

Synthesiology

遺跡が語る巨大地震の過去と未来

ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定

安心・安全な次世代モビリティを目指して

部材の軽量化による輸送機器の省エネ化

セラミックス製造の省エネプロセスの確立を目指して

高感度分子吸着検出センサーの開発

PAN系炭素繊維のイノベーションモデル

シンセシオロジー編集委員会

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

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

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

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

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

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

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

シンセシオロジー編集委員会

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

Synthesiology 第2巻第2号(2009.6) 目次

新ジャーナル「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
研究論文	
遺跡が語る巨大地震の過去と未来 — 境界領域「地震考古学」の開拓 — ・・・寒川 旭	91 – 100
ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定 — 計量トレーサビリティ体系の構築と標準化 — ・・・大澤 尊光、高辻 利之、佐藤 理	101 – 112
安心・安全な次世代モビリティを目指して — 全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす — ・・・佐藤 雄隆、坂上 勝彦	113 – 126
部材の軽量化による輸送機器の省エネ化 — 難燃性マグネシウムの研究開発 — ・・・坂本 満、上野 英俊	127 – 136
セラミックス製造の省エネプロセスの確立を目指して — 新規バインダー技術の開発 — ・・・渡利 広司、長岡 孝明、佐藤 公泰、堀田 裕司	137 – 146
高感度分子吸着検出センサーの開発 — 高度な診断・診療のためのバイオ分子検出技術の開発 — ・・・藤巻 真、粟津 浩一	147 – 158
PAN系炭素繊維のイノベーションモデル — 研究者の活動とマネジメントの相乗効果；励振モデル — ・・・中村 治、大花 継頼、田澤 真人、横田 慎二、篠田 渉、中村 修、伊藤 順司	159 – 169
インタビュー	
米国の固体照明による省エネ政策と標準研究 ・・・ヨシ 大野、小野 晃、田中 充	170 – 175
座談会	
シンセシスな研究について	176 – 182
編集委員会より	
編集方針	183 – 184
投稿規定	185 – 186
編集後記	193
Contents	
Research papers	
Study of paleoearthquakes at archeological sites — A new interdisciplinary area between paleoseismology and archeology — --- A. Sangawa	91
High accuracy three-dimensional shape measurements for supporting manufacturing industries — Establishment of the traceability system and standardization — --- S. Osawa, T. Takatsuji and O. Sato	101
A secure and reliable next generation mobility — Intelligent electric wheelchair with a stereo omni-directional camera system — --- Y. Satoh and K. Sakaue	113
Energy saving in transportation systems by weight reduction of their components — Research and development of non-combustible magnesium alloy — --- M. Sakamoto and H. Ueno	127
A strategy to reduction of applied energy in ceramic fabrication — Novel binders and their processing technology — --- K. Watari, T. Nagaoka, K. Sato and Y. Hotta	137
Development of high-sensitivity molecular adsorption detection sensors — Biomolecular detection for highly-developed diagnosis, medication, and medical treatments — --- M. Fujimaki and K. Awazu	147
Study on the PAN carbon-fiber-innovation for modeling a successful R&D management — An excited-oscillation management model — --- O. Nakamura, T. Ohana, M. Tazawa, S. Yokota, W. Shinoda, O. Nakamura and J. Itoh	159
Messages from the editorial board	187 – 188
Editorial policy	189 – 190
Instructions for authors	191 – 192

遺跡が語る巨大地震の過去と未来

— 境界領域「地震考古学」の開拓 —

寒川 旭

考古学の遺跡発掘調査で地震の痕跡が見つかることが多いが、従来は調査の対象とされずに見逃されていた。筆者は、1988年に「地震考古学」を提唱し、遺跡の地震痕跡を用いた研究方法を広く普及させた。これによって、考古学と地震関連分野との境界領域が開拓されて様々な成果が得られた。南海トラフで発生する巨大地震について過去2千年間の発生年代がわかり、次の発生を考える基礎資料となった。内陸の活断層による地震痕跡も数多く見出されており、京阪神・淡路地域では1596年慶長伏見地震での地盤災害が詳しくわかった。液状化現象についても、遺跡での観察結果から新しい知見が得られた。また、地震痕跡は一般市民にも理解しやすいことと、マスメディアにも取り上げられる機会も多いことなどにより、地震災害軽減のための活動へ大きく寄与している。

キーワード: 地震考古学、遺跡、地震痕跡、活断層、液状化現象、南海トラフ、伏見地震、阪神・淡路大震災

A study of paleoearthquakes at archeological sites

– A new interdisciplinary area between paleoseismology and archeology –

Akira Sangawa

Traces of paleoearthquakes have been found at many archeological sites in Japan. However, most of them have been neglected to date and not considered to be a subject relevant to archeological research. The author has studied these traces since 1988, naming this new study field “Earthquake Archaeology”. The field has become popular both in archeology and paleoseismology and many important and useful results have been gradually obtained. These developments will lead to a deeper understanding of the natural and cultural history of the earthquake-prone country, Japan. Most paleoearthquake phenomena present at archeological sites manifest as liquefaction, lateral spreading and landslides. Detailed geological observations may also contribute to a reduction in damage caused by big earthquakes.

Keywords: Earthquake archeology, archeological sites, trace of earthquake, active fault, liquefaction, Nankai Trough, Fushimi earthquake, Great Hanshin-Awaji earthquake

1 はじめに

地球の表面を被うプレートが押し合うことによって、地震を伴いながら細長い形で形成されたのが日本列島である。そして、この日本列島で暮らす人たちは、地震の被害を蒙り、生命の危険に曝され続けてきた。最近でも、2008年の6月14日に岩手・宮城内陸地震が発生しているが、1995年1月17日の兵庫県南部地震では6,434名の尊い命が失われた。

近い将来に目を向けると、東京周辺では首都圏直下型地震が懸念され、関東から九州にかけての太平洋沿岸地域では、東海地震・東南海地震・南海地震などの巨大地震が今世紀中に発生すると考えられている。

世界有数の地震国日本において、地震に関する対策は必須の問題であり、地震の場所・規模・時期に関する予知、さらに、被害予測と被害軽減対策などに関して、様々な視

点からの研究が行われている。一方で、地震研究の成果が社会に還元され、具体的に地震災害の軽減に結びつくためには、一般国民への地震の知識の普及も重要な課題である。

筆者は、地震の被害軽減を通じて社会に貢献することを目的として研究を進めてきた。日本列島に数多く分布する活断層を専門研究対象としているが、1986年以降、これまで地震研究と関連が無かった考古学の領域と連携した研究を展開するようになった。具体的には考古学の遺跡発掘調査で見つかる地震の痕跡を研究対象に取り入れることである。本稿では、このような研究の過程や成果の概要を紹介したい。

2 活断層に関する研究史

日本では、1960年代から、内陸地震を引き起こす原因と

産業技術総合研究所 関西産学官連携センター 〒661-0974 尼崎市若王寺 3-11-46
Kansai Collaboration center, AIST Nakoji 3-11-46, Amagasaki 661-0974, Japan E-mail : sangawa.a@aist.go.jp

Received original manuscript December 8, 2008, Revisions received January 23, 2009, Accepted January 28, 2009

しての活断層が本格的に研究されている。筆者は1970年代初めから活断層を対象として、関西圏を中心に、地形・地質学的手法を用いた研究を行った。当時は、知られている活断層も少なく、新たな活断層を認定して基本的な性質を調べる「活断層の発見と概査の時代」と言われている。

1976年、活断層に関わる30余名の研究者が活断層研究会を組織した。この研究会の目的は、日本列島各地に分布する活断層について、統一基準で個々の断層の性質を調べ、全体のカatalogを作成することである。筆者も、研究会の一員として、近畿・中国・四国地域を中心に調査を行った。4万分の1航空写真を活用して地形学的な見地から活断層の位置を推定し、地質調査によって断層の存在を確認する作業を行い、集成した成果が1980年に出版された^[1]。

1979年に通商産業省工業技術院地質調査所に入所したが、この年から『全国50万分の1活構造図』の編纂作業が始まり、調査を担当することになった。これは、日本全国を50万分の1の縮尺で15の地域に分割して、地質の概要と主要な活断層を記入したもので、地質調査所の構造図シリーズの一環として、1982年から1987年にかけて、15の地域が刊行された^[2]。

このような過程を経て、日本における活断層の全体像が概ね把握できるようになった。そして、研究者には、「活断層から地震が発生するメカニズムの追求」、「個々の活断層の性質をさらに詳しく探る」、「断層活動と地形形成の歴史を考える」など様々な視野から、一段階進んだ研究が求められるようになった。

3 新たな研究の展開

全国50分の1活構造図の編纂作業が終わりに近づいた頃、考古学の遺跡に注目することになったが、これは偶然に訪れた。

筆者は、琵琶湖に関する史料を収集する目的で、1986年の春、高島郡（現・高島市）今津町役場の町史編纂室を訪ねた。この時、今津町教育委員会による北仰西海道遺跡の発掘調査が行われており、発掘担当者と会話を交わ

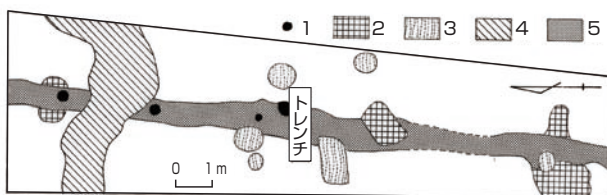


図1 北仰西海道遺跡で検出された地震の痕跡(文献^[3]に加筆)
1. 現代の杭跡 2. 土壙墓 3. 土器棺墓 4. 弥生時代の溝跡 5. 砂脈
トレンチと表記した箇所を掘削して液状化跡であることがわかった。

す機会があった。そして、発掘現場に砂の詰まった奇妙な割れ目が姿を現しており、過去の大地震と関わりを持つ存在ではないかという質問を受けた。

北仰西海道遺跡は縄文時代から弥生時代にかけての集団墓地として知られている。すぐに現場で確認すると、砂の詰まった幅約1mの割れ目が真っ直ぐに延びており、地面を掘り下げて地層の断面を観察すると、地下に堆積した砂層から砂が上昇して、割れ目の内部を満たしていることがわかった。つまり、この地域が激しい地震動に見舞われて、地下の砂層で液状化現象が発生し、上を覆う地層を引き裂きながら、地面に向かって噴砂が上昇した痕跡だった。

図1に示したように、縄文時代の古い墓は噴砂に引き裂かれていたが、新しい墓は逆に噴砂の上から設置されていることがわかった。引き裂かれた墓は地震より前、噴砂を覆う墓は地震より後となる。この遺跡で検出された墓は、穴を掘って遺体を埋めた土壙墓、甕に遺体を入れた土器棺墓の2種類で、遺体と一緒に埋葬した土器や墓に使った土器棺から墓の年代がわかった。これに基づくと、地震の年代は縄文時代晩期、考古学の編年では滋賀里Ⅲa期頃で、今から3千年余り前となった^[3]。

考古学の遺跡発掘調査で地震痕跡が見つかり、文字記録に無い地震が把握できたことに強い興味を抱いて、他の遺跡でも地震痕跡を探すことにした。京都府埋蔵文化財調査研究センターに問い合わせると、発掘調査中だった京都府八幡市の木津川河床遺跡にも同じような痕跡があるという情報を得た。

木津川河床遺跡では大規模な液状化現象が発生しており、幅1m前後の割れ目(砂脈)が地面を引き裂いて縦横に走っていた(図2)。ここから流れ出した噴砂は、南北朝や室町時代の地層を引き裂き、江戸時代の地層に覆われていたので、16世紀末頃の地震痕跡であるとわかった。

実は、1596年9月5日(文禄5年・慶長元年閏7月13日)に発生して京都などに甚大な被害を与えた慶長伏見地震に



図2 木津川河床遺跡の液状化跡
斜め方向に真っ直ぐのびる白い帯が砂脈(京都府埋蔵文化財調査研究センター発掘、寒川撮影)

ついて多くの文字記録が残されており、木津川河床遺跡の位置する八幡の集落でも家々がことごとく倒れたと書かれている。こうして、木津川河床遺跡では、記録に残る大地震が確かに存在した証拠を見つけることになった^[4]。

1986年当時の日本は経済の安定成長期で、交通網・居住地などの開発が盛んに行われていた。開発に伴って地下に埋蔵された文化財が破壊されることになり、これに対応する遺跡の発掘調査も膨大な件数に上っていた。この過程で、考古学の資料が蓄積され、土器などの遺物に関する編年作業が進み、個々の遺物の年代が精度良くわかるようになった。

しかし、遺跡の発掘調査の過程で、当然、見つかったはずの「地震の痕跡」に関しては、ほとんど関心が払われていなかった。発掘調査で地震痕跡が姿を現しても、考古学的には理解できない現象として、地震の産物という認識がないまま、多くは見逃されてきた。仮に、担当者が地震に関わる現象と気づいても、ごくわずかな場合を除いて、調査方法がわからずに放置される状態であった。

筆者は、1987年7月に、つくば研究学園都市から、大阪府中央区の合同庁舎にあった地質調査所大阪出張所に転勤した。古代・中世に都が置かれた関西圏では遺跡調査が盛んで、考古学に対する市民の関心も高かった。その後は、地震の痕跡が見つかった遺跡に頻りに足を運んで発掘調査に加わった。そして、発掘調査を担当する考古学者から調査の方法や遺物の年代を教わり、逆に地震に関する基礎的な知識を解説することになった。

1987年11月には、古代学研究会の大阪における研究講演会で地震痕跡の実例と基礎的な調査方法を紹介した^[5]。参加者からは、過去の遺跡調査で地震痕跡らしきものがあつたという話題が相次ぎ、反響は大きかった。その直後、考古学者からのアドバイスで「地震考古学」という名前をつけることにして、1988年春に日本文化財科学会と日本考古学協会で、この分野を正式に提唱した^{[6][7]}。さらに、翌年には考古学研究会の学会誌に地震考古学の基礎的な調査方法を紹介した^[8]。

地震考古学という名称を用いたことによって、遺跡の調査に携わる人たちが、地震痕跡も考古学の研究対象であると認識するようになった。遺跡の発掘調査の過程で地震痕跡が見つかった場合に、年代を絞り込み、さらに地震による人々への影響の痕跡などを検討する事例も増えた。そして、調査完了後に作成する遺跡報告書には、地震痕跡に関する詳しい記述がなされるようになった^[9]。

国立奈良文化財研究所（現・独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所）では、全国の自治体や埋蔵文化財センターから派遣された多くの発掘調査担当者が滞在し

て新しい研究法などの研修を受けるシステムがあり、1989年度からは、講師として筆者が地震痕跡の調査方法を指導するようになった。

4 研究の特徴

人々が生活した痕跡が地下に豊富に埋蔵されている地域や、文化財として貴重な建造物（古墳など）が、1950年制定の文化財保護法に基づいて「遺跡」に指定される。遺跡には、住居跡や溝跡などの遺構や、皿・茶碗・副葬品・農機具などの遺物が豊富に埋蔵されており、遺跡が開発によって破壊される場合には、建設工事に先行して考古学的な発掘調査が行われる。

日本の考古学は遺構や遺物に関する年代編年が進んでいるので、遺跡発掘調査で地震痕跡が見つかった場合、年代のわかる遺構や遺物との前後関係を考えることによって、地震痕跡の原因となった大地震の年代を絞り込むことができる。特に、弥生時代後期以降に相当する最近の2千年間は、遺構・遺物の考古学的な編年と絶対年代が概ね確定しており、地震痕跡について詳しい年代の把握が可能である。

地殻変動の激しい日本列島では、相対的に沈降する地域が、河川や海から運ばれた土砂で埋積されて平野や盆地となる。私たちの祖先は、平坦で水の得やすい場所に生活の拠点を構えてきたので、遺跡の大半は平野と盆地に集中し、古い年代の遺構・遺物ほど下位に埋積されている。

大きな地震が発生した場合、地盤の軟弱な地域の被害が著しく、北仰西海道遺跡や木津川河床遺跡で紹介した液状化現象の痕跡が見つかることが多い。この現象は1964年の新潟地震で現代都市が大被害を蒙ったことで注目を集め、1995年阪神・淡路大震災でもライフラインなどに甚大な被害を与えた。そして、液状化現象によって、地下水と一緒に地面に流れ出す砂が噴砂である。

地下に堆積した柔らかい砂層では、砂粒の間に隙間があり、強く揺れると、隙間を小さくするように砂粒が動いて砂層が縮む。この時に、隙間を満たす地下水が圧縮されて水圧を高め、上を覆う地層を引き裂きながら噴砂を含んだまま地面に流れ出す。噴砂の痕跡を模式化した図3では、噴砂が引き裂いた地層が地震の前、噴砂を覆う地層が地震の後に堆積したことになる。遺構・遺物を検討しながら、両方の地層の年代を絞り込むが、この図のように、噴砂に引き裂かれた（地震以前の）地層の最上部の年代が7世紀、噴砂を覆う（地震以後の）地層の最下部が8世紀とすると、この噴砂が7世紀から8世紀にかけての年代に発生した大地震の痕跡とわかる。

日本では、過去千数百年にわたる文字記録が残されて

おり、地震被害に関する記述も多い。1891年の濃尾地震を契機に震災予防調査会が生まれ、この活動の一つとして地震記録の収集作業が行われるようになった。現在までこの作業が継続しており^{[10] - [12]}、最近では歴史地震研究会を中心に地震史料に関する学際的な研究も進んでいる。被害記録には地震の年月日や時刻が記載されているので、遺跡の地震痕跡と文字記録を対比することによって地震痕跡の生じた年月日がわかる。

地震の痕跡が確認されると、寺社の記録や貴族の日記などの記述が裏付けられる。また、文字記録の絶対数が急減する江戸時代より前では、大きな地震が存在しても記録として残されていないことが多いので、遺跡の地震痕跡によって記録の空白が埋まる。さらに、文字記録の無い古墳時代以前では、地震痕跡の存在が地震の発見になる。

このように、歴史地震の記録と対比することによって地震痕跡の年代の精度が高まる。逆に、地震痕跡の存在が、文字記録に基づいている歴史地震の信頼性を高め、記録の無い時代まで地震の歴史を遡らせることになる。

5 研究成果の概要

日本における遺跡発掘調査の大半が開発に伴って実施されるので、どこで、どのような地震痕跡が見つかるかは偶然に支配される。発見された痕跡に合わせて研究を進めることになるが、これまでに得られた成果^{[13] - [16]}の中から、いくつかを紹介する。

5.1 文字記録が無い時代の地震

文字記録が存在しない時代の地震が明らかになった例として、琵琶湖周辺地域を取り上げる。前述のように北仰西海道遺跡で縄文時代の地震痕跡が見つかったが、その後、琵琶湖北西部にある高島郡新旭町^{しんあさひちやう}の湖岸から250m沖合で、滋賀県文化財保護協会が湖底遺跡（針江浜遺跡^{はりえはま}）の発掘調査を行った。湖底を約1m掘り下げた段階で、

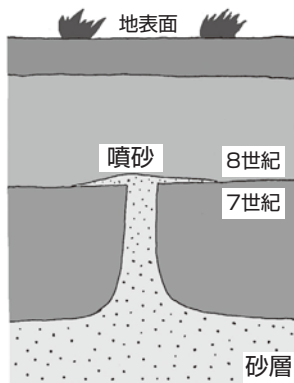


図3 液状化跡の模式図
図中の黄色の部分為砂

弥生時代中期の人たちが暮らしていた地面が見つかり、畦跡や耕作用具の他、横倒しになった柳の木々が検出された。この地面は、地下の砂層から流れ出した噴砂に覆われていたので、当時の湖岸にあった陸地が地震で水没し、その時の激しい地震動で液状化現象が発生したと考えられる。琵琶湖周辺の沖積低地では、同じ年代と考えられる液状化跡が他の多くの遺跡でも見つかっており（図4）弥生時代中頃の大地震で湖岸の一部が水没して琵琶湖周辺が激しく揺れた可能性が高い。

5.2 日本書紀に書かれた地震

地震という文字が最初に登場するのは『日本書紀』である。この中で、天武天皇7年条（679年）の筑紫地震に関しては、「地面が引き裂かれて、その広さが二丈（約6m）、長さが三千余丈（約10km）にも達し、どの村でも多くの民家が倒れた」と、被害が具体的に記述されている。しかし、『日本書紀』には歴史的事実の改ざんや中国史の模倣が多く、筑紫地震の記述についても検証が必要だった。

地震考古学誕生の1988年以降、当時の筑後国府跡を含む福岡県久留米市周辺の遺跡で地震痕跡が報告されるようになったが、7世紀後半の年代に限定されており、日本書紀に書かれた筑紫地震に対応した。そして、1992年には、久留米市東方で東西にのびる水縄断層帯^{みのう}の直上にある山川前田遺跡の調査で、この年代の断層活動の痕跡が見つかった。これらの結果、679年に水縄断層帯が活動して大地震が発生し、これが『日本書紀』に記録されたことが明らかになった。

『日本書紀』に登場する684年（天武天皇13年条）の地震は「夜の十時頃に大地震があり、国中の男も女も叫び合って逃げまどった。山は崩れ、河はあふれ、諸国の郡の官舎や民家・倉庫・寺社が壊れ、多くの人や家畜が死傷した。」

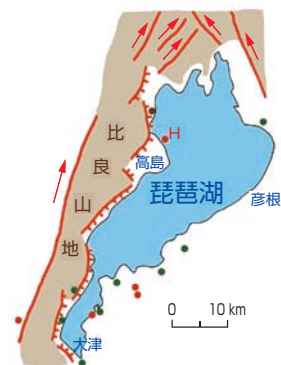


図4 琵琶湖周辺の地震痕跡

赤い線が活断層（ケバを示した側が相対的に下降し、矢印は横ずれの方向を示す）
緑色が中世から近世の地震痕跡を検出した遺跡、赤色が弥生時代の地震痕跡を検出した遺跡、茶色が縄文時代の地震痕跡を検出した北仰西海道遺跡、Hは針江浜遺跡

伊予の道後温泉の湯が出なくなった。土佐国(高知県)では田畑五十余万頃しろう(約一千町歩)が没して海となった。波が押し寄せて、調みつぎ(税)を運ぶ舟がたくさん流失した」と詳しく記述されている。

畿内を含む広い地域が激しく揺れて、道後温泉の湯が止まり、高知平野が沈降して、太平洋沿岸に津波が押し寄せるのは、太平洋海底のプレート境界である「南海トラフ」で発生する南海地震の特徴なので、684年に南海地震が発生したことがわかる。

5.3 南海トラフの巨大地震

南海トラフの巨大地震について、図5に年表を示した。トラフを西からA～Eと5区分しており、AとBで南海地震、CからEにかけて東海地震が発生する。後者については、昭和以降ではCとDで東南海地震、Eで想定東海地震と区別される。図5に西暦で示したのは、684年の南海地震のように、文字記録からわかる発生年である。

史料の豊富な江戸時代以降では、大きな地震の場合は、ほとんどが文字記録として残されている。対照的に、江戸時代より前では、史料の絶対数が激減するため、地震があっても記録が存在しないことが多い。図5に記入した西暦年代を見ると、江戸時代以降の地震の数が多くなるのはこの理由からである。

静岡県の浜名湖の東方に位置する袋井市の坂尻遺跡の調査では、7世紀中頃の住居跡が噴砂で引き裂かれていた。8世紀初めの建物群(郡衙)が噴砂の上に建築されていたので、7世紀後半に東海地域が激しく揺れたことがわかる。さらに、同じ年代の液状化跡が静岡市内の川合遺

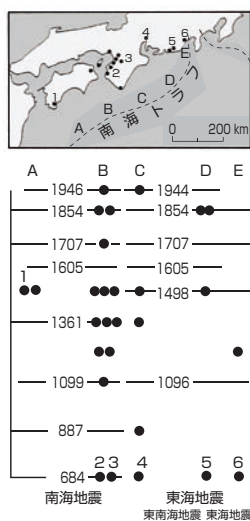


図5 南海トラフの巨大地震に関する年表(文献^[13]に加筆)
西暦年で示したのは記録からわかる発生年、●は遺跡で地震痕跡が見つかった遺跡
1. アゾノ遺跡、2. 川辺遺跡、3. 酒船石遺跡、4. 田所遺跡、5. 坂尻遺跡、6. 川合遺跡

跡、愛知県の田所遺跡で見つかっており、『日本書紀』に書かれた684年の南海地震と同じ頃に東海地震も発生した可能性が高い。また、684年の南海地震については、和歌山市の川辺遺跡や、奈良県の酒船石遺跡で対応する地震痕跡が確認されている。

一方、1498年に東海地震が発生したことが記録されているが、南海地震を示す史料は存在していなかった。しかし、1989年以降、四国の高知県四万十市のアゾノ遺跡や徳島県板野町の遺跡で、次々に15世紀末頃の液状化現象の痕跡が発見されたので^{[9][17]}、この年代に四国全体が激しく揺れる南海地震も存在したことがわかる。

このように、文字記録から考えられる地震の西暦年の他に、両地震のものと考えられる地震痕跡を図に書き込むと、南海トラフからの巨大地震は、かなり一定した間隔で、ほぼ同時、あるいは連続して発生している。

5.4 慶長伏見地震の全体像を探る

一方、大阪平野周辺では内陸地震の痕跡が数多く見つかっている。その大半が、中世の地層を引き裂き、近世の地層には被われているので、木津川河床遺跡と同様に1596年慶長伏見地震によると考えられる(図6)。地震痕跡には様々なタイプがあるが、木津川河床遺跡や内里八丁遺跡のように、京都盆地南部の地下水位の高い沖積低地では、大規模な液状化現象の痕跡が見られる(図7)。また、六甲山地南麓の住吉宮町遺跡などでは、液状化現象に伴って地盤が横方向に流れ動いた側方流動の痕跡が見ついている。高槻市の今城塚古墳や神戸市の西求女塚古墳では、古墳の墳丘が地滑りで大きく変形していたが、滑り落

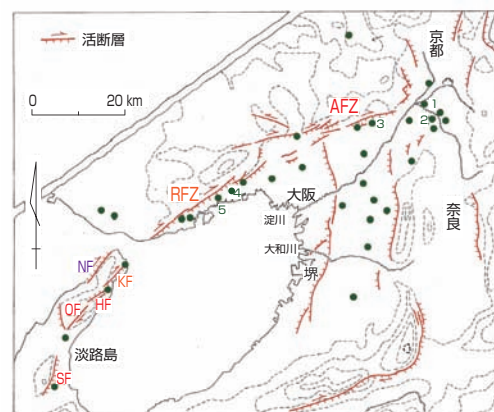


図6 伏見地震によると考えられる地震痕跡(文献^[16]に加筆)
●で示したのが、伏見地震の痕跡が見つかった遺跡
1. 木津川河床遺跡、2. 内里八丁遺跡、3. 今城塚古墳、4. 住吉宮町遺跡、5. 西求女塚古墳
1995年兵庫県南部地震で活動したのが、NF:野島断層、1596年伏見地震で活動したのがAFZ:有馬-高槻断層帯、HF:東浦断層、OF:野田尾断層、SF:先山断層、伏見地震で活動した可能性が高いのが、RFS:六甲断層帯、KF:楠本断層

ちた墳丘盛土が覆い被さった地層の年代から慶長伏見地震の痕跡とわかった。

この地震については、寺社や公家の日記に、京都では伏見城の天守閣が崩れて、東寺・大覚寺・天龍寺・二尊院などが倒壊し、大坂や堺の町屋が大被害を受け、兵庫（現在の神戸）では建物が倒壊した後に火事で燃えたことが書かれている。また、後述のように、活断層の発掘（トレンチ）調査から、この地震が有馬-高槻断層帯や淡路島の活断層などによって引き起こされたことがわかった。

慶長伏見地震の場合、活動した断層が判明し、文字記録から城郭・寺社・民家の被害がわかる。これに遺跡の地震痕跡から把握できる地盤災害を加えると、地震の全体像を三つの視点から把握できる。

5.5 液状化現象に関する新知見

1964年の新潟地震以降に液状化現象が注目されるようになったが、地面に流れ出した噴砂については、地震発生直後に誰もが観察できる。しかし、噴砂を供給した本来の砂層や、地下を上昇する過程の噴砂についての知識は乏しく、従来は地下のボーリング調査資料からの推測に留まっていた。しかし、遺跡で液状化跡が見つかった場合、地下を掘り下げて地層の断面を観察できるので、これまで不明だった次のような基礎的な事実が把握できるようになった。

例えば、液状化現象が発生した際に噴砂を供給した砂層の深さについて、ほとんどが数10 cmから2 m程度であり、一般的に考えられていたよりも浅い位置であった。また、液状化現象は砂層で発生すると考えられていたが、礫（小石）の比率の多い砂礫層が液状化して大量の礫が砂脈内を上昇した事例も遺跡で見つかっている。図8は琵琶湖湖底の針江浜遺跡で観察された液状化現象の痕跡である。礫を多く含む砂層で液状化現象が発生しているが、地下水

と一緒に砂や礫が上昇する際に大きな礫は取り残されている。この場合、地表での観察だけで判断すると、礫を含まない砂層で液状化現象が発生したことになるが、実際は、そうではない。このように、液状化現象が発生した地層が流動して、噴砂が地上に達するまでを連続的に観察することによって基礎的な知識が得られる。

6 阪神・淡路大震災

1995年1月17日の兵庫県南部地震は、地質調査所1990年発行の5万分1地質図幅「明石」に示した野島断層の活動によって生じた^[18]。この断層の位置や活動の様式は図幅の説明書に正しく記載していたが、説明書執筆時は将来の活動時期を考察し、その断層の活動によりもたらされる地震災害の規模を予測できる段階には達していなかった。

阪神・淡路大震災を契機として活断層の重要性が認識され、政府の組織として、当時の科学技術庁（現・文部科学省）に地震調査研究推進本部が設置された。そして、全国の主要な活断層について、正確な位置や活動の性格、さらに、これまでの活動履歴を調べて将来の活動を確率的に予測し、活動によりもたらされる地震動の大きさ・広がり予測する国家的プロジェクトが開始された。これを工業技術院地質調査所や科学技術庁・全国の自治体・大学が分担して調査研究を実施した。

京都盆地南西部から大阪平野北縁を通して淡路島に至るまで、多くの活断層が帯のように連なっており、その中の野島断層（図6のNF）が主に活動して兵庫県南部地震を引き起こした。大震災の直後から、もし他の活断層が長い間活動していなくてエネルギーが十分に蓄積されているなら、今回の地震と連動する形で、さらに大きな地震が近いうちに発生するのではないかという懸念が持ち上がり、大阪平



図7 内里八丁遺跡の液状化跡
（八幡市教育委員会発掘、寒川撮影）

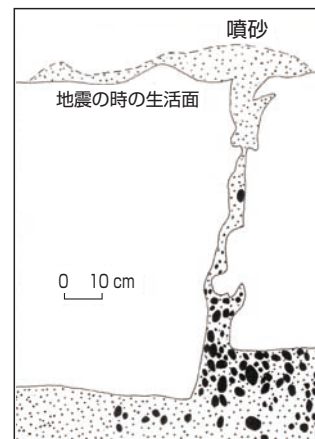


図8 針江浜遺跡の液状化跡
砂礫層で液状化現象が発生しているが、大きな礫は地面まで達していない。

野北部に居住する多くの市民に不安が広がっていた。

しかし、京阪神・淡路全域の多くの遺跡から1596年の慶長伏見地震の痕跡が見つかっており(図6参照)、この資料に基づけば、懸念される活断層が399年前の地震で活動していたことになる。さらに、1995年度に地質調査所が実施した活断層のトレンチ調査によって、有馬-高槻断層帯(図6のAFZ)など、大阪平野北縁から淡路島東岸にかけての多くの断層が慶長伏見地震で活動していたことが明らかになった^[19]。有馬-高槻断層帯のもう一つ前の活動が3千年前頃というトレンチ調査の結果^[19]も合わせて、「兵庫県南部地震に続いて、京阪神地域を壊滅させるほどの大型地震が発生する」という懸念は解消されることになった。

一方では、阪神・淡路大震災によって、寺院や神社の建物が倒壊して仏像などの文化財が被害を蒙り、展示していた考古学の遺物の多くが破損したため、歴史学や考古学の分野でも、文化財に関する地震対策や地震後の救援活動の必要性が叫ばれるようになった。

被害の著しかった阪神・淡路地域では迅速な震災復興が必要となったが、この事業に伴う建設工事が埋蔵文化財の破壊を伴うため、遺跡の発掘調査件数が一気に増加した。緊急の処置として、全国の自治体に所属する多くの考古学者が、発掘調査支援のために兵庫県下に派遣されることになり、地元の考古学者たちと共同で遺跡調査を担当することになった^[20]。

各地から被災現場に派遣された考古学者たちは、この震災での被害を詳しく知り、地震に関する基礎的な知識を学んだ。さらに、阪神・淡路地域の遺跡を発掘する過程で、慶長伏見地震の痕跡が数多く発見されたので^[21]、これまで地震痕跡に接することの無かった人たちも基礎的な調査方法を習得することになった。

このような地震痕跡に対する関心の高まりを受けて、全国の考古学者が分担して地震痕跡のカタログ「発掘された地震痕跡」を編集・刊行した^[22]。さらに、季刊「古代学研究」は毎号で地震痕跡を特集する企画を開始して現在も継続している^{[17][23]}。

前述の50万分の1全国活構造図シリーズについては、阪神・淡路大震災で注目された「京都」地域が全面的に改定されて第2版が刊行された。この中の「古地震データ図」には、慶長伏見地震や、南海トラフからの巨大地震の痕跡などが、対応する地震がわかるように色分けして表示されている^[24]。

7 今世紀の地震に向けて

兵庫県南部地震の直後、被災地で多くの人たちと接したが、ほとんどの市民が「関西には地震が無い」と思ってい

たことは大きな衝撃だった。現実には、この地域には活断層が多く、約400年前の慶長伏見地震でも甚大な被害を蒙っている。同時に、研究者レベルで持ち合わせている地震の知識が広く市民に伝わっていたら、被害も軽減されたであろうという思いを強くした。

南海トラフからの巨大地震について、文字記録に地震痕跡の資料を加えて作成した年表(図5)によると、21世紀、それも中頃までに南海地震・東海(東南海)地震が発生することがほぼ確実となる。さらに、これらの巨大地震が、同時、あるいは、連続して発生する可能性が高いと考えられる。これに加えて、南海地震などが発生する数10年前から地震の多くなる時期(活動期)が存在し、兵庫県南部地震以後、この時期に入ったと言われている^[25]。

このように、今世紀に入って、地震に対する対策が、ますます重要視されており、研究・行政諸機関もこれに取り組んでいる。このような流れの中で、一般市民への普及活動に遺跡の地震痕跡を活用することが特に有効であると思われる。

一例として、奈良県南部の飛鳥にある高松塚古墳を挙げる。この古墳の石室で1972年に発見された極彩色の飛鳥美人の壁画は考古学ブームの火付け役となった。最近の調査で、高松塚古墳の墳丘には地割れが多く刻まれ、石室にも亀裂が及んでいることがわかった^[26]。原因は、南海トラフから繰り返し発生した巨大地震である。2006年になって、壁画の劣化を防ぐ目的で石室が解体され、この作業に伴う発掘調査の成果が、連日、新聞・テレビで報道された。これに合わせて、高松塚古墳を傷つけた地震痕跡の報道も行われ、多くの市民が「南海トラフの巨大地震が近づいており、飛鳥は言うまでもなく、広い範囲が大きな揺れに見舞われる」という知識を得た。

一般市民は地震のメカニズムなどについて難解というイメージを抱いている。しかし、遺跡に現れた地震痕跡を見ることによって、自分が住んでいる地域で過去に大地震が存在し、このような地変が刻まれたという事実を容易に理解できる。考古学の遺跡発掘調査が行われると市民に対する現地見学会が実施され、多いときには数万人規模の人たちが訪れる。地震考古学の提唱以来、地震痕跡も見学の対象になり、その都度、報道されているので啓発としての効果は大きい。

筆者は講演・イベントなどで、一般市民を対象にして地震の話をする機会が多い。この時に、遺跡や歴史と関連づけることが、地震に対する関心が低かった人たちへの啓蒙を容易にしている。最近では、小学校などの生徒を対象にして地震の授業を行う機会も増えたが、親しみやすい遺跡の地震痕跡などを教材に用いることが学習効果を高めている。

この研究を始めてから20年余が経過したが、遺跡の調査で見つかった地震の痕跡を調査対象とする意識が考古学者の間に浸透し、基礎的な調査方法も普及している。この意味では、当初の目標は達せられたと思う。この分野に関する一般市民向けの普及書も執筆した。特に、1992年に出版した著書^[13]で、研究成果の紹介とともに、遺跡の地震痕跡の調査法を示したが、これによって、多くの読者が地震考古学に関心を持つことになった。さらに、縄文時代以降の日本における地震の歴史の紹介も試みた^[16]。

地震に関連した諸分野、特に地質学・工学関係の研究者に対しても、一見無関係に見える考古学の遺跡が研究対象になり得るという意識が浸透しつつあり、新たな視点からの研究が行われるようになった。

著者は東京大学生産技術研究所・京都大学防災研究所の客員教授などを兼任したが、この間にも地震工学・地盤工学などの研究者と連携して研究を行っている。

一例として、静岡県元鳥遺跡では、先述の針江浜遺跡の事例のように、液状化現象が発生した砂礫層から砂だけが噴砂として流れ出した痕跡を観察できた^[27]。この他、液状化現象に関して、遺跡から得られた様々な知見が、工学関係の研究者にも広く普及しつつある^[28]。

また、地滑りによって墳丘の盛土が滑り動く様子が連続的に観察できた今城塚古墳では、数値解析などを含めた共同研究を行った^[29]。この他、西求女塚古墳・高松塚古墳などでも、工学系の研究者とともに地滑りや地割れの痕跡を研究している^{[30]-[32]}。

今後、遺跡を用いた研究が進展することに期待しつつ、成果のさらなる普及・啓発に尽力したい。

参考文献

- [1] 活断層研究会編：日本の活断層 分布図と資料，東京大学出版会，東京（1980）。
- [2] 通商産業者工業技術院地質調査所編：1:500,000全国活構造図シリーズ（1982-87）。
- [3] 寒川 旭，佃 栄吉，葛原秀雄：滋賀県高島郡今津町の北仰西海道遺跡において認められた地震跡，*地質ニュース*，390，13-17（1987）。
- [4] 寒川 旭，岩松 保，黒坪一樹：京都府木津川河床遺跡において認められた地震跡，*地震*，2（40），575-583（1987）。
- [5] 寒川 旭：考古学の研究対象に認められる地震の痕跡，*古代学研究*，116，1-16（1988）。
- [6] 寒川 旭：地震考古学の提唱，*日本文化財科学会会報*，16，19-26（1988）。
- [7] 広瀬和雄，寒川 旭，藤永正明：遺跡から発掘された地震跡—東大阪市西鴻池遺跡を中心として—，*日本考古学協会第54回総会研究発表要旨*，72-75（1988）。
- [8] 寒川 旭：地震考古学の展望，*考古学研究*，141，95-112（1989）。
- [9] 高知県教育委員会：後川・中筋川埋蔵文化財発掘調査報告書Ⅱ，*風指遺跡・アソノ遺跡*（1989）。
- [10] 文部省震災予防評議会編：増訂大日本地震史料，全3巻（1941-1943）。
- [11] 東京大学地震研究所編：新収日本地震史料，全5巻・別巻・補遺・続補遺（1981-1994）。
- [12] 宇佐美龍夫：最新版日本被害地震総覧[416]-2001，東京大学出版会，東京（2003）。
- [13] 寒川 旭：地震考古学 遺跡が語る地震の歴史，中央公論社，東京（1992）。
- [14] 寒川 旭：遺跡に見られる液状化現象の痕跡，*地学雑誌*，108，391-398（1999）。
- [15] 寒川 旭：遺跡で検出された地震痕跡による古地震研究の成果，*活断層・古地震研究報告*，産業技術総合研究所地質調査総合センター，1，287-300（2001）。
- [16] 寒川 旭：地震の日本史 大地は何を語るのか，中央公論新社，東京（2007）。
- [17] 菅原康夫：徳島県下の遺跡にみる地震の痕跡，特集 地震の考古学13，徳島県，*古代学研究*，145，26-29（1999）。
- [18] 水野清秀，服部 仁，寒川 旭，高橋 浩：明石地域の地質，地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)，地質調査所（1990）。
- [19] 地質調査所：平成7年度活断層研究調査概要報告書，*地質調査所研究資料集*，259（1996）。
- [20] 阪神・淡路大震災と埋蔵文化財シンポジウム実行委員会編：震災を越えて「阪神・淡路大震災と埋蔵文化財」シンポジウムの記録，株式会社エビック（2001）。
- [21] 寒川 旭，菅本宏明，齋木 巖，内藤俊哉，藤井太郎：阪神・淡路大震災以後に神戸市内で検出された地震の痕跡：日本考古学協会65回総会研究発表要旨，161-164（1999）。
- [22] 埋文関係救援連絡会議・埋蔵文化財研究会編：発掘された地震痕跡（1996）。
- [23] 服部敏之：愛知県の地震と遺跡，特集 地震の考古学12，愛知県，*古代学研究*，144，52-61（1998）。
- [24] 寒川 旭，佐竹健治，関口春子，水野清秀，杉山雄一：古地震データ図.50万分の1活構造図「京都」（第2版）説明書，産業技術総合研究所地質調査総合センター，17-19（2002）。
- [25] 尾池和夫：活動期に入った地震列島，岩波書店，東京（1995）。
- [26] 寒川 旭：地震の痕跡について，独立行政法人文化財研究所奈良文化財研究所，*高松塚古墳の調査*，44-47（2006）。
- [27] 寒川 旭，小長井一男，伊藤寛倫：元鳥遺跡で検出された液状化現象の痕跡，*「元鳥遺跡」Ⅱ*，213-221（2005）。
- [28] 小長井一男：地盤と構造物の地震工学，東京大学出版会，東京（2002）。
- [29] 伊藤寛倫，小長井一男，沼田宗純，山口直也，寒川 旭：古墳に残された地震地すべり痕跡の工学的調査，*第27回地震工学研究発表会*（2003）。
- [30] 釜井俊孝：墳丘における地すべりのメカニズム，*西求女塚古墳発掘調査報告書*，235-236（2004）。
- [31] 釜井俊孝：カヅマヤマ古墳の基礎地盤と地震応答解析，*カヅマヤマ古墳発掘調査報告書*，97-100（2007）。
- [32] 三村 衛，石崎武志：墳丘の土質・地盤調査，独立行政法人文化財研究所奈良文化財研究所，*高松塚古墳の調査*，40-43（2006）。

執筆者略歴

寒川 旭（さんがわ あきら）

1979年3月東北大学大学院理学研究科博士課程修了（理学博士）、同年4月通商産業者工業技術院地質調査所入所。2001年4月産業技術総合研究所主任研究員。2007年4月より同所招聘研究員。この間、2002年4月から2004年3月まで東京大学生産技術研究所客員教授、2005年4月から2008年3月まで京都大学防災研究所客員教授。主に活断層の研究に携わり、1988年に地震考古学を提唱してからは考古学との境界領域の研究を行っている。平成12年度工業技術院長賞受賞。



査読者との議論

議論1 「地震考古学」の普及活動について

質問・コメント (佃 栄吉:産総研研究コーディネータ)

寒川さんの研究成果は、広く社会に認知されマスコミからも継続的に注目され、マスメディアを通して地震災害軽減の普及に貢献されていると思います。地震研究は近年急速に進歩していますが、本格研究として成果が社会に還元され実際に地震災害軽減に結びつくためには、一般国民の地震に対する理解の向上が不可欠で、正しい理解のもとでの長期的(地震に強い住環境など)対策、短期的(地震発生直後)行動に結びつく必要があります。寒川さんの研究はまさに、本格研究として地震災害軽減分野において、非常に重要な貢献だと思います。マスメディアとの連携の経験を通じた普及活動について、ご意見を開陳していただければと思います。

回答 (寒川 旭)

ご指摘のとおり、マスメディアを通じた普及活動は重要と思います。研究者の講演・著書で専門的な知識を市民に正確に伝えることができますが、多くの人に伝えるという点では新聞・テレビ・ラジオ報道に比べて格段の差があります。その意味で、マスメディアは、研究者と一般市民を繋ぐ架け橋の役割を担っており、研究成果などを広く伝えてくれる大切な存在です。取材があった場合には、十分な説明を行って、こちらの意図が正しく伝わるように心がけていますし、必要に応じて専門的な知識をわかりやすく解説して質の高い報道にしてもらえよう努力しています。産業技術総合研究所、特に、私の身近で地震に関わる研究を手がけている地質調査総合センターの方たちも取材に対しては丁寧に対応していると感じています。

日本列島で暮らす限り、地震に遭遇して命を奪われる可能性がありますから、誰もが地震に関する必要最小限の知識を持つ必要があります。しかし、積極的に知識を得ようとしている人たちは多くありません。地震を難しい現象と考えて、敬遠しがちな人々への普及活動こそが大切と思っています。このための手段の一つとして、一般市民にとって興味を持ちやすいテーマとセットにした啓発を心がけています。古墳などの文化財や歴史上の有名な出来事などと、地震との接点を見つけて、関連づけて報道してもらおうと啓発の効果が高まります。

議論2 「地震考古学」の構成プロセスについて

質問・コメント (小野 晃:産総研副理事長)

考古学と地震学とを融合した優れた研究で、新たな研究領域の創出に成功していると思います。異なる2つの学問領域からどのような過程を経て新しい融合領域を創出したかを図なども用いて説明していただけないでしょうか。

回答 (寒川 旭)

図aを作成してみました。考古学と地震学の融合ということですが、地質学の方法論を主体とした地震学ですので、図の左で地震学の下に地質学と小さく併記しました。

考古学の遺跡調査では、地表面から下に向かって発掘を進めて遺構と遺物を掘り出し、考古学的手法によって年代を求め、古記録や古文書との対比を行います。この結果、その地域の歴史に新しい知見を加えることになります。

地震学は、含まれる分野も方法論も多岐にわたるので、図aでは項目として研究対象を挙げました。プレート境界、活断層のように地震が発生する場所。さらに、液状化現象や地滑りのように地震によって生じる地変。両方の研究が進展することが、地震の予測や被害の軽減にとって必要です。

地震考古学では、遺跡で地震痕跡が見つかった時がスタートです。遺構・遺物の年代を用いて地震痕跡の年代を求め、資料を蓄積して地震史を組み立てます。最近では活断層の履歴調査が進展していますが、断層活動に対比できる地震痕跡も多く見つかります。プレート境界・活断層について、それぞれの地震発生史が、将来の発生を予測するための基礎資料となります。一方、液状化現象については砂が流れ動いた痕跡を観察することで新たな知見が得られます。古墳などのように、本来の形がわかる建造物の地滑り痕跡は、地滑りのメカニズムを考えることに役立ちます。

考古学では、地震痕跡そのものが、かつては、意味不明な謎の存在でした。また、地震痕跡が生じた年代を境に集落が消滅・衰退し、湖底から過去の生活を示す遺構が掘り出される、奇妙な形の古墳が存在するなど、考古学の謎のいくつかは、地震という概念を取り入れることで解決できます。また、地震痕跡が豊富で、地震の全体像がよくわかる場合、例えば、679年筑紫地震、1596年慶長伏見地震などは、地震痕跡が西暦年月日を示す指標として、逆に、考古学の細かな年代推定に役立ちます。

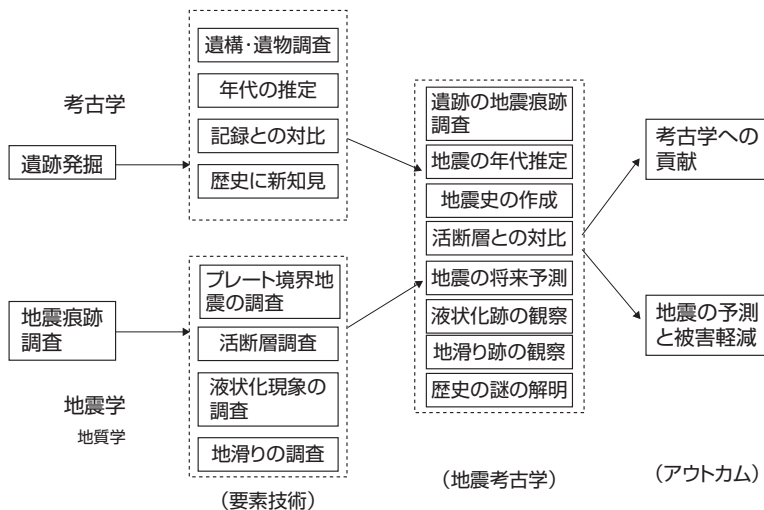
議論3 液状化以外の地震痕跡について

質問・コメント (小野 晃)

本論文では遺跡に対する巨大地震の痕跡として主として液状化現象が述べられていますが、その他の痕跡もあるのでしょうか。

回答 (寒川 旭)

遺跡の調査では液状化現象の痕跡が特に多く見つかります。液状化現象は地下水の豊富な柔らかい砂層で発生します。私たちの祖先は水の豊かな平野地域を生活の拠点としていますから、居住地の周辺でこの現象の痕跡が多く見つかります。そして、液状化現象で地面に流れ出した噴砂の痕跡によって地震の年代を特定することができます。



図a 地震考古学における構成のプロセス

す。その他、少し小高い位置に造られることの多い古墳などでは地滑りや、地震動に伴う地割れが見つかります。679年筑紫地震のように、地震を引き起こした活断層の真上で遺跡調査が行われて、断層活動の証拠が見つかることもあります。

議論4 地震の規模の推定について

質問・コメント（小野 晃）

図5は南海トラフの過去の巨大地震を示していますが、地震考古学の手法で推定できる地震の規模（マグニチュード）ほどの程度のものでしょうか。

回答（寒川 旭）

どこかの遺跡で地震痕跡が見つかった場合、その場所の震度については考察できます。同じ地震の痕跡が広い範囲の複数の地点で見つかり、激しい震動を被った地域の広がりがあり、地震の規模も推測できるようになります。南海トラフの巨大地震の場合、文字で書かれた被害の記録が豊富なため、それを参考にして、規模などを考えることになります。最近では、津波の痕跡の研究が進んでおり、津波の痕跡からも巨大地震発生の履歴がわかるようになっています。強震動と津波の両面から把握できることが望ましいと思います。

議論5 外国の地震への適用について

質問・コメント（小野 晃）

外国で起きた地震に対しても地震考古学を適用することは可能とされますが、日本と比べて異なる点はありますか。

回答（寒川 旭）

日本は世界でも特に発掘件数が多く、考古学の編年が進歩してい

ます。人口密度が高いですし、家屋などが木で建築され、壊れやすい土器や陶磁器を使っていることが、生活更新のサイクルを短くして、細かな編年を可能にしています。また、過去千数百年におよぶ膨大な文字記録があり、これとの対比が考古学的な編年の精度を高めています。もちろん、世界有数の地震国ですし、水の豊富な平野に住んでいるので、液状化現象の痕跡も沢山見つけられます。ですから、考古学と連携して地震の歴史を調べるには最も適した国土と言えます。日本と同じようにはいかないかもしれませんが、遺跡を使って地震を調べるという視点は、どの国にでも当てはまりますので、その国の状況に合った手法を考えながら、適用することは可能だと思います。

議論6 文系と理系との分野融合について

質問・コメント（小野 晃）

地震考古学は、文系と理系という相当の距離がある2つの学問を取り扱っている融合領域と考えられます。古文書の解読などは理系研究者に対して困難な要因にはなりませんでしたか。その他文理融合における要点があればお聞かせください。

回答（寒川 旭）

古文書・古記録を読むことは理系研究者にとってかなり困難な事柄だと思います。ただ、日本では明治以降に、地震に関する古記録の収集が進んで活字化されていますので、ある程度まではわかります。私自身は、考古学はもちろんですが、国文学や日本史が好きなので、古文書・古記録を読むことは、結構、楽しいものです。ただ、専門的な訓練を受けていないので、そのハンディはありますが、読み慣れるに従って理解が進んできたように思います。いずれにしろ、文理融合に関しては、相手方の分野を好きになるのが必須の条件だと思います。

ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定

— 計量トレーサビリティ体系の構築と標準化 —

大澤 尊光*、高辻 利之、佐藤 理

近年、製造業では効率的なものづくりを行うため、設計、製造、評価の全過程で一貫したデジタルデータによる作業が行われている。製品の形状の評価に多用される三次元測定機は製品の質を確保するための重要な要素の1つであるので、形状測定の信頼性を向上させるため、長さの国家標準にトレーサブルな校正体系を我が国に構築し、あわせて校正方法の標準化を行った。この中で産総研は高精度の国家計量標準を開発するだけでなく、三次元測定機の校正事業者のための技術基準を作成し、また地域の公設研究所に技術支援を行って我が国全体の三次元測定の信頼性を向上させた。これらの活動は、我が国産業界における三次元測定の精度を世界トップレベルとすることに貢献している。

キーワード：三次元座標計測、三次元測定機、計量標準、トレーサビリティ、デジタルものづくり

High accuracy three-dimensional shape measurements for supporting manufacturing industries

– Establishment of the traceability system and standardization –

Sonko Osawa*, Toshiyuki Takatsuji and Osamu Sato

Digital engineering technique has widely been used for speedy and effective manufacturing of industrial products. Coordinate measuring machines (CMM) are being used for measuring three-dimensional shapes of products and taking an important role to keep the quality of the products high. National Metrology Institute of Japan (NMIJ/AIST) has established the traceability system of CMM, that is, measurement results by CMM are traceable to the national standards of length. To achieve this objective, not only calibration techniques have been developed, but industrial standards (ISO and JIS) and guidelines to which accredited laboratories should conform were documented. In addition, to raise the calibration capabilities of prefectural laboratories and to contribute to the local industries, technical supports have been provided by NMIJ.

