

Synthesiology

大気圧電子顕微鏡 ASEMによる水中観察法の開発

交流電圧標準を導く薄膜型サーマルコンバータの開発

製造工程と製品のグリーン化を実現するための
レーザーを用いた材料プロセッシング技術の開発

高度な専門知識不要のITシステム開発ツール: MZ Platform

シンセシオロジー編集委員会

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標と社会的価値、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスを記述した論文誌です。本号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

大気圧電子顕微鏡ASEMIによる水中観察法の開発 —半導体の超薄膜技術とバイオ顕微鏡の融合研究—

電子顕微鏡は広範囲な科学技術分野で使用されているが、基本的には薄片の試料を真空下で観察するために、生体細胞等の in-situ 観察には利用が困難であった。小椋（産総研）らは、大気圧環境下で水中の生体細胞の観察が可能な走査電子顕微鏡及び光学顕微鏡との相関観察を可能とする設備の開発シナリオを策定し、試料ディッシュ窓に使用する SiN 薄膜の製造に卓越した技術を有する研究機関及び電顕メーカーと連携することにより、開発に成功した。当該研究は生体細胞の電顕観察を目標として進められたが、研究成果として電顕観察試料への制約条件が大幅に緩和されるようになり、癌や感染症の診断機器としての臨床応用、また、溶液中の電気化学反応や温度可変条件下での反応観察などへの適用も期待される。

交流電圧標準を導く薄膜型サーマルコンバータの開発 —交流電圧標準のトレーサビリティ体系構築の取り組み—

国家標準レベルの精密な交流電圧標準は、交直変換器（サーマルコンバータ）を用い、直流電圧標準と交流電圧を比較測定して導かれている。交流電圧の標準供給については、産業界から電圧と周波数の範囲の拡大が要望されており、また、校正事業者においては、操作性、耐久性の問題などからサーマルコンバータとは別方式のやや低い精度の校正器が使用されるなど、標準供給体系は十分ではなかった。そこで、藤木（産総研）らは、国家標準器と校正器のいずれにも適用しうるサーマルコンバータの開発を目標として、国家標準器に求められる不確かさの向上、標準の範囲の拡大、及び校正器に必要な操作性、耐久性、耐環境性などを満たすための課題を検討して要素技術開発から製品化までのシナリオを設定し、所期の目標を満足する開発に成功した。

製造工程と製品のグリーン化を実現するためのレーザーを用いた材料プロセッシング技術の開発 —光を用いたものづくり手法の確立と社会への貢献を目指して—

レーザーを用いた材料プロセッシング技術を体系的に概説し、製造工程と製品のグリーン化を実現するためのシナリオならびに要素技術の選択と構成が考察された。このシナリオに沿って新納（産総研）が開発した炭素繊維強化樹脂の切断、フッ素樹脂の表面改質、石英ガラスなどの透明硬脆材料の微細加工などの新規技術が例示的に紹介されている。いずれも、通常のレーザー加工法や他の競合加工技術では高速・高品位な加工が困難な例である。これら技術の実用・普及拡大に向けては、プロトタイプ機の全体製造プロセスへの適合化、当該技術の適用による高付加価値化の追求がポイントになる。

高度な専門知識不要のITシステム開発ツール：MZ Platform —製造業におけるエンドユーザー開発の実現—

澤田（産総研）らは、高度な専門知識を持たずとも、製造業の技術者が自ら IT システムを構築・運用できるツール「MZ Platform」を開発した。広く使われるためにコンポーネント化したシステムとしたが、コンポーネントは実用システム開発を通じて構築した。そして、これを普及させるためのセミナーの開催、コンソーシアムの設立、TLO 契約を通じたソフトウェアベンダーへの技術移転や公設研究所による技術指導も含めたサポート体制を充実させた。当該ツールの導入成功事例として、プラスチック射出成型企業における作業実績収集システム、金属表面処理業における受注・製造・在庫管理システム、金型製造業における受注・外注・進捗管理システムが紹介され、成功要因が考察されている。

Synthesiology 第8巻第3号(2015.8) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
大気圧電子顕微鏡 ASEM による水中観察法の開発 — 半導体の超薄膜技術とバイオ顕微鏡の融合研究 — ・・・小椋 俊彦、西山 英利、須賀 三雄、佐藤 主税	116 - 126
交流電圧標準を導く薄膜型サーマルコンバータの開発 — 交流電圧標準のトレーサビリティ体系構築の取り組み — ・・・藤木 弘之、天谷 康孝、佐々木 仁	127 - 144
製造工程と製品のグリーン化を実現するためのレーザーを用いた材料プロセッシング技術の開発 — 光を用いたものづくり手法の確立と社会への貢献を目指して — ・・・新納 弘之	145 - 157
高度な専門知識不要の IT システム開発ツール : MZ Platform — 製造業におけるエンドユーザー開発の実現 — ・・・澤田 浩之、徳永 仁史、古川 慈之	158 - 168
編集委員会より	
編集方針	169 - 170
投稿規定	171 - 172
編集後記	177
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Development of an in-solution observation method using atmospheric scanning electron microscopy (ASEM) — Interdisciplinary research between semiconductor fabrication technology and biological electron microscopy — --- T. OGURA, H. NISHIYAMA, M. SUGA and C. SATOU	116
Development of thin film multijunction thermal converters — Establishing metrological traceability system for AC voltage standard — --- H. FUJIKI, Y. AMAGAI and H. SASAKI	127
Green photonics for laser-based manufacturing — Photonics contributes to a sustainable society in the “photon century” — --- H. NIINO	145
An IT system development framework utilizable without expert knowledge: MZ Platform — Toward end-user development in manufacturing industry — --- H. SAWADA, H. TOKUNAGA and Y. FURUKAWA	158
Editorial policy	173 - 174
Instructions for authors	175 - 176

大気圧電子顕微鏡 ASEM による水中観察法の開発

— 半導体の超薄膜技術とバイオ顕微鏡の融合研究 —

小椋 俊彦¹、西山 英利²、須賀 三雄²、佐藤 主税^{3*}

タンパク質の組織内・細胞内での分布は高度に制御されており、刺激に応じて数秒以内にダイナミックに変化することも多い。このような分子機構が脳等の情報処理を支えており、その解明には多要素の変化を時間経過と共に解析する必要がある。そのため、迅速な試料作製と高分解能観察が可能な高スループット電子顕微鏡（電顕）が求められている。新開発の大気圧走査電顕（ASEM）は、水溶液中の試料をディッシュ底の薄膜を透して倒立走査電顕で観察する。試料は脱水なしに光学顕微鏡（光顕）並の短い手間で作製でき、分解能は薄膜近くで8 nmである。細胞や組織の分子分布、さらには電気化学反応や金属の融解・凝固も観察でき、癌や感染症の診断機器として期待される。

キーワード：光・電子相関顕微鏡、微小管、Stromal interaction molecule 1 (STIM 1)、免疫電子顕微鏡法、電気化学反応

Development of an in-solution observation method using atmospheric scanning electron microscopy (ASEM)

– Interdisciplinary research between semiconductor fabrication technology and biological electron microscopy –

Toshihiko OGURA¹, Hidetoshi NISHIYAMA², Mitsuo SUGA² and Chikara SATOU^{3*}

Protein complexes in cells and tissues play critical roles in various physiological functions, including embryogenesis and signal processing. To observe the dynamics of protein complexes, high resolution and high throughput electron microscopy (EM) in aqueous solution is required. However, standard EM requires the sample to be in a vacuum. With ASEM, an inverted scanning electron microscope (SEM) observes the wet sample from beneath an open dish while an optical microscope (OM) observes it from above. The disposable dish with a silicon nitride (SiN) film window can hold a few milliliters of culture medium, allowing various types of cells to be cultured in a stable environment. This system was used for the development of *in situ* correlative OM/SEM immuno-microscopy in liquid. We observed a dynamic string-like gathering of STIM1 on the endoplasmic reticulum in Jurkat T cells in response to Ca²⁺ store depletion. We have also observed filamentous-actin (F-actin) and tubulin in the growth cones of primary-culture neurons as well as in synapses. We monitored *in-situ* electrochemical reactions in electrolytes, and melting and solidification of solder using ASEM.

Keywords: Correlative Light and Electron Microscopy (CLEM), microtubule, STIM 1, immuno-electron microscopy, electrochemistry

1 はじめに

多くの物理現象や化学反応が水中で起こり、我々の遠い祖先は海で生まれた。そのため、水中を高分解能で観察することは物性、生物研究の双方に重要である。我々の体を例にとれば、タンパク質は生体機能を支える大切な要素であり、細胞内をダイナミックに移動するものが多い。イオンチャネル TRPV2 は通常細胞内膜に控えており、刺激により数秒以内に細胞表面に表れ機能を果たす^[1]。このような素早く移動するタンパク質は、近年数多く見つかってきており、他のタンパク質と会合・離散しながら生理機能

を果たす。会合したタンパク質複合体の多くは、さらに直接、間接に細胞骨格と結合して細胞内で局在する。このような構成要素の多い複合体の挙動と機能を解明するためには、迅速な試料作製・高分解能観察法が求められている。いわゆる高スループットな電子顕微鏡観察法である。しかし従来の電顕法では、サンプルを真空中で観るため、手間のかかる前処理が必要であった。

我々の開発した大気圧走査電子顕微鏡 (ASEM: Atmospheric Scanning Electron Microscope) は、金粒子や蛍光で標識した細胞を前処理することなく水中で

1 産業技術総合研究所 バイオメディカル研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2、2 日本電子(株) 〒196-8558 昭島市武蔵野 3-1-2、3 産業技術総合研究所 バイオメディカル研究部門 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第6&2

1. Biomedical Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan, 2. Advanced Technology Division, JEOL Ltd. 3-1-2 Musashino, Akishima 196-8558, Japan, 3. Biomedical Research Institute, AIST Tsukuba Central 6 and 2, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan * E-mail: ti-sato@aist.go.jp

Original manuscript received August 5, 2013, Revisions received January 9, 2015, Accepted January 27, 2015

そのまま観察する(図1)。高スループットな高分解能観察を実現すると同時に、重金属ラベル抗体でターゲット分子を標識する免疫電顕法にも優れている。さらに、光顕と電顕で相関観察が可能な光・電子相関顕微鏡 (CLEM: Correlative Light and Electron Microscopy) である。水の中を直接見る迅速性と高分解能は、さまざまな医療診断を可能にすると期待される。このような ASEM はバイオ研究のために開発されたが、物性分野やナノ分野でも気体・液体中での観察へのニーズは大きく、さまざまに応用が広がりがつつある。

2 気体・液体用の従来型電顕とASEMシステムの概要

2.1 従来の電顕法とその限界

従来、細胞内を観察するためには主に透過電顕 TEM が用いられ、さまざまな小器官が高分解能で解明されてきた。しかし、電顕では電子線を散乱させないように鏡筒内を真空にする必要がある。そのため試料は一般に真空中に耐えるように、数時間～数日間かかる複雑な処理を施される。100%有機溶媒による脱水・樹脂包埋等を伴うことが多いため、脱水処理に弱いタンパク質等の試料では構造変化の可能性があり、さらに抗体による標識性(抗原性)に問題を生じることもある。液体・気体中の試料をそのまま高分解能で電顕観察したいという要求から、サンプルを非真空環境で観察できる電子顕微鏡の開発が始まった。

2.2 環境制御型SEM

ピンホール状の電子線光路の絞りによる差動排気機構の開発と GSED (gaseous electron detector) 技術の組み合わせにより、SEM の試料室内を低密度の空気に保ち観察する環境制御型 SEM (Environmental SEM: ESEM)

が 1979 年に Danilatos 等によって開発された^[2]。1/100 大気圧程度の薄い空気での観察であるため、観察中に試料から水分が蒸発する。そのため、試料が乾燥する前に観察しなければならないという課題がある(図2左)。また、これらの課題を解決する方法として、通常、試料を 5℃ 程度の低温に保ち、水の蒸発スピードを抑える等の方法が用いられている。

2.3 環境カプセルの発展とその限界

高い大気圧下で安定した水環境を実現したいという願望から、電子線透過窓をもつ環境カプセル (Environmental capsule) が TEM・SEM 用に開発された。実は、最初のカプセル開発は電顕発明の直後である^[3]。初期のカプセル窓には、カーボンやコロジオンの薄膜が使用された。しかし、これらの環境カプセルがそれほど普及しなかった理由には、膜の弱さがあったと思われる。不均一な場所から万一破れると、電顕カラム内を汚してしまうかもしれない。しかし、近年、これらの膜が半導体微細加工のために開発された強靱な窒化シリコン (SiN) 薄膜^[4]等へと変わり、安定性が増したことで環境カプセルは飛躍的な発展を始めた^[5]。しかし、内部は数十 μl 以下の小さな閉鎖系または準閉鎖系である(図2左)。生体から細胞を一部取り出す初代培養、酸素要求性が高い神経細胞等の培養は特に困難であり、長期培養や外部からの試薬投与も難しい。SEM 用の環境カプセルは1枚窓を上には有するだけなので、上下に窓がある TEM 用よりもシンプルである。しかし、中の細胞や組織は重力により底に沈みやすい。何よりも、この小さな容器内では組織の断面を膜に接することも免疫電顕法における抗体標識や洗い操作も容易ではないと思われる。

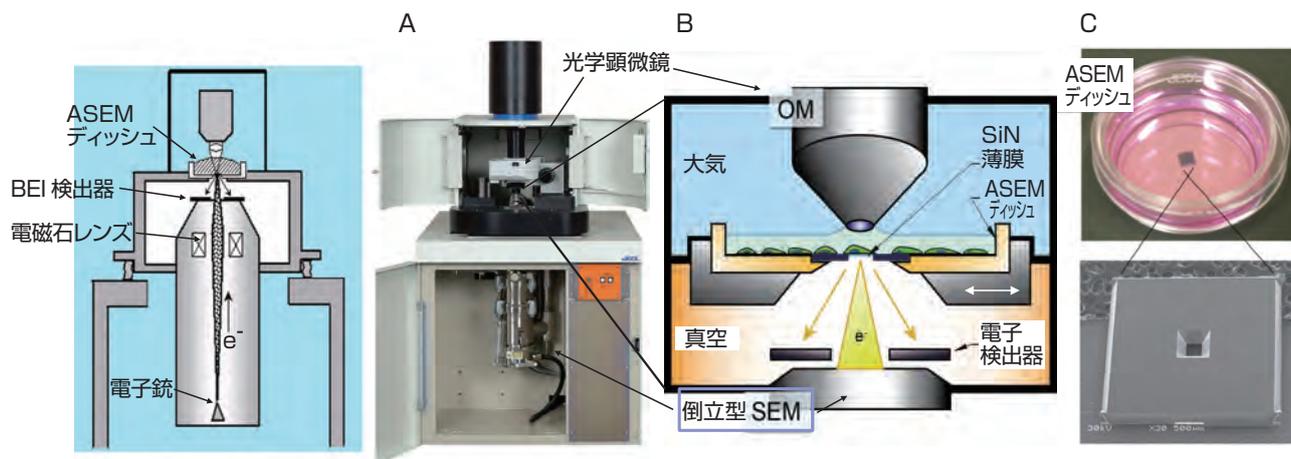


図1 ASEM の原理

(A) 倒立型 SEM に対向して光学顕微鏡を配置し、両者の間に、電子線透過薄膜を底に張った ASEM ディッシュをセットする。
 (B) このディッシュは取り外して培養器内で培養が可能である。原子 400 個厚の SiN 薄膜は、半導体製造工程から生まれたもので真空を支える強度をもつ。電子線は薄膜を透して液中の細胞を照射し、反射電子は薄膜を通過して円盤型の BEI 検出器で検出される。
 (C) ASEM ディッシュ。中央底に四角いシリコンチップが埋め込まれている。下はディッシュ底から見たチップの拡大像で、中央はエッチングにより凹んでおり SiN 薄膜が張られている。[11] より改変し転載。

3 SEMを倒立したASEMの開発

これらの課題の克服のために、我々は ASEM を開発した (図 1) [6]。強靱な 100 nm 厚の窒化シリコン (SiN) 薄膜 (0.25 mm × 0.25 mm) をディッシュ底に配置し、膜上の試料を倒立走査電顕を使って下から観察する。ここで ASEM という名称は、電子顕微鏡開発の歴史に何度も登場しているので、説明を加えたい。最初は、Danilatos が環境制御型 (低真空) SEM を Atmospheric SEM (ASEM) と呼んだが [2]、やがてその名称が ESEM に変わった。次に、Green と Kino [7] が通常型 SEM 鏡筒下部の電子ビーム放出側先端に薄膜をつけた顕微鏡に ASEM という言葉を使い、さらに真空を隔てる環境カプセルを Ackerley 等 [5] が ASEM と呼んだという経緯である。我々の顕微鏡は、電子顕微鏡を逆立ちさせ、カプセル内では開放大気下または水中のサンプルを観察できることが特徴なので大気圧電顕の名にふさわしく、この名前を 4 度目の正直で皆が使ってくれることを祈って ASEM と名付けた。そのため、我々の ASEM は Danilatos 方式とは全く異なり、むしろ膜で真空を隔てる点では環境カプセル等に近い。

我々の ASEM の工夫である取り外し可能な 35 mm 径の ASEM ディッシュは、CO₂ インキュベーター内で、気体構成や湿度を生体内に近づけた培養を可能にした。さらに、このディッシュ形状により、培養細胞に対する洗いやラベル等これまでに開発された光顕手技をそのまま適用できる。しかも、光顕と同じく水中観察が可能のため、試料作製の手間は少なく光顕とほとんど同じである。実際の観察手順は以下の通りである。細胞は ASEM ディッシュ上に蒔かれ、インキュベーター内で培養される。数時間から数日の培養後、ディッシュを ASEM 試料ステージ上に Oリングで固定して、その下の倒立 SEM 鏡筒内部を 1 分程度かけて真空排気する。最初は、より広視野を低倍率で探れる

ように、サンプル上部に配置した光顕で培養細胞の変化を観察する。目的とする細胞変化が起こった瞬間に化学固定し、10 mg/ml グルコース溶液中で、下から SiN 薄膜越しに電子ビームスキャンにより目的視野を高倍率観察する (図 1A、B)。また、光顕では、構成タンパク質相互を区別するために、それぞれを異なる蛍光色で標識して光顕で局在を解析できる。光・電子相関観察を行う場合、抗原の標識には、蛍光と金がついた FluoroNanogold [8] や quantum dots [9] も活用できる。

3.1 ASEMの構成要素

図 2 に ASEM 開発のシナリオを示した。ASEM を構築する技術要素は SiN 膜とディッシュおよび SEM・光顕である。SiN 膜は強靱である。我々は半導体製造工程を最大限利用して、山形県工業技術センターの渡部善幸等の協力も得て、わずか 15 nm の厚み (Si もしくは N 原子おおよそ 100 個分) しかない SiN 薄膜窓の製作に成功した。工作精度を上げるため CVD プロセスとウェットエッチングを採用し、二気圧の圧力差でも壊れないことを確認した。その上下に光顕と SEM をデザインした (図 2)。また、薄膜は、酸素要求性の高い神経細胞が培養できるようにディッシュの底面に組み込む開放構造とした。さらに、ディッシュを、インキュベーター内での培養のために取り外し可能とし、プラスチック素材の使い捨てにすることでハイスループットな観察を可能にした。

3.2 ASEMディッシュ (薄膜ディッシュ) の開発：電子線透過膜の作製と耐久性および分解能

電子線の一部は薄膜で散乱される。そのため、ASEM の分解能決定要素の一つとして、電子線透過膜の品質、特に厚さと平坦さが挙げられる。膜を薄くすると、電子線散乱から理論的に予想されるように、分解能は徐々に向上する。特に電子線の浸透力が弱い低加速電圧においてこの傾向は顕著である。しかし、商業機では膜破壊の可能

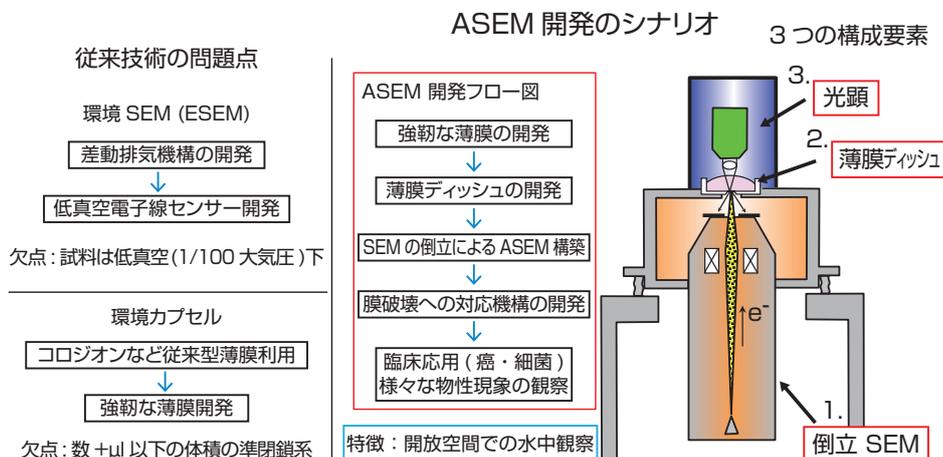


図 2 ASEM の開発シナリオ 開放空間下で、水中のサンプルを SEM で観察し、臨床診断や物性現象の開発への応用を可能にすることが目標である。装置の基本開発は、①倒立型 SEM を開発する。さらに、②その上に薄膜を dish に組み込んだ使い捨てサンプルホルダーとして開発する。③光顕を dish 上に組み合わせ、電顕と交互観察を可能にする。図は、[6] より改変し転載。

性を極力低減し、かつ 8 nm の分解能を維持するために、100 nm 厚を採用している。さらに、半導体製造技術を駆使して、8 枚窓チップの開発に成功し、それを組み込むことで観察効率が高いディッシュを開発した。

3.3 ASEMの機構

倒立させた SEM の鏡筒先端を SiN 膜でシールすることで、大気と真空を隔離して倒立型走査電子顕微鏡は機能する。薄膜はディッシュ中央の底面に組み込み加工してあり、試料は薄膜上であらかじめ培養されるか、または観察時に膜上に置かれる。ディッシュを側面の O リングと底面のディスク状ゴムシートで 2 重にステージ上にシールした後、排気は数分で完了する。電子線は下部より薄膜を透過して試料を照射し、その一部は反射電子となつてはね返る。鏡筒の出口にはディスク型の反射電子検出器を設置した。反射電子は膜を通過して、この検出器でスキャン位置ごとに定量されて、像へと変換される。試料の上部には光学顕微鏡も搭載しており、両顕微鏡での同視野交互観察が可能である。その魅力は、2 ml もの豊富な液体下の物体が見えることであるが、万一 SiN 膜が破れた時の防御システムは必須である。SiN 膜は強靱であるが、誤って鋭いチップ等で破る場合が考えられるからである。

3.4 膜破壊への対応

膜が破れた際には、以下に述べる 3 段階の防御機構が働く。膜下のセンサーが真空度の低下を察知すると、真下のシャッターが閉まり、シャッター上のコンテナが液体を受ける。同時にエアリークバルブが働き、膜下も大気圧にすることで新たな流れを止める。さらに、シャッターが閉まる前に通過した液体は、鏡筒内にインナーパイプの中ほどにある電子線を通す微小孔で止まり、電子銃を汚さない。このような機構により鏡筒内をクリーニングすることなく、部品の交換のみにより ASEM を復旧できる^[10]。

4 ASEMの細胞生物学への応用

ASEM ディッシュ上で培養された細胞は、光学顕微鏡で観察しながら外部操作が可能であり、固定・染色後に走査電子顕微鏡 (SEM) で観察する。ASEM の分解能は 8 nm である。細胞小器官や細胞骨格を中心に以下に観察した^[11]。これまでの環境カプセルでは容易ではなかった免疫ラベルを実現し、神経細胞初代培養に適用した。

4.1 細胞骨格のASEM観察

細胞骨格は細胞の形を決定するとともに、分子局在の足場であり、細胞内での物質輸送レールでもある。微小管はチューブリン重合により形成され、細胞分裂、鞭毛運動、神経回路形成等に重要な役割を果たす。図 3 は、腎線維芽株細胞 COS7 を化学固定し、Triton X-100 による膜透

過処理後に、抗 α -チューブリン抗体で一次標識を行って^[11]、Alexa Fluor 488 Nanogold -Fab' 抗体^[8] によって二次標識し金増感を行った^[12]。これらの一連の操作はディッシュの液交換で済み、2-3 時間ですべての作業が終わる。ASEM では、微小管は主に細胞中心から辺縁に向かって走る白い線に見える (図 3A)。拡大すると、約 20 nm の金粒子の連なりが正体である (図 3B)。バックグラウンドは極めて低い。もちろんラベリングは抗体に限らない。アクチンフィラメント (F-actin) は、細胞運動やシナプス形成・可塑性等に重要な役割を果たすことが知られる。図 3C と D は、Hela 細胞の F-actin を茸ファロイジン-金で標識したところ、F-actin は細胞質や細胞外縁に束状に分布した。主に、Stress fiber かとと思われる。

4.2 ASEMはどの位の厚さまで見えているか

ASEM 観察を加速電圧 30 kV で行った場合、薄膜からの程度の深さまで観察できるのであろうか? 図 3 と同様に微小管を標識し、共焦点蛍光顕微鏡で比較観察した。図 4B の ASEM 像における突起 (矢頭) や球状の突起 (矢印) は、A の共焦点像では薄膜底面像 (最上段) には存在しなかった。A の下図では観察されるため、これらは薄膜から浮いた構造であることがわかり、ASEM の観察できる深さは 2-3 μm と推定される^{[11][13]}。この値は、加速電圧 10 kV では 1 μm 程度まで浅くなる^[13]。培養神経細胞のシナプスや神経突起は、一般にこれらの範囲内にあるため、

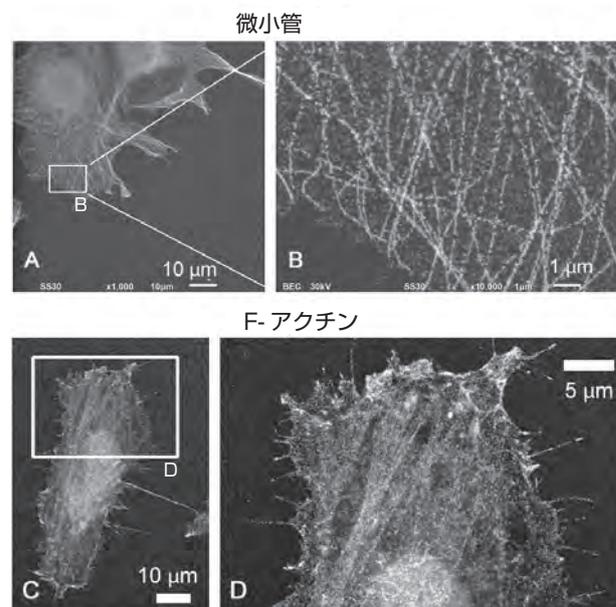


図 3 微小管・F-アクチンの免疫 ASEM (A) COS7 細胞の α -チューブリンを蛍光・金 (FluoroNanogold) 標識した水中免疫電顕像。(B) 高倍像では一本一本の微小管が観察される。(C) Hela 細胞の F-アクチンをファロイジン-蛍光金で標識。(D) 拡大像。自家蛍光のない低バックグラウンドでの観察が可能になった。[11]より改変し転載。

ASEM で十分観察可能と考えられる。

4.3 電子軌道シミュレーションによる観察できる深さ

ビーム電子の軌道を、モンテカルロ法によって確率に基づきシミュレートした。20 kV から 30 kV と加速電圧が上昇するに伴って、電子線照射深度は深くなる (図 5)。そのため、観察できる深さも大きくなると考えられる。これらの結果は、図 4 とよく一致する。実際に、10 kV では観察できる深さが約 1 μm であるが、30 kV では 2 ~ 3 μm まで深くなる [13]。

4.4 初代培養神経細胞のシナプス形成における細胞骨格の再構築

シナプスは、神経ネットワーク形成の基本単位である。そのサイズは主に 50-500 nm と小さく、構成する軸索や樹状突起も微細なものが多い。その観察には、光顕よりも電顕の分解能が適している。しかし、透過電顕で培養細胞のシナプス結合を数えるには、樹脂包埋後に培養面と水平にニューロンを薄切するという実際には困難な作業が通常必要である。これに対し、ASEM ではシナプスを包埋や薄切なしに観察可能で、50 nm の小さなスパインも観察できた。

図 6A-D では、シナプス形成に向けて伸長する神経軸索

先端 (成長円錐) を観察した。ポリ-L-リジンコートした ASEM ディッシュ上で、マウス海馬神経細胞 (錐体細胞) を 4 日間初代培養し [11]、固定・細胞膜透過処理後に、F-アクチンを標識し、白枠の成長円錐を ASEM で観察した。先端のラメリポディア (葉状仮足) では、微細な F-アクチンがまるで自転車のスポークのように発達して見える (図 6C、D)。スポーク構造の中心側には、Homer 1c が共在する (図 6B 黄緑)。このことは、Homer が Ca シグナル情報を受け取り、アクチン重合を制御することで成長円錐の運動に介在するとの考えとよく一致する。培養 14 日目にシナプスが形成されると、スパインに局在する Homer 1c (図 6F、緑) を目印に、シナプス部位を特定できる (図 6G、H)。チューブリンは樹状突起の背骨として存在して、シナプス部位にはほとんど存在しなかった (図 6G)。また、これら樹状突起内の微小管は斜め (らせん状) に走行することが新たに判明した (図 6I、J)。樹状突起はらせん状に分布し空間を最大限活用することが知られ、その構造基盤かと推定される。

4.5 シグナル伝達分子のダイナミックな再配置；CRACイオンチャンネルのCa²⁺感受機構の可視化

小胞体の膜タンパク質である Ca²⁺ センサー STIM1 は、

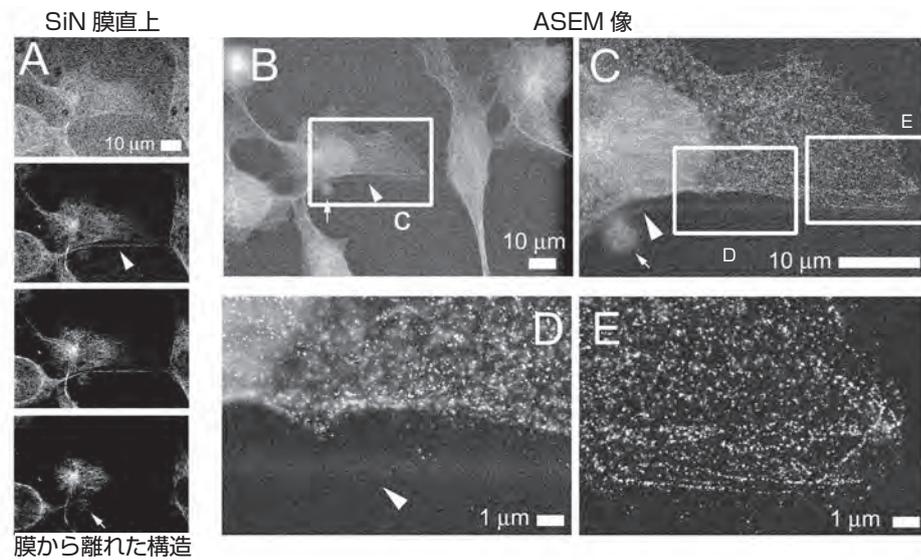


図 4 ASEM による観察深度 COS7 細胞の α -チューブリンを図 3A と同様に金・蛍光標識し、観察できる深さを Confocal 蛍光顕微鏡との比較により測定した。(A) 共焦点蛍光顕微鏡像。最上段は SiN 膜面。最下段は膜面より 1.32 μm 上。(B-E) ASEM 像。2-3 μm が ASEM が観察できる深さと推定される [11][13]。[11] より改変し転載。

