

Synthesiology

研究論文

再生・細胞医療のための自動細胞培養システムの開発

リスクトレードオフを考慮した次世代低GWP冷媒の選定

産業保安と事故事例データベースの活用

高速充放電型蓄電デバイス“キャパシタ”の開発

都市鉱山の戦略的な開発を支える物理選別技術

座談会

システムデザイン・マネジメント学とシンセシオロジー

シンセシオロジー編集委員会

「Synthesiology – 構成学」 発刊の趣旨

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

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかせたままでは、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/information/honkaku/index.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6巻第4号(2013.11) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

研究論文

- 再生・細胞医療のための自動細胞培養システムの開発 — 高品質細胞製品を調製するロボットシステム — 198–208
 ……脇谷 滋之、田原 秀晃、中嶋 勝己、蓮沼 仁志、下平 滋隆、小野寺 雅史、植村 寿公
- リスクトレードオフを考慮した次世代低 GWP 冷媒の選定 — R-1234yf に対するリスクトレードオフ評価 — 209–218
 ……梶原 秀夫
- 産業保安と事故事例データベースの活用 — リレーショナル化学災害データベース (RISCAD) と事故分析手法 PFA — 219–227
 ……和田 有司
- 高速充放電型蓄電デバイス“キャパシタ”の開発 — キャパシタデバイスの高性能化を目指した電極材料の開発戦略 — 228–237
 ……羽鳥 浩章、棚池 修、曾根田 靖、児玉 昌也
- 都市鉱山の戦略的な開発を支える物理選別技術 — 未利用・難処理資源の開発と我が国の資源ビジョン — 238–245
 ……大木 達也

座談会

- システムデザイン・マネジメント学とシンセシオロジー — 現代社会の課題に挑み、研究成果を社会に活かす方法論 — 246–254

編集委員会より

- 編集方針 255–256
 投稿規定 257–258
 6巻総目次(2013) 265–266
 編集後記 267

Contents in English

Research papers (Abstracts)

- Development of automatic cell culture system for cell therapy and regenerative medicine** — Robotized system for high quality cell product preparation — 198
 --- S. WAKITANI, H. TAHARA, K. NAKASHIMA, H. HASUNUMA, S. SHIMODAIRA, M. ONODERA and T. UEMURA
- Selection of next-generation low global-warming-potential refrigerants by using a risk trade-off framework** — Risk trade-off assessment for R-1234yf — 209
 --- H. KAJIHARA
- Industrial safety and application of a chemical accident database** — Relational Information System for Chemical Accidents Database (RISCAD) and accident analysis method PFA — 219
 --- Y. WADA
- Capacitor devices for rapid charge/discharge storage** — R&D strategies of electrode materials for high performance capacitor devices — 228
 --- H. HATORI, O. TANAIKE, Y. SONEDA and M. KODAMA
- Physical separation technology to support the strategic development of urban mining** — Development of unused/hard-to-use resources and a future vision of resources for Japan — 238
 --- T. OKI

Messages from the editorial board

259–260

Editorial policy

261–262

Instructions for authors

263–264

再生・細胞医療のための自動細胞培養システムの開発

— 高品質細胞製品を調製するロボットシステム —

脇谷 滋之¹、田原 秀晃²、中嶋 勝己³、蓮沼 仁志³、下平 滋隆⁴、小野寺 雅史⁵、植村 寿公^{6*}

再生・細胞医療技術を生かした基礎研究と臨床応用の間の橋渡し研究の大きな障壁の一つとなっている臨床用細胞調製を飛躍的に容易にすることを目標として研究を行った。川崎重工業が信州大学、産総研に設置し、すでに具体的評価を開始している世界初の細胞培養ロボットシステム (MDX) の技術を基に、建設や運営の困難な専用の細胞調製施設 (Cell Processing Center: CPC) を設置せずとも高品質の細胞試薬を調製できる実用的な培養システム (Robotized - Cell Processing eXpert system: R-CPX) を開発した。この開発を通じた多様な細胞医療の迅速な実現と世界標準品質の確立を目指した。

キーワード: 再生医療、細胞医療、自動細胞培養システム

Development of automatic cell culture system for cell therapy and regenerative medicine

– Robotized system for high quality cell product preparation –

Shigeyuki WAKITANI¹, Hideaki TAHARA², Katsumi NAKASHIMA³, Hitoshi HASUNUMA³,
Shigetaka SHIMODAIRA⁴, Masahumi ONODERA⁵ and Toshimasa UEMURA^{6*}

We carried out R&D in order to dramatically facilitate cell culture for clinical use, the difficulty of which had been a major hurdle in adapting basic research to clinical applications of cell therapy and regenerative medicine. The world's first robotized cell culture system (MDX) was developed by Kawasaki Heavy Industries, Ltd., and the systems were installed in Shinshu University and AIST. Based on the technologies of the MDX system, we developed a novel cell culture system R-CPX (Robotized-Cell Processing eXpert system) which can produce high quality medical cell products. This system does not need to be placed in a CPC (cell processing center), which is expensive to construct and difficult to manage. We aimed to realize rapid progress of various cell therapies and production of medical cell products of global standard quality.

Keywords: Tissue engineering, cell engineering, auto culture system

1 はじめに

1.1 なぜ、今、自動細胞培養装置の開発が必要か？

近年、少子高齢化が進む中、がん、糖尿病、認知症等の成人性疾患等に関して、これまで行われてきた薬剤投与や人工物を用いた代替材料による対処療法には限界があり、新たな医療技術の開発が望まれている。その実現のためには進展著しい医療分野の多様な要素技術や研究成果

を、創薬や、これを支援する解析ツール、診断技術、医療機器等の開発に応用する必要がある。そのためには、迅速な実用化に向け、民間企業と臨床研究機関が一体となって研究開発を行うことが重要である。

従来医療に代わり、次世代医療として期待される再生医療、遺伝子・細胞医療は、細胞の増殖、分化等の能力を利用して、患者自身または提供者の細胞を採取し、生体外

1 武庫川女子大学 健康スポーツ科学部 〒663-8558 西宮市池開町 6-46、2 東京大学医科学研究所 先端医療研究センター 外科・臓器細胞工学分野 〒108-8639 港区白金台 4-6-1、3 川崎重工業株式会社 システム技術開発センター 〒650-8670 神戸市中央区東川崎町 3-1-1、4 信州大学医学部附属病院 先端細胞治療センター 〒390-8621 松本市旭 3-1-1、5 国立成育医療研究センター 成育遺伝研究部 〒157-8535 世田谷区大蔵 2-10-1、6 産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 〒305-8562 つくば市東 1-1-1 つくば中央第 4

1. School of Health and Sports Sciences, Mukogawa Women's University 6-46 Ikehira-machi, Nishinomiya 663-8558, Japan, 2. Department of Surgery and Bioengineering, Advanced Clinical Research Center, Institute of Medical Science, The University of Tokyo 4-6-1 Shirokane-dai Minato-ku 108-8639, Japan, 3. System Technology Development Center, Kawasaki Heavy Industries, LTD. 3-1-1 Higashikawasaki-cho, Chuo-ku, Kobe 650-8670, Japan, 4. Center for Advanced Cellular Therapy, Shinshu University Hospital 3-1-1 Asahi, Matsumoto 390-8621, Japan, 5. Department of Human Genetics (Research Institute) National Center for Child Health and Development 2-10-1 Okura, Setagaya-ku 157-8535, Japan, 6. Nanosystem Research Institute, AIST Tsukuba Central 4, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8562, Japan * E-mail: t.uemura@aist.go.jp

Original manuscript received January 10, 2012, Revisions received January 24, 2013, Accepted April 15, 2013

で増殖や分化、あるいは遺伝子導入などによる操作を行い、患者の疾患箇所に移植することにより疾患を治癒することを目的とした医療であり、現在急速に普及しつつあり、多くの実績が積み重ねられている。国内では、自家培養表皮組織を用いた皮膚再生医療が実用化（産業化）している。

生体から取り出した細胞の操作技術は、細胞増殖や分化を制御する基礎研究レベルでの技術開発であるが、この臨床応用や産業化を図るためには、基礎研究からの橋渡し研究（Translational Research: TR）が必要である^[1]。患者自身から採取した（自家）細胞、または提供者から採取した（同種）細胞を培養して得られる培養組織を製品として扱い、安全性を担保し、その有効性を顧客である医師や患者に品質保証する必要がある。細胞培養のプロセスでは、細胞を採取する過程や細胞を増やす（増殖）過程での細胞の植え継ぎ（継代）、また分化を誘導する過程等の細胞加工（セルプロセッシング）が必要であり、病院内や企業内に特別に設置された細胞調製施設（Cell Processing Center: CPC）において、熟練した作業者が、複雑な細胞培養操作を行っているのが現状である（図1A）。

CPCでの細胞培養操作では、滅菌できない細胞や組織を扱うことから、無菌環境の維持が重要であり、また、細胞培養の過程において、クロスコンタミネーション（他人の細胞が混ざることによる汚染）やヒューマンエラーは絶対に許されない。このような観点から、CPCは、日本では、治療行為は医師法に従うが、治療に使われる細胞・組織は、薬の製造・品質基準であるGMP（Good Manufacturing Practice: 医薬品の製造にかかわる設備・工程管理・品質管理に関する規則）を満足する必要がある。CPCの満足すべきGMPの3原則は、①汚染および品質劣化の防止、②人為的ミスの最小化、③高度な品質を保証するシステム、

である^{[1][2]}。そのために、(1) 無菌管理・バイオハザード対策・クロスコンタミネーション防止、(2) 取り違え防止、(3) 運営状況の文書化および記録維持等が不可欠である。現在、国内でも多くのCPCが稼動しており再生医療の研究開発が進められているが、以上述べた高いレベルの要件を満たすための維持費用、さまざまな新しい医療技術への対応の必要性からこれまでのCPCを使用した医療システムには限界があり、再生医療や細胞治療の産業化を見据えてさらに改良されたGMP準拠のシステムや機器の開発が切望されている。3原則の②、③は手作業にとって代わる自動培養システムが重要であり、また3原則の①より、維持費のかかるCPCの無菌環境を小型の装置により実現しグローブボックスにより操作が行えるアイソレータシステムの開発が行われている（図1A）。今後、アイソレータを用いた手作業による培養が普及すると考えられる。

この研究開発では、自動培養システムをさらに発展させるべく、アイソレータ内に培養システムを組み込み、種々の用途に対応可能な、CPC不要のR-CPX（Robotized-Cell Processing eXpert system）システムの開発を目的としている。このシステムの開発により、再生医療の普及期においては、中小企業のニーズとしてCPC不要の次世代R-CPXを、中～大企業のニーズとしてより低コストを実現した専用機により、安価で安全な再生医療の普及が実現できるものと期待できる。

1.2 目的、実施体制、研究開発の概要

この研究開発では、再生・細胞医療技術を生かした基礎研究と臨床応用の間の橋渡し研究の大きな障壁の一つとなっている臨床用細胞調製を飛躍的に容易にすることを目標とした。図1Bにこのプロジェクトにおける技術項目とその構成図を示す。川崎重工業株式会社（以下川崎重工

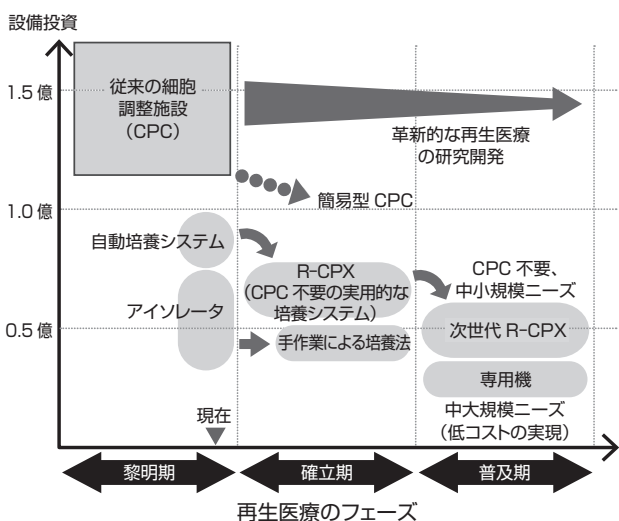


図1A 細胞調製システムのロードマップ

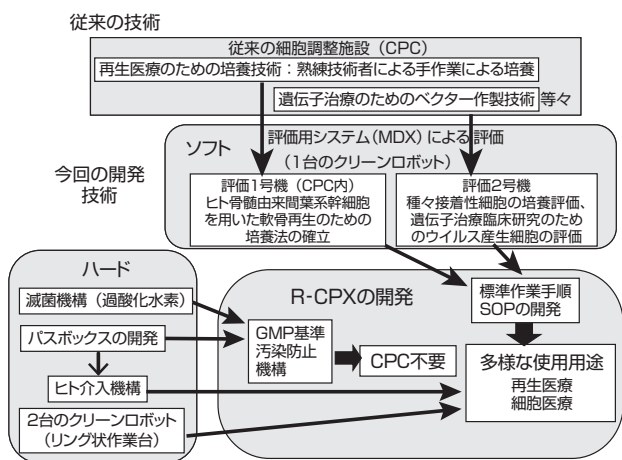


図1B このプロジェクトにおける技術項目と構成図

と略す）は、信州大学、産業技術総合研究所（以下、産総研と略す）に、すでに世界初の細胞培養ロボットシステム（MDX：Medical Device Project X、図2、図3）を設置した。以下、信州大学に設置したシステムを評価1号機、産総研に設置したシステムを評価2号機と略す。信州大学はCPC内で再生医療のための細胞培養技術に、産総研では、創薬開発等に用いるさまざまな細胞の培養に関して多くの経験とノウハウを有している。川崎重工の細胞培養ロボットは、細胞培養を行う熟練した技術者の手作業を、そのままロボット（主にロボットアーム）の動きに置き換えるというコンセプトのもと設計しており、1号機、2号機において、信州大学、産総研の培養技術を導入、そして試験することによって検証を進めた。得られた結果を基に、培養システムR-CPXを開発することを目標として研究を進めた。

再生・細胞医療は、新規性の高い治療法であり、現在も急速な研究開発が進められている分野であるため、その品質基準や機能要求は日々変化している。また、この手法は広範な疾患に応用することのできるものであるため、調製すべき最終産物（細胞）のみならず、その原材料となる細胞や組織も多様なものとなる。よって、現在手作業としてすでに確立されている一つのプロトコルにおける細胞培養関連技術を、単にロボット・システムに移植する努力をするのみでは全く不十分である。そこで、多様な作業の代表的な工程を含む二つの異なる具体的なプロジェクトを選択し、それらを実際に進行させることを軸として開発を進めた。開発する再生・細胞医療プロジェクトとしては、「ヒト骨髄由来間葉系幹細胞を用いた軟骨再生のための培養法の確立」（評価1号機）、および、「遺伝子治療臨床治療のためのウイルス産生細胞の評価」（評価2号機）を選択した。これらは、本事業担当者が十分な実績を持つ分野のプロジェクトであるため、これらの臨床試験に用いる細胞

試薬に関して、既存のCPCを用いた手作業用の標準作業工程（Standard Operating Procedures; SOP）を確立した。そして、このSOPに従って実際の試薬を調製し品質検証を行った。これらの研究と並行して、

- (i) 過酸化水素によるR-CPX内の滅菌機構
- (ii) 多様な使用用途に応えるために、すべてをロボット化せず、専用パスボックスを開発することによるヒト介入機構の導入
- (iii) 1台のクリーンロボットでは実現できなかった2台のクリーンロボットによる効率化

を主な技術項目として、CPCを使用することなくR-CPXのみにて円滑に実行できるハードを構築した。特にロボット化部分は既存のMDXを用いて検証実験を行い、将来的には手作業のほとんどが自動化可能となるものを目指した。

以上の目的にそって、以下の5つの研究項目を挙げ、研究開発を行った。

- ① GMP基準R-CPXの開発
- ② R-CPXを用いた再生医療の確立と評価
- ③ R-CPXを用いた遺伝子治療用ベクター産生法の検討
- ④ 標準作業手順SOPの開発
- ⑤ 評価機による培養評価

これらのうち、装置開発の直接関係する①、④、⑤について詳しく述べる。

2 GMP基準R-CPXの開発

2.1 R-CPX設計の基本概念

R-CPXの実現に欠かせない、汚染防止機能や人介入機構を開発し、それに基づきR-CPX全体構成の開発を行った。汚染防止としては、まずP2に対応できるように内部を陽圧/陰圧に制御できる換気機能を試作機を用いて検証し性能を確認した。次に、滅菌機能では比較検討の結果、過酸化水素蒸気による滅菌を採用し、滅菌性能を確認す

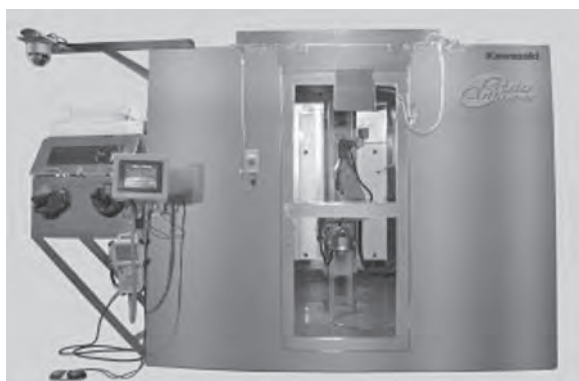


図2 MDX評価1号機（信州大学設置）（再生医療用）



図3 MDX評価2号機（産業技術総合研究所設置）（創薬用）

る各種試験を実施し R-CPX の設計に必要な基本データを得た。人介入機構では、ロボットとの協調作業となるためインターロック機構を考案し、また装置内部が陰圧の場合でも作業操作性が低下しないようにグローブのフィット機構を考案し、試作機にて検証した。

評価 1 号機、および創薬用に開発され産総研に設置された評価 2 号機およびこれらの検討結果から、R-CPX の全体構成を検討し、装置仕様を確定し概略図面を完成させた。ピペットの挿入試験、培養器具の操作性向上試験、ピペットの脱着試験、など検証が必要なものは試作機による試験を行い、性能を確認した。さらに、過酸化水素蒸気による滅菌性能やメンテナンス性の向上のために、シンプルな構造とし画像処理による環境認識技術の検証を行った。

さらに、R-CPX の詳細設計を行い、過酸化水素蒸気の発生装置は方式を見直した後、試作機を完成した。過酸化水素によるパスボックスと装置内部の滅菌と、これまでの試作機 1 号機や 2 号機にはなかった 2 台のクリーンロボットによる培養操作 (図 4) を実現し、性能試験を行い、確認した。また、評価 1 号機については、信州大学での培養試験によって確認されたハードウェアの問題点を改良し、自動培養 SOP の見直しを実施した上、同一ドナーおよび同一時期で、手培養との並行培養評価を実施した。

2.2 GMP基準の汚染防止法の開発

汚染防止として、求められる機能は以下の 4 項目である。

- (a) 外部から装置内部を汚染しないこと。
- (b) 外部と装置の間出入庫時に装置内部を汚染しないこと。
- (c) 装置内で異なる検体を扱う場合、交差汚染を起こさないこと。
- (d) 遺伝子治療用の培養等に対応し、装置内部から、外部を汚染しないこと。

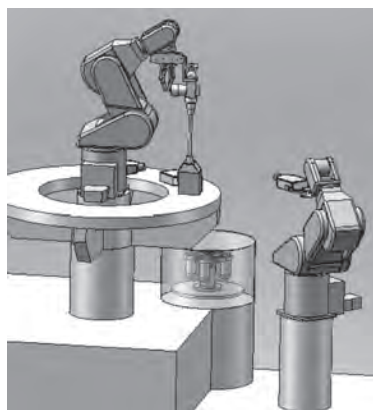


図4 ロボットと回転作業台の配置

この 4 項目の機能を実現するため、R-CPX では、パスボックスを含めた装置内の滅菌機能と装置内を陽圧 / 陰圧両方に制御できる換気機能を持たせた。滅菌機能に関しては、汚染の可能性がある場所の滅菌ができることが求められる。R-CPX では、内部装備品へのダメージが少なく、比較的、滅菌時間も短い過酸化水素蒸気滅菌を採用した。過酸化水素蒸気滅菌は、製薬や医療研究用途のアイソレータ内の滅菌用としても使われており、適切な条件を設定して使用すれば、十分な滅菌性能を発揮すると考えられる。

過酸化水素蒸気滅菌は、過酸化水素蒸気に触れた対象表面が滅菌される。それゆえ、蒸気が対象表面に十分に到達するかどうか課題となる。そのため、複雑な構造物の内部、狭い隙間は蒸気が十分に到達しないかもしれないという懸念があるため、対象の構造体はシンプルな構造とするとともに、隙間やネジ部の存在は避けられないため、それらの滅菌確認を行った。滅菌工程終了後、バイオインジケータによる滅菌性の確認試験を行ったところ高い滅菌性能を示す結果を得た。

以前の装置 (評価 1 号機、評価 2 号機) にはない R-CPX の特徴の一つが人介入機構であり、グローブボックスを用いて行われる (図 5)。このグローブは、ロボットが行う培養操作の一部を代替することになるので、グローブによる人介入の作業場所は、ロボットが届く範囲であり、かつ培養作業を行うロボットの動作範囲内の一部のうち、装置正面側の人がアクセスしやすい面を割り当てた。また、使用するグローブは、過酸化水素蒸気に暴露され、かつ、外部との間に圧力差 (150 Pa ~ 50 Pa 程度) があるため、材質に限られ作業性が悪い。特に、装置の内部を陰圧にした場合、そのままでは、グローブが膨らんでしまい、作業者の手にフィットしない。そこで、作業者の手に密着し、作業性を向上させる仕組みを考案した。構造としては、図 6 に示すように、作業者の上腕部分にリング状の密着部を



図5 過酸化水素蒸気滅菌対応のグローブ

設置し、密着部にエア供給して密着させ、密着部から先の空間に対してエア吸引を行うことで、グローブを作業者の手に密着できるように設計した。

2.3 R-CPXの基本構成

ここまで検討してきた汚染防止法と人介入機構を装備し、汚染の可能性のある箇所をできるだけ少なく、シンプルにし、手培養にできるだけ近い形で、自動化する機構を検討した。信州大に設置した評価1号機と産総研に設置した評価2号機での作業性を検討比較し、以下のように基本構成を決定した。

- (a) 構造が複雑になる自動機械の使用を減らし、主体を2台のクリーンロボットとし、1台が主に搬送を行うロボット（搬送ロボット）、他方が主に培養操作を行うロボット（作業ロボット）とする。
- (b) ネジ式キャップの開閉にキャッパーを使わずに済むよう、ワンタッチ式キャップを用いる。
- (c) ピペッタは、シリンジポンプとチューブで連結する方式をやめ、作業者が使うピペッタと同様の独立したものとし、ピペッタを作業ごとに交換し、一連の培養作業ごとにピペッタを外部に取り出し滅菌する。
- (d) センサーの多用は機構を複雑化するので、離れた場所からの視覚により代替可能な部分は、TVカメラからの映像をセンサーとして使用し、画像処理して認識する。
- (e) 培養容器は手作業による培養で使用例の多いT型フラスコとする。
- (f) インキュベータや冷蔵庫の扉はシリンダによる開閉式とせず、ロボットが開閉する方式とする。
- (g) 作業ロボットを中心として、リング状に培養操作の作業台を設置し、作業台の回転量を制御できるようにする。この回転作業台が移動することで、設置された培養容器に対する作業ロボットに装着したピペッタで行う培養作業の領域を限定することができる。
- (h) 培地や薬液の容器を遠沈管に共通化し、空になった容器を液体廃棄用容器として用いる。

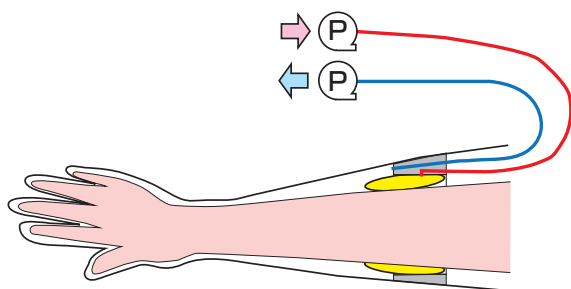


図6 グローブのフィット機構

- (i) 各ロボットの手先には、ハンド機構を設置し、容器の把持だけでなく、作業ロボットに装着するピペッタの操作も行う。
- (j) インキュベータ以外の保管庫（常温保管庫、冷蔵保管庫）は、滅菌しやすさを考慮して奥行きが少ない凹形状とする。

この基本構成のもとに R-CPX システムを構築した。全体図と完成した装置の各主要構成部の写真を図7、図8に示す。

3 標準作業手順SOPの開発

手作業による培養の場合の SOP は標準の手順書であり、ある程度の技量を持った作業者が、その手順書を見て作業すれば、同じ結果が得られる手順書である。それを、自動培養に置き換えた場合4つの部分から構成される。

- (a) 手作業による培養と同じ作業が自動培養でも必要な作業：培地の調製やコラーゲンへの播種等
- (b) 手作業による培養では不要だが自動培養で必要な作業：消耗品のパッキング等
- (c) 自動培養装置の操作する作業：消耗品の入庫、検査用サンプルの出庫等
- (d) 自動培養装置の動作

このうち、重要になるのは、(d) である。自動培養装置による動作は、すべて、作業者が行う動作と同じにはな

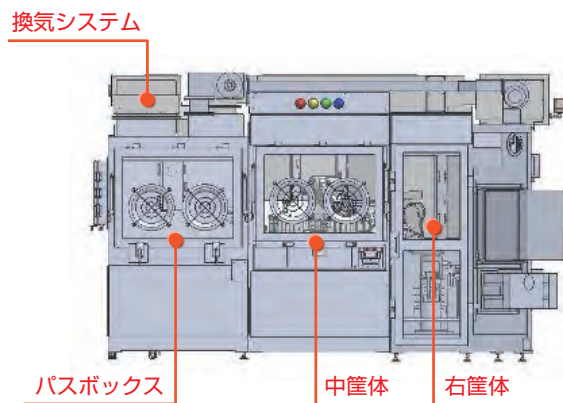


図7 R-CPX全体図（上図）および完成写真（下図）

らない。例えば、初代培養直後の培地交換では、骨髓液中に含まれていた血球成分が残っており、培地交換の前にディッシュを揺動させ、血球成分を上清中にできるだけ浮遊させてから上清廃棄を行う。作業者は揺動の加減を目で見て行うが、装置ではできない。あらかじめ、揺動の方法を決めておく必要がある。そのため、揺動の強度や回数を実験的に比較し、決定した。図9（左）は、当初の揺動条件での培地交換後のディッシュで、赤色を帯びており、血球成分が残っている。揺動条件を修正した結果、目で見て、培地交換後のディッシュに赤色は見られなくなり、図9（中央、右）に示すように、顕微鏡観察においても、血球成分は、ほとんど、見られなくなった。

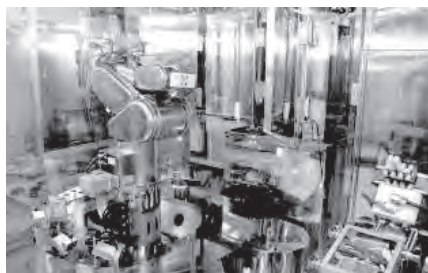
以上の基本概念のもとに、軟骨再生用自動培養 SOP の開発および遺伝子治療用自動培養 SOP の開発を行った。

手作業による培養の SOP は、同一施設でも作業者により手法が異なる、記録が正確に残らない、引き継ぎが難しい、製造物の品質が安定しない、などの問題点がある。

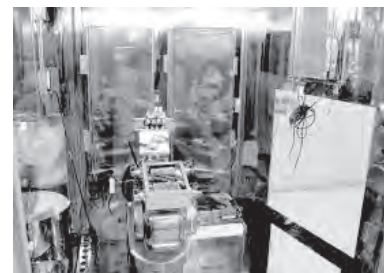
今回、自動培養用の SOP 開発を前提として手作業による培養の SOP を見なおし、曖昧であったり科学的根拠の乏しい点に検討を加えこれらを明確にした。さらに、手作業による培養から自動培養 SOP への変換の考え方を整理し、自動培養 SOP を開発した。手作業による培養のすべてをそのまま自動化できる訳ではないので、その際の考え方も整理した。これらの作業を通じて、手作業による培養の SOP および自動培養 SOP の標準化をどのように実現すれば良いかが明らかとなった。

4 評価機による培養評価

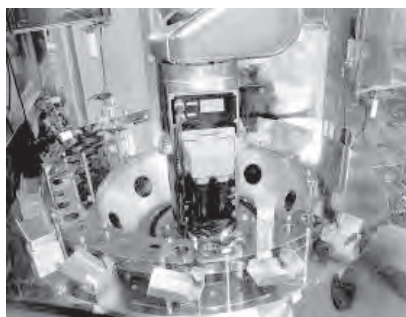
R-CPX の培養対象は、再生医療用の間葉系幹細胞のみではなく、遺伝子治療用のウイルス産生細胞や各種臨床研究用途で使われる多様な細胞が対象となる。間葉系幹細胞の培養評価は、評価1号機で行った。評価2号機では、間葉系幹細胞以外の接着系細胞を対象とした。



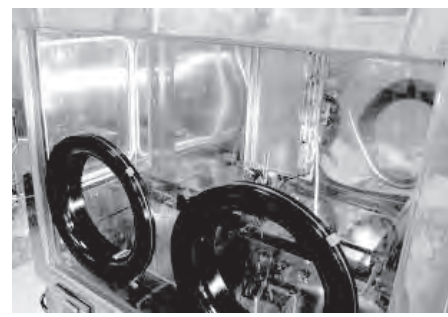
(1) 中筐体内部と作業ロボット



(2) 右筐体内部と搬送ロボット



(3) 中筐体中央部の回転作業台



(4) パスボックス

図8 R-CPXの主要構成部の写真

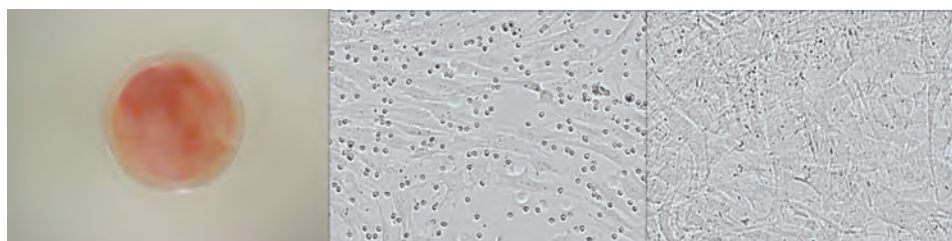


図9 初代培養直後のディッシュ（培地交換後も赤色を帯びる）（左）、揺動方法改良の効果の顕微鏡写真での比較（中央：改良前、右：改良後）

4.1 信州大設置評価1号機の概要

評価1号機は、再生医療用の間葉系幹細胞を培養し、臨床研究に使用する目的で、信州大学附属病院内のCPCに設置した。臨床研究に使用するには、厚生労働省が施行した「ヒト幹細胞を用いる臨床研究に関する指針」に基づく承認を得る必要があり、臨床研究に使用できるレベルで培養評価を行っている。

評価1号機は、以下のような特長を持つ。

- (a) 骨髓液をスタートとして培養し、軟骨再生に必要な量の間葉系幹細胞を培養し、細胞懸濁液として提供する。
- (b) 装置はクリーン度100,000の管理区域に置かれ、装置内はクリーン度100の無菌空間を維持する。
- (c) 消耗品や細胞の入出庫にはグローブボックスを用い、滅菌梱包を用いることで、内部の汚染を防止する。
- (d) 装置内で、初代培養、培地交換、継代培養、細胞回収、細胞観察が全自動で行える。培養操作の主体はクリーンロボットである。また、検査用のサンプル作成が可能である。
- (e) 培養操作の工程管理はコンピューターで行われ、スケジューリングが自由に行えるだけでなく、すべての動作履歴が記録される。
- (f) 装置内に保管設備を持ち、消耗品は常温保管庫、薬剤は冷蔵庫に保管され、培養操作時に、完全無人で運転が可能である。
- (g) 遠隔監視機能を持ち、CPC内の端末と同じ情報を遠隔から監視できるとともに、装置内の映像も確認可能である。

4.2 評価1号機による細胞培養方法、評価方法の概要

手作業による培養のDry Run（培養した細胞をドナーに移植しない培養）と並行し、同一ドナーの骨髓細胞の培養を自動培養Dry Runとして実施した。培地も、手作業Dry Runで使用するものと同一のもので、ドナーの自己血清から調製したものである。評価は、継代と細胞回収時に、無菌試験およびエンドトキシン、マイコプラズマの品質検査を行うと共に、細胞数および表面抗原の解析を行い、得られた細胞中の間葉系細胞と思われる細胞の割合を求めた。評価は、ドナー由来の骨髓液9 mlに換算した場合、培養期間3週間以内で培養細胞総数が 10^7 個以上、かつ、回収された細胞の内、90%以上間葉系幹細胞のマーカー陽性の細胞が純度80%以上で回収でき、細胞試薬の製品標準とした。

全5回の自動培養Dry Runによって、合格レベルに達する培養が行えるようになった。初代培養時の骨髓上清では、無菌試験陰性（2週間培養）およびエンドトキシン0.1

EU/ml未満であった。自動培養による継代および細胞回収時の品質検査では、無菌試験陰性（2週間培養）およびエンドトキシン0.1 EU/ml未満、マイコプラズマ陰性を確認し、培養工程における病原汚染を認めなかった。また、自動培養SOPおよび装置の改良とともに5回目のDry Runにおいては、製品標準の適格性を示し、純度、特異度ともに高品質な間葉系細胞試薬が作製された。品質保証された間葉系細胞が作製されたことから、自動培養SOPの妥当性が評価された。

4.3 産総研設置評価2号機の概要

評価2号機は、創薬をはじめとする非臨床の研究用途を目的に作られた細胞自動培養装置であり、以下のような特長を持つ。

- (a) 手作業による培養をそのまま自動化
培地交換、継代、細胞回収、細胞観察という手作業で行っていた一連の手法を、そのまま、自動化している。
- (b) 多様な細胞への対応
一般的な培養操作がプログラム化され、継代時の剥離時間、薬液の量や吐出速度等、多くのパラメータをユーザーが決められる。
- (c) 画像認識による培養支援
画像処理装置を装備し、装置内で細胞観察、自動記録も行える。細胞占有率の表示、自動記録が可能。
- (d) 培養スケジューリング機能
毎回の培養操作が自由にスケジューリングできる。
- (e) 細胞品質の安定性 / 均一性
自動操作による培養作業のため、培養性能 / 品質の安定性、均一性が実現できる。
- (f) 汚染防止
装置内はクリーン度100、操作はクリーンロボットが行うので、培養する細胞への汚染が防止できる。アルコール自動噴霧による除染機能を装備し、交差汚染を防ぐ。
- (g) コンパクトなサイズ
装置は幅約3 m、奥行約1 m、高さ約2 mで構成される。

