ISSN 2185-8292

CROSS T&T

Comprehensive Research Organization for Science and Society

No.74
2023.7

Top Title 生き物たちと環境

小杉 真貴子
加藤 翔一　松永 幸大
坂井　真
及川 ひろみ
鈴木 孝典
平野 敬子
新澤 英之
鹿山 雅裕
石山　修
鈴木 國弘
田中 光太郎
桐山 幸治
阿久津 和宏

土浦・つくば市境の里山に位置する宍塚大池（本文14 ページ～）写真は宍塚の歴史と自然の会提供

一般財団法人 総合科学研究機構

CROSS T&T 74 号 目次

Top Title（特集）生き物たちと環境

赤外線で光合成をする 南極の藻類に見つかった驚異の仕組み	小杉 真貴子 （自然科学研究機構 基礎生物学研究所）	1
身近にいた新種の微細藻類 淡水性の単細胞性緑藻類メダカモのゲノム解析	加藤 翔一（東京理科大学大学院＝研究当時） 松永 幸大（東京大学大学院）	5
温暖化に負けないイネ品種を開発する 高温気象年にコメの品質低下	坂井　真 （農研機構生物系特定産業技術研究支援センター）	9
姿消す冬季の小鳥が心配 土浦・宍塚で見られる野鳥の変遷	及川 ひろみ （宍塚歴史と自然の会）	14
夏の高温と少雨が助長？ 茨城県内のナラ枯れの現状と対応について	鈴木 孝典 （茨城県林業技術センター 森林環境部長）	18
湖のギャング、ナマズを美味しく 行方バーガーの開発と販売活動	平野 敬子 （行方市商工会 事務局長）	22

Tsukuba（つくばからの発信）

含水鉱物と衝突・破壊の記憶 小惑星「リュウグウ」から持ち帰った石	中村 智樹（講演録） （東北大学大学院 教授）	28
徹底した再利用のために X 線と近赤外線を使ったプラスチックの劣化分析	新澤 英之 （産業技術総合研究所 機能化学研究部門）	34
「月産月消」の実現へ 月の水と資源活用を目的とした探査計画	鹿山 雅裕 （東京大学大学院総合文化研究科）	38

Today & Tomorrow（今日・あす）

理想を追い求めた染色家たちの村作り	石山 修（水海道染色村 きぬの染代表）	42

Tokai（東海からの発信）

J-PARC 建設の歴史と思い出 （その２　施設完成に向けて）	鈴木 國弘 （日本原子力研究開発機構広報部）	44
持続可能な脱炭素化への道 カーボンリサイクルエネルギー研究センター始動	田中 光太郎 （茨城大学カーボンリサイクルエネルギー研究センター）	49
職場巡視で事故の芽を摘む ～安全のための取り組み～	桐山 幸治 （CROSS 中性子科学センター ）	53

＜CROSS ロード＞

黒い有機物による、ハビタブルな天体の形成への寄与　「リュウグウ」固体有機物分析チーム　32

重水素化技術をめぐる議論　J-PARC Workshop 2022 開催報告　阿久津和宏　56

Cross Release　25　短歌（松崎健一郎）　37　俳句（山口 恭弘）　41

ミュオン新ビームライン始動で勉強会　水沢多鶴子　59

赤外線で光合成をする
南極の藻類に見つかった驚異の仕組み

自然科学研究機構 基礎生物学研究所 環境光生物学研究部門　小杉真貴子

１．はじめに

「光合成」と聞くと草や木などの植物を思い浮かべる方が多いのではないでしょうか。植物が行う光合成は光エネルギーを利用して水と二酸化炭素からデンプンや糖を合成する反応です。光エネルギーは太陽光に含まれている光の中で可視光が利用されます。光合成反応の過程で生じた酸素が大気中に放出されるため「酸素発生型光合成」と呼ばれます。地球上で最初に酸素発生型光合成を行った生物は約 27 億年前に誕生したシアノバクテリアと考えられており、それまで大気中にほとんど存在していなかった酸素が大量に放出されたことで地球環境は劇的に変化しました。地球の光合成生物は長い年月をかけてシアノバクテリアから藻類そして植物へと進化し、水中から陸上、熱帯域から南極北極まで様々な環境へと進出を果たしました。

今回ご紹介するナンキョクカワノリ（*Prasiola crispa*）はアオサやクロレラと同じ緑藻の仲間で、その名が示すとおり南極に生育しています。南極という厳しい環境に分布しているという点でも興味深い生物ですが、ナンキョクカワノリは一般的な藻類が光合成に利用している可視光に加えて、可視光よりエネルギーが低い赤外線の一部である遠赤色光を使って酸素発生型光合成を行っていることが私たちの研究で明らかになりました。本稿ではナンキョクカワノリに見つかった赤外線利用型の光合成メカニズムについて、その研究の背景や今後の展望も含めてご紹介します。

写真：南極・昭和基地周辺の露岩に形成されたナンキョクカワノリのコロニー（提供：アストロバイオロジーセンター）

２．「赤外線で光合成」の何がすごいのか

太陽光には様々なエネルギーの光が含まれています。光のエネルギーは波長に換算することができ、波長が短いほどエネルギーが高く、長いほど低くなります。私たちの目に見える可視光は波長 400-700 nm に相当し、青、緑、赤の順にエネルギーが低くなります。700 nm より長波長は赤外線ですが、その中でも可視光に近い 700 ～ 800 nm は遠赤色光と呼ばれます。

酸素発生型光合成生物は、光エネルギーで電荷分離反応を起こす特別な反応中心を有する光化学系 II と光化学系 I というタンパク質を持っています。光化学系 II は光エネルギーで水を水素と酸素と電子に分解し、そのうちの水素と電子を電子伝達系に供給します。酸素は光合成に使われないため細胞外に放出されます。一方、光化学系 I は光化学系 II が供給した電子を受け取り、そのエネルギーレベルを二酸化炭素の固定に必要な電子伝達体を還元できるレベルまで光エネルギーにより高めます。この２段階の励起反応プロセスは、

シアノバクテリアから植物に至るすべての酸素発生型光合成生物に共通しています。

光化学系 II の反応中心は 680 nm に相当する赤色のエネルギーで励起されるため、680 nm より低いエネルギーである遠赤色光では光化学系 II を励起することは難しくなります。光化学系 I の反応中心は 700 nm の光エネルギーで励起されるので 720 nm くらいの光まで励起に使われることがありますが、光化学系 II が励起されない限り光合成反応は進みませんので、一般的な植物や藻類は遠赤色光だけでは光合成ができません。それではナンキョクカワノリはどのようにこの問題を解決したのでしょうか。

3．発見に至った経緯

私がナンキョクカワノリの変わった吸収特性に気が付いたのは、大学院の博士課程に在籍していた時でした。ナンキョクカワノリの光合成の活性測定を先生から頼まれて行っていたとき、たまたま藻体の吸収スペクトルを測定したところ、赤色の吸収帯が遠赤色光の波長まで伸びていました。長波長に伸びる吸収帯は光化学系 I に結合しているクロロフィルでは珍しくなかったのですが、緑藻にしてはあまりにその吸収帯が顕著でした。

その当時は学位を取る直前でそれ以上解析する余裕はありませんでしたが、その数年後、国立極地研究所に博士研究員として雇われたのがきっかけで、再びナンキョクカワノリを研究するチャンスが訪れました。南極観測隊に同行し、ナンキョクカワノリや他の光合成生物の生育地を調査するとともに生理学実験に用いるサンプルを採集しました。余談ですが、ナンキョクカワノリは南極の厳しい環境に生きているだけあって凍結にも乾燥にも耐えられるため、乾燥状態で冷凍しておけば長期間保管することができます。そして実験の際は解凍して給水すれば 30 分ほどで元の活性に戻ります。極地まで採集に行くのは大変ですがこういう点では非常に便利な実験材料です。

4．ナンキョクカワノリの光合成特性

ナンキョクカワノリに吸収された赤外線が光合成に使われていることを確かめるために、自然科学研究機構の基礎生物学研究所にある大型スペクトログラフという装置を使って光合成の活性スペクトルを測定しました。大型スペクトログラフは太陽光と同様の波長スペクトルを持つ強力な白色光源を紫外線から赤外線（250 ~ 1000 nm）まで虹のように分光することができる装置です（https://www.nibb.ac.jp/lspectro/equipment/ols.html）。分光された光をナンキョクカワノリに照射し、各波長の光で発生する酸素量を測定しました。すると、酸素の発生は長波長側で 740 nm 付近まで確認され、酸素発生活性のスペクトルと吸収スペクトルの形がきれいに重なりました。これは、700 nm より長波長の光が光化学系 II を励起できていることに加えて、赤外線による光合成反応が可視光による光合成反応と同等の効率で行われていることを示唆しています（1）。

低いエネルギーで、より高いエネルギーレベルにある分子を励起する反応を“アップヒル（上り坂）型の励起エネルギー移動”と言います。大きなエネルギー差があるはずの反応がエネルギー差の全く無い状態と同様に進むという、一見、既存の科学法則を逸脱しているように見える現象でした（図 1）。

5．新規の光合成アンテナタンパク質の発見

生物の生理学反応の分子メカニズムを解析するためには、その反応を司っているタンパク質

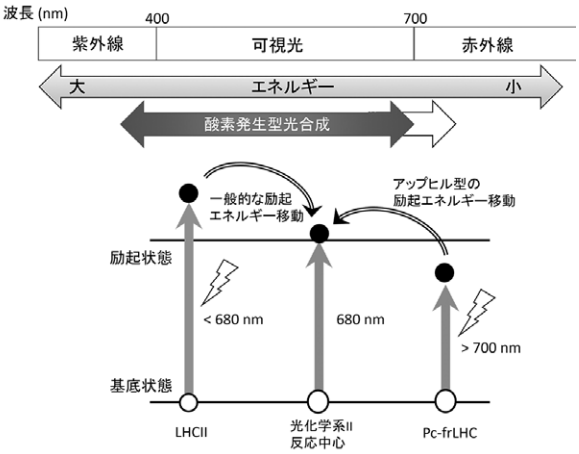


図 1．一般的な植物では可視光のエネルギーで光化学系 II が励起される。ナンキョクカワノリの光合成では、赤外線のエネルギーで励起されたクロロフィルから、より高いエネルギーレベルにあるクロロフィルへアップヒル型の励起エネルギー移動が起きることで光化学系 II が励起されている

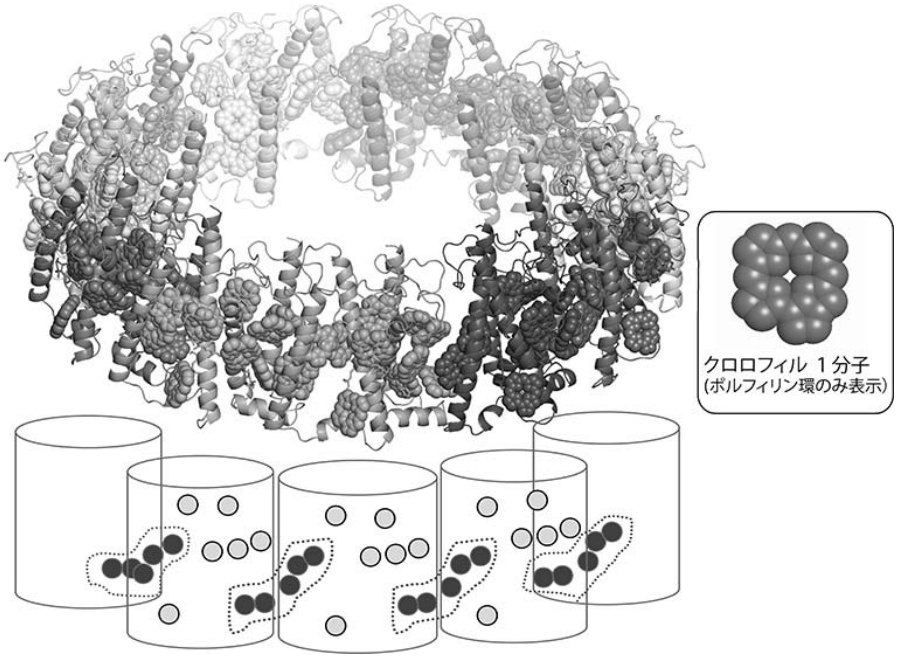


図２．ナンキョクカワノリに見つかった赤外線吸収型のクロロフィルを結合する光捕集アンテナタンパク質 Pc-frLHC。上図は構造解析の結果得られた分子モデルで、リボンと糸状の構造はタンパク質を、座布団状の球体はクロロフィルを示している。下図は分子モデルの一部を簡略化したもので、ひとつのタンパク質を円柱で表し、クロロフィル１つを１つの球で示した。黒い球で示したクロロフィルが赤外線吸収に関与していることが示唆された（裏表紙にカラー図を掲載）

を生理学的な機能を保った状態で細胞から取り出す必要があります。私たちは最終的に遠赤色光を吸収する新規の光捕集アンテナタンパク質 Pc-frLHC（→ CROSS ワード）を精製し、これを用いて構造解析と分光学解析に取り組みました(2)。構造解析は大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構の川崎政人博士、安達成彦博士、守屋俊夫博士、千田俊哉博士により、同機構のクライオ電子顕微鏡を用いた単粒子解析という手法で行われました。

この手法は近年急速に発展を遂げたタンパク質の構造解析技術で、従来の X 線によるタンパク質結晶構造解析で必要とされていたタンパク質の結晶化が必要ないため、結晶化が難しいサンプルや量に限りがあるサンプルの解析にも利用されています。Pc-frLHC の構造解析はクライオ電顕の技術が発展した今だからこそ実現できたと言えます。

こうして Pc-frLHC の３次元立体構造分子モデルを高い分解能で得ることに成功しました。緑藻の一般的な光化学系 II のアンテナタンパク質は３つの LHC タンパク質が結合した構造ですが、今回解析を行った Pc-frLHC は 11 個のタンパク質がリング状に結合している新規の複合体構造でした（図 2)。１つのタンパク質には光を吸収する分子であるクロロフィルが 11 個結合していました。このクロロフィルの立体配置が光の吸収波長特性やその後の励起エネルギー移動に重要な意味を持ちます。通常、クロロフィルは可視光を吸収しますが、複数のクロロフィル分子が接近して相互作用すると、電子軌道の安定化により吸収帯の一部が長波長側へ移動することが知られています。

解析の結果、Pc-frLHC を構成するタンパク質とタンパク質の境界付近（11 カ所ある）でそれぞれ５つのクロロフィルが強く相互作用していることが明らかになりました。このクロロフィル多量体構造が Pc-frLHC の遠赤色光吸収に関与すると考えられます。さらに、東北大学の柴田穣博士によるクロロフィル間の励起エネルギー移動の解析の結果、Pc-frLHC の遠赤色光吸収クロロフィルに吸収された赤外線のエネルギーは、Pc-frLHC

CROSS ワード

Pc-frLHC（*Prasiola crispa* far-red light harvesting Chl-binding protein complex）

ナンキョクカワノリの細胞を破砕し、タンパク質のサイズや電荷の違いで分けることにより、遠赤色光に顕著な吸収帯を持つタンパク質を精製して名付けた。クライオ電子顕微鏡による単粒子解析では、Pc-frLHC の３次元立体構造分子モデルを高い分解能で得ることに成功している。

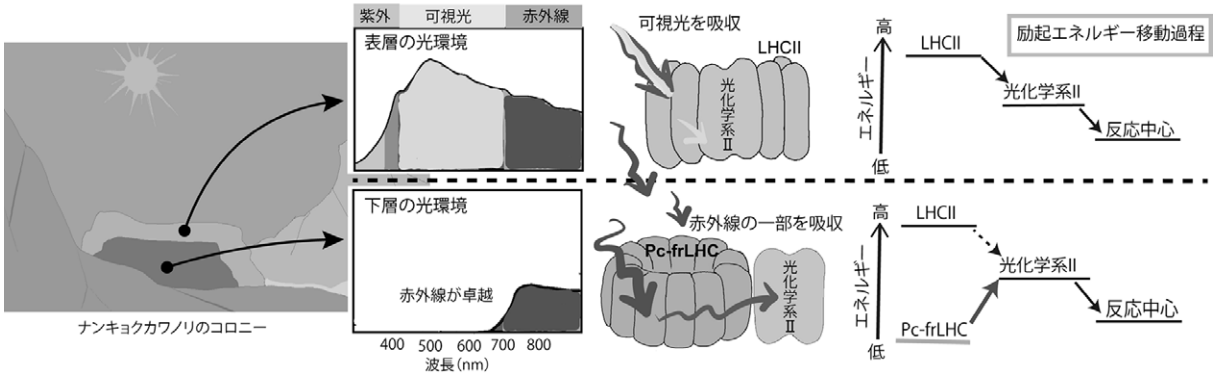


図３．南極に生育するナンキョクカワノリコロニーの光合成特性を示した。可視光が十分に届くコロニーの表層では一般的な藻類と同様に可視光による光合成が行われるが、赤外線が多く可視光が届きにくいコロニー内部では Pc-frLHC が発現し光合成に赤外線が利用できるようになる

に結合する通常のクロロフィルへアップヒル型のエネルギー移動で渡されていることが明らかになりました。この過程で遠赤色光のエネルギーの一部が可視光のエネルギーに変換され、その後の光合成反応が可視光を吸収した場合と同様に進むと考えられます。

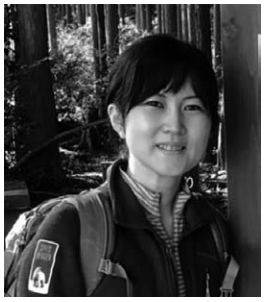
ナンキョクカワノリは南極の陸上環境においてシート状の藻体が幾重にも重なったコロニーを形成しています。コロニーの厚さは 5 mm 程度ですが、コロニーの表面と内部では光環境が大きく異なります。コロニーの表層は可視光と赤外線が両方届きますが、コロニー内部は可視光より赤外線の割合が多くなります。ナンキョクカワノリの藻体はコロニーの表層では赤外線をほとんど吸収しませんが、赤外線の割合が多い環境ほど赤外線吸収帯が顕著になることから、赤外線利用型光合成はコロニーの内部に位置する藻体の光合成生産量を増加させることに役立っていると考えられました（2）（図 3）。

６．今後の展望

今後、Pc-frLHC 内で起きているアップヒル型の励起エネルギー移動の詳細を明らかにするとともに、Pc-frLHC から光化学系 II への励起エネルギー移動についても解析し、赤外線による光化学系 II の高い励起効率について解明を目指します。赤外線で駆動する酸素発生型光合成のメカニズムは、アストロバイオロジー（宇宙生物学）の分野でも注目されています（3）。それは、宇宙に存在する惑星の多くが太陽よりも暗い恒星の周りを回っており、可視光が少なく赤外線の割合が多い環境にあるからです。赤外線利用型光合成の光変換効率と進化学的な側面から、太陽系外惑星の大気に光合成由来の酸素が検出される可能性を追究します。

引用文献

(1) Kosugi M. et al. Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg. 1861, 148139 (2020)
(2) Kosugi M. et al. Nature Communications 14, 730 (2023)
(3) Meadows, V. S. et al. Astrobiology 18, 630 (2018)



小杉　真貴子（こすぎ・まきこ）
1981 年静岡県生まれ。浜松西高等学校普通科を卒業後、兵庫県の姫路工業大学へ進学し、博士後期課程まで播磨 SPring-8 の近くにある理学部キャンパスで過ごしました。地衣類の光合成系における乾燥応答に関する研究で学位を取得し、岡山大学、国立極地研究所、中央大学、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターを経て、現在は自然科学研究機構基礎生物学研究所の特任助教として研究を続けています。

身近にいた新種の微細藻類

淡水性の単細胞性緑藻類メダカモのゲノム解析

東京理科大学大学院 加藤 翔一（研究当時）　東京大学大学院 松永 幸大

東京大学大学院新領域創成科学研究科の松永幸大教授、東京理科大学大学院理工学研究科の加藤翔一大学院生（研究当時）らの共同研究グループは、金魚やメダカを飼育していた水槽の水から、微細藻類を単離・培養することに成功し、全ゲノム配列を同定した。その結果、この微細藻類が新種の緑藻であることが判明し、*Medakamo hakoo*（メダカモ）」と命名して新種登録した。メダカモは淡水性緑藻の中で最も少ない遺伝子数を持つ緑藻であることがわかった。

研究の背景

水槽でメダカや金魚を飼育した経験のある方の中には、藻が繁殖して水槽を緑色に変色させたことがある方も少なくないと思います。黒岩常祥教授の自宅の水槽でも、ある日、緑色に変色した水槽ができてしまいました。この水槽からサンプルを採取し、顕微鏡で観察したところ、多くの真核藻類が増殖していることが分かりました。真核藻類は、陸上植物などと同様に光合成を行う真核生物であり、水中生態系の重要な基盤を築く多様な微生物の一群です。観察された生物の中にはとてもサイズの小さい細胞を持つ、単細胞性の真核藻類が含まれていました。

この細胞のサイズはおおよそ直径 1 マイクロメートルでした。一般的な真核生物の細胞のサイズはおおよそ直径 10 マイクロメートルから 100 マイクロメートルと言われており、それと比べるとこの真核藻類の細胞の直径は数十分の 1 ということになります。著者らはこの生物に興味を持ち、メダカを育てている水槽から採取されたことにちなみ、この真核藻類をメダカモと名付け、さらに解析を進めました。

メダカモの細胞核を、4',6-diamidino-2-phenylindole（DAPI）という DNA 試薬で染色し、蛍光顕微鏡で観察したところ、他の真核生物の細胞核と比べてはるかに小さいことがわかりました[1,2]。また電子顕微鏡を用いたメダカモの観察から、細胞内の構造が非常に単純であることも分かりました[2]（図 1）。例えば、細胞小器官として核やミトコンドリアがそれぞれ 1 つずつしか含まれていません。私たちヒトを含む動物の細胞や、陸上植物の細胞には、細胞小器官が数千個のオーダーで含まれていますので、メダカモの細胞構造は極めてシンプルであると言えます。

メダカモを含む真核藻類や地上で繁栄している陸上植物を含む、一次植物（Archaeplastida）と呼ばれる生物群は、単一の祖先から進化したと考えられています。したがって、重要な遺伝子セット（コア遺伝子セット）はこれらの生物間で保存されて進化していると考えられます。このコア遺伝子セットを同定することは、各生物の特徴や進化の歴史を考察する上で科学的な意義があるだけでなく、植物の品種改良や藻類を使った物質生産の効率化のための基礎データとなり、産業上での価値も大きいと考えられます。メダカモのような細胞構造がシンプルな微細藻類は、遺伝子の構成も同様にシンプルである可能性が高く、コア遺伝子セットを研究するための良い材料となります。そこで、メダカモのゲノムを解析することで、コア遺伝子セットの同定を目指しました。

ある生物が持つすべての遺伝情報をゲノムと

呼びます。生物のゲノムを調べることで、どのような機能を持つ遺伝子をどれくらい保有しているか、近縁種は何か、新種なのか既知の生物なのか、といった情報がわかります。著者らは、メダカモのゲノム解析を通して、メダカモの特徴を明らかにすること、進化的な位置づけを明らかにすることに加え、メダカモゲノムを活用してコア遺伝子セットを同定することを目標に研究を行いました。

研究の結果

メダカモの細胞からDNAを抽出・精製し、DNA塩基配列解析装置・PacBioRSIIを用いて塩基配列を決定しました。メダカモの細胞核由来のDNAとミトコンドリア・葉緑体由来のDNAを完全に同定することができました。このDNA配列を他種の藻類のDNA配列と比較した分子系統解析を行いました。その結果、メダカモは緑藻植物門トレボウクシア藻綱に属する、これまでに報告のない新種の生物であることがわかりました。そのためメダカモを*Medakamo hakoo*と名付け、新種登録を行いました[3]。

メダカモの細胞核DNA配列を、遺伝子解析ソフトウェア「BRAKER2」を用いて解析したところ、7,629個のタンパク質をコードする遺伝子が予測されました。ヒトのタンパク質をコードする遺伝子数は約21,000個、シロイヌナズナの遺伝子数は28,000個あります。このように、メダカモは真核生物の中でも非常に少ない遺伝子数しか持たないことがわかりました。また、遺伝子数が少ない微細藻類のグループの中で比較しても、今まで報告された淡水性の緑藻の中では、最少の遺伝子数しか有していませんでした（図2）。また、興味深い点として、メダカモのゲノムが非常に高いG+C含量を有していることが挙げられます。生物のDNAはアデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、チミン（T）の4種類の塩基を含むヌクレオチドから構成されており、生物種によってGC含量の値は異なります。このGC含量値は50%に近いケースが多く、73%という値は真核生物ではほとんど見られません。この高いGC含量がメダカモにとってどのような意義を持つの

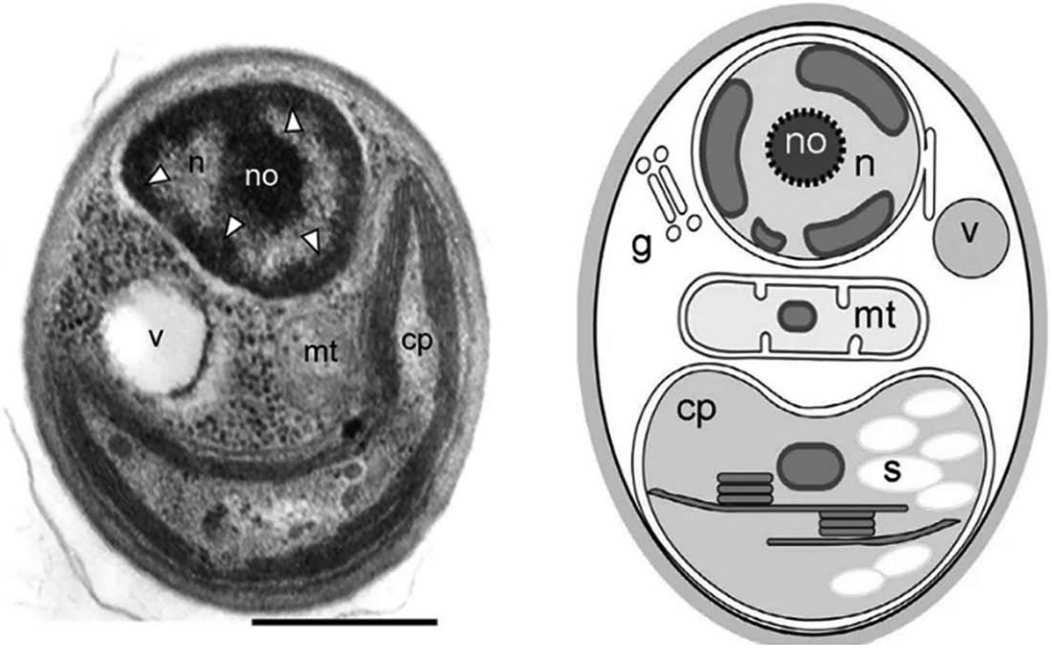


図1 メダカモの電子顕微鏡写真（左）と模式図（右） メダカモは非常に単純な細胞内構造を示す。細胞内小器官として、核（n）、核小体（no）、液胞（v）、ミトコンドリア（mt）、葉緑体（cp）、ゴルジ体（g）を1個ずつ持つ。また、葉緑体内にはデンプン（s）を貯蔵する。スケールバーは500 nmを示す。Kato et al., Communications Biology volume 6, Article number: 89 (2023) クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示4.0国際）を改変して作成