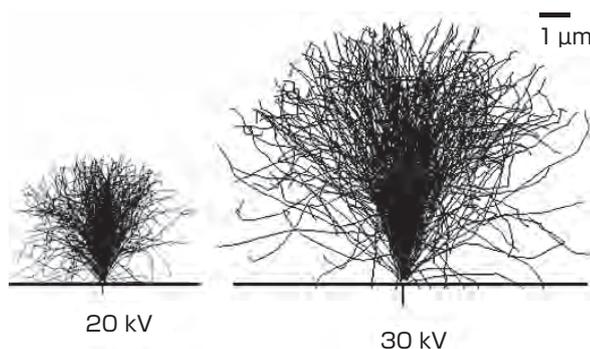


図 5 電子軌道シミュレーション ASEM での電子イメージングを、モンテカルロ法によって電子軌道シミュレーションした。20 kV と 30 kV に関して、試料をカーボン層と仮定して行った。図 4 の結果を支持する。[6] より改変し転載。

細胞膜 CRAC イオンチャネルのセンサーである。STIM1 は小胞体内部の Ca^{2+} 濃度をモニターしており、小胞体内部の Ca^{2+} 欠乏を感知し CRAC を開けると考えられている。 Ca^{2+} を枯渇させて^[11]、STIM1 の小胞体膜上での分布を観察したのが図 7 である。小胞体マーカー PDI を蛍光標識して相関観察したところ (図 7A)、小胞体が Ca^{2+} を貯蔵している定常状態では、STIM1 を表す金は小胞体全体に分散していた (図 7B、C)。ひとたび Ca^{2+} 枯渇が起こると、

STIM1 分子は細胞膜近くに斑点状に集合した (図 7E-G)。その内部では、分子は一次的につなまって凝集する様子が初めて撮影された (図 7G)。STIM1 分子は非対称なので、分子が前後に連結してゆくことが示唆される。この STIM1 重合体がさらに細胞膜の Orai と結合し、密集した活性型イオンチャネル超複合体を形成すると考えられる。この他に、癌の転移に重要な CD44 糖鎖リセプターの細胞膜上での位置変化を捉えることにも成功している^[14]。

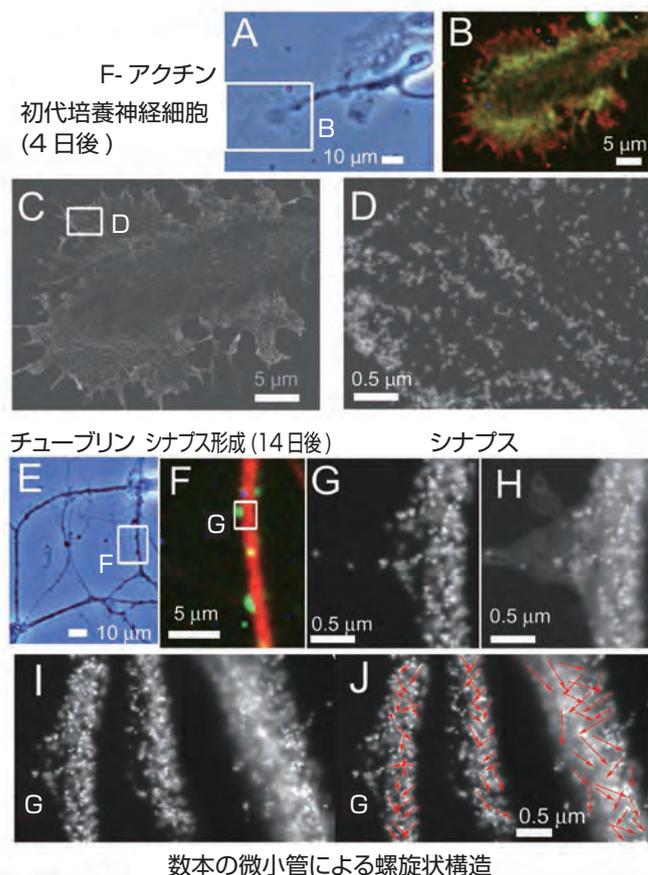


図 6 初代培養神経細胞の成長円錐とシナプス形成

ポリ-L-リジンコートした ASEM ディッシュ上で、Homer1c-EGFP トランスジュニクマウスの海馬錐体細胞を初代培養した。(A) 4 日後の成長円錐の位相差顕像。F-アクチンを赤と金で標識後、(B) 蛍光像。(C、D) ASEM 像。成長円錐のラメリポディア (葉状仮足) には、自転車のスポーク状に F-アクチンが観察された。(E) 培養 14 日後の位相差像。シナプスが形成されている。(F) 蛍光像。(G-I) ASEM 像。(G) シナプスのチューブリン。(H) さらに重金属で細胞の輪郭を染色。(I、J) 樹状突起内の微小管は、長軸に対して斜め (らせん状) に走行している。シナプスや成長円錐全体の高分解能での透過撮影が可能になった。[11] より改変し転載。

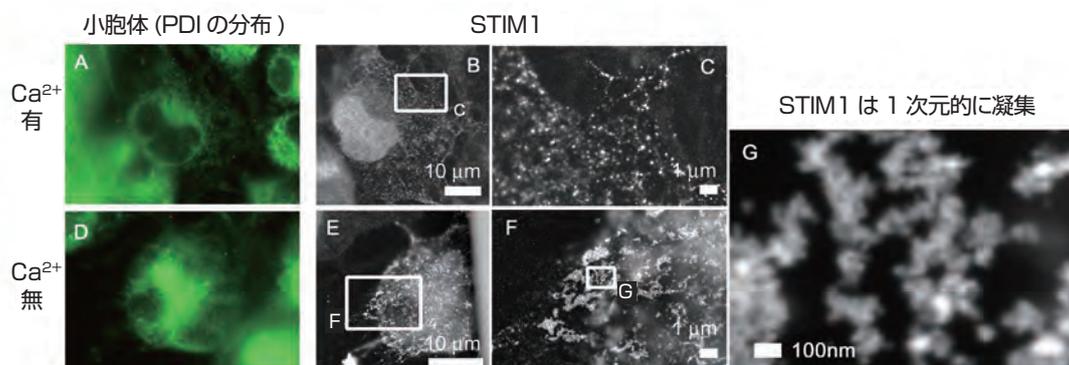


図 7 小胞体 (ER) 内 Ca^{2+} 減少による STIM1 の集合

CRAC チャネルの Ca^{2+} センサーである STIM1 サブユニットは細胞内の小胞体に分布するが (A-C)、 Ca^{2+} 枯渇を感知し細胞膜近く puncta に斑点状に集合する (D-G)。カラーは蛍光、白黒像は ASEM 像で、白枠をそれぞれ拡大撮影したのが右側の図である。STIM1 集合の最拡大像では金粒子が線状に繋がっていることが発見され、非対称分子が一次的に結合していることが推測される (G)。STIM1 は、さらに細胞膜の Orai1 とイオンチャネル超複合体を形成すると考えられる。(A、D) ER マーカーである PDI を蛍光ラベルした。小胞体の分布を表す。以上、COS7 発現系での結果を示したが、免疫系 T 細胞の内在性 STIM1 でも同様に分子集合が観察され普遍的と思われる。[11] より改変し転載。

5 臨床応用に向けて

5.1 臨床診断機としての可能性

電顕による水中での直接観察は長い前処理が要らないため、臨床現場への応用が期待される。診断の指標となる特徴を可視化するために、以下の2例では重金属染色液というソフト面での開発を行い、診断法への緒に就いた。さらに、観察エリアを広くするために8枚窓ディッシュを開発した。

5.1.1 感染細菌の同定

細菌の感染症は、生命をおびやかす最も深刻な要因の一つである。細菌の種類によって治療の方針は異なるため、培養等の時間がかかるステップを必要としない種の同定法が強く求められている。近年、肺炎等で特に注目を集めるマイコプラズマは、細胞体積が大腸菌のおよそ1/25しかない。大きなウイルス程度のサイズである。近年の大流行では、抗生物質耐性菌が9割以上を占め、特に早期診断が求められている。しかし、診断は、その小ささも相まって早期はもとより病気の進行ステージに関わらず難しい。魚のエラから発見された *Mycoplasma mobile* 種をモデルとして ASEM で観察した。細胞膜に透過処理をした後、ウラン・鉛を中心とした重金属液で染色すると、尖った先端には Cap 構造、球状の細胞後方部には核酸、中間部分には変化に富んだ構造が見られた (図 8A) [15]。これらの

構造は特徴的であり、診断に極めて有力な根拠となりそうである。また、移動を支える足複合体を金抗体で標識すると、細胞表面に腹帯状に分布が認められた (図 8B 下) ため、免疫ラベルも診断に使えるかもしれない。この他、桿菌の詳細な観察にも成功している [16]。これらの結果は、ASEM が感染症の診断を早める可能性をもつことを示している。

5.1.2 癌転移の同定；術中迅速診断への応用

手術中の迅速癌診断における最も重要な指標は核のサイズである。一般に、組織を凍結後に 3 μm 厚程度に薄切片、ヘマトキシリン・エオジンで染色して、光顕で観察する。主に核のサイズから診断し切除範囲を決定している。しかし、クライオ薄切は容易ではなく、全過程に最短でも 15-30 分必要である。術中で時間に迫られるため、観察箇所が限られることも大きな問題であった。まず、ASEM に使える核の染色法を試行錯誤によって開発した。培養した細胞を 1% パラフォルムアルデヒド (PFA) 固定後に 10 倍希釈 Ti (platinum) -Blue 液で染色すると核が高コントラストに染色されることを見出した [6]。そのため、ASEM dish の薄膜上に Ti-Blue で染色した組織を置けば、表面 2-3 μm の核を高分解能観察できるはずである。実際に金魚脳組織を固定 / 染色して、組織の切断面を観察すると核が白く際立って見えた (図 9)。この方法ならば凍結薄切が要らない

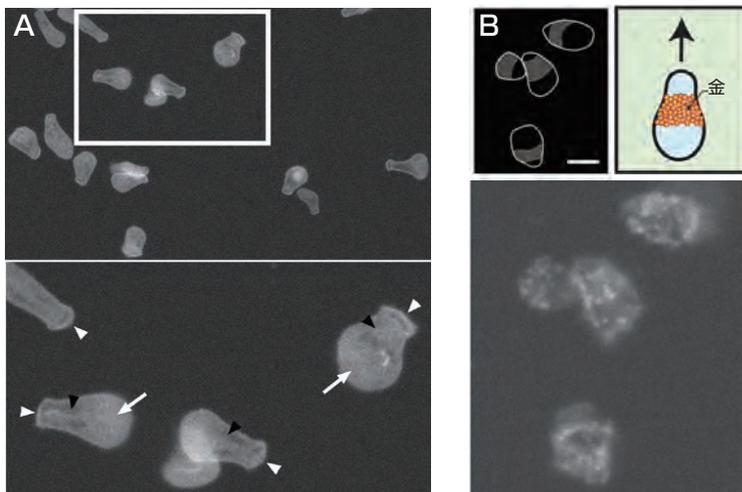


図 8 マイコプラズマ *Mycoplasma mobile* の ASEM 像

(A) 重金属染色。下は拡大図。(B) 足タンパク複合体 Gli349 の水中免疫電顕像。金標識の後で、重金属で細胞の輪郭をカウンター染色。上は模式図であり、細胞は矢印方向に移動する。マイコプラズマは一般に大腸菌の 1/25 の体積しかない。本細胞内のこのような核は、初めて観察された。[15] より改変し転載。

Ti-Blue は核を選択的に染色

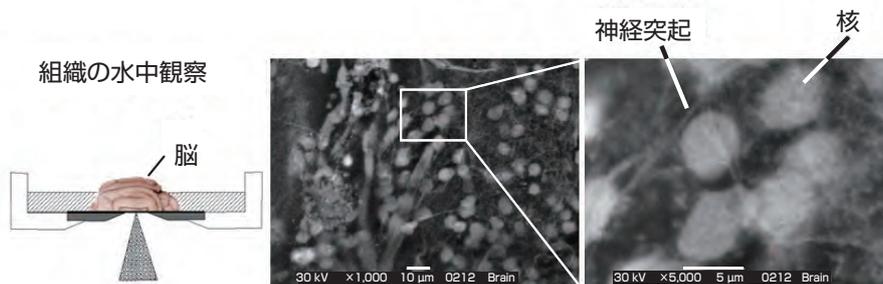


図 9 組織ブロック切断面の細胞核組織を Ti-Blue で染色するだけで、表面近傍の核が水中で明確に観察できる。神経突起等も弱く染色された。組織ブロックのまま核が観察できるようになった。[6] より改変し転載。

ため、術中診断を飛躍的に迅速・容易にする可能性がある。より多くの箇所を検鏡することにより、診断精度向上も期待される。

6 エネルギー・素材分野への応用

6.1 電気化学反応; バッテリー開発への応用

電解液中での電気化学反応を *in-situ* で高分解能観察することは、バッテリーや電解液の開発に重要である。そのために、SiN 薄膜上に 100 μm 離れた二つの電極を備える電気化学 ASEM ディッシュを開発した (図 10A, B) [17]。電極は、SiN 薄膜上に 30 nm 厚のチタンと 100 nm 厚の金をスパッタリング法で積層し、ホトリソグラフィとウェットエッチングで加工した。

飽和 NaCl 溶液中のカソード電極近傍を倍率 5,000、1 フレーム 0.15 秒、4 回積算の条件で ASEM 撮影した。撮影直後に、アノードとカソード電極の間に電圧を印加した。電圧印加 2 秒後 (図 10C) 電圧印加 4 秒後 (図 10D) の ASEM 像を示す。カソード電極からアノード電極側に向かって樹枝状構造が成長していく様子がリアルタイムに観察できた。観察後に試料全体を乾燥させて、樹枝状の析出物を SEM-EDS (Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive Spectrometry) で分析したところ、金であった。

このように、ASEM を用いれば、電気化学反応による金属の堆積をリアルタイム観察できる。これまで、SEM を用いた電解液中での電気化学現象のリアルタイム観察は、真空中で蒸気圧が低いイオン液体等の電解液に限られていた。真空中での維持が困難な一般的な電解液を用いた観

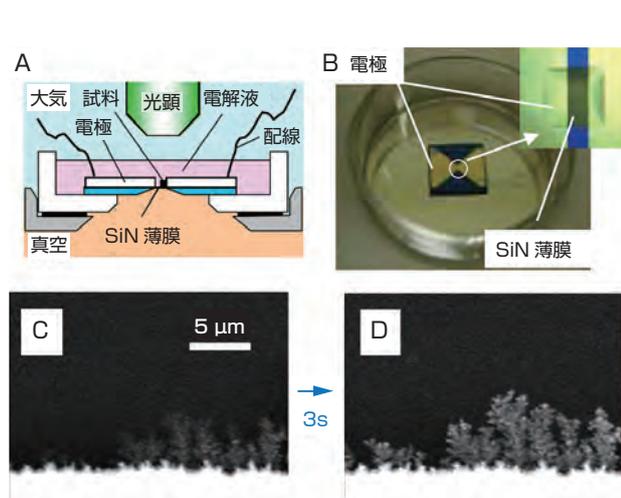


図 10 電気化学用 ASEM ディッシュ (A, B) と電解液中での電気化学反応の観察 (C, D)

SiN 薄膜の上に 100 μm 間隔で両電極を形成した (A, B)。2.1 V 電圧を印加 2 秒後にカソード付近を ASEM 観察 (C)、4 秒後 (D)。カソードからアノード方向に樹枝状の析出物が成長する。水溶液電解質中の観察が可能になった。[17] より改変し転載。

察は、本例が最初と思われる。

6.2 マイクロワイヤリングへの応用、ハンダの融解と凝固

温度により変化する現象を溶液中・気体中において観察するために、温度可変 ASEM ディッシュを開発した [17]。標準ディッシュと類似構成であるが、温度を上昇・制御できるようにヒーターと温度計を設置し、温度上昇に耐えられるように本体をチタン製とした点が異なる (図 11A)。SiN 薄膜はハンダ (Sn: 42 wt%, Bi: 58 wt%) の溶ける高温に耐える。図 11B の各温度において、融解・凝固する際の形態変化を観察した (図 11C-D)。温度が 145 $^{\circ}\text{C}$ ではハンダが融解して ASEM 像のコントラストは一様になり、その後 130 $^{\circ}\text{C}$ に冷却することにより金属が偏析する (図 11C)。再度温度を 150 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇させた後で 115 $^{\circ}\text{C}$ に急速冷却すると、偏析のモフォロジーが変化した (図 11D)。冷却条件により偏析が異なった。ハンダによる回路形成では松脂等の微量の揮発成分が重要であり、その研究・開発に ASEM は貢献すると思われる。

7 将来への課題

ASEM による水中観察の迅速さは、多条件での実験を可能にした。また、水中での光・電子相関観察が一つの装置内でできることは、ASEM の大きな特徴である。

新開発の ASEM ディッシュにより開放大気下での観察が可能になったため、気体を発生させる電気化学反応も含め、さまざまなダイナミックな現象を二つの顕微鏡で観察できるようになった。例えば、電気化学反応であれば、発生する泡は上に登るため倒立電顕では捉え難いが光顕ならば

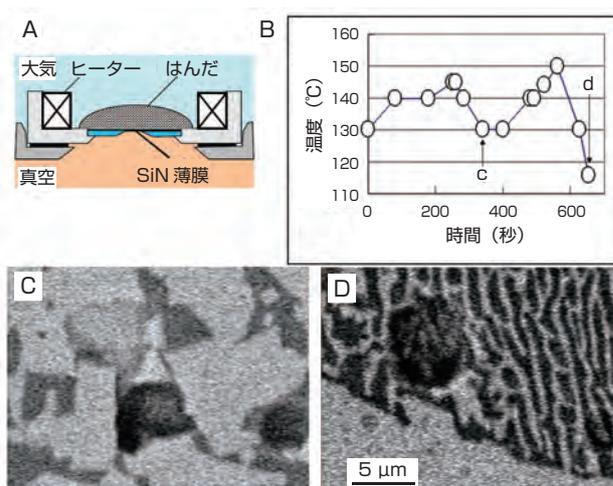


図 11 温度可変 ASEM ディッシュ (A)、温度変化 (B) とハンダの ASEM 像 (C, D)

ディッシュにヒーターと温度計を配置した (A)。融解したハンダは温度低下により凝固 (C, D)。偏析により明暗コントラストがつくが、形態は冷却条件により異なる。松ヤニ等の揮発成分の存在下でも、観察が可能になった。[17] より改変し転載。

観察できる。同時に、倒立 SEM は下から観察するため、気体を発生する現象でも泡の影響を受け難い。さらに、本顕微鏡は細胞研究に新たに二つの利点をもたらした。一つは、薄膜上では培養が難しかったさまざまな細胞を培養できるようになったこと^[18]、もう一つは標識や洗いの効率が上がったことである。ASEM ディッシュでは、環境カプセルの小さな体積とは異なり、3 ml の大きな培養体積で CO₂ インキュベーター内で細胞培養ができる。そのため、蒸発の影響を小さくでき、培養液の塩濃度を一定に保ちやすく、広い液面でのガス交換により酸素・二酸化炭素濃度が安定である。SiN 膜は、従来のガラス用に開発された表面コート剤により細胞接着が向上する^[11]。それは、膜表面が製造過程で酸化されて恐らく SiO_x となっており、ガラス様の性質をもつからと思われる。標識・洗浄の容易さは、本免疫電顕法をほぼ光顕並に高スループットなものにした。その結果、多検体解析やスクリーニングが容易となり、1日に40 ディッシュを観察した例もある。試料の調整はすべて水溶液中で行われるため、抗原性の保存は極めて良い。100種類ほどの細胞標識用の抗体を試したところ、100%の抗体で ASEM 観察することができた。使われた抗体の半数はマウスモノクローナル抗体であり、市販の抗体が広く使えることが期待される。重金属による染め分けを追加することで、特定の細胞構造を強調することができる。酢酸ウラン、リンタンゲステンは主にタンパク質・核酸を、四酸化オスミウムは油滴や膜構造を強調する^[6]。ASEM の加速電圧を変えることで、目的物の薄膜からの距離を推定することができる。この辺りは、機能的には共焦点光顕と少し似ているが、原理は異なる。

高スループットな ASEM は、多様な試料を短期間に高分解能で観察する。ASEM の操作は、電顕としては極めて習得が簡単である。常に薄膜が同じ高さにセットされるため、フォーカス位置が同じ場所にくることもその一因となっている。本結果以外にも、ASEM は、光顕分解能以下のタンパク質微結晶を結晶化溶液中で無染色で観察できる^[19]。目標の一つである臨床診断への応用は始まったばかりである。核のサイズを ASEM で測定することにより癌術中診断を迅速化することが期待される。しかし、そのためには、従来の光顕像と同じように核と細胞質を色分けすることが求められるため、画像処理による自動認識・着色ソフト開発が必要である。また、感染細菌の迅速な診断という面での活躍も期待される^{[15][17]}。そのためには、肺炎球菌や桿菌・院内感染 MRSA・ウイルス等を中心に、総合的な診断に向けて染色法を含めた観察プロトコール等のソフト面での整備が強く求められる。ASEM は創薬、食品化学、ポリマー化学、セメント等にも応用できる。さらに、

材料科学^[16]、ナノ科学等さまざまな物理・物性研究にも広く適用可能である。

謝辞

ASEM 製作では日本電子テクニクス(株)の露木誠氏、佐藤猛氏、石森能夫氏、小泉充氏、小川康司氏に、薄膜の製作では、山形県工業技術センターの渡部善幸博士と日本電子の小入羽祐治氏の御協力に感謝いたします。この研究の一部は、産業技術総合研究所と日本電子のマッチングファンド、科研費特定領域「生体超分子」、新学術領域「構造細胞生物学」、CREST の支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] M. Nagasawa, Y. Nakagawa, S. Tanaka and I. Kojima: Chemotactic peptide fMetLeuPhe induces translocation of the TRPV2 channel in macrophages, *J. Cell. Physiol.*, 210 (3), 692-702 (2007).
- [2] G. D. Danilatos: An atmospheric scanning electron microscope (ASEM), *Scanning*, 3 (3), 215-217 (1980).
- [3] I.M. Abrams and J.W. McBain: A closed cell for electron microscopy, *J. Appl. Phys.*, 15 (8), 607-609 (1944).
- [4] T. Tomie, H. Shimizu, T. Majima, M. Yamada, T. Kanayama, H. Kondo, M. Yano and M. Ono: Three-dimensional readout of flash X-ray images of living sperm in water by atomic-force microscopy, *Science*, 252 (5006), 691-693 (1991).
- [5] C. Ackerley, C. Nielsen and C. Hawkins: Experiences with wet capsule imaging exploring the potential for live cell imaging, *Microsc. Microanal.*, 12 (Supp. S02), 428-429 (2006).
- [6] H. Nishiyama, M. Suga, T. Ogura, Y. Maruyama, M. Koizumi, K. Mio, S. Kitamura and C. Sato: Atmospheric scanning electron microscope observes cells and tissues in open medium through silicon nitride film, *J. Struct. Biol.*, 169 (3), 438-449 (2010).
- [7] E. D. Green and G. S. Kino: Atmospheric scanning electron microscopy using silicon nitride thin film windows, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 9 (3), 1557-1558 (1991).
- [8] R. D. Powell, C. M. Halsey and J. F. Hainfeld: Combined fluorescent and gold immunoprobes: reagents and methods for correlative light and electron microscopy, *Microsc. Res. Techniq.*, 42 (1), 2-12 (1998).
- [9] B. N. Giepmans, T. J. Deerinck, B. L. Smarr, Y. Z. Jones and M.H. Ellisman: Correlated light and electron microscopic imaging of multiple endogenous proteins using Quantum dots, *Nat. Methods*, 2 (10), 743-749 (2005).
- [10] H. Nishiyama, M. Koizumi, K. Ogawa, S. Kitamura, Y. Konyuba, Y. Watanabe, N. Ohbayashi, M. Fukuda, M. Suga and C. Sato: Atmospheric scanning electron microscope system with an open sample chamber: configuration and applications, *Ultramicroscopy*, 147, 86-97 (2014).
- [11] Y. Maruyama, T. Ebihara, H. Nishiyama, M. Suga and C. Sato: Immuno EM-OM correlative microscopy in solution by atmospheric scanning electron microscopy (ASEM), *J. Struct. Biol.*, 180 (2), 259-270 (2012).
- [12] R. D. Powell and J. F. Hainfeld: Silver- and gold-based autometallography of Nanogold, Gold and Silver Staining: *Techniques in Molecular Morphology* (G. W. Hacker, J. Gu, eds.), CRC Press, Boca Raton, FL, 29-46 (2002).

- [13] M. Suga, H. Nishiyama, T. Ebihara, T. Ogura and C. Sato: Atmospheric electron microscope: limits of observable depth, *Microsc. Microanal.*, 15 (Supp S2), 924-925 (2009).
- [14] T. Murai, Y. Maruyama, K. Mio, H. Nishiyama, M. Suga and C. Sato: Low cholesterol triggers membrane microdomain-dependent CD44 shedding and suppresses tumor cell migration, *J. Biol. Chem.*, 286 (3), 1999-2007 (2011).
- [15] C. Sato, S. Manaka, D. Nakane, H. Nishiyama, M. Suga, T. Nishizaka, M. Miyata and Y. Maruyama: Rapid imaging of mycoplasma in solution using atmospheric scanning electron microscopy (ASEM), *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 417 (4), 1213-1218 (2012).
- [16] T. Kinoshita, Y. Mori, K. Hirano, S. Sugimoto, K. Okuda, S. Matsumoto, T. Namiki, T. Ebihara, M. Kawata, H. Nishiyama, M. Sato, M. Suga, K. Higashiyama, K. Sonomoto, Y. Mizunoe, S. Nishihara and C. Sato: Immunoelectron microscopy of primary cell cultures from genetically modified animals in liquid by atmospheric scanning electron microscopy (ASEM), *Microsc. Microanal.*, 20 (2), 469-483 (2014).
- [17] M. Suga, H. Nishiyama, Y. Konyuba, S. Iwamatsu, Y. Watanabe, C. Yoshiura, T. Ueda and C. Sato: The atmospheric scanning electron microscope with open sample space observes dynamic phenomena in liquid or gas, *Ultramicroscopy*, 111 (12), 1650-1658 (2011).
- [18] K. Hirano, T. Kinoshita, T. Uemura, H. Motohashi, Y. Watanabe, T. Ebihara, H. Nishiyama, M. Sato, M. Suga, Y. Maruyama, N. M. Tsuji, M. Yamamoto, S. Nishihara and C. Sato: Electron microscopy of primary cell cultures in solution and correlative optical microscopy using ASEM, *Ultramicroscopy*, 143, 52-66 (2014).
- [19] Y. Maruyama, T. Ebihara, H. Nishiyama, Y. Konyuba, M. Senda, T. Numaga-Tomita, T. Senda, M. Suga and C. Sato: Direct observation of protein microcrystals in crystallization buffer by atmospheric scanning electron microscopy, *Int. J. Mol. Sci.*, 13 (8), 10553-10567 (2012).

執筆者略歴

小椋 俊彦（おぐら としひこ）

1997年豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士課程システム情報工学専攻修了。1997年（株）オムロンライフサイエンス研究所研究員。2000年工業技術院電子技術総合研究所（現：産総研）特別研究員。2003年産総研脳神経情報研究部門研究員。現在産総研バイオメディカル研究部門構造生理研究グループ主任研究員、この論文では、装置の企画・開発および構成を担当。



西山 英利（にしやま ひでとし）

1992年東京工業大学応用物理学科修士課程修了。1992年日立製作所中央研究所。2005年日本電子（株）。2014年同SEM技術開発部部長代理。この論文では、装置の企画・開発、および、バイオ・材料向けアプリケーション開発を担当。



須賀 三雄（すが みつお）

1989年東北大学大学院理学研究科物理学科修士課程修了。1989年日立製作所中央研究所。2000年日本電子（株）。2013年同開発・基盤技術センター副センター長。2014年SEM事業ユニット副ユニット長。2014年に、千葉大学大学院において工学博士を取得。この論文では、装置の企画・開発、および、材料系向けアプリケーション開発を担当。



佐藤 主税（さとう ちから）

1989年東北大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。1989年工業技術院電子技術総合研究所（現：産総研）。2001年に産総研。現在、産総研バイオメディカル研究部門構造生理研究グループ長。この論文では、装置の企画・開発、および、バイオ向けアプリケーション開発を担当。



査読者との議論

議論1 全体的な評価

コメント（一村 信吾：名古屋大学、多屋 秀人：株式会社J-Space）

この論文は、半導体の超薄膜技術を活用して開発した大気圧電子顕微鏡（ASEM）を、バイオ分野でニーズの高い水中観察法に向けてのシナリオの構築、要素技術の選択とその展開について論じられており、本誌シンセシオロジーの論文としての価値が認められます。

従来の電顕法では試料を真空中に保持することが不可欠であったが、この論文に示されたASEMによる水中観察法が開発されたことにより、バイオ分野では細胞内での活動を迅速に高分解能での観察が可能となり、今後、臨床医療への応用、さらには材料科学、ナノ科学の分野への展開に繋がると期待されます。

議論2 全体構成について

コメント（一村 信吾）

Google scholarで検索すると、Atmospheric Scanning Electron Microscope (ASEM) という用語・概念が提示されたのは1980年代に遡ることがわかります。今回の論文の主眼が①ASEMを開発したことにあるのか、②ASEMを応用したことにあるのか（③あるいはその両方にあるのか）で、論文の書き方を大きく変えるべきと考えます。

①であれば、従来のASEMとどこが違うのか、その違いをだすために、どのような新しい要素技術を既存技術の中に取り入れてシステム（装置）を構成したか、その着想に至った背景は何かなどを記述いただくと、構成論的アプローチに係わる論文としての特徴が出てきます。基本的な特徴に関する幾つかの記述がすでにありますので、ASEM開発に関する歴史的な経緯を踏まえながらそれらを再構成して、今回の開発の特徴を明確にしてください。

②であれば、単に観察例を列記するだけではなく、これまでどのような方法でどこまでわかってきたか（逆に言えば何が限界であったか）、それがASEM法の適用でどこまでわかってきたか（加えて、従来法の限界を克服する技術要素として何を考え適用したか）、それによって観察対象の本質に係わる理解がどこまで進んだかを意識して記述いただくと構成論的アプローチに係わる論文としての特徴が出てきます。

回答（佐藤 主税）

今回の論文の主眼は③にあります。コメントに従いまして、①と②を併せた形の論文として下記のように再構成しました。

まず、電顕の開発史を踏まえながら1～3節を全く新たに再構成し

書き直しました。まず 2.1～2.3 章として水中観察電顕の開発史を加えることにし、これまでの方法での限界を「2.1 従来の電顕法とその限界」と「2.2 環境制御型 SEM」「2.3 環境カプセルによる水中観察電顕法の発展と限界」で書きました。また 3 章の最初の段落で、新たに ASEM の名前の由来と変遷についても書き加えました。要素技術に関しましては、「3.1 ASEM の構成要素」で、図 2 ASEM 開発シナリオを加えて新たに詳述しました。これらを踏まえて、さらにサンプルの本質に対する理解がどこまで進んだかを開発要素を新たに加えました。

議論3 シナリオについて

コメント（一村 信吾）

ASEM に関する歴史的流れはかなり明確になりました。但し、“シナリオ、要素の選択、要素間の関係と統合の概略を、まとめて1枚の「シナリオの図」に描く”という点では、不足しています。今回経緯を示されたこれまでの開発手法（環境制御型 SEM 法、環境カプセル法）の要素（特徴）と問題点を記述し、それからの取舍選択および新しい機能付加により今回の開発に至ったことが判る1枚の図をお願いします。

その際に、特徴である「SEM 鏡体の倒立」と「SiN 薄膜の活用」が、どのような経緯から新しく付加すべき要素として選択されたかの説明を、図に併せてさらに詳しく記述することが良いように思います。

コメント（多屋 秀人）

シナリオ図は、ASEM の要素を示したもので、この論文での骨子となるシナリオとしては不十分です。この論文のタイトルが、「水中観察法の開発」であれば、水中観察法を確立するに至る道筋・研究過程を示すことが必要で、ASEM の開発はその内の一つかと思えます。この論文の目標である「水中観察法の確立」に向かって必要な要素技術について、それらの解決すべき問題点等も含めて示してください。

回答（佐藤 主税）

御指摘に従い、図 2 を再構成しました。従来技術の問題点を示すとともに、「開放空間での水中観察」を実現するための研究開発の流

れを示しました。

議論4 タイトルと「はじめに」の関係

コメント（一村 信吾）

現在のタイトルは、「水中観察法の開発」です。このタイトルは、後述にバイオ以外の応用例も示されているように、液中での反応現象の解明に向けた内容の展開を期待させます。一方「はじめに」は明らかにバイオ分野に限定した記述であり、「水中観察法」の意義、必要性を指摘するものとは言えません。したがって、タイトルを残して「はじめに」の導入部を工夫する（「水中観察法」の意義、必要性を指摘する）か、「はじめに」をそのままにしてタイトルを変えるか、検討の上で整合性を図ることが必要です。

考察という章立てはこの論文では不要です。すべてが構成的アプローチに基づく考察で書かれていることが特徴のジャーナルの論文です。

回答（佐藤 主税）

「はじめに」の導入部を工夫し、この論文全体を改定いたしました。

議論5 「ASEMを応用したこと」を主眼とする記述

コメント（一村 信吾）

現在記載されている例はバイオ関連を除くと二つで、電気化学反応とマイクロワイヤリングです。この後者「ハンダの融解と凝固」は、タイトルが「水中観察法の開発」である限り、展開例として適切と思えません。（気相中での反応としか思えません。）タイトルとの関係で、この応用例の採用（不採用）、他の応用例の追記を検討してください。

回答（佐藤 主税）

ハンダによる回路形成では松脂等の微量の揮発成分が重要であり、micro wiring は今後も発展が期待できる分野であるため、応用の可能性を期待して本例を記載いたしました。御指摘を反映しまして、「ハンダによる回路形成では松脂等の微量の揮発成分が重要であり、その研究・開発に ASEM は貢献すると思われる。」の記述をこの論文に加えさせていただきます。

交流電圧標準を導く薄膜型サーマルコンバータの開発

— 交流電圧標準のトレーサビリティ体系構築の取り組み —

藤木 弘之*、天谷 康孝、佐々木 仁

国家標準の交流電圧標準は、サーマルコンバータと呼ばれる交直変換器を用いて、直流電圧標準と交流電圧を比較測定して導かれている。しかし、サーマルコンバータを作製可能な標準機関は少なく、入手が困難であるため、国家標準の範囲拡張が難しい状況であった。また、従来のサーマルコンバータは、壊れやすく、大量の校正を行う校正事業者の校正器物として使いにくいいため、国家標準機関で普及するのみであった。今回、作製方法の簡易化と従来の性能を改善する目的で、新型のサーマルコンバータの開発を行った。新型サーマルコンバータは窒化アルミ基板を採用することで、耐久性が向上し、産業現場に近い校正室でも校正器物として使用可能となった。

キーワード: 交直変換標準、交流電圧標準、サーマルコンバータ、校正、計量トレーサビリティ

Development of thin film multijunction thermal converters

– Establishing metrological traceability system for AC voltage standard –

Hiroyuki FUJIKI*, Yasutaka AMAGAI and Hitoshi SASAKI

Thermal voltage converters have been widely used in the electric standard field as a major method to derive AC voltage standards from DC voltage standards. However, few organizations have skills for fabricating thermal voltage converters. Furthermore, establishing AC-DC voltage standards has been constrained by the lack of high-quality thermal converters. High-quality thermal converters are used only by national metrology institutes (NMIs), because conventional thermal converters are too fragile for many calibration service providers. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) has developed new thin film multijunction thermal converters (TFMJTCs) to realize a reliable high-performance thermal converter. Development of a durable TFMJTC with a heater on an aluminum nitride (AlN) chip would be a significant contribution to Japanese calibration service providers.