4.4 評価2号機による細胞培養方法、評価方法の概要

R-CPXの培養対象は、再生医療用の間葉系幹細胞のみではなく、遺伝子治療用のウイルス産生細胞や各種臨床研究用途で使われる多様な細胞が対象となる。評価2号機では、間葉系幹細胞以外の細胞を対象とし、できるだけ広範な細胞種をその評価の対象とした。評価方法は接着系細胞を対象に評価し、遺伝子治療用のウイルス産生細胞に関しては、ウイルス同様培養上清中にタンパク成分を分泌するサイトカイン産生細胞をその評価系細胞として用いた。

4.4.1 広範な接着性細胞の培養評価

このシステムでは接着性の細胞を自動培養することが主目的であるが、接着細胞といっても、その接着性は細胞種により大きく異なる。評価した細胞株は、HeLa、NIH3T3など13種類であり、これら培養パラメーターは、手作業による培養によって安定して培養可能な初期細胞数、継代頻度、希釈率をあらかじめ決定し、その結果を基に評価機2号機での微調整を行うことで決定し良好な結果を得た。293 gp/mL2など、細胞接着性が弱い細胞では、PBSや培地の（ピペットからの）吐出速度の検討を行った。図10に吐出速度3、1、0.3、0.1 ml/secにおける細胞剥離状況を示す。至適吐出速度は0.3-1 ml/secであった。また、PC-12のような剥離しにくい細胞の場合、初期設定より剥離時間を長くし、また、タッピング回数を増やすことで剥離率を改善する工夫を行った。このように、細胞の特徴を考慮した培養パラメーター設定により、広範な細胞の自動培養が可能となった。

4.4.2 遺伝子治療臨床研究を想定したウイルス産生細胞の培養評価

遺伝子治療で用いられるレトロウイルスは、P2レベル拡散防止措置を必要とするため、装置を密閉構造とし、かつ、装置外に対し陰圧とすることで内部にウイルスを封じ込めることが必要であるが、評価段階では組み換え体レトロウイルス作業工程とおよそ同一である分泌タンパク質を放出する細胞株を用いた検討で十分で、実際にウイルス上清の回収が可能かどうかを評価した。使用した細胞株はNIH3T3/mL2である。遺伝子導入により、培養上清中にmIL2を放出するようにした細胞である。自動培養による回収性能を評価するために、細胞播種後34時間、58時間、82時間後に培養上清を回収し手作業による培養と比較した。培養上清に含まれるmIL2濃度を定量し、自動培養と手作業による培養で同等な濃度の培養上清を得ることができた。以上行った評価試験結果から、自動培養装置が手作業による培養とおよそ同等の安定した細胞培養が可能であり、細胞に一定の条件を必要とする細胞においても微細な培養パラメーターを設定することで培養可能になった。

5 手作業による培養から自動培養へ

このシステムは、熟練した技術者が手作業で行ってうまくいく作業を、ロボットアームの動作に置き換えるというコンセプトで開発を進めた。熟練した技術者は、その経験により、その一つ一つの作業を、主には培養顕微鏡で観察しながら細胞に対し最適な条件で操作を行う。そこにSOPが存在し、それをもとに機械が行う作業がプログラム化される。しかし、この経験により培われた無意識の操作を機械に無条件に導入するのは困難である。剥がれやすい細胞に対し、ソフトに培地をピペットから吹き付ける、剥がれにくい細胞には、強く培地を吹き付け、ときにはタッピング（たたく動作）を行う。同じ細胞であっても、微妙な条件の違いによって、その接着性、増殖性は微妙に異なってくる。その違いによらず、一つの作業（細胞を剥がす、細胞がはがれずに培地交換をするなど）を完全にこなすには、最適条件よりも強い条件で、しかも問題の生じない条件をSOPとして採用する必要がある。そこにSOPの決定の難しさがある。細胞培養を行うCO₂インキュベータのドアの開閉は、あまり長く開けないように初心者は指導される。熟練した技術者はそれを無意識に行う。無意識を無視してSOPを作ってしまうと、ドアが開いている時間が長すぎて、インキュベータ内のCO₂濃度が変化してしまい、培養に影響が出てしまう。最初それに気づかず、自動培養で手培養より悪い結果が得られ困った時期もあったが、ドアの開閉のタイミングを調整することにより改善された。人による作業のプロトコールには書かれていない無意識の作業を、いかにSOPに反映させるかが、自動化における難しさの一つであった。

6 まとめ

CPC 不要の高品質の細胞試薬を調製できる実用的な培養システム (Robotized-Cell Processing eXpert system: R-CPX) を開発した。R-CPXでは、GMP基準汚染防止機構、2台のクリーンロボットによる作業、種々の使用用途に対応できる柔軟な構造が特徴である。

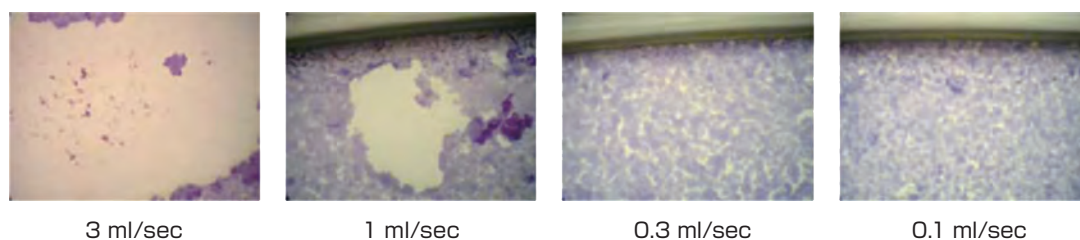


図10 吐出速度と細胞剥離の関係 (293 gp/mL2細胞)

7 今後あるべき研究体制と課題

この開発を通じて、装置開発に限らず、多様な再生・細胞医療の迅速な実現を目指した。この研究分担者が十分な研究実績を持ち、かつ臨床研究が50症例以上と豊富な実績を有する関節軟骨再生医療や、我が国では約40症例の実績を有する骨髄間葉系幹細胞等を用いた顎骨再生を含む歯周組織再生医療、を初期の対象疾患としている。R-CPXシステムにより、この対象疾患に適用できるならば、同じ細胞ソースを利用する脳神経・心筋・脊髄等の「生活習慣病等に由来する難治性疾患」の再生・細胞医療についても探索的臨床試験とその後の事業化に向けての治験の実行を格段に容易とすることができる。

この研究開発は、これまでの研究機関ごと、疾患ごとにバラバラに進められて来たことによる弊害を打破するために、図11に示す「R-CPXシステム開発センター」構想を実現すべく推進した。

この研究開発の推進を通じて、我が国を代表する研究者

とのネットワークが形成されている。また、実用化・事業化のためには、産業界との連携も不可欠である。再生・細胞医療の実現には、細胞調製事業者の役割が大きく、各分野の専門家の人材の厚みが大きく、資金力に富んだ有力企業の参画が不可欠である。この点においても、この研究開発の進展とともに協力体制が構築されて来ている。

また、細胞調製事業者が細胞を調製する上で手作業による培養に頼ったのでは事業化できないのは自明のことであり、各事業者とも自動培養装置の開発を望んでいる。そのためには、装置を構成するさまざまな技術を有する企業コンソーシアムの形成が必要となる。

参考文献

- [1] 紀ノ岡正博: 細胞治療・再生医療における培養システムの役割, *細胞治療・再生医療のための培養システム* (紀ノ岡正博, 酒井康行監修, シーエムシー出版) 3-16 (2010).
- [2] 山本宏: CPCとセルプロセッシング・アイソレータ, *細胞治療・再生医療のための培養システム* (紀ノ岡正博, 酒井康行監修, シーエムシー出版) 265-273 (2010).

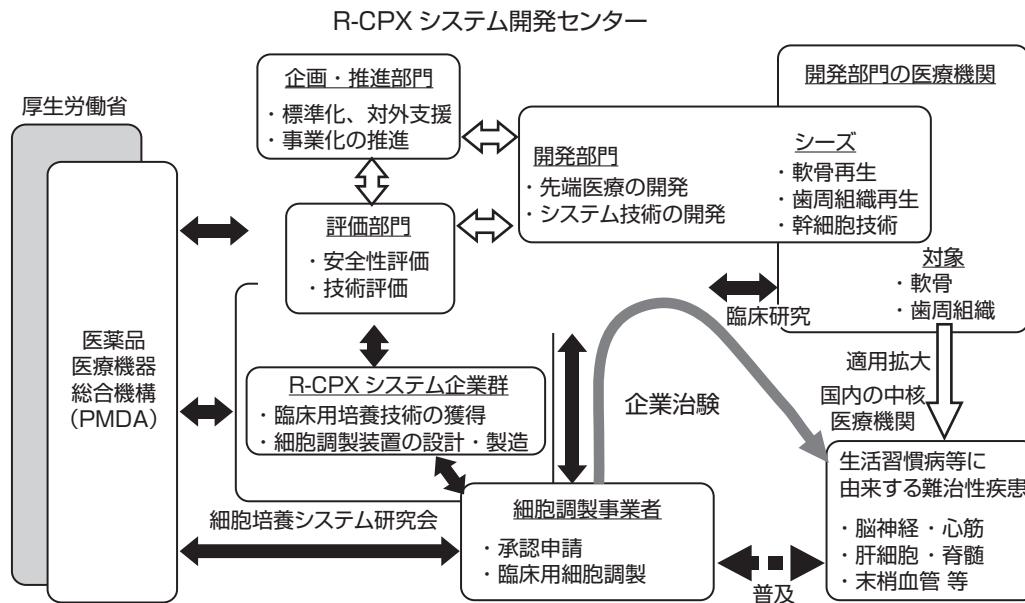


図11 革新的細胞調製システムによる再生・細胞医療を実現するスキーム

執筆者略歴

脇谷 滋之（わきたに しげゆき）

1990年大阪大学大学院医学研究科博士課程修了（医学博士）。同年より、米国ケースウェスタンリザーブ大学研究員、1992年より大阪大学助手、1994年より国立大阪南病院、2001年より信州大学、2006年より大阪市立大学、2011年より武庫川女子大学教授（現職）。骨軟骨再生に関する研究に取り組む。日本整形外科学会会員。このプロジェクトリーダー。この論文では1章、7章を担当した。



田原 秀晃（たはら ひであき）

1983年大阪大学医学部卒業。大阪大学医学部第二外科、大阪府立成人病センター等を経て1991年ピッツバーグ大学医学部外科（Dr. Michael T. Lotze）のResearch Fellowとなる。1992年より同大学外科 Assistant Professorとなり、その後 Pittsburgh Human Gene Therapy Center ベクター部門の部長ならびに分子遺伝生化学科 Assistant Professor も併任。1999年東京大学医科学研究所外科助教授、2000年より東京大学医科学研究所附属病院外科・先端医療研究センター臓器細胞工学分野教授。癌に対する免疫療法と遺伝子細胞治療に関して、基礎的研究および臨床的開発試験を行っている。このプロジェクトのサブリーダー。この論文では3章を担当した。



中嶋 勝己（なかしま かつみ）

1981年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、川崎重工業株式会社に入社、技術開発本部にて、ロボットを中心とした自動機械の開発に従事。2009年より、システム技術開発センターMDプロジェクト室長（現職）。自動培養装置の開発に取り組む。日本ロボット学会会員。この論文では、2.1章、2.2章を担当した。



蓮沼 仁志（はすぬま ひとし）

1993年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、川崎重工業株式会社に入社、技術開発本部にて、ロボットを中心とした自動機械の開発に従事。2007年より、自動培養装置の開発に取り組む。日本ロボット学会会員。この論文では、2.3章、4.3章を担当した。



下平 滋隆（しもだいら しげたか）

1990年信州大学医学部医学科卒業。1997年信州大学大学院医学研究科修了（医学博士）。2002年、信州大学医学部附属病院輸血部講師。2008年、信州大学医学部附属病院輸血部准教授。2011年、信州大学医学部附属病院先端細胞治療センター長。日本輸血・細胞治療学会認定医、評議員、日本血液学会専門医、指導医。輸血療法、樹状細胞療法に関する研究、自動培養ロボットシステムを用いた再生・細胞治療の開発研究に取り組む。この論文では、4.1章、4.2章を担当した。



小野寺 雅史（おのでら まさふみ）

1986年北海道大学医学部卒。1994年、博士（医学）北海道大学。2001年、筑波大学臨床医学系講師。2009年、国立成育医療センター、研究所・成育遺伝研究部部長、病院・内科系専門診療部免疫科・医長、病院・臨床検査部輸血・組織適合検査室・医長（現職）。小児難治性疾患に対する遺伝子治療臨床研究の実施。日本遺伝子治療学会会員。この論文では、4.4章を担当した。



植村 寿公（うえむら としまさ）

1979年京都大学理学部卒業。1984年大阪大学理学研究科博士後期課程修了（理学博士）。1985年大阪大学理学部職員を経て、1986年通産省工業技術院入所。1989年科学技術庁長期在外研究員（スイス・ETH）。1994年、産業技術融合領域研究所主任研究員。2001年、産業技術総合研究所ティッシュエンジニアリング研究センター主任研究員、東京医科歯科大学客員教授（2001～2013年）。現在同ナノシステム研究部門上級主任研究員、横浜市立大学先端医科学研究センター客員教授。硬組織における再生医学に関する研究に取り組む。この論文では、4.4章、5章、6章を担当した。



査読者との議論

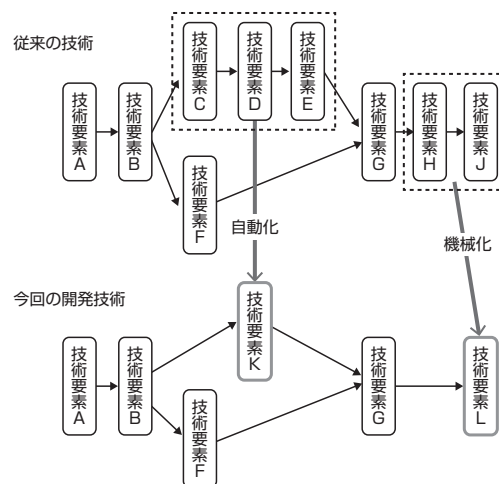
議論1 開発動機、研究目的、技術要素等

質問・コメント（久保 泰：産業技術総合研究所創薬分子プロファイリング研究センター）

細胞調製施設（CPC）がいかに高いレベルでの安全・衛生・品質管理が求められ、その建設から維持運用に至るまでいかに高いコストがかかるか、また確かな熟練技術の要求、今後臨床応用で求められる「量」への対応等、自動培養装置の開発動機や必要性を強く印象づける文章にしてください。さらに、評価2号機に関する実験と結果の記述が詳細過ぎますので内容の絞り込みによる適切な記載をお願いします。

質問・コメント（清水 敏美：産業技術総合研究所）

今回の研究目的は、専用のCPCを設置せずに高品質の細胞試薬を調製できる培養システム（R-CPX）を開発することです。当該分野以外の読者の理解を深めるために、まずどのような技術項目と構成（工程）があり、どこまでが完成しており、今回、自動化、機械化、人介入化等のために、どの技術要素をどのように改変したのかが一目



瞭然と理解できる構成図を作成することを勧めます。さらに、全般にわたって骨子と細部に関する技術が混在しており、読みづらい記述となっています。特に、評価1号機による細胞培養方法、評価方法、評価2号機の接着性細胞の培養評価に関する記述は必要最低限の分量に縮小することを勧めます。

回答（植村 壽公）

このプロジェクトは多方面からの技術開発が統合したプロジェクトであるため、記述に統一性を持たせることが困難であり、全般にわたって読者にとってわかりにくい記述になっていました。まず、1.はじめに、1.1なぜ今、自動培養装置の開発が必要か？、1.2目的、実施体制、研究開発の概要を大幅に書き換えました。また、細胞調製システムの開発ロードマップを参考に、従来技術と今回の開発技術の相関関係を示す技術項目の構成図を図1Bとして追加しました。

議論2 医薬品の製造にかかわる設備、工程管理、品質管理に関する規則GMP

質問・コメント（久保 泰）

GMPに関しては、その承認も含め、いかにこの機器に高い衛生・品質のレベルが求められるかを読者に理解してもらうために解説が必要です。

回答（植村 壽公）

GMPに関して、特にCPCに求められるGMPに関して1章に解説を加えました。

議論3 開発過程での失敗事例や試行錯誤

質問・コメント（久保 泰）

開発過程での失敗事例や試行錯誤、企業や臨床現場からの改善要請の例があれば論文の中で触れてもらうことはSynthesiologyの視野に入っています。あれば論文中に盛り込んでください。

回答（植村 壽公）

苦労話の一つ、新たに5章として、「手作業による培養から自動培

養への飛躍」を設けて記述しました。

議論4 連名著者および各研究機関の貢献

質問・コメント（清水 敏美）

それぞれの技術要素に対する今回、列挙されている各著者および研究機関の役割と貢献を論文中、簡単に紹介してください。

回答（植村 壽公）

連名著者の数は一見多いように見えますが、実際にこのプロジェクトに寄与したメンバーの数はその5倍以上であり、記載した各著者はその中心人物です。このプロジェクトにおいて川崎重工業は企業のミッションとして装置作りを担当し参加しました。他の機関は組織と言うより個人が重要と考えます。各組織の役割やミッションは重要ではなく、他の誰もを持っていない技術を有しているその人の経験、技術が役割であり、ミッションであるとお考えください。著者紹介に各著者の執筆章を記述しましたので、その著者の貢献がプロジェクトのどの部分に相当するかが理解できると思います。

議論5 産総研の技術的貢献と役割、特徴と優位性

質問・コメント（清水 敏美）

このプロジェクトにおける産総研のコア技術の内容と特徴を明確に記述してください。特に、評価1号機と2号機がそれぞれ、信州大学と産総研に設置されています。しかし、それぞれの評価機に対して産総研の技術的な貢献や役割、その特徴と優位性に関して記述をお願いします。

回答（植村 壽公）

産総研の技術的な貢献は一言で言えば、細胞培養に関する経験であると言えます。本自動培養システムは、熟練した技術者が手作業で行う動作と同様の作業を、ロボット、主にロボットアームが行うというコンセプトの元に設計しました。その際に必要であったヒトの動きを、産総研に設置した評価2号機にプログラミングしながら動作確認をすることにより完成に導くことができました。特に、知的財産が関連した訳ではありませんが、とても重要な貢献をしたと考えています。

リスクトレードオフを考慮した次世代低 GWP 冷媒の選定

— R-1234yfに対するリスクトレードオフ評価 —

梶原 秀夫

現行の空調機器の冷媒は地球温暖化係数 (GWP) が高いため、R-1234yfをはじめとした、よりGWPの低い物質が次世代冷媒候補として検討されている。しかし低GWP物質は相対的に化学反応性が高く、燃焼性、有害性、分解物生成、省エネ性能低下によるCO₂排出量増加の側面ではリスクを高める可能性、すなわちリスクトレードオフの可能性がある。この研究では (1) 環境特性、(2) 燃焼特性、(3) 有害性、(4) 温室効果ガス排出量、(5) 実装可能性の5項目から構成されるリスクトレードオフ評価の枠組みを提示し、絞り込み過程を明示しながら次世代低GWP冷媒物質の選定を行った。リスクトレードオフを考慮した意思決定において、複数の評価項目の組み合わせ方と評価基準を明示することが重要であることを示した。これにより、意思決定に必要なデータの迅速な把握と、社会情勢に柔軟に対応した意思決定が可能となった。

キーワード: 冷媒、地球温暖化、省エネルギー、燃焼性、有害性

Selection of next-generation low global-warming-potential refrigerants by using a risk trade-off framework

– Risk trade-off assessment for R-1234yf –

Hideo KAJIHARA

Because the refrigerants currently used in air-conditioners have high global-warming-potentials (GWP), substances with lower GWPs, such as R-1234yf, are considered to be candidates for next-generation refrigerants. However, low-GWP substances often have comparatively high chemical reactivity and may carry increased risks of combustibility, toxicity, generation of degraded products, and increased CO₂ emission caused by poor energy-saving performance. Therefore, a possible risk trade-off exists between currently used refrigerants and those with low-GWPs. In this research, I proposed a framework for evaluating this trade-off in the following five categories: (1) environmental characteristics; (2) combustion characteristics; (3) toxicity; (4) volume of greenhouse gas emissions; and (5) applicability to air-conditioning equipment. I then selected substances well suited as next-generation refrigerants in accordance with a specific screening process. I showed the importance of clearly specifying the combination of a number of end points and assessment criteria in the process of decision-making based on risk trade-off. This method yielded a rapid understanding of the necessary data, as well as flexible decision-making that is relevant to social conditions.

Keywords: Refrigerant, global warming, energy saving, flammability, toxicity

1 冷媒物質の変遷と「次世代冷媒」

空調機器の冷媒として用いられる物質はこれまで大きく分けて4つの世代を変遷してきている^[1]。

第1世代(1830年～1930年代)では冷凍システムが「機能する」ことが第一に考えられたため、冷媒には毒性や可燃性、腐食性のある物質でも機能を優先して使用された。第2世代(1931年～1990年代)では「安全性や化学的安定性」が追求され、クロロフルオロカーボン(CFC)やハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)等が導入された。第3世代(1990年～2010年代)では、「オゾン層破壊防止」のため、塩素を全く含まないハイドロフルオロカーボ

ン(HFC)が導入された。第4世代(2010年～)では、「温暖化防止」のためHFC等のように高い地球温暖化係数(GWP)^[1]を持たず、またCFCのようにオゾン層破壊に寄与しない冷媒の追求が開始された。現在は第3世代から第4世代の過渡期ということになる。第4世代に属する新たな冷媒をここでは「次世代冷媒」と呼ぶ。

2 次世代冷媒に求められる要件のトレードオフ関係

リスクトレードオフとは、ある種のリスクを低減させることにより別種のリスクが生じることである。次世代冷媒には地球温暖化係数(GWP)の低減が求められているが、

産業技術総合研究所 安全科学研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西
Research Institute of Science for Safety and Sustainability, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: kajihara.hideo@aist.go.jp

Original manuscript received August 27, 2012, Revisions received April 30, 2013, Accepted May 7, 2013

多くの場合、GWP の小さい物質は化学反応性が相対的に高い。すなわち、GWP を小さくするためには赤外吸収係数を小さくするか、大気寿命を短くする必要があるが、後者の場合は大気中での反応性が高いことを意味している。よって GWP の小さい物質を選択することで、逆に燃焼性、有害性、分解物生成、省エネ性能（空調機器使用時のエネルギー使用量）の側面ではリスクを高める、すなわちリスクトレードオフの可能性がある。

現在、次世代冷媒に求められる要件は下記の 5 つにまとめることができる。

1. オゾン層破壊に寄与せず（オゾン破壊係数 (ODP) = 0）、また GWP も十分に小さいこと。【環境特性】
2. 可燃性が小さくリスク管理が可能な範囲にある、もしくは不燃であること。【燃焼特性】
3. 物質としての毒性（有害性）が低いこと。【有害性】
4. 冷媒としての熱サイクル的性能（省エネ性能）に優れること。【省エネ性能】
5. 冷媒を実際の空調機器に装填・使用する際に問題が生じないこと。【実装可能性】

このような背景から、この研究の目的は HFC に代わる低 GWP 次世代冷媒の導入にあたって重要となる上記 5 項目について、リスクトレードオフの観点から評価を実施することである。

3 次世代冷媒の開発状況

冷凍空調機器別の温暖化への影響を冷媒排出量推計値（2010 年度値、CO₂ 換算量）で比較すると、全体では 1,710 万トン-CO₂ であり、内訳は業務用冷凍空調機器が 1,130 万トン-CO₂ (66 %)、家庭用空調機器が 290 万トン-CO₂ (17 %)、自動車用空調機器が 250 万トン-CO₂ (15 %)、家庭用冷蔵庫が 40 万トン-CO₂ (2 %) である^[2]。

自動車用空調機器用途での低 GWP 冷媒の検討は、他用途よりも先行して行われている。特に R-1234yf とよばれるオレフィン系の化合物である 2,3,3,3-テトラフルオロプロペン (CH₂=CF₃) は、GWP=4 とされるためにとっても有力な次世代冷媒候補と目されている^[3]（冷媒の略称については用語 2 も参照されたい）。

R-1234yf は自動車用空調機器用の現行冷媒である R-134a に対する有力な代替候補物質であるが、定置型空調機器用の現行冷媒 (R-410a 等) は R-134a に比べ冷媒としての性能が高い（空調機器運転時のエネルギー使用量が小さい）ため、次世代冷媒にも高い冷媒性能が求められる。すなわち、定置型空調機器用冷媒を代替する際には、自動車用空調機器用冷媒を代替する場合に比べ、空調機器運転時のエネルギー使用量増大の問題が生じやすい。

また、定置型空調機器では業務用機器に比べ家庭用機器は機器寿命が短いため、低 GWP 冷媒への代替による温室効果ガス排出削減効果が早期に現れると考えられ、家庭用機器での検討結果は、業務用機器での検討にも活用できると期待される。このような背景を踏まえて、この研究では家庭用空調機器を対象に、機器運転時のエネルギー使用量の変化も注視しながら、リスクトレードオフを考慮して、次世代低 GWP 冷媒物質の評価と選定を行った。

4 リスクトレードオフを考慮した次世代冷媒の選定方法

燃焼性、有害性、温暖化等異なるリスク評価項目が存在するときに最適な物質を選択するためには、各項目でのリスクを統一的なリスク尺度で定量化した上で、その合計が最小となるような物質を選択するのが理想的である。しかし、現在のところ、そのような異種リスクの統一的な定量化技術は実用的な段階にはない。

そこで、この研究では、各項目を直列につなぎ、段階的に候補物質をスクリーニング的に絞り込む形式とした。項目の並びは、候補物質自体の性質に関わる項目から、候補物質を冷媒として使用したときの性質に関わる項目へとこの順とした。

この研究での評価の枠組みおよび絞り込みの結果を表 1 に示す。第 1 段階にはオゾン層を破壊しない、GWP が小さいという「環境特性」を設定した。これらの環境特性は比較的最近、すなわち第 3 世代以降の冷媒で重視された特性である。第 2 段階には、燃焼性を設定した。これは低 GWP 化のために大気中での化学反応性の高い物質を採用するという手段は直接的に燃焼性の増加という結果をもたらすためである。第 3 段階には有害性を設定した。有害性も大気中の化学反応性の増加によって高まる場合もあると思われるが、燃焼性に比べれば変化が小さいと考え第 3 段階に設定した。第 1 段階から第 3 段階までは冷媒物質自体の性質に関わる評価項目である。第 4 段階以降には機器の使用状況の情報が必要なライフサイクルアセスメント (LCA) 評価を、第 5 段階には機器の設計に関わる情報が必要な実装可能性評価を配置した。第 4 段階以降は冷媒が用いられる環境に強く依存する評価項目であり、段階が後になるほど詳細な情報を必要とするように設定した。

各項目の評価で特に必要な技術としては、燃焼特性については燃焼速度や燃焼限界についての試験、有害性については毒性試験が挙げられる。

第 1 段階では、次世代冷媒の候補となる物質を現行の R-410A の GWP 値と比較してスクリーニングする。R-1234yf、R-32、R-152a、R-290、R-600a、R-717、R-744 と相当数の物質が候補冷媒となりうる。ここで R-1234yf

表1 次世代低GWP冷媒候補物質のリスクトレードオフ評価の枠組みとスクリーニング結果

| 評価の段階 | 評価すべき項目の概要 | 候補物質の段階的絞り込み |
|-------|--|---|
| 第1段階 | 環境特性評価 (オゾン層を破壊せず、GWP が小さい物質の選定) | R-1234yf、R-32、R-152a、R-290、R-600a、R-717、R-744 |
| | GWP については、現在家庭用定置型空調機器に使用されている冷媒である R-410A の GWP 値である 1,730 を目安にする。 | |
| 第2段階 | 燃焼特性評価 | R-1234yf、R-32、R-717、R-744 |
| | ISO 817 あるいは ASHRAE 34 で規定される Class3 (強燃性) あるいは Class2 (低燃性) に分類されるものを除外し、Class2L (微燃性) あるいは Class1 (不燃性) に分類されるものを残す。 | |
| 第3段階 | 有害性評価 | R-1234yf、R-32、R-744 |
| | 大気中寿命が短い冷媒については、分解生成物に対する大気暴露評価も同時に実施する。 | |
| 第4段階 | LCA 評価 | 5.4 において考察 |
| | 候補冷媒を使用する空調機器からの温室効果ガス (GHG) の直接排出量 (冷媒の大気排出) と間接排出量 (電力使用に伴う GHG 排出) の合計排出量を定量化する。 | |
| 第5段階 | 空調機器への実装可能性評価 | 6. において言及 |
| | 実際の冷凍空調機器の冷媒としての使用可能性の評価。機器からの漏洩に対する安全対策も含む。 | |

と異性体の関係である R-1234ze (E) は、評価に用いることができるデータが少ないことから評価対象物質とはしなかった。ただし、R-1234ze (E) は R-1234yf に化学構造が類似し、物性 (燃焼特性、GWP) も近いため、R-1234yf に近い評価結果となることが予想される。

第2段階 (燃焼特性) では明らかな可燃性を持つものを除外するために、ISO817 や ASHRAE34 で規定される Class3 (強燃性) および Class2 (低燃性) に分類されるものを除外し、Class2L (微燃性) あるいは Class1 (不燃性) に分類されるものを残した。炭化水素冷媒である R-290、R-600a や R-152a は候補から除外された。R-1234yf と R-32 は Class2L に分類される。これら2種の冷媒の燃焼特性の詳細については5.1で述べる。

第3段階 (有害性) では強い有害性を持つ R-717 が除外される。R-1234yf の有害性評価と分解生成物評価の詳細については、各々5.3、5.4で述べるが、結論としては有害性、分解生成物について顕著なリスクを持たないと考えられた。

よって候補として残るのは R-1234yf、従来冷媒で GWP がやや高い R-32、自然冷媒の R-744 となる。

第4段階の LCA 評価に関しては、上記のスクリーニングで残った候補物質を採用した際の温室効果ガス (GHG) 排出削減効果を定量化した。これに関しては5.4に記述する。

第5段階で挙げた実装可能性についてはこの研究ではデータの不足等から実施できなかったが、第6章において定性的に考察した。

5 有力候補物質に対するリスク項目別の詳細評価

5.1 燃焼特性評価

前章では環境特性、燃焼特性、有害性についてスク

リーニングを行った結果、R-1234yf、R-32、R-744 が候補物質として残った。R-744 は不燃性であるため詳細な燃焼特性評価は不要である。R-1234yf と R-32 は、国際的な冷媒の燃焼特性についての体系である ISO 817 あるいは ASHRAE 34 において、いずれも Class2L (微燃性) とされている。しかし、国内の関連法規 (高圧ガス保安法冷凍保安規則) によれば、R-1234yf は可燃性ガスに分類されるが、R-32 は可燃性ガスとはされないため、その混合冷媒は混合比によって可燃性か否かの判断が分かれる。

そこで、燃焼実験を行い R-1234yf/R-32 混合系において燃焼限界値の測定値が、混合比を用いてル・シャトリエの法則によって予測される値と一致するかどうかを明らかにした。測定は 296.15K 換算で湿度 50 % の空気中で行った。得られた結果を表2に示す。例えば体積比 50 : 50 の混合気体は、空気中に 7.78 % から 18.5 % の範囲で存在するときに燃焼することがわかる。燃焼下限値は予測値とよく一致し燃焼上限値も予測値との一致は比較的良好である。

次に R-1234yf/R-32 混合系における最大燃焼速度 ($S_{u0,max}$) の混合割合に対する依存性を測定した。結果を図1に示す。参考のために燃焼下限値 (LFL) の測定結果と、混合冷媒の GWP 値も示す。R-32 の割合の増加に伴い LFL は大きくなり不燃性にはなるが、一方で最大燃焼速度は上昇し、一旦燃え始めた際の燃焼速度は大きくなる。また、燃焼速度の増分は R-32 の割合の増加にともない大きくなることがわかった。

国内関連法規によれば可燃性冷媒ガスの定義は「燃焼下限値 (LFL) が 10 % 以下または燃焼上限値 (UFL) と下限値との差が 20 % 以上」であり、この定義に従い不燃性を実現するためには R-1234yf の混合比 (体積比) を 36.2 % 以下、重量比では 55.4 % 以下とすればよいことが

表2 R-1234yf と R-32 混合系の燃焼限界

(平成 19 年度～平成 22 年度成果報告書「ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発 / 実用的な性能評価、安全基準の構築 / 『ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発』の実用的な運転モード及び評価手法ならびに安全基準の構築」平成 23 年 4 月独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以下、NEDO 成果報告書 (2011) と略す) より引用)

| R-1234yf : R-32 (体積比) | 燃焼下限界 (vol%) | | 燃焼上限界 (vol%) | |
|-----------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | 測定値 | 予測値 | 測定値 | 予測値 |
| 100 : 0 | 5.53 (0.10) | 5.53 | 13.3 (0.5) | 13.30 |
| 80 : 20 | 6.22 (0.05) | 6.27 | 14.5 (0.5) | 14.80 |
| 60 : 40 | 7.2 (0.1) | 7.24 | 17.0 (0.6) | 16.69 |
| 50 : 50 | 7.78 (0.05) | 7.85 | 18.5 (0.5) | 17.82 |
| 40 : 60 | 8.53 (0.08) | 8.56 | 19.9 (0.7) | 19.12 |
| 20 : 80 | 10.45 (0.05) | 10.48 | 23.6 (0.7) | 22.39 |
| 0 : 100 | 13.5 (0.1) | 13.50 | 27.0 (0.5) | 27.00 |

わかった^{注1)}。この混合比 (R-32 が重量比で 44.6 %) の組成を用いたときの混合系冷媒の GWP はおよそ 300 と試算された。また、図 1 からわかるように、この混合比での燃焼速度は、R-1234yf 単体に比べ顕著な増加を示さないことがわかる。この混合比を 5.4 の LCA 評価における各種設定条件の一つとして用いた。

5.2 有害性評価

R-1234yf、R-32、R-744 のうち、R-1234yf 以外は現行の冷媒として使用実績があり、有害性は低いと考えられるため、ここでは R-1234yf を有害性評価の対象とした。