Keywords: Three-dimensional coordinate measurement, coordinate measuring machine, measurement standard, metrological traceability, digital engineering

1 はじめに

戦後の日本は製造業の発達により国富を増してきた。特に自動車をはじめとするものづくり産業は、日本経済の要を担ってきた。ものづくりにおいては、設計、製造、評価を行い、製品を完成させる。近年のものづくりは、図1のように設計、製造、評価をすべてデジタルデータにより行っている。CAD (computer aided design) 及び CAE (computer aided engineering) を利用して設計を行った後、その設計データを CAM (computer aided manufacturing) に送って、製造を行う。製造された製品は CAT (computer aided testing) を利用して測定され、その測定データを設計・製造工程にフィードバックさせ、実データに基づく解析・設計、製造プロセスの改良を行うといった一連の循環的流れが確立されている。このデジタルデータによるものづくりシステムの発達により、従来よりも試作品の製造日数を大幅に短縮

することが可能となった。このようなデジタルものづくりシステムにおいて、製造された製品の形状の評価には、三次元測定機 (coordinate measuring machine) がしばしば使用

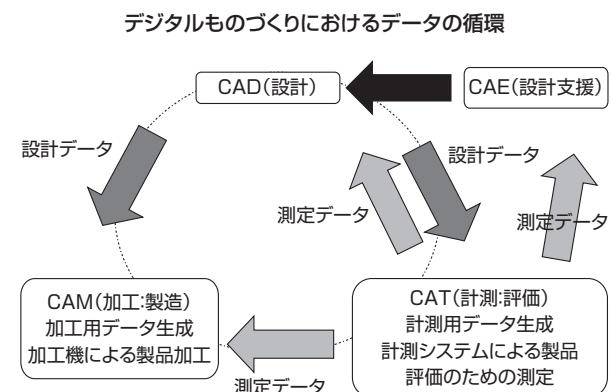


図1 デジタルデータによるものづくり

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, Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8563, Japan * E-mail: sonko.osawa@aist.go.jp

Received original manuscript December 12,2008, Revisions received January 27,2009, Accepted May 11,2009

される。三次元測定機は万能測定機とも呼ばれるように様々な三次元形状（位置、寸法や幾何公差（真直度、真円度、円筒度、直角度等））を測定することが可能である。

ここで三次元測定機の代表的なものについて、その概略の機能を見ておくことにする。三次元測定機は、図2に示すように、測定物の表面に接触することによりその座標値を検出するためのプロービングシステム、直交するX・Y・Zの三軸に沿ってプロービングシステムを直線移動させるためのガイド、移動量を検出するためのものさしであるスケール、座標変換や測定機を制御するためのコンピュータ等から構成されている。三次元測定機は、プロービングシステムに取り付けられた接触子（スタイラス）が接触できる範囲が測定空間であり、二点間の距離だけでなく、測定物もつ幾何形状の特徴量（例えば、円ならば直径、真円度、中心座標）を測定点群から最小二乗法ではめにより算出することも可能である。

かつて三次元測定機は高価で操作に高度な技能が必要であったため、大企業でも試作部門や品質保証部門にしか導入されていなかったが、ものづくりのデジタル化、製品への高い品質保証要求、アジア諸国の工業製品との差別化などが原因となり、現在は、製造ラインや町工場等にも次々と導入され、製品の品質保証に利用されるようになってきた。三次元測定機は測定物を設置し、測定プログラムを一度構築すると、あとはコンピュータ制御で装置を駆動するだけで測定が終了する。このため、企業によっては、ルーチ的な作業を行う測定者だけを常駐させて、プログラム作成等の高度な作業は測定機メーカーに依存し、測定コストを削減しているところが増えてきている。しかし、三次元測定に関する専門知識を持たない測定者による測定と専門知識を有する測定者による測定とは、明らかに差が生じることが分かっている。これは、測定物の保持や配置の方法、周囲温度など、測定に影響を及ぼす要因に関する知識と対処の能力が異なるためである。このような状況の中

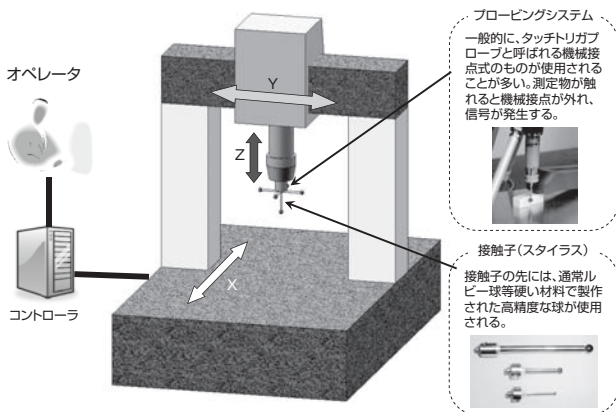


図2 三次元測定機の概略

で三次元測定の信頼性を高めるには、多量の知識と訓練を要求することなしに、測定者の技術能力を向上させられるような仕組み作りが最も重要である。

過去の日本においては、系列化された企業グループ内で製造プロセスが完結していたため、各企業グループ内で製品の信頼性確保のための体制が比較的良好に構築されていた。しかし、近年より安く良質の部品を国内外から調達したり、さらに人件費の安い海外での生産が増加したりするのに伴って、部品調達のグローバル化が進み、グループ内における信頼性確保の体制が崩れてきている。例えば、A社から納品された部品の寸法とB社から納品された部品の寸法が微妙に合わないため、組み立ての際に不具合が生じるなどの問題が起こる。このため、系列企業グループ内で構築されていた信頼性確保の体制に代わる、何らかの公的な支援体制が必要となった。

このような新しい状況の下で本研究では、ものづくり産業を支える最も基盤的な技術の1つである三次元形状測定の信頼性を高めるために必要な技術開発を行うこと、そしてそれを産業現場に波及させるための公的な仕組み作りを目標とした。

2 シナリオ

2.1 信頼性向上のシナリオ

産総研による研究開発成果をものづくり産業における広い裾野の隅々まで行き渡らせるためには、研究成果を現場まで届けるための体制作りが重要である。高精度な国家計量標準を立ち上げることをはじめとして、それを産業現場に広く展開するためのシナリオをあらかじめ作成した。図3に三次元形状測定の信頼性向上のために考案したシナリオを示す。

産総研では国家標準の整備として、標準器の開発、標準器等の校正手法の開発、さらに高精度な次世代標準の開発を行い、これらを利用してものづくり現場の三次元測定機を校正することにより、三次元測定の信頼性を向上させる。確立された国家標準は、他国の国立標準研究所との間で国際比較と呼ばれる測定値の比較を行うことにより同等性を確認し、その標準に基づく測定値の整合性が世界的に認められる。確立された標準を日本国内に普及させるために校正事業者登録制度を構築し、校正事業者による校正サービスを通してものづくり現場へと標準を展開する。地域の中小企業等の競争力向上のため各県の公設研究所等へ高精度測定のための教育や技術支援を行う。また、三次元測定機の評価法や新しい三次元形状測定法の標準化、産業現場の三次元測定機をより簡単な手順で校正するための遠隔校正技術開発等を行うことで、ものづく

り現場における三次元形状測定の信頼性を向上させる。さらに、国内だけでなく途上国に進出した日本企業への支援として、途上国の国立標準研究所への技術支援を行う。このようなシナリオを明確にすることで、国内のものづくり産業の国際競争力向上を目指した。

2.2 トレーサビリティの確保と開発目標

三次元形状測定の信頼性を客観的に示すことは、国家標準へのトレーサビリティを確保することで達成される。産総研では、10 数年前から三次元測定のトレーサビリティ体系の構築を目的として技術開発を行ってきた。これらの技術開発を長さのトレーサビリティ体系とともに示すと図4のようになる。三次元測定では、長さの国家標準であるよう素安定化ヘリウムネオンレーザにトレーサブルな体系となる。製造された製品の形状は、三次元測定機により評価され、その三次元測定機は、さかのぼると、ブロックゲージやボールプレートと呼ばれる標準器により校正され、またその標準器は安定化ヘリウムネオンレーザを使用したレーザ測長器により校正され、さらにレーザ測長器は長さの国家標準であるよう素安定化ヘリウムネオンレーザで校正されているというように上位の標準に切れ目無く連鎖する流れとなる。

このトレーサビリティ体系を産業現場において実用的に

運用するために、新たに開発を必要とする項目として、①標準器の校正システムに加えて、②民間の校正事業者の登録システム、③標準器を用いた三次元測定機の評価方法の標準化、④測定者の能力向上のための教育システムの4つを設定した。三次元測定のトレーサビリティ体系の構築にあたっては、これら4つのサブシステムの開発を目標として本格研究を行った。これらのサブシステムを開発するために産総研において行った研究内容をまとめると、以下の3つの研究テーマとなる。

- 1) 三次元測定機を校正・評価するための標準器の開発（計量標準の構築）
- 2) 三次元測定のトレーサビリティ体系構築のための技術開発（校正事業者登録システムの構築と校正方法の標準化）
- 3) 高精度の三次元形状測定技術の開発（測定技術の高度化）

いずれもものづくりのための三次元形状測定の信頼性向上に寄与する技術開発であり、特に産業現場における測定の信頼性を確保するための基盤的な技術である。3～5章では、上記技術開発に関する具体的な内容を記述する。6章では、現在産総研で三元形状測定技術に関して行っている活動内容、産業現場に計量標準を適用していくための

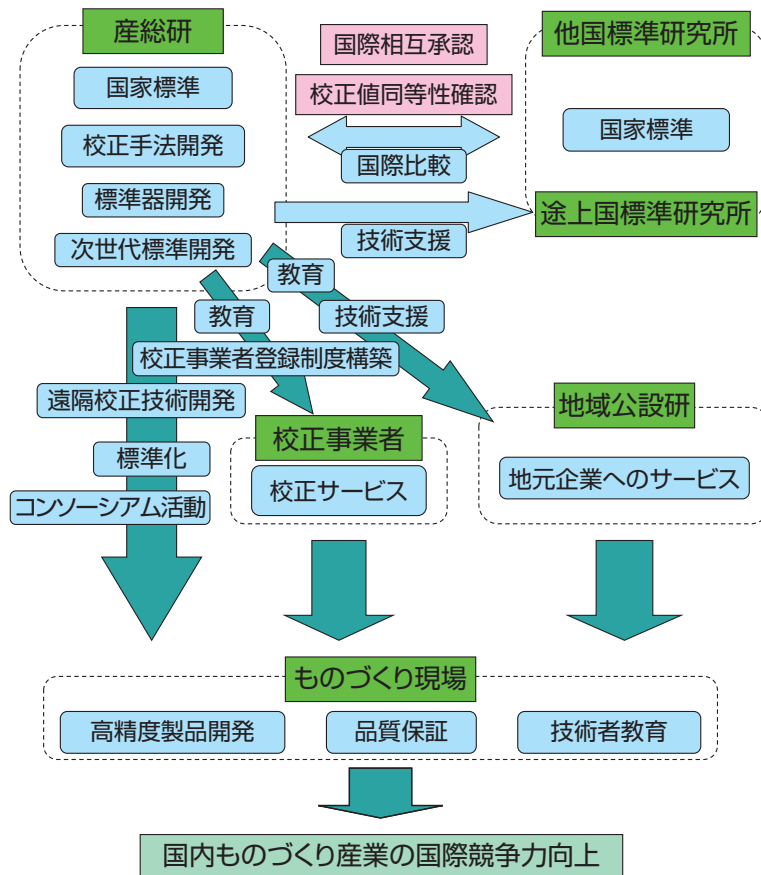


図3 三次元形状測定の信頼性向上のシナリオ

活動及び今後の展開に関して記述する。

3 三次元測定機を評価するための標準器

3.1 三次元測定における誤差

三次元測定機は非常に便利で有能な測定機であるが、信頼性に関して次のような課題がある。

- 1) 測定物の位置を検出するプローブが、スケールの基準線上に合致しておらず（すなわちプローブの位置がスケール自体から離れており）、測定誤差を生じやすい（専門的には「アップの原理を満たしていない」という）。
- 2) 上記の測定誤差のほかにも、誤差の要因が多く存在し、測定データの不確かさの評価が難しい。

1) の課題は、高精度な測定を行うにあたり、大きな問題であるが、測定機自体の剛性を高めることにより繰り返し性を良くすることで、ソフトウェアによる補正^[1]が行えるようにし、その影響を小さくしている。現在の三次元測定機のほとんどがソフトウェア補正を行う機能を有しており、この補正を適確に行うために正確な補正データをあらかじめ取得しておく必要がある。この補正データには、具体的に2種類のものがある。1つはプロービングシステム部分の補正データである。校正球と呼ばれる、あらかじめ直径の値が高精度に測定された、形状誤差の非常に小さな（真円からのずれが50 nm以下の球の測定を行うことにより、使用する接触子（スタイラス）先端球の球径、たわみ、及びそのプロービングシステムのもつ特性（具体的には球の一断面を三次元測定機で測定した場合に、測定された形状が円形ではなくプロービングシステム特性により三角形や四角形のように測定される）を求めることができる。もう1つは、スケール誤差（スケールの取付等による）、直角誤差（各軸間の直交性）、真直誤差（各軸ガイドのゆがみ等）、回転誤差（姿勢変化に伴う誤差）といった測定機の運動誤差に

についてのデータである。これらスケール誤差、直角誤差、真直誤差、回転誤差は、幾何学誤差^[2]と呼ばれ、各種の標準器を用いて算出することができる。これら2種類の補正データを正確に取得するために、次節で述べる三次元測定機用の標準器が必要になる。

2) の課題は、三次元測定機が多くの誤差要因をもつことと離散的な測定点を集合させ要素として計算し、測定データを算出する複雑な処理を行うため、不確かさ評価が難しい点にある。この課題に対してソフトウェアシミュレーションを利用した新しい不確かさ算出法に着目し、この問題解決に向けた研究を行った。本内容に関しては4.2節にて詳しく述べる。

3.2 三次元測定機のための標準器の開発

3.2.1 ステップゲージ

三次元測定機の測定精度を確認したり、ソフトウェア補正のためのデータを取得するためには、上位の国家標準（よう素安定化ヘリウムネオンレーザ）にトレーサブルな各種の標準器、例えばブロックゲージ、ボールプレート等が利用される。これらの標準器の校正が正確に行われなければ、トレーサビリティ体系の下位に位置している三次元測定機に対して、高精度な評価はできない。そのためこの標準器の校正技術開発は重要であり、各国の標準研究所も校正技術の開発や校正サービスを実施している。

産総研では、10年ほど前から本格的にこれらの標準器の校正システムの開発を行ってきた。三次元測定機の精度評価において、日本では一般に端度器（ブロックゲージ、ステップゲージ）が多用される。三次元測定機の評価には、短いブロックゲージを数多く並べた構造を持つステップゲージ（図5参照）が多種の長さの基準を実現できることから、ブロックゲージよりも多く使用される。主要な国立標準研究所ではレーザ干渉計と移動ステージを組み合わせた専用の装置を用いてステップゲージを校正している^[3]。産総

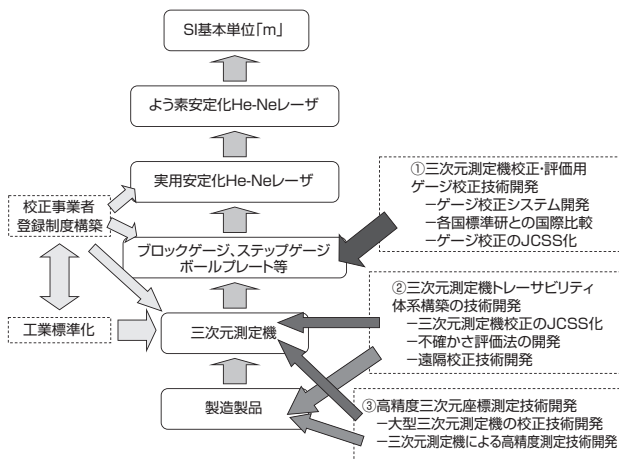


図4 トレーサビリティ体系と当該本格研究との関係

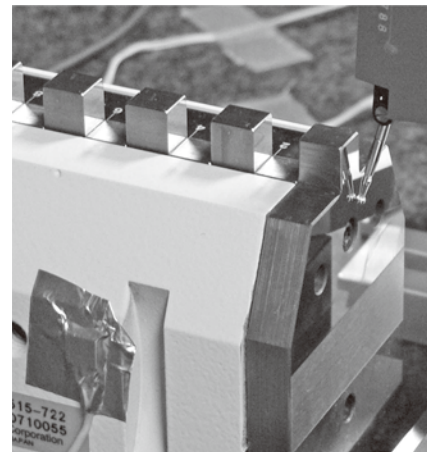


図5 ステップゲージ外観（測定面が櫛状に並んでいる）

研では、三次元測定機とレーザ干渉計を組み合わせることによりステップゲージを校正するシステムを開発した^[4]。図6は、開発したシステムの外観である。本システムは、4光路干渉計を使用することにより、接触子にピッチングやヨーイングの回転誤差が生じて、測定長は常に接触子（スタイラス）先端の球中心と干渉計との間の距離を示す。このシステムを使用し、測定長 500 mm のステップゲージを校正した場合、不確かさ 0.30 μm （95 %信頼区間）を達成した。

3.2.2 ボールプレート

ヨーロッパでは、三次元測定機の評価・校正に一次元の標準器である端度器よりも二次元的な評価ができるボールプレートやホールプレート（図7参照）が多用される。標準器に配置された球や円筒の中心座標値を決定し、この位置座標値を用いて三次元測定機の評価を行う。この場合、端度器よりも多くの情報を取得でき、測定領域内の誤差をより厳密に知ることができる。二次元の標準器を今後、日本においても利用可能にすべく、産総研ではこれら二次元標準器の校正システムを構築した^[5]。

ここでは、ボールプレートの校正システムの概要を説明する。ボールプレートは、その丸い形状から、直接的にレーザ測長器を利用して校正することは不可能である。そのた

め、三次元測定機を使用して校正するが、そのまま三次元測定機で測定した結果を使用しても、三次元測定機の精度以上の校正は不可能である。そこで、反転法と呼ばれる三次元測定機の持つ幾何学誤差を低減する手法を用いて各球の中心座標値を測定する。反転法の測定では、スケール自体が持つ誤差（通常、1次の傾き成分）のみが残ってしまうため、最後にスケール誤差を算出するために長さ標準にトレーサブルな基準器を使用してこれを補正する。通常、この補正には長さの異なる数個のブロックゲージが使用されるが、産総研ではレーザ測長器を使用してこの補正を行った。そのため、非常に高精度な補正データを得ることができた。このシステムを使用することで、測定長 500 mm のボールプレートを校正した場合の不確かさ 0.37 μm （95 %信頼区間）を達成した。図8はレーザ測長器を使用したボールプレート校正の様子を示している。現在、ボールプレートの校正に高度なレーザ測長技術を用いている機関は、世界中で産総研を含めて5機関程度である。

さらに産総研では、レーザ測長器を所有していない機関であっても高精度なボールプレートの校正ができるよう、長さ標準にトレーサブルな新たな標準器を開発した^[6]。この標準器は、ボールステップゲージと呼ばれ、ボールを一次元に配置したような形状をしている。測定対象となる球は、Hの形状をした本体プレートの断面2次モーメントの中立軸上に配置されており、上下、左右の熱変形や自重によるたわみなどで位置変化が生じた際にもその相対的位置の変動は、非常に小さくなるよう設計されている。この球間距離は、レーザ測長器を使って産総研で校正され、利用者に提供される。この標準器の有効性を確認するために、産業技術連携推進会議における活動の一環として、地域の公設研究所との間で本標準器を回送して、ボールプレートの比較測定を行った。この結果、ほぼすべての機関が産

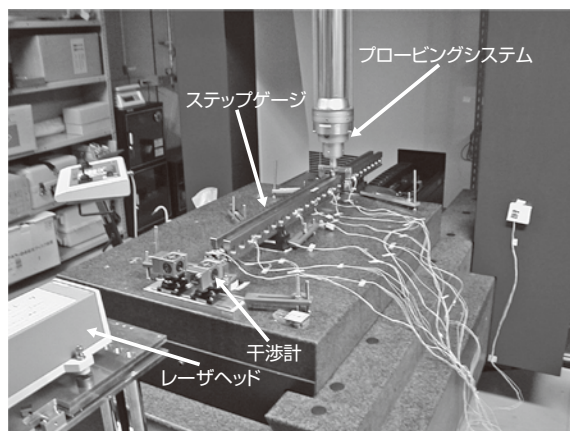


図6 ステップゲージ校正システム

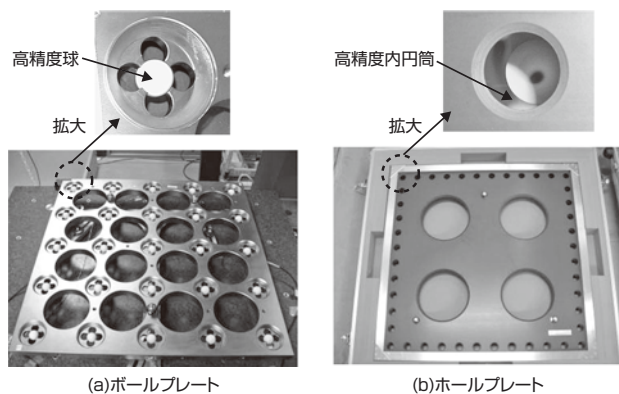


図7 二次元標準器

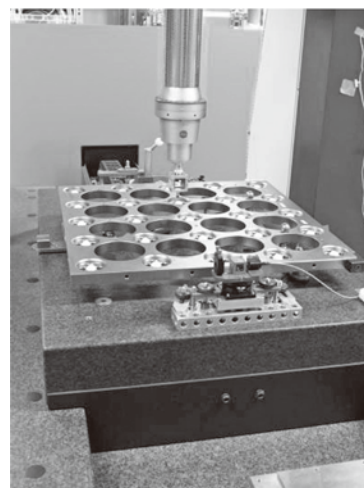


図8 ボールプレート校正の様子

総研の校正値に対し、0.5 μm 以内の偏差で一致し、本標準器が比較測定に有効であること、また各地域の公設研究所の技術水準が十分高いことが確認された^[5]。

3.3 標準器の国際比較

3.3.1 ステップゲージの国際比較

主要国の国立標準研究所が参加したステップゲージの校正に関する国際比較 (CCL-K5) が、1999～2002 年にかけて行われた。安定性に優れたステップゲージを幹事所が用意し、それを各国の標準研究所に順番に移送してブラインド測定を行い、その結果を幹事所に報告するという手順で行った。参加機関は、9 機関であった。

図 9 にその国際比較の結果を示す^[7]。国際比較では参加機関はそれぞれの国の国家標準器に基づいて独立に測定するため、どの機関の結果がもっとも真の値に近いのかわからない。そのため通常、参加した機関の測定の不確かさを考慮して重み付け平均した値を最も確からしい値（参照値）とし、そこからの各機関のデータの偏差を表示する。しかし、本国際比較では、参加したいくつかの機関の測定データが大きくばらついていることが分かり、最終的に日本（NMIJ/AIST）、アメリカ（NIST）、スイス（METAS）、ドイツ（PTB）の 4 カ国の測定データが極めて良い一致を示したため、これら 4 つの平均値を参照値とすることに決めた。図 9 の値は、この参照値からの差を各機関ごとにプロットしたものである。（産総研の値が 720 mm までしかないのは、測定システムの測定範囲によるものである。）この結果から、産総研で開発したステップゲージ校正システムの信頼性が確認できるとともに、世界における産総研の校正技術能力の高さを示すことができた。

3.3.2 ボールプレートの国際比較

ボールプレートの校正に関する国際比較 (CCL-K6) は、

2001～2004 年にかけて行われた。参加機関は、12 機関であった。図 10 に本国際比較の結果を示す。この図におけるプロット点は、1 番球から各球（2～25 番）までの距離を算出し、産総研の結果とすべての参加機関における平均値である参照値との差を示している。各球番号は、エラーバーの下に示している。エラーバー表示は、産総研の測定値に関する不確かさ（66 %信頼区間）を示しており、青線は、参照値に対する不確かさ（66 %信頼区間）を示したものである。この図から産総研の測定値と参照値とが不確かさの範囲内で一致していることがわかる。この結果より開発したシステムの信頼性が確認できるとともに、世界における産総研の校正技術能力を示すことができた。

3.4 民間企業による標準器の校正事業

上記の国際比較で確認された技術力を産業界で広く利用してもらうのが産総研の使命である。産総研が直接引き受けられる校正サービスの数は限られているので、高い校正能力もつ民間企業が校正をビジネスとして行ってトレーサビリティ体系の中位に参加することで、信頼性の高い三次元形状測定技術を広く産業界に普及できる。このとき、しかるべき校正能力をもつ民間事業者を公的に認定する仕組みとして、計量法による校正事業者登録制度 (JCSS) がある。この制度により登録された事業者は、日本の国家計量標準へのトレーサビリティが確保されていることが認定され、それを表明した校正証明書を発行することができる。この制度を利用したステップゲージの校正システムを構築するために（独）製品評価技術基盤機構の中に技術委員会が設置され、登録事業者に必要なとされる技術的要求事項適用指針^[8]などの原案を産総研が中心になって作成し、ステップゲージに関するトレーサビリティ体系を整備した。整備後すぐに複数の事業者が認定され、現在トレーサビリティのと

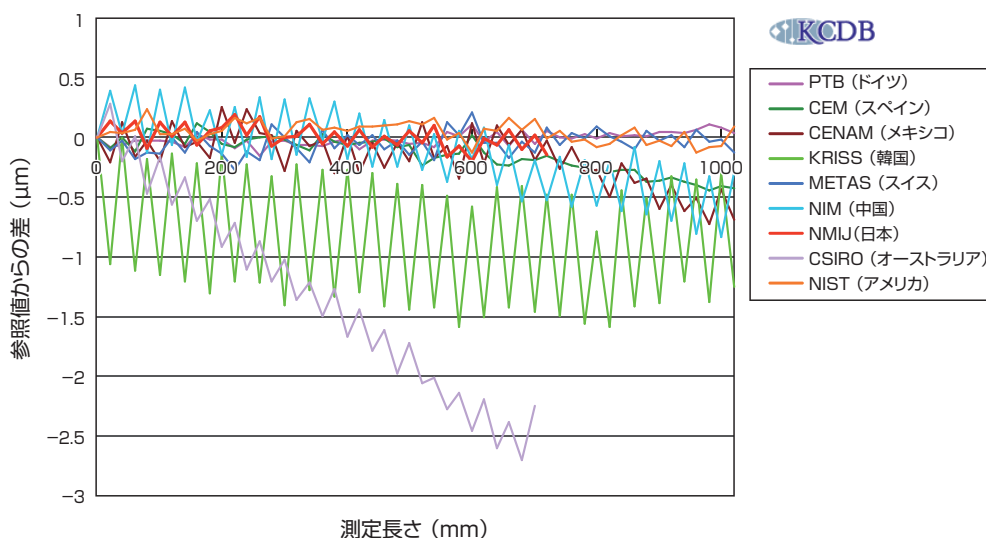


図 9 ステップゲージの国際比較 (CCL-K5) の結果

れたステップゲージが多数産業界で使用される状況を達成できた。

4 三次元測定機の信頼性評価

4.1 三次元測定機の校正事業者の認定

3章で述べたように、ステップゲージの標準器が整備されたことにより、それを用いて三次元測定機を適確に校正することが可能になった。このような状況の下、三次元測定機を所有する事業者が、国家標準にトレーサブルな三次元測定ができるという公的な証明を求めるようになった。そこで、すでに述べたステップゲージの標準器の場合と同様に、三次元測定の実業者を公的に認定するための技術委員会を（独）製品評価技術基盤機構に設置し、三次元測定機の校正に関する技術的要求事項適用指針^[9]をまとめ、現在三次元測定機に関しても複数の校正事業者が公的な認定を受けてその校正サービスを行っている。

三次元測定機は非常に多機能な装置であるため、ステップゲージを数回測定しただけではその性能の全てを適確に評価することは不可能である。より少ない手順で、より適確な評価を行えるようにすることが課題である。同じ問題は、三次元測定機の取引において購入者と販売者との間で、装置の性能検査をする際にも生じる。ISOにおいては、三次元測定機の納入時の検査方法について標準化がなされている。産総研からもISO会議へエキスパートとして参加し、標準化に参画してきた。そこで三次元測定機の校正に関する技術的要求事項適用指針を決めるに当たり、我々はこのISO規格^[10]を利用することとした。このことは、計量標準（計量トレーサビリティ体系）が工業標準（工業製品やサービスなどについての共通化や決め事）を参照していることになる。一方、このISO規格の中では国家標準にトレーサブルな標準器を使うことが規定されており、逆に、工業標準が計量標準を参照している。従来から我々

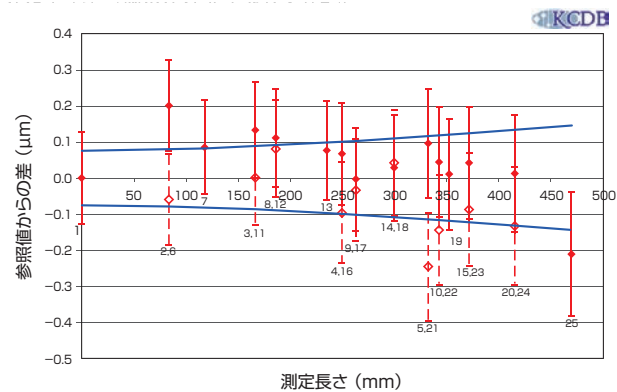


図10 ボールプレートの国際比較（CCL-K6）の結果
ボールプレート25個の球に対する産総研の値と参照値との差を示している。図中のエラーバーは産総研値の不確かさ、青線は参照値の不確かさを示している。

は計量標準と工業標準を一体的に活用することで、より効果的な制度運用が可能になり、産業界で使いやすくなるという考えのもと研究開発を進めてきたが、今回その努力の1つが実ったといえる。

4.2 三次元測定の不確かさの算出方法

三次元測定機は、1点1点のポイント測定を行い、その点データを集め、例えば円の測定であれば、最小二乗円にあてはめを行い、円の直径、真円度、中心座標等を計算により算出する。測定した点のそれぞれに測定誤差があるため、最終的に算出した円の直径や真円度がどのくらいの不確かさで算出されたのかを求めることは、かなり難しい作業である。三次元測定の不確かさの要因として、以下の項目が挙げられる（図11参照）。

- 1) プロービングに関する不確かさ
- 2) 幾何学誤差に起因する不確かさ
- 3) データ処理における不確かさ（最小二乗法等）
- 4) 測定手順に起因する不確かさ（測定点の数やその配置等）
- 5) 環境の変動に起因する不確かさ（温度、湿度等）
- 6) 測定物の保持に起因する不確かさ（固定力、自重たわみ等）
- 7) 測定物自身に起因する不確かさ（表面粗さ、形状誤差等）

このように様々な不確かさ要因が測定に関与するため、最終的な不確かさを評価することはかなり複雑である。そこで、産総研では、2001年から（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構国際共同研究助成事業（NEDO グラント）の助成を受けて、ドイツ国立物理工学研究所（PTB）、オーストラリア国立計測研究所（NMI）、東京大学等と共同で、モンテカルロシミュレーションを用いた三次元測定機による測定の不確かさに関する研究を行ってきた。この手法はバーチャル三次元測定機^[11]と呼ばれ、PTBにおいて

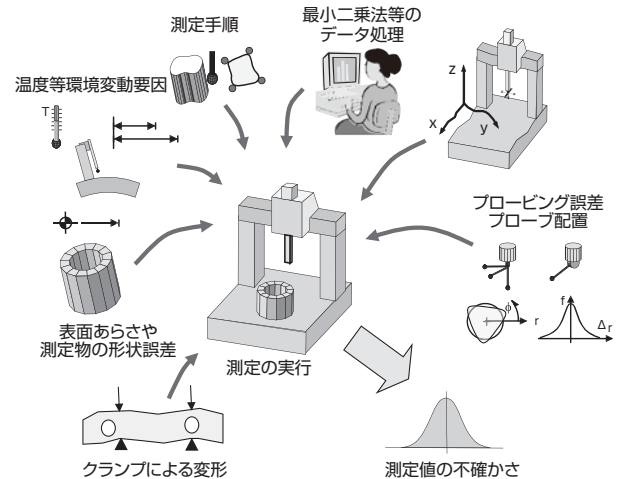


図11 三次元測定機の測定不確かさ要因

基本部分が開発されたものである。図12にバーチャル三次元測定機の概要を示す。バーチャル三次元測定機は、幾何学誤差をはじめとする重要な不確かさ要因を挙げ、これら誤差を含む三次元測定機のモデルを計算機上に作成したものである。実際の測定から得られる測定位置情報等からコンピュータ上で仮想モデルによる測定を200回程度行うことにより、その仮想的な測定から得られる測定値の標準偏差を計算し、不確かさを算出する。本研究において産総研は、通常使われる測定物を使用した比較測定を行い、バーチャル三次元測定機の実用面の評価及び普及に貢献した。このバーチャル三次元測定機技術の普及は、三次元測定のトレーサビリティ体系構築の手助けとなった。このような、シミュレーションによる不確かさ算出法は、ISO/TS 15530-4として標準化された。

4.3 三次元測定機の遠隔校正

前節で述べた方法で不確かさを算出するためには、標準器等を使用し、測定空間全体にわたって幾何学誤差のデータを取得することが必要である。三次元測定機の測定空間内の幾何学誤差のデータを取得するには極めて専門的な技術が必要のため、この作業を専門とする校正事業者が行うことが望ましい。校正事業者の専門家が産業現場に出向いて行う場合、時間的・金銭的なコストが多くなるのが予想される。そこで、産総研では、インターネットを利用し、容易にこの作業を行うためのシステム技術を開発してきた^[12]。

図13にインターネットを利用した三次元測定機の遠隔校正の概要を示す。校正事業者はまず標準器を三次元測定機のユーザに送る。輸送中の温度、湿度、振動等の変動は、同梱した記録機能を持つセンサによって監視される。校正事業者は、このセンサの記録情報を利用して、標準器が変化していないかどうかを判断する。次に二次元の標準器を用いてユーザの三次元測定機の校正を行う。標準器のセッティングは、ユーザ自身により行われるが、セッティングの様子はネットワークカメラを用いて校正事業者の専門家が

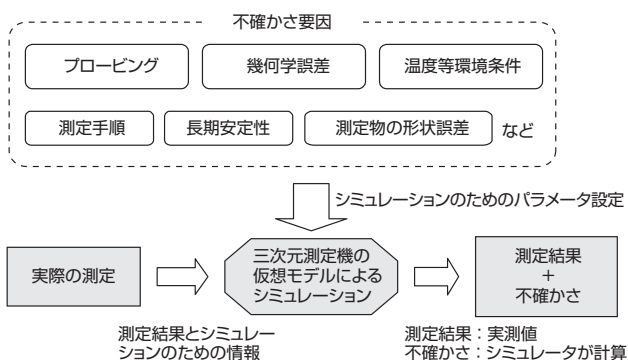


図12 バーチャル三次元測定機の概要

監視する。ユーザの三次元測定機は校正事業者がインターネットを介して制御する。校正中の周囲温度は校正事業者から標準器と同時に輸送された温度計を用いて測定される。温度測定データもインターネットを使用して送られ、校正事業者に保存される。プロービングシステムのパラメータ設定や座標系の作成等は、ユーザと電話もしくはインターネットカメラ電話等により直接コンタクトを取りながら行う。測定を終了した後、校正事業者はこれらの測定データを用いてユーザの三次元測定機の幾何学誤差を算出する。算出された幾何学誤差はユーザに送信され、誤差補正用のデータ及び不確かさ算出のためのデータとして利用される。このようにネットワークを利用した校正は校正事業者が直接校正の現場に行かなくてもよいことから、我々はこれを遠隔校正と名付けている。この技術開発は、ユーザ自ら標準器や幾何学誤差算出の知識を持たなくとも、三次元測定のトレーサビリティを容易に、かつ低コストで確保することを可能にした。

また、産総研では2005年よりこの遠隔校正手法を利用した三次元測定機校正サービスを依頼試験として行っている。このサービスは、二次元の標準器を使用するのではなく、校正事業者登録制度(JCSS)における三次元測定機の校正と同様に、ブロックゲージやステップゲージを使用して、ISO規格に基づいた評価法により行っている。

5 三次元形状測定の高度化

5.1 大型三次元測定機の校正

自動車のボディの形状測定や航空機の機体の形状測定には、測定空間が5 m × 3 m × 2 mなど大型の三次元測定機が利用される。このような大型の三次元測定機の校正には、大きな標準器を利用することも不可能ではないが、重量・時間的コストなどの点から問題がある。そこで、産総研では、標準器を使用しないで大型の三次元測定機を

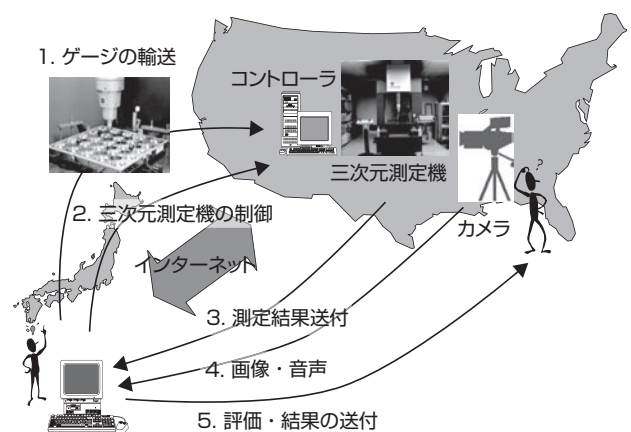


図13 三次元測定機の遠隔校正技術

校正する方法の1つとして、レーザトラッキング式レーザ干渉計（以下、レーザトラッカと呼ぶ）を使用した校正方法を提案してきた。レーザトラッカによる三次元測定機の校正システムは、イギリスの国立物理学研究所（NPL）、ドイツ国立物理工学研究所（PTB）、産総研で研究されてきた。いずれの装置も距離測定のみから三辺測量法の原理により座標値を算出するものである。NPL^[13]及びPTB^[14]は、1台のレーザトラッカを複数箇所に順次移動させて標的の位置を繰り返し測定する方法を取るが、産総研は4台のレーザトラッカを同時に設置して標的の位置を一度に測定する方法を取っている^[15]。産総研方式では、一度にすべての座標値を算出できることからNPL、PTBと比べ測定時間が短いというメリットをもつ。そのため、周囲温度の変動による測定物の座標の変化など外部環境の影響を極力抑えることが可能である。

図14は産総研で開発したレーザトラッカの外観である。本システムの特徴は、レーザ光を走査するミラーに半球を用い、トラッキングシステムの機械的な誤差を低減している点にある。通常、水平、垂直方向にレーザ光を走査する2軸を正確に合わせる必要があり、この作業は高度な技能を要する。我々の機構は、120°間隔に円上に3つの球を配置して、その3球上に半球ミラーを固定することで、安価な機械要素で、高精度なレーザ光の走査機構を実現した^[16]。このレーザトラッカを高精度三次元測定機と比較した結果、システム単体の機械的な精度は0.3 μm以下であることが確認された^[17]。また、三次元測定機の幾何学誤差をボールプレート及びレーザトラッカを使用して算出し、比較した結果、300 mm立方の測定空間内でほぼ2 μm以内で一致した^[18]。

ユーザがレーザトラッカを使用するにあたり、ハンドリングのしやすさは重要である。そこで、産総研知能システム研究部門で開発された球面モータを採用することでレーザトラッカの小型化・軽量化を実現した^[19]。これは、他分野

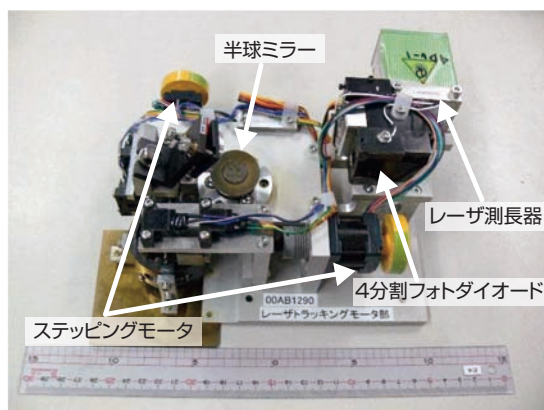


図14 レーザトラッキング干渉測長器

との融合によるよい研究成果となった。この技術開発により、大型三次元測定機の校正、産業用ロボットの手先座標位置の校正が高精度に行えるようになった。

現在、ISOの会議においてレーザトラッカの評価方法に関する標準化の議論が開始されており、本技術開発で培った知識と経験を生かし、その標準化に向けて貢献をしていく予定である。

5.2 三次元測定機による測定の高精度化

高精度なものづくりを実施している金型産業等では、測定機が固有にもつ精度よりも高い精度で評価することを必要とする場合がある。通常このような評価は不可能であるが、特別な配置と手順を取ることで、測定機のもつ誤差を互いに打ち消し合って、より高精度な測定を行うことが可能である。ボールプレートの校正に使用する反転法もこの一例である。このような高精度測定技術の開発を産総研では行ってきており、ここでは、一例として、円筒を測定する場合の成果について記述する。

図15のように、例えば等間隔8点の測定を行って円筒の真円度を測定・評価する場合、1回の測定が終了した後測定物を45度回転させ、2回目の測定を行う。同様に45度ずつ回転させ、計8つの姿勢で測定を行い、得られた8つの測定結果を平均すると、三次元測定機の幾何学誤差、2本の接触子（スタイラス）を用いたオフセット誤差、プローブの方向特性等の影響を打ち消すことができる。この方法はマルチ測定法と呼び、回転対称な形状の精密測定に利用できる^[20]。産総研では標準器の校正にあたり、このような方法を適用できるように実験計画を立て、最高精度での校正を行っている。この測定方法は、産業現場においても適用可能であり、今後、地域の公設研究所等を通して広く周知していく予定である。

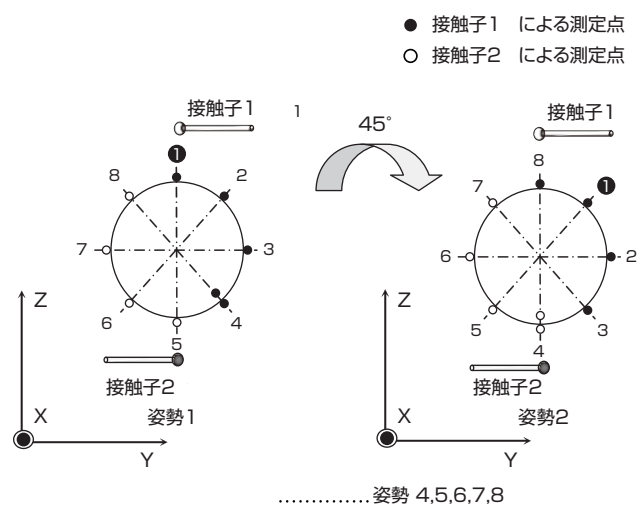


図15 円筒のマルチ測定法

6 三次元形状測定の今後

6.1 デジタルものづくりに向けた計量標準と標準化^[21]

図1のように設計、製造、評価をすべてデジタルデータにより行うデジタルエンジニアリングにおいては、設計データであるCADデータと計測した結果とを比較しなければならない。CADデータは面情報を有しており、従来からのプローブ接触式の三次元測定機の離散的な測定データでは情報量が足りない。そのため高密度な多点の測定データを一度に取得できる非接触式三次元測定機が近年多く利用されるようになってきた。これら非接触式の三次元測定機に関しては生産者がそれぞれ独自の基準で精度評価を行い、精度保証をしているのが現状であり、共通的な評価法に基づく精度保証の体系は存在していなかった。そのため、三次元測定機の利用者が製品を購入する際の統一的な指標が無く、購入したい装置の測定精度が本当にカタログ値のとおりであるのかを判断できない状況にあった。そこで産総研では、2005年度に非接触式の三次元測定機の精度評価法に関する規格作成を目標としたコンソーシアムを設立した。コンソーシアムでは、非接触式の三次元測定機の評価に使用する標準器の開発（計量標準）及びそれらの標準器を使用した評価方法を考案した。

非接触式の三次元測定機には様々な方式が存在するため、これら多種類の測定機の測定結果を同等に評価できるように標準器を製作することが重要である。光学式の測定機においては、標準器の測定部位に光沢があると測定結果に誤差が生じやすい。そのため標準器表面は、光学的に拡散面を持つことが重要となる。理想的な拡散面を選定するため、コンソーシアム会員の協力により、加工法・加工条件・表面コーティングを少しずつ変えた多くの球を製作した。図16はその一例である。100種類を超える条件の異なる加工を行い、製作した球をそれぞれ数種類の非接触式三次元測定機により測定し、すべての測定機で測定が比較的安定に行えた球を選定した。次に、選定された球を使用し、測定機の精度評価のための標準器となるボールバーを製作した（図17参照）。このボールバーはカーボンのフレームを使用し、周囲温度の変動に影響されにくいものとなっている。非接触の三次元測定機はポータブルな製



図16 異なる条件にて製作した球
（1番左：分散共析めっき（B-MOS）、サンドブラスト（左2番目：Crメッキ、中央：TiNコーティング）、右2つ：化学エッチング（FeCl₂による）

品が多く、実際に使用される環境は20℃に温度を制御された恒温室に据え置きされて使用されることは少ない。そのため、温度変動に対して安定な標準器が必要とされる。以上のようにコンソーシアムにおいて、測定機評価に使用できる国家標準にトレーサブルな標準器を製作し、これを用いた比較測定を重ねた上で、これらの標準器を使用した非接触三次元測定機の評価法をJIS化した。現在、作成したJIS原案は日本工業標準調査会でJIS B 7441として審議されている。また、同時にISOの委員会にも本成果を提案中である。非接触三次元測定機は、アプリケーションとして人体計測にも利用される。人体計測における非接触三次元測定機の評価法に関して産総研デジタルヒューマン研究センターが主体となり我々が協力し、標準化を進めている。

また以前は鋳造巣等の欠陥検査に使用されていたX線CT装置が、近年内部構造を測定できる三次元測定機として産業界で多く利用されるようになってきた。そのためX線CT装置を評価するための共通的なファントム（標準器）開発、及びそのファントムを使用した評価方法の標準化に関して、製造者及び利用者から要望が出ており、産総研ではその準備を進めつつある。

6.2 地域の公設研究所との協力

三次元測定機は高価な装置であるため、中小企業が導入するには経済的負担が大きい。そのためほぼすべての地域の公設研究所に三次元測定機が導入され、地域の企業からの依頼測定や装置開放のサービスを行っている。産総研では、産業技術連携推進会議の技術部会の1つである知的基盤部会の形状計測研究会において三次元測定技術の向上を目指した活動を行ってきた。ボールプレートの比較測定、ISOで審議されている不確かさ算出方法に関する実証実験、ビデオプローブ式の三次元測定機の評価実験等を行ってきた。また、2008年度から関東広域圏の公設研究所とともに地域イノベーション創出共同体形成事業として、三次元測定機の測定の信頼性を確保するため

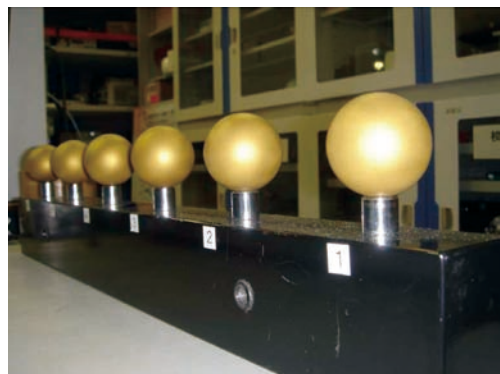


図17 非接触三次元測定機評価用ボールバー

のプロジェクトを進めている。このような活動を通して、産業現場の三次元形状測定技術の向上に貢献している。これらの技術が、公設研究所から地域の産業を担う中小企業へと伝播することで、日本のものづくり産業の活性化につながることを期待している。

6.3 技術者の教育

産総研では上記のような三次元形状測定を取り巻く技術開発や普及活動を行ってきた。計量トレーサビリティを構築する上での技術開発は、概ね整備されたと感じる。今後は三次元測定の信頼性をより向上させるために三次元測定機の日常点検方法の普及と使用者への教育に関する活動を強化していきたい。三次元測定機を含め、最近の測定機はアナログではなくデジタル処理され、測定値がディスプレイ上に出力される。そのため測定者は、その値を正しいと鵜呑みにする傾向が多い。しかし、測定においては、測定条件や測定方法等によりその値の信頼性が変化する。それを測定者が理解して使用するか、しないかで測定の信頼性に大きな差が生じる。例えば、工業製品の図面上の寸法が20℃における値であることを知らない技術者も少なからずいる。製品の信頼性を向上させるには、評価ツールを使用する技術者への教育は大変重要であると考えられる。測定者の技能向上のための教育システム構築は、産業現場に至るトレーサビリティ体系構築のための最後の要件であると考えており、測定技術力向上のための一手段として、近い将来、三次元測定の技術者認定制度を作ることを計画している。

7 おわりに

戦後の我が国は自動車産業、エレクトロニクス産業などを中心に広い裾野を持つものづくり産業を発展させてきた。三次元測定機はコンピュータの能力の向上とともに発展してきた測定機で、現在の高度なものづくり現場において重要な役割を果たしている。特にデジタル化による設計から製造、評価までの一体化した工程では欠かすことができない装置である。本論文では、ものづくり産業において必要とされる三次元測定機に関連する技術開発について述べた。

ものづくり産業の競争力強化を目標に国家標準の確立からそれをものづくり現場まで展開するためのシナリオを作成し、重要項目から順に実施してきた。現在まで、従来からの三次元測定機による三次元測定に関しては、技術者認定制度の構築を除き概ね整備できてきているが、新しい三次元測定装置や技術への対応や教育システム作りなど今後実施して行かなくてはならない課題は多く残っている。これら装置、技術に対してもシナリオを作成し、ものづくり産業へ貢献していく予定である。

参考文献

- [1] S. Sartori and G. X. Zhang: Geometric error measurement and compensation of machines, *Annals of the CIRP*, 44 (2), 599-609 (1995).
- [2] J. A. Soons, F. C. Theuws and P. H. Schellekens: Modeling the errors of multi-axis machines: a general methodology, *Precision Engineering*, 14 (1), 5-19 (1992).
- [3] P.S.Lingard, M.E.Purss, C.M.Sona and E.G. Thwaite: Length-bar and step-gauge calibration using a laser measurement system with a coordinate measuring machine, *Annals of the CIRP*, 40 (1) (1991).
- [4] 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵: ステップゲージ校正用干渉式三次元測定機の開発, *精密工学会誌*, 60 (5), 687-691 (2002).
- [5] 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 梅津健太: 座標測定機用二次元幾何ゲージ校正に関する技術情報, *産総研計量標準モノグラフ* 8 (2005).
- [6] S. Osawa, T. Takatsuji, H. Noguchi and T. Kurosawa: Development of a ball step-gauge and an interferometric stepper used for ball-plate calibration, *Precision Engineering*, 26 (2), 214-221 (2002).
- [7] *CIPM CCL Key Comparison: K5 Final Report*.
- [8] 製品評価技術基盤機構, 文書番号 JCT20102 技術的要求事項適用指針 (一次元寸法測定器・ブロックゲージ、各種長さ測定用校正器で測定面が平面であるもの (光波干渉測定法による)).
- [9] 製品評価技術基盤機構, 文書番号JCT20113 技術的要求事項適用指針 (座標測定機).
- [10] ISO 10360-2:2001 Geometrical product specifications (GPS) -Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)- Part 2: CMMs used for measuring size.
- [11] 高増潔: バーチャル座標測定機, *計測と制御*, 40 (11), 801 (2001).
- [12] 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 古谷涼秋, 柴田政典: インターネットを利用した座標測定機のトレーサビリティ体系構築, *精密工学会誌*, 70 (4), 528-532 (2004).
- [13] E.B. Hughes, A.Wilson and G. Peggs: Design of a high-accuracy CMM based on multi-lateration techniques, *Annals of the CIRP*, 49 (1), 391-394 (2000).
- [14] H. Schwenke, M. Franke and J. Hannaford.: Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer, *Annals of the CIRP*, 54 (1), 475-478 (2005).
- [15] T. Takatsuji, Y. Koseki, M. Goto and T. Kurosawa: Restriction for the arrangement of laser tracker in laser trilateration, *Measurement Science & Technology*, 9 (8), 1357-1359 (1998).
- [16] 首振り運動光てこによる光線追尾式レーザ干渉測長器 特許3427182号.
- [17] J. Hong, S. Osawa, T. Takatsuji, H. Noguchi and T. Kurosawa: A high-precision laser tracker using an articulating mirror for the calibration of coordinates measuring machine, *Optical Engineering*, 41 (3), 632-637 (2002).
- [18] K. Umetsu, R. Furutnani, S. Osawa, T. Takatsuji and T. Kurosawa: Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system, *Measurement Science and Technology*, 16, 2466-2472 (2005).
- [19] 矢野智昭, 高辻利之, 大澤尊光, 鈴木健生, 本村洋一, 板部忠喜: サブミクロンの測定精度を有する小型2軸球面モータ型レーザ追尾距離測定装置の開発, *電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌)*, 126 (4), 144-149 (2006).

[20] S. Osawa, K. Busch, M. Franke and H. Schwenke: Multiple orientation technique for the calibration of cylindrical workpieces on CMMs, *Precision Engineering*, 29 (1), 56-64 (2005).

[21] 大澤尊光, 佐藤 理: 非接触座標測定機評価法の工業標準化, *計測標準と計量管理*, 57 (2), 2-6 (2007).

執筆者略歴

大澤 尊光（おおさわ そんこう）

1998年東京電機大学大学院工学研究科博士課程修了。博士（工学）。同年工業技術院計量研究所入所。2002～2003年PTB（ドイツ国立物理工学研究所）客員研究員として三次元測定の高精度化に関する研究に従事。現在まで、三次元形状計測、幾何学量計測に関する研究及びその標準化業務に従事している。本論文では、三次元形状測定標準全般の業務を担当した。



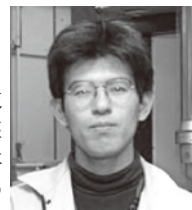
高辻 利之（たかつじ としゆき）

1990年神戸大学大学院工学研究科計測工学専攻修了。同年工業技術院計量研究所入所。1994年～1996年オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）国立計測研究所（NML）客員研究員。1999年博士（工学）取得。現在は、三次元測定機や平面度をはじめとした幾何学量計測の研究に従事している。本論文では、研究全体の統括を担当した。



佐藤 理（さとう おさむ）

2004年東京大学大学院博士後期課程修了。博士（工学）。同年産業技術総合研究所入所。測長原子間力顕微鏡、座標測定機、座標測定システムなどを用いた寸法、形状計測および座標測定機などの精度評価法標準化に従事。本論文では、遠隔校正技術開発、デジタルものづくりに向けた計量標準と工業標準化および地域公設研との協力関係構築を担当した。精密工学会アフィリエイト。



査読者との議論

議論1 全体的評価

コメント（田中 充：産総研研究コーディネータ）

当該論文は、我が国の機械工作部品の流通促進、競争力強化と技術移転にとって重要となる幾何形状測定の信頼性を保証する体制を作り上げるための本格研究として位置づけられます。豊富な内容を含んだ優れた研究成果と思います。

回答（大澤 尊光）

測定は、ものづくり産業において重要な項目であり、設計図面通りに製品が製作されているのかを検査し、その結果を製造工程に反映させて、製品の価値を向上させることができます。日本の製品の価値向上のためには、測定の信頼性を確保することが重要であり、そのための手段がトレーサビリティ体系と考えます。この体制作りは産総研のミッションであり、これの構築のためのシナリオを描き、本研究を進めてきました。

議論2 問題の背景

質問・コメント（田中 充）

かつては大きな製造会社に1つしかなかった三次元測定機が今や、下請け工場にも、製造ラインにも多数導入されているという事実があります。これら生産現場毎の信頼性への要求が拡大していること、また一方、三次元測定機の操作にかかる人のコストを避けるという専門技術離れが進んでいることについて加筆してはいかがでしょうか。

また、我が国の機械工作製造事業への当該本格研究の貢献を語る場合の背景は、単に「ものづくり」だけではありません。精密測定機器導入に際しての欧米依存信仰や工業化途上国の追い上げなどにも言及すべきではないでしょうか。

回答（大澤 尊光）

1章の「はじめに」のところに追記しました。

議論3 構成学としての記述

質問・コメント（田中 充）

要素技術を丹念に述べる一方、それをどのように構成して社会的なアウトカムに結びつけようとしたのかを語る必要があります。例えば公設研とのやり取りの中で、「公設研を介したトレーサビリティを唯一の方法として国内に根付かせる」方策はなぜ取らなかったのか。国際比較や国際相互承認についても、「産総研が参加せず登録事業者が国際試験所認定機構（ILAC）の中で技能試験に参加すれば良い」という方策はなぜとらなかったのか。

国際比較用の器物の選定についてもどのような検討があったのか、それが我が国産業界に与える影響はどうか。それぞれの要素技術との関係で記述できないでしょうか。これが構成学と考えられます。

またアブストラクトに、「計量標準と標準とをより強力に結びつけることにより長さの国家標準を製造現場までつなげることに成功した」とありますが、これは構成学の上から大切そうに見受けられますが、これに対応する記述が本文中に見えません。

回答（大澤 尊光）

経済のグローバル化に伴い計量分野における国際相互承認協定が結ばれ、各国の国立標準研究所においてその測定能力を示すことでワンストップサービスを実現しています。このような流れの中で、図3に示すようなシナリオがもっとも効率よく三次元座標計測標準をユーザに提供するものであると我々は考えております。

また、標準化と計量標準の結びつきに関しては、3.1節及び5.1節にて触れているとともに、4.1節にレーザトラッカの評価法の標準化への貢献に関して追記をしております。

安心・安全な次世代モビリティを目指して

— 全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす —

佐藤 雄隆*、坂上 勝彦

全方向のカラー画像と三次元情報を同時かつリアルタイムで取得する能力を持つ「全方向ステレオカメラ」を電動車いすに搭載することにより、高齢者や障害者はもちろん、全ての人が安心して安全に、しかも最小限のエネルギー消費かつ低公害で、歩行者とも共存しながら移動可能とすることを旨とした新しい知的モビリティを提案する。

キーワード: モビリティ、アクティブセーフティ、福祉機器、画像処理、全方向ステレオカメラ

A secure and reliable next generation mobility

— An intelligent electric wheelchair with a stereo omni-directional camera system —

Yutaka Satoh* and Katsuhiko Sakaue

We propose a secure and reliable next generation smart electric wheelchair system that is equipped with a novel 3D stereo vision system referred to here as a 'stereo omni-directional camera'. The novel vision system is not only intended for use with a new generation of electric wheelchairs for conventional wheelchair users, but also for use in future advanced personal mobility devices for everyone.

