

## 第27回名古屋大学博物館特別展記録 結晶展—研究者を魅了する多様な結晶たち—

The record of 27<sup>th</sup> Nagoya University Museum special exhibition  
Crystal Studies in Nagoya University  
—Fascinating Facts from the Laboratories—

梅村 綾子 (UMEMURA Ayako)・宇治原 妃美子 (UJIHARA Kimiko)

名古屋大学博物館

Nagoya University Museum, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, 464-8601, Japan

### 1. はじめに

第27回名古屋大学博物館特別展：「結晶展—研究者を魅了する多様な結晶たち—」（会期2021年4月27日～11月6日）を当館3階特別展示室にて開催した（図1）。本展示では、名古屋大学博物館所蔵の冒険家・植村直己氏が作製した雪の結晶レプリカや、名古屋大学名誉教授・野田稲吉博士の合成雲母の研究について展示紹介したほか、現在名古屋大学で遂行されている結晶研究の一部を分野横断的に紹介した。展示パネルは和文と英文の二か国語対応とし、また、新型コロナウイルス感染症予防対策として、オンライン上に結晶展特設WEBサイト（図2）を設けた。会期期間中（開館84日間：新型コロナウイルス感染症対策のため、5月12日～6月20日、8月27日～9月30日は休館）に延べ約2,781人の来館者、および特設サイト（トップページへのアクセス数）へは延べ18,199名の来訪者があった。また、昨今のオンライン発信の流れを汲み、Youtube（<https://youtu.be/dvVWGOAE5nQ>）上にギャラリーツアーの紹介動画を掲載したところ、結晶展会期中に計462回の視聴があった（公開日：2021年6月24日）。以下に本特別展で使われたパネルを引用し、展示の詳細の解説に替えることとする。



図1 結晶展展示会場。



図2 結晶展特設WEBサイトトップページ。

## 2. 本展示の趣旨および目的

本展示の趣旨および目的を、「ごあいさつ」の中にまとめた。

### ごあいさつ

名古屋大学博物館第27回特別展「結晶展—研究者を魅了する多様な結晶たち—」へお越しいただき、誠にありがとうございます。本特別展は、私たちの未来社会の創造に不可欠な材料である「結晶」をテーマに、現在、名古屋大学で遂行されている多彩な結晶研究の一部を、分野横断的に紹介いたします。

新材料の応用開発には、結晶学者の共通認識である「結晶学」に立ち、多様な見方・考え方で、種々の問題を克服する必要があります。実際、結晶学は、物理学、化学、材料科学、地質学、生物学、薬学、医学などにまたがる学際的な科学であり、それら科学を支えてきました。このことは、ノーベル賞が始まって以来120年の間に、結晶学に直接的または間接的に関係する研究により、50名以上の科学者がノーベル賞を受賞してきたことが物語っています。

本特別展を通じて、結晶学発展の歴史を振り返るのみならず、現行の結晶研究により多様な見方・考え方に触れ学び、さらに未来社会への期待を共に考え、語り合うきっかけとしていただけましたら幸いです。

名古屋大学博物館館長 吉田英一

展示企画：名古屋大学博物館 梅村綾子

グラフィックデザイン：名古屋大学博物館 宇治原妃美子

## 3. 導入

本展示への導入として、六面の連結パネルに読み物風にして紹介した（図3、図S1）。序章は、岩塩標本と、みんなで作る展示パネル「あなたは結晶を見て何を思う？」を用意し、来場者の岩塩に対する第一印象の「ことば」を当人の見方や考え方とみなして回収し、それをテキストマイニングにより可視化した（最終集計：延べ217の言葉）。第1章から第3章は、本展示を楽しむためのヒントとして「結晶フィロソフィー」を紹介し、「ノーベル賞受賞者に見る結晶学の発展」の歴史へと続き、現在、名古屋大学にて結晶研究を推進中の6研究室を「ダイジェストにして紹介」した。

### 序章 みんなで作る展示パネル「あなたは結晶を見て何を思う？」

この結晶を見て、どんな第一印象がありましたか？

### 第1章 「結晶」フィロソフィー

……雪の結晶は、天から送られた手紙であるということが出来る。そしてその中の文句は結晶の形及び模様という暗号で書かれているのである。その暗号を読みとく仕事が即ち人工雪の研究であるということも出来るのである。

—「雪」の結晶に魅せられ、世界で初めて人工雪の結晶を作り研究した、中谷宇吉郎博士の言葉です。



図3 結晶展導入部にあたる、六面の連結パネル。

結晶は、自然界のありとあらゆるところで見られます。例えば、グラファイト（黒鉛）とダイヤモンドは、どちらも、私たちの生活にもおなじみの炭素の結晶ですね。しかし、見た目も使いみちも異なります。グラファイトは、鉛筆に使われているように、黒く柔らかい。一方、ダイヤモンドは透明でかたく、かたい石を切るのにも使われています。一体、どういうことなのでしょう？

その説明は、X線結晶学が教えてくれます。そう、病院で「レントゲン」と呼ばれている、あのX線です。X線が結晶に当たると、結晶中の原子がそれをある方向にだけ散乱して、回折現象を起こします。結晶中の原子が規則正しく並んでいるからです。

X線結晶学は、固体結晶の特徴を原子や分子レベルで説明する、いわば「結晶フィロソフィー」を確立した一つの学問です。おかげで、「結晶」に直接または間接的に関わる学者にとって、その学問分野は多岐にわたるとしても、結晶を語る上での共通言語・共通認識をもつことができます。

この結晶展を通じて、たとえ、「結晶」を“専門”としていない人にとっても、結晶の学術的な楽しみ方を知ることになるのであれば、結晶の神秘性もやがて科学的な視点で飛び込んでくるようになることでしょう。

さて、グラファイトとダイヤモンドの違いを、原子レベルで、結晶構造の視点で見るとみましょうか。

凡ての事象を自分自身の目によって見ようとする願望、これがあれば必ずしも専門的の知識や素質がなくともよいのである。しかしこのように自然現象を自分の眼で見る人には、やがてその科学的説明を求める気持ちが出て来るであろう。

—中谷宇吉郎博士「雪」より。

## 第2章 ノーベル賞に見る結晶学の発展

今から120年前の1901年、ノーベル賞が始まりました。その後、結晶に関する研究によって、50名以上の科学者がノーベル賞を受賞しています。そのことは、結晶学がさまざまな科学を支えてきたことを示しています。

