

Synthesiology

糸引きの少ない納豆「豆乃香」の開発

海底の地震・津波堆積物

直径 1.5 mm で実現する内視鏡型デジタル顕微鏡

レアアース蛍光体の材料リサイクル技術開発

シンセシオロジー編集委員会

Synthesiology 論文のポイント

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

シンセシオロジー編集委員会

論文：糸引きの少ない納豆「豆乃香」の開発 久保 雄司ほか

茨城県の地場産業である納豆の海外展開に取り組んだ事例を紹介した論文である。これまでの国内での食習慣にこだわらず、明確なシナリオのもと、多岐にわたる産・学・官関係者が連携し、バイオ技術やマーケティング、調理技術を融合することで、多くの企業が製品化するところまで進んでいる。

論文：海底の地震・津波堆積物

－巨大地震・津波による海底の擾乱と擾乱記録を用いた巨大地震・津波履歴の解明－ 池原 研ほか

安心・安全な生活に貢献することを念頭において、海底の地震・津波堆積物という地質学的な証拠から、過去の巨大地震や津波の履歴を解明する戦略を述べた論文である。地震・津波防災において、先端的な調査・分析のみならず、平時からデータ収集を継続することの重要性にも言及している。

論文：直径1.5 mmで実現する内視鏡型デジタル顕微鏡

－微細OCTプローブでナノメートル精度のデジタル化技術－ 古川 祐光ほか

企業の有する世界トップのマイクロモーター技術と、産総研が開発した光断層計測法（OCT）の補正技術とを統合することで、円筒内面を20 nmの精度で評価できる直径1.5 mmの内視鏡型顕微鏡を開発した。医療技術として発展してきたOCTを、要求性能の方向性が全く異なる工業用途へと展開した。

論文：レアアース蛍光体の材料リサイクル技術開発

－近未来型資源循環の先駆けとして－ 大木 達也ほか

現代社会において、リサイクルは最重要課題のひとつである。本論文は、レアアース蛍光体を元素にまで還元することなく、蛍光体材料としてリサイクルする技術の実用化について述べている。材料を専門とする研究者と選別装置を専門とする研究者との連携による、高度な知見の統合の成功例である。

Synthesiology 第11巻第1号(2018.3) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
糸引きの少ない納豆「豆乃香」の開発 ・・・久保 雄司、中川 力夫	1-11
海底の地震・津波堆積物 — 巨大地震・津波による海底の擾乱と擾乱記録を用いた巨大地震・津波履歴の 解明 — ・・・池原 研、宇佐見 和子	12-22
直径 1.5 mm で実現する内視鏡型デジタル顕微鏡 — 微細 OCT プローブでナノメートル精度のデジタル化技 術 — ・・・古川 祐光、野口 尚美、山崎 大志、浅田 隆文	23-32
レアアース蛍光体の材料リサイクル技術開発 — 近未来型資源循環の先駆けとして — ・・・大木 達也、赤井 智子、山下 勝	33-45
編集委員会より	
編集方針	46-47
投稿規定	48-49
編集後記	54
「Synthesiology」の趣旨	
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Development of low sticky texture natto “MAMENOKA” --- Y. KUBO and R. NAKAGAWA	1
Submarine earthquake- and tsunami-induced event deposits —Disturbance of the sea floor by huge earthquakes and their related tsunamis, and the use of disturbance records in marine sediments for the history of past huge earthquakes and tsunamis— --- K. IKEHARA and K. USAMI	12
High-accuracy endoscopic microscopy using a thin, 1.5 mm diameter probe with optical coherence tomography --- H. FURUKAWA, N. NOGUCHI, H. YAMAZAKI and T. ASADA	23
Materials recycling technology for recovering rare earth fluorescent powder from fluorescent lamp sludge —Pioneering near-future resource circulation— --- T. OKI, T. AKAI and M. YAMASHITA	33
Editorial policy	50-51
Instructions for authors	52-53
Aim of <i>Synthesiology</i>	

糸引きの少ない納豆「豆乃香」の開発

久保 雄司、中川 力夫*

近年は日本食の持つヘルシーさが外国人に評価されているが、納豆が好きな外国人はあまりいない。納豆の糸引きが多く外国人に受け入れられないからである。そこで茨城県は、フランスやドイツ等の諸外国に納豆製品を輸出することを目指して、糸引きの少ない納豆を開発するプロジェクトを立ち上げた。糸引きの少ない納豆を製造する手法には、容器の工夫や糊料の添加などの方法もあるが、我々はメーカーが新たな設備を導入しなくても糸引きの少ない納豆を製造するには納豆菌（*Bacillus subtilis*）の育種が必要と考え、継代培養で生じた自然変異株の選抜による育種に取り組んだ。このプロジェクトにおいて我々は、粘性物質の生産量が少ない特殊な納豆菌を選抜し培養することに成功し、IBARAKI ℓ st-1と命名し、本菌で発酵させた納豆製品を「豆乃香」と呼称することにした。「豆乃香」とは豆の香りという意味である。「豆乃香」の特性評価を行ったところ、一般的な納豆と比較して粘性物質と粘度は大きく減少し、硬さ・色・栄養成分（ポリアミン）は同程度で、官能検査結果ではパネラーから糸引きが少なく食べやすいという評価を受けた。県内納豆メーカーは糸引きが少ないという特性を活かした「ディップソース、ペースト、ドレッシング等の新たな納豆加工品」の開発にも取り組んでいる。

キーワード: 納豆、*Bacillus subtilis*、糸引きの少ない、イバラキ エルエステーワン、豆乃香

Development of low sticky texture natto “MAMENOKA”

Yuji KUBO and Rikio NAKAGAWA*

Many foreigners appreciate Japanese foods because of their health properties. However, few foreigners like Natto, because of its sticky texture. The Ibaraki prefectural government started the “Development of Low Sticky Texture Natto” project to export Natto-based products to France and Germany, among other countries. The use of specially shaped packages, or edible glue lowers the stickiness of Natto. However, these methods require new processing machines. Natto makers would like to produce low sticky texture Natto without having to purchase new machines. To meet this challenge, we developed a new strain of bacteria from a natural mutation during subculture of *Bacillus subtilis*. This strain produces substances with lower stickiness. We named this strain “IBARAKI ℓ st-1”, and called Natto products fermented by IBARAKI ℓ st-1 “MAMENOKA”. MAMENOKA means fragrance of fermented soybeans. We found that the stickiness and viscosity of MAMENOKA were significantly lower than that of commercial Natto. Firmness, color, and nutrient (polyamine) content of MAMENOKA were almost the same as commercial Natto. We performed taste tests of MAMENOKA and commercial Natto. The majority of those tested reported that MAMENOKA was easier to swallow than commercial Natto, because of its low viscosity. Some Natto makers in Ibaraki are utilizing these properties of MAMENOKA to develop new Natto-based products, such as dipping sauces, pastes, and dressings.

Keywords: Natto, *Bacillus subtilis*, low sticky texture, IBARAKI ℓ st-1, MAMENOKA

1 はじめに

納豆の国内消費は米離れなどが影響して頭打ちとなっているだけでなく、過熱する価格競争が中小メーカーを苦しめる要因となっている。そのような折、2013年12月に和食がユネスコ無形文化遺産に登録されたこともあり、世界的に和食への関心が高まっていた。

海外への納豆の普及はアジア以外ではさほど進んでいるとは言い難く、これから市場を開拓できる余地は大きい。

このような背景のもとで、2013年より、茨城県産業政策

課が推進する「いばらき成長産業振興協議会」の取り組みの中で、海外に向けた納豆の開発プロジェクトが始まった。いばらき成長産業振興協議会のコーディネーターは、箸で食べる文化や食品をすすって食べる文化のない海外においては、納豆の糸引きは普及させる際のマイナス要因であると考え、納豆の糸引きを抑えてしまうことを提案した。糸引きを抑えた納豆であれば普及しやすいのではないかという目論見であった。

特に、そのまま食べるのではなく、メニューを調理する

茨城県工業技術センター地場食品部門 〒311-3195 東茨城郡茨城町長岡 3781-1
Laboratory of Local Foods, Industrial Technology Institute Of Ibaraki Prefecture 3781-1 Nagaoka, Ibaraki Town, Higashi Ibaraki-Gun 311-3195, Japan * E-mail: nakagawa@kougise.pref.ibaraki.jp

Original manuscript received July 26, 2017, Revisions received September 19, 2017, Accepted September 20, 2017

際の食材として売り込むことを想定した。「栄養面でもカロリーに対するタンパク質割合が高く、脂質割合が低い」という納豆の特徴は、健康志向の高い購買層向けのアピールポイントになると期待された。

納豆といえば一般的に「糸引き納豆」のことを指すので、この報告では、糸引き納豆を単純に納豆と記載する。

2 目的とそれを達成するためのシナリオ

納豆を新たな食材として海外へ売り込むことを目指して、糸引きの少ない納豆を開発するための研究に取り組むとともに、研究成果の県内納豆製造企業への普及を図ることが目的である。その目的を達成するためのシナリオは、次の①～⑤の順になる。

- ①納豆の海外展開に必要な要件を明確化
- ②海外展開に必要な納豆菌の育種
- ③育種した納豆菌で製造した納豆の特性評価
- ④開発した納豆の特性把握と関係者への周知
- ⑤外国人向けメニューの考案や海外展示会への出展等の海外展開に必要な取り組みの実施

①は関係者間の話し合いで、糸引きの少ない納豆の開発とブランド化、外国人向け納豆メニューの提案が必要要件ということになった。②については、当センターで文献情報を調べて検討し、継代培養の過程で生じた自然変異株の選抜による育種を行うことになった。③～④については、納豆の粘性、硬さ、色、栄養成分の評価と官能検査を実施することにした。そして⑤では、①と同様に関係者間の協議により、ブランド名と統一ロゴを設定することや、西洋料理の専門家に納豆を用いた新メニューの考案を依頼すること、ヨーロッパで開催される世界的な食品展示会に出展することなどを決定した(図1)。

3 解決しなければならない問題

糸引きの少ない納豆の製造はさまざまな方法が提案され、

- ①容器形状を工夫して大豆を発酵させて納豆を作る方法
 - ②納豆製造過程で糊料を添加する方法
 - ③オカラを原料とした納豆に、桂皮、ココア、砂糖、マヨネーズ等を混合する方法
- などが特許情報として公開されている^{[1][3]}。

しかし、容器の工夫で糸引きの弱い納豆を製造する方法^[1]は、製造方法が通常の納豆と大きく異なる場合、納豆メーカーが既存設備で生産することが難しく、設備投資費用が問題になる。また、糊料を添加する方法^[2]では、糊料の添加工程という製造上の手間が増える問題点がある他、大豆と納豆菌以外の副原料を使用した納豆製品に対する消費者心理の問題も懸念される。原料に大豆ではなくオカ

ラを使用することで納豆の糸引きをなくす方法^[3]も開示されているが、この方法を用いると大豆の種子は原料に含まれないため、納豆の風味がなくなってしまう。

以上のことから、特殊な設備投資を行わず糸引きの少ない納豆を製造するためには、糸引きが少ない納豆を作ることのできる納豆菌の育種が必要であると考えた。

4 糸引きの少ない納豆を作ることのできる納豆菌の育種方法

納豆の粘り成分は、主にガンマポリグルタミン酸^[4](以下「 γ -PGA」と表記する)というグルタミン酸のガンマカルボキシル基とアミノ基が縮合したポリマーと、レバン^[5]というフルクトースが縮合したポリマーから構成される。特に糸引きに寄与するのは、 γ -PGAであり、この成分の合成量が少ない株を選抜すれば良いと考えられた。

納豆菌に限らず、細菌あるいは真菌において、継代培養を繰り返すと稀に元の形質が維持されず親株とは表現型が変わることが知られている。そのため食品を含め有用微生物を安定して利用しようとする場合、大元の株をグリセロー

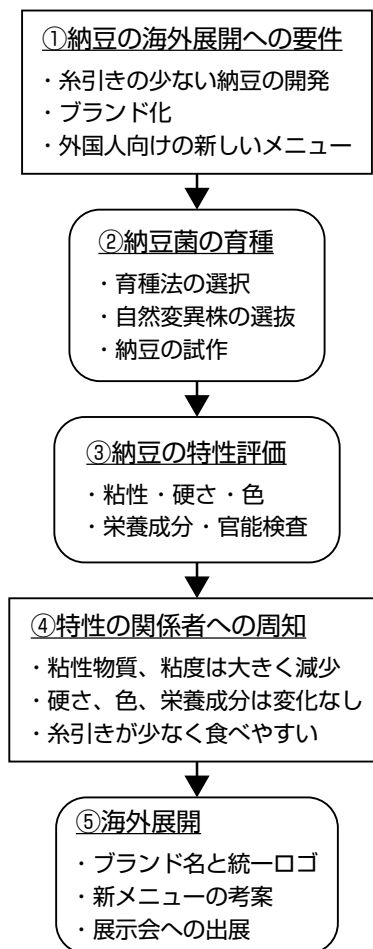


図1 糸引きの少ない納豆を開発し、海外展開するためのシナリオ

表1 糸引きの少ない納豆を製造するための従来法と当センターが採用した方法

従来法	①容器の工夫
	②糊料の添加
	③原料にオカラを使用
当センター法	納豆菌の継代培養によって生じた自然変異株の選抜を繰り返して育種改良された納豆菌の使用

ルストックやL乾燥管等で保存しておき、拡大培養は、大元に近い世代のストックから行うのが一般的とされる。今回は、この逆の手法をとった。具体的には、培地で同じ株の継代培養を繰り返す中で、元のコロニーと外観が変化したと感じられた（自然変異が疑われた）株を全て単離し、その全てで実際に納豆の試作を行い、糸引きの少ない納豆を作ることのできた株を選抜する作業を行った（表1）。

納豆菌の育種には、LB、E9⁶¹及び大豆粉末を含む培地等、納豆菌の培養に用いる培地を用いた。多くの場合、5回程度植え継いだところでコロニーの外観が元株と異なる株を得られる傾向が見られた。糸引きの少ない納豆菌育種の作業工程の概略を図2に示した。

図2に沿って糸引きの少ない納豆菌株が得られるまでの選抜方法の詳細を説明すると、市販スター株である宮城野菌をきな粉平板培地（きな粉 0.5 g、塩化ナトリウム 0.2 g、グルコース 0.1 g、寒天 1.5 g、水 100 ml）に植え37℃で48時間培養した。生育したコロニーを新たなき

な粉平板培地に植え継ぎ37℃で48時間培養する作業を5回以上繰り返した。植え継ぎを繰り返し、きな粉平板培地で生育したコロニーを釣菌し、LB平板培地に植菌して37℃で24時間培養した。元のコロニーと外観が変化したコロニーを新たなLB平板培地に植え継ぎ純粋培養を行った。単離した細菌株全てについて納豆を試作した。単離した全ての候補株をシェファー平板培地（ニュートリエントブロス (Difco) 1.2 g、硫酸マグネシウム7水和物 0.025 g、塩化カリウム 0.1g、硫酸鉄7水和物 0.0278 mg、硝酸カルシウム4水和物 23.6 mg、塩化マンガン4水和物 0.198 mg、寒天 1.5 g、水 100 ml）に塗布して37℃で2日間培養して孢子化した。その後、孢子を収集して滅菌水に懸濁した。調整した孢子液の菌数を確認後、納豆を試作した。

納豆の試作法は、最初に、大豆を3倍量の水（20℃）に16時間浸漬した後、よく水を切り、0.18 MPaで30分間蒸煮した。次に、蒸煮大豆1gに対して上記納豆菌の菌数が 10^3 個となるように納豆菌孢子懸濁液を噴霧し、よく攪拌した。これを、発泡スチロール製の容器に所定量充填し、小孔のあるポリエチレン製フィルムで被覆して蓋をした。次に、39℃、湿度90%で18時間発酵処理を行った後、20℃、湿度50%で2時間程あら熱を取り、5℃で1日以上冷蔵して熟成させ目的とする納豆を得た。

尚、通常は18時間程度の発酵を行うが、それよりも長い時間発酵させても糸引きが少ない納豆が製造可能であった。製造した納豆について菌の被り、豆の硬さ、糸引きか

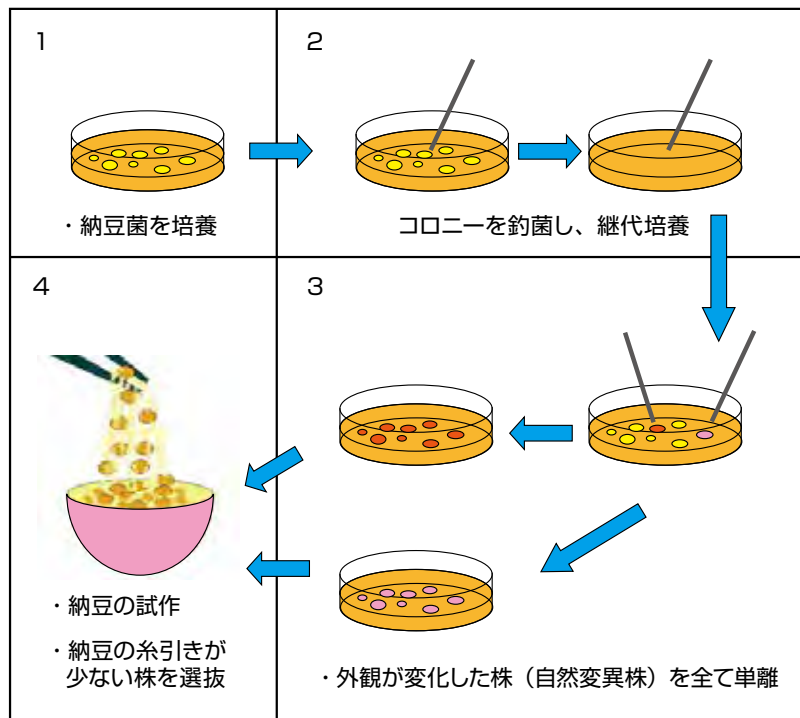


図2 糸引きの少ない納豆を製造するための納豆菌育種法

ら、従来の納豆菌株よりも糸引きの少ない納豆菌株を選抜した。選抜した細菌株について、16S rRNA 遺伝子の解析及びピオチン要求性試験を行い、その結果からバチルス・サブチリス (*Bacillus subtilis*) に属する納豆菌であることを確認した。

なお、納豆菌と納豆菌以外のバチルス・サブチリスとの相違は、納豆菌がピオチン要求性を示し、かつ粘質物産出能を有するのに対し、納豆菌以外のバチルス・サブチリスはこれらの特性を示さないことにある。

外観が変化したと思われる菌株は全てスクリーニングしたため、総数は 100 ~ 200 株程度となった。

それら全ての株で納豆を試作したところ、数株で元株よりも糸引きの少なくなった株が確認されたがその度合いにはばらつきがあった。その中でも特に糸引きが少なくなると共に食感・味にも優れた 1 株を選抜し (図 3)、その株を IBARAKI *ℓ* st-1 と命名し、その後の試作・試験に供した。

5 IBARAKI *ℓ* st-1 株を使用して製造した糸引きの少ない納豆の特性評価方法

5.1 納豆中粘性物質生産量測定

IBARAKI *ℓ* st-1 と宮城野菌を用いて、納豆の製造を行い、サンプルとなる納豆を得た。納豆 (約 13 g) を 50 ml の遠心チューブに秤量し、1 mol/L の塩化ナトリウムを含む 10 mmol/L リン酸ナトリウムバッファ (pH7.0) を 5 ml 添加した。

大豆表面をよく攪拌・洗浄した後、8,700 ×g、4 °C で 5 分間遠心し、上清を新しい 50 ml の遠心チューブに分取する作業を 3 回繰り返し、水溶性成分を回収した。回収した水溶性成分を、8,700 ×g、4 °C で 20 分間遠心し、上清を回収する作業を 2 回繰り返した。得られた上清 10 ml に 99.5 % エタノール 25 ml を添加した。さらに、8,700 ×g、4 °C で 10 分間遠心し、粘性物質を回収した。回収した粘性物質を減圧乾燥後、重量を測定した。なお、試験は 3 連で行い、平均値と標準偏差を算出して比較を行った。



図3 糸引きの少ない納豆菌 (左) と既存納豆菌株で製造した納豆 (右)

5.2 納豆をかき混ぜた際の最高粘度測定

納豆の粘性を調べるために、ラピッド・ビスコ・アナライザー RVA-4 (NEWPORT SCIENTIFIC) を用いて、納豆のかき混ぜ抵抗を測定した。納豆そのもののかき混ぜ抵抗は粘度が高すぎて測定不可能であるため、納豆 10 g に水 1 ml を添加して測定サンプルを調整した。かき混ぜ抵抗を測定するパドル及びカップは RVA-4 専用のものを用いた。回転数を毎分 180 回転、サンプル温度を 20 °C、測定時間 2 分で最高粘度の測定を行った。なお、測定は 4 連で行い、平均値と標準偏差を算出して比較を行った。

5.3 納豆の硬さ測定

納豆の硬さは、既報¹⁷⁾に従い測定した。50 粒分の納豆について、それぞれ短軸方向の切断強度 (硬さ) を測定した。その最大値及び最小値から各 10 粒分のデータを除き、中間 30 粒の平均値及び標準偏差を算出して測定結果とした。

5.4 納豆の色調測定

納豆の色は、分光式色差計 SE-2000 (日本電色工業 (株)) を用いて測定を行った。10 粒分の $L^* a^* b^*$ 測定値の平均値を算出して測定結果とした。 L^* は明度 (数値範囲 0 ~ 100) を表し、数値が大きいほど明るい色であることを示す。 a^* (数値範囲 -60 ~ +60) と b^* (数値範囲 -60 ~ +60) は色度を表し、 a^* は数値が大きいほど赤色が強いことを示し、 b^* は数値が大きいほど黄色が強いことを示す (図 4)。

5.5 納豆の基本栄養成分、ビタミン K 及びポリアミン含量測定

基本栄養成分、納豆に多く含まれるビタミン K 及び納豆の栄養成分として注目されるポリアミン^{[8][9]} (プトレスシン、スペルミジン、スペルミン) の分析を実施した。基本栄養

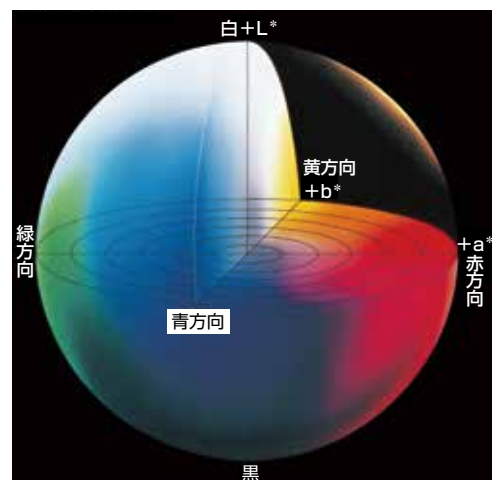


図4 L^* (明度) と色度 (a^*b^*) の関係図
コニカミノルタジャパン (株) 色色雑学より引用

成分及びビタミン K は既報^{[10][11]}に従い、ポリアミン分析は以下のとおり実施した。前記(4)に記載した方法)と同じ方法で納豆を製造して凍結乾燥した後、ミルミキサーで破碎した。サンプル 1 g に対し 5 % トリクロロ酢酸 5 ml を添加してボルテックスミキサーにて混和した。8,700 × g、4 °C で 10 分間遠心し、上清を回収した。この作業を 3 回繰り返した後、メスアップして 25 ml とした。メスアップした抽出液 50 μl に 6 nmol/ml の 1,7- ジアミノヘプタン / 0.1 M 塩酸溶液を 50 μl、炭酸ナトリウム飽和溶液を 200 μl 及び 10 mg/ml のダンシルクロライド / アセトン溶液を 200 μl 加え、ヒートブロックを用い 70 °C で 15 分間培養した。100 mg/ml の L-プロリン水溶液を 25 μl 加え、さらに 70 °C で 5 分間培養した。トルエン 500 μl を加え、よく混合した後、上層 500 μl を抽出した。これを減圧乾燥後、アセトニトリル 800 μl に溶解し、0.45 μm のメブレンフィルターで濾過して分析サンプルとした。ポリアミンの分析は、高速液体クロマトグラフ (HPLC) により行った。移動層には 10 mM のリン酸二水素アンモニウム (A 液とする) 及びアセトニトリル (B 液とする) を用いた。A 液と B 液の比が 45 : 55 の状態からスタートして、分析時間中に B 液の割合が直線的に高まる条件で分析を行った。その際の流速は 0.9 ml / 分で一定にした。

カラムは ODS カラムを用い、カラムオープンは 50 °C に設定した。検出は蛍光検出器を用い、励起波長を 340 nm、蛍光波長を 515 nm とした。標準品を用いた検量線からサンプル中のポリアミン量を算出した。

5.6 納豆の官能検査

10 代から 60 代以上の健康な男女 38 名により、それぞれの納豆がどのようなものか情報を与えずに 2 種類の納豆について比較評価を実施した。宮城野菌で製造した納豆を全ての評価項目において 3 点 (普通) とし、その点数に対して IBARAKI ℓst-1 で製造した納豆の性状及び特性を比較する形で評価を行った。また、6 つの評価項目を設定し、それぞれの項目について、宮城野菌で製造した納豆の方が良い (強い)、どちらも違いがない、IBARAKI ℓst-1 で製造した納豆の方が良い (強い) という三者択一の形式でも質問を行った。

6 糸引きの少ない納豆の特性評価結果と考察

6.1 納豆中粘性物質生産量比較

IBARAKI ℓst-1 及び市販納豆スターター株である宮城野菌を用いてそれぞれ製造した納豆について、生成する粘性物質の量を比較した。その結果、IBARAKI ℓst-1 の粘性物質生産量は宮城野菌に比べて約 25 % 減少していることが明らかになった (表 2)。

表2 納豆中粘性物質生産量比較 (単位:mg/納豆g)

IBARAKI ℓst-1	宮城野菌
11.5±0.6	15.3±0.4

表3 納豆をかき混ぜた際の最高粘度比較 (単位:RVU)

IBARAKI ℓst-1	宮城野菌
201±49	582±27

表4 納豆の硬さ比較 (単位:g)

IBARAKI ℓst-1	宮城野菌
85.2±8.7	88.9±9.5

表5 納豆の色の比較

色調\納豆	IBARAKI ℓst-1	宮城野菌
L*	55.14	58.97
a*	5.49	4.55
b*	11.90	10.32

このことから、IBARAKI ℓst-1 は宮城野菌よりも粘りの少ない納豆を製造できることが確認された。

6.2 納豆をかき混ぜた際の最高粘度比較

IBARAKI ℓst-1 で製造した納豆をかき混ぜた際の最高粘度は宮城野菌で製造した納豆に比べ 65 % 以上低下したことが明らかになった。

このことから、宮城野菌で製造した納豆に比べて、IBARAKI ℓst-1 で製造した納豆は、捌けが良く、取り扱いや食べるのが容易であることが示唆された (表 3)。

6.3 納豆の硬さ比較

宮城野菌で製造した納豆と IBARAKI ℓst-1 で製造した納豆の硬さの平均値 (表 4) を統計的に処理して P 値 0.05 で t 検定を行うと、0.119 となる。この値は 0.05 (P 値) より大きいことから、両者の間で納豆の硬さには有意差がない。つまり、二つの菌株を用いて納豆を製造すると、ほぼ同じ硬さに仕上がる事が測定データから確認された。

6.4 納豆の色の比較

両者の納豆はほぼ同じ色合いになることが、データから示された (表 5)。

6.5 納豆の基本栄養成分、ビタミン K 及びポリアミン含量比較

納豆に含まれる基本栄養成分、ビタミン K 及びポリアミン成分の分析結果を表 6 から表 8 に示す。基本栄養成分、ビタミン K は IBARAKI ℓst-1 及び宮城野菌で製造した納豆で、ほとんど差がなく栄養的に相違ないことが確認された。ポリアミンを一切含まない合成培地で納豆菌を培養し、培養液中に含まれるポリアミン含量を分析した場合に