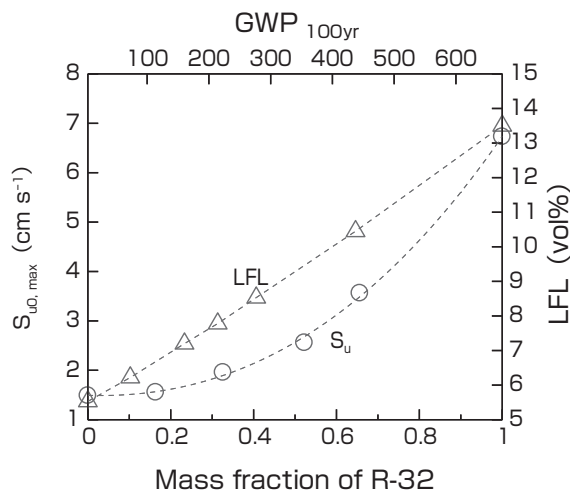


図1 R-1234yf/R-32混合冷媒系における最大燃焼速度のR-32 重量分率に対する依存性

$S_{u0,max}$: 最大燃焼速度、LFL: 燃焼下限値 (NEDO成果報告書 (2011) より引用)

表3 R-1234yfの有害性情報のまとめ (NEDO成果報告書 (2011) より引用)

| エンドポイント | 試験内容概要 | 試験結果 | 引用文献 |
|---------------------|--|-----------------------------------|------------------|
| 急性毒性 | ラット、吸入、4 時間 | 400,000 ppm まで死亡例なし | [5],[6],[9] |
| 反復吸入毒性 | ラット、吸入、2 週間 | NOEL=50,000 ppm | [9] |
| | 同、4 週間 | NOAEL=50,000 ppm | [9] |
| | 同、13 週間 | NOAEL=50,000 ppm | [5],[6],[9] |
| 心感作性 | イヌ、吸入 | 12 % (120,189 ppm) まで影響なし | [5],[6],[9] |
| ゲノミクス | 13 週間 | 50,000 ppm まで活性なし | [5],[6] |
| 発生毒性 | ラット、吸入 (鼻腔) | NOAEL=50,000 ppm | [5],[6] |
| | ウサギ、吸入 (全身) | NOAEL/LOAEL=4,000/5,500 ppm | [5],[6],[9],[10] |
| 二世世代繁殖毒性 | ラット、吸入、6 時間 / 日 | NOAEL=5,000 ppm | [5],[6] |
| 遺伝毒性 (エームス試験) | S.typhimurium (TA1535, TA98, TA100) and E.coli (WP2uvrA) | TA100 と WP2uvrA で 20 % 以上で陽性、他は陰性 | [9] |
| 遺伝毒性 (ヒト細胞) | ヒトリンパ球、4 時間 | 760,000 ppm において陰性 | [9] |
| 遺伝毒性 (in vivo 小核試験) | マウス、吸入、4 時間 | 陰性 (最大 200,000 ppm) | [9] |
| | ラット、吸入、4 時間 | 陰性 (最大 50,000 ppm) | [9] |
| 不定期 DNA 合成阻害試験 | ラット、吸入、4 週間 | 陰性 (最大 50,000 ppm) | [9] |

NOEL (no observed effect level): 最大無影響量、NOAEL (no observed adverse effect level): 最大無毒性量

R-32 は R-410A の構成成分であり、R-744 はヒートポンプ式給湯器の冷媒として用いられている^{用語2)}。R-1234yf の有害性試験結果を表 3 に示す。急性毒性試験、反復暴露試験、心臓感作性試験、二世世代繁殖試験では数万 ppm というとても高い濃度においても特段の有害性は認められておらず、また遺伝毒性試験の結果からも生体内では遺伝毒性を示さないと考えられる。最も低濃度で影響が現れた試験はウサギを用いた発生毒性試験だが、妊娠ウサギの死亡が観察された濃度は 5,500 ppm 以上であった。ただし、ラットにおいては発生毒性試験および 2 世代繁殖試験でも母体の死亡についての記述は見られず、反復暴露試験では 50,000 ppm という高濃度においても暴露の影響は認められなかったことから、ウサギは R-1234yf に対してラットよりも高い感受性を有していることが窺われる。表 3 の結果を総合的に検討して、R-1234yf の有害性は低いと判断した。

Minor^[5] は、R-1234yf の有害性は現行冷媒である R-134a と同程度に低いとしている。Rinne^[6]、Schuster *et al.*^[7]、日本冷凍空調学会^[8] 等においても R-1234yf の有害性は低いとしている。しかし、現在のところ有害性試験の詳細なデータは公開されていないため、今後、客観性、透明性を持った有害性評価を行うために有害性試験報告書の公表が望まれる。

5.3 大気経路暴露評価

R-1234yf は大気中での反応性が従来冷媒よりも高いため分解生成物が比較的高濃度に生成する可能性がある。そこで各種空調機器（家庭用、業務用、自動車用）に用いられる冷媒がすべて R-1234yf 単体に置換された場合の R-1234yf の大気放出量を推定した。R-1234yf の冷媒としての使用検討は、自動車が先行し、家庭用、業務用はそれより遅れているが、ここでは R-1234yf の排出量を最大に見積もるために各種空調機器で使用されることを仮定した。また R-1234yf は混合系冷媒として使用される可能性が高いが、混合比に関してはさまざまなケースが考えられるため、やはり排出量が最大になる場合として R-1234yf が単体で使用されることを仮定した。大気放出後の R-1234yf および大気中分解生成物であるオゾン、ホルムアルデヒド、トリフルオロ酢酸 (TFA) についての環境中濃度を推定しヒト健康および生態（水生生物）への影響を考察した。

冷媒排出量推定における仮定として、新規に生産される空調機器全部に使用される冷媒が 2011 年に R-1234yf に切り替わったとし、その後 40 年たった時点の冷媒排出量を機器種類ごと、ライフサイクルごとに推定した。機器製造台数、排出係数、廃棄時回収率等の推定パラメータは現行機器と同一とした。この仮定は将来予測を目的としたものではなく『現在用いられている空調機器の冷媒がすべて R-1234yf に置き換わる』という仮想的なシナリオにおける排出量の推定である。推定された年間排出量は合計で 15,172 t/年であり、機器の用途別では家庭用 (6,366 t/年) と業務用 (6,734 t/年) からの排出が大半を占めており、ライフサイクル段階別では廃棄段階 (8,744 t/年) からの排出が多かった。

使用した大気モデルは NO_x-VOC-オゾン系の反応過程および乾性沈着過程が内蔵された ADMER-PRO^{[11][13]} であり、R-1234yf が OH ラジカルと反応し、中間体 CF₃C(O)F を経て最終生成物である TFA に至る反応過程と TFA の湿性沈着過程を追加実装し計算を行った。TFA が雲水中で中間体 (CF₃C(O)F) から加水分解により生成する過程における総括反応速度定数については実験的手法 (2 相フロー法) により測定した。

表4 R-1234yfを冷媒として用いた場合の冷媒および分解生成物の大気中濃度 (年平均値、関東地方) (NEDO成果報告書 (2011) より引用)

| | R-1234yf [ppb] | オゾン [ppb] | | ホルムアルデヒド [ppb] | |
|-----|----------------|-----------|-------|----------------|--------|
| | | — | 増分*1 | — | 増分*1 |
| 最大値 | 0.28 | 44 | +0.13 | 2.9 | +0.012 |
| 最小値 | 0.0068 | 11 | -0.03 | 1.1 | -0.005 |
| 平均値 | 0.050 | 34 | +0.03 | 2.0 | +0.002 |

*1：コントロールケース (冷媒代替を行わない場合)からの増分

大気モデルにより算出された R-1234yf、オゾン、ホルムアルデヒド濃度を表 4 に示す。R-1234yf の最大濃度は 0.28 ppb と推定され、これは毒性試験のうち最も低い NOAEL (no observed adverse effect level:最大無毒性量) (4000 ppm、ウサギ、発生毒性;表 3) に対し 1000 万分の 1 の大きさであるため、R-1234yf の大気からの吸入暴露によるヒトの慢性影響は無視できると考えられる。またオゾンとホルムアルデヒドの平均濃度のコントロールケース (冷媒代替を行わない場合) からの増分はどちらも 0.1 % 程度と十分に小さく、よって R-1234yf のオキシダント生成への影響はとても小さいと考えられる。

また雨水中 TFA 濃度の年平均濃度の最大値は 3.4 μg/L と推定された。TFA の水生生物への NOEC (無影響濃度) は、種々の水生生物 (魚類、甲殻類、藻類) のうち最も感受性の高い藻類 (*Selenastrum capricornutum*) において、100 μg/L である^[14]。推定最大濃度はこの無影響濃度を大きく下回るため、雨水中 TFA が水生生物に影響を及ぼす可能性は極めて小さいと考えられる。

5.4 LCA評価

5.4.1 評価の対象範囲

各候補物質を冷媒として家庭用空調機器に用いたときにライフサイクル全体を通じて排出される温室効果ガス (GHG) 排出量を LCA の手法を用いて推定した。GHG 排出量は、大きく分けて空調機器使用時の電力消費や空調機器製造時のエネルギー消費による CO₂ 発生を推定する「エネルギー起因」のものと、漏洩冷媒による温室効果を推定する「冷媒起因」のものに分かれる。低 GWP 物質への代替では、冷媒起因 GHG 排出量は GWP の低下によって減少するが、エネルギー起因 GHG 排出量は、冷媒性能が下がれば増加する。よって、正味の GHG 排出を削減するかどうかを検証するためには、この「エネルギー起因」と「冷媒起因」の GHG 排出量の合計が削減されていることを確認する必要がある。

候補物質としては、第 4 章のスクリーニングにおいて残った R-1234yf、R-32、R-744 の 3 種類が挙げられる。しか

し R-744 については、この物質を家庭用固定型空調機器の冷媒として LCA 評価を実施するのに必要なデータが見当たらず、次世代冷媒としての可能性を十分に検討できなると判断し、評価対象からは除外した。ただし R-744 を家庭用空調機器の冷媒として実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加等のデータが把握できれば、以降に提示する R-1234yf 等に対する LCA 評価と同様の評価と冷媒としての適性判断は将来可能になるとと思われる。

R-1234yf と R-32 の 2 種類の冷媒に加えて、両者の混合冷媒も評価の対象とした。混合冷媒の混合比は 5.1 の燃焼特性評価において国内関連法で不燃性ガスとされる R-1234yf : R-32 = 55.4 : 44.6 (重量比) とした。

評価範囲はライフサイクル全体とし冷媒製造、機器製造、機器使用、機器廃棄の各段階について「エネルギー起因」と「冷媒起因」それぞれの温室効果ガス (GHG) 排出量を推定した。空調機器の製造、使用、廃棄場所は日本とした。GHG としては冷媒物質の他に CO₂、N₂O、CH₄ を推定対象とし GWP により CO₂ 換算した。

5.4.2 空調機器使用実態アンケート調査

空調機器の使用段階に起因する GHG は通電による消費電力量に相当するが、消費電力量は空調機器の使用実態に大きく依存する。この研究では使用実態に近い消費電力量を算出するため、詳細な調査項目 (世帯属性、住宅属性、空調機器の仕様、使用方法、使用時間等) から成る全国規模の使用実態調査を実施した。アンケートは 2010 年 2 月 (第 1 回) と 12 月 (第 2 回) にインターネットにより実施した。第 1 回調査では全国 4,000 世帯 (10 地域、各 400 世帯) を対象とし、第 2 回調査では第 1 回の調査対象世帯の追跡調査に加え、新たに全国 4,000 世帯 (10 地域、各 400 世帯) を対象とした。有効回答数は 7,090 世帯分であった。アンケート結果データから空調機器 1 台あたりの年間平均使用時間を算出した。図 2 に地域別の年間平

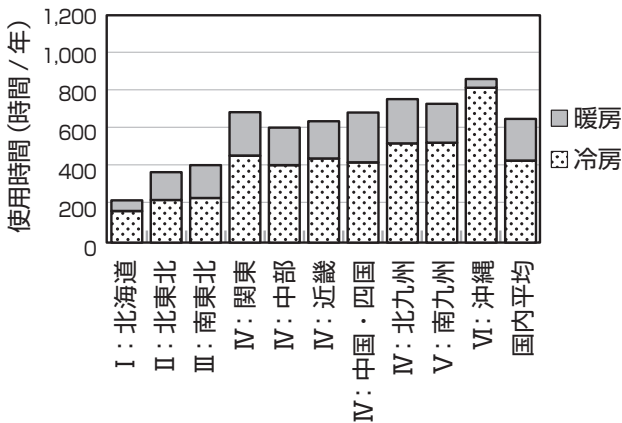


図2 地域別空調機器1台あたり平均年間使用時間 (I~VIは省エネ法での地域区分を示す)
(NEDO成果報告書 (2011) より引用)

表5 LCA評価の対象とする冷媒の特性
(NEDO成果報告書 (2011) より一部抜粋して引用)

| 冷媒 | GWP | 機器 1 台あたり冷媒充填量 [kg] | 機器使用時の消費電力増分 [%]*2 |
|-----------------|------|---------------------|-----------------------|
| R-410A | 1730 | 1.2 | |
| R-32 | 650 | 1.0 | ①-2.5 %, ②0 % |
| R-1234yf/R-32*1 | 300 | 1.1 | ①+2.5 %, ②+5 % |
| R-1234yf | 4 | 1.1 | ①+5 %, ②+10 %, ③+20 % |

*1) R-1234yf : R-32=55.4 : 44.6 (重量比)

*2) R-410A を基準とした場合の値。①、②、③は消費電力増分の仮定についての場合分けを示す。R-1234yf およびその混合冷媒を使用した際には遠藤ら [15] を参考に設定した。

均使用時間を示す。暖房について北海道や北東北等外気温が低い地域で使用時間が相対的に短いのは、それらの地域では「エアコン以外の暖房機器」を主に使用する世帯が過半数を占めることが要因であることがアンケート結果からわかった。

またアンケート結果から空調機器の 365 日×24 時間の使用スケジュールを算出し、外気温と運転開始後の経過時間を考慮した上で、機器 1 台あたりの年間平均消費電力量を地域別に算出した。

5.4.3 冷媒候補物質に対する評価結果

現行冷媒である R-410A、単体としての R-1234yf と R-32、および混合冷媒 (R-1234yf/R-32)、の計 4 種類の冷媒について LCA 評価を実施した。LCA 評価の対象とする冷媒の特性を表 5 に示す。表 5 で消費電力量増分に ①、②、③とあるのは、エネルギー起因 GHG 排出量を推定するための仮定についての場合分けを示す。R-1234yf は R-410A よりも冷媒性能が劣るという報告 [15] があるため R-1234yf 単体および混合冷媒の消費電力増分には正の値を、R-32 は R-410A よりも冷媒性能が優れるためゼロまたは負の値を仮定している。

図 3 に各次世代冷媒に対する家庭用空調機器 1 台あたりの GHG 排出量を示す。ライフサイクル別の寄与では、どの冷媒においても製造段階 (製造および機器) の冷媒起因や廃棄段階のエネルギー起因の寄与はとても小さく、GWP の大きい冷媒では廃棄段階の冷媒起因の寄与が大きく、GWP の小さい冷媒では製造段階と使用段階のエネルギー起因の寄与が大きい。全体として、冷媒の GWP を小さくすることによって GHG 排出量も概ねそれに従い削減されることがわかる。ただし、R-32 を使用した場合の GHG 排出量はいずれの省エネ性能についても約 1,100 kg-CO₂

であり、R-410A での排出量推定値である 2,300 kg-CO₂ の 50 % 程度の数値となる。これに対し、混合冷媒の GHG 排出量は約 920 kg-CO₂ であり、R-32 単体の場合と大差が見られない。よって R-32 に対する混合冷媒のメリットは GHG 排出削減の面では大きくない。これに対し R-1234yf 単体の場合は 670 ~ 740 kg-CO₂ となり、従来冷媒比で GHG 排出量を 40 % 程度にまで削減することができる。

6 次世代冷媒選定に関する考察とまとめ

本章では、第 5 段階の空調機器への実装可能性についても定性的に述べながら、この研究の評価結果と今後の課題等について考察する。

R-1234yf 単体の導入による GHG 排出削減効果はとても大きく、比較対象となった他の二つの冷媒 (R-32 単体、混合冷媒) と比較しても大きく削減できることが期待される。しかし、R-1234yf は価格が高いため今後の低価格化が課題である。また R-1234yf を導入することにより曲がり管等の設計変更のため圧縮機サイズの増大が懸念されるなど、固定型空調機器への実装に対する技術的課題の解決が今後不可欠である。

R-32 単体を導入した場合は、GHG 排出削減への効果は R-1234yf と比較すれば若干小さいものの一定の効果があり、現行冷媒の構成成分であるため機器実装上の問題は少ないと予想される。冷媒価格も安価であるため、次世代冷媒の候補と考えることができる。ただし、R-32 は弱燃性 (Class 2L) に分類されるものの R-1234yf より燃焼速

度が大きく (乾燥空气中)、安全性への対策が必要といえる。

R-1234yf と R-32 の混合冷媒については、GHG 排出削減効果、価格、燃焼性のどれも、単体冷媒の中間的な値になるため次世代冷媒候補物質といえるが、非共沸系混合冷媒特有の機器実装に際する取り扱いにくさが欠点となりうる。

よって、この研究でとりあげた 3 つの冷媒は、上で述べたような欠点や課題に対する対応がとられたうえで、第 5 段階の実装可能性についての定量的な評価が行われることが必要である。第 5 段階の実装可能性は、機器の設計に強く依存し、冷媒価格も関係するため、機器製造者と研究者、行政との密接な協力のもとに評価する必要があると思われる。

また、第 3 段階の有害性評価では有害性試験の詳細が公開されていない問題を指摘した。今後、客観性、透明性を持った評価を行うためには、冷媒製造者からの有害性試験報告書の公表が望まれる。第 4 段階の LCA 評価では、データの不足によって R-744 についての評価ができなかった。今後、家庭用空調機器の製造者が、R-744 を機器に実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加に関するデータを公表し、そのデータを用いた評価を行うことが課題であることがわかった。

この論文での評価結果は家庭用空調機器以外の冷媒使用機器については必ずしもそのまま適用できるものではないことに注意すべきである。それは表 1 に示した 5 つの段階のうち、第 4 段階 (LCA 評価)、第 5 段階 (実装評価) が機器の使用形態や現行冷媒との関係等に強く影響を受けるためである。

この研究では、リスクトレードオフを考慮して、次世代冷媒選定の意思決定を行うための方法論を提示したものが、次世代冷媒選定に限らず、リスクトレードオフを考慮した意思決定方法論全般に対し適用可能な次のような特徴を有していると考えられる。複数ある評価項目と評価基準を明確に示していること、段階的スクリーニングと詳細評価を組み合わせており、各段階で必要なデータや不足しているデータを示すことができること、である。このような方法論をとることで、社会情勢の変化等によって新たな評価項目が追加されたり、評価基準の変更が必要になった際にも、以前の評価との合理的な連続性を持った再評価が容易にできることが期待される。また、取得すべきデータと意思決定との関係を把握することができるため、他の研究機関からのデータ提供等の協力関係の構築が促進されると思われる。

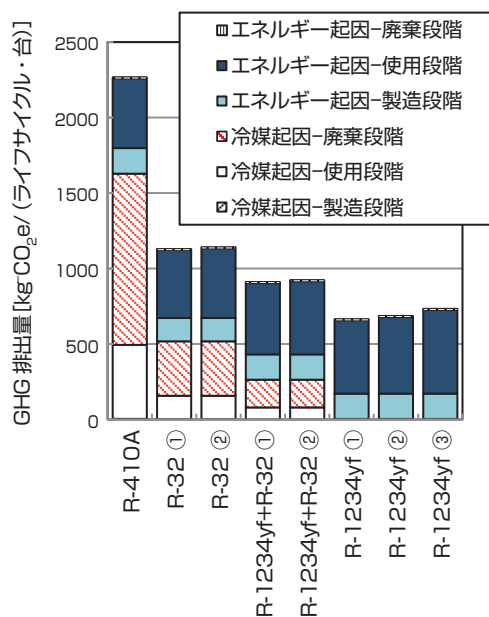


図3 冷媒の転換にともなう家庭用空調機器1台あたりのライフサイクル全体におけるGHG排出量推定結果 (横軸の冷媒種類は表5参照)
(NEDO成果報告書 (2011) より一部抜粋して引用)

謝辞

この研究は NEDO からの受託プロジェクト「ノンフロン

型省エネ冷凍空調システム開発／実用的な性能評価、安全基準の構築 (平成 19 年度～ 22 年度)」による成果の一部であり、この論文は当該プロジェクトに参加された産総研の各部署の研究者の成果である。以下に名前を挙げさせていただく。永翁龍一氏 (コンパクト化学システム研究センター)、田村正則氏、徳橋和明氏、陳亮氏、滝澤賢二氏、近藤重雄氏 (以上、環境化学技術研究部門)、中西準子氏、吉田喜久雄氏、江馬眞氏、田原聖隆氏、井上和也氏、高田亜佐子氏 (以上、安全科学研究部門)。この論文の主たる内容である「リスクトレードオフ評価の枠組み」については永翁龍一氏の努力によるものが大きいことをここに記し、謝意を表す。

注1) ここでは米国試験材料協会の標準試験法 (ASTM E681-01) に則って測定された以下の純物質の燃焼限界値^[4]を用いて混合物の燃焼限界値を計算した。R-1234yf: LFL=6.2、UFL=12.3、R-32: LFL=14.4、UFL=29.3 (単位は全てvol%)。

用語の説明

用語1: 地球温暖化係数 (GWP) : その気体の大気における濃度あたりの温室効果の強さを二酸化炭素を基準にして表したものである。ここでは特に断らない限りIPCC第2次報告書 (1995) のものを用いる。

用語2: 冷媒略称と化学式の関係

| 冷媒略称 | 化学式 | GWP |
|-------------|---|-----------------|
| R-1234yf | CH ₂ =CFCH ₂ F | 4 |
| R-1234ze(E) | CHF=CHCF ₃ | 6 |
| R-134a | CH ₂ FCF ₃ | 1300 |
| R-410A | CH ₂ F ₂ (R-32)と CHF ₂ CF ₃ (R-125)の 1:1 (重量比)混合物 | 1730 |
| R-32 | CH ₂ F ₂ | 650 |
| R-152a | CH ₃ CHF ₂ | 140 |
| R-290 | CH ₃ CH ₂ CH ₃ | 6 ^{a)} |
| R-600a | CH ₃ CH(CH ₃) ₂ | 7 ^{a)} |
| R-717 | NH ₃ | 1300 |
| R-744 | CO ₂ | 1 |

a) IPCC/TEAP (2005)の間接 GWP 値。ただし、R-600a (イソブタン) の値は異性体のブタンの値を示している。

参考文献

- [1] J.M. Calm: The next generation of refrigerants – historical review, considerations, and outlook, *International Journal of Refrigeration*, 31 (7), 1123-1133 (2008).
- [2] 経済産業省, 産業構造審議会化学・バイオ部会地球温暖化防止対策小委員会(第26回)配付資料1-2 http://www.meti.go.jp/committee/summary/0002410/026_haifu.html (2011)
- [3] O.J. Nielsen, M.S. Javadi, M.P. Sulbaek Andersen, M.D. Hurley, T.J. Wallington and R. Singh: Atmospheric chemistry of CF₃CF=CH₂: kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals, and O₃, *Chemical Physics Letters*, 439, 18-22 (2007).
- [4] B. Minor and M. Spatz: HFO-1234yf low GWP refrigerant update, *International Refrigeration and Air Conditioning*

Conference, Paper 937. Available at <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/937> (2008).

- [5] B. Minor: HFO-1234yf low GWP refrigerant for MAC applications, Mobile Air Conditioning Climate Protection Partnership Meeting in Washington, DC. (December, 2008) (2008) [cited August 4, 2010]; available from <http://www.epa.gov/cpd/mac/5%20Minor.pdf>.
- [6] F. Rinne: HFO-1234yf technology update-part 1, VDA Alternative Refrigerant Winter Meeting 2009, Saalfelden, Austria (February, 2009). [cited August 4, 2010]; available from http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/SmartAutoAC/MAC_HFO_1234yf_VDA_022009.pdf (2009)
- [7] P. Schuster, R. Bertermann, G.M. Rusch and W. Dekant: Biotransformation of 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf) in rabbits, *Toxicology and Applied Pharmacology*, 244 (3), 247-253 (2010).
- [8] 日本冷凍空調学会(2010) 最近気になる用語, HFO-1234yf (2010年8月4日引用) <http://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/187.html>.
- [9] Honeywell, Material Safety Data Sheet: 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene, HFO-1234yf (revision date 07/24/2012). [cited April 11, 2012]; available from http://msds-resource.honeywell.com/ehswww/hon/result/result_single.jsp?P_LANGU=E&P_SYS=1&C001=MSDS&C997=C100%3BJ%2BC101%3BMSDS_JP%2BC102%3BJP%2B1000&C100=*%&C101=*%&C102=*%&C005=000000011078&C008=&C006=HON&C013=+ (2012)
- [10] American Industrial Hygiene Association: AIHA-WEEL Committee Meeting Minutes of WEEL Fall Meeting, October 1-3, 2008. AIHA Headquarters, Fairfax, VA. [cited August 4, 2010]; available from <http://www.aiha.org/foundations/GuidelineDevelopment/weel/Documents/WEELminutesOct08.pdf>. (2008).
- [11] 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 ADMER-PRO Ver.0.8β 技術解説書 http://www.aist-riss.jp/software/admer-pro/ADMER-PRO_V08B_techdisc.pdf (2011)
- [12] 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 ADMER-PROウェブサイト <http://www.aist-riss.jp/software/admer-pro/> (2012).
- [13] 井上和也, 安田龍介, 吉門洋, 東野晴行: 関東地方における夏季地表オゾン濃度のNO_x, VOC排出量に対する感度の地理分布: 第1報 大小2種類の植物起源VOC排出量推定値を入力した場合の数値シミュレーションによる推定, *大気環境学会誌*, 45 (5), 183-194 (2010).
- [14] A.G. Berends, J.C. Boutonnet, C.G. De Rooij and R.S. Thompson: Toxicity of trifluoroacetate to aquatic organisms, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18, 1053-1059 (1999).
- [15] 遠藤和広, 松嶋弘章, 高久昭二: HFO1234yf冷媒ルームエアコンの性能評価第2報: 改良試験性能評価, 2010年度日本冷凍空調学会年次大会, 金沢 (2010).

執筆略歴

梶原 秀夫 (かじはら ひでお)

1996年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。日本学術振興会研究員 (PD)、科学技術振興事業団 CREST 研究員、新潟大学大学院自然科学研究科助手、助教授を経て 2005年に産総研(化学物質リスク管理研究センター)に入所。専門は化学工学。現在は安全科学研究部門主任研究員として発生源・排出シナリオ解析を中心に化学物質の暴露・リスク評価に従事。この論文では、評価シナリオ設定と大気経路暴露評価を担当。



査読者との議論

議論1 検討対象の選択

質問 (立石 裕:産業技術総合研究所つくばセンター)

用語が一貫していないので断言はできませんが、内容から判断する限り、この論文では、「家庭用空調機器」に使用される冷媒を中心に議論しているものと思います。しかし、世の中には当然業務用空調機器や、自動車等の移動体用の空調機器、さらには、家庭・業務用冷蔵・冷凍機器等、類似の冷媒を使用する多くの機器が存在しており、温暖化対策の観点からは、これらすべてを考慮した議論が必要はなはず。論文の趣旨から包括的なサーベイをする必要はありませんが、少なくとも以下のリマークが必要ではないでしょうか？

- ・冷媒の使用量からみた、家庭用空調機の位置付け
- ・業務用機器との関連性
- ・家庭用に限定することによる、トレードオフ評価枠組みへの影響の有無

回答 (梶原 秀夫)

温暖化対策の観点からは、冷凍空調機器全体に対する家庭用空調機器の割合を示すことは重要であると考えます。3章で、冷凍空調機器全体に対する業務用、家庭用、自動車用機器に用いられる冷媒量の比率について、冷媒排出量の数値を使って説明しました。また家庭用機器と業務用機器との関連については、「業務用機器に比べ家庭用機器は機器寿命が短いため、低 GWP 冷媒への代替による温室効果ガス排出削減への効果がより早期に現れると考えられ、家庭用機器での検討結果は、業務用機器での検討にも活用できると期待される。」としました。

また、評価対象を家庭用空調機器に限定することによる、トレードオフ評価枠組みへの影響についてですが、環境特性(オゾン層破壊、GWP 値)、燃焼特性、有害性、分解生成物については、家庭用空調機器に限定した場合も、その評価結果に大きな影響を与えないと思われませんが、LCA 評価については現行冷媒の省エネ性能、GWP、機器の使用時間、運転条件等が評価結果に大きな影響を及ぼすと考えられます。その点について6章に追記しました。

議論2 評価スキームの考え方

質問 (立石 裕)

表1の評価の枠組みは全体の根底となる重要なものであり、この論文がシンセシオロジーの論文たりえるポイントだと思いますが、なぜこのような形になったのか、明確な説明がないまま、アプリアーリに導入されているので、違和感があります。ここの項目はいわば当たり前の内容であり、著者の創意はどこにあるのか、なぜ個々の評価項目がこの内容でこの順番で選択されているのでしょうか？またこの項目を評価するために必要な技術の説明も抜けています。あとでてきはしますが、例えば、第一段階で、なぜ「微燃性」まで許容されるのでしょうか？

回答 (梶原 秀夫)

表1に示した評価の枠組みについて設定根拠の説明が不足しているというご指摘を受けて、4章の冒頭に設定根拠について追記しました。追記内容の概略は「本来は統一指標を設定して比較するのが理想的だが、そのような評価技術が確立していないため複数の項目を直列につないだ段階的スクリーニングとした。」というものです。個々の項目を評価するために必要な技術について追記しました。燃焼特性評価での「微燃性」の扱いについてですが、ISO817とASHRAE34での可燃性の分類はClass1:不燃性、Class2L:微燃性、Class2:低燃性、Class3:強燃性となっており、スクリーニングとしては明らかな燃焼性を持っている物質を除外するのが目的であるため、Class2とClass3を除外した、ということ強調した記述に修正しました。

質問 (田尾 博明:産業技術総合研究所環境管理技術研究部門)

この論文は、リスクトレードオフを考慮して、次世代冷媒を選定する方法論を提案したのですが、これまでにどのような評価法が提案され、それらの既存の評価法に比べて本評価法の新規性、独創性が何処にあるのかを明示することが重要と考えます。そのためには、過去にどのような評価がなされ、何が問題であり、本法ではその問題を克服するため、どのようなアイデアを取り入れたのかを示す必要があるのではないのでしょうか。この論文にも、「R-1234yfが自動車用空調機器用冷媒として有力な代替候補物質である。」とあり、これまで何らかの評価がなされていると考えられますが、それと比べて、何が進歩しているのかを示せないのでしょうか。

回答 (梶原 秀夫)

自動車用空調機器用冷媒として R-1234yf を評価した既存の方法論では、有害性、燃焼性、冷媒特性等の個々の評価項目ごとに、評価対象となっている候補物質を単独で、あるいは現行の冷媒物質との比較の形で、問題の有無を確認する方法がとられてきました(例えば、参考文献 [4])。しかし1章で述べたように、冷媒に用いられる物質は歴史的に見て、これまで多くの変遷をとげてきています。それは、時代ごとに評価項目が変わったり追加されたりしてきた結果と言えます。それゆえ今後も冷媒物質がさらなる代替の変遷をたどる可能性もあります。そのような状況で重要なのは、各時代での意思決定において、何を判断基準としたのかを明示しておくことと思われ。この研究では、各評価項目と判断基準について一覧表の形(表1の評価の枠組み)を示した上で、多くの対象物質からスタートして徐々に絞り込むスクリーニング形式をとっています。このことで、冷媒選択の歴史の中で、今回の意思決定を位置づけることができるといえる長所があると考えられます。そのことを6章の最後とアブストラクトに追記しました。

また、自動車用空調機器用冷媒のこれまでの評価とこの研究で対象とした家庭用空調機器用冷媒の評価の違いについては、3章に追記しました。両者の評価の主な違いは、それぞれの現行冷媒が異なるため達成すべき冷媒性能が異なる、ということです。

議論3 評価対象から外すことの妥当性

質問 (立石 裕)

5.4.1でR-744について「必要なデータが見当たらず、LCA 評価ができないので、評価対象から除外した」と記されていますが、このようなある意味恣意的な除外が許されるのでしょうか？少なくとも、具体的にどのようなデータが不足しており、それがないと有意な評価ができない理由を明記するとともに、今後の検討によっては候補対象となりえることをリマークすべきではありませんか？

回答 (梶原 秀夫)

「データがないため評価対象から除外した」という記述のみでは、恣意的との誤解を招く恐れもあるため、5.4.1に「ただし R-744 を家庭用空調機器の冷媒として実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加等のデータが把握できれば、以降に提示する R-1234yf 等に対する LCA 評価と同列の評価と冷媒としての適性判断は可能であると思われる。」と追記し R-744 も候補物質であることを示し、6章にも「また、データの不足によって LCA 評価ができなかった R-744 については、家庭用空調機器に実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加に関するデータを取得し評価を行うことが課題であることがわかった。」と今後の検討課題について明示しました。

質問 (田尾 博明)

評価に必要なデータがないから候補物質から外すというのでは、評価の信頼性が担保できないのではないのでしょうか。有力候補物質であれば、足りないデータは取得して評価に用いるべきと考えます。

単にデータがないから評価を行わないとするより、その判断が合理的と考えられる他の事実があれば、それらを記載すべきではないでしょうか。あるいは、そのようなデータの取得と評価を、今後の課題として記述すべきではないでしょうか。コメント2に記したように、不足するデータを公開し、実験する価値が高いことを外部に知らせることも、評価の大きな役割と考えます。

回答 (梶原 秀夫)

評価の全体枠組みの中で、不足するデータを示し、追加すべき調査や実験を示すことは大変重要なことですので、そのような記述に修正しました。具体的には、5.4.1に「R-744を家庭用空調機器の冷媒として実装した際の省エネ性能低下によるCO₂排出量増加等のデータが把握できれば、以降に提示するR-1234yf等に対するLCA評価と同列の評価と冷媒としての適性判断は可能であると思われる。」と追記し、6章にも、そのようなデータを取得し評価を行うことが課題であることを記しました。

議論4 評価スキームの一般化

質問 (田尾 博明)

この論文は、次世代冷媒といった個別の問題だけでなく、リスクトレードオフを考慮して物事を決定する場合の方法論としても一般化できるように思います。手法としては、スクリーニングと詳細検討の組み合わせであり、評価データの取得方法としては、既存データがあるものはデータマイニングによる取得、既存データがないものは実験またはアンケートによる取得になると思います。今回は自ら実験、アンケートを行ってデータを取得されたようですが、必要なデータを公開することによって大学、研究機関、企業等からの自主的なデータ提供を促す方法等も有効と考えられます。個別の冷媒の選定から、リスクトレードオフを考慮して物事を決定する方法へと一般化することにより、今後の新たな評価方法を提案できるのではないのでしょうか。

回答 (梶原 秀夫)

この論文の意義の一つは、リスクトレードオフを考慮した意思決定にとって、意思決定のプロセスを段階的に示し、複数ある評価項目と各評価項目での判断基準の提示を行うことが重要であることを実例を通して示していること、と言えると思います。また、評価に必要なデータがどのような種類のものか、そのデータがあることによつてどのような評価ができるのかを示すことが重要であることも同時に示しています。この論文のそのような意義を6章の最後とアブストラクトに加えしました。

議論5 評価実験の意図

質問 (田尾 博明)

脚注に、「ここでは米国試験材料協会の標準試験法 (ASTM E681-01) に則って測定された以下の燃焼限界値についての文献値 [4] を用いて計算した。」とありますが、この 55.4 % という値は実験結果 (図1) から求めたのではなく、文献値から計算できるということでしょうか? そうするとこの実験は何のために行ったのでしょうか? LFLの実験は文献値が正しいことを確認するためですか? それともこの実験は文献にはない最大燃焼速度を求めることに意味があるのでしょうか? 私の理解不足かも知れませんが、実験の目的を明確に記述したほうがよいと思います。

回答 (梶原 秀夫)

燃焼特性評価のための実験の目的の記述が不明確でした。実験の主たる目的は、R-1234yfとR-32の混合物において、純物質のLFLとUFLから推定される混合物のLFLとUFLが、実験値と一致することを確認することですので、そのことが明らかになるようにこの論文と脚注を修正しました。この論文では5.1の第2パラグラフに「燃焼実験を行いR-1234yf/R-32混合系において燃焼限界値の測定値が、混合比を用いてル・シャトリエの法則によって予測される値と一致するかどうかを明らかにした」とし、脚注には「純物質の」という追記を行いました。

議論6 有害性評価

質問 (田尾 博明)

R-32やR-744に対する有害性評価は行ったのでしょうか? 特に、R-32に対する有害性評価が必要と思います。行っていないければ、その理由 (他所で実行済みなど?) を書くことよいのでは。5章の5.1、5.3、5.4ではR-1234yfとR-32に対する検討が行われていますので、5.2でも何らかの記述をしておくことよいと思います。

回答 (梶原 秀夫)

R-32やR-744は冷媒としての使用実績があるため、有害性評価は行いませんでした。5.2の冒頭に以下のような記述を追記しました。「R-1234yf、R-32、R-744のうち、R-1234yf以外は現行の冷媒として使用実績があり、有害性は低いと考えられるため、ここではR-1234yfを有害性評価の対象とした。R-32はR-410Aの構成成分であり、R-744はヒートポンプ式給湯器の冷媒として用いられている (用語2参照)」。それと同時に、用語2の表においてR-410Aの説明欄に、構成成分の化学式に併記して冷媒略称 (R-32等) を追記しました。また、用語2の表にミスタイプがありR-744とすべきところがR-747となっていましたので修正しました。

産業保安と事故事例データベースの活用

— リレーショナル化学災害データベース(RISCAD)と事故分析手法PFA —

和田 有司

産業技術総合研究所では、化学物質が関連する火災、爆発、漏洩などによる事故事例を集めた「リレーショナル化学災害データベース (RISCAD: Relational Information System for Chemical Accidents Database)」を開発し、運用している。この論文では、RISCADの概要とその開発経緯を紹介する。また、複雑な事故を容易に理解するために、RISCADの一部の事故事例には、事故を時系列で整理し、原因を分析した「事故進展フロー図」を収録している、この「事故進展フロー図」を作成するために開発され、組織の安全意識の向上に有効な「事故分析手法PFA」(PFA: Progress Flow Analysis)の実施手順と企業の産業保安への活用手法について検討した結果を報告する。

キーワード: データベース、化学災害、産業保安、原因体系化、事故分析手法 PFA

Industrial safety and application of a chemical accident database

– Relational Information System for Chemical Accidents Database (RISCAD) and accident analysis method PFA –

Yuji WADA

The Relational Information System for Chemical Accidents Database (RISCAD) has been developed and operated on data concerning fires, explosions, and leakage accidents related to chemical substances, chemical processes, high-pressure gases, and explosives. In RISCAD, to understand the complicated accidents easily, some of the accident data are linked to “the accident progress flowchart,” which shows the time line and the cause analysis of each accident. In order to make these accident progress flowcharts, the accident analysis called the “Progress Flow Analysis (PFA)” was conducted. This analysis method is also useful for increasing the safety awareness of companies. In this paper, the outline and development process of RISCAD are introduced, and the procedure and application of PFA for industrial safety are reported.