か、現時点で詳しいことはわかっていませんが、メダカモの非常にユニークな特徴です。また、メダカモの遺伝子配列を他の生物と比較した結果、緑藻類の一種である *Botryococcus brauni* とメダカモのゲノムが類似していることが明らかになりました。この *Botryococcus brauni* は油脂を生産する能力が高いことで知られており、産業応用などの分野で注目されている藻類です。さらなる解析の結果、メダカモもボトリオコッカスと同様に油脂を生産する能力があることを、実際に確認することができました。

さらに、他の生物のゲノムとメダカモのゲノムを比較することで、メダカモのゲノムに含まれる遺伝子の構成について解析しました。その結果、過剰な太陽光による毒性を緩和するために必要な遺伝子である LHCSR や、真核生物の中で広く保存されているクロマチン構造の制御タンパク質であるヒストン H1、遺伝子発現制御機構のひとつである RNAi に必要な Dicer や Argonaute などの遺伝子をメダカモは失っていることがわかりました。以上の結果をまとめると、メダカモは他の生物では保存されているような遺伝子が失われており、遺伝子の数が非常に少ないこと、ゲノムの GC 含量が非常に多いこと、油脂を生産する能力があることなどが新たに分かりました。

次に、この研究のもう一つの目的である、一次植物にとってコア遺伝子セットを予測するためのアプローチを行いました。きわめてシンプルな構成であるメダカモゲノムと他の微細藻類のゲノムを比較し、種間で共有されている遺伝子を解析することによって、藻類の中で生存するために必要不可欠なコア遺伝子セットを予測できると考えられます。すでにゲノムが解読されている 14 種の微細藻類にメダカモを加えた 15 種類の微細藻類に共通する遺伝子を解析したところ、真核藻類の中で 1,263 種類の遺伝子グループが共通に存

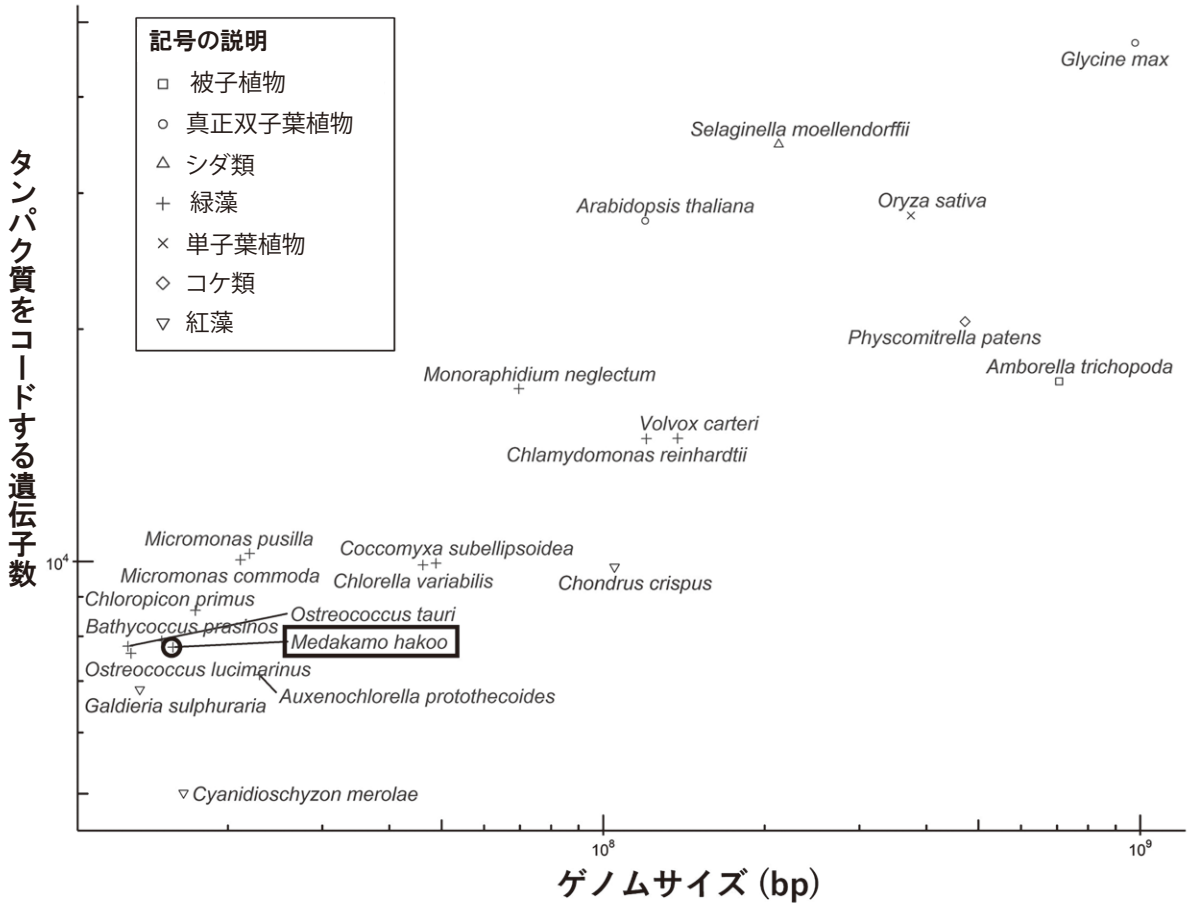


図 2 一次植物のゲノムサイズと遺伝子数　メダカモを黒枠で図示した。Kato et al., Communications Biology volume 6, Article number: 89 (2023) クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示 4.0 国際）を改変して作成

在することがわかりました。その中で、279 種類の遺伝子グループは真核藻類の中で特異的なグループであり、代謝のプロセスに関連する機能を持つ遺伝子が多く含まれていることがわかりました。

本研究の意義

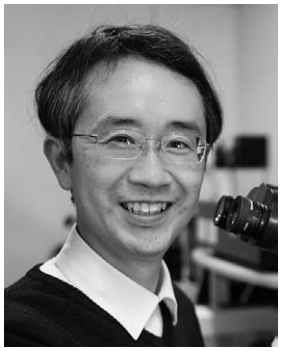
今回メダカモゲノムを利用して得られたコア遺伝子ファミリーは、一次植物の生存に必須である可能性が高いと考えられます。陸上植物や産業利用される真核藻類の品種改良の際に、今回得られた情報が活用できる可能性があると考えられます。例えば、コア遺伝子の機能を妨げないように、品種改良を進めることが可能となります。

また、メダカモゲノム解析の結果から、真核藻類の進化に関して新しい考察が得られました。これまで、真核藻類の中には、メダカモと同様に少ない遺伝子で構成されたゲノムをもつ生物が複数報告されています。しかしながら、これらの生物の多くは、高温強酸性の温泉の中であったり、海水中に生息していたりするものがほとんどでした。今回、一般家庭の水槽で生育する淡水性藻類において、非常に小さいゲノムを持つメダカモが発見されました。これは、遺伝子構成を少なく保つという進化が、様々な環境で独立に生じたことを示唆しています。メダカモの発見は、真核藻類の進化に関して新しい洞察が得られたという点においても価値があると考えられます。

参考文献

1. Kuroiwa, T., Ohnuma, M., Nozaki, H., Imoto, Y., Misumi, O., and Kuroiwa, H. (2015). Cytological Evidence of Cell-Nuclear Genome Size of a New Ultra-Small Unicellular Freshwater Green Alga, "*Medakamo hakoo*" strain M-hakoo 311 I. Comparison with *Cyanidioschyzon merolae* and *Ostreococcus tauri*. Cytologia 80, 143–150.
2. Kuroiwa, T., Ohnuma, M., Imoto, Y., Misumi, O., Nagata, N., Miyakawa, I., Fujishima, M., Yagisawa, F., and Kuroiwa, H. (2016). Genome Size of the Ultrasmall Unicellular Freshwater Green Alga, *Medakamo hakoo* 311, as Determined by Staining with 4′, 6-Diamidino-2-phenylindole after Microwave Oven Treatments: II. Comparison with *Cyanidioschyzon merolae*, *Saccharomyces cerevisiae* (n, 2n), and *Chlorella variabilis*. Cytologia 81, 69–76.
3. Kato, S., Misumi, O., Maruyama, S., Nozaki, H., Tsujimoto-Inui, Y., Takusagawa, M., Suzuki, S., Kuwata, K., Noda, S., Ito, N., et al. (2023). Genomic analysis of an ultrasmall freshwater green alga, *Medakamo hakoo*. Commun. Biol. 6, 89.

加藤　翔一（かとう・しょういち）
2020 年東京理科大学大学院 理工学研究科 応用生物科学専攻修了。博士（理学）。バイオテクノロジー研究や藻類のゲノム生物学、細胞生物学に従事。



松永　幸大（まつなが・さちひろ）
東京・青山生まれ。筑波大学附属駒場高校卒業、東京大学理学部生物学科卒業。1998 年 東京大学大学院理学系研究科生物科学専攻博士課程修了、博士（理学）取得（指導教員・黒岩常祥教授）。日本学術振興会・PD 特別研究員、米国ノースカロラナイ大学研究員、東京大学助手、大阪大学講師・准教授、東京理科大学准教授・教授、東京理科大学合成生物学研究部門・部門長を経て、2020 年 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端生命科学専攻教授、現在に至る。専門は、分子細胞生物学、生命動態学。

温暖化に負けないイネ品種を開発する
高温気象年にコメの品質低下

農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター　坂井　真

何年も前から、「地球温暖化」という言葉をテレビニュースや新聞記事で目にするようになりました。最近では、夏になると毎年のように「猛暑日」や「異常高温」という報道がなされています。「気象変動」が原因ではないかと言われる大雨による水害などの気象災害もしばしば起こっています。「地球温暖化」がいよいよ身近に迫る存在になり、その影響を緩和するための温室効果ガスの削減対策や、生活や産業のありかたを温暖化に適応させる「適応技術」の確立が求められています。本稿では、「地球温暖化」が日本農業、とりわけ日本人にとって大切な食糧であるお米を生産する稲作に及ぼす影響と、温暖化に適応しようとする稲作の技術開発について紹介します。

はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書[1)]では、人間の活動の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がないこと、また、人為起源の気候変動は、世界中の全ての地域で多くの極端な気象と気候に既に影響を及ぼしていることを明示しています。日本の気象庁も、日本の平均気温は様々な変動を繰り返しながら上昇しており、稲作に影響の大きい夏（6～8月）の平均気温は、長期的には100年あたり1.19℃の割合で上昇していると指摘しています[2)]。イネが生長する夏季の気温が上昇傾向にあることは疑いがないようです。

高温になるとイネはどうなるか

それでは、夏季に高温になるとイネはどのような影響を受けるのでしょうか、イネはもともと熱帯原産の作物で、高温条件でよく生育する特長を持っています。日本では昔から初夏に田植えをして暑い夏に生育させ、秋に収穫する作型が一般的です。高温条件下ではイネの生育は促進され、成長が早くなります。かつては東北地方の一部や北海道では、イネの生育に必要な温度が確保できないため、生育が遅れたり収穫量が減少したりする問題があり、作柄不安定の原因になっていました。これに対し特に春先に苗を保温して育てる技術の進歩と、生育が早い早生品種の開発により、こうした地域でも安定した稲作ができるようになりましたが、かつては高温よりも低温気象のほうが稲作の大敵だったのです。

一方、イネが穂を出し実ってゆく時期がこれまでより高温になることで、これまで顕在化していなかった問題が明らかになってきました。農林水産省は2006年以降、気温上昇がわが国の農業生産にどのような影響を及ぼしているのかを調査し、とりまとめ公表しています[3)]。さらに大学や公的研究機関でも様々な調査や研究が行われた結果、高温が稲作、特に作柄やコメの品質に与える影響が明らかになってきました。

一つはイネの花の咲く時期に高温になることで、受粉がうまくいかず、結果として米粒が実らなくなる現象（高温による不稔）です、もう一つは受粉が終わった後、もみの中に炭水化物などの養分が供給されて、米粒が実ってゆく時期に高温になることに、米粒の実りが不十分になる現象（高

温による登熟障害）です。どちらも、日本国内で発生が報告されていますが、現時点で被害がより深刻であるのは、後者の高温による登熟障害のほうです。ただし、高温不稔についても今後温暖化が進行すると問題が深刻化する可能性があり、将来的には本格的な技術対策が必要になると思われます。

高温による登熟障害は、品種による被害の差があるもののイネの穂が出てから約 20 日間の平均気温が 26 度～ 27 度以上で被害が発生し始め、高温になるほど影響が大きくなります。その被害は、米粒の中のデンプンの詰まり方が不十分になることで、米粒の一部または全部が白く濁る「白未熟粒」が多発する形で現れてくることが一般的です。特に高温登熟条件では、米粒の胚に近い付け根の部分が濁る「基部未熟粒（基白）」、米粒の側面が濁る、「背部未熟粒（背白）」の発生が特徴的ですが（写真１）、米粒全体が白濁する乳白粒が多発することもあります。

いずれにせよ、上述の白未熟粒は、品質検査で正常な粒（整粒）とはみなされず、一定割合以上発生すると、コメの検査等級低下の原因となります。また、登熟障害の程度がひどい場合は、粒の厚さが薄くなることによるくず米発生の増加や一粒の重さの減少により収量にも影響が出ることもあります。1999 年、2010 年、2021 年など、過去、夏季が高温になった年は、広い地域でコメの検査等級の低下がみられ、高温気象年のコメの品質低下は近年大きな問題となっています。

高温登熟耐性の強いイネ品種開発

こうした、高温登熟による米の品質低下をできる限り軽減するために、これまで主に栽培技術面からの取り組みがなされてきました。対策技術は多岐にわたりますが、主要な対策技術として田植えを遅らせる（遅植え）により、イネの出穂を遅らせ高温を回避すること、高温時期に灌漑水を田んぼに流す（かけ流し）ことで、水の冷却効果で高温の影響を和らげることが、取り組まれています。これらは、一定の効果は認められていますが、地域の作業慣行や水利慣行、灌漑水の供給量などの制約から、十分な対策が難しい局面もしば

写真１　2019 年（夏季高温年）新潟県産の玄米
左：にじのきらめき（高温登熟障害に強い）、右：コシヒカリ。※コシヒカリには高温登熟障害による白未熟粒が多発している。

しば見受けられ、栽培技術だけでの対応では被害を防ぎきれないのが現状です。このような状況下で、高温登熟条件でも白未熟粒の発生が少なく、品質低下を起こしにくい品種があれば、温暖化適応技術として大いに期待できます。

日本では、高温登熟に強い品種を育成する取り組みは 1990 年代末頃から一部の研究機関で始まり、2000 年代以降、高温による米の品質低下が顕在化した時期に、農研機構をはじめ数多くの公的試験研究機関で本格的に行われるようになってきました。その一環として、効率的に品種を選抜するために、数多くの育成系統を均一の条件で検定できる高温登熟耐性の評価手法がいくつも開発されてきました。それらのほとんどが高温の影響を受けやすい登熟前半を高温に遭遇させて評価する手法です。その方法を大別すると（1）作期の早進により登熟期を高温に遭遇させる方法、（2）ガラス室やビニールハウス等の被覆物により群落周辺を高温にする方法、（3）人工気象室等の環境調節装置を用いる方法、（4）温水灌漑により、イネの群落周辺の気温を上昇させる方法等が開発され、それぞれ育種における検定法として用いられてきました。

こうした手法が確立されると、従来の品種の中に高温登熟に強いものと弱いものがあることが明らかになってきました。一方で、そのような品種の反応（強弱）を整理して、地域ごとに高温登熟耐性の基準となる品種のセット（基準品種）を確立する必要が生じてきました。農研機構では、2017 年に東北地域から九州までの主要品種の高温登熟耐性を再検討して、統一的な基準品種を選

定しました（表 1）[4]。これにより、品種登録出願などで必要となる高温登熟耐性の評価を効率的に行えるようになることが期待されます。

主要イネの高温登熟耐性と強い品種の育成

前述のように、高温登熟耐性の検定法や基準品種が確立され、主要品種について高温登熟耐性の強弱が評価できるようになりました。その結果、日本で最も多く栽培されている「コシヒカリ」の高温登熟耐性は「中」、または「やや弱」で強くはないことが明らかになりました。また、西日本から九州にかけての暖かい地域の主力品種で、全国作付け 3 位の「ヒノヒカリ」の高温登熟耐性は「弱」であり、被害を受けやすいことも明らかになりました。実際、2000 年代のはじめ頃から九州を中心に「ヒノヒカリ」の登熟期に高温に遭遇した年、地域で明らかな検査等級の低下が数多く報告されてきています。また、「コシヒカリ」についても、2010 年や 2019 年などの夏季に顕著に高温になった年に新潟県などの主産地で検査等級の低下が見られるようになってきています。このように地球温暖化による夏季の高温気象が、主要なブランド米の品質にも明らかに影響するようになってきており、これに対応する品種の必要性は増してきています。

高温登熟耐性を備えて、かつ収量や米の食味などが優れた実用品種の先駆けとしては、「こしいぶき」（新潟県育成）、「ハナエチゼン」（福井県育成）、「ふさおとめ」（千葉県育成）などが挙げられます、最近では各地の公的試験研究機関でも高温登熟耐性が改良された品種が数多く育成されています。しかしながら、全国の作付け上位 20 位以内の品種のうち、ある程度の高温登熟耐性を示すとみられる品種は、きぬむすめ （作付け 9

表１　高温登熟耐性評価基準品種（東北以南各地域向け）

地域区分	生態型	弱	やや弱	中	やや強	強
寒冷地北部・中部	極早生・早生	駒の舞 初星		むつほまれ **あきたこまち**	ふ系 227 号 里のうた こころまち	**ふさおとめ**
	中生	**ササニシキ**		**ひとめぼれ** **はえぬき**	みねはるか	
	晩生・極晩生			**コシヒカリ**	**つや姫**	笑みの絆
寒冷地南部	極早生・早生	初星		**あきたこまち** **ひとめぼれ**	ハナエチゼン	
	中生	ともほなみ	**コシヒカリ**			笑みの絆
	晩生・極晩生	祭り晴		**日本晴** **みずほの輝き**	**あきさかり**	
温暖地東部	極早生・早生	初星 あかね空		**あきたこまち** **コシヒカリ**	**とちぎの星**	**ふさおとめ** 笑みの絆
	中生	**彩のかがやき** さとじまん		**日本晴**	**なつほのか**	
	晩生・極晩生	葵の風 **ヒノヒカリ**			コガネマサリ	
温暖地西部	極早生・早生		**キヌヒカリ**	**あきたこまち** **ひとめぼれ** **コシヒカリ**	**ハナエチゼン** **つや姫**	**ふさおとめ**
	中生	祭り晴		**日本晴**		
	晩生・極晩生	葵の風 **ヒノヒカリ**			コガネマサリ	
暖地	極早生・早生	初星 祭り晴	黄金晴	**日本晴**	みねはるか	**なつほのか**
	中生	**ヒノヒカリ**	シンレイ	**にこまる**	コガネマサリ	おてんとそだち
	晩生・極晩生	あきさやか	たちはるか		ニシヒカリ	

注）農研機構（２０１７）の研究成果情報をもとに作表

ゴシック太字は農林水産省発表の米の検査結果（令和４年産）[7] で年間５０００トン以上の検査実績があり、一定の普及が認められる品種

位、主産地:島根、岡山、鳥取他、シェア 1.7%)、こしいぶき (作付け 10 位、主産地:新潟、シェア 1.5%)、つや姫(作付け 12 位、主産地:山形、宮城、島根、シェア 1.3%)、ふさこがね(作付け 15 位、主産地:千葉、シェア 0.9%)、あきさかり(作付け 18 位、主産地:広島、徳島、福井、シェア 0.8%)、とちぎの星(作付け 20 位、主産地:栃木、シェア 0.6%)など、それほど多くはなく[5)]、20 位以下の品種を合わせてもまだ全国の作付面積の 10 数%程度のシェアにとどまっています(表2)[3)]。それでも、高温登熟耐性品種の作付け割合はここ数年着実に増加傾向にあります。温暖化に対応した安定した稲作を担保するためには、これまで以上に高温登熟耐性品種への切り替えを進めてゆく必要があると考えられます。

おわりに

近年、各作物でゲノムの解読が進んだ結果、実用形質に関係した遺伝子に連鎖する DNA マーカーの整備が進んでいます。イネはゲノムの解読がもっとも早くから進められた作物のひとつで、ＤＮＡマーカー多型を利用した遺伝解析が進んでいました。それにより「ハナエチゼン」「越路早生」など高温登熟耐性の強いとされる日本品種や、海外由来のインディカ品種が持つ高温登熟耐性に関連した遺伝子について解析がなされており、また、

表２　高温登熟耐性品種の作付け動向(単位:ha)

品種名	育成地	品種命名年	H29 産	H30 産	R1 産	R2 産	R3 産	主な産地
きぬむすめ	農研機構	H17	17144	18839	20446	21986	22432	島根県、岡山県、鳥取県
こしいぶき	新潟県	H12	ー	20800	20800	20200	20100	新潟県
つや姫	山形県	H21	11248	11339	11580	16301	17101	山形県、宮城県、島根県
ふさこがね	千葉県	H16	8624	11710	11626	12600	11800	千葉県
とちぎの星	栃木県	H23	2511	4330	4500	6100	9400	栃木県
あきさかり	福井県	H21	4174	4680	5640	7960	8930	広島県、徳島県、福井県
にこまる	農研機構	H17	7051	5952	6042	7475	7383	長崎県、愛媛県、岡山県
元気つくし	福岡県	H21	6220	6230	6230	6630	6430	福岡県
ふさおとめ	千葉県	H9	6653	7345	6728	6900	5900	千葉県
彩のきずな	埼玉県	H24	3400	4000	5200	6300	6600	埼玉県
さがびより	佐賀県	H21	5180	5120	5340	5360	5380	佐賀県
ゆきん子舞	新潟県	H17	3489	4200	4800	5300	5300	新潟県
てんたかく	富山県	H15	3900	4000	4000	3900	3900	富山県
雪若丸	山形県	H29	ー	1709	2704	3500	3800	山形県
みずかがみ	滋賀県	H24	2575	2748	3208	3303	3310	滋賀県
新之助	新潟県	H27	1100	2100	2600	2900	3300	新潟県
てんこもり	富山県	H19	2600	2600	2600	2700	2650	富山県
なつほのか	鹿児島県	H27	100	483	1076	1838	2393	長崎県、大分県、鹿児島県
その他			7785	8561	10747	11971	14890	
高温登熟耐性品種計 (ha)			93754	126746	135867	153224	160999	
主食用作付面積計 (ha)			1370000	1386000	1379000	1366000	1303000	
高温登熟耐性品種の作付け割合(%)			6.8	9.1	9.9	11.2	12.4	

※出展:　令和３年地球温暖化影響調査レポート(農林水産省)[3)]の表をベースに一部加筆。

そうした高温登熟耐性遺伝子の情報をもとに選抜された「富富富」（富山県育成）のような品種も開発されつつあります。一方で、現行の高温登熟耐性品種は出穂後 20 日間の平均気温 が 28℃前後の条件では優れた玄米品質を示すものの、近い将来さらに温暖化が進行した場合に備え、より高い登熟気温に耐える育種素材や、先に説明した開花期の高温で発生する高温不稔への耐性を持つ育種素材も準備しておく必要があり、外国品種や野生種も含めた幅広い遺伝資源の探索、解析と育種への活用が必要になると考えられます。

また、温暖化に伴い一部の病害虫の発生も増加すると予測されます。とくに近年では暖地、温暖地を中心に吸汁性害虫のトビイロウンカやウイルス性病害の縞葉枯病による被害が増加傾向にあります。現状の高温登熟耐性品種の多くは、耐病虫性については「コシヒカリ」等の従来品種と大差ないため、高温登熟耐性とともにこれらへの抵抗性を強化した品種開発も進める必要があると考えられます。その一例として、農研機構で最近開発された「にじのきらめき」[6] は、「コシヒカリ」と近い収穫時期、かつ同等のご飯の美味しさを備えた上、高温条件下での白未熟粒発生が明らかに少ない品種です（写真１）。さらに倒れにくく収量が多く、縞葉枯病やいもち病への強さも改良されています。最新の高温登熟耐性品種として生産が急拡大しており、今後一層の普及拡大が期待されます。

（参考資料）

１）気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 6 次評価報告書（AR6）サイクル「政策決定者向け要約」文科省、経産省、気象庁、環境省による暫定訳【2023 年 4 月 17 日時点】 環境省　https://www.env.go.jp/content/000127495.pdf

２）日本の季節平均気温　日本の夏 (6 ～ 8 月) 平均気温偏差の経年変化（1898 ～ 2022 年） 気象庁　https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/sum_jpn.html

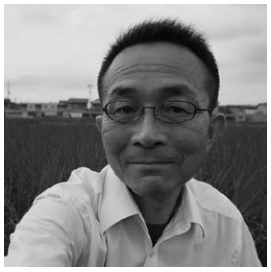
３）令和 3 年地球温暖化影響調査レポート　農林水産省 https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/report-54.pdf

４）農研機構　次世代作物開発研究センター 2017 年の成果情報　北海道を除く全国の水稲高温登熟性標準品種の選定 https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/nics/2017/17_038.html

５）令和 3 年産 水稲の品種別作付動向について 公益社団法人 米穀安定供給確保支援機構 https://www.komenet.jp/pdf/R03sakutuke.pdf

６）高温登熟性と耐倒伏性に優れ、イネ縞葉枯病抵抗性を備えた多収の水稲新品種「にじのきらめき」の育成 長岡 一朗　ほか　(2020) 育種学研究　22 巻 2 号 p. 167-173

７）令和 4 年産米の農産物検査結果（令和 4 年 12 月 31 日現在） 農林水産省 https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/attach/pdf/index-25.pdf



坂井　真（さかい・まこと）

1985 年京都大学農学部卒。同年年農林水産省 (現農研機構) 入省、以後広島県、つくば、青森県、福岡県の研究所で 28 年間水稲の品種改良に従事。「にこまる」「ミズホチカラ」「あきだわら」「あさゆき」等、50 品種以上の開発に関与。2013 年より農研機構の産学官連携、広報業務に従事し、品種特性を活かした製品の開発支援等を公設試、民間企業等との協働で行う。２０１８年より研究管理業務に従事。2023 年 3 月農研機構を定年退職。2023 年 4 月より、生物系特定産業技術研究支援センター研究リーダー。博士・農学。受賞歴：日本育種学会賞、日本畜産大賞ほか。

姿消す冬季の小鳥が心配

土浦・宍塚で見られる野鳥の変遷

宍塚歴史と自然の会　及川　ひろみ

土浦市宍塚の里山では、里山の鷹「サシバ」が毎年、4月初旬には東南アジアから渡って来ます。そして初夏には雛を伴い大空を旋回する姿が見られます。

「宍塚の里山」どんなところ？

JR土浦駅、つくばTXつくば駅から共に約4kmにある「宍塚の里山」は、東京駅からだと50kmに位置します。土浦市宍塚側が100ヘクタール（ha）、つくば側が約80ha、東京から筑波山麓までで最大級の里山で、環境省「生物多様性保全上重要な里地（重要里地里山）」に選定されています。里山の中央にある宍塚大池は、広さ約3.5haの溜め池で、農林水産省「ため池百選」に選定されており、冬には毎年1000羽を超えるカモ類が見られます。

