

Synthesiology

魚の鮮度保持のためのシャーベット状海水氷製氷機の開発

ジメチルエーテル (DME) 燃料品質の標準化

データストレージ用磁気テープの高密度化研究

細胞チップを用いた迅速高感度マラリア感染症診断法の開発

シンセシオロジー編集委員会

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標と社会的価値、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスを記述した論文誌です。本号論文の価値が一目で判るように、編集委員会が作成したシンセシオロジー論文としてのポイントを示します。

シンセシオロジー編集委員会

魚の鮮度保持のためのシャーベット状海水氷製氷機の開発 永石 博志ほか

魚の鮮度保持のために海水をシャーベット状に凍らせた氷の利用に着目し、低コストかつ安定的供給が可能で、漁船に搭載可能な製氷機を開発した過程を紹介している。従来の技術では困難な課題を解決するため、メカトロニクス技術、製氷技術、鮮度評価技術を融合して新しい製氷機の開発に成功している。企業、公設試、国研がそれぞれの得意とする技術・ノウハウを持ち寄り、ひとつの目標に向けて協力した産学官連携の成功事例を詳細に紹介した論文である。

ジメチルエーテル (DME) 燃料品質の標準化 小熊 光晴

ジメチルエーテルは石油代替燃料とのひとつとして、様々な用途に有望視されているが、その市場導入にあたっては燃料品質の標準化が必要となる。本論文では、その国際標準化の取り組みが詳細に紹介されている。燃料品質の定義や試験方法を定めるまでのプロセス、各国の機関におけるラウンドロビンテストとその実施に向けた多国間調整の実際が紹介されるとともに、多様なステークホルダーが関わる標準化の難しさにも触れられており大変興味深い。

データストレージ用磁気テープの高密度化研究

—バリウムフェライトテープの市場導入までの道のり— 原澤 建ほか

社会で取り扱われる情報、データの急激な増加に対応するため、磁気テープシステムにおいて高密度化の限界が見え始めたメタル磁性体を凌駕する新素材としてバリウムフェライトに着目し、高密度化の再加速に成功した事例を紹介している。バリウムフェライトテープを実用化するために、社内でのテープ製造技術、社外での高感度磁気ヘッドや信号処理技術等、材料開発に加え周辺技術も含めた開発を行い、バリウムフェライトテープをデータストレージ用テープとして事実上の標準化を達成した過程が示されている。

細胞チップを用いた迅速高感度マラリア感染症診断法の開発

—200万分の1の感染を見出しマラリアに立ち向かう— 橋本 宗明ほか

世界三大感染症のひとつであるマラリアの迅速かつ高感度な診断法の開発過程が紹介されている。途上国の医療現場で使用するため、感染の有無だけではなく感染の重症度も明らかにすることが必要というコンセプトのもと、各種診断法の比較、細胞チップの開発、それを用いた検出法の開発、大学と共同したアフリカ現地での実証試験という一連の研究が実施された。本論文では、新しい診断法の社会実装を目指した取り組みの過程が詳細に示されている。

Synthesiology 第10巻第1号(2017.3) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
魚の鮮度保持のためのシャーベット状海水氷製氷機の開発 ・・・永石 博志、稲田 孝明、吉岡 武也、佐藤 厚	1-10
ジメチルエーテル (DME) 燃料品質の標準化 ・・・小熊 光晴	11-23
データストレージ用磁気テープの高密度化研究 —バリウムフェライトテープの市場導入までの道のり— ・・・原澤 建、野口 仁	24-32
細胞チップを用いた迅速高感度マラリア感染症診断法の開発 — 200 万分の1 の感染を見出しマラリアに立ち向かう — ・・・橋本 宗明、八代 聖基、山村 昌平、片岡 正俊	33-40
編集委員会より	
編集方針	41-42
投稿規定	43-44
編集後記	49
「Synthesiology」の趣旨	
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Development of a compact, onboard slurry icemaker to rapidly produce optimal ice for maintaining freshness of marine products --- H. NAGAISHI, T. INADA, T. YOSHIOKA and A. SATO	1
Standardization of dimethyl ether (DME) fuel specifications --- M. OGUMA	11
A study on high-density recording with particulate tape media for data storage systems—On the process of introducing barium-ferrite tape media to the market— --- T. HARASAWA and H. NOGUCHI	24
Development of a cell microarray chip system for early and accurate malaria diagnosis—Finding one parasite in 2 million erythrocytes for elimination of malaria— --- M. HASHIMOTO, S. YATSUSHIRO, S. YAMAMURA and M. KATAOKA	33
Editorial policy	45-46
Instructions for authors	47-48
Aim of <i>Synthesiology</i>	

魚の鮮度保持のためのシャーベット状海水氷製氷機の開発

永石 博志^{1*}、稲田 孝明²、吉岡 武也³、佐藤 厚⁴

鮮魚の品質は漁獲時が最高であり、鮮度保持には漁獲時から消費までの一貫した最適処理が必要である。実用的には魚体を傷つけず急速冷却が可能で活締め効果が期待できるシャーベット状海水氷の活用が効果的である。この論文では、「食の安全・安心」とともに、国内外市場のコールドチェーンでの競争力強化に貢献できる製氷機、すなわち漁船上で連続的かつ安定的に海水を原料にシャーベット状海水氷を効率よく製氷できる製氷機を開発するまでの経緯と設計方針およびその効果を示す。

キーワード：製氷機、スラリーアイス、新鮮さ、水産物、コールドチェーン

Development of a compact, onboard slurry icemaker to rapidly produce optimal ice for maintaining freshness of marine products

Hiroshi NAGAISHI^{1*}, Takaaki INADA², Takeya YOSHIOKA³ and Atsushi SATO⁴

Marine products require optimal cold storage transport to maintain freshness and minimize damage. Slurry ice is suitable for this purpose due to its softness and immediate cooling capability. This paper describes the process from design to commercialization of a compact icemaker that continuously, stably, and rapidly produces slurry ice and can be placed on fishing vessels. This icemaker is expected to increase the competitiveness of both domestic and international cold chains by advancing both food safety and security.

Keywords: Icemaker, slurry ice, freshness, marine products, cold chain

1 はじめに

健康で豊かな食生活を確保するため、1965年に「食生活の体系的改善に資する食料流通体系の近代化に関する勧告（通称コールドチェーン勧告）」が公示された。それ以来、冷蔵や冷凍等の温度管理により、生鮮食品の劣化を最小限に抑えた物流手段で、広域流通や長期間の保存が可能となる品質管理が求められるようになった。また、食の安全・安心を求める消費者ニーズに応えるために、生産地や市場から消費地までの低温流通体系（コールドチェーン）のインフラ整備による高度化やトレーサビリティの確保のための技術開発が進み、さらに HACCP^{用語1} 対応や食品安全マネジメントシステム規格 ISO22000 認証の取得等、厳しい衛生管理基準への対応が迫られている。加えて、生食に用いられる鮮魚については、品質としてより高鮮度のものが高付加価値市場を形成する。

魚の鮮度保持を実現し、高付加価値を提供するためには、流通途中からの処置では不十分であり、漁獲時からの迅速な処理とそれに続く一連の適切な処置が不可欠である。一般に、漁場で水揚げされた魚は、劣化を防止し品質を保つために、魚船内に氷とともに低温保持され帰港する。ここで使われる氷は出航時に船に積み込み、多くは真水を原料とした破碎氷やフレーク氷が用いられる。さらに、魚の生きの良さを保つために「活締め」等の特殊な処理をすることがある。この活締め処理は、より高鮮度な保持を可能とする有効な初期処理とされており、魚体の暴れを防止し、生体エネルギー源である ATP^{用語2} の減少と乳酸の上昇を遅らせ肉質の劣化を防ぎ、死後硬直までの時間を遅らせる。さらに、微生物の繁殖が起りやすい血液を抜くことにより腐敗の原因となる微生物の繁殖を遅らせることができ、自然死させた場合と比較して長時間鮮度を高く保

1 産業技術総合研究所 北海道センター 〒062-8517 札幌市豊平区月寒東 2-17、2 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東、3 函館地域産業振興財団（北海道立工業技術センター） 研究開発部食産業技術支援グループ 〒041-0801 函館市桔梗町 379、4 株式会社ニッコー 〒084-0924 釧路市鶴野 110-1

1. Hokkaido, AIST 2-17 Tsukisamu-Higashi, Toyohira-ku, Sapporo 062-8517, Japan * E-mail: h.nagaishi@aist.go.jp, 2. Research Institute for Energy Conservation, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan, 3. Industrial Technology Center, Hakodate Regional Industry Promotion Organization 379 Kikyochō, Hakodate 041-0801, Japan, 4. Nikko Co. Ltd. 110-1 Tsuruno, Kushiro-shi 084-0924, Japan

Original manuscript received May 17, 2016, Revisions received July 5, 2016, Accepted July 15, 2016

つことができる。しかし、その効果は認められているもののこれらの処理は一尾ずつに施す必要があり、非常に労力がかかるため、高級魚や比較的大型の魚以外では多くの現場において実施するのが難しい現状である。活締めと同じように、鮮度を高く保つためには、魚が暴れる苦悶死を避けるため、致死温度以下の低温に保ち致死時間を短くする必要がある。これには、氷の利用が考えられ、氷の粒径が小さく流動性が高く、魚との接触頻度が高く熱交換速度の速い急速冷却効果の高いシャーベット状の水が適している。このような氷を利用すれば、活締めよりも魚を大量にかつ容易に処理することができ、活締めとほぼ同様の効果が期待でき、軽くてやわらかいので、特に傷つきやすい魚の劣化を防止し、鮮魚の商品価値を高く保つことができるため、産業上有効な手段になり得ると考えられる。

この論文では、漁獲から消費地までの流過程で水産物の高鮮度保持に極めて有効なシャーベット状海水氷を供給するために、海水を原料とし漁船上で連続かつ安定的に製氷できる製氷機を開発するまでの経緯と設計方針、その効果を報告する。

2 製氷機開発に至る経緯

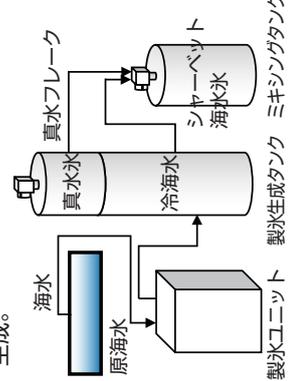
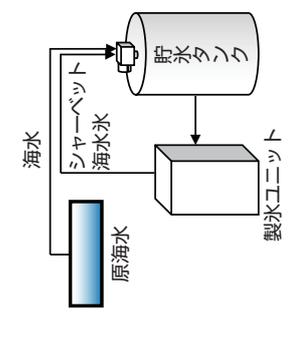
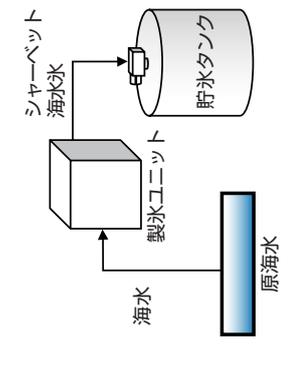
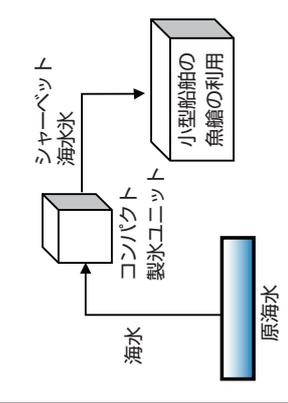
鮮魚の高付加価値化のために、魚体の高鮮度保持に最適な氷の性状を明らかにし、この性状を満たす氷を漁場において迅速かつ連続的に安定して製造できる製氷機を開発することが望まれていた。具体的には漁船搭載用の小型で高性能な国産シャーベット状海水氷製氷機である。1980年代の数多くの研究例が示すように、シャーベット状の水の有用性はすでに知られ注目されていた^{[1][2]}。しかし、当時開発されていた微細氷製氷機はほとんどが陸上設置型であり、製氷に20～24時間を要し、必要量の氷を直ちに漁船に供給できないため貯水タンクが必要等、設備面では大型でコスト高になるなどの課題があった(表1)。すなわち、シャーベット状海水氷を低コストで安定的に供給できる製氷機がなく、十分な実用化には至っていなかった。漁業における氷利用は、現在でも漁船への氷の積載には待ち時間も含めて比較的長時間を要するために、作業効率の低下が作業者の負担となっている。また、漁獲量の事前予測が必ずしも正確ではないために必要な氷の積載量の把握が難しく、必要以上の氷を積載して漁に出ると、氷費用、荷重増による燃料費増等経済的な負担と無駄が多くなる。過剰積載を避けた場合には、万一氷量が不足すれば漁獲物全体の品質保証ができず、商品価値が著しく低下するリスクが大きくなる。そこで、製氷機を漁船に搭載し、漁場までの往復路で海水を原料として製氷できれば、氷の積載時間の省略、燃費の節減、漁獲量に合わせた製氷量

の調整ができ、時間的にもコスト面でも大きな利点が得られる。

株式会社ニッコーは、地場産業への貢献を図るため、商品の付加価値を高め、地域ブランドの確立につながる水産加工に関わる技術開発を模索しており、「鮮度に勝る付加価値はない」との着眼から、生産現場から消費地までの鮮度保持を可能とする鮮度保持技術に着目した。同社は、真水を微粉碎した数ミリ程度の微細氷で農産物を繭のように包んで高密閉性と至適温度・湿度環境を実現できる野菜用の鮮度保持システムを先行して開発し、商品化しており、この技術の水産物に応用しようと氷を利用した鮮魚の鮮度保持技術について調査した。シャーベット状海水氷製氷機の開発例が国内外で数社見受けられたが、ほとんどが表1に示したカナダ、ドイツ、アイスランド等の先行企業の基本技術に類似したものであった。特許についても数件あるものの、いずれも装置形状に若干の差がある程度で、存続期間が終了したものもあり、製氷制御についてはノウハウに依存している部分が多いと見られ、微細氷の生成制御技術については不明な点が多いことがわかった。そこで、類似製氷機および微細氷の使用経験のある漁業関係者の聞き取り調査を行うなど、開発目標とする装置の具備すべき性能、生成氷の保持すべき特性および使用時の問題点等の情報収集を行い、開発すべき製氷機および微細氷の基本仕様の検討を行った。しかし、製氷が行われるジェネレータ内は基本的に直接見ることができず、試験で得られる様々な結果がどのようなメカニズムで得られているのか、そのメカニズムに基づいて改善にどのような対応法が考えられるのかなどの十分な知見を持ち合わせていなかった。また、社内に魚の鮮度を評価する技術がなかったので、鮮魚に対する氷の使用法および鮮度保持効果に関する知見も十分には得られなかった。すなわち、最適氷の仕様、また最適氷の仕様を満たす製氷条件および制御法については詳細な部分で不明な点が残っていたので、得意とするメカトロニクス技術を活かして鮮度保持のニーズに応えられる製氷機を自社生産するための設計を完全に行うまでには至らなかった^{[3][4]}。

これに対して、産業技術総合研究所は、氷生成や成長等に関する基礎的研究を行っており、超音波振動を利用したシャーベット氷の生成^{[5][7]}、不凍タンパク質や合成高分子を利用した氷の生成・成長制御^{[8][10]}、気泡を含有した機能性氷の生成等^{[11][12]}、製氷制御技術、特に氷の性状を左右する初期の核生成と結晶成長の制御に関する多くの知見を有していた。これらの知見は、鮮魚の鮮度保持に必要な氷の性状および使用法が提示されることにより初めて具体的に活かされるものであり、シャーベット状微細氷のプ

表1 海外の主なシャーベット氷製氷機の比較（2008年当時）

生産国	カナダ A社	ドイツ B社	アイスランド C社	開発機（設定目標）
製氷方法	<p>原海水を製氷ユニットに送り込み生成されたシャーベット氷を生成タンクへ送り込む。そこで分離された上部の塩分の無い氷をスクレーパーで削り取り、フレック状の氷と冷海水をミキシングタンクにて混合させ海水シャーベット氷を生成。</p>  <p>製氷ユニット 製氷生成タンク ミキシングタンク</p>	<p>原海水を製氷生成タンクに貯め製氷ユニットと循環を繰り返し、長時間（20時間～24時間）をかけて海水シャーベット氷を生成。</p>  <p>製氷ユニット 貯水タンク</p>	<p>原海水を製氷ユニットに直接供給する。運転開始数分後に、連続的に海水シャーベット氷を生成。</p>  <p>製氷ユニット 貯水タンク</p>	 <p>製氷ユニット コンパクト製氷ユニット 小型船舶の魚艙の利用</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・シャーベット氷の含有率を自由に調整できる（0～100%） ・シャーベット氷の温度が高く融けやすい。 ・装置が大型で機能が複雑なため装置の保守・点検、メンテナンスが大変である。 ・シャーベット氷を連続して生成できるが、生成タンクを一旦停止させると、スクレーパーが凍りつくため氷が必要ない時も稼働していかない可能性がある。 ・製氷生成タンク冷海水の塩分濃度調整が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・シャーベット氷生成方式が循環方式で長時間（20時間～24時間）かかるので、生産スケジュールの調整が難しい。 ・シャーベット氷の生成温度を自由に調整できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・原海水を製氷ユニットに接続するだけで瞬時に連続してシャーベット氷を生成できるコンパクトな設備（船舶搭載が可能） ・シャーベット氷の濃度（氷含有率）を瞬時に自由に調整できる機能を持ち合わせている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・大量製氷を維持したままコンパクト化 ・日本国内に多い20トン未満の小型漁船に搭載可能なコンパクトユニット ・従来装置よりも生成量が多くシャーベット濃度の濃いものを生成可能 ・冷凍ユニットと製氷ユニットがセパレート式であるため省スペースで設置可
氷の性状、性能	約50 μm、-1.5℃、10 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）	約1 mm、-3.2℃、18 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）	約10 μm、-3.2℃、8 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）	約10 μm、-3.2℃、8 kW（7.5 t/d 製氷時標準動力）
船舶への搭載	不可	不可	可能（100トンクラス）	可能（20トンクラス）
付帯設備	大きなタンクが必要 シャーベット氷生成のためのミキシングタンクが必要	貯水タンク、製氷タンクが必要	陸上設置使用では、生成量が少ないため貯水タンクが必要	魚艙を貯水タンクとして使用することで小さな漁船でも使用可能

ロタイプ製氷機の開発において有効な設計方針および基本仕様の設定に役立つと期待された。

一方、函館地域産業振興財団（北海道立工業技術センター）は、魚介類の高鮮度保持に関する技術開発について早くから取り組んでおり、一例として最も鮮度低下が速い魚種といわれるスルメイカを対象として、食品の品質変化の定量的解析と鮮度低下に関する生化学的な検討を通して、鮮度保持のメカニズムを解明し、地域産業と共同で高鮮度スルメイカの商品化技術を開発していた^[13]。しかし、先述したようにシャーベット状の水を活用した低温処理の効果や利点は期待されていたものの、実際にシャーベット状の微細氷を十分に供給する手段が見当たらなかったため、種々の魚種や条件下で鮮度保持効果を確認するための試験結果の蓄積には難があった。漁獲物の鮮度保持効果に関する知見は、製氷機の生成する最適海水氷の性状の把握にも必要であり、製氷条件を制御する組込みソフトに求められる制御機能の設定にも不可欠であった。

このように、各々得意な技術分野を有する三機関が図1に示すように連携し、補完的に技術情報を交換しながら、それまで各機関の単独の技術開発のみでは実現できなかった製氷機の開発を目指した。これにより、さらに魚種、魚体に合わせた温度管理や鮮度管理に利用できる氷を製氷して、コールドチェーンで活用を図る利用基準の検討が可能になった。

3 製氷機の開発

まず、塩分濃度、海水温度等の環境条件によって異なる海水の性状変化に応じて最適な海水氷の製造条件をリアル

タイムで制御できる組込みソフト等の制御系の開発には、最適氷の仕様を知る必要がある。最適氷の仕様を知るには実際に魚を用いた鮮度評価試験を並行して行う必要がある。また、最適氷の仕様がわかっても何をどのように制御すれば結果として仕様を満たす製氷ができるのか、製氷のメカニズムや製氷技術に関する知見が不可欠である。

一般に氷の生成は、液相中の水分子が集まり結晶の種となる微小なクラスター（集団）を作る核生成（核形成）とその核が成長する結晶成長の2段階からなる。純水の場合は静かに冷却していくと凝固点以下になっても核生成が起きず過冷却状態となりやすい。凝固点との差である過冷却度は核生成の駆動力となり、最大過冷却度は水の体積の減少により増加する。古典的核生成理論によれば、液相から固相へ相変化する核生成の駆動力は液相と固相の自由エネルギー差であり、核の体積増加による自由エネルギーの減少量が表面自由エネルギーの増加量より小さいときには核生成は促進されない。このバランスが等しくなる臨界点を越えると表面自由エネルギーの影響が小さくなり核が安定して核生成が促進されると考えられている^[14]。

一方、現実の多くの場合は非水溶性の不純物（異物質）の存在により不均質核生成が起りやすい。図2に冷却固体面で起きる製氷のイメージを示す。不均質核生成においては、固相（氷）と液相（海水）と異物質（ここでは冷却固体面）の界面自由エネルギーを考慮する必要があり、固液間より固相と異物質間の界面自由エネルギーが小さいときには、固相は液相より異物質と接する方が全界面自由エネルギーが小さくなるので核生成が容易となる。したがって核生成温度は、水溶液濃度や異物質の固体表面の性状

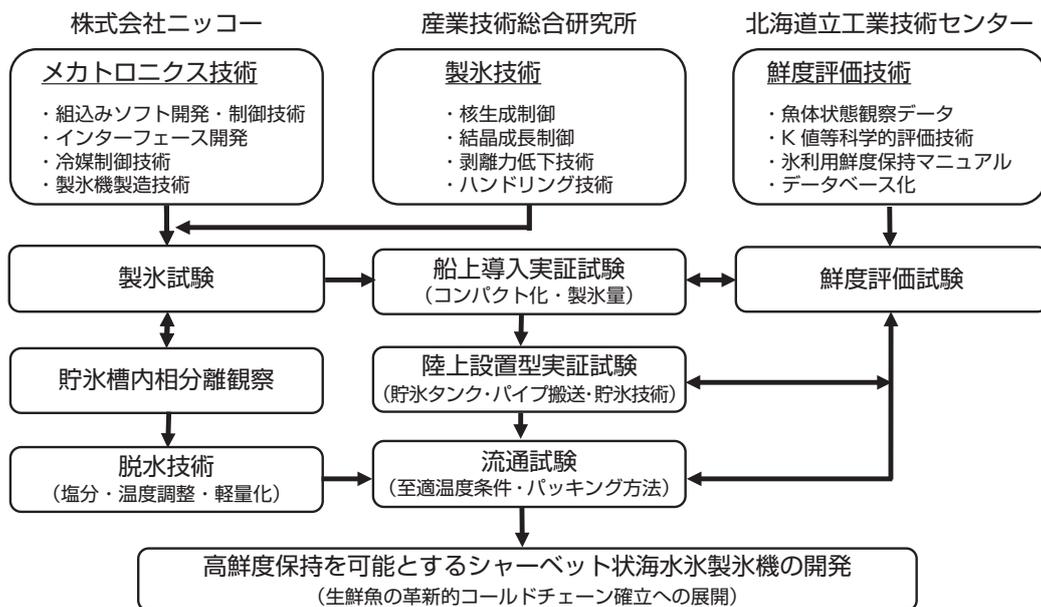


図1 シャーベット状海水氷製氷機の開発と導入のシナリオ

等によって決定される。その後の氷の成長形態は核生成温度の影響を受け、また水溶液濃度や冷却条件の影響を受ける。

上述の科学的なメカニズムを基本として工学的に製氷を行う場合は、水と接触している冷却伝熱面等の固体表面や水中の浮遊粒子が核生成の起点となり、核生成後は結晶化に伴う潜熱が除去されれば、結晶成長が継続すると考えられる。核生成後の結晶成長の進行具合は条件によって変化するため、結果として、大きさや形の異なる結晶が得られるので、核生成の条件を制御することにより生成する結晶の大きさ、形状の制御ができる可能性がある。成長時の結晶形態は、結晶構造の異方性、熱拡散（潜熱の排除等）、物質拡散（溶質の排除等）等により決まり、結晶成長過程で、これらのどの過程が律速になるか等によって様々な形態をとる。例えば、気相中で結晶表面での構成分子の取り込み、すなわち表面集積が律速になるときは雪の結晶のように分子的に平坦な結晶面を生成し、液相中で熱拡散や物質拡散が律速するときには潜熱放出の向きや溶質分子放出により表面が不安定になり、樹枝状成長の形態（デンドライト）をとりながら成長することもある^[14]。これらの結晶形態は固体面への付着力や結晶の破断に要する力にも影響を与えるので、固体表面に付着した氷の剥離を円滑に行い製氷動力を低減するためには、製氷機の冷却面や製氷方法を考慮する必要がある。以上のような考えに基づき、組込みソフト等の制御系の開発を行った。

次いで、プロトタイプ製氷機の設計においては、既存の船の空きスペースにも容易に導入できる構成ユニットの形状、設置方向等を詳細に検討しコンパクト化を図るとともに、同時に製氷量の増大を実現するための最適化を図る必要がある。

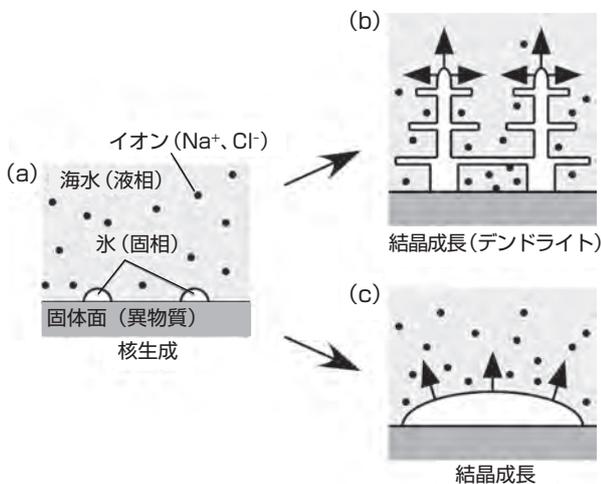


図2 製氷機内の冷却面の現象（製氷過程のイメージ）

当該事業の製氷機の設計方針は、①鮮魚の鮮度保持に有効な氷仕様を満たすこと、②低コスト化のため無駄な材料を省き加工の手間がかからないシンプルな構造であること、③単位時間当たりの製氷量が多いことである。

