

# CROSS T&T

Comprehensive Research Organization for Science and Society

No.78

2024.10

Top Title **さまざまな研究史**

加地 浩成

小針 真紀子

藤田 大介

**つくばからの発信**

宇都 甲一郎

屋良 佳緒利

伊藤 裕司 岩上 将夫 田宮 菜奈子

浦川 優子

竹村 謙信

**今日・あす**

松浦 直人

**東海からの発信**

神谷 潤一郎

**筑波研究学園専門学校**

大森 淳子

【表紙写真】筑波山塊の花崗岩が使われているつくばセンター広場

一般財団法人 **総合科学研究機構**

# CROSS T&T 78 目次

## Top Title (特集) さまざまな研究史

スポーツカー型タイムマシンで行こう “デロリアン”で自動車の歴史を覗く	加地 浩成 総合科学研究機構 総合科学センター	1
国立環境研究所の創立 50 周年事業	小針 真紀子 国立環境研究所 企画部 広報室	4
研究者への国際標準化のすすめ ～ VAMAS 国際協働研究から ISO 国際標準開発へ～	藤田 大介 表面化学分析技術国際標準化委員会	8

## Tsukuba (つくばからの発信)

湿度でキープするあなたの髪！ 新しいヘアスタイリング剤の開発	宇都 甲一郎 物質・材料研究機構	13
クリの侵入害虫との攻防戦記 今おいしい栗菓子がいただけるのは寄生蜂のお陰！？	屋良 佳緒利 農研機構 植物防疫研究部門	18
新規要介護認定者の病気のパターンと予後 人工知能を用いた医療・介護データの解析	伊藤裕司 岩上将夫 田宮菜奈子 筑波大学 医学医療系	24
宇宙創成「インフレーション」の謎に迫る 簡単かつ直観的な方法で原始重力波の計算が可能に	浦川 優子 高エネルギー加速器研究機構	28
ダイヤモンド電極で微量水銀を見逃さない 前処理不要で現場検査が可能な高感度センサを目指して	竹村 謙信 産業技術総合研究所	32

## Today & Tomorrow (今日・あす)

「CROSS Reports」創刊 J-PARC MLF での利用促進活動を発信	松浦 直人 総合科学研究機構 中性子科学センター	36
---	-----------------------------	----

## Tokai (東海からの発信)

省エネ・省スペース！「ゲタポン」の社会実装へ 神谷超高真空技術開発ラボ始動	神谷 潤一郎 日本原子力研究開発機構 / J-PARC センター	38
溶媒抽出法の最前線	CROSS T&T 編集部	42

## Tutorial (筑波研究学園専門学校発)

変えてはいけないもの —フレールに今学ぶ—	大森 淳子 筑波研究学園専門学校 こども未来学科	44
--------------------------	-----------------------------	----

## <CROSS ロード>

世界を代表する 55 のヘリテージストーンの 1 つに「筑波山塊の花崗岩」	7
アートとサイエンスの融合 レトロ加速器を特別展示	12
Cross Release (最近のプレスリリースから)	
世紀末までにコメの収量、品質とも劣化 人工気象室を用いて明らかに	22
おっばいの数「2 分の 1 ルール」覆す 春に少なく夏に多いニホンモモンガの子の数	22
照明空間の明るさ評価に救世主 照度計校正向け標準電球の枯渇を LED で解決	23
CROSS2024 総合科学市民公開講座 開催案内	47
俳句	山口 恭弘 3
短歌	松崎 健一郎 31

# スポーツカー型タイムマシンで行こう “デロリアン”で自動車の歴史を覗く

総合科学研究機構 総合科学センター 加地 浩成

小説やマンガ、映画などの中では過去にも未来にも自由に行けるタイムマシンが登場します。ここでは1980年代のヒット映画「バック・トゥ・ザ・フューチャー」に登場した、ゴミや古着から作った燃料で、時空を超えて走るスポーツカー型タイムマシン（デロリアン）に登場してもらい、高校生のマーティと友人の科学者ドクにタイムスリップして自動車の歴史を覗いて貰いましょう。図1にデロリアンを示します。

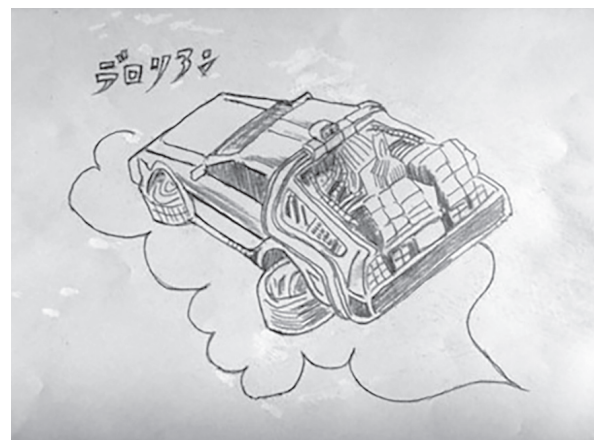


図1 デロリアン（筆者提供）

マーティ：1900年に来たよ。

ドク：自動車が生れた19世紀は車を動かす動力として、水蒸気や電気、ガソリンなどが入り乱れて研究・開発されたんだ。電気自動車（EV）は1873年に実用化された。1880年にはベンツとダイムラーがガソリンエンジンを発明し、1892年にはディーゼルがディーゼルエンジンを発明した。1900年にはポルシェがインホイールモーター付のEVを製造した。1909年にはエジソンがEVを発表したんだ。

マーティ：ガソリン車が主流になったのはどうしてなの？

ドク：この時代の電池（鉛電池）は重く、充電に時間がかかり、航続距離も短かったんだよ。また、ガソリン車の急速な性能向上と価格低下が起き、1920年にはEVは消えたんだ。1908年にT型フォードが大量生産ガソリン車として発売された

のもこの頃だよ。日本でも戦後の1950年頃にはEVが普及していたが、ガソリン不足が解消してガソリン車が普及したことで電池材料の高騰などからEVが製造されなくなった。

マーティ：1970年にきたよ。EVはその後、どうなったの？

ドク：1970年代にEVは再び浮上した。これは光化学スモッグなどの大気汚染の深刻化や石油ショックが引き金になって日本を中心にEV技術の研究開発が盛んになったんだ。しかし、この時も電池性能が不十分なことや三元触媒（注1）などのガソリン車の排ガス浄化技術が進んだことで普及には至らなかったんだ。

マーティ：1990年に飛んできたよ。

ドク：1990年代に大気汚染に悩む米国カリフォルニア州が各自動車会社に一定数以上のEVの販売を義務付けるZEV法（注2）を制定したので多くの自動車会社はEV開発に着手したんだ。

マーティ：1997年に飛んできたよ。

ドク：1997年にトヨタ自動車は世界初の量産ハイブリッド車を市場投入した。1999年にはホンダもハイブリッド車を発表したよ。ハイブリッド車はガソリンと電気の両方で走る車なんだ。ハイブリッド車は充電設備が少ない不便さを補う現在の主流になっているエコカーだ。EVはこの時も挫折した。

マーティ：2005年にきたよ。

ドク：2005年には再びEVが見直された。これは2005年に京都議定書が発効されて地球環境問題が大きく取り上げられるようになったことによる。また、原油価格が高騰してエネルギーに対する消費者の意識が変化したからなんだ。

マーティ：2014年にきたら、燃料電池自動車が話題になっているがなぜなの？

ドク：燃料電池は石油資源を使わず、水だけを排出して脱炭素化になり究極のエネルギーと言われて世界中で燃料電池自動車の開発が進められた。2014年にはトヨタ自動車が世界で初めての水素を燃料として発電する燃料電池を動力とした量産型の燃料電池自動車を発売したんだよ。しかし、燃料電池自動車の普及には大規模な水素ステーションが必要で、その整備が進まなかったために普及には至らなかった。燃料電池を自動車以外に動力源として使用した電車、船舶、航空機の開発が進められている。

マーティ：今の自動車はどうなっていて、これから自動車はどうなるの？

ドク：2024年現在、自動車は100年に一度の

大変革期を迎えていると言われている。

地球温暖化の要因となるCO<sub>2</sub>を出さないノンカーボン社会が進められている現在、ガソリンなどを燃料として普及してきたエンジン車の規制を強める動きが世界中で広がっているんだ。CO<sub>2</sub>を出さないとされているEVはガソリン車と比べて部品点数が少なく、基幹技術は電池とモーターであり、長い歴史を持つガソリンエンジンの基幹技術のエンジンとトランスミッション（変速機）（注3）を必要としないこともあって、EVが普及することによって完成車メーカーを頂点とするピラミッド構造を持つ自動車産業の業態が大変革している。一方、EVには次の課題がある。

- 1) 充電インフラの拡充とともに種々の充電システムが試行されている。
- 2) 航続距離の拡充や充電時間の短縮の実用化に向けて全固体電池の開発が進められている。

今後、自動車はますます電動化に対応するようになり、インターネットに繋がるコネクテッドカーとなる。それにより、自動運転技術の進展が可能になる。さらにライドシェアのような使用方法の変化も起きている。このように自動車は種々のサービスをするモビリティ（移動手段）として変革している。

今回は約100年前にタイムスリップして自動車の歴史を覗いてきたが、今度は未来に行って自動車がどうなっているかを見たいね。

マーティ：空飛ぶ自動車も出てきたと聞いたよ。どんな車社会になっているかわくわくするよ。

注1：三元触媒とは、自動車排ガス中の炭化水素（HC）と一酸化炭素（CO）及び窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の3物質を酸化・還元反応によって同時に除去するための触媒である。ガソリン車の排ガスを処理するために開発されたもので、現在はほとんどのガソリン車に装着されている。

注2：ZEVとは、1990年代に大気汚染対策として米国カリフォルニア州が導入を始めた規制で自動車メーカーが州内で自動車を販売する場

合、自動車に一定比率以上のZEV（排出ガスを出さない無公害車）を販売することを義務付ける規制。ZEVにはEV、燃料電池自動車（FCV）、プラグインハイブリッド車などが含まれる。ZEVの特徴はエンジンから温室効果ガスが全くないことである。これにより、大気汚染や地球温暖化防止に寄与する。

類のギア（歯車）を使い分ける変速機である。発進時や坂道では大きなギアを使って強い回転力（トルク）を出し、高速走行時は小さなギアを使って車輪の回転数を増やしてスピードを出す。

【参考にした出版物】鶴原吉郎『EVと自動運転：クルマをどう変えるか』岩波新書、2018年5月

注3：トランスミッションはエンジンの動力を車輪に効率的に伝えるために大きさの違う数種



加地 浩成（かち・ひろなり）

- 1968 東京都立大学理学部化学科修士課程修了
- 1968 東京都都市公害部環境課
- 1971 （財）日本自動車研究所
- 1990 学術博士（埼玉大学）
- 1990～1993 ISO 審査員（環境及び品質）
- 2005～2014 横浜国立大学、埼玉工業大学、東京工芸大学非常勤講師
- 2014～2016 つくば市シルバー人材センター理事
- 2014～2015 つくば市理科支援員

俳句

山口 恭弘

今年は五月から猛暑の日が続き、加えて日本各所で突然の局所的な大雨洪水が起こるなど、大変厳しい夏でした。そのような現実の中でも少しでも朗らかな心持でいたいと、爽やかな俳句を選んでみました。また良い日々が来ることを祈り。

風炉開き戸惑ひがちな柄杓の手  
 足長の娘に越され風薫る  
 黄帽子の列のはみ出し実梅路  
 高山に浴衣娘のボンジュール  
 昼寝人ローマに向かふらくだの背  
 里帰り苦瓜刻む母の笑み  
 夏山路じざの香残す尾根の小屋  
 坐禅堂警策に止む蟬の声  
 箱を開け顔まで桃となりにけり  
 宵涼み好みの猪口で故郷の酒  
 朝顔の見守る下で後ろ反り  
 秋の声円空仏の眠る寺

（やまぐち やすひろ）  
 1955年静岡県伊豆生まれ、ひたちなか市在住。日本原子力研究所、総合科学研究機構を経て、現在は林住期（世俗を離れ、自分らしく自由に生きられる歳頃）。弓道、茶道、書道、仏道、鉄道、俳句・川柳、郷土史などを学び楽しんでいる。

## 国立環境研究所の創立 50 周年事業

国立環境研究所 企画部 広報室 小針 真紀子

国立環境研究所は、2024年3月15日、満50歳の誕生日を迎えました。1974年に国立公害研究所として発足、1990年に広範化した環境問題を扱う国立環境研究所として組織改編し、2001年の独立行政法人化を経て、2015年からは国立研究開発法人として歩んできました。現在では「国環研」という略称を使用し、国民の皆さまに親しんでいただきながら、人と自然が仲よく共生できる世界をめざして研究活動を進めています。

以下に国環研の50周年記念事業についてご紹介させていただきます。

### 第39回全国環境研究所交流シンポジウム

国環研は、各地域の環境を熟知している全国の地方環境研究機関と様々な協力を進めてきており、この交流シンポジウムはその一つの機会として毎年1回開催されているものです。

2024年2月15日(木)～16日(金)の2日間、対面とオンラインのハイブリッド形式で開催しました。今回は「国立環境研究所50周年記念特別企画」として、「地方環境研究機関の“これから”を共考しよう」というテーマを掲げ、全国から50を超える地方環境研究機関やその他の出席を得て盛大に開催しました。

まずはじめに、環境省大臣官房総合政策課環境研究技術室・奥村暢夫室長から来賓ご挨拶をいただいたのち、特別企画の皮切りとして、埼玉県環境科学国際センターの大原利真研究所長から「地方環境研究機関の今」と題した基調講演をいただきました。

その後、「地方環境研究機関の現状と課題を語り

合う」と題したパネルディスカッションを開催し、①地環研(地方環境研究所)からの現状報告を基に、②地環研の役割は何か(特に「環境保全」から「持続可能な地域づくり」)、③機関連携と人材育成をどのように進めるかについて討論を行い、特別企画を終えました。

その後、「プラスチック(座長:鈴木剛(国環研))」、「大気汚染(座長:菅田誠治(国環研))」、「気候変動適応(座長:西廣淳(国環研))」、「水環境、水生物(座長:青野光子(国環研))」のそれぞれのテーマについて、地環研の皆さま、また国環研からも研究発表を行い、活発な質疑応答を経て盛会のうちに終了となりました。



写真1 第39回全国環境研究所交流シンポジウムで挨拶する国環研の木本理事長

(開催報告は下記のURLからご覧になれます。  
<https://www.nies.go.jp/renkei/koryusympo/39.html>)

## 公開シンポジウム創立50周年特別講演 および創立50周年記念式典

国環研は、研究活動や研究成果を幅広く知っていただくために、公開シンポジウムを毎年開催しています。毎回、その回のテーマに即した講演や、研究者がパネルを用いて来場者と対話するポスターセッションを行い、幅広い層の方々にご参加いただいておりますが、今回は、創立50周年特別講演として2024年6月12日、「国立環境研究所の軌跡と展望～公害、環境、そして…～」と題してZoomウェビナーにて開催し、688名の視聴者を集めました。

本シンポジウムは下記の3つの講演で構成され、過去50年にわたる国環研の活動、そして未来に向けた環境問題への取り組みなど、国環研の役割と貢献について振り返りました。

講演タイトル	講演者
人と自然の調和を目指して～環境科学を切り拓いた50年～	西岡秀三 地球環境戦略研究機関 参与
ヒトと生き物の安全・安心のために	山本裕史 環境リスク・健康領域 領域長
地球環境研究のこれまでとこれから ～新たな研究のあり方～	谷本浩志 地球システム領域 副領域長

(講演資料は下記のURLからご覧になれます。)

<https://www.nies.go.jp/event/sympo/2024/index.html#tab1>

シンポジウム終了後は、伊藤環境大臣をはじめとする来賓の皆さまにもご臨席いただき、国立環境研究所創立50周年記念式典が開催されました。

## 創立50周年記念誌『国立研究開発法人国立環境研究所50年のあゆみ』

国環研は創立50周年の節目に際して、記念誌を作成しました。

「一目で見る国立環境研究所の50年」と題した50年間の年表や組織の変遷の図など、見ていただく方にとってわかりやすいよう工夫を凝らしてお

り、中でも「第一部 社会とともに振り返る50年の足跡」は1年ごとに見開き2ページを使い、「流行語大賞」や「レコード大賞」など、当時を思い出す縁になる情報と、国環研や環境研究に関する写真や図をふんだんに取り入れ、何年に国環研がどのような活動をしていたかがすぐわかるようになっていきます。さらにページ右上にはその年の「大気中CO<sub>2</sub>年平均濃度」が数字とともに色を変えて表示され、パラパラ漫画のようにめくっていくとCO<sub>2</sub>濃度の上昇の様子が手に取るようにわかる仕掛けになっています。



写真2 『国立研究開発法人 国立環境研究所 50年のあゆみ』表紙



写真3 『50年のあゆみ』本文

また、第二部の「研究の変遷・拡大とそれを支えた人と施設」は6つの章に分かれており、第1章の「国立環境研究所の研究成果の概観」では、いくつかの環境研究のハイライトについてマンガ解説を加えたり、研究者の視点からのコラムを挿入するなど、堅苦しくなりがちな研究成果紹介を楽しく、親しみやすく読んでいただけるような工夫を行っています。

そのほかにも、国環研と研究パートナーとの連携や社会とのつながり、研究現場を支えるバックオフィスの歴史をご紹介します。ページなど、盛りだくさんの内容で完成しました。多くの皆さまにご覧いただけたらうれしく思います。

(創立50周年記念誌は下記のURLからご覧になれます。

<https://www.nies.go.jp/50th/archive/pamphlet/pdf/anniversary-50year.pdf> )

## 国立環境研究所一般公開2024

国環研は、一般の方々に環境問題に関心を持っていただくとともに、環境研究や科学技術にご理解をいただくため、1976年から研究所の一般公開を実施してきました。近年は「夏の大公開」として、7月、夏休みを迎えたばかりの子どもたちを主な対象に開催してきましたが、2024年は昨今の気候変動の影響を鑑みて開催時期を変える決断をしました。少し涼しくなるであろう10月19日(土)に開催する予定です。



写真5 夏の大公開 2023の様子



写真6 夏の大公開 2023の様子

創立50周年記念事業のひとつとして開催する今回は、「環境をまもりはぐくむ。国環研の50年と、これからの君へ」と題し、各研究ユニットのイベントを楽しみつつ、国環研を一周していただくための「国環研の50年スタンプラリー」を実施します。この原稿を書いている時点(2024年8月)ではまだ全貌が決まってはいないのですが、上記

のスタンプラリーのほかにも、環境研究の一部を体験していただいたり、研究者と直接お話いただけるような、約40件のさまざまなイベントを工夫を凝らして準備中です。来場者の皆さまとお会いできることを、一同とても楽しみにしています。

(国環研一般公開の詳細は下記のURLからご覧になれます。

<https://www.nies.go.jp/event/ippankokai.html>

<https://www.nies.go.jp/event/kokai/index.html>)



写真7 国環研一般公開 2024 チラシ

## 創立50周年特設サイト

国環研創立50周年特設サイトは、年代別の沿革や貴重な資料を集めた業績アーカイブ(年次報告書、広報誌、記念誌・イベント冊子等)の他に、「バーチャルでたどる国環研の軌跡」と題し、国環研の50年の実績の一部を全10フロアのバーチャル展示会の形式で展示しています。美術館の静かなフロアで、作品を自由に観覧している気分で国環研の50年をたどることができます。ぜひ体験してみてください。

(創立50周年特設サイトは下記のURLからご覧になれます。

<https://www.nies.go.jp/50th/> )

以上、国環研の創立50周年記念事業についてご紹介しました。

国環研は、これからも人と自然が仲よく共生できる世界をめざして研究を進めるとともに、皆さまとの接点を大切にしていまいります。今後も皆さま

までのご理解とご協力を賜りますようお願い申し上げます。



小針 真紀子 (こはり・まきこ)

茨城県日立市出身。総合電機メーカー、グループ企業での都内勤務を経て、2022年2月、つくば市の国立環境研究所企画部広報室に着任、茨城県に舞い戻る。まだまだ習得できていないことも多いが、とにかく明るくポジティブにやろうと努力中。

趣味は方向音痴ながらカーナビを駆使しての旅行、音楽鑑賞。

CROSS

ロード

## 世界を代表する 55 のヘリテージストーンの一つに

### 「筑波山塊の花崗岩」国際地質科学連合の認定



筑波山塊の花崗岩が使われる  
つくばセンター広場 (表紙の写真)

国際地質科学連合 (IUGS) が実施するプログラム『IUGS Heritage Stone』に、筑波山地域ジオパークの地質遺産「筑波山塊<sup>かこうがん</sup>の花崗岩」が認定された。世界を代表する 55 のヘリテージストーン (天然石材遺産) の一つに選ばれたものだが、日本のみならず東アジア地域初の認定となった。

今年 7 月 6 日付けで認定された。筑波山塊の花崗岩は、主に稲田花崗岩 (稲田石・羽黒青隴目石など) と加波山花崗岩 (真壁石・多喜石など)

として産出される石材で、これまでに東京の迎賓館赤坂離宮 (国宝) や日本銀行本店本館 (国指定重要文化財) など日本を代表する数々の近代建築をはじめ、つくばセンター広場 (つくば市) などにもふんだんに用いられている。

同プログラムは「国際的価値が高く、人類との関わりが古い天然石を認定する。それらの産地、地質学的特徴や石材としての特性、そして人類の文化的活用の歴史を英語文書として後世に残すこと」が目的。選ばれた 55 のヘリテージストーンにはアルペドレテ花崗岩 (スペイン)、アルワル珪岩 (インド) などあげられ、国際地質科学連合ホームページ (<https://iugs-geoheritage.org/designations-stones/>) に紹介されている。