この里山は雑木林、谷津、田や畑、草原、湿原、昔ながらの小川や湧水など、多様な自然環境によって構成され、多様な環境要素が幾多の生き物を育む場となり、レッドデータブックに掲載されている数多くの種が確認でき、この里山の重要性の所以の一つになっています。

また、里山は人の暮らしと共に利用されてきた場所で、宍塚には旧石器時代から近代までの遺跡・遺構が大池を囲むように高密度に散在し、池の北側には宍塚古墳群があり、里山の一角には大型貝塚である、上高津貝塚（国指定遺跡）があります。さらに宍塚集落には国指定重要文化財の銅鐘を有する般若寺があるなど、史跡の多さもこの里山の特長で、まさに自然環境、歴史的な環境に恵まれた里山と言えます。

里山で会が行っている主なこと

宍塚の自然と歴史の会は1989年発足以来、この自然と歴史的遺産をより深く理解しながら、地域の特性に即した姿で未来に受け渡すことを目的に1989年9月に発足しました。

自然環境調査：環境省が実施しているモニタリング1000調査（重要生態系監視地域モニタリング推進事業）は、100年間自然を見つめ，環境の変化を把握し保全に役立てるための調査です。宍塚は，この事業の「里地里山」調査の中心的な場所として、「コアサイト」に選定され、植物、野鳥・チョウ類、哺乳動物、水質、カヤネズミ、カエルの卵塊調査を2006年から実施しています。モニタリング1000による野鳥の調査は繁殖期と越冬期にそれぞれ2回、あらかじめ決められたルート（水田、谷津、林縁、池、林縁、混交林、畑を通る800mのルート）を3回歩き、出現した鳥、数、繁殖期には餌を運ぶ記録に加え、幼鳥、成鳥を記録するもので、調査時間はほぼ一定です。

また、森林、池、湿地、草原、谷津、田畑、小川、竹林、針葉樹林など多様な環境を対象に、水質、キノコ、サシバ（鷹）、湿地植生調査などの自然環境調査も行っています。

これらの調査で得られた情報をもとに，専門家の指導を仰ぎ、保全目標・計画を立て，再生・保全に取り組む努力を続けています。

保全活動：生物の多様性を求めた環境の整備活動を雑木林、草原、小川、竹林、谷津田で行っており、雑木林では、基本は明るい森づくりであり、毎年下草刈り・落ち葉掻き，大木となったコナラ・クヌギ、常緑広葉樹の伐採、整備、竹林の整備、

散策路の整備など合計 10ha 実施しています。

環境教育活動：専門家を講師に招いた月例テーマ観察会、毎週土曜の観察会、日本野鳥の会との月 1 回合同探鳥会、月 1 回子ども探偵団を実施しているほか、幼児、小中学校、大学生、一般に向けた環境学習を行っています。

広報、出版活動：地元との協働活動など、多岐にわたった活動が約 400 人の会員によって行われています。

宍塚の里山に見られた野鳥

モニタリング調査に先立ち、会発足の頃から土曜観察会（毎週）を行っていますが、その記録を会報「五斗蒔（ごとまき）だより」（月刊）に 1990 年 5 月号から掲載しています。その後 2006 年に開始したモニタリング調査の記録と合わせ、宍塚で記録された野鳥の観察記録の合計は、2022 年 12 月現在 159 種です。（表参照）

里山で見られた野鳥の変遷、特徴的な種について

1．記録開始当初と比較し、現在はほとんど見られない種　ムナグロ、アオバズク、セッカ、イスカ、タゲリ、ショウドウツバメ、センダイムシクイ、オナガ

2．記録開始当初は見られなかったが、最近は見られる種　オカヨシガモ、オオバン、キビタキ、ヤマガラ、ミサゴ

3．冬期、最近の傾向　マヒワ、アトリ、ウソ、ベニマシコ、クロジ等、冬に見られる小鳥たちが、2022 年～ 23 年にかけての冬期、全く見られませんでした。近年冬期に見られる小鳥の種類が減ってきているように思われ寂しく感じます。

外来種

宍塚で確認された外来性の野鳥はドバト、コジュケイ、セキセイインコ、ソウシチョウ、ガビチョウの 4 種です。

ドバト、コジュケイは 1990 年から毎年継続して記録しています。コジュケイは、繁殖期調査でも毎年記録され、ヒナを連れた姿を度々見ることから繁殖が確実です。ソウシチョウは 2001 年から 2003 年、2005 年、2010 年、2015 年から 2017 年、2020 年に記録されていますが、繁殖期の記録はありません。ガビチョウは 2019 年から毎年記録され、2021，2022 年、繁殖期の調査で記録されていることから、繁殖している可能性が考えられます。

宍塚の「サシバ」

サシバは特に繁殖期、カエルやヘビを捉え育雛を行う鷹です。田んぼの耕作をしている谷津田には、特に多くのカエルやヘビが生息していますが、サシバにとって餌を確保しやすいよう、谷津の田んぼ以外のアシ原は冬の間にアシを刈り取る等、サシバがヒナを育てやすい環境の整備も行っています。会では 2011 年を除き、1991 年から毎年サシバの行動調査を行っています。その結果、ほぼ毎年繁殖が確認されています。

次世代に次ぐべき価値ある里山

このように、宍塚の里山は、自然ばかりでなく文化財も豊かな貴重な地域であり、次世代にも引き継ぐべき環境です。しかし、この地域は、鳥獣保護区や保安林などにも指定されておらず、開発の波が押し寄せてくることが懸念されます。里山を侵食するように、林が削られ太陽光発電施設が建設されたり、残土の捨て場になったりと、環境が少しずつ悪化しています。

また、現在、東京の秋葉原とつくば市を 45 分で結ぶつくばエキスプレスがありますが、終着駅のつくば駅から茨城県内への延伸が検討されています。土浦駅への延伸が最有力となり、つくば駅と土浦駅を直線で結ぶと、宍塚の里山のすぐ横を鉄道が敷設されることになります。このように、宍塚の里山の将来は、決して安泰なものではありません。恒久的に保全するための有効な施策が行われることを強く願っています。

及川　ひろみ（おいかわ・ひろみ）
1943 年生まれ。1979 年茨城に転居。1980 年宍塚に出会う。1987 年宍塚に大型開発計画があることを知る。1989 年「宍塚の自然と歴史の会」を生物の多様性の保全を意識し立ち上げる。1997 年から 2020 年代表。

表　宍塚の里山で確認された野鳥（159種）の推移　1990年～2022年、毎年確認した種（43種）、確認が1回の種（30種）、この期間以外に見られた希少種：ヤマショウビン、1982年（小山完二）

年次	出現回数	90-94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
確認種類数		141	85	90	92	84	85	80	81	83	75	82	85	77	78	85	90	83	83	86	84	91	90	98	93	85	80	92	90	82
キジ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ヒドリガモ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
マガモ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
カルガモ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ハシビロガモ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
オナガガモ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
コガモ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
カイツブリ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
キジバト	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
アオサギ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ダイサギ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
コサギ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
バン	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ホトトギス	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
トビ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
オオタカ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
サシバ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ノスリ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
カワセミ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
コゲラ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
アカゲラ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
モズ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
カケス	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ハシボソガラス	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ハシブトガラス	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ヤマガラ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
シジュウカラ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ツバメ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ヒヨドリ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ウグイス	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
エナガ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
メジロ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ムクドリ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
シロハラ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
アカハラ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ツグミ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ルリビタキ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ジョウビタキ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
キビタキ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
スズメ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ハクセキレイ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
セグロセキレイ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
カワラヒワ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
シメ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ホオジロ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
カシラダカ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
アオジ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
コジュケイ	29	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
オカヨシガモ	28	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
チュウサギ	28	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
オオバン	28	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ヒバリ	28	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
カワウ	27	●		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ゴイサギ	27	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●
フクロウ	27	●	●	●		●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
キセキレイ	27	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ベニマシコ	26	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●			
アマサギ	25	●	●	●			●		●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
タゲリ	25	●	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	
オオヨシキリ	25	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
トラツグミ	25	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●		
ウソ	25	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●		
コチドリ	24	●	●		●	●	●	●		●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●
マヒワ	24		●	●	●	●			●	●		●			●	●	●	●	●	●	●	●	●		●			●	●	●
ドバト	24	●			●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
チョウゲンボウ	23	●	●	●	●						●	●	●	●	●		●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●
ビンズイ	23	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●		●	●	●	●		●	●	●	●				●	●	●
ヨシガモ	22	●			●	●	●	●			●		●	●	●	●		●	●	●		●		●	●	●	●	●	●	●	●
ホシハジロ	22	●	●		●	●	●	●		●				●	●		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
センダイムシクイ	21	●	●	●	●		●	●	●	●		●	●		●		●	●	●	●	●	●			●	●	●	●		
セッカ	21	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●		●	●					
ハイタカ	20	●	●	●						●		●	●	●	●		●	●		●	●	●	●		●	●	●	●	●	●
クロジ	19	●	●	●			●	●	●			●	●			●	●				●	●	●	●	●	●		●	●	●
ツミ	18	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●						●	●	●	●		●		●
オナガ	18	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●					●			●					●	
オシドリ	17	●					●								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●
トモエガモ	16	●		●		●	●		●				●	●		●	●			●			●	●	●			●	●	●
アマツバメ	16	●	●	●	●		●	●	●	●		●				●	●			●		●					●	●		
ミサゴ	16	●		●	●	●			●	●		●							●			●	●	●	●	●	●	●	●	
ハヤブサ	16	●	●	●	●			●		●			●	●	●	●	●	●	●				●					●	●	
キクイタダキ	16	●	●	●	●	●	●									●		●		●	●			●		●	●	●	●	●
アトリ	16		●			●		●	●		●					●	●	●		●				●	●	●		●	●	●

年　次 確認種類数	出現 回数	90-94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ショウドウツバメ	15	●	●			●		●	●	●				●	●		●	●	●	●	●	●		●						
ミソサザイ	15	●		●	●	●										●	●			●		●	●	●	●	●		●	●	●
イカル	15	●	●	●			●	●	●	●								●	●			●		●	●	●		●	●	
アオゲラ	14	●		●	●	●	●	●	●	●	●		●	●						●				●						●
サンコウチョウ	14	●		●								●		●	●			●	●			●	●	●	●		●	●	●	
コサメビタキ	14	●	●					●		●			●	●		●	●		●			●	●		●		●		●	
ミコアイサ	13	●		●	●		●						●			●	●	●						●	●	●	●			●
タシギ	13	●	●																●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●
ヒガラ	13	●	●	●	●		●	●				●				●			●	●	●							●	●	
ミヤマホオジロ	12	●		●	●	●						●				●	●			●		●	●	●			●			
キンクロハジロ	11	●		●											●					●		●	●			●	●	●	●	●
クサシギ	11	●		●	●											●							●	●	●	●	●		●	●
オオルリ	11	●			●			●	●	●		●						●			●	●			●		●			
タヒバリ	11	●		●	●	●										●	●				●	●		●				●	●	
ツツドリ	10	●	●		●			●		●		●	●	●	●						●									
ハチクマ	10	●	●			●	●											●					●	●	●	●		●		
カッコウ	9	●	●		●						●	●	●	●			●					●								
ヤブサメ	9	●				●	●		●				●	●					●						●				●	
ソウシチョウ	9								●	●	●		●					●					●	●	●			●		
コハクチョウ	8	●			●		●	●	●				●	●						●										
イソシギ	7	●											●									●	●	●	●					●
スズガモ	6	●									●	●	●		●	●														
オオハクチョウ	5	●									●									●	●	●								
クイナ	5	●		●																			●	●				●		
ヤマシギ	5	●	●													●	●					●								
アリスイ	5	●			●	●													●						●					
コガラ	5	●														●	●			●	●									
ムナグロ	4	●	●	●	●																									
タカブシギ	4	●																					●		●				●	
アオバズク	4	●								●							●	●												
キレンジャク	4	●			●																		●					●		
カヤクグリ	4	●					●								●							●								
オオジュリン	4	●			●				●															●						
ガビチョウ	4																										●	●	●	●
シマアジ	3	●				●		●																						
アオバト	3											●							●		●									
ヨシゴイ	3	●																	●		●									
ケリ	3																							●	●	●				
イカルチドリ	3	●																						●	●					
イワツバメ	3	●	●			●																								
ヒレンジャク	3																●						●					●		
ノビタキ	3											●	●																●	
ヒクイナ	2	●																												●
ユリカモメ	2	●																						●						
チュウヒ	2																								●	●				
メボソムシクイ	2			●	●																									
エゾムシクイ	2				●				●																					
ゴジュウカラ	2	●								●																				
コルリ	2						●																				●			
エゾビタキ	2				●																									
ウズラ	1	●																												
アメリカヒドリ	1	●																												
オオホシハジロ	1	●																												
アカハジロ	1	●																												
ホオジロガモ	1																						●							
カワアイサ	1																					●								
カンムリカイツブリ	1																												●	
ミゾゴイ	1																			●										
ササゴイ	1	●																												
アカガシラサギ	1																						●							
ムラサキサギ	1	●																												
ヨタカ	1	●																												
ハリオアマツバメ	1	●																												
セイタカシギ	1	●																												
トウネン	1	●																												
タマシギ	1	●																												
セグロカモメ	1																							●						
ケアシノスリ	1													●																
オオコノハズク	1			●																										
ヤマショウビン	1	●																												
サンショウクイ	1	●																												
チゴモズ	1	●																												
アカモズ	1	●																												
コシアカツバメ	1																													●
コムクドリ	1	●																												
イソヒヨドリ	1	●																												
ベニヒワ	1	●																												
ハギマシコ	1	●																												
イスカ	1	●																												
コイカル	1																													
ノジコ	1	●																												
セキセイインコ	1			●																										

夏の高温と少雨が助長？
茨城県内のナラ枯れの現状と対応について

茨城県林業技術センター 森林環境部長　鈴木　孝典

1　ナラ枯れとは

ナラ枯れとは、カシノナガキクイムシ *Platypus quercivorus* という体長5㎜ほどの小さな甲虫（以下「カシナガ」）が伝播する病原菌であるカビの1種 *Raffaelea quercivora*（以下「ナラ菌」）により、夏にナラ、シイ、カシ類が集団枯死する病気で、正式名称は「ブナ科樹木萎凋（いちょう）病」と言います（図1、2）。

ナラ枯れによる被害が確認されている樹種は、コナラ、ミズナラ、クヌギ、アベマキ、クリ、アラカシ、シラカシ、アカガシ、スダジイ、ウラジロガシ、マテバシイなどで、これらは、茨城県の平地や丘陵、山地に広く分布する広葉樹林の主要樹種です。ナラ類やシイ、カシ類の集団枯死は、1930年代に鹿児島県、1950年代に山形県、兵庫県で確認されていましたが、被害は拡大することなく短期間で鎮静化していました。しかし、1980年代以降に主に日本海側で発生した被害は全国的に拡大しており、2021年度には42都府県で被害が発生しました。本県においても、2020年度にナラ枯れによるコナラの枯死が初めて確認され、その後県内各地において被害が確認されています。

図1 コナラ被害木（8月に葉の色が変色）
編集部注：写真左手前の枝に付いている葉がすべて褐変している

2　なぜ枯れるのか

カシナガの成虫は、5～10月（最盛期は6～8月）にナラ菌を体に付着させて被害木から飛び出し、健全な木の幹に直径1.5～2mmの丸い穴をあけて樹体内に穿入しトンネル状の坑道を形成します（図3）。この時、多数のカシナガに集中的に穿入された樹木は、大量のナラ菌が穴の壁に付着し繁殖することにより辺材部の通水機能を失い、葉の色が赤褐色に萎（しお）れて

図2　カシノナガキクイムシ成虫（雌）
森林総合研究所提供

図3 カシナガの穿入孔

枯死します。

また、カシナガは、小径木よりも大径木を好むので、被害は主に大径木に発生します。1980 年以前に時折発生したナラ枯れが短期間で鎮静化したのは、ナラ、シイ、カシ類が薪炭材として活用され、定期的に伐採利用されていたので、カシナガが好む大径木が少なかったこと、木が枯れると伐採してすぐに燃料にしたため、被害木が放置されなかったことが一因と考えられています。

3　被害木の見分け方

葉枯れ、または樹勢の衰えたナラ、シイ、カシ類を見つけたら、まず、その木の地際を見ます。ナガキクイムシ類、キクイムシ類等に加害された木であれば、地際には、粉状の細かい木くずが溜まっています（図 4、5、6）。これは、トンネル状の坑道を形成した際に出たものです。

地際に木くずが溜まっていたら、次に幹の表面をよく見て木くずが出ている穴を探します。

ナラ、シイ、カシ類に加害するナガキクイムシ類は数種類いて、どれも同じような色と形をしていますが、体の大きさが若干異なるため、木に穿入した穴の直径が種を推定する目安になります。カシナガの場合、穴の直径は約 1.5 ～ 2mm です。図 7 のように爪楊枝（つまようじ）の先端が約 1cm 入る程度の穿入孔がカシナガの目安です。

被害木には、カシナガとともに、ヨシブエナガキクイムシ（以下「ヨシブエ」（図 8））が穿入していることがあります。ヨシブエは、木が衰弱または枯死してから穿入しますので、健全木を加害することはありません。本種の穴の直径は 0.7 ～ 1.2㎜とカシナガよりも小さいのが特徴です。

図 4 根元に溜まった木くず

4　ナラ枯れ以外の樹木の衰弱、枯死原因

カシナガの場合、多数の個体が集中的に加害することで、健全木を枯らしてしまいますが、カシナガを含むナガキクイムシ類は、衰弱木や枯死木に誘引される傾向があります。また、当然のことながら、健全木よりも衰弱木の方が、少ない加害で枯死に至ります。

このため、公園や街路樹などでは、木が衰弱しないように適正な育成管理に努めることも、ナラ枯れの予防に有効です。

樹木が衰弱する要因として、土壌の加湿による根腐れや乾燥による水分ストレス、公園や街路樹など、人の往来の多いところでは、踏圧（地面を踏み固めること）による根の物理的な損傷などがあげられます。

図 5 被害木伐根（ナラ菌への防御反応により、辺材が褐色～黒褐色に変色）

図 6 健全な伐採木の伐根

また、根が傷むと、ナラタケやナラタケモドキなどの菌糸が侵入して、根を腐らせます。ナラタケ類が感染して衰弱した場合、木の地際の樹皮をナタで削ってみると、樹皮下にきのこ臭のある白い菌糸膜が見られます（図9）。また、秋には、被害木の地際部や菌に侵された根が張っている地面から、ナラタケ類のきのこが発生します。このような木を放置すると、ナラタケ類の菌糸が地中を這って隣接木の根に感染し、被害は徐々に広がります。

前述したように、ナラ枯れは樹液の流動が停止することで水分の供給が絶たれることで発生しますが、これらの枯死原因との因果関係については分かっていません。近年の夏の異常な高温と少雨は、ナラ枯れの被害を助長していると考えられています。

5　被害木の処理

ナラ枯れの被害木を放置したり、伐り倒したままにしておくと、材内で増殖したカシナガが新たに繁殖するために飛び出し、被害が拡大します。

このため、カシナガが被害木から飛び出す前に、被害木内のカシナガを駆除する必要があります。駆除する方法のうち代表的なものを２つ紹介します。

図７カシナガの穿入孔に爪楊枝を挿したところ

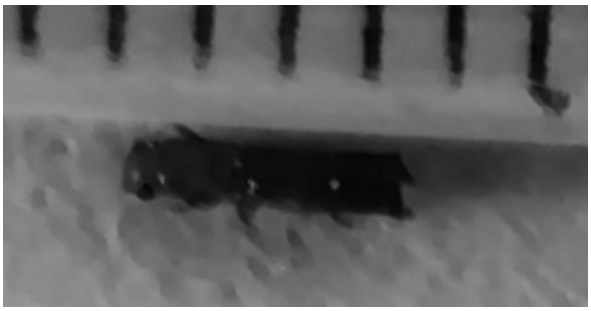


図８ヨシブエナガキクイムシ成虫（雄）（体長：約３～4mm）

図９樹皮下のナラタケ類の菌糸膜

１）焼却・破砕処理

被害木を伐採、抜根し、焼却、または破砕します。破砕する場合はカシナガが飛翔する前に実施する必要がありますが、処理後もカシナガの幼虫は２～３週間生存する可能性があるので、他の地域への移動には注意が必要です。

２）伐倒くん蒸

被害木を伐倒、玉切りし、切株や根株とともに、くん蒸ガスがカシナガの孔道の奥まで行きわたるように、チェーンソーで材に切れ目を入れます。切れ目は、丸太の場合、側面に30㎝間隔でガイドバー程度の深さに、直径30㎝未満なら片側、30㎝以上なら両側に入れます（図10）。切株や根株には、辺材部に入れます。丸太を集積し、全体をシートで被覆・密閉して、殺虫・殺菌剤（カー

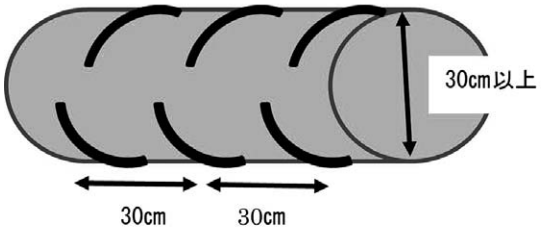


図10直径30㎝以上の丸太への切れ目（太線）の入れ方

図 11 粘着シート設置状況

バム剤）でくん蒸処理し、材内のカシナガを殺虫します。

なお、被害木周辺の健全木に対しても、カシナガの侵入を防ぐための予防措置を行うことが大切です。

6　健全木に対する被害予防

健全木に対し被害を防ぐ方法の 1 つに、樹木の幹に粘着シートを巻き付け、穿入を防ぐ方法があります（図 11）。実施時期は、成虫が飛来する 5 ～ 10 月頃に設置し 2 ～ 3 か月に 1 回回収します。粘着剤に捕らえられたカシナガを生きたまま放置すると、集合フェロモンを発して多数の仲間を呼び寄せることもあるため注意が必要です。

図 12 カエンタケ

7　おわりに

本県においても、2020 年以降ナラ枯れ被害が拡大していることから、被害により枯死木が発生した場合、落枝や倒木の恐れがあるため、枯死木には近づかないようにしてください。

また、ナラ枯れが発生した森林では、猛毒性のカエンタケ（図 12）が発生することがあります。触れるだけで炎症を起こすといわれており、誤って食べてしまった場合、死に至ることがありますので、十分な注意が必要です。

鈴木　孝典（すずき・たかのり）

2005 年に茨城県職員として採用。2022 年から茨城県林業技術センター森林環境部に在籍。森林環境部では、森林の持つ公益的機能の強化に資する森林復旧等の技術開発に取り組んでおり、ナラ枯れ被害対策の他、スギ等の植栽地における育林コストの低減や、松くい虫等の森林病害虫対策、海岸防災林の保全等の調査研究に携わっている。

湖のギャング、ナマズを美味しく

行方バーガーの開発と販売活動

行方市商工会 事務局長　平野 敬子

行方市は西に霞ヶ浦、東に北浦を臨む茨城県の南東部に位置し、『常陸国風土記』にも風光明媚な地として記される自然豊かな地域です。昔から霞ヶ浦や肥沃（ひよく）な土地を活かした農水産業や佃煮などの水産加産業も盛んで、かつては行政機関も集約しており街は賑わいを見せていました。しかしながら、近年は行政機関の移転、人口減少、若者の都会への流出など地域の活力が衰えをみせていることから、行方市商工会では、豊かな地域素材を使った地域の手による“ものづくり”（商品開発）を核として、地域の人と人の繋がりや“なめがた”の知名度向上を図り、“子どもの頃の元気あふれる街”を再現しようと考えました。

素敵旅グルメプロジェクト

そこで、私は、経済産業省の平成18年度地域資源∞全国展開プロジェクト800万円補助金で特産品を開発しようと申請したが、不採択でした。ここで諦めずに、平成19年度地域資源∞全国展開プロジェクトに申請書を出したところ見事合格。タイトルは「行方素敵旅グルメプロジェクト」です。合格した商工会は一堂に会し、東京で研修が行われました。その最後に行方市商工会は主催者側から呼び出されました。それによると、「行方さんはコンサルタントの明示がありませんでしたが、それでは、１つの特産品も商品にはなりませんよ。」と言われました。私は、「企画会議も製作も会計も全部自分たちでやります。」とお断りして地元へ帰りました。地元がみんなで考えて、作った特産品こそ、未来永劫伝承するものになると確信していたのです。

「行方素敵旅グルメプロジェクト」で、会員さんをはじめ地元の方々と農産物グループ、水産物グループ、お菓子グループ、おもてなしグループを作り会議と製造を始めました。各グループには、すぐ製作できるよう会員生産者さんを配備しました。水産物グループは、その頃から霞ヶ浦のギャングと言われ、古来の在来種の公魚（ワカサギ）、白魚（シラウオ）、鯉（コイ）、カワエビなどを食い荒らし、生態系の頂点にいたアメリカナマズを食って地元の名物にしようという意見が出ました。しかし、委員の中の海洋学者の先生方は「地域の名物は、在来種で製作したほうが良い。外来種はいつ、いなくなるかわからない。」と反対意見でした。

後継者育成、活動団体を存続させる取り組みとして、商品開発のワーキンググループには各店舗の青年層も参加し、青年層から出された斬新で奇抜なアイデアを積極的に採用しました。時には喧嘩するほど真剣に意見を出し合いながら作業を進めるプロセスでしたが、試行錯誤の未完成した商品が商品化される喜びや達成感を共感しやすく、苦労をともにした仲間との連帯感も非常に高まるだろうと期待されました。

高級燻製なまず生ハム

そこで地元の漁師さんに依頼して、霞ヶ浦の天然のアメリカナマズを獲ってもらい、ハム屋さんにナマズのハムを製作してもらい何回も試食を繰り返していました。が、湖底に住む雑食の魚の臭さはものすごかったのです。

もうあきらめようとしたところ、養殖したものがあるよといわれ、試してみました。ある日突然、これ食べてごらんと言われて、「あらっおいしい。私、生ハム大好きよ。」「それ、アメリカナ

マズだよ。こだわりの液に漬け込んで、ナラの木のチップで燻製にしたものだよ」とハム屋さんが言いました。「これだ！これを特産品として東京ビッグサイトに出展しよう」と水産物グループは、張り切りました。名前は「高級燻製なまず生ハム湖ふぐ」と命名しました。

その頃、商工会でこのプロジェクトで特産品を作る担当の職員はブログが義務付けられました。私は、エリザベスのブログを始めましたが、最初は、「なまずをハムにします」の一行だけでした。それから、試行錯誤でブログを毎日更新すると、アクセス数が増大してきました。市、商工会、特産品の宣伝効果となっていったのです。多様な電子媒体などを利用した広報活動、全国商工会ランキング１位を独走したブログ「エリザベスブログ」など多様な電子媒体を活用して情報発信を行っています。特に、エリザベスのブログは、商工会関連の情報を義務的に載せるのではなく、写真や絵文字をふんだんに使い、様々な情報や出来事を、思うままに書き込んでいるのが人気の秘訣だと思われ、現在も商工会の公式ブログとして掲載しています。