Keywords: AC-DC transfer difference standard, AC voltage standard, thermal converter, calibration, metrological traceability

1 はじめに

現在、生産現場、情報技術、科学測定等で使われている機器の大多数は、電気信号により測定されており、電圧計側や電流計側が測定の大半で利用されていると言っても過言ではない。常に、信頼できる電力量が利用できることは、社会の発展に大いに貢献する成果であると考えられる。最近では、電力量の計測のニーズが高まっており、電力は電圧、電流、位相角よりなる組み立て量であるので、交流電圧標準の高精度化の要望も強い。

産業界から求められている交流電圧標準の範囲は幅広く、電圧範囲は、医療機器や微小電力計測で求められる 1 μ V から、一般の汎用電子機器で利用されている電圧 (数 mV ~ 数百 V)、電力設備で利用される数万 kV までである。周波数範囲は、振動計測、薬品の攪拌、蓄電池評価等の物性特性の交流計測で利用される 0.01 Hz から、商用周

波数 (50 Hz と 60 Hz)、高調波計測 (商用周波数の 100 次程度である 10 kHz 程度)、無線電力伝送技術に関連する中周波 (数十 kHz ~ 数十 MHz)、通信等で利用される GHz と幅広い。これらの範囲の大半で、計測のトレーサビリティが要求されており、国家標準機関と校正事業者が計量標準の確立や、校正、維持・管理を行っている。

交流電圧標準を導く最も精度の良い方法は、熱型の交直変換器 (サーマルコンバータ) を用いて直流電圧標準と比較測定する交直変換方法である^[1]。このため、交流電圧標準の国家標準の供給は交直変換標準を用いて行われている。交直変換標準の供給においては、直流電圧から交流電圧への変換誤差に相当するサーマルコンバータの交直差の校正を行う。言い換えると、校正事業者への標準供給とは、サーマルコンバータを校正器物として用いることである。しかし、従来のサーマルコンバータは、後述するよ

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3

National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan * E-mail: h-fujiki@aist.go.jp

Original manuscript received November 27, 2014, Revisions received January 27, 2015, Accepted January 29, 2015

うに、高精度を優先しているため、構造の制約があり、過電流や衝撃に弱く、取り扱いが難しいため、校正事業者や産業界では広く普及していなかった。校正事業者や産業界の大半では交流電圧計による校正が行われているが、サーマルコンバータの最大のメリットである安定性が生かされず、校正事業者による産業界への供給範囲も、交流電圧計では範囲の拡張が難しいため、交流電圧標準の供給範囲は十分でなかった。

国内に供給する交流電圧標準の体系の確立のためには、日本の標準が国際的に認められることも重要である。このため、国際比較が実施されるが、交流電圧標準の巡回器としてサーマルコンバータが用いられ、直流電圧標準の国際比較の結果と併せて、交流電圧標準の同等性が確認される。国際比較に加えて、標準の専門家による交直変換標準の技術能力の現地審査も行われ、各国の標準機関の校正・測定能力を示す Calibration and Measurement Capabilities (CMC) の登録が行われる。CMC は、各国の国家標準機関の相互承認に必要なものであり、国家標準機関を頂点とする各国の計量標準トレーサビリティ体系を相互に信頼し、他国の国家標準の校正結果を自国でもそのまま同等と認めるものである。製品の輸出の際は、試験器等がこの計量標準にトレーサブルである場合、製品の試験成績書がワンストップで相手国に受け入れられることとなる。

このように、国家標準機関においても、産業界への交流電圧標準供給においてもサーマルコンバータは、必要不可欠であるが、作製が難しいため、供給可能な標準機関は少ない。サーマルコンバータによる交流電圧標準の開発研究が盛んであった 1960 年代や交流電圧の高精度化が行われた 1990 年代はサーマルコンバータを開発する研究者や民間企業が存在したが^{[2][3]}、2000 年代になり、民間のサーマルコンバータの製造メーカーの衰退や国家標準機関の研究者の引退により、高精度なサーマルコンバータを入手することは困難な状況である。特に、最高精度を維持するサーマルコンバータを供給している組織は 2005 年ごろから皆無になっている状況であった。

我々は、国家標準で使うことができる最高精度のサーマルコンバータの供給を目的として、実用的なサーマルコンバータの開発を行った。開発では、サーマルコンバータの性能を改善し、耐久性のある構造を設計することで、校正事業者や計測メーカーにも普及するように、使いやすいことを目的とするユーザビリティを考慮したサーマルコンバータの作製を行った。加えて、作製方法も見直すことで、従来の方法より格段に作製が簡易になり、歩留まりの改善や作製技術の継承も容易になった。この結果、サーマルコンバー

タの安定供給ができるようになり、交流電圧標準の国内体系の確立(図1)が可能となった。

2 交流電圧標準の社会的な目的

近年、研究開発や生産現場で広く利用されている電圧計、電力計、電気指示計器、電子センサー等の計測機器は、品質管理、性能評価、適合試験、環境モニタリングのため、高精度化や高信頼性が強く求められている。一方、製品のグローバル化、標準化も急速に進んでおり、日本で製造された製品を輸出する際、国内の基準のみでなく、国際規格を満たす必要性に迫られている。現在、国内外で、製品の製造者責任も厳しく問われており、検査の測定結果について保証が求められている。電気関連製品については、出荷時に耐電圧試験等の製品検査が求められ、検査に用いた計測器の信頼性の確保が重要になる。例えば、アメリカで使用される電気製品については、安全性を審査する機関：Underwriters Laboratories Inc. (UL) が発行する UL 規格において、検査する計測器に国家標準へのトレーサビリティを求められるようになってきており、計測器の不備があると、実質輸出できなくなる可能性がある。ヨーロッ

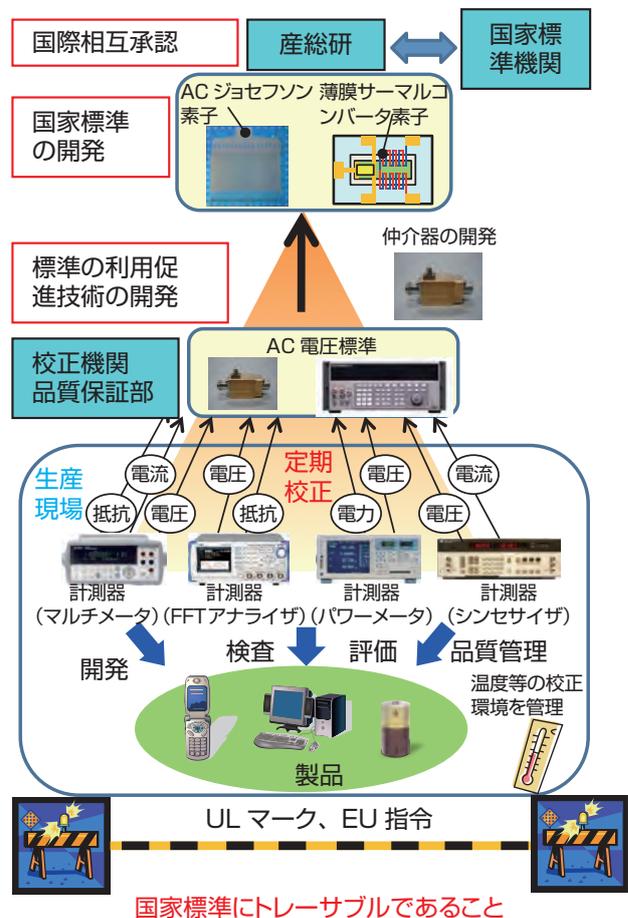


図1 交流電圧標準の国内体系の確立シナリオ

パにおいても、CE (Communauté Européenne) マーキングが存在する。上記で用いられる計測器は、定期的に（通常、年に1度）校正が行われ、検査・測定結果を保証することになる。交流電圧標準の校正が求められる1例として、図2に電力・電力量計のトレーサビリティ体系を示す。輸出や審査、その他の規格で、顧客から図2のようなトレーサビリティ体系図の提出を求められることもある。

企業の品質保証部が管理している上位標準器^{用語1}や産業現場の検査機器は、周囲温度や湿度、振動等の物理的外乱により必ずしも安定ではないため、これらの外的要因によって出力値に影響を受ける。このため、製品の品質保証部は定期的な自社の校正機器の維持・管理を行うことになる。一般に、品質保証部は、自社の上位標準器を用いて、製造メーカーの検査等で用いられる電子計測機器の定期的に社内校正を行っている。品質保証部の上位標準器は校正事業者で校正を受けている。このようにして、図1に見られるように、産業現場の検査機器のトレーサビリティが確保される。

生産現場での計測器は、生産ライン等に設置され、できるだけ移動させずに使用されるケースが多く、計測器の校正は現場環境で実施されるのが普通である。企業の品質保証部では、校正機器の安定度、物理的外乱や時間の経過に伴う校正値の劣化を考慮して校正設備の管理を行っているが、顧客から、短期納期の要望も多く、出荷前の検査不備による納期の遅れを防ぐため、校正機器の信頼性確保が重要となっている。また、仕様適合や違法コピー製品に対する問い合わせも多く、問い合わせのあった製品の

検査の結果を保証するため、計量トレーサビリティが必要となる。品質保証部では、前述のように自前の校正器物を校正事業者に校正を依頼して、値の管理を行っているが、交流電気測定の場合、浮遊容量の影響、インピーダンス特性、負荷効果、反射等を考慮に入れた測定技術も必要になっている。周波数が高くなると、測定条件のわずかな違いによって、測定結果が簡単に変わるため、自社の測定技術の正しさを確認するために、信頼性のある上位標準器が望まれている。加えて、安定で使い勝手の良い機器の要望も多い。生産現場においてトレーサビリティを必要とする計測器は、一つの生産事業所あたり約数十～数百台におよぶことも珍しくなく、ものづくり産業全体で考えると、安定で使い勝手の良い計測器の開発は、計測器の校正や生産ライン管理に係る負担軽減や経費の削減になり、競争力の向上に貢献することが期待できる。製品の高品質化、標準化、安全性の確保のいずれにおいても、測定の保証は要求されるものであり、電気標準の安定供給が望まれている。

3 交流電圧標準を導く交直変換標準

電気の基本量である交流電圧・電流標準は、エレクトロニクス産業をはじめとする電子機器産業、あるいは電力エネルギー業界、電子情報通信機器産業界において、広く用いられている物理標準である。一方、交直変換標準は、交流電圧を導く標準であるが、一般にはなじみが薄い標準であり、日本語の解説書は少ない。この章では、次章以降で必要となる交直変換標準とサーマルコンバータの原理

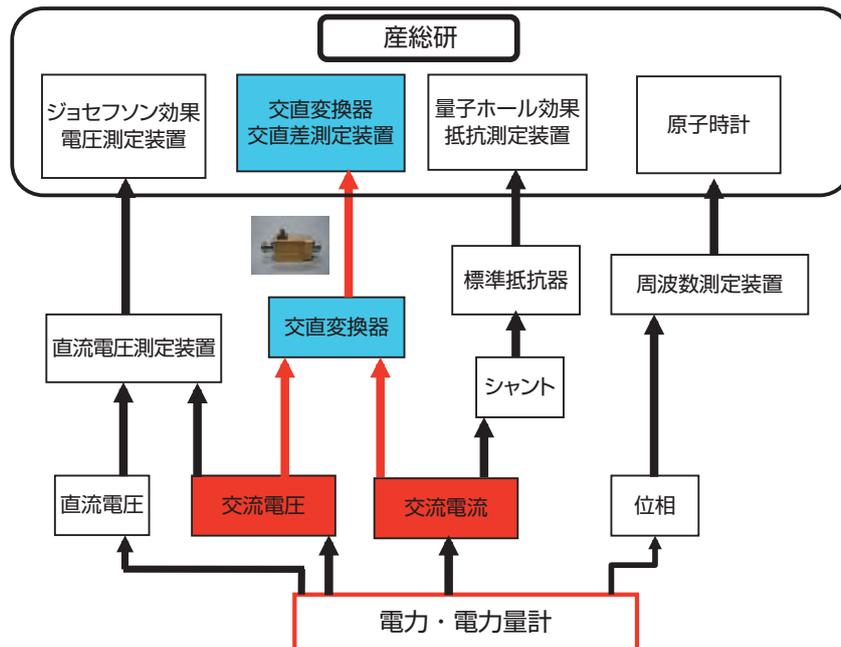


図2 電力・電力量計のトレーサビリティ体系

や技術について簡単に紹介する。

3.1 交直変換標準

交流電圧標準は、交直変換器を介して直流電圧と交流電圧を比較することで導かれる。この比較には熱が利用されている。エネルギー保存則に基づき、変換器内の負荷（ヒータ）で発生する熱量が交流および直流でそれぞれ等しいとき、交流電圧および直流電圧が等しいと定義される。この定義に基づくと、交流の実効値と直流の値を比較でき、直流電圧から交流電圧が導かれる。この比較法に基づく標準体系は「交直変換標準」と呼ばれ、直流電圧から交流電圧への変換誤差に相当するものを「交直差」と呼んでいる。現在までのところ、交流電圧を導くのに、サーマルコンバータを介して直流電圧標準（ジョセフソン電圧標準）より求めるのが一番精度が高いことから、この方法が世界的な主流である^[1]（図3）。このため、交流電圧標準の確立には、交直変換器の変換誤差に相当する交直差の評価とサーマルコンバータの開発が必要であり、各国家標準機関に交直差標準が存在する。交直差が小さく、その評価が可能なサーマルコンバータの開発は、国家標準の交流電圧標準の範囲拡張や高度化に必要であり、重要な研究テーマであるが、作製可能な標準機関は少なく、安定に入手することは困難な状況である。一方、サーマルコンバータは校正業務に伴い破損や劣化が起こるため、サーマルコンバータの安定供給は、標準供給の維持・管理のためにも不可欠で、校正事業者に小さい不確かさで交流電圧標準を供給するのに必要なものである。

ここで、5章で述べる要素技術課題では、サーマルコンバータの交直差の主な要因を考慮する必要があるため、交直差の原因について記述する。サーマルコンバータは、ヒータへの入力電圧によって生じたジュール効果による温度上昇を熱電対によって検出するものである。サーマルコンバータの主な交直差は下記に示す3項目に分類される。

(I) DC特性（熱的交直差）：サーマルコンバータ素子に直流電流を通電した場合、トムソンおよびペルチェ効果によりジュール熱以外の発熱・吸熱が生じ、ヒータ

線の温度分布が不均一になる。この結果、直流と同じ実効値を有する交流正弦波をヒータ線に通電しても、熱電対の出力電圧に差が生じ、交直差（熱的交直差）をもたらす^[4]。

(II) 低周波特性：サーマルコンバータの熱的時定数と比較して入力交流電圧の周波数が十分に高くはない場合、ヒータ線の温度は入力電圧に追従し、周波数に温度が変化する温度振動（Thermal Ripple）が生じ、交直差の原因となる。

(III) 高周波特性：10 kHz以上の周波数領域においては、表皮効果や、入力回路の浮遊容量、インダクタンスの影響がデバイスから排除できず、このため、交直差の周波数特性をもつ。また、1 MHzより高い周波数は、インピーダンスの整合を考慮に入れる必要がある。

以上の原因により、標準的なサーマルコンバータの交直差の周波数特性は、概ね図4に示されるようになる。100 Hzから10 kHzの間の周波数領域では、高周波特性および低周波特性は相対的に小さく、非ジュール熱の影響による「熱的交直差」が支配的となる。上記、(II)、(III)の交直差の評価は理論モデルによって評価され、(I)は熱的交直差を測定するFRDC-DC法によって行われる^{[5]~[7]}。

3.2 サーマルコンバータ

交直変換器は、シングルジャンクションサーマルコンバータ（Single-Junction Thermal Converter：SJTC）^[8]、ワイヤー多熱電対型TC（Multi-junction Thermal Converter：MJTC）^[9]、薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ（Thin-Film MJTC）^{[10]~[11]}、および熱型半導体RMSセンサー（Solid-State Thermal RMS Sensor）^[12]の4種類の交直変換器が開発されている。

(1) シングルジャンクションサーマルコンバータ（SJTC）

シングルジャンクションサーマルコンバータ素子（図5）は、ヒータワイヤーと熱電対から構成されている。用いられている熱電対が1対であるので、シングルジャンクションサーマルコンバータと呼ばれている。入力した直流と交流

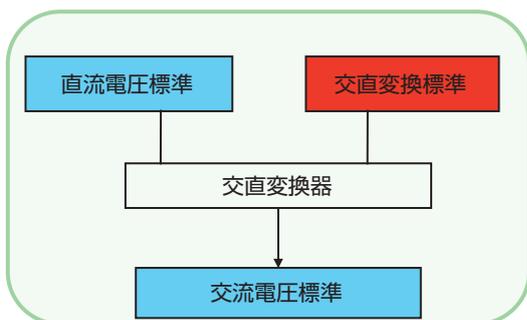


図3 交流電圧標準の流れ

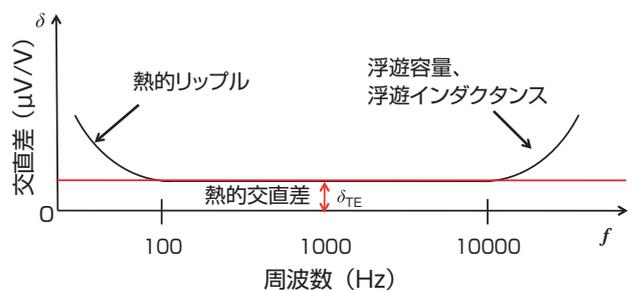


図4 サーマルコンバータの交直差の周波数特性

の電圧によりヒータ線で発生した熱を熱電対で比較測定する。熱電対は電気的絶縁をとるためビーズを介してヒータ線に取り付けられている。ヒータ線と熱電対部分は、外界との熱的絶縁を高めるため、真空ガラス球の中に封入されている。ヒータ線は、浮遊インダクタンスや容量の影響を小さくし、また、高い周波数でのインピーダンスの不整合による反射の影響を考慮し、線長は短い構造となっている。ヒータ線幅は、表皮効果の影響を抑え、抵抗値をある程度大きくするため、細線構造となり、直径おおよそ 25 μm であり、定格電流は約 10 mA である。ヒータ線は、過電流によるヒータ自体の発熱により、劣化・断線等が生じる。ヒータ線と熱電対とも細線のため、製作には顕微鏡下での手作業が必要となり、大量生産、歩留まり改善は困難である。

シングルジャンクションサーマルコンバータは 1960 年代にすでに $\mu\text{V}/\text{V}$ レベルでの測定に使用され、現在でも交流電圧標準の分野において広く用いられている。SJTC は構造が単純なために、経年変化が小さく、周波数特性が 1 MHz 程度の高周波まで小さい。しかし、ヒータ線の温度分布に起因するトムソン効果およびペルチェ効果により、ジュール熱以外の発熱/吸熱が生じ、交直差をもたらす。

(2) ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータ (Multi-junction Thermal Converter: MJTC)

ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータは、特に評価が難しかった熱的交直差の問題を解決するために開発された。ストレート形状のヒータ線は、印加電圧の Hi 側と Lo 側で温度勾配がある。このため、図 6^[9]に見られるように、ヒータ線を折り返してより線にすることで、ヒータ線の熱の不均一を軽減している。加えて、多数の熱電対を用いてヒータ線の温度分布を一様化することによって、熱的交直差を 0.1 $\mu\text{V}/\text{V}$ 以下に抑えている。また副次的な効果として、出

力電圧は多数の熱電対の数だけ増幅されて、100 mV 程度に上昇しており、交直差の測定が容易である。しかし、その構造はサーマルコンバータの中で一番複雑で、直径 10 μm から 40 μm のヒータ細線に、直径 20 μm の熱電対ワイヤーを顕微鏡下で取り付ける作業が必要で、大量生産は困難である。作製された個数は、100 個程度で、主な国立標準機関に 1、2 個程度配られた。一方、静電気により絶縁破壊を起こして壊れやすいため、頻繁に使用することはできず、通常の校正業務では、シングルジャンクションサーマルコンバータや次で述べる薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータが用いられることが多かった。また、構造が複雑なために高周波特性もシングルジャンクションサーマルコンバータに比べて劣る。現在、ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータは作製されていない。

(3) 薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ (Thin-Film MJTC)

薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ (図 7) は、微細加工技術が発達していた 1980 年後半から開発が行われた。作製が非常に難しかったワイヤー多熱電対型サーマルコンバータを薄膜化したものである。薄膜型も、SJTC の欠点である小さい出力を改善するため、一般に、多熱電対型 (MJTC) であり、標準の世界では、Thin-Film MJTC と呼ばれる。薄膜型サーマルコンバータのヒータ構造は、その温度分布の不均一を改善するため、折り返しの U 字型の形状が採用されていることが多い。薄膜型サーマルコンバータは、ヒータまわりの熱的絶縁のため、ヒータ直下の基板の厚みの調整が必要となるが、1990 年代初めに、ヒータ膜下を異方性エッチングしたシリコン基板上に薄膜を形成する技術が開発されて、国家標準機関に広く普及した。しかし、薄膜型サーマルコンバータも構造が複雑なために高周波特性は SJTC に比べて劣る。10 kHz 以

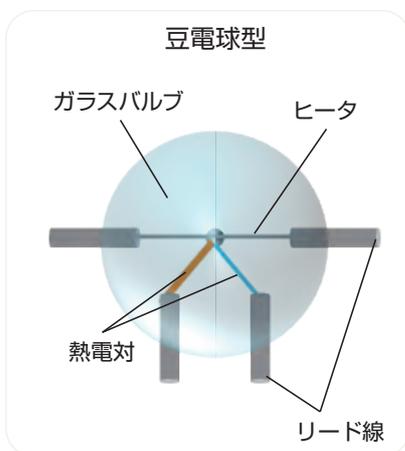


図 5 シングルジャンクションサーマルコンバータ (豆電球型) の模式図

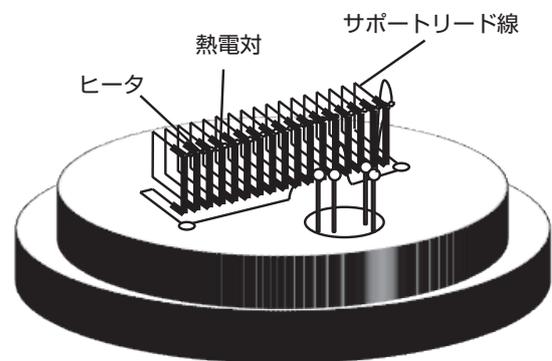


図 6 ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータの模式図

上では、ヒータ-熱電対間のストレイの影響、誘電損失等により、交直差の周波数特性の再現性が悪くなる。また、SJTCと同じく、構造の変更はあまり容易でなく、サーマルコンバータに流せる定格電流は10 mA程度で、過電流により、断線破壊される。

(4) 熱型半導体 RMS センサー (Solid-State Thermal RMS Sensor)

熱型半導体 RMS センサーは、シングルジャンクションサーマルコンバータとマルチジャンクションサーマルコンバータの実用的な代用品として、アメリカの計測器メーカーにより開発された。熱型半導体 RMS センサー型は、ヒータの温度上昇を熱電対ではなく、トランジスタのベース・エミッタ接合電圧 V_{BE} の温度依存性を温度検出素子として用いている。熱的な時定数が短いため、10 Hz 付近の交直差が $100 \mu\text{V/V}$ 以上になることもある。熱的交直差は、マルチジャンクションサーマルコンバータと比べて大きく、不確かさは多少大きい。しかし、販売されている熱型半導体 RMS センサー型のサーマルコンバータは、過電流に対する保護回路が内蔵されており壊れ難い。また、高性能アンプを用いているため、出力電圧が大きく、測定が容易になっている。校正事業者で一番普及しているサーマルコンバータは、熱型半導体 RMS センサーを用いたものである。国家標準のサーマルコンバータとして望まれることは、交直差の不確かさが小さく、その周波数特性等の評価が可能なことである。このため、熱型半導体 RMS センサーは校正事業者の校正器物として、普及している。

市販の熱型半導体 RMS センサーを除く、電圧用サーマルコンバータは、図8に見られるように、浮遊容量等の電氣的境界条件を決めるため、金属ケース内にマウントされ

る。サーマルコンバータ素子のヒータ抵抗は構造的な制約のため、おおよそ $25 \Omega \sim 100 \Omega$ 程度であるので、電圧の拡張は、図8のように、レンジ抵抗器と呼ばれる分圧用の抵抗器を直列に接続して拡張する。この方法で、サーマルコンバータの交直差は、レンジ抵抗器込みの交直差で、1000 V まで拡張される^[13]。交直変換標準で確立できる交流電圧の範囲は、電圧範囲は、1 mV \sim 1 kV、周波数範囲は0.1 Hz \sim 100 MHz 程度である。これ以外の範囲は、変成器を用いたり、サンプリング方法、サーミスタを用いた別の方法が採用されている^{[14][15]}。最近では、サーマルコンバータを用いて GHz の周波数へ拡張する開発研究が NIST で行われている^[16]。

4 交流電圧標準の確立シナリオ

交流電圧標準の国内体系を確立していく上で、求められているシナリオは、国際相互承認、高精度な国家標準の確立と産業界への標準供給である(図1)。

国際相互承認と産業界からの要望に対応するため、2001年から交直変換標準の国内体系の範囲拡張を進めた。2001年当時の交直変換標準の供給範囲は、電圧範囲は、2 V \sim 20 V、周波数範囲は、40 Hz \sim 100 kHz であり、他国の国家標準機関と比べて範囲が狭く、最高測定能力は10 ppm と不確かさも大きい状況であり、交流電圧標準の整備が望まれていた。国家標準の確立には、“新しい標準器の開発”が必要であり、校正の普及には、国家標準の“利用促進技術の開発”が重要である。このため、図1に示すように、国家標準の研究開発と標準の利用促進技術の開発の両輪で進める必要がある。

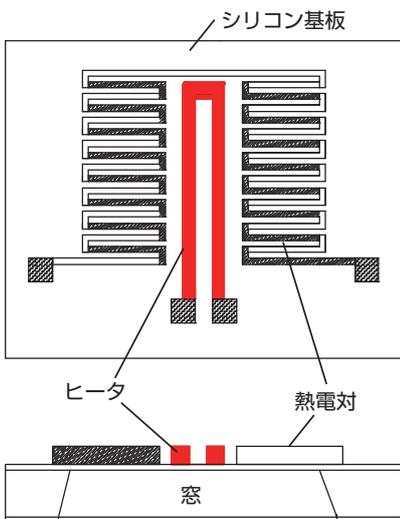


図7 薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータの模式図

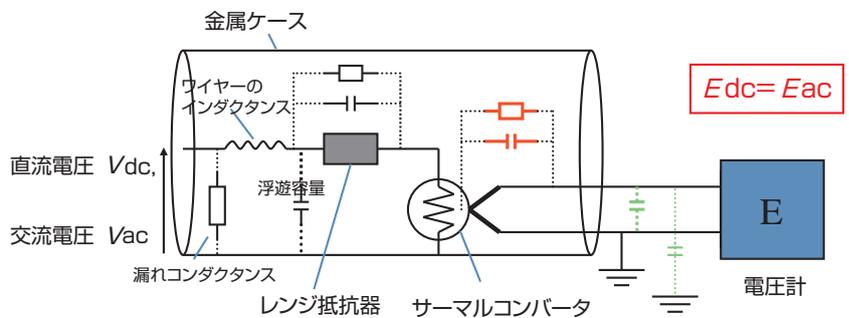


図8 サーマルコンバータのマウント例

交流電圧範囲拡張のため、分圧用のレンジ抵抗器がサーマルコンバータに直列接続され、金属ケースに取られる。これにより、図中の浮遊容量、浮遊インダクタンス、寄生抵抗を含めた交直差の周波数特性を決定できる。

