

Synthesiology

実用化をめざしての再生医療技術開発

輸送用クリーン燃料の製造触媒の研究と開発

実用化へ向けた有機ナノチューブの大量合成方法開発

フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発

水に代わる密度標準の確立

製造の全工程を考慮した資源及びエネルギー利用の合理化指針

シンセシオロジー編集委員会

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第1巻 第3号 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

i

研究論文

- 実用化をめざしての再生医療技術開発 — 安全を担保したヒト細胞操作プロセス構築と臨床応用 —
・・・大串 始 170 (1)
- 輸送用クリーン燃料の製造触媒の研究と開発 — 触媒の基盤研究から製品化に向けた触媒共同開発へ —
・・・霞村 雄二、鳥羽 誠 176 (7)
- 実用化へ向けた有機ナノチューブの大量合成方法開発 — 分子設計・合成技術と安全性評価の統合により
市場競争力のある材料へ —
・・・浅川 真澄、青柳 将、亀田 直弘、小木曾 真樹、増田 光俊、南川 博之、清水 敏美 183 (14)
- フレキシブルプリントブルデバイス製造技術の開発 — 「どこでもデバイス、だれでもデバイス」の実現に
向けて —
・・・鎌田 俊英、吉田 学、小笹 健仁、植村 聖、星野 聡、高田 徳幸 190 (21)
- 水に代わる密度標準の確立 — シリコン単結晶を頂点とする密度のトレーサビリティ体系 —
・・・藤井 賢一 201 (32)
- 製造の全工程を考慮した資源及びエネルギー利用の合理化指針 — アルミニウム鑄造工程のエクセルギー
解析 —
・・・北 英紀、日向 秀樹、近藤 直樹 212 (43)

論説

- シンセシオロジー発刊について — イリノイ大学日本人研究者らとの討論を通じて —
・・・大崎 人士、佐藤 裕二 222 (53)
- 個の「知」から全の「知」へ — 「シンセシオロジー」創刊記念シンポジウム —
・・・シンセシオロジー編集委員会 229 (60)

編集委員会より

- 編集方針 235 (66)
- 投稿規定 237 (68)

English pages

- Messages from the editorial board 238 (69)
- Abstracts of research papers 240 (71)
- Development of regenerative medical technology working toward practical application — *Construction of human cell processing system in view of safety for the purpose of clinical application* —
--- H. Ohgushi 240 (71)
- Development of highly-active hydrodesulfurization catalyst for sulfur-free diesel production — *Full research from in-house laboratory catalyst to commercial catalyst* —
--- Y. Yoshimura and M. Toba 240 (71)
- Development of massive synthesis method of organic nanotube toward practical use — *Integration of molecular design, molecular synthesis and safety assessment for materials having market competitiveness* —
--- M. Asakawa, M. Aoyagi, N. Kameta, M. Kogiso, M. Masuda, H. Minamikawa and T. Shimizu 240 (71)
- Development of flexible-printable device processing technology — *For achievement of prosumer electronics* —
--- T. Kamata, M. Yoshida, T. Kodzasa, S. Uemura, S. Hoshino and N. Takada 240 (71)
- A new density standard replaced from water — *Using silicon single-crystals as the top of traceability in density measurement* —
--- K. Fujii 241 (72)
- A rationalization guideline for the utilization of energy and resources considering total manufacturing processes — *An exergy analysis of aluminum casting processes* —
--- H. Kita, H. Hyuga and N. Kondo 241 (72)
- Editorial policy 242 (73)
- Instructions for authors 244 (75)

実用化をめざしての再生医療技術開発

—— 安全を担保したヒト細胞操作プロセス構築と臨床応用 ——

大串 始

近年、細胞を培養増殖・加工して種々の疾患治療に用いるという再生医療技術が注目されている。この技術を臨床応用するためには、これら培養プロセスの安全性のみならず用いる細胞の有用性の担保も必要である。これらプロセス構築にかかわる問題点を整理して解決し、実際の治療応用への展開に成功した。

1 緒言

近年のライフサイエンス技術の発展により、従来は根治治療が不可能であった疾患においても、革新的な治療を支える先進医療技術の応用が現実のものとなりつつある。臓器・組織移植以外の選択肢を持たなかった重篤な疾患においても、こうした先進医療技術による新規高度治療の可能性が具体化している。例えば、細胞を用いる再生医療による種々の難治性の疾患治療が試みられつつある。再生医療では、通常採取された細胞は培養による増殖・加工（分化）という過程を必要とする。この培養においては、当然のことながら、外部からの細菌、真菌、ウイルス等の感染があってはならない。さらに、感染の防御のみならず、増殖・分化操作を受けた細胞がその安全性や有効性を担保されていることも必須である。種々の細胞を用いての再生医療が想定されるが、ES細胞を用いた基礎研究から医療現場で既に用いられている患者自身の体細胞を用いての治療まで様々なりリスク、実用化段階のものが存在している。さらに、最近では京都大学山中教授等により開発された人工万能細胞（iPS）が倫理的問題のあるES細胞に取って代わり応用される可能性が示唆されている。しかし、現段階ではES細胞やiPS細胞は移植によりテラトーマという腫瘍を形成し、その安全性は確立されておらず、治療に用いることはできない。以上の状況に鑑み、本論文は再生医療技術の開発とその技術利用における問題点を整理し、早期の臨床応用をふまえて、社会に受け入れ易い医療システムの構築、特に骨再生技術を確立したので、それにいたるアプローチならびに成果について記述する。

2 再生医療技術開発における課題

再生医療とは、細胞あるいは細胞由来の組織の移植により、病気や傷害などによって失われた臓器や組織の機能を修復・再生する医療と考えられる。他の既存の治療と異なり、ユニークな点は培養という工学的な技術により細胞を増殖・加工（分化）するプロセスが存在することである。このためには、用いる細胞の選択、培養工程プロセスの安全性確保が必要である。例えば、ヒト（哺乳類）の細胞を増殖するためには、細胞を種々のアミノ酸やビタミン等が含まれた液体の培地の中で培養を行う。しかし、このとき一個の細菌でも混入すると、細菌の増殖率はヒト細胞より数倍～数十倍高く、ヒト細胞が増殖したときには、それよりはるかに多くの細菌も増殖することとなり、この培養細胞の患者への移植により感染症が発生する。

この感染を防ぐために、厳重に管理された無菌空間内

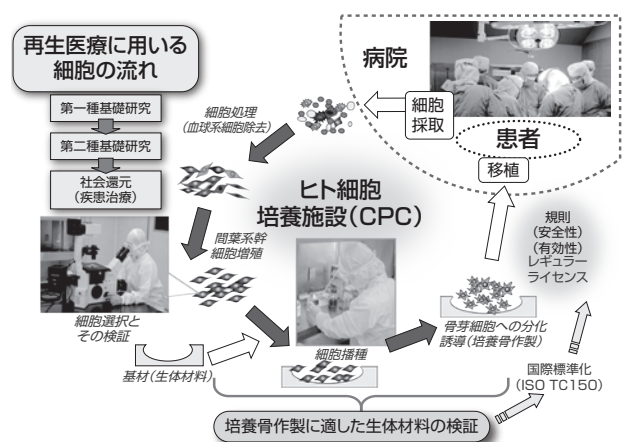


図1 患者細胞の培養から移植までの流れ

での培養環境、すなわちヒト細胞を専用に培養する施設（CPC：Cell Processing Center）を必要とする（図1）。このCPC内で細胞の増殖・加工作業を行うが、通常病院で採取された細胞は目的とする細胞以外に種々雑多の細胞を含む集団であり、その中から目的とする細胞を選択し増殖させなければならない。このためには、細胞選択技術開発をふまえて、その選択された細胞が増殖するかの検証も必要となる。さらに増殖した細胞は分化という加工プロセスを経て再生される組織・臓器に特異的な細胞へ転換される。この分化した細胞が果たしてその特異的な細胞としての機能を有しているのかの検証も必要となる。また、これらの操作された細胞を患者にそのまま移植する場合もあるが、多く（例えば我々が精力的に行っている骨・関節再生）は、細胞と生体材料とを複合化し、この複合体（ハイブリッド）が移植される。この場合、用いられる生体材料の安全性ならびに細胞に対する有用性、例えば細胞分化を支持する材料かの検証も必要である。さらに、これらの検証プロセスの規格化あるいは標準化により、より多くの患者に適応が可能となり、社会に認知される治療技術となる。

以上の点を整理すると次の4点に集約される。

- 1) ヒト細胞培養施設（CPC）の環境整備
- 2) 目的とする細胞の選択と増殖能検証
- 3) 細胞の分化検証（生体材料の検証）
- 4) 再生医療にかかわる標準化

3 再生医療の課題に対する我々の取り組み

3.1 ヒト細胞培養施設の環境整備

図1に培養工程の模式図を示す。病院内で患者から細胞（骨髄）が採取される。この細胞は我々の細胞培養施設（CPC）へ搬送され、細胞の増殖が行われる。増殖された細胞そのものを移植される場合もあるが、さらなる分化過程を経て目的とする臓器・組織の構成細胞へ分化し、こ

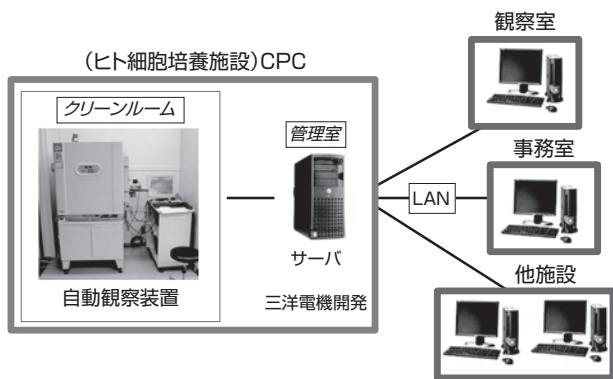


図2 ヒト培養施設の環境整備（細胞自動観察装置開発）

の分化細胞が再度病院に搬送され、病院で患者に移植される。通常、この分化過程は種々の生体材料上で行うことが多い^[1]。

上述のように、これら細胞の増殖・分化の過程で細菌や真菌が混入する（コンタミネーション）と細胞も増えるが細菌も増えることになり、このような細胞は使用できない。また、細菌は通常環境内に常在している。そこで、半導体工場のクリーンルームなどで使用されているHEPA（ヘパ）フィルターで微粒子を除去した空気をCPC内に送り込み、滅菌したキャビネットの中で細胞培養操作を行う。このように、ある程度物理的にCPC内に無菌環境域をつくることは可能であるが、我々ヒトの体内には種々の雑菌が内在していて、外部からでなくヒト（作業員）そのものが感染源となりうる。しかし、このCPC内における細胞の増殖・加工というプロセスには作業員が必要である。また、このようなプロセス以外にも、例えば細胞が予定通り増殖・分化しているかの確認のために、CPC内での顕微鏡を用いた細胞観察も必須である。このCPC内へのヒトの出入りを少なくするため、我々は三洋電機株式会社と一緒に細胞自動観察装置を開発した^[2]。図2に見られるように、本装置を用いることで、LANを介した遠隔地から、ユーザが指定する任意の培養容器の任意の位置の画像を観察することができる。すなわち、CPC内に立ち入ることなく細胞の観察が可能であり、無菌環境を保つことができる。さらに、培養工程は厳重な品質管理手順の下に行われているが、培養細胞のデータを記録する作業も作業員の負担になっている。

図3に本装置によって観察された細胞の24時間ごとの画像を示す。すべて、同一部位（定点）を観察している。

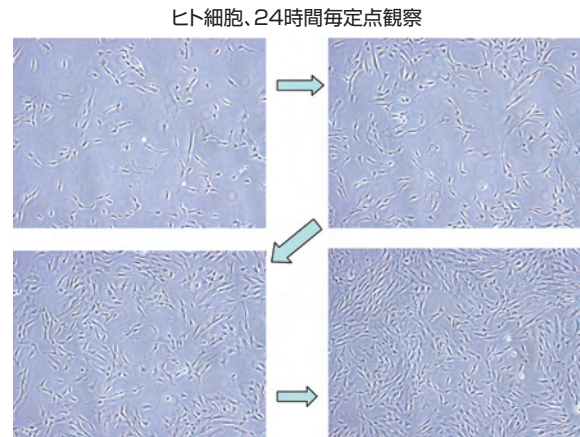


図3 細胞自動観察装置による定点観察（細胞観察機能付自動搬送インキュベータ）

時間が経過するごとに細胞数が増え、順調に細胞が増殖していることが分かる。このような細胞培養の微細領域を再現性をもって継時的に遠隔的に観察できる装置はこれまでになく、この装置の開発意義は大きい。また、本装置はこれらの観察結果を定期的に画像データとして記録することも可能である。以上、品質管理の精度の向上と作業員の負荷の低減の両方に貢献できる技術開発を行うことができた。より理想的には人手に頼らない細胞培養が望まれ、この点において、自動培養装置の開発も行っているが、紙面の関係上省略する。

3.2 目的とする細胞の選択技術（細胞増殖の検証）

さて、細胞の増殖過程は種々の再生医療において行われる最初のプロセスである。しかし、採取された細胞は種々雑多な細胞を含むのでその細胞集団より目的とする細胞の選択が必須である。例えば、我々は赤血球、白血球等の血球系細胞およびその他の細胞を含む新鮮骨髄から間葉系幹細胞を選択増殖することを行っている。具体的には培養皿に新鮮骨髄を播種し皿表面に接着する細胞を増殖・回収することで血球系の細胞を除去している。実際、このようにして回収された細胞集団は間葉系幹細胞に多く発現している種々のマーカー発現を呈する。しかし、この段階においても、種々の異なった増殖能をもつ細胞集団からなり均一ではない。すなわち、その時点で培養している間葉系幹細胞が予想通りに増殖するか判断は困難である。

我々はこれまでの臨床応用研究の過程で、培養中の間葉系幹細胞の核が薄くなり細胞形態が扁平になると、増殖速度が落ちることを経験してきている。そこで、この現象を定量的にとらえることにより、増殖能を予想することを考えた。具体的には、原子間力顕微鏡を用いて測定した間葉系幹細胞の厚みと細胞増殖活性の相関を検討し、増殖能の高い間葉系幹細胞は増殖能の低い細胞に比し、小型で細胞核部分での厚みが増加していることを見出した^[3]。し

かし、この原子間力顕微鏡は非常に高価であり、また操作も困難で計測にも時間がかかる。そこで、間葉系幹細胞の核にあたる部分の細胞厚みと光学顕微鏡像による細胞（平面）形態から、培養中の細胞増殖活性度の評価が可能かどうかを検討し、これらの指標を用いて細胞増殖活性を評価する技術ならびに増殖活性を測定する装置の開発をオリンパス株式会社と共同で行った。具体的には、光学顕微鏡による細胞厚み計測法として、培養容器に接着した間葉系幹細胞の位相像を取得し、画像解析ソフトによる画像処理により細胞厚みならびに細胞面積に対応した数値情報を取得した。図4に見られるように、本装置により、培養中の間葉系幹細胞が3次元で表示され、その厚みも自動的に測定できる。本装置を使用することにより培養中の細胞の増殖能が非侵襲的に予測されることとなり、用いる細胞の増殖の検証が可能となる。すなわち、より有効性を担保できうる細胞培養のできる技術開発に成功した。なお、本装置は既存の光学顕微鏡と連動することが可能であり、すでに各病院や研究室に設置されている顕微鏡の付属機器となりえる。このように、我々が開発した機器は、コストパフォーマンスにすぐれ、将来汎用性をもって各所で使用されることが期待される。

3.3 細胞の分化の検証（生体材料と組み合わせる場合は材料上での分化の検証）

我々は再生医療技術開発の中で、特に骨再生に関する技術開発を行ってきた。具体的には細胞培養により間葉系幹細胞を骨形成能力のある骨芽細胞へと細胞分化させ、その骨芽細胞による骨基質を種々生体材料上で形成する（再生培養骨）^{[4][5]} という手法を用いての骨再生である。この再生培養骨の作製には種々の生体材料が用いられる。特に、細胞を保持する多孔体の構造をもつ材料が有用である。しかし、その生体材料が果たして細胞を効率良く保持でき、さらに生体内で新生骨形成能を有するかの評価が必要である。そのため、再生培養骨に使用される生体材料の性状、物性と間葉系細胞の活性の比較検討を行い、生体内で骨新生を評価する手法の確立を目指した。また、この評価法を標準化すべく、細胞のソース（この場合はラット大腿骨骨髄）を一定とし、手順も一定にするべく検討を行っている。

具体的な手順を述べると、7週齢ラットの骨髄をプラスチック内で培養して間葉系幹細胞を増殖させ、細胞濃度が 1×10^6 cell/mlになるように調整する。使用する多孔体材料を培養プレートに並べ、調整した細胞懸濁液にて浸漬する。骨分化誘導培地を用いて、さらに2週間培養する。培養終了後骨分化した細胞（骨芽細胞）の検出はアルカリフォスターゼ染色によった。図5上図に見られるように、2種類

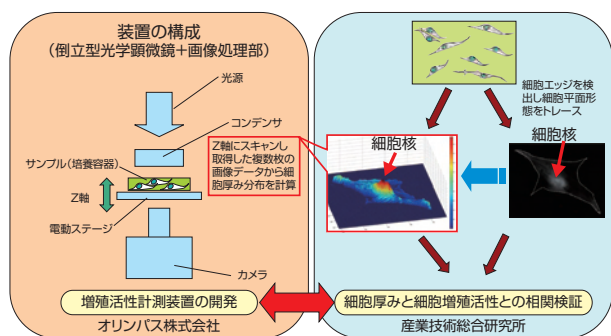


図4 細胞厚み計測装置開発（細胞増殖活性計測評価技術と計測装置開発）

の材料（多孔体の合成ハイドロキシアパタイトと珊瑚骨格由来のハイドロキシアパタイト）を比較すると、前者では材料表面の気孔にのみ骨分化が生じる。これに比し、後者では気孔の内部にまで細胞が生着し、骨分化も良好に生じていることが分かる。さらに、同系ラットへの移植を行った。図5下図に見られるように、珊瑚骨格由来の多孔体ハイドロキシアパタイトには多孔体の内部にまで新生骨（図では赤色に示される）が見られた。このように、in vitro の培養と in vivo の移植研究により、用いられる生体材料の骨分化能に関する検証がなされる。以上、骨再生医療に用いられる生体材料の有効性について事前に判定しうる評価技術を開発した。

3.4 再生医療にかかわる標準化

上述のように、再生医療においては、採種した細胞や培養増殖した細胞、さらに分化させた細胞が適切なものであることを確認するとともに培養プロセスの効率化を常に検証する必要がある。また、再生医療の産業化を考慮した場合、用いる細胞の安全性や有効性などの評価方法や基準の確立は必須である。標準化された細胞の評価方法を用いることにより評価結果の基準がつけられることとなり、安全性や有効性の判断が容易となる。すなわち、この標準化によりプロセスの効率化を進める上での指標が明確となり、再生医療製品作製のための計画立案、遂行が容易となる。3.3 節に記述のように、例えば我々は骨再生医療に用いられる生体材料の評価方法を確立しつつある。そこで、その評価法の国際標準化を視野に入れている。国際標準化機構（International Organization for Standardization：ISO）では、現在約230の専門委員会（Technical Committee：TC）が積極的な活動を展開し、その中で医療機器に関してはTC150（外科用インプラント：Implants for Surgery）が担当している。その

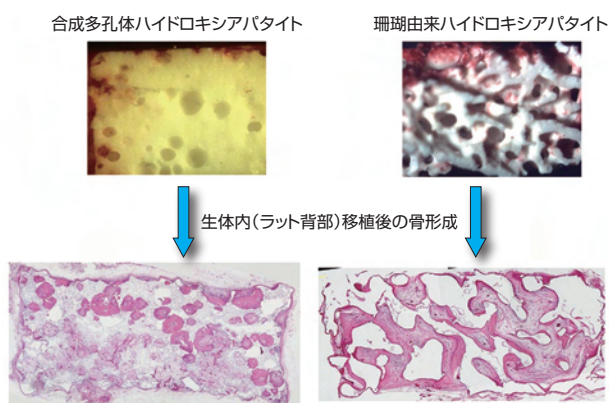


図5 生体材料の検証（間葉系幹細胞播種後の骨芽細胞存在部位）

TC150 はさらに分科会（Subcommittee：SC）や作業部会（Working Group：WG）に分かれ、各国の専門家により、議論が進められている。再生医療分野では、WG11（Tissue Engineered Implants）において、再生医療技術に関する規格案が審議され、2007年1月にはSC7（Tissue Engineered Medical Products）への“昇格”が承認された。我々は規格案「ラット間葉系細胞を用いた多孔性材料内における生体内骨形成評価法」（提案名称：In vivo bone formation in porous materials using rat mesenchymal cell - Standardization to evaluate bone forming ability of biomaterials）を提出し、我が国発の再生医療技術の規格化に向け活動を開始している。図5にその規格案により行なわれた材料内での骨形成を示す。

4 再生医療技術を利用した臨床応用

再生医療における課題を克服すべく種々の技術開発を企業の方々とともに進めてきた。その結果として、世界に先駆けて再生培養骨が形成された人工関節を変形性関節症患者者に移植することができた。最初の症例は既に約6年経過し、総数は50例を超えている。まだまだ短期的ではあるが、炎症反応や感染等の副作用も生じず、人工関節の有害事象である移植部での“ゆるみ”もなく良好な結果を保っている^[6]。また、関節症患者のみならず、骨腫瘍^[7]等にも再生培養骨が移植されている。（株）富士経済の調査によると日本における関節症患者数は約80万人でそのうち2万人が再生医療の対象患者であると推定されている。このように、我々の技術は多数の患者に適用される可能性がある。さらに、間葉系幹細胞が血管内皮や心筋細胞へも分化しうることを確認し^[8]、国立循環器病センターとともに心再生への臨床応用も開始した。このように、患者自身の組織を犠牲にすることなく、最小限の侵襲（骨髄穿刺）により採取された、患者自身の細胞（骨髄細胞）を利用することにより、骨・関節疾患のみならず心不全等の治療技術の開発に成功した。この心不全の推定患者数は160万人である。今後、骨髄由来間葉系幹細胞の様々な組織構成細胞への分化能力を利用してさらに幅広い組織・臓器再生における臨床応用が期待できる。

5 考察（残された課題）

さて、以上のように我々は再生医療に用いられる種々の技術を開発し、その結果として骨再生をはじめとして、様々な疾患の患者に対して応用、すなわち臨床研究を行ってきた。しかし、数多くの患者にその恩恵を与えるには、企業がこれらの医療応用に対して取り組みを行うことが必須である。そのためには、これらの研究が治験（ちけん）

clinical trial) というプロセスを経て、最終的に培養された細胞が厚生労働省の許認可の下、再生医療製品として販売される必要がある。例えばアメリカの Genzyme 社は米国食品医薬品局 (FDA) の認可の下、1 万例以上の患者に対して増殖軟骨細胞を製品として販売している。我が国では、広島大学の越智教授により、軟骨培養をコラーゲンゲルの中で 3 次元培養を行い、この軟骨・コラーゲンゲルの複合体を用いての軟骨再生技術が開発された。この技術はジャパン・ティッシュ・エンジニアリング (JTEC) に移転され、治験がほぼ終了状態にあるもののまだ製品としては出回っていない。この点に比し、JTEC が軟骨再生を開始するのとはほぼ同時期に韓国の SEWON Cellontech 社が軟骨再生事業にとりかかり、すでに韓国食品医薬品局 (KFDF) の認可の下 3,000 名近くの患者に適用している。

また、軟骨再生よりさらに歴史の古い皮膚再生においては、既に諸外国で複数の製品が出回っている。しかし、日本においては JTEC がつい最近再生医療製品として承認を受けた段階である。このように、この再生医療分野においては諸外国に比し日本の産業化の遅れは明白である。すなわち、許認可に対する日本のスピードの遅さは明白な事実である。今後、再生医療の産業化を推進するためには、再生医療製品の安全と有効性の科学的根拠の確立に行政側からの取り組みも必要とされるであろう。

現在、日本の医療制度は、事業段階においては薬事法で規制する仕組みになっており、例えば、医薬品や医療機器を販売するには、上述の薬事法で定めるところの治験というプロセスを経る必要がある。また、この薬事法はその性格上、不特定多数に対しての製造販売を念頭においた法体系となっている。しかし、我々が行っている再生医療、すなわち患者から細胞を分離、培養増殖して同一患者にその培養細胞を移植する医療は、患者自身の細胞（自己細胞）を利用する再生医療技術である。すなわち、特定の個人対象の医療であり、不特定多数を対象とした薬事法にはなじまない可能性がある。さらに、この再生医療技術においては、医師が患者から細胞の採取を行う必要性があり、必然的に細胞を治療目的で患者に移植するかなり以前より、医師と患者の間には一対一の対応が成り立ち、自己細胞を用いる再生医療のリスクとベネフィットの説明・許諾がなされ得る。このように、自己細胞を用いる再生医療は他家細胞を用いての治療技術とは明らかに異なるものであり、この医療技術に関しては、新たな認定体制の検討も必要であろう^[9]。このように、再生医療という新しい技術革新に関しては、既存の考え方にとらわれない新しい体系構築も考えるべきと思われる。

謝辞

本論文はセルエンジニアリング研究部門の組織・再生工学研究グループの皆様の協力の下になされ、中でも国際標準に関しては廣瀬志弘研究員の精力的な活動が不可欠であった。細胞自動観察装置の開発は新機械システム普及促進事業“幹細胞の培養状態自動観察システム開発”の支援をうけ三洋電機株式会社と共同での開発で、バイオメディカ事業部の原田 雅樹氏、ヒューマンエコロジ研究所の山本 宏氏のご協力に感謝する。また、細胞厚み計測装置に関しては健康安心プログラム“再生医療の早期実用化を目指した再生評価技術開発”の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託をうけてオリンパス株式会社との共同での研究であり、医療新事業プロジェクトの福田 宏氏のご協力に感謝する。

キーワード

再生医療、細胞培養、細胞分化、生体材料、国際標準

参考文献

- [1] H. Ohgushi and A.I. Caplan: Stem cell technology and bioceramics: From cell to gene engineering, *J. Biomed Mater. Res.*, 48(6),913-27(1999).
- [2] H. Yamamoto, M. Harada, A. Michida, M. Houjou, Y. Yokoi, A. Sakaguchi, H. Ohgushi, A. Ohshima, and S. Tsutsumi: Development of cell culture system equipped with automated observation function, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 2(3),127-137 (2007).
- [3] Y. Katsube, M. Hirose, C. Nakamura and H. Ohgushi: *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 368(2),256-260(2008).
- [4] H. Ohgushi, Y. Dohi, T. Katuda, et. al: In vitro bone formation by rat marrow cell culture, *J. Biomed Mat. Res.*, 32,333-40(1996).
- [5] Y. Tohma, Y. Tanaka, H. Ohgushi, et. al: Early bone in-growth ability of alumina ceramic implants loaded with tissue-engineered bone, *J. Orthop Res.*, 24,595-6037(2006).
- [6] H. Ohgushi, N. Kotobuki, H. Funaoka, et. al: Tissue engineered ceramic artificial joint-ex vivo osteogenic differentiation of patient mesenchymal cells on total ankle joints for treatment of osteoarthritis, *Biomaterials*, 26(22),4654-61(2005).
- [7] T. Morishita, T. Honoki, H. Ohgushi, et. al: Tissue engineering approach to the treatment of bone tumors: three cases of cultured bone grafts derived from patients mesenchymal stem cells, *Artif. Organs*, 30(2),115-8(2006).
- [8] N. Nagaya, K. Kangawa, T. Itoh, et. al: Transplantation of mesenchymal stem cells improves cardiac function in a rat model of dilated cardiomyopathy, *Circulation*, 112,1128-1135(2005).
- [9] 自己細胞再生治療法ワーキンググループ編：“自己細胞再生治療法”法制化の考え方, ティッシュエンジニアリング313-326,日本医学館,(2007).

(受付日 2008.4.14, 改訂受理日 2008.6.2)

執筆者略歴

大串 始（おおぐし はじめ）

1976年奈良県立医科大学卒業、1980年同大学院（生化学）で医学博士。整形外科医として数カ所の病院勤務、1985-1987年米国 Case Western Reserve UniversityでResearch Associateとして勤務。帰国後、臨床応用を目指して細胞を用いた骨再生研究に従事。2001年1月産業技術融合領域研究所入所（主任研究官）、同年4月産業技術総合研究所研究チーム長、2006年セルエンジニアリング研究部門主幹研究員。

査読者との議論

議論1 間葉系幹細胞利用技術の必要性

質問（栗山 博）

患者由来の間葉系幹細胞を用いる必要性を緒言の中で簡潔に述べておくことが必要と思われます。合わせてiPS細胞の危険性について、なぜなのか具体的に示しておくことも大切に思われます。（なぜ有名なiPS細胞ではいけないのかという素朴な疑問への質問として）

回答（大串 始）

本文緒言のところにiPS細胞は移植によりテラトーマという腫瘍を

形成することを挿入しました。

議論2 骨・軟骨治療の重要性

質問（栗山 博）

4. において、本技術の適用対象である骨・軟骨の再生が必要な症例の数ほどの程度あるか、また国内外の需要予測などを記載してはどうでしょうか。さらにこうした医療技術の適用が期待される他の症例と患者数も記載すると、本技術開発の有用性がより明らかになると思いますがいかがでしょうか。（患者数を表で示すことも検討してはいかがでしょうか。）

また、[6]の文献に記載されているのかもしれませんが、骨・軟骨治療に関して実際の症例数、治療結果はどうかをここで示してはどうでしょうか。

回答（大串 始）

関節症の患者数と再生医療が適応となる予想患者数を本文に挿入しました。また、心不全の患者総数も挿入しました。実際我々が行った関節症の再生医療数は50数例ですので、50例を超す患者に適応したと記入しました。なお、治療結果の詳細について述べると字数が超えますし、本題と少し離れるかと思いますので人工関節の有害事象である移植部での“ゆるみ”もなく良好な結果を保っていると記入しました。

輸送用クリーン燃料の製造触媒の研究と開発

—— 触媒の基盤研究から製品化に向けた触媒共同開発へ ——

葭村 雄二*、鳥羽 誠

輸送用燃料のクリーン化、特に硫黄分の大幅低減は自動車排出ガスの低減に有効であり、また、新規高性能排出ガス処理装置の開発支援に繋がる。我々は、軽油のサルファーフリー化（硫黄分 <10ppm）用脱硫触媒の開発を行い、触媒調製法の切り口から新規展開を図り、次いで触媒メーカーとの共同研究を通して新規脱硫触媒の製品化に成功した。

1 研究の背景

都市大気環境規制の強化に伴い、自動車排出ガス（特に、ディーゼル車からのNO_xやPM等）の更なる低減が求められており、エンジン側、排出ガス処理側、燃料側から種々の取り組みが行われている。前二者が主として自動車業界で、後者が石油業界で対応されている。排出ガス処理装置には酸化触媒、DeNO_x触媒、ディーゼルパティキレートフィルター（DPF）等が含まれるが、触媒材料として用いられる貴金属や塩基性酸化物等が硫黄被毒を受け易く、引いては触媒の燃焼再生頻度増加に伴う燃費悪化に繋がりがやすいため、革新的排出ガス処理触媒の開発加速には軽油の低硫黄化が不可欠とされてきた。このため、我が国では硫黄分を10 ppm以下に低減したサルファーフリー軽油の供給が2005年から限定的に開始され、2007年からの全国供給に至っている。しかし、これまでの軽油のサルファーフリー化（硫黄分<10 ppm）は、精油所内設備の部分改造や高性能脱硫触媒の利用に加え、処理原料の変更（難脱硫性硫黄化合物や窒素含有量の高い高沸点留分のカットや脱硫反応に対し吸着阻害効果の大きい芳香族分を多く含む流動接触分解軽油（LCO）等の混合量低減等）、脱硫反応操作条件の変更（単位触媒重量あたりの油処理量の低減等）、脱硫処理プロセス変更等により総合的に実施されている。このため、サルファーフリー軽油の製造コスト低減等の面から、原料制約や処理量低下に繋がる原料調整やプロセス変更等を最小限に抑え、脱硫触媒の交換のみで対応可能な高性能かつ長寿命の脱硫触媒に対する期待は大きい。

軽油のサルファーフリー化は世界的な潮流である（図1）。このため、製油所内の現行設備の改造や運転条件等

の変更を行うことなく、脱硫触媒の交換のみで軽油のサルファーフリー化を達成できる高性能脱硫触媒へのニーズは、海外の製油所でも急速に高まっている。我が国の軽油基材は欧米に比べて重質であり、また、難脱硫性硫黄化合物含有量も多いため、我が国で対応可能な脱硫触媒が開発できれば、その脱硫触媒技術は世界に通用する可能性も秘めている。

我々は輸送用燃料のクリーン化に対する社会ニーズに対応すべく、「軽油のサルファーフリー化用脱硫触媒」の製品化に向けた研究開発を行った。

2 研究目標とアウトカム

軽油は、原油を蒸留して得られる軽油留分を主基材とし、含有する有機硫黄化合物中の硫黄（硫黄量：1~1.5 wt%）を脱硫触媒の存在下で水素と反応させ、硫化水素に変えて除去する水素化脱硫法により製造されている（図2）。

軽油の硫黄分規制に伴い、水素化脱硫触媒の性能は徐々に向上しており、この10年間の脱硫活性向上は著しい。

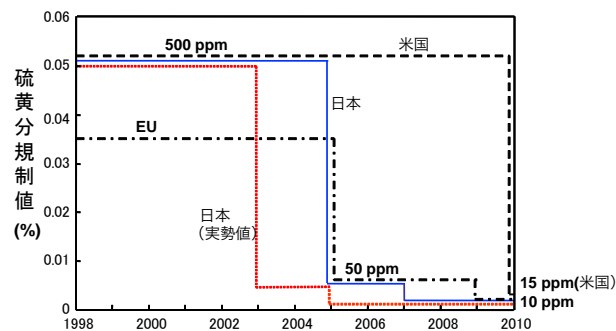


図1 軽油中の硫黄分規制の動向

サルファーフリー軽油を一世代前のS<50 ppm軽油製造用条件と同じ条件下で製造するためには、反応温度換算で約10℃高活性化（約2倍の活性）が必要とされている（言い換えれば、約10℃低い反応温度でも同等の脱硫活性が発現）。脱硫反応では通油時間の経過とともに脱硫活性が徐々に低下するため、S<10 ppmの品質は反応温度を徐々に上げていくことにより補償されている（例：約1℃増加/月）。しかし、高温反応条件下では触媒上への炭素質析出や触媒活性成分の構造変化等が顕著になり、その結果、活性低下が加速される傾向にあるため、高温域での温度補償には限界がある。このため、サルファーフリー軽油の安定製造には脱硫触媒の低温活性化（温度補償域の拡大）が不可欠である。既に、各触媒メーカー（Criterion Catalyst, Haldor Topsøe A/S, Albemarle Catalyst等）や石油会社（Exxon Mobil, IFP/Axens, コスモ石油株式会社, 新日本石油株式会社等）でサルファーフリー軽油対応型の脱硫触媒が開発され製品化されているが、原料油種や脱硫設備の操作条件等の制約を受ける場合もあり、依然として脱硫触媒の高性能化（低温活性化と長寿命化）に向けた研究開発が継続中である。

我々は、軽油のサルファーフリー化用脱硫触媒の開発を行うにあたり、脱硫触媒の高性能化の鍵は触媒調製技術にあると考え、開発した触媒調製技術を「現行の脱硫触媒の商業製造ラインをそのまま利用できる触媒調製技術」にまで最終的に仕上げることを念頭に本格研究を実施した。具体的には、研究目標（代表例）を次のように設定した。

<脱硫触媒の性能・利用面での課題>

- ① 従来型脱硫触媒（S<50 ppm軽油対応型）に比べ、活性が約2倍以上の脱硫触媒
- ② 触媒寿命が従来型脱硫触媒と同様に2年以上（活性劣化の温度補償率<1℃/月程度）の脱硫触媒
- ③ 従来型脱硫触媒とほぼ同等のハンドリング特性や安全性を有する脱硫触媒

<脱硫触媒の製造面での課題>

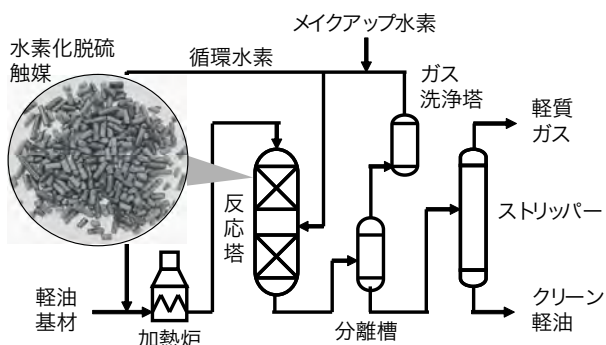


図2 製油所における水素化脱硫プロセスの概要図

- ④ 従来脱硫触媒と同様に低廉な触媒原料が可能であり、スケールアップが可能な触媒調製技術（数十gのピーカースケールからtonレベル/日の工業規模レベルへ）
- ⑤ 触媒調製工程における支配因子の抽出と支配因子制御技術
- ⑥ 開発脱硫触媒の工業規模製造技術

もちろん、この全ての項目への対応は我々単独では不可能であるため、我々は得意とする①、④、⑤、特に脱硫触媒の新規調製技術に係る④と⑤に注力し、他の項目については触媒メーカーと共同開発を行った。

研究のアウトカムとしては、軽油のサルファーフリー化用新規脱硫触媒の商品化、並びにサルファーフリー軽油の市場への供給支援である。高性能排出ガス低減触媒を搭載したディーゼル車の普及にも間接的に貢献できるため、ディーゼルスフトによる運輸部門からのCO₂低減への波及効果が期待できる。

3 目標実現に向けた研究シナリオ

軽油中には、図3のGC-SCDクロマトグラムに示すとおり、各種の硫黄化合物（ベンゾチオフェン類、ジベンゾチオフェン類等）が含まれている。これらの硫黄化合物中のC-S結合が硫化物触媒上で切断され、硫黄は水素と反応して硫化水素として除去される（式1）。



この水素化脱硫（Hydrodesulfurization、略称はHDS）反応は高温・高圧反応条件下（例えば、反応温度=330℃～360℃、反応圧力=3 MPa～7 MPa）で行われており、反応器への脱硫触媒充填後、約2年間にわたり連続運転されている。脱硫触媒は、多孔性酸化物上にMo, W, Co, Ni等の

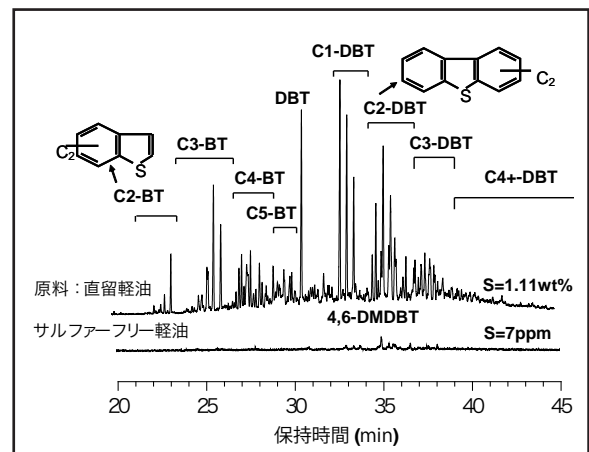


図3 常圧蒸留で得られる軽油留分（直留軽油）中に含まれる硫黄化合物

金属種（主として金属酸化物）を担持したものがほとんどであり、脱硫操作に先立ち硫化処理が行われている。

水素化脱硫触媒上に発現する活性点の構造については長年にわたり議論がされてきており、現在では、硫化CoMo/Al₂O₃系触媒を例にとれば、多孔性γ-Al₂O₃担体上でMoS₂粒子が高分散状態で存在し、MoS₂粒子のS-エッジ部位にCo種が配位しており、脱硫活性の高いCo-Mo-S相が形成されるとする活性構造モデルが多く支持されている（図4）。

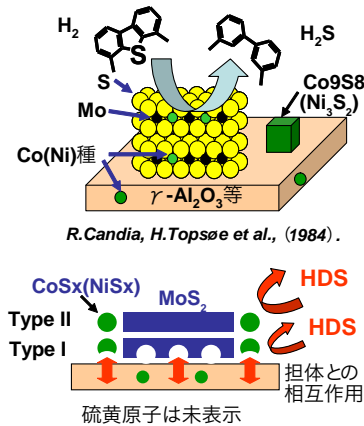


図4 硫化モリブデン系脱硫触媒の活性相の構造モデル

Topsøeら^[1]によれば、このCo-Mo-S相は、担体との相互作用が大きいType I型と担体との相互作用が小さいType II型に分類されており、単位Co量基準の脱硫活性は、Type II>Type Iであることが示された。このため、脱硫触媒の高性能化に向け、Type II型のCo-Mo-S構造を選択的に作り出す触媒調製法が開発されている。