「生ハムメロンはいかが？」

平成 19 年度 10 月の展示会には、12 種類の特産品を東京ビッグサイトに出展しました（図１）。水産物グループは、「行方丼、湖ふぐ、殿様公魚」、農産物グループは、「漬物の行方家のかたいもん３兄弟、なめちんぬるちん、ひまわり油、行方さんの３色お絵描きスープ、いもようかんの駅路」、お菓子グループは、「麻生陣屋」を出展、紹介しました。

しかし、私は、全国から来ている高級な食材に呆然としてしまい「うちは、アメリカナマズだもんなあ。」と落ち込んでいました。何故にナマズなど持ってきてしまったのだろう。すると他の職員が隣のブースの高級メロンとナマズを交換し始め、メロンに生ハム風にナマズをスライスして、「生ハムメロンはいかが」と呼び込みをはじめると行列が出来始めたのです。あれよあれよといろ

図１　平成 19 年度地域資源∞全国展開プロジェクト物産展の行方ブースの紹介。上段右から２つめに湖ふぐ

いろなマスコミがブースに訪れ、特定外来生物を利用した商品開発や地産地消への取り組みは、テレビでも放映されました。地元に戻り、多くのマスコミが湖ふぐについて取材に来るようになり、地元の旅館でもメニューとして置いてくれるようになりました。

過疎地のスーパーに人の波

２年目に経済産業省の平成 20 年度地域資源∞全国展開プロジェクト 800 万円補助金に合格して、またまた特産品開発がはじまりました。去年の開発ですっかり元気になった我々グループは、今年はスーパーＺ級グルメチームと名前を変え、今度はナマズを食べる風習のなかった若者にアメリカナマズを食べてもらおうと会議と実験を繰り返していました。そして、ハンバーガーを作ろうよということになりました。ナマズのパティは、どうしてもマクドナルドのフィレオフィッシュと同じ味、するとナマズの養殖屋さんが「えらの部分、マグロでいうと大トロでやってみよう。」それに地元の玉ねぎを使用して、白味噌を入れ、パンにはさんで地元のトマト、ワサビ菜を入れてチリソースとタルタルソースで完成するとすごくおいしいのです。地元で試してみようと近所のスーパーで発表会をしましたが、100 個用意して、お客様は 20 名足らずでした。マスコミも招待しましたが､取材は茨城新聞 1 社のみでした。私は、大失敗してしまったと頭を抱えました。しかし、茨城新聞さんが新聞紙面のほかにネットに載せてくれました。すると全国からこの過疎地の行方市の小さなスーパーを目指して人々が押し寄せるようになったのです。連日、テレビ、新聞、ラジオなどマスコミ全社が商工会に取材に来るようになりました。

平成 20 年度地域資源∞全国展開プロジェクトのビッグサイトに「行方バーガーなめパックン・鯉パックン、ぶたパックン」を持って出陣しましたところ（図２)、大反響がありました。地域づくりの取り組みが、地域ぐるみで、広範囲に行われてほしいため、現在は行方市観光物産館こいこいで、ここでしか食べられない行方市の地域のグルメとして販売されています。

図２　平成 20 年度地域資源∞全国展開プロジェクト物産展の行方ブースの紹介

商品開発に際しては、地域の知恵と情熱と汗といったプロセスを重視。地域資源の掘り起こしや新商品開発会議を繰り返すうちに、商工会会員の枠を超えた地域協力者が増え、ねらいどおりの街ぐるみの活動に発展しました。また、自由なアイデアで開発された商品はマスコミに多く紹介され、地域の知名度もアップしました。

さらには、単なる商品開発の枠にとどまらないイベント実施やイメージづくりなどの街づくり活動へと波及してきています。特定外来生物に指定されている霞ヶ浦の厄介者「アメリカナマズ」を逆手に利用して開発した「湖ふぐ」や、地元産の野菜、銘柄豚、霞ヶ浦の水産物等を使った行方バーガーなど、一貫して「行方ブランド」を発信し続けています。マイナスをプラスに変える逆転の発想や、恵まれた農水産物を地域資源としてフル活用し、資源を無駄にしない取り組みを行っています。

平野　敬子（ひらの・けいこ）
昭和 34 年 2 月 28 日　行方市麻生に生まれました。茨城県立麻生高等学校卒業、麻生町商工会に勤務して現在に至ります。平成 27 年から行方市商工会の事務局長を仰せつかっております。
「私、生まれも育ちも行方です。霞ヶ浦で産湯を使い、姓を行方、名をエリザベスと発します。人呼んで、行方のエリザベスと称します。行方のベルサイユ宮殿に住んでいます。自称永遠の 18 歳」

Cross Release

■農研機構（4 月 24 日）

廃棄食材リサイクルに家畜昆虫「ミズアブ」隠れた消臭機能を発見

https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nias/158033.html

持続的な食品サイクルが地球規模で危機にひんする中、体長数センチの小さな昆虫の存在がクローズアップされている。一般に「ミズアブ」と呼ばれるアメリカミズアブは、余った農産物や廃棄食材のリサイクル処理に有用な昆虫とされる。ミズアブの幼虫を動物性たんぱく質として回収する研究に取り組んでいた農研機構などのグループが研究成果を発表した。

研究は、農研機構昆虫利用技術研究領域の小林徹也グループ長補佐、同機構から東京大学大学院に移り応用昆虫学を研究している霜田政美教授らによる。ミズアブには、食品廃棄物の処理の際発生する悪臭を抑える機能が隠されていることを発見、再資源化システムで特許を取得した。循環型産業の「昆虫工場」を日本国内につくる上での可能性を示唆した。

ミズアブは北中米が原産で、世界各地に分布生息域を広げる。日本にも 1950 年ごろに侵入し自然繁殖するようになった。アブの仲間だが人を刺すことはなく、特に害虫扱いはされていない。この幼虫に生ごみなどを分解させると、残さはたい肥となり、体長 20-28 ミリぐらいに育った幼虫はタンパク源として飼料に用いられる。家畜化昆虫の技術で、ミズアブ繁殖の「昆虫工場」は東南アジアなどに広がりつつあるが、日本では廃棄物処理業者などが試行的に始めた段階にとどまる。

研究グループは、食品残さの中で育てたミズアブの幼虫をたんぱく質資源として回収した上で、魚粉の代替に用いる「出口戦略」を立てた。魚粉価格は高騰しており、養殖経営を圧迫し

ている。ことし1月現在キロ当たり232円で、2001年比で5倍強になっているデータもある。その飼料のたんぱく質を、食品廃棄物を原料とするミズアブから得ようとするわけだ。霜田教授は「バイオ燃料で食料のトウモロコシを取り合いしたような事態は避けられる」という。

ミズアブのたんぱく質含有量は約42％。卵からかえった幼虫が蛹（さなぎ）になる直前まで約20日間、育てる。約100キロの食品残さで、約15キロのたんぱく質が回収できるという。

食品廃棄物を餌にミズアブを飼育すると、独特の悪臭が消えていることに気づいた研究グループは、ミズアブを入れないで放置する場合と比較してみた。すると悪臭の主原因である二硫化メチルや三硫化メチルなどが激減した。数値としては検出限界以下だった。

メタゲノム解析を行ったところ、ミズアブ飼育により残さの細菌の種類が変化し、全体の多様性は減少することが分かった。ミズアブ幼虫の腸内細菌に由来する細菌が、悪臭の要因となる物質の代謝・分解に関わる酵素を有するため、悪臭が抑制されたと考えられた。乳酸菌の一種であるラクトバチラス属が有意に増えていたという。

一般に生ごみなどのコンポストでは、臭いのしなくなるたい肥の完熟には数カ月かかるが、20日程度で済むなら産業化に大きな前進。さらに昆虫のふんや腸内細菌などが混ざった飼育残さを処理前の食品残さに混合すれば消臭剤としても利用できる。この再資源化システムで昨年、特許を取得した。悪臭のしない「昆虫工場」なら、食品廃棄物が大量発生する市街地近傍での立地にも可能性が開ける。

小林グループ長補佐は「ラクトバチラス属といっても数多くの種があって、研究としては消臭作用を持ったものを同定するのがこれからの課題になる。その種を大量培養できるかなどで、産業化の展望も開けてくると思う」と語っている。

Cross Release

■国立環境研究所（4月17日）

霞ヶ浦にみる湖底の貧酸素化
頻発する猛暑が引き起こす可能性

https://www.nies.go.jp/whatsnew/2023/20230417/20230417.html

浅い湖沼の貧酸素化に猛暑がどの程度影響していたのかについて、霞ヶ浦をモデルに観測と数値シミュレーションモデルを用いて解析した結果、風が弱くなることによって湖面と湖底の水温に差が生じ、貧酸素化が加速していたことがわかった。湖底への酸素供給が少なかったことに加え、例年よりも強い日射や高い気温によって水温が上昇したことによる。

研究は国立環境研究所地域環境保全領域の篠原隆一郎主任研究員らの共同研究により行われ、その成果は4月17日付でアメリカ地球物理学連合の『Geophysical Research Letters』に掲載された。

近年、気候変動の影響から夏季の猛暑の頻度が世界的に増加していることが報告されており、日本でも昨年6月から7月にかけて例年にない猛暑が襲った。湖では、水の表面が温められると、成層が発達し、湖面から湖底への酸素供給が滞ることで「貧酸素水塊」が発生することが知られている。貧酸素水塊が長期化すると、湖底堆積物から栄養塩が溶出しアオコの発生につながる恐れや、湖底付近に生息する魚類や二枚貝のへい死（突然死）が起こる可能性がある。

浅い湖沼では、日中に成層が発達し、夜間に混じる日成層という現象が発生する。また、風によって表層水と底層水が混じりやすいため、湖底にも酸素が比較的届きやすい状態と言える。今回の研究では、霞ヶ浦を対象に、猛暑が湖の貧酸素化にどの程度影響を与えたかを調べた。

22年6月から7月に発生した猛暑では、底層溶存酸素濃度が1ℓ当たり2mg以下の貧酸素水塊が発生していた。シミュレーションを行った結果、猛暑が発生した際に風が弱かったことで底層溶存酸素濃度が低下し

たことが分かった。さらに風速を約 1.5 倍にし、シミュレーションしたところ、貧酸素水塊が解消した。日射や気温が平年並みであった場合には、風が弱かったとしても、底泥による酸素消費が抑制され、貧酸素水塊は発生しないことが明らかになった。

つまり、夏季の猛暑が発生した際には、強い日射や高い気温によって水温が上昇し、生物的または化学的なプロセスによって底質の溶存酸素消費が活発になることに加え、弱風によって底層への酸素供給が滞ることで底層溶存酸素の濃度低下が促進されるものと考えられた。

今後、気候変動が進むと、猛暑の頻度・強度ともに上がっていくことが懸念されており、これまで貧酸素水塊が発生しにくかった浅い湖沼でも、貧酸素化が拡大する可能性がある。今後は他の湖においても、同様のモニタリングを行っていく必要があるとしている。

Cross Release

■筑波大学（5 月 17 日）

定説「左右対称な花は動物による受粉の精度を高める」に異議

https://www.tsukuba.ac.jp/journal/pdf/p20230517141500.pdf

「左右対称な花は動物による受粉の精度を高める」との定説は誤り」という実証実験の結果が筑波大学生命環境系、大橋一晴講師の研究から見えてきた。

花の形は、中心を通る直線で二分するといつも同じ形が 2 つできる放射対称性や、ある一本の直線で二分したときだけ同じ形が 2 つできる左右対称性など、対称性を示すのが一般的。中でも、左右対称花は放射対称花に比べて進化的に新しく、また、放射対称花に逆戻りする進化はほとんど見られないことから、動物による受粉に適した、より洗練された形態であると考えられてきた。

研究では、左右対称花の 9 割以上が、ランに代表されるような、横向きの花である点に注目した。花が横向きならば、動物がいつも腹側を下に向け正面から花にもぐり込むのは当然で、動物の訪花姿勢の安定化は、花の対称性ではなく向きが原因であると考えることができる。そこで、花の対称性（左右対称・二軸対称・放射対称）と向き（上向き・横向き・下向き）を網羅的に組み合わせた 9 通りの人工花で室内実験を行い、対称性と向きがクロマルハナバチの訪花姿勢の安定性に及ぼす影響を調べた。

すると予想通り、横向きの花では、上向きや下向きに比べ、ハチの訪花姿勢が劇的に安定し、角度のばらつきが 6 割も減少した。一方、3 種類の対称性のいずれも、訪花姿勢の安定化には全く寄与しなかった。これは、被子植物でくり返し進化した左右対称花の適応的意義に再考を迫る結果となった。

花の形の中でも、左右対称花は放射対称花に比べて進化的に新しく、また、放射対称花に逆戻りする進化はほとんど見られないことから、動物による受粉に適した、より洗練された形態であると考えられてきた。しかし、どのように受粉に適しているのかは、実は今でもよく分かっていない。さまざまな仮説が提唱されてきたものの、いずれにも肝心の実証研究が圧倒的に不足していた。

研究の結果は、動物の訪花姿勢の安定化が、左右対称という花の形状ではなく、花を横向きに咲かせたときに生じる効果であったことを明確に示す。これまで見逃されてきた「花の向き」の適応的意義に光を当てる重要な発見という。

同時に、多くの被子植物の系統で、左右対称花がくり返し進化した理由には、他の説明が必要であることを意味しており、その点において、本研究は、左右対称花の進化にまつわる未解決の謎の存在を浮き彫りにしたと言える。

4年ぶり「対面での」交流機会となった2022年度量子ビームサイエンスフェスタ（山田悟史実行委員長）は3月13日～15日、つくば国際会議場で開かれた。KEK、J-PARCセンター、CROSSなどの主催、現地会場に414人、オンライン会場に475人の参加者を得た。量子ビームを扱うKEK放射光実験施設（PF）とJ-PARC物質・生命科学実験施設（MLF）は茨城県内に立地することから2015年度から始まり、第14回MLFシンポジウム、第40回PFシンポジウムを兼ねている。多彩な研究成果や施設の最新情報が発表される中、JAXAの小惑星探査機「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウの試料の初期分析にあたった東北大学大学院、中村智樹教授の講演を抄録する。

含水鉱物と衝突・破壊の記憶

小惑星「リュウグウ」から持ち帰った石

（講演）東北大学大学院 理学研究科 教授　中村 智樹

・小惑星「リュウグウ」から持ち帰ったサンプルの化学・鉱物分析、物性測定を行った。それらの結果を組み込んだシミュレーションの結果、リュウグウの形成進化、衝突破壊のプロセスを具体的に明らかにすることに成功した。
・リュウグウの天体内部には、かつて多くの水が存在しており，その水はアルカリ性の炭酸水で有機物を含んでいた。この水の中で水質変成による化学反応が進行し、だんだんとリュウグウは含水鉱物や炭酸塩鉱物に変化していった。
・リュウグウは太陽系形成後約200万年後に太陽から遠く離れた極寒（-200℃以下）の領域で形成された それから数百万年後には、天体内部は水で満たされ水質変成が進行した。その後天体は冷えていき、大きな衝突を経験し破壊された。現在のリュウグウはその破壊で生じた一部の欠片の集合物である。

天体に探査機を送って、その天体からサンプルを持ち帰ることをサンプルリターンミッションと言います。惑星科学において、米国のアポロ計画以降、非常に有効な手法であることが世界的に認知されてきました。

ミッションで持ち帰られたサンプルを解析するのに非常に向いているのが、放射光分析やミュオンを使った分析です。それは「非破壊」であり、「高感度」であるということのためです。実際に私自身、「はやぶさ」の初号機と2号機、すべて高エネ研（KEK）で分析してきましたが、「上流」の分析に向いています。サンプル分析は最終的には（下流で）破壊分析をしますけど、放射光分析は非破壊でできますから、サンプルの素性がどういうものであるか、まず把握するのに向いています。ですから今後、いろんな天体から持ち帰られてきたら、必ずデフォルトで、放射光で分析する、KEKで分析する、J-PARCで分析するという流れができていると思います。

「はやぶさ2」のサンプルリターンミッションは、2つに分かれています。1つは探査機を送って、天体のどこからサンプルをとるか、また実際にサンプルをとるオペレーションがパート1としてあります。この後、探査機が地球に戻ってき

てから回収されたサンプルを分析するのがパート2です。

現在の太陽系というのは、中心の太陽の回りに地球型惑星が4つあって、その外側に小惑星帯があり、木星型惑星が4つあって、さらにその外側にカイパーベルト天体群があります。

太陽系の過去を、惑星がまだ形成されていない時代にまでさかのぼると、中心に生まれたての太陽があって、その回りをガスと塵からなる原始太陽系星雲が取り巻いていた、と考えられています。この初期状態の時、約45億年前、浮かんでいた塵が集まって最初の天体、微小天体を作ります。多くの微小天体は合体衝突を繰り返して惑星になります。微小天体は今も残っています。それが小惑星だったり、カイパーベルト天体だったりするわけです。ですから小惑星には初期太陽系の記録が残っています。一方で地球のように大きく成長した天体は中がドロドロに融け、元の塵が均質化されますから、どんなに研究しても太陽系の初期のことは分かりません。我々が小惑星を目指してサンプルを取って帰る動機となるわけです。

木星内側の小惑星帯には約100万個の小惑星があります。そのうち最も数が多いのがC型小惑星です。Cは炭素のCの意味で、水や炭素を含むと考えられています。はやぶさ2がめざしたリュウグウもC型小惑星です。こうした天体はかつて、太陽系ができつつある時に軌道が乱されて地球に次々に衝突して、地球の水や生命の起源になったのではないかと考えられています。

サンプル回収に2回の着陸

はやぶさ2は2014年に打ち上げられました。訪れたリュウグウは独楽（こま）の形をしていて、水や有機物が確認されました。ですから、太陽系の比較的外側で出来た天体で、地球型惑星に水や生命の起源である有機物をもたらした可能性があります。ですからC型小惑星を研究することによって、地球の海や生命に関するヒントが得られることになります。

探査機は3年かけてリュウグウに到着しました。1回目の着陸は2019年2月20日です。探査機は段々小惑星に近づいて、着地の瞬間に弾丸を撃ちます。撃ち込まれた岩は砕けて飛び散ります。はやぶさの初号機でもまったく同じサンプルを取るシステムを使ったのですが、実は初号機で弾丸は出ませんでした。ですから今回初めて、どれくらいの岩石が飛び散るか目の当たりにしたわけです。思ったより岩石が割れて粉が飛び散りました。この瞬間にサンプル回収は成功したと思ったんです。

サイエンスフェスタで講演する中村教授
（写真提供　高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所）

着陸の2回目は19年7月11日です。着陸の前には、探査機から小さな物体（インパクター）を投げ下します。30センチほどの銅のプレートが秒速2キロで小惑星の表面に当たります。爆弾みたいなものです。この爆発の跡には人工的なクレーターが出来ます。これによって、変質をしていない小惑星内部の物質を採ろうという計画でした。インパクターを打ち込んだ結果、直径10メートル、深さが3メートルほどのクレーターが形成されました。小惑星の表面は重力が小さくて、観測していると爆弾が当たってから3分経っても衝突地点からは粉（ダスト）が舞い上がっていました。舞い上がって降り積もったクレーター外部にフラットな領域を見つけ、ここに着陸することにしました。

このようにして小惑星表面に、科学的に重要であろう、安全性も確保できるであろう地点を選んで2回の着陸を行ったわけです。

石の分析チームに5.4グラム

その後探査機は2020年の12月6日に地球に帰還しました。カプセルはオーストラリアに落下

し、そこから一度も地球の大気に曝されることがない状態で神奈川県相模原市のJAXA宇宙科学研究所に運ばれて、あらかじめ用意されてあったクリーンチャンバー（真空に保たれた大気遮断ルーム）に入れられて、さまざまな初期記載が行われました。パート２の始まりです。

サンプルは全部で5.4グラム、径２センチの皿に３皿分ありました。少し大きめの粒と砂のような物質がありました。私の担当する石の分析チームに届いたのは全サンプルの中で３番目に大きいものがありました。サンプルの実際の見た目は真っ黒です。私自身、いろんな地球外物質を見てきましたがこれほど黒い物質は初めてです。

我々の石の分析チームは日・仏・独・英・伊・ベルギーと中国の混成チームで、世界中から150名が参加していました。１年間に約20カ所でいろんな分析を行いました。チームはKEKやSPring-8、J-PARCなど放射光施設やミュオン施設を使って、「上流」の分析を行ったことが大きな特徴です。加えてサンプルの硬さとか熱伝導とか物性も測定します。それから水質変成の化学モデルやリュウグウの衝突破壊のシミュレーションを行いました。

サンプルはまず非破壊分析を行います。KEKとミュオン施設とでやらせていただきました。ミュオンビームを使った分析には一番大きな石を含む10粒子を持ち込みました。合計126ミリグラムです。この粒子に対し、ミュオンビームを照射しますと、サンプルの中の元素に当たり、元素にキャプチャー（捕捉）されて「特性X線」を出します。特性X線を検出することで、どのような種類の元素がどのぐらい入っているのか、エネルギースペクトルを得ることができます。

この分析の大きな特徴は、出てくる特性X線のエネルギーが非常に高いということです。通常のX線では粒子全体の元素組成を求めることは出来ませんが、ミュオンを使うと、出てくる特性X線がX線の照射時に比べ約200倍高いエネルギーを示します。高いエネルギーの特性X線は１ミリのサンプルがあってもほぼ吸収されずに外まで脱出します。それらを集めて検出すればサンプル全体の炭素の濃度を正確に測ることが出来ます。貴重なサンプルで、かつ大きめのサンプルの軽元素をきちんと測定できるのはミュオンだけです。

今回も非常にきれいなスペクトル、十分解析可能なスペクトルが得られています。この分析でキーポイントは２つあります。１つはサンプルを大気に曝さないということです。なぜ曝してはダメかというと、このサンプルは何と水を吸うのです。地球の大気にさらすと水を吸い取ってしまいます。するといくらサンプルの酸素を分析しても、地球の水を吸った酸素なのか宇宙の酸素なのか分からなくなります。

もう１つは、この分析はバックグラウンドを減らす必要があります。特に炭素はあらゆるところに使われているので、炭素が散乱して当たるようなところすべてに炭素を使わずに済むようにする必要があります。作業用のグローブボックスを作ってもらったのですが、内側は全部銅の板で覆

（写真提供
高エネルギー
加速器研究機構
物質構造科学研究所）

図　分析直前のリュウグウ試料分析用セットアップ。画面左からミュオンビームがやってくる。直方体のチャンバー側面は内側に貼られた銅板の色。試料操作用の黒いグローブが外に突き出ている

われていて、さらにサンプル自体も銅の薄い箔の中に入れて作業をします。大気遮断をしたグローブボックスの中にはヘリウムを流して露点を下げるなどして、軽元素のバックグラウンドがほぼない状態にしてサンプル分析を行ったのです。

そうした関係者の皆さんの努力の成果が非常にいいデータにつながった。その分析結果の数値は何を意味するかというと、リュウグウが太陽系の中で最も始原的な物質であることを示します。始原的とは、太陽系全体の化学組成とリュウグウの化学組成がほぼ一致するということ。つまりリュウグウを形成する大もとの塵は、太陽系を作った塵と同じであるということです。地球の大気に一切曝さない努力をしていただいた結果、炭素とか窒素、酸素には一切地球の成分がない。これまで地球で最も始原的と考えられていたCI（炭素質）コンドライトという隕石と比較すると、炭素と窒素は非常によく合致しています。ところが酸素については全然違う、CIコンドライト隕石は地球の酸素を吸いまくって本来の値から20％ぐらいずれていた、「汚染されていた」ということが分かりました。

水のあった形跡示す含水鉱物

一番大きなサンプルを解像度1ミクロン以下のSPring-8のCT画像で見ると、大部分が非常に細かな粒子で出来ていることが分かります。明るい粒子は鉄やイオウを含む結晶で、たまに大きな結晶で出てきます。こういうCTデータを元に実際にサンプルを切断するところを選びました。切断面を研磨して電子顕微鏡で見てみると大部分が含水鉱物です。後は炭酸塩、CO_2を含む鉱物や酸化物、硫化物で出来ています。メーンの水を含む含水鉱物の種類は、KEKの放射光X線解析で調べました。これは長年私がやってきたベーシックな分析方法で、サンプルの素性を把握するのに強力なツールになります。

それで見ると、大部分の領域がサポナイトという結晶とサーペンティンと2種類の含水鉱物で出来ているのが分かりました。ということは、リュウグウにはかつて水があったことを意味します。つまり水と水を含まない岩石が接することによって、岩石の表面から段々含水化していく。KEKで分析した粒子は全部、含水鉱物が主成分でした。つまり水と岩石はよく反応した、結果リュウグウの固体部分はほぼ含水鉱物に変わったというわけです。

こういう分析によって得られた鉱物の組み合わせや量比が再現できる「水岩石反応」はどういう状態であったのか、化学平衡計算で調べました。水が増えていくと共存する鉱物の種類が変化していく、それが計算で示されます。計算の前提条件となったリュウグウの元素の存在比は、J-PARCで決めた値を使っています。調べると大部分のリュウグウの水と岩石の割合が重量比で0.2～0.9、体積で大体1：1、そういう環境で出来た鉱物の組み合わせと量比であるということが分かりました。

引き続きCTスキャンで分析すると、鉄とイオウからなる結晶（硫化鉄）の中に空孔を発見しました。何らかの流体があると考えて、結晶ごと－120℃に冷やして流体を凍らせ真空中でイオンビームを当ててスパッタリングしました。ビームが孔に到達すると、この2ミクロンほどの孔から沢山のイオンが検出されました。孔の中に水や二酸化炭素、有機物が入っていたのが分かりました。この結晶は水岩石反応の間にできた硫化物ということが分かっていましたから、孔の中にリュウグウにあった液体の水がトラップ（捕獲）されていたというわけです。

これが何を意味するかというと、原始太陽系のガス雲の中では、太陽の近くの温度が高く段々遠ざかると温度が下がる。ガスの中の水分子も太陽から遠ざかると凍り、同様に二酸化炭素も凍ります。太陽系の最果ての領域は、水も二酸化炭素も氷になっていて、石と一緒に天体をつくるわけです。原始太陽系のそれぞれの領域で出来る天体の構成物質が違う。一番外側でできた天体は石と、水の氷と二酸化炭素の氷を含みます。そういう天体の内部の温度が上がると水や二酸化炭素の氷が解けて、天体の中に炭酸水（水の中に二酸化炭素を含む）が生じて、結果リュウグウに見られるような物質をつくるわけです。この発見は、リュウグウは太陽系の外側の方で出来たということを示

しています。

リュウグウの内部には沢山の水があって、水温は25℃～50℃であった。同位体分析をするとリュウグウが出来たのは、太陽系ができた45.7億年から少し経った（300～500万年後の）時期だと分かりました。先ほど述べた水は、リュウグウが形成された時にトラップされた45億年前の水というわけです。

この後物性の測定も行いました。たとえば天体はどれくらい破壊されやすいのか、衝突があった時にどれくらい温められるのか、は実際の小惑星を使って測定するしかありません。どれくらいの圧力をかけたらリュウグウは割れるのか、中心にどれくらいの温度を与えると熱が拡散するのか、という実験を実際に行ったわけです。