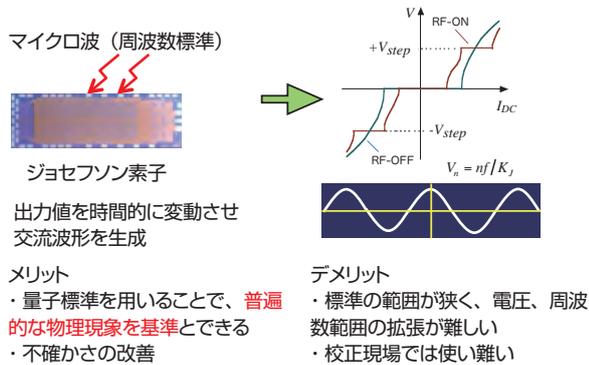
4.1 国家標準の確立

交流電圧標準を導く方法は、理想的な交流波形を作る方法と交直変換方法がある（図9）。国家標準として望ましいのは、誰がいつどこでやっても再現性がある普遍的な標準で、小さい不確かさが得られる方法である。この観点から考えると、交流電圧標準の国家標準は、量子標準が理想的である。この方法の代表例として、図9①に示されるように、ジョセフソン直流電圧標準を用いて、出力値を時間的に変動させ交流波形を生成する方法が考案されている（AC電圧ジョセフソン標準^[17]）。現在の直流電圧標準は、量子現象であるジョセフソン効果を用いて実現されているが、ジョセフソン直流電圧は、接合数と照射するマイクロ波の周波数で決まり、マイクロ波の周波数を精度良く定めれば、非常に正確な電圧を得ることが可能となるものである^[18]。現在、ジョセフソン効果を用いて、理想的な交流電圧を作る研究開発が主な国家標準機関で行われている。産総研でも、交流電圧の国家標準の候補の一つとして、直流電圧標準のグループが中心となり、AC電圧ジョセフソン標準の開発を行っている^[19]。この方法で生成される交流電圧は、厳密に見るとステップ状であるが、電圧の切り替えのときに、各ステップの量子化された電圧から外れる瞬間が存在し、誤差（トランジェントエラー）が生じるため、トランジェントエラーを回避する方法が研究されている。しかし、AC電圧ジョセフソン標準が実現しても、その電圧

範囲や周波数範囲は、一部に限られると考えられており、産業現場で、実際の校正業務に使用する際も難しい点がある。現在、理想的な交流波形を生成する研究開発の他に、AC電圧ジョセフソン標準とサーマルコンバータを組み合わせ、高精度で交流電圧測定装置や発生装置を校正するシステムの開発も行われている^[20]。この方法のメリットは、サーマルコンバータの不確かさを小さくでき、現在の交流電圧の標準供給の体系が利用できることにある。

現在の交流電圧標準のトップは、図9②に示される交直変換方法であるが、AC電圧ジョセフソン標準のトランジェントエラー等のため、将来においても国家標準である可能性もある。国家標準のサーマルコンバータは、3章で述べた交直差の原因の評価や不確かさの改善が不可欠であるが、交直差の周波数特性は、抵抗値や浮遊容量で変化する。（国家標準としてのサーマルコンバータは、他からの校正ではなく、交直差の出発点として、交直差の値を独自に見積もる必要がある。）このため、抵抗値や形状の異なる複数のサーマルコンバータを作製し、それらの交直差の変化を評価することで、交直差の値を決定している。また、交流電圧の範囲の拡張においても、3章で述べた原因に対処するサーマルコンバータを作製する必要がある。このように、国家標準の確立には、複数の特性の異なるサーマルコンバータが必要であるが、前述のように、高性能のサーマルコンバータは入手が難しく、交流電圧の体系シナリオにおいては、サーマルコンバータの開発が必要な状況であった。

①理想的な正弦波を作る方法



②直流電圧標準と比較する方法

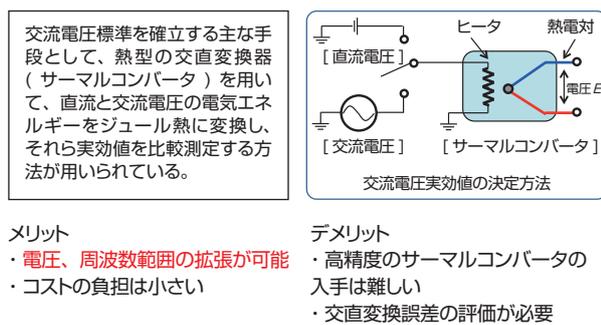


図9 交流電圧標準の実現方法

4.2 国家標準の利用促進技術

産業界から望まれている標準は、オペレーションや維持の負担が少なく、安価で、幅広い範囲で使用可能な標準である。国家標準と同等の不確かさが要求されることは例外である。量子ホール効果を利用した抵抗標準^[18]やジョセフソン直流電圧標準においても、量子標準で供給している値は、10 K Ωや10 Vの値で、その他の範囲は、抵抗ブリッジや分圧器等を用いて範囲の拡張が行われている。他の容易な実現方法がある中で、すべての標準供給範囲を量子標準でカバーするのは、現実的でなく、供給の観点からは、量子標準の意義も薄れてくる。交流電圧標準においても、量子交流電圧標準が将来確立した後でも、抵抗や直流電圧と同様に、電圧範囲の拡張や、産業界で利用されている計測機器への校正の橋渡しをする安価で、安定な校正器が必要になる。このように、交流電圧を導く方法や供給体系は、国家標準が、交直変換標準からAC電圧ジョセフソン標準に置き換わっても、サーマルコンバータは利用促進のために使われる可能性が極めて高い。実際、現在の直流電圧標準においても、最高精度の校正依頼は、

ツエナー電圧標準器によるものが求められる。交流電圧においても、サーマルコンバータの校正依頼が継続すると予想される。

産業界への利用促進のためには、交流電圧測定装置や発生装置を校正するため、安価で、経年変化が小さく、ロバストで、取り扱いが容易な標準器が望まれる。標準の普及のシナリオとして、高度な国家標準が確立しても、国家標準から校正を受ける適当な校正器物がなければ、産業現場で利用できない。一般製品の検査現場で用いられるような交流電圧測定装置や発生装置を校正器物とした場合は、経時変化や温度、湿度等の外乱による校正値の劣化を考えると、高度な国家標準の恩恵を十分受けない可能性がある。高性能なサーマルコンバータは安定で、1 kHz 付近の交直差の経年変化は、1 ppm 以下であり、電圧依存も極めて小さい。校正事業者や企業の校正室がサーマルコンバータを校正器物として利用できれば、高精度で、安定な標準を手に入れることができる。また、サーマルコンバータではなく、交流電圧計の交流電圧値で校正してしまうと、その範囲外に小さい不確かさで校正範囲を広げることが難しくなり、産業界へ供給する範囲が狭くなる可能性がある。しかし、現在のサーマルコンバータは、取り扱いに注意しても壊れることがあり、産業界への供給範囲拡大のため、サーマルコンバータの耐久性の向上が必要であった。加えて、従来のサーマルコンバータの使用できる電圧範囲が狭く、範囲の拡張には、レンジ抵抗器が必要となり、使い勝手が悪く、使用範囲の拡張が望まれていた。新たなサーマルコンバータの開発は、交流電圧標準の産業界への標準の安定供給とさらなる普及の目的とも一致する。このように、産業界への校正技術の課題として、校正器物として利用可能なサーマルコンバータの開発が望まれていた。

5 薄膜型サーマルコンバータの開発

国家標準の確立と利用促進技術の開発に対応するため、サーマルコンバータの容易な作製技術の確立と性能の課題を解決する新たなサーマルコンバータの設計を行った。産業界でも使える実用的なサーマルコンバータを開発することで、国家標準の確立と標準の維持、および産業界への高精度な標準の普及が可能となる。

5.1 要素技術課題

4章の交流電圧標準を導くシナリオから、サーマルコンバータの作製は、交流電圧標準体系の確立に十分なメリットがあると考え、新しいサーマルコンバータの開発を行った。この節では、サーマルコンバータ作製の技術課題について述べる。

(1) 作製方法の課題

豆電球型のシングルジャンクション（図5）においては、バルチュエ効果を抑え、ガラス球と熱膨張率が近いプラチナをヒータ線の支柱に使うことが望ましいが、ヒータ線材であるエバノームとの溶接は熟練の職人でないと難しい。また、直径 20 μm の熱電対線をおおよそ 25 μm のヒータ細線の中心に取り付け、真空封入するのは難しく、作製できる職人は世界でも数名である。2005 年からはプラチナ線材を用いたサーマルコンバータの購入ができない状態であった。

図7にみられる薄膜型サーマルコンバータにおいても作製の課題があった。ドイツの国立標準機関であるPTBは、シリコン基板上にヒータ薄膜を形成して薄膜型サーマルコンバータを作製し、標準供給に利用していた。サーマルコンバータの原理は、ヒータ線の発熱の測定であるので、ヒータ膜のまわりの熱的絶縁を確保するため、シリコン基板のヒータ膜直下はケミカルエッチングが施されており、基板の厚さが薄くなっている。しかし、このためヒータ膜に余分なストレスがかかり、ストレス緩和のバッファ膜等が必要である。バッファ層がないと、作製した膜に亀裂が観測されることもあった。このように、サーマルコンバータの作製には、エッチングやバッファ膜作製条件等のノウハウが必要である。加えて、ヒータ膜の温度係数や熱電対膜の出力特性も交直差に影響を与え、温度係数の小さい抵抗薄膜の作製方法や選定した熱電対薄膜の作製技術も必要であった。図7のPTBの薄膜型サーマルコンバータも担当職員の退職とともに入手が難しい状況である。

(2) サーマルコンバータの技術的課題

サーマルコンバータの設計について考察することも重要である。従来のサーマルコンバータの課題としては、構造に起因する作製の難しさと性能が限定されることにあった。従来のサーマルコンバータは交流電圧標準の最高精度を追及するように設計されている。シングルジャンクションサーマルコンバータは 10 kHz 以上の高周波で、不確かさ評価に都合の良い周波数特性を得るため、線長は短い。1 MHz の交流電圧の波長はおおよそ 300 m であるため、数センチのヒータ線は入力周波数の波長の比で考えると ppm のオーダーになる。交流電圧の不確かさを ppm で要求するときは、集中乗数方式で計算できる短いヒータ線のほうが都合が良い。しかし、回路の入力抵抗をかせぎ、ヒータの発熱を観測するため、抵抗値はある程度の大きさが必要であり、ヒータ線は細く、抵抗値は 25 Ω から 90 Ω 程度である。細線であることで、表皮効果の不確かさ評価も容易になる。一方、ヒータ線のまわりは真空のため、細いヒータ線に流せる電流は 10 mA 程度であり、定格電流の数パーセントの過電流を流すとヒータ線が焼き切れる欠点があっ

た。シングルジャンクションサーマルコンバータの構造の変更は難しいため、抵抗値や熱的時定数の変更も難しく、希望の入力電圧を得るために、レンジ抵抗器が必要になったり、3.1節で述べた（II）低周波特性のため、100 Hz 以下で不確かさが大きくなる課題もあった。

従来の薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ（図7）は、3.1節の（I）熱的交直差を評価するために作製されたのが大きな目的であった。このため、100個の熱電対薄膜がヒータ線沿いに作製されており、周波数が高くなると、取り除くことができないヒータ-熱電対間のキャパシタンスのため、電気的な絶縁は弱くなり、ヒータ線の入力電流が熱電対側の測定系に漏れてしまう^[21]。漏れる電流の大きさは、熱電対の出力を測定する回路に依存するため再現性が悪くなり、不確かさが大きくなる。また、熱電対を多数用いているので、熱電対の抵抗値が10 k Ω 程度になり、熱電対の出力電圧を測定する際のノイズの原因となる。薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータにおいても、ヒータ線に流せる電流は10 mA程度であり、熱的時定数の変更も容易でない。

産業界への利用促進の課題では、校正環境の違いが考えられる。サーマルコンバータの交直差の温度や湿度依存が大きければ、定期的な校正を受けていたとしても、産業界の校正においては、校正結果を最大限に利用できず、普及の妨げになると考えられる。また、交直差の周波数特性が大きいと、ケーブルの長さ、温度変化等の校正条件による校正値のずれを判断するのが難しくなる場合が予想され、交直差の周波数特性の小さいサーマルコンバータが望まれる。

以上のサーマルコンバータの開発技術要素を表1にまとめる。従来のシングルジャンクションサーマルコンバータとマルチジャンクションサーマルコンバータは、取り扱いが難しく、最高精度を必要とする国家標準機関で主に用いられ、産業界では普及はしておらず、3.2節で紹介した4種類の中で、熱型半導体RMSセンサー型が普及している。しかし、熱型半導体RMSセンサー型のサーマルコンバータは、3.1節の（I）～（III）の交直差の原因を直接求める構造ではないため、他の国家標準機関からの交直差の校正が必要となる。熱型半導体RMSセンサー型は校正事業者により、シングルジャンクションサーマルコンバータがマルチジャンクションサーマルコンバータによって校正されて、産業界で利用されている。

5.2 サーマルコンバータの設計と開発

5.1節で述べたサーマルコンバータの技術的課題を解消するため、作製の簡易化等の作製過程の変更が要求される。従来のサーマルコンバータは、ヒータ線と熱電対が一

体となっており、どちらか一方の不具合により、サーマルコンバータとして機能しない問題があった。また、実際の作製においても、ヒータ線と熱電対を同一基板上に作製する場合、どちらかの前段階の作製が成功していても、後の作製過程による影響を受け、劣化・破壊等が起こり、歩留まりが悪くなる可能性がある。これらを改善するため、ヒータと熱電対を別々の基板上に作製するデザインを採用した。これにより、ヒータ線と熱電対の最適な作製条件は互いに影響を受けずに、個々に追及することができ、作製の簡易化と性能の改善が期待される。また、一体型と比べ、位置の制約も少なく、それらの形状や配置等の変更が容易で、構造に依存する周波数特性の改善が可能である。サーマルコンバータの要であるヒータと熱電対を分離したことにより、従来の作製方法と比べて、基板のエッチングの必要はなく、ヒータ膜のストレスの影響による基板からの剥離や特性の変化もなくなる。作製過程も大幅に容易になり、歩留まりの改善が期待できる。

ヒータと熱電対の材料の選定にあたっては、実績のあるNi-Cr系の合金とBi-Sbを採用した。最初に、ヒータ抵抗であるが、抵抗の温度係数が大きいとジュール熱による発熱量が温度によって変化し、交直差の主な原因になるため、温度係数の改善を行った。製膜後のNi-Cr薄膜の抵抗温度係数は、おおよそ100 ppm/Kである。しかし、アニールを行うことによって抵抗温度係数を ± 25 ppm/Kまで小さくすることができる。さらに、抵抗の温度係数を改善するため、窒素雰囲気中でアニールを行い、10 ppm/K以下に改善することに成功した。これは、窒素雰囲気中では、気体の接触による熱伝導によって加熱するため、熱処理の一様性が優れていて、目標とするアニール温度を厳しく制御できたためであると考えられる。ヒータ線の作製は、一度の蒸着で、複数個の基板をセット可能で、従来のサーマルコンバータの作製と比べてヒータを大量生産できるメリットがある。

次に、熱電対膜の作製においては、従来の薄膜型サーマルコンバータの作製方法と基本的に同じであるが、従来型は約100対の熱電対を直列接続しているため、熱電対の抵抗値は数k Ω と大きい。抵抗値を改善するため、図10に見られるように、熱電対の構造を変更した。Bi膜と

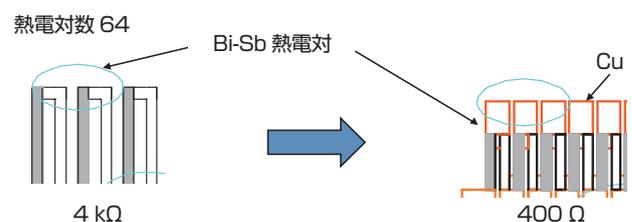


図10 熱電対パターンの改良

表1 サーマルコンバータの開発技術要素

要素技術	開発の要点	設定理由・根拠等	関連する図、表
(1) 作製方法の課題 作製の簡易化	従来の豆電球型サーマルコンバータは職人による顕微鏡下の手作業で、熟練した技術を必要としている。作製方法の簡易化を行う。	サーマルコンバータの作製が難しく、入手困難である。国家標準機関においても、サーマルコンバータを作製できることが限られている。	図5、図12、表2
(2) 作製方法の課題 サーマルコンバータの薄膜化	従来の薄膜化型のサーマルコンバータは、エッチング技術が必要である。また、構造の制約に起因する交直差の不確かさ要因がある。	一般の計測機器でも利用しやすいように、小型化したサーマルコンバータが必要になる。産業界に広く普及させるために、ユーザビリティを考慮したサーマルコンバータが要望される。	図7、図11、図12、図13、表2
(1) 技術的課題 交直差の高周波特性の改善	従来のサーマルコンバータは、ヒータ-熱電対間のストレイのため、ヒータ線の入力電流が熱電対側の測定系に漏れてしまい、高周波領域の再現性が悪く、不確かさの主要因となっている。	国家標準機器としてのサーマルコンバータは、高い再現性が要求される。校正事業者においても、高周波領域の校正は難しく、高周波特性の改善が望まれる。	図7、図14
(2) 技術的課題 サーマルコンバータのヒータ抵抗の改良	通常のサーマルコンバータのヒータ抵抗値は限定されており、入力電圧が制限される。任意の抵抗値が選択できるようにする。また、低周波領域ではヒータ線の温度変動幅とヒータ線抵抗値の変動幅により、精度が落ちるといった問題がある。ヒータ抵抗の改善を行う。	校正事業者においては、幅広い電圧範囲で使用可能なサーマルコンバータが使い勝手が良い。また、校正に伴う不確かさ要因が小さいことが望まれる。	表2
(3) 技術的課題 熱的交直差の改善	国家標準機関としてのサーマルコンバータの基準は1 kHz 付近の交直差である。1 kHz の交直差が1 ppm 以内であれば、国家標準器として利用可能な高性能のサーマルコンバータとなる。	国家標準器として利用可能なサーマルコンバータは、1 kHz の交直差が1 ppm 以内が望まれている。	図16、図17
(4) 技術的課題 耐久性の向上	サーマルコンバータの定格電流は10 mA と小さく、わずかな過電流により、ヒータ線の断線破壊が起こる。産業現場への普及のため、サーマルコンバータの耐久性を向上させる。	校正事業者や産業界では、大量に校正を実施することも多く、サーマルコンバータが壊れにくいことが望まれている。	図19、表2
(5) 技術的課題 サーマルコンバータの低周波特性の改善	サーマルコンバータの熱的時定数が0.1 s のオーダーの場合、100 Hz 以下の低周波で、交直差が大きくなる。これにより、校正の不確かさが大きくなるため、低周波特性の改善を行う。	商用周波数の交流電圧の不確かさの改善のため、100 Hz 以下の低周波の改善が望まれている。	図17、表2
(6) 技術的課題 熱電対の抵抗の改良	SN 比は出力電圧に比例し、出力抵抗 R の平方根に逆比例する。複数の熱電対の場合、抵抗値が10 kΩになり、検出感度が低減する。検出感度 (SNR) を向上させるため、熱電対の抵抗をできるだけ小さくする。	国家標準として、交直差の値を ppm レベルで評価するとき、検出感度が高いことが必要である。	図10、表2
(7) 技術的課題 サーマルコンバータの交直差の周波数特性	産業界へのサーマルコンバータの普及を考慮したとき、周波数特性のフラットなサーマルコンバータが使い勝手が良い。交直差の周波数特性 (10 Hz ~ 1 MHz) を改善する。	産業現場での校正の際、校正条件の変化による校正値のずれを判断するため、交直差の周波数特性が小さいことが望ましい。	図17、表2
(8) 技術的課題 サーマルコンバータの耐環境を評価	産業現場においては、校正室と異なり、温度や湿度の環境が整っていない場合が、予想される。サーマルコンバータの耐環境を評価し、サーマルコンバータの利用の際の指標とする。	産業現場への標準の利用促進のため、環境に対するサーマルコンバータの安定性の評価が重要になる。	図20、図21

Sb 膜の間に Cu 膜を挟むことで、接触抵抗が格段に小さくなり、我々の抵抗値は 4 k Ω から 400 Ω に改善することに成功した。また、熱電対膜を基板の両面に作製し、出力値を上げる試みを行った。このため、熱電対膜作製では次の 8 回の蒸着が必要となる。フィルム基板の表面に、① Bi 膜作製、② Sb 膜作製、③ 引き出し電極の Cu 膜作製、④ Bi-Sb 間の Cu 膜作製の順序で、マスク蒸着法によって成膜したのち、フィルム基板を裏返しにして、表と同様、⑤ Bi、⑥ Sb、⑦ 引き出し電極の Cu、⑧ Bi-Sb 間の Cu 膜作製のように、8 回のパターン形成が必要となる。複雑な熱電対膜の作製も一度に複数個の作製ができるように、図 11 のような蒸着治具を開発した。これにより、熱電対膜の位置合わせが容易になり、歩留まりの改善に貢献し、大量生産が可能な作製方法を確立した。

図 12 は、今回開発した薄膜型サーマルコンバータの構造である。ヒータ抵抗と熱電対は上述のように別々に製作され、仕様適合したヒータ抵抗と熱電対膜が、サーマルコンバータの製作に利用される。熱電対が製膜された 12 μm 厚のポリイミド膜は、アルミナ製のフレームに支持される。ヒータが製膜された窒化アルミチップをフリップチップボンディング法でポリイミド膜上に接続する。前述のように、ヒータ抵抗のアニールが独立して行えるので、アニー

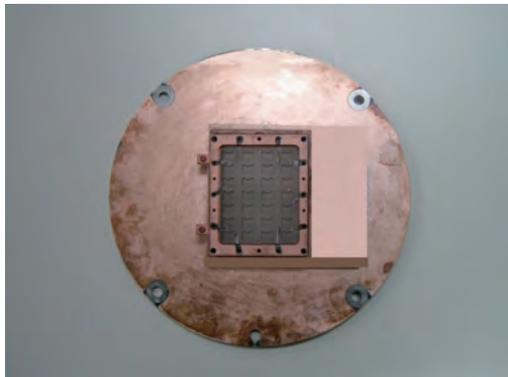


図 11 熱電対膜作製のための長方形の蒸着治具

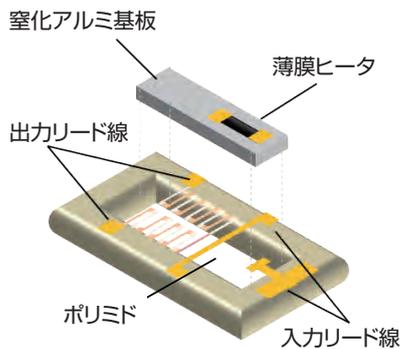


図 12 薄膜型サーマルコンバータ模式図

ルはポリイミド膜上に取り付ける前に行われ、端子や熱電対等の他の構造に熱的な影響を全く与えることがない。これにより、最適なアニール条件を適用でき、作製の簡易化にも貢献している。ヒータ抵抗と熱電対がマウントされたアルミナフレームをアルミナでカバーし、サーマルコンバータが完成する。図 13 は開発したサーマルコンバータの写真である。素子の大きさは、2 × 1.5 cm であり、計測器内部に組み込むことも可能である。

次に、性能の改善について述べる。サーマルコンバータの構造と特性は密接であるので、5.1 節の技術課題を解決できるように構造の設計を行った。ヒータ基板として、過電流によるヒータ線の劣化・破壊の対策のため、熱伝導率が高い窒化アルミ基板を採用している。窒化アルミはヒータ熱の伝熱の役割も果たし、真空封入されている熱的絶縁状態のヒータ構造より耐久性が格段に向上し、電流範囲の拡張が可能である。この構造の場合、直流電圧と交流電圧の比較は、ヒータ線の温度を直接測定するのではなく、

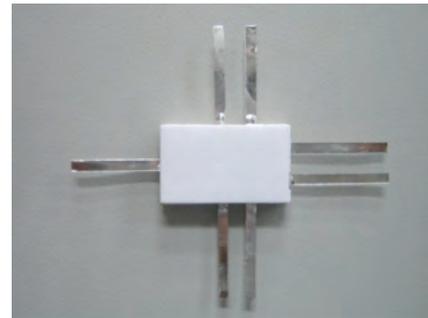
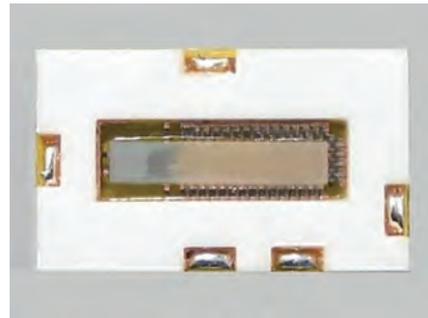


図 13 薄膜型サーマルコンバータ素子内部（上）と薄膜型サーマルコンバータ素子外観（中）、および、サーマルコンバータ用金属ケース（下）

窒化アルミ基板の温度上昇を測定することになる。このことにより、定格 200 mA のサーマルコンバータが可能となった^[22]。

ヒータの抵抗値はヒータ形状や面抵抗の調整により従来より容易に変更できる。ヒータの長さは、0.1 mm ～数 mm まで変更可能で、ヒータの製膜中に抵抗の大きさをモニターし、希望の抵抗値を得られるようにした。これにより、ヒータの抵抗値は、1 Ω ～ 2 k Ω まで選択可能である。2 k Ω のサーマルコンバータの場合、電圧拡張のための分圧用の抵抗器が必要なく、20 V まで印加可能である。ヒータ形状においても、周波数特性の計算が可能な構造であるストレート型や熱的交直差を抑える U 字型等任意の形状が可能である。抵抗値の変更と合わせて、交直差の見積もりのための周波数特性の異なる複数のサーマルコンバータが作製可能である。

熱電対の配置は、ヒータ線と熱電対間とのストレイの影響を抑えるため、図 5 にみられる従来のヒータ線の近傍に配置する構造から、ヒータ線の入力 hi 側から離れた配置とした。熱電対をヒータ線の Lo 側に配置することで、電位差が小さくなり、漏れ電流を減少することができる。このため、ヒータ線は図 14 に示されるように基板の一部にとどめており、熱電対はヒータ線のない部分の窒化アルミ基板の温度上昇を観測する。従来の薄膜型サーマルコンバータはヒータ線まわりが熱的絶縁であり、ヒータと熱電対間の配置を離すことができなかった。

次に、低周波領域の交直差を改善するために、サーマルコンバータの熱的時定数の設計を行った。熱的時定数とは、薄膜サーマルコンバータの出力電圧の応答特性を示す値で、低周波域では温度振幅の周波数特性を決めるパラメータである。サーマルコンバータの交直差は、入力電圧周波数 f が低くなると、ヒータ線で発生するジュール熱は、倍周波数 $2f$ で 0 から最大パワーまで振動する。入力周波数 f が、ヒータ線の熱時定数の逆数 ($1/\tau$) と比較して十

分に高くない場合、ヒータの温度にも倍周波数 $2f$ の振動が生じる。シングルジャンクションサーマルコンバータの時定数は 0.1 s ～ 1 s 程度であり、100 Hz 以下の低周波数領域においては熱リップルの影響が無視できなくなる。我々が開発した薄膜型のサーマルコンバータの熱的時定数の大きさは、窒化アルミ基板のサイズを変更することで 0.3 s ～ 4 s まで調整が可能である。1 例として、時定数が 2 s のときの基板の大きさは、0.3 mm × 1.5 mm × 8 mm となる。従来のサーマルコンバータの熱的時定数はその構造と密接な関係があり、独立した変更が難しかったが、我々は大幅な構造の変更なく、熱的時定数の変更が可能にした。前述のヒータ線の抵抗の温度係数を改善と合わせて、サーマルコンバータの交直差の周波数特性の改善が可能となる。

6 薄膜型サーマルコンバータの特性評価

開発したサーマルコンバータの性能としては、国家標準器で使われるような高性能を維持しつつ、耐久性の向上と使い勝手を良くして、産業界へ普及させることを目標としている。この章では、開発した薄膜型サーマルコンバータ^[23]の特性評価について述べる。

最初に、従来型の薄膜型と同じ形状のサーマルコンバータを試作した(図 15)。図 15 にみられるように、ヒータ膜と熱電対膜はシリコン基板の代わりに、ポリイミド膜上に作製した。熱電対はヒータ線に沿って配置されている。試作品の交直差の周波数特性を図 16 に示す。1 kHz 付近の交直差は、おおよそ 5 ppm であり、表 1 の (3) 技術的課題を満たしていない。国家標準器として、1 kHz 付近の交直差は 1 ppm 以内を目指しているが、この交直差の原因としては、ヒータ線上の熱の流入が異なり、ポリイミド膜状のヒータ線の熱の分布が不均一になっているため、熱的交直差が観測されていると考えられる。また、交直差の周波数特性も考慮した構造ではないため、1 MHz で 10 ppm 以上の交直差が観測されている。

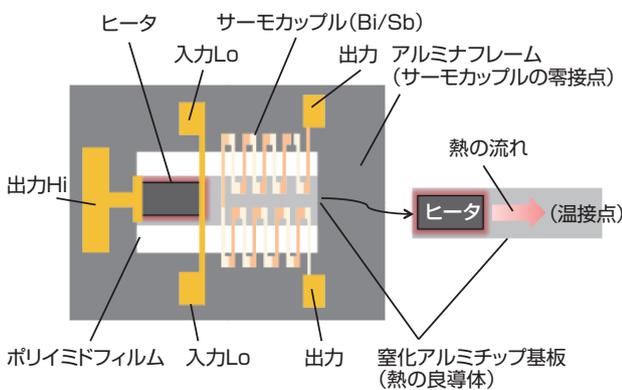


図 14 薄膜型サーマルコンバータ配置図

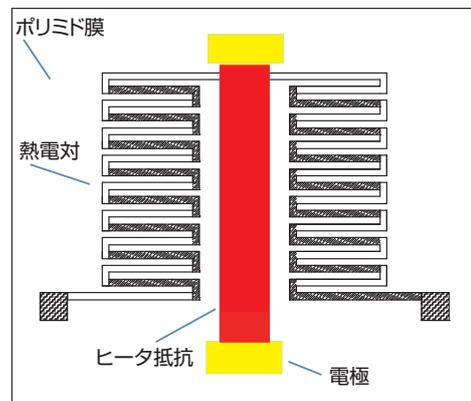


図 15 薄膜型サーマルコンバータのプロトタイプ模式図

次に、新型のサーマルコンバータ（図 10）の特性を紹介する。図 17 はサーマルコンバータの 10 Hz から 1 MHz の交直差の測定結果である。図の点線が従来のサーマルコンバータで、実線が今回開発したサーマルコンバータである。1 kHz 付近の交直差は、ヒータの不均一が改善したことで、1 ppm 以下に改善している。交直差の周波数特性においては、抵抗値や浮遊容量等を考慮した、交直差の周波数特性のモデル計算を行った。サーマルコンバータの形状を設計に従い作製することで、1 MHz においても図 16 と異なり、10 ppm 以下を達成した。また、我々のサーマルコンバータは、表 1 の (5) 技術的課題の交直差の低周波特性の原因となるサーマルコンバータの熱的時定数やヒータの抵抗値や形状、配置を自由に変えることができるので、熱的時定数が適切になるように窒化アルミ基板のサイズを調整し、抵抗の温度係数を、5 ppm/K 以下に改善している。これにより、図 17 の実線にみられるように、10 Hz から 1 MHz の広い周波数範囲で、交直差を 10 ppm

以内に抑えたサーマルコンバータを作製することが可能となった。従来のサーマルコンバータでは、図 17 の点線のように、低周波特性が大きく、また、高周波領域の交直差も大きい。産業現場では、0.1 % 程度の交直差の不確かさでも良いことも多く、今回開発したサーマルコンバータを用いることにより、交直差の値を 0 とみなすこともでき、表 1 の (7) 技術課題に示したすべての課題をクリアした。

図 18^[23] は、表 1 の (1) 技術的課題交直差の高周波特性を評価した図である。図 18 (a) は、図 15 にみられる試作品である従来型の熱電対がヒータ線に沿った配置のサーマルコンバータの周波特性である。図 18 (a) の白四角は、熱電対出力回路にローパスフィルターを入れた場合の測定結果で、黒丸はローパスフィルターなしの結果である。測定結果の差は、ヒータ-熱電対間の電気的絶縁が十分でないことを示している。この交直差は熱電対の測定回路に依存するため、不確かさの主要要因となり、校正事業者が利用する場合には、評価する必要がある。一方、図 18 (b) は、