# 研究者への国際標準化のすすめ

## ～ VAMAS 国際協働研究から ISO 国際標準開発へ～

表面化学分析技術国際標準化委員会 藤田 大介

### 1. はじめに：標準化とは？

日本における近代的な工業分野の標準化の歴史を振り返ると明治39年（1906）の政府調達における“ポルトランドセメント”の試験方法の統一が嚆矢かと思われる。我が国の標準化は国家主導であり、当初から産業競争力強化の国策に沿ったものであった。大正10年（1921）には工業品規格統一調査会が設置された。昭和14年（1939）から昭和20年（1945）8月までの戦時規格としての臨時日本標準規格を挟み、工業分野における日本標準規格（JES）は昭和21年（1946）まで継続された。終戦後、工業品規格統一調査会は廃止された。同時に日本工業標準調査会（JISC）が発足する運びとなった。今日、産業分野の国際標準化と国内標準化（日本産業規格：JIS）の推進は、令和元年の産業標準化法改正により改称した日本産業標準調査会（JISC）が担っている。

さて、標準化（standardization）とは、“自由に放置すれば、多様化、複雑化、無秩序化する事柄を少数化、単純化、秩序化すること”、とJISCは定義している。産業標準化により、製品の互換性、相互運用性、安全性、再現性、品質を最大限に高めることが期待できる。さらに世界貿易機関（WTO）において平成7年（1995）に発効したTBT協定（貿易の技術的障害に関する協定）により、すべてのWTO加盟国に対し国内規格と国際規格との整合化が義務付けられることになった。これを契機として欧米並びに中韓等の先進工業国における国際標準化戦略の重要性が高まった。当時、“国際標準が日本を包囲する”危険性が有識者

から強く指摘されはじめたことから我が国においても国際標準化推進の国家レベルでの重要性が顕在化するに至った。

このような標準化を巡る世界的潮流のなか、昭和61年（1986）から令和6年（2024）に至るまでおよそ40年にわたり自らの専門分野に関連するプレ標準化の国際協働研究と国際標準開発に従事した。現在、国際標準化機構（ISO）の専門委員会の一つであるTC 201（Surface Chemical Analysis）とTC 202（Microbeam Analysis）に対応するJISC国内審議団体（JSCA）の代表理事を務めている。

筆者の専門分野は、表面科学、真空科学、ナノ計測、ナノサイエンスを基盤とするナノ材料科学である。本稿では、標準化の潮流を俯瞰しつつ、一研究者が携わった経験を披露する。産学官の研究者と技術者に国際標準化活動への参加を促す一助となることを本旨とする。

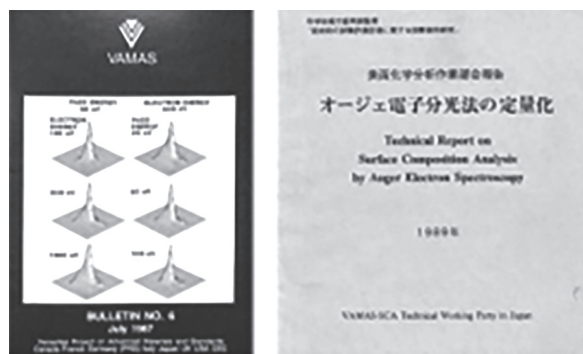


図1 1987年に発行されたVAMAS Bulletin No.6の表紙（左）とVAMAS-SCA Japanによる科技厅振興調整費「表面化学分析作業部会報告」の表紙（右）。

## 2. 表面化学分析のプレ標準化とVAMAS

標準化は手法が成熟し、世界的な市場形成と汎用性が高まるとともに本格化する。例えば、筆者の専門とする「表面と真空」が重要な計測場を提供する表面化学分析法は1950年代から開発が開始され、1970年代から市販の機器が登場し、世界市場の形成が萌芽した。1980年代からは標準化を指向した定量化や信頼性の研究が本格化した。

さて、我が国において産学官が連携した表面化学分析法の国際標準化<sup>しゅんどう</sup>へ向けた蠢動は1980年代に具現化した。表面化学分析（SCA）のプレ標準化を目指すVAMAS-SCA Technical Working Party in Japanは昭和60年（1985）に大阪大学の志水隆一先生の主導により、日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会から誕生した。ここで、VAMAS（Versailles Project on Advanced Materials and Standards：新材料及び標準に関するベルサイユ・プロジェクト）とは昭和57年（1982）6月に開催された先進7か国（G7）ベルサイユサミットで合意された国際協力プロジェクトの一つである。VAMASはラウンドロビン試験（Round Robin Test: RRT）を通じた試験所間比較（Interlaboratory Comparison: ILC）のための国際的なプレ標準化協働研究のスキームである。

VAMAS-SCA-Japanは、VAMASに設置された表面化学分析に関する技術作業分野（VAMAS-SCA TWP：後にTWA 2へ移行）の国内対応委員会である。昭和60年にVAMAS-SCA TWPは米国NBS（現NIST）のPowell博士をChair、英国NPLのSeah博士をCo-chairに指名し国際研究協力体制を整備した。1986年にVAMAS-SCA TWPの各国代表を集めた公式会議が催され共同研究テーマが採択された。当時の活動状況は1987年発行のVAMAS Bulletin（図1左）においてPowell博士が詳しく報告されている。

VAMAS-SCA-Japanは、当時の学界、国研、産業界における表面化学分析の有識者を集めた研究組織体を形成した。昭和60年12月に第1回会合が開催され、昭和61年度からは科学技術振興調整費「新材料の試験評価技術に関する国際協同研究」の支援が開始され、オージェ電子分光（AES）

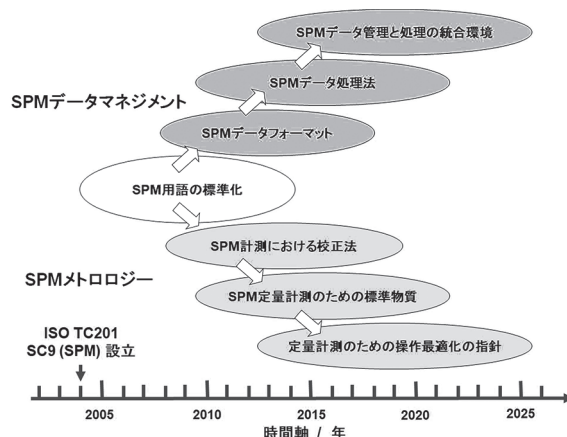


図2 ISO\_TC 201（表面化学分析）におけるSPM国際標準化のロードマップ

に依る表面化学組成の定量分析の確立と標準化を第一目標として活動が開始された。振興調整費第1期（1986～1988年度）報告書（図1右）に活動の詳細が報告されている。VAMAS-SCAの日本側TWPメンバーは筆者を含め22名であり当時の産業界と学界におけるAESに携わるエキスパートが招集されたものと自負している。

VAMAS-SCA-Japanが最初に取り組んだAESの定量化は「純金属スペクトルを用いた最適測定条件設定」のRRT（ラウンドロビンテスト）である。オージェ電子エネルギーの分析を行う円筒鏡型電子分光器（CMA）のアライメント（取付位置）を最適化することにより、オージェ電子ピーク強度の装置間バラツキを最小化するプロトコルが出来た。また、AuCu合金のオージェ表面組成定量分析のRRTを実施し、標準物質を用いた場合、十分に定量分析が可能であることを明らかにした。一方、AuCu合金では選択スパッタリングによる表面組成とバルク組成の差異が生じることも明らかになった。この発見は、選択スパッタリングや表面偏析の効果が無視できる理想的な全率固溶体のCoNi合金を表面化学分析における定量精度評価の標準物質として提案することにつながった<sup>3)</sup>。

一方、その所掌する計測手法の範囲をX線光電子分光（XPS）、二次イオン質量分析（SIMS）等へ拡大しつつ、国際的連携と協働を推進した。特に、表面化学分析法における定量化、高度化、絶対測定、データ転送フォーマット、データ処理等のプレ標準化項目において著しい協働研究の成果

をあげた。

VAMAS-SCA-Japanの成果のアウトカムとして、通産省が国際標準化戦略の好事例として主導し、ISOに対してJISCから新規専門委員会設立を申請するに至った。幸いにも平成3年（1991）に表面化学分析の標準化を所掌するTC 201としての設置が承認された。幹事国は日本（JISC）であり、歴代の国際議長及び国際幹事を我が国から輩出することができた。VAMASプレ標準化研究と連携したISO/TC 201国際標準化の発展過程については、昭和60年（1985）から今世紀前半に至るまで表面化学分析技術の標準化に著しい貢献をされた吉原一紘先生の著述に詳しい<sup>4)</sup>。

### 3. 走査型プローブ顕微鏡の国際標準化

2000年の米国National Nanotechnology Initiativeに触発されナノテクノロジーやナノ計測（Nanometrology）に関する標準化の動きが今世紀初頭に活発化した。2004年にISO/TC201にナノ計測手法として代表的な走査型プローブ顕微鏡（SPM）の標準化を担当する分科委員会としてSC9が設立された。

筆者は1990年代からSPMを用いたナノ表面計測を主とする研究に従事してきた。そのため、2004年からJSCAのSPM-WG幹事・主査としてSPMの国際標準化を担い、VAMAS/TWA 2に設置されたSPMプレ標準化分野と密接にリエゾンしながら、以後20年にわたり推進することになった。SPMマーケットが世界的に拡大するなかで、産業応用を念頭においた用語の統一などを最優先として産業標準の制定が望まれるようになった。筆者らが提案したSPM国際標準化へ向けたロードマップを図2に示す。ISO/TC 201におけるSPM国際標準化へ向けた工程表や国際規格開発の当時の状況は筆者による報告に詳しい<sup>5)</sup>。

VAMASと連携したISO国際標準化の事例として筆者が携わった事例の一つを紹介する。SPM形状計測において本質的なアーティファクトは有限サイズの探針先端形状に由来する。測定形状像はmathematical morphologyの概念を用いると実表面形状を探針先端形状により膨張（dilation）演算されたものに相当する。VAMASのRRTでは、



図3 VAMAS Sustained Achievement Award（持続的貢献賞）の表彰（2022年）

標準物質（探針キャラクタライザ）上の走査による探針先端形状その場評価方法とブラインド再構成法による形状像補正方法の妥当性を評価した。VAMAS/ILCの技術報告書に基づき、ISO/TC 201/SC 9に新規業務項目提案し、ISO 23729 “Guideline for restoration procedure for AFM images diluted by finite probe size”として2022年に発行された。

### 4. まとめ：国際標準化のすすめ

筆者が携わってきた表面化学分析手法のプレ標準化のための国際協働試験研究への長年にわたる継続的貢献に対して、VAMAS議長よりVAMAS Sustained Achievement Award（持続的貢献賞）が授賞された（図3）。これはVAMASが個人の長期にわたる持続的な活動を表彰する制度として開始したもので、筆者への授賞がその第一号である。今回、1980年代からの標準化活動を評価していただいたことは筆者にとって身に余る光栄である。

さて、筆者が専門とするナノスケール表面化学分析手法は多様な表面/界面現象やナノ機能物性の発現に関係する有用な情報を提供する。ナノ表面物性計測の定量化と標準化は新規の機能性デバイス材料の研究開発において益々重要になるものと思われる。今後もVAMASスキームにおけるプレ標準化段階からの国際協働研究がISOなどの標

準化プラットフォームにおいて国際標準規格として結実することにより、当該技術分野の発展と普及に資するものと期待する。

また、国家戦略として鑑みれば、先進材料分野における産業競争力の向上、イノベーションを支える計測分析技術の競争力強化、国際的な社会ニーズへの迅速対応などの社会的な貢献に寄与できる。さらに、個人的には、プレ標準化国際協働研究からISO国際標準化にいたる持続可能なネットワークを構築できたことは望外の喜びである。研究者諸氏に国際標準化への参加を大いに勧める所以である。



藤田 大介（ふじた・だいすけ）

学歴：東京大学大学院工学系研究科修士了、工学博士（東京大学、1991）

職歴：東京大学生産技術研究所、科学技術庁金属材料技術研究所、（国研）物質・材料研究機構にて主にナノマテリアル研究に従事

専門：表面科学、真空科学、顕微鏡学、特に、“オペランドナノ計測技術”の開発と応用

受賞：VAMAS Sustained Achievement Award(2022)、日本表面真空学会賞(2020)、日本顕微鏡学会賞（2018）、市村学術賞（2009）等

#### 参考文献

- [1] VAMAS Bulletin, No.6, pp.1-6 (1987).
- [2] VAMAS-SCA Technical Working Party in Japan, 科学技術庁振興調整費「新材料の試験評価技術に関する国際協同研究」表面化学分析作業部会報告オージェ電子分光法の定量化, (1989).
- [3] D. Fujita, A. Tanaka, K. Goto and T. Homma, Surf. Interface Anal. 16, 183 (1990).
- [4] 吉原一紘, J. Surf. Anal. 22, 2 (2015).
- [5] 藤田大介, 精密工学会誌 79, 213 (2013).

## CROSS ワード

オージェ電子分光（Auger Electron Spectroscopy、AES）

試料表面に電子を照射して励起し、その結果出てきた電子（オージェ電子）のエネルギーを測定することにより表面の化学組成を調べる分析方法。

スパッタリング

真空中の試料を高速の電子やイオンで叩くことによって表面の原子・分子をはじき出す技術。はじき出しの条件を制御して原子・分子を他の基板に付着させることにより、高品質の薄膜が要求される半導体、液晶、プラズマディスプレイなどの薄膜を製造する手法として用いられている。

## アートとサイエンスの融合 KEK つくばでレトロ加速器を特別展示

高エネルギー加速器研究機構 勝田 敏彦

高エネルギー加速器研究機構(KEK)つくばキャンパスでは9月7日、一般公開2024を開催しました。その目玉展示の一つが、現在は役目を終えたコッククロフト・ウォルトン型加速器でした。

英国のジョン・コッククロフトとアイルランドのアーネスト・ウォルトンが1932年、史上初めて加速器を使って原子核の変換反応を起こすことに成功し、2人はこの功績で1951年、ノーベル賞を受賞していますが、その実験に使われたのがこのタイプの加速器です。

静電型加速器とも呼ばれ、コンデンサーと整流器を何段か重ねた回路で高電圧を発生し、水素イオン(陽子)を加速します。放電防止のために全体が丸みを帯びており、レトロ風の独特の形となっています。

KEKにこのタイプの加速器は2基ありました。今も残る1基は1976年から2005年12月末まで約30年にわたって実験をしていたKEKで最も長い歴史をもつ加速器、陽子シンクロトロンの前段加速器として1982年から活躍していました。

これまでの一般公開でも展示されてきましたが、今年は特別に、2021年のKEK50周年記念事業の一環として企画されたパフォーマンス「テンプラム・フレクエンティア～素粒子の記憶～」と同じライトアップを再現して展示しました。

このパフォーマンスはアートとサイエンスの融合を目指したもので、カラーLEDによる照明が行われ、3人のダンサーが、4人のコーラスに合わせて踊りました。神々が去った神殿のように静かにたたずんでいた加速器に光がよみがえり、やがて人間のかたちになって舞い、歌い、そしてまた元の暗闇へと戻っていく展開です。



ライトアップされた加速器(裏表紙にカラー掲載)

一般公開の当日はダンサーやコーラスはありませんでしたが、パフォーマンスの照明を再現し、プロデューサーである森脇裕之多摩美術大学教授が解説を行いました。約1500人が来場し、大変好評でした。

つくばキャンパスには現在、陽子を加速する加速器はありませんが、30年間にわたる陽子シンクロトロン運転の経験と伝統は、東海キャンパスにあるJ-PARCの陽子加速器へと引き継がれています。

ラテン語で「周波数の神殿」という意味の「テンプラム・フレクエンティア」は、YouTubeでも配信されています。

<https://youtu.be/QRaAKvP2YRw>

# 湿度でキープするあなたの髪！

## 新しいヘアスタイリング剤の開発

物質・材料研究機構 高分子・バイオ材料研究センター 宇都 甲一郎

### 1. はじめに

髪はタンパク質でできており、水分や熱、化学物質に影響を受けやすいです。特に湿気が多いと、髪が水分を吸収して膨らみ、広がったりうねったりして、ヘアスタイルが崩れやすくなります。ヘアスタイルは自己表現や自信に影響を与えるため、湿気に強いヘアスプレーやジェルなどのスタイリング製品が人気です。これらの製品は、髪をコーティングして湿気から守ります。最近では、環境に優しい天然成分や生分解性のある製品の需要が増え、持続可能なスタイリング剤や化粧品の開発が進んでいます。私たちは、天然由来のセルロース微結晶 (CM) が持つ強力な「分子内・分子

間の水素結合を作る」特性と、ポリビニルアルコール (PVA) の「湿度に応じた形状記憶効果」を組み合わせることで、湿度に応答し駆動する形状記憶コンポジットを作成し、これを新しいスタイリング材料として応用できるかを検討しました。

### 2. 注目したポリマー：ポリビニルアルコール (PVA) とセルロース

ポリビニルアルコール (PVA) は、水に溶けやすく、成形しやすい無毒で生分解性のあるポリマーで、皮膚にも優しく環境に配慮した素材として知られています。PVAは、持続可能な環境を目指して、キトサンやセルロース、デンプンなどの天然高分子素材と組み合わせた複合材料の研究が

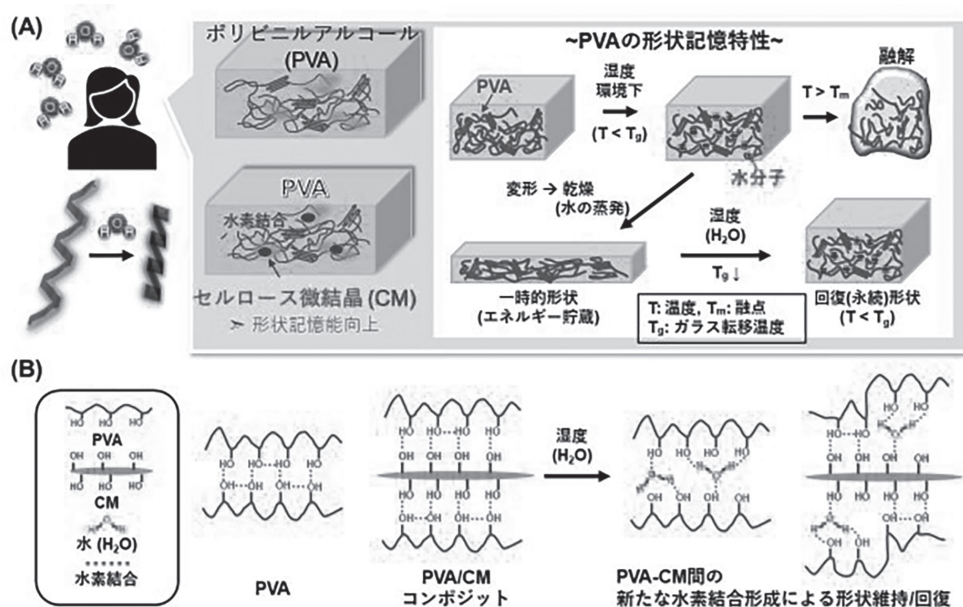


図1 ポリビニルアルコール/セルロース微結晶 (PVA/CM) コンポジット材料の湿度環境下でのヘアスタイル維持機構：(A) PVAの湿度応答性形状記憶特性の発現メカニズム、(B) PVAとPVA/CM間で形成される水素結合の様式。

進んでおり、薬物送達システムやコンタクトレンズ、ろ過素材としての利用が期待されています。また、化粧品分野では、PVAはバインダーや増粘剤、皮膜形成剤として使われ、安全性も確認されています。このPVAは、湿気に敏感で、保水性や膨潤性がありますが、水（湿気）に対して形状記憶する能力に関しては化粧品分野でまだ十分に活用されていません（図1A）。

一方、セルロースは植物の細胞壁を構成する多糖類で、自然界で最も豊富で安価かつ生分解性がある再生可能な素材です。セルロースは生体適合性や親水性、熱に対する安定性が高く、医療や化粧品、ろ過、食品包装などさまざまな分野で使われています。ナノサイズやマイクロサイズのセルロースは、強度を高める補強材としても注目され、PVAとセルロースを組み合わせることで、性能が向上することが確認されています。PVAを湿度に応答する形状記憶ポリマーとして使う場合、化学結合を導入するなど特別な処理をしなければ高湿度環境下での性能には限界がありました。そこで私たちはPVAとセルロース微結晶（CM）を組み合わせることで湿度に対する形状記憶性能を向上させ、実際に髪の毛での形状記憶特性を評価し、ヘアスタイリング剤としての可能性を探りました。

### 3.ポリビニルアルコール（PVA）/セルロース微結晶（CM）コンポジット材料

ポリマー系のコンポジット（複合）材料を作る際、フィラー（充填材）をポリマーに均一に混ぜることが重要です。本研究では、部分けん化PVA（重合度1700、けん化度88%）とセルロース微結晶（CM）を使い、さまざまな組成のPVA/CM複

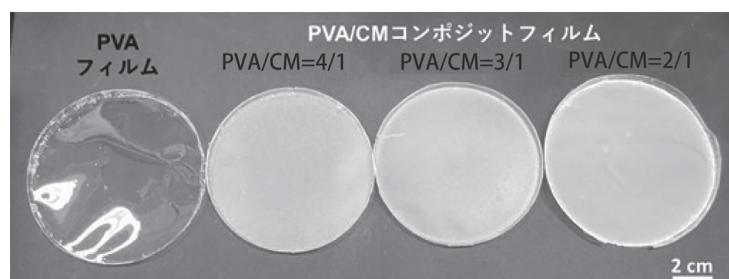


図2 溶液キャスト法により作製したPVAフィルムとPVA/CMコンポジットフィルム（PVA/CM比=4/1-2/1）の外観

合材料を作成しました。

水を使って材料を混ぜ合わせ、溶液キャスト法でフィルムを作成した結果、PVAだけでは透明なフィルムができ、PVA/CM複合材料では白く濁ったフィルムができました（図2）。電子顕微鏡観察でも均一な表面が確認され、CMがPVAの中に均一分散していることが分かりました。作成したフィルムの熱的特性を調べたところ、PVA/CMフィルムはCMの含量が増えると、水分の蒸発温度が低下し、PVAの融点が通常の182℃から190℃に上昇しました。この結果は、PVAとCMが良く混ざり、均一な構造を作っていることを示しています。さらに、フーリエ変換赤外分光法を使って、PVAとセルロースの相互作用を確認しました。PVAとCMの組み合わせにより、PVAフィルムのO-H結合（水酸基）の波数が低くなり、これがPVAとCMの間に新しい強い水素結合ができたことを示しています。これは、PVAの融点が上がったこととも一致します。結果的に、CMはPVAの中で水素結合を強め、複合材料の性能を向上させる役割を果たしていることが分かりました（図1B）。