### はじまり

1895年、レントゲンが真空放電管（クルックス管）からX線が放射されることを発見しました。「X（エックス）」の名の由来は、「未知」のもの、という意味です。X線の発見により、人類はそれまで見たこともない世界を眼にするようになりました。レントゲンの妻の手を写したX線写真も、当時は相当なインパクトだったことでしょう。こうした“分かりやすさ”は大切なことで、X線の性質を利用した応用研究が多く実施されました。結晶に関する研究がまさにその一つです。

### 結晶学の礎を築く

1912年、ラウエが結晶にX線を照射したところ、X線が特定の方向に回折する現象を発見しました。また、X線を使えば、結晶中の原子位置を正確に決定して結晶の三次元構造が分かるようになる、として、1912~1913年に、ブラッグ父子が、岩塩やダイヤモンドの結晶構造（原子配列）を解明しました。ところで、ほぼ同時期、物理学者でかつ随筆家としても有名な寺田寅彦も、ラウエの実験に興味をもち、岩塩にX線を当てて蛍光板に回折像を写し出し、ブラッグ父子と同様の考察を発表しています（Terada T., *Nature*, 91, 135-136 (1913); Terada T., *Nature*, 91, 213 (1913)）。

### タンパク質の結晶構造解明への挑戦

X線結晶学は、さらなる展開として、生命の謎に関わるタンパク質の結晶構造を明らかにしていきます。

### タンパク質が結晶化することを発見

1926年、サムナーはウレアーゼ（尿素を加水分解により二酸化炭素とアンモニアに分解する酵素）が結晶化することを発表し、続いてノースロップは、1929年に、消化酵素ペプシンが結晶になることを発見しました。ただ、その時点では、タンパク質の化学的性質や分子構造に関する知見が乏しかったため、それら結晶のX線回折像は得られず、どのような結晶構造かは分かりませんでした。

### 初めてタンパク質結晶のX線回折像が明らかに

1934年、バナールと彼の下で研究を始めたホジキン（旧姓：クローフト）は、長さ2 mmのペプシン結晶を、結晶化母液中と空気にさらした時の様子を観察し、結晶が変化していることを見出しました。今でこそ知られていますが、タンパク質結晶は、容積の30~70%（平均50%）を結晶化溶媒が占めています。このため、結晶を空気にさらすことなく、ガラスキャピラリー（毛細管）に封入することにより、初めて、タンパク質結晶のX線回折像が明らかになりました。

## DNA構造の発表へ

DNAは、タンパク質をつくるための設計図だと言われています。タンパク質合成に必要である、アミノ酸の種類、数、配列、立体構造などの情報がすべてつまっているからです。

1952年、フランクリンによってDNA繊維からX線回折像が明らかになりました。この回折像から、DNA鎖の基本的な物性（リン酸）が、何か「らせん構造」を持つものの外側にあるのだと予測しました。1953年、ワトソンとクリックは、このDNA繊維のX線データと模型製作により、DNAを理論的に説明した立体構造「DNA二重らせん構造」を発表しました。

その後、1981年にDNAの単結晶が単離され、X線解析により、DNA二重らせん構造が証明されました。

## 結晶研究のさらなる発展へ

1950年ごろから、ハウプトマンとカールは、数学と物理化学を組み合わせることで、X線結晶構造解析の位相問題に取り組み、新しい結晶構造解析法を開発しました。従来のデータ解析には時間がかかり、また結晶によって限界があったため、統計学的手法を取り入れることにより、直接的に結晶構造を決定できるようになりました。

こうした結果、ますます多くの物質が生み出されています。

最近のものを抜粋するなら、2010年に、ガイムとノボセロフが、二次元結晶性物質グラフェンの発見でノーベル物理学賞を受賞、2011年にシェヒトマンが準結晶の発見でノーベル化学賞を受賞、2012年には、レフコウィッツとコビルカが、人体のほぼすべての機能に関与している細胞表面の受容体タンパク質ファミリー（Gタンパク質共役受容体）の構造解明でノーベル化学賞を受賞しています。

また、名古屋が喜びで湧き上がった2014年のノーベル物理学賞は、高効率な青色LEDを実現させた赤崎勇特別教授、天野浩特別教授、中村修二教授に贈られています。ここでも、窒化ガリウムの結晶づくりが、その成功のカギを握っていたのです。

## 第3章 「結晶展」をダイジェストでご紹介

もう皆さんは、「これも結晶かしら」「あれも結晶かしら」なんて見方をお持ちでしょう。

結晶の特徴的な形を見て、「結晶は、なぜこんなに対称的なのだろうか」と探究心をくすぐられるなら、やがて科学的に結晶の本質を見るようになるでしょう。さらにその応用展開に期待するなら、結晶が私たちの未来社会を創造するための有用な材料だとして見るようになるでしょう。

さあここに、名古屋大学で遂行されている多彩な結晶研究のほんの一部をご紹介します。

- 吉田英一先生は、化石を包むタイムカプセル「球状コンクリーション」の形成メカニズムを解明し、さらなる応用展開として、炭酸カルシウムのコンクリーション化という技術開発を進めています。自然の産物である炭酸カルシウムの結晶に、未知なる可能性を見出しています。
- 杉本泰伸先生と永江峰幸先生は、名古屋大学が運用するシンクロトロン放射光ビームラインの新しい測定法の開発や装置開発の研究を通し、タンパク質の結晶構造解析を進めています。その研究分野は生命科学、医学、薬学、物質科学など多岐に渡っています。

- 新田州吾先生は、青色LEDの材料である窒化ガリウム（GaN）の次なる挑戦として、次世代パワー半導体としてのGaNデバイスが実現する未来社会に向け、研究を進めています。そのためには、GaNのきれいな結晶作りのための技術開発が伴うのです。
- 宇治原徹先生と石川晃平先生は、次世代パワー半導体として期待されている炭化ケイ素（SiC）の結晶成長法の開発に、AI技術を導入し、実用化に向け研究を進めています。映像コーナー（プロジェクションマッピング）にて、研究の様子をどうぞご覧ください。
- 松田亮太郎先生と日下心平先生は、多孔性金属錯体（MOF）の結晶を研究しています。その魅力は、柔軟な結晶構造にあります。結晶構造が変形するとどんなことが可能となるか、考え抜かれたデザインとその機能をご紹介します。
- 瀬川泰知先生と坂本裕俊先生は、炭素物質であるナノカーボン（グラフェンやカーボンナノチューブなど）の部分構造である「分子ナノカーボン」を生み出しています。複雑な幾何学構造は、数学的なパズルのようなおもしろさがあります。また、そのパーツが組み合わせられれば、知られざる新機能の発現へとつながります。