Keywords: Mobility, active safety, welfare apparatus, computer vision, stereo omni-directional camera system

1 はじめに

高齢者や障害者の生活の質 (Quality of Life: QOL) 向上のための技術開発は社会的に重要な課題であり、先端的な科学技術の活用が望まれている。特に高齢化が急速に進んでいる我が国では、このような取り組みへの社会的な期待が大きい。

人間にとってモビリティ (自在に動けること、あるいはそのための手段) は不可欠な要素であり、特に「歩行能力」が失われると自らの意志での移動が極端に困難になり、日常生活に重大な困難を引き起こす。このような問題は高齢者や障害者のものだけではない。現在は問題なく歩行できる者であっても、交通事故や加齢などによって歩行困難となるリスクは誰もが持っている。すなわち、歩行能力が失われた場合の代替手段を十分に整備しておくことは、全ての者にとっての重要なセーフティネットとなる。

電動車いすは歩行能力の有効な代替手段である。近年急速にその普及が進み、歩行困難な者であっても自由に外出することが可能になりつつある。しかし一方で、その台数の増加に従って歩行者や障害物への衝突、段差や階段における転倒・転落などの事故が増加し深刻な問題となっ

ており、安全を確保するための技術開発が急務となっている。このような走行中の安全確保のための技術開発は、自動車において既に盛んに行われている。例えば、ミリ波レーダーやステレオカメラなどによって前方を監視し^[1]、追突の危険性を事前に予測して自動的にブレーキを制御するなどの技術が実用化されている^[2]。これに対し、電動車いすは道路を走行する自動車と異なり、人混みや室内など様々な生活空間で用いられるため、その安全の確保のためには次世代のセンシング技術を用いる必要があった。そこで我々は、全方向のカラー画像と三次元情報を全く死角なく同時かつリアルタイムで取得する能力を持つ「全方向ステレオカメラ」を搭載したインテリジェント電動車いすを開発した。この車いすは、室内外の空間において歩行者とも共存しながら安全に移動するために、障害物や段差などを全方向にわたって同時に検出し、危険が認められる場合には自動的に減速・停止する能力を基本機能として持ち、搭乗者の安心で安全な移動をサポートする。

本論文では、研究の出発点から試作機を構成するに至った過程について、戦略、シナリオ、工夫等の紹介を交えながら、可能な限り詳細に述べる。具体的にはまず、第2章

で研究シナリオについて述べる。第3章では、試作機を構成するにあたって必要となる要素技術の選択について述べ、第4章でその統合および構成について述べる。第5章では実験と評価について述べ、第6章で本論文をまとめる。

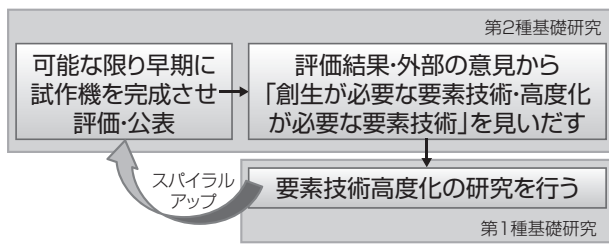
2 研究シナリオ

本研究は産総研と国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所が中核機関となって実施した文部科学省科学技術振興調整費「障害者の安全で快適な生活の支援技術の開発（平成16～18年度）」の一部として行われた。本研究のプロジェクト内での位置づけおよび責務は「future-orientedな先端技術による福祉機器高度化の可能性・必要性を提示する」であった。すなわち、製品の開発そのものではなく、先端技術が福祉機器にもたらす高度化の可能性について道標を示すことが要求された。その遂行のためには個別の要素技術についてだけでなく、それらを統合・構成したシステムとしてのコンセプトを論文、プレス発表^[3]、展示会などを通して社会へ情報発信することが特に重要になると考え、次のような研究戦略をとることとした（図1にモデル図を併せて示す）。

- (1) 可能な限り迅速に必要な要素技術の統合・構成を行うことで早期に試作機を完成させ、評価・公表を行う。
- (2) 評価結果および公表したことによって得られた外部からの意見を基に「創生が必要な要素技術、あるいは改良が必要な要素技術」を見いだす。
- (3) 要素技術の開発・改良に関する研究を行う。
- (4) (1)に戻る。

これまでの我々の研究パターンの多くは、まず要素技術の創生、高度化を行い、次にその展開を検討するというものであったが、この戦略は順序が逆となっている。これは、要素を統合・構成するという、いわゆる第2種基礎研究^[4]を起点として、必要な第1種基礎研究を連鎖的に創出する試みであると捉えることもできるだろう。

本研究ではまた、従来の「車いす」の枠組みのみに発想をとられることなく、健常者も利用する新たなパーソナルモビリティーとしての役割も視野に入れながら研究開発を



第2種基礎研究を起点として連鎖的に必要な第1種基礎研究を創出

図1 研究戦略モデル図

進めることにした。自動車のように多人数が乗車して道路を移動するのではなく、歩行者とも共存しながら1人で移動するための機器を開発することは、高齢者や障害者だけでなく、全ての人が最小限のエネルギー消費かつ低公害で移動するために重要である。また、より広いユーザーをターゲットとすることで、将来的により大きなマーケットの形成を狙うことが可能になり、高性能化・低コスト化、さらには新しいモビリティーの走行を前提としたインフラ整備などの恩恵を、現状の電動車いすのユーザーが結果として受けることができるようになると考えられるからである。

このような新しいモビリティーが室内外の空間において歩行者とも共存しながら安全に移動するためには、周囲環境を迅速かつ的確にセンシングする技術と、得られた情報からリスクを的確に検出する技術が重要となる。本研究では、全方向ステレオカメラおよび画像処理・認識技術群を電動車いすに投入することにより、歩行者や障害物への衝突、段差や階段などによる転倒・転落を未然に防止する機能を持ったモビリティーの実現を目指す。

3 要素の選択

研究目標を実現するために選択した要素技術群について述べる。なお、後の第4章で述べる要素の統合・構成を行った結果、必要なことが判明し追加選択された要素技術も含まれるが、個別にその旨を記すこととし、本章でまとめて紹介する。

図2に実際に選択した要素技術群を示す。電動車いすに対し(1)周囲の環境情報を取得するための「センシング技術」、(2)取得された環境情報から、走行環境における危険などを検出するための「認識技術」、(3)ユーザーに情報を提示するための「インターフェース」をそれぞれ投入することで、周囲の環境を積極的にセンシング・認識する機能を実現する。以下の節でそれぞれの要素技術について具体的に述べる。

3.1 全方向ステレオカメラ

全方向ステレオカメラ (SOS: Stereo Omni-directional System)^{[5][7]} は、筆者の佐藤らが科学技術振興機構岐阜県地域結集型共同研究事業 HOIP プロジェクトにおいて開



図2 要素の選択

発した、多数のカメラをボール状に集合させることにより、全方向のカラー画像と三次元情報を同時かつリアルタイムで取得する能力を実現した世界初の斬新なカメラシステムである。

広範囲の画像を取得するために、広角レンズや放物面ミラーなどを用いるカメラシステム^{[8][10]}が従来から提案されているが、単一のレンズと撮像素子によって広範囲を撮像するため、特にレンズの光学的な解像度が問題となり、得られる画像の解像度が十分でないという問題があった。これに対し、全方向ステレオカメラでは複数のカメラで分担して全方向を撮像するため、コストの低い一般的なレンズを用いたとしても全体としての解像度を高く保つことができる。また、カメラを複数持つため、カメラ間の視差を利用することで、三次元情報を容易に得ることができる。

図3左に全方向ステレオカメラの外観を示す。また、表1に主な仕様を示す。カメラが集合した部分をカメラヘッドと呼び、その基本形状は正十二面体である。三次元情報を計測するために正十二面体の各面にそれぞれカメラを3台ずつ配置しているが、カメラ間には視差を得るために適切な間隔（ステレオベースラインと呼ぶ。SOSでは50 mm）が必要であり、カメラヘッドのサイズが大きくなる問題がある。この問題を解決するために、図3右に示すように3台のカメラをT字型のアームにマウントし（このセットをステレオカメラユニットと呼ぶ）、正十二面体の各面が互いに交差し、かつ互いのカメラが互いの視野を遮らないよう三次元的に最適配置することで、50 mmのステレオベースラインを保ちつつ、カメラヘッドをこぶし大の直径116 mmにまで小型化している。カメラの総数は、3カメラ×12面=36カメラである。全てのカメラは同期しており、全く同一のタイミングで撮像する。

カメラヘッド部で取得した画像情報は1.25 Gbps×2本の光ファイバーでパソコン(PC)に転送する。PC上には36枚の画像が直列に並んだ形でメインメモリーにDMA(Direct Memory Access)転送され、ユーザーにはその先頭アドレスのポインタが通知される。このポインタを用い

ることで、転送された画像群に対して自由にアクセスすることができる。

なお、電動車いすに実際に搭載する予備実験を行った結果、走行中にカメラヘッド部に伝わる振動が想定していたよりも大きいことがわかり、カメラヘッド部の組み付け構造の強化と、撮像素子の変更を行った。初期型では通常のローリングシャッター方式（撮像管のように操作ラインごとにシャッターを切る方式。構造が簡単であるが、画像の上下で時間差が生じ、動きがある場合に微小な歪みを生じる）のCMOS撮像素子を採用していたが、振動のような激しい動きによって画像に微小な歪みを生じ、三次元計測精度に影響を及ぼすため、近年になって十分な性能を持つものが入手可能になったグローバルシャッター方式（画像全体で同時にシャッターを切る方式）のCMOS撮像素子を新たに採用した。

3.2 ステレオ画像処理

複数のカメラで撮影された画像の視差から、三角測量の原理で距離を求めることができる。人間が両目の視差を使って距離感を把握することに相当する。原理的には単純であるが、実装上難しい問題が主に2つある。

- (1) ステレオカメラの較正：距離を正確に測定するためには、焦点距離・レンズ中心・歪みなどのカメラパラメーターの実測値や、複数配置されたカメラの位置関係の実測値を正確に知る必要がある。
- (2) 対応点探索：複数のカメラによって撮影された画像間で類似性の高い点（すなわち、現実世界において同一であると推定される点）を対応付け、対応点間の距離を視差とする。カメラの近くに位置しているものは視差が大きくなり、遠方のものは視差が小さくなる。画像中の全画素に対して対応付けを行う必要があるため、処理コストが極めて大きい。

全方向ステレオカメラでは、(1)については製造時に一般的な較正手法によって全てのパラメーターを正確に求めている。また、製造以降、再調整は一切必要のないよう、カメラヘッド部を強固な構造としている。実際電動車いすに

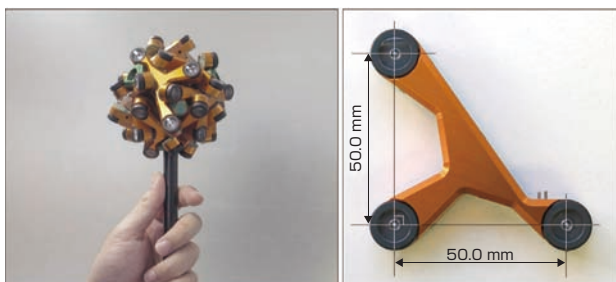


図3 全方向ステレオシステム
左がカメラヘッド部（直径116 mm）。右はステレオカメラユニット。3つのカメラが同一平面上で直交するように配置されている。

表1 全方向ステレオシステムの主な仕様

ベース形状	正十二面体
撮像素子	1/4" CMOS（グローバルシャッター方式）
素子の解像度	640 (H)×480 (V) pixels
各カメラの焦点距離	1.9 mm
各カメラの画角	101° (H)×76° (V)
ステレオ基線長	50.0 mm
フレームレート	15 fps（カラー画像のみの場合は30 fps）
カメラヘッド直径	116 mm（外接円の直径）
重量	約480 g（カメラヘッドおよび支柱）
消費電力	約9 W（12 V、750 mA）

搭載した状態で3年以上使用したものであっても、これまで再調整を必要としていない。(2)については、処理コストが極めて大きいため、ハードウェア化する戦略も考えられたが、近年のPCの急速な高速化の流れを考慮し、敢えてソフトウェアで実装することを選択した。実際プロジェクト開始から3年程度で、純粋なPCの性能向上のみで約5倍程度ステレオ画像処理の計算速度が向上した。車載可能な小型PCに実装するためにはさらにソフトウェアの高速化も必要となったため、並列計算化、重複計算の徹底的な排除などを行い、さらに約2倍の高速化を実現した。

なお、ステレオ画像処理は、ミラーを用いるなどの工夫を行わない場合、最小2台のカメラ(2眼ステレオ)で実現できるが、それ以上のカメラを使用することで複数の結果を測定結果の信頼性評価に用いることができるようになり、精度の向上が期待できる。全方向ステレオカメラでは、精度とカメラヘッドサイズのバランスを考慮し、3眼ステレオを採用した。

3.3 画像統合

図4に画像統合の例を示す。全方向ステレオカメラは複数のカメラによって構成されており、個々のカメラの画像をソフトウェアによって統合することで、全方向画像を得る。今回のインテリジェント電動車いすでは、撮影した全方向画像を携帯電話回線などにより遠隔地に動画として送信し、遠隔サポートに役立てることも将来的な機能の1つとして検討している。このため、品質良く画像を統合する必要があるが、一方で同時に周囲環境の危険検知を高い頻

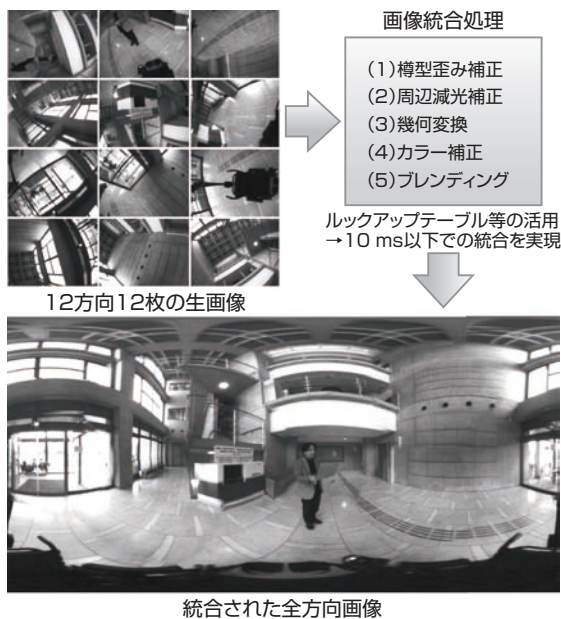


図4 高品質かつ高速な画像統合
レンズ歪みや周辺減光を含む12枚の生画像から全方向画像を高品質かつ高速に生成する。全方向画像を平面上に表現することは困難な課題であるが、ここでは世界地図と同様のメルカトル図法で示す。

度で行わなければならないため、計算コストは可能な限り小さくする必要があった。

一般的にカメラのレンズは、像の周辺部ほど歪みや減光が大きくなる(図5)。これらは通常のデジタルカメラのように1枚の画像を単独で鑑賞する目的であれば大きな問題とはならないが、複数の画像を統合する場合には、境界部にズレや明るさの差を生じてしまう。この問題を解決するために、(1)レンズの樽型歪みの補正、(2)レンズの周辺減光の補正、(3)個々のカメラ座標系から統一座標系への幾何変換、(4)カメラ間のカラーばらつき補正、(5)画像間の境界を滑らかに接続するためのブレンディング処理を行う必要がある。紙面の都合で具体的な計算式については参考文献^[11]に譲るが、三角関数等を多く含む非線形変換となるため、そのまま実装すると1枚の画像合成に10数秒(3.2GHzのCPUを用いた場合)を要した。そこで、上記の計算に必要なパラメーターが、カメラヘッドやカメラ単体の特性に依存する定数であり、かつ予め全て測定可能であることに着目し、必要なパラメーターを予め全て決定したうえで計算結果をルックアップテーブル化した。これにより、歪みや色・明るさのムラを含む、補正の一切かかっている生のカラー画像群12枚から、良好に補正された1枚の全方向画像をテーブル引きのみで得ることができる。このとき、512×256画素の全方向画像を合成するために必要な時間は、わずか10ms以下である。

3.4 カメラヘッドの姿勢推定

電動車いす周囲の環境情報を正確に取得するためには、全方向ステレオカメラのカメラヘッドが電動車いすに対してどのような姿勢で取り付けられているのかを正確に知る必要がある。当初の設計では、カメラヘッドの取り付けが完了した時点で電動車いすを静止させ、カメラヘッドの支柱に固定した加速度センサーによって重力の方向を求めることでカメラヘッドの姿勢を得ていた。しかし、(1)走行中の走路の凹凸や段差などによるカメラヘッドの動揺が予想以上に激しかったことから、リアルタイムに姿勢を推定し補正することが必要となった、(2)電動車いすへの乗降にリフ



図5 レンズ歪み補正
人物が手に持っているのは直線定規である。左の補正前の画像では弓形に歪んでいることがわかる。右は補正処理を行ったものである。天井のライン等も歪みが補正されていることがわかる。

ター（搭乗者を吊り上げて電動車いすの座面付近まで運ぶ装置）を必要とする場合があることがわかり、カメラヘッドとリフターの干渉を避けるためにカメラヘッド取り付けアームをスイング可能な構造としたためスイングと固定を行うたびに取り付け姿勢が微妙に変化してしまう、という2つの問題が試作機のテスト時に判明し、リアルタイムにカメラの姿勢を推定する方法が必要になった。

姿勢推定を行うにあたっては、加速度センサーとジャイロスコープを用いる方法が定石であるが、相対的な姿勢推定であり、累積誤差が問題となる。そこで、全方向画像からカメラヘッドの姿勢を高速かつ絶対的に推定する方法を開発し、実装を行った^[11]。具体的にはまず全方向画像からエッジ（明度勾配の大きい部分）を全て取り出す。次に取り出された全てのエッジの方向を投票空間に投票すると、2つの大きなピークが得られる。これは我々の生活空間には鉛直と水平のエッジが多く存在しているためである。例えば机の天板や、天井と壁の境界線は水平のエッジを持ち、柱や本棚の支柱は鉛直のエッジを持つ。これらのピークの位置が投票空間上のどこに現れるかが相対的にカメラヘッドの姿勢を表していることになる。もちろん、鉛直に対して斜めに木が生える森があったとすると、その中では推定を誤ることになるが、ジャイロスコープと加速度センサーを併用することで、誤りが起こったことを知ることができる。

この手法についても、可能な限りルックアップテーブル化するなどの工夫を行い、わずか10 ms程度で、姿勢の推



図6 カメラヘッドの姿勢推定および傾き補正
全方向画像中の鉛直及び水平エッジからカメラヘッド自らの姿勢を推定する。上段は補正前の画像である。全方向画像なので傾きの影響がサインカーブ状に現れる。中央付近に写る黒い物体は電動車いす本体である。下段は推定したパラメーターを用いて補正した画像で、横方向が水平、縦方向が鉛直に対応するよう補正されている。

定および座標系の補正を可能にした。図6に、実際にカメラヘッドの姿勢を推定し、画像の補正を行った例を示す。図中上段は補正前の画像で、カメラヘッドが鉛直方向に対して傾いた状態で電動車いすに設置されているため、画像が歪んで見えることがわかる。図中下段は、上段の画像と全く同一のデータに対し、推定された姿勢パラメーターを用いて幾何変換を行ったものである。横方向が水平、縦方向が鉛直に対応する画像となっていることがわかる。カメラヘッドがどのような姿勢になったとしても、このような補正をリアルタイムで行うことができる。

3.5 危険検知

図7に全方向ステレオカメラによって取得した全方向距離情報を可視化した例を示す。正十二面体状に配置された各ステレオカメラユニットから得られた距離情報を座標変換し、カメラヘッドの中心を原点とする1つの統一座標系にマッピングしている。図7は1ショットで撮った同一のデータを3つの仮想視点から観測したものである。生データを直接プロットしているため、やや粗いものではあるが、人物や壁などまでの距離感が立体的に捉えられていることがわかる。全方向ステレオカメラでは、このような全方向距離情報を1秒間に15回（角度分解能360/512度＝約0.7度、1ショットで約30万点を計測の場合）取得することができる。電動車いす走行環境の危険検知は、この全方向距離情報を直接的に用いて行う。危険検知の詳細なアルゴリズムについては参考文献^[11]に譲るが、基本的には、床面の高さを0としたとき、-0.5 m（床より低い）から1.6 mの高さまでに存在する物体を全て検出する。このとき、検出された物体が実際に走行の障害となるかどうかは、電動車いすの進行方向に依存するため、図8に示すジョイスティックを倒す方向に応じて切り替わる判定エリアを設定し、減速・停止エリアに物体が入った場合にそれぞれ自動的に減速・停止する。本論文における実験では、判定エリアの直径はそれぞれ1.2 m（減速エリア）、0.4 m（停止エリア）とした。前進直進（F₀）では、狭い通路も通過可能となるよう、判定エリアを矩形としている。これに対し、前

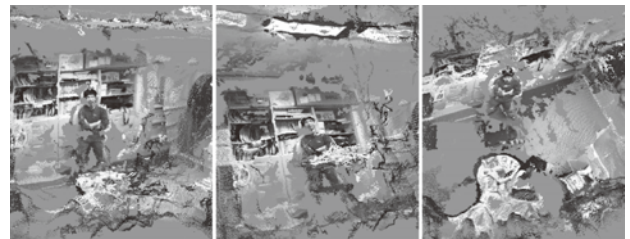


図7 全方向距離情報
同一のデータを3つの仮想視点から見たもの。観測点数は約30万点。このような全方向にわたる三次元データを1秒間に15回取得することができる。

進しつつ回転が加わる $F_{+1} \sim F_{+2}$ では、ユーザーのジョイスティック操作によって絶えず回転量が変化することが予想されるので、確率的な広がりやを考慮して扇形の判定エリアを設定している。回転量が大きくなる F_{+2} の例では、進行方向前方の障害物だけでなく、回転方向内側の巻き込みや、回転方向外側のはね飛ばしも考慮する必要があるため、回転方向内側に判定エリアを拡大すると同時に、進行方向反対側となる回転方向外側にも停止エリアを設けている。なお、障害物の観測・検出自体は、これらの判定エリアに関わらず、常に全方向に対して行っているため、急激なジョイスティック操作により急に判定エリアが切り替わったとしても、遅延なく危険の判定を行うことができる。さらに、床より低い領域も検出対象としているため、段差や下りの階段なども検出し、電動車いすの走破性能を超えると判断される場合には自動的に減速・停止させることができる。なお、段差は自動車や台車などの通過を考慮して角が削られている場合もあり、落差はあっても実際には通過可能である場合もある。しかし、現状では 5 cm を越える落差があると判定される場合は無条件で停止させる。これは、ステレオ画像処理による距離計測の誤差が条件によっては 2～3 cm のオーダーで出る場合があり、現状では、十分な安全余裕を持った判定ができないためである。なお、詳細は参考文献^[12]に譲るが、この問題を解決し、さらに高度で詳細な危険検出を実現するために、観測に近赤外パターン光を併用するステレオ画像処理システムの開発を別途進めており、数 mm のオーダーで段差を詳細に観測することに成功している。今後はこの技術の本システム

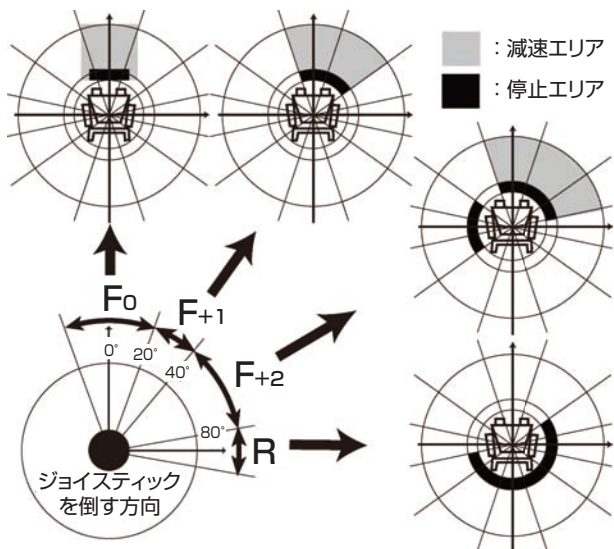


図8 判定エリアの制御
ジョイスティックの倒された方向によって判定エリアを切り替える。図は電動車いすおよびジョイスティックを真上から見たもので、上方向が前進方向、下方向が後退方向を表す。紙面の都合で前進直進 (F_0) ～右その場回転 (R) のみ示したが他の方向も同様に定義する。

への適用も検討する。

3.6 ジェスチャー検出

搭乗者の姿勢の変化やジェスチャーを全方向ステレオカメラによって三次元的に捉え、電動車いすのコントロールを行う機能を検討した。具体的には、(1) 乗車姿勢の異常を検知する機能、(2) 腕によるジェスチャーを検出する機能をそれぞれ実装した。これらはいずれも、搭乗者付近の空間を小立方体領域（ボクセル）に分割し、それぞれの領域内の物体の有無のパターンに基づいて認識を行う^[11]。乗車姿勢やジェスチャーの出し方については、搭乗者ごとに予め登録を行う。乗車姿勢の異常やジェスチャーの検出を行う際には、予め登録したパターンと観測されたパターンの類似性を基に判定を行う。具体的な動作については、5.1で詳しく述べる。なお、この機能は研究開始当初は設定されていなかったが、試作機完成後ユーザーからの要望により実装を検討したものである。

3.7 情報提示インターフェース

全方向ステレオカメラが危険を検知し、電動車いすが減速あるいは停止モードに入ったとき、搭乗者がその理由を理解できない場合に強い不快感を覚えることが試作機を用いた実験によって明らかになった。そこで、危険の検出状況を搭乗者に知らせるためのインターフェースの検討を行った。まず、情報提示のために小型の携帯情報端末を搭乗者の手元付近に設置し、次に情報提示方法の検討を行った。初期段階ではできるだけ多くの情報を搭乗者に伝えた方が良くと考え、危険が検出された方向・高さなどをグラフィカルに表示するものを試作してテストした。しかし、多くの情報が同時に表示されるため、走行中とっさに見て理解するのが困難であることがわかり、より直感的に理解できるよう工夫した。図9左に最終的に採用したものを示す。ここでは衝突や、段差からの転落などのリスクをわかりやすいピクトグラムで表現し、リスクが存在する方向に表示する。そして「STOP」、「Slowdown」などを大きな文字でコント

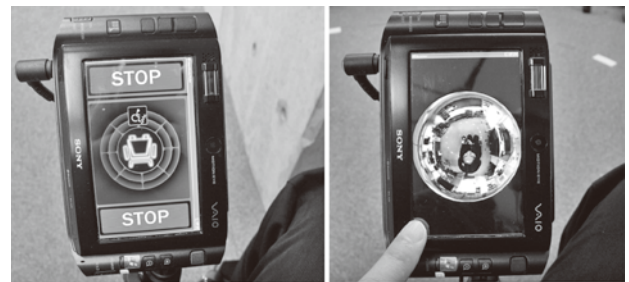


図9 情報提示インターフェース

左は電動車いすの制御状態を表示したものの。リスクの種類と存在する方向をピクトグラムで表示する。右は搭乗者を真下に見下ろす視点の全方向球面画像。タッチパネルで球を自由に回転させることができる。

ラストを高く表示することで、搭乗者が「どの方向にどのようなリスクがあって、現状どう制御が介入しているのか」を直感的に理解できるようにしている。

なお、この端末には全方向ステレオカメラによって取得した全方向画像を表示する機能も実装している。例えばバック時に後方を確認したり、自分を見下ろす視点で周囲を確認することもできる(図9右)。画面はタッチパネルになっており、指によるタッチ操作で好みの視点に調整できる。

4 要素の統合・構成

4.1 研究の具体的プロセス

研究プロセスの全体像について述べる。図10は図1で示した研究戦略モデル図に基づいて、研究のプロセスをより具体的に示したものであり、その流れは次のとおりである。(1)中核となる「センシング機能」および「危険認識機能」を実現するための要素技術として、従来の研究シーズから全方向ステレオカメラ、ステレオ画像処理、画像統合処理、危険検知処理を初期選択した。(2)要素技術の統合・構成を可能な限り短期間で行い、試作機を完成させることで研究・技術の可視化を行い、ユーザー・社会に向けて積極的に情報発信(論文のみならずプレスリリース、展示会なども通して)を行った。このとき、試作機のデザイン設計も情報発信の精度・効率を高めるために重要となる。(3)評価のフェーズでは、実験・考察のみならず、外部の評価・ニーズ・知見の獲得にも注力することで、効率的に現状を評価する。これによって、改良が必要な要素技術、あるいは新規に開発することが必要な要素技術を見極める。(4)要素技術の創生および改良に関する研究を行う。これはい

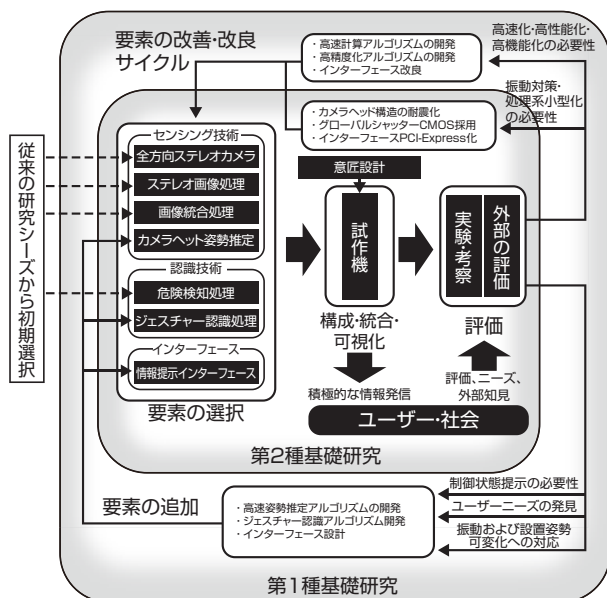


図10 研究の全体像

わゆる第1種基礎研究に相当するが、解決すべき課題および評価基準が明確であるため、効率的に研究を推進することができる。(5)更新・追加された要素技術群を再び統合・構成し、以下同様のサイクルを繰り返す。

以上は、第2種基礎研究がエンジンとなって、第1種基礎研究を生み出し、再び第2種基礎研究に回帰することで、研究成果をスパイラルアップ的に継続して進化させる構造であると捉えることができるだろう。また、我々は当初、評価のフェーズにおけるユーザー・社会からのフィードバックは(研究の内容・方向性を調整する程度の)より抽象的・間接的なものであると想定していた。しかし、実際にはユーザーを巻き込んだ評価がダイレクトに要素技術を生み出す力となった。従来の我々の第1種基礎研究を起点とする研究アプローチでは実質的な重視がされてこなかったユーザーやサービスの層まで含んで第2種基礎研究のエンジンを構成し、そこからダイレクトに出てくる要素技術を生み出す力をもって第1種基礎研究を推進するという全体像がいわゆる「本格研究^[4]」の1つの実例となり得るのではないかと考える。

4.2 試作機の概要

第3章で述べた全ての要素技術を統合・構成した試作機の外観を図11に示す。この試作機は(1)周囲の歩行者や障害物、段差や階段などを全方向にわたって同時に検出し、走行に危険がおよぶと判断される場合に自動的に減速・停止する機能、(2)搭乗者のジェスチャーや乗車姿勢を認識し、介助を行う機能を基本機能として持つ。

全方向ステレオカメラは、アーム支持により、搭乗者の頭上前方に位置するよう設置した。この位置は人間が歩行するときの目の高さに相当し、生活空間における危険を検出するうえで合理的である。また人間が歩行する空間にお



図11 試作機の外観

全方向ステレオシステムはユーザーの頭上前方に設置した。PCや電源等の機器は全て車載され、外部ケーブルを全く必要とせず約4時間連続動作することができる。

いては、頭の高さより低いこの位置は障害物に干渉する可能性が少ない。さらに搭乗者の乗降動作の軌道外にアームおよびカメラヘッドが位置するよう設計しているため、そのまま乗降が可能である。リフター等を用いる場合でカメラヘッドの干渉が問題になるときは、アーム途中の折れ部がスイング可能となっており、カメラヘッド部を後方に逃がすことで対応することができる。

試作の初期段階では、大型のPCを外部に置き、外部電源とともにケーブルで電動車いすに接続し実験を行っていた。これを全て車載化するためには、前章で述べたステレオ画像処理、画像統合、カメラ姿勢推定・補正、危険検出、ジェスチャー検出、など極めて膨大な計算を要する機能を全て1台の小型PC上に実装する必要がある。これを実現するために、まず、第3章で述べた様々な高速計算アルゴリズムの開発・実装を積極的に進め、ソフトウェアの面からPCの小型化による処理能力低下を補った。また処理の並列化のほか、重複計算の排除、テーブル引きが可能なのは全てテーブル化する、などの実装上の工夫についても徹底的に行った。さらにハードウェアの面からは、小型のマザーボードに対応するため、全方向ステレオカメラのインターフェースをPCI-X規格からPCI-Express規格に変更した。PCI-X規格はデータ転送の帯域は広いが、サーバー用のマザーボードに採用が限られている。PCI-Express規格は近年急速に普及が進んでおりほとんど

のマザーボードで対応しているほか、全方向ステレオカメラのデータ転送に十分な帯域を確保することができる。

図12に車載されたPCの外観を示す。PCは座席後部のカバー内にコンパクトに収められている。この他、電動車いす-PC間のインターフェースユニット、ジョイスティックインターフェースユニット、無線LAN機器などを全てシート下に収めた。電源はモーター駆動用の鉛蓄電池(12V、52Ah×2)を全ての機器で共通に用いた。これにより、外部ケーブルを一切必要とせず、連続で約4時間動作することが可能である。

4.3 外装デザイン

研究シナリオに沿って「future-orientedな先端技術による福祉機器高度化の可能性・必要性を提示する」ものとするためには、人々の注目を集め、かつ一目でそのコンセプト・将来性が見てとれるものでなくてはならない。そのためには外装のデザインにも十分な注意を払う必要があり、チーム内で議論・試作を繰り返した。図13左に試作中の1コマを示す。同図中右は検討の結果決定した第1号機のデザインで、これを用いてプレスリリース^[3]や展示会出展、ニュース番組等でのデモンストレーションを行った(現在は車載機器等の小型化がさらに進み、図11で示したデザインの2



図12 PCの車載
右がカバーを外した状態。PCは座席後部に車載されている。

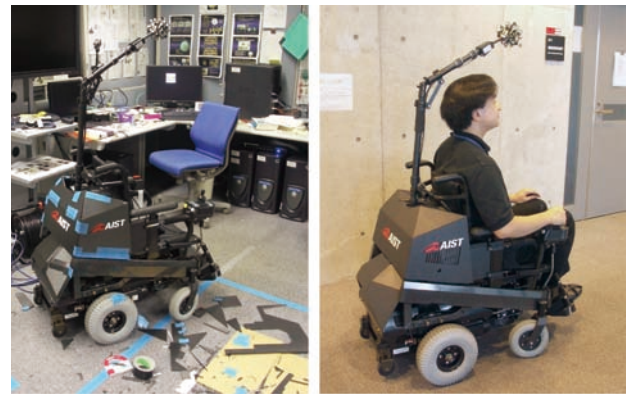


図13 外装デザインの検討
左はデザインの検討過程。何度も試作を繰り返しデザイン決定した。右は1号機のデザイン。これを用いてプレスリリースを行った。

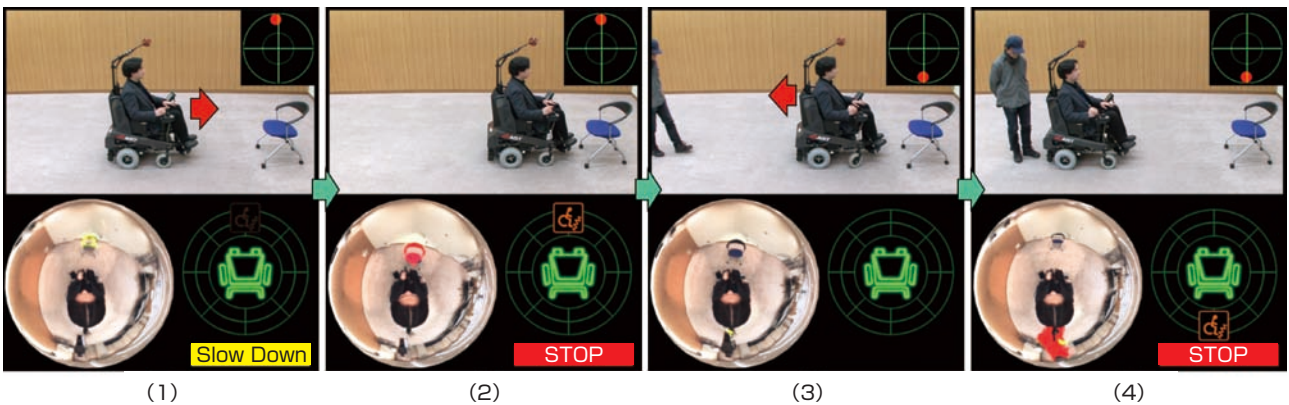


図14 障害物の検出

号機も同時に運用している）。

デザインのポイントは次のとおりである。(1) 内部の機材・配線は可能な限りカバーする。これらが剥き出しの状態を見せることは「研究室の実験に留まるレベルである」ということを取ってアピールすることに（結果的に）なり、今回のミッションには相応しくない。(2) デザインのセオリーを無視してカバーを無理に小型化しない。車載機器が小型であることをアピールしたいがために、カバーを無理に小型にデザインすると全体のまとまりが悪くなり、「余計な部分」としてむしろ目立つことになる。例えば、図13右の例では車載機器の占める体積は、カバーの体積の3分の1ほどである。しかし、全体としての一体感があるため「どこにコンピュータが入っているのですか？」といった質問を展示会等で多く受けるほどであった。(3) 産総研の取り組みであることを明示するためにAISTのロゴをデザインの一部として組み込んだ。

5 評価

5.1 試作機を用いた実験

図14に基本的な障害物検知実験の様子を示す。(1)～(4)まで時系列順に4コマのシーンを示す。それぞれ、右上に搭乗者が操作しているジョイスティックの方向（上方向が前進に相当）、左下に全方向ステレオカメラによって撮影した全方向画像（球面で表現：中央に搭乗者が映っている）、右下に第3章7節で紹介した情報提示インターフェースの画面を示す。(1)では前方の障害物（いす）に接近し、自動的に減速モードとなった。搭乗者が引き続きジョイスティックを前に倒し続けたため、障害物に衝突する直前の(2)で自動停止した。次に、(3)で搭乗者がジョイスティックを後方に倒し、後退を開始したが、搭乗者の視界の外となる後方から歩行者が接近しており、衝突の危険がある(4)で自動停止した。

図15は下り階段を検出し、自動停止する例である。路上の障害物だけでなく、段差や下り階段についても検出を



図15 下り階段の検出

下り階段や段差等を検出し、走行に危険がおよぶと判断される場合は自動的に減速・停止する。

行っているため、転落を未然に防止できる。

図16および図17に、ジェスチャー検出機能の動作例を示す。図16では、搭乗者の乗車姿勢が予め登録したものと大きく異なることが検出されたため、緊急停止を行っている。このような状態が設定された時間以上続く場合には、携帯電話などを介して外部に自動通知することができる。図17はジェスチャー検出機能と危険検出機能を同時に活用した例である。電動車いすから物を把握したり、エレベータのボタンなどを押すために対象に近づいたが、あと少しで手が届かない場合に、手を伸ばし続けるジェスチャーをトリガーとして、手が届く位置まで安全を確認しながら自動的に前進する。具体的には、(1)で搭乗者がペットボトルを把握するために腕を3秒以上伸ばし続けていると、(2)でアシストが始まり、電動車いすが自動的に微速前進する。腕を戻すか、障害物（ここでは机）と干渉する直前で自動停止するので、(3)で搭乗者はペットボトルを把握することに成功した。

これらのジェスチャー認識機能は、第3章6節で既に述べたとおり、現状ではボクセルによって粗く量子化した三次元形状のパターンを予め登録したパターンと単純に比較することによって姿勢やジェスチャーを判定しており、図16や図17の例のような比較的大きな動作を検出の対象としている。一方で、腕に障害を持つ一部のユーザーからは「肩の微妙な動きをジェスチャーとして認識できないか」といった要望も出ており、今後は学習型のパターン認識手法を導入することで、より細かな動きを正確に認識する手法の開発を検討する予定である。

なお、図17の機能は実際の車いすユーザーから要望があり、実現に向けて検討を行ったものである。電動車いすはジョイスティックによる微妙な位置決めが熟練を要する。特に物を把握するために机に近づいたり、エレベータのボタンを押すために壁に近づくケースでは、操作の間違いによって机や壁に衝突する可能性があり、大きなリスクを伴う。このような問題を避けるため、微妙な位置決めが必要な場合には介助者の手を借りるケースもあるのだが、同様の介助が1日に数10回、数100回と必要になるため、むしろ電動車いすの搭乗者が「申し訳ない」と感じ、ひいては外出を差し控えることにもつながる場合がある。このような些細だが回数の多い介助こそ機械がサポートしてくれないか?という当事者の要望を受けて検討を行った。

以上が試作機における基本機能であるが、さらに発展的にいくつかの機能を実装し、検討を行った。図18では最も近くにいる人物を認識し、常に人物に対して正対、かつ1mの距離を保つように自動追尾している。全方向を同時に監視しているため、人物が急な移動を行ったとしても

見失うことはない。今後これを発展させ、特定の人物（介助者など）を自動的に追跡する機能の実現を検討している。図19は人混みにおける経路の自動選択を想定した実験である。同図中（2）で多数の人物に囲まれてしまったが、全方向を同時に観測しているため、進行可能な方向を瞬時に判断し（4）で自動的に脱出している。人混みにおいては、常に周囲の状況が動的に変化するので、情報収集に時間を要していると、その間に状態が変化してしまう。全方向ステレオカメラは1ショットで全方向の情報を同時に収集することができるので、このような人混みにおいても全方向にわたって常に最新の情報を用いて制御することが可能である。なお、これらの機能は試作機のセンシング能力をわかりやすく表しているのここで紹介したが、他の「ユーザーを補助する」機能と異なり、電動車いすが自動的に動く。このため、より確実な安全性が求められ、実用化へのハードルは高いと考えられる。しかし、これらのような自動化技術へのニーズは高く、将来へ向けた発展的な機能として研究を進めている。

図20に様々な環境下における実験の様子を示す。家具などが複雑に配置された室内空間や、太陽光の直射を受ける屋外空間など、多様な環境において走行実験を行い、安定性を評価した。実験の過程で「安全」と「自由」のバランスが大きな課題となった。極論するとユーザーのジョイスティックの操作にかかわらず停止モードとする（すなわち全く動かない）ことが、ある意味最も「安全」である。逆に安全システムの介入を減らしていくと、より「自由」に動く

図20に様々な環境下における実験の様子を示す。家具などが複雑に配置された室内空間や、太陽光の直射を受ける屋外空間など、多様な環境において走行実験を行い、安定性を評価した。実験の過程で「安全」と「自由」のバランスが大きな課題となった。極論するとユーザーのジョイスティックの操作にかかわらず停止モードとする（すなわち全く動かない）ことが、ある意味最も「安全」である。逆に安全システムの介入を減らしていくと、より「自由」に動く

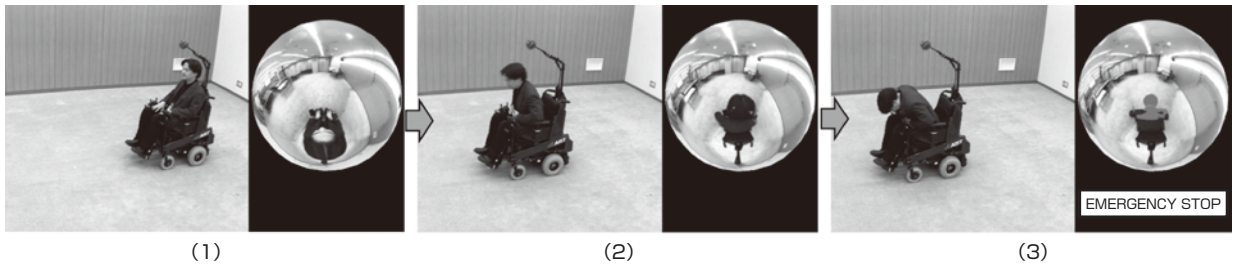


図16 搭乗者の乗車姿勢の異常を検知して緊急停止

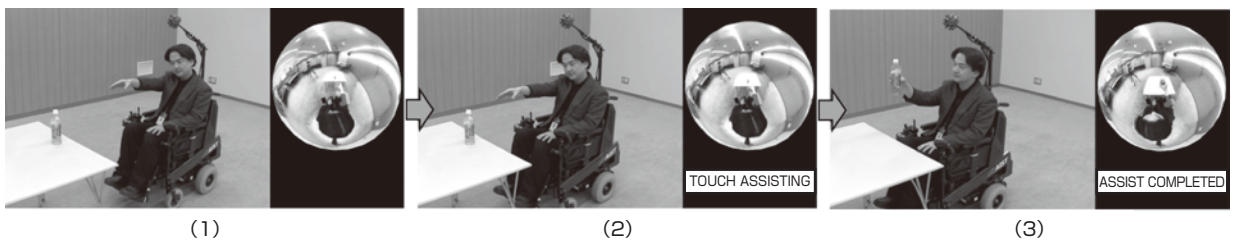


図17 搭乗者のジェスチャーを認識して手の届く位置まで自動的に介助



図18 自動追尾実験

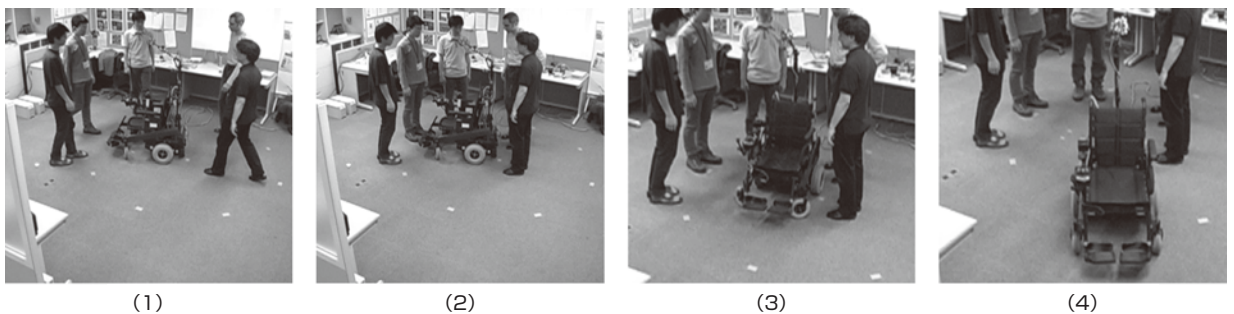


図19 人混みにおける自動経路選択

ことができるようになるが、走行のリスクは高まる。この設定については、ユーザーのスキルや身体の状態、あるいは単純な好みによって、適切な設定がかなり異なることがわかった。この問題について今後より具体的に議論を進めるためには、先に述べた自動化の問題も含めて、安全性をある程度定量的に評価するための枠組み作りが必要であると考えられる。また、万が一事故が起こった場合の責任の所在に関しても十分に議論を進めていく必要がある。これについては、例えば自動車の運転補助・自動駐車機能や生活支援ロボットなども全く同じ問題を持っている。今後これらの分野とも連携しながら、安全と責任に関する枠組み作りを進め、社会的なコンセンサスを得ていく必要があるだろう。

5.2 ユーザーの反応

本研究の研究シナリオにおいては、実際に様々なユーザーの意見を収集し、取り入れていくことがスパイラルアップのために重要となる。このため、特に従来の車いすユーザーの意見を収集するために国際福祉機器展（総来場者数は3日間で約10万人）など多くの展示会に出展を行った。当初は「かなり未来志向の提案であり、従来の車いすユーザーに相手にしてもらえないのではないか」といった不安があったが、実際には全くの逆で「このようなものを待っていた、すぐにでも欲しい」、「このような研究をさらに積極的に進めて欲しい」といった感想を多く得ることができた。東京での展示にもかかわらず、わざわざ大阪から車いすで来場された方もいた。先端技術を活用した支援システムに対する強いニーズがそこには存在したのである。来場者からは様々な意見が得られ、新たな研究課題を生み出した。既に紹介したように図17の自動介助機能などはこの過程で生まれたものである。

福祉機器は、それ単独ではユーザー層が限られることや、対象者の状態によってカスタマイズが必要になることが多いため、一般の大量生産機器と比較するとビジネスとして成立させることが難しい。このため、切実なニーズがありな



図20 様々な環境下における実験

屋内外、多様な環境下での走行実験を実施。左は狭い通路の通過実験。車幅に対してほとんど余裕がないため、安全寄りに設定すると頻繁に自動停止してしまうなど「安全」と「自由」のバランスが難しい。右は屋外の直射日光下における実験。様々な環境変動に対する安定性を評価している。

がらも先端的技術の導入が進まない現状がある。しかし本来はこのようなニーズにこそIT技術やロボット技術が積極的に活用されるべきであり、今後の状況の改善に向けた何らかのスキームを検討する必要がある。そのような意味で、従来の車いすの枠組みに限定するのではなく、新しいモビリティとして発展的に考えるというコンセプトに対して従来の車いすユーザーからも多くの賛同と期待をいただいた。また、本研究で開発した要素技術群の一部を、マーケットの大きい自動車産業における安全確保技術として一旦応用展開し、高性能・低コスト化した技術を再び電動車いすに持ち帰り適用するというスキームも検討できるだろう。

6 まとめと今後の展望

全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いすの開発について述べた。冒頭で述べたとおり、まず従来の研究シーズから初期選択した要素技術を統合・構成し、可能な限り早期に「動く」試作機を完成させることで研究・技術を可視化した。そしてその評価・公表の結果から「創生が必要な要素技術、あるいは改良が必要な要素技術」を見極め、要素技術研究を遂行し、その結果を再度統合・構成するというスパイラルアップ構造の研究戦略を実践した。そこにおいては、必要な要素技術研究が連鎖的に生み出されたが、それらはいずれも直ちに必要とされているものであり、かつ性能の評価基準も明確（発生している問題を解決できるかどうか）であったので、良い効率とバランスで研究を進めることができた。

本研究では、室内外の空間において歩行者とも共存しながら安全に移動するためのモビリティを実現するために必要となる周囲環境を迅速かつ的確にセンシングする技術と、得られた情報からリスクを的確に検出する技術の開発を行い、電動車いすに実装し実証実験を行った。今後全ての人を対象とした新しいモビリティとして更に発展させるためには、インフラの整備や法規・法令の問題など課題も多く存在しており、今後引き続き検討を進めていく。

参考文献

- [1] H. H. Meinel: Commercial applications of millimeterwaves: History, present status and future trends, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 43 (7), 1639-53 (1995).
- [2] 下村倫子, 中村 聡, 後藤敏行, 藤本和己, 室 英夫: 車載カメラとレーザレーダフュージョンによる前方車両追跡, *電気学会論文誌C*, 123(8), 1427-1438 (2003).
- [3] 全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす -安心・安全な電動車いすの実現-, 産総研プレスリリース (2006).
- [4] 第2種基礎研究を軸とした本格研究の展開, 第1集~第13集, 産業技術総合研究所 (2006-2008).

- [5] 山本和彦, 棚橋英樹, 桑島茂純, 丹羽義典: 実環境センシングのための全方向ステレオシステム(SOS), *電気学会論文誌C*, 121-C (5), 876-881 (2001).
- [6] 佐藤雄隆, 山本和彦, 桑島茂純, 棚橋英樹, 王 彩華, 丹羽義典: 移動体ビジョンを指向した小型全方向ステレオシステム(miniSOS)の開発, *画像センシングシンポジウム(SSII03)講演論文集*, 311-316 (2003).
- [7] S. Shimizu, K. Yamamoto, C. Wang, Y. Satoh, H. Tanahashi and Y. Niwa: Moving object detection by mobile Stereo Omni-directional System (SOS) using spherical depth image, *Pattern Analysis & Applications* (2005).
- [8] Y. Yagi, S. Kawato and S. Tsuji: Real-time omnidirectional image sensor (COPIS) for vision-guided navigation, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 10(1), 11-22 (1994).
- [9] J. Kurata, K. T. V. Grattan and H. Uchiyama: Navigation system for a mobile robot with a visual sensor using a fish-eye lens, *Review of Scientific Instruments*, 69, Issue 2, 585-590 (1998).
- [10] C. Mandel, K. Huebner and T. Vierhuff: Towards an autonomous wheelchair: Cognitive aspects in service robotics, *Proc. Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS2005)*, 165-172 (2005).
- [11] Y. Satoh and K. Sakaue: An omni-directional stereo vision-based smart wheelchair, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2007, Article ID 87646, 11 (2007).
- [12] 佐藤雄隆, 尾崎竜史, 坂上勝彦: 近赤外パターン光投影ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす, *信学技報(PRMU2008-106)*, 108 (263), 103-106 (2008).