Keywords: Database, chemical accidents, industrial safety, conceptual model for causes, Progress Flow Analysis (PFA)

1 はじめに

最近、大きな化学事故が増えている。個々の事故の原因はさまざまだろうが、その根本となる原因の一つに、熟練技術者の減少が関係していると言われている。1970年代までにいろいろなトラブルを経験しながら現場を支えてきた熟練技術者達がリタイアし、安定操業が当たり前の時代の技術者が現場を支えている。トラブルの経験がない者がトラブルに対応しようとしても、うまくいかない。このような状況を打開するために、体験型の安全教育が盛んに行われているが、まだまだ十分とは言えないのが現状である。

「事故に学ぶ」とは良く言われる言葉であるが、実際に事故を起こしてしまっただけでは、本末転倒である。そこで、「過去の事故事例に学ぶ」ことが必要になる。この論文では、事故事例を学ぶことによって、事故事例を疑似的に体験し、事故を繰り返さないことを目的に開発され

た「リレーショナル化学災害データベース (RISCAD: Relational Information System for Chemical Accidents Database)」の概要とその開発経緯を紹介する。また、RISCADの一部の事故事例に収録されている「事故進展フロー図」を作成するために開発され、組織の安全意識の向上に有効な「事故分析手法 PFA」(PFA: Progress Flow Analysis)^[1]の実施手順と企業の産業保安への活用手法について検討した結果を報告する。

2 リレーショナル化学災害データベース (RISCAD)

2.1 事故事例データベースの意義

ある化学プラントで事故が起きてしまったとき、過去に同じ化学プラントで同じような事故を起こしていたとしたら、それは厳しく非難されるであろう。そうでなくても、同じような事故が他の企業や化学プラントで起こっていて、その

産業技術総合研究所 安全科学研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西
Research Institute of Science for Safety and Sustainability, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: yuji.wada@aist.go.jp

Original manuscript received August 31, 2012, Revisions received May 10, 2013, Accepted May 13, 2013

事故情報を活用していなかったとしたら、やはり厳しく非難されるであろう。過去の事故は、将来の事故を防ぐための教師である。何かをやらうとするとき、どういう危険性がある、どういう事故が起こりうるかは、実際にやってみなければわからないことが多い。しかし、実際にやってみるまでもなく、過去にやってみた事例があって、失敗して、事故という教材を残してくれているとしたら、それを学ぶべきである。これが事故事例収集の原点である。

しかし、実際に事故事例を収集してみればわかるが、自分たちが目的とすることと同じようなことをやって起きた事故事例というのは、容易には見つからない。そこで、まずはできるだけ数多くの事故事例を集めておいて、その中から目的に合う事故事例を探し出せるようにする。これは初歩的な事故事例収集の考え方であり、事故事例データベースが必要とされる理由でもある。

初歩的な、と書いたが、現状では、おそらくそれが最善の方法であり、最低限やっておかなければならないことであろう。それでも、それで目的に合う事故事例が見つければよい方で、見つかったとしても、そこから役に立つ情報が得られるとは限らない。現状は、見つけた事故事例の再発防止対策をみて、自社の対策と比較して、安心することができる程度ではなからうか。

2001年に米国CSB (U.S. Chemical Safety Board) を訪問した際に、CSBでは過去3年間のプロジェクトで約1千万件の事故情報を収集し、さらにそれを約60万件まで絞り込んでみたが、結局は事故の分析に結びつく有益な情報は何も得られなかったとのことであった。つまり、ただ事故事例を集めただけでは意味がない。この結果を受けて、CSBではデータベースの運用方針を転換した。年に数件の事例だけを選び出し、2-5名の調査チームを作って、労働者や管理者へのインタビューを交えた詳細な調査を行い、分析して、事故調査報告書を発表することにした。

しかし、CSBは、化学産業を中心に産業界や政府に対して勧告する権限を持つ政府系の独立機関であって、事故の調査権も持つ特別な機関である。日本の化学産業の事故に関しては、このような調査機関が存在しない。したがって、国内の化学事故に関してCSBの事故調査報告書のような踏み込んだ内容の事故調査報告書を探そうとしても、おそらく困難であろう。

結果として、日本では事故の分析は自分でやらなければならない。単に目的に合うような事例を見つけて、再発防止対策を確認する以上のことを事故事例から学びたいければ、収集する事故の範囲を広げて、集めた事例を分析し、そこから何か自分たちに役立つ教訓を見つけ出さなければならない。これが事故事例収集のもう一つの目的である。

2.2 RISCAD開発経緯

1990年代後半に、横浜国立大学 小川輝繁教授(現名誉教授、安全科学研究部門研究顧問)らが中心となって設立した「物質安全研究会」は、化学プラントの安全性診断のためのエキスパートシステムの開発を進めていた^{[2][4]}。化学企業の安全エキスパートと呼ばれた方々の思考回路をシステム化しようという試みであった。その中で安全エキスパートの方々は、化学工学や化学プロセス安全の知識に加え、過去の事故事例を整理して、頭の中に蓄えている、ということがわかってきた。そこで、エキスパートシステムへの事故事例データベースの組み込みが必須と考えられたが、当時の日本国内の事故事例データベースは、文字情報を主体とし、単に数行の事故の概要が収録されているにすぎず、事故事例からの何らかの知識や教訓を得られる、というものではなかった。

そこで、産総研が中心となって、化学事故に特化した事故事例データベースの開発を計画した。そして、1999年10月より3年間、科学技術振興機構(JST)の研究情報データベース化事業の支援を受け、「物性リンク型化学事故事例データベース」(RISCAD開発段階のプロジェクト名)の開発を進め、2002年10月に公開したデータベースがRISCADである。

開発に際して特に考慮したのは、いかに利用者による同様の事故を未然に防止するために有益な情報を盛り込むか、ということであった。そこで、事故事例と事故に関連した物質の危険性情報とのリンク、事故事例の階層化されたキーワードによる分類、文字以外の情報や事故事例を分析した結果を収録することにより、利用者が化学物質を取り扱う際にその化学物質や使用状況に応じた事故事例を検索することができ、化学物質に関する危険性情報を知り、事故の起こった状況をより深く理解できるようなデータベースの構築を目標とした。

2.3 RISCAD概要

2012年8月末現在のRISCADの概要は下記の通りである。

- ・公開方法:産総研の研究情報公開データベース (RIO-DB)の一つとして、インターネットで無償で公開
URL: <http://riodb.ibase.aist.go.jp/riscad/>
- ・収録件数:5,840件
- ・収録期間:1949年10月28日-2011年9月10日
- ・収録物質数:5,544件
- ・事故進展フロー図件数:159件

開発当初は、それ以前に産総研のRIO-DBの一つとして公開していた「災害事例データベース」の高圧ガスや火

表1 階層化キーワードの例 (工程)

| 第1階層 | 第2階層 | 第3階層 | 第1階層 | 第2階層 | 第3階層 |
|-------|----------|---|-----------|---|---------------------------------------|
| 生産・製造 | 反応 | バッチ反応 連続反応 その他の反応 | 貯蔵 | 液体貯蔵 | タンク (固定式) 缶、瓶 ボンベ (液体貯蔵) |
| | 分離 | 蒸留 ろ過 遠心分離 その他の分離 | | 気体貯蔵 | タンク (気体貯蔵) ボンベ (気体貯蔵) |
| | 移送・移動 | 粉体移送 気体移送 液体移送 その他の移送・移動 | | 固体貯蔵 | ペレット 粉体 バルク 梱包品 その他の固体貯蔵 |
| | 乾燥 | | | その他の貯蔵 | |
| | 粉砕 | | 輸送 | 移動 | 航空機輸送 船舶輸送 (海上、河川) 列車輸送 車両輸送 |
| | 回収、抽出、除害 | 吸収 吸着 洗浄 中和 集塵 | | 荷役作業 | |
| | 操作 | 小分け 混合 洗浄 濃縮 仕込み、取り出し スタートアップ、シャットダウン 試運転 その他の操作 | | パイプライン | 液体輸送 気体輸送 その他の輸送 |
| 試験研究 | 試験、分析 | 前処理 試験・分析 | 保全・メンテナンス | 点検・検査 清掃 修理・改修 | |
| | 実験 | ラボスケール その他スケール | 廃棄・資源化 | 焼却 中間処理 最終処分 資源化 収集・運搬 保管 野積み 容器 その他の廃棄・資源化 | |
| | | | 消費 | 販売、取付け 使用 火薬類消費 発破 煙火消費 その他の消費 | |
| | | | その他・不明 | | |

薬類の事故に関する情報、開発グループのメンバーが独自に所有していた比較的詳細な化学プラントの事故情報を収録した。現在はこれに加え、RISCAD 運用グループで化学物質関連の事故情報を日々収集、登録している。

化学物質の危険性情報については、比重、融点、沸点や特に熱的危険性に着目して、発火点、引火点、爆発範囲等の物性データを収録した。また、熱分析データを収録し、目的に応じて利用者がウェブブラウザ画面上でダイナミックに解析できる機能を搭載した。

化学物質の検索で常に問題になるのは、化学物質には多数の別名があることである。エタノールで検索した結果とエチルアルコールで検索した結果は同じでなければならない。そのため、RISCAD では化合物の別名辞書をシステムに組み込み、登録されたどの化合物名で検索しても同じ結果が得られるようにした。

事故事例の分類に関しては、利用者が調べたい対象、特定の工程や特定の装置について検索できるように検索キーワードを作成することにしたが、ヒット件数が少ない

場合に検索範囲を広げて類似の事例を検索できるように、キーワードを階層化した。専門家によって、最終事象、工程、装置、推定原因、被害事象について階層化キーワードの作成を行い、それらの各階層のキーワードによる検索機能を搭載した。階層化キーワードの作成にあたっては、開発当時の海外の著名な化学事故データベースを参考にし、さらに実際の事故事例分析から特徴的に現れたキーワードを追加した。階層化キーワードの「工程」の例を表1に示す。例えば、工程では、廃棄・資源化の際の事故事例が多数あったので、他のデータベースにはなかった、廃棄・資源化の項目と関連するキーワードを追加した。装置では、安全装置等を同様にして追加した。

文字以外の情報として、事故調査報告書等に記載されている反応プロセスフロー図、機器・設備配置図、事故を起こした装置の概略図、反応式等の画像情報を収録した。

事故事例を解析した結果の表示機能として、マクロな統計分析については、事故事例検索結果のグラフ表示機能を搭載し、なおかつウェブブラウザ画面上でダイナミックに表

示方法等を変更できる機能を搭載した。

各事故事例の解析結果については、専門家によって事故に関する事象を時系列で整理し、それに対して事故の引き金となるような通常状態からのズレを抜き書きした事故進展フロー図を作成し、事例にリンクさせた。事故進展フロー図については、後で詳細に述べる。

また、JSTの要望もあり、国際化時代に対応するためデータベースをすべて翻訳し、同等の機能が英語版でも利用できるようにした。

実際の運用にあたっては、まず、日々事故情報を集める作業を行っている。これは、インターネットの新聞や通信社等の報道メディアのウェブサイト巡回して、事故の発生について知ることである。インターネットが発達して、検索等が容易にできる時代であり、こうした情報収集は容易にできると考えられがちであるが、例えば、「爆発」というキーワードで検索をすれば、打線爆発や怒り爆発といった情報が入り込み、「火災」で検索すれば、出火やぼよは抽出されない。経験から複数のキーワードを設定して検索しているが、最後は人が確認するしか方法がない。こうして事故の発生についての情報を入手したら、次に、より正確で詳細な情報を求めて、発災企業のホームページや、発災地方の自治体のホームページを検索する。詳細な事故調査報告書は、事故から数ヶ月から1年以上も後に公表されることもあり、大きな事故に関しては、常に情報のフォローアップが欠かせない。

事故概要の作成では、著作権の問題と信頼性の問題で、報道情報をそのまま掲載することはできないので、複数の情報から客観的事実のみを抜き出して、後述する一定のルールで概要文を作成している。さらに、これらの事例を上述の階層化キーワードで分類する作業は、化学や化学プラントの知識を持った専門家でなければ困難である。

このような作業を経て、RISCADには年間約250件の新規事例を追加している。

3 事故分析手法PFAの紹介

3.1 事故分析手法PFA開発経緯

事故分析手法PFA (Progress Flow Analysis) は、RISCADの中で、利用者に複雑な事故の内容を一目で理解できるようにすることを目的に、いくつかの事例にリンクさせてきた「事故進展フロー図」を作成するための手法として発展してきた。

事故進展フロー図は、RISCAD運用グループの誰かが事故事例の事故調査報告書等から、事故に関連する事象を時系列で抽出し、原因を考えて、事故進展フロー図の原案を作成し、それをRISCAD運用グループ全員で確認し、

議論して仕上げる、という手順で行っていた。

RISCAD運用グループには、安全工学、化学安全の研究者はもちろん、化学企業OBも所属している。そして、化学とは無関係の文系の出身者もいる。研究者は、事故調査報告書を読み解くことにはたけているが、実際の現場のことはわからないことが多い。こういう設備に対して、現場ではこういう対策がとられているのが常識だ、といったことは、化学企業OBの現場経験に基づく発言を聞いて初めて知ることができる。また、化学や現場の常識にとられない素朴な疑問が、核心を突いていることもある。言い換えると、グループで議論することによって、お互いのバックグラウンドを補完しあって、知識や経験を共有できることがわかってきた。特に化学企業OBの現場経験に基づく発言は、化学プラント勤務等の現場経験の無い研究者にとって得難いものであり、事故調査報告書からだけでは読み解けない原因等を抽出するために大変役に立つ。これは、まさに現在、企業現場で問題となっている熟練者の知識や経験の伝承や組織の安全意識の低下に対して有効な対策となる。

そこで、この知識と経験の共有を化学プラントの現場で実践できないかと考え、「事故進展フロー図を作成するための手法」を事故分析手法PFAとしてまとめることにした。事故分析手法PFAは、単に事故進展フロー図を作成して、事故を分析する手法にとどまらず、事故分析を通じて、組織の安全文化を伝承し、安全意識を向上するための手法であると考えている。

3.2 事故進展フロー図の構成

以前は事故事例を理解するためには、数十ページに及ぶ難解な事故調査報告書を各自が読解するしかなかった。しかし、それでは、現場で十分に活用することは困難である。そこで、難解な事故調査報告書を読まなくても、一目で事故が理解できるように整理したものを事故事例にリンクさせることにした。これが事故進展フロー図である。

事故進展フロー図は、「事故概要」、「背景」、「事故進展フロー」、「恒久的対応策」、および「教訓」から構成される。事故進展フロー図の様式を図1に示す。

「事故概要」欄には、発生日時、場所、および、概要文を記述する。RISCADでは一定のルールを定めて、この事故概要を作成している。発生日時は西暦とし、場所は市町村名までの記載とする。概要文は、「どこ(〇〇工場)で、何が(爆発、火災、漏えい、中毒)起きた。」を最初に記載し、被害の拡大状況や消防活動等を続ける。最終的な被害は、物的被害、人的被害に分けて、それぞれこの順序で記載する。次に事故原因を記載するが、原因が明確でない場合には、「という可能性がある。」と断定を避けている。最

後に、事故後の対応や行政による処分等を記載する。

次に、「背景」欄には事故事例の背景となった事柄や補足的な情報を記述する。事故が起きた設備の設立年代や設立の経緯、事故当時の社会情勢や事業所の状態、化学プロセスの事故であれば、関連化学物質の危険性やプロセスフロー等、必ずしも事故に直接関係のない事柄でも構わないが、事故を理解する上で役立つような情報があれば、記載する。

「事故進展フロー」は、事故進展フロー図の主要部分であり、事故分析手法 PFA を実施する土台となる。「事故進展フロー」部分は縦 3 列から構成される。中央列には、事象を時系列に並べ、各事象において問題の有無を検討し、問題のある事象については、左列にその原因を抽出する。火災、爆発、漏えい等の最終事象に至るまでを「経過」として記載し、被害拡大や消防活動等事故後の事象は、「対応操作」として記載する。右列は、備考欄である。備考には、各事象の補足情報を記載するほか、抽出した原因に対して、その原因を抽出するに至った理由や経緯の説明を記載する。

「恒久的対応策」には、「事故進展フロー」内で抽出され

た各原因に対する対応策を検討し、記載する。さらに、恒久的対応策を普遍化したものを教訓として、「教訓」欄に記載する。RISCAD では、教訓の表現方法として、簡潔で興味を持たれそうなフレーズをまず記載し、その説明文を一般的な意味とその教訓が分析した事例にあてはまる部分が理解できるように記載する。

事故進展フロー図は、時間の流れを基に分析を実施するものであるため、初心者でも比較的容易に事故進展フロー図を作成することが可能である。事故進展フロー図を作成するにあたっては、詳細な事故情報があることが望ましいが、少ない情報であっても相応に原因を抽出し、対応策を検討することができる。また、事故進展フロー図は、分析者以外の第三者が閲覧した場合に、難解な事故報告書を読むよりも事故の進展や原因がより容易に理解できるという利点がある。さらに、事故の進展を時系列に従って確認することにより、事故を擬似的に体験できる効果が期待できる。

事故分析手法は、FTA (Fault Tree Analysis) や ETA (Event Tree Analysis)、なぜなぜ分析や VTA (Variation Tree Analysis) などが知られているが、これらの手法はある程度の分析者の経験と事故に関する情報量が必要である。これらの分析手法に比べて、事故分析手法 PFA は少ない情報量でも実施でき、簡便であるという点が優れている。

3.3 原因抽出方法：原因体系化モデル

事故進展フロー図を用いて事故事例を分析する際にいくつかの問題が明らかになった。

一つは、事故に関連する事象と事故の原因との切り分けの困難さであった。例えば、間違っってバルブを開けた、というのは、内容物が漏洩した原因と捉えることができるが、一方で、バルブが開いた、というのは、事故に関連する事象にすぎず、バルブが開いた原因が他にあるはずだ、と考えることができる。そこで、事故分析手法 PFA においては、作業者および組織の行動、状況や設備、装置、化学物質および手順書の状態等のすべてについて、実際に起きたことが明らかか、あるいは、かなりの確度をもって推定できることを事象と定義した。このような定義は、事故進展フロー図作成の簡便化にも有効で、分析者はとにかく何か事象が記載されていれば、1 本の時系列のフローに並べることだけを考えればよい。上の例では、内容物が漏洩したのであるから、バルブが開いたことは間違いないので、バルブが開いた、というのは事象であると言える。

もう一つは、原因の抽出方法がわからない、あるいは、原因の考え方が分析者によって異なるという問題であった。ある者は、作業者の責任を重視し、ある者は、管理

PFA, RISCAD, AIST

| 事故概要 | 事故番号 | 発生日時(曜日) | 所在地 | | |
|------------|-------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|----|
| 背景 | | | | | |
| 区分 | 原因事象 | 事故進展フロー | | | 備考 |
| 経過 | | 1 日時 時間 | 事象1(事故発生前) | 事象1の備考 | |
| | | 2 日時 時間 | 事象2(事故発生前) | 事象2の備考 | |
| | | 推定原因1 | | 推定原因1の備考 | |
| | | 3 日時 時間 | 事象3(事故発生前) | 事象3の備考 | |
| | | 4 日時 時間 | 事象4(事故発生前) | 事象4の備考 | |
| | | 推定原因2* 推定原因3** | | *推定原因2の備考 **推定原因3の備考 | |
| | | 5 日時 時間 | 事象5(最終事象) 火災、漏えいなど | 事象5(最終事象)の備考 | |
| 対応操作 | | 1 日時 時間 | 事象6(事故発生後) | 事象6の備考 | |
| | | 2 日時 時間 | 事象7(事故発生後) | 事象7の備考 | |
| | | 3 日時 時間 | 事象8(事故発生後) | 事象8の備考 | |
| 恒久的 対応策 | | 1 | 恒久的対応策1 | | |
| | | 2 | 恒久的対応策2 | | |
| | | 3 | 恒久的対応策3 | | |
| 教訓 | 教訓フレーズ1：説明文 | | | | |
| | 教訓フレーズ2：説明文 | | | | |
| | 教訓フレーズ3：説明文 | | | | |

図1 事故進展フロー図の様式

者の責任を重視する、といった原因の視点の相違である。

原因の抽出方法については、図2に示す「原因体系化モデル」を用いて考える方法を開発した^[5]。原因体系化モデルはHawkinsによるSHELLモデルをベースとして開発された教訓の体系化モデル^[6]に「化学物質」という要素を追加したものである。すなわち、事故に直接関係した「組織」、「人間」、「装置・設備」、「化学物質」に加え、当事者ではない「組織」、「人間」とこれらを取り巻く「社会」を要素として考え、ある事象にこれらのどの要素が関係するかを明確にし、それらの要素間に問題が無かったかを検討する方法である。この原因抽出方法により、分析者の経験の相違による原因の相違や見落としを減らすことができる。図3に原因体系化モデルによって抽出された原因の例を示す。

3.4 事故分析手法PFAの実施手順

事故分析手法PFAは、以下の手順に従って分析を実施する。

- (1) 事象の時系列整理
- (2) 原因の抽出
- (3) 恒久的対応策の検討
- (4) 教訓の作成
- (5) 概要文のまとめ
- (6) グループによる議論

手順の詳細を以下に解説する。

3.4.1 事象の時系列整理

事故事例の分析に先立って、分析対象となる事故事例に関する事故調査報告書等の情報を精読して、内容を十分に理解する必要がある。ただし、一般に事故調査報告書等は難解であるため、事象を時系列で整理しながらまとめ

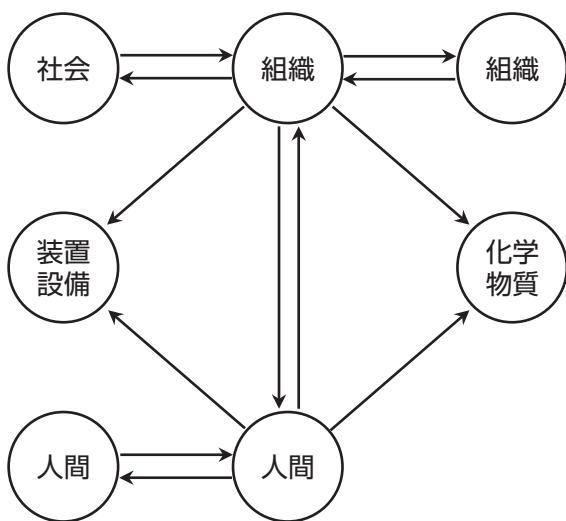


図2 原因体系化モデル

ると理解しやすい。

先に述べた通り、作業者および組織の行動、状況や設備、装置、化学物質および手順書の状態などを事象として時系列で並べる。

3.4.2 原因の抽出

時系列で整理した事象には、どこかに事故に至った原因が隠れているはずである。そこで、各事象に問題がないかを逐次検討する。問題がありそうな事象については、原因の抽出を行う。主な原因は、すでに事故調査報告書等に記載されているが、残念ながら事故調査報告書には、必ずしもすべての原因が記載されているとは限らない。そこで、分析者の知識や経験に基づいて、できるだけ多くの原因を推定して抽出することが望ましい。ここが、事故調査と事故事例分析の相違点と言える。事故事例分析では、真の原因を追及するよりも、事故事例からより多くのことを学ぶことが重要である。

3.4.3 恒久的対応策の検討

恒久的対応策は、抽出した原因ごとに検討し、原因の数だけ恒久的対応策を挙げられることが理想的である。

3.4.4 教訓の作成

教訓は恒久的対応策を普遍化して作成する。ただし、事故事例をより印象づけるために、教訓は一つの事故事例に対して、2-4件程度に絞り込むのが望ましい。したがって、教訓を考える前に、まず、この事故事例でポイントとなる、事故事例を見る人に最も伝えたいことは何か、を考える必要がある。こうした検討を行うことにより、事故事例をより印象的に記憶することができ、また、事故防止のために、まずどこに注意すべきか、どのような対策を優先すべきかを判断する能力が身につけられる。

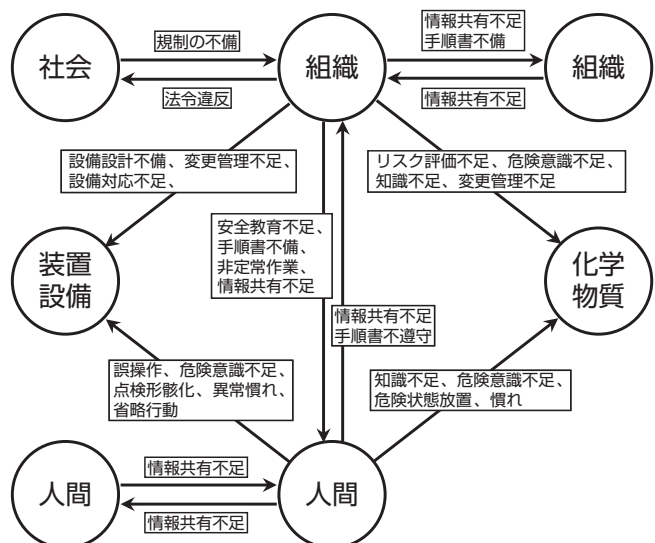


図3 原因体系化モデルによる原因抽出例

3.4.5 概要文のまとめ

最後に分析結果をまとめて概要文を作成する。概要文の記載方法は、3.2 項で紹介した。

3.4.6 グループによる議論

事故分析手法 PFA による事故進展フロー図の作成は、前節までの手順で一応は完成する。しかし、その事故進展フロー図には、情報源である事故調査報告書の内容と分析者個人の知識しか含まれていない。事故事例を知識化し、より有効に活用するために、数名のグループで議論し、事故進展フロー図を完成させる。ある分析者が作成した事故進展フロー図の原案に対して、分析者を含めた 4-5 名程度の異なるキャリアを持つ人たちからなるグループで事故事例について議論し、最終的に事故進展フロー図を完成させる。

3.5 事故分析手法PFAの効用

事故進展フロー図を囲んでのグループによる議論には、次のような効果が考えられる。

- (1) グループ内で事故の情報を知識として共有できる。
- (2) 事故の進展の見落としを補完し、違った視点で原因を抽出できる。
- (3) 原因の抽出や恒久的対応策について、他の参加者の知識や経験を共有できる。
- (4) 皆で原因を見つけ出そうという意識および組織全体の安全意識が向上される。

例えば、化学プラント現場での短時間のミーティングの中で活用するなどの方法がある。

できあがった事故進展フロー図は、事業所全体や企業全体等、さらに広い範囲に水平展開して、事故事例情報の共有と安全教育に役立てることができる。

4 まとめ

リレーショナル化学災害データベースと事故分析手法 PFA について紹介した。

事故分析手法 PFA に関しては、現在は事故調査報告書の事後分析を中心に活用しているが、理想的には事故の直後に行われる事故調査への活用が望ましい。一部、火薬類の事故で事故進展フロー図を用いた分析が行われている例や、事故を起こした企業から直接事故分析手法 PFA の事故調査への活用について相談を受けた例があり、その有用性は示されているが、今後、事故調査においても活用できるように調査の実施方法を検討し、認知度を高め、利用拡大に努力したい。

一方で、化学事故の事故事例データベースの国際化はあまり進んでいない。その一つの理由は、事故の定義が国によって異なることにある。例えば、日本の高圧ガスに関する

事故統計を国際会議の場で発表すると、その件数の多さに他国の人は驚く。それは、盗難まで事故に含めていることや、盗難を除外したとしても微少な漏洩も事故として報告し、件数として数えているためである。このような例は国際的にも珍しい。欧州共同体 (EC) の Major Accident Hazards Bureau (MAHB) が構築している重大事故報告システム (MARS: Major Accidents Reporting System) は、経済協力開発機構 (OECD) の化学品事故ワーキンググループ (Working Group on Chemical Accidents) 参加国も協力する国際的な化学事故データベースであり、人的被害 (死傷者数や避難者数等) や化学物質の保有量に対して一定の割合以上の漏洩が起きた場合等に重大事故を報告することになっている。日本の事故を登録する場合に、死傷者数による定義は可能であるが、避難者数や保有量に対する漏洩割合等は、必ずしも情報として集められておらず、登録の対象となるかどうかの判断ができないといった状況である。

最後に、リレーショナル化学災害データベースの構築と活用のためのシナリオを図 4 に示す。構成要素としては、発災日時から発災装置までの事故事例の事実に基づき収集する情報、あらかじめ蓄えておく物質危険性情報、そして、事故事例分析の結果得られる推定原因、対応策、教訓と事故進展フロー図がある。これらの要素は、データベースの基本構造であったり、信頼性やユーザー利便性を向上したり、学習教材としての利用価値があったり、事故分析手法を産み出した基となっている。

リレーショナル化学災害データベースは、化学災害に特化したデータベースとしての地位を確立させ、広く活用されることを目標としている。その活用の中身は、事故防止に、

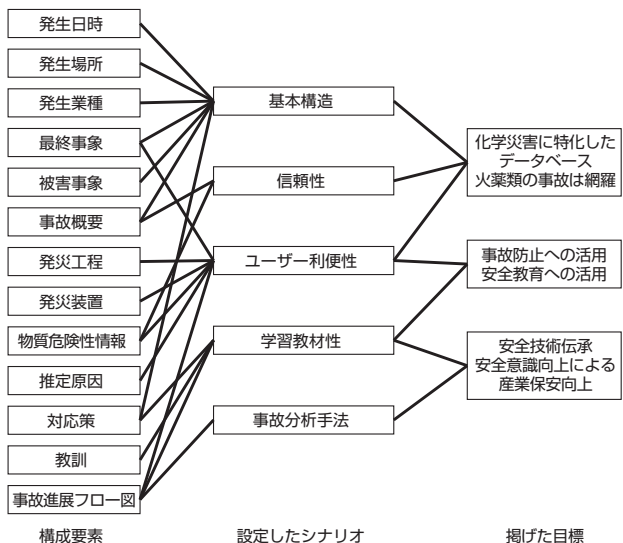


図4 リレーショナル化学災害データベースの構築と活用のためのシナリオ

また、安全教育に役立てることである。そのためには、多様な事故事例、すなわち、さまざまな原因によって引き起こされ、さまざまな教訓を得られるような事故事例を学び、それらの事故事例を詳細に分析することによって、教訓を導き出すことの重要性を伝えていくことも必要である。リレーショナル化学災害データベースの中で開発された事故分析手法 PFA は、グループでの議論を通じて、安全技術の伝承に役立ち、組織の安全意識を向上させ、結果として、産業保安の向上に役立てることを目標として掲げている。

謝辞

RISCAD は、JST の研究情報データベース化事業において JST と共同開発したものである。RISCAD の運用にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金研究成果公開促進費の交付を受けた。RISCAD の開発、運用には、産総研内外の多数の方にご協力いただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 商標登録,「事故分析手法PFA」,第5580785 (2013).
- [2] R. Takasaki, J. Nobe, Y. Wada, M. Wakakura, A. Miyake and T. Ogawa: Hazard identification system based on fire and explosion accidents in chemical processes, *Proc. Asia Pacific Symposium on Safety*, 1, 151-154 (2001).
- [3] 高崎倫, 岡泰資, 三宅淳巳, 小川輝繁, 若倉正英, 野邊潤, 和田有司: 化学プロセスの事例解析による危険性評価システム構築手法の検討, 第35回安全工学研究発表会講演予稿集, 137-140 (2002).
- [4] 高崎倫, 岡泰資, 三宅淳巳, 小川輝繁, 若倉正英, 野邊潤, 和田有司: 化学プロセスの危険性推論システムにおける事例情報のパターン化の検討, 第33回安全工学シンポジウム講演予稿集, 334-337 (2003).
- [5] K. Katoh, S. Abe, K. Nishimiya, E. Higashi, K. Nakano, S. Uchimura, K. Owa Heisig, Y. Ogata, M. Wakakura and Y. Wada: Classification of causes of chemical accidents by means of progress flow analysis (PFA), *Proc. 13th Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, 2, 89-95 (2010).
- [6] (独)原子力安全基盤機構: 巨大システム事故・トラブル教訓集 (2009).