### 4.PVA/CMコンポジット材料の特性評価:吸湿性と力学特性

PVAが高い吸水性を示すのは、水酸基による効果が大きな要因です。しかし、水に触れて膨潤や溶解が起これば、PVAのヘアスタイリング剤としての性能が大きく低下します。そこで、湿度100%の環境下でPVAフィルムとPVA/CM複合フィルムがどのように水分を吸収するかを比較しました（図3A）。結果として、両方のフィルムが湿気によって膨潤し、重量が増加しましたが、

PVA/CM複合フィルムでは水分の吸収がより抑えられました。PVAフィルムは時間が経つにつれて多くの水分を吸収し、24時間後には1.55倍にまで重量が増加しましたが、PVA/CM複合フィルムは低い重量増加を保ち、セルロースが吸湿性を抑える役割を果たしていることがわかりました。

次に、湿気を吸収したフィルムの力

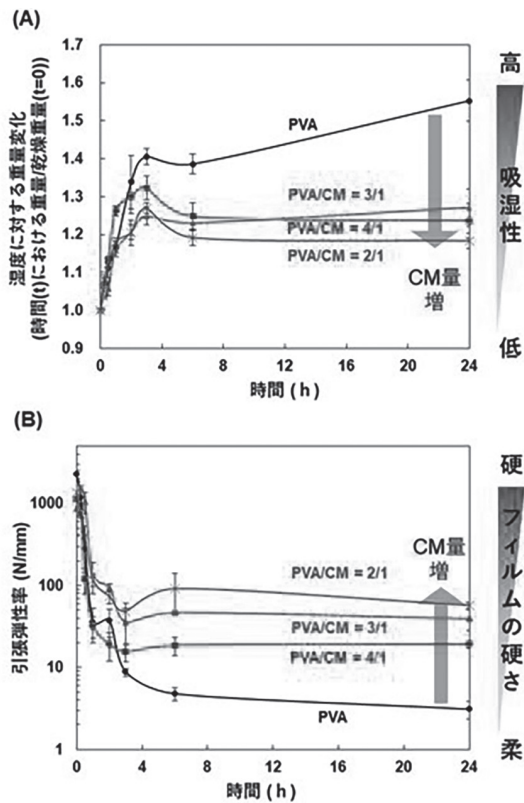


図3 PVA フィルムと組成の異なる PVA/CM コンポジットフィルムの (A) 吸湿性と (B) 力学特性 (硬さ) の経時変化

学的特性、つまり引張強度を調べました (図 3B)。PVA フィルムは吸湿により強度が低下しましたが、PVA/CM 複合フィルムではセルロースの影響で強度が維持され、24 時間後には PVA フィルムより 6~18 倍も強度が高い結果となりました。この強度の維持は、湿った状態でもフィルムの構造を強化していることを示しています。これらの結果は、上述した PVA と CM フィラーの間に強い水素結合が形成されていることを裏付けています。CM による付加的な水素結合が、湿度の高い環境でもフィルムの構造を安定に保つ役割を果たしていることが確認されました。

### 5. PVA/CM コンポジット材料の湿度応答性形状記憶効果

一般的な PVA ハイドロゲルは、水素結合によって分子鎖が結ばれており、この水素結合が可逆的に働くことで、湿気を吸収すると形状記憶効果が発動します。しかし、湿った環境で形状記憶材料として機能させるためには、物理的や化学的な結

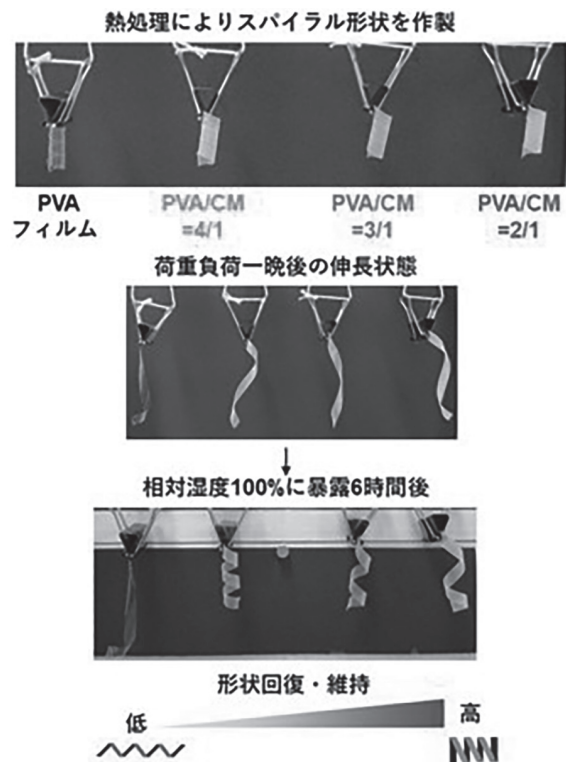


図4 PVA フィルムと PVA/CM コンポジットフィルムの湿度に応答し駆動する形状記憶特性：フィルムの湿度応答形状記憶プロセスと湿度応答形状回復の経時変化

合を導入する必要があります [1]。PVA フィルムと PVA/CM コンポジットフィルムの湿度に応答した形状記憶効果について比較したところ、PVA/CM コンポジットフィルムは、湿気を吸収した後も、形を固定する能力と元の形に戻る能力をしっかりと示しました (図4)。まず、サンプルを 120℃ で 30 分間加熱し、水分を飛ばしてから水素結合を再形成させることで、フィルムをスパイラル状に加工しました (図4上)。その後、スパイラル形状のフィルムに重さ 5g の荷重をかけて一晩放置すると、フィルムは引き伸ばされた形 (一時的な形) に変化しました (図4中)。この時、PVA と CM を混ぜたフィルムは、この引き伸ばされた形に対しても変形が抑えられていました。次に、この引き伸ばされたフィルムを高湿度の環境に置いたところ、最初の 15 分間で元のスパイラル形状に戻り始めました。形状の回復率を定量的に評価した結果、PVA と CM の比率が 4/1、3/1、2/1 の場合、それぞれ 42%、45%、31% となり、PVA 単独のフィルムの 13% よりもはるかに高い結果が

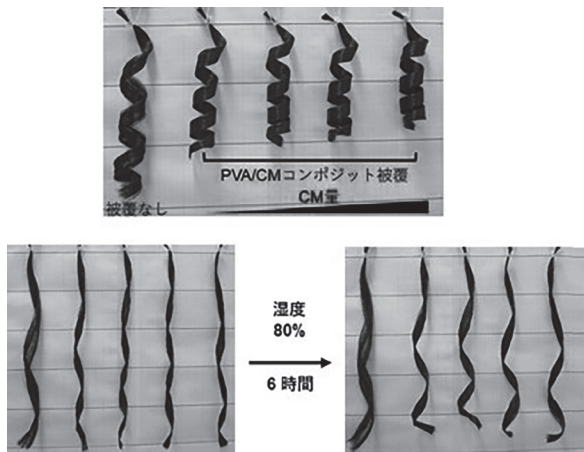


図5 PVAとPVA/CMを被覆したヒト髪の毛の湿度に応答した形状記憶特性：巻き髪スタイリング性能および湿度に応答した形状回復の経時変化

得られました。PVAフィルムは湿度に晒されると少し形状が戻りましたが、時間が経つにつれて元のスパイラル形状が失われました。一方、PVA/CMコンポジットフィルムは、形状を回復した後もスパイラル形状を長期間維持することが確認されました(図4下)。

この結果から、PVAとCMを混ぜたコンポジットフィルムは、PVA単独のフィルムに比べて形を元に戻す力が優れており、荷重をかけたときの変形にも強いことがわかりました。この形状回復の仕組みは、湿気によるガラス転移温度の変化にあります(図1A)。水分がフィルムに入り込むと、水素結合が壊れると同時に、水分が可塑剤として働き、PVAのガラス転移温度が下がります。乾燥した状態のPVAやPVA/CMコンポジットフィルムのガラス転移温度は約70℃ですが、高温の環境ではこの温度が室温以下まで低下するため、ゴム状の性質を示すようになり、フィルムが元の形に戻る現象が起きたと考えられます。

## 6.PVA/CMコンポジット材料の髪の毛への応用

人間を含む動物の毛髪は、 $\alpha$ -ケラチンという繊維タンパク質でできており、水素結合によって構成されています。そのため、毛髪自体が水や湿度に応答して形を記憶する特性を持っています [2]。しかし、湿気が多い環境では、髪型を維持する力

が弱く、長時間スタイルを保つことが難しいため、新しいスタイリング製品の開発が求められています。そのため、上述したPVAやPVA/CMの複合材料が高温環境での髪型の維持に役立つかを調べました。実験では、PVAまたはPVA/CMの溶液を人間の毛髪に塗布し、180℃のヘアアイロンを使って巻き髪を作成しました。その結果、PVAやPVA/CMで処理した髪は、水だけで処理した髪よりも巻きがしっかりとしていることがわかりました(図5上)。これは、PVAやPVA/CMで髪を覆うことで、髪の形状記憶能力が向上し、優れたスタイリング効果が得られることを示しています。さらに、図3のフィルムの時と同様に、巻き髪に一晩重さかけた場合についても併せて検討しました。その結果、髪の長さには大きな変化がありませんでしたが、PVAやPVA/CMで処理した髪は、水処理した髪に比べて、広がりや縮れが抑えられました。巻き髪を湿度80%の環境に6時間置いた後でも、PVAやPVA/CMで処理した髪は、巻き髪の形をよく保っていました(図5下)。PVAやPVA/CMを塗布することで、髪の形状記憶性が向上することが確認されましたが、形状が元に戻る力については、フィルムでの試験ほど大きな差は見られませんでした。

毛髪とコーティング剤(PVAやCM)との間の相互作用が重要であり、これが強い形状記憶特性を実現する鍵だと考えられます。特に、巻き髪が元の形に戻る際には、コーティング剤と毛髪の結びつきがしっかりしていないと、コーティング剤が持つ形状回復力が毛髪にうまく伝わらない可能性があります。さらに、CMのサイズが髪に形成されるPVAの膜より大きいことも、髪上での形状回復がフィルムでの試験より劣る理由かもしれません。それでも、PVAやPVA/CMで髪をコーティングすることで、湿気が多い環境でも水分の浸透を防ぎ、髪の広がりや縮れを抑え、スタイルを長時間維持できることが確認されました。このことから、PVAやPVA/CMコンポジット材料が、ヘアスタイリング剤として非常に有効であることが証明されました。

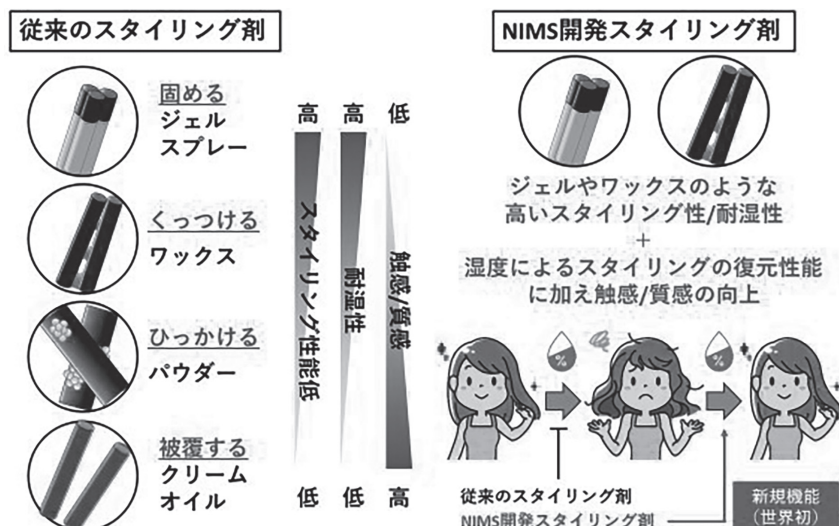


図6 従来のスタイリング剤と著者ら（NIMS）が開発したスタイリング剤の主な特徴

## 7.おわりに

本研究は、PVA（ポリビニルアルコール）およびPVA/セルロース微結晶（CM）コンポジットを人間の髪に応用した初めての試みであり、特に高湿度環境でヘアスタイルを維持し、湿度の変化に応じて元の形に戻る能力を持つ新しいヘアスタイリング剤としての可能性を世界で初めて示すことができました（図6）[3]。私たちが開発したPVA/CMコンポジットの特性は、髪型を崩す原因となる空気中の水分を逆に積極的に利用してスタイルを保つという新しい方法に繋がります。これにより、特に高温多湿な環境で悩む消費者の課題解決に役立つ可能性があります。さらに、湿度に反応して形状記憶機能が発揮されるという新しい仕組み

と、その背景にある分子間・分子内の水素結合のメカニズムに関する知見を活用することで、湿度に強いスタイリング方法の開発が期待されます。今回の研究では毛髪を対象としましたが、湿度に敏感な肌や体にもこの湿度応答性の形状記憶ポリマーは有効であり、今後さらに幅広く活用されていくことが望めます。

### 参考文献

- [1] T. Hirai et al., Journal of Applied Polymer Science 46, 1449 (1992)
- [2] X. Xiao et al., Sci. Rep. 6, 26393 (2016)
- [3] K. Uto et al., Advanced Material Interfaces 11, 2300274 (2024)



宇都 甲一郎（うと・こういちろう）

国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）高分子・バイオ材料研究センタースマートポリマーグループ 主幹研究員

2010年 鹿児島大学大学院 理工学研究科 ナノ構造先端材料工学専攻 博士課程 修了

2010年 NIMS 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点複合化生体材料センター ポスドク研究員

2015年 米国ワシントン大学バイオエンジニアリング専攻 JSPS 海外特別研究員

2016年 NIMS 若手国際研究センター ICYS研究員

国立研究開発法人 日本医療研究開発機構「メカノバイオロジー機構の解明による革新的医療機器及び医療技術の創出」研究領域 AMED-PRIME 研究代表

2018年 NIMS 機能性材料研究拠点 独立研究者&文部科学省卓越研究員事業 卓越研究員

2023年 NIMS 高分子・バイオ材料研究センター スマートポリマーグループ 主任研究員

2024年 同上 主幹研究員

専門分野：高分子化学，バイオマテリアル，メカノバイオロジー

# クリの侵入害虫との攻防戦記

## 今おいしい栗菓子がいいただけるのは寄生蜂のお陰!?

農研機構 植物防疫研究部門 屋良 佳緒利

おいしい栗菓子がいただけるのは…もちろんパティシエ、和菓子職人、そしてクリ農家さんのお陰でしょう。それは分かっているのですが…今、こうしておいしい栗菓子がいただけるのは、あの蜂こそが陰の功労者なのでは、と実は思っています。

という訳で、これから「あの蜂」こと、小さくて濃緑色にキラキラ光る、ある寄生蜂と、それにまつわる話をご紹介します。しかし、まずは事の発端となる今から80年以上も前の話、クリの害虫の日本への侵入から始めようと思います。

### 侵入害虫クリタマバチ

クリの害虫クリタマバチ（写真1）は、体長約2mm、体色は黒色の小さな蜂（ハチ目タマバチ科）です。クリタマバチが夏にクリの芽に産卵すると、翌春、その芽はこぶ状の「虫こぶ（虫癭）」と呼ばれるものになります（写真2）。虫こぶ、ご存じですか？植物体に昆虫などが産卵、寄生すると、その刺激による異常発育で形成される「こぶ

状のものを指します。虫こぶになったクリの芽はそれ以上伸長することがなく、花も咲きません。そのため、たくさんの虫こぶが作られるとクリの収穫量が減り、最悪、枯れてしまいます。クリタマバチ（虫こぶの被害）は1941年に岡山県で初めて確認された後、各地で見られるようになり、1965年頃までにはクリが分布していない沖縄県を除く日本全国に分布を広げ、クリに大きな被害をもたらしました。なお、当時は鉄道線路の枕木には丈夫なクリ材が使われていたので、果樹害虫というだけでなく、森林害虫としても大問題視されていたということです。

新たな害虫が発生し、急速に分布を広げて農作物などに大きな被害を与える場合、それは外国からの侵入害虫である可能性が高いのですが、クリタマバチが新種として記載されたのは、クリタマバチが日本で問題になってからもうすぐ20年になりそうな1958年、そして中国原産の侵入害虫



写真1 クリタマバチ成虫



写真2 クリタマバチにより形成された虫こぶ (矢印)



写真3 チュウゴクオナガコバチ成虫  
裏表紙にカラー図を掲載

との結論が出せたのは、30年以上後の1975年のこととなります。侵入の経緯としては、クリタマバチが産卵している芽がついた苗木か穂木（芽はまだ虫こぶになっていない）が持ち込まれたのではないかと考えられています。

種名が決まらなくても、侵入源がよく分からなくても、クリの大被害を抑えるためには、害虫クリタマバチの生態を良く知る必要があります。先人たちの精力的な調査研究から、クリタマバチは1年1世代であること、成虫は初夏から盛夏にかけて虫こぶから羽化脱出すること、雄は産まれず雌だけで繁殖をしていくこと（産雌単為生殖）など、多くのことが明らかになっていきました（生活史は図1参考）。

### 天敵導入に至るまで

害虫防除と聞いて真っ先に思いつく手段は化学農薬かもしれません（化学的防除）。しかし、クリタマバチはその一生のほとんどを虫こぶの中で過ごすので、1年に1回、夏場のごく限られた期間に発生する成虫を狙って農薬散布をすることになります。そのため農薬による防除（殺虫）が難しい害虫でした。

そのため、クリタマバチに強い耐性を持つクリ品種を選抜して栽培するようになります。また、クリタマバチ抵抗性の品種が育種されていきます。これらも害虫防除法にあたり、耕種的防除とよばれます。しかし1960年前後からは、これらの耐虫性を打ち破るクリタマバチが出現し、再びその加害が問題とされるようになりました。つま

り抵抗性品種だけではクリタマバチを十分に防除出来ない状況となったのです。

ほかにも天敵を使った防除（生物的防除）も当初から検討され、クリタマバチの天敵の調査研究も進められました。なかでも日本土着の寄生蜂、クリマモリオナガコバチが最も有望とされ、実際に長野県などで放飼が行われたこともありました。しかし結局、はっきりとした防除効果は得られませんでした。海外からの侵入害虫は多くの場合、侵入先には自身の天敵がいなかったために個体数が急速に増加しやすく、その結果、農作物などに大きな被害を及ぼすことが知られています。ほぼ日本全国に分布を広げたクリタマバチに対し、土着天敵でうまく防除出来なかったのは仕方ないことだったのかもしれませんが。

### 寄生蜂チュウゴクオナガコバチ

侵入害虫に対しては、永続的に防除することを目的として、侵入害虫の原産地から有力な天敵昆虫を導入し、放飼する防除法があります。化学農薬が開発されるよりも前、19世紀から行われていたことから「伝統的生物的防除」と呼ばれています。クリタマバチが中国大陸原産の侵入害虫と考えられた時から天敵の調査も行われ、中国大陸に生息する寄生蜂チュウゴクオナガコバチが有望天敵として見いだされました（写真3）。

チュウゴクオナガコバチは体長2～3 mm、体色は金属光沢のある濃緑色の蜂です（ハチ目オナガコバチ科）。クリタマバチと同様に1年1世代ですが、チュウゴクオナガコバチは春に成虫が羽化します。羽化した成虫が虫こぶを見つけると、虫こぶの中のクリタマバチ幼虫を狙って産卵（寄生）します。やがてふ化した寄生蜂の幼虫は、虫こぶ内のクリタマバチ幼虫の体表に張り付いて捕食、最終的に食い殺すという形で寄生（外部寄生）します（生活史は図1参考）。もともと中国に生息していたことと、産卵管を守る鞘（産卵管鞘）が長いことから、このような名前（和名）が付けられました。なお、クリタマバチとは違って雄雌どちらもいるのですが、受精卵からは雌が、未受精卵からは雄が生じるという、多くの蜂で見られる繁殖様式を持ちます（産雄単為生殖）。

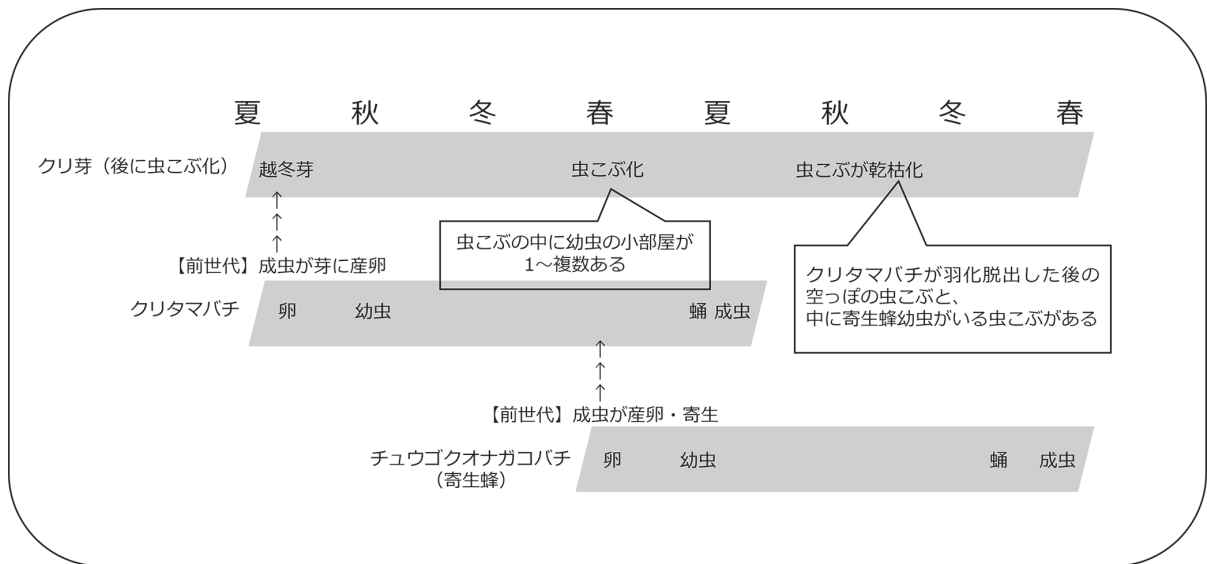


図1 クリタマバチとチュウゴクオナガコバチの生活史 (Moriya et al 2023 Applied Entomology and Zoologyより大幅改変)