コスモ石油株式会社^{[2][3]}では、Type II型のCo-Mo-S相を多積層化する触媒調製法が開発された（図5の①、触媒調製工程でクエン酸をキレート剤として利用）。MoS₂相の平均積層数~3.8で高活性が得られ、開発触媒は実用化されている（実用触媒では、脱硫性硫黄化合物中のアルキル側鎖による立体障害を回避するため、異性化機能を増強する目的でゼオライトを含有するアルミナ担体が用いられていると報告されている）。

産総研^{[4]-[6]}では、Type II型のCo-Mo-S相を低積層化す

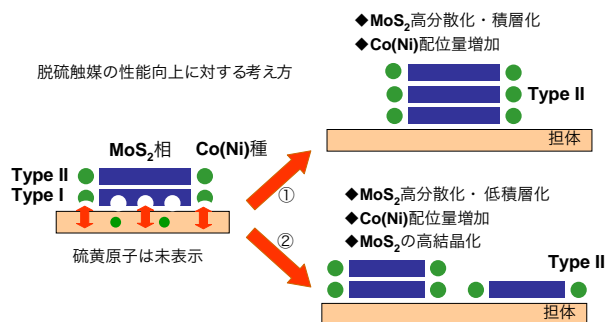


図5 脱硫触媒の高性能化に向けたアプローチ

る触媒調製法を開発した（図5の②）。これは、長期間脱硫反応に使用したCoMo/Al₂O₃やNiMo/Al₂O₃使用済み触媒では脱硫活性がある程度維持されているものの、低積層数（単層の割合が多い）かつMoS₂の(002)面が成長したMoS₂粒子が多く見られるため、低積層化でも性能が十分発揮できると考えたことによる。

さらに、我々はType IIのCo-Mo-S相の結晶性にも着目し、高結晶性化により次のメリットを期待した：①高結晶性であるため触媒の硫黄ポテンシャルが高く、Co-Mo-S相上の硫黄配位不飽和サイト（脱硫活性点）が硫化水素による吸着阻害を受けにくくなる、②配位硫黄の塩基性が高まり、硫黄化合物からのプロトン引き抜きによる脱硫反応促進や水素活性化に寄与しやすくなる、③配位硫黄の塩基性向上（近傍の硫黄配位不飽和サイトのLewis酸性低下）のため、脱硫反応が原料油中の塩基性芳香族化合物や窒素化合物の吸着阻害を受けにくくなる、などである。

このため、我々は、MoS₂の高分散化・低積層化・高結晶化・MoS₂エッジ相へのCo種の適正配位の鍵は触媒調製に用いる金属含有含浸溶液と考え、その調製法の構築に注力した（図6）。既に、MoポリアニオンやCoイオンが含まれる含浸溶液調製においてキレート剤（ニトリロ三酢酸、クエン酸^[7]、CyDTA^[8]等）の有効性が確認されていたが、我々は新たなキレート剤を見出し、さらに触媒調製における支配因子の抽出を図り、高性能のMo系触媒をラボスケールではあるが再現性良く調製できることを確認した。

4 アプローチとしての要素技術の深化と複合化

前述の3.までを、proof of principle 型の研究として進めていく場合、図7に示す三棘みの触媒研究（触媒設計・調製技術-触媒構造解析評価技術-触媒反応評価技術）からなる三位一体型を行うのが一般的である。この三棘みの関係がぐるぐる回るとともに進化し、高性能の触媒開発に至るという流れである（ちょうど、コイル状のバネのような

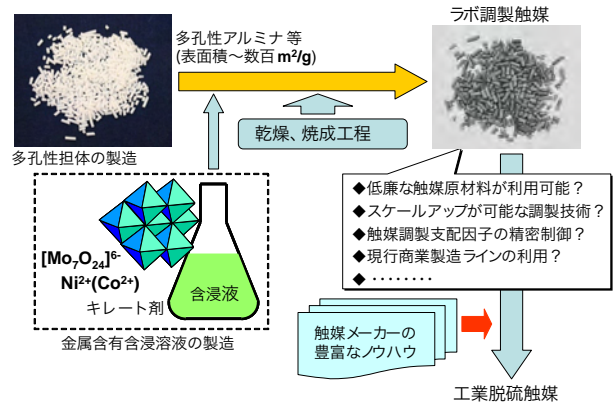


図6 新たな含浸液を用いた含浸法（従来法）による触媒調製法

流れ)。

例えば、ある考えの下に試作した触媒、あるいは入手した市販触媒を基に、最新の分析装置を取り込み触媒のキャラクター化を行い、得られた触媒構造と触媒の活性サイトを相関付け、触媒の高度化に向けた設計指針の提案に繋げるという一連の流れである。触媒の各種分析技術の進歩や触媒構造等の理論的な裏づけ (DFT計算等) に伴い、でき上がった触媒に関して得られる原子・分子レベルの情報は日進月歩の感があり、この三棘みの関係は進化しつつ、かつ成功している。しかし、工業触媒調製法の主流であり、ラボ調製でも汎用される湿式触媒調製に関しては、むしろ触媒ができ上がるまでの情報 (例えば、含浸液中の金属イオン、金属錯体、コロイド等の状態等) が不可欠であるが、でき上がった触媒に係る情報は必ずしも調製段階までフィードバックされていない。この調製部分は知財と直結する部分であるため、でき上がった触媒の情報と触媒調製に係る情報を結びつける役に立つ情報が開示されていないという表現がむしろ適切であろう。本研究は、触媒調製に用いる金属含有含浸液の調製、その含浸溶液中の金属イオン等の構造解析等、通常の固体触媒に係る三棘みの関係を溶液状態まで一段下げ、触媒調製過程を化学的側面に加えエンジニアリング的側面から見直したことに特徴がある。

我々は、ピーカースケールから工業規模触媒製造へスムーズに移行するためには次の条件が不可欠と仮定した。

- ①工業触媒材料が安価であり、工業触媒材料のロット等のブレを吸収できる含浸液調製法であり、スケールアップした触媒調製工程にも耐える品質管理が可能なこと
- ②現行脱硫触媒の商業生産ラインで受け入れられる触媒調製法であること

様々な検討の結果、ラボ調製ではあるものの、触媒調製支配因子の抽出を行うとともに、支配因子の制御技術の掘り下げを行い、触媒調製のレシピを構築するに至った。この後、産総研内で得られた成果を元に触媒メーカーと共同研究を実施し、産総研のレシピに様々な改善等が必要であることが判明したものの、大きな方向性には間違いがなかったことが確認された。共同研究を通して、工業触媒製造現場の生きたニーズに直接触れることができ、そのニーズに対しアカデミックな切り口からの対応を産総研で実施できたこ

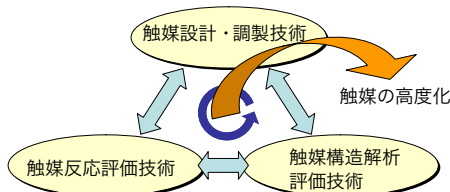


図7 触媒開発の三位一体技術

とが、ラボスケールからのスケールアップが比較的容易に行えた最大の要因と思われる。

5 研究成果

5.1 開発触媒の性能

産総研で試作・開発したNiMo/Al₂O₃系触媒の脱硫性能を、通常の製油所の脱硫操作条件下 (反応温度=340 °C、反応圧力=4.9 MPa、LHSV=1.5 h⁻¹、H₂/Oil供給比=250 NL/l)、高圧流通式反応装置により評価した。この結果、直留軽油 (S=1.11 wt%、N=105 ppm) からサルファーフリー軽油 (S<10 ppm、N<1 ppm) を製造できることがわかった。

5.2 開発触媒の構造上の特徴

開発したNiMo/Al₂O₃ (硫化物) のTEM写真を図8に示す。MoS₂粒子の平均層長は約4.4 nmであり、平均積層数は約1.7である。TEMで観察されるMoS₂粒子は、従来型のNiMo触媒に比べて層長が短く、より高分散化していた。また、MoS₂粒子の積層数は、従来型のNiMo触媒に比べて、低積層型となっていた。以上より、当初の意図どおり、γ-Al₂O₃担体上のMoS₂粒子は高分散状態で、しかも低積層型で担持されていることが確認された。

開発したNiMo/Al₂O₃ (硫化物) の広域X線吸収微細構造 (Extended X-ray absorption fine structure, EXAFS) 解析を行い、MoS₂相の原子レベルの解析を行った。図9は、従来型NiMo/Al₂O₃触媒 (conv.) 及び開発NiMo/Al₂O₃触媒 (lab.) のMo K-edge EXAFSスペクトルのフーリエ変換図である。図右上の表には、カーブフィッティング法から求めた各触媒のMo原子周りの硫黄原子の配位数 (N) 及びMo-S結合の原子間距離 (R)、並びにMo原子周りのMo原子の配位数 (N) 及びMo-Mo結合の原子間距離 (R) を示す。双方の触媒共にMo-S及びMo-Mo結合の原子間

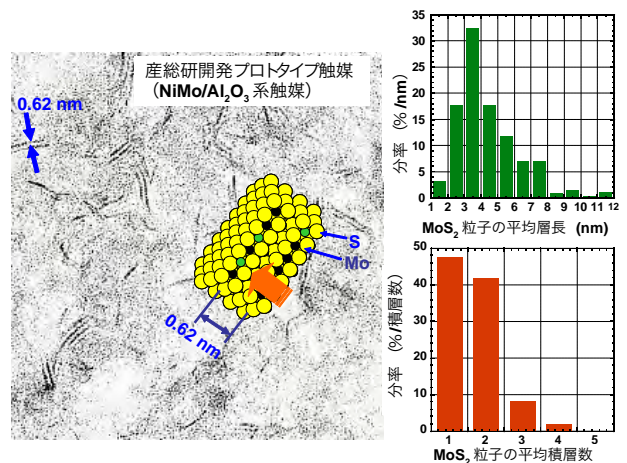


図8 開発したNiMo/Al₂O₃系触媒 (硫化物) のTEM写真及びMoS₂粒子の分散状態

距離が、それぞれ2.41 Å及び3.17 Åであり、同等のMoS₂ナノ構造が得られている。しかし、開発触媒では、Mo-Mo及びMo-S結合の配位数が増加した。前者の増加は、MoS₂の(002)面の中で高結晶化度域のサイズが大きくなっていることを示唆している。また、後者の増加は、MoS₂のユニットセルがより単結晶のセル構造に近づいたことを示唆している。一方、前述の図8のTEM写真からは、開発触媒のほうが従来型触媒に比べMoS₂粒子の層長が短くなっている。これらのことから、開発NiMo/Al₂O₃触媒（硫化物）ではMoS₂層長が短いにもかかわらず、MoS₂シートの結晶性が極めて高くなっている（ナノクリスタル状態）と推察される。以上より、当初の意図どおり、γ-Al₂O₃担体上のMoS₂粒子は高結晶化状態で担持されていることが確認された。

5.3 新規脱硫触媒LX-NC1の性能

この低積層型MoS₂ナノクリスタル構造の高機能化を設計コンセプトとした新規脱硫触媒が触媒メーカーで開発された（商品名：LX-NC1）。開発されたNiMo系脱硫触媒の性能を図10^[9]に示す。サルファーフリー軽油を現商業装置で製造するためには、S<50 ppm軽油対応の市販触媒（共同研究相手の脱硫触媒CDS-LX6）よりも反応温度換算で約10℃高活性の触媒が必要となるが、開発触媒LX-NC1はCDS-LX6に対して10℃を上回る17℃近い高活性を示し、軽油のサルファーフリー化が容易に達成できることが確認された。

開発触媒の活性安定性は工業触媒として最も重要な要素であるが、開発触媒LX-NC1の寿命評価試験（ベンチ装置）から、極めて高い安定性を有していることが確認された（硫黄分=7 ppmの軽油製造運転で、通油開始2ヶ月以降の活性低下率が約1.0℃/月）。

6 今後の展開

この新しい設計概念と高度な触媒調製技術を用い開発された軽油サルファーフリー対応触媒LX-NC1は、直留軽油からサルファーフリー軽油への低硫黄化を経済的、かつ効率

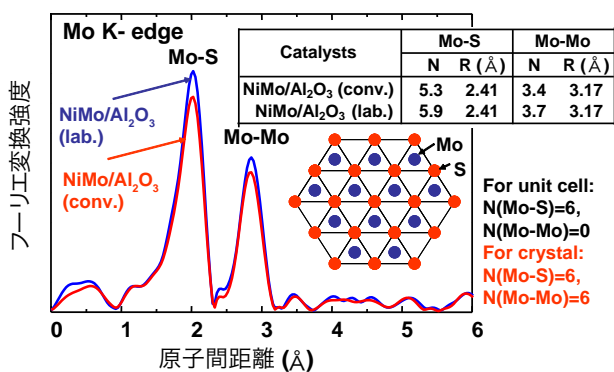


図9 開発したNiMo/Al₂O₃系触媒上のMoS₂粒子の局所構造

的に行うことのできる触媒であり、今後、我が国をはじめとして海外の石油精製各社のサルファーフリー軽油生産に十分答え得る触媒であると考えられる。サルファーフリー軽油の国内外導入により、硫黄被毒の問題が低減・克服された新規排ガス後処理技術等を含む新規自動車技術の早期の市場導入も加速され、ディーゼル排ガスの低減及びディーゼル機関の燃費向上（CO₂低減）に繋がると期待できる。

一方、軽油と同様にガソリンの硫黄規制も強化され、我が国では2008年からサルファーフリーガソリン（S<10ppm）に切り替わっている。プレミアムガソリンは以前からS<10 ppmであったため、レギュラーガソリンのS<10 ppm化が課題となっていた。レギュラーガソリンの主要基材は重油の流動接触分解（Fluid Catalytic Cracking）で得られる高オクタン価FCCガソリンであり、また、レギュラーガソリン中の硫黄分の多くはFCCガソリンに由来するため、FCCガソリンの低硫黄化と高オクタン価維持を同時に達成可能な脱硫技術が求められていた。従来から、①流動接触分解反応塔内で脱硫を行う方法、②FCCガソリンの深度脱硫を優先させ（オレフィン類の深度水素化も進行）、その後にアルキル化処理等によりオクタン価ロスを補う方法、③FCCガソリンに含有されるオレフィン類の水素化を最小限に抑え（オクタン価ロスの最少化）、チオフェン類やチオール類の脱硫を選択的に行う選択脱硫法、④FCCガソリンに含有されるオレフィン類と硫黄化合物のアルキル化反応を行い、生成した高沸点硫黄化合物を蒸留操作等で除去するアルキル化脱硫法、等が検討されてきているが、②及び③の脱硫技術が実用化されている。この内、③の脱硫技術は我が国で開発された技術である^[10]。しかし、レギュラーガソリンのオクタン価向上による燃費改善への影響等について我が国で検討が開始されており、そのオクタン価が欧州市場の95程度（我が国では90程度）まで引き上げられる可能性もある。

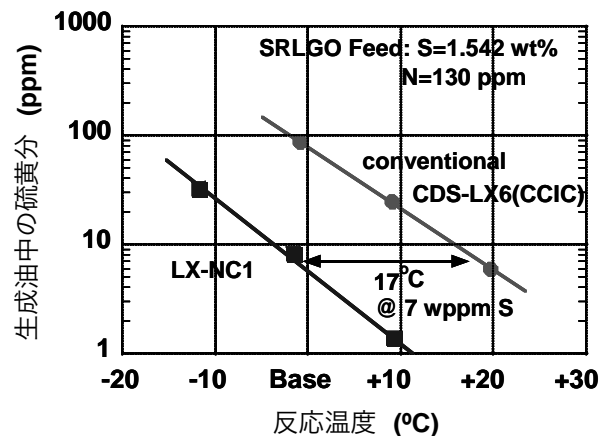


図10 共同開発した工業触媒LX-NC1の脱硫性能

このため、オレフィン類の水素化を最小限（例えば、オレフィン類水素化率<15%）にし、高い脱硫活性を与える脱硫触媒のニーズが今後益々高まる可能性がある。

FCCガソリンの脱硫選択性向上に向けては、主に、オレフィン類の水素化抑制の切り口から種々の検討が行われている。例えば、触媒担体の酸性を制御^[10]することにより、塩基性オレフィン類の触媒担体への吸着を弱め、オレフィン中の二重結合の移行による異性化や水素化を抑制する方法等。しかし、従来型脱硫触媒の多くはType I型のCo-Mo-S相（図4）が共存しており、硫化水素雰囲気下でも水素活性化や二重結合の水素化が起こり易いため、オレフィン類の水素化抑制には限界があると推察される。このため、脱硫触媒中のCo-Mo-S相（あるいはNi-Mo-S相）をType II型のみとし、しかも硫黄配位不飽和サイトあたりの脱硫活性を向上させ、さらには担体の固体酸性の適正化等を図ることができれば、FCCガソリンの脱硫選択性の更なる向上に繋がると期待される。海外ではFCCガソリンの硫黄濃度は数百～数千ppmあり（我が国の値より1～2桁高い）、脱硫選択性の向上に対するニーズは我が国以上に高い。我々は今回開発した軽油脱硫触媒の調製法をFCCガソリンの選択脱硫触媒の製造に展開^{[11][12]}し、開発技術の用途開拓を図りたい。

謝辞

軽油のサルファーフリー化脱硫触媒LX-NC1の製品化開発は、触媒化成工業株式会社（現、日揮触媒化成株式会社）との特許実用化共同研究で行われたものである。同社に深い謝意を表します。本開発脱硫触媒は、旧工業技術院東京工業試験所から今日に至るまで約40年以上に渡り継続されてきた研究の中から生まれたものであり、諸先輩方や旧西嶋研究室の西嶋昭生、佐藤利夫、島田広道、松林信行、今村元泰の諸氏に謝意を表します。

キーワード

サルファーフリー軽油、水素化脱硫触媒、触媒調製、キャラクターゼーション

参考文献

- [1] R.Candia, H.Topsøe, B.S.Clausen: *Proceedings of the 9th Ibero-american Symposium on Catalysis, Lisbon*, 211(1984).
- [2] PEC 幸手研究室：石油産業活性化センター「平成13年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託 石油汚染物質低減等技術開発成果報告書」(2002).
- [3] 藤川貴志，加藤勝博，中嶋伸昌，橋本 稔，桐山和幸，篠田清二：固体酸を付与したアルミナ系脱硫触媒の開発，石油産業活性化センター主催第18回技術開発研究成果発表会(2004).
- [4] 葭村雄二，鳥羽 誠，神田幸雄，三木康朗：NiMo/Al₂O₃

触媒を用いた一段反応による直留軽油のS-free化，石油学会第52回研究発表会講演要旨集，100(2003).

- [5] 特許第4061380号.
- [6] 特開2004-344725.
- [7] Y.Yoshimura, N.matsubayshi, T.Sato, H.Shimada and A.Nishijima: Molybdate catalysts prepared by a novel impregnation method. -Effect of citric acid as a ligand on the catalytic activities, *Applied Catalysis, A:General*, 79, 145-159(1991).
- [8] K.Hiroshima, T.Mochizuki, T.Honma, T.Shimizu and M.Yamada: High HDS activity of Co-Mo/Al₂O₃ modified by some chelates and their surface fine structures, *Applied Surface Science*, 121/122, 433-436(1997).
- [9] 井田 崇：軽油のサルファーフリー化技術，第12回触媒化成技術発表会(2004).
- [10] 畑中重人：FCCガソリンの選択的水素化脱硫，日石三菱レビュー，44(1), 24(2002).
- [11] U.S. Patent 7393807
- [12] PCT/JP2006/303801

(受付日 2008.5.19, 改訂受理日 2008.8.21)

執筆略歴

葭村 雄二（よしむら ゆうじ）

1980年京都大学大学院工学研究科博士課程化学工学専攻修了。同年、京都大学工学研究科研究生。1981年通商産業省工業技術院化学技術研究所入所、2001年から独立行政法人産業技術総合研究所研究グループ長。2007年から新燃料自動車技術研究センター新燃料製造研究チーム長。化技研入所後、エネルギー・環境関連触媒、特に輸送用液体燃料のクリーン化に係る触媒を基盤研究から応用研究まで幅広く捉え研究を実施。できるだけ「待ち伏せ」研究を目指している。文部科学大臣賞(2003)、産総研理事長賞(2006)等を受賞。本論文では主として触媒設計・調製、共同開発、特許作成を行った。

鳥羽 誠（とば まこと）

1985年東京大学大学院理学系研究科化学専攻修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院化学技術研究所入所。1994年博士（工学）（東京大学）。2001年から独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。2007年から新燃料自動車技術研究センター新燃料製造チーム主任研究員。化技研入所後、天然油脂の化学工業原料化用触媒等の石油化学用触媒の研究を実施、産総研発足後は輸送用液体燃料のクリーン化に係る触媒研究に携わる。産総研理事長賞(2006)を受賞。本論文では主として触媒の構造解析、共同開発、特許作成を行った。

査読者との議論

議論1 本研究の特徴について

コメント（水野 光一）

脱硫という最終目標には、触媒の性能向上とともに蒸留などの技術も貢献する訳ですので、これらの技術選択肢を解析した上で触媒の高性能化に的を絞って研究開発を行い、よい成果が得られたのが本論文の特徴のひとつであると推察します。

したがって、原文の「・・・しかし、これまでの軽油のサルファーフリー化は必ずしも脱硫触媒の交換のみでの対応に至っておらず、依然として高性能脱硫触媒の開発に対する期待は大きい。・・・」は少し意味が分かりにくい。平易な説明にするため、現状のサルファーフリー化（硫黄分<10 ppm）について、（1）改良した脱硫触媒以外の手法の具体例を記述、（2）その欠点も記述、（3）故に触媒単独での脱硫性能の高い触媒が要望される理由、という記述にしては如何でしょうか？

回答（葭村 雄二）

ご指摘の通り、従来の低硫黄軽油（硫黄分<50 ppm）を製造する石油精製設備を用いてサルファーフリー軽油を製造するためには、反応器増設等の設備改造、高性能脱硫触媒への変更、原料自体の易脱硫性留分への変更、脱硫反応が進行し易い反応操作条件への変更、軽油基材の混合処理プロセス変更等を含めた総合的な対策が必要となります。しかし、反応設備改造に伴う設備投資コスト増、また、原料やプロセス変更等による石油製品バランス調整の必要性等の問題点も生じます。高性能脱硫触媒への変更は最も経済的な対策であり、高性能脱硫触媒に対する期待は益々高まっています。このため、軽油のサルファーフリー化手法についてまず説明し、その中で触媒技術の役割が明確になるよう本文を修正しました。

議論2 ガソリンの脱硫について技術目標について

コメント（水野 光一）

今後の展開の中で、開発技術がガソリンの選択脱硫に展開させた旨の記述がありますが、このパラグラフは「オレフィンの水素化を抑えると同時に脱硫性能を向上させる」ことが目的のようです。ガソリンで水素化抑制と脱硫向上を同時達成できる触媒が今まで未踏であり困難な技術であることが、あまり強調されていません。なぜ困難なのか、どうすれば可能なのかなど、文章を工夫して頂ければ読者にもわかり易いと思います。

回答（葭村 雄二）

レギュラーガソリンの主要基材は重油の流動接触分解（Fluid Catalytic Cracking）で得られる高オクタン価FCCガソリンであり、また、レギュラーガソリン中の硫黄分の多くはFCCガソリンに由来するため、FCCガソリンの低硫黄化と高オクタン価維持を同時に達成可能な脱硫技術が求められています。FCCガソリンの脱硫選択性向上に向けては、主に、オレフィン類の水素化抑制の切り口から種々の検討が行われています。例えば、触媒担体の酸性を制御することにより、

塩基性オレフィン類の触媒担体への吸着を弱め、オレフィン中の二重結合の移行による異性化や水素化を抑制する方法等。しかし、従来型脱硫触媒の多くはType I型のCo-Mo-S相（図4）が共存しており、硫化水素雰囲気下でも水素活性化や二重結合の水素化が起こり易いため、オレフィン類の水素化抑制には限界があると推察されます。このため、脱硫触媒中のCo-Mo-S相（あるいはNi-Mo-S相）をType II型のみとし、しかも硫黄配位不飽和サイトあたりの脱硫活性を向上させ、更には担体の固体酸性の適正化等を図ることができれば、FCCガソリンの脱硫選択性の更なる向上に繋がると期待されます。我々は今回開発した軽油脱硫触媒の調製法をFCCガソリンの選択脱硫触媒の製造に展開し、開発技術の用途開拓を図る予定です。

議論3 燃料精製技術の将来展開について

質問（水野 光一）

今回の触媒技術に係る成果は軽油のサルファーフリー化をターゲットとしたものであり、今後、ガソリン等のサルファーフリー化にも展開されるようですが、その他の用途開拓は可能でしょうか。

回答（葭村 雄二）

石油価格の高騰による輸送用燃料資源の多様化・安定供給ニーズや京都議定書対応等へのニーズから、バイオ燃料（将来的には非食糧系バイオマスを原料とするバイオ燃料）に対する期待が急速に高まっています。非食糧系油糧作物であるJatropha等の水素化脱酸素触媒技術による炭化水素製造に加え、バイオマス残渣等の熱化学変換法により得られる燃料油（バイオオイル）の水素化脱酸素触媒技術による炭化水素燃料製造等は、新燃料製造技術として期待が高まりつつあります。これらの反応系では、C-S結合の開裂を伴う水素化脱硫反応と異なり、C-O結合の開裂を伴う水素化脱酸素反応等が主要反応となりますが、固体触媒上のヘテロ原子除去機構には類似性もあります。このため、今回開発した脱硫触媒の改良等を通し、これらのバイオ系新燃料の製造技術にも挑戦していく予定です。

実用化へ向けた有機ナノチューブの大量合成方法開発

—— 分子設計・合成技術と安全性評価の統合により市場競争力のある材料へ ——

浅川 真澄*、青柳 将、亀田 直弘、小木曾 真樹、増田 光俊、南川 博之、清水 敏美

有機ナノチューブは両親媒性分子が溶媒中で自己集合化して形成する中空繊維状の物質であり、その内部にナノ微粒子やタンパク質等を包接することができることから、幅広い分野への応用が期待されている。有機ナノチューブを実用化するために、大量合成、用途、価格、安全性等の種々の条件を満たす戦略的なシナリオを立案し、分子設計・合成技術と自己集合化技術の統合により、最適な有機ナノチューブ合成用分子を設計・合成するとともに、有機ナノチューブの大量合成法を開発した。

1 研究の目的

有機ナノチューブは、石鹸分子のように1つの分子中に水に溶けやすい部分（親水部）と油に溶けやすい部分（疎水部）を持つ両親媒性分子が自発的に集まること（自己集合と呼ぶ）によって形成する中空繊維状の物質である。有機ナノチューブのサイズは用いる分子によって異なるが、一般的には内径 10 ~ 200 nm、外径 40 ~ 1000 nm、長さ数 ~ 数 100 μm である^[1]。

両親媒性分子はその親水部を外側に向けた二分子膜構造を形成し、円筒層状に重なった膜構造をしているため、水への分散性が良い（図1）。

ブドウ糖分子が環状に6~8個つながって構成されるシクロデキストリンと呼ばれる環状分子は、食品分野、医薬品用、家庭用品など様々な分野で広く利用されている。その中空内孔に様々な有機低分子を取り込むことで、不安定な物質を安定化させたり、医薬や香料をゆっくりと放出したり、水に溶けにくい物質を溶解させたりする機能を持っている^[2]。一方、有機ナノチューブはシクロデキストリンより10倍以上大きな中空内孔を持っているため、シクロデキストリンでは取り込むことができない大きな物質、例えば、タンパク質、核酸、ウイルス、金属ナノ粒子などを取り込むことが可能である。我々は、有機ナノチューブを用いて、1

~ 20 nm 程度の大きさをもつ金ナノ粒子^{[3][4]}や直径 12 nm の球状タンパク質（フェリチン）^[5]を取り込むことに成功している（図2）。これらのことから、有機ナノチューブ材料が農業、食品、健康、医療、環境等の広い分野で用途開発されることにより、それぞれの分野で競争力のある新たな製品となることが期待されている。

1996年にノーベル化学賞の受賞成果となったフラレーン（1984年）^[6]と、その後に発見されたカーボンナノチューブ（1991年）^[7]は、その構造と特性からナノテクノロジーの代表的な革新材料として注目され、精力的に実用化へ向けた研究開発が進められている。一方、有機ナノチューブは、カーボンナノチューブより前の1984年に見出されている^{[8]-[10]}にもかかわらず、未だに実用化に至っていない。その主な要因は、カーボンナノチューブでは実現されている量産化が実現されていないこと、そのために種々の分野での既存材料との比較や用途開発が進んでいないことである。そこで、この課題を解決することができれば、有機ナノチュー

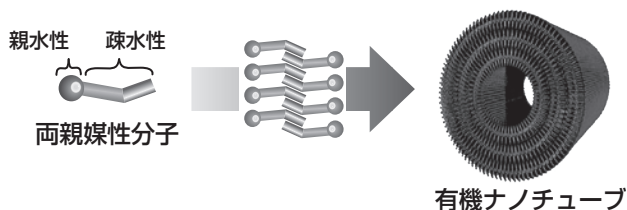


図1 有機ナノチューブ構造形成模式図

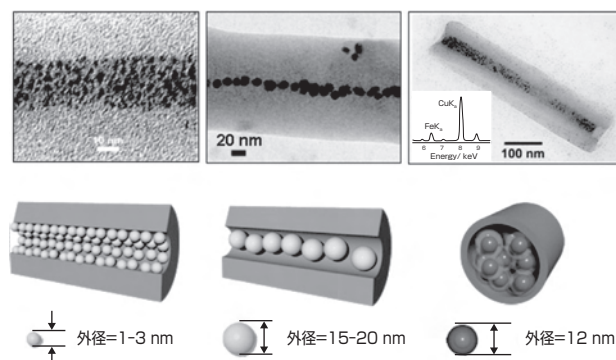


図2 有機ナノチューブ内部に大きさの異なる金ナノ粒子を取り込んだ様子（左、中）、球状タンパク質フェリチンが取り込まれた様子（右）を示す電子顕微鏡写真

ブの材料としての可能性を検証することが可能となり、実用化への道を拓くことができる。

本研究の目的は、有機ナノチューブを実用化することによって新産業を創出することである。そのためには、有機ナノチューブ大量合成方法の開発が必須である。さらに、安価な有機ナノチューブ合成用分子の開発、用途開発、安全性の実証等の課題を解決する必要がある。

2 目標と達成するためのシナリオ

有機ナノチューブを実用化するためには、各分野の企業で試してもらい製品開発候補材料として受け入れてもらうことが必要である。企業に試してもらうためには、企業へのサンプル提供を可能とする大量合成法の開発、各分野での用途に合わせた機能の提供に加えて、価格競争力、安全性等の種々の条件を満たすことが必要である。これらの要因を満たすためには、分子設計・合成技術を駆使することにより、最適な分子構造を設計するとともに、合成経路を簡略化し、合成コストの削減による安価な有機ナノチューブ合成用分子の実現が求められる。また、求められる安全性評価を実施し、情報共有することにより産業界からの参入障壁を低くすることも重要である（図3）。

上記目標を達成するためのシナリオとしては、まず第1に経済性、安全性、量産性を考慮した有機ナノチューブ合成用両親媒性分子の分子設計並びに合成技術の開発を実施することとした。ここで分子設計の指針とした考え方は、原料として天然由来の再生可能資源であり、かつ豊富に存在する資源を極力使用するということであった。豊富に存在する資源であるかどうかの判断は、試薬会社の供給価格が安いほど豊富であるとした。また、作業仮説として天然由来の原料から合成される両親媒性分子は、安全性が高いとした。

第2に、自己集合化法の改良により両親媒性分子から有機ナノチューブの合成方法を検討し、大量合成を可能とするプロセスを開発することであった。有機ナノチューブの合成には、両親媒性分子を溶媒に溶解する段階、両親媒性分子が自己集合し有機ナノチューブを形成する段階、溶媒と有機ナノチューブを分離する段階、有機ナノチューブを乾燥

する段階の4段階を検討することが必要であった。合成方法を効率化し、大量合成を可能とするためには各段階の全てにおいて改善することが必要であった。大量合成法の開発は、経済性と量産性の両立を可能とする。また、これまで100 mg以下と非常に少量でしか検討することができなかった各種用途開発へ道を拓く^[11]とともに、各種安全性評価も並行して検討することを可能とする非常に重要な課題である。

第3に、有機ナノチューブがそれぞれの分野で実用化されるためには、用途開発とともに既存材料との比較により優位性が認められることが重要であるとした。用途開発の検討には、各分野の企業において実際に必要とされる用途に使用できるかどうかを試してもらうことが重要であり、実際に既存材料を開発している企業に有機ナノチューブを提供し、共同研究体制を確立しつつ有機ナノチューブの有効性を実証することが必要であると考えた。特に各分野の企業において試してもらうためには、積極的なプロモーションが必要であり、学会や展示会での発表を通じて企業へ有機ナノチューブに関する技術を伝え関心を持ってもらおうとした。

第4に、有機ナノチューブは新規材料であるため、用途開発によって有用性が認められたとしても、安全性が認められなくては社会的な受容は実現できない^[12]。そこで、第1のシナリオで仮説を立てた天然由来の原料から合成された両親媒性分子並びに有機ナノチューブの安全性の評価を実施した。また、同時に安全性の情報は、関連企業と共有化することで企業からの当該技術導入への参入障壁低減を図った。

シナリオの第1段階と第2段階を達成するためには、並行して相補的に作業することが必要であった。有機ナノチューブに関する研究は、分子を構成単位として、その分子間相互作用に基づく集合体の機能を研究する超分子化学によって理解されるため、分子設計・合成技術の開発と自己集合化法の開発は、分子構造とその分子構造に基づく分子自己集合体の構造を詳細に検討することにより達成されると考えた。

第3のシナリオは、まず第1、第2のシナリオが達成された後に検討するとした。第3のシナリオ達成には、第1、第2のシナリオと比較して他律的な要因を解決しなくてはならないため、迅速な達成には組織的で戦略的な取り組みが必要であった。

第4のシナリオは、有機ナノチューブを実用化するに当たっては、非常に重要な項目であるとともに、応用分野によってその安全性評価項目は異なってくることから、初期段階においては共通的な評価項目を抽出し、顧客が有機ナノチューブを利用する動機付けとなるように検討するとした。

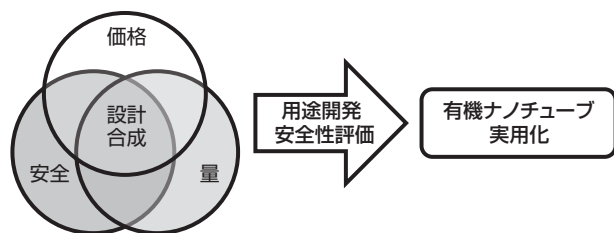


図3 シナリオ模式図

3 実現すべき機能と構成的方法

3.1 主要要素技術

有機ナノチューブの実用化を目指すための主要要素技術として、我々が選択したことは、(1) 天然由来の再生可能資源を原料とする有機ナノチューブ合成用両親媒性分子の分子設計・合成に関する技術、(2) 両親媒性分子を自己集合化することによる効率的な有機ナノチューブ合成技術、(3) 用途開発のために必要な要素技術の抽出とその開発、(4) 有機ナノチューブを普及するための安全性評価項目の選択と実施、(5) 製品化研究開発のための適切な技術移転策の選択と適切な研究経営の5つである。

3.2 統合システム化と実現される機能

それぞれの主要要素技術は、基本的には番号の順にリニアに開発され、(1) 分子設計・合成技術、(2) 自己集合化技術、(3) 用途開発技術、(4) 安全性評価技術、(5) 製品化技術へと実用化へ向けて技術が進展していくことが理想的であるが、実際の研究現場においては、そのように研究が進捗することはほとんどない。実際の研究現場での主要要素技術の進展は、まず(1)と(2)の間で作業仮説の立案と実験による検証が繰り返され、その中で新たな知識が生み出され(第1種基礎研究)、一応の回答が得られた時点で(3)や(4)へと展開する。有機ナノチューブの実用化へ向けた研究開発においては、(3)の要素技術開発以降は、設計した目標達成をより強く意識する研究段階(第2種基礎研究)へと展開するため、他律的な要因が増えてくる。具体的には用途に応じた既存技術との融合、既存競合材料との比較、経営判断等の要因から、フィードバックがかけられスパイラル的に技術が磨き上げられることとなる(図4)。(4)に関しては、初期段階では既存評価技術を用いた既存情報と比較可能な評価手法を選択するべきであり、その点において新たな技術開発の余地は少ない。(3)の用途技術開発が進捗し、新たな分野での需要が見込める段階に進んだ場合には、それと並行して(4)の安全性評価技術は、関係分野と連携を強めながら新たな評価手法の開発が必要となる。

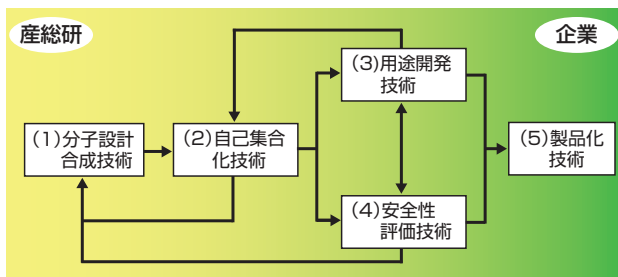


図4 有機ナノチューブ主要要素技術の統合に関する概念図

4 研究結果

4.1 有機ナノチューブ合成用両親媒性分子の分子設計・合成技術

我々は、数年前にカシューナッツの殻から取れるカルダノールとブドウ糖から合成されるカルダノール-ブドウ糖両親媒性分子1が水中で自己集合することにより、有機ナノチューブを選択的に形成することを見出した^[13]。この両親媒性分子は、水中で選択的にチューブ構造を形成することが特徴であるが、熱安定性は低く水中でのゲル-液晶相転移温度は40℃であった。すなわち水中で40℃に加温されることで、容易にチューブ構造からリポソーム様の球状構造へと構造を変えてしまうため、実用化への展開は困難であると判断した。そこで、両親媒性分子1のブドウ糖とアルキレン鎖を連結するベンゼン環をアミド基に置換することによって、自己集合するときにアミド基の部分で水素結合できるように工夫した両親媒性分子2を設計し合成した。両親媒性分子2による有機ナノチューブは、予想通り分子1よりも熱に対して安定であり、その水中でのゲル-液晶相転移温度は約70℃であった^[14]。両親媒性分子2に変更することで熱安定性に関する問題は解決したが、当初計画した天然由来の安価に入手可能な原料を使用するという目標とは異なり、分子2の原料の脂肪酸であるシス-11-オクタデセン酸(シス-パクセン酸)は、1グラム3万円以上の高価な原料であった。このため、さらに分子構造の最適化を検討した。その結果、炭素-炭素2重結合の位置を11位から9位に変更したシス-9-オクタデセン酸(別名オレイン酸)がオリーブ油に豊富に含まれており安価であること、この脂肪酸を使用した両親媒性分子3を使用して有機ナノチューブが合成可能であること、ゲル-液晶相転移温度が約70℃であり熱安定性を満足することが判った(図5)。

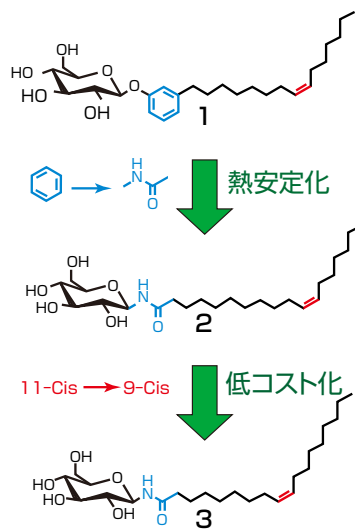


図5 両親媒性分子の実用化へ向けた分子設計

4.2 有機ナノチューブの自己集合化技術

熱安定性があり、天然由来の安価な原料から合成できる両親媒性分子3を得たことから、有機ナノチューブの効率的な合成法に関して検討した。

従来の合成法では、両親媒性分子を水中で加熱溶解し、その水溶液から自己集合化によって有機ナノチューブが形成し、析出するのを待ってから、回収・乾燥することによって有機ナノチューブを得ていた。この合成法の問題点は、両親媒性分子の水への溶解度があまり高くなく、水溶液から自己集合化によって有機ナノチューブを形成するまでに長時間を要すること、水溶液から回収した有機ナノチューブを乾燥するのが困難であることの3点があった。

この問題点を解決するために種々の溶媒を用いて、両親媒性分子の自己集合化を検討した。その結果、アルコール系溶媒を使用することで、問題が全て解決することが判った。すなわち、アルコール系溶媒は、両親媒性分子を良く溶かし、自己集合化が迅速に進行し、回収した有機ナノチューブの乾燥も簡単であった^[15]。

この新たな有機ナノチューブ合成方法により、これまで実験室で1 g合成するのがやっとであった有機ナノチューブを簡単に100 g以上合成できるようになった(図6)。

4.3 有機ナノチューブの用途開発

有機ナノチューブの大量合成法が開発できた時点から、プレスリリースや展示会での発表を通じて想定される用途に関連する企業への宣伝を実施した。それと並行して、希望する企業へのサンプル提供に対応するための準備を整え、2007年から各分野の企業へサンプル提供を実施している。サンプル提供の際には、研究所と企業との間でサンプル提供契約(MTA)の締結が必要であるが、今回は特に契約書中の使用目的の項に用途開発分野の具体的な記載を求めた。これは将来的に知的財産権の重複が危惧される分野を事前に把握し、可能な限り対応するためである。