執筆者略歴

和田 有司 (わだ ゆうじ)

1992年東京大学大学院工学系研究科反応化学専攻博士課程修了、博士(工学)取得。1992年通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所入所。1999-2001年東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻助手。2002年産業技術総合研究所爆発安全研究センター。2008年組織改編により安全科学研究部門に所属。2011年より爆発利用・産業保安研究グループ長。リレーショナル化学災害データベースの運用責任者。



査読者との議論

議論1 全体的コメント

コメント (内藤 耕: 前産業技術総合研究所)

この論文は事故事例のデータベース開発を扱っていますが、近年の社会的にとっても大きく注目を集めている複雑な構造を持つビッグデータ分析に大きく影響を与える有益な学術論文と言えます。この論文ではデータベース化に向け、キーワード(専門用語)の定義、データ分析手法(PFA等)、体系化技術(SHELLモデル)等の技術を組み合わせる構成的手法が導入されています。一方、単純な技術統合だけでは有益なデータベースとならず、情報収集への工夫、さまざまな専門家による多面的な議論等の方法論的重要性も指摘されていることがこの論文の価値です。

議論2 既存研究との比較によるこの研究の位置付け

質問 (田尾 博明: 産業技術総合研究所環境管理技術研究部門)

この研究で開発されたRISCAD以外に、我が国および世界に存在する主なデータベースと、その特徴を表形式等で示していただくと、この分野の研究の趨勢と、本データベースの特徴がより明確になると考えられます。米国のCSBの例が示されていますが、EU等でも類似の研究が行われているのではないのでしょうか。

回答 (和田 有司)

海外の化学事故情報を調べるためのデータベースはないかとの相談を受けるのですが、適切なものはないというのが現状です。米国のCSB (Chemical Safety Board) は、データベースというよりは詳細報告書や再現コンピューターグラフィックのライブラリーといった形式で、事故例の検索や統計データの取得はできません。EUにはMARS (Major Accident Reporting System) がありますが、これも重大事故に限定していること、EUやOECD各国の協力が不十分なこともあり、件数が少なく(2010年以降は14件の登録のみ)、データベースとして比較するには十分ではありません。米国では、以前公開されていたEPAのデータベースが911テロ以後、非公開になるなどの動きがあり、欧州各国は国ごとにデータベースは持っているようですが、公開していないか、公開していても自国語のみ(ドイツ等)という状況です。このような状況ですので、表形式での比較は難しい状況です。

議論3 データベースの内容

質問 (内藤 耕)

膨大なデータの分析より、数件の事故の深掘りの重要性が指摘され、これはしばしば統計分析でやりがちな「平均」ではなく、「多様性」と「詳細性」に注目することを意味しています。この点を最後のまとめの中で記述頂ければ、さらにこの論文の価値は高まります。

回答 (和田 有司)

ご指摘のとおりと思いますので、まとめに下記のとおり追記しました。

「さまざまな事故事例、すなわち、さまざまな原因によって引き起こされ、さまざまな教訓を得られるような事故事例、を学び、それらの事故事例を詳細に分析することによって、教訓を導き出すことの重要性を伝えていくことも必要である。」

質問 (内藤 耕)

事故の普遍化に対策を2-4件に絞込むことの重要性が指摘されていますが、なぜ絞ったほうがいいのかの根拠の明確化をお願いします。

回答 (和田 有司)

ご指摘のとおり、根拠について明確に記載されておりませんでした。下記のとおり、追記しました。

高速充放電型蓄電デバイス“キャパシタ”の開発

— キャパシタデバイスの高性能化を目指した電極材料の開発戦略 —

羽鳥 浩章*、棚池 修、曾根田 靖、児玉 昌也

省エネルギーかつ利便性の高いシステムを構築するため、蓄電デバイスには、電気をたくさん貯めるだけでなく、電気の出し入れを高速で行うことも求められるようになってきた。高速充放電型蓄電デバイスの研究開発は、ナノテク材料製造技術とエネルギーデバイス製造技術という対象スケールの大きさがかなり異なる分野の融合領域であり、また、実用デバイス製造では要素技術の選択と融合が鍵となることから、構成学的にも興味深い研究開発分野と言える。この論文では、高性能キャパシタデバイス開発を目的に産学官連携で実施されたプロジェクトの開発経緯を実例として示しながら、材料技術シーズの探索からデバイス製造までの研究開発のアプローチや手法等を紹介する。

キーワード: キャパシタ、蓄電デバイス、電極材料、高速充放電、カーボン材料

Capacitor devices for rapid charge/discharge storage

– R&D strategies of electrode materials for high performance capacitor devices –

Hiroaki HATORI*, Osamu TANAIKE, Yasushi SONEDA and Masaya KODAMA

Energy storage devices now require rapid charge/discharge performance, not only high storage capacity for convenient and energy efficient devices. Research and development of rapid charge/discharge storage devices are carried out in an interdisciplinary field of nanotechnology and device manufacturing, where the scope of research is very different in size and scale. This R&D is an interesting subject from the viewpoint of synthesesiology, because the keys to device manufacturing are selection and combination of element technologies. In this paper, approaches and methods employed in the R&D of high performance capacitors are introduced from the discovery of innovative materials to device manufacturing, by citing examples carried out in research projects under industry-academia-government collaboration.

Keywords: Capacitors, energy storage device, electrode materials, quick charge/discharge, carbon materials

1 背景

充電・放電を繰り返して使う蓄電デバイスとして、鉛蓄電池やリチウムイオン電池に代表される二次電池や高速な充放電に特化した用途で利用される電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor ; EDLC) が挙げられる。電池と称されるものは我々の身の回りにあふれており、蓄電デバイスの応用範囲は極めて広い。ガソリン車並の走行距離が実現できる省エネルギー自動車の実現や、自然エネルギー導入のための電力平準化等の社会ニーズに応えるための蓄電デバイス開発が、近年活発に進められてきた。蓄電デバイスに対する性能要求としては、長時間使用という利便性向上のため、まずは高いエネルギー密度を実現することが求められた。その結果として生まれたリチウムイオン電池の出現から、携帯小型機器を中心とする市場拡大までの急速な発展は、目を見張るものがある。一方で、リチウムイオン電池の優れた性能をもってしても、ガソリン車

並の走行距離を実現できる電気自動車の市場化は困難とされていた折、ハイブリッド自動車の出現によって、高入出力が可能で、繰り返しの充放電に耐える蓄電デバイスの開発がトレンドとなった。その後、現状においては、自然エネルギーの普及促進等も視野に入れながら住宅用の蓄電にも展開しつつ、プラグインハイブリッド車や電気自動車への要請が高まり、低コストかつ高エネルギー密度の蓄電デバイス開発が指向されている。このような開発トレンドの変化がこの10年ほどの間に起こっていることが示すように、社会背景等によっても技術ニーズが絶えず変化し、蓄電デバイスへの性能要求は多様である。

電気二重層キャパシタは化学反応を伴わない蓄電デバイスで、原理上、高速充放電性能と耐久性に優れたデバイスである^{[1][2]}。静電容量が1F以下の小型キャパシタは、1970年代後半より市場を確立してきたが、その後、自動車や建機等の電力回生システム用として1000F級の大型デ

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 〒305-8569 つくば市小野川16-1 つくば西
Energy Technology Research Institute, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: h.hatori@aist.go.jp

Original manuscript received September 18, 2012, Revisions received July 9, 2013, Accepted July 11, 2013

バスの開発が進められた。高速充放電（パワー密度）に特化したデバイスは、「人が便利に暮らすため」というアウトカムを設定した時、さまざまな場面での活躍が想定される。大型キャパシタの実用例であるコピー機への応用は、人を待たせずに起動するために使用されていた予備加熱のための待機電力を低減するものであり、キャパシタの高出力特性を利用した急速加熱により実現した。人間生活の利便性を保ちつつ、省エネルギーを推進した産業技術の好例と言える。充電ポイントを通過する時にキャパシタに瞬時に充電することで、おもちゃの電車が環状の線路を延々と走り続けるというものがある。長距離走行に必要な分のエネルギーを、高エネルギー密度の蓄電デバイスに一度に充電するというのが現状の電気自動車の基本コンセプトであるが、高速充放電型デバイスと非接触式充電機との組み合わせで、自動車が道路を走りながら、気づかないうちに充電を繰り返した結果として長距離走行が可能になるといった、全く違うコンセプトの電気自動車が、未来においては出現するかもしれない。

現在実用化されている電気二重層キャパシタでは、電極材料として正極、負極ともに活性炭が使われ、それ以外の主な部材は、電解液とアルミ集電体という極めてシンプルな構造のデバイスである。蓄電デバイス全般に言えることであるが、エネルギー密度とパワー密度はトレードオフの関係にあり、特にデバイス化においては、一方を向上させようとすると他方が犠牲になるということが、現状では避けられない。我々は、高速充放電型の蓄電デバイスへの社会的ニーズが高まる中で、キャパシタ用の電極活物質となる炭素電極材料の研究開発を行ってきた。すでに述べたように、蓄電デバイスの応用範囲は広く、社会ニーズに直結したシステム側の性能要求も多種多様である。また、革新的なニーズが出現して性能限界（の見込み）が上がれば、新たなニ

ーズが出現し、それを旨とした開発が活発化するということが容易に起こる分野でもある。このような背景から、我々はキャパシタの高速充放電特性という優れた特徴を損なわずに、いかにエネルギー密度を向上させることができるかを課題として研究開発を進めてきた。その開発戦略は、その時点での社会ニーズから求められる性能要求を一定の達成目標としながらも、既存原理打破を可能とするブレークスルー（第1種基礎研究）の探索から、既存事象の正確な理解（第2種基礎研究の基盤的研究）、既存原理に基づく性能限界の実現（第2種基礎研究）まで、広範なベクトルをもって電極材料を開発するというものであった（図1）。

2 キャパシタの高性能化技術の分類と技術の選択

2.1 電気二重層キャパシタの原理と電気化学キャパシタ

電気二重層キャパシタは、電極表面とそれに接する電解液との界面に形成されるイオンの吸着層を利用して電気を蓄える蓄電デバイスである（図2）。電気二重層における蓄電は、静電的吸着に基づくものであり、二次電池のように化学反応を伴わないことから、高速な充放電が可能であり、充放電を繰り返しても劣化が小さいという特徴を有する。エネルギー密度に関わる電気二重層容量は電極面積に比例することから、商用化された電気二重層キャパシタでは、高表面積材料である活性炭が使われている。

一方で、電池に比べて蓄えられるエネルギー量が限られることが、キャパシタの欠点と言える。エネルギー密度の改善を行うため、電気化学反応（酸化還元反応）を導入したものは電気化学キャパシタと呼ばれ、高速充放電特性を有することを前提に、広い意味での“キャパシタ”に分類されている。類型による分類を表1に示すが、電気化学反応を正極あるいは負極の一方に導入した中間的な位置づけのものの中では、現時点では、図2に示すリチウムイオン

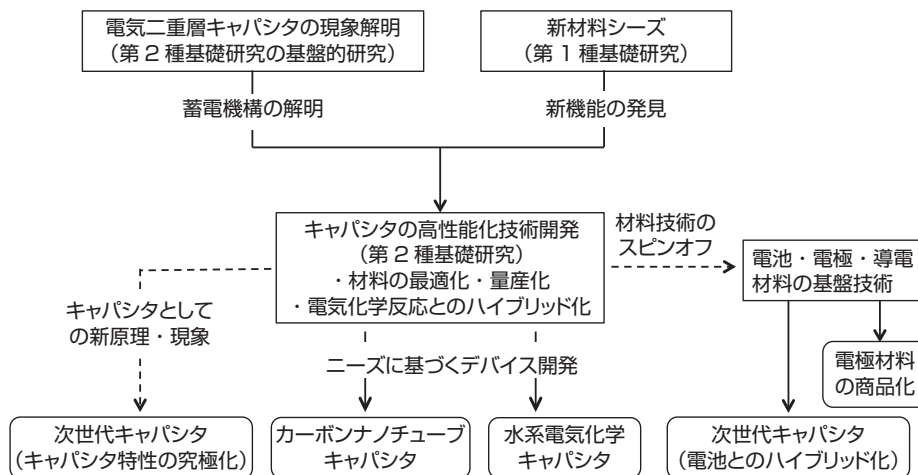


図1 高性能キャパシタ用電極材料の研究開発モデル

表1 キャパシタと二次電池の類型による分類

| | | 正極 | 負極 |
|---------------------|------------------|--|--|
| 電気二重層キャパシタ | | 電気二重層 (活性炭 / 多孔質カーボン) | 電気二重層 (活性炭 / 多孔質カーボン) |
| 電気化学 キャパシタ | リチウムイオン キャパシタ | 電気二重層 (活性炭 / 多孔質カーボン) | 酸化還元反応 (黒鉛 / ハードカーボン) |
| | レドックス キャパシタ | 酸化還元反応 (RuO ₂ 、MnO ₂ 、 導電性ポリマー等) | 酸化還元反応 (RuO ₂ 、MnO ₂ 、 導電性ポリマー等) |
| | 第三世代 キャパシタ | 酸化還元反応 (ナノ粒子化した リン酸鉄リチウム等) | 酸化還元反応 (ナノ粒子化した チタン酸リチウム等) |
| リチウムイオン電池 (二次電池) | | 酸化還元反応 (酸化物) | 酸化還元反応 (黒鉛 / ハードカーボン) |

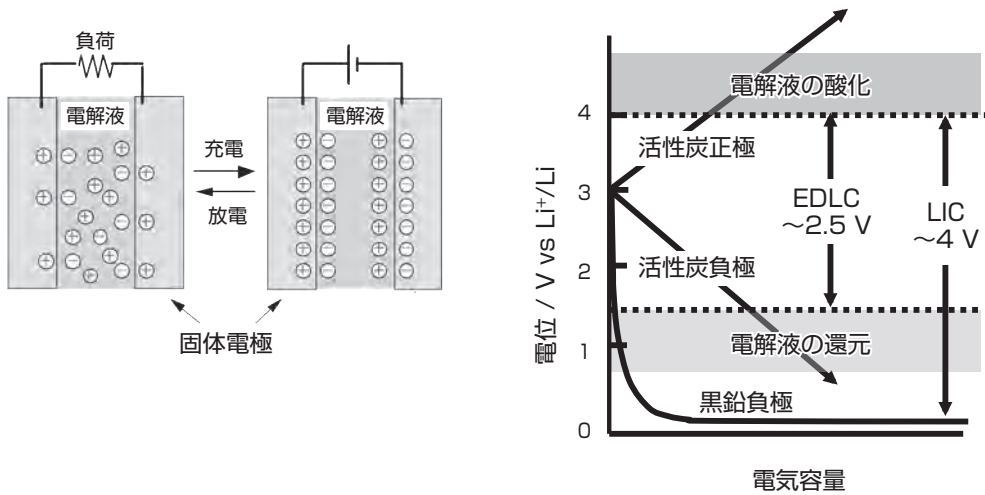


図2 電気二重層キャパシタ (EDLC) の蓄電原理 (左) とリチウムイオンキャパシタ (LIC) との比較。右図に示すように、EDLC の作動電圧は電解液の酸化還元電位によって制限されるが、LIC では黒鉛負極の還元電位が低いことにより、作動電圧を大きくとることができる。

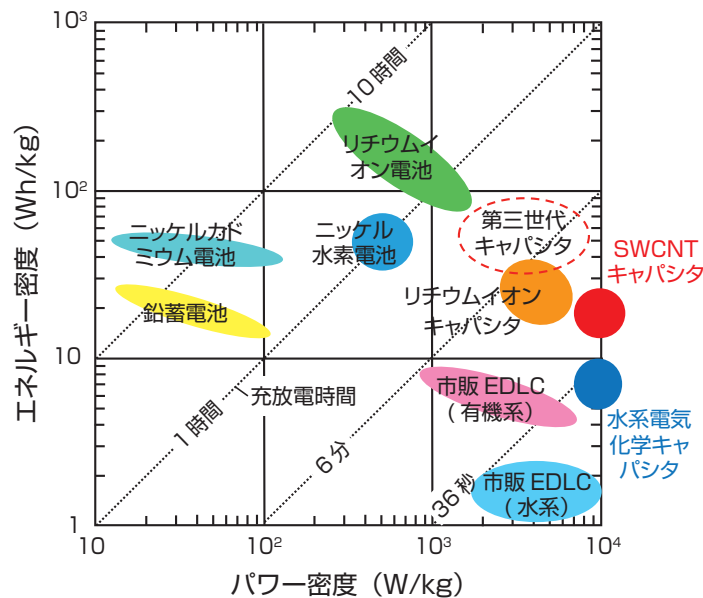


図3 各種蓄電デバイスのエネルギー密度とパワー密度

キャパシタ (Lithium Ion Capacitor ; LIC) の開発が実用化という視点で頭一つリードしている。最近では、さらなる高エネルギー密度化を目指し、正負両極に電気化学反応を導入した第三世代キャパシタと称されるものも提案されている。図3に、この論文で取り上げたキャパシタならびに代表的な二次電池について、エネルギー密度とパワー密度の関係を示す。

2.2 技術選択の理由

上述の技術分類でも示したように、電極表面での電気化学反応により発現する容量 (キャパシタにおいては‘疑似容量’と呼ばれる) を付加することで、キャパシタの欠点であるエネルギー密度を改善するというのがオーソドックス

な開発の方向性である。しかし、化学反応を導入することはキャパシタへ電池の要素を組み入れることを意味し、容量増加と引き替えに電池の短所も共に受け入れることになる。すなわち、多くの場合において、容量と寿命がトレードオフとなり、電池に対するキャパシタの優位性を損なわずに容量増加を達成することは、容易ではない。我々は、ナノカーボン材料製造のシーズの中から、キャパシタの特徴を生かしつつ、電気化学反応を導入できる電極材料の開発を目指し、窒素ドーブカーボンや膨張化炭素繊維等を見いだした。これらのカーボン材料の構造制御をナノレベルで行いつつ、電気化学反応を導入することで大容量化を目指したのが、水系電気化学キャパシタの開発である。一方、カーボンナノチューブキャパシタは、電気化学反応を一切伴わないというキャパシタ本来の動作原理のみで、実デバイスにおいてどこまでの性能が実現できるかという挑戦であった。以下にこの二つの開発事例を紹介する。

3 ハイブリッドナノカーボン電極による水系電気化学キャパシタの開発

3.1 シーズ技術となる膨張化炭素繊維と窒素ドーブカーボンの研究開発

キャパシタ電極に用いられる活性炭等の炭素材料は、熱処理温度がそれほど高くない履歴を持つ低結晶性炭素材料である。高温処理を経た高結晶性炭素材料（黒鉛材料）は、導電性や耐電圧等の面で優れることが期待されるが、キャパシタ電極に必要な、広い表面積を持つものが得られにくい。曾根田らは、黒鉛化処理された炭素繊維を電解後、急速熱分解することによって得られる膨張化炭素繊維（Exfoliated Carbon Fibers; ExCF）が、高い結晶性と比較的大きな表面積を有し、キャパシタ用電極材料として特徴的な挙動を示すことを見いだした^{[3][4]}。硫酸電解液中におけるExCFの容量は、活性炭に比べ希硫酸中では2倍以上であるが、硫酸濃度の上昇に伴い急激に向上し、濃硫酸中では十数倍に達する（図4）。このような巨大な容

量は、ExCFと硫酸分子間の電荷移動相互作用による疑似容量効果であると考えられる。

一方、児玉らは、キャパシタ用の多孔性電極を設計する方法として、鋳型（テンプレート）を用いて細孔構造を制御するテンプレート法の検討を行ってきたが、その過程において、炭素構造中に窒素を含有するテンプレートカーボンが、硫酸電解液中において高い電気容量を示すことを発見した^{[5][6]}。特に、表面積あたりの容量は1.2～2.2 F/m²に達し、これは活性炭の10倍以上にあたる（図5）。このような大きな値は、通常の電気二重層による蓄電とは考えられず、炭素骨格中に存在する窒素原子の作用による疑似容量であると考えられた。その後、この報告により、種々の原料から調製した窒素含有炭素のキャパシタ特性についての研究が数多く行われ、最近では、炭素電極材料への窒素ドーブが有機電解液を用いたキャパシタの耐電圧特性を向上させる^[7]という、新たな発見につながっている。

3.2 水系電気化学キャパシタ開発における研究戦略とその成果

キャパシタは、用いられる電解液の種類によって、水系（作動電圧：～1.2 V）と有機系（同：～2.7 V）に分類することができ、大型の電力貯蔵用途には、作動電圧が高く、容量を大きくとることのできる有機系キャパシタが有利とされている。一方、水系キャパシタは、作動電圧は低いが、内部抵抗や周波数特性等を含めたほとんどの電気的特性、および動作温度範囲等の物理的特性にわたって、有機系キャパシタより優れていることが知られている^[8]。さらに、有機系キャパシタでは、電解液が高度禁水であるため厳密な脱水とシール性を要求され、結果的に電解液が原材料コストの4割を占める。これに対して水系キャパシタでは、広く普及している鉛蓄電池と同じく、希硫酸が電解液として用いられるため、品質管理やコスト、また、多くの有機溶媒に見られる毒性や可燃性等を考慮すると環境負荷の面からも有利である。このように優れた特性をもつ水系キャパシタは、自動車の制御系や、モバイル機器のエネルギー

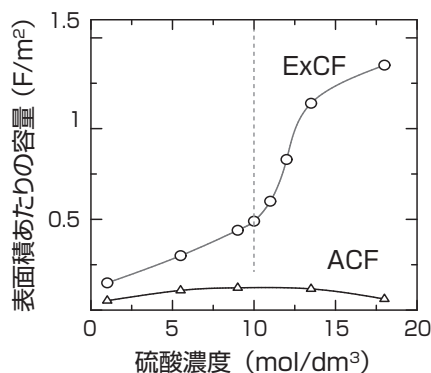
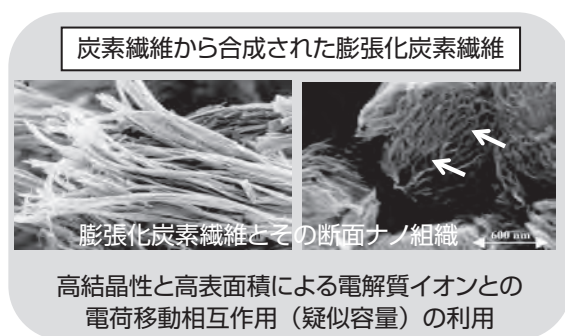


図4 膨張化炭素繊維による硫酸電解液中での高容量発現機構の解明

マネジメント等、小型・高出力の蓄電デバイスとしての利用に大きな期待が寄せられている。

このような状況の中、前出の窒素ドーパカーボンならびに ExCF について、基礎研究の段階ではあるが、疑似容量でありながらサイクル特性を損なわないことが見いだされ^{[3][9]}、炭素製造メーカーならびにキャパシタメーカーと共同で、ナノテク・先端部材実用化研究開発「ハイブリッドナノカーボン電極による水系電気化学スーパーキャパシタの開発」が実施された^[10]。その結果、原料炭素繊維の選択により、ExCF が 40 %硫酸電解液中にて、従来の活性炭では認められない 500 F/g の容量（市販のキャパシタ用活性炭は 100-200 F/g）を示すことが明らかとなった。また、窒素ドーパによる疑似容量については、図 4 に示されるような酸化還元反応を有効に発現させるために、同様の反応を起こす高分子を開発し、前出の ExCF 上に適切な厚みでコーティングすることで、水系キャパシタとしては極めて高いエネルギー密度が達成できることを示した。これは、高分子を疑似容量活物質として用いる際に、その容量と拡散抵抗、充放電の時定数を考慮してナノメートルオーダーの薄膜とする必要があり、その支持構造材として ExCF が適した構造を持つことと、ExCF 自体が今までに得られなかった高容量を持つことに原理的には起因している。さらに、ExCF の高い導電性と高分子の結着性により、従来の粉末活性炭等による電極の構成材料であり、容量に寄与しない成分であった結着材（バインダー）と導電補助剤を必要としないことも電極容量の向上に寄与した。このような特徴を持つハイブリッドナノカーボン材料について、実用キャパシタとしてのデバイス化ならびに性能実証について、今後の進展が期待される。

3.3 新規多孔質炭素の商用化

同プロジェクトの中では、酸化マグネシウム (MgO) をテンプレートとする、窒素含有炭素の高表面積化も追求さ

れた。MgO テンプレート法は、安価な有機酸マグネシウム塩と炭素前駆体である高分子を原料とすることによって、多孔質炭素材料を合成する新規な手法である^[11]。先述した窒素含有炭素では、極めて高い表面積あたりの容量をもつことを見いだしていたが、表面積を増大させることが課題となっていた。この検討の中で、クエン酸マグネシウムを原料として 2 nm 以上のメソ孔に富む多孔質炭素の合成条件の詳細な知見とノウハウの蓄積が行われ、プロジェクト参画企業である東洋炭素株式会社によって、活性炭と同等の大きな表面積とともに、メソ孔（直径 2 ~ 50 nm）に分類される細孔を多量に含有する特徴を持つクノーベル®の実用化に繋がった^{[12][13]}。通常の活性炭は細孔径が 2 nm 以下のマイクロ孔に分布しており、物質移動抵抗がキャパシタ高速充放電の妨げとなっていたが、クノーベル®は物質移動抵抗が小さく、高速充放電用途のキャパシタ電極として極めて優れた特性を持つことが明らかとなった。これまで、メソ孔を持つ炭素材料は、ラポレベルでグラムオーダーの合成が行われていたにすぎなかったが、本手法の開発によって、キログラム以上の供給が実現され、キャパシタ電極以外にも、二次電池や燃料電池電極等、広範な用途への展開が図られている。キャパシタ電極材料開発という第二種基礎研究から生まれた基盤技術のスピノフにより、多方面での用途展開が期待される材料が極めて短時間に商品化された好事例である。

4 単層カーボンナノチューブキャパシタ開発

4.1 カーボンナノチューブキャパシタの開発戦略と当初の目論み

カーボンナノチューブは、グラフェンと呼ばれる炭素の六角網面のシートを円筒に継ぎ目なく閉じてできる中空状の繊維状物質である。すでに述べたように、電極界面に蓄えられる電気量は、原理的に電極材料の表面積に比例

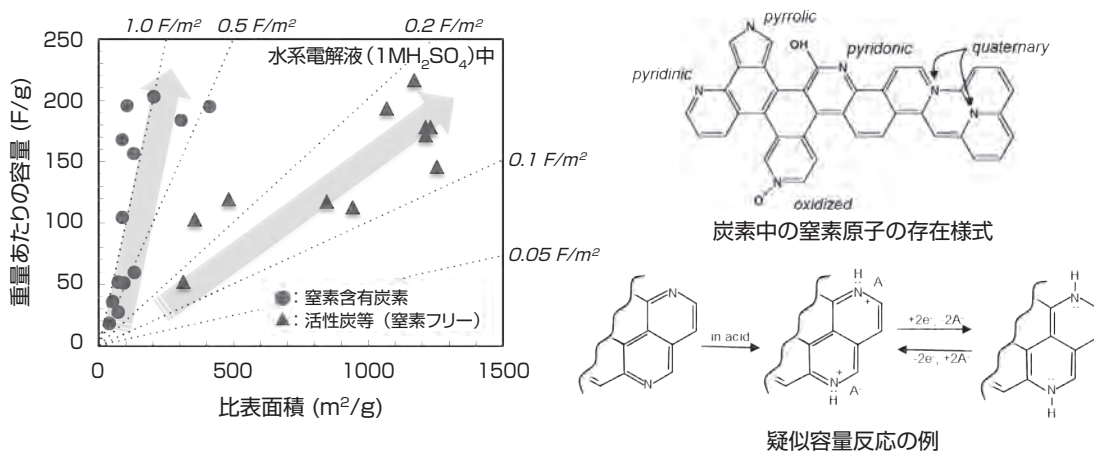


図 5 窒素含有炭素のキャパシタ電極特性と疑似容量発現メカニズム

する。1枚のグラフェンの理論表面積は、 $2,630 \text{ m}^2/\text{g}$ であるので、それを円筒状に巻いた単層カーボンナノチューブ（SWCNT）の理論表面積はチューブの外壁と内壁を合わせるとグラフェンのそれと同じになる。しかし、円筒状のグラフェンが同心円状に積層した多層カーボンナノチューブでは、グラフェン同士が接した面が発生し、その部分は電解液と接することができないことから、表面積は理論値よりも小さくなる。したがって、高いエネルギー密度を実現するには、カーボンナノチューブの表面を電荷の蓄積に最大限使えるようなナノ構造を追求することが重要である。

一方、パワー密度は、セルを構成する部材中の、電子とイオンの移動抵抗によって決まる。活性炭は微小なグラフェンの集合体であり、構造中にナノスケールの細孔を持つため、大きな表面積を有するが、粒子内の電子とイオンの移動経路は複雑であり抵抗も大きい。しかし、SWCNTの一本一本を空間配列させるナノ構造設計によって、電子とイオンの移動経路を精密に制御することができれば、両者の移動抵抗が理想的に小さい電極、すなわち極めて内部抵抗が小さいキャパシタを実現できることが期待される（図6）。

SWCNTは、高い導電性や大きな表面積を持つため、キャパシタ電極材料として期待されていたが、合成段階で触媒金属や非晶質炭素等の不純物が数10%以上も混入し

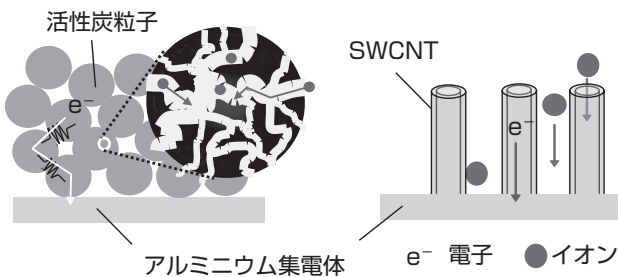


図6 活性炭電極と垂直配向したSWCNT電極のモデル構造と電子、イオンの経路

てしまうという問題があって、高純度のSWCNTを大量に作るのは容易ではなかった。折しも、不純物濃度が重量比で数百ppm以下と極めて高純度なSWCNTの製造を可能とする、スーパーグロース法^[14]と呼ばれる技術が、産総研ナノカーボン応用研究センターにおいて開発された。革新的な材料により高性能キャパシタを創出するとともに、SWCNTの量産化・低コスト化を先導するという相乗効果を狙い、産総研と企業2社が協力し、同センターの飯島澄男研究センター長をプロジェクトリーダーとして、カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクトがスタートした。このプロジェクトでは、商用化レベルのSWCNT量産化技術、ならびに、量産されたSWCNTを電極とする実用キャパシタデバイス製造技術の確立が中心課題となった。

4.2 実用キャパシタデバイス開発において達成された成果

本プロジェクトにおいては、SWCNTに特徴的な電気化学特性（図7）が明らかになった^{[15][17]}。本来、電気二重層に起因する電気容量は電圧によらず一定であるが、SWCNT電極では、充電される電気容量が電圧におよそ比例して向上する。SWCNTは、グラフェンの巻き方（キラリティ）によって、電子構造が金属的になったり半導体的になったりすることが知られているが、SWCNT電極で観測される電圧依存性は、この独特な電子構造に起因したものであり、導電性高分子の電気化学ドーピングと類似の現象として説明される。SWCNTへの電子やホール注入によって、電解液中で電位分極が生ずるために電極シートの電気伝導性が10倍以上に向上することが実験的に確認されている^[16]。さらに、通常の活性炭電極においては、単セル電圧の上限が2.5～2.7Vであるのに対し、高純度SWCNTのみで構成される電極は、3Vを超える高い電圧で動作しても十分な耐久性を維持することが明らかになった。これは、電解液の分解を促進する、グラフェン表面の官能基や金属元素等の混入物質が、極めて少ないことによ

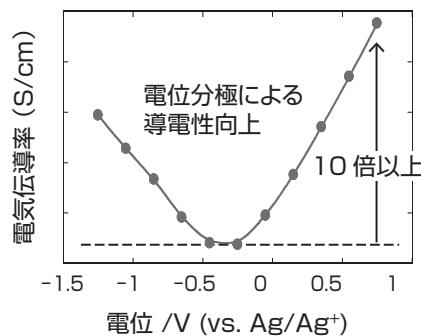
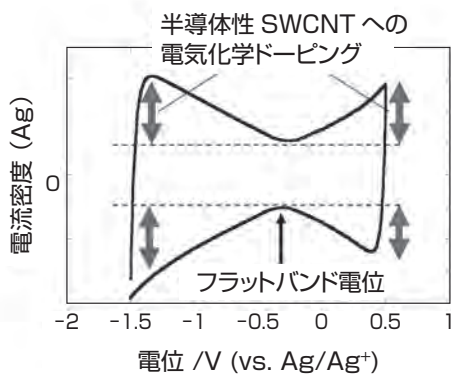