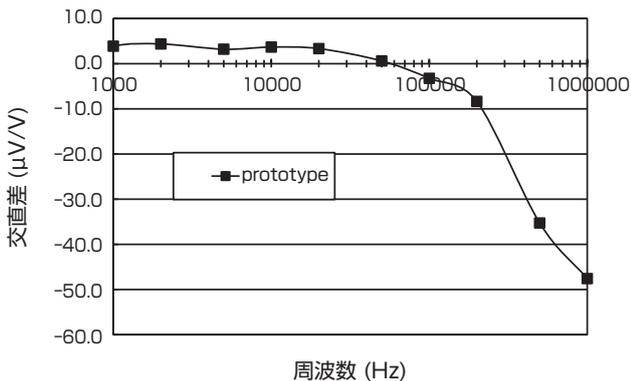


図 16 プロトタイプの薄膜型サーマルコンバータの交直差の周波数特性

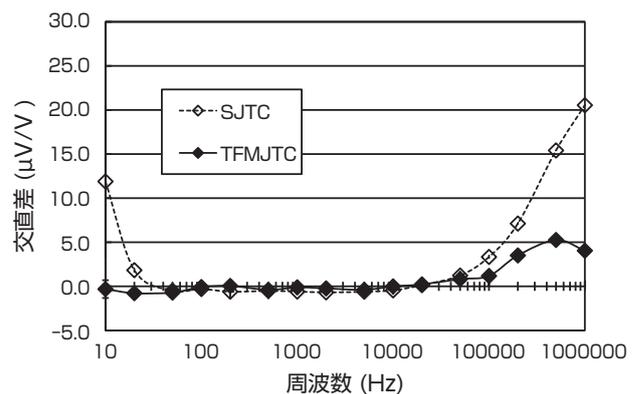


図 17 シングルジャンクションサーマルコンバータ (SJTC) と薄膜型サーマルコンバータ (TFMJTC) の交直差の周波数特性

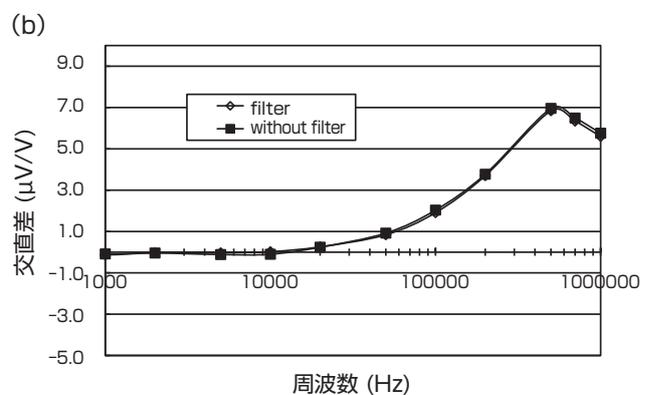
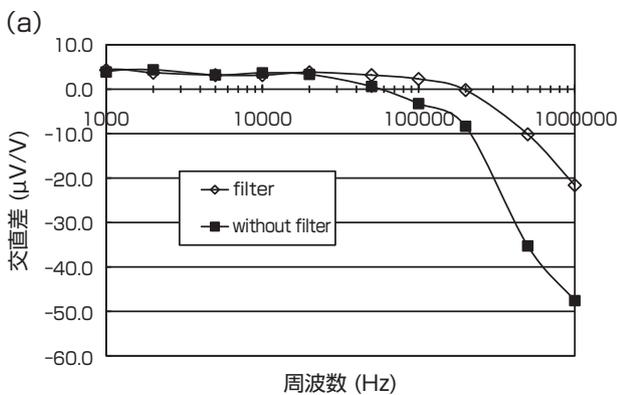


図 18 マルチジャンクションサーマルコンバータの高周波特性。
熱電対出力にローパスフィルターを用いた場合 (◆) とローパスフィルターなしの場合 (■)
(a) 従来の熱電対がヒータ線に沿った配置のサーマルコンバータの測定結果
(b) 新型の薄膜型サーマルコンバータの測定結果

開発したサーマルコンバータの結果で、フィルターがあるときとない場合で、同じ周波数特性が得られ、1 MHzの高周波で、両者の差は測定値のばらつきの範囲内である。熱電対をゼロ電位電極付近に移動したサーマルコンバータに対し、同様な良好の結果が得られており、校正事業者が利用する際の使い勝手が向上している。

耐久性の向上が望まれる1例として、高周波用サーマルコンバータが考えられる。インピーダンスマッチングの影響を考慮する必要がある1 MHz以上の交流電圧標準においては、50 Ωのサーマルコンバータの校正が要求される。しかし、従来のサーマルコンバータは定格電圧が0.5 Vと十分でないため、50 Ω以外のサーマルコンバータを用いて校正されていた。我々は、ヒータ熱の放熱の役割を果たす窒化アルミ基板を用いたことにより、従来の定格電圧の5倍の電圧範囲で使用可能となった。図19^[24]はヒータの抵抗値を50 Ωに調整したサーマルコンバータの1 MHzから

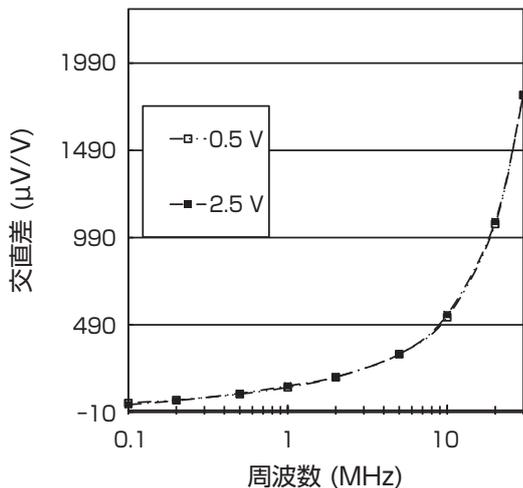


図19 ヒータ抵抗50 Ωの薄膜型サーマルコンバータの電圧依存

100 MHzの交直差の電圧依存を示しており、電圧依存は極めて小さい。短い時間であれば、0.5 Aの電圧を印加しても壊れることはなく、耐久性が格段に向上した。

校正室の校正環境は、温度、湿度とも環境条件が整えられているが、産業現場では、十分に安定した温度、湿度環境でない場合も想定される。耐環境性の評価として、温度と湿度を変えて、交直差の測定を行った。図20^[25]は、IEC規格に従い、温度を変化させて測定を行った結果である。温度変化に対して、薄膜型サーマルコンバータの交直差は検出感度の範囲内で変化が観察されなかった。また、周囲温度を15℃まで温度を下げて同様の測定を行い、15℃から35℃における交直差の温度依存性は、1 ppm以下であることが明らかになった^[25]。湿度環境に対する安定性を明らかにするため、IEC規格に従い、湿度特性の評価を行った。図21^[25]に湿度特性の評価結果と恒温槽内の相対湿度を測定した結果を示す。図21に示すように、湿度試験における交直差の変化率は、1 ppm以下である。この結果より、薄膜型サーマルコンバータが十分な湿度に対する安定性を有すると考える。参考文献25に見られるように経年変化も従来のサーマルコンバータと同様に極めて安定しており、今回開発したサーマルコンバータは産業現場でも十分に利用可能であると考えられる。

従来のサーマルコンバータと開発したサーマルコンバータの性能の比較を表2にまとめる。

7 交流電圧標準の今後の展開と課題

開発したサーマルコンバータは、現在、ニッコー株式会社で製品化されている。これまでのところ、年間おおよそ100個販売され、10カ国以上の標準機関で使われている。新型のサーマルコンバータは、表2に示されるように国家標準として使われていた代表的な従来のサーマルコン

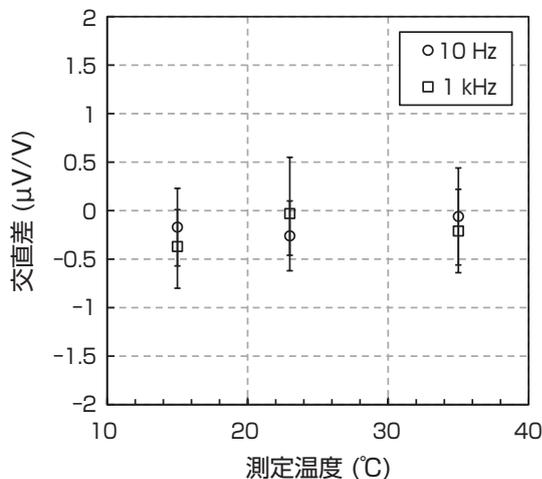


図20 薄膜型サーマルコンバータの温度特性

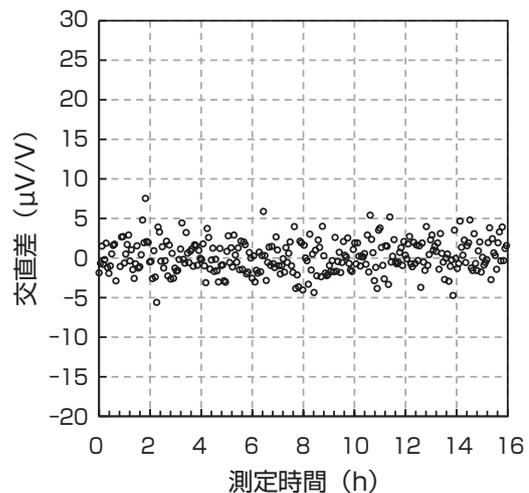


図21 薄膜型サーマルコンバータの湿度特性

表2 サーマルコンバータの比較

交直変換器	豆電球型	薄膜多対熱電対型	新型薄膜サーマルコンバータ
作成方法	手作業で1個ずつ作製	微細加工	微細加工
構造	三次元でヒータと熱電対が真空ガラス封入	ヒータと熱電対が同一基板	ヒータと熱電対が別の基板で独立に作製可能
[特徴]			
ヒータ抵抗	25 Ω, 90 Ω	90 Ω	1 ~ 2000 Ω
定格電流	10 mA	10 mA	200 mA
熱電対の数	1対	100対	68対
熱電対の抵抗	8 Ω	10 kΩ	400 Ω
出力電圧	7 mV	80 mV	35 mV
時定数	0.3 s	2 s	2 s
ヒータ抵抗の温度係数	10 ppm	10 ppm	5 ppm
ヒータ-熱電対の絶縁抵抗@1 MHz	高	低	高
低周波数特性@10 Hz	~10 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm
熱的交直差	~1 ppm	~0.1 ppm	~0.1 ppm
高周波特性@1 MHz	> 10 ppm	> 10 ppm	< 10 ppm

バータの性能を満たしている。我々のサーマルコンバータは、ヒータの定格電流が大幅に改善され壊れにくくなっている。しかし、ヒータ線に大電流が流せるようになったことで、ヒータの発熱が大きい場合、熱電対への影響が予想される。熱電対膜は、ビスマスとアンチモンを用いており、ビスマスの融点が 271.3 °C と低い。大電流を流せるように改善されたが、長期使用では、加速試験の結果、熱電対の劣化が予想されている^[26]。20 mA 程度では、ヒータの発熱による影響は小さく、20 年以上の連続通電使用が可能であるが、大電流を流した場合、熱電対の劣化により、10 年以下に寿命が短くなってしまいます。開発したサーマルコンバータの特徴である大電流が流せる利点を十分に発揮するため、熱電対の改良を考えている。

また、低周波領域の交流電圧標準は産業界から要望があるが、現在の供給範囲は 4 Hz までである。今後 0.1 Hz まで拡張するため、開発したサーマルコンバータの熱的なモデルの解析を行っている。現在、真空封入したサーマルコンバータの開発を行っており、さらなる低周波特性改善を行い、範囲の拡張を行う予定である^[27]。

サーマルコンバータの今後の応用であるが、オーストラリアの国立標準研究所が我々の開発したサーマルコンバータを利用して電圧の標準でなく電力の標準への応用を試みている^[28]。広く用いられている交流電力標準は、電圧、電流、位相の組み立て量であるが、オーストラリアの提案している電力標準は、サーマルコンバータを基準として確立しようとする電力標準である。日本の商用周波数の電力標準は、日

本電気計器検定所が指名計量標準機関 (DI: Designated Institute) となっているが、現在、日本電気計器検定所と共同で、開発したサーマルコンバータを用いて、特定標準器^{用語2}の不確かさ改善を計画している。

もう一つのサーマルコンバータの応用の可能性として、図 22 で見られるような脱着可能な小型化した伸介器を組み込んだ計測器の開発が考えられる。薄膜型サーマルコンバータは小型化と耐久性アップを実現したため、交流電圧関連の測定機器の基準デバイスとして使用できる可能性がある。通常の交流電圧の校正と同じように安定したサーマルコンバータを基準として、交流電圧の出力値を常にサーマルコンバータにフィードバックさせる機能を開発することで、高精度な交流電圧を利用することができる。サーマルコンバータを複数個内蔵することで、値の確認も行う。このような取り外し可能な伸介器を内蔵した計測器を開発す

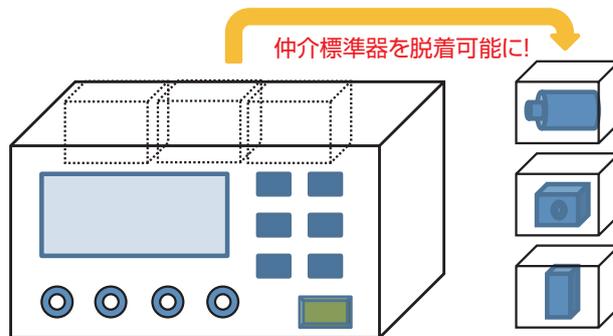


図 22 脱着可能な伸介器を組み込んだ計測器の開発

ることで、産業現場でのトレーサビリティ確保の負担が軽減できる可能性がある。従来の校正は、複数の電流量が計測できる計測器を校正機関に持ち込んで校正を行っているが、取り外し可能な仲介器を校正することで、他の電流量の測定に影響を与えることなく、校正ができることになる。これにより、より高精度な電気標準の利用促進を行っていきたいと考えている。

謝辞

当研究開発の製品化に多大のご協力をいただいたニッコン株式会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

用語の説明

用語1: 上位標準器: 標準のトレーサビリティは、国家標準（一次標準）を上位として、国家標準から校正を受ける校正事業者の標準（二次標準）、二次標準から校正を受けている校正事業者の標準（実用標準）、校正事業者から校正を受けている一般のユーザーの計測器で成り立っている。校正先の標準器は上位標準器と呼ばれている。

用語2: 特定標準器: 日本の計量法で定められている一次標準のことを特定標準器（国家標準）と呼んでいる。特定標準器から校正を受ける校正器物は、特定二次標準器と呼ばれる。

参考文献

- [1] B. D. Inglis: Standards for AC-DC transfer, *Metrologia*, 29 (2), 191-199 (1992).
- [2] F. L. Hermach: Thermal converters as AC-DC transfer standards for current and voltage measurements at audio-frequencies, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 48 (2), 121-138 (1952).
- [3] M. Klonz and T. Weimann: Accurate thin film multijunction thermal converter on a silicon chip, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 38 (2), 335-337 (1989).
- [4] B. D. Inglis: A method for the determination of AC-DC transfer errors in thermoelements, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 27 (4), 440-444 (1978).
- [5] H. Sasaki and K. Takahashi: Development of a high-precision AC-DC transfer standard using the FAST-Reversed DC method, *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, No. 989, (1999).
- [6] C. J. van Mullem, W. J. G. D. Janssen and J. P. M. de Vreede: Evaluation of the calculable high frequency AC-DC standard, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46 (2), 361-364 (1997).
- [7] H. Laiz, M. Klonz, E. Kessler, M. Kampik and R. Lapuh: Low-frequency AC-DC voltage transfer standards with new high-sensitivity and low-power-coefficient thin-film multijunction thermal converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 52 (2), 350-354 (2003).
- [8] F. L. Hermach and E. S. Williams: Thermal converters for audio-frequency voltage measurements of high accuracy, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 15 (4), 260-268 (1966).
- [9] M. Klonz: AC-DC transfer difference of the PTB multijunction thermal converter in the frequency range from 10 Hz to 100 kHz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-36 (2), 320-329 (1987).
- [10] H. Dinter, M. Klonz, A. Lerm, F. Volklein and T. Weimann: AC-DC-mV-transfer with highly sensitive thin-film multijunction thermal converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 42 (2), 612-614 (1993).
- [11] J. R. Kinard, D. X. Huang and D. B. Novotny: Performance of multilayer thin-film multijunction thermal converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 44 (2), 383-386 (1995).
- [12] D. Matson: Using a linear thermal transfer standard for high-precision AC/DC transfers, *CPEM '90 Conference digest*, 64-65 (1990).
- [13] H. Fujiki: Improvement of the voltage dependence of high-voltage AC-DC transfer differences at NMII, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 57 (9), 1992-1997 (2008).
- [14] R. L. Swerlein: A 10 ppm accurate digital AC measurement algorithm, *Proc. NCSL Workshop and Symp.*, 17-36 (1991).
- [15] P. S. Filipinski, R. F. Clark and D. C. Paulusse: Calorimetric thermal voltage converter as a wideband calculable standard of AC-DC difference, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 48 (2), 387-390 (1999).
- [16] G. M. Free, T. E. Lipe, J. R. Kinard and J. E. Sims: Characterization of RF-DC transfer difference for thermal voltage converters with built-in tees in the frequency range 1 MHz to 1 GHz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 56 (2), 341-345 (2007).
- [17] R. Behr, L. Palafox, G. Ramm, H. Moser and J. Melcher: Direct comparison of Josephson waveforms using an AC quantum voltmeter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 56 (2), 235-238 (2008).
- [18] B. N. Taylor and T. J. Witt: New international electrical reference standards based on the Josephson and quantum Hall effect, *Metrologia*, 26 (1), 47-62 (1989).
- [19] M. Maruyama, C. Urano and N. Kaneko: New drive system for programmable Josephson voltage standard using pulse packet bias, *CPEM 2012 Conference digest*, 50-51 (2012).
- [20] I. Budovsky, D. Georgakopoulos, T. Hagen, H. Sasaki, and H. Yamamori: Precision AC-DC difference measurement system based on a programmable Josephson voltage standard, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60 (7), 2439-2444 (2011).
- [21] P. S. Filipinski and M. Boecker: Experience with high-output-resistance MJTC AC-DC transfer standards at high frequencies, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 52 (4), 1314-1319 (2003).
- [22] H. Fujiki: Development of thin-film multijunction thermal current converters with increased rated current, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (6), 1853-1858 (2013).
- [23] H. Fujiki: New thin-film multijunction thermal converter design for improved high-frequency performance, *IEEE Sensors Journal*, 7 (9), 1243-1247 (2007).
- [24] H. Fujiki: Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters With a Novel Structure, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60 (7), 2725-2729 (2011).
- [25] Y. Amagai, H. Fujiki, K. Shimizume and S. Hidaka: Improved stability of thin-film multijunction thermal converter, *Electrical Engineering in Japan*, 188 (1), 18-26 (2014).
- [26] H. Fujiki, Y. Amagai, H. Sasaki, K. Shimizume, K. Kishino and S. Hidaka: Improved performance of a thin-film multijunction thermal converter, *CPEM 2014 Conference digest*, 48-49 (2014).
- [27] Y. Amagai, H. Fujiki, K. Shimizume, K. Kishino and S. Hidaka: Low-frequency characteristics of a thin-film multijunction thermal converter under vacuum, *CPEM 2014 Conference digest*, 50-51 (2014).
- [28] I. Budovsky: AC-DC transfer standard for mains- and audio frequency power, *EURAMET TCEM SC LF meeting*, (2013).

執筆者略歴

藤木 弘之（ふじき ひろゆき）

1998年九州大学大学院理学研究科物理専攻博士後期課程修了。博士（理学）。同年九州大学工学部ベンチャービジネスラボラトリ勤務を経て、1999年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門電磁気計測科研究員。2012年電磁気計測科応用電気標準研究室室長として現在に至る。この論文では、交直変換標準の立ち上げと標準供給の利用促進、および、薄膜型サーマルコンバータの開発と評価全般を行った。



天谷 康孝（あまが い やすたか）

2004年東京理科大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。博士（工学）。同年TDK株式会社勤務を経て、2009年産業技術総合研究所に入所。2013年電磁気計測科応用電気標準研究室主任研究員として現在に至る。この論文では、IEC規格に基づき、サーマルコンバータ素子の温度、湿度、圧力の耐環境性に関する評価を担当した。現在、低周波への拡張と交流プログラマブルジョセフソン電圧とサーマルコンバータを組み合わせて、交流電圧を高精度に校正するシステムの開発も行っている。



佐々木 仁（ささき ひとし）

1979年北海道大学大学院理学研究科物理学科修士課程修了。博士（工学）。同年工業技術院電子技術総合研究所標準計測部に入所。2001年産業技術総合研究所。エレクトロニクス研究部門主任研究員として現在に至る。この論文では、薄膜型サーマルコンバータの熱解析、周波数特性解析を担当し、主要部分の設計を行い、実用化に貢献した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（田中 充：産業技術総合研究所フェロー）

この論文の主旨に照らせば、標準供給体制の社会的・産業的・国際的な視点からの技術構成方式については十分に詳細に記載されています。ただ、わかりやすさの点から、供給体制を構成する国家標準器への対応と産業界の校正技術への対応の相違点あるいは類似・共通点がまだ十分に明確には示されていないと言えます。それぞれの課題を集約して記載することが必要です。

回答（藤木 弘之）

この研究では、国内の交流電圧標準の体系の確立を目的としています。この目的のためには、ご指摘いただいたように、国家標準器への対応と産業界の校正技術の開発が必要であります。初稿の文章では、国家標準器として、交流量子標準と交直変換標準の選択も意識して書いていました。交流量子標準は国家標準器のみの対応が主ですが、サーマルコンバータは国家標準器と産業界の校正技術への対応を兼ねていますので、それぞれの課題が混在した文章構成になっていました。4章の文章構成を見直し、国家標準器への対応と産業界の校正技術への対応の課題を区別し、それぞれ独立した節に改訂しました。これにより、交流電圧標準体系の確立には、“国家標準の確立” + “新しい標準器の開発” + “利用促進技術の開発”

が必要であることが理解しやすくなったと考えております。また、サーマルコンバータの開発の必要性については、国家標準の範囲拡張にサーマルコンバータが必要であったことと、交流電圧の標準供給にも、交流電圧計による供給のみでなく、サーマルコンバータを校正器物として用いることにメリットがあることを追記しました。技術的課題をまとめた表1の記載内容も再検討し、国家標準器として必要な技術と産業界への標準供給のために必要な技術がわかるように整理しました。

議論2 シナリオの範囲について

コメント（田中 充）

“国際相互承認と産業界からの要望に対応するため、2001年から交直変換標準の国内体系の範囲拡張を進めている。”の文章では、この論文が書かれた2015年段階でも供給体制が完成していないこととなりますが、シナリオとの関係でそれで良いか確認してください。

また、“開発したサーマルコンバータは、現在、ニッコー株式会社で製品化されている。これまでのところ、年間おおよそ100個販売され、10か国以上の標準機関で使われている。今後も継続して利用していただけるように、サーマルコンバータ自体のさらなる性能改善を考えている。”の文章では、10か国以上の標準機関は現在の性能で満足していないと読者は想像するのですが、それで良いのでしょうか？シナリオで確定したこの研究開発の範囲と、今後の課題範囲とを区別してはどうでしょうか？

回答（藤木 弘之）

（前者の指摘については、）交流電圧標準の整備は、国際的な範囲は終了しております。国内の交流電圧標準の要望として、国際的には整備されていない、10 Hz以下の交流電圧標準の要望があります。しかし、2001年の整備計画で目標としていた範囲は完了していますので、文章を修正しました。

（また後者の指摘については、）開発したサーマルコンバータの最大の特徴は、従来のサーマルコンバータと比べて、ヒータ線に大電流が流せるようになったことです。しかし、ヒータ線に大電流が流せるようになったことで、ヒータの発熱により、従来のサーマルコンバータでは影響がなかった熱電対に影響がでてきました。今回の開発したサーマルコンバータでも十分に国家標準のサーマルコンバータとして使用できますが、熱電対の影響を改善することで、大電流が流せるという最大の利点を生かすことができると考えております。この内容に沿って文章を修正しました。

議論3 比較すべき技術要素について

コメント（田中 充）

要素技術候補の得失について議論していることは重要ですが、その一部についてはリストしながらも、必要十分な説明が欠けています。全体の構成方式として実際に採用されたものの正当性を否定するものではありませんが、客観性の観点からこれらについても加筆することが適切だと思います。

回答（藤木 弘之）

初稿では、サーマルコンバータ開発の要素技術候補として、3章に記載してあるワイヤー多熱電対型サーマルコンバータと熱型半導体RMSセンサーの具体的な記述を省略していました。この論文では、交流電圧標準の国内の標準体系を確立することを目的としており、国家標準器の開発と利用促進技術を兼ねたサーマルコンバータの開発を目指していましたので、国家標準器に特化したワイヤー多熱電対型サーマルコンバータと標準供給の校正器物に特化している熱型半導体RMSセンサーの記載は、全体の文章も長いこともあり、名前の紹介に留めておりました。各要素技術の候補の説明があったほうが、専門家以外の読者にもわかりやすくなると思え、上記の要素技術候補の内容も追記しました。

議論4 製品化シナリオの記述強化について

コメント（羽鳥 浩章：エネルギー技術研究部門副研究部門長）

背景から研究開発のシナリオまでの部分は、非常に丁寧に説明されています。一方で、実際の開発過程から製品化に至る部分については、やや説明が箇条書き的であり、挙げられた技術開発要素が比較的多いこともあって、専門外の読者にはややわかりにくいように思います。

回答（藤木 弘之）

サーマルコンバータの技術開発要素については、専門の学術論文にならないように簡単な技術紹介に留めていました。サーマルコンバータの製品化についてですが、従来のサーマルコンバータは、作製技術が難しく大量生産が困難であることと、過電流などの操作ミスにより簡単に破壊されることから、産業現場に近い校正室では、製品として普及していませんでした。製品化のためには、国家標準としても使える性能であることに加えて、サーマルコンバータの耐久性の向上と使いやすくなることが重要であると考えていました。この研究のサーマルコンバータの開発に必要な技術要素を初稿の要素技術課題の節と表1に記載していましたが、説明が足りない箇所があったと反省しています。サーマルコンバータの開発に関する文章の構成を見直し、各要素技術の説明とそれに対応する課題解決のための取り組みの内容を加筆しました。各技術要素の説明については、レビュアーの質問コメントを参考にして、この論文と表1を修正し、図、表を追加しました。

議論5 技術要素の効率的整理について

コメント（羽鳥 浩章）

サーマルコンバータの開発技術要素について、目標・指標とその設定理由が表1に示されています。これに対し、実際に開発した薄膜型サーマルコンバータについては、5章に開発経緯、6章にその特性が述べられていますが、技術要素が多岐に渡るため、読者にわかりにくいかと思います。製品化につながった重要技術要素とその開発経緯を整理し、明確に示すことが構成学的に重要な意味をもつことから、表1に示された技術要素に対して、実際に行った開発の要点と、その結果としての特性を図表にまとめてははいかがでしょうか。

回答（藤木 弘之）

サーマルコンバータの開発の動機は、交流電圧の国家標準の供給範囲の拡張と不確かさの改善のために、高性能なサーマルコンバータが必要であるが、その入手が困難であることでした。また、交流電圧標準と交直変換標準の校正器物が異なるため、交流電圧標準の普及のためには、新しい標準器の開発も必要であると考えていました。サーマルコンバータの開発では、その特性がいろいろな要素技術の複合で決まるため、最初の文章では、各要素技術の説明が点在し、専門家以外には、読み難い論文となっていました。開発経緯と重要技術要素を整理するため、文章の構成を見直し、新しいサーマルコンバータの開発の意義については4章にまとめて記載し、4章に記載していた要素技術を5章に移行しました。表1の重要技術要素について、開発の内容とその理由を開発経緯に対応できるように表1とこの論文の文章を修正、加筆しました。加えて、従来のサーマルコンバータと開発したサーマルコンバータの特徴の比較ができるように表2を作成し、重要要素技術に関連する図番号を表1に記載しました。

製造工程と製品のグリーン化を実現するための レーザーを用いた材料プロセッシング技術の開発

— 光を用いたものづくり手法の確立と社会への貢献を目指して —

新納 弘之

レーザーを用いた材料プロセッシング技術は、高い加工精度を要求される産業分野で着実に応用の幅を広げている。ニーズ側からの高速化、微細化、高品位化等の加工要求は年々増大しており、レーザー加工への期待は大きい。レーザー加工機システムのハード面が進歩し、光照射による励起状態に続く多様な過程の現象理解が進むことで、局所場における高速・高品位な表面加工が実施できる状況が整いつつある。この論文では、光励起過程に基づくレーザープロセッシング技術を用いた局所場表面加工技術を主題とし、製造工程と製品のグリーン化を実現するためのシナリオならびにそれを達成する道筋、要素技術の選択と構成の考察を行った。さらに、実用化に向けた課題を整理した。

キーワード: 高出力レーザー、物質と光の相互作用、光励起過程、表面化学反応

Green photonics for laser-based manufacturing

– Photonics contributes to a sustainable society in the “photon century” –

Hiroyuki NIINO

Green photonics is expected to reduce energy consumption and pollution associated with a broad range of manufacturing processes. The paper is a study on the development of laser-based methods and their applications. High precision surface processing of various materials is a key technology for practical industrial applications. Well-defined micro-fabrication with high-speed and high-quality treatment of materials was performed by laser irradiation. The technical challenges are particularly great in this area, but recent developments in laser processing have opened up new frontiers. Due to advances in laser processing systems, and greater understanding of the phenomenon of diverse excited states generated by laser irradiation, these methods can be considered mature and versatile techniques that present some key benefits over other more established fabrication techniques.