表6 納豆の基本栄養成分比較 (100g当たり)

	エネルギー (Kcal)	水分 (g)	たんぱく質 (g)	脂質 (g)	炭水化物 (g)	灰分 (g)
IBARAKI <i>l</i> st-1	201	58.6	16.2	9.7	13.2	2.3
宮城野菌	197	59.2	16.3	9.5	12.7	2.3

表7 納豆のビタミンK含量比較 (単位: μg /納豆100g)

菌種\ビタミンK種類	ビタミンK ₁	ビタミンK ₂	
	フィロキノン	メナキノン-4	メナキノン-7
IBARAKI <i>l</i> st-1	22.1 \pm 0.8	3.6 \pm 0.4	1101 \pm 38
宮城野菌	22.5 \pm 0.2	1.5 \pm 0.0	1027 \pm 14

表8 納豆のポリアミン含量比較 (単位: μg /乾燥納豆g)

ポリアミン種類\菌種	IBARAKI <i>l</i> st-1	宮城野菌
ブレスシン	2.4 \pm 0.1	2.4 \pm 0.1
スペルミジン	30.6 \pm 0.2	30.6 \pm 0.7
スペルミン	7.9 \pm 0.1	7.3 \pm 0.2

表9 納豆の官能検査結果1

	IBARAKI <i>l</i> st-1 で製造した納豆	宮城野菌で 製造した納豆
1. 菌の被り 悪い やや悪い 普通 やや良い 良い 1 2 3 4 5	2.70 \pm 0.67	3.00
2. 溶菌状態 多い やや多い 普通 やや少ない 少ない 1 2 3 4 5	3.47 \pm 0.74	3.00
3. 豆の割れ つぶれ 多い やや多い 普通 やや少ない 少ない 1 2 3 4 5	3.47 \pm 0.76	3.00
4. 豆の色 悪い やや悪い 普通 やや良い 良い 1 2 3 4 5	3.23 \pm 0.75	3.00
5. 香り 悪い やや悪い 普通 やや良い 良い 1 2 3 4 5	3.23 \pm 0.93	3.00
6. 硬さ 硬い やや硬い 普通 やや軟らかい 軟らかい 1 2 3 4 5	3.27 \pm 0.97	3.00
7. 味 悪い やや悪い 普通 やや良い 良い 1 2 3 4 5	3.13 \pm 0.92	3.00
8. 糸引き 弱い やや弱い 普通 やや強い 強い 1 2 3 4 5	1.47 \pm 0.55	3.00
9. 総合評価 悪い やや悪い 普通 やや良い 良い 1 2 3 4 5	3.05 \pm 0.87	3.00

は、スペルミンは検出されない。

納豆菌が主に生成するのはスペルミジンである。表8の結果を見ると、宮城野菌に含まれるスペルミジン含量は乾燥納豆1gあたり、30.6 \pm 0.7 μg であるのに対し、IBARAKI *l*st-1では30.6 \pm 0.2 μg である。表6から表8に示すように、納豆に含まれる栄養成分においても、IBARAKI *l*st-1は市販スター株である宮城野菌に引けをとらないことが明らかになった。

6.6 納豆の官能検査結果

5点法による納豆の評価結果及び三者択一による納豆の評価結果として集計したものを、それぞれ表9及び表10に示す。表9を見ると、糸引きの項目の評価結果は、宮城野菌の3点に対してIBARAKI *l*st-1は1.47点であり、両者の違いが認識されていることが明らかになった。

また、糸引き以外の項目では、菌の生え具合を示す「菌の被り」の項目を除き、宮城野菌と比較して遜色ないか、むしろ良い評価結果が得られた。また、表10を見ると、糸引きについて、38人中38人全員が宮城野菌の方が強いと回答した。つまり100%の人がIBARAKI *l*st-1の方が糸引きが弱いと感じられ、宮城野菌との間に差があることが明らかになった。

また、食べやすいのがどちらかという質問については、宮城野菌で製造した納豆であると回答した者の数が6人であるのに対し、IBARAKI *l*st-1の方が食べやすいと回答した者は、その4倍の24人であった。

また、その食べやすさと扱いやすさから介護食として適しているのはどちらかという質問に対し、38人中32人の人がIBARAKI *l*st-1の方が適していると回答した。このよ

表10 納豆の官能検査結果2

	IBARAKI ℓst-1 で製造した納豆(人)	宮城野菌で製造した 納豆(人)	どちらも 違いがない(人)
味が良かったのはどちらか?	13	14	11
香りが良かったのはどちらか?	11	9	18
糸引き強かったのはどちらか?	0	38	0
食べやすかったのはどちらか?	24	6	8
総合的に好ましいのはどちらか?	14	16	8
介護食として適しているのはどちらか?	32	5	1

うに、表9及び表10の評価結果から、IBARAKI ℓst-1を用いて製造した納豆は、味を含めた品質では従来の納豆と比べて何ら遜色なく、糸引きが弱いという点のみで異なることが分かる。

IBARAKI ℓst-1を、納豆製造に繰り返し使用しても安定して糸引きの少ない納豆が得られるようにするため、大元の株を凍結等により保存し、そこから拡大培養することで継代培養による品質変化が起こらないように努めた。

また、企業の製造現場で納豆の糸引きの少なさを維持するには、製造工場内で他の納豆菌が混入しないように留意する必要がある。

7 研究成果の展開

7.1 産学官の連携

茨城県工業技術センターは、納豆菌株 IBARAKI ℓst-1により作成した納豆を海外へ販売したい県内納豆メーカーを、いばらき成長産業振興協議会を通じて募った。

具体的には、(株)つくば研究支援センターに所属するコーディネーターが、糸引きの少ない納豆の製品化に関心をもつ企業への働きかけを行い、茨城県工業技術センターは、(株)つくば研究支援センターと連携して、賛同の得られ

た企業への IBARAKI ℓst-1の頒布と製造上のアドバイスをを行った。

茨城県産業政策課は、筑波大学芸術専門学群でビジュアルデザイン、パッケージデザインを研究されている原 忠信准教授にロゴデザインをお願いした。また茨城県農林水産部事業において食のアドバイザーを務めているフードアナリスト藤原 浩氏にブランド戦略への助言をお願いし、茨城県日立市出身でフランス、イタリアで修業し、都内のレストラン HATAKE AOYAMA のオーナーシェフである神保佳永氏に豆乃香料理のレシピ開発をお願いした。

茨城県産業政策課と茨城県工業技術センターは、糸引きの少ない納豆を製造できる納豆菌株の知財化や海外の展示会への出展、県内納豆メーカー間の意見の相違があった際の本事業の進め方などを随時打ち合わせしながら以下のような産学官連携体制を構築した(図5)。

この産学官連携体制の中で、筑波大学の原准教授により、「豆乃香」という統一ブランド名と統一ロゴが考案された(図6)。「豆乃香」の定義は、「IBARAKI ℓst-1を使用している納豆であること」とした。

さらに、加工食材としての利用ということで、神保シェフにより、豆乃香を利用したメニューも考案された(図7)。

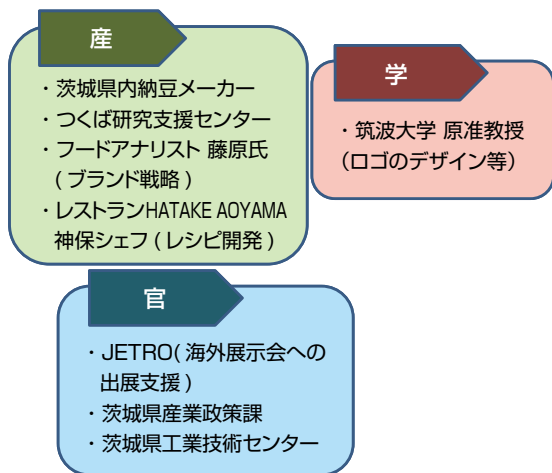


図5 産学官の連携体制



図6 豆乃香の統一ロゴ

7.2 国内外の展示会への出展

いばらき成長産業振興協議会では、IBARAKI ℓ st-1 を用いて製造した納豆を新しい食材として販売してゆくプロジェクトを「豆乃香プロジェクト」と名付けて、次の①～④の展示会へ出展した。

①Sirha2015（第17回シラ国際外食産業見本市）

2015年1月24日～28日にフランスのリヨンで開催（図8）。

②FOODEX JAPAN2015

2015年3月3日～6日に幕張メッセで開催（図9）。

③アヌーガ2015 世界食品メッセ

2015年10月10日～14日にドイツのケルンで開催（図10）。

④FOODEX JAPAN2016

2016年3月8日～11日に幕張メッセで開催。

出展後、一部は商談が進行中である。

我々は、事情により国内展示会のみ参加し、海外展示会には参加しなかったが、海外展示会に参加した関係者の話を総合すると、フランスでもドイツでも用意した豆乃香試作品は、現地の人に好評で、多くの輸入商社やレストラン、食品メーカーの方に試食いただいた。

ただ、外国人は、日本人のように納豆をご飯とともに食べるという習慣がないことや、食品流通におけるコールドチェーンが日本国内ほど完備されていないため、納豆製品

の海外販路開拓には、「ディップソース、ペースト、ドレッシング等の新しい納豆製品の開発と食べ方の提案、そして、納豆製品が常温にさらされた場合の対応や賞味期限延長を図るための技術開発が必要。」である。

現在、茨城県工業技術センターでは、このような情勢を踏まえ、引き続き県内納豆企業への技術的支援を行っている。また、納豆製品の賞味期限延長が可能となる新規納豆菌の育種研究にも取り組んでいる。

7.3 糸引きの少ない納豆を作ることのできる納豆菌の知的財産化

糸引きの少ない納豆を作ることのできる納豆菌をIBARAKI ℓ st-1 と命名し、「発明の名称：糸引性低下納豆菌株及び該納豆菌株による納豆の製造方法と納豆」という内容で特許を取得した（特許第 5754009 号、2015 年 6 月 5 日登録）。

この納豆菌変異株は、特許出願時に独立行政法人製品評価技術基盤機構 特許微生物寄託センターに、受託番号 NITE P-01836 で寄託された。

IBARAKI ℓ st-1 は、2017 年 8 月 1 日現在、豆乃香プロジェクト参画県内企業 6 社に対して当センターから提供している。



図7 豆乃香料理の一例

ブルdeナットー（発酵バターに納豆を加え、エシャロット、わさび、昆布茶等を隠し味に使用した料理）



図9 FOODEX JAPAN2015 出展ブース



図8 Sirha2015 豆乃香ブースを訪れる人たち



図10 アヌーガ2015 豆乃香製品の試食の様子

7.4 研究成果のマスコミ報道等

納豆の海外展開を県が支援していることをアピールするため、県産業政策課が県内在住外国人向けの納豆料理試食会を開催した。その試食会について県内マスコミ各社に取材を打診したことや、地域話題を探していたNHK水戸放送局の取材がきっかけとなり、豆乃香プロジェクトはNHK総合テレビやテレビ東京をはじめとする民放各局のニュース番組等で報道されるなど、マスコミにも注目されるようになった。NHKからは、関東甲信越地域放送文化賞を頂いた。これは、関東甲信越地域で年間を通して地域文化・生活・産業の分野での発展に功績をあげた人（団体）、またNHKの放送等諸活動に貢献した人（団体）を顕彰するもので、茨城県勢としては4年ぶりの受賞であった。このように、豆乃香プロジェクトは世間の高い関心と評価を頂いた。

茨城県工業技術センターは、豆乃香製品の販路拡大の一助になるように当センターを取材したマスコミ関係者に対し、「工業技術センターばかりでなく県内の豆乃香製造企業も報道して欲しい」旨、口頭で伝え、「豆乃香製造企業リスト」を手渡した。

その後、豆乃香製造企業もしばしばマスコミで取り上げられたが、企業全社が平等に報道されずに特定の企業に偏った報道がなされてしまうという問題も生じた。県行政サイドと民間企業複数社が連携してプロジェクトを立ち上げる際は、マスコミ報道が特定の企業に偏らないようにマスコミ関係者の理解と協力を得ることが今後の課題である。



図11 豆乃香プロジェクト参画企業の豆乃香
各豆乃香メーカー HP より引用

7.5 豆乃香プロジェクト参画企業の製品開発

豆乃香は、2017年8月1日現在、(株)朝一番、金砂郷食品(株)、(有)菊水食品、(有)トーコーフーズ、(株)ひげた食品(株)の5社より製品化されており、各社HPまたは茨城マルシェ(都内の茨城県アンテナショップ)にて購入可能である。原料の大豆、製法及び包装容器を各社で工夫して、それぞれ差別化を図っている(図11)。

豆乃香は、糸引きが少ないことにより、ペースト状にすり潰すなどの加工がしやすいメリットがある。このメリットを活かして豆乃香プロジェクト参画メンバーは豆乃香の加工品開発に取り組み、野菜等につけて食べる豆乃香のディップソース、豆乃香を生地に練り込んだ豆乃香ワッフルやパンに塗って食べるスプレッドタイプの豆乃香ペースト、豆乃香のドレッシング等を開発した(図12)。

現在もプロジェクトメンバーは新たな加工品開発に取り組んでおり、当センターでは、細菌検査を含めた品質の評価等により開発の支援を行っている。



図12 豆乃香を使用した加工品事例
各豆乃香メーカー HP より引用

その他にも、他の業種とのコラボにより、新たな加工品が開発されている。ラーメン店による豆乃香入りの餃子の開発、菓子メーカーによる豆乃香を使用したチョコレートケーキ、マドレーヌ、スコーン等の開発も行っている。また、2015年10月には茨城県坂東市の学校給食で豆乃香入りのドライカレーを提供する取り組みもなされた。このように、豆乃香の利用法は各方面に広がりつつある。

豆乃香プロジェクトは県内企業納豆製品の国内市場開拓には効果を上げたが、海外市場開拓に於いて効果を上げるには、まだまだ行政支援が必要である。現在、茨城県産業政策課では、海外取引の経験が豊富な民間企業出身者を雇用し、パリに駐在させ、納豆をはじめとする県産食品について現地バイヤーへの働きかけを行っている。

参考文献

- [1] 吉本巻男, 吉本友親: 納豆の製造方法および納豆, 特開2011-92027, 2009.10.27出願 (2011).
- [2] 太田敏行: 納豆, 特開平7-255408 (1995).
- [3] 森文男: 納豆加工食品, 特開2001-128 (2001).
- [4] M. Ashiuchi, C. Nawa, T. Kamei, J.J. Song, S.P. Hong, M.H. Sung, K. Soda and H. Misono: Physiological and biochemical characteristics of poly gamma-glutamate synthetase complex of *Bacillus subtilis*, *Eur. J. Biochem.*, 268 (20), 5321-5328 (2001).
- [5] I.L. Shih, Y.T. Yu, C.J. Shieh and C.Y. Hsieh: Selective production and characterization of levan by *Bacillus subtilis* (Natto) Takahashi, *J. Agric. Food Chem.*, 53 (21), 8211-8215 (2005).
- [6] G.A. Birrer, A.M. Cromwick and R.A. Gross: Gamma-poly(glutamic acid) formation by *Bacillus licheniformis* 9945a: physiological and biochemical studies, *Int. J. Biol. Macromol.*, 16 (5), 265-275 (1994).
- [7] 久保雄司, 齋藤勝一, ダニエル ホルヴェック, 舟根和美, 中川力夫, 木村啓太郎: 菌体外分解酵素が増強された納豆菌 *rpoB* 変異株による黒大豆納豆の製造, *日本食品科学工学会誌*, 60 (10), 577-581 (2013).
- [8] 早田邦康: 高ポリアミン食による哺乳類のアンチエイジング, *日本食品科学工学会誌*, 61 (12), 607-624 (2014).
- [9] 早田邦康: がん病態と栄養成分-ポリアミン, 脂肪酸, ポリフェノールについて-, *静脈経腸栄養*, 26 (5), 1211-1220 (2011).
- [10] 安本教傳, 安井明美, 竹内昌昭, 渡邊智子: 五訂増補 日本食品標準成分表分析マニュアル, 建帛社, 9-58 (2006).
- [11] 木内幹: 納豆の研究法, 恒星社厚生閣, 154-158 (2010).

執筆者略歴

久保 雄司 (くほ ゆうじ)

茨城県工業技術センター地場食品部門主任。2004年東北大学農学部卒業。2006年東北大学大学院生命科学研究所博士前期課程修了。同年、茨城県職員(化学職)として採用され、茨城県工業技術センターに配属。納豆を中心に食品の試験研究事業を担当する。2014年、工業技術センターで取り組んだ納豆に関する研究成果をまとめ、東京農工大学大学院連



合農学研究科にて、博士(農学)を取得(論文博士)。現在に至る。(著書)大豆の栄養と機能性(第3章大豆加工食品の機能性)、株式会社シーエムシー出版、2014年。(受賞歴)関東甲信越地域放送文化賞(日本放送協会2016年)。

中川 力夫 (なかがわりきお)

茨城県工業技術センター首席研究員兼地場食品部門長。1986年東京大学農学部農芸化学科卒業、農学士。同年、茨城県職員(化学職)として採用され、同県水海道保健所(現常総保健所)の食品衛生監視員に任命される。1988年より県林水産部営農再編対策課、米の減反政策や不良土壌改善対策関連補助金を担当、1993年より農業総合センター園芸研究所流通加工研究室、冷凍保存梅果実からの梅干し製造や果実のCA貯蔵試験等を担当、1997年より工業技術センター加工食品部(現地場食品部門)、レンコン変色防止、大豆品種別豆腐加工適性比較、低アミロース米の煎餅製造試験等を担当し、2003年主任研究員、2007年地場食品部門長、2014年より首席研究員兼地場食品部門長。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(池上 敬一: 産業技術総合研究所)

この論文は、多岐にわたる産・学・官関係者が連携し、バイオ技術やマーケティング、調理技術を融合することで、地場産業である納豆の海外展開に取り組んだ事例について述べています。すでに多くの企業で商品化まで進んでいることは、中心となった公設試研究者と産学の関係者らがイノベーションの「シナリオ」を共有して取り組んできたことを裏書きしており、シンセシオロジー誌にて論じられるべき事例と考えます。

コメント(湯元 昇: 国立循環器病研究センター)

納豆の海外展開のため、糸引きの少ない納豆を開発し、産学官が連携してブランド化した過程が記載されています。これまでの国内での食習慣にこだわらず、明確なシナリオのもと、多くの企業が製品化するところまで進んでいるものであり、シンセシオロジー誌の研究論文としてふさわしいものと判断します。

議論2 シナリオの明確化について

コメント(湯元 昇)

シンセシオロジー誌においては、シナリオ(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、統合したのかのプロセス)についての著者の独自性が研究論文としての要件となっています。現在の原稿では、全体像は把握できますが、著者がシナリオに基づいて、どのように要素を構成していったかが少し理解しにくい構成になっています。シナリオのフローチャートを作成し、要素技術をどのように構成したかが明確になるようにして頂けないでしょうか。また、要旨の部分も、シナリオを強調した記述にして頂けないでしょうか。

回答(中川 力夫)

要素技術をどのように構成したかが明確になるよう、シナリオのフローチャートを作成し図1として加えました。また、要旨についても、「納豆菌の育種」や「育種した納豆菌で製造した納豆の特性評価を行ったこと」などを要約して加筆し、さらに海外展開のためのシナリオを強調した記述に改めました。

議論3 連携体制の構築について

コメント(池上 敬一)

多岐にわたる機関や人材が連携した体制が構築されたことが述べられています。このような有機的な連携体制の構築は、本誌の読者

にとって非常に興味深いことであると考えます。どのように連携体制を構築し、またどのようにして「シナリオ」を共有したのか、加筆をお願いします。

回答（中川 力夫）

連携体制の構築について、公開可能な範囲で加筆しました。

議論4 継代培養と特性評価について

質問（湯元 昇）

今回得られた納豆菌は継代培養を繰り返す中で得られたものですが、繰り返し使用の中での安定性は如何でしょうか。また、官能試験における結果のばらつきはどの程度だったのでしょうか。

回答（中川 力夫）

今回得られた糸引きの少ない納豆菌の繰り返し使用においては、大元の株を凍結等により保存して、そこから拡大培養することで、継代による品質変化が起こらないように努めています。安定性については、この論文にも簡単な説明を加筆しました。また、官能試験結果のばらつきについては、表9中に標本標準偏差（ σ_{n-1} ）の値を追記しました。

コメント（池上 敬一）

官能試験を行った方々は納豆産業界関係者でしょうか。また、そもそも納豆を好んで食する人たちでしょうか？一般的な官能試験と比較しても個人の嗜好性が影響しやすい事例であると思いますので、試験者の属性を知りたいと思いました。

回答（中川 力夫）

納豆菌の育種研究段階では、県内納豆メーカー関係に官能試験をしていただきましたが、5.6節の官能試験は以下の職員がパネラーとなって実施しました。

【官能試験のパネラー】

- ・国立研究開発法人 農研機構 食品研究部門の職員
- ・茨城県内の納豆メーカー関係者
- ・茨城県産業政策課職員
- ・著者の知人の一般の方々

パネラーに対して納豆の好き・嫌いは質問していませんが、パネラーは茨城県内で生活している人たちなので、「納豆好きの人と納豆は好きでも嫌いでもないという人が混在した状態」だったと思います。

議論5 今後の取り組みについて

コメント（池上 敬一）

多くの見本市や展示会に出展したことが紹介されていますが、一口に海外と言っても、国や民族によって嗜好は異なるのではないかと想像します。出展によって得られた感触や、その感触を商品開発にどうフィードバックしたのか、本誌読者の興味を惹く論点だと思しますので、加筆をお願いします。

コメント（湯元 昇）

最後のところで、「豆乃香の利用は各方面に広がりつつある」と記述されていますが、今後、これまでとは異なるような活動をもしお考えでしたら、可能な範囲で記述して頂ければと思います。特に、展示会での懇談や色々な製品をつくる中で、ブランド化や国際展開を一層進めるために必要な活動があれば記述をお願いします。

回答（中川 力夫）

ビジネスの機微に触れる部分でもあり、詳細を明らかにすることはできませんが、出展の感触や、別事業の予算による「賞味期限延長が可能となる納豆菌の育種研究」への取り組みといった技術支援の方向性については7.2節に、橋渡し先の企業における取り組みや行政支援については7.5節に加筆しました。

海底の地震・津波堆積物

— 巨大地震・津波による海底の擾乱と 擾乱記録を用いた巨大地震・津波履歴の解明 —

池原 研*、宇佐見 和子

巨大地震や津波は海底にも擾乱を与える。2011年東北地方太平洋沖地震以降の海底調査はこの地震と津波が沿岸域から海溝底に渡る広い海底に大きな影響を与えたことを示した。地震や津波による擾乱によって発生した混濁流から堆積したタービダイトの形成も認められている。タービダイトが堆積物中に保存される環境であれば、海底堆積物中のタービダイトを用いた巨大地震や津波の発生履歴の検討が可能である。混濁流の発生場所や発生原因、流下経路の検討やタービダイトを用いた地震・津波の発生履歴研究用の試料の適切な採取場所の選択にはその基礎となる海底表層堆積物データや試料が有用であり、網羅的な海洋地質情報の整備が重要である。

キーワード: 海底堆積物、海底環境、擾乱、地震、タービダイト、海洋地質図

Submarine earthquake- and tsunami-induced event deposits

—Disturbance of the sea floor by huge earthquakes and their related tsunamis,
and the use of disturbance records in marine sediments for the history of past huge earthquakes and tsunamis—

Ken IKEHARA* and Kazuko USAMI

Huge earthquakes and tsunamis have agitated and disturbed the sea floor. Many marine geological surveys after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake indicated large disturbances of the sea floor by the earthquake and its related tsunami across a wide area from the coastal to the Japan Trench floor. Resuspension of marine surface sediment by the earthquake and tsunami might generate turbidity currents. Deposition of turbidites, which are deposits from turbidity currents, has been recognized. Therefore, earthquake- and tsunami-induced turbidite is a potential tool for understanding the history of past huge earthquakes and tsunamis. For the estimation of the origin and evolution of earthquake- and tsunami-induced turbidity currents and the selection of suitable locations for turbidite paleoseismology, marine geological information such as samples and characteristics of surface sediments and their depositional mode is useful and important.

