ニーズ (needs)	要求条件の重要性、優先度	実現したい要求条件の優先度の高低	優先度の高い要求 (Requirement) ・基本要件 (feature) ・ニーズ (needs)→難易度高

・設定にあたっては、以下を留意すること。

基準は1とし、0.1 から 1.9 まで、同一カテゴリの調査対象とする要素の数に応じて細分化して値を付与することが必要である。例えば 10 個の要素がある場合に 3 種類程度しか難易度の値が無い場合、10 個の要素のもつ難易度の差が値を設定した時点で丸められてしまい、結果としてその差が見えにくくなる。むしろ本当に難易度が同じという判断で 3 段階のみの難易度設定にすることは問題ない。また、0.1 から 1.9 としたのは、1 を基準とした場合に下限と上限を同じ幅とするためである。

参考資料2：複雑性の計算例

$(r1, r2)$ は要求条件を示すベクトルで、 $(t1, t2)$ は担当を示すベクトルとする。

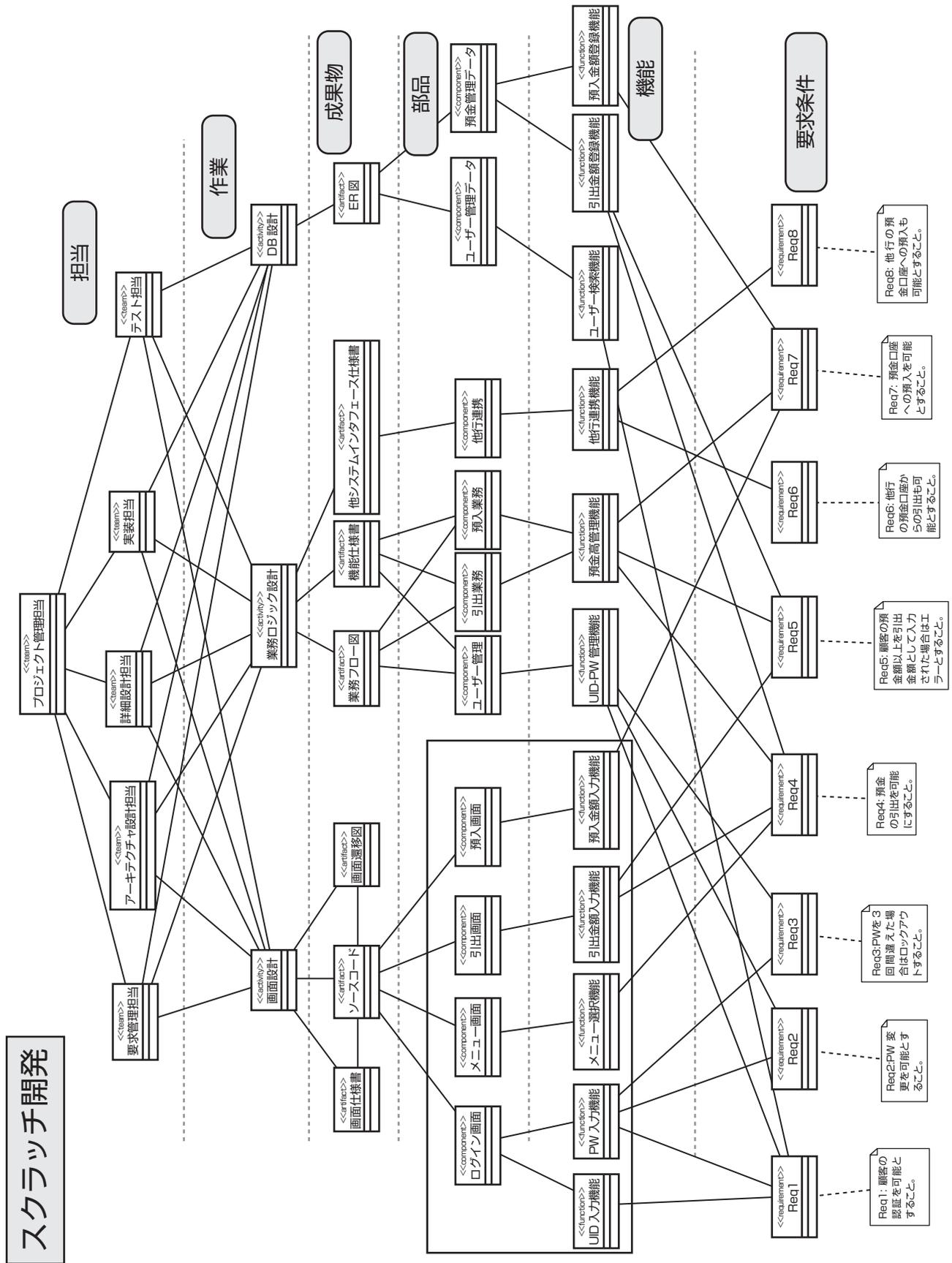
このシステムマトリックスで表される開発プロジェクトの複雑性を求める。相互依存性は関係の有無により行列の成分値を 0/1 のどちらかに設定する (システムマトリックス s)。難

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} r1 \\ r2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \text{Requirement} \\ \text{Function} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Function} \\ \text{Component} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Component} \\ \text{Artifact} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Artifact} \\ \text{Activity} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Activity} \\ \text{Team} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t1 \\ t2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1/2 & 1 \\ 1 & 1/2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

易度は個々の要素の難易度レベルにより数値設定し、行列成分値を決める (システムマトリックス n)。開発プロジェクト全体の複雑性は相互依存性と難易度を掛け合わせることに

$$\begin{aligned} \text{難易度} &= \| \text{システムマトリックス } n \| \\ &= \left\| \begin{pmatrix} 1/2 & 1 \\ 1 & 1/2 \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{5/2} \\ \text{相互依存性} &= \| \text{システムマトリックス } s - \text{単位行列} \| \\ &= \left\| \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\| = \left\| \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{2} \\ \text{複雑性} &= \sqrt{5/2} \times \sqrt{2} = \sqrt{5} \end{aligned}$$

参考資料3：スクラッチ開発プロジェクトのネットワークモデル



用語説明

- 用語 1: ニーズ: Needs。例として、私達は○○がほしい。という表記方法が該当する。
- 用語 2: 基本要件: Feature。例として: システムは××を実現すること。という表記方法が該当する。
- 用語 3: 要求条件: Requirement。例として、システムにより△△を行い、□□を出力する。という表記方法が該当する。
- 用語 4: 機能: Function。実体、部品の役割を示し、これにより要求条件を実現する。
- 用語 5: 実体または部品: Component。成果物を実装したものであり、機能を有する。
- 用語 6: 成果物: Artifact。作業により生産されるもの。例えば設計書等。
- 用語 7: 作業: Activity。担当が実施する仕事を指し、成果物を生む。
- 用語 8: 担当: Team。組織内で分担されるさまざまな役割ごとに配置されるチームまたは個人を指す。
- 用語 9: 参照アーキテクチャ: ある領域に特化して作られたものであり、その領域のシステム設計を行ううえで参考にするアーキテクチャ。
- 用語 10: スクラッチ開発: 開発者がすべてを実装する開発。

参考文献

- [1] Project Management Institute, *PMBOKガイド 第4版*, Global Standard (2008).
- [2] K. Forsberg, H. Mooz and H. Cotterman: *Visualizing Project Management Models and Frameworks for Mastering Complex Systems, Third Edition*, John Wiley&Sons (2005).
- [3] *SWEBOK*, <http://www.computer.org/portal/web/swebok>, accessed in 2011
- [4] P. Kruchten: *The Rational Unified Process: An Introduction, Second Edition*, Pearson Education (2001).
- [5] W. Royce: *Software Project Management A Unified Framework*, Addison-Wesley (1998).
- [6] (社)日本情報システム・ユーザー協会: *第15回企業IT動向調査2009*, http://www.juas.or.jp/servey/it09/summary09_0507.pdf, accessed in 2010
- [7] M. Frank, A. Sadeh and S. Ashkenasi: The relationship among systems engineers' capacity for engineering systems thinking, project types, and project success, *Project Management Journal*, 42 (5), 31-41 (2011).
- [8] Standish Group Chaos Summary 2009, The ten laws of chaos, http://www1.standishgroup.com/newsroom/chaos_2009.php, accessed in 2011
- [9] E. V. Hippel: "Sticky information" and the locus of the problem solving: Implications for innovation, *Management Science*, 40 (4), 429-439 (1994).
- [10] Dean Leffingwell and Don Widrig: *Managing Software Requirements: A Unified Approach.*, Addison-Wesley (2000).
- [11] 吉川弘之: サービス工学序説—サービスを理論的に扱うための枠組み—, *Synthesiology*, 1 (2), 111-122 (2008).
- [12] N. P. Suh: *Axiomatic Design: Advances and Applications*, Oxford University Press, New York (2001). (中尾政之, 飯野謙二, 畑村洋太郎共訳: 公理的設計, 森北出版 (2004)).
- [13] N. P. Suh: *The Principles of Design*, Oxford University

Press, New York (1990).

- [14] 青島矢一, 武石彰: アーキテクチャという考え方, *ビジネスアーキテクチャ*, 第2章, 27-70, 有斐閣 (2001).
- [15] 武石彰, 藤本隆宏, 具承桓: 自動車産業におけるモジュール化 (製品・生産・調達システムの複合ヒエラルキー), *ビジネスアーキテクチャ*, 第4章, 101-120, 有斐閣 (2001).
- [16] *TOGAF*, <https://www2.opengroup.org/ogsys/jsp/publications/PublicationsBySubjectType.jsp?limit=mainSubjectId-50:secSubjectId-50:statusId-1>, accessed in 2011.

執筆者略歴

榮谷 昭宏 (さかえだに あきひろ)

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科博士課程在籍/NTT コミュニケーション株式会社勤務。1994年学習院大学大学院修士課程修了後、NTT (日本電信電話株式会社) 入社。約15年間情報システム開発にSEとして従事。2010年慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科修士課程修了。この論文ではトレーサビリティ・マトリックスの考え方を提唱し、シナリオ構築・ソリューション構築を担当。



狼 嘉彰 (おおかみ よしあき)

1968年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。科学技術庁航空宇宙技術研究所、東京工業大学機械宇宙学科、慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科教授、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科委員長・教授を経て、慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究所顧問。この間、米国UCLA客員研究員、宇宙開発事業団研究総監を兼任。専門は宇宙システムのダイナミクスと制御。日本機械学会フェロー。INCOSE Fellow。計測自動制御学会、日本航空宇宙学会、IEEE等の会員。工学博士。この論文では数学的検証を担当。



神武 直彦 (こうたけ なおひこ)

1998年慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。同年宇宙開発事業団入社。H-IIA ロケット搭載機器の研究開発に従事。欧州宇宙機関訪問研究員を経て、宇宙航空研究開発機構主任開発員として、宇宙機搭載ソフトウェアに対する独立検証および有効性確認に従事。現在、慶應義塾大学准教授、慶應義塾大学VSEセンター長。システムズエンジニアリング、プロセスアセスメント、宇宙システムおよびユビキタスシステムのデザインとマネジメントの研究等に従事。INCOSE、IEEE、情報処理学会等の会員。博士 (政策・メディア)。この論文では研究統括を担当。



査読者との議論

議論1 構成学としてのこの論文

コメント (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)

この論文は、ソフトウェアの設計情報あるいは組織での情報がどのように伝播するかをトレース可能なモデル化手法の提案と理解しました。この手法によって、プロジェクトがどの程度複雑な

ものかを定量的に評価できることを示しています。

ソフトウェアを早く確実に構成するためには、複雑性を排除したプロジェクトを設計することが大事で、その意味において構成学に関係する論文です。しかし、情報の伝達効率を評価するためのトレーサビリティ・マトリックスの手法の説明が中心になっています。複雑性の比較ツールとしては活用できることは示されていますが、構成そのものの指針を得ることに直接的には活用できる例が示されていませんので、その点の加筆をお願いします。

コメント（中島 秀之：はこだて未来大学）

ここで提案されている手法が具体的に構成に役立つことを示してください。

回答（榮谷 昭宏）

「5.1.3 個々のマトリックスの相互依存性・難易度の低減と複雑性の評価」として記述しました。行列計算の特性から、トレーサビリティ・マトリックスの個々の行列はどのようにあるべきか説明し、具体的な事例を用いて相互依存性・難易度をどのように利用して最善の構成を作り上げていくか記述を追加しました。

議論2 この手法のマネージメントへの活用

コメント（赤松 幹之）

組織の複雑性が高いとマネージメントが困難になることは直感的には理解できますが、それはあくまで仮説であり、この手法によって、どのようにマネージメントが容易になるのかについて記載していただきたいと思います。具体的なマネージメントの仕方は構成学において重要なポイントであることから、この手法を使うことによってマネージメントがどのように容易になるのか、この手法で得られた指標を元にどのようにマネージメントをすれば良いのか等、具体的に示していただきたいと思います。

回答（榮谷 昭宏）

「5. トレーサビリティ・マトリックスを活用したプロジェクトマネージメントのPDCA サイクル」としてトレーサビリティ・マトリックスを用いたマネージメントのPDCA サイクルをシナリオとして記述しました。複雑性を指標としたプロジェクトの状況の評価する観点、また難易度や相互依存性に着目することによる個々の要素の状況の評価する観点について説明を追記しました。

議論3 PDCAサイクル

質問（赤松 幹之）

トレーサビリティ・マトリックスを使ってPDCA サイクルを回すという利用方法が書かれていますが、サイクルを回しながらシステムマトリックス上の関係性や難易度を書き換えて複雑性を計算するのは、かなり面倒な作業のように想像します。ある領域の要素が別の領域のどの要素に使われるのかを把握したり、難易度の値の大きさをどのように決めるのか等、簡単ではないと思われます。現実的にPDCAを回すためには、その部分の工夫が必要ではないかと思うので、その点についてのお考えを示していただきたいと思います。

回答（榮谷 昭宏）

ご指摘の点を追記しました。マネージメントの単位を検討し、適切な要素の粒度を選定すること、そしてその粒度にあったPDCAの周期を設定すること等を追記説明しました。また以下にシステムマトリックスの成分値の設定について、もう少し踏み込んだ見解を述べさせていただきます。

・難易度の設定について

難易度設定には、二つの難しさが考えられます。一つ目は定性的に要素の難易度を把握すること、二つ目はその定性的理解を定量化することとなります。

まず、定性的に難易度を把握することについて述べます。定性的に難易度を把握するにあたっては、プロジェクトの進捗状況やリスク事項等の情報を入力することになると考えております。既存のプロジェクトマネージメント技術としても進捗管理やリスク管理は実施されていることですので、難易度設定にあたっての入力情報としては問題なく整っていると考えております。実際、プロジェクトマネージャー、アーキテクト、または各担当のリーダークラスであるならば、感覚的には各要素の難易度の変化を把握していると考えております。例えば、多くのプロジェクトでは、誰がキーマンであるとか、どのツールに問題があるとか、どの作業がキーポイントになる等、プロジェクト内で交わされる会話の節々でプロジェクト構成要素の難易度に関する議論は多くなされています。したがって、定性的に難易度を把握することに特に大きな障害はないと考えております。

しかし、そのリスク事項を難易度に定量化することには課題があると考えております。この論文で提示した指針で、誰もが同じような評価をできるかまだ検証が不十分であり、その改善は今後の課題と認識しております。

・相互依存性の設定について

作業標準のようなものが存在しないプロジェクトにおいては、相互依存性を整理することもとても困難な作業となると予想されます。そのように作業標準が存在しないプロジェクトでは、そもそも既存のプロセスを中心としたマネージメントも困難なはずで、そのような意味で、今回提案させていただいたモデルを用いることは、当初不慣れさから生じる面倒さを感じるかもしれませんが、プロジェクトの状況を把握するツールとして有効に機能すると考えます。また作業標準をすでにもっているプロジェクトでは、一般的に作業標準では作業と成果物、また各担当の役割を定義しているものであるため、その段階から相互依存性を整理することは可能であり、その整理が一度できてしまえば、それをテンプレートとして、個々のプロジェクトでカスタマイズし、使い回すことに大きな障害はないと考えております。

・全体をとおして

ご指摘のように少なくとも当初はとても難しいマネージメント技術に感じられることもあるかもしれませんが、今までのプロジェクトマネージメントでは、プロセスを中心とした進捗状況の管理、およびそれに則した予算の管理が主体であったため、その観点から生じている問題を分析的に調べ、原因の対処を行ってきました。しかし、この手法では、モデルをもとにして個々の要素の難易度と相互依存性によってプロジェクトで生じている問題を構造的に理解し、全体を俯瞰した視点から対処を行っていくという考え方となります。つまり、今までのプロジェクトマネージメントは、分析的であるが故に個々の要素を中心とした個別最適なソリューションに傾倒してしまいがちであるのに対して、ここで提案しているものはプロジェクトの全体最適となるソリューションを思考するツールになると考えております。そういった面で、思考方法の違いが障害となってしまうケースは有り得るかもしれませんが、思考の切り替えさえできれば、大きな問題はないように考えます。難易度のところで申し上げたとおりプロジェクトマネージャー等は感覚的に把握していることですので、例えばEVM（Earned Value Management）の実行よりも容易ではないかと考えております。

議論4 終了したプロジェクト

質問（中島 秀之）

「完全に情報移転が終わった要素間ではその相互依存性が無くなっていく」とありますが、終了したプロジェクト同士には情報依存性が無いと考えるべきなのでしょう？たとえばある新しい技術が発見されて、プロジェクト1の成果を改良した場合と同じ

ことがプロジェクト2の成果にも適用できるということはないでしょうか。

回答（榮谷 昭宏）

どのような単位でプロジェクトを定義するかによって、相互依存性の有無に対する考え方は変わってきます。

新しい技術を確立したプロジェクト1と、次のプロジェクト2

を合わせて一つのプロジェクトとしてとらえた場合は、相互依存性はなくなるとは考えません。しかし、プロジェクト1とプロジェクト2を別々のプロジェクトとしてとらえた場合は、プロジェクト1において相互依存性は無くなり、プロジェクト2では例えば担当者の習熟度向上により、担当者の難易度をプロジェクト1よりも低く設定する等により、その情報移転を評価し反映します。

モノピボット遠心血液ポンプの実用化開発

— 製品につながる医工連携とは —

山根 隆志*、丸山 修、西田 正浩、小阪 亮

長期埋め込み人工心臓の前に4週間以内のつなぎに使用できる、補助循環遠心ポンプを製品化することに成功した。独自の軸受として採用した1点支持型のモノピボット軸受は、世界に先駆けて提唱した機構である。医工連携として大学医学部と意見交換をする中から、動物実験前の設計検証のために提唱した流れの可視化実験で血液適合性を定量的に評価・改良し、独自に開発した模擬血栓試験で抗血栓性を評価・改良し、最小限の動物実験数で生体適合性の評価を実施できた。技術シーズを提供して一つの製品を世に出したばかりでなく、その評価技術を他機関の製品化にも提供し、さらに医療機器ガイドライン事業にも協力して広く産業界に貢献している。

キーワード: 人工心臓、遠心ポンプ、モノピボット軸受、流れの可視化、模擬血栓試験

Research and development of a monopivot centrifugal blood pump for clinical use

– Collaboration between a medical team and an engineering team toward a product –

Takashi YAMANE*, Osamu MARUYAMA, Masahiro NISHIDA and Ryo KOSAKA

We have succeeded in developing a product of a circulatory support centrifugal pump which can be utilized to bridge within a period of four weeks before implanting an artificial heart for a long-term use. A monopivot bearing has been adopted, which was originally proposed for the first time in the world. In order to verify the validity of the apparatus design before animal tests, blood compatibility has been evaluated quantitatively and improved through flow visualization amid collaboration between a medical team of a university and an engineering team. Also, antithrombogenicity has been evaluated and improved through in vitro antithrombogenic testing proposed originally by us. Consequently, we have been able to evaluate the biocompatibility of the developed apparatus with a minimum number of animal tests. Not only has succeeded in developing a product with an original technology seed, but also has established and distributed engineering evaluation methods to other institutes for productization, and cooperated in the formulation of guidelines of medical equipments. These activities have contributed to related industries.

Keywords: Artificial heart, centrifugal pump, monopivot bearing, flow visualization, in vitro antithrombogenic test

1 人工心臓開発の歴史的背景

2010年の厚生労働省人口動態統計によれば、我が国の死亡者数を死因別にみると、第1位は悪性新生物で35万人、第2位は心疾患19万人、第3位は脳血管疾患12万人となっており、心血管疾患として第2位と第3位を合算すると30万人を超える。そのうち重症心疾患の患者として心臓移植登録者195人がおり、年間移植ドナーが法改正で年間6人から年間40人に増えてもなお150人分の心臓が不足している。これを補う医療は、人工心臓か再生医療しかなく、緊急に治療を必要とする場合は人工心臓以外に方法はない。

歴史的に人工心臓の技術は

1) 大型の空気駆動方式の全置換拍動型の人工心臓か

ら始まり、

2) 心臓を残して体外装着する補助人工心臓に適用方法が変わり、

3) 補助人工心臓の装置小型化により体内埋め込み・退院が可能になり、

4) 回転駆動機構を採用することにより、体内埋め込み・退院がより容易になり、

5) 非接触軸受を採用した補助人工心臓により永久使用が可能に(7年以上実績更新中)、

と変化を遂げてきた。駆動機構および製品例との対応を表1に示す。

これと並行して、手術中・術後用に使用するポンプについては

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
Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan * E-mail: yamane.t@aist.go.jp

Original manuscript received September 5, 2011, Revisions received December 13, 2011, Accepted December 20, 2011

表1 人工心臓の適用目的、機構、寿命、製品例

適用目的	駆動機構	使用限界	開発品・製品例
1) 完全置換型人工心臓	空気圧による拍動型	1年間 (耐久限界)	Symbion社 Jarvik 7
2) 補助人工心臓	空気圧による拍動型	1～12か月 (耐久限界)	東洋紡績(株) 補助人工心臓
3) 埋め込み補助人工心臓	電磁駆動による拍動型	1年間 (耐久限界)	Novacor, HeartMate XVE
4) 埋め込み補助人工心臓	モーター駆動による回転型 (機械軸受)	5年間以上 (更新中)	DeBakeyVAD=HeartAssist5, Jarvik 2000, HeartMate II
5) 埋め込み補助人工心臓	モーター駆動による回転型 (非接触軸受)	7年間以上 (更新中)	テルモ(株) DuraHeart, (株)サンメディカル技術研究所 EVAHEART (機械軸受に分類されることもある), Ventracor社 VentrAssist, HeartWare社 HVAD
6) 手術時体外循環	ローラーポンプ または遠心ポンプ	6時間	日本メトロニック(株) BioPump, テルモ(株) Capiox, 泉工医科工業(株) HPM15 等
7) 術中・術後補助循環	遠心ポンプ(機械軸受)カテーテル挿入	4日間	マック社 RotaFlow 等
8) 長期型埋め込みまでのつなぎ補助循環・新治療	遠心ポンプ(非接触軸受等)人工血管接続	1か月～半年間	承認品はまだない

- 6) ローラーポンプや遠心ポンプ等の手術用体外循環ポンプは、1日以内の使用に限定され、
- 7) カテーテル挿入の補助循環ポンプは、1週間以内の使用に限定されていたが、
- 8) この論文のような耐久性の高い遠心ポンプの登場により、長期人工心臓の埋め込みまで、あるいは移植まで、1か月～1年間のつなぎに使用できる人工心臓(bridge-to-decision)を目的とした新しいカテゴリーの治療が始まろうとしている。

人工心臓開発の歴史は、血栓と感染を克服する歴史であった。1957年米国 Cleveland Clinic 病院で Kolf-Akutsu 博士の動物実験から始まった。しかし抗血栓性材料が登場するまで実用化を待って、1981年から全置換拍動型の臨床試験が行われた。次に生体心臓を残して装着する補助人工心臓が主流となり、感染防止に有効な埋め込み拍動型の臨床試験が1987年から始まり、臨床使用例は4,600例を超えた。埋め込み型補助人工心臓の第1世代は、主として重量1,400gを超す大型の拍動型ポンプであった。

1998年より回転型の補助人工心臓が導入され、技術革新が起きた。機械接触軸受を採用したもので第2世代と呼ばれる。1998年より軸流型の臨床試験が始まり、臨床適用数はすでに6,500例を超えている。回転型であるため、重量200～500gと小型で埋め込みが容易なことから、部分点数が少ないため信頼性が向上したことが大きい。

拍動型から回転型になったことにより「非接触軸受」を導入することが可能になり、再び技術革新が起きた。これが第3世代補助人工心臓であり、その臨床試験が2004年から始まった。位置センサーと電磁石でインペラを浮かせる「磁気軸受」を採用した遠心型、10ミクロンオーダー

の凹凸を付けることによって発生する局所流体圧を利用する「流体動圧軸受」を採用した遠心型、およびサブミクロンの液膜で血液と冷却水の混合を遮断する「メカニカルシール」を採用した遠心型等である。形式は遠心ポンプが多く、血液ポンプサイズは軸流型よりは大きくなるが、超高耐久性（理論上は無限耐久性をもつ）に特徴がある。また小児用まで適用領域の広い動圧軸受式軸流補助人工心臓も、国立循環器病研究センター/産業技術総合研究所/三菱重工業(株)/ニプロ(株)で開発されつつある。

実用化が始まった第2世代、第3世代の補助人工心臓は体内埋め込み型で、退院ができる点が大きなメリットであり、コントローラ/バッテリー(8～10時間使用)はキャリアバッグで携行できシャワーも使える。海外での新規埋め込みはほとんどすべてこれら回転型ポンプになっており、国内でも適用患者は退院ばかりでなく、就労・就学復帰までできるようになっている^[1]。

ただし、患者が埋め込み型補助人工心臓に適しているか、例えば肺機能等の様子を見る必要がある場合、つなぎ(bridge-to-bridge)の人工心臓が必要であるが、現状では高価な(300万円以上の)空気駆動型人工心臓を使うしかならず、4週間以内のつなぎに使用できる経済的な(50万円以下の)補助循環ポンプが必要とされている。