その結果から数値シミュレーションを行いました。そうすると、リュウグウは今から45億年前、太陽からかなり離れたごく低温（-200℃以下）の領域で誕生しました。その後、太陽系形成から年月が経って、天体内部にあった短寿命の放射性核種が壊変することにより、氷やドライアイスが融けて気体になり、含水鉱物が形成されます。天体中心は50℃以内、その後放射性物質の壊変が終わって天体内部は冷えていきます。リュウグウの元の天体が冷え切った後に、別の天体がぶつかって母天体は破壊されます。衝突の時温度が上がるのは衝突箇所付近だけで大部分はあまり温度が上がりません。現在のリュウグウは母天体の低温部分が砕け散った小さな欠片が集まって出来たと考えられます。

このようにリターンサンプルを解析することによって、リュウグウがどこで出来たのか、どういう状態で進化したのかを研究して、成果をまとめ（冒頭）に示しました。（筆耕／相澤冬樹）

CROSS ロード

黒い有機物による、ハビタブルな天体の形成への寄与

「下流」薮田ひかる教授をリーダーとする固体有機物分析チーム

JAXAの小惑星探査機「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウの試料は、2021年6月から1年間、6つの初期分析チームによる分析が行われた。東北大学の中村智樹教授がリーダーを務めた石の物質分析チームを「上流」とすると、広島大学の薮田ひかる教授をリーダーとする固体有機物分析チームは「下流」にあたる。KEKフォトンファクトリー（PF）の精密X線回折、X線顕微鏡STXMなどを活用し、試料に含まれる有機物の化学組成を調べた。上流の中村教授が「見た目は真っ黒」と評した物質の正体に迫り、下流での研究成果をまとめた論文は、アメリカの科学誌「Science」に2023年2月24日付（日本時間）で掲載された。

有機物は地球外起源

小惑星リュウグウの試料は200-900マイクロメートルサイズの微粒子37個。これらをさまざまな顕微分光法で非破壊分析した後、塩酸・フッ酸で溶かして炭酸塩などの無機物を除去する処理を1カ月にわたって繰り返し、溶媒に溶けない有機物の性質を詳しく調べた。約2万種類の有機分子や黒い固体有機物が見つかった。

破壊分析によって得られた酸不溶性残渣は、黒い固体状の有機物であることが判明した。この酸不溶性残渣の測定結果は、非破壊分析した有機物のものとほとんど一致したことから、リュウグウ試料の有機物の主要な割合を黒い固体有機物が占めていると結論づけられる。この黒い固体有機物が、小惑星リュウグウが黒い天体であることを特徴づけているらしい。

分析の結果、黒い固体有機物の正体は分子量が1000を超える高分子で、一定の分子構造を持たず、ベンゼン環がたくさんつながった芳香族性の構造の中に脂肪族炭化水素の鎖やケトン基、カルボキシル基などが無秩

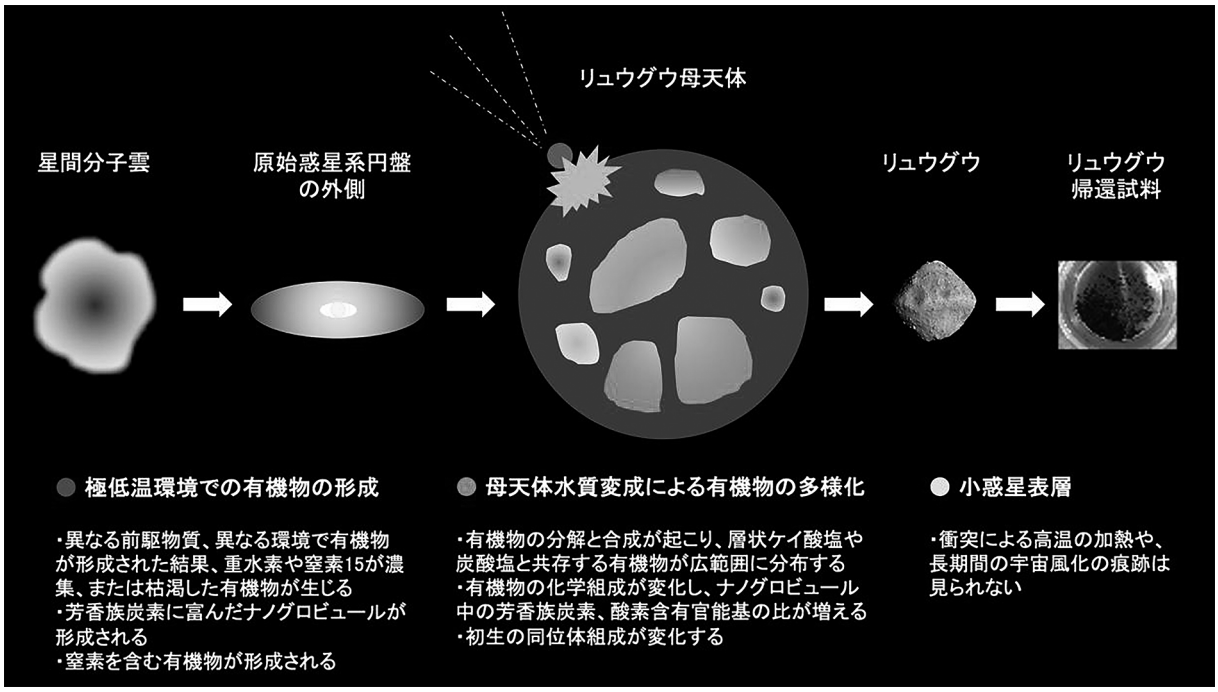


図　リュウグウの進化に伴う、固体有機物の形成と進化（広島大、JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工業大、明治大、会津大、産総研による）

序に結合したもののようだ。このような高分子の固体有機物は、CI コンドライトや CM コンドライトなどの炭素質隕石でも見つかっている。

一方で、リュウグウ試料の有機物には、グラファイトのような秩序だった構造は見られなかった。このような構造は、有機物が高温で加熱されて炭化すると生じる。リュウグウ試料の有機物は母天体内部や天体衝突によって 200℃を超える高温には加熱されなかったことを意味する。星間分子雲や原始惑星系円盤の外側といったマイナス 200℃以下の低温環境で形成されたことがわかった。

生物由来のアミノ酸に特有の左右構造の偏りは検出されなかったが、固体有機物が種々の分子を生み出すリザーバーとしての役割を担い、ハビタブルな天体環境の形成に寄与した新たな可能性を導くとした。

誕生したばかりの地球に大量の小惑星や彗星が衝突した際、これらの小天体に含まれる有機物が生命の材料としてもたらされたと考えられている。具体的な生命の材料として、隕石に微量に含まれるアミノ酸、糖、核酸塩基などの生体関連分子がこれまで注目されてきた。しかし、リュウグウに含まれる有機物の主要な割合を、黒く石炭のような見た目の固体有機物が占めることが明らかとなったことで、生命を構成する成分とは一見無関係のようにみえる有機物が初期地球に大量に降り注ぎ、その後、地球でのさまざまな環境でさらなる化学進化を経て、生命材料として利用できる分子に変化していったとも考えられる。

このほか、リュウグウ試料中の固体有機物は層状ケイ酸塩や炭酸塩と共存していたことから、リュウグウ母天体で水、有機物、鉱物との化学反応が起こった証拠を見出した。リュウグウ試料中の有機物の組成は始原的な CI コンドライト隕石の有機物と似ているが、リュウグウの方が有機物の組成に多様性が見られた。この結果は、リュウグウの母天体における液体の水と有機物との反応がさまざまな条件で進行したことを示す。

C 型小惑星リュウグウ、D 型小惑星、彗星の有機物との間の共通点と相違点から、原始惑星系円盤で生じた共通の前駆物質が、それぞれの微惑星（のちの小天体）に取り込まれた後、それぞれの母天体での化学反応に応じて変化した結果であると考えられる。

（参考プレスリリース：https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2023/02/pr20230222.pdf）

徹底した再利用のために
X 線と近赤外線を使ったプラスチックの劣化分析

産業技術総合研究所 機能化学研究部門　新澤 英之

産業技術総合研究所は、プラスチックの劣化状態を、X 線散乱と近赤外光吸収の同時計測により分析するシステムを開発した。劣化により破壊や変形が生じたプラスチックを、形状や厚みにかかわらず、非破壊で検査できる。

1. 背景

現在、限りある資源を効率的に利用し、リサイクルなどで循環させながら、将来にわたって持続して使い続けていく社会循環型社会の実現に向けた取り組みが活発に行われています。社会循環型社会の実現には、石油など化石燃料への依存を軽減するために、石油由来のプラスチック製品の劣化を防ぐことで製品の寿命を長くするとともに、徹底して再生利用することが不可欠です。プラスチックの製品や再生品の寿命を長くすることは、製造や焼却処理時の二酸化炭素の排出の抑制につながるからです。

プラスチックは光、熱、水などによって劣化します。劣化を抑制し長寿命化するためには、まず劣化がどのように起こっていくのかという仕組みを詳細に解明する必要があります。劣化の仕組みが解明されれば、そのような劣化現象が起こらないような化学的、もしくは物理的な処理をすることで長寿命化させることができるからです。しかしながら、プラスチックの劣化はプラスチックを構成する高分子の鎖の構造や、さらには高分子の鎖が折り畳まれてできる結晶と呼ばれる構造の変化が複合的に関与するため、劣化現象の解明には、劣化部分を複数の分析装置で計測する、という複合的な分析方法が求められてきました。このような課題に対して我々の研究グループは異なる 2 種類の光を使ってプラスチックの劣化部分を測定することで、これまでにはわからなかったプラスチックの劣化の進行の仕組みを詳しく解明する分析装置を開発しました。

2.X 線と近赤外線を使った新しい分析装置

我々が開発した分析装置は X 線と近赤外線と呼ばれる 2 種類の光を使ってプラスチックの劣化の状態を調べます。X 線とは電磁波の一種です。非常に短い波長の光であるためプラスチックを透過しやすいという性質を持ちます。プラスチックの中には結晶と呼ばれる硬い部分と非晶と呼ばれる比較的柔らかい部分が周期的に繰り返された構造をもったものがあります。結晶や非晶はプラスチックの硬さや柔らかさに関わる構造です。劣化によってこれらの量が変化し、プラスチックが脆くなります。このような構造を持ったプラスチックに X 線を当てると、光の一部はそのまま透過せずにわずかに散乱します。この散乱の度合いは結晶と非晶が形成する周期的な繰り返しのサイズに依存するため、X 線がどれくらい散乱したかを測定することで結晶と非晶の量を知ることができます。結晶と非晶の増減を調べることで、プラスチックの劣化の進行の度合いを知ることが可能になります。

一方、近赤外線とは可視光線と赤外線の間の波長（800 nm から 2500 nm）を持った光です。可視光や赤外線と比べると近赤外線はプラスチックを非常によく透過します。近赤外線をプラス

チックに照射すると、プラスチックを構成する高分子の形にとって、特定の波長の光だけが吸収される、という現象が起こります。つまり、プラスチックがどの波長の光をどれくらい吸収したのかを測定すれば、プラスチックの中にどのような高分子が含まれており、さらには高分子がどのような形状になっているのかということを調べることができます。高分子の形状は劣化によって変化しますので、近赤外線を使えばこれを測定することでプラスチックの劣化の進行の度合いを調べることができます。

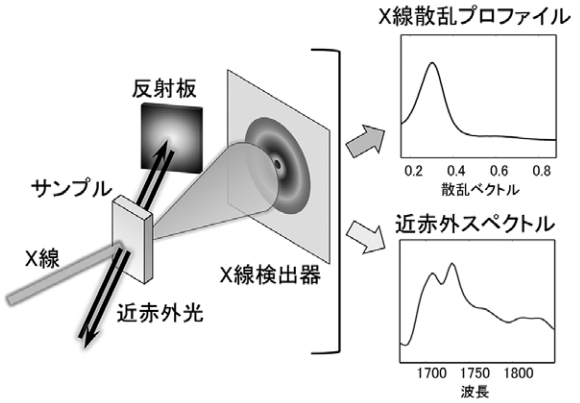


図 1 X 線 - 近赤外線同時測定装置の概要

図 1 に我々が開発した X 線 - 近赤外線同時測定装置の概要を示します。X 線をプラスチック試料に照射し、結晶と非晶が形成する周期的な繰り返し構造によって散乱した X 線を試料の背面に設置した X 線用の検出器と呼ばれるもので測定します。これに加えて、プラスチック試料の同一箇所に近赤外線を照射し、透過した近赤外線を反射させて近赤外専用の検出器で測定し、近赤外線がプラスチックを透過した際にどの波長の光がどれくらい吸収されたのかを測ります。X 線と近赤外線はプラスチックの劣化によって変化する高分子の構造に関する情報を与えます。例えば、X 線は結晶と非晶が形成する周期的な繰り返し構造、近赤外線は高分子の種類や高分子を形成する長い分子がどのような形状なっているかを示します。X 線と近赤外線は、それぞれ違った構造情報を与えますので、これらを組み合わせることで、1 種類の分析だけでは解明できないような複雑な劣化の減少を捉えることができるようになります。

3. 劣化したポリプロピレンを使った分析の例

それでは、開発した X 線 - 近赤外線同時測定装置を使ってどのような分析ができるのかを、ポリプロピレンと呼ばれるプラスチックを使って説明します。ポリプロピレンはプラスチックとして使われる材料の中でも特に軽量でかつ加工しやすいため、とりわけ大量生産に適したものです。このため、プラスチックのなかでも生産量が非常に多く、我々の身近にあるプラスチック製品にもポリプロピレンが使われているものが多くあります。しかしながら、ポリプロピレンの問題点の一つに、劣化しやすいという性質があります。ポリプロピレンでできたプラスチック製品は日光や高い温度、高い湿度に晒されると劣化してしまいます。劣化によってポリプロピレンは脆くなり、僅かな力が加えられただけでも簡単に割れてしまうようになります。つまり、劣化によってポリプロピレンは寿命が短くなってしまうわけです。それではこのように高熱によって劣化したポリプロピレンを X 線 - 近赤外線同時測定装置で調べるとどのようなことが分かるかを示します。

図 2 は高熱によって劣化したポリプロピレン、未劣化のポリプロピレンの X 線散乱の値を示しています。図 2 の横軸は q 値と呼ばれる値です。X 線を照射したプラスチックが結晶と非晶が形成する周期的な繰り返し構造を持つ場合、特定の q 値において X 線が強く散乱します。この結果、曲線の中に山のような形状が発生します。そしてその山のピークの位置での q 値からは繰り返し構造の長さを計算することができます。例えば、劣化したポリプロピレンは未劣化のものに比べて曲線に現れている山の位置が左側にシフトしていることが分かります。これは劣化によって繰り返し構造の長さを表す q 値が変化したことを意味しています。具体的には、繰り返し構造の長さは q 値の逆数（1/q）で計算できますので、劣化によって繰り返し構造の長さが増えたということが分かります。

このように X 線の値からは劣化によって結晶と非晶が形成する周期的な繰り返し構造の長さが増えたことが分かりました。しかしながら X 線

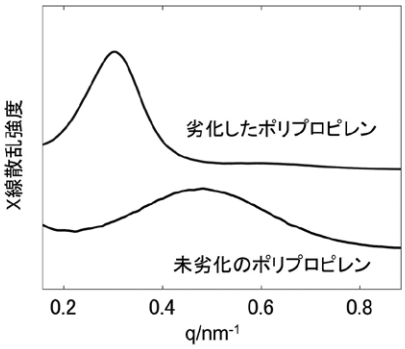


図２　劣化したポリプロピレンと未劣化のポリプロピレンでのＸ線散乱の違い

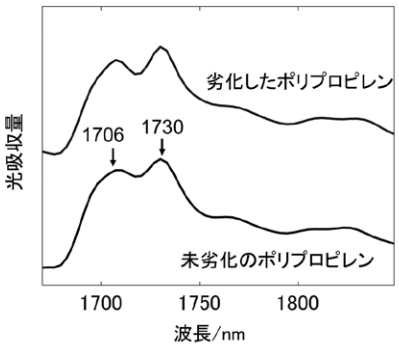


図３　劣化したポリプロピレンと未劣化のポリプロピレンでの近赤外線吸収の違い

のデータだけでは長さが増えたのが結晶の部分なのか、非晶の部分なのかといったことまでは分かりません。ここで近赤外線のデータが重要になってきます。図３は劣化したポリプロピレン、未劣化のポリプロピレンによる近赤外線の吸収値を示しています。未劣化のポリプロピレンは1706nmと1730nmの位置に大きな山が発生していることが分かります。この山はポリプロピレンの結晶構造に由来するものです。ポリプロピレンは長い高分子の鎖からできています。高分子の鎖は幾重にも折りたたまれて結晶構造を形成します。この際に高分子の鎖は巻き貝の殻の線のようにぐるぐる回った「らせん」形状になります。そして「らせん」の部分に1706nmと1730nmの波長の近赤外線が当たると「らせん」これらの光を強く吸収するという性質を持っています。その結果、他の波長の光に比べて強く光が吸収されて、光吸収ピークと呼ばれる山のような形状が図の曲線の中に発生することになります。面白いことに、劣化したポリプロピレンの近赤外線の吸収値を見てみると、1706nmと1730nmにおいて現れていた吸収ピークの高さは増加しています。劣化することでポリプロピレンがこれらの波長の近赤外線をより強く吸収するようになったということを表しています。これは、ポリプロピレンが劣化すると1706nmと1730nmの光を吸収する「らせん」が増える、別の言い方をすると、「らせん」を含んでいる結晶構造が増える、ということを意味しています。

Ｘ線と近赤外線のデータはそれぞれ単独ではポリプロピレンが劣化によってどのように変化したのかを詳細に解き明かすには不十分ですが、２つの測定データから得られた情報を組み合わせると、図４に示すような劣化による構造の変化を明確に解き明かすことができます。近赤外線の

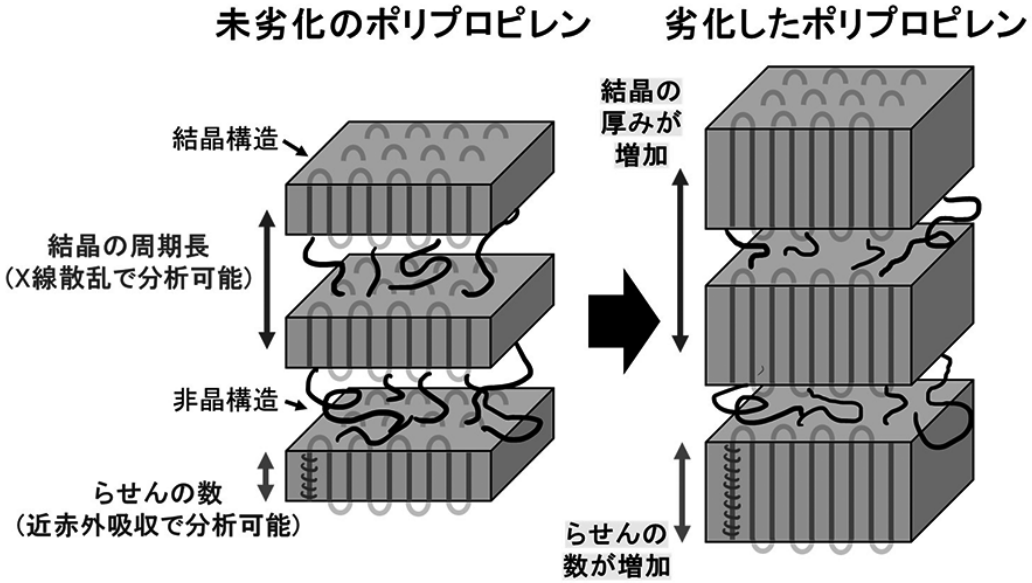


図４　ポリプロピレンの熱劣化に伴う構造変化

データからは、ポリプロピレンは高温環境に晒されると、高分子鎖が「らせん」を形成し、高分子鎖が折りたたまれた結晶構造を発生させたことが分かりました。一方、X線のデータはこのような結晶構造の発生は、既に結晶になっていない部分、即ち非晶構造と呼ばれる部位で起こっていること、その結果、非晶部分の大きさは減少し、その一方で結晶部分は大きさが増大していることを明らかにしています。つまり、高温に晒されたポリプロピレンが脆(もろ)く壊れやすくなるのは、熱によって高分子の鎖の形状が変化し、最終的には柔軟で変形に強い非晶構造が減ってしまうため、という仕組みが解明されました。このような仕組みが分かると、今度は高分子の鎖の変化を抑制するような対策をとることで、より長寿命なプラスチック製品を設計できるようにもなります。

4. おわりに

今回我々が開発したX線と近赤外線を使った分析技術は、プラスチックを構成する高分子の鎖の形や高分子の鎖が折りたたまれてできる結晶構造を2種類の光で調べることで、プラスチックが劣化する際にどのような構造の変化をしているのかを詳しく解明する方法です。この分析技術はポリプロピレンだけに限らず、結晶構造を持つ高分子からなるプラスチック、例えばポリエチレン、ナイロンといった生産量の多い他のプラスチック製品にも適用可能であり、新しい劣化診断技術として有望です。

新澤　英之（しんざわ・ひでゆき）
産業技術総合研究所機能化学研究部門化学材料評価グループ　研究グループ長
2008年　関西学院大学大学院理工学部　博士課程後期課程修了、理化学研究所光バイオプシー研究開発ユニット研究員、産業技術総合研究所　計測フロンティア研究部門　マルチスケール統合解析グループ研究員を経て2015年より現職。
専門は近赤外、赤外分光を使った分析装置の開発とデータインフォマティクス

短歌　平凡な人生はない

松崎　健一郎

仕事にも恋にも燃えてその果てに夜尿症来て人生といふ
時が来れば後輩たちも辞めてゆき職場はいつも現職のもの
あのひともこのひともその消息を知るはかなはずなつかしむのみ
年とれば新たな春をことほがむこころ薄れぬ松はかざれど
十五度に気温あがれば寒なれどいのち出で来ぬ小蠅の在り処(ど)
今の家はかたちも色も材質も鮮度よきなり時代の鮮度
兵隊にとられて戦地へ行つた父平凡なるとは言へぬ人生
子を四人生んで育てたそれのみで妻の人生平凡ならず
誰からもメール電話も郵便も来ぬ日常を家族と過ごす
身の痛みゆゑ
ジョギングも長い読書ももの書くもひかへてあれば縮むわが日々

（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』、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。

「月産月消」の実現へ
月の水と資源活用を目的とした探査計画

東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻　鹿山 雅裕

アルテミス計画や民間企業初となる民間月面着陸を目指すHAKUTO-Rなど、世界中が月探査に向け動き始めている。その鍵を握るのは月の水であり、飲料水や水素燃料などに活用することで、月面での基地建設や有人活動、さらには火星への航行に必要なエネルギーの確保などが期待されている。ここ十数年間の科学成果により、月には6億から60億トンを超える水が氷として存在する可能性が示されている。故に、アポロ計画以来の有人探査や水を目的とした無人探査計画が各国で次々と計画され、人類が再び月を目指す新時代が到来している。

月探査のブーム再来

アポロ計画から約50年後の現在、人類は再び月を目指している。月探査が世界中で空前のブームとなっており、各国の政府機関や民間企業が続々と計画を発表している。政府主導の計画として、2023年着陸予定のNASAによるVIPERや以降のアルテミス計画、CNSA（中国国家航天局）により現在運用中の嫦娥（じょうが）5号から2028年打ち上げ予定の嫦娥8号などの嫦娥計画、日本では2023年に小型月着陸実証機（SLIM）、2024年度以降に月極域探査ミッション（LUPEX）がJAXAにより予定されている。民間では、米企業のSpaceXやBlue Originがアルテミス計画に参画することを表明しており、月面着陸船やインフラ開発のための事業展開を検討している。日本企業では、ispaceが世界に先んじて商業月面輸送サービスを開始しており、民間月探査プログラムHAKUTO-Rの打ち上げに成功したニュースが世界中で大きな話題となった。人類が月に降り立ってから半世紀、なぜ今、月探査が再注目されているのか？ その答えは人類の宇宙進出に欠かせない“月の水“にある。

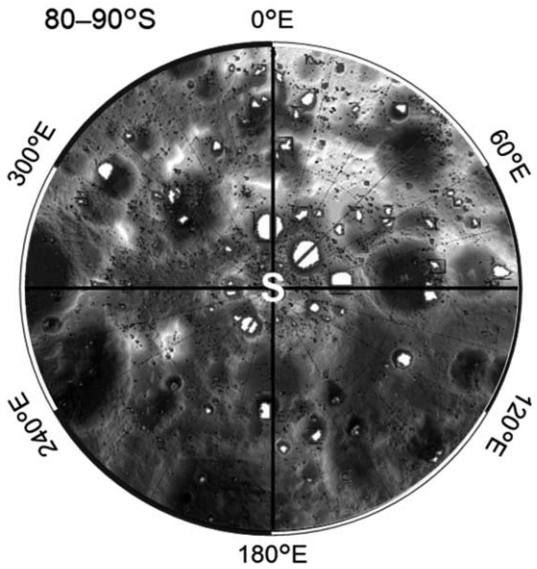


図1
月の南極付近に点在する永久影（白抜き領域）。南極点（十字黒線の交点である白字のS）から見た南緯80～90°Sの範囲の地形図。灰色から黒色は地形の高低差を表しており、白抜きの領域が永久影に対応する（Sargeant＋2019を改変）

宇宙探査と水の活用

人間にとって水は生活必需品であり、宇宙空間ではなおさらである。飲料水はもちろんのこと、衛生用品や建築材料、植物栽培、さらには水を電気分解することで呼吸・酸化剤用酸素や水素燃料にも活用できる。これまでの宇宙探査の基本方針では、ロケットの打ち上げや月や火星での現地活動、さらには地球への帰還に必要な水や水素燃料

は全て地球から輸送することを想定していた。一方で、1kgあたり数百万円とも言われる月への輸送コストがネックとなっていた。しかし最近では、月の水を現地で回収・活用する“月産月消”が提唱され、これにより輸送コストを大幅に抑えることが期待されている。もちろん、水の確保・精製に必要な初期費用（パイプラインやプラント建設）は必要となるものの、もし月に莫大な水資源が眠っているのであれば、それを遥かに上回る利益が得られる。ここでの焦点は、「果たして本当に月に水が存在するのか？」である。実は、ここ十数年間の科学成果により月に大量の水が存在する数多くの証拠が得られ、水資源の“月産月消”の実現性が高まってきた。このような背景から、近年、世界各国で水資源を目的とした月探査が続々と計画されるに至った。次章では、関連する科学成果について紹介する。

月の水の科学史

月に水が存在する可能性については、実はアポロ計画以前から一部の研究者により主張されていた。月は小天体が故に微小重力であり、水のような軽い物質はすぐに宇宙空間に散逸してしまう。その結果、月の大気は 10^{-12} から 10^{-15} 気圧と非常に薄く、水が大気中や氷として存在するには不向きと考えられてきた。しかし、月には数十億年間にわたり太陽光が一切当たらず、常に影となっている地域（永久影と呼ばれる）が北極と南極付近に点在し（図１）、その表面温度は -240 から -220 ℃に達する。月の平均気温は -20 ℃であることからも、永久影がいかに低温環境にあるが分かる。研究者の一部は、永久影であれば月でも水が氷として長期間にわたり生存できると提唱した。しかし 1960 年代から始まったアポロ計画では、残念ながら月の水に関する証拠は得られなかった。その理由として、月の低緯度地域であるアポロ着陸地点は太陽光により温度が常に高いことから、水が生存できる環境にないことが挙げられる。やはり、月の極域を調査しないことには、本当に水が存在するかは分からないと結論付けられた。