いざ各ブースへ、研究室を垣間見に。

#### 4. 名古屋大学で結晶研究を推進中の6研究室

ここに紹介する結晶研究は、現在名古屋大学で遂行されているもののほんの一部に過ぎない。しかし、そうであれ、その研究分野は多岐に渡っている。「結晶」の多様性やその面白さを紐解き活用していくための研究者らの情熱を、それぞれ展示ブースを設け紹介した。

##### ●吉田英一 教授／名古屋大学博物館，名古屋大学大学院環境学研究科（図S2）

##### 天然鉱物の結晶「方解石」

方解石（calcite、カルサイト）は、炭酸カルシウム（ $\text{CaCO}_3$ ）でできている鉱物（炭酸塩鉱物）の一種です。非常に細かな方解石の結晶が集合し堆積することで石灰岩ができますが、それが地中に埋没し圧力や高熱によって変成されると、結晶質石灰岩（石材名：大理石）となり、彫刻や建材として用いられています。

天然に見られる方解石の結晶(図4)は様々な形がありますが、その中でもよく知られるのは、マッチ箱を押しつぶしたような平行六面体の形です。そのほかに、板状、柱状、犬牙状などが

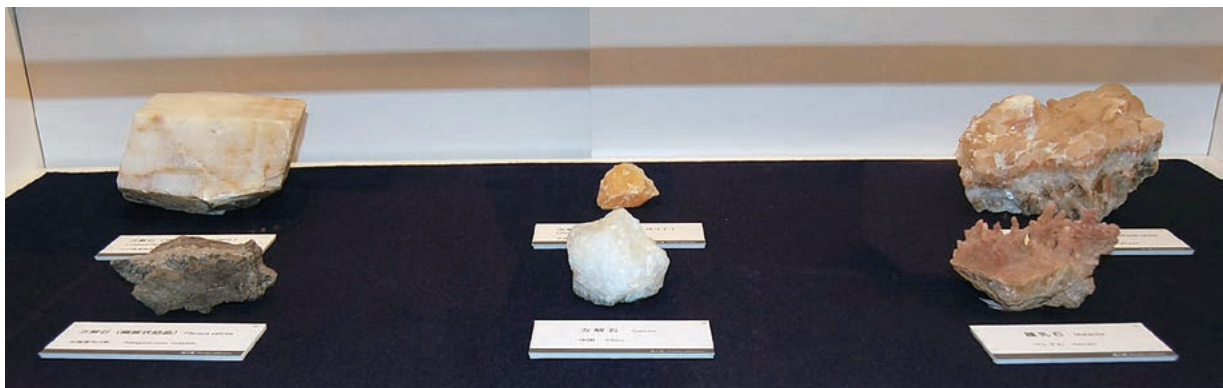


図4 様々な形の方解石.

あります。結晶の色は、一般に無色透明ですが、含まれる元素によって、ピンクや紫、黄色などを呈することもあります。

産業的にも、炭酸カルシウムは結晶材料として、セメントの原料や食品添加物などにも使われています。こうした有用性から、炭酸カルシウムの結晶成長についての研究が進められており、目的に合った大きさや形の炭酸カルシウム結晶が合成されています。

### 「球状コンクリーション」の成分も炭酸カルシウム！

古生物学者、化石研究者が地質調査で探し求める“丸い石”，その主成分も、方解石と同じ炭酸カルシウムです。炭酸カルシウムの丸い岩塊は、化石を数百万年以上もの間、生きていた当時の状態のままに遺すほどに丈夫であるため、言わば“天然のコンクリート”として「球状コンクリーション」と呼ばれています。

球状コンクリーションは、コンクリーション中の生物遺骸からの有機炭素と海水中のカルシウムイオンが反応して生成した炭酸カルシウムが、周囲に堆積した砂や泥の隙間を急速に埋めて、球状に成長し固まったものです。

炭酸カルシウムの結晶だけでは、劈開によって脆く割れやすいですが、砂や泥を含む地層の中で成長したコンクリーションは、コンクリートよりも硬く耐久性に富む性質を持っています。これらの球状コンクリーションは世界中から発見されており、それらの成因に関する研究が進められています。

### 未来へ：地下空間活用への応用

球状コンクリーションは、化石をきれいに保管する、自然が作り出した“タイムカプセル”です。その「コンクリートよりも硬く耐久性に富む性質」に学び、炭酸カルシウムのコンクリーション化を人工的に再現しよう、と現在研究が進められています。例えば、トンネルなどのセメントやコンクリート建造物の亀裂修復技術への活用が期待されています。

さらに、最新の研究では、地下空間の活用に向け、コンクリーション化の応用技術が開発されています。地下空間を利用するには、地下岩盤中の割れ目や隙間から、地下水の流出を防ぐことが必要ですが、それには、セメントやコンクリートの耐久性以上の強度で、地下岩盤中の亀裂・隙間をシーリングしなければなりません。ここに、コンクリーション化による、地下空洞の長期シーリング技術が実用化されれば、二酸化炭素地下貯留のためのボーリング孔のシーリング、放射性廃棄物の長期地下隔離や、長期エネルギー地下備蓄なども可能になっていくだろうと期待されています。

### 杉本泰伸准教授・永江峰幸助教／名古屋大学シンクロトロン光研究所（図S3）

#### 生き物の体をつくる「タンパク質」

タンパク質は、生き物の体をつくるもとであり、体の中でいろいろな働きをします。筋肉が動く、食べ物を消化する、脳が働く、これらはすべてタンパク質が働いているからこそできることです。

タンパク質は、アミノ酸が連なった「ひも」状の高分子です。一見「長いひも」ですが、“まっすぐ”ではなく、“折りたたまれて”います。同じ種類のタンパク質ならば、その折りたたまれ方（＝構造）は同じです。つまり、タンパク質の機能を正確に理解するためには、正しい折