### チュウゴクオナガコバチの導入、放飼

クリタマバチの伝統的生物的防除を目的として、チュウゴクオナガコバチが中国から導入され、1982年春に茨城県（現在のつくば市、農研機構敷地内）で国内初の本格的な放飼、チュウゴクオナガコバチ雌成虫260頭の放飼が行われました。放飼後10年間の調査結果から、放飼されたチュウゴクオナガコバチは定着していること、放飼地で増えているのに合わせてクリタマバチの虫こぶが減っていること、またチュウゴクオナガコバチはさらに周辺へどんどん分布を広げていることが分かり、防除は成功したと判断されました。このような結果を受けて、日本各地で国や県の事業としてチュウゴクオナガコバチが順次放飼されます（記録が残っている1999年までに北海道から鹿児島県までの19道府県64地点で放飼）。

### 本当に永続的に防除しているのか？

侵入害虫（クリタマバチ）の原産地から有力な天敵（チュウゴクオナガコバチ）を導入し、放飼する伝統的生物的防除法は、永続的な防除効果を狙うもの、と専門書（応用昆虫学の教科書）には書かれています。しかし、これまでに世界中で行われた伝統的生物的防除は少なくないにも関わらず、天敵を導入し放飼した後のわずか数年間の防

除の成否だけが注視され、長期的な調査に基づいて防除効果の持続性が評価されたものはありませんでした。

クリタマバチの伝統的生物的防除については、チュウゴクオナガコバチを最初に放飼した地点で放飼後40年間におよぶ長期かつ継続的な調査が行われ、天敵放飼地点の害虫（クリタマバチ）密度と天敵（チュウゴクオナガコバチ）密度を指標とした各々の数の年次変動の解析が行われました。

その結果（図2）、最初の10年でクリタマバチの密度は速やかに減少していましたが、その後の30年間で3回の密度の上昇が認められました（2000年、2008年、2014年）。しかし、これらのクリタマバチ増加に連動するようにチュウゴクオナガコバチが速やかに増加しました。これによりクリタマバチも速やかに減少して被害が抑制される現象が3回とも認められました。つまり害虫（クリタマバチ）が高密度で維持、蔓延することはなく、天敵（チュウゴクオナガコバチ）により長期的に制御されていることが明らかとなったのです。

一事例ではありますが、農薬による防除が困難で、耐虫性品種に対しても加害性を獲得した侵入害虫に対し、導入天敵を一度放飼することにより、その侵入害虫の密度を長期間制御できることが科

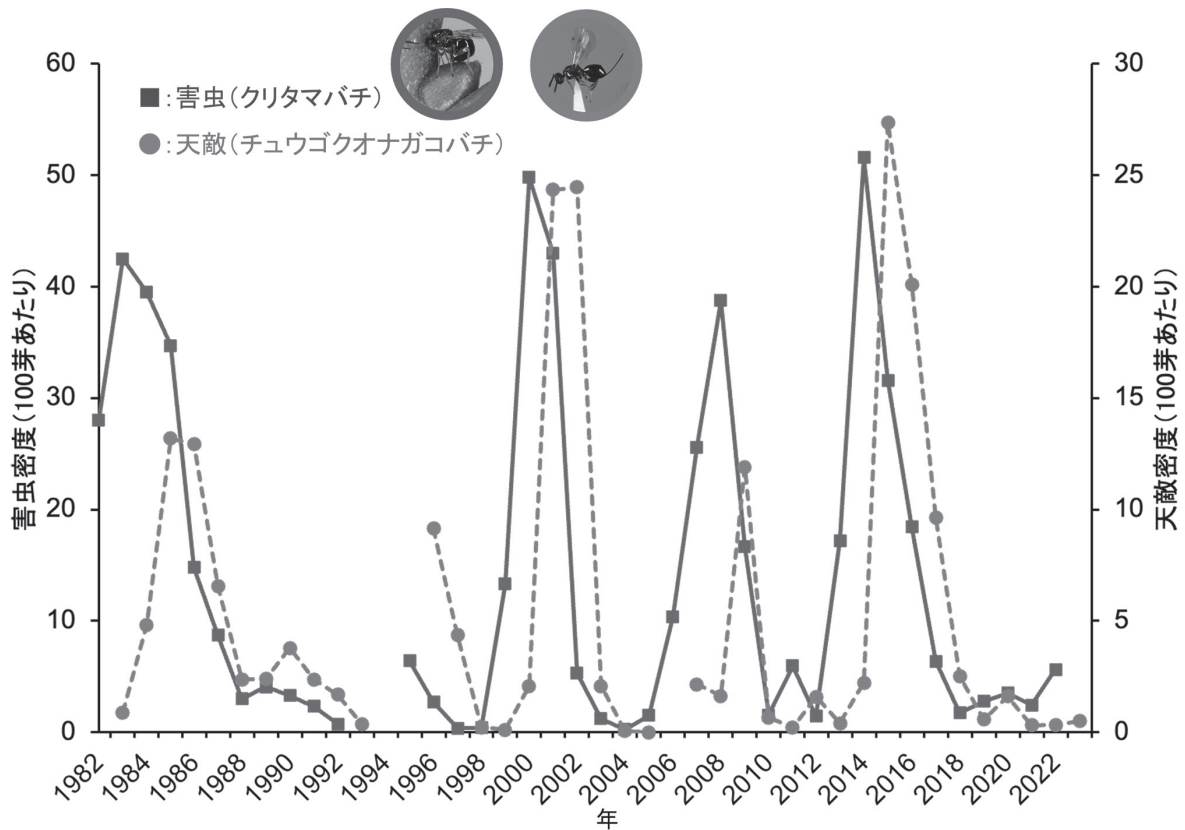


図2 クリタマバチ（害虫）とチュウゴクオナガコバチ（天敵）の長期動態（Moriya et al 2023 Applied Entomology and Zoologyより改変）

学的に明示されました。

### チュウゴクオナガコバチの導入、放飼がもたらした恩恵

こうして日本国内では、クリタマバチの被害は問題視されなくなったため、クリの品種育成においてもクリタマバチ耐性付与から果実品質の改良に重点が移っていきます。その結果の1つとして、渋皮が簡単に剥けるクリ品種「ぼろたん」の誕生があると思っています。

また、実はクリタマバチは日本だけの問題ではありません。2002年にはクリタマバチがイタリアへ侵入、その後、周辺各国でも次々と侵入が発覚し、ヨーロッパ全域のクリ産地でも深刻な問題となりました。イタリア関係者の切実な要請を受け、日本に定着していたチュウゴクオナガコバチがかき集められてイタリアに送られ、2005年に放飼されました。今のところイタリアでもチュウゴクオナガコバチ放飼によるクリタマバチ防除は成功と見なされています。将来的な長期的な防除

効果については、今回の我々の研究成果が一定の指針となるでしょう。

### 参考図書

もっと詳しく知りたい方には以下の書籍がおすすめです。出版年が古いので最新知見（クリタマバチ防除の持続性の検証）は無く、既に絶版でもありますが、拙稿の話題について、より広く、より深く知ることが出来ると思います。ぜひ図書館で探してみてください。

「虫で虫を退治する」守屋成一 著 農山漁村文化協会

「クリタマバチの天敵」村上陽三 著 九州大学出版会

### 謝辞

本成果の一部はJSPS科学研究費（JP22K05663, JP19380037, JP09306003）の助成を受けたものです。



屋良 佳緒利 (やら・かおり)

農研機構 植物防疫研究部門 果樹茶病害虫防除研究領域 果樹茶生物的防除グループ 上級研究員

東京農工大学大学院修士課程修了後、農林水産省（現農研機構）入省。つくば（農業環境技術研究所、中央農業総合研究センター）、静岡県島田市（野菜茶業研究所）、つくば（果樹茶業研究部門）を経て、現在は盛岡研究拠点（岩手県）。2008年博士（農学）。クリタマバチの伝統的生物的防除については元々、土着寄生蜂クリタモリオナガコバチからチュウゴクオナガコバチへの置き換わりや、両者の交雑など、導入天敵が防除対象外生物へ及ぼす影響解析を主に行っていた。その後、茶の侵入害虫チャトゲコナジラミの天敵寄生蜂シルベストリコバチの研究課題に従事したことで、99年前に行われたカンキツの侵入害虫ミカントゲコナジラミの伝統的生物的防除の事後評価にも関わる。

## CROSS Release

■農研機構 6月25日付

### 世紀末までにコメの収量、品質とも劣化 人工気象室を用いて明らかに

農研機構が人工気象室「栽培環境エミュレータ」を用いて、21世紀末の季節環境を人工的に構築し、水稻生育に与える影響を調査した結果、高温と高CO<sub>2</sub>濃度が生育を早め、収量と品質の低下を引き起こす可能性のあることが明らかになった。

同エミュレータは作物生育における季節環境を精密に構築する高機能な人工気象室。2種類の気候予測シナリオに基づき、21世紀末の季節環境を「栽培環境エミュレータ」で構築し、水稻への影響を調べた。

その結果、現時点を超える気候変動の緩和策をとらない想定シナリオの場合、基準環境（1990年～1999年の平均環境）と比べて生育が著しく早まり、開花までの日数の大幅な短縮、白未熟粒の発生の増加などの変化がみられることを明らかにした。白未熟粒は米粒にでん

粉が十分に詰まらないために、乾燥した米粒の一部または全部が濁って見える状態であり、これが多発すると精米時の歩留まりが下がる原因となる。登熟前半の高温により増加することが明らかとなっている。

また、遺伝子発現を調べた結果、開花促進、高温反応、高CO<sub>2</sub>濃度反応に関わる遺伝子の発現に大きな変化が認められ、形質の変化とも対応していた。これら人工気象条件下での結

果は、21世紀末には高温と高CO<sub>2</sub>濃度が水稻の生育を早め、白未熟粒の増加が起ることを示唆する新たな知見という。

エミュレータ内の環境は野外環境と比べて光質、土壌、栽植密度などが異なるものの、予測される未来の環境条件で生育した際にみられる水稻の形質を評価できる可能性が示された。今後、温暖化に対応した栽培技術の開発（田植え時期や施肥の量・時期の調整など）への利用が期待される。

[https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/rcait/163819.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/rcait/163819.html)

■森林総合研究所 8月28日付

### おっぱいの数「2分の1ルール」覆す 春に少なく夏に多いニホンモモンガの子の数

ヒトを含む哺乳類には1回に産む子の数が乳頭（おっぱい）の数の約半数になる「2分の1ルール」という法則が存在する。樹上で生活するリスの乳頭数は多くの場合6から8だが、ニホ

ンモモンガは乳頭数が10もある。通常樹上で生活するリスは乳頭数に対して子の数が少ないという考え方があったが、ニホンモモンガは夏に子供を約5頭産むが、春の子は約2頭と少

なかった。森林総合研究所の調査が明らかにした。

リスの仲間は3つのグループに分けられる。①木の上をちよろちよろと走り回る樹上性リス②モモンガやムササビなど樹上で生活し木と木の間を滑空で移動する滑空性リス③ジリスやプレーリードッグなど地上や地中で生活する地上性リスの3タイプだ。これらのうち、樹上性リスと滑空性リスが「樹上で生活するリス」になる。

地上性リスたちはちゃんと法則に則った数の子を産むが、樹上で生活するリスは乳頭の数の2分の1を大きく下回る特別なグループになる。ところが、世界中で日本の本州、四国、九州だけに生息しているニホンモモンガは10個の乳頭を持ち、最大で8頭もの子を産んだ記録がある。樹上で生活するリスの中では乳頭数も多く、子の数も多いようにみえた。

調べてみると、ニホンモモンガは季節によって産まれてくる子の数が大きく違っていた。平均的な子の数は、春が2.1頭、夏が5.3頭。つまり春の子の数は、樹上で生活するリスと同程度で法則から外れており、夏の子の数は乳頭数の半分程度なので地上性リスと同様に法則に則っているといた。このように2つの特徴を持つリスは他にはおらず、ニホンモモンガは樹上で生活するリスと地上性リスの両方の繁殖生態を持っていることが明確になった。

この結果は、樹上で生活するリスは乳頭数の2分の1より

も子の数が少ないという古典的な考え方を覆す。ニホンモモンガの子の数が季節で違う原因を明確にすることは、樹上で生活するリスの乳頭数と子の数のミスマッチが起こった進化の過程

■産業技術総合研究所 8月21日付

## 照明空間の明るさ評価に救世主 照度計校正向け標準電球の枯渇をLEDで解決

産業技術総合研究所は日亜化学工業（徳島県阿南市）と共同で、国際照明委員会が定める白熱電球の標準スペクトルを発光ダイオード（LED）で再現し、既存の光度標準電球を代替する光源を開発した。産総研の物理計測標準研究部門、神門賢二主任研究員、木下健一主任研究員、中澤由莉主任研究員らによる。

照明空間の快適な明るさは照度計により評価される。照度計は、スマートフォンへの組み込みやディスプレイの調光に活用されるなど身近になっている。最近の自動車には、薄暮時間帯の無灯火を無くすために、オートライトが義務付けられた。周囲の照度が1000ルクス未満になると、ヘッドライトを自動的に点灯させる機能が搭載されている。自動車の安全管理の観点からも照度計を正しく使用するためには、正確な照度の計測・管理が重要になってきた。

照度計を正しく使用するには、照度の基準となる標準光源による校正が必要。通常、照度計を販売する各メーカーおよび試験機関において、国家計量標準にトレーサブルに校正された

を明らかにすることが今後の課題となった。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2024/20240828/index.html>

白熱電球である「光度標準電球」を基準として行われる。しかし、白熱電球は世界的に生産されなくなってきており、光度標準電球の枯渇が問題になっていた。

LEDを用いた標準光源の開発を進め、光度標準光源が示す標準スペクトル（CIE標準イルミナントA）をLEDで再現した光源（イルミナントA標準LED）を作製した。日亜化学工業がイルミナントAのスペクトルを再現するLEDベースの標準光源を試作し、その試作品を産総研が国家計量標準を基に性能評価や、製作にフィードバックを行い、イルミナントA標準LEDの開発を進めた。

同光源は、照度計の校正に必要なスペクトルや照度値などの仕様を満たすだけでなく、LED素子の安定化処理を適切に行うことで、点灯劣化を光度標準電球の20分の1程度に抑制できる。このため、現場での標準光源の校正周期の延長や測定精度の向上も期待できるという。

[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2024/pr20240821/pr20240821.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2024/pr20240821/pr20240821.html)

# 新規要介護認定者の病気のパターンと予後 人工知能を用いた医療・介護データの解析

筑波大学医学医療系 伊藤裕司 岩上将夫 田宮菜奈子

## はじめに

世界的に高齢化が進み、高齢者が元気に自立した生活を長く続けるために様々な国で施策が行われている。日本では「高齢者が尊厳を保持し、その有する能力に応じ自立した日常生活を営むことができる」ことを目標として、2000年から介護保険制度が開始された。

日本の介護保険制度では、40-64歳で国が定めた病気（疾患）を持っている人や65歳以上の全ての人が、介護認定調査による介護認定調査票や主治医意見書などに基づいて決められる身体機能や認知機能の低下による日常生活のしにくさの程度（介護度）に応じて、サービスを受けられる仕組みになっている<sup>1)</sup>。

高齢者に対する医療・介護サービスの質と効率の向上が重要な課題と考えられている一方で、介護サービスの有効性についての報告は少ない。

## 高齢者の多様性と研究課題

高齢者は2つ以上の疾患を持っている人も多く、近年は複数の病気を同時に持っている（多疾患併存）状態に注目が集まっており、その組み合わせも多様であることが分かっている<sup>2)</sup>。高齢者を一括りにしてサービスの効果についての研究を行おうとすると、様々な特性を持った人たちが集まった不均一な集団を対象とすることになり、本来の結果が得られない可能性がある。例えば、小さい子から高齢者までの年齢層で、日本人だけでなく多様な出身国の人たちを集めた集団を対象

に、和食は美味しいか？という研究を行ったとすると、全体の平均としては必ずしも美味しいという結果にはならないかもしれない。しかし、これを日本人の高齢者だけに絞ってみると、和食は美味しい、という結果が出てくる可能性が高い。このように、効果的な医療・介護サービスを見つけるために、まず高齢者という不均一な集団から似た特性をもつグループを見つけ出し、その特徴を理解する研究が必要と考えた。

## 新規要介護認定者の疾患パターンの同定

そこで筆者らは、研究目的につくば市の介護認定調査票を入手し、2014年10月から2019年3月までに新規要介護認定された65歳以上の4,648人を同定した。また、医療保険レセプトのデータとも突合し、先行研究<sup>3)</sup>で明らかになった新規要介護認定されることに影響する22個の疾患の有無について抽出した。同定した新規要介護認定者の年齢の中央値は83歳（四分位範囲 73-88）で、女性が60.4%を占めた。併存疾患数の中央値は4（四分位範囲 3-6）で、2つ以上の併存疾患を持っていた参加者は88.6%だった。併存疾患で最も多かったのは腰部痛（59.8%）で、次いでその他の関節疾患（39.6%）であった。図1に各疾患の相互関係について表したネットワークプロットを示す。

同定した新規要介護認定者について、抽出した22疾患の有無をもとに教師なし機械学習の一つであるクラスター分析という方法を実施し、疾患のパターン（臨床サブタイプ）を同定した。その

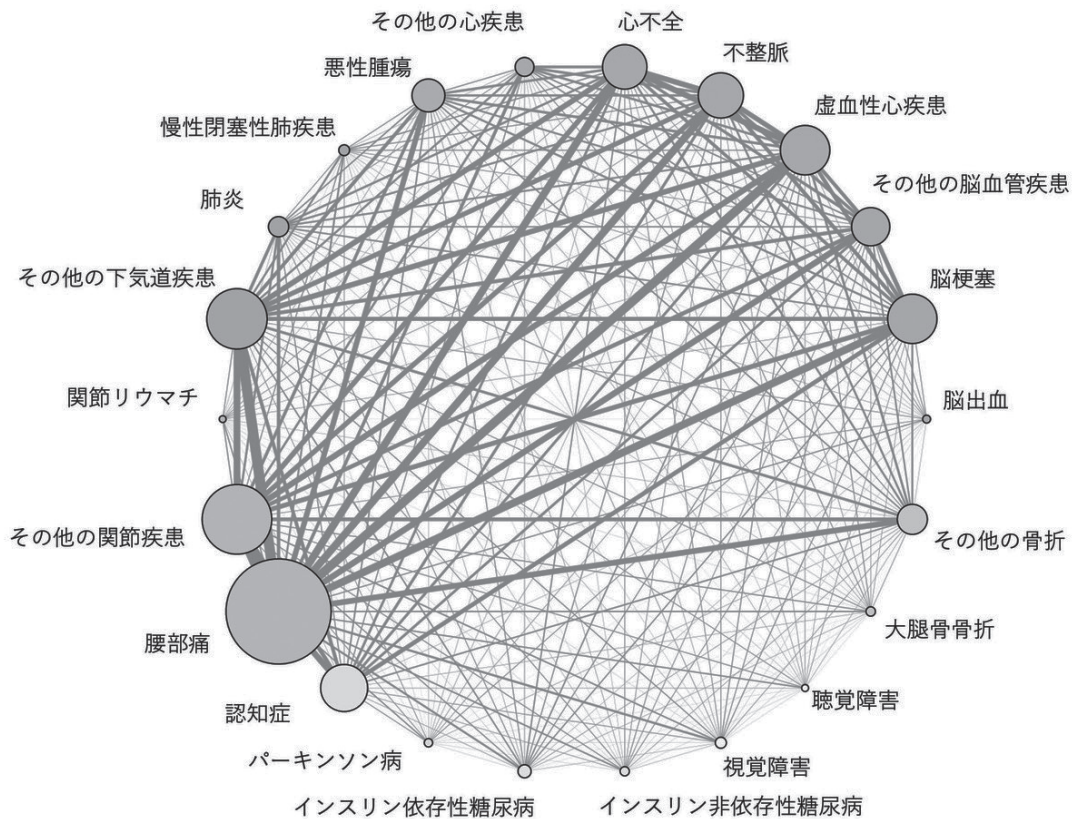


図1 観察された22疾患の相互関係を示したネットワークプロット

Note：円の大きさは疾患を持っていた患者数を、線の太さはつながっている2つの疾患を持つ患者数をそれぞれ表現している。

結果、6つの臨床サブタイプ（①筋骨格系疾患・感覚機能異常タイプ、②心疾患タイプ、③神経疾患タイプ、④呼吸器疾患・悪性腫瘍タイプ、⑤インスリン依存性糖尿病タイプ、⑥その他）が同定された。図2に本研究全体および同定された臨床サブタイプ別の22疾患の内訳を示した。他の市（千葉県山武市）のデータでも同様の解析を行い、同様の6つのサブタイプが同定された。

