

# Synthesiology

熱物性データの生産と利用の社会システム

オープンイノベーションと先端機器共用施設

次世代型下水汚泥焼却炉「過給式流動燃焼システム」の実用化

オンデマンド材料開発を目指した材料設計システム

持続発展可能な大容量・低消費電力の  
通信ネットワーク実現に向けて

シンセシオロジー編集委員会

## 「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかせたままでは、その成果の社会還元を実現することは難しい。そのため、社会の側から研究成果を汲み上げてもらうという受動的な態度ではなく、研究成果の可能性や限界を良く理解した研究者自身が研究側から積極的にこのギャップを埋める研究活動(すなわち本格研究<sup>(注2)</sup>)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<sup>(注3)</sup>)の成果としての事実に基づく知識を集積してきた。これに対して、研究成果を社会に活かすために行うべきことを知として蓄積する、すなわち実証的知識を集積することを目的として、ここに新しい学術ジャーナルを発刊する。自然についての知の獲得というこれまでの科学に加えて、科学的知見や技術を統合して社会に有益なものを構成するための学問を確立することが、持続的発展可能な社会に科学技術が積極的に寄与するための車の両輪となる。

この「Synthesiology」と名付けたジャーナルにおいては、成果を社会に活かそうとする研究活動を基礎研究(すなわち第2種基礎研究<sup>(注4)</sup>)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<sup>(注4)</sup>を軸に、第1種基礎研究<sup>(注3)</sup>から製品化研究<sup>(注5)</sup>を連続的・同時並行的に進める研究を「本格研究 (Full Research)」と呼ぶ。本格研究 [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/information/honkaku/index.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/information/honkaku/index.html)
- 注3 第1種基礎研究： 未知現象を観察、実験、理論計算により分析して、普遍的な法則や定理を構築するための研究をいう。
- 注4 第2種基礎研究： 複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究をいう。また、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。
- 注5 製品化研究： 第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。

# Synthesiology 第7巻第1号(2014.2) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
<b>研究論文</b>	
熱物性データの生産と利用の社会システム — レーザフラッシュ法による熱拡散率の計測技術・計量標準・標準化・データベース — ・・・馬場 哲也、阿子島 めぐみ	1-15
オープンイノベーションと先端機器共用施設 — 共用施設が実現する協創場とその戦略的活用方策 — ・・・秋永 広幸	16-26
次世代型下水汚泥焼却炉「過給式流動燃焼システム」の実用化 — 新規下水汚泥焼却炉の開発における産総研の役割 — ・・・鈴木 善三、村上 高広、北島 暁雄	27-35
オンデマンド材料開発を目指した材料設計システム — 開発現場から生まれた新規な材料設計手法 — ・・・稲田 禎一、松尾 徳朗	36-42
持続発展可能な大容量・低消費電力の通信ネットワーク実現に向けて — ダイナミック光パスネットワークのためのトポロジ検討 — ・・・石井 紀代、来見田 淳也、並木 周	43-56
<b>編集委員会より</b>	
編集方針	57-58
投稿規定	59-60
編集後記	67
<b>Contents in English</b>	
<b>Research papers (Abstracts)</b>	
<b>Social system for production and utilization of thermophysical property data</b> — Measurement technology, metrological standard, standardization of measurement method, and database for thermal diffusivity by laser flash method — --- T. BABA and M. AKOSHIMA	1
<b>Open foundry to spur open-innovation</b> — Establishment of a foundry to realize an innovative cooperation platform and development of its sustainable management strategy — --- H. AKINAGA	16
<b>Practical use of an advanced sewage sludge incinerator, “turbocharged fluidized bed incinerator”</b> — The role of AIST in the development of a new system — --- Y. SUZUKI, T. MURAKAMI and A. KITAJIMA	27
<b>A novel material design method for on-demand material development</b> — A method born from a development field — --- T. INADA and T. MATSUO	36
<b>Towards large-capacity, energy-efficient, and sustainable communication networks</b> — Network topology research for dynamic optical paths — --- K. ISHII, J. KURUMIDA and S. NAMIKI	43
Messages from the editorial board	61-62
Editorial policy	63-64
Instructions for authors	65-66

# 熱物性データの生産と利用の社会システム

## — レーザフラッシュ法による熱拡散率の 計測技術・計量標準・標準化・データベース —

馬場 哲也\*、阿子島 めぐみ

レーザフラッシュ法による熱拡散率の計測技術の開発、計量標準と標準物質の整備、計測技術の標準化に体系的に取り組み、信頼性の高い熱拡散率データを効率的かつ迅速に社会に供給するシステムを実現した。レーザフラッシュ法を精密化するために開発されたレーザビームの均一化技術、高速放射測温技術およびデータ解析技術により実用測定装置による熱拡散率計測の不確かさが低減され、新規に制定された複数のJIS規格およびISO規格に反映された。さらにJIS規格の最新の改定に際しては不確かさの評価法と標準物質による校正法が記載された。このようなシステムにより生み出される熱物性データはデータベースに収録されインターネット公開されている。

**キーワード:**熱物性データ、熱拡散率、レーザフラッシュ法、計量標準、標準物質、計測技術の標準化、データベース、トレーサビリティ、不確かさ、知的基盤

### Social system for production and utilization of thermophysical property data

– Measurement technology, metrological standard, standardization of measurement method, and database for thermal diffusivity by laser flash method –

Tetsuya BABA\* and Megumi AKOSHIMA

The National Metrology Institute of Japan implemented a system to supply reliable thermal diffusivity data efficiently and rapidly to society. The system was born out of R&D on technology for thermal diffusivity measurement by using a laser flash method, by establishing a metrological standard and reference materials, and by standardization of measurement technology. Uncertainty in measurement of thermal diffusivity with practical apparatus was reduced using technology to homogenize the laser beam, a fast response infrared thermometer, and a curve fitting method to analyze temperature response curves. JIS and ISO standards were established based on the advanced laser flash method. In addition, methods to evaluate uncertainty in measurement of thermal diffusivity and laser flash device calibration by reference materials are described in the latest update of the JIS standard. Traceable thermophysical property data produced by this system are stored in a database system developed and operated by the National Metrology Institute of Japan (NMIJ), which can be accessed from the web.

**Keywords:** Thermophysical property data, thermal diffusivity, laser flash method, metrological standard, reference material, standardization of measurement method, database, traceability, uncertainty, intellectual infrastructure

#### 1 はじめに

先進的なデバイスや機器、構造体においては、それらの熱的な特性が機能や安全性の限界を決めることがしばしば起こる。例えば高集積化した電子デバイスに機能を発揮させるためには、微小な空間に集中配置した多数の素子が発生する大量の熱を効果的に取り去る冷却機構が必要である。大気圏へ再突入する宇宙往還機が過酷な空力加熱に耐えるためには、その外壁に超高温下で断熱性能を発揮する特別の材料が必要である。原子力発電所の過酷事故を解析するときには、核燃料とそれを取り巻く炉心の温度挙動を超高温に至るまで正確にシミュレーションする必要がある。化石燃料の消費と炭酸ガスの排出を減らすには社会全

体で熱エネルギーの利用効率の改善が必要であるが、そのためには優れた断熱性能、伝熱性能、蓄熱性能を持った材料を適切に使い分けていく必要がある。

このようにデバイスや機器、構造体に安全で優れた機能を発揮させるためには、あらかじめ信頼性の高い熱設計を行っておくことが必要である。熱設計では関係するすべての材料と部材に関して正確な熱物性データが既知でなければならない。しかしながら材料の熱物性データを入手しようとする多くの困難に遭遇するのが現実であった<sup>[1][3]</sup>。

熱物性データが必要になった時、まずデータブックやデータベースで関心のある材料について熱物性データを探すことになる<sup>[4]</sup>。しかしながら当該材料に関する熱物性データ

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3  
National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan \* E-mail: t.baba@aist.go.jp

Original manuscript received January 10, 2012, Revisions received August 16, 2013, Accepted August 22, 2013

が見当たらない場合も結構多い。あったとしても当該材料とちょうど同じものに関するデータかどうか明確でない場合も少なくない。目安としての熱物性データが欲しい場合にはそれでもよしとされるが、機能を限界まで発揮させたり安全性を確実に担保したりするには不十分であり、自ら熱物性を測定するか専門機関に測定を依頼する必要がある。一方測定を実際に行うにしても、適確な測定法の選択や得られた熱物性データの信頼性についての情報は十分ではなく、社会的に合意された指針が提示される状況には至っていない<sup>[12]</sup>。

電子技術、精密・光学技術、環境・エネルギー技術、航空宇宙・原子力技術等の分野で種々の先進的材料が開発されているが、それらについて信頼性の高い熱物性データを入手することは現在でもなお容易でない。このような背景のもと、産業技術総合研究所（以下、産総研）は過去30年近くにわたって熱物性計測と標準物質に関する研究を行ってきたが、研究シナリオを設定するに当たって最も重視したことは、産総研が社会の中でいかにして公的な役割を果たすかであった。すなわち高精度の熱物性データが、計量標準を担う産総研においてのみ生産されればそれでよしとするのではなく、日本および世界の多くの専門家が信頼性の高い熱物性データを効率的に生産でき、かつそれらが社会の中で効果的に利用されるような技術基盤、すなわち「熱物性データの効率的生産と効果的利用のための社会システム」とでもいうべきものを構想し構築することを研究の最終目標においた<sup>[3]</sup>。

目標達成のために産総研はさまざまな熱物性に関する研究活動を行ってきたが、この論文ではその中から固体材料の熱拡散率を取り上げ、その精密計測技術、計量標準、標準物質、実用計測方法の標準化に関する研究シナリオと研究結果を述べる。また広くユーザーの要請に応えるために、産総研が熱物性を測定し標準物質を頒布するというサービス体制を整えたことにも言及する。実用計測技術に関しては国際標準化機構（ISO）の規格と日本工業規格（JIS）を作成したことに触れる。産総研では熱物性のデータベースも合わせて研究開発してきたが、この論文では紙数の関係でこれには触れず文献を挙げるにとどめた。

## 2 熱物性の計測とデータ

### 2.1 熱物性とは

材料・物質の熱的特性を数値で表したものが熱物性値である。熱エネルギーの移動と蓄積に関わる断熱性能、伝熱性能、蓄熱性能等は熱伝導率、比熱容量、熱拡散率、熱浸透率等の熱物性値によって表される。それぞれの熱物性値は以下のように定義される<sup>[4]</sup>。

熱伝導率（ $\lambda$ ）：伝導による熱の伝わりやすさは熱伝導率で表され、物質中を流れる熱流密度の温度勾配に対する比率で定義される。単位は $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ である。

比熱容量（ $c$ ）：単位質量当たり物質の温度を1 K上昇させるのに必要な熱量である。単位は $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ である。

熱拡散率（ $a$ ）：熱伝導率 $\lambda$ 、比熱容量 $c$ 、密度 $\rho$ から以下の式により定義される。

$$a = \lambda / (c\rho) \quad (1)$$

熱拡散率の単位は $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ である。断熱された物体の一部を短時間加熱して他の部分より温度を高くすると、時間の経過とともにその熱が物体全体に広がり最後に均一温度となるが、このような温度が均一になっていく速さは熱拡散率に比例する。

熱伝導率 $\lambda$ を直接測定することが難しい場合には、熱拡散率 $a$ 、比熱容量 $c$ 、密度 $\rho$ を別途測定することにより(1)式を使って計算で熱伝導率が求められる。

熱浸透率（ $b$ ）：熱伝導率 $\lambda$ 、比熱容量 $c$ 、密度 $\rho$ から以下の式により定義される。

$$b = \sqrt{\lambda c\rho} \quad (2)$$

熱浸透率の単位は $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1/2}\text{K}^{-1}$ である。直感的には十分厚い物体の表面を一樣に加熱したときに物体が熱を吸収する能力として理解される。鉄のように熱伝導率と密度が大きい材料は熱浸透率が大きく、加熱面の温度が上昇しにくい。逆に熱伝導率が小さく密度も小さい断熱材は熱浸透率が小さく加熱面の温度が上昇しやすい。

熱伝導率 $\lambda$ 、体積熱容量 $c\rho$ （＝比熱容量×密度）、熱拡散率 $a$ 、熱浸透率 $b$ の4つは互いに独立でなく、それらのうちの任意の二つの量が定まれば、残りの二つの量も決定される。またこれらの熱物性値には温度依存性があるので、温度の関数として表す必要がある。

電気・電子物性や力学物性、光学物性は、それらの定義通りの条件で測定することが比較的容易であるのに対して、熱物性は前節に述べた定義通りに正確に測定することは容易でない。その理由は、真空中でさえ熱放射でエネルギーが伝達されてしまうように、完全な断熱が現実には容易でなく、その結果熱流を正確に制御することが難しいことにある。そのため熱物性の測定法は新しい技術を取り入れながら、現在でも研究が盛んに行われている。

### 2.2 計測のトレーサビリティと標準物質

1957年にソ連が世界発の人工衛星スプートニク1号の打ち上げに成功し、米国は宇宙開発においてソ連に先行されたこと（スプートニクショック）に刺激され、科学技術の競争力を基盤に遡って底上げすることに国策として取り組んだ。スプートニクショックは米国において品質管理と計測のトレーサビリティの重要性が認識される契機となった。

国立標準局 (National Bureau of Standards, NBS) では1960年代に国家的な計測のトレーサビリティの実現に対する要請に応えるために、熱物性を含む広範な分野において標準物質の開発<sup>[5]</sup>や標準データ<sup>[6]</sup>の整備に組織的に取り組んだ。

国立標準局は1988年に国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) に改組されたが、今日では、国立標準技術研究所は熱物性分野において新規の標準物質を開発するポテンシャルを失い、在庫が切れた標準物質を補充できない状況になっている。

欧州においても熱物性標準物質の開発が行われ、固体材料については欧州標準物質計測研究所 (Institute for Reference Materials and Measurements, IRMM) が1990年代に3種類の熱伝導率または熱拡散率の標準物質を供給開始した<sup>[7]</sup>。

日本では、長さ、質量、時間、電気、温度等の基本量に関しては国家標準にトレーサブルな計測器で測定すれば、どの機関で測定しても計測結果は不確かさの範囲で一致するような社会システム (トレーサビリティ体系) がよく整備されている。一例をあげると計量法校正事業者登録制度 (Japan Calibration Service System, JCSS)<sup>[8]</sup>のもとで認定された事業者によって校正の行われた温度計を適切に使用した場合、測定した温度値は使った温度計の種類や測定者によらず、互いに整合した普遍的な値が期待できる。

組立量である物性量においても、密度や粘度については計量法に基づいて標準の整備と供給が実現されている。一方、熱伝導率や熱拡散率についてはトレーサビリティ体系は未整備であったが<sup>[2][3]</sup>、産総研の取り組みにより現在では緻密な材料の熱拡散率標準物質および熱伝導率標準物質を頒布できる状態になった<sup>[9]</sup>。

熱物性のトレーサビリティと計測に関する学会、国際度量衡委員会、旧通商産業省工業技術院計量研究所の取り組みは当論文末尾の付録を参照されたい。

### 2.3 熱物性データ整備の歴史

材料・物質の熱物性データを収集し、広範なユーザーに体系的に提供していくことに関して、欧州と米国は長い歴史を有している。ドイツでは19世紀末から熱物性を含む物性データの収集と評価に組織的かつ継続的に取り組み、その成果を編集しデータ集としてランドルト・ベルンシュタイン物理化学データブックを刊行した。今日ではそのデータはデジタル化され、SpringerMaterials (Landolt-Börnstein Database) という名称のオンラインデータベースとなっている<sup>[10]</sup>。

米国では1920年代に国立標準局の主導により International Critical Tables が編集された<sup>[11]</sup>。米国議

会は1968年に“Standard Reference Data Act”を成立させ、米国政府は世界初のデータ評価プログラムの開始を決定し、国家標準データシステム (National Standard Reference Data System, NSRDS) が発足した<sup>[12]</sup>。その一環として熱物性分野においてはパデュー大学熱物性研究センター (Thermophysical Property Research Center, TPRC) が膨大な熱物性データの収集と評価を行い、全14巻に及ぶ熱物性データブック (TPRC データシリーズ) を発刊した<sup>[13]</sup>。

このデータブックは、単体元素等の基礎的な物質に加えて実用材料を中心とした広範な材料・物質に関する熱物性のデータを文献から収集するとともに、一部のデータについてはそれらの信頼性を評価して推奨値を提供した体系的かつ継続的な取り組みの成果である。ただ収集されたデータには十分に確立されていない測定法によるデータが含まれていること、測定装置が適切に校正されていない場合があること、測定した材料・物質を同定する情報 (キャラクターリゼーション情報) が十分でないことなどの理由から、データの信頼性の評価が課題となっていた。

パデュー大学熱物性研究センターは米国における材料開発が頭打ちになった1980年代に、情報数値データ解析合成センター (Center for Information and Numerical Data Analysis and Synthesis, CINDAS) として再編され活動を継続したが、データの収集や評価に対する取り組みは限定的となった。現在は、そのデータは Limited Liability Company である CINDAS LLC に引き継がれ、データベース化されている<sup>[14]</sup>。

その後、エレクトロニクス材料、環境・エネルギー材料、ライフサイエンス関連材料に対する熱物性データのニーズが増してきたが、今日に至るまで TPRC データシリーズに匹敵する包括的なデータブックの編集・出版は行われていない。

固体材料に関する熱物性分野では国立標準局の熱物性標準物質とパデュー大学情報数値データ解析合成センターのデータ集とが NSRDS の大きな成果であったが、その間の連携は必ずしも十分ではなかった。市販されている多数の熱物性測定機器が熱物性標準物質により校正・検証され、その結果信頼性の高い熱物性データが広く生産されてデータ集に反映されると言う状況までには至らなかった。

### 2.4 熱物性データの信頼性と計測技術の課題

熱物性データを取得するためによく使用される測定方法であっても、測定装置の取り扱いが複雑であったり、測定の信頼性 (精度) が低かったり、あるいは信頼性の確認が容易でなかったりすることがある。同じ試料に対して同一の測定方法で取得した熱物性データであっても相当なばら

つきを示したり、測定方法が異なればばらつきは一層大きくなったりする状況が生じていた<sup>[3][15][16]</sup>。

熱物性データが個々の測定装置や測定機関を超えて普遍的な情報となるためには、標準化された仕様を満たし、標準化された手順に従って測定を行う必要がある。さらに測定装置を国家標準器によって値づけられた標準物質により校正するか妥当性検証を行うことによって計測のトレーサビリティが確保される。このような状況を実現するためには国家標準器と標準物質の整備、測定法の標準化(JIS規格、ISO規格等の整備)および規格に対応した実用計測器の開発の三位一体の取り組みが求められる<sup>[17]</sup>。

### 3 シナリオの設定

研究の初期段階において我々は、多くの技術者・研究者が必要となしに十分小さな不確かさで迅速に熱物性データを入手できるような社会システムを構想し、図1に示す研究のシナリオを設定した<sup>[3][15]</sup>。

図1のシナリオにおいて、第1に、該当する熱物性の計測技術の精密化と、それに基づく国家標準器と標準物質の整備を掲げた。第2に、標準物質には均質であること、長期にわたって性質が変化しないことなどを要件として定めた。また要件を満たした材料について熱物性を計測してその標準値を付与するとともに、標準値の不確かさを評価して社会に供給することとした。

第3に、計測技術の標準化すなわち規格整備を掲げた。熱物性の計測方法や手順がJISやISO等の規格に規定されていれば、上記の標準物質を用いて計測器を校正・検証

することにより、計測の不確かさの評価と国家標準にトレーサブルな熱物性計測を実現できるからである。

第4に、材料キャラクタリゼーション技術を取り上げた。物性データが温度、圧力等状態変数の測定データと本質的に違う点は、測定結果が個々の測定対象だけでなく、同一のキャラクタ(組成、構造等)を持ち同一の状態(温度、圧力等)にある材料に対しては一義的に決まることである。しかしながら流体の物性が組成によって定まると異なり、固体の場合にはたとえ同じ組成の材料であっても結晶構造等の材料キャラクタが異なれば熱物性値が大きく変化することがある。特に熱伝導率、熱拡散率等の輸送性質に関しては結晶構造や粒界等に敏感に依存して変化するので高度のキャラクタリゼーションが必要となる。

第5に、測定された熱物性データを材料の組成・構造の情報(キャラクタリゼーション情報)とをセットにして熱物性データベースに収録し、信頼性の高い熱物性データを大量にインターネット上に公開し広範なユーザーが速やかに利用できることを掲げた。

さらにこれらにデータ評価技術とデータマネジメントシステムを加え、図2に示したシナリオに基づいて信頼性の高い普遍的な価値を有する熱物性データを組織的かつ継続的に生み出すことを目標とした。また熱物性の測定値と材料のキャラクタをセットにして収録したものを「高水準データセット」と呼んだ。このデータセットが社会の中で広く利用されることを研究の最終目標とした。

長さ、質量、時間、電気、温度等の基本量の物理計測の分野では、標準器を移送して、より上位の標準器で校正することによって計測値のトレーサビリティを確保することが一般的である。化学計測の分野では標準物質を移送することによって計測値のトレーサビリティを確保する。それに対して熱物性標準を含む材料計測の分野においては、同様に標準器や標準物質といった器物を移送してトレーサビリティを確保することは可能であるが、それだけでなく、「標準データ」と「材料キャラクタ」の二つをセットにした情報を提示するだけで(すなわち、何らの器物を移送することなく)トレーサビリティを確保できる可能性がある<sup>[16][18]</sup>。

このシナリオにおいては不確かさ評価とトレーサビリティの概念を、計測から標準物質へ、次に標準データへ、さらに一般の物性データへと展開して順次適用範囲を広げていくことも目指した。こうして最終的に一般の熱物性データの信頼性が保証される。このプロセスを図2に示したが、その実現のためには、材料キャラクタと物性値の相関を定量的に表現する新規の研究開発が必要となる。

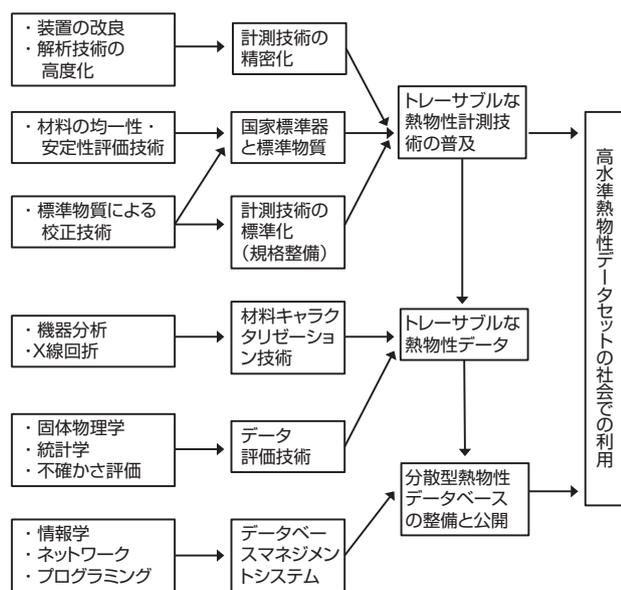


図1 熱物性データの生産と利用の社会システムを構築するためのシナリオ

## 4 レーザフラッシュ法による熱拡散率計測

### 4.1 レーザフラッシュ法の選択

熱伝導率と熱拡散率は式(1)に示されるように比熱容量と密度を介して一定の比例関係にあるので、熱伝導率を測定することと熱拡散率を測定することは補完的であり、どちらを直接測定するかは状況によって選択することができる。

熱伝導率は一般に定常法で測定される。定常法においては時間的に変化しない一定の熱流を試料に流し、そのとき試料に生じる温度勾配を測定して熱伝導率を求める。一方熱拡散率は一般に非定常法により測定される。非定常法では、温度勾配を付けた試料の温度分布が時間とともに均一になっていく緩和時間を測定して熱拡散率を求める。

定常法による熱伝導率測定では試料に温度計を設置して温度の絶対値を測定する必要があるため、試料の設置操作が煩雑なことが多い。このため大きなサイズの試料が得られる材料に適しており、均質でない複合材料等にも適用可能である。また熱源、ヒートシンク、温度計が試料に接触するので、高温で測定を行うためには、熱源やヒートシンクの材料の選定、温度計の選定、熱放射の増加の寄与の補正等種々の課題がある。

非定常法による熱拡散率の計測技術に関しては、本研究の開始時点においてすでにレーザフラッシュ法が開発されており、金属、合金、セラミックス、半導体、黒鉛等緻密な固体の熱拡散率に対して標準的な方法として広く普及し、実用測定装置が製品化されて広範な科学技術分野において使用されてきた<sup>[19]-[22]</sup>。そのような普及を反映して、緻密な固体材料に関してデータブックやデータベースに掲載されている熱拡散率や製品のカタログに記載されている熱拡散率の値の大部分はレーザフラッシュ法により求めたものとなっている。

レーザフラッシュ法の測定原理を図3に示す。レーザフラッシュ法においては、一定温度に保たれた平板状試料の表面が瞬間的に加熱される。その結果、瞬間的に温度上

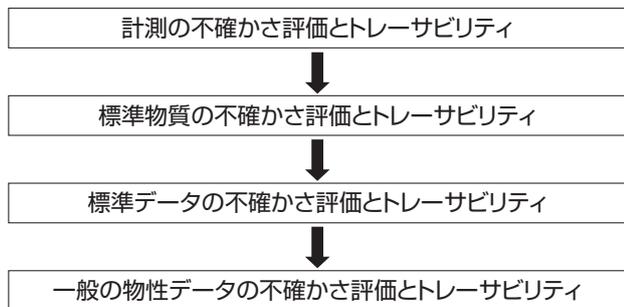


図2 不確かさ評価とトレーサビリティを「計測」から「一般の物性データ」にまで展開するプロセス

昇した試料表面から試料裏面に向かって一次的に熱が拡散し、最終的には試料全体が均一温度となる<sup>[19]-[22]</sup>。試料裏面の温度上昇の速さから材料の熱拡散率が求められる。

熱拡散率の測定方法としては、パルス加熱以外に周期的に加熱する方法、階段関数的に加熱する方法等が開発されている。また、試料表面を加熱したときのその位置の温度変化から熱浸透率を求めることも行われている<sup>[4]</sup>。

レーザフラッシュ法は熱拡散率・熱拡散率測定法として以下の優位性を有している。

- パルス加熱後の一次元熱拡散による試料裏面の温度上昇の時間変化を、解析的に求められる理論曲線でフィッティングすることにより測定の妥当性が検証できる。
- 小さい試料を短時間で測定できる。
- 試料裏面の温度変化の測定に放射温度計を使うことにより、加熱と測温をともに非接触で行うことができる。
- 室温より低い温度から2,000℃以上に至る高温まで広い温度範囲（試料裏面温度変化測定に用いるセンサーに依存する）で測定が可能である。
- 1961年にフラッシュランプによってパルス加熱する測定法として発明されて以来、多くの研究が行われ、その妥当性と優位性が広く認知され、実用測定装置も広範に普及している。

以上の背景から、レーザフラッシュ法は、精密な熱拡散率測定を実現する潜在的可能性を持つと判断し、熱拡散率計測のための国家標準器に採用することを試みた。一方レーザフラッシュ法には、熱拡散率を精密に測定する方法として未完成的な部分も多く残っており、測定結果の不確かさ評価も十分には行われていなかったため、国家標準器の研究開発では、計測技術の精密化が必須であった。また、バルク材料の熱拡散率の信頼性の高い熱物性データを効率的かつ迅速に社会に供給するシステムを構築するために、標準物質の整備、ならびに計測技術の標準化（JIS規格、ISO規格の整備）も研究課題として掲げた。

### 4.2 計測技術の精密化

図4は理想的な初期条件・境界条件下でのレーザフラッ

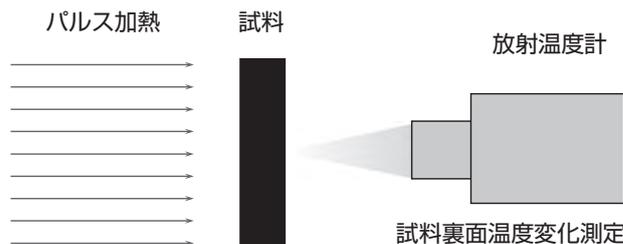


図3 レーザフラッシュ法の測定原理

シュ法における試料裏面の無次元温度上昇(最大温度上昇値により規格化した温度上昇)を無次元時間(膜厚方向の熱拡散の特性時間  $\tau = d^2 / \alpha$ により規格化した時間)の関数として表示したものである。試料裏面の温度変化の速さは熱拡散率  $\alpha$ に比例し、試料の厚さの2乗に反比例する。理想的な条件下では熱拡散率は試料の厚さ  $d$ と裏面の最大温度上昇値の半分  $\Delta T/2$ に達するのに要する時間(半値時間)  $t_{1/2}$ から下記の式により算出される<sup>[19][20]</sup>。

$$\alpha = \frac{0.1388 d^2}{t_{1/2}} \quad (3)$$

図5にレーザーフラッシュ法によりガラス状炭素を測定したときに観測された試料裏面温度の時間変化を示す。

産総研ではレーザーフラッシュ法についていくつかの新しい要素技術を開発し導入した。光ファイバにパルスレーザービームを通すことによりレーザービームの空間エネルギー分布を均

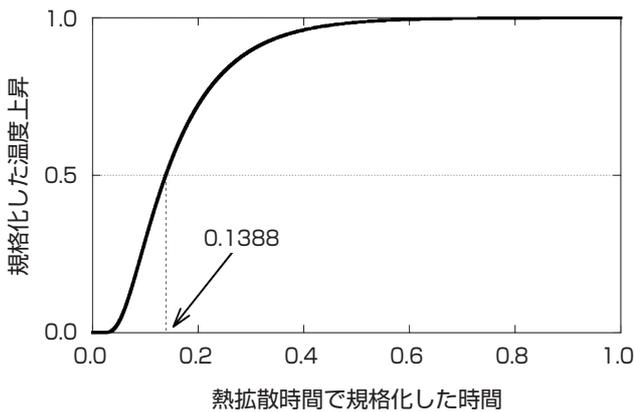


図4 理想的な初期条件・境界条件下でのレーザーフラッシュ法における試料裏面の温度応答曲線

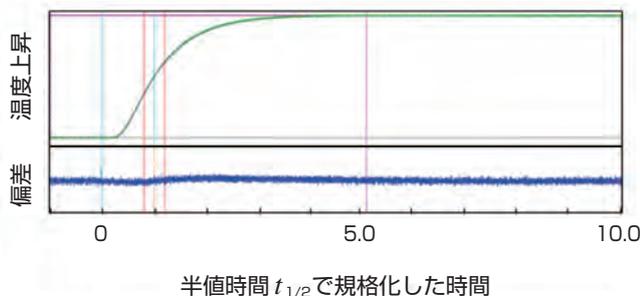


図5 レーザーフラッシュ法により実測されたガラス状炭素の試料裏面の温度応答曲線(緑線)と理論曲線(黒線)および両者の偏差(10倍に拡大して図の下部に青線で表示)  
実測曲線(緑線)と理論曲線(黒線)とは、そのままでは差が見えないほどほとんど重なっている。

一化して、試料中の一次元熱流を確実にした<sup>[22][23]</sup>。赤外放射温度計を用いて試料裏面の温度変化を非接触で高速かつ正確に測定した<sup>[22][24]</sup>。試料の表面から周囲に放射で失われる熱(熱損失)を考慮して熱拡散率を算出した<sup>[20]</sup>。試料の熱拡散率は一般に温度依存性を持っていることから、加熱レーザーエネルギーが0の場合に相当する材料固有の(インヒレントな)熱拡散率を外挿により求めた(図6)<sup>[22][25][27]</sup>。

このようにして産総研で開発したレーザーフラッシュ法による熱拡散率測定装置を国家標準器に位置づけた。図7に国家標準器の写真を示す。

#### 4.3 国家標準と標準物質の整備

我が国の国家計量標準を担う産総研計量標準総合センター(NMIJ)では、2010年までに物理系計量標準250、化学系計量標準250を整備することを目標にかかげて国家

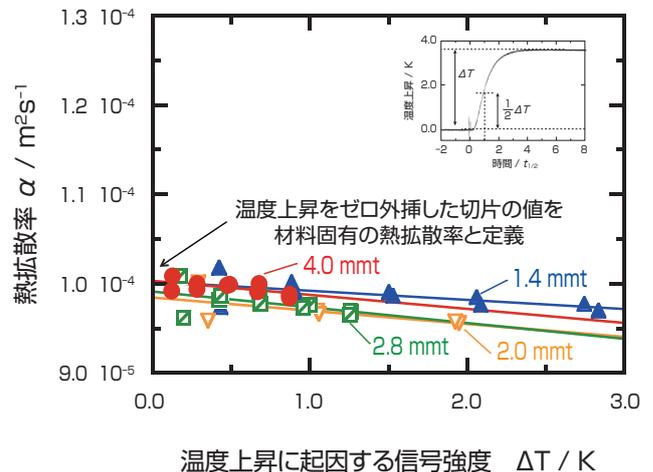


図6 材料固有の熱拡散率を求めるためのデータプロット(高密度等方性黒鉛を室温で測定した場合の例)<sup>[26]</sup>



図7 熱拡散率の国家標準器

表1 計量標準整備計画（～2010）の固体熱物性分野における標準供給品目

整備計画 整理番号	量 (依頼試験の項目)	範囲 (適用温度範囲)	拡張(相対)不確かさ 包含係数 k=2	供給形態	備考
240-00 241-00	熱拡散率	$1 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \sim 5 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ (297 K～1500 K)	< 3.4 %	依頼試験（一般）	校正対象は、等方性黒鉛
		(300 K～1500 K)	5 %～7 %	認証標準物質 NMIJ CRM5804-a	等方性黒鉛（1201-a）
242-00	薄膜熱物性 (熱拡散時間)	100 ps～6500 ps	4.2 % (Mo 400 nm 厚の場合)	依頼試験	薄膜領域（100 nm～400 nm） 厚み方向のみ
242-10		40 ns～1000 ns	3.6 %	依頼試験	校正対象は、透明ガラス基板上の 窒化チタン薄膜
		150 ns (室温)	4.9 %	標準物質 NMIJ RM1301-a	透明ガラス基板上の窒化チタン薄膜 (膜厚 700 nm)
244-00	熱伝導率	(300 K～900 K)	7.4 %～9.8 %	標準物質 NMIJ RM1401-a	等方性黒鉛（1401-a）
245-00	比熱容量	(50 K～350 K)	$1.3 \times 10^{-3} \text{JK}^{-1} \text{g}^{-1}$ $\sim 6.1 \times 10^{-3} \text{JK}^{-1} \text{g}^{-1}$	依頼試験	断熱法
246-00		(300 K～900 K)	$1.9 \times 10^{-2} \text{JK}^{-1} \text{g}^{-1}$ $\sim 3.1 \times 10^{-2} \text{JK}^{-1} \text{g}^{-1}$	依頼試験	示差走査熱量測定法

計量標準整備計画に取り組み、その目標を達成した<sup>[28]</sup>。固体熱物性分野においては産総研計測標準研究部門物性統計科（現在の材料物性科）熱物性標準研究室が標準整備を担当し、表1に示されるようにバルク材料の熱膨張率、熱拡散率および比熱容量の計量標準を整備した。また産総研依頼試験制度のもとで熱物性の測定サービスを開始するとともに、熱膨張率標準物質、熱拡散率標準物質、および熱伝導率標準物質を供給している<sup>[9][29][30]</sup>。さらに先端産業における共通の部材である薄膜の熱拡散率と熱拡散時間の計量標準の整備にも取り組み、同様に測定サービスと薄膜熱拡散時間標準物質の供給を開始した<sup>[31][32]</sup>。

産総研の熱拡散率の依頼試験は、校正機関に対する国際的な要求事項である ISO 17025<sup>[33]</sup>に基づいた品質システムを構築して実施している。頒布中の熱拡散率標準物質は、さまざまな検討の結果<sup>[34][35]</sup>、均質性と安定性に加えて表面の黒化処理を必要としないことを重視し、近赤外付近の波長の光に対して黒色かつ不透明である高密度等方性黒鉛を選定し、その標準値は国家標準器を用いて決定した。2006年から頒布を開始したが、後に標準物質の生産者に対する国際的な要求事項である ISO Guide 34<sup>[36]</sup>に適合した運用を行って、2010年度より NMIJ CRM-5804 という名称の認証標準物質として供給されている。

国家標準を整備した次の段階として、熱物性計測に関する我が国の国家標準と外国のそれとが同等であるかどうかの検証が重要である<sup>[37]</sup>。そのためには、同一のロットから切り出した均一な試料を複数の国立計量研究機関（National Metrology Institute, NMI）に配布し、それぞれでの測定値を比較し、不確かさの範囲内で互いに一致するかどうかを調べる。これを国家計量標準の国際比較と呼んでいるが、そのようにして測定結果が一致した機関同士はそれぞれの校正測定能力（Calibration and

Measurement Capability, CMC）を互いに承認し合い、その結果を国際度量衡局の基幹比較データベース（BIPM Key Comparison Database, KCDB）<sup>[38]</sup>に登録して誰でも見られるようにする。熱物性に関する国際比較は国際度量衡委員会測温諮問委員会（CIPM Consultative Committee for Thermometry, CCT）<sup>[39]</sup>の熱物性作業部会（Working Group 9, WG9）ならびにアジア太平洋計量計画（Asia Pacific Metrology Programme, APMP）<sup>[40]</sup>の測温技術委員会（Technical Committee for Thermometry, TCT）において現在実施中であるので、その状況を以下に述べる。

メートル条約のもとで国際度量衡委員会の測温諮問委員会は熱物性作業部会（Working Group 9, WG9）を2003年に設置した<sup>[41]</sup>。2005年より著者の一人（馬場）が熱物性作業部会の議長を務めている。そこでは熱物性の計量標準を整備し国立計量研究機関（NMI）相互の国家標準の同等性を検証して相互承認するために種々の取り組みを行ってきた。