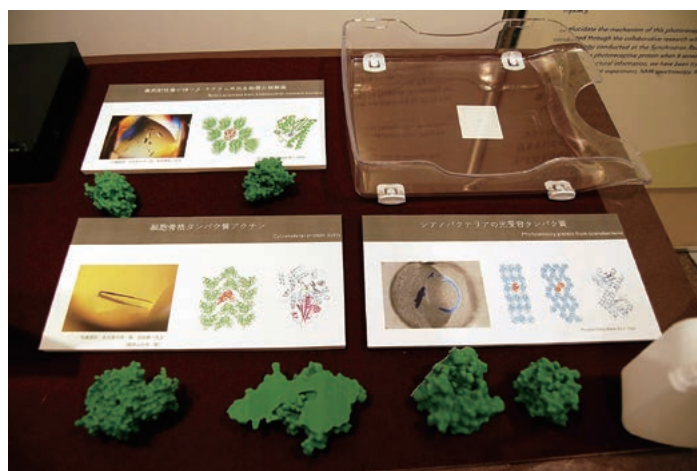


図5 タンパク質の分子構造3Dプリンタモデル。

りたたまれ方，すなわち，タンパク質の構造を知ることが不可欠です。“乱れない”きれいな結晶を作成し，X線結晶構造解析によりタンパク質の構造を調べていきます（図5）。

### X線結晶構造解析を行うための「名古屋大学ビームライン」

X線結晶構造解析を行うためのX線発生装置にはいくつかの種類がありますが，タンパク質の結晶構造解析には，「シンクロトロン放射光」がしばしば使われます。

シンクロトロン光とは，高速の電子が電磁石によって進行方向を変えられた際に発生する光のことで，赤外線，可視光線，紫外線，そしてX線までの広い波長領域の電磁波を含んでいます。

2013年に完成した「あいちシンクロトロン光センター（愛知県瀬戸市）」には，X線結晶構造解析を行うための「名古屋大学ビームライン（BL2S1）」があります。名古屋大学が建設したBL2S1は，タンパク質や有機・無機化合物などの構造解析により，生命科学，医学，薬学，物質科学などの様々な分野で，大学・企業の幅広い研究者に利用されています。

### タンパク質の構造研究

#### ●アクチンの繊維化の仕組みを解明

アクチンは，細胞の形状や動態の制御に重要な「細胞骨格」の主要な構成タンパク質です。球状アクチンモノマーは，二重らせん状につながり，繊維状のアクチンフィラメントを形成します。アクチンフィラメントは，重合と脱重合を繰り返しながら長さを変えるため，細胞の形状をダイナミックに変えることができます。しかしこの特徴（長さがバラバラ）のため，これまで繊維状アクチンの結晶を作成することはできませんでした。

そこで，アクチンを繊維状に固定する特殊な“仕掛け”を利用することで，繊維型アクチンの結晶を得ることに成功し，名古屋大学ビームラインにより，そのX線結晶構造を決定しました。これをモノマー型結晶構造と比較することで，アクチンの機能を理解する上で重要となる，繊維化の仕組みの一端が解明されました。

#### ●シアノバクテリアの光受容タンパク質の構造解析

ある種のシアノバクテリア（原核光合成生物）は，周囲に緑色光が多いときは，緑色光を吸収する光合成色素タンパク質をつくります。逆に，周囲に赤色光が多いときは，赤色光を吸収



する光合成タンパク質をつくります。このような巧みな戦略によってシアノバクテリアは効率よく光合成を行っています（これを補色順化と呼びます）。この補色順化という現象は100年以上前から知られており、いくつかの光受容タンパク質によってコントロールされることが分かっています。しかし、その詳しいメカニズムは未だ謎に包まれています。

名古屋大学ビームラインでは共同研究者らとともに、この光受容タンパク質の仕組みを解き明かすため、構造研究を進めています。そして最近、光受容タンパク質が緑色光を感知したときの構造を観測することが出来ました。得られた構造情報を、他の実験方法（変異体実験・NMR分光法・ラマン分光法・シミュレーションなど）と組み合わせて、シアノバクテリアが持つ巧みな戦略“補色順化”のメカニズム解明に挑戦しています。

## 新田州吾 特任准教授（天野浩研究室）／名古屋大学未来材料・システム研究所（図S4）

### 青色LEDの半導体材料「窒化ガリウム（GaN）」

赤崎勇特別教授と天野浩教授は、名古屋大学にて、高品質なGaN結晶の作製に世界で初めて成功しました（1985年）。このGaN結晶を半導体材料として「青色発光ダイオード（青色LED）」を開発（1989年）、そして実用化へと導き、2014年のノーベル物理学賞受賞として輝きました。

「半導体」とは、金属のように電気を流す「導体」と電気を全く流さない「絶縁体」の中間的な性質を持つ物質のことです。小さなチップで、様々な電氣的機能を発揮できるため、光、高周波、パワー制御の必須アイテムとなっています。

GaNに関する研究は、青色・白色LEDに代表される発光素子分野のほか、最近では、よりエネルギーの大きい光を発生させることで、殺菌や物の加工に有用な紫外線LEDやレーザーの開発も活発に行われています。

### GaNの“きれいな”結晶をつくる

GaNは、自然界には存在しない材料です。GaとNの原料ガスを1000℃以上の高温で混ぜることで、無色透明で、堅く、安定な結晶ができます。しかし、品質に関わる“きれいな”結晶を作るのは容易なことではありません。その技術開発が今進められています（図6）。

これまでは、サファイア（ $Al_2O_3$ ）などの異種基板上に数 $\mu m$ ほどの薄いGaN層しか作れませんでした。しかし近年、技術の向上により、そのおよそ1000倍である数mmの厚みの結晶をつくることが出来るようになりました。より厚くて大きな結晶ができるようになれば、パワー半導体の性能とコストを大幅に改善し、新しい社会の実現に向け加速させることができます。

一方で、髪の毛の1/100ほどの細さである、ナノスケール（小さい）の結晶を作る技術も研究されています。この技術が実現できれば、例えば、マイクロLEDディスプレイのような、次世代の高性能ディスプレイ等の開発につなげることができるのです。

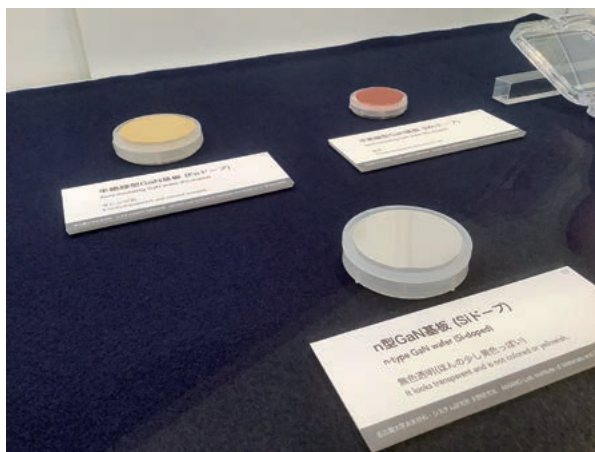


図6 様々なGaN基板。

## GaNパワーデバイス実現に向けた挑戦

パワーデバイスとは、発電所で電力エネルギーが生み出されてから、各家庭や身の回りの機器で使用されるまでの電力伝送に使用される半導体部品を指します。従来のシリコン半導体をGaNパワー半導体に置き換える場合、国内全消費電力に対して約10%もの損失低減効果があると言われてしています。