Keywords: High-power laser, laser-material interaction, photo-induced excitation, surface chemical reaction

1 はじめに

物質と光の相互作用解明は、古くから学問上の重要研究課題であり、現在もなお先端的テーマとして各国で精力的に研究が推進されている。ここで、物質への光子吸収過程に着目すると、光子吸収によって物質（原子や分子）には各種の励起状態が誘起されて、引き続き、緩和過程や化学結合開裂等が起こる。高振動励起状態からの緩和過程ではいわゆる光熱過程による高温度状態が発生し、電子励起状態からの化学結合開裂では光化学過程による分子の解離や化学結合の組換え等の化学反応が起こる。微細パターン状に結像させた光や微小スポット光を基材に照射することで、特定の場所への位置選択的な局所場処理

が容易にできることが、実用面での大きな特徴である。

この論文で主題とするレーザーを用いたプロセッシング技術（加工技術）では、高分子材料、ガラス・セラミック材料、金属材料、複合材料等さまざまな先進材料に高出力レーザーを照射することによって誘起される特徴的な光励起プロセスに基づいたレーザー局所場処理技術について言及する。レーザー励起プロセッシング技術を用いることによって、製造プロセスの省工程・省部品化を促進し、産業応用における低コスト化、高効率化、環境負荷低減に貢献することを目標とする。特に、難加工性材料等の高精度・高品位加工の実現によって新規な部材・部品・製品を提供し、製品としての省エネ特性を向上させることで社会に普

産業技術総合研究所 機能化学研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5
Research Institute for Sustainable Chemistry, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan E-mail: niino.hiro@aist.go.jp

Original manuscript received January 6, 2015, Revisions received March 3, 2015, Accepted March 10, 2015

収帯波長に光照射することが基本的な操作である。

他方、光の集光密度を高めると、多数個の光子が物質と同時に吸収される現象が観測される。これは多光子吸収過程と呼ばれ、光強度のべき乗に比例して発生することから（非線形吸収過程）、フェムト秒やピコ秒パルス光の尖頭出力の高い超短パルスレーザーの照射によって顕著に発現する現象である。多光子吸収過程によって励起される準位は、同時に吸収された光子エネルギーの和なので、一光子吸収過程よりもより高い準位に励起することができる。つまり、波長 1000 nm 近傍の近赤外域の多光子励起で可視や紫外域のエネルギーに相当する励起準位まで遷移させることができる。有機・高分子材料やガラス材料は、紫外～可視域に強吸収帯を有し、近赤外域には吸収帯が存在しないものが多いので、近赤外域の超短パルスレーザー照射によって、焦点を結ぶ基材内部部位だけを効果的に多光子励起する照射方法も考案されている^[5]。

平均出力は、1 秒間に光源装置から発振する光子エネルギーの総和である。パルス動作の発振器では、一つのパルスの光エネルギーとパルス繰り返し速度の積が平均出力となる。平均出力は、プロセッシング全体の処理速度を決める因子で、特に高速処理が要求される応用分野では、大きな平均出力の光源装置を選択することになる。

ビーム品位に関して、レーザー光の動径方向のエネルギー強度がガウス分布である場合をシングルモードと呼び、マルチモード光に比べて小さな集光径を得ることができる。したがって、単一スポット光で照射を行う場合には、シングルモード光の高速走査が有効である。しかし、複雑な微細パターンをフォトレジストに転写する半導体リソグラフィ等の用途では、スペckルノイズ（散乱光中に見られる明暗の斑点模様のこと）で、レーザーがコヒーレントであるために生じる独特の現象）を抑制できる狭短域化したマルチモード光が縮小光学系の光源として使用されている。このように、特定部位の位置選択的な加工や分析等を行いたいときには、レーザーを活用することが効果的である。さらに、パルスレーザー装置では上記の特徴に加えて時間制御性も向上する。したがって、レーザーによって“空間”と“時間”の両制御因子を精密に取り扱うことが可能になり、極微小領域における材料制御技術ができるようになっていく。

表 2 に加工用途の高出力レーザー発振器の変遷を示す。レーザー発振器の最近の進歩として、高出力化、ビーム品質の向上、短パルス化の特性向上が目目される。これまでマクロ加工分野を牽引してきた炭酸ガスレーザーや YAG レーザーに匹敵する勢いで市場導入が進むファイバレーザー装置では 100 kW 級まで平均出力が向上してお

表 2 加工用途の高出力レーザー発振器の変遷

加工分野	主要な光源装置の変遷				
	1980	1990	2000	2010	2020
マクロ加工分野 ・板金加工 ・3D造形加工	炭酸ガスレーザー				
	YAGレーザー				
	ファイバレーザー				
	半導体レーザー				
ミクロ加工分野 ・半導体リソグラフィ ・透明体等の微細加工	エキシマレーザー				
	高調波レーザー				
	フェムト秒レーザー				
	ピコ秒レーザー				

注) 各装置の左端の位置は「加工用装置として実用化された年」に相当する。

り、プラグインの電力-光変換効率は 30 % にも達することから省エネ性能も高い。これは、半導体レーザー素子の高性能化によるところが大きく、直接照射用のスタック型半導体レーザー装置の高出力化（数 kW 級）も著しい。これらのレーザー装置は、切断・穴あけ・溶接・接合・表面改質・粉末立体造形等多岐にわたるさまざまな加工技術における高品位・高速加工を実現している。ミクロ加工分野においても、短波長レーザーや超短パルスレーザーの導入が進んでいる。

2.2 レーザー加工機システムの特徴

ものづくり分野におけるレーザープロセッシング技術の産業実用システムは、①光源装置、②照射光学系、③基材（製品）搬送系、④加工プロセッシング部（プロセッシング技術、モニタ部を含む）、の主要 4 要素から構成されており、加工性能を決定する中核要素技術は、①および④。製造技術としての生産性向上の要素技術は、②および③の位置づけである。実際の工作機械として平板基材用の 2D 加工装置だけでなく、立体成形物を対象とする 3D 加工システムも製造ラインに適用できる機種が開発されている。デジタル設計データを精密に加工物に反映させる技術は高度化しており、現在も進歩を続けている。

照射光学系および搬送系の進歩は、加工分解能や処理速度の向上と基材大型化への対応に貢献している。特徴的な事例として、液晶テレビや太陽電池の製造工程にレーザー処理の適用が進んでいる。液晶テレビでは、パネル製造時の欠陥ロットを救済し、歩留り向上を図るための TFT アレイの欠陥を修正するリペア装置が開発されており、太陽電池では透明電極膜、半導体膜、金属膜等の各種薄膜のパターニング装置が使用されている。これらは基材サイズが数メートル級に年々大型化するなかで、マイクロメートルの加工精度も要求されている。そのダイナミックレンジは 5～6 桁にもわたるので、最先端・メカトロニクス技術が導入されている。

また近年は、前記の各主要要素に多数取り付けられたセンサー類が通信機能を内蔵し、相互に情報を交換しながら各要素間の自動制御の最適化技術が、IT 技術ならびにロボット技術の進歩と連動して発展しつつある。製造タクトタイム（工程作業時間）の短縮化や工場全体の稼働率を高める効果が期待されており、米国の「IoT（Internet of Things）」ならびに独国の「Industry4.0」の取り組みが注目されている¹⁶⁾⁷⁾。製造業におけるIoTでは、製造工程自体の高度化・最適化だけでなく、顧客ニーズや発注技術情報と直接連携することで、より緊密かつグローバルなものづくり体制が構築できるとされている。Industry4.0もほぼ同じ概念と言えるが、その名称には、人類の歴史としての「第4次産業革命」という位置づけが意図されている。

2.3 競合する加工技術との比較

2.3.1 切削加工や穴あけ加工等の物理的なメカニズムで加工を行う場合

競合する機械加工技術と比較して、レーザー加工は切削工具を使用しない非接触型加工のため、磨耗・劣化による消耗部品が発生しない。また、加工反力がないため剛性の小さい基材も高精度加工が適用できる。大気中における伝送減衰が少なく、光源装置本体は大きな騒音や振動を発生しないことが挙げられる。また、連続波キロワット級のレーザーも光ファイバー導光で光源装置から加工機ヘッド部まで伝送できるようになっており、光源とヘッド部の接続が容易になっていることから、遠隔部や狭隘部への高速加工法に適用できるリモート加工（加工機ヘッド部と基材を遠距離に保持する方式）による切断加工や溶接技術が発展している。物理的なメカニズムでレーザー加工を行う場合、その機構は光熱過程を経た高温状態の発生を起点とすることが多い。したがって、光エネルギー注入量と熱拡散速度のバランスを最適化し、アシストガスを併用することが大きな特徴である。レーザー加工では数 cm までの厚みの基材に対して効果的に加工できるが、5 cm を超える板厚の切断加工は現状困難な状況である。

レーザー処理技術は中量～少量段階の生産技術として適用の幅を広げている。金型を用いた加工では数万個～数十万個単位のロットである大量生産工程に対しては作業効率化と採算性が見込めるが、レーザー加工では数百個～数千個の生産単位または開発試作段階におけるコストダウン技術として有望視されている。レーザーを使った直接描画によるフレキシブルな加工を行うことで、金型製作ならびに金型管理等のリスク要因がなくなり、小・中量多品種の迅速（納期短縮）かつ仕様変更柔軟性の高い精密加工工程の生産技術として普及が始まっている。

2.3.2 光化学表面改質等の化学的なメカニズムで加工を行う場合

光照射による電子励起状態からの化学結合開裂を応用すると、分子の解離や化学結合の組換え等の化学反応を高効率かつ高密度に誘起することができる。微細パターン状に結像させた光や微小スポット光を基材に照射すれば、特定の場所への位置選択的な局所場化学処理が容易にできることになる。物理的なレーザー加工によって基材の形状を変化させるだけでなく、化学的な表面特性を任意に変更することができる。光を用いた表面改質の特徴として、

- ・基材表面への改質層の直接形成、微細パターン状の改質
- ・試薬使用量の低減、無溶媒化プロセス
- ・大気中、または、大気圧下での処理

が挙げられる。光源装置としてランプを用いることで光反応を誘起することも可能である。レーザーを使用するメリットは、パターン形状の処理ができることと高強度光照射によって活性種が高密度に生成することである。材料の表面改質では、主なレーザー照射方法として図2に示す4つの方法が挙げられる。図2(a)は表面改質を行いたい基材の表面に直接レーザーを照射する方法である。基材内部や表面層に光反応性の分子や官能基が含まれていれば、レーザー照射によって表面層の分子や官能基が励起されて、これを起点にして表面反応が進行する。誘起される光反応の種類を注意深く選択することで、表面に官能基を付与することができ、重合反応や表面極性を変化させることができる。また、基材表面に親水層または疎水層の薄い膜をコーティングし、レーザー加工によってその薄膜層を除去して母材層を部分的に露出させることで、表面特性をパターン化することも可能である。

図2(b)は図2(a)の派生例で、レーザー照射雰囲気

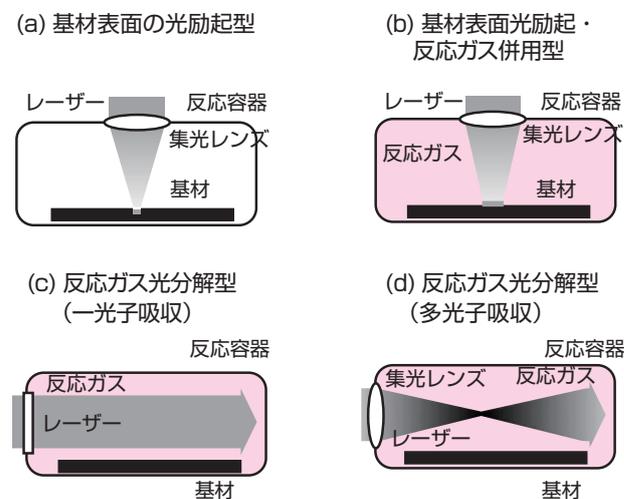


図2 レーザー照射による表面改質手法

表3 光反応を主体とする表面改質の種類と効果(応用例)

表面改質の種類	応用例
濡れ性改善	親和力・接着力向上、印刷適性、生体適合性向上、撥水性、防曇性
架橋、結晶化	表面硬化層形成、耐摩耗性
汚染層除去	表面洗浄
表面修飾 (グラフィ、コーティング)	高潤滑層形成、着色層形成、光反射(防止)膜、液晶配向膜、耐熱性、耐薬品性、ガスバリア性、帯電防止、耐候性、難燃性

に反応ガスを導入している。したがって、基材の表面反応を加速することができるとともに、意図的に基材表面層に光反応性分子を導入しなくても、最適な反応ガス種を選ぶことで目的の表面反応を行うことができる。この方法では基材と反応ガスの両方を同時に光励起することも可能で、図2(a)のようにパターン状の表面改質を行うことができる。

図2(c)や図2(d)では基材の光励起は行わず、反応ガスの光反応生成物を基材表面に堆積させることで、表面改質特性を得ているところに特徴がある。反応ガスが一光子吸収過程によって分解する場合には、図2(c)のように直入射照射で十分である。ガス分子の反応性が低いときや多光子吸収過程を必要とするときには、レーザーを反応容器内で集光することで、実効的な反応効率あげることができる。

表3に光反応を主体とする主要な表面改質の種類と応用例を示す。経時劣化が少なく耐久性の高い改質表面を作製するには、反応部位を材料最表面層だけでなく、母材特性を損なわない程度まで内部層も改質した方が多い。特に、高分子材料のように分子主鎖構造が柔軟で分子運動しやすい系では、最表面層の親水基が内部層に拡散し、表面の親水性が処理後徐々に低下することがあるため、1 μm前後の厚さの表面層を親水化すると耐久性の高い改質処理を行うことができる。

3 具体的な研究事例の紹介

第3章においては、第2章記述の現状のレーザー加工機システムをベース技術として、さらなる応用展開や適用拡大を指向した具体的な研究事例を3点紹介する。いずれも通常のレーザー加工法や他の競合加工技術では、高速・高品位な加工が困難な例である。

3.1 複合材料の高速・高品位加工

近年、地球温暖化対策としてCO₂削減ならびに省エネルギー化の推進が求められており、自動車や航空機等の輸

送機器の軽量化・低燃費化が進展している。その抜本的な軽量化候補構造材料として、アルミニウム等の金属に比べて比強度や比弾性に優れる炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)が挙げられる。輸送機器においては、CFRPを用いた自動車・航空機のCO₂削減効果に関心が集まっており、同材料を用いた開発製品を広範囲に普及させることが、社会全体の省エネを推進するための効果的な手段と考えられる。しかし、CFRPは異種難削材として知られ、革新的な製造技術として高精度な切断・接合技術の開発が要望されており、さらに製品製造タクトタイムの一層の短縮化が喫緊の課題となっている。産業の製造工程への応用展開を考えた時、製造リードタイムから帰着されるタクトタイムの値によって目標とされる加工速度が設定される。量産型の普通自動車製造を例にとると、タクトタイムは概ね1分であるので、個別部品の各々の大きさが要求する加工領域を基に大型部品であるルーフやフード(ボンネット)の外周トリミングでは、6 m/分程度の加工速度が必要となることが理解できる。そこで、CFRP材料のレーザー高速加工について、産業応用展開に向けた取り組みを行った(図3)^[8]。

航空機製造の現場で実際に使用され、競合技術に位置づけられる機械加工ならびにウォータージェット加工とレーザー加工を比較するために、2 mm厚のCFRP基材に対する加工速度を測定したところ、それぞれ0.1 m/分、1 m/分であった。これらの加工では上記目的には速度不足は否めず、また、工具摩耗や部品劣化が早いなどの課題が指摘されている。レーザー加工の場合、シンプルに速度向上だけを希求するのであれば、発振器の平均出力値を上げることが基本解決策となり、キロワット級の平均出力を有する大型レーザー装置を使うことで、数 m/分に達する加工速度を得ることができる。克服すべき技術課題として、加工時における熱損傷領域の発生を抑制することが重要ポイントとして存在する。

炭素繊維は5～10ミクロン直径の高耐熱性かつ高伝熱

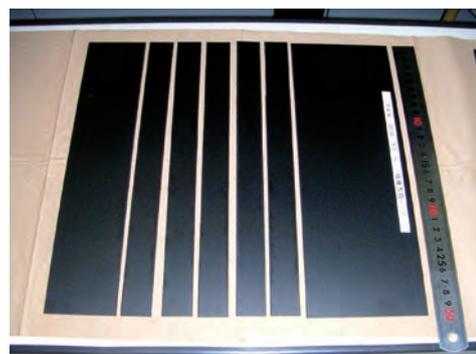


図3 30 cm角CFRP基板へのレーザー切断加工

性の繊維材料であり、樹脂は対照的に低耐熱性・低伝熱性のマトリックス材料である。CFRPは両材料を複合化（積層化）した構造なので、高出力レーザー照射時に頻発する過剰入熱が発生した場合に、樹脂部で熱損傷や層間剥離が発生しやすい傾向が認められる。特に、連続繊維型CFRP材料の場合、炭素繊維束が伝熱経路として作用するので、加工部周囲の樹脂領域に熱損傷が拡散する懸念がある。これらの熱損傷によって、繊維表面と樹脂部界面の密着度が低下すれば、構造材としての強度特性が劣化するので、加工部周囲への熱損傷拡散は極力回避する必要がある。例えば、板金材の切断加工を行う時の標準的な照射条件で炭酸ガスレーザー（800 W、20 kHz、8 μ s）を用いると、2 mm厚試料断面には1 mmを超える広範囲な領域に樹脂層の熱損傷が拡がり、不適切な条件設定であることが判明した。そこで、レーザービームの高速掃引法を導入し、加工ラインに沿って多重線および多重回照射（多重線マルチパス照射）を行うことで、3 mm厚の基板に対しても完全切断に至る照射回数を大幅に低減させるとともに、樹脂層の熱損傷についても、0.1 mm程度に抑制できていることがマイクロX線CT測定結果から判明した（図4）。国産の高出力ファイバレーザー装置開発を産学官連携の取り組みから実施し、現時点で6 m/分の加工速度を得ている（図5）。

3.2 樹脂表面の局所的な表面化学反応

高分子材料の表面改質は濡れ性・接着性向上を目指した研究が活発に行われており、基礎研究ならびに産業実用の広範な分野において重要な技術である。ポリアミドやポリエステル等のように炭化水素鎖を主体とする高分子材料では、[炭素-水素 (C-H)] 結合部分に水素に代わって親水基を置換させることで、親水性を発現することができる。したがって、光酸化反応が一般的な改質手段となる。高分

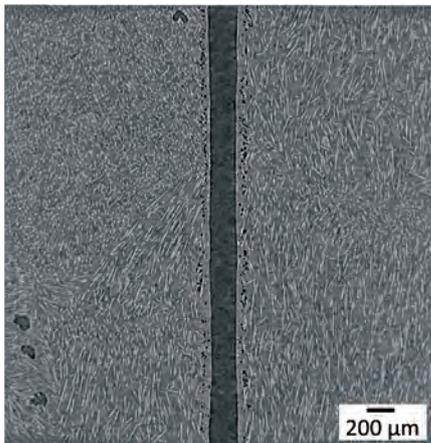


図4 レーザー加工後のCFRP試料断面のマイクロX線CT観察結果^[8]

子材料親水化処理の場合のポイントは、炭素主鎖構造は破壊せずに側鎖構造部位に親水基を導入することである。仮に炭素主鎖構造を酸化反応によって切断してしまうと、分子鎖が低分子量化してしまい、溶出等が起りやすくなり耐久性が低下する要因になる恐れがある。本項では、フッ素樹脂の表面親水化を例にレーザーを使った化学的な表面改質法を説明する。

ポリ四フッ化エチレン (PTFE) 等に代表されるフッ素樹脂は、化学的安定性や耐熱性が高い優れた材料である（図6）。しかし、表面の疎水性が非常に高いので異種材料との接着・接合性が極めて悪く、現状では金属ナトリウム有機溶液に基材を浸漬させて脱フッ素を行うことで表面を親水性に変えている。金属ナトリウム有機溶液は発火する危険性が高く、劣化が早い薬品である。また、溶液に基材を浸漬するので基材全表面を改質することになるので、安全性の高い局所的な改質も可能な新しい手法の開発が望まれていた。

フッ素樹脂の表面改質で特徴的なことは、親水性は側鎖の[炭素-フッ素 (C-F)] 結合を切断して、F原子を親水基に置換することで発現するが、C-F結合は主鎖であるC-C結合よりも結合エネルギーが大きいので、C-F結合に特異的に作用する反応系を選ばないと主鎖C-C結合の切断が起り、ポリマー鎖の低分子量化やモノマー・ユニット脱離による表面エッチングが起きてしまうことである。前述の金属ナトリウム有機溶液では、ナトリウム原子がF原

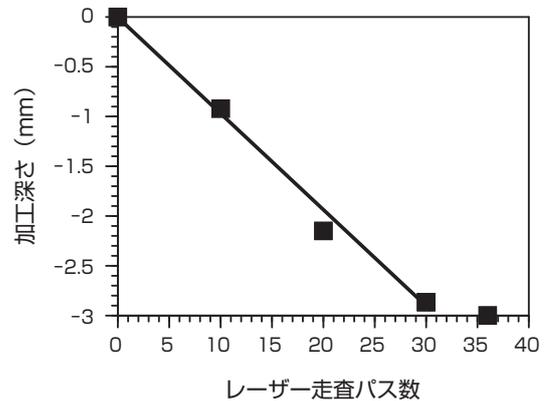


図5 多重線マルチパス照射を用いた3 mm厚CFRP基板の加工深さ
(ビーム走査速度3.6 m/s)

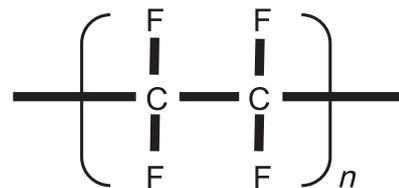


図6 PTFE化学構造

レーザー誘起背面湿式加工法（LIBWE法：Laser-induced backside wet etching）は、寸法精度の高い露光マスク縮小型と、試作品が簡単にできるレーザー走査照射型の2種類である（図11）。LIBWE法では高濃度の色素溶液を用いるので、溶液層に数 μm 程度しかレーザーは侵入できず、この薄い層内で完全に吸収される。したがって、レーザー照射によって色素分子の高密度励起状態が石英界面近傍に局部的に形成され、溶液のアブレーションが起こり、過渡的な高温・高圧状態によって石英ガラス表面層が数十nm深さでエッチングされる。重畳照射を行うことで積算パルス数に比例して加工深さが増加する^[13]。他手法と比較し

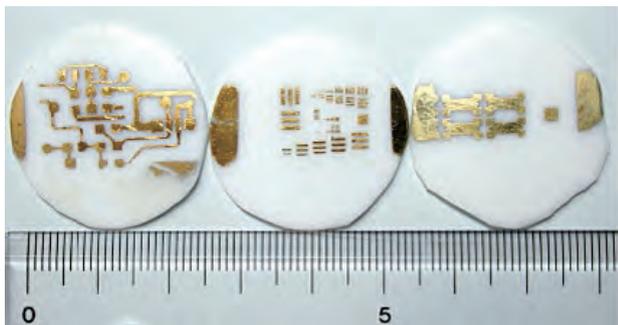


図10 PTFEへのニッケル化学めっき処理（めっき膜最表面は金置換）^[12]

て、従来のリソグラフィ加工では不可欠であったフォトリジスト保護膜層形成工程や除去工程、あるいは真空装置等が不要であるため、前処理や後処理が著しく簡便である。

加工表面の平坦性は高く、アブレーション時に発生する分解片の付着やクラック等の微細な加工損傷も観測されなかった。ビームホモジナイザーや露光用組レンズの導入等マスク露光縮小光学系の改良等によって、最高値として1 μm 分解能の格子状微細加工や大型の光学素子への微細加工に成功している（図12）。

加工対象基材にアルミノ珪酸塩系ガラス（ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ 系ガラス）を選択した時の加工結果を図13に示す。アルミノ珪酸塩系ガラスは熱膨張特性がシリコン単結晶に近く、シリコンとの歪みの少ない陽極接合が可能であることから、MEMS等の各種センサーのマイクロマシーニング接合用ガラスとしての用途が拡大している材料である。波長355nmのナノ秒パルスレーザーを用い、ピレントルエン溶液と接するガラス基板に、レーザービームをガルバノ光学スキャナで走査した。ガルバノ光学スキャナは、モータと反射ミラーによりレーザーを高速・広範囲に走査する光学装置で、図形的设计形状に沿って直接描画する方式（ベクトルモード走査）に適している。

(a)

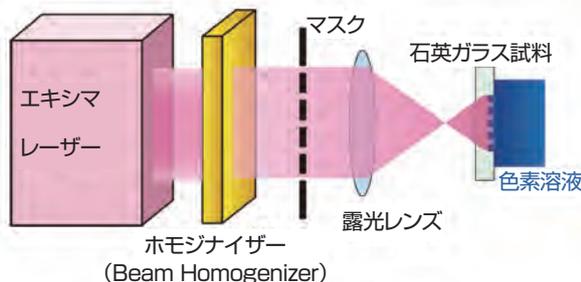


図11 LIBWE法の実験装置

(a) エキシマレーザー露光マスク縮小型、(b) DPSSレーザー/走査鏡照射型^[14]

(b)

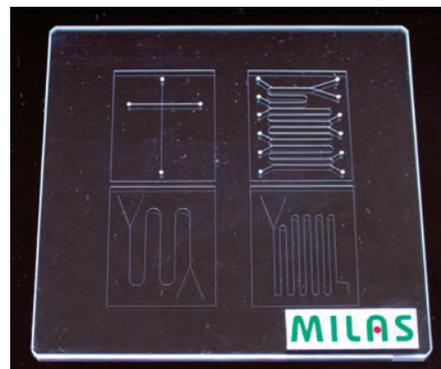
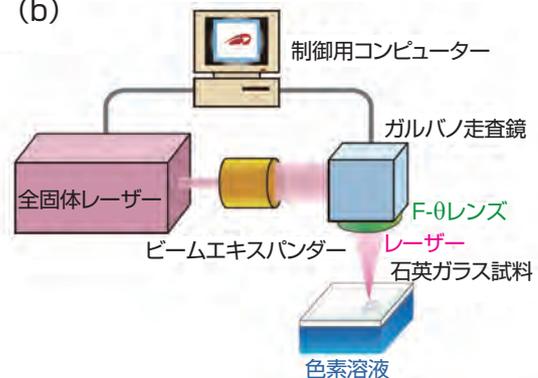


図12 石英ガラスへのLIBWE法大面積加工：レーザー走査照射型装置にて作製（左図の着色部は、透過型回折格子からの散乱光）。^[14]

溝幅 20 μm （単重線走査）、50 μm （4重線の集積）、80 μm （8重線の集積）の3種類について、加工パス数を増やした重畳照射によって溝深さは各々150 μm 以上が得られた。図13では1枚のガラス基板に深さや溝幅の異なる深溝構造を形成させているが、LIBWE加工ではこれを1バッチで一括作製でき、工程数を削減する上で有利な特徴を実証している。

4 考察：この研究結果の意味と想定シナリオとの比較

この研究では、社会での実現を目指す研究の目標の明確化を考える際、社会背景として持続可能社会・安心安全

社会の実現を指向した軽量・高強度材料等革新的な材料開発が進む中で、これらを複合化・製品化するためには従来法を凌駕する新しい加工技術が必要とされていることが背景にある。具体的な企業側ニーズとして、多機能化、微細化、高速化等の高性能化が要求されている。したがって、この研究稿における研究目標は、レーザーを用いた材料プロセッシング技術を用いることで、製造工程と製品のグリーン化を促進させることである。

一方、この研究目標を達成するために第3章に示した具体的な研究事例の想定シナリオとそれを達成する道筋を図14に、全体図を図15に示す。

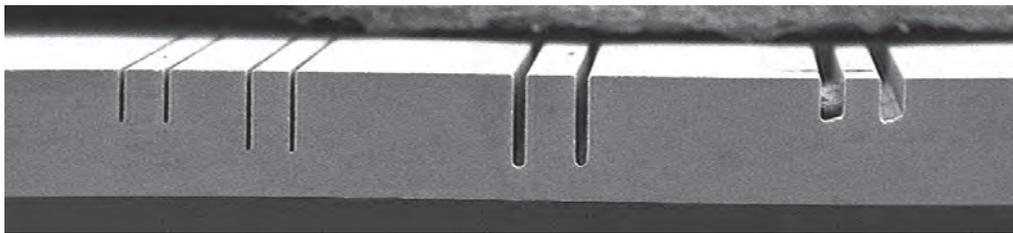


図13 アルミノ珪酸塩系ガラス基板のLIBWE法による深溝加工結果、断面構造のSEM写真（ガラス基板厚み：0.5 mm）。溝幅20 μm （左）、50 μm （中央）、80 μm （右）

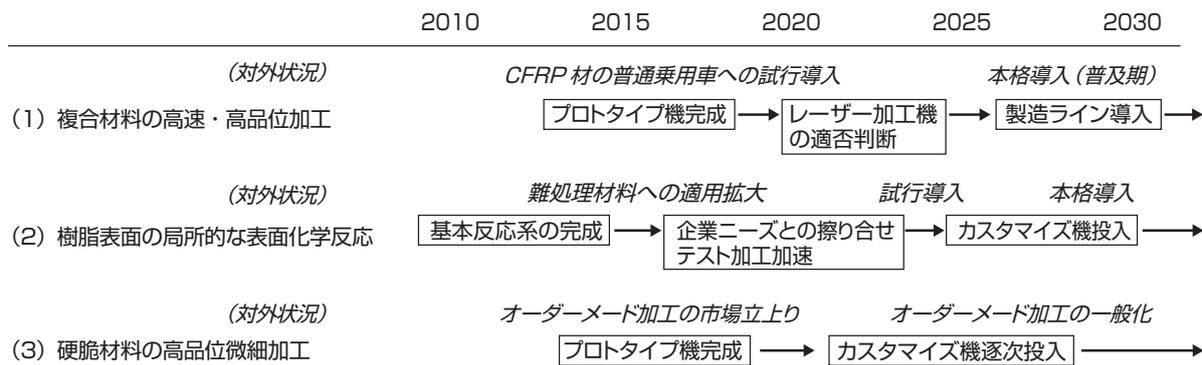


図14 第3章における具体的な研究事例の想定シナリオ

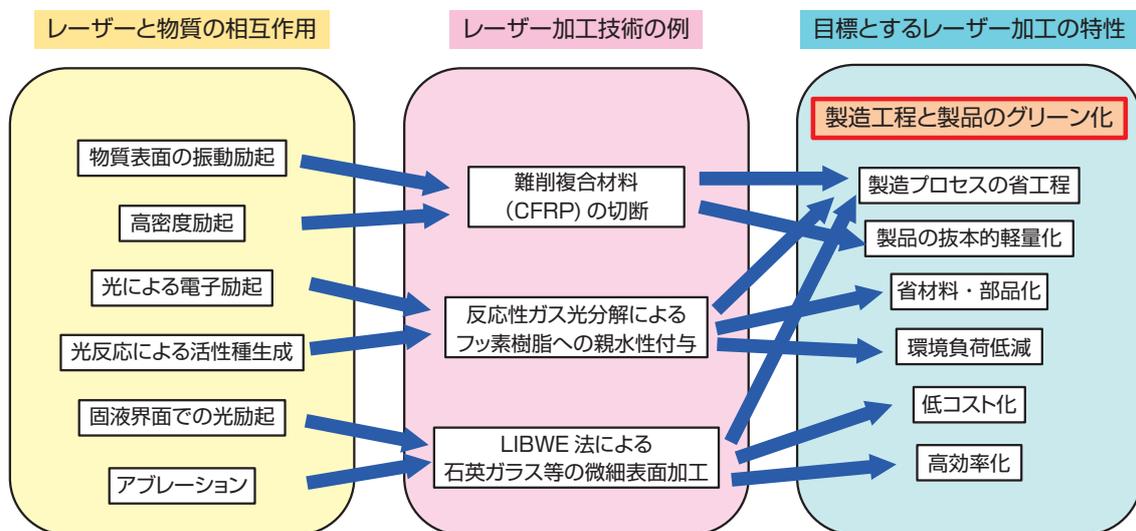


図15 第3章における具体的な研究事例の全体図

表4 第3章における具体的な研究事例の社会的なインパクト等

	社会的インパクト	予想される新しい製品群	その市場規模
複合材料加工	車体軽量化による 燃費大幅改善	超軽量化 普通自動車	2.5万トン(世界炭素繊維生産量 2020年予想) 1000万台(世界エコカー販売台 数予想 2020年)
表面化学反応	フッ素樹脂の適用 範囲拡大	電気電子用表 面改質フッ素 樹脂材	1万トン(国内フッ素樹脂販売量 2008年)
硬脆材料の 微細加工	微小光学デバイス カスタム品の短納 期化	石英板ガラス 材の精密加工 製品	2兆円(国内ガラス製品出荷量 2006年) 730億円(石英ガラスの国内出荷 量 2006年)

レーザー応用技術の成果を社会に波及させるには、加工機システムとしてプロトタイプ機をまず作製し、テストを繰り返すことで完成度の高い工作機械に仕上げていくことになる。3.1で述べたCFRP加工や3.3のガラス微細加工はプロトタイプ機が完成し、現場ニーズに即した機器性能が発揮できるかどうかの試験を進めている。装置を購入する可能性がある業界企業との密接な連携がポイントである。表4に社会的なインパクト等を整理した。想定シナリオと現在の技術レベルとのギャップは、①複合材料加工に関しては、現場生産技術との擦り合わせが、②表面化学反応に関しては、大面積処理技術の確立、使用薬品量の削減が、③硬脆材料の微細加工に関しては、カスタム品ニーズの詳細把握、が挙げられる。

一般に、レーザー加工を技術導入する事例では、多品種変量生産における生産性向上用途に最も適している。現在のレーザー加工機は、板金加工(切断、溶接)や製造時りペア技術(製造時の不良品に対して工場内でレーザー補修を行い、歩留まりを向上。液晶モニタの点欠陥修正等)に成功を収めている。