2008年より保護熱板法による断熱材の熱伝導率測定、レーザフラッシュ法による固体材料の熱拡散率測定、固体材料の分光放射率測定の予備的国際比較（Pilot study）を実施し参加機関の測定結果がそれぞれの幹事機関に集約され、最終報告書の作成が進められている。

レーザフラッシュ法による固体材料の熱拡散率測定の予備的国際比較（PT02）は2008年から2011年にかけて行われた<sup>[42][43]</sup>。この国際比較は、国立計量研究機関の間でのレーザフラッシュ法による熱拡散率測定の国際比較としては初めてのものであり、最新の計測技術のレベルを調べるとともに測定手順やデータ解析方法、不確かさの評価方法について共通の理解を得ることが目的であった。参加機関は、フランス国立計量研究所（Laboratoire national

de metrologie et d'essais, LNE)、中国計量科学研究院 (National Institute of Metrology, NIM)、産総研計量標準総合センター (NMIJ)、英国国立物理学研究所 (National Physical Laboratory, NPL) の4機関であり、この論文著者の一人(阿子島)がオーガナイザを務めた。

初回の国際比較であるので、測定対象とする材料は、試料表面を別途黒化処理しなくてもそれ自身でレーザビームを効率的に吸収できるような材料や、過去に十分に評価がなされて安定であることが確認されていてかつ製品として市場で入手可能な材料のなかから、アームコ鉄と高密度等方性黒鉛を選択した。これらの材料で直径が10 mm、厚さがそれぞれ1.0、1.4、2.0、2.8、4.0 mmの円板状試験片セットを参加機関の数だけ製作し、事前に均質性をチェックした後で各参加機関に1セットずつ送付して測定を行った<sup>[43]</sup>。測定には、産総研が提案しているインヒレントな熱拡散率を求める手順を取り入れ、それ以外の作業は各機関で通常行っている手順に基づいて行った。各機関から報告された結果を図8および図9に示す。全体の温度依存性の傾向から外れている値は、測定装置の応答速度が不十分であるなど、装置に起因する原因が判明しているものである。それらを除いて、適切に測定がなされたと評価されたデータは、3機関でのばらつきの標準偏差が、300 Kから1200 Kの温度範囲で7%以下と、不確かさの範囲内で一致を示した。この国際比較から、レーザフラッシュ法による熱拡散率測定は国立計量研究機関の間で十分に同等性を有することが確認された。

一方、2010年の測温諮問委員会 CCT の会合において

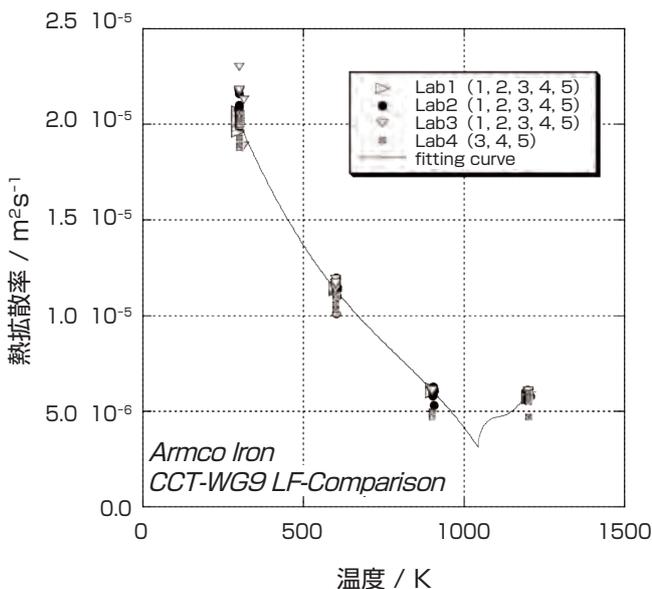


図8 アームコ鉄の熱拡散率に関する予備的国际比較の結果<sup>[43]</sup>  
Lab1 (1,2,3,4,5) のカッコ内の数字はサンプル番号を表す。

熱物性分野の熱伝導率、熱拡散率、比熱容量、熱膨張率を国立計量研究機関の校正測定サービスの項目に組み入れることが合意され、各機関の校正測定能力 CMC を国際度量衡局の基幹比較データベース KCDB に登録する道筋が開けた。現在、熱拡散率、熱伝導率等の校正測定能力を審査するための基準文書を作成中である。

アジア太平洋地域における国立計量研究機関の連合体であるアジア太平洋計量計画 APMP においても、2010年に測温技術委員会 TCT 内に熱物性作業部会が設置された。国際度量衡委員会測温諮問委員会 CCT の活動とリンクして、アジア太平洋地域での国際比較(補完比較: Supplementary Comparison) が2件開始された。具体的には、フラッシュ法による熱拡散率測定 (APMP T.S-9) と保護熱板法による断熱材の熱伝導率測定 (APMP T.S-10) である。APMP T.S-9 は、測温技術委員会 TCT と材料計量技術委員会 TCMM との合同企画である。

このように、熱物性分野で初めて CMC 登録に向けた活動を進めているところである。

#### 4.4 計測技術の標準化

熱物性データが機器やデバイスの設計と性能の評価、省エネルギー特性の評価、品質や安全性の保証等の目的で客観的なデータや公的なデータとして活用されるためには、熱物性の測定に用いる装置の仕様や測定手順が標準化され、規格により規定されていることが望ましい。

本研究の成果および関連する研究開発が寄与した規格の一覧を表2に示す。著者の一人(馬場)は2件の JIS 規格 (JIS H7801、R1667)<sup>[44][45]</sup> で、原案作成委員会の

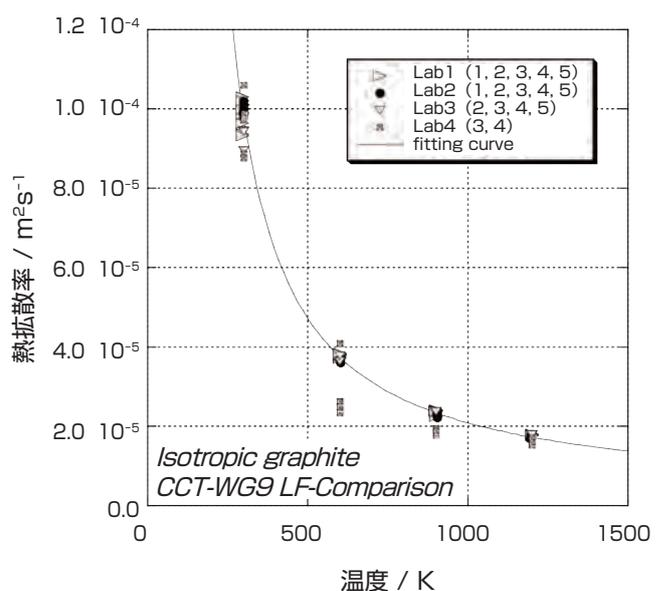


図9 高密度等方性黒鉛の熱拡散率に関する予備的国际比較の結果<sup>[43]</sup>  
Lab1 (1,2,3,4,5) のカッコ内の数字はサンプル番号を表す。

表2 本研究が寄与したレーザフラッシュ法に関するISO規格とJIS規格

種別	規格番号	発行 / 制定年	規格名 (和文)	規格名 (英文)
ISO	18755	2005年	—	Fine ceramics: Determination of thermal diffusivity of monolithic ceramics by laser flash method
JIS	R1611	1991年 (2010年改訂)	ファインセラミックスのレーザフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率試験方法	Test methods of thermal diffusivity, specific heat capacity, and thermal conductivity for fine ceramics by flash method
JIS	H7801	2005年	金属のレーザフラッシュ法による熱拡散率の測定方法	Method for measuring thermal diffusivity of metals by the laser flash method
JIS	R1667	2005年	長繊維強化セラミックス複合材料のレーザフラッシュ法による熱拡散率測定方法	Determination of thermal diffusivity of continuous fiber-reinforced ceramic matrix composites by the laser flash method
JIS	H8453	2010年	遮熱コーティングの熱伝導率測定方法	Measurement method for thermal conductivity of thermal barrier coatings

委員長または主査として新規作成を進めた。ISO/TC206（ファインセラミックス）/WG15に日本代表として参加しISO 18755 “Fine ceramics: Determination of thermal diffusivity of monolithic ceramics by laser flash method” の成立に寄与した<sup>[46]</sup>。

熱拡散率測定のための技術的課題は、測定する材料に依らない共通課題と材料毎の個別課題（個別ハード・ソフト技術）に大別される。前者は、規格で規定することで、統一された技術基準として社会で共有されている。レーザフラッシュ法による熱拡散率測定の場合、材料に依らない共通課題は、図10に示されるように、装置の仕様（共通ハード技術）とデータ解析と結果の検証（共通ソフト技術）に区分でき

る。規定した事項を以下に列挙する。

- 1) 外界との接触熱伝達を最小化した状態で、試料を安定に保持すること。
- 2) 試料の定常温度を安定に保持し、正確に測定すること。
- 3) 試料表面を空間的に均一にパルス加熱すること。
- 4) 試料表面から試料裏面への熱拡散時間に対して、パルス加熱の時間幅を十分に短くし、データ解析の原点となるパルス加熱時刻を正確に同定すること。
- 5) パルス加熱後の試料裏面の温度変化を、熱拡散時間に対して十分早い応答速度で歪みなく観測すること。

これらは、熱物性計測器メーカーに技術移転され、実用化されている。

2010年のJIS R1611改定では著者ら（阿子島、馬場）が主導的な役割を果たし、レーザフラッシュ法による熱拡散率の国家標準の研究において新たに開発した上記の技術を多数導入した。特に、測定データの不確かさの評価方法と熱拡散率標準物質を用いた校正方法／妥当性の検証方法、長年の課題であった黒化処理の影響の定量的評価方法が、附属書に記載されている。

このような熱物性計測における我々の取り組みは、図11に示すような三位一体の取り組みとして、計量標準と標準化、実用計測技術が、互いに寄与して全体が向上するような形で発展させることができたと考えている。薄膜の熱拡散率計測においても同様の取り組みが行われた<sup>[17]</sup>。これらの測定規格に記述された不確かさ評価方法の手順は、材料計量の分野において広く参照されることが期待される。

### 5 熱物性の社会システムの構築状況

図12はレーザフラッシュ法による熱拡散率測定に関連する主要な要素技術とそれらの関係を技術体系として示したものである。図の中央に示されるように、測定装置（ハードウェア）によって観測された温度応答信号に対して、解析プログラム（ソフトウェア）によって理論曲線をフィッティング（カーブフィッティング）して熱拡散率を算出する。こ

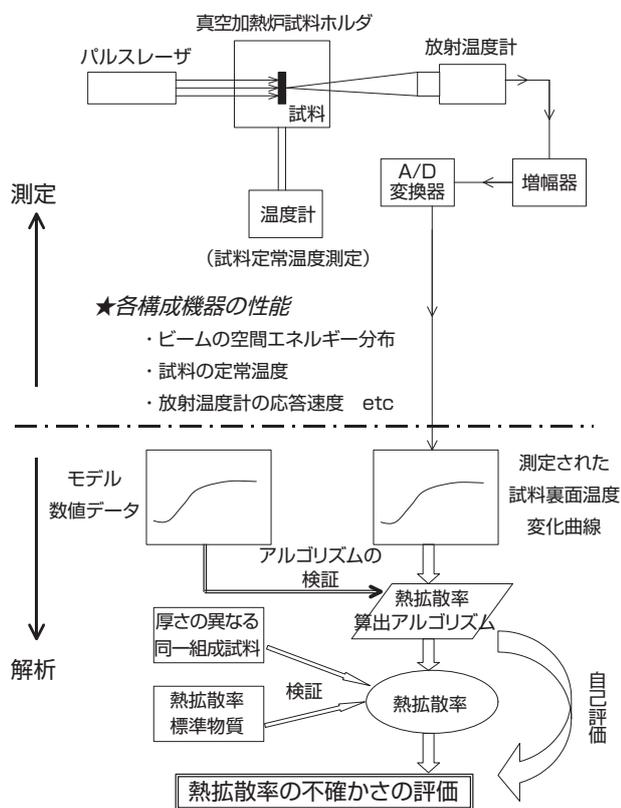


図10 レーザフラッシュ法における測定装置の仕様と解析技術

のとき計測技術の改良に対応して解析技術の改良が促され、逆に解析技術の進歩により測定装置に対する要請が高まるといった相乗効果が働いた。すなわち計測技術と解析技術は密接に相互作用して循環的に進歩してきた。

その具体例を示すと、レーザフラッシュ法において光ファイバを用いてパルスレーザビームの空間エネルギー分布を均一にすることにより熱が試料中を一次元的に拡散していくことを確実にできた<sup>[22][23]</sup>。そのような計測技術の進歩に刺激されて一次元的な熱拡散に対する応答関数法による汎用の解析技術を開発することができた<sup>[47][49]</sup>。

このような計測技術と解析技術の循環的な進歩により熱拡散率測定の不確かさが著しく低減され、これらの技術が熱拡散率測定用の国家標準器に反映されて、標準物質に標準値を付けるときの不確かさも同様に低減された。さらにこの結果として、標準物質の熱拡散率データの不確かさが厳密に評価できるようになり、高品質の熱拡散率標準物質の整備に結実した。

新規の計測技術および解析技術の普及には、その技術に基づく実用測定装置が開発され市場で広く入手可能になることが重要である。レーザフラッシュ法においては光ファイバを用いたレーザビームの均一化技術やカーブフィッティング法による解析技術等を熱物性測定装置メーカーへ技術移転してきた。

## 6 まとめと今後の展開

以上のように、我が国においてレーザフラッシュ法による熱拡散率の計測技術と計量標準、標準化が体系的に進展し、信頼性の高い熱拡散率データを効率的かつ迅速

に供給する社会システムが実現された。自ら開発した計測技術と解析技術に基づいて国家標準器と標準物質を整備し、技術を民間企業に移転して実用測定装置の開発を支援し、対応する JIS 規格および ISO 規格を整備するとともに、データベースを整備して当該社会システムによって生み出される信頼性の高いデータを収録してインターネット公開した。このような包括的かつ体系的な取り組みは世界的にも例をみないユニークなものと考えている。

この論文において報告したレーザフラッシュ法によるバルク材料の熱拡散率、および別途研究している超高速レーザフラッシュ法による薄膜の熱拡散率に関して、その計測技術、計量標準、規格整備、実用計測器の開発、データベースの整備に関する体系的取り組みをさらに発展させていくことにより社会の要請に応えられるものと考えている。引き続き、2010 年度から開始された産総研第 3 期中期計画<sup>[50]</sup>、および産総研第 3 期標準整備計画（2010 年度から 2014 年度まで）<sup>[51]</sup>に沿って国家標準と標準物質の整備を着実に推進するとともに、国際度量衡委員会測温諮問委員会（CIPM CCT）や国際標準化機構（ISO）等においても本報告で述べた体系的な取り組みに基づき熱物性の統合された計測体系を世界規模で実現していく計画である。

さらに不確かさ評価とトレーサビリティへの取り組みを、標準物質に対する標準値と標準データに対して拡張するだけでなく、一般の熱物性データへと展開する。そのためのキーテクノロジーとして材料の均質性評価と安定性評価に加えて、材料キャラクタと物性値の相関を定量的に表現する手法を開発する。

国内の関係機関（独立行政法人、大学、学協会、企業等）のみならず材料・物質の物性データに関わる海外の主要機関とも積極的に連携していくことにより、上記の計測体系により生み出される信頼性の高い熱物性データを分散型熱物性データベースに継続的に収録し、科学技術の基

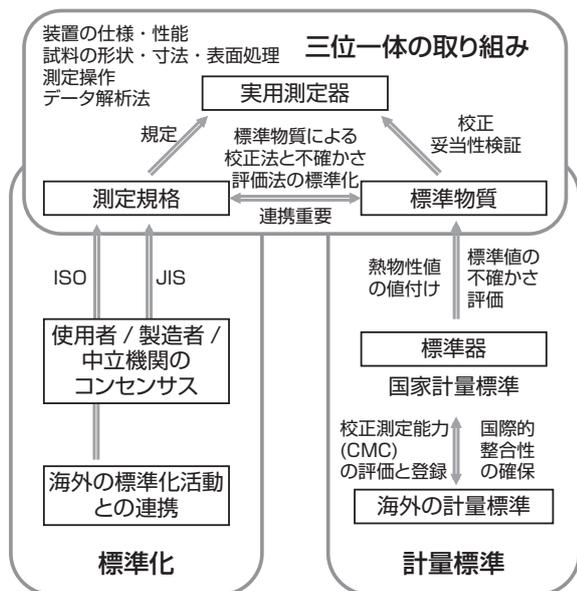


図11 計測技術の標準化と計量標準との連携

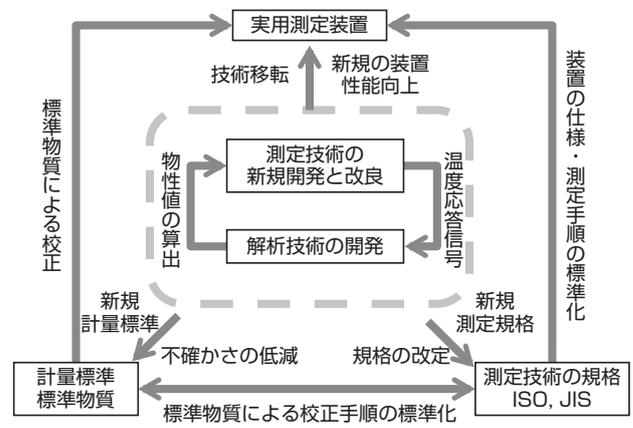


図12 レーザフラッシュ法による熱拡散率測定に関する技術体系

盤情報である熱物性データを広範なユーザーに電子情報として提供していく体制の構築を目指している。

今後はこのシステムを国際的な枠組みに発展させて行く取り組みを推進する。バルク材料を測定対象とするレーザーフラッシュ法は実用測定装置が世界中の広範なユーザーに普及しており、ISO/TC206（ファインセラミックス）において国際規格が策定され、国際度量衡委員会測温諮問委員会熱物性作業部会におけるメートル条約下の計量標準の整備に関しても先進的な取り組みが進展している。したがって今後の最重要課題は策定された国際規格と計量標準・標準物質が世界の広範なユーザーに活用されることであり、海外の国立計量研究機関との連携のもとに測定装置製造事業者、および熱物性データを必要とする研究機関、エネルギー関連企業、エレクトロニクス関連企業等への普及を目指していく。

#### 付録A 学会における取り組み

我が国においては科学技術と産業において欧米へキャッチアップした1970年代から知的基盤として熱物性データを自ら整備することの必要性が強く認識されるようになり、1980年に日本熱物性研究会が設立され1990年より日本熱物性学会となった<sup>[52]</sup>。

日本熱物性学会は毎年日本熱物性シンポジウムを開催し、また機関誌「熱物性」<sup>[53]</sup>を発行するなど、日本は世界的にも最も活発な研究拠点の一つとなっている。またアジア熱物性会議が1986年に結成され、米国、欧州の熱物性研究機構と連携して「世界熱物性コンGRESS」を形成し、世界的な研究交流の場を提供している。

日本熱物性学会においては、科学技術の広い分野にわたる熱物性に関する情報を一冊に集約した「熱物性ハンドブック」を1990年に発刊した<sup>[54]</sup>。熱物性ハンドブックは熱物性データを収録するのみならず、熱物性値の解説や定義、検索、入手法、測定法等を記載し、熱物性データを入手して利用する方法を、熱物性を実測で求める場合も含めて体系的に記述している。2008年には初版以降の科学技術の進歩とデータの増加に対応して改訂され、「新編熱物性ハンドブック」として発刊された<sup>[4]</sup>。

1996年に制定された日本の第1期科学技術基本計画において知的基盤整備の重要性が指摘され<sup>[55]</sup>、それを受けて産業技術審議会と日本工業標準調査会合同の「知的基盤整備特別委員会」において1998年に、新規産業創成を推進するために積極的な整備および研究開発を行うべき重点分野として、計量標準、化学物質安全管理、人間生活・福祉、生物資源情報、材料が選定された<sup>[56]</sup>。この動きと連動して日本熱物性学会において1997年に「知的基盤と

しての熱物性のあり方」について検討が行われ、1998年に日本熱物性学会の提言として報告されている<sup>[2]</sup>。

#### 付録B 国際度量衡委員会における取り組み

メートル条約のもとではその締結以来100年以上にわたり、長さ、質量、時間、電気、温度等基本量の国際標準を設定してきたが、近年食品の安全性や環境汚染物質の検査、健康診断等において元素や化学物質の含有量の分析結果が世界的に共通に使えることが重要であると認識され、化学計測に対しても国際的整合性やトレーサビリティを要請するようになった<sup>[57]</sup>。このような要請に応じて1995年、メートル条約の枠組みのもとで国際度量衡委員会（CIPM）に物質量諮問委員会（Consultative Committee for Amount of Substance, CCQM）が設置された<sup>[58]</sup>。

物理標準が各国の国立計量研究機関（National Metrology Institute, NMI）の校正測定能力（Calibration and Measurement Capability, CMC）に基づく国家標準による校正サービスを介して供給されるのに対して、物質質量標準は認証標準物質（Certified Reference Material, CRM）により供給されトレーサビリティが確保されることが一般的となっている。

一方、材料の計測評価分野に関してはベルサイユサミット（1982年）において「参加国間での、新材料に関連した新技術の発展と国際標準化を促進することにより、先端技術製品の貿易を活性化し、経済的交流を活性化する」ことを目的として、新材料および標準化に関するベルサイユプロジェクト（Versailles Projects on Advanced Materials and Standards, VAMAS）が設立された<sup>[59]</sup>。

また国際度量衡委員会（CIPM）では今日の社会を支える「材料」の技術的役割と通商の重要性に鑑みて、熱物性のみならず、材料の力学特性や電気特性を含む材料特性一般を対象として、世界の国立計量研究機関および材料研究所の専門家により構成される材料計量暫定作業部会（Ad hoc Working Group of Material Metrology, WGMM）を設置することを2005年に決定した。2006年から検討が行われ2007年に国際度量衡委員会に最終報告書が提出された<sup>[60]</sup>。作業部会の結論として材料計量に関する別途の諮問委員会（CC）を新設するのではなく、既存の各諮問委員会における材料関係のWGがVAMASと連携して取り組んでいくことが勧告された。その活動成果のより詳細な内容は専門誌 Metrologia の特集号として発刊されている<sup>[61]</sup>。

熱物性に関しては測温諮問委員会（CCT）の中に Working Group 9 熱物性（Thermophysical Property、議長：馬場、CCTのVAMAS対応担当を委任される）が

設立され<sup>[62]</sup>、断熱材の熱伝導率、レーザーフラッシュ法による固体の熱拡散率、放射率に関して予備的な国際比較を実施した。

この論文の第1章において記述したように、熱伝導率、比熱容量、熱拡散率、熱浸透率等の熱物性は基本物理量を用いて一義的に定義され、原理的には計測方法に依存せず同一の値が求まる物質・材料に固有（インヘレント、inherent）な物理量である<sup>[16][27][63]</sup>。

## 付録C 通商産業省工業技術院計量研究所における取り組み

産総研計測標準研究部門の前身の一つである旧通商産業省工業技術院計量研究所では1985年に「物性計測に関する調査研究」を実施し、その成果を報告書として取りまとめた<sup>[1]</sup>。その知見に基づき熱物性部が創設され、熱物性の計測技術と標準に関する研究に関する組織的取り組みが開始された。

その一環として科学技術振興調整費による知的基盤整備推進制度の中で、旧計量研究所が中核機関となり、「機能材料の熱物性計測技術と標準物質に関する研究」が1997年度より5年計画で実施された。この研究課題においては、密度、熱伝導率／熱拡散率、比熱容量、熱膨張率、放射率、音速／弾性率について下記の目標を設定し、国内10数機関の共同研究プロジェクトとして実施された<sup>[3][15][64]</sup>。

- ① 熱物性値の精密計測技術を開発して、国の一次標準を確立する。
- ② 標準試料・標準物質を開発し、標準データを取得して、広く研究・生産現場に供給する。
- ③ 先進的機能材料に対応できる先端的計測法を開発し、また実用的計測法の標準化を行う。
- ④ 特定の重要材料に対して、材料キャラクタを同定しつつ、熱物性値の高水準データセット（熱物性値だけでなく、材料を同定するためのキャラクタを含むひとまとまりのデータ）を作成して、この研究のアプローチの有効性を検証する。
- ⑤ プロトタイプ熱物性データベースを試作して、データ普及用ツールとしての有効性を検証する。

上記の知的基盤整備推進制度をはじめとする多くのプロジェクトの実施の積み重ねによりこの論文に記述した包括的かつ体系的な成果が達成された。

上記⑤の取り組みは産総研計測標準研究部門に引き継がれ、「分散型熱物性データベース」としてインターネット上に公開されている<sup>[65]-[67]</sup>。

## 参考文献

- [1] 通商産業省 工業技術院 計量研究所(編): 物性計測技術に関する調査研究報告書 (1985).
- [2] 福迫尚一郎: 知的基盤としての熱物性のあり方, *熱物性*, 12 (3), 152-169 (1998).
- [3] 小野 晃: 知的基盤と熱物性, *熱物性*, 12 (1), 20-30 (1998).
- [4] 日本熱物性学会(編): *新編熱物性ハンドブック*, 23-25, 養賢堂 (2008).
- [5] <http://www.nist.gov/srm/>
- [6] <http://www.nist.gov/srd/>
- [7] [http://irimm.jrc.ec.europa.eu/reference\\_materials\\_catalogue/Pages/index.aspx](http://irimm.jrc.ec.europa.eu/reference_materials_catalogue/Pages/index.aspx)
- [8] <http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/outline/index.html>
- [9] 阿子島めぐみ: 固体材料の熱拡散率標準の開発, *計測標準と計量管理*, 59 (2), 23-29 (2009).
- [10] <http://www.springermaterials.com/navigation/>
- [11] National Research Council: *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology Vol. 1-7, U.S.*, (1929).
- [12] D. R. Lide Jr.: Critical data for critical needs, *Science*, 212 (4501), 1343-1349 (1981). DOI:10.1126/science.212.4501.1343
- [13] Y. S. Touloukian and C. Y. Ho eds.: *Thermophysical Properties of Matter; TPRC Data Series, 1970-1972*, IFI-Plenum, New York (1970).
- [14] <https://cindasdata.com/>
- [15] A. Ono, T. Baba and K. Fujii: Traceable measurements and data of thermophysical properties for solid materials: a review, *Meas. Sci. Technol.*, 12 (12), 2023-2030 (2001).
- [16] T. Baba: Measurements and data of thermophysical properties traceable to a metrological standard, *Metrologia*, 47 (2), S143-S155 (2010). DOI:10.1088/0026-1394/47/2/S12
- [17] 産業構造審議会・日本工業標準調査会合同会議: 知的基盤整備特別委員会中間報告－知的基盤整備・利用促進プログラム, 49 (2012) <http://www.meti.go.jp/press/2012/08/20120815002/20120815002-3.pdf>
- [18] 馬場哲也, 山下雄一郎: 分散型熱物性データベースの開発, *計測標準と計量管理*, 59 (2), 49-57 (2009).
- [19] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G. L. Abbott: Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity, *J. Appl. Phys.*, 32 (9), 1679-1684 (1961).
- [20] 長坂雄次, 馬場哲也: 第3章 固体熱物性の光学的計測技術, *新編伝熱工学の進展 第3巻*, 養賢堂, 163-226 (2000).
- [21] A. Cezairliyan, T. Baba and R. Taylor: A high-temperature laser-pulse thermal diffusivity apparatus, *Int. J. Thermophys.*, 15 (2), 317-341 (1994).
- [22] T. Baba and A. Ono: Improvement of the laser flash method to reduce uncertainty in thermal diffusivity measurements, *Meas. Sci. Technol.*, 12 (12), 2046-2057 (2001). PII: S0957-0233(01)27342-1
- [23] T. Baba, M. Kobayashi, A. Ono, J. H. Hong and M. M. Suliyanti: Experimental investigation of the nonuniform heating effect in laser flash thermal diffusivity measurements, *Thermochim. Acta*, 218, 329-339 (1993).
- [24] 小林 正信, 馬場 哲也, 小野 晃: レーザーフラッシュ熱拡散率測定用赤外放射温度計, *熱物性*, 8 (3), 143-148 (1994).
- [25] M. Ogawa, K. Mukai, T. Fukui and T. Baba: The development of a thermal diffusivity reference material using alumina, *Meas. Sci. Technol.*, 12 (12), 2058-2063 (2001). DOI:10.1088/0957-0233/12/12/305
- [26] M. Akoshima and T. Baba: Study on a thermal-diffusivity standard for laser flash method measurements, *Int. J. Thermophys.*, 27 (4), 1189-1203 (2006).
- [27] M. Akoshima, B. Hay, M. Neda and M. Grelard: Experimental verification to obtain intrinsic thermal diffusivity by laser-

- flash method, *Int. J. Thermophys.*, 34 (5), 778-791 (2013). DOI:10.1007/s10765-013-1470-7
- [28] <http://www.nmij.jp/service/>
- [29] 馬場哲也, 榎原研正, 山田修史, 藤井賢一: 物性統計技術における到達点と今後, *計測標準と計量管理*, 60 (4), 2-9 (2011).
- [30] T. Baba, N. Yamada, N. Taketoshi, H. Watanabe, M. Akoshima, T. Yagi, H. Abe and Y. Yamashita: Research and development of metrological standards for thermophysical properties of solids in the National Metrology Institute of Japan, *High Temperatures-High Pressures*, 39 (4), 279-306 (2010).
- [31] 竹歳尚之, 八木貴志, 馬場哲也: パルス加熱サーモリフレクタンス法を用いた薄膜熱物性標準の整備, *計測標準と計量管理*, 59 (2), 36-41 (2009).
- [32] 八木貴志, 竹歳尚之, 馬場哲也: 薄膜の熱物性計測と標準 - 熱拡散時間の標準薄膜 -, *計測標準と計量管理*, 59 (2), 42-48 (2009).
- [33] ISO/IEC 17025 1999 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- [34] M. Akoshima and T. Baba: Thermal diffusivity measurements of candidate reference materials by the laser flash method, *Int. J. Thermophys.*, 26 (1), 151-163 (2005).
- [35] M. Akoshima and T. Baba: Laser flash thermal diffusivity measurements of isotropic graphite and glass-like carbon, *Thermal conductivity*, 28, 497-506 (2006).
- [36] ISO Guide 34:2009 General requirements for the competence of reference material producers
- [37] Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, BIPM (1999).
- [38] <http://kcdb.bipm.org/>
- [39] <http://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/>
- [40] <http://www.apmpweb.org/>
- [41] [http://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/tor\\_wg9.html](http://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/tor_wg9.html)
- [42] M. Akoshima, B. Hay, J. Zhang, L. Chapman and T. Baba: International comparison on thermal diffusivity measurement using laser flash method - preliminary results, *Thermal Conductivity*, 30, 367-377 (2010).
- [43] M. Akoshima, B. Hay, J. Zhang, L. Chapman and T. Baba: International comparison on thermal-diffusivity measurements for iron and isotropic graphite using the laser flash method in CCT-WG9, *Int. J. Thermophys.*, 34 (5), 763-777 (2013). DOI:10.1007/s10765-012-1209-x
- [44] JIS H 7801 金属のレーザフラッシュ法による熱拡散率の測定方法 (2005制定)
- [45] JIS R 1667 長繊維強化セラミックス複合材料のレーザフラッシュ法による熱拡散率測定方法 (2005制定)
- [46] ISO 18755:2005 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Determination of thermal diffusivity of monolithic ceramics by laser flash method.
- [47] 馬場哲也: 応答関数法による傾斜機能材料熱物性の解析, *熱物性*, 7 (1), 14-19 (1993).
- [48] T. Baba and N. Taketoshi: Analysis of thermal diffusion in multi-layer thin films by a response function method, *Proc. of Eurotherm*, 57, 285-292 (1999).
- [49] T. Baba: Analysis of one-dimensional heat diffusion after light pulse heating by the response function method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48, 05EB04. 1-05EB04.9 (2009).
- [50] [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/outline/middle\\_plan3/middle\\_plan3\\_1.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/outline/middle_plan3/middle_plan3_1.html)
- [51] <http://www.nmij.jp/info/planning/>
- [52] <http://www.netsubusseijp/>
- [53] <http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjtp/-char/ja>
- [54] 日本熱物性学会編: *熱物性ハンドブック(初版)*, 養賢堂, (1990).
- [55] <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index4.html>
- [56] [http://www.meti.go.jp/report/committee/data/g\\_commi03\\_01.html](http://www.meti.go.jp/report/committee/data/g_commi03_01.html)
- [57] *Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the Role of BIPM*, edited R. Kaarls, (2007) <http://www.bipm.org/utills/en/pdf/Kaarls2007.pdf>
- [58] <http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccqm/>
- [59] <http://www.vamas.org/index.html>
- [60] S. Bennett and G. D. Sims: *Evolving Needs for Metrology in Material Property Measurements, Report of the CIPM ad hoc Working Group on Materials Metrology (WGMM)*, (2007).
- [61] S. Bennett and J. Valdés: Special issue for materials metrology: *Metrologia*, 47 (2), (2010). DOI:10.1088/0026-1394/47/2/E01
- [62] [http://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/working\\_groups.html#wg9](http://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/working_groups.html#wg9)
- [63] R. G. Munro: *Data Evaluation Theory and Practice for Materials Properties: NIST Recommended Practice Guide*, SP 960-11, U.S. Government Printing Office, Washington (2003).
- [64] [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/kagaku/chousei/data/14/hyoka030129/2/40.pdf](http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/chousei/data/14/hyoka030129/2/40.pdf)
- [65] <http://tpds.db.aist.go.jp/>
- [66] T. Baba, Y. Yamashita and A. Nagashima: Function sharing and systematic collaboration between a networking database system and printed media on thermophysical properties data, *J. Chem. Eng. Data*, 54, 2745-57 (2009).
- [67] Y. Yamashita, T. Yagi and T. Baba: Development of network database system for thermophysical property data of thin films, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50 (11), 11RH03 (2011).