サンプル提供の結果、分野ごとに用途開発における課題

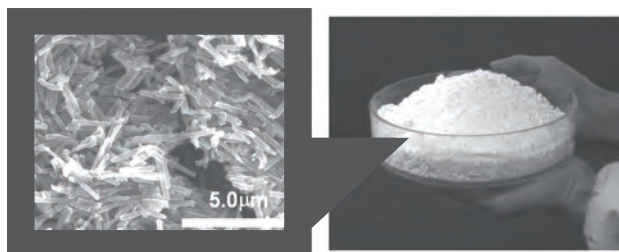


図6 有機ナノチューブの白色固体粉末(重量約140 g)(右側)とその走査電子顕微鏡像(平均外径=300 nm、平均内径=90 nm)(左側)

が顕在化してきており、分野に依存して実用化までにかかる時間が異なることが明らかになった。特に実用化の早い分野では、需要と供給の最適化を図ることが迅速な技術移転を進める上で重要である。

一方、我々の研究チームでは、有機ナノチューブの用途開発に関しては、水への分散性、ゲスト包接能等の既知情報に加えて、ナノバイオ系分野での研究開発ツールとして有効であると考えられる発光性有機ナノチューブの開発(a)並びに温和な条件下での分解法の開発(b)を実施した。

(a) 発光性有機ナノチューブの開発：有機ナノチューブの大量合成法の工程で、両親媒性分子が有機溶液中で自己集合する際に、蛍光分子を加えておくと、蛍光分子が取り込まれて、発光する有機ナノチューブが得られる技術である(図7)。今後、発光性有機ナノチューブを投与した細胞などの生体内での観察を実施することにより、有機ナノチューブの生体内での安定性や挙動など、貴重な情報が得られることが期待できるため、ナノバイオ分野での用途開発研究ツールとして役立つと考えられる。

(b) 有機ナノチューブ分解法の開発：有機ナノチューブは水中でゲル-液晶相転移温度(約70℃)以上に加熱することで球状構造へと変化する。さらに温和かつ安全に分解する方法を検討した結果、有機ナノチューブにシクロデキストリン水溶液を添加すると板状構造へと変化するを見出した。有機ナノチューブを構成する両親媒性分子がシクロデキストリンに包接されることによってチューブ構造が分解されることが判った(図8)。機能性材料として期待される有機ナノチューブは、温和な条件で容易に分解できることにより、その適用範囲が広がると期待される。

4.4 有機ナノチューブの安全性評価

有機ナノチューブの安全性評価に関しては、まず所内で安全性評価項目を決めるための会議を、産学官連携推進部門、知的財産部門、TLO、技術情報部門等の技術移転関連部署と開催することにより、議論を深め決定した。

その結果、量産化を目指すためには、1トン以上の合成の際に必要なとされる化審法「新規化学物質等に係る試験の方法について」に対応するため環境中の微生物による分解度試験、食品や医薬系への応用を指向してラットを用いた経口急性毒性試験、環境中に暴露した際に影響を受けや



図7 発光性有機ナノチューブの製造工程

すい水中生物への影響を評価する生態毒性試験、変異原性を評価するための復帰突然変異試験の4項目に対する安全性試験を実施した^{注1)}。

環境中の微生物による分解度試験では、有機ナノチューブが環境中に放出されても、環境中の微生物によって28日間ではほぼ完全に分解されるため、人や動植物への影響はほとんどないことが判った。ラットを用いた経口急性毒性試験では、5,000 mg/kgの有機ナノチューブをラットへ経口投与しても2週間の観察で死亡例が見られなかったことから、その急性毒性は極めて低毒性であり、その最小致死量(LDL₀)は雌雄ともに5,000 mg/kg以上であることが判った。藻類、オオミジンコ、ヒメダカを用いた生態毒性試験では、100 mg/Lの有機ナノチューブ水溶液を調整し、それぞれ72時間生長阻害、48時間急性遊泳阻害、96時間急性毒性に関して試験したところ、生長阻害、急性遊泳阻害、急性毒性は観察されなかった。また、復帰突然変異試験では、変異原性陰性であることが確認された。

5 考察：研究結果とシナリオの比較

有機ナノチューブ合成用両親媒性分子の分子設計・合成技術の開発という第1種基礎研究を推進することにより、天然由来の再生可能資源を原料とした安価な両親媒性分子を設計・合成することに成功した。さらには自己集合化技術の開発という第1種基礎研究を分子設計・合成技術と統合することにより、有機ナノチューブの大量合成法の開発(第2種基礎研究)を達成した。この結果により、有機ナノチューブの実用化へ向けた研究開発を可能とした。

用途開発に関する課題解決へ向けには、企業へのサンプル提供を実施し、企業とのコミュニケーションから顕在化した課題を整理し、解決へ向けた研究開発を展開している途上である。用途開発分野ごとの課題解決には、企業との連携はもちろんのこと関係分野との連携も必要であり、適切な研究実施体制作りが重要である。

安全性評価に関しては、環境中の微生物による分解度試験、ラットを用いた経口急性毒性試験、水中生物への

影響を評価する生態毒性試験、変異原性を評価するための復帰突然変異試験の4項目に対する安全性試験を実施し、それぞれの項目で安全性が確認された。この結果は、用途開発において重要な要因である企業へのサンプル提供において多くの担当者から評価されており、安全性への早い段階からの配慮は、産業界からの参入障壁低減に役立つことが証明された。また、分子設計段階で考えていた天然由来の原料から合成される両親媒性分子の安全性に関しては、今回の事例においては立証された。

技術移転策に関しては、シナリオ作成時点においても時間軸の設定が困難であることを感じていたが、実際の状況においても一般的にいわれている人、物、金の要因が絡み合っており、しかも用途分野に依存するより複雑な時間的要素もあることから、最適解を出すことは難しい。今回の研究課題においては、サンプル提供を広く実施することで有機ナノチューブの可能性を多方面に求めた結果、ある分野では実用化が早く、ある分野では時間がかかることが明らかになった。実用化の早い分野に合わせた研究開発要素を抽出し、需要と供給の最適化を図ることが今後の迅速な技術移転を進める上での優先課題であることが判った。また、迅速な技術移転のためにはサンプル提供に基づく共同研究体制で望むことが良いと判断し、公募型共同研究という仕組みを作り検討を開始した。

6 将来への課題

有機ナノチューブというまだ世の中で使われたことのない新しい材料を実用化するための研究は、その想定される応用分野の広さから、研究所内での閉じた研究開発手法ではなく、サンプル提供により実用化へ向けた用途開発を外へ求める開いた研究開発手法を選択した。この研究手法を可能としたのは、有機ナノチューブの大量合成法が達成できたことによる。同様に大量合成法の達成は、実用化へ向けた研究開発の初期段階での安全性評価を可能とし、企業の有機ナノチューブに対する受容性を高めることに役立った。

今後はサンプルを受け入れた企業からの情報を基に、用途開発に関する要素技術の抽出とその解決策を検討し、企業と連携することにより製品化研究へ展開する。また、企業からの情報に基づき市場形成の早い分野と時間のかかる分野を見極め、早い分野では需要に応じた供給体制を整え、遅い分野では加速するために大学との連携を含めた研究開発を実施する。特に新産業の創出においては、新たな安全性評価手法の開発や有機ナノチューブの工業標準化も視野に入れて、関連分野との連携による研究開発、必要な情報収集・蓄積を目指す。さらに、ミニマルマニュファクチャ

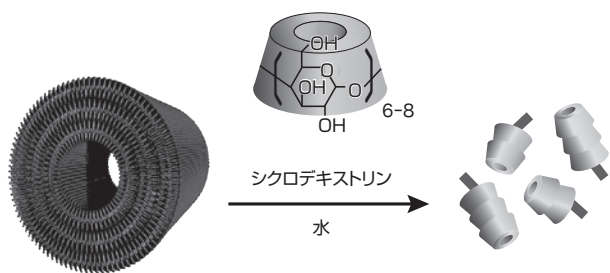


図8 シクロデキストリン添加による有機ナノチューブの分解

リング^{注2)}の概念に基づいて、有機ナノチューブ合成法の高度化を図り、より効率的な合成プロセスの開発と有機ナノチューブのサイズ制御による高付加価値化を検討することにより、有機ナノチューブの実用化による新産業創出を目指したい。

付記

この研究は、独立行政法人 科学技術振興機構（以下「JST」という）と産総研の共同研究【戦略的創造研究推進事業（CREST）プロジェクト、平成12～17年度】およびJSTの委託研究【戦略的創造研究推進事業発展研究（SORST）プロジェクト、平成17～20年度】の一環として実施された。

注1 各試験は専門試験機関に委託し、それぞれ以下の試験法に従って実施した。分解度試験：化審法「新規化学物質等に係る試験の方法について」に規定する「微生物による化学物質の分解度試験」に従って実施。ラットを用いた経口急性毒性試験：「医薬品の製造（輸入）承認申請に必要な毒性試験のガイドラインについて」別添「医薬品毒性試験法ガイドライン」および「単回及び反復投与毒性試験に係わるガイドラインの改正について」に準拠して実施した。生態毒性試験：魚類急性毒性試験は「OECD Guideline for Testing of Chemicals 203 (1992) “Fish, Acute Toxicity Test”」、ミジンコ類急性遊泳障害試験は「OECD Guideline for Testing of Chemicals 202 (2004) “Daphnia sp., Acute Immobilisation Test”」、藻類生長障害試験は「OECD Guideline for Testing of Chemicals 201 (2006) “Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test”」にそれぞれ準拠して実施した。復帰突然変異試験：「医薬品の遺伝毒性試験に関するガイドラインについて」に準拠して実施した。

注2 独立行政法人産業技術総合研究所 第2期研究戦略平成20年度版 第3部-3：ナノテクノロジー・材料・製造分野研究戦略 http://www.aist.go.jp/aist_j/information/strategy_revise.html

キーワード

有機ナノチューブ、大量合成、自己集合、包接、安全性評価

参考文献

- [1] T. Shimizu, M. Masuda and H. Minamikawa: Supramolecular nanotube architectures based on amphiphilic molecules, *Chem. Rev.*, 105(4), 1401-1443 (2005).
- [2] シクロデキストリン学会編：ナノマテリアルシクロデキストリン, 産業図書, 203-218 (2005).
- [3] B. Yang, S. Kamiya, K. Yoshida and T. Shimizu: Confined organization of Au nanocrystals in glycolipid nanotube hollow cylinders, *Chem. Commun.*, 500-501 (2004).
- [4] B. Yang, S. Kamiya, Y. Shimizu, N. Koshizaki and T. Shimizu: Glycolipid nanotube hollow cylinders as substrates: Fabrication of one-dimensional metallic-organic nanocomposites and metal nanowires, *Chem. Mater.*, 16(14), 2826-2831 (2004).

- [5] H. Yui, Y. Shimizu, S. Kamiya, M. Masuda, I. Yamashita, K. Ito and T. Shimizu: Encapsulation of ferritin within a hollow cylinder of glycolipid nanotubes, *Chem. Lett.*, 34(2), 232-233 (2005).
- [6] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O' Brien, R. F. Curl and R. E. Smalley: C₆₀: Buckminsterfullerene, 318, 162-163 (1985).
- [7] S. Iijima: Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354, 56-58 (1991).
- [8] N. Nakashima, S. Asakuma, J. M. Kim and T. Kunitake: Helical superstructures are formed from chiral ammonium bilayers, *Chem. Lett.*, 13(10), 1709-1712 (2005).
- [9] K. Yamada, H. Ihara, T. Ide, T. Fukumoto and C. Hirayama: Formation of helical super structure from single-walled bilayers by amphiphiles with oligo-l-glutamic acid-head group, *Chem. Lett.*, 13(10), 1713-1716 (2005).
- [10] P. Yager and P. E. Schoen: Formation of tubules by a polymerizable surfactant, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 106(3-4), 371-381(1984).
- [11] 西宮佳志, 三重安弘, 平野悠, 近藤英昌, 三浦愛, 津田栄: 不凍蛋白質の大量生成と新たな応用開拓, *Synthesiology*, 1(1), 7-14 (2008).
- [12] 阿多誠文, 石橋賢一, 根上友美, 関谷瑞木: ナノテクノロジーの社会受容, NTS (2006).
- [13] G. John, M. Masuda, Y. Okada, K. Yase and T. Shimizu: Nanotube formation from renewable resources via coiled Nanofibers, *Adv. Mater.*, 13(10), 715-718 (2001).
- [14] S. Kamiya, H. Minamikawa, J. H. Jung, B. Yang, M. Masuda and T. Shimizu: Molecular structure of glucopyranosylamide lipid and nanotube morphology, *Langmuir*, 21(2), 743-750 (2005).
- [15] 浅川真澄, 清水敏美: 安くて安全・高機能な有機ナノチューブ, *未来材料*, 7(10), 38-43 (2007).

(受付日 2008.5.21, 改訂受理日 2008.6.10)

執筆者略歴

浅川 真澄 (あさかわ ますみ)

1996年工業技術院物質工学工業技術研究所入所以来、分子を構成単位として、その分子間相互作用に基づく集合体の機能を研究する超分子化学の手法を用いて、分子素子や分子集合体の研究に従事した。2004年度に企画本部企画主幹を経験した後、有機ナノチューブの大量合成法の開発と実用化へ向けた研究を展開している。本論文では、大量合成法の開発、安全性評価、用途開発、実用化へ向けたプロモーションに関わり、全体構想の取りまとめを担当した。

青柳 将 (あおやぎ まさる)

2001年産総研入所。自己集合、包接化学、分子膜をキーワードに気水界面における単分子膜の分子認識の研究、それを利用したセンサシステムの開発に従事してきた。近年では有機ナノチューブ合成法の高度化、および有機ナノチューブと種々の物質が引き起こす現象（吸着、放出など）の探索、評価に取り組んでいる。本研究では合成プロセス開発、用途開発を担当した。

亀田 直弘 (かめた なおひろ)

JST-SORSTプロジェクトに参加して以来、化学的プロセスを駆使し、タンパク質やDNAといった生体高分子を外部刺激により包接・放出可能なテララメド型有機ナノチューブの開発に取り組んできた。また、有機ナノチューブ中空シリンダー内に包接されたタンパク質の動的挙動や安定性評価等、ナノ空間における特性解明も行っている。

る。本論文では、有機ナノチューブのナノバイオ分野での応用展開において重要なツールとなる発光性有機ナノチューブの製造を担当した。

小木曾 真樹（こぎそ まさき）

1995年工業技術院物質工学工業技術研究所入所以来、ペプチド脂質の自己組織化による1次元ナノ構造体形成に関する研究を推進している。研究のコンセプトは「簡易な化合物から簡易な手法で世界に類のないナノ構造体を形成させる」。これが功を奏して、世界で初めて有機ナノチューブの大量製造法を開発することに成功し、実験室レベルでの基礎研究から実用化を目指した本格研究へと繋がった。現在は、グリシルグリシン部位をもつ簡易なペプチド脂質を用いた、様々な表面官能基をもつ有機ナノチューブライブラリの構築を検討している。本論文では、大量合成法の開発と用途開発を担当した。

増田 光俊（ますだ みつとし）

1992年工業技術院繊維高分子材料研究所入所以来、双頭型糖脂質や芳香族アミド等、分子の自己組織化によるナノファイバーやナノチューブ形成、重合による機能化などの研究を推進してきた。有機ナノチューブにおいてチューブ内外表面の非対称化、内表面の選択的な修飾法を開発した。現在、有機ナノチューブの中空ナノ空間の物性解明、実用化のための要素技術開発について検討している。本論文では、両親媒性分子の分子設計、合成技術開発を担当した。

南川 博之（みなみかわ ひろゆき）

1988年工業技術院繊維高分子材料研究所入所以来、糖脂質など機能性脂質を研究対象にして、分子設計・合成、脂質分子集合体・液晶の構造・機能解析、コロイド化学などの研究に従事してきた。現在は脂質集合体の生体高分子との相互作用への研究展開を行っている。本論文では、有機ナノチューブの分子設計に基づく構造相関評価並びに物性評価を担当した。

清水 敏美（しみず としみ）

1977年工業技術院繊維高分子材料研究所入所。2001年から産総研界面ナノアーキテクトニクス研究センター長、2008年から同所研究コーディネータ。工学博士。1996年から工業技術院・産業科学技術研究開発制度を皮切りに、JST-CREST、JST-SORSTの研究代表者を務め、一貫してボトムアップナノテクノロジーの開拓と発展に全力を注いできた。本論文では、有機ナノチューブ形成用分子の最適化やナノバイオ応用に関する研究総括を担当した。

査読者との議論

議論1 産総研が主導すべき研究開発範囲の考え方

質問（五十嵐 一男）

図4中の(5)が製品化技術となっていますが、論文を最後まで読んでも製品化研究開発のための技術移転策について述べられているのみです。著者が考えている産総研が主に担う研究開発の範囲とここに記載されている製品化技術の位置づけを教えてください。

回答（浅川 真澄）

図4では、産総研から企業への寄与の状況を黄色から緑色への色の変化で表しました。(5)の製品化技術に関しては、主に企業側で開発されると考えており、論文中では(3)、(4)の段階を経て、企業側で迅速に製品化技術開発が行われるような技術移転策と研究経営手法が必要であると論を展開しました。

したがって、どの段階まで産総研が関わるべきかという課題はありますが、製品化技術開発に関しては企業側が主体となると考え、本論文ではその手前までに関して述べました。

議論2 有機ナノチューブのナノリスクへの対応

質問（五十嵐 一男）

図4の安全性評価技術について、本文中では「初期段階では既存

評価技術を用いた既存情報と比較可能な評価手法を選択するべきであり、その点において新たな技術開発の余地は少ない。」とありますが、安全性評価技術に関しては、開発段階によって評価手法が異なるとは思えません。どこのレベルまで評価するかということでしょうか。

また、4.においてラットに対する安全性試験を実施していますが、本文をそのまま読むと筆者らが自身の実験室で実施したように受け取れます。それが正しければ問題ありませんが外部に委託したのであれば外部委託であることを明記することが望まれます。加えて、信頼性に関しては如何でしょうか。

回答（浅川 真澄）

有機ナノチューブはナノサイズのものであることから、その安全性評価技術はいまだ各分野で定まっている状況であるとは言えないと考えました。材料はナノサイズとなることで、反応性や浸透性の向上が期待されるとともに、予想外の効果も考慮しなくてはなりません。例えば、食品や医療分野においてナノ材料が使用された場合には、そのサイズに由来する効果が期待される反面、予想外の影響が発現する可能性も考慮した評価技術を開発する必要があります。

現在、農業・食品産業技術総合研究機構の研究者と検討する体制の構築を目指すとともに、産総研内においても材料フォーラム内に新たな分科会「食品ナノテクノロジー」を設立し、食品とナノ材料との関係を検討する準備を進めています。

安全性試験は外部委託によって実施しましたので、その旨注1)に明記しました。また、その信頼性に関しても試験手法に関する情報を記載しました。

議論3 第1種、第2種基礎研究に対する認識とシナリオ構成の関係質問（一條 久夫）

有機ナノチューブ研究の初期に行われた設計・合成・構造機能解析は第1種基礎研究で、その知見をもとに工夫を加えた「大量合成」は第2種基礎研究と理解していましたが、第1種基礎研究と位置づけられているのでしょうか。また、2.において(1)と(2)の間で作業仮説の立案と実験が繰り返されたとありますが、これは試行錯誤的に最適な方法を見つけるという意味でしょうか。さらに、用途開発は第2種基礎研究と記され、図4には主に企業が担う形で描かれています。発光性有機ナノチューブの開発のみが用途開発として記述されていますが、他は具体的に何も記されていません。他の研究は無いのでしょうか。

回答（浅川 真澄）

(1) 第1種基礎研究と位置づけについて。

「大量合成」は、(1)分子設計・合成技術、(2)自己集合化技術、と言う第1種基礎研究の統合によって達成されたとの考えに基づいて判断するならば、第2種基礎研究であると考えて良いかと思います。(2)作業仮説の立案と実験の繰り返しと試行錯誤的に最適な方法を見つけることについて。

その通りです。誤解を恐れずに言わせていただきますと、研究のコンセプトと目標地点が定まっている場合には、適当な出発地点からスタートしても、作業仮説の立案、それを検証するための実験、結果の評価、課題の抽出、という一般に言われるPDCAサイクルにより、目的地点へと近づいていきます。(1)と(2)の間で得られる出発地点近傍の最適解は、(3)、(4)へと進んで行くに従って、さらに大きなサイクルとなり、(5)を満足する顧客の視点に立った最適解に近づけると考えております。出発地点をどこに決めるのかは、それまでに実施した研究の背景や研究者の経験と勘に依るところが大きいと思います。

(3) 他の研究について。

図4において、用途開発は産総研と企業との連携によって達成できる部分が大きくなっていくため、黄色（産総研）と緑色（企業）が混ざり合っているように表現したつもりです。他の研究としては、薬剤投入に伴う有機ナノチューブの分解法の開発があります。具体例を記載しました。

フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発

— 「どこでもデバイス、だれでもデバイス」の実現に向けて —

鎌田 俊英*、吉田 学、小笹 健仁、植村 聖、星野 聰、高田 徳幸

IT 技術の裾野拡大を目指し、情報端末機器のユーザビリティ向上をもたらすべく、使用者の個性が活かせる端末機器の製造技術として、フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発に取り組んできた。ディスプレイ等の情報端末を含む新たな情報機器関連分野を切り拓く技術となるだけに、その技術の展開、普及のための開発シナリオとして、社会要求仕様の分析、個別開発要素技術の位置づけの明示、材料・製造・デバイスの各要素技術のセット化による全体像の提示、関連技術の連続的开发などを描き、それを実践していった。

1 背景：求められるフレキシブル情報端末機器

IT 技術が広く社会に浸透するようになって来た今日、その利便性を向上させる技術の開発は、IT 技術の拡大普及をもたらすこととなり、その結果巨大な経済効果を生むことが期待できる。またこれにより不要不急の資源、あるいは移動や通信のためのエネルギーを節約できるなど、持続的発展可能な社会の構築に資する技術を提供できるようになると考えられる。このため、今日そのハード、ソフトに関連する技術の開発が盛んに行なわれるようになってきており、国際的に技術開発競争が極めて熾烈になっている。

IT 技術は、ハードに関しては、情報を集約して処理を行なう「中央・幹線系技術」と、情報を吸い上げたり配布したりする「端末・アクセス系技術」とに大別される(図1)。前者は、コンピューターに代表されるように、技術的には

「高速」「大容量」「規格化」といった点などが重視され、シリコンテクノロジーを中心に様々な研究開発の取り組みが行なわれている。これに対して、後者は、ディスプレイに代表されるように、技術的には「多様化」「大量普及」「ユーザビリティ(使いやすさ)」といった点などが重視され、使用する人、使用される場所の個性に合わせた対応が望まれている。IT 技術の一層の普及拡大には、特にこの情報端末の普及(IT 技術の裾野拡大)が必須となっており、更なる利便性を提供する情報端末機器の創出が期待されている。こうした新たな情報機器の創出には、市場要求をよく把握することが重要である。特にこの情報端末機器に関しては、今日広く一般の人々がネットワークの利用に慣れ親しんでくるようになってきたために、そのユーザビリティに対しては、実に様々な要求が出されるようになってきてい

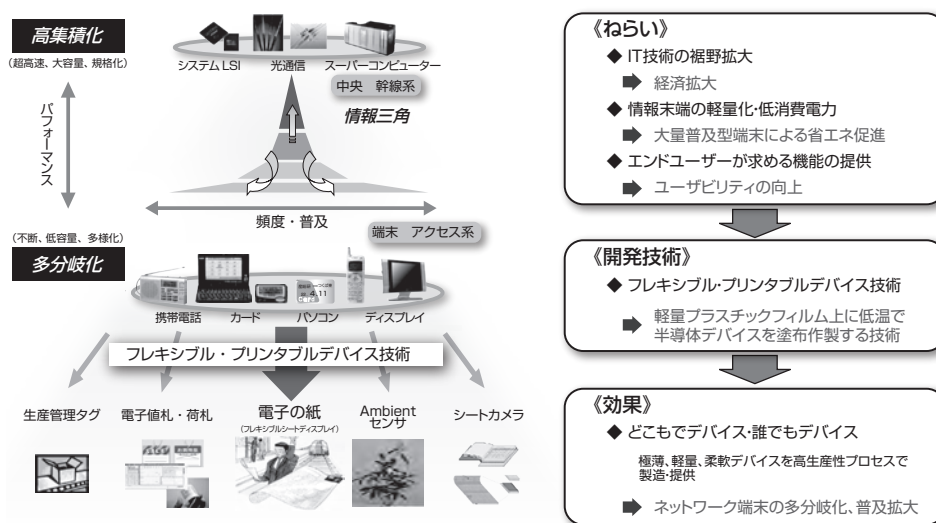


図1 フレキシブルプリンタブルエレクトロニクス技術の開発

産業技術総合研究所 光技術研究部門 〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第5 産総研つくばセンター * E-mail: t-kamata@aist.go.jp

る。例えば、軽量、極薄、落としても壊れない等の使用感に関する要求や、設置場所や使用環境に左右されない情報端末デバイスの製造（どこでもデバイス）、欲しい人が自分の欲しいものを作製できるようになる製造（だれでもデバイス）など、端末デバイスの提供方法に関する要求なども強く求められるようになってきている。これらの多様な個別要求に対応していくためには、従来の画一的な仕様を満たすだけの技術では、個別対応に終始するようなこととなり、とても産業として成立し得ない。それで、できる限り多様な仕様に適合できる自由度を備えた技術の開発が必要とされるようになってきている。

その一方、昨今の省エネルギー化推進の流れの中で、半導体プロセスにも大幅な省エネルギーが実現できるプロセスの開発（半導体技術のプロセス革新）が要求されるようになってきている。真空プロセスからの脱却、高温プロセスからの脱却、フォトリソグラフィプロセスからの脱却などが、特に重要視されていることで、適用されるターゲットによらず、決して見逃すことのできない重要な社会要請事項となっている。

2 研究開発のねらい

2.1 Prosumer electronicsの実現を目指す

「軽量・柔軟」「高生産性製造」「消費者が欲しいもの」などのような情報端末機器にかかる様々な要求を満たし得る技術としては、多様な仕様に適合できる自由度を備えた技術として、プラスチックや紙などのフレキシブル基板上に、液相プロセスでデバイスを作製可能にする技術、すなわち「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術」の開発が一つの大きな目標となる。これは同時に、脱真空プロセス、脱高温プロセスなどの低環境負荷プロセスを実現するものであり、社会要請という点からも、実現していかなければならない重要な技術目標である。

こうした技術が追求していく究極的な目標は、欲しい人が自ら欲しいものを作れるようにする、すなわち消費者による端末機器の生産（Prosumer electronics; Prosumer=Producer+Consumer）ということを実現させることにある。情報端末機器のように、使う人の個性を反映させることが究極の目標となるならば、それを実現できるツールを個人レベルに開放していくのが、技術目標となるということである。

この究極的な目標を実現するためには、単にフレキシブル基板上に液相プロセスでデバイスが作製できるようになればよいというだけではダメで、できるだけ簡便な素材と簡便な製造プロセス（150℃以下の低温塗布）、簡便なマシンでデバイスを作製することが可能になるということを実現

しなければならない。筆者らは、こうした技術目標を掲げて、それに資する技術開発を行ってきた。

2.2 必要機能・デバイス性能とプロセス条件との整合化

このような技術で作製される情報端末デバイスは、少なくとも用途に合致した必要最低限の性能は発揮されなければならない。単一技術で突出して性能が優れたものがあつたとしても、それがトータルシステムの中に組み込むことが困難であるならば、技術価値は発生しない。その一方で、一部多少の性能が劣っている部分があつたとしても、トータルとしての整合性が高ければ、効果的な技術となりうる。すなわち全体セットアップした段階でどのような価値が発生するのかが重要になるということであり、オプティマリー・コンシステント・デバイス（最適整合デバイス）というようなコンセプトである。そこで、本研究開発では最終製品を見据えたデバイス設計とそれによる基本仕様の抽出、およびそれらとプロセス条件との整合性が図れる技術を開発することを目標としている。

3 キーテクノロジーの開発

3.1 開発技術の抽出

上記目標を達成するためには、開発しなければならない要素技術は数多くある。しかし、まずは象徴的コンセプトとして掲げた「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術」が、そもそも実現可能なことなのかを示すために、実現のための代表的な技術課題を抽出し、その解決の手法を提示することで、実現へのシナリオを描くことを試みた。

例えば、フレキシブルデバイスというと、柔軟性を有する素材を用いたデバイス作製ということになる。柔軟性を有した最も代表的な素材は有機材料であるが、有機材料を用いる以上、加工には温度制約が必ず入る。すなわち、少なくとも素材が分解してしまわない200℃以下という加工温度で、必要性能を発揮するデバイスが製造可能になるのかを示す必要がある。また、プリンタブルデバイスといったとき、プリントという加工手法で、デバイス性能を向上させることができる加工精度が担保することができるのかということは最低限示す必要がある。

そこで、我々はまずこうした代表的な課題に対して、その解決手法が存在することを実証するための技術開発に取り組み、以下のような成果を得ることにたどり着いた。

3.2 低温塗布製造プロセス

製造プロセスの低温化には、製造に要する熱エネルギーの代替エネルギーを付与することが有効である。熱エネルギーは、反応場に対して全体に徐々に均等に伝わるエネルギーであるため、これを用いて作製されたデバイス構成部位としての薄膜は、均質性が大きな特徴となる。しかしな

がら、エネルギーが徐々に伝わり、なおかつ全箇所等方的に伝わるために、不必要な箇所にもエネルギーが伝わり、これにより様々な副反応が生じてしまう。これらを回避する技術として、光エネルギーや機械エネルギーなどの代替エネルギーを付与する技術の開発を検討した。

① 多源光酸化法

デバイスを高性能で安定動作をさせるためにキーとなる構成部材の代表的なものの一つとしてSiO₂絶縁膜をあげることができる。このSiO₂絶縁膜をデバイスに適用可能な高品質膜として形成させるためには、通常は少なくとも数百℃の加工温度が不可欠とみなされている。このような代表的デバイス構成部材を仕様通りの制約下（加工温度200℃以下）で加工可能にすれば、技術コンセプトが受け入れられるとの考えのもと、同部材の低温塗布加工技術の開発に取り組んだ。

数百度のケイ素化合物に酸素を反応させると二酸化ケイ素（SiO₂）が生成する。これが溶媒溶解性の材料を原料として、反応後に高緻密薄膜として得られるようになると電子デバイス用絶縁層が液相プロセスで得られることとなる。しかし、この反応は酸化反応であり、通常は塗設後500℃以上の高温処理を要する。この反応温度を下げるためには、触媒を用いる工夫がなされたりするが、ここでは電子材料として用いるので不純物の混入を避ける必要があり、その意味では添加剤を用いることはできない。そこで、我々は光のエネルギーで必要なエネルギー量を局所的に注入するという構想を持ち、この反応を進ませる技術の開発に取り組んだ。その結果、多源光酸化法を開発することで技術導入に成功した^[1]（図2）。ここでの技術開発のポイントは、SiO₂膜を作製するための反応前駆体に応力損傷を受けにくい結合種を有する材料を選択したこと、この結合種を励起させるのに適切なエネルギーを有する光源を選択できたこと、さらにこの前駆体と反応させる反応活性種を励起させるために適切な別光源を選択できたことなどにあり、特にこれらの

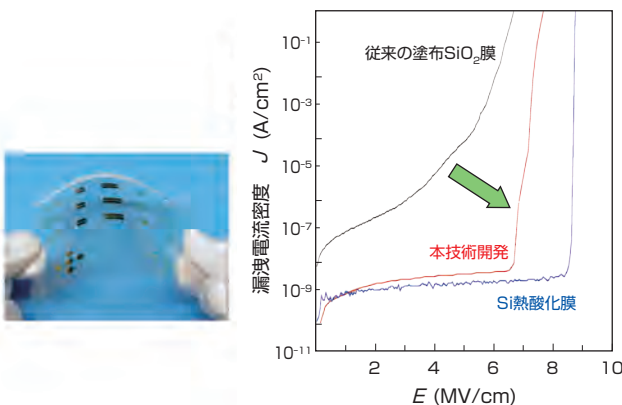


図2 低温印刷絶縁層形成のための多源光酸化法の開発

光源にレーザーのような局所高密度エネルギー光源を用いるのではなく、ランプレベルの比較的汎用性が高い光源で反応を進ませることができるようにしたことが、新規開発プロセスの意義をアピールするのに大きなポイントとなった。全工程の中での最高反応温度を、200℃以下とすることができたため、膜の膨張収縮に伴う欠陥発生を抑制することができ、結果的に高緻密SiO₂薄膜が得られるようになった。作製したSiO₂薄膜は、抵抗率10¹⁵Ωcm以上、絶縁耐圧は7 MV/cm以上という高い絶縁性を示すものとなった。この技術は、現在主としてディスプレイ用TFTの絶縁層の構成材料などとして検討されており、ディスプレイの面積積化やフレキシブル化に資する技術として、ディスプレイメーカー等で実用化検討がなされるようになってきている。

② 三軸分配加圧アニール法

「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術」とは言っても、使用される技術対象によっては、開発すべき技術の仕様に更なる大きな制約が入る。例えば、メモレブルの表示媒体を電子化する際には、生産コストの制約は極めて厳しくなる。この場合高価な材料は使用できなくなってくる。すなわち、低温加工ということに加え、使用できる材料にも制約が入るということで、こうした条件でも技術適用が可能であることを示す必要がある。そこで我々は、汎用プラスチックフィルム（PETフィルム）上に、汎用導電インクで、低抵抗配線を印刷で作製する技術の開発に取り組んだ。導電インクは、印刷パターン形成後、抵抗を低下させるために通常は400℃以上で焼成する。この温度を低下させる技術として、最近ナノ粒子の利用が良く検討されている。しかし、ナノ粒子を利用して材料コストを高騰させてしまっは、上記目的に合致

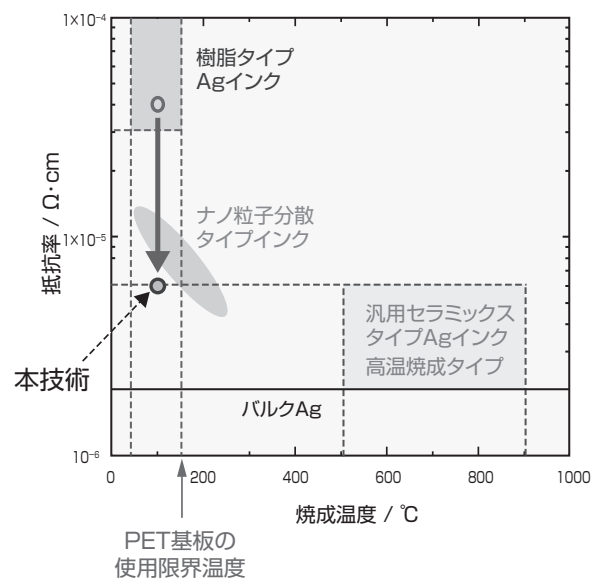


図3 低温印刷導電パターン形成のための三軸分配加圧アニール法の開発

しなくなる。そこで我々は、汎用インクでも低抵抗が得られる低温焼成技術の開発に取り組み、圧力を用いる技術を採用することで技術導入を実現させた（図3）。ここでもやはり反応に要する温度をいかにして下げるかがポイントであった。本技術においては、圧力エネルギーを利用することで低温化に成功したわけだが、この圧力エネルギーは、全体に均質エネルギーとして与えるのではなく、局所に異方的エネルギーとして与えることで低温化を実現させたのである。すなわち、エネルギーは欲する局所に集中させ、周辺の不要部分には分散させないという考え方である。結果的に、この手法で汎用銀ペーストを用いた印刷パターンにおいて、120℃以下の反応温度で抵抗率 $6 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ （参考：バルク銀の低効率 $=1.6 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ ）を得るに至っている。前述のナノ粒子銀ペーストを用いても、同様の抵抗率を出すためには200℃以上の加熱が必要となっているのに比べると、圧力エネルギーが低温焼成に極めて有効に働くことがわかる。

3.3 プリントブルデバイス製造プロセス

一方、プリントブルデバイス製造技術を開発するに際して、最も大きなハードルとなっていたのが、「プリントブル」というプロセス仕様要求と高性能動作というデバイス仕様要求とが両立できるかということにある。デバイス性能は、ある程度微細な構造制御を行なうことが必須となるために、加工精度が担保できるかということが絶えず問われる。通常液相プロセスでは、デバイス加工をする際に、面内方向の微細加工精度があまり高くなく（数十 μm 程度まで）それ故に面内加工精度が必要なトランジスタ素子などは、十分な機能を発揮させることができないのではないかと目されていた。そこで我々は、プリントブルデバイス製造技術を確立するためには、まずこの技術課題を解く方法を開発することが技術分野にブレークスルーを与えるものとして着目し、そのための技術開発に取り組んだ。

① トップ&ボトムコンタクト型トランジスタ

技術開発上の着眼点として、まずプロセス面内加工精度

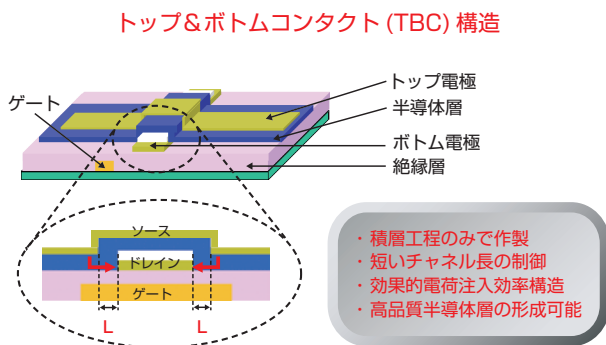


図4 全印刷素子形成のためのトップ&ボトムコンタクト (TBC) 構造の開発

は数十 μm 程度までしかないという事実は一旦受け入れること、その上でデバイスのパフォーマンスを決める数 μm 以下の動作部位（チャンネル）を素子構造設計により構築することという方針を立てた。こうして開発したのが「トップ&ボトムコンタクト型トランジスタ」である^[2]（図4）。デバイスのパフォーマンスを決める μm 以下のスケールでの制御を要するチャンネル部位は、膜厚方向に設置されるように設計し、制御は膜厚でなされるようにした。これで、面内方向の加工精度は高精度を要求しなくても良いようになるわけである。この結果、基本的には、描画細線の積層だけでトランジスタが作製できるようになり、その際でもサブ μm 台のチャンネル長を形成させることに成功した。この素子構造を用いることで、比較的移動度の低い高分子半導体（ $\mu = 10^{-2} \text{cm}^2/\text{Vs}$ 台）を用いて、全て印刷技術で形成したトランジスタにおいても、出力電流の電界効果変調率に当たるSS値にして0.2 V/dec以下の性能が発揮できることを実証した。これにより、プリントブルという製造プロセスとデバイス性能の向上という要求とが両立可能であることを示すこととなった。

4 いかに産業展開させるかのシナリオ

上記は、我々が開発した代表的な要素技術の例である。これらを個別に見ると、その技術価値は個別の特異的な技術にしか見えないかもしれない。しかし、これらの開発のシナリオとその技術の位置づけとを把握してもらうと、とたんに違う世界が見えてくる。次に、筆者らが産業展開を見据えて推進した上記技術開発のシナリオを紹介する。

4.1 エンドユーザーと技術ユーザーの異なる要求

斬新な技術を開発しても、それを誰が欲しがっているのかを把握していなければ、技術のアピール点を見出しそこなってしまう、結局は世に送り出せなくなってしまう。そこで、まず誰が何を求めているのかという点を良く分析・把握することを重要視した。情報端末機器というのは、まず何よりもそれを使用する人（エンドユーザー）の要求が最も重要である。それでは、エンドユーザーが欲しくなるようなものを提供するというで技術要求を整理することができるのかというところがそうはいかない。この技術要求も、機器の生産者、すなわち製造する企業の要求と合致する点がないと成立しないのである。例えば、エンドユーザーが欲する利便性の高い情報端末機器が1個10円でできる技術を提供するとする。しかし、これを1億個売っても売り上げは10億円にしかならない。これでは大企業では生業として成り立たなくなってしまうので、技術を欲することはない。しかし、事業規模の小さな企業であるならば十分成り立っていく。当たり前のことだが、こうしたことが「誰が欲しがっている技術か？」ということの原点となっていくわけである。

4.2 プレイヤーマップの作成

上記「誰が欲する技術か」ということを整理するためには、プレイヤーマップの作成が有効である。類似の技術であっても、技術レベルによって要求することが変わってくるため、それを整理し、開発技術の価値の発揮どころを明確化するということである。表1は、技術フェーズとそのターゲット商品、主たる対象企業種を示しており、表2はそれぞれの技術フェーズにおける技術課題に対する取り組み状況を示すプレイヤーマップである。