執筆者略歴

佐藤 雄隆(さとう ゆたか)

2001年北海道大学工学研究科博士後期課程修了。財団法人ソフピアアジア HOIP プロジェクト主任専門研究員を経て、現在、産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員。前職で全方向ステレオカメラを開発。産総研に入所後、その障害者支援への応用に関する研究を進めている。他にロバストパターンマッチングに関する研究を行っており、これまで監視カメラによる人物の自動検出アルゴリズムの製品化などを行った。筑波大学大学院准教授(連携大学院)。博士(工学)。本論文では、研究計画、システム的设计・実装、実験・考察に関する部分を担当した。



坂上 勝彦(さかうえ かつひこ)

1981年東京大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年電子技術総合研究所に入所。以来、一貫して画像処理とその実世界応用に関する研究に従事。RWC(リアルワールドコンピューティング)プロジェクト実世界知能技術分野の研究開発や障害者の安全で快適な生活の支援技術の開発等のプロジェクトに参画。現在、産業技術総合研究所情報技術研究部門主幹研究員。筑波大学大学院システム情報工学研究科教授(連携大学院)。1979年度電子通信学会学術奨励賞、1985年度情報処理学会論文賞、2006年 IAPR(国際パターン認識連盟) Fellow。工学博士。本論文では、研究戦略に関する検討および全体の総括を担当した。



査読者との議論

議論1 ゴールの設定とそれへのシナリオについて

質問・コメント(赤松 幹之:産総研人間福祉医工学研究部門)

表題に明記されているように、本研究開発は電動車いすに限定するものではなく、新しいパーソナルモビリティをゴールと設定したと第2章で述べられています。しかしながら、第3章以降に記載されているシナリオや技術は車いすへの適用という観点からしか説明がなされていません。要素の統合によって得られる機能の中で、新しいパーソナルモビリティを意識したものが何であったかを明記してください。

質問・コメント(内藤 耕:産総研サービス工学研究センター)

この論文で提示されている技術群は、電動車いす以外への発展の可能性が高く、そのことは表題のみならず、第2章でも記述されています。一方、論文はこの電動車いすの試作機(プロトタイプ)開発を軸に、第1種基礎研究として、さまざまな要素技術の開発とその統合プロセス、評価結果が記述されています。この研究成果の普及に伴い形成されるこれからのパーソナルモビリティ社会像や、そこへのシナリオ、必要な技術課題等についての提案を追加してください。

回答(佐藤 雄隆)

ご指摘のとおり、要素の統合によって得られる機能の中で、何が新しいパーソナルモビリティを意識したものであったか明確になっておりませんでしたので、1章および2章に、室内外の空間において歩行者とも共存しながら走行する電動車いす程度のスケールのモビリティを想定している旨、そしてそこにおいては、歩行者や障害物への衝突、段差や階段における転倒・転落などを未然に防止するための「周囲環境を迅速かつ的確にセンシングし、得られた情報からリスクを的確に検出する機能」が重要となる旨を追加しました。

本研究は基本的には電動車いすの高度化に関するものであったため、「高齢者や障害者のQOL向上」は常に外すことができない重要なテーマで、本論文全体の文脈もそれに沿ったものになっております。その一方で、「電動車いすはモーター移動台車にイすを取り付け、乗車可能にしたものである」と技術的にシンプルに捉えれば、従来の電動車いすの概念を一旦リセットして新しいパーソナルモビリティとしての役割を発展的に検討できる可能性があり(そのために外装のデザインもできるだけ従来の車いすと異なった新しい形に見えるよう設定しました)、そしてそれがより広い層をユーザーとして取り込むことにつながり、結果として電動車いすの市場規模の問題を解決する方向に向かってくれればベストである、という思いを同じ文脈の中に混在させたことが問題であったかと思えます。

なお、この考え自体は研究のカウンターパートである国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所の研究者の方やユーザーの皆様からも一定の賛同を得ることができましたので、第5章2節に記述を追加しました。一方で、その実現に向けては電動車いすに準ずる移動体に安全技術を投入しただけでは不十分で、インフラの整備や法規・法令の問題など解決すべき課題が山積である旨も第6章に追加しました。

議論2 研究課題の設定の図式化について

質問・コメント(赤松 幹之)

スパイラルアップ型の研究戦略をとり、試作と評価のプロセスを経ながら、要素技術を設定して統合していくという第2種基礎研究のアプローチをとっています。具体的な内容は本文中に書かれていますが、読者がこの研究プロセスを理解しやすいように、研究課題設定のプロセスを図示してください。例えば、最初の段階で構想した必要な要素技術は何で、それはそれぞれどういう問題があると想定して設定したのか。そして、試作のプロセスや試作品の評価によって明らかになった技術課題は何だったのか、それぞれはどういう観点からの課題だったのか(例えば、耐久性、精度不足、新たに発見されたユーザーニーズ、実環境の耐用性への対応等)などがわかるようにブロック図的な図で表現することを検討してみてください。また、「まとめ」

に、このスパイラルアップの方法をとったことに関する考察（良かった点や改善すべき点など）を加えてください。

質問・コメント（内藤 耕）

研究のスタイルは、プロトタイプ開発を通じて技術を可視化し、必要な外部知見を効率的に導入することで、研究成果が継続的に進化していく方法論が採用されています。この研究方法論によって、応用的に見える研究（第2種基礎研究）から、さまざまな基礎科学研究（第1種基礎研究）がドライブされていることを、自ら実証しています。これは研究マネージメント上の重要な発見で、第3章において、どのような知見をもとに、どのような第1種基礎研究がドライブされたかを、各要素技術の記述を構造化することで、その流れを明確化できます。記述方法の再構築と第3章の最後にそれを表として整理をお願いします。

回答（佐藤 雄隆）

研究の具体的なプロセスを整理した図10を追加いたしました。また、同図に関する説明を第4章1節として追加いたしました。具体的な説明につきましては第4章1節のとおりですが、図10の構造は第2種基礎研究がエンジンとなって活発に第1種基礎研究を生み出し、その第1種基礎研究によって創生および性能・価値が上がった要素技術によって更にレベルの高い第2種基礎研究を行う、という「価値を増幅させるサイクル」が実現されています。しかも、第1種基礎研究において研究を行う要素技術はいずれも直ちに必要とされているものであるため出口が明らかで、かつ性能の評価基準も明確（発生している問題を解決できるかどうか）であるので、研究のバランス・効率がとても良かったと考えています。これに関する記述を整理して第6章に記述しました。

また、当初我々は評価のフェーズからのフィードバックは、研究の内容・方向性を調整する程度の間接的・抽象的なものになると考えていました。しかし、実際にはユーザーなどを巻き込んだ評価がダイレクトに要素技術を生み出す力となりました。これは我々にとって新しい発見であり、図10中にそのプロセスを表現いたしました。従来の我々の第1種基礎研究を起点とする研究アプローチでは実質的に重視されてこなかったユーザーやサービスの層まで含んで第2種基礎研究のエンジンを構成し、そこからダイレクトに出てくる要素技術を生み出す力をもって第1種基礎研究を推進するという全体像が本格研究の1つの実例となり得るのではないかと考えています。

議論3 実現した各機能について

質問・コメント（赤松 幹之）

実現した代表的機能として、障害物検知、下り坂検知、姿勢異常の検知、ジェスチャー検知、自動追尾、自動経路選択の5つを紹介していますが、これらの機能を発揮する状況の説明が必ずしも明確ではないようです。ユーザーの状態として脇見をしていることを想定しているのか、また障害の程度を想定した機能なのか、また車いすの事故分析に基づくものなのか、など研究開発のゴール設定の説明が望まれます。

回答（佐藤 雄隆）

ご指摘のとおり各機能の選定理由および目的が明確ではありませんでしたので、第1章、第2章、第3章冒頭、図2、および第4章2節にそれぞれ記述を追加しました。ユーザーとして想定する対象は健常者も含む全ての人ですが、歩行者とも共存しながら安全に走行することを検討するにあたって、「周囲環境を迅速かつ的確にセンシングし、得られた情報からリスクを的確に検出する機能」が必須であると考え、障害物検知および段差の検知を第一に実装いたしました。

更に、高齢者や障害者を対象とした情報収集を行ったところ、ジェスチャー認識機能に対するニーズがあることを発見し、同機能をスパイラルアップ・サイクルの過程で実装しました（これについて第3章6節に記述しました）。自動追尾、自動経路選択の機能につきましては、将来的な自動移動に向けた発展的な取り組みとして研究を行っています。試作機のセンシング能力をわかりやすく表しているため、本文中

で紹介しましたが、その位置づけが明示されていませんでしたので、第5章1節に記述を追加しました。

議論4 他の自動化技術との関連について

質問・コメント（赤松 幹之）

第5章1節の終りに安全と自由の議論がありますが、自動車のITS分野では自動運転の実路実験が行われた10年前に議論が多くなされました。自動車の場合には加害性が高いため、事故が起きた場合の責任を誰がとるかが議論のポイントでした。結局、完全自動運転で事故が起きた場合にはメーカーが責任を取るようになる可能性があることから、ドライバーの意志の元での運転支援技術とする方向になりました。すなわち、基本的に必ずドライバーが関与した状態にしており、ドライバーが発現した行動に対するアシスト技術として社会に導入していくという戦略がとられています。そして、アシスト技術が普及する過程で、システムの信頼性や機能の高度化が進められ、そのプロセスで自動化が受け入れられる社会が形成できれば自動化システムが導入されていくかもしれません。一方、センシング技術を中心とした運転支援システムとしては、衝突警報システムが市場導入され始めています。ここでは、ユーザーインターフェースのデザイン（センシングした状況をいかに正しく、かつ迅速にユーザーに伝達するか）と、警報システムに対する過信の問題（警報が出ることに安心して脇見を多くするようになる等）が議論されています。このようにITS分野では、安全と自由の問題は、制御においてはシステムとユーザーとの役割分担、センシングにおいてはユーザーインターフェースのデザインと過信の問題として議論されています。

この研究開発はセンシング技術が基盤となっていますが、上述のように、ユーザー自身による制御とシステムによる制御のバランスをどうするかが社会導入へのポイントになると考えられます。この点についてのお考えがあれば書いていただきたく思います。

回答（佐藤 雄隆）

たいへん悩ましい問題ですが、ご指摘のITSでの流れが的確に状況を表していると思います。我々としては、システムの信頼性や機能の高度化を進めることで、自動化が受け入れられる社会の形成を目指すこととなります。残念ながら現状で具体的な案が固まっているわけではありませんが、その過程では安全性を評価するための枠組みを、同様の問題を持つ自動車や生活支援ロボットの分野とも連携しながら積極的に形成していく取り組みが必要であると考えます。これに関して第5章1節後半に記述しました。

議論5 リスクを的確に検出する技術について

質問・コメント（赤松 幹之）

リスク検知を重要な技術課題として挙げられていますが、実際には第5章1節に書かれているように、ユーザーのリスク認知に合致したリスク判定は極めて難しいもので、今後の研究開発が不可欠です。その意味からすると第3章5節の「危険検知」は物体検知（凹みも含めて）のレベルの技術の説明になっていると思います。危険度の判定、制御を減速とするか停止とするかの判定などの記述が必要と思います。

回答（佐藤 雄隆）

ご指摘のように、リスクを的確に検出する技術について記述が不十分でしたので、第3章5節に記述を追加するとともに図8を新たに追加しました。また、段差の詳細な分析に関しては、現状のシステムでは精度の問題で困難であること、また、その問題を解決するために近赤外パターン光を用いるステレオ画像処理システムの開発を別途進めている旨と、その参考文献を新たに追加しました。

議論6 ジェスチャー検出について

質問・コメント（赤松 幹之）

ジェスチャー検出についての記述がやや簡単で、その適用範囲が

明確にはなっていません。ジェスチャーや乗車姿勢のセンシングおよび判定についてももう少し詳しい説明をお願いします。

回答（佐藤 雄隆）

ご指摘のとおりジェスチャーに関する記述が不足していましたので、第3章6節 および第5章1節に記述を追加しました。具体的には、現状実装しているのは(1)乗車姿勢の異常を検知する機能、

(2)腕によるジェスチャーを検出する機能である旨、また、それぞれ現状では量子化した三次元パターンの単純なマッチングによってジェ

スチャーを判定しているのです、ある程度大きな動作を前提としている旨、を追加しました。実は、ジェスチャー認識は、障害によって体の一部しか動かすことができない方からも期待が寄せられています。具体的には、肩だけわずかに動くという方のジェスチャーを認識できないか、という話があり検討を行っていますが、現状の比較的大きな動作を前提とする場合と異なり、通常の動作とジェスチャーの動作の判別が困難であるため、現状の単純なマッチングでは不十分で、学習型のパターンマッチング手法などを導入することを検討しています。これについても記述を追加しました。

部材の軽量化による輸送機器の省エネ化

— 難燃性マグネシウムの研究開発 —

坂本 満^{1*}、上野 英俊²

輸送機器の分野では、省エネルギーと二酸化炭素排出量の低減に直結する技術革新が喫緊の課題となっている。この要求に対して機器の軽量化は直接的な効果をもたらすことから、軽量で高機能の構造材料が求められている。マグネシウム合金は、その有力な候補として長らく期待されてきた材料であるが、容易に発火するという致命的な問題を有していた。難燃性マグネシウム合金は、発火性を抑制して金属材料としての実用性を飛躍的に高めた材料である。これを低環境負荷の基幹材料として育成することは、輸送機器の軽量化のための技術革新に大きく貢献する。本稿では、実用化に関わるさまざまな技術課題の解決を通じて、新素材の産業化のための1つの方法論を述べる。

キーワード：難燃性マグネシウム合金、SF₆ガスフリープロセス、基幹材料、軽量構造材料、連携ネットワーク

Energy savings in transportation systems by weight reduction of their components

– Research and development of non-combustible magnesium alloys –

Michiru Sakamoto^{1*} and Hidetoshi Ueno²

Technological innovation bringing direct energy savings and reductions in carbon-dioxide emissions has been cited as an urgent issue in the field of transportation machinery. To cope with this issue, demand has been growing for structural materials that are lightweight yet offer high functionality because weight reduction of machinery can be immediately beneficial. A new non-combustible magnesium alloy with drastically improved areas of application is sought in which flammability is suppressed—the worst weakness of magnesium alloys. Developing this new alloy as a basic component for reducing environmental load will contribute greatly to technological innovation for weight reduction in transportation machinery. This paper examines one methodology for industrialization of a new material through the resolution of the various technical issues related to practical application of non-combustible magnesium alloys.

Keywords: Non-combustible magnesium alloy, SF₆ gas-free process, basic material, lightweight structural materials, research network

1 研究の目的とアウトカム

エネルギー消費の主要な位置を占め、今後の急激な増加が危惧される運輸部門の省エネルギーは、世界の喫緊の課題となっている。その対策の中で、最も直接的で効果的な対応策の1つに輸送機器の軽量化がある。現状の輸送機器を支えるのは基幹材料である鉄鋼やアルミニウムであるが、これに続く新たな基幹材料となり得る軽量材料が望まれている。マグネシウムはこの目的にかなう材料候補の1つであり、環境調和循環型技術への社会ニーズの観点から近年とみに期待が高い材料である。資源として飛び抜けて豊富であり、世界的に普遍的に分布し、金属材料としての再生のたやすさと環境毒性のない安全性等、循環型材料として、また、鉄鋼やアルミニウムのような基幹材料として

の大きい可能性を秘めた材料である。しかしながら、さまざまな技術的課題によりいまだに基幹材料と呼べるほどの地位を獲得するにはいたっていない。マグネシウムの特性を工業的な視点で定量化してこれを基幹材料として育て上げることができれば、資源・エネルギー使用の最適化の観点から、真に持続的な社会の実現に貢献することができると期待される。

具体的には、マグネシウムの広範な実用化により、およそ動くもの全ての軽量化を実現する。自動車・鉄道・航空機等の輸送機器や機械要素・ロボット等の軽量化による高効率化を目指す。当面は、エネルギー効率に優れた大量輸送システムである鉄道車両部材への適用による一層の省エネへの貢献を目指し、将来の量産技術の展開により自動車

1 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98、2 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒841-0052 鳥栖市宿町 807-1

1. Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST Anagahora 2266-98, Shimo-shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan * E-mail : michiru-sakamoto@aist.go.jp, 2. Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST Shuku-machi 807-1, Tosu 841-0052, Japan

Received original manuscript January 23,2009, Revisions received March 30,2009, Accepted March 30,2009

やささまざまな機械構造材への広範な適用を目指している。これによって、環境負荷の低減を通じてそれ自体が環境調和型である基幹材料の確立と、輸送機器の省エネルギーに貢献する。

2 マグネシウムにおける最大の課題

マグネシウムの最大かつ深刻な問題は大気中で燃えることである。この性質が、古く戦前から航空機用構造材料として実用されていたにも関わらず、その後の一般民生用途への適用の大きな心理的障壁であったことは確かである。製造技術の面からも、マグネシウムの発火・燃焼性のために溶解・鋳造プロセスは特殊なものとなり、これまでに培われてきた一般の金属材料技術をそのまま流用することは困難であった。難燃性マグネシウムの研究では、マグネシウムを難燃化して通常の大気中での製造プロセスを開発することを核として、産業界に受け入れられる低コストプロセスを確立することを目指してきた。特に、環境負荷の大きな地球温暖化ガスでありながら溶解工程で防燃ガスとして必須であった六フッ化硫黄ガスを用いないプロセスは、今後のこの分野の方向性を決める重大な技術である。これを通じて、マグネシウムの製造技術が特殊なものから一般的な技術へ転換することができる。すなわち、従来の認識である特殊な材料から、誰でも安心して使うことができる基幹材料として、安全で環境に優しい高効率の量産プロセスの確立を目指している。

難燃性マグネシウムの製造技術は、作る側すなわち生産現場における安全・安心と、生産の低コスト化（特殊設備が不要となる）にとって福音となるばかりではなく、さらに重要なことはユーザーの視点すなわち使う側の安全・安心を満たすことにある。マグネシウムの発火に対する心理的な不安感に加えて、事故や火災に際しての安全性については、ともしれば見過ごされてきた重要な問題であった。

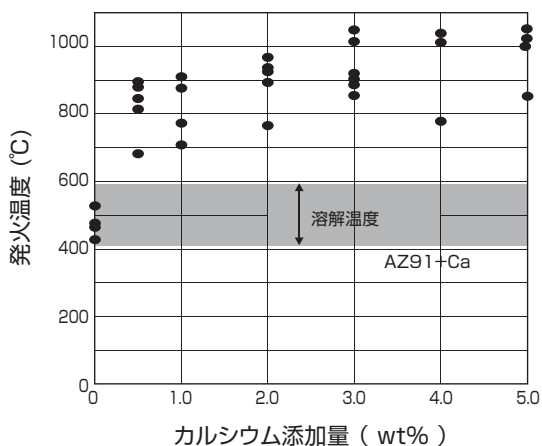


図1 代表的な難燃性マグネシウム合金 (AZX912) の発火温度

2.1 カルシウム添加による難燃性の発見と難燃化機構

難燃性の発見は掘出し物を見つけたようなものであった。アルミニウムに各種のセラミックス微粒子を分散させた軽量金属基複合材料の開発において、溶融アルミニウムにセラミックス微粒子を直接混入して分散させるには、溶湯と粒子表面の濡れ性の改善と溶融アルミニウムの粘性を最適に制御することが重要である。この研究においてさまざまな元素を添加して溶湯性状変化への影響を探索する過程で、カルシウムが主として溶湯の粘性の制御に効果的であることが見いだされ、微粒子分散アルミニウム合金基複合材料の低コスト製造プロセスが開発された。より軽量化を狙ってこの技術を溶融マグネシウムへ適用する過程で、溶融マグネシウムに添加したカルシウムが示す溶融マグネシウムの劇的な性状変化—大気中での難燃性という偶発的な発見が難燃性マグネシウム合金の研究の端緒であった。

図1には代表的な難燃性マグネシウム合金であるAZX912合金 (A:Al,Z;Zn,X;Ca、数値はwt%) の大気中における発火温度を示す。この図から明らかなように、カルシウム添加によっておよそ200°C以上も発火温度が上昇する。ここまで発火温度が上昇すると大気中での溶解が可能となる。

一方、発火特性と同様に、カルシウムを含むか含まないかで溶融状態のマグネシウムの表面にできる酸化物の様相が著しく異なっている。純マグネシウムの場合、不活性雰囲気中で溶解してから速やかに大気中に取り出して燃える前に急冷したものの表面酸化物は、溶融状態で大気に触れた時間がわずか数秒という短時間にも関わらず、極めて厚く成長している。また、その構造は微粒子からなる多孔質であり、酸化物は表面の保護膜とはなり得ていないことを推測させる。この様子を図2の酸化物表面の走査型電子顕微鏡写真に示す。図で(a)、(b)はそれぞれ低倍率の

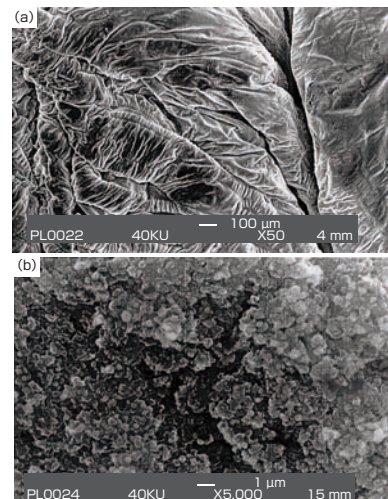


図2 純マグネシウムの酸化物被膜の表面組織

全体組織及び高倍率の拡大組織である。このような酸化物の組織は、酸化物のでき方から理解することができる。純マグネシウムは融点温度において、金属に対する生成酸化物の体積の比 (Pilling-Bedworth ratio) が1よりはるかに小さく、したがって生成した酸化物が溶湯表面を完全に覆いつくすような保護被膜にはなり得ない。このことがカルシウムを含まない合金にできる酸化被膜が多孔質組織を呈する原因と考えられる。

これに対して、カルシウムを含んだ合金の酸化物表面の様子を図3の走査型電子顕微鏡に示す。図で (a)、(b) はそれぞれ低倍率の全体組織及び高倍率の拡大組織である。カルシウムを含んだ合金では、溶融状態で大気中に1時間保持して十分に表面を酸化させた場合でも、できた被膜は厚く成長することがなく、表面の組織は極めて緻密である。カルシウムを含むマグネシウム合金にできる酸化被膜は、カルシウムを含まない場合とは著しく異なる様相を示す。この結果は、カルシウムを含む合金が溶融状態にある時は、その表面に緻密な酸化被膜が形成し、これが酸化に対して極めて有効な保護被膜として働いていることを示している。

純マグネシウムとマグネシウム-カルシウム系合金におけるこのような表面組織の著しい相違は、酸化被膜の構成相や形成機構に違いがあることを示唆している。酸化被膜をさらに詳細に調べると、カルシウムを含む合金の表面酸化物ではその最表層が主として酸化カルシウムからなることが明らかとなっており¹⁾、この酸化物が緻密な組織であることが、大気からの酸素供給や溶湯表面からのマグネシウムの蒸発を防ぐ効果的な障壁となり、その保護作用により発火温度が上昇するものと考えられる。

なぜカルシウムを含んだ合金だけにこのような緻密な酸化被膜ができるのかということは、非常に重要で興味深い

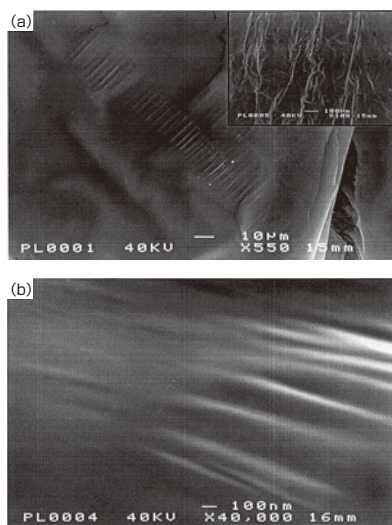


図3 Mg-5Ca 2元合金の酸化物被膜の表面組織

問題ではあるが、この形成機構に関しては実はいまだによくわかってはいない。カルシウムはマグネシウムよりさらに活性であり、カルシウム単体ではマグネシウム単体（あるいはカルシウムを含まないマグネシウム合金）と同様に緻密な表面酸化被膜が形成されない。明らかなことは、マグネシウムとカルシウムが共存するということが極めて重要な意味を持つのであろうということである。カルシウムとマグネシウムが共存状態で酸化が起こると、さまざまな相互作用が起こると考えられる。カルシウムが融点近傍の温度域でマグネシウムの酸化物の還元を期待できる数少ない元素の1つであることから、酸化カルシウムからなる酸化被膜最表層の形成は、マグネシウムに対するカルシウムの優先的酸化に加えて、カルシウムによる酸化マグネシウムの還元と酸化カルシウムの生成も関与する複雑な過程であると考えられる。

カルシウムの効果の発見後、さまざまな元素による同様の効果の探索は徒労に終わり、カルシウムのように劇的な発火抑制効果を示す添加元素は発見されなかった。現在のところ、カルシウムに勝る難燃化元素はないのである。それは、上記のメカニズムから考えて、酸化物形成自由エネルギーがマグネシウムより低い元素はカルシウムのみであることから妥当な結論であると考えられる。

3 必要とされる個々の要素技術課題の解決

実用化のためには、個々の要素技術課題を適切に設定し、着実に解決してゆくことが必須である。しかし、ことは言うほど簡単ではない。その時々直面する課題について行き当たりばったりに対応するならば、ゴールにたどり着くまでには極めて長い時間がかかるであろう。新しい材料を世に出すためには明確なシナリオが必要である。難燃性マグネシウムの開発においては、上記の①新素材の発見に引き続き、②素材を材料に持ち上げる精製技術の開発、③部材化技術（成形加工技術）、④信頼性評価、および⑤製品化の各段階での技術的なブレイクスルーが必要であった。

前章で述べたようなメカニズムにより、カルシウム含有合金は大気中でも安全に溶解・鋳造ができるので、マグネシウムのベース合金として製造プロセスを安全でシンプルなものにすることができる。シンプルであるということは工業的な観点からは重要なことである。しかし、ここで何よりも重要なことは、そもそもマグネシウムを基幹材料として実用化する根本の動機は、マグネシウムがもたらすであろう低環境負荷社会の実現である。したがって、全ての各要素技術はこの指導原理に基づいてなされなければならないということである。以下に、その概要を紹介する。

3.1 クリーンな溶湯精製技術

難燃性合金は活性なマグネシウムにさらに活性な金属カルシウムを添加することから、一般の合金に比べて溶製時¹に生成する酸化物などの介在物が溶湯に多量に混入し、強度や耐食性に悪影響を及ぼすことが問題となる。介在物はその比重が溶湯に近いために、沈殿させたり浮上させたりして分離するのが難しく、完全な分離除去は困難である。通常はマグネシウムやカルシウムの塩化物、フッ化物を主とするフラックスを用いて取り除くのが一般的であるが、フラックスが微量でも残留すると耐食性に悪影響を及ぼし、これを回避しようとする材料与歩留まりが低下する等の問題を有している。また、塩化物やフッ化物からなる産業廃棄物が出ることも問題である。せっかく防燃ガスやフラックスを使わない大気溶解プロセスを開発しても、その精製工程でフラックス等を使うのであれば技術としての価値は大きく損なわれてしまう。我々はこの問題について第1に環境面でクリーンであり、できるだけ単純でしかも効果的な方法を開発することが生き残りの条件と考えた。

熔融した難燃性合金の表面には緻密な酸化被膜ができ、これによって酸化が防止されると同時に、熔融状態のマグネシウムの高い蒸気圧が見かけ上極めて低く抑えられていることに着目した。すなわち、減圧法による精製技術の開発であり、難燃性マグネシウム合金を実用材料へと変えるブレークスルーであった。この方法は極めてシンプルのために実施が容易で、特に大規模な生産現場でも導入できることが特徴である。

減圧法は、合金溶湯を減圧下で保持することにより、介在物を合金溶湯の表面に浮上・分離させて除去する簡単な方法である。溶湯中には種々のガスが溶存しているので、介在物は減圧により生成したガス気泡に付着して溶湯表面に短時間で浮上する。通常マグネシウム合金の蒸気圧は高いので減圧下に置くことはできないが、難燃性マグネシウム合金は溶湯表面に形成する酸化被膜の働きにより、見

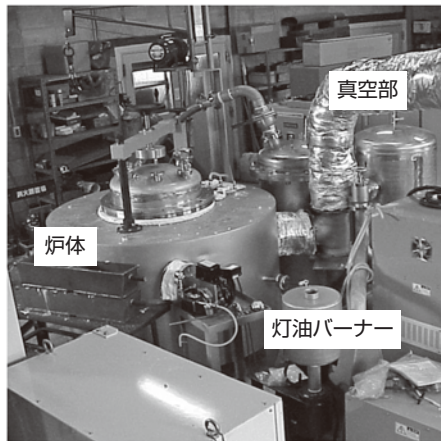


図4 減圧精製機構を備えた難燃性マグネシウム合金溶製炉（容量 100 kg）

かけ上の金属蒸気圧が極めて低くなるので、アルミニウムや鉄鋼のように減圧法による精製処理を適用することができる。減圧による到達圧力は通常の機械式ポンプの排気能力で充分であり、保持時間は溶湯の量に応じて数十秒から数分である。このため、大型の溶解炉でも容易に応用することができる。図4には産総研に設置された減圧精製機構を備えた容量 100 kg の難燃性マグネシウム合金溶製炉の概観を示す。従来のフラックス法ではフラックスに由来する蒸気等によって作業環境が劣悪になるが、本法は作業環境が安全でクリーンであり、また、フラックスが溶湯中に残留する心配がないので材質的な信頼性を損なう心配もないというメリットを持っている。この技術を現在のところ4社へ技術移転し、量産化を進めているところである。一方、一連の溶製プロセスは大気溶解が中心となっており、最後の段階で介在物を除去するために蓋をして減圧して精製を行うという、基本的に大気プロセスであることから、 castingプロセスの低コスト化に直結し、実用化されている。ただし、後に述べるように難燃性合金の鋳物を製造するためには多くのノウハウを必要とするのが現実である。

3.2 塑性加工技術

第2の問題は塑性加工に関するものである。鉄鋼やアルミニウムに比べてマグネシウムの冷間²での加工性は劣悪であり、ユーザーが初めて採用することは大きなリスクを伴う。このことはマグネシウムの製造コストを悪化させ、産業界での現実的な高い障壁となる。鉄鋼やアルミニウム合金が立方晶を基本とする異方性の小さい構造を有するのに対してマグネシウムは異方性の大きな六方晶であり、冷間ではそもそも豊かな塑性変形能は乏しく、本質的に塑性加工性の問題を有している。難燃性合金では問題がさらに深刻となる。マグネシウム合金は強度と耐食性の面からアルミニ

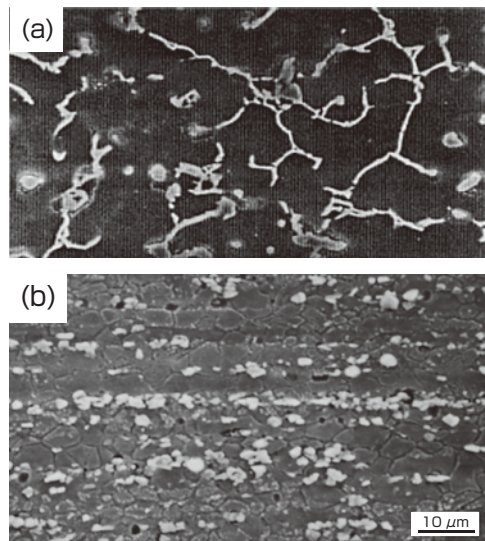


図5 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の組織
a: 凝固組織、b: 押し出し加工後の組織

ウムを含むことが必須であるので、難燃化のために添加したカルシウムと高融点のアルミニウム-カルシウム系金属間化合物が形成し、これが初晶として粒界にネットワーク状に晶出し、溶湯の湯流れ性を悪化させ、機械的性質、特に延性に悪影響を及ぼす。この組織を図5aに示す。アルミニウム-カルシウム系金属間化合物は母相金属中への固溶度が極めて小さいため、熱処理等でこのような凝固組織を制御することは容易ではない。

一方、塑性加工を想定すると事情は異なってくる。塑性加工性に劣る難燃性合金であっても、基本的には熱間^{用語2}で、より静水圧的な加工法である押し出し加工を適用することにより良好な加工ができる。この時、粒界のネットワーク状のアルミニウム-カルシウム系金属間化合物は押し出し方向に微細に破碎されるとともに、母相金属は再結晶作用により結晶粒が微細化し、全体に極めて微細な組織となる（図5b）。これによって強度および伸びは著しく向上する。図6にはAMX602合金の機械的性質を示すが、押し出し材の場合は熱間押し出し後にT4処理^{用語3}を施したものは室温伸びが20%を越えるレベルにまで改善する。このことは、難燃性合金の塑性加工を最適に行えば、強度と伸びのバランスに優れた材料を得ることができることを示している。

塑性加工の重要な技術に鍛造と圧延がある。熱間押し出し加工による製品開発と平行して、押し出し材を出発材料として鍛造や圧延による製造技術の開発が必要である。また、凝固組織を微細制御した低コスト連続铸造材からの直接鍛造技術も研究途上にある。板材に関しては基礎研究の成果としてようやく冷間成形性に優れた組成・組織が見いだされつつあり、低コストの量産技術開発フェーズへの移行段階にある。また、マグネシウム合金の合金種の乏しさ、特に高強度材や耐熱材料に関しては依然としてさらなる基礎研究が必要である。

構造材料として実用化するためには信頼性評価が重要である。図7は難燃性合金AMX602押し出し材の回転曲げによる疲労強度評価結果の一例である。この材料の特

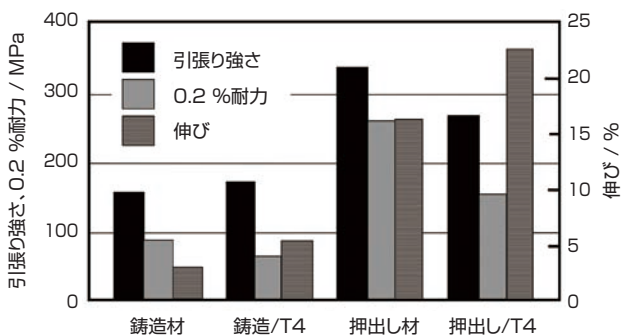


図6 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の機械的性質

徴は、明確な疲労限があり、またアルミニウム合金に比べて切り欠き感受性が低いことが明らかとなっており^{[2]-[4]}、構造材料としては使いやすい材料である。ただし、破壊は全て介在物起点^{用語4}で起こり、清澄な高品質素材の製造技術が非常に重要であることが明らかとなっている^[2]。

3.3 リサイクル技術

一方、ユーザーサイドの材料選択の指標として最近ではリサイクル性の高さが重要となっている。またリサイクル性は製造コストにも直結する重要な特質である。リサイクルに関する研究として铸造メーカーにおいて溶製時のインハウスリサイクル技術の開発が進められており、現状では回転材利用率50%以上を維持する精製レベルにある。また、自動車部材として実用した場合のシュレッダー処理を想定した安全性と、処理材の機能利用に関する検討例として、大気中での機械式粉碎結果の一例を図8に示す。写真は、篩径38μmアンダーの粒子であり、機械粉碎が安全にできることを示している。さらに、このような粉碎粒子の利用方法として、排水中のヒ素やホウ素、亜鉛、クロムの吸着特性を調べ、マグネシウム水酸化物が強力な吸着剤となることを明らかにしている^{[5]-[7]}。

4 製品化のための産学官連携スキーム

新しい材料を世に出すためには、それがもたらすであろう技術の全体を俯瞰した上で、明確なビジョンと実現のためのシナリオが必要であると考えられる。難燃性マ

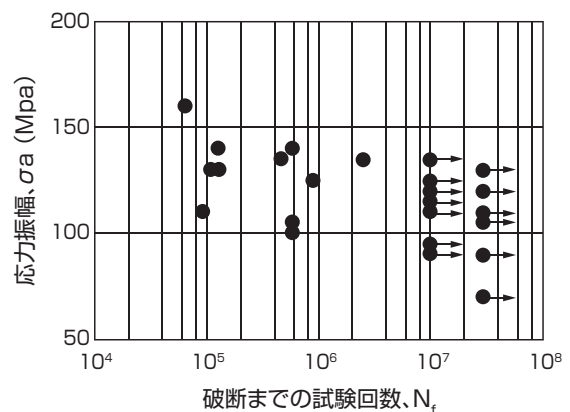


図7 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の疲労強度評価

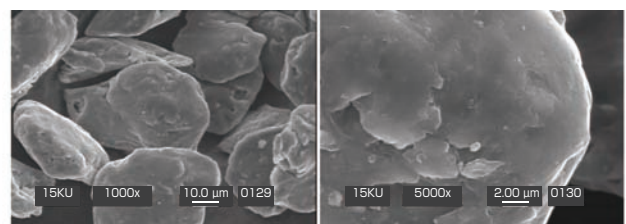


図8 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の粉碎粒子 (38 μm 篩下)

・**鋳造用素材・塑性加工用ビレット材**

塑性加工に供する素材はできる限り清浄度の高い高品質なものである必要があり、最も川上に位置する素材の品質がその後の塑性加工品の品質とコストに大きく影響する。我々は、素材供給メーカーとして企業3社に減圧法による溶湯精製技術を移転し、高品質で低コストの素材ビレットの量産と用途開発を進めている。素材メーカーを複数社体制としたのは、素材の安定供給を図るためであり、その内の1社は大量生産を想定したビレット製造から押し出しまでの一貫生産が可能であり、もう1社は多品種少量生産が可能な鋳造メーカーで、将来の機械構造用部品としての需要をにらんで小回りのきく生産体制を目指している。図9の右上および左端中央にある写真に円柱状の棒材形状の塑性加工用ビレットを示す。

・**鋳造材**

難燃性合金は大気中で燃えにくいことから金属を溶かして型で固める鋳造においては、基本的に低コストでの鋳物製造が可能であるので、上記の鋳造メーカーと共同で各種機械部品に向けた鋳造技術の研究開発を進めている。鋳造そのものはアルミニウムと同様に行うことができ、特筆すべき点はAZ91合金ベースの難燃性合金の場合、大気中で生砂型への鋳造も可能なことである。ただし、難燃性合金は前出の特異な凝固組織により通常合金以上に湯流れ性が劣り、またアルミニウムや鋳鉄に比べて熱容量が小さいために凝固が急速であるので鋳造方法案や鋳造条件の問題が十分に解決されていない。実施にあたっては依然として技術蓄積や経験、ノウハウを必要とする。しかし、とにかくコストの面で有利であるので、今後さまざまな機械部品への応用が期待される。図11は最新鋭新幹線車両へ採用された荷棚受け部品の例である。難燃性合金AZX912のダイキャスト製で、鉄道車両に採用される世界初のマグネシウム部品である。

・**熱間押し出し材**

アルミサッシのフレームのような複雑で様な断面を持つ長い製品は、金属を加圧して穴の開いたダイスから押し

出すことにより、効率よく量産することができる。複雑形状断面や中空などの形状が容易にできる押し出し材は基本的な工業素材である。難燃性マグネシウム合金も熱間での押し出し加工によって型材の製造が容易にできるので、上記のビレットメーカーとアルミニウム押し出し専門メーカーと2社体制で用途開発を進めている。現在、後者のメーカーから難燃性マグネシウム型材の実用化の第1号として、高速道路料金所のETC阻止棒用に角型パイプ材が製品化されている。これは、阻止棒の開閉速度の高速化に伴い、従来のアルミニウム型材では軸部からの破断が多発し軽量化が望まれたためであるが、当初はCFRP製であったものが交換後のリサイクルの問題と製品価格の観点から、さらに難燃性マグネシウム合金製に代替が進んだ例である。この用途では、単なる軽量化のためのアルミニウム代替ではなく、高比強度とリサイクル性という他にはない特性がキーになるという、材料代替の教訓的な興味深い例である。

・**熱間鍛造材**

強度や信頼性を向上させる目的で単純形状の金属材料を叩いて鍛えることを鍛造と呼び、金型で鍛造することにより品質の揃った部品を大量生産することができるので、工業的に重要な加工技術である。難燃性マグネシウム合金の鍛造は一般の合金に比べてより難しく、加工温度や加工速度を厳しく管理しないと容易に割れが発生する。しかし、あらかじめ熱間押し出し加工を施して微細な再結晶組織とした鍛造素材では鍛造性が飛躍的に向上し、ハンマ式鍛造機による高速成形が可能である。したがって製品によっては、予備押し出しという工程数が増加しても、トータルコストの面で有利となる可能性もあることから、現在、自動車部品メーカーと共同で開発を進めている。ただし、現段階ではいまだに製造コストの壁が高く、これを克服するためには3章2節で述べたように、原理原則まで立ち返った基礎的な研究が早急に求められている。

・**板材**

金属の板材はさまざまな形状に容易に加工できることから基本的な工業素材である。普通、回転する2つのロール

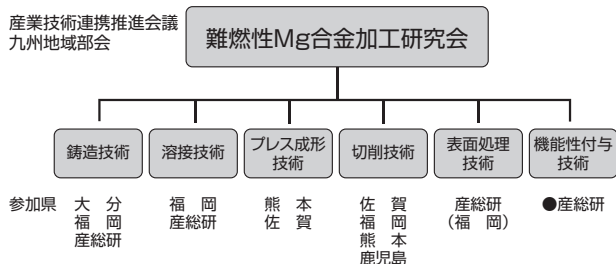


図10 公設研連携による難燃性マグネシウム合金の加工技術基盤研究体制



図11 難燃性マグネシウム合金 (AZX912) の荷棚受け部材

の間に常温または高温の金属を通して薄く板状に延ばす圧延法で成形されている。マグネシウム合金の板材についても需要は高いが、素材が割れやすいことから圧延が難しくアルミニウム等に比べて圧延工程の繰り返し回数が多くなることから価格が高いことが問題となっている。サイズや精度の面で制約はあるが、熱間押し出しによって直接板材の製造が良好にできることが確認されている。上記の押し出しメーカー2社ともに、板厚1 mm以下のものが容易に製造できている。また、押し出し材をその後に圧延する場合においても、良好な性質を有していることが確認されている。ここでも難燃性合金の利点として、熱間圧延温度でも発火や酸化の心配が少ないため薄板の製造ができ、現在、圧延メーカーにおいて板厚0.1 mmの製品の製造が可能となっている。ただし、板材の製造プロセスは工程数が多いために鍛造材以上にコストの問題が深刻であり、低コストの板材の大量供給には、加工性の良い材料開発から製造プロセスまで、いまだ多くの技術開発が必要である。

・押し出し形材を用いた溶接構造体

鋳鍛造材や板材・押し出し形材などの塑性加工材を接合した構造体は、自動車や鉄道車両、航空機、各種機械構造体等、さまざまなアプリケーション展開の鍵となる基盤技術である。図12は、アプリケーションの1つとして、鉄道車両の腰掛けの例である。本製品は現行の車両用腰掛け規格をクリアし、軽量化に大きく貢献することからJRへ提案し、客先での検討が進められている。ところで、このたった1つのアイテムにも、鋳造材・押し出し形材・板材を用い、曲げ成形やプレス成形が必要であり、接合技術がキーとして重要である。接合は基礎的な接合試験と疲労試験を通じての信頼性補償が必須である。この例ではTIG溶接^{用語5}を採用し、そのための溶接棒の製造も必要であった。また、部位によっては難燃性合金に適した新たな表面処理も施している。このことは、実際の製品開発においていかに幅広い技術の総合が必要であることを物語っており、すべての要素技術について前記の研究開発ネットワー



図12 難燃性マグネシウム合金（AMX602）の鉄道車両用腰掛

クの大学や公設試験研究機関における基礎的検討のフィードバックが重要であった。

6 残された課題

1つの材料を基幹材料として育成するためには、川上から川下まで極めて幅広い技術開発とその蓄積が必要である。その意味では残された課題は何かというより、ようやく開発の入り口に立ったという状況である。ただ、我々は将来に向けて、環境調和型の材料としてマグネシウムを上手に使う技術を培っていかねばならない。そのためには、LCAの観点から原料採取に始まって精錬、加工、リサイクル技術、カスケードリサイクルの社会システム等、材料の全般にわたる広範な技術開発が残されている。特に、現状の精錬工程はチタンやアルミニウムと並んでエネルギー多消費であり、ようやく将来に向けた抜本的な省エネルギー化に向けた取り組みが始まっている。精錬技術に関するわが国の現在のポテンシャルは、過去に比べて格段に進歩しているが、ここでもこれまでにない画期的なブレイクスルーが熱望される。一方、個別課題としては、溶湯やインゴットの品質評価技術、低コストの表面処理技術、高信頼性の接合技術、さまざまな材料標準および評価技術の標準化、等々、課題は山積みである。上記の課題を解決し、低環境負荷・低コストプロセスによる基幹材料の産業化を目指したい。

用語説明

用語1: 溶製: 金属を、その熔融状態を経て加工すること。熔融金属を型に流しこんで凝固させる鋳物や塑性加工用の金属塊の製造法がこれに当たる。溶製に対して金属の粉末を固めて成形する方法や金属塊を塑性変形させて加工する塑性加工法等がある。

用語2: 冷間加工と熱間加工: 金属の塑性加工を行うときの温度域による区別のこと。金属の結晶は室温等の低温域で塑性加工して変形させると、硬度や強度を増加(加工硬化)させることができるが、逆に割れが生じたり加工性が低下する。これに対して高温域で塑性加工すると、強度の向上は望めないものの加工性は飛躍的に高まる。一般に前者を冷間加工、後者を熱間加工と呼び区別される。加工された材料を固有の温度に加熱することにより、結晶内部は歪がない新しい結晶粒へ変化する再結晶と呼ばれる現象が起こる。厳密には、再結晶が起こらない低温域での加工が冷間加工、再結晶が起こる温度以上の高温での加工を熱間加工と呼んで区別する。

用語3: T4処理: 金属の機械的性質をコントロールする種々の熱処理の中の1つ。母材に添加した合金元素を高温で十分に保持して均一に分散させてから急激に冷却する

と、低温では析出するはずの合金元素を母材に溶けこんだままの状態を凍結することができ、これを溶体化と呼ぶ。その後で溶体化材を適当な温度で一定時間保持すると、溶け込んでいた合金元素が微細な結晶として母材中に析出し、これにより強度や硬さ、延性といった性質が変化する。この一連の熱処理を時効処理という。溶体化状態からの時効を室温で起こさせることを自然時効と呼び、高温下で強制的に起こさせることを人工時効と呼んで区別される。さまざまな熱処理方法の中で、特に軽金属の分野ではこの2つが頻りに用いられ、これらを指す記号として前者をT4処理、後者がT6処理と呼ばれている。

用語4：介在物起点：疲労による強度の低下は、物体の中に微視的な割れ目が発生し、これに繰返しかかる力によって割れ目が次第に進展して大きくなることによる。最初の微視的な割れは物体内部で応力集中が起こる場所に発生する。応力集中はさまざまな場所で起こるが、物体の中に含まれる異質な固体不純物（金属では酸化物等の非金属介在物）の周辺は応力集中の場所となることが多い。また、このような介在物と母材との界面の結合が弱い場合、介在物の存在は母材の欠陥となって微小な割れ目と同様の作用をする。このような介在物の周りが起点となる破壊のこと。

用語5：TIG溶接：Tungsten Inert Gas溶接の略で、金属を溶かして接合する溶接法の1種。金属を溶かす方式で、アーク放電を用いるものの中で、高融点のタングステン棒と接合母材の間に高電圧を掛け、タングステン棒からアークを出すことによって母材を溶かして接合する方法である。基本的に手で溶接するために複雑形状にも適用でき、非鉄金属の溶接では広く一般的に用いられている。

参考文献

- [1] 坂本 満, 秋山 茂, 上野英俊, 大城桂作: マグネシウムへのカルシウム添加による酸化被膜特性の変化と難燃化, *鑄造工学*, 69, 227-233 (1997).
- [2] 北原陽一郎, 池田健介, 島崎洋明, 野口博司, 坂本 満, 上野英俊: 難燃性マグネシウム合金の疲労強度特性(AMCa602Bの疲労強度に及ぼす非金属介在物の影響), *機械学会論文集*, 57, 7-8 (2004).
- [3] 北原陽一郎, 池田健介, 島崎洋明, 野口博司, 坂本 満, 上野英俊: 難燃性マグネシウム合金の疲労強度特性(第1報, 3種類の難燃性マグネシウム合金の定量的疲労強度特性), *機械学会論文集A*, 72, 661-668 (2006).
- [4] 池田健介, 北原陽一郎, 野口博司, 坂本 満, 上野英俊: 難燃性マグネシウム合金の疲労強度特性(陽極酸化コーティング材の特性), *機械学会論文集*, 57, 9-10 (2004).
- [5] 野口文男, 吉田信一郎, 山根政博, 柿本幸司, 橋 武史, 阪本尚孝, 川田勝三: マグネシウムおよびマグネシウム合金の排水処理への応用, *資源素材学会春季大会概要* (2006).
- [6] 野口文男, 吉田信一郎, 山根政博, 柿本幸司, 橋 武史, 阪本尚孝, 川田勝三: 排水中の有害金属の除去と有価金属の回収-廃水中のAsの除去(第一報), *日本鉄鋼協会第149回春季講演大会概要* (2005).

季講演大会概要 (2005).

- [7] 野口文男, 吉田信一郎, 山根政博, 柿本幸司, 橋 武史, 阪本尚孝, 川田勝三: 排水中の有害金属の除去と有価金属の回収-マグネシウムによる廃水中のCrの回収(第二報), *日本鉄鋼協会第153回春季講演大会概要* (2007).

執筆者略歴

坂本 満 (さかもと みちる)

1980年筑波大学第一学群自然学類卒業、1985年筑波大学大学院博士課程地球科学研究科修了、博士(地質学)。同年4月工業技術院九州工業技術試験所機械金属部入所後、金属基複合材料の研究開発に従事。2007年8月産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門に配置換、同年11月中部センターへ異動。本研究では難燃性マグネシウム合金の難燃化機構の解明と連携ネットワーク構築・運営に従事した。



上野 英俊 (うえの ひでとし)

1965年福岡県立浮羽工業高校卒業、同年4月工業技術院九州工業技術試験所機械金属部入所後、金属基複合材料の研究開発に従事。2001年産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門環境適応型合金開発グループ長。一貫して軽量金属材料の研究に従事し、金属基複合材料の実用加工技術開発および発泡アルミニウムの実用化に成功。本研究は主として難燃性マグネシウム合金の塑性加工技術を担当した。



査読者との議論

議論1 マグネシウム合金の位置づけについて

コメント・質問 (清水 敏美: 産総研研究コーディネータ)

本研究の社会的価値は輸送機器や機械要素の軽量・高効率化を介しての省エネルギー化です。しかしながら、現在の基幹材料でもあり、本文中にも記述がある鉄鋼やアルミ、さらにはCFRPなどと比較して、なぜマグネシウムが研究対象の中心になっているのかが不明確です。第1章では、シナリオの導入にあたってまず重要なマグネシウムの位置づけを明確にする必要があると思います。

回答 (坂本 満)

マグネシウムを難燃化することで基幹材料としての地位を確立し、その先にある鉄鋼やアルミニウムのような既存の基幹材料とは別次元の輸送機器の軽量化に大きく資することが目標です。基幹材料としての可能性のある材料は多くはなく、マグネシウムはその数少ない候補の1つと考えております。

社会の基盤をなす輸送機器の容積を考慮すると、これを軽量化するための材料は鉄鋼やアルミニウム並の供給ができる基幹材料でなければならず、工業材料としてその資格がある材料としての観点からマグネシウムを選択しています。確かに、定性的には様々な材料が軽量材料として考えられます。また、既存の輸送機器システムがそのまま将来にわたって使われるわけではなく、新しいシステムが登場するのは間違いないわけで、その構成材料は既存の材料とはかけ離れたものになる可能性もあると思います。しかし、構造材料としての面から考えた場合、やはり既存の鉄鋼材料やアルミニウム並みの供給に対する安定性、それも環境負荷の観点からの保障が必要になるものと思います。

議論2 製品化を意識したシナリオの作成について

コメント・質問 (村山 宣光: 産総研先進製造プロセス研究部門)

構成学的な視点から興味ある点は、カルシウム添加によるマグネシウムの難燃化の発見をされたとき、製品化まで見越して、どの程度開発すべき要素技術を設定され、研究計画を立案されたかという点です。また、精製技術以降の研究でも、溶湯表面に形成する酸化被膜の効果を想定して減圧法を選択されたのかどうか、押出し加工による組織の微細化とそれによる鍛造、圧延は、当初からシナリオとして描くことができたかどうかという点も大変関心があります。多くの試行錯誤があったのではないかと想像されます。試行錯誤と必然性の混在が材料開発に関するシナリオの特徴ではないでしょうか。

回答（坂本 満）

製品化を意識したシナリオというのは、我々研究者は苦手なわけですが、企業にとっては当たり前のことであり、要は最も効率的に最短距離で製品化に結びつくシナリオの策定が当初からできたということが重要です。ただし、最短距離といってもそのルートが荒唐無稽のものであっては元も子もなく、やはり確固とした技術的な裏づけが重要となります。その役割を大学や公設試験研究機関の連携組織が支えるという構図がどうしても必要となると思っています。ここでは連携組織がやはりシナリオを共有しているという点が重要であって、これがないと研究が拡散し、点として繋がりに欠けるものとなってしまおうと考えています。

議論3 部材の軽量化による省エネ効果について

コメント・質問（清水 敏美）

およそ動くものの軽量化を実現するという大命題のもと研究が進捗し、代表的な成果物として難燃性マグネシウム合金を用いた鋳造材として最新鋭新幹線の荷棚受け部品が採用されています。しかしながら、最初の軽量化という意味で漠然とは理解できませんが、この部品の採用によりどれほどの軽量化への貢献あるいは省エネ効果があったのか、定量的な数値を加筆していただければ読者の理解も深まると考えます。

回答（坂本 満）

定量的な数値があれば軽量化による省エネ効果への貢献が明確になるとのご指摘は、まさにもっともなことであり、日頃から我々も常に意識している点です。しかし、省エネ効果を明確に示すことは、なかなか容易なことではありません。例えば私どもとある自動車メーカーとの共同研究での結果では、自動車のレシプロエンジンのピストンのようなのであれば、エンジンのベンチ試験で通常のアルミピストンとマグネシウムピストンとで明確な差が計測されています。ただし、これはあくまで実験であって、ピストンの実用化は未だ開発途上にあります。新幹線車両の場合は1両あたり50トンほどです。この中で難燃性マグネシウム荷棚受け部品の占める重量は15 kgです。これ

は従来のアルミニウム製をそのままマグネシウムに材料代替したわけではなく、設計が変わり直接比較は難しいのですが、全体でおよそ7.5 kgの軽量化になっております。最新鋭新幹線車両系プロジェクトでは、1両あたり500 kgの軽量化が第一の目標として掲げられ、そのうちの僅か7.5 kgほどではありますが貢献しており、それでも車両メーカーから感謝されたと聞いております。かように軽量化の効果をすぐにというのは難しいのですが、将来様々な部材に使われた時にそれが当たり前のことであったかのように考えられる材料となるものと考えております。

議論4 産学官連携スキームについて

コメント・質問（村山 宣光）

難燃性マグネシウムの発見に興味を示した複数の異業種企業の理解を得て、共通の目標を持つ連携組織を作ることができたことが、本研究の成功の鍵とされます。連携組織を作るにあたり、知財の扱い、企業間の調整、企業と大学・公設試験研究機関との橋渡し等で苦勞された点あるいは工夫された点をお聞かせください。

回答（坂本 満）

連携組織を作る過程で重要であったことは、まずなにより思想的な方向性の一致が大切であるということです。すなわち、技術の総体としての環境親和性ということが社会的に最も重要であり、難燃性マグネシウム合金の実用化はこの方向に沿うものであるという共通認識を持ちえた企業が連携組織の構成員となっております。企業というのはとなく技術開発とその後のビジネスにのみ関心があるように思われがちで、現に筆者もそのように認識していた面もあるのですが、我々が考える以上に技術開発の根底にある社会的な問題を多面的に捉えて意思決定をすることが日常的に行われており、この構成員も最終的にそのような企業がコアとして残ったわけです。ここにおいては、一方の構成員である大学が、環境親和性という思想的背景を支える役割を担ってくれたことに大きな意味があったと考えています。加えて、連携企業のモチベーションを維持する上では、主役は企業であるという公設試験研究機関の持つ意識が重要であったと考えております。これらを一つのまとまりとしてとらえ、連携組織としての共通の目的意識を維持する努力が重要であると考えます。

しかしながら、ビジネスが見えてくるにつれ、役割分担やその後の知財等、実に様々な問題が次から次へと出てくるのが現実です。これについては、とにかくできるだけ情報を共有すること、メンバー同士で粘り強く話し合っ、一つ一つ地道に対応してゆくことに尽きると考えます。そのために、あらゆる機会を利用して連携組織全体での意見交換の場を設け、その都度、方向性やシナリオの再確認を繰り返すことが重要であったと思います。

セラミックス製造の省エネプロセスの確立を目指して

— 新規バインダー技術の開発 —

渡利 広司^{1*}、長岡 孝明²、佐藤 公泰²、堀田 裕司²

地球環境保全の観点から、セラミックス産業においても製造プロセスにおける投入エネルギーの削減が強く望まれている。本研究では、現在稼動しているセラミックスの製造プロセスを対象にした省エネプロセスについて検討を行った。研究開発にあたっては、既存プロセスへの適用、既存装置の利用、低コスト化、機能・特性の維持等の条件を設定した。適用可能なプロセス技術の検討および抽出により、セラミックスの製造プロセスの省エネ化には有機バインダー量の低減化もしくはゼロ化が極めて有効であり、その結果新規バインダー技術の開発を進めた。得られた知見は民間企業との共同研究を通じて既存生産ラインへ適用され、投入エネルギー量の大幅な削減に生かされている。

キーワード：セラミックス、製造、省エネ、バインダー、プロセス、水

A strategy to reduce energy usage in ceramic fabrication

– Novel binders and related processing technology –

Koji Watari^{1*}, Takaaki Nagaoka², Kimiyasu Sato² and Yuji Hotta²

Because of serious global environmental problems, the ceramic industry has been concentrating on the reduction of energy usage during manufacturing. In this project, we have investigated low-energy processing techniques for ceramic components. Our research and development approach was carried out with the goal of realizing new ceramics that can be manufactured using conventional manufacturing processes and equipment at low-cost without significant degradation in material properties. After a careful investigation of possible technologies, we concluded that a decrease in the amount of organic binder is the most effective technique to promote low-energy processing, and have successfully developed a novel binder technology. Our technology and knowledge have contributed to greatly reduce the amount of energy required for ceramic fabrication through a collaborative research project with a private company.