#### 執筆者略歴

馬場 哲也 (ばば てつや)

1979年東京大学大学院理学系研究科相関理化学専門課程博士課程修了(理学博士)。1980年通商産業省工業技術院計量研究所入所。1986年～1988年米国立標準局客員研究員。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門物性統計科熱物性標準研究室長。2005年より国際度量衡委員会測温諮問委員会熱物性作業部会議長。2007年より計測標準研究部門上席研究員。2011年日本熱物性学会会長。熱物性の計測技術・計量標準・標準物質の研究および熱物性データベースの開発に従事。1999年 Thermal conductivity award、2000年市村学術賞功績賞、2005年文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)、2013年アジア熱物性会議 ATPC significant contribution award 受賞。この論文では全体を統括した。



阿子島 めぐみ (あこしま めぐみ)

2000年東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。1999年1月～2001年3月日本学術振興会特別研究員DC。2001年(独)産業技術総合研究所入所。同計測標準研究部門物性統計科(現材料物性科)熱物性標準研究室に配属。入所以来、固体材料の熱拡散率計測の研究に従事し、レーザフラッシュ法を用いた熱拡散率測定で、SIトレーサブルかつ材料固有の熱拡散率を決定する方法を確立し、依頼試験及び標準物質の供給を行っている。最近、熱拡散率の国際比較のオーガナイザとして CCT-WG9 および APMP TCT WG で活動を行っている。この論文では熱拡散率の計測技術・計量標準・



標準物質の開発と規格整備ならびに国際比較を担当した。

## 査読者との議論

### 議論1 全体評価

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

この論文の研究は固体材料の熱物性を社会全体で効率的に生産し効果的に利用するシステムを構築することを目標に掲げて取り組んだ優れた構成的研究です。研究目標のスケールの大きさと、関係する多くのステークホルダーを巻き込みつつ目標を実現するための合理的なシナリオが注目されます。

### 議論2 米国における熱物性研究の状況

質問（小野 晃）

3.2節で米国における1960年代から70年代の熱物性研究を振り返って、国立標準局の熱物性標準物質とパデュー大学情報数値データ解析合成センターのデータ評価との連携が必ずしも十分ではなかったと述べられています。

当時米国では熱物性研究が盛んで、その成果はいろいろな技術分野に貢献したと思います。しかしながら標準物質が社会で広く利用され、その結果良質な熱物性データが多く生産されてパデュー大学のデータブックに反映されるまでには時間が足りなかったということでしょうか。当時の米国の熱物性研究に限界があったとすればどのような点だったのか、著者にお考えがあればお聞かせ願います。

また国立標準局とパデュー大学の両者にどのようなモチベーションやシナリオの共有があればよりよい連携が生まれたと考えられるか、著者にご見解があればお聞かせ下さい。

回答（馬場 哲也）

パデュー大学の熱物性研究センター（TPRC）において行われていた「データ評価」は測定トレーサビリティや不確かさの概念が普及する以前に行われており、データを測定の信頼性から評価するというより、報告されているデータ全体を俯瞰し、物性論的知見や測定機関の評判等に基づき、評価者の見識により個々に判断されていました。

国立標準局の熱物性標準物質の開発はTPRCのデータ評価開始より少し遅れて開始され、本格的に供給が開始されたのは1970年代後半です。残念ながらそれ以降にはTPRCおよびその後継機関であるCINDASによる熱物性データブックの改訂はなされませんでした。

もし、パデュー大学がデータ評価において「計測の不確かさとトレーサビリティ」の重要性を認識するに至っておれば、国立標準局の標準物質により校正された測定器を使って取得したデータを参照情報として、それ以外の一般のデータの信頼性を評価するという視点を導入することにより、計測の不確かさに基づくより普遍的なデータ評価手法にまで発展した可能性があると考えます。

### 議論3 情報によるトレーサビリティの確保

質問・コメント（小野 晃）

4章において材料標準分野では、標準器や標準物質といった器物に依存せずに、情報だけでトレーサビリティを確保できる可能性があるかと述べられています。これは従来にはない柔軟なトレーサビリティの考え方ですので是非発展させてほしいと思います。

①情報だけでトレーサビリティがとれるのは、具体的にどのような材料についてまず可能になりそうでしょうか。単結晶シリコンの熱物性等がその候補でしょうか。著者のお考えをお聞かせ願います。

②情報だけでトレーサビリティをとろうというこの考え方は現在まだ計量標準関係者に広く受け入れられるには至っていないと思います。どのようにしたら広く受け入れられるかを考えてみますと、情報のみによってトレーサビリティを確保した場合に、計測結果の信頼性（ばらつきや偏り）が現実にはどの程度大きくなってしまおうのか、いろいろな場合について実際に検証してみてもどうかと思いますがいかがでしょうか。広く受け入れられるための方策について著者のお考えがあればお

聞かせ下さい。

回答（馬場 哲也）

①液相および気相の水等の熱物性データは組成（必要に応じて不純物の量や同位体組成比まで考慮する）が既知であり、計測のトレーサビリティが確保されていれば、不確かさが評価された普遍的なデータとして提供可能です。例えば温度目盛りの場合は、国際原子力機関（IAEA）の標準物質Vienna Standard Mean Ocean Water（VSMOW）の同位体組成の純水の三重点は上位の標準による校正を必要とせず普遍的に実現できます。粘度標準はISO/TR3666:1998（E）に規定された20℃、大気圧における蒸留水の粘度を一次標準として構成されています。

比熱容量と熱膨張率につきましてはNMIJにおいて特定のロットのシリコン単結晶を保管し、均質性を評価し国家標準による値付けを行って標準物質として供給しています。次のステップとして指定された純度より良いシリコン単結晶について比熱容量や熱膨張率の標準データを器物に依存せず情報として供給する可能性が考えられます。またシリコン単結晶は本報告において述べました熱拡散率においても器物に依存せず標準データを提供できる可能性が高いものと考えております。

以上は国家計量標準の供給に関わる取り組みですが、ユーザーと測定器メーカーのニーズ主導のデファクトスタンダードとして、比熱容量参照物質としての酸化アルミニウムが挙げられます。エンタルピーおよび比熱容量の標準物質として、米国国立技術標準研究所（National Institute of Standards and Technology, NIST）のEnthalpy and Heat-Capacity Standard Reference Material: Synthetic Sapphire（Alpha-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）が供給されていますが、形状が細い円筒状であるため、示差走査熱量計（Differential Scanning Calorimeter, DSC）の参照試料としては適していません。このような状況においては、認証標準物質をDSC用の参照標準物質として用いることができず、市販の高純度のアルミナを使用することが一般に行われています。ロットを限定していないアルミナにおいて製造者や製造時期の違いにより比熱容量がどの程度ばらつくかの情報についての系統的検証は行われておらず今後の課題となっています。

②情報だけでトレーサビリティをとろうという考え方が計量標準関係者に広く受け入れられるためには、第1にその値が国家標準にトレーサブルな計測を行った結果と整合していることを証明する必要があります。第2にその情報に対応する物質・材料の集合を明確に規定することが不可欠です。物質・材料の集合を定量的に定義することは、気体と液体の場合には組成を同定することに対応しますが、固体の場合には多様な構造をどのように定量的に記述するかが難関となります。

今日、膨大なデジタル情報が生み出されウェブ上で共有され解析・利用されています。このようなデータの信頼性・信憑性をどのように判定し保証するかは最も根源的で困難な課題です。多様なデータのなかでセンサを含む計測器による定量的データの信頼性・信憑性は不確かさにより表現することができ、「情報によるトレーサビリティ」の実現が具体的アプローチであると考えています。

### 議論4 不確かさの評価手順の規格化

質問・コメント（小野 晃）

5.4節で、JIS R1611の中で熱拡散率標準物質を用いた校正方法／妥当性検証方法と測定データの不確かさの評価方法とを規定したとあります。これはとても画期的なことと高く評価します。

そこでJIS R1611では具体的にどのように不確かさの評価方法の手順を規定したのか、簡単に結構ですので内容をご教示願います。

またこの動きは熱拡散率だけでなく他の物性に関する測定方法の規格や、一般の試験評価の規格にも広がることを期待しますが、そのためにはどのようなことが今後ポイントになるのでしょうか、著者にお考えがあれば願います。

回答（阿子島 めぐみ）

JIS R1611「ファインセラミックスのフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率の測定方法」の2010年改定において不確かさの評価手順に関する記述を加えました。

具体的にはこの改訂に下記の附属書を追加しました。

附属書E：入手可能な標準物質、その供給機関等の情報

附属書JB：標準試料を用いた校正及び測定結果の補正方法

附属書JD：不確かさ評価の情報

附属書JC：黒化処理の影響の評価方法

フラッシュ法による熱拡散率の計測においては附属書JBに示した標準試料を用いた校正または補正を行う場合と、標準試料を用いず熱拡散時間を絶対測定する場合があるので、附属書JDにおいてはそれぞれの場合について不確かさの評価方法を提示しました。

試料が透光性を有する場合や、試料のフラッシュ加熱光に関する吸収率や放射測温波長での放射率が十分高くない場合には試料の両面に黒色で不透明な薄膜を付加します。この薄膜の存在により熱拡散時間は試料だけの場合より増加しますので、その増加分を評価し補正する方法を附属書JCに記載しました。

物性に関する測定方法において校正方法／妥当性検証方法ならびに測定データの不確かさの評価方法を規定するための前提として、その物性が測定法に依存しない材料固有の量（インヒレントな量）であることが重要だと考えています。

測定法依存の量（プロセス量）の場合には同じ材料を測定した場合でも測定値は測定法に依存して異なる値が得られることとなります。

JIS R1611では、測定した熱拡散率がインヒレントな量であることを検証する方法も含めた測定方法を規格に記述することで、不確かさ評価方法がより効果的であると言えます。

校正方法／妥当性検証方法ならびに測定データの不確かさの評価方法を普及させるためには、この論文により提示した精密測定技術の開発、計量標準と標準物質の整備、および測定方法の標準化に体系的に取り組むことがポイントであると考えています。

## 議論5 三位一体の取り組みの重要性

質問・コメント（小野 晃）

5.4節と6章で「計量標準と標準物質の整備」、「計測技術の標準化」、「実用計測器の開発と普及」の三位一体の取り組みが、熱物性データの生産と利用の社会システムの根幹にあると述べられています。今後熱物性以外の分野でもこのような取り組みが進むことを期待しますが、熱物性分野でこのような取り組みが行われた要因は何だったのか、当事者の立場で紹介してもらえそうですと他分野の今後の参考にもなると思います。

回答（馬場 哲也）

長さ、温度等の基本量では計量標準の精度と実用計測の精度は何桁も隔たりがあり、計量標準と実用計測では用いる技術も異なっていることが少なくないと思われます。この論文においては実用計測技

術として普及しているレーザフラッシュ法により熱拡散率の国家標準を整備するというアプローチを採用したため、技術開発の成果は計量標準と実用計測技術の両サイドに寄与しました。さらに開発した要素技術とそのシステム化による実用計測技術の高精度化と開発された標準物質による国家標準へのトレーサビリティの実現を計測技術の標準化に反映させることができました。

このようなアプローチはレーザフラッシュ法を超高速度で薄膜に適用する技術においても採用されており、同様の三位一体の社会システムが整備されつつあります。

熱物性のみならず、材料の力学物性、電気物性・磁気物性、光学物性データの生産と利用のための社会システムも同様のアプローチが適用できるのではないかと認識しています。

## 議論6 社会システムの発展のための各ステークホルダーへの期待 質問・コメント（小野 晃）

図1に熱物性データを効率的に生産し効果的に利用できる社会システムを構築するための研究シナリオが提示されています。現在この社会システムの骨組みがまずできたとところで、骨組みの強化も含めて中身はこれから順次充実させていくのであろうと思います。

このシステムが社会の中に定着していくためには、熱物性に関するさまざまなステークホルダー（大学、公的研究機関、材料製造メカ、材料利用メカ、標準化団体）に今後期待するところがあると思います。どのようなステークホルダーにどのような活動を期待するのか、著者のお考えがあればお聞かせ願います。

回答（馬場 哲也）

熱物性の計測器メカには標準物質と規格を活用したトレーサブルで計測の不確かさが客観的に保証された熱物性計測器を広く社会に提供されることを期待します。

大学および学会には、計測技術の進歩とともに供給量が增大する熱物性データを、トレーサビリティと不確かさ評価技術および情報技術の進歩を駆使して評価する新しいアプローチを提示していただくことを期待します。

公的研究機関には、その設置目的に応じて所掌する分野の熱物性データを組織的かつ継続的に収集・評価することを期待します。例えば産業技術総合研究所であればエネルギー関連材料・エレクトロニクス関連材料の熱物性データなど、原子力研究開発機構であれば原子力産業・研究に必要な熱物性データが該当すると思われます。

材料製造メカには製品の熱物性値を計量標準にトレーサブルな計測技術により測定し計測の不確かさを備えたデータを提供するとともに、販売する材料品目ごとに熱物性値のばらつきを示して提示していただければと思います。

材料利用メカには本社会システムにより、製品の高度化やイノベーションを実現するために必要とされる総合特性（熱物性を含む）を備えた材料を見いだしていただけるものと考えています。もし既存の材料がその総合特性を満たすことができない場合には、産総研は、そのような総合特性を実現する材料のニーズを材料製造メカに提示する情報ハブの役割を担っていきたいと考えています。

# オープンイノベーションと先端機器共用施設

## — 共用施設が実現する協創場とその戦略的活用方策 —

秋永 広幸

先端機器を設置した共用施設を産学官、国内外に公開し、異分野融合や人材流動を促進する場を整備することが、研究開発力を効率的に強化し、オープンイノベーションを推進するための実行力を伴う施策であると広く認識されるに至り、世界各国の公的機関で先端機器共用施設の整備が進められている。この論文では、産総研が運営する先端機器共用施設であるナノプロセス施設を紹介し、その運営戦略を説明する。そして、ナノプロセス施設が、ユーザーへの研究開発支援を通じて創出した研究成果や要素技術からなる知識パッケージを形成し、そのパッケージをユーザーに対して公開する“協創場”を構築するとともに、その協創場空間を持続的に拡げるエコイノベーション推進シナリオを述べる。

**キーワード:** 共用施設、異分野融合、人材育成、オープンイノベーション、協創場、エコイノベーション

### Open foundry to spur open-innovation

#### – Establishment of a foundry to realize an innovative cooperation platform and development of its sustainable management strategy –

Hiro AKINAGA

Open foundries enable us to share cutting-edge equipment with global partners of industry-academia-government collaboration, and to promote interdisciplinary integration and job mobility among research personnel. Foundries have been established in many world-class public organizations, and are widely recognized as one of the most effective measures to spur R&D open-innovation. In this paper, the management strategy of the AIST open foundry, the Nano Processing Facility, is discussed. In this foundry, cooperation with users brings about the integration of R&D achievements and technologies. This paper also presents a scenario for sustainable development of the foundry as an eco-innovative cooperation system.

**Keywords:** User foundry, interdisciplinary integration, human resource development, open-innovation, global cooperation platform, eco-innovation

#### 1 はじめに～先端機器共用施設とは何か～

研究開発を効率的に進めるには、先端機器を共用する施設とその試作機能が重要と考えられている。その背景としては、経済が急速にグローバル化した21世紀において、研究開発から技術開発そして企業化への展開、あるいは、製造現場から研究開発現場への研究課題の受け渡しを迅速に行う必要性が高まっていることが挙げられる。

企業が推進しなければならない研究開発とビジネスを展開する空間が広がっている現代において、研究開発と技術開発を自社内に求め、限られた空間における仕組みの構築に労力を費やしてきた内向きベクトルを持つ企業に対して、先端機器共用施設はそのベクトルを外向きに、そして空間をオープンなものに変えるエンジンとして機能する。ナノテクノロジーは極めて広い研究領域を横断する基盤技術であ

ることから、その共用施設はさまざまな産業に大きな貢献ができる。大学や公的研究機関においては、高額な先端機器を自前で持つことを避けられるため、限られた予算の効率的執行が図れるだけでなく、共用施設を介した異分野融合の促進も図れるであろう。

先端機器共用施設を、米国のナノテクノロジー研究開発の例で見てみる。米国 National Nanotechnology Initiative (NNI) では、公的機関における研究開発インフラの整備が継続的な予算投入対象として位置付けられ、NNI 総投資額の10%以上が充当されてきた<sup>[1]</sup>。国立科学財団 (NSF) の National Nanotechnology Infrastructure Network (NNIN)、エネルギー省 (DOE) の Nanoscale Science Research Center (NSRC)、国立標準技術研究所 (NIST) の Center for Nanoscale Science and

Technology (CNST) 等、それぞれに特色を持ったインフラが整備された。このNNI 関連施策とその成果を総括するとともに、2020 年へ向けた課題と指針をまとめたレポートに、先端機器共用施設とは、“科学と技術の発見 (science & engineering discovery) を イノベーション (innovation technologies) に導く試作 (prototyping) 機能を持つもの”と説明されている<sup>[2]</sup>。また、共用施設の更なる整備と機能高度化が2020 年に向けた最重要課題の一つと位置付けられた。「共用施設の試作機能なしには、さまざまな研究開発への投資が台無しになってしまう可能性がある」ことが、最重要課題として設定された理由とされている。

この論文では、まず、公的機関が運営する先端機器共用施設の類型と機能、そしてその運営におけるジレンマを説明する。次に、産総研が運営する共用施設の現状分析を基に、先端機器共用施設が持続的に成長するためのシナリオ、そして共用施設がエンジンとなった協創場の空間を持続的に広げるエコイノベーション (持続的発展可能なイノベーションシステム) を実現するシナリオを示す。

## 2 先端機器共用施設の類型と機能、課題

### 2.1 先端機器共用施設の分類<sup>[1]</sup>

先端機器共用施設には代表的な幾つかの類型がある。3つの視点において、類型を対比させて説明する。

#### 2.1.1 大型機器共用型と複数機器集約型

超大型実験装置を共用するタイプの先端機器共用施設は、国内では大型放射光施設 (Spring-8) や高エネルギー加速器研究機構のビームライン、海外ではロスアラモス国立研究所等が例としてあげられる。また、ナノテクノロジー分野の装置は比較的高額なものが多いことから、例えば超高圧透過型電子顕微鏡を共用する場合においても、大型機器共用型施設と同様の運営形態になる場合が多い。一方で、汎用の中型・小型機器であっても、それらが1ヵ所に集約されていることで、ユーザーへの強い求心力を発揮する施設がある。大学が開放している共用施設、米国ではNNIN に参画している施設等が、この複数機器集約型施設として類型化される。米国 Albany NanoTech Complex、欧州のIMEC (大学間マイクロエレクトロニクスセンター/ベルギー) とMINATEC (マイクロ・ナノテクイノベーションセンター/フランス)、産総研のスーパークリーンルーム施設等、半導体テクノロジーに係わる大型露光装置が周辺の汎用機器群とともに整備されている拠点は、これら類型の中間に位置する施設と考えられる。

#### 2.1.2 拠点型とネットワーク型

上記の大型機器共用型施設や、韓国 National Nano Fab Center (NNFC)、Korea Advanced Nanofab Center

(KANC)、シンガポール Institute of Microelectronics (IME) 等は、大型の装置を拠点内に集約することでユーザーへの求心力を高める拠点型施設と分類できる。一方、米国 NNIN に参画する施設群、国内においては文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業<sup>[3]</sup> に参画している公的機関の共用施設群等は、相補的な研究支援サービス提供を目指すネットワーク型に分類される。

### 2.1.3 知の集積・融合型と産業競争力強化型

NSRC の一つである The Center for Integrated Nanotechnologies (CINT) は、国家施策として知の集積を図り、集積された知識を融合し、そして新しい知識を創出することが期待されている施設である。成果を公開するユーザーには課金を行わず、より多くのユーザーを集めることが第一の評価指標となっている。ユーザーを受益者とみなして課金を行う施設と比較した場合、施設運用形態の観点から対極の施設として分類される。一方、産業競争力強化型共用施設では、受益者としてのユーザーに課金が行われ、成果を非公開とすることが多い。特定課題の解決を主たる目的として設立されている場合には、課題解決型共用施設と呼ばれることがある。

## 2.2 先端機器共用施設の機能と役割

先端機器共用施設は、2.1 節で記載したそれぞれの類型に特徴的な機能と役割を持つと考えられる。本節では、機能と役割を5つに分類し、特にどの類型に期待されるものなのかを整理した。なお、この論文においては、「科学」と「技術」を区別して用いると共に、「研究」と「開発」も異なるベクトルを持つ行為と考えている。先端機器共用施設のうち、特に産業競争力強化型施設においては、研究と開発の違いを明確にした方がその機能を理解しやすい(図1)<sup>[4][5]</sup>。

#### ① 異分野融合の促進

知の集積・融合型や拠点型共用施設においては、専門が異なる多くの研究者が集い、新しいつながりが構築されることにより異分野融合が促進される。新しいつながりの形成こそがイノベーションの源泉であり、多彩な人と知識が集結する共用施設の代表的な機能である<sup>[6]</sup>。

#### ② 研究成果の流動性促進

知識の生成には研究者のみならず、技術者や学生、さらには研究開発にたずさわらない営業担当者他、多彩なプレーヤーとのかかわりが必要であり、知識はそれらから生まれるパッケージ的性質を持っている<sup>[6]</sup>。共用施設においては、図1に示したように、それぞれの研究成果を取捨選択して集約する開発の過程で知識パッケージが生成される。一方、図中右側の技術開発フェーズにおいても、知識パッケージを外部転移して実用化することは容易なことではなく、数多くのプレーヤーが集結している共用施設がトレーディングゾー

ンとして機能することが重要である。

### ③ 複雑性・不確実性への対応力強化

全く新しい課題に対応する研究開発力を強化することを目的の一つとして設置されている米国NSRCは、研究開発が持つ複雑性やイノベーションの不確実性に対応できる機能を備えている。特に、複数機器集約型や知の集積・融合型の共用施設は、複雑性や不確実性への対応力強化を目的として運営されることが多い。

### ④ 技術の相補的提供

多様で幅広いユーザーからのリクエストに対し、最適な解をスピーディーに提供することが先端機器共用施設の普遍的な役割である。特に、複数の共用施設とのネットワークを構築している先端機器共用施設に対しては、それぞれの得意とする技術を相補的に提供することで、より効率的な研究支援を実施する機能が期待される。

### ⑤ 人材流動化の促進

研究者が勤務先や部署を異動した後に新たな研究をスタートアップする際には、時間的・財政的な障害が大きい。それらが先端機器共用施設を利用することによって軽減され、若手研究者の流動化が促進される。よって、NNINやナノテクノロジープラットフォーム事業では、地理的条件も考慮した上で、参画する先端機器共用施設が選ばれている。

## 2.3 先端機器共用施設運営におけるジレンマ

日本国内の多くの先端機器共用施設が直面している代表的な運営上のジレンマの一つを紹介する。公的機関にとって、高額になる先端機器の維持費用を確保することは大きな課題の一つである。そのために先端機器の遊休時間を他者の研究開発に充て、他者からの課金収入を機器

維持費に充てようと考えられることが多い。その結果として、自らの研究開発のための使用と他者への機器共用を兼ね、高額機器の有効活用をうたった共用施設が設立される。一方で、この遊休時間の有効活用を徹底すると、共用施設ではコスト削減の優先度が過度に上がり、①人件費削減、②工程数の多い支援の排除、③難しい研究開発課題の排除等が行われることになる。さらにその施設が所属する機関や財政的支援を行う機関が、ユーザーを受益者として位置付け、課金制度を整備して受益者負担を強く求めた場合には、ユーザーからもコスト削減への要求が強くなる。強いコスト削減が求められる環境で長時間使用される施設と機器の機能は疲弊し、老朽化の加速によって「コモンズの悲劇」がやってくる<sup>[7][8]</sup>。疲弊した施設と機器のユーザー求心力は低下し、結局は、さらに遊休時間が増加することとなる。機器共用を主たる業務としない限り、共用施設は機器共用が生み出すプロフィットを享受できず、合理的経営が経営力強化に結実しないジレンマに陥る。遊休時間の活用は、施設のコスト削減を目指す策の一つであるが、そのコスト削減には、提供するサービスを枯渇させる側面もあることに注意が必要である。

## 3 産総研が提供する先端機器共用施設

### 3.1 3つの先端機器共用施設とそれらの連携体制

産総研では、つくば西事業所にスーパークリーンルーム（Super Clean Room: SCR）、つくば中央第2事業所にナノプロセッシング施設（Nano Processing Facility: NPF）という、10年以上の稼働実績を持つ二つの先端機器共用施設が運営されている。また、NPFに併設する形で、課

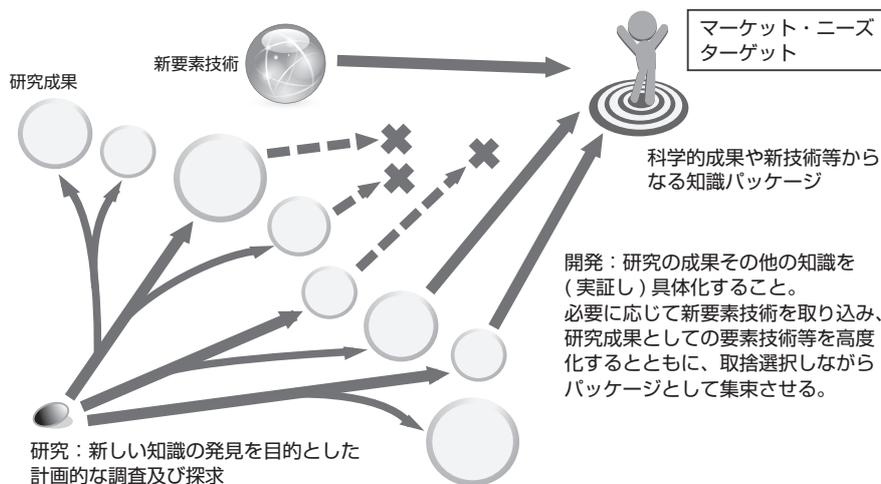


図1 研究と開発の違い

研究であれば、当初予想していなかった矢印も含め、全ての玉が成果となる発散的なベクトルを持つ。一方で、開発は、研究成果を取捨選択し、マーケットのニーズに見合う知識パッケージとして集束させるベクトルを持つ。以前は、研究と開発はその多くの部分が重なったリニアな関係にあることが多く、良い技術であれば実線になりえた。現在では、研究と開発を明確に分けて実施しないと、新しい価値は生まれない。しばしば、全く新しい要素技術も必要となる。

題解決型共用施設である機能性酸化物グリーンナノテクノロジー研究拠点 (Platform for Green Functional-Oxide Nanotechnology: GreFON) が運営されている。

SCR は 12 インチウエハのプロセスラインが構築されている 3,000 m<sup>2</sup> のスーパークリーンルーム (JIS 規格クラス 3) と、主に 4 インチウエハのプロセスラインが構築されている 1,500 m<sup>2</sup> の研究クリーンルーム (JIS 規格クラス 5) を備えた、大型機器共用型と複数機器集約型双方の特徴を持つ先端機器共用施設である。

一方、NPF は複数機器集約型とネットワーク型の特徴を持つ。また、先に紹介したナノテクノロジープラットフォーム事業や、GreFON と連携することで、知の集積・融合型と産業競争力強化型双方の機能を備えた運営がなされている。

最近では、NPF や GreFON で開発した新材料の大規模集積化プロセス技術への適用を目指して SCR を活用したり、SCR における研究開発のボトルネックを解消するための要素技術開発を NPF で行う等、これらの共用施設を研究開発のフェーズに合わせて使い分けるユーザーが急速に増えてきている。この論文では、紙面が限られていることから、今後の議論の対象として NPF に的を絞る。

### 3.2 ナノプロセッシング施設

産総研ナノプロセッシング施設 (NPF) は、2001 年 4 月に、産総研内の共用施設として誕生した。設立当初施設は 231 m<sup>2</sup> のクリーンルームからなり、当時行ったプレスリリースでは、「“アイデアの機動的実現” をモットーに、電子工学、光工学、分子工学、バイオ・テクノロジー関連の研究者が共同で利用する施設であり、次世代情報デバイス、超高密度光記録、分子デバイス、センサー等の研究開発を通じて、各研究者の創意を融合し、21 世紀に期待されるナノテクノロジー応用製品に結びつけ、新規産業の開拓を行うことを目的としている」と謳っている。ナノテクノロジー研究部門を中心に、主に産総研内の 7 つの研究組織が協力して運営を行い、産総研内の各研究組織で必要とされるさまざまなマイクロおよびナノメートルレベルの構造形成を、広範な専門分野の研究者がバリアを感じることなく、高スループットで、再現性良く、均一に実現するための設備および支援体制の整備・運用を目指した結果、2003 年 4 月には産総研内のユーザーが 100 名を超えた。ナノテクノロジー研究部門が主たる運営の責任を担ったものの、研究者が行き来する十字路となり研究支援に徹することを当初からの基本方針としており、共用施設に設置される先端機器へのアクセスは、どのユーザーに対しても公平となるように運営がなされていた。

現在、NPF は、クラス 100 から 10000 (米国連邦規格) のクリーンルーム 600 m<sup>2</sup> と、一般実験施設 300 m<sup>2</sup>、ユー

ザーの一時滞在スペース等を備えた先端機器共用施設に発展している。2002 年から現在まで文部科学省の研究支援プロジェクトを受託し、知の集積・融合型と産業競争力強化型双方の機能を持った共用施設としての運用を推進している。2012 年度末の段階で、1,200 人を超えるユーザー登録があり、そのうちの約 2/3 が産総研外の所属である。数百万円から数億円クラスの機器が合計で約 50 台設置されており、平均して毎年 100 件程度の支援課題が実施されている。産総研が推進する数多くの民間企業との共同研究を支え、つくばイノベーションアリーナ事業にも参画している<sup>[9]</sup>。

NPF は文部科学省の委託事業を活用して、国内に共用施設ネットワークを構築している。例えば、東日本大震災後に約 4 ヶ月の稼働停止となったが、その間、NPF と同様の機器を設置している都内大学の共用施設に民間企業ユーザーを紹介し、ユーザーの研究開発スケジュールの遅れを最小限に抑えた。このように復元力のある (レジリエントな) 研究開発体制を維持することも、それぞれの施設の機能を一部重畳させながら相補的に技術を提供するネットワーク型共用施設の重要な役割である。

NPF では、特許出願における実施例を補強するための技術支援、学術論文の査読プロセスにおける査読者への回答資料作成支援等、ユーザー 1 人 1 人に対する手厚いサポートが実施されている。NPF の活動ドメインである Support for Success は、第一にユーザーの成功、そしてユーザーの成功を介して NPF 関係者の成功があると考えて行動することを宣言したものである。この結果として、同等規模の国内共用施設と比較して、NPF は民間企業ユーザーの比率が高い施設となっている<sup>[10]</sup>。NPF にて実際に行われた民間企業への研究開発実施例を図 2 に示した。ユーザーからの試作依頼を受け、NPF のプロセス技術者が新プロセスの開発を行い、そのノウハウが NPF に蓄積された。なお、NPF を活用する民間企業のユーザーはリスクの高い研究課題を持ち込むことがあり、そのようなケースにおいては“当初設計通りのプロセスでは課題が解決されないことが明らかになった”ことが成果となる場合も多い。ユーザーが最小の投資で、研究開発の複雑性や不確実性へ対応していることの事例である。

### 4 先端機器共用施設 NPF の現状分析と協創場

本章では、産総研が運営する先端機器共用施設のうちで最も登録ユーザーの多い NPF について現状の分析を行う。次に、その分析結果を用いて、NPF が新しいユーザーを獲得して持続的に成長する協創場を構築するための戦略を述べる。

### 4.1 NPFの現状分析と経営戦略

NPFの現状を把握するために、SWOT分析を行った。SWOT分析を選択した理由は、類似する共用施設が増加し、商業ベースでファウンドリビジネスを展開する民間施設も存在する中、低コストを競争力の源泉とするコストリーダーシップを目指さないという境界条件のもとに、いかにして差別化したNPF利用価値をユーザーに提示できるかという明確な戦略のもとに分析を行えるからである。SWOT分析の結果を図3に示す。内部環境と外部環境の仕切りは産総研内外の境界線に置き、その内容は産総研が直接コントロールできるか否かで分類した。

通常のクリーンルームでは、電子デバイスの性能に影響を持つアルカリ金属や重金属等不純物や微粒子の存在を徹底的に少なくする必要がある。よって、それらの不純物がクリーンルーム内に混入する危険性を伴う新材料の

導入には極めて慎重にならざるを得ない。しかし、「強み（STRENGTHS）」に明らかのように、NPFでは、機器操作等に工夫を加えて電子デバイス研究開発と新材料研究開発を両立させることで、新しい材料の導入障壁を大幅に下げること成功している。また、NPF利用価値を差別化するという目標の元にSWOT分析各項を眺めると、「強み（STRENGTHS）」と「機会（OPPORTUNITIES）」のクロス分析から明らかのように、特に材料メーカーや装置メーカーからのユーザーを集めることを戦略として選択し、より多彩な産業分野のユーザーが集う施設を目指すべきであるという結論が示唆される。

次に、SWOT分析の結果を基にして、産総研が取るべき戦略のさらなる明確化を行った。SWOT分析では内部環境と外部環境にミシン目を入れた分析を行うため、戦略を策定する手法として、同じく内部と外部にイノベーション

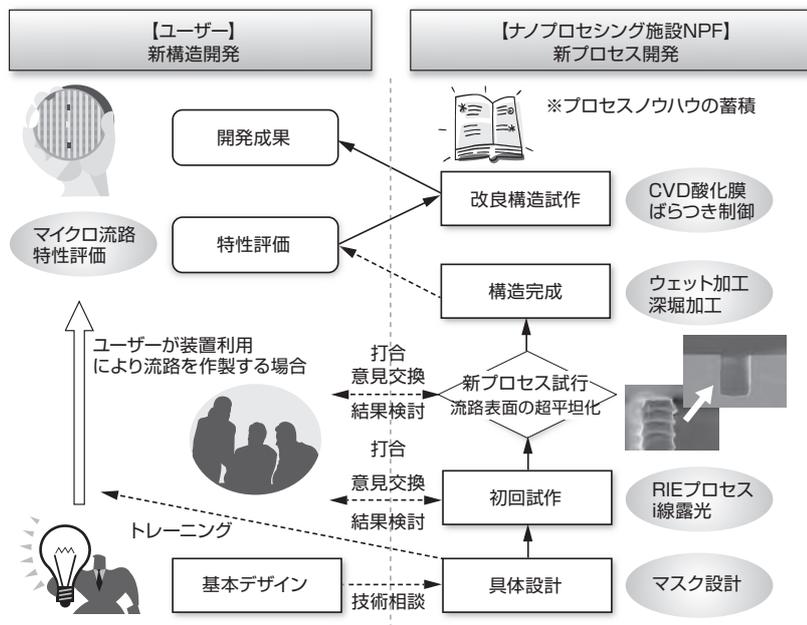


図2 NPFにて実際に行われた研究開発の例  
マイクロ流路開発を目指すユーザーからの試作依頼を受けたのち、標準プロセスでは所望の特性を示す流路の作製が不可能であったことから、エッチングプロセスの開発を行った。さらに、流路表面の超平坦化とばらつき制御を両立させる酸化膜形成プロセスを開発することで、試作成功に至った。

内部環境	<b>STRENGTHS</b> ・ 様々な研究開発プロジェクトの集積 1000名を超える登録ユーザー ・ 世界的に優れた研究テーマ 機能性酸化物関連技術 (GreFON) ・ 新材料持込が容易 ・ 優秀な技術者 ・ 豊富な技術研修プログラム ・ 産総研リソースへのアクセスしやすさ	<b>WEAKNESSES</b> ・ クリーンルーム稼働時間の制限 ・ クリーンルーム空きスペースの不足 ・ 基盤プロセス用装置の老朽化 ・ 多い装置トラブル ・ マンタイムの不足 ・ 施設運用・予算執行規制 ・ 技術蓄積システムが未構築 ・ 技術継承システムが未構築 ・ 技術移転システムが未構築
	<b>OPPORTUNITIES</b> ・ 連携共用施設の数多さ ・ 研究開発と共用設備運営の水平分業意識の高まり ・ 設備共用化による研究資源有効活用 設備維持費用負担低減、 省エネルギー意識の高まり ・ 強い国内材料・装置メーカーの存在	<b>THREATS</b> ・ ナノテク共用施設事業への新規参入 組織と施設 ・ 研究開発拠点の海外移転

図3 NPFに関するSWOT分析結果

の源泉を分類して戦略検討を行う競争戦略論の手法を採用した<sup>[11]</sup>。その結果を、図4に示す。左上、資源アプローチにおいては、NPF 内部の資源に着目し、その資源そのものを強化していく戦略を提示する。SWOT 分析において「弱み (WEAKNESSES)」にある項目のうち、技術継承システムを構築するというアクションアイテムが導き出される。この課題は、図中の「▼」で示されている。同様に、右上の学習アプローチにおいては、それをどのように実現していくかというプロセスに軸足を移した検討を行うことになる。我々は、この項目に対しては、「強み」を生かすという観点から、プロセス技術者によって蓄積されている技術ノウハウを求心力にして、ユーザーへの情報開示を行うというアクションアイテムを得た。一方、ポジショニングアプローチにおいては、NPF が持つ強みを生かせるように、NPF を位置付ける戦略を検討することになる。このアプローチに関しては、NPF と生産拠点との強連結を図る等、長期的な検討が必要となった。NPF が先端機器共用施設として、デバイスメーカー、材料メーカー、装置メーカー、そしてさらにはファブレス企業等に対しても求心力を持つことができれば、ユーザーのビジネスにおける移動障壁を下げる事が可能である。

先端機器共用施設は、ユーザーと産総研の双方が価値を生み出す場である。ユーザー視点になって考えれば、拠点の生み出す価値の総量が大きくなると同時に、その取り分も大きくなければ魅力がない。よって、NPF が採択すべきゲームアプローチは、ユーザーを含めた外部環境に働きかけながら、そのような都合の良い状況を作り出すことで新規ユーザーを獲得する戦略となる。NPF は半導体プロセス開発が行えるほどの規模は無いものの、要素技術開発を行うデバイスメーカーのユーザーも多い状況にあることから、例えば材料メーカーの研究開発パートナーとして NPF が機能するようになれば、NPF を含むステークホルダーの

範囲が広がるとともに、デバイスメーカーの NPF 活用方法に関する選択肢を増やすことも可能となる。さらには、複数の企業から数多くの研究者が NPF で研究開発を行っているという強みを生かして、NPF から得られる成果の国際標準化を積極的に進めることができれば、まさに、ゲームチェンジングを目指した NPF 活用法をユーザーに提示できると考えられた。

#### 4.2 NPFにおける協創場構築シナリオ

前節で立案した戦略を用いて、NPF がより高度な研究開発の推進ツールとなるためのシナリオを描く。シナリオ構築に際しては、NPF がゲームアプローチを採用することで、下記に説明する協創場が成長するという仮説を立てた。ここで、第2章第3節に記載したジレンマを抱えながらも共用施設運営を推進しなければならないという視点から見れば、アウフヘーベン型のシナリオを描くことができるであろう<sup>[12]</sup>。NPF では、数多くのブレイクスルー型研究開発が行われてきた実績もある<sup>[13]</sup>。しかし、紙面が限られていることもあり、この論文においては、NPF が中核となった協創場空間を構築し、そして持続的に協創場空間を拡大するというシナリオを描いた。そのエコイノベーション推進シナリオを図5に示す。著者らが今までの10年間に行ってきたことは、共用施設と研究支援関連規程の整備であり、図5において NPF と記載された縦長長方形とその内側を整備してきたことに相当する。NPF は共用施設という一つの協創場になっていて、国内外共用施設とは線で結ばれた連携を構築してきた。一方、図4で示したゲームアプローチを推進することで、NPF は提供サービスを高度化し、NPF の持つネットワークも活用してサービス提供力を強化することで新規ユーザーを創造していく。そして、創造されたユーザーは新たな研究シーズを NPF に持ち込み、NPF がそのシーズをインキュベートしてパートナー企業やユーザーに手渡す過程でさらに提供サービスが高度化されるというポジ



図4 SWOT 分析 (図3) を基に作成した NPF に関する戦略分析マトリックス  
 SWOT 分析における「強み (STRENGTHS)」を生かして NPF を差別化するためのゲームアプローチを策定するまでの過程を黒矢印で示した。図中、本文には記載しなかった弱み (▼印) を克服するためのアクションアイテムについても記載を残してある。

タイプフィードバックによって、NPF を中核とした協創場は NPF の枠を越えて拡大し、持続的に成長していく協創場が構築される。このシナリオでは、NPF が知識パッケージを構築・高度化してユーザーに手渡すという協創場が、さらに新規ユーザーによって外向きに拡大され、パートナー企業や国内外共用施設のビジネス空間をも取り込んで階層的に成長していく。よって、この成長する協創場を、研究開発の推進ツールとして共用施設をとらえる視点からエコイノベーション研究開発システムと名付けた。先述のように、この 10 年間で、研究開発のツールとして先端機器共用施設の活用が定着し、その共用施設がネットワークを構築したことで、研究開発の様相は大きな変革を遂げた。例えば、「研究者や技術者が機器保守等の作業から解放され、限られた時間を有意義に活用できるようになった」、あるいは「研究開発に必要な技術シーズを共用施設で効率的に獲得することができるようになった」等、研究開発システムそのものが変わってきたと言える。著者は、このエコイノベーション研究開発システムによって、研究開発の枠を越えて協創場を拡げることで、2020 年には、「研究開発成果の社会受容（科学リテラシーの向上等を含む）を促進する場としての先端機器共用施設」を実現したいと考えている<sup>[12]</sup>。