Keywords: Marine sediment, sea floor environments, turbulence, earthquake, turbidite, marine geological map

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）とそれに伴う巨大津波では、東北地方太平洋沿岸を中心とした東日本～北海道の沿岸域に大きな被害が発生した。また、想定外と言われたこの地震・津波も地層記録から見るとその先例があったことが陸域の津波堆積物からわかっており^[1]、地層記録の解読が巨大地震・津波の履歴の理解に重要であることが改めて認識された。一方で、地層記録の解析結果が防災計画に十分に活かされていなかった問題点も指摘された^[2]。陸上の津波堆積物の一部には通常時や嵐の時の波浪では移動不可能な水深域に由来する粒子が入っていることがあり^[3]、津波により海

底堆積物が擾乱され、陸上に打ち上げられることがあることは間違いないと考えられる。実際、後述する2011年以降の東北沿岸から沖合域の調査観測の結果によれば、仙台湾から三陸、八戸沖の沿岸・陸棚域をはじめ、三陸沖前弧斜面域から日本海溝底まで広い範囲で海底堆積物の再懸濁や再移動・再堆積現象が報告されている^[4-9]。このことは、このような再堆積現象が残される場であれば、海底においても陸上の津波堆積物と同様に、過去の巨大地震・津波が地層記録として残され、履歴解読に利用できる可能性を示唆している。そして実際に日本海溝底堆積物の記録から過去の地震発生履歴が陸上の津波堆積物記録との比較を踏まえて検討されてきている^[7]。

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7

Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan * E-mail: k-ikehara@aist.go.jp

Original manuscript received September 14, 2017, Revisions received November 16, 2017, Accepted November 17, 2017

一方、海岸から沿岸域は構造物の建設や漁業、レジャー等に人間が利用するなど、人間生活に密接に関係する場である。さらに、より沖合の陸棚から上部斜面の水深帯でも漁業活動は行われており、海岸から沖合までの海底環境が地震・津波によりどのように変化するかを知っておくことは地震・津波がこれらの人間活動に影響を与えるかの推測に重要である。しかし、海底環境がある地震・津波イベントによってどのように変わったか、またその後どう回復したかを具体的に示した例は数少ない。

ここでは、2011年東北沖地震・津波後の研究の現状を踏まえ、地震・津波による海底の擾乱やそれに伴う海底堆積物の再懸濁・再堆積の過程をまとめる。そして、地震時に形成される堆積物（以後、地震イベント堆積物と呼ぶ）を用いた地震発生履歴研究の現状について概観した後、これらをより正確に理解するための基礎情報としての海底堆積物情報の整備の重要性を指摘したい。その上で、海底堆積物中の地震・津波記録を用いた履歴研究で今後行うべきことに言及する。

2 地震・津波による海底堆積物の再移動・再懸濁・再堆積と海底環境の変化

地震による海底での大規模な土砂輸送現象の存在は、北米大西洋岸での1929年グランドバンクス地震（マグニチュード7.2）の際に明らかとなった。この地震では海底斜面に複数敷設された海底ケーブルが次々に切断され、海底斜面崩壊に伴う混濁流の発生が推定された^[10]。混濁流とは土砂粒子が混ざった海水の流れの乱流で粒子を維持しながら重力的に斜面を流れ下る重力流^[11]である（図1A）。グランドバンクス地震での混濁流の流速は、海底ケーブル間の距離と切断時間の差から斜面域で最も速く28.4 m/s、沖合の深海平坦面で8.3～6.2 m/s程度と計算されている^[10]。そしてその後、混濁流の流下した範囲からタービダイト（混濁流から堆積した堆積物：図1B）が確認され、地震に伴う海底斜面の崩壊→混濁流の発生と流下→タービダイトの堆積、という一連の現象が発生したことが明らかにされた^[12]。同様な地震時における海底ケーブルの連続的な破断事故は複数報告されており^{[13][14]}、2011年東北沖地震の際にも発生している^[15]。また、地震直後の海底調査において震源域周辺の海底面にタービダイトの堆積が報告される例も多く^{[16][18]}、タービダイトの形成原因の一つに地震があることは明らかである。

2011年東北沖地震・津波は海底に大きな影響を与えたことが多くの報告から明らかになっている。まず、津波と地震に伴う地殻変動による海岸線の変化は目視や空中写真、衛星画像から容易に認識でき、地震直後からマスコミ

を含めて多くの報告がなされている。海岸に続く沿岸域の地形変化は仙台湾において浅深測量結果から推定され、海岸域と合わせた堆積物の堆積・侵食量の地理的分布が推定された^[19]。海底堆積物の採取結果は、2011年東北沖地震・津波起源と考えられる堆積物が堆積域と推定された場所で厚く、侵食域と推定された場所で薄いことを示し、浅深測量の結果と堆積物採取の結果が基本的によく一致することがわかった^[20]。仙台湾南部でも高分解能音波探査記録と堆積物コアから海底の津波堆積物の存在が報告されている^[21]。一方、三陸のリアス式海岸を構成する内湾では気仙沼湾の湾口海底において津波による堆積地形の形成が報告されている^[22]ほか、広田湾、越喜来湾、唐丹湾等において津波堆積物の形成があったことがわかっている^[23]。また、女川湾のような泥質の底質からなる湾では津波堆積物は明瞭な砂層となって存在し、これらが堆積後の底生生物の活動により破壊されていく様子が確認されている^[24]。同様な泥層の中に挟在する砂層は仙台湾北部においても2011年の地震以前に報告され、嵐起源の砂層とされてきた^[25]。しかし、2011年以降の調査結果を踏まえると、少なくともその一部は津波起源の砂層である可能性が高い。仙台湾外側の陸棚では、混濁流の繰り返しにより形成された堆積層が報告されている^[6]。ここで確認された一連の細粒タービダイトは、その下部がセシウム134を含まない細粒タービダイト、上部がセシウム134を含む細

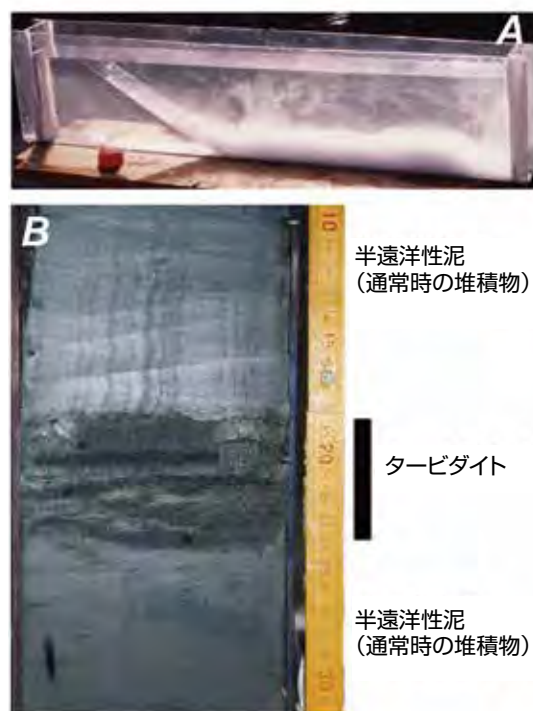


図1 水槽で作られた混濁流(A)と海底堆積物コア中に見られる混濁流からの堆積物であるタービダイト(B)

粒タービダイトの2階建構造からなっており（図2A、B）、下部は地震・津波直後、上部は福島第一原発事故後の地震・津波から少なくとも数日後に堆積したものと考えられている。このことは、詳細は不明であるが地震・津波後の数日あるいは数十日に渡って仙台湾内は堆積物が懸濁した環境下であり、本震に引き続き余震等でも混濁流が発生したことを示唆する。浅海域における堆積物の移動・再堆積現象は震源域に近い仙台湾や三陸沖に限らない。Toyofuku *et al.*^[8] は八戸沖において水深 200 m 付近まで堆積物の再移動現象が起きたことを報告した。津波は広範囲に波及するので、その海底への影響域も広範囲に渡ったと推定できる。三陸沖では陸棚付近の堆積物がより沖合の水深約 900 m の深海域まで輸送されたことが堆積物中に含まれる底生有孔虫の分析から明らかになった^[26]。興味深いのは、ここでのタービダイトも2階建構造を有し、下位のタービダイトは近傍のほぼ同じ水深帯を起源に持つのに対し、上位の最表層部分のタービダイトのみが浅海の底生有孔虫を含むということである。そしてこれは、下位のタービダイトは地震による擾乱により、上位のタービダイトは引き続き津波による浅海域での擾乱により形成されたものと解釈された。すなわち、一連に見える堆積層であっても地震とそれに引き続き津波という異なる複数の堆積プロセスから形成されたものであることを示す。このような浅海域からもたらされた混濁流は海底に設置された観測機器を押し流し、また測器中に泥を混入させるなどでトラブルを引き起こした^[5]^[27]。このように震源域近傍だけでなく、津波が遡上した広範囲の陸域の沖合の浅海域に擾乱を起こすのが、巨大津波の特徴と言える。

2011年東北沖地震・津波の影響は浅海域にとどまらない。Noguchi *et al.*^[28] は前弧斜面域で底層水が濁っていることを報告した。Arai *et al.*^[5] は前弧斜面域の水深約 1000 m で津波起源の混濁流の流下を報告し、Ikehara *et al.*^[29] は外側陸棚から中部斜面の水深 5500 m までの広い範囲の海底表層にイベント堆積物が存在することを示した。McHugh *et al.*^[9] は三陸沖の mid-slope terrace と呼ばれる水深 5000 ~ 6000 m の平坦面上で 2011 年地震・津波起源のイベント層が広く分布することを報告した。さらに、Oguri *et al.*^[4] は日本海溝底でも底層水の懸濁を報告し、海底表層にセシウム 137 や過剰鉛 210 に富むイベント堆積物の堆積を報告した。Ikehara *et al.*^[7] もその近傍の複数の地点から同様の堆積物を確認し、その堆積構造から細粒タービダイトとして堆積したものと結論づけた。

Noguchi *et al.*^[28] や Oguri *et al.*^[4] が 2011 年の地震時に報告した地震時の底層水の懸濁現象は他の地震でも観測されている。Ashi *et al.*^[30] は 2004 年紀伊半島沖地震（マグニチュード 7.4）後の南海トラフ陸側斜面の海盆で底層水の懸濁と海底直上に懸濁物濃度が非常に高い懸濁水の存在を報告し、この厚さを 2 m 程度を推定した。この結果は、約 2 m の深さの泥水の池（泥池と呼ぶ）が海底の凹みに沿って形成され、そこから泥が沈積して地震イベント堆積物を形成するというプロセスの存在を想像させる。さらに Ashi *et al.*^[31] は凹地の面積と泥池の厚さ、凹地に泥を供給し得る斜面の面積から斜面を覆う未固結堆積物の数 cm 程度が再懸濁することでこの泥池が形成できるとした。このように地震動により海底最表層の未固結堆積物が再懸濁して混濁流を発生させることでタービダイトを形成させるプロセ

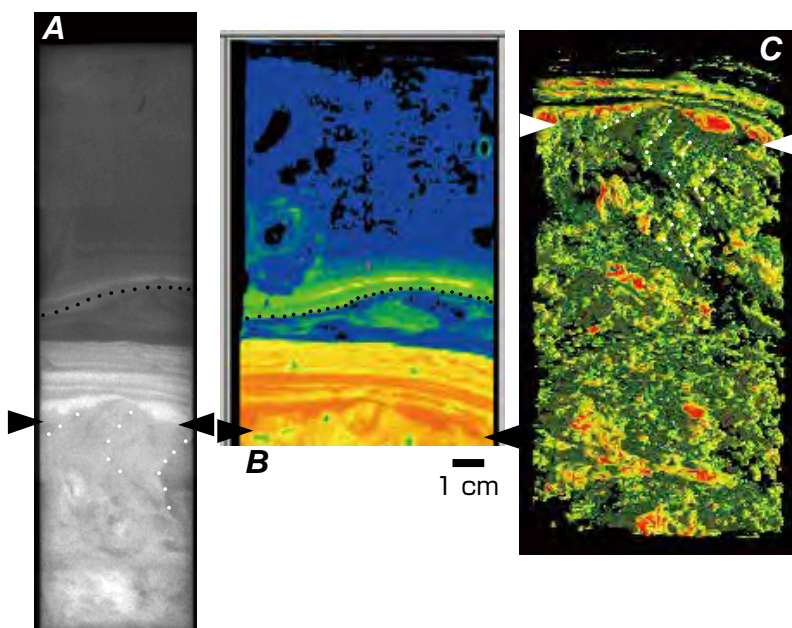


図2 仙台湾で採取された2011年東北沖地震の津波により形成された堆積物（A：軟X線透過画像、B：上部層のX線CT画像、C：下部層のX線CT画像）堆積物は二つのユニットから構成され、上部層（図の矢印より上部）は全体として上方に細粒化する細粒タービダイトからなり、これは内部侵食面（一連の堆積物中に形成される下位の堆積物を削り込む面：黒点線）を境に上部と下部の二つのタービダイトの重なりからなる。上部と下部のタービダイトもそれぞれ上方に細粒化する（砂から泥への粒度変化に対応して、図2Aでは白から黒へ、図2Bではオレンジ・黄色から青へ変化する）。下部層は生物擾乱に富む半遠洋性泥からなるがその上部には地震動による変形構造（白点線）が見られる。X線CT装置では三次元データが非破壊で得られるので地震動変形構造が容易に観察できるが、堆積構造の詳細を観察するにはやや解像度が低い。

ス（図 3B）の存在は、チリの湖のタービダイトの有機物含有量や堆積物の色調測定結果^[32]から、また日本海溝陸側斜面の放射能測定結果^[9]からも言われるようになってきている。では実際に地震動で海底堆積物の再懸濁が発生するか、については、Oguri *et al.*^[33]による三陸沖の継続的海底観察から 2011 年東北沖地震の余震（マグニチュード 7.3）の際に底層水の懸濁と懸濁した粒子の堆積現象が確認されている。図 3A に示したような海底地すべりや水中土石流の末端相としてのタービダイトの堆積は、海底地形図で確認できる多数の海底地すべり様の馬蹄形地形の存在もあり、地震時の海底の斜面崩壊が地震性タービダイトの形成に必須であるという暗黙の前提を研究者に共有させていたかもしれない。しかし表層堆積物の再懸濁プロセスによれば、地震性タービダイトの形成に大きな海底地すべりの発生は必ずしも必要ないことになる。さらに、堆積速度が地震発生頻度に対して十分に大きいならば、地震間に次の地震時に再懸濁し、タービダイトを構成する堆積物を斜面に貯めることができるので、地震の度にタービダイトを形成することが可能となる。例えば、日本海溝陸側斜面の堆積速度が 50 cm/千年の場合で平均的な地震発生間隔が 200 年であれば、地震間に斜面には 10 cm の堆積物がたまるので、次の地震でタービダイトを形成するための数 cm の表層堆積物は十分に供給できる。一方で堆積速度が 10 cm/千年の場合であれば、地震間にたまる堆積物は 2 cm であり、毎回の地震で堆積物が再懸濁すると斜面は侵食され含水率が低い古い堆積物が露出する。このため、毎回の地震によりタービダイトを形成することは困難になると推定される。

海底堆積物中の地震記録としてはこのほかに地震動による変形構造がある。地震動変形構造として報告されているものには現世の堆積物、地層を含めてさまざまなものがあ

る^[34]。Sakaguchi *et al.*^[35]は、南海トラフ陸側斜面での掘削コアの最上部に地震動によって表層堆積物が角礫状に割れる構造を報告し、過剰鉛 210 の測定から 1944 年東南海地震によって形成されたとした。Ikehara *et al.*^[6]は仙台沖の外側陸棚において、縦に配列する線状構造（図 2C）を報告し、これが地震動で形成されたと考えられている上総層群の泥岩中に観察される脈状構造^{[36][37]}と大きさや間隔が異なるものの形態や長さ/間隔比が同じであることを示した。さらに、この変形構造が 2011 年の津波によって形成されたイベント堆積物に覆われることから、2011 年の地震動によって形成されたものと考えた。このような地震動による変形構造を持った堆積物による地震発生履歴の推定はスイスの湖の堆積物でも行われている^[34]。

3 地震性タービダイトを用いた地震発生履歴の検討の現状

海底・湖底の堆積物中に挟在するタービダイトを用いた地震発生履歴の検討は世界各地で行われている^{[7][18][34][38]-[40]}。特にここ数年に発表された論文が多い。混濁流はすでに述べたような地震動や津波によるまき上げ・再懸濁以外にも暴風時のサージ状の流れ、洪水時に河川から排出されるハイパーピクナル流、暴風時の大波による繰り返し荷重による堆積物の液状化、堆積物の急激な堆積による間隙水圧の上昇、海底での地下水流出、火山噴火、地球外物質の落下等によっても生じ得る^{[39][41][42]}。したがって、堆積物中に認められるタービダイトがどんな原因で形成されたかを識別することが重要になるが、タービダイト自体の特徴から形成原因を特定するのは容易でない。河川や浅海域に起源を持つ混濁流では陸源や浅海起源の粒子を含むことが期待されるので、これらが形成原因の特定に使われることがある^[43]。例えば地震時に河口の水中三角州前置面が崩

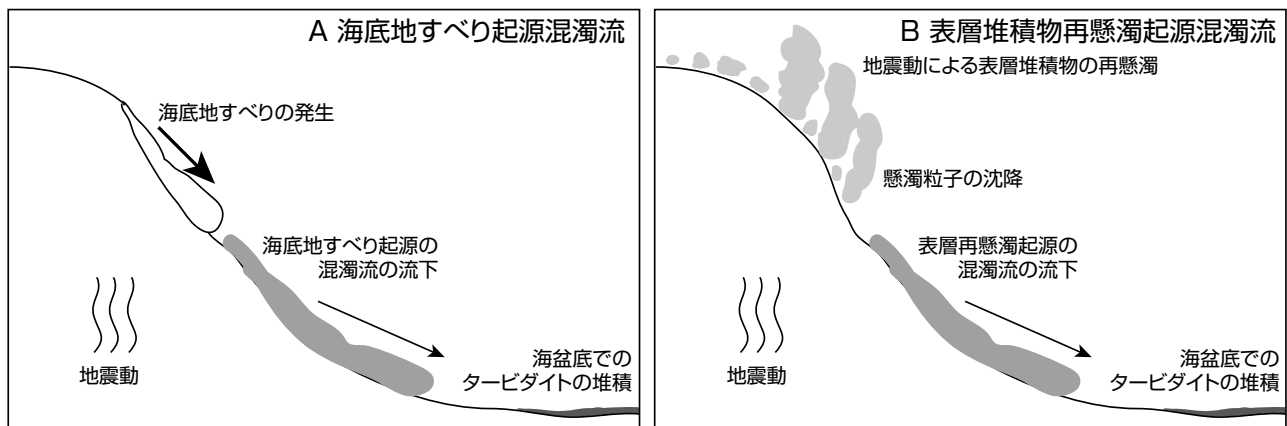


図3 地震性タービダイトの二つの堆積モデル

(A) 地震動により海底斜面が崩壊する海底地すべり起源と (B) 地震動により未固結表層堆積物がまき上がる表層堆積物再懸濁起源。

壊すれば河川堆積物とはほぼ同じ組成の粒子が流下するので、粒子組成のみから形成原因の特定は困難である。このため現状では、堆積物採取地点が河口から続く海底谷から離れている、あるいは海底谷のない孤立した凹地内にあるなど、浅海からの影響が少ない地形・堆積学的設定に基づいて、挟在するタービダイトを地震性とする場合が多い。このため、海溝陸側斜面に断層運動に伴って形成される凹地（スロープ海盆）がタービダイトによる地震発生履歴の検討のための好適地の一つと考えられている^[44]。また、ある大きさ以上の地震の度にタービダイトが形成され、それが堆積物記録として保存されることも重要な要素である。ある場所においてどのくらいの地震でどのような地震イベント堆積物が形成されるかはほとんどわかっていない。しかしすでに述べたように、表層堆積物が再懸濁・再堆積してタービダイトを形成するような場では再懸濁する堆積物量よりも十分に大きい量の堆積物が地震間に斜面域に堆積する必要がある。また、地震イベント堆積物が海底の物理的侵食や底生生物の活動による擾乱から逃れ、より確実に堆積物記録として残るためには地震間にその場所にたまる堆積物量は多くて、侵食の影響や底生生物による擾乱を受けやすい海底表面から遠ざけられる方が良い。実際には海底地形や堆積状況等からこのような場所を選定して、高品質の分析用の試料を得ることが非常に重要である^{[39][44][45]}。どこで採った試料でも地震発生履歴の検討に使えるわけではない。

タービダイト等の地震イベント堆積物を用いた地震発生履歴の推定では、適切な場所から採取された試料（海底堆積物コア）について、試料中に挟在する地震イベント層の範囲を認定し、地震イベント堆積物の堆積年代を決めることで過去の地震発生年代を決めていく（図4）^[39]。さらに同時に形成された地震イベント堆積物の平面的広がりから震源位置や破壊領域の大きさを推定する。イベント層の範囲の認定には肉眼やX線透過画像・X線CT画像で観察される堆積構造や堆積物の色調、粒度変化、バルク密度や帯磁率変化、鈹物組成や化学組成変化等が使われてきた（図4）^[39]。含有される微化石や有機物組成等も指標になる場合がある。これらを組み合わせた地震イベント層の識別がまず必須である。

海底堆積物の年代決定に最も普通なのは堆積物中の浮遊性有孔虫遺骸を用いた放射性炭素年代測定法である。他には、挟在する火山灰の既知火山灰との対比、地磁気永年変動曲線、古地磁気強度変化曲線、微化石層序、浮遊性・底生有孔虫の酸素同位体層序、堆積物中の有機物を用いた放射性炭素年代測定等がある。このうち最も年代決定精度が高いのは、噴火年代が決められている歴史噴火の火山灰であるが、それ以外は最も普通に使われる浮遊性有孔虫の放射性炭素年代測定法でも数十年（数千年前まで）から数百年（数万年前）の誤差を持つ。最近是个々の年代値の確率分布からベイズ統計理論を利用して、誤差を考慮したより確からしいイベントの年代を求める試みがな

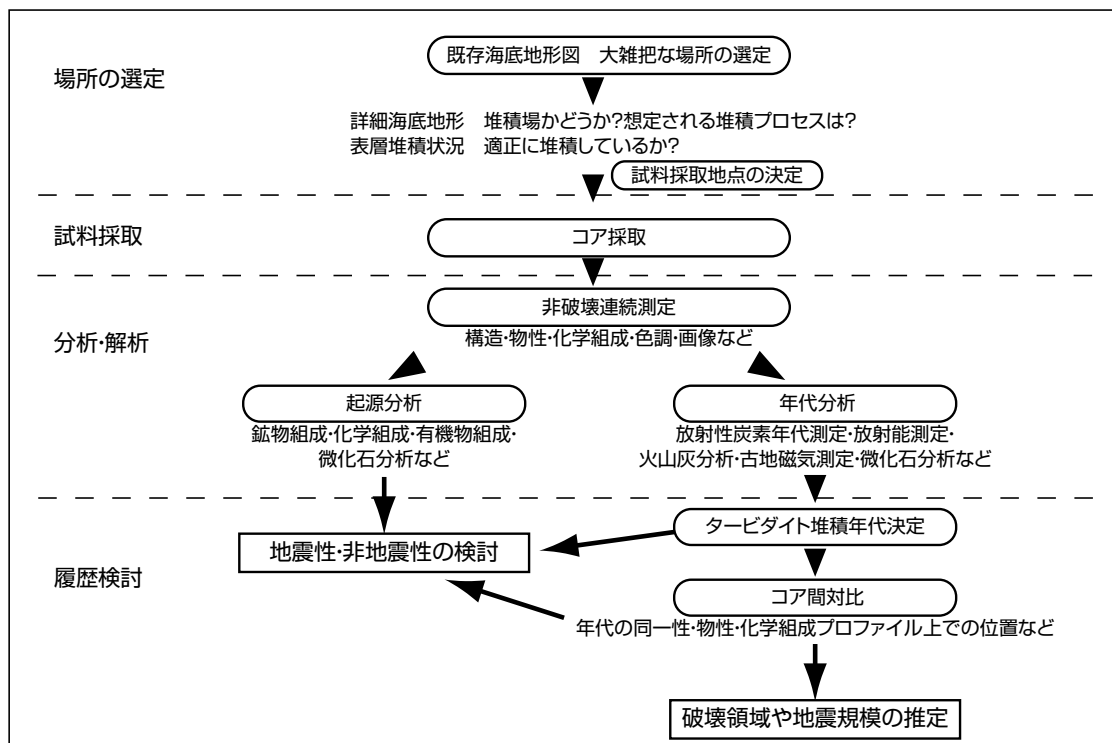


図4 地震性タービダイトを用いた地震発生履歴の推定の方法

されているが、確からしいイベントの年代を得るためにはできるだけ多くの年代測定値があるに越したことはない。

試料間のイベント層のより確からしい対比は、互いに対比される火山灰のような絶対的同時面を基準とし、放射性炭素年代を参照しつつ、地磁気永年変動曲線や色調値、物性値、元素濃度のような連続データ（プロファイル）上での位置から行うのが望ましい。そして、可能な限り高分解能の数値データを得るのが好ましい。このためには非破壊測定が有利である。現在はさまざまな非破壊分析装置があるので、これらを組み合わせた多項目高解像度のプロファイルを組み合わせて、イベントの対比を行い、これにできるだけ多数の年代目盛を加えることで地震イベントの対比と年代決定の精度の向上が期待される。

試料間での地震イベントの対比ができると、ある地震でのタービダイトの堆積範囲の見積もりが可能となる。地震直後の海底調査の結果からすると、地震性タービダイトの分布範囲は地震による破壊領域とその近傍に限られることが多いので^{[17][18]}、ある地震による地震性タービダイトの堆積域から破壊領域の位置と地震規模の推定が可能になると期待される。また、地震動変形構造には地震動の大きさとの関連が指摘されているものもある^[46]。地震性タービダイトや地震動変形構造の地理的分布から地震規模を推定す

る試みもなされている^[34]。これができると、地震発生時期だけでなく、地震発生場所と規模の推定も可能になるが、現状では地震性堆積物の正確な対比手法の確立が大きな課題である。

4 地震時に海底で起こる現象のより良い理解のためのバックグラウンドデータの重要性

地震や津波により海底で堆積物の再懸濁・再移動・再堆積が起こっていることは2011年東北沖地震後の調査研究の例ですでに示した。しかし、本当にそれが2011年の地震や津波で形成されたかどうかを明確に示すのはなかなか困難である。また、海底での堆積物の移動量を定量的に捉えることも難しい。この一つの原因は、ほとんどの海底堆積物の調査研究が大地震・津波や洪水といった地質・気象イベントの後には行われても、通常時の海底を面的に捉えるような調査が行われることが少ないことによる。イベント後の調査結果と比較できるイベント前のデータがイベント時に海底で起こる現象のより定量的な理解に重要である。

産総研は日本周辺海域の海洋地質図作成にかかる調査研究を1970年代から実施しており、その中で表層堆積図を整備してきた（図5）。表層堆積図は、表層堆積図の区

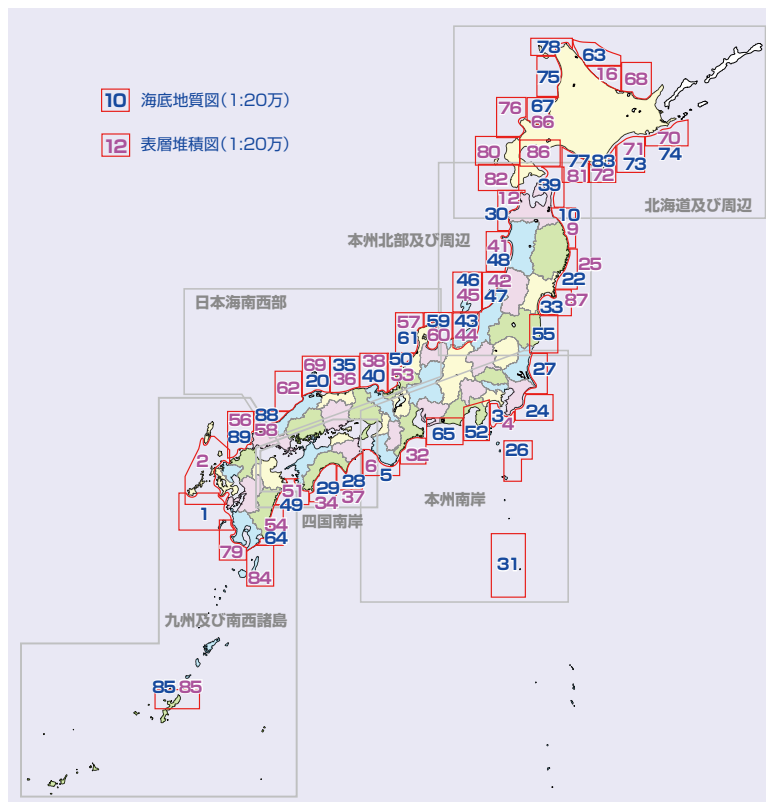


図5 産総研による海洋地質図の出版状況
赤い数字の入った枠が1/20万表層堆積図の出版済み区画。青い数字の入った枠は1/20万海底地質図、灰色枠は1/100万海底地質図の出版済み区画。産総研地質調査総合センター HPより。

画の海域面積や水深、航海日数によって間隔は変わるが、4～7マイル（7.4～13 km）程度の間隔で格子状に配置された採泥点から採取された海底堆積物の粒度や組成の分析結果に、海底写真や表層地層探査記録の解析結果を加え、単に堆積物の分布を示した底質図ではなく、過去数万年程度に渡る堆積物の移動・堆積過程も表現する地球科学図である。20万分の1の縮尺で作成される1枚の表層堆積図のためには100点程度の採泥点が設定される。通常の海洋地質調査での採泥作業は特定の目的を解明するために行うことが多いが、表層堆積図作成のための採泥では均等で画一的な海底堆積物情報の取得のため、堆積図の区画内において均等な間隔で採泥点が配置される。さらに必要に応じて、特定の現象の解明のための試料採取や補足的な採泥が実施される。このような海底堆積物情報を系統的に取得している機関は日本では産総研以外にない。

この表層堆積図のデータは地震や津波、洪水等のイベントの海底への影響評価にも利用できる。2011年東北沖地震・津波の例では、産総研が三陸から仙台湾沖で表層堆積図作成のために取得した海底写真が地震・津波前後の底生生物の変化の解析に用いられ、この海域での主要な底生生物であるクモヒトデの分布に変化があったことが明らかにされた^[47]。また2011年東北沖地震・津波前後での仙台湾の表層堆積物の比較は、仙台湾全域で津波による表層堆積物のまき上げと再堆積が起こったことを示した^[48]。その後の分析結果も踏まえると、表層堆積物は最大で10 cm以上がまき上げられ、堆積物が懸濁した状況は少なくとも数日以上は続いたと考えられる。このような地震・津波前後の表層堆積物の比較はそれぞれのイベントにおいて何が起こったか、あるいは起こらなかったかの事実を明確に指示する。これらの事実の積み重ねは今後の巨大地震・津波時に海底のどこで何が起こりそうかの推定にも利用できる^[49]と期待される。

