

Synthesiology

ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料合成への挑戦

燃えるごみの焼却残さを高付加価値材料に変換する技術開発

機械部品の加工穴内壁面傷のレーザ検査装置の開発・商品化

スペースワイヤ国際標準への提案プロセス

シンセシオロジー編集委員会

Synthesiology 論文のポイント

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標、具体的なシナリオや研究手順、特に実用化のために要素技術を構成・統合するプロセスを記述した論文誌です。本号に掲載した論文の価値が一目で判るように、編集委員会が作成したシンセシオロジー論文としてのポイントを示します。

シンセシオロジー編集委員会

論文：ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料合成への挑戦

—ここまできたメソポーラス材料の組成の設計と制御— 木村 辰雄

これまで困難とされてきたハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料の合成を達成した経緯が述べられている。その戦略は、新たな出発原料の選定、さらには従来にない合成ルートを駆使するものでした。その結果、メソポーラス材料の組成や構造の拡張に成功した。有機種や金属種といったサブナノメートルスケールの化学種をツールとした要素技術の統合化が重要であることを示している。

論文：燃えるごみの焼却残さを高付加価値材料に変換する技術開発

—「溶融スラグ」の高比表面積シリカへの変換とシリカを原料とするケイ素化学産業基幹原料の製造—

深谷 訓久ほか

ごみの焼却残さという負の価値を有する溶融スラグを原料として、有価物、それも静脈産業の中での価値ではなく動脈産業において価値を持つ高機能材料を産み出す技術について述べている。従来のように単に分別し高純度化するのではなく、化学平衡理論に基づいて合成を行うところが革新的である。著者が述べているように、研究の成果が次のステージに進む時は、異なる専門分野の人との出会いと連携が重要になることが示されている。

論文：機械部品の加工穴内壁面傷のレーザ検査装置の開発・商品化 岡田 三郎ほか

工業製品の大小さまざまな径の穴内壁面の傷欠陥検査において、目視検査では見落としやすい、光沢面や鏡面の傷を自動かつ高精度に検出する装置を開発・商品化した過程が述べられている。各開発ステージでのポイントが明示されているとともに、研究所の組織改編やリーマンショックによる危機を乗り越えるためには、企業ニーズにマッチした製品開発が効果的であったことなど、製品化に成功するためのシナリオが論じられている。

論説：スペースワイヤ国際標準への提案プロセス

—開発型の標準化における技術的実績と標準化活動における行動様式— 檜原 弘樹ほか

人工衛星のネットワーク上の通信規格であるスペースワイヤの国際標準化において、日本の提案が採用されていったシナリオが、その技術背景と人の役割の面から記述されている。開発型の標準策定に対して吉川モデルを適用し、欧州、米国、日本の規格策定実践者の行動様式を分析している。人工衛星の通信規格に限らずに、国際標準開発一般に通じるものがあり、他の分野にも参考となる。

Synthesiology 第11巻第3号(2018.9) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料合成への挑戦 — ここまできたメソポーラス材料の組成の設計と制御 — ・・・木村 辰雄	115 - 127
燃えるごみの焼却残さを高付加価値材料に変換する技術開発 — 「熔融スラグ」の高比表面積シリカへの変換とシリカを原料とするケイ素化学産業基幹原料の製造 — ・・・深谷 訓久、片岡 祥、崔 準哲	128 - 136
機械部品の加工穴内壁面傷のレーザ検査装置の開発・商品化 ・・・岡田 三郎、中村 修、江崎 泰史	137 - 147
論説	
スペースワイヤ国際標準への提案プロセス — 開発型の標準化における技術的実績と標準化活動における行動様式 — ・・・檜原 弘樹、能町 正治、高橋 忠幸	148 - 158
編集委員会より	
編集方針	159 - 160
投稿規定	161 - 162
編集後記	167
「Synthesiology」の趣旨	
Research papers (Abstracts in English)	
Challenge towards synthesis of non-silica-based hybrid mesoporous materials —Level of compositional design and control of mesoporous materials achieved so far— --- T. KIMURA	115
High-value materials from incineration residues of burnable garbage —Production of silica with high specific surface area from “molten slag” and direct transformation of silica to basic raw material for silicon chemical industry— --- N. FUKAYA, S. KATAOKA and J-C. CHOI	128
Development and commercialization of laser inspection system to detect surface flaws of machined holes --- S. OKADA, O. NAKAMURA and Y. ESAKI	137
Commentary (Abstract in English)	
Contributing to the SpaceWire international standard —Successful factors for the development of a de jure standard— --- H. HIHARA, M. NOMACHI and T. TAKAHASHI	148
Editorial policy	163 - 164
Instructions for authors	165 - 166
Aim of <i>Synthesiology</i>	

ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料合成への挑戦

— ここまできたメソポーラス材料の組成の設計と制御 —

木村 辰雄

両親媒性有機分子はその濃厚溶液中で液晶構造を形成することがある。この論文では、その液晶構造を転写したナノ構造を有する一連の多孔質材料「規則性メソポーラス材料」に着目した研究に関して、その組成設計がどこまで実現できるようになっているかを紹介する。最初の報告例であるシリカ系材料に加え、最近では、多様な無機組成からも合成できると考えられている。この研究では、より難易度が高いハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料の合成に挑戦してきた。規則性メソポーラス材料の合成に利用されたことのない化学原料の選定並びに新しい合成ルートの提案に始まり、最近では化学原料の反応性制御や機能設計まで実現できるようになっている。

キーワード: メソポーラス構造、超分子鑄型、組成設計、非シリカ系材料、無機有機複合骨格

Challenge towards synthesis of non-silica-based hybrid mesoporous materials

—Level of compositional design and control of mesoporous materials achieved so far—

Tatsuo KIMURA

Amphiphilic organic molecules have often been transformed into liquid-crystal structures in their concentrated solutions. This paper focuses on a group of porous materials, called “ordered mesoporous materials.” Ordered mesoporous materials have nanostructures that replicate liquid-crystal structures. I report on the current level of compositional design that can be realized using mesoporous materials. In addition to silica-based materials, various inorganic compositions have been recently considered as possible alternatives. I have been striving to develop a more difficult method to obtain hybrid mesoporous materials in a non-silica-based system. To realize this, I have selected novel chemical resources for the synthesis of ordered mesoporous materials, proposed a new synthetic route, and realized reactivity control of such chemical resources and their functional design.

Keywords: Mesoporous structure, supramolecular template, compositional design, non-silica-based material, inorganic-organic hybrid framework

1 はじめに

多孔質（ポーラス）材料とは、内部に大量の空間を有する材料のことを指す。したがって、材料表面が大量に露出している、すなわち、表面積が非常に大きい材料としての特徴を活かしたさまざまな用途への利用が期待される。また、その孔径によって、マイクロポーラス材料、メソポーラス材料およびマクロポーラス材料に分類される。IUPAC（International Union of Pure and Applied Chemistry：国際純正応用化学連合）の定義では、それぞれ、孔径分布が 2 nm 以下、2 ~ 50 nm および 50 nm 以上の範囲に存在するポーラス材料とされている。工業的に重要なマイクロポーラス材料の代表例にはゼオライト（結晶性アルミノケ

イ酸塩）があり、石油精製プロセスや化成品合成に利用されるだけでなく、イオン交換ゼオライトが自動車排ガス浄化触媒として実用化されている。メソポーラス材料としては、乾燥剤として使用されているシリカゲルが最も有名であり、その他、吸着分離材として分析用機器のカラム充填剤等にも利用されている。

メソポーラス材料の中でも、特に界面活性剤（両親媒性有機分子）が自己集合する性質を利用して合成されるシリカ多孔体の発見は 1990 年前後にまで遡る^[1]。孔径分布が非常に狭い均一メソ孔が規則配列しているというこれまでにない構造上の特徴に対する新しい用途開発への期待から世界中の関心を集めた^[2]。今では当たり前であるが、そ

産業技術総合研究所 無機機能材料研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98
Inorganic Functional Materials Research Institute, AIST 2266-98 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan
E-mail: t-kimura@aist.go.jp

Original manuscript received March 9, 2018, Revisions received June 1, 2018, Accepted June 6, 2018

の発見当初に *Nature* 誌に掲載された均一メソ孔が規則配列している透過型電子顕微鏡 (TEM) 写真は、材料研究者に衝撃を与えたことは想像に難くない^[3]。図1 (上段) にメソポーラスシリカの典型的な分析結果を示す。低角度領域のX線回折測定からナノスケールの周期構造の存在が確認でき、TEM 観察でその様子を直接可視化することもできる。また、窒素吸着等温線の形状を解析することで、比表面積や細孔容量、孔径分布を算出することができる。ただし、多孔化できていない不純物が混在している可能性もある。したがって、メソポーラスシリカの合成の成否はメソ孔の均一性や周期性だけでなく、各種分析結果から総合的に判断する必要がある。

図1 (下段) にはさらに、これまでの多様な材料組成でのメソポーラス化の可能性を含め、用途開発の例をまとめた。通常は酸化物そのものの機能を利用した用途開発が進められる。多孔質材料の場合は、その空間を利用する触媒担体や吸着材といった用途開発も行われる。シリカ単独では発現しない機能を付与するため、異種元素を導入して機能 (酸性質、酸化機能等) を発現させたり、時には、メソポーラス有機シリカ (シリカ骨格 (無機種) と有機基が分子スケールで複合化したハイブリッド型のメソポーラス材料) のようにシリカ骨格に有機基を内包させたりもする。いずれの場合も、機能発現に必要な成分を導入して触媒機能等を設計することになる。最終生成物が提供する孔内

環境をそのまま使用する以外に選択肢がないため、発現した機能をより効率的に進行させるための孔内環境の設計は重要となる。この研究では、メソポーラス材料の組成設計と制御技術が高度化されたハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料の合成法を例に、合成研究の困難さと現時点での到達レベルを紹介する。言い換えれば、孔内環境を設計するための方法論を論じる。最終的に、シリカ系で明らかになっている機能設計に必要な要素技術を活用すれば、発現した機能をより効率的に進行させるナノスケールの化学反応場が設計できる。

図2に、一般的にメソポーラスシリカの合成に使用されている界面活性剤の種類と孔径制御 (1~100 nm 超) の範囲、並びに典型的な分子の大きさととの対比を示した。マイクロポーラス材料ではベンゼン等の小さな分子しか扱えない。一方、メソポーラス材料ではさらに大きな基質を孔内に取り込むことができる。例えば、ファインケミカルを対象とするナノスケールの合成容器やタンパク質や酵素等の巨大な機能性分子の固体化媒体としての期待も高まっている (赤点線枠)。その他にも分子の拡散性が高くなることに起因した性能向上の可能性もある。あくまでも目安として、それらが有効に機能する孔径領域も示した (青点線枠)。こうしてメソポーラス材料は材料自身のユニークさのため世界的な研究分野として発展を遂げるようになった。さらに、シリカ以外の組成でも類似の合成法でメソポーラス材料が

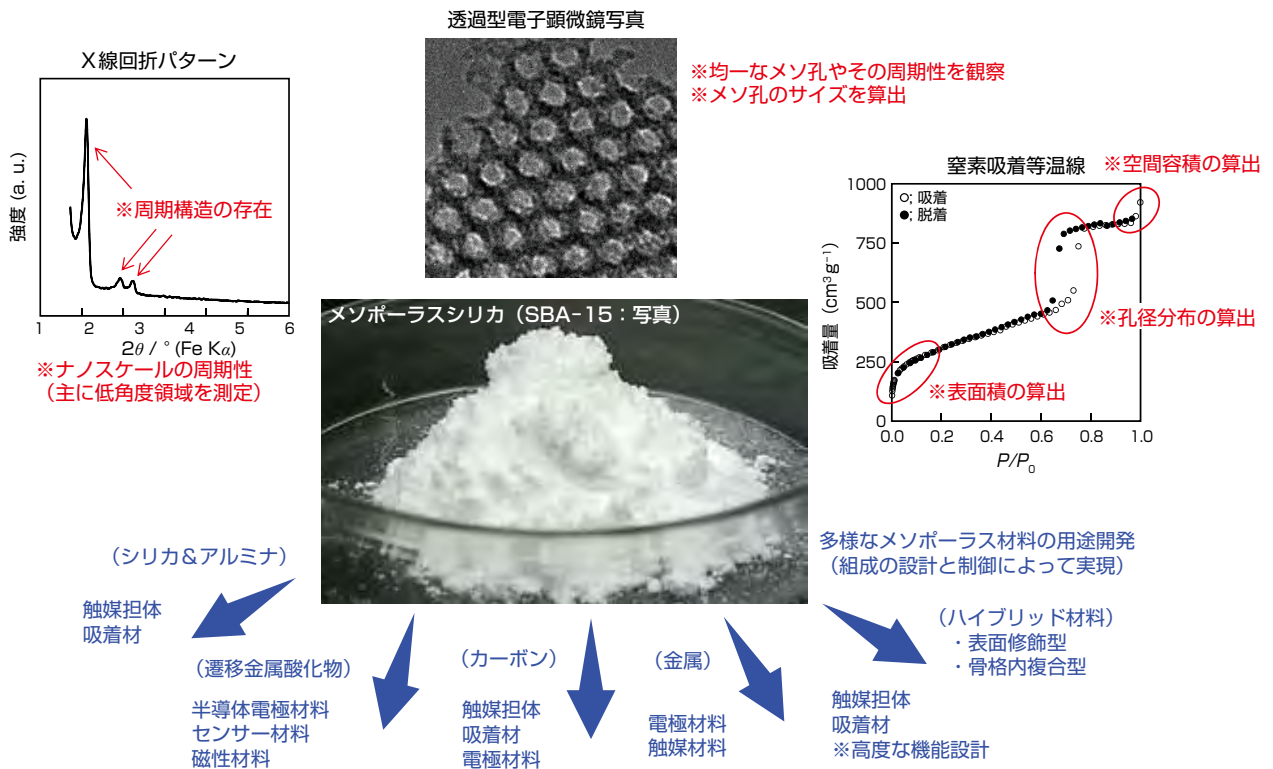


図1 メソポーラスシリカの典型的な分析結果と多様なメソポーラス材料系での用途開発の例

合成できるという期待感も高まっていった¹⁴⁾。

シリカ系材料で先行開発されていたメソポーラス有機シリカが「機能設計に特化」した研究活動であるならば、この研究の第一の研究戦略は「孔内環境の設計」にある。一般に、シリカ表面には水酸基が存在するため、平面上ではある程度の親水性を示すと言われている。ただし、湾曲したメソ孔内部の凹面上ではより疎水的な挙動を示すことが報告されている。メソポーラス有機シリカは、骨格内に存在する疎水的な有機基がメソ孔表面に露出しているため、さらに疎水的な孔内環境になることを前提とした用途開発しかできない。このような背景から、他のメソポーラス材料でも観察されたことのない「親水的な表面構造」を設計することをこの研究の最初の目標に設定した。メソポーラスリン酸アルミニウムは構造安定性が非常に低く用途開発には適していなかった。しかし、親水的な表面構造を有する唯一のメソポーラス材料であることを報告していたので¹⁵⁾、この知見を突破口に、表面構造の設計指針を提案することとした。

2 メソポーラス材料の組成制御域の拡張と技術的課題の整理

この研究では、メソポーラス材料の骨格組成の制御技術のレベルアップに絞って議論を進める。合成化学的な見地から、非シリカ系材料のメソポーラス化の困難さ並びにその無機有機複合化を阻んでいた技術的な課題を、シリカ系材料のハイブリッド化（無機有機複合化）の進展との対

比も交えながら、整理する。メソポーラス材料の合成研究に関する主な要素技術の構成としては、

- ① 適切な無機原料の選択と溶液中での無機種の反応性制御
- ② 溶液中に存在する無機種と両親媒性有機分子との相互作用の設計
- ③ 相互作用によって新たに生成した両親媒性分子の自己集合挙動の理解
- ④ 液晶類似構造を形成する過程およびその後の無機種の重合反応の調節
- ⑤ 両親媒性有機分子の除去法の開発
- ⑥ 薄膜や粉体等への用途開発を前提としたプロセス設計となる。これらの要素技術をメソポーラスシリカ前駆物質の生成機構の各段階に重ねて示したのが図3である。ここで最も重要なことは、すべての要素技術を総合的に理解すること、すなわち、これらの要素技術を統合できなければ、より高度なメソポーラス材料の組成設計技術であるこの研究成果は創出できなかった。

メソポーラスシリカの発見直後に示されたメソポーラスシリカ前駆物質の生成機構には、議論を呼んだものもある。図3（上段）に示した液晶鋳型ルートで前駆物質が生成していると理解すれば、酸化材料の内部でのナノメートルレベルの空間設計が簡単にできると信じ込ませるには十分であった。しかし、その後の検証の結果、ほとんどの場合は液晶鋳型ルートではなく、図3（下段）に示した協奏的組織化ルートによって前駆物質（液晶構造類似のシリカー

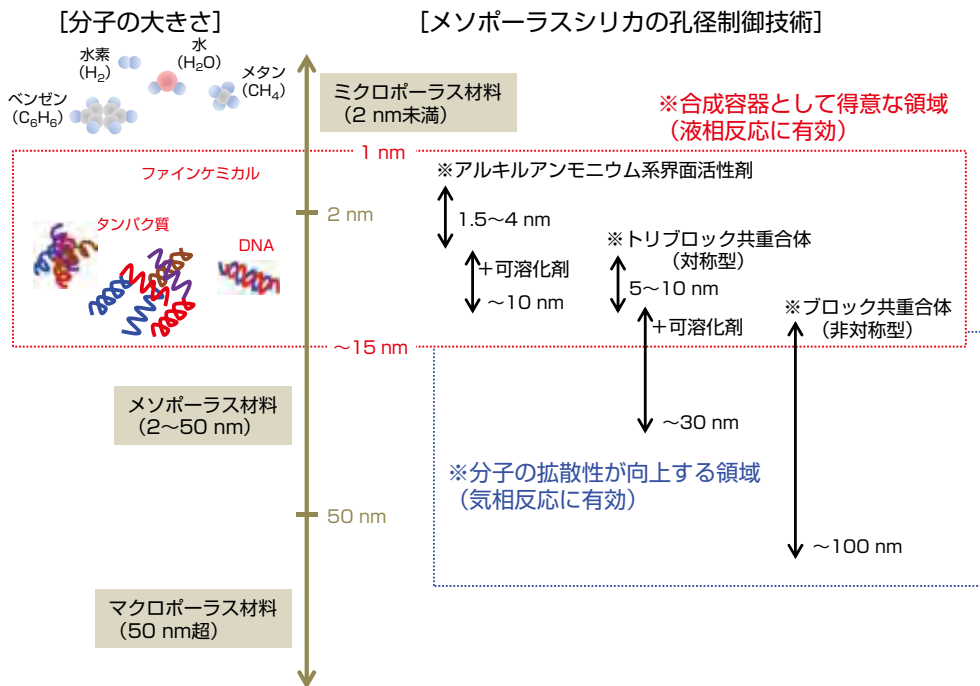


図2 メソポーラスシリカの孔径制御の範囲と分子の大きさとの対比

両親媒性有機分子複合体) が生成しているとされた。最初に両親媒性有機分子の親水部とオリゴマー状の溶解ケイ酸種が相互作用する。この際に、無機種の分子量(サイズ)が大き過ぎると構造規則性を有する前駆物質が得られなくなる、あるいはその前に沈殿が生成してしまう。無機種とうまく相互作用することができれば、両親媒性を示す新しい無機有機複合分子が生成したと見なすことができる。この複合分子の自己集合と無機種の結合生成が同時に(協奏的に)進行できれば、液晶構造を内包した構造規則性の高い前駆物質が得られる。最後に構造規則性が壊れないよう有機分子を焼成等で除去できれば、材料内部に規則的なメソ空間が導入される。

2.1 シリカ系からそのハイブリッド型(有機シリカ系)へ

テトラアルコキシシラン等のシリカ原料から合成する場合は、ケイ酸化学として確立された十分な知見がある^[6]。それは、溶液中での加水分解や重縮合反応を制御しやすい環境にあることを意味する。さらに、溶解ケイ酸種の状態やその反応過程が²⁹Si NMRで追跡できるといった基礎科学的な理解も進んでいるため、実際に多種多様なメソポーラスシリカの合成が可能になっている。有機基で架橋されたシラン化合物を原料として用いても、シリカ系材料に於ける骨格の無機有機複合化は比較的容易に実現できる^[7]。シラン化合物の反応性は変わるが、酸性あるいは塩基性のいずれの条件を選択して合成するか等、ケイ酸化学の知見が十分に活用できる。図4に示すように主に、種々の有機基で架橋されたシラン化合物からのメソポーラス有機シリカ

の合成が報告されている。また、無機種と有機基は分子スケールで交互に配列することになり、シラン化合物内の有機基同士の分子間相互作用が無機種と有機種との配列に周期性を与えることもある^{[8][9]}。単純な有機基は孔表面を疎水化する程度の役割しか期待できない。一方、有機基自身の機能性あるいは設計性を活用する取り組みも行われている。例えば、骨格表面に配置されたピピリジン等を足場として金属錯体を形成させ、光エネルギーの捕集技術等も調査されている^[10]。

2.2 シリカ系から非シリカ系へ：非シリカ系メソポーラス材料の合成の困難さ

非シリカ系のメソポーラス材料の合成にケイ酸化学の知見はまったく通用しない。ここでは、アルミナやチタニア等の酸化物を非シリカ系材料の代表として説明する。非シリカ系の無機原料は、溶液中で反応が激しく進行する。そこで、一般的なゾルゲル反応を遅くするための制御法として、化学修飾剤を用いたり、非水系で反応を行ったり、さまざまな取り組みが報告されている。しかし、こうした反応制御技術をメソポーラス材料の前駆物質を得るための協奏的組織化ルート(図3)に融合させることは十分にできていない。これらの取り組みは主に反応初期にしか適用されないため、その後の無機種間での結合生成を制御できない。したがって、自己集合と骨格形成を適切な速度に調整できず、両親媒性有機分子を十分に取り込めないまま無機材料だけが沈殿してしまう。こうした挙動は、無機骨格の結合(共有結合) エネルギー >> 無機種と両親媒性有機分子の相互

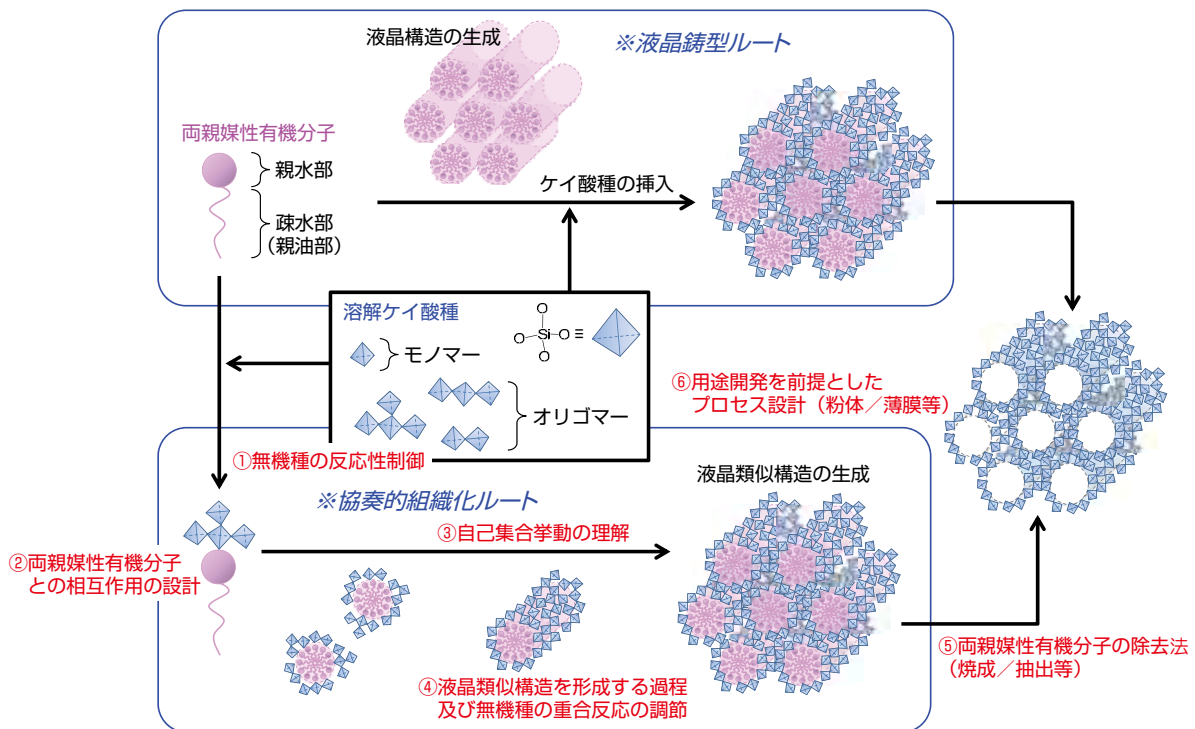


図3 メソポーラスシリカの生成機構：液晶鑄型ルートと協奏的組織化ルート

作用（静電的相互作用、水素結合等）のエネルギー→自己集合のエネルギーの強弱で理解できる。本物質系に於いては、無機種間の結合生成が支配的になると解釈できる。構造規則性の高いメソポーラス構造を得るには、溶液中での無機種の結合生成をいかに制御するかが最も重要な構成要素になる。

このように反応制御が難しい非シリカ系材料では、溶液中の反応性制御に精密さが求められる。言い換えれば、アルミナやチタニア等の報告例のほとんどが薄膜に限定されていることからメソポーラス材料として得ることの困難さが伺える。無機種の結合生成を抑制しながら沈殿を生成させないためには、最初に透明な前駆溶液を調製する。さらに、迅速にメソポーラス構造を生成させる溶媒揮発法^{[11][12]}を採用して規則性の高いメソポーラス薄膜材料を得ているのが実情である。主にエタノール溶媒系で前駆溶液の調製を行う。しかし、アルコキシド原料そのものは両親媒性有機分子の親水部と相互作用ができない。アルコキシド原料の加水分解と縮合反応を少しだけ進行させるつもりで少量の塩酸を添加する。それでも、両親媒性有機分子と溶解無機種を相互作用させたら直ぐにスピコートやスプレードライ等のプロセスで溶媒揮発を促し、メソポーラス材料の前駆物質として一気に仕上げる^[13]。さらに厄介なことに、例えば、成膜後であっても酸化物材料の重合反応が進行してしまう。この反応を遅らせる苦肉の策として、成膜直後に冷凍庫（約-20℃）に入れるという強引なプロセスまで行われることさえある。

実際の追試でも、確かに冷凍庫に入れないと構造規則性は大きく低下することが確認できている。目的基礎研究

として材料の性能評価や構造との相関を調査する分には構わない。しかし、実用化に向けた大量合成の実施あるいは量産化に向けたプロセス設計は望めないだろう。しかも、驚くべきことに、粉体試料として論文発表されている非シリカ系メソポーラス材料の大半が実は溶媒揮発法で合成しているのである。より薄く前駆溶液を拡げ薄膜合成のようにサンプルを回収しているケースもあると聞いている。このように、非シリカ系メソポーラス材料の合成の困難さの裏返しとして強引な合成法が世界中で横行している。無機原料の反応性に対する理解を深め、真の意味で組成制御技術を高度化させなければ、実用化に適したプロセス設計を意識した合成研究は進められない。加えて、アルミナ等、高表面積化した効果だけを活用する触媒担体としての利用を期待する場合もある。ほとんどの場合、酸化物骨格の結晶性を高めなければ十分な機能発現が見込めない。遷移金属酸化物でメソポーラス薄膜の合成が実現できたものは、センサー材料や電極材料等のデバイス部材としての新たな利用技術の提案が相次いだ。こうして、センシング対象成分の吸着サイトや追加機能としての光応答性分子の吸着量を増加させる効果は見られた。しかし、メソポーラス構造由来の多孔性を保持したままで結晶性を十分に高くできなかったため、メソポーラス化の効果は限定的だったように思われる。

3 ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料：物質群の構築に向けて

上記のように、シリカ由来の機能設計はほぼ期待できない。この研究を開始するに当たって、非シリカ系材料での

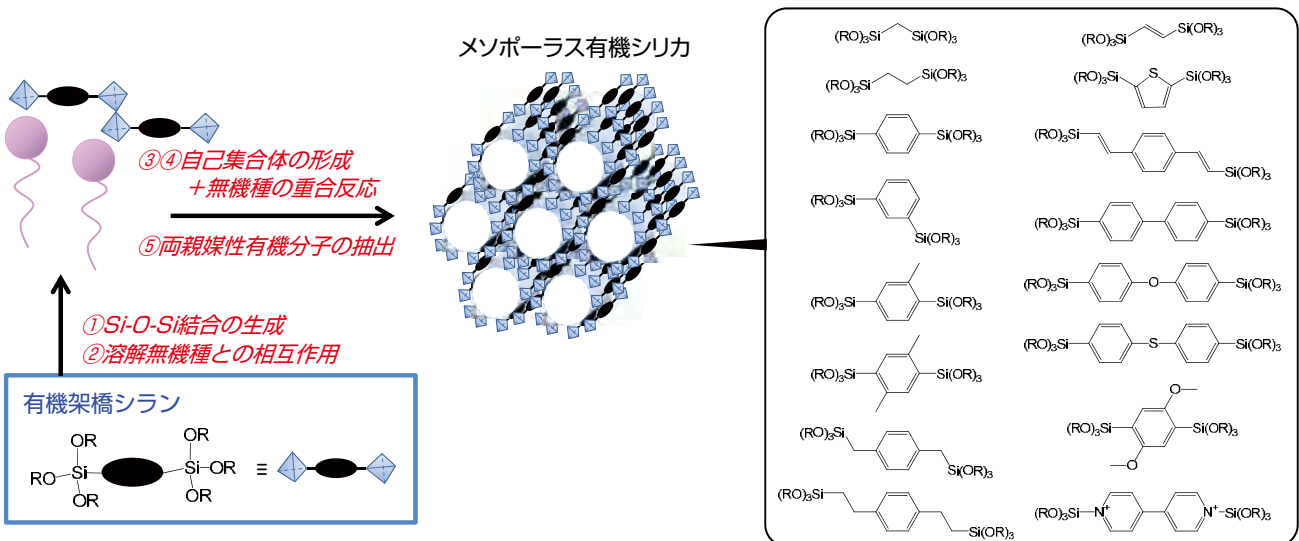


図4 メソポーラス有機シリカの合成：有機基の多様化（図3で抽出した要素技術の番号で整理）

メソポーラス化に加え、骨格の無機有機複合化を同時に実現する必要がある。この高度な材料設計への道を開拓することを最終目標“合成研究での到達点”として設定した。開始当初は、ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料を合成する術すらなかったのが実情である。非シリカ系で無機有機複合骨格からなるメソポーラス材料の汎用な合成技術が開発できれば、非シリカ系材料表面の性質を利用してナノ空間内の環境を疎水性から親水性の範囲で任意に変化させたり、あるいは無機種由来の機能と複合化させたり、より高度な材料設計への道が開拓できる。前述の通り、シリカから有機シリカへの展開は比較的容易に進んできた。他方、何故非シリカ系酸化物に関する研究がその後の無機有機複合化に関する合成研究に進展しなかったのか。それは、出発原料の反応性制御が難しいからと言うよりはむしろ、単純にそうした出発原料がなかったためであろう。シリカ以外では、架橋有機基を構造中に含むアルコキシド原料あるいは類似の化合物は市販されていない。あるいはその合成法すら報告されていないのが現状である。有機基で架橋されたスズ系化合物を3種類だけ見つけた^[14]。金属種ごとにこうした化合物の合成法を開発していた