ここで、このエコイノベーション研究開発システムとその課題について、「提供サービスの高度化」と「ユーザー創造」の観点から、より詳細な説明を行う。まず、「提供サービスの高度化」は、単なる技術的な高度化だけでは推進できない。例えば、産業競争力強化型共用施設において開発された技術的ノウハウであっても、共用施設とユーザー派遣元との双方に同等の機器さえあれば容易に技術移転できるといった類のノウハウでは、結果としてその新技術を用いた製品開発までもが容易に他者に追従されてしまう。よって、ユーザーにとっては、さまざまな技術的ノウハウが連結し一体化した知識パッケージを共用施設で開発し、必要に応じて生産拠点に技術移転する方が、過度な研究開発競争を避けるという観点から時間的投資効率がより高い事業となる。さらに、先端機器共用施設において、まずビジネスにおけるターゲットを設定してから、設計、製造、セットの各階層における利益を最大化するようにパッケージ化を図れるようになれば、製品化と事業化の間に横たわる“死の谷”を乗り越え、社会がイノベーションを実感できる事業化さらには新産業化へ貢献できるであろう<sup>[14]</sup>。パッケージ化を図るにあたり、研究成果や要素技術の取捨選択や連結を行うのは人である。独立行政法人や大学等の先端機器共用施設においては、技術開発を担うプロセス技術者の育成や、生産拠点他技術移転先への人事異動障壁の低減等が課題となっている。

先端機器共用施設が新しいユーザーを創造するためには、その共用施設にさまざまな人材が集まり、創造性豊かな若手人材が輩出される源泉となるように運営を行うことが重要である。NPF においては、多彩なカリキュラムを提供する人材育成スクールを開催しているが、スクール参加者が新規ユーザーとして共用施設の利用を開始するだけでなく、スクールに協力した装置開発メーカーとスクール受講生と間で創発的に連携が形成され、その連携体制から新規研究テーマとそのテーマを実施する新規ユーザーが誕生した例も少なくない。すなわち、先端機器共用施設においては、実践的なスキル向上という価値をユーザーに提供することで、共用施設のユーザー求心力を高められることになる。ユーザー求心力の向上は共用施設側にとつてのプロフィットであり、ユーザーのスキル向上は受益者負担を補ってんしても余りあるユーザー側のプロフィットであることから、第 2 章第 3 節に記載したジレンマを解消するための方策として、人材育成事業の充実は、先端機器共用施設に必要な不可欠な課題となっている。最近では、人材交流ネットワークを海外に拡げることも我が国における先端機器共用施設の課題と認識されるに至っている。NPF では、その設立当初よりアジア各国の共用施設との情報交換を推進し<sup>[15]</sup>、さらに米国 CINT と連携をとった創エネルギー素子開発支援事業を 2010 年度から開始した。国境を越えた協創場空間構築に必要な施設運用に係わる考え方を整理すること、そしてその関連規程整備が課題となっている。

## 5 まとめ～エコイノベーション実現へのシナリオ～

先端機器共用施設とは、先端「機器」を広く共用することで「人」と「知識」が集う場を構築するためのツールである。そして、先端機器共用施設は、「人」と「知識」を効率的に流通させる仕組みを持つ。これこそ、オープンイノベーション機能であり、産総研が先端機器共用施設を運営する意義である。P.F. ドラッカーは「事業の唯一の目的は利潤ではなく、顧客（価値）創造にこそ求められ、そのための事業の機能はマーケティングとイノベーションだ」と説明している<sup>[16]</sup>。これに倣えば、先端機器共用施設がユーザーの求める成果を提供するために必要な機器と技術ノウハウを提示する行為が「マーケティング」であり、共用施設の研究推進力および開発実行力、そして知財や情報の集約力と発信力を生かして、新しいユーザー、新しい支援依頼を創出することが、我々の「イノベーション」となろう。

図 5 では、知識パッケージ（図 1）をユーザーからの依頼に応じて統合する共用施設という協創場があって、それら共用施設を中核とした協創場を階層的に統合することで、さらに協創場の空間を持続的に拡大していくエコイ

バージョン推進シナリオを示した。この論文では、この階層的統合をエコイノベーション研究開発システムと名付けたが、このシステムを推進する主体も「人」である。著者が尊敬するS教授は、我が国で共用施設事業が盛んになる以前に、「研究開発を行うユーザー、プロセス技術の開発を担当する技術者が互いに Acknowledge する（互いの価値を認め合う）文化を醸成することが我が国にとって必要である。そしてそのために真の共用施設を設立しなければならない」とお話しされた。図中の輪は、ユーザーをはじめ、研究者や技術者がイコールパートナーシップでつながる環である。この環があって初めて共用施設の連携は強まり、それぞれの協創場に重なりが生まれる。勁健な環の構築が、産総研のみならず日本の先端機器共用施設全体の継続的な課題である。

### 謝辞

この論文に記載した共用施設における事例分析やSWOT分析は、産総研ナノデバイスセンター（2011年4月～2013年3月）に所属されていた堀川剛氏、秦信宏氏、品田賢宏氏の援助を得て行ったものである。この論文の一部は、同じく森雅彦氏、井上靖朗氏、福田浩一氏、恩田則之氏、鳥久氏、浅沼周太郎各氏との議論を基に執筆された。この論文に記載した試作事例を実際に担当されたプロセスエンジニア他、産総研ナノデバイスセンターに所属された各位にこの場を借りて心より御礼申し上げる。

注）著者が尊敬するN教授は、これらの効果をProximity Effectと呼んでいる。

### 参考文献

- [1] 主要国のナノテクノロジー政策と研究開発・共用拠点、G-TeC報告書（CRDS-FY2011-GR-01）、独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター（2011）、<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2011/GR/CRDS-FY2011-GR-01.pdf>
- [2] Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020, Retrospective and Outlook, (Sept. 30, 2010), <http://www.wtec.org/nano2/>
- [3] 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム, <https://nanonet.go.jp/>
- [4] ヘンリー・チェスブロウ, ウィム・ヴァンハーベク, ジョエル・ウェスト, PRTM監訳, 長尾高弘訳: オープンイノベーション, 英治出版 (2008).
- [5] 出川通: 技術経営の考え方, 光文社新書 (2004).
- [6] 上山隆大: アカデミック・キャピタリズムを越えて, NTT出版 (2010).
- [7] G. Hardin: The tragedy of the commons, *Science*, 162 (3859), 1243-1248 (1968).
- [8] 秋道 智彌: コモンズの地球史, 岩波書店 (2010).
- [9] つくばイノベーションアリーナナノテクノロジー拠点, <http://tia-nano.jp/>
- [10] イノベーションシステムに関する調査、第4部 基盤となる先端研究施設、平成20年度科学技術振興調整費調査研究報告書（NISTEP REPORT No.130）、文部科学省 科学技術政策研究所 (2009).
- [11] 青島矢一, 加藤俊彦: 競争戦略論, 東洋経済新報社 (2012).
- [12] 小林直人, 赤松幹之, 岡路正博, 富樫茂子, 原田晃, 湯元昇: *Synthesiology*論文における構成方法の分析 (議論5), *Synthesiology*, 5 (1), 36-52 (2012).
- [13] 学術論文として発表されている例, K.Hata, Don N. Futaba, K.Mizuno, T.Namai, M.Yumura and S. Iijima: Water-assisted highly efficient synthesis of impurity-free single-walled carbon nanotubes, *Science*, 306, 1362-1364 (2004).
- [14] 半導体戦略プロジェクト～産業競争力強化のための先端研究開発～、産業競争力懇談会2011年度プロジェクト最終報告 (2012), <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema41-L.pdf>
- [15] Asia Nano Forum, <http://www.asia-anf.org/>
- [16] P.F. ドラッカー著、上田惇生編訳: マネジメント【エッセンシャル版】、ダイヤモンド社 (2001).

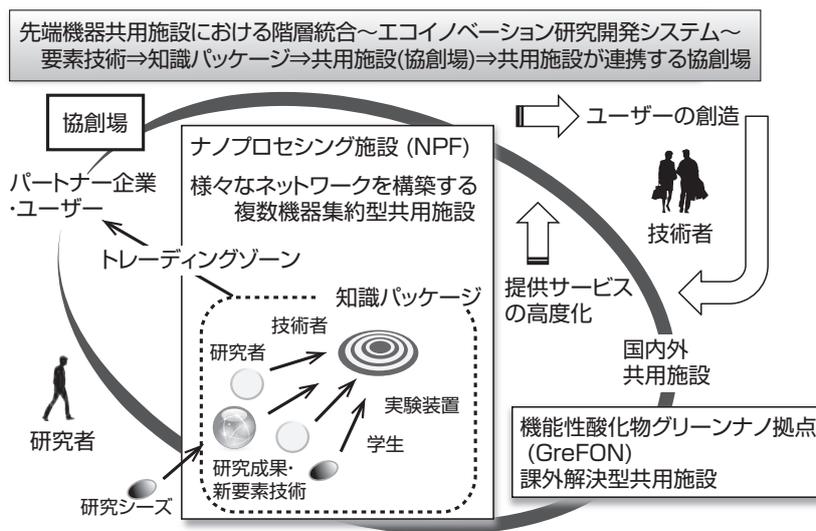


図5 エコイノベーション実現にむけたシナリオ

研究成果や新要素技術を統合して知識パッケージとする先端機器共用施設が、それぞれの協創場を成長させる。そして、先端機器共用施設は提供する知識パッケージを高度化し、その高度化された知識パッケージを持った研究者、技術者、そしてユーザーが、それらの共用施設の連携を促進し、協創場を統合することでさらに高度な協創場を構築する。その仕組みが、エコイノベーション研究開発システムである。

**執筆者略歴**

秋永 広幸 (あきなが ひろゆき)

1992年筑波大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。産業技術総合研究所ナノ電子デバイス研究センター副研究センター長等を経て、2011年よりナノデバイスセンター長、2013年4月からナノエレクトロニクス研究部門総括研究主幹、現在に至る。この間、ベルギーIMEC客員研究員、東京大学客員助教、東京工業大学客員教授、大阪大学客員教授等。2003年丸文学術賞。現在、国際半導体技術ロードマップ・新探究材料ワーキンググループCo-Chair。国際電気標準化会議(International Electrotechnical Commission, IEC)、TC113 Convenor。機能性酸化物を用いた不揮発性メモリの研究、先端機器共用施設の運営等に従事。

**査読者との議論****議論1 全体評価**

コメント(小野 晃:産業技術総合研究所)

この論文はオープンイノベーションを推進するための先端機器共用施設の問題を取り上げ、当該施設の運営に豊富な実務経験を有する著者によってその運営シナリオ、実績、評価が述べられています。共用施設の利用者や運営者にとって参考になる情報が多く含まれており、シンセシオロジー誌の論文として優れたものになっています。

**議論2 知識パッケージの発信**

質問・コメント(赤穂博司:産業技術総合研究所評価部)

協創場システムでは、知識パッケージの創出とともに発信が重要と考えられます。知識パッケージ発信についての方策や方法をご教示ください。

回答(秋永 広幸)

まさに、情報発信サービスが、オープンイノベーションを推進する求心力向上の第一歩になっています。NPFでは、施設におけるサービスを以下の8つに類型化してきました。(1)技術相談、(2)装置利用、(3)技術支援、(4)成果創出支援、(5)実地訓練、(6)人材育成、(7)情報発信、(8)ネットワークです。

7番目の情報発信サービスとしては、ニュースレターや教本の発行、各種ワークショップの開催を行ってきていて、最近ではFacebook等ICT媒体の活用も開始しています。例えば、ニュースレターにおいて特徴的な微細加工の結果を紹介し、その知識パッケージとしての微細加工プロセス一式はNPFに参加したユーザーに利用してもらう等のサービスを行っています。一方、微細加工やナノ計測・分析に係わるノウハウを整備し、アーカイブ化して複数のユーザーと共有しつつさらに高度化する仕組みは未構築で、試行錯誤を繰り返しているところです。研究成果はユーザーに、高度化された技術ノウハウは共用施設側にといたような切り分けを行うこと、あるいは図2の右上に記載したプロセスノウハウを新しい別のユーザーへの研究支援に活用すること等は、現実的には一筋縄ではいかないことが多くなっています。今後の課題と認識しています。

**議論3 共用施設の運営におけるジレンマ**

質問(小野 晃)

2.3節で先端機器共用施設の運営におけるジレンマの一つが述べられています。この論文で述べられたもの他にも運営のジレンマがあれば、簡単に紹介していただけませんかでしょうか。

回答(秋永 広幸)

2.3節では、遊休時間活用と受益者負担に係わるジレンマの例を記

載しましたので、ここでは、課金設定と受益者負担に係わるジレンマをご紹介します。

先端機器の共用体制が整えられ公開が開始されると、より最先端でより使いやすい共用体制が整っている装置ほど、より多くの利用予約を受けることになり、結果として多くのユーザーがその装置の運転にかかるコストをシェアできることとなります。ここで、受益者が負担する当該機器のコストに、その運転に必要となる実費相当額が上限として宛てられた場合には、次のジレンマが発生します。すなわち、実費相当額が上限の場合には、コストシェアにより当該機器の課金単価が安くなり、安い課金単価はさらに多くのユーザーを呼ぶ求心力となることから、遊休時間活用と受益者負担に係わるジレンマと同様に、コスト削減下での機器老朽化が加速され「コモンズの悲劇」が訪れることとなります。施設を運営する観点から考えれば、利用依頼が多い機器の課金は高く設定する方が良いことも多いと考えています。例えば、高い課金設定は混雑するマシンタイムを緩和する効果を持ちます。また、実費相当額以上に集められた余剰分の課金は、同等装置の追加設置や、あるいは老朽化した装置のリプレースに割くことが可能となり、結果としてユーザーへの支援が高度化することにつながるからです。

一方で、優れたアイデアを持っている人が必ずしも十分な研究開発予算を持っているわけではないことから、先端機器共用施設はそのような人への財政的負担を軽減しつつ研究開発のスタートアップを支援する役割も担うべきです。ユーザーの試行的な利用を促進するための制度整備も、先端機器共用施設における今後の課題となっています。

**議論4 最先端機器の更新**

質問(赤穂 博司)

4.3節の「ジレンマ解消」で、装置の有効活用ならびに陳腐化サイクル延長についてはよく理解できましたが、最先端装置の更新あるいは導入に対する方針もご教示ください。

回答(秋永 広幸)

NPF設立当初は、材料分析から成膜、リソグラフィ、デバイス評価等の一貫プロセス構築を図るための装置を優先して導入していました。最近では、NPFがネットワーク型共用施設であることから、連携をとっている共用施設群と相補的であると同時に、強みであるナノエレクトロニクス分野やマテリアルサイエンス分野等における技術高度化を図るという方針で装置の導入を進めています。例えばNPFが参画しているナノテクノロジープラットフォーム事業では、他機関に電子ビーム描画装置や電子ビームマスク描画装置が多数設置されていることから、NPFではターンアラウンドタイムに優れた描画装置を導入し、さらに、デバイス作製プロセスや評価に係わる最先端機器の導入を優先して進めています。

**議論5 機関を横断した共用施設の連携**

質問・コメント(小野 晃)

5章と図5で協創場を成長させるために異なる機関をまたいで共用施設を階層的に統合させるシナリオが提示されており、今後の発展が期待されます。ナノテクノロジーの分野でこのような試みが行われているかどうか、行われていればどのように行われているか紹介していただけないでしょうか。

回答(秋永 広幸)

2.1節でご紹介した米国NNINや我が国のナノテクノロジープラットフォーム以外にも、台湾、米国、オランダ、オーストラリア等に共用施設ネットワークがあります。米国においては、微細加工と計測、シミュレーションの各ネットワークが、ナノテクノロジープラットフォーム事業においても、微細加工、微細構造解析、分子・物質合成の各ネットワークが階層的な連携をとっています。実際には、研究実施に伴う契約や知的財産の取り扱いに係わる制度上の問題が残っているもの

の、これら Network of Networks で研究開発を行うユーザーは、すでに複数の機関に属する共用施設を目的と研究のステージに合わせて活用し、自身の研究開発を加速することに成功しています。

NPF においても、物質・材料研究機構、東京大学、東京工業大学、京都大学をはじめ、ナノテクノロジープラットフォームに参画する複数機関の共用施設を活用しているユーザーが増えてきています。最近、NPF ではアジア各国との共用施設連携を促進するための ICT 技術の活用を開始しているところであり<sup>[15]</sup>、国際的な求心力を持つ先端機器共用施設となることを目指したいと考えています。

## 議論6 先端機器共用施設と図書館との対比

質問・コメント（小野 晃）

大学や公的研究機関において研究用の共用施設を持続的かつスムーズに運営することはなかなか容易でないように思います。かつて大学で共用施設として分析センターを設置することが盛んに行われましたが、うまく定着しなかったという意見もあります。

一方で図書館は書籍や資料の共用を目的とした施設ですが、大学や研究機関での運営は十分定着しています。機器の共用施設と対比して図書館が成功している理由は何でしょうか。単に伝統と経験の長さの差が出ていると言うことでしょうか。

回答（秋永 広幸）

先端機器共用施設の運営は、総合病院のそれと比較されることが多かったのですが、図書館と比較することも有意義です。

図書館の運営に関して、「図書館学の五法則（参考文献 S1, S2）」が広く知られています。「(1) 本は利用するためのものである。(2) いずれの人にもすべて、その人の本を。(3) いずれの本にもすべて、その読者を。(4) 読者の時間を節約せよ。(5) 図書館は成長する有機体である。」からなる五法則において、「本」を「装置、あるいはノウハウも含めた知識パッケージ」、「人」を「ユーザー」、そして「図書館」を「共用施設」に置き換えると、まさに協創場としての先端機器共用施設の運営指針になると考えています。この五法則の発表は 1931 年になされ、例えば、(2) は図書館の社会的意義とその目的を達成するための財政的問題に関する検討課題を提示しており、(4) は読者サービスを向上するための図書館制度から配架や分類にまでわたる広い課題を提示しており、ご指摘のように、図書館にはその運営に係わる伝統と長い経験が積み上げられています。さらに最近では、オープンアクセス化することによって新しい知の創造に積極的に貢献しようとする、図書館の新しい試みも報告されるようになってきました（参考文献 S3）。

一方、未だ、先端機器共用施設の運営に関する検討が系統的また学術的に行われていない現状ではありますが、最近の 10 年間で、大学や研究機関における共用施設の重要性は強く認識されるようになったと考えています。図 5 に示したように、共用施設は多様な研究開発を推進し、そしてその成果を社会に還元していく場となっています。よって、研究現場と社会を繋ぐ場としても適切な役割を果たせるはずで、著者は、今後の 10 年間で共用施設が研究開発成果の社会受容に関しても大きな役割を果たすようになって考えており<sup>[2]</sup>、この論文がその先駆けとして幅広い分野の多くの読者にお読みいただけることを期待しています。

[S1] 今まど子: 図書館学基礎資料 第十版, 樹村房 (2011).

[S2] 竹内愼: 図書館の歩む道, 日本図書館協会 (2010).

[S3] R. Monastersky: The Library Reboot, *Nature*, 495, 430-432 (2013).

## 議論7 共用施設運営に関するシナリオとその時間スケジュール

コメント（小野 晃）

産総研のナノテクノロジー関係の共用施設は 2000 年代初めに建設が進められましたが、当初どのような共用施設にするかという構想（シナリオ）は練られていたと思われます。2000 年代のシナリオと 2010 年代のシナリオを対比することで、この 10 年間の産総研の先端機器

共用施設の展開が、読者によりよく理解されると思います。

質問・コメント（赤穂博司）

第 1 章において、2020 年へ向けた課題として共用施設の整備と高度化が位置付けられています。ここで記述されているシナリオもこの時期を一つの目標としていると思われます。このため、このシナリオの実現に向けた時間的なスケジュールも示していただくと、より理解が深まると思いますが、如何でしょうか？また、目標となる 2020 年の位置付けも記述することによって、戦略的運営に対するシナリオのダイナミクスがより明確になると考えられます。

回答（秋永 広幸）

設立当初の NPF が構築していたシナリオを 3.2 節に、また、4.2 節に時間的なスケジュールを記述しました。

著者は、参考文献 [2] において、共用施設の進化の過程を、2005 年に「User facility and network of user facilities」、2010 年には「Problem-solving user facilities, and networking」、2015 年には「User facility as a center of Science and Technology formation」となると述べました。そして 2020 年の共用施設は、「User facility in a society, as demonstrative test area and for outreach activities」となるべきと考えています。

## 議論8 企業による先端機器共用施設利用のねらい

質問・コメント（小野 晃）

4.2 節において述べられているように民間企業がターゲット設定からパッケージ化まで全体を「先端機器共用施設において」行えるようになれば素晴らしいことと考えますが、企業秘密やもろもろの理由から、実際は企業にとって先端機器共用施設は要素技術や基盤技術の開発・検証のための一つのツールとして位置付けるのが通常ではないでしょうか。オープンイノベーションが重要であるといっても、「ターゲット設定」や「パッケージ化」はそれぞれの企業の中で行うのではないかと想像します。SCR と NPF とでは状況が異なると思いますが、仮に先端機器共用施設が一つのツールに過ぎないとしても、企業にとって「先端機器共用施設」の利用価値はなお高いと言えないでしょうか。

回答（秋永 広幸）

産業界に対する先端機器共用施設の役割について、重要な論点です。ご指摘のように、2.1 節に記載したネットワーク型、知の集積・融合型の共用施設では特に、民間企業ユーザーが、実用化研究開発プロセスの一部のみを実施する事例が多くみられます。NPF においても同様です。例えば、新しい材料を製造プロセスに導入する際の要素技術開発や、デバイス試作及びその特性評価等があげられます。新しい材料や技術を導入するに当たっては当初計画通りの結果が出ないことも多く、その観点からリスク回避を行っているのとらえることができ、2.2 節と 3.2 節に記載した「不確実性への対応」例となっています。

一方で、研究開発の過程でボトルネックが明らかとなり、その結果として、新たにターゲットを設定することになった場合には、技術的課題の明確化、不良原因の解明、そして、それらを実現するために必要な知識と技術の速やかな提供を行うことを通じて、NPF がそのターゲット設定からご支援することもあります（参考文献 S4）。新しい研究開発の過程で、要素技術のパッケージ化を行う担い手が民間企業側になるのか、あるいは NPF 側になるのかはケース・バイ・ケースとなりますが、ターゲット設定から二人三脚で研究開発を進める場合には、その後のプロセス開発だけではなく、特許出願等による知的財産権（intellectual property: IP）の確保や、フィールドテスト用デバイスの開発等、まさに知識のパッケージ化までを NPF にて行うこともまれではありません。この場合、ご推察の通り、企業が元々持っているバックグラウンド IP と NPF で開発されたフォアグラウンド IP に境界を設ける合意形成が課題となります。さらに、そのフォアグラウンド IP を、NPF を中核とした協創場におけるバックグラウンド IP

として活用することが、エコイノベーション研究開発システム実現のために必要不可欠です。一つずつ成功事例を積み上げていきたいと考えています。

補足的な説明となりますが、参考文献 S4 に記載の NPF に関する調査結果において、「研究者の質的向上、スキルアップに役立った」という回答が複数ありました。研究開発推進のみならず、社員育成の観点からも、民間企業にとっての「先端機器共用施設」の利用価値は高いものとなってきています。実際に、社員教育プログラムの一つとして、NPF における実習を活用している民間企業があります。

[S4] 文部科学省・先端研究施設共用イノベーション創出事業【ナノテクノロジーネットワーク】研究課題追跡調査報告書 (2012).

### 議論9 企業や研究グループによるNPF利用のメリット

質問・コメント (小野 晃)

産総研の NPF は設立以来 10 年以上を経過し、その間文科省のサポートも継続して受けるなど、スポンサー側から成功と見なされていることは喜ばしく思います。その一方で、成功の程度は NPF に参加した企業や研究グループの評価によってこそ決まるものとも思いません。

そこで NPF を利用した企業や研究グループが NPF の利用からそれぞれどのようなメリットを受けたのかという、NPF に対する利用者側の評価を知りたいと思います。といっても統計データのような「定量的・客観的」な評価は難しいだろうと思いますので、NPF に対する利用者の評価を、NPF を実際に運営して日常的にユーザーに接してきた著者から「定性的・主観的」で構いませんので事例的に紹介していただけませんか。

回答 (秋永 広幸)

NPF では、微細加工やナノ計測・分析に関するスクール等、さまざまな人材育成事業を推進してきました。そして、スクール後にアンケートを行い、受講生から回答をもらうことにしています。次年度に開催するスクールのカリキュラム立案に生かすためです。最近、自由記述の質問項目に対して、「上司からの紹介でスクールに参加した」、

「後輩に参加を勧めたい」という回答が増えてきています。議論 8 で回答しましたように、利用した企業や研究グループが「NPF の利用によって、参画研究者・技術者のスキルアップにつながった」と評価している事例が多いと考えています。

また、NPF では定期的にユーザーの満足度調査を行っています。例えば、平成 19 年 2 月に実施したアンケート調査 (有効回答数 105) では、「当初の目的は、支援により達成できましたか。」という問いに対し、「予想以上の結果が得られた」「達成できた」「およそ達成できた」との回答の割合が 73 % でした。そして、「支援により得られた結果は役に立ちましたか。」という問いに対しては、「大変役立った」「役立った」との回答の割合が 92 % という結果が出ています。著者は、「予想とは異なる成果が得られても (ユーザーの) 満足度が高い」という評価を受けたという観点から、NPF の現場で働くエンジニア (テクニカルスタッフ) の志とスキルを高く評価しています。

さらに、2013 年度 6 ~ 7 月に文科省事業の関係機関によって実施された NPF ユーザーへのアンケートにおいては、大学ユーザーから「技術代行では、懇切丁寧な解説に加えまして、有益な知見を与えてくださり、心強く思いました。(原文のまま)」、民間企業ユーザーの方から「技術代行の中で革新的な技術開発まで行ってきて……。 (原文のまま)」というメッセージがありました。一方、他独法ユーザーからは、「実際の利用までに、Web システム上での手続きが何段階もありわかりづらい。逆に対応者、各担当者からの説明は大変わかりやすくて助かりました。(原文を 1 文字修正)」という指摘もありました。ユーザー目線で、施設利用手続きを見直し、よりアクセスしやすい施設運営にすべく、NPF システム\*の改良を実施しているところです。

\*NPF システム : <https://nanoworld.jp/npf/>

NPF 運営を円滑に進めるための支援システム。議論 6 の回答に記載した「図書館学の五法則」における「(4) 読者 (ユーザー) の時間を節約せよ」を実現するために開発したもの。ユーザー側からは、支援申請や装置予約、課金額の確認等が可能な電子申請システムになっている。NPF 側からは、ホームページ表示、各種データベース、支援進捗、課金集計等の管理ができるシステムになっている。

# 次世代型下水汚泥焼却炉「過給式流動燃焼システム」の実用化

## — 新規下水汚泥焼却炉の開発における産総研の役割 —

鈴木 善三\*、村上 高広、北島 暁雄

国内の下水汚泥排出量は年々増加しており、その大部分は焼却処理されている。現状の下水汚泥焼却システムは、エネルギーを大量に消費し、また汚泥中の窒素含有量が高いため、燃焼により温暖化ガスである $N_2O$ を大量に排出することが懸念されている。この研究では、研究機関と民間会社との共同で、省エネルギー運転に加え、低環境負荷運転をも達成できる加圧流動焼却炉と過給機を組み合わせた次世代型汚泥焼却システムである「過給式流動燃焼システム」を提案し、実用化に至った。この論文では、提案したシステムの実用化に至るまでの研究開発について主に紹介する。

キーワード：下水汚泥、焼却炉、加圧流動層、過給機、エネルギー回収

### Practical use of an advanced sewage sludge incinerator, “turbocharged fluidized bed incinerator”

– The role of AIST in the development of a new system –

Yoshizo SUZUKI\*, Takahiro MURAKAMI and Akio KITAJIMA

Annual production of sewage sludge in Japan has increased, and most of the sewage sludge is incinerated. With conventional sewage sludge incinerators, a large amount of energy is needed for operation. Additionally, the emissions of greenhouse gas  $N_2O$  are expected to be high, because sludge contains a high concentration of nitrogen. In this R&D, an advanced sewage sludge incinerator “turbocharged fluidized bed incinerator,” which can achieve not only energy savings but also a low environmental impact, was proposed in collaboration with a public research institute and a company. This new system consists of a pressurized fluidized bed combustor coupled with a turbocharger. The R&D to achieve practical use of the proposed system is primarily explained in this paper.

Keywords: Sewage sludge, incinerator, pressurized fluidized bed, turbocharger, energy recovery

#### 1 はじめに

下水処理システムの普及に伴い、我が国の下水汚泥排出量は年々増加しており、その大部分は焼却処分されている。脱水処理後の下水汚泥は約 80 % の水分を含み、単体での焼却が困難であり、都市ガス、重油等の多量の補助燃料を使用して焼却処理されているのが現状で、下水汚泥焼却プロセスは、エネルギー多消費型プロセスとなっている。これに加え、下水汚泥は、石炭やバイオマスのような他の固体燃料と比較して窒素含有量が極めて高いため、燃焼させると窒素酸化物（以下、 $NO_x$ ）や亜酸化窒素（以下、 $N_2O$ ）を多量に排出する。一般的には、燃焼温度が高くなるに連れて、 $NO_x$  濃度は高くなる一方、 $N_2O$  濃度は低くなる。特に、温暖化ガスである  $N_2O$  の温暖化係数は、 $CO_2$  の 310 倍と高く、その排出が懸念されている。

現状では、下水道施設から排出される温暖化ガス量（ $CO_2$  換算）の内、汚泥焼却時に発生する  $N_2O$  の排出は、その約 1/4 を占めており、その  $N_2O$  削減法として、現状では燃焼温度の高温化が試みられている。 $N_2O$  の生成は、高温では抑制されることが知られており、燃焼温度をこれまでの標準的な 800 °C から 50 °C 高くした 850 °C での高温運転により、 $N_2O$  排出量を約 6 割削減できることが見込まれている。しかし、国内の下水汚泥焼却炉は 1980 - 90 年代にかけて建設されたものが多く、燃焼炉の老朽化が進んでおり、炉体を損傷する燃焼温度の高温化が困難なシステムも多数ある。このような現状から、下水道事業を所管する国土交通省では、下水汚泥焼却プロセスの省エネ対策・温暖化ガス削減対策を掲げており<sup>1)</sup>、本質的な省エネルギーと低  $N_2O$  発生量を両立させた下水汚泥焼却システムが求められている。今後、

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

Original manuscript received February 20, 2013, Revisions received July 16, 2013, Accepted August 1, 2013

既存炉の大量更新が予想されており、新規技術による下水汚泥焼却プロセスの開発が喫緊の課題となっている。

従来型の下水汚泥焼却システムの一部を図1に示す。本図にも示すように、汚泥焼却炉には流動層がよく使用される。流動層では、空気分散板上に砂を充填し、分散板の下部から空気を供給することにより、水の沸騰時のように、気泡を生成しながら砂を激しく流動させる。この砂が熱媒体となり、流動層中では含水率の高い脱水汚泥を燃焼温度が安定した状態で燃焼させることが可能となる。下水汚泥は80%程度の水分を含有しており、焼却炉内温度維持のために、補助燃料（都市ガス、重油等）が使用される。流動焼却炉は大きく砂層（流動層）と、その上部の主に気体の空間であるフリーボードとに分けられ、砂層内で汚泥の乾燥・熱分解が主に起こる。次いで、フリーボードで熱分解により発生した可燃ガスが燃焼する。燃焼後の排ガスは、処理系統を経てクリーンなガスとして大気中へ放出される。ここで注目すべきは、運転に必要な二つのファンである。一つは、汚泥燃焼用の空気を供給するためのファン、もう一方は、

汚泥燃焼後の排ガスを誘引するためのファンである。これら二つのファンを駆動するための動力が、システム全体に必要なエネルギーの約40%を占めるといわれており、電力由来のCO<sub>2</sub>排出の大きな根源となっているため、省エネルギー対策が求められる機器となっている<sup>[2]</sup>。

産総研、国土交通省土木研究所（以下、土研）、民間会社の共同開発で、下水汚泥焼却炉の省エネルギー化、低N<sub>2</sub>O排出量化のため、図2に示すような新しい焼却システムが考案された<sup>[2][3]</sup>。これは、流動焼却炉を加圧条件で運転し、発生する高温高压の排ガスを利用して、炉後段に設置した過給機（ターボチャージャー）を駆動し、燃焼用空気を生成させることが大きな特徴である。本システムでは、従来型のシステム（図1）と比較して、以下に示す利点が挙げられる。

- 1 加圧運転により燃焼が促進されるため、同一焼却量において装置のコンパクト化が可能となる。これにより、焼却炉からの放熱量を低減でき、補助燃料使用量を削減できる。
- 2 過給機により燃焼用空気を生成できるので、空気供

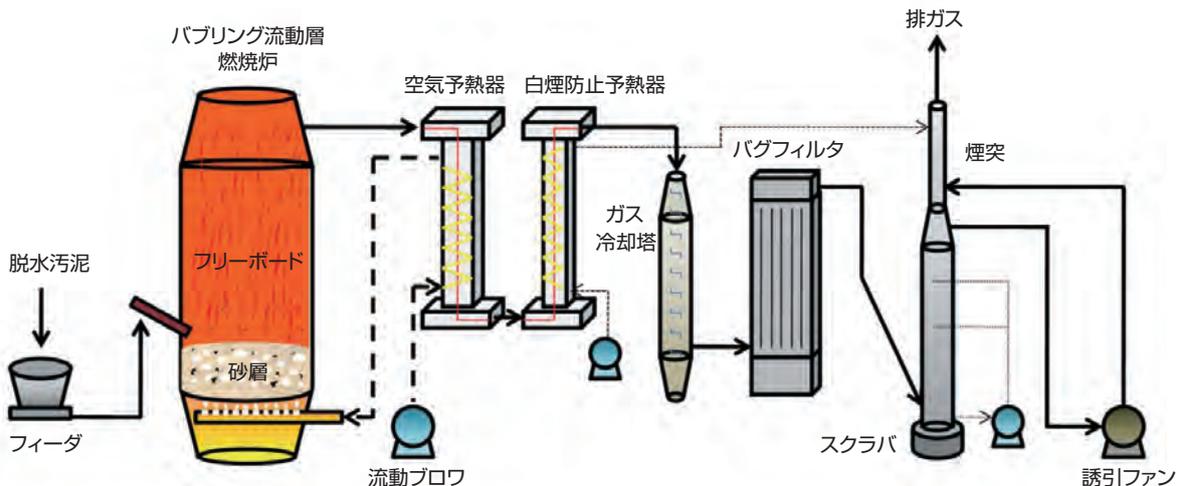


図1 従来型の下水汚泥焼却システムの概略図

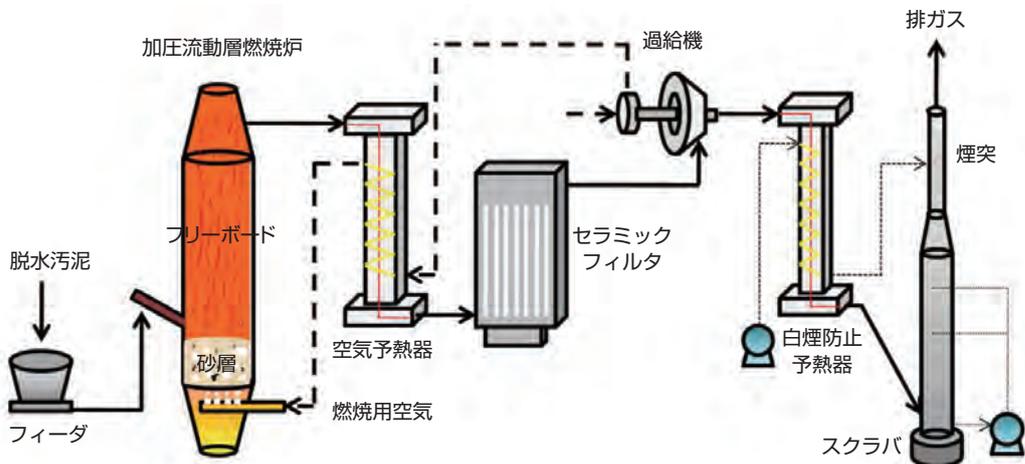


図2 過給式流動燃焼システムの概略図

給用のファンが不要である。さらに、加圧運転のため、燃焼排ガスは残圧で大気放出されるので、誘引するためのファンも不要となる。これより、大電力消費源である二つのファンを省くことができ、従来型と比較して、大幅に電力を削減できる。さらに、余剰空気は、曝気用空気として利用することも可能である。

- 3 エネルギー回収を過給機で行っているため、ガスタービンと比較して設備が簡便になる。過給機とのマッチングでは、最大でも2.5気圧程度の圧力しか要求されないため、ガスタービンとのマッチングに必要な高圧運転と高コストの加圧容器を必要としない。

我々は、この次世代型下水汚泥焼却システムを「過給式流動燃焼システム」と名付け、本システムを実用化することを目標として、研究開発を実施した。

## 2 目標を実現するためのシナリオ

この研究開発の目標は、前節で述べたとおり過給式流動燃焼システムの実用化である。国内の下水汚泥焼却炉の平均的な規模は、焼却炉へ供給する汚泥量として100 t/dとなるため、新規技術を導入したこのような大型プラントを商用化するためには、実験室規模の実験設備による基礎研究、つづいて、その基礎研究成果を活かしてスケールアップさせた実証プラントでの実証研究が必要となる。それぞれのステップの達成には複数年を要するため、一般のプロセス開発と同様に、実用化までには長期の研究開発期間が必要となる。本節では、商用化に至るまでの経緯を述べる。

2000年当時、土研では、汚泥焼却炉の抜本的な技術革新を計画して、民間会社と共同して研究会を立ち上げていた。その中で、当時石炭の新規高効率発電として注目され実用化が進められていた、加圧流動層複合発電技術が研究会で取り上げられた。下水汚泥は高圧ポンプで高圧の場に輸送することが可能であり、連続供給には問題がなく、加圧流動層燃焼とのマッチングが良いためである。システム検討を行った結果、高温高圧の排ガスからエネルギーを回収することにより、大幅に省エネを達成できる可能性が確認された。しかし、下水汚泥や廃棄物焼却の分野では、加圧流動層燃焼の経験は全くなく、土研や焼却炉メーカーによる加圧流動層燃焼を応用した新規システムの開発は困難な状況にあった。