網羅的に整備された海底堆積物試料と情報は、地震や津波起源の混濁流の発生源の推定にも利用可能である。地震・津波による海底の擾乱によりどこで発生した混濁流がどのように流下し、どこにタービダイトを堆積させたかを知ることはより正確なタービダイトを用いた地震発生履歴の検討に重要であるが、現時点では発生源と流下経路を正確に推定した例はほとんどない。混濁流は流下する過程で、混濁流中に含む堆積物粒子の一部を堆積させ、その一方で流れの先端部では表層堆積物を混濁流に取り込む^[11]。このため、混濁流から堆積したタービダイトを構成する粒子のすべてが混濁流の発生源を示すわけではない。しかし一方で、発生源の粒子をすべて失っているわけではない。これは例えば、四国沖南海トラフ底のタービダイトが

その起源である600 km以上離れた富士川の粒子を含んでいる^[49]という事実^[50]に示される。したがって、混濁流の発生源や流下経路の推定には発生源と流下経路になり得る範囲の堆積物試料や組成に関する情報が重要になる。表層堆積図作成のために網羅的に採取された表層堆積物試料については粒度や粒子組成のほか、化学組成についても分析され、公表されている^[50]。近年の粒子供給源の推定には主要元素のほか、さまざまな微量元素やそれらの同位体比が用いられている^[51]。地震や津波前のこれらの化学組成の地理的分布の情報は、混濁流の発生源や流下経路の推定にも役立つと期待される。

5 まとめと今後の展望

最終氷期最盛期以降の海水準上昇や陸域からの土砂供給による海岸線の後退や前進、海岸地形の変化の影響を受ける陸上の津波堆積物に比べて、海水準上昇の影響を受けにくい深海底堆積物はより長い時間での地震・津波発生履歴の記録媒体として期待される^[50]。このため世界各地で海底の地震性堆積物を用いた地震発生履歴の解読が試みられている。しかし、試料採取場所が水深数千 m以上になる深海底の海底の状況をしっかりと把握し、適切な場所から高品質な試料を得るのは簡単ではない。すでに述べたように、高精度・高解像度の海底地形データと地層断面記録から適切な場所を選び出すことがまず必要になる。産総研の海洋地質図とその元となるデータ・試料群はこれらの場所選定の基礎データとなる。そのためには海洋地質図作成のための調査研究の一層の充実と成果の迅速な公表が必要である。この基礎データの上で地震性堆積物採取のための調査が行われることが効率的である。また、海洋地質図作成のための日本列島主要4島周辺の調査は終了したが、その調査域（図5）は日本周辺の地震発生域と比べると陸側に偏っている。巨大地震の発生が想定される海域についての基礎的海洋地質情報の整備が今後望まれる。

高品質な試料が採取できたら、可能な限り高分解能での分析がなされる必要がある。すでに述べたように、最近発展の著しい非破壊測定装置を複数組み合わせることにより、迅速かつ高分解能のデータから、イベント層の認定が可能となっている。迅速な分析は多数の試料の分析を可能にし、より確からしいデータの構築に貢献する。産総研でもこのような分析システムを構築することが望まれる。一方で、通常時の堆積物とは異なる堆積過程から形成されたイベント層は、通常時の堆積物とは異なる粒度・粒子組成や構造を持つと考えられる。これらの違いは堆積物の見かけにも違いを生じさせるであろう。分析データだけに頼らず見かけ上の違いの有無を理解する「堆積物を見る眼」を養う

ことも重要である。「堆積物を見る眼」はたくさんのさまざまな堆積物を意識を持って見ることで養われる。また、非破壊測定 of 異常値や変化パターンを実際の試料と見比べることを繰り返すことによって経験値が増す。非破壊測定 of データだけでイベント層を捉えるのではなくそれが堆積物のどういう違いや変化によるのかを常に意識することが重要である。さらに非破壊測定 of 結果の解釈では古環境変遷等一見地震履歴の研究には関係ないように思えるところで得た知識が役に立つことも多々あった。「堆積物を見る眼」を養うには、単に一つのことの経験を積むというだけでなく、幅を広げる努力も重要である。特に若手研究者はできる限りたくさんの経験を積むことが大事だと考える。

西太平洋のプレート境界域に位置し、地震大国である日本では過去の地震や津波の発生履歴を知ることが安心・安全な生活の基礎情報であると考えている。海域の地質学的情報をしっかりと収集し、解説して、これに貢献していきたいと考えている。

参考文献

- [1] 阿部壽, 菅野喜貞, 千釜章: 仙台平野における貞観11年(869年)三陸津波の痕跡高の推定, *地震*, 43, 513–525 (1990).
- [2] 岡村行信: 西暦869年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓—古地震研究の重要性と研究成果の社会への周知の課題, *Synthesiology*, 5 (4), 234–242 (2012).
- [3] 内田淳一, 阿部恒平, 長谷川四郎, 藤原治: 有孔虫殻にもとづく遡上型津波堆積物の供給源の推定とその流体力学的検証, *第四紀研究*, 46 (6), 533–540 (2007).
- [4] K. Oguri, K. Kawamura, A. Sakaguchi, T. Toyofuku, T. Kasaya, M. Murayama, K. Fujikura, R. N. Glud and H. Kitazato: Hadal disturbance in the Japan Trench induced by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Scientific Reports*, 3, 1915, doi: 10.1038/srep01915 (2013).
- [5] K. Arai, H. Naruse, R. Miura, K. Kawamura, R. Hino, Y. Ito, D. Inazu, M. Yokokawa, N. Izumi, M. Murayama and T. Kasaya: Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geology*, 41 (11), 1195–1198 (2013).
- [6] K. Ikehara, T. Irino, K. Usami, R. Jenkins, A. Omura and J. Ashi: Possible submarine tsunami deposits on the outer shelf of Sendai Bay, Japan resulting from the 2011 earthquake and tsunami off the Pacific coast of Tohoku, *Marine Geology*, 358, 120–127 (2014).
- [7] K. Ikehara, T. Kanamatsu, Y. Nagahashi, M. Strasser, H. Fink, K. Usami, T. Irino and G. Wefer: Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years, *Earth and Planetary Science Letters*, 445, 48–56 (2016).
- [8] T. Toyofuku, P. Duros, C. Fontainer, B. Mamo, S. Bichon, R. Buscail, G. Chabaud, B. Deflandre, S. Gouber, A. Grémare, C. Menniti, M. Fujii, K. Kawamura, K. A. Koho, A. Noda, Y. Namegaya, K. Oguri, O. Radakovitch, M. Murayama, L. Jan de Nooijer, A. Kurasawa, N. Ohkawara, T. Okutani, A. Sakaguchi, F. Jorissen, G.-J. Reichart and H. Kitazato: Unexpected biotic resilience on the Japanese seafloor caused by the 2011 Tohoku-Oki tsunami, *Scientific Reports*, 4, 7517, doi:10.1038/srep07517 (2014).
- [9] C. M. McHugh, T. Kanamatsu, L. Seeber, R. Bopp, M.-H. Cormier and K. Usami: Remobilization of surficial slope sediment triggered by the A.D. 2011 Mw9 Tohoku-Oki earthquake and tsunami along the Japan Trench, *Geology*, 44, 391–394 (2016).
- [10] B. C. Heezen and M. Ewing: Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake, *American Journal of Science*, 250, 849–873 (1952).
- [11] E. Meiburg and B. Kneller: Turbidity currents and their deposits, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 42, 135–156 (2010).
- [12] D. J. W. Piper, P. Cochonat and M. L. Morrison: The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar, *Sedimentology*, 46 (1), 79–97 (1999).
- [13] B. C. Heezen and M. Ewing: Orleansville earthquake and turbidity currents, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 39 (12), 2505–2514 (1955).
- [14] S.-K. Hsu, J. Kuo, C.-L. Lo, W.-B. Doo, C.-Y. Ku and J.-C. Sibuet: Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan, *Terrestrial, Atmospheric, and Oceanic Sciences*, 19 (6), 767–772 (2008).
- [15] 白崎勇一, 伊藤啓司, 桑水流正邦, 清水健二: 海底ケーブル障害から見える海底地盤変動, *海洋調査技術*, 24 (1), 17–20 (2012).
- [16] T. Nakajima and Y. Kanai: Sedimentary features of seismoturbidites triggered by the 1983 and older historical earthquakes in the eastern margin of the Japan Sea, *Sedimentary Geology*, 135 (1-4), 1–19 (2000).
- [17] 池原研, 宇佐見和子: 1993年北海道南西沖地震の地震性タービダイトの堆積機構, *第四紀研究*, 46 (6), 477–490 (2007).
- [18] J. R. Patton, C. Goldfinger, A. E. Morey, K. Ikehara, C. Romsos, J. Stoner, Y. Djadjadihardja, Udrek, S. Ardhyastuti, E. Z. Gaffer and A. Viscaino: A 6600 year earthquake history in the region of the 2004 Sumatra-Andaman subduction zone earthquake, *Geosphere*, 11 (6), 2067–2129, doi: 10.1130/GES01066.1 (2015).
- [19] 有働恵子, 田中仁, 真野明, 武田百合子: 東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性, *土木学会論文集B2(海岸工学)*, 69 (2), I_1391-I_1395 (2013).
- [20] T. Tamura, Y. Sawai, K. Ikehara, R. Nakashima, J. Hara and Y. Kanai: Shallow-marine deposits associated with the 2011 Tohoku-oki tsunami in Sendai Bay, Japan, *Journal of Quaternary Science*, 30 (4), 293–297 (2015).
- [21] S. Yoshikawa, T. Kanamatsu, K. Goto, I. Sakamoto, M. Yagi, M. Fujimaki, R. Imura, K. Nemoto and H. Sakaguchi: Evidence for erosion and deposition by the 2011 Tohoku-oki tsunami on the nearshore shelf of Sendai Bay, Japan, *Geo-Marine Letters*, 35 (4), 315–328 (2015).
- [22] T. Haraguchi, K. Goto, M. Sato, Y. Yoshinaga, N. Yamaguchi and T. Takahashi: Large bedform generated by the 2011 Tohoku-oki tsunami at Kesenuma Bay, Japan, *Marine Geology*, 335, 200–205 (2013).
- [23] I. Sakamoto, Y. Yokoyama, M. Yagi, T. Inoue, S. Iijima, Y. Nkada, M. Fujimaki, K. Tanaka, K. Nemoto, T. Kasaya and Y. Fujiwara: Geo-environment change caused by the 3.11 tsunami disaster around the coastal area revealed by the marine geological investigation, In K. Kogure, M. Hirose, H. Kitazato and A. Kijima (eds.), *Marine Ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011*, 129–130, Tokai University Press (2016).
- [24] K. Seike, T. Kitahashi and T. Noguchi: Sedimentary features of Onagawa Bay, northeastern Japan after the 2011

- off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: sediment mixing by recolonized benthic animals decreases the preservation potential of tsunami deposits, *Journal of Oceanography*, 72 (1), 141–149 (2016).
- [25] Y. Saito: Modern storm deposits in the inner shelf and their recurrence intervals, Sendai Bay, northeast Japan, In A. Taira, and F. Masuda (eds.), *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, 331–344, Terra Scientific Publishing, Tokyo (1989).
- [26] K. Usami, K. Ikehara, R. G. Jenkins and J. Ashi: Benthic foraminiferal evidence of deep-sea sediment transport by the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami, *Marine Geology*, 384, 214–224 (2017).
- [27] R. Miura, R. Hino, K. Kawamura, T. Kanamatsu and Y. Kaiho: Accidental sediments trapped in ocean bottom seismometers during the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Island Arc*, 23, 365–367 (2014).
- [28] T. Noguchi, W. Tanikawa, T. Hirose, W. Lin, S. Kawagucci, Y. Yoshida-Takashima, M. C. Honda, K. Takai, H. Kitazato and K. Okamura: Dynamic process of turbidity generation triggered by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13 (11), Q11003, doi:10.1029/2012GC004360 (2012).
- [29] K. Ikehara, K. Usami, R. Jenkins and J. Ashi: Occurrence and lithology of seismo-turbidites by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Abstracts of IGCP the Fifth International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 74 (2011).
- [30] J. Ashi, K. Ikehara, M. Kinoshita and KY04-11 and KH-10-3 shipboard scientists: Settling of earthquake-induced turbidity on the accretionary prism slope of the central Nankai subduction zone, In Y. Yamada *et al.* (eds.), *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 561–571, Springer (2012).
- [31] J. Ashi, R. Sawada, A. Omura and K. Ikehara: Accumulation of an earthquake-induced extremely turbid layer in a terminal basin of the Nankai accretional prism, *Earth, Planets and Space*, 66 (51), 1–9, doi:10.1186/1880-5981-66-51 (2014).
- [32] J. Moernaut, M. Van Daele, M. Strasser, M. A. Clare, K. Heirman, M. Viel, J. Cardenas, R. Kilian, B. Ladron de Guevara, M. Pino, R. Urrutia and M. De Batist: Lacustrine turbidites produced by surficial slope sediment remobilization: A mechanism for continuous and sensitive turbidite paleoseismic records, *Marine Geology*, 384, 159–176 (2017).
- [33] K. Oguri, Y. Furushima, T. Toyofuku, T. Kasaya, M. Wakita, S. Watanabe, K. Fujikura and H. Kitazato: Long-term monitoring of bottom environments of the continental slope off Otsuchi Bay, northeastern Japan, *Journal of Oceanography*, 72 (1), 151–166 (2016).
- [34] K. Kremer, S. B. Wirth, A. Reusch, D. Fah, B. Bellwald, F. S. Anselmetti, S. Girardclos and M. Strasser: Lake-sediment based paleoseismology: Limitations and perspectives from the Swiss Alps, *Quaternary Science Reviews*, 168, 1–18 (2017).
- [35] A. Sakaguchi, G. Kimura, M. Strasser, E. J. Screaton, D. Curewitz and M. Murayama: Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, *Geology*, 39 (10), 919–922 (2011).
- [36] Y. Hanamura and Y. Ogawa: Layer-parallel faults, duplexes, imbricated thrusts and vein structures of the Miura Group: keys to understanding the Izu forearc-arc sediment accretion to the Honshu forearc, *Island Arc*, 2 (3), 126–141 (1993).
- [37] T. Ohsumi and Y. Ogawa: Vein structures, like ripple marks, are formed by short-wavelength shear waves, *Journal of Structural Geology*, 30 (6), 719–724 (2008).
- [38] C. Goldfinger, C. Hans Nelson, J. E. Johnson and the Shipboard Scientific Party: Deep-water turbidites as Holocene earthquake proxies: the Cascadia subduction zone and Northern San Andreas Fault systems, *Annals of Geophysics*, 46 (5), 1169–1194 (2003).
- [39] C. Goldfinger, C. Hans Nelson, A. E. Morey, J. E. Johnson, J. R. Patton, E. Karabanov, J. Gutierrez-Pastor, A. T. Eriksson, E. Gràcia, G. Dunhill, R. J. Enkin, A. Dallimore and T. Vallier: Turbidite event history – Methods and implications for Holocene paleoseismicity of the Cascadia subduction zone, *USGS Professional Paper*, 1661-F, US Geological Survey (2012).
- [40] H. Poudoux, J.-N. Proust and G. Lamarche: Submarine paleoseismology of the northern Hikurangi subduction margin of New Zealand as deduced from turbidite record since 16 ka, *Quaternary Science Reviews*, 84, 116–131 (2014).
- [41] 中嶋健: タービディティ・カーレントの発生機構—タービダイトを用いた海域地震発生間隔評価手法の確率に向けて—, *地質調査所月報*, 51, 79–87 (2000).
- [42] K. T. Pickering and R. N. Hiscott: *Deep Marine Systems: Processes, Deposits, Environments, Tectonics and Sedimentation*, AGU and Wiley, (2016).
- [43] A. Omura, K. Ikehara, K. Arai and Udrek: Determining sources of deep-sea mud by organic matter signatures in the Sunda trench and Aceh basin off Sumatra, *Geo-Marine Letters*, doi:10.1007/s00367-017-0510-x (2017) (in press).
- [44] 池原研: ターミナル小海盆タービダイト古地震学の一つのターゲット, *第四紀研究*, 54 (6), 345–358 (2015).
- [45] C. Goldfinger, S. Galer, J. Beeson, T. Hamilton, B. Black, C. Romsos, J. Patton, C. Hans Nelson, R. Hausmann and A. Morey: The importance of site selection, sediment supply, and hydrodynamics: A case study of submarine paleoseismology on the northern Cascadia margin, Washington USA, *Marine Geology*, 384, 4–46 (2017).
- [46] M. A. Rodriguez-Pascua, J. P. Calvo, G. De Vicente and D. Gómez-Gras: Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene, *Sedimentary Geology*, 135 (1), 117–135 (2000).
- [47] T. Yamakita, H. Yamamoto, K. Ikehara, H. Yokooka, Y. Fujiwara, S. Tsuchida, Y. Furushima, K. Oguri, M. Kawato, T. Kasaya, S. Watanabe, K. Fujikura and H. Kitazato: Earthquake and habitat mapping in the deep sea, *Abstract of the International Association for Impact Assessment 2016*, #34 (2016).
- [48] 池原研: 仙台湾陸棚域の表層堆積物: 2011年東北地方太平洋沖地震／津波の浅海域海底環境への影響, 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書, *地質調査総合センター速報*, 66, 409–413 (2014).
- [49] 平朝彦: 日本列島の誕生, 岩波新書, (1990).
- [50] 今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴真澄, 岡井貴司, 立花好子, 池原研, 片山肇, 野田篤, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃: *海と陸の地球化学図*, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, (2010).
- [51] Y. Saitoh, T. Ishikawa, M. Tanimizu, M. Murayama, Y. Ujiie, Y. Yamamoto, K. Ujiie and T. Kanamatsu: Sr, Nd, and Pb isotope compositions of hemipelagic sediment in the Shikoku Basin: Implications for sediment transport by the Kuroshio and Philippine Sea Plate motion in the late Cenozoic, *Earth and Planetary Science Letters*, 421, 47–57 (2015).

執筆者略歴

池原 研（いけはら けん）

1982年東京学芸大学教育学部卒業。同年通商産業省工業技術院地質調査所入所。2005年産総研地質情報研究部門海洋地質研究グループ研究グループ長。2009年同部門副研究部門長。2015年から同部門首席研究員。入所以来日本周辺海域を中心とした海洋地質調査に従事。専門は堆積学。複数の受託研究等を通じて海底の地震性堆積物の研究を主導している。この論文では、全体的な構成と執筆、及び表層堆積図データの活用の項目を担当。



宇佐見 和子（うさみ かずこ）

2010年熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。2012年産総研地質情報研究部門特別研究員。2017年から同部門客員研究員。専門は微生物学及び堆積学。この論文では、地震時の海底堆積物の擾乱と地震性タービタイトによる地震発生履歴の議論を担当。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（牧野 雅彦：産業技術総合研究所）

この論文は、海底の地震・津波堆積物という地質学的な証拠をつかみ、過去の地震・津波発生履歴を明らかにすることによって地震防災に資する新しい科学的有用性について論じています。著者らは2011年東北地方太平洋沖地震以降、関係機関と協力しながら精力的にこの研究を進め多くの成果を上げてきました。

具体的には、1)タービタイトの形成プロセス、2)仙台沖で採取された2011年東北沖地震の津波により形成された堆積物、3)タービタイトによる地震発生履歴の推定方法等について論じています。この研究をさらに進めるためには、高精度で高分解能の海底地形データと地層断面記録が必要であり、海洋地質情報の知的基盤整備が重要であると主張しています。

これらの研究は地震防災の観点から重要であり、シンセシオロジー論文として適切であると考えます。

回答（池原 研）

2011年東北地方太平洋沖地震とその津波は東北地方だけでなく、広い範囲に大きな被害を発生させました。今回紹介した海底堆積物を用いた地震発生履歴の研究はこの地震・津波以前から行われておりましたが、2011年の地震・津波以降の研究の進展は驚くべきものと思っております。地震・津波時に海底で起こることのいくつかの詳細が観察され、記録として残されてきています。まだまだ分からないことだらけではありますが、海洋地質研究から社会に貢献できるようさらに調査研究を進めていければと思っております。

コメント（後藤 雅式：産業技術総合研究所）

この論文は、安心・安全な生活に貢献することを念頭におき、海底堆積物中のタービタイトを分析することにより、巨大地震や津波履歴を解明するストラテジーに関するものです。先端的な調査・分析のみならず、通常データ収集の重要性、産総研の役割についても言及されています。専門外の人間が読んでも参考になる構成になっており、シンセシオロジー掲載の価値は十分あると考えます。

回答（池原 研）

調査研究の社会への貢献を念頭に執筆させていただきました。また、産総研でこれまで行ってきた研究とその研究財産をいかにこの研究に活かせるか、活かしていくべきか、思うところを書いたつもりです。

議論2 タービタイトの説明について

コメント（牧野 雅彦）

図1Aの斜面を流れる混濁流の水槽実験は引用かどうかこの論文には文献[11]とあるので。引用であれば図のキャプションにその旨を記載してください。

回答（池原 研）

この写真は水槽で発生させた混濁流を筆頭著者が撮影したもので、論文から引用した写真ではありません。引用はこの論文で混濁流とはどのようなものであるかを説明した部分になります。混乱を生じさせないように、この論文の引用の表示の場所を移動させました。

コメント（牧野 雅彦）

図2についてこの論文ではタービタイトの「2階建構造」、図のキャプションでは「内部浸食面」としています。「内部浸食面」について解説があれば形成プロセスがさらに分かりやすいと思います。

回答（池原 研）

ご意見を踏まえ、説明文について加筆・修正しました。

議論3 技術的課題について

コメント（牧野 雅彦）

海底の地震・津波堆積物の研究が最近大きく発展した原因として、解決できた何らかの技術的課題はありますか？

第3章に記載されていますが、もう少し整理して分かりやすくできないでしょうか？

回答（池原 研）

技術的要素としては、第5章に書きましたようにコア試料の物性・化学組成の非破壊計測があると思います。これは迅速かつ高分解能でデータを提供してくれます。

第3章では研究手法を説明しておりますので、ご指摘いただいた点については、非破壊計測が最近発展してきた技術であることを第5章に加筆しました。しかし、現状ではこのような測定データに頼り切って、実際のもの（コア）を見ない研究者が数多くいます。データとコアを見比べていくことで「堆積物を見る眼」が養われると考えていますので、その点も加筆しました。

コメント（牧野 雅彦）

図4で各要素技術を記載していますが、要素をつなぐ矢印が短いのもう少し全体配置を考えて書くと分かりやすくなると思います。各技術のかたまりを四角形で囲めませんか？

回答（池原 研）

ご意見を踏まえ、図を修正しました。

質問（後藤 雅式）

「まとめと今後の展望」では、「堆積物を見る眼」を養うことの重要性に言及されています。そのためには意識を持って見る、経験を積むことが必要と記載されていますが、もう少し具体的に記載していただくことは可能でしょうか。恐らく、他の分野の研究者にも通ずることだと思いがたいかと思いますがどうでしょうか。

回答（池原 研）

なかなか言葉で言い表すことが難しいですが、一見関係しないと思われることが後々に互いに関係を持つてくることを多数経験してきました。単に経験を積むのももちろん大事ですが、一つ一つの課題にしっかり向き合ってやっていくことを重ねることが大

事だと思しますので、その点について加筆してみました。また、最近発展してきた非破壊計測の結果（データ）と実際のもの（コア）を見比べてどのような特徴の部分でデータが変化しているのかをきちんと押さえていくことも「堆積物を見る眼」を養う上で重要と思しますので、その点についても加筆しました。

直径 1.5 mm で実現する内視鏡型デジタル顕微鏡

— 微細OCTプローブでナノメートル精度のデジタル化技術 —

古川 祐光^{1*}、野口 尚美¹、山崎 大志²、浅田 隆文²

20 nmの精度で内部を非接触で計測可能な直径1.5 mmの内視鏡型の顕微鏡を製作した。眼科等で生体計測に利用される光干渉断層法 (OCT: Optical Coherence Tomography) の光源を高安定化し、工業用に精度を高めた。プローブ直径が1.5 mm以下で、内蔵された微小径モーター2個により軸方向スキヤニングと回転方向スキヤニングとを行い、試料内筒に挿入することで、内側を全周計測することが可能となった。光はプローブ挿入方向に対して側射されており、測定更新レートは毎秒60フレームである。わずかな隙間から挿入することで高精度計測が可能となる装置は、分解点検の負担が減少させられ、日常点検管理を信頼の高いものにすることができる。

キーワード: 内視鏡、ファイバースコープ、光干渉断層法、OCT、超解像、内径測定

High-accuracy endoscopic microscopy using a thin, 1.5 mm diameter probe with optical coherence tomography

Hiromitsu FURUKAWA^{1*}, Naomi NOGUCHI¹, Hiroshi YAMAZAKI² and Takafumi ASADA²

We developed an endoscopic microscopy system with 20 nm accuracy that affords inspection through narrow gaps using a thin, 1.5 mm diameter probe. Accuracy was improved using Optical Coherence Tomography (OCT). The frequency modulated light source is stabilized with closed control from self-interference measurement. The probe is driven by two miniature motors, which allow three-dimensional scanning of an internal surface. Imaging performance is 60 frames per second. The high accuracy with narrow clearance capabilities of this system reduces the need for machine overhauls, which affords trustworthy daily inspections and hence greater machine reliability.