例えば、ディスプレイといってもいろいろなものがある。テレビのように高度なディスプレイ（フェーズI）は、かなり大掛かりに高度な技術を組み合わせていく必要があり、大手ディスプレイメーカーの欲する技術となる。この場合、ビジネス展開のシナリオは市場要求からほぼ定まってきたので、あとはシナリオを実現可能にする革新的技術を開発するか、社会要求を導入できる技術を提供するようにするか先駆的技術開発の課題となるわけである。

次に、電子ペーパーなどの新しいディスプレイ（フェーズII）は、テレビほど大掛かりな技術を必要としない。したがって、大手メーカーであっても新興産業を狙う企業が欲する技術となる。この場合は、新市場開拓となるため、既存のものにはない機能の発現が開発の最優先事項となる。ただし、そのプロセスには、比較的簡便なものでも作製可能にしなければならないという制約は入る。同じディスプレイでも、表示器やラベルなどのような簡素な表示の電子化技術（フェーズIII、IV）は、簡易な技術ではあっても、まったく新しい産業製品を創出する技術となることから、中小やベンチャー企業等が欲する技術となる。ここでは、高価な特殊材料を用いない、高コスト製造技術を用いないなど、更なる多くの技術的制約がはいつてくるために、やはりそれ専用の技術の開発が必要となるわけである。

さて、このプレイヤーマップの活用の仕方であるが、ここからどのようなことを読み取っていったのかをいくつか例示

する。

- ① 開発しようとする個別要素技術は、全体のセットアップコンセプトとの整合性が取れるか。技術抜け、プレイヤー抜けなどが発生していないか。
- ② 開発しようとする技術は、先導性が発生する技術となるか。
- ③ 開発しようとする技術は、多角展開が可能な位置づけにある技術か。
- ④ 開発しようとする技術は、技術競争力のある位置づけが得られるものとなるか。

すなわち、技術マップ上の位置づけを明確に示して、勝てる技術となるかどうかの判断に非常に役立つということとなる。ここで言う「勝てる技術」とは、産業創出を先導するキー技術となりうる技術か（先導技術）、省エネなどの社会要請に応えられる技術となりうる技術か（社会技術）、技術開発力に十分な力を有しない産業への支援となりうる技術か（中小企業支援）ということをまず基準として検討している。

4.3 リニアモデル型とノンリニアモデル型技術開発

ところで技術開発のスタイルには、統一的で明確な目標を立て、そこに向かって計画的に開発を進めていくリニアモデル型技術開発と、ターゲットイメージは漠然と存在するが、そこに統一的な明確目標を立てることが困難で、なおかつそこへたどり着くシナリオもよく見えず。そのためあるジャンプアップ技術の出現に期待するというノンリニアモデル型技術開発というのがある（図5）。情報端末デバイス技術のように、目標仕様が多種多様にわたっている場合には、概して後者のノンリニアモデル型の技術開発になることが多い。

ノンリニアモデル型の技術開発は、一般的にはジャンプアップ技術の出現に期待されるところが大きく、その点では計画的技術開発が行いづらいつと目されている。しかし、実際に適応されている技術分野をよく分析すると必ずしもそう

表1 展開のシナリオ









技術階層	市場の例	技術レベル	技術ユーザー
フェーズI	 テレビ 携帯電話	 真空バッチ プロセス	大手専門企業
フェーズII	 電子ペーパー IDタグ	 印刷ロール Toロール	大手新企業
フェーズIII	 センサー スマートオブジェクト	 汎用印刷	中小企業
フェーズIV	 ラベル 認識表示	 個人製造	ベンチャー個人

表2 技術開発のプレイヤーマップ

	材料				プロセス	デバイス	プロトタイプ
	導体	半導体	誘電体	周辺材			
フェーズI 大手専門企業向け	企業	企業	企業	企業	企業	企業	企業
フェーズII 新規展開企業向け	企業	企業	企業 既技術	企業		企業	企業
フェーズIII 中小企業向け	既企業 既技術		既企業 既技術	既企業 既技術			
フェーズIV ベンチャー個人向け	企業 (既技術)		企業 (既技術)	企業 (既技術)	大学		
基礎		大学	大学		大学	大学	

ではない場合がよくみかけられる。本論文で検討の対象となっている、「情報端末デバイス技術」などもその一例である。技術的なバリアが高すぎるためにジャンプアップ技術の出現を待つのではなく、技術プレイヤーがいがないためにそこが技術欠けとなってしまっていて、その状態をあかかもジャンプアップ技術の出現を待つかのように取り扱ってしまう場合である。このような場合には、本来技術整理により、きちんとした計画展開ができるように持ち込めるはずなのである。

4.4 技術の効果・先駆性は、ものとして見せる

ところで開発した技術は、例え単一技術であっても、それを関連技術ときちんと組み合わせ、技術アピールする試作品を作製して見せることが効果的である。すなわち、技術開発のセットが可能であるということを示し、技術コンセプトを先導していくことである。ただし、ここで注意すべきは、単に試作して機能を示すだけでなく、そこにメッセージを込めることが重要である。例えば筆者らの上記の開発例では、それぞれ固有のメッセージ付けを検討した。

「多源光酸化法」はディスプレイ用印刷 TFT として仕上げることを検討した。この試作検討の初期段階では、有機 TFT 駆動液晶ディスプレイで、カラー動画表示を世界で初めて成功させたというものとなった^[3-5] (図 6)。印刷形成 TFT 技術への期待が高まっていた時期であっただけに、世界中で大きな話題となる成果となった。この技術には、将来的に大面積の極薄壁掛けスクリーンテレビが作製可能になるというメッセージを込め、技術的には高機能に加え、高信頼性、大面積加工適合性といった点を強調してアピールした。

「三軸分配加圧アニール法」は、全印刷無線タグとして試作デモンストレーションした^[6] (図 7)。これは、フィル

ム上に無線タグが印刷だけで作製できることを示した世界初の例である。このため、近い将来フレキシブルな情報端末が手に入るようになるというメッセージを込めたものとなり、技術開発の目指すところまでアピールする結果となった。

ところで、ここで示した上記の開発技術例は、一般的に注目を集めやすいデバイスの活性層（半導体層）の作製方法ではなく、むしろ開発が後手になりがちな電極、配線、誘電体層の形成技術であるが、こうした技術に関して我々が積極的に開発に取り組んでいった事例をここでまず示したのにはもう一つの理由がある。それが、プレイヤー抜きの充填という狙いを紹介することである。ある技術コンセプトに対して、注目を集めやすい要素技術に対しては、自ずと多くの技術開発プレイヤーが集まっており、そこそこの技術発展が見込める場合が多い。しかし、上述のような要素技術は、往々にして技術ハードルではなく、ビジネス要因などその他の要因で技術開発に取り組めないような状況に陥ることがある。これではセットしようにもセットできない。技術コンセプトに対して「Totally consistent」ということが、成立させられないような状況になってしまうということである。したがって、技術コンセプトがトータルセットできますということをアピールするためには、抜け技術の充填をあえて狙って開発していく必要があるわけである。完結に向けた「last piece technology」というような概念である。我々は、公的機関の研究者として、技術開発コンセプトが、トータルセットができるということを一早く提示し、技術開発の方向性に対する先導性を示し、産業界での技

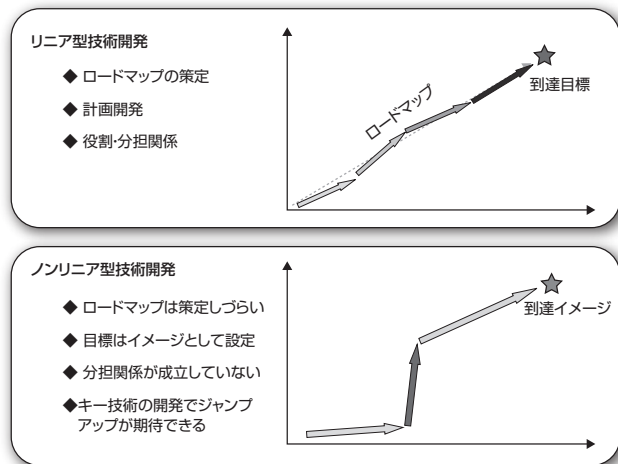


図5 リニアモデル型技術開発とノンリニアモデル型技術開発

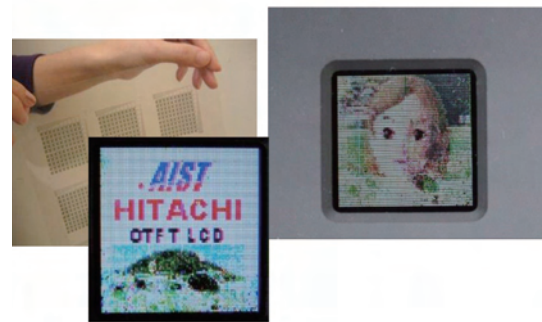


図6 有機TFT駆動カラー液晶ディスプレイの開発

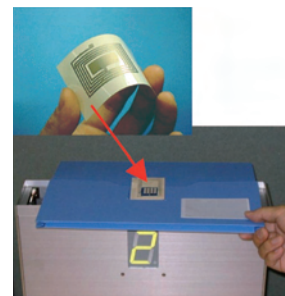


図7 全印刷製造フレキシブル無線タグの開発

術開発の取り組み方向へのリスクを軽減させるという役割を担うことを狙い、このような取り組みを行っていった。

こうした狙いの実践をもう少し具体的な事例で紹介してみる。プリンタブルデバイス技術（トップ&ボトムコンタクト型トランジスタ技術）の横展開として開発した技術に、三次元ナノポーラスデバイスというのがある^[7]（図8）。液相プロセスの特徴の一つである壁面加工を有効に生かすべく設計したデバイス技術であり、これにより、多孔体の孔内を通過、あるいはそこに取り込まれる物質の高感度計測を可能にするデバイス（農業用センサー）を実現したというものである。これは、そもそもエンドユーザー（農業従事者）からの相談を受けて開発した技術である。農作物の生産管理用に、農業者が使いやすい高感度農業用センサーを開発して欲しいというものであった。これに対して、技術のセットを検討してみると、材料は入手可能、作製プロセスも既存技術で問題なし、システム開発者は既に存在、そしてもちろんユーザーもいる。唯一存在していなかったのがデバイス開発者である。すなわち、「技術抜け」が生じてしまっている状態であったわけである。この場合のデバイス開発は、経済活動をしているデバイス技術開発者にとっては、ほとんど収益の期待できない技術であることから、その開発に取り組む技術者が皆無であるという状況であった。それで、我々は公的機関の研究者として、開発に取り組むにはリスクが高い要素技術に対しては積極的に関与するという「リスクシェアの役割分担」の狙いで、この開発を引き受け、結果としてトータルでセットされる端末機器の開発を実現させた^[6]（図9）。この成果はさらに Prosumer electronics 実現の可能性に関して強いメッセージを発するのに有効な技術ともなった。すなわち、ターゲットとしたセンサーは、取り付ける作物によってその形状・仕様等を少しずつ変える必要がある。しかも、取り付け場所は1個1

個異なる状態にある。さらに、その製造には過度の負担をかけてはならないという製品構想である。このような現場の多種多様な個別要求に応えられる情報端末デバイスを、現場ユーザー（農業試験場）と共同で開発することができたというメッセージを込めて発表した。

いずれの試作機も、開発技術がセットアップした後も十分機能するということを実演するというで技術の確からしさを示すとともに、開発技術により今まで見たこともないものが出来上がっていくというメッセージを込めたものとして技術の魅力点をアピールしていったという点が大きな意義を有していたと認識している（図10）。

最終的に、試作品そのものが実用化に向けて企業で取り込まれるようになるかは定かではない。しかし、こうしたメッセージの発信は、少なくともこれらの開発技術がその後企業で実用化への検討が進められるようになってきていることに大きく貢献しているものと思われる。

5 今後の課題・展開

上述してきたように、プリンタブルデバイス製造技術がカバーしようとする情報端末デバイス技術分野は、普及を促進すればするほど多岐化されていき、要求技術仕様は多様になっていくという性格を帯びている。それをそのまま受け取って開発に着手してしまうと、モグラたたきのような開発スタイルとなってしまい、モグラの数だけ技術が並列表記されるようになるだけで、およそ戦略的・計画的技術開発などというものが展開できなくなってしまう。そこでこれらを計画的に取り扱えるようにする取り組みとして、今後の技術展開の仕方として技術開発の面展開ということと連続展開ということを特に重要視するようにしている。

5.1 セット化の取り組みとそのタイミング

今日産業技術として展開させていくためには、単一技術だけで技術コンセプトを達成することは極めて困難である。多くの場合、開発技術を補完し合う異種技術の展開が

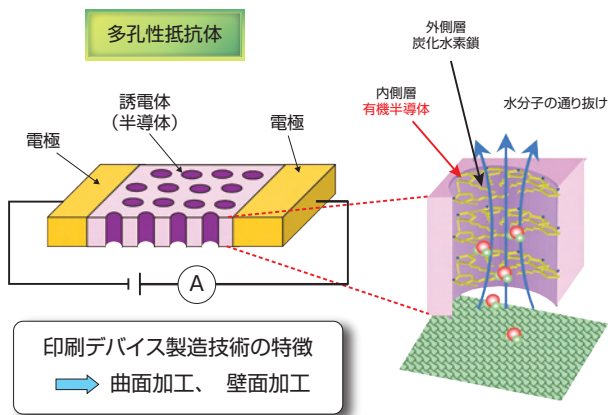


図8 フレキシブルセンサーのための三次元ナノポーラスデバイスの開発

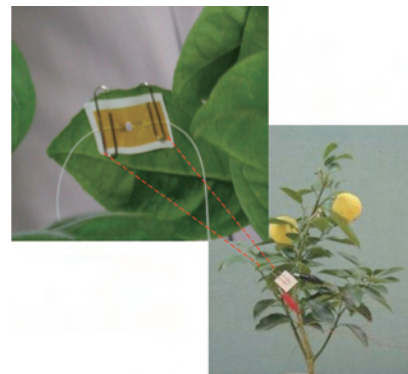


図9 農業用フレキシブル蒸散センサの開発

必要となってくる。これが、対象とするターゲットが既存のものであり、開発した技術がその一部を置き換えるだけという場合には、関連技術に対して注意を払う度合いは必ずしも高くないかもしれない。しかし、これが新たな市場創出につながっていく新技術概念である場合、すなわち先駆性の高い技術である場合、必ず他技術との組み合わせに大きな注意を払い、技術体系化することが必要となっていく。それで、技術開発の展開としては面展開すなわち技術のセット展開が重要となってくるわけである。

さて、この際一つ忘れてはならない重要な視点がある。それは今開発している技術はどの開発段階にいるのかという開発フェーズの概念である。技術のセット化はある意味当たり前であり、事業を見据えた開発をする企業においては、日常的に取り組みされていることである。しかし、ここに開発フェーズという時間の概念をきちんと読み込むと、単一的な概念ではないことに気がつく。すなわち、企業においてセット化の取り組みが行なわれるのは、技術がある程度完成させられるシナリオの全体像が見えてきた段階に入ってきてからである。企業といえども、シナリオがまだ良く見えてこない技術に対しては、その単一技術の探索することに終始せざるを得ず、どこかでそのシナリオが描けるようになるという情報が得られるのを待つということになる。

もう一つは、上述したようにセットしようにもそもそも「抜け技術」があるがためにセットのしようがなかったというターゲットを狙うという視点である。それを新規技術開発によりセットすることができるようになったということを示す意味合いである。これは、将に新産業製品の提示につながるが多いため知恵の出しがいと努力のしがいがあるということになる。企業活動においては、自社技術でないところで抜け技術が発生してしまった場合には、いかようにもすることができず、諦めてしまうことすらある。

こうしてみると、いったい誰が最初に産業展開のシナリオを示していくのかというのが課題となる。すなわち、産業技術に関しては、ここを示せるかが勝ち目のある技術とさせられるかのキーポイントとなるということであり、将に我々

が狙ったポイントである。

5.2 連続展開が早期普及を呼ぶ

更には、技術の連続展開すなわち次なる技術を連続的に開拓していくことはかなり重要なこととなる。開発技術がどのようなシナリオで産業技術として展開されていくのかという視点は、実用化させていくということを睨んだ場合には極めて重要な事柄となっていく。とかく単発的な技術開発になりがちな、当該分野においてはなおさらである。単発的な技術は、特定用途に適することはあっても、広く普及させることが困難となってしまうことが多い。一方、ひとたび関心を寄せてもらった技術に、二の手、三の手を示していくことは、技術の奥深さを示していくこととなり、より強い関心を引き寄せるのに役立つ。結果的に、関連技術全般についてその産業界への普及速度が速まっていくという効果を発揮してくれる。だからこそ、技術は常時連続的に開拓していき、どのような技術として成長させていくのかというシナリオを示していくことが重要となるのである。

6 おわりに

上記展開を推進し、ある程度社会に認知される成果をあげられることになったのは、我々が相互に密接な関係を有する研究チームを構成し、それぞれの研究開発が実質的に相互補完をなしえるような取り組みを行ってきたためと認識している。この点では、組織研究の強みを発揮できていると考えている。また、一方でこうした技術の多角的な展開ができたのも、その元をたどれば地道な学会活動がベースとなっている。学会活動における第1種基礎研究での活躍なしには、こうした技術に関心を寄せていただくようになることはさほどなかったのではないかという感触をもっている。

今後も、チームとしてこうした第1種基礎研究と第2種基礎研究のバランスをとりながら、新産業創出につながる産業技術とその展開シナリオの提示に努め、新産業の創出につながる技術の開発に取り組んでいくつもりである。

付記

本研究の一部は、NEDO「高効率有機デバイスの開発」事業、ならびにNEDO産業技術研究助成事業「三次元ナノポーラスフィルムセンサーデバイス技術の開発」の支援により行われた。

キーワード

ディスプレイ、情報端末デバイス、フレキシブルデバイス、プロセス革新、有機半導体、印刷

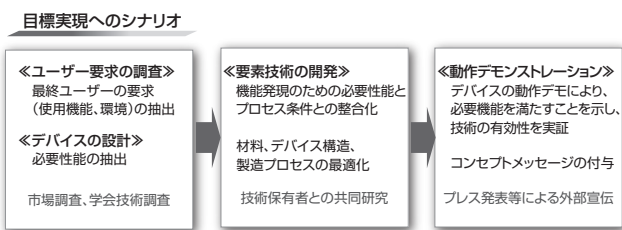


図10 フレキシブルプリンタブルエレクトロニクス実現のシナリオ

参考文献

- [1] T.Kodzasa, S.Uemura, K.Suemori, M.Yoshida, S.Hoshino and T.Kamata : Development of SiO₂ dielectric layer formed by low-temperature solution processing, *Proc. 13th Inter. Display Workshops*, (2) 881 (2006).
- [2] M.Yoshida, S.Uemura, S.Hoshino, N.Takada, T. Kodzasa and T.Kamata : Electrode effects of organic thin-film transistor with top and bottom contact configuration, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44(6), 3715 (2005).
- [3] M.Kawasaki, S.Imazeki, S.Hirota, T.Arai, T.Shiba, M.Ando Y.Natsume, T.Minakata S.Uemura and T.Kamata : High mobility solution- processed organic thin-film transistor array for active-matrix color liquid crystal displays, *J. Soc. Information Display*, 16, 161 (2007).
- [4] M.Kawasaki, S.Imazeki, M.Ando, Y.Sekiguti, S. Hirota, S.Uemura and T.Kamata : High-resolution full-color LCD driven by OTFTs using novel passivation Film, *IEEE Trans. Elect. Dev.*, 55, 435 (2006).
- [5] 鎌田俊英：有機TFT技術によるディスプレイの革新, *月刊ディスプレイ*, 11, 1 (2005).
- [6] 鎌田俊英：有機エレクトロニクスを印刷で創る (1), *日経エレクトロニクス*, 925, 131 (2006).
- [7] S.Hoshino, M.Yoshida and T.Kamata : Organic semiconductor-based flexible thin-film water vapor sensors for real-time monitoring of plant transpiration, *Sensor Letters*, 6, (2008) in press.

(受付日 2008.5.22, 改訂受理日 2008.9.3)

執筆者略歴

鎌田 俊英 (かまた としひで)

1990年3月京都大学大学院理学研究科後期博士課程修了。1992年4月工業技術院化学技術研究所入所(現産業技術総合研究所)これまで、有機材料を用いた光電子デバイスの開発に従事。NEDO「高効率有機デバイスの開発」事業では、プロジェクトリーダーを務める。2005年第11回東京テクノフォーラム21ゴールドメダル受賞、2006年第38回市村学術賞功績賞受賞。本論文では、ディスプレイの開発ならびに全体構想・戦略立てを担当した。

吉田 学 (よしだ まなぶ)

1999年3月千葉大学大学院自然科学研究科物質科学専攻後期博士課程修了。2001年4月産業技術総合研究所入所。有機材料を用いた新規電子デバイスの開発を得意とし、これまでフェーズⅡ、Ⅲ向けのデバイスおよびプロセス技術の開発に従事してきた。2006年第38回市村学術賞功績賞受賞。本論文では三軸分配加圧アニール法およびトップ&ボトムコンタクト型トランジスタの開発部分を担当した。

小笹 健仁 (こざさ たけひと)

1993年3月大阪大学大学院理学研究科修士課程修了。1993年4月工業技術院物質工学工業技術研究所入所(現産業技術総合研究所)。これまで、有機無機ハイブリッド材料を用いた光学デバイスや電子デバイスの作製技術の開発に従事して来た。2006年第38回市村学術賞功績賞受賞。本論文では、フェーズⅠ向けプロセス技術の開発を担当し、多光源酸化法の開発等で貢献した。

植村 聖 (うへむら せい)

2001年9月千葉大学大学院自然科学研究科高次物質科学専攻後期博士課程修了。NEDOフェローを経て、2003年4月産業技術総合研究所入所。これまで、バイオマテリアル、ソフトマテリアルを利用したデバイスの開発に従事してきた。2006年応用物理学学会講演奨

励賞受賞。フェーズⅠ、Ⅲ向け材料、プロセス技術の開発に取り組み、本論文では低温製造プロセスの開発部分を担当した。

星野 聡 (ほしの さとし)

1993年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科電子科学専攻修士課程修了。日本電信電話株式会社基礎研究所研究員、NEDOフェローを経て、2003年4月産業技術総合研究所入所。2001年東京工業大学博士(工学)。これまで、発光素子、センサー素子、そのネットワーク化などに関する開発研究に従事してきた。本論文では、フェーズⅡ、Ⅲ向けデバイス技術として三次元ナノポーラスデバイスを開発、またフェーズⅠ向けデバイス基礎科学解析を担当した。

高田 徳幸 (たかだ のりゆき)

1995年3月九州大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。1995年4月工業技術院物質工学工業技術研究所入所(現産業技術総合研究所)。これまで、有機ELや、メカノルミネッセンスなどの発光素子に関する研究に従事してきた。主として第1種基礎研究に取り組み、本論文では開発技術の基礎科学解析を担当した。

査読者との議論

議論1 フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の位置づけについて

コメント(立石 裕)

本論文における研究目標は、表題の「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発」に端的に表現されているとの理解が正しいとすると、この研究目標の持つ社会的価値の記述が不十分であると思います。具体的には、情報端末機器に要求される仕様様々な使用感、どこでもデバイス、だれでもデバイスと、フレキシブル・プリンタブルデバイスの概念の間にはギャップがあります。フレキシブル・プリンタブルデバイスは、あくまでも上記のような仕様を満たしうるオプションの一つであり、これがすべてではないはずで、他にも候補があるが、ある条件が加わった時に、フレキシブル・プリンタブルデバイスがベストチョイスになる、その条件(あるいは詳細仕様?)についての説明がないと、始めにフレキシブル・プリンタブルデバイスありきの議論になってしまいます。製造工程上の省エネルギー化の要請だけで説明するのは無理があります。どのようなニーズのために、なぜこのようなデバイスが必要なのか、あるいは効果的なのか、その説明が欠落しているように思います。この問題は図1に端的に現れています。中央の「多分岐化」でくられた階層とフレキシブル・プリンタブルデバイスの間には、明らかにギャップがあります。この図だとフレキシブル・プリンタブルデバイスがすべてを解決するようには見えませんが、そう単純な話ではないだろうと思います。

回答(鎌田 俊英)

情報端末デバイス技術は、これまでローエンドターゲットなどと呼ばれ、あたかも技術的には、ハイテクを結集すればでき上がってしまう付随技術であるという印象を持たれることが多くありました。しかし、実際にはその感覚に反して当該技術フィールドは思いのほか開拓することができず、産業技術展開しうる技術がほとんどないという状況におかれてしまっています。これは、ひとえに技術要求と市場要求とのマッチングが取れないため、技術指標のみからだけでは産業技術が開拓できないことを示しております。ご指摘いただいたような事項をそのまま受け止めてしまうと、結局はこの技術指標から積み上げるといった悪循環サイクルの中に落ち込んでいってしまいます。そこで、このような状況を打破し、技術フィールドを開拓していくには、この問題を解決しうる象徴的な技術掲げ、その旗のもとに技術牽引を図るというのが、一つの好適な手法です。本論文では、現状では最も好適な技術指標として捉えられている「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発」というコンセプトを象徴的に用い、当該技術フィールドの裾野開拓をしようとしている技術戦略について記述してお

ります。その社会的価値は、今日思うように進まない情報端末デバイス技術の裾野拡大の牽引というところにあります。したがって、その他の補完技術の詳細に触れることは、主論点をはずしてしまうこととなり、本論文で記載することはかえって逆効果と考えます。

コメント（小林 直人）

「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術」の開発研究では、どのような有力な対抗すべき技術があるでしょうか。たとえば有機デバイスだけではなく無機半導体やガラス材料など異種材料・デバイスを使う場合と、同じ有機デバイスを使う中でも構成法やプロセスが違うものがあると思います。ある目標に向けた性能比較（ベンチマーク）が示されていると非常に分かりやすいと思います。全ての例示をする必要はありませんが、何か特徴的な例について行ってみたいかがでしょうか。

回答（鎌田 俊英）

本文に追記いたしましたが、技術開発には技術指標を示し、そこに計画的に邁進するリニアモデル型研究開発と、最終イメージはあるものの技術指標をたてにくく計画的展開がしにくいノンリニアモデル型技術開発があり、ここでは後者のノンリニアモデル型技術開発をいかにして進めるかという視点での議論を投げかけているつもりです。

ノンリニアモデル型は、その推進は概して特異的なひらめきに依存すると思われがちですが、実際には、全体マップを描き（全体の体系化を行い）その中で、いくつか尖っている部分を見出すという手法を用いれば、論理的・計画的技術開発が可能になるということを示してみようという趣旨です。したがって、例えば研究計画をたてるにしても、最初に有機材料とか無機材料とかの材料科学からのスタートにするのではなく、フレキシブルという物理量軸、溶解性という化学量軸等を用いて、その軸のもとに材料を体系化し、場面に応じて最適なものを逐次選択していくという手法ではないかと考えております。

したがって、必要なことは一技術指標のもとにベンチマークを作成して一軸的な技術開発計画を立てるのではなく、マップを作成して、技術的にマッチングがとれる部分（複数存在する）を浮き彫りにし、そこを研ぎ澄ましていくような開発計画を立てるという手法が、技術分野にフィットしているということ表現したいということです。この理屈からすると、技術シーズから積み上げていくと、かえって技術展開エリアを狭めてしまうことになるかと思えます。

コメント（立石 裕）

鎌田さんの回答を読んでから図1を見直してみたのですが、この図が私の mislead の出発点なのかもしれません。中央幹線系 → 端末アクセス系 という構図の下にフレキシブルプリンタブルデバイス技術、という絵が配置されているため、私は無意識のうちに、「フレキシブルプリンタブルデバイス技術が、既存の端末デバイス技術を代替しようとするもの」として読んでしまいましたが、実はそうではなく、既存のデバイスと「端末機器」という意味では同じ階層にあるものの、「別方向への展開としてフレキシブルプリンタブルデバイス技術が存在する」、というように理解すべきなのでしょう。既存の技術が総じて言えば「汎用性のある、なんでもできる技術」としての性格を持つのに対し、フレキシブルプリンタブルデバイス技術は、「エンドユーザーのニーズに特化して単純化された機能の技術」としてとらえられるように思います。ただし、そのための製造技術が個々のデバイス毎に異なったものが必要だとすれば、とても産業としては成立しえないので、製造技術としては「汎用かつ異なったニーズへの対応が容易な自由度をもつもの」でなければ、裾野の拡大にはつながらないという点が、論文の主張のポイントになると思います。以上の私の理解が正しいとすれば、そのような意味合いを文章として入れ込んでいただくことは可能でしょうか？

回答（鎌田 俊英）

論文の主張点を汲み取っていただきましてありがとうございます

た。上記ご指摘いただきましたことが、まさに主張していきたい点です。本文の序章の段に、ご指摘いただきました点を意識して、少し追記しました。

議論2 技術展開の方向性について

コメント（立石 裕）

表1、表2に使われている「フェーズ」という表現には違和感があります。通常フェーズといえば、それは順次展開されていくものだと思いますが、ここで言われているフェーズはIV→III→II→Iと進化してゆくような性質には見えません。むしろ「レベル」という感じに近いのではないのでしょうか。

回答（鎌田 俊英）

ここで記述している「技術フェーズ」は、I→II→III→IVと発展していくものであり、その意味でフェーズという言葉は適切と考えます。「IV→III→II→Iと進化するのではないか」というご指摘は、現状の理解を誤っており、ここのところをご理解いただくことが、本論文では極めて重要なところだと思います。情報端末機器など、より最終ユーザー（使用者）に近いところの技術は、より複雑な技術が後から開発されるという図式は必ずしも成り立ちません。使用者の要求と製造者の要求とがマッチしないと、産業技術として発展していかないためです。例えば、フェーズIは、統一規格のマスプロという性格が比較的強いことから、より製造者の意向が反映しやすい技術です。すなわち、技術提供者、生産者がともに容易に存在するために、産業技術としての市場展開は比較的速く行なわれます。しかし、フェーズIVは完全に使用者よりの技術です。製造者にとっては、ビジネス利点がなかなか見出せないため、生産者・技術提供者として現われづらく、産業技術展開はなされにくいという性格を有しています。したがって、技術的難易度という指標ではなく、産業開花度というような指標からはフェーズIの技術よりは、はるかに遅れをとってしまいます。あえて言うならば、技術はフェーズI→II→III→IVの順に枝葉的に発展していくと見なすことができます。

本論文では、このように技術オリエンテッドでは市場展開しにくい技術、されどそれを求めている人（使用者）が多いという技術を、いかにして発展させていくのかということに問題提起していくことが一つの重要な主張点となっています。

議論3 産総研の果たすべき役割について

コメント（小林 直人）

表1の展開のシナリオ、表2の技術開発のプレイヤーマップは、この分野特有のあり方について極めて示唆的かつ独自性の高い指摘だと思います。将来的には、技術が Prosumer Technology を目指すとすると、開発者・技術ユーザー・エンドユーザーが密に意見交換する場（時間と空間）が重要だと思いますが、それを先導する何か良いアイデアがあればお聞かせ下さい。

回答（鎌田 俊英）

Prosumer Technology は、言い換えると「自給自足」という概念であり、また視点を変えると究極のベンチャーという見方ができるかと思えます。したがって、役割分担という考え方をはずしていかねばならないという方向となるため、始めに役割分担ありきで、分担された役割に基づいた相互意見交換を求めてしまうと、実は実現しにくくなってしまふように思います。実際に実現させるためには、自分が Prosumer Technology の実施者となるのだという意識を促すこと、そのための補助として①技術情報を提供する場を設けること、②モデルケースを提示し、手法の先導を行なうこと、③実際に実行するためのツールを提供することということが必要と考えます。この中で、①や③はリスクシェアという視点から公的サービスとしての位置づけを検討すべきものではないかと考えます。また②は、セカンドジョブのような、新たな技術ライフスタイルを提示していくようなことかと思えます。いずれも、産総研のような公的機関が産業技術社会の一つの

スタイルとして検討提示していくべきことではないかと考えます。

質問（立石 裕）

議論1の観点から、表1と表2を見ると、よく概念が整理されていることが分かりましたが、本文を含めて、産総研（鎌田グループ）のポジショニングについての記述がないのが気になりました。これらの表の中に産総研の戦略を具体的に記載するのは難しいでしょうか？

回答（鎌田 俊英）

公開論文という性格上、あまりあくの強い形で自己主張するのをはばかり、「自分が」というトーンは意識的に少し落としていたところがあります。ただ、実際には本論文の分析主張自体が産総研の立ち位置、我々の狙い（技術コンセプトの先導、リスクシェアなど）を強く主張しているものとなっております。ご指摘に従い、修正文においては、主語（我々は、）を意識的に追加しました。

議論4 技術開発の展開の基本的な考え方について

質問（小林 直人）

材料・プロセス・素子を絶えずセットで捉える考え方は、極めて重要であると思います。また補完すべき他の異種技術との統合を行う面展開の考え方や連続展開の考え方も非常に大切であると思います。これらの考え方は、産業技術開発一般に共通して言えることだとも思いますが、今回の「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術」の開発研究に特有の課題として他に何か特徴的なことがあるのでしょうか。

回答（鎌田 俊英）

「フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術」がカバーしようとしている情報端末デバイス技術のように、その技術仕様の多くをエンドユーザー（使用者）が決めるような技術では、技術は少量多品種提供への対応ということになることが多いため、技術開発スタイルは、統一指標をもたないノンリニアモデル型となりがちです。このような場合、その技術コンセプトが、一要素を分担する製造者のビジネスコンセプトとマッチングがとれないというようなことだけでも、材料から素子、モジュールまでを一貫させることができなくなってしまい、結果としてその技術コンセプト全体が産業として花咲かせることができなくなってしまうということが数多く生じてしまいます。すなわち、一連の要素技術の中で、「技術抜け」ができてしまい、そこが律速となって技術開花しないというケースが極めて多いというのが特徴となるということです。しかも、その「技術抜け」が技術的困難さで生じるのではなく、ビジネス背景などから生じてしまうことが多いため、いくら待ってもプレイヤーが現われなれないという状況になっています。

本文中に記載した「面展開」という概念は、自分の守備位置を確認するために、全体像を把握する必要があるということを表現しているのではなく、「技術抜け」を生じさせないために全体像を把握し、「技術抜け」ができているところこそリスクシェアの役割を果すプレイヤーが取り組むべき課題が発生しているということを表現しようとしたものです。また、「連続展開」ということを敢えて強調したのは、少量多品種適用にかかる技術に共通の課題となっている「技術開発が単一ターゲット適用に見えてしまい、技術の奥深さが見えなくなってしまう」という問題点を解消することを意図しました。すなわち、一見単一技術適用に見える技術であっても、実は横展開ができるという具体的事例を示すことで技術の奥深さを示し、技術開発のプレイヤーと

しての参入障壁を低くしてやる効果を発揮させることが必要であるということを主張しています。

質問（小林 直人）

今回の第2種基礎研究としての構成的方法は、4.4節「技術の効果・先駆性は、ものとして見せる。」に詳しく記されていると理解しました。特に「多元酸化法」、「三軸分配加圧アニール法」では、それらが「抜け技術」を補完する「脇役技術」と言う表現がありますが、しかしこれがないと技術として完成しないわけですので、極めてエッセンシャルな技術ではないかと思えます。構成方法としては、完成しつつある部分に最後のピースを入れるような「はめ込み型」とも言えるかもしれません。そうであるとしたらそのような役割を強調した表現（「脇役技術」と言う表現でなく）が必要な気がしますが、上記解釈も含めてどのように考えられますか？

回答（鎌田 俊英）

「脇役技術」というのは、少し後ろ向きな表現で、適切性に欠けると認識いたしました。ご指摘いただきましたとおり、実態としては、トータル設計のために不可欠な技術です。このところの表記を、「抜け技術の補完」→「抜け技術の充填」、「脇役技術」→「last piece technology」のように変えました。

議論5 個々の要素技術の見極めの戦略について

質問（小林 直人）

「著しく優れた技術があってもデバイスはできず、一部多少の性能が劣っている部分があったとしても、トータルとしての整合性が高ければ、効果的な技術となりうる。」との指摘がありましたが、これは極めて重要だと思います。仮に、これを最適整合デバイス（オプティマリー・コンシステント・デバイス）と名づけたとして、それを構成する個々の要素技術をどこまで許容するか、あるいはそのうちの幾つかについてさらなる高性能化を図るかは技術開発戦略によると思います。その見極め（どこでオプティマムと判断するか）をどのようにするかについてのアイデアがあればお聞かせください。

回答（鎌田 俊英）

技術は進歩に対して受け入れられるということを考慮すると、まず「最適整合」というのは時間の関数として捉える必要があると考えます。取りあえず、現状と明確な差別化ポイントが認識できるようであれば、その技術は受け入れられると思います。ただし、進歩の歩幅があまりにも大きすぎると逆に受け入れられなくなってしまいます。そのため、「最適整合」は必ず時間で刻むこと、その刻んだ歩幅の中では明確な差別化ポイントが認識できるようにすることというのが、技術見極めを行なうための最初の指針かと思えます。その上で見極めをどのようにするかは、差別化ポイントをどのように認識できるようにするかということになりますので、これに対して敢えて言うならば、開発者は可能な限り社会に出て、一市民となった時の感覚（社会性）を磨くことが重要なのではないのでしょうか。繰り返し述べることになりませんが、当該技術分野においては、技術仕様は製造者によるよりも、エンドユーザーによることの方が圧倒的に高いということが特徴となっているため、技術オリエンテッドではなく、いかに社会性オリエンテッドにすることができるかが、重要な点になるのではないかと考えます。

水に代わる密度標準の確立

—— シリコン単結晶を頂点とする密度のトレーサビリティ体系 ——

藤井 賢一

物質の密度、あるいは、体積や内容積、濃度といった物理量を計測するための基準として従来は水が広く用いられていた。密度だけでなく比熱や表面張力など他の物性の基準としても水が用いられることが多い。しかし、水の密度はその同位体組成に依存して変化したり、溶解ガスの影響を受けるため、1970年代からはシリコン単結晶など密度の安定な固体材料を基準として密度を計測することが検討されるようになり、特に最近では計測のトレーサビリティを確保し、製品の信頼性を向上させるために、より高精度な密度計測技術が産業界からも求められるようになってきた。このような背景から産総研では密度標準物質としてシリコン単結晶を用い、従来よりも高精度な密度標準体系を整備した。密度の基準を液体から固体にシフトすることは、単なる精度向上にとどまらず、薄膜のための新たな材料評価技術や次世代の計量標準技術の開発を促すものである。

1 はじめに

水は密度の基準として古くから用いられてきた。現在、質量の基準として用いられている国際キログラム原器も元々は18世紀末に製作されたメートル原器に基づいて測られた1リットルの水の質量を基準として決められたものである^[1]。国際単位系(SI)^[2]において密度の単位(kg/m³)はSI基本単位である質量の単位キログラム(kg)と長さの単位メートル(m)から構成されるSI組立単位で表される。国際単位系の定義に従って密度を計測するためには質量と長さの標準(standard)があれば十分であり、新たに密度の標準を設定する必要はないように思われるかもしれない。しかし、密度という物理量を測るために質量と長さの絶対測定から始めることは大掛かりな計測設備を要するため極めて困難であり、それよりもむしろ密度の絶対値があらかじめ計測された物質の密度を基準として未知の物質の密度を相対測定する方がはるかに容易である。このため誰もが入手でき、かつ、密度の再現性が高い物質について、あらかじめ密度の絶対値を計測しておき、この物質の密度を基準として未知の物質の密度を相対測定する方法が一般に用いられる。このとき密度の基準となる物質のことを密度標準物質と呼ぶ^{[3][4]}。

水は最も早くから用いられてきた密度標準物質であり、他の物質の密度や体積、内容積を求めるために広く用いられてきた。その密度は1890年代から1910年にかけて国際度量衡局(BIPM)^[5]で最初に絶対測定されたが、この測定は同位体(isotope)が発見される以前に行われたため、水の同位体組成の不確かさに起因する問題が残されていた。このため同位体組成が明確な水の密度の絶対値を 1×10^{-6} よりも小さい相対合成標準不確かさで再測定することが国際純正応用科学連合(IUPAC)をはじめとするいくつかの

国際機関から勧告され、これをうけてオーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)^[6]と我が国の産総研計量標準総合センター(NMIJ、当時は工業技術院計量研究所)^[7]では標準平均海水(standard mean ocean water: SMOW)^[8]に等しい同位体組成を有する化学的に純粋な水の密度の絶対測定を1990年代に行った。オーストラリアと我が国において独立した絶対測定結果が得られたが、両者の値には不確かさを上回る 2.1×10^{-6} の相対的な隔たりがあったため、国際度量衡委員会(CIPM)質量関連量諮問委員会(CCM)の密度作業部会(WGD)において両者のデータは解析され、4℃、101.325 kPaにおけるSMOWの密度を999.9749(8) kg/m³とする0~40℃の範囲の推奨値が決められた^[9]。括弧内の数値は最後の桁の拡張不確かさ($k = 2$)を表す。この値は現在、国際推奨値として広く用いられている。しかし、水の密度は溶解ガスの影響や同位体組成の変動によっても変化するため、正しい値を得るためには実際の使用状況に応じた幾つかの補正が必要になる。