この時期は温暖化ガスへの関心が高まっており、つくばの研究機関では環境省による省庁横断型の温暖化ガスインベントリー推定に関する研究が行われていた。この

中で、当所は化石燃料の燃焼プロセスの温暖化ガス排出を担当したが、土研の担当する下水汚泥焼却炉からの $N_2O$ ガス排出量測定も支援した<sup>4)</sup>。その当時、当所では、石炭の加圧流動層燃焼を主要な研究テーマとしていたが、土研担当者との交流の中で、当所の研究が彼らのニーズに与えられることが分かり、土研の主催する研究会からの正式な共同研究の要請に繋がった。これが、この研究のスタートであり、研究機関が集うつくばの特徴がうまく活かされた技術開発と言える。

開発に参加した研究機関は、当所と土研の2機関であるが、役割分担は最初から明確であり、当所が研究を実施する上での技術支援、土研が技術の評価、自治体や企業へのピーアールをそれぞれ担当した。最初に共同研究に参加した民間企業は、月島機械（株）、（株）クボタ、（株）IHIの3社であり、下水汚泥焼却プラントのメーカーに加え、ガスタービンのメーカーの内、この基本コンセプトを十分理解でき、かつ、過給機も製造しているメーカーと連携した。このように、5者共同で自主研究からスタートした。自主研究を進める中で、基礎研究や新規技術を導入したシステム設計の最適化等の成果を上げつつあったが、国内景気動向による企業内の諸事情もあり、2005年には月島機械（株）以外の企業は撤退した。しかし、新たにこの技術を高く評価した三機工業（株）が開発に加わり、土研と当所を加えた4者共同で再スタートとなった。その後、外部資金獲得による実証プラントの運転、実証プラント長時間運転による耐久性を確認でき、プロセスを完成した。

しかし、実績のない新規プロセスの導入は、ユーザーにとって大きな不安材料であり、プロセスの完成が直ちに実用化に結びつくわけではない。このため、主要ユーザーである自治体関係者への技術ピーアールについては、下水道行政と密接な関係を持つ土研が担当した。その結果、この技術は関係者から高い評価を受けることができたが、直ちに採用までには至らなかった。

開発グループ内で実用化に至る戦略を検討した結果、最も効果的なのは、公共事業である下水道事業で日本をリードする東京都で本プロセスを採用してもらうことであると結論に達した。当時、東京都下水道局では、下水処理での温暖化ガス削減計画（アースプラン）を策定中であったことから、省エネ性と低 $N_2O$ 性に絞って、この技術のピーアールを行った。担当者の理解も徐々に得られたが、採用の最も大きな障壁と考えられた長時間の耐久性について、東京都を加えて改めて共同で確認試験を行うことになった。最終的にそれを達成したことから東京都のアースプランの主要技術に登録され、商用機

受注の獲得に至った。

### 3 目標実現のための構成的方法

#### 3.1 実験室規模の加圧流動層燃焼実験

この研究は、前節で述べたとおり自主研究からスタートしたが、その研究期間中当所では、主に下水汚泥の加圧燃焼実験を担当し、民間企業と土研では、次世代型の汚泥焼却システムの最適設計を担当した。当時、下水汚泥の加圧条件下での燃焼データは皆無であった。そこで、図3に示す当所所有の加圧設備に、下水汚泥焼却用バブリング流動層燃焼装置および下水汚泥供給用のモノポンプを設置し、実験を開始した。

システム全体の概略図を図4に示す<sup>[5][6]</sup>。加圧容器は石炭の加圧燃焼実験用に設計製作したもので、内径1,200 mm、高さ3,200 mm、設計圧力は0.99 MPaのステンレス製である。容器内にステンレス製のバブリング流動層燃焼炉（内径80 mm、高さ1,300 mm）を設置し、実験中の汚泥供給量、空気量、電気炉等を操作できるように、それらの制御機器は圧力容器外部に設置した。流動層最上部の垂直投入管より汚泥を連続供給した。圧力容器や流動層の汚泥供給管との接合部分には、実験前準備および実験後の後片付けを考慮し、ワンタッチコネクタを使用した。実験中の汚泥供給量を安定させるために、実験前の準備として、モノポンプ内の攪拌層内に汚泥10 - 20 kgを投入し、汚泥に流動性を持たせるために水を加えて攪拌し、汚泥の粘度を調整した（図5）。

実験試料の下水汚泥は、茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所より、実験毎に実脱水汚泥を採取したものを供給して

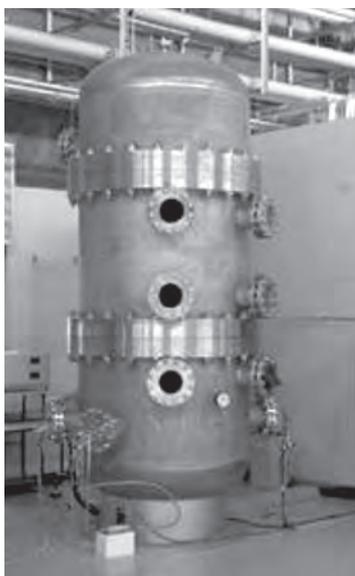


図3 加圧容器の外観写真

表1 下水汚泥の性状

工業分析値 [wet, wt.%]	水分	78.0
	揮発分	13.9
	固定炭素	1.8
	灰分	6.3
元素分析値 [dry, wt.%]	C	29.8
	H	4.0
	N	5.0
	S	1.1
	O	21.4
高位発熱量 [MJ/kg (dry)]		17.10

表2 汚泥焼却灰組成の一例

灰組成 [dry, wt.%]	SiO <sub>2</sub>	39.97
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.88
	CaO	6.33
	MgO	2.57
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.78
	Na <sub>2</sub> O	0.63
	K <sub>2</sub> O	1.63
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20.51

もらった。脱水汚泥の性状を表1に示す。化石燃料と比較すると灰分と窒素分が多いのが特徴である。また、下水汚泥特有の問題として臭気があるが、臭気対策として、脱水汚泥の密閉型容器による保管と、実験後のモノポンプの洗浄を徹底した。

基礎研究で確認する必要があったのは、灰の溶融の有無と環境汚染物質であるNO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>Oの排出特性である。前者は、プロセス成立の根幹に関わる事象である。下水汚泥の灰分は、表2に示すように<sup>[2]</sup>、多量の低融点アルカリ成分を含み、高負荷燃焼となる加圧燃焼条件では、局部高温域での灰の溶融とそれに起因する流動化停止が危惧された。しかし、最大10気圧の加圧条件での燃焼実験を行ったが、図6に流動層燃焼炉後段のセラミックフィルタで捕集したフライアッシュの外観写真として示すように、灰の大部分はフライアッシュで赤褐色を示し、灰の溶融は認められなかった<sup>[9]</sup>。これは、汚泥処理における曝気槽での汚泥の沈降性を高めるために添加する鉄系の凝集剤が、結果的にアルカリ成分の溶融を抑制するためと推測された。

灰溶融を回避できることから、プロセスは基本的に成立することを確認した後、燃焼炉内温度分布やNO<sub>x</sub>/N<sub>2</sub>O排出特性の温度依存性等、加圧運転における燃焼

特性を明らかにした。N<sub>2</sub>O 排出量は、燃焼温度の上昇と共に減少し、従来知られていた N<sub>2</sub>O の温度依存性の一般的な知見と同様の結果が得られた。一方、NO<sub>x</sub> 排出量は、同温度において、石炭や乾燥させた下水汚泥を燃焼させた場合よりも低くなった<sup>[6]</sup>。これは、燃焼後の生成ガス中に約 40 % 含まれる水蒸気による NO<sub>x</sub> 生成抑制効果と推測された<sup>[7]</sup>。これらの結果から、脱水汚泥を加圧条件で燃焼させても特段の環境特性の悪化は見られず、むしろ環境負荷を低減できる可能性があることが明らかになった。

### 3.2 システム設計

一方、民間企業と土研が主体となって実施した、次世代型の汚泥焼却システムの最適設計に関しては、汚泥焼却システム更新時には、技術的に進歩した設備を導入することが期待されており、まず省エネルギーの観点から検討した。省エネルギー化には、大容量の動力消費源となっている燃焼用空気供給用のファンと燃焼後の排ガスを誘引するファンの二つのファンの省略が効果的であるが、これはシステムの加圧化により達成される。汚泥は

前述のとおり、多量の水分会を含まため、燃焼後の高温排ガス中の水蒸気量は 40 % 程度と大きい。このため、高圧の排ガスからエネルギーを回収する場合、多量に含まれる水蒸気を利用できる。水分を多量に含む汚泥特有の排ガスを、そのままエネルギー回収に有効利用できることは大きなメリットとなる。さらに、一般の化学プラントと同様に加圧システムでは、同一容量で比較した場合、常圧に比べ実容積は小さくなる。このため、炉の表面積が小さくなるため放熱量が減少し、燃焼温度維持のための補助燃料使用量を削減できる。

通常は、排ガスからのエネルギー回収には、ガスタービンを用いて燃焼用加圧空気を製造することが考えられるが、今回目標とする 100 t/d 規模の焼却炉の排ガス量にマッチするガスタービンは、汎用規格にはなく特注となること、このため導入コストとメンテナンスコストがとて高くなることが判明した。加えて、ガスタービンとの最適なマッチングには、10 気圧以上の高圧が必要であり、そのためには焼却炉を高コストの加圧容器に収容する必要があることが明らかになった。以上のシステ

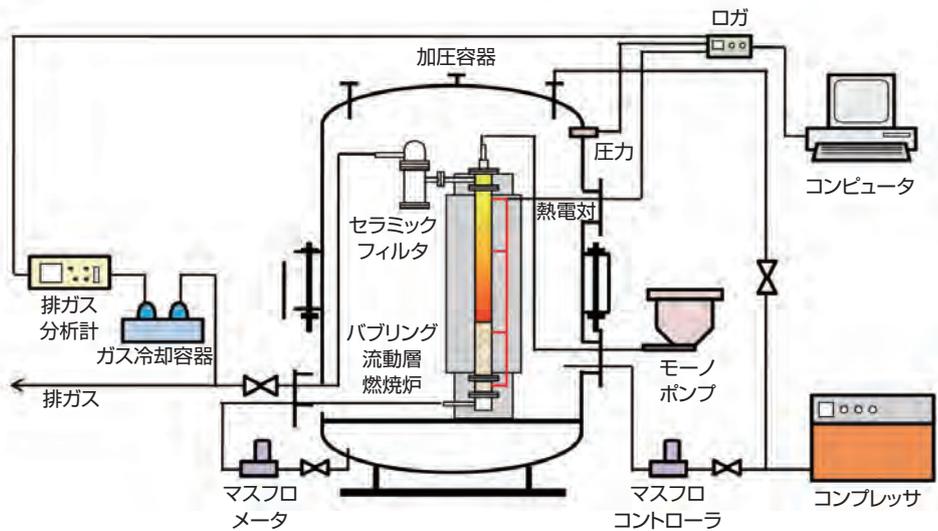


図4 実験室規模の加圧流動燃焼システムの概略図



図5 モノポンプによる脱水汚泥供給の様子



図6 汚泥燃焼実験後のフライアッシュの外観写真

ム解析から、ガスタービンの使用による加圧燃焼システムは断念することとなった。

この打開策として、ガスタービンより汎用な機器である過給機の採用に至った。過給機との組み合わせは、最大でも2.5気圧の微加圧運転で可能であり、高コストの圧力容器を必要とせず、装置の耐压構造も簡易で済み、建設コスト、必要運転人員、定期点検等も従来型のシステムとほとんど差異はないと考えられる。開発目標である100 t/d規模の排ガス量にマッチする過給機としては、船用ディーゼル機関用のものが汎用品としてあり、導入コストもとても安価である<sup>[2]</sup>。以上のシステム検討から、電力由来のCO<sub>2</sub>と補助燃料燃焼により生成するCO<sub>2</sub>を同時に削減できる省エネ型の「過給式流動燃焼システム」が誕生し、直ちに基本特許を共同出願した<sup>[8]</sup>。

### 3.3 実証試験および実用化

基本的なシステム設計と基礎燃焼特性の把握につづき、提案した過給式流動燃焼システムを建設し、実証する必要がある。そこで、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の公募事業「都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発」に応募した結果、幸いにも採択された。実証設備の建設場所は、この段階から新たに参加した三機工業（株）の循環炉実証機があった北海道長万部町の終末処理場内とし、5 t/d規模のプラントを建設した。設計には当所での基礎研究の成果が反映された。実証設備の概略図を図7に示す<sup>[2][3]</sup>。加圧焼却炉は鋼板製の内部耐火物構造で、内径700 mm、高さ9200 mmである。流動焼却炉の後段に設置した過給機は、実証設備の規模に適合する、大

型ディーゼル貨物自動車に搭載されている汎用品を使用した。結果として、従来型のシステムで使用していた二つのファンを省いた運転に成功した<sup>[2][3]</sup>。

この段階からは、当所は主に排ガス分析ラインの構築および運転結果の解析を担当した。実汚泥による連続燃焼試験を実施した結果、排ガス中N<sub>2</sub>O濃度は、図8に示すように<sup>[3]</sup>、フリーボード温度に依存し、温度が高くなるに連れて、その濃度は低くなった。また、その排出量は、従来型の高温運転時よりさらに半減できることが分かった（図9）<sup>[3]</sup>。当所では基礎燃焼実験結果より、N<sub>2</sub>O排出量の温度依存性を明らかにしており、この経験から、実証プラントの燃焼炉内温度分布に注目した。実験結果の解析結果（図10）より<sup>[6]</sup>、フリーボード下部に局所的な高温域が生成されることが分かった。本図は、従来型の常圧運転時と出口温度をおよそ同じ条件として比較した結果である。加圧運転の場合でも、砂層に供給された脱水汚泥の乾燥と熱分解により発生した可燃ガスの燃焼が、フリーボードで生じることは従来型と同様であるが、その燃焼速度は大幅に大きくなる。このために、フリーボード下部に局所高温域が形成される。これに対し、従来型の常圧運転の場合は、ガスの燃焼速度が小さいために、熱分解後の可燃ガスがフリーボード全体で燃焼するために、緩慢な温度上昇となる。このように、過給式の加圧条件におけるN<sub>2</sub>O排出量低減の要因は、フリーボード下部に形成される局所的な高温域でのN<sub>2</sub>Oの分解であると推定された。

当所の基礎燃焼実験は、設備の制約から6気圧以上の運転であったが、実証試験に合わせて設備を改造し、実

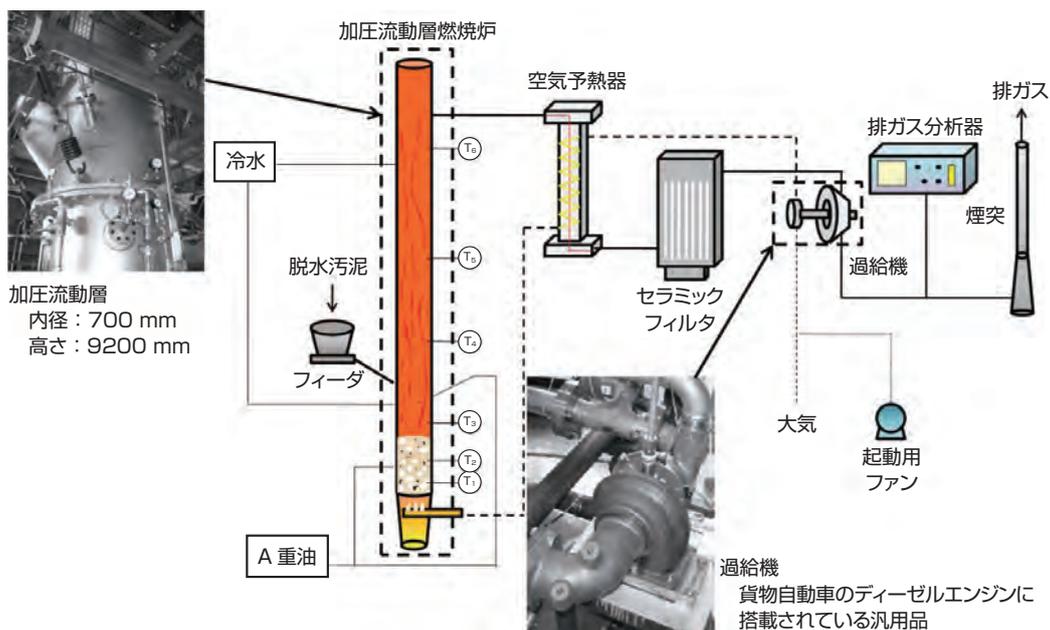


図7 実証プラントの概略図

証プラントとおおよそ同条件である 2-3 気圧で燃焼実験を行い、 $N_2O$  排出濃度は圧力よりも温度に依存することを明らかにした<sup>[6]</sup>。また、 $N_2O$  低減効果を理論的に補完するため、素反応速度解析プログラムである CHEMKIN により、フリーボード温度分布を計算した。その結果、圧力が高くなるに連れて、フリーボードの下部で高温域が生成され、実証プラントと同様の傾向が得られた<sup>[9][10]</sup>。 $N_2O$  低減の原因を迅速に究明できたのは、基礎研究と実証試験をうまくリンクさせた効果であるといえる。

さらに、 $NO_x$  排出量についても、当所の基礎研究結果と同様に排出量は低く、従来型と比較しても半減できた。これは、前述したとおり、燃焼排ガス中の水蒸気の  $NO_x$  生成抑制効果や砂層内でチャーによる  $NO$  還元効果が加圧化により増大されるためである。

最終的に完成したシステムでは、従来型システムと比較すると、電力使用量を約 40 %、補助燃料使用量を約 10 %、 $NO_x$  排出量を約 50 %、 $N_2O$  排出量を高温焼却時と比較して約 50 %それぞれ削減できる。これより、温暖化ガス削減効果（ $CO_2$  換算）として、国内平均規模

である 100 t/d 規模 1 基につき、年間約 4000 トンを見込める。国内の下水汚泥焼却炉は約 240 基あるが、その内半分導入されると推測すると、年間約 48 万トンの削減を見込むことができ、これは国内下水処理場の温暖化ガス総排出量の約 7 %に相当する。以上より、過給式流動燃焼システムは、省エネルギーに加え、低環境負荷をも達成できる画期的なシステムであることを実証できた<sup>[2]</sup>。

このように、NEDO 事業完了後のピーアールの結果、東京都がこの技術に注目し、最終的な技術評価として、2008 年度より民間企業 2 社とで長期耐久性試験を目的とする共同研究が開始され、長時間運転を実施し、累積 2000 時間以上に及ぶ連続運転に成功した。これより、過給機の信頼性、耐久性に問題ないことが明らかとなり、温暖化ガス削減を掲げたアースプラン 2010 にこの技術が採用され、2010 年度末には、商用第 1 号機の受注を獲得することができた。1 号機の規模は、汚泥供給量で 300 t/d と国内最大級の規模である。実証プラントから約 60 倍のスケールアップとなるが、流動燃焼炉のスケールアップ手法はすでに確立されており、燃焼負荷、すなわち燃焼炉内断面積当たりの汚泥焼却量をあわせれば良く、スケールアップしても基本的には炉の横方向に大きくなるだけで、燃焼炉内のガス速度や滞留時間は同じである。したがって、炉の高さ方向の温度分布に変わりはなく、スケールアップさせても低環境負荷運転は可能であり、大きなトラブルなく運転できると考えられる。

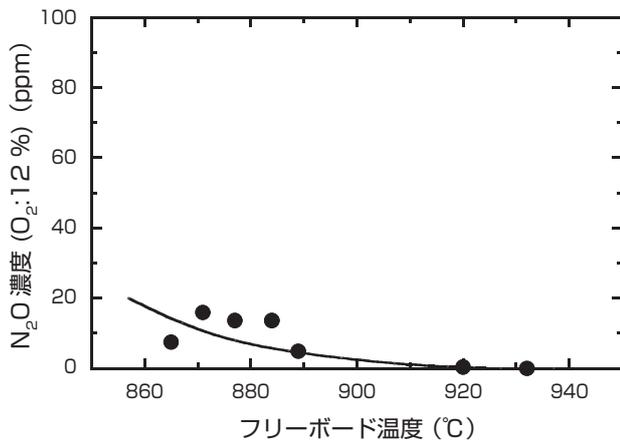


図 8 排ガス中  $N_2O$  濃度とフリーボード温度との関係<sup>[9]</sup>

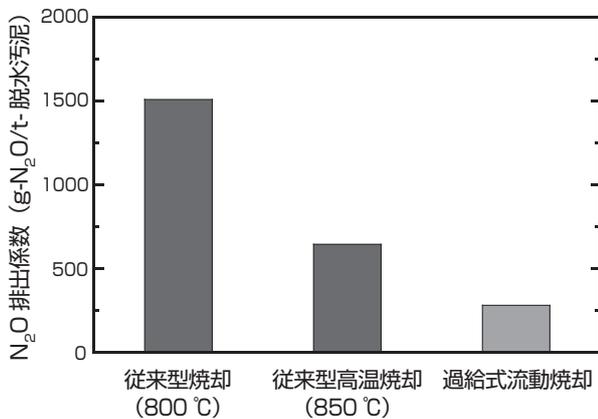


図 9  $N_2O$  排出量の比較<sup>[9]</sup>

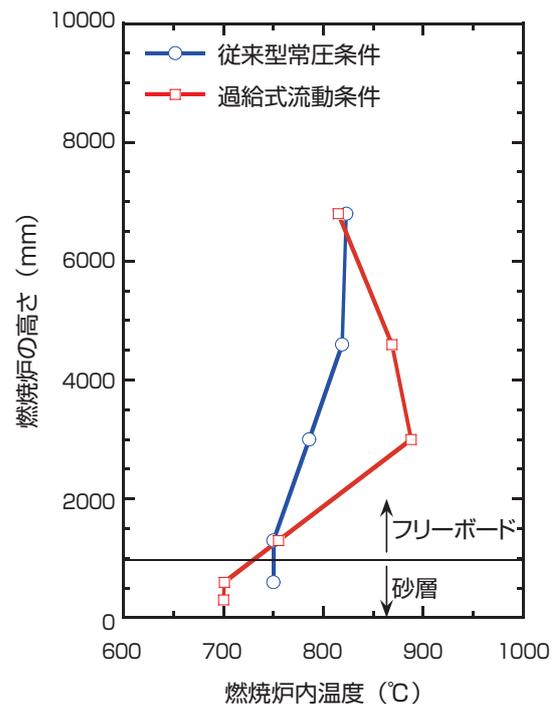


図 10 流動層燃焼炉内温度分布の比較<sup>[10]</sup>

#### 4 技術的波及効果

2010年度に、東京都葛西水再生センター向けに300 t/d規模の商用第1号機を受注した。2013年度末には運転開始予定である。さらに、これまでに1号機を含め以下に示す5機の受注を獲得できた<sup>[11][12]</sup>。

- |                           |            |
|---------------------------|------------|
| 1 東京都葛西水再生センター向け          | 規模：300 t/d |
| 2 東京都浅川水再生センター向け          | 規模：60 t/d  |
| 3 東京都新河岸水再生センター向け         | 規模：250 t/d |
| 4 神奈川県相模川右岸処理場向け          | 規模：100 t/d |
| 5 大阪府安威川流域下水道中央水みらいセンター向け | 規模：100 t/d |

5機の中で最も運転開始の早いのは東京都浅川水再生センター向けで、2013年1月末より運転を開始し、試運転期間を経て、4月26日に現地で完成式典が行われた。関連特許も多数共同出願（現在11件）しており、運転開始後には当所へ特許料収入も見込める。公的研究機関として、この技術を通じて社会貢献ができたと考える。また、前述のとおり、各研究機関が集結したつくばの利点から生まれた技術であり、研究学園都市の目指すべき今後の技術開発の一つの方向性を示す好例であると考えられる。

1号機受注の際には、土研においてプレス発表が行われ<sup>[13]</sup>、新聞等で大きな反響を得た<sup>[14]</sup>。また学会においても実用化したことを認められ、2012年度化学工学会の技術賞をはじめ、2011年度化学工学会流動層分科会技術賞、2008年度環境システム計測制御学会奨励論文賞、2008年度日本エネルギー学会奨励賞等、多数受賞している。

国内には約240機の下水汚泥焼却炉があり、今後の設備更新が活発化される予測の中で、受注数はさらに伸びるものと期待できる。これまでの単純な焼却に代わる下水汚泥処理プロセスでは、現在多数の新技术が提案されているが<sup>[15][16]</sup>、それらの中でもこの技術は実用化が最も早い技術である。当所としても、商用機運転時のトラブル等、緊急事態に対する迅速なバックアップを準備している。

#### 5 将来の展望

これまでの、下水汚泥に特化した研究を行ってきたが、前述のように、下水汚泥は高含水燃料であり、この技術は同様の高含水燃料である都市ごみや尿尿・家畜糞

尿、焼酎粕等への応用展開が期待できる。さらに、国内のみならず、現在は埋め立て処理を行っているが、今後は焼却処理が主流となると予想される中国や韓国のような海外への展開も大いに期待できる。

この研究により確立した過給式流動燃焼システムは、各々の構成技術に着目すると、決して新しいものではなく、既存設備の組み合わせである。今回のように、発想次第では、新しいものが生まれる可能性は今後も十分にあると思われ、一層研究に精進していく所存である。

#### 参考文献

- [1] 国土交通省HP (WEB).
- [2] 平成17年度-19年度NEDO成果報告書: 都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発 (2008).
- [3] T. Murakami, Y. Suzuki, H. Nagasawa, T. Yamamoto, T. Koseki, H. Hirose and S. Okamoto: Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery, *Fuel Process. Technol.*, 90 (6), 778-783 (2009).
- [4] Y. Suzuki, S. Ochi, Y. Kawashima and R. Hiraide: Determination of emission factors of nitrous oxide from fluidized bed sewage sludge incinerators by long-term continuous monitoring, *J. Chem. Eng., Japan*, 36 (4), 458-463 (2003).
- [5] Y. Suzuki, T. Nojima, A. Kakuta and H. Moritomi: Pressurized fluidized bed combustion of sewage sludge (energy recovering from sewage sludge by power generation system), *JSME Int. J. Ser B*, 47 (2), 186-192 (2004).
- [6] T. Murakami, A. Kitajima and Y. Suzuki: Study on freeboard properties to maintain low N<sub>2</sub>O emissions from sewage sludge in a fluidized bed combustor, *Energy Fuels*, 24, 4879-4882 (2010).
- [7] M. Shoji, T. Yamamoto, S. Tanno, H. Aoki and T. Miura: Modeling study of homogeneous NO and N<sub>2</sub>O formation from oxidation of HCN in a flow reactor, *Energy*, 30 (2-4), 337-345 (2005).
- [8] (独)土木研究所, (独)産業技術総合研究所, 株式会社クボタ, 月島機械株式会社: 汚泥処理システム及び方法, 特許第3783024号 (2006.3.24).
- [9] 村上高広, 北島暁雄, 鈴木善三, 長沢英和: 過給式流動炉を利用した下水汚泥燃焼場におけるNO<sub>x</sub>-N<sub>2</sub>O排出特性, *TSK技報*, 6-10 (2010).
- [10] T. Murakami, A. Kitajima, Y. Suzuki, H. Nagasawa, T. Yamamoto, T. Koseki, H. Hirose and S. Okamoto: Effect of operating pressure on freeboard temperature distribution in a pressurized fluidized bed incinerator of sewage sludge, *Journal of JSEM*, 10, 58-61 (2010).
- [11] 月島機械(株)HP (WEB).
- [12] 三機工業(株)HP (WEB).
- [13] NHKニュース (2011.3.10).
- [14] 例えば、朝日新聞 (2011.3.11).
- [15] メタウォーター(株)HP (WEB).
- [16] (株)神鋼環境ソリューションHP (WEB).

## 執筆者略歴

鈴木 善三（すずき よしぞう）

1980年3月早稲田大学大学院理工学研究科応用化学専攻博士前期課程修了、4月通産省工業技術院公害資源研究所入所、公害第4部。1988年工業技術院サンシャイン本部、石炭液化を担当。2001年（独）産業技術総合研究所エネルギー利用研究部門主任研究員、2005年10月エネルギー技術研究部門クリーンガスグループ長、現在に至る。入所以来、石炭、バイオマス、廃棄物の流動層燃焼、流動層ガス化を中心に研究。2005年加圧流動層燃焼の研究により博士（工学）取得。この論文では、開発初期段階での実験室規模の加圧流動層による下水汚泥燃焼実験を担当し、開発を支援した。



村上 高広（むらかみ たかひろ）

2001年3月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程環境・生命工学専攻単位取得退学、4月同大学工学部エコロジー工学系教務職員。2001年10月石川島播磨重工業株式会社基盤技術研究所基礎技術研究部入社、2002年4月基盤技術研究所熱・流体研究部所属。2007年4月独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門クリーンガスグループ研究員として入所し、2012年10月主任研究員として現在に至る。2001年12月に博士（工学）取得。エネルギー・環境分野が専門。この論文では、主に実験室規模の加圧流動層による下水汚泥燃焼実験、実証プラントの排ガス分析および運転結果の解析を担当した。



北島 暁雄（きたじま あきお）

2000年慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻後期博士課程修了。博士（工学）。2000年通産省産業技術院資源環境技術総合研究所入所。2001年（独）産業技術総合研究所エネルギー利用研究部門研究員。2013年（独）産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃焼評価グループ主任研究員として現在に至る。1998年～2000年新エネルギー・産業技術総合開発機構提案公募研究員。2011～2012年産業技術企画調査員（経済産業省中小企業庁創業・技術課）。実用燃焼器における燃焼現象の解明と制御に関する研究に実験および数値解析の両面から取り組む。この論文では燃焼炉内気相燃焼領域の詳細化学反応数値計算による $N_2O$ 抑制機構の解析を担当した。



## 査読者との議論

**議論1 全般**（長谷川 裕夫：産業技術総合研究所、景山 晃：産業技術総合研究所イノベーション推進本部）

順次、更新時期を迎える下水汚泥焼却システムについて、省エネルギー化と低 $N_2O$ 排出量を図る新規システムを関係機関、企業と共同で設計、開発、評価し実証プラント試験まで行った統合的な論文で、シンセシオロジーにふさわしい内容と判断します。

技術が社会で価値を生み、実用化されるための研究開発の進め方を示す点で、読者の参考になると思います。

質問・コメント1（長谷川 裕夫）

産総研と土研という、つくばにある異なる分野、異なる省庁の研究機関、および参加企業が、互いに協力し、それぞれの持つポテンシャル

を補完し合って、技術を実用化に結びつけた好例だと思います。

地方自治体の代表である東京都をターゲットにすることが導入拡大に効果的と思われるが、自治体に導入するまでのむずかしさ、その過程における土研の役割を明らかにしてください。また、実用化に向けて実証研究が、重要な役割を果たしたと思われるが、いかがでしょうか。

回答1（鈴木 善三・村上 高広）

下水道事業を所管する国土交通省に所属する土研が中心となっており、プロジェクトをスタートさせるために、まず、国内の各自治体へこの技術の優位性について説明を行いました。しかし、とても興味をもってはいただけず、第1号機の安定運転を確認してからという声が多くありました。そのような中、東京都がこの技術に高い関心を持ち、民間企業2社と共同研究を開始し、温暖化ガス削減を掲げたアースプラン2010にこの技術を取り上げたことが大きなステップアップとなりました。下水処理業界の中で東京都は中心的な役割を果たしており、各自治体が東京都の動向に注目していました。実機導入へは、実証システムの長時間連続運転による性能評価が重要であり、実証研究の中で、性能、運用に問題ないことを示すことができ、最終的な受注の獲得につながりました。

質問・コメント2（景山 晃）

この論文は1980～1990年代に設置された下水汚泥焼却装置の更新時期が近づいていること、既存の焼却装置ではエネルギー消費が大きく、かつ、亜酸化窒素 $N_2O$ の生成濃度が比較的高いことを課題としてとらえ、低エネルギー消費、 $N_2O$ が低濃度となる新規下水汚泥焼却システムの開発を進めようとしたことが核であろうと思います。

その際、加圧燃焼の要素技術の蓄積がある産総研と、汚泥焼却装置の評価・設計技術に知見がある土研および関係企業とが相互補完する形で新規な汚泥焼却システムの開発に取り組み、画期的な成果を得たことがポイントだと思います。

回答2（村上 高広）

本システムの開発当初は、省エネルギー化を達成できるシステムを重要視したコンセプトを描いていました。そこで、加圧条件下で汚泥を燃焼させ、その高温燃焼排ガスを利用して過給機により燃焼用空気を製造すれば、動力消費の高い二つのファンを省けるというシステムの考案に至りました。 $N_2O$ の削減に関しては、実際に燃焼試験した結果をみてからという位置付けでしたが、これまでの高温焼却時よりも半減できるというとても良い結果を得ることができました。

質問・コメント3（景山 晃）

過給機を利用したシステムの開発において、過給機自体には大きな技術課題はなかったのでしょうか。一方、この研究においては、ガスタービンメーカーであり、かつ過給機のメーカーでもある企業の参加を得たことは情報力の勝負であり、真に構造的な研究を進める際には狭義の技術開発だけでなく、情報力や複数企業・機関の融合効果を発揮させるという取り組み方が重要と思われます。

回答3（村上 高広）

過給式システムの導入に当たって技術的隘路となったのは、過給機の耐久性でした。2008年度より民間企業2社とで長期耐久性試験を目的とする共同研究が開始され、長時間運転を実施し、累積2000時間以上に及ぶ連続運転に成功しました。これより、過給機の信頼性、耐久性に問題ないことを明らかにでき、実用化につながりました。

この研究開発においては、下水汚泥焼却プラントのメーカーに加え、これまでさまざまな研究開発を通して産総研とつながりの深かったガスタービンのメーカーの内、この研究開発の基本コンセプトを十分理解し、かつ、過給機も製造実績のある企業との連携体制を速やかに築くことができたことも開発のポイントでした。

# オンデマンド材料開発を目指した材料設計システム

## — 開発現場から生まれた新規な材料設計手法 —

稲田 禎一<sup>1\*</sup>、松尾 徳朗<sup>2</sup>

最先端の半導体用材料の開発現場では、毎月のように新しい材料を開発しなくてはならない。開発期間の短縮を目的に、線形計画法、組合せ最適化、グラフ理論等をベースに独自の材料設計支援システムを構築した。このシステム（弱条件組合せ線形計画法）により、複数の特性を満たす配合候補を見出すことが可能になった。また、複素特性値やクリープ等の時系列特性を含む材料の最適化にも適用可能であるほか、供給リスク計算等も開発時に行えるようになった。この手法を活用することで目標値を満たす材料を効率的に開発することが可能になった。

**キーワード:** 線形計画法、組合せ最適化、オンデマンド開発、材料設計

## A novel material design method for on-demand material development

### – A method born from a development field –

Teiichi INADA<sup>1\*</sup> and Tokuro MATSUO<sup>2</sup>

Advanced materials for the semiconductor industry are being developed every month. To reduce the development period, we constructed a novel material design method based on linear programming, combinatorial optimization, and graph theory. This method (called weak conditioned combinatorial linear programming) enabled us to find composition candidates that satisfy a number of properties at the same time. By defining the solution area as a function of the combination index, the optimum formulations were acquired. This optimization could be done by newly developed user-friendly software. This system is applicable to optimization of materials with complex properties and time-series properties such as creep. The method enabled us to develop materials satisfying target values efficiently.