Keywords: Ceramics, manufacturing, energy saving, binder, process, water

1 緒言

セラミックスは一般の産業機械分野はもとより、半導体・電子部品、電子機器、自動車、加工、環境、エネルギー、バイオ等さまざまな産業分野において広く普及し、金属材料や高分子材料と並んで産業を支える重要な部材として強く認知されている。

一方、セラミックス製造プロセスを環境負荷低減の観点から俯瞰すると、課題も見えてくる。国内では、セラミックス産業を含む産業部門がエネルギー消費起源の温室効果ガスの約4割を排出している。産業別の鉱工業生産指数当たりのエネルギー消費単位指数変化を比較すると、セラミックス産業を含む窯業土石産業は鉄鋼、化学、紙・パルプ産業に比較して約1.5倍と高い^[1]。とりわけ、セラミックスの製造は省資源、省エネ、環境負荷を十分に考慮し

たプロセスとさえ、高効率な製造を進める上で課題が多い。そのため、既存のセラミックス製造における省エネ化を促進するプロセス技術、さらには革新的な高効率製造プロセスの開発が急務である。

我々の研究グループは、これらの社会的背景のもと、セラミックスの省エネプロセスの開発を含む低環境負荷製造プロセスの構築を目的に研究開発を進めてきた。本稿では、既存のセラミックス製造プロセスを対象にした省エネプロセスの開発について、これに至った経緯、ならびにその成果について報告する。

2 既存製造プロセスの現状

セラミックスの製造は金属や高分子等の他材料の場合と比較して多品種少量生産でありながら、混合・分散、乾燥、

1 産業技術総合研究所 イノベーション推進室 〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2、2 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98

1. Research and Innovation Promotion Office, AIST Tsukuba Central 2, Umezono1-1-1 Tsukuba 305-8568, Japan *E-mail: koji-watari@aist.go.jp, 2. Advanced Manufacturing Research Institute, AIST Anagahora 2266-98, Shimo-shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan

Received original manuscript March 2,2009, Revisions received March 25,2009, Accepted March 27,2009

成形、脱脂、焼結といった多数の工程を必要とする。図1にセラミックス製造にかかわる各工程を示す。最初の工程は原料粉末および助剤等の出発原料にバインダーと溶媒を加え、それらを混合・分散する原料調製である。助剤はセラミックスの緻密化および機能発現を誘導する添加剤である。バインダーは粉体からなる成形体への形状付与とその強度維持の目的で使用される有機質の添加剤であり、加熱処理により分解し除去できる高分子系材料が一般に用いられている。その後、溶媒を蒸発させる乾燥、粉末に所定の形状を付与する成形、添加したバインダーを除去する脱脂、成形体を高温で焼き固める焼結を経てセラミックスを得る。これらの工程に加え、脱脂により発生するバインダー由来のガスは有害な成分を含むため、排ガス分解処理が製造ラインに付加される。

このように、セラミックスの製造は多数の工程で構成されるため、製造プロセスの開発は単なる一つの工程の技術開発にとどまらず、前後の工程さらには工程を遡って検討する必要がある。例えば粉末の成形性が極めて低い場合、原料粉末、バインダー、溶媒等の原料因子、さらには混合・分散および乾燥におけるプロセス制御因子を検討し、数多くの実験および試作品の作製と評価を通じて最適なプロセス条件を導き出す。そのため、セラミックスの製造には原料調製から焼結に至る幅広い知識と経験、これらに加えて各工程で高い技術力が不可欠である。我が国の製造現場は自らが問題を抽出し、それを解決していく過程で高い技術力を持った。その結果、日本メーカーのセラミックス製品は世界をリードする高い産業競争力を持つことに至った。しかしながら、この技術力はややもすればノウハウとしてブラックボックス化してしまい、工学的な検討がなされていなかった。さらには、既存の製造プロセスの幅広い技術発展を妨げ、生産技術を対象とした学術研究機関と生産現場との接点をますます遠くした。

3 省エネプロセス技術における死の谷

省エネプロセス技術を生産現場に導入するには超えなければならない「死の谷」が2つあると考えられる。すなわち、実用化のためには、既存技術と比べたときのコスト等にかかわる「経済的な死の谷」と、既存の製造ラインへの技術導入に関する「技術的な死の谷」である。

3.1 経済的な死の谷

「経済的な死の谷」は技術導入に伴うコスト増である。絶えずコストの低減を目指している生産現場は、新規製造装置への投資に慎重である。従来成果を凌駕すると期待される技術への投資であっても既存プロセスをはずれる場合はなおさらである。そのため、開発する技術は既存プロセスに組み込まれ、既存製造装置が利用できることを前提として考える必要がある。また、製造ラインの多くは24時間体制で稼働しているため、軽微な変更で成果が得られることが求められる。

3.2 技術的な死の谷

製造プロセスの省エネ化に関して数多くの要素技術が提案されている。しかしながら、その技術の多くは工程の複雑化、前後のプロセスとの連携の難しさ、作業性の低下、廃棄物および有害物の発生等の問題を生じる。また、省エネ化を目指すあまり、原料や既存製造ラインの大幅な変更を伴う。その結果、多くの開発技術がセラミックス製造現場で実用化されていない。

4 目標達成のシナリオ

開発技術が製造現場で有効に使われるには、上記に挙げた2つの「死の谷」を超える必要がある。「死の谷」を超えるには、開発する技術を既存製造ラインに採用されることを前提に検討することが重要である。生産システム全体の省エネ化を目指した場合、多数のプロセス因子が変動すると、その結果として工程が複雑になり、製造コストが大幅

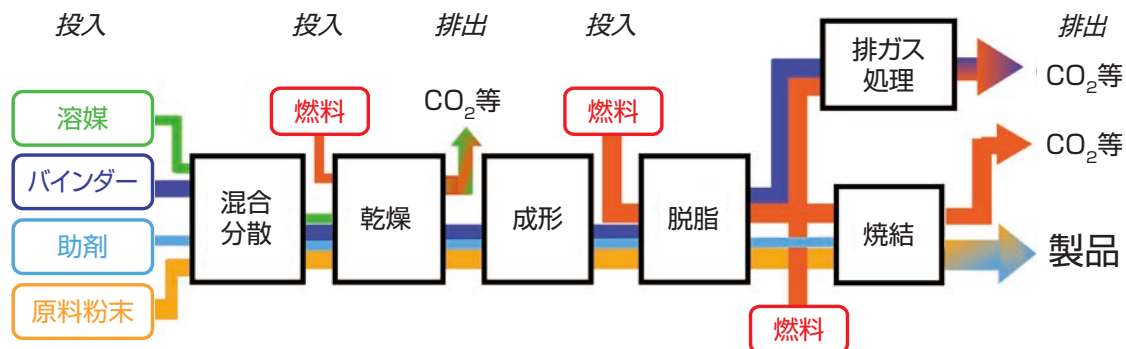


図1 セラミックス製造に関わる各工程と資源の流れ

に上昇する傾向にある。そのため、我々は多量なエネルギーを消費する工程に焦点を絞り、そのプロセス因子と消費エネルギーの関係を明らかにした。その結果をもとに、既存製造ラインに組み込むことができる要素技術を検討した。

4.1 セラミックス製造に要する消費エネルギー

図1のセラミックス製造にかかわる工程に加え、資源投入および排出の流れも示す。さらに、各工程におけるエネルギー消費の割合を図2に示す。図2の結果から多量のエネルギーを消費するのは脱脂や排ガス分解処理、そして焼結といった工程である。これは、成形体中の有機バインダーの除去や排出されたガスの二酸化炭素や水蒸気等への転化、さらにはセラミックスの焼結には熱エネルギーが必要であること、しかもそのエネルギー効率が極めて低いことに起因する。そのため、熱エネルギー由来のエネルギー消費量の削減には、①各工程において高効率な焼成炉の利用、②焼結温度の低下による熱エネルギーの低減化、さらには、③脱脂や排ガス分解処理に起因する熱エネルギーの低減化を目指すことである。

4.2 装置開発からのアプローチ

①については、例えばガス焼成炉を取り上げると、セラミックス成形体を1300℃で焼結するために必要なエネルギーは消費エネルギー全体の約2%である。残りのエネルギーは炉壁の加熱に約25%、炉壁からの熱損失に約17%が費やされ、さらに排ガスによる損失が50%以上を占める。そのため、高効率焼結を目指した焼成システムの開発等の早急な対応が必要であり、近年マイクロ波炉、高温排気をガスの回収に用いたりジェネ炉等が開発されている^[2]。セラミックスの製造ラインの省エネ化には高効率焼結炉の開

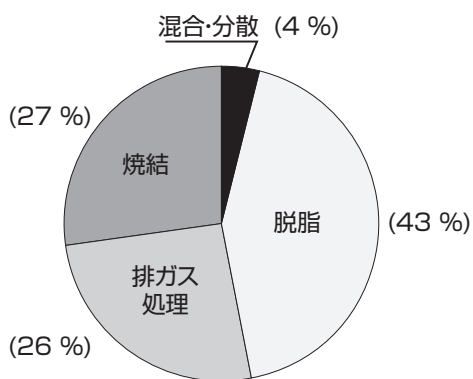


図2 各プロセスの消費エネルギー量の割合（いずれも研究室レベル、粉末合成に関わるエネルギー量は除く）
アルミナ1kgの焼結に要する消費エネルギー。有機バインダー添加量：10 mass%。脱脂工程：600℃ 1h 保持（12℃/h）。排ガス処理工程：900℃ 保持。焼結工程：1400℃ 4h 保持、（600℃/h）。脱脂工程と焼結工程には、6KWの電気炉を使用。排ガス処理工程には、1.4KWの電気炉を使用。

発が極めて重要であるが、この問題は装置開発が主たる課題となるため目標達成のシナリオから除外した。

4.3 焼結技術からのアプローチ

②の場合、その一つは低温焼結技術の開発により既存の焼結装置を使用して加熱に必要なエネルギー全体量を削減することである。セラミックスの低温焼結の促進には、ナノ粒子ハンドリング技術^{[3][4]}、低融点助剤技術^[5]、分散技術^[6]、表面被覆技術（助剤と粒子の焼結反応を加速するための助剤を対象）、高密度成形技術等を駆使することが求められる。いずれの技術も低温焼結化に有効に働き、通常の焼結に比較して100～300℃低い焼成温度で緻密な焼結体を得ることが可能となる。しかしながら、ナノ粒子の添加による焼成後の大きな収縮やその収縮制御の難しさ、低融点助剤の添加による材料特性の変化や試料表面の汚染、高密度成形技術を用いることによる作業性の低下等の問題は完全に解決したとは言えない状況である。このため、焼結技術をベースとしたアプローチからは撤退した。

4.4 バインダー技術からのアプローチ

③の方法が既存の有機バインダーの減量化さらにはゼロ化である。有機バインダーの添加は粉末成形体に複雑形状の付与と強度の向上を可能とする。しかしながら、有機バインダーはセラミックス原料粒子との親和性が低いため部分的なバインダー凝集を生じやすく、また粒子同士を結びつける力が弱い。このため、良好な成形性と成形後の形状保持のためには有機バインダーの多量の添加が必要である。バインダー量は対象とする成形体の大きさ、厚さ、形状、プロセス技術によって異なるが、一般的には乾式成形品の場合では5wt%以下、シート成形品では10wt%以上、複雑形状成形品では20wt%以上添加される。しかし、成形後これらのバインダーは不要であるため、脱脂工程にて熱分解・気化され、成形体から除去される。バインダーとして使用される有機質は通常600℃程度の温度で加熱されガスとなる。バインダーの一部が粉末表面に灰分や炭素の状態で残留すると焼結性の低下の原因となるため、脱脂工程では精緻なプロセス制御が求められる。同時に、発生したガスは成形体およびシート内での気孔、剥離、反り等の構造欠陥の生成を引き起こすため、ゆっくりとした昇温速度が選択される^[7]。ここで、バインダーが完全に除去される温度を600℃とすると、この温度に到達するまで昇温速度10℃/時間では60時間、30℃/時間では20時間の加熱が必要となる。さらには、保温時間および冷却時間を考慮すると脱脂に投入されるエネルギー量は極めて多くなる。

バインダーの熱分解によって発生するガスは有機物質

を含むことが知られており、そのため排出ガス分解工程として通常アフターバーナー等で二酸化炭素や水等の無害な物質に処理される。多くの有機物ガスの熱分解温度は600℃以上であり、アフターバーナーの温度を熱分解温度以上に設定すると、排ガスの熱分解に要するエネルギーは無視できないかなりの量である^[8]。図1と図2に示すようにバインダーに関係するエネルギー消費は非常に多い。何らかの技術開発により有機バインダーの使用量を低減することができると、脱脂および排ガス分解処理に要する熱エネルギー量の抑制が期待できる。そこで、我々は既存セラミックス製造プロセスの省エネ化を進めるために、バインダー技術からのアプローチを取ることにした。

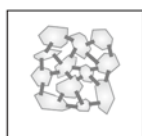
開発したバインダー技術が既存製造ラインを大幅に変更させては当初の目的からはずれてしまう。そのため、開発するバインダーに従来のバインダーとほぼ同じ機能を持たせることが重要である。このことから、高いバインダー機能を持ち、その使用量を低減できるバインダー技術についての検討を開始した。

5 開発技術と研究成果

5.1 キーテクノロジーの抽出

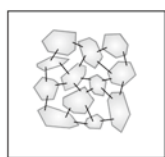
バインダーの機能を図3にまとめた。その機能は大きく2つに分かれる。第1は粒子同士を強固に結合させ、安定的に形状を維持することである（形状維持）。セラミックス成形体はある程度の強度を持つ必要がある。ひとたび与えられた形状を成形体の自重や生産現場でのハンドリングによる荷重に耐えて維持することは、バインダーの重要な機能の一つである。本機能を持つバインダーはセラミックス製のフィルムやシートさらには大物品の製造に生かされている。第2は、バインダーが粒子の塊に対して流動性と保形性を同時に付与すること（可塑性）である。つまり、原料粉末

形状維持

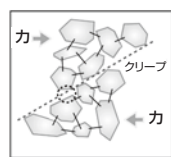


(1) 強固な結合

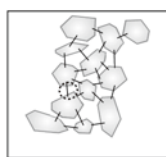
可塑性付与(流動性、保形性)



(1) 弱い結合(保形性)



(2) 結合の切断(流動性)



(3) 再結合(保形性)

図3 バインダーの機能

とバインダーを混合した状態では粒子同士はバインダーを通じて弱い結合によりつながり、形状を維持する(保形性)。さらには、一定以上の力を加えるだけで変形を起こさせ(流動性)、力を解除した後もその形状が維持されることである(保形性)。可塑性は、特に押出成形や射出成形などの複雑形状品の生産において求められる機能である。

我々は有機物量の低減を目指しながら、形状維持および可塑性付与に関して高いバインダー機能を持つ材料について検討を進めた。さらには、バインダーの機能以外に(1) 安価、(2) 原料粉末と反応しない、(3) 水や溶媒に溶ける、(4) 分解揮発した後に灰分等が残らない、(5) 分解ガスは有害性および腐食性がない等の一般的なバインダーに求められる性質も充分考慮して、新規バインダー技術の開発を目指した。

5.2 反応バインダー技術

製造ラインで用いられる既存の有機バインダーと同じ機能を、ごくわずかな量の有機物に与えることで有機バインダー量を減量化する方策を我々は選択した。まず、「形状維持」の機能(図3)を最小限の有機物量で発現させることを目的として、新しいバインダー技術を開発した。すなわち、あらかじめセラミックス原料の粒子表面に、バインダーの役割を果たす反応性の高い有機分子を薄膜の状態で固定する。これらの粒子からなる集合体を所望の形状にした上で化学反応を励起する反応トリガー(外部刺激)を印加し、有機薄膜層の分子同士を相互に化学結合させ、粒子同士が強固に結合するセラミックス成形体を作製する。図4に、我々が進めた有機バインダー量の低減に関する技術の概念を示す。通常の方法と異なり、バインダー分子がセラミックス粒子間を化学結合で強固につないだ構造を得られるため、少量のバインダーで効率よく成形体の形状を維持できる。また、粒子表面に薄膜の状態ではバインダー分子が固定されているため、バインダーの部分的な凝集を防ぐことができ、有機バインダー量の減量化が可能となる。

この成形方法においては、粒子の集合体が所望の形状を

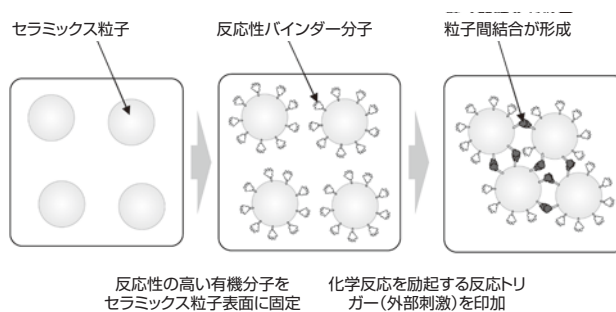


図4 有機バインダー量の低減のための有機分子の固定化と反応トリガーの印加

とる以前に粒子間に結合が生じることは望ましくない。そのため、外部からの刺激を反応トリガーとして用いることで任意の段階で化学結合を導入するという手法を採っている。反応トリガーとしては、電磁波（紫外線^[9]、マイクロ波^[10]）の照射、100℃での加熱^[11]などを利用した。紫外線を反応トリガーとした場合、セラミックス粒子にアミノ基、フェニルアジド基を被覆することにより、強い粒子間結合を生じ、強固な成形体の作製に成功した^[9]。マイクロ波に反応する有機物質については過去の報告を参照して実験を進めたが、我々はそれを実証することができなかった。そこで、マイクロ波を吸収する高誘電損失物質である水に着目し、水分を含む水溶性カルボジイミドをマイクロ波反応バインダーとして使用した。水溶性カルボジイミドを構成するオキシエチレン（ $-C_2H_4O-$ ）は親水性セグメントとなり、マイクロ波を吸収し、自己発熱する。一方、反応性セグメントのカルボジイミド（ $-N=C=N-$ ）は別の粒子の表面に存在するセグメントと強固に結合させる機能を持つ^[10]。

紫外線反応バインダーはセラミックスシート等の成形に有効であったが、紫外線は波長が短いため大きな試料の場合内部まで到達しにくい欠点があった。一方、マイクロ波は紫外線に比較して長波長での照射が可能であるため、マイクロ波反応バインダーは大型の成形体の製造に有効であった。これらのバインダーにより作製したセラミックス成形体は有機物質を0.5 wt%程度しか含まず、通常の方法に比べ著しく少ない量の有機物質で成形体の形状を維持できる。当該技術は、我々がこれまで省エネプロセス実現のための要素技術で培った表面被覆技術および反応トリガー技術を応用したものである。

5.3 無機バインダー技術

次いで、我々は「可塑性付与」の機能（図3）を発現する有機バインダーのゼロ化を目指して、無機物質を利用する無機バインダー技術を検討した。まず、粘土鉱物が可塑性を有することに着目した。粘土鉱物の可塑性発現メカニズムは良く分かっていないが、①粒子表面に形成される水膜の作用、②粘土の層間化合物に起因する滑り等に関係すると考えられている。我々は①に注目し、水を保持できる無機物を検討した。すなわち、新規無機バインダーが保形性と流動性を付与するメカニズムを粘土鉱物の場合と同様に「粒子表面に形成される水膜の作用」と仮定し、材料系の絞り込みにあたっては、粒子表面-水間に相互作用があり、材料中に十分な水を保持できる材料に着目した。このうち、水和物は多量の水を化学的に含有し、さらには構成元素の化学結合に応じて多系をとる。そのため、水和物は各種のセラミックスに広く対応できると考えた。また、水和物の多くは安価であり、粘土鉱物に比べて純度が高

い利点がある。このように研究の開始は流動性と保形性を有する水和物材料技術がベースとなった。

“バインダーを制するものはセラミックスを制する”の言葉が存在し、セラミックスの製造プロセスではバインダー技術の重要性は極めて高い。そのため、バインダーの開発指針等はほとんど公表されない。また、バインダー機能は複雑な因子で構成されているため、それを物理的定量性で示すことは困難である。そのため、研究現場および生産現場では、例えば押出成形技術の検討にあたっては「最後は実機で押し出して判断する」状況である。そこで、研究の最初の段階ではバインダー機能（保形性と流動性）の定義を独自に決め、これを押出用治具から押し出される試料の挙動から評価した。この手法は保形性と流動性の相対的な評価と押し出された試料の観察からなるため、物理量の絶対的な評価とはかけ離れている。しかし、少量の試料で簡便に評価できるため、材料の絞り込みと最適条件の探索に非常に有効であった^[12]。

無機バインダー技術の開発にあたっては、バインダー機能の評価技術をもとに、既存の有機バインダーおよび粘土鉱物と同じ可塑性挙動を示す無機材料を探索することにした。その結果、アルミナセラミックスの可塑性発現には水和物の一つである水硬性アルミナ（ ρ -アルミナ）の添加が有効であることを見いだした。水硬性アルミナは水和反応によりアルミナ原料粒子表面に水和物粒子として析出し、その粒子は多量の水を含有し、高いバインダー機能を持つことを明らかにした。その結果、添加量によっては有機バインダーを用いずに図5に示すチューブ状のアルミナセラミックス部材を押出成形することに成功した^[13]。さらには、他の水和物においても同様な効果が見られ、各種セラミックスでの可塑性の発現を確認した。

5.4 無機バインダー粒子表面の評価技術

前節で述べた無機バインダー開発は、その保形性・流動性が無機バインダー表面に存在する水膜によると仮定し

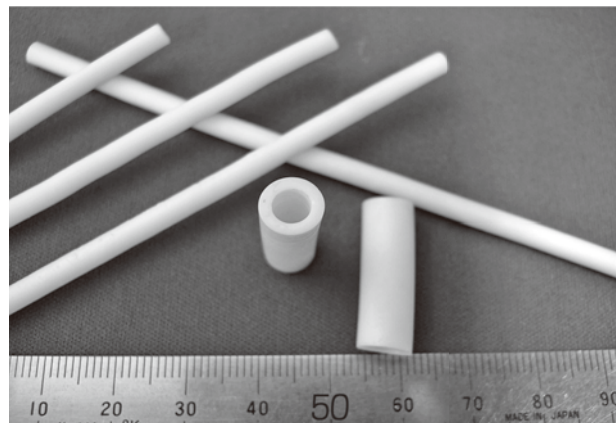


図5 無機バインダー技術で作製したアルミナセラミックス

て成功した。これを受けて我々は、無機バインダーによる可塑性発現メカニズムを以下のようなものと考えた。すなわち、無機バインダーに随伴する水の表面張力によってセラミックス粒子同士は緩やかな結合力を得るため、保形性が確保される。一方で、水膜がベアリングのように作用し、セラミックス粒子と無機バインダーの表面間に潤滑性が生じ、流動性が付与される。表面張力の作用は容易に理解されるが、潤滑性発現には実験的検証が必要である。そこで我々は、セラミックス粒子と無機バインダーの物質表面間に働く相互作用力を実測することを目指し、原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope: AFM）を用いた表面間相互作用力の計測技術をグループ内に確立した。

AFMは、試料とプローブの間の狭い領域に生ずる相互作用力をカンチレバー（力検出のための板ばね）の変位として検知する。元来は試料表面のモルフォロジー情報を得るための「顕微鏡」として用いるが、カンチレバー先端に所望の粒子を固定してプローブとすることで（コロイド・プローブ法）、粒子試料と平板試料の間の相互作用力を実際に計測することが可能である（図6）。この時、カンチレバーのたわみから平板試料に対して垂直方向の力（引力・斥力）を、カンチレバーのねじれから平板試料に対して平行な方向（横方向）の力を見積もることができる。我々は、無機バインダーとなる水硬性アルミナ粒子をカンチレバー先端に固定し、セラミックス粒子のモデル物質としてのアルミナ単結晶基板との相互作用力を測定した。無機バインダーがセラミックス表面との間に及ぼす相互作用力を評価することは、初めての試みであった。

測定の結果、無機バインダー粒子とアルミナ基板との間

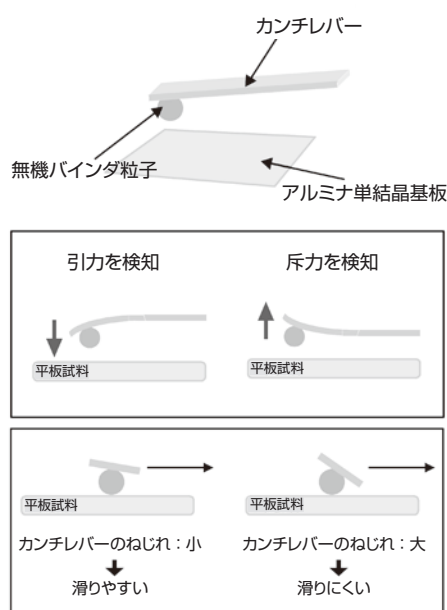


図6 表面間相互作用力の計測技術

に、一般的な静電的相互作用や van der Waals 力で説明できない斥力が計測された。これは水和斥力と呼ばれる相互作用力であると結論づけられた。高い親水性を有する物質が水中に置かれると、その表面上に水分子が水素結合により拘束・構造化された薄い層（水和層）が形成される。ここに別の表面が接近した時に生じる斥力が水和斥力である。また、表面間に水和斥力が観測された状態では、水和斥力が生じない（水和層がない）状態に比べて「滑り」やすい状態にあることが、横方向の相互作用力の計測から分かった^[4]。

無機バインダー開発において仮定された水膜は、水和斥力の原因となる水和層として、その存在が確かめられた。また、水和層の存在が無機バインダーとセラミックス粒子間の潤滑性を高めるため、それにより流動性が発現することが示唆された。

6 考察

我々の研究の流れを図7にまとめた。これまで省エネプロセスの実現のための要素技術を我々も含めた多数の研究者が取り組み、数多くの知見を生み出してきた。これは第1種基礎研究に相当するもので、代表的な要素技術を図7左に示した。しかしながら、開発した要素技術の多くは既存製造プロセスとの連携性の不備、コストの増加等により「死の谷」に陥っている。本研究では、製造現場で使用されることを前提に条件の絞り込みを最初に進めた。その結果、「死の谷」に陥る技術的および経済的な問題が明確にされた。これらの問題を解決する研究開発は第2種基礎研究に相当する。

低温焼結技術の開発は材料プロセス研究では魅力的な研究分野である。低温焼結化には数多くのアプローチがあり、さまざまな方法での組み合わせにより、有効な省エネプロセスが構築できると考えた。しかしながら、低温焼結化の要素技術はいずれもセラミックスに対して大きな物質移動を伴うものであり、既存製造プロセスの条件を大きく変更させるものである。一方、開発したバインダー技術は（1）原料粉末の特性を大きく変質させない、（2）セラミックスに対して大きな物質移動を伴わない特徴を持つ。これにより、既存の製造プロセスの大きな変更を伴わず、省エネプロセスの構築ができると考え、研究課題の設定が明確になった。この研究の位置づけを考えた場合、研究テーマの見極めに相当すると考えられる。ただし、この見極めは「複雑さの中の単純さ」を見いだすものであり、長年培った知識と経験の上に成り立っている。

バインダー機能は原料粉末、溶媒およびバインダーの種類や量により著しく変化するため系統的な研究報告は極め

て少ない。また、最適な成形機能を付与するために複数のバインダーの組み合わせで使うことが多く、それぞれのバインダーの役割は複雑に絡み合う。そのため、バインダーの研究はセラミックスの研究開発において極めて重要な位置づけでありながら、科学的な検討はほとんどなされていなかった。そこで、我々が考えたのは、既存の有機バインダーと同様な機能を持たせながら、有機バインダー量の減量化もしくはゼロ化を目指すことだった。これらの条件を踏まえ、有機系および無機系バインダー技術の開発に取り組んだ。このことは、新規バインダー技術を開発するための技術の抽出である。

本研究を進めていくにつれ種々の条件が明らかになり、要素技術が錬磨されていった。また、無機バインダーによる可塑性発現に関する研究開発と AFM コロイド・プローブ法等を利用した粒子表面解析技術の研究開発を行うことにより、粒子表面—水との関係をマクロおよびミクロレベルから解析した。この結果からセラミックスの可塑性における水の役割の重要性、さらには含水量を増大させる無機バインダー種の選択の方向性が定量的に示され、有機バインダー量の低減化およびゼロ化に関する技術に対して科学的根拠からアプローチできた。これらの研究は第2種基礎研究の中の基礎・基盤研究に相当する。

可塑性を示す有機バインダー量の低減化およびゼロ化を目指した無機バインダーの研究の流れは、①バインダー評価技術の開発、②無機バインダーのプロセス研究、③水—粒子界面の研究、④無機バインダー技術を制御するプロセス因子の解明と移動した。その結果、水含有量の多い無機材料は可塑性発現の無機バインダーになることを明ら

かにした。これは、我々が進めている第2種基礎研究のアウトカムである。

粘土鉱物および無機バインダーにおける水の重要性をグループ内で議論することにより、マイクロ波に反応する有機物バインダーの候補として、水を含有する、つまり親水性を有する有機バインダーへとつながり、その結果マイクロ波反応バインダーの開発を誘導した。無機バインダーおよびマイクロ波反応バインダーにおいて水の役割は異なるが、バインダーという大きな概念では“水”は重要な共通キーワードとなった。

得られた成果およびその知見をもとに、共同研究を通じて大手材料メーカーで製品が実用化された。これらの研究は製品化技術研究に相当し、製造ラインで開発された技術の有効性を確認しながら開発が進んだ。

我々が開発したバインダーの利点は技術の優位性に加え、当該技術の導入に伴うコストが低いことである。反応性および無機バインダーは原料および助剤とともに溶媒に入れ、混合・分散させるため、新たな工程は付加されない。さらに、我々が使用したバインダーは他の用途で大量に使用されており、その材料コストは低い。

7 結果の評価および将来の展開

開発する技術は既存プロセスへの適用、既存装置の利用、低コスト化等といった社会・産業ニーズを満足させることを条件に研究を進めた結果、技術の境界条件さらには要素技術が明確にされ実用に耐えうる技術が開発できたと考えられる。コア技術の抽出は、一見複雑に絡まっている製造プロセスの中から「複雑さの中の単純さ」を見いだすこ

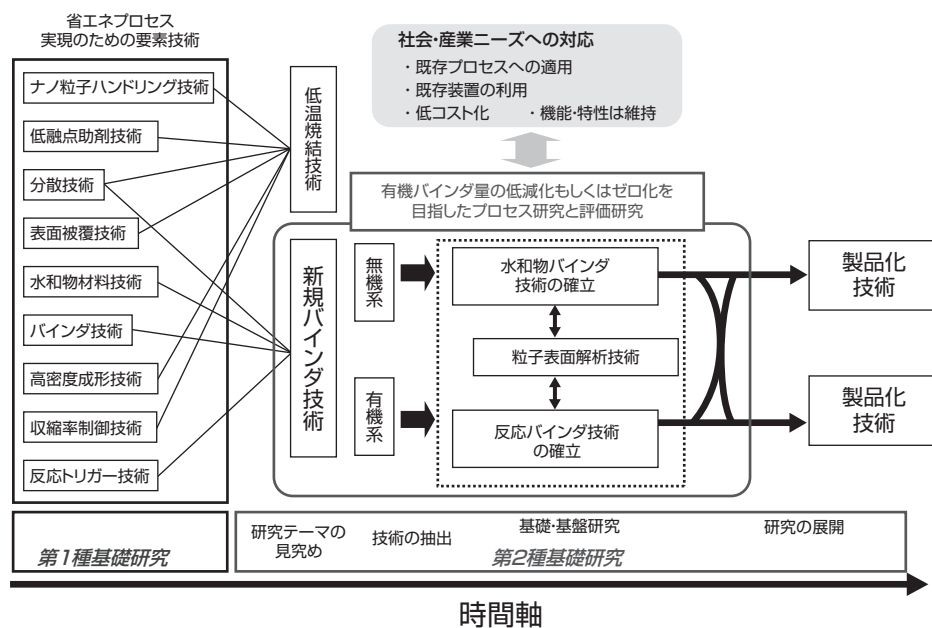


図7 既存のセラミックス製造工程における低環境負荷プロセスの構築と相互の関係

とである。研究開発の初期段階で、研究の境界条件および開発する技術のコアが分かっているのなら、研究資源を効率よく投入でき、研究開発の速度をかなり向上できる。しかし、製造プロセスは要素技術の集積と各技術間の連携により成り立っているため、コア技術の抽出に思った以上の時間がかかる。これらの問題を解決するには、早い段階で要素技術を体系化し、プロセスの連続性を確保するための課題とコア技術を抽出すべきであろう。これは、いわゆる産業展開の研究シナリオを作ることである。それにより、技術実用化にあたっての種々の課題が把握でき、さらにはそれらを解決できる処方案ができ、研究スピードを一段と増すことができると思う。

しかし、我々が得る民間企業の商品およびプロセスについての情報は断片的である。そのため、産業技術を目指すテーマによって、その分野で長年の経験と幅広い知識を持つ人材を確保し、対象とする課題および背景を十分に理解し、産業展開のシナリオを書きながら研究開発を進めることが重要であると認識する。

また、産業技術の公的研究機関に期待されるのは、何年たっても風化しない“普遍的な考え”だと思う。これは産総研が行う第2種基礎研究のアウトカムの一つだと考える。我々の研究では有機バインダー量の低減さらにはゼロ化という課題を設定したが、その問題の解決を通じてセラミックスの成形には原料粒子表面の水が強く影響をするという一般解を得た。製造現場から発生する研究課題に共同研究を通じて取り組む場合、個別企業への技術貢献や単発のサービスとなる場合が多いが、科学的な普遍性のある概念の構築を同時に考えることにより、第2種基礎研究のアウトカムは極めて意味あるものになる。

本研究の最終ターゲットは、有機バインダー量のゼロ化である。我々は無機バインダーを用いることにより単純な押出成形に成功した。この技術の完成により、脱脂と排ガス処理の工程を経ないでセラミックスの製造が可能となり、その結果二酸化炭素排出削減量は約70%となった(図2参照)。また、反応性バインダーもその量は通常プロセスのバインダー量に比較して1~2桁少ない量であるため、将来的には脱脂と排ガス処理の工程は必要がなくなることも考えられる。ここで見積もられる二酸化炭素排出削減量はセラミックス産業界にとってインパクトがある。ただし、部材の大きさおよび複雑形状度により、従来の有機バインダーの添加無しでは産業界の要求を応えることができないのが実状である。そのため、現状では開発したバインダー量に少量の有機バインダーを添加して成形する等の対応を進めている。

開発した技術は既存のセラミックスの生産プロセスに対応できることから、現在積極的に技術の普及を目指してい

る。我々は材料・プロセスをベースとして研究開発をこれまで進めてきたが、研究プロジェクトを通じて得た知見をもとに省エネ化を向上させる製造装置の開発も視野に入れ、研究開発を進めたいと考える。特に、材料・プロセスからの研究開発と製造装置からの研究開発の融合化を目指し、シナジー効果を誘導し、セラミックスプロセスの省エネ化に今後も貢献したい。

謝辞

本研究開発において、共同研究先の企業の研究者および技術者、さらには産総研の研究者などの多くの関係者の皆さまの御協力および御指導を頂いたことに深く感謝します。

参考文献

- [1] 日本経済エネルギー研究所, 経済産業省/EDMC推計, 62-13 (2003).
- [2] 渡利 広司: セラミックスの低エネルギープロセス技術の最近動向, *マテリアルインテグレーション*, 19, 2-9 (2006).
- [3] Y. Hotta, C. Duran, K. Sato, T. Nagaoka and K. Watari: Densification and grain growth in BaTiO₃ ceramics fabricated from nanopowders synthesized by ball-milling assisted hydrothermal reaction, *J. Euro. Ceram. Soc.*, 28, 599-604 (2007).
- [4] J. Qiu, Y. Hotta, K. Watari and T. Mitsuishi: Enhancement of densification and thermal conductivity in AlN ceramics by addition of nano-sized particles, *J. Am. Ceram. Soc.*, 89, 377-80 (2006).
- [5] K. Watari, M. C. Valecillos, M. E. Brito, M. Toriyama and S. Kanzaki: Processing and thermal conductivity of aluminum nitride ceramics with concurrent addition of Y₂O₃, CaO and Li₂O, *J. Am. Ceram. Soc.*, 79, 3103-8 (1996).
- [6] T. Isobe, Y. Hotta and K. Watari: Preparation of Al₂O₃ sheets from nano-sized particles by aqueous tape casting of wet-jet milled slurry, *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, 3720-24(2007).
- [7] Y. Kinemuchi, R. Ito, H. Ishiguro, T. Tsugoshi and K. Watari: Binder burnout from layeres of alumina ceramics under centrifugal force, *J. Am. Ceram. Soc.*, 89, 805-809 (2006).
- [8] 渡利広司, 佐藤公泰, 長岡孝明, 尾崎利彦: バインダープロセスと省エネ焼成技術, *新材料シリーズ, 環境対応型セラミックスの技術と応用*, 13-27 (2007).
- [9] K. Sato, Y. Hotta, T. Nagaoka, K. Watari, M. Asai and S. Kawasaki: Mutual linkage of particles in a ceramic green body through potoreactive organic binders, *J. Ceram. Soc. Japan*, 113, 687-691 (2005).
- [10] K. Sato, M. Kawai, Y. Hotta, T. Nagaoka and K. Watari: Production of ceramic green bodies using a microwave-reactive organic binder, *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, 1319-22 (2007).
- [11] C. Duran, K. Sato, Y. Hotta and K. Watari: Covalently connected particles in green bodies fabricated by tape casting, *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, 279-282 (2007).
- [12] T. Nagaoka, C. Duran, T. Isobe, Y. Hotta and K. Watari: Hydraulic alumina binder for extrusion of alumina ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, 3998-4001 (2007).
- [13] T. Nagaoka, K. Sato, Y. Hotta, T. Tsugoshi and K. Watari: Extrusion of alumina ceramics with hydraulic

without organic additives, *J. Ceram. Soc. Japan*, 115, 191-94 (2007).

- [14] M. Polat, K.Sato, T.Nagaoka and K.Watari: Effect of pH and hydration on the normal and lateral interaction forces between alumina surfaces, *J. Colloid Interface Sci.*, 304, 378-387 (2006).

執筆者略歴

渡利 広司(わたり こうじ)

1990年3月長岡技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了(工学博士取得)し、同年4月通産省工業技術院名古屋工業技術試験所入所。その後名古屋工業技術研究所を経て、2001年4月より産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門低環境負荷型焼結技術研究グループ長、2004年4月より先進焼結技術研究グループ長。現在、産業技術総合研究所イノベーション推進室総括企画主幹。その間1998～1999年ペンシルバニア州立大学(博士研究員)、1999～2000年通産省工業技術院研究開発課に在籍。2004年2月より長岡技術科学大学、2009年3月Gebze Institute of Technology(トルコ)において客員教授。日本セラミックス協会進歩賞(1997年)、永井科学技術財団学術賞(2002年)、American Ceramic Society, Richard M. Fulrath賞(2006年)、粉体・粉末冶金協会研究進歩賞(2007年)、異方性工学国際ワークショップ(トルコ)貢献賞(2008年)、大倉和親記念財団表彰(2008年)、日本セラミックス協会学術写真賞優秀賞(2009年)、Best Paper Award, Journal of the Ceramic Society of Japan(2009年)等を受賞。MRS Bulletin(2001年6月)、Journal of the Ceramics Society of Japan(2008年2、3月)等でGuest Editorを歴任。これまで、セラミックスのプロセス技術、反応場制御プロセス技術、高熱伝導率セラミックス等の研究開発に従事した。本研究では全体計画の立案と研究管理・運営および低温焼結技術を担当した。



長岡 孝明(ながおか たかあき)

1985年東北大学理学部卒業、日本セメント(株)(現太平洋セメント(株))勤務を経て1987年工業技術院名古屋工業技術試験所入所。次世代基盤技術研究プロジェクト等のプロジェクト研究に従事。その間1996～1998年ファイナセラミックス技術研究組合出向。2001年より産業技術総合研究所で無機バインダー技術の研究開発に従事、現在に至る。本研究では無機バインダー技術を担当した。



佐藤 公泰(さとう きみやす)

1997年東京大学大学院理学系研究科博士課程中退。同年科学技術庁無機材質研究所重点研究支援協力員。2000年科学技術振興事業団CREST研究員。2002年産業技術総合研究所入所。2008～2009年ストックホルム大学客員研究員。現在、産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門無機複合プラスチック研究グループに所属。博士(理学)。本研究では反応有機バインダー技術と無機・有機界面評価技術を担当した。



堀田 裕司(ほった ゆうじ)

1997年北海道大学大学院理学研究科博士課程を修了し、通産省工業技術院名古屋工業技術研究所(現産業技術総合研究所)に入所、2000～2001年(財)ファイナセラミックスセンターへ出向後、2001～2002年スウェーデン表面化学研究所(YKI)客員研究員。現

在、産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門無機複合プラスチック研究グループ長。ナノ粒子ハンドリング技術、セラミックス粒子の分散技術、成形プロセス技術等に関する研究に従事している。本研究では、ナノ粒子を用いた低温焼結技術を担当した。



査読者との議論

議論1 開発バインダーによる省エネ効果および二酸化炭素排出削減について

コメント・質問(村山 宣光:産総研先進製造プロセス研究部門)

有機バインダーの低減および無機バインダーの適用により、どの程度のエネルギー削減や二酸化炭素排出削減が達成できたのでしょうか、あるいは期待されるのでしょうか。

回答(渡利 広司)

無機バインダーを用いることにより、現在アルミナおよび窒化ケイ素セラミックスの単純な押出成形に成功しており、この場合製造にかかわる二酸化炭素排出削減量は約70%となります(図2参照)。実際の生産ラインでは、成形プロセスの違い、さらには部材の種類、大きさおよび複雑形状により、開発した反応性および無機バインダーの添加量は異なります。また、部材によって従来のバインダーを添加しないと成形できない場合があります。技術移転先企業からは大幅な二酸化炭素排出削減の効果があったと聞いておりますが、共同研究の制約上削減量の数値および技術内容の公開は控えさせていただきます。

今後、開発技術を広めるために、実機レベルでの部材のスペック(材料種、大きさ、形状等)に応じた必要なバインダー量を見積もり、その量に基づく二酸化炭素排出量およびその削減量等の関係を定量的に整理したいと思っています。

議論2 開発バインダー導入に伴うコストの増減について

コメント・質問(清水 敏美:産総研研究コーディネータ)

製造プロセスの省エネ化において、「経済的な死の谷」の観点から新規開発技術のコスト要因が重要であるという記述があります。反応性バインダーおよび無機バインダーの導入コストははいかがでしょうか。

回答(渡利 広司)

私たちが開発したバインダーの利点は技術の優位性に加え、当該技術の導入に伴うコストが低いという点です。反応性および無機バインダーは原料および助剤とともに溶媒に入れ、混合・分散させるため、新たな工程は付加されません。さらには、我々が使用したバインダーは他の用途で大量に使用されており、その材料コストは低く抑えることができます。

議論3 有機バインダーのゼロ化と無機バインダーとの関係について

コメント・質問(清水 敏美)

省エネ化プロセスの実現としての課題設定が、有機バインダーの減量化あるいはゼロ化とありますが、「ゼロ化=無機バインダーの導入」を意味するのでしょうか。

回答(渡利 広司)

ご指摘のとおりであり、無機バインダーの導入が有機バインダーのゼロ化、さらにはセラミックスの製造プロセスでの二酸化炭素排出量の大幅な削減につながります。

議論4 材料合成と評価技術との関係について

コメント・質問(村山 宣光)

無機バインダーの開発では、まず、バインダー評価技術の開発を行い、そのあと、無機バインダー開発を進めています。この研究の進め方は大変示唆に富んでいます。通常、材料プロセスの研究は、材料を開発した後、それを評価しますが、新しい機能を目指す研究では、その評価技術自体も自ら確立する必要があります。材料合成と評価との関係について、お考えをお聞かせください。

回答（長岡 孝明）

材料系の探索とその最適化による材料・プロセスの研究開発では、評価試験を数多く行う必要があります。しかしながら、本研究では二つの制約がありました。1点目はバインダー機能の評価方法が定まっていないこと。その結果、生産現場では「最後は実機で押し出して判断する」状況です。2点目は実機での評価には1回あたり多量（数百グラム）の試料を必要とすることです。生産現場では少量と感ぜられる量でも産総研では時間と労力を考えると容易ではありません。評価試験を数多く行わなければならない場合はなおさらです。そこで、押出成形を行うためのバインダー機能（保形性と流動性）の定義を独自に決め、最小限の試料量でバインダー機能を評価できる手法を開発しました。その結果、有望な試料の絞り込みを少量の試料で簡便かつ迅速に行うことができました。

新たな材料機能の探索、研究室レベルでの機能評価技術がない場合等、研究担当者は評価技術を自ら確立する必要があります。一見遠回りなようですが、評価技術の開発を一緒に進めることにより、研究者は発現する機能の意味を深く考え、評価者に近い視点で材料合成に取り組むことができます。さらには、自分たちが評価技術を蓄積することにより、開発した技術および材料は高度な知識の塊なり、独創性の高いものになると考えます。

議論5 ノウハウ的な技術に対して科学のメスを入れることの意義について

コメント・質問（村山 宣光）

本研究は、バインダー技術というノウハウ的な技術に対して科学のメスを入れたと言えます。それにより、製造プロセスは進歩することは間違いありません。一方で、セラミックス分野で先行している企業のノウハウのオープン化により、それらの企業の競争力の低下をまねく可能性もあります。材料プロセス分野で、経験に頼っていた技術を科学することの意義について、考えをお聞かせください。

回答（渡利 広司）

査読者のご指摘のとおり、バインダー技術の基礎・基盤研究の取

り組みにより、企業の経験に頼っていた技術に対して科学的考察を入れることになり、逆に将来的には日本のセラミックス企業の競争力をそぐこととなります。そのため、研究リーダーとして発表する特許および論文の内容を吟味し、共同研究先には十分な説明を行い、了解を得た上で研究成果を公表しています。

経験に頼っていた技術を科学すること、つまり技術の科学的本質の把握、技術の体系化および重要因子の抽出は、研究のプロフェッショナルが集まる産総研のような公的研究機関のアウトカムとして極めて重要な意味を持ちます。また、産総研の役割として“死の谷”を科学的な観点と根拠で乗り越えることが求められており、経験に頼っていた技術を科学することにより適切な要素技術や代替技術を提供できると思います。

私たちの研究グループと共同研究した企業の多くは“基礎・基盤研究を通じての高付加価値製品の開発および生産効率の向上”を最終目的にし、その結果基礎・基盤研究に対する重要性を認識し、高い研究成果を求めてきました。これは、企業が経験に頼っていた技術を科学することにより、より良い製品を作ること、さらには生産効率を上げることを目指している意志の表れではないでしょうか。一方で、技術ノウハウは企業の貴重な財産であるため、その取り扱いには充分注意する必要があります。

議論6 製造ラインの抜本的な変更を伴う革新的な材料プロセスの技術移転について

コメント・質問（村山 宣光）

著者らの言われる経済的な死の谷を越えるには、「開発する技術は既存プロセスに組み込まれ、既存製造装置が利用できることを前提とした技術開発」が効率的であることは間違いありません。一方で、製造ラインの抜本的な変更を伴う画期的な材料プロセスの技術移転というパターンもあります。後者の場合、例えば、産総研等の公的研究機関が試作ラインを持ち、製造を実証することが一つの方法だと考えます。この点について、ご意見をお聞かせください。

回答（渡利 広司）

民間企業の多くは製造ライン等の新規投資は躊躇します。そのため、その技術の重要性および波及効果を考え、産総研等の公的研究機関がプロトタイプ製造装置や製造ラインを立ち上げ、製造を実証することは大変意義のあることだと思います。ただ、かなりの投資の額になるために、代替技術の可能性、ユーザーおよび維持費の確保、キーマニケーションの抽出、市場動向の把握等ビジネスモデルの構築が新規投資を開始する前に必要かと思えます。

高感度分子吸着検出センサーの開発

— 高度な診断・診療のためのバイオ分子検出技術の開発 —

藤巻 真*、栗津 浩一

特定の物質の存在を高感度で検出するセンサーは、医療や創薬、環境などの分野でその高機能化が切望されている。我々は、診断、診療のための高性能なセンサーを目指し、基本技術として導波モードを用いた高感度分子センサーの開発を行った。本センサー開発において、我々は、ナノ穴形成技術の適用、光学シミュレーションと実験結果のフィードバック、検出板作製工程の見直しを経て、センサーの高感度化、安定化に成功した。本稿では、これらの研究シナリオ及びシナリオ実現に用いた要素技術、各要素技術の構成方法とそれにより達成したセンサー技術の特性に関して述べる。また、ブレイクスルーによって得られた飛躍的な検出性能の向上についても報告する。

キーワード: バイオセンサー、導波モード、導波路、エバネセント場、分子吸着

Development of high-sensitivity molecular adsorption detection sensors

– Biomolecular detection for highly-developed diagnosis, medication, and medical treatments –

Makoto Fujimaki* and Koichi Awazu

High sensitivity sensors for detection of molecules are aspired in various fields of application, particularly in medical technology, pharmacy and environmental sciences. In the present research, we have developed a high-performance molecular detection sensor for diagnosis, medication, and medical treatments that utilizes waveguide modes as basic technology. We successfully obtained sensors with high sensitivity and stability by applying nano-perforation technology, optical simulation and experiments, and an originally developed sensing-plate fabrication process. In this report, the scenario of the present research, elemental technologies and their synthesis for achieving the scenario and the properties of the realized sensors are described. In addition, a rapid progress in sensing performance obtained by a breakthrough is reported.