水の他に水銀も密度の基準として用いられてきた。水銀の密度は、圧力標準の設定を目的として1957年および1961年に英国物理研究所(NPL)^{[10][11]}で絶対測定された。これらの測定の平均値を現在の温度目盛であるITS-90に換算すると、20.000℃、101.325 kPaにおける密度は13 545.854(3) kg/m³である^[12]。測定の相対合成標準不確かさは 0.2×10^{-6} であると報告されているが、同位体組成の違い等により、原産地の異なる水銀試料の密度は最大で 1.7×10^{-6} の相対偏差がある。このため、値付けされていない水銀の密度の相対合成標準不確かさは 1×10^{-6} よりも大きいと考えられている^[13]。水銀の密度の不確かさは、圧力標準^[14]の設定に大きな影響を与えるだけではなく、球形共振

器による一般気体定数 R の絶対測定^[15]や、液体電位計によるジョセフソン定数 $K_J=2e/h$ （ここで e は電荷素量を、 h はプランク定数を表す）の絶対測定^[16]における主な不確かさの要因となっている。

このように、従来から用いられている液体の密度標準には測定結果の不整合や同位体組成の不確かさに起因する問題が残されているため、これらのデータから 1×10^{-6} よりも小さい相対不確かさの密度標準体系を構築することは極めて困難である。その一方で、計量標準の分野においても国際相互承認（MRA）を加速し、計測におけるトレーサビリティを明確にすることが求められるようになり、特にSI単位の定義にトレーサブルなかたちで密度を計測することが求められるようになってきた。また、振動式密度計などに代表される高感度な密度センサーが産業界でも広く用いられるようになり、計量法で行っている浮ひょうの基準器検査制度や検定制度だけでは十分な精度の密度標準を供給することが困難になってきた。特に醸造産業ではアルコール表を使って密度測定から酒類のアルコール濃度を決定しているため、自動計測化に対応でき、かつ、高精度な測定が可能な振動式密度計の導入が検討されるようになり、計量法に基づく校正事業者登録制度（JCSS）によるトレーサビリティ体系の構築が求められるようになってきた。

近年は産業界からだけではなく、SI単位の定義の改良や基礎物理定数の決定など科学技術的視点からもより高精度な密度標準が求められている。特に人工原器に頼る唯一のSI基本単位であるキログラムを再定義するための実験的研究がNMIJや海外の計量標準研究機関で行われている^[17]。シリコン単結晶の密度、格子定数、モル質量などの絶対測定からアボガドロ定数を決定するX線結晶密度（XRCD）法では、同位体濃縮されたシリコン単結晶の密度を 1×10^{-8} の相対標準不確かさで絶対測定することが求められている^[18]。

このような背景から産総研では2001年までにシリコン単結晶を頂点とする密度のトレーサビリティ体系を構築し、従来の計量法では対応できなかった固体密度の標準供給を開始した。現在までに浮ひょう、密度標準液、振動式密度、固体材料、薄膜、PVT性質等に対応した密度校正技術を開発し、SI単位の定義にトレーサブルな密度標準を産業界やユーザーに提供することに貢献している。

2 新たな密度標準体系の必要性

2.1 社会的ニーズ

石油化学産業、アルコール産業、醸造産業、食品産業などでは製造工程や品質管理のために液体の密度が計測される。特にアルコール濃度の正確な計測は酒類の製造管

理、成分表示、流通そして公平な酒税の賦課に不可欠なものである。計量法では経済活動やサービス等において特に重要な計測器を特定計量器に指定し、計測器の構造と仕様に対して型式承認実験を実施することを定めてきた。液体の密度計測については特定計量器として検定された密度浮ひょう、比重浮ひょう、酒精度浮ひょうなどが供給されてきた。浮ひょうは「浮きばかり」とも呼ばれる密度の計量器であり、アルコール濃度と密度との関係を表すアルコール表^[19]を使って酒精度浮ひょうの目盛が校正される。浮ひょうの目盛は従来は水の密度を基準として校正されていたが、その構造上、液体試料の表面張力の影響を受けやすく、浮ひょうによる密度測定の相対不確かさは最も小さい場合でも約 1×10^{-4} である。これに基づくアルコール濃度測定の不確かさは約0.1%であった。また、浮ひょうの目盛は測定者が肉眼で読み取る必要があり、安価ではあるが計測の自動化に対応しにくいという側面もある。

一方、国税庁による酒税の賦課において最も広く用いられている計測方法は酒精度浮ひょうによるアルコール濃度計測である。国税庁所定分析法では計量法に基づいて検定された酒精度浮ひょうが用いられている。これは賦課の際に用いられるデータには公平性が求められるが、第三者認証の得られたアルコール濃度計測器としては計量法で検定された酒精度浮ひょうのみしか当時は供給されていなかったためである。

このような状況のなかで、醸造産業では品質管理の高度化、自動化などに対応できるより高精度な密度計測器への需要が高まっていた。製造工程を緻密に管理するためにはアルコール濃度を0.05%程度の精度で計測したいという要望が産業界からあり、そのためには少なくとも0.005%の精度で国家計量標準にトレーサブルな密度標準を供給することが必要だった。

振動式密度計は極めて分解能の高い密度計測器であり、最も安定なものでは $10^{-6} \sim 10^{-7}$ の再現性で液体の密度を計測することができる。この問題を検討し始めた当時から醸造産業では既に振動式密度計が試験的に導入されていたが、その正確さを保証するためには密度標準液と呼ばれるあらかじめ密度が校正された標準液体で密度と振動数との関係を校正しておくことが不可欠である。そのためには第三者認証の得られた密度標準液を約0.001%の相対不確かさで供給することが必要であるが、我が国ではトレーサブルな密度標準液の供給体制が整備されていなかった。

2.2 科学的ニーズ

真空中の光の速さ c 、プランク定数 h 、電気素量 e 、アボガドロ定数 N_A などは自然現象を記述する際に現れる基本的な物理定数であり、これらの基礎物理定数を国際単位系

に準拠したかたちで決定できれば、これらを組み合わせてさまざまな基礎物理定数を誘導することができる。基礎物理定数の値は学術的にも重要であり、波及効果も大きいので、国際学術連合会議（ICSU）科学技術データ委員会（CODATA）に設置された基礎物理定数作業部会では基礎物理定数間の関係に一貫性が保証されるような調整を行い推奨値としてまとめている^[20]。

アボガドロ定数は、基礎物理定数の調整だけでなく、物質の単位モル（mol）を定義する上でも重要である。さらに、アボガドロ定数を十分に小さな不確かさで決定することができれば、国際単位系において人工物によって定義されている唯一のSI基本単位であるキログラムを、原子の質量あるいは基礎物理定数を基準として再定義することが可能となる^{[21] [22]}。このためメートル条約に基づいて組織された国際度量衡総会（CGPM）からは世界の計量標準研究機関が協力して国際キログラム原器の質量安定性を評価し、基礎物理定数を用いてキログラムをはじめとする幾つかのSI基本単位を再定義するための実験的研究を行うことなどが勧告されてきた。

シリコン単結晶の密度を小さい不確かさで計測する技術は、X線結晶密度法（x-ray crystal density method: XRCD法）からアボガドロ定数を決定するうえで重要な役割を担っている。XRCD法において、アボガドロ定数 N_A はシリコン単結晶の密度 ρ 、モル質量 M 、格子定数 a のそれぞれを絶対測定することにより $N_A=8M/(\rho a^3)$ として求められる。2005年にNMIJ、ドイツ物理工学研究所（PTB）、欧州Joint Research Center標準物質計測研究所（IRMM）は協力して自然同位体比のシリコン結晶からアボガドロ定数を測定し、XRCD法としては最も精度の高い 3×10^{-7} の相対標準不確かさを達成した^[23]。2004年に国際度量衡委員会（CIPM）によって組織されたアボガドロ国際プロジェクト運営委員会（IAC）ではNMIJを含む世界の8研究機関の協力の下で、シリコン同位体 ^{28}Si を高濃縮した単結晶を作製し、アボガドロ定数の精度を 2×10^{-8} まで向上させ、キログラム再定義を実現するための研究が行われている。この目標を達成するためにはシリコン単結晶の密度を 1×10^{-8} の相対不確かさで決定することが必要とされている。

シリコン単結晶から求められるアボガドロ定数は、交流ジョセフソン効果と量子ホール効果で用いられている理論の検証にも用いられている^[20]。交流ジョセフソン効果における直流電圧は $U=nf/K_J$ （ n は整数、 f はジョセフソン接合素子に照射するマイクロ波の周波数、ジョセフソン定数 $K_J=2e/h$ ）、量子ホール効果における電気抵抗は $R=R_K/i$ （ i は整数、フォン・クリッツィング定数 $R_K=h/e^2$ ）で表され、これらは電気標準を確立する上での重要な基礎理論となっ

ているが、これらの電圧と電気抵抗が厳密に $2e/h$ あるいは h/e^2 を単位として量子化されているのかどうかを理論的に証明することはできないので、これらの効果を用いない実験から求めた h や e などの値との比較・検討から、実験の不確かさの範囲内で理論を検証する作業が行われている。CODATA基礎物理定数作業部会では交流ジョセフソン効果と量子ホール効果に頼らずに h や e を求めることができるデータとして、X線結晶密度法から求めたアボガドロ定数の値などを用いている。これらの検証により今のところジョセフソン効果と量子ホール効果は約 10^{-7} 程度の不確かさで正しいことが確かめられている^[20]。

2.3 目標達成のためのシナリオ

社会的ニーズと科学的ニーズの両者を満足しながら目標を達成するためには、研究開発の方針を明確にしておくことが重要である。これらを以下にまとめた。

- (1) SI基本単位の定義にトレーサブルな方法で密度の特定標準器（国の最上位の計量標準）を設定できること
- (2) 密度の特定標準器が社会的ニーズだけではなく将来の科学的ニーズにも対応できる性能をもつものであること
- (3) ユーザーが用いる浮ひょう、密度標準液、振動式密度計などの計量器を切れ目のない連鎖によって校正し、密度の特定標準器へと結びつけることが可能であること
- (4) 校正事業者登録制度（JCSS）を活用し、ISO/IEC 17025規格に適合した登録校正事業者がユーザーへと密度の校正サービスを行うことができる体系であること
- (5) 登録校正事業者が保有する最上位の標準器は十分に安定であり、産総研が保有する特定標準器による頻繁な校正を要しないものであること

これらの方針のなかで(1)を選択する際に、水の精製方法や純度分析方法、同位体組成測定方法などを規定し、水を密度の特定標準器に指定することも検討した。しかし、最大限の技術的努力を重ねたとしてもその精度は 1×10^{-6} を上回することは極めて困難である。一方、アボガドロ定数の測定のために産総研で開発していたシリコン単結晶の密度測定技術は既に 1×10^{-7} のレベルに到達していた。このため、シリコン単結晶の密度をトレーサビリティの頂点とする密度標準体系を選択した。(5)は登録校正事業者となる計測器メーカーの負担を考慮した場合に重要なファクターとなる。この点については候補となる校正事業者との打合せを行ったところ、校正装置への最初の設備投資が多少高価であっても、より安定な密度の標準器を保有することによって校正の信頼性を確保し、標準器の頻繁な校正を排除することができる方法のほうが中長期的には運用しやすいとの結論に達した。これらの検討結果に基づいて産総研では新しい密度標準体系の構築に着手した。

3 新しい密度標準体系の開発

シリコン単結晶の密度は極めて安定しているので、密度標準物質として用いることが1970年代に米国標準技術研究所 (NIST) で最初に検討された^[24]。1987年にオーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) においてシリコン単結晶から球体を研磨する技術^[25]が開発されてからは、その形状と質量の測定から密度を直接決定することが可能となり、密度の不確かさを飛躍的に減少させることが可能になった。従来、シリコン単結晶の密度は、形状測定から体積が正確に決められた鋼球の体積を基準として液体中での浮力測定^[24]から求められていたが、シリコン単結晶を球体に研磨することにより、浮力測定を介することなく密度の絶対値を直接的に求めることができる。CSIROで単結晶シリコン球体を単に密度標準として使用するだけでなく、アボガドロ定数の決定にも使えるようにするために、研磨の最終段階において機械的除去だけではなく化学的除去方法 (mechano-chemical polishing) を取り入れた研磨方法を開発し、球体表面に結晶欠陥ができるだけ入らないような工夫が加えられた^[26]。透過型電顕による球体表面付近の断面観察では結晶構造が保たれたまま表面酸化膜に移行していることが確認されている。現在ではこの研磨技術により直径約94 mm、質量約1 kgの球体を真球度 (平均直径からの偏差の最大値) 50 nm、表面粗さ0.1 nmの精度で仕上げることが可能となっている。産総研ではCSIROで研磨技術が開発された当初からシリコン固体密度標準の優れた特徴に着目し、水に代わる新しい密度標準体系の確立に着手した^{[27] - [30]}。

3.1 シリコン固体密度標準の特徴

シリコン単結晶は半導体産業における基盤材料であり、現在では高純度、無転位、大寸法の単結晶が容易に入手できる。シリコンには3つの安定同位体²⁸ Si、²⁹ Si、³⁰ Siが存在するので天然同位体組成のばらつきと結晶製造工程における質量分別効果等により個々のシリコン単結晶の密度は約 1×10^{-5} 程度ばらつくが、その平均値は20.000 °C、101.325 kPaにおいて約2329 kg/m³である。シリコン単結晶を密度標準として用いた場合の特徴は以下のようにまとめられる。

(1) 完全に近い結晶性を有するので一度測定してしまえばその密度は極めて安定している。

(2) 水や水銀が液体であるのに対し、シリコン単結晶は固体なので、使用中の化学的純度低下や同位体組成の変化による影響がない。

(3) 表面は酸化膜で覆われているが、酸化膜の密度は基盤であるシリコン単結晶の密度に近いので、酸化進行によ

る密度変化は極めて小さい。

特に (2) は水に代わる新たな密度標準体系の開発を促すに至った重要な動機である。シリコン固体密度標準は単に高精度であるだけでなく、校正事業者が行う実際の校正作業や標準器の維持・管理においても、液体の密度標準物質にはない優れた利便性を兼ね備えている。

3.2 密度の絶対測定技術の開発

図1に、シリコン単結晶の密度を絶対測定するために開発したレーザ干渉計を示した^[31]。日本国キログラム原器にトレーサブルな質量測定を実現するためにシリコン球体の質量が約1 kgとなる大きさを選択した結果、その直径は約94 mmである。真球度が小さい球体の体積は、その直径を多方位から測定して平均直径を求めることにより十分に小さい不確かさで求めることができる。このため真球度が100 nmよりも小さいシリコン球体が密度の特定標準器として用いられている。

SI基本単位であるメートルは、定義された光速と、周波数が校正された光の波長から決められるので、レーザ干渉計の光源周波数は秒の定義にトレーサブルな方法で校正されていなければならない。しかし、長さ測定の度に光周波数を絶対測定することは困難なので、秒の定義にトレーサブルな方法で周波数があらかじめ絶対測定された幾つかの周波数安定化レーザの推奨波長が国際度量衡委員会 (CIPM) によって決められている。シリコン球体の直径測定では、よう素安定化He-Neレーザの推奨波長を基準として校正されたレーザダイオードを光源とすることによりメートルの定義へのトレーサビリティを確保している。

光波による正確な直径測定のためには、球体表面の酸化膜の厚さを評価し、入射光が表面で反射する際の位相変化を評価することが重要である。特にアボガドロ定数などの基礎物理定数を決定してキログラムなどのSI基本単位を再定義するためには、シリコン球体を直径のサブナノメートルの精度で測定することが求められる。シリコン球体の表

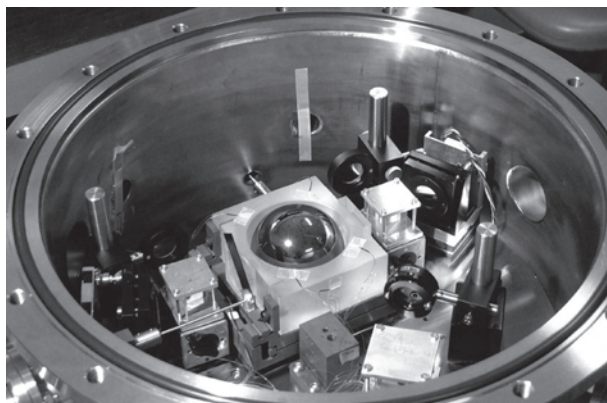


図1 シリコン球体の直径を測るレーザ干渉計

面は通常3~5 nmの酸化膜で覆われているので表面分析技術の導入が必要である。そのために従来はシリコン球体表面のエリプソメトリーを行ってきたが、近年ではX線反射率法（XRR）やX線光電子分光法（XPS）などの表面分析技術を併用し、より正確で信頼性の高い表面計測が行われている。シリコン単結晶にも一定の熱膨張係数があるので、直径測定の際の球体温度を1 mK程度の不確かさで測定することが求められる。そのため最近では真空中における物体の温度をより一定に保つためのアクティブな放射シールドを導入するなどの改良が加えられている。

シリコン単結晶の密度を絶対測定するための要素技術を表1に列挙した。SI単位の定義にトレーサブルな固体密度標準を確立するためには光周波数標準、温度標準、表面分析技術、質量標準など多くの計測標準が必要である。これらの標準を組み合わせる新たな密度標準を構築した。

3.3 密度比較測定技術の開発

トレーサブルな浮ひょう、密度標準液、振動式密度計などをユーザーに供給するためには、特定標準器である単結晶シリコン球体の密度を基準として密度を比較計測する技術が必要である。このために産総研では以下に示す液中ひょう量装置、浮ひょう校正装置、磁気式密度計などの開発を行った。

3.3.1 液中ひょう量法による固体材料の密度校正

シリコン球体の密度を基準として固体材料の密度を校正するために開発した液中ひょう量装置の構造を図2に示した^[32]。作業液体には表面張力が小さく、密度が安定なトリデカン（n-C₁₃H₂₈）が用いられている。荷重交換装置を用いて単結晶シリコン球体と測定対象物である固体材料とを交互に液中ひょう量することにより、これらの密度差を 4×10^{-8} の相対標準不確かさで校正することができる。温度分布や液体の自重による密度勾配の影響を補正するために、垂直方向に配置した2個の単結晶シリコン球体の中間に固体材料

表1 シリコン単結晶の密度の絶対測定のために開発した要素技術

要素技術	開発目標	目標達成のために開発した要素技術
光周波数の計測・制御	周波数固定のガスレーザーによる直径のナノメートル計測（広帯域での光周波数制御が実用的に困難だった頃の開発目標）	エタロンの機械的走査（mechanical scanning）による干渉フリンジの変調・解析技術：3 nm の直径測定精度を実現（1994年）
	レーザーダイオードの導入による光源周波数の広帯域制御と直径の完全自動計測化	20 GHz 帯域での光源周波数計測制御
	サブナノメートルの精度での直径測定	位相シフト法（phase shifting method）による直径の完全自動計測：直径測定精度を1 nmに改良（2007年） ダークフリンジ法による干渉フリンジ計測：量子ノイズによる限界まで性能を向上（開発中）
表面分析	シリコン球体表面の酸化膜の厚さの評価	球体表面の分光エリプソメトリー（～1996年） X線反射率法（XRR）とX線光電子分光法（XPS）の併用（2007年）
	温度計測・制御	真空中におけるシリコン球体の温度の精密測定
球体の方位制御	真空中での多方位からの直径測定	恒温水循環による真空容器の温度制御：ITS-90に基づく温度測定と熱電対による温度分布の評価により温度測定精度5 mKを達成（1994年） 放射シールドの導入とそのアクティブな温度制御により温度測定精度1 mKを達成（2008年）
	体積の誘導	不完全な球体の体積の決定
質量計測	真空中におけるシリコン球体の質量評価	空気浮力精密補正のためのシンカーシステムの導入 シリコン球体表面での吸着係数の評価

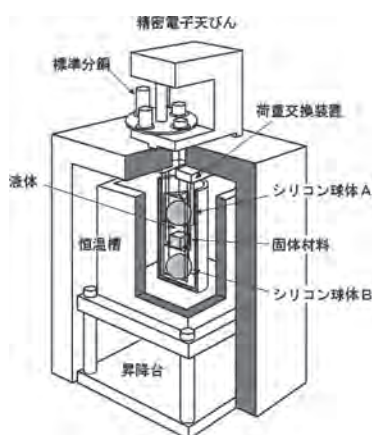


図2 液中ひょう量装置の構造

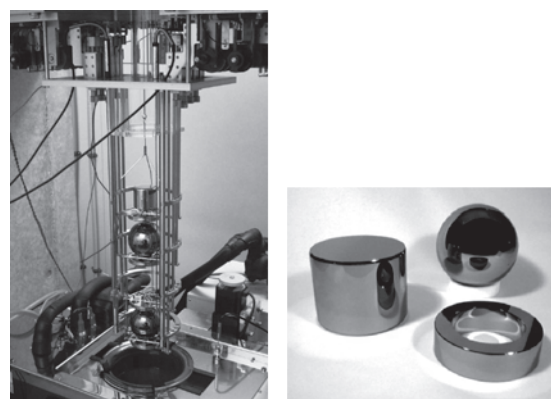


図3 液中ひょう量装置（左）と特定二次標準器として密度校正されたシリコン単結晶（右）。球体の他に円柱、円環など様々な形状のシリコン単結晶が特定二次標準器として用いられている。

が配置されている。この液中ひょう量装置は、JCSSにおいて密度の特定二次標準器として用いられるシリコン単結晶の他に分銅、ガラス、半導体結晶、貴金属など任意の固体材料の密度校正にも用いられている。液中ひょう量装置と密度校正されたシリコン単結晶を図3に示した。

3.3.2 衡量法による浮ひょう校正

図4に衡量法による浮ひょうの目盛校正の原理を示した。浮ひょうが作業液体から受ける浮力を電子天びんで測定することにより浮ひょうの棹に付された目盛を校正することができる^[33]。従来の衡量法においては、水の密度が基準として用いられていたが、水の表面張力は大きく表面の汚染に敏感なため、小さい不確かさで浮ひょうの目盛りを校正することは困難だった。現在では水の代わりにトリデカンが作業液体として用いられている。このため、密度が校正されたシリコン単結晶の円環（特定二次標準器）によってトリデカンの密度を液中ひょう量法で校正する方法が用いられている。この方法により計量法における基準器検査やJCSSにおける浮ひょうの目盛校正が実施されている。

3.3.3 磁気浮上式密度計による密度標準液の校正

振動式密度計^[34]は感度の高い密度測定装置として石油化学業界、アルコール産業、醸造産業、食品産業、医療検査等の多くの分野で用いられている。通常は水と空気のみを密度標準物質として校正されるため、標準物質の密度と異なる領域で用いた場合の不確かさは大きい。このため、密度が約 0.5 g/cm³から 2.0 g/cm³までの領域において、密度の異なる幾つかの密度標準液を供給することにより、振動式密度計の信頼性とトレーサビリティを確保することができる。

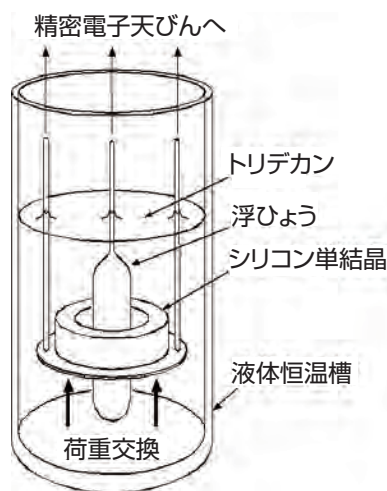


図4 浮ひょうの目盛校正に用いられるシリコン単結晶

図5に密度標準液を校正するために産総研で開発した磁気浮上式密度計を示した^[35]。この密度計は図2に示した液中ひょう量装置と同じ原理で流体の密度を測定するものであるが、磁気浮上による非接触の懸垂機構を用いているため、メニスカスにおける表面張力の影響を受けることなく、加圧流体や蒸気圧力の高い液体の密度も測定することができる。

液中ひょう量装置によって密度が校正されたシリコン単結晶をシンカーとして用いることにより、広い温度・圧力範囲においてトレーサブルな密度標準液を供給することができる。この方法で校正された密度標準液の相対標準不確かさは 7×10^{-6} である。産総研での測定結果は、JCSSにおける登録校正事業者の測定結果が正しいことを検証するための技能試験を実施する際の参照値として用いられている。

4 校正の不確かさと国際同等性の検証

我が国では3.2節で述べたように固体密度の絶対測定によって単結晶シリコン球体の密度を決定し、これを計量法における密度の特定標準器に指定している。この特定標準器の値と不確かさを表2に示した。これらは2005年までに当所で実施した密度の絶対測定結果に基づくものであり、密度の相対合成標準不確かさは 1.2×10^{-7} である。

我が国の固体密度標準の絶対値とその不確かさの妥当性を検証し、その国際同等性を確認することは、計量標準における国際相互承認 (MRA) を進展させ、我が国の密度計測器の信頼性を示す上で重要な課題である。このため筆者は2000年頃から国際度量衡委員会 (CIPM) 質量関連

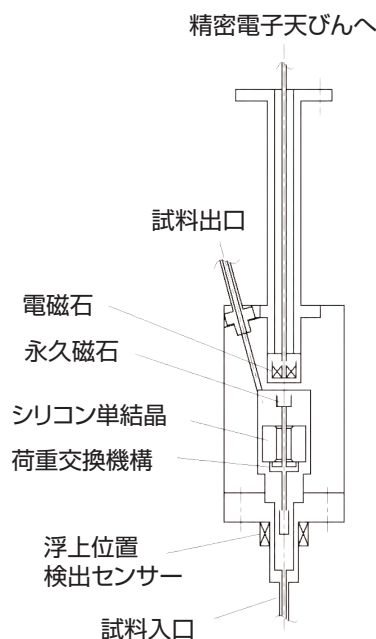


図5 磁気浮上式密度計

量諮問委員会（CCM）の密度作業部会（WGD）で行うべき基幹比較（key comparison）について調べるために、各国の計量標準研究機関へアンケートを配布し、各国で保有している密度標準の現状と密度の校正方法について調査した。その結果、単結晶シリコン球体とそのための光波干渉計を保有し、産総研のように密度の絶対値の基準を保持している計量標準研究機関は極めて少ないが、既に多くの国において水ではなくシリコン単結晶などの固体密度標準に基づいてトレーサビリティの構築を開始していることが判明した。そこで、NMIJが幹事所（pilot laboratory）となり、CIPMが主催する密度の基幹比較を世界で最初に実施した。この基幹比較では各国の密度標準の国際同等性を評価するためにNMIJの単結晶シリコン球体を2001年から2002年にかけて参加国に輸送し、各参加国の液中ひょう量法によってその密度を測定し値を比較した。

NMIJを含む8ヶ国の計量標準研究機関での測定結果を図6に示した。NMIJの値は最も不確かさが小さく、他の参加国の値とも不確かさの範囲内で整合している。これらの値の重み付け平均から求められた参照値（reference value）はSIの定義にトレーサブルな密度の値として最も信頼性が高い。NMIJの値はこの参照値とも良く一致する。これにより我が国における密度の絶対測定技術と比較測定技術の信頼性の高さが検証された。

密度標準液についてもCIPMが主催する密度の基幹比較CCM.D-K2が2005年までに実施された。NMIJの校正結果はこの基幹比較においても国際同等性が検証されている。

5 密度のトレーサビリティ体系の確立と社会への貢献

産総研ではJCSSによる密度標準供給を開始するために2000年頃からJCSS認定機関となる製品評価技術基盤機構との打合せを開始し、ISO/IEC 17025規格に基づいて密度の校正事業を実施するのに当たって必要となる技術的要求事項適用指針の策定を開始した。この指針は特定標準器となる単結晶シリコン球体へのトレーサビリティの確保の方法や校正の頻度、浮ひょうや密度標準液、振動式密度計の校正方法などを規定するためのものであり、候補となる複

表2 20 °C、101.325 kPaにおける特定標準器S4、S5の体積、質量、密度の絶対値

物理量	単位	球体 S4	球体 S5	相対合成標準不確かさ $u_{rel}/10^{-6}$
体積	cm ³	429.601242	429.615 387	0.119
質量	g	1000.578 619	1000.612 019	0.016
密度	kg·m ⁻³	2329.086 89	2329.087 95	0.120

数の校正事業者との共同作業として検討を加えた。策定に当たっては登録校正事業者が構築する校正システムにできるだけ多くの自由度を与えながら、校正の不確かさを正確に評価することができるようにし、将来においても密度の校正事業を多様な形態で発展させることができるように配慮した。密度の校正事業のための最初の技術的適用指針が完成した2001年からは、JCSS登録校正事業者となるための申請が幾つかの校正事業者からあり、産総研関係者は技術アドバイザーとして製品評価技術基盤機構が実施する認定審査に協力した。

密度の絶対測定技術と比較測定技術によって構築したトレーサビリティ体系を図7に示した。密度が絶対測定された単結晶シリコン球体S4、S5をトレーサビリティの頂点（特定標準器）とし、これに連鎖して液中ひょう量法で校正されたシリコン単結晶（図3参照）が登録校正事業者の最上位の標準器（特定二次標準器）として用いられている。JCSSではこの特定二次標準器を基準としてISO/IEC 17025規格に適合した登録校正事業者が浮ひょう、密度標準液、振動式密度計などユーザーの計測器を校正している。

2001年から開始したJCSSによる密度の標準供給件数は順調に増加し、2007年までの実績として年間約6000件の校正証明書がユーザーの密度計測器のために発行されている。特に酒類のアルコール濃度計測に関しては従来は「振動式密度計によるアルコール分の測定」は「国税庁所定分析法とは異なる測定方法で合理的かつ正確であると認め

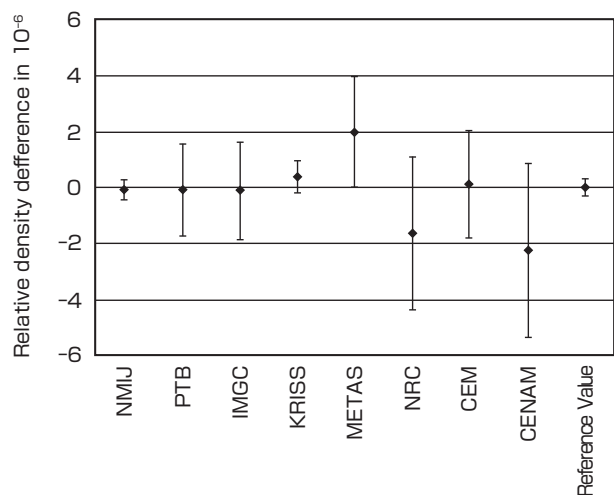


図6 CIPMが主催する密度の基幹比較CCM.D-K1の測定結果。持ち回り標準器として1 kgの単結晶シリコン球体を参加国の計量標準研究機関に輸送し、各参加機関の固体密度標準を基準とした液中ひょう量装置により持ち回り標準器の密度を測定した。エラーバーは拡張不確かさ（ $k=2$ ）を表す。NMIJ：産総研計量標準総合センター。PTB：ドイツ、IMGC：イタリア（現在のINRIM）、KRIS：韓国、METAS：スイス、NRC：カナダ、CEM：スペイン、CENAM：メキシコの計量標準研究機関。Reference value（参照値）はこれら全ての測定結果の重み付け平均値を表す。

られる方法」としてその使用が認められていたものの、その使用にあたっては国税庁への申告が義務付けられていた。また、密度をアルコール濃度に換算するためのアルコール表については、国税庁所定分析法に値が記載されていたが、JCSSに基づいて校正された振動式密度を酒税の分野においても導入するためには産総研が計量法において使用しているアルコール表との整合を図る必要があった。このため、国税庁と連携し、産総研で使用しているアルコール表をホームページ上で公開し、醸造産業の関係者が産総研のアルコール表を参照することができるようにした。これにより、JCSSに基づいて校正された振動式密度計で測定したアルコール濃度が酒税法における賦課の根拠として用いることが可能となった。これによって振動式密度計の普及が進み、2007年からは国税庁による規制が緩和され「振動式密度計によるアルコール濃度の測定」が国税庁所定分析法に取り入れられた。すなわち、JCSSで認定された登録校正事業者が供給する密度標準液で校正された振動式密度計であれば自由に酒類のアルコール分の測定に用いることができるようになったのである。JCSSによって認定された密度計測器は行政においてもその信頼性が認められ、醸造産業などでもその使用が着実に増加しつつある。

6 新しい計測評価技術への発展

密度の比較測定技術のなかでJCSSに取り入れられているものについては3.3節で述べたが、産総研ではその他にも新しい密度比較計測技術を開発し、材料の先端的計測評価技術や省エネルギー技術などに貢献するための計測技術開発を行っている。圧力浮遊法^[36]によるシリコン固体密度比較技術は、元々はアボガドロ定数の高精度化を目標としてシリコン結晶内の微小な密度分布を検出するために開発した計測技術であるが、その相対密度差の測定精度が極めて高く 10^{-7} ~ 10^{-8} まで検出することができるので薄膜の密

度計測^[37]にも応用することが可能である。シリコン基盤上に形成された厚さ10~100 nmの薄膜密度を約 0.1 %の相対不確かさで測定することに成功した。この計測技術を用いて、異なる製法で蒸着した酸化膜の密度を評価し、最も緻密な密度をもつ膜の製造プロセスを特定することが可能となった^[38]。

更に最近では3.3.3項で述べた磁気浮上式密度計を改良し、試料流体そのものもつ反磁性の影響をほぼ完全にキャンセルすることができる新しいPVT性質（圧力-密度-温度関係）計測技術を開発した^[39]。この新しい磁気浮上式密度計はシリコン単結晶とは密度の異なるゲルマニウム単結晶もシンカーとして用いたダブルシンカー方式を採用したものであり、作動流体や代替冷媒のPVT性質をより高精度に計測することが可能である。

シリコン固体密度標準を用いたこれらの計測技術の応用例を表3にまとめた。これらはシリコン単結晶の密度を基準とする密度標準体系があつて初めて創出されたものであり、従来の水の密度を基準とする標準体系から開発することは極めて困難であつたと言えよう。

7 おわりに

完全に近い結晶性を有するシリコン単結晶は形状安定性、密度安定性など固体密度標準物質としての優れた材料特性を備えている。産総研ではシリコン球体の直径と質量の絶対測定から密度を絶対測定する技術を開発し、密度の比較計測技術との統合によって水に代わる新しい密度標準体系を構築した。これらの密度計測技術は計量法における基準器検査制度や検定制度などに取り入れられただけではなく、JCSSにおける密度のトレーサビリティ体系の構築を実現し、産業界で用いられる密度計測器のトレーサビリティの確保に貢献している。JCSSによって校正される密度計測器の校正件数は着実に増加しつつある。

この固体密度標準体系を新しい材料評価技術や熱物性

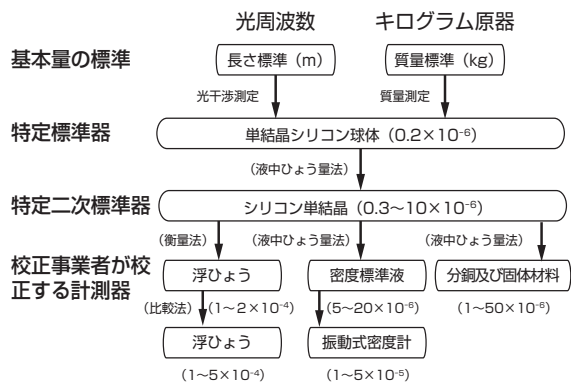


図7 単結晶シリコン球体の密度を頂点とするトレーサビリティ体系。括弧内の数値は95 %の信頼の水準における相対拡張不確かさを表す。

表3 新しい密度比較計測技術の開発と応用

測定方法	特徴	応用例
圧力浮遊法	シリコン単結晶の試料間の微小な密度差を検出	シリコン結晶内の密度分布評価
	相対密度差の測定の不確かさは 10^{-7} ~ 10^{-8}	シリコン結晶内の欠陥評価
	極めて高い精度の温度制御を要する (10~100 μ K)	
薄膜の密度計測		薄膜製造プロセスの評価
		SAWデバイスの密度評価
		フレキシブルプリント基盤の密度評価
磁気浮上法	PVT性質の精密計測	気体、液体の密度計測
	磁化率が未知の流体であってもその反磁性の影響をほぼ完全に相殺させて密度計測を行うことが可能	作動流体、代替冷媒の熱物性評価
	シリコンとゲルマニウムの単結晶からなるダブルシンカー方式を採用	省エネルギー技術開発
		地球環境保全
		炭酸ガス排出抑制

計測技術などと統合させて更に発展させ、デバイスや省エネルギー技術の開発にも積極的に応用できるようにすることが今後の課題である。

謝辞

本研究開発を行うにあたり、密度のトレーサビリティ体系構築のために貢献された小野晃産総研副理事長（元計量研究所熱物性部長）、単結晶シリコン球体と液中ひょう量装置の導入に貢献された田中充産総研計測標準研究部門長（元計量研究所熱物性部物性計測研究室長）、計測標準研究部門 物性統計科 流体標準研究室の早稲田篤主任研究員、倉本直樹研究員、粥川洋平研究員をはじめとする関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

用語説明

用語1： 相対合成標準不確かさ：従来、誤差と呼ばれていた測定の質を表す概念がISO/IECでは「測定の不確かさの表現に関するガイド (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)」として統一的にまとめられている。ある量 x の測定のばらつきを標準偏差で表したものが標準不確かさ $u(x)$ 、多数の入力パラメータの標準不確かさを誤差の伝播式によって合成した測定結果 y の標準不確かさを合成標準不確かさ $u_c(y)$ 、合成標準不確かさを測定結果の相対量として表したものが相対合成標準不確かさ $u_{c,r}(y) = u_c(y)/y$ である。

用語2： MRA：Mutual Recognition Arrangementの略。計量標準の分野では世界の地域あるいは国家の間でそれぞれの計量標準研究機関 (NMI: National Metrology Institute) が供給する標準の同等性を国際比較を介して互いに認め、各NMIが発行する校正証明書を互いに承認すること。これにより、あるNMIが校正した計測器を再校正することなく他の国や地域でもそのまま使用することができ、校正のワンストップサービスを実現することができる。TBT協定に基づいて強制規格、任意規格や適合性評価手続きの策定における透明性を確保し、国際規格や国際的ガイドを基礎として国際的な調和を進め、貿易障壁としての基準・認証制度を可能な限り低減することを目指したもの。

用語3： トレーサビリティ：国際標準や国家標準を基準として、比較（校正）の連鎖により、ユーザーレベルの計測器に至る計量管理システムの総称。特にISO/IEC 17025規格においては、国際単位系(SI)の定義に従って実現された量をトレーサビリティの基準にすることが定められている。

用語4： 校正事業者登録制度 (JCSS: Japan Calibration

Service System)：1993年11月より計量法に基づく校正事業者認定制度として発足し、2005年7月より校正事業者登録制度となった。国際標準化機構 (ISO) 及び国際電気標準会議 (IEC) が定めた校正機関に関する基準 (ISO/IEC 17025規格) の要求事項に適合しているかどうかを審査し、校正事業者を登録する制度。

用語5： ISO/IEC 17025規格：試験所・校正機関等のサービスの品質管理に関する国際標準文書。産総研計量標準総合センター (NMIJ) の実施する物理標準供給については、同規格に基づいた品質管理及び第三者認証が実施されている。

キーワード

密度、標準、水、シリコン単結晶、トレーサビリティ、アボガドロ定数

参考文献

- [1] K. Fujii: Present state of the solid and liquid density standards, *Metrologia*, 41 (2), S1-S15 (2004).
- [2] 独立行政法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター(訳編者): 国際単位系(SI)国際文書第8版(2006)/日本語版, 日本規格協会(2007).
- [3] 藤井賢一: 密度の計測技術とトレーサビリティ—シリコン単結晶に基づく密度標準体系について—, *熱物性*, 13, 201-210 (1999).
- [4] 藤井賢一: 密度標準と質量の単位をめぐる最近の動き, *計測と制御*, 41 (2), 155-162 (2002).
- [5] C. Guillaume: La Creation du B.I.P.M. et Son Oeuvre, Paris, Gauthier-Villars (1927).
- [6] J. Patterson and E. C. Morris: Measurement of absolute water density, 1 °C to 40 °C, *Metrologia*, 31, 277-288 (1994).
- [7] R. Masui, K. Fujii and M. Takenaka: Determination of the absolute density of water at 16 °C and 0.101 325 MPa, *Metrologia*, 32, 333-362 (1995/96).
- [8] H. Craig: Isotopic variation in meteoric waters, *Science*, 133, 1833-1834 (1961).
- [9] M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto and N. Bignel: Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based of recent experimental reports, *Metrologia*, 38, 301-309 (2001).
- [10] A. H. Cook and N. W. B Stone: Precise measurements of the density of mercury at 20 °C. I. Absolute displacement method, *Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, 250, 279-323 (1957).
- [11] A. H. Cook: Precise measurements of the density of mercury at 20 °C. II. Content method, *Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, 254, 125-154 (1961).
- [12] K. D. Sommer and J. Poziemski: Density, thermal expansion and compressibility of mercury, *Metrologia*, 30, 665-668 (1993/94).
- [13] J. B. Patterson and D. W. Prowse: Comparative measurement of the density of mercury, *Metrologia*, 21, 107-113 (1985).
- [14] A. Ooiwa, M. Ueki and R. Kaneda: New mercury interferometric baromanometer as the primary pressure standard of Japan, *Metrologia*, 30, 565-570 (1993/94).