我々は第2世代および第3世代の補助人工心臓を開発してきたが、その技術を基にして4週間使用できる第2世代の補助循環ポンプを製品化することに成功したので、その研究開発のシナリオを述べ医工連携による製品化研究について論じる。

2 モノピボット遠心血液ポンプの研究

我々が人工心臓の開発を始めた1991年当時、世界的には貫通軸・シールがないシールレス回転型血液ポンプの開

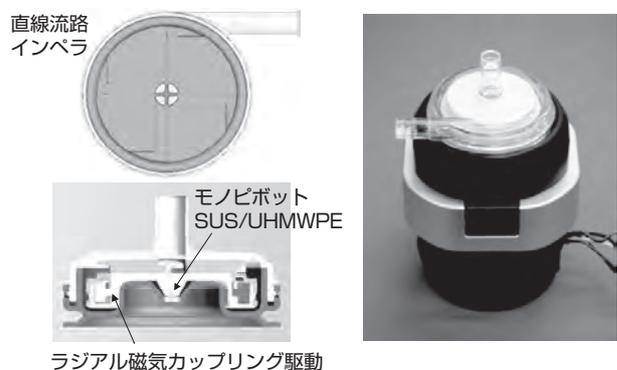


図1 製品化したモノピボット遠心ポンプの構造と概観
(泉工医科工業(株)使い捨て可能なメラ遠心ポンプ HCF-MP23) (ポリカーボネート製、直径50mmのインペラ、直径8mmの洗浄貫通孔、直径3mmの球面ピボット(SUS球/超高分子量ポリエチレン製))

発機運が高まっていた。シールレス方式のなかで、回転羽根（インペラ）を1点支持にする新機構「モノピボット遠心ポンプ」^[2]（図1）を提唱して特許を取得して、筑波大学臨床医学系との共同研究を進めた。これまでは、回転羽根車を貫通軸と二つのボールベアリングで支えるポンプが使用されていたが、シール部の血液漏れから溶血を起こす構造になっていた。貫通軸をなくして2点のピボット軸受で支えるポンプも使用され始めていた。そこで我々は、コマのように1点支持で回転する機構を提唱した。接触面積が減り溶血が減ると期待されたからである。

この医工連携で、特に臨床サイド（筑波大学臨床医学系筒井達夫教授）から強く助言されたのは、むやみに動物実験を行うのではなく、まず実験室で工学評価（in vitro 試験）によって科学的エビデンスを獲得してから次の動物実験に進むという、エビデンス・ベースト・メディシンの考え方であった。ちょうど1995年から始まったNEDO体内埋め込み型人工心臓プロジェクトのもとで、体内埋め込み型補助人工心臓の開発を当面の目的として研究を進めた。

まずポンプモデルの可視化実験により、考案した遠心ポンプの設計検証を反復し設計改良を進めた。透明アクリル製3倍模型を用い、模型と同一屈折率（1.49）の64 wt%NaI水溶液（比重1.9）を作動流体とし、およそ同一比重の銀コーティングガラス粒子（平均粒径10 μm、比重1.4）をトレーサ粒子として、連続光A rイオンレーザー光シート（出力4W）で照明し、高速ビデオカメラ（Phantom）で撮影した画像を、面内速度については4時刻画像にわたって軌跡の滑らかさを評価する「4時刻粒子追跡法」で、面外速度については軌跡が照明面外に抜けるため、4時刻でなく3時刻に緩和して「3時刻粒子追跡法」で解析した。遠心ポンプでは通常、背面の流体が交換しない構造であ

るため、血栓防止のために羽根上下面に貫通孔を設け血液循環させる孔（ウォッシュアウト・ホール）を設けることが多い。実験結果により孔を分散させるよりも小径で集中化の方が、高速旋回流を中心にまで誘導できピボット側面の洗い流しが優れていることを立証した^[3]（図2）。

またポンプ全体の血液適合性を支配するモノピボット軸受機構に関して、接触面積が小さいほど血球破壊（溶血）が少ないことを、牛血を使ったin vitroの溶血試験で立証した^[4]（図3）。

これら可視化実験および溶血試験のエビデンスをそろえて、筑波大学との動物実験で改良前モデルと改良後モデルの比較を行い、間違いがないことを立証した。

3 開発目標の再設定と臨床ニーズ

このように医工連携で動物実験まで共同研究を進めていたところに、2002年から製造販売企業である泉工医科工業（株）が製品化を希望して共同研究に加わった。医療機器製造会社は概して中小企業ないし中堅企業が多いこともあり、動物実験で開発技術が使えることを見定めてからでないと開発に参加しないことは、開発リスク回避の観点からはごく自然な傾向であると考えられる。また当時、遠心ポンプを開発していたチームのなかで、企業のかかわりが弱いのは産総研チームであったことも理由と考えられる。この共同開発が始まった時点で、下記の根拠に基づいて目標修正が行われた。製品開発目標は、工業技術院・NEDOが目指した体内埋め込み型補助人工心臓ではなく、企業提案により4週間程度使用できる体外式の補助循環用遠心ポンプとし、我々の提唱の「モノピボット遠心血液ポンプ」を採用することになった。

現在、心臓血管外科手術および補助循環に使用できる

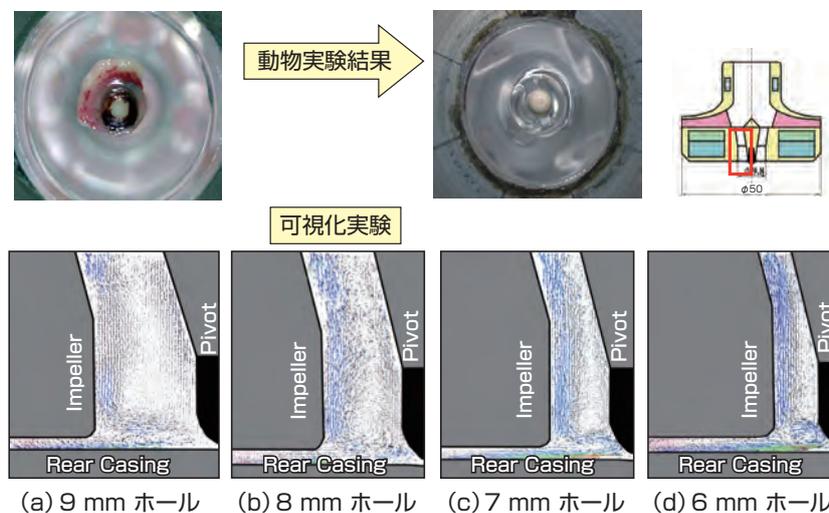


図2 抗血栓性向上のための流れの可視化による貫通洗浄孔の洗い流し効果比較

補助循環ポンプは、下記 4 種類に分類される。

①短期使用型（ポリマー製、軸シール付き、耐久性 6 時間、一般型とも呼ばれる）

は薬価約 6 万円であり、年間 4 万個が心臓血管外科手術用に使用されている。

②長期使用型（ポリマー製、シールレス構造、耐久性 4 日間）

は薬価約 10 万円だが、関東地区では一般手術用としては保険で払えない縛りがある。

③体外拍動式補助人工心臓ポリウレタン製、寿命 1 ヶ月）

は 1 ヶ月使用でき、保険で払えるが薬価は 316 万円である。

④長期体内埋め込み型補助人工心臓（チタン製、超耐久）

は最近承認され、長期間使用でき保険も使えるが、薬価は 1,810 万円と高価である。

経済的には、6 万円の体外循環ポンプを年間 4 万台の市場でシェア 25 % を販売すれば、年間売り上げ 6 億円を期待できる。比較として、1,810 万円の埋め込み型補助人工心臓を年間 100 万台の市場でシェア 50 % を販売すれば、年間売り上げは 9 億円が見込まれ、売り上げはおよそ同等である。そこで、臨床応用の第一ステップとして、堅実に製品化できると見込まれる前者を目指すことにした。このポンプは、高価な 1 ヶ月使用の拍動人工心臓（316 万円）と同等の性能を、安価な（6 万円程度）短期使用型ポンプで実現し得る経済性に大きな特徴がある。

このポンプの製品化目標としては、手術用も当然含めるが、あわせて臨床ニーズが高まりつつある長期補助人工心臓までのつなぎ用（bridge-to-bridge）も考慮に入れ、性能は②以上で、コストは①のポンプを目指すことにした。

技術的には、モノピボット遠心ポンプの製品は、結果的に

に直線流路を有し直径 50 mm のインペラが直径 3 mm の球面ピボット（SUS 球／超高分子量ポリエチレン）で支えられ、ピボット周りには 8 mm の孔が設けられたポリカーボネート製のディスパーザブル遠心ポンプとなった。ポリカーボネート製は遠心ポンプ製品に共通な仕様であるが、断面積一様を実現する直線流路インペラ、およびほとんど接着剤もシールも使用しない組立方法は、経済性も勘案した企業独自の発案であった。

4 補助循環ポンプ製品化のための設計とその検証における産総研の役割と研究成果

4.1 実験室における工学評価

申請に必要な評価試験として、薬事法に定められた有効性、安全性、品質にかかわる試験を行う必要がある。企業は、試験法が定められた安全性、品質試験を担当した。産総研が担当したのは有効性試験であり、「流れの可視化実験」および「模擬血栓試験」で血液適合性を評価し、機械的な「耐久性試験」も実施して設計検証を行った。

流れの可視化実験では、産総研の経験値としてせん断速度 300 s^{-1} 以下の領域は血栓形成の可能性ありと判定している。実験の結果、ピボット支持部の鋭角な隅にせん断速度 300 s^{-1} 以下のよどみが見出されたため、血栓形成の可能性があると判断して、この隅をなくす設計にした^{[5][6]}（図 4）。

4 週間の耐久性試験では、インペラ上面の変位をレーザー焦点変位計で連続計測し、ピボット受の軸方向摩耗率がわずか $1.1 \mu\text{m}/\text{day}$ であることを確認した。ピボット受形状は、回転摩耗に一般的な W 字型断面の摩耗痕が観察できる摩耗レベルではなかった。しかも連続使用でも動作音が静かであることがわかった。

模擬血栓試験は、動物実験前に実験室で抗凝固性を確

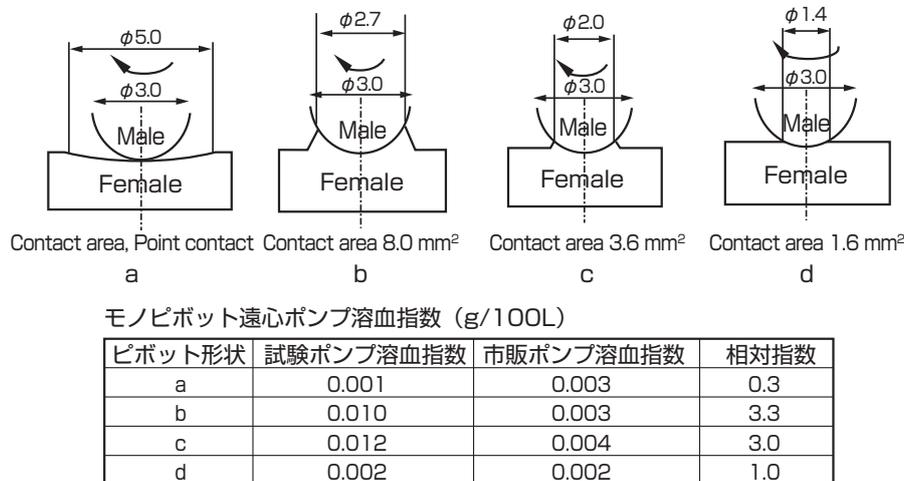


図 3 ピボット形状によるポンプ溶血特性の違い

認できるよう、我々が開発した手法である^[7]。ポンプを含む閉回路を購入牛血で満たし、クエン酸ナトリウム（凝固抑制）と塩化カルシウム（凝固促進）で調整しながら、手術時のヒト血液の凝固能 ACT ≒ 200 s (37 °C) と同等に維持し、2 時間後に血栓観察を行った。その結果、雄・雌球面ピボットの半径製作誤差によるすき間に生じた血栓が、雄・雌球面の製作時径でなく使用時径を一致させることで解消できることを確認した（図 5）。

4.2 医工連携による動物実験評価

動物実験については、筑波大学でプロトタイプを用いたヒッジによる動物実験を延べ 20 回以上繰り返し、血栓除去を繰り返し最終的に 5 週間の動物実験で無血栓を確認した。またポリカーボネート製の量産モデルについては、東北大学の協力を得て 4 週間の動物実験を行った結果、血栓がおよそ解消することを確認した（図 6）。前述したように、この医工連携では特に臨床サイドから、むやみに動物実験を行うのではなく、実験室評価（in vitro 試験）を活用して科学的エビデンスに基づいて次の動物実験に進むという、エビデンス・ベースト・メディシンの考え方を助言された。実験室で可視化実験や模擬血栓試験や溶血試験を事前に十分実施したことにより、動物実験数は最小限に抑えて製品まで到達した。結果的に医学サイドから、課題解決の研究指針を示し動物実験施設をご提供いただいたことにより研究開発を短期に推進できた。産総研の成果は医工連携の賜物といってよい。

一般に「医工連携」というと二つのパターンがありうる。一つは、企業と病院がメーカーとユーザーの立場で連携す

ることによって、製品化を実現する場合である。なぜなら一般産業と違って、医療機器メーカー自身がユーザーになれないという、法律上の拘束を受けているためである。他の一つは、大学・病院・研究機関がシーズを提供し、そこに企業が加わってニーズに見合った製品を実現する場合である。今回はこの後者にあたる。過去の後者のパターンによる補助人工心臓（VAD）の開発例としては、

- ・東京大学・日本ゼオンの拍動型 VAD
 - ・国立循環器病センター・東洋紡績の拍動型 VAD
 - ・京都大学・テルモ(株)の磁気浮上型 VAD
 - ・早稲田大学・(株)サンメディカル技術研究所のメカニカルシール VAD
 - ・バイラー医大・日機装(株)の遠心式体外循環ポンプ
 - ・バイラー医大・京セラ(株)の遠心式体外循環ポンプ
- 等があり、いずれも製品化に成功している。

4.3 成果のまとめ

このように産総研では、耐久性と血液適合性の向上を中心に研究開発を行ってきた。評価試験で確認したように、モノピボット遠心ポンプの実用上の特長は

- 1) 摩擦が少なく、動作音が静かであり、4 週間以上の連続使用に耐える。
- 2) 血栓が無く、溶血が低く、4 週間以上の連続使用に耐える。
- 3) これだけの性能をもちながら、手術用ポンプ並みの価格で提供できる。

ことといてよい。

またモノピボット遠心ポンプの製品化に役立った産総研

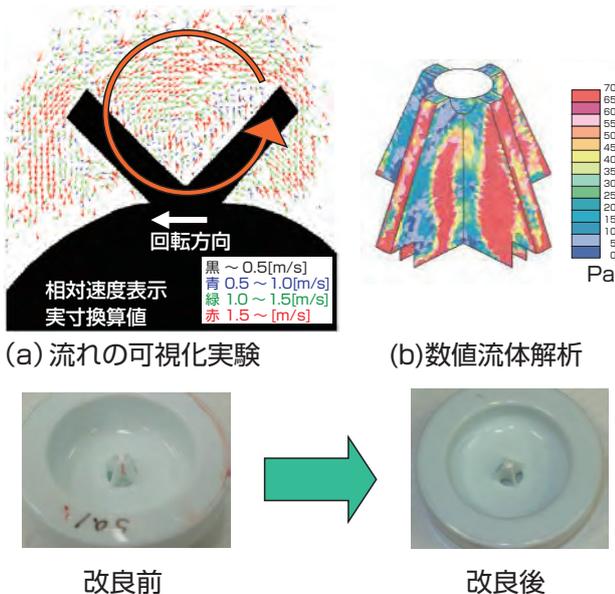


図 4 流れの可視化実験と数値流体解析による血栓防止
隅部のよどみにおける血栓を予測し、鋭角の隅をなくして血栓除去を改良

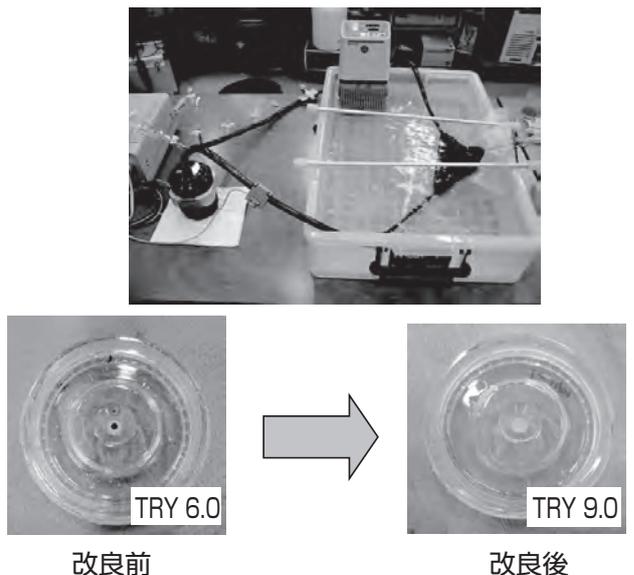


図 5 模擬血栓試験による血栓防止
回路を牛血で満たし、クエン酸ナトリウム（凝固抑制）と塩化カルシウム（凝固促進）で血液凝固能を一定に維持し 2 時間運転する試験で、血栓防止設計に改良

のオリジナル技術は以下のとおりである。

1) 「モノピボット軸受」は我々が世界に先駆けて提唱した機構名称であり^[2]、モノピボット軸受でのみ溶血、血栓、摩耗が起き、これらは接触面積が支配することを理論的・実験的に立証した^[3]。しかもポンプは、血液適合性および耐久性とも、4週間以上の連続使用に耐えることを立証した。

2) 「可視化実験」で血液適合性を定量的に実験できる評価法を提唱した^{[5][6]}。我々の成果発表の後、国際会議では可視化実験の研究が増え、人工心臓のISOでもANNEXとして流れの可視化が採用された。また後述するように我々の実施した可視化実験データが、FDA承認申請や国内の薬事承認申請に使われ承認を受けた。

3) 「模擬血栓試験」では、動物実験前段階で動物実験に近い抗血栓性が評価できる試験法として世界で初めて開発した^[7]。この試験法はまだ研究段階であるが、初期の動物実験を代替できるものであることから、企業からの受託研究が相次いでいる。

一方、企業の製品化技術の特徴は以下のとおりである。

1) Oリング等を使用しない、ケーシング組み立ての単純化により低価格化。

2) 不要な磁石やセラミックス部品を省き、軸受にステンレス球を使用して低価格化。

3) ラジアル磁束式、つまり磁石を水平対向型とした駆動装置を自社製作。

この結果、これまでの316万円の空気駆動型人工心臓に匹敵する機能を、約6万円の遠心ポンプで実現した。

なお産総研内には特許実用化共同研究という制度があり、実施契約の早期締結、ビジネスプランの明確化等により、本品製品化に大変役立った。

5 製品としてのアウトカム

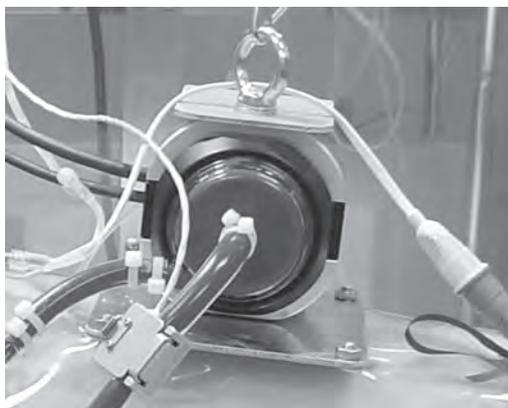


図6 モノピボット遠心ポンプの動物実験
東北大学にて左心バイパス外付け形態で4週間の実施

2002年から共同研究を始めた泉工医科工業(株)が、2008年末に体外循環ポンプ「メラ遠心ポンプ」(型式HCF-MP23)を薬事申請し、2011年1月に製造販売承認を取得した。同年4月から販売を開始し、臨床使用数は2011年11月末の時点ですでに100例を超えている。承認範囲としては「心臓血管外科手術および補助循環用の体外循環用遠心ポンプ」であり、型式名に「MP23」とあるのは産総研提唱のモノピボットの頭文字であって、その貢献が名称に表れている。音が静かで摩耗が少ないことが特徴である。開発には9年間を要したが、我々の開発チームの場合、影響要因の多い動物実験を最小限に抑え、工学的実験によって得られた性能データの蓄積を多く行い、企業の設計根拠やユーザーへの説明資料が数多く残ったことが特徴である。また、申請範囲の6時間を超える4週間程度の耐久性と血液適合性の可能性を確認しており、近い将来には長期人工心臓埋め込みまでのつなぎという薬事上の新ジャンルの治療にも使用できると期待される。産総研では、いち早く泉工医科工業(株)との共同研究により長期用までのつなぎの補助循環ポンプの開発に参入したが、病院側との医工連携によりこれからさらに臨床確認、適用拡大を行う計画である。

6 今後の展開—産業界への貢献

我々が研究開発したモノピボット遠心ポンプを基にして、一つの製品を世に出したばかりでなく、その評価技術を他機関の申請・製品化にも提供している。さらに経済産業省/厚生労働省のもとでの開発・審査に関するガイドライン策定により類似医療機器の早期承認への道筋をつけることにより広く産業界に貢献している。

2010年12月には植え込み型補助人工心臓2機種が承認されたが、(株)サンメディカル技術研究所のEVAHEARTに対しては、共同研究による流れの可視化実験データの提供を行った。それらは薬事申請およびFDAのIDE申請に使用されいづれも承認を得ている。またテルモ(株)のDuraHeartに対しては、薬事審査の迅速化を目的に実施されている医療機器ガイドライン策定事業により、在宅医療まで含めた開発・審査における評価指標のコンセンサスを構築し、審査期間を短縮し早期承認に大きく貢献した。

さらに、国内ばかりでなく海外からも受託試験の依頼が来ている。今後とも、独自の開発技術と評価技術をもって、国の内外を問わず産業界に広く貢献していく計画である。

7 医工連携を志す研究者へ

これまでの我々の経験から、医工学の実用化研究に必

要なものは以下のとおりである。

- 1) 医工学研究は、開発初期から機械、流体、材料、電気電子、基礎医学、臨床医学、製造、薬事法、保険償還等あらゆる学問分野、技術、法律、経済がかかわる「チーム研究」である。「保険償還」と書いたのは、我が国は国民皆保険制度であるため、販売はすべて保険償還によるしかなく、これを理解しなければ経済が理解できないという、我が国の特殊事情がある。
- 2) 長期間、チーム連携を維持できる「研究リーダー」が必要である。管理者が変わっても、10年以上変わらないリーダーが必要である。およそ10年間の研究開発の全体像の中で、「医」側の分担課題、「工」側研究者・製造者の分担課題を定め、年オーダーでしかも時間差をもって出てくる個別研究の成果を、チームとして製品にまとめ上げていくのは、まるで積み木細工のようであり、ゆるがない研究リーダーなしでは困難である。（我々は20年間変わらないリーダーを維持した。）医工連携による実用化の研究に必要なのは、機関関係を維持しながら、研究目標を定められる長期継続的な研究リーダーの存在である。
- 3) 研究所、臨床機関、製造販売会社の「医工連携」が必須だが、相互に意見を出し得るイコール・パートナーでなければ製品には到達しない。往々にして医学サイドの意見のみが偏重され、研究志向に陥り勝ちであるが、できるだけ多くの患者に使ってもらえるような使用目的、設計、材料の選択には、バランスがとても重要である。そのためには製品化に向けた企業の経験や自主性も重んじるのが肝要である。医学界には、往々にして完全置換型人工心臓を尊重し、次に補助人工心臓を尊重し、外科手術用の体外循環・補助循環は軽視する風潮がある。その中で企業に重要な経済性の観点からの意見がつつさされないよう、学会・研究機関が支援した今回の例は良い例である。
- 4) よい研究目標を立てるより、よい製品目標を立てるべきである。産総研が単独に研究目標を追求しては、社会の要請に答えられない。研究予算の獲得も必要だが、研究のための研究では社会に貢献しない。

参考文献

- [1] 山根隆志: 人工心臓の新展開, *バイオマテリアル-生体材料*, 29 (3), 199-203 (2011).
- [2] T.Yamane, M.Nishida, B.Asztalos, T.Tsutsui and T.Jikuya: Fluid dynamic characteristics of monopivot magnetic suspension blood pumps, *ASAIO Journal*, 43 (5), M635-M638 (1997).
- [3] T.Yamane, O.Maruyama, M.Nishida, R.Kosaka, T.Chida, H.Kawamura, K.Kuwana, K.Ishihara, Y.Sankai, M.Matsuzaki, O.Shigeta, Y.Enomoto and T.Tsutsui: Antithrombogenic properties of a monopivot magnetic-

- suspension centrifugal pump for circulatory assist, *Artificial Organs*, 32 (6), 484-489 (2008).
- [4] O.Maruyama, M.Nishida, T.Tsutsui, T.Jikuya and T.Yamane: The hemolytic characteristics of monopivot magnetic suspension blood pumps with washout holes, *Artificial Organs*, 29 (4), 345-348 (2005).
- [5] M.Nishida, O.Maruyama, R.Kosaka, T.Yamane, H.Kogure, H.Kawamura, Y.Yamamoto, K.Muwana, Y.Sankai and T.Tsutsui: Hemocompatibility evaluation with experimental and computational fluid dynamic analysis for a monopivot circulatory assist pump, *Artificial Organs*, 33 (4), 378-386 (2009).
- [6] T.Yamane, O.Maruyama, M.Nishida, M.Toyoda, T.Tsutsui, T.Jikuya, O.Shigeta and Y.Sankai: The most profitable use of flow visualization in the elimination of thrombus from a monopivot magnetic suspension blood pump, *Artificial Organs*, 28 (4), 390-397 (2004).
- [7] O. Maruyama, Y. Tomari, D. Sugiyama, M. Nishida, T. Tsutsui and T. Yamane: Simple in vitro testing method for antithrombogenic evaluation of centrifugal blood pumps, *ASAIO Journal*, 55 (4), 314-322 (2009).