1990 年代以降になると、人工衛星や天体望遠鏡の技術進歩により、地球から遥か彼方にある天体を観測することが可能となった。その結果、冥王星や衛星カロン、太陽系外縁天体（例えば、クワオアーやハウメア）、太陽系外惑星などの星々から続々と氷が発見された。これらは氷天体と呼ばれ、非常に分厚い氷の層に覆われ、微小重力により大気は薄く、表面温度は -100 ℃を下回る。故に、環境が共通する月の永久影においても、氷が十分に生存し得ると考えられた。このような経緯から、1990 年代に NASA が月衛星探査を実施し、月の極域、特に永久影から氷として存在する水の間接的な証拠を得ることに成功した。月衛星探査機クレメンタインでは、レーダー観測により南極の永久影で認められる偏光特性は氷による可能性があることを示唆した。ルナ・プロスペクター（LP: Lunar Prospector）による中性子分光観測（銀河宇宙線により月の土壌から放出された中性子を検出、観測範囲は表面から地下約 1 m の深さまで）では、月極域の永久影に大量の水素が濃集し、その原因は氷であると報告している（Feldman et

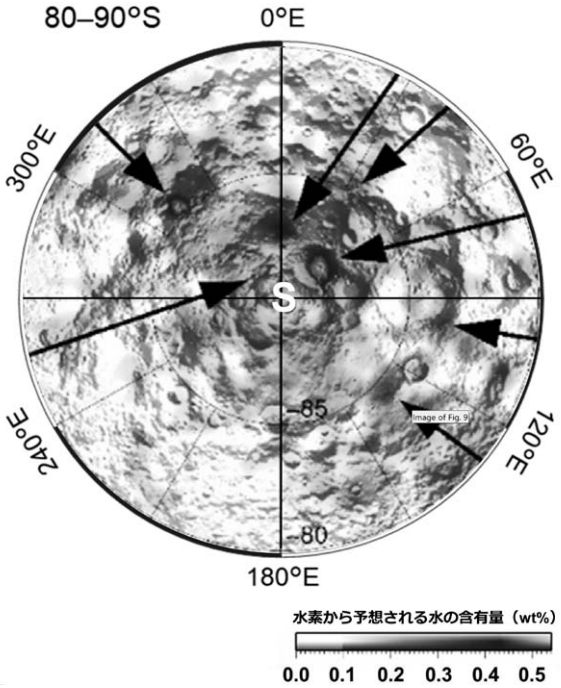


図２　月の南極付近における水素の分布　南極点（十字黒線の交点の白字 S）から見た南緯 80 ～ 90° S の範囲を表示しており、白色から黒色になるほど水素から予想される水の含有量（wt%）は高くなる。水素は表面から地下 1m までの深さまでの分布であり、図１と比較すると永久影において水の含有量は高い傾向にある。 LRO による中性子分光観測により取得（Sanin + 2017 を 改変）

al. 1998)。

2000年後半から2010年代になると、より直接的に月の氷の証拠を得るべく、各国が高精度かつユニークな探査を実行した。NASAの衛星探査機ディープ・インパクトでは、赤外分光観測（月面で反射した太陽光を使って物質の種類や量を観測）により、北極周辺から水の吸収による信号を検出した。ルナー・リコネサンス・オービター（LRO: Lunar Reconnaissance Orbiter）は、高空間分解能の中性子分光観測により、LPの予想以上に大量の水素を月極域から検出した（観測範囲は表面から地下約1 mの深さまで）（図２）。さらにエルクロス（LCROSS: Lunar Crater Observation and Sensing Satellite）では、水素が大量に濃集する南極のカベウス・クレーターにロケットを衝突させ、舞い上がった蒸気の成分と量を赤外分光観測で決定している。その結果、衝突により氷から蒸発した成分として水や二酸化炭素、硫化水素、各種炭化水素を検出し、蒸気の量からカベウス・クレーターには少なくとも5.6 wt%にも及ぶ大量の水が霜のような状態（直径約2 μ mの微小な氷粒子が土壌の隙間に存在）で存在することを明らかにした。

LPやLRO、LCROSSでは深さ約1 mまでの浅い表層の情報しか取得できないものの、各データから月には少なくとも60億トンもの大量の水が氷として埋蔵すると予想している。ISROのチャンドラヤーン1号では、赤外分光観測により月極域の永久影に露出する氷を直接観測することに成功した（図３）。この観測では極表面の情報しか取得できず、より温度の低い地下深くに氷がどれほど存在するかは定かではないものの、月極域に露出する水の総量は最低でも約6億トンに達すると推定している。

月衛星探査により水の存在の確証性が高まると、アポロ計画で回収された月の石や月隕石の再分析の重要性が認識され、アポロ計画当時では不可能であった高精度分析装置の導入も相まって、月の水に関する数々の証拠が月試料から得られるようになった。例えば、アポロ試料の化学分析により、火山噴火で月面に放出されたガラス球に大量の水が含まれることが判明した（Saal et al. 2008）。

最近では、嫦娥5号により地球に持ち帰られた月の石からも同様に水を含有するガラス球が発見され、月全体としては2700億トンもの水が存在すると報告している（He et al. 2023）。もちろん氷とは異なり、ガラス球の中に強固に捕らわれた水（一般に構造水と呼ばれる）を月面で抽出することは現時点では技術的に困難ではあるものの、月面のインフラ整備が進むことで、貴重な水資源としての活用が期待される。月隕石の再分析からは、数m以深の地下に大量の水が存在する痕跡としてモガナイトと呼ばれる鉱物が発見された（Kayama et al. 2018）。これを裏付ける証拠として、月衛星探査ラディによって、月への隕石衝突で舞い上がった砂塵から水が検出された。月の地下深くにも水が埋蔵することから、上記の各種月衛星探査で予想された量を優に超える水が月に眠ると示唆される。

アポロ計画以前からの謎であった「果たして本当に月に水が存在するのか？」この問いに対する答えは、ここ十数年の科学成果により「月極域

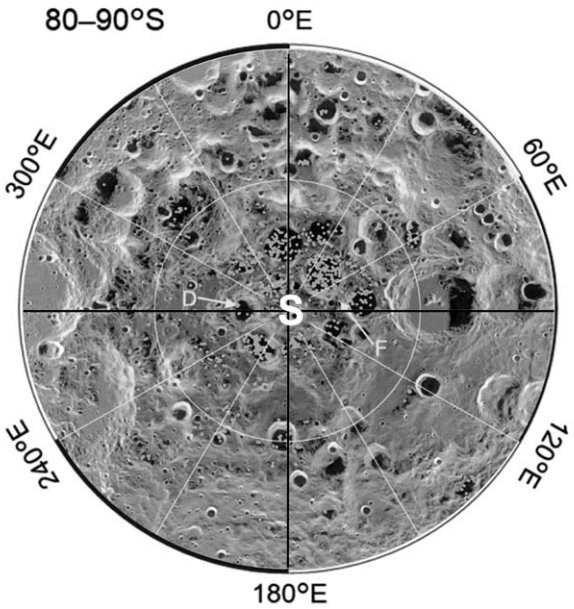


図３　月の南極付近の露出する水の分布　南極点（十字黒線の交点の白字S）から見た南緯80～90°Sの範囲を表示しており、白色から黒色になるほど温度が高い。黒色は永久影に対応し、その中の灰色のドットが水が氷として月の地表面に露出している領域を表している。チャンドラヤーン1号による赤外分光観測により取得（Li+ 2018を改変）

に大量に存在する可能性が極めて高い」ところまで来ている。人類は今まさに月で直接水を確認するフェイズまで来ており、故に昨今、続々と月探査計画が発表される経緯となった。

月探査の将来と課題

世界中で水資源を目的とした月探査が盛り上がる一方、実は月の水に関してはまだまだ謎が多い。月衛星探査や月試料の再分析により確証性は高まったものの、月の水は何度で凍るのか？いつどこからやってきたのか？氷成分は水だけなのか？など基礎的なことすらまだ分かっていない。月の水に関する基礎科学は、将来の月探査の成功や効率化、計画推進の鍵を握る重要な課題である。このように、月には重大な科学テーマが数多く残されており、産業的にも貴重な水資源が莫大に眠る可能性を秘めている。故に、来る月面開拓時代に向けて、月の水を対象とした研究の活発化が望まれる。

参考文献

1) Feldman, W.C., et al. Science (1988)
2) He, H., et al. Nature Geoscience (2023)
3) Kayama, M., et al. Science Advances (2018)
4) Li, S., et al. The Proceedings of the NationaAcademy of Sciences (2018)
5) Saal, A.E., et al. Nature (2008)
6) Sanin, A.B., et al. Icarus (2017)
7) Sargeant, H.M., et al. Journal of Geophysical Research: Planets (2019)

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K03471 の助成を受けたものです。

鹿山　雅裕（かやま・まさひろ）

2012 年に広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻での特任助教、2014 年に神戸大学大学理学研究科惑星学専攻での日本学術振興会特別研究員 PD、2016 年に東北大学学際科学フロンティア研究所での助教を経て、2019 年より東京大学総合文化研究科広域科学専攻の助教。専門は、月の科学や宇宙資源工学。月や太陽系天体における水や各種揮発性成分の実験・理論研究、月の水資源を活用した月面産業開発の検討。理学博士。猫が好き

俳句

山口 恭弘

春から夏に向け、事物も人も動き出す

蹲踞（つくばい）の古苔目覚め水ぬるむ
立春や半紙を走る右払い
春の雷背筋を伸ばし明日を見る
市場沸く笊（ざる）の浅蜊（あさり）が潮を吹く
ミモザ咲く袴姿の門出かな
花束の友を見送る星おぼろ
黄昏てこの日を終ふ鼓草（つづみぐさ）
風薫る児らを見守る巨人像
平磯に跳ねる帽子や夏来る
古戦場ペダルが巡る薄暑かな

（やまぐち・やすひろ）

１９５５年静岡県生まれ、ひたちなか市在住。東京工業大学大学院修了。工学博士。専門は被ばく線量評価学。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。弓道、茶道、書道、仏道などを学び楽しんでいる。

理想を追い求めた染色家たちの村作り

水海道染色村　きぬの染　代表　石山　修

高度経済成長の真っ只中の1971年、きもの業界は最盛期を迎えていた。生産は分業製の量産で、各専門職人の手に掛かり高価な一反のきものが出来上がっていた。

そんな時代の中で更なる生産の効率化や情報交換を求める者、離れた工房に製品を運ぶ手間を省き、また、生産に於ける緊密な打ち合わせやコミュニティーを求める者、オリジナル性のある作品の表現を目指し豊かな自然環境を求める者など、東京在住の若手染色関連業者が制作に適した環境を求め常総市（旧水海道市）に移住、染色村の建設が始まった。総勢120名のいずれも希望に満ち溢れた若者達であった。

当時は常磐自動車道も開通しておらず、筆者も東京の武蔵野からこの地に辿り着く時間の長さに不安を感じたのを覚えている。千葉県野田市から利根川を渡り、最初に目にした菅生沼やそこから広がる関東平野の解放感、鬼怒川と小貝川の中州を吹き抜ける風に一抹の不安を吹き飛ばされ移住を決意した。

村内にはまだ空き地も多く未完成な環境の中、若者たちは皆元気で、問題の多かったインフラ整備にも協力的であった。そして徐々に三十三軒の染色村としての原型が出来あがっていったのである。

これまでの活動

しかし、90年代にバブル経済が弾け一気に景気が一転。社会情勢の大きな変化と共に染色業を取り巻く環境も悪化の一途を辿った。卸問屋や呉服店からの注文は減り、それまでの受注で生産を賄っていた工房は大きなダメージを受けた。

世間の景気動向に翻弄され廃業あるいは転業する者が続出する中で、なお、染色業を生業としていた同志が再び集結し、それぞれの方法で染色の灯を次世代に継承すべく粘り強く活動を続けたのである。

染芸展入賞作品「余陽」（最終頁にカラー図解）

そして06年、茨城県指定の郷土工芸品「きぬの染」の認定を受け、現在も活動の母体として自然環境に恵まれたこの染色村を拠点としている。

「きぬの染」は茨城県主催の美術館や商業施設でのイベント等に参加するだけではなく、見学者や染色体験を積極的に誘致するなどの取り組みも行っている。県内外からの参加者も多く、企業団体の慰安イベントとしての問い合わせもある。活動の内容は様々で、各地域に出向き製品を紹介したり有名百貨店での催事に参加、または自身の作

品の展示館を創り作品を通じて染色村を紹介、さらには国内外でオリジナルな作品を発表し顧客を獲得するなどそれぞれの方法で活躍している。

いずれにせよ現在も制作を続けているものは呉服販売業者から自立した染色家で、歴史に裏付けられた技術と日本人特有の細やかな心配り、奥ゆかしさをその作品の中に込め魅力を伝える努力をしているのだ。

こうした環境の中で、最近筆者の制作する作品にも変化が起きている。これまでの衣装から現代生活を彩るインテリアやアパレルの制作が進んでいるのだ。何故なら日常に側面から伝統工芸の魅力を伝えることも必要だと思うからである。

私たちの日常生活に日本人特有の感性が寄り添い、そして人々がその魅力に改めて気づくことが伝統工芸の新たな未来に繋がってゆくと私は感じている。

そのためにもブランドに対する一定のイメージ化を図り、説得力のある作品の制作を新たに模索することが求められる。実験的な活動が必要なのだ。

課題はマーケティングと認知であり、柔軟な姿勢で現代の感性に合った作品を生み出すことでメディアも取り込み幅広い窓口で発信していきたい。ビジネスモデルとしては、自社のブランドを自社で展開する自己完結型の製造小売業を目指している。今後、「きぬの染」の市場を海外にも広げていきたいというのが筆者の夢である。

生活の中に非日常空間を構築し、伝統工芸から得られる豊かな価値観を再発見したい。

私の趣味は深山幽谷を駆け巡る渓流釣りだ。自然の摂理を会得し、自分と向かい合う。こうして私のテーマである生命の作品は生まれる。

30年も前のことだが、駅ビルのデパートで個展を開催中に、一人の御婦人が「生命の歓喜」というタイトル作品の前で立ち尽くし何か深く考え込んでおられ、帰り際に「実は私の最も尊敬している方を亡くし悲しみの中やっとこの駅まで辿り着き、偶然にこの作品に出会い、また頑張って生きようと励まされました。ありがとうございます」と声をかけて頂き、私自身もやるべきことの確信を得た。 この様に作品を通して他者と触れ合い響きあえる事こそ表現者の喜びだと思う。大変な事は経済的な事は元より、私の世界（生活に 美と潤いを求める）をどのような方法で広く伝えれば良いのか紆余曲折（うよきょくせつ）の日々である。現代は結果が優先する時代だ。その中で時間を掛けて身につけなければいけない技術をどう継承するかが悩みである。私は幸いにも多くの理解者に恵まれここまで乗り越えてこられたが、この様な職業は余程の覚悟と情熱が必要だ。理想と現実との狭間で苦しむのは作り手の宿命である。

これまでのように、工芸家もモノを作っていれば良しという時代はすでに終わっている。

「きぬの染」で立ち上げたブランドを積極的に発信し、この村は多くの染色家のロマンと情熱で創り上げたコミュニティーであることを具体的な形にして後世に伝えたいと思う。

石山　修（いしやま　おさむ）

1946年、愛媛県生まれ。インダストリアルデザイナーの兄の影響を受け洋画を公募展などに出品していた頃、父親の紹介で手描き染色に出会う。1966年に東京友禅岡川延美氏に入門。1973年に独立。その8年後、旧水海道市にアトリエを構える。1981年の東京染芸展で入賞を果たす。1975～1994年まで美術公募展、工芸公募展に出品。1995年、自然界に於ける全ての生命が持つダイナミズムを友禅染で表現するという現在のスタイルを確立、個展発表に切り替える。フランスなど海外での個展も精力的におこない、現在きものからファッション・照明・タペストリーのインテリア全般を制作し国内外での個展や茨城県の主催するイベントに水海道染色村きぬの染として参加、展示販売を続けている。

J-PARC 建設の歴史と思い出
（その２　施設完成に向けて）

日本原子力研究開発機構広報部　　鈴木　國弘

2000 年代初頭、J-PARC（大強度陽子加速器施設）は本格的に建設工事を開始したが、次々と問題や障害が発生する。

1. 地下水位の低下問題

工事を開始して間もない 2003 年初めに、隣接する宿区（原子力科学研究所南西側）で井戸の水位が低下したとの連絡があった。J-PARC の加速器トンネルは放射線遮蔽などのために地下に設置することから、工事中は湧水（地下水）の汲み上げが必要となる。JAEA と KEK では工事着手前から、建設地周辺の連続的な地下水観測と、地下水の動態や変動予測解析を産業総合研究所（旧地質調査所）と共同で進めていた。水位低下の連絡があった時点では、地下水に影響を与える可能性のあるような工事は開始されてなかったが、敷地境界線付近に汲み上げた地下水を地中に戻すための揚水（地下水）復水設備（日量約 250 トン）の設置を急ぐとともに（写真１）、産総研に地下水動態のシミュレーションや、現地での井戸水調査等を改めて依頼した。井戸枯れの原因を完全に把握することは難しかったが、産総研や東海村等の協力もあり、地元住民等への説明を行い、工事は予定通り進められることになった。その後も一部の井戸で水位低下が見られたものの、やがて水位は回復し、大きな影響を回避することができた。

写真１　揚水（地下水）復水設備（揚水を通すパイプを敷設後に埋設）

2. 埋蔵文化財の発掘調査

02 年 11 月、茨城県教育委員会による埋蔵文化財の試掘調査で、南地区の 50GeV シンクロトロントンネル建設予定地から、埋蔵文化財の所在を確認したとの回答があった。J-PARC の施設配置計画を変更することは困難であるため、記録保存のために発掘調査が必要であると判断され、工事着手前に調査を実施するよう通知があった。文化財保護法の規程では、地方公共団体等が実施す

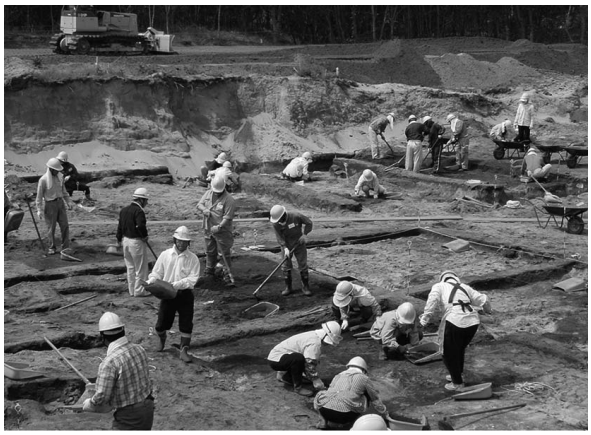


写真２　埋蔵文化財発掘作業の様子

る発掘調査では、土地の所有者や事業者に対して発掘の協力を求めることができる。この協力とは、発掘調査のための費用を負担するということである。当時、発掘調査は1㎡あたり約1万円の費用が必要とされており、J-PARCでは数億円の負担になると予想された。JAEAとKEKでは県教育委員会や関係省庁等と協議を行い協力することを決定し、茨城県教育財団が発掘調査を実施した。

発掘調査にあたり最も懸念されたことは、調査が終了するまでは建物等の工事をすることができず、J-PARC全体の建設工期に遅延が生じることである（もちろん、膨大な発掘費用の工面も問題ではあったが…）。そこで調査機関等と協議を重ね、調査エリアを1～9区に分割し、調査が終了した場所から順次建設工事が開始できるように配慮いただいた（写真2）。加速器トンネルは細長く円形であることが幸いし、発掘終了箇所を追いかけ、鉄道の線路を敷設していくように工事を進めることができた。また、全体の調査期間は長くなるが、発掘作業を優先し、調査結果の整理作業はその後に実施することで、工事の遅延を最小限に抑えることができた。

調査は03年4月から04年8月まで、合計63,110㎡を発掘、「村松白根遺跡」と命名され、報告書が05年と07年の2回にわたり刊行された。調査では、中世後半以降の大規模な製塩跡、建物、畝（うね）状遺構、150体を超える人骨や、労働力とした馬の骨なども埋葬された状態で発見され（写真3）、製塩に関わった人々が生活していた集落跡であることが確認された（写真4）。また土師質（かわらけ）土器、中国製の碗や皿、古瀬戸などの陶磁器のほか、合計2,000枚を超える古銭も出土した（写真5）。中国からの輸入銭である永樂銭が作りかけの枝銭という状態で本邦初の出土があり、ニセ金を作っていた？などと話題にもなった。

茨城県では、これまで数多くの遺跡の発掘や調査が行われているが、海岸線が120kmもあるにもかかわらず塩田跡の発見は村松白根遺跡が2例目であり、製塩と集落の様相を明らかにする大変貴重な遺跡である。KEKでは製塩に必要な塩水を貯める鹹水（かんすい）槽の断面の遺構をそのままはぎ取った遺跡模型を制作し、郷土歴史の理解を深め

写真3　丁寧に埋葬された馬の骨を発掘（どこの馬の骨だ？）

写真4　集落跡から発見された井戸

写真5　出土した古銭（2000枚以上が発掘された）

写真6　濃い塩水を溜めるための鹹水槽発掘の様子

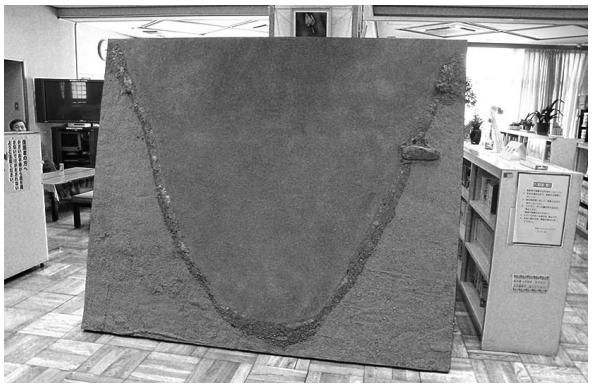


写真７　鹹水槽剥ぎ取り模型

るための資料として07年３月に東海村教育委員会へ寄贈した（写真6、7）。

また、J-PARCの建設エリアに隣接する村松虚空蔵尊（こくぞうそん）に伝わる中世の古文書には、この地域で製塩が行われていたことや、大風によって集落が砂に埋もれたという伝説が書かれているが、この遺跡がそれを示す可能性もあることが明らかになった。この伝説を裏付けるかのように、J-PARCエリアに通じる工事用仮設道路が、強風によってあおられた砂で一夜にして埋没してしまうということもあった。

3. オオタカの営巣

遺跡の発掘調査が進められていた頃、日本野鳥の会茨城支部から連絡があり、J-PARC建設地周辺にオオタカの営巣木があると指摘を受けた（写真8）。オオタカは国内希少野生動植物に指定されており、保護対策が必要である。場合によっては建設工事の中断や、建設エリアの見直しなども必要となる可能性がある。そこで04年度から同会にオオタカの生息、繁殖状況の調査を依頼するとともに、同会の指導により、抱卵期や子育て期間中には営巣場近くの工事を制限する、営巣場近くには立ち入らない、天敵カラス対策として生ごみの野積みをしないことなどを徹底した。その後、同会の調査結果では、２～３つがいのオオタカが生息し、それぞれの巣から１～２羽のヒナが巣立ったことも確認され、オオタカの生活環境に影響を与えずJ-PARCの工事を予定通り進めることができた。

写真８　オオタカの巣

4.J-PARC建設現場の特殊性

J-PARCの建設地であるJAEA原科研など、東海・大洗地区にある原子力事業者は、茨城県及び近隣市町村と「原子力施設周辺の安全確保及び環境保全に関する協定書」（原子力安全協定）を締結し、事業所敷地内で火災や事故が発生した場合は、直ちに県や市町村への連絡や、状況、原因、措置、環境への影響等を速やかに報告することが義務付けられている。

そのためJ-PARCでの作業は、建物工事も装置等の据付け工事も、一般的な他の工事現場とは異なり、工事を受注した企業ばかりでなく下請け企業や資材・機材の搬入業者に至るまで、些細な事象と思われる事であってもきちんと対応することが求められた。また事故やトラブルの程度によっては、県や市町村による立ち入り検査や工事の中断を求められることもあり、JAEA・KEKの担当者は常に緊張の連続であった。各工事受注者と一体となった安全管理体制の構築や、定められたルールや通報連絡網を、朝礼や安全大会などで確認、徹底することを継続して実施した（写真9）。

02年２月の工事着工から建物建設工事が概ね終了した07年６月までの間に、工事関係で大小

写真９　建設業者安全大会

33 件のトラブルや事故が発生したが、その都度、関係機関に対して迅速に報告を行い、原因調査、再発防止対策などを明らかにしたことから、長期にわたる工事中止を求められることはなかった。

5.J-PARC センターの発足とマークの制定

06 年 2 月には、JAEA と KEK は、J-PARC の運営に関する業務を共同で円滑に実施することを目的として J-PARC センターを設置し、KEK 教授で大強度陽子加速器計画推進部長の永宮正治氏が初代センター長に就任した。発足当初は加速器、安全、業務の 3 ディビジョン、62 名の体制であったが、その後業務の増加などに応じて組織や人員が順次拡大された。

また 06 年 3 月に J-PARC のマークを、公募による 122 点の応募作品の中から選定した。選定された作品は、J-PARC の J をモチーフに陽子が加速する様子をデザインしたもので、中性子や中間子、ニュートリノ等が飛び出す様も表しているとして採用された（J-PARC の刊行物で使用中 https://j-parc.jp/c/index.html）。

6. 加速器や実験設備の建設、施設利用開始へ

こうして J-PARC は、数々の困難を乗り越え、完成した建物への加速器や実験装置の搬入や据付、試験調整を開始した（写真 10 ～ 13）。06 年 11 月からリニアックビーム試験を開始（写真 16）、07 年 1 月に所定のビーム性能（181MeV）を達成した。07 年 10 月からは 3GeV シンクロトロンへのビーム入射を開始、同月内に 3GeV の加速を達成した。08 年 5 月には 50GeV シンクロトロンへのビーム入射と、当初予定である 30GeV のエネルギーでの陽子ビーム周回に成功した。同月には物質・生命科学実験施設で最初の中性子ビーム発生にも成功、9 月にはミュオンビームの発生も確認した。そして 12 月からついに中性子・ミュオン利用施設は施設利用が開始された。

JAEA・KEK がプロジェクトチームを設置した時点では 07 年 4 月からの利用開始を目標としていたが、約 1 年 8 か月の遅延になる。しかし、計画段階や建設途上で発生した幾多の障害や困難を考えると、総建設費 1,500 億円を超えるような大規模プロジェクトでは順調な進捗であったと思われる。これもひとえに JAEA や KEK の担当者の努力と、国・県・村をはじめとする関係各位の協力があってこそである。また 09 年 2 月からは、原子核・素粒子実験施設（ハドロン実験施