図7 SWCNTの特徴的な電気化学特性

ると推察される。キャパシタのエネルギー密度は、充電電圧の2乗に比例することから、この特性はエネルギー密度向上のために極めて重要なものであった。

SWCNTは、電解液の分解を引き起こしやすいグラフェンの末端が極めて少ないという構造から、キャパシタ電極として用いた場合、高電圧作動の可能性を持っている。また、現在市販されている活性炭電極は、粉碎した活性炭粒子をバインダーと呼ばれる高分子、ならびに粒子間の接触抵抗を低減するための導電助剤となるカーボンブラックとともに混練することでシート状にしたものであるが、これらの添加物は高電圧条件で電解液等の分解を誘発し、エネルギー密度向上の妨げとなる。これに対して、SWCNTは繊維状であることから、バインダーを全く必要とせず、紙すきの要領でシート化ができる。また、スーパーグロス法によるSWCNTは単純にプレスするだけでも柔軟な電極シートを与える。すなわち、SWCNT自身が高純度であることに加えて、成形体としても電極活物質であるSWCNTが100%の電極を得ることができる。しかも、この研究プロジェクトではSWCNT電極シートとアルミニウム集電体との接着剤フリー接合にも成功した(図8)。

SWCNTが本来有している高い耐電圧特性に加えて、高電圧条件で電解液等の分解を誘発する不純物の混入や混合を避けることによって、SWCNTキャパシタはエネルギー密度、パワー密度において現状の活性炭電極の2-3倍の性能を示し、しかも耐久性においても15年以上というプロジェクト目標を達成した^[18]。

図6に示すような垂直配向したSWCNT電極は、イオンの拡散抵抗を低減し、パワー密度を最大化するためには理想的な構造であり、そのような電極構造を実現できるような成形技術シーズも見いだされていた^[19]。しかし、本プロジェクトによって紙すき法や単純なプレスといった手法を選択しても十分なパワー密度が実現できることがわかり、

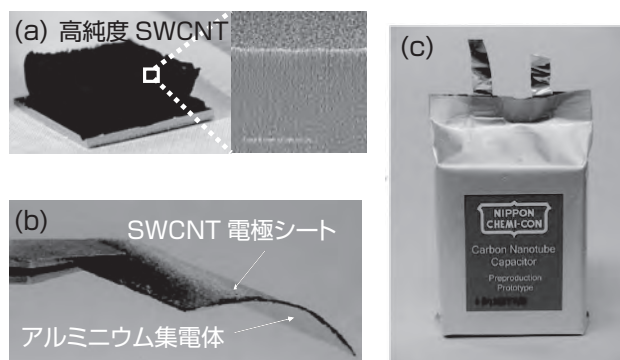


図8 カーボンナノチューブキャパシタ
a) 基板上に垂直に成長したSWCNT、b) SWCNT電極シート、c) 1000F級SWCNTキャパシタ

理想構造よりは実用性の観点で生産性の高い電極製造方法を選択したことが、デバイス製造の成功につながったと言える。

SWCNTでは、チューブ同士が凝集して束状の構造(バンドル構造)を形成するのが一般的であるが、キャパシタ電極として使用した場合に、バンドル構造内部にあるSWCNTの外表面には電解質イオンが接近できないため、チューブ同士が接する表面は電荷の貯蔵に関与できない。我々は、この点にも注目し、電気化学的にバンドルを解放する方法について検討し、バンドル構造を形成する市販のSWCNTにおいて実証している^[20]。スーパーグロス法で製造されたSWCNTは、表面積の大部分が物質の吸着に関与できる特異なものであったが、上述の紙すき法による電極成形技術と同様、多様なSWCNT商品に備えて、汎用性の高い製造技術オプションを用意することが重要であり、このバンドル解放技術もその一つと考えている。

カーボンナノチューブキャパシタ技術開発プロジェクトは平成23年度で終了し、実用レベルである1000F級のSWCNTキャパシタの製造に成功している(図8)。さらに、SWCNTという素材の優れた導電性、電極成形性が見いだされ、SWCNTを電極活物質として使うのではなく、導電材料かつ成形材料として活用する方向性も示された。その結果として、ナノ結晶チタン酸リチウムとのコンポジット化によりエネルギー密度を30 Wh/kg以上に向上させた電気化学キャパシタの開発にも成功している^[18]。現時点では高価であるSWCNTの使用量を15%程度までに低減できるという利点もあり、より実用化時期の早いデバイスとして期待されている。

4.3 SWCNTの電気化学特性の理解とさらなる高容量化の可能性

我々は、SWCNTの金属半導体分離を行ってキャパシタ特性を評価した結果に基づいて、SWCNTの半導体性を活かし、さらに、直径制御ならびにキラリティ制御を行うことにより、カーボンナノチューブキャパシタのエネルギー密度を向上させることが可能であることを提案している^[21]。電極への電荷の蓄積が充電電位に比例する電気二重層キャパシタ的な蓄電挙動と、電荷の貯蔵が一定の電位で起こる二次電池的な蓄電挙動を比べた場合、最終的に同じ電荷量を収容できる電極であれば、後者は前者の2倍のエネルギー密度をもつことになる。すなわち、半導体性SWCNTの電子物性制御を行い、充放電電位を最適に制御することができれば、デバイスとしてのエネルギー密度が2倍に向上することになる。しかし、SWCNTの直径制御とキラリティ制御は現行の量産技術のコスト面でのハードル

をさらに困難にする技術であることから、まずは金属/半導体混合物として量産化される SWCNT が商品化され、その後のステップとして、SWCNT 製造技術がさらに進化することを期待したい。

5 まとめと将来展望

常に進化する材料技術によって、製品性能向上の新たなシーズが見いだされる一方で、実用化という社会ニーズの中では現状で足の速い技術を取捨選択しながら、デバイスやシステムの構築を行っており、第1種基礎研究から商用化研究までが絶えず相互にリンクしながら進行しているのが近年の蓄電関連技術開発と言えよう。蓄電デバイスについては、多様な用途展開があることから、現状の性能レベルから見てはるかに高いところにある目標を目指しながらも、もう少し低い性能でも対応可能なシステム、あるいはコスト面で折り合える用途等をステップに開発を進めることも一つの方策である。カーボンナノチューブ等の革新的な材料の出現とエネルギーデバイスという実用出口がリンクすることによって、第1種基礎研究を行う広範な領域の研究者が新たな開発意欲をもって電極材料関連研究に取り組むということも起こった。また、キャパシタという出口を指向した第2種基礎研究の中から、より広範な応用が期待され、汎用性のある材料が見いだされてきている。MgO テンプレート法による多孔質炭素の商品化に見られるように、材料技術のスピノフによって、キャパシタ以外の応用商品が生み出されることも期待できる。

カーボンナノチューブキャパシタについては、SWCNT の優れた実力が実用デバイスレベルで実証されるとともに、その製造に必要なさまざまな技術オプションが蓄積された状況と言える。しかし、数千円/kg でも高いと言われるのが実用電極材料の世界であるので、SWCNT がまだ高価な材料である点は否めず、他用途も含めたマーケットの広がりと共に要する時間とがまだ必要である。同じ繊維状カーボンであり、日本人が工業的製法を発明した炭素繊維は、世界シェアのおよそ7割を日本企業が占める産業へと発展した^[22]。現在では、航空機の構造材料や建築物の補強材料等にも使われ、汎用品であれば数千円/kg のレベルまで価格は下がっているが、その商品化は10万円/kgからのスタートだったと聞く。真に優れた材料は経済的な死の谷をも乗り越えることを証明した炭素繊維の歴史をよりどころに、優れた特徴をもつナノカーボン材料が、キャパシタ電極材料をはじめとする広範な分野で商品化されることを期待したい。

謝辞

水系電気化学キャパシタの開発は、NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）ナノテク・先端部材実用化研究開発「ハイブリッドナノカーボン電極による水系電気化学スーパーキャパシタの開発」（2008年度～2011年度）において実施されたもので、共同研究を行った大分大学、東洋炭素（株）、NECトーキン（株）の皆さまに深く感謝いたします。カーボンナノチューブキャパシタの開発は、NEDO エネルギーイノベーションプログラム「カーボンナノチューブキャパシタ開発」（2006年度～2010年度）において実施されたものであり、共同研究を行った連携企業、大学ならびに産総研の皆さま、特に日本ケミコン（株）の関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 松田好晴, 逢坂哲彌, 佐藤裕一(編): キャパシタ便覧, 丸善(2009).
- [2] 玉光賢次, 末松俊造, 石本修一: 大容量キャパシタの開発, 炭素素原料科学と材料設計X, CPC研究会, 64-73 (2008).
- [3] Y. Soneda, M. Toyoda, K. Hashiya, J. Yamashita, M. Kodama, H. Hatori and M. Inagaki: Huge electrochemical capacitance of exfoliated carbon fibers, *Carbon*, 41, 2680-2682 (2003).
- [4] Y. Soneda, J. Yamashita, M. Kodama, H. Hatori, M. Toyoda and M. Inagaki: Pseudo-capacitance on exfoliated carbon fiber in sulfuric acid electrolyte, *Appl. Phys. A*, 82 (4), 575-578 (2006).
- [5] M. Kodama, J. Yamashita, Y. Soneda, H. Hatori, S. Nishimura and K. Kamegawa: Structural characterization and electric double layer capacitance of template carbons, *Mat. Sci. Engineer. B*, 108, 156-161 (2004).
- [6] D. Hulicova, J. Yamashita, Y. Soneda, H. Hatori and M. Kodama: Supercapacitors prepared from melamine-based carbon, *Chem. Mater.*, 17 (5), 1241-1247 (2005).
- [7] S. Shiraishi: Heat-treatment and nitrogen-doping of activated carbons for high voltage operation of electric double layer capacitor, *Key Eng. Mat.*, 497, 80-86 (2012).
- [8] 西野敦, 直井勝彦(監修): 大容量キャパシタ技術と材料, 第9章 電解質材料, シーエムシー (1998).
- [9] D. Hulicova-Jurcakova, M. Kodama, S. Shiraishi, H. Hatori, Z.H. Zhu and G.Q. Lu: Nitrogen-Enriched Nonporous Carbon Electrodes with Extraordinary Supercapacitance, *Adv. Funct. Mat.*, 19 (11), 1800-1809 (2009).
- [10] 平成20年度～平成23年度成果報告書 ナノテク・先端部材実用化研究開発/ハイブリッドナノカーボン電極による水系電気化学スーパーキャパシタの開発, NEDO成果報告書データベース番号: 20120000000874
- [11] T. Morishita, Y. Soneda, T. Tsumura and M. Inagaki: Preparation of porous carbons from thermoplastic precursors and their performance for electric double layer capacitors, *Carbon*, 44 (12), 2360-2367 (2006).
- [12] 森下隆広:カーボンコーティングプロセスを用いたポーラスカーボンの作成と性能, 炭素材料の研究開発動向2012, CPC研究会, 90-99 (2012).
- [13] http://www.toyotanso.co.jp/Products/Newly_developed_Porous_carbon.html
- [14] K. Hata, D. Futaba, K. Mizuno, T. Namai, M. Yumura and S. Iijima: Water-assisted highly efficient synthesis of impurity-

- free single-walled carbon nanotubes, *Science*, 306, 1362-1364 (2004).
- [15] 末松俊造, 町田健治, 玉光賢次, 羽鳥浩章: スーパーグロースカーボンナノチューブ(SG-SWCNT)キャパシタの開発, *Electrochemistry*, 75 (4), 374-379 (2007).
- [16] O. Kimizuka, O. Tanaike, J. Yamashita, T. Hiraoka, D. N. Futaba, K. Hata, K. Machida, S. Suematsu, K. Tamamitsu, S. Saeki, Y. Yamada and H. Hatori: Electrochemical doping of pure single-walled carbon nanotubes used as supercapacitor electrodes, *Carbon*, 46 (14), 1999-2001 (2008).
- [17] Y. Yamada, O. Kimizuka, K. Machida, S. Suematsu, K. Tamamitsu, S. Saeki, Y. Yamada, N. Yoshizawa, O. Tanaike, J. Yamashita, D. N. Futaba, K. Hata and H. Hatori: Hole opening of carbon nanotubes and their capacitor performance, *Energy Fuels*, 24, 3373-3377 (2010).
- [18] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: 「カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト」事後評価資料 (2012)
http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_bunkakai_23h_jigo_10_1_index.html
- [19] D. N. Futaba, K. Hata, T. Yamada, T. Hiraoka, Y. Hayamizu, Y. Kakudate, O. Tanaike, H. Hatori, M. Yumura and S. Iijima: Shape-Engineerable and Highly Densely Packed Single-Walled Carbon Nanotubes and their Application as Super-Capacitor Electrodes, *Nat. Mater.*, 5 (12), 987-994 (2006).
- [20] O. Tanaike, O. Kimizuka, N. Yoshizawa, K. Yamada, X. Wang, H. Hatori and M. Toyoda: Debundling of SWCNTs through a simple intercalation technique, *Electrochem. Commun.*, 11 (7), 1441-1444 (2009).
- [21] Y. Yamada, T. Tanaka, K. Machida, S. Suematsu, K. Tamamitsu, H. Kataura and H. Hatori: Electrochemical behavior of metallic and semiconducting single-wall carbon nanotubes for electric double-layer capacitor, *Carbon*, 50 (3), 1422-1424 (2012).
- [22] 中村治, 大花継頼, 田沢真人, 横田慎二, 篠田渉, 中村修, 伊藤順司: PAN系炭素繊維のイノベーションモデル, *Synthesiology*, 2, 159-169 (2009).

執筆者略歴

羽鳥浩章 (はとり ひろあき)

1989年筑波大学大学院理工学研究科修了、同年通商産業省工業技術院公害資源研究所入所。産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門エネルギー貯蔵材料グループ長を経て、2012年より同部門総括研究主幹。この論文では、単層カーボンナノチューブキャパシタのデバイス化技術開発について構成学的な視点で考察するとともに、全体とりまとめを行った。



棚池 修 (たないけ おさむ)

1998年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)。博士研究員、NEDO産業技術養成技術者を経て、2005年産業技術総合研究所入所。現在、エネルギー技術研究部門エネルギー貯蔵材料研究グループ主任研究員。この研究開発では、主に、カーボンナノチューブの電気化学特性解明と電極材料としての高度化研究を担当した。



曾根田 靖 (そねだ やすし)

1993年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所入所。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門エネルギー貯蔵材料グループ主任研究員。この研究開発では、主に、膨張化炭素繊維、MgO テンプレートカーボンを用いた水系電気化学キャパシタの開発を担当した。



児玉 昌也 (こだま まさや)

1990年東京理科大学大学院理学研究科博士課程修了、同年通商産業省工業技術院九州工業技術試験所入所。産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門エネルギー貯蔵材料グループ長を経て、2013年よりイノベーション推進企画部総括企画主幹。この研究開発では、主に、窒素ドープカーボンを用いた水系電気化学キャパシタの開発を担当した。



査読者との議論

議論1 カーボンナノチューブキャパシタ

質問・コメント1 (阿部 修治: 産業技術総合研究所評価部)

カーボンナノチューブのような精緻なナノ構造を作ることは、活性炭等と比べればはるかに高コストであることは最初から明らかであり、量産化技術開発が進展してきた現在でもその状況は変わっていないと思われれます。カーボンナノチューブ開発のプロジェクトの意義は、カーボンナノチューブの特性から引き出されるポテンシャルを実際に示して、量産化を先導、誘導することかと思いますが、このような研究戦略はどのように総括できるでしょうか。

回答1 (羽鳥 浩章)

材料コストに関しては、ご指摘のような懸念が開発当初からありましたので、カーボンナノチューブの量産化による価格低下とキャパシタ性能向上による材料コスト低減で、どこまで現状の材料に対しての競争力を発揮できるかを想定し、また実用的な仕様に落とし込むため常に複数の選択肢を持ちながら研究開発を進めました。4.2の最後の段落で説明していますが、表1のレドックスキャパシタに相当する設計により、カーボンナノチューブの使用量が少なく済むデバイスの開発も同じ研究開発プロジェクトにおいて実施し、エネルギー密度における高い性能が実証されています。

カーボンナノチューブの低コスト化という視点では、生産技術の改良のみならず、その需要が大幅に確保されなければ低価格化は実現しないことから、高性能キャパシタの性能実証により、単層カーボンナノチューブの量産化・商用化を誘導することがこの研究開発の一つの目的であることを4.1の最後で述べています。材料コストとその商用化までの道筋については、「5.まとめと将来展望」の最後で炭素繊維を例として挙げております。炭素繊維は鉄に替わる構造材料として現在注目されていますが、発明特許からスポーツ用品等のニッチ商品向けの販売まで20年、構造材料のように大量の需要が見込まれる分野で使用されるまでに更に20年かかっています。汎用品レベルの価格を要求される蓄電部材としてのSWCNTを考えた時、炭素繊維の商品化の歴史は大いに参考になるとともに、シンセシオロジー誌でもその研究開発戦略が分析されておりますので、引用文献として追加しました。

議論2 研究開発モデル（図1）

質問・コメント2（阿部 修治）

図1の「研究開発モデル」について、右上にある「新材料シーズ（第1種基礎研究）」は単層カーボンナノチューブの研究を指しているようですが、そこから下に向かう矢印の「新機能の発見」とは具体的に何を指しているのでしょうか。

回答2（羽鳥 浩章）

キャパシタ電極材料の視点から見た場合、スーパーグロース法によるカーボンナノチューブの大量合成法は第1種基礎研究と位置づけられます。また、「新機能の発見」は、1) 製造時の特殊な集合体構造により高表面積であったこと、2) 電位依存性（結果として限られた電位窓の中でより多くの電気を蓄えられる）や3) 高電圧での充放電が可能であることなど、初期の実験で見いだされた電気化学特性が該当します。この研究開発を開始した時点で、1) はキャパシタ電極としてSWCNTに期待されることとして知財等書かれてはいたが実験的実証はなされていなかったものであり、2、3) については論文、知財等において科学的知見が全く示されていなかったものです。

議論3 水系キャパシタ

質問・コメント3（長谷川 裕夫：産業技術総合研究所）

従来型の有機系キャパシタと比較して、開発された水系キャパシタはどのような特徴を持ち、応用分野としてどのようなものが考えられるのでしょうか。

回答3（曾根田 靖）

電気化学キャパシタは、従来の二次電池と比べて高出力、低容量の蓄電デバイスですが、そのキャパシタにおいても、高出力型、高容量型、両者の中間型等、実際の用途に合わせてデバイスの設計が行われています。高出力型の性能を極限まで求める際には、電解液の導電性が高い水系キャパシタの方が有機系より本質的に適しています。また、自動車等で重視される温度特性についても、水系の方が一般的な有機系電解液よりも高温、低温とも優れています。環境負荷の点では、水系電解液として用いられる希硫酸は、鉛蓄電池の普及に見られるように広く受け入れられていますが、有機系電解液のいくつかはそれ自体の毒性や、燃焼時の危険性が指摘され、国内外でもその利用に温度差が見られます。

モバイル機器等で用いられる小型の基板実装型キャパシタでは、個々のデバイスの回収が見込めないために環境負荷が小さいことや廉価であることなどが強く求められ、これらの点においても、水系キャパシタに利点があると言えます。

都市鉱山の戦略的な開発を支える物理選別技術

— 未利用・難処理資源の開発と我が国の資源ビジョン —

大木 達也

我が国ではものづくりを支える天然金属資源のほとんどを海外からの輸入に依存しており、近年、価格の急騰や輸出規制等によりその安定供給が危ぶまれる事態が続いた。都市鉱山はこのようなリスクに対応し得る有望な自国資源であるが、レアメタル等の金属集積度は必ずしも高くなく、省コストに1次濃縮できる物理選別技術の適用が欠かせない。廃製品からレアメタルを元素ごとに取り出す行為はまだ誰も経験したことがなく、新しい思想の選別技術が必要となる。本報では、物理選別の技術革新によるレアメタルリサイクルの実現から、物理選別を核に金属資源の国内循環を図る「戦略的都市鉱山」を目指した将来構想について紹介する。

キーワード: 都市鉱山、リサイクル、レアメタル、物理選別、タンタル、戦略的都市鉱山

Physical separation technology to support the strategic development of urban mining

– Development of unused/hard-to-use resources and a future vision of resources for Japan –

Tatsuya OKI

Most of the natural metal resources supporting manufacturing in Japan are imported from foreign countries. In recent years, the need for a stable supply is an ongoing serious issue in the face of sudden price rises or export regulations. Urban mining is a promising way of using domestic resources to minimize this risk. However, because the degree of integration of metals, including rare metals, in products is not necessarily high, the use of a physical separation technology that can concentrate such metals and save costs is indispensable. Moreover, because we lack experience in recovering some types of individual rare metal elements from waste products, innovative separation technologies are needed. In this report, I introduce ways of achieving rare metal recycling through innovations in physical separation. I also present a plan for “strategic urban mining” that has physical separation technology at its core and is aimed at domestic circulation of metal resources.

Keywords: Urban mine, recycling, rare-metal, physical separation, tantalum, strategic urban mining

1 はじめに

我が国では、ものづくりを支える金属資源のほとんどを海外からの輸入に依存している。近年、レアメタル価格の急騰や輸出規制等によりその安定供給が危ぶまれる事態が続いた。金属資源は元素（鉱種）ごとに特徴的な機能を有するため、エネルギー資源とは異なって他の金属資源で置き換えることが難しい。したがって、使用量はごく僅かであっても、特定の金属の供給が滞ると、それを使用する製品が国内で生産できなくなる恐れがある。長期的に見れば、技術立国日本の根幹を揺るがす事態に発展することも懸念される。また、製品自体に寿命が来ても、金属は製造時とおよそ同様の状態にあり、理論的には完全に元の原料に戻すことができる。すなわち、循環使用が可能である。我が国には多くの廃製品が

残されており、有望な資源として期待できることから、1980年代に南条道夫氏（東北大）が命名した「都市鉱山」という言葉が再び使用されることが多くなった。しかし、廃製品は国土に散在しており、天然鉱山に比べて必ずしも金属集積度は高くない。このような難処理資源を開発する上では、金属を省コストに1次濃縮できる物理選別技術の適用が欠かせない。特に、廃製品からレアメタルを元素ごとに取り出す行為は、まだ誰も経験したことがなく、新しい思想の物理選別技術が必要となる。本報では、物理選別の技術革新によるレアメタルリサイクルの実現から、これまで脇役であった物理選別を核にして金属資源の国内循環を促進する、「戦略的都市鉱山」の構築を目指した取り組みを紹介する。

産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西
Research Institute for Environmental Management Technology, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan E-mail: t-oki@aist.go.jp

Original manuscript received January 20, 2013, Revisions received July 9, 2013, Accepted July 9, 2013

2 難処理資源開発を実現する物理選別技術

2.1 都市鉱山開発における物理選別技術の重要性

我が国には現在稼働している金属鉱山はほとんどないが、輸入した金属原料が製品や廃製品の形で国土のどこかに存在する。国土に眠る廃製品は「都市鉱山 (urban mine)」と呼ばれることが多くなった。しかし、鉱山と称するには、一定の経済性をもって資源を取り出すことができなければならない。したがって、国土のどこかにあるという段階では、鉱山とは呼べない。天然鉱山は地球がとてつもなく長い時間をかけて資源を濃縮したものであり、金属集積度の高い大量の廃製品が自然に集まるわけではない。すなわち、「都市鉱山 (urban mine)」がどこかに存在するのではなく、人類が意図的に「都市鉱山開発 (urban mining)」して初めてその存在が具現化する。都市鉱山開発とは、人工的に集積するためのエネルギーを最小限化する技術といえる。

当初、都市鉱山の開発では、廃製品の収集等社会システムの整備による「量の確保」が優先された。我が国ではすでに、1990年代の法整備に伴い大型廃家電等のリサイクルインフラが整っていたため、廃製品を収集すれば容易にレアメタルが回収できるとの認識が強かった。しかし、現実には、既存のリサイクル施設で廃製品からレアメタルを取り出すことはできなかった。1990年当時は廃棄物処分場の逼迫が社会問題となっており、量の多い、鉄、アルミ、プラスチック等をリサイクルして最終処分量を減容する、環境制約に基づいた「量のリサイクル」が主体であった。一方、2008年から指定地域で実施された小型家電の回収事業では、対象はレアメタルに変わった。各種レアメタルの濃度は数百～数千 ppm 程度であり、いわば資源制約に基づく「質のリサイクル」が要求される。旧来のリサイクルインフラで小型家電からレアメタルを回収することは、鶴嘴 (ツルハシ) で外科手術を試みるようなものであった。量のリサイクルから質のリサイクルへ、技術転換の必要性が社会に認識されたのはやっと 2010 年頃のことである。

廃製品中のレアメタルは、製品内に限定的に使用されており、鉄やアルミ等の構造材に比べて含有率が低いため、そのままでは化学試薬を用いる湿式製錬での経済的回収は難しい。また、高温反応を利用する乾式製錬では、低濃度の銅や貴金属を効率的に回収できるが、多くのレアメタルは熱溶融してガラス状のスラグ内に分散してしまうため、技術的に回収は困難である。廃製品からレアメタルを回収するには、製錬前に物理選別によって、銅や貴金属と分離しておくことが不可欠となる。なお、「レアメタル」とは世界共通の用語ではない。我が国で

は 1980 年代にレアアース 17 元素を含む 47 元素がレアメタルと定められている。あるいはレアアースを 1 種として 31 鉱種と呼んだりする。「レアメタル」という用語を使わない国も多く、使っても定義が異なる。近年は、英語圏でも日本語の「Rare metal」を使用する例が見られる。しかし、貴金属のうち白金とパラジウムだけがレアメタルで、金や銀はレアメタルでないなど、一つのグループとして扱うことの合理性を疑問視する声もある。このことから、著者は個人的に、我が国にとって戦略的な金属資源を総称して「戦略メタル」という言葉を併用している。

2.2 物理選別の技術的課題

レアメタルを銅・貴金属と事前に物理選別するには廃製品個別の課題も多いが、ここでは、基礎的な共通課題について述べる。廃製品は多くの成分が組み合わさったいわば複合粒子であり、一般的には「粉碎」によってバラバラにすることが先決となる。多くの工業プロセスでの粉碎の効用は、流動性、加工性や反応性の向上等であり、粉碎によって粉体の「均一化」を図ることが目的である。一方、物理選別での粉碎の目的は、唯一「単体分離」の促進にあるといっても過言ではない。単体分離とは、1 粒子が 1 成分で構成された状態にすること、あるいは、なった状態を呼ぶ。この「成分」とは回収対象物であり、状況に応じて回収したい元素や合金、部品等を指す。つまり、粉碎は単体分離という粉体の「不均一化」操作をする選別前処理と位置づけられる。物理選別は固体粒子を選り分ける操作であるから、事前に粒子を単体分離しておかなければ、その後、いかなる技術を駆使しても高度な選別はできない。図 1 は粉碎による単体分離の進行と、粉体の不均一化の関係を著者の視点でまとめたものである。多成分からなる複合粒子 (出発粒子) は粉碎が進み細分化されると、次第に単成分からなる単体分離粒子の集合体となり、粒子相互の組成にムラが生じて不均一状態となる。これが、粗粒 (粒子が大きい) 段階で達成されるのが理想である (粉碎の結果としてミックスナッツのような状態となるイメージ)。しかし、ここからさらに粉碎したり、微粉碎によってようやく単体分離が達成される場合には、集合体としての均一化 (良く混ざった状態) が進行してしまい、今度は、選別によって特定粒子を回収することが困難となる (七味唐辛子のイメージ)。このように、粉碎による単体分離の促進とは、集合体としての不均一性を犠牲にしながら、個別粒子の不均一化を達成させる行為といえる。したがって、できる限り粗粒段階で単体分離を達成させることが肝要であり、決して過剰に微粉碎してはいけない。また、粉

砕しても細分化されるだけで、単体分離が全く進行しないもの（インスタントコーヒーのイメージ）は、物理選別の対象とはなり得ない。

図1の粉碎工程において、複合粒子が一様に粉碎される「ランダム粉碎」より、選択的に粉碎される方が、良好な単体分離を達成させることが可能となる。粗粒段階で単体分離を達成させる粉碎方法は「選択粉碎」と呼ばれ、最も重要な物理選別の前処理操作の一つである。しかし、多種多様な対象物の物性や構造に対応する必要があるため、選択粉碎は技術的に難易度が高く、万能な選択粉碎機なる装置は存在しない。現状では、特定の対象物に対して偶然に各種粉碎機を選択粉碎性が見いだされるのを待つしかなく、理論的・組織的なアプローチによる技術の体系化が望まれている。

都合よく単体分離されたとしても、粉碎した段階ではいまだ種々の粒子が混在した状態であり、選別操作が必要である。物理選別では、各種の粒子物性の差が利用される。気相（通常は空気）で行う乾式選別は、乾燥や水処理が不要なため省コスト、低環境負荷に選別することができる。一方、液相（通常は水）で行う湿式選別では高い分離精度が期待できる場合もあるが、水循環動力や乾燥等が必要で、エネルギーやコストの面で不利となる。また、湿式選別でも、多量の界面活性剤等を使用する粒子表面性質を利用した方法では、粒子バルク性質を利用した方法に比べて廃水処理の負荷が大きくなる。以上の理由からリサイクルでは乾式選別が好まれるが、各選別法には適用粒径の制限があり、乾式選別だけで完結

するとは限らない。適用粒径下限の線引きは難しいが、目安として、乾式選別で1 mm、バルク性質利用の湿式選別で50 μm程度であり、それ以下では表面性質利用の湿式選別に頼る必要がある。つまり、物理選別の省エネ・省コストの鍵を握るのは、前処理の粉碎工程でいかに粗粒段階で単体分離させるかに関わってくる。

図2は、1 粉碎工程-1 選別工程からなる最も単純な物理選別プロセスのモデルである。出発物質としてはさまざまな廃製品が単一種で、あるいは混合されて、あるいはプリント基板等が取り出されて投入される。粉碎機の種類も多種多様であり、そのコンディションや運転条件によっても粉碎のされ方は全く異なる。ここで最適な粉碎条件を選択し、選択粉碎により粗粒段階で単体分離できれば、後段の選別工程を極めて有利に実施できる。しかし、これらの膨大な組み合わせから、選択粉碎が達成できる条件はごく僅かであり、いまだほとんどの廃製品について選択粉碎条件は見いだされていない。レアメタルのリサイクルでは、このような状況下で得られた粉碎物に対して、単体分離不十分と認識されずに、後段の選別方法を模索している例も少なくない。物理選別プロセスの効果は、粉碎性能と選別性能の相乗作用で決まるので、後段だけに優秀な選別機を備えていても意味がなく、選択粉碎による単体分離の効率的な達成は、成功への最初の鍵となる。

一方、理想的な単体分離が達成できても、いまだ粒子は混合状態にあり、選別のためのお膳立てが整ったにすぎない。上述したように各選別法には適用粒度がある

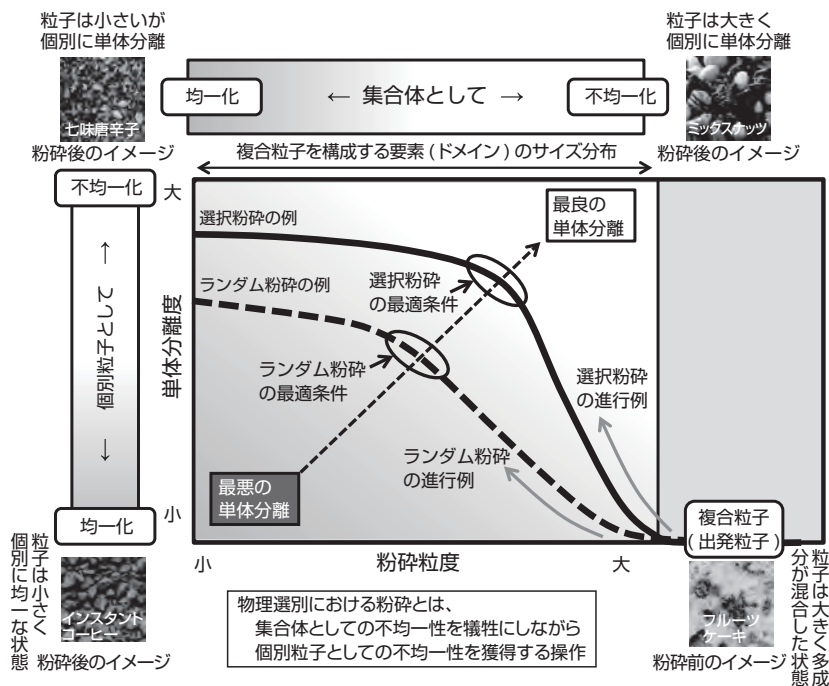


図1 粉碎による単体分離の進行と粉体の不均一化の関係

が、乾式選別が適用できたとしても、利用する粒子物性（サイズ、形状、比重、磁性、導電性、色、X線透過率等）に応じてさまざまなタイプの装置があり、一つの物性に対してもさらに多くの選別機が存在する。また、粉碎機と同様に、コンディションや運転条件によって選別のされ方は全く異なる。図2に示した1粉碎工程-1選別工程の単純なモデルでもパラメータは7種あり、それぞれ少なくとも数十の選択肢があるので、取り得るパターンは数千億通りにも及ぶ。実際には、2～3の粉碎工程と3～10程度の選別工程が実施されるので、そのパターンは天文学的な数値となる。都市鉱山のような難処理資源で理想的な物理選別を実現する条件は、このうちのごく僅かのパターンに限定される。また、同様の組成の鉱石が数十年にわたって採掘される天然鉱山と異なり、都市鉱山では製品サイクルが早く、廃製品ごとに含まれているレアメタルの種類、形態および量も異なるため、特定の対象物に対する選別パターンの有効期限が数年と短い。膨大な選択肢から僅かな時間で最適条件を導き出すことが困難なため、現状では極めて不満足な選別条件下で処理することを余儀なくされている。

3 物理選別の革新によるリサイクルの実現

3.1 手解体・手選別代替技術～イーゼーセンシング～

単体分離を実現する選択粉碎条件を見いだすことは難しいが、回収物のサイズが比較的大きければ、個別に「解体」することで単体分離が図れる。実際、大型家電からモーターを取り出す工程等では、我が国でも手解体が行われ、そのまま目的部品を手選別で回収することも少な