- [15] M. R. Moldover, J. P. M. Trusler, T. J. Edwards, J. B. Mehl and R. S. Davis: Measurement of the universal gas constant R using a spherical acoustic resonator, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 93, 85-144 (1988).
- [16] W. K. Clothier, G. J. Sloggett, H. Bairnsfather, M. F. Curry and D. J. Benjamin: A determination of the Volt, *Metrologia*, 26, 9-46 (1989).
- [17] 藤井賢一: 基礎物理定数の新しい推奨値—アボガドロ定数とプランク定数の決定をめぐる最近の動き—, *日本物理学会誌*, 57 (4), 239-246 (2002).
- [18] P. Becker, D. Schiel, H.-J. Pohl, A. K. Kaliteevski, O. N. Godisov, M. F. Churbanov, G. G. Devyatykh, A. V. Gusev, A. D. Bulanov, S. A. Adamchik, V. A. Gavva, I. D. Kovalev, N. V. Abrosimov, B. Hallmann-Seiffert, H. Riemann, S. Valkiers, P. Taylor, P. De Bièvre and E. M. Dianov: Large-scale production of highly enriched ²⁸Si for the precise determination of the Avogadro constant, *Meas. Sci. Technol.*, 17, 1854-1860 (2006).
- [19] アルコール濃度測定《国際アルコール表》: 第4回国際法定計量会議制定, 国際法定計量機関(OIML), *国際勧告 No. 22* (1972).
- [20] P. J. Mohr and B. N. Taylor: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002, *Rev. Mod. Phys.*, 77 (1), 1-107 (2005).
- [21] 藤井賢一: 質量標準と基礎物理定数—質量の単位の定義をめぐる最近の動き, *応用物理*, 68, 656-662 (1999).
- [22] P. Becker, P. De Bièvre, K. Fujii, M. Glaeser, B. Inglis, H. Luebbig and G. Mana: Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units, *Metrologia*, 44, 1-14 (2007).
- [23] K. Fujii, M. Tanaka, Y. Nezu, K. Nakayama, H. Fujimoto, P. De Bièvre and S. Valkiers: Determination of the Avogadro constant by accurate measurement of the molar volume on a silicon crystal, *Metrologia*, 36, 455-464 (1999).
- [24] H. A. Bowman, R. M. Schoonover and C. L. Carroll: A density scale based on solid objects, *J. Res. Natl. Bur. Stand. Sect. A*, 78, 13-40 (1974).
- [25] A. J. Leistner and G. Zosi: Polishing a 1-kg silicon sphere for a density standard, *Appl. Opt.*, 26, 600-601 (1987).
- [26] A. J. Leistner and W. J. Giardini: Fabrication and sphericity measurements of single-crystal silicon spheres, *Metrologia*, 31, 231-243 (1994).
- [27] K. Fujii, M. Tanaka, Y. Nezu, K. Nakayama, R. Masui and G. Zosi: Interferometric measurements of the diameters of a single-crystal silicon sphere, *Rev. Sci. Instrum.*, 63, 5320-5325 (1992).
- [28] K. Fujii, M. Tanaka, Y. Nezu, K. Nakayama and R. Masui: Accurate determination of the density of a crystal silicon sphere, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 42, 395-400 (1993).
- [29] K. Fujii, M. Tanaka, Y. Nezu, A. Leistner and W. Giardini: Absolute measurement of the density of silicon crystals in vacuo for a determination of the avogadro constant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 44, 542-545 (1995).
- [30] K. Fujii, M. Tanaka, Y. Nezu, K. Nakayama, H. Fujimoto, P. De Bièvre, and S. Valkiers: Determination of the Avogadro constant by accurate measurement of the molar volume of a silicon crystal, *Metrologia*, 36, 455-464 (1999).
- [31] N. Kuramoto, K. Fujii, Y. Azuma, S. Mizushima and Y. Toyoshima: Density determination of silicon spheres using an interferometer with optical frequency tuning, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 56, 476-480 (2007).
- [32] K. Fujii: Precision density measurements of solid materials by hydrostatic weighing, *Meas. Sci. Technol.*, 17, 2551-2559 (2006).
- [33] 坂本裕子: 浮ひょうと国税庁所定分析法におけるアルコール濃度計測法, *計測標準と計量管理*, 58 (1), 10-14 (2008).
- [34] 尾林正信: 振動式密度計と密度標準液のJCSS校正について, *計測標準と計量管理*, 58 (1), 15-19 (2008).
- [35] N. Kuramoto, K. Fujii and A. Waseda: Accurate density measurements of reference liquids by a magnetic suspension balance, *Metrologia*, 41, S84-S94 (2004).
- [36] A. Waseda and K. Fujii: Density comparison measurements of silicon crystals by a pressure-of-flotation method at NMIJ, *Metrologia*, 41, S62-S67 (2004).
- [37] A. Waseda, K. Fujii and N. Taketoshi: Density measurement of a thin-film by the pressure-of-flotation method, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 54 (2), 882-885 (2005).
- [38] A. Waseda and K. Fujii: Density evaluation of silicon thermal-oxide layers on silicon crystals by the pressure-of-flotation method, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 56, 628-631 (2007).
- [39] Y. Kano, Y. Kayukawa, K. Fujii and H. Sato: A new method for correcting a force transmission error due to magnetic effects in a magnetic levitation densimeter, *Meas. Sci. Technol.*, 18, 659-666 (2007).

(受付日 2008.6.2, 改訂受理日 2008.7.18)

執筆者略歴

藤井 賢一 (ふじい けんいち)

1982年慶應義塾大学工学部機械工学科卒業、1984年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。博士(工学)。1984年計量研究所(当時)入所。密度標準と流体の音速の精密測定などに従事。1994年から2年間、米国標準技術研究所(NIST)に客員研究員として滞在し、ワットバランス法によるプランク定数の測定に関する研究を行った。現在、産総研計測標準研究部門物性統計科流体標準研究室長。密度、粘度、屈折率の標準開発やX線結晶密度法によるアボガドロ定数の測定に従事。国際度量衡委員会(CIPM)質量関連量諮問委員会(CCM)密度作業部会(WGD)議長、単位諮問委員会(CCU)委員、CODATA基礎定数作業部会委員。

査読者との議論

議論1 試料の作製と評価の重要性について

質問(村山 宣光)

本研究の成功は、シリコン単結晶の密度の絶対測定のための各種要素技術の開発とともに、高品質なシリコン単結晶球体の作製によるものと考えられます。シリコン単結晶球体の作製および品質評価(純度、結晶欠陥等)について言及されると、さらに本論文の構成学的価値が高まると思います。

回答(藤井 賢一)

シリコン単結晶を真球度の高い1kgの球体に研磨する技術がCSIRO(オーストラリア連邦科学産業研究機構)で開発されたことは、水に代わる新たな密度標準の確立を目指すに至った重要な動機なので、3章冒頭部分にその作製方法と品質評価を加筆しました。また、研磨方法の詳細については参考文献[26]を追加しました。単に密度標準として使用するためであればシリコン結晶の純度や結晶欠陥を

評価することは重要ではなく、その密度安定性を計測で保証できれば十分です。しかし、アボガドロ定数を決める場合には、不純物が密度や格子定数に与える影響を補正し、点欠陥や空孔などの濃度を定量化して、単位格子に含まれる平均原子数を正確に評価することが不可欠となります。通常の機械的除去方法によって球体を研磨すると表面付近に結晶欠陥が混入し、アボガドロ定数を正確に決めることが困難になります。このため、CSIRO では研磨の最終段階で化学的除去方法を取り入れた研磨方法 (mechano-chemical polishing) を採用し、結晶に与えるダメージが最小とするような工夫を加えました。このような研磨を行うことによって、球体としての幾何学的精度だけではなく、結晶としての完全性も保証されるような球体が得られるようになりました。

議論2 専門用語について

質問 (村山 宣光、田中 充)

「相対合成標準不確かさ」、「SI 単位の定義にトレーサブルな標準」について、定義や考え方を説明することにより、他分野の読者の理解が深まると思います。

回答 (藤井 賢一)

謝辞の後に「用語説明」を加え、相対合成標準不確かさやトレーサビリティなどについて説明しました。

議論3 科学的ニーズについて

質問 (田中 充)

「2.2 科学的ニーズ」基礎物理定数の必要性として記載されているのは必ずしも科学的ニーズを網羅していないので、他の事例も挙げるのが良いと思います。「 R_k (あるいは a) を通じた理論の検証」などについても言及すべきではないでしょうか。

回答 (藤井 賢一)

アボガドロ定数を測定する科学的ニーズとして、交流ジョセフソン効果や量子ホール効果などに用いられている理論の検証も挙げられることを 2.2 節に加筆しました。

議論4 本格研究を構成する第1種基礎研究として位置づけるべき研究課題について

質問 (田中 充)

単結晶によるアボガドロ定数決定の研究が、出発点として記載されています。むしろ、球の体積測定技術を第1種基礎研究としたほう

がわかりやすいのではないのでしょうか。科学的アウトプットも本格研究の目標に入れているので、単結晶によるアボガドロ定数決定の研究からスタートすると分かりにくいと思います。

回答 (藤井 賢一)

第2種基礎研究のためのシナリオについてですが、球体の体積測定技術を高精度化するための研究を開始した 1984 年頃は、当時の計量研究所で行っていた水の密度の絶対測定のために石英球体の体積測定が必要だったということが挙げられます。しかし、この研究に必要とされる体積測定精度は 7 桁程度であったため、更に高い精度で体積を求める必要性が生じた理由はやはりアボガドロ定数の高精度化にあったと言えるでしょう。密度標準に不可欠な体積測定技術の開発を第1種基礎研究として捉えられることもできますが、体積測定精度を 8 桁まで向上させるに至ったきっかけは 1987 年に CSIRO で開発されたシリコン球研磨技術であり、この開発もやはりアボガドロ定数の高精度化を意図したものであったと理解しています。

議論5 社会や産業での製品化研究の記述について

質問 (田中 充)

登録校正事業者への指導、認定審査への貢献、認定技術基準の作成など著者は成果普及活動に大きな貢献がありました。アルコール表などについても、産総研の告示や国税庁の通達の関係などについても述べるべきでしょう。また、CCM 密度作業部会などの国際活動も追記されるほうが良いでしょう。

回答 (藤井 賢一)

4 章では我が国の密度標準の国際的同等性を検証するために筆者らが世界で最初に密度の CIPM 基幹比較を実施し、CIPM の質量関連量諮問委員会 (CCM) 密度作業部会 (WGD) の活動に貢献していることなどを加筆しました。

5 章「密度のトレーサビリティ体系の確立と社会への貢献」の部分ですが、登録校正事業者への技術指導、技術アドバイザーとしての JCSS 認定審査への貢献、JCSS 認定技術基準の作成などにも貢献したことなどを加筆しました。特に、これらについては多くの時間を要した部分であり、トレーサブルな計測を行うに当たってのキーポイントを校正事業の関係者あるいは技術者に正しく理解して頂けるよう度重なる説明と打合せを実施しました。また、校正事業者との交流を通じてユーザーが求めている技術や情報が何なのかを知る機会が得られたことも貴重であり、産総研が社会貢献を果たす上で重要なプロセスであると考えています。

製造の全行程を考慮した資源及びエネルギー利用の 合理化指針

— アルミニウム鑄造工程のエクセルギー解析 —

北 英紀*、日向 秀樹、近藤 直樹

製造効率を高め、環境負荷を少なくするには、1つの過程を起点として全体に広がる資源やエネルギーの消費と排出の過程を知ることが必要である。本稿では、まず、アルミニウム溶湯中で使用されるヒーターチューブを鉄とセラミックスで作製した場合のエクセルギー解析とその比較を行い、次にアルミニウム鑄造の全工程についてのエクセルギー解析を行った。これらの結果から資源とエネルギーを有効に利用するための鑄造プロセスにおける合理化指針を得た。

1 はじめに

原材料を加工して有用な製品を得る「製造」とは、自然界に存在する天然資源を有用な形態の物質やエネルギーに変換する一方で、無用な物質やエネルギーを環境に排出するシステムである。製造の背後には、採掘に始まり、移動、使用、廃棄といった多くの過程が連なっていると同時に、製造そのものは個々の工程というサブシステムの集合体である。また、製品はやがて無用物となって廃棄され、長い時間を経て環境に還っていく。広く長い時空間の中で、製造に関わる全てのシステムは、相互に関連しながら各階層の周囲環境との間で物質やエネルギーのやり取りを行いつつ、環境にも影響を及ぼすこととなる(図1)。

1960年代の高度成長期、製造の志向は大量生産・大量消費であり、廃棄物は埋めてしまえば良いという時代であった。しかし環境と経済を両立させねばならない現代、個々のシステムからの消費や排出が無為に増大することが許されるはずはなく、かといって単なる最適・最小化やその統合だ

けでは問題は解決しない。個と総体が相反することは通常であり、一見小さな消費に見える製造システムであっても、背後に大きな消費と排出を伴い、総体ではかえって負荷が大きくなる場合もあれば、その逆もある。競争力を維持しつつ、総体として消費や排出を少なくするためには、個を起点として総体に広がる消費・排出の過程を知り、その大きさや意味を明らかにするとともに、それらを開発に戦略的に活かしていくことが必要である。今回、こうした評価と開発を双発的に進めるための基軸概念としてのエクセルギーについて検討することにした。エクセルギーは環境を基準としたGibbsの自由エネルギーであり、着目するシステムが環境と熱的に平衡状態になるまでに為すことのできる最大仕事と定義されている^{[1]-[3]}。

エクセルギーは、生産活動を通じて一方的に消費されており、物質とエネルギーに共通した資源消費性を定量化するために相応しい指標である。またエクセルギーを使って、循環の中で投入・排出されるモノやエネルギーのエネルギー的価値や、回収する場合の理論的限界を明らかにすることができ、それらはプロセスの合理化の指針とすることができる。エクセルギーを指標として使用し、状態を評価することはもちろん重要なことであるが、それだけでは変革をもたらすことにならない。評価結果を開発と連携させながら、環境負荷や資源消費の緩和に合理的なハードやプロセスを、広い階層における負荷低減という新しい価値とともに示していくことが必要であると考え(図2)。

エクセルギーはこれまで主に熱の有効利用の尺度としてJISにも記載されており^[4]、熱機関や建築の設計指針として使用されてきた^{[2],[5]-[7]}。製造分野では鉄鋼や化学プロセスの合理化に利用されているが、異種分野の製造を統合した

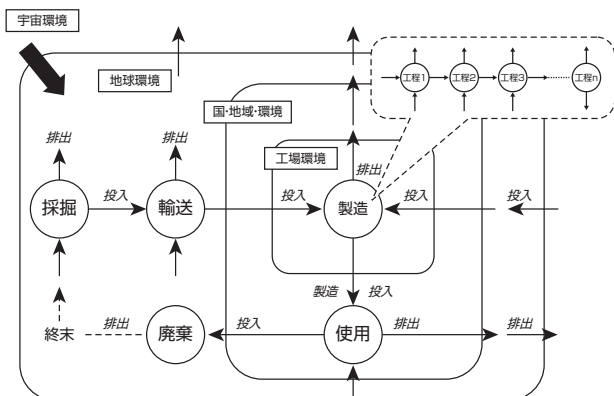


図1 製造システムと環境の関わり

システムを考察対象として資源消費の過程や、広く合理化の指針を示した例は見当たらなかった。本論文では、セラミックス部材、および鉄部材の製造、それらがエンジン部品等、アルミニウム鑄造ラインの生産部材として使用・廃棄されたという事例についてエクセルギー解析を行い、まず工程、製造、使用といった「境界」の採り方により、エクセルギーの消費や排出が相反する点に着目し、消費の過程、その意味と大きさを明らかにする。次にその解析結果をふまえ、プロセスの合理化の指針を示す。

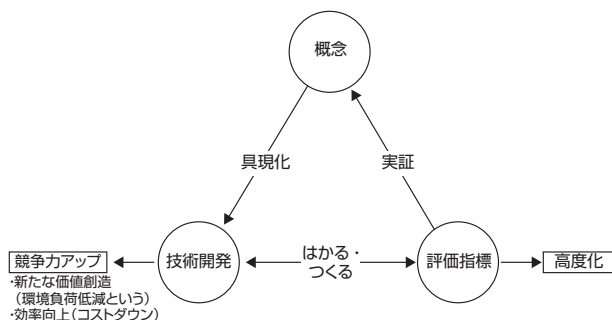


図2 技術と指標の連携の重要性

2 解析方法

2.1 エクセルギーの計算

①物質の化学エクセルギー^[1]

参照種の化合物が $X_xA_aB_b \cdots$ (X, A, B は元素、 x, a, b は組成比) という組成をもち、化学反応 (1) によって生成され、その際のGibbsの自由エネルギー変化を ΔG^0 とすると化学エクセルギー E_x^0 は、(2) 式で算出できる。



$$E_x^0 = \frac{1}{x} [-\Delta G^0 - aE_x^0(A) - bE_x^0(B) - \cdots] \quad \cdots (2)$$

参照種とは周囲環境中において単独では化学反応を起こさない物質であり、そのエクセルギーは定義によりゼロである。参照種はJISに記載されているが^[4]、記載されていない場合には、自由エネルギーの最も小さいものを参照種とした。

②化学反応を伴うシステム^{[5][7]}

熱力学データとして入手できる自由エネルギーの値は標準状態、純粋物質1モルの値で示されている場合が多く、エクセルギー計算では補正が必要である。反応物 r_1 は周囲環境には存在しない物質、反応物 r_i ($i=2, 3, \dots, L$) と生成物 p_j ($j=1, 2, \dots, N$) は周囲環境に存在する物質とする。反応物 r_i と生成物 p_j のモル分率はそれぞれ x_{ri} 、 x_{pj} で周囲環境でのそれらのモル分率とは異なる。また n_{ri} 、 n_{pj} はそれぞれ反応物と生成物の物質質量 (mol) である。

$$\left(\sum_{j=1}^N n_{pj} RT_0 \ln \frac{1}{x_{poj}} - n_{r1} - \Delta G - \sum_{i=2}^L n_{ri} RT_0 \ln \frac{1}{x_{roi}} \right) + \sum_{i=2}^L n_{ri} RT_0 \ln \frac{x_{ri}}{x_{roi}} - S_g T_0 = \sum_{j=1}^N n_{pj} RT_0 \ln \frac{x_{pj}}{x_{poj}} \quad \cdots (3)$$

左辺第一項の [] 内は反応物 r_1 の化学エクセルギーである。左辺第二項は反応物 r_i ($i=2, 3, \dots, L$) がモル分率 x_{ri} のときにもつ分離エクセルギー、右辺第一項は生成物 p_j ($j=1, 2, \dots, N$) がモル分率 x_{pj} のときにもつ分離エクセルギーである。また S はエントロピー、 T_0 は外界温度 (K)、 R は気体定数である。

③有機物

有機物の化学エクセルギーの計算式としては、Rant^[8]やSzargut^[9]の式が知られているが、本報告ではそれらを実用的に修正した信澤らの導いた次式^[10]を使用した。

$$E_x = m \cdot H_1 \cdot \left[1.0064 + 0.1519 \frac{\phi_C}{\phi_C} + 0.0616 \frac{\phi_H}{\phi_C} + 0.0429 \frac{\phi_N}{\phi_C} \right] \cdots (4)$$

m 、 H_1 はそれぞれ対象とする有機化合物の乾燥質量 (kg)、低位発熱量 (J/kg)、また ϕ_C 、 ϕ_H 、 ϕ_O 、 ϕ_N はそれぞれ対象とする有機化合物に含まれる炭素、水素、酸素、窒素の重量分率である。

④電力、気体燃料

電力はエントロピーを含まないエネルギーであり、そのままエクセルギーの値として使用した。一方、燃料ガスのエクセルギー計算は次式で計算した^[10]。

$$e_c^0 = \sum x_i e_{ci}^0 + RT_0 \sum x_i \ln(x_i) \quad \cdots (5)$$

e_c はエクセルギーで、上つきの0印は標準温度 (25 °C) を意味し、下つきの i は成分 i に対するものを意味する。また x_i は成分 i の体積分率である。

2.2 システムの整理と入出力データ

本稿では、製造における大きな全体構成は「システム」と呼び、個々の採掘、輸送、使用、廃棄などは「過程」と呼ぶ。また過程は「工程」の集合体として捉えている。

図3に工程における物質、エネルギーの入出力フローを示す。各工程には原燃料が投入され、中間製品が生産される一方、廃物、廃熱を生じそれらは系外に排出される。得られ

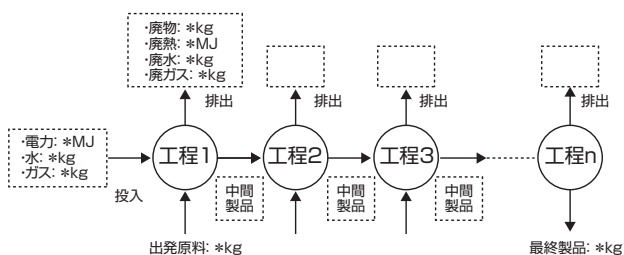


図3 工程への入出力とフロー

た中間製品は次の工程の原料となり、所定の工程を経て最終製品が得られる。

エクセルギー計算にあたっては、原料から最終製品にいたるまで工程に投入、及び排出される全ての原料やエネルギーの種類とその量を明らかにする必要がある。今回、大手製造メーカーの協力を得て、製造現場でのデータを入手することができた。大半はそのデータを使用した不明な部分もあり、それらについては経験を基にした推定値で補った。

2.3 製造効率

投入された全ての原燃料とエネルギーのエクセルギー総和に対する製品のエクセルギーの割合をエクセルギーの部材内固定率 (η) と呼ぶこととした。

$$\eta = E_X(p) / E_X(in) \quad \dots\dots (6)$$

ここに $E_X(p)$ は製品の化学エクセルギー、また $E_X(in)$ は投入されたエクセルギーの総和である。本稿では上記エクセルギーの部材内固定率、及び投入に必要なエクセルギーの両方を勘案しながら、製造効率の評価を行った。

3 事例研究

3.1 アルミニウム鑄造ラインの工程とヒーターチューブの役割

アルミニウムは熱伝導性が良く、軽量性に優れ、こうした長を活かしてエンジン部品への採用が進んでいる。またアルミニウムはリサイクル性に優れ、廃エンジンはスクラップとして回収され、諸工程を経て再びエンジンとなる。図4はアルミニウムの鑄造ラインの工程を中心とした循環システムを示す。まず回収された廃エンジン（スクラップ）は集中大型炉で溶解される。それらはいったん固められインゴット（塊）として工場内に搬送され、再び集中溶解炉で溶かされた後、保持炉に移送される。温度と成分調整が施された溶湯はダイキャストマシンに配湯され、成形され製品となる。こうした循環システムにおいて、熱損失、アルミニウム溶湯の酸化、不純物の混入といった効率を低下させる要因は多い。一

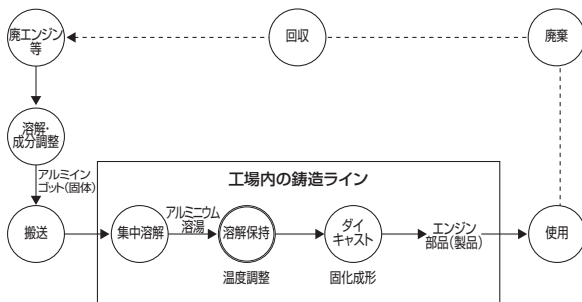


図4 アルミニウムの循環と鑄造ラインの工程

定の品質と生産量を確保するために外部からエネルギーやモノの投入は不可避であって、これらの投入を低減することが循環システムの効率を向上させるということである。

その対応の1つとして、生産部材のセラミックス化が試みられている。保持炉（図5）に使用されるヒーターチューブ（図6）もその1つであり、電熱線等を内包した保護管であって、アルミニウム溶湯の温度を一定に保持するために使用される。保存性の高い窒化ケイ素をヒーターチューブに適用することで、炉内下部に水平に固定された水平浸せき型構造が可能となり熱効率が向上する（図5）。ただし鉄製に比べてセラミックス製のチューブは格段にコストが高い。今回、ヒーターチューブ（重量19 kg）を窒化ケイ素と鉄で製造した場合について、各々、製造-運用-廃棄に関わるエクセルギーの解析を行った^{[11][12]}。

3.2 化学エクセルギーの算出

解析にあたり、まず製造に関与する全ての物質のエクセルギーを算出する必要がある。以下に重要な材料である窒化ケイ素 (Si_3N_4) を例として、そのエクセルギーの算出過程を示す。窒化ケイ素の参照種はシリカ及び空気である。

$$E_X(\text{N}_2) = RT_0 \ln(101.3/76.57) \quad \dots\dots (7)$$



$$E_X(\text{Si}) = (-\Delta G^0) + E_X(\text{SiO}_2) - E_X(\text{O}_2) \quad \dots\dots (9)$$

$$E_X(\text{Si}_3\text{N}_4) = 3(\Delta G^0) + 3E_X(\text{Si}) + 2E_X(\text{N}_2) \quad \dots\dots (10)$$

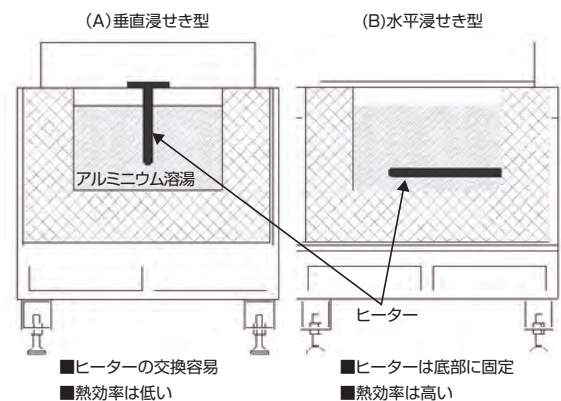


図5 保持炉の構造

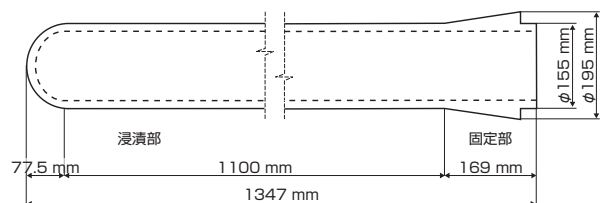


図6 ヒーターチューブの形状、寸法

$E_x(X_i)$ は物質 X_i についてのエクセルギーを示す。(8) 式の () 内は、空気的全圧と窒素の分圧の比である。以上より窒化ケイ素のエクセルギーは 1877 kJ/mol と算出された。同様にして主な原燃料のエクセルギー値を算出した(表)。

3.3 工程別消費と効率

図7には窒化ケイ素による部材製造の工程と製造全体で出入りするエクセルギーの値を示す。なお窒化ケイ素の原料は、別の工場において酸化ケイ素を熔融還元し、さらに窒素と反応させて製造された人工物として本システムに投入されている。原料のエクセルギーは製品1本あたり 291 MJ と算出された。粉末を出発原料として混合、造粒、成形、脱脂、焼成を経て製品となるが、工程別で見ると、造粒と焼成にそれぞれ 2547 MJ、776 MJ と多大なエクセルギーが投入され、これは投入エクセルギーの全体の約 80 % に相当する。そしてそれらは廃熱としてほぼ全てが系外に排出されていること、一方、原材料の粉末は回収され、工程間でほとんど損失はないことが判った。全体で最終製品に固定されたエクセルギーは 229 MJ でこれは投入されたエクセルギー (4175 MJ) のわずか 5.5 % に過ぎない。すなわち 94.5 % に相当する 3946 MJ を廃棄しているという極めて効率の悪いプロセスである。

一方、図8には鉄部材製造における工程別のエクセルギーの出入りを示す。鉄の場合、原料は酸化鉄 (Fe_2O_3) を出発原料としており、定義によりそのエクセルギーは 0 である。また還元反応等固体の反応を有効に利用して製造され、どの工程にも投入、廃棄されるエクセルギーは少なく、また平準化していることが判った。製品として固定化されたエクセルギーは 126 MJ で、投入されたエクセルギー (621 MJ) の 20 % 程度であって、投入エクセルギーの量はセラミックスの約 1/7 程度と極めて少ない。すなわち、1本の部品を製造するというシステムで見ると、鉄に比べてセラミックス

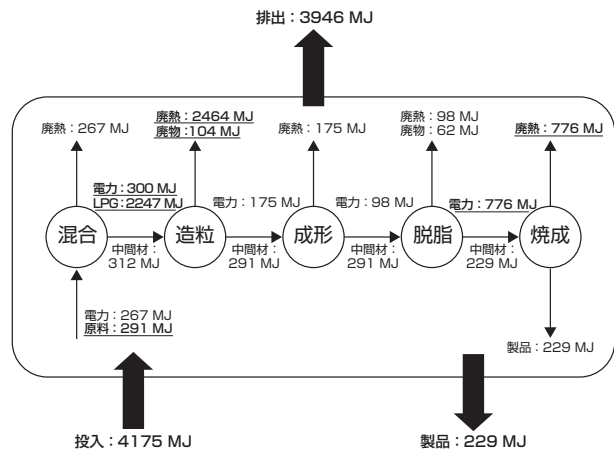


図7 セラミックス部品の工程、および製造におけるエクセルギーバランス (製品1本=重量19 kgあたり)

表 関与する主な原燃料のエクセルギー計算結果

原燃料	エクセルギー
Y_2O_3	47 kJ/mol
Al_2O_3	0 kJ/mol
Si_3N_4	1877 kJ/mol
N_2	7×10^{-1} kJ/mol
Fe_2O_3	0 kJ/mol
Si	851 kJ/mol
Fe	368 kJ/mol
Al	788 kJ/mol
CO_2	20 kJ/mol
O_2	4 kJ/mol
PVA	49 MJ/kg
LPG	48 MJ/kg

は極めて多くのエクセルギーを消費し、効率も低いことが確認された。

3.4 各過程でのエクセルギー解析

3.4.1 使用

① 損耗と物質廃棄

鉄製ヒーターチューブをアルミニウム溶湯中で使用すると、アルミニウムに侵食され、時間経過 t に伴い減肉していく。減肉は下式によって進行するとの仮定をおいた。

$$D = D_0 \cdot (2 - \exp(kt)) \quad \dots (11)$$

ここに、 D : ヒーターチューブの厚さ (mm)、 D_0 : 初期厚さ (mm)、 k : 見かけの反応速度係数、 D_1 : 取替時の厚さ (mm)、である。上記に関して D_0 : 3 mm (データより)、また D_1 として: 0.5 mm を仮定し、半年毎に交換という条件から反応定数 k は 0.067578 となる。

この間の消費エクセルギーは次式で示される。

$$E = E_0 \cdot \exp(kt) \quad \dots (12)$$

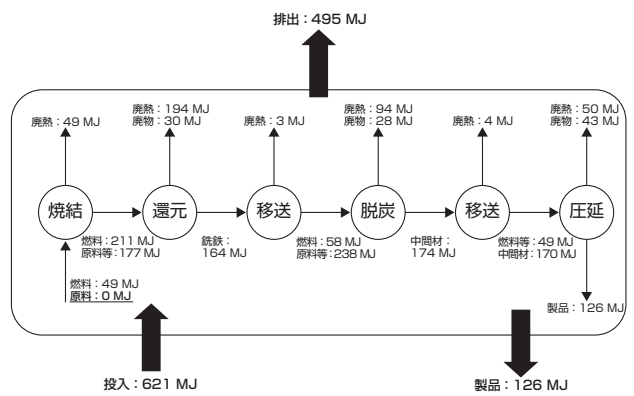


図8 鉄部品の工程および製造におけるエクセルギーバランス (製品1本=重量19 kgあたり)

鉄のエクセルギーは6.6 MJ/kg (=368 KJ/mol) であり、製品の全重量が19 kgであるから、溶損が進行してDiに達したところで廃棄されるとすると、126 MJ/本が消費されることになる。鉄製のヒーターチューブを半年に1回交換するのに対して、窒化ケイ素は安定で反応し難く、7年後に炉の寿命と合わせて交換、廃棄される。7年間のエクセルギーの消費の経時変化を図9に示す。またこの間、廃棄に伴い消費されたエクセルギーは次式の通りである。

- ・鉄使用時：126 (MJ/本) × 14 (本) = 1764 MJ
- ・窒化ケイ素使用時：229 (MJ/本) × 1 (本) = 229 MJ

鉄製ヒーターチューブを使用した場合、溶損と廃棄を繰り返す、エクセルギーの消費が階段状に増大しているのに対して、セラミックスでは7年間ほとんど消費はなく、炉の寿命と同時にエクセルギー値 (229 MJ) が排出されたことになる。なお、セラミックス使用時、鉄に比べ不純物の混入機会が少なくクリーンな溶湯が得やすいことが期待され、これもセラミックスの価値である。

②ランニング

(a) 溶解保持炉

鉄製ヒーターチューブを使用した垂直浸せき型では、運転時に9.4 kW、休止時には4.0 kWを要するのに対して、窒化ケイ素を用いた水平浸せき型の場合には、熱効率が改善され、運転時並びに休止時における消費電力はそれぞれ6.8 kW、3.8 kWとなる。1日のうち60 %運転 (40 %休止) するとして、年間で360日稼働させたとすると7年間の総消費電力、すなわち投入エクセルギーはそれぞれ以下の通りである。

- ・鉄使用時：(9.4 × 0.6 × 24 + 4.0 × 0.4 × 24) × 360 × 7 × 3.6/1000 = 1576 GJ
- ・窒化ケイ素使用時：(6.8 × 0.6 × 24 + 3.8 × 0.4 × 24) × 360 × 7

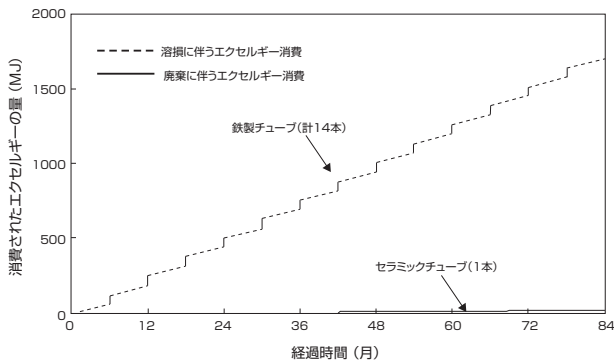


図9 使用過程での溶損と廃棄に伴うエクセルギー消費量の比較 (7年間の試算)

× 3.6/1000 = 1219 GJ

(b) ダイキャストマシン

ダイキャストマシンの消費電力を20 kW、1日のうち60 % 運転するとして、年間で360日稼働させたとすると7年間の総消費電力、すなわち投入エクセルギーはそれぞれ以下の通りである。

・ 20 × 0.6 × 24 × 360 × 7 × 3.6/1000 = 2612 GJ

3.4.2 製造・使用・廃棄

企業への聞き取りの結果、7年間の鋳造品の総製造量は約4300トンと試算された。なお、本稿では、原料ロスは考慮していない。したがって溶融アルミニウムの量も最終製品と同じく4300トンであり、そのエクセルギーは溶融した状態 (温度700 °C) で126802 GJ、また固化した状態で125582 GJと計算された。

図10はセラミックス及び鉄製のヒーターチューブの製造、及びそれらが溶解保持炉に使用され、7年間鋳造が行われた場合の投入・排出されるエクセルギー量とその流れを示した図である。上述した通り、炉を7年間運転した場合、鉄製チューブは溶損により14本を必要とする。したがって、その製造過程において投入、あるいは排出されるエクセルギーは下記の通りである。

- ・投入：621(MJ/本) × 14(本) = 8694 MJ
- ・排出：495(MJ/本) × 14(本) = 6930 MJ

一方、窒化ケイ素製チューブは同期間で1本のみであり、投入と排出に伴うエクセルギーは図7を参照して、それぞれ4175 MJ、3946 MJとなる。次に、使用時の溶損と廃棄に伴うエクセルギーは、下記の通りである。

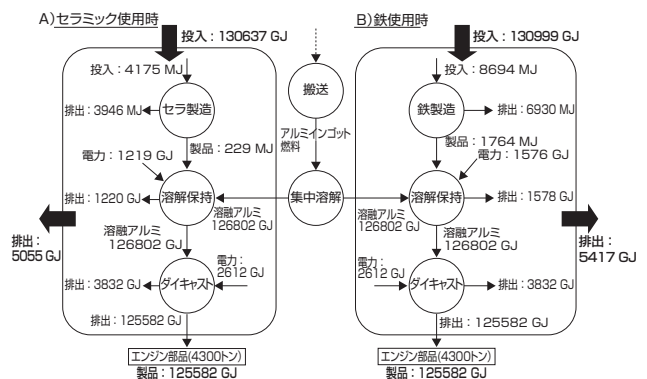


図10 アルミニウム製エンジン部品鋳造におけるエクセルギーバランス (7年間)

- ・鉄使用時：126(MJ/本)×14(本)=1764 MJ
- ・窒化ケイ素使用時：229(MJ/本)×1(本)=229 MJ

全ての過程を通してみると、投入されるエクセルギーは、鉄、窒化ケイ素使用時にそれぞれ130999 GJ、130637 GJ、また排出されるエクセルギーは同じく5417 GJ、5055 GJとなり、窒化ケイ素を使用することにより鉄に比べて投入・排出されるエクセルギーは362 GJ低減できることが判った。

以上の検討結果から、窒化ケイ素製チューブは製造過程において1本当たりでみると、約7倍ものエクセルギーを消費するが、保存性の高さから交換頻度が減り、効率の高い構造の炉が実現し、その結果消費電力が小さくできるために、製造、運用、廃棄のライフサイクルを通じた総量ではエクセルギーの消費量が鉄に比べて小さくなっていることが明らかとなった。

3.5 合理化の検討

まず、現状のシステムを前提として、セラミックス、鉄の各部材を使用した場合それぞれの合理化の指針を示し、次に鑄造システムの合理化の現状や方向性をまとめた。

3.5.1 鉄部材

経済性に優れた鉄部材はヒーターチューブの主流である。鉄部材を使うことを前提とした場合には、寿命を延ばすために溶けたアルミニウムに侵食され難い材料、あるいはコーティング技術の開発が必須である。またリサイクル性も鉄の優れた点であり、その効率を高めることも重要である。

3.5.2 セラミックス部材

セラミックス製造の合理化をはかるには前述した通り、全工程の中で特に消費の大きい造粒と焼成工程を中心とした効率向上が不可欠である。こうした改善は環境負荷低減と同時に、経済性において優位な鉄部材への対抗手段としての意味合いが強い。

①造粒

鉄鋼をはじめ金属のプロセスが、高温化することで原料を熔融させ、液体自身のもつ拡散能力により混合や反応を生じやすくしているのに対して、セラミックスでは重力場において拡散能力のない固体粉末を使用している。そのため混合時には固体粒子間に最終製品に残らない水やバインダーを介在させ、それらを除去するため更にエネルギーを要するという、本質的に非効率となる要素を含んだプロセスである。

水を介在させると粒子間距離が小さくでき、混合が容易になるが、後工程の乾燥造粒の工程ではスラリー中の水分を揮発させるのに多量の潜熱を消費することになる。投入されたエネルギーは水分に熱として伝わり、揮発し、水蒸気としてエントロピーとともに系外に排出されている。したがっ

て、造粒時のエクセルギー消費を抑えるには解こう材の選定や粒度配合の調整も含めた水分量の低減が必要であるが、その場合、前工程である混合の時間が増加することも考えられる。造粒工程でのエクセルギー消費を低減するには、前後の工程への影響を考えた水分量の最適化が必要である。

また造粒にはLPGを燃料として使用している。LPGを使用した場合、投入されたエクセルギーはスラリーの乾燥・造粒以外に、燃焼に伴い不可避免的に水や二酸化炭素を生成することになり、その系外への排出にもエクセルギーが消費されることになる。LPGに換えて電力を使用すると見かけ上、投入エクセルギーは低減できる。その場合、工場内でのエクセルギー消費は低減されても、実際には外界（発電所）でエクセルギーが消費されることになる。今回、造粒工程でLPGを使用したのはコストが優先されたためと考えられる。

②焼成

図11はプロセスの合理化に向けて、原料、製品、ならびに投入エクセルギーの関係を整理した概念図である。参照種（エクセルギー=0）と原料とは、化学エクセルギー、および表面エネルギーに由来するエクセルギーがあり、さらに原料と製品（焼結体）とは、表面・界面に由来、および配置に由来するエクセルギーの違いがあると仮定をおいた。