執筆者略歴

山根 隆志 (やまね たかし)

1980年東京大学大学院工学系研究科博士課程航空学専攻修了、同年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。2001年(独)産業技術総合研究所発足にあたり、人間福祉工学研究部門副研究部門長、同時に東京理科大学大学院理工学研究科連携大学院客員教授。2007年より2年間、経済産業省高機能人工臓器システム開発ガイドライン事務局をつとめ、2008年より2年間、(独)医薬品医療機器総合機構にスペシャリストとして出向。2010年より帰任し、現在ヒューマンライフテクノロジー研究部門主幹研究員。2009年日本機械学会バイオエンジニアリング部門業績賞受賞。この論文では、ポンプ機構の提案、流体特性・輸受特性実験、動物実験・企業共同研究の統括を担当。工学博士。



丸山 修 (まるやま おさむ)

1995年群馬大学大学院医学研究科生理学系ホルモン測定学専攻修了、同年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。2001年(独)産業技術総合研究所発足にあたり人間福祉工学研究部門人工臓器グループ主任研究員。2003年より1年間、企画本部企画主幹をつとめ、2010年よりヒューマンライフテクノロジー研究部門人工臓器グループ長。2006年日本人工臓器学会論文賞受賞。この論文では、ポンプの血液適合性評価試験および動物実験を担当。博士(医学)。



西田 正浩 (にしだ まさひろ)

1995年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程生体工学専攻修了。同年、通商産業省工業技術院機械技術研究所に入所し、1999年バイオメテックス研究室主任研究員。2000年より6ヶ月間、通商産業省工業技術院医療福祉機器技術開発調整室に勤務し、2000年より1年間ベルリン・フンボルト大学シャリテ大学病院客員研究員となり、帰国後10ヶ月間、経済産業省産業技術環境局大学連携推進課に勤務。2001年(独)産業技術総合研究所発足に当たり、人間福祉工学研究部



門人工臓器グループ主任研究員。2009年より1年間、国立大学法人筑波技術大学非常勤講師。現在、ヒューマンライフテクノロジー研究部門人工臓器グループ主任研究員。この論文では、流体工学実験および数値流体解析を担当。博士（工学）。

小阪 亮（こさかりょう）

2003年より日本学術振興会特別研究員DC2のち、2005年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程修了。同年（独）産業技術総合研究所に入所し、人間福祉医工学研究部門研究員。2010年よりヒューマンライフテクノロジー研究部門人工臓器グループ研究員。この論文では、システム制御および状態モニタセンシングを担当。博士（工学）。



査読者との議論

議論1 全体構成

コメント（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）

Synthesiology は研究をいかに進めるべきかを読者が知識として獲得できるための論文を掲載することが目的です。例えば、研究開発プロセスのどのタイミングで、何が必要と判断したのか、何に注力することと決めたのか、その理由は何であったか、といったことが書かれることを期待します。例えば、2章に目標設定が書かれていますが、その目標を受けて、どのような開発をすることにしたのか、といったシナリオが書けませんでしょうか。

回答（山根 隆志）

第2章「2.モノピポット遠心血液ポンプの研究」を立てて研究の論理を述べ、設計上重要となる現象を抽出し、第3章を「3.開発目標の再設定と臨床ニーズ」として製品開発への目標修正を示し、第4章はもとのまま開発成果の構成に変更しました。

議論2 ポンプの設計検証と実験との関連性

コメント（赤松 幹之）

4.1節の冒頭に、設計検証を効率的に行って課題解決を図ったと書かれていますが、流れの可視化実験や模擬血液試験がなぜ必要となったかを、専門外の読者にも分かるように説明を入れてください。他の血液ポンプの研究開発と比較する等して、アドバンテージがどの程度のものであったかを記述してください。

質問（濱 純：産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門）

ポンプの設計検証の章では、可視化実験、模擬血栓試験、耐久性試験を説明されていますが、ポンプの設計検証の評価の全体像はどのようになっているのでしょうか？その中で、3つの試験の各評価項目への対応等を、より具体的に記載してください。

回答（山根 隆志）

4.1節以下を加筆しました。

申請に必要な評価試験として、薬事法に定められた有効性、安全性、品質にかかわる試験を行う必要がある。企業は、試験法が定められた安全性、品質試験を担当した。産総研が担当したのは有効性試験であり、「流れの可視化実験」および「模擬血栓試験」で血液適合性を評価し、機械的な「耐久性試験」も実施して設計検証を行った。

またこれらの評価技術は、臨床サイドからの要請であり、どのような効果があったかを、4.2節に加筆しました：

前述したように、この医工連携では、特に臨床サイドから、むやみに動物実験を行うのではなく、実験室評価（in vitro 試験）を活用

して科学的エビデンスに基づいて、次の動物実験に進むという、エビデンス・ベースト・メディシンの考え方を助言された。実験室で可視化実験や模擬血栓試験、溶血試験を事前に十分実施したことにより、動物実験数は最小限に抑えて製品まで到達した。結果的に、医学サイドから、課題解決の研究指針を示し動物実験施設をご提供いただいたことにより研究開発を短期に推進できた。産総研の成果は医工連携の賜物といってよい。

さらに5章にその効果を加筆しました：

開発には9年間で要したが我々の開発チームの場合、影響要因の多い動物実験を最小限に抑え、工学的実験によって得られた性能データの蓄積を多く行い、企業の設計根拠やユーザーへの説明資料が数多く残ったことが特徴である。

議論3 補助ポンプの承認基準

質問（濱 純）

心臓血管外科手術等の補助循環ポンプとして、承認できる尺度は具体的にどのように規定されているのですか。

回答（山根 隆志）

基本的に薬事では安全性には尺度がありますが、有効性には尺度はありません。有効性は数字ではなく、提出したエビデンスの期間（この場合6時間データ）に基づいて承認するという形で行なわれています。

議論4 評価技術の展開

質問（濱 純）

評価項目ならびに検証実験は、実際に評価手法として国内外へどのように認定されていくと考えればよいのでしょうか？例えば、これらの評価方法を人工心臓設計評価のより一般的な評価手法として認知されるように、どのような取り組みをされているのでしょうか。

回答（山根 隆志）

ISOでの人工心臓の評価法には可視化実験を盛り込みました。企業がどこまで申請したいかで適用される評価法は異なります。具体的には6章に記述したとおりです。2010年12月には植え込み型補助人工心臓2機種が承認されましたが、（株）サンメディカル技術研究所のEVAHEARTに対しては、共同研究による流れの可視化実験データの提供を産総研が行い、薬事申請およびFDAのIDE申請に使用され、いずれも承認を得ています。

議論5 製品化への判断、目標の再設定

質問（赤松 幹之）

この論文のポイントの一つは、泉工医科工業（株）が製品化を目指して参画してきたときの判断や、その後の目標の再設定のところです。他にも多くの人工心臓の研究があったと思いますが、なぜ企業はこのモノピポット遠心ポンプを製品化しようと判断したのか（あるいは製品化できる可能性を見出したのか）その理由を書けませんでしょうか。

質問（濱 純）

大学との連携で補助人工心臓を開発目標としていたものが、企業との製品化では体外用循環ポンプに目標設定が変更された理由については、特に医療関連の製品化の難しさやバリエーションが推測されますが、その変更の理由を具体的に教えてください。

回答（山根 隆志）

企業がモノピポット遠心ポンプを製品化しようと判断したのは、ある大学の先生が遠心ポンプ開発パートナーとして産総研を紹介してくれたことによります。2002年当時、我が国で回転型人工心臓を研究している施設の中で、動物実験まで到達していたのは5グループだけでした。このうちで新たに企業が参画し易い状態だったのが産総

研グループだけであったことが判断の第一理由だったと思われます。

開発目標の再設定についてはその経緯を3章に記載しましたが、医療機器の中でも単価の安いローリスク製品ないしディスプレイ製品で事業を行うというのが、今回の企業の基本姿勢です。製品を安く作る方法として、当該企業はポリマーの材料入手および加工面が強く、今回のデザインでもほとんど接着剤を使わずに単に組み立てるだけで作ることができ、通常の製品でよく使われるOリングやネジ等を使用しない安価にできる製造方法を探っています。しかも産総研のモノピボット機構を採用すれば、ボールベアリングや軸シールが不要となる等、安価な製品になる見通しがあったことが、産総研方式を基にした補助循環ポンプの製品化を目標とした理由です。

議論6 医工連携

コメント（赤松 幹之）

医工連携と言ったときの「医」としては、基礎研究的観点での医

学部の先生もいますし、臨床すなわち病院での患者への治療や診断という観点もあります。「工」といっても大学の工学系の先生もいれば、我々公的研究機関の工学系の研究者もいますし、企業で製品化をする技術者もいます。これらを整理して説明していただくと読者の参考になるとと思います。

回答（山根 隆志）

一般に「医工連携」というと二つのパターンがあり得ます。一つは、企業と病院がメーカーとユーザーの立場で連携することによって、製品化を実現する場合です。なぜなら一般産業と違って、医療機器メーカー自身がユーザーになれないという法律上の拘束を受けているためです。他の一つは、大学・病院・研究機関が連携してシーズを提供し、そこに企業が加わってニーズに見合った製品化を実現する場合です。今回はこの後者にあたります。過去の後者のパターンによる補助人工心臓（VAD）の製品化成功事例を4.2節に追加しました。

マグネシウムおよびその合金中の不純物酸素分析手法

— 研究開発と併行した国際標準化への取り組み —

柘植 明*、兼松 渉

マグネシウムおよびその合金中の不純物酸素を対象とする簡便かつ信頼性の高い分析手法を開発した。今回、分析対象の不純物酸素を直接分析するのではなく、不純物酸素が含まれる酸化物の部分を試料から分離した後に酸素分析を行うという「多段階昇温法」を考案した。酸化物中の酸素の分析は、金属中酸素の分析手法として広く用いられている不活性ガス融解-赤外線検出法を用いて試験装置毎の温度校正を行うことで、十分な精度での分析が可能であることを実証した。また、これらの研究開発と併行して国際標準化の準備を進めた。韓国への技術協力により日韓両国で整合性のあるデータが得られることを示し、ISO専門委員会への提案を円滑に進めることができた。

キーワード: マグネシウム、マグネシウム合金、酸素分析、不活性融解-赤外線検出法、多段階昇温、国際標準化

An analysis method for oxygen impurity in magnesium and its alloys

– International standardization activity in parallel with R&D –

Akira TSUGE* and Wataru KANEMATSU

A simple and reliable analysis method has been developed to measure oxygen impurity in magnesium (Mg) and its alloys. Instead of directly analyzing oxygen impurity of an analyte, a multi-step heating-up method has been invented, in which oxide, compound of oxygen impurity with metals, is first separated from an analyte and then oxygen content analysis is carried out. The oxygen analysis of the oxide has been performed by Inert Gas Fusion-Infrared Absorptiometry widely used as a method for oxygen analysis in metals. We verified that analysis with adequate accuracy can be achieved with temperature calibration of each equipment. In parallel with R&D of the analysis method, we performed international standardization activity. It has been shown that consistent data can be obtained both in Japan and Korea through our technical assistance to Korea, and a proposal to the ISO technical committee for Mg and its alloys has been submitted smoothly.

Keywords: Magnesium, magnesium alloy, oxygen analysis, inert gas fusion-infrared absorptiometry analysis, multistep heating procedure, international standardization

1 はじめに

マグネシウム (Mg) は、その比重が 1.8 g/cm^3 と鉄 (比重: 7.8 g/cm^3) に比べて $1/4$ 、アルミニウム (比重: 2.7 g/cm^3) に比べて $2/3$ という代表的な軽量金属であり、自動車等輸送機械への使用により、大きな二酸化炭素削減効果が期待されている。我が国において輸送機械が年間に排出している二酸化炭素は、2億5千万トンと見積もられており、その55%を自家用車が占めている^[1]。各種の自動車部材を軽量化することで仮にその重量を $3/4$ に軽減することができれば燃費は約20%向上し、自家用車だけでも2億5千万トン \times $0.55 \times 0.2 = 2,750$ 万トンの二酸化炭素の排出を削減できることとなる。

このような環境負荷低減効果に優れた Mg 材料の利用研究は、ヨーロッパや米国において国家政策として大規模

に行われており、EU の「EUCAR プロジェクト」やドイツの「SFB390 プロジェクト」、米国の「USCAR プロジェクト」等が広く知られている。しかし、実際の自動車一台あたりの Mg の使用量は、2005 年度の時点で、先進的なヨーロッパにおいても 6 kg とまだ限定的ではある。日本での使用量は 2 kg であり、これよりもさらに少ない状態にある^[2]。

Mg は酸素親和性が高く、酸化物 (非金属介在物) として存在する不純物酸素が、強度や疲労寿命等の機械的特性に悪影響を及ぼすことが知られており^{[3][4]}、これが自動車用をはじめとする各種構造部材への Mg の使用量増大の障害となっていると考えられる。また、Mg に関しては工業的な酸素分析方法が確立されておらず、試験片の鑄肌観察や、CT スキャン画像内の酸化物の目視等の精度や正確さに欠ける方法で評価が行われているのが現状である。こ

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98
Research Institute of Instrumentation Frontier, AIST 2266-98 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan
* E-mail: akira-tsuge@aist.go.jp

Original manuscript received September 9, 2011, Revisions received November 15, 2011, Accepted November 22, 2011

のことはリサイクルシステムの構築という観点からも障害となり、Mg 使用量増大をさらに難しくしている。

すなわち、酸素親和性の高い Mg においては、その部材化工程や部材の使用過程で表面の酸化が起りやすく、部材化時に生じる端材やリユース部品の再原料化使用にあたっては、酸素含有量のチェックとその評価結果に基づく酸化物清浄化処理が必要不可欠であるが、生産現場で適用可能な酸素分析方法のないことがリサイクル推進の障害となっているのである。

Mg 材料および部材の製造技術という観点からは、我が国は世界的に優位にあり、特に酸素遮蔽下での融解鋳造技術や半溶融状態での射出成形加工を行う技術では、世界をリードしている。これらの部材化技術は、加工時の酸素増加を原理的に起こさない技術であり、製造された部材の酸素含有量が低いことが知られている^[5]。Mg を巡る国際市場においては、我が国は「原料輸入加工品輸出国」と位置付けることができる。同様の位置付けにあるといわれている韓国では、比較的大規模な事業者が、押し出し成形による棒材や双ロール圧延による薄板等加工用素材の製造を行うという形が多い。

一方、図 1 に示すように Mg 地金の世界シェアのうち約 85 % を中国の熱精練地金が占めており、中国は現在「原料輸出国」として位置付けられているものの、将来的には合金や部材の製造に力を入れてくると考えられている^[2]。このように、現状では東アジアの主要国が三者三様の形で世界市場に参入しており、ライバルであるとともに協調・協力関係を構築できる可能性を秘めているのが Mg 材料業界の特徴の一つであるといえる。

地球環境保護という観点からは、Mg 材料の利用拡大を図るべきであることは論を待たない。酸素分析手法の普

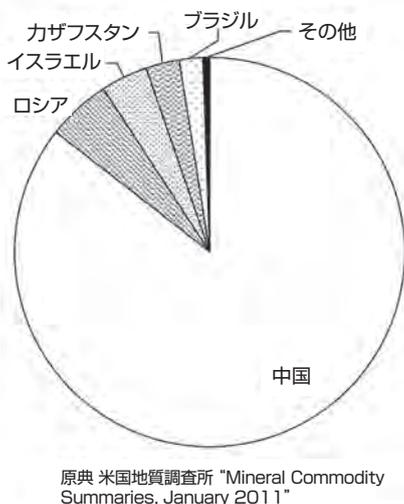


図 1 マグネシウム地金の世界シェア

及は、材料・部材の品質・信頼性の裏付けを容易にし、これらの向上に大きく貢献することが期待される。同時に、Mg 部材加工技術に関しては世界のトップクラスにある我が国の製品の優秀性をアピールすることも可能になる。そこで我々は、部材製造現場での工程管理等にも利用可能な簡便かつ信頼性の高い酸素分析手法を開発することとした。この研究の成果は、当初から産業界への普及を意識したものであるが、本格的に研究開発プロジェクトに着手する段階で、開発した手法を国際規格として提案することを最終的な目標に設定した。国際規格が、世界市場における製品特性評価の公正な物差しとなることを期待したものである。この報告では、酸素分析手法を構成する要素技術の開発と、手法の信頼性を検証した過程を紹介するとともに、国際標準の提案に向けた国際協力の経緯についても述べる。

2 国際標準化に必要な要素技術・課題

2.1 基本となる技術の開発

工業材料の分析方法の標準化にあたっては、単に分析技術からの視点以外に考慮すべき要素として汎用性がある。例えば、酸素の分析方法としてよく知られる放射化分析法等は、結果の正確さにおいては優れているものの、放射化に用いる原子炉や加速器の使用は一般に制約が大きく、生産現場で日常的に分析する方法としては適さない。また、過去には主流であった湿式操作を伴う分析法は、分析者が分析操作に習熟を要するため敬遠される面があり、他に汎用的な機器分析法がない時に限って標準化されているのが実情である。

このような背景から、金属中の酸素の工業的計測手法としては、一般に不活性ガス融解-赤外線検出 (IGF-IRA) 法が用いられている^[6]。IGF-IRA 法による酸素分析は、鉄鋼業界を始めとする産業界で広く用いられており、自動化された装置も多数普及している。また、外注分析を受託できる分析会社も数多く存在する。これらの点から、Mg の酸素分析においても、この方法が標準化に適していると考えられた。

IGF-IRA 法の測定原理を図 2 に模式的に示す。ヘリウム等の不活性ガス気流下にある黒鉛るつぼ中に入れた試料を、黒鉛るつぼに通電することによって加熱し、試料中の



図 2 不活性ガス融解法の概念図

酸素をるつぼ材の炭素と反応させることによって還元し、一酸化炭素として抽出する。さらに、ヘリウム気流中の一酸化炭素濃度を赤外線吸収検出器で計測・積算することで試料中の酸素を定量する。分析に利用している反応は、炭素による試料の還元反応であり鉄鉱石から鉄を精錬する反応と同じである。このことは、この手法が鉄鋼産業で考案され発展してきた分析法であることに由来する。

すでに確立されているこの方法によって、Mg 中酸素の測定が可能となれば、Mg 中の酸素分析に対するニーズに速やかに応えることが可能であるが、Mg の沸点が低く酸素親和性が高いために、一般にはこの方法は Mg 中の酸素分析には適用できないとされてきた。

図3に酸化マグネシウムを黒鉛るつぼ中に入れ、印加電力を増加させながら一酸化炭素の抽出量をモニターした結果(昇温不活性ガス融解プロファイルと呼ぶ)を示す。2,400 W 付近から一酸化炭素の抽出が始まっているが、この印加電力に対応する黒鉛るつぼの温度は約 2,000 °C と見積もられ^{注1)}、Mg の沸点である 1,090 °C よりもはるかに高い。すなわち、Mg 中に存在する酸化マグネシウムが炭素と反応を始めるよりも先に、より低い温度で母材である Mg が沸騰をはじめてしまうことになる。試料が沸騰すると、その発生蒸気力で溶融した試料がるつぼから飛び出し、分析は困難となる。

我々はその解決法として、試料中の酸化物を試料から分離して、分離後に酸素分析を行うという「多段階昇温法」を新たに考案した。その考え方のヒントは鉄と Mg の精錬法にあった。

IGF-IRA 法は、前述のように炭素による試料の還元反応を利用している。そしてその反応は、反応生成物である二酸化炭素あるいは一酸化炭素が気体として反応系から脱離する不可逆反応である。この不可逆反応の反応後の液相(金属)を得るのが鉄の精錬であるのに対して、反応後の気相(一酸化炭素)を得るのが酸素分析であると考えられることができる。

Mg の代表的な熱精錬法であるピジョン法では、原料の

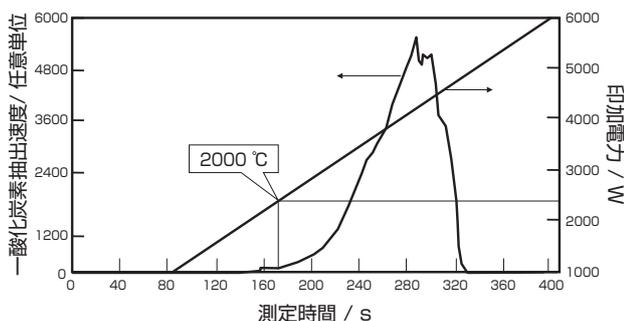


図3 酸化マグネシウムの昇温不活性ガス融解プロファイル

酸化マグネシウム鉱物は、鉄-ケイ素系合金(フェロシリコン)の粉末と混合され加熱される。酸化マグネシウムの酸素がフェロシリコンに移動すると金属となった Mg が蒸発して反応系から除かれるため、この反応は逆反応を起すことなく進行して酸素はフェロシリコンに移動し、蒸発した Mg は低温部で凝固して回収される。つまりこの製錬工程では、不可逆反応の気相の Mg の方から金属が得られていることになる。そこで我々は、酸素を測定するためには逆に酸素が残留する液相の方を測定すればよいと考えたわけである。

何らかの Mg より沸点の高い金属を酸素の受容体として Mg 試料と混合した後、Mg を蒸発させれば試料中の酸素は受容体金属に残留するはずである。そして、Mg と分離された酸素は受容体金属中の酸素として測定できることになる。

研究開始当初は、Mg 試料中の酸化物の酸素を酸化還元反応によって受容体に移す必要があると考えていたため、アルミニウムのような酸素親和性のより強い金属を受容体候補として検討していた。しかしその後、試料中の主たる酸化物と考えられる酸化マグネシウムを、そのまま受容体に移してもかまわないことに気づき、酸素受容金属としてスズを選択することとした。スズは融点が 232 °C と低い一方、沸点は 2,602 °C と高いために融解した Mg と液体状態で混ざり合い、酸化物の受け取りが容易に進行することが期待される。また、スズは不活性ガス融解では浴金属として使用されることの多い金属であり、酸素含有量の低いものの入手が容易であることも選択の理由となった。一方、アルミニウムは通常の不活性ガス融解で浴金属として使用されることはないため、酸素含有量の低いものの入手は困難である。

図4に、今回開発した、酸素受容金属としてスズを用いる分析方法の概念図を示す。Mg 0.3 g をスズ 0.5 g と約 900 °C で共融させた後、1,000 秒以上の時間を掛けて穏やかに 2,000 °C まで昇温すると、るつぼの底の残留物は 0.5 g を幾分下回る重さとなった。2,000 °C におけるスズの蒸気圧は数 kPa であることから、若干のスズの蒸発が生じてスズの重量が投入量を下回ったものと考えられる。また、こ

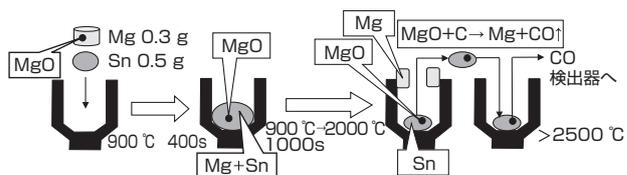


図4 多段階昇温法によるマグネシウム中酸素の分析手法の概念図

の温度は Mg の沸点を大きく超えており、Mg はほとんど完全に蒸発分離できたものと考えられた。昇温の速度や加熱時間を変えてこの共融物の重さを測定し、Mg と受容体を分離できる適切な昇温条件の範囲を明らかにした。

るつぼ中の残留物は、スズと Mg 中の酸化マグネシウムからなると考えられるので、図 3 の分解プロファイルに示されるように黒鉛るつぼの中で 5,000 W 以上の電力で加熱すると、酸素を一酸化炭素として完全に抽出できることが予想される。そこで、Mg 0.3 g、Sn 0.5 g に酸化マグネシウム 10 mg を添加したモデル試料を用いて Mg を分離し、残留物を 5,000 W で加熱した時に抽出・検出される一酸化炭素中の酸素の量が、添加した酸化マグネシウムから予想される酸素量約 4 mg（酸化マグネシウム中酸素の化学量論組成は 39.7 %）に対して、どの程度の比率（回収率）になるかを調べた。ところがこの実験において回収率は 2 割程度に留まり、この原因究明に少なからぬ時間を要することとなった。最終的には、るつぼの縁についた Mg をそのままにして加熱すると、残留物から発生する一酸化炭素中の酸素と再結合したためであることをつきとめ、再結合を防止するためには炉を開けて黒鉛るつぼから残留物を取り出し、炉内の Mg を除去後に新しい黒鉛るつぼで測定すればよいという簡単な手順を思いつくに至った。

Mg 蒸気と発生した一酸化炭素との反応性が予想以上に高く、IGF-IRA 法は一連の分析操作を不活性ガス気流下で行わなくてはならないという自らの固定観念に捕らわれていたために、原因究明に時間を要することとなった。なお、分析の途中で大気中に残留物を取り出すことによって試料の酸化が起こることが懸念されたが、試料をるつぼに入れずに分析を行って確認したところ、その影響はほとんどないことが分かった。

2.2 試料採取法についての検討

規格にしたがって測定された分析値は、商取引において対象物全体を代表する値として取り扱われるため、分析手法を標準化するにあたっては基本となる分析手順以外に試

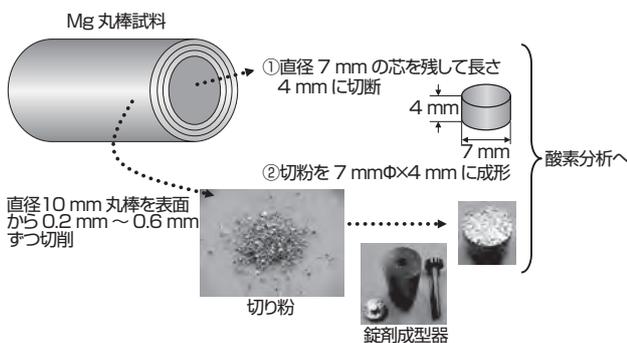


図 5 切粉採取方法および分析用試料作成方法

料全体を代表する分析値が得られるような試料採取方法を規定する必要がある。このため、通常は測定対象物の複数か所から分析に用いる量より相当に大量の試料を採取し、それらをよく混ぜ合わせて均質化を図ること（均質化操作）が行われる。この研究でも、当初は金属中の主成分や不純物の化学分析に広く用いられ、試料採取物の均質化操作が可能な「切粉採取法」を検討した。これは、測定対象物の複数か所からドリル穿孔によって採取した切粉に対して均質化操作を行い、分析試料を得るものである。

