

Synthesiology

サービス工学としてのサイバーアシスト

学問分野を超えた「システムデザイン・マネジメント学」の
大学院教育の構築

紫外線防御化粧品と評価装置の製品化

コンパクトプロセスの構築

正確性・コストパフォーマンスに優れた遺伝子定量技術の
開発と実用化への取り組み

シンセシオロジー編集委員会

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第3巻第2号(2010.5) 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
サービス工学としてのサイバーアシスト — 10年早すぎた?プロジェクト — . . . 中島 秀之、橋田 浩一	96–111
学問分野を超えた「システムデザイン・マネジメント学」の大学院教育の構築 — 大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材の育成を目指して — . . . 神武 直彦、前野 隆司、西村 秀和、狼 嘉彰	112–126
紫外線防御化粧品と評価装置の製品化 — 産総研の論理・戦略的方法と工業技術院の経験・試行錯誤的方法を組み合わせた地域連携型の製品化研究 — . . . 高尾 泰正、山東 睦夫	127–136
コンパクトプロセスの構築 — 高圧マイクロエンジニアリングと超臨界流体との融合 — . . . 鈴木 明、川波 肇、川崎 慎一郎、畑田 清隆	137–146
正確性・コストパフォーマンスに優れた遺伝子定量技術の開発と実用化への取り組み — 蛍光消光現象を利用した遺伝子定量技術の開発 — . . . 野田 尚宏	147–157
報告	
シンセシオロジー(構成学): 知の統合を目指す学問体系	158–168
編集委員会より	
編集方針	169–170
投稿規定	171–172
編集後記	179
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Cyber Assist project as service science and engineering — A project that began ten years too early — . . . H. Nakashima and K. Hasida	96
Graduate education for multi-disciplinary system design and management — Developing leaders of large-scale complex systems — . . . N. Kohtake, T. Maeno, H. Nishimura and Y. Ohkami	112
Products and evaluation device of cosmetics for UV protection — AIST commercialization based on regional collaboration that combines the current strategic logic, and an intermediary's experience and trial-and-error approach — . . . Y. Takao and M. Sando	127
Establishment of compact processes — Integration of high-pressure micro-engineering and supercritical fluid — . . . A. Suzuki, H. Kawanami, S. Kawasaki and K. Hatakeda	137
Development of an accurate and cost-effective quantitative detection method for specific gene sequences — Development of a quantitative detection method for specific gene sequences using fluorescence quenching phenomenon — . . . N. Noda	147
Messages from the editorial board	173–174
Editorial policy	175–176
Instructions for authors	177–178

サービス工学としてのサイバーアシスト

— 10年早すぎた?プロジェクト —

中島 秀之¹、橋田 浩一²

サイバーアシスト計画は2000年に発動し、2001年より2005年まで産総研サイバーアシスト研究センターを中心として研究開発が行われた。これは日本におけるユビキタス・コンピューティングやサービス工学の先駆けであったと同時に、世界的にも先見性を持った計画であった。おそらく、現在であれば高く評価された活動であると考ええる。ポイントは人間中心の情報システムを謳ったこと、実空間でのサービス提供を行ったこと等である。本稿は同センターが当時残した文書を中心にセンターの目標と活動を再構成する。また、それを受けて今後の研究方向を示す。

キーワード: サイバーアシスト、サービス工学、環境知能、ユビキタス・コンピューティング

Cyber Assist project as service science and engineering

– A project that began ten years too early –

Hideyuki Nakashima¹ and Koiti Hasida²

The Cyber Assist project was initiated in 2000, and its R&D was conducted at Cyber Assist Research Center of AIST from 2001 to 2005. This project was a leading activity followed by ubiquitous computing and service engineering in Japan as well as one of the foresighted projects in the world. It should be highly evaluated even in the present time. The project had its focus on a human-centered information system that provides services in the physical world. This article rebuilds the goals and activities of the research center on the basis of documents produced then, and provides future research directions.

Keywords: Cyber Assist, service science and engineering, ambient intelligence, ubiquitous computing

1 はじめに

サイバーアシスト計画は2000年に発動し、2001年より2005年まで産総研サイバーアシスト研究センターを中心として研究開発が行われた。これは日本におけるユビキタス・コンピューティングやサービス工学の先駆けであったと同時に、世界的にも先見性を持った計画であった。ポイントは人間中心の情報システムを謳ったこと、実空間でのサービス提供を行ったこと等である。

通常、技術が最初に開発されてから世の評価を得るには10年単位の時間がかかるようである。たとえば現在ソフトウェア作成の主流となっているオブジェクト指向の考え方は1970年代後半に提案され、1990年頃から実社会で使われ始めた。そして更に10年を経てやっと主流というところまできている。10年を単位としてみるときに、サイバーアシスト研究センターは短命(2001～2004年)であった。そのため未完成の要素が散見される。

発案から10年を経た現在、サイバーアシストの目指し

たものが他の研究開発テーマの下に市民権を得始めている。それらとの関連を示し、新たな研究開発の枠組みを作り上げるという意味での構成的研究という観点からサイバーアシストの再評価をすることが本稿の目的である。特に、最近注目を浴びているサービス工学の実践^{註1}としての活動を中心に取り上げたい。以下では同センターが当時残した文書を中心にセンターの目標と活動を再構成し、その後には評価を加える。

2 研究開発目標とその実現手法

まず、サイバーアシスト研究センターの目標と、それを実現するための組織について述べる。

2.1 サイバーアシスト計画

サイバーアシスト計画の最初の発表は1999年^[1]であるが、そこで述べられている背景認識は現在でも変わらない:

サイバネティクス(Cybernetics)はアメリカの数学者ウィーナーが“動物と機械における制御と通信”^[2]で提唱した概

1 公立はこだて未来大学 〒041-8655 函館市亀田中野町116-2、2 産業技術総合研究所 社会知能技術研究ラボ 〒135-0064 江東区青海2-3-26 臨海副都心センター407号

1. Future University Hakodate 116-2 Kamedanakano-cho, Hakodate 041-8655, Japan, 2. Social Intelligence Technology Research Laboratory, AIST 2-3-26 Aomi, Koto-ku 135-0064, Japan

Original manuscript received September 15, 2009, Revisions received February 23, 2010, Accepted February 23, 2010

念である。彼は情報のフィードバックによる制御系の概念を打ち出した。我々は街にこのような情報フィードバック系(神経系)を与えたい。中枢神経系は高度な情報処理を行なうし、末梢神経系はセンサー情報の伝達や人間との情報通信を行なう。

そのような動きはすでに始まっている。インターネットを始めとする情報インフラの提供により、一般人が世界中の情報を容易に入手できるようになってきた。ネットワークの利便性は今後ますます高まって行くように思う。また、携帯端末の普及により、個人が情報処理装置を持ち歩き、それを通して社会の情報システムと対話することが日常的になると予想される。(中略)

我々が従来別の手段で行っていたことをインターネットで行なえるようになったこと(例えば商品を買うことやホテルや航空機の予約等)にとどまらず、情報処理の助けによって初めて可能となったことも多い。更にその結果として、情報の選別、セキュリティ、プライバシー等の問題が新しく浮上してくることも考えられる。それらを解決するために個人に適応した情報処理システムが必要であり、パーソナルエージェントの研究も開始されている。個人のプライバシーを確保しつつ情報洪水の中から自分に必要な情報を選別し、安全に通信する技術が問われるのである。もちろん、法規制等の社会制度の大幅な見直しが必要であるが、技術者としても、そういった社会設計の道具として何が提供できるのかを考えておく必要がある。

上記の論説はサイバーアシスト研究センター(Cyber Assist Research Center。以下CARC)設立前のもので、他にデジタル・シティー^[3]等を含む広い文脈のものであった。概念的には情報処理が関連する(あるいは、関連する)人間生活のあらゆる場面を包含する。たとえば、(空や海を含むが)典型的にはITS(知的交通システム)に代表される地上交通網のためのインフラや情報システム、都市設計や都市の情報システム、行政サービスや行政自体のためのシステム、遠隔医療システム、観光情報のためのインフラ等である。都市の神経網という意味ではビルや道路、橋梁等の構造物に歪みセンサー等を埋め込み、地震による被害を実時間測定するといったことも含まれる。あまりにも広範囲にわたりすぎるため、少し後の論説^[4]では個人用情報機器とそれに関連する技術に絞り込み、以下のように記述されている：

サイバーアシスト(Cyber Assist)プロジェクトは、すべての人々が生活のあらゆる場面で状況に即した支援を情報技術に基づいて受けられる社会の構築を目指す。以前の情報技術は、机上のコンピュータを通じてしか利用できなかった。最近ではモバイル機器の普及によって利用範囲が広がっ

てきたが、それでもなお、一部の人々が生活の特定の場面で利用できるに過ぎない。

モバイル/ユビキタス情報技術を用いて、「今ここで」使える、生きた情報にいつでもどこでも誰にでもアクセスできる環境を創ることにより、社会全体を活性化することができる。黙っていてもスケジュールに合わせて切符を買ってくれたり、ショッピングモールの中を道案内してくれたり、隣席の人が小学校時代の同級生であることを教えてくれたりするサービスを可能にすることによって、われわれの生活を単に便利にするだけでなく、実世界での絆を結び、深めるような、物質的な面に限らない豊かさの支援を実現したい。

CARC活動当時、一般的に使われていたキーワードは「いつでも・どこでも・誰にでも」であった。これはいかなる状況でも情報通信機器にアクセスでき、そのサービスを楽しむことができることを意味する。それに留まらず、サービスの状況依存性を強調して「今ここで」としたのは先見の明である。現在は両方のキーワードが使われるようになりつつある。すなわち、いついかなる状況においても、その状況に適したサービスを提供することを重要視している。従来の情報技術はコンピュータを介してアクセスできるデジタル世界にはほぼ限定されていたが、われわれ人間の生活は実世界で営まれている。したがって、情報技術の利用可能な場面をすべての人々の生活のあらゆる側面に拡張するということは、デジタルな情報を実世界に密接にグラウンディングすることを意味する。実世界とは人間にとって意味のある世界であり、モノや個人や社会が織り成すリアリティの総体である。グラウンディング(grounding; 接地)とは、デジタルな世界とこの実世界との間で意味や状況を共有するということである。物理的位置の計測やコンテンツの意味構造化等の情報通信インフラに基づいてグラウンディングを実現し、それによって、実世界にある人やモノの間の絆を支援しようというのがサイバーアシストの構想といえる(図1)^[4]。

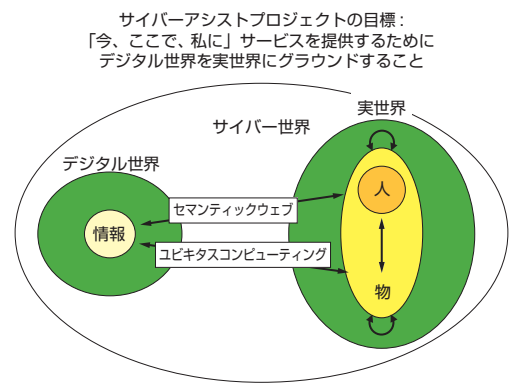


図1 サイバーアシストの研究目標

デジタルな世界と実世界とを緊密に結び合わせることで、情報技術を効果的に活用する上で本質的に重要である。米国におけるネットバブルの崩壊が物語っているように、デジタルな世界に閉じこもっている限り新しい価値を生み出せない。インターネットに閉じた世界は、金融のみに閉じた(工場生産の存在しない)経済と同じようなものである。情報に価値があるのは、伝達経路の両端に人がいてモノがあるからにはほかならない。情報技術を用いた健全なビジネスモデルを数多く生み出し、また情報技術によってわれわれの生活におけるさまざまな価値を高めるには、デジタル世界を実世界と融合する情報技術が欠かせない。

2.2 具体的研究目標と手段へのブレークダウン

サイバーアシスト計画を実現するには人間の日常生活における(前述のような交通・医療・災害等を含む)極めて広い範囲の場面において、極めて広い範囲の支援を考える必要がある。これが一研究センターの手に負える仕事ではないことは明らかである。適切なサイズの部分問題を切り出す必要がある。研究組織としては上記のトップダウンの要請と、自らが持つ資源(研究者の専門分野、研究施設、研究資金)からのボトムアップな制約を考慮した結果、以下のような具体的目標を設定した(研究センターの設立提案書より)：

● 目標：個人情報支援(位置とIDを併用した総合的な情報収集・検索・提示技術)

1. 状況依存パーソナルエージェント
2. 状況依存情報検索・提示
3. タグを用いたコンテンツ構造化

4. マルチモーダルインターフェース

● 手段：状況依存通信ソフトウェア

1. 位置に基づく通信技術
2. セキュリティとプライバシーの段階的管理
3. 物理情報を利用した情報サービス

● 媒体：位置による通信を用いた携帯端末・インフラ

1. 携帯端末
2. センサー・タグ群

センター活動の初期段階において、研究者全員からなるミーティングを毎週行い、各自の専門・興味とセンターの目標を繋げる作業を行った。その結果、上記目標を具体化・詳細化し研究テーマに落とし込んだものが図2^{註2}である。状況依存性はあらゆるテーマにおいて考慮すべき事項なので、それより下が具体的研究テーマとして設定されることになる。3章でこれらのうちの重要なものについて記述する。

2.3 研究センターの運営と構成

前節で述べた目標を達成するために、CARCでは従来と異なる組織運営・構成を行った。現在でいえばサービス工学を実践するための組織づくりを行ったのである。

新しいサービス概念に基づくシステムを構築するためにはデバイスからアプリケーションまでを一貫して扱う研究開発の体制が必要である。そのためCARCの研究チームの構成は技術層別になってはいるが、それらの技術が互いに連携してユーザーの状況依存支援を目指せるように図3のような円環構造とした。ユーザーインターフェース(図2のインターフェースを担当)を頂点に、デバイス(図2の位置に基づく通信とそれを実現するデバイスを担当)、ソフトウェア(図

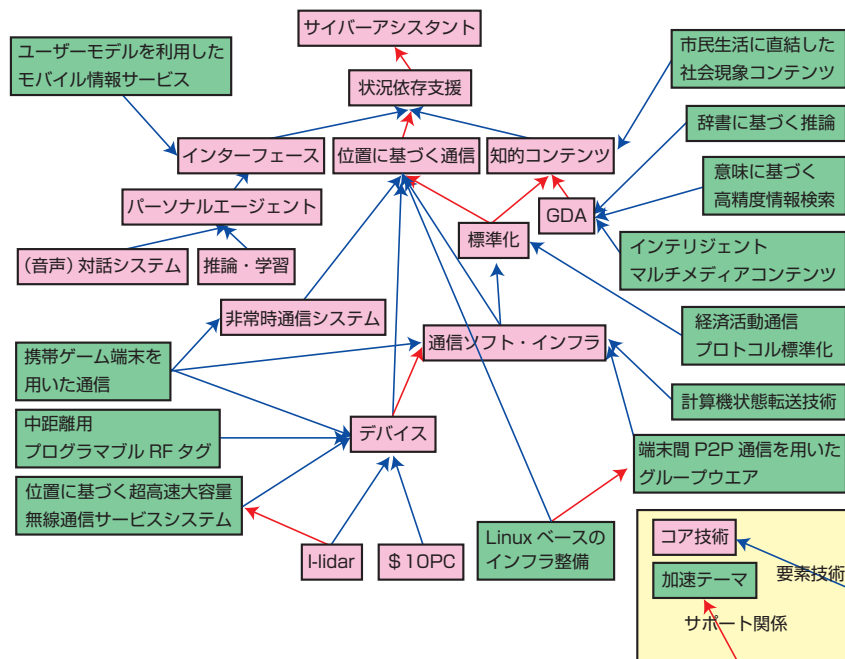


図2 サイバーアシストの研究テーマ相互関連図(初期)

2の通信ソフト・インフラを担当)、マルチエージェント(図2のパーソナルエージェント以下を担当)、知的コンテンツ(図2の知的コンテンツ、GDA、標準化を担当)の各チームが連携する。コンソーシアムのバザール方式(付録9.3)と同じで、アプリケーションを中心に基礎から応用までの技術がそろい、独自にアプリケーション開発ができることを目指したものである。単一の研究組織内にこのような異種技術分野がそろうのは産総研の、技術を社会に出すというミッションと、その中でも特に応用を担う研究センターならではのものと見えよう。

分野の異なる研究者間で全体としての出口イメージを共有するため、センター開始初期には、チーム別ではなく全員が集まってどのようなサービスを構築すべきかを議論する機会を毎週1回設けた。また毎年全体合宿を行い、各チームの進捗状況やアプリケーションイメージの共有に努めた。

また、出口(社会応用)を意識したことから、設立時より研究コーディネータを採用^{注3}した。彼の働きにより工業デザイナー^{注4}や弁理士事務所長を非常勤顧問とすることができた。その事務所の若い弁理士にはCARCのミーティングに出席していただき、特許化への対応をとった。知財の有効管理は企業との共同研究やベンチャー創出には不可欠のものである。また、サイバーアシストコンソーシアムも産総研初のコンソーシアムとしてその規則作りから行う必要があったが、これも研究コーディネータの働きである。

3 研究シナリオ

サイバーアシスト計画には現在で言うところの「ユビキタス・コンピューティング」と「サービス工学」との二つの性格がある。ユビキタス・コンピューティングはその名の通りコンピュータによる人間支援を「遍在」させることが目標であり、かつ、コンピュータの存在を人間に意識させないインターフェースを必要とする。そのため、研究要素や技術要素が多岐にわたり、狭い範囲にフォーカスすることが困難である。そのため以下で述べる項目は、一貫性を持ったものでも、サイバーアシスト計画の全体をカバーするものでもない。

またサービス工学としての実践重視の性格を持つため、

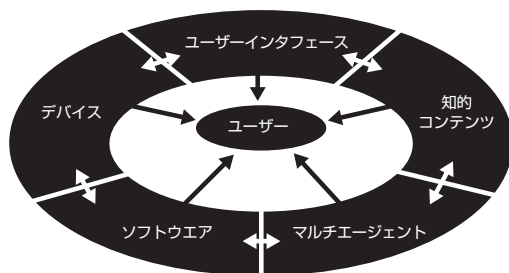


図3 CARCのチーム構成

ますます多岐にわたる些細な技術項目をクリアして行かねばならない。従来型の論文になりにくい研究である^{注5}。

3.1 位置に基づく通信

CARCの研究領域を一言で表せば「情報の実世界へのグラウンディング」である。グラウンディングのためにはさまざまな実世界情報を得、利用することが必要であるが、その中でも位置情報は他の情報に比べて格段に重要かつ有用なものだと考えている。

我々は研究の初期に「位置に基づく通信」という概念を提案した^{[5][6]}。これは従来の電話番号やインターネットのIPアドレスといった、世界中からユニークに一機器を同定できるIDをアドレスとする方式に代わり、位置をIDとすることによりプライバシー保護と状況依存(最近では「コンテキスト・アウェア」と呼ばれることも多い)の支援を両立させようとするものである：

現在の情報通信では、電話番号、IPアドレス、ハードウェアのMACアドレス等、個人やマシンを同定するIDに依存して通信が送られる。その通信を中継するために、これらのIDの情報を全世界に配っておく必要がある。このように個人のIDを公開するとプライバシーが保護されない。たとえば電子マネーで買物をする際にも身分が明かされる危険がある。一方、IDが必要であるため、近くの見知らぬ人と交信できず、日常生活で頻繁に必要なコミュニケーションの用を満たせない。

自由な社会生活と経済活動を保証するとともに、日常生活における必要性の高い通信を実現するには、個人やマシンのIDを宛名としない通信技術が必要である。さらに、匿名性の悪用を防ぐためのセキュリティ技術も同時に並行して開発し、プライバシーとセキュリティを両立させなければならない。(初期のCARCホームページより)

位置に基づく通信は状況依存ユーザーインターフェースの観点からも重要である。たとえば駅の自動改札は、位置による同定を通じたサービスを行っている。物理的に1人ずつしか通れない空間を作り出すことにより、料金支払カードと乗客の1対1対応をとっている。仮にSuica^{注6}が5m先から読み取れたとしたら、ユーザーの位置が不確定になり誰に課金してよいのか判定できないためサービスが破綻する。位置が使えないとすると別の認証が必要となり、インターフェースが複雑になる。つまり、位置をインターフェースの一部とすることにより、煩雑なやり取りが避けられるわけである。これと同等の考え方が後述のCoBITシステム(4.1節)で採用されている。

3.2 マイボタン

CARCでは、究極の状況依存ユーザーインターフェースの概念として「マイボタン」を提唱した^[7]。これはボタンが1

個しか無い個人用端末(図4)で、長年生活を共にした老夫婦の「阿吽の呼吸」のようにボタンの一押し(1ビットの通信)で「今、ここで、私が」欲しいサービスを得られるようにしようという努力目標である。つまり、ユーザーが多くを指示しなくても、その状況を共有・理解して適切な動作を行うのである。簡単かつ自然なインターフェースの究極モデルとして提案した。実際にはボタン1個ですべてをこなすのは無理だとは考えているが、ボタンの数が少ない方が良いのは事実である。また、ボタンを排除する完全自動化も好ましくないという意味を含んでいる。最終的な決断はユーザーの側に残すべきである。

構成的研究においてはこのような、ニーズ指向でもシーズ指向でもない、ある意味理想化されたゴールを持つことは重要であると考えている。これを基に研究と応用のシナリオを組み立てることができる。サービス工学では新しい理想化されたサービスモデルを中心に据えることもできよう。

3.3 インテリジェントコンテンツ

近年のサービス提供において大きな比重を持つのがコンテンツサービスである。映画、ニュース、情報検索、音楽等のコンテンツと、それを提供する仕組みは車の両輪の関係にある。CARCではCoBIT(4.1節)等で提供されるコンテンツを操作する仕組みにも注目した。

CARCでは電子データの構造化のための標準的な方法を策定し普及させるとともに、それに基づいて構造化されたさまざまな情報コンテンツ(インテリジェントコンテンツ)を作成・配布するための技術を開発した^[8]。具体的には文章や映像にタグ付け^[9]を行うことにより、構造を明示し、コンピュータによる意味処理を可能にした。それによってコンテンツのさまざまな操作、特に意味に基づく検索や再構成が可能となる。

さらに、自然言語処理やマルチエージェント等の技術を用いてインテリジェントコンテンツのさまざまな応用技術を開

発した。これによって、コンテンツの意味に関する情報を広く共有し再利用できる社会の構築を目指した。情報コンテンツはしばしば実世界に関するデータであるから、インテリジェントコンテンツを物理世界にグラウンディングすることにより、世界を意味的に構造化できる。

位置に基づく通信と世界の意味的構造化とは情報をグラウンディングするための車の両輪である。これらにより情報の意味をコンピュータシステムと人間が共有でき、従来になかったシステムの実現の可能性をもって社会全体に長足の発展を促す。それは、これらの技術の応用分野が、通信技術や知能情報処理技術の全般に関連する極めて幅広い範囲におよぶからである。特に、こうした技術と携帯電話等の技術とは互いに補完する関係にあり、これらが自然に融合することによって、時と場所を選ばないさまざまな知的情報サービスが実現される。CARCでは、上記のような基礎技術を開発し、関連する規格の標準化を推進するとともに、研究要素の大きい代表的な応用技術のいくつかについてプロトタイプを示し、多くの応用に共通のプラットフォームを広く提供することにより、民間企業が他のさまざまな応用技術を開発するための基盤を整備することを目指した。

現在、これらの研究は映画の場面の検索、オンライン総合辞書^[10]の共同執筆システム等に結実している。CARCとしては後述のイベント空間支援システム(5.2節)や愛・地球博(5.4節)等における情報提供システムでの利用も想定していた。大量のタグ付きデータから状況に応じて必要とされる情報をリアルタイムに再構築し端末へ発信するのである。しかしながら、コンテンツ作成にかかるコストの膨大さと、適切な内容を切り出す際に必要となるセンシングの設備の欠如等から、部分的にしか実現できなかった。

4 プロジェクト群(研究開発内容)

研究開発内容について目標テーマ毎に記述する。内容は研究開発の進展により徐々に変化したが、ここでの記述は最終成果時点の観点によるものである。なお、活動内容は多岐にわたり、すべてをここに記すことはできない。以下は代表的な成果である。

4.1 マイボタンを目指した端末の開発

プロジェクトの初期には「位置に基づく通信」(3.1節)の例としてレーザー・レーダ*i-lidar*による位置測定と通信を組み合わせたものを考えていた^[11]。*i-lidar*は時間変調をかけたレーザー光を反射波と干渉させることにより対象物との距離を測定する装置である。レーザーの発射方向の情報と合わせることで対象物の3次元位置が測定できる。しかしこの装置は1台あたり数千万円のコストがかかり、量産時にも百万円のオーダーを下回ることは不可能で

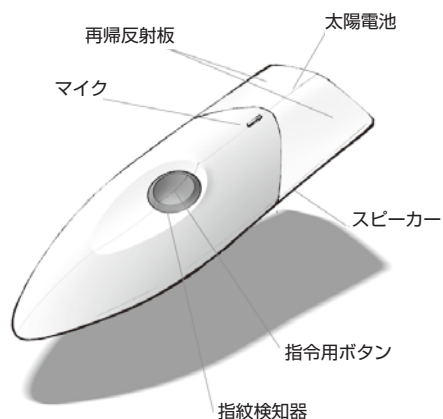


図4 マイボタンのイメージ(例)

ある。実社会で多数用いるには高価すぎるという点からこのシステムの利用は基礎研究のみにとどめた。

この *i-lidar* から派生^{注7}した概念が赤外線通信を用いた無電源端末 CoBIT^[12]（図5）である。これは赤外線により位置指定と通信を同時に行う（さらには端末へのエネルギー供給も同時にこの赤外線が行う）という意味で位置に基づく通信の例であるとともに、「マイボタン」概念の要求する簡単かつ自然なインターフェースを満たす CARC 初の成果となった。環境側に必要な装置も LED のみに簡略化することによりさまざまな応用が可能となり、CARC が設立した産総研ベンチャー「サイバーアシスト・ワン」を通じて普及させる構想もでき、実際に5章で述べるような多くの応用がなされた。

CoBIT は光源の前方に位置したときのみ情報を受信するという意味で、「位置に基づく通信」を行っている。Suica は 10 cm の超近接通信を行う位置に基づく通信システムであるが、CoBIT は数メートルオーダーの通信距離を持っている。Suica は電磁波であるため無指向である。このため高い位置精度を要求する。一方 CoBIT は光通信の利点として方向性を有している。即ち光源に向いた場合のみ受信可能である。この方向性を活かすことによって、同じ位置で向きによる複数の情報の分離が可能となる。たとえば街角の信号機から盲人用の案内情報を流す場合、位置だけでなく方向性が重要である。ある方向の信号が青でも、それから 90 度ずれた方向の信号は赤になっており、どちらに行きたいかによって情報が変わることが重要である。

4.2 ミドルウェアの設計と開発

ユビキタス・コンピューティングの世界では、さまざまなデバイスがアドホックに連結されるため、デバイスの固定コンフィギュレーションを前提とした従来型 OS の概念は通用しない。ハードウェアとソフトウェアの層間にミドルウェアと呼ばれる層を構築し、ここで異種デバイスの相互接続や、デバイスを仮想化してアプリケーションソフトウェアに見せる等の変換を行う必要がある。



図5 CoBIT

ソフトウェア研究チームでは UBKit^[13] と呼ぶミドルウェア構築のためのツール群を提案・実装し、情報家電システム等の実装に用いた。

CARC では、デバイス研究チームも CoBIT のための独自のミドルウェアを構築していたため、両者の共通化に腐心した。しかしながら、ベースが違いすぎたのと、3 年余りという短い研究開発期間で各々のアプリケーションを優先したため、CARC の全体会議では再三話題に上ったものの、この共通化は最後まで実現しなかった。時間が足りなかったことが主要因ではあるが、残念である。

4.3 マルチエージェントシミュレーションの応用

マルチエージェントチームは交通シミュレーション等^{[14][15]}の基礎研究の他、シミュレータ技術の応用として、日本発世界標準となった「ロボカップ」^[16]（サッカーならびにレスキュー）における標準シミュレータ構築等の中心的役割も果たした。ロボカップにおいてはサッカーもレスキューも共に実機（ロボット）部門とシミュレーション部門があるが我々はシミュレーションのみに参加している。時期的にはサッカーは CARC 開始以前から行われていた活動を続けたものであり^{注8}、レスキューは CARC 時代に開始されたものである。同時にレスキューシミュレーションや災害時にユーザー端末をアドホックに繋いだ情報伝達システム（無線）のシミュレーション等も行った。災害時の情報伝達システムは日常使っているものをそのまま使うのが望ましいので、CoBIT 等の無電源端末にまで広げられれば CARC としてのテーマが閉じるのだが、果たせずにいる。

5 豊富な実証実験や応用

CARC ではサービスの設計のみならず、実際にサービスを提供し、そこからフィードバックを得る活動を重視した。サービス工学の実践である。以下に代表例を示す。

5.1 After 5 Years

新丸の内ビルの竣工に合わせて、5 年後の情報環境を見据えた After 5 Years という名の展示会が開催された。会場では多くの展示が隣接して並べられていたため、当初音声無しで企画されていた。しかしながら、CoBIT を使うことにより、展示の前に来た人だけに音声情報を伝えることが可能になる（位置に基づく通信の実現例）ため、これが採用された（図6）。

この展示の他にも「ドラえもん」展等で使用した結果、音源となる LED の劣化の問題が明らかとなった。LED に供給する電源電圧を音声変調しているため、LED の設計レベルを超える電圧がかかると性能の劣化が激しいことがわかり、これ以降の回路設計を修正した。

この方式はその後さまざまな展示（日本科学未来館や

産総研)でも使われることとなった。その大集成が後述の愛・地球博での応用である。

5.2 イベント空間支援システム

人工知能学会の全国大会では図7のような会議用システム^[17]を構築して会議参加者に提供した。会議参加者の入場識別タグを兼ねた名札に特別設計の赤外線受光部、イヤホン、反射板、LEDライト(反射板の中央部に見える)からなるユニットを取り付けて端末とした。会場内の各所に設けられた情報ステーションには赤外線発光部、カメラ、ディスプレイからなるユニット(写真のものはPCをそのまま用いた試作版)を用いた。ステーションからの音声情報をイヤホンで聞くほか、LEDからIDを発信することによって、その記録をサーバーに残す機能、反射板の動きをカメラで捉えてマウスのように使って情報をディスプレイに表示する機能等を付けた。

なお、このシステムにはコンテンツとしてWeb上の論文情報等を用いた研究者関係自動抽出^[18]を元に構築した研究者マップによる情報の利用^[19]が含まれている。研究者の集会であるということを最大限に活用したサービスである。他にも会議のプログラム等と連動したサービスを提供し、CARCとしては数少ないインテリジェントコンテンツの利用例となっている。



図6 After 5 Yearsにおける使用風景(左上が光源)

このイベント空間支援サービスは人工知能学会の毎年の大会で継続的に提供した他、東京で開催されたユビキタス・コンピューティングの国際会議UbiComp 2005でも提供した。

5.3 情報家電

ソフトウェア研究チームで開発したミドルウェアUBKit^[20]を使い、複数の情報家電を有機的に結合したシステムの実証実験を横浜で行った。ユーザーは個々の機器を意識するのではなく、音声により要求を発するだけで、後は部屋全体のネットワークが知的にタスクを遂行するシステムである。たとえば、「NHKのニュースが見たい」と言えば、テレビの電源、チャンネル(地域によってNHKのチャンネルが異なる)の設定、部屋が明るすぎる場合にはカーテンを閉める等の一連の動作を行う。朝の一定時刻になるとカーテンを開き、エアコンのスイッチを入れる等の設定も可能である。

実証実験(図8)は地域のコミュニティセンターで行い、実証実験の数カ月前から適宜住民に集まっていただき、アンケート調査の他、数回にわたるミーティングも行った。これにより情報機器に弱い老人や弱視の方等を含むさまざまな方の貴重な生の声を集め、次の研究へとフィードバック^{注9}することができた。

5.4 愛・地球博

CARCが挑んだ最大の応用は愛・地球博であった。これは万博という世界規模のイベントでのサービス提供を半年にわたって続けるという、研究所としては未経験の挑戦であった。ここでは二つの企画に参加した。

グローバルハウス：日本政府直営の展示館である。荒俣宏氏の収集物等を中心に展示が行われ、その音声説明部分をCARCが受け持った。ここではCoBITのIDタグ付き発展型が投入されたが、商標の関係からCoBITの名は使わず新たにAimulet™ GHと命名した(GHはGlobal House)(図9)。Aimuletはamulet(お守り)に情報のIを重ねた造語であり、日本語の「愛」にも掛けている。

Aimulet GHは多国語対応とすることを旨とした。これ

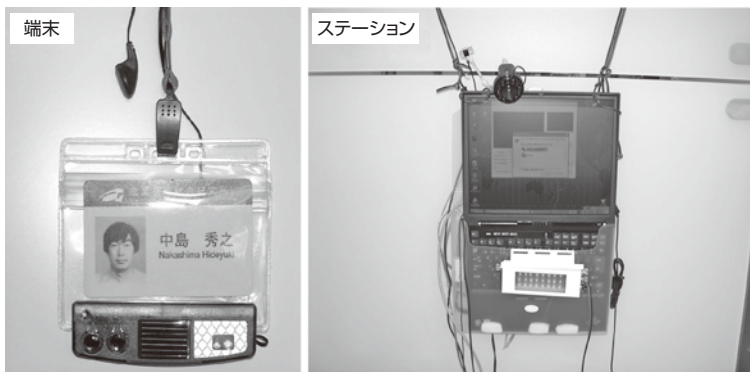


図7 会議用端末(左)とステーション(右)



図8 情報家電実証実験風景

は放送電波で使われている方式と同様に赤外線の周波数帯を変えることによる方式である。万博計画当初はアジア圏の言語を含む5ヶ国語を目標としたが、その後の実験で十分な帯域が確保できないことがわかり、実施は日英の2ヶ国語のみとなった。研究上の理論的な可能性と実用のギャップを痛感した。今後のサービス工学研究における課題である。

音声による情報提供の他、内臓のタグを天井のセンサーで検出することにより、訪問者の動線データを獲得した。これは以後のイベント会場設計における重要なデータとなる。

Show & Walk: これはパフォーマンスアーティストのローリー・アンダーソンが企画したイベントで、日本庭園内の各所にオブジェや音源を隠しておき、その場に行った人だけが体験できるという概念のものである(図10)。位置に基づく通信の理念に近いものであり、CARCにとっても新しい応用分野を示唆するものであった。我々は音の部分だけを担当することとし、企画時にアメリカの彼女の事務所に研究者が出向いて先方スタッフと共にさまざまな可能性を検討した。当初はステレオ方式により空間中に音像を定位させることを狙ったのであるが、これは挫折し、結局は他のCoBITやAimulet GHと同等の方式とならざるを得なかった。

こちらの端末(図11)(Laulie Andersonの頭文字をとってAimulet™ LAと命名した)は安価で入場券の代わりに



図9 Aimulet™ GH



配布できることを目指した。博物館等で貸し出した端末を漏れなく回収するのに苦労していること、特に出入り口の多い日本庭園のような屋外環境での回収の困難さを考えればこの安価な端末は強力な武器になると考えた。同時に愛地球博のテーマであるエコロジーをデザインに採り入れ、省資源で安価な竹の皮でケーシングを作り、回収せず来場者がお土産として持ち帰れるようにした。

図11はAimulet LAを受光部側(屋外での太陽光干渉を避けるため下に向けて使うよう設計)から見たものであるが、球形の太陽電池を使用している。これは指向性を鈍感にすると共に受光面積を増すのに役立っている。なお、Aimulet LAは竹と太陽電池の使用が評価され、2006年のグッドデザイン経済産業大臣賞エコロジーデザイン賞^{注10}を受賞することができた。

なお、Aimulet GHならびにLAは太陽電池を電源としていることにより、会期中に電池交換が不要というメリットを持つ。数百から数千単位の端末の電池入れ替え(あるいは充電)作業は大きな負担で、これを必要としないメンテナンスフリー端末は長期間イベントでは大きな武器となろう。

6 サービス工学と環境知能

最後に最近の動向から振り返ったサイバーアシストの位置付けについて考察したい。CARCの活動は「Cyber-physical system」のドメインで「環境知能」を実現し、「サービス工学」を実践してきたものだと言えよう。

6.1 サービス工学

まずはここでいう「サービス工学」の意味を明確にしておく必要がある。「サービス工学」という用語は最初に東京大学人工物工学研究センターにおいて使用された⁽²¹⁾⁽²²⁾ p.134)。ここでは「サービス」は提供者が、対価を伴って受容者が望む変化を引き起こす行為と定義されている。

英和辞典で「service」という項目を引くと20以上のエントリーが並んでいる^{注11}。勤務、(神に)仕えること、兵役、点検、テニスのサーブ、種付け等が並ぶ。これはservice



図10 Show & WalkにおけるAimulet LAの利用場面(左はLaulie 本人)

という概念に1対1で対応する日本語が存在しないことを意味する。

しかしながら、これらに共通する本質的な部分は「提供すること」である。何を何に提供するかによって意味が異なってくるのである。本稿の文脈で言えば情報システムを実際に使ってもらうことがサービスである。この部分(使用)を対象とした工学がサービス工学である。工学とは一般的な意味ではなんらかのシステムを構築するための学問体系である。自動車を構築するのが自動車工学、情報システムを構築するのが情報工学である。これら縦割りの工学分野に対し、それらを「使用」というフェーズで横断的に切ったものがサービス工学である。使用のフェーズを客観的に分析する(科学する)のではなく、そのフェーズを実際に構成し(つまり、サービスの提供を実施し)、その知見をシステムに戻すことが中心となる。

なお、IBMはservice science, management and engineering (SSME) という研究分野を打ち出している。日本でこれは「サービス科学」と呼ばれることもある。しかし、実用に供するシステムをデザインしたり構築したりする学問体系は科学ではなく工学である^[23]。その意味でサービスは科学の対象というよりは工学の対象と考えるべきであるから、この学問分野を「サービス工学」と呼びたい。英語では「工学」にぴったり対応する単語がないためこのように長くなってしまふのであろう。

サービス提供を中心に据えた情報工学の実践という意味で、CARCの活動はまさにサービス工学の一分野の実践として位置付けることができる。製品化される前の研究成果を実際の使用に供するという行為は、産総研の研究センターという組織にして初めて可能になったように思う。この部分は従来の研究開発の枠組みを超えており、公的研究資金の調達しにくい部分である。そのため「死の谷」あるいは「悪夢の時代」^[24]とも呼ばれ、研究者も企業も手をだせなかった領域である。産総研では

1. 独立行政法人化により研究資金を用いたさまざまな人



図11 Aimulet™ LA

(研究者以外)の雇用が可能になったこと

2. ベンチャー支援資金の供給が得られたこと^[12]
3. 愛・地球博の場合には産総研に運営資金が投入されたこと
4. 研究センターという、基礎研究指向ではない組織の存在等によりサービス提供が可能であった。

サービス工学の実践は、基礎研究を中心に行う研究組織とサービスの実現を目指す研究組織という二つの性格の異なる研究組織に分離して考えるのが重要だと考える。後者は従来の基礎研究の評価基準にはのらないためである。

6.2 Ambient Intelligence

実空間に配置したセンサーやアクチュエータを通じて人間の活動を支援する仕組みを研究する分野は ubiquitous computing, pervasive computing 等さまざまな呼び方をされている分野であるが、ヨーロッパでは ambient intelligence^[13] (環境知能) と呼ばれることが多い。

サイバーアシストは人工知能の応用分野と見ることもでき、実際、サイバーアシスト研究センターの正副両センター長を初めとするセンターの研究員の大半は人工知能分野の出身者であった。米国では個人の熾烈な成果競争のため、論文数をかせぐ必要から社会応用を目指す研究開発は困難らしく、ambient intelligence の研究も会議室等、大学や研究所の環境内に応用範囲が限定されているものが多く CARC のような社会に出た活動は少ない。そのためか、人工知能の社会応用をテーマとした 2007 年人工知能国際会議では招待講演^[25] を依頼されることとなった。

6.3 Cyber Physical System

最近 NSF が中心となって CPS (Cyber Physical System)^[26] という研究分野が立ち上がっている。物理システムが情報システムに影響を与え、情報システムが物理システムを制御する、両者間のフィードバックループを扱うという意味ではサイバネティクスやサイバーアシストの考え方と同じである。

7 評価

最後に、サイバーアシスト計画全体の自己評価を記しておきたい。

7.1 プロジェクトとして

サイバーアシスト計画は参考資料に示すように、当初通産省工業技術院産業科学技術研究開発制度による先導研究「知的社会基盤工学技術」の一翼を担うものとして計画されたものである。先導研究はその名のとおり、より本格的な国家プロジェクト(たとえば第五世代プロジェクトのようなもの)を目指しての先行的調査研究の仕組みであるが、残念ながら知的社会基盤プロジェクトが日の目を見ることは

なかった。一つには省庁横断型であり、通産省あるいは経済産業省が担うには大きすぎたということがある。この縮小版であるサイバーアシストも同様に国家プロジェクト志向のものであり、CARCの活動を中心にして全日本に広がることを期待していた。その点では失敗であったといえよう。以下でその理由を分析したい。

7.2 サービス工学として

産総研の役割の一つに、研究開発の「死の谷」を渡るというものがある。技術開発から製品化の間のギャップを埋める役割である。産総研には研究部門と研究センターがあるが、この製品化への橋渡しは研究センターが担うのが適切であると筆者らは考えている。

CARCはこの実践に努めた。情報技術において、この橋渡しには実サービスの提供を例示することが最も有効である。そのためCARCの活動はサービス工学の実践であると位置付けることができるし、同時に方法論の研究という意味ではサービス工学の研究対象ともなり得ると考えている。本論文はサービス工学という観点からCARCの活動を振り返ったものである。

CARCの提供したさまざまなサービス(学会におけるイベント空間支援サービス、愛・地球博における展示案内サービス等)は、それらが社会で実用化されたときに成功といえる。しかしながら、自分たちの手を離れて実用化されたサービスは残念ながら存在しない。この理由の一つは、3年少々というセンターの存在期間の短さにあると考えている。新しい技術が社会に出るには通常少なくとも10年の期間を要する。それに比べて3年は短すぎた。CARCがそのまま存続し、現在のサービス工学研究センターへと繋がっていたら、実用システムをいくつか世に送り出せたのではないかと思っている。

7.3 名前のこと

プロジェクト、論文、研究テーマ、造ったシステム等の名前は非常に大事である。名前が良くて広がったテーマ(たとえば「カオス」)や、逆に名前が悪くて広がらなかったテーマなど枚挙に暇がない。その意味では「サイバーアシスト」という名前は失敗だったと思う。研究内容を知る同分野の研究者には多大な影響を与えることができたが、多くの企業を巻き込むことや国のプロジェクトとする等の社会的広がりには達することができなかった。総務省が使っている「ユビキタス」や経済産業省が使っている「サービス工学」のようにはなれなかった。

第一の失敗は「サイバー」の意味。我々はWienerのCyberneticsの意味で使ったのであるが、映画Matrix等の「サイバー世界」が、ジャックインした先のデジタル構成された仮想世界の意味に用いられており、こちらが市民権

を得てしまった。「サイバー・テロ」ではインターネットと同義に用いられている。そのため、我々の研究がユビキタス・コンピューティングとは無関係なネットワーク上のシステムの研究に思われてしまった節がある。我々は

サイバー=デジタル+リアル

であるという主張を繰り返した^[27]が、それを繰り返さなければならなかったという時点で負けであろう。最近米国ではCyber-physical systemという分野(6.3節)が立ち上がりつつあるが、我々が目指したものは正にこれである。「実世界」を意味する単語を入れておくべきだったと反省している。

第二の失敗は「ユビキタス」という用語を用いなかった点にある。センター設立時には「ユビキタス」という用語は存在していたものの市民権は得ていなかった。当時の首相が意味不明と言ったという話もあり、現在のように市民権を得るという予測が立たなかった。ただし、この「ユビキタス」という用語は総務省が使い始めたために、Mark Weiserの本来の意味ではなく、通信に偏った使われ方が主流になってしまった気がする。すなわち「いつでも・どこでも・誰でも」インターネットに繋がるという限定された使い方である。本当はその上でのサービスが大事なのだ。また、「ユビキタス社会」のように意味不明の使い方(インフラだけに言及しているのか?)も現れている。

ただし「アシスト」という人間支援の概念を名称に含めたのは成功だった。技術あるいは分野名ではなく、目的を含んだ名称の例は少ないが重要であると考えられる。では、今ならどういった名称にしたであろうか?候補としては「ユビキタス・アシスト」、「サイバー・アシスト・リアル」あるいは「環境知能」あたりであろうか?