一方で、GaN結晶には数種類の「転位（原子数個分（数nm）のごく僅かなズレ）」と呼ばれる欠陥が存在しますが、大きな電力を扱うパワー半導体においては、その結晶中の転位密度を相当小さくする必要があります。例えば、LED向けGaN結晶と比較するなら、それが保有する転位密度の10000分の1以下に抑えなければなりません。特に重要なのは、「キララ欠陥」の特定と排除です。その起源と性質を突き止められれば、より効果的にGaNパワーデバイスの高品質化と高信頼性が達成できます。

研究室では、電流が流れないオフ（逆バイアスをかけた）状態のパワー半導体をエミッション顕微鏡で観察し、欠陥部分での“漏れ電流”による発光を確認しています。この発光部分にどのような転位・欠陥があるかを調べるため、結晶表面を水酸化カリウム（KOH）融液で溶かすと、転位を起点としたエッチピットが形成され、位置と大まかな種類が特定できるようになります。また、透過型電子顕微鏡（STEM）や3次元アトムプローブ（3DAP）などを用いて、詳細な解析を行っています。

## 宇治原徹教授・石川晃平研究員／名古屋大学未来材料・システム研究所（図S5）

### 次世代パワー半導体「炭化ケイ素（SiC）」

金属のように電気をよく通すものを「導体」、電気をほとんど通さないものを「絶縁体」と言いますが、「半導体」は導体と絶縁体の中間的な性質を持つ物質のことを言います。例を挙げると、パソコンなどの「0」と「1」のデジタルデータは、半導体が電気を通したり、通さなかったりする性質を利用しています。

このように半導体は私たちの身の回りで不可欠な材料ですが、中でも、炭化ケイ素(SiC)は、次世代パワー半導体として注目を集めています。現在主流のシリコン（Si）半導体と比較するなら、SiC半導体は高温・高電圧下でも有効のため、例えば、電気自動車などに用いられる直流交流変換装置（インバータ）への利用が期待されています。さらに、SiCインバータを利用するなら、Siインバータと比較して70%の電力損失低減が可能であるため、省エネ効果にもつながるのです。

### SiCの結晶成長方法

SiCは、常圧で融点を持たず、高温で昇華分解します。そのため、SiC結晶は、その原料粉末をおよそ2400℃の高温で昇華させ、低温部のSiCの種結晶上に結晶化させる手法（昇華法）によって生産されています。一方で、この種結晶中の結晶構造に乱れ（欠陥）があると、SiCの品質に影響してしまう、という難しさがあります。

そこで、より欠陥が少ない高品質なSiCを得るため、溶液成長法（溶液法）の研究が進められています。溶液法は、ケイ素（融点1414℃）の融液に炭素を溶解させた後、低温にすることで、SiCとして析出する方法です。昇華法と比べて低温で行えるうえ、これまでも、高品質なSiC結晶を得ることに成功しています。

### AI技術を利用：溶液成長法の実用化に向けて

SiC溶液成長法の実用化に向け、研究室レベルの実験を産業レベルに展開するためには、結晶成長に必要となる炉や部材も大型化（大口径化）する必要があります。しかし、実験のコストが大きく上昇するほか、結晶成長における実験パラメーターは、その膨大な組み合わせを検討しなければなりません。

最新の研究では、SiCの溶液成長法の大口径化に向け、より効率的な実験を行うため、人工知能（AI）を用いています。仮想実験を組み立て、SiCの結晶成長における実験パラメーターをAIが予測し、数値シミュレーションによる実験を繰り返し行います。

これまでに、AIはシミュレーションの結果を驚くほどに正確に予測したほか、数値シミュレーションには平均3800秒（およそ1時間）ほどかかるのに対し、機械学習による予測時間は平均で0.0003秒であり、非常に高速に炉内の温度・流速分布を予測することができました（図7）。

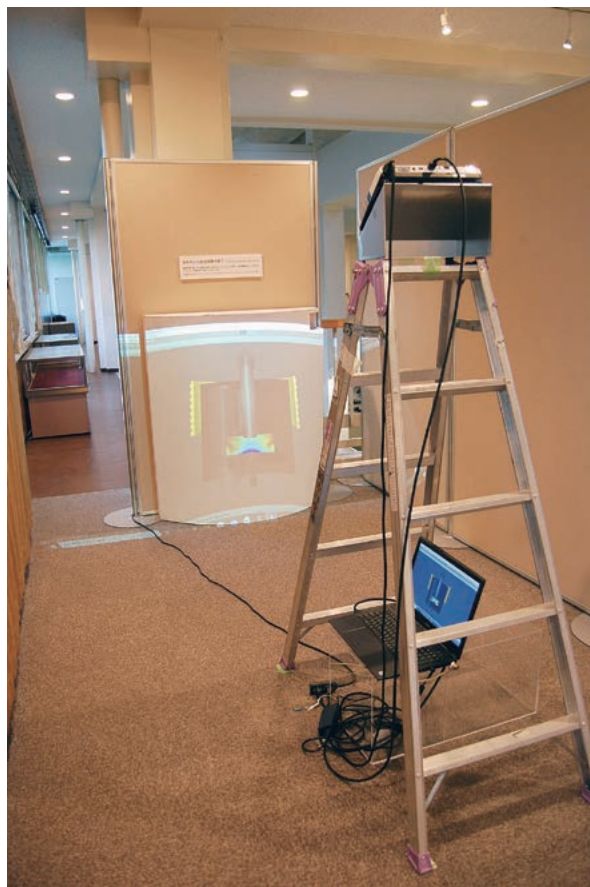


図7 AIを用いた仮想実験の実演。

### 松田亮太郎教授・日下心平助教／名古屋大学 大学院工学研究科（図S6）

#### 多孔性金属錯体 MOF (Metal Organic Framework)

MOF（モフ）は、金属イオンと有機配位子が規則正しく配列することによってできる結晶で、機能性材料として注目を集めています。特徴は、その結晶構造にあります：

1. 金属イオンと有機配位子の骨格構造が、均一なナノサイズの細孔（ナノ空間）を形成します。この空間で、ねらった分子などの貯蔵やふるい分け（分離）、またイオン交換などが可能です。
2. 他の多孔性材料（ゼオライトなど）と異なり、配位結合という結合様式により結晶構造の骨格が柔らかいため、結晶を取り巻く環境の変化に応じて、穴のサイズを変えることができます。
3. 求める機能に合わせて、金属イオンと有機配位子の組み合わせから、構造や性質を自由にデザインすることが可能です。これまでに80,000種類以上のMOF（図8）が報告されています。