しかし、Mg がとても酸化されやすいため、簡便で実用的な酸素遮蔽では切粉採取に伴う試料の酸化が避けられないことが分かったため、均質化操作を行うことはできないが酸化の影響が小さいコアドリル採取法について検討した。以下に、試料採取法の検討結果と、その過程で得られた標準化に資すると期待される知見について述べる。

2.2.1 切り粉採取法

通常の切粉採取法では、切粉生成段階で試料は大きな表面積をもつことになるため、Mg のように酸素親和性の高い材料では表面の酸化が避けられず、これをそのまま適用することは難しいことが予想された。

そこでまず、簡便な酸化防止処置を施した状態で切り粉採取を試みることにした。図 5 に模式的に示すように、窒素パージしたグローブボックス内でミニ旋盤を用いて直径 10 mm の丸棒を表面から 0.2 ~ 0.6 mm ずつ切削し、その切粉を錠剤成形器に量りとりパスボックスを通じて外に出してからプレスしたものを試料とした。これを分析したところ、図 6 に示すように、窒素パージ中で採取した切粉は材料の芯の部分よりも高い酸素濃度を示しており、窒素パージしたグローブボックス内で切粉を採取するという手順をとっても大気中での作業と同じく切粉の酸化が避けられないということが分かった。

これは、用いたグローブボックスが、真空パージができ

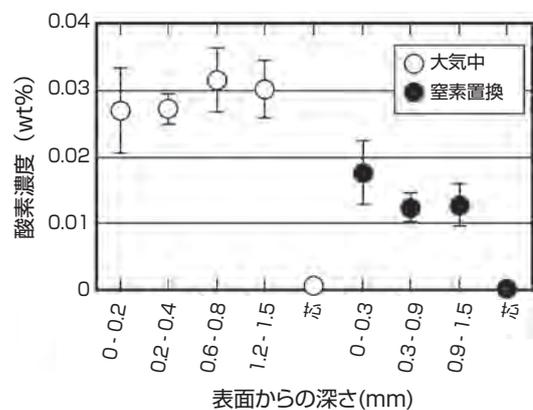


図 6 切粉採取時の雰囲気による表面酸化の影響

ないタイプであり、窒素を吹き捨てる形でパージを行ったものの、わずかな酸素が残ってしまい切粉の酸化が生じたと考えられる。

このように切粉の酸化を避けるためには、とても慎重な作業を必要とすること、また、グローブボックス中で切粉を作製し錠剤成型器に採取する操作は相当に難しく熟練を要するばかりでなく、回転機械である旋盤を厚みのある手袋を通して操作することは危険性を伴う作業であることから、作業現場において簡便に実施可能であることが望ましい分析方法としてはふさわしくないと考え、切り粉採取法の採用は見送ることとした。

一方、以上のような切り粉採取に関する実験結果から、その後の研究遂行に役立つ二つの貴重な知見を得ることができた。まず一つは、図6の芯の部分の測定結果からわかるようにバルク体の表面の酸素の影響は、今回開発した分析方法ではほとんど問題にならない程度であることがわかった。これは、Mgは酸素親和性が高く大気中で簡単に表面が酸化される試料ではあるが、その酸化は表面のごく薄い層に限られていることを意味している。これにより、体積に対して表面積が比較的少ない形状を採用するなら、表面酸化の影響はこの分析法の検出限界と同等程度に抑えられることが明らかとなり、次に示すコアドリル法の開発につながった。他の一つは、切り粉を同じ厚さとすればある程度酸素量の揃った切り粉成形体が得られるという結果であり、これは分析値の妥当性検証試験や共同分析試験等に用いる試料を準備する上で重要な知見となった。

2.2.2 コアドリル法

2.2.1で述べたように、体積に対して表面積の少ないバルク体を試料とすることで、表面酸化の影響を抑えることができる。その一方で、試料採取法として充たすべき要件として、さまざまな形状が予想される測定対象物の任意の位置から測定に適した大きさの試料を偏りなく、かつ簡便に採取できることがある。その他にもIGF-IRA法固有の条件として、試料を黒鉛るつばに確実に投入できる



図7 試料くりぬき用コアドリル (内径 7 mm)

ことが必要である。IGF-IRA法の市販装置では、最初に炉内の不活性ガスパージを行い黒鉛るつばの脱ガスの後、試料を直径8 mmほどの試料落下経路を自重で落下させながら投入することとなる。鉄等の試料では、比重が大きいため問題とならないが、Mgの場合は比重が小さいために、何らかの原因で経路の途中で引っかかる恐れがある。これら二つの要件を充たすためには、試料を小さく、形状を球体に近づければよい。一方、試料投入量と測定値の精度はトレードオフの関係にあり、球体の測定試料を得るためには加工の手間がかかり加工中の酸化の影響が大きくなることが予想される。この研究では、これらの条件を勘案し、できるだけ簡便に採取できる形状として円柱形を選び、測定精度を維持しつつできるだけ小さな寸法として試行錯誤の結果、直径7 mm、長さ4 mmとした。

この形状の試料を、測定対象物から効率よく採取するために、直径7 mmの丸棒をくりぬくことができるコアドリルを試作した。試作したコアドリルにより、測定対象物の任意の位置から丸棒をくりぬいて採取し、任意の深さの部分を丸棒から切り出すことで試料を作成した。コアドリルの写真を図7に示す。図8に直径170 mm、長さ500 mmの押出用ビレットから系統的に130個の試料を切り出した事例を示す。このような、大型試料の分布解析用試料の切り出しも2日間以内に可能である。

3 国際標準化に向けての手法の信頼性検証

国際標準化を行うためには、これまでに述べた要素技術の確立に加えて、それを各国の専門家からみて標準化にふさわしいレベルの分析法であることを示す必要がある。具体的には、1) 分析値が精確に対象物中の酸素を測定していること、2) 分析法を適用可能な合金の範囲が明らかであること、3) 市販されている不活性ガス融解法の装置においてこの分析法を適用した際に再現性のよい結果が得られること等である。以下に国際標準化に向けて、これらの点に関して検討した結果について述べる。

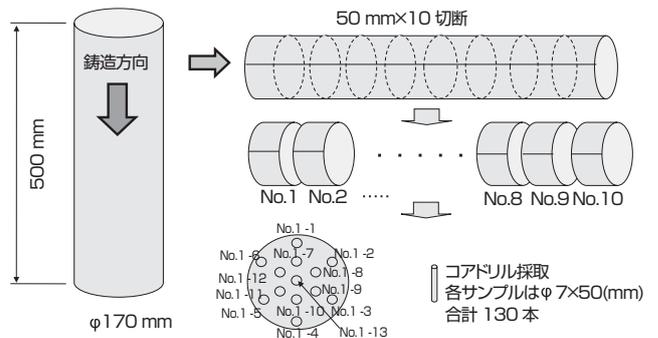


図8 押出用ビレット中酸素分布測定のためのコアドリルによる試料採取例

3.1 分析値の妥当性の検証

新たな分析法を開発した場合に、分析値が精確に測定試料中の分析対象の含有量を表しているかどうかを確認するのは当然のことであるが、開発した分析法が新規性の高いものであるほど実際の確認は困難なものとなる。例えば、その分析対象の含有量が明らかな認証標準物質が頒布されていれば、その標準物質を分析し分析値が認証値に近い値となるかどうかを確認すればよい。しかし、これまで測ることが困難とされていたものを対象とする分析法の場合は、当然のことながらそのような認証標準物質は存在しない。このような場合には、ISOの発行している文書「ISO Guide 34 General requirements for the competence of reference material producers」^{注2)}に記述されているトレーサビリティ、バリデーション、データの評価の考え方に準拠し、測定可能な他の方法で得られる分析値との比較によって妥当性を検証することが広く行われている。

ここでは比較対象として、まず「フェノール溶解法」を選んだ。これはMgがフェノールと反応してフェノキサイドを生成して溶解するのに対して、Mg中の酸化マグネシウムはフェノールに不溶であることを利用して、Mg中の酸化マグネシウムを定量する方法である。その操作の概容を図9に示す。フェノール溶解法では適用対象は試料が溶解の容易な切粉状試料に限定される。また、溶解や希釈に用いるフェノールやメタノール中に水分を含む場合は生成したフェノキサイドが加水分解して水酸化マグネシウムを形成する。これは酸素含有量を過剰に見積もることになるため、フェノール溶解法は湿度に敏感である。この湿度による影響を除去するには湿式分析の煩雑な操作に習熟することが必要ことから、部材製造現場にも適用できる標準的な分析手法としては適当ではない。

図10に種々のMg試料をIGF-IRA法とフェノール溶解法で分析した結果の比較グラフを示す。分析値と酸素の含有量との間には相関が得られているが、フェノール溶解法の結果が幾分高めになっている。この原因としては上述の

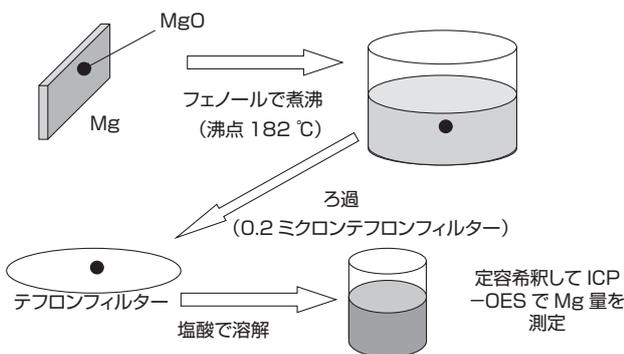


図9 フェノール溶解法の概念図

水分の影響が考えられる。

次に比較対象として用いたのは、荷電粒子放射化分析法である。この方法は、測定試料にヘリウム原子核(α線)を照射し試料中の酸素を放射性のフッ素原子に放射化した後、そのフッ素原子の放射線量から試料中の酸素量を求める分析法である。荷電粒子放射化分析法は加速器を必要とするため、現場で日々の分析には用いることができないものの、合金開発の段階等ではMg等の酸素含有量の測定には比較的よく用いられており、豊富な実績を有する分析機関も複数存在する方法である。荷電粒子放射化分析法の概容を図11に、その結果を表1に示す。用いた試料は純Mgの押し出し材(No.1)と、その押出材を大気中で厚み0.2mmの切粉に加工した後に錠剤に成型したもの(No.2)、さらにその切粉を湿度100%のデシケーター中に3日間放置して酸化を進めた後に錠剤に成型したもの(No.3)である。No.1試料は酸素濃度がIGF-IRA法の定量下限に近いために平均値に対して大きな標準偏差となったが、No.1およびNo.2試料において、IGF-IRA法と荷電粒子放射化分析法の分析値は標準偏差の範囲内で一致した。No.3試料の分析値はIGF-IRA法の分析値が荷電粒子放射化分析法による分析値より幾分低いものとなった。これは、荷電粒子放射化分析法は、試料中の酸素は水分等であってもすべて検出されるのに対して、IGF-IRA法はその分析原理からわかるように安定な酸化物となっている酸素のみを定量しているためであると考えられる。特にNo.3試料は水蒸気により酸化を進めたために安定な酸化物となっておらず、水分や水酸化物が含まれていたものと考えられた。これらの事情を勘案すると、水分の影響を受けていないNo.1およびNo.2試料では荷電粒子放射化分析法とIGF-IRA法の分析値は標準偏差の範囲で一致しているとみなしてよく、後者の分析値の妥当性は確認されたと言える。

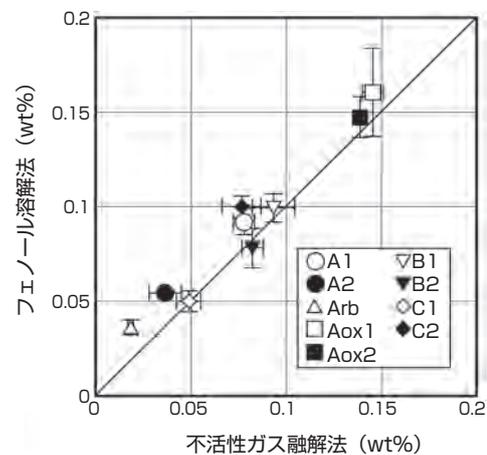


図10 不活性ガス融解法とフェノール溶解法の分析値との関係

3.2 適用可能な合金の範囲

Mg 合金に関しては、企業等から合金組成や不純物量の明らかな標準物質が多数頒布されている。しかし、それらの標準物質のうち酸素含有量が認証されているものはない。そこで、それらの市販標準物質を用いて、今回開発した手法の測定操作上の問題を生じないかという点についてのみ検討を行うこととした。その結果、表 2 に示すように現在市販されているほとんどの Mg 合金においてこの測定操作は可能であることがわかった。例外的に認められた操作上の障害は、アルミニウムの含有量が 6 % を超える試料について、Mg を蒸発分離した後のスズがるつぼに固着すること、アルミニウムの含有量が 9 % を超えるるとつぼの底に広がりながら固着することがわかった。これは、アルミニウムが炭化物を作りやすく、また炭素に対して濡れ性がよいことによると考えられる。固着に関しては、るつぼを破壊すれば残留物を取り出すことが可能であることから、この方法の規格化において適用範囲を Mg 合金一般としても問題がないと判断した。

3.3 分析装置の適用範囲

不活性ガス融解法の分析装置は、現在国内外を通じて 2 社のみから市販されているが、装置の年式により種々の型番がある。分析装置を用いる分析方法を規格化する場合には、現場で使用されている分析装置のメーカー・型番を可能な限り広く包含するように配慮した規定内容としなくてはならない。そこで、まず国内において参加機関を募り、共同で分析試験を行った。その際、我々が使用している装置とは異なるメーカーの分析装置に関しては、そのメーカーの協力を得て装置に適合した印加電力や加熱時間等の分析条件を明らかにした。3.1 で述べた試料を供試材とし、黒鉛るつぼにかける電圧によって加熱条件を指定した。

その結果と 3.1 で示した荷電粒子放射化分析の結果とを表 3 に示す。ここでは、条件提示の協力が得られた装置メーカー（分析所 B）と我々（分析所 D）の値は荷電粒子放射

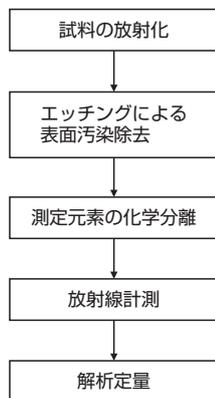


図 11 荷電粒子放射化分析の分析フロー図

表 1 不活性ガス融解法と荷電粒子放射分析法との分析結果比較

試料 No.	不活性ガス融解法	荷電粒子放射化分析法
No.1	0.0006±0.0005 (mass%)	0.0001(mass%)
No.2	0.0165±0.0023 (mass%)	0.0180(mass%)
No.3	0.0480±0.0052 (mass%)	0.0600(mass%)

表 2 各種合金への適用の可否

試料名	形状	合金化成分(濃度)	分析の可否 (○:可,△:障害, ×:不可)
MBH C61XMgp10	切粉	—	○
MBH C61XMgp30	切粉	—	○
MBH C63XMge30	切粉	Mn(2.36 %)	○
MBH C65XMga50	切粉	Al(6.01 %),Zn(0.411 %)	△(融解物固着)
MBH C66XMgc40	切粉	Zn(6.81 %),Mn(0.166 %)	○
MBH C67XMgf30	切粉	希土類(2.4 %),Zn(3.18 %)	○
MBH C67XMgg40	切粉	Zn(5.47 %),Th(1.85 %)	○
MBH C68XMgh40	切粉	Ag(2.05 %),希土類(2.4 %)	○
MBH C69XMgy4-a	バルク体	Zn(0.5 %),Mn(0.1 %), Nd(2.4 %),Gd(1.5 %)	○
HMP A-41-T05	バルク体	Al(4.1 %),Zn(0.2 %), Mn(0.4 %),Si(1.2 %)	○
HMP STD1/85	バルク体	Al(9.5 %),Si(1.1 %)	○
市販 AZ91	バルク体	Al(約9 %),Zn(約1 %)	△(融解物固着)
市販 AM60b	バルク体	Al(約6 %),Mn(約0.1 %)	△(融解物固着)
市販 ZK61a	バルク体	Zn(約6 %),Zr(約0.7 %)	○
市販 AMX602	バルク体	Al(約6 %),Mn(約0.1 %), Ca(約2 %)	△(融解物固着)
市販 AZX1211	バルク体	Al(約12 %),Zn(約1 %), Ca(約1 %)	△(融解物固着)

表 3 国内共同分析試験の結果

試料	分析所 A	分析所 B	分析所 C	分析所 D	荷電粒子
No.1	ND	0.0014	突沸	0.0006	0.0001
No.2	0.0015	0.0212	突沸	0.0165	0.0180
No.3	0.0021	0.0492	突沸	0.0480	0.0600

化分析のそれと大きく異なることはなかったが、沸騰により試料がるつぼから飛び出したため測定ができなかった例（分析所 C）、蒸発除去が不完全であるため残留物中の酸素分析時に Mg 蒸気が発生して一酸化炭素を再度酸化物に戻したため低値となったものと推定される例（分析所 A）があった。これらのことから、用いる装置や型番により「印加電力-黒鉛るつぼ温度」の関係が異なっていると推定された。つまり、規格における加熱条件としては印加電力ではなく、るつぼ温度を規定することが必要であり、そのためには装置毎の温度-印加電力検量線を得る方法を規定しなくてはならないことがわかった。

検量線を得る方法に関しては、図 12 に示すように印加電力を少しずつ上昇させながら、黒鉛るつぼ内の融点の明らかな金属粒の融解を観測することによって行うこととした。この手法は、るつぼ内の試料温度を直接測ることが難しい黒鉛通電加熱炉においては、以前から測定者の間でよく用

いられてきた温度確認方法である。図 13 (a) に 5 種類の金属を用いて求めた関係を示す。一般には、検量線は図に示すような曲線となるのであるが、Mg の蒸発除去を行う 900 °C ~ 2,000 °C の範囲ではその曲率は十分小さく、図 13 (b) に示すように銅およびクロムの粒が融解する際の電力を測定して、直線近似しても問題がないことが分かった。

4 国際規格提案にむけた取り組み

分析手法を国際規格として提案する場合、技術的な信頼性を高めて手法として確立するための研究開発を行うとともに、国際的に共通な技術ニーズに合致したものであることを国内外に広く認知させ、他国に先駆けて規格提案の意思表示をすることが重要になる。以下においては、これらに関する我々の取り組みを紹介する。

4.1 日本マグネシウム協会による意見集約

我々は、この分析法の技術要素確立の後、それを ISO 規格として提案することを目標とする研究開発プロジェクトを提案したが、その準備段階から産業界の意向を把握するため、業界団体であり ISO 規格の国内審議団体でもある日本マグネシウム協会と密な連携を維持してきた。筆者の一人は、2006 年度の酸素分析手法の開発初期段階から、同協会の分析委員会の委員として研究進捗の報告を行うとともに産業界のニーズに対応した分析手法の開発を目指した。また 2007 年度には、同協会の会員企業を対象に酸素

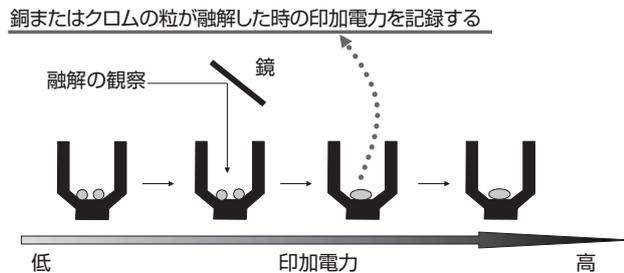


図 12 黒鉛るつぼの温度校正の概念図

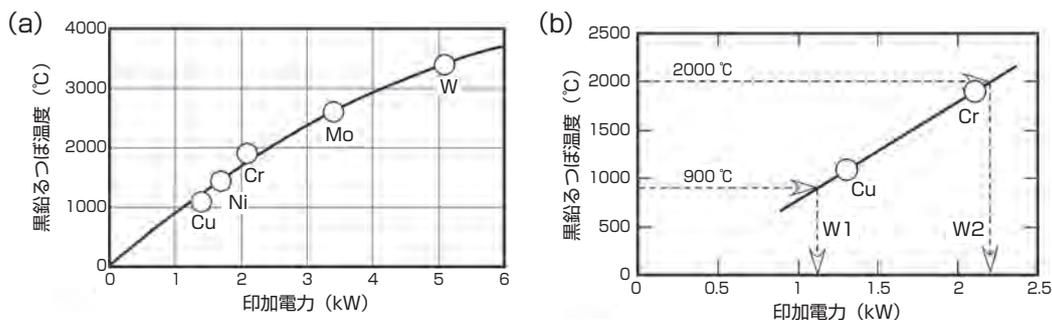


図 13 印加電力と黒鉛るつぼ温度との関係

(a) 融点の異なる 5 種の金属による校正曲線 (b) 900 °C ~ 2,000 °C の範囲での校正方法

表 4 国際標準化に向けての取り組み

2008	2009	2010	2011	2012
4月			3月	
METI 基準認証研究開発制度 「マグネシウム地金・合金中の酸素分析手法の標準化」				
	5月	5月	5月	
	★ ISO/TC79/SC5 東京会議で基本概念説明	★ ベルリン会議で経過報告	★ ロンドン会議で規格原案の概要説明	
		韓国への技術協力		
			6月	
			★ 新業務項目 (NWIP) 案提出	
			7月 10月	
			作業原案 (WD) 審議	
				NWIP 投票

分析のニーズについてアンケート調査を行った。その結果、「今すぐ必要」とする企業が 2 割、「将来は必要」と回答した企業が 5 割あった。このアンケート結果は、産業界における酸素分析手法のニーズの強さを示すものであり、この後に続く研究開発プロジェクトの提案および遂行の過程で我々を支える強力な情報となった。

4.2 ISO 専門委員会での事前活動、韓国との協力

2008 年度より 3 年間、経済産業省基準認証研究開発制度の下で不純物酸素分析に関する ISO 規格素案作製のための研究開発を行うこととなった。我々はこの研究開発段階から Mg に関する ISO の専門委員会 ISO/TC79/SC5^{注3)} への事前活動を開始した。この間の取り組みについて表 4 に示す。まず、2009 年の 5 月に東京で行われた同委員会の会議で「将来の提案課題」としてこの分析法の基本概念の紹介とこの方法を用いた ISO 規格提案を検討している旨を表明した。翌 2010 年 5 月にベルリンで行われた同会議においても、サンプルの採取法や荷電粒子放射化分析法の結果との比較等、開発の途中経過を中心に報告した。その際、韓国から「前年、東京で示された条件ではうまく分析できない」という情報が伝えられた。韓国には鉄鋼生産と Mg の部材生産の両方を行っている大企業等があるため、鉄鋼業ではよく使用される IGF-IRA 法への理解が深い。また韓国の主たる Mg 製品が特定の機能をもたせた部

品ではなく板材等の素材であり、酸素量等の品質保証への要求が高いこと等が、酸素分析手法に強い興味を示し、独自に追試を行ったことと関係していると推測された。このように韓国は近年 Mg の素材供給国としての位置付けを明確にして SC5 の中でも発言力を増しつつあることから、この機会をとらえて技術的な協力関係を構築することは、その後の規格案提案プロセスで有利に働くと考えられた。さしいわい、この時点では 3.3 で述べた装置や型番の違いにより「印加電力-黒鉛るつぼ温度」の関係が異なっていることを把握していた後であったので、韓国に対してその問題の原因と解決策を提示することができた。2011 年 2 月には日本マグネシウム協会の調査団が韓国を訪問する機会があり、韓国側からは我々が提案した手法で温度校正を行うことで安定した分析値が得られるようになったこと、独自の試料を用いて荷電粒子放射化分析との比較を行ったところ良好な結果が得られたこと等の情報もたらされた。2011 年 5 月にロンドンで行われた ISO/TC79/SC5 の会議においては、黒鉛るつぼの温度校正の方法と上記のような韓国との協力について報告したところ、国際幹事から「良く検討されているので新規提案を歓迎する」というコメントが得られた。

このように、ISO の専門委員会において早めの意思表示と手法の開発状況を逐次報告することによって、建設的な議論を行う雰囲気醸成され、幹事国やその他の P メンバー国^{註4)}に対しても「大きな摩擦なく規格化が可能」というよい印象を与えることができたと考えている。黒鉛るつぼ温度の校正方法も含んだ分析法の素案は日本マグネシウム協会の標準化委員会の審議を経て、2011 年 6 月に ISO/TC79/SC5 に提案され、現在、NWIP（新業務項目提案）として 3 ヶ月間の投票に付されている。

5 今後の展開

分析法や評価法の標準化という業務は、すでに開発され使用されている方法を基本として、各国における条件の違いを調整しながら統一的方法を規格化することが多く、我々の経験したような基本方法の開発から出発し、それを普及させる目的で規格へ提案するという一貫した取り組みはまれなケースと思われる。分析・評価に関するフロンティア技術が普及して広く使われるようになることは、計測分析技術開発に携わる研究者や技術者の夢である。規格化はフロンティア技術を普及させるために必要不可欠であるとする。

この分析法は、現在、経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業（サポートインダストリー）の「耐熱・難燃性マグネシウム合金鍛造によるパワートレイン耐熱部材の開

発」の中で耐熱・難燃性マグネシウムの製品管理技術として応用がなされようとしている。Mg を輸送機関等に使用する上で大きな問題となる難燃化に関しては、カルシウムを添加した合金が産総研で開発されている⁷⁾。また、高温部材として使用するための耐熱化については、希土類元素やケイ素の添加が有効であることも公知である。しかし、これらの添加金属は、いずれも酸素親和性が高い金属であり、その添加により合金中の酸化物の増加を伴う。さらに部材化技術として鍛造はコスト的に優れた方法であるが、鍛造工程では作製した部材に湯道や押し湯と呼ばれる付属部分が生じ、それらの鍛造用の溶湯への再利用はコスト上昇を抑えるために必要不可欠である。この再利用材の再溶湯化も酸化物増加の原因となる。この分析法のような工場内で工程中の材料の酸素量を測定できる方法は、工程管理技術・品質管理技術として強いニーズがある。このサポートインダストリー事業は企業の製品開発を支援する目的の事業であり、製品が普及するのに合わせて、この分析法も産業内に普及し定着していくものと期待される。現在は、この手法を品質管理技術として高度化することを目指した研究開発に取り組んでいる。

謝辞

この研究の一部は、経済産業省・NEDO の委託研究「マグネシウム地金・合金中酸素分析方法の標準化」の下で行われたことを記すとともに、同プロジェクトの遂行に御協力いただいた運営委員会委員および日本マグネシウム協会に対して謝意を表します。

注1) 2,400 W 印加時の黒鉛るつぼの温度は後出の図13 (a) との対比から約2,000 °Cと見積もられる。

注2) 比較する分析法が検証したい分析法と原理的に大きく異なる場合に両者の分析値が近い値を示すなら、その分析値を妥当と見なすことができる。これは、比較する複数の分析法が真値に対してそれぞれ誤差をもっていた場合でも、原理的に異なる方法であればその誤差の影響が同じになる可能性は大変低いため、互いに近い分析結果が得られるなら誤差の影響は少なく、得られた分析値は真値に近いものと考えられるからである。（対応するJIS規格は「JIS Q 0034 : 2001 標準物質生産者の能力に関する一般要求事項」）

注3) ISO規格案はその技術的内容に対応した専門委員会（TC）またはその下部組織となる分科委員会（SC）で審議される。ISO/TC79/SC5とは、TC79の5番目の分科委員会SC5を意味し、その名称は、“Magnesium and alloys of cast or wrought magnesium”（マグネシウムおよびその鍛造合金）である。なおTC79の名称は“Light metals and its alloys”（軽金属及びその合金）である。

注4) ISOのTCおよびSCに参加する国々は、規格案の票決など委員会業務に積極的に参加する義務を負うPメンバーと、オブザーバーとしての業務を行うOメンバーに分けられる。ISO/TC79/SC5のPメンバーは、日本、中国、韓国、ドイツ、英国、イタリア、ロシア、スペイン、ルーマニアの9カ国で、幹事国は中国となっている。

参考文献

- [1] 社団法人中部経済連合会:「温暖化問題と交通体系のありかた」(2007).
- [2] 日本マグネシウム協会:「平成16年度自動車用Mgの実用化に関する調査」(2005).
- [3] A. G. Haerle: The effect of non-metallic inclusions on the properties of die cast magnesium, *SAE Technical Paper* 970331, Detroit, MI, (1997).
- [4] H. Hu and A. Luo: Inclusion in molten magnesium and potential assessment technique, *JOM*, 10, 47-51 (1996).
- [5] 西直美: ダイカストの歩み, *軽金属*, 57, 163-170 (2007).
- [6] R. Inoue and H. Suito: Determination of oxygen in iron-aluminum alloy by inert gas fusion-infrared absorptiometry, *Material Transactions, JIM*, 32 (12), 1164-1169 (1991).
- [7] 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-難燃性マグネシウムの研究開発-, *Synthesiology*, 2 (2), 127-136 (2009).