Keywords: Biosensor, waveguide modes, optical waveguide, evanescent field, molecular adsorption

1 はじめに

医療におけるセンサーに求められる重要な役割の1つに、病気の早期発見が挙げられる。近年の目覚ましい医療の進歩から、様々な疾患に起因する物質が特定されてきており、これらの物質の有無を検出することによって、罹患の有無や進行具合を判定できる。疾患は早期発見によって、治癒の可能性が格段に高くなる。疾患を早期に発見するには、これらの物質が低濃度である段階でも、感度良く検出できることが求められる。つまりセンサーにはより高い感度が要求される。

センサーに求められる役割としては、この他に、疾患の原因の特定、患者の経過の観察が挙げられる。例えば、風邪や食中毒の場合、その症状を引き起こしたウイルスや菌を短時間で特定することが求められる。ある疾患によ

て入院した患者に薬を投与した場合、その薬の効果が出ているのかどうかのその場観察も重要である。これらの状況下では、センサーは、その場で迅速に検出を行うことが求められる。このような場合、センサーには検出感度に加えて、持ち運びに適した程度にコンパクトであること、測定環境に依存しない検出が可能であることが望まれる。

高性能なセンサーによって病気の早期発見、早期の特定、ストレスの少ない正確な経過観察が可能となれば、患者の早期回復が期待でき、その結果、患者の肉体的負担の軽減、治療期間の短縮及び医療費の削減が実現できる。もちろん、微量物質を検出できる方法は数多く存在するが、医療現場で用いることを考えると、安価である必要があり、また、装置操作に比較的熟練を要さなくともよいものでなければならない。既にいくつかの疾患などに対し

産業技術総合研究所 近接場光応用工学研究センター 〒305-8562 つくば市東 1-1-1 中央第4
Center for Applied Near-Field Optics Research, AIST Tsukuba Central 4, Higashi 1-1-1, Tsukuba, 305-8562, Japan * E-mail: m-fujimaki@aist.go.jp

Received original manuscript March 9,2009, Revisions received April 21,2009, Accepted May 11,2009

ではこのような条件をある程度満たすセンサーが考案され実用化されており、イムノクロマトグラフィー法を用いたインフルエンザの診断（ロシュ・ダイアグノスティクス株式会社 タミテストインフルエンザ AB、DS ファーマバイオメディカル株式会社 QuickVue ラビッド SP influ、など）、金コロイドクロマト免疫測定法を用いた妊娠検査（ロート製薬株式会社 ドゥテスト、株式会社アラクス チェックワンファスト、など）などがその例として挙げられる。

しかしながら、多くの場合、疾患に起因する物質の濃度があまりに低かったり、他の物質との分離が困難であったという理由のために、これを克服する有効なセンサーが開発されておらず、今後の開発に大きな期待が寄せられている。このようなニーズを受け、小さな病院でも短時間で、初期段階の病気を発見できるようにするためのバイオセンシング技術を確立することを目標に、様々な特定の微量物質を感度良く検出でき、持ち運びが可能な程度にコンパクトで、測定環境に依存しない安定な検出が可能な、バイオ物質センサーの開発を行った。また、特に人由来の検体、例えば血液や尿や唾液を対象に検出を行う場合、様々な物質が混在しているため、検出したい物質以外の物質（夾雑物）に検出を邪魔されてしまうことが大きな問題となる。よって、夾雑物の影響を受けにくくするための開発も行った。

2 分子吸着検出センサー開発

図1にセンサー開発に求められる課題、課題克服によって期待できる性能、得られた性能によって享受できるメリットを示す。このように、目的とするセンサーは、特定の物質（検体）の存在を感度良く、安定に、そして低ノイズで検出するものである。我々は、本センサーの開発に、検体を特異的に捉え、その結果生じる誘電環境の変化を導波モード^{用語1}の変化によって検出する手法を基本技術として用いた^{[1][2]}。以下に本技術の特徴及び本開発によって行った高機能化に向けたシナリオを説明する。

2.1 エバネセント場結合型導波モードセンサーの原理とセンサーに求められる性能

課題	期待できる性能	得られるメリット	応用
高感度化	小さい分子の検出。 少量・低濃度物質の検出。	様々な疾患・病原体の特定。 初期段階での疾患の特定。	医療 創薬 健診 健康 環境測定 テロ対策
高安定化	物理的安定性の向上。 化学的安定性の向上。 温度に対する感度の安定性。	キズによる誤診の防止。 ハンドリング時に壊れにくい。 センサーの長寿命化。 安定した製造。製造誤差の低減。 検体に対して安定。 (酸、アルカリ、腐食性、反応性)。 空調が不要。屋外で使用可能。	
低ノイズ化	夾雑物、非特異吸着の影響低減。	正確な診断。高感度な診断。	

図1 センサーに求められる課題、期待される性能、得られるメリット及び応用分野

我々が開発を行ったエバネセント場^{用語2}結合型導波モードセンサー（Evanescent-field-coupled waveguide-mode sensor、EFC-WM センサー）と非常に似た機構を持ち、主に研究開発用として市販されているバイオセンサーとして、表面プラズモン^{用語3}共鳴（SPR）を用いたセンサーが知られている^[1]。EFC-WM センサーの仕組みの理解を容易にするために、この既に実用化されている SPR センサーの測定原理を簡単に説明する。

一般に SPR センサーでは高屈折率ガラス基板表面に金属薄膜を堆積し、金属薄膜面と反対側の面に基板と同一のガラスで形成されたプリズムを配する。一般に、金属薄膜には、可視光で表面プラズモンを励起することができる Au や Ag が用いられる。図2 (a) に SPR センサーに最も良く用いられる光学系を示す。この光学配置はクレッチマン配置と呼ばれる^[3]。クレッチマン配置において、プリズム側から全反射条件下で光を入射すると、ある特定の入射角において金属薄膜表面に表面プラズモンが励起される。この入射角度を共鳴角と呼ぶ。共鳴角付近で光を入射して金属薄膜による反射光の強度を測定すると、入射光が表面プラズモンと結合することによって反射光強度が著しく減少する。表面プラズモンは、金属表面の誘電率の変化に敏感であることから、表面に生体分子などが吸着すると、この共鳴角が変化し、光の反射光強度が大きく変化する。この反射光強度の変化を検出することによって、生体分子の吸着を検出する。特定分子のみを検出するため、金属表面には、検出対象分子を特異的に吸着する物質を表面修飾しておく。

EFC-WM センサーに用いる検出板は、基板ガラス上に反射膜と透明誘電体導波路を持つ^{[4][5]}。測定に用いる光学系には、SPR センサーと同じ光学系が使用可能である。図2 (b) はクレッチマン配置を用いた EFC-WM センサーの光学配置を示す。SPR センサーと同様にプリズムを介して光を入射すると、ある特定の入射角（共鳴角）において反射膜で発生するエバネセント場を介して入射光と導波路を伝搬する導波モードとのカップリングが生じる。この特定角度付近で光を入射すると、反射光強度が著しく増減す

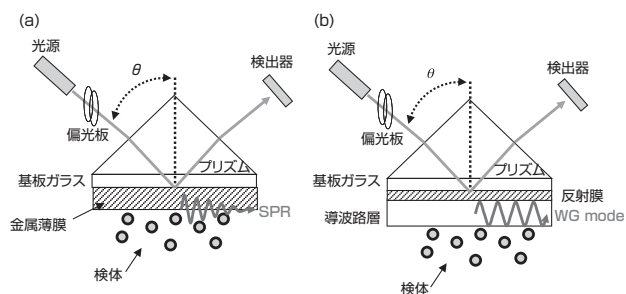


図2 (a) SPR センサーに用いられる光学配置、(b) EFC-WM センサーに用いられる光学配置。

る。導波モードも、SPR モードと同様、表面状態に敏感であるため、導波路の表面に生体分子などが吸着すると、上記の共鳴角が変化し、反射光強度の変化が生じる。この反射光強度の変化を利用し分子吸着を検出するセンサーが EFC-WM センサーである。

SPR センサーは、検体を標識物質で標識しないラベルフリーな検出手法であり、ラベル化を行わずとも十分に検体を検出できるだけの感度を持っていることが大きな特徴である。よって、煩雑なラベル化工程が不要で、その結果、検出が簡単に行えるという特徴がある。また、検体をラベル化しないことから、検体自身が持つ特性や特徴が損なわれない。したがって、対象となる分子の挙動、例えば、特定分子をどのような環境下で吸着するか、などを正確に観察することができる。しかし、感度という面では、標識物質を用いる高感度検出法、例えば酵素結合免疫吸着法（Enzyme-Linked Immunosorbent Assay^[6]、エライザ法と呼ばれる）よりは 2～3 桁程度劣ると言われている（ただし、感度は、測定対象分子の種類や大きさ、測定対象分子の捕捉方法、測定環境、例えば、血液中か緩衝液中か、夾雑物は存在するか、など様々な要因に大きく左右されるため直接の比較は難しい）。EFC-WM センサーも SPR センサー同様、ラベルフリーな検出手法である。これまで、EFC-WM センサーは、光反射物質に制限がないことや S 波 P 波の両方が使えるなどの利点があるにもかかわらず分子吸着検出センサーとして SPR センサーの後塵を拝してきた。その最も大きな理由は、分子吸着時の共鳴角の変化量の絶対値が SPR センサーに比べ小さいことである。しかしながら、EFC-WM センサーでは共鳴角の幅が鋭く、よって小さな角度変化でも大きな反射率特性の変化が得られると言う特徴がある。また、SPR センサーに比べ、EFC-WM センサーでは導波路層を形成する分、作製工程が煩雑になる。しかし我々はこの導波路層を工夫することこそ、さらなる高感度化の鍵であると考えた。これらの特徴を活かし EFC-WM センサーの感度を 2～3 桁向上できれば、分子吸着検出センサーの感度としては申し分無い。

感度の他に、使用する環境、特に室温に対する感度の安定化も求められる。感度が高い検出方法は、高感度であるがゆえに、環境の影響を受けやすい。一般に生体分子は、血液や尿や緩衝液など、何らか形で水に溶けている。水は温度によって誘電率が変化するため、SPR センサーや EFC-WM センサーのように誘電率の変化を検出するセンサーは、原理上温度に対して非常に不安定である。センサーを高機能化するに際し、この温度安定性の問題の解決は大変重要な課題である。

このように、EFC-WM センサーを医療分野で使用可能

な有効な検出手法とするには、性能上求められる様々な課題がある。しかしながら、SPR が発現する材料しか使用できない SPR センサーとは異なり、EFC-WM センサーは、反射膜材料には光を反射する薄膜材料であればあらゆる材料が使用でき、また、導波路層には透明薄膜材料であればどのような材料でも使用できる、という大きな自由度があり、高感度化、高性能化の余地が多分にあった。そこで我々は、以下に示すシナリオを描き、センサーの高機能化に取り組んだ。

2.2 EFC-WM センサー高機能化のシナリオ

まず我々は、導波路自体の構造に着目した。図 3 は、導波モードが励起されている時の導波路内の電界分布のシミュレーション結果を示す。ここでは、入射光は波長 632.8 nm の S 偏光、基板ガラスの屈折率は 1.769、反射膜は厚さ 40 nm の Au、導波路層は厚さ 500 nm のシリカガラスであるとした。また、導波路表面は水に浸っているとした。入射光は、図の左側から照射されている。図から分かるように、電界は導波路内部で強く、導波路表面付近では弱くなってしまふ。この電界の強い位置に分子を誘導できれば、より高い感度で分子検出ができる。よって、我々は、導波路層に穴を形成し、検体を導波路内に誘導することを考えた^{[7][8]}。この穴形成によって導波路の表面積が増えることから吸着する検体の個数も増加するため、より大きな感度の向上が望める。穴のサイズは、入射光の散乱を防ぐため、入射光の波長より十分小さいことが望ましい。よって、可視光を用いる場合、孔径は数 10 から 100 nm 程度でなければならない。また、穴はできるだけ深い方が、より大きな面積増加が望めるため、導波路層を貫通する程度に深いことが望まれる。このように直径が小さく、アスペクト比が高いナノ穴を形成する手法として、我々は、高速重イオン照射によって形成された潜トラックのフッ酸蒸気による選択エッチングを用いた^[9]。本技術では、直径数 10nm でアス

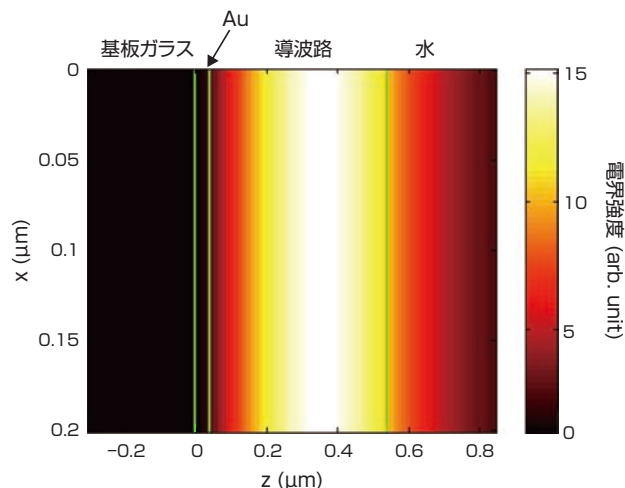


図 3 導波モード励起時の導波路内電界強度分布。

ペクト比 40 以上のナノ穴の形成が可能である^[8]。

次に我々は、検出板の材料、特に反射膜の材料について見直しを行った^[5]。従来の EFC-WM センサーでは、反射膜に Au や Ag などの貴金属を用いる例が多く報告されている^{[10][11]}。また、実際にこれらの材料を用いることによって、高い感度が得られていた。ところが、これらの金属は EFC-WM センサーに用いられるガラス基板やプラスチック基板、導波路層として用いられる誘電体層との密着性が非常に悪く、簡単に剥がれてしまうという問題点があった。したがって、実用に耐える高い信頼性を得るために、接着層を入れる必要があったが、この接着層の導入によって、センサーの感度低下や製品のコスト高、製造誤差の増大という悪影響が問題となっていた。光学シミュレーションによってどのような光学特性を持った材料が EFC-WM センサーに適するかを再検討し、また、実際に様々な検出板を作製して、センサーの性能比較を行った。

以上の開発の結果は以下の章で詳述するが、これらの結果を受けて、我々は、ナノ穴形成に適した導波路が Si を熱酸化して形成したシリカガラスであり、また、反射膜として Si を用いることが有効であることを見出した。これらの結果を踏まえ我々は、Silicon-on-Quartz (SOQ) と呼ばれるシリカガラス基板上に単結晶 Si 層を持つ貼り合せ基板^[12]を検出板製造に用い、この単結晶 Si 層を酸化して導波路を形成する手法を考案した^[13]。我々はこの手法で作製した検出板をモノリシック検出板と呼んでいる。また、我々は、このモノリシック検出板が吸着物の光吸収を敏感に捉えることを利用し、飛躍的な高感度化を達成した。このことは 4 章「ブレイクスルー」で述べる。図 4 はこの一連の研究開発の構成を示したものである。

3 開発の成果

本研究の取り組みによって得られた研究成果を以下に示す。

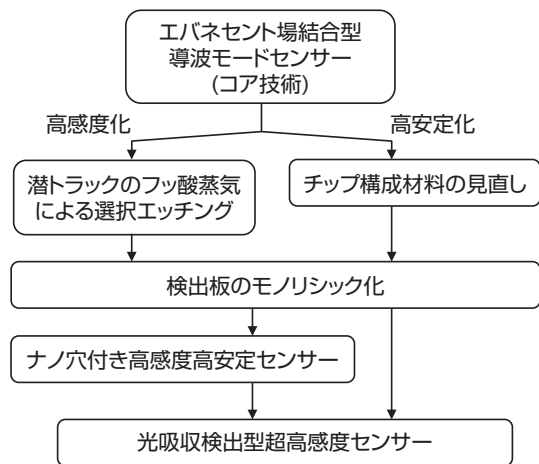


図 4 本研究開発の構成

3.1 ナノ穴形成技術による高感度化

上述のように、導波路へのナノ穴形成に、高速重イオン照射によって形成された潜トラックのフッ酸蒸気による選択エッチングを用いた。イオン照射には筑波大学の 12 MV タンデム加速器を用いた。イオン照射方法を図 5 に示す。150 MeV で加速した Au イオンを厚さ 0.8 μm の Al フォイルに照射する。すると、フォイルによってイオンが散乱され、均一で電流密度の低いイオンビームが形成される。イオンビームの電流密度はチップ上で 100 pA/cm² 程度となるように設定した。低い電流密度にする理由は、イオン照射量が 1 cm² 当たり 10⁹ ~ 10¹⁰ 個のオーダーと非常に少ないため、このような低い注入量を正確に制御するためである。エッチングには、20 % フッ酸による蒸気を用いた。フッ酸を入れた容器内に、フッ酸に浸らないように試料を入れ、試料をフッ酸蒸気にさらす。

図 6 は厚さ 2.0 μm の Si 熱酸化膜に Au イオンを照射した後、フッ酸蒸気で 60 分エッチングを行った時の表面及び断面 SEM 写真である。エッチング時のフッ酸温度は 21.5 °C とした。図より、熱酸化膜を貫通する穴が形成されていることが分かる。エッチング後の熱酸化膜の厚さは 1.9 μm であった。つまり穴のアスペクト比は 42 となる。このように、本手法によって数 10 nm オーダーの直径を持つナノ穴を精度良く多数形成できる。

この手法を用いて、実際にシリカガラス導波路を持つ検出板の導波路層にナノ穴を形成し、感度の向上を試みた。基板には、ガラス基板 (OHARA S-LAH66, 2 cm 角、厚さ 1 mm、屈折率 1.769 (波長 632.8 nm)) を用いた。反射膜には Au を用いた。また、Au とガラス基板、Au と導波路層の接着層として Cr 層を用いた。これらの膜は真空蒸着法によって形成した。Au の厚さは 53 nm、Cr の厚さは 0.8 nm とした。導波路層はシリカガラスをターゲットに用いた rf マグネトロンスパッタリング法によって形成した。導波路層の厚さは 550 nm とした。スパッタリング後、導波路層を緻密化するために大気中 600 °C で 24 時間熱処理した。この導波路表面に前述の方法でナノ穴形成を行った。Au イオン照射量は 5.0 × 10⁹ cm⁻² とし、フッ酸蒸気

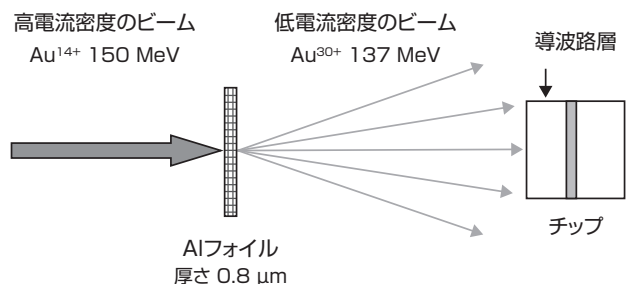


図 5 ナノ穴形成に用いるイオン照射方法

で30分間エッチングを行った。このときのフッ酸の温度は19.0℃とした。図7はエッチング後の検出板の表面及び断面SEM写真である。図に示すように、直径約30nmのナノ穴が観測される。また、この穴はAu層まで貫通していることが分かる。エッチング後の導波路層の膜厚は400nmであった。

作成した検出板にS-LAH66製の直角三角形プリズムを、マッチングオイルを介して密着させ、クレッチマン配置によって、反射率の入射角依存性の測定を行った。光源にはHe-Neレーザー（波長：632.8nm、S偏光）を用いた。導波路側には検体を保持するための液セルを配した。導波路層表面にビオチニル基を表面修飾し、ビオチン^{用語4}に対するストレプトアビジン^{用語5}特異吸着による反射率変化を観測することによって、検出感度を評価した。ストレプトアビジンはリン酸緩衝液中に溶かし、その濃度は100nMとした。図8に測定結果を示す。図8(a)はナノ穴を持つ検出板、図8(b)はナノ穴を持たない検出板を用いて測定し

た場合の結果を示す。白丸は液セル中をストレプトアビジンを含まないリン酸緩衝液で満たした際の反射特性、黒丸はストレプトアビジンを含むリン酸緩衝液を液セルに注入し、ストレプトアビジンがビオチンに吸着した後の反射特性である。いずれの場合も、導波モード励起による負のピークが観測され、ストレプトアビジン吸着によって、このピーク位置がシフトすることが分かる。ナノ穴を持つ基板によって得られたストレプトアビジン吸着によるこのピークのシフト量は0.38°であった。一方、穴を持たない基板でのピークシフト量は0.06°であった。このように、穴あけによって大幅な感度の向上が得られることを示すことができた。しかしながら、図8(a)に見られる様に、ナノ穴の形成によって、ピークの半値幅が広がり、深さが浅くなってしまった。これはエッチングによって、導波路層表面が荒れてしまったことによるものと考えられる。実際、図7に見られるように、エッチング後の導波路表面には粒子状の凹凸が観測される。この問題は、3.3章に記載のモノリシック検出板の開発によって、大幅に改善できた。

3.2 反射膜材料

EFC-WMセンサーの感度は、反射膜の光学特性に大きく依存する。そこで我々は、シミュレーションによって様々な反射膜材料に対するセンサー感度の予測を行い、また、実際に多種のセンサーを作製し検証を行った。

図9(a)、(b)、(c)は、それぞれ反射膜にAu、W、Si

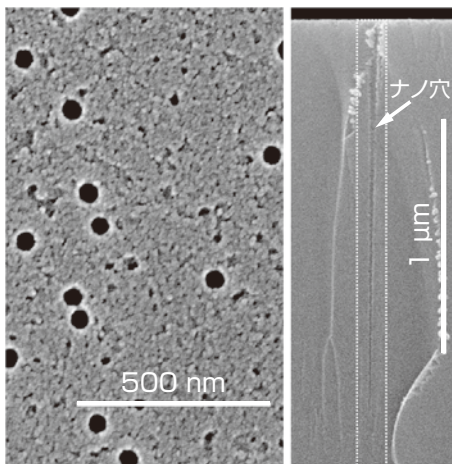


図6 Si熱酸化膜に形成したナノ穴の表面(左)及び断面(右)のSEM写真。

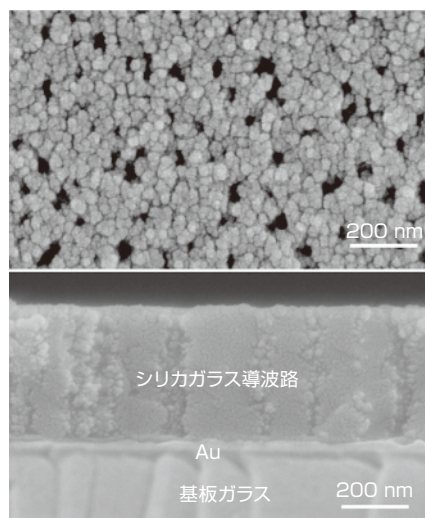


図7 ナノ穴を形成した検出板の表面(上)及び断面(下)のSEM写真。

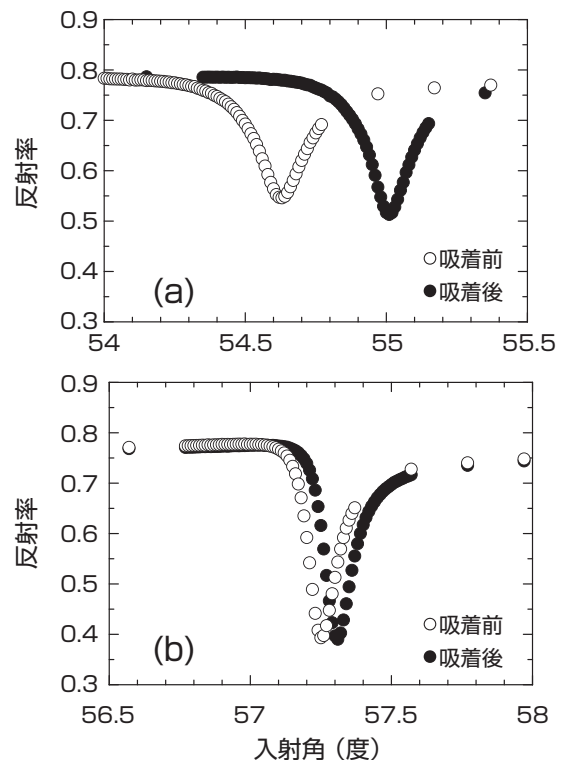


図8 ナノ穴あり(a)、及びナノ穴なし(b)の検出板を用いて観測した、ビオチン-ストレプトアビジン吸着前後の反射特性。

を用いた時の反射特性を計算した結果を示す。計算に用いた基板の屈折率は1.769、反射膜の厚さはそれぞれ40、20、30 nm、導波路層の屈折率と厚さはそれぞれ1.485、500 nmとした。入射光はS偏光された波長632.8 nmの単色光とした。また導波路表面は水に浸っていると仮定した。反射特性に見られる形状は反射膜材料によって異なるものの、いずれの場合も反射特性においてピークが観測されることが分かる。反射特性における形状、つまり、波形が上凸となるか下凸となるかは、バックグラウンドとなる反射光強度と共鳴の状態によって決まる。これらのピークの位置は、導波路表面への物質吸着によってシフトする。

どのような光学特性を持つ材料が反射膜として好ましいかを知るために、反射膜材料の複素屈折率 $n + ki$ と検出感度の関係を計算した。計算結果を図10に示す。図は、導波路表面に厚さ5 nm、屈折率1.45の物質が吸着した場合に得られる最大反射率変化量と、反射膜の n 及び k との関係を示す。ここで、入射光の波長は632.8 nm、基板ガラス及びプリズムの屈折率は1.769とした。また、導波路の厚さ及び屈折率はそれぞれ350 nm、1.485とした。光の入射角度、偏光方向及び反射膜の膜厚はシミュレーションによって最適値を導出した。得られた変化量が大きい複素屈折率を持つ材料が反射膜材料として好適な材料であるといえる。図中には、幾つかの材料の複素屈折率を黒点で示してある。計算結果から、従来から用いられてきたAu、Ag、Cuといった材料が高い感度を示すことが分かる。その次に高い感度を示すのは、SiやGeなどの、 n が大きく k が小さい材料であることが分かる。

図中に記載した幾つかの材料を用いて実際に検出板を作製し、前述と同様のビオチン-ストレプトアビジン吸着の観測を行った。ストレプトアビジンは、直径が5 nm程度、屈折率が1.45であり、前記計算結果と近い結果が期待できる。表1に、作製に用いた反射膜材料と、各反射膜材料で得られたストレプトアビジン吸着時の最大反射率変化量 $|\Delta R_{ex}|$ と上記計算で得られた最大反射率変化量 $|\Delta R_{cal}|$ を示す。Auを反射膜に用いる際、接着層を入れない場合には検出板形成後にAuが剥がれてしまい、実験値は得られなかった。実験で得た値では、Cuを用いた際の $|\Delta R_{ex}|=0.505$ が

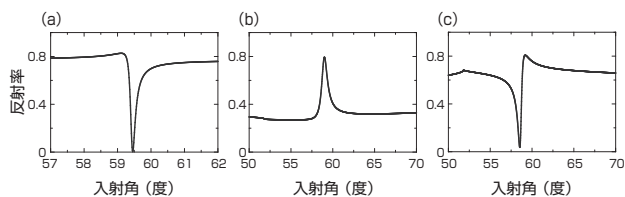


図9 反射膜にAu (a)、W (b)、Si (c)を用いた時の反射率の入射角依存性。反射膜の厚さはそれぞれ40、20、30 nm。

表1 検出板作製に用いた反射膜材料と、 $|\Delta R_{ex}|$ 、 $|\Delta R_{cal}|$ の関係

反射膜材料	$ \Delta R_{ex} $	$ \Delta R_{cal} $
Au	NA	0.719
Cr/Au/Cr	0.263	0.380
Cu	0.505	0.683
Cr	0.064	0.101
W	0.070	0.098
a-Si	0.234	0.271
Ge	0.139	0.405

最も高い値であった。しかしながら、CuもAuほどではないが密着性が悪く、剥がれが生じた。Au反射膜を用いる際、厚さ0.8 nmのCr層を接着層として用いた場合、 $|\Delta R_{ex}|$ は0.263であった。得られた実験値中では大きな値と言えるが、Auのみを反射膜として用いた場合の計算値 $|\Delta R_{cal}|=0.719$ と比べると遙かに感度が低いことが分かる。次に大きな値は、a-Siを用いた場合の0.234であった。Geは計算では大きな反射率変化が期待されたが、実際の感度は計算値の3分の1程度であった。これは計算値が単結晶Geの複素誘電率を用いて算出したものであり、一方、実験では、スパッタリング法でGe層を堆積したため、形成されたGe層がアモルファスとなったためであると考えられる。

本研究より、従来使用されていたAu、Ag、Cuといった材料では、高い感度は得られるものの、安定性に問題があることが分かった。安定性は接着層の導入である程度解決できるが、接着層を用いた場合の感度は、Siを反射膜として用いた場合の感度と同程度であり、またSiはガラス材料との密着性が非常に高いことから、安定性と感度の両方を簡易に得るにはSiは好適な反射膜材料であると言える。

3.3 モノリシック検出板

以上のアプローチから、我々のナノ穴形成技術が高感度化に有効であることが分かり、また、Si反射膜も感度と耐

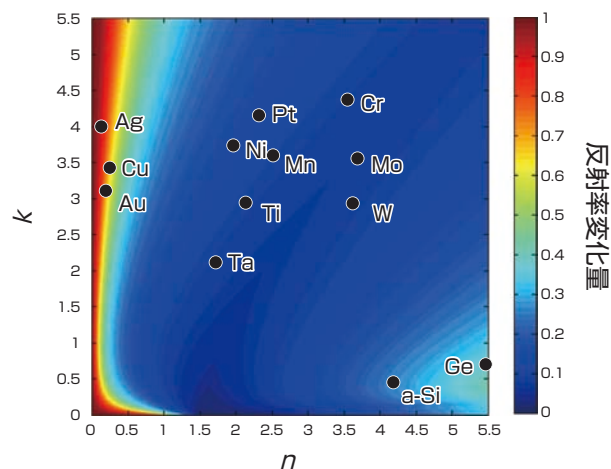


図10 反射膜材料の複素屈折率と検出感度の関係の計算結果。図中の●は反射膜となりうる幾つかの材料の複素屈折率を示す。

久性の面で有効であることが分かった。しかし、図7のSEM像から分かるように、スパッタリング法によって形成した導波路層表面は、ナノ穴形成によって荒れてしまい、反射率特性の劣化を引き起こし、その結果、十分な感度向上が得られていなかった。図6に示したように、Si熱酸化膜では、このような表面荒れがほとんど生じないことから、我々は、導波路層形成にSiの熱酸化プロセスを導入できないか検討した。Siを反射膜に用いた場合、Si層を厚く形成しておき、その表面を熱酸化して導波路を形成すれば、Si熱酸化膜を導波路として持つ検出板を形成できる。この時、基板に用いるガラスには、高熱処理に耐えられるガラスを用いる必要がある。

このアイデアを実現するために、我々は検出板形成にSOQ基板を用いることを考案した。導波路形成には厚い酸化膜層が必要であるため、我々は、酸化速度が速い水蒸気酸化法^[14]を取り入れ、SOQ基板のSi層を酸化することによって、シリカガラス基板上に単結晶Si反射層及びSiO₂導波路層を持つ検出板を作製した。検出板の作製の様子を図11に示す。熱酸化前の単結晶Si層の厚さは440 nmであった。この層を、1000℃の水蒸気を含む酸素雰囲気中で1時間酸化したところ、Si層表面が酸化され、厚さ482 nmの導波路層が形成された。残った厚さ220 nmのSi層が反射膜として働くこととなる。これがモノリシック検出板である。

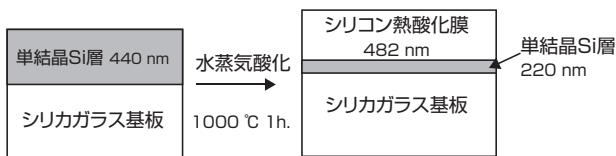


図11 SOQ基板の単結晶Si層を水蒸気酸化して検出板を作製するプロセスを説明する図。

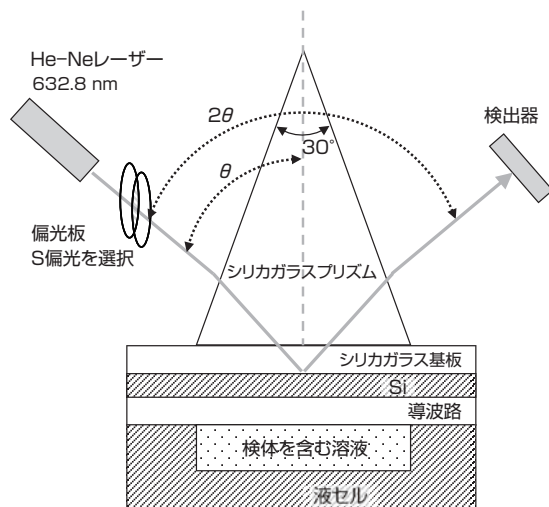


図12 モノリシック検出板を用い分子検出を行う際に用いた光学系。

作製した検出板は、図12に示すような光学系にセットし、分子検出実験を行った。図13(a)及び13(b)はそれぞれ、ナノ穴ありとナノ穴なしのモノリシック検出板を用いて、ピオチン-ストレプトアビジン吸着を検出した時の反射特性の変化を示す。入射光源にはHe-Neレーザー(波長632.8 nm)のS偏光を用いた。ナノ穴の直径は約50 nm、個数は 5×10^9 個/cm²とした。図中の白丸が吸着前、黒丸が吸着後の反射光強度の入射角依存性を示す。ナノ穴形成によって、ピーク位置のシフト量が約10倍になっていることが分かる。また、ナノ穴形成によって、チップの半値幅は若干大きくなったが、深さはほとんど変わらず、エッチング時のダメージ低減による効果が見られた。

ナノ穴形成による感度の向上を理論的にも確かめるため、我々は、フレネルの式を用いたシミュレーションを行った。図14(a)、(b)、(c)はシミュレーションに用いた構造の概念図である。図14(a)は従来のSPRセンサー、(b)はナノ穴が形成されていないモノリシック検出板を用いたEFC-WMセンサー、(c)はナノ穴が形成されたモノリシック検出板を用いたEFC-WMセンサーである。SPRセンサーのプリズムは屈折率が1.769の直角三角形プリズムとした。検出チップは、同屈折率の基板上に厚さ51 nmの金薄膜が形成されているとした。EFC-WMセンサーのプリズムは、頂角が30°で屈折率1.456の二等辺三角形プリズムとし、検出チップの基板はシリカガラス(n=1.456)とし、反

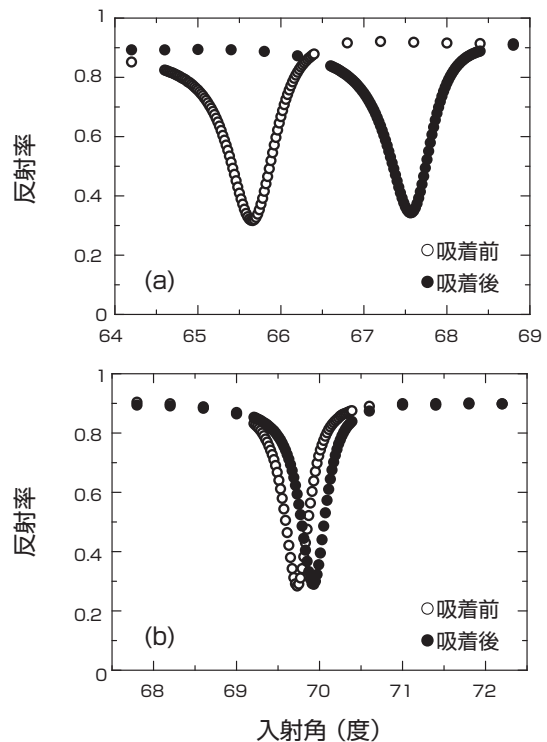


図13 ナノ穴あり(a)、及びナノ穴なし(b)のモノリシック検出板を用いて観測した、ピオチン-ストレプトアビジン吸着前後の反射特性。ストレプトアビジンの濃度は1.5 μM。

射膜の Si 層は厚さ 220 nm とし、導波路層の厚さは 450 nm とした。ナノ穴は実験条件と同様に、直径 50 nm、個数 5×10^9 個/cm² とした。ストレプトアビジンの吸着を想定し、分子吸着時には、厚さ 5 nm、屈折率 1.45 の層（図中の薄ピンク色の層）が検出面に図のように形成されたと仮定した。図 14(d)、(e)、(f) はそれぞれ、図 14(a)、(b)、(c) に示した場合の分子吸着前後の反射特性の計算結果を示す。本センサーにおいては、ディップの半値幅(W) が小さく、ピーク位置のシフト量(S) がより大きいほど、つまり S/W 値が大きいほど感度が高い。表 2 に実験及び上記シミュレーションで得た分子吸着時の反射率変化量 (ΔR)、S、W、S/W の値を示す。ナノ穴なしの EFC-WM センサーの場合、いずれの値も実験値と計算値がほぼ一致している。ナノ穴を形成した EFC-WM センサーの場合、S 値は実験値の方が大きくなった。実験値で得られた S=1.91 程度のシフト量を計算で得るには、ナノ穴の直径を 65 nm とし、個数を 6×10^9 個/cm² とすれば良い。つまり、実験では、孔径及び穴の個数が、設定値より若干大きかったと思われる。

表 2 に示したように、S/W 値の実験値はナノ穴付きの場合で 2.98、ナノ穴なしの場合で 0.514 であった。これらの値はいずれも SPR センサーの S/W 値の理論値より大きく、ナノ穴なしの場合で約 4 倍、ナノ穴付きの場合では約 25 倍となっている。

モニタリング検出板は安定性においても優れている。モニタリング検出板では、基板、反射膜、導波路層がいずれも原子レベルで結合しており、物理的に非常に安定である。また、Si と SiO₂ のみで構成されており、化学的にも安定である。

表 2 SPR センサー及び EFC-WM センサーの感度比較。Sim. は計算値、Ex. は実験値。

	ΔR	S	W	S/W
SPRセンサーSim.	0.15	1.00°	8.4°	0.12
SOQ ナノ穴なし Ex.	0.38	0.19°	0.37°	0.51
SOQ ナノ穴なし Sim.	0.40	0.17°	0.34°	0.49
SOQ ナノ穴形成 Ex.	0.60	1.91°	0.64°	2.98
SOQ ナノ穴形成 Sim.	0.63	0.72°	0.34°	2.12

4 プレイクスルー

我々は、このセンサーを実際の様々な疾患に起因する物質の検出へ適応させるため、どのような物質の検出を試験したらよいか、病院などに対して調査を行った。この調査の過程で、我々は、実際に病院において、同様の目的で使用されている多くのセンサーが、着色量の濃度をもって疾患に起因する物質を検出していることに気付いた。モニタリング検出板は上述のように屈折率変化に対して敏感であるが、光吸収の変化、つまり「色」の濃さに対してより敏感である。そこで、我々はセンサーを「色」の変化をより敏感に検出できるように設計し直した。EFC-WM センサーの反射特性に見られるディップは、屈折率の変化に対しては、角度方向つまり横軸方向に変化し、光吸収の変化に対しては、反射強度の変化つまり縦軸方向に変化する。よって、縦方向の変化がより鮮明に現れるように検出板の構造を変更した。具体的には Si 反射膜層を薄くしたのである。

作製した検出板は、シリカガラス基板上に厚さ約 35 nm の単結晶 Si 層と厚さ約 520 nm の熱酸化 Si 導波路層を持つ。導波路層表面をビオチン修飾した後、この検出板を図 12 に示す光学系にセットし、Au ナノ粒子が付いたストレプトアビジンを検体とした検出試験を行った。この検体は直

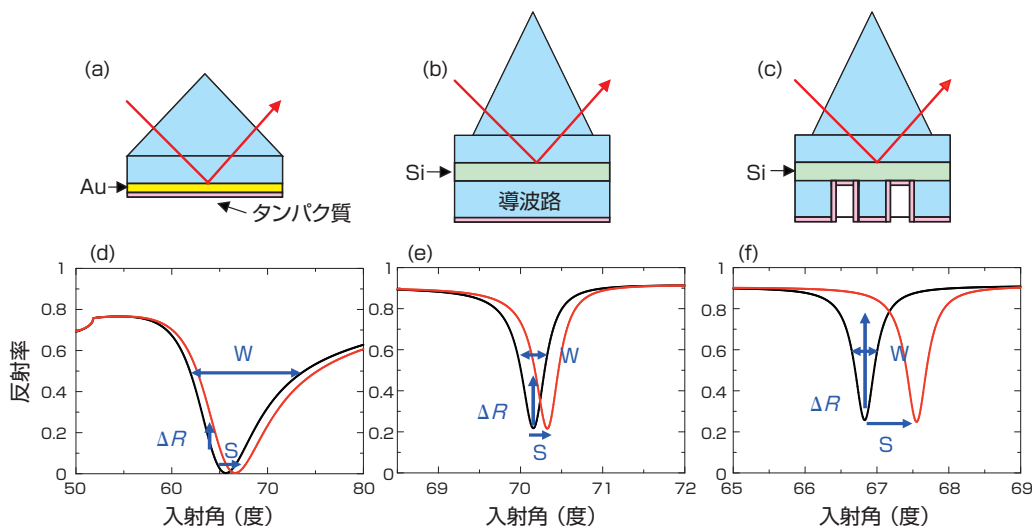


図 14 SPR センサー (a)、ナノ穴がない EFC-WM センサー (b)、ナノ穴が形成された EFC-WM センサー (c) において分子吸着が生じた時の概念図。(d)、(e)、(f) はそれぞれ、(a)、(b)、(c) に示した場合の分子吸着前後の反射特性の計算結果を示す。

径 20 nm の Au ナノ粒子に 4～5 個のストレプトアビジンが付いている。Au ナノ粒子は波長 632.8 nm において光吸収を持っている。この検体を 10 pM 含有するトリス緩衝生理食塩水を試料として用いた。図 15 は検体注入前後の反射率特性の変化を示す。白丸は注入前、黒丸は注入後 20 時間経過後の反射率特性を示す。最大で 0.046 の反射率の減少を観測することができ、上述のような低濃度の検体を検出することに成功した。

次に、色素を用いることによって感度向上が得られるかを試験するために、ストレプトアビジンを青色の色素である Coomassie Brilliant Blue G-250 で着色した後、ビオチンによるストレプトアビジンの捕捉を検出した。この色素は、波長 600 nm 付近に光吸収を持つ。検出板及び光学系は前述の試験と同様のものを用いた。この検体を 100 pM 含有するリン酸緩衝液を試料として、検出実験を行った。図 16 に試料注入前後の反射率特性の変化を示す。白丸は注入前、黒丸は注入後 1 時間経過後の反射率特性を示す。この場合も十分な大きな反射率変化が生じることが分かる。この検出感度は、これまでの EFC-WM センサーの感度と比べ約 3 桁高い感度である。

以上に示した 2 つの例では、いずれも検体の吸着による屈折率変化に伴うディップ位置の変化も生じていると思われるが、いずれの場合も分子の吸着量が少なく、ディップ位置の変化は明確には確認できない。また、このタイプのセンサーでも、ナノ穴形成によって感度のさらなる向上が期待できる。この試みは今後の課題としたい。

本手法では、ディップの深さの変化のみを測定するように設定すれば、検出感度が温度の変化の影響を受けなくなる。なぜなら、温度変化による水の屈折率変化はディップの角度方向の変化のみを生じ、ディップの深さ方向の変化を伴わないからである。また、この測定方法では、物質の光吸収を捉えて検出するため、光吸収を持たない物質が

吸着しても殆ど反射特性に影響を与えない。つまり、夾雑物が検出面に付着しても、その物質が検出光に対して光吸収を持たなければ検出されないことから、夾雑物の付着の影響を受けにくいという特徴も合わせ持つ。このように本手法は、従来法に比べて多くの優位点を持つ。

5 本研究の構成

以上に示した我々の開発の流れを図 17 にまとめる。我々は、本センサーの高機能化研究において、結果的に戦略的選択型と呼ばれる構成方法を用いた^[15]。まず、コア技術である EFC-WM センサーの感度の向上を図るために、シミュレーションを元に、導波路層へのナノ加工を実施することを選択した。ナノ加工を実施することによって感度の向上を得ることができたが、新たにセンサーの物理的安定性と加工面の平坦性に問題が生じた。この問題を解決するために、材料選択に立ち返って、従来とは違った視点、つまり感度だけでなく密着性や加工性の高さを新たな基準として、反射膜材料の選択を行った。反射膜として Si が適していることを見出し、このことから熱酸化によって導波路層を形成する手法を考案した。均一性の高い、つまりナノ加工時に荒れが少ない熱酸化 Si 層を得るためには、単結晶 Si 層が良い。そこで、シリカガラス基板上に単結晶 Si 層を持つ SOQ 基板を用いることとした。この単結晶 Si 層を熱酸化して導波路を形成することによって、高い性能を持つセンサーを開発できたのは既述の通りである。このように、複数の要素技術を戦略的に組み合わせることによって、最終的な高機能センサーという統合技術を得ることができた。

6 今後の課題

本センサーを実用化するには 2 つの大きな課題がある。1 つは、実際の測定環境下、つまり様々な夾雑物が混在

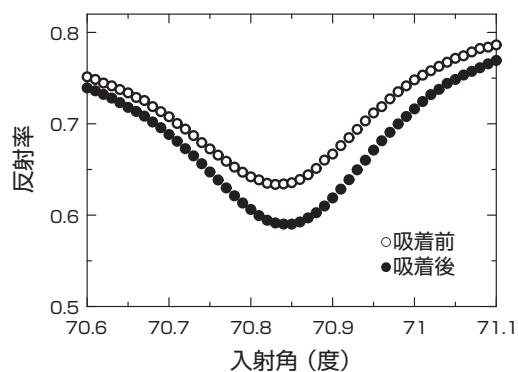


図 15 光吸収検出型モノリシック検出板を用いて観測した、金ナノ粒子が付いたストレプトアビジン（濃度 10 pM）がビオチンに吸着する前後の反射特性。

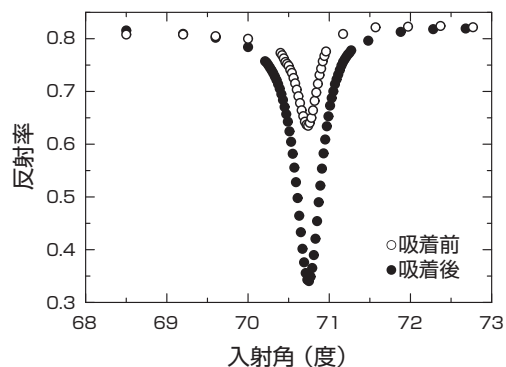


図 16 光吸収検出型モノリシック検出板を用いて観測した、Coomassie Brilliant Blue G-250 で着色したストレプトアビジン（濃度 100 pM）がビオチンに吸着する前後の反射特性。

する血液や唾液のような人由来の検体を用いて、実際の検出対象となる物質の検出を行い、その性能を示すことである。ここで重要なことは「選択性」である。より正確に、他の物質と検出対象物質を分離する高い選択性を得ることが第一の課題である。そこで、実際のアウトカム実現に向け、疾患に応じて、その疾患に起因した物質を特異的に捉える物質の開発が重要となる。また、本開発で得た、色による判別方法を積極的に取り入れ、目的とする検体に特異的に着色が可能な色素の開発により高い選択性を獲得していきたい。もう1つの課題はコストである。医療目的であることから、検出板の原価は高くとも100円程度であることが望まれる。この点は、集積化技術を取り入れ、量産化することによって、達成できるであろうと期待している。

7 おわりに

上述のようなセンサー開発によって、実際の応用面からの要求に十分答えられる検出感度を得ることができ、また従来のセンサーにおいて大きな問題であった、夾雑物の影響、温度変化の影響も低減できる可能性を示すことができた。開発した検出板は、物理的、化学的な安定性も高い。さらには、上記では触れなかったが、導波路をSi熱酸化膜で形成することによって、分子検出における表面修飾においてシランカップリングを利用できる点も大きい。シランカップリングは非常に強固で、簡易で、かつ安価な表面修飾方法であるからである。また、我々の装置は、コンパクト化にも向いている。現在、我々の検出機構を搭載した「広辞苑」と同程度の大きさの卓上型の装置を試作中である。

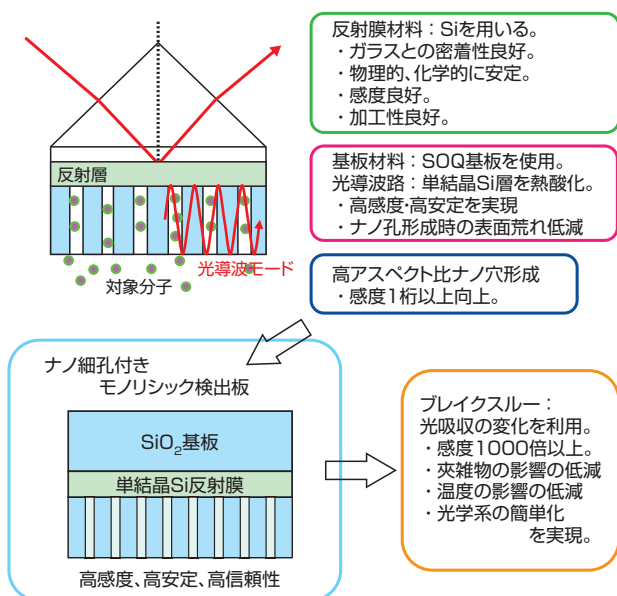


図 17 本研究開発の流れ

このように開発当初想定していた要素に対しては、十分な結果が得られている。今後、実際に本センサーを必要としている分野の研究者と交流を密にし、医療機関との連携、化学やバイオの分野の研究者との異分野連携を推進し、医療分野で活躍する検出器の実現を目指して、研究を進めていきたい。

謝辞

本研究開発において、導波モード測定実験を手伝って頂いた光技術研究部門バイオフォトニクスグループ 福田伸子研究員、早稲田大学理工学術院 大木義路教授及び大木研究室の学生諸氏、イオン注入実験を手伝って下さった筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門 小松原哲郎先生、シミュレーションを手伝って下さった近接場光応用工学研究センター 王曉民氏、Friedrich Schiller University Jena カーステン ロックスチュール博士、及び関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

用語説明

用語1: 導波モード: 光が有限の媒体内を全反射して伝わる時、反射角は制限されてとびとびの角度となる。そのときの媒体内の光の強度分布は共鳴によって強めあったり弱めあったりする「節」を形成する。このような光強度分布を保ったまま光が伝搬する状態を導波モードと呼ぶ。一例として、光ファイバ内の光の伝搬モードが挙げられる。

用語2: エバネセント場: 光が反射する際、その光が反射する媒質内部に浸透する。この浸透した電磁場をエバネセント場と呼ぶ。全反射条件下では、1波長程度まで低屈折率な媒質側に光が浸透する。

用語3: 表面プラズモン: プラズモンとは、金属中の自由電子が集団的に振動する現象のことである。金属表面でのこの自由電子の振動のことを表面プラズモンと呼ぶ。一般に光はプラズモンとはカップリングしないが、エバネセント波は表面プラズモンとカップリングすることができる。つまり、エバネセント場によってプラズモンを励起することができる。

用語4: ビオチン: 分子量 244.31、分子式 $C_{10}H_{16}N_2O_3S$ 。ビタミン B7、ビタミン H と呼ばれることもある。

用語5: ストレプトアビジン: 分子量約 60,000 の糖タンパク。ビオチンに対する親和性が非常に高く、このビオチン-ストレプトアビジンの吸着反応は、様々な生体分子やナノ粒子などの繋ぎ合わせに用いられている。

参考文献

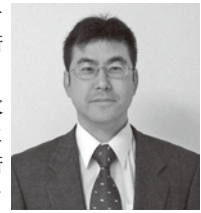
- [1] W. Knoll: Optical characterization of organic thin films and interfaces with evanescent waves, *MRS Bulletin* 16, 29-39 (1991).
- [2] W. Knoll: Interfaces and thin films as seen by bound electromagnetic waves, *Annu. Rev. Phys. Chem.* 49, 569-638 (1998).
- [3] E. Kretschmann: Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflächenplasmaschwingungen, *Z. Physik* 241, 313-324 (1971).
- [4] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awazu, J. Tominaga, T. Ikeda, Y. Koganezawa and Y. Ohki: Biomolecular sensors utilizing waveguide modes excited by evanescent fields, *J. Microscopy* 229, 320-326 (2008).
- [5] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awazu, J. Tominaga, N. Fukuda, Y. Koganezawa and Y. Ohki: The design of evanescent-field-coupled waveguide-mode sensors, *Nanotechnology* 19, 095503-1-7 (2008).
- [6] J. Y. Douillard and T. Hoffman: Enzyme-linked immunosorbent-assay for screening monoclonal-antibody production using enzyme-labeled second antibody, *Methods in Enzymology* 92, 168-174 (1983).
- [7] K. Awazu, C. Rockstuhl, M. Fujimaki, N. Fukuda, J. Tominaga, T. Komatsubara, T. Ikeda and Y. Ohki: High sensitivity sensors made of perforated waveguides, *Opt. Express* 15, 2592-2597 (2007).
- [8] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awazu, J. Tominaga, T. Ikeda, Y. Ohki and T. Komatsubara: Nanoscale pore fabrication for high sensitivity waveguide-mode biosensors, *Microelectron. Eng.* 84, 1685-1689 (2007).
- [9] R. G. Musket, J. M. Yoshiyama, R. J. Contolini and J. D. Porter: Vapor etching of ion tracks in fused silica, *J. Appl. Phys.* 91, 5760-5764 (2002).
- [10] M. Osterfeld, H. Franke and C. Feger: Optical gas detection using metal film enhanced leaky mode spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.* 62, 2310-2312 (1993).
- [11] K. H. A. Lau, L. S. Tan, K. Tamada, M. S. Sander and W. Knoll: Highly sensitive detection of processes occurring inside nanoporous anodic alumina templates: A waveguide optical study, *J. Phys. Chem. B* 108, 10812-10818 (2004).
- [12] T. Abe, K. Sunagawa, A. Uchiyama, K. Yoshizawa and Y. Nakazato: Fabrication and bonding strength of bonded silicon-quartz wafers, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, 334-337 (1993).
- [13] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awazu, J. Tominaga, Y. Koganezawa, Y. Ohki and T. Komatsubara: Silica-based monolithic sensing plates for waveguide-mode sensors, *Opt. Express* 16, 6408-6416 (2008).
- [14] B. E. Deal and A. S. Grove: General relationship for the thermal oxidation of silicon, *J. Appl. Phys.* 36, 3770-3778 (1965).
- [15] リチャードK.レスター, 小林直人: シンセシオロジーへの期待 -MITレスター教授へのインタビュー-, *Synthesiology* 1, 139-143 (2008).