材料プロセッシングにおいて高品位特性保持と処理高速度化は相反することが多く、両者はトレードオフの関係にあることが経験的に知られるが、レーザー加工ではプロセス制御を巧みに工夫することで両特性を向上させている。第3章で紹介した具体例は、そのような難加工性材料への表面処理を材料化学の視点を加えて解決を試みたところに特徴がある。光を用いる材料プロセッシングでは、複数の要素に対して協調性を持たせながら、加工対象に作用させることができる。2014年ノーベル化学賞は、超解像度の蛍光顕微鏡の開発に対して授与された^[15]。波長の異なる二つのレーザー(極小スポット光とドーナツ状パターン光)を照射すると、蛍光分子に強制的な脱励起現象が誘起されて、回折限界200 nmを突破する10 nmスケールでの顕微鏡観測が可能になる誘導放出制御(STED: Stimulated Emission Depletion)が考案されている。これは、二つの

入射光の役割を明確化し、同時照射することで、従来理論を凌駕する優れた結果を提示している。現在このSTED現象を応用する微細加工技術が基盤研究段階として試行され始めている。

レーザープロセスは他の製造技術と比較すると、装置やシステムが複雑・高価になるためにしばしばコスト高を誘引することになる。したがって、レーザーを実用的な生産・分析手段として用いる場合には市場価値に見合う経済性の確保は重要な課題である。安価な大量生産品に用いるよりは、高付加価値化が期待される特定部位への局所場処理や最適波長照射による基質選択的反応、ナノ秒からフェムト秒にわたる極短時間領域での加工過程制御がレーザー処理の特徴を最大限に発揮することができる主たる応用分野と考えられる。デジタル化したフレキシブルな生産スタイルや3D加工にも十分に対応できることから、トレーサビリティを確保する手段としても有効である。想定シナリオとのギャップを埋めるための今後の課題として、一層緊密な産学連携取り組みが挙げられる。

この研究においては、光源装置や加工システム等の基幹装置の性能に依存する要素は大きいので、試験に用いた装置で実証された成果・性能は、将来の基幹装置性能の進歩でさらに加速・向上する可能性を有する。その装置性能向上と加工プロセス高度化取り組みの協調的展開が、今後の加工技術全体の進歩の大きな鍵になることは間違いない。したがって、関係する各種技術分野の幅広い知識俯瞰力や観察力・セレンディピティも重要な要素となる。

5 まとめ、将来への課題

この論文で紹介した高出力レーザー装置を用いた材料加工技術を多方面に適用することにより、従来の製造工程と比較して省工程化や時間短縮化が進展する。また、難加工性材料等の高精度・高品位な微細加工の実現による新規な部材・部品・製品の提供が可能となり、製品としての省エネ特性の一層の向上が期待できる。個別要素の進歩において注目されるのが、照射光学系の回折光学素子や空間光位相変調器の発展である。光は粒子的な性質と波動的な性質の両方をあわせ持つという「光の二重性」を積極的に活用することにより、高性能分枝ビームや微細パターン化が容易に利用でき始めている。

また、加工機システムのさらなる性能向上には、我が国が有する他分野先端技術(加工データのデジタル化およびネットワーク配信技術、ロボット駆動技術)との融合によるブレークスルー型のイノベーション展開が有効で、他国と競合しながら、ものづくり技術の革新方向が示されると考える。

謝辞

CFRP 加工の研究は NEDO プロジェクト「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の委託により実施した研究結果で、技術研究組合 ALPROT に所属する企業や研究機関と共同で行った成果である。また、LIBWE 法による硬脆材料の高品位微細加工は、産総研環境化学技術研究部門レーザー化学プロセスグループ（当時）のメンバーとの研究成果である。

参考文献

- [1] 国際光年ホームページ: 国内<http://iy12015-japan.org/>, 国際<http://www.light2015.org/Home.html>, 閲覧日2015-03-01.
- [2] レーザー学会編: レーザーハンドブック(第2版), オーム社(2005).
- [3] 次世代レーザープロセッシングとその産業応用調査専門委員会編: 最新レーザープロセッシングの基礎と産業応用, 電気学会(2007).
- [4] D. Bäuerle: *Laser Processing and Chemistry*, 4th Ed., Springer, (2011).
- [5] K.M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto and K. Hirao: Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Opt. Lett.*, 21 (21), 1729-1731 (1996).
- [6] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito: The internet of things: a survey, *Computer Networks*, 54 (15), 2787-2805 (2010).
- [7] National Academy of Science and Engineering (April 2013): Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Report_Industrie%204.0_engl_1.pdf, Accessed 2015-03-01.
- [8] H. Niino, Y. Kawaguchi, T. Sato, A. Narazaki, R. Kurosaki, M. Muramatsu, Y. Harada, K. Anzai, K. Wakabayashi, T. Nagashima, Z. Kase, M. Matsushita, K. Furukawa and M. Nishino: Laser cutting of carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) by laser irradiation, *JLMN*, 9 (2), 180-186 (2014).
- [9] H. Niino and A. Yabe: Surface modification and metallization of fluorocarbon polymers by excimer laser processing, *Appl. Phys. Lett.*, 63 (23), 3527 (1993).
- [10] H. Niino and A. Yabe: Chemical surface modification of fluorocarbon polymers by excimer laser processing, *Appl. Surf. Sci.*, 96-98, 550-557 (1996).
- [11] H. Niino, H. Okano, K. Inui and A. Yabe: Surface modification of poly(tetrafluoroethylene) by excimer laser processing, *Appl. Surf. Sci.*, 109-110, 259-263 (1997).
- [12] 新納弘之: 紫外レーザーを用いたテフロン表面の改質方法および化学めっき方法, *産総研Today*, 3 (12), 26 (2003).
- [13] J. Wang, H. Niino and A. Yabe: One-step microfabrication of fused silica by laser ablation of an organic solution, *Appl. Phys. A*, 68 (1), 111-113 (1999).
- [14] 新納弘之, 佐藤正健ほか: 自由自在なレーザー微細加工の実現に向けて, *産総研Today*, 5 (10), 10-13 (2005).
- [15] S.W. Hell and J. Wichmann: Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy, *Opt. Lett.*, 19 (11), 780-782 (1994).

執筆者略歴

新納 弘之 (にいの ひろゆき)

1986年九州大学工学部応用化学科卒業、博士(工学)、1987年工業技術院化学技術研究所研究員。2015年産総研機能化学研究部門首席研究員、現在に至る。専門：高出力レーザー微細加工およびレーザー化学。



査読者との議論

議論1 全体

コメント(小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

この論文は著者が長年にわたって研究開発を行ってきたレーザーを使用した物質・材料表面の高精度・高品質加工技術に関して、著者自身が開発した技術を例示してその特質や有用性を述べたものであり、「レーザープロセッシング技術」を体系的に記述する試みという意味で、シンセシオロジーに相応しい論文と言えましょう。また、その技術的内容は高い水準のものであります。しかし初稿では、技術の解説記事的な色彩が強くなり、まだ「構成学」的な論述としては不十分だと思われましたので、質問・コメントを参考に論述の追加を依頼した結果、分かりやすい論文になったと思います。

コメント(村山 宣光: 産業技術総合研究所)

この研究は、レーザー加工技術と他の技術とを組み合わせることにより、レーザー加工の新たな応用を目指す構成学的な取り組みであり、シンセシオロジー論文に相応しい研究と考えられます。

議論2 研究目標と論文題目について

コメント(小林 直人)

初稿での論文題目が「高速・高品位レーザープロセッシング技術の開発」となっています。これでは一般的な技術開発の解説という印象があります。シンセシオロジー(構成学)では、まず社会での実現を目指す研究の目標を述べ、そのためのシナリオとそれを達成する道筋、要素技術の選択と統合(構成)を述べるのが求められます。研究目標としては、①どのような機能を持った材料の表面加工するための研究開発なのか、あるいは②どのような特徴を有する加工技術の開発なのかを明らかにする必要があります。またそれとともに論文題目も具体的に読者を魅了する題目にすることが望まれますので、検討を期待します。

回答(新納 弘之)

ご指摘誠にありがとうございます。パワーレーザー装置を用いた材料プロセッシング技術を構成学に照らして、具体的に、かつ、より深く考察するように改めました。この論文主題における構成学の第一の要素では、軽量・高強度材料や生体適合性材料等革新的な材料開発が進む中で、これらを複合化・製品化するためには従来法を凌駕する新しい加工技術が必要とされている背景があります。より具体的な企業側ニーズとして、多機能化、微細化、高速化等の高性能化要求が年々増大している状況下にあるため、レーザー等の光を用いた材料プロセッシング技術を用いることで、過去～現在までの時間展開が示すこの技術固有の技術高度化を継続的に推進することで、「製造工程と製品のグリーン化を促進させること」をこの論文における研究目標として明確化しました。構成学の第二の要素では、個別事例における具体的な研究目標の明確化を行い、シナリオとそれを達成する道筋を記述しました。また、第三の要素では要素技術の選択と統合の考察を行います。しかし、該研究分野における着実・堅実なリアモデル型の常法的な展開に加えて他分野技術の融合や合流を図ることでの発展経緯も併せて適時記述いたしました。さらに題目は、「製造

工程と製品のグリーン化を実現するためのレーザーを用いた材料プロセッシング技術の開発（英文：Green Photonics for Manufacturing and Products by Laser Materials Processing）」に変更しました。元の題目から削除した高速および高品位については、個々の事例に具体的な特性データを加えることで詳しく説明し、意図が明確になるように改訂しました。

議論3 全体の技術構成について

コメント（小林 直人）

この論文では、高速・高品位なレーザープロセッシング技術により何を実現したいのかという目標、そのためのシナリオ、要素技術の統合、などの提示をするよといと思います。具体的には技術の全体図を示して、その内容を詳しく説明すると著者の意図が十分伝わると思います。

コメント（村山 宣光）

3つの研究事例で、それぞれレーザー技術とどのような技術とを組み合わせたかを図表で整理して、より明示的に表現してください。

回答（新納 弘之）

全体概念の明確化を図るために、第4章においてこの論文主題における構成学の3つの要素を具体的にこの論文に記述するとともに、図15として全体図を付与して考察しました。ここでは第3章に示した3つの研究事例（難削複合材料、反応性ガス光分解、LIBWE法）を中心に、それらに必要な要素としての「レーザーと物質の相互作用」（表面振動励起、高密度励起、光による電子励起、等）を示し、さらにそれらの研究事例によってもたらされるレーザー加工の特性、特に製造工程と製品のグリーン化の例を示しました。

議論4 新しい応用について

コメント（村山 宣光）

レーザー加工の新しい応用として、(1) 複合材料の高速・高品位加工、(2) 樹脂表面の局所的な表面化学反応、(3) 硬脆材料の高品位微細加工の想定シナリオをもう少し充実させてください。これらの3つの新しい応用の社会的インパクト、新しい製品群とその市場規模を記載してください。また、シナリオに時間軸を入れてください。さらにこの想定シナリオと現在の技術とのギャップとそのギャップを埋めるための今後の課題をもう少し詳しく記載してください。また、この内容を図表で整理されるとよりわかりやすくなると思います

回答（新納 弘之）

第4章において、構成学の第二要素である、個別事例における具体的な研究目標の明確化を行い、想定シナリオとそれを達成する道筋ついて、時間軸を加えて記述しました。また、想定シナリオと現在の技術とのギャップを列記し、そのギャップを埋めるための今後の課題を記載いたしました（図14）。具体的には、(1) 複合材料の高速・高品位加工では、2015年くらいにプロトタイプが完成し、2020以降にレーザー加工機の適否判断が行われ、2025年から2030年かけて製造ライン導入というシナリオが想定されます。さらに、それらの社会的インパクト、予想される新しい製品群とその市場規模を記載しました（表4）。例えば、複合材料加工の社会的インパクトとしては「車体軽量化による燃費大幅改善」が想定され、予想される製品群としては、「超軽量化普通自動車」、その市場規模として「2.5万トン（世界炭素繊維生産量2020年予想）、1000万台（世界エコカー販売台数予想2020年）」等が想定されます。

議論5 実用上の課題について

質問（小林 直人）

この論文に詳しく述べられているようにレーザープロセッシングには多くの長所があると考えられます。具体的には、この論文に見られるように薄型テレビや太陽電池の製造工程等に一部利用されているよ

うですが、まだまだ普及は遅いようです。最大のネックはコストであると思われませんが、この論文で示されたCFRP加工やガラス微細加工等を含めて、どのような課題を克服して行けば実用化（あるいは事業化）に至ると考えられますか。

回答（新納 弘之）

実用化に向けた課題として、加工機装置の低価格化、低消費電力性、堅牢性、信頼性等の性能向上が重要です。また、加工機装置を使用する側からの観点では、多品種適量生産に自由度高く適合できる高度にフレキシブルな生産体制のコアシステムに使用できることが鍵になります。したがって、加工機装置のハード部もカスタマイズが可能であり、操作・ソフト部も顧客が用途に応じて自由に可変できる範囲が広いことが望ましいです。マクロ加工分野であるキロワット級の炭酸ガスレーザーやファイバレーザーを搭載する板金加工用途の加工機装置は世界数社での寡占が進み、装置性能もこれらのニーズを満たす製品が適時投入されています。世界の加工機市場は年間1兆円規模で、マクロ加工分野はその6割です。一方、マイクロ加工分野は全世界で数百社のメーカーが存在し、群雄割拠の状態です。個々の実用化事例は、レーザーの特性を最大限にまで生かした工夫がなされていますが、相対的な市場規模の小ささが企業での事業展開を維持拡大していく上での大きな課題です。半導体リソグラフィ工程におけるエキシマレーザー露光装置のように、露光技術の進展状況に従い装置性能を着実かつ納期遅れなく向上させることに成功すれば、レーザーの中で最も装置単価の高価な商品として市場の信頼を得ることができます。

議論6 将来動向について

質問（小林 直人）

この論文にIoTやIndustry4.0の例が挙げられていますが、レーザープロセッシングはICT（情報通信技術）による制御が他の加工方法に比べて容易だと思いますので、将来的には遠隔加工も含めてICTとの融合が極めて重要になると思います。現状の3Dプリンターの例なども踏まえ、ICT化を含むレーザープロセッシングの将来動向について、ご意見をお聞かせ頂けると有難いです。

回答（新納 弘之）

ご指摘の通り、レーザーが搭載された工作機械ではICTによる遠隔制御を可能とする製品が開発中です。IoTやIndustry4.0が提唱している概念自体は我が国においてもすでに検討がなされて、実際の工作機械システムにすでに搭載されている機能もあります。ただし、これらIoTやIndustry4.0は機械システムの性能を向上させるだけでなく、発注側と受注側の関係を刷新する新しいビジネスモデルの構築につながると予想されています。また、個別に各地に分散していた製造拠点が全世界的に情報一体化することから、地球規模での社会・環境問題解決の糸口になることが期待されています。

例えば、現状の3Dプリンターの性能ではメートル級の大規模成型品を造形するには日～週単位での作業時間が必要です。このため、人が常に機械を監視し続けることには無理があります。今後、装置の信頼性や制御性が向上し、遠隔制御に十分耐えられる性能段階になった時に、競合他社との差別化、工場立地の地理条件、技術者の勤務・雇用形態に至る、会社の組織形態まで影響を及ぼす可能性があることが指摘されています。

議論7 国際競争について

質問（村山 宣光）

レーザー加工技術に関する研究開発は、日本と比べてドイツが先行していると聞いています。その背景と現状および今後の日本の進むべき道を教えてください。

回答（新納 弘之）

レーザー加工技術の研究開発に関して、ドイツが我が国に先行し

ているのご指摘についてその背景には、①ドイツでは1980年代後半から該分野の大規模国家プロジェクトを切れ目なく継続的に推進してきたこと、②量産型乗用車製造ラインへのレーザー加工技術（特に車体の金属溶接）の積極採用がドイツ企業は突出して早期に行われたことが挙げられ、マクロ加工分野でのドイツの先行傾向は顕著です。また、光学の学問黎明期におけるドイツ人科学者の大きな貢献を出発点として今日に至っている経緯にも起因すると言えます。

日本では製造産業用の炭酸ガスレーザー装置の開発（プロジェクト期間：1977～84年）ならびにエキシマレーザー装置の開発（1986～94年）を基盤として、板金加工装置や半導体リソグラフィ装置は世界有数のシェアを現在も維持しています。しかし、平均出力キロワット級のファイバレーザー装置の開発ではやや出遅れてしまったことから、現時点における産業見本市（展示会）での最新型レーザー加工機の機器展示ではファイバレーザー国産機のプレゼンスは高いとは言えない状況です。

レーザー加工技術は広範な材料系に適用できるとともに、さまざまな応用分野が存在することを特徴としますので、多種多様な研究開発が世界各国で推進されており、欧州ならびに北米各国に加えて日本の研究開発が世界トップグループを形成しています。

今後の展開方策として、産業用途の光源開発では、現状性能から

1桁ないし2桁の大出力化を目標とした、1.キロワット級のピコ秒・フェムト秒レーザー、2.ファイバー導光型の半導体レーザー（狭小コア径での高出力光導光）、3.深紫外域半導体レーザー（超小型サイズ装置の窒化ガリウム系等）の3つが有力な課題候補と考えます。順位は実現可能性の高さに相当し、いずれも我が国にコア技術が存在します。さらに、我が国では光分野の高レベルな基礎学術的な研究が数多く行われているので、これらのフロンティア研究の成果から次世代産業応用の核になる技術の抽出と発展を迅速に行う制度構築が必要です。個々の開発テーマに適應した事業規模・体制・期間の柔軟な設定、ならびに、シナリオ・ドリブンな個別テーマ間での連携推進が有効と考えます。レーザー加工機システムは2.2節で説明しましたように多種類のハイテク技術の集積体であり、現時点ではIT技術との融合も促進されつつあります。時系列に沿ってどの技術要素を重点的に何時開発するのかを見極めることで、市場規模拡大を率先して主導することがポイントです。したがって、技術の多層構造の結節部位に空白を生じさせないことや層間の親和性向上が重要となります。

これまでのレーザー加工技術では、光の粒子性を活用した応用事例が多数を占めてきました。今後は光の波動性も併用するなどの光の性質を最大限駆使した新しい産業応用技術が発展するべきと考えています。

高度な専門知識不要の IT システム開発ツール: MZ Platform

— 製造業におけるエンドユーザー開発の実現 —

澤田 浩之*、徳永 仁史、古川 慈之

短納期や多品種生産への対応、品質保証責任、トレーサビリティの確保等、製造業に対する社会的要求が高まりつつある中、業務革新を推進し、競争力の維持向上を図るためにはIT化への取り組みが不可欠であると広く認識されている。しかし、特に中小企業では、ITシステムの開発や導入、運用のための負担が企業規模に対して非常に大きく、IT化を進められないというケースが多く見られる。このような問題を解決するため、高度な専門知識を持たずとも製造業の技術者が自らITシステムを構築・運用できるツールMZ Platformを開発した。その研究開発アプローチ、成果普及活動について述べるとともに、有効性について考察する。

キーワード: コンポーネントベース開発、ソフトウェアコンポーネント、製造業、IT システム、エンドユーザー開発

An IT system development framework utilizable without expert knowledge : MZ Platform

– Toward end-user development in manufacturing industry –

Hiroyuki SAWADA*, Hitoshi TOKUNAGA and Yoshiyuki FURUKAWA

Manufacturing companies are increasingly being called upon to fulfill various social demands, such as rapid delivery, multiobjective production, quality assurance and traceability security. The introduction of information technology is needed to meet these demands and to strengthen competitiveness. However, the development, operation, and maintenance costs of IT systems are too high for their introduction into small and medium-sized companies. To encourage manufacturing companies to introduce IT systems, we have developed an IT system development framework, called "MZ Platform", which enables manufacturing industry workers to construct and operate IT systems without professional IT knowledge. We describe our research and development approaches and dissemination activities, and discuss the effectiveness of the MZ Platform.

Keywords: Component-based development, software component, manufacturing industry, IT system, end-user development

1 はじめに

近年、我が国の製造業を取り巻く環境は厳しさを増しており、企業には、短納期や多品種生産への対応、品質保証責任、トレーサビリティの確保等、より一層の高度な要求に応えることが求められている。ITの導入による業務のシステム化と文書の電子化は、そのための有効な手段として認識されており、これまでにCADを初めとする多くの設計製造アプリケーションが開発されてきた。しかし、特に中小企業では、ITシステムの開発や導入、運用のための負担が企業規模に対して非常に大きい上に、実際の業務に合わせて使いこなすための人材を確保することが難しく、IT化を進められないというケースが多く見られる。

高度な専門知識を持たずともITシステムを構築・運用できるツールを開発して広く普及し、製造業の技術者が自ら必要なITシステムの開発に携わるエンドユーザー開発^[1]

を実現することによって、IT化を推進することがこの研究の目的である。したがって、この研究は、非専門家でも使うことのできるITシステム構築ツールの実現という技術開発、そして実際にそれを使いこなせるようにするための環境整備という成果普及の側面を持つ。

2 技術開発

2.1 技術開発目標

この研究で開発したMZ Platformは、ソースコードを書く必要のないコンポーネント方式のITシステム構築ツールである。従来、ITシステムを構築するためには、プログラム言語を習得し、それを使ってソースコードを記述する必要がある。ところが、ITの非専門家にとって、プログラム言語の習得とソースコードの記述は大きな負担となる。そこで、この負担を取り除くために採用したのが、コンポーネ

ントベース開発^[2]という手法である。

コンポーネントベース開発とは、あらかじめ用意されたソフトウェアの部品（コンポーネント）を組み合わせることによって、全体の IT システムを構築する手法である。この概念は、オブジェクト指向開発を発展させたものとしてソフトウェア工学の分野では広く知られており、Microsoft 社の Visual Studio^[3] 等、コンポーネントベース開発を基本とした市販のツールもすでに存在する。

しかし、これら既存ツールでは、IT システム全体の枠組みはコンポーネントの組み合わせとして構成しながらも、各コンポーネント内の詳細な機能実装は開発者がソースコードとして記述する必要がある。すなわち、一定の IT 知識を備えた利用者を想定したツールであり、ここで対象とする IT の非専門家が利用するには難易度が極めて高い。したがってこの研究では、ソースコードの記述を完全に排したフルコンポーネント方式による IT システム構築ツールの開発を目標とした。

2.2 技術課題と開発アプローチ

この技術開発における課題として、大きく以下の二つが挙げられる。

(1) フルコンポーネント方式の有用性立証

ソースコードの記述によるソフトウェアの詳細な作り込みを行わないフルコンポーネント方式のシステム構築によって、製造企業の現場での使用に耐えられる実用システムを作り上げることが可能であり、かつ有効であることを示す。原理的な証明は不可能であるため、事例による例証を行う。

(2) コンポーネント群の整備

製造企業のさまざまな現場や要求に応えられるだけの多様性と汎用性を確保しつつ、IT システム構築の効率化を実現するためのコンポーネント群を整備する。重要なことは、用意するコンポーネントの種類、そして機能粒度を適切に設定することである。

これらの課題に取り組むために、企業の実用システム開発を通じた研究開発というアプローチを採った(図 1)。すなわち、中小製造企業数社の協力を得て、工程管理システム等の実用 IT システムを実際に開発し、その事例によりフルコンポーネント方式の有用性を例証すると同時に、コンポーネント群整備のための知見を獲得し、それらの知見に基づいて用意すべきコンポーネントの種類と機能粒度を決定した。

具体的な手順は以下の通りである。

- ① 企業に対する聞き取り調査の実施
- ② 業務分析と開発する IT システムの仕様策定
- ③ IT システム開発に必要なコンポーネントの新規作成
- ④ IT システム開発

- ⑤ 開発した IT システムの機能検証と標準機能の抽出
- ⑥ 標準機能の組み合わせによる同等機能の再構成
- ⑦ 標準機能に基づいたコンポーネント群の作成

以上の手順のうち、前半①から④の中小製造企業における実用 IT システムの開発が「フルコンポーネント方式の有用性立証」に関わる活動であり、後半⑤から⑦のコンポーネントの標準化が「コンポーネント群の整備」に関わる活動である。以降、「標準機能に基づいたコンポーネント」を「標準コンポーネント」と呼ぶことにする。

2.2.1 中小製造企業における実用 IT システムの開発

中小製造企業における実用 IT システムの開発は、フルコンポーネント方式の有用性を例証すること、そして中小製造企業が抱える問題の本質を理解することを目的として行った。ここで開発した IT システムは、作業進捗状況を把握するための工程管理システムや、製品設計や工程設計に必要なデータを参照するための技術情報管理システム等である。IT システム開発のための聞き取り調査においては、予断を排し、企業側の意見や提案を極力そのまま受け入れることを重視した。それらの中には、過剰なデータ入力が必要になるなど、現場作業負担の軽減という目的に照らして不要あるいは不適切と考えられるものも含まれていたが、この段階では、企業の意識や考え方を理解することが重要と考えたためである。

IT システムの開発は、必要機能を洗い出し、それらの機能をサブ機能、サブサブ機能へと逐次要素機能と考えられる段階まで分解したあと、要素機能ごとのコンポーネントを作成し、それらを組み合わせるといった方法で行った。開発の過程では企業側との連絡を密に取り、IT システムの企業での動作検証と機能評価、それに基づく機能追加及び改良、というサイクルを1～3ヶ月の単位で回した。

フルコンポーネント方式によって実用 IT システムを作り上げた結果、この方式はシステムの機能改善に際して有効であることが分かった。フルコンポーネント方式で構築された IT システムは、互いに独立性の高いサブ機能の組み合

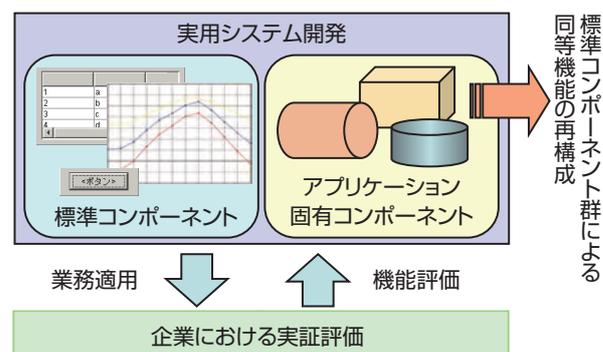


図 1 企業の実用システム開発を通じた研究開発

わせによって構成されている。したがって、機能改善が必要な場合には、修正すべき箇所を最小限まで絞り込むことが容易であり、作業負担を軽減することができる。このことは、業務形態の変化に応じた機能修正が求められる企業の業務システムにおいて、極めて有効である。これはまた、フルコンポーネント方式のこの利点を生かすためには、各コンポーネントの機能の切り分け方が重要であるということの意味している。

これらの IT システム開発を通じて見えてきた中小製造企業における本質的な課題として、大きく二つが挙げられる。第 1 に挙げられるのは、業務における問題点を特定し、具体的な改善手段を考える「業務分析」に関わる課題である。業務分析を行うとき、人はそれぞれの立場から問題点や改善要望を挙げるのが通常である。そして、それらが互いに矛盾することも少なくない。例えば、経営層はより詳細な現場データや分析結果を求めがちであるが、そのためには詳細なデータ入力が必要となり、現場作業者の負担軽減という要求と相反する。IT 化による業務改善を推進するためには、IT システム導入の負担、IT システム運用の負担、IT 化による業務改善の効果を適切に評価した上で明確な目標を立て、経営層、現場作業員、IT 担当者間で意識共有を図ることが重要なのである。第 4 章で事例として紹介する企業は、いずれも目標を明確化したことが成功の基本となっている。

第 2 に、多くの中小製造業に共通する技術的課題として、「情報の一元管理」が挙げられる。開発した IT システムの用途は、工程管理や技術情報管理等さまざまであるが、本質的には、紙の帳票やエクセルファイル等に散在しているデータを一元的に取り扱うことによって、作業負担を軽減し、データ間の齟齬を解消することである。

以上の知見は、コンポーネントの標準化の方針を決定する上で、また、その後の多くの企業に対する技術指導において活かされている。

2.2.2 コンポーネントの標準化

前項で述べた IT システムの開発は、中小製造業が抱える問題の本質を理解し、IT 化推進のために必要な機能を抽出することを目的として行った。そのため、そこでのコンポーネントの作成は各必要機能の実現を優先させて行っており、その企業のみの特化したコンポーネントも多く含まれている。多様性と汎用性を確保しつつ、IT システム構築の効率化を実現するコンポーネント群を整備するため、ここでは、それら必要機能の実現手段を再検討し、汎用性の高い標準機能の組み合わせによって同等機能を再構成するという作業を行った。

この作業は、主として、特定企業に特化したコンポーネントの細分化と、機能の抽象化によって行った。企業の IT システム開発において作成したコンポーネントは、その企業の業務という観点では要素機能と呼べるレベルにまで分解されている。それをさらに細分化し、ソフトウェアの機能としての観点から分解を進め、複数の異なる企業の IT システム開発で利用可能というレベルに機能粒度を設定した。

その一方、異なる企業の IT システムにおける類似性の高い機能について、それらを抽象化した機能を整備することにより、汎用的なコンポーネントを作成した。例えば、企業のデータは表形式で管理されることが多いが、その項目やデータの種類の等、表の構造はさまざまであり、ある企業で用いられている表データを他の企業で利用することは不可能である。それは特定の表データを扱うコンポーネントを他の企業の IT システムで使うことが不可能であることを意味する。このようなとき、表の構造そのものを操作するような、一段階抽象的な機能を用意することにより、さまざまな企業の IT システムの構築に対応可能なコンポーネントを作成できる。

一例として、ある企業で開発した工程管理システムにおけるデータ管理機能の例を図 2 に示す。この企業は IT システムを導入しておらず、製造現場のデータを紙の帳票で

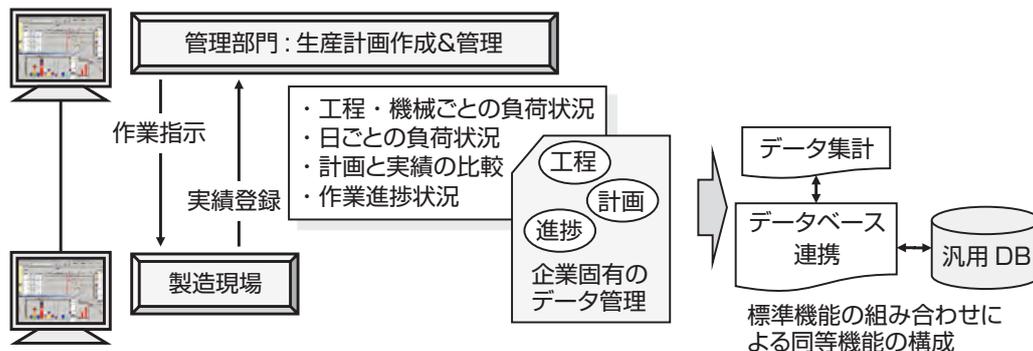


図 2 工程管理システムにおけるコンポーネント標準化の例

管理していたため、管理部門において製造現場の状況をリアルタイムに把握することができなかった。この工程管理システムは、このような問題の解決を目的として開発したものである。IT システム開発に当たっては、当初、管理部門が必要とするさまざまなデータを蓄積し、適切な集計処理等を行うために、固有のコンポーネントを作成していた。この構成を見直し、まずはデータの蓄積機能と集計処理機能を分離し、それぞれ別のコンポーネントとすることにした。さらに、データの蓄積については、企業固有のデータ構造に依存しない汎用のデータベースソフトウェアを利用するものとし、各種データベースとの連携を行うための標準コンポーネントを作成した。集計処理機能も同様に、企業固有の集計処理に特化しない、クロス集計処理を始めとするさまざまなデータ集計に対応した標準コンポーネントを用意した。

この例にも見るように、MZ Platform では、必要な機能のすべてを自身で提供することには拘らず、外部のソフトウェアとの連携を重視し、それらの優れた機能を積極的に活用するという方針を採っている。このことは、経理システム等、企業内の他のシステムとの連携を図り、企業全体における情報の一元管理を実現する上でも有効である。

これらの作業により、約 180 種類の標準コンポーネントが整備され、製造企業の業務システム開発において必要とされる機能のほぼすべてをカバーできるようになった。その後も、Web 機能に対する要求の高まりなどを受けてコンポーネントは追加され、現在では 200 種類を超える標準コンポーネントが用意されている。

2.3 MZ Platformの構成と機能

MZ Platform は、IT システムの開発と実行を行うためのアプリケーションビルダー、実行のみを行うアプリケーションローダー、そして IT システムの部品となる標準コンポーネント群から構成される。これらはすべて Java 言語^[4]で実装されている。