この機械学習は人工知能による解析方法の一つで「大量のデータをもとに、事前に決めてあるデータ処理用のプログラムに基づいて、機械が自己学習をしながら自動的に意思決定をする」方法<sup>4)</sup>とされている。機械学習には「教師あり機械学習」「教師なし機械学習」「半教師あり機械学習」などがあり、機械が学習する際の方法として、正解のラベルが事前につけられているものを『教師あり』と呼び、正解のラベルが事前につけられていないものを『教師なし』と呼ぶ。教師あり機械学習は分類や予測に用いられ、教師なし機械学習はクラ

スター分析の手法として用いられることが多い。教師なし機械学習によるクラスター分析を実施することで、研究者の目では見えていないグループ分けを行うことが可能とされる<sup>4)</sup>。

### 同定された臨床サブタイプの予後

さらに同定された臨床サブタイプごとの「全ての原因による死亡」と「2年後の介護度の変化（特に悪化）」についても評価を行った。医学の世界では、このような「将来の見通し」を指す場合に『予後』という言葉を用いる。予後を評価する際に年齢、性別、初回認定時の介護度で調整を行った。臨床サブタイプごとの生存率について Kaplan-Meier 曲線を作成した（図3）。多変量コックス比例ハザードモデルという統計学的手法を用いて死亡について検討したところ、筋骨格系疾患・感覚機能異常タイプを基準とした時に、心疾患タイプの調整ハザード比1.22 [95%信頼区間 1.05-1.42]、呼吸器疾患・悪性腫瘍タイプは同1.81

	全体 N=4,648 (100)	筋骨格系疾患と 感覚機能異常タイプ n=1,025 (100)	心疾患タイプ n=729 (100)	神経疾患タイプ n=765 (100)	呼吸器疾患と 悪性腫瘍タイプ n=421 (100)	インスリン依存 性糖尿病タイプ n=371 (100)	その他 n=1,337 (100)
脳出血	209 (4.5)	3 (0.3)	11 (1.5)	21 (2.8)	7 (1.7)	164 (44.2)	3 (0.2)
脳梗塞	1,304 (28.1)	50 (4.9)	204 (28.0)	557 (72.8)	80 (19.0)	158 (42.6)	255 (19.1)
その他の脳血管疾患	1,011 (21.8)	67 (6.5)	197 (27.0)	450 (58.8)	66 (15.7)	152 (41.0)	79 (5.9)
虚血性心疾患	1,307 (28.1)	208 (20.3)	533 (73.1)	236 (30.9)	135 (32.1)	105 (28.3)	90 (6.7)
不整脈	1,195 (25.7)	103 (10.1)	524 (71.9)	199 (26.0)	133 (31.6)	85 (22.9)	151 (11.3)
心不全	1,174 (25.3)	107 (10.4)	592 (81.2)	120 (15.7)	189 (44.9)	83 (22.4)	83 (6.2)
その他の心疾患	496 (10.7)	31 (3.0)	344 (47.2)	38 (5.0)	30 (7.1)	29 (7.8)	24 (1.8)
悪性腫瘍	871 (18.7)	254 (24.8)	127 (17.4)	86 (11.2)	187 (44.4)	87 (23.5)	130 (9.7)
慢性閉塞性肺疾患	285 (6.1)	4 (0.4)	16 (2.2)	10 (1.3)	240 (57.0)	5 (1.4)	10 (0.8)
肺炎	534 (11.5)	43 (4.2)	88 (12.1)	59 (7.7)	243 (57.7)	70 (18.9)	31 (2.3)
その他の下気道疾患	1,596 (34.3)	366 (35.7)	338 (46.4)	257 (33.6)	364 (86.5)	104 (28.0)	167 (12.5)
関節リウマチ	180 (3.9)	71 (6.9)	38 (5.2)	28 (3.7)	32 (7.6)	4 (1.1)	7 (0.5)
その他の関節疾患	1,840 (39.6)	692 (67.5)	388 (53.2)	369 (48.2)	147 (34.9)	83 (22.4)	161 (12.0)
背部疾患	2,777 (59.8)	917 (89.5)	546 (74.9)	590 (77.1)	281 (66.8)	163 (43.9)	280 (20.9)
認知症	1,245 (26.8)	88 (8.6)	138 (18.9)	331 (43.3)	75 (17.8)	34 (9.2)	579 (43.3)
パーキンソン病	221 (4.8)	40 (3.9)	13 (1.8)	98 (12.8)	4 (1.0)	6 (1.6)	60 (4.5)
インスリン依存性糖尿病	346 (7.4)	20 (2.0)	54 (7.4)	2 (0.3)	47 (11.2)	218 (58.8)	5 (0.4)
インスリン非依存性糖尿病	244 (5.3)	62 (6.1)	37 (5.1)	94 (12.3)	15 (3.6)	6 (1.6)	30 (2.2)
視覚障害	293 (6.3)	91 (8.9)	29 (4.0)	107 (14.0)	18 (4.3)	32 (8.6)	16 (1.2)
聴覚障害	184 (4.0)	72 (7.0)	24 (3.3)	54 (7.1)	17 (4.0)	3 (0.8)	14 (1.1)
大腿骨骨折	249 (5.4)	94 (9.2)	71 (9.7)	4 (0.5)	17 (4.0)	34 (9.2)	29 (2.2)
その他の骨折	796 (17.1)	394 (38.4)	140 (19.2)	93 (12.2)	46 (10.9)	46 (12.4)	77 (5.8)

図2 本研究全体および同定された臨床サブタイプ別の22疾患の内訳

Note：全体および臨床サブタイプ別の患者数とその臨床サブタイプ内における疾患の割合（カッコ内）を示す。太枠で囲まれた疾患は、全体と比べた場合や各臨床サブタイプ内で比べた場合に頻度が高く、各臨床サブタイプの特徴と考えられた。

[1.54-2.13]、インスリン依存性糖尿病タイプは同1.21[1.00-1.46]であった。ハザード比が1を超えていると、基準と比べて「より早期に死亡しやすい」という解釈になる。また、多変量ロジスティック回帰モデルという統計学的手法を用いて2年後の死亡を含む介護度の悪化について検討したところ、筋骨格系疾患・感覚機能異常タイプを基準とした時に、心疾患タイプの調整オッズ比は1.39[95%信頼区間1.08-1.80]、呼吸器疾患・悪性腫瘍タイプは同2.29[1.67-3.15]、その他タイプは同1.47[1.18-1.83]であった。オッズ比が1を超えていると、基準と比べて「介護度が悪化しやすい」という解釈になる。

### 結論と今後の展望

新規要介護認定を受けた高齢者を22疾患の組み合わせでグループ分けした結果、6つの臨床サブタイプに分けられることが分かった。各臨床サブタイプは予後が異なり、筋骨格系疾患・感覚機能異常タイプと比べて死亡リスクが高い臨床サブ

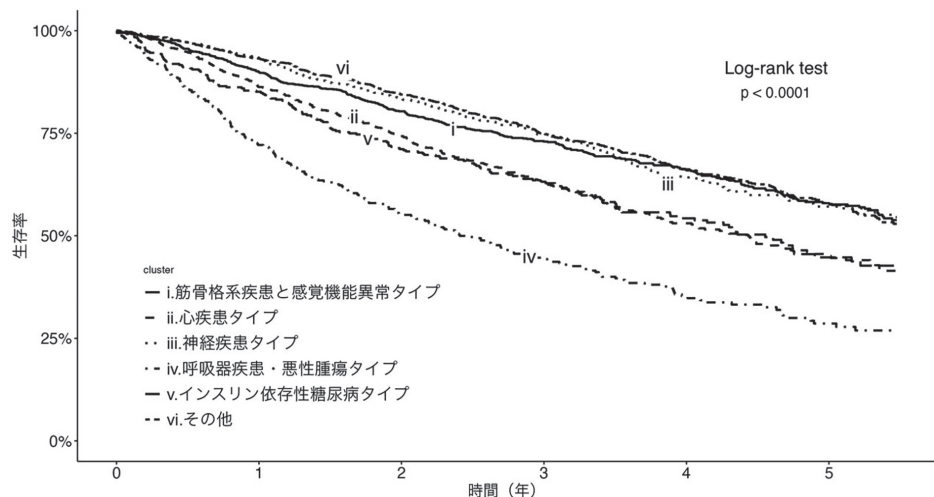


図3 臨床サブタイプ別の Kaplan-Meier 生存曲線

タイプとして心疾患タイプ、呼吸器疾患・悪性腫瘍タイプ、インスリン依存性糖尿病タイプが、介護度悪化のリスクが高い臨床サブタイプとして心疾患タイプ、呼吸器疾患・悪性腫瘍タイプ、その他が明らかになった。

今回明らかになった臨床サブタイプを介護ケア現場で参考にしていただくことで、対象者のより正確な予後（死亡や介護度悪化）が予測できるようになる。これにより、利用する介護サービスの選択や将来に対するさまざまな準備について関係者が意見を一致させやすくなることが期待される。また本研究で同定した臨床サブタイプごとに最適化された介入方法を研究開発すれば、医療政策にも応用できる可能性がある。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人医療科学研究所（2023年）と厚生労働科学研究費補助金（23AA2003）の助成を受けて実施された。

## 引用文献

- 1) Tamiya N. et al. Lancet 378: 1183-1192, 2011.
- 2) Mitsutake S. et al. Prev Chronic Dis 16: E11, 2019.
- 3) Iwagami M. et al. Ann Clin Epidemiol 1: 56-68, 2019.
- 4) Bi Q. et al. Am J Epidemiol 188: 2222-2239, 2019.



伊藤 裕司（いとう・ゆうじ）

筑波大学客員研究員。2007年に名古屋大学医学部卒業し、初期研修修了後から総合内科医として勤務。2014年より中東遠総合医療センター着任し、臨床研修センター長として研修医教育にも関わる。2023年にハッピーヘルス・ラボを起業。地域医療に関わり始めるタイミングで筑波大学 田宮教授・岩上教授のもとで研究生として学び、本論文を執筆した。集中して作業する時にはX JAPANやhide、メロディックメタルを聞くようにしている。



岩上 将夫（いわがみ・まさお）

筑波大学医学医療系教授。2008年東京大学医学部、初期研修、内科後期研修の後、2013年東京大学公衆衛生学修士、2014年英国ロンドン大学疫学修士、2018年同博士。2018年より筑波大学医学医療系ヘルスサービスリサーチ分野に助教として着任、2022年より准教授、2024年5月より現職。専門は疫学、公衆衛生学、内科学。



田宮 菜々子（たみや・ななこ）

筑波大学医学医療系教授。1986年筑波大学医学専門学群卒業、1990年東京大学大学院医学研究科博士課程（医学博士）、1994年米国ハーバード大学公衆衛生学部修士課程修了。1999年南大和老人保健施設施設長、2000年帝京大学医学部衛生学公衆衛生学教室講師などを経て、2003年筑波大学ヘルスサービスリサーチ分野教授、2017年 筑波大学ヘルスサービス開発研究センター長兼任、日本公衆衛生学会理事（2017年～現在）、2023年 第82回日本公衆衛生学会総会学会長。

# 宇宙創成「インフレーション」の謎に迫る

## 簡単かつ直観的な方法で原始重力波の計算が可能に

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 浦川 優子

### はじめに～宇宙インフレーション～

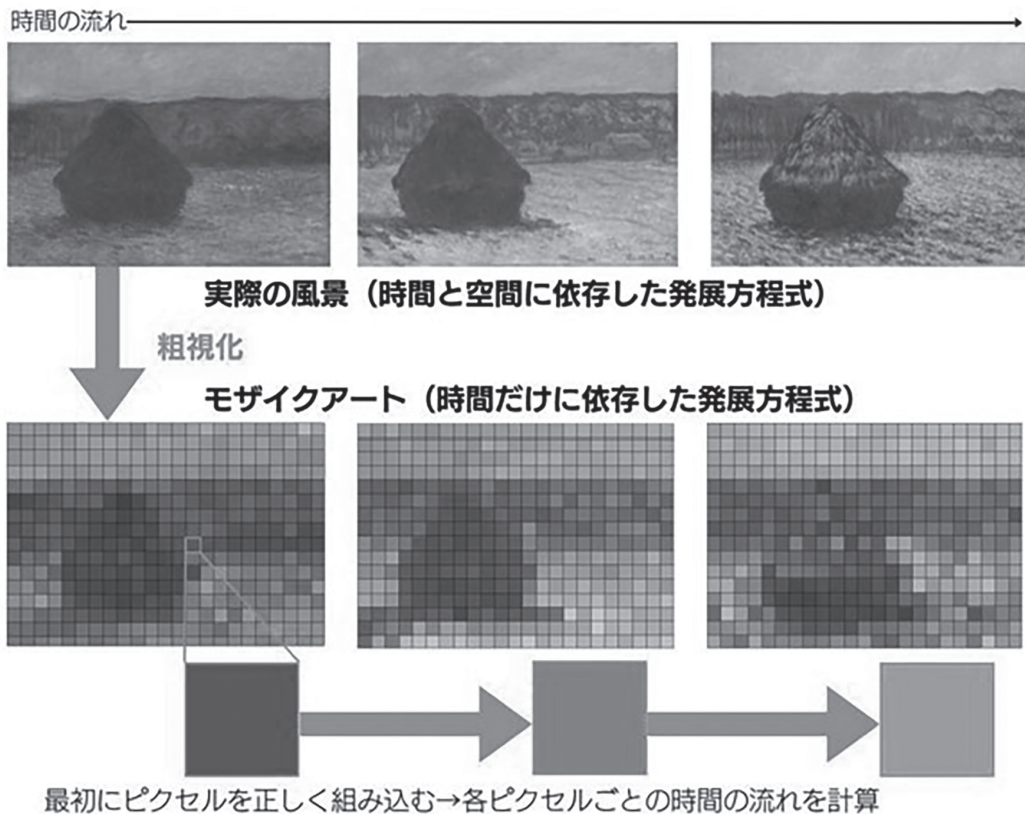
約138億年前、小さな宇宙は非常に高温・高密度の状態から膨張し、徐々に冷却されながら現在の広大な宇宙が形成されました。このビッグバン理論は、宇宙背景放射や銀河の後退速度などさまざまな観測結果を説明し、宇宙の進化と構造形成を理解するための基本的な枠組みを提供しています。しかし、この理論にはいくつかの未解決の問題がありました。たとえば、宇宙が誕生してから約38万年後、宇宙は非常に均一で、どの場所もほぼ同じ温度を持っていたことが宇宙背景放射の観測からわかっています。さらに、わずかな温度の濃淡が存在していたことも判明しました。ビッグバン理論では、この均一性や温度の濃淡を十分に説明することができませんでした。

この問題を解決するために、1981年に佐藤勝彦やアラン・グース（米国）らによって提案されたのがインフレーション理論です。この理論では、宇宙創生直後のごく短い時間に膨張速度をスピードアップしながら宇宙は急速に膨張したとされています。この急激な膨張により均一な性質を持っていた宇宙の一部が広域に広がった結果、現在観測できる宇宙の空間領域がほぼ均一になります。一方で量子力学によると、量子的な場の値は一定の値に定まらず微小な揺らぎを持ちます。この揺らぎは「量子揺らぎ」と呼ばれています。インフレーションを引き起こした真空のエネルギーには量子的な揺らぎがあるため、宇宙の場所ごとに密度はほんの僅かに異なっていました。この僅かな濃淡が急速な加速膨張によって引き伸ばされ、生

まれたばかりの原始宇宙の空間分布を決める巨視的な密度の濃淡（揺らぎ）となったと考えられています。インフレーションが予言する原始密度揺らぎは宇宙背景放射や銀河分布など様々な観測データを統合的に説明できるため、インフレーションは創生直後の宇宙を説明する標準的な理論として広く受け入れられるようになりました。

宇宙の創生直後に起こったとされるインフレーションは、いわば宇宙進化を解く際の初期条件を与えるものです。各インフレーション模型が予言する初期条件をもとに宇宙の進化計算を行うことで、異なるインフレーション模型は現在の宇宙の異なる姿（異なる空間分布）を予言することがわかります。各模型の理論的予言を最新の宇宙観測のデータと比較することにより、どのインフレーション模型が我々の宇宙史と整合的なのか調べることができます。

近年のWMAP衛星、PLANCK衛星による宇宙背景放射の温度揺らぎの精密な観測などからインフレーションを引き起こした真空のエネルギーの大きな性質はわかってきました。しかしながらこの真空のエネルギーの正体は素粒子標準理論では説明することができません。宇宙創世直後の加速膨張期であるインフレーション期間中は、地上のあらゆる加速器実験で到達可能なエネルギーを凌駕する非常に高い真空のエネルギーで宇宙が占められていた可能性が高いと考えられています。このためインフレーションを引き起こした真空のエネルギーの正体を調べることは、超弦理論に代表される超高エネルギーの世界の物理法則の検証につながると期待されています。



図：分割宇宙アプローチのイメージ。実際の宇宙は上段のように場所ごとに異なる非一様な空間分布をもつため、宇宙の進化を解くには時間と空間に依存した方程式を解く必要があります。これを下段のモザイクアートのように粗視化することで、時間だけの方程式を単色の各ピクセルごとに解きます。(裏表紙にカラーで掲載)

## 分割宇宙アプローチから「起源」に迫る

宇宙の観測からインフレーション模型を探る際には、非線形効果と呼ばれる微小な効果を検出することで模型の詳細な情報を引き出すことができます。非線形効果の計算は一般に非常にとも複雑になりますが、原始密度揺らぎについては非一様な宇宙の空間分布をモザイクアートのように粗視化して捉え直す「分割宇宙アプローチ」という簡単な計算方法が1990年代に確立され、幅広く用いられてきました。分割宇宙アプローチでは場所ごとに異なる密度をもつ非一様な宇宙を小さく分け、同じ密度からなる小さな宇宙の集合体と捉え直します。図に示されるように、それはあたかも無数の単色のピクセルを組み合わせて多様な色彩の絵を作り出すモザイクアートのようなものです。

このように捉え直すことによって、非一様な密度揺らぎの時間発展を解く複雑な作業を、単色の

各ピクセルに対応する一つ一つの分割された宇宙の時間発展を解く作業に置き換えることができます。一つ一つの分割宇宙は一樣いわば単色なのでその進化を解くには時間だけの関数からなる(常微分)方程式を解けば十分なため、劇的に進化計算のコストを下げるすることができます。インフレーション宇宙の詳細な空間分布を知るにはモザイクアートのように粗視化された宇宙の情報だけでは不十分ですが、宇宙の観測から確かめることができるのはインフレーション宇宙の非常に粗い精度の空間分布だけであることがわかっています。

分割宇宙アプローチを用いて密度揺らぎを計算する方法は「デルタN形式」と呼ばれています。デルタN形式を用いることで、様々なインフレーション模型における原始密度揺らぎの非線形進化を簡単な計算から求めることができるようになりました。得られた理論予言と宇宙の観測データを比較することで、データと整合しないインフレーション模型が棄却され、模型の淘汰に繋がってき

ました。

## 原始宇宙からやってきた重力波

アインシュタインが提唱した一般相対性理論によると、時空の歪みはさざ波のように時空間を伝播し、この波は重力波と呼ばれています。2015年にはレーザー干渉計重力波観測所（LIGO）が初めて重力波の直接観測に成功し、物理学の新たな扉を開きました。2019年からは岐阜県飛騨市の地下に設置された大型重力波干渉計（KAGRA）も加わり、現在までにブラックホール及び中性子星の衝突現象に由来する重力波が多数観測されており、重力波天文学が急速に発展しています。

重力波天文学が急速に発展する中、インフレーション期間中に密度揺らぎと同様に量子揺らぎを通じて生じたとされる「原始重力波」にも注目が集まっています。原始重力波にはインフレーションの模型に関する重要な情報が刻まれています。例えばインフレーションを引き起こした真空のエネルギーの大きさは密度揺らぎの観測のみからは決めることができませんが、原始重力波を観測することで決定できると考えられています。原始重力波の確定的な観測は現在のところありませんが、原始重力波を探索するいくつかの実験事業が進行中で検出への期待が高まっています。

重力相互作用は自然界に存在する4つの力の中でも特に弱いため、原始宇宙で作られた重力波はいわば化石のように良い保存状態で我々に太古の宇宙の姿を伝えてくれます。原始重力波が観測されれば、密度揺らぎの観測だけからはわからなかった創生直後の原始宇宙の姿の理解が飛躍的に進むと考えられています。

## 原始重力波研究の課題と分割宇宙アプローチ

原始重力波の観測を原始宇宙の理解へとつなげるためには、高エネルギー基礎理論が预言する多様なインフレーション模型でどのような原始重力波が作られるか理論的に预言する必要があります。しかし原始重力波を模型ごとに見積もる理論計算は一般にとっても複雑で、原始重力波の非線形効果を計算するには多くの場合コンピューターを使った計算が必要でした。その原因の一つは、重

力波については分割宇宙アプローチを用いた計算手法がわかっていないことにありました。分割宇宙アプローチでは非一様な宇宙を小さく分け均一な小さな宇宙の集合体として捉え直しますが、となり合う宇宙を正しく配置しなければ全ての方程式が整合的に満たされません。このとなり合う小さな宇宙の関係を決めるプロセスが、空間を歪ませる重力波が存在するととても複雑になることが困難の原因でした。

2021年から2024年にかけて京都大学田中敬浩教授と共同で行った一連の研究において、となり合う宇宙の関係を決める簡単なアルゴリズムを見出すことに成功しました。この結果、原始密度揺らぎの分割宇宙アプローチを用いた計算方法の確立以降四半世紀以上に渡って閉ざされていた扉を開け、幅広いインフレーション模型が预言する原始重力波を分割宇宙アプローチを用いて簡単な計算から調べることが可能にしました。分割宇宙アプローチは宇宙の進化を直観的に理解する際にも役立つため、原始重力波の時間進化の過程についての理解を深化できると期待されています。

## 世界はどう変わるか？

分割宇宙アプローチを多様な宇宙模型で预言される原始重力波の計算に用いることができるようになったことで、創成直後の宇宙そして超高エネルギーな世界の物理法則を解明することに繋がると期待されます。例えば、インフレーション期間中には地上では作られない様々な性質（例として多様なスピン）を持つ粒子が作られていた可能性があり、それらの痕跡を探索することにより超高エネルギーの世界の物理法則を検証することができます。このような多様なスピンを持つ粒子が作り出す原始重力波の研究が進むことが期待されます。