7.4 デザインのこと

CARCでは外部スタッフ(研究アドバイザー)としてデザイナーの山中氏を起用する等、設立当初よりデザインを重視してきた。これは技術を社会に出す上でデザインが重要と考えたからである。デザインには形のデザイン(意匠)と機能のデザインの二つがあり、後者は研究者にもある程度可能であるが、前者はやはりプロにはかなわない。

山中氏は元は自動車デザイナーであったが、本人の弁によれば、自動車は機能と形の間の自由度が大きすぎて面白くないということで独立された。機能が形を決める例としては氏のSuica読み取り機のデザイン等が有名である。

山中氏には隔週の全体ミーティングの他、センターの合宿討論にも参加していただき、我々の議論している機能を形にするアイデアを出していただいた。機能を活かす形作りができたと考えている。Aimulet LAがグッドデザイン賞を受賞したことは成功例の一つに数えることができるが、し

かしながらこれに代表される赤外線通信システムがいまだに実用的に使われた例が無いのは残念である。

7.5 達成できなかった課題

プロジェクトの初期に課題として掲げながら達成できなかったものに「デジタル情報版の割符方式」がある。割符というのは物理的な1枚の板や紙を2分割し、それぞれを別個に保存するもので、両者が合わないと鍵とならない。個人情報保護のために、これのデジタル版を開発することを目指した：

【例】割り符方式による情報格納

サーバーに個人情報を集積するのは、悪用や漏洩などプライバシーの問題がある。ユーザー端末とサーバーに情報をうまく分離し、両者が揃わないと意味を持たないような表現、暗号技術の開発が必要である。

これは非常に困難な技術であることは当初から認識していた。暗号化した情報では、複合化した瞬間に通常のデジタル情報となり、コピーが可能である。たとえば病院に個人カルテを暗号化して持ち込んでも医者が端末で見た瞬間にコピー可能な情報になってしまう。患者がいるときにしか見えない方式が欲しいと考えているが、これはデジタル世界だけでは実現不可能という見通しもあった。実世界の情報をうまく組み合わせる(例えば「位置に基づく通信」と組み合わせる)ことによる実現が唯一の可能性と考え、その方式を模索したが、今のところ失敗に終わっている。

7.6 アドバイザリボードから

最後にサイバーアシスト研究センターアドバイザリボードの最終レポート(2004年)のエグゼクティブサマリー(元は英語)の日本語訳を掲載しておきたい。これは我々が考えるCARCの評価とも一致している。

サイバーアシスト研究センター(CARC)は以下の理由でユニークな組織であると考えます：

- 世界的に重要な分野で有力な新しいビジョンを追求している
- 研究成果を実世界の環境におけるプロトタイプとして精力的に実装している
- 国際的な位置づけの研究室としての勢いを得つつある

CARCの分野は「環境知能」である。これは、情報技術をデバイス、建築物、衣服あるいは他の人工物にまんべんなく埋め込み、それらの能力と有用性を飛躍的に拡大することを強調するパーベイシブコンピューティングのアプローチである。この分野においてCARCは生活のあらゆる局面で人間を支援する情報技術に焦点を当てている。CARCのビジョンの独自性は、人間と物理的文脈を最大限に利用することによって、比較的単純な情報インタラクションで最高の援助が得られるとする点にある。

CARCの、研究成果の初期型プロトタイプを実際に適用するという方式は一般社会からの即時フィードバックを可能にし、同時に社会に対し新しい技術の利便性を印象づける効果を持っている。それに呼応するかたちで外部資金は年々著しく増加しており、CARCのプロトタイプの成功に合うものとなっている。

CARCのビジョンと研究手法は海外の研究コミュニティにおいて名声を高めてきた。CARCは日本における情報技術革新の先端的研究室の一つと見なされている。CARCは環境知能、セマンティックウェブ、マルチエージェント技術という世界的な情報技術の三つの主要な流れを、世界に先駆けて統合するという意味で流れに先行している。この競争的優位性を活かすために、CARCは研究センターとしてこの統合ビジョンを精力的に追求し続ける必要がある。

8 謝辞

ここに述べた研究はCARCの研究員の手によるものであるが、謝辞にその名を列記することはしない。引用文献から推測いただきたい。

また、CARCではさまざまな非研究員の方に客員として参加していただいた。工業デザイナーの山中俊治氏のデザインなしにはCoBITやAimuletの成功はなかった。また西澤特許事務所の小澁高弘氏には毎週のミーティングの段階からお付き合いいただき、特許出願や審査請求後の対応を一手に引き受けていただいた。(株)サイバー創研は利益度外視でコンソーシアムの運営を引き受けていただいた。他にも研究コーディネイト等で多くの方の協力の上にサイバーアシストプロジェクトの成立があったことを記しておきたい。

参考資料

研究センターの歴史と運営

1) CARC設立までの経緯

通産省工業技術院産業科学技術研究開発制度による先導研究「知的社会基盤工学技術」(安西祐一郎委員長)^[28]ではITによる新しい社会インフラ設計の提案を行った。ここで提案されていた知的社会基盤工学は、当時の通産省の領域を超え、郵政省や建設省等にまたがる省際性や、その規模の大きさから残念ながら国家プロジェクトとしては成立しなかったが、サイバーアシスト研究は上記構想のうちの主としてソフトウェア部分を切り出したものである。

「サイバーアシスト」の名称は上記先導研究の後継として組織された、安西祐一郎氏を委員長とする通産省のユーザビリティ委員会(1999)^[29]にて創造されたものである。当時「ユビキタスコンピューティング」という名称はまだ市民権を得ていないという理由で使用されなかった。

通産省工業技術院が独立行政法人産業技術総合研究所とし

て再編成された際にサイバーアシスト研究センターが設立され、サイバーアシスト研究の中心となった。以下は設立時に記述された CARC の目標である。

誰でもどこでも安心して高度な情報支援が受けられる社会を実現するため、情報洪水を解消し、情報弱者を支援し、またプライバシーを保証する、現実世界の状況に基づいた情報サービス（状況依存型知的情報サービス）の技術を開発し、その普及を図る。そのための基盤として下記のような技術を研究開発する。

- 状況依存通信ソフトウェア技術と位置に基づく通信を用いた携帯端末・インフラ技術
- コンテンツの意味構造化とその利用技術
- 有用な情報をユーザーの状況に応じて提供する技術

以下はCARCにまつわる代表的イベントのリストである。

- 1998/3 知的社会基盤工学技術調査研究報告書
- 1999/3 ユーザビリティ研究会報告書
- 2001/2 第1回サイバーアシスト国際シンポジウム開催
- 2001/4 産総研サイバーアシスト研究センター（CARC）設立（2004/7まで）
- 2001/4 情報処理学会知的都市基盤研究グループ設立（2003/3まで）
- 2001/9 サイバーアシストコンソーシアム設立
- 2002/10 第2回サイバーアシスト国際シンポジウム開催
- 2003/4 情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会設立
- 2003/4 産総研ベンチャー：(有) サイバーアシスト・ワン設立
- 2004/7 CARCが産総研の他の研究部門と合体し情報技術研究部門設立
- 2004/11 第3回サイバーアシスト国際シンポジウム開催
- 2005/10 第4回サイバーアシスト（国内）シンポジウム
- 2007/3 サイバーアシストコンソーシアム終結

2) 世界のトップクラスを集めたアドバイザリボード

CARC では独自のアドバイザリボードを組織し、関連分野の世界的権威を集めた。メンバーは以下のとおり（敬称略。肩書は当時）：甘利俊一（理化学研究所ディレクター）、安西祐一郎（慶應義塾大学塾長）、Rodney Brooks（マサチューセッツ工科大学教授）、William Mark（SRI インターナショナル AI 担当副社長）、二木厚吉（北陸先端科学技術大学院大学教授）、大星公二（NTT ドコモ相談役）、Stanley Peters（スタンフォード大学教授）、竹内郁雄（電気通信大学教授）、田中芳夫（日本 IBM 理事）、辻井潤一（東京大学教授）、Wolfgang Wahlster（ドイツ人工知能研究センター所長）、Steven Willmott（カタルーニャ工科大学客員研究員）、米澤明憲（東京大学教授）。

3) 産総研初のコンソーシアム結成

CARC 立ち上げ直前からサイバーアシストシンポジウムを国内と国際を隔年で開催し、それを通じてサイバーアシストコンソーシアムへの参加を勧誘した。センターの立ち上げ後約半年で産総研コンソーシアムの規約をまとめるとともに産総研初のコン

ソーシアムを組織した¹⁴。

通常のコンソーシアムは同業種による連合を基本とするが、本コンソーシアムではバザール方式と呼ぶ異業種連合を目指した。たとえばデバイス製造業者とサービス提供者者が組むことにより技術が世に出ることを願ったからである。

4) 産総研初のゼロからのベンチャー立ち上げ

産総研ではベンチャー起業を推奨していたが、我々としては CARC 設立時にはベンチャー立ち上げの構想は持っていなかった。しかしながら、研究開発の出口として社会応用までを射程に入れた¹⁵ ことで、すぐに装置の製造や設置を担う企業が必要となった。当然のことながら、そのようなことを一貫して扱う企業は存在しておらず自分たちでベンチャーを立ち上げるのが最適と考えるに至った。株式会社として最低限必要な一千万円の資金を出し合っただけで設立となった。メンバーの半数が CARC 研究員である。

しかしながら、我々の想定するベンチャーの形態と産総研のそれとは必ずしも一致していなかった。特に障害となったのは利益相反の問題であった。CARC のメンバーがベンチャーの出資者であり、その役員を兼ねていたため、利益相反の可能性があるというだけでベンチャーの入札参加が拒否されたため、初期の目的であったベンチャーを通じての応用の実施は困難を極めた。

また、ベンチャーの運営についても齟齬があった。我々は研究者として永久にベンチャーにかかわる予定はなく、ある程度軌道に乗った時点で売却して運営を移譲することを想定していた。しかしながら、知的所有権の独占使用権が5年間ベンチャーに貸与された後に産総研に戻されるという方針であったため、売却もかなわなかった。2009 年度現在、我々のボランティア的活動で支えているが、今後の展開の目は立っていない。

5) 学会活動

サイバーアシスト計画には学会での研究グループの育成も含まれていた。情報処理学会では 2001 年より知的都市基盤研究グループを組織し、IT 社会応用を中心とした研究活動を行った。この研究グループは情報家電研究グループと合体し、2003 年度より情報処理学会ユビキタス・コンピューティング・システム研究会となり、現在に至っている。

関連分野の研究者とともにユビキタス情報研究会という任意団体にもセンター長の中島（筆者）が積極的に参加した。これは学会に属する研究会ではなく、むしろこの研究会の参加者が各学会で研究会運営に携わりながら、それらを統括する組織として機能していた。この研究会の主たる成果として Small Stories 2008¹⁶ というビデオ創りが挙げられる。Microsoft、Hewlett Packard、NTT DoCoMo、Nokia 等がさまざまな未来予測／研究プロモーションビデオを作成する中で、研究者が技術的可能性を担保した上で描く未来像として制作した。CARC で試作した CoBIT やマイボタンの概念を反映した情報ルーベ等が登場する。

注1)現状において「サービス工学」の定義は多様であるが、我々は後述のように、実践の学として捉えている。サービス産業のための工学という限定は行わない。

注2)図2においてGDAとはGlobal Document Annotation(インテリジェントコンテンツのためのタグ⁹⁾)

注3) 独法化以前の工業技術院として研究者ではない人材の初の正式採用を働きかけ、実現した。

注4) 日産のQ45やJRのSuica読み取り装置のデザインで有名な山中俊治氏を非常勤に迎えた。

注5) CARC活動時にSynthesiologyが存在したなら、ここに投稿できたであろうと考えている。その意味で、終わってからの投稿が本論文である。

注6) Suicaのサービス開始は2001年11月であるから、CARC設立より後になる。

注7) i-lidarで位置測定のために発射している赤外線をそのまま通信に使ってしまうというアイデアの実装がCoBITである。

注8) 研究者個人の活動は研究所の組織改編やプロジェクトの実施期間を超えて続いていることが多い。CARCにおいてはプロジェクト独自の研究テーマとこのような個人的活動の比率は1対1とするように指示・運営した。ただし、これらは必ずしも分離すべきものではなく、ロボカップの例のように、プロジェクトの一環として継続できるものも多い。

注9) 詳細を記すスペースはないが、一例だけ示しておく。視覚障害の人もテレビ聴取をすることがわかった。その場合、音声だけでは想像できない情報を友人に電話して聞くことがあるらしく、遠隔地とのテレビチャンネル同期システムが有用であることがわかり、実装した。

注10) 通常のグッドデザイン賞は約一千点の商品に授与されるが、そのうち経済産業大臣賞の冠がつく賞は合計21しかない。しかもエコロジーデザイン賞の受賞枠は通常二つである。大変な名誉と言える。

注11) 実は英英辞典でも事態は同じで、20以上の項目が列記されている。

注12) ベンチャー支援資金の用途は、産総研側での開発に限定されており、直接ベンチャーを支援する用途には使えなかった。そのため、我々の創ったベンチャー自身は成功しなかったが、このような支援資金を使ってサービス実施のための開発が可能であった点は大きい。

注13) The European Union report, Scenarios for Ambient Intelligence in 2010. (<ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/istagscenarios2010.pdf>)

注14) 産総研のコンソーシアム規則はCARCが中心になって起草したものである。

注15) 産総研理事長が本格研究という概念を規定する前である。

注16) Ubilaプロジェクト制作。 <http://www.akgt.u-tokyo.ac.jp/ubila/video/>

参考文献

- [1] 中島秀之, 石田亨, 西田豊明, 久野巧: サイバー・シティ計画, コンピュータソフトウェア, 16 (5), 84-90 (1999).
- [2] N. Wiener: *Cybernetics, or the control and communication in the animal and the machine*, Wiley, New York (1948). (池原止戈夫, 彌永昌吉, 室賀三郎, 戸田巖訳: サイバネティクス第2版-動物と機械における制御と通信, 岩波書店 (1962, 2004).
- [3] T. Ishida: Digital City Kyoto: Social information infrastructure for everyday life, *Communications of the ACM*, 45 (7), 76-81 (2002).
- [4] 中島秀之, 橋田浩一, 森彰, 伊藤日出男, 本村陽一, 車谷浩一, 山本吉伸, 和泉潔, 野田五十樹: 情報インフラに基づくグラウンディングとその応用-サイバーアシストプロジェクトの概要-. コンピュータソフトウェア, 18 (4), 48-56 (2001).
- [5] H. Nakashima and K. Hasida: Location-based communication infrastructure for situated human support, *Proc. SCI 2001(World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Florida, USA. (2001).*
- [6] 中島秀之, 伊藤日出男, 山本吉伸: 位置に基づく通信の提案, *情報処理学会研究報告 2001-MBL-1*, 25-30 (2001).
- [7] 中島秀之: マイボタンによる状況依存支援, *人工知能学会誌*, 16 (6), 792-796 (2001).
- [8] 橋田浩一: 人間中心の知的都市基盤-インテリジェントコンテンツ, *情報処理*, 43 (7), 780-784 (2002).
- [9] 橋田浩一: GDA, 意味的修飾に基づく多用途の知的コンテンツ, *人工知能学会誌*, 13 (4), 528-535 (1998).
- [10] 橋田浩一: オントロジーに基づく学術辞典の設計, 総合学術オントロジーフォーラム, 東京 (2005).
- [11] H. Itoh, S. Yamamoto, M. Iwata and Y. Yamamoto: Guest guiding system based on the indoor laser radar system using hv targets and a frequency shifted feedback laser, *International Topical Workshop on Contemporary Photonic Technologies 2000 (CPT2000)*, 117-118, Tokyo (2000).
- [12] T. Nishimura, H. Itoh, Y. Yamamoto and H. Nakashima: A compact battery-less information terminal (CoBIT) for location-based support systems, *Proc. International Symposium on Optical Science and Technology (SPIE)*, 4863B-12 (2002).
- [13] H. Nakashima, M. Hashimoto and A. Mori: UBKit for cyber assist, *Proc. 2nd International Conference on Active Media Technology*, 46-56, China (2003).
- [14] 太田正幸, 篠田孝祐, 野田五十樹, 車谷浩一, 中島秀之: 都市型フルデマンドバスの実用性, *情報処理学会高度交通システム研究会研究報告 2002-ITS-11-33* (2002)
- [15] T. Yamashita, K. Izumi, K. Kurumatani and H. Nakashima: Smooth traffic flow with a cooperative car navigation system, *Proc. Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 478-485 (2005).
- [16] H. Kitano, M. Asada, Y. Kuniyoshi, I. Noda, E. Osawa and H. Matsubara: RoboCup - A challenge problem for AI -. *AI Magazine*, 18 (1), 73-85 (1997).
- [17] 武田英明, 松尾豊, 濱崎雅弘, 沼晃介, 中村嘉志, 西村拓一: イベント空間におけるコミュニケーション支援, *電子情報通信学会誌*, 89 (3), 206-212 (2006).
- [18] 松尾豊, 友部博教, 橋田浩一, 中島秀之, 石塚満: Web上の情報から人間関係ネットワークの抽出, *人工知能学会論文誌*, 20 (1), 46-56 (2005).
- [19] 武田英明, 西村拓一, 松尾豊, 濱崎雅弘: 出会いの情報技術, イベント空間の高度化, *人工知能学会誌*, 23 (4), 461-467 (2008).
- [20] 森彰, 橋本政朋, 泉田大宗, 渡邊充隆: ユビキタスコンピューティング環境構築のためのオープンプラットフォーム UBKit(ミドルウェア), *情報処理学会研究報告, ユビキタスコンピューティングシステム 2003-UBI-2*, 201-206 (2003).
- [21] 下村芳樹, 原辰徳, 渡辺健太郎, 坂尾知彦, 新井民夫, 富山哲男: サービス工学の提案(第1報)サービス工学のためのサービスモデル化技法, *日本機械学会論文集C編*, 71 (702), 315-322 (2005).
- [22] 内藤耕(編), *サービス工学入門*, 東京大学出版会 (2009).
- [23] 中島秀之: 科学・工学・知能・複雑系-日本の科学をめざして, *科学* 17 (4/5), 620-622 (2001).
- [24] 吉川弘之: *本格研究*, 東京大学出版会 (2009).
- [25] H. Nakashima: Cyber-assisting real world with ambient intelligence and semantic computing, *International Joint Conf. on Artificial Intelligence, Hyderabad, India* (2007).
- [26] Edward Lee: Cyber physical systems: Design challenges. *Technical Report UCB/EECS-2008-8*, University of California, Berkeley (2008). <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8>

- [27] 産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター, デジタルヒューマン研究ラボ(編): デジタル・サイバー・リアル人間中心の情報技術-, 丸善 (2003).
- [28] 安西祐一郎 他: 知的社会基盤工学技術の調査研究報告書, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1998).
- [29] ユーザビリティ研究会報告書, 通商産業省 (1999).

執筆者略歴

中島 秀之 (なかしま ひでゆき)

1983年、東京大学大学院情報工学専門課程修了(工学博士)。人工知能を状況依存性の観点から研究。マルチエージェントならびに複雑系の情報処理とその応用に興味を持っている。公立はここで未来大学理事長・学長。認知科学会元会長、ソフトウェア科学会元理事、人工知能学会元理事、情報処理学会元副会長。マルチエージェントシステム国際財団元理事。主要編著書：Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments (Springer)、知能の謎(講談社ブルーバックス)、AI 辞典第2版(共立出版)、知的エージェントのための集合と論理(共立出版)、思考(岩波講座認知科学8)、記号の世界(岩波書店)、Prolog(産業図書)。本論文で記述したプロジェクトの立案ならびに初代センター長としてプロジェクトの遂行を受け持った。



橋田 浩一 (はしだ こういち)

1981年東京大学理学部情報科学科卒業。1986年同大学院理学系研究科博士課程修了。理学博士。1986年電子技術総合研究所入所。1988年から1992年まで(財)新世代コンピュータ技術開発機構に外向。2001年より産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター副研究センター長、2004年に同研究センター長。その後、情報技術研究部門研究部門長等を経て現在は社会知能技術研究ラボ長。専門は自然言語処理、人工知能、認知科学。最近は、セマンティックコンピューティング、制約に基づく社会的相互作用(サービス)の計算モデル等に興味を持つ。日本認知科学会会長、言語処理学会会長、情報処理学会「次世代情報処理ハンドブック」編纂委員長、ソフトウェア科学会理事。著書・編著書に、知のエンジニアリング: 複雑性の地平(ジャストシステム)、言語(岩波講座認知科学7)、言語の数理(岩波講座言語の科学8)、Topics in Constraint-Based Grammar of Japanese (Kluwer)等。本論文で記述したプロジェクトの立案ならびにインテリジェントコンテンツ研究を担当。また二代目センター長としてプロジェクトを継続、特に愛・地球博実施を担当した。



査読者との議論

議論1 全体

コメント(小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

本論文は、産総研に2001年に設置された「サイバーアシスト研究センター(CARC)」の活動を振り返り、発足当時の同研究センターが目指したものの意味と現在の状況を比較し、その活動を再構成して、現在でも(あるいは現在だからこそ)通じるその高い意義を確認することを目標とするもの、と理解しました。しかし、シンセシオロジーが第2種基礎研究をベースにおいた研究の学術論文誌であることに鑑みると、再構成を行うことだけでは論文としての価値は発揮できないと思います。そこで、シンセシオロジーの論文の眼目である(1)研究目標、(2)そこに至るシナリオ、(3)要素技術、(4)要素技術の構成方法、(5)結論、のそれぞれに対応して記述していただけませんか。

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)

この論文の主題は、サイバーアシスト研究センターという構成学的手段が、いかにして「サイバーアシスト構想」に構成学的に取り組んだかという方法と成果、考察を述べることだと理解しています。そこで、例えば、ストーリーの主題を「位置に基づく通信」に絞りこむ等、主張が明確に読者に分かるようにしていただきたいと思います。

回答(中島 秀之)

客観的なコメントをありがとうございました。CARCの設計に関して自分では当然だと思っていることが、実はそんなに自明のことではないということが良くわかりました。センターの構成等も売りの一つなのですが、伝わっていないようです。これ以外の部分も含めて全面的に加筆・修正しました。

サイバーアシストのような、人間支援という概念を全面に出したサービス工学あるいは純粋なサービス提供という行為はストーリーの絞り込みが困難だと考えています。つまり、特定の機器や特定の機能の提供ではなく、それを含む広範囲の些細なことの積み重ねが必要であり、だからこそ従来そのような研究開発が行われてこなかったのだと思います。その点を強調するよう加筆しました。

議論2 タイトルにある「サービス工学」の定義

質問(赤松 幹之)

サイバーアシストはサービス工学である、という視点がタイトルとして表現されており、その一方でサービス工学に対して独自の定義をされています。6.1節においてサービス工学についての記述がありますが、初稿においては著者らにとってのサービス工学の定義があまり明確に記述されていないようです。「提供する」という意味でのサービスの工学ということでしょうか。

回答(中島 秀之)

一般的に言って「実用に供するシステムをデザインしたり構築したりする学問体系」には、そのシステムを「実用に供する」部分が含まれます。ここが「サービス」だと考えています。そうすると「サービス工学」とは、サービス産業のための工学という(狭い)定義ではなく、工学のうちシステムを実用に供する部分、あるいはシステムを実用に供することを中心に再構成した工学分野ということになります。6.1節に定義を含めて加筆しました。

議論3 サブタイトル

コメント(赤松 幹之)

サブタイトルに「10年早すぎた」とありますが、なぜ10年早すぎたのか初稿には述べられていないように思います。もし、これが本論文の重要な観点であれば、早すぎてうまく行かなかった原因や考えられる対処法、また、現在ならうまくいくであろうと判断した論拠等記述が望まれます。

質問(小林 直人)

サブタイトルで「10年早すぎた? プロジェクト」とありますが、これはCARCが活動を始めた10年前には世の中がまだサイバーアシストの中心概念である「人間中心の状況依存型知的情報サービス」の重要性を理解するには早すぎ、それを認知させるには3年という時間が短すぎたという解釈でよいでしょうか。あるいはCARCの活動に関係なく、世の中は10年後の今やっとその重要性に気づき始めたと考えればよいでしょうか。

回答(中島 秀之)

例えば、今ならサービス工学をやりますと言えば済んだことが、色々説明が必要でした。世の中より10年進んでいたとの自負でもあります(当時の当該研究ユニットの外部評価委員がそのように言ってくれました)。CARCだけが先駆だとは言いませんが、時代がそうなる

前に始めてしまった苦労は多々ありました。また CARC のみで世の中に認知させられたとも思いませんが、3年ではなく10年続いていたら、もっとメッセージ性の高いプロジェクトになっていたのだと考えています。ただ、この部分で言いたかったのは「実用システム」を世に出すことに失敗したという点です。そのように改変しました。

議論4 サーバーアシストを構成する技術

コメント (赤松 幹之)

読者の立場からは、サーバーアシストを構成する技術が分かることを期待します。具体的には、「2.2 具体的研究目標と手段へのブレークダウン」について、シンセシオロジーの論文としては、「トップダウンの要請と、自らが持つ資源からのボトムアップな制約を考慮した」というそのプロセスの中身が具体的に書かれることを期待します。

回答 (中島 秀之)

トップダウンの要請と、自らが持つ資源からのボトムアップな制約を考慮したプロセスの中身が具体的にうまく分析できれば貴重な資料になると思います。しかし、このあたりは毎週のミーティングを通して長い間に絞り込んできたので、具体的に書ける形にはなっていません(分析できていません)。「センター活動の初期段階において、研究者全員からなるミーティングを毎週行い、各自の専門・興味とセンターの目標をつなげる作業を行った。その結果、上記目標を具体化・詳細化し研究テーマに落とし込んだものが図2である。」という記述を追加するに留めさせていただきたいと思います。

議論5 研究開発された技術

コメント (赤松 幹之)

サイバーアシストはデジタルな情報を実世界にグラウンディングする構想であると述べられ、それを実現するためのセンターの構成要素として、位置に基づく通信、マイボタン、知的コンテンツ、ユーザインタフェース、が書かれています。しかしこれらは要素技術に落ちているので、サイバーアシストを構成するためのサブゴールが分かりにくくなっています。可能であれば、2章の各内容と3章の内容の相互関係を図示する等して、要素技術からみた研究シナリオを読者にとって理解しやすいようにしていただきたいと思います。

回答 (中島 秀之)

確かに整理不足でした。2.2節に説明と研究テーマの関連図(図2)を追加しました。また、説明が総花的になっていたのを、いくつかのテーマを落としました。特に「新しい交通システムの提言」に関しては割愛しました。

ただ、カーナビを用いた最適経路誘導に関して説明だけはしておきたいです。現在使われている技術が問題で、これは装着率が増すに従って効率が悪くなるのがわかっています。混雑情報を時間遅れで反映するシステムのため、フィードバック系の発振が起こります。我々はマルチエージェントシミュレーションによる未来予測型(現在の技術で実現可能です)にしたため上記の問題を根本的に解決しました。しかし、これらの説明にあまりページを割けないことと、これが抜けてもCARCの全体説明には問題がなさそうなので削ぐことにします。なお、フルデマンドバスは函館全域で実施する計画を立てています(はこだて未来大学と産総研他の共同)。都市を対象としたサービスの実施です。

議論6 構成学におけるデモの役割

コメント (赤松 幹之)

これまでのシンセシオロジーの論文でも主張している論文がありましたが、実装やデモによって実際に動かしてみることで問題点や重要なポイントが明らかになって、次のステップでそれに取り組むといった研究のプロセスがあると想像されます。それぞれのデモで得られて、それに基づいて取り組んで、次のステップにつながったことがあったら、その具体的な内容を記載してください。

回答 (中島 秀之)

一つの問題は、愛・地球博実施中にサイバーアシスト研究センターが解散してしまったことにあり、その後の研究展開の追跡ができていません。分かっている範囲で記述し、注8)に記述を追加しました。

議論7 研究成果に対する評価

コメント (赤松 幹之)

未達成の成果として割り符方式による情報格納を挙げられていますが、5.2節の記述からは、原理的にデジタル技術では実現できないことをゴールとして設定してしまったようにも読取れます。もし、そうでしたら、研究を進めていくうちに、どういったことがわかってきて、その結果として原理的に不可能なことに気付いたのか、といったことが書けませんか？

回答 (中島 秀之)

「割り符」はデジタル+リアルで解決すべき問題であると初期より考えていました。デジタル技術のみでは解決不能であったとしても、それだけで不可能ということにはならないのですが、実際に解決の目的が立たなかった問題の一つです。ただ、今後の情報技術における面白いテーマだとは思っています。そこで、表現を補強しました。

議論8 Suicaとの関係

コメント (赤松 幹之)

2.2節の最後にSuicaの話があり、CoBITにその考え方が採用されたとあります。Suicaも位置に基づく情報、ユーザーの意思による、プライバシーが守れる、など、サイバーアシストの狙っている概念を実現する手段としてSuicaに近いものと推察します。こういったSuicaを用いたアシストと、サイバーアシストとして提唱されている技術とはどのような関係があるのか等の記述があると、読者にとって身近なものとの対比になるので、読者の理解が進むものと期待できます。

回答 (中島 秀之)

CoBITの項(4.1節)の最後にSuicaとの比較を追加しました。

議論9 産総研の研究部門と研究センター

コメント (小林 直人)

初稿6.1節に「サービス工学の実践は産総研のように、基礎研究を中心に行う研究部門とサービスの実現を目指す研究センターという二つの性格の異なる研究ユニットを分離して考えることが重要である。」とあり、同7.2節に「要素技術の開発は基礎研究として研究部門が担い、製品化への橋渡しは研究センターが担うという図式がある。」とありますが、このような図式は公式的にはないと思いますのでご確認ください。現在の産総研のウェブサイト(http://www.aist.go.jp/aist_j/field/index.html)には、「研究部門：産総研ミッションと中長期戦略の実現に向け、研究ユニット長のシナリオ設定と研究者の発意に基づく研究テーマ設定を基本とし、一定の継続性をもって研究を進める研究ユニット。研究センター：研究部門からの派生ないし社会からの要請に応じて、特定の課題を解決するための技術、知識を早期に産み出すことを主目的に、研究ユニット長の強いリーダーシップのもと、集中的かつ時限的に研究を進める研究ユニット。設置年限は3～7年間。」と書かれています。

回答 (中島 秀之)

私見になりますが、私は当時の産総研吉川理事長の本格研究の分類に関して、基本的には第1種基礎研究=科学、第2種基礎研究=工学だと理解しています。氏の従来の研究は第1種基礎研究のことであるという言明は、世間では基礎研究が科学と同義に語られていたことに合致します。(ウェブサイトの「本格研究」p4「本格研究とは」の中に、基礎研究と応用研究として対比されています)。ただし、通

常の「科学」と「工学」の使い方は人によって異なりますから、ちゃんと定義しておく必要があると思います。ここでの「科学」とは、現象を理解するための分析的手法、「工学」とは現象を作り出すための構成的手法を意味します。「製品化研究」に関しては正直なところ良くわかりませんが、第2種基礎研究を世に出すフェーズのことを言っているのだと思います。

このように考えたときには研究部門は第1種基礎研究を中心とし、研究センターは第2種基礎研究を中心とするのが良いと考えています。当然、両者はきれいには切れませんから、一人の研究者が両方

やることもあるし、同一研究ユニットに両者が混在するのも当然です。しかし、そのことと、理念としてのユニットの設計とは別だと考えます。また、産総研のウェブサイトにあるような、時間スケールによって分けるというのは二次的なことではないかと考えます。製品化研究は必然的に短期になるでしょう。

いずれにしても、CARCは上記の理解の下に運営してきました。研究センターとして第2種基礎研究を中心に運営できたことが強みであると考えています。

学問分野を超えた「システムデザイン・マネジメント学」 の大学院教育の構築

— 大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材の育成を目指して —

神武 直彦*、前野 隆司、西村 秀和、狼 嘉彰

環境共生や安全等の社会的価値に配慮した大規模・複雑システムの構築や運用をリードする人材の育成を行うためには、学問分野を超えた文理融合型の「システムデザイン・マネジメント学」教育が必要である。そこで、技術システムのみならず社会システムを含むあらゆるシステムを教育の対象とし、システムのライフサイクルに沿ったデザイン能力、システムの実現に必要なマネジメント能力を身につけることのできる大学院教育を構築した。まず、社会・産業界や関連する国内外の教育研究機関等のステークホルダーと連携し、教育カリキュラムの整備や教員の採用、教育設備や研究拠点の整備、学生の募集、教育の実施、更には成果公表の方法を設計した。設計にあたっては、学生が身につけるべき能力と知識を六つに分類し、それらの能力と知識を身につけることのできる教育研究機関として2008年4月に大学院を開校した。現在まで約2年間大学院教育を実施し、学生の自己評価、外部評価委員による評価、論文等の学生の成果に基づいて検証した結果、構築した大学院教育の有効性を確認した。

キーワード：システムデザイン・マネジメント学、大規模・複雑システム、文理融合

Graduate education for multi-disciplinary system design and management

– Developing leaders of large-scale complex systems –

Naohiko Kohtake*, Takashi Maeno, Hidekazu Nishimura and Yoshiaki Ohkami

“System Design and Management” program, a study that integrates humanities and sciences by crossing many disciplines, is essential to foster talented persons who can lead in the development and operation of large-scale complex systems that are symbiotic, safe and secure. The subject of the new graduate school education is large-scale complex technological and social systems, with an education curriculum that provides practically oriented lectures through which students can acquire the capacity to consider systems, the faculty to design systems in line with system life cycles, and the ability for system management. By collaborating with industries and related stakeholders such as domestic and international educational research institutions, we designed an educational curriculum and recruited faculty members, developed educational facilities and research centers, recruited students, provided education, and moreover designed the method of publishing accomplishments. As for the establishment of the graduate school in April 2008, the educational curriculum was formed to provide students with opportunities to acquire must-learn capability and knowledge that were classified into six groups. The validity of the education method was confirmed based on verification of the students’ self-evaluation, evaluation by the external evaluation committee and accomplishments by students such as papers, after the first two years of graduate education.

Keywords: System design and management, large-scale complex system, multi-disciplinary

1 はじめに

日本の大学および大学院は、主に「単一の学問分野（以下、ディシプリン）の教育」と「未知現象を計画的に探索することによって普遍的な知識を発見、解明、形成するための研究である第1種基礎研究^[1]」を行っている。このような従来からの教育および研究は、長きにわたり高度な専門性を有する人材の育成成果をあげてきた。しかし、学問の専門化や詳細化は、分野を超えた問題に対処できる人材の育成には向かないという一面を有する^[2]。

一方、近年の実用化されたシステムには、ある分野の専門化や詳細化のみでは対処することが困難な様々な問題が生じつつある。例えば、発電システムや宇宙航空システム

の運用の際に直面する予期せぬ事故や故障への対応の困難さ、自動車やロボットの開発において直面する安全設計の困難さである。いずれも、対象とするシステムの大規模化や複雑化に起因することが多い^[3]。同時に、現代の科学技術文明が作り出したというべき地球環境問題の深刻化が、現代社会の最重要課題の一つとなっている。すなわち、各々のシステムが直面する安全性の問題やそれを巻き込む地球環境問題をそれぞれ個別の問題と捉えていたのではシステムを適切にデザインすることが困難になりつつある。安全や環境共生に代表される時空間スケールの異なる問題を同時に解決するシステムを実現するためには、安全性の問題、地球環境の問題、システムとそのシステムを構成する

慶應義塾大学 〒223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1 協生館

Keio University Kyoseikan, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8526, Japan * E-mail: kohtake@sdm.keio.ac.jp

Original manuscript received November 6, 2009, Revisions received March 23, 2010, Accepted March 24, 2010

個々の要素の関連性、といったカテゴリやスケールの異なる多様な価値の間の複雑な相互作用をシステムの関係性としての確に捉え、システム全体をデザインする横断的学問の体系化と、これに基づくシステム統合的視点からの教育が不可欠である。ところが、産業界における様々な製品の開発やその運用の際に生じる複数のディシプリンにまたがる問題を解決するための方法は、国内では十分に教育されてきたとは言い難い。

欧米では、システムズエンジニアリングが複数のディシプリンにまたがる問題解決の役割の一翼を担ってきた。なお、日本ではシステムズエンジニアリングはITシステムのための工学と狭義に捉えられがちであるが、本来は、機械システムやITシステムから社会システムまで、あらゆるシステムの解析と統合に関する工学である。システムズエンジニアリングの国際学会であるInternational Council on Systems Engineering（以下、INCOSE）によれば、システムズエンジニアリングとは「システムを成功裏に実現するための、複数のディシプリンにまたがるアプローチおよび手段」であると定義されている^[4]。そして、特に米国ではINCOSEにて定義されたシステムズエンジニアリングに沿った教育がマサチューセッツ工科大学、スタンフォード大学、海軍大学、空軍工科大学を初めとする75校の大学・大学院で体系的、実践的に行われている^[5]。

大学や大学院で行う教育では、産業界からのニーズを常に把握しておく必要がある。日本経団連教育問題委員会「企業の求める人材像についてのアンケート結果」^[6]では、理系の大学・大学院に対して人材育成の点で期待する点として主に表1に示した項目が挙げられている。技術系人材を採用する立場から、大学・大学院（理系学部・学科・専攻）に対して人材育成の点で何を期待するかを520社に質問したアンケートの結果であり、回答数が多かった項目五つを示している。このアンケートでは各社それぞれ三つまで回答を選択できることとしている。この結果からも、高度な専門知識を生かし、著しく変化する現在の社会情勢に対応して次世代のシステムを創り出し、マネジメントできる人材を輩出する大学・大学院が必要とされていることがわかる。

表1 産業界から大学・大学院への期待

回答	企業
専門の知識を学生にしっかり身につけさせること	340社
知識や情報を集めて自分の考えを導き出す訓練をすること	287社
専門分野に関連する他領域の基礎知識も身につけさせること	231社
理論に加えて、実社会とのつながりを意識した教育を行うこと	162社
チームを組んで特定の課題に取り組む経験をさせること	119社

このような社会的背景に鑑み、慶應義塾大学では2008年4月に大学院としてシステムデザイン・マネジメント研究科（以下、SDM研究科）を開設した。この大学院では、これまでの大学院にはない実践重視のユニークな教育カリキュラムを構築し、主に何らかの専門性を身に付けた実務経験者に対し、環境共生、安心・安全等の社会の要請を考慮した大規模・複雑システムのデザインを行える人材の育成を行っている。言い換えれば、従来の日本の大学院では育成することが困難であった、第2種基礎研究^[1]や応用研究をリードできる人材の育成を行っている。なお、ここで言う大規模・複雑システムには、発電システムや宇宙航空システムのような技術システムのみならず、金融システム、医療システム、地域社会、企業組織、NPO組織のような社会システムも含む。

我々の目標は、大規模・複雑システムを創造的にデザインし、確実にマネジメントするための学問体系であるシステムデザイン・マネジメント学（以下、SDM学）を構築し、その大学院教育を行い、大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材を育成することである。本論文では、我々の目標を実現するために設定した大学院設立のシナリオ、大学院教育を実施するために選択したそれぞれの要素とそれらの統合による現在までの成果について紹介する。その上で、学生による評価および外部評価とそれらに関する考察、今後の課題について述べる。

2 シナリオ

慶應義塾大学では、長い構想期間を経て、SDM学教育のための大学院開設に至った。1996年には世界に先駆け理工学部内にシステムデザイン工学科を設立し、機械工学、電気工学、情報工学、建築学等の工学系ディシプリンの枠を超えたシステムデザイン工学の教育・研究を行い、基礎学問能力と統合的視点を併せ持ったエンジニアの育成を行ってきた。2008年には、理学、工学、経済学、政治学等の技術系・社会科学系ディシプリンの枠を超えた文理融合型の学問であるSDM学の教育・研究を行うために、理工学部・理工学研究科とは別の組織としてSDM研究科を開設した。

SDM研究科開設にあたっては、大規模・複雑システムに携わる国内や海外の方々を対象に、大規模・複雑システムの開発や運用における現状の課題や大学院教育に対する産業界のニーズについてインタビューを行った。その結果、大学院教育へのニーズは、表1に記述した内容とほぼ同一であることを確認した。また、欧米を中心に発展してきているシステムズエンジニアリングや、日本の産業界において発展してきた自動車やロボット、プラント等の大規模・複雑

システムに対するデザイン手法、慶應義塾大学が21世紀COEプログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」で構築したシステムデザイン方法論^{[7][8]}、社会システムのデザインとマネジメントに必要な知識や手法を基本に、大学院教育の仕組みを設計した。修士課程では、教員および学生、もしくは学生同士のインタラクティブな教育を重視し、専門職大学院的な教育によって大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材を育成することを教育目標として設定した。また、博士課程では、研究を重視することによってシステムデザイン・マネジメント学の専門家を育成することを教育目標として設定した。

複数のディシプリンにまたがる課題を対象にした大学院教育において、我々の目標を実現するためには、様々な利害関係者(以下、ステークホルダー)との連携が重要である。目標を実現するために設定したシナリオと、主なステークホルダーとの関係を図1に示す。各ステークホルダーとSDM研究科との間のインプットとアウトプットを矢印で図に示し、そのうち、SDM研究科として特に重視しているものについてはその文字を下線・大文字で示した。なお、この図において、主なステークホルダーの一つである社会・産業界は、いわゆる「産官学」の「学」(教育研究機関)以外の全てを意味しており、政府や地方自治体、NPO法人等、あらゆる社会組織を含む。シナリオの詳細は、以下のとおりである。

(1) 教育カリキュラム整備

社会・産業界での課題や大学院教育に対するニーズを踏まえ、大規模・複雑システムを扱うために学生が身につけるべき能力を設定し、それらの能力を培うことのできる学問体系としてSDM学の体系を構築し、教育カリキュラムを整備する。単一のディシプリン教育に関しては、必要に応じて国内外の大学・大学院と連携する。

(2) 教員採用

教育カリキュラムに基づき、各科目の講義およびSDM学に関する研究を推進することのできる教員を採用する。特に、企業経験や海外経験を有し、大規模・複雑システムの開発や運用で一流の研究開発経験を有する教員を数多く採用する。

(3) 教育施設整備

教員と学生、もしくは学生同士の様々なコミュニケーションやグループ学習の創出を促進する教育施設を整備する。また、教育や研究における社会との密接な連携を重視するため公共交通機関によるアクセスの良い場所に整備し、遠隔地にいる学生や教員、国内外の関連機関との議論、会議を支援するための通信システムを充実させる。

(4) 研究拠点整備

社会や産業界での課題をSDM学の適用により解決す

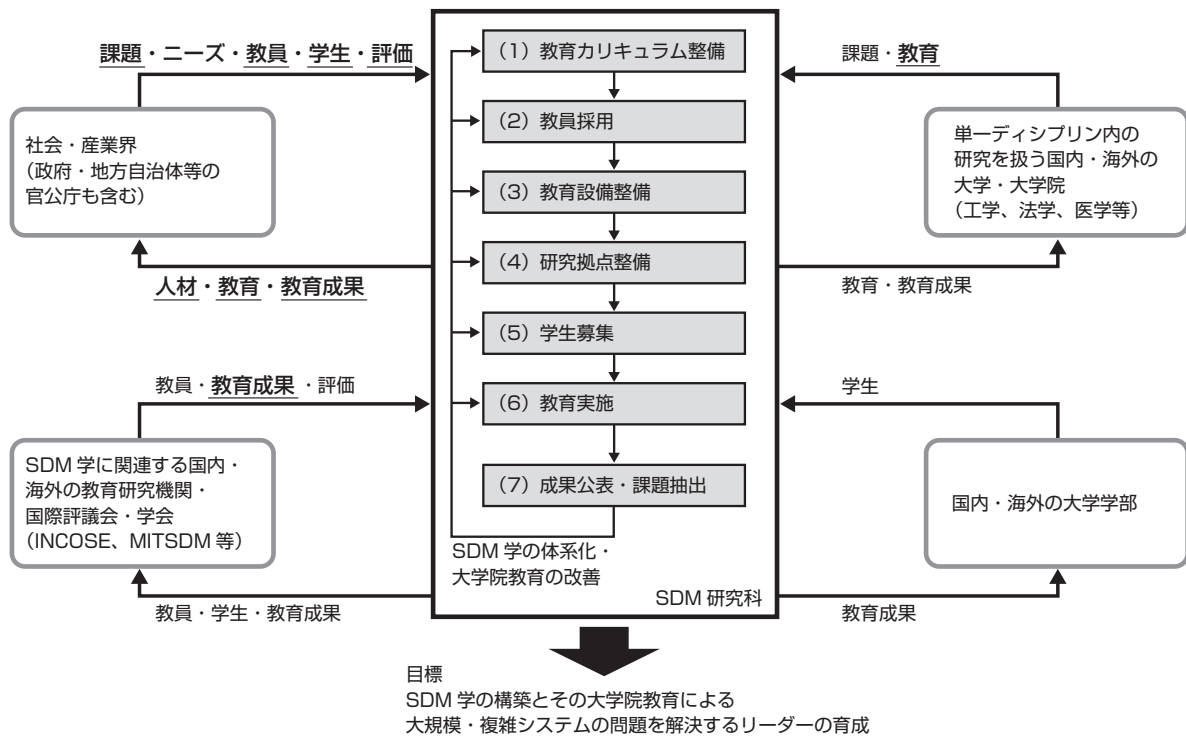


図1 目標達成のためのシナリオおよび各ステークホルダーとの関係

るとともに、得られた知見の活用と関連する教育研究機関、国際機関、学会との連携によってSDM学をさらに発展させるための研究拠点を整備する。

(5) 学生募集

多様な人材の交流に基づく学びを可能にするために、理工系、社会科学系、人文科学系等の何らかのディシプリンでの専門性を具備した人材を中心に募集する(いわゆる理科系と文科系の専門性を有する人材の割合を1:1、実務経験学生と新卒学生の割合を2:1程度にする)。また、国内学生の国際性の向上と、日本語を母国語としない学生へのSDM学の普及を目的として留学生を積極的に募集する。

(6) 教育実施

社会における未解決課題を主な対象にし、実体験型教育、グループ型教育を中心にSDM学の教育を実施する。それに加え、学生としての受け入れではなく産業界の実務者を対象にSDM学に関連したセミナーや講習会を積極的に実施し、大規模・複雑システムに携わるリーダーの育成を行うと共に、社会での課題や大学院教育へのニーズを抽出する。また、各教員の教育能力を向上させるためのファカルティ・ディベロップメント^{用語1}の機会を定期的に数多く設ける。

(7) 成果公表・課題抽出

大学院教育によって学生が得た能力や、教員が得た知見等を成果として各ステークホルダーに提示し、評価を受ける。また、SDM研究科に在籍する学生からの評価も受け、それらの評価を分析することで課題を抽出し、その結果に基づいて教育改善を行う。

上記のシナリオは、1サイクルで終わるのではなく、(7)の成果公表・課題抽出の結果を基に、(1)～(6)のそれぞれにおいて、SDM学の更なる発展と大学院教育の改善を定期的実施し、目標の実現を目指すというスパイラルアップ型^{用語2}のシナリオである。