**Keywords:** Linear programming, combinatorial optimization, on demand development, material design

### 1 はじめに

材料開発には長期間の地道な研究と偶然の発見を見逃さない洞察力（セレンディピティ）が何より大切である。この正論に異を唱えるつもりはないが、一方で、最先端の半導体用材料の開発現場では、毎月のように新しい材料を開発しなくてはならない。画期的な新材料の完成や偶然の発見を待っている余裕はなく、すでにある材料を組み合わせて、期限内にどうにかして目標値を満たすように悪戦苦闘しているのが現実である。このような業務に携わる研究者はどのようなスタイルで開発を進めればよいのであろうか。

このような材料開発は、持ち合わせの素材を職人芸で巧みに組み合わせて作ることが多いことから、レヴィ＝ストロースの言うブリコラージュ（器用仕事）<sup>[1][2]</sup>の範疇に入るかもしれない。

しかし著者らは10年以上にわたり超短期間開発のテー

マをこなしていくうちに、単なるブリコラージュではなく、合理的な設計をして、確実に目標値を満たす材料を開発したいと考えるようになった。この考え方はブリコラージュの対比概念であるエンジニアリング（必要な道具をそろえて、設計図通りにもものを作るものづくりの仕方）に近い。いわば、ブリコラージュの現実的で器用な面とエンジニアリングの合理的設計のメリットを併せ持つ開発手法を構築したいと考えたのである。

これまでの一般的と思える材料開発のスタイルと著者らが考えたスタイルの比較を図1に示す。通常材料研究は飛び抜けた特性を持つ画期的な材料を見出すことを目的に行われる。この論文の研究スタイルはすでにある材料を組み合わせて材料設計することであり、飛び抜けた性能を追求していない。例えば半導体パッケージ製造プロセスの中では、流動性や粘着性等多様な目標特性があるが、そ

1 日立化成(株)筑波総合研究所 〒300-4247 つくば市和台48、2 公立大学法人首都大学東京 産業技術大学院大学 〒140-0011 品川区東大井1-10-40

1. Hitachi Chemical Co., Ltd. Tsukuba Research Laboratory 48 Wadai, Tsukuba 300-4247, Japan, 2. Industrial Technology Graduate Course of Information Systems Architecture, Advanced Institute of Industrial Technology 10-40-1 Higashi-Ooi, Shinagawa-ku 140-0011, Japan \* E-mail: t-inada@hitachi-chem.co.jp

それぞれの特性がある範囲にあることが重要であり、飛び抜けて良い特性は必要とされないからである。

このような材料開発の進め方は、極めて短時間のうちに完了することを最大の特徴としているので、この論文ではオンデマンド材料開発と呼ぶ。以下に著者らが確立したオンデマンド材料開発手法のコンセプトと実際の適用結果について順を追って説明したい。

## 2 研究の背景

スマートフォンやタブレット端末、超薄型ノートPCやクラウドを支えるサーバー等、最先端の電子機器は常に進化しており、この心臓部である半導体素子、半導体パッケージも進化し続けている<sup>[3]</sup>。

図2に示す半導体パッケージには種々の材料が使用される。半導体パッケージは若者を中心とする消費者の嗜好や流行(例えばスマートフォン等の小型化や記憶容量拡大等)に応じて構造が変わるため、技術進化の動向が予測しにくいという特徴がある。例えば半導体チップと支持体間の接着に使用される半導体用接着材料(ダイボンディングフィルム)<sup>[4][5]</sup>の必要特性も毎月のように変化している。

半導体パッケージの組立プロセスは図3のように多岐にわたっており、プロセス毎に種々の特性が要求される。共通で要求される特性は、

- (1) 80℃以下の温度で流動し、ウエハを接着できること。
- (2) チップと実装基板間等の接着に使用されるため、それらの熱膨張係数の差を吸収し、応力緩和できること。
- (3) 半導体パッケージを配線基板に接続するためのほとんど溶融工程(260℃程度)で流動や剥離が生じないことなどがあるが、それ以外にも多数の要求がある。新規な構造の開発当初は半導体メーカーでさえ材料の必要特性が分からない場合が多い。むしろいろいろな材料を評価しな

がら、目標値を明確にしてゆくのである。

材料の開発期間は短いものでは数か月間であるが、ポリマー等の新素材を数か月のうちに合成し、最終的にフィルム等の形で提供することは極めて困難である。

一方で、最先端の半導体産業では極めて多額の設備投資を行い、短期間で回収し、さらに次世代向けに投資しなければ、生き残っていけないことがよく知られている。最先端の半導体産業においては、競争力を強化するため、また投資リスクを抑えるためにも、材料の早期開発のための合理的な設計手法、最適化手法に対する要求が強まっている。

従来検討されていた数理的最適化手法としては、線形計画法、非線形計画法、組合せ最適化等がある<sup>[6]-[9]</sup>。材料設計にもこれらの手法の応用が期待されるが、材料開発に役立てるには、以下のいくつかの課題がある。

- (1) 数多くの化学素材の中から、最適な組合せを選ぶ必要があるが、実際には、素材を保管・混合するタンク数、廃液パイプ数等の制約、自然災害や工場の事故などによる素材の供給停止リスク等により、使用する素材の数は限られる。
- (2) 他社特許の制約等があり、制約関数が複雑になるため、解の候補集合が凸集合でない場合がある。



図2 電子機器と半導体パッケージの一例

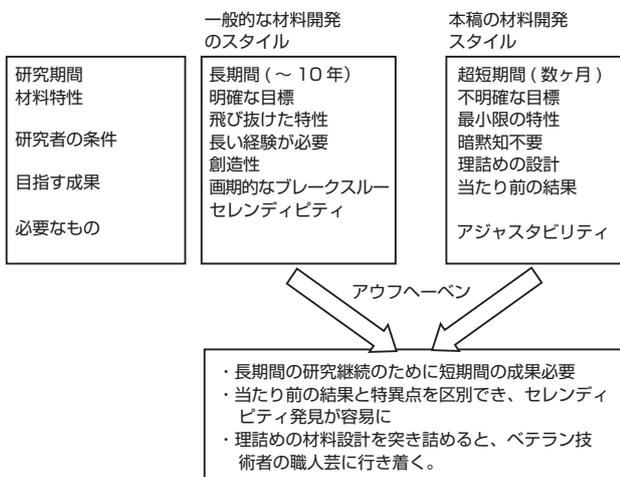


図1 これまでの材料開発のスタイルとこの論文のスタイルの比較

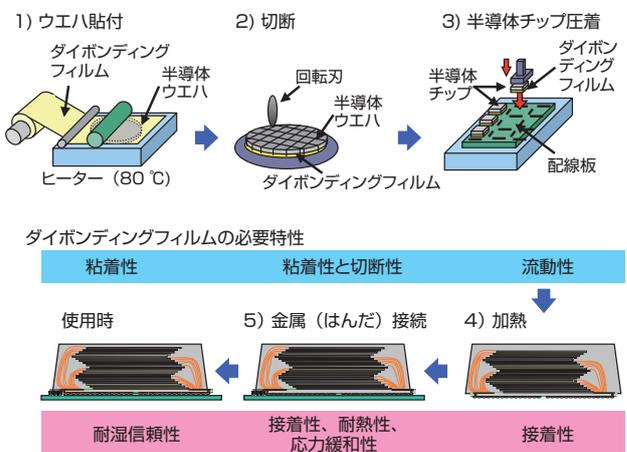


図3 半導体パッケージの組立プロセス

(3) 粘接着剤の設計には、複素弾性率等の複素物性の最適化が必須であるが、これまでの数理設計は実ベクトル空間を対象としており、複素数の取り扱いが困難である。

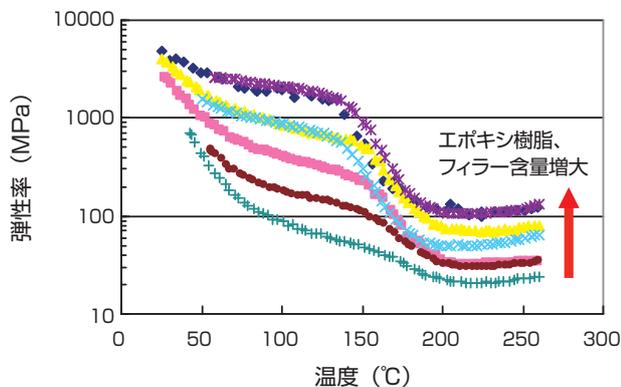
(4) 1点のみの最適値を見いだすことは必要ではなく、むしろ、ばらつきや設計変更への備えのために目標値を満たす解領域の広さが重要になる。

したがって、これらの課題を解決する数理設計手法を構築し、これを実際の開発に役立てることが必要であると考ええる。

著者らは、これまで材料設計に適した、かつ現場で使いやすい設計手法について検討してきた。素材の配合と材料特性との相関を詳しく調べた結果、配合と材料特性の間には準線形関係を有するケースが多いことから、線形計画法をベースに手法を構築することが早道であると考えた。しかし、材料開発に応用した際には目標関数を唯一の直線で表したとしても、解が存在しないケースも考えられる。さらにフィルムの特性のばらつきに対する耐性（ロバスト性）も求められる。つまり、解の制約条件を強くする（最適値のみを議論する）よりも、解の条件を弱くして、目標値を満たす領域の広さや形を議論することが重要である。これらに適した手法として、我々は線形計画法を応用して、複数の素材を配合して、複数の目標値を満たす組合せを算出する材料開発システム：弱条件組合せ線形計画法とそのソフトウェアを開発した<sup>[10]-[12]</sup>。

### 3 弱条件組合せ線形計画法の基礎

ダイボンディングフィルムはエポキシ樹脂、無機粒子等のフィラー、アクリルゴム、触媒等の多数の素材を組み合わせたコンポジット材料である。このため、配合比率を変えることで、図 4a) に示すように、弾性率にだけ注目すれば、かなり幅広く変更することが可能である。半導体メーカーからは、「大体、目標を満足したので、あとは弾性率だけ



a) 種々の配合での弾性率  
図4 各種特性の相関関係

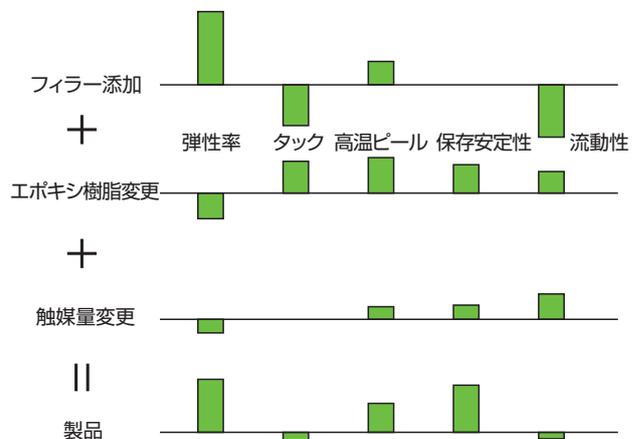
下げてくれ」などと言われることがある。しかし、これは最も難しい注文である。なぜなら、図 4b) に示すように各素材の量を変更すると、弾性率だけでなく、すべての特性値が変化するため、弾性率を下げること、今まで目標値を満足していた特性がすべて目標範囲から外れてしまうこともあるからである。

この課題を解決するために、著者らは下式に示すように線形計画法をベースに設計手法を構築した。配合から配合／特性行列により線形写像された値が特性になる。例えば、 $a_{mn}$  はあるエポキシ樹脂の配合量と接着強度の関係を示す。 $a_{mn}$  からなる行列は特性 / 配合行列、 $(c_1 \cdots c_n)$  は配合量ベクトル、 $(p_1 \cdots p_m)$  は特性ベクトル、 $(k_1 \cdots k_n)$  を組合せベクトル、 $\otimes$  は Hadamard 積である。

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ a_{12} & & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

なお、行列の Hadamard 積は下記のように定義される。

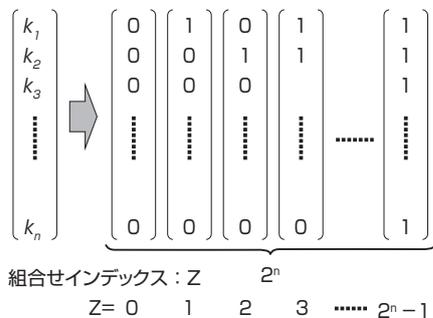
$$A \otimes B = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \cdot b_{11} & \cdots & a_{1n} \cdot b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} \cdot b_{m1} & \cdots & a_{mn} \cdot b_{mn} \end{pmatrix}$$



b) 各要素の特性への寄与の概念図

図 4b) に示すように各素材の量を変更すると、すべての特性が上下するが、それを相殺したり、足し合わせたりすることで、目標値に合わせ込んでいくことができる。

材料の組合せパラメータ  $k_n$  は材料  $n$  を使用する場合には 1、使用しない場合には 0 とした。素材の組合せベクトルは、組合せインデックス（以下  $Z$  と記す）と 1 対 1 対応する。例えば  $n$  種類の材料から  $0 \sim n$  種類を選んで配合を検討する場合、 $2^n$  通りの組合せが考えられる。組合せの表示を 010101... などのように表すと材料の種類が多い場合に煩雑になることから、この数字の並びを二進数であるとして、十進数の  $Z$  に 1 対 1 対応させた。それぞれについて対応する組成パラメータ  $c_n$  量を変更し、目標とする特性値を満たす範囲があるかどうかを調べることで、目標値を満たす配合範囲を調べることが可能である。



これまでの線形計画法が評価関数の最大あるいは最小の値を探索するのに対して、目標値を満たす解すべてを解集合として扱うことから、“弱条件”と名づけている。解の条件を弱くすることは計算時間の短縮に寄与する。

弱条件組合せ線形計画法は、数学的には、図 5 に示すように、制約を有する組成パラメータ  $c_n$  が作る空間  $C$  が、配合/特性パラメータからなる行列により、特性空間に線形写像され、実現可能な特性の空間  $P$  を作る。空間  $P$  と目標値の空間  $T$  の積集合  $S (=P \cap T)$  が目標値を満たす

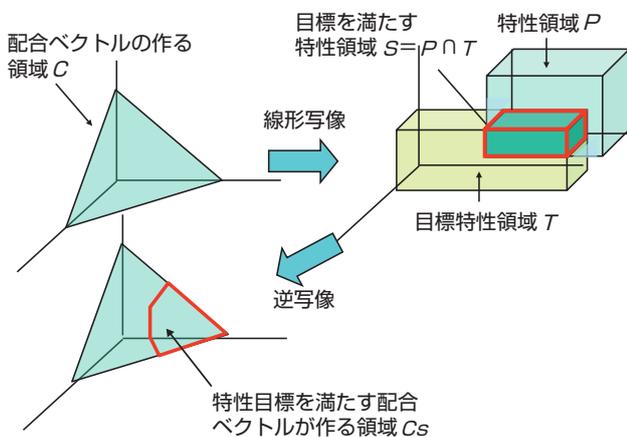


図5 弱条件線形計画法の概略

空間になる。また、 $S$  を満たす組成パラメータ  $c_n$  が作る空間  $C_s$  が定義され、これが目標特性を満足する配合となる。 $S$  や  $C_s$  の領域が広いほど、将来的に要求特性が変化した場合にも対応が可能である点で好ましい。実際にはこの配合の中で、さらにコストや裕度を勘案して配合を決定する。

#### 4 弱条件組合せ線形計画システム

上記の数学的処理は、材料技術者が日常業務として行うには煩雑であり、また、 $2^n$  個の組合せ毎に解空間を求める必要があるため、 $n$  が増加すると計算量が極めて大きくなる。エクセルや手作業の計算では解空間を求めることは極めて困難である。そこで、材料開発の現場においてより実用的に利用可能となる実装した解探索ソフトウェア M-Designer<sup>[10]-[12]</sup> を開発した。M-Designer は、図 6 に示すインターフェイスを持つ弱条件組合せ線形計画ソフトウェアである。M-Designer により、組合せインデックス毎に、目標値を満たす配合（解集合）があるか否かが計算できる。具体的には、あらかじめ実験的あるいは理論的に得られた特性/配合行列の数値、目標特性の範囲、配合数、配合量の上限下限を入力する。その後は、自動的に材料の配合量を適当な間隔で変更し、目標を満足するかを判定し、目標値を満たす配合を出力する。

なお、この配合候補は目標値を満足していれば良く、最適値を求める必要はない。むしろ目標を満たす領域が広いことが重要である。すなわち、領域が広ければ、いろいろな用途に使用できる可能性が増す。また、最適値を求めるアルゴリズムを実装しないシンプルなシステムであるため、後述するように複素物性値を含む非線形計画法、時系列データを含む配合設計等に幅広く使用可能であるというメリットがあることが分かった。

シミュレーションの一例を図 7 に示す。実際の結果の比較については既報<sup>[13]</sup> に示すが、精密さに欠ける点はあるが、特性をおおよそ予測することができる。さらに精度を向上するためには、配合量と特性の関係式を非線形連立方程式で表示することが好ましいが、多数の材料の組合

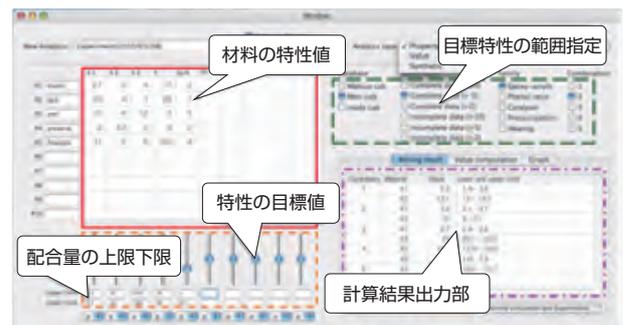


図6 システムのインターフェイス

せを検討する場合、それぞれについて変数  $n$  個の関数を求めるのは極めて多くの実験データを要する。実際には、図8の示す手順で、線形近似で候補材を絞った後、精度が必要な場合に非線形近似を行っている。

このシステムは多数の素材を組み合わせた接着剤の配合検討に使用されてきたが、図9に示すように非線形計画法への拡張<sup>[14]</sup>、材料供給リスク算出<sup>[13]</sup>、データベース化<sup>[15]</sup>等幅広い機能拡張と応用が可能であることが分かってきた。

粘着テープや接着剤等では、材料に対する刺激と応答との間に位相のずれ  $\theta$  がある場合、例えば、正弦波関数  $x=Ae^{-i\omega t}$  で表される歪みに対して、応力が、 $y=Be^{-i(\omega t - \theta)}$  であると、その間に定義される特性値（弾性率）は  $y/x = (B/A) \times e^{i\theta}$  となり、特性値は複素数になり、その制御は極めて重要である。この場合、配合と特性との関係は複素非線形関数になる。このような複素物性についても、複素数をガウス平面のベクトルとして扱うことにより、前述のシステムで処理できる<sup>[10][16]</sup>。

また、一昨年の東日本大震災で浮き彫りになったことの一つに、素材の供給停止リスクがある。高度に効率化、集積化された半導体や自動車産業では、一つの素材や部品の供給が止まっただけで大きな影響が生じる。このシステ

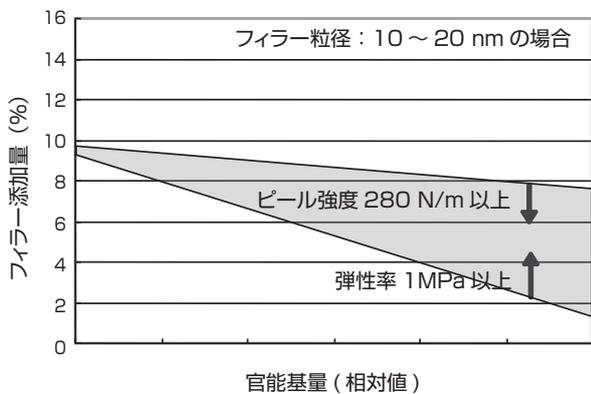


図7 シミュレーションの一例

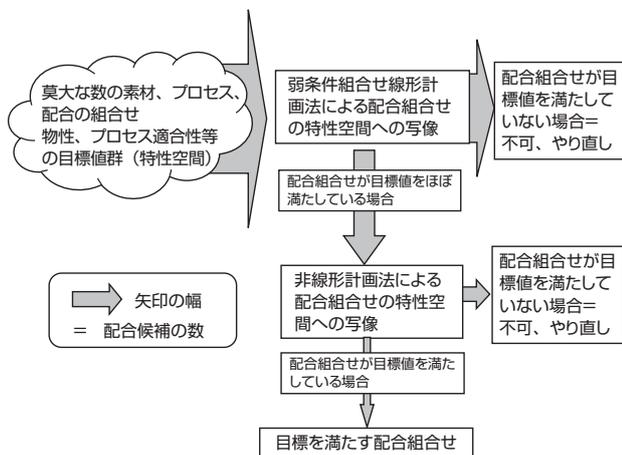


図8 線形、非線型近似の使い分け

ムでは、単に配合候補をいくつか出力するだけでなく、その複数候補が共通の素材を使用しているかを考慮し、供給リスクを算出することができる。素材の供給リスクを正確に把握できない課題はあるが、いずれも 0.01 % 等の一定リスクであると仮定すれば、配合製品の供給ロバスト性を表す指標を算出できる。つまり、設計時にリスク対策を打つことができるのである。

このようなリスクの算出は、これまでの線形計画法では不可能であり、弱条件組合せ線形計画法とその計算システムの構築により初めて可能になったもので、本手法の有用性を示す結果であると考えられる。

また、特性／配合行列等のデータを整理して収納できるデータベースは、過去の失敗データを新規な開発に活かすのに役立っている。この際、単に過去の実験データを保存するだけでは、特性と配合の相関が不明なため、あまり役に立たないが、特性／配合行列等のデータの形で保管し、それを M-Designer に入力、計算することで再利用することができる。例えば、過去には失敗例であったが、構造や目標値が大幅に変更になったことで、若干の修正を加えることで目標値を満足する配合になることもあった。このようなデータベースがあれば、過去の結果を知らずに、もう一度同じ失敗を繰り返すことも防ぐことができる。

## 5 弱条件組合せ線形計画法の応用

本手法は、短期間の開発に特に有効であるため、今後の半導体関連材料の開発に有用であるだけでなく、食品、環境等さまざまな応用展開が可能である。

例えば、この論文では、配合の最適化に焦点を当てたが、設計手法はそれに限定されるものではなく、配合量の代わりに、製造条件、例えば、温度、湿度、速度等、物質以外のものも取り上げることでもできる。

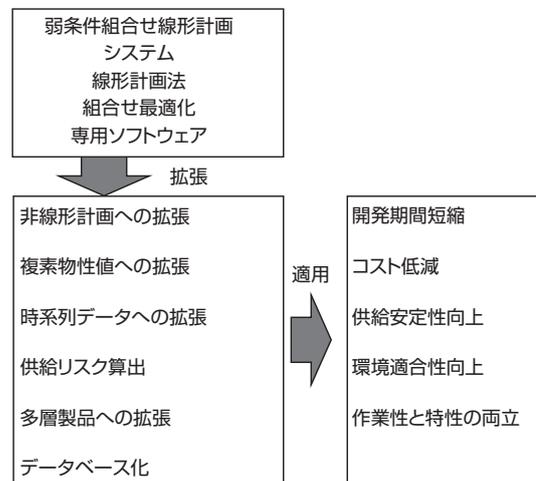


図9 弱条件線形計画法の拡張と適用範囲

また、この論文の最適化手法は、将来的に種々の分野への応用が可能であると考えられる。例えば、調理、香水の調合、酒類の調合、香辛料の調合、漢方薬や合成薬品等の医薬品等、組合せ最適化が重要な分野は枚挙に暇がない。特に食品産業においては、調味料の組合せや素材の組合せによる食味の設計は極めて重要なテーマである。実際には、料理人が旬の素材を活かすため、そのつど味付けを変えるなどの職人の勘、感性を活かして行っているため、これまで数理的設計はほとんど行われていない。味センサー等の開発に伴い、定量的な食味の評価が進んでいることから、今後、この分野での数理設計が大きく進展すると予想する。

## 6 おわりに

この論文では、半導体実装材料等の開発効率化を目指して構築した材料設計手法について述べた。本手法を活用することにより、材料特性を臨機応変に変更して目標値に適合できる能力(アジャスタビリティ)を活かしたオンデマンド製品開発が可能になった。

ブレークスルーを目的としていないことから、大きな仕事から目をそらした部分最適化に過ぎないとの批判を受けることもある。しかし、ブレークスルーは別の人が追いかければよいだけである。割り切りがなければ短時間開発はできない。

このように短期間の材料開発の現場は、セレンディピティからは最も縁遠い所と思われたが、意外にも、本手法を用いて素材の組合せから特性を予測しベースラインを明確化した後に実験を行うと、予想からのずれを敏感に検知できることが分かってきた。単なる予測の誤差がほとんどであるが、極稀に予期しない相乗効果や新規な構造による効果によるものもある。つまり、セレンディピティのきっかけを感度良く検知することもできるようになった。

この論文で提案した新たな材料設計手法やシステムは、このようにフィードバックをかけながら、必要な材料をタイムリーに開発するためには、不可欠のツールになると信じている。最終的には、職人芸と融合したオンデマンド材料開発システムを実現することが、究極の課題である。

## 参考文献

- [1] C. Lévi-Strauss: *The Savage Mind*, University of Chicago Press (1966), (Original work, *Pensées Sauvage*, published 1962).
- [2] 荒井裕彦: ロボット技術を用いたスピニング加工(へら絞り), *Synthesiology*, 5 (2), 126-134 (2012).
- [3] 盆子原學: 3次元実装半導体の現状とビジネスの取り組み, *エレクトロニクス実装技術*, 26, 12, 22-26 (2010).
- [4] T. Iwakura, T. Inada, M. Kader and T. Inoue: Structure-properties of acrylic rubber/epoxy adhesive by reaction-

induced phase decomposition, *E-Journal of Soft Materials*, 2, 13-19 (2006).

- [5] 稲田禎一: 反応誘起型相分離を用いたダイボンディングフィルムの設計と実用化に関する研究, 山形大学工学部博士学位論文 (2007).
- [6] W. Leontief: *Input-Output Economics*, Oxford University Press (1966) (新飯田宏訳: 産業連関分析, 岩波書店 (1969).)
- [7] G. Dantzig: *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press (1963).
- [8] 森口繁一: *線形計画法入門*, 日本科学技術連盟 (1957).
- [9] 今野浩, 山下浩: *非線形計画法*, 日科技連出版社 (1978).
- [10] 稲田禎一: プログラムドマテリアル開発のための計算論的最近最適集合解析に関する研究, 山形大学博士論文 (2012).
- [11] 松尾徳朗, 稲田禎一: 弱条件組合せに基づく半導体ダイボンディングフィルム材料設計システム, *情報処理学会第72回全国大会* (2010).
- [12] 稲田禎一, 村形晃規, 松尾徳朗: 弱条件組合せ線形計画に基づく材料設計支援システム, *パーソナルコンピュータ利用技術学会論文誌*, 6 (1), 30-35 (2012).
- [13] 稲田禎一, 松尾徳朗: 材料供給リスク評価アルゴリズム, *パーソナルコンピュータ利用技術学会論文誌*, 7 (1), 1-7 (2013).
- [14] 稲田禎一, 松尾徳朗: 弱条件組合せ線形計画法による熱硬化系接着フィルムの特性予測, *ネットワークポリマー*, 31, 2-10 (2010).
- [15] T. Inada and T. Matsuo: Intelligent material design system based on weak conditioned linear programming, *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 7 (4), 45-58 (2012).
- [16] 稲田禎一: 有機ガラス形成物質の緩和時間の一般的な性質と複素弾性率の予測式, *ネットワークポリマー*, 34 (4), 207-211 (2013).

## 執筆者略歴

稲田 禎一 (いなだ ていいち)

1990年3月東京工業大学大学院修士課程材料科学専攻修了。同年日立化成(株)入社、現在、同社 筑波総合研究所主管研究員。2007年エレクトロニクス実装学会技術賞受賞。2011年、第9回産学官連携功労者表彰内閣総理大臣賞受賞。2012年、平成23年度高分子学会賞受賞、SERS主催 The 2012 International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application Best Paper Award。博士(工学)、博士(学術)。高分子材料、接着材料および材料配合の数理設計に関心を持つ。高分子学会等会員。この論文では、弱条件組合せ線形計画法の基礎確立と各種応用展開に寄与した。



松尾 徳朗 (まつお とくろう)

2001年3月佐賀大学文化教育学部卒業。2003年3月北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科修了。2006年3月名古屋工業大学大学院工学研究科修了。博士(工学)。同年、山形大学大学院理工学研究科准教授。2010年～2011年カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。2010年よりセントラルミシガン大学ソフトウェア工学情報技術研究所リサーチフェロー。2012年8月より、産業技術大学院大学教授。人工知能、電子商取引、教育工学に関心を持つ。主著として、「Electronic Commerce」(Springer, 2008年)、「E-Activity and Intelligent Web Construction: Effects of Social Design」(IGI20011年)。IEEE、電気学会等会員。この論文では、弱条件組合せ線形計画法の基礎確立とソフトウェアの開発に寄与した。



## 査読者との議論

### 議論1 全体について

コメント (多屋 秀人:産業技術総合研究所広報部)

この論文では、最先端の生産活動の現場で、すでにあるものの組合せにより期限内に目標性能を実現する材料を開発するための材料設計支援ツール構築に向けた取り組みが論じられており、大変興味深い、本シンセシオロジーの趣旨に合致した内容です。

### 議論2 材料開発のスタイル

質問 (多屋 秀人)

最先端の半導体用材料の生産現場において超短期間の制約のもとでの材料開発を展開する中で、「単なるプリコラージュではなく、合理的で確実に目標値を達成する材料の開発」を目指し、オンデマンド材料開発手法が開発されています。

オンデマンド材料開発手法で目指すのは、合理的だが、創造性のない単なる足し合わせの材料開発なのか、あるいは、「プリコラージュとエンジニアリングのメリットを併せ持つ手法 (図1中のアウフヘーベン)」なのでしょうか。また、両者の関係は、今後どのように展開されるのでしょうか？

回答 (稲田 禎一)

この論文での材料開発スタイルは、まずは、合理的だが、創造性のない単なる足し合わせの材料開発です。しかし、これを突き詰めると、意外にも、予期しない相乗効果を見出しやすくなりました。これを説明したのが、図1に記した合理性と創造性の止揚 (アウフヘーベン) の図です。

例えば、本手法を用いて素材の組み合わせから特性を予測し、ベースラインを明確化した後に実験を行うと、予想からのずれを敏感に検知できることが分かってきました。つまり、相乗効果がない場合の実験結果を予測することで、小さな相乗効果を検知することができるようになりました。小さな相乗効果を見いだした後、さらにこれを大きくすることに成功し、差別化技術を生み出した例もあります。この論文の材料開発スタイルはともすれば時間に追われた無味乾燥な材料開発に見えますが、予期しない効果を見いだす顕微鏡の役割を果たすのです。

### 議論3 構成について

質問 (多屋 秀人)

「3. 弱条件組合せ線形計画法の基礎」について、シミュレーション結果、線形・非線形の使い分け、拡張性等について新たに章を設け、より詳細な説明を記載してはいかがでしょうか？

回答 (稲田 禎一)

章を改め、説明を増やしました。内容はこの論文に記載しております。ここでは、ポイントのみ改めて説明します。

#### 1) 複素数への拡張

粘着テープや接着剤等では、しばしば特性値が複素数になります。このような複素物性についても、複素数をガウス平面のベクトルとして扱うことにより、前述のシステムで処理できることを明らかにしました。

#### 2) 供給リスクの算出

材料は目標特性を満たすだけでなく、安定供給できることが重要です。素材の供給停止リスクがある場合に、配合候補が共通の素材

を使用しているかを考慮し、供給リスクを算出することができるようにしました。その結果、目標を満たす材料開発と同時に供給リスクを概算することができるようになりました。このようなリスクの算出は、これまでの線形計画法では不可能であり、弱条件組合せ線形計画法とその計算システムの構築により初めて可能になったものです。

#### 3) データベース化

過去の実験結果を特性/配合行列等のデータの形で保管し、それをM-Designerに入力、計算することで再利用することにより、有効活用ができます。例えば、過去には失敗例であったが、構造や目標値が大幅に変更になったことで、若干の修正を加えることで目標値を満足する配合になるなど、過去の結果を活かして、開発効率を改善することができます。

### 議論4 本開発手法の問題点は？

質問 (多屋 秀人)

オンデマンド材料開発手法を生産の実現場に適用する中での評価・評判はどのようなものでしたか？ 導入にあたって配慮した点は何があったのでしょうか？

回答 (稲田 禎一)

この手法を社内で説明していたとき、先輩技術者がほそつと言った言葉があります。「ベテランの技術者が頭の中でやっていることを書きくたしたら、きっとこんな感じになるんだろうね」。確かに、ベテランの技術者は素材の良いところ、悪いところを知り尽くして、悪いところが突出しないように、良いところが目立つように設計します。理詰めでの材料開発を徹底的に進めたところが、行き着いたところは、職人芸だったのです。これは、意外なことではなく、職人芸がいかにシステマティックで優れたシステムかを示す事例であると言えます。今後は、理詰めと職人芸を止揚、統合し、さらに一歩先を行くシステムを構築することができるのではないかと考えています。

### 議論5 本手法による開発期間の短縮について

質問 (多屋 秀人)

「本手法は、短期間の開発に特に有効である」とのことですが、経験的にどの程度の期間短縮になっているのでしょうか？

回答 (稲田 禎一)

実際の開発作業は毎回、目標値や制約条件が異なるため、本手法の使用有り無しでの比較を正確にすることは難しいのですが、経験的には、以下のようなメリットがあります。

- 1) 配合候補は極めて数多くあるのですが、本手法を用いることで、まず、全く可能性のない配合を排除し、可能性の高い候補に絞ることができます。本手法は線形近似のため、実験データとずれがあることは否めませんが、候補材を絞り込むことには十分有効であり、これにより、開発期間は大幅に短縮可能と考えます。
- 2) 改良製品は過去の結果を踏まえて、モディファイをします。例えば、10年前に先人が作った製品を見直して新製品を開発する際、なぜ、これらの材料を配合したのか分からないが、ともかく性能が良いなどがあります。このような場合、なぜ、この機能が出るのか、なぜこの薬品は必要なのか分からないため、わずかな改良もとても手間取ることがあります。このようなとき、解析システムとデータベースがとても役にたち、かつ開発期間短縮ができます。

# 持続発展可能な大容量・低消費電力の 通信ネットワーク実現に向けて

## — ダイナミック光パスネットワークのためのトポロジ検討 —

石井 紀代\*、来見田 淳也、並木 周

映像関連アプリケーションの発展により、通信ネットワーク上の通信需要が増大し続けている。映像関連アプリケーションは将来、高臨場感双方向映像通信、遠隔診断医療、遠隔教育等への発展が期待されている。しかし、現状のネットワークは消費電力が通信量に依存して増加するため、消費電力増大が大容量通信ネットワーク実現のボトルネックとなることが懸念される。この論文では、持続発展可能な通信ネットワーク技術の確立に向け、通信量に対する依存が小さな消費電力特性を持つネットワークアーキテクチャ（ダイナミック光パスネットワーク）を提示する。トポロジとノード構成との詳細検討を通し、収容ユーザー数、通信帯域、および消費電力の観点からその有効性を明らかにする。

**キーワード:** 大容量低消費電力通信ネットワーク、光パスネットワーク、光スイッチ、超高精細映像通信

## Towards large-capacity, energy-efficient, and sustainable communication networks

### – Network topology research for dynamic optical paths –

Kiyo ISHII\*, Junya KURUMIDA and Shu NAMIKI

Internet traffic continues to increase due to the growth of video-related communication services. Such video-related services are expected to support future advanced communication services such as tele-presence based on real-time high resolution bidirectional video communication, tele-diagnosis, and remote education. However, the risk of an energy crunch in communication networks is increasing with the increase in traffic since energy consumption of current IP router based networks depends on traffic volume. In this paper, we present a network architecture, called “dynamic optical path network (DOPN)”, whose energy scaling is much less dependent on traffic volume than that of the current networks. This paper demonstrates the validity of DOPN to realize greater bandwidth, national-scale, and energy-efficient network, by defining detailed network topologies and node architectures of DOPN.