執筆者略歴

藤巻 真 (ふじまき まこと)

1998年早稲田大学博士後期課程修了。博士(工学)。1998-2000年日本学術振興会特別研究員として、早稲田大学、モンリオール

大学にて、光通信デバイスの研究に従事。その後、科学技術特別研究員として、電子技術総合研究所にてパワーエレクトロニクス素子、光通信素子の開発に従事。早稲田大学助教授を経て、2004年に産業技術総合研究所に入所。近接場光を用いたバイオセンシング技術の開発に従事している。産総研技術移転ベンチャーの取締役に就任し、産総研の技術の実用化に従事。本論文では、主に光学設計及び全体構想の取りまとめを行った。



粟津 浩一 (あわづ こういち)

1991年東京工業大学博士後期課程修了。博士(工学)。同年電子技術総合研究所入所、加速器応用工学の研究に従事。1996年から1998年までモンリオール大学招聘研究員。2001-2002年 新エネルギー・産業技術総合開発機構主任研究員、2002-2004年 分子科学研究所客員教授。2003年より産業技術総合研究所近接場光応用工学研究センターチーム長、2005年より東京大学工学系研究科客員教授、現在に至る。ナノフォトニクス、医療とビーム応用の融合領域の研究に従事している。本論文では、特にナノ穴形成技術及び導波路形成技術に関する検討を行った。



査読者との議論

議論1 研究開発シナリオについて

質問 (小林 直人: 産総研特別顧問)

超高感度な分子センサーの開発が今日必要なことは明白だと思いますが、今回の研究開発で達成を狙う成果が生まれると、今までにないような効果が期待できるのでしょうか。単に従来のセンサーに比べて、感度が高く安定で使いやすいと言うことに過ぎないのでしょうか。それらのみが成果であるとする、高感度化や安定化によって何がどう変わるのか、と言う点を是非記述し、そこにいたる研究開発シナリオも記述をお願いします。

回答 (藤巻 真)

センサー開発では、感度と安定性の向上が第一です。また、これらに並び重要な性能として、検体の正確な判別、つまり低ノイズな検出が挙げられます。性能別に「高感度化」「高安定化」「低ノイズ化」を取り上げ、具体的に何が課題かを示し、また各課題の解決によって享受できるメリット、さらには最終的な応用のターゲットとして図1としてまとめ、2章の冒頭に挿入しました。また、図4として研究のシナリオを図式化し、2.2章の最後に挿入しました。

議論2 要素技術の整理

質問 (小林 直人)

この論文の開発技術の眼目は、すでに開発されていた「エバネセント場結合型導波モードセンサー (EFC-WM)」の導波部に、高いアスペクト比の穴を多数あけることによりそこに多数の分子を吸着ないし接触させ、導波路モード変化による反射率変化を測定することにより感度を向上させたこと、さらにモノリシック検出板の開発による安定性の向上、光吸収による感度の更なる向上を図ったこと、にあると理解しました。

そこで、EFC-WMは、光反射物質に制限がないこと、S波P波の両方が使えるなどSPRより利点が多いのに、実用化されなかったのはなぜでしょうか。

回答 (藤巻 真)

EFC-WMセンサーの原理自身は古くから知られていました。分子吸着を測定するセンサーとしてSPRセンサーの後塵を拝してきた最も大きな理由は、分子吸着によって生じる共鳴角の変化量の絶対値がSPRセンサーに比べ小さいということと考えられます。また、導波路

層を形成する手間が掛かるという点もマイナスでありました。そのことを2.1章の後半に記載致しました。

質問（小林 直人）

著者らの主要な貢献の1つは、高いアスペクト比のナノサイズの穴を多数あけることにより感度を向上させたこと、であると理解しました。論文によると、高アスペクト比ナノ穴により検出物質が吸着される表面積が大幅に増大すること、導波路部分の光電場の大きな部分に検出物質を多数分布させること、により感度を向上させたとの記述がありますが、計算やシミュレーションによる合理的な議論が不足しています。穴の密度依存性などのデータも含めて、定量的な記述を行うことをお勧めします。

回答（藤巻 真）

ナノ穴形成による感度の向上を理論的にも確かめるため、我々は、フレネルの式を用いたシミュレーションを行い、また実験値とも比較を行いました。本センサーにおいては、ディップの半値幅(W)が小さく、ピーク位置のシフト量(S)がより大きいほど、つまりS/W値が大きいほど感度が高いと言えます。ナノ穴を形成したモノリシック検出板利用EFC-WMセンサーの場合、ナノ穴形成によるS/Wの増加は、シミュレーションで約4倍、実験値で6倍と、非常に大きな値を示しました。この点を、3.3章に感度向上を示す結果として追加しました。

質問（小林 直人）

最後の「ブレイクスルー」では、光吸収による反射率変化を利用して超高感度(約1000倍)なセンサーを実現したとのことですが、この場合には屈折率変化等誘電環境の変化、またそれが及ぼす角度変化はどのように影響しているのでしょうか。極めて微量のため角度変化への影響が少ないと理解して良いのでしょうか。また、その場合でも、ナノ穴の効果は十分あったと考えられますか。そうであればその記述をお願いします。また、この場合でもクレッチマンの配置が最適なのでしょうか。

回答（藤巻 真）

この場合も角度変化は生じますが、吸着量が少なく、ほとんど角度変化は生じません。このことを4章に追記しました。また、まだ実験は行っていませんが、この場合もナノ穴の効果はあり、穴があった方が感度は高くなります。このことも4章に追記しました。クレッチマンの配置に関しては、ナノ穴あり、なしに係わらず、必ずしもクレッチマンにこだわる必要はありません。ただ、この系は組み上げが簡単で、光学系も単純なため、利用しやすいと考えられます。

議論3 構成的方法について

質問（小林 直人）

本研究では、構成学としての考え方の構築がまだ不十分だと思います。上記のとおり、個々の要素技術の内容と意義、効果などはよく記述されていますが、それを組み合わせて1つの超高感度で安定なセンサーを創り上げた構成のユニークさ、独創性などを詳細に記述することをお勧めします。

回答（藤巻 真）

我々は、本センサーの高機能化研究において、結果的に戦略的選択型と呼ばれる構成方法を用いました。まず、コア技術であるEFC-WMセンサーの感度の向上を図るために、シミュレーションを元に、導波路層へのナノ加工を実施することを選択しました。またセンサーの物理的安定性及び加工面の平坦性の問題を解決するために、材料選択に立ち返って反射膜材料の選択を行いました。反射膜としてSiが適していることを見出し、さらにシリカガラス基板上に単結晶Si層を持つSOQ基板を用いることとしました。このように、複数の要素技術を戦略的に組み合わせることによって、最終的な高機能センサーという統合技術を得ることができました。この点に関する記述として新たに第5章を挿入し、また図17についてより詳しく説明することとしました。

議論4 今後の展開

質問（小林 直人）

本研究成果は分子吸着センサーの超高感度化・安定化という大きな成果を生み出したと考えられますが、実際の医療現場で実用に供されるには、まだ課題が多くあると思われます。実用化の見通しとそのために解決すべき課題を付け加えることを期待します。

回答（藤巻 真）

第6章中に、実用化の見通しと課題として、主としてノイズの低減、つまり夾雑物の除去、非特異吸着の低減、検体のより正確な認識を挙げました。また、コスト的な記述も加えました。これらの2つが解決できれば、本技術は実用化されるであろうと期待されます。

議論5 新型インフルエンザへの対応

質問（小林 直人）

この技術は、現在世界的流行が問題になっている新型インフルエンザ・ウィルスの早期発見に役立つでしょうか。

回答（藤巻 真）

現在、当グループで最も力を入れているテーマの1つがこの「新型インフルエンザ・ウィルスの超高感度検出と迅速な特定」です。研究段階としては、ウィルスの断片(HAと呼ばれる部分)の検出に成功した、というところですが、これまでに開発した高感度分子検出技術を応用し、近い将来、インフルエンザの感染拡大防止策として用いられるような装置開発を行っていきたく考えています。

PAN 系炭素繊維のイノベーションモデル

— 励振モデル；研究者の活動とマネジメントの相乗効果 —

中村 治^{1*}、大花 継頼²、田澤 真人³、横田 慎二⁴、篠田 渉⁵、中村 修⁶、伊藤 順司⁷

公的機関の研究成果が社会に認知され、大きな影響を与え、産業変革につながっていった「PAN系炭素繊維」を取り上げ、この顕著なイノベーションの過程の中で、その核心にある旧大阪工業技術試験所および研究者の行動を中心に、①研究者の意識、②研究テーマ設定に係る研究者と研究管理者（マネジメント）の意識、③研究成果の発信と受け手の態勢、④研究成果活用のための人的及び情報ネットワーク、の観点から、その実相を検証した。さらに、一連のプロセスの構造化を図ることにより、イノベーションモデルとして『励振モデル』を提案する。

キーワード：PAN 系炭素繊維、イノベーションモデル、技術移転、研究管理

Study on the PAN carbon-fiber-innovation for modeling a successful R&D management

– An excited-oscillation management model –

Osamu Nakamura^{1*}, Tsuguyori Ohana², Masato Tazawa³, Shinji Yokota⁴,
Wataru Shinoda⁵, Osamu Nakamura⁶ and Junji Itoh⁷

We have investigated the processes of invention of PAN (Polyacrylonitrile) carbon fiber and its technology transfer to private companies. From this investigation and analysis, we have found a new R&D management model, named “excited-oscillation model”. This model suggests that both the top-down management and the personal motivation should be in phase and synergetic with each other. In this paper, the results and concept of the above model are described in detail.

Keywords : PAN-based carbon fiber, innovation model, technology transfer, management

1 はじめに

「研究」は時代によっても、分野によっても多種多様である。したがってそこから生まれる成果もまた「社会との関わりが短期的に見えるものと長期を要するもの、さらにはその両方を含むもの」が存在する。それゆえ、「社会に役立つ研究」などといった言い方で一元的にとらえると、物事の本質が見えなくなってしまうことがある。また、研究者が考える「役立つ」と、それを受け入れる社会側の見解は往々にして一致しない場合が多い。

そうであるならば、研究が社会に役立つ顕著な事例を対象にして、その過程－イノベーションの過程－を一定の時

間が経過した時点で検証することが、今後のイノベーションモデル（イノベーション創出のための方法論）を検討するに際し最も有用なアプローチと思われる。少なくともいくつかの技術移転などの過程において現在でも通用する行為に対する示唆を含んでいれば、それを学習し、研究のやり方や他者への情報伝達の一助となすことは十分有効と考えられる。もちろん、時代背景や種々の条件が異なるため、いくら正確に複製しても役に立たないことは自明である。けれども研究の進め方、着眼点、上司や共同研究者（企業を含め）の気づき、研究成果の社会への伝達の仕方及び

1 産業技術総合研究所 評価部 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2、2 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5、3 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98、4 産業技術総合研究所 イノベーション推進室 〒100-8921 千代田区霞ヶ関 1-3-1、5 産業技術総合研究所 計算科学研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2、6 長崎県科学技術振興局 〒850-8570 長崎市江戸町 2-13、7 産業技術総合研究所 理事 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

1. Evaluation Division, AIST Tsukuba Central 2, Umezono1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail : osamu-nakamura@aist.go.jp, 2. Advanced Manufacturing Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8565, Japan, 3. Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST Anagahora 2266-98, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan, 4. Research and Innovation Promotion Office, AIST Kasumigaseki 1-3-1, Chiyoda-ku 100-8921, Japan, 5. Research Institute for Computational Sciences, AIST Tsukuba Central 2, Umezono1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan, 6. Science and Technology Promotion Division Nagasaki Prefectural Government Edo-cho 2-13, Nagasaki 850-8570, Japan, 7. AIST Board of Trustees, AIST Tsukuba Central 2, Umezono1-1-1, Tsukuba 305-8568, Japan

Received original manuscript March 9,2009, Revisions received May 27,2009, Accepted May 27,2009

効率的に機能する体制などから本質的な働きを抽出することは可能と考えられる。

本論は、公的機関の研究成果が社会に認知され、大きな影響を与え、産業変革につながっていった「PAN（ポリアクリロニトリル）系炭素繊維」を取り上げ、この顕著なイノベーションの過程の中で、その核心にある旧通商産業省工業技術院傘下の大阪工業技術試験所（以下大工試）及び研究者の行動を中心に、

- ①研究者の意識
- ②研究テーマ設定に係る研究者と研究管理者（マネジメント）の意識
- ③研究成果の発信と受け手の体制
- ④研究成果活用のための人的及び情報ネットワーク

の観点からPAN系炭素繊維の研究についての実際に起こったことと対比させて、その実相を検証している。さらには、一連のプロセスの構造化を図ることによってイノベーションモデルの導出を試みた。

なお、PAN系炭素繊維の製造法、評価法などに係る企業への技術移転及び、その後の複合材料化を含めた企業努力により今日の不可欠な材料となった過程についてはここでは取り扱わない^{[1][3]}。

結論から言うと、研究の要素の有機的連携が「励振的」に行われたことが、PAN系炭素繊維のイノベーションをもたらした。励振的とは『研究者の興味を原動力に、研究開発の進展に伴って、社会に役立つように研究テーマを新たに設定するような自律的行動（オートノミー）と研究マネジメントとの同期が取れた「協調』を意味し、さらに産業化に向けた企業との顕在的、潜在的な交流と「協働」をも含む。

PAN系炭素繊維を産業へ受け渡すまでの一連の過程から見出したイノベーションモデルを「励振モデル」として提示し、今後のイノベーション創出に向けたマネジメント強化に対する示唆とした。

2 技術発明の経緯

2.1 炭素繊維開発の状況

(1) 発明された炭素繊維の概要

1950年代において、炭素あるいは黒鉛（結晶性の高い炭素）からなる製品は、耐熱性、導電性などの性質を利用した電機用ブラシ、電解用電極、原子炉用黒鉛などの成形品、またはカーボンブラック、活性炭、コロイド黒鉛、その他微粉状のものに限られており、繊維状の炭素材料は知られておらず、繊維状の黒鉛は製造が難しいと考えられていた。

そもそも黒鉛は高圧の下で4000℃近い温度まで加熱し

なければ溶融しないので、合成繊維やガラス繊維のように炭素を熔融して紡糸することはできない。やはり一般の炭素原料や材料を製造するのと同様に有機物を炭化して繊維状のものを得なければならず、セルローズ系繊維、ポリ塩化ビニリデン系繊維など様々な繊維状の原料について検討していた。その結果、アクリロニトリル系繊維は適度な加熱条件を選んで炭化すれば、その分子中の窒素と水素とを主としてアンモニアおよび青酸として放出し、その繊維の形状をよく保持した炭素を与え、しかもこの繊維状炭素は高温熱処理によって黒鉛化することを見出したのである。ここに得られたものは、金属光沢を有しており、X線による測定の結果、相当黒鉛化していることが認められた^[4]。こうしてPAN系炭素繊維は開発された。

(2) 開発の経緯

炭素繊維の端緒は1956年に米国においてレーオンを原料として開発されたものである（図1）^[1]。この後、米国ではUCC社によりレーオン系炭素繊維が一定の成功を収めた。

一方、大工試では、進藤昭男博士が米国での動向を知り、時を移さずレーオンとは別にポリアクリロニトリル繊維の炭素繊維化に取り組んだ。1959年9月には、PAN系炭素繊維に係る基本特許が出願され^[5]、同年10月の化学関係学協会連合秋季発表会において「黒鉛繊維の研究（第1報）熱処理に伴う結晶子の成長」と題した研究発表がなされている^[6]。さらに同年11月には関西地域の企業を中心に関係者に広く読まれていた「大工試ニュース」にこの研究成果が紹介されている^[7]。なお、研究結果の詳細は大阪工業試験所報告第317号にまとめられている^[8]。

この一連の活動から、PAN系炭素繊維の成果は、新規性が高くかつ将来性も高いと判断され戦略的に発表されたものと容易に想像される。

次に進藤博士の研究開発の大きな転機となったのは、1965年の米国の軍事関係者のアドバイスである^[2]。PAN系炭素繊維はそれまで耐熱性と電気的特性を柱とし、「しなやかさ」を特徴とする材料として応用展開を図っていたが、この専門家から「機械的強度」と「引っぱり弾性率」について優位性があると指摘され、構造用材料としての可能性を研究すべく方針を大きく転換した。この転換のころから企業の炭素繊維への参入も増え、産業化に向けた各社の取り組みも本格化し始めた。これら企業にとってはPAN系炭素繊維の研究で突出した成果を出していた大工試はなくてはならない存在となっていった。

研究や技術指導での産業との「協働」に加え、1975年からは新しい素材の開発にとって不可欠な「標準」の研究が始まり、1980年には炭素繊維に関するJISが制定された。こうした一連の取り組みは炭素繊維のわが国企業の競

争力向上に大きく貢献した。当初、軽量で強靱な特性を付加価値とするレジャー用品から始まり、より信頼性が要求される建築や航空機等の産業用構造材へ拡大し、現在、わが国企業の炭素繊維の世界シェアは8割を占める。

2.2 研究環境（大工試の研究マネジメント）

炭素繊維開発の始まったこの時期の大工試は「研究による工業技術の振興」を謳っており、そのためのインフラ整備、人心の鼓舞を図っていた。

戦後約10年間に大工試が行った研究の内、工業化に至ったものは少なくない。昭和34年（1959年）度「大阪工業技術試験所年報」には以下の内容記述がある⁹⁾。「第1部は無機化学工業に関する研究を行っている。炭素に関する研究は当所では伝統ある研究の一つであり、従来から継続して行われている基礎研究と併行して、炭素製品の密度増大、空気電池用電極、原子炉用炭素材料、粘結材の脱硼素の研究などが行われていたが、当年の最大の成果は『相当な機械的強度をもつ黒鉛繊維、黒鉛織布の製造に成功したこと』で、将来新しい工業用材料として期待されている。」この時点で、炭素材料は従来のテーマであった原子炉用の黒鉛材料に加え、繊維状黒鉛に焦点があてられ、組織的な取り組みを企図していることがうかがえる。

1958年8月に仙石正が所長に就任したころから、大工試における研究成果も大いに上がり、研究発表や特許出願の数も急増した。後述のように時代背景は国の経済成長

が軌道に乗り始めた時代で、技術革新の波に乗って研究所を設けた企業も多く、また技術指導を求めて大工試へ人を派遣する会社も多くなった時期でもあった。また逆に、大工試における業績を基に、民間から招かれて産業界に進出する人の数も少なくなかった。このように産業界との間での人的な交流も推進されていたことが分かる。

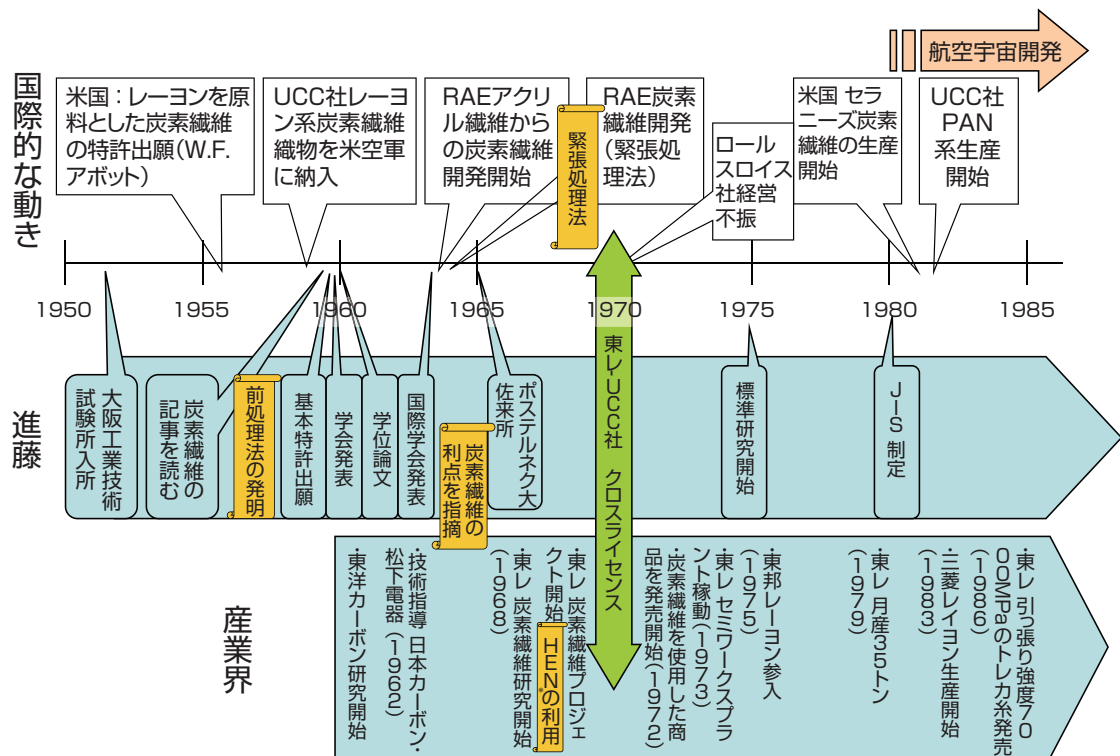
さらに、炭素繊維基本特許出願の2年後の1961年には、所内には価値ある研究で未利用のまま埋もれているものも多い実情なので、その研究成果を適当な民間企業に移すことを目的として、技術の指導と相談事務を処理するための「技術相談所」が開設された。当時のマネジメントは産業との協調・連携を大いに意識していたことが分かる。

2.3 発明に至る動機

発明者である進藤博士は1952年に大工試に入所し、配属先研究室で炭素に関するテーマを与えられていたものの、必ずしも工業化に直結するものとは考えていなかった。こうした状況で進藤博士は、「社会の役に立ちたい」という基本姿勢の下、工業技術に関する研究で新規性のあるテーマを探索していた。

この意識の下、日頃の情報収集活動の一つとしていた新聞で、米国において「繊維状の黒鉛が製造された」との記事（図2）¹⁰⁾を見つけ、これに刺激されたところから新しい炭素繊維（一次元炭素材料）の研究が始まった。

この研究に取り組むに当たって、進藤博士は工業化の可



* HEN：ヒドロキシエチルアクリロニトリルの略、共重合体とすることで焼成時間の短縮と機械的特性の大幅な向上がもたらされた。

図1 炭素繊維開発の流れ

能性を検討する立場から「繊維状黒鉛は将来にどのような新しい用途を約束しているか?」と自問し、結果として

- ①耐薬品性に非常に優れているので酸・アルカリの濾過材に好適である
- ②耐熱性が非常に良いので非酸化性高温ガスの濾過に用いられよう
- ③耐熱性に加えて電気伝導性が良いので赤外線放射体や真空管用フィラメントなどにも用いられよう（[著者注] 当時、トランジスターは知られていたが、まだまだ真空管時代であった。）
- ④合成樹脂の充填材としても使用されよう
- ⑤黒色であるという難はあるが合成樹脂の帯電防止にも役立つであろう
- ⑥紐状あるいは布状にしたものは電気用のリボンなどとしての使用も可能であろう
- ⑦火焰の防断材に用いることも考えている。

と自答している¹⁷⁾。

後に PAN 系炭素繊維は機械的強度に産業応用の方向を定めたため、これらはどれ一つとして実用化されることなかったが、ここで大切なことは、研究の目的として社会に役立つ形を明確にするという発想であり基本姿勢である。進藤博士個人の興味、関心に基づいて研究テーマが設定されるのであるが、自身の研究が「社会のどこに役に立つのか」について事前に十分な吟味をしていることは注目すべきである。

2.4 技術移転に係る時代背景と研究者の行動

(1) 時代背景

PAN 系炭素繊維に係る基本特許は 1959 年に出願された。この年は、尺貫法廃止（メートル法実施）、東海道

新幹線起工式、民放テレビ開局が続いた年であり、続く 1960 年代に入ると、エネルギーの形態が石炭から石油へと変わり始め、太平洋沿岸にはコンビナートが立ち並び始めるなど高度成長期に突入した頃である。

産業技術面においては、三種の神器（白黒テレビ、電気洗濯機、電気冷蔵庫）が家庭に浸透し始め、欧米の生活レベルに近づく努力が続けられた。ただし、まだこの時代の産業によって生産されるものは、すでに欧米諸国で実現されているものであったので、わが国に合った性能と価格であれば、国内販売が非常に容易であった。1960 年代も後半になると、貿易自由化につれて、わが国の産業技術代の強化の必要性が強く意識されるようになり、産業界の国の研究機関に対する期待と関心は戦前以上のものとなった¹⁸⁾。

こうした時代の転換点に臨み、大工試も産業技術の研究開発に一層の貢献をすべく技術移転を促進するための機構改革が行われた。1967 年 4 月、工業技術院傘下の他の 5 試験研究機関とともに、管理部門の機構改革が行われて、総務部および研究企画官制が施行されている。

因みに PAN 系炭素繊維の産業化で大きな成功を収めている東レ（株）が炭素繊維について本格的に生産を開始したのは 1968 年頃であり、大工試が上記機構改革を梃子にして、炭素繊維に係る技術移転を様々な企業に対して行っている頃と一致する。

(2) 研究者の行動

こうした時代の要請で国立研究機関の役割が産業の開発力強化の支援へと明確化する中、研究者もその使命に沿った行動を重視するようになり、大工試の研究マネジメントの方針に沿ったものとなった。ただし、その行動は強く管理されたものではなく、進藤博士の研究テーマも、上司の理解の下、研究者の好奇心と使命感（国立研に期待されているもの）で設定できた感が強い。また、過度の情報が氾濫している現代と異なり、実験を行いながらも研究の内容について独自に考える時間が持てた時代であった。

一方、研究成果の取り扱いについては、研究者が独自先行的に学会発表に走るのではなく、特許申請を先行させることが研究管理者によって適確に行われている。このように、PAN 系炭素繊維による技術革新に係る初期段階の研究期間は、決して研究者の興味が原動力になる努力だけではなく、周囲研究者及び研究管理者、工業技術院を始めとする産業政策側の判断・意思決定と実行がうまく絡み合った効果が大いと考えられる。

2.5 産業界の動向

(1) 大工試と地元産業界

大工試は、創立以来伝統的に地元の企業との付き合いを重んじてきた。大阪は、近世から商業が発展し、近代

日刊工業新聞 昭和34年5月29日(金曜日) 16面



図2 PAN系炭素繊維開発の契機を与えた新聞記事（日刊工業新聞より転載許可）

になって築いた富によって新しい事業に取り組む下地があり、実際、財閥系を始め、製薬、家電等の個人による創業が盛んな土地柄である。このような周辺事情であるので、事業の種探しから展開・発展のための情報入手のために多くの人が出入りしていた。その人たちにとって、大工試は情報を取る場であり、大工試側にとっても組織的な活動以外のアンダーグラウンド的な情報供与という概念はあまり意識されていなかった。

ある程度まで大きくなった研究開発型企業においては、後日談ではあるが「仕事に行き詰まったら大工試詣でをしる」という上司の声があった。一方、企業研究者にとって日常の会話から得た技術情報を自分自身の思考展開で眼前にある課題解決または新規提案にこぎつけてある程度の成果が得られた場合、往々にして当該成果に繋がった種は大工試にあることを言わないで社内説明展開を行ったようだと言われ、著者の一人は聞く。このためか共同研究や特許許諾などの具体的な公式データによる繋がりには多くはない。

しかし、技術指導または共同研究等を介して企業への技術移転が行われたことは少なからずあったようで、大工試への感謝が「社史」などの形で表現されていることで一端を知ることができる。本論のPAN系炭素繊維に係る記事の例としては、

- ①「日本カーボン（株）50年史」（日本カーボン（株）、1967年8月31日発行）
- ②「東レ50年史」（東レ（株）、1977年6月1日発行）
- ③「努力のあゆみエスイーシー（旧昭和電極）50年史」（（株）エスイーシー、1984年10月23日発行）

などが挙げられ、いずれも炭素繊維開発における大工試との共同研究、特許許諾が事業展開に貢献したことが記され

ている。

(2) 炭素繊維開発を巡る産業界の動向（図3）

当時、炭素繊維開発に参入した企業は先発グループと第2グループに分けられ、両者でその行動が異なっていた。前者については、炭素系複合材料 CFRP の商品化を目指し、表立って研究開発を進めた。後者はPAN系の代替材となる廉価な材料の探索やコストダウンにつながる製造プロセスの研究などが主体となっているが、これらは対外的に取り組みを宣言する類のものではなく、「地下にもぐったもの」とならざるを得ない。すなわち、進藤博士の研究グループとの日常的（非公式）「意見交換」を介して実質的な成果をねらっていた。

結果的にPAN系を越える性能のものは見出されなかったが、大工試側としては、彼らから持ち込まれる資料と情報が「秘密である」という認識のうえで、有用材料の体系化に役立たせることができた。企業側の意図と大工試側の微妙な呼吸の下、結果としてこの分野の材料開発の進展を進め、国際競争力を高めることとなった。すなわち、産業界側の興味（「気づき」と「活かし」）と大工試の日常生活における交流等が表舞台に出ない形で当該イノベーションに大きく関わっていることが後世になって示される結果となった。

3 イノベーションモデルとしての分析

3.1 個人の興味と組織的研究の動機（図4）

(1) 個人の興味

進藤博士は炭素繊維に取り組むに当たり「こういうことが出来るのではないかと考え、研究の社会的な効用のイメージを描くことから始めた。こうした具体的目標があると、行

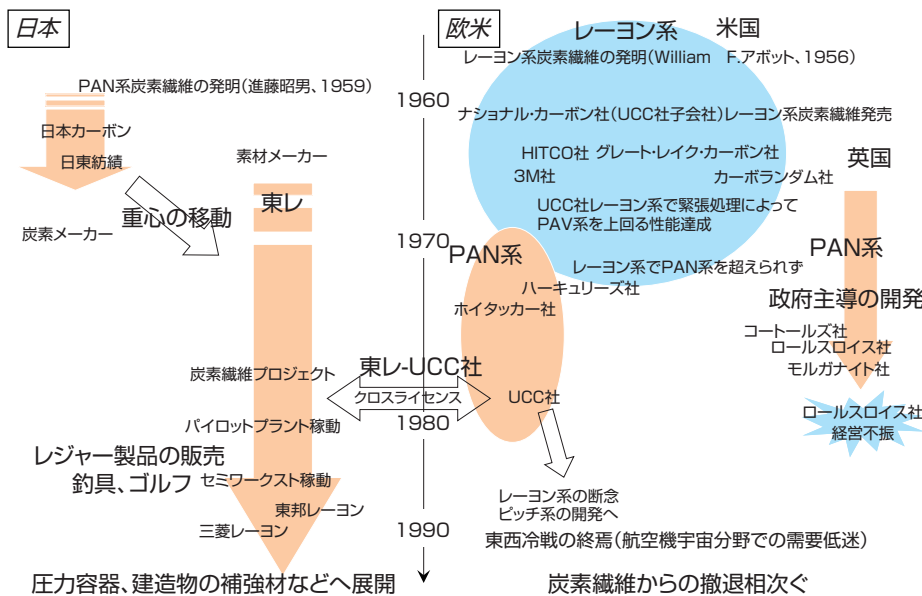


図3 炭素繊維に係る国内外の産業界の取り組み

き詰まってもどこへ行きたいかという先の目標が見通しや指針を与えてくれる。また、その目標を変更する、あるいは目標値を上下させる努力により、予期せぬ解決の糸口が見つかる。

こうした個人の興味を原動力とする自発的な行動（オートノミー）は、セレンディピティを生み出す可能性をも高める。こうしたセレンディピティとは、何かを探している時に、探しているものとは別の価値あるものを見つける能力・才能を指し、何かを発見したという「現象」ではない。「能力」であれば、意図的に磨くことができる。また、感動や観察、ファイリング（記録）、行動範囲の拡大、連想、などを元手にこういう能力を磨くことができるだろう。このためには、個人の関心を育てるような自由度を保つことが重要である。ただし、奔放な自由ではなく、社会に役立つものを常に志向するという基調となる意識を根付かせる必要がある。

(2) 組織的研究の動機

大工試は研究成果の工業化を強く意識したマネジメントを方針としていた^[11]。研究の進展に応じて成果の社会への出し方（特許、論文、報告会など）と産業界へのコンタクトを考えていた。さらに、成果にはずみをつけるため、成長に併せて研究費の規模をコントロールする方法もうまく使っている。基礎研究から経常研究^{用語}化し、多くの企業が参入する状況になり産業界の技術開発への要請が高まった段階では、大型の研究費を供する特別研究^{用語}へと移行させている。組織的研究の動機は産業化の契機を見据えることに始まる。社会に近づく良い成果が出せれば、研究者の興味を原動力にする研究もより強い後押しが受けられるとのメッセージが必要である。

3.2 研究マネジメント

研究マネジメントを丁寧に検討すると、いくつかの特徴にまとめられる。

(1) 目標の明示

当時の大工試では「工業技術の振興」を本務とする取り組みを数々展開している。こうした方針に沿って研究も取り組まれている。研究者も研究を推進する原動力は個人の興味であるが、組織の方針がある以上実用化を意識した取り組みを考える姿勢が醸成される。対外的には、とくに企業にとって実用化という同じ目的で研究が行われるとの信頼を与えることになったと考えられる。

(2) 企業との日常的交流

大工試は関西地元企業にとって「頼りになる存在」になっていた。日常的に企業の相談を受け入れる土壌があり、制度的な手続きを経ることなく情報交換が行われていた。また企業からの研究者の受け入れも頻繁に行われ、企業への大工試人材の移転なども少なくない状況であり、こうした「人的交流を通じた技術移転」の土台が形成されている。知識の交流は企業側の研究状況、方向についても再確認させることとなり、この確認は企業の気づきを誘発することにつながっている。さらに、後になると企業側の要望として「技術標準」をくみ取り、産業化の基盤となる標準の研究にも着手することとなった。

(3) テーマの成長に同期させた研究費配分

炭素繊維研究は発明以来、工業化に向けた着実な取り組みが続けられていた。機械的特性が大きく取り上げられるまでは企業の参入も炭素メーカーが主力であり、後に大きな成功を収める東レなど素材メーカーの参入はまだ本格

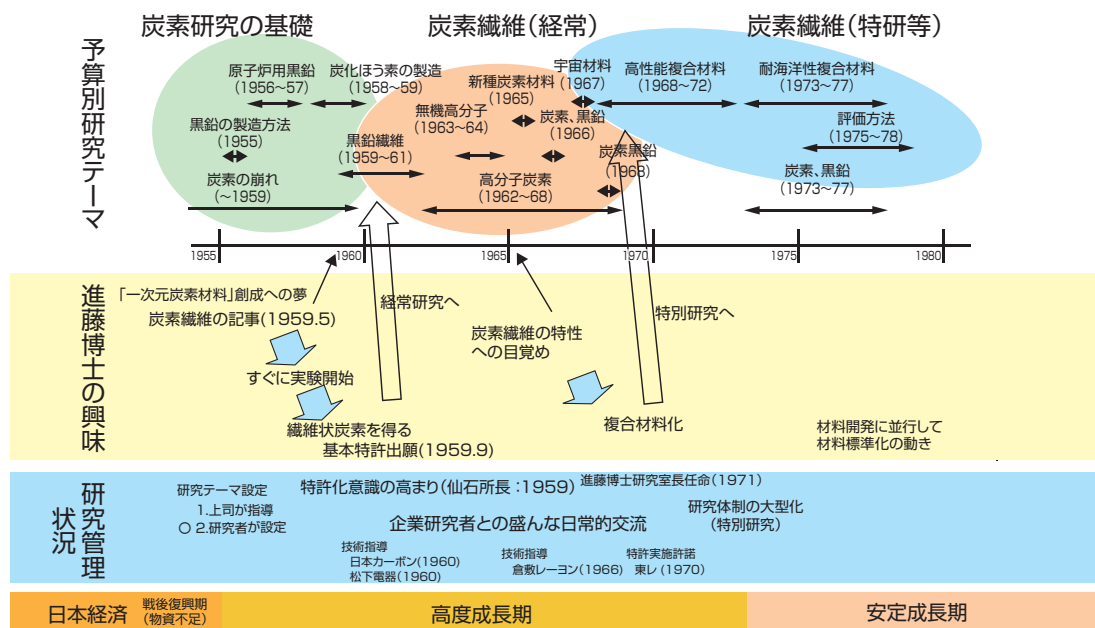


図4 個人の興味と研究テーマの方向

化していなかった。このため経常研究として位置づけられていたが、企業の参入が一挙に増加して、工業化の新たな展開が意識されるようになると、これに呼応するように特別研究、大型のプロジェクト研究へと離陸させ、これがその後の研究を加速させる力となった。

3.3 技術移転の実相

英国の炭素研究者は1963年の米国炭素会議における進藤博士の発表によってPAN繊維を炭素繊維原料にするこの有利性を認識してPAN系炭素繊維の研究を開始している。また、当時まだ発展途上国であった日本発の発明の価値を認知したのは米国の軍関係者であった^[2]。これは、発明者の進藤博士をも驚かせた。耐熱性、導電性、一次元形状から推定される製品イメージとは全く異なったニーズである「機械的強度」が評価されたのである。研究者は、それに焦点を絞り、さらに性質の高いものがないか、作れないか等に研究興味に移る。

このあたりから、わが国の炭素製品メーカー、化学繊維メーカー等が参入し始める。しかしながら、公表されている特許を参照しても発明者のものと同等の強度のものではない。物性を決める条件は何か。何を評価軸として開発してよいかを発明者グループに「公には内緒で」技術指導を受けに来ていた。上記メーカーの分類ではない企業も新規参入の機会を窺っていた。このことが発明者グループのところに各種データの集中をもたらす。競合他社の情報は決して漏らさないルールはしっかり守られていたため、結果として発明者グループだけに世界最先端のデータと解析結果が集まった。

このようなスパイラルは現在でも起こりうる話である。市場原理のもとでの研究開発においては、この部分についてのシステム化・効率化には手をつけることができない。もちろん、先発グループの必死の努力で商品化した後の、第2グループへの技術指導は、特定企業の名前を明かさずに系統的に行うことはできるかもしれない。その際、第2グループは、単に先発グループと同じ製品を開発するのではなく、自らのオリジナルアイデアを付加しようとしての開発研究であると、公的機関研究者も企業研究者も心得ることが肝要である。

このオリジナリティが先発商品をしのぐものに成長する源である。すなわち、世間にまだないものを見出す力（発明者グループ）、芽が出た研究結果を見逃さずに取り上げる力（先発グループ）、ある程度見えてきた製品の性能向上のための改良研究を行う力（第2グループ）と、技術革新には様々な段階が存在する。とかく、発明者グループの偉業がもてはやされる結果とはなるが、技術の組み合わせによる技術革新もまた重要な産業競争力の強化に寄与する要素

であることも忘れてはならない。

PAN系炭素繊維の開発においては、炭素製品メーカー、化学繊維メーカー、電機メーカーなどの一部企業が興味を持ち技術取得を試みており、実際の製品が世に出る10年以上前から技術移転が行われている。炭素繊維そのもの、および樹脂と組み合わせたCFRPは全く新しい材料であったため、研究開発の段階においても、製品としてベスト性能のものかを判断するための評価基準がないまま手探り状態の時期が長く続いた。後発企業においては、ますます混乱が助長し、進藤研究室に自社の製品を持ち込み、「これが本当に炭素製品と呼べるものなのか？」から「どういふ物性を研究開発指針としたらよいのか」「同じものを作るキーポイントは何か？」等の問い合わせが続出した。もちろん、その過程において進藤研究室で開発された「PAN系炭素繊維」なるものに勝るものが偶然にでも開発されれば幸運である。もっとも、そういうものはなかった。

そこには、オリジナル研究者、周辺にいる共同研究者による性能向上（または当該材料を超える材料がないことの確認）のための研究が継続的になされていることは論を待たない。企業研究者は企業利益を考慮に入れた研究開発において周辺データの蓄積を図る。ただし、この場合、全てのデータが公表されるわけではない。知的財産として、特許等の取得も盛んに行われる。ただし、出願された特許の内容においては、「本命」のものと「その他大勢」のものが混在している。これは、企業活動の一環であることを認識しておく必要がある。「その他大勢」は競合企業への目くらまし的役割を演じるし、また、技術の売買の際のパートナー材料ともなり得るからである。

ここで重要なことは、「技術移転」は単一的または画一的なものではなく、周辺状況をも巻き込んで行われるものであることの認識である。すなわち、時によっては、後世の解説は成功事例の要素を先鋭的に取り扱いがちで読者もスマートに読みこなす面があるが、ここで指摘したいことは、競争者が大勢存在することや、関係者の層が厚くなることで大量の非顕在研究結果群に支えられて最高のもの（PAN系）だけが生き残る、という実態である。国立研研究者はこのような実態にも深く関与している。

LesterとPioreは、イノベーション創出に向けて「研究者に解釈的取り組みに心置きなく参加できる場を与えれば、研究者の自発性が新たな発展をもたらす」として、「解釈的空間」モデルを提唱している^[12]。一方、当時の大工試における「空間」は、明確な技術的ニーズをもった産業界の研究者の集いではあったが、研究者間の交流の場というより、おのおのの進藤グループとの対話があったものであろう。ただし、通商産業省、工業技術院、炭素繊維

協会といった進藤グループを取り巻く国際産業競争力向上のための対話空間は開かれており、著者らはこの対話空間と大工試進藤グループとの複合体に対して、静的な空間の様相の濃い「解釈的空間」としてより、研究開発とマネジメントが相互に位相の合った作用を加える「動的な空間」として作用していたと考える。

4 結論

PAN 系炭素繊維を例にとり、イノベーションの過程をつぶさに検証したが、この発明から製品化に至る一連の展開は、時代背景が異なるとはいえ、現在の研究者にとって示唆に富むものである。

研究者が新しい炭素材料の探索に絞った日頃の情報収集活動の中で偶然知りえた炭素繊維開発の情報を契機に、この工業化を最初から意識し、狙いを定めたテーマ選択を行い、実験方法の探索、研究を実践した。また、時宜を得た特許取得等に関する手続き等がうまく展開して出願特許も成立した。その後の飛躍は、炭素繊維材料への時代及び産業ニーズは機械的強度が主力であるという情報を得て、研究テーマの方向性を転換し、材料特性の最適化、プラスチックとの複合化、CFRP 複合材としての実用化を目指した産業界との協働的・協調的な研究と指導によりもたらされた。これらに増して重要な要素は、信頼性を担保するために機械的強度の測定法の標準化という取り組みであり、これが炭素繊維の産業化の基盤を強化するのに大きく貢献している。また、産業サイドでは、大工試との日常的な情報交流など実用品として世の中に出るための潜伏期間に成した日の目を見ない研究成果の積み上げが新たな気づきを誘引し、共同研究へと回帰することとなり、シーズ側の当初の思惑をはるかに超えた産業変革をもたらしている。

こうした過程の構成要素として、

- ・ 研究者の明確な課題意識に基づくセレンディピティ
- ・ 研究者の動機とマネジメントとの位相整合
- ・ 産業界の旺盛な新事業開拓意欲

などが重要であることが再認識された。このうちどの過程が欠けても現在の産業変革はなかったか、またはずっと小さいものであったろう。

さらに各要素の時宜を得た協調作用がとりわけ重要である。それが相互に働きを強める『励振』ともいべき作用となることで、ある時期から加速度的に産業応用へと進むことが見て取れた。つまり、研究のオートノミーと社会における使命を矛盾なく結合するためのイノベーションモデルとして『励振モデル』が提唱できよう（図5）。

繰り返しになるが、この励振モデルの確認のため PAN 系炭素繊維のイノベーションプロセスを再掲すると、PAN 系炭素繊維に係る一連の研究においては、まず黒鉛化による炭素繊維の製造法の研究が研究者の興味を原動力にセレンディピティ的に生まれ、これを特許成立に至るマネジメントによって実用化へと弾みがつけられた。また、予期せぬ第三者との出会いが契機となり力学的強度に照準が当てられ、この方針転換に沿って材料開発、複合材料（CFRP）化の研究開発が進められ、これをマネジメントがプロジェクト化による予算支援で加速させ、その後の飛躍をもたらした。くわえて、炭素繊維の材料標準化に係る研究が信頼性を担保することに貢献し産業の用途が拡大する後押しをした。いずれも研究者とマネジメントサイド、研究と産業との綿密な協調の下で行われている。

このモデルと分析の過程で得られた知見を、今後のイノベーション創出に向けた取り組みへの提言と位置づけるなら、
①研究者の「自発性」の基となる「マインドセット」の明確化
②その研究者のマインドを社会と同期させる「マネーメン

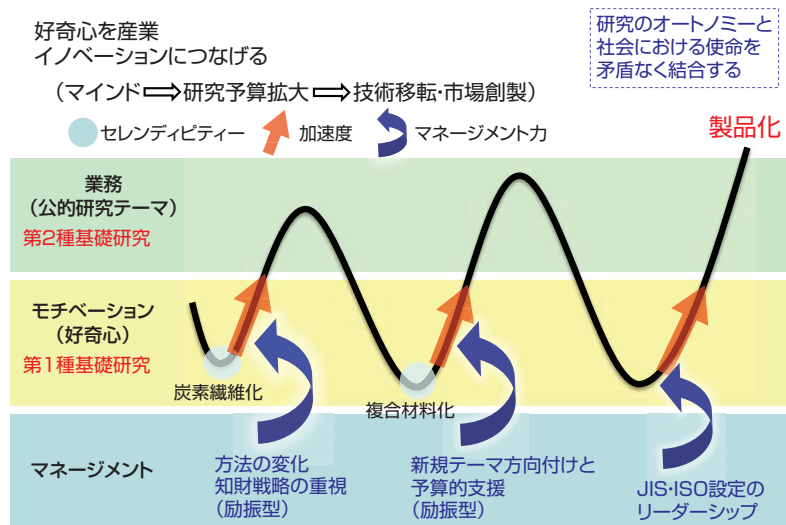


図5 イノベーションの『励振モデル』

ト]の確立

がキー・シナリオとなり、これらを研究組織（研究開発の実行側）と行政機関（研究開発政策の企画）が、適切に理解・運用することが重要と結論される。

このモデルを踏まえマネジメントには、「研究者の研究テーマの設定時の動機付け」、「研究の進捗状況を踏まえ社会価値とのマッチングを図った結果としての研究テーマ及び体制の見直し」、「社会価値向上または創造のための技術移転や関係委員会活動」などが求められる。また、これらの有機的連携、とりわけ研究の進展に伴い研究者サイドの研究テーマの再設定とマネジメントサイドの同期の取れた共同作業が強く望まれる。

なお、本モデルは Stephan J. Kline の連鎖モデル^[13]と類似の特徴を備えているが、Kline モデルが現象論的なモデルであるのに対し、励振モデルは主としてイノベーションを創出するマネジメントモデルである。この点は本論で我々が特に重視しているところであり、今後のイノベーションを創出するためには、何よりマネジメントの役割が重要であり、その指針を作るモデルとして本モデルが有効であるとの認識である。

謝辞

本論をまとめるに当たって、PAN 系炭素繊維の生みの親である進藤昭男博士へのインタビュー結果は、論文や特許には現れない情報源として役立たせていただきました。進藤博士の共同研究者としての中西洋一郎博士、澤田吉裕博士からはインタビューにより研究業務行為についての認識と実体についてきめ細かな情報を得ました。炭素繊維の研究に取り掛かる曙期の共同研究者である藤井祿郎博士からは、インタビューにより彼の興味や好奇心との重ね合わせからの見解を教わりました。松尾寛二博士と荻野勲元主任研究官からは、インタビューにより当時の研究環境の状況や研究者の日常行動について教わりました。本論は、上記の人たちから得た情報に加え、大谷和男博士をはじめ関わりのある現産総研職員からの情報を重ね合わせてできたものです。

用語説明

用語：「経常研究」と「特別研究」：旧工業技術院で実施された研究は大別して、基礎的な「経常研究」と、通産行政上必要な研究または大規模な研究である「特別研究」に分けられる。工業技術院研究管理基本要綱に基づき、これら研究のテーマ選定、計画の立案、予算の配分、成果の管理は各所長の裁量に委ねられていた。

参考資料

PAN 系炭素繊維は、進藤博士らが製造の基本原則を発見、特許化した。東レ(株)がライセンス許諾を受け、産官連携として長期の研究開発を行った。世界の有力企業が参入・挑戦を行ったが高性能炭素繊維市場において日本企業（東レ、東邦テナックス、三菱レイヨン）が世界シェアの 80 %を占め、世界を制覇しているといえる。その理由として、

- ①欧米企業は技術革新競争で脱落
- ②長期間に亘る研究開発投資を継続
- ③日本政府からの継続的な研究開発支援があげられる。

（吉永稔（炭素繊維協会）、「日本がリードする21世紀の革新素材－低炭素社会に貢献する炭素繊維－」、総合科学技術会議（第80回）配布資料4-1（2009.4.21）より引用）。

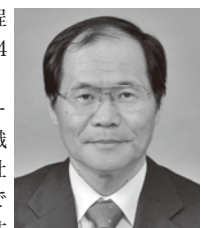
参考文献

- [1] 石井正道：独創的な商品開発を担う研究者・技術者の研究，文科省科学技術政策研究所（2005）。
- [2] 進藤昭男：炭素繊維の研究開発，*近畿化学工業界*，611，5-8（2004）。
- [3] (財)日本産業技術振興協会：平成18年度 工業技術院ホームラン特許の調査・分析評価報告（2007）。
- [4] 進藤昭男：炭素繊維の研究 I 熱処理に伴う結晶子の成長，*大阪工業技術試験所季報*，12(2)，110-118（1961）。
- [5] 進藤昭男、藤井祿郎、仙石正：特公昭37-4405「アクリルニトリル系合成高分子より炭素製品を製造する方法」（1959）。
- [6] 進藤昭男、藤井祿郎、高橋輝、仙石正：黒鉛繊維の研究（第1報）熱処理に伴う結晶子の成長，*化学関係学会連合秋季発表会*（1959）。
- [7] 「新しい炭素材料－黒鉛繊維の製造－」*大工試ニュース* 3（11），（1959）。
- [8] Akio Shindo：Studies on graphite fibre，*大阪工業技術試験所報告*第317号（1961）。
- [9] 大阪工業技術試験所：*昭和34年度大阪工業技術試験所年報*（1959）。
- [10] *日刊工業新聞* 昭和34年5月29日 16面（1959）。
- [11] 大阪工業技術試験所：*大阪工業技術試験所50年史*（1968）。
- [12] R.K.Lester and M.J.Piore: *Innovation—the missing dimension*, Harvard University Press (2004). 依田直也（訳）：イノベーション，生産性出版（2006）。
- [13] S. J. Kline: Innovation is not a linear process, *Research Management*, 28(4), 36-45 (1985).

執筆者略歴

中村 治（なかむら おさむ）

1973年大阪大学大学院理学研究科博士課程中退後、大阪大学産業科学研究所を経て1974年大阪工業技術試験所に入所。1998年以降、愛媛県工業技術センター所長、関西センター所長代理、評価部審議役を経験し、研究組織のマネジメントと評価の面から研究成果の社会貢献のあり方等について考えてきた。本論では、自身の大阪工業技術試験所、大阪工業技術研究所時代の経験と、関係者へのインタビュー等を踏まえ、論文骨子の組み立て、内容・強調ポイントの整理を担当した。



大花 継頼 (おおはな つぐより)

大阪市立大学大学院前期博士課程応用化学専攻修了後、化学技術研究所に入所、組織改編に伴い、物質工学工業技術研究所を経て、(独)産業技術総合研究所へ。2007年5月から2008年8月までイノベーション推進室企画主幹。現在、先進製造プロセス研究部門所属。博士(工学)。本論では資料の収集及び分析を担当。進藤博士へのインタビューなどを通じて、時代背景等について考察を行った。



田澤 真人 (たざわ まさと)

名古屋大学大学院前期博士課程応用物理学専攻修了後、名古屋工業技術試験所(現、産業技術総合研究所中部センター)に入所。理学博士。2007年4月から2009年4月までイノベーション推進室総括企画主幹。本論では関係者へのインタビュー、内容の構築などに貢献した。



横田 慎二 (よこた しんじ)

財団法人未来工学研究所を経て2001年～2006年文部科学省科学技術政策研究所主任研究官。2006年産業技術総合研究所入所。技術情報部門を経て2008年からイノベーション推進室総括主幹。2006年から科学技術政策研究所客員研究官(兼務)。科学技術政策関連(技術予測、科学技術の影響評価等)の調査研究に従事。現在は産総研経済インパクトシミュレーションモデルの開発、公的研究のイノベーションシステムに関する調査等に従事。本論では、事実の解釈とモデル化の構成を中心に全体編集を担当した。



篠田 渉 (しのだ わたる)

1998年東京工業大学総合理工学研究科博士課程修了。理学博士。三菱化学株式会社を経て、物質工学工業技術研究所、組織改編により、産業技術総合研究所。2008年6月から2009年5月までイノベーション推進室企画主幹。本論では資料の収集・作成を中心に担当した。



中村 修 (なかむら おさむ)

1979年九州大学大学院農学研究科修士課程を修了後、鹿児島大学歯学部口腔生化学講座助手として教育と研究に従事し、1987年歯学博士(大阪大学)を取得。その後、ケース・ウェスタン・リザーブ大学(米オハイオ州クリーブランド)・客員研究員、九州工業技術研究所主任研究官、福岡県工業技術センター生物食品研究所・参事兼生物資源課長、産総研評価部・シニアリサーチャー、経産省技術評価調査課・産業技術総括調査官を経て、2007年産総研評価部・次長に就任し、研究開発マネジメントの評価に携わるとともに、国内外の評価関連人脈を構築してきた。現在、長崎県科学技術振興局長。本論作成に当たり、論文骨子の組み立て、内容・強調ポイントの構築に貢献した。



伊藤 順司 (いとう じゅんじ)

東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。理学博士。1984年電子技術総合研究所に入所、組織改編に伴い産業技術総合研



究所。同所にてエレクトロニクス研究部門長、企画本部企画副本部長を経て産業技術アーキテクト、2007年より理事。本論では基本モデル設計、全体統括を担当。

査読者との議論

議論1 研究開発シナリオについて

質問・コメント(小林 直人:産総研特別顧問)

本論で提示された「励振モデル」は斬新で興味深いものです。このように過去に行われた良い研究開発例やそのモデルを参考にし、「今後我が国の産業界にイノベーションを誘起するためには、どのようにしたらよいか」等について、そのシナリオ(この研究成果の活用シナリオ)を明確にすることを薦めます。これにより論文の価値が増増すると思いますので、是非その面での記述を期待します。

回答(中村 治)

ご指摘のとおり、本論で提示した「励振モデル」は産総研のこれまでの研究開発の取り組みの中で、顕著な社会経済的インパクトをもたらした事例を分析対象として導き出したものです。このモデルと分析の過程で得られた知見を今後のイノベーション創出に向けた取り組みへの提言とするならば、

- ・研究者の「自発性」の基となる「マインドセット」の明確化
- ・その研究者のマインドを社会と同期させる「マネージメント」の確立の2つを特記し、これらを研究組織(研究開発の実行)及び行政機関(研究開発政策の企画)が勘案(理解し、適切に運用)することが重要との記述を加えました。

議論2 構成要素について

質問・コメント(小林 直人)

この論文の眼目は、進藤博士が開発したPAN系炭素繊維が如何にして実用に結びついたか、に関していくつかの構成要素の有効な関連・連携が作用したことを指摘したものだと思います。本文の言葉を借りれば、(1)研究者のセレンディピティ(研究者のオートノミーの所産)、(2)研究者の興味と同期の取れた研究環境(オートノミーとマネージメントの結合)、(3)産業界の気づき(市場創成への起点)、です。これらを含んだ普遍的なモデルを構築する場合、これらの構成要素で必要十分なのか、あるいは単に必要条件でしかないのか、を明確にすると良いと思います。またその際、(1)～(3)がより普遍的な表現になるような言葉の選択も必要だと思います。(将来「励振モデル」として引用された時に、より分かりやすい表現の方が良いと思います。例えば、(1)研究者の自由な発想と社会意識、(2)研究マネージメントの適切な時空間的支援、(3)産業界の気づきと率直な意見交換、等。(また、米軍関係者からの指摘は、(3)に入ると考えてよいでしょうか?)