ら、メソポーラス材料の合成原料を用意するために膨大な労力を割かなければならず、現実的なアプローチではないと考えた。

3.1 合成法の提案：有機架橋ホスホン酸の限界

以上から、さまざまな金属種との結合生成が可能でしかも、架橋有機基が分子構造中に存在している化合物を探索した。その結果、有機基で架橋されたホスホン酸化合物（有機基で架橋されたリン酸類似の化合物）を利用することを発案した。ホスホン酸の合成技術もほぼ完成したものになっている。しかも、金属リン酸塩の合成では、例えば、金属種と同モルのリン酸が溶液中に存在していると、金属種同士の反応が抑制されるので、この利点も享受できると考えた。早速、市販の有機基で架橋されたホスホン酸を用いてメソポーラス材料を合成した。「親水的な表面構造」を設計することを最初の研究目標に定めたので、開始当初は、アルミニウムを金属種としたメソポーラスホスホン酸アルミニウムの合成に注力した。その結果、図5にあるハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料の合成ルートの世界に先駆けて提案するに至った^[15]。その実証のため、一番単純なメチレン架橋ホスホン酸とアルミニウム源であるア

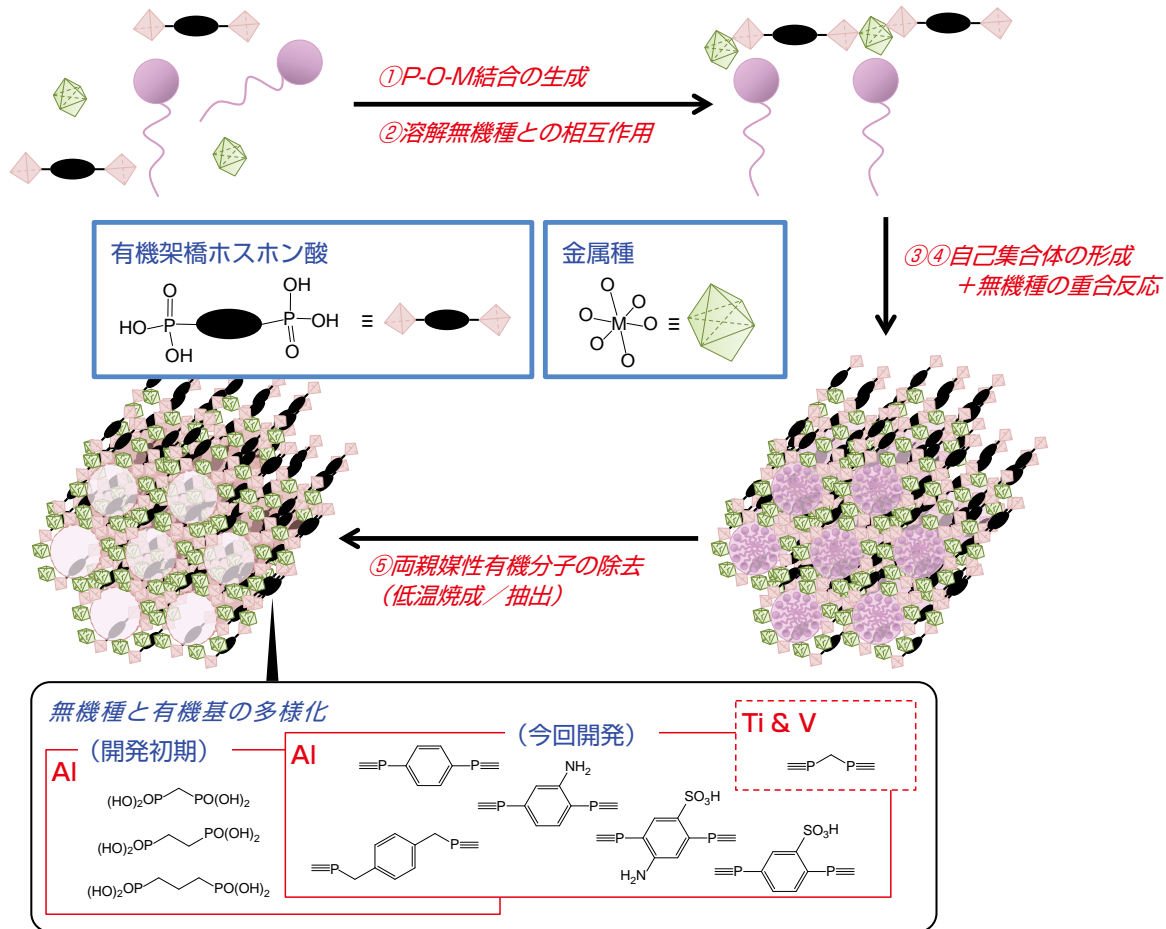


図5 有機架橋ホスホン酸化合物からの合成ルートの提案と組成制御技術の進展 (図3で抽出した要素技術の番号で整理)

ルミニウムイソプロポキシドとの反応を選定し、アルキルトリメチルアンモニウム (C_nTMA) 系の界面活性剤を利用した合成を塩基性条件下で行った。メソポーラス化した際の構造規則性が十分に高くできていないこと、および界面活性剤を抽出できないため低温焼成で除去している (部分的にリン原子と架橋有機基との結合が解列してしまう) ことが新たな課題として抽出された。

最初の課題であるメソポーラス構造の規則性を向上させることはそれほど難しくはなかった^[16]。メチレン架橋ホスホン酸と適度な反応性を有する塩化アルミニウム ($AlCl_3$) をアルミニウム源とし、合成条件を酸性条件下に変更しただけで、構造規則性が大幅に改善した。界面活性剤には、 C_nTMA だけでなく、アルキルポリオキシエーテル (C_nEO_m) 系あるいはポリオキシエチレン-ポリオキシプロピレン-ポリオキシエチレントリブロック共重合体 ($EO_nPO_mEO_n$) を用いることができる^{[16][17]}。アルキル鎖長の変化や重合数の異なるものを用いることで、2 nm 前後から 10 nm 弱の範囲で孔径が制御できることも確認した。この段階では、まだ界面活性剤を低温 (例えば 400 °C) 焼成により除去していたため、メチレン基やエチレン基のように架橋有機基の耐熱性がある程度高いものしかできなかった。同様の合成法で、例えば、機能設計が可能で耐熱性の高いベンゼン架橋ホスホン酸からの合成も試みた。しかし、構造規則性の高いメソポーラスホスホン酸アルミニウムは得られなかった。詳細は後述するが、これが有機架橋ホスホン酸から合成する際の限界を示している。すなわち、出発原料の反応性を精密制御するためのブレークスルーがなければ、本物質系を拡張することが難しいとの結論に至った。

また、第二の課題であった界面活性剤の抽出法の開発に向け、試行錯誤した。その結果、アセトン溶媒中で加熱するだけで、 C_nEO_m および $EO_nPO_mEO_n$ を分解 (除去) できることを見出した^{[18][19]}。こうして、架橋有機基の耐熱性を考慮せずにハイブリッド骨格を設計できる状況になり、この研究の進展を後押しする非常に重要な成果となった。酸性を示す固体表面のリン酸 (P-OH) 基が EO ユニットや PO ユニートを分解するための触媒として作用したと理解している。なお、メソポーラスリン酸アルミニウムは水蒸気が存在する程度でも構造規則性が徐々に崩壊するほどメソポーラス構造の安定性が低い。そのため、リン酸アルミニウム類似骨格を含むホスホン酸アルミニウムの場合も、水 (H_2O) 分子をできるだけ共存させないようアセトン処理することが重要であった。この安定性の低さを解決しなければ、親水環境を示すメソ空間に特有の性能評価が進められないと思われた。幸いなことに、架橋有機基の導入によってメソポーラス構造の安定性が向上することも確認され

た。リン酸アルミニウム類似骨格の近傍に疎水的な有機基が導入されたことで H_2O 分子による加水分解がある程度抑制されたと考えられる。有機基を導入した結果、材料表面は若干疎水化される。局所構造として理解すると、 H_2O 分子の吸着起点となるリン酸アルミニウム類似骨格は依然として孔表面に露出している。すなわち、親水的な表面環境あるいはその近傍での性能調査への道は閉ざされてはなかった。

3.2 出発原料の反応性制御：ホスホン酸化合物の可能性

ベンゼン架橋のように電子密度が高い架橋有機基になると当該ホスホン酸の反応性が大きく変わる。この場合には $AlCl_3$ との反応性が低くなり、メソポーラス材料が合成できなくなったと考えられる^[20]。ここでは、エタノール/水の混合溶媒を用いて合成しているが、溶媒への有機架橋ホスホン酸自身の溶解性にも配慮する必要がある。例えば、キシレン架橋のホスホン酸は同エタノール/水の混合溶媒には溶解せず前駆溶液の調製すらできなかった。単純なアルキル基で架橋されたホスホン酸からの合成では、有機基が多少変わっても、最適な合成条件でメソポーラス材料が合成できた。ベンゼン架橋のようにその性質が大きく変わると、最適な合成条件が適用できなくなった。例えば、メソポーラス金属リン酸塩の合成に於いて、出発原料の酸性と塩基性の差を適切に選択することの重要性が報告されている^[21]。反応初期の反応性に準ずるが、本合成系でも、ホスホン酸： $(HO)_2OP-R-PO(OH)_2$ (R: 架橋有機基) の代わりに、ホスホン酸エステル： $(H_5C_2O)_2OP-R-PO(OC_2H_5)_2$ を出発原料に用いると、 $AlCl_3$ との反応性が高過ぎてゲル化した。ホスホン酸の反応性が不十分であったことも考慮すると、ホスホン酸とそのエステルの中間の反応性を有する類似の化合物があれば、 $AlCl_3$ との反応性を適切に設計することに着眼した。

3.3 有機基の多様化：アルキル基から芳香族化合物へ

ここでは、ホスホン酸化合物と総称するが、ホスホン酸は、ホスホン酸エステルを過剰量の塩酸水溶液中で処理して得られる。エステル基の数に対して塩酸量が不足した状態で処理すれば、その中間状態の化合物、すなわち、酸とエステルが同一分子構造中に共存したホスホン酸化合物が得られる。しかも、その割合を任意に変えれば連続的な反応性制御も可能であると考えた。ここでは、アルミニウム源に $AlCl_3$ を用いた場合のベンゼン架橋ホスホン酸エステルからのメソポーラスホスホン酸アルミニウムの実際の合成例を説明する。ベンゼン架橋ホスホン酸エステルの塩酸処理の程度を変えたホスホン酸化合物を出発原料として合成した。その結果、構造規則性が非常に高いメソポーラス薄膜を得ることに成功した^[22]。その TEM 観察の結果

を図6に示す。均一なメソ孔が薄膜全体に存在している様子が確認されている。

その他、キシレン架橋のような芳香族化合物で架橋されたホスホン酸化合物からも同様のアプローチでメソポーラス薄膜が得られた。さらに、任意に分子構造を設計したホスホン酸エステルを自身で合成するためのスキルアップにも励んだ。その取り組みによって、架橋ベンゼン環にアミノ基(-NH₂)やスルホン酸基(-SO₃H)を付加した有機架橋ホスホン酸化合物からのメソポーラス薄膜の合成にも到達した。図5には、これまでに架橋有機基として導入できたものをまとめた。これまでの単純な有機基だけでなく機能設計が可能な各種芳香族化合物まで導入できている。このことは、シリカ並みの応用研究が可能なレベルにまで組成設計技術が高度化できつつあることを示している。したがって、この研究の第一の研究戦略として掲げている「孔内環境の設計」に向けた「親水的な表面構造」の設計並びに「その特異性の調査」ができる状態までは概ね実現できた。

3.4 無機組成の多様化：アルミニウムから遷移金属系へ

ここまでは、金属種としてアルミニウムを中心に進めてきた合成研究を紹介した。次のステップとして、アルミニウム以外の金属種での合成に着手し「孔内環境の制御」に向けた予備的な実験を開始した。無機種の多様化が実現できれば、無機種の種類に起因する無機ユニット表面の性質を利用できるようになる。例えば、アルミニウムでは、リン酸アルミニウム類似の無機ユニットの性質として、4配位アルミニウム種(AI₂O₃)が6配位種(AI₂O₆)になるまでH₂O分子が配位できるため、その表面が親水的な挙動を示す。したがって、それ以外の金属種での合成が実現できると、それらの金属種は4配位となることがないため、H₂O分子

を吸着する挙動にも変化が現れるはずである。

ここでは、一番単純な例としてメチレン架橋ホスホン酸エステルを部分的に酸処理したホスホン酸化合物から金属ホスホン酸塩のメソポーラス薄膜の合成を行った結果を示す。反応性がそれほど高くない塩化バナジウム(VCl₃)だけでなく、塩化チタン(TiCl₄)を無機原料とした場合にも、メソポーラス薄膜を得られることを確認した。ただし、TiCl₄は反応性が極めて高いため、非水系(エタノール)で前駆溶液の調製を行った。溶液中でイオン種として存在する金属種(M)からの骨格形成(M-O-P結合の生成)は難しいと思われる。リン原子(P)と酸素(O)を介して共有結合することができる金属種(M)であれば、それらの金属種の溶液中での反応性を十分に理解し、制御することで、新しい組成のメソポーラス材料が設計できると確信している。

4 メソポーラス材料の用途開発を前提としたプロセス設計

この論文では、メソポーラス材料の合成研究に関する主要な要素技術の構成を①～⑥に分類した。例えば、図5に示すように①～⑤を統合した結果として非シリカ系でのハイブリッド型メソポーラス材料が合成できたことを説明した。最後の要素技術⑥：用途開発を前提としたプロセス設計、についての見解を記して結言としたい。通常、材料開発は、図7(上段)に示すように、「社会ニーズ(用途開発)」に対する高性能化の要求を満たすところから始まる。既存材料との置き換え(改良研究)であれば、使用される形態はほぼ決まっている。そのため、類似の合成系で高性能化が実現できれば、どの程度の性能向上があるかを確認でき

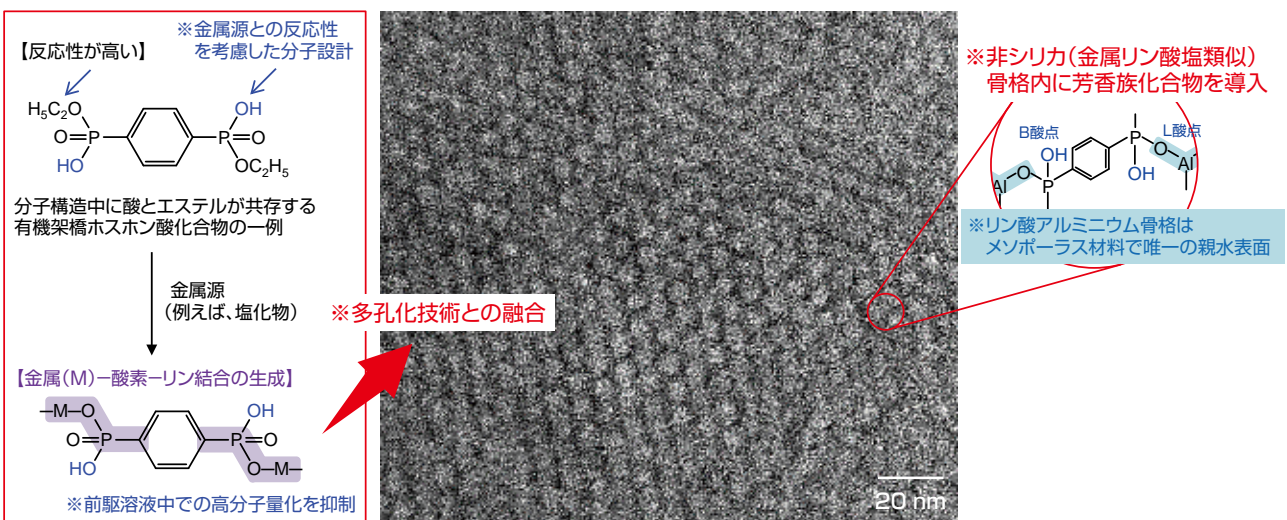


図6 ベンゼン架橋ホスホン酸化合物と金属源との反応並びにメソポーラス化技術との融合

る。そして、原材料や製造プロセスに係るコストに特段の問題がなければ、代替材料の候補になる。一方、新材料の発見（飛躍的な機能発現）から始まるケースは、技術革新をもたらす可能性がある。一方、それが実用化されるまでには超えなければならない技術的なハードルが幾つもあることは周知の通りである。新材料をどのように使うかで、最初に見つけた合成法すら大幅に改良しなければならない。一般的な言い方をすると、それが合成研究に於ける「組成」「構造」および「形態」の制御技術の開発に相当する。

メソポーラス化技術を採用した材料開発の場合は、もう少しターゲットとする開発要素を明確にして材料合成に臨むことができる。図7（下段）を用いて説明する。要求性能が明確であれば、その機能を発現するための候補組成は、既存研究を調査してある程度の目星を付ける。構造制御（この研究では主にメソポーラス化）によって性能向上が期待されるケースに限り、候補組成の材料で多孔化技術の開発に着手する。使用する形態も決まっていれば、薄膜や粉体として試料調製するためのプロセスをあらかじめ想定すればよい。例えば、均質な前駆溶液、特に透明な前駆溶液が調製できたとする。この場合、薄膜と粉体の作り分けは、メソポーラス材料の前駆物質が生成する溶媒揮発の過程が共通しているコーティングあるいは噴霧乾燥という使い分けのみで可能である。したがって、構造制御と形態制御は一体で進める要素技術開発であると理解できる。選定した候補組成に対してメソポーラス化を進めるといふ意味では、組成は制御対象ではない。この研究のようなメソポーラス材料の合成研究に於いては、溶液中での原料の反応性を適切に理解し、メソポーラス化技術を高度化

させることが最も重要となる。

ただし、想定する性能を最大限発現させるためにもうひとつ重要なことがある。メソポーラス材料の前駆物質はほとんどの場合、無機骨格が非晶質の状態で作られるため、想定している性能がある結晶性材料の機能発現に由来するものであれば、メソポーラス化後に無機骨格を結晶化させる必要がある。熱処理（焼成）で無機骨格は結晶化できるため、追加のプロセスは必要ない。途中でも述べたように、結晶化させ過ぎるとほとんどの場合で、メソポーラス構造が崩壊する。そのため、メソポーラス化の効果を損なわずに結晶化した成分を最大化するのが、この点での材料設計指針となる。また、孔径が大きいものほど結晶化させてもメソポーラス構造が崩壊しにくくなるという傾向がある。その際には、「結晶性の向上」だけでなく「拡散性の向上」というメリットも享受できる。そこで、表面積、結晶性および拡散性の効果により性能が極大化するような精密な合成技術として仕上げるのが重要となる。

5 今後の課題と展開

今回開発した“ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料”の合成技術には、大きな進歩が見られ、規則性メソポーラス材料の組成制御域を大幅に拡張するポテンシャルがある。ただし、研究開始当初のアルキル基で架橋されたホスホン酸を原料として合成したメソポーラスホスホン酸アルミニウムは粉体として回収できた^{[15]-[19]}。一方、最近、開発に成功した各種芳香族化合物で架橋されたホスホン酸化合物からは薄膜合成を研究の主体としてきた^[22]。幸いなことに、薄膜合成と同様に溶媒揮発プロセスを含む合成

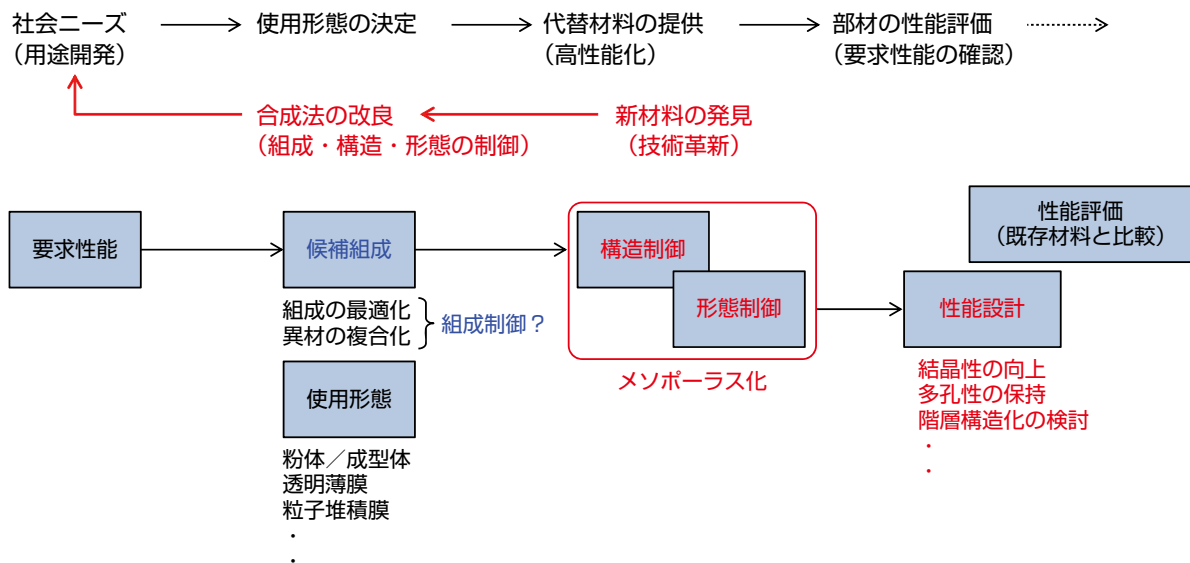


図7 用途開発に於ける材料設計指針の基本的な考え方

法として知られる噴霧乾燥プロセスを用いてメソポーラスホスホン酸アルミニウムの粉体合成も研究対象として^{[23][24]}、その理解も進めてきた^[25]。したがって、用途開発の要望に応じて、最近開発したあるいは今後組成設計される各種メソポーラス金属ホスホン酸塩も粉体試料として問題なく提供できるようになるだろう。

“ホスホン酸化合物の反応性制御”はこの研究を大きく進展させるためのブレークスルーとなった。そこから見えてきた将来展開として骨格内有機基の種類拡大がある。市販のホスホン酸化合物に見られる有機基だけに限定せず、所望の架橋有機基を有するホスホン酸エステルの有機合成や市販のホスホン酸エステルへの官能基の付与等、あらゆる化学的アプローチを想定した架橋有機基の分子構造を設計していくことが必要である。骨格内有機基をさらに活用した機能設計も未来志向で進められると確信している。この研究アプローチでは、ホスホン酸エステルの部分的な酸処理によってその反応性を連続的に制御できる。しかし、あらゆる無機原料に対して万能な手法であるとは思っていない。しかも、メソポーラス材料の無機骨格の結晶性を考えた合成法というレベルにはまだ到達できておらず、その実現には新たな着想も必要になってくるだろう。

無機種側にも連続的な反応性制御という概念が導入できるかは定かではない。今後は、反応初期に於ける無機原料の反応性に関する理解だけでなく、溶液中で連続的に進行している無機種の反応性をいかに制御するかも意識して多様なメソポーラス材料の合成法を開発する必要がある。さらには、無機骨格の結晶性を最大化できるような合成法にまで高度化させていきたい。そうすることで、これまで無機種の多様化を「孔内環境の設計」に向けた取り組みに位置付けてきた。今後の設計指針にはさらに「無機種由来の機能設計」が追加できる。幾つかの総説の中でメソポーラス金属ホスホン酸の簡単な用途がまとめられている^{[26][29]}。未来志向の材料設計と言う意味では、金属リン酸塩とその金属酸化物は、金属種の性質に由来する類似の性質を示すと予想される。したがって、今後は、メソポーラス化並びにその粉体合成技術が十分に完成していない非シリカ系酸化物材料についても、用途開発を代替する材料系としての可能性を議論していきたい。

謝辞

この研究を推進する過程に於いては、十分な予算措置を受けたとは言い難い状況の中、合成屋としての意地と必ず成就させるとの思いがあった。そこで、著名な国際誌に論文発表することを心掛け、外部研究機関との連携も活用しながら、着実な研究成果の創出を継続してきた。その

結果が実ったものと信じている。ごく最近になって、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費助成事業を通じて「基盤研究(B):分子構造デザインによる非シリカ系ハイブリッドメソ多孔体の精密合成技術の開発」(課題番号:26288110、平成26~28年度)として支援を受けることができ、この研究を大きく進展させることができた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Yanagisawa, T. Shimizu, K. Kuroda and C. Kato: The preparation of alkyltrimethylammonium-kanemite complexes and their conversion to microporous materials, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 63 (4), 988–992 (1990).
- [2] M. E. Davis: Ordered porous materials for emerging applications, *Nature*, 417 (6891), 813–821 (2002).
- [3] C. T. Kresge, M. E. Leonowicz, W. J. Roth, J. C. Vartuli and J. S. Beck: Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism, *Nature*, 359 (6397), 710–712 (1992).
- [4] Q. Huo, D. I. Margolese, U. Ciesla, D. G. Demuth, P. Feng, T. E. Gier, P. Sieger, A. Firouzi, B. F. Chmelka, F. Schüth and G. D. Stucky: Organization of organic molecules with inorganic molecular species into nanocomposite biphasic arrays, *Chem. Mater.*, 6 (8), 1176–1191 (1994).
- [5] T. Kimura: Surfactant-templated mesoporous aluminophosphate-based materials and the recent progress, *Microporous Mesoporous Mater.*, 77 (2-3), 97–107 (2005).
- [6] C. J. Brinker and G. W. Scherer: *Sol-Gel Science - The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, Academic Press, Boston (1990).
- [7] F. Hoffmann, M. Cornelius, J. Morell and M. Fröba: Silica-based mesoporous organic-inorganic hybrid materials, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 45 (20), 3216–3251 (2006).
- [8] S. Inagaki, S. Guan, T. Ohsuna and O. Terasaki: An ordered mesoporous organosilica hybrid material with a crystal-like wall structure, *Nature*, 416 (6878), 304–307 (2002).
- [9] S. Fujita and S. Inagaki: Self-organization of organosilica solids with molecular-scale and mesoscale periodicities, *Chem. Mater.*, 20 (3), 891–908 (2008).
- [10] M. Waki, Y. Maegawa, K. Hara, Y. Goto, S. Shirai, Y. Yamada, N. Mizoshita, T. Tani, W. J. Chun, S. Muratsugu, M. Tada, A. Fukuoka and S. Inagaki: A solid chelating ligand: periodic mesoporous organosilica containing 2,2'-bipyridine within the pore walls, *J. Am. Chem. Soc.*, 136 (10), 4003–4011 (2014).
- [11] Y. Lu, R. Ganguli, C. A. Drewien, M. T. Anderson, C. J. Brinker, W. Gong, Y. Guo, H. Soye, B. Dunn, M. H. Huang and J. I. Zink: Continuous formation of supported cubic and hexagonal mesoporous films by sol-gel dip-coating, *Nature*, 389 (6649), 364–368 (1997).
- [12] Y. Lu, H. Fan, A. Stump, T. L. Ward, T. Rieker and C. J. Brinker: Aerosol-assisted self-assembly of mesostructured spherical nanoparticles, *Nature*, 398 (6724), 223–226 (1999).
- [13] T. Kimura: Evaporation-induced self-assembly process controlled for obtaining highly ordered mesoporous materials with demanded morphologies, *Chem. Rec.*, 16 (1), 445–457 (2016).
- [14] H. Elhamzaoui, B. Jousseume, H. Riague, T. Toupance, P. Dieudonné, C. Zakri, M. Maugey and H. Allouchi: Self-assembled tin-based bridged hybrid materials, *J. Am. Chem. Soc.*, 126 (26), 8130–8131 (2004).