**Keywords:** Large-capacity and low-energy-consumption communication network, optical path network, optical switch, super high vision video communication

### 1 はじめに

電話網やインターネット網に代表される通信インフラは、電気・水道・ガスに匹敵する重要なライフラインとなっている。通信インフラの拡充や映像関連アプリケーションの進展により、ネットワーク上を流れる通信量（トラフィック）の増大が世界的に続いている<sup>[1]</sup>。日本に注目すれば、ブロードバンドサービス契約者数が年々増加を続けると同時に、DSL (Digital Subscriber Line) 契約者数が減少しFTTH (Fiber To The Home) 契約者数が増加するなど、より広帯域サービスへの移行も進み、契約者あたりのトラフィック量も年々増加を続けている。これらの動向を背景に、日本のネットワークでは年率 20 ~ 40 % での通信量増加が継

続している<sup>[2][3]</sup>。今後も高精細映像等大容量コンテンツの更なる進展により、通信量の増加傾向が続くと予測されている。仮に、今後 20 ~ 30 年にわたって年率 20 ~ 40 % の通信量増加が継続すると、現在の 1000 倍を超える通信需要を収容するネットワークが必要となる。

通信量が増加するほど通信ネットワークの重要性は増し、ひとたび通信断が発生すれば甚大な影響を及ぼすことになる。現在、断線等の故障リスクに対し、通信拠点間に複数の経路（西回り経路・東回り経路等）を確保し、一方の経路に障害が発生しても他方の経路を使用することで、通信サービスを継続可能とする運用がなされている。しかし、2011 年東北地方太平洋沖地震のような大災害時には、

産業技術総合研究所 ネットワークフォトンクス研究センター 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2  
Network Photonics Research Center, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan \* E-mail: kiyo-ishii@aist.go.jp

Original manuscript received June 13, 2013, Revisions received August 22, 2013, Accepted September 2, 2013

故障発生が広範囲・多数箇所に及ぶため通常の運用では障害復旧が困難であり、より大幅で迅速なネットワーク再構成が必要であることが浮き彫りになった。さらに、災害時に生じる電力供給不安に影響されずに通信を継続するために、平時からの低消費電力なネットワーク運用の重要性も再認識されている。

通信ネットワークは、信号の伝送を行うリンク（伝送路）と、信号の宛先やアプリケーションに応じて処理を行う通信ノード（節点）とから成る。信号伝送は主に光ファイバリンクを用い、光信号により行われている。1本の光ファイバで複数の光信号を多重化して伝送することが可能であり（波長分割多重伝送、WDM：Wavelength Division Multiplexing）、学会では1ファイバ当たり100 Tbpsを超える容量の伝送実験も報告されている<sup>[4]</sup>。一方、ノードでは主に光/電気変換と電気スイッチやIPルータを用いた電気領域での処理が行われている。光/電気変換や電気スイッチおよびIPルータの消費電力は、信号伝送レート、すなわち、取り扱う通信量に比例して増加するため、消費電力が大容量ネットワーク実現のボトルネックとなることが懸念されている<sup>[5]</sup>。将来の通信インフラ技術確立に向けて、ネットワークの低消費電力化は先に述べた耐災害性の観点のみならず、大容量化の観点からも重要な課題である。

現在、低消費電力での大容量通信ネットワーク実現に向け、ノードでのトラフィック処理をより低消費電力な低レイヤで行うこと（IPトラフィックオフローディング）が検討されている<sup>[6][7]</sup>。トラフィックオフローディング技術の一つに、ノードにおいて光/電気変換を行わず、光スイッチを用いて光信号の行き先を切り替える光カッター技術が検討され、ROADM（Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer）の技術と共に導入が進んでいる。しかし、

これらトラフィックオフローディング技術は現在のIPルータ網をベースとして検討されており、ネットワークの境界（エッジ）での信号処理が避けられず、ネットワーク全体の低消費電力化効果は20～30%程度と限定的である<sup>[8][9]</sup>。通信容量3ケタ増大等の長期的展望においては、さらに抜本的な検討が必要である。

我々は、持続発展可能な将来の大容量通信ネットワークを目指し、これを実現するネットワークアーキテクチャを「ダイナミック光パスネットワーク（DOPN）」と名付け、取り組んでいる<sup>[10][11]</sup>。DOPNは、将来のトラフィック量増大の主要因が高精細映像を主体とした大容量アプリケーションであることに着目し、ユーザー間にGbps以上の直通大容量パス回線をリクエストに応じて動的に提供する。大粒度通信要求を主眼とすることで、低消費電力な光スイッチや低レイヤ電気スイッチのみでネットワークを構成し、通信量への依存が小さい消費電力特性の実現を目指すものである。一方、小容量の通信要求を頻繁に発生するwebやメール等の既存通信サービスには、数十～数百kbit毎のパケット交換を行う現在のIPルータ網が適している。したがって、DOPNは既存IPルータ網を置き換えるものではなく、併存し相補関係をなすものとなる。DOPNの運用管理には、通信リクエストごとにネットワーク資源（帯域）からストレージ資源（コンテンツ）までを包括的に予約管理する新たな統合資源管理技術の導入が必要となる<sup>[12]</sup>。従来サービスのwebやメールはIPルータ網を使用し、高精細VOD（Video On Demand）や遠隔会議等の大容量サービスではDOPNを使用するというように、アプリケーションに応じて使用する網を資源管理システムが自動的に選択し、必要に応じてパス回線の予約を行う（図1）。資源管理システムは、ユーザーがIP網とDOPNとの違いを意識すること

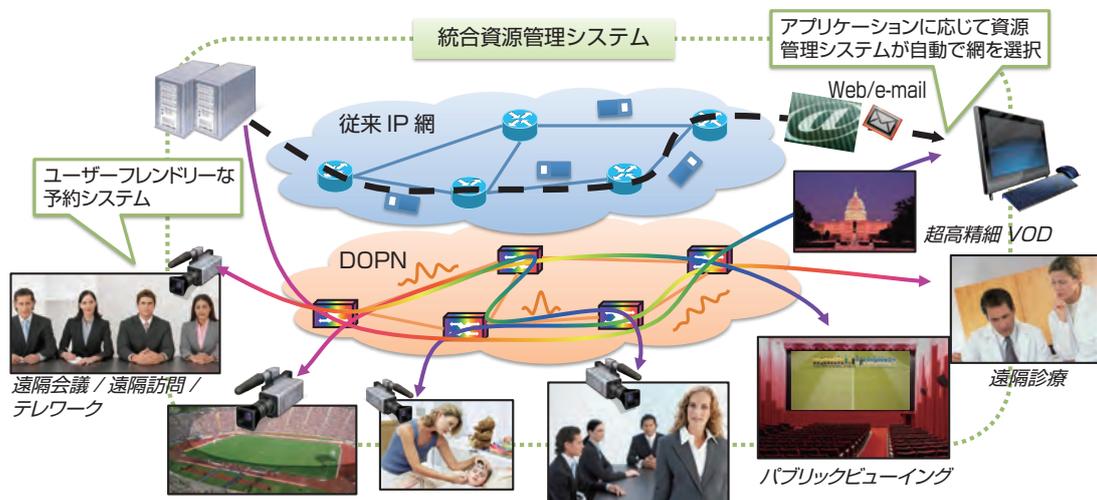


図1 IP網とDOPNとから構成される将来の情報通信ネットワークとサービスのイメージ

なくシームレスに使用することを可能にするもので、産総研情報技術研究部門と協働して検討を進めている。DOPNはこれまでのOSI7レイヤ<sup>用語1</sup>の視点で言うと、光スイッチも含む物理レイヤの動的な切替の実施を意味するものであるため、その要素技術は、先に述べた災害等有事の際の物理レイヤをも含む大掛かりなネットワーク再構成の迅速な実施を可能とする技術への発展も期待できる。

DOPNにより安定した大容量パスをスムーズにユーザー間に提供できれば、あらゆる大容量通信サービス実現のプラットフォームとなる。DOPNがターゲットとする映像サービスとして、現在開発が進められているスーパーハイビジョン（SHV）があげられる。SHVはハイビジョン（HV）の16倍の高精細画像で、非圧縮伝送には72 Gbps以上の帯域が必要であり、現在の日本のインターネット網のピーク接続速度の40.5 Mbps<sup>[13]</sup>と比較すると、3ケタ以上のギャップがある。DOPNを用いればSHVの非圧縮伝送に必要な帯域を安定して提供可能である。当然、映像圧縮技術も開発されているが、実際に対面しているのと遜色ない程の高臨場感を実現するためには、映像圧縮の利用には限界がある。高精細映像を用いた高臨場感双方向通信が実現できれば、意思決定を伴う会議や資格／就職試験面接等、重要場面における遠隔会議活用も現実的となる。超高精細映像を用いた遠隔会議・遠隔診断医療・遠隔教育等のアプリケーションが真に社会に普及すれば、地理的距離に制約されない共働が可能となり、ひいては、教育や医療等の地域格差をも激減させるなど、大きな社会的価値に繋がることが期待される。

この論文の目的は、将来の映像関連サービスを支える通

信インフラ実現の基盤技術として、DOPNの有効性を示すことである。将来の映像関連サービスを支える通信インフラへの要求として、1. 通信需要増大時の消費電力のボトルネック解消、2. 数千万人規模の収容ユーザー数、3. 遠隔共存（～100 Gbps）から高精細VOD（数Gbps）までさまざまな大容量映像サービスに対応可能、の3点がある。この論文ではDOPNのネットワークトポロジとノード構成について詳細に検討し、1～2.5 Gbpsのパス回線を使用するコンシューマーユーザーを5000万以上、40～100 Gbpsのパス回線を使用するエンタープライズユーザーを60万以上収容可能であり、現在のネットワークにくらべ2～3ケタ程度の消費電力効率改善の可能性を有することを示す。

## 2 ダイナミック光パスネットワーク（DOPN）～目標・課題・要素技術～

ダイナミック光パスネットワークは、低消費電力な光スイッチや電気スイッチを主要構成要素とすることで、持続発展可能な将来の大容量・低消費電力ネットワークを実現しようとするものである。図2にこの論文で扱うダイナミック光パスネットワークが達成すべき目標とそれを達成するために使用する要素技術の相関を示し、以下に詳細を説明する。

### 要素技術1：光スイッチ

光スイッチの注目すべき特徴として、消費電力が信号伝送レートに依存せずスイッチポート数に比例するという点がある。DOPNでは、光スイッチを主要構成要素とすることで、通信需要量への依存が小さな消費電力特性を目指す。しかし、光スイッチには大きな入出力ポート数の実現が困難であるという技術的問題がある。電話網で使用される交

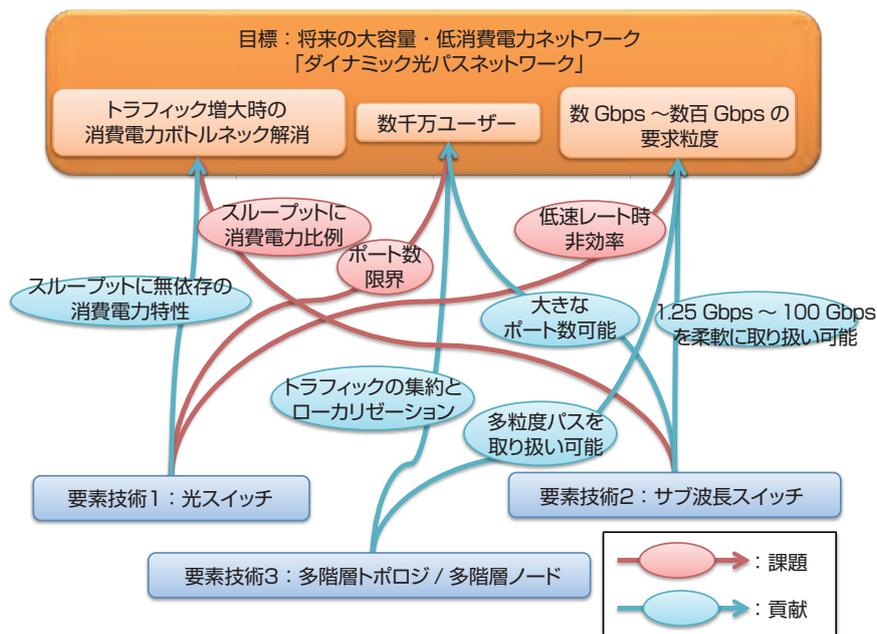


図2 目標・要素技術・課題の相関

換機が数万ポート数規模であるのに対し、現状の光スイッチ製品のポート数は8～200ポート程度である。光スイッチを主要構成要素としてネットワークを構成する際には、光スイッチポート数限界による収容可能ユーザー数の制限が問題となる。さらに、光スイッチにはファイバ単位で切り替えるもの（光マトリックススイッチ）と、波長単位で切り替えるもの（波長選択スイッチ、WSS: Wavelength Selective Switch<sup>用語2)</sup>の2種類がある。光ファイバは1本あたり数Tbps以上、波長は数十～数百Gbpsの通信データレートであり、光スイッチのみでは数Gbps程度の小粒度の通信需要に対し非効率であるという課題がある。

### 要素技術2: サブ波長スイッチ

光スイッチを主要構成要素とする場合の課題の解決のため、サブ波長パスを導入する。サブ波長パスとは、波長パスより小粒度の電気パスのことで、具体的には同期デジタル通信方式を用いる。この論文ではサブ波長パスとしてODU (Optical Data Unit) パスの使用を想定する<sup>[14]</sup>。ODUスイッチは電気パススイッチとして動作するため消費電力がスループットに依存するが、取り扱うデータの粒度が1.25 Gbps以上と大きいため、パケットルータと比べると消費電力は1/6以下である<sup>[15]</sup>。ODUパスは1.25 Gbps～100 Gbpsまで1.25 Gbps刻みで扱うことが可能であり(ODUflex)、スループットTbps級・数千ポート規模のODUスイッチの開発が進められている。この論文のDOPNで取り扱うパス粒度のイメージを図3に示す。

### 要素技術3: 多階層トポロジ/多階層ノード

要素技術1と2とを効率的に組み合わせて使用するため、多階層トポロジ/多階層ノードを導入する。多階層ノードとは、さまざまな粒度のパスを効率的に扱うためのノード構成で、光スイッチやサブ波長スイッチ等の粒度が異なるスイッチを階層的に接続したものである。可能な限り大粒度のパス単位で切替を行うことにより、ネットワーク全体で必要となるハードウェア規模が低減される<sup>[16][17]</sup>。多階層ト

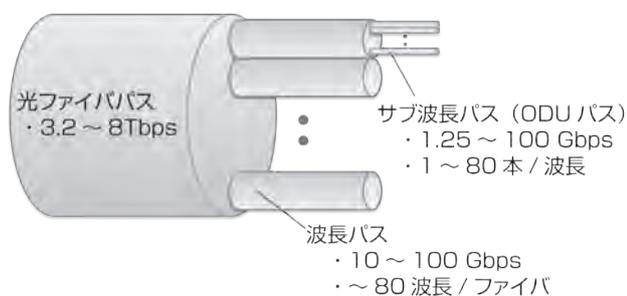


図3 この論文で取り扱う多粒度多階層パスの概念図  
光ファイバパス容量については、現在商用化されている技術を基に1波長あたり最大100 Gbps・最大波長多重数を80として想定した。将来的には、この論文に書く通り1ファイバあたり100 Tbps超へも進展可能である。

ポロジとは、ユーザーサイドのアクセス網、トラフィックを集約するアグリゲーション網、長距離伝送を行うコア網等が階層的に接続されたネットワークトポロジである。近距離通信についてアグリゲーション網等で適宜トラフィックを折り返す(トラフィックのローカライズ)ことにより、大量のトラフィックが集結するコア網の負担を軽減し、数千万ユーザーへの拡張性をサポートする。また、多階層ネットワークトポロジは現状のネットワークの形状と親和性が高く、DOPN導入のマイグレーションにおいて設備共有等の観点からも有効である。

## 3 ネットワークトポロジとノード構成

本章では、ダイナミック光パスネットワークのトポロジとノード構成とを検討する。まず、日本のブロードバンド加入者数や想定アプリケーションを考慮し、DOPNの収容ユーザー数と帯域の数値目標を設定する。さらに、現状の光スイッチ技術等を考慮し、使用光デバイスとトポロジへの要求条件を設定する。具体的なトポロジと詳細なノード構成を示し、設定した要求条件の範囲内で数値目標を達成可能であることを示す。

### 3.1 目標と要求条件

DOPNが主眼とする将来の映像関連アプリケーションのユーザーとして、高精細VOD/テレビ電話等の数Gbps程度を主に使用するコンシューマーユーザーと、超高精細パブリックビューイングや大容量ファイル交換等の数十～100 Gbps程度を主に使用するエンタープライズユーザーとが想定される。現在の日本の世帯数が約5000万、数十人以上の規模の事業所数が約60万であることから<sup>[18][19]</sup>、通信容量1 Gbps以上のコンシューマーユーザーを5000万以上、通信容量40～100 Gbpsのエンタープライズユーザーを60万以上収容することを目標とする。

光デバイスとトポロジ構成について、以下の4点を要求条件として仮定した。

1) 光マトリックススイッチポート数500以下: 光スイッチの多ポート化に向けた技術開発が進んでいるが、製品として現在リリースされている光マトリックススイッチのポート数は、MEMS (MicroElectroMechanical System) 技術によるもので200ポート程度、PLC (Planar Lightwave Circuit) 技術によるもので16ポート程度である。また、スイッチスピードや製造性の観点から期待されるSiフォトニクス技術を用いた32ポートのスイッチが開発中である。複数の32ポートスイッチをクロスの3段構成<sup>[20]</sup>を用いて組み合わせれば、500ポートのスイッチを構成可能である。以上の技術動向から、この論文で使用する光マトリックススイッチポート数の最大値を500と仮定する。

2) 波長選択スイッチポート数  $1 \times 35$  以下：現在、LCOS (Liquid Crystal On Silicon) や MEMS 技術による  $1 \times 9$  や  $1 \times 4$  のサイズの波長選択スイッチが複数のメーカーからリリースされている。波長選択スイッチも多ポート化に向けた技術開発が進んでおり、2011 年には  $1 \times 20$  ポート製品の発売が発表されている<sup>[21]</sup>。将来のさらなる多ポート化を考慮し、この論文で使用する波長選択スイッチポート数の最大値を  $1 \times 35$  と仮定する。

3) 基本的なファイバトポロジをツリー・リング・メッシュとする：現在のネットワークで使用しているファイバ線路や基地局設備等を活用するため、ダイナミック光パスネットワークの地理的ファイバ配置を現在のネットワークで想定される地理的ファイバ配置と共通であるとした。すなわち、アクセスサイドでは PON (Passive Optical Network) のトポロジと互換性の高いツリー、メトロ領域ではリング、コア領域ではメッシュの地理的ファイバ配置とする。

4) ネットワーク全体でフレキシブルグリッドに対応：現在のネットワークでは、波長チャネルの伝送データレートによらず一定の周波数帯域 (100 GHz 間隔または 50 GHz 間隔の ITU-T グリッド<sup>[22]</sup>) が使用されている。周波数利用効率を向上するため、周波数帯域のより柔軟な利用を可能とするフレキシブルグリッド技術の研究・開発が進められ、25 ~ 50 % 程度の効率向上が試算されている<sup>[23]</sup>。効率的な大容量通信網を実現するため、アクセス網も含め end to end でのフレキシブルグリッド接続対応可能とする。

### 3.2 トポロジ

3.1 節で示した要求事項を満足するダイナミック光パスネットワークのトポロジを探究する。一番の課題は、数百ポートのスイッチを主要構成要素として、数千万ユーザーの相互接続を実現することである。2 章の要素技術 3 にて述べた通り、光スイッチのポート数制限とトラフィック集約の点から、フラットなネットワーク構成での実現は不可能であり、ユーザー端末をグルーピングして階層的に接続する多階層トポロジが必須である。多階層トポロジでは、少ない階層のシンプルな構成が望ましい。トラフィック集約階層(最下層)と長距離バス設立階層(最上層)の 2 階層以外に、どのような役割で何階層のネットワークが必要になるかがポイントである。トラフィック集約について、ユーザーのパス粒度に応じ、サブ波長パスを波長パスへ、波長パスをファイバへと順次集約する。集約を 2 段階に分けるのは、ユーザーに近い位置でサブ波長パスから波長パスに集約することによる伝送路使用効率向上のためと、ファイバ容量への集約時に必要となるサブ波長パススイッチのポート数削減のためである。ターゲットとするユーザー数とユーザーあたりの帯域を考慮すると、最上層ネットワークに集約されるト

ラフィック容量は膨大となる。最上層ネットワークでは、波長スイッチより大きなポート数を想定可能で、より大容量を収容可能な光ファイバスイッチの使用が必須となる。すなわち、ファイバ単位で切り替えられるほどに波長パス・サブ波長パスが整理 (グルーミング<sup>[24]</sup>) された状態で、最上層ネットワークに接続する必要がある。集約ネットワークの通信ノード構成を定量的に検討した結果、波長パスの多重化に使用する光カプラ分岐数と損失の点で、ファイバ単位で切り替え可能とするほどのトラフィック集約を行うことは困難なことが分かった。すなわち、最上層ネットワークに接続する前に、グルーミングを行うネットワーク層の追加が必要になった。このような検討過程により、図 4 に示す 4 階層のネットワークに行き着いた。詳細な数値検討を行ったところ、光スイッチポート数や収容人数の要求条件を満足可能なが分かった。次項からトポロジの詳細と具体的な数値検討を述べる。

#### 3.2.1 各ネットワークの役割

ここで検討するネットワークトポロジは 4 階層で構成されている。すなわち、複数のユーザー端末からなるグループネットワーク (NW)、複数のグループ NW を集約するカテゴリネットワーク、複数のカテゴリ NW を集約するカテゴリコアネットワーク、複数のカテゴリコア NW を接続するコアネットワークから構成されている。グループ NW が第一段階のトラフィック集約を、カテゴリ NW が第二段階のトラフィック集約を行い、カテゴリ NW ではグルーミングを、コア NW では長距離バス設立を行う。

グループ NW 部はコンシューマーユーザーとなるサブ波長パス端末、エンタープライズユーザーとなる波長パス端末、および、サブ波長パス端末を波長パス粒度に多重化するサブ波長パス集約ノードとから構成される。これらの端末およびノードと上流のカテゴリ NW のノードとは、ツリートポロジで接続される。これは、現在の PON と互換のトポロジである。なお、ネットワーク全体でブロッキングを最小とする柔軟な波長割当を実現するため、波長パス端末のアップリンク側に波長可変光送受信器を仮定している。

カテゴリ NW 部では、複数のグループ NW から送られてくる複数の波長パスをファイバパス粒度に多重化し、宛先に応じて上流 (カテゴリコア NW) へ接続、または同一カテゴリ NW 内のグループへ折り返し接続する。カテゴリ NW の地理的ファイバ配置はリングであるが、ノード間のファイバ接続としては、カテゴリ NW 内ではフルメッシュ接続、上流のカテゴリコア NW との接続はスター接続とした。すなわち、図 5 に模式図で示す通り、リングトポロジ上で隣接しないノード間について、途中のノード設備箇所まで直接ファイバ接続される。フルメッシュ接続およびスター接続

を用いることにより、カテゴリ NW のノードは自ノードが接続するグループ NW から送受信されるトラフィックのみを扱えばよく、他グループ NW を始終点とするようなトランジットトラフィックを扱わないため、ノード構成が簡易化され、必要となる光スイッチのポート数を抑制できる。

カテゴリコア NW 部では、カテゴリ NW から接続されるパスをコア NW へ接続する。この際、コア NW において可能な限りファイバ単位での切替が可能となるように、パスの整理を行う。すなわち、コア NW 上で同じ宛先の波長パスを同じファイバに集約する（波長パスグルーミング）、および、同じ宛先のサブ波長パスを同じ波長パスに集約する（サブ波長パスグルーミング）。カテゴリコア NW の地理的ファイバ配置はリングであるが、ファイバ接続としては上

流のコア NW とスター接続している。なお、ノード構成簡易化と必要光スイッチポート数抑制のため、カテゴリコア NW での折り返しは行わないこととした。

コア NW では、集約されてきたトラフィックについて、宛先に応じた長距離パスを設立する。

### 3.2.2 ネットワークのボトルネック

ネットワーク容量の設計において、全ユーザーが全時刻にわたって接続要求を出し続けるという仮定は現実的ではない。ネットワークの利用効率を上げるため、多くのユーザーで共有されるコア NW とカテゴリコア NW において、カテゴリ NW からの接続容量を制限する。これをオーバーサブスクリプションと言う。容量設計の例を図 6 に示す。図 6 ではオーバーサブスクリプションを 10 とし、各グルー

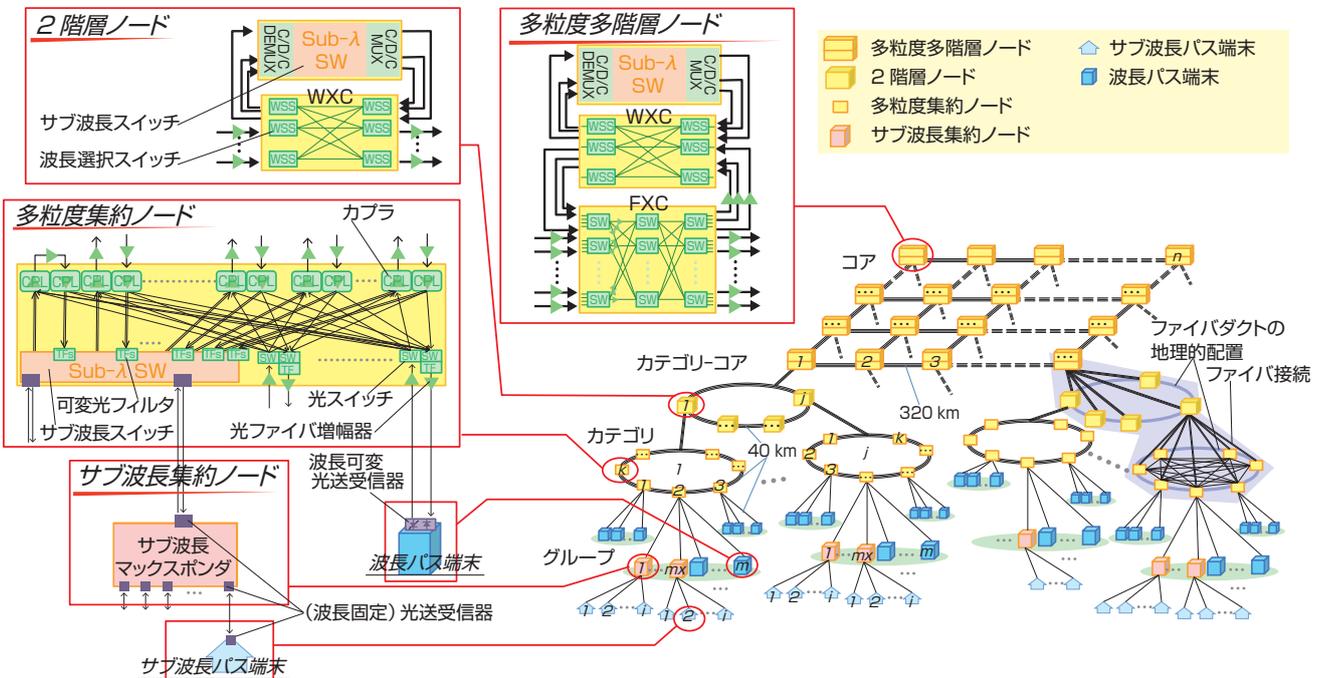


図4 ダイナミック光パスネットワークのトポロジとノード構成

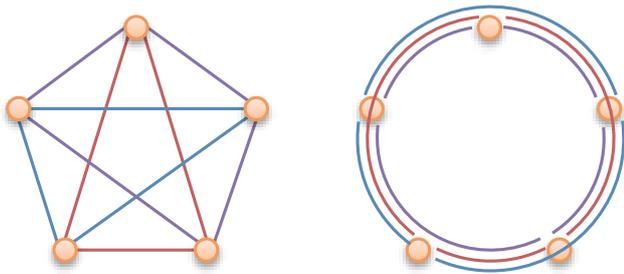


図5 カテゴリネットワーク部のノード間ファイバ接続（左）と地理的ファイバ配置（右）の例

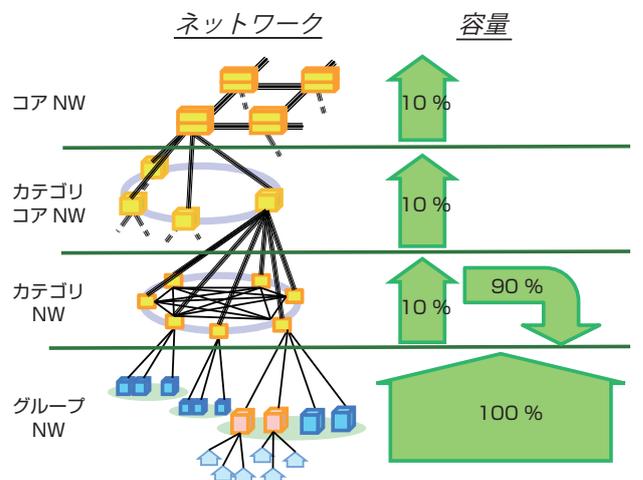


図6 ネットワーク容量設計の一例

プ NW からのトラフィックのうち 10 % をカテゴリ NW を通してカテゴリコア NW と接続可能としている。残りの 90 % については、各カテゴリ NW 内での折り返し接続を可能としている。この折り返し接続により、同一カテゴリ NW 内接続要求に対し低ブロッキング率での接続が可能となる。一方、遠距離間接続要求はコア NW を通る必要があるため、オーバーサブスクリプションの影響を受けることとなる。

オーバーサブスクリプションの最適値は、トラフィックパターンやサービス形態に強く依存するため現状では詳細な検討が困難である。典型例として高精細テレビ会議アプリケーションを考慮すると、事前予約制のサービス形態が想定される。効率的な予約アルゴリズムや利用時間帯に応じたメリハリのある料金体系により、数十 % 程度の比較的高いブロッキング率、すなわち大きなオーバーサブスクリプションでも意味のあるサービス運用が可能であると想定される。

ダウンロード型サービスについては、コンテンツサーバを適切に配置することにより、ブロッキング率の低減が可能である。例えば、カテゴリ NW 毎にコンテンツサーバを配置すれば、同一カテゴリ NW 内での低ブロッキング率特性を活用できる。サーバ間接続については、多数のユーザーからのリクエストが集約され大容量の需要が発生するため、大容量パスを扱う DOPN で効率的に収容可能である。一方で、コンテンツサーバ設置によるブロッキング率低減と、消費電力およびコスト増大の間にはトレードオフの関係がある。低ブロッキング率かつ低消費電力なダウンロード型サービスのためのコンテンツサーバ最適配置は、サーバ性能やサービス形態に強く依存する問題であり、今後詳細な検討が必要である。ダウンロード型サービスの効率の検討には、ファイル転送にかかる時間（パス / サービス保持時間）とパス切替時間も重要なファクターである。すなわち、効率的な運用のためには、パス保持時間に対しパス切替にかかる時間が十分短い必要がある。光スイッチの切替時間は実現技術に依存するが、MEMS のファイバスイッチでは数十ミリ秒オーダー、Si フォトニクススイッチではマイクロ秒からサブミリ秒オーダー、LCOS の WSS では数十ミリ秒オーダーである。パス切替に要する時間が数百ミリ秒オーダーであると想定すると、数分以上の保持時間（ファイルサイズ約 40 GByte 以上）をもつサービスが DOPN の対象サービスとして適していることになる。もし、パス切替に要する時間がサブミリ秒オーダーになれば、100 MByte 程度のファイル転送（パス保持時間が数秒）も DOPN のサービス対象となり得る。

### 3.2.3 ネットワーク規模

ネットワーク全体で収容されるユーザー数は、各ネットワークが幾つのノードまたは端末から構成されるかによ

表1 ネットワークトポロジパラメータ一覧と収容ユーザー数5184万時の数値例

	表記法	数値例
コアネットワークのノード数	$n$	25
カテゴリコアネットワークのノード数	$j$	10
カテゴリネットワークのノード数	$k$	10
各カテゴリネットワークから上流のカテゴリコアネットワークに接続するファイバ数	$k_c$	1
グループ中の波長バス端末数	$m(1-x)$	256 ( $m=768, x=2/3$ )
グループ中のサブ波長バス集約ノード数	$mx$	512 ( $m=768, x=2/3$ )
サブ波長バス集約ノードあたりサブ波長バス端末数	$i$	40
ファイバ当たりの波長数	$w$	80
波長バスユーザーの伝送レート	$B_w$	40 Gbps
サブ波長バスユーザーの伝送レート	$B_s$	1 Gbps
サブ波長バス端末総数	$ijkmnx$	
波長バス端末総数	$jkmn(1-x)$	

る。ネットワークトポロジの設定に必要なパラメータの一覧および収容ユーザー数の数値目標を達成する数値例を表 1 に示す。本数値例では、1 グループ NW につき約 2 万ユーザー端末、1 カテゴリ NW につき約 20 万ユーザー端末が収容される。

### 3.2.4 各ネットワークノードの詳細

前述のとおり、各ネットワークは役割や集約されるトラフィック量が異なるため、ネットワーク毎に適した取り扱いパス粒度 / ノード構成を採用する必要がある。各ネットワークで使用されるノードについて詳細を述べる。

グループ NW におけるサブ波長バス集約ノードは、 $i$  個のサブ波長バスを 1 本の波長バスに集約 / 多重化する機能を持つノードで、ここでは ODU 信号多重化機能（マックスポンダ）の使用を想定している。また、 $B_w \geq iB_s$  とすることで、グループ NW でのオーバーサブスクリプションを回避する。

カテゴリ NW のノードは図 4 中に示す多粒度集約ノードである。本ノードのダウンリンク側は、 $m$  個の波長バスポートを有し、一つのグループ NW を収容する。アップリンク側は  $k + k_c$  個のファイバポートを有する。このうち  $k$  ポートは自カテゴリ NW 内折り返し用ポートであり、上流ネットワークへの接続ファイバ数は  $k_c$  本である。すなわち、オーバーサブスクリプションは  $m/wk_c$  で表され、表 1 の数値例では 9.6 となる。本ノードは、 $m \times 1$  光カプラ、 $(k + k_c) \times 1$  光スイッチ、スルーポート  $imxB_s$  のサブ波長バススイッチ、波長可変光フィルタ (TF: Tunable optical Filter)<sup>用語 4</sup> から構成される。波長バス粒度からファイババス粒度への多重化を、ポート・波長・帯域に無依存な光カプラを用いて行うことで、フレキシブルグリッド接続に対応する。

カテゴリコア NW におけるノードは、波長クロスコネク

とサブ波長クロスコネクタから構成される2階層ノードである(図4)。各ノードにはカテゴリNWから平均的に $(1-x)wkk_c$ 本の波長パス、 $iw_xkk_c$ 本のサブ波長パスが接続される。これをすべて波長パスグルーミング/サブ波長パスグルーミングするには、波長パススイッチ部のポート数として $kk_c + \lceil xkk_c \rceil$ ポート、サブ波長パススイッチ部のスルーポートとして $iw_xkk_c B_s$ が必要となる。

コアNWにおけるノードはファイバスイッチ、波長スイッチ、サブ波長スイッチから構成される多粒度多階層ノードである(図4)。コアNWではトラフィックはすでに十分集約され、またカテゴリコアNWにおけるグルーミング処理により宛先ごとに可能な限りまとまっていると考えられ、主な切替はファイバパス単位で行われると想定できる。グルーミングが十分でなかった場合には、波長パスおよびサブ波長パスのスイッチを用いたグルーミングをコアNWでも行う。各多粒度多階層ノードに必要なスイッチのポート数について、3.3節で検討する。

### 3.2.5 ネットワークトポロジーのバリエーション

図4に示すネットワークトポロジーのバリエーションとして、地理的条件に応じコアNWについて $N \times N$ の格子型でなく、 $N \times M$ のラダー型やその他の非対称なトポロジーを用いる等の変更が考えられる。あるいは、3.2.2項で触れたコンテンツサーバ配置に応じたバリエーションも考えられる。コンテンツサーバ配置方法に応じ、カテゴリNWおよびカテゴリコアNWの部分的な変更やノード構成の細かな調整が必要になる。しかし、ネットワークの階層数の増減を伴うような抜本的な変更は困難である。すなわち、層を減らすことはスイッチポート数の観点から困難であり、層を増やすことはノード数の増加、ひいては機器コストと消費電力増加につながり賢明ではない。図4に示すネットワークトポロジーと抜本的に異なる構造でDOPNを実現するには、収容ユーザー数や通信容量についての目標変更、あるいは光スイッチポート数拡大等、デバイス技術の飛躍的な向上等の要求条件の変化が必要である。例えば、数百ポート規模の波長選択スイッチが実現されれば、波長パスグルーミングが容易になり、グルーミング処理のためのカテゴリコアNW層の簡略化、あるいはコアNWとカテゴリコアNWとの統合が可能になり、ネットワークの階層を削減できる可能性がある。

### 3.3 コアNWの光スイッチポート数とサブスライバ数

カテゴリNWおよびカテゴリコアNWは、ファイバ接続が単純なツリーおよびスター構成のためパスの経路が一意に決まり、また、自ノードに属する端末のトラフィックのみを扱えばよい構成である。このため、各ノードで必要となるスイッチのポート数はトラフィック分布によらず、各ノード

に収容/集約されるサブスライバ数とオーバーサブスクリプション率にのみ依存して決定される。一方でコアNWはメッシュトポロジのため、パスの経路候補が複数存在する。さらに、自ノードに属さない端末のトラフィック(トランジットトラフィック)も扱う必要があるため必要となるスイッチのポート数はトラフィックパターンに依存し、確定的に決めることが不可能である。

コアNWで必要となるスイッチポート数を次のように試算した。トラフィックパターンとしては一様分布を仮定し、グルーミング操作については全デマンドがファイバ単位で切替可能という理想的状況を仮定する。この条件下で、必要スイッチポート数を最小化する最適経路割り当ての結果を図7に示す。グラフ上方の横軸は、 $n$ 以外のパラメータについて表1の数値例を用いた場合のユーザー収容数である。パラメータ $n$ については $9(3 \times 3$ トポロジ)から $64(8 \times 8$ トポロジ)までの値を用いて計算を行っている。

この論文で検討しているDOPNトポロジのコアNWでの必要収容ファイバパス数は $jnk_c$ で、表3の数値例では2500本である。グラフでは2500本のファイバパスを収容するのに、 $5 \times 5$ トポロジで450ポートのスイッチが必要となっている。500ポートを最大とすると、残り500ポートをグルーミング操作に、すなわち、波長パススイッチ部との接続に使用可能となる。さらに多くのグルーミング操作が必要な場合には、ファイバパススイッチポート数を増加させる、すなわち、スイッチの多段構成を拡張する必要が生じる。グルーミング操作に必要なポート数はトラフィックパターンとパス収容アルゴリズムに強く依存し、これらの検討は今後の課題である。しかし、消費電力の観点では、後述の通りコアNWが占める消費電力の割合は少なく、コアNWで光ファイバスイッチ使用数が増加しても総消費電力には大きく影響しない。

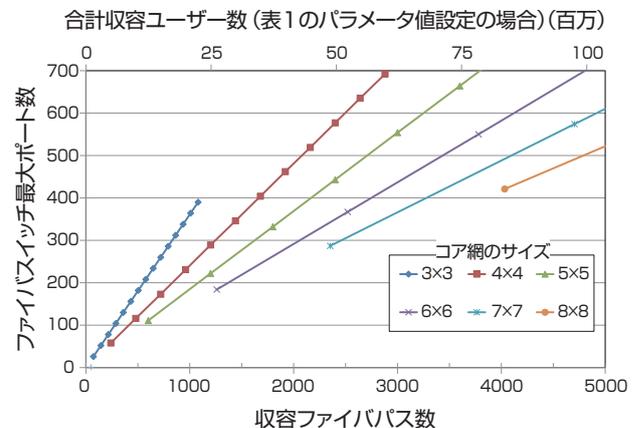


図7 最適経路割り当てによるコアNWで必要となる光スイッチポート数の試算結果

### 4 光信号伝送距離の検討

光信号は、光ファイバや光スイッチ等、各光デバイス通過時にパワーの減衰が生じる。この減衰を補償するため、一定の伝送距離毎、あるいは一定の光信号パワー減衰量毎に光増幅器を配置する必要がある。長距離通信に主に使用されている1.55 μm帯の光信号の増幅には、一般にエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)が使用されている。EDFAを通過した光信号は、光信号パワーが増幅されると同時に、EDFAから発生する自然放出光が付加され信号にとっての雑音となる。何段もEDFAを経由する際にはこの雑音が累積し、信号対雑音比が低下する。適切に信号を受信するためには、信号対雑音比が一定以内のうちに信号再生中継を行う必要がある。ここで必要となる信号再生の頻度、すなわち、EDFA通過による雑音の累積具合は、EDFAの雑音特性や利得、入力光パワーに依存する。一般に、利得が大きなEDFAを低頻度で使用すると累積雑音は大きくなり、利得が小さなEDFAを高頻度で使用すると累積雑音は小さく抑えられる。

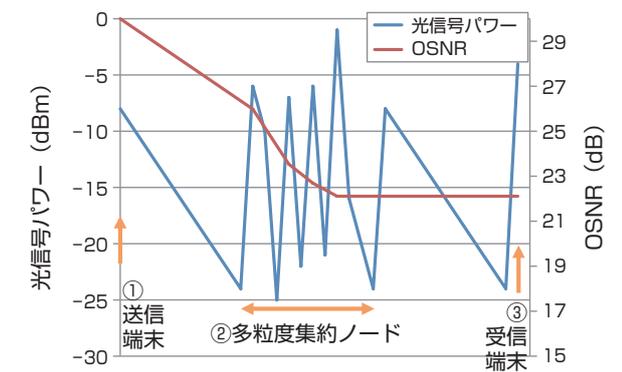
ダイナミック光パスネットワークにおいて必要となる信号再生器および光ファイバ増幅器の数と配置箇所について、