執筆者略歴

柘植 明 (つげ あきら)

1983年、工業技術院名古屋工業技術試験所入所後、ファインセラミックスの化学分析方法の研究開発に従事。産総研となってから工業標準に関する研究にも従事し、これまでにJIS R1603, R1616 原案作成・改訂において、ファインセラミックス原料粉末中の不純物酸素・窒素・炭素の分析手法開発を担当してきた。現在、計測フロンティア研究部門不均質性解析研究グループ主任研究員。この研究では、経済産業省基準認証研究開発制度による委託研究において、分析手法の開発・ISO素案作成を行うとともに、ISO/TC79/SC5 会議への参加等を通じて規格案提案に向けた事前活動にも取り組んだ。



兼松 渉 (かねまつ わたる)

1984年、工業技術院名古屋工業技術試験所入所後、構造用セラミックスの機械的特性、加工損傷に関する研究に従事。産総研となってから工業標準に関する研究にも従事し、これまでにJIS R1674 原案作成委員会主査、ISO/TC206 (ファインセラミックス) /WG31 コンピナー、同WG36 プロジェクトリード等を務める。現在、計測フロンティア研究部門不均質性解析研究グループ、グループ長。この研究では、経済産業省基準認証研究開発制度による委託研究のコーディネーター、ISO素案作成等に従事した。



査読者との議論

議論1 全般

コメント (岡路 正博: 産業技術総合研究所 (現: (株) チノー))

当初から産業界への貢献を明確に目指し、また出口として標準化を見据えた研究開発を進めており、シンセシオロジー誌にふさわしい内容の論文と思います。

議論2 国際的な状況

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)

「はじめに」で日本、中国、韓国の状況が述べられていますが、原料生産、製品生産に関する世界各国のシェアを、参考図として示していただければ、業界の状況を理解しやすくなると思われます。

回答 (兼松 渉)

米国地質調査所の報告を元に作成したマグネシウム地金の国別生産量円グラフを図1として1章に追加し、世界シェアの数値をこれに合わせて修正 (95 % → 85 %) しました。なお製品生産に関しては、他の非鉄金属製品に比較して市場規模が小さく、業界団体等による統計にもマグネシウム製品が独立した調査対象項目となっていないというのが実態です。

議論3 IGF-IRA法を選択した経緯

コメント (岡路 正博)

いくつかある酸素分析法の中からIGF-IRA法を選択した経緯について、よりシナリオドリブ的な見地から示していただけたいと思います。

2章1節で、いきなり不活性ガス融解-赤外線検出 (IGF-IRA) 法から始められていますが、3章1節で示されているフェノール溶解法、荷電粒子放射化分析法との比較を最初に取り上げて、標準化に向けてなぜIGF-IRA法が最適かを示される方が論理的には分かり易いと思います。論理展開の順序を再考していただければ幸いです。

回答 (柘植 明)

IGF-IRA法を選択した経緯につきまして“2.1 基本となる技術の開発”の最初の部分に、IGF-IRA法が標準化に最適である理由がより明確に理解されるように、放射分析法や湿式操作を伴う分析法等の問題点やIGF-IRA法が広く産業界に普及しており標準化に適していること等の文章を書き加えました。

議論4 試料採取法の選択の経緯

コメント (岡路 正博)

議論3におけるコメントの趣旨と同じですが、同様に試料採取法についても、両者 (切り粉採取法、コアドリル法) の比較検討を最初に簡潔に記述した方が、筋道が自然で理解しやすいと思います。

回答 (柘植 明)

“2.2 試料採取法について”の冒頭部分から“2.2.1 切り粉採取法”の最初の部分にかけて加筆し、一般的な切り粉採取法ではマグネシウムのように酸素親和性の高い材料における表面酸化の影響が避けられないこと、したがって均質化操作を行うことはできないが酸化の影響が小さいコアドリル採取法を採用した経緯を示し、筋道をより明確化しました。

議論5 荷電粒子法の一致の妥当性の根拠

コメント1 (岡路 正博)

3章1節の終段で、この方法と荷電粒子法の一致の妥当性の根拠を説明されていますが、データが不一致である原因の説明には推定が入っており、より客観的な説明が求められると思います。例えば、後段の、“No.3 試料は...、水分や水酸化物が含まれていたものと考えられた。”では、水分や酸化物の濃度を具体的に測られた結果なのでしょうか? また、一致度に関しては、不確かさの要求レベルとの比較で、十分満足できると言えるのでしょうか?

回答1 (柘植 明)

水分、水酸化物等については測定していません。この実験に用いたNo.3の試料が、切粉を湿度を上げて酸化させた試料であることから推測した誤差要因です。

不確かさの要求レベルということに関しましては、もともとIGF-IRA法による金属中酸素の分析値は相対標準偏差で2% - 10%程度 (試料の投入量によって変わります) の変動をもつことが許容されているものです。この比較的低い精度を許容している背景には、金属中酸素分析値が、日常的な製品の工程管理において値が一桁高くなるような不具合の検出等に用いられることが多いということがあります。そういう意味では、この方法が生産現場で用いられる際の不

確かさの要求レベルは満たしていると考えております。

コメント2（長谷川 裕夫）

3章で二つの分析方法と比較し、この分析方法との隔たりの原因について議論していますが、確たる理由を推定できるのなら、その理由を除いて一致がよくなることを検証すべきなのではないでしょうか。それをしないのであれば、測定誤差範囲で一致という議論にとどめるべきと思われます。

回答2（柘植 明）

No.3の試料に関して誤差内一致に至らなかったために、その隔たりの原因について検討をしております。もともと、分析原理の異なる分析法間の結果比較においては、分析原理によって異なる部分（不活性ガス融解法=試料に酸化物として含まれる酸素、荷電粒子放射線分析=試料に含まれる酸素は形態を問わずすべてを分析対象とする）について考察することは、たとえ誤差内で一致する結果を得たとしても必要な検討であると考えております。今回については、その異なる部分がNo.3の試料で誤差範囲を超えて出たものと考えております。

議論6 共同分析実験の結果の妥当性

コメント（岡路 正博）

3章3節において、産総研+3機関での共同分析実験の結果、産総研と1機関は値を出せたとのことですが、それらのデータが示されていないため、読む方としては妥当性が確認できません。「印加電力-黒鉛るつば温度」の関係がわかれば、一致度がどれだけ上がるのか、具体的なデータで示す必要があると思います。

回答（柘植 明）

表3に国内共同試験の結果をまとめて具体的な数値を示しました。また、それぞれの分析値の解析やND（定量不能）の理由も付け加えました。

議論7 国際規格化

コメント1（長谷川 裕夫）

国際標準化に向けたプロセスは、国際標準化に関わる関係者にとって参考になるものと思われれます。プロセスを年表として示していただければ、そのような取り組みの参考になると思われれます。

回答1（兼松 渉）

国際標準化に向けてどのような取り組みを行ったかは、4章におよそ時系列に述べています。読者によりよく理解していただくために、これらの内容を表4にまとめて示しました。

コメント2（岡路 正博）

4章2節において、このままではISO規格提案における、韓国の立場がよくわかりません。国際間の協力体制の構築は重要ですので、日本から協力をもちかけて参加してもらったのか、彼らが主体的に手を挙げたのか、標準化への道筋について背景・経緯をより詳しく記述される方がよいと思います。

回答2（兼松 渉）

韓国国内にはマグネシウム素材を供給する大企業があり、彼らは元々、酸素分析法自体には強い興味がありました。したがって、追試は日本の要請ではなく独自に行われました。我々の活動に対して彼らが積極的に協力してくれた背景についても推測を交えて説明を加えました。

質問3（長谷川 裕夫）

SC5における韓国の役割はどのようなもののでしょうか。また、韓国が前向きに評価することは、専門委員会における議論に大きく影響したと考えてよいのでしょうか。

回答3（兼松 渉）

1章に述べているようにマグネシウムの世界市場において韓国は素材供給国としての位置付けを明確にしつつあります。そのためSC5のPメンバーの中でも影響力は大きく、ISOに提案しようとしている分析法の確かさを韓国が検証してくれたことは、他のPメンバー国によい印象を与えたことは間違いないと考えています。この旨を明示するために文章を加筆しました。

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 4-2-1、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^[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

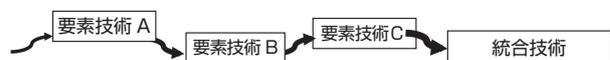


図1 構成方法の基本型

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。

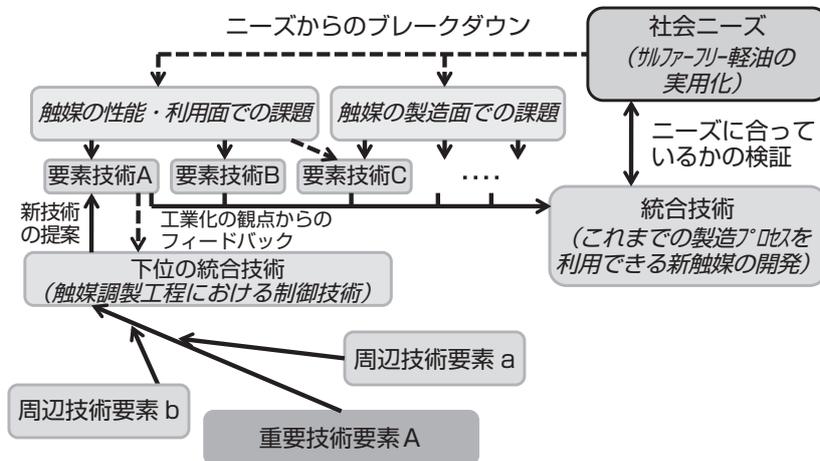


図2 環境・エネルギー分野の戦略的選択+ブレークスルー型の構成方法

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で進めることになり、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。

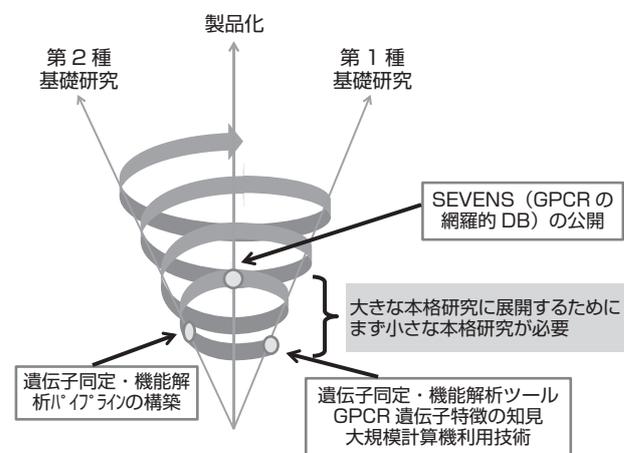
(2) ライフサイエンス分野

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）。

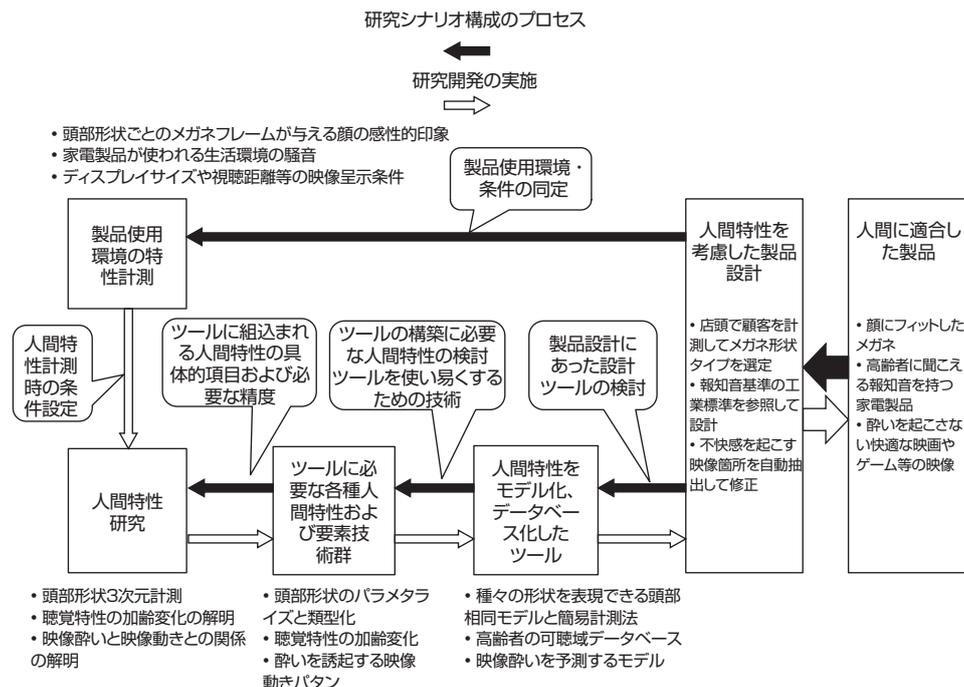


図4 ライフサイエンス（人間生活技術）分野における戦略的選択型の構成プロセス

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連なった、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

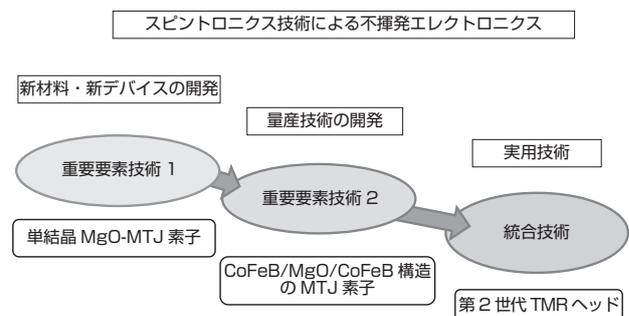


図5 情報通信エレクトロニクス分野におけるブレークスルー型の構成方法

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った面が少なく、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

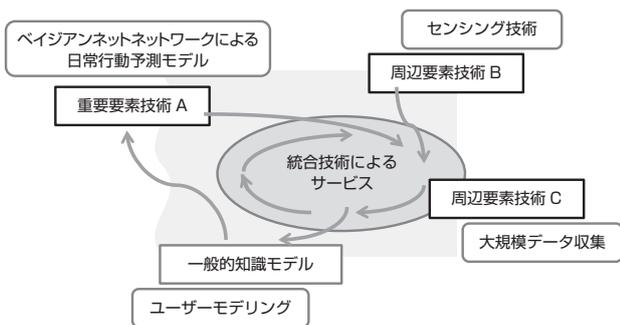


図6 社会循環型の構成方法（文献 [26] の図6を改訂）

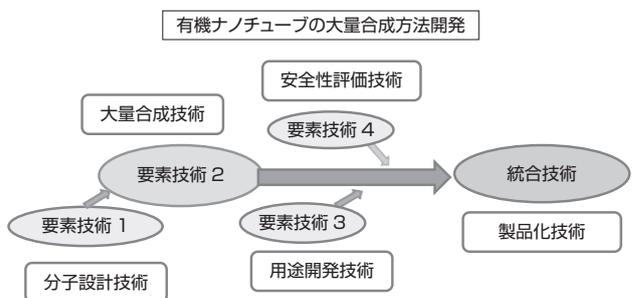


図7 ナノテクノロジー・材料・製造分野におけるブレークスルー型の構成方法

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・評価する必要がある、そのため定量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。

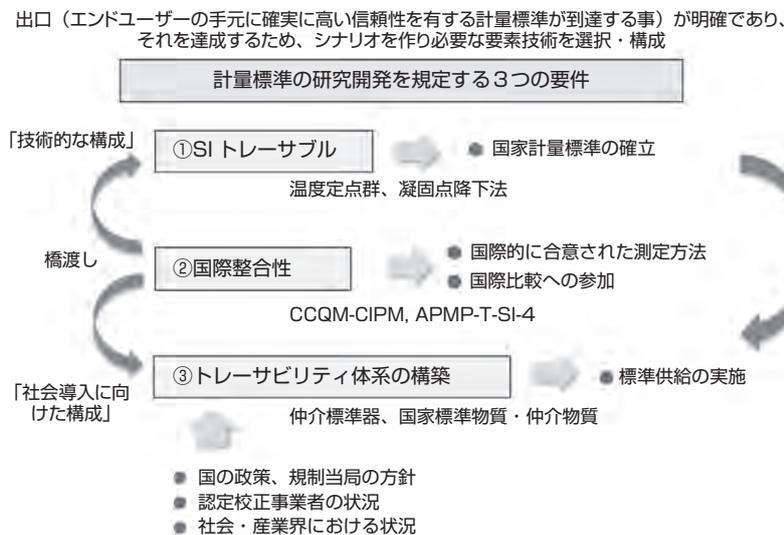


図8 標準・計測分野における戦略的選択型構成方法

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] はブレイ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「ブレイクスルー」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、ブレイ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

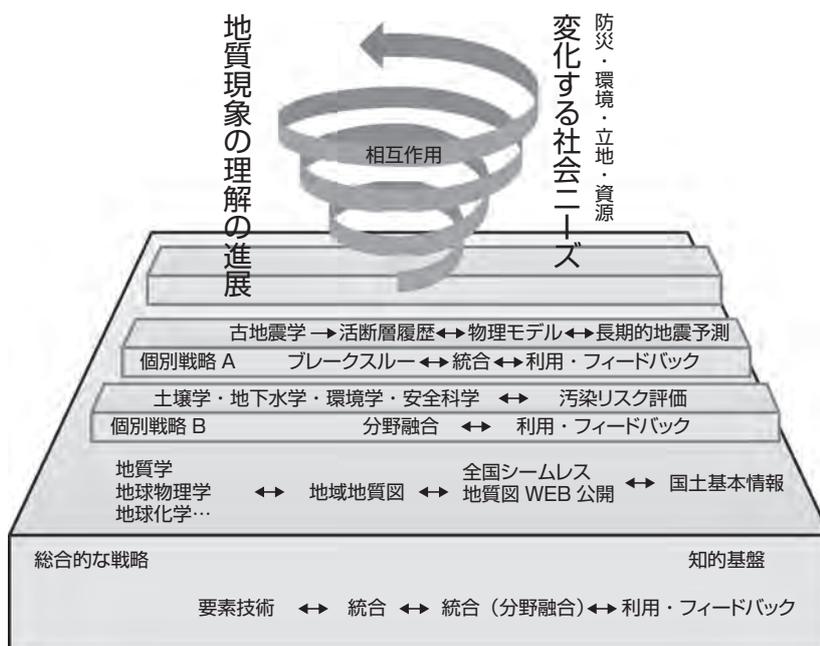


図 9 地質分野における個別戦略と総合的戦略からなる構成方法

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

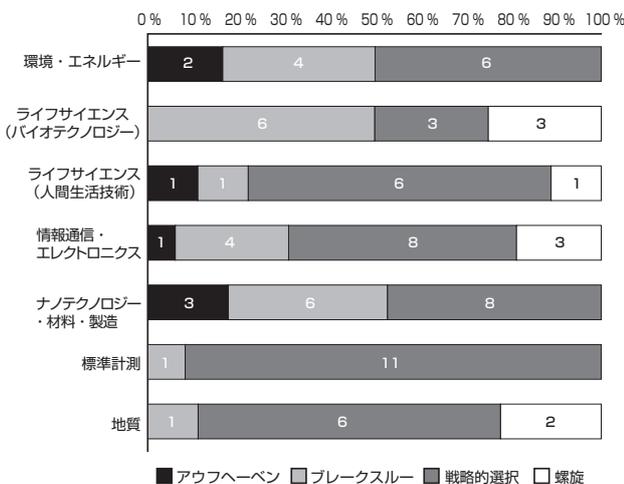


図10 分野ごとに4類型に分類した結果(組み合わせ型を各類型に重複して計数)

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

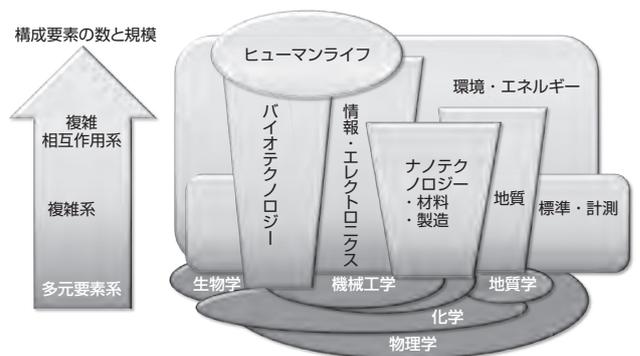


図11 構成方法における分野的特性

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

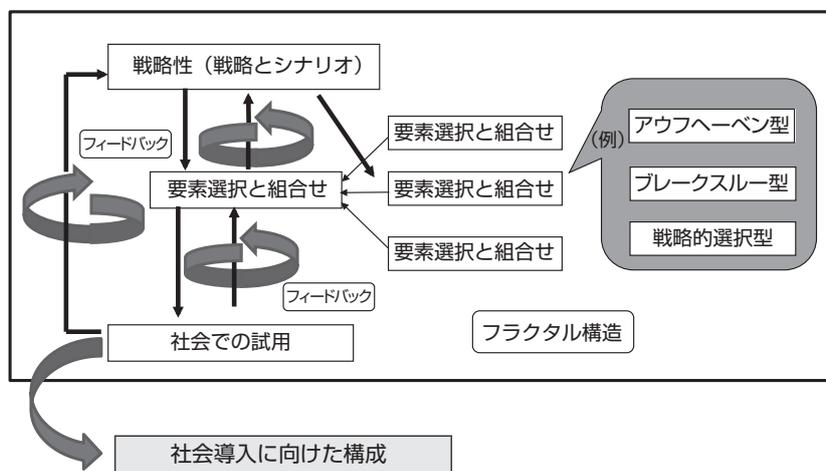


図12 シンセシオロジーにおける技術的な構成

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, 長岡貞男編著), 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、同年通商産業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して、「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、複数要素（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、複数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スタディを実施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。

家庭用固体高分子形燃料電池の 実用的耐久性確保のための技術開発

— 固体高分子形燃料電池の劣化加速試験法のための劣化要因解明 —

谷本 一美*、安田 和明、城間 純、秋田 知樹、小林 哲彦

クリーンで小型でも高効率発電が可能な固体高分子形燃料電池を利用し、電気と熱を供給できるコージェネレーションシステムは、家庭内での大幅な省エネルギー化が可能で、その市場化が期待されてきた。市場化には燃料電池の40,000時間の耐久性が目標であった。この実現のため燃料電池の耐久性の技術見通しを立て市場化を目指して、燃料電池メーカー、エネルギー供給会社、大学、産総研がコンソーシアムを形成し、劣化加速手法の確立に取り組んだ。産総研は仮説であった劣化機構を実験的に確認することを通して、開発した劣化加速手法の合理性を示した。これにより、開発された劣化加速手法を実際の燃料電池の耐久試験へ適用して実用的耐久性を見通すことができ、家庭用燃料電池コージェネレーションの市場化へ繋がった。

キーワード：固体高分子形燃料電池、劣化加速試験、劣化機構解明、家庭用コージェネレーション

Durable polymer electrolyte fuel cells (PEFC) for residential co-generation application

– Elucidation of degradation mechanism to establish an accelerated aging test method of PEFC –

Kazumi TANIMOTO*, Kazuaki YASUDA, Zyun SIROMA, Tomoki AKITA and Tetsuhiko KOBAYASHI

Co-generation system using clean and compact PEFC which makes highly efficient power generation possible, promotes considerable energy savings at home since it provides both heat and electricity together. Therefore, its commercialization has been expected. The goal of 40000-hour-operation has been set as a practical target. In order to realize it, the durability of PEFC has been technologically prospected and the accelerated aging test protocol of PEFC has been developed within the frame of the consortium of PEFC makers, energy companies, academia and AIST. AIST has shown the rationality of the accelerated aging test protocol of PEFC through the experimental verification of hypothetical degradation mechanism. The application of the developed accelerated aging tests to actual fuel cells has made it possible to get a clear view of practical durability, and this has led to the commercialization of residential PEFC co-generation.