くない。廃製品は複雑な構造をもち、日々変化することから、手解体・手選別は単体分離-回収を実現する最も確実な方法である。しかし、経済性、生産性、国際競争力といった点から、我が国でこの方法を適用するには限界があるため、その機械化を促す研究が進んでいる。完全自動の解体技術が実現した例はないが、手選別を自動化するソーティング技術は種々存在する。これらは製造工程で使用する高度なセンシング技術を転用した高価な装置が多く、均質な粒子群から不適合物を取り出すことは得意であるが、ばらつきが大きい廃製品解体物を対象とした場合には、十分な性能が得られないことも少なくない。

そこで著者は、対象物を限定した低価格の手解体・手選別代替装置を「イーゼーセンシング」と名付けて開発している。これは、高価なセンサーの代わりに、人の五感程度の安価なセンサーを複数組み合わせ、また、製品情報に基づいた制御により高精度な選別を達成させる技術である。例えば、著者はハードディスクドライブ（HDD）から、レアアースを含むネオジウム磁石を高純度で回収する2段階粉碎選別法を提案しているが、その中で開発した「HDD カuttingセパレータ（HDD-CS）」がその一つである。HDDを普通に粉碎すると、強力なネオジウム磁石が粉碎機内に強固に磁着し、スクリーンの閉塞等のトラブルを招く。運良く粉碎機外に排出されても、近傍の破砕鋼板と直ちに磁気凝集体を形成するため単体分離が達成できない。このようなことから、物理選別の一環として脱磁工程を取り入れるのが一般である。ネオジウム磁石はCurie温度が低いため、350℃前後

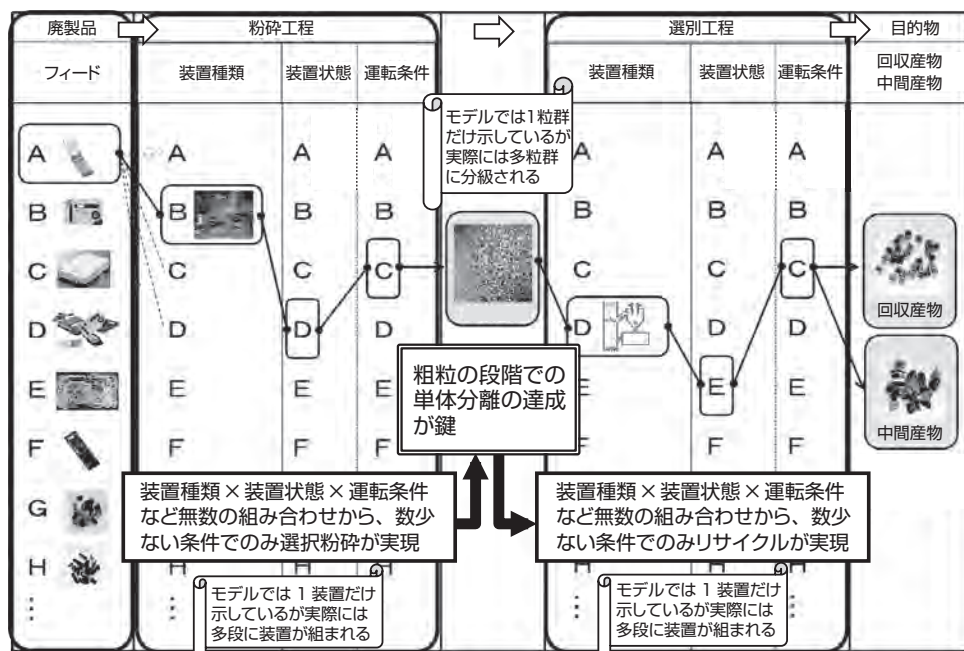


図2 物理選別（1粉碎工程-1選別工程）モデルに基づくプロセス最適化のポイント

の加熱で磁力を失わせることができる。しかし、HDD重量の2%程しかないネオジウム磁石を脱磁するのに、その50倍もの金属を加熱するのは効率が悪いので、脱磁法の模索が続いている。著者は、HDDが他の小型家電と違い、メーカーや年式、機種によらず、形や構造がおおよそ同じであることに着目した。近畿工業（株）と共同開発したHDD-CS（図3）は、4つの磁気センサーと二つの位置センサーによりHDD表面の漏洩磁気を検出し、ネオジウム磁石部位を非破壊で検出する機能をもつ。その後、非磁性刃直下にHDDを搬送し、脱磁前に磁石部位を打ち抜く装置である。各種HDDの漏洩磁束密度をデータベース化し、これに基づいた装置最適化により検出精度を上げている。小型で安価な装置でありながら、年間40万～100万台のHDDを自動処理することが可能である。なお、本装置で10倍程度に濃縮された磁石部位は、脱磁後、衝撃粉碎、スクリーニングを施すことで、純度94～97%の磁石粉末を回収することに成功している。

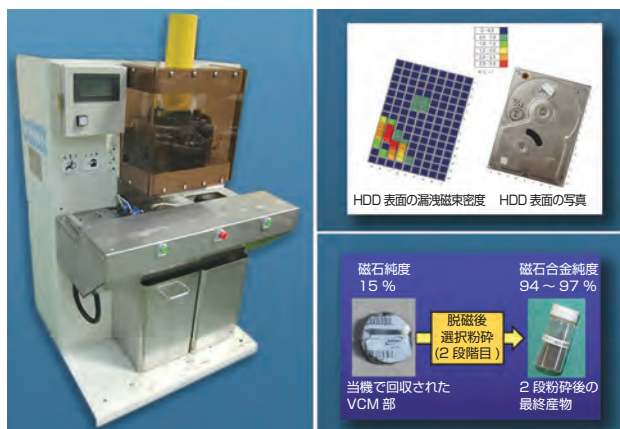
3.2 選別の自動制御化～スマートオペレーション～

HDDでは、幸運にも衝撃破碎－スクリーニングで磁石のみを回収することが可能であったが、通常は、仮に単体分離が達成できても、選別の最適化が困難である場合が多い。既述のように、通常、3～10工程の選別が組み合わされるため、選別条件の組み合わせが天文学的数字になり、装置本来の限界性能を導き出す前に「この装置では分離できない」と断念するケースがほとんどである。そこで著者はデータベースとこれを用いた数値計算によって、速やかに最適条件を導き出す方法を検討した。熟練工の経験に頼らずに、最適条件で装置を自動運転するシステムを「スマートオペレーション」と名付けた。この技術をプリント基板のリサイクルに応用した結果、

世界で初めてタンタルコンデンサのリサイクルが可能となる選別プロセスの開発に成功し、2012年の春に都市鉱山モデル事業を推進するリサイクルプラントへ導入した。

タンタルはレアメタルの中でも高価な金属であり、かつ、ほとんどリサイクルされていないことから、国が定めたリサイクルを優先すべき5鉱種（タングステン、タンタル、コバルト、ネオジウム、ジスプロシウム）の一つとなっている。タンタルの多くはプリント基板上のタンタルコンデンサとして使用される。開発当初は著者らも、これまでの選別セオリー（図1）に従い、単体分離種をタンタル元素（主として酸化物として存在）として、プリント基板を微粉碎して単体分離の向上を目指した。微粉碎後、タンタル酸化物の物性に基づく選別を施すと、タンタルは数倍に濃縮されたが、プリント基板に占めるタンタルの重量割合が千ppm程度であるため単独では回収できず、貴金属や他の重金属とともに重産物として回収された。既述のように、タンタルのようなレアメタルは、乾式製錬前に銅や貴金属と分離しておく必要があるが、上記の方法ではタンタルの資源化は達成できなかった。一方、この頃、共同研究先企業において、ある粉碎機でプリント基板から電子素子がおおよそ原形のまま剥離される現象が見いだされた。この時点では、種々雑多な電子素子が混在する中、特定の電子素子のみを回収することなどは困難と考えられていた。しかし、著者は、これらは一見無秩序な混合物に見えるが、各素子は人工物ゆえの固有の選別特性をもっているはずと考え、タンタルコンデンサを単体分離種として想定した最適選別パターンを抽出を目指した。従来型アプローチの選別実験データから最適条件を見いだすことは到底困難と考え、パソコン等から回収した電子素子40万個以上を1680分類し、その物性や選別特徴をデータベース化した。その後、サイズ選別、比重選別、磁選の3種の選別法について、反復使用を含めた約2000兆通りの選別パターンの結果を数値計算で予測し、タンタルコンデンサが濃縮可能な最適条件の絞り込みを行った。その結果、剥離電子素子群から6工程で、回収率（剥離素子群中のタンタルコンデンサの内、回収されたタンタルコンデンサの重量割合）80%以上、品位（回収産物のタンタルコンデンサ重量割合）80%以上の精度で回収できる選別条件を突き止めた（図4）。

最適選別パターンは明らかになったが、既存装置でこの選別条件を満たすものは存在しなかった。そこで、次にそれを実現するための装置開発を行った。傾斜弱磁力磁選機（図5（a））は補助的役割を果たす小型装置で、傾斜コンベア型形状選別部でアルミ電解コンデンサを、



筆者と近畿工業（株）で共同開発し近畿工業（株）とライセンス契約

図3 HDD カuttingセパレータ(近畿工業(株)と共同開発)によるネオジウム磁石リサイクル

弱磁力選別部で水晶振動子等を回収するハイブリッド機である。形状選別部は、円筒形のアルミ電解コンデンサを転がして回収するが、転がりを促進するための定荷重スイングピンゲート機構を新規に開発した。また、これまでの磁選機では、タンタルコンデンサの一部も磁着してしまうが、コンベア面で極めて弱い均一な磁束密度を精度良く発現する機構を開発し、鉄分の多い水晶振動子のみを磁着回収することに成功した。同装置により、鉄とアルミを個別に回収するとともに、タンタルコンデンサを含む残分を気流選別機へ供給することで、供給量を

抑制することができる。複管式気流選別機は(図5(b))、この選別プロセスの主力機で、一つの送風機により二つのカラム内の風速を極めて精度良く制御することができる。第1カラムではタンタルコンデンサより重い素子を落下回収し、タンタルコンデンサとこれより軽い素子は第2カラムに送られ、ここで、タンタルコンデンサのみを落下回収する(図5(c))。数値計算に基づき、第1カラム内の風速を第2カラムより僅かに速く設定している。普通、カラム内に上昇気流を発生させると、中心部が速く、周辺部が遅くなる速度分布となる。これでは、

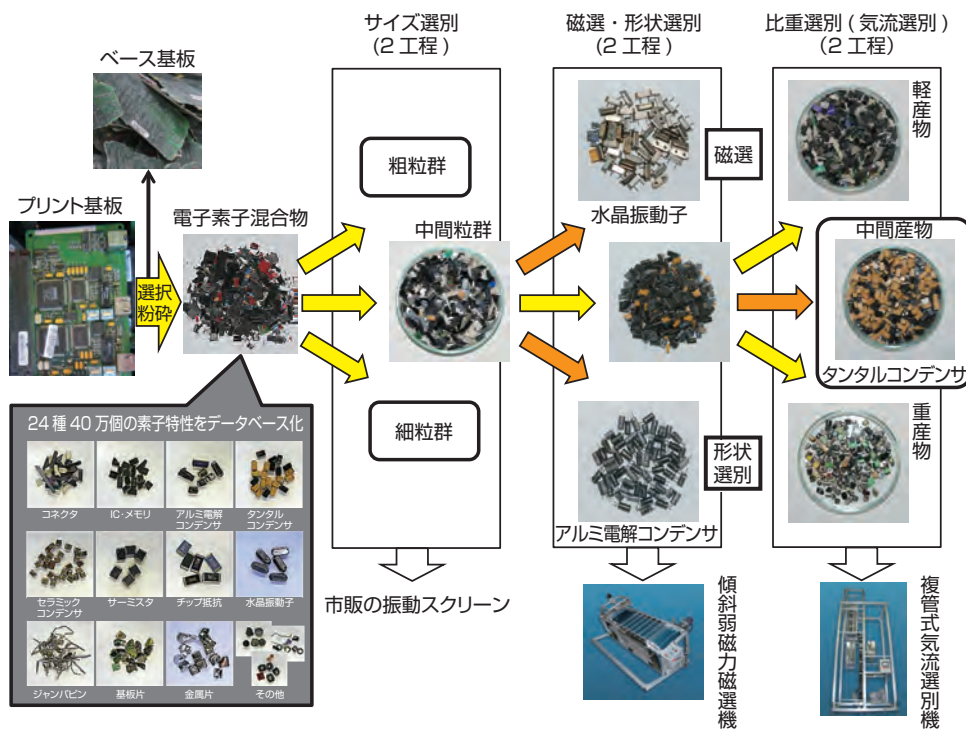


図4 データベースに基づく計算で抽出されたタンタルコンデンサ回収プロセス

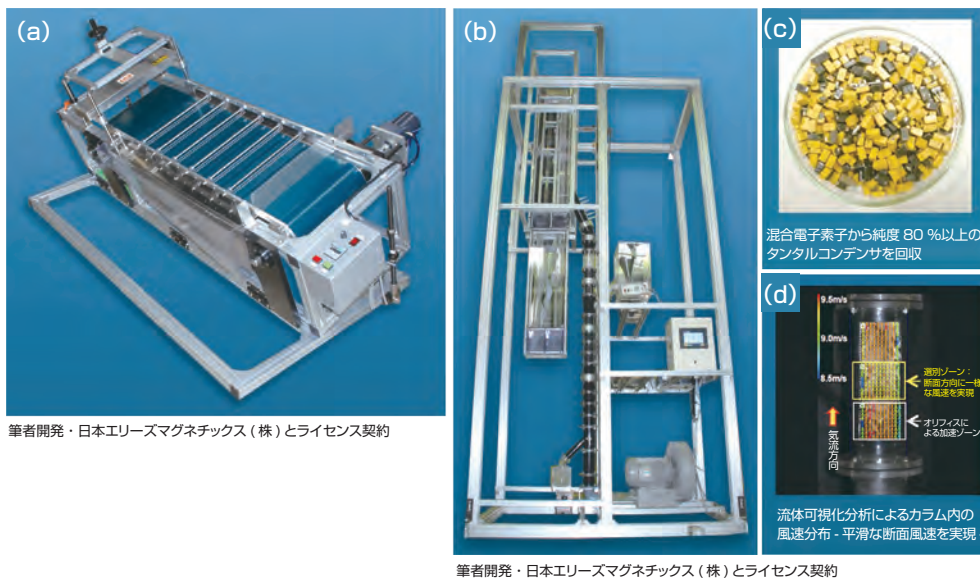


図5 傾斜弱磁力磁選機と複管式気流選別機によるタンタルコンデンサのリサイクル

同一素子でも上昇するものと落下するものが現れ、高精度な選別は望めない。そこで、著者は、カラム内の断面風速が均一になる機構を開発（図5（d））、これにより極めてシャープな選別を可能にした。また、カラム内上昇気流と近接した落下速度をもつ素子は、姿勢の変化に伴いカラム内で上下運動を繰り返し、速やかな選別を阻害する。これを回避するため、オリフィス機構を導入し選別速度が改善された。この他、二つのカラムの風速を安定させながら速やかに素子が移動するジョイント機構等、気流選別機として世界初の機構が幾つか盛り込まれている。また、素子データベースに基づく運転制御により、ディスプレイ上でタンタルコンデンサを初めとする任意の素子を選択するだけで、装置のキャリブレーションから素子の回収まで自動運転することが可能である。

以上のような開発により、これまではタンタルコンデンサの品位を10～30%程度とするのが限界であったが、両装置が導入された実証プラントでの試運転では、最大でタンタルコンデンサ品位97%を記録した。このように、製品情報を適切に利用すれば、最適選別条件を迅速に導出することができ、また、製品仕様が一部変更されても、一からやり直す必要はなく、変更情報の置換により容易に最適選別条件の再計算が行える。イーゼンセンシング、スマートオペレーションの導入は始まったばかりであるが、このような物理選別技術の革新により、多くの難処理資源の開発がいち早く実現することが期待される。

3.3 戦略メタル資源循環技術（都市鉱山）プロジェクト

都市鉱山開発では、資源循環ループの一部に新技術を導入しても、これを支える周辺環境が整わなければ資源

の循環は実現しない。戦略メタルの持続的な循環使用を実現するには、物理選別等の資源処理技術にとどまらず、製品設計から再生原料の供給に至る一連のシステムの構築が重要となる。著者は、現状の都市鉱山から戦略メタルを高度に回収する技術開発から、将来の戦略的な都市鉱山創生に至る「戦略メタル資源循環技術（都市鉱山）」プロジェクト（2013年に「戦略メタル国内資源循環プロジェクト」より改名）を産総研戦略予算として開始した。2012年度から3年間で、産総研型の資源循環ビジョンの提案と、我が国の戦略メタルリサイクル研究拠点の整備を目指すものである。このプロジェクトでは、7ユニットにまたがる30名以上の産総研研究者により、5つの課題の検討を行う（図6）。課題1では、次世代の戦略メタルの選定とその真のリサイクルポテンシャルを評価する。課題2は、戦略メタル回収対象となる廃製品の物性・選別データベースを構築、これに基づいて戦略メタル高含有製品の自動選別技術を開発する。課題3では、回収された廃製品群を確実に製錬原料とするための製錬前処理技術を確認する。そして、課題1～3により、現状の「無秩序都市鉱山」から戦略メタルを回収する「リサイクルビジョン」を提案する。課題4では、課題2、3の検討によっても、なお、リサイクルが困難な製品について、特に物理選別技術の視点から、これを容易にする最小限度のリサイクル設計指針を提供する。課題4の循環型「生産ビジョン」の提案により、将来の廃製品は、生産段階から日本のリサイクルインフラに適合した、いわば「戦略的都市鉱山」を構築することに繋がる。さらに、課題5では、課題1～4を融合した、産総研型「生産－リサイクル統合ビジョン」を提案する。

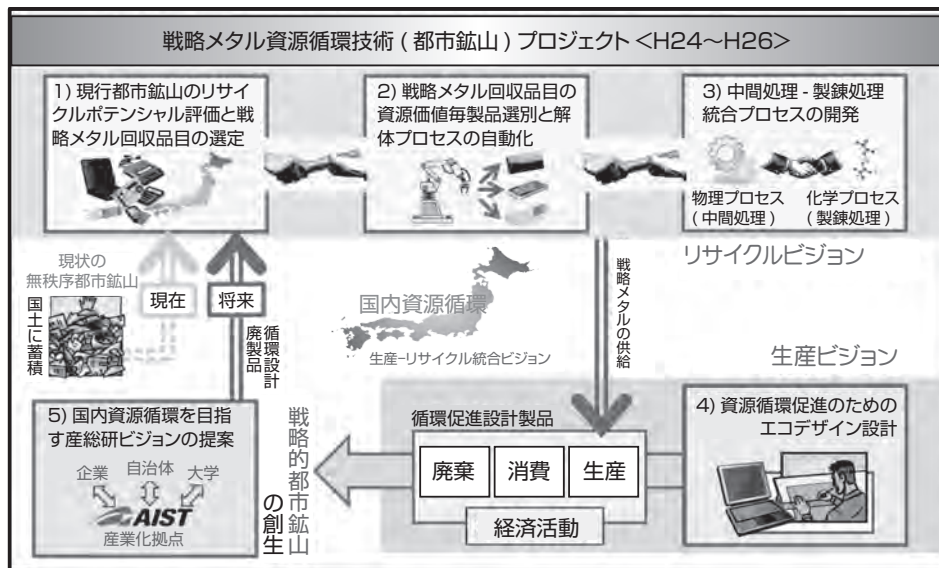


図6 戦略メタル資源循環技術（都市鉱山）プロジェクトの概要

また、その際、我が国で開発された個々のリサイクル技術がバラバラに存在したのでは、国際競争力をもつ実効性の高い資源循環を実現できない。そこで日本のリサイクル技術の産業化拠点となるべく、「戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）」を整備し、プロジェクト終了後に本格稼働することを目指している。

4 まとめ～研究開発の展望～

天然金属資源の乏しい我が国にとって、都市鉱山は有望な自国資源の一つである。さいわい、製品製造に多くのレアメタルを利用してきた我が国では、その供給手段としてリサイクルにいち早く着手したため、2013年現在、レアメタルリサイクル技術は欧米をしのいで世界トップの水準にある。このアドバンテージを将来にわたって維持できれば、資源大国に対抗できる資源開発ツールとすることも可能であろう。しかし、それには幾多の課題の克服が必要である。まず、将来の製品市場を予測することは困難なため、例えば30年先に必要なリサイクル技術をあらかじめ準備しておくことは難しい。また、必要な技術を準備できたとしても、製品サイクルの早さからそれが利用できる期間はそれほど長くはない。さらに、製品が新しくなるに伴って、中長期的には省資源化や安価な金属への代替が進むため、重要な金属ほど製品中の濃度は次第に低下し、より高度な回収技術が必要となる。一方、レアメタルの安定供給はものづくりに多大な影響を与えるものの、それ自身の流通量は少なく、マーケットは決して大きくない。このため、大規模なリサイクルインフラは必要でなく、我が国が開発した新技術は、他国でも比較的速やかに導入される可能性がある。我が国の技術が世界のトップを走り続けるためには、常に3年～5年の技術的アドバンテージを維持しながら、新しいリサイクル技術を迅速に導入し続けることが必要となる。

このように、物理選別を核にした都市鉱山開発には幾多の課題が待ち受けている。しかし、現状では、当該分野の研究者人口が少ないため、膨大な課題に対する網羅的取り組みや新規技術開発が緩慢であることは否めない。このため、国際競争以前に、都市鉱山開発自体が社会ニーズに立ち遅れることの方が問題かもしれない。企業連携や人材育成も含め、生産技術からリサイクル技術に至る一連の戦略的な取り組みを実施する「戦略金属資源循環技術（都市鉱山）」プロジェクト、あるいはこれに続く「戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）」の整備は、諸外国の資源ナショナリズムに対抗し得る、我が国の資源ビジョンを牽引していくことが期待される。

執筆者略歴

大木 達也(おおき たつや)

1994年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士(工学)。早稲田大助手を経て1995年通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所入所。2009年より産業技術総合研究所環境管理技術研究部門リサイクル基盤技術研究グループ長。タンタルコンデンサをはじめとするレアメタルリサイクル技術開発、海底熱水鉱床の選鉱技術開発等に従事。資源処理技術に関する多数のNEDO、JOGMECプロジェクトに参画。2013年産総研内に戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）を設立。



査読者との議論

議論1 全般的コメント

コメント(長谷川 裕夫:産業技術総合研究所、中村 守:産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門)

最適な物理選別によって、これまでコスト的に成立しなかった、廃家電製品からのレアメタル回収に成功した研究開発について紹介されており、論文の構成、内容ともにシンセシオロジーにふさわしい研究論文と判断します。廃棄されたいろいろな製品から有価なレアメタルを効率的に取り出し、「廃製品」を「都市鉱山」として利用できるようにするプロセス技術の設計手法の提案、試行のプロセスの紹介、は他の分野の研究者にとっても参考となる、有益なものと考えます

質問・コメント1(長谷川 裕夫、中村 守)

廃家電製品からのレアメタル回収について、これまでなぜ開発が成功しなかったのか、どこに著者のブレイクスルーがあったのかを、分かりやすく記述してください。

回答1(大木 達也)

レアメタルは、製品内に限定的に使用されており、鉄やアルミ等の構成材に比べて含有率が低いため、そのままでは化学試薬を用いる湿式製錬や高温反応を利用する乾式製錬での経済的な回収が不可能でした。そこで、物理選別で事前に1次濃縮することが重要となりますが、その過程において、できる限り大きな粒子のまま単体分離させること、すなわち、プリント基板から、電子素子をそのままに近い形で剥離し、レアメタルを含む素子だけを選択的に回収する技術の開発が必要です。

タンタルコンデンサの例では、パソコン等から回収した電子素子40万個以上について、その物性や選別特徴をデータベース化し、サイズ選別、比重選別、磁選の3種の選別法について、反復使用を含めた約2000兆通りの選別パターンを選別結果を数値計算で予測し、剥離電子素子群から6選別工程で、純度、回収率ともに80%以上の精度でタンタルコンデンサを回収できる選別条件を突き止めました。最適選別条件を見いだすこのようなアプローチに最も大きなブレイクスルーがあったと考えており、開発の経緯を3.2にまとめました。

また、3.1で紹介した、ハードディスクドライブ(HDD)から、レアアースを含むネオジム磁石の回収技術の開発では、磁気センサーと位置センサーにより漏洩磁気からネオジム磁石部位を非破壊で検出して打ち抜くという独自の工程を開発して、磁石を10倍程度に濃縮することによって、その後の脱磁、衝撃粉碎、スクリーニングにおける大幅な省エネルギー化、経済性向上を達成しています。この技術開発においても、各種HDDの漏洩磁束密度をデータベース化し、これに基づいた装置最適化を行うことにより、小型で安価な装置でありながら、年間40万～100万台のHDDを自動処理することが可能になりました。

システムデザイン・マネジメント学とシンセシオロジー

— 現代社会の課題に挑み、研究成果を社会に活かす方法論 —

シンセシオロジー誌が創刊された2008年に、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が創設されました。当該研究科は、社会のさまざまな課題の創造的な解決を図る全体統合型学問を目指しています。この考え方は研究成果を社会に出していく構成学的方法論を探っているシンセシオロジー誌にとって大変参考になるので、今後の共通の課題や連携のあり方などを話し合いました。

シンセシオロジー編集委員会



座談会出席者

- 前野 隆司 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科教授
- 西村 秀和 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科教授
- 高野 研一 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科教授
- 神武 直彦 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科准教授
- 中島 秀之 公立はこだて未来大学学長

<シンセシオロジー普及幹事>

- 赤松 幹之 産総研
- 小林 直人 早稲田大学

小林 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 (SDM) が2008年に創設され、我々のシンセシオロジーも2008年に創刊されたということで、因縁を感じるころですが、SDMは社会の課題をシステムチックに捉え、分析し、解決策を創造的にデザインすることを目指しているとお聞きしています。この考え方はシンセシオロジーの趣旨に共通していると考えていますので、まず研究科委員長の前野先生からSDMの教育、研究の活動の特徴などをご紹介いただけますか。

現代社会の課題に全体統合型学問の実践で取り組む

前野 従来の学問は固有の学問分野やアナリシスが中心でそれぞれのサイロに分かれていましたが、現代社会においてあらゆるものごとは大規模・複雑化しており、数々の問題を引き起こしています。専門的なコアを持っていても、それだけでは問題を解決することはできません。機械工学だけではロケットはつくれないし、経済学や法学だけでは政策をつくれません。ですから、世の中のニーズに基づき学問を統合できるような分野横断型の新しい学問をつくらうということでSDMは創設されま

した。

SDMの在学学生には新卒学生もいますが、過半数が社会人ですので、既に専門性を持っている人がそれを越えて学べます。職種は、エンジニアが多いと当初は思っていたのですが、マーケティングやコンサルタント、芸術家、経営者、大学教授等々、多様な人たちが集う場ができました。それが1番目の特徴です。2番目の特徴は、SDM学という複合分野を統合する学問をつくり、多様な者が共通言語で話す、ここが新しい試みだと思っています。

SDM学のコアの一つは「システムズエンジニアリング」です。日本ではITのためのエンジニアリングという狭い意味で捉えられがちですが、インターディシプリナリーな問題を解決する、つまり分野横断的に問題解決をする学問であると定義されていますので、それを社会システムにも拡張して教育しています。

もう一つのコアは「デザイン思考」です。もともとはスタンフォード大やIDEO社発なのですが、イノベティブに共創することによって新しいものをゼロから出していきましょうという学問です。「つくりながら考え

る」「きちんとした評価よりもどんどん失敗する」という学問なので、エンジニアリングと相性が悪いと思われるがちなのですが、我々はその両方をやるというところが特徴だと思っています。つまり、大規模システムをシステムズエンジニアリングで開発するというのと、イノベティブに自由に創造することをうまく統合しながらやっていく。

目指しているところはシンセシオロジーと近いと思うのですが、ただ、我々は“システム”という言葉を使います。“システム”と“構成”の違いは、“システム”というのは「構成する」という意味と「システムチックに分解する」という意味も含んでいまして、シンセシオロジー的なものと従来型の学問を両方やりましょうという姿勢です。両方やることによって「部分」も「全体」もデザインできると考えています。つまり、SDM学というユニークな方法によって、シンセシオロジーと同じように従来のまさに「死の谷」を埋めるべくやっているということです。

中島 シンセシオロジーというのはシンセシスを強調した名前ですが、僕はアナリシスとシンセシスの両方が必要だと思っているのです。シンセシスするためには、つくったあとのアナリシスも要りますし、つくる前のアナリシスも要ります。

社会的な課題をどのように見出すのか

小林 構成学の方法の一つは、明確な社会的目標を設定し、それからバックキャストをしてシナリオをつくり、そのシナリオに沿って要素技術を構成し、社会的試用・評価を経てフィードバックをして、さらにシナリオを精緻化していくということだと思っているのですが、SDMの場合、学生の皆さんが自分で「こういうものを社会的目標の対象にしたい」と決められるのですか。

前野 システムズエンジニアリングで言うとVモデルの最初の要求分析、デザイン思考で言うとデザイン思考の活動そのものが、課題や目標の設定に相当します。まさに、フィールドに出て行って、世の中のニーズをつかんでくるというフェーズですので、どちらの学問にとっても最初の入り口のところです。ここにはかなり力を入れて教育・研究しています。

小林 「課題解決型」という言い方をよくしますが、課題をどうやって見つけるか、ということ自体が学生や研究者にとって非常に難しい気がするのです。

前野 難しいけれども、今まさに注力すべきところだと思います。デザイン思考の文脈で話しますと、参与観察(エスノグラフィ)のようなフィールドワークをして、自分が入り込んで世の中をコンTEMPLレートに見ること、それからブレインストーミングで多様な人が集まってワイワイやることで、人の考えに乗っかり合って世の中を理解する、いろいろなプロトタイプングをつくり、それを世の中の人に見てもらうことによって世の中を理解することが大事だと思っています。

つまり、学問の枠にこもるのではなく、「共創」です。世の中あるいは多様な分野の人達と一緒にやることで、そもそも社会では何が問題で、自分たちはどんなコンピテンスを持っているから、どこを目標にすべきか、ということの明確化にかなり時間をかけています。デザインプロジェクトという必修科目では、前半の半分くらいを費やして、そこを構造化して、目標を曖昧なものではなくすることに注力しています。徹底的に社会のモデリングをしたり、「なぜ」をいろいろな手法により可視化します。

中島 情報系で考えると、「技術」とシステムデザインの「目標」は表裏一体のような気がするのです。要するに、夢物語をしてもしょうがない。技術がないとつぐれない。そういう意味では、これは行ったり来たりするのだから、ループになる。さっきの小林さんの疑問でもあるのだけれども、情報系って技術はいっぱいあるので目標はいろいろ考えられるけれども、ほんとうにいい目標は何なのか?といったときに、社会学と一緒にやらないとうまくできない。ところが、見ていると社会分析はしても社会デザインをしている人がなかなかいないのです。そういう意味で、SDMにすごく興味を持っています。

前野 まさにおっしゃるとおりです。我々はVモデ



前野 隆司氏

ルで問題の解決案まで示します。文系出身の学生にもシステムのデザインと検証という形の研究を学んでいただきます。逆に、理系出身の学生にも、社会目標の明確化について、徹底的に学んでいただく。

西村 「システムズエンジニアリングにおける」と言うとき若干狭くなる感じがするので、SDMにおける社会目標ということでお話ししますと、目標を設定するのは難しいです。フューチャーセンターのまねごとなどで、例えば「エネルギー問題について話してみましよう」とか「地域モビリティはどうあるべきか」というワークショップをすると、2、3時間やってもそこでまとまるということはないです。では、長い時間をかけたなら目標が定まるのかというと、やっぱり定まらない。目標を決めなければいけないとしたら、そのためにどうしたらいいかということ学問的に追求する必要があります。そうはいつでも何か決めないと話が始まらないので、学生への我々の教育としては、目標を設定して、それに向かってやっていったらどんなふうになるのかを一度何かの形で見せて、フィードバックをかける。そこで「失敗は許されない」ということになると何も動かなくなってしまうので、この期間はこれでやってみよう、と言って進めてみるといいと思うのです。

小林 仮説形成推論といいますが、帰納でも演繹でもない第三の推論が重要ですね。そこでは、まず仮説を形成しなければいけないので、仮説をつくる能力が重要ですね。

高野 私はどちらかというと社会科学的な分野に取り組んでまして、今おっしゃられた「仮説をどのように形成するか」ということは研究の一番キーポイントだと思っています。問題定義は「ほんとうはこうあるべきだ」というところからスタートしますね。ところが、現



西村 秀和氏

状とのギャップがある。現代社会では問題が複雑に関連していますので、この問題にはこういう要素が効いている、その結果こうなっている、といったように、全体の問題構造をきちんと分析・確定できれば、それなりのプロセスをたどることで領域に対する相場観が持てるだろうと思います。相場観を持ったなら、複雑に絡んでいる全部の問題を解決することは不可能ですから、その中で学生が2年間でどの部分であれば実証的に研究できるのかというところを絞り込んでいく。その中で、自分なりの仮説を立てて、例えば質問紙（アンケート）やエスノグラフィ、インタビューなどの社会科学的方法論を使って仮説が正しいかどうかを見ていきます。

我々はアンケート調査を主体として、共分散構造分析を適用し、仮説のような因果関係があるかどうかを見ています。そういう分析をしていくと、新しい因果関係や新しい視点が入ってきて、そこから新しい問題解決に結びついていく可能性が出てくるのかなという感じがします。問題の因果関係がわかったら、何らかの提案が必要です。提案したことを実際の具体的な施策に落とすということになると、どうしても企業との連携が必要になってきますが、少し長い目で見ないとなかなか検証まではいかないという感じがしています。

研究のverificationとvalidation（検証と妥当性確認）

小林 確かに検証までいこうとすると時間が非常にかかると思いますが、そのあたりの方法論については、赤松さん、いかがでしょうか。

赤松 今までのお話からすると、SDMがやられていることはやや実社会に寄っているのですが、その検証は難しいと思います。問題が解決されたかどうかを、バイアスをかけずに評価すること自体、不可能だと思うのです。それがもう少し技術寄りになれば、ある意味、検証はできるのだけれども、ただ、技術が社会の中でほんとうに使われているかという話になると、社会の中でどういふうにその技術が位置づけられているかを評価しなければわからない。非定常な社会の中での検証方法を我々は自然科学的には持っていないですから。

高野 社会現象自体は不可逆性があるといいますが、例えば、Aという施策をやった場合とやらない場合は全く同じ条件で比較ができないので、ほかの要素の寄与がないことが実証できないので、十分な検証はできないのですね。