なお、最後の(3)に関して言えば、MITのR. K. Lester教授の言う解釈的空間(sheltered space)

(<http://www.arenfund.org/upload/Editor/industryengines/files/foorum/lester%20slides%2020021208.pdf>)が、すでに40年前の大工試にあったということができるとは思いませんか。

回答(中村 治)

ご指摘のとおり本論では励振モデルを3つの構成要素で説明しています。イノベーションをもたらす過程を分析し、本質的な3つの要素に集約したものであり、本モデルの構成要素としては必要十分と考えます。しかしながら、各構成要素の働きをさらに明快に示し、普遍的なものとするため以下のとおり表現を改めます。

- (1) 研究者の明確な課題意識に基づくセレンディピティ
- (2) 研究者の動機とマネージメントとの位相整合
- (3) 産業界の旺盛な新事業開拓意欲

最後の(3)に関しては、ご指摘のようなLester教授の解釈的空間(sheltered space)は当時の大工試にはなかったと認識しております。

Lester 教授の解釈的空間は「研究者に解釈的取り組みに心置きなく参加できる場を与えれば、研究者の自発性が新たな発展をもたらす」としています。しかし、場を与えるだけでは静的（スタティック）なモデルとの印象があります。一方、本論の「励振モデル」は研究者とマネジメントの相互干渉を基底に置き、「マネジメントは研究者が気づかない意図をも発掘、顕在化させ、イノベーション創出に向けて位相の合った作用を加える動的（ダイナミック）なモデル」です。大工試では萌芽的ながら動的なモデルがあったと分析しており、その意味で解釈的空間とは違うとしました。

なお、本論中では Lester 教授の解釈的空間を引用し、励振モデルとの違いについて記述しました。

議論3 モデルの効果について

質問・コメント（小林 直人）

今回提示の「励振モデル」は、大変興味深いのですが、その後工業技術院においてあまり大きなイノベーションに繋がる成果が出ていない理由は何でしょうか。

回答（中村 治）

工業技術院時代にも大きなイノベーションに繋がった複数の事例があると考えられます。また産業技術総合研究所への再編以後は、「本格研究」という方法論が打ち出され、研究を社会へ送り出しイノベーションへ繋げるための取り組みが工業技術院時代よりも生まれているのではと考えます。本論は大工試の炭素繊維を対象としましたが、今後、新旧の事例を選定し、それらのプロセスを精査してイノベーションモデルの構築に繋がりたいと考えています。

インタビュー

米国の固体照明による省エネ政策と標準研究

米国立標準技術研究所 (NIST) で測光標準の研究をされているヨシ大野さんが 2008 年 12 月に産総研を訪問された機会に、シンセシオロジー編集委員会の小野委員長と田中委員がインタビューしました。照明分野で今後大きな省エネルギー政策を実行していこうとする米国政府の意欲的な計画と、それに応えていく標準研究者の意気込みが伝わるお話が聞けました。また NIST での大野さんの研究と産総研の本格研究との間に多くの共通点があることが印象的でした。

シンセシオロジー編集委員会

ヨシ 大野：米国立標準技術研究所 物理研究部門 光学技術部グループ長

小野 晃：シンセシオロジー編集委員長・産総研副理事長

田中 充：シンセシオロジー編集委員・産総研研究コーディネータ

本格研究とSynthesiology

小野 産総研は 2008 年からシンセシオロジーという学術誌を出しています。現代における科学研究と社会とのつながりを考えてみますと、科学的に優れた発見や発明があると世の中の注目を浴びて、その研究に大きな研究費が充当されます。ただ、通常は、発見や発明がそのままいわゆる“製品”として社会に出ていくことはまれで、その後、人々の関心が薄れた状態の中で一つひとつ現実のものにしていくという、大変地道な努力が必要となる時期があります。それは研究者にとっては「悪夢の時代」といってしまうか、人々の関心は薄れてゆき、研究費もつかなくなってくる。産総研のような公的研究機関は、研究成果を社会に生かすために悪夢の時代に挑戦しよう、我々の使命はむしろそこにあるのではないかと考えています。

現代においては、基礎研究と同時に応用研究の価値が非常に大きくなっています。基礎研究を個別の狭い分野でやっているだけでは、地球環境問題やエネルギー問題、あるいは健康の問題、食糧の問題など、社会的な問題を解決できないのではないかとみんなが何となく感じています。

従来の「応用研究」と言ってきたところをもっと活性化しないと、科学が現実の社会的な価値に結びついていかないのではないかと考えています。

従来の研究論文の書き方は、事実とそこから導かれる結論を書いて、論理整合性を確認する。「それだけ」と言ってしまうのはよくないのですが、社会的な価値とのつながりを意識しないで、それぞれの狭い分野において新しい事実を積み上げて論理的完成度を高め、そこに価値があると思って我々は論文を書いてきたのですが、研究の毎日の現場はもっと生々しくて、社会的な要請や政府の政策と強くリンクしている部分があるわけですが、その部分はなかなか書けません。

大野 そうですね。論文のイントロダクションとして数行書くくらいです。

小野 おっしゃるとおりです。論文のイントロダクションは読んでおもしろいものですが、それが論文の価値を決めるものではありませんでした。研究者は社会の要請に真摯



に伝えようという熱い気持ちを持っているのですが、その部分まで書くと「論文ではない」と言われてしまいます。それに対して *Synthesiology* では、研究者のインテリジェンス（知性）とインテンション（意図）が組み合わさったものを世の中に発信していきたいと思っています。

田中 小野さんから *Synthesiology* の趣旨、我々の思いについてお話しいただきましたが、基礎研究をしても、応用研究の視点を持つということは大事だと思いますが、アメリカではこのような考え方は当たり前なのでしょうか。

大野 私が勤めている米国立標準技術研究所 (NIST) の場合、一部、基礎研究もあるのですが、私の感じでは大半が応用研究です。いろいろな機会を捉えて「なぜ、この研究をしているのか」ということについて説明しなければいけません。例えば、数年に1度、プロジェクト評価を研究部全体でやって、プロジェクトごとに今どういうことをやっていて、産業界でどういうコンタクトがあって、どういうふうに関与しているのか、ということを発表して、みんなで議論します。それに、研究予算自体が十分でないので、どういうふうに関与しているかわからないような研究というのはなかなかやりにくいですね。

NISTの測光標準研究

田中 アメリカではブッシュ・オバマ両政権を通して省エネルギーのために、今後固体照明を広めていくという明確な政策があるのですが、そこに NIST で測光標準研究を担当されてきた大野さんが非常に大きな貢献をされています。それは、NIST の測光標準研究とアメリカの固体照明政策を結ぶ社会技術と言ったらいいでしょうか、大きな括りとしては「技術・製品の規格化と政策・規制」ということだと思うのですが、測光標準の研究にこれまでどのように取り組んでこられたのかも含めて、お話しいただけますか。

大野 白熱灯や蛍光灯など、現在照明に使われている

エネルギーは膨大な量になっていますが、米国エネルギー省は、今後 20 年間かけて、固体照明を段階的に市場に導入することによって、電力消費を現在の半分に減らすという目標を打ち出しました。

もともと 2005 年に議会で固体照明を国家として推進することが決まっており、エネルギー省がその推進をやることになっていましたが、「固体照明を使えば、効率が倍になる」と言われています。2 倍の効率の光源ができればすごい省エネができるし、地球温暖化防止にも役立つということで、非常に注目されています。

ただ、次世代の光源ということで従来の光源と異なる面が多く問題も出てくるでしょうし、新しい技術も必要になってきます。固体照明の推進政策として、コアテクノロジー、いわゆる半導体の基礎研究の部分から、発光ダイオードの開発、照明製品の開発、次のステップの市場導入促進というふうに関与している。エネルギー省は全体を見ています。小野さんのお話にあったように、基礎研究があって、それが市場までつながっています。その中で、標準が非常に重要な役割を果たしています。標準が悪いと劣悪な製品が出回り、消費者の立場からすれば、性能の良くない粗悪品を買ってしまうと、「発光ダイオードはこんなものか」と失望して買わなくなってしまいます。最初が大切だということで、エネルギー省は商業化支援ということに力を入れています。

NIST は標準化についていろいろな意味で支援していますが、その対象の一つにエネルギー省が行っているエネルギースターというマーク制度があります。エネルギースターはほとんどの電化製品を対象にした制度で、エネルギー効率がいい製品にこのラベルがつけられています。エネルギー省が審査して、エネルギー効率だけでなく、製品の質も見ますが、このエネルギースターの固体照明への導入が今始まっています。

小野 そうしますと、NIST はエネルギースターをつける基準を決めていこうということですね。



ヨシ 大野氏



小野 晃氏

大野 そうです。固体照明はエネルギースターを2008年10月から申請できる状態になりました。2年前からそれらの標準の開発を始め、私どもNISTも積極的に参加しましたし、一部、主導的な役割を果たしてきました。

標準がなければ推奨できない

小野 NISTは、計量標準だけでなく工業標準をつくるのにも協力しているわけですね。

大野 ええ、工業標準では、さきほど質の話をしました。が、実際、照明光源の色度については、全体が黄色っぽくなったり、緑っぽくなったりすると非常に嫌われますし、返品の原因にもなる。これは非常に重要だということで、まず固体照明光源の色度の標準を作る作業部会が米国規格協会(ANSI)に作られ、私とそのリーダーになって標準をつくりました。

小野 私も感覚として、黄色い部屋にはいたくない、緑の部屋も落ち着かない。赤か青だったら、まあ、落ち着いていられる。

大野 そうなのです。それをきちんと定義して、工業標準として決めて、エネルギースターで守ってもらうということです。

測定について、米国照明学会は標準文書(LM-79)を出版していますが、これはエネルギースターで参照している試験法の規格です。これも私が主導したのですが、例えば光束をその単位ルーメンを使ってどのようにして測るか、積分球をどのようにセットして、どういう検出器を使うのか。積分球にはフォトメーターと分光器を使うものと両方あるのですが、分光器を使った方が産業界での精度はずっといいわけです。校正する計量標準としては分光放射束の計量標準が必要になりますが、この開発をNISTで数年前からやっています、それがキーポイントの一つになっています。

要するに、この方法を推奨しようと思ったら、そのため



田中 充氏

の計量標準がないと、それを使った方法を文書にのせて「この方法を使ってください」とは言えないわけです。

小野 分光測定が大事だということは産総研でもよく認識されていて、そちらの方向に踏み出してきたところですよ。

評価数値を上げれば高品質な製品になるのか

大野 もう一つ、発光ダイオード(LED)光源のスペクトルに関するのですが、照明光源の演色性を評価する場合、CRI(Color Rendering Index)という指標があります。100点満点で、80点以上が屋内照明に推奨されています。この指標は蛍光灯のために40年くらい前につくられたものです。ところがこれを発光ダイオードに使うといろいろな問題があるということが、私のシミュレーションプログラムでわかりました。

スペクトルを可視域の真ん中に集めると光束の効率(ルーメン/ワット)の値は高くなりますが、一般に演色性は低下します。企業はルーメン/ワットの値で他社と競争をしているので、例えば、CRI指標を80としてルーメン/ワットが最も高くなるスペクトルを求めると、赤の見え方が非常に悪くなり、CRI指標が80でも屋内照明用としてとても使えない場合があることがシミュレーションでわかりました。(図1)

それから、スペクトルをある程度操作することによって、色のコントラストを上げることができます。たとえば、黄色いスペクトル成分を吸収するネオジウム電球が実際に売られていますが、物が鮮やかに見えるのです。ところが、この電球の評価指標は非常に低くなります。しかし、私は、これは実用に使う光源としては非常にいいのではないかと思います。ところが、産業界でものをつくるときは、評価指標の数値を上げるように研究開発しますので、下手をすると間違った方向に開発がすすんでしまう恐れがあります。

小野 ここでは指標になっている工業標準自身が良くな

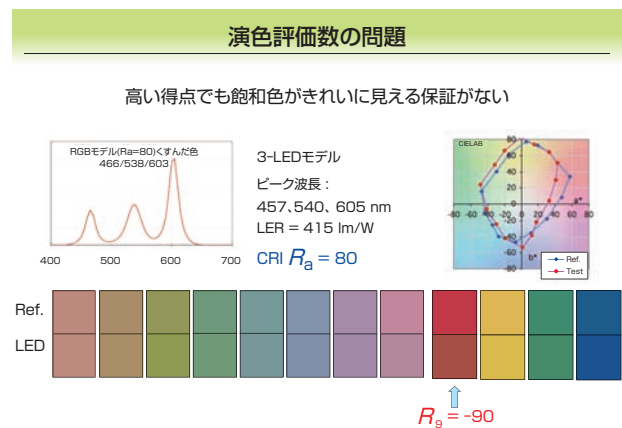


図1 演色評価数の問題

いということですね？

大野 そうです。CRI 指標 80 でそういう製品が市場に出たら、非常に問題になると思いました。

我々は、これに関連する研究を数年前からやっていたのですが、「イノベーション計測科学」という NIST の所長が出す研究予算のコンペに応募しました。書類選考で物理部門で選ばれて、最後は NIST の研究部門長たちの前で私が発表したのですが、これが通ったのです。

小野 それはおめでとうございます。

大野 最初は検査用のブースで細々と実験をやっていたのですが、中に物を置いて RGB (赤、緑、青) のスペクトルを少し変えると、色の見え方が大きく変わることがわかりました。CRI 指標が 82 で、数値は結構いいのですが、赤が茶色になりました。これはシミュレーションが正しいということです。(図 2)

田中 そうですね。82 と 71 を比べると、むしろ 71 のほうが鮮やかですね。

大野 71 は非常に鮮やかで、中に手を入れても非常に良く見えます。しかし、エネルギースターでは 75 ないとだめなのです。CRI 指標 82 の方がエネルギースターに通ってしまっ、これは非常にまずいことになります。エネルギー省からは「新しい工業標準を早くつくってくれ」と言われています。

小野 数値が実態に即していないということですね。

研究と標準化の一体的推進

大野 一部は論文に出していますが、そういった問題を

すべて解決できるような新しい指標をつくりました。「CQS」(Color Quality Scale) という指標が私どもが新しく提案しているものですが、これでいくと CRI = 82 が CQS = 74 に、CRI = 71 が CQS = 83 にというように逆転するのです(図 3)。しかし、新しい評価方法は工業標準にしないと意味がないし、工業標準にならないと使ってもらえない。しかも演色性は、歴史的に国際的な標準です。それで国際照明委員会に提案して、委員会をつくって、そこに私どもの方法を提案して、議論を進めています。

国際標準なり、実際に産業界に使っていただいて、初めて研究が実るといことです。

小野 まさにそうですね。私たちはそれを「研究と標準化の一体的推進」と言っています。研究が終わってから標準化に着手するというのではなく、標準化の要請があって、それが研究に反映される。そして、その結果をまた標準化にフィードバックするという、両方が一緒に走っていかないとだめなのだと産総研では言っていますが、そういう良い例ですね。

大野 その通りだと思います。今回は、特にエネルギー省のエネルギースター がもう走り出しているということで、今はそれに急かされて CRI 指標を使っているのですが、エネルギースターに限らず、固体照明の産業全体がどんどん進んでいますので、標準が追いつかないと、間違った方向で無駄なものをつくってしまう恐れがあります。

今、白色発光ダイオードは青の発光と蛍光体を組み合わせる方式が主流なのですが、RGB 方式では値段が高く、CRI 指標が悪くて色が良くないという話がよくありますが、見た目はそんなに悪くない。特に RGB をやっているメーカーは、非常に興味を持ってサポートしてくれています。

小野 RGB というのは比較的狭いスペクトルを持った 3



図2 RGB LEDの演色性



図3 RGB LEDの演色性

つの波長で構成していこうということですね。そして、CRI 指標ではなくて、CQS 指標を使っていこうということですね。ところで CQS 指標は日本語で言うと、どうなりますか。

大野 Color Quality Scale の日本語は考えたことがなかったです。考えておかないといけませんね。

小野 「色質度」とかでしょうか。

大野 あ、「色質度」はいいですね。この研究プロジェクトでは、人件費のほかに設備関係に 50 万米ドルくらい予算がいただけたので、実際の部屋全体を照らしてスペクトルを自由に変えられるという世界初めの実験設備を今つくっています。(図 4)

小野 なるほど、ブースからルームへ、ですね。

大野 部屋にすると、実際にその中で仕事をしたり、会話をしたり、顔色が見えるという、非常に大きな利点があります。そこまでやらないと最終的な確認にはなりません。今実験室にあるのは仮に納められたシステムで、RGB の 3 色しかないのですが、2009 年 2 月に 25 色のピーク波長に分かれたコントロールができるシステムが納入されます。いろいろな照明に関する色覚の研究ができるので、固体照明に大きく貢献できるのではないかと考えています。

NISTにおける本格研究

田中 これまでの固体照明に関するエネルギー省の政策に関して、本格研究としての成果が出てきているということですね。

大野 そうですね。最初にお話しました色度の工業標準と、もう一つ LM-79 という試験方法の工業標準に貢献で

きたことは大きな成果だと思います。色度というのは光の色ですが、光の色がいいポイントにあっても、物の演色がいいとは限りません。両方が関連しているのですが、光の色の方をまず工業標準として出したということです。次は演色性の標準です。

他にも、私の担当ではなかったのですが、例えば寿命の試験法の工業標準があります。発光ダイオードの寿命は 3 万時間、5 万時間と長いのですが、産業界では 6,000 時間測って 3 万とか 5 万時間まで外挿しますので、寿命の不確かさが大変大きい。エネルギー省の締め切りがあったので予測方法ぬきで出版しましたが、次のステップとしてどこまでやるかということは今後の課題です。

小野 新しくできた技術は、今後、データが積み重なっていけばより良い方向にいくでしょうね。こういう工業標準をつくるに当たって、日本のメーカーや研究者の貢献はどのようなものですか。

大野 米国規格協会や北米照明学会 (IESNA) はアメリカの標準化団体ですから、日本からの参加は基本的にはありません。ただ、アメリカに会社を持っている日本の企業は参加することはできます。国際照明委員会にはもちろん世界中から参加しているのですが、LED 照明に関しては日本のメーカーの方の積極的な参加はまだないようです。

産業界のニーズに触れながら研究する

小野 測光技術は基礎的な研究対象であると同時に、世界中が関心を持っている省エネルギーの問題ですね。そこをつなぐ、非常に大きなお仕事をされていると思いました。

「研究をやりつつ標準化する」ということを実践されておられますが、大野さんは NIST でグループリーダーをしていらっしゃるの、若い研究者の生きざまも考えなければいけないというお立場にあると思います。研究者としても成立し、また社会への貢献も十分してもらいたいという中で、どんなふうに配慮されておられますか。我々も同じ問題を抱えているものですから、アドバイスをいただければと思います。

大野 委員会などに出て、いろいろな問題があるということがわかれば、こういう研究をしないといけないということが明確になってくると思うのです。いろいろな質問があったり、要望があったりして、私自身も委員会の会合でいろいろなことをいつも学んでいます。若い研究者もできるだけそういう会合に連れていったりしています。

もちろん研究としては自由にやってもらおう部分もあるので



図4 NISTのスペクトル可変照明実験設備

すが、産業界のニーズとといいますか、そういうものに触れながら研究してもらおうというのではないかと思います。

専門外の人もわかることが大切

小野 標準化で成果を出していくときに、それをどういうレポートの形で出すかということも重要と思っています。NIST は今まで専門技術書（モノグラフ）やテクニカルノートなど、いわゆる研究論文とは違う形でいろいろ成果を発表していますが、そういうものも非常に価値があるというふうに思っておられるのでしょうか。

大野 もちろんです。科学技術的な論文も大切に、それも出さないといけないのですが、一方で、もう少し一般向けの記事も書いています。最近では、インターネットで出版するような LED レビューや LED マガジンにも投稿しています。演色性や測定の問題をテーマにしたりしていますが、産業界の方からいろいろな反響があります。

それ以外に NIST がメディアに対して出している記事があります。2 ページくらいのもなのなのですが、標準の仕事が 2 つ終わったときと、ハイパワー LED の測定方法ができたときに出しています。これは専門でない方もわかるように書くのですが、産総研の *Synthesiology* と少し似ているかもしれませんが、それは NIST から非常に高く評価されています。

小野 まさにおっしゃられたとおりで、*Synthesiology* は理学、工学、農学、薬学をカバーし、ライフサイエンスやエレクトロニクスから計量標準まで全部含んでいます。そのような編集方針を立てているのですが、他の分野の人たちからも読める形になっています。

大野 そうですね。私も読ませていただいて、自分の分野と全く異なる分野の記事でも結構読めるなと思いました。

小野 ありがとうございます。まさにそこがこの雑誌を出すときに気にしていたところなのです。私も環境や地質の分野の論文の査読者になっているのですが、実は論文を読んで内容がわかりましてね。わかったということ自体が驚きで、さらに驚いたことに査読意見も書いてしまいました。

大野 著者とディスカッションされたのですね。それは楽しいですね。

さまざまな課題に研究者コミュニティが取り組む

小野 地球環境問題などいろいろな問題を抱える中で、科学技術の果たす役割はとても大きいものがあるのですが、科学者あるいは研究者自身がお互いに意見交換できなくて、それぞれのチャンネルを通しては社会につながっているのだけれども、コミュニティとしての意見がなかなか出せないという感じがしていたのです。その中で気候変動に関する政府間パネル (IPCC) に多様な研究者が集まって協力してレポートを出したり、標準化していく中でさまざまな技術者や研究者と意見交換して一つのものをつくりあげていったり、というのはすばらしいことだと思います。

大野 標準はあって当たり前で、地味な分野といいますか、目に見えて役に立つということは難しかったわけです。そういう中で、この固体照明の標準の課題というのは大きな変革のチャンスといたしますか、光源の歴史で見ても 100 年に 1 回くらいの出来事ですし、ニーズとしてもすごく大きいと思うので、そこをうまく捉えていけば、国立研究所として大きく貢献できる仕事はたくさんあると思うのです。測定技術もそうだし、一部、視覚の研究にも踏み込んで、エネルギー省を中心とした大きな夢に結びつので、それに貢献していきたいと思っています。

田中 日本も同じニーズ、問題意識を持っているのですが、政策的に明確なメッセージが必要かもしれないですね。

小野 きょうは大変いいお話を伺いましてありがとうございます。ありがとうございました。ありがとうございました。

大野 こちらこそ、私も大変参考になりました。ありがとうございました。

略歴

大野 ヨシ(おののよし) (大野 義弘)

現在、米国メリーランド州、国立標準技術研究所 (NIST)、Optical Technology Division、Optical Sensor Group のグループ長。1977 年京都工芸繊維大学電気工学科卒業。1977 年松下電器産業 (株) 照明研究所に入所、測光測色技術を担当。1984 年から 2 年間、米国 NIST (当時 NBS) に留学、絶対測定積分球などを研究。1992 年に米国に移住し NIST に移籍、Photometry Project Leader として赴任。2003 年よりグループリーダー。現在、国際照明委員会 (CIE) 第 2 部会長を務めるほか、ANSI、IESNA (北米照明学会)、CIPM - CCPR (国際度量衡委員会測光諮問委員会) などで活躍。

産総研イノベーションスクール生との座談会

シンセシスな研究について

産総研では、所内のポストドクをイノベーション人材として育成する「産総研イノベーションスクール」を2008年7月31日に開講しました。本座談会は、最終講義の一つとして2009年3月に実施したものです。スクールの受講生に、これまで刊行された *Synthesiology* の中から興味を持った論文を選んで読んでいただきました。自分の研究に関係あるテーマを選んだ人もいますし、全く違う分野のテーマを選んだ人もいますが、ユーザーの視点や、製造するためのコスト、安全性、環境負荷等々の広い観点から、自分の研究を見る手がかりになっています。ここでは、なぜその論文を選んだのか、論文のポイントは何か、普段読んでいる学術論文とどう違うのか、*Synthesiology* から何を読み取ることができたか、価値ある点はどこか、今後、*Synthesiology* に何を期待するかについて討論しました。

シンセシオロジー編集委員会



座談会出席者

赤松 幹之 (研修生)	人間福祉医工学研究部門 研究部門長
居村 史人	エレクトロニクス研究部門
加藤 大	生物機能工学研究部門
岡崎 敬	セルエンジニアリング研究部門
菅沼 直俊	光技術研究部門
松廣 健二郎	エレクトロニクス研究部門
大橋 昇	太陽光発電研究センター
長田 英也	健康工学研究センター
河合 信次	太陽光発電研究センター
大木 康太郎	エネルギー技術研究部門
遠藤 聡人	先進製造プロセス研究部門

赤松 産総研イノベーションスクールで、皆さんに *Synthesiology* の中から関心があるテーマの論文を選んで輪講形式で3回にわたって発表していただきました。皆さんがプロの職業研究者として活躍するための勉強の一つの材料として提供させていただいたわけですが、どの論文を選んだか、なぜそれを選んだかということをご自身の研究も含めて紹介していただけますか。

なぜ、その論文を選んで読もうと思ったのか

居村 私が読んだのは産総研中部センターの北さんらの『製造の全工程を考慮した資源およびエネルギー利用の合理化指針』(1巻3号)という論文です。私自身、半導体製造技術そして評価技術に関する研究を行ってきました。1947年にトランジスタが発明され、半導体は半世紀以上たって巨大産業になりました。しかし、数多くのデバイスがあり、しかもそれぞれのデバイスに対して製造工程がいくつもあるということで、果たしてファブ全体とデバイス関連に関してすべて把握している人はいるのだろうかと考えました。

また、半導体では“コスト”という言葉をよく聞きます。“コスト”とは何を指針に計算されているのか。どうすればコス

トを下げた効率の良いデバイスを提供できるか。このエクセルギー解析という一つのツールを通して、参考にできることがあるのではないかと思います。

加藤 私は現在、新しい材料を用いた分析技術に関する研究に携わっていますが、もともとのバックグラウンドは合成化学で、無毒性で人体にやさしいバイオマテリアル分野への興味から再生医療学会に所属していることもあって、関西センターセルエンジニアリング研究部門 大串さんらのグループの『実用化を目指しての再生医療技術開発』(1巻3号)を選びました。再生医療関連の学会に行くと、「早期に産業展開しよう」とうたっているものの、再生医療技術の事業化が実を結ばないということが耳に入ってきます。この論文は、まさになぜ事業化が難しいかという問題を抽出して展開しているのではないかと思います。

岡崎 私が選んだのは、北海道センターの津田さんらの『不凍タンパク質の大量精製と新たな応用開拓』(1巻1号)の論文です。今、私はOJT先で抗体や酵素などのタンパク質を扱っていますが、その安定性には大変気を遣っていま

す。一度に使う量は微量ですが、同じ状態のものを使うために小分けして用いたり、極力凍結融解のサイクルを少なくするように意識しています。不凍タンパク質が安定性を上げる材料になるということを論文で読んで、自分のしている仕事にも関係していたので興味を持ちました。

菅沼 私が読んだ論文は明渡さんらの『エアロゾルデポジション法』(1巻2号)という、新しいMEMSとか製造プロセスに使われる成膜技術に関するものですが、掛け値なしに世の中で役に立つ技術を開発して、それに適した応用課題を的確に設定したというものです。私も以前、大学でポストドクをやっていたときに電気薄膜をパターンニングする新しい方法を考えて、世の中になかった技術を開発するという道筋をつくって研究を進めていました。でも、基礎研究としてはそれなりにうまくいったものの、世の中とのつながりという点ではうまくいきませんでした。この論文には、核となる技術があってそれを応用するというモデルが書かれていたので興味がありました。

松廣 私は以前に核融合分野において、エネルギー問題に非常に興味を持っていたので、関西センターの舟橋さんらの『熱発電を利用した小型コージェネシステムの開発』(1巻2号)を選びました。高温でも安定に動作できる熱電素子の材料を開発、製品化させようということで、ニーズをいかにつかみ、シーズをいかに活かすかというシナリオを立てています。そして、コージェネレーションシステムに用いる際に、熱機関から出てきた廃熱エネルギーを利用するのではなく、熱電素子の特性を活かす方法として、先に熱発電によってエネルギーを取り出し、その廃熱をその他の熱システムに適用するというトッピングシステムを考案するという、この「逆転の発想」がブレイクスルーする成功例の要因になるのではないかと思います。

大橋 私は太陽電池の研究をしています。仕事をする上で、他の人との知識の共有化についてもどかしいなと感じていましたので、江渡さんの『だれでも構築運営できるコラ



赤松 氏

ボレーションシステムの実現』(1巻2号)という論文を選びました。qwikWebのシステムは、メーリングリストにメールを送るとそれが自動的にデータベース化されるので、各人が別々のメールソフトを使っていたとしても、一つの共通したデータベースをつくることのできるという便利なものだと思います。

長田 私はナノバイオテクノロジーを応用したデバイスを開発する仕事をしていますが、有機ナノチューブが自分の研究に役立つのではないかと考え、ナノチューブ応用研究センターの浅川さんらが『実用化へ向けた有機ナノチューブの大量合成方法開発』(1巻3号)を読みました。この論文は、有機ナノチューブという両親媒性分子が溶媒中で自己集合化して、ナノメートルオーダーの中空繊維状の物質をつくるというおもしろい現象を見いだして以来、これを実用化まで導くストーリーになっています。そのための戦略として、安価な材料で両親媒性分子を合成する技術や、安全性の評価やサンプル提供をするための大量合成、アルコール溶媒による高速合成の方法の開発、企業参入のバリアーを下げるための安全性評価をつけて有機ナノチューブを使いやすくする活動が書かれています。安全性を考慮して両親媒性分子を天然由来の分子から合成して、なおかつコストを考慮して豊富に存在するものを使うという指針を立てたことが興味深いところでした。

河合 『水に代わる密度標準の確立』(1巻3号)という計測標準研究部門の藤井さんが執筆された論文を選びました。私は太陽光発電研究センターの評価・システムチームで、太陽電池の性能を評価する研究に取り組んでいますので、自分の業務という点でこの論文に引かれたということがありますし、計量の中の密度を標準化する技術を確認することに興味を持ちました。

大木 光技術研究部門の西井さんの書かれた『高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ』(1巻1号)という論文を選びましたが、私自身は超伝導、燃料電池という、大きくはセラミックスの研究を行っています。次世代のキーワードの一つである“光技術”を挙げて光通信や次世代ディスクなどの要素技術を取り扱っているという技術的なところにも興味があったのですが、一番の理由は、“低コスト製造”というキーワードを題目に入れているところです。研修で企業に行くと、企業では製品が目標であり、そのための研究を行っていく、考え方が違うのだということに気づきました。低コストがいかに大事かというのを思い知らされました。低コストのための研究がどのように構成されているかを抽出するためには、自分と異なった分野のほうがいいと思ってこの論文を選択しました。

遠藤 私はインクジェットを使ってプリンタブルデバイスをつくる研究をしています。読んだ論文は『フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発』（1巻3号）で、光技術研究部門の鎌田さんらが執筆した論文です。ユーザーが自分の欲しいものを自分でつくると、「だれでもデバイス、どこでもデバイス」というコンセプトを立てて、そこから技術的な課題の発見、技術課題への対処、試作という、実用化までの流れについて書いてあります。これは「研究のスピードを上げる」技術課題を設定し、どのような解決方法で、最終ゴールまで向かっていくかという内容の構成の論文だと思いました。

赤松 自分の研究に近い論文を選んだのは岡崎さんと長田さん、他の方は自分の研究に直接関係ない論文を選んだわけですが、参考にしたと思ったことなどありますか。

巨大産業の製造を“見える化”する

居村 半導体製造プロセスという巨大産業の製造の見える化が非常に重要だと思っています。新しい技術を導入するときの費用対効果やリスクを含めて、将来の経済や環境負荷も考慮に入れて、導入すべきかどうかということが今はわかるような形で示されていないと思うのです。そういう意味で、北さんらのグループがエクセルギーという、自然科学に基づいた根本的な視点で評価しようというのに非常に興味を持ちました。CO₂の排出量や設備投資額という、経済的には評価されないところに自然科学的なツールを使ったことが非常におもしろい。これまで自然科学を通した勉強をしてきた私にとって参考にするべきところがあると思いました。

赤松 北さんらの論文は、環境負荷というマクロな観点で、製造システムを製造工程に分けて評価できる指標を提供するというものですが、これは、もの自体の性能ではなくて、いかに製品として製造するという観点でものを見るということですね。

加藤さんが選んだ大申さんの論文も、安全性や有効性の標準化によって産業化を促進するというプロセスの意味では製造だと思うのですが、どうですか。

加藤 目的の細胞を人体から取り出してまた再移植する上で、完全な無菌条件下での操作や、従来の細胞計測技術にとらわれない新しい計測技術の開発が望まれます。大申さんはそれだけに留まらず、そういった新しい技術を導入するに当たっての細胞評価法の規格化（国際標準化：ISO）に積極的に取り組まれていたのが印象的です。再生医療という分野の問題点がいくつか指摘されていたわけですが、こういった「製造」に至るまでをISOによる基盤整備として取り組み

つつ、数十人に対して既に臨床試験の段階まで検討を行っていることに興味を持って読みました。

赤松 菅沼さんの読んだ明渡さんらの論文も製造関係ですね。

菅沼 AD（エアロゾルデポジション）法の論文の中で説明されている技術の構成モデルは、核になる技術があって、それが実際に実用化につながるような道筋として応用課題を選んでいくものです。企業など実利を得る組織の中では数限りなく基礎的な技術要素があって、その中で何か一つ本当にものになりそうな要素を選んで、それを育てていくという道筋をつくることは日常的に行われている作業ですが、産総研や大学では、それぞれの人がいろいろな基礎的な研究をしていますし、AD法に相当するような課題を持っている方もいるし、そうではない場合もある。では、今、産総研で提唱されている構成学に沿っていくためにはどうしたらいいのだろうかということで、明渡さんはなぜうまくいったのだろうか、ということに関心を持ってこの論文を選んだのですが、結論としては「いかに最終的にものになりそうなものを見つけ出し、それをつかむか」が大事なのだということを確認したというイメージです。

赤松 要素技術的な分野の人たちは、製造技術を考えた上でのコアとなる技術をつくるという発想はあまりなかったかもしれませんが、遠藤さんは先進製造なので、プロセス製造は当たり前という感じですか。

遠藤 プロセス製造技術になるとコスト的な概念も必要ですし、技術課題をブレイクスルーするためのコアとなる要素が重要です。材料が良くて、プロセス製造技術も良い、コストも安くつくることができればうまくいくかということ、製造するデバイスなどが社会的なニーズに合わなければ、最終的に世の中に出ていかないと考えています。私自身もインクジェットを使ってプリンタブルデバイスをつくるための製造プロセスの研究をしていますが、そのテーマに沿って、コア技術をつ



左から岡崎、加藤、居村の各氏

くるという発想は、現状では見にくかったので、この論文を研究の次のステップの参考にさせていただきました。

低コストでない企業では採用されない

赤松 製造といっても個別の製造プロセス自体だけでなく、低コスト、大量につくるということも大事な要素ですね。

大木 企業に行って一緒に研究をして、初めて、低コストでないで採用されないのだということが身にしみてわかりました。低コストをいかにして実現したか。目標の立て方から、目標に対する課題の抽出の仕方、そして課題を解決するための要素技術の選定とそれの統合の仕方を学びたいと思いました。

長田 企業へのサンプル提供と安全性評価という段階を経ないと実用化には至りませんが、サンプル提供と安全性評価でかなりの量が必要になってきます。実用化に至っては、キロ、トン単位で必要になってくる。コア技術としての大量合成は実用化のために必要な要素です。試薬会社の供給価格が安いほど豊富であるというシンプルな考えがおもしろく、早い段階から安全性に注目したことで実用化に早く結びついたことを選んだ論文から学びました。

岡崎 私の読んだ論文も、シナリオとしては大量精製がカギで、量を確保することによって開けてくるその先が非常に典型的な感じがして、不凍タンパク質への興味とは別に、シナリオの部分もおもしろく読むことができました。やはり量を確保しないとものをつくれませんし、果たして使えるのかという安全性の評価も進まないということで、「量」は産業化において大事だと思います。

また、製造プロセスでは、コストにも関係しますが、「既存のラインを使えるか」という要素も大きいと思います。全く新しいものを生み出すのであれば新しい製造プロセスで良いと思うのですが、既にあるものにとって代わるとなると、なかなか大変だろうと思います。既存のラインを使うことが前提にある場合も多いと思います。



左から長田、大橋、松廣、菅沼の各氏

他の人たちに自分の研究に興味を持ってもらう

松廣 舟橋さんの論文では、シナリオを立てて、いろいろ技術課題をピックアップしています。統合技術という点では深くは書かれていなかったのですが、大阪ガスとのコラボレーションによって進めていったということなので、個々の技術開発においては、他の機関の専門家をいかに引き込むか、ということが大事なのだと感じました。最後にモックアップをつくって発電を実証したのは大きな成果だと思います。また、コージェネレーションシステムを考えると、一次エネルギーを投入してどれだけ回収したか、有効利用したエネルギーは何%か、どれくらい上昇したかというのが最終的な目標なので、そういう点での総合的な評価もしてほしいと思いました。

大橋 私が読んだ江渡さんのコンピューターソフトの研究論文は、独特なスタイルをとっているところが刺激になりました。アクセス解析による定量化や、またユーザーを巻き込んで、いわゆるベータテストでいろいろな人に使わせるという、「他人に研究を手伝わせる」という方法があることは結構おもしろかったです。

赤松 河合さんが読んだ藤井さんの論文は、アルコール産業における振動式密度計の導入、アボガドロ定数の精度向上を背景とした、安定した固体材料による標準ですね。

河合 産総研として計量標準は大切なミッションになっていますが、私は性能評価のための標準化という点から、藤井さんたちのグループがどのように密度の信頼性を確保していったのか、トレーサビリティ体系をいかにしてこのグループが構築していったかという手法をこの論文から学びたいと思いました。

コア技術を社会に活かすための構成学的ポイント

赤松 社会に技術を活かすためのシナリオも含めて、論文のどういうところがポイントだったのでしょうか。

大木 初めに目的とするものがはっきりイメージとしてありますから、それを実現するためにどこがネックになるかをあらかじめ明確にしておいて、課題をかなりはっきりと抽出し、どのようにしたら短時間で効率的に解決できるかを意識して構成しています。具体的には、家電メーカーが得意な分野、材料メーカーが得意な分野、あるいは評価が得意な分野というふうな、それぞれ得意な方たちに配分することを最初から意識して構成していたところが、私はポイントだと思います。

赤松 これは、産業界、大学と産総研とで行ったプロジェ

クト型ですね。低コストでつくりたいからモールドですがどこかで合意されて、それに必要な技術を整理するという形でやられていたと思います。ゴールが決定されていて、それを実現するために何が必要だということを考えて、それを攻めたというタイプの論文は他にありますか。

大橋 qwikWebは、初めに曖昧ながらも「簡単に使えるコミュニケーションツールの作成」というゴールがあって、手当たり次第、それに関する技術を集めていったという、まさにそのタイプの研究だと思います。

長田 私が読んだ浅川さんの論文も、企業で有機ナノチューブを使ってもらうことが最終目標になっています。有機ナノチューブが合成された当時はまだまだ高価なものだったのですが、経済性、量産性、安全性、その評価と用途開発を行って、実用化に結びつけていったところが同じだと思います。

河合 目標は「標準化させる」というところですから、そのアプローチとして、絶対測定と比較測定を産総研で開発していったという点では似ていると思います。

加藤 私が興味を持った大串さんの論文は「統合技術型」でしたが、大串さんは4種類のコア技術があって、それを再生医療の早期実現に向けて統合したと記述されています。それぞれ他の要素を抽出して、最終的に再生医療へと統合されたのかもしれないですし、構成は記述の仕方によって変わってくると思います。

赤松 大串さんは再生組織をつくるという研究はもちろんやっているのですが、この論文では、いかにコンタミネーションを減らすとか、成長をモニターしようというふうに、製品化するために必要なコアとなる組織再生技術以外のところを書いていますね。

松廣さんの読んだ、コージェネレーションシステムの論文は、「材料ありき」ですか。

松廣 逆に、「シーズをいかに活かすか」というところをずっと考えて、いかに実用化に結びつけていくかということだと思います。

長田 先ほど、「ゴールが決まっている（戦略的選択型）」タイプの論文で紹介したのですが、浅川さんらの論文はブレイクスルー型の構成にもなっています。有機ナノチューブというおもしろいシーズがあって、これをいかに実用化に結び

つけるか。松廣さんの読まれた舟橋さんらの論文と共通するところだと思います。

菅沼 AD法も構成のスタイルとしては、有機ナノチューブやコージェネレーションシステムと似ている形だと思います。結果は少し違うかもしれませんが、ファクトなり技術があって、それをどう応用していくか、選択していくという意味では一緒です。

岡崎 不凍タンパク質も実際に使ってみて、「安定でした」という実験例も出しておられましたので、そういった意味では「見せる」というのは共通したポイントだと思います。

加藤さんが「書き方で変わる」と言われていましたが、量をつくって、そういう方向を目指すのだというシナリオで引張られているところは多分感じました。ですが、やはり不凍タンパク質の研究がしたかったのではないかと思います。大量に見つかった点でブレイクスルー型であり、応用・利用を模索する方向に速やかに移行できて、大量精製、そして実際に使ってみせるという仕事に移れたのではないかと思います。

赤松 不凍タンパク質を研究している段階から、大量合成したらそういうのに使えると思うところに、何か飛躍というか、アイデアがあったということでしょうか。

岡崎 タンパク質以外のものでそういうふうにご利用されているものが既にあるとあって、そういう用途が見えていた。類似な機能を持ったタンパク質であるから、そういう用途も量さえこなせば、というのはわりと自然な流れではないかと思いましたし、飛躍は感じませんでした。

死の谷を越えるには、コア型とゴール型のどちらの方法が有利？

大橋 これまでに、ゴールを目指すという方法と、コアを売り出すという、二つの方法が出されましたが、「死の谷を越えるには」どちらが有利なのでしょう。今までの話の流れで、



左から遠藤、大木、河合の各氏

コアを売り出すタイプの技術は、足元を見られているような感じもしますが。

大木 コアをもとにして進めていくというやり方は、今までも普通にやっていたと思います。本格研究というのは、それを「要素技術の統合」という新たな視点からやったということだと思います。

大橋 私としては、最終的な目標があれば、自分の今やっている研究も人生変わるくらいの行動ができるのに対して、コアが売り出せなかったら、自分ごと沈没するという感じなのかなと。世の中に出せる技術にするというポイントでは、私としては前者のやり方のほうが優れていると思います。

大木 どこに興味があるかということでも違ってくると思います。そのもの自体を研究対象として、自分がその研究をやりたいんだという人と、こういうものをつくりたいのだという人、どちらも私はいいと思うのですが、世の中に出せる技術という意味では確かに大橋さんの言われるとおりにかもしれません。

加藤 そのあたりをうまくリンクさせていく意識を持つことが大事だと思うのですが、どうしてもそこまで至らないケースが多い気がします。講義の中でトヨタの方がおっしゃっていましたが、シーズを持っていろいろなところに出歩いていくといった「現場の共有」を、研究者側からしていかななくてはならないことをこのスクールで痛感しました。

遠藤 研究を進めるにおいて、ゴールの設定を間違えていたら、何をどんなにスピードを速くしようと、予算をつけようと、うまくいきません。私にとって要素技術は、ゴールに対するスピードを加速するための技術というイメージがあります。一方、強いコア技術が見つかることさらにゴールは設定しやすと思います。なければ、技術を進めるためにいろいろな課題を抽出して、その課題に対してアプローチし、ゴールに進めていく。*Synthesiology* の論文は、どのように研究のスピードを加速するのか、社会貢献するための技術を出していくのかという道筋について、構成的に書いているのかなと思いました。

赤松 北さんらのエクセルギー解析の論文も、セラミックスがコア技術で、公平に製造プロセスを評価するという観点で書いていますが、その裏には「セラミックスがいい」と言いたいような気もするし、それはどうですか。

居村 中部センターはセラミックスの研究拠点として有名なところですが、北さんらは自分たちの技術を売り出したいのかというと、この論文はセラミックスを前面に押し出すということは書かれていません。逆に、セラミックスのリサイクルが困難という懸念も書いています。技術を単に推し進めるだけではいけないという、要は一步下がった視点から見るということを書いた論文は稀だと思いました。

研修生が*Synthesiology*に期待すること

赤松 最後に、*Synthesiology* に書いてほしいこと、期待や提言などについて教えてください。

遠藤 知財関係に関しては全然書いていません。書きづらいということもあるし、生臭い部分も出てくると思うのですが、実際に実用化まで持っていこうとすると、知財は絶対関わってくるので、どのポイントで知財を考えていくかということについて書いた論文があるといいと思います。具体的には、コア技術があって、研究を進めるとどのポイントで特許をとったほうがいいのか、そういうところに関して記述があればと思います。

加藤 各要素技術の抽出について、論文によっては当たり前のようになっているケースがあります。このジャーナルは「いろいろの分野の人が読者」というコンセプトがあったので、例えばどのような選択肢の中から一つの要素技術を選んだのかが簡単にわかる技術マップのようなものがあると、別の分野の人でも読みやすいのではないかと思います。

居村 一つの技術をイノベーションとして見いだせたから、*Synthesiology* の論文になっていると思うのです。では、どうやってそれをイノベーションと見いだせたのかというポイントをぜひ聞きたい。人とのコラボレーションもあると思いますし、ドキュメンタリーなどところもあるかもしれませんけれども、そういうのも聞きたいです。

赤松 確かに人との関係や体制づくり等々あると思いますが、それが論文の内容として適切かどうかというのは悩ましいところで、書かれていても真似できるものでもないし、運が良かっただけにも見るかもしれない。プロジェクト型だとある程度並行的に役割分担してできるけれども、所内の研究グループくらいの単位になるとそれほど並行的にはできなくて、一緒にやってくれる人をどうやって探しながら進めていくかということがポイントになるという気もします。

加藤さんが読んだ大串さんの論文も、企業の人をいかにうまく巻き込むかということがありましたね。

加藤 はい。複数の外部機関が関与すると、知財の問題などいろいろあるので、記述は難しいと思うのですが、外部機関側からの共同で開発した経緯なり、コメントが掲載できると良いと思います。

岡崎 目的に向かって進むに当たっては選択肢がいくつかあると思うのですが、「なぜ、それを選んだか」というのは非常に知りたいところなので、そういった部分を書いていたいただきたいと思います。自分と類似した目標を持っている研究が違うアプローチによって成功している例もあると思うので、それらを分類して、シナリオを比較できると、今後ジャーナルの投稿数が増えるに従って、過去にどういうシナリオがあって、なぜそのシナリオを選んだのかというように、「シナリオを基準にした論文引用」ができるようになるし、自分たちの場合はどうだろうかというふうにイメージしやすくなると思います。

菅沼 コア技術をもとにして応用展開していくタイプと、ゴールを設定して向かっていくタイプがあるという議論がありましたが、そもそもゴールを設定しない研究なんてあり得ないと思うのです。タイプ分けは、どこをスタート地点として見るかということだけでだいぶ変わってくると思うのです。全体像が見えるような、歴史背景も含めた論文だと *Synthesiology* としてわかりやすくなると思いますが、長編になってしまうかもしれないですね。

松廣 論文としては、ゴールがあってそれにどういうシナリオでという構成で書かれていると思うのですが、研究者の立場からすると、コア技術をまず培って、それを活かすほうが多いと思います。研究者側にとって役に立つという意味では、実際のコア技術から発展してというシナリオがあるといいし、それをどのように実用化に向けて、スピードアップさせていくかというような方法論をコア技術から書いていただくといいと思います。

大橋 一番期待しているのは構成学そのものの論文です。「研究生活に役立つ構成学」があって、「今こういう研究がある」と入れると、シナリオジェネレーターみたいなのが最後までつくってくれたり、今、自分で考えていることが二つあるけれども、どっちを研究したらいいのかなというときに、どっちをやったほうが自分の人生が終わったときに最終的な価値が高まるかを数値化できるような基準であったり、あとは自分が悩んだときに、こういう他の事例ではこういう失敗例があったけれども、成功例はこういうタイプでしたというような博物学的なデータベースがあると最高です。

赤松 抽象化した表現で、こういう構成をされるといいですよと書いたとしても、実際に自分の研究にその抽象化したものが当てはめられるかどうかの判断は結構難しいですし、そういう意味では事例でやっていくしかないのかもしれないですね。

大橋 これまで出た *Synthesiology* 中の事例をシナリオ典型分類として一つの論文としてまとめていただけると使いやすいと思います。

長田 *Synthesiology* は、死の谷と呼ばれている谷間をいかに縮めるかということで構成的に書かれているのですが、筆者の視点で「短縮するためにここを工夫した」というところをシナリオ比較のところで強調していただくと、もっと参考にしやすいと思います。それに付随して、「サンプル提供契約書」などのフォーマットを Supporting Information として公開しても、同様の研究を進めている研究者にとって谷間の期間短縮の助けになりますし、*Synthesiology* らしい試みになると思います。

河合 著者が他の論文について感想や批評をするような論文を入れたらいいと思います。かつ対談をして、クロスチェックとか、お互いの論文を批評し合えるようなことが盛り込まれると、読者としては読みやすいと思います。

大木 著者は産総研の方が多く、産総研中心の研究が紹介されているのですが、企業中心で、そこに産総研が共同研究でやっているタイプもあると思うので、企業が中心となった研究についても知りたいということが一つ。もう一つは、大橋さんも強調されていましたが、今から自分がどうすればいいのか、ということが一番知りたいわけです。そのための指針となるような解決法や、出てきた事例をある程度まとめるような形のものがあったらいいなと思いました。

遠藤 研究の最初から最終的なゴールの間で、自分がどの位置に立っているのか。著者の主観になってしまうかもしれませんが、研究の流れに対する時間軸を書いていただければおもしろいと思いました。

赤松 今後の *Synthesiology* の作り方の参考になるお話をたくさんいただきました、ありがとうございます。幅広く読んで、皆さんの研究の糧にいただければと思います。

(2009年3月7日)

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはしない。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、専門外の実験者にも内容が理解できるように記述することが必要であるとともに、その専門分野の実験者に対しても学術論文としての価値を示す内容でなければならない。

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2008年6月18日

改正 2008年10月24日

改正 2009年3月23日

1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿、および読者フォーラムへの原稿を受け付ける。

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不要とする。読者フォーラムへの原稿は、シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また読者への有益な情報提供などとし、1200文字以内で自由書式とする。論説および読者フォーラムへの原稿については、編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

3.2.2 タイトル、要旨、著者名、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、英文の場合は刷り上で同程度（3,400ワード程度）とする。

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

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

3.2.11 原稿中に他から転載している図表等や、他の論文等からの引用がある場合には、転載許可等の明示や、参考文献リスト中へ引用元の記載等、適切な措置を行う。また、直接的な引用の場合には引用部分を本文中に記載する。

3.3 書式

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

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

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, 巻(号), 開始ページ-終了ページ(発行年).

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

4 原稿の提出

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

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先:

産業技術総合研究所 広報部出版室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology@m.aist.go.jp

MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

“*Synthesiology*” Editorial Board

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

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

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

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: A.Ono

Senior Executive Editor: N.Kobayashi, M.Seto

Executive Editors: M.Akamatsu, K.Naito, T.Ishii

Editors: H.Yoshikawa, A.Yabe, K.Ueda, A.Kageyama, E.Tsukuda, M.Tanaka,

Y.Owadano, T.Shimizu, K. Igarashi, Y. Hasegawa, N. Murayama,

H.Tateishi, M.Mochimaru, K. Kudo, S.Togashi, H.Ichijo, J.Hama,

K. Mizuno, H.Nakashima, K.Ohmaki, A. Etori, P. Fons

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

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

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

URL: <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

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

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

1 Types of contributions

Research papers or editorials and manuscripts to the “Readers’ Forum” should be submitted to the Editorial Board.

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

3.2 Structure

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

3.2.2 Title, abstract, name of author(s), 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, permission for citation, if needed, should be clearly stated and the sources should be listed in the reference list. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

3.3 Format

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.

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

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

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

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

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*, Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

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

4 Submission

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

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

訂正

1巻4号の研究論文「ロータリエンコーダに角度標準は必要か」
の中の式に誤りがありましたので訂正いたします。

ロータリエンコーダに角度標準は必要か 一角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発— (渡部 司 著)
299頁 左段 23行目

誤

$$\mu = \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$

正

$$\mu = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$

編集後記

やや発行が予定よりも遅れてしまいましたが、無事第2巻2号を発行することができました。この号には6編の原著論文が掲載されていますが、材料、センサ、計測標準、地質、製造技術、システム、そして研究マネジメントまでも言及した幅広い内容になりました。様々な要素を考慮して構成するという構成的研究が、様々な側面やスケールで行なわれており、いわゆるフラクタル構造になっていることをあらためて感じさせられます。このなかでも中村論文は研究者と研究組織の30年間の活動を扱っており、寒川論文では千年という時間単位で対象を扱うために考古学を導入して、これまでの方法では得ることのできなかった知識を獲得することで、地震予測という構成的研究をより確実にしようというものです。組織管理・運営また研究者としてのライフワークという視点からも、スケールの大きな研究論文です。少々言葉は悪いですが、いずれの構成的研究の論文にも共通する点の一つは、目的達成のためには手段を選ばないという態度を持っていることだと思います。

米国のNISTの大野氏が産総研を訪問された機会を利用して、小野編集委員長と田中編集委員と鼎談を行いました。大野氏は日本の電機メーカーのご出身であり、基礎研究から製品化までを良く理解されている研究者です。構成的研究を推進するためには、その研究が最終的に社会に与えるインパクトをスポンサーなどに理解してもらう必要がありますが、大野氏の場合は照明のデモをとともうまく利用されています。ちなみに、鼎談の中に赤の発色が良くないという話がありますが、この赤の発色が悪いことをマグロの赤身を使って見せたりされています。日本食が米国での構成的研究を推進することに役立ったのかもしれませんが。

産総研での人材育成として、昨年度からポストドクを対象としたイノベーションスクールを実施しています。そのイノベーションスクールでの重要な教材として*Synthesiology*を使って、輪講形式で講義と討論を行ないました。輪講では、論文内容の紹介と構成学として学んだことなどを発表してもらい、皆で議論しました。本号に掲載した座談会は、その総括として行ったものです。スクール生はそれぞれの分野で研究をしていますが、自分の専門外の論文を選んで発表された人もいました。発表後の議論においては、専門外の内容に対しても皆ポイントを押えて内容が理解されており、なかなか鋭い意見が出ることもありました。他の研究分野の研究であっても、意見がいえるというのが、*Synthesiology*の論文の良い所であることをあらためて感じるとともに、異なる研究分野の研究者からの視点で見ることが構成的研究を進める上で重要であることも感じさせられました。今回は初めての試みでしたが、この*Synthesiology*は、MOTはもちろんのこと、幅広い研究開発者のための良い教材になりうるということが分かったことは大きな収穫です。読者の皆様も、ぜひ教材としての活用を考えてみていただければと思います。

原著論文の投稿は産総研の現場研究者に依頼する形でスタートしたのですが、次第に自主投稿がされてくるようになり、さらに産総研外部からの投稿もありました。構成的研究としての主張をお持ちの方が多くおいでだと思いますので、構成学としての知を蓄積していくために、多方面からの積極的な投稿を期待するだけです。

(編集幹事 赤松 幹之)

Synthesiology 2巻 2号 2009年6月 印刷・発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

シンセシオロジー編集委員会

委員長：小野 晃

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：石井 武政

委員：吉川 弘之、矢部 彰、上田 完次、景山 晃、佃 栄吉、田中 充、大和田野 芳郎、清水 敏美、五十嵐 一男、長谷川 裕夫、
村山 宣光、立石 裕、持丸 正明、工藤 勝久、富樫 茂子、一條 久夫、濱 純、水野 光一、中島 秀之、大蒔 和仁、
餌取 章男、Paul Fons

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

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 産業技術総合研究所広報部出版室内

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

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

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



Messages from the editorial board

Research papers

Study of paleoearthquakes at archeological sites

-A new interdisciplinary area between paleoseismology and archeology-

A.Sangawa

High accuracy three-dimensional shape measurements for supporting manufacturing industries

-Establishment of the traceability system and standardization-

S.Osawa, T.Takatsuji and O.Sato

A secure and reliable next generation mobility

-Intelligent electric wheelchair with a stereo omni-directional camera system-

Y.Satoh and K.Sakau

Energy saving in transportation systems by weight reduction of their components

-Research and development of non-combustible magnesium alloy-

M.Sakamoto and H.Ueno

A strategy to reduction of applied energy in ceramic fabrication

-Novel binders and their processing technology-

K.Watari, T.Nagaoka, K.Sato and Y.Hotta

Development of high-sensitivity molecular adsorption detection sensors

-Biomolecular detection for highly-developed diagnosis, medication, and medical treatments-

M.Fujimaki and K.Awazu

Study on the PAN carbon-fiber-innovation for modeling a successful R&D management

-An excited-oscillation management model-

O.Nakamura, T.Ohana, M.Tazawa, S.Yokota, W.Shinoda, O.Nakamura and J.Itoh

Interview

US standards research and energy conservation policies on solid-state lighting

Y.Ohno, A.Ono and M.Tanaka

Round-table talks

Synthesiological approach in researches

Editorial policy

Instructions for authors