Keywords: Endoscope, fiber scope, Optical Coherence Tomography (OCT), super resolution, internal diameter measurement

1 機械加工技術とイノベーション

機械加工技術はどこまで進展していくのだろうか。精度に関しては、精密加工分野で有名な図1に示すロードマップがある^[1]。機械加工では原子の加工はできないため、原子サイズに近づく1 nmを限界点として、さまざまな方法でその領域へアプローチしていくのがナノテクノロジー技術である。その意味では、すでに原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) 等を用いた原子マニピュレーション^[2]、分子マニピュレーション^[3]が実現されており、それ以上の進展は理論的には望めない。機械加工技術は終わったのだろうか。

しかし、超高精度の加工技術であるAFM操作、集束イオンビーム等がすぐに個人ユースでの立体造形 (3Dプリンター) やコンピュータ数値制御 (CNC: Computer

Numerical Control) フライスに搭載されるわけでもなく、コスト・時間も見合わない。近年、生産技術の革新として3DプリンターやCNCフライスが取り上げられることが多くなり、これらが生産技術を根本から変えるかもしれないと言われているが、実はともに35年以上前に発明されている。CNCは1952年からマサチューセッツ工科大学 (MIT) のプロジェクトで開発され^[4]、3Dプリンターは1980年には小玉秀男氏によって発明された技術である^{[5][6]}。余談になるが、小玉氏は開発機や造形した試作品を発表したが、サブミクロンレベルの加工精度を競っている技術者たちに全く相手にされなかったそうである^[7]。最高のクオリティー技術もごく一部の人しか使えなければ、世界は変わらない。研究分野や大型の生産現場だけにしか利用できなかった技術が個人ユースレベルにまで普及することで、改めて「革

1. 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 〒305-8565 つくば市東1-1-1 中央第5、2. アダマンド並木精密宝石株式会社 〒036-0539 黒石市大字下目内沢字小屋敷添5-1

1. Electronics and Photonics Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail: h-furukawa@aist.go.jp, 2. Adamant Namiki Precision Jewel Co., Ltd., 5-1 Koyashikizoe, Shimomenaisawa, Kuroishi 036-0539, Japan

Original manuscript received November 2, 2017, Revisions received January 19, 2018, Accepted January 19, 2018

新」や「イノベーション」という評価が与えられるのだと感じている。この意味でこれまでに発明されたものを使いやすい形にし、コストダウンしていくことは、極めて重要なイノベーションである。制御技術・測定技術を含めて、ほとんどのものづくり技術は、まだ原子精度に至っていないため、発展の余地が大きい。

我々が着目しているのは、内筒を高精度に測定する技術である。内筒は、エンジン、発電タービン等の内燃機関としての利用だけでなく、その精度が軸受け、ベアリング等でもエネルギー効率を左右する重要な部分である。それにも関わらず、高精度測定に適した技術はいずれも顕微鏡技術から発展してくるためか、薄い平面試料向けに限られることが多く、内径検査には適していない。このため、内筒検査では従来から用いられている真円度測定機をいかに高精度化するかという方向に進んでいるのが現状となっている。現状の最高精度は 0.05 μm 程度であり、真円度測定機の延長である限りは、心出し・水平出しなど測定者にも職人技が求められる。

このように内径測定技術は、精度・手間・測定可能な大

きさ・形状等の制限が多く、利便性や適用範囲が低いことが問題となっている。部品製造時の品質管理だけでなく、日常点検・負荷試験等においても摩耗状態・交換時期の見極めなどに使用されるので、PC で管理できるデジタルデータが高精度で誰でも得られることが必要である。

この目的に適した技術は内視鏡であるが、多くの場合では写真・ビデオを撮って診断の目安にするいわゆる図 2 左のようなビデオスコープであり、図 2 右のような計測技術には至っていない。写真では対象の微小な形状変化を検出することが難しいので、デジタル化されたデータでの比較が望ましい。この点において、従来の内視鏡というよりは、狭い空間に入り込む内視鏡型のプローブを有しながらも、機能的には微小な形状を検知し、測定や比較に便利なデジタル顕微鏡に相当する技術が求められている。

この研究では光干渉断層法 (OCT: Optical Coherence Tomography) をベースにして、高精度計測を試み、デジタル化する技術を目指している。OCT に用いられている光干渉計測は、古くから白色干渉測定技術として工業的な表面形状計測に用いられていたが、山形大学の丹野教授と

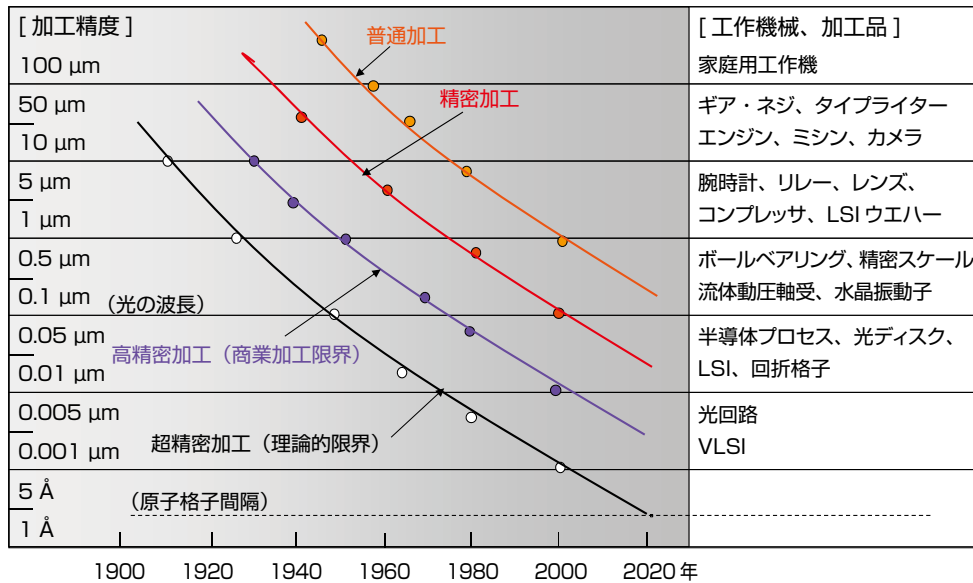


図1 機械加工精度のトレンド

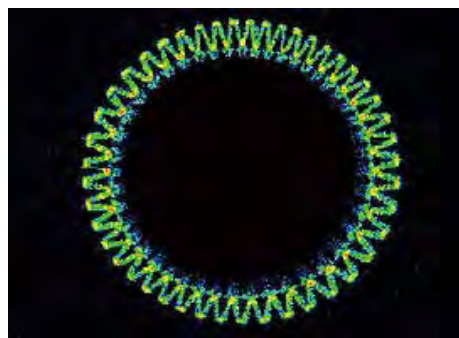


図2 アナログ内視鏡とデジタル内視鏡の例
それぞれ試料は異なるが、管内の内視鏡写真(左：従来)とデジタル化データ(右：本技術)とを示したものである。

マサチューセッツ工科大学 (MIT) の J. Fujimoto らがほぼ同時期に眼底網膜の断層計測^{[8]-[10]}ができることを示したことによって眼科応用が急速に進み、現在では世界中のほぼすべての眼科医療機器メーカーから製品が出ている。人の網膜の断層像が得られることによって、眼科診断は革新的な変革もたらされた。

元々、OCT 技術は当初から光ファイバーを用いて構成されており、微小プローブの製作に適合しやすい技術であるが、内視鏡としての利用はやや遅れている。OCT を利用した内視鏡は、医療分野には限定的に応用されており、血管を内側から描出する血管 OCT が着目されている。一方で、血管内に挿入されたプローブから血管壁に測定光を放射する際に、血液が OCT の光路の妨げとなる。このため、バルーンカテーテル等で短時間だけ血管を塞ぐことにより血液の流れを遮断し、生理食塩水注入による血液のフラッシュを行ったうえで血管を観察する必要がある。手技として、従来の超音波を利用した血管内超音波装置 (IVUS: Intravascular Ultrasound) に比べて手間がかかり、置き換えには至っていない。簡便に使えるイノベーションが必要である。

一方で、工業応用はほとんど行われていない。次節で述べるが、医療応用とは求められるスペックが異なっており、この溝を埋めるには異分野となる光学技術と機械技術との両方の技術が必要である。我々は、光学技術を専門とする産業技術総合研究所電子光技術研究部門 (以下、産総研) と、精密機械技術を専門とするアダマンド並木精密宝石株式会社 (以下、並木精密) とが組んで両方を高度化するというアプローチを取った。並木精密は、プローブのキーパーツであるマイクロモーター製作技術において世界一であり、大変高い目標値を設定することになった。我々が目標としているのは、直径 1.5 mm のプローブを用いて、表面形状を 20 nm 精度で測定することである。このような計測器はこれまで無かったため、応用分野は未知数だが、発電所や自動車・航空機等回転摩耗する機械を分解することなく、隙間から点検・データ蓄積したいという用途は必ずあると考える。

例えば、精密測定機の国内出荷額は日本精密測定機器工業会の資料^[11]によれば、2016 年において約 1100 億円 / 年である。この研究の用途は従来の真円度測定機 (160 億円 / 年)、表面粗さ計 (90 億円 / 年)、三次元測定機 (50 億円 / 年)、および工業用 CCD カメラ内視鏡では測定できない深穴内径測定用であり、従来のそれら用途向け装置生産額 (約 300 億円) の 30 % 以上と仮定すると、100 億円 / 年程度の新たな市場が形成されるものと考えられる。

2 コア技術の研究開発

2.1 自己位相検出による高精度 OCT: 20 nm

OCT は医療技術として発展したことにより、技術普及初期に付きものとなっている高価な装置価格の時期を乗り越えており、現在では各パーツが比較的安価に入手できる。この恩恵を活かして、工業用途での普及の準備は整っているが、医療と工業とで異なる指標が、再現性の問題である。

医療 OCT に求められる性能は、ある患者の網膜各層の像を綺麗に得ることであり、指標としては奥行分解能と深達性が主なものとなる。この医療で用いられている内視鏡型 OCT として血管 OCT^[12]がある。一方、工業 OCT に求められる性能は、被測定物の表面を精度よく描画することであり、指標としては距離精度と再現性が主なものとなる。特に工業用途で、金属表面を対象とする場合には、奥行分解能と深達性とはほとんど不要な指標となるため、目指す方向性が異なっている。この問題に対処するため、我々は以下のような手法を用いた。

我々の用いた光学系は、主として光ファイバー干渉計からなっており、波長走査光源を用いた OCT (SS-OCT: Swept source OCT) と呼ばれるタイプのものである。その概要図を図 3 に示す。光源は、波長 1240-1400 nm の波長走査光源 (Santec HSL-2100) である。光源は、光ファイバーカプラ 1 において 95:5 の割合で分割され、それぞれ距離計測のためのマイケルソン干渉計と補正のための自己干渉計に導かれる。

マイケルソン干渉計では、光ファイバーカプラ 2 で 95:5 に分割され、それぞれ被測定試料の反射面と参照反射面へ向かう。それぞれの反射面からの反射光は、光ファイバーカプラ 3 で結合され、干渉信号が検出器で測定される。この干渉計においては、光ファイバー 2 で分割された位置から、被測定試料の反射面までの距離と参照反射面までの距離との差が、光源波長の整数倍となるときに干渉信号が強くなるため、光源波長を走査することでそれぞれの距離の差 (距離差) が計測できる。つまり、試料反射面がある基準位置 (参照反射面までと同一距離) に置かれたとき、波長に依存することなく干渉信号が強くなるが、その基準位置から離れると光源スペクトルに強弱の縞 (スペクトル干渉縞) が発生する。スペクトル干渉縞の周期は、距離差が大きくなるにしたがって、より短くなっていくため、基準位置に対する試料反射面までの距離差が判る。

ここで、距離差を決めるのはスペクトル干渉縞の周期であるため、精度の高い距離測定を行うためには、スペクトル干渉縞の周期が安定していることが必要である。ところが、波長走査光源では、時間に対して一定の波数変化を保

つのが難しい。走査機構にもよるが、一般には走査の始めと終わりは波数変化が遅くなることが多く、時間に対する光源波数は非線形になっている。この様子を図 4 左 (改良前) に示す。実験では試料反射面としてミラーを用いたので、走査速度が一定の時には等間隔のスペクトル干渉が見られるはずであるが、波長走査開始・終了の 1240 nm 付近と 1400 nm 付近ではスペクトル干渉縞が広く、中間の

1320 nm 付近では狭いことが判る。一般に、光源メーカーは検出ソフトと連携してこれを一定の走査速度と同等になるよう補正している。大まかな補正はこれで可能であるが、走査ごとのブレは残るため、我々は光源の一部を自己干渉計に導き、リアルタイムに走査速度をモニタリングすることによって補正する改良を行った。自己干渉計では二つに分割された光の光路長が 2 本のファイバーの長さの差だけ異

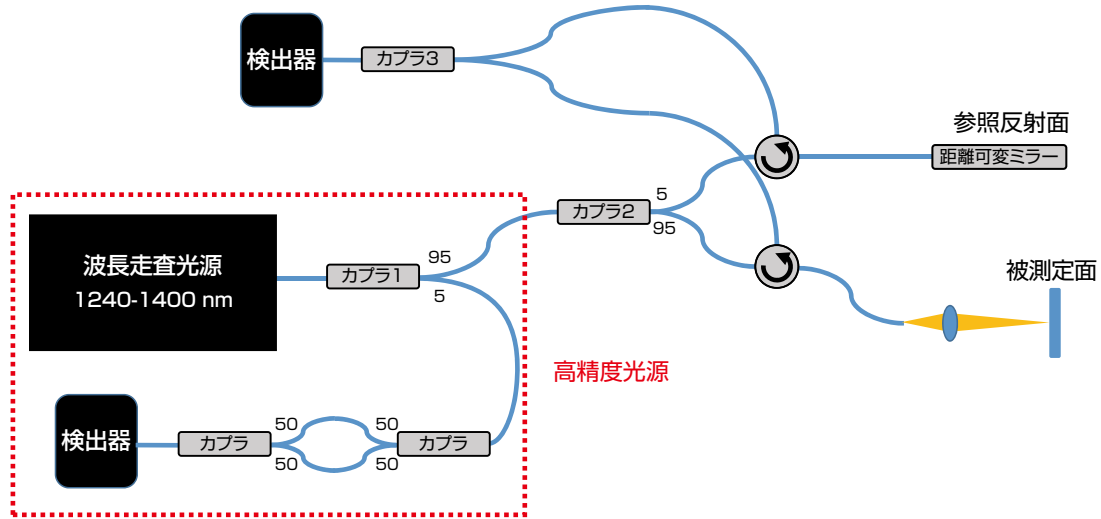


図3 高精度OCTの光学系の概要図

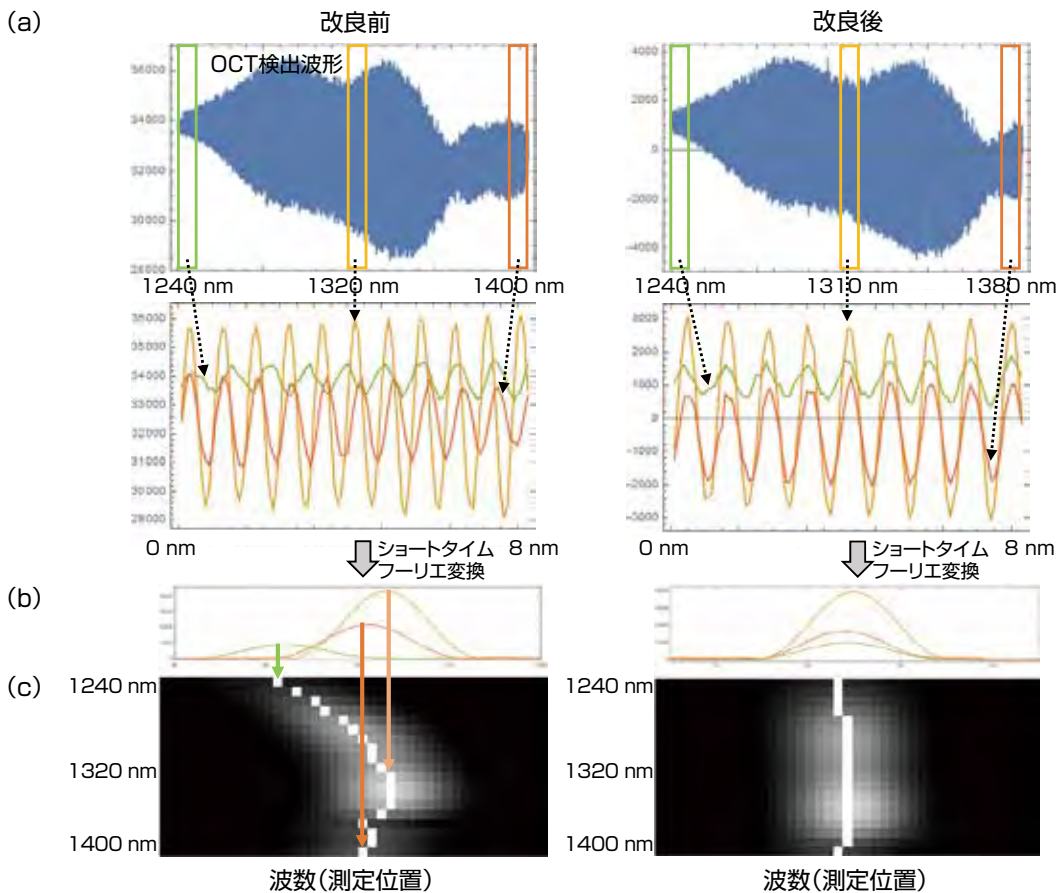


図4 既存光源に見られる干渉波形の非線形性 (左側) と、自己干渉計による補正後 (右側) の比較

なっているため、もし一定の速度で波長走査すると、等間隔でのスペクトル干渉が生じるはずである。波長走査速度にムラがあれば、それがスペクトル干渉の縞間隔に反映されるため、この情報を元に、試料検出信号の間隔も補正することができる。この原理によって、波長走査速度にムラがあっても、一定速度での波長走査を再現できる。この結果、図 4 右 (改良後) のように、波長走査の開始から終了まで一定の測定が可能となり、測定位置の安定性が高まる。図 5 に改良前後での OCT 位置測定結果を示す。改良前は、500 回繰り返し計測時の標準偏差が 380 nm であったのに対して、改良後は 22 nm へと約 17 倍の向上が得られた。

この高精度位置計測技術を適用して図 6 左に示すとおり、10 円玉の形状計測を行った。10 円玉の凹凸は約 100 μm であり、検証としてはやや大きすぎるため、段差のない部分 (フラット面) の測定も行った。図 6 右は高さ方向を 100 倍に強調表示したものであり、表面形状計測結果

より表面粗さ $Ra=0.31 \mu\text{m}$ と求められた。詳細な表面形状計測が行えるため、工業計測で重要な表面加工精度 Ra を求めることが可能となる。

2.2 直径 1.5 mm の回転プローブ^[13]

並木精密では、2005 年に世界初の直径 1.5 mm のマイクロモーターを開発し、さらに小型化を目指して直径 0.9 ~ 2.0 mm のモーターの開発に成功してきている。

この技術では、直径 1.5 mm の 3D スキャニング OCT プローブを作製するため、直径 1.5 mm の第 1 マイクロモーターと直径 0.9 mm の第 2 マイクロモーターを利用した。図 7a に示したように OCT プローブ先端に内蔵された第 1 マイクロモーターは直径 1.5 mm のモーターでミラーを回転駆動している。これにより光ファイバーからの光は 90 度折り返された側面照射 (側射ビーム) となり、360 度の回転方向スキャニングが行える。第 2 モーターは直径 0.9 mm のモーターであり、側射ビームの角度を変える役割をしており、前方から後方の軸方向スキャニングを行う。具体的に

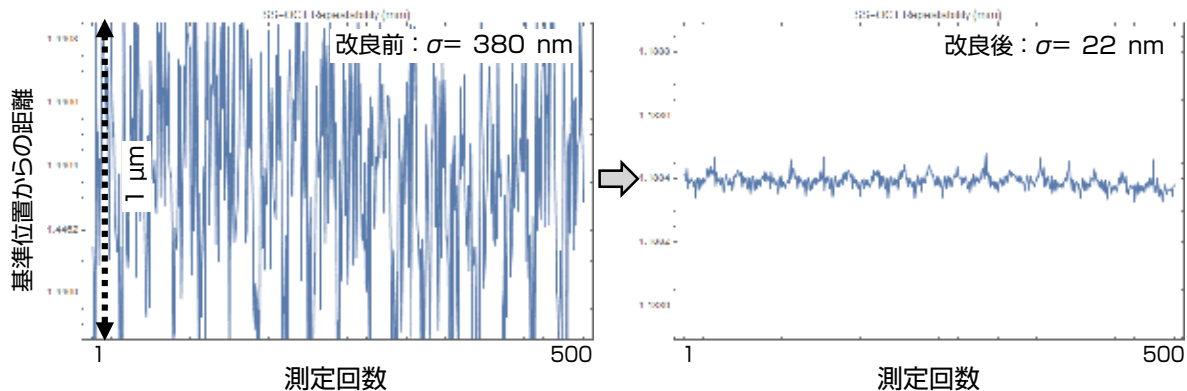


図5 改良前後での距離測定精度の比較

縦軸は測定された試料面の位置、横軸は測定回数を示している。500回繰り返し測定において、標準偏差 $\sigma=380 \text{ nm}$ から 22 nm へと向上した。

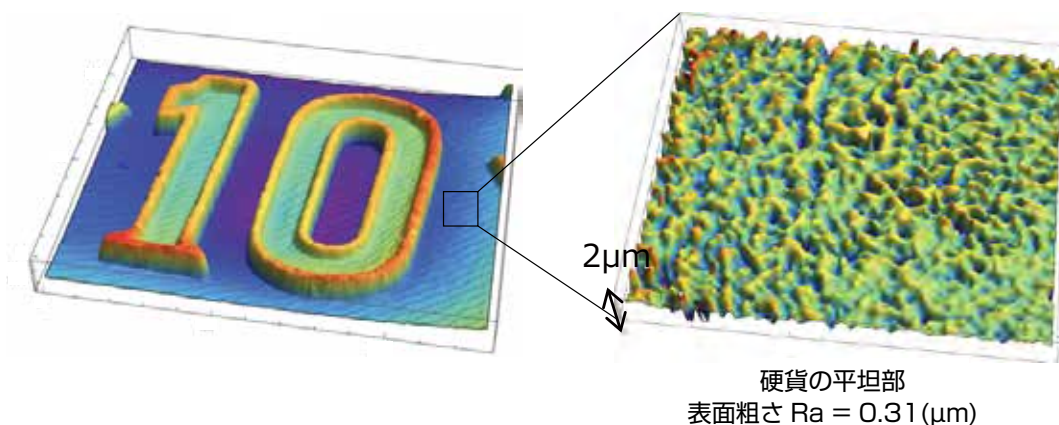


図6 高精度OCTによる10円玉の高さ計測 (左: 10 mm四方) および10円玉のフラットな面を高さ計測した結果 (右: 1 mm四方)

は、第 2 モーターでは、先端が斜めに切れた光ファイバーを回転させており、光ファイバーからの射出される光の方向が中心からずれる。これにより第 1 マイクロモーターに駆動されたミラーの上側や下側にビーム位置を制御することが可能となり、側射ビームの角度を変えられる。これら 2 個のモーターを同期回転させ、例えば第 1 モーターを 3600 rpm、第 2 モーターを 3540 rpm に設定し、わずかに回転数差を与えることで回転位相が生まれ、光ビームは 1 分間に 3600 回転しながら、軸方向に 60 回の往復運動を行うというヘリカルスキニングが実現される。

図 7a に示した第 2 モーターは直径 0.9 mm と極細のため、ブラシレスコアレス方式を採用している。これに使われる回転シャフト、軸受、コイル、マグネット等の各部品は図 7b に示すように微細に作られる。回転シャフトの直径は 0.2 mm でその中心には光ファイバーが挿通されるため直径 0.125 mm の貫通穴が設けられている。コイルは線径 0.024 mm のワイヤを専用巻線機により高密度にコイルングすることにより回転トルクを確保している。また軸受は内径 0.2 mm であり、内周面には図 7c に示すヘリングボーン動圧発生溝がレーザー加工で施されている。これにより、回転が始まるとオイルが溝に沿って軸受け内に流れ込み、オイル圧力に支えられて、回転シャフトが軸受けから浮き上がる。これは動圧軸受けと呼ばれ、回転で発生するオイル動

圧を利用した非接触回転により回転中心が安定し、精度を高めることができる。これらの大変微細で芸術的とも思える製造技術がマイクロモーターの特性を向上させている。

図 8 のように、この高精度 1.5 mm 内視鏡を、六角ネジの内部測定に適用した。結果を図 9 に示す。1 秒当たり 60 フレームでの安定したデジタル化が可能であった。

3 Discussion (ブレイクスルー、インパクト)

本装置では、非接触で 20 nm 精度の形状計測を行う技術と、直径 1.5 mm の全周回転プローブ製作技術とを融合して、新しい内視鏡を実現する。隙間から内部を高精度でデジタル化するという用途は、文字通りスキマ産業かもしれないが、隙間から高精度デジタル化が可能になるならば、図 10 のように分解せずに点検業務を行うことができ、休止期間や日常管理のコストを下げる。

- (ア) 光学技術（非接触）を用いながら、ナノメートルでの形状計測
- (イ) 隙間から計測できる回転プローブの実現（撮影だけではないデジタル化）

この二つの技術を一つに統合したことで、隙間からの検査が容易に行え、分解検査が不要となる。特に本装置のターゲットと想定しているのは、回転駆動装置への適用である。例えば、摩耗しやすいジェットエンジン、発電タービ

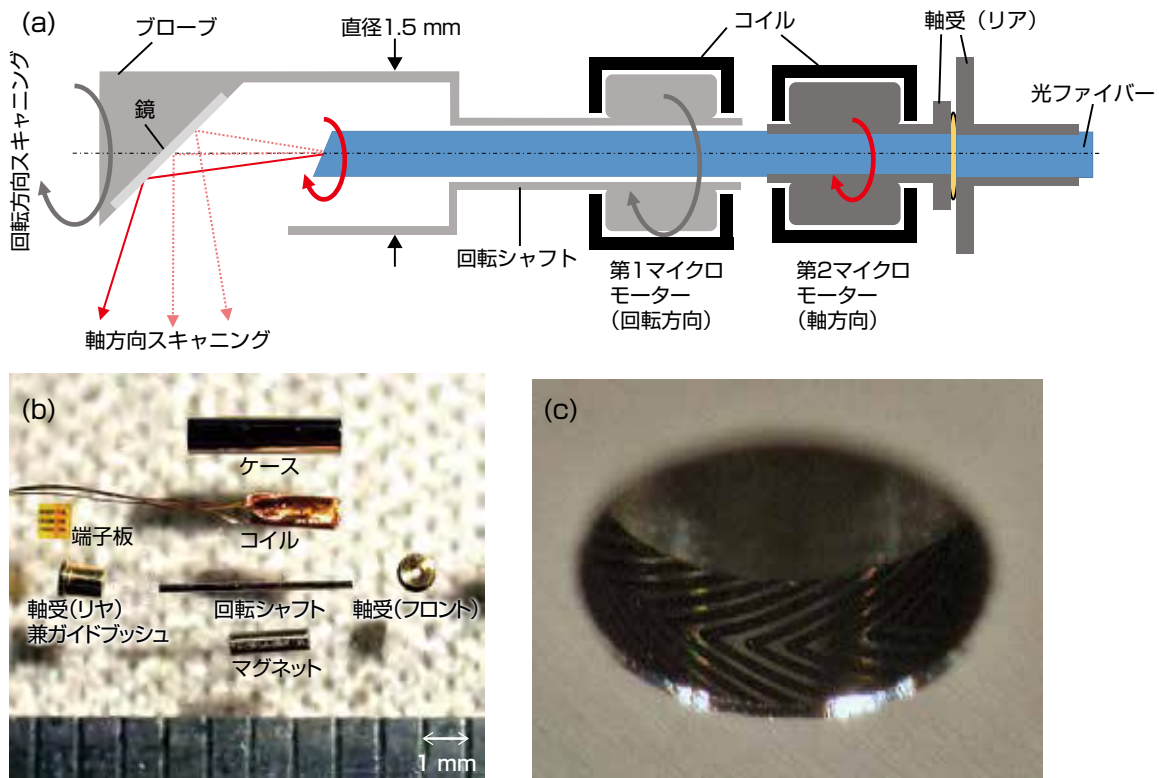


図7 微細径プローブ先端の制御機構

(a) 回転プローブ断面構造、(b) 第 2 マイクロモーター部品、(c) 動圧軸受内部のヘリングボーン動圧発生溝

ンの日常管理や、自動車等の小型エンジンの内筒検査等がある。エンジンをはじめとする回転駆動装置では、内筒研磨の形と研磨精度が燃費向上に大きくかわる。外形を測定できる機器は多いが、内筒を測定できる機器はほとんどない。高精度デジタル化により、摩耗状態や付着物を管理することで、短時間で精度の高い品質管理が行える。日常管理はもとより、開発研究や生産ラインにおいても有用な技術となると考えている。

4 今後の課題、展望

この論文では、精度評価のために同じ試料を繰り返し測定する円形スキャンを用いて検証を進めた。プローブ構造の箇所ですべて述べたように、本プローブは第2モーターによる軸方向へのスキャンを組み合わせ、ヘリカルスキャンを行えるため、3D形状の測定も容易である。しかし、3D デジタルデータを再構成するには、図 11 のように軸方

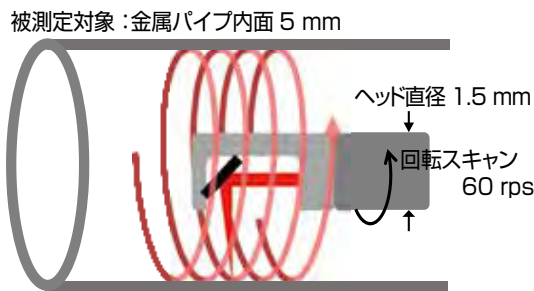
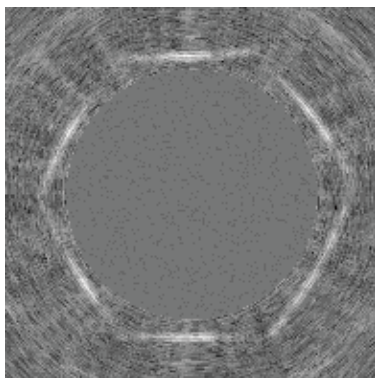


図8 直径1.5 mmの回転プローブ外観図(左)と試料(M6ネジのヘッド部分)測定の様子(右)



内径測定結果
60 fps



被測定物(ワーク)