赤松 そうですね。お伺いしたいのは、自然科学的な検証は不可能なのだけれども、SDMで学生達が何かに取り組んで、「これはうまくいったね」といったり「あまりうまくいかなかったね」といったりするためには、たぶん何らかの評価、判断がされていると思うのですが、それはどういう観点で評価されているのでしょうか。

前野 我々の研究テーマは「物事をシステムとして考えましょう」ということなので、多様です。例えばヒューマンマシン・インターフェースをつくってそれがきちんと動くかを検証するという、技術システムに絞られるケースの場合には明確な検証が可能です。一方、「世界平和のための交渉のあり方のデザイン」を研究した学生がいますが、このようなテーマの場合は完全には検証しきれない。しかし、必ず何らかのシステムデザインをして、何らかの検証、それも verification (do the right thing の検証) と validation (do the thing right の検証) をできる限り両方するという視点で研究を行っています。

良い研究とは、テーマのスケールに関わらず、明確な新規システムをデザインして、それを verification と validation していることと考えます。わりと絞り込まれたシステムの場合は検証がクリアにできますので、そんな研究を行う学生には新規性を問うて、単なる重箱の隅になっていないことを確認します。それに対して平和の研究や幸せの研究のように大きく漠然としたシステムを対象としている学生の場合、基本コンセプトを明示するとともに、アンケート、インタビュー、多変量解析などを通して、できる限りシステムチェックに研究できている必要がある。どこまで検証できて、どこからできないかがよくわかっている、それが良い研究だと思っています。

高野 2年間は限られた時間なので、その中でプロポーザルの検証までするのは難しい場合もあります。そのた



高野 研一 氏

め研究室の世代にわたった継続性が重要だと思っています。仮説をつくって検証して、プロポーザルして、次の2年間は実証してもらって、最後に評価をするというふうに、研究室としての継続性のある程度担保できていれば、大きな中で検証することはできると思っています。

前野 学生は小さい検証をしつつ、全体として大きな検証をやっているという意味ですね？

高野 そうです。Vを重ねていくような、そういうイメージです。

神武 社会システムにおいては、振る舞いが必ずしも再現するとはかぎりませんし、どこまでがそのシステムの境界かを明確にすることが技術システムと比較して難しいので、そこはそういうものだということを認識することが重要だと思います。学生が検証するときには、自分が今回検証するのはどの範囲なのか、そのためにどういう手法があって、なぜその手法を適用するのかというのをしっかり認識した上で手と頭を動かさないといわれています。すべてを対象にするのは難しいということは前提にあるのですが、では検証できないかということ、その中での定義をしっかりとすればできるのではないかと。実際にシステムを動かす以外の検証もいろいろあることを理解してもらって、ここがこの大学院に2年間いていただくことの価値かなと思っています。

構成的研究の方法論

小林 シンセシオロジーについて、中島さんが『構成的研究の方法論と学問体系－シンセシオロジーとはどういう学問か？－』という論説を第1号に書かれていますが、ご紹介いただけますか。

中島 私自身は研究テーマとして人工知能をやっている、人間の環境依存性というか、状況依存性にすごく興味を持っています。要するに、知識表現するとそれに合わない場面がいっぱい出てくる。人工知能でよく言われているフレーム問題ですが、知識だけを形式的に取り出しても全然だめだということがあります。コンピュータはプログラムにならないと使えないのですが、人間はなぜかうまくやっている。スタンフォードで状況理論をやっている人がいたので、同じことをやっているのかと思ったのですが、違う。市川惇信さんの『暴走する科学技術文明』を読んでわかったのは、スタンフォードは状況依存性を上から見ている、つまり神や憲法のようなシ

システムを超越した存在を前提としているのですが、日本では集団ごとに異なる規則を容認している。我々は状況依存になる仕組みが欲しいというか、中にいる、そういう違いだと思っています。

言語学者の池上嘉彦さんが紹介した実験が面白い。川端康成の『雪国』の第1文「国境の長いトンネルを抜けると雪国であった」の英訳は、The train came out of the long tunnel into the snow country で、これを絵にすると、汽車がトンネルから出てくるのを上空の視点から描いたものになります。ところが、日本語の場合は乗客の視点からの絵になる。いずれにしても、「つくる」立場（シンセシス）は分析（アナリシス）を一部に含んでいる。いわゆるサイエンスが中になければならず、サイエンスに対峙するのではなく、サイエンスをやった上で、さらにそれを大きく構築するものだというふうに最近考えています。考えてみれば、サイエンスをするときも、仮説・検証というところでループを回しますね。仮説をつくって、実験して、だめなら修正しているわけです。

もう一つ、多層のシステムを扱う場合、ノエマとノエシスという、これは現象学の木村敏さん達の用語でフッサールが最初だったわけですが、ノエマとノエシスのループができます。音楽を例にとると「未来ノエマ」は奏でたい音楽の設計図あるいは楽譜、「ノエシス」とは実際の奏でられた音、「現在ノエマ」は奏でられた音を聴いた結果の音楽。目標、要求があって、それを外在化してつくったものがあるけれども、これを分析してみると要求とは少しずれがある。だから、それをもう一回要求に戻す。設計に戻す場合もあるし、実は要求が違った場合もあるので、要求がずれるかもしれないということを含んで戻すのですが、最初の想定になかった環境との相互作用という部分がかかなり大きな役割をしていると思っています。ですから、最近のサービスサイエンスという言い方のときは、これがサービスの実施部分でしよ



中島 秀之 氏

うと言っています。だから、ノエマ層というか、コンセプトのところではいろいろなことをやっているのがデザインで、ノエシスという実態層で本当に何かやるというのがサービスだと思うけれども、両方の間を回らないとだめだと思っています。

前野 表現の仕方は違いますが、賛同します。私たちも同じことをやっていると思います。

西村 演奏って非常にいい事例だと思うのですが、要するに、自分の頭の中で妄想している、考えているだけだったことをちょっと実行してみる。そうすると、やっていたことが全然違う方向であったとか、あるいは、制御という可制御性というのですが、そこに一生懸命、入力しても意味がないことに気がつく。そうしたら、違う方向から攻める。机上の空論で考えて終わってしまう人が比較的多いのですが、ちょっとでもやってみるとわかるのですね。そこは、短い時間でループを回すようなイメージだと思います。

前野 まさにそのとおりです。昔のシステム工学は「計画したら全部できるはずだ。ノエシスがないはずだ」という感じだったのですが、今のシステムズエンジニアリングは繰り返しをしていく、あるいはデザイン思考を取り入れるというように、主観的に、まさに神の視点ではなくて自分自身が入り込んでいって問題解決するということを教育に取り入れています。

高野 関連ですが、QCD（Quality, Cost, Delivery）という観点は非常に重要だと思っていて、プロジェクトを成功裏に終えるためには上流工程が重要です。コンセプト・オブ・オペレーションズといいますか、最初の時点で使用場面を思い浮かべて、どんな使い方ができるのか、そのためにはどういう要求が発生するのかを考えて、それをステークホルダーごとに考えていくことをきちんとやっていくと、最初の時点で、かなり使用頻度の高い機能に限定して開発できるというメリットがあります。このような実証的な研究を実施しています。

西村 システムのまわりの環境、外部システムとの相互作用をできるだけ考える、そこが大事だと思います。

研究成果を社会につなげる構成方法論の分析

小林 シンセシオロジーは執筆要件として、「研究目標の設定」「研究目標の社会的価値」「シナリオの提示

と要素の選択」「要素間の関係付けとそれらの統合・構成」を求めています。そこで、まずどのような構成方法を行っているかを調べるために、2012年にそれまでシンセシオロジーに発表された七十編の論文を分析しました。これは私が作った仮説なのですが、①アウフヘーベン型は、要素技術 A と要素技術 B を統合して新たな新技術をつくり上げる方法、②ブレイクスルー型は、実現した重要要素技術に周辺技術を結合させて統合技術に成長させる方法、③戦略的選択型は、要素技術を戦略的に選択して構成を行う方法、という構成方法における3つの基本型を考えました。この3つを基礎に分析を進めたのですが、そのうちにフィードバックが重要だという話が出てきました。特にバイオテクノロジー、ライフサイエンスやヒューマンテクノロジーでは、実社会での試用による検証が必要で、フィードバックをするループを何回か回していかないとイケません。また技術を社会導入に持っていく方法は、実はこの論文の中からだけではなかなか出てこないのですが、そこは赤松さんから説明していただけますか。

赤松 我々の対象は自然科学や技術がほとんどなのですが、ものの形にしたならそれを社会の中で使ってもらわなければ意味がありません。どうやって社会導入させるかというとき、論文を書いた人たちがどういう取り組みをしてきたかを分類してみました。

「産業界でニーズが明確化されている場合」「産業界でニーズが明確化されていない場合」「産業として確立・拡大」に大きく分けると、「ニーズが明確」なのは、例えば計量標準のトレーサビリティ体系の構築や、精度検証の標準の世界では、目標がはっきりしているし、正解が一つではないにせよ、何が必要で、ここにこういう標準を供給されるにはどういう体制が必要であるという、ある意味、ロジカルにシナリオがつけられる世界です。けれども、「産業界でニーズが明確化されていない」場

合は、どこにパズルの穴が開いているかわからないですから、そこを埋めるロジックが存在しません。要素技術の展示やサンプル提供したり、試作品をターゲットユーザー的な人に実際に使ってもらって問題点を出してもらおう。そこまではわりとわかりやすいのですが、現実的に研究成果を企業の方に使ってもらうときは大きなバリアがあります。基本的に人はみんなコンサバティブ（笑）なので、新しい技術を導入するメリットが頭でわかっても、なかなかそれに踏み切らないというのをどうするか、ですね。そのときに企業の人達と深く付き合うことで価値の理解が促進され、「これはやるべき」という気持ちになるまで待つ、ということもあります。そして、「産業としての確立・拡大」の場合は、世の中の先を進んでいる感性的リードユーザーに導入して、それにみんながくっついていくというタイプや、カーナビの実用化のように共同開発や標準化する共通部分は競合他社が連携することでうまく広まっていくという例が論文に見受けられます。その人なりにベストと思っている方法を選んでいますが、どういうタイプならこういうふうにするべきということがわかるようになるといいと思っています。

イノベーションに向けたシステムデザイン・マネジメント学および構成学の課題

小林 今のようなことをもっと突き進めていくと、イノベーションのために必要な要素は何なのか、どう組み合わせたらいいかということまでいけないかなというのが私の期待なのですが、SDM 学から「イノベーションはこうやったらおきるんだよね」、というようなことを言うことは可能ですか。

中島 それがわかったらイノベーションって言わない（笑）。



赤松 幹之 氏



小林 直人 氏

西村 本当にそう思うのです。最近、システム・オブ・システムズとって、自分で要求がわかったと思って製品やサービスを世に出しても、それがその要求どおりではなく、他のシステムとの関係性で全く違うように使われる。今の電子メールのシステムも、最初に考えた人は、「お昼ごはん、一緒に食べに行かない？」くらいのメールのやりとりをしようくらいに思っていたのが、今や我々の仕事にプラスになっているのか、マイナスなのかよくわからないようなシステムですね。要求どおりつくられていたのかというと、そうではないかもしれないけれども、イノベーションをおこしていると言えるかもしれません。イノベーションをデザインするというのを狙おうとはするのですけれども、難しいだろうなと思います。

前野 世の中で普及している手法がありますから、それを使うことによって、ステイブ・ジョブズをつくることはできなくても、普通の人が、より、クリエイティブ・イノベティブになるということではできると思っているのです。その方法がデザイン思考とシステムズエンジニアリングを組み合わせた、我々の教育だと思っています。

西村 システムズエンジニアリング的な側面で説明させていただくと、例えばものがあって、「これはこういう要求に対しては使える」といって当てはめると、そこで終わりなのです。我々は一步下がって、要求から機能をまず導き出しましょう。機能を実現するときはどうするのかと考えたときに、もしかするとこのフィジカルなものではなくて違うものがその機能をうまく果たすかもしれない。そうすると、この機能に対してはこっちのものがイノベーションをおこしたとも言える、ということが比較的単純なシステムズエンジニアリングでも言えます。

中島 ソフトウェアで学生に教えるときにまさにそういうことを言っていて、要求仕様どおりつくるのではない。相手は何が欲しいのか、ITでは何ができるかをこちらから考える。“要求開発”という言葉がありますね。

前野 考え方は一緒です。今の続きを述べますと、システムズエンジニアリングではシステムを物理、機能、目的に分けますが、機能に遡って考えるというのがシステムズエンジニアリングで最初に行う問題の構造化です。デザイン思考になると、目的自体を、バリュエーター

などを用いて構造化します。「そもそも何であるのか」をたどっていくと、最後は平和や幸せに行き着く。それを書き出していったら、抽象度の高いレベルで構造変更するほどイノベティブになります。実はシステムズエンジニアリングからイノベーションを見ると、抽象度の高いレベルでの設計変更といえるわけです。普通の人から見て発想が飛んだように見えるイノベーションも、目的まで分析すると設計改良に過ぎない、そうも捉えられると思っています。

西村 僕がイノベーションでイメージするのは、枠を外す、あるいは境界を越えるとか、人間の頭の中の問題だと実は思っているのです。目的については、それがほんとうに目的なのかということに対して、なかなか疑問に思わないわけですね。学生なんかは、教員から「これが目的だ」と言われると、そのまま論文に書いてしまったりする（笑）。

高野 心理的な枠というのが非常に大きくて、そこをいかに越えるかというところが一番問題だと思うし、自分のイメージできる社会しか学生はイメージできない。創造的開発のほうではメタ思考みたいなことをやりながら、「なぜ」「なぜ」とやっていくと、若干、そこを越えようとするエンジンになってくるかなと思っています。

赤松 “イノベーション”という言葉を使うのが適当かどうか別としても、技術の場合は、結局、使ってもらえるかどうかです。社会の中で浸透しなければ、少なくともイノベーションとは言ってもらえない。例えば、SDMで修論とかでやられて、現場で試しにやってみて、それが学生さんがいなくなっても、そのまま自律的にその中で根付いて使われているということはありますか。

前野 うちの過半数が社会人学生ですので、学生が社長で、修論を書いてそれを実際に会社でやっているというケースは複数あります。大企業に行かずに起業するという学生も増えています。企業内で修論の内容を具現化するケースもある。したがって、修論の結果をリアルに事業に結びつけている例はかなりあります。大規模システムの検証は時間がかかり、10年くらいかからないと検証できないケースもありますが、小さなシステムを一人で始めたケースですと、事業が回り始めたという例は少なくありません。

赤松 それは社会のニーズを正確に捉えていたから、

ということでしょうか。

前野 そうです。さらにいうと、我々の学問にはマネジメントも含まれますので、的確なマネジメントができたから、というのも理由だと思います。今後、我々はもっとマネジメントを強化して、イノベーティブな開発を行うと同時にそれを実現できる組織への改編も行うべきだと考えています。

小林 私も SDM がマネジメントまで入れたのはすごいと思っているのですが、いかにインプリメンテーションするかというところまで学にしようとしてされているのですか。

神武 インプリメントして、オペレーションして、廃棄する、ちゃんと終わるところまでを視野に入れているという、すべてのライフサイクルを学の対象にしています。

前野 我々はシステムズエンジニアリングの中にプロジェクトマネジメントという学問を持っているので、大規模プロジェクトをマネジメントする教育をしています。それと、高野が中心になっている組織のマネジメントもあります。

高野 今やっているのは組織の診断ですが、目標は「生産性」と「安全性」です。生産性と安全性をパフォーマンスと捉え、その良否を組織の文化、風土で説明できるのではないかということで、現在、大規模な調査をやっています。企業の文化を変えていけば安全性のパフォーマンスも上がるし、業績も高くなるという結果が出つつあります。そして、各企業の経営トップの理解が進み、多くの企業で実際に安全文化の診断をしています。そのときに、「この組織はこの辺が問題ですよ」というところまではお互いの合意ができるのですが、具体的にそれをどう変えていくかというところに入っていきますと、ヒト、モノ、カネがかかってくるのでそう簡単にはできません。しかしながら、やっとなつ二つの会社で自律的にやっとうまくいった例が出てきています。生産性すなわち、業績の改善はまだ、悪いところだけを指摘する、いわゆる医者のようなものですが、将来的には組織の自律的な改革にまで結びつけられるといいなと思っています。

赤松 こういうシステムデザイン・マネジメントは、自分の専門なり、ディシプリンを持っている人間が学べ

るものなのか、それともディシプリンを持っていない新卒レベルの人たちにいきなりこれを教えて、彼らは学べるのでしょうか。

西村 新卒は社会的な経験がないために話している内容がすぐに入ってこないのが、不利なところはあります。社会人は棒をしっかりと持っているので、要求を言われると「それはこのことでしょうか」と差し出す。でも、新卒はちょっと素っ頓狂なことを言ったりして、そこがなかなかいい線をいってたりします。

前野 もう一つ、社会人が新卒に教えるだけではなく、「教えることによる学び」ってあるじゃないですか。多様な専門性を持つ者が集まっているので、みんなで教え合う雰囲気が出ています。我々も学びますしね。それに新卒学生には丁寧に教えないとわからない。チームでいろいろワークをする中で、未熟な若者と一緒にいること自体が社会人にとっても成長になっていると思います。

神武 社会人学生はここに来て2年間ですごい気づきを得ることが多いと思うのです。一方、新卒学生は、ここにいるときには授業の中でバーチャルな会社を立て、小さなロボットを使ってあるサービスを実際に運用できる程度までデザインしたりして、わかった気になるんですが、実はよくわかっていない。だけれども、企業などに入ると、「これが授業で1年前に先生が言っていたことなのか」ということをリアルワールドで気づくようで、我々に「自分がいかに木を見て森を見る教育を受けていたかよくわかりました」と言いに来てくれます。そのような経験をする、自分がどこを深く突き詰めて学ぶべきかということも明らかになるようで、それはすごくうれしいです。

小林 我々はシンセシオロジーをもっとオープンな学



神武 直彦氏

術誌にしていきたいと考えていますが、今後シンセシオロジーに期待することかありましたら、ぜひ伺いたいと思います。

前野 最初にシンセシオロジーを見つけたときはびっくりしました。私たちはこれまでにない新しい道を切り開いているのだと思っていたら、シンセシオロジーは同じところを目指していた。立場は違いますが、志を同じくしている者が国の機関と私立大学にあったということはとてもうれしく思いました。我々もこの5年間でSDM学がかなり深まり、広まって、知名度が上がってきたという自負はありますので、これからもっと連携を深めていきたいと思っています。

小林 きょうはどうもありがとうございました。

この座談会は、2013年7月25日に横浜市にある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において行われました。

略歴（五十音順）

神武 直彦（こうたけ なおひこ）

慶應義塾大学大学院修了後、宇宙開発事業団入社。ロケットの研究開発と打上げに従事。欧州宇宙機関（ESA）研究員を経て、宇宙航空研究開発機構主任開発員。国際宇宙ステーションや人工衛星に搭載するソフトウェアの独立検証・有効性確認の統括およびアメリカ航空宇宙局（NASA）、ESAとの国際連携に従事。2009年度より慶應義塾大学准教授。Sentinel Asia Project（アジア防災・危機管理国際協力プロジェクト）メンバー、Multi-GNSS Asia運営委員、IMES（屋内GPS）コンソーシアム代表。博士（政策・メディア）。

高野 研一（たかの けんいち）

1980年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年財団法人電力中央研究所入所。1995年マンチェスター大学客員フェロー、早稲田大学非常勤講師、電力中央研究所首席研究員を経て、2007年より現職。博士（工学）。大規模技術システムにおけるリスクマネジメントとヒューマンファクター。著書（訳書）：「組織事故」「保守事故」（日科技連出版）など多数。組織診断・根本原因分析などの手法の開発および実践など安全文化醸成の専門家。安全管理の実務、コンサル経験。

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）。同年、電子技術総合研究所入所。2001年産総研サイバーアシスト研究センター長。2004年公立はこだて未来大学学長。認知科学学会会長、情報処理学会元副会長、現編集長。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事典（共立出版）, 思考（岩波講座認知科学8）, Prolog（産業図書）。

西村 秀和（にしむら ひでかず）

1990年3月慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻後期博士課程修了。同年4月千葉大学工学部助手、1995年同助教授を経て、2007年4月より慶應義塾大学教授。2008年4月より、同大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授、モデルベースシステムズエンジニアリングに関する教育と研究に従事。著書にシステムズモデリング言語SysML（監訳）、MATLABによる制御理論の基礎／制御系設計（共著）などがある。日本機械学会フェロー、計測自動制御学会（2013年度副会長兼総務理事）、IEEE、INCOSEなどの会員。工学博士。

前野 隆司（まえの たかし）

1984年東京工業大学卒業、1986年同大学院修士課程修了。キャノン株式会社、カリフォルニア大学バークレー校訪問研究員、ハーバード大学訪問教授等を経て現在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。博士（工学）。著書に、『脳はなぜ「心」を作ったのか』（筑摩書房、2004年）、『思考脳力のつくり方』（角川書店、2010年）など多数。専門は、ヒューマンマシンインタフェースデザイン、システムデザイン・マネジメント学、地域活性化、イノベーション教育など。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

本ジャーナルは、個別要素的な技術や科学的知見をいかに統合して、研究開発の成果を社会で使われる形にしておくか、という科学的知の統合に関する論文を掲載することを目的とする。この論文の執筆者としては、科学技術系の研究者や技術者を想定しており、研究成果の社会導入を目指した研究プロセスと成果を、科学技術の言葉で記述したものを論文とする。従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実に知識）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的知識を記載する論文形式に対して、なすべきことは何であるかという当為的知識を記載する論文のあり方については、論文に記載すべき内容、書き方、またその基準などを模索していかなければならない。そのためには査読プロセスを秘匿するのではなく、公開していく方法をとる。すなわち、査読者とのやり取り中で、論文の内容に関して重要な議論については、そのやり取りを掲載することにする。さらには、論文の本文には記載できなかった著者の考えなども、査読者とのやり取りを通して公開する。このように査読プロセスに透明性を持たせ、どのような査読プロセスを経て掲載に至ったかを開示することで、ジャーナルの質を担保する。また同時に、査読プロセスを開示することによって、投稿者がこのジャーナルの論文を執筆するときの注意点を理解する助けとする。なお、本ジャーナルのように新しい論文形式を確立するためには、著者と査読者との共同作業によって論文を完成させていく必要があり、掲載された論文は著者と査読者の共同作業の結果ともいえることから、査読者氏名も公表する。

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日
 改正 2008年6月18日
 改正 2008年10月24日
 改正 2009年3月23日
 改正 2010年8月5日
 改正 2012年2月16日
 改正 2013年4月17日

1 投稿記事

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

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

3.1.1 投稿原稿は日本語あるいは英語で受け付ける。査読により掲載可となった論文または記事はSynthesiology (ISSN1882-6229) に掲載されるとともに、このオリジナル版の約4ヶ月後に発行される予定の英語版のSynthesiology - English edition (ISSN1883-0978) にも掲載される。このとき、原稿が英語の場合にはオリジナル版と同一のものを英語版に掲載するが、日本語で書かれている場合には、著者はオリジナル版の発行後2ヶ月以内に英語翻訳原稿を提出すること。

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

3.2.3 原稿等はワープロ等を用いて作成し、A4判縦長の用紙に印字する。図・表・写真を含め、原則として刷り上り6頁程度とする。

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

3.3.1 見出しは、大見出しである「章」が1、2、3、…、中見出しである「節」が1.1、1.2、1.3…、小見出しである「項」が1.1.1、1.1.2、1.1.3…、「目」が1.1.1.1、1.1.1.2、1.1.1.3…とする。

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

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

3.3.4 図については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は、白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@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, this stage 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 actively try to bridge the gap.

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
(written in January, 2008)

- Note 1** The period was named “nightmare stage” by Hiroyuki Yoshikawa, the then President of AIST, and historical scientist Joseph Hatvany. The “valley of death” was used 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: S. ICHIMURA

Senior Executive Editor: M. SETO, N. YUMOTO

Executive Editors: T. SHIMIZU, H. TATEISHI, M. TANAKA, S. TOGASHI, Y. HASEGAWA, M. AKAMATSU, F. UEDA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), A. OKADA (Sumitomo Chemical Company, Limited), N. KOBAYASHI (Waseda University), T. MAENO (Keio University), M. YAMAZAKI (The Energy Conservation Center, Japan), H. TAYA

Editors: H. AKOH, S. ABE, K. IGARASHI (Institute of National Colleges of Technology, Japan), K. UEDA (Hyogo Prefectural Institute of Technology), A. ETORI, K. OHMAKI (Toyo University), M. OKAJI (CHINO Corporation), A. ONO, A. KAGEYAMA, S. KANEMARU, T. KUBO, C. KURIMOTO, N. KOHTAKE (Keio University), K. SAKAUE, H. TAO, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), K. CHIBA, E. TSUKUDA, H. NAKASHIMA (Future University Hakodate), S. NIKI, Y. BABA (The University of Tokyo), Y. HINO, T. MATSUI, Y. MITSUISHI, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU, A. YABE, H. YOSHIKAWA (Japan Science and Technology Agency)

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Website and Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

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

URL: http://www.aist.go.jp/aist_e/research_results/publications/synthesiology_e

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

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

1 Types of contributions

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

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

3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

are included.

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

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

3.3 Format

3.3.1 The headings for chapters should be 1, 2, 3..., for subchapters, 1.1, 1.2, 1.3..., for sections, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, for subsections, 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.1.3.

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

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

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

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

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

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

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

4 Submission

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

Synthesiology 6巻総目次(2013)

6巻1号

座談会

Synthesiology 発刊5周年記念座談会

科学・技術・イノベーション時代の新しい研究方法－基礎的研究における構成的アプローチについて・・・ 1-11

研究論文

高効率SOFCシステムによる分散型発電の実現に向けて

－SOFCシステム早期導入に向けた性能評価手法の開発と規格標準化－

・・・田中 洋平、門馬 昭彦、根岸 明、加藤 健、高野 清南、野崎 健、嘉藤 徹 12-23

地下水観測による地震予知研究

－地下水位変化から地殻変動を推定することによる地震予測－

・・・小泉 尚嗣 24-33

高齢者でも読める文字サイズはどのように決定できるか

－文字表示のアクセシブルデザイン技術とその標準化－

・・・佐川 賢、倉片 憲治 34-44

光ファイバ広帯域振動検出システムの開発

－FBGセンサを用いたひずみ・AE同時計測技術－

・・・津田 浩、佐藤 英一、中島 富男、佐藤 明良 45-54

6巻2号

研究論文

視覚障害者のための音による空間認知の訓練技術

－リハビリテーション現場での実用化に向けて－

・・・関 喜一 66-74

生体分子の分離法でカーボンナノチューブを分離

－大量・安価な金属型・半導体型CNTの生産を目指して－

・・・田中 丈土、片浦 弘道 75-83

セラミックカラーデータベースの構築

－30数万点の釉薬テストピースのデータベース化と活用－

・・・杉山 豊彦 84-92

業務用ビデオゲーム表示技術の変遷

－テレビ受像機への描画からリアルタイムグラフィクスへ－

・・・三部 幸治 93-102

大陸棚画定調査への挑戦

－国の権益領域拡大と地球科学の貢献－

・・・西村 昭、湯浅 真人、岸本 清行、飯笹 幸吉 103-117

論説

英国における大学評価の新たな枠組み：Research Excellence Framework

－最近の日本の研究評価の状況との比較－

・・・大谷 竜、加茂 真理子、小林 直人 118-125

報告

研究・技術計画学会第27回年次学術大会での講演

構成学(シンセシオロジー)の論文分析による技術の社会導入に向けた方法論

・・・ 126-128

6巻3号

研究論文

| | | |
|---|--------------------|---------|
| 電力不足発生リスク回避のための節電率設定方法への一提言 -電力供給量逼迫環境下での電力不足発生確率評価システム- | ・・・有蘭 育生、竹本 康彦 | 140-151 |
| ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究開発 -究極のパワーデバイスを目指して- | ・・・鹿田 真一、梅沢 仁 | 152-161 |
| 沖縄海域の海洋地質調査 -海底鉱物資源開発に利用できる国土の基盤情報の整備- | ・・・荒井 晃作、下田 玄、池原 研 | 162-169 |
| 基礎研究および応用・開発研究における標準化活動に係る投入資源の計量方法および差異について -大学・TLO等と電気機械産業の事例- | ・・・田村 傑 | 170-179 |

論説

| | | |
|---|---------|---------|
| 技術開発におけるポートフォリオ構成と社会実装 -GERASの開発と普及に向けての新たな展開- | ・・・駒井 武 | 180-186 |
|---|---------|---------|

6巻4号

研究論文

| | | |
|---|---|---------|
| 再生・細胞医療のための自動細胞培養システムの開発 -高品質細胞製品を調製するロボットシステム- | ・・・脇谷 滋之、田原 秀晃、中嶋 勝己、蓮沼 仁志、下平 滋隆、小野寺 雅史、植村 寿公 | 198-208 |
| リスクトレードオフを考慮した次世代低 GWP 冷媒の選定 -R-1234yfに対するリスクトレードオフ評価- | ・・・梶原 秀夫 | 209-218 |
| 産業保安と事故事例データベースの活用 -リレーショナル化学災害データベース (RISCAD) と事故分析手法PFA- | ・・・和田 有司 | 219-227 |
| 高速充放電型蓄電デバイス“キャパシタ”の開発 -キャパシタデバイスの高性能化を目指した電極材料の開発戦略- | ・・・羽鳥 浩章、棚池 修、曾根田 靖、児玉 昌也 | 228-237 |
| 都市鉱山の戦略的な開発を支える物理選別技術 -未利用・難処理資源の開発と我が国の資源ビジョン- | ・・・大木 達也 | 238-245 |

座談会

| | | |
|--|-----|---------|
| システムデザイン・マネジメント学とシンセシオロジー -現代社会の課題に挑み、研究成果を社会に活かす方法論- | ・・・ | 246-254 |
|--|-----|---------|

編集後記

シンセシオロジーは発刊当初から、「構成学の考え方は普遍的なものであるので、投稿については産総研に限定するものではなく、外部からの投稿を歓迎する」というスタンスでしたが、発刊の経緯や認知度の制約もあり、外部投稿はなかなか期待したほどには増えていないというのが実情です。この状況を打破しないと、本誌の未来もないという危機感もあり、シンセシオロジーの裾野を拡げるために、編集委員会に、積極的に産総研以外の方に参加していただくという取り組みを始めました。その結果、巻末のリストにある通り新たに住友化学株式会社、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構及び慶應義塾大学から数名の方のご協力を得ることができました。ご多忙中、シンセシオロジーのために時間を割くことをご快諾いただいた新メンバーの皆様に、この場を借りて御礼を申し上げます。

さて、この外部委員リクルートの際に、当然のことながら、シンセシオロジーとは何かについて初めての方に説明しなければならない機会があり、あらためてこの雑誌の性格を的確に伝えることの難しさ、自分自身がどこまでコンセプトを理解できているか、について考えさせられました。私は「通常の学術誌では、何かを発明・発見したことそのものの価値を主張するのに対し、シンセシオロジーは、どのようにしてその発明・発見にたどりついたのかというプロセスとそれによ

りどのような社会的価値を創造したのか（あるいは創造しようとしているのか）を主張するところに特徴がある。」と説明しましたが、果たしてこれが標準的な回答かと言われると、首をひねる方もあるかもしれません。発刊の趣旨や、創刊号の吉川先生の論文に回答はあるわけですが、簡潔な表現で分かりやすく説明しようとするとなかなか難しく、つい余分な形容詞を重ねたくなくなってしまいます。

こうした観点から見ると、今回の座談会の内容は非常に興味深いものがあります。慶應義塾大学SDMという、従来産総研とおそらくほとんど研究上の交流がなかった組織が、シンセシオロジーの考え方に共鳴して、積極的に投稿していただくに至ったのはなぜか。その答えが発言の中に凝縮されているように思えます。また、先生方の経歴を拝見すると、慶應義塾大学の中での純粋培養というケースは皆無で、企業や研究機関、他大学等を経て慶應義塾大学SDMに来られており、シンセシオロジー的なものの見方というのがどのようにして醸成されるのか、バックグラウンドの一つを垣間見る気がします。ひるがえって見ると、産総研の研究者は、出身大学は別として、他の組織の経験者が圧倒的に少ないので、今後は外部人材の導入や人材交流をもっと積極的に行う必要があるように感じました。

(編集幹事 立石 裕)

Synthesiology 6巻4号 2013年11月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：一村 信吾

副委員長：瀬戸 政宏、湯元 昇

幹事（編集及び査読）：清水 敏美、立石 裕、田中 充、富樫 茂子、長谷川 裕夫

幹事（普及）：赤松 幹之、植田 文雄（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、岡田 明彦（住友化学株式会社）、
小林 直人（早稲田大学）、前野 隆司（慶應義塾大学）、山崎 正和（一般財団法人 省エネルギーセンター）

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：赤穂 博司、阿部 修治、五十嵐 一男（独立行政法人 国立高等専門学校機構）、上田 完次（兵庫県立工業技術センター）、
餌取 章男、大薮 和仁（東洋大学）、岡路 正博（株式会社 チノー）、小野 晃、景山 晃、金丸 正剛、久保 泰、
栗本 史雄、神武 直彦（慶應義塾大学）、坂上 勝彦、田尾 博明、竹下 満（独立行政法人 新エネルギー・産業技術
総合開発機構）、千葉 光一、佃 栄吉、中島 秀之（公立はこだて未来大学）、仁木 栄、馬場 靖憲（東京大学）、檜野
良穂、松井 俊浩、三石 安、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之（独立行政法人 科学技術振興機構）

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 産業技術総合研究所広報部広報制作室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Development of automatic cell culture system for cell therapy and regenerative medicine

-Robotized system for high quality cell product preparation-

S.WAKITANI, H.TAHARA, K.NAKASHIMA, H.HASUNUMA, S.SHIMODAIRA, M.ONODERA and T.UEMURA

Selection of next-generation low global-warming-potential refrigerants by using a risk trade-off framework

-Risk trade-off assessment for R-1234yf-

H.KAJIHARA

Industrial safety and application of a chemical accident database

-Relational Information System for Chemical Accidents Database(RISCAD) and accident analysis method PFA-

Y.WADA

Capacitor devices for rapid charge/discharge strage

-R&D strategies of electrode materials for high performance capacitor devices-

H.HATORI, O.TANAIKE, Y.SONEDA and M.KODAMA

Physical separation technology to support the strategic development of urban mining

-Development of unused/hard-to-use resources and a future vision of resources for Japan-

T.OKI

Round-table talks

“System design and management” and “synthesiology”

-Methodology to address social challenges and to utilize research results for society-

Editorial policy

Instructions for authors