Keywords: Polymer Electrolyte Fuel Cell, accelerated test protocol, degradation mechanism, co-generation system for resident

1 はじめに (研究の背景)

水素と酸素を電気化学的に反応させ水の生成に伴い生ずるエネルギーを電気として取り出す燃料電池発電技術は、物質のもつ化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換する技術であり、熱機関と異なり熱エネルギーを経由しないためカルノー効率の制約を受けることなく、高いエネルギー変換効率が期待でき実用化を目指して多くの研究が行われてきた。水素と酸素から水が生成する化学反応を利用するため、反応温度が高いほど反応が速く進みやすく効率の向上も可能である。また、燃料電池の生成排出物は水であることから、クリーンで高い地域環境適合性があるという特徴をもっている。

燃料電池は、1839年に英国の Grove 卿が行ったとされるガス反応実験で始まったと言われている。図1に示すよ

うに、希硫酸水溶液の二つの白金電極へそれぞれ水素ガ

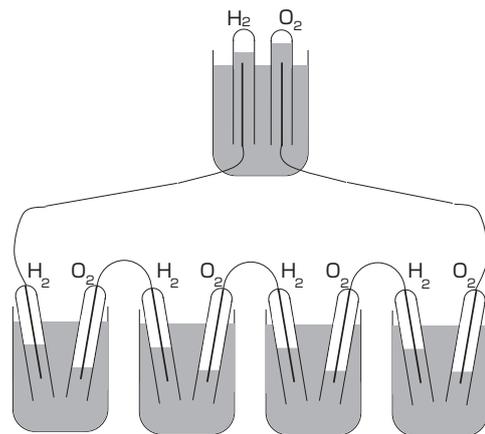


図1 Grove 卿の希硫酸水溶液でのガス電池実験
上部が水の電気分解。下部が燃料電池。

産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー研究部門 〒563-8577 池田市緑丘1-8-31

Research institute for Ubiquitous Energy Devices, AIST 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda 563-8577, Japan * E-mail: tanimoto-k@aist.go.jp

Original manuscript received November 4, 2011, Revisions received December 8, 2011, Accepted December 14, 2011

スと酸素ガスで満たして直列に接続し、それにより発生した電気で電気分解を行う実験と思われる。電気化学プロセスを利用した発電手法は、その後の熱機関による発電方法の大幅な展開に比べて進展はしなかったが、当時の主力な燃料である石炭を活用した発電手法への技術展開の一つとして高温型燃料電池の基礎的研究が行われ、20世紀はじめに熔融塩や酸化物等を電解質とした燃料電池の研究が進められた。1921年には、熔融炭酸塩を電解質とする1.5 kWの高温燃料電池が実証されている。

現在の燃料電池の基本構造となる正負極の多孔質構造の電極を電解質ではさむ構成が、1933年に電解質としてアルカリ水溶液、電極としてニッケル焼結体を用いるBacon電池で実証された。燃料(水素ガス)としての気体、電解質としての液体、電極の固体から構成される三相界面で効率的な電極反応を進める実用的な燃料電池構成を示した意義は大きい。実用的燃料電池の基本デザインとなるBacon電池が、米国の宇宙開発で宇宙船用の発電装置として特殊用途ではあるが実用化され、その後スペースシャトルでの電源としてアルカリ型燃料電池が搭載された。

一方で実際の宇宙船用途で最初に用いられたのは、1965年 Gemini 5号での燃料電池で、それはアルカリ型ではなくカチオン交換膜を電解質としたタイプで、宇宙船の推力源で使用される純水素、純酸素を用いる燃料電池であった。その後、前記のように宇宙用としてはアルカリ型が主流となっていく。他方で Du Pont 社が、フッ素化炭素系のカチオン交換膜のナフィオンを開発したことにより性能が大きく向上した。1970年代に次世代発電技術としての民生用燃料電池システム開発が進められた。民生用途では、利便性から酸化剤ガスとして空気を用いることが好ましい。しかし、空気には二酸化炭素が含まれるためにアルカリ水溶液を電解質とする燃料電池では、二酸化炭素が溶け込み炭酸塩として蓄積されて性能低下を引き起こす課題があった。さらに、民生用の燃料電池では燃料の水素ガスも炭化水素から製造されるので、燃料ガスにも二酸化炭素が含まれる。そのため、民生用燃料電池開発は、二酸化炭素を除去する装置を加えるか、酸性電解質とすることが必要であった。そのため、アルカリ型と酸性のリン酸を電解質とした燃料電池の開発が並行して進められた。その後、長期の性能安定性の点からリン酸形燃料電池は民生用途として開発が進み、現在では100 kW程度の分散型発電システムとして発展して寿命としても6万時間程度、システムコストでも分散発電技術としての競争力のある技術として発展している。東日本大震災においても、停電時に代替の発電システムとして機能した例もあり^{注1)}、耐久性とコストが実用化のために必要な課題とも考えられる。

ナフィオン膜の開発後、1980年代後半に白金担持カーボンと水素イオン交換樹脂の電解質を混合し触媒としての白金表面を有効に利用して、使用する白金量を数分の1にする技術が開発された。これにより1990年代に米国、欧州を始め我が国でも民生用としての固体高分子形燃料電池(Polmer Electrolyte Fuel Cell: PEFC)の開発が開始された。分散型コージェネ用途や自動車用途等での開発計画が進められた。このように燃料電池には、長い開発の歴史があるが、実用化の例は限られている。実用化を目指した製品化のために、基礎研究から、開発、市場化に向けてそれぞれのフェーズで必要とされる研究の取り組みがある。産総研では、これらを基礎研究から製品化研究までを一貫して行う本格研究(Full Research)で取り組んでいる。燃料電池実用化を例とした本格研究の取り組みを紹介する。

2 燃料電池の実用化に向けて

燃料電池自体は水素と酸素を電気化学的に反応させて電気を取り出す発電デバイスであり、エンドユーザーが利用する製品の構成要素の一つである。そのため、燃料電池そのものは製品とは言えない。例えば、燃料電池自動車という製品で考えると燃料電池はその自動車を駆動させるエンジンであり、それを買い求めるかどうかは、燃料電池自動車という製品に対してのエンドユーザーの価値で判断されるであろう。その際に、エンジンとしての燃料電池の特徴であるクリーンで環境適合性に優れ効率的な発電システムであることが燃料電池自動車のもつ価値を高めることにはなるかもしれないが、いわゆる自動車としての価値はパワー等の走行性能および燃費等の経済性、価格で総合的に評価される。これまでの燃料電池技術開発では、実用化を目指して進めてきた。そこではその性能、コスト、耐久性について一つずつ取り組んできた。これは燃料電池技術がこれら3つを同時に解決できない技術的萌芽段階であったことに起因する。そのために研究開発段階から抜け出せない実状にあった。これは同時に内燃エンジン、二次電池等の競合技術に対して、燃料電池技術が常に未来の技術であったことを示すものでもあった。これは燃料電池技術だけの問題でなく、多くの次世代技術の基礎研究段階では実用化に向けた課題の同時達成が困難であるため、どこかに絞った課題で開発を進めることとなる。そのため目標とする課題開発が進むほど、他の技術課題が実用面で乖離していくという研究開発を進める上で常に研究開発者を悩ます難しさがある。

燃料電池技術では、これを克服するためには製品の燃料電池のサイズを小さくし技術課題のハードルを下げつ

つ、製品としての価値を損なわない方針で進める方法が試みられた。すべての製品に関してこの方法が有効とは言えないが、社会情勢からくる要請、あるいは製品のもつ特徴等から試行の可能性があった。PEFCを発電デバイスとして組み込んだ家庭用コージェネレーションシステムは、70℃程度で動作するPEFCが発電した電気と同時に発生する熱の冷却に用いられた排熱水を給湯する家庭内でのコージェネレーションが適用可能である。これは家庭内での省エネルギーの推進やCO₂排出量低減をとおした温暖化対策の役割をもつ製品として市場導入の可能性があると予想された。実際に、2003年にはガスエンジンを用いた家庭用コージェネレーションシステムが市場化され普及に至った先行事例がある。ガスエンジンの発電効率は20%台で電気に比べて熱供給が主体となる熱主電従供給となる。家庭でのエネルギー使用形態として、電化機器の比率が高まったことや我が国での高温多湿の気候風土を考えると、電気供給の比率の高い電主熱従供給の要求が高いと考えられる。そのため、コージェネレーションの発電デバイスには高い発電効率が求められる。PEFCの発電効率は30%台が期待できるので家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの社会的受け入れの可能性が高いと予想される。実際に、1990年代以降の継続的なPEFC研究開発の進展に伴い、性能面ではおおむね発電効率30%台と、市場化の条件を満たしつつあったが、製品の耐久性については競合技術に比べて充分でなく、実用化に対応した耐久性確保の技術開発が必要であった。

この状況の中で2004年当時、2008年に燃料電池の本格普及を目指した家庭用燃料電池コージェネレーションを導入する方針が定められ、2005年度からモニター導入事業が進められるのと並行して、市場化のために必要となる耐久性向上に係る研究開発が求められた。その際、普及当初のPEFCの耐久性目標は、社会的な受け入れ性、システムコスト等から40,000時間とされた。低炭素エネルギー社会への移行という社会の変化のもと、これまでの競合技術に対して、燃料電池が小型化し技術課題のハードルを下げ、家庭用コージェネレーションとしての開発課題を耐久性に重点化することで市場化につなげる展開の考え方を図2に示した。

なお、PEFC技術の製品の展開として考えられる自動車用途、モバイル電源用途に対しても、その耐久性向上の技術開発は不可欠である。自動車用途では、使用環境の過酷さ、電源デバイスとしての急激な出力変動、短時間での起動等が想定され、その上実用面では稼働時間が停止時間に比べて短いと予想される。このような稼働条件の違いは耐久性確保の技術見通しを立てる際に異なった対応には

なるであろうが、PEFCの材料構成に大きな差はないので家庭用コージェネレーションシステムでの検討で得られる劣化現象、劣化メカニズムの知見は同じように適用可能と考えられる。

3 PEFCの劣化加速手法の目的と必要性

我が国のPEFC技術は、1990年代前半から国のプロジェクト、燃料電池システムメーカー等がそれぞれに技術開発を進めた。そのため、システムメーカーにはPEFC材料、構成、システムに関する各社固有の技術が蓄積された。2004年頃に、前述した省エネルギーの推進および地球温暖化対策としての家庭用燃料電池コージェネレーションの2008年市場化を目指す方向性が示されたが、40,000時間の耐久性を確保する技術に対して各社とも共通の課題の存在を認識しつつも技術情報交換が進まない状況にあった。特に、実用化の上で課題となる劣化現象に関しては、PEFCの運転条件が、材料、特性、電池構造に影響を与えることが予見されていたが明確ではなかった。

このような中で2008年PEFCの本格普及を目指すための耐久性に関する技術確立の一環として、2004年10月から3年6ヶ月のNEDOプロジェクト「PEFCスタック劣化基盤研究」が、スタックシステムメーカー、エネルギー供給会社、大学と産総研からなる産学官連携コンソーシアムで開始された。家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの中核となる燃料電池の耐久性には40,000時間以上が必要とされていたが、2005年当時のPEFCの寿命は1万時間程度とされており大幅な耐久性向上技術が必要であった。燃料電池システムメーカーの所有する固有の技術情報を保持しながら共通する劣化課題を解明するために、各社ごとの燃料電池に対しての劣化加速手法の開発という目標

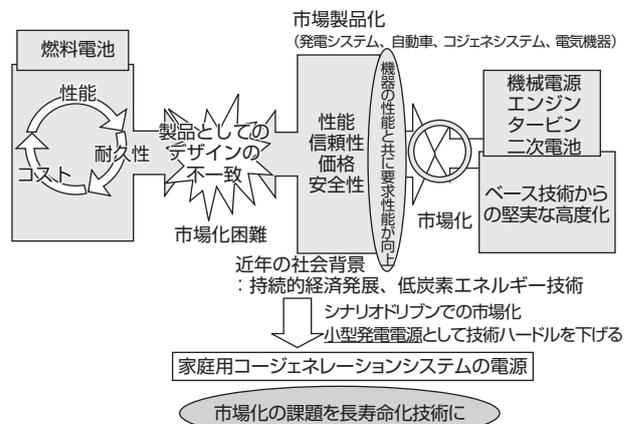


図2 燃料電池開発の過去の過程とそれを踏まえ市場化を目指した開発への展開

を設定して、劣化現象の解明の研究を進めるスキームでこのプロジェクトが実施された。40,000時間は実時間では4.6年程度あるため、短時間で40,000時間の耐久性を見通す技術としての劣化加速試験法の開発は、各社としても意義があると同時に、劣化加速試験法には科学的説明が必要であるため劣化要因解明が進められることにもなる。実際にプロジェクトでは、劣化加速試験方法による40,000時間の寿命確認だけが目的でなく、劣化要因解明も重要な開発課題であった。

このプロジェクトでは、2008年の市場化を予想される燃料電池コージェネレーションシステムの実用的な劣化加速試験法の技術確立のために、1年間での加速試験で、40,000時間を見通す劣化加速試験法の開発に取り組んだ。そのために、エンドユーザーに近いエネルギー供給会社が主導して、燃料電池コージェネレーションシステムでのPEFCの劣化に係る課題について、エネルギー供給会社、燃料電池システムメーカーとラウンドテーブルでの議論を通して、PEFCの劣化に関する優先課題を抽出して、劣化機構解明、劣化加速試験法の開発を目指した¹⁾。

4 劣化機構の検討

4.1 実電池・スタックの劣化要因と劣化加速法

プロジェクト開始時に、参画メンバーそれぞれが保有した電池特性の時間変化プロファイルのデータを図3に示す。電池の特性低下による劣化を4つのパターンに分けて検討した。

その中で(c)の加速劣化型のパターンは、定常的運転下の定出力が継続されるが、屈曲する時期が予測できない。屈曲点以降で急速に規格出力が得られない状態となるので、このパターンがコージェネレーションシステムに対してもっとも致命的と判断される。(a)の直線的な性能低

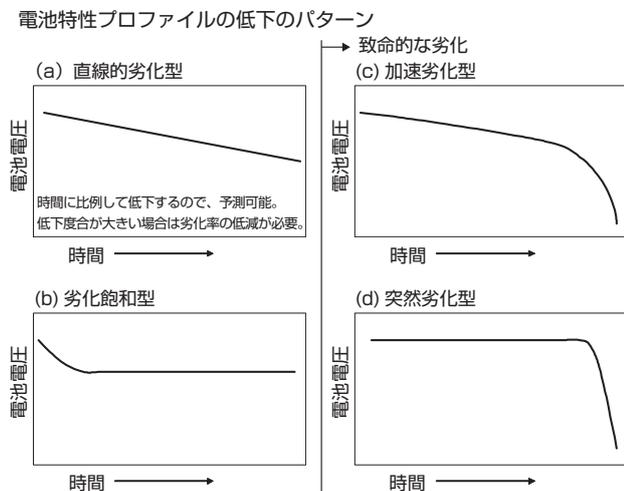


図3 電池特性の経時変化パターンでの劣化挙動の類型

下では、電圧低下率から寿命となる時期の予測が可能である。その時期が40,000時間より早ければ、それを抑制する必要がある。(d)のパターンについては、電池作製上の管理およびシステム構成の不具合等に起因する場合が多いと判断した。これらを踏まえて、各システムメーカーの電池特性の経時変化データ、発電による電池材料劣化の状況に関しての情報から判断して、以下の3つの要件を備えるものが当面の最重要課題であり、メカニズム解明も含めて最優先で取り組むべきものであると考えた。3つの要件とは①(c)の劣化加速型のパターンを呈すること、②電池電圧の低下傾向が飽和せず、40,000時間の耐久性を考えた場合にその影響が致命的であること、③現時点で劣化の評価方法および対策が明確でないものである。図4に示す「耐CO被毒性の低下」および「電極でのフラッディングの進行によるガス拡散性の低下」を当面の実用的な耐久性向上のための課題として選び出し、メンバー内で共通の認識とした。

これらの劣化要因を加速する劣化加速試験法として導入ガス切替試験法を提唱した。これは①PEFCのカソード（空気極）へ空気と窒素（不活性な雰囲気）を交互に導入する手法（手法1）、②PEFCのアノード（燃料極）へ水素→窒素→空気→窒素→（水素）のサイクルを繰り返す手法（手法2）である。両方法ともにカソードを高電位にすることでカソード触媒層の担持カーボンの表面が酸化されて担持カーボンが濡れやすくなり、触媒表面に滞留した水によるフラッディングが進行し、電極でのガス拡散性の低下につながると予測される。ガス切替による劣化加速試験法の科学的説明のためには、カーボンの腐食挙動についての材料面と腐食反応機構の解明も重要となる。

また、もう一つの劣化要因である「燃料極での触媒の耐CO被毒性の低下」については、これを加速条件とすることも検討されたが、実際のシステムではアノードガス中のCO濃度が数10ppmレベルで影響が生じることが確認されている。CO被毒を起こす要因の制御を精度良く実施できなければ実用的な劣化加速試験法とすることが困難であると判断し、これを要因としての劣化加速試験法につなげることは適当でないと判断した。これは、むしろ結果として発生する事象であるので、劣化の度合いを判断する際の指標となる。実際のPEFCのアノード触媒には、CO被毒に耐性をもたせるために通常は、被毒しやすい白金(Pt)触媒に替わって白金とルテニウム(Ru)を合金化した触媒が使用されている。しかし、この合金触媒でも耐CO被毒性の低下は発生しており、使用されているルテニウムが長期運転下でアノード触媒から溶出しているためと考えられる。また、同時に合金触媒中の白金の挙動も耐久性に係

る重要な因子となりうる。

4.2 実電池の劣化観察

劣化試験を行った実電池の微細構造をマイクロレベルで観察するために、透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて電極触媒の構造観察を行った。TEMでの観察にあたって実際に劣化試験を行った実電池からTEM観察可能な試料を作製することが最初の課題となるが、劣化模擬条件で発電試験を行った電池を解体し、電解質膜-電極触媒接合体（MEA）についてウルトラマイクロームにより薄片化した電子顕微鏡試料を作製した。この方法により電極触媒、電解質膜の構造をある程度保ったまま観察することができる。燃料不足、電位変動サイクル、高電位保持等のさまざまな条件での劣化試験後の試料について観察を行い^{[2][4]}、TEM観察による粒子径分布測定から電極触媒粒子の粒子径が大きくなること、エネルギー分散型X線分光法（EDS）でアノード PtRu/C 触媒から Ru が溶出し、PtRu 微粒子の組成が変化すること^[2]、また図5に示すように試験条件に依存して、電解質膜中に電極触媒中の金属粒子が析出する現象等が観察された。この電解質膜中に析出した粒子はアノード、カソードに供給するガスの種類や電解質膜の厚さの影響で、その粒子径分布と析出粒子の空間分布が変化することがわかった^[4]。図5a、bはカソードの電位を1.0 Vに保持し、窒素ガスを供給して膜厚が50 μm（図5a）、175 μm（図5b）の電解質膜を用いたときのカソード近傍のTEM像である。図中の下部がPt/C触媒層となっている。電解質膜の膜厚が薄い場合は、Pt/C触媒層近傍に多く粒子が析出している。カソードに空気を供給した場合（図

5 c、d）は、窒素を供給した場合と比較すると析出粒子が触媒層から離れた領域まで分布する。このことからアノードから膜内を透過する水素の膜内での濃度分布が、膜中での白金粒子の析出分布に影響を与えているものと考えられる。電子顕微鏡による観察では図5に示したようなμmのスケールから、数nmの電極触媒微粒子までの構造評価が可能であり、PEFCのような実用材料においても微細構造解析の有用性を示すことができた。近年の電子顕微鏡技術の進歩はめざましくPt単原子の観察等も可能であり、電極触媒の構造についてより詳細なデータが得られるものと考えられる。また、電子顕微鏡の空間分解能の向上と共に、電子エネルギー損失分光法（EELS）の高感度化によりカーボンの電子状態を詳細に調べることも可能となっており、カソード触媒のカーボンの劣化状態についても詳細な情報が得られることが期待される。

4.3 モデルセルでの劣化メカニズムの解明

起動・停止動作がPEFCの劣化を促進するということは経験的に知られていたが、2005年に米国の研究者が「逆電流メカニズム」によって劣化しているという説を提案した^[5]。これは、アノード内に空気が残留している状態で燃料の供給を開始すると、一つのセル内に、燃料のある領域とまだ酸素が残っている領域が同時に存在するような過渡状態ができてしまい、その結果、酸素残存領域で局所的に逆向きの電流が生じるとともに、カソードの電位が局所的に高電位となり、電極材料であるカーボンの腐食をもたらすというものである。このような現象は、セルを外から観測するだけでは測定できないため、我々はこの「逆電流メカニズム」

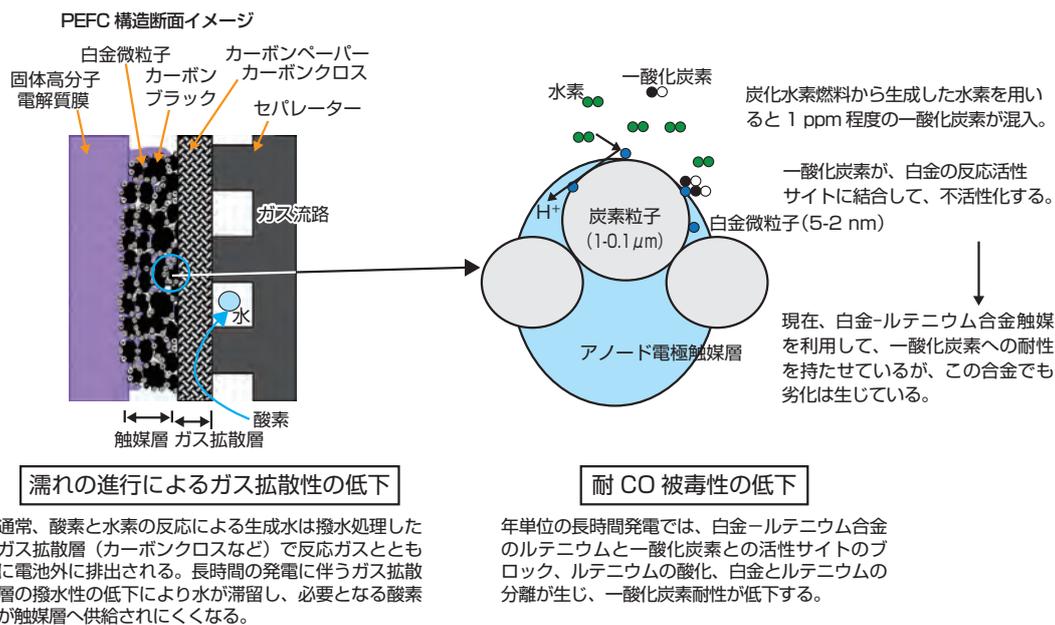


図4 スタック劣化のために重点的に取り組むべき二つの課題
プロジェクト参画の企業保有の発電データを基に電池性能低下に係る劣化メカニズムとしての重要な二つの課題を抽出。

の実証のため、電極を微小な多セグメントに分割した「100分割セル」（図6）を作製し、一つのセル内の発電電流分布、局所電位分布の経時変化を測定できるようにし、何種類かのガス切り替え過渡状態を作り出して測定を行った。その結果、「逆電流メカニズム」で想定されているタイプの過渡状態では、局所的に約1.6Vという異常な高電位（通常の運転であれば材料は1Vより高い電位にはさらされない）が生じていることを実測することに成功した^[6]。また、これ以外のタイプの過渡状態の測定から、我々の提案している劣化加速試験での条件と密接に関連する二つの現象を見出した。一つは、アノードガスを窒素から燃料に切り替えた場合でも「逆電流メカニズム」と同様にカソード劣化をもたらしうる高電位が生じること、もう一つは、カソードガスを窒素から空気に切り替えた際に、1V以下の電位領域内ではあるもののアノードが局所的に高い電位（約0.7V等）になることである。これらはそれぞれ「劣化加速手法2」と「劣化加速手法1」で起きている現象を理論的に説明可能にする研究成果となった。ここで、カソードガス切り替え実験においてアノード局所電位が例えば0.7Vに上昇する現象は、アノード触媒に含まれるルテニウムが溶出するという点で劣化要因であるということは論をまたないが、1V以下であるためカーボン材料に対しては無害であると考えられていた。しかし、カーボンの腐食速度に影響を与える因子を詳細に調べる目的で、ピーカーセルを用いた基礎的試験を行ったところ、これまでほとんど腐食をもたらさないと考えられていた1V以下の領域においても、電位の変動がカーボン腐食の促進要因となることを見出した^[7]。この知見も併せて考えると、「劣化加速手法1」での劣化はルテニウム溶出のみならずカーボン腐食も加速されていることがわかった。