3 大学院の開設

SDM研究科を開設するにあたって実施した国内や海外の産業界100社以上へのインタビューを基に産業界での課題や大学院教育に対するニーズを抽出した。その結果、大規模・複雑システムを扱うために学生が身につけるべき能力および知識を図2に示すように六つに分類した。横軸が関連するディシプリンの範囲、縦軸が対象とするシステムの規模や複雑さを示す。つまり、大規模・複雑システムを扱うリーダーには、システムデザイン能力、システムマネジメント能力が必要であり、その能力を身につけるためには、基盤となる能力としてシステム思考能力、コミュニケーション

ン能力が必要であることを意味している。また、ある分野の専門知識とその専門知識に関連した他領域の基礎知識を予め身につけていることが必要であることも意味している。それぞれの能力、知識の定義を以下に示す。

A) システムデザイン能力：

利用者、顧客、社会、環境等の多様なステークホルダーの真の課題や需要を把握し、システムの構想から開発、運用、廃棄までのライフサイクルの各段階において全体の整合性を考慮しながら創造的に課題の解決策を提案できる能力(デザインには、技術システムのデザイン、意匠デザイン、組織のデザイン、社会のデザイン、経営や政策のグランドデザインまで、あらゆるシステムにおける構想提言、ソリューション提言を含む)

B) システムマネジメント能力：

プロジェクトの進行やライフサイクルの進捗に伴う環境の変化に対応し、利用者や顧客等のステークホルダーの要求を満たすシステムデザインの実現やシステム管理・運用を統合的に進めることのできる能力

C) システム思考能力：

独立した個々の事象のみならず、各事象間の相互依存性や相互関連性に着目し、システムの全体像や課題の本質を横断的、俯瞰的、体系的に捉えることのできる能力

D) コミュニケーション能力：

自分の考えを相手に伝え、相手の考えを理解し、多様な人材とチームを組んで課題を解決することのできる能力

E) 専門知識：

技術系もしくは社会科学系での何らかの分野における深い知識(複数あることがより好ましい)

F) 基礎知識：

専門知識に関連する他領域の基礎的な知識
目標を実現するために選択した要素群およびそれらの要素の統合によって開設した大学院の教育について以下に述

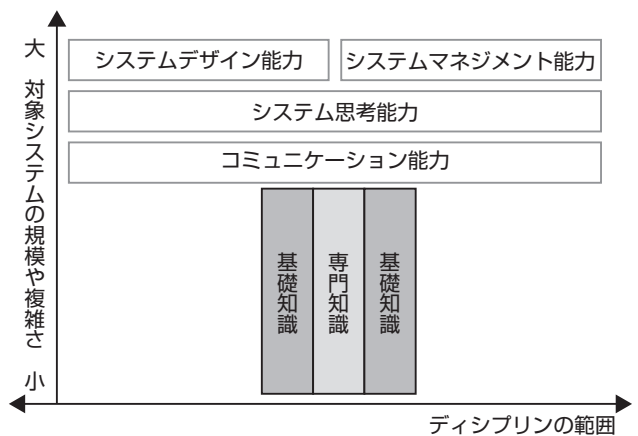


図2 学生が身につけるべき能力および知識

べる。

3.1 教育カリキュラム

設置した講義科目の概要を表2に示す。教育によって学生が身につけるべき能力および知識の各項目に対し、講義科目毎に関連があるものを○、特に関連の強いものを◎で示している。また、学生が専門とする分野によって受講すべき科目が異なるものについては△で示した。選択必修科目群および選択科目群に含まれる個別の講義科目については、表3にその名称を示す。

学生が身につけるべき四つの能力は、主に必修科目でその基盤となる内容を教育し、選択必修科目で補強する。それぞれの学生の専門分野によって学ぶべき内容が異なる場合は、選択必修科目もしくは選択科目によって習得する構成とした。対象とするディシプリンが多様であるため、学生はある分野の専門知識や基礎知識の習得のためにSDM研究科以外の大学院や大学の講義科目を受講することができる。特に、慶應義塾大学内の理工学研究科、経営管理研究科等の他の大学院と連携し、講義の相互補完を行い、教育機会を提供できるようにした。

各講義の単位は一部の講義を除いてほぼ全て1科目2単位とした。図3に修士課程カリキュラムの枠組みを示す。

()内の値は、学位取得のために必要な各科目の単位数である。修士課程の修了要件は、30単位以上の講義科目を修得し、そのうち、共通コア科目8単位、デザインプロジェクトALPS (Active Learning Project Sequence、以下ALPS) 4単位、システムデザイン・マネジメント研究2単位を修得することである。そして、技術系選択必修科目6単位以上、社会科学系選択必修科目2単位以上もしくはは

表2 教育カリキュラムと能力および知識の対応

	必修科目群						12科目 選択必修科目群 (技術系・社会科学系)	16科目 選択科目群 (技術系・社会科学系)	(他学部・他大学院開設科目)
	共通コア科目								
学生が具備すべき能力および知識	システムエンジニアリング序論	システムアーキテクチャとデザイン	システムインテグレーション	プロジェクトマネジメント	デザインプロジェクトALPS	システムデザイン・マネジメント研究			
システムデザイン能力	◎	◎	◎	◎	◎	◎			
システムマネジメント能力	○	○	○	○	○	○			
システム思考能力	◎	◎	◎	◎	◎	◎			
コミュニケーション能力				◎	◎	◎	○		
ある分野における専門知識					○	◎	△	◎	
専門分野に関する他領域の基礎知識					○	○	△	◎	

技術系選択必修科目2単位以上、社会科学系選択必修科目6単位以上を取得した場合に、修士の学位を取得することができる。学生が主体となって関わるができるよう、講義はグループ学習や演習、ディスカッションの機会が多く、1コマ90分の講義を14回実施する形式にした。海外からの学生を積極的に受け入れるために必修科目を中心に日本語のみならず英語による講義科目を併設した。

必修科目の教育カリキュラムについて以下に示す。教科書については、国際的な標準を講義における基礎知識とするために、システムズエンジニアリングに関する国際資格 Certified Systems Engineering Professional (以

表3 選択必修科目および選択科目

選択必修科目群	技術系科目	システム環境論
	リスクマネジメント論	
	ディペンダブルシステム論	
	システム生命論	
	デジタルマニファクチャリングシステム論	
	コンピュータツールとテラリング	
社会科学系科目		国際問題概論
		コミュニケーション技法
		ヒューマンリレーションズ論
		システム管理技術
		デザインと倫理
選択科目群	技術系科目	モデリングの数学的手法と数理統計の基礎
		予測と最適化の数学的手法
		ダイナミクス解析と制御の数学的手法
		ネットワークとデータベース
		ソフトウェアセーフティエンジニアリング
		ソフトウェア工学
	社会科学系科目	経済・経営・会計概論
		法的問題概論
		システムのシミュレーション技法
		システムに関わる標準化の実例と対策
創造的意思決定論		
	ビジネスインテリジェンス	
	政策デザイン論	
	国際経済システム論	
	社会中枢システム	
	システムデザイン・マネジメント特別講義	

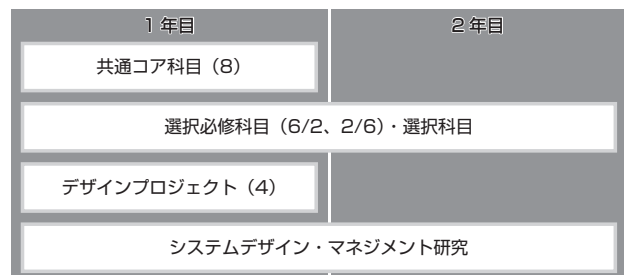


図3 修士課程カリキュラムの枠組み

下、CSEP)、プロジェクトマネジメントに関する国際資格 Project Management Professional (以下、PMP) に準拠した四つの書籍を採用した。共通コア科目全てに利用する書籍^[9]と、プロジェクトマネジメントを除く3科目で利用する書籍^[4]、プロジェクトマネジメントで利用する書籍^[10]、ALPS で用いる書籍^[11]である。

大規模・複雑システムの実務経験があり、その分野での知見や能力を持った教員が多いため、多くの講義では、その実務経験を講義に反映する形での教育形式としている。例えば、共通コア科目の「システムインテグレーション」では、システムズエンジニアリングの分野で体系化されつつあるそのプロセスや関係する手法について教科書を用いて紹介し、その上で、自動車および人工衛星の開発に携わったそれぞれの教員が実務上での課題解決事例の紹介や理論と実務間のギャップの説明、ある事例を題材にした演習等を行う。これによって、学生は、大量生産品の自動車と一品生産の人工衛星におけるシステムインテグレーションの違いや、日本で発展してきたデザイン手法等を学ぶことができる。

3.1.1 システムズエンジニアリング序論

システム開発プロセスにおける V モデル^{用註3}に沿った戦略的システムズエンジニアリングの基礎を講義する。つまり、システム思考、要求分析、機能物理分解、アーキテクティング^{用註4}等についての講義と実習を行い、社会の多様な要請に応えるシステムデザイン・マネジメント体系の基本を学ぶ。実習では、学生が数名でチームを組み、「利用者が自宅不在時に遠隔から操作可能な自動掃除システム」といった具体的なシステムの実現を最終ゴールとする開発も体験する。複数の教員が講義を担当し、学生は顧客役の教員にヒアリングを行い、課題やニーズの抽出から始め、システムの要求抽出から納入までの各開発プロセスにおける仕様書を作成し、開発プロセスに沿ってシステム開発を行う。それぞれのチームは競合他社という設定で、システムの実現を目指す。あるチームが実現した遠隔自動掃除システムを図4に示す。左図は遠隔地から操作を行うための web

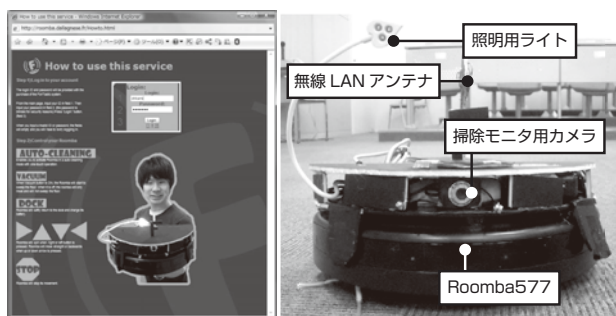


図4 自動掃除システム

によるサービス提供画面、右図が iRobot 社製 Roomba577 を基に開発された掃除システムであり、主な構成を示す。

3.1.2 システムアーキテクティングとデザイン

社会の要求に応じた多視点からの可視化と問題解決構造・詳細構造のアーキテクティングとデザインについて講義する。また、各学生の研究テーマのアーキテクティングとデザインについてグループ討議を行う。

3.1.3 システムインテグレーション

要素に分解する過程とそれらをシステムとして確実に統合するための学問体系を講義する。つまり、システムの要求仕様作成、分析、設計、動作検証、要求仕様の妥当性確認についての講義を行う。また、実践的なグループ演習を行い、その上で討議を行う。

3.1.4 プロジェクトマネジメント

プロジェクトマネジメントの基礎の講義を行う。具体的には、大規模・複雑システムのマネジメント、ロジスティクス（人事や調達）の基礎と実践、クロス・マネジメントおよびプロジェクトマネジメントの技法についての講義と演習を行う。演習の一例として、紙を利用したタワー建築のプロジェクト演習の様子を図5に示す。学生が数名でチームを組み、プロジェクトマネージャーを中心とした役割分担を決め、PMP に準拠したマネジメントプロセスに従ってタワー建築のための準備を実際に行う。紙の単価や学生1時間あたりの作業時間の単価も設定し、限られた費用、スケジュールの中で、より安定し、高さの高いタワーの建築をチーム毎に競い、その後に各チームのプロジェクトマネジメントの成果を評価する演習である。

3.1.5 デザインプロジェクトALPS

スタンフォード大学およびマサチューセッツ工科大学との国際連携グループプロジェクト科目であり英語で行われる。“Enhancing Senior Life in Japan”（2008年度）“Sustainable Community”（2009年度）といった全体テーマのもと、年間を通して4、5回のワークショップ（各2

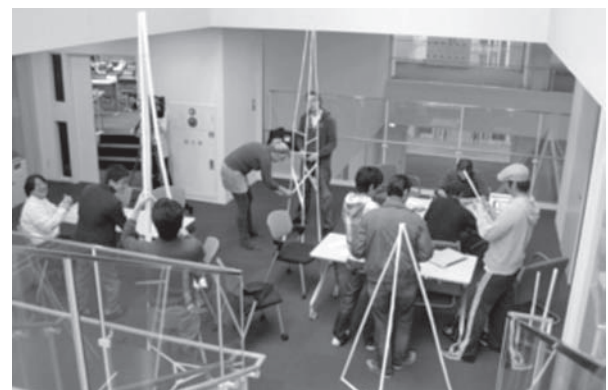


図5 紙タワー建築プロジェクト演習

日間）とその間のグループ学習を行い、学生は5-8名のチーム毎にシステムライフサイクルの全プロセスを体験し、最終回にはシステム提案の発表と議論を行う^{[11][12]}。図6に年間のワークショップおよびグループ学習の流れを示す。3大学の教員はテレビ会議も含めほぼ毎月ALPSの講義内容や方法について調整を行う。共通コア科目を中心に多くの科目と関係深い科目であり、学生は本科目を中心に個々の講義を理解し、個々の講義で得た知識を本科目に適用できる仕組みになっている。本科目については、文献^[12]で詳細を紹介している。

3.1.6. システムデザイン・マネジメント研究

修士論文研究に相当する。ただし、従来型の個人研究とは異なり、グループによってプロジェクト形式で学問分野を横断的に研究を実施し、安心・安全、環境共生、社会共生を含む社会のニーズに合致した研究を行うことを推奨している。学生は、プロジェクトにおいて個人で行った部分について論文としてまとめる。

3.2 教員

SDM研究科専任の教員12名と数10名の特別研究教員および招聘教員を教員として採用した。産業界での実務経験者が多くを占めることが一つの特色であり、宇宙航空、原子力、自動車、情報、精密機械といった技術システムや、金融、政策、財務、農業といった社会システムに関する大規模・複雑システムの実務経験があり、その分野での高度な知見や能力を持った人材を教員として構成した。海外からの学生を対象とした講義や海外の教育研究機関の教員や研究者との連携による教育を可能にするため、英語での講義が可能であることを採用の条件としている。

また、SDM学に関連する学問の世界的な動向を学生に提供し、ファカルティ・ディベロップメントの一環として教員の知識を向上させるために、海外から毎年10名程度の講師を招聘し、主に共通コア科目に関連した講義を集中講義や遠隔講義にて実施できるようにした。

3.3 教育施設設備

教員と学生、もしくは学生同士のコミュニケーションやグループ学習を促進するためにフリーシーティング型^{用語5}の学生居室とし、各学生には教材や実験機材を保管する個人ロッカーを提供するようにした。専門を同じくする教員と学生毎にスペースを壁で区切る従来の研究室型と異なり、学生固有の座席が存在しないが、様々なコミュニケーションやグループ学習毎に学生がその目的に応じて部屋や座席を確保し、互いに議論できる形態になっている。教員の居室はフロア内の一区間に集中させ、教員同士が頻繁にコミュニケーションできるレイアウトとした。

全ての講義を専属のスタッフがビデオ撮影し、講義資料と共にオンラインで配信するe-learningシステムを構築し、物理的に講義に出席できない学生に教育機会を極力提供できるようにしている。遠隔地の学生や教員、関連機関との議論、会議を行えるようにするために多くの会議室にテレビ会議システムを導入した。

大規模・複雑システムを扱うにはシステムデザインやシステムマネジメントを支援するシミュレーション技術やモデリング技術の能力を向上させる必要がある。そのため、それらの技術を扱うソフトウェアを学生はネットワーク経由で自由に利用できるような環境を整備した。また、コンカレントデザイン^{用語6}を行うことを目的とした大規模ワークステーションと複数の高精細ディスプレイで構成されるコンカレントデザインルーム（図7）を整備し、学生が複数の端末を持ち込むことでネットワークを介して様々なシステムを対象としたデザインを行うことができるようにした。

3.4 研究拠点

産業界における多種多様な課題をSDM学の適用によって解決すると共に、得られた知見を蓄積し、SDM学を発展させるための研究拠点として、SDM研究科附属のSDM研究所を開設した。産業界や学術界との連携によって様々な課題を解決することを目的に設立した研究所であり、各

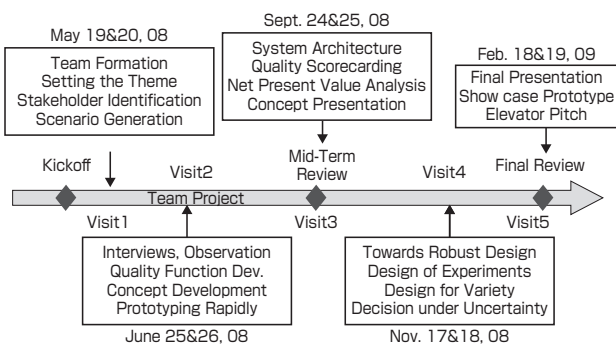


図6 ワークショップおよびグループ学習の流れ



図7 コンカレントデザインルーム

教員は研究所の中に特定の課題を解決するためのラボラトリーを設立することができる。連携者は、SDM 学に関連した情報を入手できるうえ、SDM 研究科の施設を利用できる。

また、大規模・複雑システムに関する課題を解決するには、ディシプリンの枠を超えた教育機関との連携、国際的な連携が必要である。そのため、慶應義塾大学大学院理工学研究科との連携によって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」を 2008 年より開始し、主に環境共生・安全に代表される社会的価値を考慮したシステムデザインの研究と、それらを身につけた研究者の育成を目指した教育・研究活動を行っている。

SDM 研究科の研究課題の一部を以下に示す。対象とするシステムは、家電、情報、金融、保険、人間、教育等様々である。

- ・家電設計における分散設計環境での熱/音響トレードオフ設計手法^[13]
- ・情報システムにおけるメンテナンスコストを考慮した基盤ソフトウェア選択の効果検討^[14]
- ・屋内外シームレスな位置情報システムの実用化検討^[15]
- ・日本における企業通貨によって設計されたアライアンスシステムの評価^[16]
- ・日本における保険金不適切不払い・支払漏れとそれに対するより良い支払いアーキテクチャ設計^[17]
- ・階層構造化モデルを用いた人体の運動生理学的動作分析手法^[18]
- ・学問領域を超えたシステムデザイン・マネジメント学教育のための実習講義^[11]

SDM 学に関連する学問の世界的な動向を常に把握し、また、SDM 研究科の教育成果による学問分野への寄与を目的として、INCOSE ならびにシステムズエンジニアリ

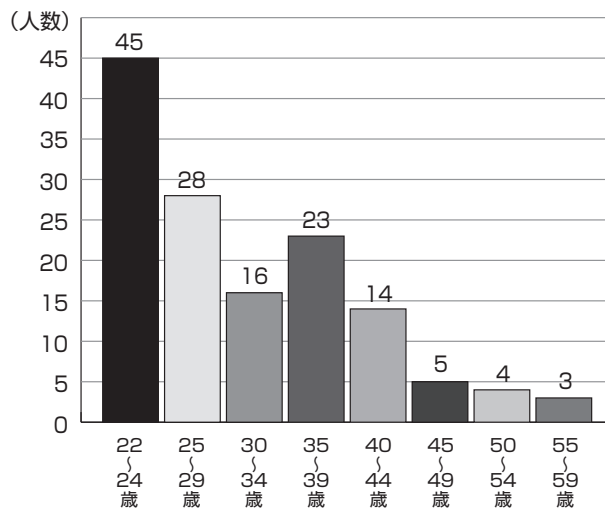


図8 修士課程在学学生の年齢分布

ング教育の国際協議会 Council of Engineering Systems Universities (以下、CESUN) に加盟し、定期的な協議会への教員の派遣やアジア太平洋地域の国際学会 APCOSE (Asia-Pacific Conference on Systems Engineering)^[19] を主催し、学生および教員の知識レベルの向上を図っている。

3.5 学生

産官学を問わず様々な組織に対して SDM 研究科による学生募集についての周知を行い、産業界に対しては社会人学生の派遣を要請した。その結果、年間 3 回にわたる入試を経て、開設前に設定したシナリオに近い形で学生を受け入れることができている。特徴的な点の一つは、幅広い年齢、様々な分野、国籍にわたる学生構成となっている点である。2008 年度、2009 年度それぞれ春学期および秋学期に入学生を迎え入れており、2009 年度の時点では、修士課程に在籍する学生が 138 名、博士課程に在籍する学生が 46 名である。在籍する学生の年齢は、20 代から 60 代まで広く分布しており、平均年齢は修士課程学生が 32 歳 (図 8)、博士課程学生が 42 歳 (図 9) である。また、出身学部は理工系から法学、政治学、経済学、文学、商学、農学、体育学にわたっており、実務経験者が多く、修士課程では 66 %、博士課程では 89 % を占めている (図 10)。実務経験者の職業は、製造、通信、コンサルティング、情報、航空・宇宙、金融、不動産、官公庁、建築、エネルギー、システム、医療、マスコミ・出版、法曹等と多岐にわたっている (図 11)。また、海外の大学からの留学生を含めた海外国籍の学生の割合は 20 % 程度である。当初の目的どおり、多様な専門知識を持つ学生および教員による多様な人材の交流に基づく学びの場を形成している。

3.6 教育

前述のように、教員の多くは大規模・複雑システムに関連した実務経験があるため、その経験を講義に反映する

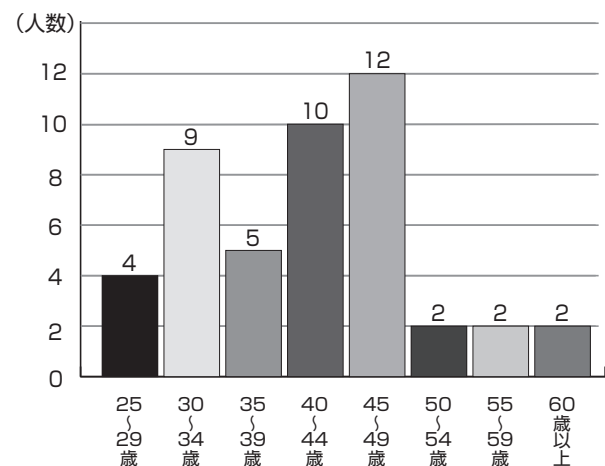


図9 博士課程在学学生の年齢分布

形での教育形式としている。また、専門知識が豊富で実務経験のある学生が多いため、産業界における特定の課題解決のための方策を講義の中で導き出す形式やSDM学の一部を体系化するための議論を主題にする形式の講義を数多く設置している。例えば、「社会システムに対する検証方法にはどのようなものがあるか？それぞれの方法の利点欠点は何か？」というテーマを金融システムの実務経験者である教員が学生に提示し、議論を講義毎に深化させていくという講義を行っている。それに加え、学生の主体性を重視し、学生が主催する講義の時間を用意し、学生自らがそれぞれのニーズに応じて専門性を持った学生もしくは外部の講師を招いて講義を実施することも奨励している。

それぞれの教員の能力や知識の向上を目的として、月に数回の頻度で教員によるファカルティ・ディベロップメントの機会を設けている。各教員が教育経験によって得た知見や課題を提示し、その知見の共有や教育・研究向上のための議論を定期的に行っている。

平日の昼間に通学することが困難な社会人学生にも学びの機会を提供するため、共通コア科目の日本語での講義は土曜日もしくは平日夜(19:00-20:30)に実施している。一方、海外からの学生はほぼ全員が仕事を持たないフルタイムの学生であるため、共通コア科目の英語での講義は平日昼間に実施している。また、学生としての受け入れではない産業界の実務者を対象に、SDM学に関係する対外セミナーや講習会を実施し、大規模・複雑システムのデザインやマネジメントに携わるリーダーの育成に貢献している。このことは、産業界での課題や大学院教育へのニーズ抽出にも役立っている。

3.7 成果公表・課題抽出

教育の成果は積極的に公表し、主に産業界からの評価を得る機会やその成果の産業界での適用の機会を設けた。たとえば、ALPSでは、最終講義において、各チームが与えられたテーマに対するサービスもしくはプロダクトの提案を行うが、その際に、10名程度の起業家、企業関係者、研究機関関係者に参加していただき、各提案を社会への

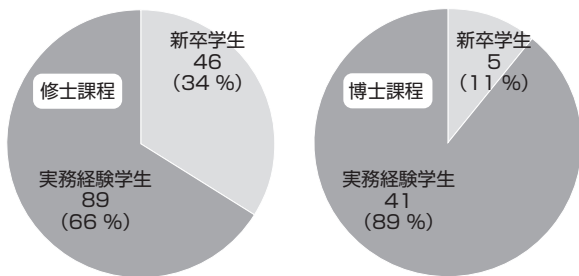


図10 新卒学生および実務経験学生の人数比率

適用の観点から審査して頂く機会を設けている。

授業の評価としては、講義科目毎に講義最終回時に受講生にアンケートを行い評価を受けるようにした。各講義科目の評価は担当教員および関係者のみが確認することができ、大学院教育全般に関する受講生からの評価については全教員で共有し、適宜課題を抽出して次年度の講義に反映している。また、大規模・複雑システムの開発や運用に従事されている産業界の方5名に外部評価委員に就任していただき、SDM研究科での大学院教育に対する外部評価を定期的実施していただく仕組みを構築した。

4 現在までの成果と今後の課題

SDM研究科を開設してから2年が経過し、2010年3月に修了者を輩出する現時点までの成果と評価、そして、それらを踏まえた今後の課題を以下に述べる。

4.1 多様な人材によるグループ学習の成果

ALPSでは、チーム毎に年間を通してグループプロジェクトを行い、多くの学生はシステマチックに社会要求を明確化すると共にアイデアを創出し具現化するための様々な考え方や手法を実践を通じて身につけることができた。具体的な事例として、あるチームによって創出されたアイデアとその成果について紹介する。

このチームは、2009年度のALPSのテーマ“Sustainable Community”に対し、少子化による廃校増加、農業の後継者不足、改善しない若者失業率といった課題を同時に解決する方法として、都心の廃校を利用した水耕栽培システムを提案した。図12にこのチーム(六本木ベジ&フルーツ)が作成した提案資料の一部を示す。新鮮で、安心、安全な食材を求める消費者のニーズと、都会で安定した収入を

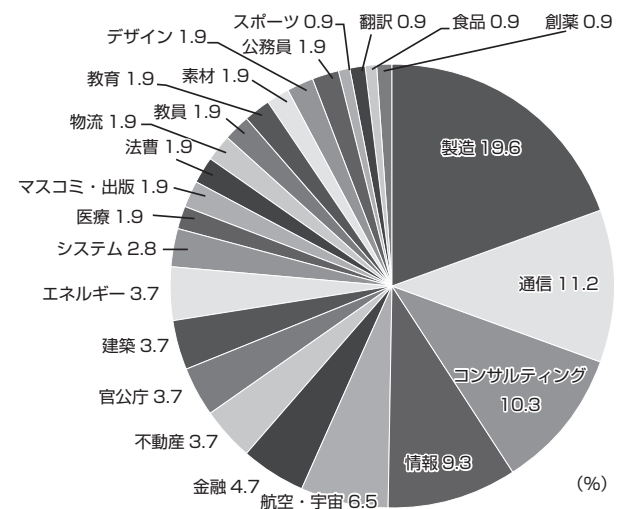


図11 実務経験学生の職種分布

得られる仕事をしたい若者のニーズを満たし、かつ、持続可能なビジネスモデルを構築したことがこの提案の強みである。この提案を導き出すために、このチームは、ALPSで得た手法や知識を基に、市場調査、ステークホルダーへのアンケート、インタビュー、テストプラントによるプロトタイプングを経て実現性の検証を行った。その結果、東京都および東京都中小企業振興公社主催の「学生起業家選手権」で優秀賞および日刊工業新聞社主催の「キャンパスベンチャーグランプリ」で関東経済産業局長賞を受賞した。現在、チームメンバーに数名の学生を加え、事業化に向けての検討と自治体や関係企業との調整を進めている。SDM 研究科の教育によって、実社会からの要求を抽出し、システムの構想から運用、廃棄までのライフサイクルを考慮したデザインを行う能力を獲得した一例である。

また、ALPS 以外の多くの講義においても、グループ学習やグループ討議を重視する SDM 研究科のコンセプトが有効であることを確認した。すなわち、多様なバックグラウンドを持つ学生同士が相互にそのバックグラウンドを理解し合うとともに、講義で得た知識を共有化するための議論がなされ、その上で、協調して課題に取り組むトレーニングを頻繁に行い、高い教育効果を得た。

4.2 複数のディシプリンの連携による教育

教員同士の連携による単一のディシプリンの枠を超えた講義を様々な形で実現すると共に、受講する学生からのフィードバックを得た。一例としては、社会科学系の専門性を持つ教員を中心とする研究グループが扱っている「コールトリアージ^{用語7} 緊急救急システム」に対し、技術系の専門性を持つ教員が連携して「システムのシミュレーション技法」の講義を行い、シミュレーション技法を用いたシステム設計や検証を実施している。その上で、技術的、社会科学的な側面において、このシステムの改善について分析、検

討を行っている。例えば、技術的に最適な解決方法を実現する場合に課題となる法的な制約や、現状の法的な制約の中で技術的に解決できることの限界について、従来よりも具体的、専門的な議論が可能になった。従来関係することが少なかったディシプリンの連携によって効果的な教育を行なうことができていると言える。また、「システム生命論」では、生物の環境適応性に学ぶシステムデザイン手法の教育を行い、従来のシステムズエンジニアリングでは解決できなかった、予期せぬ事態を考慮した設計論の講義と演習を行った。システムデザイン・マネジメント学がシステムズエンジニアリングを超えた社会・人間システムデザインに適用できることの一例である。

4.3 修士研究および博士研究

サービスやプロダクトのデザインのみならず、マネジメントのデザインや政策の提言等も含めた様々なシステムのデザインとマネジメントを対象にした特徴ある研究が修士課程および博士課程で行われている。特に、環境共生、安全・安心、社会協生等の複合的な価値と関係する研究テーマが数多く進められている。2009 年度に実施された修士研究テーマの一部を表 4 に示す。対象とするシステムは技

表4 2009年度修士研究テーマの例

研究テーマ
太陽光発電に併設する蓄電池共有による CO ₂ 削減効果の推定
クリーンエネルギービークル普及のための LCA を用いた炭素税設計
バイオマスエネルギー技術を中核とした都市農村共生社会のシステムデザイン
リサイクルを考慮した国内銅資源供給の持続可能性評価
大規模化学プラントにおける安全管理システムの提案
プロジェクト記述言語によるソフトウェア開発プロジェクトのリスクマネジメント
セミアクティブニーボルスターを用いた乗員下肢の保護制御システムデザイン
国際海運システムの安定化のためのグローバルな海上安全保障政策の作新
製造業における企業パフォーマンスと組織風土・文化の関連性の調査研究
地方自治体職員のモチベーションに関する調査研究 —活力ある組織風土の構築に向けて—
若手技術者のモチベーションに関する研究 —多大学共同微小重力実験プロジェクトを例にして—
主観的幸福における社会的なつながりの価値の明確化
住宅内超高速プラスチック光ファイバネットワークの中国展開戦略に関する研究
電子書籍の将来展望と活字メディア産業における構造変化に関する研究
海上を利用した宇宙往還機のビジネスモデルの検討および実証試験計画 —日本独自の有人機実現に向けて—



図12 ALPSでの提案の事例（六本木ベジ&フルーツ）

術システムから社会システムにわたる多様なシステムであるが、システムのライフサイクルを重視し、様々なステークホルダーからの要請に合致したデザインやマネジメントを行い、その成果の検証や有効性の確認までを研究論文にまとめるという点は全ての修士研究に共通しており、その点がSDM研究科での研究の特徴である。なお、SDM学に関連する博士論文の成果も出始めている^[20]。

4.4 産業界や海外機関との連携

産業界の実務者等を対象とした対外セミナーや講習会を定期的に行っている。また、宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）とは、SDM学に関する協力協定を締結し、教育ならびに研究における連携を進めている。その一つとして、教員が、連携協定を結んでいるJAXAの職員に対してSDM学に関連するセミナーを提供しており、2008年度は延べ93名が受講した。宇宙開発分野で生じている様々な課題を共有するとともに、SMD研究科にて体系化された講義を提供し、それぞれの課題に対する解決方法についての議論を行った。受講者にアンケートを行なった結果、いずれのセミナーにおいても高い満足度が得られていた。特に、システムとしての全体的、包括的な視点に関する講義についての高評価が目立った。

また、前述のStanfordおよびMITとのALPSの講義の構築とワークショップの実施以外にも海外との連携を積極的に推進している。TU Delft（オランダ）やStevens Institute Technology（アメリカ）、ETH（スイス）、INSA（フランス）等と教育カリキュラムの相互利用等についての連携契約を締結し、TU Delftとは修士課程学生をそれぞれ複数名双方の大学に滞在させ、国際連携教育の成果を挙げている。さらに、KUSTAR（アブダビ）やAMET（インド）、エジプト日本科学技術大学より、それぞれの国の産業界からのニーズに対応したSDM学の構築や各大学での教育実

施の支援要請を受け、調整を進めている。これらにより、SDM学教育の世界的な需要があることを確認している。

4.5 学生による評価

2008年度春学期入学の修士課程2年生36名を対象に、入学してから1年の間にSDM研究科の教育によって向上したと考えられる能力とその程度、満足している経験の内容とその程度について意識調査を行った。また、その調査結果の比較として、慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学系の修士課程2年生23名を対象に同様の意識調査を行った。各々の項目に対して6段階での評価を記入できる形とした。各項目に対する両研究科での調査結果をもとにt検定を実施した。有意水準を1%とし、評価結果に優位差があったものを図13に示す。各項目に対する上側のグラフがSDM研究科学生から得た調査結果の平均値および標準偏差、下側のグラフが理工学研究科学生から得た調査結果の平均値および標準偏差である。

この結果により、SDM研究科の教育・研究カリキュラムが、少なくとも学生の自己評価の範囲では、表1に示した産業界から理系大学・大学院への期待に応える教育・研究を実施できていることがわかる。「論理的でわかりやすい論文や報告書を作成する文書作成能力」についてSDM研究科の学生による自己評価が低いことは、今後改善すべき課題の一つである。アンケートの対象が2年生になったばかりの修士課程学生であったため、1年生時には文書を作成することよりも課題の現場へ行くなど、行動することを重視しているSDM研究科の教育を受講した学生は文書作成能力の自己評価が低くなったのではないかと考えられる。これに対応し、コミュニケーション能力を向上させる講義を強化する予定である。なお、文書作成については、ALPSではチーム作業にて英語で報告書を作成する経験をし、修士論文では個人作業にて日本語で作成する経験をする。

大規模・複雑システムの問題を解決するために必要となる基本的な考え方や手法は、必修科目群によって全学生がある程度身につけられていると感じている。一方、その考え方や手法を社会・産業界で適切に使いこなすには、必修科目以外の科目をSDM研究科および他の大学や大学院で受講し、学生自らが研究や実際の業務で試行や適用を行う必要がある、その点での教育の成果の大きさは各学生の問題意識の強さ、視野の広さ、行動力の有無等に依存するところが大きい。この課題全てを大学院教育で解決することは難しいが、SDM研究科による社会・産業界との密接な連携や各指導教員による学生への個別指導、多様な人材で構成される学生同士の様々な交流を更に促進することで解決できることも多いと考えている。

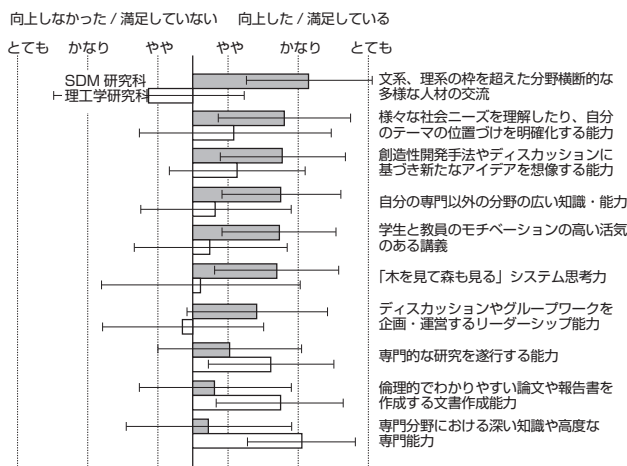


図13 SDM学生（上側棒グラフ）および理工系学生（下側棒グラフ）の意識比較

深い知識や高度な専門能力を向上させるための教育も重要であるため、その能力も他の能力と同時に向上させることができるようなカリキュラム作りを更に検討中である。学生毎に専門性が大きく異なるため、講義科目によっては、受講する学生の能力や知識レベルに大きな開きがあることも課題である。現在は、能力や知識レベルの高い学生に合わせた講義を行い、別途、その科目に関する補講を行うことで対処している。

4.6 外部評価

2008年度末の時点で、外部評価委員5名の方からSDM研究科開設1年経過後の外部評価をしていただいた。その結果、新たな教育に対する高い評価を得た一方、以下のような改善点も指摘された。開設後1年を経たSDM研究科による成果の産業界との更なる連携、講義を既に受講した学生の講義メンターとしての採用といった学生に主体性を持たせる教育の仕組み作り、視野を広く持ちつつ個々の本質も見極める「木を見て森も見る」SDM研究科の教育・研究コンセプトの徹底、等である。

それぞれの指摘を踏まえ、既に教育の向上を目指した改善を実施している。産業界との更なる連携については、例えば、ALPSにおいて、チームの提案次第では産業界と連携して実用化できるようにする、といった仕組み作りについて検討と調整を進めている。また、各講義で対象とする課題を産業界における課題と一致させ、その講義を経て創出された提案を課題提供企業にフィードバックする仕組みも検討している。

5 まとめ

技術システムから社会システムにわたる様々な大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材の育成を目指して開設したSDM研究科は、2010年3月に初めて修了者を出す。学生や外部評価委員の方による評価から、我々が大学院開設時に設定した大規模・複雑システムを扱うために学生が身につけるべき能力および知識を学生に身につかせていると判断できる。特に、多様な人材によるグループ学習やグループ討議を重視する教育カリキュラムによって、システムチックに社会要求を明確化し、その上でアイデアを創出し、確実に具現化するための考え方や手法を多くの学生が身につけていることを修士研究等の学生の成果物から確認している。一方、学生毎に高度な専門能力を向上させるための教育カリキュラムの拡充や、学生毎に専門分野が大きく異なることに起因する講義科目毎の学生の能力や知識レベルの開きに対する対処は今後の課題であるが、教育カリキュラムの更なる改良や、社会・産業界や関連教育研究機関、大学・大学院との連携の更なる強化が有効で

あると考えている。また、今後、修了者の卒業後の社会・産業界での成果を追跡調査し、SDM学の大学院教育の成果や課題をより具体的に検証、評価することによって、独自の大学院教育の更なる向上を図ることができると考えている。

6 謝辞

本研究の一部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」の援助により行われ、SDMの教育の一部はグローバルCOEプログラムの若手研究者育成のために利用した。記して謝意を表す。また、創設時よりSDM研究科開設に尽力された浦郷正隆氏、小木哲朗氏、佐々木正一氏、白坂成功氏、高野研一氏、手嶋龍一氏、当麻哲哉氏、中野冠氏、春山真一郎氏、日比谷孟俊氏、保井俊之氏、故石井浩介氏、Olivier de Weck氏に深く感謝する。

用語説明

用語1: ファカルティ・ディベロップメント (faculty development) : 教員が授業内容やその方法を改善、向上させるための組織的な取り組みのこと。

用語2: スパイラルアップ (spiral up) 型: 計画を立て、それを実行し、検証し、改善点をまた次の計画へ盛り込むといったPDCA (Plan-Do-Check-Action) のサイクルを回しながら、目標に向けて活動することにより、直線的ではなく、らせん状の軌跡で目標を達成するやり方のこと。

用語3: Vモデル (V-model) : 要求分析から運用、廃棄までのシステム開発ライフサイクルを記述するための枠組みのこと。V字型に表される概念図の左側は要求が設計によって細分化され、下位の要求になることを示し、右側は試験と組み立てによってシステムが統合されていく様子を示している。

用語4: アーキテクティング (architecting) : コンセプトを具現化し、機能を要素に割り当て、要素間の関係性 (インタフェース) を明確化すること。

用語5: フリーシーティング (free seating) 型: 個々の学生に特定の座席は用意されず、先着順もしくは事前予約によって座席や居室を利用する仕組みのこと。

用語6: コンカレントデザイン (concurrent design) : システムの開発において、企画から運用、廃棄にいたるシステムのライフサイクルの全フェーズに関連する部門の担当が集まり、諸問題を討議しながら協調して同時並行的に作業にあたるデザイン手法のこと。

用語7: コールトリアージ (call triage) : 救急通報の際、通報者からの伝達情報に基づいて傷病者の緊急度・重症度を判断し、出動の必要性を判断する仕組みのこと。横浜市が2008年10月1日から開始した。

参考文献

[1] 吉川弘之, 内藤耕: 第2種基礎研究, 日経BP社 (2003).

[2] 吉川弘之, 内藤耕: 「産業科学技術」の哲学, 東京大学出版会 (2005).

[3] Nancy G. Leveson, *Safeware: System Safety and Computers*, Addison-Wesley Professional (1995).

[4] *INCOSE Systems Engineering Handbook*, version 2a (2004).

[5] W. Fabrycky and E. McCrae: Systems engineering degree programs in the United States. *Proceedings of the 15 INCOSE International Symposium*, CD-ROM (2005).

[6] 企業の求める人材像についてのアンケート結果, 日本経団連教育問題委員会, 2004年11月8日
<http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2004/083.pdf>, (2004).

[7] 吉田和夫編著: 生命に学ぶシステムデザイン-知能化から生命化へのパラダイムシフト, コロナ社 (2008).

[8] 松岡由幸編著: デザイン・サイエンス 未来創造の六つの視点, 丸善 (2008).

[9] K.Forsberg, H.Mooz and H.Cotterman: Visualizing project management, *Models and Frameworks for Mastering Complex Systems*, Wiley (2005)

[10] *PMI A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, Fourth Edition (2008)

[11] 石井浩介, 飯野謙次: 設計の科学 価値づくり設計, 養賢堂 (2008).

[12] K. Ishii, O. de Weck, S. Haruyama, T. Maeno, S. Kim and F. Whitfield: Active learning project sequence: Capstone experience for multi-disciplinary system design and management education, *Proceeding of the International Conference on Engineering Design*, CD-ROM (2009)

[13] K.Seki, H.Nishimura, K.Ishii and L.Balmelli: Thermal/Acoustic trade-off design for consumer electronics in a distributed design environment, *Proceedings of the 19th INCOSE International Symposium*, CD-ROM (2009).

[14] K.Shimazu, S.Morita, K.Mori and Y.Okumura: A case study of the effects of platform software selection on information system maintenance cost, *Proceedings of the 19th INCOSE International Symposium*, CD-ROM (2009).

[15] S.Kim, N.Minato, D.Busser, and N.Kohtake: Transforming seamless positioning technology into a business using a systems design approach - scenario-based amorphous design, *2010 IEEE International System Conference* (2010).

[16] H.Yasuoka and Y.Ohkami: The evaluation of the alliance systems designed by "Enterprise Currencies" in Japan, *Proceedings of the 19th INCOSE International Symposium*, CD-ROM (2009).

[17] T.Yasui: Claim-payment failures of japan's insurance companies and designing better payment architecture: finding a standard solution to socio-critical systems by applying the system engineering vee model approach, *Proceedings of The 19th INCOSE International Symposium*, CD-ROM (2009).

[18] M.M.Kayo and Y.Ohkami: A method for analyzing fundamental kinesiological motions of human body by applying interpretive structural modeling, *Proceedings of The 19th INCOSE International Symposium*, CD-ROM (2009).

[19] APCOSE2008, <http://www.incose.org/japan/apcose2008/>

[20] 安岡寛道: 企業通貨 (ポイント・電子マネー) を用いたビジネスに関するマネジメントと評価方法の研究, 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論文 (2009).