①のシャーベット状海水氷の仕様は、粒径、氷含有率、温度のパラメータ等で規定でき、魚体の冷却速度を大きくするためには粒径が小さいほど良い。ここで定義するシャーベット状海水氷とは、科学的には分散質が氷であり、分散媒が海水（塩化ナトリウムが主体）である氷の微細粒子が溶液内に均一分散している懸濁液であるため、凝固点降下によりマイナス温度帯となる。現実的には氷のサイズは10 μm前後から～100 μm程度、少なくとも1 mm程度以下であり、氷の温度は魚の致死温度より低い必要がある。ただし、致死温度と致死時間は魚種によって異なり不明な点も多い。これに対し、海水氷の温度は初期海水塩分濃度を基準にして推算することができる。例えば、海水の塩分濃度が約3.5 wt.%の場合、凝固点降下を $\Delta T = K \cdot m$ ^[15]で推算すると、凝固点は-2.2℃程度になる。ここで、 ΔT :凝固点降下度、 m :溶質の質量モル濃度 (mol/kg)、 K :モル凝固点降下 (定数:溶媒が水の場合は1.85 K·kg/mol) である。氷の含有率を変えれば未凍結の海水濃度が変わり、凝固点降下が変化するためシャーベット状海水氷の温度帯も変えることができる。

次いで②の条件を満たし冷媒により効率よく原料水（海水）を冷却し製氷するには、

- (1) 熱交換表面積を大きくする。
- (2) ジェネレータの熱交換部に熱伝導率の高い材料を使う。
- (3) 冷媒蒸発温度を下げ冷媒と被冷却原料水間の温度勾配を大きくする。

などが有効な手段と考えられる。まず、熱交換表面積を大きくするには、大型化あるいは多管式にする手法が考えられるが、コンパクト化と製氷速度の増大を併せて実現し、最適性状の氷を連続的にかつ安定に製氷するために、ジェネレータの構造は複雑な冷却面の構造をとらないシンプルな二重管形の単管とし、冷却は直膨式^{用語3}とした(図3)。熱交換部の材料の選択は、熱伝導率の他、強度、耐食性、加工性、コストを総合的に考慮し、既製のパイプ加工で十分に対応できるSUS316ステンレスを選択した。

②の条件を満たすこのような方式であれば、製氷は二重管内管の内壁表面で不均質核生成とそれに続く結晶成長により進行すると考えられ、壁面で生成した氷結晶が大きく成長する前にすばやく掻き取れるスクレーパ（掻き取り機）をジェネレータ内部に取り付けることにより、①の仕様を満たす微細結晶のまま製氷できる。この場合、掻き取りを円滑に行うには、氷結晶の剥離力（氷結晶を壁面から離

す力、あるいは氷結晶を破断する力) を超える掻き取り動力が必要であり、必要最小限の動力で掻き取りが可能な最適形状のスクレーパにする必要がある。スクレーパにはジェネレータ内の攪拌効果により温度境界層を薄くし、半径方向の温度分布を小さくする効果もあり、結晶成長形態に影響を与え剥離力の低減が期待できる。また、剥離によって内壁に付着する氷の層を常に薄く保つことができれば、生成氷の付着による内壁の熱抵抗低減効果も期待され、③の条件を満たすことができる。

氷結晶の剥離は、図4に示すように大別して、氷結晶全体を壁面から根こそぎ剥離する完全剥離と、氷結晶を破断して剥離する部分剥離が考えられ、両者のうち剥離力の小さい方が現象を支配することになる。どちらの剥離が支配的になるかは条件によって変化する。完全剥離力を小さくするには、冷却面温度を上げるか¹⁵⁾、冷却面と氷の接触面積を低減する必要がある。冷却面温度の上昇は、製氷量とトレードオフの関係にあるので不利である。冷却面と氷の接触面積を低減するために、冷却面上での氷の核生成発生点数を減らし、核生成後の冷却面に沿った結晶成長を抑制する方法が有効であると考えられる。一方、部分剥離力を小さくするには空隙の多い氷の結晶形態が有利であり、デンドライト成長の形態が望ましい。熱拡散や物質拡散が成長を律速すればデンドライトの形態をとるので、冷媒蒸発温度を低くして固体表面温度を低くすれば、氷の成長速度が速くなり塩分拡散が追いつかず(物質拡散律速)、未凍結の高濃度海水が樹枝状の氷に包含され空隙の多い氷を生成し、部分剥離力の低減が期待できる。したがって、常識的には固体表面温度が低くなれば剥離が困難になると考えられるが、上述の様々な工夫を施すことにより、いずれの剥離の場合も冷媒蒸発温度を低くしても剥離力を低減できる可能性が示唆され、併せて単位時間当たりの製氷量を多くすることも可能である。これらのジェネレータ内部の製氷条件の制御の工夫が主な改良点である。また、核の発生起点となる海水中の不純物(異物)を取り除

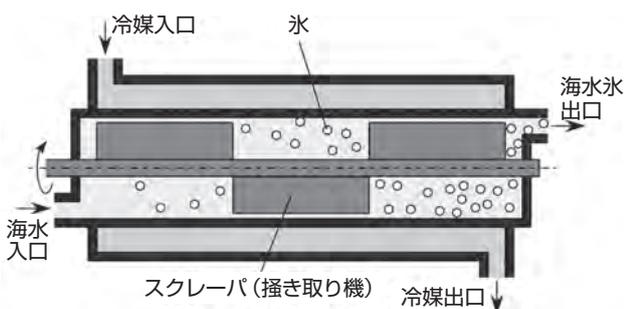


図3 シャーベット海水氷の製氷機 (ジェネレータ)

くためにフィルターによる事前の水核微粒子除去も効果的と考えられる。剥離された後の氷結晶は原理的には焼結やオストワルド熟成により流動流体内での粒径増大が考えられるが、滞留時間を適当に選ぶことにより成長前に製氷機より排出し、生成粒子径を制御して微細粒経のままで最適氷を製氷することができる。以上のような設計方針に基づきプロトタイプ製氷機を製作することができた。

プロトタイプ製氷機による製氷試験では、様々な条件設定と試験運転を繰り返すことにより、運転条件の最適化を図った。通常、低温下では氷結晶の付着力が強くなり冷却面からの剥離は困難であるが、 -15°C 以下の低温下でも冷却面上に氷が蓄積しないように、生成した氷を効率よく逐次剥離することができるジェネレータを開発することができ、これを実装した小型で高性能な目的の漁船搭載用のシャーベット状海水氷製氷機を実現することができた。さらに、このプロトタイプ製氷機による実証試験に備え、海上で想定されるピッチング、ローリング、ヨーイング等の大きな三次元の揺れが製氷能力に与える影響も特殊な試験装置を試作し確認した。さらに、製氷後もシャーベット状の形態を維持するためには、氷相と海水相の相分離を防ぐ必要があり、複数の魚艙を持つ漁船もあるため、シャーベット状海水氷の魚艙間移動を想定した魚艙内の最適攪拌法やパイプ搬送等も検討した。これらの知見は、陸上設置型では不可欠となる貯氷タンク内の攪拌羽根の形状、攪拌方法等の設計にも役立った。また、海外への鮮魚の長距離輸送試験等、鮮度保持効果を科学的に確認する数多く

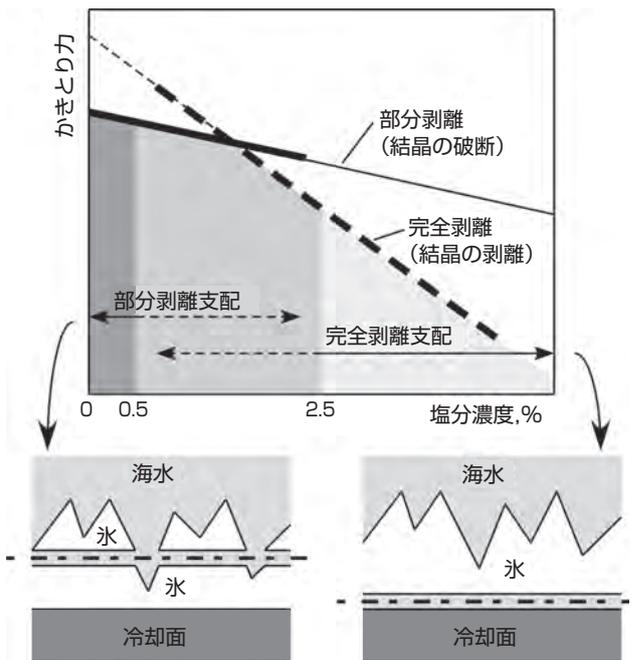


図4 氷結晶の完全剥離と部分剥離(破断)に要する力と塩分濃度の関係

の鮮度評価試験が容易に可能となり、魚種や流通段階における最適な鮮度保持条件や氷性状について有益な知見が得られるようになった。現在、魚種に応じた最適な鮮度管理手法の検討を種々行い、当該シャーベット氷を鮮魚の高鮮度保持に有効に利用する方法を明らかにしつつある。これらの知見の蓄積は、制御技術、製氷技術および鮮度評価技術について効果的な情報交換をする良好な連携関係により促進され、製氷機の開発開始から上市までが比較的短期間で可能となった。また、この連携を維持することにより、上市後も普及拡大を図りながら現場ニーズに対応できる製氷機の改善・改良に努めている。

4 シャーベット海水氷の効果

開発した製氷機で生成されるシャーベット状海水氷の効果について示す。シャーベット状であれば魚体を傷つけず、海水を原料水とすれば魚体を冷却した後の融解水は海水の浸透圧に近く魚体の色調および筋肉組織の維持にも有効である（図5）。魚の死によって酸素供給が断たれると生体のエネルギー源であるATPの再生はいずれ停止し、ATPは以下のように分解し、「鮮度」は低下を始める。



したがって、ATP量と不可逆的に進行するATP由来の生成物の分解過程の進行度を表すことができれば、「生きていた状態から如何に離れているか」、すなわち鮮度の低下状態を知ることができる。この分解速度は環境条件や魚種によって異なるものの、分解経路はほぼ一定であり、不可逆であることから、これらの分解過程の進行度を鮮度変化の指標と見なし、以下で定義されるK値がひとつの鮮度評価指標として利用されている。K値とは、ATPとその分解生成物の全成分の合計値に対する(HxR+Hx)量の百分率であり、以下のように定義される。

$$\text{K 値 (mol\%)} = (\text{HxR} + \text{Hx}) /$$

$$(\text{ATP} + \text{ADP} + \text{AMP} + \text{IMP} + \text{HxR} + \text{Hx}) \times 100 \quad (2)$$

すなわち、K値が低いほど鮮度が良いことを示す。図6はこのように冷却能が高いと考えられるシャーベット状海水氷を用いたときのK値を海水氷（海水+真水氷）と比較した例である。いずれも、シャーベット状海水氷のK値が低く、魚体の鮮度を高く保つことがわかる。

ただし、冷却のし過ぎによる漁体の凍結には注意すべきであり、凍結により結晶成長が進むと細胞が破壊され、解凍したときにドリップを生じる品質低下の原因となる場合もあり敬遠される。したがって、致死後は凍結を防ぐために、凍結点（魚種により異なり、概ね白身魚-0.8~-1.1℃、赤身魚-1.1~-1.5℃等）以上の温度保持が望ましい。実用的には、漁獲量に対して氷の使用量を調整するなど、シャーベット状海水氷で急冷、致死後の魚体内の温度を至適温度付近に保つ等の工夫が必要である。また、微生物の増殖を概ね抑制するには、一般に5℃以下の低温域であれば良いと考えられていることから、船の魚倉から揚げて陸上の流通過程に移行した後も鮮度保持には5℃以下の低温帯であることが望ましい。例えば、低温であるほど微生物の増殖は抑制できるが、致死後の輸送時には、シャーベット状海水氷から未凍結の海水を脱水した脱水氷とし、魚体を柔軟に包み込むなどして軽量化を図り、低塩分濃度で保持温度を-1℃付近の未凍結点付近に保ち、高鮮度を保持する輸送法等が最適と考えられる。

このような脱水処理は、重量軽減による輸送コストの低減とともに氷が融けにくくなるため、高鮮度保持時間の延長を可能とし、潜熱を利用していることから安定した低温が確保できる。したがって、遠距離輸送のみならず出荷調整



図5 フィールドテストで陸揚げされたサンマ（体表の青色は高鮮度の指標）

ここにもあった産総研, 2, 24-25 (2014)

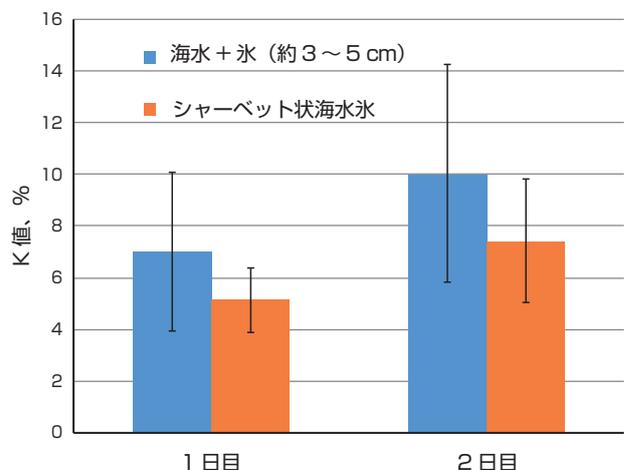


図6 冷却の相違によるサンマのK値の比較

水揚げ直後のサンマを、漁船上にて海水氷、シャーベット状海水氷にそれぞれ漬け込み、発泡スチロール容器にて保管。各6尾より筋肉中の核酸関連成分を定法により定量し、K値を算出。

や流通過程での不慮の足止め等に対しても有効に対応できるため優位性が期待でき、低温流通において競争力向上に繋がる新規な技術と考えられる。なお、鮮魚の流通においては最適な氷の使用法が魚種により異なると考えられることから、魚種に対して最適なシャーベット状海水氷の活用を図るためには、さらなる十分な検討が必要である。

5 おわりに

今後は衛生管理のみならず、氷の特性を積極的に利用して、魚種に応じた鮮度保持の最適条件を緻密に制御できる新たな鮮度管理技術にも氷の利用が期待される。水産物の高付加価値化や差別化を図るための鮮度管理技術は、特に、ユネスコ無形文化遺産に登録された「和食」等の日本料理に代表される魚の生食において重要な技術であり、日本がリードしてグローバル化することが望まれる。このように、シャーベット状海水氷の利活用は、高鮮度保持による最高級の付加価値を提供するビジネス手法としても有効な手段として有望であり、高度利用が期待される。

謝辞

本開発事業の開始前より当該製氷機開発の実現に多大なるご尽力をされた元株式会社ニッコー技術顧問の輪嶋壽勝氏に敬意を表し深謝いたします。また、事業化のご助言を頂いた元産業技術総合研究所技術支援アドバイザーの安達均氏、組込みソフト開発の基礎を確立された元株式会社ニッコー社員の下山利美氏、日頃より開発試験にご協力いただきました株式会社ニッコーの輪嶋史氏、平間和夫氏、千葉繁生氏、他社員の皆様に感謝いたします。

注) 厳密には溶質の濃度域によって凝固点効果の推算式が異なる。なお、世界の海面表層の塩分濃度は地域により異なり3.2～3.7 %程度である。また、海水面温度は、北極海付近でおよそ-2℃程度から赤道付近で35℃程度であり、日本近海は、15℃～20℃程度である。

用語の説明

用語1: HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Pointの略。微生物汚染等の危害をあらかじめ分析し、その結果に基づいて重要管理点を定め、これを監視することにより製品の安全を確保する国際的に採用を推奨されている衛生管理の手法。

用語2: ATP: アデノシン3リン酸。筋収縮活動に関与する塩基、五炭糖、リン酸が結合したヌクレオチドの一種であり、リン酸が外れる際にエネルギーを生み出す。

用語3: 直膨式: 利用する場所で冷媒を膨張させ熱を奪う方式。

用語4: ADP: アデノシン2リン酸。ATPよりリン酸がひとつ少ないヌクレオチド

用語5: AMP: アデノシン1リン酸(アデニル酸)。リン酸がひとつのヌクレオチド

用語6: IMP: イノシン酸(イノシン1リン酸)。AMPの塩基から脱アミノ化した核酸系の旨み成分

用語7: HxR: イノシン。ヒポキサンチンとD-リボースからなるN-リボシド

用語8: Hx: ヒポキサンチン。イノシン酸、イノシンの中の核酸塩基の部分成分。苦味を呈する。

参考文献

- [1] M. Kauffeld, M.J. Wang, V. Goldstein and K.E. Kasza: Ice slurry applications, *Int. J. Refrig.*, 33 (8), 1491–1505 (2010).
- [2] M. Kauffeld, M. Kawaji and P.W. Egolf (eds.): *Handbook on Ice Slurries: Fundamentals and Engineering*, International Institute of Refrigeration (IIR), (2005).
- [3] 経済産業省中小企業庁経営支援部創業・技術課: 戦略的基盤技術高度化支援事業 研究開発成果事例集 平成22～23年度研究開発プロジェクト, 6–8 (2011).
- [4] 経済産業省中小企業庁: 中小企業支援施策を活用した成果事例集, 4 (2016).
- [5] T. Inada, X. Zhang, A. Yabe and Y. Kozawa: Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44 (23), 4523–4531 (2001).
- [6] X. Zhang, T. Inada, A. Yabe, S.S. Lu and Y. Kozawa: Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 2. Generation of ice slurries and effect of bubble nuclei, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44 (23), 4533–4539 (2001).
- [7] X. Zhang, T. Inada and A. Tezuka: Ultrasonic-induced nucleation of ice in water containing air bubbles, *Ultrason. Sonochem.*, 10 (2), 71–76 (2003).
- [8] T. Inada and S.S. Lu: Thermal hysteresis caused by non-equilibrium antifreeze activity of poly(vinyl alcohol), *Chem. Phys. Lett.*, 394 (4–6), 361–365 (2004).
- [9] T. Inada and P.R. Modak: Growth control of ice crystals by poly(vinyl alcohol) and antifreeze protein in ice slurries, *Chem. Eng. Sci.*, 61 (10), 3149–3158 (2006).
- [10] T. Inada, T. Koyama, F. Goto and T. Seto: Inactivation of ice nucleating activity of silver iodide by antifreeze proteins and synthetic polymers, *J. Phys. Chem. B*, 116 (18), 5364–5371 (2012).
- [11] K. Yoshimura, T. Inada and S. Koyama: Growth of spherical and cylindrical oxygen bubbles at an ice-water interface, *Cryst. Growth Des.*, 8 (7), 2108–2115 (2008).
- [12] T. Inada, T. Hatakeyama and F. Takemura: Gas-storage ice grown from water containing microbubbles, *Int. J. Refrig.*, 32 (3), 462–471 (2009).
- [13] 吉岡武也: スルメイカの高鮮度保持と流通技術の開発, *日本水産学会誌*, 77 (5), 787–790 (2011).
- [14] N.H. Fletcher: *The Chemical Physics of Ice*, Cambridge Univ. Press, (1970).
- [15] H.H.G. Jellinek: Adhesive properties of ice, *J. Colloid Sci.*, 14 (3), 268–280 (1959).

執筆者略歴

永石 博志（ながいし ひろし）

産総研北海道センターイノベーションコーディネータ。工学博士。福岡県飯塚市出身。1987年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了後、三井鉱山株式会社入社、翌年旧工業技術院北海道工業開発試験場（現産業技術総合研究所）に入所。石油代替エネルギー研究の国家プロジェクトに従事、カナダアルバータ大学化学工学科博士研究員を経て、廃プラスチック、分散エネルギーシステムの研究から産学官連携業務に転向。企業支援を行い現在に至る。1996年日本エネルギー学会進歩賞（学術部門）、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



稲田 孝明（いなだ たかあき）

産総研省エネルギー研究部門熱流体システムグループ上級主任研究員。工学博士。福岡県太宰府市出身。1996年に東京大学大学院工学系研究科博士課程修了後、同年に旧工業技術院機械技術研究所（現産業技術総合研究所）に入所。氷の発生や成長についての基礎的な研究を進めながら、冷熱の輸送媒体として氷を活用した冷凍空調機器の技術開発を実施。氷の発生や成長を制御し、エネルギー、食品、医療等の分野に貢献できる新しい技術の開発を目指す。1995年日本伝熱学会奨励賞、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



吉岡 武也（よしおか たけや）

函館地域産業振興財団（北海道立工業技術センター）研究開発部研究主幹。博士（水産科学）、技術士（水産部門）。北海道函館市出身。1987年北海道大学大学院水産学研究科修士課程水産食品学専攻修了、日本水産株式会社入社、1999年現機関に入社、2003年北海道大学大学院水産科学研究科博士課程修了、2012年より現職。長年水産加工技術の研究開発に取り組み、近年は水産物の鮮度保持に関する研究開発を実施。2011年日本水産学会技術賞、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



佐藤 厚（さとう あつし）

株式会社ニッコー代表取締役。北海道浜頓別町出身。旭川工業高校卒業。東京の食品包装メーカーに就職、退社後、1977年株式会社ニッコーを設立。一貫して加工機械の開発・製造に努め、2005年「第一回ものづくり日本大賞・経済産業大臣賞、優秀賞」を受賞。2007年経済産業省中小企業庁「元気なモノ作り中小企業300社」、2014年経済産業省「グローバルニッチトップ企業100選」においてネクストGNTに選定。2011年「インライン型全周三次元計測装置」および2013年「漁船搭載型海水氷製氷機「海水」にて北海道新技術・新製品開発賞ものづくり部門大賞、2016年産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞受賞。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（松田 宏雄：産業技術総合研究所 東北センター）

この論文は、新たな製氷機の開発と、それによって製造された海

氷水を用いた水産物鮮度保持に関する考察を述べています。複数の要素技術を合成して可能となる「水産物の品質向上」を追及している点は、シンセシオロジー論文として十分意義があると認めます。

コメント（湯元 昇：国立循環器病研究センター）

この論文では、魚の鮮度保持のため、シャーベット状海水氷の利用に着目し、低コストかつ安定的供給が可能で、漁船に搭載可能な製氷機を開発した過程が記載されています。これまでの技術開発では困難な課題を解決するため、明確なシナリオのもと、産学官連携により、それぞれの機関が得意とするメカトロニクス技術、製氷技術、鮮度評価技術等を融合したものであり、シンセシオロジー誌の論文としてふさわしいものと判断します。

議論2 論理構成の緻密化について

コメント（松田 宏雄）

それぞれの要素技術に関する研究がどのように行われたのか、プロセスの記述が不十分であり、あるいは単に先行研究を引用してデータを再掲しただけであったり、加えて表現への配慮も足りません。また、開発プロセスをわかりやすく表現するためには、新たに開発した製氷機が先行技術をどのような点で改良したのか、図等を用いて比較記述するとよいと考えます。

コメント（湯元 昇）

シンセシオロジー誌の研究論文としては、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が論文としての要件となっています。著者が図1のシナリオに基づいて、どのように要素を構成して、目的とするシャーベット状海水氷製氷機を開発したかが明確になるようにして頂けないでしょうか。

回答（永石 博志）

全体の構成を見直すとともに、課題とその解決策に関する記述を加筆いたしました。開発前の記述と開発中の記述に分けるとともに、組込みソフトの開発やプロトタイプ作成から上市に至る過程等開発過程の記述を若干加え、上市までの流れがわかるようにしました。具体的には、組込みソフト等制御系の開発、プロトタイプ製氷機的设计、製氷試験、実証試験に向けた試験と課題等の順に記載し、構成を変更しました。また、表1に新たに開発した製氷機の欄を追加しました。ただし、企業様のご希望もあり、詳細やノウハウにつきましては伏せさせていただきますことをご理解ください。

議論3 新たな鮮度指標について

コメント（松田 宏雄）

初稿において新たな鮮度指標をこの論文の中で提案されていますが、標準化の試みが行われたとは認められません。K値は多くの自治体が発行する鮮度保持マニュアルに活用されるなど、ステークホルダーのコンセンサスを得ようとしており、これらの活動は、明らかに標準化を推進していると言えます。しかし、新たに提案されている指標をそのレベルに上げるためには、その公開とステークホルダーによる比較活用まで進める必要があります。

コメント（湯元 昇）

初稿において新たな鮮度指標をこの論文の中で提案されていますが、この指標の妥当性については、専門誌での評価が必要と思います。シンセシオロジー誌は、研究開発の成果を社会に活かすために何を行えばよいかについての知見を記載することが目的ですので、新しい提案についての妥当性は評価できません（鮮度管理手法の標準化が達成されれば、そのプロセスは本誌の対象となり得ます）。

回答（永石 博志）

最初の原稿で記述した鮮度指標は新しい提案です。この定義自身は特許とはなり得ないものと考えておりますが、現在、知的財産・標

準化推進部のご協力の下、この指標を利用したコールドチェーンにおける技術について鋭意検討中ですので、この部分は大幅に削除しました。

議論4 先行技術の改良点

コメント(松田 宏雄)

ノウハウの秘匿は理解できますが、先行開発企業の機械をベースにして改良したのはどのような点でしょうか？

回答(永石 博志)

本開発機は先行開発機械をベースにしており、コンパクト化と省スペース化を図ってはいますが、製氷法や構成はほとんど同じです。改良点は、ジェネレータ冷却面(内壁)の仕上げと掻き取り機(スクレーパー)の羽数、位置、羽根の固定具合等、ジェネレータ内の製氷条

件の制御になります。これらの部分がノウハウの秘匿部分の主なものになりますが、設計方針の区分をわかりやすくし、記述を加えました。

議論5 鮮度について

コメント(松田 宏雄)

執筆者が行った鮮度に関する実験研究は、サンマのK値比較以外にはないのでしょうか？

回答(永石 博志)

共著者(北海道立工業技術センター吉岡氏)は多くの実験を行っています。ただし、ここでは開発した製氷機で生成した氷にどのような効果があるのかを示すための例示ですので、一例で十分と考えています。

ジメチルエーテル (DME) 燃料品質の標準化

小熊 光晴

安心・安全・安価な新燃料の市場導入や流通には、実市場における燃料の品質管理が重要であり、法整備や標準化が必要となる。ジメチルエーテル (DME) という新燃料を題材に、2001年より基盤技術研究 (噴霧・燃焼解析) を開始し、応用実用化 (テスト車両開発)、実証研究開発 (公道走行試験) を経て、2007年より燃料品質の標準化に着手し2015年にISOを発行した。ここでは、DME燃料品質の標準化に関して、燃料利用システム側からの視点で検討した、不純物の影響評価やその混入限界値の定義、ならびに不純物分析方法のラウンドロビン結果等、検証実験データ等を含めて紹介する。

キーワード: ジメチルエーテル、DME、燃料品質、標準化、不純物

Standardization of dimethyl ether (DME) fuel specifications

Mitsuharu OGUMA

Legislation and standardization are necessary and important for fuel quality control to ensure safety, security, and stability with regard to the commercialization and trading of new fuels. The author began R&D of dimethyl ether (DME) fuel utilization technology in 2001. This work involved basic research on fuel spray and combustion, applied research on the development of test vehicles, and field tests of these applications. In addition, work on standardizing DME fuel specifications commenced in 2007. In 2015, five ISO standards were published. In this paper, the standardization of DME fuel is presented, which includes a way to define limits on impurities, and the results of round-robin-tests for deterioration by impurities from the users' viewpoint.