PEFC カソードでは劣化に伴い有効な白金触媒表面積が減少するが、これは白金の溶解による消失や粒径増大

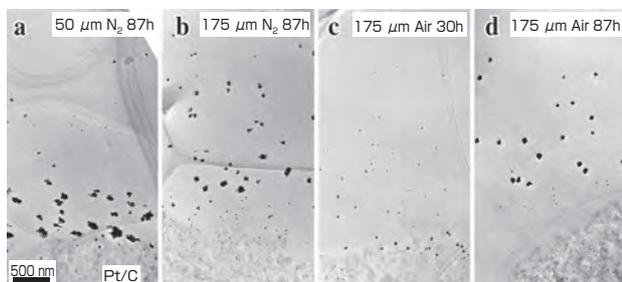


図5 電位保持による劣化試験を行った後のPt/C電極触媒層と電解質膜界面付近の電子顕微鏡像
(a) 50 μmの電解質膜を使用し、カソードに窒素を供給し87時間1.0Vで保持。(b) 175 μmの電解質膜を使用し、カソードに窒素を供給し87時間1.0Vで保持。(c) 175 μmの電解質膜を使用し、カソードに空気を供給し30時間1.0Vで保持。(d) 175 μmの電解質膜を使用し、カソードに空気を供給し87時間1.0Vで保持。

と、担体カーボンの腐食に伴う脱落や凝集がある。我々はこれらの現象を調べるため、「その場観察」に近い知見が得られると考えられる「同一場所観察」手法を考案し、モデル電極上の白金粒子の脱落・凝集の顕微鏡観察（AFM、SEM）を行うとともに、白金の存在がカーボン腐食を促進する現象をとらえた^{[8][9]}。これらの成果は、劣化加速条件下で起きている劣化現象を正確に把握する上での基礎的な貢献となったと考えている。

5 劣化加速手法開発から商品化へ

劣化要因としての「電極でのフラッディングの進行によるガス拡散性の低下」を加速的に進行させて劣化を加速する試験方法として、二つのガス切替法を提案した。カソードでの水の滞留によるフラッディングの現象は、触媒担持カーボン表面での親水性官能基の生成によると予想された。その親水基の生成には開放電圧である1V程度を放置しておいてもカーボンの酸化を大きく促進させることはないが、カソードガスやアノードガスの切替での電位変動を起こすことで、そのような官能基の生成をもたらすことが示唆された。また、ガス切替の条件によっては1.6V程度の高電位も発生することがモデル電池の実験から確認され、これらのガス切替法による劣化加速手法の合理性が説明される。触媒層のガス拡散性の低下は、触媒担持カーボンの電気化学的反応に起因すると考えられた。アノードにおけるルテニウムの溶出現象はモデル電池の発電後の電解質膜や電極触媒層等の分析・観察からも確認できた。これらの挙動が、白金-ルテニウム合金触媒の耐CO被毒性を時間とともに低下させていると考えられる。アノードガス切替条件では、アノードの電位上昇が確認された。この加速条件は、定常発電条件では起こりえないと考えられていたが、局所的なガス組成の分布が電位上昇を引き起こすことから、アノード触媒のルテニウムの溶出を加速していると考えられた。

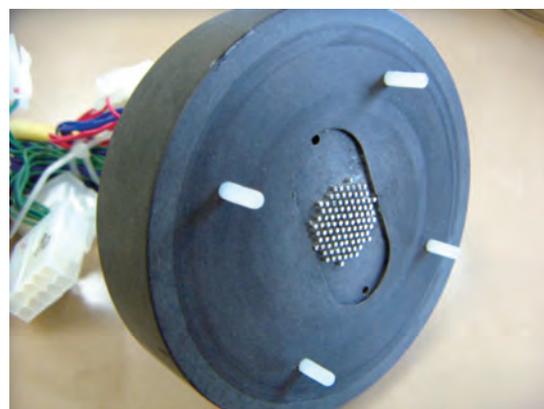


図6 部分電流・局所電位測定用に作製した「100分割セル」の分割電極部外観

表1 エネファームの補助金による導入実績

	都市ガス仕様 / 台	LPG仕様 / 台	合計設置台数 / 台
平成21年度	3,681	1,349	5,030
平成22年度	3,969	1,016	4,985
平成23年度	10,526	1,911	12,437
総計	18,176	4,276	22,452

(平成23年度については、平成23年12月27日までの申請で受理されたもの)

家庭用PEFCコージェネレーションシステムの燃料電池は1kW程度の燃料電池を発電源としている。この燃料電池にガス切替法による劣化加速試験を適用して、その耐久性が評価された。その結果、それぞれの燃料電池システムメーカーの燃料電池に関して、カソードガス切替法では加速倍率7倍程度が得られるとともに、アノードガス切替法では100倍程度の加速効果を確認できた。このプロジェクトにより、家庭用PEFCコージェネレーションシステムを製造するそれぞれのメーカーが、この劣化加速試験法での試験から40,000時間の耐久性を確認でき、市場化の道筋がつけられた。エネルギー供給会社、燃料電池システムメーカーは、家庭用PEFCコージェネレーションシステムの普及を図るため、このシステム商品機にエネルギーとファーム＝農場を合わせてエネファームとの統一名称を与えた。エネファームは2009年5月に市場化されて、表1に示すような普及が進んでいる。

6 おわりに

次世代技術としての燃料電池の研究を進めてきた筆者らには、常に次世代の技術と言われていた燃料電池がエネファームとして商品化されたことは、これまで研究を継続してきた者として喜ばしいことである。次世代技術であった燃料電池が商品化できた要因として、エコ志向の社会状況での家庭用コージェネレーション市場が形成しつつある初期段階であること、この市場内でまず導入されたガスエンジン技術に比較して燃料電池の発電効率が高いことに優位性があったことであろう。家庭内でのエネルギー利用における電主熱従の傾向が高まっているので、発電効率の高さは電気を主とする電気と熱のバランスからも適用性が高く、商品としてみてガスエンジンコージェネレーションとの差別化が可能であった。また二酸化炭素削減対策ならびに災害対策で省エネルギーへの関心が、家庭用コージェネレーションの市場形成を加速した面もある。さらにエネファームの商品化には産学官連携のプロジェクトによる技術開発も重要であった。これまで市場化に近い製品に関して、メーカーとしては固有情報の共有化の基に技術開発を進めるというインセンティブは大きくない。今回の場合、家庭用コージェネレーション市場という新たな

市場形成を目指し、エネルギー供給会社が参画した垂直連携であり、産総研も参画して固有の技術情報の配分が管理され、開発された情報の共有化が進み、研究開発に対してのリスク低減等の好ましいインセンティブが働いたと考えている。

現在では補助金によりエネファームの普及が広がっているが自立して普及するためには、さらなる低コスト化、信頼性や耐久性の向上が望まれる。そのためには、燃料電池システムメーカーでの家庭用コージェネレーションシステムの設計面からの対応と同時に、PEFC本体の性能および耐久性の向上や低コスト化技術の対応も図ることが必要である。産総研としての可能な限りの貢献を果たしたいと考えている。

謝辞

産学官連携プロジェクト「PEFCスタック劣化基盤研究」は、2004年10月から2008年3月まで、NEDO（独立行政法人・新エネルギー産業技術総合開発機構）の委託事業で実施したもので関係各位に感謝いたします。また、このプロジェクトの実施者である以下の機関（実施時の名称）にも深く感謝します。東芝燃料電池システム(株)、三洋電機(株)、松下電器(株)、東京ガス(株)、大阪ガス(株)、新日本石油(株)、京都大学、横浜国立大学、同志社大学。

注1) <http://www.fujielectric.co.jp/about/news/11041101/index.html>

参考文献

- [1] NEDO成果報告書「平成17年度～平成19年度成果報告書 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発 基礎的・共通的課題に関する技術開発 固体高分子形燃料電池スタックの劣化・解析基盤研究（スタック劣化メカニズム解明に関する基礎的支援研究）」管理番号 100012431。NEDOホームページよりダウンロード可能。
- [2] A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda and Y. Miyazaki: Analysis of electrocatalyst degradation in PEMFC caused by cell reversal during fuel starvation, *J. Power Sources* 130, 42-49 (2004).
- [3] K. Yasuda, A. Taniguchi, T. Akita, T. Ioroi and Z. Siroma: Platinum dissolution and deposition in the polymer electrolyte membrane of a PEM fuel cell as studied by potential cycling, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 8, 746-752 (2006).
- [4] T. Akita, A. Taniguchi, J. Maekawa, Z. Siroma, K. Tanaka, M. Kohyama and K. Yasuda: Analytical TEM study of Pt particle deposition in the proton-exchange membrane of a membrane-electrode-assembly, *J. Power Sources* 159, 461-467 (2006).
- [5] C.A. Reiser, L. Bregoli, T.W. Patterson, J.S. Yi, J.D. Yang, M.L. Perry and T.D. Jarvi: A reverse-current decay mechanism for fuel cells, *Electrochem. Solid-State Lett.*, 8, A273-A276 (2005).
- [6] Z. Siroma, N. Fujiwara, T. Ioroi, S. Yamazaki, H. Senoh, K. Yasuda and K. Tanimoto: Transient phenomena in a PEMFC during the start-up of gas feeding observed with a 97-fold segmented cell, *J. Power Sources*, 172, 155-162 (2007).
- [7] Z. Siroma, M. Tanaka, K. Yasuda, K. Tanimoto, M. Inaba and A. Tasaka: Electrochemical corrosion of carbon materials in an aqueous acid solution, *Electrochemistry*, 75, 258-260 (2007).

- [8] Z. Siroma, K. Ishii, K. Yasuda, Y. Miyazaki, M. Inaba and A. Tasaka: Imaging of highly oriented pyrolytic graphite corrosion accelerated by Pt particles, *Electrochem. Commun.*, 7, 1153-1156 (2005).
- [9] Z. Siroma, K. Ishii, K. Yasuda, M. Inaba and A. Tasaka: Stability of platinum particles on a carbon substrate investigated by atomic force microscopy and scanning electron microscopy, *J. Power Sources*, 171, 524-529 (2007).

執筆者略歴

谷本 一美 (たにもと かずみ)

1984年工業技術院大阪工業技術試験所入所。2001年産業技術総合研究所産学官連携部門関西産学官連携センター溶融炭酸塩形燃料電池連携研究体連携研究体長。2004年ユビキタスエネルギー研究部門副研究部門長、燃料電池機能解析研究グループ長を兼務。現在、同部門イオニクス材料研究グループ長を兼務。1995年溶融炭酸塩形燃料電池での40,000時間の連続発電試験を達成し劣化要因の解明を行い、耐久性向上の材料研究に従事。2004年から2007年まで、この論文での固体高分子形燃料電池スタックの劣化機構基盤解析プロジェクトの取りまとめを担当した。



安田 和明 (やすだ かずあき)

1994年工業技術院大阪工業技術研究所入所。2001年産業技術総合研究所生活環境系特別研究体小型燃料電池研究グループ。2004年ユビキタスエネルギー研究部門次世代燃料電池研究グループグループ長。現在、環境・エネルギー分野研究企画室室長。入所時から、高分子膜の燃料電池に係る基礎研究を進め、この論文での固体高分子形燃料電池スタックの劣化機構基盤解析プロジェクトに先立ち2001年からPEFC劣化要因解明の産学官連携プロジェクトで、劣化に関しての実施内容に対して基礎研究面で支援し、それらを踏まえ実用面での課題設定を提言した。



城間 純 (しろま じゅん)

1996年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年工業技術院大阪工業技術研究所入所。固体高分子型燃料電池の性能向上・劣化要因解明のため、主として電気化学的手法による材料やセルの評価に従事。2008年博士(工学)(京都大学)。現在、産業技術総合研究所ユビキタスエネルギー研究部門次世代燃料電池研究グループ主任研究員。この論文ではモデルセルを用いた劣化現象解明を担当。



秋田 知樹 (あきた ともしき)

1998年大阪大学工学研究科応用物理学専攻博士後期課程修了(博士(工学))。同年大阪工業技術研究所(現産業技術総合研究所)特別研究員、1999年大阪工業技術研究所入所。2001年産業技術総合研究所生活環境系特別研究体ナノ界面機能科学研究グループ、2004年ユビキタスエネルギー研究部門ナノ材料科学研究グループ主任研究員。分析電子顕微鏡による機能材料の構造解析に関する研究に従事。この論文では、燃料電池材料の電子顕微鏡による劣化解析を担当。



小林 哲彦 (こばやし てつひこ)

1984年工業技術院大阪工業技術試験所入所。2001年生活環境系特別研究体系長。2004年ユビキタスエネルギー研究部門研究部門長。この論文での固体高分子形燃料電池スタックの劣化機構基盤解析プロジェクトの発足に際し、経済産業省、NEDO、燃料電池システムメーカー、エネルギー供給会社、大学等の関係機関との調整総括。



査読者との議論

議論1 “製品”と“商品”の違い

質問 (五十嵐 一男:国立高等専門学校機構)

本文中で“製品”と“商品”の二つを使っていますが、これらを立て分けて使っているように思われる箇所と、そうでない場合があるように見受けられます。この論文では、立て分けることが重要と考えますので検討をお願いします。

回答 (谷本 一美)

この論文では“製品”は、燃料電池コジェネシステム、燃料電池自動車等、燃料電池を組み込んだもの、“商品”とは市場化されたもので、現時点では家庭用コージェネレーションシステムの「エネファーム」としております。“製品”が市場化される際に性能、耐久性等の機能にコストを加えて一般に受け入れられるものが“商品”となると考えています。

ご指摘のように「6.おわりに」の章で2箇所、この基準で入替わった箇所がありましたので、本文のように修正しました。

議論2 溶融炭酸塩形燃料電池

質問 (五十嵐 一男)

2.の第2段落において「・・・、あるいは製品のもつ特徴等から試行の可能性があった。」とありますが、この試行とは何を意味しているのでしょうか。

回答 (谷本 一美)

分散型燃料電池発電の一つである溶融炭酸塩形燃料電池について述べたものです。現在、日本では、米国のFCE社で開発された技術を丸紅(株)が分散型発電システムとして市場化を試み、日本燃料電池発電機を設置し、いくつかの導入実証試験を行いました。その発電機も終了して日本では行われていません。この技術開発に20年間携わったものとして、残念でなりません。他の燃料電池に比べて優れた性能を有していると思っております。海外では実証導入が進められており、市場化へ向けたプロセスの面で検討され、この技術の再開の可能性を信じ、このような記述にしております。

議論3 固体高分子形燃料電池の劣化パターン

質問 (五十嵐 一男)

4.1の第1段落において「(c)の劣化加速型のパターンがコージェネレーションシステムに対してもっとも致命的と判断される」とありますが、何故そのように判断されるのか、もう少し詳細に記載されては如何でしょうか。

回答 (谷本 一美)

メーカーおよびエネルギー供給会社の経験データに基づいています。コージェネレーションシステムでのシステム制御の柔軟性、適合性については、個別のシステム設計が異なっているようです。ダメージの度合い等で判断しているようです。

議論4 燃料電池の実用化に向けてのシナリオ

質問 (村山 宣光:産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門)

2. 燃料電池の実用化に向けての章の第2段落目の冒頭「燃料電池技術では、・・・技術課題のハードルを下げつつ・・・」と記載されていますが、具体的にはどのような技術課題をどのように下げたのでしょうか。

回答（谷本 一美）

燃料電池は、かつては分散型電源を目標として導入され大型化することも技術課題とされていました。結果として、この大型化に伴うコスト高も派生しています。部材の大型化は、新たなプロセッシング開発の課題も伴います。小型電池であれば、製造技術もラボレベルからの延長にあることからハードルがいくらか下がるとの意味で用いております。

議論5 固体高分子形燃料電池の劣化機構

質問（村山 宣光）

導入ガス切替試験法によって、「電極でのフラッディングの進行によるガス拡散性の低下」と「耐CO被毒性の低下」が加速されると整理した方が、素直ではないでしょうか。この整理を前提にすると、4.1実電池・スタックの劣化要因と劣化加速法の3段落目では、導入ガス切替試験法によって耐CO被毒性が低下する機構を説明されたほうがよいと思います。

回答（谷本 一美）

プロジェクトでは二つの劣化要因を選定して進めましたが、本文中でも記しているように「耐CO被毒性の低下」を加速させる要因を十分に制御することができませんでした。ご指摘のように論文の流れとして二つの因子を挙げたのであれば、それに続くように論理展開をすべきとは思いますが、この論文が研究手法の取組みおよびプロセス等を示すとの観点に立って、このようにしております。また、「耐CO被毒性の低下」を受けて劣化加速法として具体的に、燃料中のCO含有量を調整し、劣化度合いを変化させることが考えられましたが、数千時間内では、期待した結果になりませんでしたのでこの論文の表記となっています。

議論6 固体高分子形燃料電池の劣化加速試験の標準化

質問（村山 宣光）

導入ガス切替試験法は、標準化されているのでしょうか。

回答（谷本 一美）

実際の加速試験になるには、開発された劣化加速手法を標準条件での試験と比較して加速係数を求めることが必要になると考えられます。実時間の試験数が多くありませんので、今後劣化加速法での試験も含めて十分なデータを収集する必要があると思われま

研究・技術計画学会 構成学ワークショップ

シンセシオロジー（構成学）：知の統合からイノベーションへ

2011年10月に山口大学常盤キャンパスにて開催された研究・技術計画学会年次学術大会における構成学ワークショップ「シンセシオロジー（構成学）：知の統合からイノベーションへ」の概要をご報告いたします。

シンセシオロジー編集委員会



（開会挨拶）

小林 直人（シンセシオロジー副編集委員長、早稲田大学） 世界経済危機、超円高、タイの洪水、新興国の成長減速、震災復興、大財政赤字等々、目の前に立ちはだかる困難な課題に対して、我々、「学」や「研究」に携わる者は何ができるのか。それは研究開発の成果を社会で活かし、イノベーションを創出・加速化することだと考えます。



「シンセシオロジー」は科学的知見や技術を統合することでシンセシスの科学を实践し、イノベーションを加速したいと考えています。研究・技術計画学会は、科学技術をイノベーションに役立てるための企画、計画、マネジメント、知財、技術経営を研究しています。しかし、残念なことに、現実の世界を見ると、どれほどよい研究成果や技術が生まれても、それだけでイノベーションに直結し、社会に受け入れられるわけではありません。

それでは、イノベーションを興すためにはどうすればよいのでしょうか。本ワークショップは、研究・技術計画学会と産業技術総合研究所が合同で「構成的知をイノベーションにつなげるための方法論」を議論する場です。今回のワークショップでは、シンセシスの科学の方法論の紹介や、イノベーション論にまで踏み込み、そしてイノベーションを興すためにどのような方法があるのかを具体的に取り上げ、相互理解を深めたいと考えています。

そこで、初めに基調講演として産業技術総合研究所の小野さんから「構成的知の確立の方法論」というお話を、その後、東京大学の妹尾堅一郎先生から特別講演として「イノベーションとシンセシオロジー～知の創出と再編成は社会価値転換と産業競争力強化にどう役立ちうるか～」という興味あるお話をお聞きし、その後、妹尾先生、政策研究大学院大学の隅蔵先生、産業技術総合研究所の赤松さんに入っていただき、知の統合からイノベーション創出に向けてと題してパネル討論を行います。

（基調講演）構成的知の確立の方法論

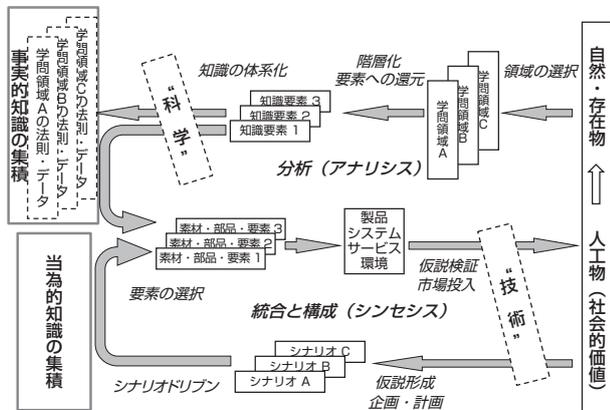
小野 晃（シンセシオロジー編集委員長、産業技術総合研究所） 基礎的な科学の研究が現実の社会に出ていくまでには長い時間がかかり、またその間に多くの研究成果が散逸していきます。この“死の谷”あるいは“悪夢の時代”をどのように乗り切っていくのか。その方法論を「シンセシオロジー」を通して確立していきたいと考えております。



科学の研究では、まず物理や生物、電気などの学問領域を選択します。つぎに分析（アナリシス）という手法を用いてさまざまな事象を階層化し、要素に分解して、最後に、それらの知識要素を体系化することで自然の特定の側面を理解・解明しようとしています。17世紀に科学が誕生して以来、科学は要素還元主義と分析的手法を中心にして発展してき

ました。これに対して自然のように既に存在するものではなく、未だないもの、目的を持った人工物を作ろうという営みがあります。シナリオを作り、それぞれの学問領域で得られた知識要素を用いて素材・部品、製品、システム、サービス、環境をつくります。ここでは要素の構成（シンセシス）や統合というプロセスが非常に重要になります。前者を「科学」、後者を「技術」と定義しますと、いったん作られた人工物は「存在物」として認識され、分析の対象になり、分析の結果をまた技術に使う、これが「科学」と「技術」の相互作用だと思っています。言わば、日本語で言うところの「工学」です。しかし現在、工学でさえもその専門領域は細分化される傾向にあります。

分析的研究と構成的研究の対比



分析的研究と構成的研究を対比してみましょう。手法については、分析的研究は分析と理解、構成的研究は構成と統合です。対象とする領域は、前者は通常単一の学問領域、後者は複数の学問領域にまたがることが多いと思います。そしてこの二つの非常に大きな相違は、解の一意性があるか、ということです。事実に知識には唯一の解があるという信念のもと、分析的研究は唯一解に収束するまで研究を続け、そこに至って研究が終了します。しかし、構成的研究は複数の同等な解がありえます。解の間に優劣はあるかもしれませんが、同等な解が複数ありうるという、非常に異なった構造をしています。ですから、研究を評価するとき、分析的研究では専門家によるピアレビューを行います。細分化された領域では結論が唯一解であるかどうかを見極めるのはその領域の専門家でないとうわらない。しかし、構成的研究では、むしろその研究成果を利用する人たち、つまりメリットを受ける人たちが評価すべきではないか。非専門家によるメリットレビューという形になると思っています。

地球環境問題をはじめ現代社会の課題は非常に複合的です。「アナリシスの科学」だけでなく「シンセシスの科学」が必要とされているにもかかわらず、その「シンセシスの科

学」はまだ十分に定式化されておらず、何をどのようにすべきかという当為的知識も研究者個人あるいは各組織の中に閉じて蓄積されているだけです。そのような知識を散逸させずに社会の財産として蓄積し、利用可能なものにしたい、そして「シンセシスの科学」ができる研究者をハイライトしたい、世の中でもっと活躍していただきたい、そしてイノベーションを促進したいと思っています。我々にとってのイノベーションとは、「基礎研究と現実の社会とをいかに強く関係づけるか」ということです。「シンセシスの科学」の方法論を確立し、その実践をとおして現代社会の問題を解決すること、そのためには「シンセシスの科学」を記述する論文形式を開発することが重要であると考え、新ジャーナル「シンセシオロジー」を刊行しました。

「シンセシオロジー」の特徴は、狭い領域から広い領域へ、知識の新規性よりも有用性へ、ピアレビューからメリットレビューへ、そしてイノベーションに有用な研究者をハイライトすることです。もう一つ、著者と査読者との議論は査読者名を公開して論文の後ろに掲載しています。通常の学術雑誌では、中立性・公平性の観点から匿名で査読が行われるわけですが、我々は著者と査読者あるいは読者が協力しながら論文形式を開発していくという立場に立ちまして、著者と査読者とのやりとりを掲載しております。わかったことは、査読者も自分の名前が出るとなると偏った意見を出せないという、むしろ自ら、中立・公正であらねばならぬという自律的なフィードバックが働いて、大変よい査読意見を出していただいて著者との間で興味ある議論が成立しています。読者の中には、まず著者と査読者とのやりとりを読んでから論文本体を読むという方もおられるくらいです。

これまで4年間に、いろいろな方からご意見をいただきてまいりましたが、著者からは「これまでの学術雑誌では書けないことが書けた」、一般読者からは「他分野の研究が理解できておもしろい」、産業界からは「多分野の研究がわかり有益な情報である」という好意的な意見をいただいています。

現代社会の問題を解決すること、そのために「シンセシスの科学」の方法論を確立し、「シンセシスの科学」を実践することが重要です。「シンセシスの科学」をとおしてイノベーションを加速することができると考えております。

(特別講演) イノベーションとシンセシオロジー ～知の創出と再編成は社会価値転換と産業競争力強化にどう役立ちうるか～

妹尾 堅一郎 (産学連携推進機構、一橋大学 (なお、ワークショップ当日



は東京大学) 最初に「システム論から見たシンセシオロジー」、次に「イノベーションから見たシンセシオロジー」、最後に「知の創出と再編成は社会的価値転換と産業競争力強化にどう貢献するか」という議論に入っていきたいと思えます。