- [15] T. Kimura: Synthesis of novel mesoporous aluminum organophosphonate by using organically bridged diphosphonic acid, *Chem. Mater.*, 15 (20), 3742–3744 (2003).
- [16] T. Kimura: Synthesis of mesostructured and mesoporous aluminum organophosphonates prepared by using diphosphonic acids with alkylene groups, *Chem. Mater.*, 17 (2), 337–344 (2005).
- [17] T. Kimura: Oligomeric surfactant and triblock copolymer syntheses of aluminum organophosphonates with highly ordered mesoporous structures, *Chem. Mater.*, 17 (22), 5521–5528 (2005).
- [18] T. Kimura and K. Kato: Simple removal of oligomeric surfactants and triblock copolymers from mesostructured precursors of ordered mesoporous aluminum organophosphonates, *Microporous Mesoporous Mater.*, 101 (1-2), 207–213 (2007).
- [19] T. Kimura and K. Kato: Synthesis of ordered mesoporous aluminum alkylendiphosphonates with integrated inorganic-organic hybrid frameworks, *J. Mater. Chem.*, 17 (6), 559–566 (2007).
- [20] 木村辰雄: ホスホン酸アルミニウムのメソ多孔化技術の進展, *PHOSPHORUS LETTER*, 91, 20–27 (2018).
- [21] B. Tian, X. Liu, B. Tu, C. Yu, J. Fan, L. Wang, S. Xie, G. D. Stucky and D. Zhao: Self-adjusted synthesis of ordered stable mesoporous minerals by acid–base pairs, *Nature Mater.*, 2 (3), 159–163 (2003).
- [22] T. Kimura: Molecular design of bisphosphonates to adjust their reactivity toward metal sources for the surfactant-assisted synthesis of mesoporous films, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 56 (43), 13459–13463 (2017).
- [23] T. Kimura, K. Kato and Y. Yamauchi: Temperature-controlled and aerosol-assisted synthesis of aluminum organophosphonate spherical particles with uniform mesopores, *Chem. Commun.*, 33, 4938–4940 (2009).
- [24] T. Kimura, N. Suzuki, P. Gupta and Y. Yamauchi: Effective mesopore tuning using aromatic compounds in the aerosol-assisted system of aluminum organophosphonate spherical particles, *Dalton Trans.*, 39 (21), 5139–5144 (2010).
- [25] T. Kimura and Y. Yamauchi: General information to obtain spherical particles with ordered mesoporous structures, *Chem. Asian J.*, 8 (1), 160–167 (2013).
- [26] TY. Ma and ZY. Yuan: Metal phosphonate hybrid mesostructures: environmentally friendly multifunctional materials for clean energy and other applications, *ChemSusChem*, 4 (10), 1407–1419 (2011).
- [27] YP. Zhu, TZ. Ren and ZY. Yuan: Mesoporous non-siliceous inorganic–organic hybrids: a promising platform for designing multifunctional materials, *New J. Chem.*, 38 (5), 1905–1922 (2014).
- [28] YP. Zhu, TY. Ma, YL. Liu, TZ. Ren and ZY. Yuan: Metal phosphonate hybrid materials: from densely layered to hierarchically nanoporous structures, *Inorg. Chem. Front.*, 1 (5), 360–383 (2014).
- [29] T. Kimura: A new family of nonsiliceous porous hybrids from bisphosphonates, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 13 (4), 2461–2470 (2013).

執筆者略歴

木村 辰雄 (きむら たつお)

1994年3月早稲田大学理工学部応用化学科卒業、1999年3月早稲田大学大学院理工学研究科応用化学専攻修了、博士(工学)取得。1998年4月より早稲田大学理工学部応用化学科助手。2000年10月に名古屋工業技術研究所(現在の産業技術総合研究所中部センター)入所、2015年7月より経済産業省製造産業局非鉄金属課並びに金属課への出向を経て、2016年10月より産総研無機機能材料研究部門物質変換材料グループ研究グループ長。専門は、無機材料化学、主に多孔質材料の精密合成に関する研究に従事。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(清水 敏美、赤松 幹之:産業技術総合研究所)

この論文は、これまで困難とされてきたハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料の合成を達成した経緯をシナリオ風に詳細に述べています。その挑戦的な戦略と戦術は、新たな出発原料の選定、さらには従来にない合成ルートを駆使するものです。その結果、メソポーラス材料の組成や構造の拡張に至ったことは意義深いと考えます。有機種や金属種といったサブナノメートルスケールの化学種をツールとして、これまでの要素技術の統合化が重要であることを実証したシンセシオロジーにふさわしい論文と言えます。

議論2 要素技術の構成と統合に関して

コメント・質問(清水 敏美)

メソポーラス材料の合成に関する要素技術として著者は図3を用いて、①から⑥の個別事項を提示し、それらの統合が高度なメソポーラス材料の組成設計制御には不可欠と強調しています。しかし、初稿のこの論文の見出しをたどると、それら①から⑥の要素技術ごとの説明ではなく、シリカ系から有機シリカ系へ、あるいはアルミナ系やチタニア系へ、さらには非シリカ系のハイブリッド型メソポーラス材料への創製に向けた新たな化学原料や合成ルートに関して記述を進めています。言い換えれば、要素技術の統合に関して具体的な記述がありません。読者の理解を深めるために、今回開拓した化学原料や合成ルートに関して、①～⑥の各要素技術とどのような相関関係があるのか、さらに各要素技術の統合に関する具体的な内容を明確に提示すべきと考えます。また、質問ですが、新たに著者が開拓したルート(図4および図5)は、図3にある液晶鋳型ルートでもなく、また協奏的組織化ルートでもないのでしょうか。

回答(木村 辰雄)

図1に示したメソポーラスシリカを合成する過程で、考慮すべき要素技術は①～⑥に分類することができます。要素技術⑥を除けば、それらの統合によって、メソポーラスシリカが合成されているという理解に齟齬はありません。その重要性は、非シリカ系材料のようにメソポーラス化が困難なものでより顕著に表れます。個別の要素技術の改善だけではメソポーラス材料は合成できません。そのため、特に重視した技術は、要素技術①に相当する溶液中での無機種の結合生成をいかに制御するかであります。それは、非シリカ系メソポーラス材料の合成の困難さの箇所でも説明しています。さらに、一見、他との関係性が低いように見える要素技術⑤であっても、周期構造の完全性(対称性の高さ)やメソポーラスシリカ前駆物質におけるケイ酸骨格の縮合の程度等が影響します。その結果として、両親媒性有機分子を除去する際にメソポーラス構造が崩壊することが報告されています。

メソポーラス材料の前駆物質は、液晶鋳型ルートあるいは協奏的組織化ルートのいずれかで必ず生成します。この研究がこれらとは別の生成ルートを開拓したということはありません。そこで、図4および図5において、合成ルートの詳細を要素技術の番号と対応するように修正しました。こうして、この研究では、両親媒性有機分子の集合体を取り囲む成分を非シリカ系で無機有機複合化させるために、有機架橋ホスホン酸化化合物と金属源との反応を利用した新たな組成設計技術を提案、実証しました。

コメント (赤松 幹之)

第2章の最初の第2段落では、シリカ系での合成ルートが紹介され、協奏的組織化ルートで合成されていることが述べられています。これに基づいて、6つの要素技術を同定し、非シリカ系においてもこの6つの要素技術が統合される必要があると主張していると理解しました。そして、第3章において非シリカ系メソポーラス材料開発について述べられており、3.0節では材料の選択、3.2節については反応性制御と明示されています。しかし、それ以外の記述のどれがこの6つの要素技術のどれに当たるのかが、専門外の読者ではには理解できないと思います。対応関係が分かるようにできませんでしょうか。可能であれば、第3章の節立てと対応した構成にしていただと分かりやすくなると思います。

回答 (木村 辰雄)

図4(シリカ系ハイブリッド材料) および図5(非シリカ系ハイブリッド材料)の生成機構の説明図の中により重要な要素技術を明示したつもりでした。しかし、専門外の読者では理解し難かったようなので、分類した6つの要素技術の番号を用いての記載に変更しました。

議論3 研究戦略に関して

コメント・質問 (赤松 幹之)

第1章第5段落で、シリカ系材料によるハイブリッド型メソポーラス材料が「機能設計に特化」した研究開発であるのに対して、この研究(=非シリカ系ハイブリッド型メソポーラス材料)では「孔内環境の設計」を行う研究戦略(=研究の方針?)とした、という記述があります。この両者の本質的な違いはどこにあるのでしょうか?シリカ系はゴールオリエント(ある機能を実現する材料を開発する)に進んで来たことに対して、なぜゴールオリエントなアプローチを取らなかったのか、その考え方を説明してください。

回答 (木村 辰雄)

「機能設計に特化」した研究戦略と「孔内環境の設計」を行う研究戦略の本質的な違いは、以下の通りです。

シリカ系メソポーラス材料は、シリカ単独では発現しない機能を付与するため、異種元素をケイ酸骨格内に導入して機能(酸性質、酸化機能等)を発現させたり、時には、メソポーラス有機シリカのようにシリカ骨格に有機基を内包させたりもします。いずれの場合も、機能発現に必要な(ゴールオリエント)な成分を導入して触媒機能とか光応答性とかの設計に特化しています。しかし、最終生成物が提供する孔内環境をそのまま使用する以外に選択肢がないため、発現した機能をより効率的に発現させるための孔内環境の設計は不可能です。

この研究では、非シリカ系ハイブリッド型メソポーラス材料に関する合成研究の困難さと現時点での到達レベルを論じています。言い換えれば、孔内環境を設計するための方法論を論じていると解釈できます。最終的に、シリカ系で明らかになっている機能設計に必要な知見を活用すれば、発現した機能をより効率的に発現させるナノスケールの化学反応場が設計できるはずだと考えています。

また、この研究のターゲットである非シリカ系ハイブリッド型メソポーラス材料に関して、なぜゴールオリエントなアプローチを取らなかったのか、というご質問ですが、それは、ゴールオリエントにまだ自在に合成できる段階にはないためです。シリカ系メソポーラス材料であっても、オンデマンドに合成できるわけではありません。報告例

が圧倒的に多く、しかも選択の幅が広がっている結果として、その次のフェーズである「機能設計に特化」した取り組みができていているように見えるだけです。非シリカ系材料では、この論文にも記載した通り、原料の反応性が速く、ある無機組成のメソポーラス材料を1種合成するだけでも膨大な実験量が必要です。したがって、この研究の原料の反応性を連続的に制御するというアプローチによって、非シリカ系ハイブリッド型メソポーラス材料の多様化への道を開拓したことは大変意義があると考えています。

議論4 材料の新特性や用途拡大に関して

コメント (清水 敏美)

メソポーラス材料の組成を現在のシリカ系から有機シリカ系へ、あるいはシリカ系からアルミナ系、チタニア系へ、さらに有機シリカ系から非シリカ系のハイブリッド型へと展開することで、メソポーラス材料の構造や機能、特性値が拡大することが期待できます。この論文の意義をより確かなものにするために、ハイブリッド型の非シリカ系メソポーラス材料の汎用的合成法が開発されれば、具体的にどのような新特性や優位性が期待できるか加筆してはいかかでしょう。さらに、可能であれば、最終的に、それは産業や社会ニーズにどのように貢献するのかといった可能性や期待も追記することで、読者がこの研究の目的を理解する際の手助けになると考えます。図1の下段にそれを示唆する表示があります。しかし、「シリカとアルミナ」、「遷移金属酸化物」、「カーボン」、「金属」、「ハイブリッド型材料」といった項目で整理されており、この論文にある「非シリカ系」、「ハイブリッド型非シリカ系」等の用語との整合性が必ずしもとれていません。

回答 (木村 辰雄)

ご指摘については、最終稿の第1章第3段落に加筆しました。また、図1下段の表示に関しても、同じ第1章第3段落に簡単な説明文を追加しました。

コメント・質問 (赤松 幹之)

第1章に、「この研究の第1の研究戦略は孔内環境の設計にある」と書かれており、その後に「親水的な表面構造を設計することを目標に設定した」とあります。これは「孔内環境の設計」の具体的な目標として「親水的な表面構造を設計」することとしたという理解でよろしいでしょうか?また、そのように目標を設定したのは、シリカ系では疎水的であること前提とした用途開発しかできないのに対して、親水的であることで用途が拡大することを期待していると理解しました。親水的であることで、図1のシリカの用途に比べて、どの領域に拡大すると期待できるか記述できませんでしょうか。

回答 (木村 辰雄)

ご指摘の通り、「孔内環境の設計」の具体的な目標としてこれまでに報告例がほとんどない「親水的な表面構造を設計」する取り組みを開始しました。シリカをはじめとするメソポーラス材料は孔内環境がすべて疎水的であり、しかも有機基を利用した用途開発においては、孔内環境がさらに疎水化してしまいます。そこで、最初に目指すべき目標として、その対極にある親水的なナノ空間の創成を目指しました。したがって、図1に記載したシリカ系メソポーラス材料の主な用途である触媒担体や吸着材としての用途を想定し、表面が親水的にできたことで、例えば、親水的な部位を含む化学物質が関与する反応効率を大幅に向上させる化学反応場としての用途開発を期待しています。

議論5 無機種の反応性制御に関して

質問 (清水 敏美)

要素技術の中でも、シリカ系から非シリカ系に変えた場合、①無機種の反応性制御をどのような戦略と戦術で行うかが重要になると思います。無機種の反応性を抑制するためには、「シリカ種の間有機架橋部分を挿入して、Si-O-Si結合を生成させる、またはホスホン酸

の間に有機架橋部分を入れ、ホスホン酸と金属種の相互作用を用いて P-O-M 結合を生成させる。その後、自己集合させ多孔性材料の前駆体がうまく生成すれば、いかに、コア部分を抽出するか(溶媒抽出、低温焼成、分解抽出等)が鍵となる。」という理解で間違いはないのでしょうか？

回答 (木村 辰雄)

無機種の反応性制御の理解について、特にご指摘の部分について補足しておきます。最終生成物において無機有機複合格にするために有機架橋部分を挿入した出発原料を使用します。しかし、原料の反応性に変化を与えることはありますが、制御することと直結する話ではありません。

例えば、シリカの場合は、クロロシラン (Si-Cl) を利用するか、アルコキシシラン (Si-OR) を利用するかで原料の初期の反応性が変わります。前駆体溶液を調製する際の pH で、反応初期の加水分解反応だけでなく、Si-O-Si 結合の生成速度も変わってきます。こうした反応が進行している間に、両親媒性有機分子の親水部と溶解ケイ酸種とが相互作用し、自己集合とともにさらに結合形成しながらケイ酸骨格が形成し、メソポーラスシリカの前駆物質が得られてきます。ケイ酸種の反応が進み過ぎるとケイ酸骨格の電荷密度が低下して相互作用している両親媒性有機分子が脱離し、周期構造の完全性が低下したメソポーラスシリカ前駆物質しか得られなくなります。

さらに反応性が高い非シリカ系酸化物では、無機種だけからなる沈殿が生成します。こうして、メソポーラス材料の前駆物質すら得られなくなります。ただし、金属リン酸塩のメソポーラス化の場合は、ほとんどの場合でリン酸がリン源として用いられ、金属源に塩化物 (M-Cl) を用いるか、アルコキシド (M-OR) を用いるかによって初期の反応性が変わってきます。この場合は、リン酸が一定量の比で共存していると、金属源とリン酸が先に反応 (P-O-M 結合が生成) して、その反応が比較的遅い場合は、その後の反応も比較的緩やかになります。P-O-M 結合の生成が速い場合は、非シリカ系の場合と同様に、溶液中での反応性を抑えなければならず、非水系で前駆溶

液を調製する等の工夫が必要となります。

以上を考慮しますと、リン酸の代わりに、この論文で述べたホスホン酸化合物を用いた合成でも、有機架橋部分の挿入はあくまでも機能設計も同時に行う(無機有機複合化を実現する)ためのものです。有機基の種類によってリン原子の電子密度が変わるため、原料の初期の反応性は変わります。その制御のため、この研究では、同一分子構造中にエステル部位 (P-OR) と水酸基 (P-OH) を共存させた出発原料を利用して反応性を制御するという新たな手法の提案に至っています。

議論6 最終目標に関して

コメント・質問 (赤松 幹之)

第3章の最初の段落で、「この高度な材料設計への道を開拓することを最終目標“合成研究での到達点”として設定した」とありますが、それは汎用な合成技術の開発を目標として設定したことを指しているのでしょうか?この段落の後半には、出発材料についての記述がありますが、これは汎用な合成技術につながる出発材料ということでしょうか?また、それが3.1節で紹介されている有機架橋ホスホン酸なののでしょうか?議論2において、私からの質問とも関連しますが、この辺りの論理展開が分かりにくいので、検討をお願いします。

回答 (木村 辰雄)

ご指摘の箇所の直下に記載しましたが、メソポーラス材料の研究分野において、より高度な材料設計への道を開拓することが、非シリカ系ハイブリッド型メソポーラス材料の合成研究の意義となります。その結果、孔内環境が任意に制御できることが証明されてくれば、その次の研究フェーズとして、高度な用途開発を進めることとなります。開発した材料に合わせた用途試験ではあまり意味がありません。そこで、合成研究に注力して、多様な孔内環境を示す一連のメソポーラス材料を提供できるようにすることを目指してきました。論理展開については、該当箇所について、修正を加えました。

燃えるごみの焼却残さを高付加価値材料に変換する技術開発

— 「熔融スラグ」の高比表面積シリカへの変換と シリカを原料とするケイ素化学産業基幹原料の製造 —

深谷 訓久^{1*}、片岡 祥²、崔 準哲¹

都市ごみ清掃工場から排出される熔融スラグを原料として、高い比表面積を持つシリカを製造する技術を開発した。この方法で得られるシリカは市販の合成シリカに匹敵する純度や比表面積を持ち、吸着剤やゴムの添加剤、コーティング剤等さまざまな用途への展開が期待できる。この研究成果は、これまでコンクリートやアスファルトの骨材としての利用に限定されていた熔融スラグを、新たに機能性材料として社会に循環させることを可能にするものである。この研究をスタートするきっかけとなった「シリカを原料とする機能性化学品の直接合成技術」の概略と研究シナリオおよび今後の展望について報告する。

キーワード: 熔融スラグ、シリカ、メソポーラスシリカ、ケイ素

High-value materials from incineration residues of burnable garbage

—Production of silica with high specific surface area from “molten slag” and direct transformation of silica to basic raw material for silicon chemical industry—

Norihisa FUKAYA^{1*}, Sho KATAOKA² and Jun-Chul CHOI¹

We developed a technology for producing silica with high specific surface area from molten slag discharged by a garbage disposal plant. The obtained silica has purity and specific surface area comparable to commercially available synthetic silica. Therefore, this silica can be used in various applications, such as in adsorbents, rubber additives, and coating agents. Previous use of silica recycled from molten slag was limited to aggregate for concrete or asphalt. This research result means that silica recycled from molten slag can now be used as a functional material. We also report on “direct synthesis technology of functional chemicals using silica” as the starting point for this research, the research scenario, and future prospects.

Keywords: Molten slag, silica, mesoporous silica, silicon

1 はじめに

1.1 この研究の概要

著者らは、株式会社三井 E&S エンジニアリング（以下、三井 E&S。この研究開始当初は三井造船株式会社。2018 年 4 月に分社化に伴い社名変更）と共同で、都市ごみ清掃工場から発生する熔融スラグを原料にして、高比表面積シリカを製造する技術を開発した。今回共同開発した技術を用いて得られた高比表面積シリカは、静脈産業（都市ごみ清掃工場）から発生する熔融スラグを動脈産業（化学産業や素材産業）の機能性材料として、有効利用することが可能となる。この論文では、開発の背景と熔融スラグ利用の

高度化を目指した技術の内容および今後の展望について報告する。

1.2 この研究のシナリオ

図 1 に研究開始のきっかけとなった社会課題に基づいた技術シーズと産業ニーズのマッチングから技術の発明につながる過程、および今後の展望に関するシナリオの全体像を示す。熔融スラグから機能性材料を製造する技術開発は、産業技術総合研究所（以下、産総研）が、新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）プロジェクトの中で社会課題である「ケイ素化学品製造の省エネルギー化」を目的に進めていたがこれとは別の社会課題である「自治

1 産業技術総合研究所 触媒化学融合研究センター 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第 5、2 産業技術総合研究所 化学プロセス研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第 5

1. Interdisciplinary Research Center for Catalytic Chemistry, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail: n.fukaya@aist.go.jp, 2. Research Institute for Chemical Process Technology, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan

Original manuscript received March 16, 2018, Revisions received July 15, 2018, Accepted July 18, 2018

体におけるごみ処理の高効率化（収益の改善）」や「分散型エネルギー施設のさらなる利用」などの解決を目指す、新しい研究課題への挑戦に発展したものである。図1のように整理し俯瞰してみると、研究の成果が次のステージに進む時は、異なる専門分野をもつ人的リソースとの連携が重要になる場合が多く、その連携のきっかけとして「成果の普及」の過程で、自身の研究成果の意義をわかりやすく発信し、広く社会に認知してもらうことがキーポイントになっていることがわかる。三井E&Sのごみ処理工程に係るプラント運営の課題について知見を有する専門家と、産総研触媒化学融合研究センターの化学反応および分子設計を専門とする研究者や、化学プロセス研究部門の化学工学あるいは表面化学を専門とする研究者とでは、専門フィールドがあまりにも異なるため、通常の学会発表や論文発表等の活動では、両者が直接意見交換する機会は得られない。研究開発の専門分野が細分化し、他分野あるいは科学技術全体を見渡すことがますます困難となりつつあるなか、産総研の保有する技術シーズを産業界の招待者に紹介するテクノブリッジフェアのような、産総研全体の研究を俯瞰し、体系的に外部発信しようとするイベントは非常に重要であると考えられる。振り返ってみると、全くの異分野の専門家同士がニーズとシーズのマッチングにより、双方が新しい課題に挑戦する共同研究をスタートできたこと自体

が、この研究のブレークスルーポイントと言っても過言ではない。

さらにこの研究では、三井E&Sと産総研の共同研究の成果について双方共同でのプレスリリースという形で、対外発表を行った。その結果、研究期間の前半では、新たな課題に取り組む共同研究の開始につながり、後半では「熔融スラグから製造したシリカを使ってみたい」という複数の企業からの問い合わせを受け、サンプルワーク開始に向けたユーザー開拓へと展開できた。次節以降ではこのシナリオの流れに沿って、詳細を報告する。

2 開発の背景

2.1 都市ごみ処理の現状

東日本大震災以降、自立分散型エネルギーの利用・普及拡大の重要性が高まっている^[1]。なかでも都市ごみ清掃工場は、ごみを処理する際に発生する熱エネルギーを活用することが可能であり、全国の地方自治体単位で設置された分散型のエネルギー回収施設として注目されている。一方で、清掃工場ではごみ焼却に伴って焼却灰が発生しており、主に最終処分場に埋められているが、一部の清掃工場では、焼却灰を減容するため、高温で熔融させた後に、水中で冷却して生じる「熔融スラグ」と呼ばれるガラス状固形物として回収する処理が行われている。2015年度の統

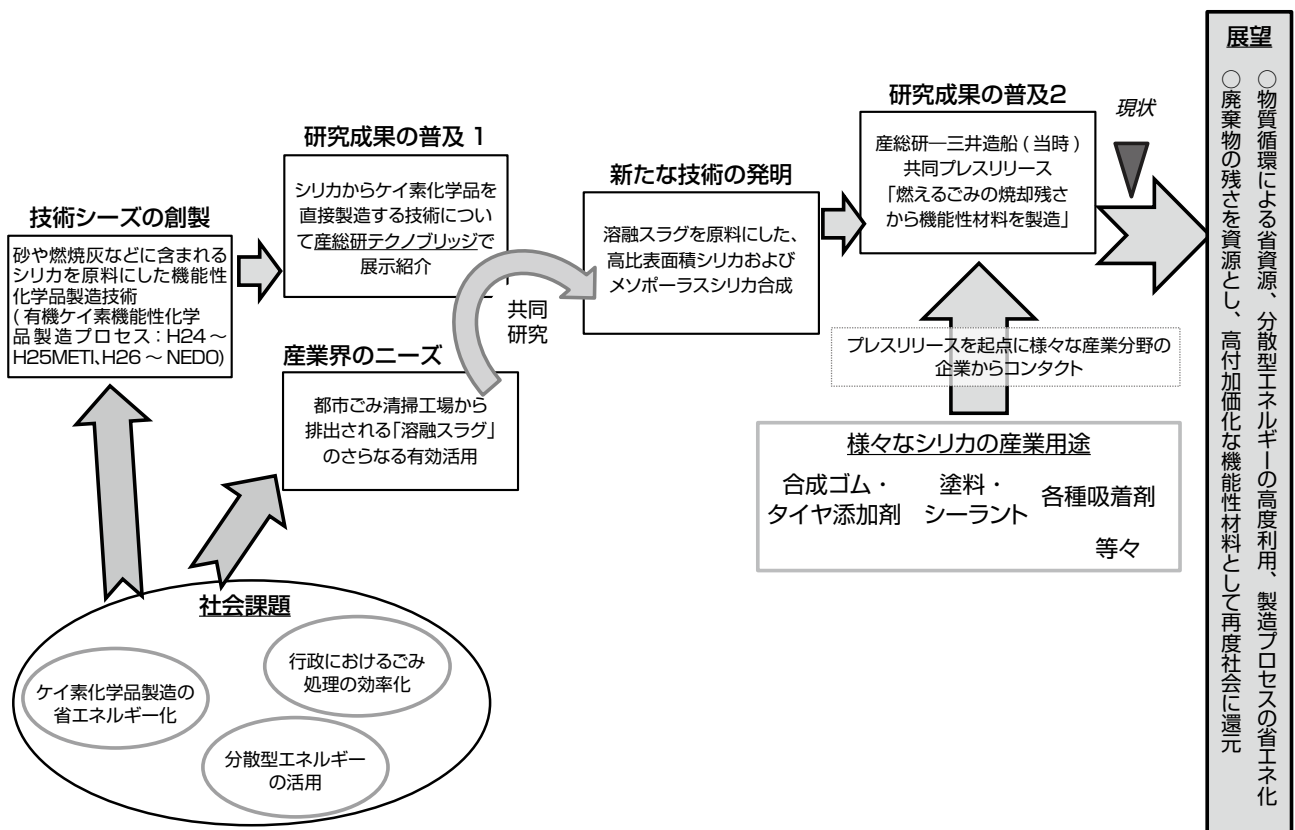


図1 この研究のシナリオと今後の展望

計では、都市ごみ清掃工場は日本全国で 1,141 施設あり、その処理様式はいくつか存在するが、溶融スラグを生産する溶融施設を有するタイプの施設は 220 施設となっている^[2]。これは都市ごみ清掃工場施設全体の 20 % 弱だが、その発電電力量は、3,645 GWh であり、これは都市ごみ清掃工場の総発電電力量 8,175 GWh の約 45 % を占め、エネルギー施設としては重要な位置付けとなっている。

2.2 溶融スラグの特徴

ごみ由来の溶融スラグの主成分は SiO₂、CaO、Al₂O₃ であり、これらの組成比は地域や季節によっても変動はあるものの、概ねこの 3 成分の合計が組成中の約 70 wt% となっており、なかでも SiO₂ は 40 ~ 50 % 程度を占める。国内の一般廃棄物を処理する都市ごみ清掃工場での溶融スラグ生産量は、約 80 万トン/年 (2015 年度) に達している (図 2)。2006 年には、溶融スラグの安全性を明確にし、有効利用を促進することを目的として、二つの JIS 規格 (JIS A 5031 と JIS A 5032、それぞれコンクリート用骨材と道路用) が制定されている。品質項目として、物理的性質 (密度、吸水率、すりへり減量等)、化学的性質 (組成等) および安全性試験等 (有害物質の溶出量・含有量) がある。現在の溶融スラグの用途は主に、土木資材であり、道路用骨材が約 34 %、コンクリート用骨材が約 17 % とインフラ用途が大半を占める (図 3)^[2]。

2.3 溶融スラグのさらなる有効活用に向けて

現在は、震災復興や 2020 年の東京オリンピック・パラリンピックに向けたインフラ整備工事に伴い、上記のような道路やコンクリート用骨材等の土木資材全般の需要が高い時期となっているが、それ以降は、ごみ清掃工場からの溶融スラグの排出量が需要に対して過剰になるのではないかと懸念されている。したがって、溶融スラグから高付加価値な材料を創出し、従来よりも幅広い分野での有効利用を

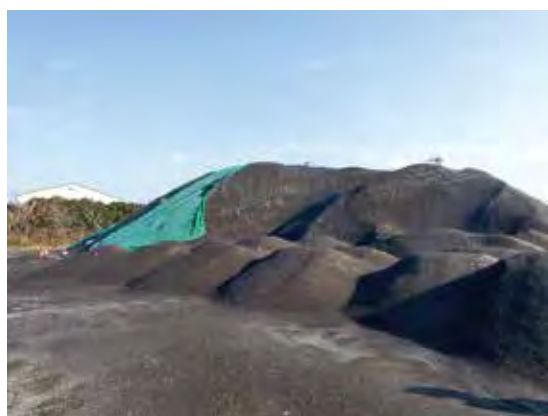


図2 溶融スラグ保管ヤード

図るための技術開発が求められている。三井 E&S は、エンジニアリング企業としてごみ処理清掃工場の建設、および建設後の施設の運営・メンテナンスを自治体等から受託することを事業としている。同社はこの事業展開のなか、上記の社会課題としての溶融スラグの有効活用手法開発について強いニーズを持ち、その解決に資する大学・公的研究機関等の技術シーズを探索していた。

一方、産総研触媒化学融合研究センターでは、NEDO のプロジェクト「有機ケイ素機能性化学品製造プロセス技術開発」(2012 年~2021 年予定) において、幅広い産業分野で使用されているシリコンをはじめとするさまざまな有機ケイ素材料の研究開発を行っている。著者らは、2015 年 10 月 22 ~ 23 日に行われた産総研テクノブリッジにおいて、上記 NEDO プロジェクトの研究成果についてポスター展示を行った。三井 E&S の研究開発責任者が、来所し、展示中の「シリカを原料とするケイ素基幹化学品の直接合成」の内容に高い関心を持った。その後コンタクトがあり、エネルギー施設から排出される燃焼灰や溶融スラグの有効活用の可能性について協議を重ね、共同研究を開始した。次節では、この共同研究を開始する前段となった NEDO プロジェクトの成果で創出した技術シーズの概要を説明する。