Keywords: Dimethyl ether, DME, fuel specification, standardization, impurity

1 はじめに

電気自動車への転換が現状では不可能なトラック・バスのパワートレインは、今後も内燃機関主流であるといえる。原油価格の高騰は一段落しているものの、エネルギーセキュリティの確保は早急の課題であり、未利用資源を含む資源の多様化は、温室効果ガス排出に及ぼす影響と一体的に、継続的な検討を進めるべきである。

ジメチルエーテル (DME、化学式:CH₃-O-CH₃) は炭素・炭素結合がなく含酸素のため、燃焼時に粒子状物質 (PM) をほとんど排出しないクリーンな燃料である。LP ガスと同等の約 6.1 kgf/cm² の加圧で液体となる液化ガスで、セタン価が軽油同等以上あり、ディーゼル燃料として利用する場合 PM 対策が不要なため、燃焼温度低減による窒素酸化物 (NO_x) 低減策が有効に適用可能で、高度な排気低減触媒システムを採用することなく厳しい排気規制をクリアすることができる。合成ガス (CO、H₂) を得ることができれば原料を特定する必要が無く、石炭・オイルサンド、天

然ガス・シェールガス、バイオマス等、あらゆる資源を原料として製造可能である。また、ディーゼル燃料のほか、LP ガスや都市ガス代替としてのボイラやガスタービン、民生利用等に加え、水素キャリアとしても利用価値があり、マルチソース・マルチユースな燃料という点は、DME の持つ最大のキャッチコピーである。現状は石炭や天然ガスを原料に製造されている DME であるが、製紙工場の廃液 (黒液) や間伐材等未利用木質系バイオマスから合成ガスを経て製造する技術が、経済性も含めて確立されれば、Well to Tank (一次エネルギーの採掘から燃料タンクに充填されるまで) での温室効果ガス削減へのポテンシャルは大きく、次世代バイオディーゼル燃料としても期待される。

新規な燃料の市場導入に際しては、燃料品質の標準化が不可欠である。民生利用を含む DME 燃料の国際間流通がよいよ期待できる状況となり、ISO/TC28 (LNG および LP ガス担当部会) の SC4 および SC5 において、2007 年より DME も取り扱うこととなった。国際間流通時のサン

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 〒 305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東
Research Institute for Energy Conservation, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan E-mail: mitsu.oguma@aist.go.jp

Original manuscript received November 12, 2016, Revisions received December 8, 2016, Accepted December 16, 2016

プリングや計量方法を扱う SC5 では日本が幹事国 (幹事：日本海事検定協会) を務め、また、DME の品質を担当する SC4 では、幹事国フランス (幹事 TOTAL) のもと、工業用、発電用等の燃料としての DME の品質を、2007 年当時に唯一定義 (TS K 0011、2005 年 11 月発行) していた日本と共同で、DME 品質基準を整備することとなった。我が国では ISO/TC28/SC4/WG13 (Classification and specifications of commercial Di-Methyl Ether (DME))、同 WG14 (Joint project with TC 28 on “Test methods for dimethylether (DME)”) および SC5/WG3 (Procedures for measurement and calculation of refrigerated fluids)、同 WG4 (Sampling of refrigerated fluids) にエキスパートを積極的に派遣し、著者もそれぞれにエキスパートとして参加してきた。2011 年 7 月には、退任した SC4/WG13 の前コンビーナ (フランス) の後を引き継ぐ形で著者が同コンビーナに就任した。

同 WG13 における DME 燃料品質の議論は、どの場所における品質を定義するか? からスタートした。図 1 は DME 燃料の製造、流通および各種利用機器適用のイメージを示している。最終的には、製造プラントから出荷され、タンカーや一次基地、二次基地を経由し、民生用や産業用、および自動車用燃料としてエンドユーザーに出荷される直前における、ベース燃料としての品質を定義する、ということに同 WG13 では決定された。ちなみに、自動車用燃料としては潤滑性向上剤等の添加剤が必要であり、また、国によっては民生利用等で万が一の燃料ガス漏洩を検知できるよう、着臭剤の添加を義務付ける可能性もあるが、添加剤については各国の事情によるため、WG13 における DME 燃料品質の定義からは除外されている。

本報では、DME 燃料品質の標準化に関して、燃料利用システム側からの視点で検討した、不純物の影響評価やその混入限界値の定義、ならびに不純物分析方法のラウンドロビン結果等、検証実験データ等を含めて紹介する。

2 DME燃料品質における不純物混入限界の検討

燃料の品質を定義するには、製造側としてどの程度の品質の燃料が作れるか、利用側として、利用システムがどの程度の燃料品質を要求するか、経済性も含めて双方の歩み寄りによるところが大きい。DME はマルチユースな燃料ではあるが、利用システム側の視点に立ち、燃料中に不純物の混入をどれだけ許容できるか? を検討するに際しては、適用し得る利用システムの中で最もセンシティブなものに合わせる必要がある。そこで、著者らは同 WG13 における DME 燃料中の不純物混入限界検討の議論にエキスパートとして参加するにあたり、ディーゼルエンジンの燃料として DME を適用した場合における、不純物混入が及ぼす影響の実験的評価を開始した。

図 2 に自動車用ディーゼル燃料としての、DME 燃料品質の定義に際しての要検討項目を示す。燃料製造工程や流通過程で混入し得る不純物や自動車用として使用し得る添加剤等が及ぼす影響として、①デバイス部材材料の耐性、②エンジン性能および③エンジンシステムの耐久性等への検証が必要である。それぞれの項目で実施した検証試験とその結果の概要を、一部データを紹介しながら解説する。

2.1 不純物・添加剤がデバイス部材の耐性に及ぼす影響^[1]

デバイス部材の材料耐性に及ぼす不純物混入の影響評価は、実際に使用される材質を DME 燃料に漬け込み評

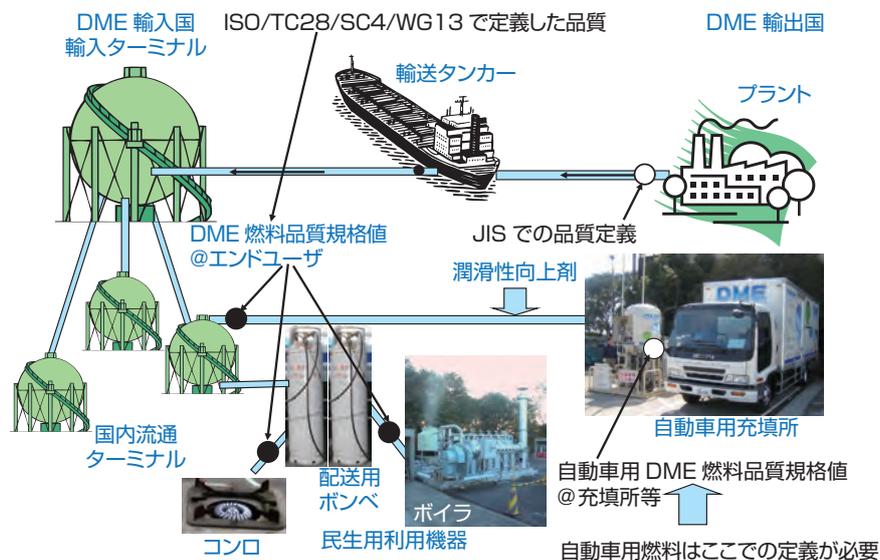


図1 DME燃料品質の定義場所

表1 浸せき試験テストピース

テストピース		テストピース形状	使用されるデバイス
ゴム	改良 HNBR	- ダンベル型 #3 (JIS K 6251) - Oリング (P-12)	噴射ポンプ 燃料ポンベ
	FFKM	- ダンベル型 #3 (JIS K 6251) - Oリング (P-6)	
金属	SG 鋼板	15x15x3.2 mm φ3.5 穴あり	燃料ポンベ
	銅 (C1100)	15x15x2.0 mm φ3.5 穴あり	噴射ポンプ
	真ちゅう (C3604)	15x15x2.0 mm φ3.5 穴あり	噴射ポンプ
	インジェクタノズルニードル	-	エンジン
	インジェクタノズルボディ	-	エンジン

価する、浸せき試験により実施した。対象とするゴムおよび金属材料は、実車で使用されているものを選定した(表1)。

浸せき条件を表2に示す。試験片を耐圧容器内で浸せきし、80℃条件下にて1000時間放置後の試験片の状態をチェックした。また、途中経過として、72時間、250時間および500時間でも状態チェックを行った。テスト燃料は現在流通している化学品(噴射剤用途)としてのDME(純度99.9%以上)をベース燃料とし、ISOにて議論中の不純物を質量割合で混合したものを燃料DMEとした。また自動車用燃料として必須の潤滑性確保のため、低硫黄軽油用の市販脂肪酸系潤滑性向上剤(LI)を適量である100ppm添加したものと、過剰に添加し燃料全体の酸価を0.13mgKOH/g、すなわちバイオディーゼル燃料5%混合軽油(揮発油等の品質確保等に関する法律で定められている軽油)の品質基準を超えるまであえて増加させたものを用意した。これらの比較により、不純物の影響と脂肪酸系添加剤の影響を確認した。各浸せき時間経過後は、表3に示す測定項目について計測や観察を行った。

表2 試験条件

温度 [°C]	80
浸せき時間 [hr.]	70、250、500、1000
試験燃料	- 軽油(比較燃料) - 純DME - 燃料DME* - 燃料DME+潤滑性向上剤** 100 ppm - 燃料DME+潤滑性向上剤700 ppm

*燃料DME: 純DME
+メタノール500 ppm
+水100 ppm
+プロパン1.0 %
+ギ酸メチル500 ppm
+硫黄約2 ppm

**潤滑性向上剤: 脂肪酸系潤滑性向上剤(市販品)

表3 評価項目

テストピース	評価項目
ゴム	- 引っ張り強さ、伸び、硬さ、体積および質量の変化率 - 外観 - 圧縮永久歪 (Oリングのみ)
金属	質量変化率、外観

(1) ゴム材に及ぼす影響

燃料タンクや噴射ポンプ等に使用されているゴム材として、FFKM(テトラフルオロエチレン-パーフルオロビニルエーテル系フッ素ゴム) および改良 HNBR(水素化ニトリルゴム) における浸せき試験結果からは、純DMEおよび燃料DMEの間の違いはほぼ見られなかった(図割愛)。ゴム材を膨潤させるDMEそのものの影響が強く、耐DME性を持つゴム材であれば不純物が及ぼすゴム材への影響はほぼ不問と考えられる。また、潤滑性向上剤添加の影響も確認されなかった。FFKMおよび改良HNBRとの比較で

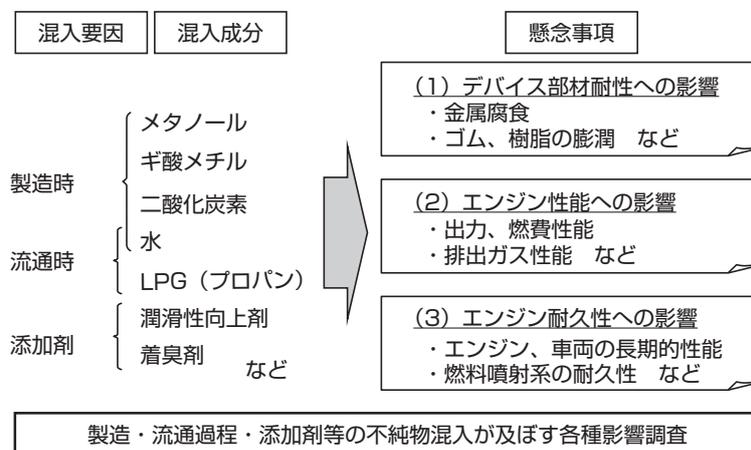


図2 自動車用DME燃料規格化に対する混入し得る成分とそれによる懸念事項

表4 テスト燃料 (不純物の影響)

燃料名	不純物	添加剤
Reference DME	-	脂肪酸系潤滑性向上剤 100 [ppm]
Methanol 5%	メタノール 5 [%]	脂肪酸系潤滑性向上剤 100 [ppm]
Propane 5%	脱臭プロパン 5 [%]	脂肪酸系潤滑性向上剤 100 [ppm]
FAME 5%	FAME 5 [%]	-
Water 5%	水 5 [%]	脂肪酸系潤滑性向上剤 100 [ppm]

表5 テスト燃料 (添加剤の影響)

燃料名	不純物	添加剤
Reference DME	-	脂肪酸系潤滑性向上剤 100 [ppm]
LI 500	-	脂肪酸系潤滑性向上剤 500 [ppm]
Pure fatty acid	-	純脂肪酸 100 [ppm]
Odorant	-	着臭剤 40 [ppm] 脂肪酸系潤滑性向上剤 100 [ppm]

は両者の間で機械的物性の違いは見られるものの、これらは DME 自身に対するゴム材特性の違いであり、不純物や潤滑性向上剤による影響ではないことを確認した。

(2) 金属材に及ぼす影響

燃料タンクに使用される金属材の浸せき試験結果より、SG 鋼板およびインジェクタノズルのニードルおよびボディについてはいずれの条件においても目立った外観の変化は確認されず、良好な状態を保っていた (図割愛)。

一方、噴射ポンプ部品である銅 (C1100) および真ちゅう (C3604) については、酸化反応による変色が見られた (図 3 および図 4)。銅の C1100 では、純 DME で光沢がなくなりやや変色が見られ、燃料 DME では黒色に近い変色が確認された。潤滑性向上剤を添加した条件ではさらに黒色への変色が明確になっており、表面部の変質が発生していると示唆される。真ちゅうの C3604 では、C1100 より顕著ではないものの同様の傾向が確認された。潤滑性向上剤には脂肪酸系のものを添加しているため、燃料の酸価が増加し酸化反応による変色が起きたと思われる。燃料システムのシール剤として使われる銅は、酸化による腐食が進行すると燃料漏れの恐れがあり、脂肪酸系潤滑性向上剤の過剰な添加は注意が必要である。また、燃料 DME には水分 100 ppm とギ酸メチル 500 ppm が含まれており、加水分解からギ酸が発生し燃料酸価を増加させている可能性も示唆される。潤滑性向上剤無添加の燃料 DME のみにおいて変色が確認されているのはこれが原因の一つと考えられる。いずれの試験結果も浸せき試験後に重量が減少するには至らない程度であるが、注意を要すると思われる。

2.2 不純物・添加剤がエンジン性能に及ぼす影響^{[1]-[3]}

エンジンダイナモメータによる部分負荷性能試験および JE05 モード試験より評価した。

不純物の影響評価における供試燃料を表 4 に、添加剤の影響評価における供試燃料を表 5 にそれぞれ示す。いずれも主燃料である DME は、現在流通している化学品 (噴射剤用途) としての DME (純度 99.9 % 以上) とし、低硫黄軽油用の市販脂肪酸系潤滑性向上剤を約 100 ppm 添加した DME を基準燃料 (Reference DME) とした。各種不純物の濃度は全体量に対する質量割合である。

不純物の影響について、メタノール脱水で作られる DME 製造工程で残留する可能性のあるメタノール、DME 専用流通網が完備されるまでの間は LP ガス機器を代用し得るため、混入する可能性のある脱臭プロパン (着臭剤無添加)、製造工程および流通過程で残留または混入する可能性のある水、および潤滑性向上剤として機能する報告^[4]もある脂肪酸メチルエステル (通称バイオディーゼル燃料、以下 FAME) それぞれを 5 % 混入し、潤滑性向上剤を約 100 ppm 添加したものを供試燃料とした。ただし、FAME 5% では、FAME を DME に 3000 ppm 添加することで潤滑性が軽油相当となるデータがある^[5]ことから、潤滑性向上剤は無添加とした。なお、FAME については、市販混合メチルエステルをモデル FAME として使用した。なお、市場における水分混入の可能性は、容器間移充填時の接続ホース内への吸着水分の混入が最も発生し得ると考えられる。その他、燃料充填ステーションおよび車両側の充填口において、湿度による水分付着も起こり得ると考えられる。2004 年から 2007 年まで公道走行試験を実施した産

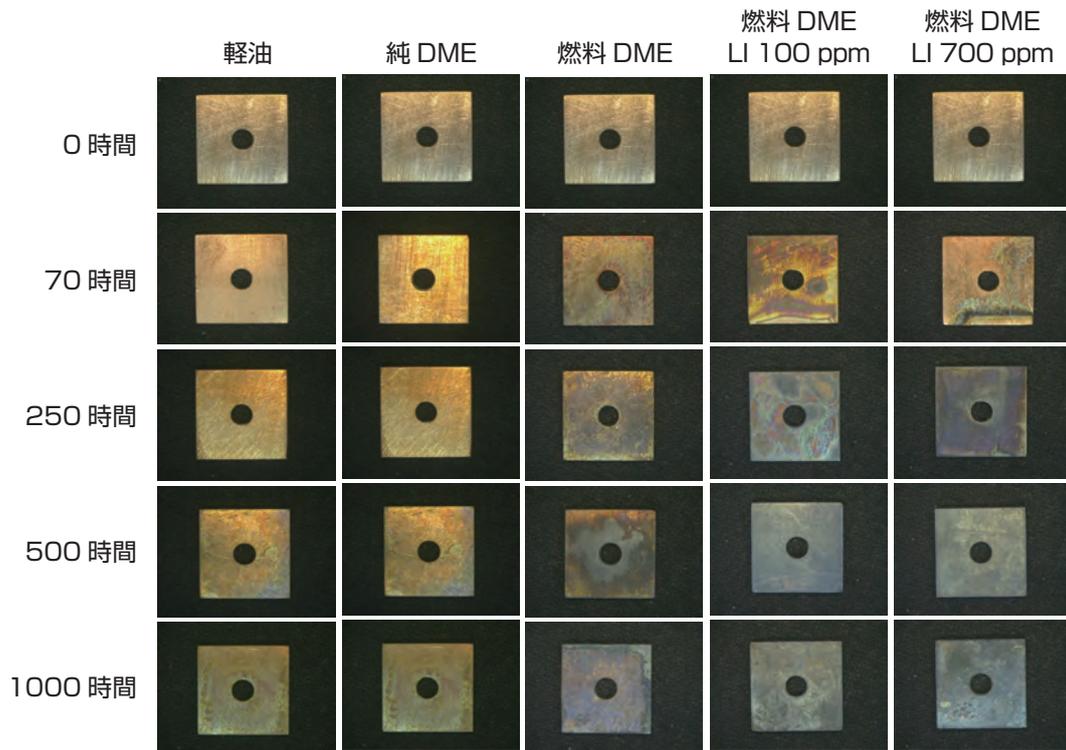


図3 浸せき試験後の試験片外観 (銅C1100)¹¹⁾

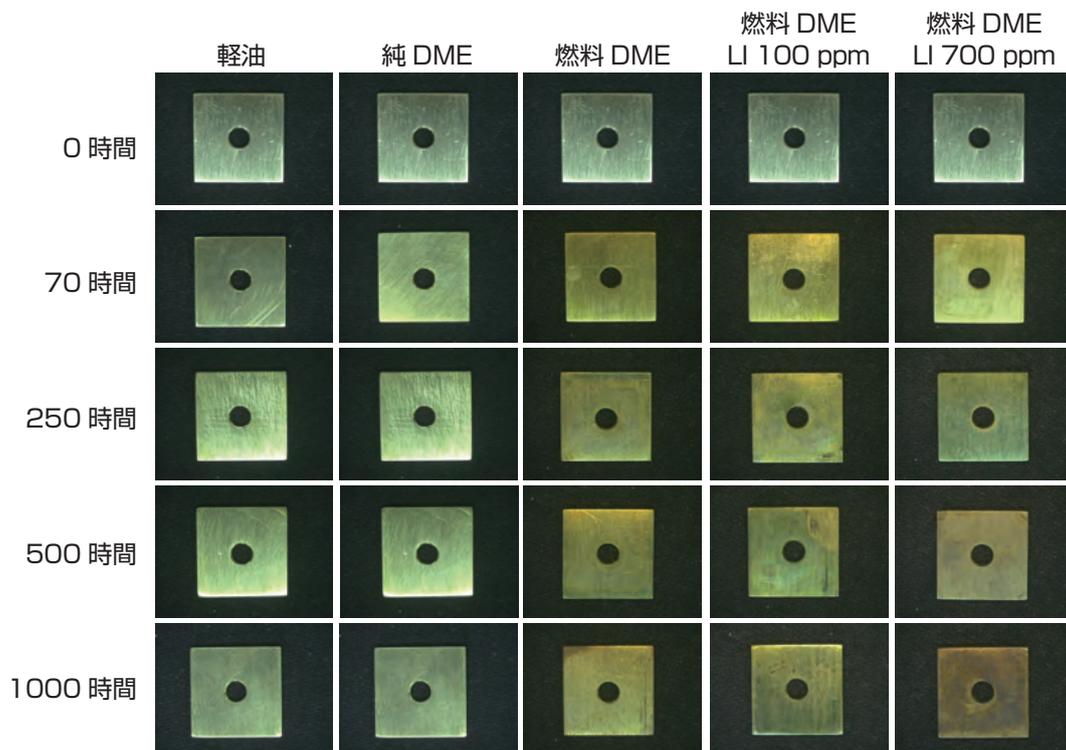


図4 浸せき試験後の試験片外観 (真ちゅうC3604)¹¹⁾

業技術総合研究所らの中型 DMEトラックに対し、搭載されている燃料タンクから DME 燃料のサンプルを取り出し水分を計測したところ、177 ppm 程度混入していたというデータも存在する。

添加剤の影響について、基準燃料 (燃料名: Reference DME) で使用している脂肪酸系潤滑性向上剤の添加濃度を 500 ppm 添加したもの (燃料名: LI500)、潤滑性向上剤主成分の脂肪酸のみを潤滑性向上剤として使用したもの (燃料名: Pure fatty acid) と、燃料として普及する際に LP ガスや都市ガスと同様着臭剤が導入された場合を想定し、LP ガス用の着臭剤を 40 ppm 添加したもの (燃料名: Odorant) について評価した。なお、着臭剤添加の燃料には、基準燃料と同様の潤滑性向上剤も添加している。

DME 燃料中の不純物や DME 燃料への添加剤がエンジン性能や排気特性に及ぼす影響をエンジン試験により評価した。それぞれの傾向を図 5 にまとめる。表中黄色および桃色で示された項目は要注意度を示し、黄色よりも桃色の方が注意する必要がある高いことを示す。酸化触媒の活性温度に達しない無負荷運転時のメタノール、プロパンおよび水それぞれ 5 % 混入 DME による排気や、FAME 5 % 混合およびプロパン 5 % 混入 DME による PM (粒子状物質) 個数濃度等は要注意である結果となった。

ただし、図 5 に示す傾向が見られたものの、「万が一、5 % もの不純物が存在する DME が利用されたとしても、モード運転による排ガス性能試験結果に及ぼす影響は大きくない」ことが確認できたといえる。すなわち、燃料の品

質規格として DME の純度および不純物混入限界を定義し得る因子としては、排気性能に及ぼす影響よりは、燃料供給系および燃料噴射系等、DME 燃料が触れるエンジンデバイスの部品材料の耐性や、エンジンシステムや車両システムの耐久性に及ぼす影響の方が大きく、これらによって不純物の混入限界を決定すべきであると考えられる。

2.3 不純物・添加剤が潤滑性に及ぼす影響

燃料中の不純物や添加剤がエンジンシステムの耐久性に及ぼす影響の評価として、燃料の潤滑性評価により代替した。DME の潤滑性評価には、液化ガスに対応させた MPT-HFRR 試験機 (Multi-Pressure/Temperature High-Frequency Reciprocating Rig)^[6] を使用した。同試験機は、密閉された容器内で従来の HFRR 試験機と同一の試験原理を達成したものである (図 6)。表 6 に従来型 HFRR 試験機との仕様比較を示す。試験条件は石油学会規格 (JPI 規格)^[7] で定める軽油の試験条件と同等とし、雰囲気圧力のみテスト温度 (60 °C) での DME の蒸気圧がかかるものとした。データ整理手法は 4 回測定の変差からデータ追加数を定める著者らの手法^[8] を踏襲した。

自己潤滑性の乏しい DME に対する潤滑性向上剤の添加濃度と摩耗痕径 (WSI.4) の関係や、水分の混入が摩耗痕径に及ぼす影響等、およびメタノールの混入が摩耗痕径に及ぼす影響等は既報を参照されたい^[8]。これらの結果では、低硫黄軽油用の市販脂肪酸系潤滑性向上剤を 100 ppm 程度添加することで、同一装置で市販軽油を評価した場合と同等の摩耗痕径が得られる (すなわち軽油相当の