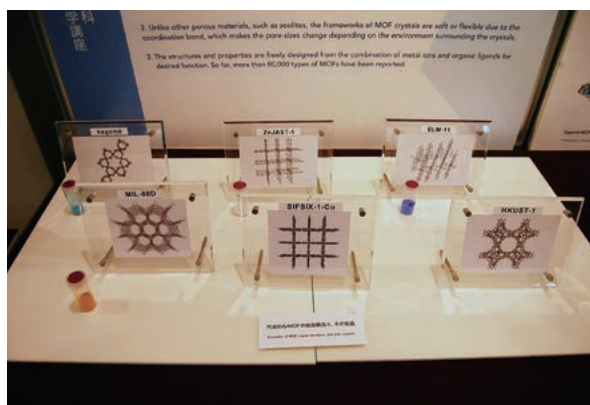


図8 代表的なMOFの結晶構造と、その結晶。

## MOFの研究：ガスの貯蔵と分離

### ●アセチレンガスの貯蔵

アセチレンガスは、溶接用バーナーの燃料やプラスチックの原料などに使われています。一方、アセチレンガスは、空気や酸素の混入がなくても、圧力をはじめ、発火エネルギーが加わると爆発してしまうため、貯蔵や運搬の際は、規則を守り、細心の注意を払って行う必要があります。

このような背景のもと、アセチレンガスを安全に貯蔵することができるMOFが開発されました。MOFを使うことで、アセチレンガスを大気の400倍の圧力に相当する密度にすることができます。

### ●一酸化炭素のみを選択的分離

一酸化炭素は、樹脂などの化学製品を作るために使われています。それには、高い純度の一酸化炭素が必要ですが、一酸化炭素と窒素ガスは混入してしまうと、互いの分子の大きさがほぼ同じため、これらガスを分離することは難しいとされています。

これに対し、一酸化炭素と窒素の電気的性質の違いに着目して、kagomé-MOFが開発されました。一酸化炭素の電気化学的な力があれば、孔への通り道である弁が開かれ、一酸化炭素のみを選択的に取り込むことができます。

## MOFの研究：光反応による酸素の分離

水の中には酸素が溶けています。水中の酸素は魚が生きていくために非常に重要です。一方で、水中に溶けている酸素はボイラーの配管を錆びさせるなど私たちの生活に害をもたらすこともあります。しかし、水中に溶けている酸素を直接見ることはできませんし、それを取り除くことはさらに困難です。そのため、水中から酸素を取り除くための技術が開発されていますが、有害な物質を使っていたり、使いまわすことができなかつたり、課題が多く残されています。

こうした課題を解決すべく、光を当てるだけで、水の中に溶けている酸素のみを選択的に吸着する新しいMOFが開発されました。空気中で、酸素と共存する窒素や二酸化炭素などの気体を吸着することはありません。気体の分離には、通常、膨大なエネルギーが必要ですが、MOFを使うことで、省エネにも貢献できるとして、産業界などから注目されています。

### ●瀬川泰知グループリーダー（現：分子科学研究所准教授）と坂本裕俊グループリーダー（現：特任講師）／名古屋大学ERATO伊丹分子ナノカーボンプロジェクト（図S7）

#### 立体構造がカギを握る「有機化合物」

有機化合物には、原油、食物、木材、皮革など、生物を由来とする天然有機化合物と、プラスチック、医薬品、塗料など、人工的に作り出した人工有機化合物があります。どの有機分子もその立体的分子構造に独特な機能が備わっています。

例えば、医薬・農薬・香料などの生理活性物質には、右手と左手のように、鏡に映した時の自身の鏡像を重ね合わせることができない性質（キラリティ）が存在します。こうした立体的な構造の違いは、香りや味、薬効や毒性・副作用として生物に影響を与えるのです。

したがって、有機分子を望み通りに設計し合成する際には、結晶として精製し、X線結晶構造解析によってその立体構造を明らかにしていきます。有機分子の立体構造が分かれば、「なぜこのような性質をもつのか」という疑問の解決につながり、また「次はもっとこういう性質をもつ分子をつくらう」という新たな研究がスタートできるのです。

## 「分子ナノカーボン」の設計、合成、構造決定

グラフェンやカーボンナノチューブなど、ナノメートルサイズの周期性をもつ炭素物質を「ナノカーボン」と呼びます。熱や電気を通しやすく、軽量かつ高強度の次世代材料として期待されている物質です。

ナノカーボンは、その分子構造により電子的・機械的性質に大きな違いがあるため、望みの性質をもつ構造を狙い、精密に合成する必要があります。そのため、ナノカーボンの部分構造となる分子（分子ナノカーボン）に着目し、複雑な幾何学構造（トポロジー）をもつ「トポロジカル分子ナノカーボン（図9）」を生み出すべく、研究が進められています。

これまでに、カーボンナノチューブの部分構造分子である筒状の分子ナノカーボンの合成、単離、そして、X線結晶構造解析を用いた構造決定に成功しています。さらに、3次元的に入り組んだ構造として、結び目（ノット）や絡み目（カテナン）をもつ分子ナノカーボンを合成し、単離、そしてX線結晶構造解析により、その構造が明らかとなりました。