執筆者略歴

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士課程修了。博士(政策・メディア)。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。システムズエンジニアリング、宇宙技術を利用したインテリジェントシステム等の研究に従事。INCOSE、IEEE、情報処理学会等の会員。SDM研究科では、主にインタラクティブな講義や国際連携を推進し、本論文では、全体の構成および現在までの成果に関する分析と考察を担当した。



前野 隆司 (まえの たかし)

1984年東京工業大学工学部機械工学科卒業、1986年東京工業大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。博士(工学)。同年キャノン株式会社入社。1995年慶應義塾大学専任講師、同大学助教授を経て現在教授。この間、1990年-1992年カリフォルニア大学バークレー校 Visiting Industrial Fellow、2001年ハーバード大学 Visiting Scholar。システムデザイン・マネジメント学の研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会等の会員。本論文では、SDM研究科の全体構想、その導入と実業界からのニーズ分析、ソーシャルスキル系科目の教育・研究カリキュラムに関する議論、学生による評価の調査を担当した。



西村 秀和 (にしむら ひでかず)

1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。1990年千葉大学助手、1995年千葉大学助教授を経て、2007年慶應義塾大学教授。2008年同大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授。現在に至る。モデルベースシステムズエンジニアリング、環境共生・安全のための制御システムデザインの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、自動車技術会、IEEE、INCOSE等の会員。本論文では、技術系科目の教育・研究カリキュラムに関する議論を担当した。



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。工学博士。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を経て、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。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。SDM研究科開設を提案し、開設のおよそ10年前から国際調査や設立準備を行ってきた。本論文では、シナリオの構築から教育の実施、成果公表、課題の抽出に至る全てのプロセスの統括を担当した。



査読者との議論

議論1 全体

コメント・質問（小林 直人：早稲田大学研究戦略センター）

本稿は、2008年度慶應義塾大学に新たに開設されたシステムデザイン・マネジメント研究科（SDM研究科）について、その創設のための基本コンセプトやその仕組み、カリキュラム構成など他には見られないユニークな特徴を紹介しています。また、この取り組みは社会的な問題解決のために従来のディシプリンを越えて複数ディシプリンを統合するとともに、それについて実践的な教育を行うという新たな魅力的な試みの例であり、本稿は社会的にも・教育的にも非常に有意義な報告となっています。

しかし、その一方で、初稿を研究論文としてみた場合、いくつかの不足している点があります。まず、この度のSDM研究科開設の経緯等はよく理解できますが、この論文の著者がそのプロセスの中で何を果たしたのかが不明です。大学自体や新たな研究科（あるいはその準備組織）が行ったことは概ね理解できますが、その中で具体的に著者が実施したことが、SDM全体の設計や構築なのか、あるいはより部分的な活動たとえば「5.2 学生による評価」、「5.3.3 実業界や海外機関との連携」などなのか、明確にしていなければならないと思います。また、その上で、本論文で論考し主張すべき内容を、整理して記述することが必要だと思います。

そこで、本稿をシンセシオロジーの研究論文とするためには、①まずSDM研究科開設にあたって著者は何を行ったのかを明らかにし、②（執筆要件にも書かれているように、）、本研究の研究目標、シナリオ、要素の選択とそれらの構成・統合、結果の評価と将来展開、などを記述し論考を完結していただきたいと思っています。

研究論文とするには、たとえば以下のことが考えられます。

（例1）複数のディシプリンを統合した新たなSDM研究科の構成方法に主眼を置く考えかた（この場合は著者が研究科開設の中心的役割を果たしたことが必要です。）

1. 研究目標：「新たに開設したSDM研究科の構成方法の発展」など。
2. シナリオ：これまでのSDM研究科・SDM学の構成方法の論考を行うことにより、今後のカリキュラム改編などを通して、真のSDM学と教育の構築に向けたシナリオを記述。
3. 要素の選択とそれらの構成・統合：SDM研究科開設にあたって、SDM学が必要とする複数のディシプリン（要素）を何故選択し、それらを全体として統合する方法をどのように作り上げて行ったか、を記述。
4. 結果の評価と将来展開：上記判断を基に「木を見て森も見る」SDM研究科の教育・研究コンセプトは徹底されたかどうかの検証を述べる。もし、所期の成果が未達成の場合はその達成のための改善策を提示し、達成された部分はさらなる発展のための課題を記す。

（例2）SDM研究科の理念・実践の検証に主眼を置く考えかた（この場合は著者が検証・評価の中心的役割を果たしたことが必要です。）

コメント・質問（赤松 幹之：産総研ヒューマライフテクノロジー研究部門）

初稿では、全体として研究科の紹介の印象が強く、論文としての主張点が明確になっていないようです。構成学として伝えたいことを明確にして、それに関係しない部分は省略するなどして、ポイントが読者に伝わるように工夫していただきたいと思っています。

シンセシオロジーの論文としては、事実の列挙に留まることなく、全体の取り組みをシナリオとして記述していただきたいと思っています。例えば、システムデザイン・マネジメント研究科のカリキュラム作り、実際の学生教育、その教育の成果、という全体のプロセスを、どのような狙いや意図に基づいて、どのように具体化していったのか、さらに、学生達による具体的な成果を見て、それによって何を学生が獲得したと判断したのか、といった狙いと事実とその解釈を明確にして記述していただくことが、読者への多くの有益な情報提供になると思います。

回答（神武 直彦）

狼がこのSDM研究科設立の提案者であり、設立のおよそ10年前から国際調査や設立準備を行ってきました。また、前野、西村は、設立当時の教員であり、前野はSDM研究科開設の全体構想と主にソーシャルスキル系科目の教育研究カリキュラム、西村は主に技術系科目の教育研究カリキュラム構築の中心的役割を果たしました。最後に、神武は、産業界からの立場として開設前から関係があり、設立1年後にSDM研究科に加わった教員です。本研究においては、新たにSDM研究科に加わった立場で、SDM研究科におけるインタラクティブな講義の遂行や国際連携、SDM研究科における教育成果の分析や検証、考察を行っています。

そのため、研究論文とするために、（例1）のような流れでの論文として、本研究の研究目標、シナリオ、要素の選択とそれらの構成・統合、結果の評価と将来展開について、記述しました。新たに作成した図1がそのシナリオであり、我々の取り組みに特に関係のある利害関係者（ステイクホルダー）との関係を明記することで、我々の取り組みと社会との関係を説明しました。その上で、そのシナリオをどのように具体化し、現状どのような成果が出ており、今後解決すべき課題はどのようなものか、などについてその事実と解釈を記述しています。論文全体の記述を大幅に変更しました。

議論2 タイトル、サブタイトル

コメント・質問（赤松 幹之）

初稿のメインタイトルが「学問分野を超えた「システムデザイン・マネジメント学」の大学院教育」となっていますが、構成学の論文タイトルらしさが足りないと思います。SDM自体が構成学であるとともに、教育システムを作ることも構成学だと思いますので、例えばタイトルは「...大学院教育の構築」として、サブタイトルは「大規模・複雑システムの構成と運用ができるリーダーの育成を目指して」など、両方の観点で構成学の論文であることを明示できるタイトルをご検討ください。

回答（神武 直彦）

ご提案下さいましてありがとうございます。本論文の具体的な内容が推察できるように、タイトルおよびサブタイトルを以下のようにしました。

学問分野を超えた「システムデザイン・マネジメント学」の大学院教育の構築

—大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材の育成を目指して—

議論3 システムデザイン・マネジメントのカリキュラムの狙い、ポイント

コメント・質問（赤松 幹之）

表1で示された大学・大学院への期待に対応して、獲得すべき能力としてA)からC)にリストで示された能力を設定したとありますが、これらのポイントを説明いただけませんか。また、同様に表2に能力と科目とのマトリックスがありますが、カリキュラムの選定の考え方、講義におけるポイント、教材の選定など、システムデザイン・マネジメント学を学ばせるための工夫がどういったところにあったのかを明記いただきたいと思っています。

回答（神武 直彦）

表1および、4.1項A)からC)で記述しましたリスト、表2の関係について不明瞭な点、冗長な点がありましたので、その関係を明確にするとともに、学生が獲得すべき能力および知識についてそれぞれの関係を含め記述を追加修正しました。なお、学生が獲得すべき能力および知識は、修正後の論文における3項のA)からF)にあたります。表1に記述した日本経団連教育問題委員会によるデータのみならず、SDM研究科開設前に実施した社会・産業界100社以上へのインタビューで得られた見聞も踏まえ、設定しました。

能力と科目のマトリックスについても、カリキュラム設定の考え方や講義のポイント、工夫を説明するために表2の記述を含め、修正致しました。具体的な説明をさせて頂くために特に必修科目に焦点を絞って3.1項に記述しました。選択必修科目、選択科目については表3として添付しました。

議論4 システムデザイン・マネジメントを学ぶための教育方法

コメント・質問（赤松 幹之）

学ぶ方法としての講義、ALPS、またSDM研究が挙げられています。講義で学べること/学べないこと、ALPSで学べること/学べないこと、SDM研究によって学べること/学べないことを、整理していただけると良いと思います。また、システムデザイン・マネジメントは、教育でどこまで学ぶことができるのか、教育の限界はどこにあるのか、といったことにも言及していただけると有益です。

回答（神武 直彦）

理論的なことを講義で学び、そこで得た知識や手法を用いて、ALPSにおいて一定の期間5-8名程度の決められたチームによってシステムをデザインする、各学生が研究を行う、というのが基本的な切り分けです。ただ、講義においても得た考え方や手法を実際に手を動かしながら学ぶというインタラクティブ性を重視しており、ALPSや研究実施の過程で必要に応じて講義を受講する、学生が自ら講師を招いて理論的なことを学ぶということを推奨しているため相互補完的な関係になっています。また、個々の専門性は、それぞれの学生による研究の過程で高めていく形になっています。

学生の大半が実務経験者であり、それぞれが各専門分野での課題をSDM研究科に持ち込み、研究を行っています。そのため、SDM研究科にてシステムに関する全ての分野を常に網羅することはできませんが、教員および学生が多様な専門性を既に持っており、「半学半教（学ぶ者と教える者の分を厳密に定めず、相互に学び合い教え合う仕組み）」の形式でそれぞれの専門的知見を教え合うことができるため、本研究科のやり方により実質的にはあらゆることを扱うことができると考えています。

しかし、それぞれの学生によって専門性や問題意識が異なるため、システムデザイン・マネジメントについて学べることは、その学生の問題意識の強さ、視野の広さ、行動力の有無に依存するところが少なからずあると考えています。その点を課題として認識しています。そのため、その点4.5項に以下のように記述しました。

「大規模・複雑システムの問題を解決するために必要となる基本的

な考え方や手法は、必修科目群によって全学生がある程度身につけられていると感じている。一方、その考え方や手法を社会・産業界で適切に使いこなすには、必修科目以外の科目をSDM研究科および他の大学や大学院で受講し、学生自らが研究や実際の業務で試行や適用を行う必要があり、その点での教育の成果の大きさは各学生の問題意識の強さ、視野の広さ、行動力の有無などに依存するところが大きい。この課題を大学院教育で全てを解決することは難しいが、SDM研究科による社会・産業界との密接な連携や各指導教員による学生への個別指導、多様な人材で構成される学生同士のさまざまな交流を更に促進することで解決できることも多いと考えている。」

質問5 文理融合や国際連携

コメント・質問（赤松 幹之）

システムデザイン・マネジメント研究科の取り組みとして多くのことが列挙されていますが、例えば、文系・理系の枠を超えた人材交流によって何を学ぶのか、国際連携教育とシステムデザイン教育との関連はどのような点にあるのか、などについて、具体的に説明があると読者が理解しやすくなると思います。

回答（神武 直彦）

○文系・理系の枠を超えた人材交流によって何を学ぶのか？

実社会は文理融合型であり、技術システムや社会システムのデザインのためには、経済学、政治学、理工学など多様な分野の知識や経験が重要だと考えています。そのため、実社会と同じ構造での学びが可能であるということがSDM研究科での文系・理系の枠を超えた人材交流の意義だと考えています。

実際、修士課程1年生が全員受講するALPSでは、チーム構成において、文系理系のみならず、国籍、実務経験の有無、年齢、男女が異なる多様な構成になるよう考慮しており、（言語のみならず）言葉の違い、考え方の違い、専門性の違いを生かしあって特定の課題を解決していく力を身に付けてもらっています。

具体的には、4.2項の記述を追記修正し、具体例を記述しました。

○国際連携教育とシステムデザイン教育との関連はどのような点にあるのでしょうか？

具体的な事例の事例によって、我々の現在までの取り組みの成果を説明するために4.1項～4.4項に記述を追記修正しました。特に、ALPSについては、あるチームの活動を説明することによって学生が獲得した能力や知識、学生によって創造されたアイデアについて説明しています。

紫外線防御化粧品と評価装置の製品化

— 産総研の論理・戦略的方法と工業技術院の経験・試行錯誤的方法を 組み合わせた地域連携型の製品化研究 —

高尾 泰正*¹、山東 睦夫²

紫外線防御化粧品の製品開発の研究事例を紹介する。最近の化粧品は、UV防御・透明感・使用感の3課題を同時に解決する必要がある。しかし、最適な製法と使用感の評価法は確立していない。本研究は、産総研の戦略的地域連携とAIST認定付与ベンチャー、事前シナリオを設定しない工業技術院時代の即効的な技術指導とを組み合わせ、新製法と新評価法を具現化し、独自性の高い化粧品および粉体評価装置を製品化した。特に社会的要素（地域連携）について、*Synthesiology*誌の提唱するアウフヘーベン型・ブレイクスルー型・戦略的選択型の研究開発の方法論と、進化論など自然現象とのアナロジーによる人文系のアイデアとを比較検証し、方法論としての一例証を示す。

キーワード:セラミックス複合粒子、紫外線防御化粧品、粉体層剪断評価、装置工学、工業技術院、産総研認定付与ベンチャー

Products and evaluation device of cosmetics for UV protection

– AIST commercialization based on regional collaboration that combines the current strategic logic, and an intermediary's experience and trial-and-error approach –

Yasumasa Takao*¹ and Mutsuo Sando²

We introduce a case study of UV-protective cosmetic product development. Recently, cosmetics need to solve 3 problems simultaneously: 1) UV-protective effect, 2) transparence, and 3) smooth-textured touch. However, the best recipe and usable evaluation methods are not established. This research is the result of a strategic regional alliance of the AIST grant venture and the technical guidance that did not set a prior scenario with immediate effect of the national research institute. A new manufacturing and evaluation method has been commercialized in the forms of a highly original cosmetics and a new evaluation device. An example of the methodology is shown concerning social factors (regional alliances), particularly. The example is illustrated by comparing 2 elements. The first is the R&D methodology that the *Synthesiology* journal advocates (the Aufheben type, breakthrough type and strategic selection type). The second is the humanities way of thinking by analogy with natural phenomena such as the evolutionary theory.

Keywords: Ceramic composite particles, UV-protective cosmetic, shearing evaluation of powder-bed, apparatus engineering, Agency of Industrial Science and Technology, AIST grant venture

1 研究の背景～「紫外線防御化粧品」の課題と問題点

本稿の目的は、セラミックス粉体技術をベースとして、戦略的シナリオと経験的な試行錯誤を組み合わせた研究開発について、方法論としての一例証を示すことにある(図1)。

最近の化粧品は、透明感や使用感に加え、有害な紫外線(UV)を遮蔽することが必須の技術的要素となっている。図2(a)のように、化粧品用セラミックス粒子にUV防御用のナノ粒子(=数10 nm粒子の光散乱サイズ効果と、チタニアのバンドギャップのUV-B遮蔽効果を利用)を加えると、セラミックス粒子間にナノ粒子の凝集体が不均一に生

ずる。所望のUV防御を達成するには、過剰にナノ粒子を加えざるを得ず、可視光の遮蔽(=透明感の低下)と、凝集粒子による高摩擦(=使用感の低下)が発生する。透明感・使用感の低下を抑えるためナノ粒子量を抑制すると、十分なUV防御能が得られないというジレンマに直面する^{[1][2]}。

そこで図1(a)のように、本研究は、UV防御・透明感・使用感の「技術的要素」に対しては、複合粒子^[1]と自乗法近似モデル^[2]を、産総研的な戦略的アプローチ^{[3][7]}(=成果と責任を明確化した短期的契約に基づく開発・連携法を意図)として、提示する(詳細なシナリオは第2章、構

1 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門、2 産業技術総合研究所 産学官連携推進部門中部産学官連携センター
〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98

1. Material Research Institute for Sustainable Development, AIST Anagahora 2266-98, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan * E-mail: lilliput@ni.aist.go.jp

Original manuscript received December 2, 2009, Revisions received March 4, 2010, Accepted March 4, 2010

成的方法論は第3章）。

また具体的な材料・製法のアイデア提案や、各組織の利益の齟齬の調整等の「社会的要素」に対して、工業技術院的（＝経験的な試行錯誤を意図）な地域連携^{[1][2]}を提案する（図1（b））。

以上、セラミックス粉体単位操作の基盤技術の応用^[1]と、産総研認定付与ベンチャー等による評価技術の確立^[2]、短期的な組織利益を一時停止した長期的連携^{[8][13]}で、粉体系材料（化粧品）と評価装置を製品化した（第4章）^{[14][21]}。特に社会的要素の解決過程について、最近の比較研究^{[3][8]}（＝自然現象^{[22][29]}とのアナロジー）を参照し、研究開発の方法論として検証する（第5章）。

2 解決シナリオ

2.1 技術的要素の解決シナリオ

化粧品の①UV防御・②透明感・③使用感を満たすには、①「高い紫外光遮蔽性」②「高い可視光透過性」③「高い滑沢性」の各技術要素を同時に達成できる製法の確立が急務である^{[1][2]}。中でも③使用感の滑沢性評価は、図3（a）に示すとおり、現状では定性的な官能試験（主にアンケート調査）しかない。まず評価試験法・装置の標準化が急務で、その上で、滑沢性の向上に資する粉体設計指針を提供しなければならない^[2]。

本研究では、現状の化粧品の設計・混合工程が、設計ではナノ粒子偏析を事前に想定しておらず、混合では単純な機械的混合が主流である点に着目した。図4のように、粒子充填模型（固相法）、水系でのナノ粒子均一分散（液相法）、液滴の急速固化（気相法）を組み合わせ、基盤技術としての複合粒子法を完成した（構成的方法論詳細は第3章）^{[1][2][14][21]}。

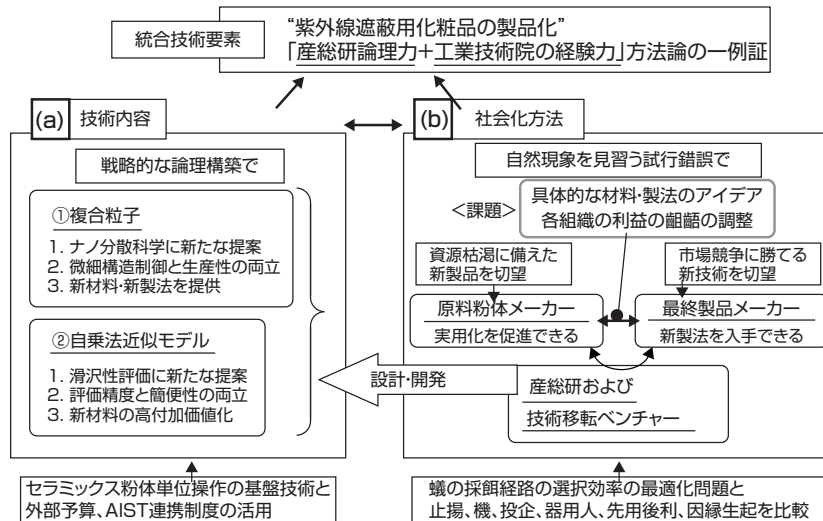


図1 論文の構成：「死の谷」克服策（技術的・社会的解決策）として
 (a) 技術的要素の解決策（＝粉体技術を用いた論理・戦略的なシナリオ）
 (b) 社会的要素の解決策（＝即効的シナリオを設定しない名工試時代の技術指導型の地域連携）

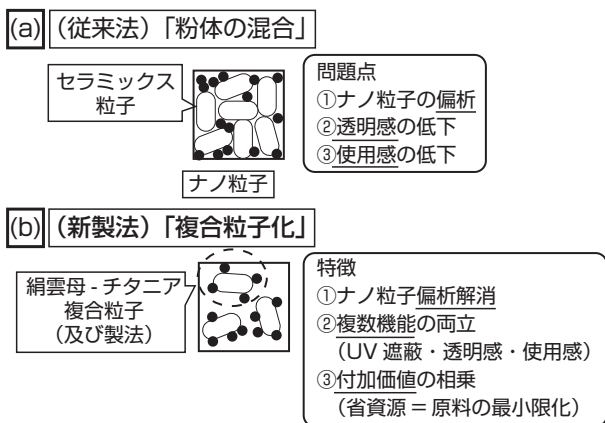


図2 紫外線防御化粧品の課題・問題点（本研究の技術的着眼点）

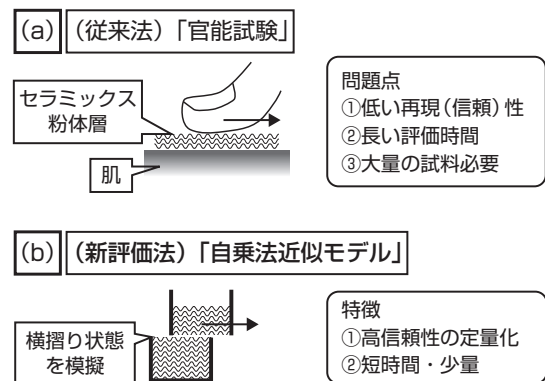


図3 化粧品の「使用感」に対する課題・問題点（本研究の技術的着眼点・その2）

滑沢性評価については、現状が治具への試料充填密度が安定し難く横摺り力の再現性が低い点（＝圧密状態の設定が困難）に着目した。短時間・少量で評価可能な基盤技術として、法線力と横摺り力の自乗法近似モデルを考案した。図5において、図5(a)に示したように従来法は、充填密度が安定するまで圧粉しており、サイロなど特定の粉体単位操作を除き、実際のセラミックス製造工程を反映した評価とならない。図5(b)に見られるように新モデルでは、遷移状態の法線・横摺り力を連続的に検出することで、圧密状態の設定問題を解決した（方法論の詳細は第3章）^{[1][2][14][21]}。

2.2 社会的要素の解決シナリオ

独自のアイデアや組織間の利害調整等、社会的要素の解決法として、90年代以前は科学や技術の研究開発と平行し、実用・製品化を優先した対症療法的な産官連携が（特に地域試験所において）行い得た^{[1][2]}。その後、広範な研究基盤や企業との信頼関係の上になった、企業～産総研間のWin-Win関係構築のための論理的・戦略的な対応の実践^{[3][7]}が目立っている。

図1(b)に示すとおり、本研究では、資源枯渇に備えた新製品を切望する原料メーカー^[15]と、市場競争に勝てる新技術を早急に求める製品メーカー^[17]間で、材料・製法の開発指針の具体化と、各組織利益の齟齬の調整という社会的問題に直面した。

本研究で選択した社会的要素の解決策を、図6に示す。工業技術院名古屋工業技術試験所時代～現在までの、セラミックス粉体単位操作の基礎研究と、外部予算・連携制度の活用経緯で、中央に年表、その上段に材料開発、下段に評価装置の経緯を図示している。地域特産品の高付加価値化を狙った技術指導から出発し（90年代）、外部予

算で粉体合成パイロットプラント建設（03年）、滑沢性評価について公的ベンチャー起業（05年）、実施契約を必須としない緩やかな地域連携を経て（07年）、粉体系材料・評価装置を製品化（10年）した（構成的方法論詳細は第3章）^{[1][2][14][21]}。

社会的要素の解決の方法論として、①アウフヘーベン型（相反する二命題を一時「止揚」し新概念を創出）②プレイクスルー型（基盤技術の一意的な「成長」モデル）③戦略的選択型（「論理的」シナリオによる仮説検証法）^[5]が、昨年 Synthesiology 誌に整理された。本研究は、短期的な組織利益の判断を一時停止（先送り）するという意味で、①アウフヘーベン型のアイデアを社会的要素に適用した事例と言える（当時は、全く無意識であったが）。

3 解決策（構成的方法論）

3.1 技術的要素の論理的・戦略的な解決策

<化粧品用セラミックス粉体系材料>

図4のように、粒子充填模型（固相法）と、ナノ粒子の液（水）中分散に DLVO 理論（液相法）を用いて、化粧品の最終形態（＝ポリマーなど他成分と配合されたセラミックス成形体状態）でナノ粒子が（雲母の粒間に）偏析しない条件を予め計算し、原料粉体の仕込み組成に反映させる^{[1][21]}。

図7に、複合粒子など、粉体の構造制御プロセスを図示する。絹雲母^[15]とナノ粒子の混合スラリーを噴霧し（気相法）、絹雲母単体とナノ粒子のみ（または複数個づつ）が含まれる状態にスラリーを分割（液滴化）する。この液滴を、連続的に乾燥（または反応）させ、セラミックス単体の粒表面のみにナノ粒子を付着させた複合粒子（図7(a)）や顆粒体を合成した（図7(b)～(d)は第4章で詳述）^{[1][2][14][21]}。

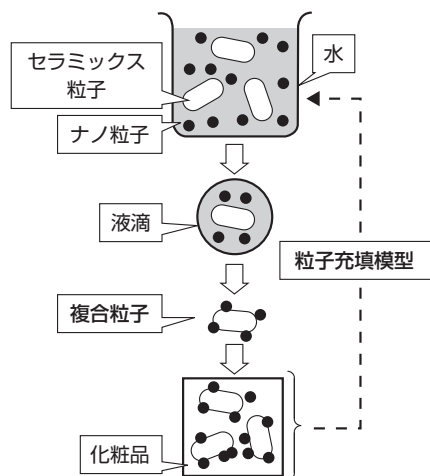


図4 技術的解決策（新製法）：制御性とコストを整合化した「複合粒子法」

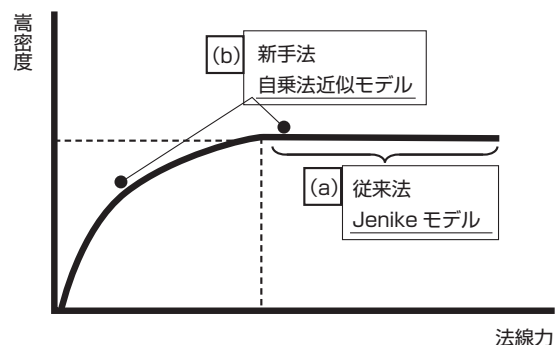


図5 技術的解決策：新評価法；法線力と横摺り力の「自乗法近似モデル」

(a) 従来法「Jenike 法」：静摩擦に相当しホップ圧密状態等を再現（与圧密状態）
 (b) 新手法「自乗法近似モデル」：動～静摩擦を網羅し、従来法では不可能な圧密過程の非定常（動摩擦）状態を定量化でき、以下の特徴を有す。①実際の粉体材料系の使用状態を再現、②高コストパフォーマンス（少試料・短時間）

<セラミックス粉体特性評価装置>

図5(a)のように、現状の滑沢性評価技術は、横摺り力の低い再現性（=測定容器への粉体の充填密度の不安定性）を解消する目的で、予め過度に圧密（「予圧密」=固め嵩密度の状態）している。この条件は、ホッパなど過充填になり易い一部の粉体単位操作を除き、化粧品や電子フィラーなど、一般的なセラミックス粉体系材料には適合しない^{[2][14][16]}。

図8に、自乗法近似モデルを図示する。図8(a)～(b)のように、充填～圧密で条件毎に試料交換していた従来法を改め、法線力・横摺り力を、0～連続的に検出する。次にクーロン粉体を仮定した法線力・横摺り力の自乗法近似で、両者の傾き（内部摩擦角）を算出する（図8(c)）。図5(a)従来法（=数学的包絡線近似）に比べ、新モデルは、遷移状態から圧粉状態まで広域に法線・横摺り力の関係を評価でき（図5(b)）、一般のセラミックス工程を反映した簡易型評価法という特徴がある。現在、本手法をJIS標準粉体や化粧品・フィラー・薬剤・食品の各実用材料に適用し、粉体評価法としての再現性と信頼性を保障するとともに、品質管理技術としての妥当性を確認している^{[1][2][14][21]}。

3.2 社会的要素の経験的・試行錯誤的な解決策

<ベースとなった地域の産官連携（旧・技術指導制度）>

図6に示したとおり、独立行政法人になる以前の工業技術院（90年代）時代より、地域の雲母メーカー^[15]と愛知

県の特産品（天然鉱物）の高付加価値化を目標に、短期的な組織利益を互いに棚上げした協働（技術指導）を開始した。その過程で、属する組織の目的の齟齬等が原因で、担当者や連携の危機を何度も経験しながら、結果的に、セラミックス粉体の基礎研究成果（新規な複合粒子や形態制御法等）と、一定の信頼関係が熟成できた^[2]。

<粉体系材料の製品化作戦>

セラミックス粉体単位操作に関する一定の進展（=第1種基礎研究レベル^{[6][7]}）は得られたが、紫外線防御化粧品の製品化と、その実施契約に至るには、完成度不足であった（≠第2種基礎研究レベル）。地域の原料メーカー^[15]・製品メーカー^[17]サイドも、実施契約例の経験に乏しく、社内の（始めから資金負担できない等）・心理的（高再現性の合成条件を重視するか否か等）な障壁も大きかった。以上、属する組織目的の齟齬から、連携の危機（=死の谷^{[3][7]}）に直面した。

一般に、これら組織間の利害調整等の社会的要素は、論理・戦略の帰納的方法だけでは必ずしも解決せず、要素の数を増やす・関係を複雑化する・時間的に一時棚上げする等、技術的外部不経済を内部化する経済的手法（LCCや、環境リスク学、ピグー税等）の必要性が多数報告されている（この構成的方法論の妥当性は第5章で検討^{[8][13]}）。

これを参考に、図1(b)のとおり産総研の当面の利益や制度（実施契約等）を一時的に棚上げ（止揚^[5]）し、先ず

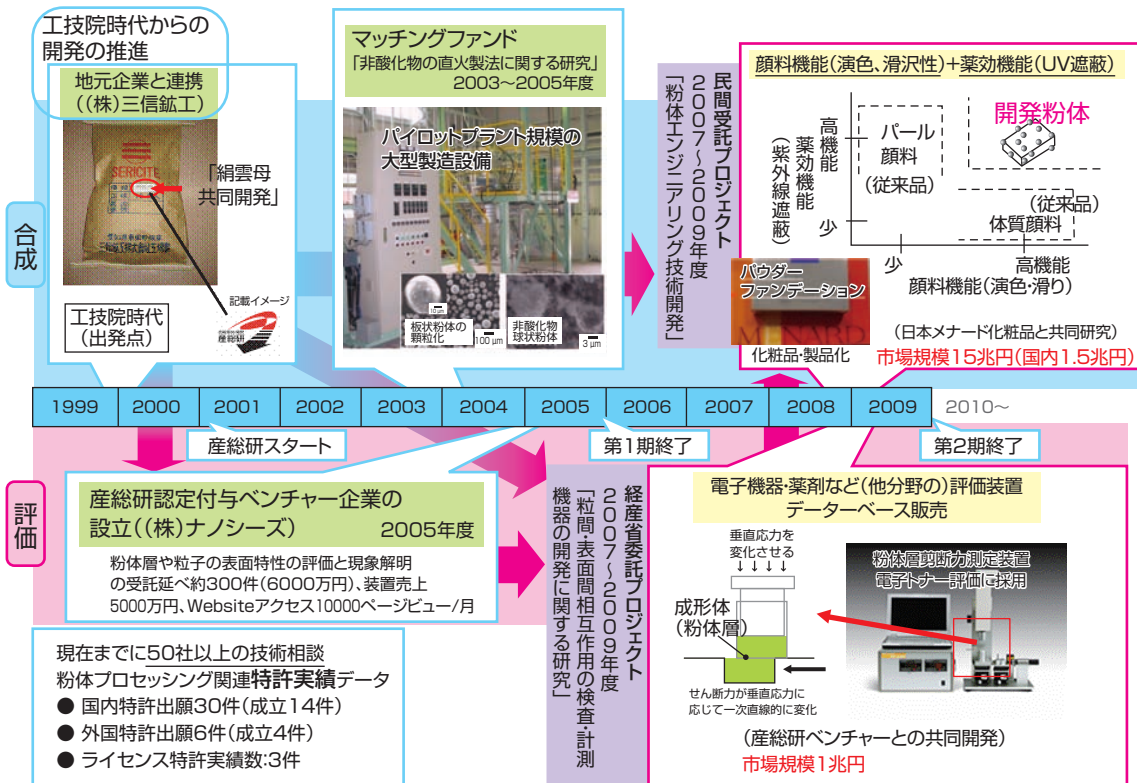


図6 研究ロードマップ（社会的課題に対する本研究の解決策の時間的経緯）

製品メーカーと緩やかな情報提供関係を構築した(02年)。この協力関係を使い、第2種基礎研究レベルを達成するための製品化の課題（化粧品原料基準（粧原基）に違反しない具体的な材料性情報等）を得た。次に外部予算を用い、実機レベルの粉体合成パイロットプラントを建設（03年）し、上記の社会的課題より先に、3.1節の技術的要素を解決した。以上、原料メーカー・製品メーカーとの受託研究契約（07年）を経て、粉体系材料を製品化（10年度予定）するという、関係調整を行った^{[1][2][14][21]}。

<粉体特性評価装置の製品化作戦>

上述の材料開発から派生して、滑沢性評価についても、第1種基礎研究レベルの進展（滑沢性の簡易型評価法のアイデア等）は得られた^[2]。しかし、紫外線防御化粧品に高滑沢性を付与できる原料粉体の設計指針や、他のセラミックスの製造現場への品質管理技術を提供可能な第2種基礎研究レベルとしては、完成度不足であった。

一般に評価技術は、独自性・希少性を要求する材料型

製品とは違って独占利用させるより、JIS や ISO 等の標準化規格のように、汎用性を訴求する複数チャンネルを有したプラットフォーム化、例えば会社組織による評価受託請負形態等が望ましい。一方で、株式会社等の組織形態は、歴史を辿れば航海の度に募集される籤のようなもので、現在であれば宇宙探査並みのリスクがある^[12]。現下のような困難な社会的状況で、これを緩衝化する一手として、公的ベンチャー論が展開されている^{[6][7]}。

そこで図6のように、産総研のTLO制度を活用し、滑沢性評価技術の受託評価や評価装置開発の公的ベンチャー^[16]を起業した（05年）。これを市場の窓口に、日常業務として複数企業からの受託評価を行って、第2種基礎研究レベルを達成するための製品化課題（=品質管理技術として不足している評価パラメーター等）を明確化した。結果、3.1節の技術的要素（①高いUV防油性②高い可視光透過性③高い滑沢性）の中の滑沢性向上に資する原料粉体の設計指針を提供できた。同時に、製品化レベルの

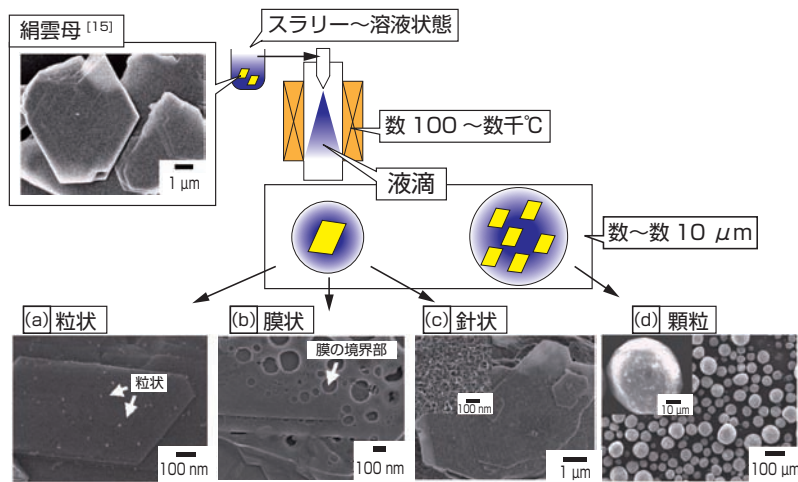


図7 技術的成果：形態制御バリエーション

- (a) 粒状被覆・複合粒子：雲母表面に粒状チタニアナノ粒子が均一に複合化
- (b) 膜状被覆・複合粒子：雲母表面にチタニア薄膜が均一に複合化（識別し易いように膜が剥離した部分のFESEM写真を示す）
- (c) 針状被覆・複合粒子：雲母表面に針状チタニア粒子が均一に複合化
- (d) 雲母・顆粒体（中実）：その他、中空体や、チタニア顆粒（中実・中空）も可能

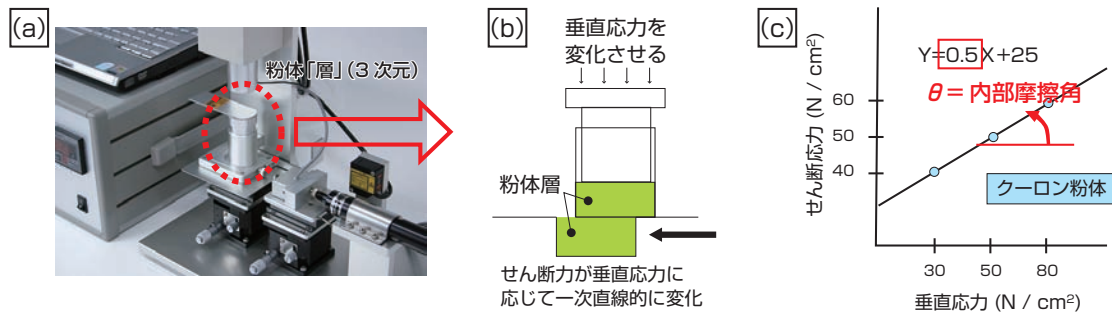


図8 技術的解決策：簡便な「内部摩擦角」の定量化法を確立

- (a) 産総研認定付与ベンチャーで製品化した評価装置の中心部
- (b) 新手法「自乗法近似モデル」の模式図
- (c) 評価パラメーター：内部摩擦角

材料設計に資する評価法であるという既成事実が、評価装置の社会的信頼性も高め、装置の普及（マーケティング）と装置開発の受注を促進（10年度）するという、関係調整に（結果的に）発展した^{[1][2][14][21]}。

4 研究成果と考察

4.1 Ordered-mixture（ナノ粒子偏析の解消）とUV防御・可視光透過性を両立

ナノ粒子の粒間の偏析を抑え、化粧品用セラミックス単体（絹雲母^[15]）の粒表面のみにナノ粒子を付着させた複合粒子（Ordered-mixture）を合成した成果を、図9（a）TEM像と図9（b）～（c）EDS線分析マップで示す。板状のセラミックス単体粒子（絹雲母）の表面（直方体の卓・端面の両方）に、微細均一に球状のナノ粒子が付着している。ナノ粒子は、単体表面以外には観察されず、粒間の偏析を抑制できている^[1]。

また図7（a）～（d）に、複合粒子の複合（被覆）状態を形態制御した結果（a）～（c）と、マイカ顆粒体（d）を示す。複合粒子は、セラミックス単体粒子の表面に（a）粒状、（b）膜状（=膜を判別し易いように敢えて膜の破断部分を撮影）、（c）針状にチタニアを析出させた。この他、板状のセラミックス単体粒子の卓・端面の一方のみに、ナノ粒子を（制御された不均一状態で）被覆させることもできる^{[1][2][14][21]}。

顆粒体として、セラミックス単体（マイカ）粒子の中実顆粒を図7（d）に示す。この他、別の板状セラミックス単体（窒化ホウ素BN）や、ナノ粒子（チタニア）の中実（又は中実）

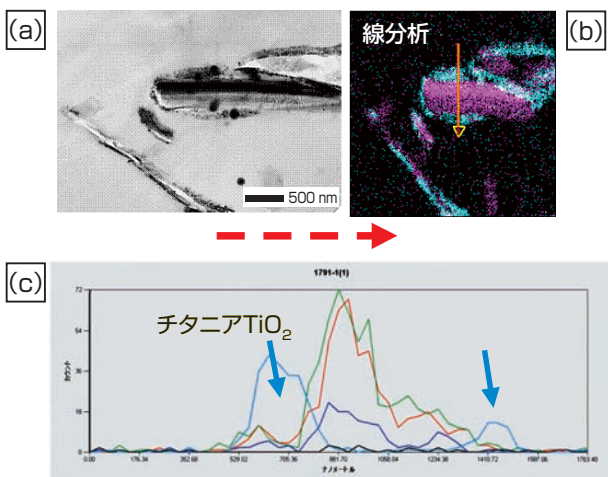


図9 技術的成果：“Ordered-mixture”状態を具現化（ナノ粒子偏析を解消）

- (a) TEM像：雲母から剥離したチタニアナノ粒子が存在しない（埋め込み研磨）
- (b) WDS面分析結果：中心の板状粒子が雲母、周囲の球状粒子がチタニア
- (c) EDS線分析結果：雲母の周囲にチタニアナノ粒子が均一に複合化

顆粒、水分を内封～吐出できる膨潤顆粒も作製可能である^{[1][21]}。

以上の形態制御は、液中の静電ヘテロ凝集・ホモ反発力と粒子充填モデルの併用等、2・3章で詳述した固・液・気相法の制御因子を適宜選択することで実施できる^{[1][2][14][21]}。

材料特性として図10に、UV防御・透明感を両立した成果を示す。図10（b）既往製品は、約400 nm以下のUV域で光透過率が下がらず、UVのみの遮蔽が不十分だけでなく、400 nm以上の可視光域でも透過率が極端に低下し、透明性が悪化している。一方、複合粒子法による図10（a）開発品は、UV域の低透過率化（=高遮蔽能）と、可視光域での図10（c）原料単体の透過率低下を抑制できた（=高い透明感）^[1]。以上により、化粧品の①UV防御・②透明感・③使用感の3課題に対し、①「紫外光だけの高い遮蔽性」②「高い可視光透過性」を達成できた。紫外光領域だけに特異的な遮蔽能を実現できた理由として、ナノ粒子の板状のセラミックス単体粒子（絹雲母）間の偏析を抑え、原料粒表面の卓・端面に「制御された異方性」状態で配合でき、色調の制御性が向上した効果を、挙げる事ができる^[21]。

4.2 滑沢性の定量化と、高使用感（素肌感）も同時に達成

図11に、紫外線防御化粧品の残りの技術的要素：③高い滑沢性に関し、図5および図8で示した自乗法近似モデルで評価した法線力・横摺り力線図を示す。図11（b）の既往製品は、図11（c）の原料単体に対し、法線力と横

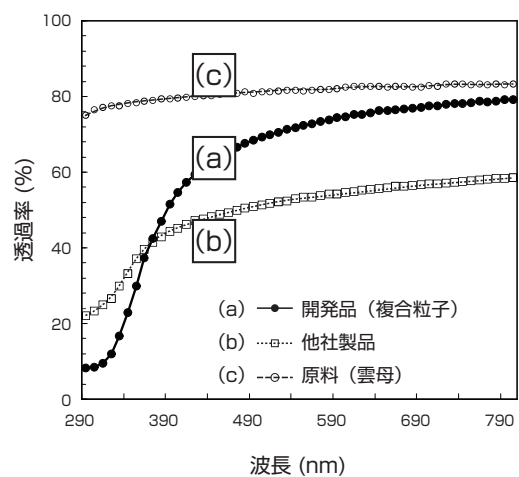


図10 技術的成果：UV防御と可視光透過性を両立

- (a) 開発品「複合粒子」＝静摩擦に相当しホップ圧密状態等を模型的に再現（理想状態）
- (b) 他社製品＝UV防御能は改善するがナノ粒子凝集のため透過（透明）性まで低下し、化粧の「顔の白浮き」が発生する
- (c) 原料（雲母）粉体＝可視光透過（透明）性は高いがUV防御機能がない

摺り力の傾き（＝内部摩擦角）が増加し、使用感が悪化している。一方、図 11 (a) 開発品により、内部摩擦角を低減でき（＝高い使用感）、高い滑沢性が達成可能となった。

高使用感の理由として、ナノ粒子の絹雲母間の偏析を抑え、原料粒子の表面のみに配合でき、（結果的に）絹雲母およびナノ粒子の使用量の極少化を実現した効果を挙げることができる。

過剰な原料使用を抑制できた効果は、3R（＝リデュース・リユース・リサイクル）のリデュース（省資源化）に相当し、サステナブルマテリアル研究部門のミッション＝「持続的発展を可能とする素材開発にむけたイノベーション推進や資源の有効活用」に、貢献できる可能性を示唆している^{[1][2][14][21]}。

4.3 具体的な製品例

図 12(a)～(c) に、合成および評価研究の製品例として、(a) 化粧品「材料」製品と、(b) 評価「装置」製品、(c) 公的ベンチャー^[16]を示す。3.2 節で述べたとおり、合成（材料）と評価（装置）研究を事前シナリオで限定せず、転用可能な基盤技術は柔軟に利用し合えるようにした。その結果、合成（材料）研究の複合粒子法が、評価装置の適用可能性の広範さを担保し、また同時に、評価（装置）研究が粉体材料の高機能化に貢献した。

以上の相乗効果が、互いの技術的要素の解決を促進し、社会的要素の競争力向上に寄与し、産総研成果活用マーク付き化粧品やベンチャーの評価装置の上梓に結実した^{[1][2][14][21]}。

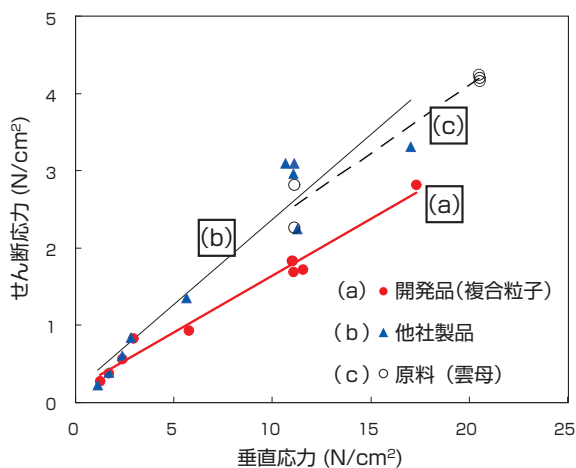


図 11 技術的成果：光学特性（図 10）に加え、滑沢性の定量化と、高使用感（素肌感）も同時達成
 (a) 開発品「複合粒子」：内部摩擦角・最小値
 (b) 他社製品：(UV 防御能は改善するが) ナノ粒子凝集のため滑沢性（使用感）は低下し、内部摩擦角が増加
 (c) 原料（雲母）粉体の内部摩擦角（両・複合体の中間値）

5 自然現象とのアナロジーによる研究開発方法論の検証と、まとめ（展望）

5.1 社会的要素の経験的・試行錯誤的な解決策の検証

本研究の、特に社会的要素の解決策を振り返り、産総研の当面の組織目標や規則を一時棚上げした判断の妥当性を、以下に考察する。

特性向上や新規性の発揮等、目標の統一化が比較的図り易い技術的要素と異なり、組織間の利害調整等の社会的要素は、論理・戦略の帰納的方法だけでは解決しないことが多数報告されている^{[8]-[13]}。

解決の方法論として Synthesiology は、①アウフヘーベン型②ブレイクスルー型③戦略的選択型を主張している^[5]。そこでは、主として技術的要素の解決策として議論されている。本研究は（2.2 節のとおり）、短期的な組織利益の判断を一時停止（先送り）するという意味で、既報^[5]のアイデアを社会的要素にも適用している。