2.4 NEDO「有機ケイ素機能性化学品製造プロセス技術開発」の概要

ケイ素は、地球の表層を構成する成分のうち、酸素に次いで豊富に存在する元素であり、自然界では、岩石や砂の中の主成分としてシリカの状態で存在している。ケイ素を含む材料は、我々の身の回りで非常に多く、さまざまな形態で利用されている。シリコン、シランカップリング剤に代表される有機ケイ素化学品は、耐熱性、耐候性、耐薬品性、絶縁性等の観点で優れた物性を有し、自動車、航空

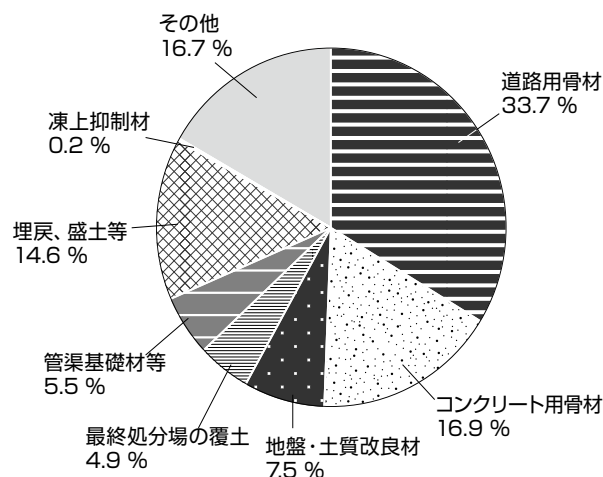


図3 溶融スラグ (ごみ由来および下水汚泥由来) の用途の現状^[2]

表1 さまざまな天然原料からテトラエトキシシランを直接合成した結果

シリカを含む原料	原料中のシリカ純度	テトラエトキシシランの収率
砂 ^a	90 %	51 %
もみ殻燃焼灰	93 %	78 %
稲わら燃焼灰	84 %	72 %
産業副産物 ^b	95 % 以上	72 %

a: 青森県夏泊半島産珪質頁岩を粉碎（株式会社アサカ理研より提供）

b: 合成石英製造時の副生シリカ（クアーズテック株式会社より提供）

宇宙、建設、エレクトロニクス、医療や化粧品等非常に幅広い産業分野で用いられる機能材料である。また、テトラアルコキシシランと呼ばれる化合物（例えばテトラエトキシシランは、TEOS/テオスという略称で良く知られている）は、主に無機ケイ素材料の原料として幅広く利用されていて、機能性セラミックス、ガラス、合成石英等の光学材料、電子デバイス用の保護膜等を作る際に欠かせない基幹物質である。

さまざまな製品の材料に用いられる含ケイ素化学品は、いずれも製造工程の第1段階において、出発原料である天然のケイ石を高温で炭素と反応させ、金属ケイ素に還元する必要がある。これは大量の電気エネルギーを消費し、同時に二酸化炭素(CO₂)も大量に排出する工程である。このことが、ケイ素という元素自体は地球上に豊富に存在する資源であるにもかかわらず、ケイ素を含む化学材料が比較的高価な製品となっていることの主要因である。国内にも豊富に存在し、かつ安価なシリカから含ケイ素化学品を直接合成する技術の開発が望まれている(図4)。

著者らは金属ケイ素を経由しない新たな有機ケイ素化学品製造方法の開発を目指して、シリカから直接テトラアルコ

キシシランを合成する技術の開発に取り組み、高効率な反応プロセスの開発に成功した。この技術の特徴は、非常に安定な酸化物で通常は化学変換を行うことが困難な物質であるSiO₂に対して、反応システムの中に水を除去できるユニットを組み込んで反応中に継続的に水を除去できるプロセスを設計し、直接反応で有用化学品に変換できることである。使用する無機脱水剤であるモレキュラーシーブは固体状であるため、反応後の回収が容易で、加熱や減圧で再生して繰り返し使用できるため、製造コスト低減にもメリットがあると考えられる(図5)^{[3]-[6]}。

シリカを含有する出発原料として、「砂(青森県夏泊半島産の珪質頁岩を粉碎して得られたもの)」、「燃焼灰(もみ殻や稲わらを燃焼させた後に残ったもの)」、「産業副産物(合成石英を製造する際に副生するシリカ)」を用いた。これらにエタノール、触媒として水酸化カリウムを加え、無機脱水剤としてゼオライトの一種であるモレキュラーシーブ3A(細孔径0.3 nm)の存在下で加熱し、3時間反応させた。反応結果を表1に示す。砂からは、含有するシリカ基準で51%の収率でTEOSが生成した。また農業副産物として未活用の資源とも言えるもみ殻や稲わらを燃焼させた後に



図4 砂(SiO₂)からの有機ケイ素原料の製造と有機ケイ素材料を含む多様な製品群

残った灰は比較的高いシリカ純度を有しており、これらを原料として合成すると72～78%の高い収率でTEOSを得ることができる。また合成石英製造時の副産物を回収して原料として利用すると、72%の収率でTEOSが得られた。

この技術の開発過程で困難であった点は、モレキュラーシーブを本反応に適用可能にする発想の転換と反応装置の設計である。シリカとアルコールからテトラアルコキシシランを合成するための最も理想的なプロセスは、図5の上部に示したように極めてシンプルな化学反応式で記述できる。しかし実際には、この反応は化学平衡によって支配されており、シリカが熱力学的に安定な物質であるために生成したテトラアルコキシシランと水が反応して、原系のシリカとアルコールに戻る逆反応の方が圧倒的に進行しやすく、収率よくテトラアルコキシシランを得ることは困難である。化学平衡を望みの方向にシフトさせるためには、生成する水を反応系から逐次的に取り除く、脱水手段が鍵となる。モレキュラーシーブは汎用的に使用される脱水剤で、通常は脱水する対象(液体や気体)に対して直接接触させて用いられる。脱水力が強い一方で比較的容易に再生・再利用することも可能なため、これが利用できれば反応の高効率が期待される。しかしモレキュラーシーブは物質としては結晶性の「アルカリ金属アルミノシリケート(アルミナ

とシリカの複合物のアルカリ金属塩)」であり、その構造中にシリカのユニットを持つ。したがって、シリカを分解することを目的とする反応系にモレキュラーシーブを直接投入すると、その構造自体が崩壊するため、研究開始当初は、本反応には使用できないという先入観を持っており、反応系に直接投入可能な有機脱水剤の探索を行っていた^[4]。

一方で、NEDOプロジェクトでの研究の進捗に伴い、実験室レベルではなく工業的な規模で新しい反応プロセスを適用するためには、目的物との分離と再生・再利用が容易で脱水剤を使用可能な、よりシンプルなプロセスの開発の必要性を強く意識するようになり、発想を転換して反応条件では崩壊してしまうモレキュラーシーブを使いこなすためのアイデアを追求した。反応装置を工夫して、図6の様に水酸化カリウム触媒存在下でシリカとアルコールを反応させる容器(下部)とモレキュラーシーブが脱水剤として機能する容器(上部)を分離した。この反応装置では、下部容器からアルコールと水が気化して、上部のモレキュラーシーブに移行して、水のみが吸着除去されながら還流する。したがって、シリカのSi-O-Si結合の切断を促進する水酸化カリウム触媒とモレキュラーシーブは接触することがないので、構造崩壊することなく逐次的に水を除去することができるようになった。



図5 シリカを原料とする有機ケイ素原料の直接合成

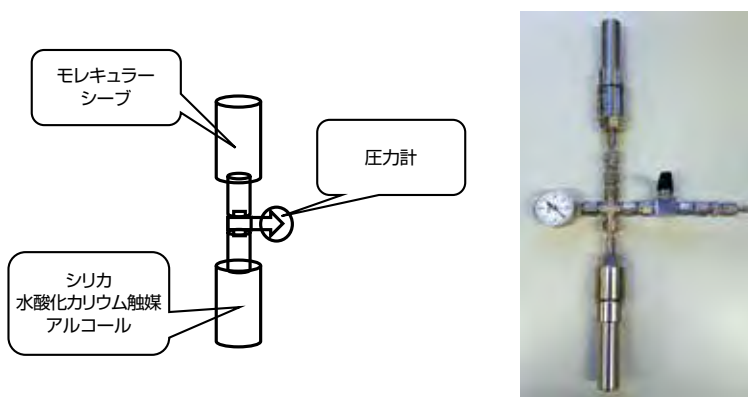


図6 テトラアルコキシシラン合成の反応容器の模式図とその写真^[3]

3 溶融スラグを原料とする高付加価値材料の製造

3.1 溶融スラグから高比表面積シリカを製造する技術

三井E&Sは、上述のNEDOプロジェクトにおける研究成果が「溶融スラグの主要構成成分でもあるシリカを高度に利用」しつつ、グリーンサステナブルケミストリー（GSC）の実現を指向するものであることに着目し、溶融スラグのさらなる有効利用、特にコンクリート用骨材等のいわゆる「静脈産業」での活用でなく、新たな価値を付与した機能性素材等の「動脈産業」での活用を目指した研究を産総研と共同で開始した。

都市ごみ清掃工場から発生した溶融スラグを、特定の条件下で酸性の溶液を用いて化学的に処理することで、溶融スラグ中に含まれるシリカ成分が、白色の固体として沈降することを新たに見いだした。この白色固体をろ過等により回収すると、純度93～98%を超えるシリカが容易に得られる（図7）。

この反応について推定されるメカニズムを考察する。2.2節で述べた通り、溶融スラグは、 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 を主成分としており、ケイ素成分は純粋なシリカではなく「ケイ素とアルミニウムの複合酸化物のカルシウム塩」として存在していると推定される。このカルシウム塩は、酸による中和作用を受け、アルミニウムやカルシウムはイオンとして酸水溶液中に可溶化するとともに、ケイ素はオルトケイ酸もしくはシリカゾルという状態の低分子シリカ状態を経由し、酸による触媒作用で脱水縮合反応によって高分子量化が進み、シリカがゲル化して不溶な白色固体として沈降するものと考えられる。すなわち本反応系において、酸はシリカ以外の成分をイオンとして可溶化する作用と、ゾル-ゲル反応によるシリカ生成の触媒としての作用という二つの役割を果たしている。ゾル状態という低分子量かつ高分散なシリカ状態を経由してから縮合が進むため、最終的にゲル化して得られるシリカは高い比表面積を持つことが予想される。

実際に窒素ガス吸着測定の結果より、算出した比表面積はおおよそ $600 \text{ m}^2/\text{g}$ であり、これは高比表面積材料として市販されている合成シリカ材料と同等以上の値である。したがって、この技術によって得られる溶融スラグ由来の高比表面積シリカについても、現在工業的に合成シリカが使用されている各種吸着剤、タイヤや合成ゴム等の添加剤、触媒担体、化粧品、研磨剤等さまざまな用途展開が期待できる。またシリカが高い比表面積を有することは、化学反応の原料として考えた場合、アルコールや塩基触媒等の反応対象物と接触できる反応点を多く持つこととなるため、2.4節で述べたテトラアルコキシシラン製造の原料としての有用性も期待できる。

現在工業的に広く用いられている高比表面積シリカは、四塩化ケイ素を高温の水素炎中で気相反応させて製造されるヒュームドシリカや、ケイ酸ナトリウムと硫酸との反応を液相で行って製造される沈降法シリカ（ホワイトカーボンと呼ばれることもある）などが知られている。これらの製造方法は四塩化ケイ素やケイ酸ナトリウムといったエネルギーを多く消費し、一定のコストのかかる工程で製造される物質を原料としている。一方、今回開発した技術では、我々の生活で排出される燃えるごみを処理する際に、不可避免的に発生する残さを原料として利用することができ、またその価格は、JIS規格を満足する品質のものであっても200円/トン前後で圧倒的に安価である。したがって、従来の工程に比べ、シリカの製造時における省エネルギー化や、二酸化炭素排出削減、シリカ製品の低コスト化への貢献が期待できる。

3.2 溶融スラグから規則性ナノ多孔体メソポーラスシリカを製造する技術

近年、メソポーラスシリカと呼ばれる規則的で均一な孔径 $2 \sim 50 \text{ nm}$ の細孔（メソ孔）を持つシリカ多孔体材料が注目されている。メソポーラスシリカは、一般的に溶液中で界面活性剤が自己集積してできる構造をメソ孔の鋳型



図7 原料の溶融スラグ（左）と合成した高比表面積シリカ（右）

として利用し、その周囲にゾルーゲル反応によってシリカを形成することによって合成される。メソポーラスシリカは、規則性構造を有し、均質なナノ空間が材料内部に構築されていることから、既存の多孔質材料では実現できないような高選択的反応場として期待され、高機能調湿剤、薬物伝達システム、酵素担体としての応用展開について世界中で盛んに研究が行われている高付加価値な材料である^[7]。

前節で述べた溶融スラグから得られるシリカは、高い比表面積を有しているが、特定の細孔構造を持たない。そこで溶融スラグをさらなる高機能・高付加価値な材料に変換する技術の開発を目的としてメソポーラスシリカの合成に取り組んだ。

前節の高比表面積シリカ得るための化学的処理を、空孔をつくるための鑄型となる界面活性剤を共存させた状態で行い、得られた白色固体を550℃で焼成して鑄型を焼き飛ばすことで、規則的なナノサイズの空孔を有するメソポーラスシリカを得ることができた。溶融スラグから生成したメソポーラスシリカの比表面積は675 m²/g、平均細孔径は9.2 nmであった。図8に得られたメソポーラスシリカの電子顕

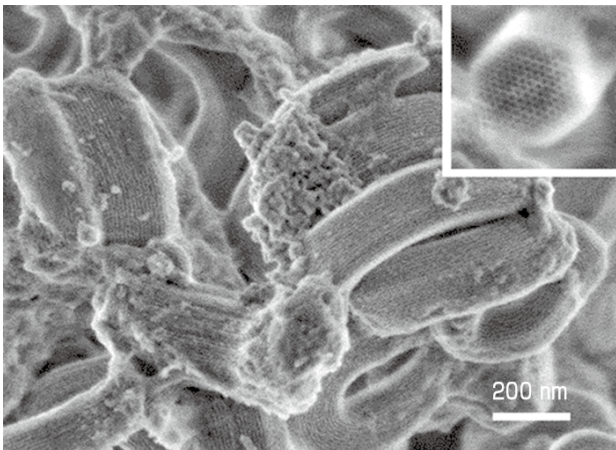


図8 溶融スラグから合成したメソポーラスシリカの電子顕微鏡写真

微鏡写真を示す。従来知られているメソポーラスシリカは、コイダルシリカやテトラアルコキシシラン等元々純度の高い、比較的高価なケイ素原料から合成されている。一方、今回の技術では、溶融スラグを前処理せず、カルシウムやアルミニウム等の不純物を多く含んだ状態のままであっても、反応時間や反応温度の工夫によって、鑄型となる界面活性剤の自己集積が進む条件を見だし、従来知られているメソポーラスシリカと同様の比表面積、細孔径等の品質を持つ材料を合成することに成功した。

産総研と三井E&Sは、これらの共同研究に基づく成果を2017年7月25日に、双方からプレスリリースを行った(図9)^{[8][9]}。このプレスリリースの内容を見て興味を持った複数の化学産業、非鉄金属産業、窯業や商社等多様な分野の企業からコンタクトがあり、一部の企業とは高比表面積シリカのサンプルワーク等に向けた準備が進んでいる。

4 今後の展望

今回開発した技術は、現在利用が限られている溶融スラグに対して、高比表面積シリカを含む幅広い応用につながり、今後の溶融スラグの高度利用の可能性を拡大することができる。今後は、さらなる製造プロセスの改良とともに、製造のスケールアップに取り組み、数年後の実用化を目指す。この技術の実用化により、廃棄物残さの有効活用による高付加価値化、物質循環による省資源化等のアウトカムに繋げていきたいと考えている。

5 謝辞

この論文の内容の中で、シリカを原料とした有機ケイ素原料の直接合成に関わる研究は、NEDO「有機ケイ素機能性化学品製造プロセス技術開発」(平成26年度～現在)の一環として行われたものである。



図9 燃えるごみの焼却残さである溶融スラグを高付加価値材料に変換

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁：総合エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会資料，2015年4月。
- [2] エコスラグ利用普及委員会：エコスラグ有効利用の現状とデータ集(2016年度)，一般社団法人日本産業機械工業会(2016)。
- [3] N. Fukaya, S. J. Choi, T. Horikoshi, S. Kataoka, A. Endo, H. Kumai, M. Hasegawa, K. Sato and J.C. Choi: Direct synthesis of tetraalkoxysilanes from silica and alcohols, *New Journal of Chemistry*, 41 (6), 2224–2226 (2017).
- [4] N. Fukaya, S. J. Choi, T. Horikoshi, H. Kumai, M. Hasegawa, H. Yasuda, K. Sato and J.C. Choi: Synthesis of tetramethoxysilane from silica and methanol using carbon dioxide and an organic dehydrating reagent, *Chemistry Letters*, 45 (7), 828–30 (2016).
- [5] T. T. H. Nguyen, S. Kataoka, N. Fukaya, K. Sato, J.C. Choi and A. Endo: Feasibility study of new synthesis route of tetraethoxysilane from rice hull ash, *Computer Aided Chemical Engineering*, 40, 703–708 (2017).
- [6] T.T.H. Nguyen, N. Fukaya, K. Sato, J.C. Choi and S. Kataoka: Technoeconomic and environmental assessment for design and optimization of tetraethyl orthosilicate synthesis process, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57 (6), 2192–2199 (2018).
- [7] X. Ma, H. Feng, C. Liang, X. Liu, F. Zeng and Y. Wang: Mesoporous silica as micro/nano-carrier: From passive to active cargo delivery, a mini review, *Journal of Materials Science & Technology*, 33 (10), 1067–1074 (2017).
- [8] 産総研プレスリリース(2017): 燃えるごみの焼却残さから機能性材料を製造, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170725/pr20170725.html, 閲覧日2018-03-16.
- [9] 三井E&Sプレスリリース(2017): 燃えるごみの焼却残さから機能性材料を製造, <https://www.mes.co.jp/archive-news/press/2017/20170725.html>, 閲覧日2018-03-16.

執筆者略歴

深谷 訓久（ふかや のりひさ）

2002年4月筑波大学大学院博士課程化学研究科修了（博士（理学））。キャンノン株式会社を経て、2007年4月産総研に入所。入所後、分子触媒の固定化技術、砂を原料とする有用化学品の直接製造技術の開発に従事。専門は、有機金属化学、触媒化学。この論文では、熔融スラグから高比表面積シリカの合成と共同研究全体の統括を担当した。



片岡 祥（かたおか しょう）

2003年5月ウィスコンシン大学—マディソン校環境化学工学専攻博士課程修了（Ph.D.）。テキサス A&M 大学化学科博士研究員を経て、2006年4月産総研に入所。入所後、シリカを含む無機酸化物の多孔質材料・機能性材料の開発に従事。専門は、化学工学、表面化学。この論文では、熔融スラグからメソポーラスシリカの合成と評価を担当した。



崔 準哲（ちえー じゅんちよる）

1998年3月東京工業大学総合理工学研究科博士課程修了（博士（理学））。日本学術振興事業団科学技術特別研究員を経て、2000年4月物質工学工業技術研究所（2001年4月、産総研へ組織変更）に入所。入所後、二酸化炭素の変換技術、固定化触媒設計・合成技術、砂から有用化学品への変換技術の開発に従事。専門は、有機金属化学、有機合成化学、触媒化学。この論文では、熔融スラグから高比表面積シリカの合成実験を担当した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（小林 直人：早稲田大学）

この論文は、ごみ焼却場から生成される熔融スラグの有用活用を目指して、技術開発とその応用、さらには産業界との連携による実用化の観点から極めて意義深い研究成果を示していると言えましょう。また「静脈産業」から「動脈産業」への変換という概念も極めて魅力的です。一方、要素技術の詳細とその相互の関係が初稿では明確ではありませんでしたが、最終稿ではそれらが明らかになり全体が分かりやすくなりました。

コメント（池上 敬一：産業技術総合研究所）

この論文は、ごみの焼却残さという負の価値を有するモノ（処分費用が必要）を原料として、有価物、それも静脈産業の中での価値ではなく動脈産業において価値を持つ高機能材料を産み出す技術の開発について述べています。従来のPET再生や貴金属回収とは異なり、単に分別し高純度化するのではなく、化学平衡理論に基づいて賢く合成を行うところが革新的です。著者が述べているように、「研究の成果が次のステージに進む時は、異なる専門分野をもつ人的リソースとの連携が重要になる」ことを示す好例であり、シンセシオロジー誌に掲載する十分な価値があると考えられます。

議論2 異分野人材との連携

コメント（池上 敬一）

「研究の成果が次のステージに進む時は、異なる専門分野をもつ人的リソースとの連携が重要になる」というのは、重要な指摘だと思います。この「異なる専門分野をもつ人的リソースとの連携」について、該当する各小節においてもう少し具体的にご説明いただくと、読者の興味が増すと思います。

回答（深谷 訓久）

「1.2 この研究のシナリオ」の節に以下の追記を行いました。「三井E&Sのごみ処理工程に係るプラント運営の課題について知見を有する専門家と、産総研触媒化学融合研究センターの化学反応および分子設計を専門とする研究者や、化学プロセス研究部門の化学工学あるいは表面化学を専門とする研究者とでは、専門フィールドがあまりにも異なるため、通常の学会発表や論文発表等の活動では、両者が直接意見交換する機会を得られない。（中略）産総研の保有する技術シーズを産業界の招待者に紹介するテクノブリッジフェアのような、産総研全体の研究を俯瞰し、体系的に外部発信しようとするイベントは非常に重要であると考えられる。振り返ってみると、全くの異分野の専門家同士がニーズとシーズのマッチングにより、双方が新しい課題に挑戦する共同研究をスタートできたこと自体が、この研究のブレイクスルーポイントと言っても過言ではない。」

議論3 要素技術の関係

コメント (小林 直人)

「2.4 NEDO「有機ケイ素機能性化学品製造プロセス技術開発」の概要」の趣旨は、シリカからのテトラアルコキシランの生成であって、必ずしも初稿の副題の「高比表面積シリカ」の製造に寄与しているのではないようです。そうすると今回の副題の内容に寄与したのは、「3 溶融スラグを原料とする高付加価値材料の製造」のみとなります。あえて両者の要素技術の成果を記述するなら、副題や研究目的を変更すべきですし、前者が後者への大きな寄与をしているのであれば、その関係を記述すべきだと思います。

回答 (深谷 訓久)

ご指摘に沿って、溶融スラグからケイ素化学産業のテトラアルコキシラン (ケイ素化学産業基幹原料) までをフォーカスに含む副題にしました。また、その関係性を明瞭にするため、3.1 節の最後に、「またシリカが高い比表面積を有することは、化学反応の原料として考えた場合、アルコールや塩基触媒等の反応対象物と接触できる反応点を多く持つこととなるため、2.4 節で述べたテトラアルコキシラン製造の原料としての有用性も期待できる。」を追記しました。(実験的なエビデンスもあるのですが、NDA があるので、コンセプトのみの記述とさせていただきます)

議論4 詳細戦略

コメント (池上 敬一)

「都市ごみ清掃工場から発生した溶融スラグを、特定の条件下で酸性の溶液を用いて化学的に処理することで、溶融スラグ中に含まれるシリカ成分が、白色の固体として沈降することを新たに見いだした。」とありますが、いささか唐突感があります。すべてを明かすことはできないでしょうが、どのような戦略で実験を進めていってこの発見に

至ったかについて、少し触れることはできないでしょうか？

回答 (深谷 訓久)

3.1 節の冒頭付近に、「この反応について推定されるメカニズムを考察する。(中略) すなわち本反応系において、酸はシリカ以外の成分をイオンとして可溶化する作用と、ゾル-ゲル反応によるシリカ生成の触媒としての作用という二つの役割を果たしている。ゾル状態という低分子量かつ高分散なシリカ状態を経由してから縮合が進むため、最終的にゲル化して得られるシリカは高い比表面積を持つことが予想される。」として、この化学的処理に関する反応機構の考察を追記致しました。

議論5 技術高度化

コメント (池上 敬一)

3.2 節でさらに技術を高度化させていますが、この際のニーズと課題は何だったのでしょうか？ 言い換えると、高比表面積というだけではなく、多孔質を狙わなければならなかった理由は何でしょう？ (比表面積の向上は1割強にとどまっていますが、多孔質となったことで売価の大幅向上が期待できるのでしょうか?) また、化学的処理は酸性溶液中で行われるとのことですが、高イオン強度化で界面活性剤を機能させるためには技術的にも壁があったのではないのでしょうか？

回答 (深谷 訓久)

メソポーラスシリカに関する課題・ニーズが分かるよう、メソポーラスシリカの材料としての期待について追記し、それらが記載されている総説を引用に追加致しました。また溶融スラグを原料とする場合には、界面活性剤を機能させるためにノウハウが必要である旨のコメントを追記致しました。

機械部品の加工穴内壁面傷のレーザ検査装置の開発・商品化

岡田 三郎^{1*}、中村 修¹、江崎 泰史²

自動車等の工業製品製造においては、部品の全数外観検査が必須となっており、中でも目視検査で見落としやすい光沢面や鏡面の微細な傷欠陥の自動検査技術の確立が求められている。この論文では、高品位の加工が施された大小さまざまな径の穴内壁面の傷欠陥検査の自動化と高精度化を実現するため、産総研の半導体レーザによる光回折を応用した技術シーズを活用して革新的な傷検査装置を開発し、“穴ライザー”として製品化した経緯、意義、今後の展開について報告する。

キーワード: 傷検査装置、半導体レーザ、回折光、光ファイバー、シリンダーボア

Development and commercialization of laser inspection system to detect surface flaws of machined holes

Saburo OKADA^{1*}, Osamu NAKAMURA¹ and Yasufumi ESAKI²

An indispensable aspect of manufacturing is the external inspection of all product parts. For example, in the manufacturing of cars, autonomous inspection technology is required to detect minute flaws on glossy or mirror surfaces, which are easily overlooked by visual inspection. In this paper, we report on the history, significance, and future development of an innovative defect inspection system, “ANALYZER,” which has been developed and commercialized. This system utilizes AIST technology—optical diffraction by semiconductor laser—to realize accurate, autonomous inspection of inner wall surfaces of high quality machined holes of various sizes.