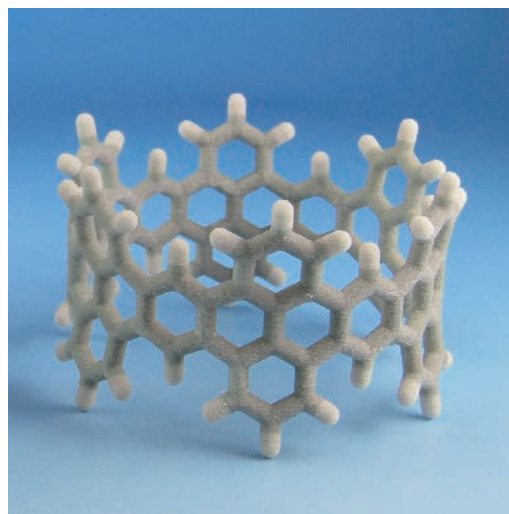


図9 トポロジカル分子ナノカーボン（ジグザグ型）の分子構造3Dプリンタモデル。

## 分子ナノカーボンが集まって、新しい機能をもつ材料に

### ●カーボンナノリングの“あな”でつながる

リング状の分子ナノカーボンの“あな”を利用することで、様々な現象を起こすことができます。例えば、この“あな”にヨウ素を取り込み、電圧をかけ続けると、中のヨウ素がつながったワイヤー状の物質を形成します。

このリングとヨウ素の複合体は、電気刺激により、電気伝導性をもつようになり、同時に白色発光することが分かりました。分子ナノカーボンの集積構造により、これまでにない刺激応答による機能発現が見出されたとして注目を集めています。

### ●分子の凹凸で二重らせんが組み上がる

炭素のシートを積み重ねるといろいろな機能が発現しますが、大きく曲がった炭素シート（湾曲分子ナノカーボン）同士を積み重ねることは難しいとされていました。

そこで、凹凸がお互いにキレイに組み上がるような湾曲分子ナノカーボンを設計し合成したところ、分子同士が自発的に積み重なりナノファイバーを形成しました。ナノファイバーはとても細いためX線測定では構造が分かりませんでした。電子回折結晶構造解析という新しい手法によって、隙間なく組み上がった美しい二重らせん構造であることが明らかになりました。

凹凸で分子を整列させるレゴブロックのような方法は、繰り返し利用可能な導電ワイヤーなど様々な分野での応用が期待されています。



図10 植村直己による雪の結晶レプリカ.

## 5. 名古屋大学博物館に収蔵されている代表的な結晶研究

名古屋大学博物館が収蔵する代表的な結晶研究の紹介として、冒険家・植村直己氏が作製した雪の結晶レプリカや、名古屋大学名誉教授・野田稲吉博士の合成雲母の研究について展示紹介した。

### 植村直己による雪の結晶レプリカ

冒険家・植村直己氏は、1978年4月に、犬ゾリ単独行として世界で初めて北極点に到達し、その後5月から8月にかけて、グリーンランドを縦断しました。この途中、毎日、気象観測を実施するとともに、各地点で、雪の結晶のレプリカ作成（図10）と写真撮影、エアロゾルや積雪の試料採集などを行いました。それら資料の解析のため、1979年10月から半年間、名古屋大学水圏科学研究所の研究生となり、雪の結晶レプリカの顕微鏡観察などを行いました。

### 野田稲吉による合成雲母の研究

雲母は層状のケイ酸塩鉱物で、結晶面に平行な割れ目（へき開面）にそって、薄く剥がれます。また、組成の違いにより様々な種類があり、工業的にも欠かせない素材として利用されています。

野田稲吉博士（名古屋大学名誉教授）は、電気絶縁性や耐熱性に優れた合成雲母のニーズを背景に、1950年頃、鉄を含まない合成雲母「フッ素金雲母（図11）」を実用可能なほどの大きさに生成させることに成功しました。



図11 野田稲吉による合成雲母の研究.

## 6. 結晶体験コーナー

結晶の気持ちになって考える「結晶体験」コーナーを併設した。大学の結晶学で学ぶ「Miller indices」, 「結晶成長速度」, 「結晶の対称性」について、親しみながら体験してもらえるよう、手作りの模型や作品を用意した (図12)。

## 7. 自由研究のヒントを紹介

本展示の会期期間中、身近な材料 (ミョウバン、塩、砂糖など) で大きな結晶を成長させることに挑戦している子どもたちからの問い合わせも多かった。「わくわく科学教室」の山田芳子さんが育成した大きなミョウバンの結晶や、塩・砂糖の大きな結晶もお借りし、その「作り方」として参考資料を展示紹介した (図13)。

また、関連イベントとして、「結晶アート展覧会」を開催した。新型コロナウイルス感染症対策のため、人数制限や時間制限などの制限に対応し、結晶作りとそのサイエンスに触れられるという30分プログラムを構築した。結晶は、尿素、硫酸マグネシウム、ビスマスをテーマとし、各回全8部制にて計64名の参加者を受け付けることが可能となった。参加者がつくった結晶は、特設サイトにて「結晶アート展覧会」として紹介した (図14)。中には、自主的に自由研究レポートをまとめてくれた参加者もあり、それに刺激された参加者からのレポート提出が相次いだ。



図12 結晶体験コーナー。



図13 自由研究コーナー。

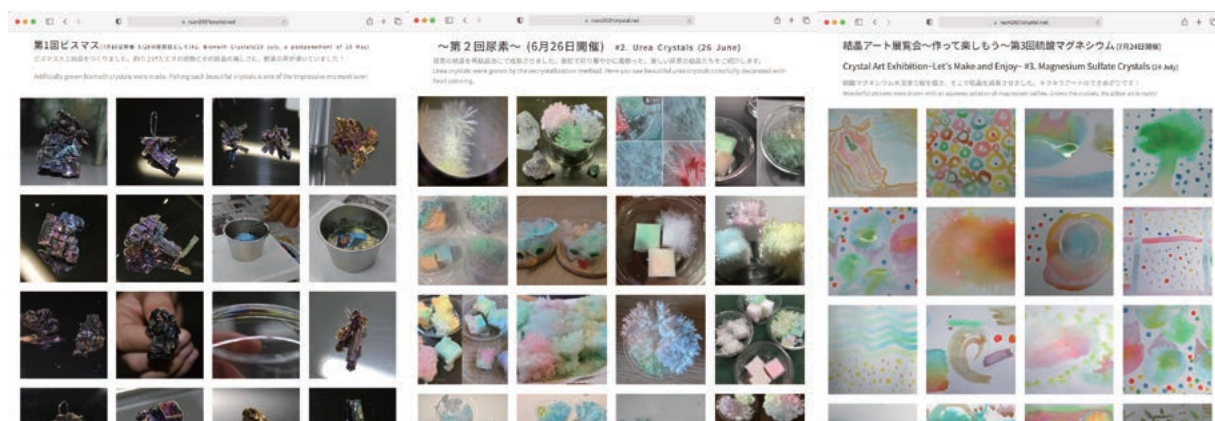


図14 結晶アート展覧会 (結晶展特設WEBサイトより)。



図15 結晶展会場内の様子.