要注意度数： <<

不純物	部分負荷性能試験					JE05 モード試験 ※酸化触媒後による評価
	エンジンアウト			酸化触媒アウト		
	低 高	→ 負荷 → λ →	高 低	無	低→負荷→高 高→λ→低	
メタノール	・ホルムアルデヒド、メタノール微増		・THC、CO 微増	・ホルムアルデヒド、メタノール微増		
プロパン	・ホルムアルデヒド微増		・THC 微増	・ホルムアルデヒド微増		・PM 粒子個数濃度増
FAME			・CO 増大、HC 増			・CO、THC 微増 ・PM 粒子個数濃度増
水	・着火遅延 ・THC、CO 増 ・ホルムアルデヒド、ギ酸増			・着火遅延 ・THC、CO 増 ・ホルムアルデヒド、ギ酸増		

添加剤	部分負荷性能試験					JE05 モード試験 ※酸化触媒後による評価
	エンジンアウト			酸化触媒アウト		
	低 高	→ 負荷 → λ →	高 低	低 高	→ 負荷 → λ →	
LI 過剰		・THC (メタン) 増		・メタン 微増		
純脂肪酸 LI						
着臭剤			・CO、THC 増			

図5 燃料性状影響調査エンジン試験まとめ^[1]

表6 MPT-HFRRと従来HFRRの仕様比較

	単位	JPI 規格	従来 HFRR*	MPT-HFRR
試料量	cm ³	2±0.20	←	500
ストローク	μm	1000±30	20-2000	1000-5000
周波数	Hz	50	10-200	10-50
負荷	N	1.96 ±9.81×10 ⁻³	0.98-9.8	←
燃料浴表面積	cm ²	6±1	←	113
試験燃料温度	℃	60±2	室温-150	最大 100
試験圧力	MPa	大気圧	←	最大 10
試験時間	分	75±0.1	←	←

*PCS Instruments 社製

潤滑性が得られる) こと、同潤滑性向上剤を 100 ppm 一定のもと水分の混入割合を増加すると、水分 300 ppm 程度から摩耗痕径が増大し始め、水分 1000 ppm 程度で軽油の摩耗痕径よりも大きくなること (すなわち軽油相当の潤滑性が得られなくなる) こと、メタノールの混入は摩耗痕径 (すなわち潤滑性) に影響を及ぼさないこと等を確認した^[8]。本報では、メタノールと水分共存の影響および燃料 DME の潤滑性について評価結果を加え、不純物が及ぼす燃料潤滑性への影響を紹介する。

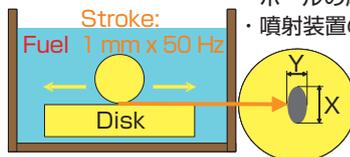
図 7 は純 DME にメタノールを 500 ppm 混合し、さらに水分を 5000 ppm まで混入した際の摩耗痕径の変化を示している。潤滑性向上剤は燃料全体に対して 100 ppm 一定である。なお図 8 は、図 7 について水分混入割合 0 ~ 1000 ppm の部分を拡大したものである。既報による水分のみの場合と同様、水分 300 ppm 近傍より摩耗痕径の増加が見られ始め、水分 1000 ppm 以上で軽油相当の摩耗

痕径を超越する。この結果から、メタノールと水の共存は、水分混入が及ぼす摩耗痕径増大の影響に対し、メタノールは助長も抑制もせず、潤滑性の悪化は水分の混入割合のみで決まるといえる。水による潤滑性悪化のメカニズムは、金属表面に化学吸着した境界潤滑膜の破断に対して水が何らかの影響を及ぼしているためであり、その要因として、金属石けん化していた境界潤滑膜が再び脂肪酸に戻ることで融点が下がり転移温度に達することや、転移温度自身の低下に水が影響していることなどが想定される。

図 7 および図 8 中の○は、浸せき試験でも使用した燃料 DME による摩耗痕径である。水分 100 ppm および 300 ppm の二点存在するが、燃料 DME に水分を加え、300 ppm に調整したものととも、それぞれの水分混入割合上に二点プロットしている。他の不純物混入により摩耗痕径増大を大きく助長はしないが、水分混入割合が小さいときは、他と比較し不純物の影響は小さくないと思われる。

High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)

- ・軽油潤滑性評価の標準試験法 (JPI-5S-50-98)
- ・ボールの摩耗痕径で評価
- ・噴射装置の耐久性と高い相関性



軽油の標準評価方法

Fuel Temp. 60 deg.C
Press. ambient
Load 200 g
Test duration 75min.

MWSD < 460 μm

潤滑性良好

DME 用 (液化ガス対応) 潤滑性試験機
Multi-Pressure/Temperature HFRR
(MPT-HFRR) の製作



図6 潤滑性評価装置および評価方法

表7 ISO16861: 2015 (DME燃料品質) およびASTM D7901-14 (DME燃料品質) との比較

項目	単位		ISO16861: 2015	ASTM D7901-14
純度	mass %	min.	98.5 以上	←
メタノール	mass %	max.	0.050 以下	←
水分	mass %	max.	0.030 以下	←
炭化水素 (C ₄ 以下)	mass %	max.	1.00 以下*	—
二酸化炭素	mass %	max.	0.10 以下	—
一酸化炭素	mass %	max.	0.010 以下	—
ギ酸メチル	mass %	max.	0.050 以下	報告のこと
エチルメチルエーテル	mass %	max.	0.20 以下	—
蒸発残分	mass %	max.	0.0070 以下	0.05 (100 mL 蒸発した際の残分、 単位: mL)
硫黄分	mg/kg	max.	3.0 以下	←
蒸気圧 @37.8 °C	kPa	max.	—	758
銅板腐食 @37.8 °C		max.	—	No. 1 (ASTM D1838 試験で、 わずかな変色で収まること)

*DME 流通過程で LP ガスのインフラを流用・転用した場合

2.4 DME燃料品質の定義

表7に約7年間の議論の末に2015年5月に発行された、ISO16861: 2015 (DME 燃料品質) のスペックを、ISOの後追いながら2014年に先んじて発行されたASTM D7901-14 (DME 燃料品質) との比較でそれぞれ示す。水分は前述の潤滑性評価結果のデータを基に、製造側の要望も考慮して300 ppmを混入限界値と定めた。炭化水素 (C₄以下) は、DME 燃料市場導入初期にLPガスインフラを流用・転用可能とするため、1%の混入を許容しているが、この決断の際には、LPガス(プロパンで代表)5%混入でもエンジン試験による排出ガス性能への影響が小さいというデータが参照されている。硫黄分については、エンジンシステムという利用システム側の視点からすれば、限りなくゼロであって欲しいところであるが、一部のDME

製造プラントでは未だに硫酸脱水法による製造工程が利用されていること、ディーゼルエンジンの従来燃料である低硫黄軽油が、先進国においても硫黄分5 ppm弱であることなどに鑑み、3.0 ppmを許容値とした。蒸発残分については、DME 製造工程で高沸点成分が残留する可能性は非常に小さいが、異物混入をキャッチできることを目的として、70 ppm以下の値が採用された。その他の不純物に関しては、利用システム側の視点で影響が非常に小さいことから、製造側の経済性を考慮した各値が採用された。

なお、ASTMはISO/TC28/SC4/WG13およびWG14と数回情報交換を実施し、ISOでの議論を参考にしながらそれぞれの項目を定義したとのことである。蒸気圧や銅板腐食等はISOでは定義していないが、ASTMではLPガスの規格を参照したと思われる。

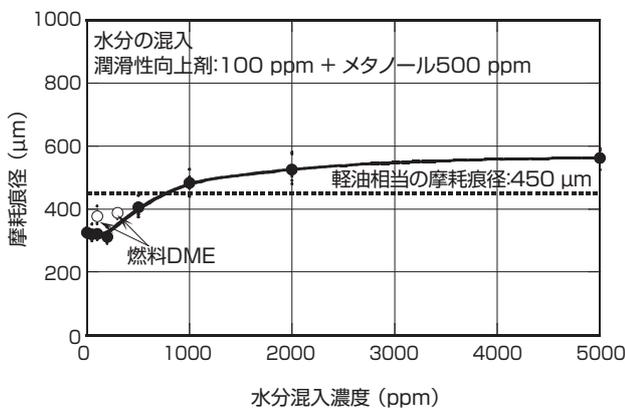


図7 水分混入が摩耗痕径に及ぼす影響^{[1]*}
(水分0-5000 ppm、メタノール500 ppm)

※[1]に一部データ追記

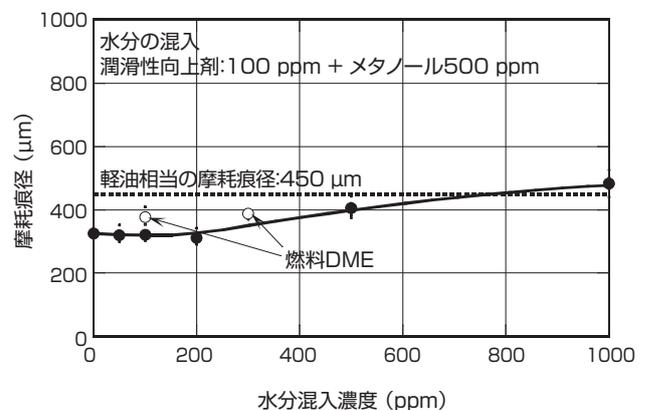


図8 水分混入が摩耗痕径に及ぼす影響^{[1]*}
(水分0-1000 ppm、メタノール500 ppm)

※[1]に一部データ追記

3 DME燃料品質分析方法の検討

ISO16861: 2015 すなわち DME 燃料品質の定義、その規格化に際し、同品質を満たすか否かを判定する分析方法も併せて必要である。DME は液化ガス燃料のため、主に LP ガス (液化石油ガス) や LNG (液化天然ガス) の分析方法を参考に、以下の 4 種分析方法の原案作成およびラウンドロビンをテストを実施し、幾多の議論を重ね、それぞれ発行されている。

ISO17198: 2014, DME 燃料分析方法 – 硫黄分紫外蛍光法 / Dimethyl ether (DME) for fuels–Determination of total sulfur, ultraviolet fluorescence method (2014.11.15)

ISO17786: 2015, DME 燃料分析方法 – 蒸発残渣分析方法 / Dimethyl ether (DME) for fuels–Determination of evaporation residues–Mass analysis method (2015.5.1)

ISO17197: 2014, DME 燃料分析方法 – 水分カールフィッシャー分析方法 / Dimethyl ether (DME) for fuels–Determination of water content–Karl Fischer titration method (2014.11.15)

ISO17196: 2014, DME 燃料分析方法 – 不純物ガスクロマトグラフィ分析方法 / Dimethyl ether (DME) for fuels–Determination of impurities–Gas chromatographic method (2014.11.15)

ラウンドロビンテストについては、本来は分析対象の測定水準、すなわち、本 DME 燃料品質の場合では、DME

に含まれる不純物の種類およびその濃度を、分析適用範囲で幾つかの水準で用意し、精度解析をするべきであるが、サンプルおよび時間的制約のため、一つの測定水準だけで実施した。ラウンドロビンテストには、日本国内の 7 ラボに加え、韓国より 2 ラボ、スウェーデン、カナダおよびベルギーよりそれぞれ 1 ラボずつの参加があり、ラボによって分析項目ごとの対応可否はあったが、全ての分析項目において 8 ラボは確保された。

テストサンプルは著者らの研究グループにより、純 DME に不純物を重量法で混合、作成し、その値を通達せず、各ラボにて分析を実施してもらった。本報では、最も課題の見たガスクロマトグラフィ分析法による不純物濃度のラウンドロビンテスト結果について紹介する。

まず、重量法で混合した不純物濃度に、比較的近い分析結果を示すことができるラボが多かったものとして、C₄ 以下の炭化水素 (HC) およびメタノールの分析結果を図 9 および図 10 にそれぞれ示す。各ラボ内での測定値のばらつきは、エラーバーで示している。ラウンドロビンテスト結果の精度解析は、ISO5725-2 に規定されるコ克蘭の検定およびグラブスの検定を行い、併行標準偏差および再現標準偏差を算出することによって行った。その結果、C₄ 以下の HC については、併行標準偏差 Sr = 0.0134、再現標準偏差 SR = 0.0393 であった。ただし、この精度は 6 ラボが参加し 0.0952 wt.% 水準実験によって求められたものである。同実験ではコ克蘭の検定およびグラブスの検定にて各 1 個の 1 % 外れ値が検出されたが、それらは捨てずに計算に含まれている。重量法により作成したサンプルにおける C₄ 以下の HC 濃度は、0.100 wt.% であり、ラウンドロビンテストの分析結果から得られた一般平均値が 0.0952 wt.% と、比較的近い結果を示した。

また、メタノールについては、併行標準偏差 Sr = 0.0025、再現標準偏差 SR = 0.0072 であった。ただし、この精度

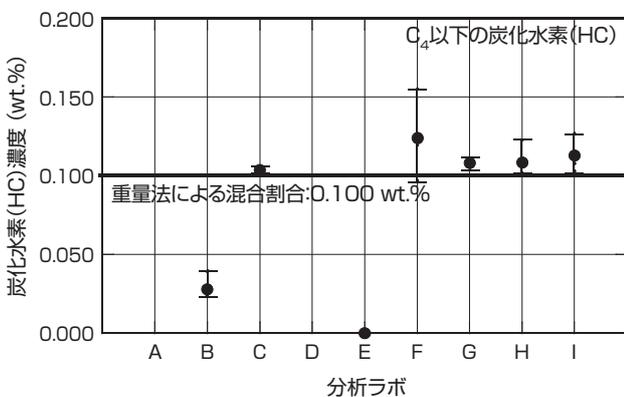


図9 ラウンドロビンテストによるC₄以下の炭化水素 (HC) 分析結果^{[9]**}
※[9]のデータを基にグラフ化

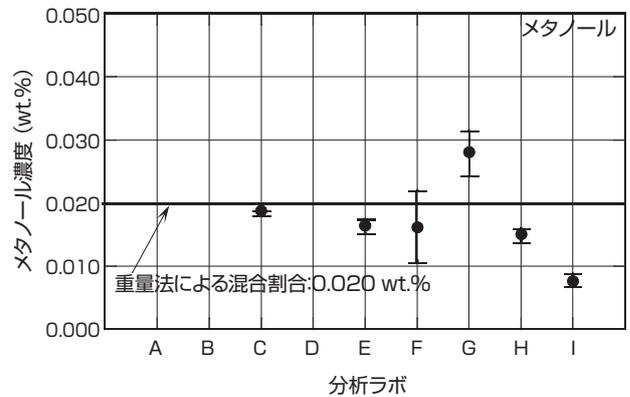


図10 ラウンドロビンテストによるメタノール分析結果^{[9]**}
※[9]のデータを基にグラフ化

は6ラボが参加し0.0160 wt.%水準実験によって求められたものである。同実験ではコ克蘭の検定にて各1個の5%外れ値が検出されたが、それらは捨てずに計算に含まれている。重量法により作成したサンプルにおけるメタノール濃度は、0.020 wt.%であり、ラウンドロビントの分析結果から得られた一般平均値が0.016 wt.%と、比較的近い結果を示した。これらC₄以下のHCおよびメタノール等については、ラボにおける技術の熟練によって、精度は改善するものと考えられる。

一方、重量法で混合した不純物濃度と比較し、分析結果が大きく異なる値を示したラボが多かったものとして、一酸化炭素(CO)および二酸化炭素(CO₂)の分析結果を図11および図12にそれぞれ示す。同様に、各ラボ内での測定値のばらつきはエラーバーで示し、精度解析は、ISO5725-2に規定されるコ克蘭の検定およびグリップスの検定を行い、併行標準偏差および再現標準偏差を算出することによって行った。その結果、COについては、併行標準偏差Sr = 0.0006、再現標準偏差SR = 0.009であった。ただし、この精度は5ラボが参加し0.0013 wt.%水準実験によって求められたものである。同実験ではコ克蘭の検定にて各1個の1%外れ値が検出されたが、それらは捨てずに計算に含まれている。重量法により作成したサンプルにおけるCO濃度は、0.010 wt.%であり、ラウンドロビントの分析結果から得られた一般平均値が0.0013 wt.%と、大きな乖離が起きた結果を示していることがわかる。ただし、併行標準偏差および再現標準偏差は比較的小さく、ラボ内およびラボ間でも再現性良く、重量法で作成したCO濃度よりも10分の1程度小さい分析結果を示した。

CO₂についても、COと同様の傾向で、併行標準偏差Sr = 0.0018、再現標準偏差SR = 0.0018で、この精度は6ラボが参加し0.0064 wt.%水準実験によって求められたものである。同実験ではコ克蘭の検定にて各1個の1%

外れ値が検出されたが、それらは捨てずに計算に含まれている。重量法により作成したサンプルにおけるCO₂濃度は、0.010 wt.%であり、ラウンドロビントの分析結果から得られた一般平均値が0.0064 wt.%と、CO同様、大きな乖離が起きた結果であるが、併行標準偏差および再現標準偏差は比較的小さく、ラボ内およびラボ間では再現性の良い分析結果を示した。

このままでは、作成したガスクロマトグラフィによる不純物の分析方法が、COおよびCO₂には適用できない。そこで、この分析結果の乖離要因の解析として、COおよびCO₂のDMEへの溶解度を測定した。純DMEが充填されている容器に、各圧力にてCOを供給し、容器をシャッフルしてDMEとCOの混合を促進した後に液相よりサンプルを取り出し、ガスクロマトグラフィによる分析を行った。CO₂も同様にサンプルを作成し、分析を実施した。図13に、COの分圧に対するDME中へのCOの溶解度を、図14に、CO₂の分圧に対するDME中へのCO₂の溶解度を、それぞれ示す。これらのデータより、COおよびCO₂は、分圧によりDMEへの溶解度が整理されることが確認された。2次の多項式近似により今回のラウンドロビントで重量法により作成したサンプル中の濃度、CO = 0.010 wt.%およびCO₂ = 0.10 wt.%を正確に分析するには、サンプルの取り出しに、0.0194 MPaおよび0.0825 MPa以上のバックプレッシャーを、それぞれかける必要があったことが明らかとなった。

結果として、COおよびCO₂がDMEの製造工程および流通過程で混入する可能性は低いことから、分析手法に課題を残しつつも、Appendixにてこれら溶解度等の情報を記述することで、ISOの発行に漕ぎ着けている。

4 議論と課題

約7年に及ぶ議論の末に、DME燃料品質およびその分析方法4種をISOとして発行することができた。ここでは、

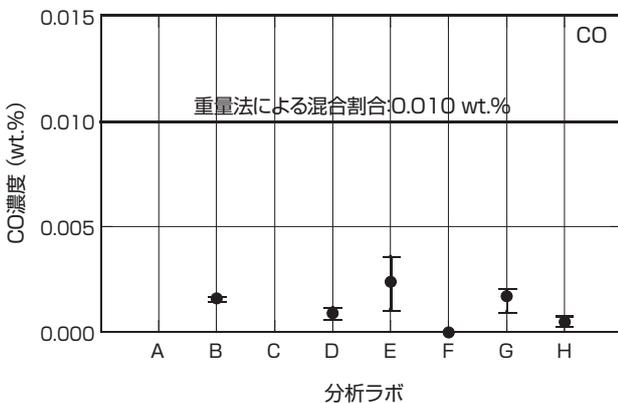


図11 ラウンドロビントによる一酸化炭素(CO)分析結果^[9]※
※[9]のデータを基にグラフ化

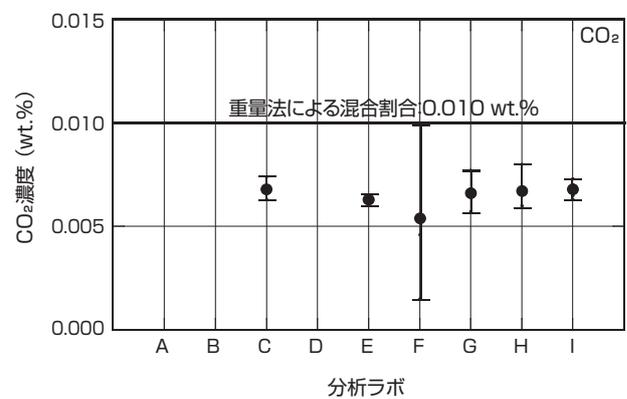


図12 ラウンドロビントによる二酸化炭素(CO₂)分析結果^[9]※
※[9]のデータを基にグラフ化

ISO 制定までの間に著者が経験した、いくつかのポイントを記述する。

(1) 水分混入限界決定に対する計測データの有用性

前述の通り、DME 燃料品質における不純物の混入限界決定に際しては、製造者側の主張（ここまで不純物を許容して欲しい）と、利用者側の主張（これ以上不純物が入ると、エンジン等利用システムとして不具合を生じてしまう）による、議論の歩み寄りによって定義した。とりわけ水分の混入限界決定に際しては、この議論が顕著であったため、ここに紹介する。

利用システムとして最もシビアな燃料品質を要求するであろう、DME ディーゼルエンジンに対し、水分の混入は、耐久性に大きな影響を及ぼす燃料の潤滑性を低下させる傾向を、実験データを基につかんでいた著者ら日本のエキスパートは、水分の混入限界を 100 wt.ppm までと主張した。一方、DME 製造プラントを多く稼働させていた他国エキスパートは、製造技術的に 300 wt.ppm までの許容を要求してきた。当時、世界における DME 燃料市場のトップシェアを誇る国からの要求であり、完全に彼らの要求を拒否することは、DME 燃料の市場形成および拡大に向けて、得策ではないと判断し、実験データからも潤滑性を極度に低下させるまでは若干余裕があったため、水分混入限界 300 wt.ppm を最終的には許容した。

当時、液化ガスである DME 燃料の潤滑性を評価可能な機関は、著者らを含め 3 機関のみであった。その 3 機関で、同一サンプルを評価したことがあり、その結果から、測定精度に自信を得ていた著者らは、豊富なバックデータを基に、ワーキンググループ会議の場で、即断することができた。

(2) ラウンドロビテスト実施に対する経験の蓄積

実は著者らは機械工学系の研究実施者である。分析方法の精度を確認するラウンドロビテストへの参画は、当初計画していなかったが、参加ラボ数確保の点から要請を

請け、分析装置の導入から進めた次第である。重量法によるサンプル作成は、これまでもエンジン試験の燃料作製で経験があり、化学分析と合わせて、多くの経験を積むことができた。CO および CO₂ の溶解度が分析精度に影響を及ぼしていたことを明確にした件は、この経験が有効であった。

(3) Discussion と Negotiation

国際会議における議論では、ロビー活動すなわち会議室外での相談、根回しが必要であり重要な作業である、等と聞く。賛否両論あるであろうが、実際に、経験したのも事実である。一方で、科学的実験データの説得力は絶大である。DME 燃料品質およびテスト方法の ISO 化における議論の場では、同燃料の商用化を目指す欧州を初めとする企業のもくろみが議論を引っ張ろうとしていたが、不純物が利用システムに及ぼす影響や不純物分析結果等、データが乏しく、想定や仮定で Negotiation（権利権益の主張が先行する根回し）を進めていた。このままでは良質の DME 燃料を製造する化学メーカーや高性能な DME 自動車を製造する自動車メーカー等、国内 DME 産業や国益に影響を及ぼすことが懸念され、豊富な実験データおよび解析結果を基に、Negotiation から Discussion（データに基づく技術的議論）に持ち込み、次第に主導権を得ることができたと回想する。

5 おわりに

DME 燃料品質の標準化に関して、燃料利用システム側からの視点で検討し、不純物の影響評価やその混入限界値の定義、ならびに不純物分析方法のラウンドロビン結果等、検証実験データ等を含めてここにまとめた。著者個人としては、ISO における標準化という題材を通じて、国際的な議論の場に立つ貴重なチャンスと経験を得ることができた。その過程では、発言しなければ、場合によっては国益を損ねかねないという緊張感をも経験し、たとえ不完全

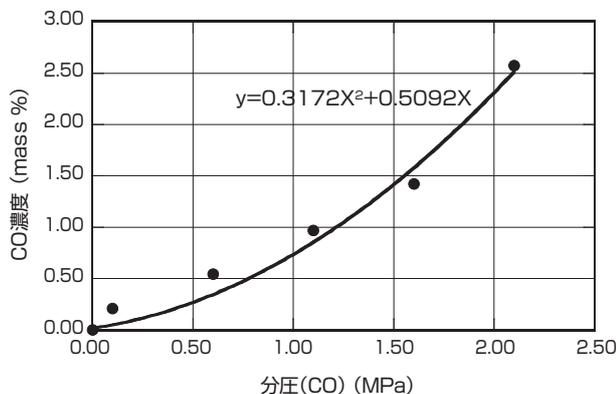


図13 CO分圧がDMEへのCOの溶解度に及ぼす影響¹⁹⁾

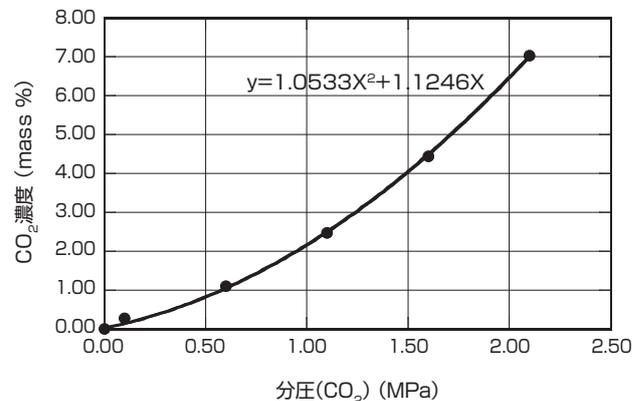


図14 CO₂分圧がDMEへのCO₂の溶解度に及ぼす影響¹⁹⁾

な英語であっても、データに基づく技術論は説得力があることを体感し、データの重要性を痛感した。さまざまな国の技術者との交流、ネットワークが得られるのも国際標準化活動の醍醐味である。この経験を活かし、自己の研究者としてのスキルアップと後進の育成に、今後も邁進していきたい。

謝辞

MPT-HFRR 試験機は岩谷産業株式会社との共同研究で開発したものである。この研究は経済産業省平成 21 年度基準認証研究開発委託費(国際標準共同研究開発事業:ジメチルエーテル (DME) 燃料に関する標準化) および NEDO 平成 22 年度戦略的国際標準化推進事業/標準化研究開発/ジメチルエーテル (DME) 燃料に関する標準化の成果を含む。研究および標準化活動は産総研省エネルギー研究部門後藤新一名誉リサーチャーにご指導いただいた。産総研物質計測標準研究部門ガス・湿度標準研究グループ渡邊卓朗主任研究員には DME 品質分析に協力いただいた。また、産総研省エネルギー研究部門エンジン燃焼排気制御グループテクニカルスタッフの日暮一昭氏の実験補助、ならびに産総研旧新燃料自動車技術研究センター新燃料燃焼チーム元テクニカルスタッフの大無田亜紀子氏のラウンドロビンテスト分析解析作業をはじめ、多数の当グループ員による協力の基に為し得た標準化作業である。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 小熊光晴, 野内忠則, 後藤新一: 燃料中の不純物がDMEディーゼルエンジンシステムに及ぼす影響評価—JASO化に向けた総合評価, 第21回内燃機関シンポジウム講演論文集, 593-598 (2010).
- [2] 小熊光晴, 後藤新一, 西村輝一, 三木田裕彦: 自動車用DME燃料における不純物がエンジン性能に及ぼす影響調査, 自動車技術会論文集, 40 (4), 1003-1009 (2009).
- [3] 小熊光晴, 後藤新一, 西村輝一, 三木田裕彦: DMEディーゼルエンジンにおける燃料不純物の影響—過渡運転時のエミッション特性—, 自動車技術会学術講演会前刷集, 12-09, 21-24 (2009).
- [4] 中里俊洋, 岡本毅, 金野満: パームメチルエステル/DME複合燃料ディーゼル機関における性状および燃焼に関する研究, 自動車技術会学術講演前刷集, 80-04, 15-20 (2004).
- [5] 小熊光晴, 辻村拓, 後藤新一, 鈴木信市: DME直噴ディーゼルエンジンのPM解析—化学分析によるSOF成分の評価—, 自動車技術会論文集, 36 (6), 91-97 (2005).
- [6] K. Sugiyama, M. Kajiwara, M. Fukumoto, M. Mori, S. Goto and T. Watanabe: Lubricity of Liquefied Gas Assessment of Multi-Pressure/Temperature High-Frequency Reciprocating Rig (MPT-HFRR)—DME Fuel for Diesel, *SAE Paper*, 2004-01-1865 (2004).
- [7] 石油学会 (JPD): 軽油—潤滑性試験方法, JPI-5S-50-98, (1998).
- [8] 小熊光晴, 後藤新一, 野内忠則, 三木田裕彦: HFRR試験によるDME燃料の潤滑性評価, 自動車技術会論文集, 41 (6), 1353-1358 (2010).