2.3.1 アプリケーションビルダー

IT システムを開発するためのユーザーインターフェースと、動作確認のための IT システム実行機能を提供する。アプリケーションビルダーは、画面上の操作によってコンポーネントを組み合わせて IT システムを作り上げるツールである。基本的に部品と部品をつなぎ合わせるだけなので、ソースコードの記述と比較した場合、はるかに容易に IT システムを作成できる。アプリケーションビルダーを利用した IT システム構築の手順を図 3 に示す。

作業者は、アプリケーションビルダー上のメニューから必要なコンポーネントを選択し、処理の流れをコンポーネント同士の接続図として記述する。画面レイアウトの設定は、別画面として表示される画面編集ウィンドウ上で行う。機能の追加や変更は、コンポーネントの追加や削除、接続関係の編集により、容易に行うことができる。

機能修正の容易さは、継続的な業務改善の推進という点で大きな意味を持つ。従来、一度作成した IT システムは変更が困難であり、修正には多大な労力を必要とした。そのため、IT システムの変更が必要となるような業務改善を実施することは困難という状況が生じていた。換言すると、IT システムの導入によって業務が固定化し、それ以上の業務改善を進められないというジレンマに陥るようになっていた。このような問題を解決し、企業現場の業務改善を継続的に進められることが、MZ Platform の大きな利点であると言える。

2.3.2 アプリケーションローダー

アプリケーションローダーは、作成された IT システムを現場で運用するために用いるものであり、実行機能のみを持つ。アプリケーションビルダーとアプリケーションローダーの関係を図 4 に示す。

2.3.3 標準コンポーネント群

MZ Platform では、企業の実用 IT システムにおいて汎

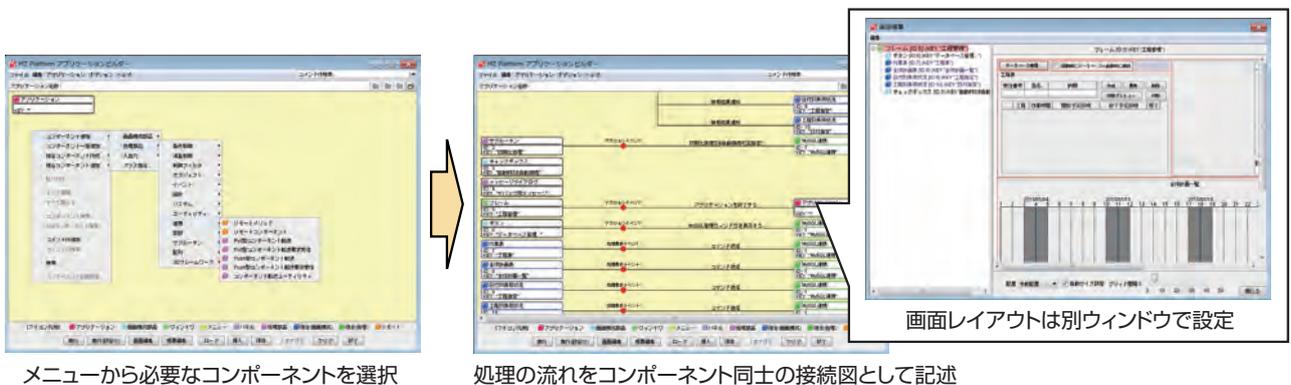


図 3 アプリケーションビルダーによる IT システム構築手順

表 1 MZ Platform標準コンポーネント概要

区分		説明	主なコンポーネント
画面構成部品	操作部品	ボタンのような画面操作や、データの入力や表示を行うためのコンポーネント	フレーム、ダイアログ、ボタン、テキストフィールド、ラベル、イメージ、メニューバー、ツールバー、テーブル、ツリー他
	グラフ部品	データを様々な形式でグラフ化して表示するためのコンポーネント	棒グラフ、折れ線グラフ、面グラフ、散布図、円グラフ、ガントチャート、パレート図他
処理部品		IT システムのデータ処理を行うためのコンポーネント	数値演算、論理演算、統計演算、テーブルデータ処理、ファンクション、サブルーチン、外部プログラム通信他
入出力		ファイルやデータベース等、外部データの入出力や帳票出力を行うためのコンポーネント	データベースアクセス、エクセルファイルアクセス、CSV ファイル入力・出力、画像ファイル入力・出力、シリアル通信、帳票他

用的に使われるコンポーネントとして、現在、200 種類余りの標準コンポーネントを用意している。主なコンポーネントを表 1 に示す。

これらの他、Java 言語によるプログラミングにより、利用者自身が独自のコンポーネントを作成して使用することも可能である。これは高度な IT 知識を有した利用者を想定したものであるが、そのための説明書や雛形ファイル、サンプルファイルも合わせて提供している。

2.3.4 MZ Platformの機能検証

2004 年から 2005 年にかけて実施した MZ Platform 機能検証の結果をここに報告する。これは MZ Platform による IT システム開発における作業量削減効果を、定量的に評価するために行ったものである。評価軸は、MZ Platform 操作方法の習得が容易であるかどうか、そして、MZ Platform を利用することにより、IT システム開発に必要な工数をどの程度削減できるかである。

(1) MZ Platform 操作方法の習得

MZ Platform 操作方法の習得の容易さは、習得に必要な期間を従来のプログラム言語と比較するという方法で評価した。ソフトウェアベンダーの協力により、プログラマーの方々に実際に MZ Platform の操作方法を学んでもらい、それまでに自身が学んだ他のプログラム言語における習得期間と比較した。

その結果、MZ Platform 操作方法の習得に必要な期間

は、MFC/C++^[6]、Java と比較して、半分以下との回答が得られた。

(2) MZ Platform による IT システム開発工数の削減

中小製造企業数社の協力を得て、その企業の実用 IT システムを MZ Platform で開発し、同等機能の IT システムを従来のプログラム言語で開発するとした場合に必要な工数を、ソフトウェアベンダーの技術者に概算してもらい、MZ Platform による実際の開発工数と比較した。その結果を表 2 に示す。

この比較には、MZ Platform で開発を行った作業者と従来工数を概算した技術者が異なるものも含まれており、また、従来工数の算出は概算に過ぎないため、数値としての精度は決して高くない。しかし、MZ Platform が大きな開発工数削減効果を持つことを示すには、十分な値である。

3 成果普及

MZ Platform に IT システム開発ツールとしての機能を整えても、それだけでこの研究の目標である「企業の技術者自身による IT システムの開発」が実現されるわけではない。目標達成のためには、IT 化推進に対する啓蒙、ツールを使いこなす人材の育成、そして企業が自社開発に取り組めるための環境整備が必要である。このような考えから、以下の成果普及活動に取り組んだ。

(1) 成果普及セミナーの開催

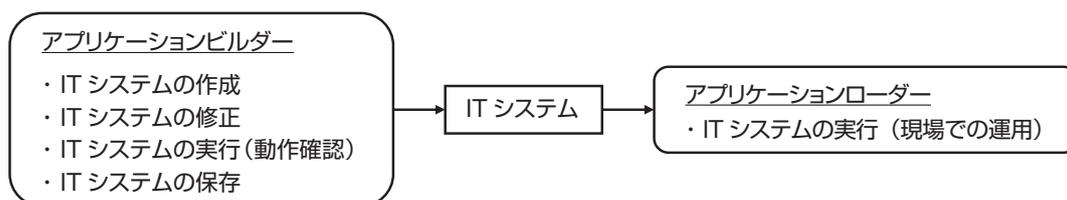


図 4 アプリケーションビルダーとアプリケーションローダーの関係

導を受けて開発した IT システムである。この企業では、従来、作業指示や作業実績登録といった情報伝達を、紙の帳票やホワイトボードへの手書きで行っていた。そのため、作業進捗管理や数量管理は半日単位でしか行えず、転記ミス等に起因する情報管理の不備も避けられなかった。これを電子化して一元管理することにより、時間単位での進捗管理を実現し、納期管理の精度を高め、作業時間を平均で約 20 % 削減した。同社は、本 IT システム開発により、2007 年度九州経済産業局 IT 経営力大賞特別賞を受賞している。また、本件の成功は、2008 年度から 2010 年度にかけての大分県中小企業 IT 化モデル事業^[6]の実施へとつながった。

図 6 に開発した作業実績収集システムの概略を示す。生産計画の作成と参照には、従来から使用しているエクセル表を用いている。この生産計画をもとに作業計画が作成され、作業指示書が発行される。作業実績の登録は、ハンディターミナルを使ったバーコードの読込により行われ、すべてのデータはデータベースに登録される。

本 IT システム開発の作業手順は、以下の通り、準備、初期、中期、後期の 4 段階から成る。括弧内は、それぞれの段階の遂行に要した期間である。

(1) 準備 (1 ヶ月)

- ・サポート体制の明確化
- ・IT 化対象業務と IT 化担当者の任命
- ・各担当者のアクションの明確化

(2) 初期 (3 ヶ月)

- ・情報の流れを追った業務分析
- ・IT 化版作業工程表の作成
- ・IT システム仕様書作成

(3) 中期 (2 ヶ月)

- ・プログラム作成 (MZ Platform アプリケーション作成)
 - ・ハードウェア選定
- (4) 後期 (2 ヶ月)
- ・試験運用

ここでのポイントは (1) の準備、すなわち IT 化の対象と目的、担当者と責任を明確にしたことである。また、大分県産業科学技術センターが、技術面のみならず、IT システム開発の運営面で大きな役割を担っていたことも見逃せない。

社員のみで IT システム開発を進める場合には、社内での上下関係等への配慮により、率直な意見交換を行えないことがある。それが意識共有の不徹底や方針の偏りを生じさせ、結果として IT システム開発の運営に支障をきたすことも少なくない。公設研の研究員が公平中立な立場に関わることにより、率直な意見交換を促し、運営上のリスクを事前に回避していたのである。

4.2 金属表面処理企業における受注・製造・在庫管理システム (長崎県)

これは、長崎県の金属表面処理企業である滲透工業 (株) がソフトウェアベンダーのサポートを得て開発した IT システムである。この企業では、手書きの帳票類を電子化し、データを一元管理することで原価を把握し、生産性を向上させることを目指していたが、IT システム開発のための適切なツールが見つからずに、計画が中断していた。そのようなときに MZ Platform を知り、IT システムの開発に着手した。その構成を図 7 に示す。

これにより製造現場の生産量や設備稼働率等を把握し、生産性向上のためのデータ分析を行うことが可能となった。同社は、本 IT システム開発により、2009 年度九州経済産業局 IT 経営力大賞特別賞を受賞し、経済産業省 IT

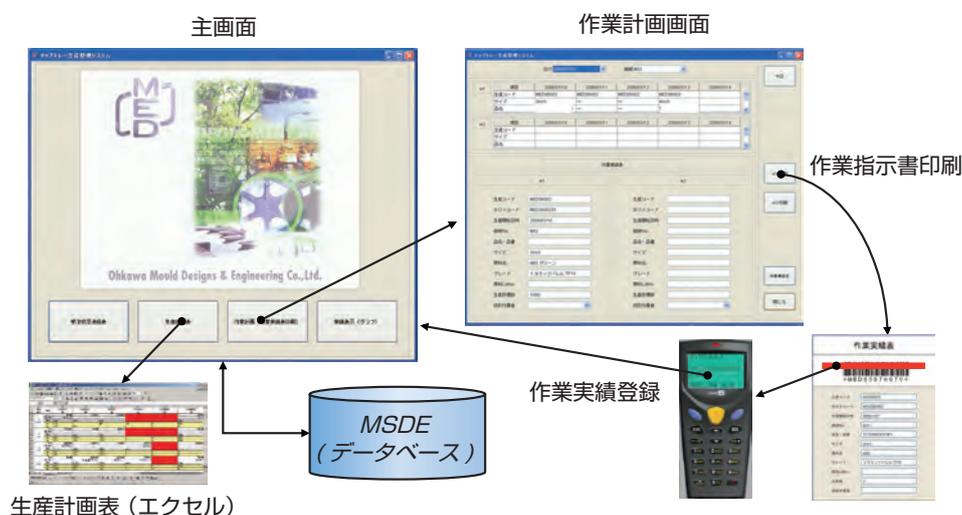


図 6 作業実績収集システム概略 (資料提供: 大分県産業科学技術センター)

表 3 受注・製造・在庫管理システム構築作業手順

(1)	業務フロー図作成（現在の作業にそった業務フロー図作成、帳票の洗い出し等）	滲透工業
(2)	IT 化の範囲決定（業務フローの中でどこまでをIT化するか、手作業を残すか）	共同
(3)	データベース設計（データの整理と、帳票の整理、マスターデータ検討）	共同
(4)	画面設計（処理フローから画面を設計）	共同
(5)	プログラム作成（MZ Platform アプリケーション作成）	ソフトベンダー
(6)	テストラン	共同
(7)	運用、第二ステージ開発（修正、追加を含む）	滲透工業

経営実践企業に認定されている。

この事例で特徴的な点は、ソフトウェアベンダーとの役割分担である。表 3 にその作業手順を示す。社内の業務分析等の製造企業自身でなければできないところと、ソフトウェアベンダーの専門知識が必要なところとを明確に切り分けて作業分担を行い、IT システム開発を効率的に進め、最終的にはソフトウェアベンダーからも完全に自立したのである。

4.3 金型製造企業における受注・外注・進捗管理システム (佐賀県)

これは、佐賀県の金型製造企業である聖徳ゼロテック（株）が、県の工業技術センターとソフトウェアベンダーのサポートを受けて構築した IT システムである。この企業では、すでにパッケージソフトウェアを導入していたものの、日報入力の負担が大きく、データも不正確であった。そこで、現場での日報入力負担の軽減と正確なデータ収集を目的として、バーコードによるリアルタイム日報入力を中心とした IT システムを構築した。その外観を図 8 に示す。

作業者の名札、工作機械、作業指示書にはすべてバーコードが記されており、作業者はバーコードリーダーでそれらを読み取るのみで日報入力が完了する。そして、記録時刻を自動登録しておくことで、リアルタイムでの日報入力が

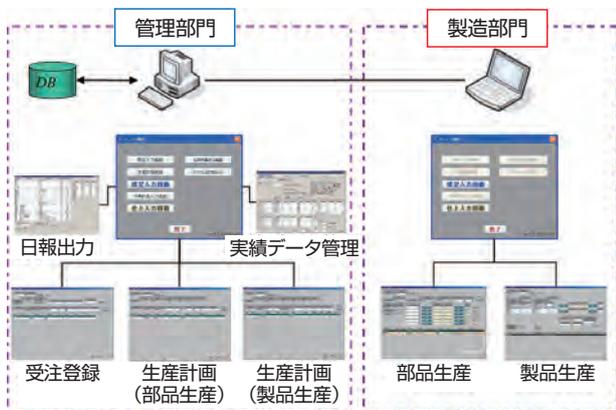


図 7 受注・製造・在庫管理システム構成 (資料提供: 滲透工業 (株))

実現され、すべてのデータが一元的に管理できるようになった。この IT システム開発により、同社は、2008 年度九州経済産業局 IT 経営力大賞特別賞を受賞し、2010 年には経済産業省 IT 経営実践企業に認定されている。

この事例で注目すべき点は、収集したデータの活用方法である。これらのデータから各製品、各工程のコストを正確に算出できるようになり、それを工程改善に活かしている。その例を図 9 に示す。

この例は、ある製品の工程ごとのコストを算出したところ、すでに一つの工程だけで原価割れしていることが判明し、その工程を改善することにより黒字化に成功したというものである。ここで重要なことは、現場作業者に気付きを与えたことである。現場作業者は、チョコ停の発生自体はそれまでも認識していたものの、コストと結び付けて考えてはいなかった。それを数値データとして提示することにより改善対象を認識させ、現場の改善能力を引き出したのである。

4.4 事例に見るエンドユーザー開発の効果と MZ Platform

以上の成功事例に見られる共通点として、IT システム開発の開始当初に IT 化の対象と目的を明確にしていたことが挙げられる。このことは、製造企業が自らプログラム作成に携わったことが大きく関係している。

製造企業における IT システムの開発、特に外注による

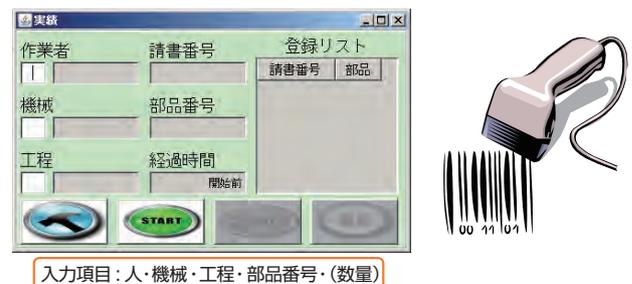


図 8 バーコードによるリアルタイム日報入力 (資料提供: 聖徳ゼロテック (株))

IT システムの導入においてしばしば見られる失敗要因として、発注者である製造企業と、受注者であるソフトウェアベンダーとの意識共有や意思疎通の齟齬が挙げられる。IT 知識を持たない製造企業と、現場の知識を持たないソフトウェアベンダーとの間の意識共有には困難がともなう。このとき、製造企業が自らプログラム作成を行うことができれば、高度な IT 知識を持たないまでも IT システム開発の考え方を身に付けられるようになり、それを基本として最も効果的な IT 化の対象や手段を考えることが可能となる。このことは、完全な自社開発はもちろんのこと、ソフトウェアベンダーとの意識共有を図り、協働を進める上でも有効に働くのである。これが顕著に表れているのが、第 4.2 節で紹介した滲透工業(株)の事例である。

エンドユーザー開発には、利用者が IT システムを自らの手で作り上げるといった面が強調されることも多いが、むしろ自らが積極的に開発に関わることで、専門家との協働を促すという点にこそ大きな効果があるものと我々は考える。そして、MZ Platform が製造企業におけるエンドユーザー開発を進める上で有効なツールであることは、これらの事例により例証されたと言える。

5 おわりに

「これまでは業務改善のアイデアを実現する手段がなかった。MZ Platform を手に入れた今、仕事をもっと楽にすることを日々考え、IT システムとして実現させている。」

これは、ある導入先企業担当者のコメントである。当初、IT システム開発の負担削減という技術面での貢献しか想定していなかったが、アイデアを簡単に実現できるツールを手に入れたことによって、それまで埋もれていた個人の業務改善能力を存分に発揮できるようになったことは想定を大きく超えており、これこそが最大の効果ではないかと考える。

この研究では、成果普及の比重が非常に大きい。これは

研究開発当初の反省を踏まえた結果である。MZ Platform の開発が一定の段階に達したとき、MZ Platform で構築した IT システムは実用に耐えるだけの機能を備えていながら、企業では使われなかったのである。聞き取り調査の結果、社内でシステムの維持・管理、業務展開、運用を担う人材の確保に困難があることが分かり、成果普及活動とサポート体制の整備に力を入れ始めたという経緯がある。

成果普及とは、成果物を単に配って回ることではない。最終的な普及場面、特に利用者の立場から見たときの状況を想定し、そこから遡って方針を立てることが重要である。この基本中の基本、分かっているつもりでいながら実は分かっていなかったことを明確に認識できたことは、我々がこの研究から得た大きな資産である。

IT システム開発ツールとしての MZ Platform はほぼ完成しており、残りは今後の技術進歩を反映した機能拡張と認識している。IT 分野の技術進歩は著しく、5 年前には認知すらされていなかった技術が普遍化していることも珍しくない。MZ Platform には、新技術をコンポーネントという形で取り入れて機能を拡張していく仕組みが用意されている。今後は、そのような新技術を取り入れ、企業の IT 化支援のみならず、研究用のプラットフォームとしての利用も進めていく。そして、得られた研究成果を企業の現場に適用するための、技術発信チャンネルとしても活用していくことを予定している。

謝辞

この研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「ものづくり・IT 融合化推進技術の研究開発」および「中小企業基盤技術継承支援事業」により行われたものです。また、資料を提供いただいた大分県産業科学技術センター、(株) 大川金型設計事務所、滲透工業(株)、聖徳ゼロテック(株)に、この場を借りて感謝申し上げます。

タップ工程だけで原価割れしていることが判明!

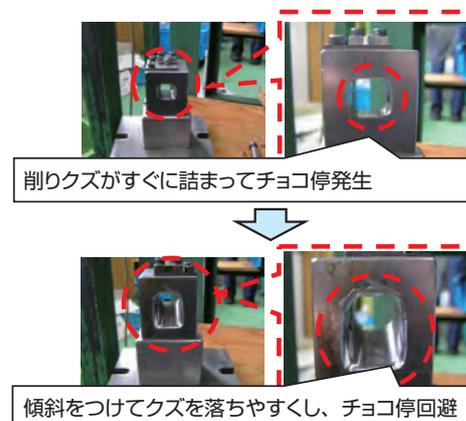
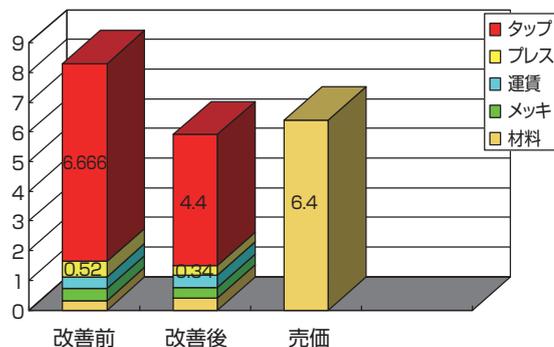


図 9 収集データの活用による工程改善の例 (資料提供: 聖徳ゼロテック(株))

参考文献

- [1] H. Lieberman, F. Paternò and V. Wulf (eds.): *End-User Development*, Springer (2006).
- [2] I. Crnkovic and M. Larsson (eds): *Building Reliable Component-Based Software Systems*, Artech House (2002).
- [3] Microsoft: *Visual Studio*のソリューション, <http://www.microsoft.com/ja-jp/dev/default.aspx>, 閲覧日2015-01-05.
- [4] Oracle Corporation Japan: *アプリケーション開発の改革*, <http://www.oracle.com/jp/technologies/java/overview/index.html>, 閲覧日2015-01-05.
- [5] Microsoft: *Visual Studio 2013*へようこそ, <https://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/dd831853.aspx>, 閲覧日2015-01-05.
- [6] 大分県商工労働部情報政策課: *IT導入・利活用事例集*, (2014), http://www.pref.oita.jp/uploaded/life/275013_317659_misc.pdf, 閲覧日2015-01-05.

執筆者略歴

澤田 浩之(さわだ ひろゆき)

1989年東京大学大学院工学系研究科航空学専攻課程修了。同年、工業技術院機械技術研究所入所。Ph. D。2001年産総研ものづくり先端技術研究センター主任研究員。2004年同システム技術研究チーム長。2010年先進製造プロセス研究部門製造情報研究グループ長。この研究では、MZ Platform 開発の総指揮を執る他、企業への技術指導や技術研修を主に担当。



徳永 仁史(とくなが ひとし)

1999年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻博士後期課程修了。同年、工業技術院機械技術研究所入所。博士(工学)。2001年産総研ものづくり先端技術研究センター研究員。2006年主任研究員。2010年先進製造プロセス研究部門製造情報研究グループ主任研究員。この研究では、アプリケーションビルダーを初めとするMZ Platform 基幹機能の整備とバージョン管理を主に担当。



古川 慈之(ふるかわ よしゆき)

2003年東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻博士課程修了。同年、産総研入所。博士(工学)。現在、先進製造プロセス研究部門製造情報研究グループ主任研究員。この研究では、産業用アプリケーションを想定した機能整備やコンポーネント群の新規開発を主に担当。



査読者との議論

議論1 全体のサマリー (赤松 幹之:産業技術総合研究所)

中小企業等で負担が大きいために、IT システムの開発・導入が進みにくいことから、IT の専門知識がなくてもシステムを構築・運用できるためのツールの開発について述べた論文である。ソフトウェアをソースコードで記述することは難易度が高いことから、ソースコードを一切使用しないですむように、コンポーネントの組み合わせのみでシステムを構築できるツールの開発を行った。フルコンポーネント方式を実現するためには標準コンポーネントの整備が必要であり、それを企業の実用システム開発を通じて構築するという戦略をとった。また、それを普及させることが最も重要なことであり、企業とベンダーと産

総研と公設研のネットワーク体制を組むことでこれを実現した。

議論2 コンポーネントの標準化について

質問 (赤松 幹之)

フルコンポーネント方式を実現するために、コンポーネントの標準化が必要になるとしています。ただ、ここでいう「標準化」とはどういう意味でしょうか? どういうものであれば標準コンポーネントと呼ぶことができるのでしょうか。また、どのようにして標準コンポーネントを作るのかを分かるようにしてください。

コメント (市川 直樹:産業技術総合研究所)

当初からある方針を持って計画通りに進めたのか、それとも開発を進めるなかで現実的なかたちを模索しながら進めたのかなど、コンポーネントの標準化の過程が分かると良いと思います。

回答 (澤田 浩之)

コンポーネントの標準化とは、「製造企業のさまざまな現場や要求に応えられるだけの多様性と汎用性を確保しつつ、IT システム構築の効率化を実現するためのコンポーネント群の整備」という意味で用いています。このようなコンポーネント群を構成する個々のコンポーネントが標準コンポーネントであり、「標準機能に基づいたコンポーネント」と同義です。「標準機能に基づいたコンポーネント」を、「標準コンポーネント」と呼ぶことにします。」との説明を追加しました。

標準コンポーネントの作成は、主として、特定企業に特化したコンポーネントの細分化と、機能の抽象化によって行いました。コンポーネントの細分化とは、コンポーネントの機能を複数の異なる企業のIT システム開発で利用できるレベルにまで機能を分解することであり、機能の抽象化とは、異なる企業のIT システムの中の類似性の高い機能に着目し、それを抽象化した機能を用意することで汎用性を高めることです。この説明を、「2.2.2 コンポーネントの標準化」に追加いたしました。

製造企業のさまざまな現場や要求に応えられるだけの多様性と汎用性を備えたコンポーネント群を整備することが目的ですので、汎用性の高いコンポーネントの組み合わせとしてシステムを構成するのは当初からの計画です。特化して作ったのは、コンポーネント群整備のための知見を得る、すなわち企業のIT 化で必要となる機能を抽出するための手段と位置付けています。

議論3 ITシステム導入に際して企業に望むこと

コメント (市川 直樹)

実際に導入する上での企業側での考え方で必要なことも記載する必要があるのではないかと? こうしたIT システムを導入することが、「なんとなく」必要だし、導入すれば「なにか」良いことがある、あるいは事例に書かれたようなことが自分のところにも生じて業務改善になると、「なんとなく」考えているのではうまくいかないということを明示すべきではないでしょうか? どのようなことを企業側で考えておいてもらいたいかなどについても記載されたらどうでしょう。

回答 (澤田 浩之)

「2.2.1 中小製造企業における実用 IT システムの開発」の後半部、「これらのIT システム開発を通じて見えてきた…」の段落の中で、本質的な課題の一つとして業務分析を取り上げ、企業自身がIT 化の目標を明確化することの重要性について言及しました。

議論4 企業へのシステム導入

コメント (市川 直樹)

淡々と書かれているのですが、実際は組み上げていく上でいろいろな可能性を検討したと思います。また、どの程度までできたところで企業に使ってもらっていったのか、使ってもらって大きく仕様等が変更になった大きなターニングポイント等があれば、そうしたことも記載されると良いかと思えます。

回答 (澤田 浩之)

「2.2.1 中小製造企業における実用 IT システムの開発」の前半部で、企業に対する聞き取り調査で重要視したことと、IT システム開発における評価と改良のサイクルについて記述しました。また、ここで得ら

れた知見として、「機能改善が容易というフルコンポーネント方式の利点を生かすためには、各コンポーネントの機能の切り分け方が重要である」ということを明記しました。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日
 改正 2008年 6月18日
 改正 2008年10月24日
 改正 2009年 3月23日
 改正 2010年 8月 5日
 改正 2012年 2月16日
 改正 2013年 4月17日
 改正 2014年 5月 9日
 改正 2014年11月17日
 改正 2015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、論説、座談会記事、読者フォーラム

このうち、研究論文、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。

③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元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。

④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、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 研究論文または論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文か論説）を明記する。

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

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

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。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 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 June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

Revised May 9, 2014

Revised November 17, 2014

Revised April 1, 2015

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

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

Of these, the submitted manuscripts of research papers 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 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 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 reviewed 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 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.

④ 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 editorials 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 and editorials shall have front covers and the category of the articles (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheets.

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

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

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

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

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

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

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

3.3 Format

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

3.3.2 The 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 a web page, Name of a website (The name of a website is possible to be omitted when it is the same as an author name), 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 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba
305-8568

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

Synthesiology Editorial Board
c/o 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

本号では、「水中試料の観察可能な大気圧電子顕微鏡」、「交流電圧標準のサーマルコンバータ」、「レーザー加工のグリーン化技術」、「製造業のITシステム開発ツール」に関する論文4編をお届け致します。論文の内容は多様ですが、研究の分野や技術の内容によって研究開発と社会への活用のシナリオ及びその実現プロセスが異なるのは当然であり、そのために、多様な技術分野の様々な研究開発を社会へ活用する具体的事例を論述した論文を継続的に掲載し、蓄積していくことに本誌の使命と意義があると考えております。

科学技術の社会への貢献は極めて多岐にわたりますが、その中で最近、地球規模の環境保全に関して一つのニュースが報じられました。それは、大手の自動車メーカーが、新設の工

場でCO₂排出量の半減に取り組むというものです。高度な技術の採用やコスト負担を前提とした計画になりましょうが、地球温暖化の回避、持続可能な社会の実現に向けた意義深い取り組みの一つと言えましょう。科学技術と持続可能な社会の実現との関わりについては、再生可能エネルギーの利用拡大と社会的なコスト負担増大についての議論に例示されるように、技術の社会的な価値とそれに対するコスト負担について多面的に議論し、評価することが今後ますます重要になります。本誌に掲載される論文が、そのような議論において有用な知見として参照されることを期待しております。

(編集幹事 山崎 正和)

シンセシオロジー編集委員会

委員長：金山 敏彦

副委員長：湯元 昇、四元 弘毅

幹事（編集及び査読）：池上 敬一、栗本 史雄、清水 敏美、富樫 茂子、山田 由佳

幹事（普及）：赤松 幹之、小林 直人（早稲田大学）、山崎 正和

幹事（出版）：高橋 正春

委員：安宅 龍明、綾 信博、一村 信吾（名古屋大学）、上田 完次（兵庫県立工業技術センター）、小野 晃、景山 晃、後藤 雅式、竹下 満（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、多屋 秀人（株式会社 J-Space）、内藤 茂樹、松井 俊浩、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

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 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/synthesiology>

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: T. KANAYAMA

Senior Executive Editor: N. YUMOTO, H. YOTSUMOTO

Executive Editors: K. IKEGAMI, C. KURIMOTO, T. SHIMIZU, S. TOGASHI, Y. YAMADA, M. AKAMATSU, N. KOBAYASHI (Waseda University), M. YAMAZAKI, M. TAKAHASHI

Editors: T.ATAKA, N. AYA, S. ICHIMURA (Nagoya University), K. UEDA (Hyogo Prefectural Institute of Technology), A. ONO, A. KAGEYAMA, M. GOTOH, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. TAYA (J-Space Inc.), S. NAITOU, T. MATSUI, 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 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan

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

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

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

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

「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8巻第3号 2015年8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

Development of an in-solution observation method using atmospheric scanning electron microscopy(ASEM)

— *Interdisciplinary research between semiconductor fabrication technology and biological electron microscopy* —

T.OGURA, H.NISHIYAMA, M.SUGA and C.SATOU

Development of thin film multijunction thermal converters

— *Establishing metrological traceability system for AC voltage standard* —

H.FUJIKI, Y.AMAGAI and H.SASAKI

Green photonics for laser-based manufacturing

— *Photonics contributes to a sustainable society in the “photon century”* —

H.NIINO

An IT system development framework utilizable without expert knowledge: MZ Platform

— *Toward end-user development in manufacturing industry* —

H.SAWADA, H.TOKUNAGA and Y.FURUKAWA

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*