Keywords: Flaw defects inspection system, semiconductor laser, diffracted light, optical fiber, cylinder bore

1 はじめに

自動車等に組み込まれる部品が設計通りの機能・性能を発揮することを保証するためには、部品の外観検査が不可欠であり、将来の人手不足を見越して多大なコストをかけて検査の自動化が進められているものの、目視検査に頼らざるを得ない例も多く残っており、さらなる高性能の自動検査技術へのニーズが高い^[1]。自動車部品の中でも、重要保安部品であるシリンダーボアや自動変速機用バルブボディ、油圧シリンダー等に開けられた大小さまざまな口径の加工穴内壁面の検査は検査基準が特に厳しいことから目視検査がおこなわれているが、見落としが許されないため、0.1 mm程度の微細な傷欠陥を確実に検出する高精度かつ高速の自動検査技術が求められ、これまでに渦電流式、カメラ撮像式、レーザ反射式等のさまざまな方式の装置が開発されてきたものの、いずれも現場の要求を満たすレベルになかった。岡田らは、小型軽量で扱いやすい半

導体レーザを用いた先進的な工業計測器の研究開発に取り組み、従来の計測技術では困難であった光沢面や鏡面の形状を測定可能な新しい装置を開発してきた。この経験を活かし、地域企業と密接に連携して、さまざまな口径の加工穴内壁面の微細な傷欠陥を高速かつ高精度に検査する装置の開発に取り組み、レーザ傷検査装置の開発・商品化に成功した。

この報告では、レーザ傷検査装置開発の技術基盤となる半導体レーザを用いた光沢面や鏡面の形状を測定可能な装置開発について述べた後に、地域企業からの技術相談をきっかけとして、高品位鋼板の表面傷検査を皮切りに、円筒内外面および大小さまざまな径の加工穴の内面検査と対象物に合わせて独創的なレーザ傷検査装置を開発し、商品化に至った経緯とその間の連携活動について紹介し、その意義と今後の展開について言及する。

1 産業技術総合研究所 中国センター 〒739-0046 東広島市鏡山 3-11-32、2 シグマ株式会社 〒737-0012 呉市警固屋 9-2-28
1. Chugoku, AIST 3-11-32 Kagami-yama, Higashi-hiroshima 739-0046, Japan * E-mail: s-okada@aist.go.jp, 2. Sigma Corporation 9-2-28 Kegoya, Kure 737-0012, Japan

Original manuscript received May 18, 2018, Revisions received July 10, 2018, Accepted July 12, 2018

2 レーザ傷検査装置開発に至る経緯

1980年以降、紫外光から近赤外光までの広い波長範囲で発光する半導体レーザ素子が次々に開発されレーザ光の産業応用が急速に拡大し、工業計測分野においても従来の大型で衝撃振動に弱いガスレーザに代えて、小型軽量で扱いやすい半導体レーザを用いた計測技術へのニーズが高まってきたことが動機となって、岡田らは、半導体レーザ光の特徴を有効に活用した新規な工業計測技術に関する研究開発に力を入れてきた。

まず、光沢のある高品位な自由曲面の金型や部品の形状計測を安定かつ高精度に行うため、大阪大学と共同で同軸線形変位法に基づく形状計測装置の開発に取り組んだ。同軸線形変位法は、正反射光の影響を受けにくく、変位と出力の関係が線形で、測定範囲全域で精度が不変などの利点があり実用化が期待されてきたが、図1に示すように、レーザ光特有のスペックル^[1]による精度低下が実用化を妨げていた^[2]。この問題の解決を図るため、岡田らは、図2に示すように、受光部にエアセンサに代えて高

密度のラインセンサを用い、それを回転させるユニークな機構を考案し、ラインセンサを200 rpmで回転し空間平均化を行うことでスペックルを大幅に低減できることを実証した。すなわち、図3に示すように、ラインセンサの回転によりスペックルが低減し画質が改善されたことで、計測範囲150 mmにおいて0.1 mm以内の精度で形状を計測することが可能になり実用化の目途が立った^[3]。

ついで、光沢面よりさらに難易度の高い鏡面物体の非接触三次元計測装置の開発に取り組んだ。鏡面物体はレーザ光を全反射し反射点が全く見えないため、表面形状を計測するのが極めて困難であり、平面以外の曲面物体の形状を計測可能な測定器は見当たらなかった。そこで、ドーム状に配置した複数の位置検出素子(PSD)を回転させて三次元空間内の複数の位置でレーザ反射光をとらえ、光線追跡法に基づいて反射点の三次元座標を算出する手法を考案した。図4に開発試作した鏡面物体計測装置^[5]の外観を示す。2組4個のPSDを上下方向にずらして設置して三次元空間の2カ所でレーザ反射光をとらえることで三次

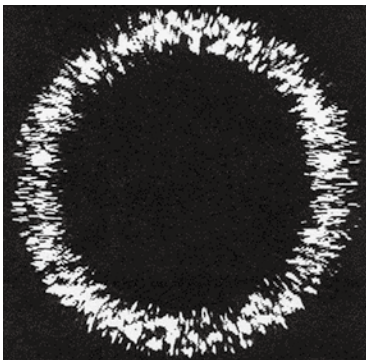


図1 エリアセンサによるレーザ円環光像

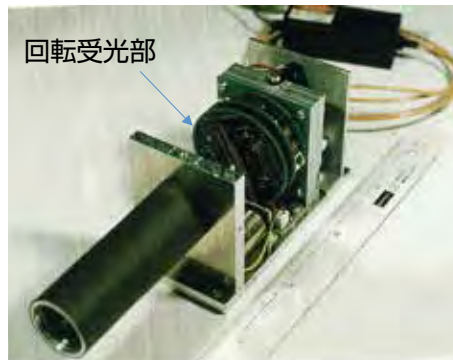


図2 開発試作した形状計測装置

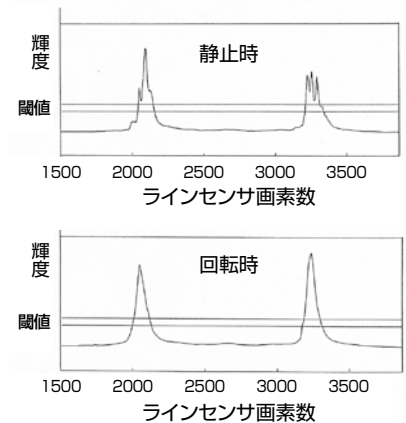
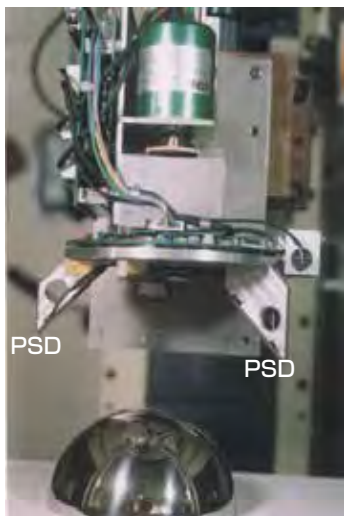
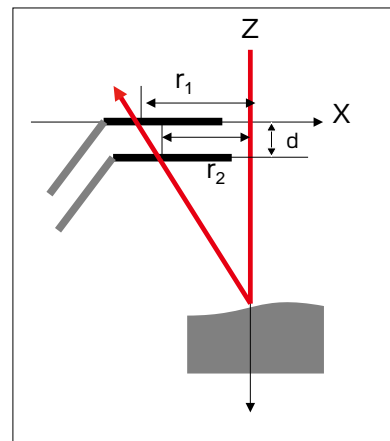


図3 ラインセンサ回転の効果



PSDの配置



測定原理

図4 鏡面物体計測装置

元空間の2点を通るレーザー光線の式を求め、照射光との交点を仮想の反射点とみなすことで形状計測が可能になった^[4]。この技術は特許申請し知財として登録され、2000年の科学技術庁の注目発明に選定された。（特-317857、1999.2）

半導体レーザーを工業計測に活用するため新しい計測技術の研究開発を進めていた矢先、地元の鋼板製造会社から光沢性の高い圧延鋼板表面の微細な傷欠陥の検査装置に関する技術相談を受けたのがきっかけとなって、レーザー光を用いた検査技術の開発に踏み出すことになった。鋼板メーカーの要望は、高品位の圧延鋼板表面のミクロンオーダーの微小傷の検出、圧延痕と傷との識別、検出した傷の傷種の判別等であった。

新規に開発したレーザー傷検査装置^[5]を図5に示す。開発のポイントは、レーザー光の投光系に加えて受光系にも放物柱面鏡を用い、測定幅内のすべての反射光を焦点に収光して、焦点位置に置いた面状光検出器で反射散乱光と回折光の二次元光量分布を計測する構造にある。面状光検出器は図6に示すように、直径0.5mmの光ファイバー約三千本を半円状に束ね、それを半径方向に4分割、円周方向12分割し、合計48個のブロックに入射した光量をそ

表1 傷の種類

傷形態	傷名称
点状欠陥	ロールマーク
線状欠陥	へゲ、スリバー、掻き傷
分布状欠陥	錆、汚れ、擦り傷

れぞれフォトダイオードで光電変換する。本検出器は、カメラ画像に比べると解像度は粗いものの反射光パターンの特徴把握には十分なことに加え、1点当たりの計測時間が1 msec 以下と高速であること、データ量を500分の1以下に削減できるなどの利点がある。

表1に示す鋼板製造で発生する傷種のうち頻度の高い掻き傷（ひっかき傷）と擦り傷の反射散乱光のカメラ撮影画像と面状光検出器で計測した光量分布をLEDで可視化表示した例を図7に示し、面状光検出器により傷種の識別が可能なることを実証した。ここで、縦方向の線状光は圧延痕により発生した回折光で、圧延鋼板の全面で検出されるが、鋼板圧延工程では圧延方向が一方向であるため、

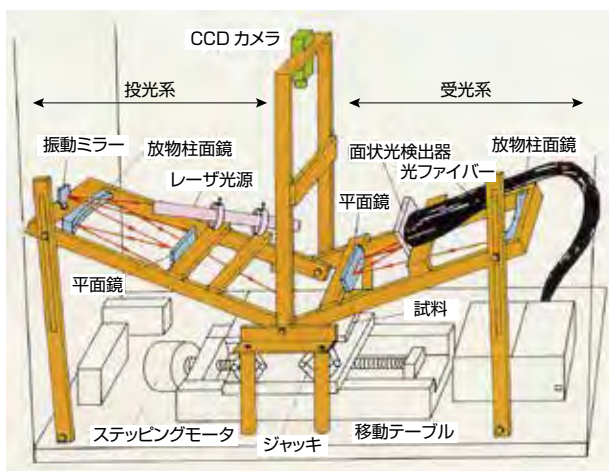


図5 平板用レーザー傷検査装置



図6 面状光検出器

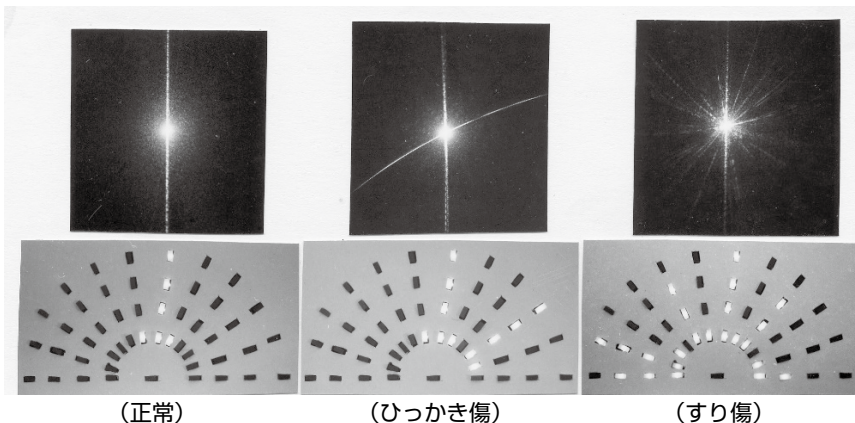


図7 傷種による回折パターンの違いと面状検出器による測定例

圧延痕による回折光も縦方向のみの発生することから、この方向に発生する回折光を検査から除外することで傷欠陥と区別した。この技術は、特許申請し知財として登録済みである。（特-2073658、1996.7）

3 加工穴内壁面傷検査装置の開発

加工穴内壁面検査へのきっかけは、1998年頃、広島県内の自動車部品製造会社から、自社製造部品の自動車用油圧マスターシリンダーの内壁面の微小傷欠陥検査についての技術相談であった。対象は、内径25mm奥行き150mmの円筒形部品で、内面は鏡面加工されており、目視検査では内面が見づらく微小な傷を見落としやすいことから、レーザ光を用いた傷検査法を適用することとした。対象部品が円筒形で回転可能なことから、図8に示す装置を試作した^[6]。検査面に細く絞ったレーザ光を照射すると傷がない場合は、レーザ光はそのまま反射し、散乱しない。一方、傷がある場合は、傷に当たったレーザ光は正反射光の外にまで広く散乱する。そこで、光ファイバーを正反射光が受光できる位置と散乱光だけを受光できる位置にそれぞれ設置すれば、二つの光を分離できることに気づき、レーザ反射光のビーム中心から直径5mmと直径15mm

の二つの同心円の円周上に配置した0.5mmの径の光ファイバー束で正反射光、散乱光・回折光とをそれぞれ分離受光した。

図9に0.2mm間隔でサンプリングした光量データを円周方向に展開してパノラマ画像化した例を示す。(a)は正反射光の光量画像、(b)は散乱光と回折光を含む光量画像である。(a)の画像では破損した切削バイトによるらせん状の押し込み傷が、(b)の画像ではスクラッチ傷がそれぞれ明瞭に検出されており、正反射光と散乱光とを併用することで多様な傷を高感度に検出できることが明らかとなった。図中の黒および灰色の穴は油穴で欠陥ではない。

他方、同じ頃、呉市内の自動車用部品製造のシグマ社の下中社長が、特許流通フェアに出展していたレーザ傷検査装置を見て、半導体レーザに興味を持ち、当該装置を自社の円筒形状の自動車用量部品の外面傷検査に使いたいとの要請があった。シグマ社は、自動車用小物部品を量産し、不良品の流出ゼロを目指して検査の自動化を進めているところで、微小傷の検査が可能なレーザ傷検査装置の導入を検討したいとのことだった。

2000年に共同研究を開始し、2002年に産総研とシグマ社が共同開発した円筒部品外面傷検査用のレーザ傷検査



図8 加工穴内壁面検査装置

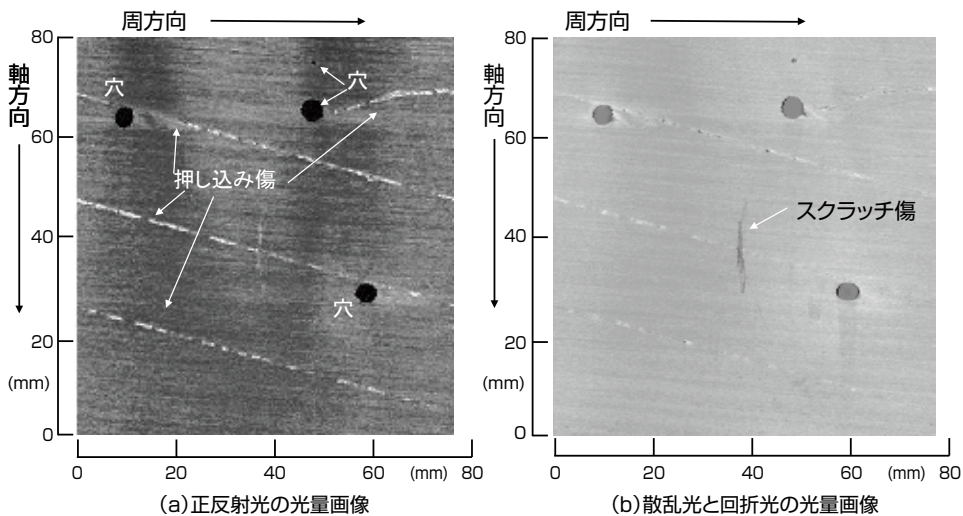
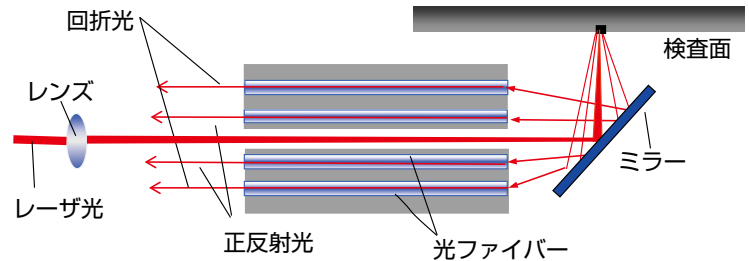


図9 加工穴内面の検査画像の例

装置を図 10 に示す。レーザ光を用いた外面検査装置が微小傷検査に予想以上の効果を上げたことから、下中社長から世の中にまだ普及していないレーザ傷検査装置を商品化して自動車部品製造企業向けに販売する事業を立ち上げ、カーメーカー向けにシリンダーボア内面のレーザ傷検査装置を新たに共同開発したいとの申し入れがあった。

4 連携研究体の設立による研究開発の加速

折しも 2001 年に、通商産業省工業技術院傘下の研究所は独立行政法人産業技術総合研究所へ大規模な機構改革が実施され、2003 年に中国センターは、バイオマスの研究に重点化する方針が決まり、ものづくり関連の研究者はすべて他センターに異動したため、実用化開発を目前にしてレーザ傷検査装置の研究開発の継続を断念するかどうかの大きな転機を迎えた。打開策を検討していた時、レー

ザ傷検査装置の将来性を確信したシグマ社の下中社長から開発継続の強い要請に加えて研究資金提供の申し出があり、中国センターの矢部所長（当時）とつくばに異動した研究者とで協議した結果、中国センター産学官連携センターに研究開発の拠点となる連携研究体を設置し、企業から提供された資金をもとに研究開発を継続することで合意し、設立申請を行った。申請の条件として、複数の企業の要望があること、3 年間で産総研の規定を満たす純粋民間資金の提供があること、明確な研究目標があり産業界へのインパクトがあり共同研究により達成可能なこと、産総研に研究シーズがあることなどハードルは高かったが、2004 年より 3 カ年の期間で、レーザ応用機能診断連携研究体の設立が認められた。

研究目標は、カーメーカーのニーズを踏まえて自動車シリンダーボア内壁面用のレーザ傷検査装置の研究開発と製品化とした。当時市販されていた渦電流式、光学式のシリンダーボア内面検査装置は、現場のニーズを満たすレベルになく、さらなる高性能、高機能な検査装置が求められていた。産総研が基本構想を提供し約 1 年かけて共同研究により開発試作したシリンダーボア用の内面検査装置を図 11 に示す。開発のポイントは、1500 rpm で回転する検査プローブを穴の中心軸に沿って一定速度で下降させ、直径 0.1 mm の真円に整形した半導体レーザ光を壁面に垂直に照射し、壁面からの正反射光と反射散乱光および回折光とを二重の同心円状に配置した光ファイバーで集光し、光ファイバーの他端に配置した光センサで光量測定し、光量変化から傷欠陥を検出する構造にある^{[7][8]}。特にプローブ先端部の構造は性能に大きく影響するため、光ファイバーの端面位置や先端形状を種々替えて実験を繰り返すなど時間と手間を要したが、シグマ社の開発要員の努力により、最適な配置と形状を見出すことができた。また、プローブ先端部は着脱可能にし、先端を前後にスライドする構造にすることで内径 40 mm から 150 mm までの広い口径に対応した。



図10 自動車円筒部品の外面傷検査装置



図11 加工穴内壁面検査装置

図12は内側の光ファイバーで計測した正反射光の光量を、図13は外側の光ファイバーで計測した散乱光の光量をそれぞれ画像化した例と1回転分の光量データを示す。検査対象は、内径80mmのシリンダーボアで、計測は、円周方向、軸方向とも0.2mm間隔で行った。計測ポイント数は1回転あたり約4000点、軸方向600ラインで、データ総数は240万点（5メガバイト）である。正反射光画像と散乱光画像とでは、光量分布に明らかな相違がみられる。

両図において、各図の下に示す図が1回転分の各光量の実測値（青線または赤線）で、それをういて自動生成した閾値の上限と下限をそれぞれ黄線と緑線で示し、この範囲を上下に超えた部分を傷欠陥の候補とする。上限と下

限を設けた理由は、正反射光画像では、ほとんどの傷欠陥の場合レーザ光が散乱して光量が下限を下回るのに対して、光沢性の欠陥の場合は逆に光量が増加し上限を上回ることに対処するためである。同様に、散乱光画像でも、傷欠陥により散乱光が上下限を超えた部分を傷の候補とする。ここで、正反射光と散乱光とで、表面の汚れや色に対する応答の違いを白いテープを例に検証した。正反射光画像では、白いテープにより反射光量が増加し光沢性欠陥の候補と判定されるものの、散乱光画像では、テープの表面でレーザ光はほとんど散乱しないため、光量変化は小さく、欠陥ではないと判定される。また、表面に微小な穴が開いている場合は、正反射光、散乱光ともに減少すること

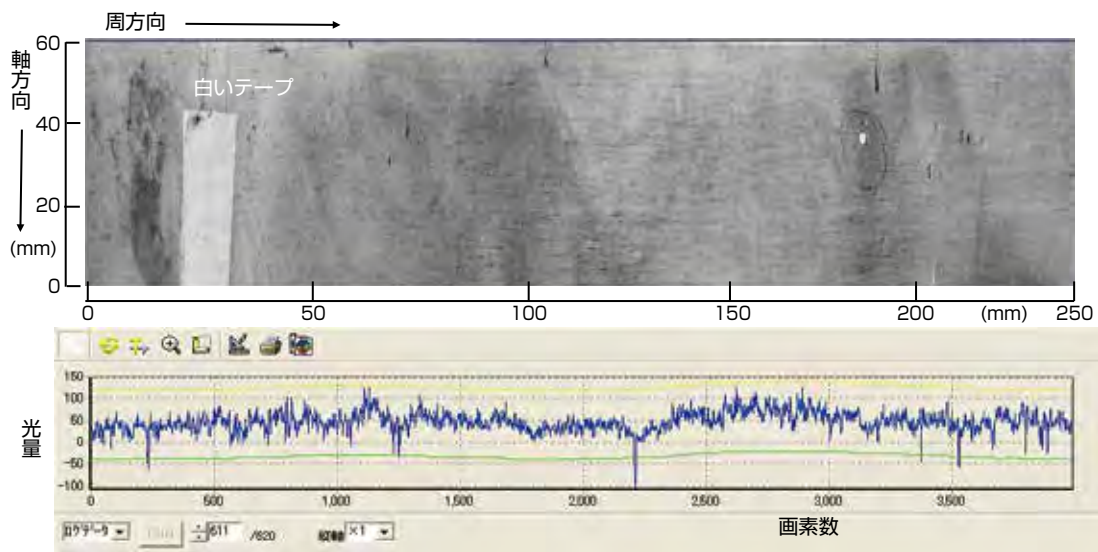


図12 正反射光の光量検出画像

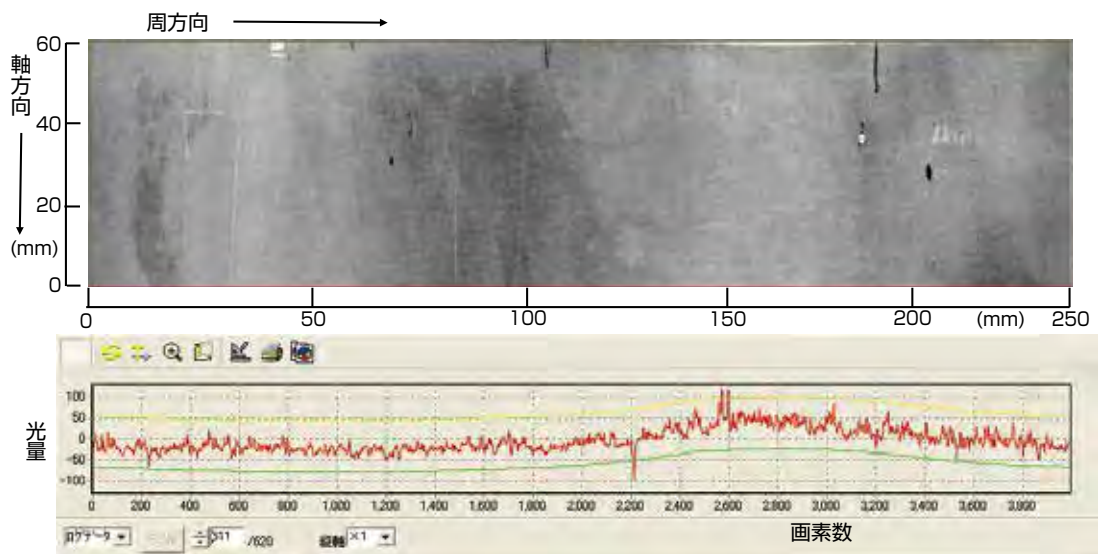


図13 散乱光の光量検出画像

から欠陥と判定できる。以上に示すように、2枚の検査画像を併用することが検査の信頼性を高めるとともに誤判定防止に極めて有効であることが示された。

他方、連携研究体の活動を円滑かつ効率よく進めるため、隔月ごとに社長が同席する進捗会議を開き、開発の状況報告、技術的課題の整理と対策、長期、短期の開発工程について意見交換し、その場で社長が方針を決めるなど、意思の疎通を欠かさないように努めた。また、問題が発生した時は緊急の実務担当者会議を開き、計画の見直しや変更を迅速に行った。本事業の場合、研究予算は民間提供資金と産総研のマッチングファンドのみのため、金額にこだわらず必要なものを直ちに調達することができたことも開発のスピードアップにつながった。

5 レーザ傷検査装置事業の立ち上げと“穴ライザー”の商品化

2005年に、シグマ社はレーザー傷検査装置事業室を新たに立ち上げ、レーザー傷検査装置の販売を開始し、2006年6台、2007年11台と売り上げを順調に伸ばしてきたことから、販売体制の強化を図るため、江崎が室長に着任した。ところが、2008年10月に突然起きたリーマンショックによる不況の余波を受け、検査装置が売れなくなるだけでなく、本業の業績も大きく落ち込んだため、傷検査事業を撤退するか否かの重大な危機に直面した。

そこで、江崎は事業の将来性を見極める方策として、これまでに装置を購入した企業や、機械加工関係企業をきめ細かく訪問して、レーザー傷検査装置の潜在需要調査を実施し、当該装置では検査対象外の内径20mm以下の小径穴検査に想定外の大きな潜在需要があることと、自動車部品の小径穴検査では、検査する穴の数が多く、現場のタク

トタイムに合わせるには、1個あたりの検査時間をこれまでの30秒から10秒以内に短縮する必要があることなどを把握し、社長へ事業の継続と、不況の間に検査プローブの小径化と検査の高速化等の抜本的な改造を行うことを提言し、社長の決断のもと即実行に移した。

まず、検査の高速化については、高速化のネックになっている外付けモーターによるベルト駆動方式に代えて、プローブの高速回転を可能にする中空モーターを新規開発した結果、検査プローブ回転数を約10倍の15,000rpmまで高速化し、検査時間を目標とする10秒以内に短縮することに成功した。

次に、プローブの小径化に関して、シグマ社は産総研のアドバイスに基づいて小径用プローブを新たに開発した。図14に示すように光ファイバーの配置場所を変え、先端部をL字型からストレートへ形状変更したことでプローブ径は6mmまで小径化できたが、光ファイバーの本数減に伴う受光量の減少を補うため、受光した反射光を光電変換するフォトダイオードを高感度・高速の素子に変更した。小径化により、取得可能な検査画像が散乱光画像のみになったため、閾値を超える異常部の面的な形状の特徴量解析機能を強化し、それに合わせて傷判定条件をより細かく設定できるようにアルゴリズムの改良を行うことで、製品としての完成度は格段に向上した¹⁹⁾。

2010年には景気の回復傾向が顕著になったため、“穴ライザー (ANALYZER)” という商品名を新たに付けて販売を再開したところ、自動車関連企業だけでなくさまざまな業種の企業から幅広く注文を受けるようになり、販売台数を急速に伸ばすことができた。その後もユーザーニーズに合わせて、図15に示す直径6mmの標準タイプ、直径2.3mmの極細タイプ、穴ライザーロボット等を順次開発販売

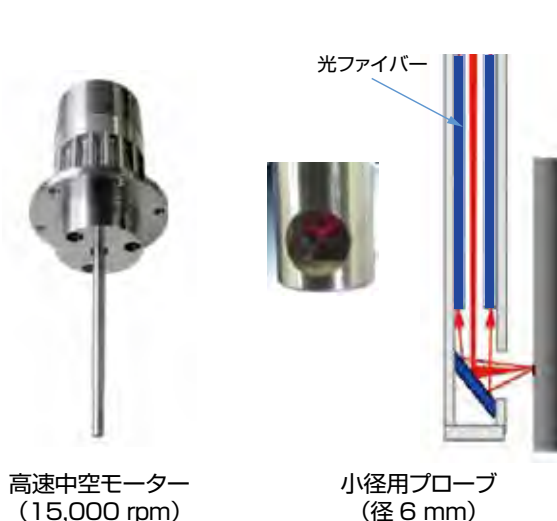


図14 検査プローブの改造

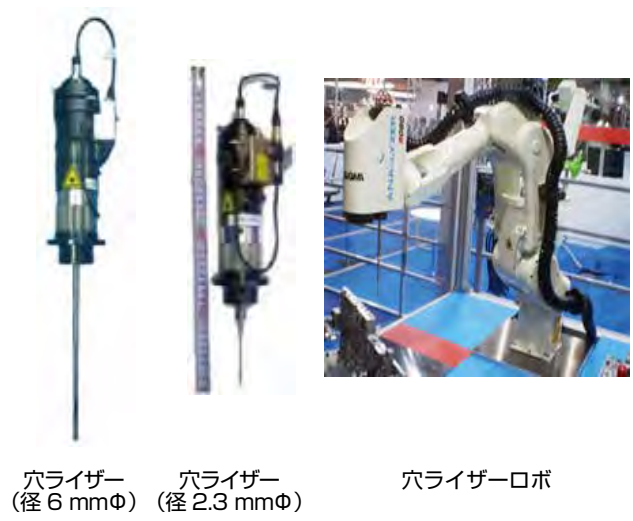


図15 開発した傷検査装置の例

表2 市販されている穴内面検査装置（各社のホームページから引用）

メーカー名	A社	B社	C社	D社	シグマ社
測定原理	渦電流式	レーザ反射式	カメラ撮像式	カメラ撮像式	レーザ反射式
特徴	180°で向き合うように設置したNDプローブ2本で巣や割れを、90°で向き合うように設置したエアージェット4個で内径を測定する。ワーク径に合わせてプローブ径を変える必要がある。ワーク穴径：直径40mm以上	二本の光ファイバーの一方にレーザ光を注入し、先端のレンズで50μmに絞り金属内表面に垂直に当て、他方のファイバーで正反射光を集光しPDで光量測定する。プローブ先端の45度ミラーを高速回転させて穴内面を全面検査する。短焦点レンズのため焦点深度が浅い。ワーク穴径：直径2mm以上	複数のミラーを同期回転させる光回転機構と高解像度のエリアカメラとで円筒内面の精細な画像を撮像することを特徴とする。構造が複雑になる。ワーク穴径：直径60mm以上	アクリル丸棒の先端を逆円錐状に加工し、他端からリング照明で内壁面を照らし、先端の円錐面に写った内壁面の画像をカメラで撮り込み、画像処理により傷欠陥を検査する。回転部分がないのでコンパクト、軽量。ワーク穴径：直径6mm～60mm	レーザ光を長焦点レンズにより検査面に垂直に照射し、プローブ先端に円筒状に並べた複数の光ファイバーに正反射光の一部を注入しPDで光量測定し、光量変化から傷欠陥を判定する。長焦点レンズのため焦点深度が深いので、位置ずれによる感度低下はない。ワーク穴径：直径4mm以上

し、累積で200台を超える販売実績を上げるまでになった。
シグマ社は国内では穴内面の傷検査装置販売のニッチトップメーカーになったものの、表2に示すように国内では多様な方式の穴内面検査装置が販売されている。しかし、性能表示に統一性がなく、ユーザー企業に混乱を与えていることから、江崎は傷検査装置の標準化の必要性を感じ、まずは国内規格の標準化に向けて活動を開始した。2015年に公益財団法人ひろしま産業振興機構の支援の下、標準化原案作成委員会を立ち上げ、装置メーカーと使用企業に参加を募り、日本工業標準調査会に新市場創造型標準化制度を申請し採択されたことから、標準化に向けた審議を進めている。

6 半導体レーザの産業応用に至るシナリオ

地元の企業から持ち込まれた技術相談がきっかけとなって、業界が求めるレーザ傷欠陥検査の研究開発に取り組むことになった。図16に、これまでに記述してきた産総研の技術開発とシグマ社との連携による商品化の流れを示す。まず、光沢性のある小物円筒形部品の内外面の傷欠陥検査を実用化するため、傷欠陥により発生したレーザ光特有の回折光を分離計測する高感度の検査装置を開発・実用化した。ところが、事業化を目前に産総研の機構改革により研究開発の継続は困難と思われたが、連携研究体という研究組織を立ち上げることでプローブ回転型のレーザ傷検査装置を開発・製品化した。しかし、突然発生したリーマンショックにより事業撤退の危機を迎えたが、小径穴の内面検査に活路を見出して方針転換し、企業ニーズにマッチした小径用高速レーザ傷検査装置を開発した結果、事業は急速に進展した。現在、新市場創造型標準化制度に基づき、国内標準化を同業者に呼びかけて進めており、海外展開に向けて国際標準化の準備を進めている。