- [9] ISO 17196: 2014, Dimethyl ether (DME) for fuels—Determination of impurities—Gas chromatographic method.

執筆者略歴

小熊 光晴 (おぐま みつはる)

2001年、茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程生産科学専攻終了、博士(工学)。2年半のポストドクを経て、2003年産総研入所。2009年新燃料自動車技術研究センター新燃料燃焼チーム主任研究員、2010年同研究チーム長、2015年より省エネルギー研究部門エンジン燃焼排気制御グループ長兼次世代自動車エンジン研究ラボ長。新燃料利用システムの実用化・標準化研究開発、低公害高効率エンジンの研究開発等に従事。2011年よりISO/TC28/SC4/WG13コンビーナ。2006年第56回自動車技術会賞浅原賞学術奨励賞、2012年第62回自動車技術会賞論文賞、2016年度工業標準化事業表彰 国際標準課貢献者表彰 (産業技術環境局長表彰) 受賞。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント (小原 春彦: 産業技術総合研究所)

この論文は、DME 燃料品質の標準化に関して著者が取り組んできた研究を端的にまとめている。特にこの標準化活動により著者は今年度の経済産業省工業標準化事業表彰を受賞しており対外的に高く評価されている。また、この論文ではラウンドロビン測定等国際標準化活動についても記載されており、国際標準化活動の重要性が分かる。分野外の読者の参考になるものと評価する。

コメント (四元 弘毅: 産業技術総合研究所)

DME 燃料に求められる要件や、国際標準化の取り組み、その苦労がよく分かる論文だと思います。

議論2 DMEの将来性について

コメント (四元 弘毅)

導入部分でDMEの将来性について、「製紙工場の廃液(黒液)や間伐材等未利用木質系バイオマスから合成ガスを経て製造する技術が確立されれば」とありますが、これはどのくらい実現可能性のある仮定なのでしょうか?合成ガスを持ち出すならすべての炭素源が原料の対象になってしまい、黒液や間伐材の場合のフィジビリティが他の炭素源に比べてどれほど高いのかの議論が見えなくなるのではと思いますのでお聞きする次第です。

回答 (小熊 光晴)

黒液や木質系バイオマスから合成ガス(CO、H₂)を製造する技術自身は難しくないのですが、経済性という点で石炭や天然ガスより劣っています。

「製紙工場の廃液(黒液)や間伐材等未利用木質系バイオマスから合成ガスを経て製造する技術が、経済性も含めて確立されれば」に修正いたします。

議論3 不純物・添加剤が金属材料に及ぼす影響について

コメント (四元 弘毅)

図3で、銅C1100が変色しているのは、銅にどのような反応が起きているからなのでしょう?また、材料にとってどのように有害であるかを追記してはいかがでしょうか?

回答（小熊 光晴）

酸化反応による変色であり、燃料系統のシール材として使われる銅は、酸化による腐食が進行すると燃料漏れの恐れがあります。この論文に追記いたします。

議論4 不純物・添加剤がエンジン性能に及ぼす影響について

コメント（四元 弘毅）

「総合的な排気性能」とは何を指しているか不明ですので、説明が必要だと思われます。これが排気中の環境汚染物質の多寡を意味するのであれば、それに先立つ図5の説明として記載されている「要注意」との関係をうまく説明する必要があると思いますが、いかがでしょうか？

回答（小熊 光晴）

当該箇所を「DME燃料中の不純物やDME燃料への添加剤がエンジン性能や排気特性に及ぼす影響をエンジン試験により評価し

た。それぞれの傾向を図5にまとめる。表中黄色および桃色で示された項目は要注意度を示し、黄色よりも桃色の方が注意する必要があることを示す。」及び「ただし、図5に示す傾向が見られたものの、「万が一、5%もの不純物が存在するDMEが利用されたとしても、モード運転による排ガス性能試験結果に及ぼす影響は大きくない」ことが確認できたといえる。」に修正します。

議論5 国際標準化のプロセスにおける議論と課題について

コメント（四元 弘毅）

国際標準化の会議において、NegotiationとDiscussionでは、具体的にどのような違いがあるのか説明が必要ではないでしょうか？

回答（小熊 光晴）

ご指摘ありがとうございます。以下のように説明を付けます。

Negotiation（権利権益の主張が先行する根回し）

Discussion（データに基づく技術的議論）

データストレージ用磁気テープの高密度化研究

— バリウムフェライトテープの市場導入までの道のり —

原澤 建*、野口 仁

磁気テープシステムは、安価、大容量という特徴からアーカイブ、バックアップ用途に広く使用されている。他のストレージ媒体同様に持続的な高容量化という市場ニーズに応える為、高記録密度化の研究が進められてきた。従来、メタル磁性体を用いたテープにより高密度化が進められてきたが2000年代後半に減速し始めた。しかし2011年、ポストメタル磁性体としてバリウムフェライト磁性体を採用したテープを市場導入し、高密度化の再加速に成功した。この論文は、近年の磁気テープシステムの大きな技術革新の一つであるバリウムフェライトテープの基礎研究から市場導入までの道のりについて報告する。

キーワード: バリウムフェライト、塗布型テープ媒体、面記録密度、リニアテープシステム、データストレージ

A study on high-density recording with particulate tape media for data storage systems

—On the process of introducing barium-ferrite tape media to the market—

Takeshi HARASAWA* and Hitoshi NOGUCHI

Magnetic tape storage systems are widely used for archive and data backup from their characteristic of low cost and large capacity. Research on magnetic tape targets higher recording densities to meet market needs for continuously increasing storage capacity like in other storage media. Progress on increasing the recording density of magnetic tapes using conventional magnetic metal particles has slowed in the years leading up to 2010. However, progress improved in 2011 with the introduction of tape media using barium-ferrite magnetic particles. In this paper, we describe the process of going from basic research on tape media using barium-ferrite to marketplace introduction.

Keywords: Barium-ferrite, particulate tape media, areal recording density, linear tape system, data storage

1 はじめに

近年、コンピューターの発達、通信基盤の充実によるコミュニケーション機会の増加、各種センサー等のデバイスの高性能化により、生成されるデータが爆発的に増えている。全世界で生成および複製されるデータは、2009年に0.9 ZB (10^{21} bytes)^[1]、2011年に1.8 ZB^[2]、2013年に4.4 ZB^[3]と年率40%のペースで増加し、2020年には44 ZBに達すると予想されている。このためデータストレージデバイスの持続的な記録密度の向上が期待されている。各種ストレージシステムの中で磁気テープは、システム費用やビットコストが安価、長寿命、省エネといった特徴からハードディスクドライブ (以下 HDD) のバックアップ用途、データを長期間保存するアーカイブ用途として使用され続けている^[4]。図1に示す通りHDD、光ディスク、磁気テープの面記録密度は年々向上しているが、近年、記録密度の進歩

は減速傾向にあり、磁気テープにおいても2010年頃に記録密度の進歩が減速した。これは当時主流の記録材料で

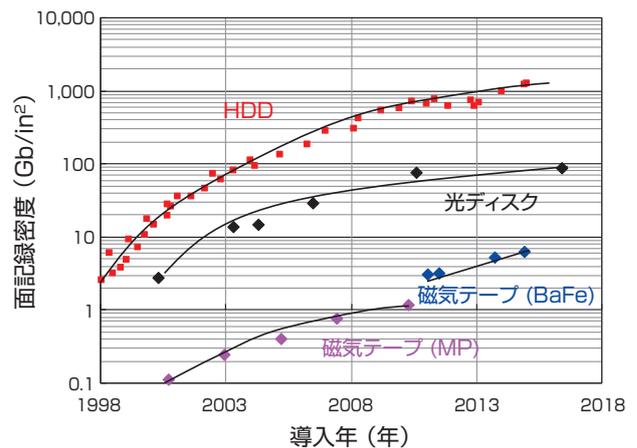


図1 HDD、光ディスク、磁気テープの面記録密度の変遷

富士フイルム株式会社 記録メディア研究所 〒250-0001 小田原市扇町 2-12-1
FUJIFILM Corporation recording media research laboratory 2-12-1 Ogicho, Odawara 250-0001, Japan * E-mail: takeshi.harasawa@fujifilm.com

Original manuscript received November 30, 2016, Revisions received January 24, 2017, Accepted February 10, 2017

あったメタル（metal particle 以下 MP）磁性体において、高密度化に必須である微粒子化の限界に近づいたためである。このため当社はさらなる微粒子化が可能であるバリウムフェライト（barium-ferrite 以下 BaFe）磁性体を採用した磁気テープを 2011 年に市場導入し、記録密度向上の再加速に成功した。本報告では、磁気テープにおける大きな技術革新である BaFe テープ導入について基礎研究から商品化研究までのプロセスを記述する。

2 磁気テープの歴史

2.1 磁気テープの用途

磁気記録は音を録音するというデンマークの科学者ポールセン（Valdemar Poulsen）が 1898 年に発明した磁気録音機が始まりとされる。その後、磁気記録技術は、テレビ、コンピューター等の急速な発展に伴い、録音だけでなく映像分野、情報記録分野へ展開された。

オーディオ映像分野では 1990 年代まではオーディオカセットや、VHS、8 mm といったビデオテープが広く普及していたが、CD や DVD といった光ディスクの台頭によりその姿を消すことになった。また 2000 年代以降は、放送局用ビデオテープも光ディスク、HDD といった他の記録媒体に置き換わり、徐々にその役割を終えようとしている。

一方、情報記録分野では 1950 年頃からコンピューターの記憶装置用として使われ始めた。その後もコンピューターの発展で安価、大容量を特徴とする磁気テープはデータセンター、大手企業、官公庁、研究機関を中心に広く使われるようになり、近年では、その用途は映像分野ではなく情報記録分野がほとんどを占めるようになった。現在の代表的なテープシステムは、オープンフォーマットで最も普及している Linear Tape-Open (LTO) 並びにエンタープライズ向けのクローズドシステムである IBM 社の 3592 と Oracle 社の T10000 の 3 システムである。それぞれのシステムの記録密度は持続的に向上しており、現在、LTO が 6 TB/巻^[5]、3592 が 10 TB/巻^[6]、T10000 が 8 TB/巻^[7]に至っており、すべてのシステムで BaFe 磁性体が採用されている。

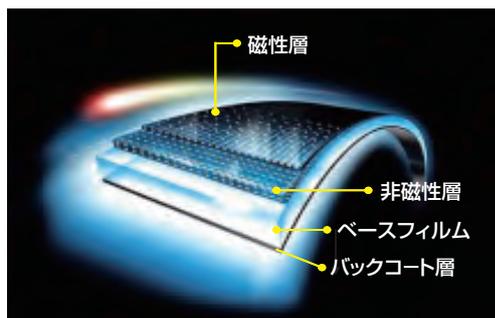


図2 磁気テープの層構成

2.2 磁気テープ技術の変遷

現在主流となっている磁気テープの製造は、低コスト、大量生産を実現するために塗布型方式が採用されており、図2に示したようにプラスチックのベースフィルム上に導電性や表面平滑性を付与する非磁性層、その上にデータを記録する磁性層が設けられ、ベースフィルムの裏面にはテープの走行を安定化させるバックコート層が設けられている。

磁気テープの高密度化は、磁気記録の原理により①磁性体の微粒子化、②磁性層の薄層化、③磁性層の表面平滑化により進められてきた。図3に磁気テープの磁性体の粒子体積、図4に磁性層の厚み、図5に表面平滑性の指標である平均表面粗さ Ra のトレンドを示した。磁性体の微粒子化、磁性層の薄層化、表面平滑化が持続的に進められていることが分かる。特に図4の磁性層厚みのトレンドの中で、磁気テープの層構成が磁性層単層から前述の非磁性層上に磁性層を設ける多層構成に技術革新されたことにより、磁性層厚は数ミクロンからサブミクロンオーダーへ飛躍的に薄層化が進んだ^{[8][9]}。一方、順調に見えた MP 磁性体の微粒子化も 2000 年代後半にその限界に近づいてきた。これは図6に示したように MP 磁性体は微粒子化に伴い磁性体の基本特性である保磁力（記録された信号を維持する特性）を十分に確保することが困難になってきたためである。一方、新たに開発した BaFe 磁性体では、組成・合成プロセスを制御することで 1000 nm³ 程度の微粒子でも十分な保磁力とすることに成功している。次項では、BaFe 磁性体の特徴と課題について説明する。

3 BaFe磁性体の特徴と課題

3.1 BaFe磁性体の特徴

MP 磁性体と BaFe 磁性体の特徴を表1に比較した。MP 磁性体は、鉄・コバルトを主体とした針状の金属合金磁性体であり、酸化抑制のために粒子の周囲に最低でも数 nm の厚みを持つ酸化保護層（徐酸化膜）が必要とな

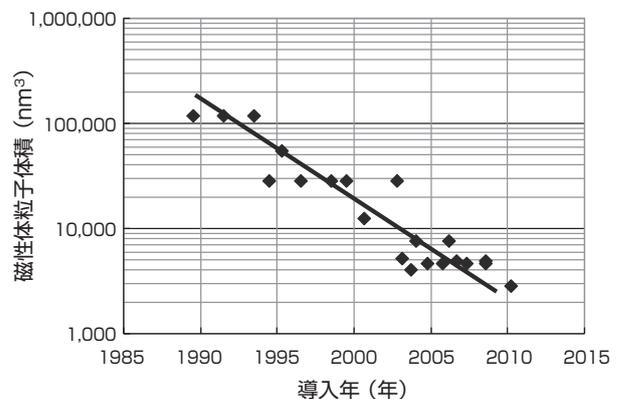
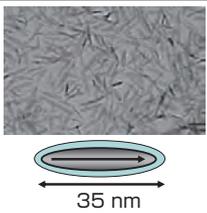
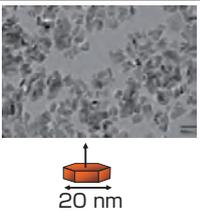


図3 磁性体体積のトレンド

表1 磁性体の特徴

磁性体	MP	BaFe
TEM像と模式図		
素材	FeCo、酸化保護膜が必要	BaO(Fe ₂ O ₃) ₆ 、酸化物で安定
磁化の起源	形状異方性	結晶異方性
磁化の方向	長手方向	垂直方向
飽和磁化量(MS)	600-900 emu/cc	250-300 emu/cc

る。また、「磁化の起源が粒子の針状形状に由来する」という形状磁気異方性を有し、異方性エネルギーを増大させるには、高軸比(長軸長 / 短軸長)化が必要である。一方、BaFe 磁性体は「異方性エネルギーが粒子の結晶構造で決定される」という結晶磁気異方性を有する酸化物である。また、BaFe 磁性体の磁化容易軸は盤面に垂直方向にあり、テープ化時には磁性層垂直方向に磁化成分をもつという特徴がある。

これらの特徴から、BaFe 磁性体が本質的に以下の優

位性を有しており、我々はポスト MP 磁性体の最有力候補になると考えた。

- ①MP磁性体は微粒子の高軸比化が困難なこと、酸化保護膜が必要なことから、微粒子化に伴い十分な保磁力を維持できなくなるのに対し、BaFe磁性体は、その異方性エネルギーが結晶構造で決定されること、酸化物のため保護膜が必要ないことから、微粒子化しても高い保磁力を維持できる。
- ②酸化物であるBaFe磁性体は高温高湿環境でも非常に安定であり、テープとしての長期保存性に優れている(図7)。
- ③テープ化後に磁性層垂直方向に磁化成分を有するため、HDD分野で実用化された垂直磁気記録への適性が期待される。

3.2 BaFe磁性体の課題

前項で述べたように、BaFe 磁性体は高密度化に有利となる多くの特徴を有しているが、その特徴を引き出すためには克服すべき以下の課題があった。

- ①BaFe磁性体が微粒子かつ板状のため磁性体同志が非常に凝集しやすく、従来の分散技術・塗布技術では均

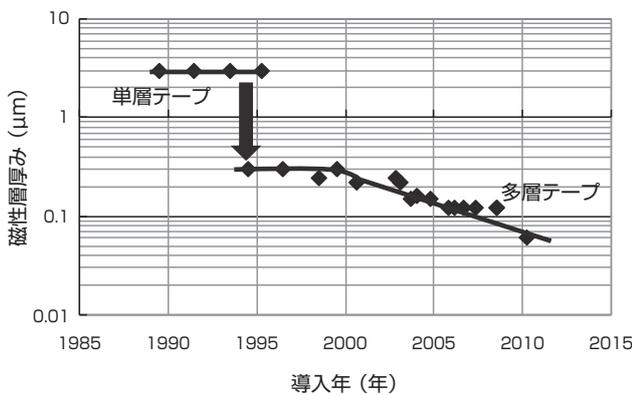


図4 磁性層厚みのトレンド^{[8][9]}

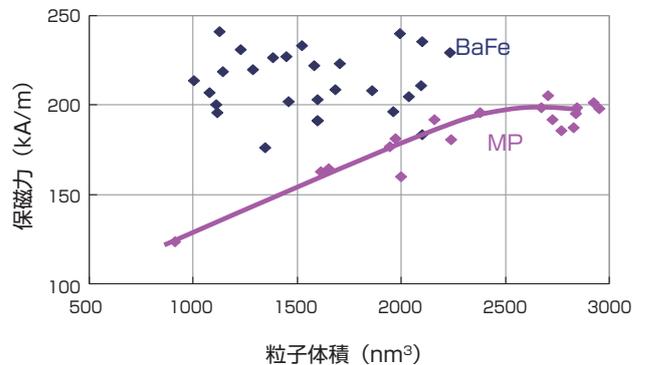


図6 磁性体の粒子体積と保磁力

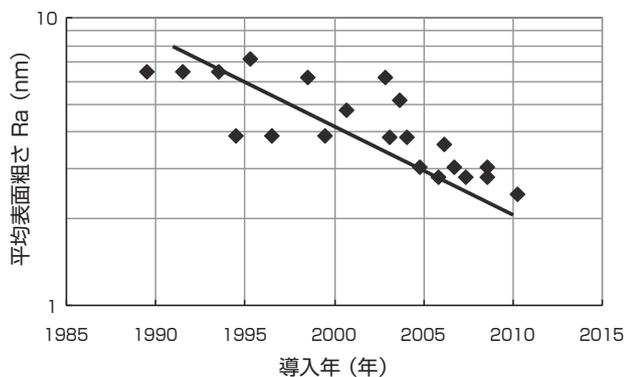


図5 テープの表面平滑性のトレンド

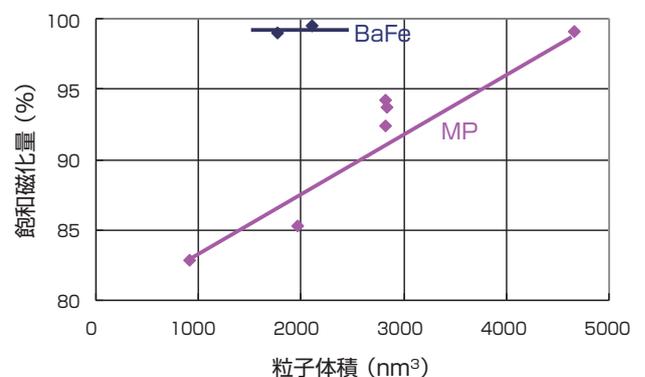


図7 60 °C 90 %RH (湿度)1 カ月保存での飽和磁化量 (Ms) 変化

- 一・平滑な薄層磁性層を構築できなかった。
- ②BaFe磁性体の飽和磁化量 (Ms) が小さいためMPテープと比較して再生出力が低く、それを補う高感度な磁気ヘッドが必要であった (図8)。
- ③BaFeテープが垂直磁化成分を有するため孤立反転波形の対称性が著しく悪く、その非対称性を補正する信号処理技術が必要であった。
- ④BaFeテープに興味を持ち、テープシステムを共同開発するシステムメーカー候補がいなかった。

4 市場導入のシナリオとその実践

4.1 市場導入のシナリオ

この研究は1992年から3名の技術者で開始されたが、そこから10年近く経ってもMPテープの性能を大きく超える結果を出せなかったため、中断を繰り返し、最終的には休止寸前まで追い詰められた。しかし2001年にBaFe磁性体のポテンシャルを引き出す新たな分散・塗布技術の開発、また、BaFeテープの性能を引き出す高感度ヘッドによる評価技術開発により、当時のMPテープの性能を大きく超える結果を示し、研究は継続・加速された(1st step)。

その後、本結果をもとに技術的に先行するシステムメーカーであるIBM社と共同研究を開始しBaFeテープの性能を引き出すドライブ技術の開発により、これまでに無い高い記録密度特性を実証することに成功した(2nd step)。本共同研究の成果を受けて、IBM社を含むドライブメーカー数社とシステム開発がスタートした。我々はBaFeテープの実用性・量産化技術の開発を行い、各種テープ製品を市場導入した(3rd step)。さらに、これらの製品化と並行して、IBM社と共同でBaFeテープのさらなる高容量化の検証研究を行い、前述のBaFeテープ製品の市場導入と同タイミングでその成果を発表した。本発表によりBaFe技術

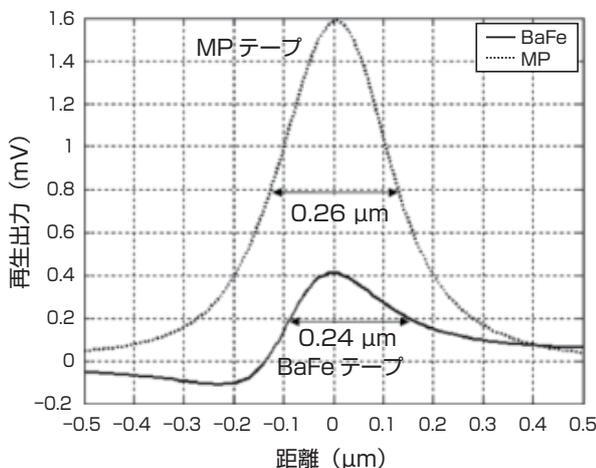


図8 BaFe/MPの孤立反転波形比較

が今後数世代のテープシステムをサポートする技術であることが認知され、市場導入した製品の普及を加速させた(4th step)。次項では、その詳細について説明する。

4.2 シナリオの実践

4.2.1 1st step基礎研究(～2003年)

<社内での記録再生特性の検証>

BaFeテープに期待される高い記録再生特性を引き出すために3.2項で示した課題の中で、まずはBaFeに適応した高分散化技術・超薄層塗布技術の開発と高感度ヘッドでの評価技術開発を行った。

①-1: 高分散化技術

BaFe磁性体は磁性を持った微粒子であり、その上形状が六角板状のため板面同志が凝集するスタッキングを起こしやすい。微粒子化の効果を発現するには磁性体を均一に分散することが重要だが、図9に示すように従来の分散方法では磁性体が数個～十数個の塊となっており不均一な状態にあった。MP磁性体からBaFe磁性体への移行にあたり、分散剤・ポリマー等の新規有機素材開発、新規分散プロセス開発を行い微粒子BaFe磁性体の一次分散化に成功した。

①-2: 超薄層塗布技術

磁気記録媒体の高密度化には磁性層の薄層化が必須となるが、従来の塗布方式では0.1 μm以下の薄層化は困難であった。これは図10にあるように従来の塗布方式では下地である非磁性下層との界面の乱れが大きく均一な薄層磁性層を得ることができなかったためであり、BaFe磁性体の塗布液ではこの傾向がより顕著であった。このため、新たな塗布方式を開発し、非磁性下層との界面の乱れがなく均一で厚み変動が少ない数十nm厚の薄層磁性層を実現した。