最近、研究開発の方法論として、ポパーやソシュールらの漸進的・持続的進化論や循環・仮説検証モデル等、人文系のアイデアを用いた第 1 種基礎研究（観察）～Synthesiology 誌（事実知識）～第 2 種基礎研究（設計）の整理法が進展している^{[6][7]}。進化論など自然現象とのアナロジー^{[3]-[7]}は、組織間の利害調整の報告^{[8]-[13]}と同様、個体レベルの最適が、必ずしも全体最適とならないこと（＝合成の誤謬）を示している。

例えば木村資生の中立説は、突然変異は自然選択だけ



図 12 技術的（社会的）成果：製品例
 (a) 物質（合成）製品：開発粉体を地元メーカー^{[15][17]}より製品化（特許実施契約と産総研成果活用マークのコモディティ商品への付与：高いマーケティング効果）
 (b) 方法（評価）製品：新評価法を評価装置として産総研認定付与ベンチャーより製品化
 (c) 産総研認定付与ベンチャー^[16]

でなく、DNA レベルでは試行錯誤的に起こるといふ、進化論を細分化し、自然現象を動植物個体（論理的主体）と環境（経験的客体）に腑分けした概念である^[29]。蟻の採餌経路選択では、低い採餌能力個体が集団内に存在する方が、優秀な蟻だけの場合より、新経路の発見確率の向上等を原因に、集団採餌効率が高いことが報告されている^{[23][24]}。既報^{[8]-[13]}のような競争社会では、一方向的な論理・戦略の帰納法だけでは意思決定バイアスに陥り易く、常に新しいことを続けないと生き延びられない自転車操業の赤の女王（レッド・オーシャン）化する認知的傾向（Heuristic）が指摘されている^{[22][25][29]}。歴史人口学は、人口増減の波が1万年に4回あったことを示し、人口減少期（文明の成熟期）には、富山の薬売りやオフィスグリコなど「三方よし」や「先用後利（＝他者に先に利用して貰い他者が儲かってから返して貰う）」という概念が重視されると述べている^{[25][28]}。原因→結果の一意的ロジックだけではなく、未踏の他者まで含めて論理の射程範囲を拡張する考え方は、武道の「機」、禅の縁起（因縁生起）や隻手音声、Bricoleur（＝器用人；Claude Lévi - Strauss）などに見られる（図1（b））^{[11][13]}。

以上、局所最適≠全体最適（合成の誤謬）は、進化論など自然現象においてむしろ前提条件となっている。したがって既報^{[3]-[7]}のアナロジーには、少なくとも成熟期を迎えた現代においては、次世代技術シーズの揺籃として短期的組織利益を保留する社会的要素の解決策も、既に含意されているもの、と考える。本研究は（進化論における中立説などと同様に）、これら既報^{[3]-[13]}の方法論を、技術的要素（＝3.1節の論理・戦略）と社会的要素（＝3.2節の短期的利益の棚上げ）に細分化したものと位置づけられる。

5.2 本研究のまとめと今後の展望

本研究は、Synthesiology 誌の提唱するアウフヘーベン型^[5]に分類され、技術的要素の解決に粉体技術を用いた論理・戦略的なシナリオ法を、社会的要素の解決に（即効的シナリオを必ずしも設定しない）技術指導型の地域連携とを組み合わせた。結果、地域ブランド特産品（絹雲母^[15]）の化粧品展開と、公的ベンチャーの評価装置販売に結実し、事後的に、実施契約や産総研研究成果活用製品マークによる基礎研究の実用化につながった^{[1][2][14][21]}。

現時点の問題として、研究開発を経て実用化に至って後（死の谷の克服）、既存製品との競争など技術や製品の広範な事業化のための市場競争がある（＝ダーウィンの海^{[3]-[7]}）。複合粒子法は、複数の製法を組み合わせるため、工程増加を招き、製品単価が高くなった結果、高機能化粧品に用途が限定され、市場規模の大きい汎用品には配合し難くなっ

てしまった。自乗法近似モデルも、技術的に煩雑な側面があり、簡便なセラミックス品質管理技術として十分に認知されていない。開発期間が限られていたとはいえ、材料の機能開発や、製法・評価法の費用対効果の検討が不十分であったと、反省している。

今後、高制御製法として形態制御例の拡大や、機能・用途の新規開拓、評価パラメーターの科学的側面の明確化やJIS・データベース化を進め、汎用化を促進する。また3R（リデュース）の側面にも着目して、地域連携による利害調整で培われた信頼関係を生かし、サステナブルマテリアル研究部門のミッション＝「持続的発展を可能とする素材開発にむけたイノベーション推進や資源の有効活用」に、貢献できる可能性を模索する。

6 謝辞

本研究推進において、10年に渡り絹雲母開発に共に取り組んできた三信鉱工(株)浅井 巖主任研究員、産総研ポストドクから起業された(株)ナノシーズ島田泰拓社長および産総研成果活用マーク付き製品開発の日本メナード化粧品(株)浅野浩志主管研究員ほか、関係各位の御指導に感謝します。

参考文献

- [1] 高尾泰正, 浅井 巖, 浅野浩志, 津幡和昌, 奥浦朋子: ナノ粒子の凝集・解砕による複合粉体と顆粒体その製法と装置, 特願2009-238461 (2009.10.15).
- [2] 高尾泰正: 複合粒子と特性評価装置の開発とベンチャー起業, 産総研TODAY, 9(4), 6-7 (2009).
- [3] 中島秀之: 構成的研究の方法論と学問体～シンセシオロジーとはどういう学問か, Synthesiology, 1(4), 305-313 (2008).
- [4] 市川惇信: 科学が進化する5つの条件, 1-10, 岩波科学ライブラリー(2008).
- [5] R.K. Lester, 小林直人: シンセシオロジーへの期待, Synthesiology, 1 (2), 139-143 (2008).
- [6] 吉川弘之: オープンラボによせて, 産総研TODAY, 9 (1), 2-8 (2009).
- [7] 吉川弘之: 観察型と設計型科学者(51-69) 公的ベンチャー論(110-122) 第二種基礎研究の原著論文誌(240-249), 本格研究, 東京大学出版会 (2009).
- [8] 中西準子: 環境リスク学～不安の海の羅針盤, 1-10, 日本評論社 (2004).
- [9] 箭内道彦: 流されるから遠くに行ける(51-69), クリエイティブ合気道, アスキー(2007).
- [10] 小笠原 泰: 日本型イノベーションのすすめ, 1-23, 日本経済新聞社 (2009).
- [11] 内田 樹: 「機」の思想(158-210), 日本辺境論, 新潮社(2009).
- [12] 池田信夫: トヨタ・パブル「擦り合わせ」ではもう生き残れない(182-201), 希望を捨てる勇氣～停滞と成長の経済学, ダイアモンド社(2009).
- [13] 茂木健一郎, 南 直哉: 存在の根拠としての欠落(102-107), 人は死ぬから生きられる, 新潮社(2009).
- [14] 技術内容に関する産総研公式ウェブサイト<http://staff.aist.go.jp/yasumasa.takao/>
- [15] 愛知産の雲母「絹雲母」製品<http://www.sanshin-mica.com/CCP005.html>

- [16] 技術移転ベンチャー企業と評価装置 <http://www.nanoseeds.co.jp/co/gaiyo.html>
- [17] 実用化した地元化粧品メーカー製品 <http://www.menard.co.jp/products/skin/embellir/index.html>
- [18] Y.Takao and M.Sando: Flame synthesis of aluminium nitride filler-powder, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 34, 828-833 (2001).
- [19] Y.Takao and M.Sando: Al-system non-oxide spherical powder synthesis by liquefied petroleum gas firing, *J. Am. Ceram. Soc.*, 88, 450-452 (2005).
- [20] Y.Takao, K.Shuzenji and T.Tachibana: Preparation of aluminum oxynitride and nitride spherical powders via flame synthesis assisted by DC arc plasma, *J. Am. Ceram. Soc.*, 91, 311-314 (2008).
- [21] 浅井 巖, 浅野浩志, 津幡和昌, 奥浦朋子, 高尾泰正: ナノ粒子の表面電位や凝集性を利用した微粒子複合化技術の開発, 2009年度色材研究発表会優秀講演賞, 23A08 (2009).
- [22] Clayton M. Christensen: 持続的イノベーションと破壊的イノベーション(27-59), *イノベーションのジレンマ～技術革新が巨大企業を滅ぼすとき*, 翔泳社 (2001).
- [23] 長谷川英祐: 「集団」行動の最適化, *日本動物行動学会 Newsletter*, 43, 22-23 (2004).
- [24] 田尾知巳, 中川寛之, 西森拓: 環境変化下での蟻集団のトレイル戦略評価, *数理解析研究所講究録*, 1413, 164-175 (2005).
- [25] 野中郁次郎, 戸部良一, 鎌田伸一, 寺本義也, 杉之尾宜生, 村井友秀: 分析的アプローチと解釈的アプローチ(336-366), *戦略の本質～戦史に学ぶ逆転のリーダーシップ*, 日本経済新聞社 (2005).
- [26] 鬼頭 宏: 人口増減の波は1万年の間に4回(1-10), *人口で見る日本史*, PHP (2007).
- [27] Jacques Attali: 21世紀の企業のあり方(193-237), *21世紀の歴史～未来の人類から見た世界*, 作品社 (2008).
- [28] Niall Ferguson: マネーの系譜と退歩(金融業界と進化システムに共通する特徴) (450-470), *マネーの進化史*, 早川書房 (2009).
- [29] 吉村 仁: 溺れる子を助けられない理由(30-74), 共生する者が進化する(211-229), *強い者は生き残れない～環境から考える新しい進化論*, 新潮社 (2009).

執筆者略歴

高尾 泰正 (たかお やすまさ)

1990年に工業技術院名古屋工業技術試験所へ入所。1997年に大阪府立大学より博士(化学工学)。1998年に(財)ファインセラミックスセンターへ出向。2001年からフィンランド国立技術研究所で在外研究。本研究では、要素技術の研究開発と構成化を担当した。



山東 睦夫 (さんどう むつお)

1976年に工業技術院名古屋工業技術試験所へ入所。1987年に名古屋大学より博士(化学工学)。2004年から2年間、佐賀県工業技術センター所長。現在は中部センター産学官連携部門産学官連携コーディネータ。本研究では、地域連携企業との仲介、工技院時代から現在に至る粉体・装置工学に関する研究開発と、俯瞰的な指導・統括を担当した。



査読者との議論

議論1 技術的要素と社会的要素

コメント(清水 敏美:産業技術総合研究所研究コーディネータ)

第一稿では、技術要素の構成方法を分類するに当たって、いわゆる「技術的要素」と、予算制度や支援制度等の「社会的背景・要素」が混在した議論になっています。技術的要素だけに絞って、構成分類を考えてはいかがでしょうか。

コメント(五十嵐 一男:産業技術総合研究所生産計測技術研究センター)

第一稿では、シナリオ解決策として、始めには、「課題の技術的・社会的要素に対し、複合粒子法・自乗法近似モデルと、産総研的な戦略シナリオと工業技術院時代の地域連携を組み合わせた方法を提案する」となっていますが、結論では、「……アウフヘーベン型を再現した。」等となっています。具体的な提案が何なのか、明確に記述する必要があります。

回答(高尾 泰正)

技術的要素(論理・戦略的シナリオ)と社会的要素(経験的試行錯誤)を分離して明示できるよう、緒言以下の構成と、新原稿の図を修正いたしました。また、技術的要素の解決に粉体技術を用いた論理・戦略的シナリオを、社会的要素の解決に名古屋工業技術試験所時代の速攻的なシナリオを設定しない技術指導型の地域連携を組み合わせることを、解決策としました。

議論2 UV遮蔽

質問(清水 敏美)

本研究の目的は、UV遮蔽用ナノ粒子と化粧品用セラミックスとの新規な複合化技術を開発することにより、化粧品粉末の透明感と使用感を両立させることです。ところが、本文では、UV遮蔽、透明感、使用感の三つの課題全ての両立とあります。UV遮蔽は化粧品として当然の必要事項としますので、課題は二つ、すなわち、透明感と使用感の両立と思いますが、UV遮蔽をわざわざ課題として設定している理由は何でしょうか。

回答(高尾 泰正)

ご指摘のとおり、ナノ粒子で必然的に得られるUV遮蔽を列挙する必要はありません。現状では粒子表面に適切に配置する技術がないため、透明感・使用感を両立するにはナノ粒子を過剰に抑制しなければならず、その結果、UV遮蔽が得られなくなります。

議論3 技術要素課題

コメント(清水 敏美)

第一稿では、技術要素課題が、「UV遮蔽」、「透明性」、「使用感」とありますが、それらの用語は感覚的、非技術的な表現です。基本物性からすれば、例えば、各々「高い紫外光遮蔽性」、「高い可視光透過性」、「高い滑沢性」等と言い換えることができます。あるいはそれに匹敵する適切な「物性を表現できる用語」に修正することをお勧めします。

回答(高尾 泰正)

ご指摘のとおり、適切な「物性を表現できる用語」に修正しました。

議論4 滑沢性評価装置と技術的課題の関係

質問(清水 敏美)

使用感を定性的に評価するために、まずは滑沢性評価装置を開発したのは理解できます。しかし、本来の高い使用感、言い換えれば高い滑沢性をUVナノ粒子/セラミックス複合材料に付与するために、技術的課題としてどのような製造条件を設定し、技術課題を克服したのかが記述されていないように思います。この点に関して、単なる試行錯誤で技術的に解決したという意味でしょうか。高使用感達成を評価装置の開発で解決したという論理は容易には理解できません。

回答（高尾 泰正）

高使用感の理由として、ナノ粒子の絹雲母間の偏析を抑え、原料粒子の表面のみに配合でき、（結果的に）絹雲母およびナノ粒子の使用量の極少化を実現した効果を挙げることができます。その旨、文中に追加して記載しました。

議論5 Synthesiologyの構成法の3つのタイプ

質問（五十嵐 一男）

第一稿では、Synthesiology, 1(2), 139-143 (2008)の構成法の3つのタイプを引用していますが、本報告事例と比較する際に、何と何を比較するのですか。また、統合型の技術的・社会的解決策と記載されていますが何を意味するのでしょうか。

回答（高尾 泰正）

社会的要素の解決の方法論として、Synthesiology 誌は、①アウフヘーベン型（相反する二命題を一次、「止揚」して新概念を創出）、②ブレイクスルー型（基盤技術の一意的な「成長」モデル）、③戦略的選択型（「論理的」シナリオによる仮説検証法）と三つのタイプを整理しています。本研究は、短期的な組織利益を一次、止揚（停止）するという意味で、①アウフヘーベン型のアイデアを社会的要素に適用した事例と言えます。

議論6 社会的解決策

質問（五十嵐 一男）

社会的解決策が地域ブランドと独自製法で製品競争力を高めるという意味を教えてください。

回答（高尾 泰正）

合成（材料）と評価（装置）研究を事前シナリオで限定せず、転用可能な基盤技術は柔軟に利用しあえるようにしました。その結果、合成（材料）研究の複合粒子が、評価（装置）の適用可能性の広範さを担保し、それにより評価（装置）研究が粉体材料の高機能化に貢献しました。言い換えれば、合成（材料）と評価（装置）研究が、互いの技術的要素の解決と社会的要素の競争力向上に寄与しました。

議論7 蟻の採餌経路選択問題

コメント（五十嵐 一男）

第一稿では、自然現象との対比として「蟻の採餌経路選択問題」を取り上げ、その論理構造の類似性を挙げていますが、一般読者には、蟻の採餌経路選択問題の論理構造はほぼ不明です。さらに、新経路の発見確立の向上などが方法の高度化に有利であることと、本論文のシナリオとの関係が不明です。

回答（高尾 泰正）

「個体レベルの最適が必ずしも全体最適とならない」ということが本論文の重要視点ですので、改訂稿においては文章中でその点が明確になるよう記述しました。

コンパクトプロセスの構築

— 高圧マイクロエンジニアリングと超臨界流体との融合 —

鈴木 明*、川波 肇、川崎 慎一郎、畑田 清隆

持続可能な発展をめざすためには、大量集中生産方式をベースに構築された産業構造・社会システムおよび技術体系を早期に変革していくことが強く望まれる。必要なものを必要な場所で必要な量、かつ多品種で生産しうる分散適量生産方式の実現に向けて高速で制御性の高いコンパクトプロセスの確立が求められており、そのコア技術としてマイクロリアクタ技術と超臨界流体利用技術の融合が注目されている。これらを実現するためには、急速熱交換や精密な温度制御等高圧マイクロエンジニアリングの基盤確立が初めに必要であり、次にそれに基づいたプロセス開発が行われる。ここでは、超臨界水条件下での有機合成を中心に、無機合成、および二酸化炭素を用いた革新的塗装技術についても議論する。

キーワード: 分散適量生産方式、コンパクトプロセス、マイクロリアクタ、超臨界流体、急速熱交換

Establishment of compact processes

– Integration of high-pressure micro-engineering and supercritical fluid –

Akira Suzuki*, Hajime Kawanami, Shin-ichiro Kawasaki and Kiyotaka Hatakeda

In order to realize sustainable development, it is anticipated that industrial structure, social and technical systems based on large-scale production at concentrated sites must be changed in the near future. Establishment of highly controllable compact processes with high speed reaction is desired to realize distributed production with multi-purpose low-volume production. Integration of high-pressure micro-engineering and supercritical fluid has received considerable attention as a core technology for compact processes. To realize the technology, basic developments for high-pressure micro-engineering such as rapid heat exchange and precise temperature control were firstly needed, and then process developments on basic engineering followed. As applications of compact processes, organic synthesis under supercritical water is discussed, and inorganic synthesis and an innovative coating process using supercritical carbon dioxide are also described.

Keywords: Low-volume production at distributed site, compact process, micro-reactor, supercritical fluid, rapid heat exchange

1 研究の背景・目的

化学産業の中核である大量集中生産方式は、現在の私達の生活水準の向上に大きく寄与し、20世紀後半の繁栄をもたらした。同方式を用いれば、製品コストを飛躍的に低下させることが可能であり、多くの人々が優れた製品をなにごとに不自由なく使うことが可能となった。一般に製造コストはおよそ生産量の0.6乗で増加すると言われており、このスケールアップ則に従うと、ある生産規模で1,000円/kgの製造コストは、その10万倍の生産規模では1/100の10円/kgとなることを意味する($10^{5 \times 0.6} \div 10^5 = 10^{-2}$)。この大量集中生産方式の劇的な経済効果は、多くの分野・製品で生産規模の拡大(スケールアップ)へとつながった。しかし、同方式は一方的かつ大量の化石資源の使用を前提としたシステムであり、回収・再利用のバランスをとることが難しく、循環システムの構築は極めて困難であった。

また、大量生産の裏側では、化石資源の大量消費(→枯渇)、化石資源の地球規模の移動に伴う大量のエネルギー消費、さらには大量の廃水・廃棄物の発生などが起こり、地球温暖化や有機物汚染・化学物質汚染など多くの地球環境問題を引き起こしている。

持続可能な発展を目指すためには、大量集中生産方式をベースに化石資源のみに依存して構築された産業構造・社会システムおよび技術体系を早期に変革していくことが強く望まれる。具体的には、バイオマスなどの再生可能資源の利用を第一義に考え、かつ資源・エネルギー循環の容易な低環境負荷型の安全で小回りのきく効率的プロセスの構築が不可欠となる。すなわち、必要なものを必要な場所で必要な量、かつ多品種で生産しうる分散適量生産方式(地域適量生産方式とも言う)の実現である。そのためには、高速で制御性の高いコンパクトプロセスの確立が求め

産業技術総合研究所 コンパクト化学システム研究センター 〒983-8551 仙台市宮城野区苦竹4-2-1
Research Center for Compact Chemical System, AIST 4-2-1 Nigatake, Miyagino, Sendai 983-8551, Japan * E-mail: suzuki-akira@aist.go.jp

Original manuscript received December 11, 2009, Revisions received April 5, 2010, Accepted April 7, 2010

られる。ここで言うコンパクトプロセスとは、資源・エネルギー循環の容易な低環境負荷型の安全で小回りのきく効率的なプロセスのことで、高速で制御性の高い機能を有しており、分散適量生産方式を実現することができる。

マイクロリアクタはコンパクト性及び反応場の精密な制御可能性などから分散適量生産方式のコア技術として大きな期待を集めている^[1]。一般的には幅数 μm ～数百 μm のマイクロ空間内の化学反応を行なうための装置を指し、その目的・機能により、マイクロ反応器、マイクロ混合器、マイクロ熱交換器などに分類される。マイクロリアクタは単位体積当たりの表面積（比表面積）が大きいため、熱交換の効率が極めて高くなり、急速温度操作（加熱・冷却）や精密温度制御が可能となる。また、リアクタ比表面積が大きいことは、界面での反応が効率よく起こることを意味する。さらに、マイクロ流路は拡散距離が短いことから分子拡散による混合が急速に進行するため、高速かつ効率的な混合が行なわれる。これらの特徴は、コンパクトプロセスに求められる条件（高速で制御性が高い）と良く合致している。しかし、従来のマイクロリアクタは加工が容易なシリコン、ガラス、プラスチック系の材料が主体で構成されていて、以下に述べるような、マイクロリアクタの特性をより効果的に利用できる高温・高圧環境下では使用できない。現在、高温高圧に耐えられるマイクロリアクタの技術は確立されていない。

一方、超臨界流体は臨界点（飽和蒸気圧曲線の終点）を越えた流体として定義され、物質の3態、固体、液体、気体のどれにも属さない第4の流体と言われる。しかし特別な流体ではなく、高い密度に圧縮しても液化することのない不凝縮性の流体として理解される。この超臨界流体は、温度・圧力を変化させることにより密度を気体から液体相当まで大きく連続的に変えることができ、それに応じて粘性、拡散係数などの輸送物性や誘電率、イオン積などの溶媒物性が大きく変化する^{[2][3]}。特に、臨界点（374℃・

22 MPa）を越えた水である超臨界水の誘電率は有機溶媒並であり、高温で唯一安定な反応溶媒と考えることができる。また、イオン積を 10^{-10} 程度まで高くすることが可能であり、超臨界水に酸・塩基触媒の役割を期待することができる。これら物性は、超臨界水の高速化学反応への適用を示唆するものであり、超臨界水利用技術も分散適量生産方式のコア技術として期待されている。

2 マイクロリアクタと超臨界水の融合

2002年頃まで、超臨界水・高温高圧水による化学プロセスは、有機化合物の分解（加水分解、熱分解など）は可能だが、合成には不向きであるというのが常識であった^[4]。事実、物理化学的あるいは分光学的には、超臨界水に通常の水には無い酸・塩基性が示されてきたものの、実際にバッチ式反応装置を用いて超臨界水有機合成実験を行っても、全く目的物質が得られなかったり、あるいは収率がとても低かったりという結果の連続であった^{[5][7]}。このことから、超臨界水を有機合成に利用することは極めて困難であると考えられ、超臨界水応用の研究はしばらくの間停滞期（死の谷）に入っていた。当然その間、関連研究資金も先細りとなり、仕方なく使い古された液体クロマトグラフィ用ポンプや高圧細管を用いて自前で加工を繰り返しながらラボスケールで小型の流通式反応装置を製作し反応を行っていたところ、突然、収率が向上することが分かった。詳細に調べていくと、上述の困難の原因が、反応温度における保持時間を厳密に制御しても、その反応温度に到達するまでの加熱時間（あるいは冷却時間）が長ければ、その加熱域（冷却域）で原料や目的生成物の分解、副反応などが起こり、結果として目的生成物が得られないことにある、と理解されるに至って研究は急速に進展した^[8]。図1は、本反応における急速熱交換の重要性をイメージ図として表現している。超臨界水有機合成の発端となった反応例を以下に紹介する。

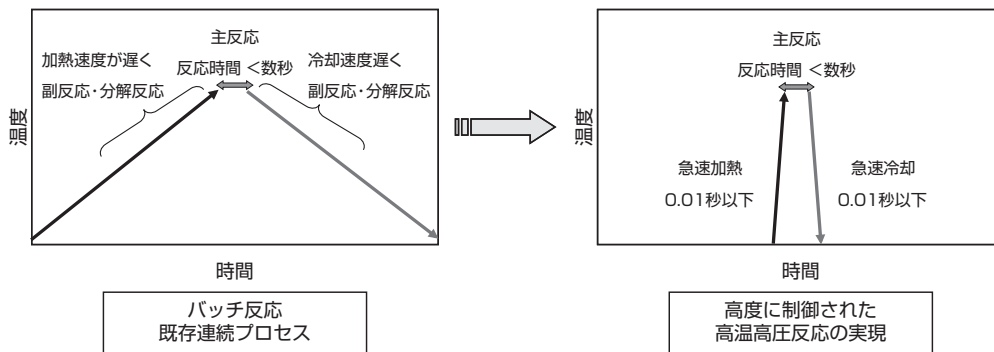


図1 超臨界水有機合成における開発ポイント（急速熱交換の必要性）

超臨界水は反応性が高く加熱・冷却に時間がかかると、副反応・分解反応が起こり主反応が阻害される。反応場への急速な投入・離脱が必須の条件。

ナイロンの原料であるεカプロラクタムの合成は、従来濃硫酸を酸触媒としてシクロヘキサノンオキシムのベックマン転位反応で行われている。しかし、この合成方法では、使用後の濃硫酸をアンモニアで中和する必要があり、その結果、大量の硫酸アンモニウムが発生、その処分が環境上・経済上問題となっていた。これに対し、超臨界水の酸触媒機能を利用してベックマン転位反応を行なう方法が提案された^{[5][8]}。実験結果を表1に示す。反応条件は400℃・40 MPaと同一であるが、バッチ操作では数%の収率に留まり、連続マイクロ反応では、80%以上と飛躍的に収率が增大した。この違いは反応時間（ここでは室温から反応温度までの到達時間+反応温度での保持時間）にあり、バッチ操作では昇温速度が遅いため、昇温過程で原料のシクロヘキサノンオキシムがシクロヘキサノンに分解されてしまうことが原因であった。これに対し、連続マイクロ反応では原料に超臨界水を直接混合することで加熱を行っており、極めて短時間のうちに反応温度まで昇温できたためベックマン転位反応が主に進行し、εカプロラクタムが高収率で合成された。これは、明らかに、マイクロ反応場と超臨界水とを組み合わせることにより単独では成し得なかった効果が得られたことを示しており、有機合成反応における超臨界水とマイクロ反応場との融合の結果である。これ以降、超臨界水に加え、臨界点以下の高温高压水の領域を含め数多くの実験的な検討が行われ、水を用いた有機合成の可能性が大きく拓けた。その後の実用化への課題は、原料物質の反応場への急速な投入（すなわち急速昇温）と生成物の反応場からの急速な離脱（急速冷却）の効率的な実現であった。

3 高温高压マイクロデバイスと高压マイクロエンジニアリングの確立

前章で議論した急速熱交換（急速加熱および急速冷却）を達成するためには、εカプロラクタム合成で採用された直接熱交換方式か、あるいは極めて高効率な間接熱交換方式の開発が必要であった。直接熱交換方式とは、加熱の場合、常温の原料と超臨界水との直接的な混合により目的温度までの加熱を達成するものであり、冷却の場合、高温高压反応物に冷却水を直接混合することにより必要な温度（反応の停止する温度）までの冷却を行う。必要な超臨界水および冷却水の温度や質量流量は熱収支計算から決定される。直接熱交換方式における熱交換速度は、原料と超臨界水、あるいは高温高压反応物と冷却水とがいかにかに混合されて平衡温度に到達するかで決まるため、混合器の混合性能に依存する。したがって、直接熱交換方式は急速混合が可能な高压マイクロ混合器の開発に帰着する。

表1 超臨界水によるε-カプロラクタム合成（実験結果）

バッチ反応では収率低いが、連続マイクロ反応では高収率達成。反応時間（加熱時間含む）の違いによる差が顕著。

実験装置	反応温度(℃)	反応圧力(MPa)	反応時間(sec)	収率(%)
バッチ反応	400	40	180	1.9
連続マイクロ反応	400	40	0.625	83.0

一方、間接熱交換方式で急速熱交換がどこまで可能かについては具体的な伝熱コンセプトに基づき後述する。

3.1 高压マイクロ混合器（直接熱交換方式）

超臨界水反応の熱交換方式として高压マイクロ混合器が使われる場合、超臨界水は粘性係数が常温の値に比べ10分の1以下と低く、かつ高流量が設定できることから、高レイノルズ数の乱流条件を適用しやすい。常圧付近のマイクロ操作では、圧力損失を大きくとることができないため流量を低くせざるを得ないが、高压マイクロ操作では、混合器で生じる許容圧力損失に比較的余裕があるため高流量が設定できる。したがって、高压マイクロ混合器は従来のマイクロ混合器のように層流条件で拡散を制御する混合方式とは異なり、強制乱流をベースとした混合方式を採用している。具体的な混合器構造としては、市販のT字型継手、スワール流れを積極的に利用したスワールミキサー、そして混合部で2液が衝突する中心衝突型混合器などが挙げられる。図2にT字型継手の例として、Swagelok社の一般型SS-100-3 (STD TEE)、マイクロ型SS-1F0-3GC (LDV TEE)を示した。Standard T字型継手 (STD TEE)の流路内径1.3 mmと比べ、Low Dead Volume T字型継手(LDV TEE)の流路内径は300 μmと小さく、大きなレイノルズ数（乱流効果）に基づく良好な混合結果が報告されている^[9]。

混合性能の比較・評価として、図3に2種類のT字継手の数値計算結果を示す。計算条件は圧力が30 MPa一定で、超臨界水は463℃、33 g/min、原料は15℃、12 g/minで供給され、混合後温度は400℃である。いずれ

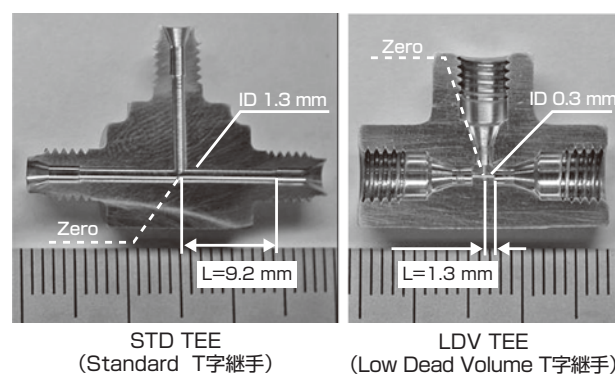


図2 T字継手 (STD, LDV)
市販の1/16インチT字継手（左が標準タイプ、右が混合流路を0.3 mmとしたマイクロタイプ）

も 30 MPa の水の物性値で計算を行った。この条件における STD (内径 1.3 mm) と LDV (内径 0.3 mm) のレイノルズ数はそれぞれ 16,700 と 72,500 となる。図 3 より、STD の場合下部から流入する低温流体と左から流入する超臨界水が混合され、混合後流体の下部流路に温度遷移域が形成され、流路内に温度勾配を生じている。一方、LDV は内径 300 μm 、長さ 1.3 mm のマイクロ流路内でほぼ均一な温度となり、迅速な流体混合が達成されている。混合後流体について、混合器中心から下流方向の鉛直断面における最高温度と最低温度をプロットしたグラフを図 4 に示す。図より、STD では継手出口 (混合点から 9.2 mm) においても温度が収束しないのに対して、LDV では混合点からわずか 1.3 mm の出口部において急速に温度が均一化することが示されている。流路内で平均して昇温速度を概算すると、STD は 31,000 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、LDV は 270,000 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ と約 9 倍の違いがある。この昇温速度、すなわち混合速度の違いは、副反応を生じるといった繊細な合成反応の精密制御が可能であることを示す結果である。

図 5 には私達が開発したマイクロスワールミキサーの写

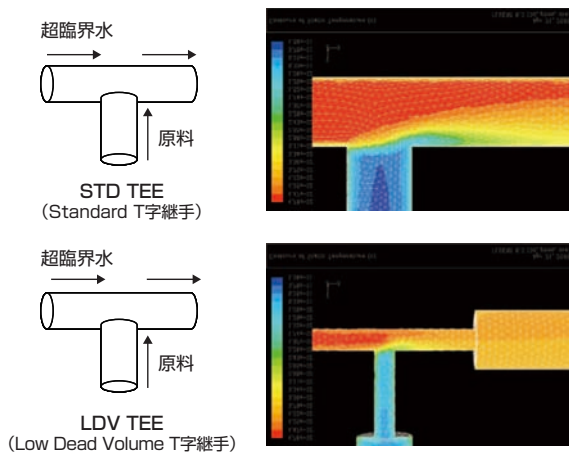


図 3 T 字継手による流体混合数値計算結果(温度コンター図) STD TEE では継手出口でも温度が一様となっていないが、LDV TEE では長さ 1.3 mm のマイクロ流路出口でほぼ均一に混合。

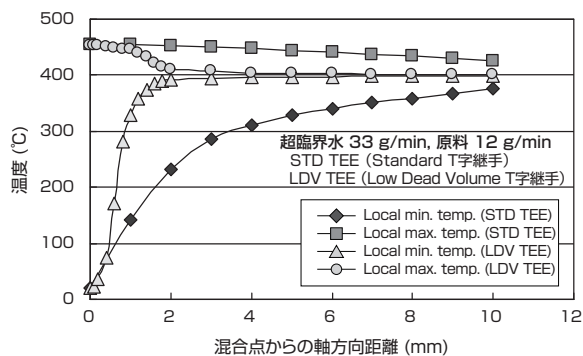


図 4 混合後流体の温度プロファイル STD TEE では温度が収束しにくい、LDV TEE では急速に均一化されている。

真と数値計算結果を示す^[10]。左から常温の原料が供給され、中心軸から 60° の角度から 2 分割された超臨界水が供給される。更に、超臨界水は混合器中心から相互に偏芯して接続されていて、混合器中心部で 2 分割された超臨界水により旋回流を発生させることができる。原料流体は、旋回流により軸方向のみならず周方向の慣性力を付与されるため、混合性能が向上すると考えられる。T 字継手の場合には、流体が必ず直角に曲がるため、曲がり部で渦を生じる。この渦領域は滞留を引き起こす原因となるため、滞留時間の増加が危惧される。一方、マイクロスワールミキサーは混合後の流体が常時旋回しているため、混合中心部付近で滞留域を形成しにくい。図 6 に示した中心衝突型混合器は、上部に上下可動式のニードルを有する原料導入管 (原料はニードル外表面にそって薄層状に導入) と、下部に複数の超臨界水導入管を有する流体混合部 (中心衝突部) との連結構造から構成され、迅速な混合と加熱を実現している^[11]。原液は超臨界水からの伝熱の影響を受けない構造 (ニードル内管の冷却媒体による冷却効果、外部フィンによる放熱効果および小型金属シールリングによる伝熱抑制) となっており、ほぼ室温のまま混合場に導入される。また、この混合器では、流体混合部におけるニードル長を連続的に変えることができ、それにより混合状態を制御することが可能である。

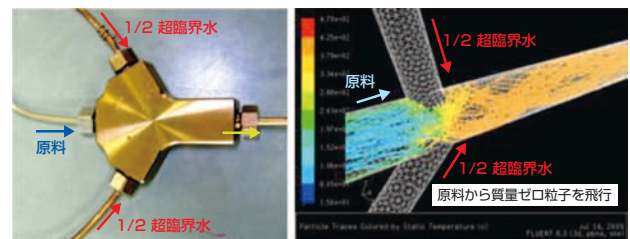


図 5 マイクロスワールミキサー写真と数値計算結果 (原料の流線) 超臨界水を二分割して旋回流を形成し原液と混合。T 字混合で起こる渦の発生を防止する構造。

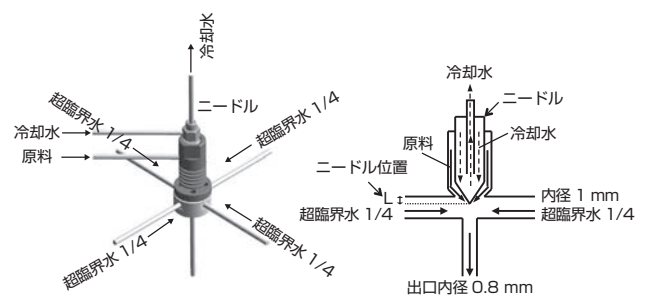


図 6 中心衝突型混合器 超臨界水は 4 分割され、原液は上部から中心衝突部へ向けて導入される。ニードルが上部から挿入されており混合状態を調節しうる。

3.2 高圧マイクロ熱交換器（間接熱交換方式）

超臨界水反応操作における熱交換器は、効率的な超臨界水製造および反応温度までの急速な昇温を実現する加熱器として、また反応後、反応停止温度域までの急速な冷却を行なう冷却器としての役割を担う。高圧マイクロ熱交換器は耐圧設計の観点から高圧マイクロチューブの採用が基本となり、チューブ内をマイクロ空間として利用する。前述したように超臨界水プロセスではある程度の圧力損失は許容できるため質量流量を大きく設定できる。そのため、マイクロチューブ内は激しい乱流状態（高レイノルズ数）となるため、管内（受熱側・低温側）境膜伝熱係数は極めて大きな数値が期待できる。問題は管外（与熱側・高温側）境膜伝熱係数をいかに大きく設定できるかにかかる。一般的な超臨界水製造装置では、加熱源としてニクロム炉からの対流伝熱および輻射伝熱を利用しているが、ニクロム炉の熱がマイクロチューブ表面へ伝わる速度である管外境膜伝熱係数は極めて小さく、それが全体の伝熱速度（総括伝熱係数）を律速する。

私達は高圧マイクロ加熱器の加熱法として、マイクロチューブそのものに電気を流し、ジュール発熱を行なう方法

を提案した^[12]。この方法を採用できれば、管外境膜伝熱係数は見かけ上無限大と考えることができ、伝熱は金属伝熱抵抗と管内境膜伝熱係数のみで決定されることになる。マイクロチューブに電気を流す方式としては電磁誘導方式と、直接通電方式の2通りが考えられるが、電磁誘導方式では誘導コイルを外部に設置することが必須であり、装置のコンパクト化という観点から制限を受けるため、今回は直接通電方式を採用した。図7に、直接通電方式を用いた高圧マイクロ加熱器（チューブ構成：内径 0.25 mm、外径 1.6 mm、長さ 200 mm）の概念図を、図8に評価結果を示す。伝熱性能は供給する純水の流量の増加につれて良好となるが、これは流量の増加により管内境膜伝熱係数が増大したためである。総括伝熱係数は最大 10,000 W/m²・℃、熱効率 95 % 以上と極めて効率的な加熱が実現できており、この結果を昇温速度に換算すると、最大 150,000 °C / 秒となる。これは、数ミリ秒で水を臨界温度以上に昇温できることを示しており、超臨界水の直接混合による昇温時間に匹敵する結果である。

本稿では、高圧マイクロ冷却器について記述を省略するが、マイクロチューブの外側に冷却ジャケットを設けることにより簡便に高圧マイクロ冷却器を構築することができる。冷却器では、冷却水の流量を大きくすることにより管外境膜伝熱係数を大きくすることができ、加えて冷却時は加熱時よりも温度差を大きく設定することができるため、比較的大きな伝熱速度をとることはそれほど難しくない。

3.3 ナンバリングアップ戦略と高圧マイクロエンジニアリングの構築

マイクロリアクタの実用化における課題として、処理量増加の達成をいかに行うかが重要なポイントとなる。従来の化学工学ではこれをスケールアップ（例えば、反応器径の拡大など）で対応するが、マイクロリアクタではマイクロ特有のメリットを生かすために、当然スケールアップ法を採用できない。そのため、並列化法（ナンバリングアップ）が

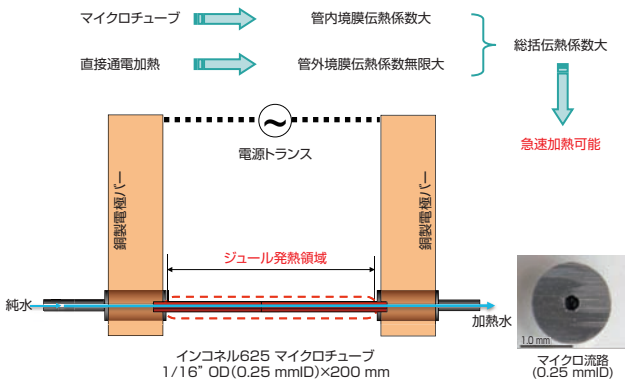


図7 直接通電加熱による高圧マイクロ加熱器の原理概念図
直接通電加熱の採用により、総括伝熱係数が極めて大きくなる。

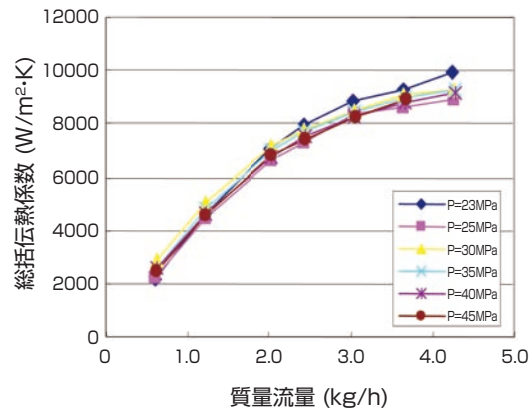
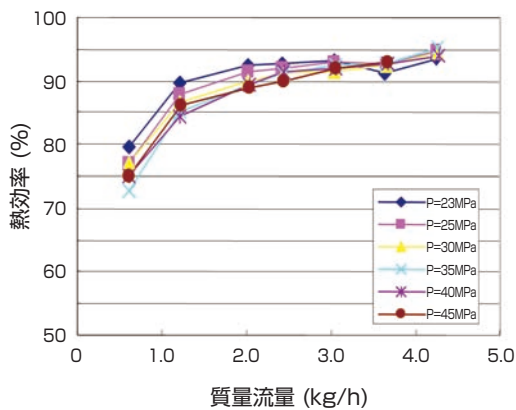


図8 高圧マイクロ加熱器の評価結果
最大熱効率 95 %、総括伝熱係数 10,000 W/m²・Kと極めて効率的な加熱が実現。

選定されるが、通常のマイクロリアクタでは基本構造当たりの処理量が小さいため、現実的な並列数とまらないケースが多い。これに対し、高圧マイクロリアクタはある程度の圧力損失を許容できるため、基本構造当たりの流量を大きくできるというメリットがある。上記高圧マイクロ加熱器もマイクロチューブ（内径 0.25 mm、外径 1.6 mm、長さ 200 mm）1 本当たり最大 5 kg/h の処理が可能であり、この高圧構造を維持したまま基本構造のモジュール化（5 本マイクロチューブ / モジュール）、更にはモジュールの並列化（4 モジュール / 装置）により 100 kg/h 規模のナンバリングアップが可能となる。ナンバリングアップ戦略のイメージを図 9 に、試作したナンバリングアップ装置の写真を図 10 に示す。この装置では、加熱を各モジュール毎の直接通電加熱（12.5 kW / モジュール × 4 モジュール）で、冷却を各モジュールの外側に設けたジャケットに冷却水を循環する方式で行った。その結果、熱交換性能は基本構造と同等であることを確認し、1 m × 2 m 程の面積で設置できるコンパクトプロセスにより、年間数百トン規模の物質生産に匹敵する熱のやり取りを急速かつ安定して行えることを実証した。ここで用いられた直接通電加熱による高圧マイクロ加熱器の

能力を従来法の電気炉加熱方式と比較すると、熱効率はほぼ 2 倍、伝熱係数は 100 倍以上と推測され、熱効率の差がエネルギー必要量の差に直結するためエネルギーコストは 2 分の 1 になる。更に、伝熱係数の差が必要伝熱面積、すなわち加熱管総長さにはほぼ比例すると考えられ、加熱管は 1/100 以下になる。100 kg/h の生産能力では上述したように、高圧マイクロ加熱器では加熱管総長さが 4 m（200 mm × 5 本 / モジュール × 4 モジュール / 装置 = 4,000 mm）となるが、電気炉加熱方式では 400 m 以上となり、設備が大型化してしまう。

図 11 に、以上述べてきたことも含めて高圧マイクロエンジニアリング構築の過程について整理した。マイクロリアクタ技術と超臨界流体利用技術の融合に向けて、急速熱交換等技術課題の明確化が土台にあり、それらを解決するための加工・接合技術等基盤技術の確立、混合器等高圧デバイス化そして各種高圧装置化の検討・構築を経て、応用プロセス開発へとステージを着実に上げてきている。

4 高圧マイクロエンジニアリングによるコンパクトプロセスの構築

4.1 超臨界水による有機合成プロセス

超臨界水・高温高圧水による有機合成プロセスは、マイクロエンジニアリング技術によるミリ秒～マイクロ秒オーダーでの急速昇温・急速冷却を実現することで、先に説明したバックマン転位反応を筆頭に、超臨界水は合成反応場として不適であるという常識を覆すこととなった^[8]。その他の一例として、芳香族のニトロ化を紹介する。ニトロ化法は、古くから硝酸と硫酸などの混酸法が汎用的であり、その製法（硫酸によるニトロニウムイオンの発生）はほとんど変わってない。しかし、混酸法は、安全性の問題に加えて廃硫酸の処理に問題があり、新たなニトロ化技術の開発