レーザ傷検査装置の開発・事業化にあたっては、2度の大きな転機があったが、産総研と企業とが知恵を振り絞って難局を乗り越え、“穴ライザー”を世に送り出すことができた。これまでに、トヨタ自動車(株)、本田技研工業(株)、

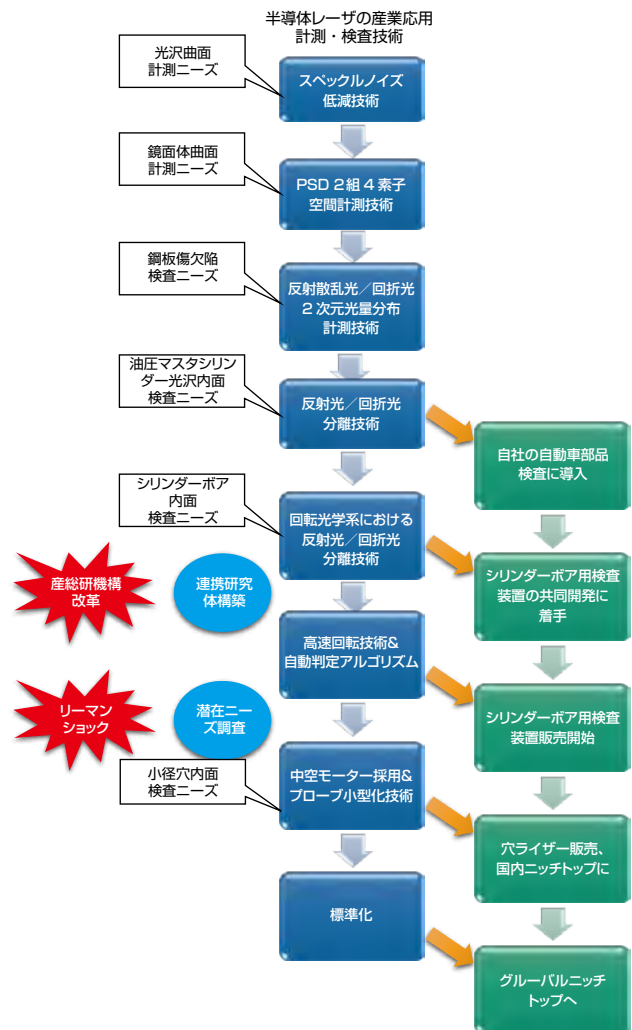


図16 産総研（青色）の技術開発とシグマ社（緑色）との連携による商品化の経緯

マツダ（株）他の自動車メーカーおよび（株）デンソー、アイシン精機（株）、三菱重工業（株）他の自動車部品メーカー各社に納入の実績があり、また徐々にダイムラーをはじめ海外企業からの引合いも増えているところである。

7 地域センターを跨いだ連携による次世代型検査装置の開発

産総研は、イノベーション創出のための橋渡し機関として機能するためのミッションをさらに明確にすべく、第4期中期目標期間では「橋渡し研究」の展開を重点目標に掲げている。産総研の地域センターは、地域の産業集積等の特徴を踏まえて看板研究テーマを設定して最高水準の研究開発を行うとともに、地域の経済産業局や公設研究機関等と連携して地域の中小・中核企業のニーズを把握して、オール産総研による技術の橋渡しを行って地方創生に貢献することを目指している^[10]。

中国センターにおいては、中国5県の中小企業、大企業、公設試等からなる「産総研中国センター友の会」（産友会）を2011年に立ち上げてネットワーク形成等連携活動を開始し、中国地域企業の課題を現場に出向いて抽出するスキームを確立した^[11]。

シグマ社とは、研究者が異動したこともあり連携研究体を解散してから疎遠になっていたが、2011年に中国センターの中村所長（当時）と下中社長とのトップ会談において産総研で誤判定や過剰判定を解決できないかとの要望を受け、全国の産総研の研究者の中から九州センターに適任の研究者を特定し、2012年から傷欠陥と汚れを識別可能な傷検査装置の開発に取り組み、新たな発想のもとに改良型レーザー傷検査装置を開発・実用化した。その後も九州センターと連携して品質管理も可能な次世代型検査装置の開発に精力的に取り組んでおり、地域を跨いだ連携によって世界を席巻する製品が開発される日もそう遠くないと期待される。

謝辞

この場を借りて、これまで本事業の研究開発、事業化に携わってきた関係各位に心から深謝するとともに、本報が産総研の今後の橋渡し活動を推進する上での一助となることを願ってやまない。

用語の説明

用語1: スペックル：レーザーのように干渉性の良い光が物体により散乱したときに生じる斑点状の模様で、画像計測における精度低下の原因となり取り除くことが極めて難しい。スペックルノイズとも称される。

参考文献

- [1] ちゅうごく産業創造センター：ものづくり企業生産現場における検査の自動化促進可能性調査報告書（2016）。
- [2] 三好隆志他，高橋裕浩，滝澤暢，福沢亮太：三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究（第3報）光リング式3-D形状計測センサ，*精密工学会会誌*，61（2），258-262（1995）。
- [3] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和，三好隆志，住本哲宏，山本秀樹：Noncontact 3D shape inspection based on optical ring imaging system，*Proceedings of SPIE*，2909，58-65（1997）。
- [4] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和：鏡面物体の表面形状と法線ベクトルの同時計測システムの開発，*第3回画像センシングシンポジウム講演論文集*，319-322（1997）。
- [5] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和，住本哲宏，山本秀樹：傷種識別機能を有する複合型傷検査システム，*論文誌C*，電気学会，115（3），452-459（1995）。
- [6] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和：レーザー光回折法による油圧シリンダー内壁曲面上の微小傷検査装置の開発，*知能メカトロニクスワークショップ講演論文集*，6，151-156（2001）。
- [7] 岡田三郎：解説 レーザ光回折法による微小傷検査システム，*検査技術*，9（3），8-13（2004）。
- [8] 岡田三郎：レーザー光回折法による超高精度微小傷・欠陥検出装置，*自動車技術*，56（4），84-85（2002）。
- [9] 江崎泰史：半導体レーザーを使用したキズ検査装置のインライン活用，*検査技術*，12，64-67（2011）。
- [10] 中村修：地域発イノベーション創出のPDCA：産総研地域センターの取り組みを事例にして，*研究・イノベーション学会年次学術大会講演要旨集*，31，349-352（2016）。
- [11] 産総研：地域センターの連携で実現した世界トップクラスのテクノロジー グローバル市場で戦える高精度なレーザー傷検査装置「穴ライザー」，*LINK*，4，10-15（2016）。

執筆者略歴

岡田 三郎（おかだ さぶろう）

1974年広島大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院中国工業技術試験所入所。瀬戸内海大型水理模型関係各種水理計測装置の研究開発に従事。1995年以降、半導体レーザーを活用した計測装置の研究開発に従事。2005年産総研産学官連携推進部門産学官連携コーディネータ（計測標準担当）2008年定年退職後、公益財団法人のコーディネータを経て2014年より産総研中国センターの産学官連携スタッフとして活動中。情報工学博士（九州工業大学）。この論文では、産総研における研究開発の経緯およびレーザー傷検査装置の開発・実用化に関する執筆を担当した。



中村 修（なかむら おさむ）

1979年九州大学大学院農学研究科修士課程修了。同年、鹿児島大学歯学部口腔衛生化学講座助手。1989-1991年Case Western Reserve大学客員研究員。1997年通商産業省工業技術院九州工業技術研究所主任研究員。2001年福岡県工業技術センター生物食品研究所参事兼生物資源課長。2005年経済産業省技術評価調査課産業技術総括調査官。2007年産総研評価部次長。2009年長崎県科学技術振興局長。2011年産総研中国センター所長。2014年より産総研上席イノベーションコーディネータとして活動中。歯学博士（大阪大学）。この論文では、論文の構成および地域センターと地域企業との連携に関する執筆を担当した。



江崎 泰史（えさき やすふみ）

1988年公立大学法人都留文科大学卒業。同年、大手通信企業と外資系の合弁会社に入社後、都市銀行担当営業を経て、2002年にシグマ株式会社に入社。社長室室長兼セキュリティ事業部次長を経て、現在 LISカンパニー最高執行責任者（COO）。企業側における事業および量産装置化開発の推進責任者として、これまで自動車メーカー、および部品メーカー等の有力顧客を開拓し、検査装置 200 台以上の導入実績を作り上げた。この論文では、企業ニーズとウォンツの把握、産総研との連携、事業化の成果について執筆を担当した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（池上 敬一：産業技術総合研究所）

この論文は、大小さまざまな径の穴内壁面、それも光学的な取り扱いが難しい光沢面や鏡面の傷欠陥検査を、自動かつ高精度に行う装置を開発・商品化した過程について詳述しています。最終的な商品化に至るまでの各ステージについて「開発のポイント」が明示されており、技術的な発展が分かりやすく解説されています。加えて、技術的なハードルばかりでなく、研究所の組織改編やリーマンショックに伴って生じた想定外のハードルを乗り越えた過程も述べられており、大変示唆に富んでいます。

コメント（藤井 賢一：産業技術総合研究所）

この研究は、自動車等に用いられる工業製品の大小さまざまな径の穴内壁面の傷欠陥検査において、目視検査では見落としやすい、光沢面や鏡面の自動検査技術を開発してきたという点で価値の高いものとなっています。産総研の半導体レーザによる光回折を応用した技術シーズを活用して、革新的な傷検査装置を開発し、製品化に成功した経緯や意義が詳細に報告されています。特に、産総研の機構改革やリーマンショックによる危機を乗り越えるためには、企業ニーズにマッチした製品開発が効果的であったことや、製品化に成功するためのシナリオも十分に論じられている優れた論文です。

議論2 自動検査技術への需要について

質問（藤井 賢一）

第1章に、「自動車産業における重要保安部品であるシリンダーボアや自動変速機用バルブボディ、油圧シリンダーなどに開けられた大小さまざまな口径の加工穴内壁面の検査は検査基準が特に厳しいため、目視検査が行われているが、見落としが許されないため、0.1 mm 程度の微小な傷欠陥を確実に検出する高精度かつ高速の自動検査技術が求められていた。」と述べられています。自動車産業がこの種の検査に投資しているコストや、今回の自動化によるコスト軽減の効果がどの程度のものであるのかを示す、分かりやすい尺度などがあれば説明をお願いします。

回答（江崎 泰史）

バルブボディ（トランスミッション部品）自動検査を実現するための装置コストは、1500万円～2000万円/台です。これによりバルブボディの穴検査は自動となります。実際、バルブボディ総検査項目の約60%がこれにより自動化されました。

一方、一般的な検査員コストはおおよそ1000万円/人・年です。通常バルブボディの穴検査は4名/セットで実施しますので、4000万円（1000万円×4）分が年間のコスト削減となります。当然、品質の向上も同時に実現できました。

議論3 加工穴内壁面傷検査装置の開発について

質問（藤井 賢一）

第3章では、図8に示されているように、正反射光が受光できる位置と散乱光だけを受光できる位置にそれぞれ光ファイバーを設置するなどの優れた着想で、加工穴内面を検査する手法を開発してきたことが記されています。このような着想に至る背景や経緯にはどのようなものがあったのでしょうか。

回答（岡田 三郎）

著者らは、当時半導体レーザの特徴を活用した新規な工業計測機器として、非接触形状計測装置の開発を目指し研究を行っていたところに、地元の鋼板製造メーカーから高品位の圧延鋼板表面のマイクロオーダーの微小傷の検出、圧延痕と傷との識別可能な手法と装置を実現できないかとの要請を受けて、レーザ光を用いた検査装置の開発にも取り組むことになりました。開発当初の課題は、レーザ反射光の二次元的な分布を短時間に効率よく計測可能なセンサの開発でありました。当時、アメリカで開発された同心円状のフォトダイオードを用いた特殊なセンサは入手困難でしたが、代わりに安価で自作可能なセンサとして図6に示す光ファイバーを束ねた多分割面状検出器を考案し、これにより目的を達成しました。

また同時期に、自動車部品企業から、直径25 mm、深さ150 mmの円筒内面を鏡面加工した部品の検査装置開発の要請があり、図7の反射光画像をヒントに図8の装置を着想しました。さらに、レーザ光源を傷面から200 mm以上離して長焦点レンズで緩やかに収光して焦点深度を深くしたことで、光ファイバーの径と本数と先端位置を試行錯誤で最適化したことで、正反射光と散乱光、回折光とを効率よく分離することができ検査性能を大幅に向上することができました。

コメント（池上 敬一）

当該装置の原理については概ね第3節にて先述されていますが、この論文の技術的な面での山場は図12、13にあると思いますので、ここで図に即してもう少し詳しく解説された方が読者に対して親切であろうと思います。

回答（岡田 三郎）

図12、13に詳しい説明を追加しました。

質問（池上 敬一）

プローブの小径化によって、正反射光/回折（散乱）光を弁別するための幾何学的条件が厳しくなったように思えるのですが、それにどう対応したのか、差し支えない範囲で述べていただけると、一層分かりやすくなると思います。

回答（江崎 泰史）

データ種類の減少対策については、アルゴリズムの追加にて細かく判定条件を設定できる様にしています。毎年、25機能～30機能を追加することで正答率の向上を図ってきました。また、並行しレーザ照射/反射光の受光効率の改善も進め取得データの向上も進めました。

議論4 危機克服の鍵について

質問（藤井 賢一）

2003年の産総研の機構改革が発端となり、連携研究体が設立され、また、リーマンショックの不況時期に潜在需要調査を実施し、20 mm以下の穴径への潜在需要や検査時間の更なる短縮化への需要を把握できたことが、その後の製品化に役立ったことが記されています。この間に新たな橋渡し技術として中空モーターを開発したこと

でプローブの小型化に成功し、製品としての完成度を高めたことで、2010年以降の販売実績に繋がりました。不況時に新たな開発に踏み切るには多くの困難をともなうものと予想されますが、鍵となる考え方や方針としてはどのようなものがあるでしょうか。

回答（江崎 泰史）

不況時期に最も重要なのは、景気が回復した時の準備をいかにしておくかと考えています。不況のお蔭で時間はいくらでもあり、独自調査の試算により、この検査装置のビジネスポテンシャルはすでに把握していたので、後は最短でどのように事業を進めて行くべきかを考えていました。まずは、ターゲットワークを絞り込むことを実施し、

自動車重要部品および重要保安部品に狙いをつけました。検査の見逃しが許されない全数検査をする部品の自動検査に予算が割られることが見込まれていたからです。

次に、中小企業のベンチャー部門にはマンパワーには限りがあるので、競合製品とのベンチマークを実施し、上記部品の検査において何処で差別化するかを考え、効果が大きく実現度の高い開発テーマを優先し進めて行きました。

つまり、この検査装置に最も向く対象ワークを絞り込み、競合他社に負けない装置に仕上げる事ができれば、景気が戻った時には一気に事業を前進させることができると考えていました。

スペースワイヤ国際標準への提案プロセス

— 開発型の標準化における技術的実績と標準化活動における行動様式 —

檜原 弘樹^{1*}、能町 正治²、高橋 忠幸³

我が国における宇宙機用標準規格の導入プロセスは、複数の既存規格をトレードオフし、要求を満たし、持続性が見込める方式を選定することが一般的であった。これに対し、X線天文衛星「ASTRO-H (ひとみ)」に採用したネットワークの国際標準規格スペースワイヤ (SpaceWire) には我が国の科学衛星が培ってきた独自規格を取り込むことに成功した。この提案プロセスを振り返り、開発型の国際標準規格について、我が国の提案を反映し得る再現可能な手法を考察した。

キーワード: デジュール標準、デファクト標準、スペースワイヤ、SpaceWire、国際標準化

Contributing to the SpaceWire international standard

—Successful factors for the development of a de jure standard—

Hiroki HIHARA^{1*}, Masaharu NOMACHI² and Tadayuki TAKAHASHI³

Incorporating standards for spacecraft in Japan involves trading off various existing standards to comply with requirements and sustainability. However, well-established proprietary specifications developed for Japanese scientific satellites were successfully incorporated into the international standard of embedded networks, called SpaceWire, which was adopted for the X-ray astronomical satellite “ASTRO-H (Hitomi).” Looking back on this proposal process, we studied a mutual collaboration scheme to incorporate Japan's proposal, regarding the development type international standards.

Keywords: De-jure standard, de-facto standard, SpaceWire, international standardization

1 はじめに

人工衛星の内部に搭載する機器はネットワークで互いに接続されており、各機器に対するコマンドや各機器から収集するテレメトリと称するモニター信号を送受信する。これらの信号を伝送する規格は、人工衛星システム全体の運用や人工衛星を遠隔制御する地上設備と密接な関係がある。各国の地上局の運用設備を相互利用することも行われることから、ネットワーク上の通信規格は近年、国際標準に準拠することが求められるようになってきている。

これまでの我が国における当該国際標準規格の導入プロセスは、宇宙機のみならず民生品の規格も含めて複数の既存標準規格を調査し、各規格のトレードオフを行うことにより、要求する機能・性能を満たし、制定状況を確認して

持続性が見込める方式を選定することが一般的であった。一方、我が国においては、科学観測に用いられる人工衛星で草創期から独自開発が進められてきたことから、独自に策定した規格を使用している場合もある^[1]。国際標準規格は技術の進歩を反映して継続的に改訂作業が進められており、民生機器市場の急速な技術発展を背景とした改訂や、新たな規格の策定も行われている。我が国独自の規格を国際標準規格に取り込むことも可能なはずであるが、これまでは容易ではなかった。これは技術的な要因というよりも、人工衛星に搭載する機器間の通信に関する独自規格を国際標準として提案する動機づけがなされなかったものと考える。

X線天文衛星「ASTRO-H (ひとみ)」は、衛星システム

1 NEC スペーステクノロジー株式会社 技術本部 第二搭載技術部 〒183-8551 府中市日新町 1-10、2 大阪大学大学院 理学研究科 付属原子核実験施設 〒560-0043 豊中市待兼山 1-1、3 東京大学国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli-IPMU) 〒277-8583 柏市柏の葉 5-1-5

1. On-board Electronics Department, Space Engineering Division, NEC Space Technologies 1-10 Nisshin-cho, Fuchu 183-8551, Japan
* E-mail: h-hihara@bc.jp.nec.com, 2. Osaka University 1-1 Machikaneyama, Toyonaka 560-0043, Japan, 3. Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa 277-8583, Japan

Original manuscript received March 2, 2018, Revisions received July 20, 2018, Accepted July 23, 2018

に求められる機能・性能がそれまでの我が国の人工衛星に比べて飛躍的に向上した^{[2][5]}。また、ASTRO-H衛星に搭載する機器の開発は幅広い国際協力の下に進められた。これらのことから、従来の開発実績を継承した確実な開発と同時に国際標準規格への準拠が求められた。ASTRO-H衛星に採用したスペースワイヤ国際標準規格^{[6][7]}は欧州宇宙機関（European Space Agency, ESA）が仕様を取りまとめた、いわゆるデジュール標準である。これに我が国の科学衛星が長年培ってきた独自規格を取り込むことができた。

スペースワイヤ国際標準規格に我が国の独自規格を反映できたプロセスを振り返り、成功要因を考察するに当たっては、文献[8]の考え方にに基づき体系的に説明できる可能性が見出された。スペースワイヤ国際標準規格は、実現すべき機能と性能を関係者間の討議を通じ集約して設定し、その実現手段を技術開発も伴いながら国際標準とすべく仕様化する手法により制定された。これは、いわゆる開発型の標準^[9]といえる。この論文では文献[8]の考え方に基いて提案活動を振り返り、近年事例が増えている、開発型の国際標準化に対応するに当たり再現可能な提案プロセスについて考察した。以下、2章にてスペースワイヤの初の集大成として実用化されたASTRO-H衛星のシステムアーキテクチャが国際的に認知された経緯を紹介し、3章にてASTRO-H衛星の開発過程で我が国の独自技術と提案を国際標準に反映できた技術要因について纏める。さらに、これらの独自技術と提案を国際標準に取り込むまでの我々の行動様式を振り返るに当たり、文献[8]に述べられているモデルを参照して欧州および米国の関係者の行動様式と比較することにより、我が国の行動様式を活かした再現可能な提案プロセスの考察を4章で纏める。

2 ASTRO-H衛星のシステムアーキテクチャ

ASTRO-H衛星は、これからの日本の目指す姿として文献[10]に述べられている「開放的なプラットフォーム」を実現すべく、その開発は国際協力の下に進められた。これは、世界中から新たな発想や技術や人材が集まり、日本という活動拠点で最先端の付加価値が生み出される姿であり、グローバルな知的活動の拠点を目指したものであった。また、革新的な成果を生み出す宇宙機システムを開発する上で障害になっていることを組織を超えて協力し解決するしくみを構築し、宇宙機システムの開発への敷居を下げることにより、国民に幅広い参加の機会を提供することを目指した。

科学衛星に搭載される機器が多様になるにつれて、高い信頼度を保ちながら、短期間で開発を行うことの困難さ、あるいは開発過程の試験の複雑さが大きな課題となっていた。このため、特にデータ処理、ないし搭載機器間通信という観点から、信頼度の高い設計を行うための宇宙機システムのアーキテクチャの研究開発を進めた^{[11][12]}。科学衛星のように多岐にわたる観測ミッションや、目的に応じて異なった形状を持つ人工衛星では固定化した共通バスの考え方ではなく、小型衛星から大型衛星に共通に適用可能なスケーラブルなアーキテクチャに基づくデータ処理システムという観点が重要となる。スペースワイヤ国際標準規格に準拠したASTRO-H衛星に搭載した電子機器のネットワークは、文献[13]に述べられている「科学衛星データ処理系の将来展望」に基づき開発した。スペースワイヤ国際標準規格の目指したフル冗長^{注1)}のスペースワイヤネットワークはASTRO-H衛星により世界で初めて実現された^[14]。規格を制定した欧州でもその功績は高く評価され、図1に示すようにESAで作成された各国の関係者向けの資料において



図1 “WELL CONNECTED”、欧州宇宙機関会報にスペースワイヤ国際標準とASTRO-Hが紹介された。2011年2月号[15]より

も ASTRO-H 衛星が冒頭で紹介された^[15]。

3 我が国の取り組み

ASTRO-H の衛星内通信規格を開発するに際しては、日本側から積極的に欧米の関係者に働きかけ、規格策定の段階から実用化開発と軌道上実証を行い、日本側で実績を積んだ仕様を国際標準規格に刷り込むというアプローチを取った。スペースワイヤ国際標準規格に準拠した機器の試験・検証環境についても、国際標準規格の策定段階から国際共同研究開発を進め、仕様書に記載されることのないオフノミナル^{注2)}条件の対処についても国際間理解を一致させることを目指して研究開発・整備を進めた^[16]。

人工衛星搭載用ネットワークの国際標準規格に我が国の提案が取り入れられたのは初めてのことである。日本からの提案は主要なプロトコル階層定義から細かな誤記訂正まで多岐にわたる。本節では標準規格に取り込まれた中から主要な三点、および試験・検証環境の国際共同研究開発を振り返る。これらは、我が国がこれまでに開発してきた科学衛星や実用衛星、宇宙ステーションなどのデータ処理系の開発経験の集大成ともなっている。

3.1 最適設計の視点の相違

スペースワイヤ国際標準規格の一つである、ネットワークに繋がる機器内のメモリ等を読み書きする通信規格 (SpaceWire Remote Memory Access Protocol, SpaceWire RMAP) 国際標準規格には我が国の独自仕様も活かされた。この過程を振り返ると、我が国の開発プロセスには二つの強みがあることがわかった。

一つは、研究開発を進める組織間において、コミュニケーションの風通しをよくしてすり合わせることに長けていることである。ESA の研究機関である European Space Research and Technology Centre (ESTEC) に置かれたスペースワイヤ作業部会委員会 (SpaceWire Working Group Committee, SpW WG) が当初纏めつつあった通信規格階層にはリアルタイム性 (即時性) を実現するために追加された階層があり、SpaceWire-RT ないし SpaceWire-T と呼ばれ検討されていた。この案では最上位のテレメトリ・コマンド階層に直結するインタフェースが複雑な仕様になっており、議論が紛糾して1年近く纏まらなかった。我が国の科学衛星のデータ処理系の開発・運用実績から考えても、そのプロトコル階層は実装負荷が重く、現実的ではなかった。宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 宇宙科学研究所を中心として SpW WG に参加していた我々は一つのこと気が付いた。欧州は各自の仕事内容を厳密に定義する社会である。そのためか、通信規格の各プロトコル階層は各々イン

タフェースが明確で作業分担がしやすい、いわゆる手離れの良い仕様になっており、それに起因するとみられる重複が至る所にあった。これに対して我が国の科学衛星に用いてきたネットワークの実装仕様は各プロトコル階層の重複が巧みに排除されていた。これは、仕様を纏めた際に各関係者の密なコミュニケーションの下に各プロトコル階層のすり合わせが巧みに行われてきたことを示唆していた。我々は RMAP それ自体がリアルタイム性を確保する上で十分な機能を有するプロトコルであることを確認しており、そのデータ形式と通信手順を活用することにより、リアルタイム性を確保する上で SpaceWire-RT ないし SpaceWire-T は不要である旨を指摘し、改善提案という形で我が国の既開発仕様を刷り込んだ^[17]。さらに、小型実証衛星 (Small Demonstration Satellite 1, SDS-1) を2009年に打ち上げ、本提案に基づく仕様の軌道上実証に成功した。

図2に我々が提案した通信規格階層を示す。当初8階層以上になっていたものを、図2に示すように7階層で実現できることを示した。この通信規格階層の特長は、科学衛星の開発・運用実績に基づき、人工衛星搭載用ネットワークに必要なリアルタイム性を簡素なプロトコルで実現した点にある。この原案は2010年の第15回 SpW WG で提案され、ESA/ESTEC に集まった各国の参加者の満場一致の賛同を得た。これによりスペースワイヤの通信規格階層が簡素化され、100 kg 級の超小型衛星から2.7トンもの大型衛星にまで適用可能なスケラビリティ (柔軟な拡張性) が実現可能となった。本提案が我が国からなされなければ、スペースワイヤの簡素で高性能な特性は得られなかったものと我々は考えている。

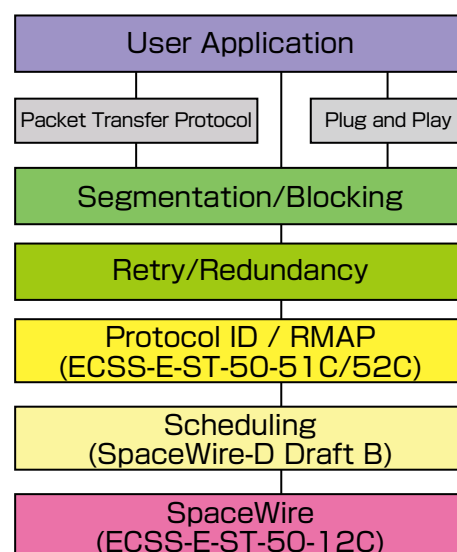


図2 日本から SpW WG (スペースワイヤ作業部会) に提案した通信規格階層^[17]

もう一つの強みは、標準化提案のさなかにおいても、我々は各国からの参加者の立場を尊重することができた、という点である。前述のように、我々はいち早く小型衛星 SDS-1 を 2009 年に打ち上げ、世界で最初に SpaceWire RMAP 規格の軌道上実証に成功した。この時点で ESA が我々を信頼するようになったことを肌で感じた。ただし、我々の技術開発力が評価されたのではなかった。彼らは策定中の規格が本当に軌道上の運用に耐えるかどうかを心配していた。我々は、SpaceWire RMAP 規格の軌道上実証に成功したことを日本側の成果として報告する代わりに、SpW WG の成果である策定中の規格案が軌道上の運用に耐えたことを報告した。これにより我が国の軌道上実証成果は彼らの心配を払拭し、その軌道上実証成果は関係者全員で共有するものとなった。これが信頼に繋がったようであった。

3.2 タイムスロットの共用割当

スペースワイヤネットワーク上で十分なリアルタイム性を確保するための枠組みは、前述した我が国からの提案をもとに大幅に簡素化され、SpaceWire-D^[18]として設計指針が公開された。この SpaceWire-D の規格案では当初、1 タイムスロット内で 1 回の通信のやり取りしか認めていなかった。これは、1 タイムスロット内で複数のやり取りを許すとリアルタイム性が検証できない、という欧州側の主張に基づくもので、単一通信割り当て (Simple Schedule) として規格化提案されていた。

しかし、我々は 1 タイムスロット内で複数の通信のやり取りを可能とするデータ処理系を長年にわたり開発・運用してきており、十分な軌道上実績があった。この仕様の実用性は経験的なものであったが、JAXA では形式検証と論理的な検証を重視する欧州の文化に造詣が深く、このための官学産共同研究計画を推進し、JAXA と名古屋大学、および産業界の共同研究開発を通じて欧州の論理的 (形式的) に検証が可能であることを重視する発想にも対応できる指針を構築した^[19]。この実績に基づき 1 タイムスロット内で複数の通信のやり取りを実装すべく提案を行い、タイムスロットの共用割当 (Concurrent Schedule) として上記仕様書に反映された。ここでは 1 タイムスロット内で複数の通信のやり取りは検証できないという当初の欧州からの主張は再検討され、検証可能なリアルタイム性能を実現する設計指針として仕様化された。これは、我が国の人工衛星の開発・運用経験を反映した経験知と論理的な整合性と検証ができることを重視した欧州の形式知を意図して融合した成果であった。