②高感度ヘッドによる評価系開発

当時のテープ用ヘッドではBaFeテープの性能を十分に引き出せる高感度な磁気ヘッドが存在しなかったため、我々は技術的に先行していたHDDヘッドを用いて媒体評価を行うことを考えた。このため当時所有していたテープ用の

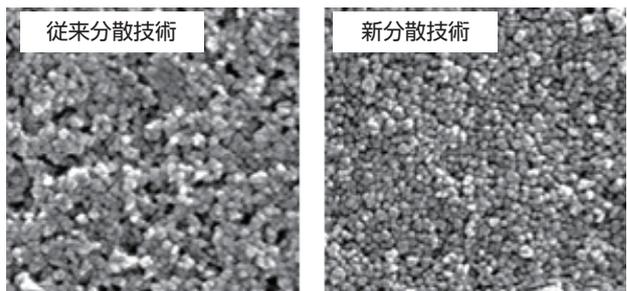


図9 テープ表面のSEM像

評価装置ではなく、HDD用に使用されていた再生幅1.9 μmのマージ型AMR(anisotropic magneto resistive)ヘッドを搭載したディスク用の評価装置を立ち上げ、円盤状のBaFe媒体を用いて評価を実施した。線記録密度180 kfcf (flux change per inch)における当時のMP媒体と分散塗布技術を見直したBaFe媒体の変調スペクトラムを図11に示す。変調スペクトラムが示すように比較のMP媒体に対し出力で+4 dB、媒体の記録再生性能を表すSignal to noise ratio (以下SNR)は+10 dBとMP媒体の10倍の記録密度を達成できる可能性を示した^[10]。

4.2.2 2nd stepシステムとしての可能性研究(～2006年) ＜ドライブメーカーにおける記録密度検証＞

1st stepの社内検討で初めてBaFeテープの高い記録再生特性を確認することに成功したが、磁気テープメーカー単独のSNRの結果だけでは、ドライブメーカーを十分に納得させ、BaFeテープに向けたシステム開発をスタートさせることはできなかった。このため次のステップとしてシステムメーカーを巻き込んだ共同研究により、3.2項で示したBaFeの波形補正を実現する新規信号処理の開発およびシステムメーカーとの関係構築を目指した。

テープドライブ技術を牽引するIBM社を共同研究相手として選び、我々の評価データとIBM社に評価してもらうための試作品を持ち込み、BaFeテープの可能性の説明を繰り返すことで、共同研究がスタートした。共同研究における最大のターニングポイントは再生ヘッドの選択にあった。当社は、当時テープ用に使用されていたAMRヘッドではなく、より再生感度が高く、HDDでは標準であったGMR (giant magneto resistive) ヘッドによる評価をIBM社に提案したが、IBM社はテープ業界では馴染みがなく、新しいデバイスであるGMRヘッドの採用には慎重な姿勢であった。当社は、HDD等の別システム用のGMRヘッドによる評価を行い、BaFeテープの高い記録再生特性^[11]^[12]を示し、最終的にはIBM社もGMRヘッドを採用、結

果として高い記録密度特性を検証することに成功し、共同研究の成果として2006年に当時の製品の面記録密度0.4 Gb/in²の約17倍に相当する6.7 Gb/in² (カートリッジ容量8 TB/巻相当)の面記録密度の検証に成功した^[13]。技術的なハイライトは、①微粒子BaFe磁性体を用いた磁気テープと新規信号処理技術DD-NPML (data dependent noise predictive maximum likelihood) との組み合わせによる線記録密度の向上と②高精度ヘッドフォローイング技術によるトラック密度の向上が挙げられる。本共同研究の中でIBM社が設計した新規信号処理DD-NPML^[14]により、BaFeテープの課題であった再生波形の歪みは補正され、目標のエラーレートを達成し、IBM社も次世代テープ技術の本命としてBaFeテープの検討を進めることになった。この時点で3.2項に記した課題③の波形非対称性の補正、課題④のシステム開発パートナーの選定が解決され、BaFeテープの実用化が大きく進展した。

一方富士フイルムが提案するBaFeテープ以外にも日立マクセル社からは窒化鉄(NanoCAP)磁性体を用いたテープ^[15]、ソニー社からは蒸着テープ^[16]が提案され、テープシステムの業界団体であるINSIC (Information Storage Industry Consortium) の中ではMPテープに続く次世代テープの議論が開始された。

4.2.3 3rd step商品化研究(～2011年) ＜BaFeテープの量産化技術確立＞

1st step、2nd stepを通して、当初の課題はすべて解消され、IBM社との技術検証の成果を受けて多くのシステムメーカーにBaFeテープが認知された。IBM社に加え、Oracle社、HP社、Quantum社へ技術説明とBaFeテープ試作品を供給し、その性能評価を繰り返すことで実用化段階に進んだ。2011年にIBM社の3592第4世代ドライブ^[17]とOracle社のT10000第3世代ドライブ^[18]にBaFeテープが採用され、それぞれ4 TB、5 TBの製品化に成功した。また2012年にLTO第6世代ドライブ^[19]

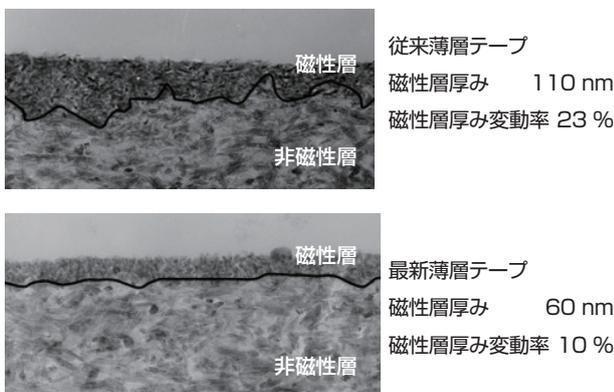


図10 テープの断面TEM像

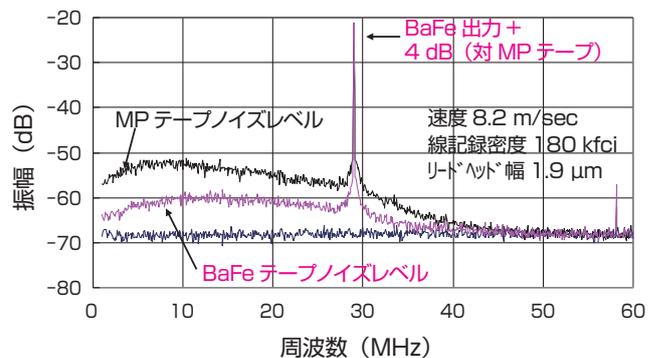


図11 MP媒体とBaFe媒体の変調スペクトラム^[10]

に BaFe テープが採用され、目標であった主要テープシステムすべてに BaFe テープの導入を果たした。

社内的にはテープの量産化技術と実用化技術の開発に注力した。量産化技術開発においては、前項で述べた新規分散・塗布技術のスケールアップを中心に高密度テープを安定生産するためのプロセス開発を進めた。また、実用化技術開発においては、主にテープの走行耐久性の向上を目指した。テープシステムでは広い温湿度範囲（10～32℃、10～80%RH）において数万パスに及ぶ全長走行等の過酷な耐久試験をクリアしなければならず、テープの表面設計や潤滑性能、摩耗性能の設計を行った。これらの量産化および実用化技術の開発を経て最終目標であった BaFe テープの市場導入が実現された^[20]。

4.2.4 4th stepさらなる可能性研究（～2015年）

<さらなる高記録密度の検証>

2011年に長年の念願であった BaFe テープの市場導入を果たしたが、システム変更に伴って高額な投資が必要なユーザーにとっては、BaFe 技術が将来どこまで発展するかが大きな関心であった。このため我々は商品化研究と並行して BaFe テープの記録密度向上の可能性検証を継続的に行い、その将来性を市場に訴求し続けてきた。

BaFe 製品の市場導入1年前の2010年には記録密度 29.5 Gb/in²^[21]（カートリッジ容量 35 TB/巻相当）の技術検証に成功、この技術検証で採用した BaFe テープでは、

① BaFe 磁性体の粒子体積を 2100 nm³ から 1600 nm³ まで微粒子化（図 12）、②表面性の指標である平均表面粗さ Ra を 2.0 nm から 0.9 nm まで平滑化（図 13）、③磁性体の垂直磁場配向技術の採用により垂直方向の配向度を 0.61 から 0.86 に向上（図 14）を実現した。

その後も上記①～③の技術をさらに進化させ、2014年に 85.9 Gb/in²^[22]（154 TB/巻相当）、2015年には 123 Gb/in²^[23]（220 TB/巻相当）の技術検証に成功した。

研究スタートから20年以上の歳月をかけて BaFe テープ製品を市場導入し、同時に進めてきた技術検証により今後、10年以上の高密度化の見通しを示したことで、MP テープに代わり BaFe テープのデファクト化を成し遂げた。

5 まとめ

性能の限界が見えた MP 磁性体に代わり BaFe 磁性体を採用することでテープシステムの高密度化を加速し、増え続けるデータを保存するという市場ニーズに応えることができた。

本報告で示した BaFe テープのデファクト化というイノベーションが生まれた最大の要因は、BaFe テープの本質的な可能性を信じ、周囲を巻き込みながら必要な技術開発を進めてきたことにある。もちろん、BaFe 磁性体そのものの技術革新は重要であったが、それ以上に BaFe 磁性体、BaFe テープのポテンシャルを引き出すための周辺技術開発が重要だった。社内的には新規の分散技術・塗布技術開発、社外的には高感度磁気ヘッド・波形補正技術の開発なくしては、BaFe テープの高密度化は達成し得なかった。

研究スタートから製品化まで約20年の年月がかかったが、この期間、諦めずに研究を進めることができたのは、(短所も含め) BaFe 磁性体の本質的な特徴を理解していたこと、その特徴が原理的に磁気記録の高密度化に有効だと理解できていたことにある。本事例は昨今求められている効率の良い研究開発とは言い難いが、モノの本質、原理に

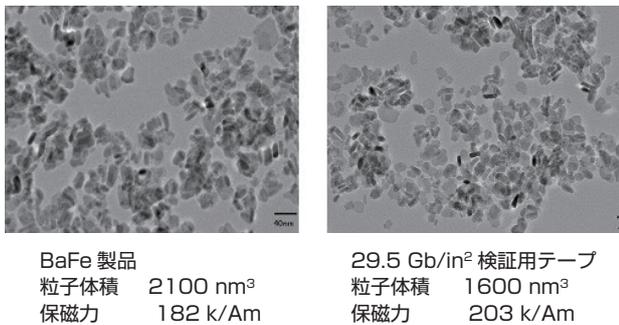


図 12 BaFe 磁性体の TEM 像^[21]

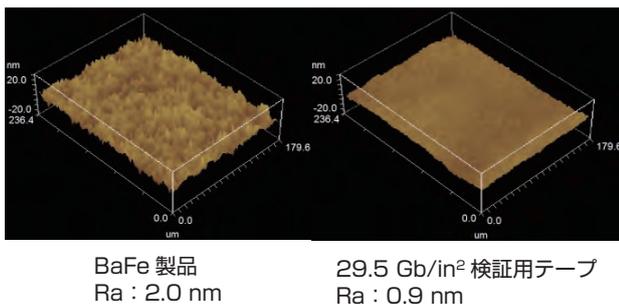


図 13 光干渉表面粗さ計による表面プロファイル^[21]

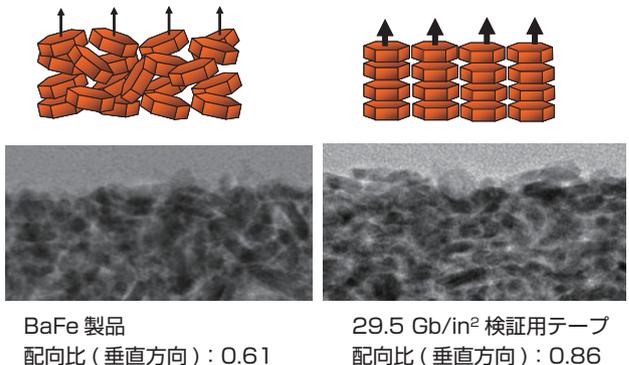


図 14 磁性層の断面の TEM イメージ^[21]

基づき、諦めない姿勢、周囲を巻き込む姿勢によりイノベーションを生んだ研究プロセスとして参考にしていただけたら幸いである。

最後に今後も増大するデータを保存していくという市場ニーズに応じていくために、新たなテープの高密度化技術の開発とHDDの先進的なドライブ技術革新を取り込むことでさらなるテープシステムの高密度化が進められていくと信じている。最後にこの研究の主だったイベントの年表を図15に整理した。

1st step	1992	・3名の研究者でBaFeテープの研究をスタートした。
	2001	・研究継続の危機にあったが社内で初めてBaFeテープの高い記録特性を示すことに成功した。
2nd step	2004	・IBMと記録密度検証の共同研究をスタートした。
	2006	・富士フイルムは、BaFeテープで高い記録密度の可能性をGMRヘッドとの組み合わせで実証した ^{[1][12]} 。 ・IBMと共同でBaFeテープで記録密度6.7 Gb/in ² (容量8 TB相当)の技術検証に成功した ^[13] 。 ・M社より窒化鉄テープ、S社より蒸着テープが提案され、業界でポストメタルテープの議論が開始された。
	2007	・システム各社にBaFeテープの技術プレゼンとサンプル提供を開始した。
3rd step & 4th step	2010	・IBMと共同でBaFeテープの記録密度29.5 Gb/in ² (容量35 TB相当)の技術検証に成功した ^[21] 。
	2011	・Oracle(当時のSUN)製T10000第3世代システム(容量5 TB)用テープに採用されBaFeテープで初めて商品化に成功した。 ・IBM製3592第4世代システム(容量4 TB)用テープの商品化に成功した。
	2012	・LTO6(容量2.5 TB)用テープの商品化に成功した。この結果、主要3テープストレージシステム全てにBaFeテープが採用された。 ・Oracle製T10000第4世代システムが発売された。第3世代システム用テープ使用(1U-7)で容量8.5 TBに向上した。
	2013	・IBMと共同でBaFeテープの記録密度85.9 Gb/in ² (容量154 TB相当)の技術検証に成功した ^[22] 。
	2014	・IBM製3592第5世代システム(容量10 TB)用テープの商品化に成功した。 ・IBMと共同でBaFeテープの記録密度123 Gb/in ² (容量220 TB相当)の技術検証に成功した ^[23] 。
	2015	・LTO7(容量6 TB)用テープの商品化に成功した。

図15 バリウムフェライトテープ開発の年表

参考文献

- [1] J. Gantz and D. Reinsel: The Digital Universe Decade—Are You Ready?, IDC, <http://japan.emc.com/collateral/analyst-reports/idc-digital-universe-are-you-ready.pdf>, 閲覧日2016-11-30.
- [2] J. Gantz and D. Reinsel: 混沌から価値を引き出す, IDC, <http://japan.emc.com/collateral/analyst-reports/idc-extracting-value-from-chaos-ar.pdf>, 閲覧日2016-11-30.
- [3] IDC: The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things, [http://japan.emc.com/leadership/digital-universe/2014view/executive-](http://japan.emc.com/leadership/digital-universe/2014view/executive-summary.htm)

- summary.htm, 閲覧日2016-11-30.
- [4] Jeita専門委員会: テープストレージの製品動向—2010年版, http://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181855_mnBLMw2T4A.pdf, 閲覧日2016-11-30.
- [5] LTO Ultrium: What is LTO Technology?, <http://www.lto.org/technology/what-is-lto-technology>, 閲覧日2012-12-15.
- [6] IBM: IBM Knowledge Center, http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ja/STQRQ9/com.ibm.storage.ts4500.doc/ts4500_ipg_drives_3592.html, 閲覧日2016-11-30.
- [7] 日本Oracle: Storage Tek T10000Dテープ・ドライブ, <http://www.oracle.com/jp/products/servers-storage/storage/tape-storage/t10000d-tape-drive/overview/index.html>, 閲覧日2016-11-30.
- [8] H. Inaba, K. Ejiri, N. Abe, K. Masaki and H. Araki: The advantage of the thin film magnetic layer on a metal particulate tape, *IEEE Trans. Magn.*, 29 (6), 3607–3612 (1993).
- [9] H. Inaba, K. Ejiri, K. Masaki and T. Kitahara: Development of an advanced metal particulate tape, *IEEE Trans. Magn.*, 34 (4), 1666–1668 (1998).
- [10] 齊藤真二, 野口仁, 遠藤靖, 江尻清美, 萬代俊博, 杉崎力: 記録密度Gb/in²クラスの塗布型磁気記録媒体, *富士フイルム研究報告*, 71–75 (2003).
- [11] T. Nagata, T. Harasawa, M. Oyanagi, N. Abe and S. Saito: A recording density study of advanced barium-ferrite particulate tape, *IEEE Trans. Magn.*, 42 (10), 2312–2314 (2006).
- [12] R. M. Palmer, M. D. Thornley, H. Noguchi and K. Usuki: Demonstration of high-density removable disk system using barium-ferrite particulate and CoPtCr-SiO₂ thin film flexible media, *IEEE Trans. Magn.*, 42 (10), 2318–2320 (2006).
- [13] D. Berman, R. Biskeborn, N. Bui, E. Childers, R. D. Cideciyan, W. Dyer, E. Eleftheriou, D. Hellman, R. Hutchins, W. Imano, G. Jaquette, J. Jelitto, P.-O. Jubert, C. Lo, G. McClelland, S. Narayan, S. Oelcer, T. Topuria, T. Harasawa, A. Hashimoto, T. Nagata, H. Ohtsu and S. Saito: 6.7 Gb/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 43 (8), 3502–3508 (2007).
- [14] J. D. Coker, E. Eleftheriou, R. L. Galbraith and W. Hirt: Noise-predictive maximum likelihood (NPML) detection, *IEEE Trans. Magn.*, 34 (1) pt. 1, 110–117 (1998).
- [15] Y. Sasaki, N. Usuki, K. Matsuo and M. Kishimoto: Development of NanoCAP technology for high-density recording, *IEEE Trans. Magn.*, 41 (10), 3241–3244 (2005).
- [16] T. Ozue, M. Kondo, Y. Soda, S. Fukuda, S. Onodera and T. Kawana: 11.5 Gb/in² recording using spin-valve heads in tape systems, *IEEE Trans. Magn.*, 38 (1) pt. 1, 136–140 (2002).
- [17] IBM: Barium Ferrite: The storage media of the future is here today, http://www.sinus-europe.com/files/IBM_Barium_Ferrite_White_Paper.pdf, 閲覧日2017-01-24.
- [18] Oracle: Oracle's Storage Tek SL3000 modular library system: Clearly superior to Quantum—at a lower cost, <http://www.oracle.com/us/products/servers-storage/storage/tape-storage/wp-sl3000vsquantum8-12-12-1906152.pdf>, 閲覧日2016-11-30.
- [19] 富士フイルム: 世界初!大容量磁気テープメディアLTOに独自のBaFe(バリウムフェライト)磁性体を採用, ニュースリリース, http://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articleffnr_0706.html, 閲覧日2012-12-15.
- [20] 高野博昭, 浅井雅彦, 小柳真仁, 大石忠宏, 白井正幸: バリウムフェライト磁性体によるエンタープライズデータストレージシステム用の高性能テープメディアの開発, *富士フイルム研究報告*, 28–32 (2013).

- [21] G. Cherubini, R. Cideciyan, L. Dellmann, E. Eleftheriou, W. Haerberle, J. Jelitto, V. Kartik, M. A. Lantz, S. Olcer, A. Pantazi, H. E. Rothuizen, D. Berman, W. Imano, P.-O. Jubert, G. McClelland, P. V. Koeppel, K. Tsuruta, T. Harasawa, Y. Murata, A. Musha, H. Noguchi, H. Ohtsu, O. Shimizu and R. Suzuki: 29.5 Gb/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 47 (1) pt. 1, 137-147 (2011).
- [22] S. Furrer, M. A. Lantz, J. B. C. Engelen, A. Pantazi, H. E. Rothuizen, R. D. Cideciyan, G. Chrubini, W. Haerberle, J. Jelitto, E. Eleftheriou, M. Oyanagi, Y. Kurihashi, T. Ishioroshi, T. Kaneko, H. Suzuki, T. Harasawa, O. Shimizu, H. Ohtsu and H. Noguchi: 85.9 Gb/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 51 (4) pt. 1, Art. ID 3100207 (2015).
- [23] M. A. Lantz, S. Furrer, J. B. C. Engelen, S. Pantazi, H. E. Rothuizen, R. D. Cideciyan, G. Cherubini, W. Haerberle, J. Jelitto, E. Eleftheriou, M. Oyanagi, A. Morooka, M. Mori, Y. Kurihashi, T. Kaneko, T. Tada, H. Suzuki, T. Harasawa, O. Shimizu, H. Ohtsu and H. Noguchi: 123 Gbit/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 51 (11), Art. ID 3101304 (2015).

執筆者略歴

原澤 建（はらさわ たけし）

1991年新潟大学大学院理学研究科修士課程修了、同年富士写真フイルムに入社、記録メディア研究所（当時、磁気材料研究所）に配属。主に民生用磁気テープ開発を経て、2001年よりバリウムフェライトテープ開発に加わる。主に記録密度の技術検証に従事。



野口 仁（のぐち ひとし）

1987年京都大学大学院工学研究科修士課程修了、同年富士写真フイルムに入社、記録メディア研究所（当時、磁気材料研究所）に配属。1992年にバリウムフェライト媒体の基礎研究をスタートし、主に大容量フロッピーディスクの高密度化研究、バリウムフェライトテープの商品開発に従事。2012年より記録メディア研究所所長。2014年に第46回市村産業賞「本賞」、2015年に第61回大河内記念賞を受賞。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（尾崎 公洋：産業技術総合研究所）

この論文は実用化・製品化に至る材料開発からシステム開発に繋がるニーズとシーズの関係、対外連携の重要性が明確に示されている内容になっており、シンセシオロジーの研究論文として申し分ありません。要素技術や製品化へのシナリオが明確に記載されており、20年に渡って研究・開発を続けて製品化に結び付けたことは、テーマ選定から研究展開手法等、他の分野の研究・開発者にとっても重要な示唆を得られるものと思われます。また、内容についても、分野外でもわかりやすく書かれており、優れた論文であると思われます。

コメント（小島 功：産業技術総合研究所）

主に情報分野における製品化デファクト化にかかる観点から査読

しましたが、一連の質疑応答の過程で上記実現のための活動とその結果が明確になり、より良い論文に仕上げていただいたと評価します。

議論2 対称性の課題について

質問・コメント（尾崎 公洋）

「3.2 BaFe 磁性体の課題」には、解決課題を①～④まで整理されて記載されております、そのうち③の、「孤立反転波の対称性を補正する信号処理技術」の課題は、「4.2 シナリオの実践」の「4.2.2 2nd step システムとしての可能性研究」に記載されている、「IBM社が設計した新規信号処理 DD-NPMLにより」解決された、と理解いたしました。それでよろしいでしょうか？

この対称性の課題を、材料的に解決することは困難なものでしょうか。この論文には、「垂直磁化成分を有するため」とありますが、微細粒子間の磁気相互作用による物理的に避けられない現象に起因するのでしょうか。BeFeの磁気物性に起因するのでしょうか。

回答（原澤 建）

DD-NPMLにより解決されました。

また波の対称性の課題は、本質的に垂直磁化成分に起因するものです。これは、BaFe磁性体の形状が板状で磁化容易軸を板面に対して垂直方向に有しているためです。磁性液を塗布、乾燥時に板状のBaFeは、板面がテープ表面と平行に並びやすいためテープ表面に対して垂直方向に磁化成分を持つためです。特にBaFeの磁気物性、磁気相互作用による現象ではありません。

またHDDも垂直記録に移行したように垂直方向の磁化成分をメリットと捉え、2010年の35TBの技術検証では垂直配向（垂直磁化成分アップ）を採用し記録密度向上に成功しています。

質問（小島 功）

課題③（非対称性を補正する信号処理技術の必要性）の解消にあたりDD-NPMLの開発はポイントであったと思いますが、これは共同研究の成果になるのでしょうか。技術を組み合わせることがポイントとも読めるので、確認させてください。

また、上記がIBM社の技術と考えた場合、他社における③の課題解消は十分できないという推測も可能です。一方でデファクト化に成功しているわけですから、IBM社でない製品や規格においてはどのような解決になったのでしょうか。

回答（原澤 建）

DD-NPML自身の開発はIBM社の成果であり、共同研究の成果はBaFeテープとDD-NPMLを組み合わせると高い記録密度を達成したことになります。

DD-NPMLは、テープシステムとして最先端の信号処理なので波の補正だけでなくエラーレートを低減し、記録密度向上に貢献しています。このため波形補正だけでなくDD-NPMLは必須ではなく、その他の信号処理でも可能と推定しています。

実際にはHP社、Quantum社はBaFeテープ検討スタート時に波の歪の件に対し懸念を持っていました。我々は引用論文[12][13]の結果をもって、波形等価は技術的に可能なはずなので各ドライブメーカーで検討して欲しい旨を要請してきました。この結果、実用化の過程でHP社、Quantum社は波形等価可能な信号処理を独自に採用したと理解しています。

議論3 競合技術について

コメント（小島 功）

他社も含めた技術競合の状況について記載することはできないでしょうか。世界初の開発とそれに従った形での現行シェアアップであることは推測ができますが、一方で日立マクセル社やソニー社等の技術開発も現状では進んでいますので、富士フイルムのこの開発が競合に対してどのようなインパクトがあったのか理解できると良いと思います。

回答（原澤 建）

他社の競合技術の発表論文を整理すると以下の通りになります。
またこの論文 4.2.2 項に 2006 年当時の競合技術の記述を追加しました。

日立マクセル社

2005、6 年頃までポストメタルテープとして窒化鉄を用いた塗布型テープの発表を行っていた。最近では、2012 年に窒化鉄の論文はなく記録容量 50 TB と見積もられるスパッタ法を用いた磁気テープの発表を行った。

主な論文

窒化鉄 (NanoCAP : nano Composite Advanced Particles)
・Y. Sasaki, N. Usuki, K. Matsuo and M. Kishimoto: Development of NanoCAP technology for high-density recording, *IEEE Trans. Magn.*, 41 (10), 3241-3243 (2005).