写真 11　レーザー測定器を利用した電磁石精密アライメント（位置合わせ）

写真 10　3GeV シンクロトロン偏向電磁石へのセラミックダクトの組み込み

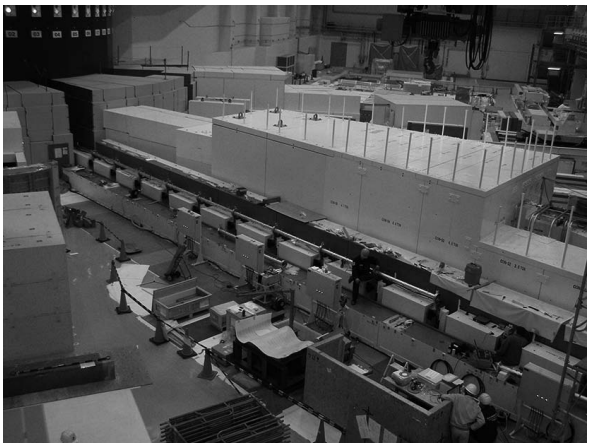


写真 12　物質・生命科学実験施設でのビームラインの据え付け

写真 13　CERN（欧州原子核研究機構）から譲渡された電磁石の据え付け

設）で、また 4 月からニュートリノ実験施設でも、それぞれビーム試験を開始した。

7.J-PARC 完成記念式典

09 年 7 月 6 日、J-PARC 第一期施設の完成記念式典が、海外からの研究者約 60 名（ほとんどが自費で参加）を含む、約 900 名の参加者を迎え、東京九段会館で開催された（なお九段会館は、11 年 3 月の東日本大震災でホール天井が落下して犠牲者が出るなど、大きな被害を受け廃業）。

式典では、J-PARC 建設の経緯などについて永宮 J-PARC センター長が報告し、塩谷文部科学大臣、江田参議院議長、橋本茨城県知事、村上東海村長、金澤日本学術会議会長、トム・メーソン ORNL 所長、小柴昌俊平成基礎財団理事長（ノーベル物理学賞受賞者）などの来賓や研究者から、J-PARC への大きな期待が寄せられた。またロルフ・ホイヤー CERN 所長や、スティーブ・クーニン米国 DOE 次官からは、ビデオレターで

写真 14　リニアックビーム試験開始のスイッチを押す永宮 J-PARC センター長

写真 15　完成記念式典での固い握手。（左から）岡崎 JAEA 理事長、永宮 JPARC センター長、鈴木 KEK 機構長

写真 16　完成記念式典の壇上に集まり祝福する各国の研究者たち

J-PARC へのエールが送られた。さらに「J-PARC への期待」と題して、ノーベル物理学賞受賞者の小林 KEK 特別栄誉教授が講演を行った。式典の最後では、外国からの研究者等が壇上に集まり、永宮 J-PARC センター長等と固い握手を交わし、J-PARC の完成を祝した（写真 15、16）。

私は、舞台袖から永宮センター長や関係者の姿を感慨深く眺めていたが、改めて J-PARC の建設に関わった全ての担当者や関係者への敬意も感じていた。その後 J-PARC は順調に施設利用や実験を進めていたが、11 年 3 月の東日本大震災により、未曽有の試練に襲われることになるのである…。（つづく）

注：各写真は J-PARC センターの提供による

鈴木　國弘（すずき・くにひろ）
日本原子力研究開発機構広報部　広報コーディネーター（プロフィルの詳細は 73 号に掲載）

持続可能な脱炭素化への道

カーボンリサイクルエネルギー研究センター始動

茨城大学カーボンリサイクルエネルギー研究センター　田中　光太郎

茨城大学の新たな研究組織として 2023 年 4 月 1 日、日立キャンパス内にカーボンリサイクルエネルギー研究センターが設立された。2050 年のカーボンニュートラルに向けて社会経済活動を発展させながら脱炭素化を図ることが求められており、その方法として、再生可能エネルギーや脱炭素燃料（水素やアンモニア）の燃焼に伴う熱エネルギーの利用とともに、二酸化炭素を新たな資源としてとらえ有効活用する「カーボンリサイクル」という技術開発が重要視されている。設立したセンターでは、３つの方法の中でも、カーボンリサイクル技術に焦点を当て研究、開発を行い、社会実装を目指す。センターの設立背景と、取り組み内容について紹介する。

１．センター設立の背景

2015 年のパリ協定採択以降、カーボンニュートラル（CN と表記）に向けた動きが加速し、日本では温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出量を 2050 年までにネットゼロとする挑戦的な目標を掲げています。このような目標がありますが、重要なことは地球温暖化を抑止するため、その原因になっている大気中の二酸化炭素濃度を低下させることです。

この目標に向け、取るべき方法は二酸化炭素を排出しないエネルギーを活用すること、つまり二酸化炭素を出さないようにすることと、大気中の二酸化炭素を利用すること、つまり二酸化炭素を何とかして消費するようにすることです。

前者の二酸化炭素を排出しない方法として、これまで化石燃料を燃焼させ利用していた熱エネルギーを電気エネルギーに置き換える「電動化」という手法があります。この時、もちろん電気を化石燃料から作らないということが大前提になります。そして、電気エネルギーの利用では賄いきれない熱エネルギーを必要とする分野では、炭素を含まない水素やアンモニアといった燃料を燃焼させその熱エネルギーを利用する「脱炭素燃料への置換」という手法もあります。ただし、水素やアンモニアも合成しないと使用することができず、

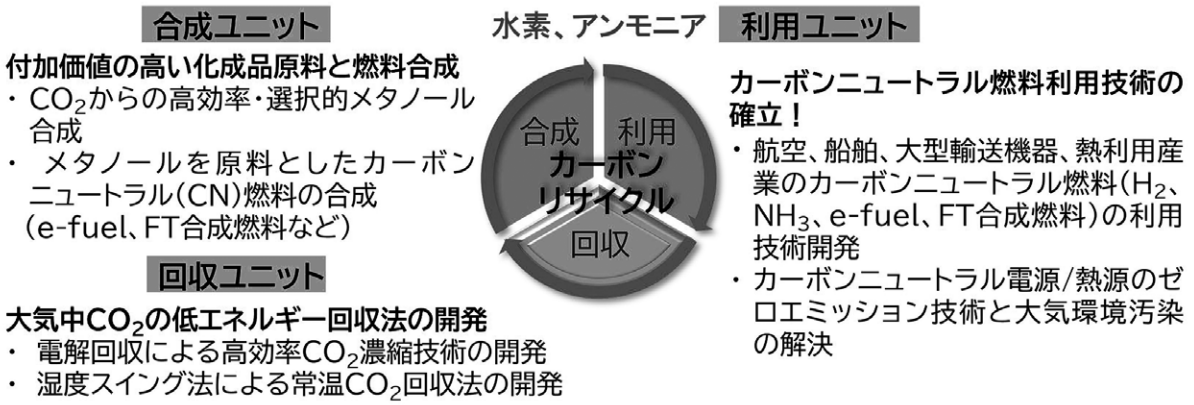


図１　カーボンリサイクルエネルギー研究センターで扱う研究内容の概要

その合成にはエネルギーが必要です。そのエネルギーを確保し、脱炭素燃料への置換を進めていかなければ､エネルギーバランス上破綻します。「電動化」と「脱炭素燃料への置換」は新産業の創出にもなり、現在活発な研究活動が進められています。

一方、大気中の二酸化炭素を利用することができれば、それによっても大気中の二酸化炭素濃度を削減することができます。電動化が難しい熱エネルギー分野の中でも、エネルギー源とともに長距離を移動しなければならない大型の航空機や船舶といった輸送機器では、輸送する人や荷物の空間を確保するため、燃料の体積をできるだけ小さくすることが求められます。そのような燃料として、炭素を含む「液体燃料」は単位体積当たりのエネルギー量が大きく、最適な燃料であり、今後も利用していくことが求められます。しかし、これまで通り化石燃料を利用することはできないため、排出してしまった二酸化炭素を回収し、水素と組み合わせて液体燃料にする、合成燃料を利用していく必要があります。それらの合成を植物や藻類に託したものがバイオ燃料であり、その利用も考えられます。いずれにせよ、大気中の二酸化炭素を回収し、付加価値の高い化成品や燃料としてそれを利用し、排出してしまった二酸化炭素は再度回収するというカーボンリサイクルという技術によって大気中の二酸化炭素を削減していく手法も有効であると考えられます。

2023 年 3 月に欧州委員会が、2035 年でガソリンや軽油を利用する内燃機関車の新車販売を禁止するという方針を、合成燃料を利用する内燃機関車であれば販売を可能とするという方針に転換したことは、この合成燃料の重要性を再認識させた大きなニュースです。また、液体燃料は備蓄ができるというメリットもあり、島国日本のエネルギー安全保障を考えると、液体燃料を自国で精製し、長期保管できる技術を持つことは非常に大切です。

このように、地球温暖化の抑制に資する大気中の二酸化炭素濃度の低下に向け､「電動化｣､「脱炭素燃料利用」、そして「カーボンリサイクル」という 3 つの技術を確立していくことが重要です。そのような中、茨城大学ではこれまで、二酸化炭素と水素から付加価値の高い化成品の原料となる物質の精製や燃料合成に関する研究を行い多くの成果を上げてきています。そして、内燃機関の燃料に関する研究を長年行っており、バイオ燃料や合成燃料と言われる以前から、それらの燃料

図 2　カーボンリサイクルエネルギー研究センター設立記念式典の様子。前列は来賓の皆様で右から 4 人目がセンター長を仰せつかっている筆者。後列が参画研究者。

を内燃機関に活用する研究を脈々と行ってきています。脱炭素燃料でもある水素やアンモニアの利用についても研究を進めています。

さらに近年、二酸化炭素の回収という研究も開始しております。これらは別々の研究者が個々に活動をしておりましたが、二酸化炭素の回収、燃料合成､燃料利用という研究が組み合わされば、カーボンリサイクル技術の創出に直結する成果が出せると考えられます。そこで、2023 年 4 月のタイミングで、学内のリソースを再配置し、カーボンリサイクルエネルギー研究センターを設立することといたしました。

2． センターの研究内容

カーボンリサイクルエネルギー研究センターでは、上述の背景に基づき、二酸化炭素を新たな資源として捉え、電動化や脱炭素燃料への置換が難しい熱エネルギー利用領域のカーボンニュートラルを実現するために、カーボンリサイクル技術を開発し、同サイクルの社会実装することを最終的な目標として研究開発を進めてまいります。

この目標に向け、二酸化炭素の回収、燃料合成、燃料利用という 3 つのテーマ扱う研究ユニットを準備し研究を進めてまいります。そして、そのベースとなる基礎研究を国内外、産学官の学外研究者にも参画いただき実施するオープンサイエンスユニットも準備し、カーボンリサイクルに関する研究を垣根無しに研究していく体制をとっています。

各ユニットの研究について図 1 に示します。まず、二酸化炭素の回収ユニットでは、大気からの二酸化炭素の回収法について研究を推進します。大気からの二酸化炭素回収については、先行研究がたくさんあり、商用ベースのシステムもいくつか提案されています。現状の方法では、二酸化炭素を回収した後、吸着材に吸着した二酸化炭素を脱離するときに大きなエネルギーが必要になります。そこで、このセンターではできるだけエネルギーを使わない低エネルギーで二酸化炭素を回収、脱離できる手法を研究いたします。具体的な方法は湿度スイング法という手法を活用するもので、吸着材に供給するガスの湿度を制御することにより常温でも二酸化炭素の吸着脱離を実現する方法です。現状の二酸化炭素回収システムの 1/4

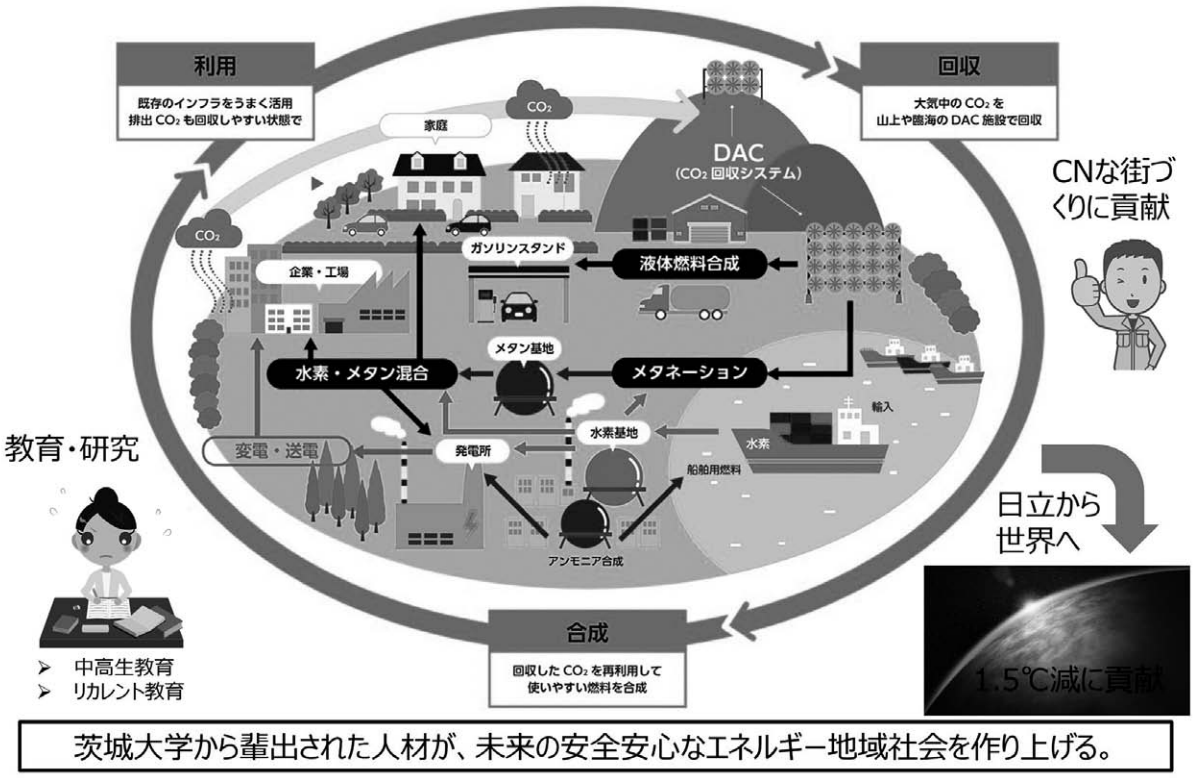


図 3　カーボンリサイクルエネルギー研究センターが目指す安全で安心なエネルギー社会のイメージ図

以下のエネルギーで実現する手法の開発を目指します。

次に、燃料合成ユニットでは、回収した二酸化炭素と水素から高効率にメタノールを合成できる手法の開発を行います。これは選択的にメタノール合成の効率を高くする触媒の開発を行うものです。また、合成したメタノールも燃料として利用することができますが、より内燃機関の効率を向上させることが可能な燃料を合成する手法についても研究してまいります。

最後は利用ユニットですが、合成した燃料を無駄なく利用する手法に関する研究を進めます。このユニットでは、合成燃料単体だけでなく、水素との混焼や、既存燃料との混焼についても研究を行い、合成燃料の安全で安心な利用法を提案します。合成燃料や水素を用いることができれば二酸化炭素は削減できますが、それらの燃料を燃焼させると、窒素酸化物や、場合によっては未燃の燃料成分が排出されることもあります。そのような副生成物を出さない方法や、生成してもそれらを浄化する触媒システムについてもこのユニットでは研究テーマとして扱ってまいります。そして内燃機関を使用しても排気がゼロとなる研究開発を進めます。

これらの３つのユニットが有機的に協力し合い、それぞれのユニットの境界領域についてもシームレスに研究を行ってまいります。回収、合成、利用というそれぞれ個々の研究は国内外で多く行われていますが、それらを一つのセンターで扱うことができることがこのセンターの魅力であり強みです。そして、この研究活動に賛同いただける方が一緒に参画して研究できるようにオープンサイエンスユニットというユニットを設け、国内外、産官学の研究者が一堂に集まり、研究活動を推進できる体制も準備しています。4 つのユニットで基礎から応用研究を推進し、最終的には三位一体となり実証研究を実施していく予定です。設立時点では学内の教員 10 名が参加し、研究を開始しています（図 2）。

３． 今後の展望

カーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会の実現に重要で、特に二酸化炭素の回収技術はできるだけ早く実用化していくことが望まれています。そこで、茨城大学カーボンリサイクルエネルギー研究センターでは、2027 年度に実験室サイズのマイクロプラントを構築し、カーボンリサイクルを実証する計画です。そして、2031 年にはスケールアップしたミニプラントを学内に設置し、実験室の電力を賄えるレベルのカーボンリサイクルシステムの実証を目指します。この技術が確立されることにより、エネルギーの選択肢が増えます。今後は、どれか一つのエネルギーに頼るということではなく、適材適所で電気エネルギー、熱エネルギーを、熱エネルギーでも水素、アンモニア、合成燃料を適切に選択し、最も環境負荷が低くなるように組み合わせて使用するようになると考えられます。そのようなエネルギーマネジメントをどうするかということについても、大学がある地元の日立市や茨城県と連携しながら実施し、安全で安心して使用できる、エネルギーに困らない街づくりを考えていきたいと思います。日立市がまさにそのモデル都市になれるように進めていくことができればと思います。そして、単に地域の問題ではない地球規模の問題解決に貢献できればと考えています。

田中　光太郎（たなか・こうたろう）
茨城大学大学院理工学研究科（工学野）教授。茨城大学カーボンリサイクルエネルギー研究センター長。大阪府出身。独立行政法人交通安全環境研究所、CNRS Nancy University（フランス）、東京大学環境安全研究センターなどを経て、2012 年に茨城大学着任。専門は熱工学。燃料の高度利用技術（燃焼反応技術、熱機関）、レーザーを用いた高感度ガス計測手法開発、排気浄化システム（CO_2 回収を含む）に関する研究を実施しています。カーボンニュートラルの実現に向け、電動化や脱炭素燃料利用が難しい熱エネルギー分野のカーボンニュートラル化を実現できるよう、カーボンリサイクル（炭素循環）という手法、つまり炭素とうまく付き合いながら実現する方法を検討しています。2050 年にカーボンニュートラルが実現しているのか、それを自分の目で見てから死ぬことが目標です。実現されているように微力ながら研究を続けたいと思っています。

職場巡視で事故の芽を摘む
～安全のための取り組み～

総合科学研究機構中性子科学センター　桐山幸治

コップをテーブルの端っこに置かないようにするというだけで部屋の中でのトラブルの確率は格段に下がる。そんな小さな気遣いの積み重ねで快適で作業しやすい空間を作るべく行われているのが職場巡視である。職場の安全衛生上の問題点を見出し改善していくことを目的として作業環境を実際に見てまわるのである。巡視を行うメンバーは、各室に立ち入り、潜在的に危険な個所を探し出し管理者や担当者に改善を求める。CROSS では、実験室だけでなくデスクワークのための居室に対しても巡視を行っている。研究所にはどんな危険が潜んでいるか、どのように安全を確保しているかを具体的な事例と共に紹介する。（編集部）

1. 職場巡視と安全

職場巡視とは、職場での事故の未然防止や職場環境の改善・維持・向上を目的として、事業実施部門や安全衛生部門において職場の作業環境や作業状況を直接確認して行われるものである。労働安全衛生法では一般的に安全衛生部門に属する産業医や衛生管理者等の選任資格者による職場巡視の実施が定められているが、これとは別に現場業務を直接的に指揮命令する事業実施部門の管理者や関係者による職場巡視の実施も極めて重要である。

総合科学研究機構中性子科学センター（以下、センターという）では、大強度陽子加速器施設（J-PARC）の物質・生命科学実験施設（MLF）に係る登録機関業務を行う上で、センター職員やMLF 共用ビームライン利用者等の安全を確保するためにセンターの事業実施部門を“MLF エリア”及び“IQBRC エリア”に大別して安全管理体制を構築し、その活動の一環として職場巡視を行ってきた。この職場巡視は、センターの登録機関業務が 2011 年度に開始されて以来 [1]、いばらき量子ビーム研究センター内にある CROSS が直接管理する室を対象としては合計 63 回実施され、749 件の指摘がされてきた。そこで、本報告では職場巡視の結果・指摘事項を整理し、どのような事故が起こる可能性があるかを指摘内容の傾向から把握し、その対策を示すことで良好な安全衛生状態の維持に改めて活用し、引き続き安全な登録機関業務を実施していくことを目的とする。（本報告内容は 2023 年 3 月末時点のものである）

2. 指摘事項の分類

1）職場巡視の対象場所

本報告における職場巡視の対象場所は、茨城県が管理するいばらき量子ビーム研究センター内のセンターが使用している室を大きく 3 つに分類し、一般的な事務作業等を行う「居室・会議室」、化学物質取扱いや機器調整、MLF での中性子実験の予備実験等を行う「ユーザー実験準備室（以下、実験室という）[2]」、上記以外の作業を行う「ユーザー情報交換室・ユーザーデータ解析室・機材及び資料保管場所等（以下、作業室等という）」とした。

2）事故の型による分類

厚生労働省では“事故の型”を以下の 21 種に分類している：「墜落・転落」、「転倒」、「激突」、「飛

来・落下」、「崩壊・倒壊」、「激突され」、「挟まれ・巻き込まれ」、「切れ・こすれ」、「踏み抜き」、「おぼれ」、「高温・低温の物との接触」、「有害物等との接触」、「感電」、「爆発」、「破裂」、「火災」、「交通事故（道路）」、「交通事故（その他）」、「動作の反動・無理な動作」、「その他」、「分類不能」。本報告では、これに従い、指摘事項に対して想定される事故の型の分類を行った。

３）指摘事項の要点の分類

指摘事項のコメントそのものは、時々により表現が多少異なっていたため、事故の型に適応させる形で「整理整頓」、「通路未確保」、「転倒防止」、「電気不安全」、「掲示不備」等として指摘事項の要点を分類した。

3. 指摘事項の傾向

指摘事項の事故の型に基づく分類結果を表１に示す。全 749 件の指摘件数を“居室・会議室”、“実験室”、“作業室等”の対象場所で分類すると、それぞれ 273 件、362 件、114 件であり、実験室における指摘件数が約半数近くを占めた。事故の型による分類の傾向として、全体では①転倒（137 件；18.3%）、②火災（93 件；12.4%）、③激突（87 件；11.6%）の順に割合が高かった。“居室・会議室”における分類の傾向は全体と同じ順であったが、“実験室”では①有害物との接触（55 件；15.2%）、②火災（48 件；13.3%）と飛来・落下（48 件；13.3%）、③転倒（45 件；12.4%）、“作業室等”では①その他（29 件；25.4%）、②激突（19 件；16.7%）、③転倒（11 件；9.6%）と、全体とは異なる傾向を示した。

指摘事項には事故の直接要因と考えられにくい「分類不能」の事故の型に分類されるものが一定数あった。「墜落・転落」、「挟まれ・巻き込まれ」、「踏み抜き」、「おぼれ」、「高温・低温の物との接触」、「爆発」、「交通事故（道路）」、「交通事故（その他）」の事故の型に分類される指摘項目は無かった。

全体において「転倒」、「火災」、「激突」に関する指摘事項の要点の内訳として、「転倒」では整理整頓・足の引掛り・段差・滑り、「火災」では、電気不安全・可燃物、「激突」では、通路未確保・機材床置き・大量荷物等が具体的な指摘内容として挙げられた。

4. 指摘事項の傾向に係る対策

指摘項目において分類されなかった「墜落・転落」等の事故は、センターで起こらないという証拠にはならないが、頻繁に指摘された「転倒」、「火

表１“事故の型”による職場巡視の指摘事項の分類　①～③：指摘件数の多い（割合の高い）順位

事故の型	全体		居室・会議室		実験室		作業室等		指摘事項の概要	指摘の例
	指摘件数（件）	割合（%）	指摘件数（件）	割合（%）	指摘件数（件）	割合（%）	指摘件数（件）	割合（%）		
墜落・転落	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
転倒	**①137**	**①18.3**	**①81**	**①29.7**	**③45**	**③12.4**	**③11**	**③9.6**	段差、すべり、整理整頓、足の引掛り	段差、机周りの整理整頓等
激突	**③87**	**③11.6**	**③31**	**③11.4**	37	10.2	**②19**	**②16.7**	通路未確保、機材の床置き、分電盤前荷物、大量荷物	荷による通路の塞ぎ、機材等の床置き、分電盤前の荷物等
飛来・落下	69	9.2	18	6.6	**②48**	**②13.3**	3	2.6	飛来物、棚、机上・台上、それ以外	高所の物、実験台の機材散乱等
崩壊・倒壊	44	5.9	19	7.0	19	5.2	6	5.3	転倒防止、立てかけ、大量荷物、大型荷物	転倒防止、積み上げられた物の崩れ
激突され	9	1.2	0	0.0	9	2.5	0	0.0	機材未固定、それ以外	
挟まれ・巻き込まれ	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
切れ・こすれ	19	2.5	4	1.5	13	3.6	2	1.8	刃物、突起物、ワレモノ	
踏み抜き	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
おぼれ	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
高温・低温の物との接触	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
有害物等との接触	60	8.0	4	1.5	**①55**	**①15.2**	1	0.9	化学物質、有害光線、ガス	
感電	33	4.4	9	3.3	21	5.8	3	2.6	短絡のおそれ、漏電のおそれ、活線近接	通路の電源コード、短絡、断線
爆発	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
破裂	17	2.3	0	0.0	17	4.7	0	0.0	ガスボンベ	ガスボンベの返却期限切れ
火災	**②93**	**②12.4**	**②36**	**②13.2**	**②48**	**②13.3**	9	7.9	可燃物、電気不安全	高温物近くの可燃物、アース線未処理
交通事故（道路）	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
交通事故（その他）	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
動作の反動・無理な動作	1	0.1	0	0.0	1	0.3	0	0.0	作業スペース	
その他	75	10.0	30	11.0	16	4.4	**①29**	**①25.4**	不衛生、衛生基準、清掃、それ以外	不衛生、衛生基準、虫よけマット、ゴミの不適切等
分類不能	105	14.0	41	15.0	33	9.1	31	27.2	緊急連絡網不備、掲示不備、それ以外	緊急連絡網、掲示等
合計	749	100	273	100	362	100	114	100		

災」、「激突」に比べては発生の可能性は少ないように考えられる。ここでは上位３項目を中心として、その他の指摘項目を合せて対策例を挙げる。

１）転倒対策

「転倒」は、厚生労働省の労働災害統計において休業４日以上の死傷災害の原因として最も割合が高く [3]、センターにおいても指摘件数が最多であることを踏まえると、重点的な対応が求められる項目の筆頭である。「転倒」は単に転ぶことだけを意味せず、骨折等の負傷やそれに起因する疾病、後遺症等により影響が長期化することもある。具体的な転倒対策としては、①段差の解消（または“見える化”）、②床面清掃･靴の防滑、③通路やその近傍、床面の整理整頓（場合により“通路”を設ける）、を重点として、作業スペースや適切な照度の確保等が挙げられる。いわゆる“4S（整理・整頓・清掃・清潔）”が対策の基本となる。

２）火災対策

「火災」はその規模により生命や周辺への影響が特に大きく（一般的に火災による死因は火傷、一酸化炭素中毒・窒息と割合が高く、また、死亡原因として逃げ遅れが半数を占める [4]）、“火の用心”も重要項目である。発生時の初期消火や転倒、激突の対策としても通路の確保等は万一の備えとして必要な措置であるが、予防策として、①高温物の近くに紙や布等の燃えやすい物を置かない、②電気器具のコンセントはしっかりと挿し込み、プラグ周囲を定期的に清掃してホコリを取り除く（トラッキングの防止）ことを行うだけでも火災の可能性は下がる。