3.3 プラグアンドプレイ

SpaceWire RMAP 規格は通信規格としては我が国の

科学衛星で従来から用いられている周辺機器接続規格 (Peripheral Interface Module, PIM)^[11]の仕様と類似点が多い。我が国の従来からの軌道上運用実績を基に、ASTRO-H 衛星では RMAP の機能を活用し、ネットワーク全体にわたる共通アドレス空間として標準 RMAP アドレス空間と称するアドレス指定方式と共通参照できるアドレス範囲を定義した。このアドレス範囲では特定のアドレスをアクセスすると、そのアドレスに対応した通信手順でデータのやり取り (通信サービス) が行えるよう、アドレスと通信サービスを結びつけた。この実績は SpW WG でも参照され、SpaceWire Plug and Play 規格 (現 Network Discovery Protocol)^[20]では ASTRO-H 衛星で策定した標準 RMAP アドレス空間を適用できるよう、仕様が策定された。この結果、「コンセントに差し込むように人工衛星搭載機器を繋ぐプラグアンドプレイ」というコンセプトが具現化された。

プラグアンドプレイ (Plug and Play) は民生品では一般的に聞かれる概念であるが、日本では宇宙機搭載機器への適用は現実味が無いと考えられていた。これに対して我が国の独自規格であった PIM が欧州側で定義した Plug and Play の概念に通じるものがあることに気が付いたことから、具体的な仕様化提案に繋がった。

3.4 日欧共同開発成果

ASTRO-H 衛星は「コンセントに差し込むように」各機器を接続し、ただちに試験・運用ができることを目標として開発した。このために機器・サブシステムの開発のみならず、試験・検証環境についても、単体試験と調達計画からサブシステム試験までを俯瞰して整備した。さらに、広範な国際協力のもとに開発が進められることを鑑み、ESA の委託によりスペースワイヤの仕様を取りまとめているダンディー大学 (University of Dundee) と共同で RMAP 仕様適合性試験装置 (Conformance Tester) の研究開発を行った^[16]。これにより仕様書に明記されていないオフノミナル (正常ではない) 条件における応答を包含した試験仕様の策定と合否判定が国内においても可能となり、各国で開発された機器を我が国に集結し、2.7 トンにも達する大型衛星のフル冗長ネットワークを確実に開発することができた。

RMAP 仕様適合性試験装置では日英共同研究開発の過程で洗い出し、互いに理解の一致したオフノミナルの試験ケースが約 80 % にも達している。オフノミナルの試験条件は標準規格書には明記されない。しかし、オフノミナルの試験条件を精査することにより確実な試験・検証が可能となるばかりでなく、ノミナル (正常な状態) の試験条件の設定の不足や不備も検出される。このような地道な研究開発を進めた結果、日本と英国 (ひいては欧州) の担当者

の理解と要望が一致した RMAP 標準規格が完成した。RMAP 仕様適合性試験装置はデファクトスタンダードとして各国で使用されており、これにはノミナル試験ケースとオフノミナル試験ケースの双方が同梱されている。この結果、スペースワイヤ国際標準規格に準拠した装置を我が国において海外から購入し、衛星システムに組み付けるに当たっても、ノミナル条件とオフノミナル条件の双方において理解が整合することが担保されるようになった。スペースワイヤの試験装置については、この他にも欧州内各社との共同開発を進めており、国際間理解の整合性が維持されるよう、継続的な協力が進められている。

4 各国行動様式の比較

前章にてスペースワイヤ国際標準規格に反映された我が国の提案の技術要素を纏め、規格提案活動を振り返った。日本案が国際標準規格に反映された成功要因をさらに抽出すべく、技術的な蓄積のみならず、日本からの参加者の行動様式についても振り返る。本節では、文献 [8] に述べられている、ある対象が持続的進化をするための基本ループをモデルとして参照して考察する。

4.1 参照モデル

この論文が参照する基本ループを図 3 に示す^[8]。ここに示される各ブロックは、自然と人間（個人、組織、社会）を含む自治的な存在であり、全体を制御する統一者は不在である。対象の状態を観察者が観察し、状態の変化の意味を解釈して警告を発する。構成者はその警告によってとるべき行動を考案して助言する。行動者は助言から任意に選択し、それに基づいて行動する。行動は対象に同化して対象の状態を変化させる。この変化が再び観察されることにより、情報がループ上を循環する。結果として対象は進化する。このように、解釈、考案、選択、同化が他律的

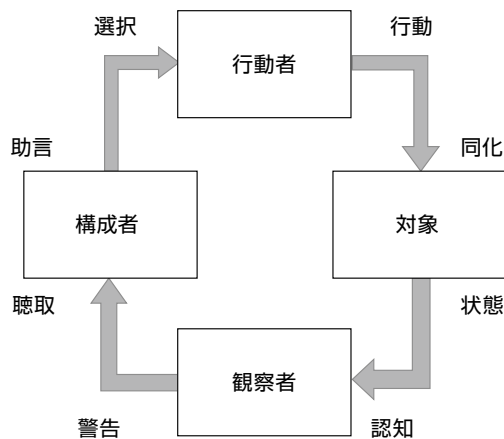


図 3 ある対象が持続的進化をするための基本ループ^[8]

でなく自律的に行われるが、このことは各ブロックが自治的な存在であることを意味しており、これが進化の条件であるとされる^[8]。

基本ループにスペースワイヤ国際標準規格を当てはめて考察するに当たり、各ブロックは自治的な存在であることが条件になる。具体的には、観察者には SpW WG が対応し、構成者には通称技術委員会（Technical Committee, TC）と呼ばれている、欧州宇宙標準協会（European Cooperation for Space Standardization, ECSS）が対応する。行動者には産業界の各ベンダが対応し、対象は人工衛星の搭載機器やその間でやり取りされるデータの通信規格である。スペースワイヤ国際標準規格は欧州が取りまとめるデジュール標準であるが、標準規格を制定する技術委員会の前段階に SpW WG がおかれ、この委員会の参加者は自治的な存在であることが許容されている。各参加者は個別に意見することができ、この委員会には行動者であるベンダが参加することもできる。各国の宇宙機関の代表者であることは要求されない。これは従来の宇宙機搭載機器用の通信規格の策定過程で一般的であった各国代表による標準化策定プロセスとは異なっており、近年事例が増えている開発型の標準化^[9]である。さらに、欧州内のベンダは構成者である ECSS にも参加することが許されている。以降は SpW WG における我が国の行動様式をこの基本ループに当てはめ、欧州および米国と比較する。議論に際しては、各ブロックの構成メンバーは重複することもあり、矢印は働きかけの役割を表すものとする。

4.2 欧州からの参加者の行動様式

観察者および構成者と、行動者は主体が分かれており分業されている。前者（観察者および構成者）は ESA を代表とした官の組織であり、システムベンダや装置ベンダが含まれる場合もある。後者（行動者）はハードウェアないしソフトウェアベンダであることが多く、システムベンダの装置開発部門が含まれていると見られる場合もある。前者と後者の作業分担は仕様書で明確に区別されており、両者の間の会話等の情報交換は頻繁に見られるが、作業自体が重複するケースを目にすることは稀である。すなわち、仕様を検討する作業と、当該仕様を適用したものづくりの作業がほとんど重複しない。行動者は観察者および構成者からの発注仕様を待ち、観察者および構成者は行動者の結果が対象に反映されるのを待つ。

この行動様式を、図 3 に示す基本ループにおいて観察者および構成者と、観察者の場および構成者の場を区別して説明を試みる。ある場に参加している構成メンバーはその場に割り当てられている役割分担、判断に要する情報の入手元、および議論の伝達先を明確に自覚する。スペース

ワイヤの規格策定に際しては観察者と構成者の場がそれぞれ用意され、これらの場には国の研究機関、大学、企業が参加可能である。観察者の場には欧州域外からの参加も拒まず、推奨されるケースさえある。観察者と構成者は重複することもあるが、観察者の場で議論する際には対象を観察する立場にあることを自覚し、構成者の場で議論する際には観察者の場からの報告を正式なものとして受け取り、行動者からの報告を直接判断に用いることはしない。行動者に属する者が観察者の場である SpW WG に参加し、意見することもあるが、観察者の場にいる間は、例えば試作のような行動を起こすことが無い。すなわち、構成者のインプットは観察者のアウトプットに集約、ないし限定することにより、国際標準を制定する権限を制御しているように見受けられる。構成者の場には前述した技術委員会が相当し、欧州からの選任者しか参加できない。ここでは観察者からの報告および規格制定案が審査される。観察者の場は提案する権限を有しているが、標準規格を制定する権限は持たない。標準規格を制定する権限は前述のように構成者の場である技術委員会が有している。この様子を図4に示す。図4では構成メンバーを角の尖った四角で表し、場を角の丸い四角で表した。

観察者の場と構成者の場が分かれているのは、欧州内の調整を行ってから標準規格案を纏めるためとされる。ものづくりと仕様策定がしくみとして分け隔てられており、観察者と構成者の場の参加者に行動者としての意識が希薄である。例えば、産業界のベンダの所属者が観察者や構成者の役割を担う場合には、組織を異動して対応しているように見受けられる。

4.3 米国からの参加者の行動様式

米国からの参加者には観察者、構成者、行動者の階層意識が顕在化していない。観察者は行動者として対象に働

きかけ、迅速なフィードバックを求める。また、観察者の場として設定された SpW WG に構成者の意識を期待し、直接標準化案を提案する。すなわち、観察者の場の制約は自覚されない。構成者の場としての技術委員会の権限と役割は認識しているが、構成者の場における規格制定に際して行動者が直接提案することを可能と考えており、行動者が市場で実績を積んだ仕様をそのまま国際標準仕様とすべく提案する、いわゆるデファクトスタンダードとしての審議を期待する。すなわち、行動者と構成者間の情報の流れが双方向であることを意味する。この様子を図5に示す。この図で示された行動者と構成者間の双方向の矢印は図4の欧州の参加者の行動様式には対応するものが無い。すなわち、米国からの参加者の行動様式が欧州では受け入れられないことが、このモデルから見て取れる。

観察者および構成者と行動者の階層が別れていないのは日本の行動様式によく似ているが、一方で観察者と構成者は行動者と利害を共有していることが珍しくない。この状況になると、日本からの参加者は力負けしがちとなるが、欧州側では Working Group Committee を観察者の場と捉えており、ここでは既存の実績に基づく仕様をそのまま国際標準として提案するという、いわゆるデファクトスタンダード提案を受け入れない。日本からの参加者にとっては、客観的に意見を述べる機会が提供されたと考えられる。

4.4 日本からの参加者の行動様式

日本には宇宙航空研究開発機構を取りまとめた国内規格制定のしくみが整備されている。スペースワイヤの規格制定に際しては、欧州の例のような観察者の場に対応する SpW WG と構成者の場に対応する欧州宇宙標準協会のような明示的な分業体制は無く、規格制定に関する構成者の場として設計標準ワーキンググループが設置されている。構成者の場は独立性が高く、欧州の例のような観察

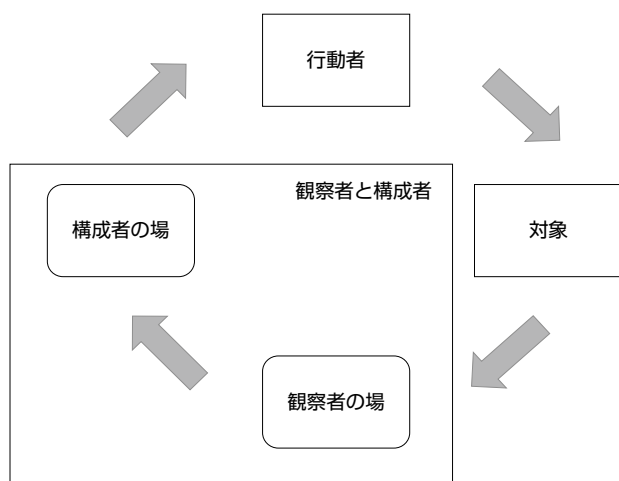


図4 欧州からの参加者の行動様式

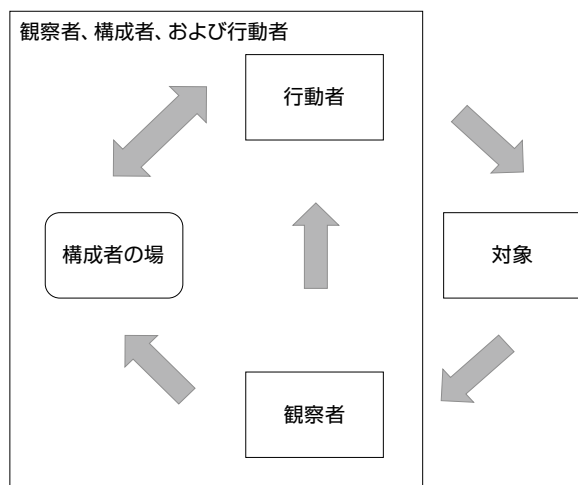


図5 米国からの参加者の行動様式

者(観察者)の場から構成者(行動者)の場への明示的な働きかけのしくみは無い。国の研究機関、大学、および各企業からの委員が構成者の場である設計標準ワーキンググループに参加して規格を策定する。大学や国の研究機関は規格策定プロセスでは観察者であることが多く、研究開発に際しては行動者となることもある。また、通常は行動者である製造企業がシステムベンダとして観察者になることもある。これは我が国の宇宙開発が官民一体になって進められてきたという背景にも依存しているものと考えられる。海外の構成者の場のアウトプットを取り込むことも可能であり、国際標準規格を迅速に製品化することも可能である。これを図6(a)に示す。観察者が構成者の場に働きかけずに独自仕様で行動者であるベンダに発注することも珍しくない。この場合は観察者から行動者に向かう矢印には委託仕様書が対応するが、委託仕様書の内容は行動者と観察者の相互の働きかけによる合議に基づくことが多く、この矢印は双方向になる。ここで実績が積まれた後、改めて構成者の場で規格を制定し、行動者に働きかける。この図6(a)の構成は欧州の行動様式と相反する働きかけの矢印が無く、うまく重ね合わせができる。この様子を図6(b)に示した。

SpW WGでは前述のように観察者の場に欧州域外の参加者を認めると共に、構成者の場に観察者の場のアウトプットを一元的に取り入れるしくみとなっている。日本からの参加者は観察者の場に観察者と行動者としての意識を持ったまま参加している。この意識がWorking Group Committeeの場で葛藤が生じることは無かった。これは、米国からの参加者の行動者と構成者の場の双方向意識が欧州側の意識と葛藤を生じたのとは対照的であった。

日本からの参加者は、行動者と観察者の意識が一体で

あり、先に述べた小型衛星 SDS-1 の例は、図4に示す欧州の行動様式に、図6に示す日本の行動様式がうまく融合したことを示している。また、これにより米国の先行開発の成果も我々からの提案を通じて無理なく構成者の場に持ち込むことができ、結果的に米国と欧州の橋渡しにも貢献できたものとする。

一方で、我が国の課題も明らかになった。SpW WGで討議した技術検討内容については、アメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)やESAと比較して我が国の技術レベルは大差なかった。にもかかわらず、欧米では新しい技術の軌道上実証例も多く、新規デバイスの採用事例も豊富であった。この差異が何に起因するのか。SpW WGは、参加者の出身国は欧州、米国、極東、アジアにまたがり、14カ国前後に及ぶ。各国ではそれぞれ独自の開発も進められており、新規技術の実証でも先行している国がある。その実績を参照し、目指すべき仕様が決まっていく。実用化する際のリスクについても、さまざまな観点から指摘が出る。問題が指摘されても、代替案の提案も活発である。日本からの主張や提案も、筋が通っていて実績があり、SpW WGの方向性と整合していれば、分け隔てなく採用される。このように多様なバックグラウンドを持つ専門家を結集し、活かす場が設けられていることが、イノベーションやコストダウン、小型・軽量化に繋がり、結果として「欧米の先行事例」に繋がっているものと考えられる。すなわち、共通の目標に向かって多様な背景を有する参加者の技術と英知を結集するプラットフォームが整備されているとみなすことができる。このようなプラットフォームを我が国にも用意することが課題である。

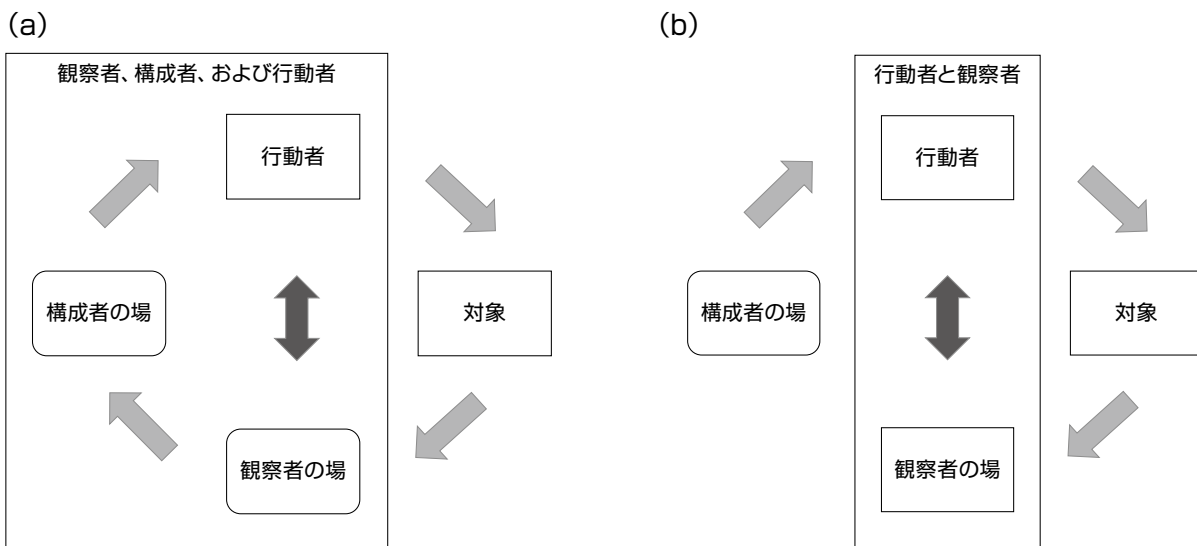


図6 日本からの参加者の行動様式

(a) 国内における標準規格策定プロセス、(b) 欧州のデジュール標準規格策定プロセスとの組み合わせ

5 まとめ

この論文では、スペースワイヤ国際標準規格に日本からの提案を反映することができた過程を振り返り、文献 [8] によるある対象が持続的進化をするための概念のモデルを参照して成功要因を考察した。この振り返りにより、我が国の独自技術にも国際的に通用するものがあつたことが改めて自覚できたと共に、先行技術を尊重しつつ改善するという我が国の行動様式が、独自技術を国際標準に取り込む（あるいは擦り込むと言った方が、より適切に状況を説明し得る）ために有効であることも自覚できた。この結果、欧州のデジュール標準策定プロセスを活用して日本からの提案を国際標準規格に反映するための経験知を再現可能なモデルとして記述できたものと考え。このモデルを意識することにより、国際標準規格に我が国の提案を反映する活動が活発化することが期待される。

6 謝辞

スペースワイヤを実用化するに当たり、当時、宇宙科学研究所にて ASTRO-H 衛星のスペースワイヤネットワークの実現に深くかかわった湯浅孝行博士 (Spire Global 社) に感謝します。スペースワイヤ国際標準仕様をいち早く取り入れた試験装置を開発し、実用化に貢献されたシマフジ電機株式会社様に感謝します。この論文に述べた考察は、東京大学先端科学技術センターの馬場靖憲教授による先端レギュラトリーサイエンスの講義により、スペースワイヤの国際標準規格提案経験とその成功要因について、再現可能なモデルを構築できそうだという気付きに基づく。個別の経験談となりがちである標準化活動の成功事例について、さらに応用に結び付け得る気付きをもたらして頂いた馬場靖憲教授に感謝します。

注 1) 全ての構成機器が冗長系を有すること。

注 2) 仕様書で規定される正常な状態ではないこと。

参考文献

- [1] H. Hihara, K. Iwase, J. Sano, H. Otake, T. Okada, R. Funase, R. Kashikawa, I. Higashino and T. Masuda: SpaceWire-based thermal-infrared imager system for asteroid sample return mission HAYABUSA2, *J. Appl. Remote Sens.*, 8 (1), 084987 (2014).
- [2] T. Takahashi, K. Mitsuda, R. Kelley, F. Aharonian, F. Akimoto, S. Allen, N. Anabuki, L. Angelini, K. Arnaud, H. Awaki, A. Bamba, N. Bando, M. Bautz, R. Blandford, K. Boyce, G. Brown, M. Chernyakova, P. Coppi, E. Costantini, J. Cottam, J. Crow, J. de Plaa, C. de Vries, J.-W. den Herder, M. Dipirro, C. Done, T. Dotani, K. Ebisawa, T. Enoto, Y. Ezoe, A. Fabian, R. Fujimoto, Y. Fukazawa, S. Funk, A. Furuzawa, M. Galeazzi, P. Gandhi, K. Gendreau, K. Gilmore, Y. Haba, K. Hamaguchi, I. Hatsukade, K. Hayashida, J. Hiraga, K. Hirose, A. Hornschemeier, J. Hughes, U. Hwang, R. Iizuka, K. Ishibashi, M. Ishida, K. Ishimura, Y. Ishisaki, N. Isobe, M. Ito, N. Iwata, J. Kaastra, T. Kallman, T. Kamae, H. Katagiri, J. Kataoka, S. Katsuda, M. Kawaharada, N. Kawai, S. Kawasaki, D. Khangaluyan, C. Kilbourne, K. Kinugasa, S. Kitamoto, T. Kitayama, T. Kohmura, M. Kokubun, T. Kosaka, T. Kotani, K. Koyama, A. Kubota, H. Kunieda, P. Laurent, F. Lebrun, O. Limousin, M. Loewenstein, K. Long, G. Madejski, Y. Maeda, K. Makishima, M. Markevitch, H. Matsumoto, K. Matsushita, D. McCammon, J. Miller, S. Mineshige, K. Minesugi, T. Miyazawa, T. Mizuno, K. Mori, H. Mori, K. Mukai, H. Murakami, T. Murakami, R. Mushotzky, Y. Nakagawa, T. Nakagawa, H. Nakajima, T. Nakamori, K. Nakazawa, Y. Namba, M. Nomachi, S. O'Dell, H. Ogawa, M. Ogawa, K. Ogi, T. Ohashi, M. Ohno, M. Ohta, T. Okajima, N. Ota, M. Ozaki, F. Paerels, S. Paltani, A. Parmar, R. Petre, M. Pohl, S. Porter, B. Ramsey, C. Reynolds, S. Sakai, R. Sambruna, G. Sato, Y. Sato, P. Serlemitsos, M. Shida, T. Shimada, K. Shinozaki, P. Shirron, R. Smith, G. Sneiderman, Y. Soong, L. Stawarz, H. Sugita, A. Szymkowiak, H. Tajima, H. Takahashi, Y. Takei, T. Tamagawa, T. Tamura, K. Tamura, T. Tanaka, Y. Tanaka, Y. Tanaka, M. Tashiro, Y. Tawara, Y. Terada, Y. Terashima, F. Tombesi, H. Tomida, M. Tozuka, Y. Tsuboi, M. Tsujimoto, H. Tsunemi, T. Tsuru, H. Uchida, Y. Uchiyama, H. Uchiyama, Y. Ueda, S. Uno, M. Urry, S. Watanabe, N. White, T. Yamada, H. Yamaguchi, K. Yamaoka, N. Yamasaki, M. Yamauchi, S. Yamauchi, Y. Yatsu, D. Yonetoku and A. Yoshida: The ASTRO-H mission, *Proc. SPIE*, 7732, 77320Z-77320Z-18 (2010).
- [3] S. Watanabe, H. Tajima, Y. Fukazawa, R. Blandford, T. Enoto, J. Kataoka, M. Kawaharada, M. Kokubun, P. Laurent, F. Lebrun, O. Limousin, G. Madejski, K. Makishima, T. Mizuno, T. Nakamori, T. Nakazawa, K. Mori, H. Odaka, M. Ohno, M. Ohta, G. Sato, R. Sato, S. Takeda, H. Takahashi, T. Takahashi, T. Tanaka, M. Tashiro, Y. Terada, H. Uchiyama, Y. Uchiyama, S. Yamada, Y. Yatsu, D. Yonetoku and T. Yuasa: Soft gamma-ray detector for the ASTRO-H mission, *Proc. SPIE, Astronomical Telescopes + Instrumentation* 2012, 8443, 844326 (2012).
- [4] T. Takahashi, K. Mitsuda, R. Kelley, F. Aharonian, H. Akamatsu, F. Akimoto, S. Allen, N. Anabuki, L. Angelini, K. Arnaud, M. Asai, M. Audard, H. Awaki, P. Azzarello, C. Baluta, A. Bamba, N. Bando, M. Bautz, T. Bialas, R. D. Blandford, K. Boyce, L. Brenneman, G. Brown, E. Cackett, E. Canavan, M. Chernyakova, M. Chiao, P. Coppi, E. Costantini, J. de Plaa, J. W. den Herder, M. DiPirro, C. Done, T. Dotani, J. Doty, K. Ebisawa, T. Enoto, Y. Ezoe, A. Fabian, C. Ferrigno, A. Foster, R. Fujimoto, Y. Fukazawa, S. Funk, A. Furuzawa, M. Galeazzi, L. Gallo, P. Gandhi, K. Gilmore, M. Guainazzi, D. Haas, Y. Haba, K. Hamaguchi, A. Harayama, I. Hatsukade, K. Hayashi, T. Hayashi, K. Hayashida, J. Hiraga, K. Hirose, A. Hornschemeier, A. Hoshino, J. Hughes, U. Hwang, R. Iizuka, Y. Inoue, K. Ishibashi, M. Ishida, K. Ishikawa, K. Ishimura, Y. Ishisaki, M. Itoh, N. Iwata, N. Iyomoto, C. Jewell, J. Kaastra, T. Kallman, T. Kamae, J. Kataoka, S. Katsuda, J. Katsuta, M. Kawaharada, N. Kawai, T. Kawano, S. Kawasaki, D. Khangaluyan, C. Kilbourne, M. Kimball, M. Kimura, S. Kitamoto, T. Kitayama, T. Kohmura, M. Kokubun, S. Konami, T. Kosaka, A. Koujelev, K. Koyama, H. Krimm, A. Kubota, H. Kunieda, S. LaMassa, P. Laurent, F. Lebrun, M. Leutenegger, O. Limousin, M. Loewenstein, K. Long, D. Lumb, G. Madejski, Y. Maeda, K. Makishima, M. Markevitch, C. Masters, H. Matsumoto, K. Matsushita, D.