スパッタ法を用いた磁気テープ

・S. Matsunuma, T. Inoue, T. Watanabe, T. Doi, Y. Mashiko, S. Gomi, K. Hirata and S. Nakagawa: Playback performance of perpendicular magnetic recording tape media for over-50-TB cartridge by facing targets sputtering method, *J.Magnetism and Magn Matls.*, 324 (3), 260-263 (2012).

ソニー社

8 mm ビデオテープや DVC (Digital Video Cassette) 等で実用化した金属蒸着テープをポストメタルテープとして研究開発を行っていた。2009 年頃までは記録密度向上やリニアテープシステムでの実用耐久性に関する発表を行っていた。最近では 2014 年に金属蒸着テープの発表はなく記録密度 148 Gb/in² (容量 180 TB 以上に相当) のスパッタ法を用いた磁気テープの発表を行った。

主な論文

金属蒸着テープ

・K. Motohashi, T. Sato, T. Samoto, N. Ikeda, T. Sato, H. Ono and S. Onodera: Investigation of higher recording density using an improved Co-Co metal evaporated tape with a GMR reproducing head, *IEEE Trans. Magn.*, 43 (6), 2325-2327 (2007).

・P.-O. Jubert, D. Berman, W. Imano, T. Sato, N. Ikeda, D. Shiga, K. Motohashi, H. Ono and S. Onodera: Study of perpendicular AME media in Linear Tape Drive, *IEEE Trans. Magn.*, 45 (10), 3601-3603 (2009).

スパッタ法を用いた磁気テープ

・J. Tachibana, T. Endo, R. Hiratsuka, S. Inoue, D. Berman, P.-O. Jubert, T. Topuria, C. Poon and W. Imano: Exploratory experiments in recording on sputtered magnetic tape at an areal density of 148Gb/in², *IEEE Trans. Magn.*, 50 (11), Art. ID 3202806, (2014).

議論4 数値の技術的背景について

質問（小島 功）

IBM 社との協業にあたってヘッドの選択は一つのハイライトですが、論文 [11][12] を含んだ引用雑誌 (*IEEE Trans on Mag.*) が専門論文誌でもあるので、説得の背景となる数値 (対 AMR 等) 等の技術的背景を簡単に教えて (記載して) いただけないでしょうか。論文 [11] によると 7 Gb/in² が達成できたとありますが、(相対比較でなく) 絶対的な達成水準として価値があったのでしょうか。

回答（原澤 建）

論文 [11] の 7 Gb/in² (テープ)、[12] の 17.5 Gb/in² (ディスク) の絶対的な達成密度の高さが説得理由と考えています。

BaFe テープと GMR ヘッドとの組み合わせで当時の最新システム (記録密度 0.4 Gb/in²) の 10 数倍の記録密度 7 Gb/in² の検証結果をもって IBM 社に理解していただきました。

質問（小島 功）

LTO への採用にあたってどういう活動がなされたのでしょうか。HP 社、Quantum 社への技術説明等の働きかけが記載されていますが、IBM 社を含め、LTO の各プレーヤに対する働きかけを行うことで LTO での採用を狙った、という意味で良いのでしょうか。それとも富士フイルムとして何か直接的な活動を行ったのでしょうか。

回答（原澤 建）

LTO プレーヤである HP 社、Quantum 社に対し、LTO への BaFe テープ採用に向け働きかけを行ってきました。2006 ~ 2007 年当時当社が単独で行った活動は以下の通りです。

- ① 再生幅の異なる数種のリニアテープ用 GMR ヘッドをヘッドメーカーと共に開発し、そのヘッドで評価した当社 BaFe テープの高い性能を業界団体である INSIC (Information Storage Industry Consortium) で発表、各ドライブメーカーとの技術ミーティングで報告した。
- ② 2007 年に発表した 6.7 Gb/in² の技術検証テープを各社に提出し、各ドライブメーカーの評価を実施した。

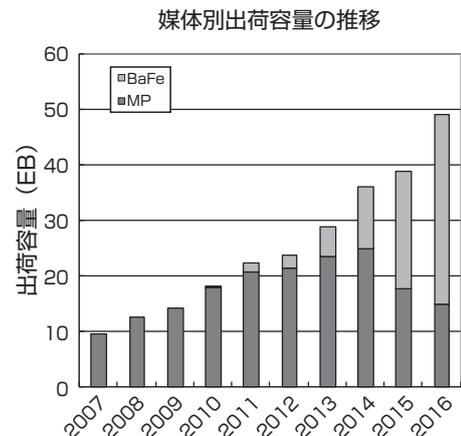
議論5 シェアから見た成功シナリオについて

質問（小島 功）

成功シナリオと考えた場合、テープの出荷量やシェアと言った数値に最終的に反映するのではないかと思います。MP テープの出荷量の減少傾向、BaFe のテープ量の増大、また並行して富士フイルムのシェアの優位性等が数値として見えているのではないかと推測しますが、そういう数値は公表可能でしょうか。

回答（原澤 建）

下記は、リニアテープの総出荷容量 (巻数×容量 / 巻、縦軸単位は EB: exabyte) のトレンドになります。MP テープから BaFe テープに切り替わりが進み 2016 年には BaFe テープは 7 割を占めるようになりました。(富士フイルム調べ)



細胞チップを用いた迅速高感度マラリア感染症診断法の開発

— 200万分の1の感染を見出しマラリアに立ち向かう —

橋本 宗明*、八代 聖基、山村 昌平、片岡 正俊

マラリアの制圧のためには、正確・高感度・迅速かつ易操作な診断方法の開発が必須である。我々はこれらを可能にし得るマイクロチップ技術を応用したデバイスを開発し、実際にマラリア流行地でその有用性を示すことができた。マラリア原虫を検出するためのマイクロチップ（細胞チップと呼ぶ）には約2万個のマイクロチャンバーが並ぶ。患者の血液から白血球を除去後、細胞チップ上で静置することで、200万個以上の赤血球がマイクロチャンバー内で単層に並び、蛍光核酸染色試薬および蛍光検出機を用いることで、マラリア原虫の高感度検出および感染率の算出が短時間で可能になった。

キーワード：マラリア、診断、フィールドワーク、マイクロチップ、高感度検出

Development of a cell microarray chip system for early and accurate malaria diagnosis

—Finding one parasite in 2 million erythrocytes for elimination of malaria—

Muneaki HASHIMOTO*, Shouki YATSUSHIRO, Shohei YAMAMURA and Masatoshi KATAOKA

Early and accurate diagnosis of malaria is needed to prevent the spread of this parasite. To this end, we developed a novel microarray chip system for the detection of malaria, and evaluated it in Africa. A chip with approximately 20,000 microchambers was developed to detect malaria parasites (hereafter called a cell chip). Leukocytes were removed by filtration columns from whole blood cells. An erythrocyte suspension containing fluorescent nuclear staining dye was dispersed onto the cell chip surface and washed, creating an erythrocyte monolayer in each microchamber that contains more than 2 million erythrocytes. Malaria parasite-infected erythrocytes are then detected using a fluorescence detector. Accurate and rapid detection of the parasites with high sensitivity was achieved by the developed system.

Keywords: Malaria, diagnosis, cell microarray chip, field work

1 研究背景

マラリアはハマダラカが媒介する感染症であり、世界三大感染症の一つである。年間約2億人が感染し、43万人が亡くなっている。マラリアを制圧する世界的な戦略として、迅速かつ正確な診断法の開発が重要な課題の一つとして挙げられている^[1]。マラリア診断は血液薄層ギムザ染色標本の顕微鏡観察（ギムザ染色法）により100年以上前から行われており、ゴールドスタンダードになっている。この方法はマラリアの検出だけでなく、感染率（重症度）も診断することができることから、優れた方法であり、以下のステップで行われる。(1) 患者血液を一滴採取、(2) スライドガラス上で血液薄層標本作製、(3) 薄層標本をギムザ液で染色する、(4) 染色された赤血球内に寄生するマラリア原虫を顕微鏡観察する。しかし、この方法は熟練した技術者がいないと正確な診断はできず、通常数千個か

ら数万個の赤血球を観察しなければならないため時間もかかり（通常30分～1時間程度）、非常に大変な作業である。したがって、これまでのゴールドスタンダードの方法では迅速診断は難しく、また感染率が低い患者の早期診断は不可能である。

現在発展途上の医療現場ではイムノクロマト法を原理としたRDT (rapid diagnosis test) が迅速(20分)かつ易操作で行うことができ、普及している。しかし、RDTの検出感度はギムザ染色標本の解析と同等であり、擬陽性や偽陰性も多く、ギムザ染色法による確定診断のための、事前のスクリーニング手法として補助的に用いられている。また、RDTは感染率を算出できない（すなわち感染の有無だけの診断）ということも欠点の一つである。最近では、フローサイトメーター法やPCR (polymerase chain reaction) 法を応用した新しい診断法が開発されているが、

産業技術総合研究所 健康工学研究部門 〒761-0301 高松市林町 2217-14
Health Research Institute, AIST 2217-14 Hayashi-cho, Takamatsu 761-0301, Japan * E-mail: muneaki-hashimoto@aist.go.jp

Original manuscript received February 3, 2017, Revisions received February 21, 2017, Accepted February 21, 2017

表1 マラリア診断法の比較

	ギムザ染色法	迅速診断法 (RDT)	PCR 法	フローサイトメーター法	細胞チップ
検出感度	0.01 %	0.01 %	0.0005 %	0.0005 %	0.00005 %
検出時間	60 分	20 分	6 時間	5 分	15 分
難易度	超高度	易しい	高度	易しい	易しい
費用*	低	中	高	超高	中～高

*人件費を含まない

早期診断には感度が不十分であり、結果を得るまでに数時間かかるなどの問題点がある^{[2]、[6]}。マラリアの早期発見による感染阻止を可能にするためには、高感度・正確・迅速かつ易操作な新たな診断法の開発が求められている。各診断法の特徴を表1に示した。

我々は個々の細胞をハイスループットかつ超高感度・簡便に解析を行うためにマイクロチップ技術に注目し、研究を行っている^{[7]–[10]}。この論文では、この技術を応用し、実際にマラリア流行地でも高感度で診断可能なデバイス開発に至る「シナリオ」をご紹介したい(図1)。

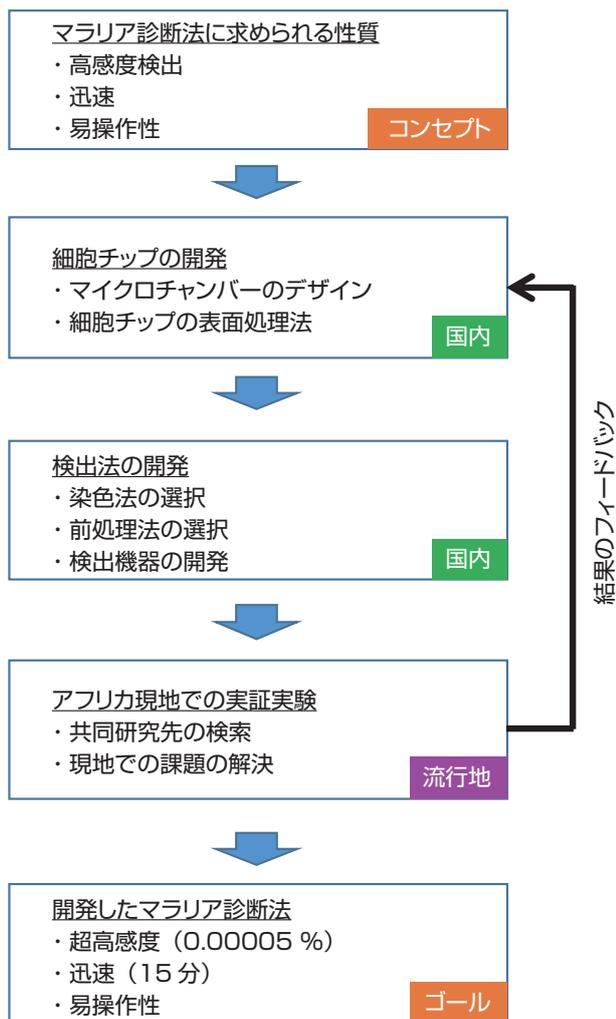


図1 この研究の進め方(シナリオ)のフローチャート

2 マラリア診断を目的とした細胞チップの開発

マラリアの診断法の開発を始めるにあたり、発展途上国の医療現場における診断およびその後の効果的な治療を進めるために、感染の有無だけでなくマラリアの重症度を示す感染率(患者赤血球の何%が原虫に感染しているか)の測定が必須であると考えた。なぜなら、早期診断が遅れる可能性、また、それを防ぐために発熱等の症状だけで薬を処方してしまうと、薬剤耐性原虫の出現のリスクを高めてしまうからである。そのことから、感染の有無のみを検出するPCR法やイムノクロマト法等の既存の方法の改良という選択はしなかった。すなわち、PCR法やイムノクロマト法は擬陽性偽陰性の問題もあり、ギムザ染色法がゴールドスタンダードと言われ、最も汎用されている現状、並びに正確性の高さを考慮すると、原虫の数を数える方法がよいと考えた。既存法の中で細胞の数を数える方法としては、フローサイトメーター法があり、これを用いれば感染率の算出は可能である。しかし、測定精度を上げるためには測定細胞数を多く解析する必要があり、数百万の赤血球に一匹の原虫といった低感染率を検出しようとする、100以上の原虫数のカウントが必要となる(参考：https://www.bc-cytometry.com/FCM/immunologyFCM_02.html)。そのため先に述べた数百万個に1個という割合を加味すると1億個以上の赤血球をカウントすることを意味することから、検出時間が長くなり、迅速な診断法にはなりえないと考えた。さらに、将来的にアフリカ等の発展途上国で用いる、あるいは販売するとなると、高額すぎて現実的ではない。そのような中で我々の研究グループはMEMSやμTAS等の分野で用いられる微細加工技術を応用し、プラスチック製の基板の上に種々の細胞をマイクロアレイ上に一個ずつ並べる技術を赤血球に応用し、できるだけ多くの赤血球を単層に並べ、そこからマラリア原虫が感染した赤血球を探し出し、感染率を算出しようと考えた。

詳細は後述するが、核を蛍光染色したマラリア原虫感染赤血球を細胞チップ上に静置すると、赤血球がマイクロチャンバー内で単層に並び、そこから原虫のみを検出することが可能である。PCR法と同程度あるいはそれ以上の検出感度を目標として、約2万個のマイクロチャンバーを有する

ポリスチレン製の細胞チップを作製し、使用することを考えた。細胞チップの最適化に関しては、感染率を求めようから、測定対象となる細胞数を一定に制御するというのが大前提であった。フローサイトメーター法のように細胞を流しながら検出機器で赤血球を数えることによって測定対象細胞数を求めるようなデザインもあるが、我々が目指したのは数えなくても迅速かつ正確に細胞数を一定に制御すること、さらに言えば、新たなデザインによって、これまでの細胞生物学的ハンドリング技術を発展させて、個々の細胞を一定数ずつ正確に配列することであった。煩雑な操作がなく、一定数の細胞を配列できる可能性のある細胞チップのデザインを考案したときは、この方法は画期的なものになると直感した。色々と共同研究者と議論を重ね、マイクロチャンバーの直径と深さをコントロールすることで、細胞を各マイクロチャンバーに単層かつ複数個並べることが可能ではないかと考えた。また、マイクロチャンバーの直径は、100 個程度の赤血球を並べるのが最適ではないかと考えたが、これはチャンバー内に 1 個の原虫が存在すれば感染率 1 %となること、また、その後の、薬剤耐性試験等の培養や反応に使いやすくすることを考慮したためである。すなわち、従来の方法で薬剤耐性試験を行うには、血液全体を対象にする必要があったが、この細胞チップでは感染が見つかったチャンバー中の細胞だけを対象とすればよい点が大きな特長であり、細胞数も 100 個程度であれば、試験を行ううえでも問題が少ないと考えたためである。上記のことや赤血球のサイズを考慮し直径は 105 μm とした。また、

PCR 法と同等以上の検出感度を目指していたことから必要なマイクロチャンバーの数を決定した。最終的にデザインした細胞チップは 20,994 のマイクロチャンバーを有しており、各チャンバーは直径 105 μm 、深さ 50 μm である (図 2)。

マイクロチャンバー内で赤血球が積み重なると感染赤血球を見落とす可能性があるため、顕微鏡やマイクロアレイスキャナーでの解析を可能にするためには単層に並べる必要があった。赤血球を細胞チップ上に 10 分間静置すると、重力で赤血球はチャンバー内に堆積する。しかし、細胞チップ表面を緩やかに生理食塩水等で洗浄すると、チャンバー底面に吸着した最下層の赤血球のみが残り、他のものは洗い流されて赤血球の単層化が可能であることを見出した (図 3)。各チャンバーに入る赤血球数は 130 ± 6 個とほぼ一定であり、赤血球を数えなくても一定に制御できるようになった。この細胞チップは約 270 万個の赤血球を一度に解析することができ、PCR 法と同等以上の検出感度が得られることとなった。

簡単な操作で赤血球を単層に並べることができるマイクロチャンバーの設計はさまざまな形状 (直径の大きさや深さ等) のものを試行錯誤することによって行った。最近、コンピューターシミュレーションによるマイクロチャンバー内の液の流れがシミュレートされ、下層から 10 μm はほとんど流れが起こらないことが示された^[7]。これにより最下層の赤血球のみが洗浄操作でも洗い流されないことが理論的に裏付けされた。今後は異なるサイズのマイクロチャンバーの設計や最適化にこのシミュレーション技術が大きく役に

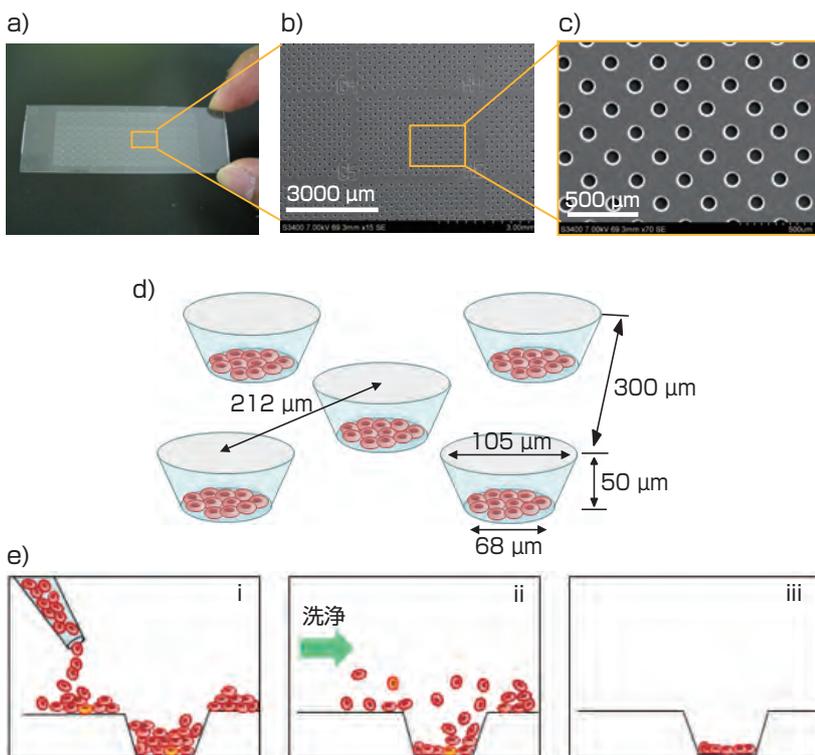


図 2 細胞チップの構造とマイクロチャンバー内での赤血球の単層化^[8]

(a) 細胞チップの大きさはスライドガラスとほぼ同じである。(b, c) 細胞チップの SEM 像。細胞チップはポリスチレン製で、20,944 のマイクロチャンバーを有する。細胞チップは 187 のマイクロチャンバーからなるクラスターが 112 (14×8) 並んで形成される。(d) マイクロチャンバーは直径 105 μm 、深さ 50 μm 、チャンバー間が 300 μm 離れて配置されている。チャンバーの底面は直径 68 μm であり、チャンバーは円錐状になっている。この形状は赤血球を単層化するのに適している。(e) マイクロチャンバー内で赤血球が単層化する過程を示す。(i) 赤血球を細胞チップ上に静置、(ii) 不要な重層した赤血球を除く、(iii) 赤血球が単層化する。

立つと考えている。さらにマイクロチャンバー内で赤血球を単層に並べるうえで重要なのは細胞チップ表面の酸素プラズマ処理による親水化処理である。この処理により赤血球のチャンバー底面への接着力が増し、単層形成を制御しやすくなる。プラスチック基板の親水化は山村の専門であり、このプロジェクトを始める前から、種々の細胞に最適化された親水化処理を行ってきた。そのお陰もあり、赤血球に対しても順調に最適化を行うことが可能であった。

3 細胞チップ上のマラリア原虫を検出する方法の開発

細胞チップの開発によって赤血球を単層に並べ、容易に測定対象細胞数を一定に制御することが可能になった。次に、細胞チップに適した原虫の検出法を検討した。原虫の検出法としては、操作をできるだけシンプルにというのが基本的なコンセプトである。このため、界面活性剤等による膜透過性の付与や数回の洗浄操作を必要とする方法、すなわち原虫を特異的に認識する抗体を使用する方法は望ましくなかった。我々は赤血球には核がなく、マラリア原虫は赤血球のみに寄生する病原体である性質を利用することを考えた。すなわち、核の有無の指標となる核酸(DNA)を蛍光試薬で染色し、蛍光シグナルを有する赤血球を感染赤血球として検出することにした。

上記の検出法のコンセプトは、できるだけ操作をシンプルにということであり、核酸の染色方法としても、原虫を生かしたまま(固定等の必要なし)、簡便迅速に染まる(洗浄の必要なし)、蛍光法で高感度に検出できることを必要条件と考えた。DNAやRNAを染色する蛍光色素で市販のものを網羅的にほぼすべて(膜透過性の有無に関わらず)比較検討した。その結果、膜透過性かつ安定した染

色が可能なものとして SYTO 系試薬が優れていることを見出し、その中でもバックグラウンドが低い SYTO21 を選択した。

実際のマラリア患者にこれを応用するためには、有核細胞である白血球を血液から除かなくてはならない。マラリア流行地では遠心機等の使用が、電気が安定して供給されないなどの理由で、難しいことが多い。そこで、遠心機を必要としないプッシュカラムを何種類か使用し、必要な血液量や白血球の除去率等を比較検討した結果、パナソニック社製の silicon oxide ナノファイバーを用いたカラムを使用することで、血液から 99.9 % 以上の白血球(血液中の基準値 白血球:3200 ~ 9000/ μ L、赤血球:360 ~ 500万/ μ L)が除去できることを確認した。また、このプッシュフィルターはマラリア流行地で多い鎌状赤血球症の患者に対しても同様に用いることが可能であった。

検出機器はパナソニック社製の蛍光検出器を付けた CCD カメラシステム (EZBLMLH01T) を使用した。細胞チップのスキヤニングを 5 分間で終了させるために、480 nm 半導体レーザー、対物レンズ、最適化された蛍光検出用フィルター、および XYZ 軸自動電子ステージを搭載した。原虫の検出のために、細胞チップを検出器にセット後、“analyze” ボタンを押すだけで、蛍光陽性の赤血球を検出することが可能である。この機器の解像度は 1.1 μ m である。原虫感染赤血球は検出された蛍光の形から特異的に検出することが可能である。非感染赤血球の蛍光シグナル強度の 1.3 倍以上、7.5 倍以下をマラリア原虫感染赤血球とした。また、蛍光スポットのアスペクト比(縦横比)が 2.8 以上またはその面積が 4.8 μ m² 以下または 45 μ m² 以上の場合をノイズとして検出するようプログラミングした。実際

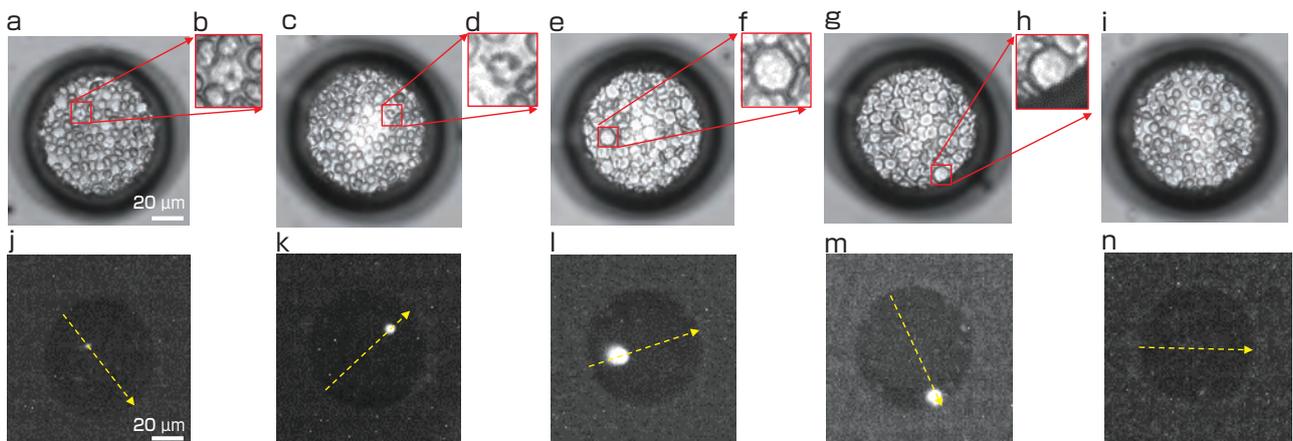


図3 マイクロチャンバー内での白血球と感染赤血球の区別

(a, c) マイクロチャンバー内の感染赤血球の明視野顕微鏡像を示す。(b, d) 感染赤血球の拡大写真、(e, g) マイクロチャンバー内の全血内の細胞の明視野顕微鏡像を示す。(f, h) 白血球の拡大写真、(i) マイクロチャンバー内の非感染赤血球の明視野顕微鏡像を示す。(j-n) 各チャンバー内の細胞を SYTO21 で染色し、CCD カメラで撮影した蛍光像を示す。マラリア原虫と白血球ではそのシグナル強度と大きさが大きく異なることがわかる。