図9 直径1.5 mm回転プローブによる試料内径測定



図10 スキマ計測イメージ

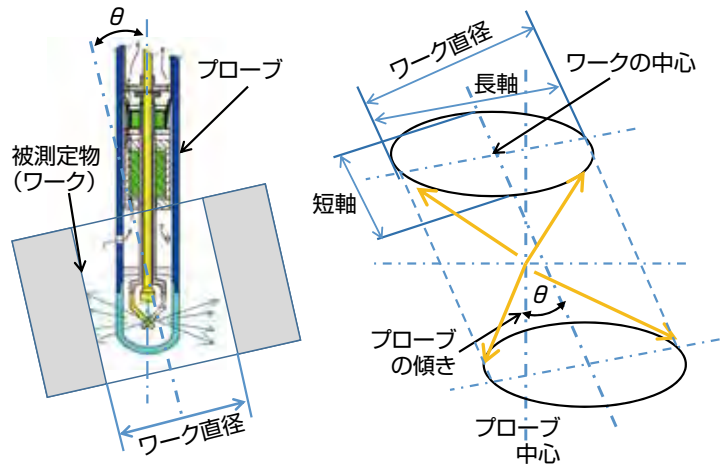


図11 傾斜自動補正アルゴリズム

向スキャンニングをナノメートル精度で補正する必要がある。今後はこの課題に取り組むことを考えている。回転スキャンニングだけでは、例えば円筒試料へプローブを挿入したときに円筒軸に対してプローブが傾いていると楕円形になるため、正しく測れない。3D 形状であれば、どのように挿入しても正しく測れるため、利便性は格段に向上するだろう。

5 最後に

この研究の一部は、戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン) の補助を受けて行われた。事業開始を審査するヒアリングは通常厳しいものであるが、この事業の審査ヒアリングでは、審査員に感心していただいた。いや、むしろ目標が高すぎて心配されたのである。「たとえ測定精度 20 nm が達成できず、1 桁悪くても十分に役に立つのですよね。」と、目標達成が至上命題とされる公的研究予算において、管理・審査の側から達成目標を下げたときの算段を提案されて恐縮した。それも尤もな話であり、実は我々の中でも議論となって、他の光学計測専門家の意見でも、この目標設定はかなり厳しいという意見が大勢を占めていた。

それでも我々がこの目標設定を掲げた理由は三つあり、一つにこの研究の主眼である円筒内径計測の既存製品の精度が低いことであり、審査員の言葉通り、目標より 1 桁落としても世界トップになることが見込めるためであった。二つ目は、並木精密の機械技術レベルとこの技術実現への意識が高く、光学技術についても短期間での向上が見込めたことである。産総研で協力できそうな話を伺ったときには、並木精密では自己流ではあったと思うが、すでにある程度の OCT ベース技術を持っていた。それでも教を乞うという姿は新鮮に映った。そして、産総研ではさまざまな企業との共同研究を行っているが、並木精密の実現への意気込みは特に異色であることが印象的であった。青森工場を訪れたときにはさらに驚くこととなり、他の開発メンバーにもお会いしたが、言葉だけでは知っていた「全員が一丸となって開発に取り組む」という言葉が具現化された姿があった。渋谷工場長を筆頭に、パーツ製作のメンバーに至るまで全員が専門性高く、プロの仕事である。正しく他人の教を受けるが、そのまま頼ろうとはせずに、自らで実現しようと取り組む姿があることに気づき、大変に感銘を受けた。三つ目に、研究分野とメーカーとの見解の違いを考慮したことにある。研究では多くの場合、試作機は 1 台しか製作しないので、精度といえば「repeatability」のことであり、つまり計測値の標準偏差と同等という感覚がある。ところが、メーカーは多数の生産を想定しているため、標準誤差を重視しており、品質管理上重要とされているようである。標準誤差であれば、少し気楽に取り組むことが

できる。

このように高い目標と強い意志、そして少しの逃げ場を作って採択され、研究を開始することとなった。結果はこの論文で示したように、逃げることなく repeatability で評価を行っても目標が達成できており、さらに冒頭で述べた意味でのイノベーションを目指して、利便性を高める技術開発を行っている。

参考文献

- [1] 谷口紀男: 超精密加工技術の発達と今後の課題-ナノテクノロジーとの関連, *日本機械学会誌*, 87 (791), 1101-1108 (1984).
- [2] D. M. Eigler and E. K. Schweizer: Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope, *Nature*, 344, 524-526 (1990).
- [3] D. G. de Oteyza, P. Gorman, YC Chen, S. Wickenburg, A. Riss, D. J. Mowbray, G. Etkin, Z. Pedramrazi, HZ Tsai, A. Rubio, M. F. Crommie and F. R. Fischer: Direct imaging of covalent bond structure in single-molecule chemical reactions, *Science*, 340 (6139), 1434-1437 (2013).
- [4] W. Pease: An automatic machine tool, *Scientific American*, 187 (3), 101-112 (1952).
- [5] H. Kodama: A scheme for three-dimensional display by automatic fabrication of three-dimensional model, *IEICE Transactions on Electronics (Japanese edition)*, J64-C (4), 237-241 (1981).
- [6] H. Kodama: Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, *Review of Scientific Instruments*, 52 (11), 1770-1773 (1981).
- [7] 日経オンライン: 3Dプリンターで特許を逃した僕の「失策と教訓」発明者・小玉秀男氏が次世代に贈る言葉, <http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/16/063000051/070500003/>, 閲覧日2017-11-02.
- [8] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito and J. G. Fujimoto: Optical coherence tomography, *Science*, 254 (5035), 1178-1181 (1991).
- [9] 丹野直弘, 市村 勉, 佐伯昭雄: 光波反射像測定装置, 特許第2010042号 (特公平6-35946).
- [10] J. G. Fujimoto, D. Han, C. A. Puliafito, C. P. Lin, J. S. Schuman and E. A. Swanson: 光学的イメージ形成および測定の方法および装置, 特許第3479069 (B2); 光学的イメージを形成するシステム、方法および装置, 特許第3692131(B2).
- [11] 日本精密測定機器工業会: 生産販売統計, <http://www.jpma.gr.jp/statistics/>, 閲覧日2017-11-02.
- [12] G. J. Tearney, M. E. Brezinski, B. E. Bonma, S. A. Boppart, C. Pitris, J. F. Southern and J. G. Fujimoto: In vivo endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography, *Science*, 276 (5321), 2037-2039 (1997).
- [13] 浅田隆文, 山崎大志: 3D内視鏡光プローブ式精密測定方法の開発, *日本機械学会論文集*, doi:10.1299/transjsme.16-00492, (2017).

執筆者略歴

古川 祐光 (ふるかわ ひろみつ)

産総研電子光技術研究部門光センシンググループ上級主任研究員。工学博士。大阪市出身。1997年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了後、理化学研究所、医薬品医療機器総合機構等を経て、現在は産業技術総合研究所。レーザー光学・分光学を基礎とした医用イメージングに関する研究に従事している。薬機法(薬事法)にも対応できる光学技術ベースの装置開発を得意としている。



野口 尚美 (のぐち なおみ)

産総研電子光技術研究部門光センシンググループテクニカルスタッフ。茨城県土浦市出身。2007年より眼底計測プロジェクトに従事。2010年バイオフォトニクスグループにてプラズモンフォトニクスに要するナノ加工・ナノ計測技術開発を行い、2014年より光センシンググループにおいて分光装置開発プロジェクトの主力を務める。光技術をベースにした社会インフラ・医療計測等の分野に貢献している。



浅田 隆文 (あさだ たかふみ)

アダマンド並木精密宝石株式会社青森工場技術顧問。工学博士(動圧軸受)。京都市出身。1973年国立舞鶴工業高専修了、2004年放送大学修了、2010年金沢大学自然科学研究科博士後期課程修了。1973年松下電器産業株式会社入社、2010年日本電産株式会社入社、2012年より現職。1973年より2011まで一貫して精密動圧軸受の設計、加工法開発および多くの軸受応用製品の量産化を担当。2012年より光学式精密測定機の開発に従事。1993年第25回市村産業賞貢献賞、2002年大河内記念生産賞、2010年日本設計工業会論文MIR賞受賞。



山崎 大志 (やまざき ひろし)

アダマンド並木精密宝石株式会社研究開発本部モータ開発部課長。1999年国立八戸工業高等専門学校修了後、並木精密宝石株式会社に入社。一貫して、光学部品およびマイクロモーターの開発設計に従事。2012年より固有技術である光学部品加工、マイクロモーター加工・組立技術を融合・応用し、細径OCTプローブおよびそれらを適用した精密測定機の開発に従事。現在に至る。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(赤松 幹之、藤井 賢一:産業技術総合研究所)

この論文では、光断層計測法(OCT)と超小型モーターを統合することで、直径1.5mmという狭い隙間から内視鏡型の顕微鏡を挿入することによって、円筒内の内面を20nmの精度で評価できるようにした画期的な開発です。OCTは光ファイバーを用いた技術として始まっており、光ファイバーを用いた内視鏡型装置との相性が良いことから、世界トップクラスのマイクロモーターによって駆動するプローブ

に組み込み、自己位相検出技術を開発してOCTを高精度化することで、世界最高の精度の内視顕微鏡を実現できた。分解することなしに機器の内部を日常点検できるようになるので、品質管理の短時間化等に加え、将来は血管の内壁を検査する血管OCT等の医療応用も考えられるので、今後も発展性のある計測評価技術であると言えます。

議論2 コア技術の研究開発について

質問(藤井 賢一)

従来は380nm程度であった内面の距離(凹凸)測定精度を22nmまで飛躍的に向上させることに成功した要因として、光源の一部を自己干渉計に導き、波長走査速度をリアルタイムでモニタリングできるようにしたことが挙げられています。これがスペクトル干渉縞の周期の安定化に繋がり、距離測定の安定性が高まったということが述べてありますが、具体的にはphase-shifting method等を用いて距離計測を行っているのでしょうか。光学的な位相測定方法等について、もう少し詳しく記述して、表面形状測定原理等についても説明すると、読者の理解が深まると思います。

回答(古川 祐光)

具体的には、自己干渉計を用いて光源の波長走査速度をモニタリングしておき、あたかも走査速度を一定にしたときのように、検出光を補正しております。これが理解しやすいように図4を変更し、説明文もこの図を元にして技術内容が判りやすいように記載しました。

議論3 内視鏡型デジタル顕微鏡の応用について

コメント(藤井 賢一)

ジェットエンジンやタービンの日常点検等、1.5mmの隙間から挿入できることの利点を生かした応用例が挙げられていますが、さらなる小型化が実現できれば血管内壁や生体組織の観察への応用も考えられるのではないかと思います。機器以外への応用等についても検討されているものがあれば紹介してください。

回答(古川 祐光)

ご指摘のように、医療応用の方が早く実現されており、応用例として、血管OCTについて記載しました。コメントいただいたように、我々も生体組織の観察への応用も考えることが可能です。すでに、並木精密のモーターは血管OCTの論文に利用されており、我々も今後その分野での展開も視野に入れる必要があると考えています。

しかし、工業応用も重要にもかかわらず、あまり用いられることはありません。工業応用の方が、医療応用よりも求められるスペックが高く、コストは低くなければならぬためです。このため、この研究では血管OCTとは異なる性能を高め、工業応用に適したOCT内視鏡となるように努めました。

議論4 微細径プローブ先端の制御機構について

質問(藤井 賢一)

図7に並木精密が開発した直径0.9mmと1.5mmのモーターを用いた微細径プローブの説明があります。このような小型モーターの動作原理や機構についても説明があれば、モーター単体での応用も広がるのではないかと思います。

回答(古川 祐光)

図7に、マイクロモーターの構造写真(図7b、7c)を追加し、この論文に機構の説明と、動圧軸受けの説明を追加しました。

議論5 技術の統合について

質問(赤松 幹之)

OCT技術とマイクロモーターによるプローブ技術を組み合わせることで、高精度の内径を実現できたことは分かりますが、そもそもなぜこの技術に取り組むことになったのでしょうか。OCT技術は最初から

使うことになっていたのか、OCT 技術の応用を探していたのか、など色々な経緯が考えられますが、実際はどのようになっていたのでしょうか。その出会い自体も読者の参考になると思います。

回答（古川 祐光）

産総研へ訪ねてこられたときには、すでに OCT 基本技術は製作しており、自社のみで完成できるだけの技術はあったと考えます。通

常なら、自社で完結させようとすると思いますが、それでも産総研を頼ろうとする姿が、立派であると同時にやや疑問でもありました。青森工場に訪問したとき、その疑問がとけたので、その様子を、第 5 節「最後に」に記載させていただきました。出会いとは少し違うかもしれませんが、ものづくりをはぐくむ社風という意味で読者の参考になれば幸いです。

レアアース蛍光体の材料リサイクル技術開発

— 近未来型資源循環の先駆けとして —

大木 達也^{1*}、赤井 智子²、山下 勝²

材料を専門とする研究者と選別装置を専門とする研究者の連携によって、廃蛍光体から重レアアースのテルビウムを含む緑色蛍光体の、材料リサイクルを可能にする選別システムを実用化した。市中に出回った廃製品を元に、水平リサイクルよりさらに内側のループで、金属としてではなく、より高価な高機能材料の原料として金属循環を確立した例は、世界的にもほとんどない。これは欧州が推進する循環経済 (Circular Economy: CE) / 資源効率 (Resource Efficiency: RE) を基軸にした政策などでも、近未来の理想的循環と称されるリサイクルシステムである。今後、さまざまな廃製品の資源循環を確立し、我が国が都市鉱山開発で世界をリードする上で、近未来型資源循環の先駆けとなる成功例である。

キーワード: レアアース、リサイクル、蛍光体、高勾配磁選機、テルビウム、都市鉱山

Materials recycling technology for recovering rare earth fluorescent powder from fluorescent lamp sludge

—Pioneering near-future resource circulation—

Tatsuya OKI^{1*}, Tomoko AKAI² and Masaru YAMASHITA²

A materials recycling technology to recover green phosphor, including terbium, which is a heavy rare earth, from fluorescent powder in waste lamp sludge was realized by collaborating with researchers who specialize in materials and powder sorting. There are few cases worldwide in which materials circulation from post-consumer waste has been established in loops further inside than horizontal recycling. This is a recycling system which is described as an ideal circulation system for the near future in Europe's circular economy (CE)/resource efficiency (RE) policies, *etc.* This study is a successful example of Japan leading the world in urban mine development to establish a resource circulation system of various waste products, and becoming a pioneer in near-future resource recycling.

Keywords: Rare earth, fluorescent powder, high gradient magnetic separation, magnetic matrix, terbium, urban mine

1 はじめに

我が国は金属資源の大部分を輸入に依存している。特にハイテク機器の製造に欠かせないレアメタルは世界最大の輸入国であり、レアメタル資源の輸入によって製造業が成立しているといっても良い。レアメタル供給の問題は、多くが副産物で生産コントロールが難しい点、消費量が少ないため寡占状態になりやすく、国際情勢に左右されやすい点にある。ゆっくりと枯渇に向かうベースメタルに比べ、産出国事情等人為的要素に影響されやすいレアメタルは、いつ、どの金属の供給が滞るかを予測することが難しい。

レアメタルの1種であるレアアース (17 元素) は、中国が市場を独占している。対日禁輸政策やその後の輸出量制限により、一時的だが、国内産業が大きな打撃を被った「レアアース危機」は記憶に新しい。レアアース資源は、

アメリカ、オーストラリア等世界中に存在し、我が国の排他的経済水域 (EEZ) 内の海底下にも堆積していることは近年話題にもなった。中国が現在の市場獲得に至った理由は、極めて有力な鉱山を有しているためである。一つは他のレアアース鉱山に見られる放射性不純物をほとんど含まないこと。このため、簡易な資源処理で生産が可能である。もう一つは、磁石や蛍光材料として利用されるディスプレイウムやテルビウム等、重レアアースに富んでいることである。特に低炭素化に向けた世界的な動きの中、高性能モーター等の製造に必要な重レアアース資源は、注目度が高い。

この研究は、レアアース危機が本格化する前に端を発する。2005 年頃、価格が徐々に上昇してきたことから、手付かずの国内都市鉱山資源が俄かに注目されてきた。著者は、その頃より、磁石やコンデンサ等の物理選別技術開発

1. 産業技術総合研究所 環境管理研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西、2. 産業技術総合研究所 無機機能材料研究部門 〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31 関西センター

1. Environmental Management Research Institute, AIST Tsukuba West 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: t-oki@aist.go.jp, 2. Inorganic Functional Material Research Institute, AIST Kansai, 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda 563-8577, Japan

Original manuscript received January 8, 2018, Revisions received February 2, 2018, Accepted February 3, 2018

を実施してきたが¹¹、この研究では、廃蛍光ランプから、テルビウムを多く含むLAP（緑色蛍光体）を、高濃縮回収することが目的である。蛍光ランプは白色系と三波長系（レアアース系）に大別され、三波長系にはRGBに相当する3種の蛍光体を使用されている。この研究の課題は、白色・三波長廃蛍光体の混合スラッジから、ガラスや不純物、白色蛍光体を除去した上、緑色（G）のLAPのみを高濃縮して、再び蛍光体原料として利用することにある。

旧来、大学等で蛍光体選別が研究され、粒子密度や表面の親/疎水性を利用した選別が試されてきたが、白色系と三波長系すら選別することが困難であり、実用化に至ったケースはない。この研究の成功の発端は、一見して磁石に反応しないが、極めて強力な磁力下に置くと、LAPが選択的に磁着することを著者ら（赤井、山下）が見出したことである。この原理を工業的に利用するため、高勾配磁選機をLAP高濃縮装置へと改良した（大木）。この研究では、材料および選別を専門とする研究者の連携によって選別システムを開発し、実用化を果たすに至った。以下に、実用化に至る道筋を、特に選別装置開発の視点から記述する。

2 選別装置開発着手までの経緯

2.1 課題抽出以前の研究（2005年～2006年）

著者（大木）は、2005年末頃からレアメタルを含む廃製品のリサイクル技術の検討を開始していた。石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の調査事業で、小型燃料電池、自動車触媒、ネオジウム磁石、蛍光ランプの高度なりサイクル方法を模索した。当時からリサイクル工場では、直管型蛍光ランプの両端をカットし、ガラスやアルミを回収した上、水銀を含む廃蛍光体を適正処分する自動化技術が確立していた。その頃、我が国では、白熱灯から電球形蛍光ランプへ移行が目されており、リサイクル方法の確立が必要と考えられていたため、後続事業では、電球形蛍光ランプの選択破碎や蛍光体剥離方法を検討した。しかし、直管型に比べ、電球形蛍光ランプの種類は多様であり、網羅的な処理技術を開発する目途が立たずにいた。

他方、バイオ関連で磁気浮上の研究をしていた所内の研究者がその応用を模索しており、著者ら（赤井、山下）の研究に応用できないかと照会を受けた。当時、ガラスの研究をしていたが、超伝導磁石による磁気浮上（湿式法による吊下げ磁選に相当）を廃ガラスのリサイクルに適用することは資源価値的に見合いそうになく、より高価な対象として廃蛍光体を提案し、共同で検討を開始した。同時期に、所内のレアメタルタスクフォースで、ガラス化法によりLAPからテルビウムを回収する方法¹²を検討したが、コス

ト的に厳しい印象があった。また、大手ランプメーカーの技術者から、LAPはほとんど劣化しないため、廃蛍光体から再利用可能なLAP回収技術について、社会ニーズがあることを認識していた。

2.2 課題抽出と研究開発の開始（2007年～2011年）

2007年に著者ら（赤井、山下）が、磁気浮上による蛍光体分離試験を行ったところ、適切な界面活性剤の添加により、LAPのみが磁気浮上することを確認した。さらに、さまざまな蛍光体の磁気浮上試験を実施し、磁気浮上による蛍光体の分離方法を確立させた¹³。この頃には、レアアース価格が高騰しはじめ、ランプメーカーがこの技術に強い関心を示したため、プロジェクト提案に向けて本格的な準備を進めた。この準備の段階で、予てから蛍光ランプのリサイクル技術を検討しており、選別技術を専門とする著者（大木）に相談があり、実用化を目指すなら、磁気浮上より高勾配磁選の方が実現性が高いと回答、以後、高勾配磁選機の開発へと駒を進めた。

2009年に新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の希少金属代替材料開発プロジェクトに採択され、プロジェクトの一部として、高勾配磁選によるリサイクル技術開発が本格始動した。当初3年は、赤井、山下により、既存のバッチ式高勾配磁選機を用いたモデル試料による基礎試験を実施、同選別機によるLAP回収方法の基礎を確立し¹⁴、2011年5月にプレスリリースを果たした。当時はレアアース危機の最中（価格ピークは2011年10月）にあり、ランプメーカー等から多くの問い合わせが寄せられた。このような実用化を急ぐ声の中で、実際の廃蛍光体処理と連続システムの構築が急務の課題となり、NEDOプロジェクト後年度（2012年～2013年）における装置開発へと展開した。

3 選別装置開発の課題

3.1 高勾配磁選機の機構

基礎研究を始めていたNEDOプロジェクトの要請に基づいて、著者（大木）も本格的な装置開発を実施した。まずは、高勾配磁選機の原理を解説する。磁選機の磁気捕捉の強さは、通常、磁石表面の磁束密度（B）（単位、T：テスラ、1 T = 10,000 ガウス）で表される。ネオジウム磁石の表面磁束密度は0.35 T程度だが、磁気回路を組むと局所的に1 T程度を発現できる。また、電磁石は熱減磁するため、通常は2 T程度である。これに対し、超伝導磁石は10 Tを越える磁束密度が発現可能である。多くの磁選機は開放系で、磁束密度は距離の2乗に反比例して減衰し、磁気勾配（2点間の磁束密度差）が制御できないた

めスペックとして記載されないが、実際に粒子を引き寄せる「磁力」は、磁束密度(B)と磁気勾配(ΔB)の積(B・ΔB)である(図1上)。

一方、粒子側の磁石の付きやすさは単位体積当たりの磁化率(無次元数)で表される。これは物質の性質を表す指標であるが、磁石の付きやすさは粒子体積にも依存し、粒子が大きいほど磁石に着きやすくなる。また、鉱山やリサイクル等多種混合物を選別する場合、一般に50 μm以下の細粒子を、粒子バルクの性質(比重や磁性等)で高精度選別することは極めて難しい。このような細粒混合物を選別する際には、搬送や分散を容易にするため粒子を水に分散させたスラリーを対象とするが、細粒子では水の粘性や粒子表面の性質が支配的となり、粒子のバルク物性で粒子運動に差を生じさせることが難しくなる。しかし、著者ら(赤井、山下)の先の検討では、粒径5 μm程度の強磁性体でない蛍光体混合物から、超伝導磁石による磁気浮上で高精度なLAP回収が可能ことがラボ試験で確認された。この磁気浮上は吊下げ磁選機と同じ機構であり、開放系の磁選である。すなわち、開放系10 T程度に相当する磁力を以てすれば、5 μmのLAPが選択回収できるといことである。低コストな実用システム構築には、同じ磁力を常伝導で発現することが求められる。理論上は、開放

系の5倍の磁気勾配を発現すれば、開放系10Tに相当する磁力を発現可能であり、これを実現できる唯一の方法が高勾配磁選機である。

N極とS極を向かい合わせ、1Tの平行磁束が発現する場に磁性体を置いても、極めて強い磁場でありながら粒子は動かない。なぜなら磁気勾配がないからである(図1下)。逆に言えば、高い磁気勾配が発現できれば、低い磁束密度でも強い磁力が発現できる。このような解釈は古くからあったが、マサチューセッツ工科大学のH.H.Kolinらは、これを実現する高勾配磁選機の機構を1968年に提案した。物理選別機は近年も多くが開発されているが、選別機構自体を開発した例としては最も新しい事例である。彼らは、高透磁率細線の束(マトリックス)を平行磁束内に置くことで細線内に磁束を集中させ、細線周囲の空間に極めて高い磁気勾配を発現させることに成功した。この技術は、白色顔料にも使用されるカオリンの脱鉄(有色鉱物除去)法として実用化した。また、80年代には、石炭の脱硫選別(硫化鉄鉱物除去)等への応用研究も行われた。それまで、粒径50 μm以下の選別には、粒子表面性質を利用した浮選が主流であったが、この開発により粒子バルク性質を利用した選別技術でも、細粒選別の道が開かれた。

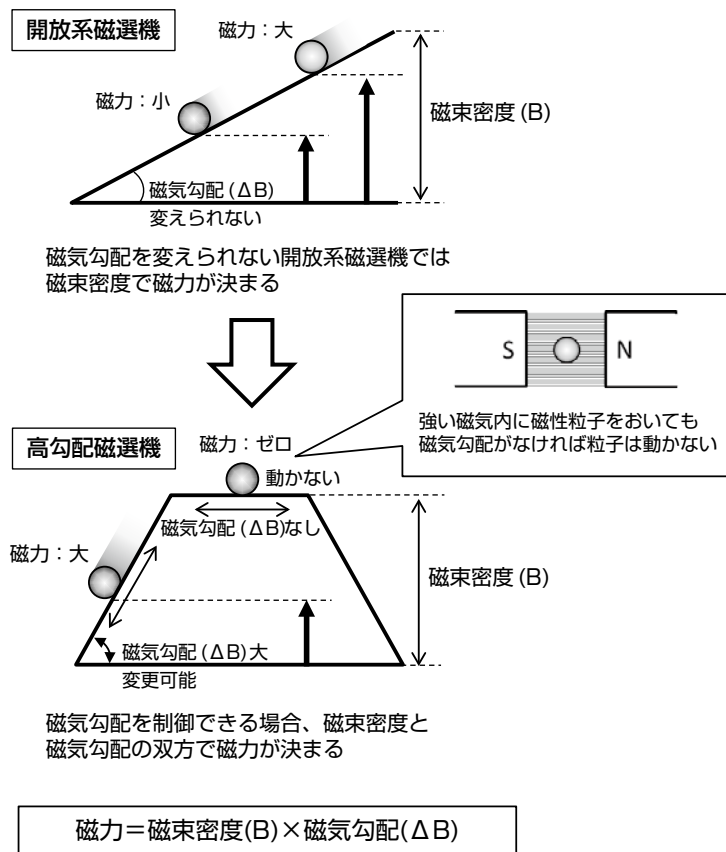


図1 開放系磁選機と高勾配磁選機の磁力イメージ

3.2 蛍光体選別の課題と開発目標

高勾配磁選機は蛍光体を常伝導で選別できる可能性があったが、実用機開発に向けて二つの課題があった。一つは、同磁選機では強い磁気勾配の付与はできても、その精密な制御はできないことである。マトリックスとしてエキスパンドメタル（金属板に切れ目を入れて引っ張り、菱形等の網目に加工したもの）等を使用するが、素材の透磁率、太さ、細線間の空間分布等により、磁束密度に応じて磁気勾配は固定される。つまり、電圧で任意の磁束密度に調整できるような制御ができない。さらに、空間内の磁力にはムラがあり、かつ、励磁によってマトリックスが収縮するため、ムラを正確に把握することもできない。マトリックスが粗な状態にあると、粒子の軌道により被る磁力が異なってしまうため、マトリックスを密な状態でスラリーを流し、すべての粒子をマトリックスに付着させたのち、励磁状態で非磁性粒子を洗い流す。しかし、粒子の抱き込みなどが解消できず、高精度な選別は難しい。二つ目は装置サイズである。同装置は鉱山ベースで開発されたため、連続式の商業機は大型装置であり、ベンチサイズ機はバッチ式のラボ機となる。蛍光体の処理量を考えれば、サイズ的にはラボ機で十分であるが、これをベースとした連続装置を新たに開発する必要があった。

また、そもそも、カオリンの脱鉄や石炭の脱硫は不純物除去（除去物を磁着回収）であり、極力強い磁力を発現させ、より細粒の鉄(硫化鉄)を回収することが目的であった。この時、多少のカオリンや石炭が誤って除去されても問題