- McCammon, D. McGuinness, B. McNamara, J. Miko, J. Miller, E. Miller, S. Mineshige, K. Minesugi, I. Mitsuishi, T. Miyazawa, T. Mizuno, K. Mori, H. Mori, F. Moroso, T. Muench, K. Mukai, H. Murakami, T. Murakami, R. Mushotzky, H. Nagano, R. Nagino, T. Nakagawa, H. Nakajima, T. Nakamori, S. Nakashima, K. Nakazawa, Y. Namba, C. Natsukari, Y. Nishioka, M. Nobukawa, H. Noda, M. Nomachi, S. O'Dell, H. Odaka, H. Ogawa, M. Ogawa, K. Ogi, T. Ohashi, M. Ohno, M. Ohta, T. Okajima, T. Okazaki, N. Ota, M. Ozaki, F. Paerels, S. Paltani, A. Parmar, R. Petre, C. Pinto, M. Pohl, J. Pontius, F. S. Porter, K. Pottschmidt, B. Ramsey, R. Reis, C. Reynolds, C. Ricci, H. Russell, S. Safi-Harb, S. Saito, S. Sakai, H. Sameshima, K. Sato, R. Sato, G. Sato, M. Sawada, P. Serlemitsos, H. Seta, Y. Shibano, M. Shida, T. Shimada, P. Shirron, A. Simionescu, C. Simmons, R. Smith, G. Sneiderman, Y. Soong, L. Stawarz, Y. Sugawara, S. Sugita, A. Szymkowiak, H. Tajima, H. Takahashi, H. Takahashi, S. Takeda, Y. Takei, T. Tamagawa, K. Tamura, T. Tamura, T. Tanaka, Y. Tanaka, Y. Tanaka, M. Tashiro, Y. Tawara, Y. Terada, Y. Terashima, F. Tombesi, H. Tomida, Y. Tsuboi, M. Tsumimoto, H. Tsunemi, T. Tsuru, H. Uchida, H. Uchiyama, Y. Uchiyama, Y. Ueda, S. Ueda, S. Ueno, S. Uno, M. Urry, E. Ursino, C. de Vries, A. Wada, S. Watanabe, T. Watanabe, N. Werner, N. White, D. Wilkins, S. Yamada, T. Yamada, H. Yamaguchi, K. Yamaoka, N. Yamasaki, M. Yamauchi, S. Yamauchi, T. Yaqoob, Y. Yatsu, D. Yonetoku, A. Yoshida, T. Yuasa, I. Zhuravleva, A. Zoghbi and J. ZuHone: The ASTRO-H X-ray astronomy satellite, *Proc. SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014*, 914425 (2014).
- [5] T. Takahashi, M. Kokubun, K. Mitsuda, R. Kelley, T. Ohashi, F. Aharonian, H. Akamatsu, F. Akimoto, S. Allen, N. Anabuki, L. Angelini, K. Arnaud, M. Asai, M. Audard, H. Awaki, M. Axelsson, P. Azzarello, C. Baluta, A. Bamba, N. Bando, M. Bautz, T. Bialas, R. Blandford, K. Boyce, L. Brenneman, G. Brown, E. Bulbul, E. Cackett, E. Canavan, M. Chernyakova, M. Chiao, P. Coppi, E. Costantini, J. de Plaa, J-W. den Herder, M. DiPirro, C. Done, T. Dotani, J. Doty, K. Ebisawa, M. Eckart, T. Enoto, Y. Ezoe, A. Fabian, C. Ferrigno, A. Foster, R. Fujimoto, Y. Fukazawa, A. Furuzawa, M. Galeazzi, L. Gallo, P. Gandhi, K. Gilmore, M. Giustini, A. Goldwurm, L. Gu, M. Guainazzi, D. Haas, Y. Haba, K. Hagino, K. Hamaguchi, A. Harayama, I. Harrus, I. Hatsukade, T. Hayashi, K. Hayashi, K. Hayashida, J. Hiraga, K. Hirose, A. Hornschemeier, A. Hoshino, J. Hughes, Y. Ichinohe, R. Iizuka, Y. Inoue, H. Inoue, K. Ishibashi, M. Ishida, K. Ishikawa, K. Ishimura, Y. Ishisaki, M. Itoh, N. Iwata, N. Iyomoto, C. Jewell, J. Kaastra, T. Kallman, T. Kamae, E. Kara, J. Kataoka, S. Katsuda, J. Katsuta, M. Kawaharada, N. Kawai, T. Kawano, S. Kawasaki, D. Khangulyan, C. Kilbourne, M. Kimball, A. King, T. Kitaguchi, S. Kitamoto, T. Kitayama, T. Kohmura, T. Kosaka, A. Koujelev, K. Koyama, S. Koyama, P. Kretschmar, H. Krimm, A. Kubota, H. Kunieda, P. Laurent, F. Lebrun, S-H. Lee, M. Leutenegger, O. Limousin, M. Loewenstein, K. Long, D. Lumb, G. Madejski, Y. Maeda, D. Maier, K. Makishima, M. Markevitch, C. Masters, H. Matsumoto, K. Matsushita, D. McCammon, D. McGuinness, B. McNamara, M. Mehdipour, J. Miko, J. Miller, E. Miller, S. Mineshige, K. Minesugi, I. Mitsuishi, T. Miyazawa, T. Mizuno, K. Mori, H. Mori, F. Moroso, H. Moseley, T. Muench, K. Mukai, H. Murakami, T. Murakami, R. Mushotzky, H. Nagano, R. Nagino, T. Nakagawa, H. Nakajima, T. Nakamori, T. Nakano, S. Nakashima, K. Nakazawa, Y. Namba, C. Natsukari, Y. Nishioka, M. Nobukawa, K. Nobukawa, H. Noda, M. Nomachi, S. O'Dell, H. Odaka, H. Ogawa, M. Ogawa, K. Ogi, M. Ohno, M. Ohta, T. Okajima, A. Okamoto, T. Okazaki, N. Ota, M. Ozaki, F. Paerels, S. Paltani, A. Parmar, R. Petre, C. Pinto, M. Pohl, J. Pontius, F. S. Porter, K. Pottschmidt, B. Ramsey, C. Reynolds, H. Russell, S. Safi-Harb, S. Saito, S. Sakai, K. Sakai, H. Sameshima, T. Sasaki, G. Sato, Y. Sato, K. Sato, R. Sato, M. Sawada, N. Schartel, P. Serlemitsos, H. Seta, Y. Shibano, M. Shida, M. Shidatsu, T. Shimada, K. Shinozaki, P. Shirron, A. Simionescu, C. Simmons, R. Smith, G. Sneiderman, Y. Soong, L. Stawarz, Y. Sugawara, H. Sugita, S. Sugita, A. Szymkowiak, H. Tajima, H. Takahashi, S. Takeda, Y. Takei, T. Tamagawa, T. Tamura, K. Tamura, T. Tanaka, Y. Tanaka, Y. Tanaka, M. Tashiro, Y. Tawara, Y. Terada, Y. Terashima, F. Tombesi, H. Tomida, Y. Tsuboi, M. Tsumimoto, H. Tsunemi, T. Tsuru, H. Uchida, Y. Uchiyama, H. Uchiyama, Y. Ueda, S. Ueda, S. Ueno, S. Uno, M. Urry, E. Ursino, C. de Vries, A. Wada, S. Watanabe, T. Watanabe, N. Werner, D. Wik, D. Wilkins, B. Williams, T. Yamada, S. Yamada, H. Yamaguchi, K. Yamaoka, N. Yamasaki, M. Yamauchi, S. Yamauchi, T. Yaqoob, Y. Yatsu, D. Yonetoku, A. Yoshida, T. Yuasa, I. Zhuravleva and A. Zoghbi: The ASTRO-H (Hitomi) X-ray astronomy satellite, *Proc. SPIE 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016*, 99050U (2016).
- [6] Requirements & Standards Division, ESA-ESTEC, ECSS Secretariat: ECSS-E-ST-50-12C, SpaceWire—links, nodes, routers and networks, (2008).
- [7] 宇宙航空研究開発機構: JERG-2-432, SpaceWire オンボードサブネットワーク設計標準, (2016).
- [8] 吉川弘之: 科学者と専門家の役割, 科学技術振興機構シンポジウム「社会における科学者の責任と役割」於・政策研究大学院大学講演資料, (2011).
- [9] 田中正躬: 国際標準の考え方, 東京大学出版会, 東京 (2017).
- [10] 経済財政諮問会議「構造変化と日本経済」専門調査会: グローバル経済に生きる—日本経済の「若返り」を—, (2008).
- [11] T. Yuasa, T. Takahashi, M. Ozaki, M. Kokubun, M. Nomachi, H. Hihara and K. Masukawa: A deterministic SpaceWire network onboard the ASTRO-H space X-ray observatory, *Proc. Intl. SpaceWire Conference 2011*, 348–351 (2011).
- [12] T. Yuasa, T. Takahashi, M. Nomachi and H. Hihara: A SpaceWire router architecture with non-blocking packet transfer mechanism, *Proc. Intl. SpaceWire Conference 2014*, 213–219 (2014).
- [13] 高橋忠幸, 笠羽康正, 高島健, 吉光徹雄, 山田隆弘: 科学衛星データ処理系の将来展望, 宇宙科学シンポジウム講演, (2005).
- [14] 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所ASTRO-Hプロジェクトチーム: 8-2 SpaceWireネットワーク—ネットワーク型衛星アーキテクチャー, X線天文衛星ASTRO-H実験報告書, 812–883 (2016).
- [15] European Space Agency: *WELL CONNECTED, European Space Agency Bulletin*, (2011).
- [16] H. Hihara, S. Moriyama, T. Tamura, T. Tohma, K. Kitade, S. Parkes, S. Mills, M. Nomachi, T. Takahashi and T. Takashima: SpaceWire protocol analyzer on Space Cube, *Proc. Intl. SpaceWire Conference 2007*, 249–252 (2007).
- [17] T. Yamada: Results of analysis for the SpW-D draft specification, 15th SpaceWire Working Group, (2010).
- [18] Space Technology Centre, University of Dundee: SpaceWire-D—deterministic control and data delivery over SpaceWire networks, revision: draft B, (2010).
- [19] 高田光隆, 陳暘, 高田広章, 湯浅孝行, 高橋忠幸, 能町正治:

SpaceWireのリアルタイム性保証手法の検討とソフトウェアプラットフォームの開発, 第13回宇宙科学シンポジウム, (2013).

[20] SciSys UK Ltd.: Network discovery protocols, protocol specification, SpaceWire plug-and-play protocol, reference, SSL/08717/DOC/003, Issue: 1.5, (2013).

執筆者略歴

檜原 弘樹（ひはら ひろき）

1986年日本電気(株)入社、2015年NECスペーステクノロジー(株)勤務、日本電気(株)兼務。人工衛星に搭載するネットワーク機器と画像処理機器の開発を取りまとめている。この論説では、日本からの技術提案をスペースワイヤ国際標準規格に反映する交渉に従事し、スペースワイヤ国際標準規格を適用した人工衛星に搭載するデータ処理系サブシステムの実用化開発を取りまとめた。



能町 正治（のまち まさはる）

2011年9月30日まで大阪大学理学研究科附属原子核実験施設教授。現在、大阪大学放射線科学基盤機構・教授。SpaceWire Working Group Committee（スペースワイヤ作業部会委員会）において、国際標準規格に関する日本からの技術提案を取りまとめていると共に、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）におけるスペースワイヤオンボードサブネットワーク設計標準策定の主査をつとめている。この論説では、スペースワイヤ作業部会委員会における日本からの参加者を統率すると共に、運営委員会に我が国を代表して参加し、スペースワイヤ国際標準規格における日本からの技術提案活動を主導した。



高橋 忠幸（たかはし ただゆき）

2018年2月15日まで国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授。現在、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli-IPMU）教授。我が国のスペースワイヤ国際標準規格を適用した共通データベースの開発、および国際標準化活動全般を取りまとめた。この論説では、科学衛星データ処理系の将来展望と国際標準規格の提案と連携した研究開発計画を策定すると共に、国際協力の枠組みを構築し、人工衛星に搭載するデータ処理系の研究開発全般を取りまとめた。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（小野 晃、赤松 幹之：産業技術総合研究所）

人工衛星のネットワーク上の通信規格であるスペースワイヤの国際標準化において、日本の提案が採用されていったシナリオが、その技術背景と人の役割の面から記述されている。開発型の標準策定に対して吉川モデルを適用し、欧州、米国、日本の規格策定実践者の行動様式を分析している。人工衛星の通信規格に限らずに、標準開発一般に通じるものがあり、シンセシオロジーの論説としてふさわしい。

議論2 規格策定における参加者の範囲と役割

質問（小野 晃）

いわゆる国際規格としてはISOやIECがあり、そこでは各国の標準化機関が合意して国際規格を作ります。一方この論説の主題であるスペースワイヤ国際標準規格はどのような人々と組織が合意して作った国際規格なのでしょう。世界中の宇宙技術の専門家、各国の宇宙機関、欧州宇宙機関（ESA）等が関わったと想像されますが、スペースワイヤ国際標準規格を作成するに当たって、どのような主体がそれぞれどのような役割を果たしたのでしょうか。

回答（檜原 弘樹）

スペースワイヤは、欧州宇宙機関の研究所であるEuropean Space Agency / European Space Research and Technology Centre（ESA/ESTEC）が発案者となり、それまで軍用の部品が使われていた宇宙機内の機器間通信の規格を、特殊な部品を使わずに実現することを目的として検討が始められました。ESAにおいて国際標準規格を制定するのはESTEC内の技術委員会ですが、技術委員会での制定作業に先立ち、仕様案を討議し、技術委員会に仕様案を提出するという役割を担うスペースワイヤ技術部会委員会（SpaceWire Working Group Committee, SpW WG）が設けられました。

このSpW WGに参加するに際しては参加資格に制約は事実上ありません。いかなる国も、官・学・産の立場によらず参加でき、また、SpW WGにおける発言権に制約が課されることも無く、自由に発言ができます。実際は、欧州、日本、ロシア、米国の宇宙機関、大学、企業が参加しており、トルコやブラジル等の宇宙関係の政府機関や研究所が参加することもあります。

ただし、欧州が受け入れることのできる参加者として暗黙の了解はあるように感じられます。すなわち、明確な参加資格の規定は無いものの、宇宙機の研究開発が可能であり、かつ、仕様案について提案や議論のできる参加者が受け入れられているように感じられます。

議論3 開発型の標準

質問（小野 晃）

「開発型の標準」という用語がしばしば用いられていますが、通常の標準とどこが異なるのか、その定義はどのようなものですか。スペースワイヤ国際標準規格が「開発型」である理由は何かご説明願います。また開発型国際標準である場合、従来型と異なって標準化で留意すべき点に関して著者の見解をお聞かせください。

回答（檜原 弘樹）

「開発型の標準」という用語は、参考文献9)として参考にさせていただきました。「田中正躬著：“国際標準の考え方” 東京大学出版会、東京（2017）」から引用させていただきました。この用語の理解としまして、開発目的が先行し、そのためにあるべき標準規格の体系と規格の種類自体から討議されると共に、SpW WGに参加する各組織は研究開発成果、試作評価結果、さらには独自に進めた軌道上実証成果等を持ち寄ることが期待され、さらにその実績が尊重されるという状況が「開発型」という用語で端的に表現できるものと解釈しました。

標準化提案を進めるに当たりましては、このスペースワイヤ自体は通信規格であるにも関わらず、コネクタや半導体デバイス等の開発提案も推奨されており、宇宙機に適用するための信頼性を担保しながら新規技術を導入することが許容されていることから、機能性能的に先進性を追求できることがSpW WGの参加者に求められます。これが暗黙の了解に繋がるように感じられ、留意すべき点と認識しました。

また、規格適用範囲の統廃合も起こり、また、規格策定の期限も明確では無いことから、企業の立場としては製品開発を進めつつ、その開発と並行し、製品仕様として他組織との互換性を要するところを積極的に開示して規格案として提案する提案力が求められる点も、留意点と考えます。

議論4 観察者、構成者、行動者に対応する組織

質問（小野 晃）

4章「各国行動様式の比較」における「観察者」、「構成者」、「行動者」

が具体的にどのような組織に対応するのかを日本の場合に当てはめてご説明願います。「対象」＝人工衛星あるいは搭載センサ、およびそれらから得られるデータ・情報、「観察者」＝研究機関、大学、宇宙航空研究開発機構の研究者、データ利用者、「構成者」＝宇宙航空研究開発機構、「行動者」＝製造企業、と理解してよいでしょうか。外国の場合もこの対応関係が当てはまりますか。

通常、規格は、製品の提供者と利用者が、市場取引において準拠すべき合意事項として捉えることが多いですが、今回の論説で製品の提供者と利用者はどの主体に対応しますか。

回答（檜原 弘樹）

日本には宇宙航空研究開発機構を取り纏めとした国内規格制定の仕組みが整備されており、行動者である製造企業と観察者である宇宙航空研究開発機構間の対象である人工衛星と観測データの受発注関係による討議に基づいた規格が制定されてきています。

大学や国の研究機関は規格策定プロセスでは観察者の立場を取ることが多く、研究開発に際しては行動者の立場をとることもあります。また、システムベンダの性格を持つ製造企業が観察者の視点を持って規格策定に参画することもあります。規格策定は参加者の所属組織にあまりよらない中立的な意識を共有した参加者による標準化委員会によって進められることから、構成者の場は独立性が高く、これは我が国の宇宙機の技術開発が官民一体になって進められてきたという背景にも依存しているものと考えられます。

外国の場合、欧州は宇宙機関以外の研究機関がスペースワイヤ規格に関する限り、規格策定に関与してきません。研究機関の間でも分野に応じた役割分担が明確である印象を受けます。米国はさらに大学も規格策定に関与せず、事実上、米国航空宇宙局と企業のみが規格策定に関与しています。このため、どちらも、参照モデルへの対応が日本と異なります。

今回参照しているモデルにおいて、提供者と利用者それぞれ行動者と観察者に対応付けることにより上述の差異を表現し得ると考えますが、欧州の場合は市場取引のしくみの一つとして規格を活用する意識が見受けられ、観察者が構成者の立場を取って市場取引のしくみの提供者ともなっていると考えられます。

議論5 各国行動様式の違いの原因

質問（小野 晃）

4章に欧州、米国、日本の行動様式の違いが説明されていますが、それぞれで行動様式が異なる一番の原因はどこにあると考えられますか。

回答（檜原 弘樹）

スペースワイヤの規格策定のプロセスを経験する中から、行動様式の異なる一番の原因は産業を育成する場の方針の違いであると感じます。欧州は淘汰を好まない共存を目指しており、そのままでは発展が停滞するリスクを、異なる価値観の存在を認めた議論により合意することで回避しています。米国は淘汰を意識的に認めており、提案の選択によって発展を促進しています。日本では規格を産業育成の手段としてではなく、仲裁として位置づけている印象があります。

議論6 日本の課題

質問（小野 晃）

欧州や米国と比べた場合、行動様式の点で日本にとっての課題は何だとお考えでしょうか。

回答（檜原 弘樹）

欧州や米国と比べた場合、日本では多様性を活かす場が用意されていないように思います。欧州でもそれぞれ個々の国の中では暗黙の了解に基づく常識のようなものが見受けられますが、各国間の価値観の相違や実績を尊重しつつ討議する場を用意しており、これが多様性

を明示的に活用するのに役立っています。

米国は国内に多様性があり、異なった視点に基づく実績が生まれることを認識しており、それが強みの源泉であることを明確に意識しています。日本にも国内に多様性がありますが、多様性から派生する実績を共有する場が用意されていないように感じます。

質問（赤松 幹之）

我が国独自の規格を国際標準規格に取り込むことは容易ではなかった、という記述がありますが、なぜ容易ではなかったと考えるのかを記載してください。

回答（檜原 弘樹）

御指摘頂きました点の後者のモチベーションが主因であると考えられ、これを追記いたしました。

議論7 大学との共同研究と標準化について

質問（赤松 幹之）

Concurrent Schedule について記載されていますが、このポイントは軌道上での実績に加えて共同研究で設計指針を構築した点であると理解しました。この共同研究は、国際標準化に持ち込むことを目的としたシナリオの一部としての共同研究だったのでしょうか？もし、前者であれば、どういう判断のもとでこの共同研究を実施することになったのでしょうか？

回答（檜原 弘樹）

共同研究につきまして改めて思い返しますと、「ひとみ」の開発のプロジェクトマネージャーをされていた高橋教授が形式検証と論理的な検証を重視する欧州の文化に造詣が深く、経験知に基づく実装仕様を欧州でも認められる形式として整えるべく、このための官産学共同研究計画を推進し、その共同研究開発を通じて欧州の論理的（形式的）に検証が可能であることを重視する発想にも対応できる指針を構築したものと再認識しました。この旨を追記いたしました。

議論8 将来の貢献

質問（小野 晃）

この論説は宇宙技術の中で日本が国際規格の作成に大きく貢献した事例を紹介していますが、今後もこのような貢献を続けていくために、最も重要な点は何だとお考えでしょうか。宇宙技術以外の一般の技術に関してでも結構です。

回答（檜原 弘樹）

スペースワイヤの規格策定のプロセスを振り返りますと、今後は先行事例のみならず多様性に働きかける、という意識が最も重要であると考えます。その理由は次の二つです。

まず、我々はいわゆるカイゼンの意識により、既存の成果を否定するところから始まる競争の意識ではなく、既存の成果を尊重する意識からでも国際標準規格の策定に貢献できることがわかりました。それは、仕様を策定する側と仕様を利用する側に階級意識が無く、一体となる文化を持ち合わせていることから、PDCAサイクルが早くまわせることに起因します。

次に、カイゼンの手法は先行事例があるところから始まります。我が国の技術レベルの向上に伴い、先行事例を見つけることが難しくなってきました。今後は先進国や発展途上国、あるいは新しい技術や古い技術という意識を排除し、多様性の発露を先行事例として捉えるよう認識を改めることにより、常に先行事例を視野に入れることができます。

これらの理由から、多様性を先行事例として捉えなおし、それを尊重し、カイゼンしてゆくことにより、欧米の競争の価値観と共存し、かつ継続的な国際標準規格策定への貢献が可能になると考えます。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2017年 4月 1日

1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、報告、論説、座談会記事、読者フォーラム

このうち、研究論文、報告、論説は、原則として、投稿された原稿から査読を経て掲載する。座談会記事は編集委員会の企画で記事を作成して掲載する。読者フォーラムは読者により寄稿されたものを編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。いずれの記事も、多様な研究分野・技術分野にまたがる読者が理解できるように書かれたものとする。記事の概要は下記の通り。

①研究論文

成果を社会に活かすことを目的とした研究開発の進め方とその基となる考え方（これをシナリオと呼ぶ）、その結果としての研究成果を、実際に遂行された研究開発に関する自らの経験や分析に基づき、論理立てて記述した論文。シナリオやその要素構成（選択・統合）についての著者の独自性を論文としての要件とするが、研究成果が既に社会に活かされていることは要件とはしない。投稿された原稿は複数名の査読者による査読を行い、査読者との議論を基に著者が最終原稿を作成する。なお、編集委員会の判断により査読者と著者とで直接面談（電話・メール等を含む）で意見交換を行う場合がある。

②報告

イノベーションに繋がるような実用的価値のある技術の開発事例および新しい技術の実用化事例を記述した報告。記述の内容は、1) 目的、2) 開発の経緯（目的への道筋）、3) 成果、から成る。投稿された原稿は編集委員による内容の確認を行い、必要な修正点等があればそれを著者に伝え、著者はそれに基づいて最終原稿を作成する。

③論説

研究開発の成果を社会に活かすあるいは社会に広めるための、考えや主張あるいは動向・分析などを記述した記事。主張の独自性は要件としないが、既公表の記事と同一あるいは類似のものではないものとする。投稿された原稿は編集委員による内容の確認を行い、必要な修正点等があればそれを著者に伝え、著者はそれに基づいて最終原稿を作成する。

④座談会記事

編集委員会が企画した座談会あるいは対談等を記事にしたもの。座談会参加者の発言や討論を基に原稿を書き起したもので、必要に応じて、座談会後に発言を補足するための追記等を行うことがある。

⑤読者フォーラム

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本誌の主旨に合致した読者への有益な情報提供などを掲載した記事とする。1,200文字以内で自由書式とする。

編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

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、報告・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。

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・報告・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・報告・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。報告または論説における編集委員との議論は、編集委員が必要と認める場合に編集委員名を公開して行い、主な論点について800文字程度(半ページ以内)で編集委員会編集して掲載する。

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)。

ウェブサイト：[番号] 著者名(更新年)：ウェブページの題名、ウェブサイトの名称(著者と同じ場合は省略可)、URL、閲覧日。

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(Wordファイル)も含め電子媒体も下記宛に提出する。

〒305-8560

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第1

産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内

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 企画本部広報サービス室内

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

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 April 1, 2017

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

- Research papers, reports, commentaries, roundtable talks, and readers’ forums

Of these, the submitted manuscripts of research papers, reports, and commentaries undergo review processes before publication. The roundtable talks are organized, prepared, and published by the Editorial Board. The readers’ forums carry writings submitted by the readers, and the articles are published after the Editorial Board reviews and approves. All articles must be written so they can be readily understood by the readers from diverse research fields and technological backgrounds. The explanations of the article types are as follows.

① Research papers

A research paper rationally describes the concept and the design of R&D (this is called the scenario), whose objective is to utilize the research results in society, as well as the processes and the research results, based on the author’s experiences and analyses of the R&D that was actually conducted. Although the paper requires the author’s originality for its scenario and the selection and integration of elemental technologies, whether the research result has been (or is being) already implemented in society at that time is not a requirement for the submission. The submitted manuscript is reviewed by several reviewers, and the reviewers will recommend whether the manuscript should be accepted, revised, or declined. The author completes the final draft based on the discussions with the reviewers. Views may be exchanged between the reviewers and authors through direct contact (including telephone conversations, e-mails, and others), if the Editorial Board considers such exchange necessary.

② Reports

A report describes a development example of technology which has practical value as well as an example of new technology which has been put to practical use. It contains 1) the aim, 2) the process of development (the course to the goal), and 3) the outcomes. The submitted manuscript is checked by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members’ comments.

③ Commentaries

Commentaries describe the thoughts, statements, or trends and analyses on how to utilize or spread the results of R&D to society. Although the originality of the statements is not required, the commentaries should not be the same or similar to any articles published in the past. The submitted

manuscripts will be checked by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members’ comments.

④ Roundtable talks

Roundtable talks are articles of the discussions or interviews that are organized by the Editorial Board. The manuscripts are written from the transcripts of statements and discussions of the roundtable participants. Supplementary comments may be added after the roundtable talks, if necessary.

⑤ Readers’ forums

The readers’ forums include the readers’ comments or thoughts on the articles published in *Synthesiology*, or articles containing information useful to the readers in line with the intent of the journal. The forum articles may be in free format, with 1,200 Japanese characters or less. The Editorial Board will decide whether the articles will be published.

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 reports and commentaries should also comply with the same structure and format except subtitles and abstracts are unnecessary.

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, reports, and commentaries shall have front covers and the category of the articles (research paper, report, or commentary) 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, 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 with the names of the reviewers disclosed. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article. Regarding the reports and the commentaries, discussion with the Editorial Board members will be opened at the Board's discretion. In this case, the Editorial Board will edit the discussion to about 800 Japanese characters (less than half a page) with the names of the Board members disclosed.

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 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).

Website – [No.] Author(s) name (updating year): Title of web page, Name of website (may be omitted). If the name of the website is the same as that of the author(s), URL, Access date.

4 Submission

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

Synthesiology Editorial Board
c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

Proofreading by author(s) of articles after typesetting is complete will be done once. In principle, only correction of printing errors is 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 Public Relations Information Office, Planning Headquarters, 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

編集後記

本号には3つの研究論文と1つの論説記事が掲載されています。深谷論文と木村論文はいずれもポーラス材料に関わる内容ですが、前者はすでに広く使われているシリカ系材料を焼却残渣から製造する技術に関するもので、後者はポーラス材料の高機能化を目指して非シリカ系材料の可能性を追求するための合成技術に関するものです。ケイ素化学製品製造の省エネルギー化技術を元としてゴミの焼却残渣を原料として高い品質のポーラス材料を作り出し、種々の産業用途に提供するというエコシステムを実現する研究開発が行われている一方で、ポーラス材料の可能性を追求するという深掘りの研究が進んでおり、研究を進める方向としてのいわば両極端のように見えます。いずれもがインパクトのある研究開発であり、自身の持つ研究スキルや技術をどのように展開するのかを考える時の大いなる参考になると思います。岡田論文は機械部品の内壁のレーザ検査装置の開発・商品化に関する内容ですが、機械製造の自動化の流れの中で検査技術の進化が求

められている中で、企業と連携し種々の工夫をしながら新しい技術を実用化にまで持って行っています。本誌11巻1号にも光計測を用いて内筒の精度を計測する検査装置の技術開発に関する古川論文が掲載されていますが、両者の共通点は企業との連携であり、企業の持つ技術との融合と市場の潜在的ニーズの把握と新しい技術を実現しようとする熱意が大きな力になっていることが分かります。檜原論説はスペースワイヤと呼ばれる衛星内の通信規格の国際標準化に関する内容で、日本でやってきたことが国際標準として採用された経緯が述べられています。ここでは、日本で進めてきた通信技術の優位性と実績が正しく評価されてきたこととともに、日本と欧州と米国の関係者の行動様式の違いが指摘されています。国際標準化活動に関わってきた読者には同じような印象を持たれる方が多くおられるかもしれませんし、これから国際標準化活動に関わる方にとって国際の場での議論の進め方の参考になろうかと思えます。

(普及幹事 赤松 幹之)

シンセシオロジー編集委員会

委員長：三木 幸信

副委員長：湯元 昇 (国立循環器病研究センター)、小原 春彦

幹事 (編集及び査読)：池上 敬一、金山 敏彦、清水 敏美、牧野 雅彦

幹事 (普及)：赤松 幹之、小林 直人 (早稲田大学)

委員：綾 信博、有本 裕 (理化学研究所)、一村 信吾 (名古屋大学)、小賀坂 康志 (国立研究開発法人 科学技術振興機構)、小野 晃、景山 晃、栗本 史雄、後藤 雅式、内藤 茂樹、藤井 賢一、松井 俊浩 (情報セキュリティ大学院大学)、吉川 弘之 (国立研究開発法人 科学技術振興機構)

事務局：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

〒 305-8560 つくば市梅園 1-1-1 中央第 1 産業技術総合研究所企画本部広報サービス室内

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/aist_j/aistinfo/synthesiology/index.html

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: Y. MIKI

Senior Executive Editor: N. YUMOTO (National Cerebral and Cardiovascular Center), H. OBARA

Executive Editors: K. IKEGAMI, T. KANAYAMA, T. SHIMIZU, M. MAKINO, M. AKAMATSU, N. KOBAYASHI (Waseda University)

Editors: N. AYA, Y. ARIMOTO (RIKEN), S. ICHIMURA (Nagoya University), Y. OGASAKA (Japan Science and Technology Agency),

A. ONO, A. KAGEYAMA, C. KURIMOTO, M. GOTOH, S. NAITOU, K. FUJII, T. MATSUI (Institute of Information Security), H.

YOSHIKAWA (Japan Science and Technology Agency)

Publishing Secretariat: Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST

c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST

Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560, Japan

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

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

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

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

「Synthesiology」の趣旨 — 研究成果を社会に活かす知の蓄積 —

科学的な発見や発明が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。そのため、研究者自身がこのギャップを埋める研究活動を行なうべきであると考え。これまでも研究者によってこのような活動が行なわれてきたが、そのプロセスは系統立てて記録して論じられることがなかった。

このジャーナル「Synthesiology - 構成学」では、研究成果を社会に活かすために行なうべきことを知として蓄積することを目的とする。そのため本誌では、研究の目標設定と社会的価値、それに至る具体的なシナリオや研究手順、要素技術の統合のプロセスを記述した論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に生きる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。

Aim of *Synthesiology* —Utilizing the fruits of research for social prosperity—

There is a wide gap between scientific achievement and its utilization by society. The history of modern science is replete with results that have taken life-times to reach fruition. This disparity has been called the *valley of death*, or the *nightmare stage*. Bridging this difference requires scientists and engineers who understand the potential value to society of their achievements. Despite many previous attempts, a systematic dissemination of the links between scientific achievement and social wealth has not yet been realized.

The unique aim of the journal *Synthesiology* is its focus on the utilization of knowledge for the creation of social wealth, as distinct from the accumulated facts on which that wealth is engendered. Each published paper identifies and integrates component technologies that create value to society. The methods employed and the steps taken toward implementation are also presented.

Synthesiology 第11巻第3号 2018年9月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所



Research papers

Challenge towards synthesis of non-silica-based hybrid mesoporous materials

—*Level of compositional design and control of mesoporous materials achieved so far*—

T. KIMURA

High-value materials from incineration residues of burnable garbage

—*Production of silica with high specific surface area from “molten slag”
and direct transformation of silica to basic raw material for silicon chemical industry*—

N. FUKAYA, S. KATAOKA and J-C. CHOI

Development and commercialization of laser inspection system to detect surface flaws of machined holes

S. OKADA, O. NAKAMURA and Y. ESAKI

Commentary

Contributing to the SpaceWire international standard

—*Successful factors for the development of a de jure standard*—

H. HIHARA, M. NOMACHI and T. TAKAHASHI

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*