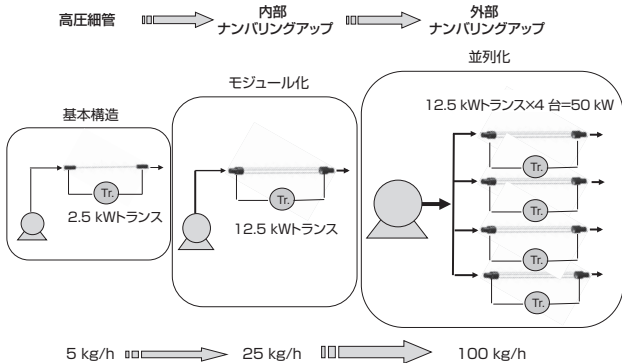


図 9 ナンバリングアップ戦略
基本構造のモジュール化、モジュールの並列化で処理量増加に対応。

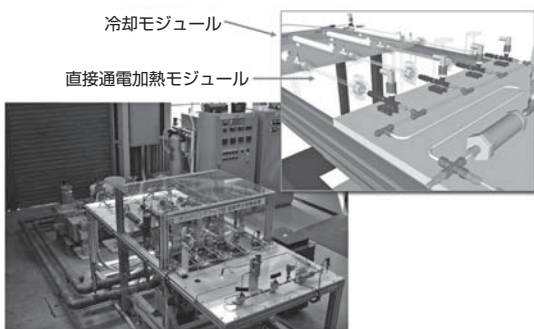


図 10 100 kg/h 級マイクロリアクタープラント
(モジュールの 4 系列並列動作)
直接通電デバイス単体での熱交換能力を維持したまま処理量アップに成功。

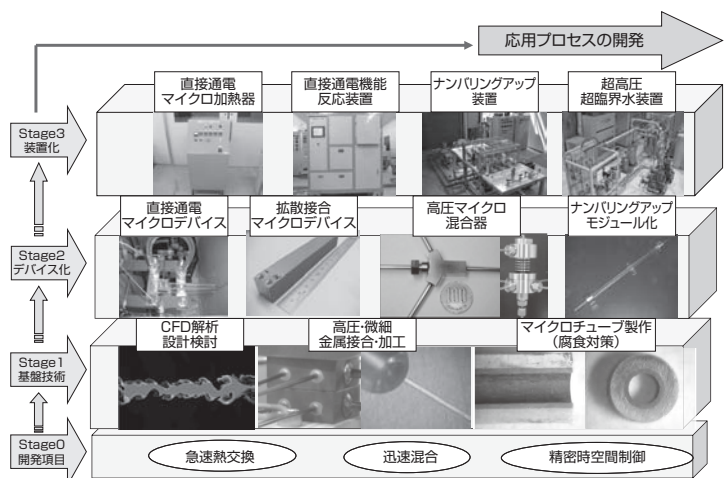


図 11 高圧マイクロエンジニアリングの構築
基盤技術構築からデバイス化、装置化を経て応用プロセス開発へ。

が望まれている。これに対し、我々は、ニトロニウムイオンを硫酸により発生させるのではなく、高圧マイクロエンジニアリング技術を用いて希硝酸を高温高圧水中でイオン化あるいはラジカル化させるニトロ化法を検討し、これらの問題を解決した。この場合、強烈な腐食性環境のため、硝酸導入後の高温高圧部はすべてチタンライニングを施したインコネルのマイクロチューブ、継手などの部材を新たに開発することで、高温高圧条件でありながら硝酸などの強酸を安全に取り扱うことに初めて成功した。これら耐高温高圧チタンライニングの部材を用いて、ナフタレンの硝酸によるニトロ化を行った。実験装置の概略を図12に、その実験結果を図13に示す。反応条件として圧力を40 MPa一定にして、温度を200～325℃の範囲で実施した。ナフタレンのニトロ化は225℃以上で進行し、反応時間わずか1.3秒ながら250℃でニトロナフタレンの収率が最大値91% (1-ニトロナフタレン収率85%、2-ニトロナフタレン収率6%)を実現した。しかも、より爆発性の高いジニトロナフタレン、トリニトロナフタレンなどがほとんど生成しないことも明らかとなった。

なおこの方法は、この他、ベンゼン、ピリジンなどの比較的広範囲な芳香族化合物のニトロ化にも有効である。さらに、高圧マイクロリアクタを用いたニトロ化法として、爆発性の高い硝酸アセチルをニトロ化剤に用いながらも精密な時空間制御・反応制御により、安全に反応を行うプロセスを開発した。この方法では、マイクロ混合器により硝酸アセチルを瞬時に発生させるが、その時の発熱を僅か±0.2℃に抑えることができ、反応温度40℃、反応時間1.8秒

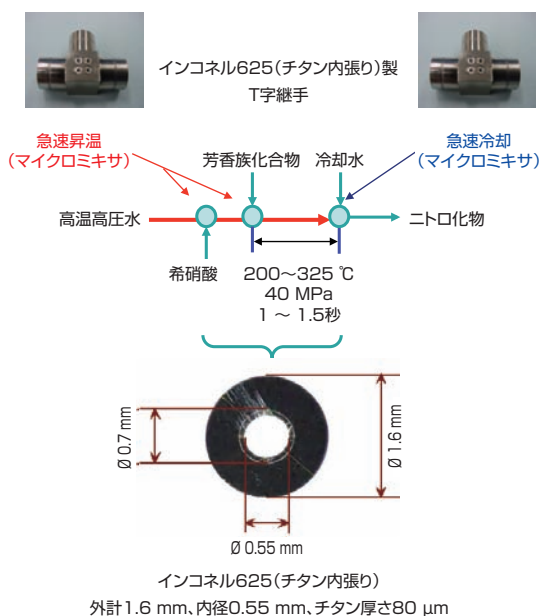


図12 高温高圧水下での無触媒ニトロ化実験装置の概要
硝酸投入後から急冷まではチタン内張りインコネル管および継手を使用。

でフェノールのニトロ化を収率96%、選択率ほぼ100%で実現した。反応は40℃という低温で行うため、腐食はほとんど起こらない上、未反応の硝酸アセチルは、反応後に水中で全て加水分解するため、系外では安全に取り扱うことができる。なお、この方法は、高圧条件ながら反応を低温で実現できるため、さまざまな置換基を有する芳香族化合物に適応でき、特に医薬中間体を用いるニトロ化にも有効である。この他、急速混合・急速昇温・急速冷却による精密制御により、水中でありながら超高速・高効率な有機反応として、ピナコール転位、クライゼン転位、エステル化などを実現している^{[13]-[15]}。更に現在では、バイオマス原料として糖類を用いた有用な化合物、例えば近年血圧降下などの生理活性が報告されている5-ヒドロキシメチルフルフラールの高収率・高選択率合成も実現している^[16]。

4.2 超臨界水による金属酸化物微粒子合成プロセス

超臨界水熱合成法は、金属塩水溶液を急速に超臨界状態まで加熱して加水分解・脱水反応で生成された金属酸化物の溶解度を激減させナノレベルの微粒子を得る方法である^{[17][18]}。亜臨界温度(200～300℃)では水熱合成反応の反応速度も低く、かつ水の誘電率は30程度と高いため、生成した結晶は大きく成長してしまうことが多い。一方、超臨界温度(代表的な温度は400℃、30 MPa)では、反応速度が高くなり、かつ誘電率も一桁となるため、生成した結晶は成長しない。したがって、この方法のポイントもいかに急速に超臨界状態まで加熱できるかにあり、この急速加熱を金属塩水溶液と超臨界水との直接混合で実現している。図14に硝酸アルミニウムを原料とした超臨界水熱合成法によるベーマイトの合成について、混合器種類を変化させて得られた生成物の粒子径分布を示した。用いた混合器は前述の16分の1インチ用STD TEE、スワールミキサー、中心衝突型混合器(ニードル位置を変化させた場合)である。反応条件は400℃・30 MPa・2秒とした。図より、標準的なT字混合器(流路径1.3 mm)と比較して、スワールミキサー、中心衝突型混合器とも粒子径が小

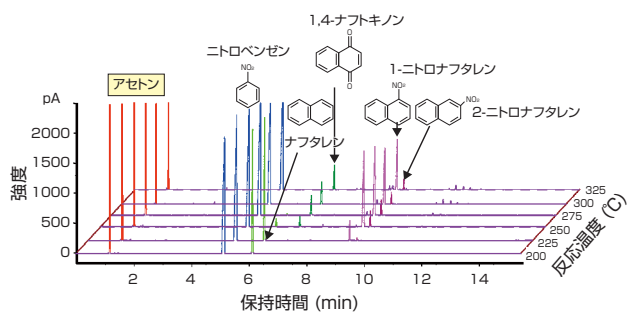


図13 ナフタレンのニトロ化実験結果
ニトロ化は225℃以上で進行し、250℃で最大収率91%を達成。

さく、シャープな分布を得た。中心衝突型混合器は流路クリアランスが狭い図中ニードル位置の $L = 1 \text{ mm}$ (図6 参照)の方が、流体混合性能が高いと考えられ、その結果急速混合による微細粒子が合成されたと考えられる。この技術は、単一酸化物だけでなく複合酸化物の合成においても有効性が示されており、蛍光体、強磁性体、透明電極、電池電極材料、触媒などと幅広い用途が期待されている。

4.3 超臨界二酸化炭素による革新的塗装プロセス

日本国内の全産業から排出される揮発性有機化合物 (VOC) の総量は約 150 万トン (2000 年度) で、その内 33 % 相当の 50 万トンが塗装工業からの排出であり、同工業が全産業の中で最大の VOC 排出業種となっている。VOC は光化学オキシダントや浮遊粒子状物質の原因物質であり、削減技術の開発が急務である。従来の有機溶剤系塗料によるスプレー塗装において大量に使用される希釈溶剤 (代表的な VOC 成分) を極少量の二酸化炭素に替えることにより、有機溶剤系塗料と同等の塗装仕上げ品質を確保したまま、VOC 発生を大幅に低減させる塗装法の開発を目指した。この技術の基本原理は米国のユニオンカーバイド社を中心に新規な塗装プロセス^[19]として開発されたが、同プロセスでは、塗料と二酸化炭素との混合方法として流体多段分割理論に基づく従来型のスタティックミキサが主に用いられており、迅速な混合を行うことが困難であった。そのため、ライン閉塞等の問題により使用できる塗料が限定されていた。これに対し、私達が開発した二酸化炭素塗装プロセスでは、混合方法として乱流混合理論に基づく高压マイクロ混合器を開発して使用しているため、極めて迅速な混合が可能となり塗料種類によらず安定的な塗装

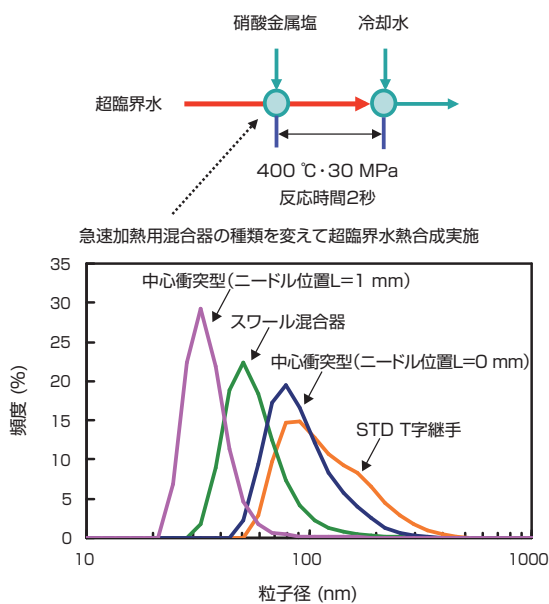


図 14 混合器によるペーサイト合成微粒子の粒子径分布
高压マイクロ混合器の違い (迅速混合性の違い) により、粒子径分布に大きな差が認められる。

操作が可能となった。二酸化炭素塗装技術の概略フローを図 15 に示す。塗料と二酸化炭素は、混合器で瞬時に混合され、二酸化炭素が塗料中に完全に溶解する。その結果として粘度が低下し、噴霧が可能となる。混合器は、超臨界水反応において急速熱交換を実現するために開発された中心衝突型マイクロ混合器を塗装用に改造して採用した。この方式で塗装 (混合器条件: $40 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 10 \text{ MPa}$) したサンプルを第三者機関で評価した結果、実用レベルの塗膜品質であることが確認された^[20]。したがって、希釈溶剤由来の VOC が基本的に削減可能であり、現状の希釈溶剤使用量 (年間数十万トン) からみて、その削減効果は莫大と推測される。

5 まとめと今後の展開

高温高压水下での有機合成・無機合成反応は、大量集中生産型の従来の合成プロセスを大きく変革する可能性を持っている。この反応場では、迅速かつ精密な温度・圧力・時空間制御を行うことにより効率のかつ理想的な物質合成が可能となり、バルクケミカルに加えてファインケミカル合成や天然物変換による高付加価値物質の創出などが強く期待される。

例えば、超臨界水有機合成の発端として紹介した ϵ カプロラクタムは、1 工場当たり年間 10 万トン規模の生産が行われており、同量の硫酸と約半量のアンモニアを消費し、1.5 倍量の硫酸アンモニウムを廃棄物として排出している。これを年間 1 万トン規模の分散適量生産方式として超臨界水有機合成で行えば硫酸およびアンモニアを使用することなく、生産が可能となる。この達成のためには、基本単位 (構造) での処理量増大に向けて、高压マイクロエンジニアリングの更なる強化が必要であるが、年間 1 万トン規模のコンパクトプロセスは実現できる規模と考えられる。

一方、二酸化炭素塗装は揮発性有機化合物 (VOC) 削

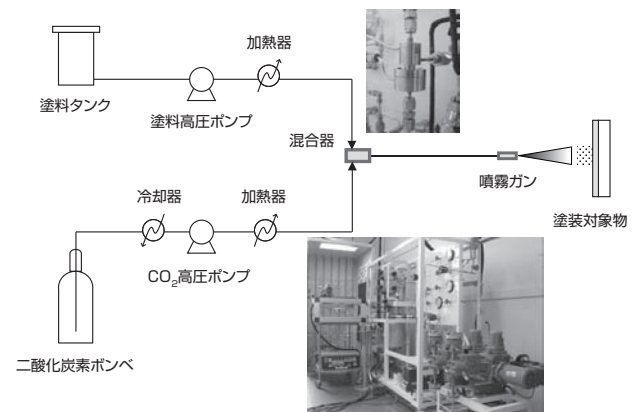


図 15 二酸化炭素塗装技術の概略構成
混合器として塗装用に開発された中心衝突型マイクロ混合器を採用。

減の中心的な技術として早期の普及が求められるが、同技術は単に VOC 削減を目的とするだけでなく、乾燥用エネルギーの減少などに伴う省エネルギー効果も期待でき、二酸化炭素削減技術として考えることもできる。さらに、二酸化炭素による霧化技術は、塗装、印刷、接着および機能性膜の塗布 (膜化) 技術として、また医薬品、ポリマーおよび機能性物質の微粒子化技術として、大きな広がりを与えさせる。

マイクロリアクタ技術と超臨界流体技術の融合を実現する高圧マイクロエンジニアリングの構築は、分散適量生産方式 (コンパクトプロセス) を実現し、持続可能な社会の形成に向けて大きな成果をもたらすことが期待できる。

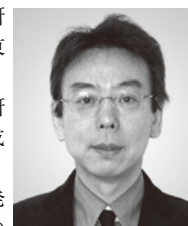
参考文献

- [1] K. Mae: Advanced chemical processing using microspace, *Chem. Eng. Sci.*, 62 4842-4851 (2007).
- [2] H. Weingärtner and E. U. Franck: Supercritical water a solvent, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44, 2672-2692 (2005).
- [3] W. L. Marshall and E. U. Franck: Ion product of water substance, 0–1000 °C, 1–10,000 bars new international formulation and its background, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 10, 295-304 (1981).
- [4] P. G. Jessop, W. Leitner eds.: *Chemical Synthesis Using Supercritical Fluids*, WILEY-VCH, Weinheim (1999).
- [5] O. Sato, Y. Ikushima and T. Yokoyama: Noncatalytic Beckmann rearrangement of cyclohexanone-oxime in supercritical water, *J. Org. Chem.*, 63, 9100-9102 (1998).
- [6] Y. Ikushima, H. Hatakeda, O. Sato, T. Yokoyama and M. Arai: Acceleration of synthetic organic reactions using supercritical water, Noncatalytic Beckmann and pinacol rearrangements, *J. Am. Chem. Soc.*, 122, 1908-1918 (2000).
- [7] Y. Ikushima, K. Hatakeda, O. Sato, T. Yokoyama and M. Arai: Structure and base catalysis of supercritical water in the noncatalytic benzaldehyde disproportionation using water at high temperatures and pressures, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 40, 210-213 (2001).
- [8] Y. Ikushima, K. Hatakeda, M. Sato, O. Sato and M. Arai: Innovation in a chemical reaction process using a supercritical water microreaction system: environmentally friendly production of ϵ -caprolactam, *Chem. Commun.*, 2208-2209 (2002).
- [9] S. -I. Kawasaki, Y. Wakashima, A. Suzuki, Y. Hakuta and K. Arai: Continuous hydrothermal synthesis of nano particles using T-shape micro mixer, *Proc. 11th Euro. Meet. Supercrit. Fluids*, (Barcelona) P_PR_36 (2008).
- [10] Y. Wakashima, A. Suzuki, S. -I. Kawasaki, K. Matsui and Y. Hakuta: Development of a new swirling micro mixer for continuous hydrothermal synthesis of nano-size particles, *J. Chem. Eng. Japan*, 40 (8), 622-629 (2007).
- [11] K. Mae, A. Suzuki, T. Maki, Y. Hakuta, H. Sato and K. Arai: A new micromixer with needle adjustment for instant mixing and heating under high pressure and high temperature, *J. Chem. Eng. Japan*, 40 (12), 1101-1107 (2007).
- [12] Y. Wakashima, K. Hatakeda, S. -I. Kawasaki and A. Suzuki: Performance evaluation of a high pressure microtube as a high-speed heating device for supercritical state generation, *J. Chem. Eng. Japan*, 41 (2), 76-83 (2008).
- [13] M. Sato, N. Otabe, T. Tuji, K. Matsushima, H. Kawanami, M. Chatterjee, T. Yokoyama, Y. Ikushima and T. M. Suzuki: Highly-selective and high-speed Claisen rearrangement induced with subcritical water microreaction in the absence of catalyst, *Green Chem.*, 11, 763-766 (2009).
- [14] M. Sato, K. Matsushima, H. Kawanami and Y. Ikushima: A highly selective, high-speed, and hydrolysis-free O-acylation in subcritical water in the absence of a catalyst, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 46, 6284-6288 (2007).
- [15] H. Kawanami, K. Matsushima, M. Sato and Y. Ikushima: Rapid and highly selective copper-free Sonogashira coupling in high-pressure, high-temperature water in a microfluidic system, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 46, 5129-5132 (2007).
- [16] 産総研プレスリリース: 安価な糖から生理活性物質HMFを迅速に製造-高温高圧マイクロリアクターにより実現-, 2009年4月20日.
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090420/pr20090420.html
- [17] T. Adschiri, K. Kanazawa and K. Arai: Rapid and continuous hydrothermal crystallization of metal oxide particles in supercritical water, *J. Am. Ceram. Soc.*, 75, 1019-1022 (1992).
- [18] T. Adschiri, K. Kanazawa and K. Arai: Rapid and continuous hydrothermal synthesis of boehmite particles in subcritical and supercritical water, *J. Am. Ceram. Soc.*, 75, 2615-1618 (1992).
- [19] チンスー・リー, ケネス・ルック・ホイ, マーク・デイビッド・ドノフー: コーティングの液体噴霧塗布における希釈剤としての超臨界性流体, 特開平01-258770(日本特許1927328), 出願日1988年1月5日 (1988).
- [20] 鈴木明, 川崎慎一郎, 相澤崇史, 小野實信, 早坂裕, 雪下勝三, 早坂宜晃, 佐藤勲征, 千代窪毅, 中塚朝夫: 高圧マイクロ混合器を用いた二酸化炭素塗装技術の開発, *塗装工学*, 44 (7), 230-237 (2009).

執筆者略歴

鈴木 明 (すずき あきら)

1978年3月東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻修了。2002年工学博士 (東京工業大学) 1978年4月水処理エンジニアリング会社に就職。超臨界水酸化プロセスの研究に従事して世界初の同プロセスの実用化に成功。2003年4月、産業技術総合研究所に入所、超臨界流体エンジニアリングを中心に研究開発を推進し、現在、超臨界技術とマイクロ技術の協奏という観点から新規プロセスの確立を目指している。本論文では、全ての部分に関与するが、特に高圧マイクロエンジニアリングの構築と、革新的塗装装置の開発を主に担当した。



川波 肇 (かわなみ はじめ)

1997年3月東北大学大学院理学研究科化学第二学科博士後期過程修了。博士 (理学)。近畿大学理工学部助手などを経て2001年4月産業技術総合研究所に入所。有機合成・有機反応の立場から特に二酸化炭素と水の高圧高温条件下での化学を推進してきた。第4回グリーン・サステナブルケミストリー賞経済産業大臣賞 (2005年) を受賞。本論文では、高圧マイクロエンジニアリングを用いたコンパクトプロセスの構築、超臨界水による有機合成プロセスを担当。



川崎 慎一郎（かわさき しんいちろう）

1996年3月鹿児島大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。1996年4月水処理エンジニアリング会社に就職し、難分解性有害廃棄物（ポリ塩化ビフェニル、ダイオキシンなど）の完全分解技術として超臨界水酸化プロセスの実用化研究に従事した。2006年3月東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻博士後期課程を修了し、博士（環境科学）。同年4月産業技術総合研究所に入所し、超臨界水および超臨界二酸化炭素利用技術のエンジニアリング研究を行っている。特にマイクロミキサーの開発に注力し、流体混合デバイスの基盤研究を中心として、超臨界水熱合成による金属酸化物微粒子合成の研究を行っている。本論文では、マイクロ混合器の開発、超臨界水による金属酸化物微粒子合成プロセスの開発を担当。



畑田 清隆（はたけだ きよたか）

2005年3月東北大学大学院環境科学科博士後期課程修了。博士（環境科学）。1966年産業工芸試験所入所。その後、組織変更に伴い東北工業試験所、東北工業技術研究所を経て産業技術総合研究所へ。超臨界水有機合成の発端となったε-カプロラクタム合成を実験的に明らかにした。本論文では、高温高压水条件下のニトロ化合物の連続合成系を本質的に担当。



査読者との議論

議論1 全体的に

コメント（原田 晃：産業技術総合研究所東北センター）

副題「高压マイクロエンジニアリングと超臨界流体との融合そして協奏」ですが、「融合」と「協奏」の意味について解説して下さい。

回答（鈴木 明）

副題として付けた「高压マイクロエンジニアリングと超臨界流体との融合そして協奏」は、単なる「1+1=2」的な融合ではなく、超臨界流体の特性が高压マイクロエンジニアリングを用いることで3にも4にもなるということ表現しております。近年、化学の世界でも「協奏的反応場」なる言葉も使われ始めています。ただし、「融合」という言葉の中にも単なる合流という意味合い以上の要素も含まれていると思いますので、読者の理解のためには「協奏」を削除し、「高压マイクロエンジニアリングと超臨界流体との融合」としたいと思います。

コメント（大和田野 芳郎：産業技術総合研究所研究コーディネータ）

専門外の読者のために、本稿で紹介されているコンパクトプロセスは、次のどちらに該当するかが書いてあるとよいと思います。

- 1) 従来不可能だった合成を可能にしている
- 2) 従来法に比べて低環境負荷または高い収率を実現している。

また、2) ならば、従来法と比べて、生産量(の可能性)や省エネルギーなどが定量的にどうなのか、どんな価値を目標とするのかを、できる範囲で示して下さい。例えば、「ナンバリングアップ戦略」の後半や、最後の「今後の展開」に、何の製法、どんな産業に用いられていくのか、やや具体的な将来像を示せるとよいと思います。

回答（鈴木 明）

本稿で紹介したコンパクトプロセスは、従来、大量集中生産方式で生産されていたバルクケミカルなどを、必要な場所で必要な量を生産する分散適量方式に転換するための高速で制御性の高いプロセスを意味しています。したがって、従来不可能だった合成を可能にするものではなく、従来法に比べて低環境負荷であり、かつ高収率を実現するプロセスです。本稿では、有機合成例として二つの反応例（ベッ

クマン転移、ニトロ化）を挙げておりますが、両者とも従来は濃硫酸を酸触媒として用いていましたが、コンパクトプロセスでは濃硫酸の役割を高温高压水が担うことにより、無触媒（硫酸未使用→低環境負荷）かつ高速（マイクロ反応→高収率）のプロセス構築が可能となりました。

以上の議論を明確化するため、「ナンバリングアップ戦略」の中で従来技術と比較してマイクロ熱交換の優位性を記述し、さらに「今後の展開」において、εカプロラクタム合成を例に取り、生産量増大の可能性などについて記述しました。

コメント（原田 晃）

この論文で使われている「コンパクトプロセス」という言葉は、一般的な意味合いよりは狭義な、化学工業に特化した意味を持っているものになっているように思います。専門外の読者のために、「コンパクトプロセス」とは何かをどこかで定義してはどうでしょうか。

回答（鈴木 明）

本文中に、「ここでいうコンパクトプロセスとは、資源・エネルギー循環の容易な低環境負荷型の安全で小回りのきく効率的なプロセスのことで、高速で制御性の高い機能を有しており、分散適量生産方式を実現することができる。」と記載しました。

議論2 循環システムの構築でのバランス

質問（原田 晃）

「1. 研究の背景・目的」の中での議論で、「回収と再利用のバランス」が重要と主張しているが、このことが循環システムの構築にとって必要条件になるのでしょうか。

回答（鈴木 明）

大量集中生産方式では、扱う量が極めて多量であり、ある工程から排出される副生物の回収や廃棄物の再生により他工程、あるいは他工場での再利用が可能としても、需要と供給のバランスや移動の問題などにより現実的な対処法となり得なかったと考えています。すなわち、循環システムの構築が困難であったと思われる。

議論3 従来法との比較

質問（原田 晃）

「2. マイクロリアクタと超臨界水の融合・協奏」ですが、論旨からすると、まず従来法との比較が必要ではないかと思いますが、いかがでしょうか。

回答（鈴木 明）

濃硫酸を用いたベックマン転移によるカプロラクタム合成は、収率98%と高効率プロセスです。一方、表1に記載した高温高压水のみによる収率は83%であり数値的には劣りますが、濃硫酸を全く使用しないという大きな優位性があります。ここでは、反応時間を精密に制御すれば超臨界水のみで収率が急激に上がるということを強調すべく、従来法の収率にはあえて言及しませんでした。

議論4 電磁誘導のメリット

質問（原田 晃）

「3.2 高压マイクロ熱交換器」の電磁誘導のメリットは何でしょうか。今回は「大きさ」で不採用になったとのことですが、どういうときはこちらのほうが優れているのでしょうか。

回答（鈴木 明）

直接通電と比べて、電磁誘導のメリットは漏電対策が不要であること、誘導コイルの巻き方により加熱強度を変えられることなどと考えられます。どちらが良いかはケースバイケースですが、誘導コイルを必要としないため、マイクロデバイス化には直接通電の方が優れていると考えています。

正確性・コストパフォーマンスに優れた遺伝子定量技術の 開発と実用化への取り組み

— 蛍光消光現象を利用した遺伝子定量技術の開発 —

野田 尚宏

遺伝子定量技術は医療、農業、水産業、環境、食品等の幅広い分野で利用されており、社会的にも重要な技術である。筆者等は、グアニン塩基との相互作用により蛍光が消光する現象に着目し、それを利用した正確性・コストパフォーマンスに優れた新しい遺伝子定量技術を開発した。本稿では、既存の遺伝子定量技術に内在する問題を克服するために選択した要素技術とその統合・構成による新規遺伝子定量技術開発に関する研究展開を中心に、企業と取り組みつつある開発技術の実用化に関するシナリオについて論じる。

キーワード：遺伝子定量、蛍光消光、生命科学、蛍光プローブ

Development of an accurate and cost-effective quantitative detection method for specific gene sequences

– Development of a quantitative detection method for specific gene
sequences using fluorescence quenching phenomenon –

Naohiro Noda

DNA and RNA quantifications are essential in various fields such as biomedicine, agriculture, fishery, environment, and food. We have developed an accurate and cost-effective method for the quantification of specific nucleic acid sequences; the method involves the use of the fluorescent quenching phenomenon via an electron transfer between the dye and a guanine base at a particular position. This paper describes the elemental key technologies and their synthesis for the development of such a gene quantification method. Furthermore, based on the findings of a collaborative research project with a private company, we report the scenario for the industrialization and the practical use of the developed method.

Keywords: Gene quantification, fluorescence quenching, life science, fluorescent probe

1 はじめに

遺伝子解析技術は医療、農業、水産業、環境、食品等、経済社会活動の幅広い分野で利用されている。中でも臨床検査分野での遺伝子解析用途での利用が広まりつつある。具体的には、C型肝炎ウイルスの検査薬キットや結核菌診断薬等がすでに商品化されており、B型肝炎ウイルス、ヒト免疫不全ウイルス、敗血症原因菌等の検査にも遺伝子解析技術は利用されつつあるほか、ベンチャー企業等が生活習慣病に関連する遺伝子型解析の受託サービス等を始めている。臨床検査分野以外にも、犯罪捜査でのDNA型鑑定による個人識別、食品中の食中毒原因微生物検出、遺伝子組み換え食品の混入率検査、品種鑑別さらにはバイオテロや環境計測等にまで遺伝子解析技術は利用されるようになってきている。今後も遺伝子解析技術が

利用される分野が広がっていくことは確実であると言えるが、遺伝子解析技術の中でも特定の遺伝子を検出・定量する技術は最も基礎的で重要な技術の一つである。

一般的に遺伝子定量技術等の定量分析法に関する定量性の評価項目は、(1) 特異性 (specificity)、(2) 真度 (trueness)、(3) 精度 (precision)、(4) 検出限界 (detection limit)、(5) 直線性 (linearity)、(6) 範囲 (range)、(7) 頑健性 (robustness)、(8) 分析法間比較同等性 (commutability)、の8点に集約することができる。特異性とは、共存する類似分子が存在する中で対象とする分子のみを正確に測定する能力であり、核酸検出においては標的核酸分子とそれ以外の配列を持つ核酸分子をきちんと識別できるかどうかという点が重要となる。真度は、測定結果と測定対象の真の値との間の一致の度合を指し、精度

産業技術総合研究所 バイオメディカル研究部門 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6
Biomedical Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan E-mail: noda-naohiro@aist.go.jp

Original manuscript received January 26, 2010, Revisions received February 15, 2010, Accepted February 19, 2010

は、繰り返し測定を行った際の測定結果のばらつき（低さの）度合を意味する。検出限界は測定対象分子を検出する際の最低量を指し、定量限界の場合は適切な真度と精度を保って定量できる測定対象分子の最低量を意味する。直線性は、一定の範囲内で測定対象分子の物質量と測定結果が直線関係で表される能力の度合であり、範囲は、適切な真度、精度、直線性を与える測定対象分子の濃度の上限および下限を意味する。頑健性は、測定条件が変動した場合に測定値が影響を受けにくい度合を意味し、例えば遺伝子定量においては阻害物質の混入の影響等もこの要素に影響を及ぼすものと考えられる。分析法間比較同等性は、得られた測定値に関して、同一試料を他の（基準となる）方法で測定した結果と比較した場合の測定値の同等性を意味する。これらの定量性の指標以外にも、計測の実用化の観点から、簡便性、コストパフォーマンス、スループット性、迅速性等が重要な要素となる。実用的な遺伝子定量技術の開発を想定した場合には、その技術が一定水準以上の特異性、真度、精度、検出限界を持つのは当然のことであるが、さらにその上で頑健性（阻害物質の混入等があっても正確な定量が可能）および簡便性が高く、コストパフォーマンスに優れている方法が普及しやすいと考えられる。

特定の遺伝子（定量対象の遺伝子）の定量においては、試料中に含まれる標的対象遺伝子は通常極めて微量な場合が多いということを念頭に置かなくてはならない。したがって特定の遺伝子の定量を行うためには、まず雑多な核酸混合物の中から目的とする遺伝子のみを特異的に増幅する必要がある。この目的遺伝子の増幅法にはさまざまな方法が考案されているが、最も良く利用されている方法が Polymerase Chain Reaction (PCR) 法である。PCR 法はノーベル化学賞を受賞した米国の研究者キヤリー・マリスが 1984 年に開発した方法であるが、耐熱性のポリメラーゼ、反応の起点となる短い DNA 断片（プライマー）等の試薬を利用し、温度のサイクリックな変化を与えるという簡単な方法で指数関数的に目的遺伝子を増幅することができる。しかし、PCR 法による最終的な増幅産物量は必ずしも最初の反応溶液中の標的遺伝子量を反映しないため、最終増幅産物量から最初の標的遺伝子量を直接定量することができないという問題がある。そのため、PCR を利用して目的遺伝子を定量する技術（定量的 PCR 法）においては、最初の反応溶液に含まれる標的遺伝子の量を測定するための工夫が必要になる。

定量的 PCR 法にはリアルタイム法^[1]、競合法^[2]、限界希釈法 (MPN 法)^[3] 等、測定原理の異なる方法がいくつか開発されている。その中で最も利用されている方法がリア

ルタイム法である。リアルタイム PCR 法では PCR の 1 サイクル毎に増幅産物の量を測定し、指数関数的な増幅反応が起こっている領域において、反応産物が所定の量に達するのに要したサイクル数 (Cycle of threshold: Ct) を求める。この Ct と初期の反応溶液に含まれる遺伝子量の関係をあらかじめグラフにしておくことで (標準曲線)、未知試料について求められた Ct をもとに標準曲線から初期の反応溶液中の標的遺伝子の量を算出することができる。

リアルタイム PCR 法においては増幅産物の量を 1 サイクル毎に測定する必要がある。このために増幅産物の量を蛍光で識別定量する手法が利用されている。代表的な方法として、SYBR Green 等のインターカレーターを用いる方法^[4] と TaqMan プローブ法^[5] のような蛍光プローブを用いる方法がある。SYBR Green は DNA の 2 本鎖に取り込まれると蛍光を発する特殊な蛍光色素 (インターカレーター) の 1 種で、PCR の反応溶液に SYBR Green を加えておくと、PCR によって増幅された 2 本鎖 DNA に SYBR Green がインターカレートして蛍光強度が増加する。この蛍光強度を計測することで PCR 産物の量を測定することができる。この方法はどのような配列の標的遺伝子に対しても同じ試薬で対応することができ、低コストで簡便であるため広く利用されている。一方でプライマーダイマーのような非特異的な増幅産物でも蛍光が増加してしまうため、蛍光強度と PCR 産物量が必ずしも一致しない場合もあるという欠点がある。TaqMan プローブ法は図 1 に示したように、標的遺伝子の増幅領域の一部分の塩基配列に対応したオリゴヌクレオチドの一端をレポーター (蛍光色素) で標識し、もう一方の端をレポーターの蛍光を消光させるためのクエンチャーで標識したプローブ (TaqMan プローブ) を用いる方法である。PCR の反応溶液に TaqMan プローブを加えておくと、PCR 増幅産物に結合した TaqMan プローブが

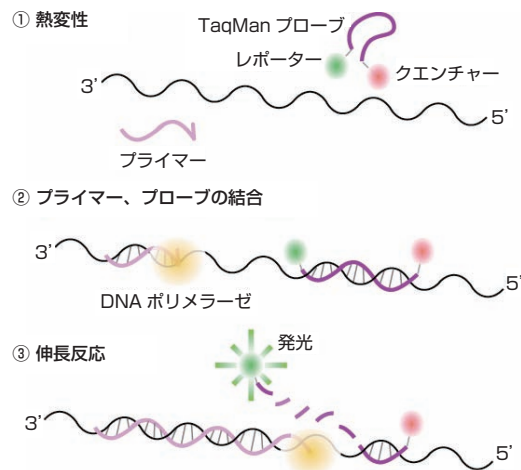


図 1 TaqMan プローブ法

DNA ポリメラーゼの 5' → 3' エキソヌクレアーゼ活性による伸長反応によって分解される。プローブが分解されると、レポーター蛍光色素はクエンチャーと離れることから本来の蛍光を発するようになる。この蛍光強度を測定することにより PCR 産物量を計測することができる。TaqMan プローブは増幅産物にのみ特異的に結合することから、プライマーダイマーのような非特異的増幅産物の影響を受けないため、特異性の高い定量が可能である。本手法も幅広く利用されているが、二つの蛍光色素による標識が必要である。

リアルタイム PCR 法は、比較的短時間 (30 分～2 時間) に標的遺伝子の量を測定することができる、ゲル電気泳動が不要なため PCR 増幅産物による実験室の汚染の心配が少ない、といった利点を持ち、真度・精度にも優れている。さらに遺伝子増幅を伴うため検出限界も低く、測定範囲も $10^5 \sim 10^8$ コピーに達する。しかし、1) 増幅産物の量を測定するために PCR の 1 サイクル毎に蛍光を測定する必要があるため、蛍光測定装置と PCR 用サーマルサイクラーが一体となった高価なリアルタイム PCR 装置が必要 (導入コストの問題)、2) 蛍光プローブ法の場合には特異性は高くなるが、増幅産物量の測定のために標的遺伝子毎に蛍光プローブを設計・合成する必要がある (ランニングコストパフォーマンスの問題)、3) 測定試料中に PCR を阻害する物質が入っている場合には標的遺伝子の量が過小評価される、もしくは擬陰性となる場合がある (頑健性の問題) のような欠点も存在する。今後の遺伝子定量技術の実用化面で、on-site での多検体を対象とした遺伝子定量技術の利用等を見据えた場合、頑健性、簡便性、コストパフォーマンスに重点を置きつつ、他の項目は既存の技術 (リアルタイム PCR) と同等のレベルを保持した技術開発が望まれている。

本稿では、上記のような観点から既存のリアルタイム PCR 法に内在する問題を解決する新規技術として開発した二つの定量的 PCR 法を紹介するとともに、開発した技術の実用化を目指した企業との取り組みについても述べる。

2 正確性・コストパフォーマンスに優れた遺伝子定量技術開発のためのシナリオ

2.1 技術開発のためのコア技術：グアニン塩基による蛍光消光現象

既存のリアルタイム PCR 法に内在する問題を解決すべく、1) 標的遺伝子が変わっても 1 種類の蛍光プローブで対応できる (蛍光プローブの汎用化によるコストダウンの実現)、2) PCR 阻害物質の存在下でも正確な定量が可能、という二つの課題を克服する新しい定量的 PCR 法の開発を行った。この技術開発においてコア技術としたのが「グ

アニン塩基による蛍光消光現象」である。そもそも蛍光とは、(蛍光性の) 分子が光を吸収して励起状態分子に遷移し、元の基底状態分子に戻る時に発する光を指す。すなわち、分子の励起状態と基底状態のエネルギーの差が蛍光エネルギーとして放出されているのである。分子が励起状態から基底状態に遷移する時に、近くに電子密度が高い別の分子が存在すると、この分子が電子供与体として蛍光分子に電子を供与するという現象が起きる。この時、もともとの蛍光分子で励起された電子は基底状態に戻ることができなくなるため、本来の蛍光を発することができなくなり蛍光が消光するのである。この現象は光励起電子移動反応 (Photoinduced Electron Transfer: PET) と呼ばれており、分子内・分子間で起こることが知られている^[6]。核酸を構成する塩基の中ではグアニン分子の電子密度が最も高いために、この光励起電子移動反応による蛍光消光を引き起こしやすい。すべての蛍光色素がグアニン塩基との間で蛍光消光を起こすわけではなく、BODIPY FL や TAMRA といった、いくつかの蛍光色素が特にグアニン塩基との間で蛍光消光を起こしやすいことが知られている^[7]。

グアニン塩基による蛍光消光現象は可逆的反応であるので、核酸の検出・定量のためのツールとして使い勝手が良い。末端のシトシン塩基に BODIPY FL を標識した 20 塩基長程度の蛍光プローブに対して、完全に相補的な DNA を準備し、同一の反応溶液内で結合 (ハイブリダイゼーション) が起こるように温度等を調節すると BODIPY FL の蛍光は消光する。その後、温度を上昇させるなどをして、結合を解離させると BODIPY FL は再び蛍光を発するようになる。このように、結合・解離を制御することで蛍光の ON/OFF を制御することができる。また、蛍光消光の程度を測定することで、蛍光プローブに対する相補鎖の量を推定することが可能となるのである。この現象を利用した定量的 PCR 法は Quenching Probe (QProbe) PCR 法として、生物機能工学研究部門から派生した産総研ベンチャーである (株) J-Bio21 の蔵田信也博士らと産総研との共同研究により開発され、すでに実用化が成されている^[8]。筆者は蔵田信也博士らのグループおよび早稲田大学先進理工学部常田聡教授らのグループと共同研究体制を構築して、この QProbe PCR 法をさらに発展させた新規技術の開発を目指した。

2.2 蛍光プローブの汎用化によるコストダウンを実現した Universal Qprobe法の開発

蛍光プローブを用いたリアルタイム PCR 法として最も良く利用されている TaqMan Probe 法が、二つの蛍光色素 (レポーター色素とクエンチャー色素) をプローブに標識する必要があるのに対し、同じリアルタイム PCR 法である

QProbe PCR 法はグアニン塩基をクエンチャーとして利用しているため、蛍光色素は一つですむ。さらに、QProbe PCR 法は反応終了後に 40 °C 付近から徐々に温度を上げて増幅産物に結合した蛍光プローブの解離温度を測定する解離曲線解析を行うことで、増幅産物の妥当性を確認することができるが、TaqMan Probe 法ではそれができない。このような利点を持つ QProbe PCR 法ではあるが、標的遺伝子に応じて蛍光プローブを設計・合成する必要があるのは他の蛍光プローブ法と同じである。蛍光プローブ法は増幅産物に特異的な蛍光プローブを利用するため検出・定量の特異性が上がるが、PCR プライマーに加え、蛍光プローブを設計・合成する必要があるためコストが高くなる。蛍光を標識しない合成オリゴヌクレオチド DNA が、一つの対象遺伝子に対して概ね 2,000 円程度で準備できるのに対し、蛍光を標識したプローブ（蛍光プローブ）はその価格が 20,000 円以上である。標的遺伝子が複数種存在した場合には、標的遺伝子毎に蛍光プローブを設計・合成する必要があるため、コストが高くなる。配列によらず 1 種類の蛍光プローブであらゆる標的遺伝子を定量することができれば、蛍光プローブを大量合成することの利点により、コストパフォーマンスに優れた新しい遺伝子定量方法の確立につながると考えられる。

このような考えの基に開発したのが Universal Qprobe 法である (図 2)^[9]。グアニン塩基による蛍光消光を利用した QProbe 法の原理を最大限に活かしつつ、さらに配列によらず 1 種類の蛍光プローブ (Universal QProbe) であらゆる標的遺伝子を定量するというコンセプトを実現するために、Universal Qprobe 法には標的遺伝子と蛍光プローブの両者を結びつけるジョイント DNA というアイデアを加えた。ジョイント DNA は 5' 側には標的遺伝子に相補的な配列、3' 側には蛍光 DNA プローブに相補的な配列を持ち、両配列をシトシンとチミン塩基で繋いだ 1 本の

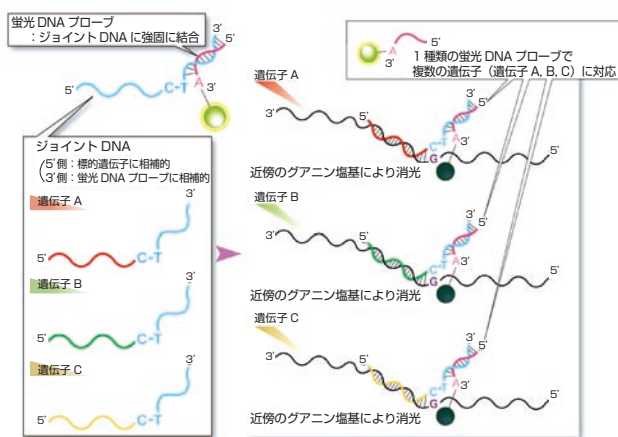


図 2 Universal QProbe 法

オリゴ DNA である。蛍光プローブは近傍のグアニン塩基の影響で蛍光が消光する色素で標識されている。ジョイント DNA は標的遺伝子と蛍光プローブの両者に結合し、蛍光プローブが標的遺伝子中のグアニン塩基に近づくにつれて蛍光が消光する。そのため、QProbe 法と同様に蛍光消光の程度を測定することで、標的遺伝子の量を測定することができる。本手法における蛍光プローブはその 3' 末端のアデニン塩基に蛍光色素を標識している。このアデニン塩基はジョイント DNA 鎖内のシトシン-チミン配列のチミン塩基の向かいにきて、となりのシトシン塩基の向かいには標的 DNA のグアニン塩基がくるので、グアニン塩基が蛍光色素のそばにきて蛍光消光するように設計されている。

ジョイント DNA は標的遺伝子毎に設計・合成する必要があるが、蛍光色素を標識しないため合成時間とコストが大幅に節約できる。これによって対象の遺伝子が異なった配列であっても、1 種類の蛍光 DNA プローブで定量が可能となる。

2.3 PCR 阻害物質に強い Alternately Binding probe Competitive (ABC) PCR 法の開発

リアルタイム PCR 法では測定しようとする試料中に PCR を阻害する物質が含まれていると、定量結果を過小評価したり、定量結果が擬陰性となる問題が生じることが知られている。もともと阻害物質が少ない試料や高度に精製された試料ではそのような問題は少ないが、血液試料や腐食物質等が多く含まれる土壌試料等においては、増幅阻害物質が混在すると考えられ、増幅阻害が問題となることがある。競合的 PCR 法は古典的な方法であるが、この増幅阻害物質の問題を解決している。競合的 PCR 法では標的遺伝子と同じプライマーで増幅されるが増幅塩基長が標的遺伝子とは異なる内部標準遺伝子を利用する。具体的には標的遺伝子の内部配列の一部を欠失させたり、余分な塩基を加えたりすることで、標的遺伝子よりも短いあるいは長い内部標準遺伝子を作製し、それを既知の濃度で試料に加え、標的遺伝子とともに競合的に PCR を行うというものである。標的遺伝子と内部標準遺伝子は鎖長が異なるので、PCR 後に鎖長の異なる標的遺伝子と内部標準遺伝子を電気泳動で分離後、標的遺伝子と内部標準遺伝子それぞれのバンドの濃淡を定量比較することで、既知である内部標準遺伝子量から標的遺伝子の量を測定することができる。この方法では試料中に PCR 阻害物質が存在しても、その阻害効果は標的遺伝子と内部標準遺伝子の両者に同じように影響するために、結果的に正確な定量が可能となる。本手法は PCR 阻害物質が存在しても正確な定量ができるという利点を有しているものの、電気泳動という煩雑な操作が必要なため、近年はあまり利用されていない。