にどのようにしてこれらの数値を決定したかであるが、多くのマラリア患者血液サンプルを細胞チップおよびギムザ染色像の顕微鏡観察で比較解析し、蛍光源（白血球、血小板、壊れた細胞の破片等）を特定し、マラリア原虫のみを特異的に検出することを可能にした。採血から原虫解析までのワークフローは図4で示した。

4 流行地での細胞チップを用いた解析

ウガンダ共和国グル地区はマラリア高度流行地域であり、ここを研究拠点とし、検証実験を行った。研究拠点はLector Hospitalであり、大阪大学堀井教授、順天堂大学美田教授らが、それぞれワクチン開発や薬剤耐性マラリアの調査のためにフィールド研究を行っており、そこに同行させていただけることになった。共同研究先を一から探すことは、共同研究の契約の締結を含め、時間も労力もかかるので、非常にありがたかった。来院した41人の患者血液サンプルのギムザ染色像の解析を顕微鏡観察で行ったところ、37人で原虫が確認され、感染率は0.0039%から2.34%であった。同じ検体に対して、細胞チップを用いて解析を行ったところ、感染率は0.0033%から2.39%であった（図5）。ギムザ染色と細胞チップを用いて算出された感染率は値がほぼ一致し、正の相関を示した ($R^2=0.9945$)。

実際は上記のデータを得るためには大変な苦勞があった。まず、電源の問題である。グル市はウガンダの首都カンパラに次ぐ大きな都市であるが、停電が頻発する。半日以上停電が続くこともあるため高品質の無停電電源装置が必須であった。また、機材の輸送も困難であった。日本からグル市までは約2日かけて移動するため保冷が必須な試

薬は使えない。さらに、機器類を飛行機に預けると、予想以上に手荒に扱われて使いものにならなくなり、現地で修理する術もない。常温でも安定な試薬の選定、機械装置のコンパクト化、または信頼のおける輸送ルートの確保が非常に重要であることを痛感した。

上記の問題を解決し、実験のセットアップを終えて、あとはデータを取るだけだと考えていた。しかし、フィールド研究の開始当初は、患者の血液サンプルがほとんど我々の元には届かなかった。共同研究先の病院には多くのマラリア患者が来院しているのに不思議であった。共同研究先の医師に問い合わせたところ、現地医師による患者の研究へのインフォームドコンセント（説明と同意）の取得、研究用血液の採血、我々までの輸送手段が機能していなかった。病院は患者でごったがえしており、致し方がない部分もある。これを構築するために何度も関係者と話し合い、研究の重要性を理解してもらう必要があった。これらの苦難を経て協力して頂いた41人の血液サンプルは大変貴重なものであった。我々は、国際的な認知度の高いWorld malaria reportへこの診断システムを掲載するため、約500症例の実証データを得ることを目標としている。日本国内の病院の感覚からすると500症例は容易に集められると思われるかもしれないが、アフリカ現地では上記のような苦勞があるのである。

5 考察・今後の展望

我々の細胞チップ技術は赤血球270万個に一つのマラリア原虫（感染率0.00005%）を検出するポテンシャルを有している。これまでの研究では、マラリア流行地という過酷

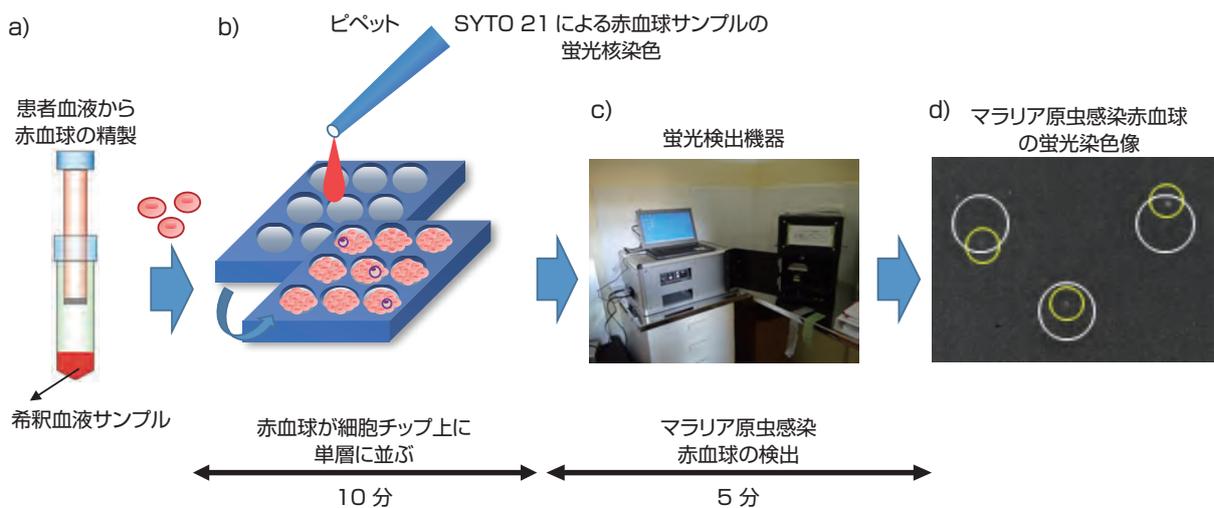


図4 細胞チップを用いたマラリア原虫感染赤血球の検出のワークフロー¹⁸⁾

(a) プッシュカムを用いて患者血液から赤血球を単離する。(b) 赤血球を蛍光核染色試薬(SYTO21)で染色し、マラリア原虫の核染色をする。その後、赤血球を細胞チップ上に静置することでチャンパー内の赤血球を単層化する。(c) 蛍光を検出することにより、マラリア原虫を検出する。(d) 自動画像解析を行い、検出された原虫数をカウントする。チャンパー内に入っている赤血球数は一定であるため、感染率を算出することが可能である。

な現場においても感染率 0.0033 % の感染者の血液で原虫の検出に成功しており、現在のゴールドスタンダードのギムザ染色法の検出限界 (0.01 %) を上回っている。すなわちギムザ染色法では検出されない感染早期段階での検出が可能である。なお、0.0033 % という数字は 0.00005 % という値に比べて 2 桁ほど高い値であるが、これは患者の多くに感染が進行した段階で病院に来ているためで、感染直後の初期段階での血液サンプルを入手できれば、より低い感染率でも検出が可能と考えられる。一方、擬陽性の問題に関しては、41 サンプル中ギムザ染色法で検出されなかった 4 サンプルについては細胞チップ法でも検出されなかった。一方、RDT や PCR 法では陽性となったものがあり、擬陽性が起こりやすいことが示された。PCR 法による擬陽性に関しては、マラリア治療後の原虫 DNA が血中に残ったことが原因となる場合が報告されている^[11]。細胞チップの結果は、実際に赤血球が寄生しているマラリア原虫を検出し、可視化できるので擬陽性が起こることがないことも大きな特長の一つである。

現在、マラリア治療はアルテミシニン併用療法 (ACT: artemisinin-based combination therapy) によって行われている。適切な診断は ACT の使い過ぎを防ぐことで、コストを削減し、薬剤耐性マラリアの出現と拡散を抑制するために重要である^[12]。すなわち、ハイスループットな高感度診断法の開発は、膨大な時間やコストが必要な新薬開発を必要とせず、既存の治療薬を最大限に有効利用し、マラリア制圧向け、大きく貢献できると考えられる。細胞チップを用いた診断法は高感度、迅速かつ易操作である。さ

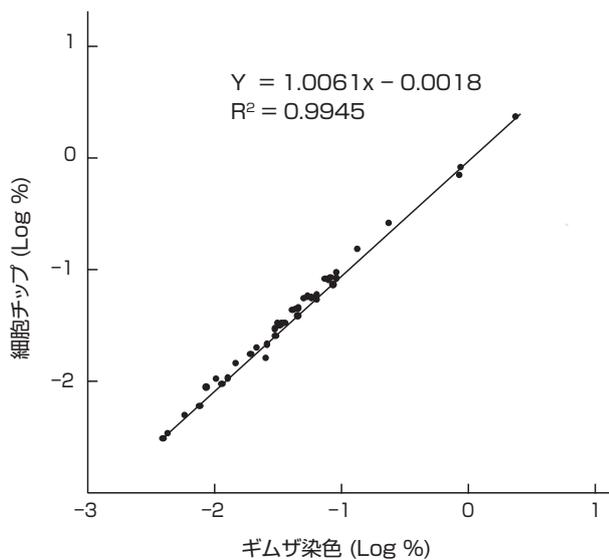


図5 マラリア流行地での細胞チップを用いた感染率の測定^[8] 細胞チップ (縦軸) およびギムザ染色 (横軸) により、ウガンダでのマラリア感染者の感染率を算出し、比較解析を行った。

らに、この診断に用いる消耗品 (細胞チップ、SYTO21、ブッシュカラム) は比較的安価 (2 USD 以下) であるといった特長があるが、検出機器が高価 (8,000 USD) で、サイズが大きく携帯性が悪いなど、村や小学校等でのフィールドワークでの使用は難しいといった問題がある。

すでに、検出器の小型化および低価格化 (WHO は一人当たりの検査費として 1 USD 以下を目指している) に関しては、プロトタイプ機の開発を進めており、今後、幅広いフィールドでの使用およびマラリア流行地域でも購入可能なデバイスを作製し、商品化を目指していきたい。さらに将来的には、マラリアをより高度に診断することで、感染初期段階での治療や薬剤耐性を誘起する恐れのない治療を可能とし、ひいてはマラリアの制圧へとつなげていきたい。高度診断のためには、マラリア原虫の超高感度検出だけでは不十分であり、5 種類存在する原虫種の同定および薬剤耐性の有無の判定が可能な「高機能診断細胞チップ」の開発が不可欠であり、現在、この開発を進めている。

謝辞

この成果は、文部科学省および国立研究開発法人日本医療研究開発機構創薬等ライフサイエンス研究支援基盤事業 (創薬等支援技術基盤プラットフォーム事業) および公益社団法人グローバルヘルス技術振興基金の支援により得られました。検出機器開発において、パナソニック株式会社オートモーティブ & インダストリアルシステムズ社技術本部センシングソリューション開発センター生体センシング開発部の方々に感謝申し上げます。また、ウガンダにおけるフィールド実証研究において、グル市 Lector Hospital、大阪大学微生物研究所難治感染症対策研究センター分子原虫学分野、および順天堂大学医学部熱帯医学・寄生虫病学講座の諸先生方に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] H. C. Slater, A. Ross, A. L. Ouédraogo, L. J. White, C. Nguon, P. G. Walker, P. Ngor, R. Aguas, S. P. Silal, A. M. Dondorp, P. La Barre, R. Burton, R. W. Sauerwein, C. Drakeley, T. A. Smith, T. Bousema and A. C. Ghani: Assessing the impact of next-generation rapid diagnostic tests on *Plasmodium falciparum* malaria elimination strategies, *Nature*, 528 (7580), S94–101 (2015).
- [2] F. Perandin, N. Manca, A. Calderaro, G. Piccolo, L. Galati, L. Ricci, M. C. Medici, M. C. Arcangeletti, G. Snounou, G. Dettori and C. Chezzi: Development of a real-time PCR assay for detection of *Plasmodium falciparum*, *Plasmodium vivax*, and *Plasmodium ovale* for routine clinical diagnosis, *J. Clin. Microbiol.*, 42 (3), 1214–1219 (2004).
- [3] M. B. Jiménez-Díaz, J. Rullas, T. Mulet, L. Fernández, C. Bravo, D. Gargallo-Viola and I. Angulo-Barturen: Improvement of detection specificity of *Plasmodium*-infected murine erythrocytes by flow cytometry using

- autofluorescence and YOYO-1, *Cytometry A*, 67 (1), 27–36 (2005).
- [4] B. E. Gama, E. Silva-Pires Fdo, M. N. Lopes, M. A. Cardoso, C. Britto, K. L. Torres, L. de Mendonça Lima, J. M. de Souza, C. T. Daniel-Ribeiro and M. Ferreira-da-Cruz: Real-time PCR versus conventional PCR for malaria parasite detection in low-grade parasitemia, *Exp. Parasitol.*, 116 (4), 427–432 (2007).
- [5] Q. Li, L. Gerena, L. Xie, J. Zhang, D. Kyle and W. Milhous: Development and validation of flow cytometric measurement for parasitemia in cultures of *P. falciparum* vitally stained with YOYO-1, *Cytometry A*, 71 (5), 297–307 (2007).
- [6] W. K. Peng, T. F. Kong, C. S. Ng, L. Chen, Y. Huang, A. A. Bhagat, N. T. Nguyen, P.R. Preiser and J. Han: Micromagnetic resonance relaxometry for rapid label-free malaria diagnosis, *Nat. Med.*, 20 (9), 1069–1073 (2014).
- [7] T. Sawada, J. Araki, T. Yamashita, M. Masubuchi, T. Chiyoda, M. Yunokawa, K. Hoshi, S. Tao, S. Yamamura, S. Yatsushiro, K. Abe, M. Kataoka, T. Shimoyama, Y. Maeda, K. Kuroi, K. Tamura, T. Sawazumi, H. Minami, Y. Suda and F. Koizumi: Prognostic impact of circulating tumor cell Detected using a novel fluidic cell microarray chip system in patients with breast cancer, *EBioMedicine*, 11, 173–182 (2016).
- [8] S. Yatsushiro, T. Yamamoto, S. Yamamura, K. Abe, E. Obana, T. Nogami, T. Hayashi, T. Sesei, H. Oka, J. Okello-Onen, E.I. Odongo-Aginya, M.A. Alai, A. Olia, D. Anywar, M. Sakurai, N.M. Palacpac, T. Mita, T. Horii, Y. Baba and M. Kataoka: Application of a cell microarray chip system for accurate, highly sensitive, and rapid diagnosis for malaria in Uganda, *Sci. Rep.*, 6, 30136 (2016).
- [9] S. Yamamura, S. Yatsushiro, Y. Yamaguchi, K. Abe, Y. Shinohara, E. Tamiya, Y. Baba and M. Kataoka: Accurate detection of carcinoma cells by use of a cell microarray chip, *PLoS One*, 7 (3), e32370 (2012).
- [10] S. Yatsushiro, S. Yamamura, Y. Yamaguchi, Y. Shinohara, E. Tamiya, T. Horii, Y. Baba and M. Kataoka: Rapid and highly sensitive detection of malaria-infected erythrocytes using a cell microarray chip, *PLoS One*, 5 (10), e13179 (2010).
- [11] World Health Organization: *World Malaria Report 2009*, (2009).
- [12] B. Aydin-Schmidt, M. Mubi, U. Morris, M. Petzold, B.E. Ngasala, Z. Premji, A. Björkman and A. Mårtensson: Usefulness of *Plasmodium falciparum*-specific rapid diagnostic tests for assessment of parasite clearance and detection of recurrent infections after artemisinin-based combination therapy, *Malar. J.*, 12, 349 (2013).

執筆者略歴

橋本 宗明 (はしもと むねあき)

2005年順天堂大学大学院医学研究科博士課程修了。博士(医学)。順天堂大学医学部准教授を経て、2016年より産総研健康工学研究部門に配属。マラリア診断デバイスのさらなる高機能化を目指す。この論文では、主にマラリア流行地域での診断デバイスの実証実験に従事。



八代 聖基 (やつしろ しょうき)

2001年岡山大学自然科学研究科博士後期過程修了。博士(薬学)。日本学術振興会特別研究員(PD)、就実大学薬学部助手を経て、2007年より産総研健康工学研究部門に配属。この論文では、主にマラリア原虫の検出法の開発に従事。



山村 昌平 (やまむら しょうへい)

2002年北陸先端科学技術大学院大学材料化学研究科博士後期過程修了。文部科学省知的クラスター創成事業：とやま医薬バイオクラスター博士研究員、北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科助教を経て、2008年より産総研健康工学研究部門に配属。この論文では、主に細胞チップのデザインおよび開発に従事。



片岡 正俊 (かたおか まさとし)

1990年徳島大学大学院歯学研究科修了。歯学博士。徳島大学歯学部にて臨床と研究に従事後、同ゲノム機能研究センター遺伝子発現分野助教授として研究に従事。2006年より産総研健康工学研究部門に配属。2007年から同研究グループ長。この論文では全体構想のとりまとめを行った。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(田尾 博明:産業技術総合研究所)

この論文は、世界三大感染症の一つであるマラリア感染症の早期検出デバイスの開発に関するものです。アフリカ現地で使用するための診断法のコンセプト、コンセプトを実現するための独創的な技術である細胞チップ開発や試薬類の選定の経緯、ゴールドスタンダードであるギムザ染色法をはじめとする他法との比較、アフリカ現地での実証試験で使用の際の問題点と解決策、将来展望等が記述されており、診断機器類の研究開発から社会実装を目指す研究者の参考になるものが多いため、シンセシオロジー論文として掲載する意義があると考えます。

コメント(湯元 昇:国立循環器病研究センター)

マラリア診断のため、マイクロチップ技術を応用して、正確・高感度・迅速かつ易操作な診断デバイスを開発した過程が記載されています。これまでの診断法では困難な課題を解決するため、明確なシナリオのもと、国際的な産学官連携により、流行地でのフィールド試験まで進んでいるものであり、シンセシオロジー誌の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

コメント(田尾 博明)

この研究の進め方(シナリオ)は、「診断法のコンセプト」→「コンセプトを実現する装置・試薬の研究開発」→「アフリカ現地での実証試験」→「新たな技術開発ニーズの発見」の4つのプロセスを繰り返しながら、診断法を高度化し社会実装につなげるといった戦略になると考えられます。これを図として第1項の最後に示しておく、研究全体が分かりやすくなると思います。また、第2項に、チャンパー内の液の流れのシミュレーションや最下層の細胞の吸着性を制御するための親水性処理等についても言及しては、いかがでしょうか。当

初の経験に基づいた設計だけでなく、シミュレーションによる理論的裏付けがあること、将来、異なるサイズのチャンバーの最適化や設計にシミュレーション技術が役立つことを記載するとよいのではないのでしょうか。また、細胞チップとしては、各チャンバーに一つの細胞しか入らないように設計されたものがあると思いますが、それらと比べたこの細胞チップの長所も記述しておくとういと思います。

コメント（湯元 昇）

シンセシオロジー誌の研究論文としては、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が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できにくい構成になっています。この研究でシナリオの実現の鍵となったのは細胞チップの開発だと思います。そこでは、基板の選択、デザイン、加工、表面処理といった技術要素を組み合わせ実現されたと思いますが、その点の記述が少ないものとなっています。またフィールド試験では、WHO 等から出された課題をどのように解決しようとしているか、どのように共同研究先を見出したかなどを記述して頂いた方がよいと思います。

回答（橋本 宗明）

- ・シナリオのフローチャートを図1として追加しました。
- ・細胞チップを作製するにあたっての各技術要素について出来る限り、追記しました。シミュレーションについては、最近報告された論文を引用しつつ、第2項の最終段落に追記し、それが将来的にも有用であることも記述しました。親水化処理についても同段落に

追記しました。この細胞チップは一つのマイクロチャンバーに100個程度赤血球が並べられることから、例えば感染率が1%の場合、一つのチャンバーに一つのシグナルが検出されます。したがって、ある程度感染率が高い場合、いくつもチャンバーを解析する必要がない点が、この細胞チップの目指したところの一つであり、メリットです。これについても追記しました。基板の選択ですが、実際は多くのプラスチック素材を試してみましたが、大きくは結果が変わらなかったため、この論文では記述していません。

- ・WHO 等からの課題ということですが、一番はコストだと思います。細胞チップはランニングコストはもう少し頑張れば何とかなりそうですが、検出機器が高額なのが問題となっております。現在、企業と開発を進めているものは検出原理は同じなのですが、それをクリアするものと考えております。これについては、WHO が1人当たりの解析料が1 USD になる必要があると主張しているため、第5項、第3パラグラフで明記しました。
- ・どのように共同研究機関を探したかですが、第4項、第1パラグラフに追記しました。

議論3 既存の方法との比較

コメント（田尾 博明）

ギムザ染色法、イムノクロマト法、PCR 法、フローサイトメーター法、この細胞チップ法の原理、長所、短所を一覧表にしておく、現在のマラリア診断法の全体像と本法の特徴が理解しやすくなると思います。

回答（橋本 宗明）

表1として新たに作成しました。

編集方針

シンセシオロジー編集委員会

本ジャーナルの目的

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

研究論文の記載内容について

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

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

対象とする研究開発について

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

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

査読について

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

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

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

参考文献について

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

掲載記事の種類について

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

執筆要件と査読基準

(2008.01)

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

投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定	2007年12月26日
改正	2008年6月18日
改正	2008年10月24日
改正	2009年3月23日
改正	2010年8月5日
改正	2012年2月16日
改正	2013年4月17日
改正	2014年5月9日
改正	2014年11月17日
改正	2015年4月1日
改正	2015年10月1日

1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、論説、座談会記事、読者フォーラム

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

①研究論文

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

②論説

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

③座談会記事

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

④読者フォーラム

シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また本誌の主旨に合致した読者への有益な情報提供など

を掲載した記事とする。1,200文字以内で自由書式とする。編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

2 投稿資格

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

3 原稿の書き方

3.1 一般事項

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

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

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

3.2 原稿の構成

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

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

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

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

3.2.5 タイトルは和文で10～20文字（英文では5～10ワード）前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究

論文には和文で15～25文字（英文では7～15ワード）前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

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

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

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

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

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

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

3.3 書式

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

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

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

入する。

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

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

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

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

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

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

4 原稿の提出

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

〒305-8560

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 June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

Revised May 9, 2014

Revised November 17, 2014

Revised April 1, 2015

Revised October 1, 2015

1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

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

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

① Research papers

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

② Commentaries

Commentaries describe the thoughts, statements, or trends and analyses on how to utilize or spread the results of R&D to society. Although the originality of the statements is not required, the commentaries should not be the same or similar to any articles published in the past. The submitted manuscripts will be reviewed by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members’ comments.

③ Roundtable talks

Roundtable talks are articles of the discussions or

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

④ Readers’ forums

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

2 Qualification of contributors

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

3 Manuscripts

3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

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

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

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

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

3.2 Structure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 Format

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

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

3.3.3 Figures, tables, and photographs should be enumerated. They should each have a title and an

explanation (about 20–40 Japanese characters or 10–20 English words), and their positions in the text should be clearly indicated.

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

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

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

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

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

Website—[No.] Author(s) name (updating year): Title of a web page, Name of a website (The name of a website is possible to be omitted when it is the same as an author name), URL, Access date.

4 Submission

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

Synthesiology Editorial Board
c/o Public Relations Information Office, Planning
Headquarters, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology(AIST)
Tsukuba Central 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 are allowed in the proofreading stage.

6 Responsibility

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

7 Copyright

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

Inquiries:

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

編集後記

本号では、「シャーベット状海水氷製氷機の開発」、「ジメチルエーテル燃料品質の国際標準化」、「バリウムフェライト磁気テープの開発」、「迅速高感度マラリア診断法の開発」に関する論文4編をお届けします。魚の鮮度保持をめざし良質な魚を市場に届ける、石油代替を促進して温暖化対策に貢献する、データ記録装置の記録密度を上げ情報インフラの強化を図る、深刻な被害を出している感染症の早期診断を可能にして途上国の人々の命と健康を守る、と、それぞれ目的は異なりますが、新技術により社会にイノベーションをもたらすという点では一致した重要な研究です。いずれの論文も、技術シーズを確立するためにどのように基礎研究を進めるのか、実用化に向けてその技術シーズをどのような周辺技術と融合するのか、実証試験をどのように行い、その結果を研究開発にどのようにフィードバックするのか、研究シナリオを明確にして研究開発に取り組み、それぞれの新技術の社会実装を達成した、あるいはしつつあるプロセスが紹

介されています。

社会的課題を解決するのに果たす科学技術の役割は大きいですが、その研究開発は容易ではありません。往々にして想定外の事態に遭遇し、それを打開するための試行錯誤に多くの時間と労力を投入しなければならないことが少なくありません。研究者にとっては、その試行錯誤をいかに少なくするのが腕の見せ所になりますが、その際に研究のシナリオというのを意識して明確にしておく、役に立つことがあります。

今回紹介する論文では、いずれも他機関との連携により研究を実施しており、基礎研究の進め方以外に、どの機関とどう連携するのかというも研究シナリオに生かされています。様々な研究開発に関わる方々にとって有用な情報が掲載されていると思いますので、是非、ご一読いただければ幸いです。

(編集副委員長 四元 弘毅)

シンセシオロジー編集委員会

委員長：金山 敏彦

副委員長：湯元 昇 (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、栗本 史雄、清水 敏美、富樫 茂子、山田 由佳

幹事 (普及)：赤松 幹之、小林 直人 (早稲田大学)

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、後藤 雅式、竹下 満 (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)、多屋 秀人 (株式会社 J-Space)、内藤 茂樹、藤井 賢一、松井 俊浩 (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)、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: T. KANAYAMA

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

Executive Editors: K. IKEGAMI, C. KURIMOTO, T. SHIMIZU, S. TOGASHI, Y. YAMADA, 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, M. GOTOH, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. TAYA (J-Space Inc.), S. NAITOU, K. FUJII, T. MATSUI (New Energy and Industrial Technology Development Organization), 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10巻第1号 2017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 a compact, onboard slurry icemaker to rapidly produce optimal ice for maintaining freshness of marine products

H.NAGAISHI, T.INADA, T.YOSHIOKA and A.SATO

Standardization of dimethyl ether (DME) fuel specifications

M.OGUMA

A study on high-density recording with particulate tape media for data storage systems

— *On the process of introducing barium-ferrite tape media to the market* —

T.HARASAWA and H.NOBUCHI

Development of a cell microarray chip system for early and accurate malaria diagnosis

— *Finding one parasite in 2 million erythrocytes for elimination of malaria* —

M.HASHIMOTO, S.YATSUSHIRO, S.YAMAMURA and M.KATAOKA

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*