## 終わりに

原始重力波に関する一連の研究は私自身にとってはとても思い出深いものとなりました。というのも私事になりますが、この研究に従事していた期間に二度の妊娠と出産を経て、慣れない育児に奔走する中で取り組んでいたためです。基本的な



浦川 優子 (うらかわ・ゆうこ)

アイデアについて悩んでいた時期に1人目の出産を迎え陣痛が始まってからも共同研究者とメールのやり取りをしていたことが思い出されますが、一連の成果をまとめた論文(2024年6月にPhysical Review Letters誌に発表)の投稿日が2人目出産当日と重なったことには数奇な縁を感じます。共同研究者の田中貴浩氏、いつも研究活動を支えてくれる夫、両親、そして元気にすくすく育ってくれた2人の子供たちに心より感謝申し上げます。

短歌 人間は悩む

松崎 健一郎

純米酒の一升瓶を飲みて知るその酒蔵の技とことごと  
百本の一升瓶を年ごとに飲みてもちたる酒のものさし  
いま聴けば昭和の香り私鉄駅の伝言板やダイヤル電話  
性豪と言はれた男も淫蕩の女も老いて一期なる夢  
若くして記憶失ふといふ映画 過去を背負うておのれはあるを  
おのがことで手いつばいにてひとはあれどもらい泣きする夜もあるなり  
すぐれてゐるひとはすぐれてゐるゆゑの悩みもつらむ悩むなりひと  
半年の余命と言はれたる友を生者の岸にて見てゐるころ  
二段つつ駅の階段のぼると誇りし友の葬儀(かみ)にをりぬ  
傾きゆくわれのいのちと思ふとき死者たち列(なら)ぶ最後尾見ゆ

(まつざき・けんいちろう)

1947年茨城県生まれ。東北大学文学部卒業。水戸市在住。  
著書に『親鸞像』、『起源の物語』『常陸国風土記』、『吉本隆明 異和』、共  
編著に『三・一一 その日その夜、そしてひと月』、歌集に『仕事と日々』  
(茨城文学賞受賞)、『死者たちの時』(茨城県歌人協会賞受賞)ほか2冊  
がある。

# ダイヤモンド電極で微量水銀を見逃さない 前処理不要で現場検査が可能な高感度センサを目指して

産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター 竹村 謙信

## 1. はじめに

国内の化学工場から排出されたメチル水銀が川や海に住む魚介類に吸収され、それを食べたことで後に水俣病と呼ばれる神経疾患が発生しました。水銀は環境中に放出されると長距離にわたり大気中を移動します。環境残留性と生物蓄積性、最終的に人体へ取り込まれた際の重大な悪影響を及ぼすため、厳密に管理される必要があります。2017年に発行された水俣条約は109カ国が締結しており、世界中で水銀管理が重要視されていることが分かります。

水銀は私たちの安全な暮らしを守るために、様々な基準値が設けられています。特に土壌は畑・家・商業施設や道路など私たちの生活の基盤であるため $0.5 \mu\text{g/L}$ 以下（ $\mu\text{g}$ は100万分の1グラムの単位）の環境基準値が設けられています。非常に低濃度であるため、政府が定める公定法では大型の機器による高精度分析が使用されています。また、検体についても測定に影響を与える土そのものや夾雑物を取り除くために酸溶出、フィルタリング、超音波処理などの多段階前処理が必須となります。前処理を十分に行った土壌溶出液を検体として扱うことで、高精度な測定を実現しています。検査には専門性と設備が必須となり、敷居が高いのが現状です。

## 2. 電気化学測定

物質の酸化還元は私たちが教育課程で習う最も身近な化学反応です。酸化還元は物質間の電子の

授受を示します。電気化学はその反応プロセスで生じる電子を電極で捉え、電流値として測定することが可能な測定法です。さらに電圧をコントロールすることで、特定の物質を電極上で酸化還元させることもできます。比較的簡易な装置で高精度機器と同程度の検出感度を示すため水銀検出法として多数の研究が実施されてきました。具体的には溶液中に存在する水銀イオンを還元電圧印加でセンサ上に粒子化して濃縮し、酸化電圧を印加することで粒子化した水銀をイオン化します（図1）。電極上で粒子化した水銀が再びイオン化すると、電極には電子が供給されます。この時に生じる電流値の増加を基に水銀の有無を判断することが可能です。電気化学測定法の特徴は濃縮という工程を検出に組み込むことで高感度な測定が実現することです。この有用性から電気化学測定装置は国内外で小型化したものが市販され、重金属測定専用の装置も既に市販されています。一方で、現場測定することが可能な装置は未だ実現していません。大きな理由の一つは夾雑物の影響が非常に大きい測定法であるためです。例えば土壌

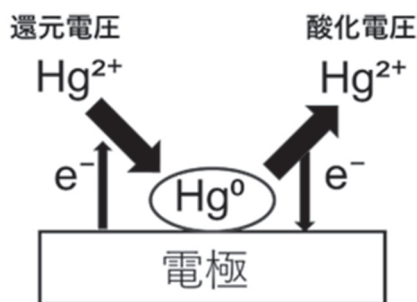


図1. 水銀の電気化学的酸化還元の概要

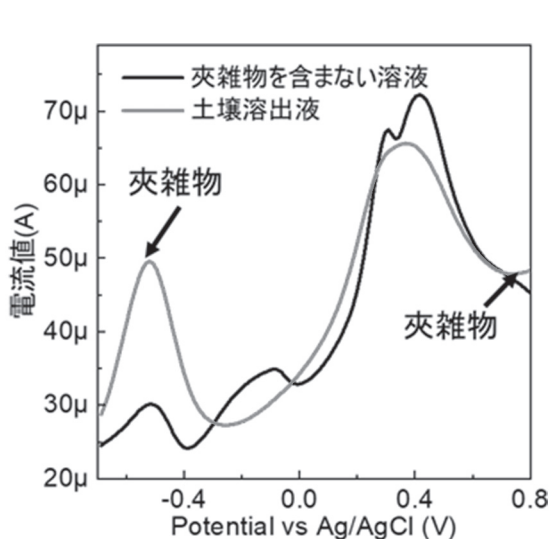


図2. 夾雑物の有無による電気化学測定結果の信号差

※原論文の図を引用・改変したものを使用しています。クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示 4.0 国際）

中には微生物などが大量に存在しており、検査用の溶出液を前処理なしで電気化学測定に用いた場合、電極界面や溶液中でタンパク質が大量に存在する測定環境となります。タンパク質は基本的に電気を通さないため、結果として電気化学測定で得られる信号が小さくなります。水銀のように微量な物質を検出する必要がある場合にはそもそものピーク信号が小さいため、感度を維持するため

に溶液からは夾雑物を取り除く必要があります。もう一つの大きな理由は定量を目的とした際の検量線の作製です。電気化学測定は溶出液に含有される物質に依存して信号が大きくなります。正確な定量を行うためには溶液ごとに検量線を用意する必要があります。水銀を対象とする場合、現場で測定するためには毒物である水銀の標準試薬を持ち運ばなければなりません。現場検出のために毒物取り扱いが可能な専門の人員を配置しなければならないため、現実的ではありません。

本稿では電気化学測定系が抱える実装を妨げる2つの課題点を解決した著者らの研究成果についてご紹介します[1]。

### 3. 濃度判定という視点

電気化学を用いた定量試験は事前に作製した検量線に測定結果を当てはめて算出するという一般的な測定法と同様の手順を必要とします。最も重要な条件は検体と検量線作製に用いた溶液や測定環境を一致させることです。夾雑物の有無で測定結果は大きく変わります（図2）。現場測定を想定した場合、こうした細かい作業を実施することは現実的ではありません。測定する溶出液を準備したら、簡易な下準備と1度の測定で結果が分かることが必要となります。これを実現するために著者らは水銀の測定したい濃度に対して、○×判

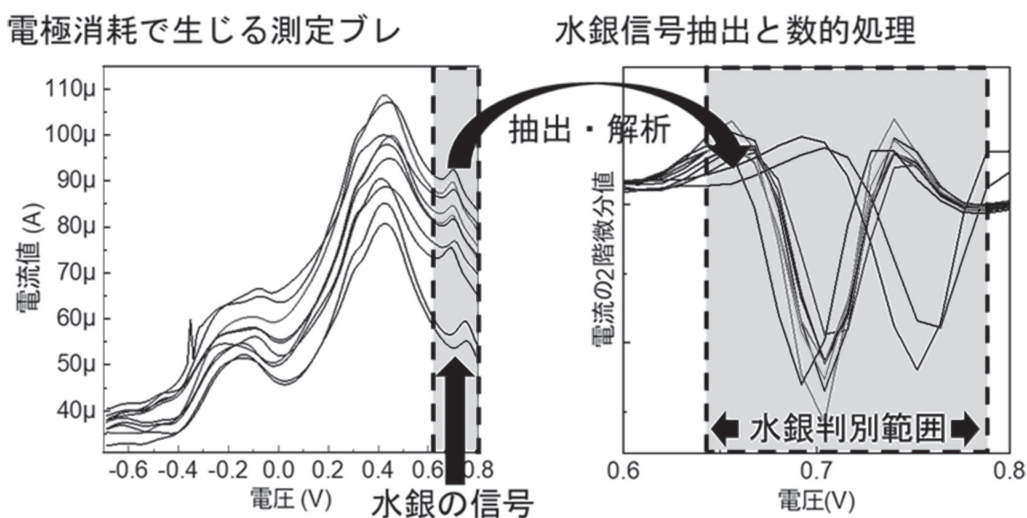


図3. 電極消耗による電流値低下とデータ処理による測定差の解消

※原論文の図を引用・改変したものを使用しています。クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示 4.0 国際）（裏表紙にカラーで掲載）

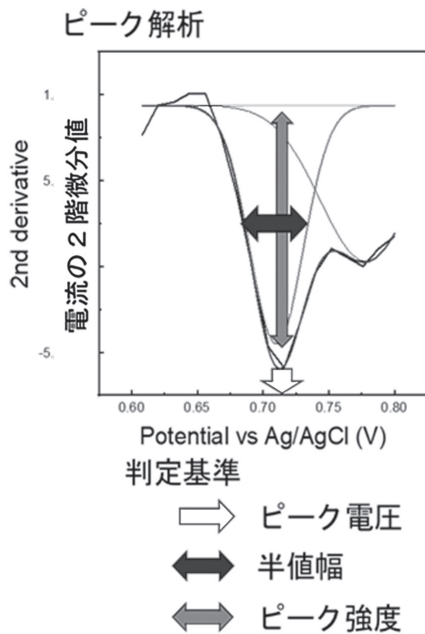


図4. 電気化学測定結果の解析・判定の概要図  
 ※原論文の図を引用・改変したものを使用しています。クリエイティブ・コモンズ・ライセンス (表示 4.0 国際)

定ができる測定系を考案しました。具体的には土壌や地下水の環境基準値である0.5 ppb (ppbはParts Per Billionの略で10億分率のこと。1ppb=0.0000001%) という数値に対して、検体中の水銀量が超えているか、超えていないかを精度よく判定することを可能にする手法です。

#### 4. 二階微分による電極差の解消

著者らは以前の研究で重金属を高感度に検出可能な金ナノ粒子修飾ホウ素ドーパダイヤモンド電極(以下AuNP-BDD)を開発しています[2]。この電極は水銀0.10ppbという超低濃度の検出を可能にします。AuNP-BDDは高感度ですが作製時の個体差と繰り返し利用による経時的な消耗が課題でした。同じ条件での測定であっても印加した電圧に対してAuNP-BDD電極に流れる電流量には電極の状態に依存する大きな差が生じるという課題がありました。一方で、測定波形については電極材料によって決定するため、波形の特徴を基とした解析を実施することで溶液に依存した電流値の差を解消することが出来ます。著者らは“変化の割合の割合”すなわち二階微分をみるのが最も単純

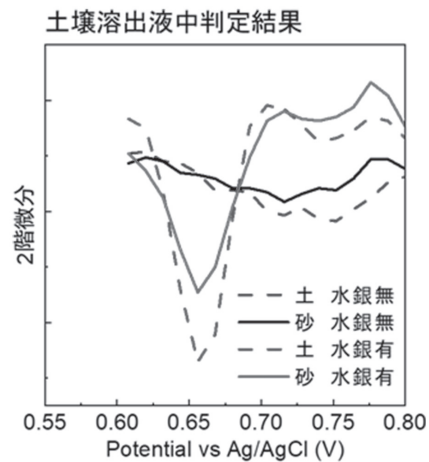


図5. 土壌溶出液中水銀の測定結果  
 ※原論文の図を引用・改変したものを使用しています。クリエイティブ・コモンズ・ライセンス (表示 4.0 国際) (裏表紙にカラーで掲載)

な解決手法であると考え、光学的手法でもよく使用されている微分法を適用しました。結果として、ランダムな損耗率の電極10本を使用した10 ppbの水銀検出試験により得られたグラフに二階微分を施すことで電極差による電流量の差を簡単に解消することに成功しています (図3)。

#### 5. 特定濃度の水銀がピークを示す条件の設定

水銀の電気化学信号強度は電極上で再イオン化した水銀の量に依存します。そのため、測定したい濃度の水銀が電極上に粒子化する条件を正確に設定することで濃度の判定が可能になります。本研究では水銀未添加の土壌溶出液を含む様々な溶液74検体からバックグラウンド信号やノイズ信号をデータ化しました。このデータを基に極低濃度の水銀が存在する際にピークとして認識できる測定の見出し、濃度判定範囲を設定しています (図4)。なお、濃度判定は二階微分を施した結果から実施しています。使用する数値はピーク位置、ピーク強度、半値幅となります。ピーク位置と半値幅は水銀以外の夾雑物が電流ピークを水銀近傍で発生させた場合の誤判定を防ぎ、ピーク強度は判定したい濃度未満の水銀もしくは外的要因 (衝撃等) による瞬間的な測定ブレによる誤判定を防ぎます。

## 6. 特定濃度の水銀検出

濃度判定を実現するためにきれいな溶媒中における特定水銀濃度の測定条件を設定しました。使用したパラメータは設定した濃度判定数値を満たす量の水銀が電極上に粒子化するまでの時間（以下電着時間）です。実際に0.1ppbから0.5ppbまで最適な電着時間を設定すると判定基準を満たしたピーク波形を得ることが可能になります。本研究の特性上、高濃度の水銀溶液に対しては濃縮手順が要らずに十分な強度を示すため、高濃度検体の濃度判定は不可となります。濃度判定が可能な範囲は狭い手法ですが、検量線を作製することなく環境中の微量な水銀の濃度判定を実施することが出来ます。対象となる検体は基本的に微量水銀の検査を目的としているため、本手法は簡易検査のための測定・解析手法として有効です。

## 7. 土壌溶出液からの低濃度水銀検出

本研究における最も重要な課題が前処理を十分に施していない土壌溶出液中においても微量水銀を検査可能であるかという点です。本研究では市販されている砂と土から作製した溶出液を用いて評価を行っています。どちらの溶液も前処理は大きな粒子を取り除くためのろ紙を使用した濾過のみです。微粒子などはろ紙の孔を通過するため、特に土から作製した溶液は茶色く、夾雑物が多い検液となりました。2種の土壌溶出液を用いて本手法による微量水銀検査を実施すると、0.5 ppbの水銀をきれいな溶媒中と同条件で検出することに成功しています。（図5）夾雑物が電極に付着することで、溶液との反応性低下や電流値の減少



竹村 謙信（たけむら・けんしん）

2016年静岡大学農学部卒業、2018年静岡大学大学院修士課程修了、2021年同大学博士課程修了、工学博士号取得。2021年4月より産業技術総合研究所センシングシステム研究センターに入所。

が生じます。前者は溶液と接触する面積を増やすことが可能なナノ粒子の使用により解決し、後者は本研究で考案した解析技術により解消しています。この結果より、実際の土壌溶出液においても本手法が機能していることが示されました。

## 8. おわりに

本稿では著者らの最近の研究成果を基に、水銀の簡易検査キット実現に向けた研究開発内容を紹介しました。夾雑物に大きく影響されてしまうが、高感度な電気化学測定系を解析技術と組み合わせることにより安定かつ高感度な測定系としています。水銀は環境中を常に循環しており、土壌だけでなく地下水などにも新たな汚染が発生する可能性があります。環境に放出された水銀は生物によって濃縮され、摂食によって私たちに影響を及ぼす危険な物質です。そのためにも厳しく規制・監視されるべきであり、国を挙げて管理されています。本手法は水銀検査のアクセシビリティを向上し、より手軽に誰でも環境中の水銀を検査することが出来るようになる可能性がある技術です。今後は現場での測定実現を目指し、簡易測定装置の試作を実施していきます。

### 参考文献

- [1] Kenshin Takemura et al., *Nanomaterials*, 14, 11, 981, 2024.
- [2] Kenshin Takemura et al., *Nanomaterials*, 12, 10, 1741, 2022.

# 「CROSS Reports」創刊

## J-PARC MLF での利用促進活動を発信

総合科学研究機構 中性子科学センター 研究開発部 松浦 直人

CROSS 中性子科学センターは、CROSS 職員の様々な活動を見える化し、内外部への情報共有、人材育成、CROSS 活動の外部発信することなどを目的とした「CROSS Reports」を 2023 年 12 月に創刊いたしました。

### CROSS Reports 創刊の背景

現在、世の中のデジタル化の進展に伴い、様々な場面でデータ公開が求められています。CROSS 中性子科学センターでは、J-PARC MLF の利用を促進すべく様々な活動を行っていますが、それらの活動は、内容によって、CROSS 内で情報が閉じるもの、MLF 内で周知されるもの、外部に発信されるものに分かれます。論文成果やプレスリリースは外部に向け発信される最たるものですが、それ以外にも外部の人にとって有益な情報を含む活動が数多くあります。

例えば、ユーザーの利便性を向上させるシステムの開発や試料環境機器の開発などは、論文に必要な新規性が無くても同様な開発を進めている人にとって有益な情報が含まれています。また、外部の人のみならず、CROSS 内部においても技術や知識の継承という観点で、開発活動を記録としてまとめることは重要です。加えて、成果として見やすい論文という形にならない活動を見える化し、きちんと評価することは人材育成の観点からも求められています。

### CROSS Reports の対象

CROSS で進めている利用促進活動には、支援、促進、2つのサイクルがあり、それらを両輪とし

て活動を進めています。支援サイクルは、課題申請時のサポートから始まり、課題選定、実験準備、実験支援、解析支援により成果創出へと導いたのち、さらに、成果分析、広報活動により新たな申請へと繋げるサイクルです。促進サイクルは、社会やユーザーのニーズを組んだ技術開発や利用環境整備、先導的研究によって新たなニーズや実験手法、解析手法を先導していくサイクルです。

支援サイクルにおける CROSS Reports の対象としては、CROSS 利用推進部が進めている MLF 成果分析、プロジェクトの報告書、CROSSroads 研究会の資料集などがあります。

促進サイクルに関しては、(1) 実験の高度化及び高効率化のための技術開発あるいは先導的研究、(2) 産業利用促進に資する共同研究開発、(3) 他機関との連携利用促進や人材育成に資する研究開発などの目的に対し、CROSS 開発課題というチームタイム枠が設けられており、CROSS 開発課題の中でも論文化しにくい開発や先導研究は、CROSS Reports で発信されることを期待しています。また、ビームライン以外でも、CROSS 実験準備室で行われている基礎物性測定に関する開発や試料重水素化、解析情報グループが進めている解析の高度化・オンライン化、ユーザーの利便性を向上するユーティリティ構築などの活動も対象の1つです。これら利用促進の両輪に関わる様々な活動を CROSS Reports で発信していければと思っています。

### CROSS Reports 発行形式

CROSS Reports は日本語での執筆を可とし、投



図 1 CROSS 機関リポジトリの画面例

稿された記事は、CROSS 内部で選んだ 3 人（サイエンスコーディネーター、グループリーダークラス、専門分野が近い人）から、下記の観点に基づくレビューを受け、レポートとしての一定の水準を保つよう努めています。チェック項目は、背景の十分な説明、記述の正確さ、図の分かりやすさ、一般読者への読みやすさ、後から同じことをやろうとした人に参考になる情報が過不足なく書かれているか、また公知にしてよい情報かどうか、MLF 関係者以外には不明な略語は無いかなど、MLF ならではのチェックも行っております。

CROSS Reports は、紙媒体での発行はせず、オンラインで公開する形式をとっております。オンラインでの公開にあたっては、CROSS 機関リポジトリ（→ CROSS ワード）の運用を開始し、記事に DOI を付与できるようにしました。DOI

（→ CROSS ワード）の付与により、参考文献として参照されることが期待されます。加えて、英語、日本語の両方で記述したタイトル、アブストラクト、キーワードを機関リポジトリで公開することで、図 1 に示すように機関リポジトリ内での検索や、google 等の web 検索で記事がヒットする確率が高まることも期待されます。

現在、CROSS Reports 記事は随時受け付けています。研究開発部の部次長（松浦・大石一城）がエディターを務め、2024 年 4 月からは、新しく着任した安部裕美が執筆者とのやり取りや校正を担当し、利用推進部の伊藤崇芳にはオンライン公開や CROSS 機関リポジトリへの登録などを行って貰い、発行しています。2023 年に発行された Vol.1 では

- J-PARC MLF BL11 でのスクリーンショットによる測定状況確認システム（岡崎伸生, 服部高典）
- MLF におけるガスフロー式調湿実験環境の運用（有馬寛, 森川利明）
- 動的光散乱法による成分分率評価法の検証（有馬寛, 上田実咲）

2024 年に発行された Vol.2 では

- 簡易型化学重水素化装置の開発（阿久津和宏, 上田実咲, 柴崎千枝, Zoë Fisher）
- J-PARC MLF BL17 におけるクラウドを使った実験状況モニタリングおよび解析システムの開発（笠井聡, 青木裕之, 永井佑樹, 阿久津和宏, 花島隆泰, 宮田登）