窒化ケイ素のような共有結合性の高い安定な物質では、特に活性化エネルギーの障壁に相当するエクセルギーに加えて、さらに炉の運転や炉材の加熱に多大なエクセルギーを必要とする。これらは不可避免的に廃エクセルギーとなり、廃熱回収の検討を行うことになる。

エクセルギー消費を低減するには、低エクセルギー原料を使用し、固体の有するエネルギーを利用して投入と排出を小さくすることができる。窒化ケイ素の化学エクセルギーは、1877 kJ/molと高い。さらに窒化ケイ素粉末はケイ素の窒化、得られた窒化ケイ素の焼成という分離された工程をとり、それぞれの工程で廃熱がある。

一方、ケイ素の化学エクセルギーは851 kJ/molと算出され、窒化ケイ素の約半分である。エクセルギー消費を低減するには、ケイ素から窒化ケイ素への転化、その後の焼結をひとつの工程で行う事は有効である。このプロセスは既知であるが、窒化過程での発熱の制御が困難であることや、ケイ素自体活性であるため、水を媒体にした混合が困難であるといった理由で普及するにはいたっていない。今後、実用的なプロセスにするには、水を媒体として短時間で混合し、粗いケイ素粒子を使用して低温で窒化できる触媒の開発が必要である。その他、効率を向上させるには乾燥炉や焼成炉の大きさを大きくして単位時間あたりの生産量を増

加するため、焼成温度を上昇させることが考えられるが、設備投資や生産個数を考慮しながら、全体システムの最適化を図っていくことになる。

なお、熱工学より生まれたエクセルギーは有効エネルギーとして物質との共通項として捉えられているが、上述したような界面や表面の扱いといった物理学的な視点での体系化は十分ではないように思われ、指標の高度化を図る上でも今後の課題であろう。

③設計、その他

前述したようにセラミックスがアルミニウム溶湯中で極めて安定であることから中実体である必要はない。中空構造を前提とした設計・プロセスは原料使用量が低減するだけでなく、薄肉化により、熱応力が低減され、焼成時間の短縮も可能となるため効率向上に極めて有効な手段である。

一方、セラミックスはリサイクルに不向きである。多大なエクセルギーを投入して製造されたセラミックス部材をできる限り長く使うという意識をもつことが生産者と消費者に必要であり、技術開発においては、セラミックスのこうした特徴を考慮し、壊れても部分的に交換、修理が可能な構造の設計やプロセス開発が必要と考える。

3.5.3 鋳造システムの革新

鋳造工程全体でみると、固体を溶解させる工程が2回あり、搬送過程で熱を相当放散することが考えられる（図4）。固体を溶解させるために要するエクセルギーは約19000

GJ（4300トン当たり）と試算された。これを減らすため現在、外部で溶解されたアルミニウム溶湯を断熱容器に入れ、溶湯のまま直接工場内に搬送し、保持炉による温度調整、成形という溶湯搬送といわれるシステムの開発が大手自動車会社を中心に進められている。溶解-固化という工程が1回減るため、効率が向上することが期待されている。しかし現状、搬送容器の断熱性が十分でなく、搬送過程で外部ヒータを使って加熱していることや、容器自体が重量物であるため、搬送過程での燃料消費が多いといった課題がある。溶湯搬送は原理的に効率の高いシステムであり、その普及が期待されるが、それには軽量で断熱性に優れた搬送容器の開発が鍵となっている。

上記搬送システムにおいて大本となる集中大型溶解炉では、いったん炉内でアルミニウムを溶解すると、熔融状態を維持するため、連続操業となる。必要量に関係なくエネルギーを投入し続ける必要があることを考えると、究極は、固体のまま工場内まで搬送し、必要なときに、必要な量を溶かして製品とするシステムではないだろうか。このシステムを実現するためには、瞬間的に溶解する加熱源や、同システムの構成要素となる断熱性に優れ、溶湯が付着しない大型のセラミック管や容器、さらに分解性を更に高めたエンジンの設計、そして廃エンジンの回収システムが社会的に定着させることなど、多方面にわたる課題があり、全体のエクセルギーバランスを考えつつ、個々の解決を図ることが必要である。

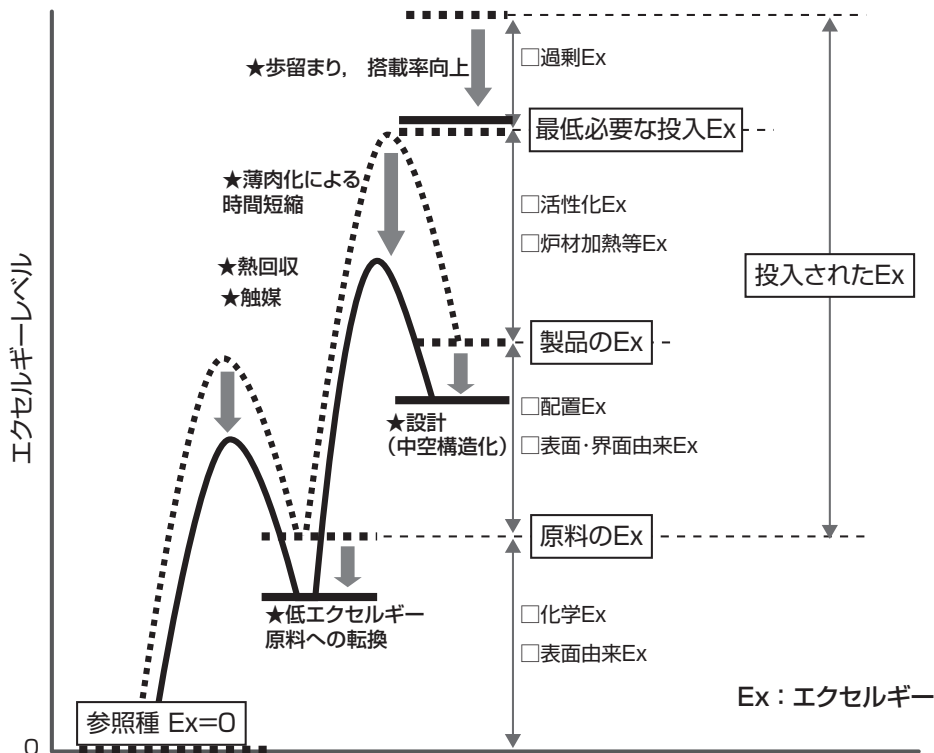


図11 セラミックスプロセスの合理化の検討

4 まとめ

4.1 製造の評価

セラミックスと鉄で部材を製造し、それらをアルミニウム製エンジン部品の鋳造ラインにおいて生産部材として7年間使用、そして廃棄されたというケースのエクセルギー解析を行った。

- ①製品1本当たり投入されるエクセルギーはセラミックス製が4175 MJ、鉄製が621 MJであって、鉄に比べてセラミックスは極めて多くのエクセルギーを消費している。
- ②セラミックスに固定されたエクセルギーは229 MJ、でこれは投入されたエクセルギーの5.5 %であり、大半を系外に排出している。
- ③工程別では、造粒と焼成で投入全体の80 %を消費している。
- ④しかし多大なエクセルギーを投入した結果、セラミックスは高い保存性を得る。この特徴を活かして熔融アルミニウム中で使用されると、7年間で鉄を使用した場合に比べ、エクセルギー消費を362 GJ小さくできる。

4.2 合理化検討

現状のシステムを前提として、セラミックス、鉄の各部材を使用した場合の合理化の指針、ならびに鋳造システム全体の合理化を図る上で必要な技術をまとめた。

①鉄

・アルミニウム溶湯に侵食され難い材料やコーティング技術の開発。

②セラミックス

セラミックスの製造効率向上には全工程の中で特に消費の大きい造粒と焼成の合理化が不可欠である。

- ・造粒工程における解こう材の選定や粒度配合の調整等、前後の工程への影響を考えた水分量の最適化。
- ・粗いケイ素粒子を使用して低温で窒化できる触媒、また窒化と焼結の同時化プロセス。

・中空構造を前提とした設計：原料の使用量の低減と焼成時間の短縮化。

・多大なエクセルギーを投入して製造されたセラミックス部材を長く使うため、部分的に交換、修理して使用できるための技術開発。

③鋳造システム

・溶湯搬送システムの効率を高めるためには、軽量で断熱性に優れた搬送容器の開発が鍵。

・固体のまま工場内に搬送し、必要な量を処理して製品とするシステム。瞬間的に溶解する加熱源や、断熱性に優れ、溶湯が付着しない大型のセラミックス管や容器、さらに分解性を更に高めたエンジンの設計、そして廃エンジンの分別回収システムを社会的に定着させることなど、多方面にわたる課題の解決を図ることが必要。

5 今後の展望

以上の検討をふまえ、エクセルギー解析の有効性と課題についてまとめた。

5.1 エクセルギー解析の有効性

①通常の環境負荷評価は製造段階で実施され、その内容は上位計画で既に決められているため、負荷低減に向けた対応の選択肢は限られる。製造に移行する前の段階、すなわち企画、研究開発、設計といった段階で、幅広い階層に渡るシステムについて資源消費や環境負荷を予測し、その結果を技術や製造にフィードバックすべきである。モノとエネルギーを結び付けるエクセルギーは性質上、事前評価に適した指標であり、その有効活用が望まれる。

②循環システムは持続性の外殻である。循環システムを稼働させるために必要な外部からの資源・エネルギー投入を少なくするために、エクセルギーを適用したシステムの合理化設計は急務である。

③本稿ではセラミックスや金属の事例を取り上げたが、エクセルギーは特定の分野や対象に限定されるものではない。最終目標は、製造（マイクロな要因）とグローバルなレベルでの持続性（マクロな結果）を結びつけることにある。排出に関わる国家レベル等マクロな入出力データを使ってエクセルギーの消費速度を算出することは原理的に可能であり、それを持続性への重心移動の指標とできないだろうか。

5.2 改良すべき課題

①粉末粒子とそれを原料として作製された焼結体を同じ化学エクセルギーで評価している。

今後、表面や界面エネルギー等を考慮した状態の違いを表す指標とする必要がある。

②希少性、有害性を評価する上でエクセルギーは不適であり、他の指標とも組み合わせながら多面的な評価を行うことが必要である。

謝辞

本稿は産総研内部の分野横断的メンバーによるミニマルマニュファクチャリングワーキングでの議論の一部をヒントにしながらとりまとめたものであり、同ワーキングの関係各位に感謝の意を表す。

用語説明

用語1：エクセルギー：他のエネルギーに変換可能な有効エネルギー。

キーワード

エクセルギー、環境、製造、システム（系）、効率、合理化

参考文献

- [1] 唐木田健一：エクセルギーの基礎，オーム社（2005）。
- [2] 宿谷昌則，西川竜二，高橋達，斉藤雅也，浅田秀男，伊澤康一：エクセルギーと環境の理論，*流れ・循環のデザインとは何か*，北斗出版（2004）。
- [3] Rant：Exergie, Ein neues Wort fur Technische Arbeits-fahigkeit, *Forsch. Ing.-Wes* 22, 36-37 (1956)。
- [4] 有効エネルギー評価方法通則：日本工業規格，Z 9204 (1991)。
- [5] 森花朋弘，高橋達，宿谷昌則：コンクリートの生産と運用におけるエクセルギー消費の試算，*日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学II*, 495-496 (1997)。
- [6] 八木順一郎，村松淳司，埜上洋：地球環境から製鉄技術を考える エクセルギー概念によるエネルギー有効利用，CO₂排出量の評価，*金属*, 6月号, 23-32 (1993)。
- [7] 高橋達，宿谷昌則：化学変化を伴うエクセルギー・エントロピー過程の計算方法の検討，*建築学会大会学術講演梗概集*, 465-466 (1996)。
- [8] Rant, Z: Zur Bestimmung der spezifischen Exergie von Bnennstoffen, *Allg. Warmetech.* 10, 9, S172 (1961)。
- [9] J. Szargut und T. Styrylska: Brennst.-Warme-Kraft, 16, 12, 589-596 (1964)。
- [10] 信澤寅男：燃料及び燃焼, 43, 11, 49-79 (1976)。
- [11] 北英紀，日向秀樹，近藤直樹，高橋達：セラミックス製造プロセスにおけるエクセルギー解析, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 115, No.12, 987-992 (2007)。
- [12] H. Kita, H. Hyuga, N. Kondo, and T. Ohji: Exergy consumption through the life cycle of ceramic parts, *Intl. J. App. Ceram. Tech.* (in print)

(受付日 2008.6.11, 改訂受理日 2008.7.9)

執筆者略歴

北 英紀 (きた ひでき)

東京工業大学大学院修了。企業勤務を経て2004年4月産総研入所。企業においてエンジンフリクション、セラミックス材料、プロセス、DPF (ディーゼルパティキュレートフィルター) 等に関わる研究ならびに生産のマネジメントに従事。産総研入所後は、新規造形プロセスや、熱力学に基づく環境負荷の評価手法について研究。本論文では解析と全体構想のとりまとめを行った。

日向 秀樹 (ひゅうが ひでき)

大阪大学大学院工学研究科プロセス工学専攻課程修了。同年、(株) いすゞセラミックス研究所 (現(株)いすゞ中央研究所) 入社。窒化ケイ素セラミックスの開発に従事。1999年ファインセラミックス技術研究組合に出向、2004年復職。2005年産総研先進製造プロセス研究部門高温部材化プロセス研究グループに所属、窒化ケイ素セラミックスの応用に関する研究に従事、現在に至る。本論文では主にデータ収集とセラミックスプロセス合理化に関する検討を行った。

近藤 直樹 (こんどう なおき)

1993年4月工業技術院名古屋工業技術試験所入所、2000年1月博士 (工学) 取得。2007年4月～2008年3月在籍出向 (経済産業省)。セラミックスの超塑性変形、高強度セラミックス、高温用セラミックス、低コストセラミックスなど、構造用セラミックスの研究に従事。本論文では主にデータ収集と金属プロセスの合理化に関する検討を行った。

査読者との議論

議論1 「図2技術と指標の連携の重要性」について

質問・コメント (村山 宣光)

図2は、構成学的研究アプローチにおける評価指標の重要性を示す

もので、本論文のメッセージの核心です。技術開発と新たな評価指標の間で、「つくる」は何をつくるのでしょうか。また、指標から技術開発への矢印は「はかる」ではないのでしょうか。逆に技術開発から新たな評価指標への矢印は「高度化」ではないのでしょうか。

回答 (北 英紀)

「つくる」対象は、技術開発という過程の中で得られた1つの製品やプロセスです。評価指標と技術開発の結果を相互に反映させながら向上・発展させていくという意味で、両者を双方向の矢印で結んでおります。「概念」-「開発」-「評価」のサイクルを廻すアクションの結果として、指標は「高度化」され、技術開発は「競争力」が向上すると考え、それらは三角形の外に出しました。

議論2 製造効率について

質問・コメント (村山 宣光)

例えば、100 %アルミナの焼結プロセスを想定すると、アルミナは参照種であるので、エクセルギーはゼロであり、焼結体に固定化されるエクセルギーもゼロです。したがって、投入された全エクセルギーが異なっても、「製造効率」は常にゼロとなり、プロセスの違いが表現されません。「製造効率」と表現するよりは、例えば「エクセルギーの部材内固定化率」と表現するのが妥当ではないでしょうか。また、「エクセルギーの部材内固定化率」と投入全エクセルギーの2つの値を並記することにより、製造プロセスの全体性能をよりの確に表現することができるのではないかと思います。

回答 (北 英紀)

エクセルギーは熱工学にはじまり、それを物質にも適用しているわけですが、粉と塊では結合状態が違って同じエクセルギーとしている点など、私の理解する限り、エクセルギーを物質に応用する場合、表面や界面エネルギーの扱いなど物理学的な視点での体系化はまだ十分ではないように思います。製造の指標としては課題の1つであり、本文中第5章にもその旨記述しました。

議論3 部材の耐久性を考慮した製造プロセスの性能評価について

質問・コメント (村山 宣光)

投入全エクセルギーは、自然界の安定な状態からどれだけ離れているかを示しており、いわばコストの科学的表現と言えます。さらに、論文ではセラミックス部材の耐久性の議論を展開していますが、投入全エクセルギーを耐用年数で除いた値が、その効果を加味した製造プロセス全体の性能を表現する指標に成りうるのではないのでしょうか。

回答 (北 英紀)

投入全エクセルギー/耐用年数の値は性能を表現する1つの指標だと思います。一方、環境負荷を考慮する場合、耐用年数(耐久性)自体も重要な目安です。たとえば、投入全エクセルギー/耐用年数の値が同じであっても、耐久性の長い製品の方が、廃棄物の量は少なくなります。

議論4 エクセルギーを活用した評価方法の将来方向性について

質問・コメント (水野 光一)

今回得られたセラミックスと鉄を材質とするヒーターチューブの比較から、将来的にどのような発展が具体的に示唆できるか、という視点をお考えになつては如何でしょうか?

方向は2つあります。1つは、ヒーターチューブ以外の工程まで広げる考え方で、査読者には助言はできません。＜横への広がり＞

もう1つは、ヒーターチューブをさらに深掘りした発展系ですく縦への深掘り＞。たとえば、さらにエクセルギー効率を上げるために、鉄の場合リサイクルすることで効率を上げる技術への展望、並びにアルミニウム浴場への溶解を防止する鉄合金の技術などが期待されます。また、セラミックスの場合、製造工程の内エネルギー消費の高い造粒工程や焼成工程をさらに省エネ化する技術展望などがあります。後者

では、高温焼成(焼結)を避けるセラミックスの製造研究として、「ソフト溶液プロセス」などが技術開発されております。

回答（北 英紀）

ご指摘の主旨をふまえ、本文中、3.5に、まず、現状のシステムを前提として、セラミックス、鉄の各部材を使用した場合それぞれの合理化の指針を示し、次に鑄造システムの合理化の現状や方向性をまとめました。なお、5.展望についてはあくまでもまとめという形式をとらせて

いただいております。

第2の方向性については、3.5に合理化の検討として、鉄、セラミックスそれぞれについて合理化指針を追加記述しました。とくにセラミックスについては製造工程の中でエネルギー消費の高い造粒工程や焼成工程をさらに省エネ化する技術展望を図11とともに記述しました。なお、ソフト溶液プロセスは軽量小型部材、あるいは薄膜には有効な手段と考えますが、本件のような大型窒化ケイ素の焼結体には不向きなプロセスと考え、反映しておりません。

シンセシオロジー発刊について

—— イリノイ大学日本人研究者らとの討論を通じて ——

大崎 人士*、佐藤 裕二**

本稿では、ジャーナル *Synthesiology* の創刊とその背景にある産総研の理念について、イリノイ大学計算機分野の日本人研究者らと討論した様子を紹介する。また、議論を通じて得られた質問や意見をもとに、ジャーナルを取り巻く問題や、今後検討すべき課題を明らかにする。

1 背景

本稿は、産業技術総合研究所（以下、産総研と略す）が2008年1月に創刊したジャーナル *Synthesiology* について、イリノイ大学日本人研究者らと行った討論をもとに、執筆者らの考察を述べる論説である。

まず最初に、本稿を執筆するに至った背景を簡単に述べる。ジャーナル創刊当時執筆者の一人である大崎は、産総研の在外研究派遣制度により、2007年6月からイリノイ大学に1年間の滞在予定で、システム検証技術とツリーオートマトンの研究に従事していた。また、研究のかたわら、自らの研究分野を解説する講義をイリノイ大学大学院生らに試行したり、計算機分野の日本人研究者らを対象としたセミナー（CSセミナーと呼ぶ）の運営に関わっていた。

CSセミナーは、イリノイ大学の日本人研究者らに研究交流の場を提供することを目指して2007年8月から始まった。セミナーの趣旨はおよそ次の通りである。専門分野の違う研究者らに対し、各人の研究内容や主張を紹介することを目的とする。セミナーの参加者は、自らの経験や知識にもとづいて意見や質問ができる。セミナーでは、話題提供者による発表とともに、自由討論の場を提供する。

セミナーの回を重ねるごとに、参加者の背景は明らかになっていく。同じ計算機分野と言えども、研究スタイルや研究を通じた社会との関わり方は、大きく違っていた。大学教員、大学院生、または研究員という立場の違いも、各人の考え方に大きく影響しているようであった。

こうしたCSセミナーという場を借りて、大崎が話題提供者となって新ジャーナルやその背景にある産総研の理念を説明し、セミナー参加者による討論会を2008年3月に行っ

た。産総研が取り組む新たな挑戦は、自己満足に陥っていると一蹴されるのか、それとも傍目八目（おかめはちもく）の諺どおり、当事者以上に産総研の取り組みの是非は見通されているのか、振ってみなければ賽（さい）の目は分からない、という状況であった。

事前に、シンセシオロジー編集委員会からは、座談会形式の記事が提案された。しかし、自由討論の雰囲気を壊したくない、また、あくまで本稿の主張は明確にしておきたいという2つの理由から、編集委員会からの提案は採用されなかった。

したがって本稿では、セミナーで自由に発言された研究者らの意見を引用しながら、執筆者らの考察を中心に据えて本文をまとめている。

2 学術研究とフィールドワーク

産総研が目指す本格研究は、3種類に分類された研究から成る。それらは、第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究と呼ばれる。以下、本格研究に関する記事^[1]をもとに、用語や基本概念の説明を行う。

第1種基礎研究は、「閉じた領域の特定知識をもとに、その領域知識と矛盾しない新しい知識を実現する研究」と定義される。既存の知識との相互干渉を起こさない独立性をもった新たな知識を獲得し、それを整理して知識体系全体に寄与することを目的とする研究である。一般的には、「学術研究」と呼ばれる。

第2種基礎研究は、「領域無限定の知識を融合し、必要に応じて新知識を創出して、社会的に認知可能な表現形態を実現させる研究」と定義される。知識の領域に限定を設

*産業技術総合研究所 システム検証研究センター 〒560-0083 大阪府豊中市新千里西町1-2-14 三井住友海上千里ビル5階
産総研関西センター千里サイト **法政大学 情報科学研究科 〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2 * E-mail:
ohsaki@ni.aist.go.jp

けないため、研究プロセスに独自性がある。従来の学術研究の基準では、研究プロセス自体を研究成果として取り上げることは難しいため、苦勞のわりに学術論文などの成果物を生みにくいと評される。また、目に見える成果を得るまでに長い時間を要したり、研究遂行のために解決すべき問題が多岐に渡っていたりするなど、多くの研究リスクが常に付きまとうことも特徴である。

しかし、研究者のもつ知識と専門的な技能を生かして、社会が求める成果を得ようとする活動こそが、基礎研究と社会生活とが互いの存在を確認し合える機会を作る。執筆者の一人である大崎が所属するシステム検証研究センターでは、社会を観察し、それを説明する枠組みを作る研究を「フィールドワーク」と呼んでいる^[2]。上述の第2種基礎研究の定義に照らすと、第2種基礎研究をフィールドワークと呼ぶことに、あまり抵抗がないのではないだろうか。

一方で、一般にはまだ馴染みの薄い2つの基礎研究の概念を、言葉による定義だけで直ちに理解することは難しい。そこで、CSセミナーの解説では、図1に示す概念図を作成して、第1種、第2種基礎研究の説明に用いた。

2種類の基礎研究は、左右2つの楕円で表現した。2種類の基礎研究が相互に作用し合う様子は、一方から他方へ向かう大きな矢印で表現した。つまり、第1種基礎研究と第2種基礎研究を往き来することを、楕円を結ぶ大きな矢印を通じて、一方から他方へ往來する様子で表現する。さらに、2種類の基礎研究の特徴を説明するために、第1種基礎研究は自己完結した円運動から成り、第2種基礎研究は全領域を横断的に流れる動きから成る、という解説を加えた。

第1種基礎研究と第2種基礎研究は、いずれも製品化研究へ移行可能である。そこで、「イノベーションを実現する研究方法論」^[3]で示された概念図とは異なるが、製品化研究を表す領域は、2種類の基礎研究の中間に配置した。図は、2種類の基礎研究を連続的に往來しながら、結果として

製品化研究へつながっていくことを表している。

CSセミナーの参加者には若い研究者も含まれており、「2種類の基礎研究を往き来するというイメージを掴みにくい」（大門）という感想もあったが、ここまでの説明に特段の異論や質問はなかった。

3 第2種基礎研究=実用化研究？

基礎研究で得られた研究成果をもとに、事業化の段階に進むためには、研究成果を利用したいと望む誰もが、その成果を容易に利用可能であることが求められる。基礎研究段階から、実用化研究の段階を経て事業化に至る、という流れである。一方、前節の第2種基礎研究の問題点でも挙げたように、基礎研究成果をもとに事業へ発展するという図式は、実現の保証が約束されている訳ではない。図2は、基礎研究の段階から事業化に至るまでの流れと、陥りやすいと指摘されている問題点を表している。

ここまでの説明に対して、CSセミナーで次のような質問があった。以下、発言者の名前は敬称を略す。

[南] では、第2種基礎研究とは、実用化研究のことなのか。

図2に示した実用化研究は、将来の事業化を目指した研究の発展段階の1つである。基礎研究成果をもとに、社会的に認知可能な形の研究成果を得ようとする研究を意味する。よって、前節の定義より、第2種基礎研究 ≡ 実用化研究（実用化研究ならば、第2種基礎研究）は成り立つ。一方、「第2種基礎研究 ≡ 実用化研究」（第2種基礎研究ならば、実用化研究）が成り立つならば、図2に示した「基礎研究 → 実用化研究 → 事業化」の図式より、第2種基礎研究の目的は事業化となる。かたや、第2種基礎研究の中には、要素技術や特定の材料を抽出した後、その技術や材料を科学的な目で観察して、体系化する衝動に駆られることがある。つまり、第2種基礎研究の目的が常に事業化であるとは言い難い。よって、「第2種基礎研究 ≇ 実用化研究」であるのが自然である。

ジャーナル*Synthesiology*は、第2種基礎研究の成果を発表する論文誌であると謳っている^[1]。確かに、従来の価値基準では論文の題材としては取り上げにくい研究プロセスこそが、第2種基礎研究では重要である。*Synthesiology*では、研究プロセスに注目し、それを論文の題材として取り上げる、としている。

上述の「第2種基礎研究 ≇ 実用化研究」であるという考察を合わせると、*Synthesiology*は、第2種基礎研究の、特に（図2の意味の）実用化研究の成果やその研究プロセスを

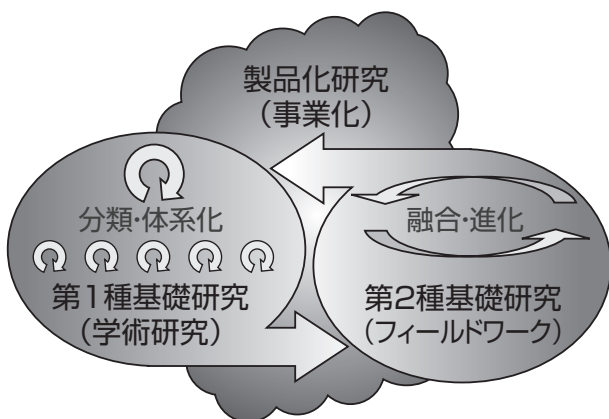


図1 2種類の基礎研究

発表する論文誌である、と言うのが正確だと考えるが、どうであろう。

次に、図2そのものについて、以下のような意見があった。

[佐藤] 企業やプロジェクトの種類によっては、研究成果の出口イメージは明確になり、矢印の向きが逆向きになるのではないだろうか。例えば、（事業部などからの要請で）開発目標となる製品のイメージが最初に示される場合には、要求を実現するために必要な基礎研究の成果は何か、また人員をどう構成するかを検討して、研究を開始することが多いのではないか。

爾々と製品開発に取り組む企業の一部、または短期的な研究プロジェクトで具体的な成果を取めようとする場合は、トップダウン的なマネージメントになるかも知れない。しかし、第1種基礎研究では、「未知なるものを明らかにしたい」という意志に動かされて研究を行う。そのため、新たに発見した知識が、直ちに事業化への足がかりになることは少ない。特に基礎科学的な研究分野では、成果が実際に社会で生かされるまでには長い時間がかかったり、埋没してしまうことが多い。図2は、そうした基礎研究の成果が事業化段階に至るまでに、研究者が陥りやすい状況を説明している。

また製品開発であっても、非常に意欲的な製品を開発しようという場合、出口のイメージは明確だが、製品化を実現するために必要な基礎研究の成果がすぐに見つかるとは限らない。そこで全く新しい基礎的な研究成果を得ようとし、ここで得られた基礎研究成果を事業化につなげるには、図2に示したような流れで研究が行われる。こうした場合、図2で指摘した状況に陥るかも知れないことは容易に想像できる。

4 開発の苦労話と技術報告書

ジャーナル発刊の趣旨の文に、次のような記述がある。「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生かすための活動が行われてきた。しかし、そのプロ



図2 実用化段階の研究

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」。この主張については、一部に誤解を招く恐れがないか、という指摘があった。

[佐藤] 新ジャーナルが、第2種基礎研究の研究プロセスを論文として取り上げようと言っているが、企業ではすでに、社内刊行物に事業化の流れやプロジェクトの苦労話などを文章として残すことが一般的になっている。こうした刊行物は、〇〇技報、××社報などの名前で発刊され、同業他社の刊行物は企業内の図書館で閲覧可能である。また一般にも入手可能である。

例えば、日立グループでは新製品・システムを紹介しながら事業や技術の方向性を報告する刊行物として「日立評論」(<http://www.hitachihyoron.com/>)が定期的に刊行されている。2008年2月号のタイトルは「特集電力・エネルギー分野の最新技術開発」である^[4]。大学や研究機関の研究者らが執筆する論文とは異なり、「原子力事業のグローバル化への取り組み」、「日立 H-25ガスタービンの特徴と適用例」など、新製品・システムの紹介を中心に、製品に関係した技術、適用例、開発を進める際の苦労話などが記事として取り上げられる。

他にも、三菱電機技報^[5]、NEC技報^[6]、東芝レビュー^[7]などは、ウェブサイトから基本的に無料で配信されており、誰でも閲覧可能である。一方、NTT DoCoMoテクニカル・ジャーナル^[8]やヨタテクニカルレビュー^[9]などは、雑誌として販売されている。

社報や技報は、おもに組織内部の活動を外部に紹介したり、解説する機会であるから、外部からの投稿を受け付けていないことが多い。また、企業が個別に掲げる理念や目標を逸脱するような主張は、社報や技報の記事にはなりにくい。また、研究分野によっては、当為的知識や総合的判断（synthetic judgment）を論文に含めることをためらう文化がある。こうした状況から、基礎研究に軸足を置く研究者らが、成果を社会に役立てようとする活動の中で総合的考察が得られたとしても、その考察を系統立てて論じるための受け皿があるとは必ずしも言えない。

5 公開しない研究成果

[古川] 第2種基礎研究では、分野によっては、事例研究が成果となる場合が多いと思うが、守秘義務契約などによって公表できないことはないのか。

企業では、利益に直結するような研究成果は非公開が原

則である。例えば、LSIの歩留（ぶどまり）向上技術に関する研究は、半導体企業では重要なテーマである。歩留とは一般に、原料の使用量に対する製造品の量の比率をいう。半導体分野では、生産したICチップやメモリーなど、製品の全数量の中に占める所定の性能を発揮する良品の比率を表す。通常は、歩留をある割合に設定して、製品価格を設定する。つまり、歩留が初期の割合より向上したら、その分は企業の利益につながる。

したがって、LSIの歩留向上技術に関する詳細は、半導体企業にとってはきわめて重要な情報である。企業の研究者や技術者が、歩留向上のためのアイデアや技術を提案できたとしても、それを研究成果として、学会を含め社外に公表できないことが一般的である。

一方、大学や公的な研究機関は、集積された知識を利用し、また普及させることによって科学技術の発展に寄与することを目指すのが原則である。ところが現実には、研究成果の詳細をあえて公表しないことがある。だれかに経済的損失を与えると予想できるような研究成果が得られた場合、大きな損失にならないよう対策を講じるために成果の公表を遅らせたり、公表を差し控えたりする。また、事業化を目的とする研究では、戦略的な理由により研究成果を公表しない。どうやってその成果を得たのか、その成果は再現可能なのか。研究の肝をあえて公表しないことで、同様に事業化を目指す競争相手に追従させないためである。

研究成果を特許という目に見える形で公開するという選択肢もある。実用化研究が一段落して、次の研究を開始する資金的余裕のある場合の選択肢である。しかし、およそ2-3年と言われる審査期間を待てない場合には、研究成果の独占的利用権を与える契約（ライセンス契約）が有力な選択肢となる。この場合、少なくとも契約期間内は成果の詳細を公開しないことが契約条件となる。その結果、論文の材料が著しく減るので、外からは「研究は行ったが、成果は少ない」という評価が下されてしまう。

さらに、どこまで学術論文として公表するのか、という研究の取り分についての交渉や取り決めは、研究を開始する以前に行われる。研究のリーダーシップをとるものが、将来を見据えた抜け目ない交渉ができるかどうかによって、論文という成果物をどのくらい出せるかが大きく左右される。優れた研究成果でもイノベーションにつながらないといわれる「研究の日本型デスバレー」は、リーダーシップの育成の仕方の一因があると言われていたが、リーダーシップのあり方1つで公開できる成果も大きく変わってくる。

第2種基礎研究の、特に、事業化や製品化を目指す研究では、実にさまざまな理由で、成果を公開できないことが分かる。しかし、*Synthesiology*は、発言の場がなくて困ってい

る研究者を助けようという発想ではない。研究者が他の研究者らに是非知っておいてもらいたいと前向きに思うことを論文という形で記録し、集積した知識を再構成して利用することが、このジャーナルの目的だと考える。

6 *Synthesiology*への期待と疑問

実用化研究の成果やその研究プロセスを発表する論文誌として、*Synthesiology*の今後の動向に注目したい、という意見が討論会では多かった。一方、よい論文を掲載しようとする論文誌側の希望とは裏腹に、よい論文ほど既存の学会誌に流れて行ってしまうのではないかと、という指摘があった。

[佐藤]（産総研外の人間として）論文を投稿する側の立場に立てば、質の高い論文ほど既存の著名な学会誌に投稿したいと考えるのが自然である。事業化や製品開発に関連する論文でも、ビジネスとしての新規性や製品としての優位性があれば論文として扱われるため、*Synthesiology*だけが受け入れ先として優位になるとは限らない。

この問題は、新刊ジャーナルが抱える共通の問題である。*Synthesiology*の場合、アポステリオリ (a posteriori) な知識から『構成』のための一定の法則や一般論を導こうとしている。したがって、構成のための学という観点で論文を評価されたいと考える研究者らを対象としている以上、既存の学会誌との棲み分けは可能である。またジャーナルは、こうした第2種基礎研究を学として確立するために貢献したいという研究者らにメッセージを発し続ける役目を担う。

一方、第4節でも指摘があった通り、研究・開発・製品化の一通りを行う企業の多くは、実用化研究の成果や研究開発プロセスについての記事を社内向け刊行物に掲載し、一般に公開している。産総研が新たに取り組む*Synthesiology*でも同様に、実用化研究の成果や研究開発プロセスを、記事として手厚く取り上げようとしている。したがって、この点だけを強調してしまうと、企業の技報や社報との本質的な差異を見出しにくくなる。

製品化を意識する以前からの基礎研究にもとづく、研究プロセスを論じた論文は、企業の技報や社報の記事とは、本質的な違いがあるはずである。また仮に、*Synthesiology*に掲載される論文の多くが産総研内からの投稿であっても、学会と社会との板挟みにある研究者が、いかなる思考プロセスをもち、いかに研究を昇華させていくのかという記事であれば、産総研以外からも多くの共感が得られるはずである。

いずれにせよ、新ジャーナルの浮沈についての結論を得

るには、ジャーナルの今後を見るより他ない。

一方で、いかなる研究であっても、普遍性をもつ主張を含んだ成果や研究プロセスであれば、それを文章化して公開することは十分な価値がある、と言えないだろうか。

[稲葉] 実用化研究の成果や研究プロセスに話題を限定せず、研究の苦労話を公表する開かれた機会としてとらえると、*Synthesiology*の独自性と存在価値は主張できるのではないか。その意味では、基礎研究に重点を置いた国内最大規模の研究機関である産総研には、話題提供が可能な研究者が多いのではないか。

コンピュータ黎明期にvon Neumannが書いた有名な“First Draft of a Report on the EDVAC”^[10]は、第2種基礎研究の論文、または当為的知識を記載した論文と言えるだろうか。当時のコンピュータ技術は機密情報の扱いを受けていた。特に、EDVACの前身であるENIACの詳細を明らかにする論文は少なかった^[11]。Von Neumannの書いたその論文（草稿）は、当時の最先端技術を解説する技術文書というより、プログラム内蔵方式のコンピュータ（現在のコンピュータの原型）のアーキテクチャを、数学者としての視点で総合的に解説した学術論文に近い。実際に、プログラム内蔵型コンピュータの基本構成要素と基本演算の処理の流れについて、コンピュータ設計の技術的詳細に立ち入らず、普遍的であるが概念的な説明をしている。この“First Draft”とそれに続く数編のvon Neumann論文の影響により、1948年以降、世界各地にプログラム内蔵型コンピュータの誕生がもたらされ、標準的なコンピュータとして世界中に普及していく^[12]。

Von Neumannの論文の例は、特殊な事例かも知れない。しかし、この例から次のような教訓が得られる。第2種基礎研究の成果を分析整理して再合成（analysis and synthesis）して得られた学術的考察は、当為的知識と事実的知識の境界が明確ではない。たとえ事実的知識のみから構成された論文であっても、論文に込められた著者の主観（subjective statement）は、にじみ出てきてしまうのである。

では当為的知識の論文とは、一体どのようなものだろうか。従来の科学論文は、事実の積み重ねのみにより結論を導く事実的知識の論文である。よって、主張の真偽は、特定の知識領域の上で判定可能である。

しかし、当為的知識には主観的な主張が含まれる。“No ought from an is”（「である」から「べき」は導き出せない）の立場では、明かな誤りを除き、当為的知識の論文の主張は、妥当性や真偽さえも最終的な判断は読者に委ねられる。

一方、当為的知識と事実的知識は領域不可分であるという立場^[13]では、当為的知識の論文とは、社会通念や価値観などを含む枠組みの中で、事実の積み重ねにより導き出された結論を述べる機会である。やはり、真偽や妥当性を判定しにくい部分が生じる可能性はある。

当為的知識や主観を掲載する論文に対する解釈がいずれの立場でも、多くの学術論文誌が避けようとした状況を受け入れて、ようやく当為的知識の論文は発表の機会を得る。*Synthesiology*は、発刊の目的を達成するために、敢えて論文誌としては困難な状況を受け入れようと言っている。こうした姿勢だけ見ても、論文誌としての独自性があるのではないか。

次に、扱う論文がさまざまな研究分野に及ぶ点について、査読プロセスの問題が指摘された。

[佐藤] 投稿された論文の査読については、多種多様な製品分野に関係した論文を対象とする。したがって、査読の質をどう均一化するのか、査読プロセスや結果をどう公平化するのか。

この点については、査読者と論文執筆者との議論が論文ごと最後に掲載されており、査読プロセスの透明性は確保されている。また、査読の質が保たれているかどうかは、その議論の内容を知ることによって確認することができる。さらに、客観的に検証可能な誤りは、査読プロセスで取り除かれるが、主観的な要素を含む主張（結論）の真偽や妥当性を（1）査読者はどうみるか、（2）最終的な判定を読者に委ねるか、などを伝えることができる。

新しいジャーナルが、独自の趣旨を掲げて論文を募集するというのは、傍目から見れば独善的かも知れない。しかし、その趣旨に賛同し、ジャーナルの存在価値を高めようとする人が、産総研外に多く生まれれば、*Synthesiology*の背景にある産総研の理念も含め、ジャーナルとしての存在は正当化される。

[南] そのためには、ジャーナルとしての認知度を上げることが先なのか、それともジャーナル発刊の趣旨を理解してもらうことが先なのか。

ニワトリが先か、タマゴが先か、という議論には結論がない。むしろ、なぜ産総研では、基礎研究、応用研究、設計開発という分類ではなく、第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究と分類するのかなど、産総研が独自に提唱する概念をいかに定着させるかを考える方が、ジャーナルの議論より先かも知れない。

7 むすび

(受付日 2008.5.23)

CSセミナーでの討論会を通じて、*Synthesiology* 発刊が意味するジャーナルの観念的な目的に触れる機会が得られた。また、検討すべき問題や将来に向けての課題のいくつかも明らかになった。容易に解決可能な問題ではない。しかし、これらの問題を、今後どのように解決していくかが、新ジャーナル *Synthesiology* の成功の鍵を握るのは確かである。

謝辞

イリノイ大学計算機分野の日本人研究者、特に、CSセミナー参加者の皆さんには、多くの助言や励ましを頂きました。José Meseguer イリノイ大学教授からは、事実 (fact) と価値 (value) の概念、およびその周辺事情について、助言を頂きました。最後に、イリノイ大学での滞在および在外研究に協力や支援をしてくださった関係者の方々に、深く感謝します。

参考文献

- [1] 吉川弘之: 第2種基礎研究の原著論文誌, *Synthesiology*, 1(1), 1-6 (2008).
- [2] 木下佳樹, 高井利憲, 大崎人士: フォーマルメソッドとフィールドワーク, 特集「フォーマルメソッドの新潮流」, *情報処理*, 49(5), 499-505 (2008).
- [3] 産業技術総合研究所イノベーション推進室: イノベーションを実現する研究方法論「本格研究」, 公開資料 (2007). http://unit.aist.go.jp/ripo/ci/strategy/full_research/
- [4] 日立製作所: *日立評論*, 2008年2月号 (2008). <http://www.hitachihyoron.com/2008/02/>
- [5] 三菱電機: *三菱電機技報*. <http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/giho/>
- [6] 日本電気: *NEC技報*. <http://www.nec.co.jp/techrep/ja/journal/>
- [7] 東芝グループ: *東芝レビュー*. <http://www.toshiba.co.jp/tech/review/>
- [8] NTT DoCoMo: *NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル*. http://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/technical_journal/
- [9] トヨタ自動車: *トヨタテクニカルレビュー*. http://www.toyota.co.jp/jp/tech/for_engineer/technical_review/
- [10] John von Neumann: *First draft of a report on the EDVAC*, Moore school of electric engineering, University of Pennsylvania, W-670-ORD-4926 (1945).
- [11] Georges Ifrah: *The universal history of computing --- From the abacus to the quantum computer*, John Wiley & Sons (2001).
- [12] Norman Macrae: John Von Neumann: *The scientific genius who pioneered the modern computer, game theory, Nuclear Deterrence, and Much More*, AMS (1999).
- [13] Hilary Putnam: *The collapse of the fact/value dichotomy and other essays*, Harvard University Press (2002).