表2 各光デバイスの損失想定値

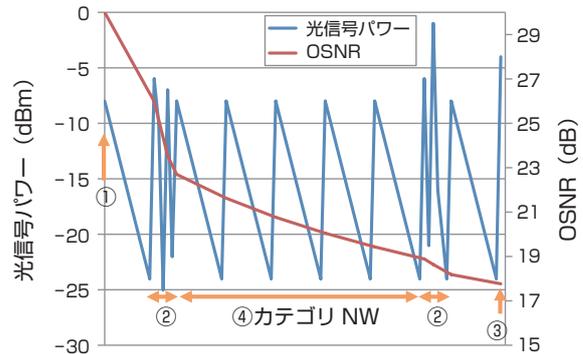
項目	損失	
光ファイバ	0.4 dB/km	
多粒度集約ノード	1×10 スイッチ	4 dB
	1×768 光カプラ	30 dB(※-15 dB 毎に増幅)
	波長可変光フィルタ	4 dB
2階層ノード	1×17 波長選択スイッチ	6.5 dB
多粒度多階層ノード	3-stage 500×500 マトリクススイッチ	24 dB(※stageの間に増幅)
	1×35 波長選択スイッチ	6.5 dB

光信号対雑音比(OSNR)を試算し検討した。試算に用いた光デバイスの典型的損失値を表2に示す。なお、使用するEDFAのノイズフィギュアは6 dB、雑音帯域は12.5 GHzとし、各ネットワーク部におけるファイバ長は図4に示す値とした。

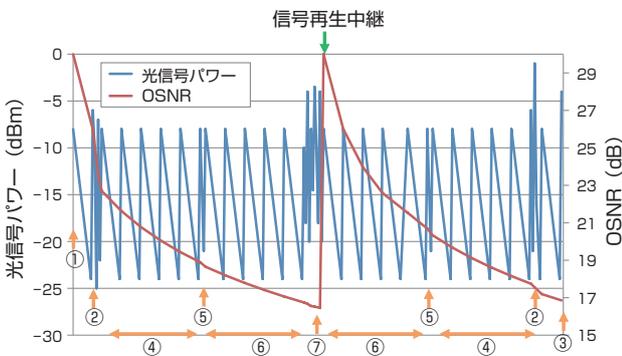
試算結果を図8に示す。レベルダイアグラムは、各箇所配置したEDFAへの入力光信号パワーと利得を示している。多粒度集約ノードでは、分岐数の大きなカプラ(CPL)を用いるため、大きなロスが生じる。ここでのOSNR劣化を低減するため、分岐の途中にEDFAを配置している。



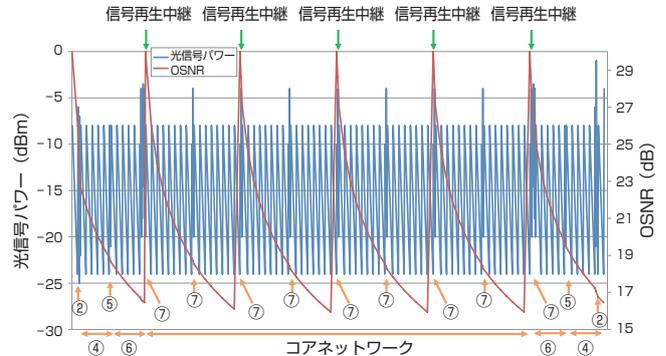
(a) 同一グループ内パス



(b) 同一カテゴリ内・他グループ間パス



(c) 他カテゴリ間・同一コアノード内パス



(d) 他コアノード間パス

図8 典型パス経路のレベルダイアグラムとOSNR試算結果

グラフ中の番号は次と対応：①送信端末②多粒度集約ノード③受信端末④カテゴリNW⑤2階層ノード⑥カテゴリコアNW⑦多粒度多階層ノード

また、クロス3段スイッチ構成を想定した多粒度多階層ノードのファイバパススイッチ部においても、OSNR劣化を防ぐため3段スイッチ構成の途中にEDFAを配置している。検討結果から、信号再生器はコアNWのノードに配置する必要があり、光信号がコア網へ入る時、コア網から出る時、コア網伝送中には2ノード経由毎に1度、信号再生中継をすればよいことがわかった。なお、OSNR閾値は最近実用化が進んでいるデジタルコヒーレント送受信技術<sup>5</sup>を適用した100 Gbps DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying、偏波多重四位相偏移変調)<sup>5</sup>の使用を想定し、15 dBとした<sup>[24][25]</sup>。

### 5 消費電力試算

3章・4章の検討により、ダイナミック光パスネットワークのトポロジにおいて、光スイッチ等パス切替デバイスから信号再生中継器までの主要構成機器の配置箇所と必要個数とが明確化された。各機器の消費電力を総計することにより、DOPNで必要となる総消費電力が試算される。各機器の消費電力について、カタログ等に記載されている値に基づき表3に示す値と仮定し、ネットワーク全体の消費電力を試算した結果を図9に示す。

試算結果より、DOPNの消費電力は、グループNW、すなわち、通信端末が支配的であることが示されている。端末速度が一定の場合、総消費電力はサブスライバ数に比例して増加する。サブスライバ数一定として端末速度を増加させた場合、全体のトラフィック量増加に相関し総消費電力も増加する。これは、DOPNがスループットに無依存な光スイッチのみでなく、サブ波長パススイッチや波長パス端末装置/信号再生中継器等スループット依存の消費電力特性を持つ機器も使用するためである。

現在の日本のネットワークにおいて、総トラフィック量が1.9

表3 消費電力試算における各機器の消費電力想定値

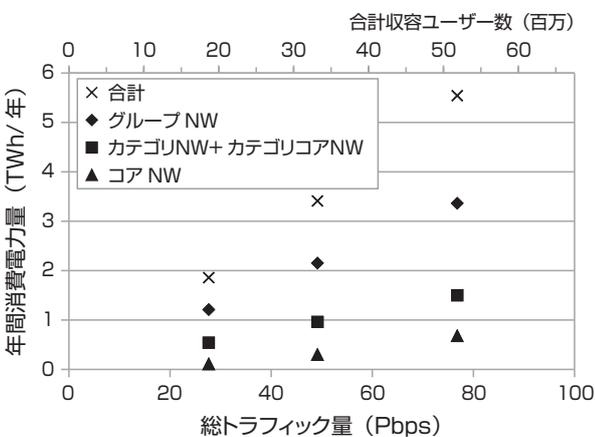
ネットワーク装置	消費電力	備考
単一波長用光ファイバ増幅器	2 [W/span/fiber]	1スパン40kmを想定
WDM対応光ファイバ増幅器	20 [W/span/fiber]	1スパン40kmを想定
サブ波長クロスコネクタ	1 [W/Gbps]	
波長パス端末	1 [W/Gbps]	40 Gbps以上を想定
サブ波長パス端末	5 [W/device]	5 Gbps未滿を想定
光マトリックススイッチ	0.05 [W/port]	Siフォトニクススイッチを想定
波長選択スイッチ	20 [W/device]	
波長可変光フィルタ	5 [W/device]	

Tbps、総消費電力が~10 TWh/yearと言われている<sup>[3][26]</sup>。DOPNでは、消費電力を同程度のみで、4~5ケタ以上多くのトラフィックを収容している。本試算には、制御に係る消費電力やネットワーク使用率が考慮されていないが、これらのオーバーヘッドにより1~2ケタの効率低下を見込んだとしても、3ケタ以上の電力効率改善が可能である。

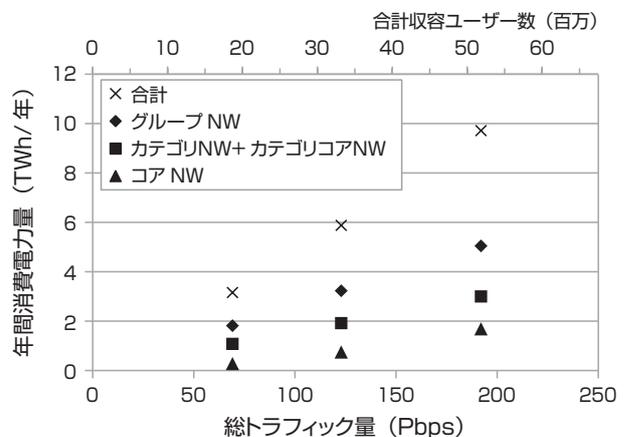
DOPNのさらなる低消費電力化に向けて、通信端末のトランシーバへのスリープ機能導入が挙げられる。各ユーザーのDOPN平均使用時間を5時間/日と仮定し、未使用時には端末電力を完全にオフできると想定すると、図9の試算に対し22~37%の消費電力削減が見込まれる。通信端末のトランシーバは、複数ユーザーでシェアされる網内のトランシーバに比べ、スリープ機能の導入が容易であると想定される。また、光スイッチおよびWSSの挿入損失改善も重要である。光デバイスの挿入損失が低減されれば、網中で必要となるEDFA数および信号再生中継器が削減され、特にコアNWの低消費電力化が見込まれる。

### 6 おわりに

この論文では、ダイナミック光パスネットワークについて、



(a) 波長端点 40 Gbps、サブ波長パス端点 1 Gbps の場合



(b) 波長端点 100 Gbps、サブ波長パス端点 2.5 Gbps の場合

図9 消費電力試算結果

詳細なトポロジとノード構成とを示し、収容ユーザー数、通信帯域、および消費電力の観点から将来の通信インフラ実現の基盤技術としての DOPN の有効性を明らかにした。DOPN 実現に向けては、低損失・コンパクトな光スイッチの開発や、効率的な統合資源管理技術等、さまざまな要素技術の一層の研究開発が必要である。DOPN が対象とするのは、現在通信ネットワークに流れているアプリケーションではなく、将来登場・発展が期待される遠隔診断医療・遠隔教育等を含む高臨場感映像アプリケーションである。真に DOPN が社会に資するためには、先に挙げたネットワークに係る要素技術のみならず、実際に対面するのと遜色ないほどの高臨場感を実現する映像 / 音声技術およびディスプレイ技術から、新サービスを実現するビジネスモデルまで、DOPN を活用する周辺技術への展開も必要不可欠である。以上を踏まえ、今後もデバイスからアプリケーションまでを視野に入れ、将来の通信インフラ基盤技術確立に向けた研究開発を進めていく予定である。

## 謝辞

この研究は文部科学省イノベーションシステム整備事業先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラムにおける、光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点の一環として実施された。本検討において、産総研情報技術研究部門の工藤知宏副研究部門長、岡崎史裕氏、高野了成氏、竹房あつ子氏、谷村勇輔氏を始めとする研究者各位、ならびに協働研究機関・協働企業の皆さまから貴重なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表す。

## 用語の説明

用語1: OSI7レイヤ: 国際標準化機構 (ISO) により策定された、データ通信における通信機能の階層モデルである。OSI参照モデルとも呼ばれる。物理層 (layer-1)、データリンク層 (layer-2)、ネットワーク層 (layer-3)、トランスポート層 (layer-4)、セッション層 (layer-5)、プレゼンテーション層 (layer-6)、アプリケーション層 (layer-7) から構成される。広域網において使われているIPルータはlayer-3の接続・ルーティングを、LAN (Local Area Network) において多く使われているEthernetスイッチはlayer-2の接続・スイッチングを行う通信機器である。DOPNの主要構成要素である光スイッチはlayer-1、あるいはさらに下位の階層 (layer-0と呼ばれることもある) に相当する。

用語2: 波長選択スイッチ (WSS: Wavelength Selective Switch): 基本構成として1入力多出力の光ポートをもつデバイスで、波長多重された入力光信号について、任

意の波長を任意のポートに振り分ける機能を持つ。波長チャンネルの帯域として、50 GHzグリッドあるいは100 GHzグリッドに固定のものと、フレキシブルグリッドと呼ばれる12.5 GHz毎に連続的な帯域を任意に扱えるものがある。

用語3: グルーミング: 小粒度の通信要求をグループ化することで大粒度の通信要求として取り扱い可能にするための処理。ここでは、宛先が同じ複数のサブ波長パスを同一の波長パスに収容することで一つの波長パスとしてスイッチング可能とする、あるいは、宛先が同じ複数の波長パスを同一の光ファイバに収容することで一つの光ファイバパスとしてスイッチング可能とする処理を指す。

用語4: 波長可変光フィルタ (TF: Tunable optical Filter): 透過する光信号の中心波長を変更できる光デバイス。また、中心波長と透過帯域幅とを変更可能な、中心波長帯域可変光フィルタもある。

用語5: DP-QPSK: デジタル信号の変調方式の一つで、四位相偏移変調信号に偏波多重を適用した方式である。2005年以降、スペクトル効率の向上を背景にデジタルコヒーレント光通信技術の進展とともに具現化されてきた。2010年にはOIF (The Optical Internetworking Forum) にて100 Gbps DP-QPSK光トランシーバーモジュールの標準規格が発表され、現在これに準拠した製品が発売され、チャンネル当たり100 Gbpsの伝送システムの実用化が急速に進んでいる。また、高速デジタル信号処理により伝送線路のさまざまな問題の線形補償を可能にすることから、再生中継無しでの数千km超の伝送も報告されている。

## 参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index: The Zettabyte Era – Trends and Analysis, [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI\\_Hyperconnectivity\\_WP.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.html)
- [2] 平成24年版情報通信白書(総務省) 第2部 情報通信の現況と政策動向 第5節 電気通信事業, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/pdf/index.html>
- [3] 総務省: 我が国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握(平成25年3月15日報道発表), [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000211328.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000211328.pdf)
- [4] D. Qian, M. Huang, E. Ip, Y. Huang, Y. Shao, J. Hu and T. Wang: 101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3×55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, PDPB5 (2011).
- [5] R. S. Tucker: Scalability and energy consumption of optical and electronic packet switching, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 29 (16), 2410-2421 (2011).
- [6] W. Shen, T. Yamamoto, Y. Tsukishima and N. Takahashi: Power-aware traffic engineering for multi-layer networks with partial deployment of TDM-XCs, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*,

Mo.1.D.5 (2010).

[7] B. Puype, D. Colle, M. Pickavet and P. Demeester: Energy efficient multilayer traffic engineering, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, Paper 5.5.2 (2009).

[8] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, W. V. Sorin and R. S. Tucker: Energy consumption in optical IP networks, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 27 (13), 2391-2403 (2009).

[9] K. Ishii, F. Okazaki, J. Kurumida, K. Mizutani, H. Takeshita, K. Kobayashi, D. Mochinaga, S. Namiki, K. Sato and T. Kudoh: Unified approach of top-down and bottom-up methods for estimating network energy consumption, to appear in *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)* 2013.

[10] S. Namiki, T. Kurosu, K. Tanizawa, J. Kurumida, T. Hasama, H. Ishikawa, T. Nakatogawa, M. Nakamura and K. Oyamada: Ultrahigh-definition video transmission and extremely green optical networks for future, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 17 (2), 446-457 (2011).

[11] 来見田淳也, 並木周: 超高精細映像送受信を支える光通信ネットワークの実証実験 - ダイナミック光パス・ネットワーク映像配信実験 -, *Synthesiology*, 4 (2), 100-110 (2011).

[12] K. Yamada, Y. Tsukishima, K. Matsuda, M. Jinno, Y. Tanimura, T. Kudoh, A. Takefusa, R. Takano, and T. Shimizu: Joint strage-network resource management for super high-definition video delivery service, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and National Fiber Optic Engineers Conference*, JWA1, (2011).

[13] アカマイ ホワイトペーパー「インターネットの現状2012年第2四半期」([http://www.akamai.co.jp/enja/html/perspectives/whitepapers\\_content.html](http://www.akamai.co.jp/enja/html/perspectives/whitepapers_content.html)からユーザー登録をすることにより無料で入手可能)

[14] ITU Telecommunication Standardization Sector: Optical transport network (OTN), *ITU-T Rec. G.709/Y.1331* ed., Apr. 2011

[15] O. Tamm, C. Hermsmeyer and A. M. Rush: Eco-sustainable system and network architectures for future transport networks, *Bell Labs Technical Journal*, 14 (4), 311-327 (2010).

[16] K. Sato and H. Hasegawa: Prospects and challenges of multi-layer optical networks, *IEICE Transactions on Communications*, E90-B, 1890-1902 (2007).

[17] X. Cao, V. Anand and C. Qiao: Waveband switching in optical networks, *IEEE Communications Magazine*, 41 (4), 105-112 (2003).

[18] 総務省統計局: 日本統計年鑑第2.2節 世帯, <http://www.stat.go.jp/data/nenkan/02.htm>

[19] 総務省統計局: 平成21年経済センサス-基礎調査 事業所に関する集計, <http://www.stat.go.jp/data/e-census/2009/index.htm>

[20] C. Clos: A study of non-blocking switching networks, *Bell System Technical Journal*, 32 (2), 406-424 (1953).

[21] Finisar Corporation, Press Release. (Sept. 13, 2011), available online: <http://investor.finisar.com/releaseDetail.cfm?ReleaseID=604799>

[22] ITU Telecommunication Standardization Sector: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, *ITU-T Rec. G.694.1* ed., Feb. 2012

[23] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, A. Hirano and M. Jinno: Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, Mo.2.K.3 (2011).

[24] H. Sun, J. Gaudette, Y. Pan, M. O'Sullivan, K. Roberts and K. Wu: Modulation formats for 100Gb/s coherent optical systems, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and National Fiber Optic Engineers Conference*, OTuN1 (2009).

[25] J. Faure, B. Lavigne, C. Bresson, O. Bertran-Pardo, A. C. Colomer and R. Canto: 40G and 100G deployment on 10G infrastructure: market overview and trends, coherent versus conventional technology, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and National Fiber Optic Engineers Conference*, OThE3 (2010).

[26] 由比藤光宏, 西史郎: ブロードバンドネットワークの電力消費量の試算, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS13-5 (2008).

#### 執筆者略歴

石井 紀代 (いしい きよ)

独立行政法人産業技術総合研究所ネットワークフォトンクス研究センター光信号処理システム研究チーム、研究員。2008年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2011年同博士後期課程修了。同2008-2011年日本学術振興会特別研究員。2011年より現職。光ファイバ通信技術分野において、システムからネットワークにわたる研究開発に従事。並木、来見田と議論しながら、DOPNトポロジーの詳細を検討し、この論文ではすべての章を執筆した。



来見田 淳也 (くるみだ じゅんや)

独立行政法人産業技術総合研究所ネットワークフォトンクス研究センター光信号処理システム研究チーム、主任研究員。1998年大阪電気通信大学大学院工学研究科修士課程修了。2008年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。富士通株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門、カリフォルニア大学デビス校を経て2009年より現職。光ファイバ通信技術分野におけるデバイスから装置システムにわたる研究開発に従事。この論文では実用的なシステムの観点からDOPNの概要を検討した。



並木 周 (なみき しゅう)

独立行政法人産業技術総合研究所ネットワークフォトンクス研究センター、研究センター長、兼職、光信号処理システム研究チーム、研究チーム長。1988年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年古河電気工業(株)入社。以来、半導体光デバイス、モード同期レーザー、光増幅器、非線形ファイバ光学、光伝送等の研究および製品開発に従事。1994-1997年米国MIT客員研究員。2005年より産総研。2013年より現職。これまでに、200件以上の出版物を共著し、多くの国際会議プログラム委員やIEC国際標準化委員を務める。2005年から電子情報通信学会英文誌B編集副委員長、電子情報通信学会通信ソサイエティ副編集長、OSA Optics Express誌のAssociate Editorを務め、現在、Optics ExpressのAdvisory Editor。理学博士。アメリカ光学会(OSA)フェロー。この論文ではDOPNの全体像を検討した。



## 査読者との議論

### 議論1 全般

コメント（小林 直人：早稲田大学研究戦略センター）

この論文は、近未来の情報通信ネットワークの隘路となる通信大容量化に伴う消費電力の著しい増大に対処するために考案した方式であるダイナミック光パスネットワーク（DOPN）に関して、そのトポロジ構成を検討してその有効性を明らかにしたもので、論理的にも明確で有意義な内容の論文と考えます。またその論文構成も、シンセシオロジー誌に掲載するのにふさわしい論文であると言えます。

### 議論2 ネットワーク構造について

コメント（坂上 勝彦：産業技術総合研究所・研究環境安全本部）

この研究は貴研究チームが取り組んでいる DOPN を、我が国の現実的な規模に適用するためのネットワークアーキテクチャに対する精密な検討であると理解しました。ただし、3.1 節でその要求条件が仮定され、3.2 節でいきなり検討対象として 4 階層からなるトポロジが示されています。このトポロジはとても合理的なものであり異論があるわけではありませんが、シンセシオロジー誌では、どのような思考過程や検討結果を経てこのトポロジに至ったのかの議論を書き下す必要があると考えます。適切な章の中で記述をお願いします。

回答（石井 紀代）

トポロジ検討の際の一番の課題は、数百ポートのスイッチを主要構成要素に、数千万ユーザーを相互接続するところにあります。また、ユーザーから送出されるトラフィック量が伝送路（光ファイバ）容量に比べ  $1/80 \sim 1/6400$  以下と小さいため、伝送路使用効率向上のためにユーザー端末からなるべく近い地点でトラフィックを集約する必要があります。既存網との親和性のみならず、ポート数制限とトラフィック集約の点からもフラットなネットワークトポロジによる DOPN 実現は困難で、ユーザー端末をグルーピングして階層的に接続する多階層トポロジが必要となりました。多階層ネットワークトポロジでは、少ない階層のシンプルな構成が望ましく、トラフィック集約階層（最下層）と長距離パス設立階層（最上層）の 2 階層以外に、どのような役割で何階層のネットワークが必要になるかがポイントでした。トラフィック集約について、ユーザーのパス粒度に応じ、サブ波長パスを波長パスへ、波長パスをファイバへと順次集約することとしました。集約を 2 段階に分けたのは、よりユーザーに近い位置でサブ波長パスから波長パスに集約することで、伝送路の使用効率を向上させるためと、ファイバ容量に集約する階層において必要となるサブ波長パススイッチのポート数を削減するためです。ターゲットとするユーザー数とユーザーあたりの帯域を考慮すると、最上層ネットワークに集約されるトラフィック容量は膨大となります。最上層ネットワークでは、波長スイッチより大きなポート数を想定可能で、より大容量を収容可能な光ファイバスイッチの使用が必須です。すなわち、ファイバ単位で切り替えられるほどに波長パス・サブ波長パスが整理された状態で、最上層ネットワークに接続する必要があります。集約ネットワークの通信ノード構成を定量的に検討した結果、光スイッチのポート数や光カプラのロスの観点から、集約ネットワークでは宛先が同じ / 近い通信需要をファイバ容量まで集めるのは困難でした。そこで、集約するネットワークと最上層ネットワークとの間に、グルーミングを行うネットワークが必要になることがわかりました。すなわち、集約ネットワークが 2 層、グルーミングネットワークが 1 層、長距離パス設立ネットワークが 1 層の 4 階層ネットワークです。詳細な数値検討を行い、光スイッチポート数や収容人数の要求条件を満たせることがわかり、図 4 に示すトポロジおよびノード構成となりました。上記議論を 3.2 節に追加しました。

質問（小林 直人）

要素技術 3 のネットワーク構造は、既存のネットワーク構造との類似性や下位層・上位層の制御特性等も考慮されており、妥当だと思います。

われます。ただし、他の選択肢も可能などまだ任意性があると考えてよいのでしょうか。あるとすればどのようなトポロジやノードの可能性が考えられるのでしょうか。

回答（石井 紀代）

この論文で示しているネットワーク構造は、3.1 節で示した目標と要求条件に基づき、妥当性をもとに積み上げたものです。本ネットワーク構造に行きつくまでに、フラットなネットワーク構造を含めさまざまなトポロジの検討を行いました。3.1 節の条件を満たすことはできませんでした。例えば、層を減らすことはスイッチポート数の観点から困難です。層を増やすことはノード数の増加、ひいては機器コストと消費電力増加につながり賢明ではありません。コンテンツサーバ配置のバリエーションや想定トラフィックパターンに応じて、カテゴリ NW やカテゴリコア NW の細かい調整など部分的な変更について、今後検討が必要であると考えております。また、地理的条件に応じ、コア NW について  $N \times N$  の格子型ではなく、 $N \times M$  のラダー型やその他の非対称なトポロジを用いる等のバリエーションも考えられます。しかし、抜本的に異なるトポロジで 3.1 節の条件を満たすことは困難で、その場合には、光スイッチポート数拡大などデバイス技術の飛躍的な向上などの要求条件の変更、あるいは収容人数や容量についての目標変更が伴うものと考えております。上記議論について、3.2.5 項を新たに設け追記しました。

### 議論3 要素技術

質問（小林 直人）

要素技術 1 の光スイッチを始め、この研究では、現状の個別の要素技術の仕様で、DOPN の特性を予測していますが、特にどの部分の要素技術が飛躍的に変化すれば大きくネットワーク特性が改善されるかなどの見通しがあれば教えてください。

回答（石井 紀代）

さらなる低消費電力化の観点では、消費電力の大半を占めているユーザー端末（トランシーバー）でのスリープ機能が挙げられます。グループ網のトランシーバーは大半が単一ユーザーに使用されるため、複数ユーザーでシェアされる上流の網のトランシーバーに比べスリープ機能の導入が容易であると想定されます。各ユーザーの DOPN 平均使用時間を 5 時間 / 日と仮定し、未使用時にはトランシーバー電力を完全にオフできると想定すると、図 8 の試算に対し 22 ~ 37 % の消費電力削減が見込めます。また、光スイッチおよび WSS の挿入損失が改善されれば、必要となる EDFA 数および信号再生中継数が削減され、コア網の消費電力削減につながります。トポロジの観点からは、数百ポート規模の波長選択スイッチが実現されれば、波長パスグルーミングが容易になり、グルーミング処理のためのカテゴリコア NW 層の簡略化、あるいはコア NW とカテゴリコア NW との統合が可能になると考えられます。対象とするサービスの観点からは、波長選択スイッチや光ファイバスイッチの切替速度がサブミリ秒オーダーに向上すれば、保持時間が数秒程度のサービス（HV や 4K の VOD ダウンロード等）も DOPN で効率的に実現可能となり、対象となるサービス領域拡大の可能性がります。本議論について、5 章、3.2.5 項、および 3.2.2 項に追記しました。

### 議論4 将来のアプリケーションの課題

質問（坂上 勝彦）

DOPN が使われるのは、将来登場・発展が期待される遠隔診断医療・遠隔教育等を含む高臨場感映像アプリケーションであると随所に書かれています。しかし、これらは、現状の IP ルータ網でも実現されつつあり、IP 技術による柔軟性が、L1 スwitch を光にすることによる低電力性・高速性を凌駕しているのが現実であるように思えます。現状の IP ルータ網では破たんするアプリケーションとはどのような規模感の姿なのでしょうか？

回答（石井 紀代）

DOPN がターゲットとする映像サービスの品質として、現在開発が進められているスーパーハイビジョン（SHV）があります。SHV はハイビジョン（HV）の 16 倍の高精細画像で、非圧縮伝送には 72Gbps 以上の帯域が必要となり、現在の日本のインターネット網のピーク接続速度の 40.5 Mbps と比較すると、3 ケタ以上のギャップがあります。DOPN を用いれば SHV の非圧縮伝送に必要な帯域を安定して提供可能です。当然、映像圧縮技術も開発されていますが、実際に対面しているのと遜色ない程の高臨場感を実現するためには、圧縮の適用に限界があり、DOPN でターゲットとしている数 Gbps ～ 100 Gbps 程度の伝送帯域が必要になると考えております。上記議論を第 1 章に追記しました。

質問（小林 直人）

将来のアプリケーションとして映像関連アプリケーションの多数のユーザーを想定していますが、実際にはトラフィック上にはダウンロード・サービスが極めて多く、リアルタイム映像ストリーミングは少ないのではないかと、という予想もありそうです。3.2.2 で「コンテンツサーバを各カテゴリに配備することで、ダウンロード型サービス等でのブロッキング率低減が可能」と記されていますが、その場合コンテンツサーバの数や容量が膨大になり、かえって非効率になるということはないでしょうか。

回答 4（石井 紀代）

ご指摘いただきました通り、コンテンツサーバ設置による消費電力やコストの増大と、トラフィックのローカリゼーションによる網の効率化との間にはトレードオフの関係があります。適切なサーバ配置とトポロジ設計により、ネットワーク資源のみでなくコンテンツ資源も含めて高効率化が可能であると考えています。このトレードオフの最適化

は、ビジネスモデルや資源管理方法とも関連する問題で、今後の課題となっています。コンテンツサーバ配置では、サーバ間接続も重要な課題ですが、これについては多数のユーザーからのリクエストが集約され大容量の需要が発生するため、大容量パスを扱う DOPN で効率的に収容可能です。上記議論について、3.2.2 項に追記しました。

## 議論5 将来のユーザビリティ

質問（小林 直人）

将来、ユーザーは、既存の IP ネットワークと今回提案の DOPN をシームレスに、違いを意識せずに使いたいと期待するものと思われます。そのようなことは実際に可能でしょうか。あるいは、DOPN 利用の場合は常に光パスを確保するための予約作業が入る可能性があるため、そうなる使い勝手がよくないということはないでしょうか。

回答 5（石井 紀代）

DOPN の運用管理には、ネットワーク資源からストレージ資源まで包括的な予約管理を行う新たな資源管理システムの導入が必要となります。IP 網と DOPN 網との併用の観点では、web やメールは IP 網、高精細 VOD 等の大容量ファイル転送は DOPN といったように、アプリケーションに応じて使用する網を資源管理システムが自動的に選択し、必要に応じて光パスの確保を行います。また、遠隔会議サービス等のように、ユーザーが事前予約を行うことが自然なものについては、ユーザーからのサービス予約に基づき、資源管理システムが光パスの事前予約を行います。この際も、ユーザーが行うのはあくまで遠隔会議サービスの予約であり、光パスの予約は資源管理システムが行うため、ユーザーが DOPN の使用を意識する必要はありません。これを実現する資源管理システムについて、産総研情報技術研究部門と協働して検討を進めています。上記議論について、第 1 章に追記しました。

# 編集方針

シンセシオロジー編集委員会

## 本ジャーナルの目的

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

## 研究論文の記載内容について

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

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

## 対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の実験者にも内容が理解できるように記述することが必要であるとともに、その専門分野の実験者に対しても学術論文としての価値を示す内容でなければならない。

論文となる研究開発としては、その成果が既に社会に導入されたものに限定することなく、社会に活かすことを念頭において実施している研究開発も対象とする。また、既に社会に導入されているものの場合、ビジネス的に成功しているものである必要はないが、単に製品化した過程を記述するのではなく、社会への導入を考慮してどのように技術を統合していったのか、その研究プロセスを記載するものとする。

## 査読について

本ジャーナルにおいても、これまでの学術ジャーナルと同様に査読プロセスを設ける。しかし、本ジャーナルの査読はこれまでの学術雑誌の査読方法とは異なる。これまでの学術ジャーナルでは事実の正しさや結果の再現性など記載内容の事実性についての観点が重要視されているのに対して、本ジャーナルでは要素技術の組合せの論理性や、要素技術の選択における基準の明確さ、またその有効性や妥当性を重要視する（次ページに査読基準を記載）。

一般に学術ジャーナルに掲載されている論文の質は査読の項目や採録基準によって決まる。本ジャーナルの査読においては、研究開発の成果を社会に活かすために必要なプロセスや考え方が過不足なく書かれているかを評価する。換言すれば、研究開発の成果を社会に活かすためのプロセスを知るために必要なことが書かれているかを見るのが査読者の役割であり、論文の読者の代弁者として読者の知りたいことの記載の有無を判定するものとする。

通常の学術ジャーナルでは、公平性を保証するという理由により、査読者は匿名であり、また査読プロセスは秘匿される。確立された学術ジャーナルにおいては、その質を維持するために公平性は重要であると考えられているからである。しかし、科学者集団によって確立されてきた事実的知識を記載する論文形式に対して、なすべきことは何であるかという当為的知識を記載する論文のあり方については、論文に記載すべき内容、書き方、またその基準などを模索していかなければならない。そのためには査読プロセスを秘匿するのではなく、公開していく方法をとる。すなわち、査読者とのやり取り中で、論文の内容に関して重要な議論については、そのやり取りを掲載することにする。さらには、論文の本文には記載できなかった著者の考えなども、査読者とのやり取りを通して公開する。このように査読プロセスに透明性を持たせ、どのような査読プロセスを経て掲載に至ったかを開示することで、ジャーナルの質を担保する。また同時に、査読プロセスを開示することによって、投稿者がこのジャーナルの論文を執筆するときの注意点を理解する助けとする。なお、本ジャーナルのように新しい論文形式を確立するためには、著者と査読者との共同作業によって論文を完成させていく必要があり、掲載された論文は著者と査読者の共同作業の結果ともいえることから、査読者氏名も公表する。

## 参考文献について

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

## 掲載記事の種類について

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

## 執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

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

## 1 投稿記事

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

## 2 投稿資格

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

## 3 原稿の書き方

### 3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

### 3.2 原稿の構成

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 書式

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

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

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

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

#### 4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2  
産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

#### 5 著者校正

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

#### 6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

#### 7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 広報部広報制作室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

## MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board  
(written in January, 2008)

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

*Synthesiology* Editorial Board

Editor in Chief: S. ICHIMURA

Senior Executive Editor: M. SETO, N. YUMOTO

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

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

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

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

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

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

E-mail: [synthesiology-ml@aist.go.jp](mailto:synthesiology-ml@aist.go.jp)

URL: [http://www.aist.go.jp/aist\\_e/research\\_results/publications/synthesiology\\_e](http://www.aist.go.jp/aist_e/research_results/publications/synthesiology_e)

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

## Editorial Policy

*Synthesiology* Editorial Board

### Objective of the journal

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

### Content of paper

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

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

### Subject of research and development

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

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

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

### Peer review

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

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

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

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

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

## References

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

## Types of articles published

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

## Required items and peer review criteria (January 2008)

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

## Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

### 1 Types of contributions

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

### 2 Qualification of contributors

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

### 3 Manuscripts

#### 3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

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

#### 3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

are included.

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

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

### 3.3 Format

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

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

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

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

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

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

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

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

## 4 Submission

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

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

E-mail: [synthesiology-ml@aist.go.jp](mailto:synthesiology-ml@aist.go.jp)

The submitted article will not be returned.

## 5 Proofreading

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

## 6 Responsibility

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

## 7 Copyright

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

Inquiries:

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

## 編集後記

シンセシオロジーに記載する論文は、技術・知見の個別要素を統合することにより社会で使われる製品・サービスの新たな構成方法に関するものです。理工学分野出身の当編集者の頭の構造からするとどうしても、特定の構成事例を挙げる“実験”、構成方法を議論・体系化する“理論”で整理してしまいます。今回の論文5件の内、鈴木氏ほかの「次世代型下水汚泥焼却炉『過給式流動燃焼システム』の実用化」は、都市の汚泥処理を省エネ・地球温暖化防止の為に最適化すべく開発した新燃焼システムを実証し、地方自治体に導入した実績を示したのですが“実験”に重点が置かれています。勿論ここで言う実験とは地方自治体を相手にした社会実験です。同様に馬場氏ほかの「熱物性データの生産と利用の社会システム」の内容も、計量標準分野の典型的な構成方法論の上に立った社会実験の事例と言えます。一方、石井氏ほかの「持続発展可能な大容量・低消費電力の通信ネットワーク実現に向けて」の論文では、新しい高速光スイッチ、サブ波長スイッチ、その組み合わせ配置論という要素技術を統合して将来の情報通信需要にこたえることとし、その中で需要の分類予測も加え、国全体に及ぶ通信システムの最適化を図っています。その枠組みは、これらの組み合わせ配置や需要分類に関する体系化を垣間見ることができ、“理論”の様相を呈しています。この

他、秋永氏の論文「オープンイノベーションと先端機器共用施設」では、施設公開運営という社会実験を通して持続的な異分野融合・人材流動などの新たな価値に向けた最適化実験の方法を議論しています。そして稲田氏ほかの「オンデマンド材料開発を目指した材料設計システム」では、基礎素材を利用して半導体材料を合成する場合のデータベースを用いた材料設計を支援するシステムの事例を取り上げていますが、いわばそれ自体が、ミクロな意味で構成方法を議論しているともいえましょう。さらに供給リスク低減という価値を最適化する可能性についても触れています。

構成方法を“理論的に”議論するに当たって、最適化の対象となる評価指標を設定することは重要ですが、昨今喫緊の省エネ、環境汚染対応、高速化などといった指標以外に、構成して得られたシステム・製品を市場や社会に投じて、例えばその反応となるクレーム項目から新たな評価指標を見出すことも構成学の重要な営みと言えます。その意味で、構成学に付すデータの宝庫となる社会実験の蓄積はますます重要と考えています。そして技術開発の成果としての“製品・サービス”を市場にデビューさせる際の実験の意義を、顧客に明らかにして行くことも極めて大切だと思います。

(編集幹事 田中 充)

Synthesiology 7巻1号 2014年2月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

---

シンセシオロジー編集委員会

委員長：一村 信吾

副委員長：瀬戸 政宏、湯元 昇

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

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

幹事（出版）：多屋 秀人

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

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

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

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



## Messages from the editorial board

### Research papers

Social system for production and utilization of thermophysical property data

*-Measurement technology, metrological standard, standardization of measurement method, and database for thermal diffusivity by laser flash method-*

T.BABA and M.AKOSHIMA

Open foundry to spur open-innovation

*-Establishment of a foundry to realize an innovative cooperation platform and development of its sustainable management strategy-*

H.AKINAGA

Practical use of an advanced sewage sludge incinerator, "turbocharged fluidized bed incinerator"

*-The role of AIST in the development of a new system-*

Y.SUZUKI, T.MURAKAMI and A.KITAJIMA

A novel material design method for on-demand material development

*-A method born from a development field-*

T.INADA and T.MATSUO

Towards large-capacity, energy-efficient, and sustainable communication networks

*-Network topology research for dynamic optical paths-*

K.ISHII, J.KURUMIDA and S.NAMIKI

### Editorial policy

### Instructions for authors