が掲載されています。是非、ご一読ください！

URL: <https://neutron.cross.or.jp/ja/cross-reports>

CROSS

ワード

機関デポジトリ

大学や研究機関が生産した電子的な知的生産物の管理・発信を行うために、その構成員に提供する一連のサービス

DOI (Digital Object Identifier : デジタルオブジェクト識別子)

論文などのコンテンツの電子データに付与される国際的な識別子。ブラウザ等に入力するとコンテンツの所在情報 (URI) に変換されるので、それを使ってコンテンツにリンクを張ることで、リンク切れを防ぐことができる

# 省エネ・省スペース! 「ゲタポン」の社会実装へ 神谷超高真空技術開発ラボ始動

日本原子力研究開発機構 / J-PARC センター 神谷 潤一郎

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）で生まれた成果の社会実装を進めるための研究開発チーム、「パイオニアラボ」が2024年度より始動しました。その一つに“神谷超高真空技術開発ラボ”があります。社会実装とは、研究開発で得られた知識や技術を皆さんの生活する実社会に活用することですが、このラボはどんな技術を開発し、何を目指しているのか、そもそも超高真空とは何なのか、などを解説したいと思います。

## 2. 真空、超高真空、ゲッターポンプ

“真空”とは、大気圧よりも圧力が低い状況です。例えば山頂でお菓子の袋が膨らむ現象がありますが、あれは山頂の気圧が低いため、お菓子の袋の中の圧力が外より大きくなり、膨らむわけです。真空はJIS（日本産業規格）で、「通常の大気圧より低い圧力（分子密度）の気体で満たされた空間の状態」と定義されています。標準的な大気圧として、1気圧（1atm）は102325Paと定められています。真空は低い分子密度の気体の空間の状態であり、分子密度は状態方程式で圧力と結び付けられているから、真空を表現する単位は圧力の単位、パスカル（Pa）です。真空は圧力によってレベル（領域）が区分されています。低真空（大気圧未満、100Pa以上）、中真空（100Pa未満、0.1Pa以上）、高真空（0.1Pa未満、 $10^{-6}$ Pa以上）、超高真空（ $10^{-6}$ Pa未満、 $10^{-9}$ Pa以上）、極高真空（ $10^{-9}$ Pa未満）と、非常に幅広い圧力範囲にわたり区分されています。超高真空は $10^{-6}$ Pa未満（大気圧の約



ゲタポン：開発しているゲッターポンプのイメージキャラクターです。17世紀に真空の存在を実証したマグデブルグの半球、ゲッター作用で吸着した気体分子、活性化を意味する火、身近な真空を表す吸盤、などの意味を込めています

1000億分の1未満！）という空間内の気体分子の密度が極めて小さい状態です。この環境下では、電子やイオンビームの気体分子による散乱を防げる、材料の表面を清浄に保てるといった理由から、J-PARCのような加速器や重力波望遠鏡、核融合炉といったビッグサイエンスや、走査型電子顕微鏡、X線光電子分光装置などの表面分析装置、また固体同士を接合する常温接合など、学術と産業の幅広い分野で活用されています。

大強度陽子加速器施設（Japan Proton Accelerator Research Complex: J-PARC）ではチタンをビームラインの真空容器（ビームパイプやベローズ）の材料として用いています。これはチタンが高エネルギー粒子により放射化した後の半減期が、一般的な超高真空材料であるステンレス鋼に比べて短

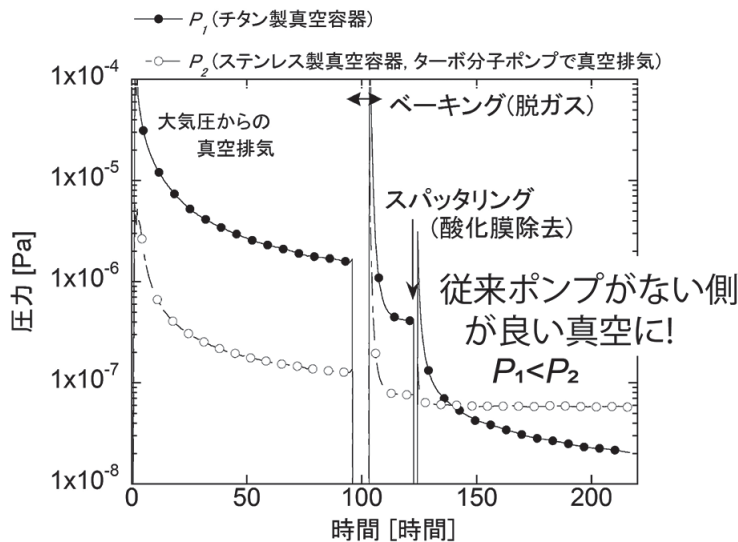


図 2: チタン製真空容器自体をゲッターポンプとした初めての実験結果

いという、低放射化材料だからです。一方で、チタンには気体を吸着、吸収する作用（ゲッター作用）があることが知られています。

ゲッター材料を利用すると、表面に飛んできた気体分子を吸着し、空間に再放出しないため、真空容器中の残留ガスを減らすことができます。即ちポンプ機能を果たすことから、ゲッターポンプといわれます。ただ通常のチタン材は、チタン酸化膜に表面が覆われているため、ゲッター作用はありません。何かしらの方法で、チタン製真空容器の内表面の酸化膜を取り除けば、真空容器自体を真空ポンプとして活用するという発想で開発を始めました。大げさな言い方をすると、J-PARC 加速器のチタン製のビームラインを、すべてゲッターポンプとすることができるのです。また、ゲッターポンプは駆動電力が必要ないため、超高真空中で使用する電子顕微鏡などの様々な産業装置に活用すれば、省電力化や小型化につながり、カーボンニュートラルな持続可能社会へ貢献できます。

### 3. 真空容器をゲッターポンプへ

チタン製真空容器内表面のチタン酸化膜の除去には、スパッタリング法を用いました。チタン製真空容器を、直径5mm程度の穴（オリフィス）が空いたフランジを介して、ターボ分子ポンプで排気を行うステンレス製の真空容器と接続しました。そして、フランジマウント型の円筒状電極を

挿入し、チタン製真空容器表面を放電ガス(アルゴン)イオンによってスパッタリングしました。つまり電場でイオンにエネルギーを与え、チタン酸化膜を弾き飛ばすのです。図2のように、初めは当然、ターボ分子ポンプで排気している側の圧力 (P2) のほうが、ポンプをつけていないチタン製真空容器側の圧力 (P1) よりも低いのですが、スパッタリングでチタン酸化膜を除去すると、P1は減少し続け、P2よりも低い圧力となりました。これが、チタン製真空容器をターボ分子ポンプ以上の排

気速度を持つゲッターポンプにした初めてのデータです。

このような感動的な結果が得られたのですが、例えば電極を外すために大気にさらすと、再度チタン酸化膜が表面を覆い、ゲッター作用が失われるので、使い勝手は今ひとつです。そこでNEG（非蒸発型ゲッター：Non-evaporable getter）コーティングという技術に着目しました。もともと欧州原子核研究機構（CERN）で開発され、気体吸着性能を持つ金属（NEG材）を加速器のビームダクトにコーティングして、ダクト内壁をゲッターポンプとして機能させます。ただNEGコーティングの弱点は、膜厚が1μm程度なので、大気暴露と表面にゲッター作用を持たせるための昇温（活性化という）を数回繰り返すと、コーティング内に酸素が蓄積し、ゲッター作用が低下することです。やはり産業やJ-PARCで使うためには繰り返して使いたいため、酸化膜を除去してゲッター作用をもったチタンの上にこのNEGコーティングをすることを試みました。これなら、膜厚1μm程度のコーティングの下にはゲッター作用を持った厚み3mm程度のチタン材があるため、NEGコーティングの劣化を防ぐとともに、NEGコーティングによって大気に曝した際のチタン表面の酸化が防げると考えたのです。

そのために、まず電極電位を+にしてチタンの酸化膜を除去します。ここまでは、先と同じです。

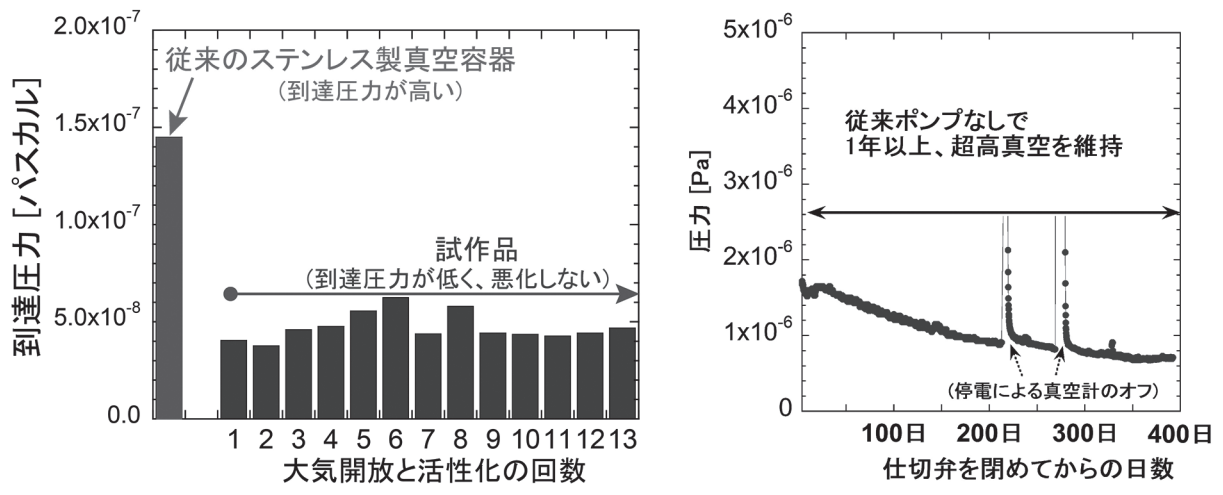


図3: NEGコーティングしたチタン製真空容器試作機での性能試験結果。(左) 繰り返しの大気暴露と活性化によっても性能を維持。(右) 真空容器だけで1年以上、超高真空を維持。

その時に電極表面をNEG材で覆っておき、次に電極をマイナスに変えて、真空のまま、今度はNEG材をスパッタリングして容器のチタン上にNEGコーティングをしたのです。これがこの開発した技術の肝となるところです。

#### 4. ゲッター性能の繰り返し回復、長期間維持

性能を調べるため、NEGコーティングしたチタン製真空容器を試作しました。まず大気開放と活性化を繰り返しても性能劣化をしないかを調べたところ、図3左のように、従来の真空容器よりも低い圧力を、何度も達成できることが実証できました。また、真空容器自体のゲッター作用だけでどの程度の真空を維持できるのかを調べるため、真空封止試験を行いました。活性化した試作機を仕切弁を閉めて孤立状態にし、圧力を計測し続けたところ、1年以上経ても $10^{-7}$ Pa台の超高真空を

維持することができました(図3右)。

#### 5. “ゲタポン”の社会実装へ

さて、この新しいゲッターポンプの技術を社会実装するというのが、神谷超高真空技術開発ラボの使命です。社会実装というのは、技術を皆さんの生活に役に立てることなので、親しみを持ってもらいたいです。そこで、この技術に“ゲタポン”(もちろんゲッターポンプが由来です)と名前を付けて、イメージキャラクターを作りました(1ページの図)。

ラボで現在取り組んでいるのが、試料輸送容器(トランスファーケース)です。最先端材料に関わる方のお話で、酸化しやすい試料を分析装置から別の分析装置へ、大気中で搬送すると表面が酸化、あるいは汚染してしまい、分析ができなくなることを知りました。ゲタポン技術を使えば、

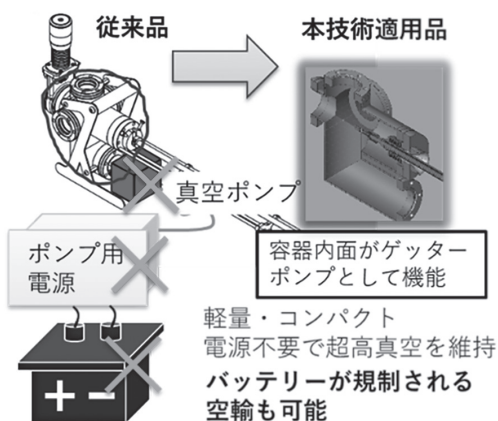


図4: 超高真空トランスファーケース

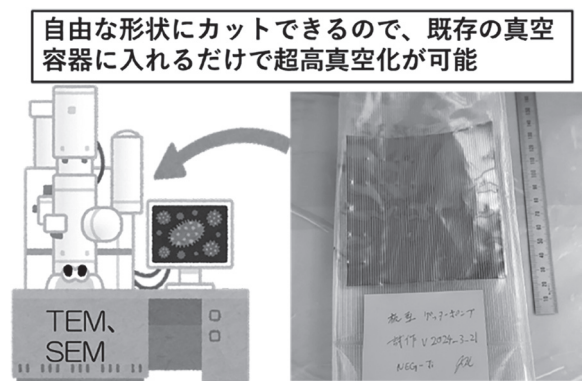


図5: 板形状ゲッターポンプ(裏表紙にカラーで掲載)

軽量・コンパクトで電源不要で超高真空を維持できるので、トランスファーケースへの活用はぴったりだと思いました(図4)。既に試作機を製作し、実は先日、ラボメンバーが、試料をトランスファーケースで真空を維持したまま、J-PARC（茨城県東海村）からSPring-8（兵庫県佐用町）へ飛行機で運んで、SPring-8の原子力機構のビームラインで放射光分析する、という試験をしました。酸化していない表面が保たれている、というとてもインパクトのある結果を得ることができました。

また、新しいアイデアとして、板形状ゲッターポンプを作ろうとしています。例えば図5のようなチタン板の表面に、当ラボの技術を適用しますと、板材がゲッターポンプになるわけです。板材を好きなサイズに切ったり、丸めたりして装置に入れて活性化すれば、真空をよくすることができます。これは超高真空が重要な様々な装置の役に立つと思っています。

社会実装へ弾みをつけることができたこととして、ゲッターポンプが2023年に第7回茨城テックプラングランプリで最優秀賞を受賞しました。この企

画は、新たな産業を創出する科学技術を発掘するプログラムで、ラボの技術が社会に役立つことを外部から認められということで、自信になりました。

## 6. まとめ

チタン製真空容器をゲッターポンプ化する技術である開発や、ゲッターポンプを社会実装に繋げるための神谷超高真空技術開発ラボの活動について紹介しました。ゲッターポンプは、従来の真空ポンプがなくても超高真空を維持できるため、真空部品の輸送用容器などへ適用し、カーボンニュートラルな社会へ貢献できる技術だと考えています。これまで私は、J-PARCの真空システムの構築や運転維持に取り組んできました。その中で真空に関わる日本メーカーのものづくりの力を感しました。ゲッターポンプもそれらメーカーさんとの知り合いになれたことで生まれたアイデアです。今後は、真空装置の性能高度化などを実現し、真空業界をはじめ産業界を盛り上げて、恩返しをしないとけません。



神谷 潤一郎（かみや・じゅんいちろう）

2003年大阪大学大学院博士課程修了、博士（理学）。同年日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）に入所。J-PARC 加速器で主に 3GeV シンクロトロン内の真空内パルス電磁石、真空システムの製作、運転維持、開発業務に携わってきた。真空の物理現象、新しい真空技術の開発、超高真空、極高真空に興味を持っている。特に今回の開発は、真空、材料表面の際（きわ）、そして材料内部に関わる現象であることに面白さを感じている。現在、日本原子力研究開発機構において研究主幹、J-PARC センター加速器第三セクションリーダー、神谷超高真空技術開発ラボリーダー。

## 溶媒抽出法の最前線

### 「エマルションフロー」で事業化進む

東海村のベンチャー企業、エマルションフローテクノロジーズ（EFT、鈴木裕士代表取締役社長CEO）は今年6月、リチウムイオンバッテリーの効率的なリサイクルを行う「エマルションフロー小型実証プラント」を稼働させ、リサイクル電池開発向けのサンプル提供サービス「EFTファウンドリー」の提供を開始した。

EFT社は、日本原子力研究開発機構（JAEA）の長縄弘親らが開発した新しい溶媒抽出技術に基づき、同機構発のスタートアップ企業として2021年4月に設立された。2023年には東海村に実験設備を備えた社屋が完成、レアメタルリサイクル事業と、エマルションフロー技術の普及に取り組んでいる。

#### 有用金属を回収する新たな溶媒抽出法

使用済みのスマートフォンなどから集められた電子機器類には貴金属や希土類など有用な金属が含まれており、いわゆる「都市鉱山」と呼ばれる。薄膜に加工されていたりプリント基板の配線として製品に組み込まれているため、分別して取り出すのは容易ではない。これらの回収技術として注目されているのが「溶媒抽出法」だ。

分離したい物質を含む水溶液に有機溶媒を接触させることにより、その物質を有機溶媒に選択的に移す技術である。ウラン鉱石の精錬や原子炉の使用済み燃料の再処理に適用されていることで知られている[1]が、工業的に重要な金属リサイクルへの応用を目指して研究が進められている。

一般的に溶媒抽出では、液相どうしを「混ぜる」「置く」「分離する」の3工程を必要とする。エマルションフローは「送液」のみの1工程で、これら3つの工程をすべて同時に行うことができる。

従来技術として広く用いられているミキサーセ

トラーは有機相と水相を攪拌羽根によって攪拌・混合するミキサー部と、両相を静置して分離するセトラ部で1段が構成される。これを水平方向に複数段並べることによりひとつの装置としている。

抽出剤を含む油相と金属イオンを含む水相を混ぜ合わせるにより、油相と水相の界面において、抽出剤が金属イオンと結合する。その後、重力による油相と水相の分離を待てば、油相側に金属イオンを抽出することができる。この方法では、機械的に攪拌<sup>かくはん</sup>するため液滴の径は不均一で密集度が低い。

一方、エマルションフローにおいては、ノズルから噴出した液滴の径は均一で密集度が高く、理想的な乳濁混合を実現できるという。液滴が狭い流路から広い液貯に流れ込む際に減速するため、液貯の入り口で密集度が高まり液滴どうしの合体が進行する。このためミキサーセトラのように静置せずとも、送液のみで理想的な溶媒の抽出すなわち、細かな乳濁混合と完全な相分離が可能となる。

エマルションフローは従来技術の10倍以上の生産能力を可能にする。結果的に従来比1/10以下のダウンサイズ、ランニングコストの80%削減を実現できるという。

また、密閉構造のために無臭で快適な作業環境を実現するとともに、IoT管理による自動化も容易。高い油水分離能力は、水相の廃水処理における環境負荷の低減を可能にするとされる。

この技術に関連する特許は既にJAEAより10社以上にライセンスされており、エマルションフローを活用したレアメタル精製の事業化により、収益を得ている企業もある。

## 溶媒抽出のメカニズムを探る<sup>[3]</sup>

溶媒抽出法を使うとき、どの金属がどれだけ抽出分離されるかは抽出剤と金属イオンの相性のみで決まり、溶媒の種類による影響はないというのがこれまでの考え方だった。日本とフランスの国際共同研究チームによると、触媒や永久磁石などに使われるパラジウム (Pd) とネオジウム (Nd) という2種類の金属を分離する過程で、抽出剤にマロンアミドを用いるとき、油相にトルエンを使った場合にはパラジウムだけが抽出され、ヘプタンを使った場合にはパラジウムとネオジウムの両方が抽出される。さらに、トルエンを使った場合にはパラジウムの抽出速度が非常に遅くなる。すなわち、同じ抽出剤でも、油相に使う溶媒の種類を変えることで、抽出できる金属と抽出速度を変えることができるという。

抽出剤は分子内に親水的な部分と疎水的な部分を併せ持つことから、界面活性剤のように複数の抽出剤が集まってミセルやエマルジョンに似た「超分子集合体」をつくることが予想されるが、集合体についての理解はほとんど進んでいなかった。そこで、X線と中性子線を用いた分析を進めた結果、油相に使う溶媒の違いによって、抽出剤(マロンアミド)がつくる超分子集合体の特性に違いがみられた。

研究グループによれば、マロンアミドは、トルエン中では2、3分子が寄り集まった小さな超分子集合体をつくり、その内側のポケットにはパラジウムイオンのみがフィットして、ネオジウムイオンは取り込まれにくい。一方、ヘプタン中では約100分子のマロンアミドが集まった大きな集合体がつくられる。この場合はパラジウムとネオジウムを識別できない。

水相と油相の界面をみると、油相にヘプタンを使った場合は、界面付近にマロンアミドの密な層が形成される。一方、油相にトルエンを使った場合には、マロンアミドは界面から数ナノメートル離れた領域に広がった希薄な層が形成される。希薄な層はパラジウムとマロンアミドが界面で衝突する確率を減らし、結果として抽出速度を遅くすると考えられる。これらの結果は、新しい金属イ

オンの分離方法や、新しい抽出剤の設計につながる可能性がある。

## 新技術の社会実装へ

JAEAでは従来比100倍の生産能力と99.99%以上の高純度化、また、従来技術では分離の難しいレアースなどの元素分離を可能にする「多段エマルジョンフロー」の開発にも成功している。これは低コストで高効率にレアメタルの高純度精製が可能な唯一の方法である。

EFT社はこれを事業のコア技術とし、レアメタルリサイクル事業と、エマルジョンフロー技術の普及を目的としたトータルサポート事業を展開し、将来の脱炭素社会の実現に不可欠なレアメタル資源の将来にわたる安定供給に貢献していくとしている。

CROSS T&T編集部

## 参考

- [1] ATOMICA <https://atomica.jaea.go.jp>
- [2] エマルジョンフローテクノロジーズ <https://emulsion-flow.tech/>  
プレス発表2021年6月3日「限りあるレアメタル資源を、未来につなぐ原子力機構発ベンチャー企業 株式会社エマルジョンフローテクノロジーズを認定」日本原子力研究開発機構、エマルジョンフローテクノロジーズ
- [3] プレス発表2024年4月12日「資源のリサイクル技術を進化させる新たな視点-「超分子集合体」による希少金属の選択性と抽出速度のコントロール -」日本原子力研究開発機構 他