はなく、選別の選択性が高くなくても目的を達成できた。一方、蛍光体の選別では、LAPを有価物として選択的に回収する（有価物を磁着回収）という発想である。LAPと他の粒子の僅かな透磁率差の間に選別境界を設定しなければならず、同時に小型の連続装置の試作を2年で達成するというのが、著者(大木)に課せられたNEDOプロジェクトのミッションであった。

4 小型高勾配磁選機の自動連続運転化

4.1 自動連続運転システムの概要とバッチ式プロセスとの比較

市販のバッチ式小型高勾配磁選機（Jones型湿式強磁力磁選機、最大1 T）をベースとして、自動連続運転を実現しつつ、高精度にLAPを回収できる磁選システムの開発を目指した。図2にバッチ式プロセスと、新規開発した自動連続運転フローを示す。バッチ式と異なる点が幾つかあるが、大きな違いはバッチ式では消磁・励磁の繰り返して非磁着物を水相に解放していたのに対し、連続システムでは、水流のみで非磁着物を洗い流す点である。その後、スラリー流速を最適化するとリンス効果が発現し、リンス工程をすべて省略しても十分な選別精度が維持できることを見出した。このシステムの検証のため、3組の自動・定量給排水システムとその制御機構を組み込んだ、自動連続運転式高勾配磁選機を試作した(図3)^[5]。その最適化に当たり、まずは、連続システムがバッチ式と遜色ない選別精度となるかを、予察検証した。ここで、バッチ式では前処

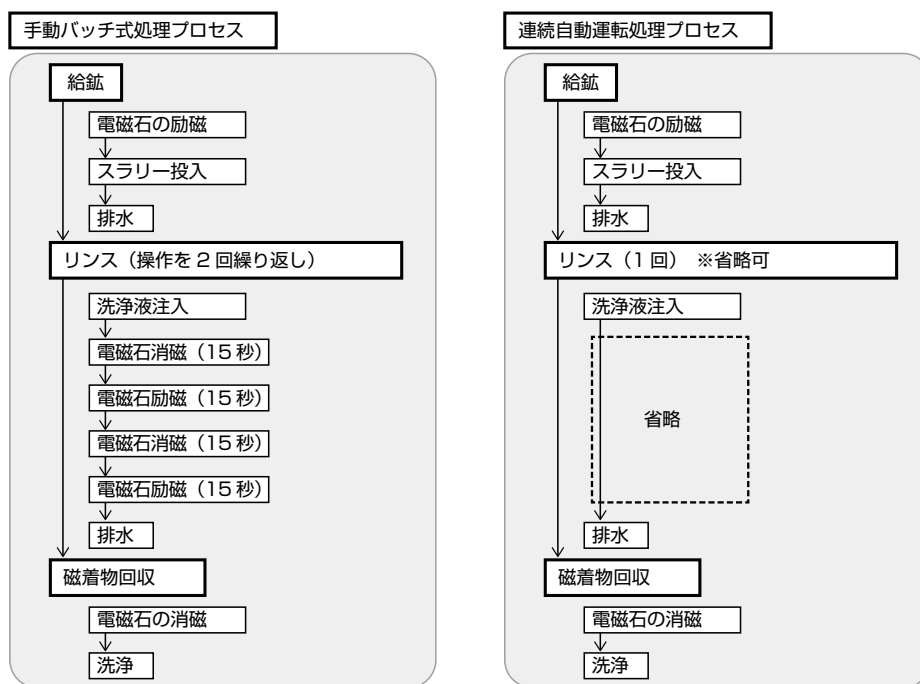


図2 従来のバッチ式プロセスと新規開発した自動連続運転フロー

表1 バッチ試験機と自動連続システム機の予察選別試験の結果

	回収率 <分配率 (%)>				純度 <品位 (%)>				前処理として、 ①38 μm篩分け(篩下回収) ②鉄除去磁選 (0.05 T 磁選-非磁着物回収) ③沈殿洗浄(上層部除去)3回 の3工程を実施		
	磁着物	リンス物	非磁着物	合計	磁選前	磁着物	リンス物	非磁着物			
手動 バッチ 試験	全体(歩留)	18.0	20.5	61.5	100						
	LAP	86.4	4.8	8.7	100	LAP	12.0	60.7	3.0	1.8	
	BAM+CAT	23.6	17.9	58.5	100	BAM+CAT	4.0	5.1	3.4	3.7	
	SCA	4.9	18.2	76.9	100	SCA	6.5	1.9	6.2	8.7	
	YOX	9.5	21.2	69.3	100	YOX	13.6	8.0	15.7	17.1	
	ハロリン酸	7.2	24.7	68.1	100	ハロリン酸	60.7	23.4	70.9	64.9	
	ガラス	5.5	6.2	88.4	100	ガラス	3.2	0.8	0.8	3.8	
自動 連続 運転 試験	全体(歩留)	17.9	0.0	82.1	100					前処理として、 ①20 μm篩分け(篩下回収) の1工程のみを実施	
	LAP	79.8	0.0	20.2	100	LAP	13.9	62.9	0.0		3.5
	BAM+CAT	27.7	0.0	72.3	100	BAM+CAT	7.3	9.7	0.0		5.5
	SCA	4.9	0.0	95.1	100	SCA	4.7	1.5	0.0		6.4
	YOX	7.0	0.0	93.0	100	YOX	16.9	7.7	0.0		22.3
	ハロリン酸	5.8	0.0	94.2	100	ハロリン酸	54.7	17.0	0.0		60.0
	ガラス	6.4	0.0	93.6	100	ガラス	2.3	0.7	0.0		2.2
酸化鉄	66.4	0.0	33.6	100	酸化鉄	0.2	0.5	0.0	0.1		

いずれもマトリックスにエキスバンドメタルを使用

※LAP (LaPO₄: Ce,Tb)、BAM (BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺)、CAT (CeMgAl₁₁O₁₉: Tb³⁺)、SCA ((SrBaCa)₁₀(PO₄)₆Cl₁₂: Eu)、YOX (Y₂O₃: Eu³⁺)

理として、① 38 μm 篩下回収、② 鉄除去磁選、③ 沈殿洗浄3回の3工程を施していた。一方、自動連続システムでは、供給流量や供給時間の精密制御により、前処理の大幅な簡略が可能であることが分かり、① 20 μm 篩下回収のみを実施した。表1に、エキスバンドメタルを用いて、バッチ式で試験した結果と自動連続システムでの結果を示す。②と③の工程を省略したにもかかわらず、自動連続システムの鉄や結着剤、アルミナ微粉の残留量は極僅かであった。両者の選別結果を比較すると、回収率は、自動連続システムの方が6.6%低い、磁着物中のLAP純度(品位)は、自動連続システムの方が2.2%高く、前処理を大幅に省略した同システムでも、バッチ式と概ね同等の選別性能が得られることが確かめられた。

4.2 従来型マトリックス(エキスバンドメタル)を用いた制御最適化

市販のエキスバンドメタル・マトリックスを図4に示す。マトリックス内のどこかでスラリー流路を遮蔽するよう、積層させたエキスバンドメタルをカラム内に挿入して使用する。粒子はほぼ例外なく細線に衝突し、磁着物はそのまま磁気捕捉される。非磁着物も多くは細線上あるいは磁着物に挟まれる形でマトリックスに付着するが、スラリーやリン

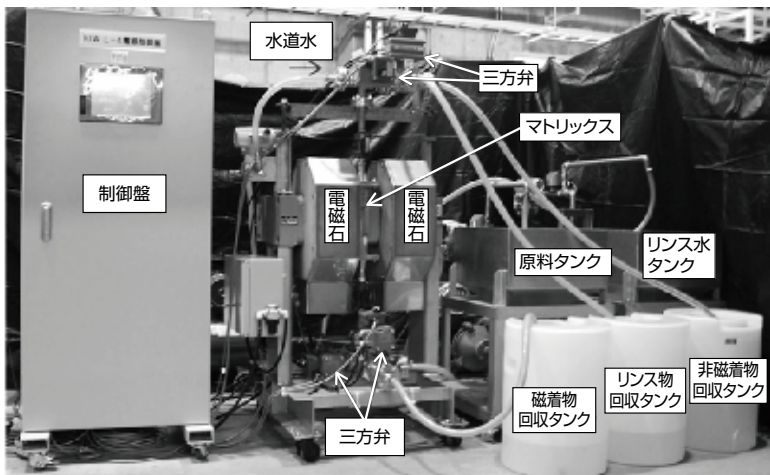


図3 自動連続運転式高勾配磁選機(試作機)

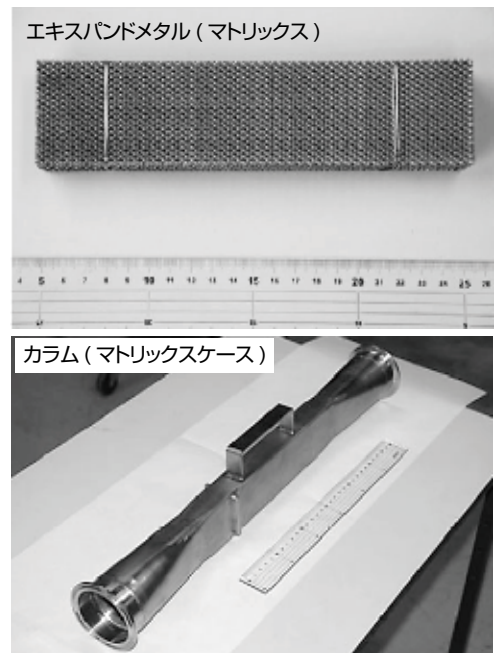


図4 エキスバンドメタル(マトリックス)とカラム(マトリックスケース)

ス水で洗い流すことで選別される。すなわち、粒子がマトリックスに留まり「磁着物」として回収されるか、脱着して「非磁着物」として回収されるかは、磁力と水の流速の関係で決まる。しかし、そもそも磁性不純物を除去する装置として発展したため、磁着物の純度向上のためのリンス流速制御という認識が低く、市販装置にこの機能は組み込まれていない。磁化率の僅かに異なる粒子を、適切に磁着物と非磁着物に分けるには、磁束密度と流体速度・時間の双方を厳密に制御することが必要となる。知財の関係で詳しい検討過程は省略するが、種々の試験を繰り返したのち、次に1サイクルの最適磁着量を決める試験を行った。図5は1磁選サイクルにおけるマトリックスの磁着量と、LAPとLAP以外の分離効率を示したものである。分離効率は磁着量50g前後で最大となる。マトリックスの磁力分布は非常にムラが大きく、初めは磁力が極めて強い特異部にLAP以外も磁着して、選択性がやや低くなる。その後、一定量が磁着すると磁力が均一なサイトへの磁着が起り、選択性が改善される。しかし、さらに磁着量が増えると、マトリックスに磁着物と非磁着物が積層して磁力が低下し、本来、磁着させたいLAPが磁着しなくなって分離効率は再び低下する。

以上の結果、本試験で用いたエキスバンドメタルでは、1サイクルで磁着すべき量は50g程度と判断された。磁着量を50gとしたときの系統的選別試験結果を図6にまとめる。1回目の磁選（粗選）でLAP純度は16.5%から61.9%に向上する。このときのLAP回収率は79.4%、次いでBAM + CATが27.3%、酸化鉄が15.2%である。他の成分はいずれも8%以下で、この時点で92~95%が非磁着物として除去される。磁着物にもう1度磁選（精選）を施すと、積算のLAP回収率は64.2%に低下するが、LAP純度は82.0%まで向上する。さらにもう1度繰り返すと（再精選）、積算LAP回収率は56.4%に低下するが、

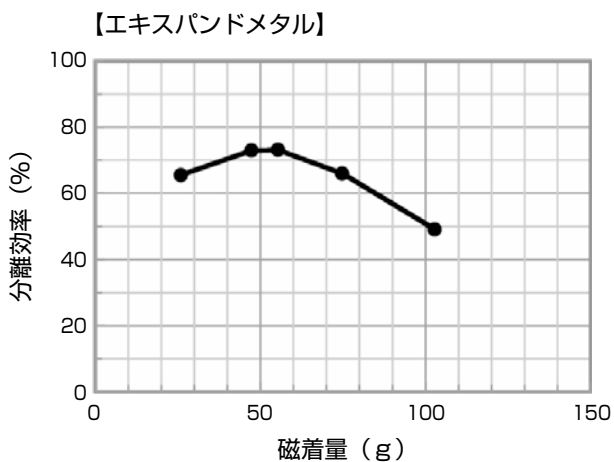


図5 磁着量とLAPの選別性（エキスバンドメタル使用）

LAP純度は85.9%まで向上し、SCA、YOX、ハロリン酸系蛍光体の除去率は99%以上となる。以上の結果から、LAP回収率優先条件として「磁選1回」を、LAP純度優先条件としては、回収率の低下を考慮して「磁選2回」が適当であると判断し、自動システムのプログラムとして組み込んだ。

5 高選択性マトリックスの開発

5.1 高選択性マトリックス概要

前章では、従来型マトリックスを利用して、その性能を最大限に引き出すための自動連続運転システムを開発したが、このシステムを以てしても、選別精度不足となる場合に備え、選択性の高いマトリックスを開発した。一般的な磁選適用例では、磁着物と非磁着物の磁化率差は非常に大きく、事実上、磁性粒子と非磁性粒子の分離となることが多い（図7）。高勾配磁選機でも、強い磁力で磁性微粒子を極力除去することに意識が置かれ、マトリックス内の磁力のムラは配慮されない。一方、蛍光体はLAPの磁化率が最も高いもののいずれも弱い磁性体であり、他の蛍光体との磁化率の差は僅かである。そこで、選別性を改善するために、新たな思想のマトリックス開発に着手した。この研究で開発したマトリックス¹⁶⁾は、従来のように粒子を機械的に衝突させるのではなく、流路に均一な磁力を発現させ、粒子が障害物のない流路を通過する間に所定の磁化率を持つ粒子だけが磁力でマトリックスに引き寄せられ、磁着するものである。これにより、一定の閾値より磁化率が小さい粒子はマトリックスを素通りするので、選択性の高い分離を達成することが期待できる。開発したマトリックス（図8）は、有限要素法磁界シミュレーションにより、内部の磁力分布を最適化して設計した。剛性の高い、高低差1mm以下の波形磁性体壁を向かい合わせた構造を持ち、マトリックス空間に規則的かつほぼ均一な磁力を発現できる。磁着した磁性粒子が脱着しないよう、壁面近傍のみ磁力が強くなるよう設計した。計算結果の一例として、装置磁束密度0.9Tにおける、マトリックス周辺の磁束密度(B)分布と、マトリックス内の磁力(B・ΔB)分布を図9に示す。NEDOプロジェクト中は、磁力分布に規則的な濃淡が残っていたが、その後開発した最新マトリックスでは、ほぼ均一な磁力の発現に成功し、極めて精密な選別閾値設定が可能となっている。

5.2 新規高選択性マトリックスの選別性能

新規マトリックスの選別特性を把握するため、前章のエキスバンドメタルと同様にして、1サイクルの最適磁着量を検証した。新規マトリックスの磁着量と、LAPとLAP以外の分離効率を図10に示す。エキスバンドメタルに比べ粒

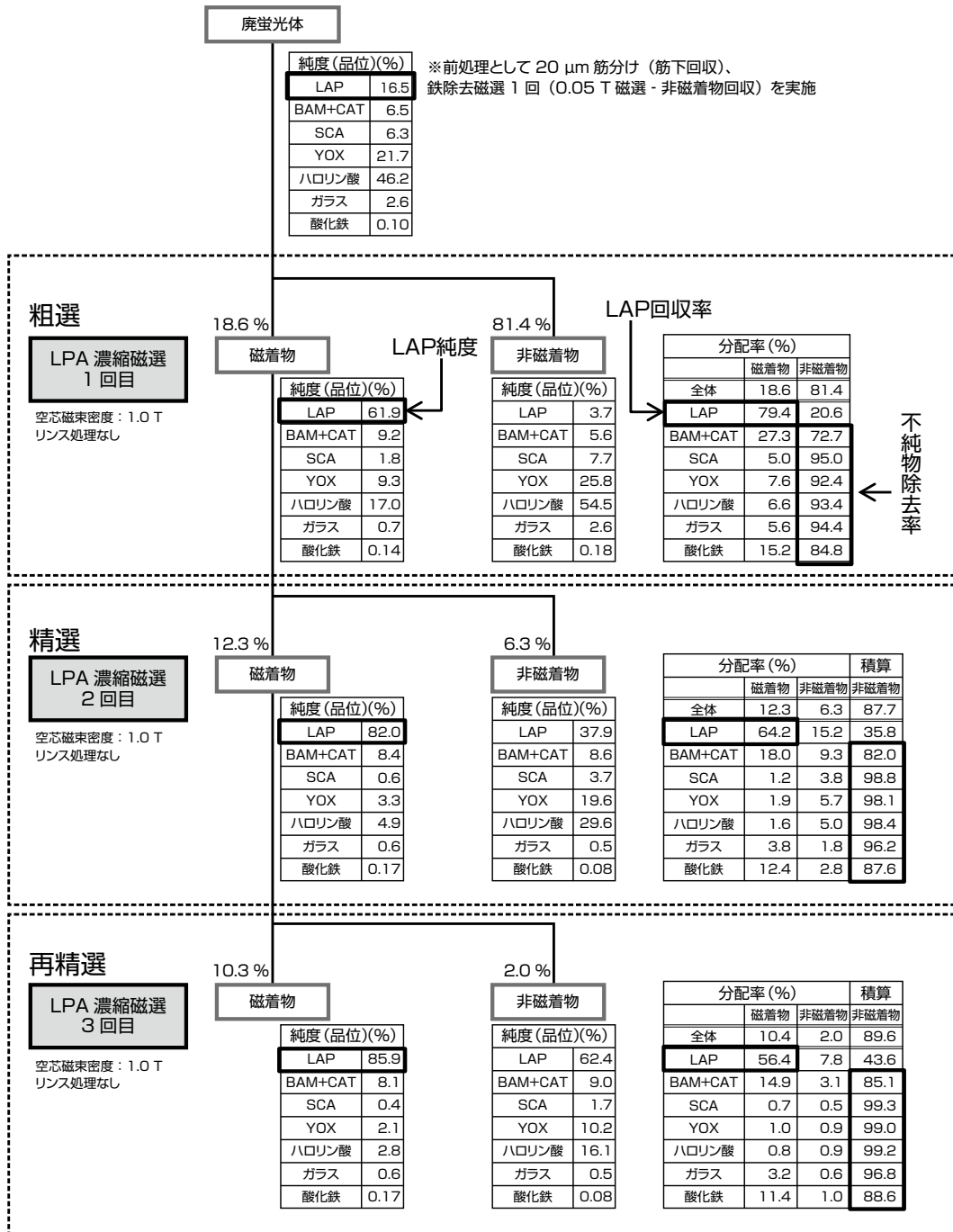


図6 エキスパンドメタルによるLAP高純度化磁選の結果

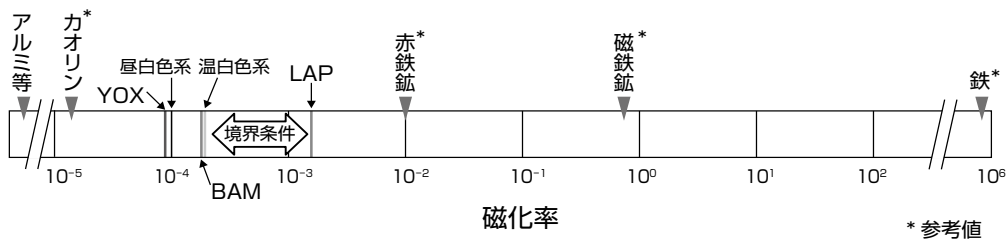


図7 各物質の磁化率と本研究の選別境界条件

子との接触機会が少ないことから、磁着量が少ない時の分離効率はやや低い値となる。しかし、磁着量が 50 g 以上となっても分離効率はほとんど低下せず、180 g 付近でも 70 % 近くを推移している。これは、マトリックス空間のどこに粒子がいても、壁面に引き寄せられる一定の遠達磁力が発現し、また、壁面近傍の強い磁力によって、壁面上に磁着物層が形成されても LAP の脱着が起きないためと考えられる。表 2 に従来型エキスパンドメタルと新規マトリックスの選別結果を比較した。予備試験の結果から、両マトリックスにおいて回収率優先条件～純度優先条件の 3 例挙げた。両者の回収率、分離効率が大きく異なるが、LAP 純度および LAP 濃縮比は、いずれも新規マトリックスの方が 1～3 割程度良い結果となった。

一方、このマトリックスには原理上の弱点が存在する。

従来は流体が粒子を搬送するが、新規マトリックスでは、粒子自体の運動によってマトリックスに到達しなければならない。したがって、粒子速度が遅い細粒子ほど、1 サイクルに要する時間が増大する。通常の磁選対象である数十 μm 以上の粒子ではほとんど影響はないが、廃蛍光体は 5 μm 程度と磁選粒径としては極めて小さいため、スラリー流速をエキスパンドメタルの 1/20 程度にする必要がある。しかし、新規マトリックスには、これを補う二つの可能性がある。1つは、1 回の磁着量を多くできること。既述のように、同一サイズなら、エキスパンドメタルの 4 倍程度の磁着物を捕捉・回収可能である。もう一つは、発生した磁束を無駄なくマトリックス空間に分配できるため、LAP の捕捉に必要な電磁石の出力を大幅に低減できる点である。表 2 で示したように、ほぼ同等の選別結果を得るのに、エキ

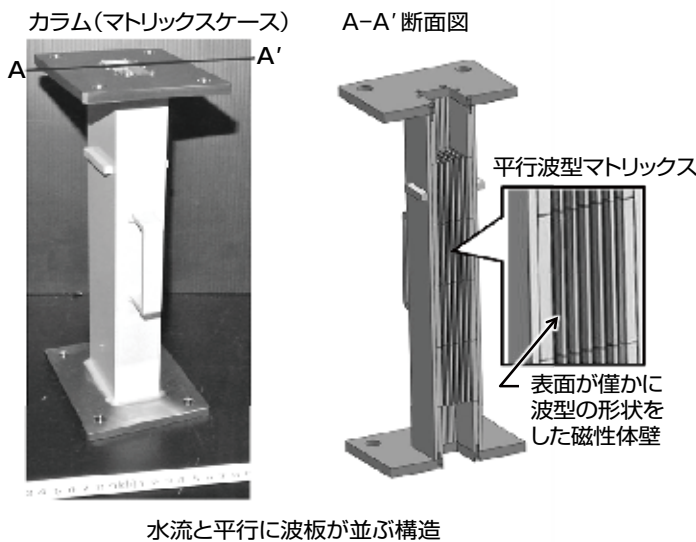


図 8 新規開発した高選択性マトリックス

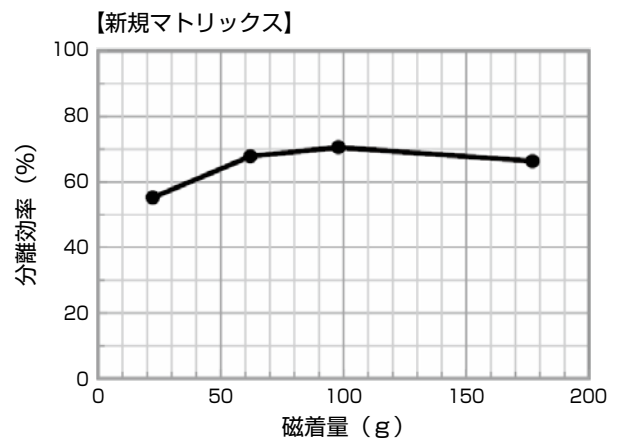


図 10 磁着量と LAP の選別性 (新規マトリックス)

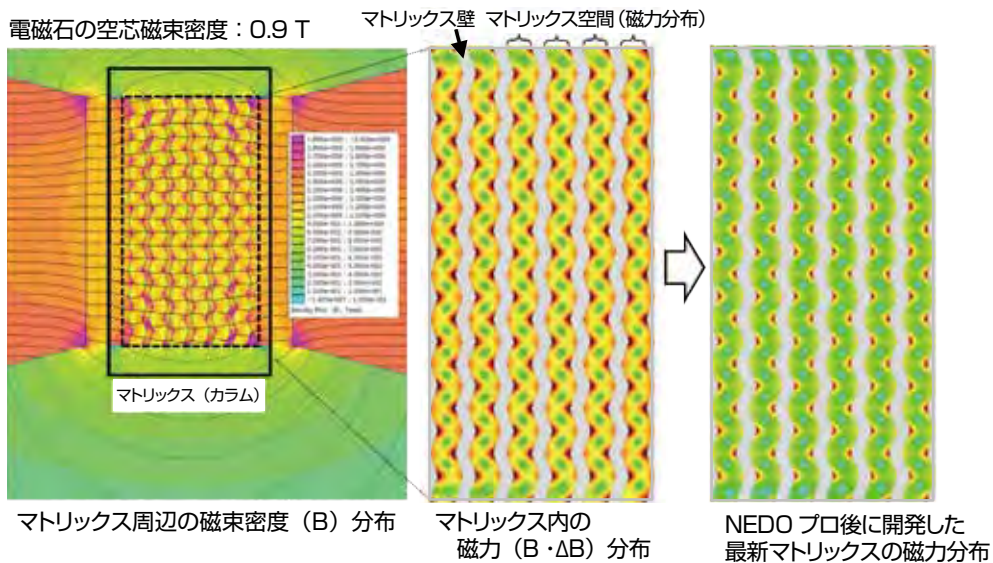


図 9 高選択性マトリックス周辺の磁束密度とマトリックス内磁力のシミュレーション結果一例

表2 エキスパンドメタルと新規マトリックスのLAP高純度化磁選の結果

エキスパンドメタル					新型マトリックス						
処理条件	空芯磁束密度 (T)	1.0			処理条件	空芯磁束密度 (T)	0.4				
	給鉱流速比	1	1.2	1.45		給鉱流速比	0.05				
	リンス流速比	リンスなし				リンス流速比	なし	1.0	2.9		
歩留まり (%)		20.6	17.9	16.3	歩留まり (%)		15.4	13.8	13.4		
LAP 回収率 (%)		84.2	79.8	78.8	LAP 回収率 (%)		83.1	79.7	73.0		
LAP 分離効率 (%)		73.1	72.0	72.1	LAP 分離効率 (%)		76.2	74.1	68.4		
LAP 濃縮比		4.1	4.5	4.8	LAP 濃縮比		5.4	5.8	5.5		
純度 (品位) (%)		選別前	磁選後 磁着物			純度 (品位) (%)		選別前	磁選後 磁着物		
	LAP	13.9	53.0	62.8	64.2		LAP	13.9	60.2	64.5	70.1
	BAM+CAT	7.3	10.3	9.7	10.0		BAM+CAT	7.3	9.7	9.8	9.6
	SCA	4.7	1.8	1.5	1.4		SCA	4.7	1.6	1.5	1.1
	YOX	16.9	8.8	7.7	6.9		YOX	16.9	6.9	6.5	5.2
	ハロリン酸	54.7	24.5	17.0	16.2		ハロリン酸	54.7	19.5	15.9	12.3
	ガラス	2.3	1.0	0.7	0.7		ガラス	2.3	1.5	1.3	1.1
	酸化鉄	0.2	0.6	0.5	0.6		酸化鉄	0.2	0.6	0.6	0.6
LAP 濃縮比 = LAP 回収率 / 歩留まり					LAP 濃縮比 = LAP 回収率 / 歩留まり						

エキスパンドメタルでは 1.0 T (出力 73 %) が必要であるが、新規マトリックスでは 0.4 T (出力 15 %) で済む。すなわち、前者と同等の 1.0 T を発生させれば、もっと容積の大きなマトリックスが利用できる。1 時間当たりの蛍光体処理量は、エキスパンドメタルの 12.9 kg/h に対し、新規マトリックスでは約 1/12 の 1.1 kg/h だが、容積を 12 倍にすれば同等の処理量を得ることができる。