３）激突対策

通路や人が通る可能性のある場所に置かれた機材や荷物は人との接触を誘発する。特に“金属製、重量物、突起箇所有り、大量”等の要因が重なると接触時に怪我をする可能性は高まる。また、分電盤前の荷置きは緊急時対応に駆けつける電気担当者との接触も想定される（電気保安上も良くない）。対策例として、通路を明確に区別して通路上に荷物を置かない（センター内では見かけられないが、“通路である廊下に荷物を置くこと”は避けるべきである）、接触すると危ない機材や荷物は周囲を区画する方法がある。ここでも“4S”は対策の基本となる。

４）その他の対策

＜飛来・落下対策＞指摘では棚や机・台から重量のある物の落下が多い。棚には落下防止ベルトや滑り止めテープ等が落下対策となる。特に実験室においては机や台上の機材等は、一時的な設置であれば、出来るだけ中央に配置する、定常的に設置する場合にはボルトやベルトで台に固定する等の対策をとることが望ましい。

＜崩壊・倒壊対策＞転倒防止されていない棚や機材、立てかけてある物への指摘が主である。棚や物は適切に固定することにより、大地震発生時の倒壊した物への激突の予防や（特に避難のための）通路の確保にも有効である。固定すべき物のサイズの目安としては、「$B/\sqrt{H} \leqq 4$（B：奥行㎝、H：高さ㎝）の場合、固定」が一例として示されている [5]。

＜激突され対策＞キャスター付きの機材には注意が必要である。キャスターにストッパーがある場合は使用場所で必ず利用し、無い場合は外付けの輪留めを使用して不意に動くことが無いようにする。

＜切れ・こすれ対策＞カッターや刃物、ワレモノを使用する実験室で指摘が目立つ。試料の加工等で刃物類を使用する際は十分に注意し、使用後は放置しない（片づける場所を決める）。ガラス器具も同様に慎重に取扱い、落ちやすい場所で使用、保管しない。

＜有害物等との接触対策＞実験室では様々な化学物質が利用されるが、その多くは何らかの法令で規制されているものであり、指定場所（局所排気装置、保管庫等）での使用や保管、廃棄等の取扱いや保護具の着用等の法定対応が求められる。実験室の管理者や作業主任者等の指示や実験室のルールをよく確認して、それに従い活動する。

＜感電対策＞電気不安全に関しては、いくつもの事例やその対策が報告されているので参考して貰いたい [6-8]。

＜破裂対策＞指摘内容は高圧ガスボンベの期限内未返却である。高圧ガス容器は茨城県が定める指針に基づき適正に扱う [9]。

＜動作の反動・無理な動作対策＞動作の反動や無理な動作により突発性の腰痛が発生する。重量物の取扱いでは荷物の小分け、台車の使用、手で持つときは体に引き寄せて持つ、腰を曲げた姿勢にならない等の対策が必要である。また、作業スペースを確保し、不自然な姿勢を取らないような作業環境にすることも重要である。

＜その他対策＞その他の指摘では室の床等の清掃不十分やゴミの放置、蛍光灯切れによる照度低下、部屋の乾燥等が多い。対策としては、定期的な床の清掃やゴミの処分、蛍光灯が切れた場合の交換や予備の確保、低湿度時には加湿器を使用する等が挙げられる。この様な衛生環境の維持は快適な職場環境形成のために地味ながら重要である。やはり、ここでも “4S” は対策の基本となる。

5. まとめ

職場巡視において、全体では「転倒」、「火災」、「激突」の要因となる指摘事項が多く、実験室では「有害物等との接触」、「火災」、「飛来・落下」、「激突」が多い。多くの項目で “4S（整理・整頓・清掃・清潔）” は対策の基本であると考えられ、4S を徹底することにより様々な “ 事故の芽 ” を摘むことに繋がる。これに加えて個別の対策を対象場所で適切に行い、かつ、職場巡視を継続して対策状況を確認して良好な職場環境を維持していくことが事故の予防につながる。

今後も適切な安全管理を行うことで、引き続いてセンター職員や MLF 共用ビームライン利用者の安全確保、安全な事業の実施に努めていきたい。

CROSS ロード

重水素化技術をめぐる議論
J-PARC Workshop 2022 開催報告

総合科学研究機構　中性子科学センター　阿久津和宏

1．はじめに

大強度陽子加速器施設（J-PARC）の物質・生命科学実験施設（MLF）では、中性子ビームを利用した多種多様な物質・生命科学研究が行われている。J-PARC Workshop は J-PARC MLF における研究活動の活性化や将来計画の討論等を目的として開催される国際ワークショップであり、中性子科学研究に関わる専門家を国内外から招聘（しょうへい）し、最先端の研究技術・成果に関する議論が展開されている。

本記事では、2023 年 1 月 19, 20 日に開催された J-PARC Workshop 2022 ～ Deuterium Science Entering a New Phase ～の概要について紹介する。なお、本ワークショップは現地会場（東海村）で開催しており、多数の研究者・技術者による活発な議論が対面式で行われた。

2．重水素化合物の利用と役割

重水素（^{2}H）[*1] は水素の安定同位体であり、自然界に 0.015% ほどの割合で存在している。1932 年には H.C. Urey らによって世界で初めて重水素の単離に成功し [1]、その後は様々な研究分野で重水素が利用されている。有機分子中の水素を重水素で置換した化合物（重水素化物）は、中性子散乱法や核磁気共鳴（NMR）法などの同位体に敏感に相互作用する分析法で広く利用されている。特に、中性子を利用したソフトマテリア

謝辞

登録機関業務開始以降、歴代のセンター長、MLF エリア及び IQBRC エリアの管理者・担当者、ユーザー実験室管理関係者による職場巡視の実施及び全ての職員等による指摘への対応等の職場巡視への多大なる御理解と御協力により、幸いなことにセンターでは重大な事故や労働災害はこれまでに発生していない。ここに記して謝意を示す。

参考文献

[1] 柴山充弘、波紋 Vol.33,1, p.19 (2023)
[2] 坂口佳史ら、波紋 Vol.24,1, p.60(2014)
[3] 厚生労働省、令和 3 年労働災害発生状況
[4] 消防庁、令和 4 年版消防白書
[5] 消費者庁、本棚等の転倒防止策について（消安全第 278 号、平成 22 年 12 月 1 日）
[6] 平松英之ら、CROSS T&T, 61,p.47(2019)
[7] 平松英之ら、CROSS T&T, 63,p.44(2019)
[8] 野尻雄幸ら、CROSS T&T, 73,p.18(2023)
[9] 茨城県、高圧ガス容器適正管理指針

桐山　幸治（きりやま・こうじ）
総合科学研究機構　中性子科学センター安全管理室　課長
労働衛生コンサルタント、博士（理学）

ル・生命科学の研究では、重水素でラベルした化合物（重水素化物）を溶媒もしくは溶質として用いることで見たい分子のコントラストを調整することで、観測したい対象を可視化することが出来る（図 1)。このような背景から、重水素化物は中性子散乱によるソフトマテリアル・生命科学の研究に必要不可欠なものであり、その活用は MLF 成果最大化とユーザーの拡大のための起爆剤となり得る。そのため、2022 年度は重水素化物の合成技術や中性子への応用に関する国際ワークショップを開催し、研究成果の議論と情報交流が行われた。

3. ワークショップの様子と講演内容の紹介

重水素化物の合成技術や中性子への応用に関する J-PARC Workshop は 2017 年度、18 年度にも開催しており、今回はそれらに続く第 3 回の J-PARC Workshop となる。参加者は国外からの講師を含め 55 名で、そのうち 12 名は学生を含む若手研究者であった。図 2 にワークショップで撮影した集合写真を示す。写真の通り、国内外からの多数の参加者が一堂に会してワークショップが現地で開催された。

今回のワークショップでは、2 日間にわたり 14 件の講演と 14 件のポスター発表（合計 28 件の発表）が行われた。1 日目は化学的な重水素化技術及び中性子研究に関する発表、2 日目は生物学的な重水素化技術及び中性子研究に関する発表、産業利用、ポスター発表が行われ、口頭発表では議論の時間が不足し座長が進行に苦慮する場面も見受けられたが、不足した分は休憩時間やポスター発表の時間などを活用することで追加の議論が展開されていた。これは、対面式のワークショップだからこそできた、細やかなコミュニケーションであったと言える。また、新型コロナパンデミックの影響で対面での開催に慣れていない学生・若手研究者も少々見受けられたが、全ての発表は滞りなく終了した。

5 件の基調講演では、それぞれオーストラリア原子力科学技術機構（ANSTO）の国立重水素化施設 (NDF) における重水素化活動の紹介（T. A. Darwish、ANSTO-NDF)、量子科学計算による重水素同位体効果研究（立川仁典、横浜市立大)、カルボン酸の位置選択的重水素化反応（大

嶋孝志、九州大学)、創薬における同位体科学を加速させる重要な触媒反応（V. Derdau、Sanofi Germany)、中性子散乱のためのタンパク質重水素化（杉山正明、京都大学）に関する最新の話題が紹介された。その中でも、九州大学大嶋孝志先生によるカルボン酸の位置選択的重水素化反応[2]の講演では、3 種類の試薬を用いた常温でのカルボン酸重水素化反応が紹介され、聴講者から多くの質疑があった。常温の重水素化反応は温度変化に弱い化合物にとっては非常に魅力的な反応であり、今後のさらなる発展に注目したいトピックスであった。

また、本ワークショップでは若手研究者（35歳以下)を対象としたポスター賞を選考しており、厳正なる審査の結果、学術発表の優秀なポスターに対して「J-PARC Workshop ポスター賞」を授与した。ポスター賞並びにベストポスター賞を受賞された若手研究者のさらなる活躍を期待するとともに、ポスター発表及び審査にご参加、ご協力頂いた方々に改めて感謝申し上げたい。

４．まとめ

本ワークショップでは、重水素化物による最先端の研究内容とその周辺技術の情報が共有されるとともに、熱のこもった議論が交わされた。また、今回初めて開催したポスター発表では、学生を始めとした若手研究者による研究討論が活発に行われた。今回の対面でのポスター発表は、若手研究者が新しいアイデアや解決策を見出すための良い機会となったのではないだろうか。

なお、次回のワークショップは 2024 年秋頃に開催予定であり、詳細については後日ホームページ等で周知される予定です。特段の参加要件はありませんので、皆様の次回のワークショップへのご参加を心よりお待ちしております。

また、世話人の皆様（https://neutron.cross.or.jp/ja/events/20230119-20-2/）には、多大なご協力と貴重なご意見を頂いており、ここに記して謝意を示します。

参考文献

[1] H.C. Urey, F.G. Brickwedde, G.M. Murphy, Phys. Rev. (1932), 39, 164.

[2] T. Tanaka, Y. Koga, Y. Honda, A. Tsuruta, N. Matsunaga, S. Koyanagi, S. Ohdo, R. Yazaki, and T. Ohshima, Nat. Synth. (2022), 1, 824.

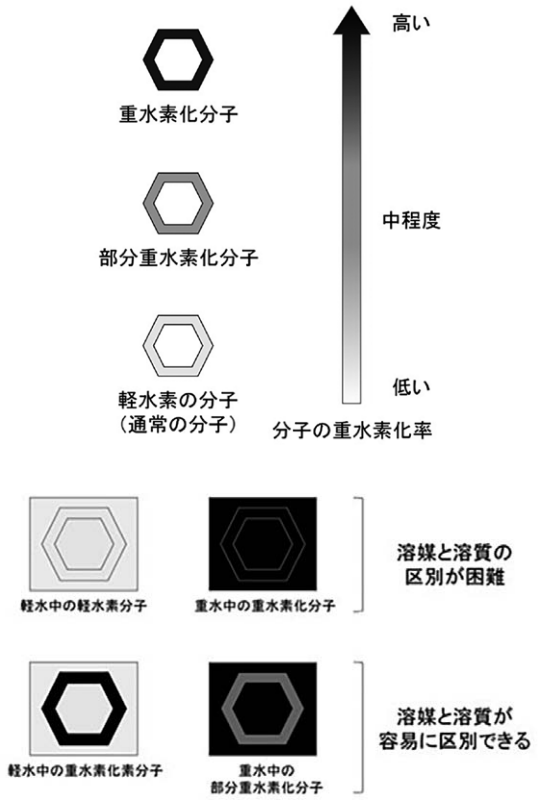


図１　重水素化合物を用いた中性子散乱コントラスト調整のイメージ図

図２　J-PARC Workshop 2022 の集合写真

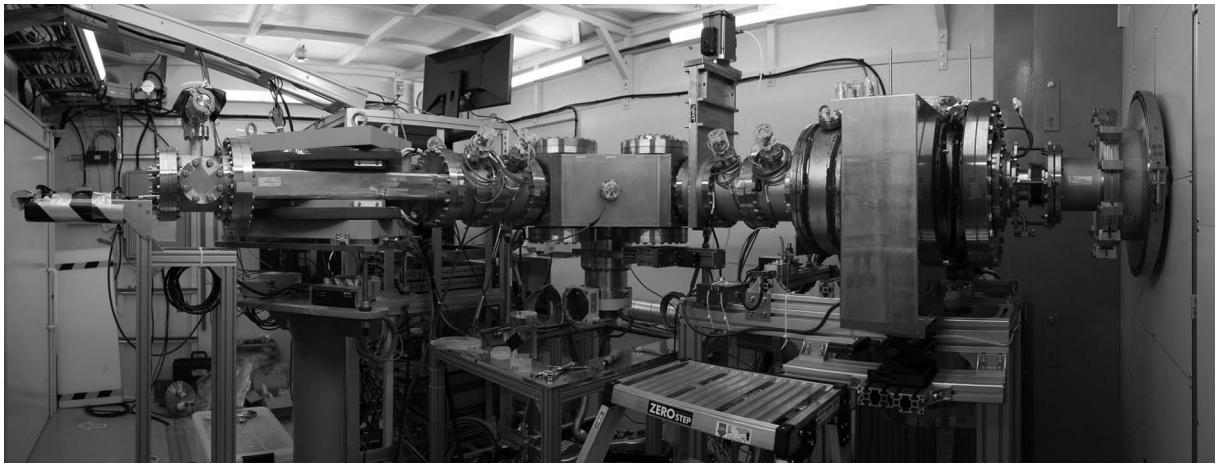
※１　重水素

水素には天然に３つの同位体、軽水素（^{1}H)、重水素（^{2}H)、三重水素（^{3}H）が存在し、重水素はその２番目の同位体である。軽水素は原子核が陽子１つのみで構成されているが、重水素は原子核が１つの陽子と１つの中性子から構成されているため、質量は軽水素の約２倍となる。そのため、重水素の化学的・物理的性質は軽水素と異なることがある。分子中に重水素を多量に含む水は重水と呼ばれ、工業や化学実験等に利用されている。

CROSS ロード

ミュオン新ビームライン始動で勉強会

J-PARC　3つの基礎実験に加え顕微鏡機能の二刀流



S2 実験エリア内部に設置された装置。ミュオンビームは右から左に入射する
（写真提供　高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所）

J-PARC プレス勉強会「超低速ミュオンの夢が花開くとき～二刀流をめざすミュオン新ビームライン始動～」が 2022 年 2 月 8 日、オンライン開催され、J-PARC 物質・生命科学実験施設（MLF）に新設されたミュオンの H ラインが紹介された。J-PARC センターと高エネルギー加速器研究機構(KEK）が主催した。

新設されたミュオンビームラインは、基礎物理も物質科学も実験できるという“二刀流”。J-PARC では、加速器からのプロトンビームをターゲットに照射して原子核反応によりミュオンを得ている。もともとのミュオンはエネルギーが高く、容易に物質を通り抜けてしまう。そこでミュオンを減速して実験に用いる。超低速ミュオンは速度も方向もよく揃ったビームで、物質科学の実験に好適。これを再加速すれば、良く揃った状態を保持したままエネルギーの高いミュオンが得られる。

KEK 物質構造科学研究所ミュオン科学研究系研究主幹の下村浩一郎教授らによると、超低速ミュオンは、加速器で生成した正ミュオンからミュオニウムをつくり、レーザーで電子を引きはがしたエネルギーの低いミュオンビームのこと。加速するとレーザー光のように指向性の高いビームを作ることができるので、高精度の測定が必要な基礎物理実験や顕微鏡観察などに適しているという。

ミュオン H ラインでは、g-2（ジーマイナスツー）、EDM、ミュオニウム精密分光の 3 種の測定が行われる。いずれも高統計を要する基礎物理実験で、3 つの実験がすべてできるのは世界でも J-PARC だけなのだという。一方、新規に開発が進められているミュオン顕微鏡は、電子顕微鏡では難しい厚い試料の観察が可能で、細胞内部のイメージングや材料内部の元素や磁気構造分布の研究に用いられる。

プレス発表では、下村教授による概要説明の後、KEK 素粒子原子核研究所の三部勉教授による「ミュオンで探求する基礎物理」、KEK 物構研ミュオン科学研究系、永谷幸則特別准教授による「ミュオン顕微鏡で探る世界」などの解説が行われた。

新ラインは 2012 年から段階的に建設が進められてきたが、2021 年夏期シャットダウン中に建設が大きく進展し、2022 年 1 月に第 1 分岐である H1 実験エリアでファーストビームを観測した。今年度のユーザー実験に向け、ビームチューニングおよび負ミュオンビームのコミッショニングも進行中とされる。（水沢多鶴子）

ＣＲＯＳＳの動き

法人事務局の活動

2023（令和５）年１月～４月

2月2日　第６回編集委員会をTIST会議室で開催し、第73号の発行について、今後の企画、編集方針等について議論した。

28日　第３回総合科学研究センター研究懇話会をオンライン開催した。新冨孝和氏が「再生可能エネルギーの有効利用に向けて」、原田博夫氏が「森林環境税・譲与税の現状と課題」というテーマで講演し、参加者17名と活発な議論を行った。

3月2日　第６回常任理事会を開催し、第４回理事会資料について、茨城県ビームライン事業の応募、客員研究員規程、育児休業細則の改正、総合科学研究センター長の再任、編集委員会委員について審議した。またCROSS研究員に関する細則の改正（ガイドライン）について意見交換した。

6日　「CROSS T&T 73号」を発行し、CROSS会員、図書館・公共機関・高等学校等へ配布した。

8日　第５回総合科学研究センター運営会議を開催し、今後のセンター運営について（センターのあり方、CROSS研究員に関する規程の改正等）、常任理事会報告、各委員会からの報告、今後の活動等について意見交換を行った。

14日　第４回理事会をハイブリッド開催し、令和５年度事業計画、令和５年度収支予算、定款の変更、評議員会招集、理事候補者の推薦、中性子科学センター長の再任について審議した。そのほか会計実地検査の結果と今後の対応、制定（改正）済み規程、細則等に関して報告した。

17日　第２回評議員会を開催し、定款の変更に関する件、理事選任に関する件を審議し、茨城県ビームライン受託事業に関する件、令和５年度収支予算の件、令和５年度事業計画の件、会計実地検査と今後の対応の件等を報告した。

17日　第５回理事会をオンライン開催し、役付き理事選定等に関する件、主たる事務所の住所変更に関する件が審議した。

24日　第７回常任理事会を開催し、客員研究員規程について審議した。

24日　一般財団法人新技術振興渡辺記念会「科学技術調査研究助成」に申請した「総動員戦略からイノベーション戦略まで（技術員・STAC・科学技術庁の政策）、國谷実特任研究員」のテーマが採択された。採択額：230万円、助成期間：令和５年４月から令和６年３月

31日　宮﨑司、加倉井和久、野尻雄幸、美濃部静香が退職した。

4月1日　東海地域の事業の拡大化に対応するため、主たる事務所を、つくば地域（土浦市）から、東海地域（東海村）に変更した。

1日　令和５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５件の交付内定の通知があった。

1日　川田麻衣子が法人事務局に、太田一子が新事業展開部に着任した。また、同日付で中性子産業利用推進センターを新設し、鈴木淳市がセンター長に就任するとともに、佐藤衛、峯村哲郎、大貫梨香、池田一貴、石垣徹、羽合孝文、日下勝弘、坂倉輝俊、杉山晴紀、柴田伸寿、安田淳一、中村雅俊が着任した。

6日　第１回編集委員会を開催し、2023年度編集委員の選任、委員長の選出、2023年度運営方針や第74号の編集等について議論した。

14日　第１回総合科学研究センター運営委員会を開催し、今後の総合科学研究センターの運営方法や体制、活動方針等について議論した。

20日　第１回常任理事会を開催し、「総合科学研究センター「総合科学研究員」に関する細則について」審議した。

J-PARC物質・生命科学実験施設（MLF）に関する活動

1月10日以降

1月10日～1月13日、2月6日～2月10日　東海大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程２年、能登勇真氏がCROSS中性子科学センターの研究生として「中性子反射率法によるアモルファスGeS_2への銀のフォトドーピングの研究―中性子反射率データの解析」をテーマに研修を行った。

19 日 「J-PARC Workshop 2022 Deuterium Science Entering a New Phase」を J-PARC と共同で AQBRC 2 階会議室とオンライン配信のハイブリッドで開催した。参加者数：55 名

2 月 2 日 「第 6 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」を共同で AQBRC 及び J-PARC MLF 中性子小角・広角散乱装置「大観」（BL15）で行った。参加者数：4 グループ 6 名

3 日　J-PARC センターと合同で「利用研究課題審査委員会・中性子課題審査部会」をオンラインで開催した。2023A 期には共用ビームラインに 138 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。

13 日　TKP 東京駅大手町カンファレンスセンター（東京）で J-PARC センターと合同で「選定委員会・MLF 施設利用委員会」を開催した。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 57 件の課題（新利用者支援課題 4 件を含む）の採択が承認された。CROSS は課題申請者に採否結果の通知を行った。

16 日 「第 15 回材料系ワークショップ～計算・計測のデータ統合による材料開発の革新～」を共同で秋葉原 UDX とオンライン配信のハイブリッドで開催した。参加者数：363 名

3 月 6 日 「ものづくり基盤研究会 – 接合・加工における課題解決に向けた評価技術」を共同でオンライン開催した。参加者数：26 名

13 日～15 日 「2022 年度量子ビームサイエンスフェスタ」をつくば国際会議場とオンライン配信のハイブリットで共同開催した。参加者数：885 名

16 日 「2022 年度液体・非晶質研究会」を KEK つくば 4 号館 4F 輪講室とオンライン配信のハイブリッドで共同開催した。参加者数：63 名

16 日 「中性子小角散乱研究会」を KEK つくば 4 号館セミナーホールで共同開催した。参加者数：26 名

22 日「2022 年度中性子構造生物学研究会『天然変性タンパク質』」を共同でオンライン開催した。参加者数：121 名

30 日 「文部科学省　データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト (DxMT) 第 1 回マテリアル革新力強化に向けた総合シンポジウム」を一橋講堂（東京）と web 配信のハイブリッドで共同で開催した。

4 月 18 日～7 月 14 日　マドリード・コンプルテンセ大学（スペイン）より Dhoha Rashed Alshalawi 氏が大型施設での経験を積むことを目的に来日、CROSS 研究生として滞在する。

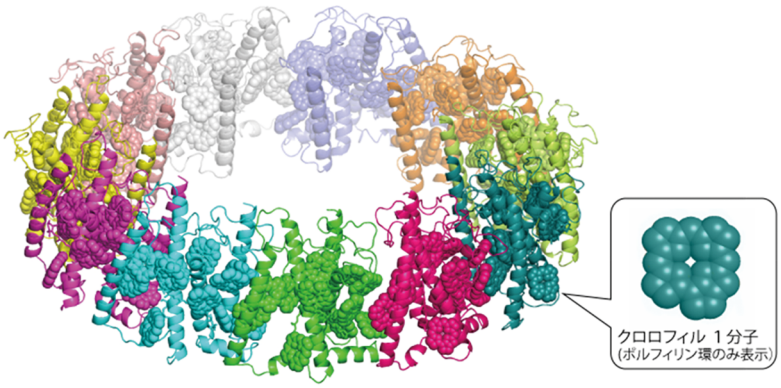
21 日　プレス発表「反強磁性体におけるトポロジカルホール効果の実証に成功――磁気情報の新しい読み出し手法としての活用に期待――」を行った。東京大学、理化学研究所、 東北大学、富山県立大学、大阪大学、総合科学研究機構、日本原子力研究開発機構、J-PARC センター、科学技術振興機構（JST）の連名。

26 日 「第 89 回 SPring-8 先端利用技術ワークショップ / 第 4 回放射光・中性子連携利用研究会 / 第 2 回量子ビームを用いた構造材料研究会」を共同でオンライン開催した。参加者数：125 名

編集後記 ■4 月 1 日から総合科学研究機構（CROSS）の体制が変わり、法人事務局の業務の大部分は土浦から東海に移転しました。東海地区には J-PARC MLF の茨城県ビームライン（BL03 と BL20）の運転維持管理、人材育成、先導的研究のため「中性子産業利用推進センター」が設立され、従来の「中性子科学センター」との 2 本立てになります。■前号の編集後記で筆をおく形となった編集委員長ですが、3 月末をもって編集委員会の事務局仕事から外れたものの、引き続きテーマや執筆者の掘り起こしや編集実務のサポート仕事はこなしてくれています。■ CROSS の体制は変わりましたが、本誌はこれからも、つくば土浦、東海地区から発信されるサイエンスの解説記事の他、学術振興、文化交流、まちづくりの視点などから、経験談やご所見等を掲載していきます。■今回も巻頭特集「生き物たちと環境」ほか、たくさんの記事をご寄稿頂きました。どうぞお楽しみください。

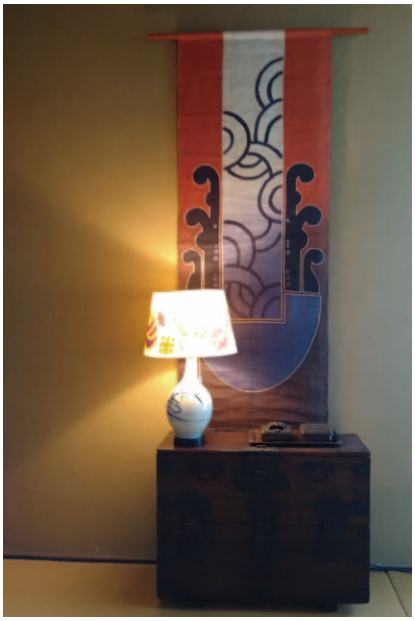
CROSS T&T

Comprehensive Research Organization for Science and Society



Pc-frLHC の立体構造分子モデル（本文 3 ページ）ひとつひとつのタンパク質を異なる色で示した。それぞれのタンパク質に 11 個のクロロフィル分子（球体で示した分子）が結合している。タンパク質部分は、リボン図で表している。（アストロバイオロジーセンター提供）

色彩図録



水海道染色村「きぬの染」石山修さんの作品（本文 42 ページ）
染芸展入賞作品「余陽」（左）と壁掛ランプシェード

CROSS T&T —第 74 号—

令和 5 年（2023）7 月 7 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／久保　稔
松下　博充／水澤多鶴子

印刷所　松枝印刷株式会社
〒303-0034 常総市水海道天満町 2438
TEL：0297(23)2333　FAX：0297(23)5865

No.74
2023.7

会員頒布価格　700 円