# 変えてはいけないもの —フレーベルに今学ぶ—

筑波研究学園専門学校 こども未来学科 大森 淳子

## I. 近未来の保育への期待と危惧

近年、保育のニーズが高まり、深刻な保育士不足となっていることは周知の事実である。その一方で「保育の質の向上」が求められる状況の中、現場のICT化も進んでいる。これらは、あくまでも現場の保育士が、子どもたちと関わる時間を増やすための効率化であることや乳幼児の安全のためのツールであることなども承知している。そして、AIが急速に発達している現在、保育の現場では、場合により補助的にでもAIが人の手にとって代わることも近い将来のことと予測される。しかしながら、これらによって子どもたちの成長にとって失われる部分もあることは理解していなくてはならない。

## II. 今も生き続けるフレーベルの教育思想

筆者は以前、保育者養成校の人間教育について考察をした折に、幼児教育の父といわれるフレーベルについて触れたことがある。フレーベルの思想については、現代も変わらず幼児教育者に広く学ばれている。幼児教育者によって研究され、継承され、今も生き続けるフレーベルの思想こそが、これからも変えてはいけないものではないかと考え、彼の主たる著書を見ていく。

### (1) 「人間の教育」(1826)

『人間の教育』はフレーベルの教育思想の根本を表明したものとされる主著である。その中で、「母親の愛、すなわち包容のある母のこころはまた、幼児にいろいろな運動をさせて、幼児が自身

の内的生命を自ら感ずるように導くのである。それでことに大切なのは、規則正しい律動的な運動によって幼児に自身の生命を意識させることである。すなわち、たとえば幼児を抱いたり支えたりしながら、調子をとってこれを動かしたり、また、音律的な、拍子の調った歌などを歌いつつ、律動的に拍子を合わせて歩いたりするのである。そのようにして、自然的な純真な母親は子どものうちに次第しだいに各方面に向かって動いている生命をよく注意して、まだ深く子どもの内面に眠っている生命を呼び覚まし、これを強め、各方面に向かって発達するように導いていくのである。」と述べている。また、生後間もない子どもが母の話しかけにおいて、四肢の些細な限られた活動をすることが認められるが、この母の「言葉の精神的な影響は、リズムによって、歌の調子または母の歌い方によってさらに高められる。」とも述べている。

教育の第一歩が「母親の愛」であること、包容力のある母親＝保育者の愛情を礎とした歌や、話しかけ、それが生命を呼び覚ますものであることを幼児教育の祖、フレーベル自身が予感している。彼の教育思想そのものが、「母親の愛」抜きには語れない。

### (2) 「恩物（教育遊具）」(1838～1840)

恩物おんぶつとは、柔らかいボールや硬い球、立方体、直方体等の積み木からなり、子どもがその形状や動きを観察したり、動かしてみたりするといった、フレーベルが子どもの成長における遊戯のために作成した遊具である。そして、フレーベルは恩

物における遊戯論を一冊の著作としてまとめたのではなく、恩物にそれぞれ手引書を添え、箱からの取り出し方、子どもへの提示の仕方を詳しく記述し相次いで発表した。

ここで注目したいのは、子どもに提示する仕方である。『人間の教育』において、遊ぶことと語ることはこの時期の子どもの要素であり、幼児は周りのもの全てが自分と同じであると思い、話しかけながら遊ぶ幼児初期の特性が述べられているが、恩物において子どもと遊びを密接に結合している。

例えば、立方体の取り扱いにおいて、「上へ重ねる時にはとくに強い調子で歌い、そして下へおろす時にはとくに低い調子で歌うようにする。」「…言葉やリズムカルな歌の音をとまわせて」という記述が見られる。

恩物の扱い方において、フレーベルは「歌う」「歌いながら語る」というように、遊びの方向づけや遊びを活気づけるために、幼児の記憶や直感が目覚め、同時に自ら考えるように、考え深くなるように、言葉やリズムカルな歌を伴わせている。

これらの恩物を使つての遊戯は、リズムと言葉、音という音楽的な要素で支えられ、さらに周りのものに生命力を与え、子どもの内的なものを呼び覚ますために重要な位置づけであることをフレーベルは繰り返し述べている。

恩物を使つた作業とともに歌われる音を子どもに感じさせることが、自己自身を通じ、自分自身で表現するように教育されることであり、「このことは実に全くあらゆる教育、あらゆる生活の究極の目的であり、最高の目的」としている。

そこには、子どもの遊びに合わせた、包容力のある母親＝保育者の愛情を礎とした歌や、話しかけが伴われていることを理解する。フレーベルの恩物を活かすものも母親＝保育者の愛と言ってよい。

### (3) 「母の歌と愛撫の歌」(1844)

フレーベルは62歳の時、『母の歌と愛撫の歌』を発表した。フレーベルはこの著書について次のように書いている。「私はこの書の中に、私の教育法の最も重要なものを示した。それは、自然に

即した教育のための出発点である。なぜならそれは、人間の素質の萌芽が健全に、そして完全に発達すべき場合には、いかに育てられ支えられなければならないかという方法を示しているからである。」

『母の歌と愛撫の歌』は母のための教育書として発行され、母が子どもを愛撫しながら楽しく遊んであげるための歌集であり、母も子も健やかに生きるためのものである。詩、音楽と絵画のなされる芸術性の高い崇高な宗教性のある著書である。この後フレーベルは70歳で生涯を閉じる。

次に挙げる例は、幼児が情緒を安定させ、その心地よい快感や喜びを表わすための遊戯である。

#### 例) 足をばたばた

「入浴を終えた子どもが布団の上で小さな両腕、両足を動かし気持ちよさそうに横たわっています。自分の力をためし、それによって力を高め、その力の高まりを喜ぶ相手を求めています。その要求を母性愛はいたわり深く受けとめます。子どもがするがままに足を動かす運動をさせます。そうすることで身体の発達を促すだけでなく、子どもの内的な感情、知覚、精神面の発達を促すことができます。」

フレーベル全集第5巻「母の歌と愛撫の歌」より  
かわいい足をばたばたさせて

けしと亜麻の油をしぼりましょう  
小さくきれいなランプに入れて  
わが子のために  
母が夜長をあかすとき  
明るくきれいにともるよう

Strampelbein F. フレーベル作詞  
ロベルト・コルビー作曲

flieg' ich lieb' mir das Stampel - bein! wol - len schla - gen aus  
Mohn und Lein oil für's Lämpchen, zieh - lich Klein,  
dass es bren - ne hell und lein, wann Mut - tet - lieb' in lan - ger  
Nacht, für's lie - be Klei - ne Kind - chen wacht, Wenn Mut - tet -  
lieb' in lan - ger Nacht, für's lie - be Kind - ne Kind - chen wacht.

※(ドレミ楽譜出版熊谷周子編を引用)

フレーベルの教育の根底には、母の愛の尊さがあり、その愛を表現し幼子に伝え、人間の素質そのものである心を、そしてあらゆる感覚を育てる手段が、心地よいリズムとメロディであること、すなわち母自らの歌が存在することは否めない。また、フレーベルは教育の最も重要な時期が穢れない乳幼児期であることをこの『母の歌と愛撫の歌』によって示している。

フレーベルというと、ロマン主義、キリスト教的で、自然や人間、身の回りの無機物にも神の法則が宿るといった教育思想を思い浮かべるが、母と子の信頼関係、深い情愛について、また子の心のよりどころが母のぬくもりであること、そしてそれが人間の教育＝保育の原点であることを伝えている。

### III. おわりに

何年も前、大阪のUSJを訪れた折、ターミネーターというアトラクションに立ち寄った。その入り口で子どもたちの美しい未来が暗示され、子どもをあやしているのが実はAIであったことを記憶しており、最近その映像が私の脳裏をよぎる。その時私は、映画での世界のことで、AIが現実のものになろうとは、ドローンが兵器となりえるとは想像もできなかった。保育現場でAIが完全に人間に取って代わることは難しい。AIには多くの優れた能力があるが、保育という分野には人間らしい感情や直感、柔軟な対応が求められる場面が多く存在することを忘れてはならない。当然だという意見が多数を占めるだろう。では何故現在、保育者による弾き歌いの代わりにCDを使い、読み聞かせの代わりにDVDや動画コンテンツを見せるのだろうか？

読み聞かせは、読み手の声が聞こえ、読み手と同じ空間・温もりを子どもと共有することで、子どもの思いに気づき、心の成長を牽引けんいんすることに繋がる。弾き歌いについても同様である。読み聞かせにしても、弾き歌いにしても、子どもの気持ちを感じながらの感情移入や間の取り方等、人でなければできないこと、何よりそれらを通して子どもとの間に生まれる信頼関係をも、すでに忘れ去られてはいないだろうか。

その昔、先生の真似をしてピアノを弾いてみたいと思い、そして母の読み聞かせの時間がとても楽しみであったことは、いくつになっても記憶に新しい。利便性と手軽さを求めるあまり、「人」でなければできないことがおざなりになりはしないかと危惧する。

もし、ICT化を魅力として発信している保育現場があったとしたら、子どもと向き合う時間を増やすためのICT化は、保育の質向上に寄与することであるという本質を見失うことになってはならない。

保育の原点を、変えてはいけなものを改めてもう一度考え直すことは、保育者の質を高める責任を担うこれからの保育士養成校の使命でもあらう。

### 引用・参考文献

- F. フレーベル W. ランゲ編 小原國芳・荳司雅子監修『フレーベル全集』全5巻 玉川大学出版部 1977～1981年  
荳司雅子『フレーベルの生涯と思想』玉川大学出版部、1999年  
フレーベル著 熊谷周子編『母の歌と愛撫の歌』ドレミ楽譜出版、1991年  
小笠原道雄『フレーベル』清水書院、2000年  
岡田正章編『フリードリヒ・フレーベル』フレーベル館、1990年  
大森淳子『保育者養成校における「人間教育」の一考察』総合科学研究機構 T&T、2017年

### ※フレーベル

フリードリヒ・フレーベル（1782年-1852年）はドイツの教育者。幼児教育の祖。1837年、世界初の幼稚園（Kindergarten）として「一般ドイツ幼稚園」を開設。主著『人間の教育』に記した、幼児（人間）の中に宿る神性をどのようにして伸長していけるか、ということに腐心し、子供たちのための教育に一生を捧げた。



大森 淳子 (おおもり・じゅんこ)

フェリス女学院短期大学音楽科および音楽専攻科、創価大学教育学部卒業。明星大学人文学研究科教育専攻博士前期課程修了。教育学修士。

ラ・フルートアンサンブルの一員として演奏活動、後進の指導後、筑波研究学園専門学校こども未来学科にて音楽表現系科目の教鞭を執る。H25～H31 同学科長。現在、豊岡短期大学通信教育部こども学科非常勤講師、姫路大学教育学部通信教育課程こども未来学科非常勤講師、筑波研究学園専門学校副校長。



梶谷 勇 氏

## CROSS2024 総合科学市民公開講座

11/23 (土・祝) つくば開催  
健康・福祉サポートの2講演



寺田 康彦 氏

CROSS2024 総合科学市民公開講座は 11 月 23 日 (土・祝) 午後 1 時 30 分から 4 時まで、つくば市研究学園の同市役所会議室 202(本庁舎 2 階) を会場に開く。今回は「健やかな市民生活をサポートする科学技術」をテーマに 2 講演を予定。参加者を募集している。

講演は寺田康彦氏(筑波大学数理物質系准教授)の「スポーツ検診最前線 - 病院を飛び出たモバイル MRI」、梶谷勇氏(産業技術総合研究所人間拡張研究センター生活機能ロボティクス研究チーム主任研究員)の「ロボットについて知ろう! (介護、福祉編)」の 2 テーマ。

寺田氏は医療機器の MRI (Magnetic Resonance Imaging、磁気共鳴画像法) がポータブル化して、病院以外の様々な場面で使われるようになった近況に触れる。応用研究が進み、特に成長期にボールを投げすぎること懸念される障害「野球肘」の検査が現場でできる車載型モバイル MRI の開

発や、小児骨年齢計測用 MRI などの開発について紹介する。

梶谷氏は「ロボット博覧会」とも呼ばれた 1985 年の科学万博から来年で 40 年、ロボットはどこまで進化したのかを問う。「介護や福祉分野で活用されつつあるロボット技術を題材に、関連する人工知能、自動運転などの要素技術の紹介や安全性について解説。介護や福祉の分野でロボット等の先端技術が注目されている理由についても紹介する」ということだ。

参加は無料だが事前登録が必要。中・高校生以上を対象としている。メールアドレス: [tsukuba@cross.or.jp](mailto:tsukuba@cross.or.jp)、電話連絡先: 029-219-5300。QR コードから申し込みできる。



## CROSSの動き

法人事務局

2024（令和6）年5月～8月

5月7日 林田翔平が中性子科学センター研究開発部に着任した。

16日 令和5年度業務執行状況、令和5年度財務状況及び令和5年度公益目的支出計画実施報告書等について監事監査を受けた。

17日 第1回常任理事会を開催し、第1回理事会資料について審議した。

23日 第1回理事会を開催し、令和5年度の事業報告、財務諸表、公益目的支出計画実施報告書、定時評議員会の招集、理事候補者推薦等について議論し、令和6年度事業執行状況等について報告を行った。

6月1日 村崎遼が中性子科学センター研究開発部に着任した。

5日 総合科学研究センター第1回企画委員会を開催し、市民公開講座の講師候補者、研究懇話会の講師候補者について議論し、各委員会から報告を行った。

6日 第2回編集委員会を開催し、77号の進行状況、78号の誌面等について議論した。

12日 令和6年度科学研究費助成事業（研究代表者分）について、中性子科学センターは3件（申請14件）の新規交付決定通知があった。

14日 定時評議員会を開催し、令和5年度財務諸表、任期満了に伴う理事選任について審議し、令和5年度事業報告、会計実地検査対応、令和6年度事業の執行状況等について報告を行った。

14日 第2回理事会を開催し、理事長選定、役付き理事選定及び業務分掌、常勤理事等の報酬額、

理事長職務代理者に関して審議し、量子ビームゲートウェイの提案に関して報告を行った。

14日 令和5年度公益目的支出計画実施報告書をWeb提出した。

20日 共用法第19条に基づく令和5年度分についての財務諸表等を文部科学省に提出した。

26日 総合科学研究センター第2回企画委員会を開催し、市民公開講座の講師と概要、研究懇話会の講師と演題について議論し、各委員会から報告を行った。

27日 科学研究費助成事業間接経費執行実績報告書を日本学術振興会にWeb提出した。

7月2日 共用法第22条に基づく役員の選任の届出を文部科学省に提出した。

3日 渡部宏美が中性子科学センター事務部に着任した。

8日 CROSS T&T 77号「特集：いばらき量子ビーム研究センターの活動」を発行し、CROSS会員、図書館・公共機関・高等学校等へ配布した。

23日 第2回常任理事会を開催し、諸規程類の改正等、「J-PARC建設—その足跡を辿る」の発行（J-PARC建設に関わった有志）の対応について審議し、令和6年度市民公開講座の開催について報告を行った。

24日 総合科学研究センター第3回企画委員会を開催し、市民公開講座のポスターチャシ、日時、司会者、研究懇話会の分担について議論し、各委員会から報告を行った。

31日 第1回総合科学研究センター研究懇話会を開催した。中尾隆友氏が「人口とAIから読み解く、今後の日本の潮流」、藤田大介氏が「研究者への国際標準化のすすめ（VAMASからISOへ）」というテーマで講演し、参加者18名と活発な議論が行われた。

8月1日 第3回常任理事会（メール審議）を開催し、編集委員会の新規委員について審議した。

7日 第3回編集委員会を開催し、編集委員会の新規体制、新規編集委員の紹介等を行った後、78号の進行状況、2025年テーマ等についての誌面等について議論した。

J-PARC 物質・生命科学実験施設（MLF）に関する活動  
2024（令和6）年5月以降

5月16日 プレス発表「シリカがタイヤを高性能化する秘密を中性子と水素のスピンで解明『埋もれた界面』を観測する新技術で、複合材料の高機能化に貢献」を実施。日本原子力研究開発機構（JAEA）、J-PARCセンター、山形大学、総合科学研究機構（CROSS）、三重大学、横浜ゴム、京都大学の連名。

6月3～7日 京都大学工学研究科修士課程1年田端伊織さんがCROSS中性子科学センター研究生として滞在した。柔軟性イオン結晶試料の合成技術を確認するとともに、中性子反射率法によるIPC/電極界面構造解析の予備実験を実施した。

6月24日 プレス発表「水を極限までおしてみた—超高压中性子回折実験で水素結合の対称化の観察に成功！—」を実施。東京大学、JAEA、J-PARCセンター、CROSS、愛媛大学の連名。

25日 「2024年度中性子実験技術基礎講習会（レベル1講習会）」を共同でリモート開催した。参加者数：133名

7月11～12日 令和6年度中性子産業利用報告会を共同で、秋葉原コンベンションホールで開催した（オンライン併用）。2日間の延べ講演数が22件、ポスター発表数が72件で、密度の高い議論が交わされた。現地参加者247名、オンライン参加者135名

8月8日 「利用研究課題審査委員会・中性子課題審査部会」をAQBRでJ-PARCと合同開催した。

2024 B期には共用ビームラインに152件の一般利用課題（短期）の申請があり、これらの課題の採否について審議された。

19日 【事前講習会@オンライン開催】第10回放射光・中性子の連携利用に向けた合同研修会「粉末回折測定研修会」を共同でオンライン開催した。参加者数：54名（講師、幹事を含む）

22日 「令和6年度中性子イメージング研究会」を共同で新橋ビジネスフォーラムとハイブリッド開催した。参加者数：延べ166名

27日 「選定委員会・MLF施設利用委員会」をJ-PARCセンターと合同でAP 東京八重洲で開催した。選定委員会では利用研究課題審査委員会の審議結果が報告され、共用ビームラインの一般課題に52件の採択が承認された。

28日 【事前講習会@オンライン開催】第11回放射光・中性子の連携利用に向けた合同研修会「小角散乱測定研修会」をオンライン開催した。参加者数：60名

【訂正】

2024年7月発行 CROSS T&T 第77号68ページ「CROSSの動き」欄で報告事項に脱落がありました。ここに改めて掲載いたします。（編集部）

法人事務局

2024（令和6）年1月～4月

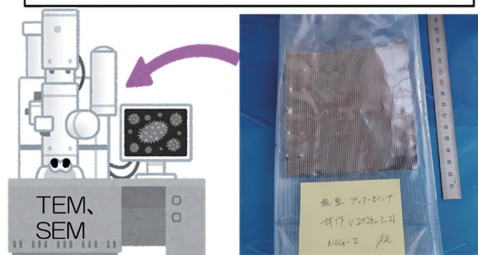
3月31日 疋田卓、石川知子が退職した。

4月1日 上床美也が中性子科学センターのサイエンスコーディネータに、高橋友美が法人事務局（中性子科学センター兼務）に、酒井雄樹、秋葉佳美、大井みどり、安部裕美が中性子科学センターにそれぞれ着任した。

編集後記

8月より編集委員会が新体制になりました。詳細は次号で紹介予定です。今後ともCROSS T&Tをよろしくお願いいたします。（水）

自由な形状にカットできるので、既存の真空容器に入れるだけで超高真空化が可能



さまざまな機器に装着できる超高真空ポンプ「ゲタポン」(本文 40 ページ)



虫こぶの中にいるクリタマバチ幼虫への寄生(産卵)を狙っているチュウゴクオナガコバチ(本文 19 ページ)

## 色彩図録



実際の風景(時間と空間に依存した発展方程式)



粗視化  
モザイクアート(時間だけに依存した発展方程式)

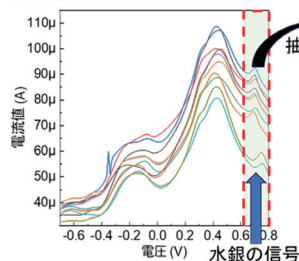


最初にピクセルを正しく組み込む→各ピクセルごとの時間の流れを計算  
分割宇宙アプローチのイメージ(本文 29 ページ)

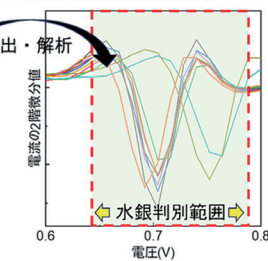


ライトアップされたレトロ加速器(本文 12 ページ)

電極消耗で生じる測定ブレ

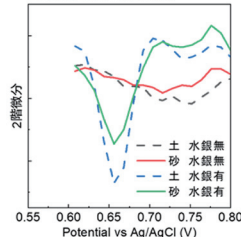


水銀信号抽出と数値処理



高感度電極と数値解析により微量水銀を検出(本文 33 ページ)

土壌溶出液中判定結果



実際に土壌溶出液中水銀を測定した結果(本文 34 ページ)

## CROSS T&T 第 78 号



令和 6 年 (2024) 10 月 31 日  
 一般財団法人 総合科学研究機構  
 理事長 横溝 英明  
 〒319-1106 那珂郡東海村白方 162-1  
 いばらき量子ビーム研究センター内  
 TEL.029-219-5300 (代)  
 【編集委員会事務局】  
 〒300-0811 土浦市上高津 1601  
 筑波研究学園専門学校内  
 TEL.029-826-6251

<https://www.cross.or.jp/tsukuba/reference/cross-tt>

CROSS T&T 編集委員会  
 委員長 相澤 冬樹  
 委員 北島 重司/勝田 敏彦/鈴木 國弘  
 松下 博充/水澤多鶴子  
 印刷所 松枝印刷株式会社  
 〒303-0034 常総市海天道天満町 2438  
 TEL:0297(23)2333 FAX:0297(23)5865

No.78  
2024.10