以上、新規マトリックスは開発途上にあるものの、すでに、従来型マトリックスとは異なるさまざまな特徴、優位性が示された。また、上述したように、NEDO プロジェクト後にさらなる高精度型の開発に成功し、すでに、海底熱水鉱床や銅鉱石脱砒素等の国のプロジェクトでも、その実力を発揮している。従来型マトリックスと違い、僅かな磁化率の差でも選別可能である性質を利用すれば、今後、さまざまな用途での活用が期待される。

6 まとめ～選別システムの実用化と近未来の資源循環の展望～

NEDO プロジェクトの後年度において、著者 (大木) を中心に小型高勾配磁選機の自動連続運転化を実施し、その後、磁選機メーカーと実施契約を締結した。この間、著者ら (赤井、山下) では、前・後処理工程の検討を実施した。また、市中回収廃蛍光体を対象に LAP のランプ試作試験を実施したところ、98.9 % の光束が発現する結果も得られている。光束維持率は問題なく、不純物を除去した LAP は新品 LAP とほぼ等しい輝度を示し、再利用可能であることを見出した。この技術について、我が国の水銀処理を

担う、廃蛍光ランプ処理最大手の野村興産株式会社が、2014 年に NEDO 助成事業に採択され、同社イトムカ鉱業所へ開発技術の導入が進められた。原型バッチシステムから、連続システム開発を経て、2015 年 2 月実用化導入された蛍光体選別システムの全容を図 11 示す。また、この研究の発端から、実用化に至る流れを図 12 にまとめた。この間、2013 年 10 月に「水銀に関する水俣条約」が採択、2016 年 2 月に条約が締結され、同社の水銀処理機能が大きい期待された。一方、2015 年 11 月に政府は、照明機器の省エネを進める方針を発表、その後、照明機器メーカーが次々と蛍光灯照明器具の生産終了を発表している。蛍光ランプ自体の生産は継続するが、国内では徐々に縮小傾向となるであろう。このように、廃製品を取り巻く環境は時々刻々と変化しており、リサイクル技術は時代の変化に適合してゆくことが求められる。さらに言えば、製品の省エネ性は、製造時・使用時だけでなく、資源再利用の可能性や、廃棄時の消費エネルギーも加味されるべきであり、リサイクル技術が確立されているからこそ、安心して新製品を開発できるという時代も訪れるであろう。

一方、本報では、選別装置開発の視点からその経緯をまとめたが、リサイクルのされ方についても特筆すべき点がある。一般にリサイクルと呼ばれるものには 2 種類ある。一つは製造工程内リサイクル (工程内廃材)、もう一つはポストコンシューマーリサイクル (市中廃製品) である。この研究では両者ともに実現可能だが、一般的には前者に比べ後者のハードルは非常に高い。図 13 に示すように、製造工程内リサイクルは、工程管理された端材の再利用であり、

ある程度純度が確保されている場合が多い。生産性改善プロセスとしては重要であるが、1度も製品として社会利用されておらず、資源循環の確立には寄与しない。一方、後者は、不特定多数の廃製品が混濁とした状態に始まり、ここから資源を再利用することは難しい。後者は資源利用方法によって、さらにカスケードリサイクルと水平リサイクルに大別できる。我が国が長年取り組んできた廃棄物処理は、廃棄物にしないことを目的とした処理であり、再利用の用途を問うものではない。極めて高いリサイクル率を達成しているが、そのほとんどはカスケードリサイクルである。特に金属の場合は無害化することに主眼が置かれ、路盤材に利用するなど、本来、金属が持つ価値を全く利用していな

い例も多い。カスケードリサイクルが増えても、天然金属資源の輸入量を削減する効果はほとんどなく、廃製品を都市鉱山として利用するには、水平リサイクルを進めることが必須条件である。幸い金属は有機物と異なり、製錬原料とすることができれば、ほぼ完全に元の金属に戻ることができる。しかし、貴金属や銅を除くその他の金属は、手間のかかるリサイクル処理をしても、原料としての価格はそれほど高くなく、コスト的に不採算となることが多い。この研究の注目すべき点は、廃蛍光体からテルビウム金属を回収するだけでなく、LAPという高性能材料の原料とした点にある（図14）。廃蛍光体を再利用可能にした選別プロセス自体が世界初であるが、それ以上に、水平リサイクルよりさらに内側

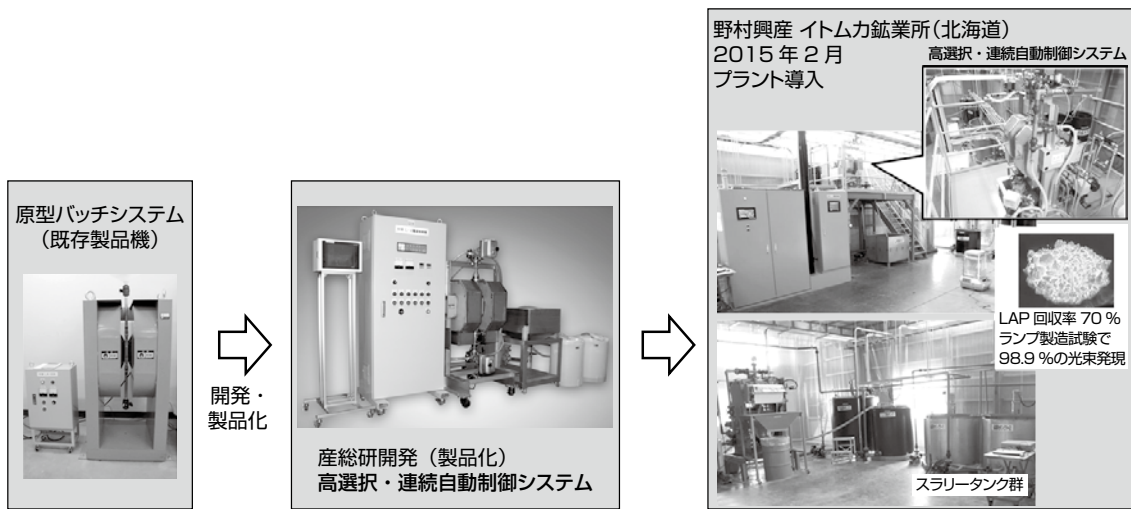


図 11 原型バッチシステムから実用化導入された蛍光体選別システムまでの装置全容

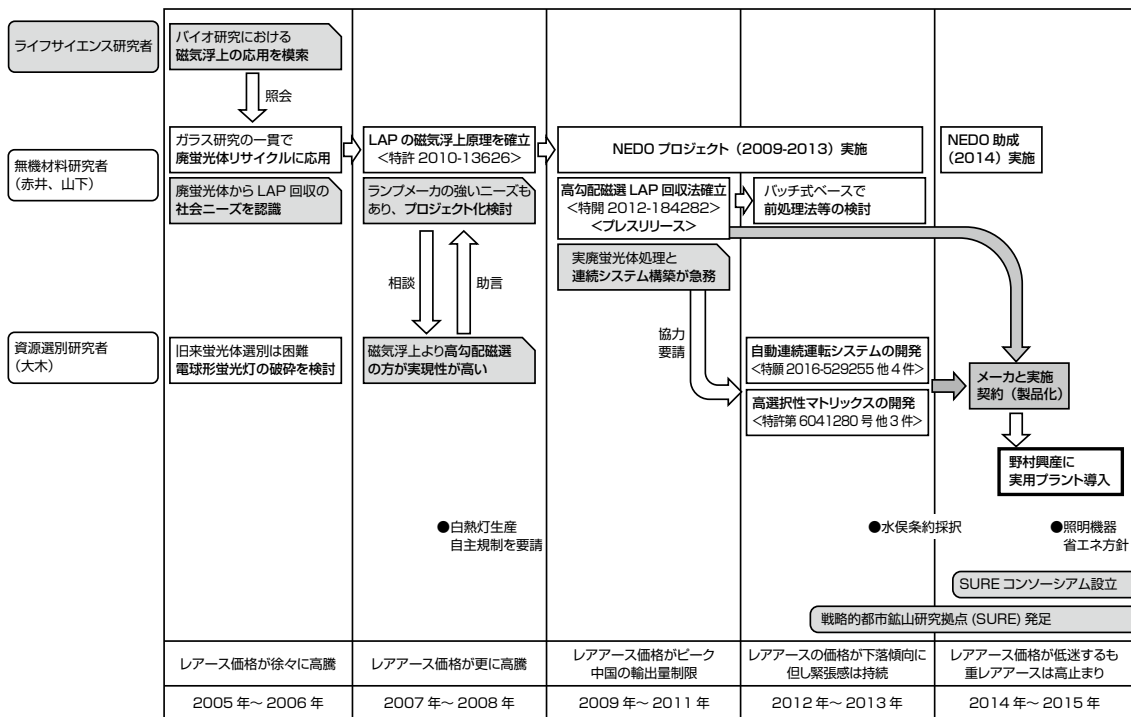


図 12 本研究の発端から実用化に至るまでの流れ

のループで金属循環を確立した例は、世界的にもほとんどなく、欧州の CE/RE 政策等でも近未来の理想循環とされるシステムの先駆けでもある。

本報で記した廃蛍光体の高度リサイクル技術は、紆余曲折を経ながらも、幾つかの好条件が重なることにより実用化を達成できた。一方、未来の都市鉱山確立には、より多くの廃製品について、少なくとも水平リサイクルに乗せる必要がある。それにはコストの問題が大きいですが、リサイクルの低コスト化には、リサイクル技術の革新だけでなく、

動 - 静脈が連携した社会システムそのものの変革が必要である。著者らは 2012 年に所内融合組織 SURE (戦略的都市鉱山研究拠点) を立ち上げ、翌 2013 年には、官民連携の SURE コンソーシアムを設立した。現在、産総研研究者 35 名と民間企業 61 社、公的機関 26 機関が会員となり、動 - 静脈連携による近未来の都市鉱山構築に向けて活発な活動を行っている。今後、我が国が都市鉱山開発で世界をリードする上で、この研究の成果が近未来型資源循環の先駆けとして参考になれば幸いである。

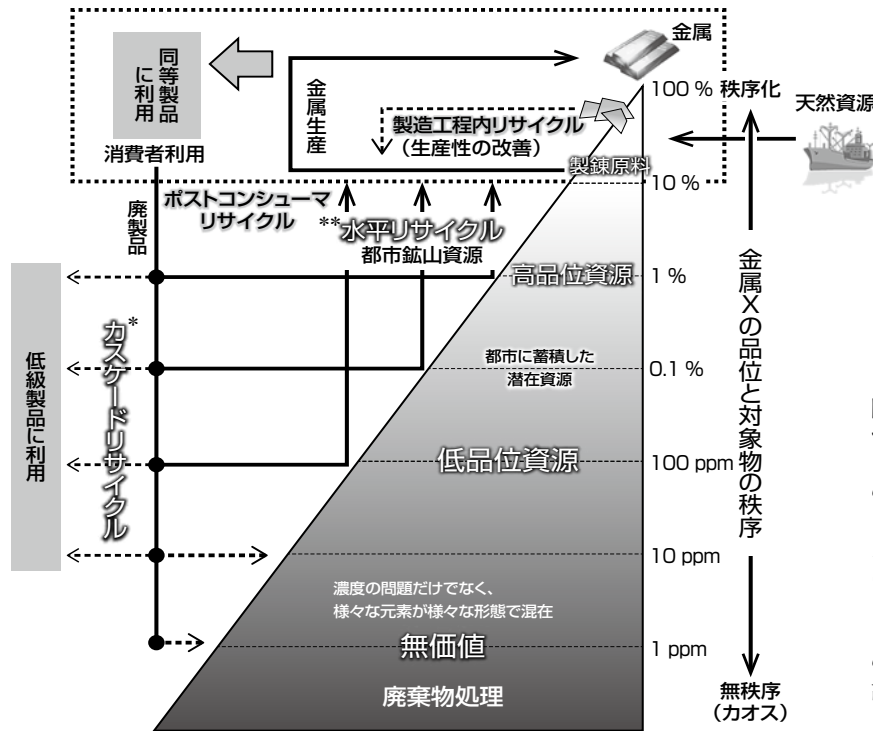


図 13 資源ポテンシャルと水平リサイクルによる都市鉱山の確立
 *カスケードリサイクルは、金属を元の製品よりも低級の製品に利用すること。主として無害化を目的としてセメントや路盤材に混ぜるなどもこれに該当。
 **水平リサイクルは、元の製品と同じグレードで再利用すること。金属の場合は、主として製錬原料化して高純度の金属として再利用することを指す。

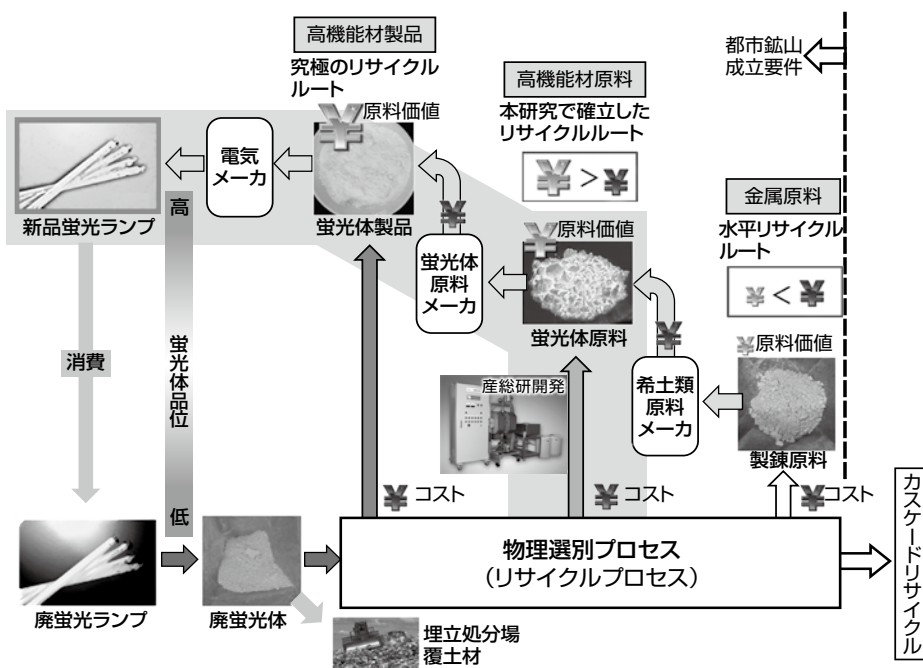


図 14 水平リサイクルとより高度な材料リサイクルループ

参考文献

- [1] 大木達也: 都市鉱山の戦略的な開発を支える物理選別技術—未利用・難処理資源の開発と我が国の資源ビジョン—, *Synthesiology*, 6 (4), 238–245 (2013).
- [2] 赤井智子: 蛍光体からの希土類元素の回収方法, 特開2009-96902, (2009).
- [3] 赤井智子, 安宅光雄, 山下勝: 廃蛍光体のリサイクル方法, 特開2010-13626, (2010).
- [4] 赤井智子, 山下勝, 大木達也: 蛍光体混合物の分離方法及び分離装置, 特許第5674142号, (2015).
- [5] 大木達也, 野口智弘, 羽澄妙子: 特願2016-529255 (他、外国出願4件), (2016).
- [6] 大木達也, 野口智弘, 羽澄妙子: 磁選機用マトリックス及び磁選機, 特許第6041280号 (他、外国出願3件), (2016).

執筆者略歴

大木 達也(おおき たつや)

1994年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士(工学)。早稲田大助手を経て、1995年工業技術院資源環境技術総合研究所入所。2015年より産総研環境管理研究部門総括研究主幹。タンタルコンデンサをはじめとするレアメタルリサイクル技術開発、海底熱水鉱床の選鉱技術開発等に従事。資源処理技術に関する多数のNEDO、JOGMECプロジェクトに参画。2013年産総研内に戦略的都市鉱山研究拠点(SURE)を、2014年にSUREコンソーシアムを設立。現在、SUREコンソーシアム会長。この論文では、高勾配磁選機・マトリックスの開発及び全般に渡る構成を担当した。



赤井 智子(あかい ともこ)

1990年大阪大学理学研究科無機物理化学専攻博士前期課程修了。1991年同後期課程中退。工業技術院大阪工業技術研究所(現産総研関西センター)入所。1997年理学博士(大阪大学)。1997年科学技術庁長期在外研究員(アイオワ州立大学材料工学科)。2000年～2004年JSTさきがけ研究員併任。2004年環境化学技術研究部門高機能ガラスグループ長。組織再編を経て現在に至る。専門は、ガラス材料、無機材料、蛍光材料。この論文では、研究開発・プロジェクトの経緯、ランプ性能試験等を担当した。



山下 勝(やました まさる)

1981年神戸大学理学部化学科卒。1983年京都大学工学研究科工業化学専攻修士課程終了。同年工業技術院大阪工業技術試験所(現産総研関西センター)入所。以降ガラス材料に関する研究に従事。2008年博士(工学)。現在無機機能材料研究部門研究主幹、高機能ガラスグループに在籍。この論文では、プロジェクトの経緯・磁選前後の処理等を担当した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(四元 弘毅: 産業技術総合研究所)

レアアース蛍光体のリサイクル技術を開発するにあたり、資源工学分野で用いられている高勾配磁選機の適用を試み、リサイクル技術

の実用化に成功しています。異なった分野の研究者が協力し、目標を明確に定め、研究を段階的に着実に進めて、新しいリサイクル技術を開発したことに意義があると考えます。

コメント(栗本 史雄: 産業技術総合研究所)

現代社会において、材料のリサイクルは最重要課題のひとつです。この論文はレアアース蛍光体の材料リサイクルの実用化について、材料を専門とする研究者と選別装置を専門とする研究者の連携による高度な知見の統合の成功例を紹介しています。論文の構成が明解で、詳細な図表も提示されていて、研究開発から実用化、さらに将来展望に至るシナリオを適切に記述しています。このことから、この論文はシンセシオロジーの趣旨に十分適っており、掲載にふさわしいと判断します。

議論2 シナリオについて

コメント(四元 弘毅)

異なった専門分野の研究者が協力したというのは重要なのは理解できますが、内部の固有情報の記述が目につきます。その辺を整理してはいかがでしょうか？

また、ライフサイエンス研究者の考え方や常識が、無機材料研究者と資源技術研究者のそれらとどのように反発・あるいは融合していったのかという情報が紹介される方が、読者にとっては価値があると思いますが、そのような記述はできないでしょうか？

回答(大木 達也)

まず、本誌は結果を淡々と記載する通常の論文誌と異なり、そこに引き着くための役割、構成、思想や戦略を記載するものと理解しました。その上で、ご指摘に合わせて、全面的に修正を行いました。

一方、後半のご指摘については、実態として各研究者のすべての意見を集約して、最適解を求めたわけではなく、各研究者の手におえない部分を、ライフサイエンス→無機材料→資源技術の順にパトパスし、実用化に向けた検討内容を、資源技術→無機材料にフィードバックしたため、反発に相当することは発生しませんでした。課題を1人で抱え込まずに、適材適所の役割を行った点が融合になるかと思えます。

コメント(栗本 史雄)

先に公表した大木(2013、シンセシオロジー)からの研究戦略の展開について、例えば「1章はじめに」の中で大木(2013)を引用して論じると、より論旨が明確になると思います。

回答(大木 達也)

「著者は、その頃より、磁石やコンデンサ等の物理選別技術開発を実施してきたが[1]、…」を追加いたしました。

コメント(栗本 史雄)

図12はこの論文のシナリオの流れを示しており、重要な図と思います。上記コメント2とも関連しますが、日本(あるいは産総研)の動向として、SUREの設立等を追加してはいかがでしょうか。

回答(大木 達也)

この論文記載のSUREおよびSUREコンソ等について、図に追加いたしました。

コメント(四元 弘毅)

要旨の「市中に出回った～世界的にもほとんどない。」という記述ですが、金や白金のリサイクルがすでに存在しているのと矛盾しないでしょうか？それら貴金属のリサイクルとはカテゴリーが異なるなら、その説明を記述しないと読者は理解できないと思います。

回答(大木 達也)

銅や貴金属のリサイクルは、元の「金属」と同等の価値で(インゴツ

トとして) 再利用する「水平リサイクル」に相当します。この研究では、「水平リサイクルよりさらに内側のループで金属循環を確立した例」(図 14 参照) に相当します。つまり、廃蛍光体を「レアアース金属」としてではなく、より付加価値の高い「蛍光体原料」として再利用可能にしました。元の製品に戻すという意味では、これも「水平リサイクル」と思われるかもしれませんが、通常は、元の「金属」に戻すの

が最上位のリサイクル概念であり、今回は、それを越えた価値物として再生したという点で、世界的にも稀な例と言えます。

ご指摘の箇所は「水平リサイクルよりさらに内側のループで、金属としてではなく、より高価な高機能材料の原料として、金属循環を確立した例は」に修正しました。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定 2007年12月26日

改正 2017年 4月 1日

1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、報告、論説、座談会記事、読者フォーラム

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

①研究論文

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

②報告

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

③論説

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

④座談会記事

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

⑤読者フォーラム

シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また本誌の主旨に合致した読者への有益な情報提供などを掲載した記事とする。1,200文字以内で自由書式とする。

編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

3.1.2 研究論文については、下記の研究論文の構成および書式にしたがうものとし、報告・論説については、構成・書式は研究論文に準拠するものとするが、サブタイトルおよび要約はなくても良い。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

3.2.4 研究論文・報告・論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文・報告・論説）を明記する。

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

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

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

3.2.8 本文は、和文の場合は9,000文字程度とし、英文の場

合は刷上りで同程度(3,400ワード程度)とする。

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

3.2.10 研究論文における査読者との議論は査読者名を公開して行い、査読プロセスで行われた主な論点について3,000文字程度(2ページ以内)で編集委員会が編集して掲載する。報告または論説における編集委員との議論は、編集委員が必要と認める場合に編集委員名を公開して行い、主な論点について800文字程度(半ページ以内)で編集委員会編集して掲載する。

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

3.3 書式

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

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

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

3.3.4 図については画像ファイル(掲載サイズで350 dpi以

上)を提出する。原則は白黒印刷とする。

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8560

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第1
産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

5 著者校正

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

6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

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

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

Editorial Policy

Synthesiology Editorial Board

Objective of the journal

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

Content of paper

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

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

Subject of research and development

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

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

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

Peer review

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

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

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

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

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

References

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

Types of articles published

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

Required items and peer review criteria (January 2008)

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

Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised April 1, 2017

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

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

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

① Research papers

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

② Reports

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

③ Commentaries

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

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

④ Roundtable talks

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

⑤ Readers’ forums

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

3.1.2 Research papers should comply with the structure and format stated below, and reports and commentaries should also comply with the same structure and format except subtitles and abstracts are unnecessary.

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

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

3.2 Structure

3.2.1 The manuscript should include a title (including

subtitle), abstract, the name(s) of author(s), institution/contact, main text, and keywords (about 5 words).

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

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

3.2.4 Research papers, reports, and commentaries shall have front covers and the category of the articles (research paper, report, or commentary) shall be stated clearly on the cover sheets.

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

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

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

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

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

3.2.10 Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly, and the Editorial Board will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or a maximum of 2 pages with the names of the reviewers disclosed. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article. Regarding the reports and the commentaries, discussion with the Editorial Board members will be opened at the Board's discretion. In this case, the Editorial Board will edit the discussion to about 800 Japanese characters (less than half a page) with the names of the Board members disclosed.

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

3.3 Format

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4 Submission

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

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

The submitted article will not be returned.

5 Proofreading

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

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

本誌の目的は、研究の成果を社会に役立てていくにはどのような「シナリオ」が有効であるのか、その具体的な事例を積み上げていくことにあります。自治体が設置する試験研究機関は、一般に「公設試」と略称されますが、中小企業によるイノベーション創出を目的として、研究成果を地域社会に還元する活動の最前線に立っています。本号は、そのような公設試の活動の一端を紹介する論文として、『糸引きの少ない納豆「豆乃香」の開発』を掲載しています。近年、健康食として注目を集めながらも消費が頭打ちとなっている納豆について、海外展開を明確な目標として掲げ、それを可能とする技術を公設試が開発しました。それだけでなく、大学のデザイン研究者や有名レストランのオーナーシェフも巻き込んで、産地としての戦略を策定しています。本誌がこれまで蓄積してきた「シナリオ」群の幅をさらに広げる事例としても着目されます。本論文を皮切りとして、今後、公設試からの投稿が続くことを期待したいと思います。

本号に掲載された他の論文でも、「地域」や「異分野融合」が、イノベーション創出のキーワードとなっていることが伺えます。「海底の地震・津波堆積物」では、地域社会に深刻なダメージを与えかねない津波の履歴を明らかにする研究が、海

洋地質学的調査と物理学的洞察、古生物学的知見の見事な融合によって進められているさまが紹介されています。「直径1.5 mmで実現する内視鏡型デジタル顕微鏡」は、東北の精密機器メーカーの、圧倒的世界最高性能を目指す情熱が、産総研の光技術研究者を突き動かすことで、共に比類のない両者のコア技術が融合され、革新的な内面測定技術へと結実した経過を述べています。「レアアース蛍光体の材料リサイクル技術開発」では、ライフサイエンス研究者が研究していた磁気浮上の技術が、廃蛍光管からの蛍光体を選別する手法として原理的に有効であるとガラス研究者によって示され、さらに資源選別技術を専門とする研究者がそれを工業的に成立させました。ある分野から別の分野へと、技術が有機的に受け渡されたことで結果を生んだ好例です。

イノベーションとは、事物の新結合・新機軸であると言われる。産業において革新的な技術の開発が重要であることは論を待ちませんが、それだけでビジネスの差別化を図るのが難しいことも、また事実でしょう。本号の4報の論文は、専門性の高い研究者が、その専門における研究開発を遂行するに止まることなく、他の専門家との新結合により新機軸を打ち出すことの重要性をよく表していると思います。

(編集幹事 池上 敬一)

シンセシオロジー編集委員会

委員長：三木 幸信

副委員長：湯元 昇 (国立循環器病研究センター)、四元 弘毅

幹事 (編集及び査読)：池上 敬一、金山 敏彦、清水 敏美、牧野 雅彦

幹事 (普及)：赤松 幹之、小林 直人 (早稲田大学)

幹事 (出版)：高橋 正春

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

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

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

TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

ホームページ：http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/synthesiology/index.html

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

Synthesiology Editorial Board

Editor in Chief: Y. MIKI

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

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

Editors: N. AYA, Y. ARIMOTO (RIKEN), S. ICHIMURA (Nagoya University), Y. OGASAKA (Japan Science and Technology Agency),
A. ONO, A. KAGEYAMA, C. KURIMOTO, M. GOTOH, S. NAITOU, K. FUJII, T. MATSUI (Institute of Information Security), H.
YOSHIKAWA (Japan Science and Technology Agency)

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

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

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

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

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

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

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

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

科学的な発見や発明が社会に役立つまでに長い時間がかかったり、忘れ去られ葬られたりしてしまうことを、悪夢の時代、死の谷、と呼び、研究活動とその社会寄与との間に大きなギャップがあることが認識されている。そのため、研究者自身がこのギャップを埋める研究活動を行なうべきであると考え。これまでも研究者によってこのような活動が行なわれてきたが、そのプロセスは系統立てて記録して論じられることがなかった。

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

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

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

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

Synthesiology 第11巻第1号 2018年3月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所



Research papers

Development of low sticky texture natto “MAMENOKA”

Y. KUBO and R. NAKAGAWA

Submarine earthquake- and tsunami-induced event deposits

—*Disturbance of the sea floor by huge earthquakes and their related tsunamis,*

and the use of disturbance records in marine sediments for the history of past huge earthquakes and tsunamis—

K. IKEHARA and K. USAMI

High-accuracy endoscopic microscopy using a thin, 1.5 mm diameter probe with optical coherence tomography

H. FURUKAWA, N. NOGUCHI, H. YAMAZAKI and T. ASADA

Materials recycling technology for recovering rare earth fluorescent powder from fluorescent lamp sludge

—*Pioneering near-future resource circulation—*

T. OKI, T. AKAI and M. YAMASHITA

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*