システム論の確認です。現象学的解釈主義に基づくシステム論、その意味ではアメリカ型ではなくむしろイギリス型です。我々が対象にアプローチするときに①成り行き、②科学的アプローチ、③ハードシステムアプローチ、④ソフトシステムアプローチの4つを持っています。日常生活では、“先入観”、つまりさまざまな既存の世界観や暗黙の前提によるフレームワークを通じて“成り行き”で接する。これに“科学的な知”のアプローチが加わった。それは3つのRで示されます。要素還元主義(reductionism)に基づく分析、再現性(repeatability)のある世界への適応、その結果を実証的あるいはPopper流に言えば反証的(refutation)な言明で示すこと、です。それが「知」として構成されるのが科学的知と言えましょう。これが有用だったことは19、20世紀の科学の世界を見れば明らかです。しかし、限界が来た。なぜか? 実践的・経営的あるいは政策的な知は再現が不可能だからです。そこで出てきたのがBertalanffyを初めとする一般システム論の世界です。つまり要素還元的に部分を見るのではなく、それらの関係性に着目したシステム論です。そのシステム論は、まず、世の中は存在としてのシステムによって構成され、それにシステムティックにアプローチできるだろうという工学的なアプローチが先行しました。第二次世界大戦の影響もあってこのハードシステム思考が優勢を占めました。その方法論はシステムエンジニアリング(SE)、オペレーショナル・リサーチ(OR)、システムアナリシス(SA)、そして経営科学(MS)等を発展させました。これに対して、イギリスを中心に80年代以降に進展したのがソフトシステム思考です。「世の中はシステムだ」ということを前提として仮説検証を行うハードシステム思考ではなく、「世の中をシステムとして見ることはできるけれども、それが何かは分からない」という前提に立ち、そこにシステムティックに探索学習というアプローチをとるパラダイムです。ハードが存在論的言明による仮説検証を軸にした論理実証主義的哲学を基盤にもつものに対し、ソフトは認識論的言明による探索学習を軸にした現象学的解釈主義を基盤にします。特に人間活動をシステムとしてとらえるという社会意味論や概念論に特徴があるとも言えましょう。

これらの観点から「シンセシオロジー」を見るとどうなるか。私は二つの観点があるのではないかと考えています。第1は、シンセシオロジーは、アナリシスをするか、シンセシスをするかという考え方に対して、関係化(rationalize)

と創発(emergence)というパラダイムもあるのではないかと。第2はlogyの三面性です。シンセシオロジーは、存在論的(Ontology)、認識論的(Epistemology)あるいは方法論的(Methodology)のどの言明を求めるのか。おそらくシンセシオロジーはこの3つの側面の全てがあるのではないのでしょうか。

我々は“創発性”を重視しますので、重要な概念は“関係付け”です。“関係付け”とは、社会事象を創発として解釈し、了解する一方で、社会事象を創発的に産み出すための実践の方法論が要ります。①現在、創発を産んでいるシステムを構成する個を取り替える、②システムを構成する個の関係性を変える、③設計的に新結合を起こす、④誘導的に新結合させる、⑤場と機会による新結合の発見と育成を行う、⑥自らが当事者として場と機会に入り込み創発を起こす探索学習的な実践を行う、今のところこれらの6つのスタイルがあると私は考えています。

次に、「イノベーションから見たシンセシオロジー」です。

イノベーションの話をするときに、“成長(growth)”と“発展(development)”を分けなくてはいけないというのが私の持論です。成長とは同一モデルの量的拡大を言い、発展は新規モデルへの不連続的な移行を指します。成長を促すのは現状を磨き上げる錬磨(improvement)ですが、イノベーションはモデル自体の革新を指します。私はイノベーションを日本経済新聞が“技術的革新”と未だに訳していることを憂いておりますが、improvementをいくらやってもイノベーションにはかなわない。ただし、イノベーションは長くは続かない。イノベーションを続ける不断の努力をしなければ産業競争は勝ち抜けません。産業競争力的な意味でのイノベーション論では、錬磨モデルと革新モデルを理念的にきちんと分けなければいけない。このとき、両者を企業内に内在化させること、すなわちChristensen流のイノベーションジレンマを同時に内在化させることは極めて重要な仕事です。キャンソンの中央研究所はキャンソンのつぶす研究をしている、トヨタの中央研究所はトヨタをつぶす研究をしている。それをしない限り、外部からのイノベーションにやられる。イノベーションにやられたいくれば自らがセルフイノベーションを起こす以外に道はない、こういう世界に入ってくるわけです。

では、イノベーションをシンセシオロジーが支えるとしたらどうすればよいのか? その前に、まず二つの確認をした。第一は、イノベーションはinvention(技術革新)そのものではないということです。“科学技術のイノベーション”という言葉が私はいまひとつよくわかりません。なぜならば社会的価値を創発するだけではなく普及・定着させるまでやらなければイノベーションとは言えないからです。技術的

価値をうむだけだったら invention です。これが私の問題提起の一つです。第二に、既存モデルをいくら改善・洗練させてもイノベーションにはなりません。既存モデルの錬磨（improvement）と新規モデルの創新（innovation）も、これまた区別すべきでしょう。レコードの技術をいくら高めたとしても CD にはかなわず、CD の技術をいくら高めても最終的には iPod の世界に入る。そうだとすると、新規価値の創出と普及・定着をどうやるのか。クリエーション、ジェネレーション、プロデュース、その一つの方法論としての“統合化”あるいは“構造化”という意味でのシンセサイジングではないかと思えます。しかし、それだけでしょか。

最後の「知の創出と再編成は社会的価値転換と産業競争力強化にどう貢献するか」の議論をします。

イノベーションの方法論には、研究・技術計画学会が中心に置いている「技術革新起点型」もありますが、デザインやコンセプトを起点として技術をうまく活用するという「事業革新起点型」があります。コンセプトドリブンもあれば、デザインドリブンもある。例えば、商品企画から入った例として <iPod> があり、意味から入りモノとコトを変える例として旭山動物園があるでしょう。人気の秘密は、形態展示というコンセプトを行動展示に変えたことを通じて動物園の設計まで全部変えた。デザインドリブンとは、例えば日用品がそのまま防災に使えるというふうに、日常と非日常の垣根を越えたものにする「スマートデザイン」があり、現在私はその運動を始めています。これを私は「オアの関係からアンドの関係への変容」と言っています。これ以外にもユニバーサルデザイン、エコデザインの考え方もありますが、これらは最初に革新的なコンセプトを置いて、それを起点として技術を誘導するスタイルです。

そして「商品形態・事業態革新起点型」です。製品イコール商品と考えていた時代からハードウェアにソフトウェアやユースウェアが入ってくる。iPod は iTunes store というサービス形態と同時に価値の創発的形成をしています。iPod について、ウォークマンはプレーヤーだが、iPod はメディアとプレーヤーとストレージの融合体であり、かつ iTunes store というサービスとの複合的な価値形成だと言ったのは、自慢させていただくと私です。この方向にすべてビジネスモデルは動いています。モノとサービスとの相乗的階層化による価値形成、すなわち商品形態・事業態の革新です。

調査をして、ニーズを調べれば何かが出てくるというのは 20 世紀までの話です。ニーズを“欲求”とか“要望”とか訳される方がいますが、我々やマーケティングの人間は“不足”“欠落”あるいは“欠乏”と訳します。欠乏を充足させることが調査の対象であった時代では今はありません。

複数の垂直統合型企業が切磋琢磨して自前主義・抱え込

み主義でやれる時代では、技術がイノベーションに直結していました。しかし、今のようにビジネスモデルと知財マネジメント、広い意味での標準化も含めて、それらの開発、展開による「国際斜形分業型のイノベーション」の時代には、その方法論は通じません。技術優位であれば企業優位であったときのように、技術に注力すれば事業優位になるのか。G7 時代は 10 億人の先進国市場を相手にしていました。G20 時代は 30 億以上の世界を相手にしなければなりません。その時、商品形態や事業形態、産業生態のモデルによって技術が全く変わってきます。これは技術政策をされている方には喧嘩を売するような話にみえるかもしれませんが、実際、半分は喧嘩を売っております。産業生態系がいったん作られたら、どんな優秀な要素技術を開発しても生き残れないという新しい産業の鉄則に目を向けるべきだと思っております。

結論です。技術優位＝産業優位を前提にするだけの R&D 政策はいかがなものでしょうか。あるいは技術起点で全ての産業競争力が形成されるという前提だけの政策はいかがなものでしょうか。これは 2002 年に知財立国ができたときの基本モデルです。もちろん王道ですから重要だと思えますが、今、世界のイノベーションは事業覇道で動いていることを直視すべきです。我々はこの二つの両輪を同等に眺めないといけない。シンセシオロジーがこの世界をどういうふうに考え、どのような議論をしていくのか、それが求められているのではないかと考える次第です。いずれにせよシンセシオロジーの展開に大いに期待をしたいと思います。

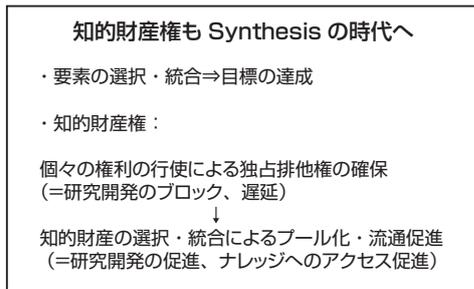
（話題提供）

隅藏 康一（政策大学院大学） お話を伺って想起したことを知的財産に関連して話題提供させていただきます。

「シンセシオロジー」のポイントの一つは「要素の選択と統合を行って目標を達成する」ことです。知的財産権は、本来、個々の権利を行使して独占排他権を確保すること、裏を返せば他人の研究開発をブロックし、遅延させるという機能を持ちます。しかし、これからの知的財産権はシンセシオロジーの時代へ入るのではないかと。特許やノウハウを含めたいろいろな知的財産を選択・統合してプール化し、パッケージにして流通を促進させる。これによって研究開発が奨励され、そこに蓄積されているナレッジに他者がアクセスすることでイノベーションの加速につながる、そういった事例を紹介したいと思います。

知的財産の協働的マネジメントとして二つのパターンを考えました。一つは、「研究開発は各機関で個別に行われるが、知的財産のマネジメントは共同で行う」パターンです。





これには有償のライセンス契約の締結を前提とするパテント・プールと、無償での使用を前提とするコモンズがありますが、どのような要素を選択して、どのようなパッケージを作るか、それらをいかに普及させていくかが重要になります。

パテント・プールの有名な例として MPEG-2 がありますが、パテント・ポートフォリオを作ってパッケージでライセンスして、ビジネスとしても非常に成功しています。農業の分野での Golden Rice は、ビタミン A を大量に含有し、途上国の人々への栄養状態に貢献するライスですが、特許はアメリカだけで 70 件以上、マテリアル・トランスファー契約も 6 件結ばなければいけないというものをパッケージ化することによって、個別の権利者と交渉する手間やコストを省いて技術の普及に促進しているケースです。もう一つの例として、グラクソ・スミスクライン社は、企業の一つの CSR 活動とも言えるのですけれども、Neglected Tropical Disease に関する特許を集めて低価格で提供するというパテント・プールの構築を試みており、他社に参加を呼びかけています。その他にオープンソースでソフトウェアを開発するのと同じような動きが農業分野にもあります。オーストラリアの CAMBIA は BiOS ライセンスを受けたライセンシーに対して、改良発明が生じた場合、他者が自由に使えるようにすることを求めています。一方、コモンズは、例えば毒性のある医薬品のデータを集めて、その毒性試験に関する二重投資を防ぐ構想や、エコ・パテントコモンズのように特定分野の特許を集合化・パッケージ化して、無償でそれを使えるようにしています。

二つ目は「研究開発を複数の機関が共同で行うと同時に知的財産の管理も一定のルールのもとで執り行う」というものです。iPS 細胞のような幹細胞を医薬品の毒性試験に使えるようにしようという SC4SM (Stem Cells for Safer Medicines) はイギリスの官民コンソーシアムですが、政府機関や大手製薬が参加し、仕組みを開発すると同時に、開発された特許のマネジメントを行っています。

最後に、今後求められることとして「エネルギー消費量の削減と経済活性化の両立」のための新技術の開発について触れたいと思います。震災後の状況の中、エネルギー消費量を削減しながらも経済の活性化を止めないことが重要で

す。そのためには広くニーズを収集するための仕組みづくりや、必要な要素を開発し、それをうまく組み合わせる研究開発、そして新しい技術が社会に普及するようにしなければいけません。

これは一つの具体策ですが、ニーズの収集を募るために Wikipedia のようなだれでも書き込めるボトムアップ型のウェブサイトを設置する。必要な要素の開発や組み合わせについては、専門家による委員会等により緊急的に必要な技術を認定し、税制上の優遇措置や特許料の減免措置により研究開発を促進する。そして、実装した製品が普及できるように、搭載した製品を使用する企業に対して税制上の優遇措置をとる、といった仕組みが考えられるのではないのでしょうか。特に、知的財産権の扱い、ならびに、特許料の減免も研究開発促進機能をもつのではないかということで、討論の素材としてあげさせていただきました。

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)



これまで研究開発が実際の市場で使われるプロセスとして一般的だったのは要素技術者を企業の人が探して、それを使うという流れでした。「シンセシオロジー」では研究者側から成果が社会で実現できる方法論の確立を目指しています。どのようなシナリオやプロセスで研究が社会に展開されていったかを 70 編余の「シンセシオロジー」の論文を分析・類型化しましたので、幾つか紹介したいと思います。

「社会でニーズが明確化されている場合」です。スピントロニクスを使ってハードディスクの高性能化をする研究では、大きく性能が上がったことを示すと企業がすぐ食いついてくれます。さらに、研究者が製造装置の開発に寄与することで企業に使ってもらいやすくなる。また、計量標準のトレーサビリティのように使われ方が社会構造として確立している場合もあります。

これに対して「社会のニーズが明確化されていない場合」があります。この場合には、①“使ってみる”というプロセスが有用です。有機材料でナノチューブができた、その使用法の可能性は無限にあると思うので、サンプルを提供して使い道を見つけていきたい。ここでのポイントの一つは、製造プロセスに使えるくらいの大量製造ができることを示した上でサンプルを提供するという事です。もう一つの例として、愛知万博で展示物を説明するときに使った無電源携帯情報端末 (Aimulet) は、展示会やイベントで使ってもらうことによってニーズを掘り起こしたり、改良点についてフィードバックをかけながら技術開発をすすめていくという

ものです。

②“製品の形にしてやってみせる”という方法もあります。製品の形にまず作って、どんな性能があるかを具体的にを見せてしまうというものです。多くの長さの国家標準器として用いられるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの発振波長はレーザ共振器の機械的長さによって決まっていたのですが、それを汎用的な要素技術をうまく使って机の上に乗るコンパクトな長さ標準器を作り、「こんなに小さくてもできる」ということを見せました。また実時間全焦点顕微鏡は、高さに違いがあってもピントが合うことを見せてインパクトを与えることで、実際に製品化されています。

③“ニーズは理解されているが、躊躇がある”こともあります。知財の関係や、必要性や重要性はわかっているけれども、なかなか手をつけてもらえない。このときは相手の理解を待つか、あるいは相手の懐に飛び込む。紫外線防御化粧品のケースですが、ものはできたものの知財関係でうまく話が進まなくなったので、しばらくその問題を棚上げにして、調整することで2、3年後に製品化されました。また情報システムの信頼性を高めるための活動をしているグループは、実際にそのフィールドに入り、価値を理解してもらったという例があります。

最後に、「製品化はできていて、社会に定着させる場合」です。これには多様なステークホルダーの寄与がポイントになります。IH調理器が家庭に普及していくプロセスの中で、重要な役割をしていたのが感性リード・ユーザーである料理研究家の貢献だったという例です。また、カーナビは要素技術から全体の社会システムまで、マイクロからマクロまでのさまざまな技術の統合ですが、それぞれが自分たちの役割を考えながら産業システム全体としてうまく動くことによってカーナビを広めていきました。この場合、特に大事だったことは各レイヤーの企業の人たちが「カーナビを広めよう」という夢を共有していたということです。

幾つかの事例のサマリーですが、これからの議論の材料にいただければと思います。

研究開発成果の社会導入のためのシナリオ

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を提供 <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

パネル討論「知の統合からイノベーション創出に向けて」

小林 「構成知」をイノベーションにつなげるための方法論の発表について、フロアからご質問、ご意見をお受けしたいと思います。

フロア 第4期科学技術基本計画で「科学技術政策から科学技術イノベーション政策へ」ということが決定されたが、どうやっていいかわからないという状況だと思います。ただ、今、非常時で思考の枠組みを変えるチャンスではないか。ぜひ、妹尾先生、隅藏先生から過激なご発言をいただきたいと思っています。

妹尾 “イノベーション体感速度”が日本だけ非常に鈍いという感じがします。死の谷という問題があるから解決しようという発想はあります。しかし、欧米のビジネスモデルをみると、むしろ死の谷自体を作らないモデルを工夫しています。問題を解決するのではなく、問題自体を解消しようとしている、これは大いに学ぶべきだと思っています。ファンドを入れずに急速に市場形成が立ち上がれば研究開発投資の回収はあっという間にできる。そのスタイルを新興国とのWin-Winの関係でつくるというモデルをなぜ日本はできないのだろうかと言っています。

隅藏 社会的に必要な技術を集集する方法として、例えば地図ですが、みんながGPSを入れた携帯をつけて車や徒歩で移動すると歩いた道が地図と同じように表示されて使えるというウェブサイトがあります。これはまさにボトムアップ的なものづくりの可能性を考えさせられるものであり、そういったことも活用できるのではないかと思います。

妹尾 今のお話は、ベンダードリブンではなくてユーザードリブンだということとも言えるのではないのでしょうか。イノベーションの提案はベンダー側がやるという発想ではなく、ユーザードリブンイノベーションの力をもっと引き出さなければいけない。今日の非常時に盛んに言われているのはソーシャルイノベーションです。私はソーシャルイノベーションとは、「ソーシャルを、ソーシャルで、ソーシャルにやる」ことだと考えています。生活空間から社会空間における今の閉塞感は、社会全体の価値形成を変えなければ打破できない。今、ソーシャルビジネスという領域が出てきています。同じ空間にソーシャルにつながることによっていろいろなことが創発されるという世界が動き始めていることに注目したいと思います。

フロア 研究・技術計画学会の前身として、30年前、東京大学の中で基礎科学科第二をつくったのですが、シンセシ

スをやるといふこと、それから実務的なことをやろうといふことでした。「シンセシオロジー」とディシプリンの関係、それを実体化させていくときの仕組みという観点からいかがでしょうか。

赤松 「シンセシオロジー」が目指しているのは、事例を集めることによって、既存のディシプリンを越えた何らかの方法論が見えてくるのではないかということです。例えば戦略的選択型、ブレイクスルー型、アウフヘーベン型と分けられると思いますが、「シンセシオロジー」のいいところはすべての分野を対象にしていることです。意外に自分の専門分野でなくても理解できるのですが、それは「研究者のものの考え方」という意味で共通しているところがあって、構成するという観点になると話が通じてくる。それが学際をつなぐディシプリン構築の一つの力になるのではないかと思います。

妹尾 ディシプリナリーの話でいうと、私は新領域を開発する方法は、“尖” 端知、学際知、間隙知、融合知、横断知、上位知、今のところこの6つだろうと思っています。また、先端的領域は仮説検証なんだろうかという疑問をもっていて、むしろ探索学習ではないかと考えています。さらに、「シンセシオロジー」を横から拝見していて、一体どこにいくのかなと思ったときに、オントロジカルなディシプリンではなく、むしろエピステモロジカルなディシプリンやメソドロジカルなディシプリンでの展開もあってよいのではないかと考えます。それを指向しているとしたらシンセシオロジーの可能性はすごい領域になりそうな気がして、私はワクワクしています。

小野 大変元気づけられるご意見をありがとうございます。日本語の“科学”という用語は「枝分かれしていった先」という意味があると思うのですが、シンセシオロジーでは特定のディシプリンをつくらないということを考えておきまして、各ディシプリンに共通で横断的、あるいは融合にも使えるような3つの形態の方法論を今は強調していますが、先生が言われた形態もぜひ検討していきたいと思っています。

小林 「イノベーションにつながる政策をどのように議論していけばいいのか」ということに関して、「イノベーションをベンダーではなくユーザードリブンで行う」、「日本が世界のスピードについていけない」等々のお話もありましたが、「どのように計画して政策にもっていくのか」、ということについてはいかがでしょうか。

赤松 具体的なものを手にしてみても初めて何かを感じるところがあります。存在物になった物やシステムの力はすごくあるので、そこをうまくフィードバックをかけながらやって

いくというプロセスを組むことはひとつ考えられる。これまでであればハードウェア的なものをしっかり積み上げていかないと物ができなかったけれども、シミュレーション的なものをうまく使って、想定される形をある程度つくってやってみることは早い段階でできるのではないかと思います。

隅藏 ニーズ収集するための仕組みとしてボトムアップ的なものが必要だというふうに提示したのですが、もちろんいろいろなルートがあり得ます。特にニーズを考えないでやっている基礎研究がどこかでニーズにつながることもあるので、うまくそれらを汲み上げて必要なところにつなげていくマッチングの仕組みが必要ですし、それらのインタラクションのところにいる目利きの人材の育成が必要だと考えます。

妹尾 みんなが「知をどう使うかという知のあり方」を開発しはじめた、ここがポイントです。私は「知を活かす知」という言い方をしているのですが、日本が遅れているのは知そのものの開発ではなく、知を活かすための知の開発です。シンセシオロジーは知を活かす知の開発を試みているのだらうと思いたいのです。

赤松 知といっても事実に知識ではなくて“当為的な知識”、「何をなすべきかの知をつくる」、これが一番のターゲットだと考えています。

妹尾 そこに踏み込まれたのはすごくよいと思っているのです。一つは研究開発について、時間的な変容と空間的な変容が起きていると思っています。国内ローカルでやったものをグローバルに出すという国内先行ではなく、グローバルファーストをやらないとだめになってきた。時間的な問題をいうと、これまでのような短期1~3年、中期5年、長期10年という考え方でいいのだろうか。イノベーションの短期とは既存モデルの磨き上げの時期、長期とは次世代モデルの普及・定着の時期、中期を既存モデルから新規モデルに移行する時期と定義するとバイオの世界とITの世界では明らかに違います。

もう一つは、政策と産業界の動向があまりにもかけ離れているので、その乖離をチューニングし直しましょうと提案しています。このリチューニングの方法論も「シンセシオロジー」で開発するターゲットの一つとして期待しています。

小林 きょうの議論をさらにまた発展させていただきたいと思っています。私自身も新たな示唆を受けましたが、会場の皆さんも新しい方向性が少し見えてきたのではないかと思います。これでパネル討論を終了させていただきます。ありがとうございました。

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日
 改正 2008年6月18日
 改正 2008年10月24日
 改正 2009年3月23日
 改正 2010年8月5日
 改正 2012年2月16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 図については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は白黒印刷とする。

3.3.5 写真については画像ファイル(掲載サイズで350 dpi以上)で提出する。原則は白黒印刷とする。

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, H.TAYA

Editors: S. ABE, K. IGARASHI, H. ICHIJO, K. UEDA, A. ETORI, K. OHMAKI, Y. OWADANO, M. OKAJI, A. KAGEYAMA, T. KUBO, T. SHIMIZU, H. TATEISHI, M. TANAKA, E. TSUKUDA, S. TOGASHI, H. NAKASHIMA, K. NAKAMURA, Y. HASEGAWA, Y. BABA, 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

Revised February 16, 2012

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, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

3.3.5 For photographs, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be 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

シンセシオロジー 5巻1号では、研究論文5編とワークショップ報告1編をお届けします。研究論文の主題は、情報、ライフ、計測、エネルギーと多彩です。いずれも社会への出口を求めた研究であり、評価方法の標準化等をうまく活用して、技術を社会へ積極的に押し出していています。

また本誌(シンセシオロジー)に過去3年間で掲載された70編の研究論文に関して「構成方法」を分析した研究論文「シンセシオロジー論文における構成方法の分析」が注目されます。構成的研究が実際にどのようなプロセスを経て行われているのか、技術分野ごとに特徴的な様態が浮かび上がっています。

シンセシオロジー誌では著者に対して、社会的に価値のある研究目標を設定した上で、その目標を達成するためのシナリオを記述し、さらにそのシナリオに基づいて実践した要素技術の構成と統合のプロセスを記述していただくよう要請しています。構成と統合のプロセスは著者ごとに独特のものがあ、非常に

多様です。しかしそれらを大括りに捉えると、いくつかの共通の手法が浮かび上がってくるのは興味深いところです。

構成的なアプローチは現にさまざまな研究プロジェクトで実践されています。構成と統合のプロセスを類型化して考えることができれば、プロジェクトの企画立案や運営、そしてそれらの事後評価に対しても、今後好ましい影響を与えるものと期待されます。

なお2011年10月に山口大学で開かれた研究・技術計画学会の年次学術大会で、当該学会と産総研とが共同でワークショップ「シンセシオロジー(構成学):知の統合からイノベーションへ」を開催し、構成的な研究とイノベーションの関係を議論しました。本誌の「ワークショップ報告」から分かるように、多岐にわたる興味深い論点が提示され、今後の我が国の科学技術政策にも影響を与える可能性があることを感じました。

(編集委員長 小野 晃)

Synthesiology 5巻1号 2012年2月 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）：多屋 秀人

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、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、馬場 靖憲、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

Construction of a traceability matrix for high quality project management

-A proposal of a basic theory toward a change from process-centric management to information-centric project management-

A.SAKAEDANI, Y.OHKAMI and N.KOHTAKE

Research and development of a monopivot centrifugal blood pump for clinical use

-Collaboration between a medical team and an engineering team toward a product-

T.YAMANE, O.MARUYAMA, M.NISHIDA and R.KOSAKA

An analysis method for oxygen impurity in magnesium and its alloys

-International standardization activity in parallel with R&D-

A.TSUGE and W.KANEMATSU

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-

N.KOBAYASHI, M.AKAMATSU, M.OKAJI, S.TOGASHI, K.HARADA and N.YUMOTO

Durable polymer electrolyte fuel cells (PEFC) for residential co-generation application

-Elucidation of degradation mechanism to establish an accelerated aging test method of PEFC-

K.TANIMOTO, K.YASUDA, Z.SIROMA, T.AKITA and T.KOBAYASHI

Report

The Japan Society for Science and Research Management: Synthesiology Workshop

-Synthesiology: Synthesis of Knowledge Leading to Innovation-

Editorial policy

Instructions for authors