執筆者略歴

大崎 人士 (おおさき ひとし)

2000年旧電子技術総合研究所入所。独法化のため、2001年より産総研職員。計算論の研究に従事。現在は、ソフトウェア開発現場への自動検証技術の移転に取り組む。さきがけ研究「機能と構成」領域 (JST) では研究員 (兼任) として参加し、自動検証技術とツリーオートマトンの研究を行う (2002.11-2006.3)。招聘研究員としては、イリノイ大学 (2004.1-3)、リール大学 (2002.6, 2005.5-6)、エコー・ノルマル・シュペリエール・カシオン校 (2004.8-9, 2006.8-9) などでの研究経歴がある。本稿執筆当時は、在外研究のため客員研究員としてイリノイ大学に滞在 (2007.6-2008.6)。文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞 (2006.4)。

佐藤 裕二 (さとう ゆうじ)

1981年東京大学工学部物理工学科卒業。同年株式会社日立製作所入所。同中央研究所を経て、2000年4月法政大学情報科学部助教授。2001年4月より同大学教授。工学博士。可変論理構造LSIの設計、ニューラルネットワークのハードウェア化、進化的計算を用いた機械学習などの研究に従事。情報処理学会、IEEE Computer Society、IEEE Computational Intelligence Society、ACM SIGEVO 各会員。

話題提供者

稲葉 和久 (いなば かずひさ)

Department of Industrial and Enterprise Systems Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign (イリノイ大学アーバナシャンペーン校インダストリアル・エンタープライズ・システムズエンジニアリング学科)

2001年東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (修士) 修了。同年ヒューレット・パッカード・ソリューションデリバリー株式会社入社。2003年日本ヒューレット・パッカード株式会社に移籍。2007年筑波大学大学院ビジネス科学研究科経営システム科学専攻 (社会人大学院修士) 修了。日本ヒューレット・パッカード株式会社退社後、2007年よりイリノイ大学インダストリアル・エンタープライズ・システムズエンジニアリング学科博士課程。現在、ソーシャルネットワーク/ソーシャルキャピタルなどにもとづく外部イベントに対する組織対応の研究を進めている。

大門 優 (だいもん ゆう)

Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign (イリノイ大学アーバナシャンペーン校コンピュータサイエンス学科)

2006年よりイリノイ大学ポスドク研究員。ロケットの燃焼室、ノズルにおける燃焼など、流体解析の研究に従事。現在は、固体燃料燃焼の不均一性を考慮した固体ロケットモータ内における音響現象の解析を行う。これまでに、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の宇宙航空プロジェクト研究員として、流体 / 壁面後退の連成解析を用いた固体ロケットモータノズル壁アブレーション解析の研究 (2005.4-2007.1) や、日本学術振興会特別研究員 (DC2・慶應義塾大学) として、デトネーション、超音速燃焼の解析の研究 (2004.4-2005.3) に従事した。

古川 泰隆 (ふるかわ やすたか)

Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign (イリノイ大学アーバナシャンペーン校コンピュータサイエンス学科)

2001年東京大学理学部情報科学科卒業。同年東京大学情報理工

学系研究科コンピュータ科学専攻に進学するが、翌年渡米し、2002年よりイリノイ大学コンピュータサイエンス学科博士課程。コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックスが専門。主に画像ベースの高精度3次元形状復元、モーションキャプチャーの研究を行う。2008年5月イリノイ大学コンピュータサイエンス学科よりPh.D.授与。

南 和宏（みなみ かずひろ）

Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign（イリノイ大学アーバナシャンペーン校コンピュー

タサイエンス学科）

2007年よりイリノイ大学ポスドク研究員。同年8月から12月には、イリノイ大学客員講師として、データベースシステムの講義を担当。ダートマス大学コンピュータサイエンス学科よりPh.D.授与（2006）。分散システムのセキュリティ、特にアクセスコントロールの研究に従事。現在は、分散証明システムの情報の機密性に関する研究に取り組む。Institute for Information Infrastructure Protection フェローシップ受賞（2006.8-2007.7）。

「シンセシオロジー」創刊記念シンポジウム

個の「知」から全の「知」へ ― そのシナリオの共有と蓄積について

2008年5月13日、秋葉原コンベンションホール（東京都千代田区）において、「シンセシオロジー―構成学」創刊記念シンポジウム“個の「知」から全の「知」へ―そのシナリオの共有と蓄積について”が開催され、産業界を中心に330名を超える方々にご参加いただきました。シンポジウムでは、小野 晃 シンセシオロジー編集委員長の挨拶の後、野間口 有 三菱電機株式会社取締役会長から「基礎研究、その今日的意義」と題し、また中島 秀之 公立はこだて未来大学学長から「構成的方法論と学問体系」と題してご講演いただきました。引き続き、経済ジャーナリスト柏木 慶永氏をモデレーターに、広瀬 研吉 科学技術振興機構理事、木村 英紀 横断型基幹科学技術研究団体連合会長、上田 完次 東京大学教授、前田 拓巳 株式会社島津製作所技術推進部長、持丸 正明 産総研デジタルヒューマン研究センター副研究センター長、赤松 幹之 シンセシオロジー編集委員会編集幹事をパネリストに、「技術の統合と共有の方法論について」をテーマとしたパネルディスカッションが行われました。最後に、吉川 弘之 産総研理事長が総括・閉会挨拶をしました。当日の各挨拶、ご発言、コメント等の要約（本誌編集委員会作成）を以下に記します。

シンセシオロジー編集委員会

小野 晃 シンセシオロジー編集委員会委員長【開会挨拶】

イノベーションの推進には、基礎研究の成果をどのように効果的に社会あるいは産業に結びつけていくかが重要です。私たちは、研究における最初の発見や発明のところを第1種基礎研究と名付け、そこから現実の製品に至る過程での異なる領域にまたがる構成的・統合的研究を第2種基礎研究とすることを提唱しています。第2種基礎研究の部分は、研究にとっては非常に困難な時期であり、「悪夢の時代」とか「死の谷」とも呼ばれます。そこに技術的な観点から、あるいは研究者側から積極的に取り組むことが大事ですし、悪夢の時代をいかに乗り越えるかというところに研究開発型独立行政法人の大きなミッションがあります。基礎研究の大きな担い手である大学、製品化への担い手である企業との連携の必要性も同時に認識しています。

このような背景のもとに、第2種基礎研究をより深く掘り下げ、それを社会や産業界の方にもご理解いただこうと、雑誌「シンセシオロジー」を創刊しました。現在の科学技術は細分化された分野ごとに学術誌が刊行されています。しかし、現実の製品とか、社会に出て行く技術は、多様な分野の技術を統合していかざるを得ません。多様なディシプリンを統合する研究者には細分化された学術誌では不十分ですし、また、先端的なアカデミアの雑誌は産業界とか社会の人々が読めるような形になっていないという問題

意識もあります。「シンセシオロジー」では、科学技術の全分野を対象に、第2種基礎研究のプロセスと成果を記述します。読者としてはいわゆるアカデミアの研究者だけでなく、産業界、社会の研究者、技術者の方々を想定しています。

論文の記述上のポイントが幾つかあります。まず、研究目標の設定では社会的な意義や価値を科学技術の言葉で書くということで、従来のイントロダクションをより精緻にしたものになります。次が最も大事な点で、研究目標を達成するためのシナリオを書くこと、つまりどういう要素技術を組み合わせたり開発したりしながらいくのかという、研究者としての夢の達成の道筋を研究者自らが開示していこうということです。要素技術選択の理由や、組み合わせにおける問題なども記します。著者と査読者との議論を載せている点については、大変面白いという反応をいただいています。第2種基礎研究をどのように論文として記述するか、査読者と著者との議論の公開を通じて進化させていきたいと思えます。



シンポジウム会場

野間口 有 三菱電機株式会社取締役会長【招待講演：基礎研究、その今日的意義】

およそ20年前、欧米にキャッチアップするまで、日本は技術導入期でした。基礎研究および技術的に立証されたものを導入する形で、投資効率は高く、品質と生産性で強い経済力をつけました。その後、バブル経済の終焉を経て、先導型のR & Dに移行したと言えます。ただ企業がすべて自前のR & Dをやるわけではなく、産学官連携などを広くやろうという時代です。新しい技術も市場形成も自ら生み出さなければなりません。社会における法整備なども絡め、大変な努力を必要とする点で、先導型R & Dはキャッチアップ型R & Dと大きな違いがあります。



先導型R & Dを進めるには基礎研究は重要ですが、市場経済の中で民間企業ではどうしても製品化研究の比重が大きく、「死の谷」の存在は投資効率の障害になります。そこで三菱電機は今やオープンイノベーションの体制をとっています。1つは産学官連携で、内外のアカデミアの基礎研究成果を活用しようという取り組み。もう1つは他の企業との連携も行っていこうということです。また、事業、知財、R & Dの三位一体経営を指向しています。事業戦略を立てるとき、製品や販売といった点だけではなく、その事業を支えるR & D能力の位置づけを行い、これまで蓄積してきた知財をどれだけ活用できるかを経営レベルでも把握します。核となる技術と知財を重視して事業をやっていくということです。三菱電機では5つのセグメントがあり、その中で技術的なシナジーを活かした強い電機・電子事業の複合体をうたっています。もちろん経営は技術的なものだけではなくありませんから、全社の知財を共有・活用し、21世紀の社会動向、技術ロードマップなどを考えながら、今後の50年100年を目指しています。

歴史の長い企業ではどうしても組織間に壁ができ、1つの知が全体の知になりません。それをコーポレート（開発本部など）のところで見渡すようにして全体の知にする仕組みとしています。そうすると、R & Dが引っ張る事業が生まれることもあれば、知財の分析から事業戦略の提案がなされることもあります。R & Dには新製品や新技術の創出のほかに、生産性の向上、論文発表や標準化という期待もあります。特に国際標準は大事で、それを成果として提案できるよう、産学官連携で取り組みたいと思います。環境対策や品質改善活動でも横の連携をとって進めています。先導型R & Dの時代では成果もまた多様で、単に目

に見える有用物だけではなく、世界の人から尊敬される日本生まれの知的財産やルール、そういうものがあるから安心してそれを使えると言ってくれるような成果を出すことも大変重要ではないかと思えます。

中島 秀之 公立ほこだて未来大学学長【招待講演：構成的方法論と学問体系】

構成学の方法論をお話するに当たり、最初に言葉の問題に触れます。科学とサイエンスという言葉がありますが、どうも1対1に対応していません。英語のサイエンスからアートを引いた部分が一般に日本語で科学と呼ばれていて、ここが第1種基礎研究に相当し、サイエンスとアートのオーバーラップする部分が工学や第2種基礎研究になるだろうと理解しています。日本語の芸術はアートからサイエンスを抜いた部分かと思えます。もう1つは、視点をどこに置くかということで、研究者がシステムの外から観察するのが自然科学の方法論です。これに対して、研究者が中に入っている内部観察の視点があり、実は構成的なシステムを作る、もしくは構成的にシステムを作るというのは内部観察にならざるをえません。



言葉の問題は言い換えれば文法とか構文の問題であり、視点の位置に関係しますし、思考をも規定していると考えられます。例えば、りんごを離れた位置から“もの”として見る場合は客観的な見方になりますし、りんごが落ちる“こと”というときはその動きを経験する立場になります。別の例を挙げると、川端康成の「雪国」は「国境の長いトンネルを抜けると雪国であった。」で始まります。この英訳の1例は“The train came out of the long tunnel into the snow country.”で、原文における話者あるいは読者の視点は列車の中にあり、英訳では外から列車を見ています。システム内視点と客観的視点です。

では構成的方法論とはどんな分野を扱うのか。例えば、複雑系、それから実験不可能な宇宙論や進化論。これらは多層システムであり、従来の分析的科学では幾つかの層をまとめて理解する方法論にはなっていません。そこでどうするのかというと、「ある現象が現れるのを期待する」とか「出てくるのを期待する」方法で、これこそ構成的方法論、あるいはイノベーションの唯一の方法論ではないか考えています。すなわち、トライアル&エラーで、生成と選択を繰り返す方法論です。構成では部品集めから始め、モデルか試作品をとにかく作り、途中で分析を行い、改良を加え

ていく、このように言うこともできます。構成と分析は単純な逆方向ではなく、入り組んだ、強いて言えば90度違う方向を向いているのだと思います。

実はほとんど全ての生成物には環境との相互作用が絡んでいて、構成を難しくしています。進化も環境との相互作用で変化していくものです。製品でいえば、ユーザーの使い方や反応に相当する部分です。したがって、作ってから分析し、評価し、フィードバックさせていく、そういうループを何回も回すのが構成的な方法であると言えます。

広瀬 研吉 科学技術振興機構理事【パネルディスカッションコメント】

研究者側と企業側の間に横たわる悪夢の時代を乗り越えていくために、もし研究者側と企業側の結びつきに困難があるとすれば、そこにはJSTのような科学技術の振興を担う機関の果たすべき役割があります。



JSTは、悪夢の時代をつなぐいろいろな仕組みを用意していますが、今回のシンセシオロジー誌の論文にある、社会還元に向けた関門をどうクリアしていくのかについての記述を踏まえていけば、悪夢の時代を乗り越えるための仕組みをさらによく考えていけるのではないかと思います。つまり、研究者の持っている研究成果というのは、特許前のもの、特許手続中のもの、特許成立後のものというようにいろいろな段階がありますが、それぞれの段階に応じた仕組みを考えていこうというものです。企業の側にもいろいろな幅がありますから、企業の状況や幅を見ながら仕組みを考えて、よりきめ細かくやっていくことが重要と思っています。JSTの取り組みは、大きな意味では研究者側と企業側の間をできるだけ狭めていく、つなげていくということですが、もっとそれが重なるようにできないのかと考えています。例えば、一方で物質探索をしながら、もう一方で生産工程の研究をほとんど同時に検証しながらやっていくことができないか、こういう並行的な研究にチャレンジしたいと考えています。

シンセシオロジーに期待することの第1点は、第1種基礎研究の成果を製品化し、社会に還元していくには、いろいろな要素を組み合わせる必要があるため、シンセシオロジーの内容はまさにそれを世の中にきちんと示すことなのではないかということです。第2点は、成果を社会に還元するに当たって通るべき関門、それが大量生産なのか、標準化、規格なのか、また、コスト低減、エネルギー消費の低減のかなどを丁寧に示すことです。

そうすれば悪夢の時代に橋をかける役割を担おうとする者にとって大いに役立ちます。第3点目は、研究者、特に大学の先生方は、つい理論や計算のほうに、雑誌もサイエンスやネイチャーに向きがちであると感じています。そこで、研究者の側から社会に還元するための努力について、シンセシオロジーでステータスが与えられれば非常に意味のあることです。科学技術を振興する立場として科学技術の研究開発と知財戦略をどう結びつけていくのが課題になっていますので、そういうところにもシンセシオロジーが取り組んでいただければと思います。

木村 英紀 横断型基幹科学技術研究団体連合会長、独立行政法人理化学研究所理研BSIトヨタ連携センター長【パネルディスカッションコメント】

制御工学における制御理論では、1960年前後に、現代制御理論という非常に抽象的な概念が生まれました。これは制御系の設計に制御対象の数学モデルを使う非常に数学オリエンテッドな方法です。アメリカでも軍と宇宙を除けば、産業界ではほとんど使われませんでした。



それが日本でも使われるようになった決定的な理由の1つは、ロボスタ制御が発達したからです。ロボスタ制御はモデルが不確かでもいいから使える理論で、これを一生懸命やったからです。実際の工場で動いているプラント、あるいは製品になっている制御系というのは、ごちゃごちゃした、泥くさいものですが、それでもちゃんと理論を使って設計できることが示されたのです。現在では、制御理論が非常にたくさん使われ、例えば、ロボットの歩行というのは制御理論そのものになっている感があります。

さて、シンセシオロジーに期待したいのは、理論が出てきて、それが使えるためには何を克服したらいいのかということです。学問論の視点から述べますと、まず議論になるのが認識科学と設計科学です。認識科学というのは伝統的なサイエンス、特に自然科学を中心とした世界を知るためのサイエンス。一方、設計科学は対象を構成するためのサイエンスでシンセシオロジーと相通ずるものがあります。認識科学の方々が世の中では圧倒的に強く、ペーコン以来の確立された方法論を持っています。彼らは仮説を立てる、その仮説を実験によって検証するというループを回し、間違っていれば次の仮説を立てます。一方の設計科学には対応するものがあるのか。ペーコン流の仮説、検証のループを回すのに対応する設計科学の方法論、これが実は

ないところが、設計科学あるいは構成学の弱みになっています。設計科学にもそれに対応するものがあると言っている方もいます。事実命題に対して価値命題というのを作る。価値命題を、物を作ることによって試して、価値命題が満たされるか満たされないかでループを回すというような考え方です。

横幹連合も「横幹」という雑誌を去年から出しました。また、横幹連合はコンファレンスを隔年、総合シンポジウムも隔年でやっています。そこでは、本当にいろいろな学会の人たちが出てきて、議論が発展しています。シンセオロジーのコンファレンスもやられたらいいかでしょう。そのときには横幹連合も呼んでいただければありがたいです。もう1つ、実は私ども「コトづくり宣言」というのを横幹連合で発しました。これはモノづくりもいいけれども、これからはコトづくりが必要ではないかというものです。「コトづくり」は悪夢の時代を乗り越えるための方策にもなりえるのではないのでしょうか？

上田 完次 東京大学教授【パネルディスカッションコメント】

シンセシスとアナリシスを整理してみますと、まず、物質の根源を解明するというのは全体としての存在が既にあるわけですから、まさに分解していった、それは何かということ、つまりアナリシス・バイ・アナリシス。アナリシスというのは、分析と同時に、理解したい、わかりたいという意味も含んでいて、シンセシスは、統合する、構成すると同時に、何か作るということを含んでいます。つまり、方法論としてのアナリシスとシンセシス、それから対象としてのアナリシス、シンセシスという見方があるわけで、4つの象限が描けます。シンセシス・バイ・アナリシスという場合は、分析的な学問というものがあるって、それを合成して新しいものを作るという立場。現状の工学的なものはそれにのっとっています。それが正しいかどうかは、世の中に出して、市場でセレクションされ、役に立つかどうかで検証されます。アナリシス・バイ・シンセシスでは、失敗や間違いを含めて何かをやってみる。それで科学的な発見をするような研究者も出てきます。合理的な、演繹的な手法では、この試みというのは、演繹的に理屈があって、これだからこれをやるということでのやるわけです。シンセシス・バイ・シンセシスというのは、理屈はわからないけれども、どれだけの合理性を持って試行錯誤できるか、そのあたりが1つの重要なシン



セシスというものの方法論の「そうでないものではない」ということを主張できる根拠がありそうな気がします。

人間というのは何か新しいものを作るということと、不思議に存在するものを不思議だから理解したいという両方があります。シンセオロジー誌で全てをターゲットにするというのであれば、存在しているものの不思議を解明するときに、個別学で到達する深さ以上に、バイ・シンセシスでそれができるのかというところができたらすごいです。それから、新しいものを作るということも、理屈は何であれ、世の中にはいろいろ有用なものができてきているわけですから、それに対してシンセシス・バイ・シンセシスでもって、社会にとってより有益なもの、経済的価値も含めた価値を生み出すことができるのか、それらがこのジャーナルの中から出てくる、あるいは、そういう論文を扱ったということができればすごいなと、少し期待を込めて気になっています。

前田 拓巳 株式会社島津製作所技術推進部部长【パネルディスカッションコメント】

企業においては、本当の意味での基礎研究はなかなかやる余裕はありませんが、5年先10年先をにらんだ研究、それを使った先端的な、非常に挑戦的な製品を開発しようとした場合、産学の連携で国のプロジェクトなども利用しながら研究して、その成果を新しい製品、画期的な製品に結びつけようという動きが大きくなってきました。ただ、こういうものが終わった段階ですぐに新製品が出るわけではありません。やはり新しい製品であればあるほど、いきなり市場に出すのではなく、例えばユーザーのところに行ってベータサイト評価やいろいろな実証データを得ていく、その中でデータを積み上げ、性能を確認していくことが必要になります。先を見た研究であればあるほど、それを製品に結びつけるまでの間に時間的なギャップが存在します。企業にとって将来非常に大きな製品になるであろうという研究、このあたりに「悪夢の時代」があるだろうと思います。



「島津評論」は1940年に発刊されました。古い歴史はありますが、企業の技術誌ですから、やはりほとんどが新製品の技術紹介という内容になっています。できるだけお客様に有効性をアピールして使っていただくというのが基本的なスタンスです。他企業のいろいろな技術誌と比べると技術寄りの色彩の強い雑誌で、年2回発行しています。例えば、医療とか環境分析とかの特集を組み、特集論文と

一般論文という形で出しています。毎号10編から10数編の論文を掲載し、約3000部をいろいろな機関や社内に配付しています。技術誌はいろいろなビジネストークに使ったり、共同研究するときの取っかかりの資料とすることで、別刷りも用意して活用しています。

シンセシオロジーには、研究開発の成果を社会に活かすための方法論を記すという目的があるようですが、シナリオをきっちり作って研究するという姿勢は、当社の中の研究部門の特に若手の教育にも非常に意味があるのではないかという気がします。企業の研究部門は、研究のための研究といいますが、本当に研究が企業にとってどういう役に立ち、最後にどういう形になるのかを明確にイメージして、そのために最短距離でいくにはどういうシナリオで研究していくのか、何を押さえていかなければいけないのかを、ともすれば余りよく考えないで研究をしているというのがまま見られます。やはり研究をするときには、研究者が自分なりに十分考えた上でシナリオを作ってやってみる、だめだったらまた考え直すという、常にそうやって考えて研究をする、開発をするということが必要になってきます。そういう考え方を教え込むのに、シンセシオロジーは非常に役立つのかなと思ってきました。

持丸 正明 産総研デジタルヒューマン研究センター副研究センター長【パネルディスカッションコメント】

産総研の研究の1つの特徴は、要素技術を研究するだけではなく、それらを組み合わせ構成してみるということです。私の例では構成したものを実社会に出す、そして実社会で動かした結果を観測、分析してやることです。私は足の形の研究をずっとやっていて、ある企業と一緒に足の形を測る機械を開発しました。世界中で1万足ぐらいのデータをアーカイブし続けていますが、なかなか終わりません。実際に社会に出してみると、わからない問題がようやく見えてきて、それに対して技術開発や必要なときは政策提言をしたりして動かなくてはいけない、つまり「手離れ」悪く研究をする、面倒見続けるということになります。



シンセシオロジーでの査読についてはオープンになる査読は初めてで、まず緊張しましたし、かなり多くの時間を費やしました。著者と率直に話し合い、こんな点をもう少し強調すると面白いのではないかとということも含めて、査読のやりとりはなかなか面白いと感じました。一方、執筆を依頼されたときは、また所報を作るのかと思いましたが、

説明を聞いてみるとコンセプトが面白く、大変新しいことをえらく古い方法、つまり論文誌という方法でやるのだなと思いました。実際書いてみて難しかったのは、研究プロセスを一般化するために書くということ。研究上でどうやって手段を選び、構成していったかという方法論は書いたことがありませんでした。査読者とのやりとりも踏まえながら改めて考えてみると、どうもあまり合理的ではなかったかなとも思いました。それから、一般化は、残念ながら自分でもできたような気はしません。また、学術性を担保しつつ、異分野の読者にもどうしたら面白いと感じていただけるか、読者の理解をどう得るかは、やはり執筆者として苦労しました。技術的に難しかった点の1つは、企業との守秘情報をどう取り扱うかということで、共同研究先企業と率直に話をし、判断しながら論文を構成しました。

シンセシオロジーそのものが悪夢の時代を迎えないようにするのが大事です。アーカイブすれば構成学は自然と構成されるのかということ、そうではありませんし、一般論を抽出し切れないところもあります。そういうところをワークショップとしてやってみると面白いのではないのでしょうか。シンセシオロジーのレベルとかステータスを守るために、厳しい査読をしなければならないケースも出てくるでしょう。そういうことも含めて、まだまだ乗り越えなければならない山が幾つかあると感じています。

赤松 幹之 シンセシオロジー編集委員会編集幹事【パネルディスカッションコメント】

新ジャーナルに名前をつける時、研究成果を社会に活かすには統合や構成がキーワードになると考え、「構成」に対応するギリシャ語のシンセシスに、「学」を表すロジーを付け「シンセシオロジー」にしました。シンセシオロジーは新しいタイプの学術誌と言えます。シーズとして転がっている研究成果を実際に使えるようにするためのプロセスやどう育てたらいいか、すなわち方法論を論文という形で収録するので、知の共有を行うのがジャーナルという媒体だとすれば、物事を構成していく方法論を記録に残し、土台となるものをつくりたいというのがシンセシオロジーの基本的な考え方です。シンセシオロジーでは全分野を対象に、どういうふうに構成して社会の役に立てるようにしていくか、そういうことの共通的な方法論を見出すというのがポイントです。また論文の査読プロセスと査読者の氏名を公開しています。公開することによって査読者側は言わば読者の代表の立場



になり、研究成果の使われ方が読者から見て十分納得できるものかどうかという観点で論文を読むのです。読者から見て一体何が大事なのかを考えながら査読者は意見を著者に返し、著者との意見交換を通じて分野外の人でも読めるストーリーのしっかりした論文がまとまります。

さて、従来の研究者というのは、正しく分析し、正しい方法論で確実に結論を出していく、いわば厳密に科学的な方法論を適用して真理を見出す能力がある人だと思のですが、それに対して、社会に科学的な知見を役立てるといふ観点からシンセシオロジーの論文を書ける人は、科学的な発見を社会にどのように持って行くと社会に役に立つかを意識して研究のできる人間となります。社会に役に立つためには何をしなければいけないかを強く意識する、指向性がはっきりしている人ですし、かつ、全体を見渡して、この成果に加えるためあと何をしなければいけないか、そういう研究を進めるパースペクティブな能力を持つ研究者がシンセシオロジーに論文を書けるといいます。

このように考えますと、シンセシオロジーを、研究能力の1つとしての研究に対するパースペクティブ能力をアピールする場にも使っていただきたいと思います。それは大学の先生でも、企業の方でもいいです。企業では、自分の研究所の人間がこういう論文を書けるということは、その人が成果をいかにして次の研究につなげていけるかを考えられる、そういう能力を持っている研究者だと上司の方がわかっていただけるとか、そういう使い方も非常に大事なことではないか。これまで持っていた研究者に対する評価軸とは違う軸で研究者を評価するというところにシンセシオロジー使っていただけないだろうかと思います。

吉川 弘之 産総研理事長【総括・閉会挨拶】

研究の、あるいは研究者としての“悪夢”とは何なのかを考えると、方法論がなかなか見えてこないという状況に遭遇していることです。こういう状況は工学系の人たちは皆経験していることですが、現代という時代そのものが方法論の見えない状況にあるような気がしています。なぜかという、今、環境の時代が来たと言うものの、環境問題は、昔から指摘され、警告されてきているのです。ただし、発見があり、事実が解明され、警告があっても、どう行動すべきかはまだわかっていません。問題を解決する方法が分からないという状況が社会全体として起こってしまっているということです。普通、温暖化がわかればそれを停止する方法がある



というのが調和的な構造ですが、そうならないところに科学の1つの不十分性、科学の考え方の限界があります。人間と自然との関係はどうなのかを扱う自然観という言葉があるように、人工物とはいったい何なのかを総体として考える人工物観がなければなりません。人間が人工物を作ってきたことによって今の状況があるのですから。

私たちがぶつかる思考過程とか研究過程の“悪夢”が社会現象にまでなってくると、それをやはり一人ひとりの行動に立ち返って考えてみる必要があります。どうすればいいのか、今日のディスカッションで面白かったのは「手離れの悪い研究」という表現です。研究成果を世の中に出してみると、それが1つの新しい研究テーマになって、後はもう知りませんとは言えなくなります。そこにはやはり循環という経路があり、研究が研究論文として出て行くだけではなく、その結果がどうなったかという世の中から再び返ってくることを見届けるという基本的な態度が必要です。したがって、大きな社会的な仕組みの中では、ある人工物が社会で使われ、その結果がどうなったかを観察し、ある種の価値判断を下して次に何を提案していくか決めなければなりません。

さて、このような様々な背景のあることを基にして「シンセシオロジー」を見てみますと、人間の行為、研究者の行為が社会の利益や価値とどう結びついているか、そういう第2種基礎研究の過程を可視化するための雑誌だと位置づけられます。その書き方はまだ確定していませんが、執筆者と査読者の議論を通じて両者が対話するという“進化”の構造を持っています。これは明らかに1つの情報の循環であり、ループを実現する1つの手段だと言えます。「シンセシオロジー」は1つの雑誌にすぎませんが、科学のあり方、あるいは研究と社会との関係ということについて一石を投じる意味があることを、ぜひご理解いただきたいと思います。



編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿を受け付ける。

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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、著者に英語版への掲載のための翻訳版の作成を依頼し、翻訳されたものを英語版に掲載する。

2) 原稿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。表紙には記事の種類(研究論文か論説)を明記する。

3.2 原稿の構成

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。

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

3) 原稿は、図・表・写真を含め、原則として刷り上り6ページ程度とする。

4) 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。

5) 和文要約は200文字程度とし、英文要約(75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。

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

7) 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。

8) 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。

9) 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、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。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

1) 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。

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

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

5) 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、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、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

原稿の提出は段刷文書1部および電子媒体に原稿提出チェックシートを添付のうえ、下記宛に提出する。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先:

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board
Published by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono
Senior Executive Editor: N.Kobayashi, A.Yabe
Executive Editors: M.Akamatsu, K.Naito, H.Taya
Editors: A.Kageyama, K.Ohmaki, K.Igarashi, E.Tsukuda, M.Tanaka,
H.kuriyama, Y.Owadano, T.Shimizu, H.Tateishi, M.Mochimaru,
N.Murayama, S.Togashi, K.Mizuno, H.Ichijo, A.Etori, H.Nakashima,
K.Ueda, P. Fons

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board
c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST
Tsukuba Central 2, Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212
E-mail: synthesiology@m.aist.go.jp
URL: <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

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

Abstract of Research Papers

Development of regenerative medical technology working toward practical application

– Construction of human cell processing system in view of safety for the purpose of clinical application –

Hajime Ohgushi

Research Institute for Cell Engineering, AIST
Nakoji 3-11-46, Amagasaki 661-0974, Japan
E-mail: hajime-ohgushi@aist.go.jp

Recently, technology of regenerative medicine which utilizes cells after their proliferation and differentiation process has drawn attention. In order to utilize the technology for clinical application, safety issue of the process as well as usefulness of the cells should be confirmed. We analyzed the issues and succeeded in utilizing the cells after proliferation / differentiation process for the purpose of therapeutic applications.

Development of highly-active hydrodesulfurization catalyst for sulfur-free diesel production

– Full research from in-house laboratory catalyst to commercial catalyst –

Yuji Yoshimura* and Makoto Toba**

*Research Center for New Fuels and Vehicle Technology, AIST
Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8565, Japan
E-mail: y.yoshimura@aist.go.jp

The need to reduce diesel exhaust emissions requires stringent specifications for diesel, in particular, sulfur content less than 10 ppm. We have recently developed a highly-active hydrodesulfurization (HDS) catalyst supported on Al_2O_3 using some chelating agents. Newly developed catalyst was quite unique in structure, i.e., consisting of highly dispersed and highly crystalline MoS_2 nano-particles, etc. This in-house $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst was further developed as a newly commercialized HDS catalyst of LX-NC1.

Development of massive synthesis method of organic nanotube toward practical use

– Integration of molecular design, molecular synthesis and safety assessment for materials having market competitiveness –

Masumi Asakawa*, Masaru Aoyagi, Naohiro Kameta, Masaki Kogiso, Mitsutoshi Masuda, Hiroyuki Minamikawa and Toshimi Shimizu

*Nanotube Research Center, AIST

Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8565, Japan
E-mail: masumi-asakawa@aist.go.jp

Since organic nanotubes have excellent dispersibility in water, and can encapsulate guest substances, such as proteins and nucleic acids, they are expected to be applied to various fields. We have planned and implemented a strategic scenario to meet various requirements, such as large quantity synthesis, applications, price competitiveness, safety, etc. to put organic nanotubes to practical use. We have designed and synthesized the most appropriate amphiphilic molecules for the formation of organic nanotubes and developed massive synthesis method of organic nanotubes by integrating design, synthetic, and self-assembly technologies.

Development of flexible-printable device processing technology

– For achievement of prosumer electronics –

Toshihide Kamata*, Manabu Yoshida, Takehito Kodzasa, Sei Uemura, Satoshi Hoshino and Noriyuki Takada

*Photonics Research Institute, AIST

Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8565, Japan
E-mail: t-kamata@aist.go.jp

We have worked on the development of the flexible-printable device processing technology as a processing technology of information terminal device that can make the best use of user's individuality. We have succeeded in the development of several low-temperature printing technologies for flexible active devices such as flexible displays and circuits. In this research, we have paid attention especially to the social requirements for the technology, and positions of respective technologies in the total set-up concept. We believe that it would contribute to the expansion of information technology in the world.

A new density standard replaced from water
– Using silicon single-crystals as the top of traceability in density measurement –

Kenichi Fujii

National Metrology Institute of Japan, AIST

Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8563, Japan

E-mail: fujii.kenichi@aist.go.jp

In order to measure and calibrate the density, volume, and concentration of substances, water has been used as a density standard. Not only as a density standard, but also for measuring other properties, such as specific heat and surface tension, water is often used. Since it became evident that the density of water changes depending on its isotopic compositions and dissolved gasses in it, silicon single-crystals have been considered to be more stable materials for measuring the density. Recently for clarifying the traceability in measurement and improving the reliability in the products, more precise density measurements have been needed in the society and industry. Considering these circumstances, AIST established a more precise density standard system using silicon single-crystals as density standard reference materials. Shifting the density standard from liquid to solid introduces not only an improvement of uncertainty in measurement, but also

new evaluation techniques for material science and new metrological standards for the next generation.

A rationalization guideline for the utilization of energy and resources considering total manufacturing processes

– An exergy analysis of aluminum casting processes –

Hideki Kita*, Hideki Hyuga and Naoki Kondo
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST
Anagahora 2266, Shimo-Shidami, Moriyama, Nagoya
463-8560, Japan

E-mail: hideki-kita@aist.go.jp

For reducing the environmental burden as well as improving the efficiency in manufacturing, it is necessary to find the resources and energy consumption process which starts from an individual stage and spreads to overall. In this study, first, exergy analysis was conducted on the production systems of ceramic and steel heat-tubes, which are used in molten aluminum, and they were compared. Secondly, the same analysis was performed on the whole aluminum casting processes. On the basis of these results, rationalization guideline for the effective use of resources and energy in casting process could be obtained.

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

1. Types of contributions

Research papers or editorials should be submitted to the Editorial Board.

2. Qualification of contributors

There are no limitations regarding author affiliation or discipline as long as the content of the submitted article meets the editorial policy of *Synthesiology*, however, 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

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 in. All articles will also be published *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.

2) The manuscript shall be prepared using a word processors or similar devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheets of paper. The category of article (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheet.

3.2 Structure

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).

2) Title, abstract, name of author(s), and institution/contact shall be provided.

3) The length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.

4) 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.

5) The abstract should be about 200 Japanese characters (75 English words).

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

7) The article submitted should be accompanied by profiles of all authors, 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 contribution to the paper are included.

8) Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly with name 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 a part of the article.

9) If there are reprinted figures, graphs or citations from other papers, permission for citation, if needed, should be clearly stated and the sources should be listed in the reference list. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

3.3 Format

1) The text should be in formal style. The section and subsection headers should be enumerated. There should be one line space at the start of paragraph.

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

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

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

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

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title of journal*, Volume(Issue), Start page-End page

(Year of publication).

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

4. Submission

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

Synthesiology Editorial Board
c/o Publication Office, Public Relations
Department, National Institute of Advanced
Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 2 , 1-1-1 Umezono, Tsukuba
305-8568

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

The submitted article will not be returned.

5. Proofreading

Proofreading by author(s) of articles after typesetting
is complete will be done once. In principle, only

revisions or correction of printing errors are allowed
in the proofreading stage.

6. Responsibility

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

7. Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

シンセシオロジーも号を重ねて第1巻第3号の発刊の運びとなりました。今回も広い分野から第2種基礎研究に関する多彩な論文を掲載することができました。執筆者・査読者を始め、関係された方々に厚く御礼申し上げます。

さて、今号では特別記事として、5月13日に秋葉原コンベンションホールで開かれた「シンセシオロジー」創刊記念シンポジウムの内容を紹介いたしました。当日は、会場満員の参加者(特に産業界からの方々を中心)にお集まり頂き、大変密度の濃いシンポジウムとすることができました。これも多様な分野の皆様からの大きな関心の表れであると考えており、講演者の方々を含めて参加者の皆様に対して深く感謝しております。

同シンポジウムでは、招待講演に加えてパネルディスカッションでもシンセシオロジーに対する熱い期待や注文が寄せられました。その中で、多くの方が発言しておられたことは「社会的な出口に結びつけるシナリオ」とそのための「構成的方法論」の重要性です。これらはシンセシオロジーの創刊に向けて特に我々が重視してきたことであり、正に第2種基礎研究の中心的課題であります。また、それを記述するシンセシオロジーの論文としても、これらを執筆要件として記載してあります。

これまでの論文の査読や編集委員会での議論の中で感じたことですが、執筆者の方々はそれぞれ「第2種基礎研究とは何か」ということを意識して論文執筆の様々な努力・苦労を重ねています。特に「社会的な出口に結びつけるシナリオ」については、よく考えて記述されていると考えられます。これは社会に役立つ

研究をするにはどうしたら良いかを常に意識して考える研究者としては当たり前のことかも知れませんが、それをシナリオとして記述できたことは画期的なことと考えられます。

その一方で、構成的方法論についてはまだまだ記述の形式が定まっていません。これには課題が大きく二点あるように思います。一点目は、第2種基礎研究の構成的方法論は極めて多様であり、方法論としての考え方・捉え方がまだ不明確であると言う点があります。二点目は、たとえ方法論として作り上げることができても研究の構成的プロセスをうまく記述することがそう容易ではない、と言うことではないかと思えます。これらはシンセシオロジーが巻を重ねることによって自ずと明らかになっていく面もありますが、やはり意識してその方法論を議論していく必要があると思えます。

21世紀の世界は、地球環境・資源・エネルギーと言ったかつてない大きな制約の中で持続的な発展を目指さなければなりません。そのためには社会的な出口を常に意識する第2種基礎研究のような研究の方法論が必要となります。それを記述するとともに、その知識を広く研究者・技術者・生産者・企業家ひいては社会が共有していくためにもシンセシオロジーの使命は大きなものがあります。

広い分野の多くの研究者・技術者の方々の積極的な投稿とディスカッションにより、まだ生まれたばかりのこのジャーナルを一緒に創りあげていくことへのご協力を是非期待したいと思います。

(編集副委員長 小林 直人)

Synthesiology 1巻3号 2008年10月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、矢部 彰

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：景山 晃、大蒔 和仁、五十嵐 一男、佃 栄吉、田中 充、栗山 博、大和田野 芳郎、清水 敏美、立石 裕、持丸 正明、
村山 宣光、富樫 茂子、水野 光一、一條 久夫、餌取 章男、中島 秀之、上田 完次、Paul Fons

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒308-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2 産業技術総合研究所広報部出版室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。