PCR 阻害物質による定量性の問題を回避できる競合的 PCR 法の利点を活かしつつ、グアニン塩基による蛍光消光現象を利用することで、競合的 PCR 法で問題となっていた電気泳動操作を省き、従来より利便性を高めた遺伝子定量法として、Alternately Binding probe Competitive (ABC)-PCR 法を開発した (図 3)^[10]。ABC-PCR 法では標的遺伝子と鎖長が同じで、かつ同じプライマーで増幅される内部標準遺伝子と蛍光プローブ (Alternately Binding probe: AB-Probe) を用いる。AB-Probe の片方の末端には近傍にあるグアニン塩基で蛍光が消光する緑色の蛍光色素 (BODIPY FL) が、反対の末端にはグアニン塩基で蛍光が消光する赤色の蛍光色素 (TAMRA) がそれぞれ標識されている。AB-Probe の配列は標的遺伝子と内部標準遺伝子の共通配列部分に相補的な配列で設計されているため、両遺伝子に同じ結合力で結合する。一方、内部標準遺伝子は AB-Probe が結合する部分の緑色の蛍光色素の外側の 3 塩基をグアニン塩基に置換している (標的遺伝子ではグアニン以外の塩基)。したがって、AB-Probe は標的遺伝子と内部標準遺伝子由来の増幅産物に同じ結合力で競合的に結合し、標的遺伝子に結合した時には緑色の蛍光を発するが、内部標準遺伝子に結合した時にはグアニン塩基の影響で蛍光色素が消光するため、蛍光を発しない。すなわち、標的遺伝子の量が内部標準遺伝子に対して多ければ多いほど、緑色の蛍光が強くなり、反対に標的遺伝子の量が内部標準遺伝子に対して少なければ少ないほど、緑色の蛍光は弱くなる。内部標準遺伝子の量は既知量なので、ここから標的遺伝子の量を求めることができる。また、赤色の蛍光色素である TAMRA は AB-Probe が標的遺伝子と内部標準遺伝子のどちらに結合した時にも、同じように蛍光が消光する。TAMRA の蛍光

消光の程度は標的遺伝子と内部標準遺伝子に由来する増幅産物の量に応じて変化するため、増幅の有無を確認することができる。

ABC-PCR 法は、競合的 PCR 法で必要不可欠であった電気泳動のステップをグアニン塩基による蛍光消光現象を利用した蛍光プローブで置き換えた方法と考えることができる。競合法であるため、PCR 阻害物質の存在下でも正確な定量ができるだけでなく、蛍光消光の程度を PCR 終了後に測定すれば良いというエンドポイント定量法なので、リアルタイム PCR 法で必要とされる高価な装置も必要なく、安価なサーマルサイクラーと蛍光測定装置があれば標的遺伝子の定量が可能となる。

3 開発の成果

3.1 Universal QProbe PCR法

β アクトチン、アルブミン、 β グロビン遺伝子を標的遺伝子として Universal QProbe PCR 法の原理を実証するための実験を行った。本手法において最も重要と考えられる点はジョイント DNA と蛍光プローブの安定性である。PCR の反応中であってもジョイント DNA と蛍光プローブの結合が解消されずに、安定であることが望ましい。そこで蛍光プローブの核酸部分を Locked Nucleic Acid (LNA) に置き換えた合成オリゴヌクレオチドを利用した。LNA は二つの環状構造を分子内にもつ核酸のアナログで、LNA を含むオリゴヌクレオチドは相補的な DNA・RNA に対して熱安定性が飛躍的に上昇することが知られている^[11]。13 塩基長の LNA からなる BODIPY FL で標識した蛍光プローブを合成し、この蛍光プローブとジョイント DNA の相補配列の T_m を Exiqon T_m prediction tool (<http://lna-tm.com>) を用いて計算したところ、102 °C であった。PCR で最も高い温度は熱変性時の 95 °C であるので、蛍光プローブとジョイント DNA の複合体は PCR の間も安定的に結合を維持すると考えられた。

設計した蛍光プローブとジョイント DNA を用いて、Universal QProbe PCR 法による標的遺伝子の定量を行った。熱変性時の蛍光値 (プローブと標的遺伝子が解離している状態) とアニーリング時の蛍光値 (プローブと標的遺伝子が結合している状態) から蛍光消光率を算出した。図 4 に β アクトチン遺伝子を定量した時のサイクル数と消光率の関係を示した。蛍光消光率は 30 ~ 40 % 程度であり、QProbe PCR 法とはほぼ同程度であった。図 4 から C_t を求め作製した標準曲線を図 5 に示す。定量下限は 10 コピーで標準曲線の相関係数 R^2 は 0.9967 であった。定量下限、相関係数ともに QProbe PCR 法と同程度であった。また、PCR 終了後に 40 °C 付近から徐々に温度を上げて、蛍光プ

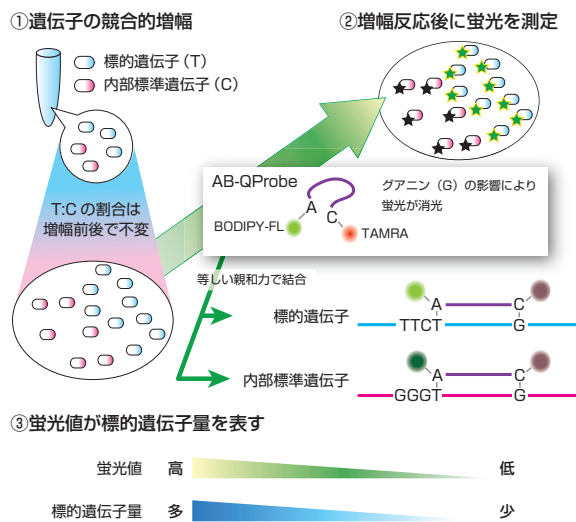


図 3 ABC-PCR 法

ローブとジョイント DNA の複合体が増幅産物から解離する温度を測定する解離曲線解析を行うことで、増幅産物の確認を行うこともできた。βアクチン遺伝子だけでなくアルブミン、βグロビン遺伝子でも同様の定量精度を持つ結果が得られている。このように Universal QProbe PCR 法により、これまでに開発した QProbe PCR 法と同程度の定量性を持ちつつ、1 種類の蛍光 DNA プローブで複数の標的遺伝子配列の定量を実現するという当初の目的を達成することができた^[9]。

次に、Universal QProbe PCR 法をヒト遺伝子の一塩基変異多型 (Single Nucleotide Polymorphism: SNP) の遺伝子型解析への応用の可能性を検証した。SNP とは塩基配列中の 1 塩基の違いを指し、特定の集団において 1 % 以上の頻度で認められる変異と定義される。近年、ヒトゲノム・遺伝子解析研究の進展により、病気のかかりやすさや薬剤への応答性の違いのような個人差の原因の一つとしてこの SNP が注目されている。SNP は平均 1000 塩基に 1 箇所程度あるとされており、30 億塩基対のヒトゲノム中には 300 万箇所程度以上の SNP があると考えられている。Universal QProbe PCR 法を用いた解離曲線解析により、

この SNP の遺伝子型の区別を行った。ジョイント DNA は一方のアレルに対しては完全に相補鎖になるように設計されており、もう一方のアレルに対しては 1 塩基のミスマッチになる。温度を下げて PCR 増幅産物に蛍光プローブとジョイント DNA の複合体を結合させた後、温度を上昇させることで消光していたプローブが発する蛍光から解離曲線を得ることによって、SNP を解析することができる。ミスマッチがある場合には低い温度で解離して蛍光を発するが、完全にマッチしている場合にはより高い温度で蛍光が発せられることになる (図 6)。実際にある SNP の野生型ホモと変異型ホモ、ヘテロ型の三つの遺伝子型を解析した結果を図 7 に示す。野生型と変異型では発蛍光によるピークの位置が異なるため、容易に区別することができた。また、野生型と変異型の混ざったヘテロ型では両方のピークが観察された。Universal QProbe PCR 法は 1 種類の蛍光プローブで複数の標的遺伝子に対応できることから、ヒトゲノム中に 300 万箇所以上存在すると言われていた SNP の解析においても有効なツールになると期待される。

3.2 Alternately Binding probe Competitive (ABC) PCR法

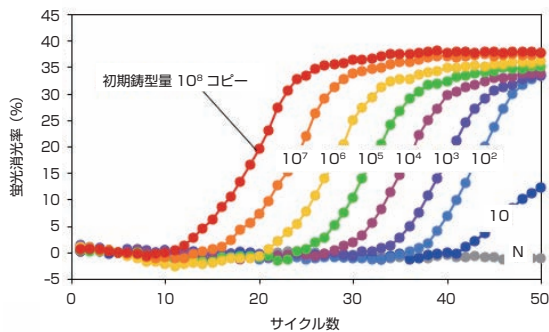


図 4 Universal QProbe 法におけるサイクル数と蛍光消光率の関係
10⁷ ~ 10⁰ コピーの βアクチン遺伝子を増幅した時の蛍光消光率を示している。蛍光消光率の算出は参考文献^[9]に従って行った。

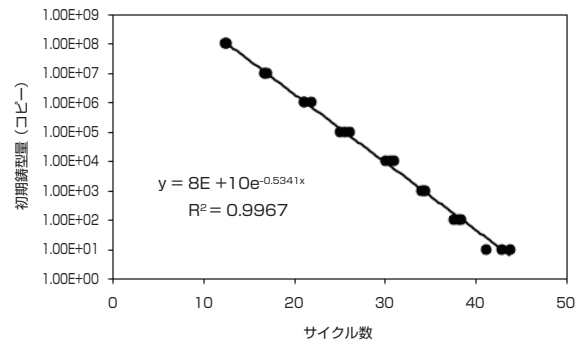


図 5 Universal QProbe 法における標準曲線
図 4 のサイクル数と蛍光消光率の関係より求めた反応産物量が所定の量に達するのに要したサイクル数と初期鋳型量の関係を示している。

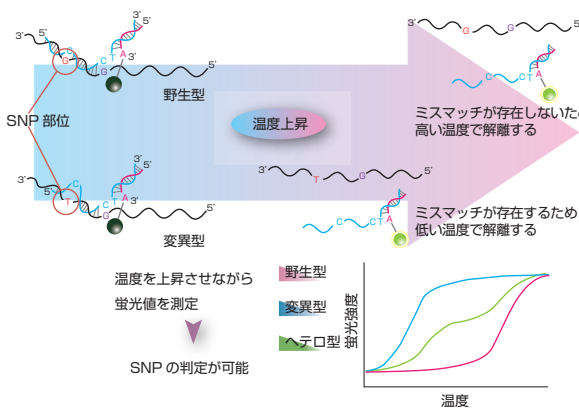


図 6 Universal QProbe 法による SNP タイピングの原理

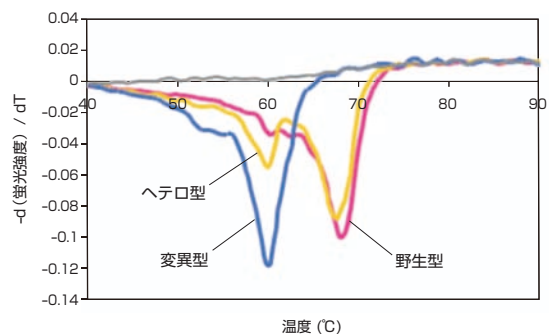


図 7 Universal QProbe 法による SNP タイピングの結果
SNP タイピングは 40 °C から 90 °C まで徐々に温度を上げ、その間の蛍光値を測定する解離曲線解析により行った。縦軸は蛍光値を時間で一次微分した値を示している。

緑色蛍光タンパク質として有名な *gfp* 遺伝子 ($10^2 \sim 10^6$ コピー) を標的遺伝子として ABC-PCR 法における定量性の検討を行った。*gfp* 遺伝子の配列を元に内部標準遺伝子を作製し、それを用いて ABC-PCR 法の検証を行った。PCR 終了後の蛍光値から求めた蛍光消光率をいくつかのバックグラウンド蛍光値で補正した値を相対蛍光強度とした。この相対蛍光強度と、初期鋳型に含まれる標的遺伝子の量の関係をグラフにしたものを図 8 に示す。本手法では、標準曲線は競合 ELISA 法等の他の一般的な競合的測定法により得られる標準曲線と同様にシグモイド曲線に回帰することができる。図 8 より標準曲線の相関係数は 0.9997 であった。また、定量下限は 10^3 コピーであった。本手法は競合法であるため、一つの標準曲線での定量可能範囲は 2~3 オーダー程度であるが、内部標準遺伝子の濃度を変えることで定量可能範囲を調節することができる。もしくは未知試料を測定する際に、対象の未知試料の希釈系列を作って測定し、定量可能範囲に入った希釈試料から標的遺伝子の量を求めることも対応することができる。また、本手法は遺伝子定量だけでなく Universal Qprobe 法と同様に遺伝子の一塩基変異多型を識別するための遺伝子型解析方法としても活用することができる^[10]。

土壌等に含まれ、DNA 増幅阻害物質として知られているフミン酸を添加して、ABC-PCR 法とリアルタイム PCR 法における定量値へ及ぼす影響を評価した。その結果、リアルタイム PCR 法ではフミン酸の濃度が高くなるにつれて、定量値が真値よりも低くなる（過小評価される）が、ABC-PCR 法ではフミン酸の存在下でも定量値が真値とほぼ同じ値であった^[10]。また、フミン酸以外の DNA 増幅阻害

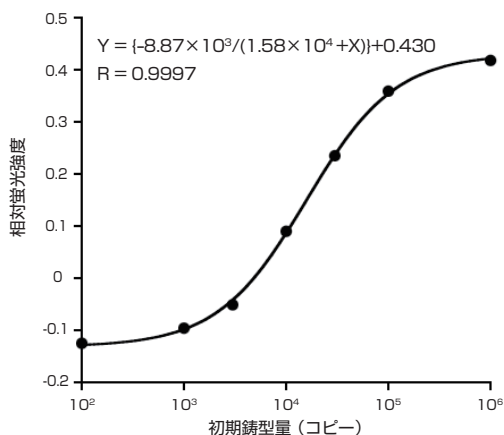


図 8 ABC-PCR 法における標準曲線
初期鋳型に含まれる標的遺伝子の量と相対蛍光強度の関係を示す。PCR 終了後の蛍光値をいくつかのバックグラウンド蛍光値で補正した値を相対蛍光強度とした^[9]。得られたプロットを直角双曲線で回帰した。R は相関係数である。

物質として尿素と Triton X-100 を用いた実験においても、ABC 法はリアルタイム法に比べて正確性の高い定量を行うことができることがわかった^[12]。

以上の結果から、ABC 法は DNA 増幅阻害物質の存在下でも正確な定量が可能という特徴だけでなく、遺伝子増幅反応終了後に蛍光を測定するだけで標的遺伝子の定量が可能であるという特徴も持つ。すなわち、遺伝子増幅反応が PCR であっても、それ以外の遺伝子増幅技術であっても同じように標的遺伝子を定量することができるのである。近年、PCR 法に代わる等温遺伝子増幅法として、Loop-Mediated Isothermal Amplification (LAMP) 法や Helicase-Dependent Amplification (HDA) 法といった方法が開発されている。これらの等温遺伝子増幅法と ABC 法の AB-Probe と内部標準遺伝子を組み合わせることで ABC-PCR 法と同等のことが行えるため、ABC 法はこれらの等温遺伝子増幅法とも組み合わせ利用することが可能である。このように ABC 法は正確性が高いだけでなく、遺伝子増幅法との組み合わせという点から汎用性の高い方法であるといえる。

4 開発技術の評価と実用化へ向けたシナリオ

ここでは、開発した二つの遺伝子定量技術 (Universal QProbe PCR 法と ABC-PCR 法) の利点・欠点を既存技術と比較しつつ、それぞれの技術の利点が最大限活かされるような実用化へのシナリオについて考察する (図 9)。表 1 に従来技術 (TaqMan Probe 法、QProbe 法、インターカレーター法、競合法) と Universal QProbe PCR 法、ABC-PCR 法の特徴を比較した。それぞれの技術には利点・欠点があるため、個々の技術の特徴を十分に理解した上で、その実用化の方策を考えることが重要である。なお、Universal QProbe PCR 法と ABC-PCR 法の実用化へのビジネス展開は共同研究のパートナーである (株) J-Bio21 が実際に進めているところである。

表 2 は Universal QProbe PCR 法の特徴を、従来のリアルタイム法 (蛍光プローブ法およびインターカレーター法) と比較したものである。表 2 からわかるように、Universal QProbe PCR 法は蛍光プローブ法とインターカレーター法の利点を集約したような技術である。マルチカラー検出については本稿ではこれまで触れなかったが、グアニン塩基の影響で蛍光が消光する色素としては色違いで 4 色利用することができるため、本手法はマルチカラーでの検出・定量にも利用することができる。Universal QProbe PCR 法はリアルタイム PCR 法であることから、リアルタイム PCR 用のサーマルサイクラーは必須である。しかし、逆に考えるとリアルタイム PCR 用のサーマルサイク

表1 定量的PCR法の特徴の比較

	リアルタイム法				内部標準法	
	TaqMan Probe 法	Qprobe 法	インターカレーター法	Universal QProbe 法	競合法	ABC 法
蛍光プローブ	標的遺伝子ごとに必要 (2色で標識)	標的遺伝子ごとに必要 (1色で標識)	不要	1種類の蛍光プローブ であらゆる標的遺伝子 に対応 (1色で標識)	不要	標的遺伝子ごとに必要 (2色で標識)
内部標準遺伝子	不要	不要	不要	不要	必要	必要
電気泳動	不要	不要	不要	不要	必要	不要
解離曲線解析による 増幅産物の確認	不可能	可能	可能	可能	不可能	可能
リアルタイムPCR装置	必要	必要	必要	必要	不要	不要
阻害物質への耐性	無	無	無	無	有	有

表2 Universal QProbe 法と従来のリアルタイムPCR法の比較

	従来法		Universal QProbe 法
	蛍光プローブ法	インターカレーター法	
特異性	○ (非特異産物は検出せず)	× (非特異産物も検出)	○ (非特異産物は検出せず)
コスト* (プローブ・プライマー)	× (1遺伝子：約2万円以上)	◎ (1遺伝子：約2千円)	○ (1遺伝子：約6千円)
準備に要する時間*	× (1~2週間)	○ (最短翌日)	○ (最短翌日)
SNPタイピング	○	×	○
マルチカラー検出	○	×	○

* (株) J-Bio21 の試算に基づく

ラーがあればすぐにでも本手法を適用することができるということでもある。すなわち、本技術の実用化における最も重要な強みはすでにリアルタイムPCR法を汎用的に利用しているユーザーを対象として導入を勧めることができるという点である。従来のリアルタイムPCR法では、特定の遺伝子(病原性の微生物やウイルス、または特定のSNP)を

検出・定量の対象として試薬キットが市販されているが、Universal QProbe PCR法ではそもそもこのような上市の方式は馴染まない。試薬キットの利点としては、特定の遺伝子を検出するための蛍光プローブを大量に合成することによるコストメリットが考えられるが、そもそも Universal QProbe PCR法では1種類の蛍光プローブでさまざまな配

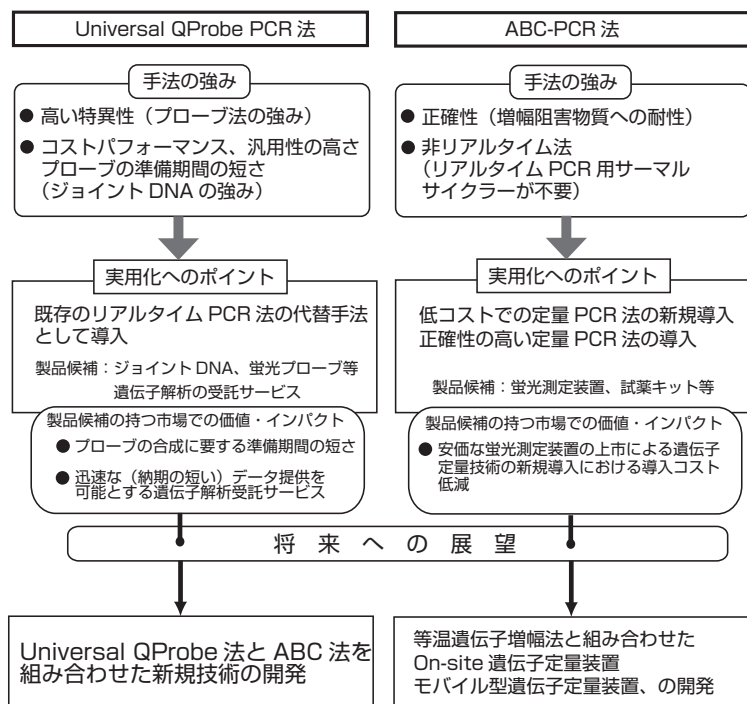


図9 Universal QProbe PCR法とABC-PCR法の実用化へのシナリオ

列の遺伝子に対応することができるため、試薬キットで販売することのコストメリットはそれほど意味がない。したがって、本手法の利点を生かしたビジネスプランとしてはクライアントの標的遺伝子配列に応じたジョイント DNA と蛍光プローブを提供する、もしくはクライアントの標的遺伝子配列の検出・定量を行う遺伝子解析受託サービスを提供するといった方法が考えられる。このようなビジネスプランにおいては本手法の特徴である、蛍光プローブのコストが安い、蛍光プローブ合成に要する準備期間が短いという点を最大限に生かして、安価で納期の早い遺伝子解析受託サービスの提供等を行うことができると考えられる。安価で納期が早いという特徴を發揮できる具体的なクライアントの一つとして、微生物を利用した環境浄化に関連する分野の企業が考えられる。近年、新聞等でも報じられているが、土壤汚染を巡るブラウンフィールドが問題になっている。このような土壤汚染の浄化に対しては、微生物を利用したバイオレメディエーションがコストの面から有効とされている。しかし、環境中に微生物を導入して汚染物質の浄化を行ううえで導入した微生物のみならず、もともと土壤中に存在する微生物群等への影響を評価する必要があることがバイオレメディエーション利用指針でうたわれている。このような微生物群の評価には遺伝子情報に基づいた方法が有効であり、そのため遺伝子定量技術がこの分野において注目を集めている。環境中の微生物は非常に多様であり、検出対象微生物は土壤の種類毎に変化するため、1種類の蛍光プローブでさまざまな遺伝子配列に対応することが可能な Universal QProbe PCR 法は多様な環境微生物の検出・定量に非常に有効である。したがって、このような環境浄化ビジネスの分野において、多様な微生物群を低コストかつ短期間で検出・定量するような受託解析ビジネスが Universal QProbe PCR 法の有効な実用化の方策の一つとして考えられる。

ABC-PCR 法は Universal QProbe PCR 法とは異なる利点・欠点を持つため、実用化へのシナリオも異なる。

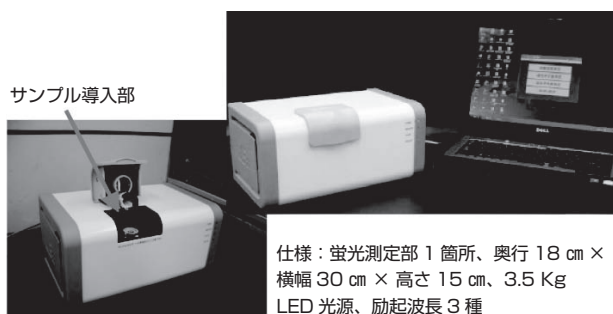


図 10 簡易型蛍光測定装置(EGBox)試作機(株)J-Bio21 製作)

ABC-PCR 法の利点は遺伝子増幅阻害物質の影響を受けずに正確な定量ができる点と、遺伝子増幅反応終了後に蛍光を測定するだけで今までよりも簡便に標的遺伝子の定量が可能である点の二つである。前者においては既にリアルタイム PCR 法を利用しているユーザーであっても、増幅阻害物質の影響に問題を抱えるユーザーにとっては、本手法の導入は大きなメリットがあるといえる。さらに、本手法は遺伝子増幅反応終了後に蛍光を測定することで標的遺伝子の定量が可能となるため、高価なリアルタイム PCR 用のサーマルサイクラーが不要である。その代わりに遺伝子増幅反応終了後に蛍光を測定する蛍光測定装置は必要となる。共同研究を行っている(株)J-Bio21では、すでにこの蛍光測定装置(EGBox と命名)の上市の準備を進めている(図 10)。本装置は ABC 法における蛍光測定に特化した装置であり、具体的な仕様は蛍光測定部 1 箇所、奥行 18 cm × 横幅 30 cm × 高さ 15 cm、3.5 Kg、LED 光源、励起波長 3 種である。PCR チューブをそのまま測定部に挿入するだけで、蛍光値を測定することができる。(株)J-Bio21では販売予定価格が 100 万円以下となるように準備を進めている。このような安価な蛍光測定装置と試薬キットを上市することで、遺伝子定量技術の導入を希望しているが、導入コストの面で悩んでいるようなケースに適合したビジネスができるのではないかと考えている。特に発展途上国等において、今後低コストで遺伝子定量技術の導入を行っていくことを目指した場合には ABC-PCR 法は非常に適している。このような実用化シナリオを具現化するうえでは、持ち運びがしやすいサイズへの小型化、電池程度の電力を動力とすることが可能となる省エネルギー化等が課題となってくる。小型化・省エネルギー化を達成する技術として、近年微細加工技術を利用してシリコン、ガラス等の基板上に流路、回路等を成形し、微小空間内で反応・分離・検出を行う micro-Total Analysis System (μ -TAS) が開発され、核酸・タンパク質等の生体分子の解析に利用されつつある。このような μ -TAS の技術と ABC 法を融合することで、小型化・省エネルギー化が達成されるであろう。また、ABC 法は、PCR 法以外の遺伝子増幅手法と組み合わせることで、サーマルサイクラーの代わりにエネルギー使用量の少ない恒温装置等だけのシンプルで安価な装置で遺伝子定量が可能になる。このような技術の開発のためには、遺伝子増幅技術の選択(必要に応じて新規等温遺伝子増幅法の開発)や簡易的な核酸抽出技術の開発等、まだ解決すべき多くの課題が残されているが、これらの課題を克服することができれば、社会で広く利用されている遺伝子定量技術よりも簡便で安価な遺伝子定量

技術が完成するものと期待される。

このように、簡便性やコストパフォーマンスを追求した形で、Universal QProbe 法と ABC 法を基盤とした遺伝子検出・定量技術が普及して欲しいというのが筆者等の夢であるが、将来的な展望として、Universal QProbe 法と ABC 法とを組み合わせた新規技術の開発も目指している。具体的には ABC 法で利用する蛍光プローブを Universal QProbe で置き換えるという技術であるが、そのためにはジョイントプローブに関するアイデアをより高度化する必要があるなどのさまざまな難題がある。しかし、Universal QProbe 法と ABC 法が統合された技術は ABC 法の正確性と Universal QProbe 法の柔軟性を併せ持った技術になるので、コストパフォーマンスやプローブ合成に係る準備期間短縮等の面で社会的インパクトの高い技術になることが予想される。

2009 年のリアルタイム PCR の国内市場は装置関連が推定 68 億円（前年比 3 億円の増加）、試薬関連は推定 45 億円（前年比 5 億円の増加）となっている^[13]。ヒト遺伝子の詳細な発現解析等遺伝子発現の定量分析に対するニーズは高まっており、リアルタイム PCR の市場も今後ますます拡大していくことが予想される。これまでコスト的な面から、遺伝子検査等の導入を見送っていた施設や開発途上国等においても普及が進むことが予想されるが、そのためには低コストでの導入が可能なシステムが重要と考えられる。Universal QProbe PCR 法と ABC-PCR 法はコストパフォーマンスや汎用性に優れており、そのような社会情勢の中でも、次世代の遺伝子定量技術として期待が持てると思われる。

5 おわりに

本稿では Universal QProbe PCR 法と ABC-PCR 法という二つの遺伝子定量技術について、構成学的視点から開発段階の要素技術および開発後の実用化シナリオを論述した。完成された技術の原理図はシンプルに見えるが、要素技術の選択からその結集に至るプロセスにおいて、実はさまざまな苦労や試行錯誤があった。産総研、早稲田大学、(株) J-Bio21 の 3 者間での共同研究体制のもと 10 名以上の研究者がアイデアを結集し、議論を重ねて技術を完成させた。一つ一つのピースを穴埋めする作業を繰り返し、あたかも難解なパズルを解いていくかのようにして完成した技術が Universal QProbe PCR 法と ABC-PCR 法である。この技術に用いたコアとなる要素技術は、グアニン塩基との間で起こる蛍光色素の消光現象であるが、蛍光色素とグアニン塩基との位置関係やプローブと増幅産物の結合力等を考慮すると蛍光プローブの消光パターンは無数にあり、

どれが最も効率良く安定的に消光して、遺伝子定量に適しているかを試行錯誤する必要があった。知識と経験から予想がつく消光パターンだけではないので、一つ一つ未知の可能性を試していく作業はゴールの見えない暗闇を進むような作業であった。今回は運良く技術を完成させることができたが、これは決して一人二人の力では為し得なかったことである。関わった研究者全てが立場を超えて、時に厳しい議論もしながら、協力し合って為し得た仕事である。

第 2 種基礎研究の推進においては、第 1 種基礎研究で見出された現象等を多角的に見つめ直し、統合していくことで実用化技術を生み出すプロセスが重要となる。より効率的に第 2 種基礎研究を推進していくためには少人数のアイデア・視点だけで進めるのではなく、産学官のようなさまざまな立場の人間が信頼関係を築き、お互いの価値観を尊重し合いながら研究開発を進めていくことが肝要である。

6 謝辞

Universal QProbe PCR 法の開発は (株) J-Bio21 の蔵田信也氏、市川康平氏ら、早稲田大学先端生命医科学センターの常田聡教授、谷英典氏（現：東京大学 RI センター）ら、産業技術総合研究所の中村和憲氏、関口勇地氏らの協力によるものである。ABC-PCR 法の開発は (株) J-Bio21 の蔵田信也氏ら、早稲田大学先端生命医科学センターの常田聡教授、谷英典氏（現：東京大学 RI センター）ら、京都学園大学の金川貴博氏、産業技術総合研究所の中村和憲氏、関口勇地氏らの協力によるものである。また、ABC-PCR 法に関する研究資金は NEDO 産業技術研究助成事業の支援によるものである。

参考文献

- [1] R. Higuchi, C. Fockler, G. Dollinger and R. Watson: Kinetic PCR analysis: Real-time monitoring of DNA amplification reactions, *Bio/Technology (NY)*, 11, 1026-1030 (1993).
- [2] M. Becker-Andre and K. Hahlbrock: Absolute mRNA quantification using the polymerase chain reaction (PCR). A novel approach by a PCR-aided transcript titration assay (PATTY), *Nucleic Acids Res.*, 17, 9437-9446 (1989).
- [3] C. Picard, C. Ponsonnet, E. Paget, X. Nesme and P. Simonet: Detection and enumeration of bacteria in soil by direct DNA extraction and polymerase chain reaction, *Appl. Environ. Microbiol.*, 58, 2717-2722 (1992).
- [4] T.B. Morrison, J.J. Weis and C.T. Wittwer: Quantification of low-copy transcripts by continuous SYBR Green I monitoring during amplification, *BioTechniques*, 24, 954-962 (1998).
- [5] L.G. Lee, C.R. Connell and W. Bloch: Allelic discrimination by nick-translation PCR with fluorogenic probes, *Nucleic Acids Res.*, 21, 3761-3766 (1993).
- [6] J.R. Lakowicz: *Principles of fluorescence spectroscopy*

- 3rd editoin, Springer (2006).
- [7] M. Torimura, S. Kurata, K. Yamada, T. Yokomaku, Y. Kamagata, T. Kanagawa and R. Kurane: Fluorescence-quenching phenomenon by photoinduced electron transfer between a fluorescent dye and a nucleotide base, *Anal. Sci.*, 17, 155-160 (2001).
- [8] S. Kurata, T. Kanagawa, K. Yamada, M. Torimura, T. Yokomaku, Y. Kamagata and R. Kurane: Fluorescent quenching-based quantitative detection of specific DNA/RNA using a BODIPY® FL-labeled probe or primer, *Nucleic Acids Res.*, 29, e34 (2001).
- [9] H. Tani, R. Miyata, K. Ichikawa, S. Morishita, S. Kurata, K. Nakamura, S. Tsuneda, Y. Sekiguchi and N. Noda: Universal quenching probe system: flexible, specific, and cost-effective real-time polymerase chain reaction method, *Anal. Chem.*, 81, 5678-5685 (2009).
- [10] H. Tani, T. Kanagawa, S. Kurata, T. Teramura, K. Nakamura, S. Tsuneda and N. Noda: Quantitative method for specific nucleic acid sequences using competitive polymerase chain reaction with an alternately binding probe, *Anal. Chem.*, 79, 974-979 (2007).
- [11] S.K. Singh, P. Nielsen, A.A. Koshkina and J. Wengel: LNA (locked nucleic acids): synthesis and high-affinity nucleic acid recognition, *Chem. Commun.*, 4, 455-456 (1998).
- [12] H. Tani, T. Teramura, K. Adachi, S. Tsuneda, S. Kurata, K. Nakamura, T. Kanagawa and N. Noda: Technique for quantitative detection of specific DNA sequences using alternately binding quenching probe competitive assay combined with loop-mediated isothermal amplification, *Anal. Chem.*, 79, 5608-5613 (2007).
- [13] 日経バイオテク編: *日経バイオ年鑑2010*, 837-838, 日経BP社 (2009).

執筆者略歴

野田 尚宏 (のだ なおひろ)

2002年早稲田大学理工学研究科応用化学専攻博士後期課程修了(博士(工学))(2000年1月~2002年3月日本学術振興会特別研究会DC)。同年産業技術総合研究所特別研究員。2005年産総研生物機能工学研究部門生物資源情報基盤研究グループ研究員。2006年生物機能工学研究部門バイオメジャー研究グループ研究員。2010年4月バイオメディカル研究部門バイオメジャー研究グループ研究員。核酸(DNA/RNA)の定量技術の開発・評価および核酸に相互作用するタンパク質のハイスループット活性評価技術の開発に関する研究に従事。



査読者との議論

議論1 具体的な想定クライアントおよび展開するシナリオ

コメント(地神 芳文:産業技術総合研究所評価部)

このビジネスを成功させるために必要な課題や克服すべき問題点として、例えば、「安価で納期が早い」特徴を發揮できる具体的な想定クライアントの属性とそれをビジネス展開するシナリオの分析が必要ではないかと思われます。

回答(野田 尚宏)

「安価で納期が早い」特徴を發揮できる具体的な想定クライアントとしては、多様な遺伝子多型を解析する必要がある遺伝子検査会社やバイオレメディエーション等における多様な環境微生物のモニタリングを行う必要がある環境関連企業等が考えられます。したがって、本稿では特に今後の市場拡大が見込まれる環境微生物のモニタリングに係る環境関連企業を取り上げ、原稿を改訂しました。

議論2 普及すべき課題や問題点

コメント(地神 芳文)

試薬キットを組み込んだ安価な蛍光測定装置(100万円以下)の販売計画が記載され、このビジネス展開として、発展途上国等で、低コストで遺伝子の定量・解析を実施する際のツールとしての普及が提案されています。非常に興味深い提案ですが、では、これを実現するために克服すべき課題や問題点は何かの考察が記載されていません。

回答(野田 尚宏)

発展途上国等で普及を実現する上で、克服すべき課題や問題点を考えると、開発した技術の小型化・省エネルギー化を達成することが重要と言えます。そのためには近年、技術開発が目覚ましい micro-Total Analysis System (μ -TAS) の技術と融合したバイオチップの開発等が今後の実用化シナリオでは重要と考えられます。この点を改訂原稿の中で記述しました。

議論3 市場での価値、社会的インパクト

コメント(地神 芳文)

図9に、実用化へのポイントが記載され、その製品候補も記載されていますが、これらの製品の持つ市場での価値、社会的インパクトをさらに記載すると、よりわかりやすくなるのではないのでしょうか。

回答(野田 尚宏)

図9の製品候補に対して「製品候補の持つ市場での価値・インパクト」を追加しました。

議論4 技術開発における問題点と解決のためのシナリオ等

コメント(地神 芳文)

将来への展望として、「Universal QProbe法とABC法を組み合わせた新規技術の開発」と「等温遺伝子増幅法と組み合わせた On-site 遺伝子定量装置やモバイル型遺伝子定量装置の開発」が記載されています。これは「研究者の夢」または「研究目標と社会とのつながり(社会的価値)」を判断する上で重要な部分ですが、これらの技術開発において克服すべき問題点、それを解決するためのシナリオ、および実用化された際の市場へのインパクト等に関する記載が望まれます。

回答(野田 尚宏)

「Universal QProbe法とABC法を組み合わせた新規技術の開発」においては、これまでのジョイントDNAの概念をさらに高度化してABC法に適合したジョイントDNAのアイデアを産み出す必要があります(アイデアの詳細については現在技術開発中のため、本稿では割愛)。また、「等温遺伝子増幅法と組み合わせた On-site 遺伝子定量装置やモバイル型遺伝子定量装置の開発」については、等温遺伝子増幅技術の選択(必要に応じて新規増幅技術の開発)や簡易的な核酸抽出技術が必要とされます。このような技術開発上克服すべき課題と実用化された際の市場へのインパクトについて、改訂原稿の中で記述しました。

シンセシオロジー（構成学）：知の統合を目指す学問体系

2009年12月に横断型基幹科学技術研究団体連合（横幹連合）が主催する第3回コンファレンスが東北大学で開催されました。その中に「シンセシオロジー（構成学）：知の統合を目指す学問体系」という特別企画のセッションを設けていただき、講演と総合討論を行いました。ここでは横幹連合のご了解を得て、基調講演の論文を再掲し、総合討論の概要をご報告します。

シンセシオロジー編集委員会



（開会挨拶）

鈴木 久敏（横幹連合副会長、筑波大学） 横断型基幹科学技術研究団体連合は、様々な専門分野しかも文理にまたがる学協会が自然科学と並ぶ技術の基礎である基幹科学の発展と振興を目指し、大同団結した組織です。2008年1月に産総研から学術ジャーナル『Synthesiology』が創刊されましたが、「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の確立」という発刊の趣旨やジャーナルに載っている論文の方法論は、私ども横幹連合の考え方と非常に近いと思っております。

2009年1月に横幹連合、統計数理研究所（統数研）、産総研により、この分野をもっと組織立って振興していくことを目的に合同ワークショップを開催しました。この試みは非常に有意義であり、今回の第3回横幹連合コンファレンス特別企画のセッションにつながりました。

産総研の「基礎研究の成果を社会に生かす」ための構成的研究の方法について、そのエッセンスを産総研副理事長の小野晃様にご講演いただき、その後、赤松幹之様をコーディネーターに総合討論をしたいと思っております。

（講演）

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）（講演内容は本号のp.164～p.168に掲載した論文「シンセシオロジー（構成学）：構成的研究の方法と記述」

を参照してください。）

（総合討論）

赤松 幹之（シンセシオロジー編集幹事、産業技術総合研究所） 横幹連合で狙っていることの一つは「知の統合」だと思うのですが、我々の『Synthesiology』で扱っている構成的研究もいろいろな意味で「統合していく」ということで、共通したところを狙っているのではないかと思います。そこで本総合討論は、横幹連合と産総研、そして横幹連合のサポーターである統数研にも加わっていただき、横幹連合・統数研・産総研の三つ巴で議論していこうという企画です。

『Synthesiology』は多岐にわたる分野の論文が掲載されています。そのために議論が抽象的になってしまわないように、最初に、構成的研究の具体例として産総研の岸本充生さんから創刊号に掲載された論文「化学物質のリスク評価」について紹介していただきます。

そして、横幹連合の立場から、構成的研究が向かうべき方向についてどのように考えておられるかについて原辰次先生から、そして数理統計という観点も含めて田村義保先生からご意見をいただきます。また、小林直人先生からはSynthesiologyのシナリオのタイプについて解説いただき、その後、議論を進めたいと思っております。

（異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略）

岸本 充生（産業技術総合研究所） 論文の中身に入ると

いうよりも、「考え方」に焦点を当てて紹介したいと思います。私の研究が産総研の典型的な研究スタイルと言えるかどうかはさておき、研究する中で考えていたことが『Synthesiology』に書かせてもらうことによって、「あ、僕はこういうことを考えていたのだ」ということを後から非常に整理できた気がしています。



私の研究は化学物質のリスク評価ですが、工業的に生産されている約 10 万種あるという化学物質の日本におけるリスク対策の優先度をつけるためにどうすればいいかを考え、そのためには異なる化学物質のリスクの大きさを比較しなければいけない、ということになりました。

リスクは曝露量と毒性の大きさを掛け合わせることで表すことができますが、日本人全体の曝露量の分布がどうなっているかと、曝露量を増やすと発症確率がどのくらい増えるかという2つのデータを合わせてそれぞれの化学物質のリスクの大きさを見ていくこと、これが「必要な情報」になります。ところが、「必要な情報」に対して「入手可能な情報」が全然足りないことがわかりました。

曝露量に関しては、非常に曝露濃度の高い人の例はあります。例えば新築の家でのホルムアルデヒド濃度が非常に高い計測例や短期の1日平均値はたくさんあるのですが、しかし、我々が出したい長期の1年平均値や、季節間の変動を示すデータはほとんどなかった。毒性についても、「これ以下なら有害影響がない濃度」という無毒性量情報はあるものの、「このくらいの曝露量だったらこのくらい発症する」という用量反応関数のデータはなく、既存の要素技術はそのままでは使えないということで、独自に要素技術の開発、修正に着手しました。

では、「役に立たない」と私が判断した「既存の要素技術」は何かというと、これは論文を書いた後に考えてみたことも含まれていますが、化学物質のリスク評価が社会で必要になった当初のニーズを反映していたわけです。それは化学物質のスクリーニングという、膨大な数の化学物質の中からリスクの懸念がない物質を除去するということをやろうとしたときに出てきた要素技術だった。そのための方法論が探索され、高濃度の個人曝露とこれ以下なら安全であるという濃度を出して、「高濃度で大丈夫だったらこの物質は大丈夫ですね」という作業のための最適化した要素技術が開発されていったのです。

このようにして開発された要素技術は、繰り返し実践されることで確立され、ガイドラインやマニュアルができて、定着し、当初の化学物質のリスク評価の方法論が成立したわけです。

ところが、私たちがやろうとした「異なる種類の化学物質のリスク評価をする」というのは、ある意味、新しい社会ニーズなのです。これを既存の要素技術を使ってやろうとしても全

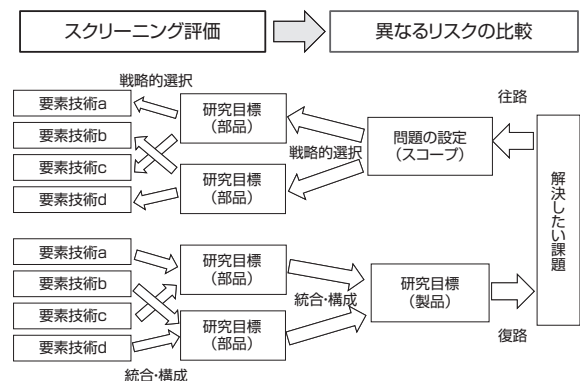
然合わない。既存の要素技術とは別の社会ニーズ、つまりスクリーニング評価に最適化された要素技術群だったので、新しいニーズでリスク評価をしようとしても、そのまま使えないというギャップがわかったということです。

そこで、原点に帰り、社会ニーズである「異なる種類のリスク比較」を可能にするためにどのような要素技術が必要なのかという方法論の探索を始めました。これは構成学の中で「再構成」といいます。曝露濃度の高い人だけを推計するのではなく、個人曝露量の推計の年間平均値の分布と環境中濃度の推計の日本全国の分布を探る、そして、これ以下なら安全であるという1点の値だけではなく、全体像を見ようとすると、最適化すべき要素技術がいろいろあることがわかります。それらを開発する、これが「要素技術の戦略的開発」です。次に、いったん開発したこれらの要素技術を統合して構成する。そうすると、新しい方法論が確立し、それを実践するという、「多様な要素技術の統合・構成」のフェーズになります。

このように、新しい方法論を開発し、異なる種類のリスクを比較するためのリスク評価を試みたというのが『Synthesiology』に書いた論文のエッセンスです。

その時に、私が考えたのは「専門分野の陥るワナ」ということです。大げさなタイトルですが、今存在する専門分野や研究テーマは、必ず過去の社会ニーズから導出されたものだろう、そうして形成された「専門分野」は、いつの間にか、その生い立ちから切り離され、独自の進化を遂げていく。例えば学会、専門家、ガイドライン、ジャーナル、科目、教科書ができて、自立してしまう。ところが、社会ニーズ、社会的価値は、常に変化し続けています。変化が激しい現代社会の中で、それらの専門分野はその存続自体が自己目的化して、いつの間にか社会ニーズから大きくかけ離れてしまうのではないかということを感じました。もちろん、私が話した既存の要素技術が役に立たないということではなく、それは化学物質のスクリーニングという目的には役に立つのだけれども、その他の目的に直接には役立たないということです。

化学物質リスク評価が解決したい課題の変化



私は、課題解決のために往路と復路があると考えています。構成学は統合・構成から研究目標（製品）という復路がメインなのですが、そのためには必ずすべての要素技術を一回見直すという戦略的選択があり、確立された技術をいかに組み合わせしていくかという、往路をやったのかなと考えています。つまり、解決したい社会的な課題が変化したときには、このサイクルをもう一度回す、さらに解決したい課題が出てきたときにまた回す、ということをしていく必要があるのではないかと考えています。

(新しい学術の体系)

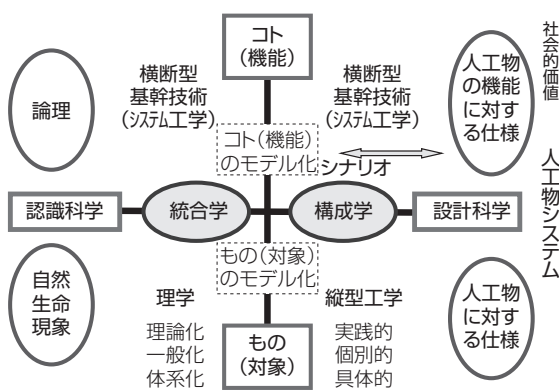
原 辰次（東京大学） 私は横幹連合の『横幹』という雑誌の編集委員長を2年ほど務め、今、日本学術会議の総合工学委員会「知の統合分科会」で、館委員長のもとで幹事をしています。横幹連合の活動も絡めて、考えたことを紹介したいと思います。



日本学術会議では、吉川先生が会長のごときに「新しい学術の体系」ということで、認識科学と設計科学という枠組みが作られました。従来の「科学」が認識科学に当たりますが、それは科学のための学術であり、「あるものの探求」である。それに対して設計科学とは、従来、「技術」と言われていたものであり、これは社会のための学術であり、「あるべきものの探求」である。知的好奇心に基づいた学術と価値・目的に焦点を当てた学術、この2つは共に重要であり、新しい学術の体系である、ということです。

認識科学と設計科学があること、この軸と横幹連合の「もの」と「コト」という軸、この2つの軸で考えてみました。

「横断型基幹科学技術」と+「構成学」



学術会議で認識科学、設計科学と言っていたのは、我々から見ると「もの（対象）」というところに焦点を当てた考え方ではないか。認識科学とは自然や生命、現象を対象にした大ざっぱに言えば理学であり、理論化、一般化、体系化

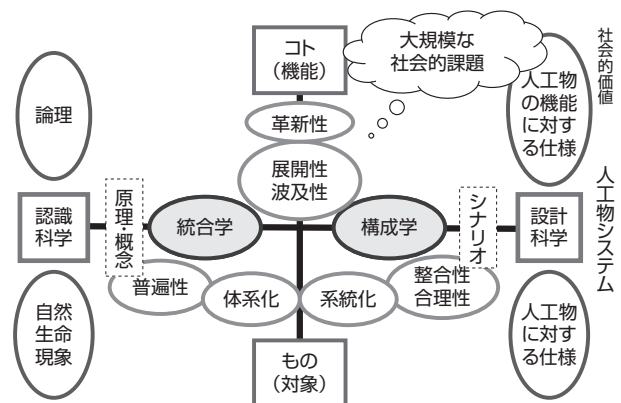
を目指しています。これに対して、設計科学は人工物システムであり、人工物を設計し、実現するということで、実践的、個別的、具体的というキーワードが挙げられますし、いわゆる機械や電気など縦型のディシプリンに基づく従来型の縦型工学が適合するかと思います。これらはどちらかというと「もの」だけ見えています。しかし、実際に人工物システムや社会に有用なシステムを作っていくためには、「もの」と「コト（機能）」の両方が必要です。理学や縦型工学は「もの（対象）」を正しく理解するという学問として明確に成り立っています。しかし、横断型基幹技術であるシステム工学やシステム理論が成り立つためには、「コト」における「もの」のスペクに相当するものを定義することが一つのポイントです。

では、構成学とは何だろうかと思ったときに、それは「もの」だけでなく、「コト」だけでもなくて、多分、真ん中を狙っているのではないかと。構成学に対置するものとして、横幹連合のもう一つのキーワードは「知の統合」なので、とりあえず「統合学」とすると、統合学と構成学が新しい認識科学、設計科学として、「もの」と「コト」を両輪とする中でうまく成り立っていけば、一つの姿になるのかなということを描いてみました。

私は、構成学は「シナリオ」が一つの大きなキーワードになるだろう、要するに、「シナリオドリブンな研究である」と考えました。我々が「もの」を対象とするとき、学問となるためには、対象に対するモデルを持ち、それに基づいて研究するのが科学技術の一つのスタンダードなやり方です。しかし、「コト（機能）のモデル化」は十分なされていないのではないかと気がします。したがって、我々が「もの」と「コト」が両輪だと言うならば、機能のモデル化をきちんと定義する必要があります。それらを踏まえて、シナリオは何かというと、このモデル化と人工物の機能に対する仕様を結ぶこと、ここをある意味で整合性良く、合理的につなげることだろうと思います。

評価についてですが、構成学や統合学では何を評価した

「統合学」と「構成学」における評価



らよいか。統合学とは、統合する新しい原理や概念を作り出し、それに基づいて普遍性を追求し、体系化していくことです。構成学は、整合性と合理性が重要です。バラバラになったものを一つにまとめ上げるという意味での整合性、もう一つはシナリオとして成り立つという意味での整合性であり、いわゆる論理の整合性とは違う意味合いです。「合理性」はもしかしたら「妥当性」と言うほうがいいかもしれません。岸さんの例は、単にリスク比較問題を解決するだけでなく、その方法論は他のところにも使えます。そこを系統化・一般化することによって普遍的になっていくと思います。新しい評価基準として、「こういう意味の整合性です」ということが定義できると、評価がきちんとできるとは思います、いずれにしてもシナリオがベースになっているということです。

もう一つ、我々が対象としているのは大規模かつ複雑な社会的な課題であるので、評価として「革新性があるかどうか、展開性や波及効果があるかどうか」ということを問わないといけないと思います。体系化や系統化、普遍性が持っているものがその領域にとどまらないためには、展開性や波及性をきちんと評価していくことが大事だということです。

NSF で支援の検討が行われているトランスフォーマティブ・リサーチとは、革新的な展開で科学を変貌させるということですが、これをベースにアメリカでは、予期しなかった展開や多分野への波及や新研究領域の創出を期待しています。ヨーロッパ型の融合は、チームを作って融合研究をして、そこからイノベーションを導くという、融合研究を通して何かを期待しようというものです。

これに対して、日本の場合の融合研究は必ずしもうまくいっていません。なぜかという、何か重点領域を決めると、それに真っ直ぐに向かった研究活動を行い、その問題解決だけを狙って、結果が出たか出ないかということをやります。そのときに本当に融合研究ができていくかどうかは怪しい。

このような状況の中で、我々としては、構成学、統合学によって、社会的な課題に対してもきちんとした学問的なアプローチでやっていく、それが展開性や波及効果を生んでいく、そういう絵が描ければいいなというふうに考えています。

(統計数理研究所と構成的研究)

田村 義保 (統計数理研究所) 「統計的データ解析」という言葉があるので、統計はアナリシスだと思っている方が多いかもしれませんが、逆でして構成学的なことが多いという気がしています。昔、統数研の例えば赤池先生のセメントの研究でいいますと、セメントキルンを安定に動かすために、既存の方法ではだめだったので、新しい統計的な制



御の方法を考え、成功されました。

院生の研究ですが、3月にドクターをとった院生が最初にやったのは「ネズミの呼吸中枢は脳のどこか」を探る研究です。数学がやたら好きで数学モデルばかり書いてしまって、医者に怒られました。なぜ怒られたかという、生理学を無視している。「そんな研究ではだめ」と医者が注意してくれたのですが、院生はショックを受けたようで、その研究をやめてしまいました。もう一人の院生は、ある制御関係の会社に入った人で、経験豊富な60歳。データは単に脳の切片を色素で染めて顕微鏡で見ただけなのですが、研究のツボを知っていた。既存的な数学の技術や統計学を使いますが、実際の問題をやっていたから、仮想的な数学にばかり走らずに、生理学と実際のモデル化がうまくいきました。ネズミの脳で失敗した学生は、その後、ネズミのアゴの骨の形を分析しました。これも既存の技術では形の数値化がうまくいかない。そこで彼は遺伝研でとったデータを活用し、モデル化もうまくいっているようです。

しばしば「融合研究はうまくいった試しはない」と言われますが、遺伝研と統数研の融合研究は結構うまくいっています。なぜかという、遺伝学と統計学はルーツが一緒ですし、遺伝学者と統計学者は相性が良いので融合がうまくいっています。

また、統数研には金融から来た学生も多いのですが、目的は「会社が損しない」ということです。どういうシナリオを書いて、どうやったら一番利益が上がるかということ、かなり難しい確率の微分方程式を使ってやっています。いろいろな要素技術を組み合わせますが、どれを選んだら一番いいかというシナリオモデルは統計学では一番大事なので、構成学的な考え方に統計学はかなり昔から合っていたのではないかという気がします。アナリシスと言っているのは、最終的なレベルのところを解析、分析すること、で、「どう分析するか」ということは、やはり慎重に、統合しながら構成しているという感じです。

今、統計や情報系の方は、「データドリブン」という言葉が好きで、第4の科学は「データの科学」と言っているのですが、データのモデル化というとおかしいかもしれませんが、データを出している体系をどうモデル化するかということが一番大事なところですし、構成的研究にも合っていると思っています。

(構成方法の種類)

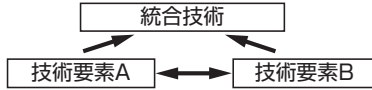
小林 直人 (早稲田大学) 私は専門が物理なので、構成といいながらも分析的に考えてしまう傾向があるのですが、構成の方法もまず分析的に考えてみました。この図は『Synthesiology』



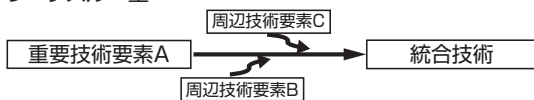
の1巻2号でMITのリチャード・レスター先生と議論したときに、私が提示したものです。掲載された論文を読んだり、執筆者と話したりして、論文上の構成方法のタイプがあるのではないかと思います、3つくらいに分けてみました。

構成方法のタイプ

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



1つ目は、ヘーゲルの弁証法を借りまして「アウフヘーベン（止揚）型」です。技術要素Aと技術要素Bという、異なったテーゼが統合され、新しいコンセプトが作り出されるタイプです。

2つ目は「ブレークスルー型」です。これは科学技術者はわりと得意なのですが、自分の要素技術が重要な鍵となる技術を生み出し、それに周辺要素を結合させると統合技術になり、ブレークスルーするというタイプです。実は本当はこのように簡単にはいかずなかなか難しいのですが、うまくいっている例もあります。

3つ目は「戦略的選択型」です。岸本さんから往路、復路という話がありましたが、私は岸本さんの論文を読んでこのタイプではないかと思いました。出口が先にあって、それを達成するためにいろいろな要素技術を選択・構成したというものです。この場合、要素技術の重要性は同等であっても、これらを選択・構成するための戦略性が必要です。

もちろん、この3つのタイプだけではなく、これら3つのタイプをさらに組み合わせる例もあると思いますし、実際にきれいにタイプ分けできるかというとなかなか難しいと思います。さらに重要なことはこの技術要素の構成の際に、何がエッセンシャルな主導理念なのかだと思います。

我々は『Synthesiology』の発刊の趣旨を理解して、論文を書いてくださいと皆さんにお願いしているのですが、構成の方法論はまだできていないと思っています。私が査読で執筆者にシナリオや要素技術の構成の重要性を説明したり、議論して、「それって、こういうことなんですか?」と聞くと、「あ、そうかもしれないですね。でも、そんなことは全然考えていませんでした」と言われます。このあたりは、原先生の言われ

た「構成学はシナリオドリブンな研究であり、機能のモデル化の定義が必要」という議論につながるのではないかと思います。まさにイノベーションの議論とほとんど一緒になってくるかもしれません。道のりは長いかもしれませんが、ひょっとすると我々は知の統合の方法論を得ることができるかもしれないなと思っています。

(質疑応答)

赤松 フロアから、これまでの4人のご発表に対して、質問やご意見はございますか。

(「人工物」の中に企業は入るのか)

フロア 素朴な質問なのですが、人工物の中に企業みたいなものも入っているのでしょうか。リスクの話がありました。リスクを回避して国民がメリットを受けるという考え方もありますが、企業も経営的課題や地震等々、多くのリスクに直面しています。リスクマネジメントの標準を調べたことがありますが、オーストラリアやニュージーランドをベースにした企業のリスクマネジメントの標準で重視されている方向は「リスクはチャンスである」ということです。企業がリスクを回避するだけでなく、それをチャンスにイノベーションをおこし、新しい企業価値を高めることも含むわけですね。その方法が他の企業に広がり、普及することによって、当面の企業価値が上がるだけでなく、社会全体にも還元されます。企業を基本にして検討すると、数理的なもの他にビジネスモデル的な、よくわからない世界が入って来るのですが、それは人工物システムの中にも含まれるのでしょうか。

岸本 公的研究機関の研究という意味で、日本全体で国民というお話をさせていただきましたが、「リスクはチャンスである」ということはすごくやっています。世の中で今後何がリスクになるかについて先取りし、手法を開発し、それを例えば標準化に持っていくことは日本の競争力につながります。それには、まず、「誰にとって」ということを明示化することが必要です。「企業にとって」を明示化すれば、そういう戦略が出てくるでしょうし、構成学的枠組みが適用できると思います。

原 私は図の中で「人工物システム」と書いていますが、それは学術会議で提示されたものです。我々が「コト」というものを考えたとき、それは社会システムや人間の営みを含むということで、もっと広い概念としてこれを捉えないといけないと思っています。

(知の統合の整理)

フロア 私は「知の統合」とか「構成」と言うときに、

対象となる「知」の構造にドメインの違うものがあることについて整理したほうが良いと思うのです。

まず、自然や物理世界など自然の摂理によって検証できるもの。次に、論理世界、シンキングワールドの話があって、これは数学であったりモデルであったりするもの。問題なのはいわゆる人間社会を扱うというタイプであって、これは意思や意味、価値が絡む話であり、やろうとしている我々自身が含まれている、しかも自然や工学を含んだ社会であるということです。まず3つのディメンションで知の統合を整理すべきだと思います。それらをつなぐタイプの統合は、野心的、あるいは問題を通じたアドホックな統合という新しいタイプの動きがあるかもしれません。

赤松 世の中にさんざんジャーナルがあるにもかかわらず、なぜまたジャーナルを出すのかという議論があったとき、事例の蓄積ということをやらないと理論化したところで使えるかどうか分からない、研究そのものうまくいったデータを集めて学びとる形にしていかに得ないだろうと考えました。したがって、『Synthesiology』では、我々編集サイドと著者が構成的と考えるさまざまな研究が論文となっています。小林先生から紹介があったような研究の分類は試行的にやっていますが、今フロアからいただいたような観点からの分類整理も考えられます。ただ、まだ研究事例を集め始めた段階なので、あまり慌てずにじっくりと蓄積しながら検討していけば良いと考えています。

フロア 原先生の図（「横断型基幹科学技術」と「構成学」）はすごく興味深いのですが、一つ質問させていただきたいのは、自然現象は対象になっていたのですが、社会現象はどういうふうな位置付けになるのか。それは別の世界になるのか、自然現象と同等に社会現象もこの図で表すことができるのか。社会が外にあって、ここで蓄積した知識、構築した論理を別の社会というところである種の意味付けを持たせているのか。

私の考え方は、「科学といえども社会的な現象である」というのが前提です。社会は動いているし、科学も動いている。チャレンジングでおもしろいのはそのインタラクションだと思うのですが、それをこの中に表現していただくと横幹連合の良い部分が強くわかってくると思います。

もう一つ、「構成」は Synthesis という言葉を使われているのですが、複数のロジックで固めた塊があって、それをいかに一つのストーリーにするかというものですし、「統合」はもっと深い意味で、組み合わせて一つのものになるという話です。これまで様々な異分野融合が行われていますが、やはり難しい。現実的に可能なのは Synthesis のほうだと思うのです。

それが究極なところに行くと、ある種の統合が起こって新しいディシプリンができて、またグルグル回って新たなものにされるという形になるのかなと思います。

赤松 我々が『Synthesiology』でターゲットとしているのは「研究者の営み」です。したがって、その研究者を動かした社会背景というものがあるはずですが、岸本さんの研究も社会とのインタラクションによって行われた研究ということができます。これ以外にも、研究組織内の研究者間のインタラクション、研究者と産業界とのインタラクションなどが背景になっている研究が多いことは、『Synthesiology』の論文を読んでいると気付かされることです。出来上がったものだけを対象にするのではなく、社会とインタラクションしながら、ゴールの定義をきちんとし、そこを目指して、何を組み合わせたいかというのを考えていく、そのプロセスが研究者として大事です。これまではあまり意識せずにそれをやって来たのを、『Synthesiology』ではそれを論文として記述して行こうというのが狙いの一つです。そういう意味で「統合」という言葉をあえて使わずに、だんだん形作っていくというイメージを持って、「シンセシス」という言葉を使うことにしました。

きょうは、いろいろな形の議論ができたと思いますし、今後もお互いに切磋琢磨しながらやっていきたいと思っています。ありがとうございました。

（閉会挨拶）

木村 英紀（横幹連合会長、理化学研究所）2年ほど前に『Synthesiology』発刊の計画を伺って、これはすごい、やられたと正直、思いました。まさに我々が思っていたことをこれからおやりになるのだということで、出てきた結果も実にすばらしい。

吉川先生は、ディシプリンは学問が発展するために必要だが、必要悪とまで言い切り、研究者の情熱は、必ずそれを乗り越えて問題に肉薄するものであるという信念を持ち続けておられますが、きょう発表していただいた岸本さんは、まさにディシプリンの限界を身をもって体験され、それを乗り越え、すばらしい結果を出されたわけです。しかし、学会はディシプリンによってできており、それを相対化して必要悪と言ってしまおうと学会連合は存在しないという矛盾を抱えるのですが、バランスをとってその存在を認め、それを乗り越える情熱を持つ方向を求めているかなければいけないだろう。これは今後の学問の進展の必然的な方向性だろうと思います。

産総研という、すばらしい研究者を何千人も抱えているところがこういうことを始められたということで、我々は今後とも見守りたいし、学としての立場でできる限りサポートしていきたいと考えております。

シンセシオロジー（構成学）：構成的研究の方法と記述

小野 晃、赤松 幹之（産業技術総合研究所）

The Method and Description of Synthetic Researches

A. Ono, M. Akamatsu (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Abstract— A new method and processes are provided with synthetic researches integrating elemental technologies to realize societal values. The synthetic researches are characterized in comparison to the analytical researches and are modeled in the cycling processes among the society, researchers and academic communities. A new description framework is given to write original scientific papers of the synthetic researches. It is now demonstrated by the publication of new scientific journal, *Synthesiology*, for the synthetic researches.

Index terms— Synthetic research, method, description, type two basic research, synthesiology

1 はじめに

科学は要素還元の方法をとることで17世紀以来著しい発展を遂げてきたが、21世紀に至って地球規模の環境のような複合的な問題に対しては、その方法だけでは対処できないことも強く認識されている。また20世紀に技術は科学の裏打ちによって大きな発展を遂げたが、要素還元論だけで技術が進歩してきたのではないことも自明である。

認識科学に対する設計科学、分析的な方法に対する構成的ないし統合的な方法、理学に対する工学などの対立する関係が議論される中で、最近、要素還元論とは異なる新たな科学の方法論がさまざまところで模索されているように見える。

この講演では科学技術の基礎的な研究開発において、分析的な方法だけでなく、構成的ないし統合的な方法が果たす役割に着目する。基礎的な研究開発が社会的な価値を生み出す過程において構成的な方法が重要であることを指摘し、そのような構成的研究の方法論を提示する。また構成的研究のプロセスと内容を記述するための新たな論文形式を提示する。ここで述べる構成的研究の方法論は2001年以降産総研において“本格研究”あるいは“第2種基礎研究”として議論され、実践されてきた¹⁾。また新たな論文形式は2008年に産総研から創刊された学術誌 *Synthesiology* において現実に試みられている²⁾。

2 基礎研究の新たな方法論

研究を基礎研究、応用研究、開発研究に分けることがしばしば行われるが、ここでは次の3つのフェーズに分けて考察する。

- 第1種基礎研究：自然を研究の対象とし、未知の現象を観察、実験、理論計算により分析して、事実的な知識を蓄

積し、さらに普遍的な法則や定理を構築する研究である。純粋基礎研究と同じフェーズにある。通常単一の専門領域の中で研究を行い、複数の専門領域に跨って行うことはまれである。研究は、研究者の学術的な好奇心によってドライブされる。

- 第2種基礎研究：複数の専門領域の知識を構成・統合して社会的価値を実現する研究である。何をどのようにすべきかという当為的な知識を蓄積し、方法論を構築する研究である。目的基礎研究や応用研究と同じフェーズにある。研究は、社会的な価値の実現への研究者の意欲でドライブされる。
- 製品化研究：上記二つの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研究。開発研究に相当するフェーズである。研究は、研究成果を社会の中で具体化することへの研究者の意欲でドライブされる。
- 本格研究：前記の第2種基礎研究を軸に、第1種基礎研究から製品化研究にいたるまで、一貫して連続的かつ同

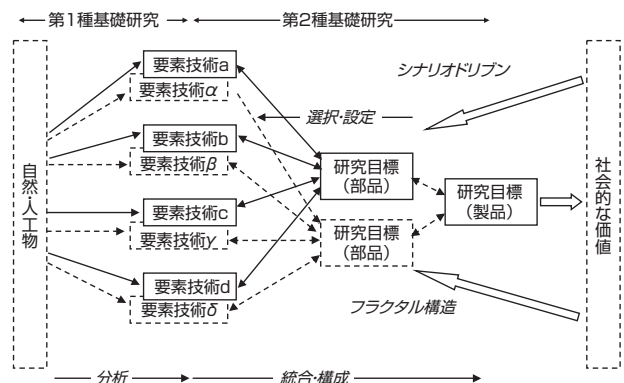


Fig. 1 Method of Type Two Basic Research

本論文は、2009年12月4日に行われた横幹連合第3回コンファレンスの特別企画セッションで発表した講演の予稿であり、横幹連合の許可を得て再掲したものである。

時並行的に進める研究である。通常グループあるいは組織として一体的に行われる。個々の研究者は通常本格研究のどこかの部分を担当するが、時間的に見れば第2種基礎研究から第1種基礎研究へ、あるいは第2種基礎研究から製品化研究へと移動したり、複数の研究を同時に行うこともある。

Fig. 1は第2種基礎研究の方法を図示したもので、第1種基礎研究との関係も合わせて描いている。第2種基礎研究では、第一に、社会的な価値をもつ研究目標を定める。研究目標は社会への出口に近いものもあれば、遠いものもあるが、いずれも社会的な価値との関係を明確に記述しなければならない。第二に、研究目標を科学技術の言葉を用いて研究課題にブレークダウンし、それらの課題を解決して目標を達成するためのシナリオを設定する。シナリオの設定では、課題解決のために用いる要素技術をいかに選択するかが重要になる。通常、要素技術は複数の異なる専門領域に跨る。第三に、要素技術を組み合わせ、それらを構成統合して研究課題を解決しつつ研究目標の達成を試みる。

ここで注目すべきことは、このような構成的研究においては同じ研究目標に対しても、それを達成するためのシナリオは必ずしも一つに限られるわけではなく、複数存在しえることである。また最良と考えるシナリオも研究者ごとに異なるのが普通である。通常研究者は複数のシナリオを想定し、比較検討の結果最良と考えるものを設定する。シナリオが異なれば必然的に選択する要素技術も研究者ごとに異なったものになる。

研究者が選択する要素技術は、第1種基礎研究で得られた成果ないしは結論に基づくものである。複合的な研究目標を達成しようとする場合、すべての要素技術が単一の専門領域の中に存在することはまれである。むしろ通常は複数の専門領域から要素技術を選択する。既存の要素技術がそのままの形で第2種基礎研究に適用できる場合もあるが、多くの場合既存の要素技術の修正や改良をあわせて

行うことも必要になる。またシナリオに照らしてみても適切な要素技術がない場合には、研究者あるいは研究グループが自ら第1種基礎研究を行い、新たな要素技術を開発する場合も多いと考えられる。

第2種基礎研究を実施して一定の結論が得られた場合、当初定めた研究目標がどの程度達成されたかを評価した上で、一つのサイクルが完了する。第2種基礎研究は社会への出口に向けてさらにサイクルをくり返しつつ展開していくが、前のフェーズで得られた結論は次のフェーズで活用される。第2種基礎研究はどの場合にも上記のサイクルを構成しており、フラクタル構造を有していると考えられる。

以上述べた第2種基礎研究の諸性質を、第1種基礎研究と対比させて Table 1 に示す。

3 研究成果の社会還元

Fig. 2は基礎研究の成果をどのようなプロセスで社会に還元するかを描いたものである。現代社会では公的な資金が科学技術の研究に対して与えられる。公的な資金は、その提供者の意思を反映して研究実施機関に委託され、一定の契約のもとで研究者によって研究が行われる。研究成果は研究者によって研究論文として記述され、専門領域の学会に提出される。研究論文は学会で、ピアレビューと呼ばれる同じ分野の研究者による匿名の審査を経た後に学術論文誌に掲載されて公開され、学術と知識への貢献が認められる。

現実には現代の科学技術は多くの専門領域に細分化されている。通常細分化された個別の専門領域ごとに学会が組織され、学会は独自の学術論文誌を設ける。専門領域が細分化されればされるほど、研究論文を読んで理解するには特殊な用語と専門知識を必要とするため、研究成果を活用したいと思う社会の人々が容易に理解できるものとはなっていない。それだけでなく、他の専門領域の研究者からもほとんど参照不能なものとなっている。

Table 1 Characteristics of Type One and Type Two Basic Researches

	第1種基礎研究	第2種基礎研究
手法	分析(アナリシス)	構成・統合(シンセシス)
行為	発見、解明	発明、作成
対象の範囲	単一領域	複数領域
解の一意性	唯一解	複数の同等解
駆動力	学術的な好奇心	社会的な価値の実現
重視する性質	論理の整合性	解の有用性
オリジナリティ	解の飛躍性	方法の固有性
新規性	解の新規性	方法の新規性
評価の方法	ピアレビュー	メリットレビュー
評価の視点	整合性、飛躍性	有用性、固有性

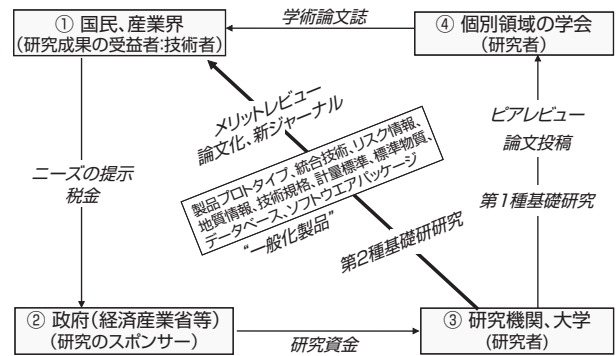


Fig. 2 Cycling process of research in the society

研究論文が学術論文誌に掲載されることは、研究者であることの最も基本的な要件であることから、研究者は全力で研究論文の執筆に取り組む。特にピアレビューアーと呼ばれる同じ専門領域の研究者に、自己の研究成果が価値あるものと評価されなくては学術論文誌への掲載が認められないために、研究者はしばしば自己の専門領域の研究者を納得させることを第一に想定して研究論文を書くことになる。研究者がこのような努力をすればするほど、皮肉なことに、研究論文は他の専門領域の研究者や一般の技術者には理解が困難な記述に陥っていく。このようにして、近年世界的にも多くの学術論文誌が発行され、発表される研究論文の数もうなぎのぼりの状況にあるが、公的資金で行われる基礎研究の成果は、資金の提供者のもとに直接還元されにくい状況は変わっていない。

ところがこのような状況の中でも、研究者によっては、個別の専門領域の学会を通さずに直接社会や産業界に成果を提供しているものがある。例えば公的研究機関が民間企業と共同研究を行って製品のプロトタイプを作るような場合には、研究成果を研究機関と企業が共有するよい機会となる。その他にも特許情報、リスク情報、地質情報などの情報や、技術規格や計量標準・標準物質などの公的な基準、ソフトウェアパッケージなども学会を通さずに直接利用者に届けられることが多い。

これらの成果は第2種基礎研究の代表的なものであり、社会に直接的な貢献をする点で価値が高い。ところがややもするとこれらの活動は、本来の研究活動とは別のサイドワークのように軽んじる傾向がある。さらに現状では第2種基礎研究の成果を研究論文として記述する方法論も媒体も確立されていないという状況にもある。第2種基礎研究のプロセスと成果を価値あるものと評価して、オリジナルな研究論文として発表できるような新たな論文形式を開発し、それらを掲載する新たな学術論文誌を刊行することは大きな意義があると考えられる。

4 新たな論文形式の開発

現代では研究者が、自己が行った研究のプロセスや内容を学術論文にまとめ、学術論文誌に発表することはごく当然のことと思われる。逆に研究論文を全く書かない研究者と言うのはそもそもありえないし、そのような場合はむしろ正当な研究者とは評価されない。しかしながら少し振り返ってみれば、現在我々が書いている科学技術の研究論文は、極めて限定された一定の形式のもとで書かれていることに気付く。

現在の科学の源流は17世紀の西欧にさかのぼるが、それ以来科学の方法には、ある事象が事実であるか否かを

判断するための実証主義が取り入れられている。研究者が研究論文を書く場合には、著者以外の他の研究者が追試をすることにより、その結果が論文で述べられている通りになるかどうかを検証できるだけの十分な情報を記述しなければならない。また事実として確認された事象間の論理的関係について考察し、法則や定理を構築していく。

このように現代の科学技術の研究論文には、著者がなぜその研究を始めたのか、どのような動機と意図をもっていたのか、なぜそのような決断をしたのかなど、“客観的”事象と関連のないことは書かないこととし、わずかに記述したとしてもそれを査読の対象にすることはなかった。その理由は、事實的知識の蓄積を第一の優先事項としてきた第1種基礎研究では、“客観的”事象の記述が重要であり、それだけで十分と言えたからであろう。しかしながら社会的な価値の実現を研究の動機とし、複数の同等なシナリオの中から一つを選択するような第2種基礎研究の場合、“客観的”事象を記述するだけでは研究の最も重要な部分を表現しきれない。

そこで第2種基礎研究の論文の構成を Table 2 のように考えた。これは Fig. 1 に示した第2種基礎研究の方法の各プロセスを研究の展開の順に並べたものである。論文のオリジナリティは、設定したシナリオの独自性と要素技術の統合・構成の方法の固有性にあると考える。ありていに言えば、同じ研究目標を掲げても、異なる研究者が行えば異なるシナリオが設定されるであろうし、異なる要素技術が選択されれば異なる統合・構成の方法が採られるであろう。それゆえにこれらは研究者に固有の“オリジナル”なものと考えられる。

また第2種基礎研究の論文には要素技術の詳細を繰り返して書く必要はない。それはすでに第1種基礎研究の成果として論文で発表されているものであろうから、参考文献に挙げて結果のみを記述すればよい。

5 新しい学術論文誌 *Synthesiology* の刊行

新たな論文形式と執筆要領を定めて、新しい学術論文誌

Table 2 Contents and features of *Synthesiology* papers
論文の構成

1	研究目標の設定
2	研究目標の社会的価値
3	シナリオの提示と要素の選択
4	要素間の関係付けとそれらの統合・構成
5	結果の評価と将来の展開

論文の特徴

オリジナリティ	設定したシナリオ 選択した要素、統合・構成の方法
参考文献	第1種基礎研究の結論は参考文献へ

Synthesiology^{3, 4)}を2008年に刊行した。1巻1号には6編の研究論文を掲載したが、それぞれの論文題名を以下に記す。

- ・不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓
- ・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
- ・高性能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ
- ・異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略
- ・個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術
- ・耳式赤外線体温計の表示温度の信頼性向上

論文題名にある、大量精製、標準化、低コスト製造、評価戦略、設計・販売支援技術、信頼性向上といったキーワードは、これまでの学術論文の題名にはほとんど使われないものであり、第2種基礎研究の論文の特徴がよく出ている。

*Synthesiology*の研究論文の査読は同じ専門領域の研究者が行うピアレビューとせず、大ぐくりした同じ分野から一人、他の分野からもう一人の研究者を充て、Table 1にある評価の視点からメリットレビューを行った。

また*Synthesiology*の特徴の一つであるが、掲載された論文のうしろに、著者と査読者との議論を載せて公開した。同時に査読者の氏名も公表した。第2種基礎研究の論文形式が十分に完成していない現段階では、著者と査読者との議論を公開した方が、今後論文形式を固めていく上で有用と判断したためである。読者からはこの議論が大変新鮮で面白いという感想が多く寄せられている。

*Synthesiology*を刊行してほぼ2年近くになるが、発行してみて分かった点がいくつかあるのでそれを紹介する。まず多くの著者から、今までの学術論文誌では書きたくても書けないことが今回書けた、と言う感想があった。研究者にとって、自己の研究目標の背景や理由、また研究遂行に当たって自己が採用したシナリオはむしろ公開し、他の研究者と議論したいという前向きな気持ちの現われと見ている。

つぎに査読者からは、シナリオに研究者固有のオリジナリティが良く出ているとの感想があった。一方で要素技術の構成や統合の様態は研究者ごとに多様であり、現時点で何らかの統一的な様態を描き出すことは難しいが、少しずつ類型化を進めていけるのではないかと予想している。一方ほとんどの査読者が驚きとした点は、専門領域が異なる研究者が書いたオリジナルな研究論文を読んで、内容を理解できただけでなく、一定水準の査読意見を提出できたことである。このようなことは現行の第1種基礎研究の学術論文誌ではありえないことで、*Synthesiology*の大きな特徴であり、広い読者層に受け入れられる可能性があるのではないかと受け止めている。

読者からは同じく、自己の専門とは異なる領域の研究を

理解し、知ることができたことを有益とし、参考になるとの意見が寄せられている。

地球環境問題をはじめとして複合的な研究課題が多く出てきている現代にあって、またオープンイノベーションといった新たな産官学連携が唱導されている中にあって、構成的研究の方法論は、その表現媒体でありかつ交流の場でもある*Synthesiology*とあいまって、一定の重要な役割を果たせるのではないかと考えている。

6 さらに議論に向けて

構成的研究においては有用性を重視するが、科学技術はそのおこりにおいて既に有用性がうたわれていた。現在我々が営んでいる自然科学研究の思想はフランシス・ベーコンに始まるが、自然を探求して発見・発明を行なうことによって人類は幸福になると主張されていた⁵⁾。それと同時に、自然科学は実証主義をとり、そのための方法として学術雑誌が確立したが、そこにおいては事実的知識としての検証が重視されることになった。その一方で、ベーコンが期待していた有用性については、研究社会ではその検証方法に手がつけられてこなかった。とはいえ、大発見、大発明という言葉があるように、社会は価値ある発見や発明を科学技術に期待している。その価値の基準の一つが有用性であると考えられるが、有用性の評価は容易ではない。社会へのインパクトという観点からは研究成果が市場にどれだけの影響を与えたかによって評価することが考えられるが、市場におけるダイナミックスは、既存権益や業界を守るための抵抗、流行また価格競争など、科学技術としての価値とは別のものによって大きく動かされることが多い。これらのこともあり、長い時間が経ってみないと市場での評価は定まらない。したがって、市場でのインパクトによって有用性をはかることは必ずしも適切ではない。

構成的研究を行って社会に成果を出していく時に、いわば漫然と要素技術を構成していく場合もあるが、十分な検討をしながら要素技術を構成していく場合もある。しかし、前者のように構成されたものは、偶然うまくいく場合もあるが、多くの場合には良い結果を生まないであろうことは想像にかたくない。したがって、後者のような研究の進め方が有用性をはじめとする価値を生み出すためには不可欠であろう。そこで、研究の進め方すなわちプロセスのことをシンセシオロジーではシナリオと呼んで、それを論文として記述することを求めている。しかしながら、その有用性をどのように考えるべきか、またその有用性を実現するためのシナリオがどうあるべきかは定かではない。

そこで、横幹連合、統計数理研究所、産業技術総合研究所との合同企画として、田村義保氏(統計数理研究所)、

原辰次氏(東京大学)、岸本充生氏(産業技術総合研究所)、小林直人氏(早稲田大学)をパネラーとして招いて、これらの課題について総合討論を行なう。まず始めに、構成的研究の具体例として、化学物質リスクの評価について岸本氏から解説し、シンセシオロジー論文の内容をパネラーや聴衆に理解いただきながら、知の統合という観点からみたシンセシオロジーについて原氏を中心にして議論を行なう。続いて、研究の有用性とは何か、またその有用性をどのように示すのかについて討論し、そのなかで科学的研究を社会的価値につなげるためのシナリオの評価をどのようにすべきであるか議論を行なう。そして、シナリオ構築や有用性評価のためのツールとしてのモデルおよびシミュレーション技術について、田村氏などを中心にしてその可能性を探る。さらに、これまでのシンセシオロジーに掲載された論文を俯瞰して、実施されてきたシナリオにはどのようなタイプがあ

るのかについて小林氏から案を提示いただき、それをもとにシナリオの類型化についての議論を行なう。これらをもとに、研究者の営みとしての知の統合を記述することの意味を明らかにするとともに、社会における研究の価値付けのための活動の今後の方向性を探る。

参考文献

- 1) 吉川弘之、内藤耕、産業科学技術の哲学、東京大学出版会(2005)
- 2) <http://www.aist.go.jp/synthesiology/>
- 3) 吉川弘之、*Synthesiology* 1-1、1/6 (2008)
- 4) *Synthesiology*、1-1 (2008)
- 5) 赤松幹之、井山弘幸、科学と社会あるいは研究機関と学術雑誌：歴史的回顧、*Synthesiology* 1-1、59/65 (2008)

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはしない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の研究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、その専門分野の研究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に知識を記載する論文形式に対して、なすべきことは何であるかという当為的知識を記載する論文のあり方については、論文に記載すべき内容、書き方、またその基準などを模索していかなければならない。そのためには査読プロセスを秘匿するのではなく、公開していく方法をとる。すなわち、査読者とのやり取り中で、論文の内容に関して重要な議論については、そのやり取りを掲載することにする。さらには、論文の本文には記載できなかった著者の考えなども、査読者とのやり取りを通して公開する。このように査読プロセスに透明性を持たせ、どのような査読プロセスを経て掲載に至ったかを開示することで、ジャーナルの質を担保する。また同時に、査読プロセスを開示することによって、投稿者がこのジャーナルの論文を執筆するときの注意点を理解する助けとする。なお、本ジャーナルのように新しい論文形式を確立するためには、著者と査読者との共同作業によって論文を完成させていく必要があり、掲載された論文は著者と査読者の共同作業の結果ともいえることから、査読者氏名も公表する。

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

	項目	執筆要件	査読基準
1	研究目標	研究目標（「製品」、あるいは研究者の夢）を設定し、記述する。	研究目標が明確に記述されていること。
2	研究目標と社会とのつながり	研究目標と社会との関係、すなわち社会的価値を記述する。	研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。
3	シナリオ	研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）を科学技術の言葉で記述する。	道筋（シナリオ・仮説）が合理的に記述されていること。
4	要素の選択	研究目標を実現するために選択した要素技術（群）を記述する。 また、それらの要素技術（群）を選択した理由を記述する。	要素技術（群）が明確に記述されていること。 要素技術（群）の選択の理由が合理的に記述されていること。
5	要素間の関係と統合	選択した要素が相互にどう関係しているか、またそれらの要素をどのように構成・統合して研究目標を実現していったかを科学技術の言葉で記述する。	要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。
6	結果の評価と将来の展開	研究目標の達成の度合いを自己評価する。 本研究をベースとして将来の研究展開を示唆する。	研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。
7	オリジナリティ	既刊の他研究論文と同じ内容の記述をしない。	既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

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。

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、英文の場合は刷り上で同程度（3,400ワード程度）とする。

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

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

3.2.11 原稿中に他から転載している図表等や、他の論文等からの引用がある場合には、執筆者が予め使用許可をとったうえで転載許可等の明示や、参考文献リスト中へ引用元の記載等、適切な措置を行う。なお、使用許可書のコピーを1部事務局まで提出すること。また、直接的な引用の場合には引用部分を本文中に記載する。

3.3 書式

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

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

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

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

雑誌：[番号] 著者名：表題, 雑誌名 (イタリック), 巻 (号), 開始ページ-終了ページ (発行年).

書籍 (単著または共著)：[番号] 著者名：書名 (イタリック), 開始ページ-終了ページ, 発行所, 出版地 (発行年).

4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

Published by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi, M.Seto

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

Editors: K. Igarashi, H. Ichijo, K. Ueda, A. Etori, K. Ohmaki, Y. Owadano,

A. Kageyama, K. Kudo, T. Shimizu, Y. Jigami, H. Tateishi, M. Tanaka, E. Tsukuda,

S. Togashi, H. Nakashima, K. Nakamura, Y. Hasegawa, J. Hama, K. Harada,

N. Matsuki, P. Fons, K. Mizuno, N. Murayama, M. Mochimaru, A. Yabe, H. Yoshikawa

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

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

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

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

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

1 Types of contributions

Research papers or editorials and manuscripts to the “Readers’ Forum” should be submitted to the Editorial Board.

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

Accepted articles will be published in *Synthesiology* (ISSN 1882-6229) in the language they were submitted. All articles will also be published in *Synthesiology - English edition* (ISSN 1883-0978). The English edition will be distributed throughout the world approximately four months after the original *Synthesiology* issue is published. Articles written in English will be published in English in both the original *Synthesiology* as well as the English edition. Authors who write articles for *Synthesiology* in Japanese will be asked to provide English translations for the English edition of the journal within 2 months after the original edition is published.

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

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

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

3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 Format

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

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

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

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

3.3.5 For photographs, clear prints (color accepted) or image files should be submitted. Image files should specify file types: tiff, jpeg, pdf, etc. explicitly (resolution 350 dpi or higher). In principle, the final print will be 7.2 cm x 7.2 cm or smaller, in black and white.

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

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

Book – [No.] Author(s): *Title of book* (italic),

Starting page-Ending page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

4 Submission

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

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

編集後記

シンセシオロジー 3巻2号が、執筆者および査読者のご協力をいただき、予定どおり発行されました。

本号では総説として、横断型基幹科学技術研究団体連合（横幹連合）主催のコンファレンスで設けられた「シンセシオロジー（構成学）：知の統合を目指す学問体系」という特別セッションでの総合討論の様子を掲載しています。科学・技術の研究から生み出される「知」を常に変化し続ける社会ニーズや社会的価値と整合させながらつなげるための知の構成・組み合わせとシナリオについて議論された様子が紹介されています。研究そして研究者が社会とインタラクションすることが不可欠であることを改めて認識させられる議論が展開されています。

本号では5編の論文が掲載されましたが、これまでとは異なるタイプの論文が2編含まれています。一つ目は人材育成に関する論文です。慶應大学でシステムデザイン・マネジメント学の専門家を育成することを教育目標として掲げて設置された大学院研究科（SDM研究科）の取り組みについて、大学院における人材教育における個別要素が非常に具体的に紹介され、目指す人材の育成に向けてそれぞれの要素の構成、統合、そしてシナリオについて論じられています。今日本では人材育成プログラムが溢れているように思いますが、各人材育成プログラムが社会ニーズとつながる形に発展することを期待したいと思います。二つ目はサイバーアシスト

計画を振り返った論文です。産総研発足と同時にスタートしたサイバーアシスト研究センターの活動を現在のサービス工学研究の先駆けとして位置づけ、第2種基礎研究を中心に活動した成果が論じられています。“10年間続けられたら”という強い思いも語られていますが、サイバーアシスト計画によって見出された知見が今進められているサービス工学研究に一つの構成要素として統合され、産総研の貢献として近い将来大輪の花となる日を待ちたいと思います。

さて、産総研は本年4月より5年間の第3期中期計画をスタートさせました。第3期では政府の掲げる新成長戦略を踏まえ、「21世紀型課題の解決」と「オープンイノベーションハブ機能の強化」を大きな柱とし重点的に研究開発などに取り組む計画です。産総研はこの第3期中期計画の目標達成に向けて、基礎的研究の成果を民間企業が行う製品化につなぐための、出口を見据えた基礎から製品化に至る連続的な研究「本格研究」を一貫して推進し、我が国のイノベーション創出に貢献していく所存です。「社会の中で、社会のために」というシナリオの中で生み出される成果が今後も産総研の内外から本誌に次々と掲載され、シンセシオロジー誌が「知」と「社会」とをつなぐ役割を今後も大いに発揮していくことを願う次第です。3年目どうぞよろしく願いいたします。

（編集副委員長 瀬戸 政宏）

Synthesiology 3巻2号 2010年5月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：石井 武政

委員：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、景山 晃、工藤 勝久、清水 敏美、地神 芳文、立石 裕、田中 充、佃 栄吉、富樫 茂子、中島 秀之、中村 和憲、長谷川 裕夫、濱 純、原田 晃、松木 則夫、Paul Fons、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 広報部出版室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒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出版室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Cyber Assist project as service science and engineering

-A project that began ten years too early-

H.Nakashima and K.Hasida

Graduate education for multi-disciplinary system design and management

-Developing leaders of large-scale complex systems-

N.Kohtake, T.Maeno, H.Nishimura and Y.Ohkami

Products and evaluation device of cosmetics for UV protection

-AIST commercialization based on regional collaboration that combines the current strategic logic, and an intermediary's experience and trial-and-error approach-

Y.Takao and M.Sando

Establishment of compact processes

-Integration of high-pressure micro-engineering and supercritical fluid-

A.Suzuki, H.Kawanami, S.Kawasaki and K.Hatakeda

Development of an accurate and cost-effective quantitative detection method for specific gene sequences

-Development of a quantitative detection method for specific gene sequences using fluorescence quenching phenomenon-

N.Noda

Report

Synthesiology: Knowledge for interdisciplinary consilience

Editorial policy

Instructions for authors