図16 結晶編集室（仮）開催中の様子.

## 8. 結晶展を振り返って

結晶展は、鑑賞者と主催者、さらに鑑賞者同士が、展示を介した対話を図ることで、互いに共感しながら学び合う空間を作ることを一つの目標とした（図15）。

ここに、関連イベント「結晶編集室（仮）」（図16）より、参加者の言葉を一部抜粋して以下（図S8、図S9）に紹介する。「結晶編集室（仮）」では、結晶展を鑑賞して「わかったから、知らせたいこと」もしくは「気になったけど、わからなかったこと」を探す、という視点で鑑賞してもらい、言語化してもらった。展示を通して、鑑賞者の見方や感じ方を共有することで、鑑賞者同士のさらなる気づきや発見を促したほか、主体的に展示に関わっていただく一つの方法だったと言える。

### 「わかったから、知らせたいこと」

- ・この展示をみて「結晶にも好みがある！ 最も好きな形へと変化する！」  
こんなことがわかったから、みんなに知らせたい！「結晶には核があって、成長する！ 自分が思っていた以上に、様々なところで大活躍中！」

### 「気になったけど、わからなかったこと」

- ・この展示をみて「そもそもなぜ形があるの？」  
こんなところが気になったけど「意志のあるなしにかかわらず、形がある」  
こんなところがわからなかった「なぜ形（結晶）が生まれるのか？」



## 9. 特別展の関連イベント

- 2021年5月1日(土)「おいしいチョコレートのひみつ!～結晶サイエンス～」  
講師:梅村綾子(名古屋大学博物館 研究員)
- 2021年5月29日(土)「結晶アート展覧会～作って楽しもう～第1回ビスマス」  
※愛知県に新型コロナウイルス感染症緊急事態宣言が発令されたため、中止。
- 2021年6月26日(土)「結晶アート展覧会～作って楽しもう～第2回尿素」  
講師:梅村綾子(名古屋大学博物館 研究員)・袖浦雄也(経済学部3年生)・高山楓菜(理学部3年生)
- 2021年7月10日(土)「結晶アート展覧会～作って楽しもう～第1回延期回ビスマス」  
講師:梅村綾子(名古屋大学博物館 研究員)・吉田颯稀(工学部3年生)・石橋果歩(理学部4年生)
- 2021年7月24日(土)「結晶アート展覧会～作って楽しもう～第3回硫酸マグネシウム」  
講師:梅村綾子(名古屋大学博物館 研究員)・近藤萌(理学研究科修士1年生)・柴田万桜子(理学部B2)
- 2021年8月2日(月)「結晶展ギャラリートーク(友の会)」  
講師:梅村綾子(名古屋大学博物館 研究員)
- 2021年8月3日(火)「夏休みワークショップ タンパク質結晶を学ぼう!」  
講師:Leonard Chavas(名古屋大学シンクロトロン光研究センター 教授)・梅名泰史(名古屋大学シンクロトロン光研究センター・准教授)・永江峰幸(名古屋大学シンクロトロン光研究センター・助教)
- 2021年8月7日(土)「結晶編集室(仮)」  
講師:フジマツ(アートプログラムユニット)
- 2021年8月19日(木)「結晶アート展覧会～作って楽しもう～第4回ビスマス」  
講師:梅村綾子(名古屋大学博物館 研究員)・吉田颯稀(工学部3年生)・樗沢秀明(経済学部3年生)
- 2021年8月25日(水)「分子で作る結晶を楽しく学ぼう!」  
講師:瀬川泰知(分子科学研究所 准教授)・坂本裕俊(名古屋大学物質科学国際研究センター 特任講師)・周戸大季(理学研究科博士1年生)・渡邊幸佑(理学研究科修士2年生)
- 2021年8月28日(土)博物館コンサート(ボサノヴァ)「美々しき音の結晶」  
唄:Wendy, ピアノ:美山晃大, フルート:渡邊賢道  
※愛知県に新型コロナウイルス感染症緊急事態宣言が発令されたため、中止。
- 2021年9月11日(土)「結晶編集室(仮)」  
講師:フジマツ(アートプログラムユニット)  
※愛知県に新型コロナウイルス感染症緊急事態宣言が発令されたため、中止。
- 2021年11月3日(祝)「館長と巡る結晶展」  
講師:吉田英一(名古屋大学博物館 教授)／ギャラリートーク:梅村綾子(名古屋大学博物館 研究員)

## 謝辞

展示準備にあたり、下記の方々にご協力いただきました。心より感謝申し上げます。

### 展示解説

杉本泰伸 准教授・永江峰幸 助教(名古屋大学シンクロトロン光研究センター)  
新田州吾 特任准教授(名古屋大学未来材料・システム研究所 天野研究室)  
宇治原徹 教授・石川晃平 研究員(名古屋大学未来材料・システム研究所 宇治原研究室)  
松田亮太郎 教授・日下心平 助教(名古屋大学大学院工学研究科 松田研究室)

瀬川泰知 准教授（分子科学研究所）・坂本裕俊 特任講師（名古屋大学物質科学国際研究センター）

展示品借用

西本昌司 教授（愛知大学）

山田芳子 様

結晶体験コーナー協力

名古屋芸術大学芸術学部芸術学科芸術教養領域 2020年度2,3回生の皆様

関連イベント協力

一般財団法人石田退三記念財団様

### Supporting Information

本報告で引用された以下の図は、Supporting Informationとして、博物館報告HP (<http://www.num.nagoya-u.ac.jp/media/report/index.html>) の第38号一覧から閲覧できます。

- 図S1 六面の連結パネル内容（展示パネル）。①枚目は「序章」として、来館者の岩塩標本に対する第一印象の「ことば」をテキストマイニングにより可視化した。
- 図S2 吉田英一先生のパネル内容（展示パネル）。
- 図S3 杉本泰伸先生と永江峰幸先生のパネル内容（展示パネル）。
- 図S4 新田州吾先生のパネル内容（展示パネル）。
- 図S5 宇治原徹先生と石川晃平先生のパネル内容（展示パネル）。
- 図S6 松田亮太郎先生と日下心平先生のパネル内容（展示パネル）。
- 図S7 瀬川泰知先生と坂本裕俊先生のパネル内容（展示パネル）。
- 図S8 「わかったから、知らせたいこと」（結晶編集室（仮）より）。
- 図S9 「気になったけど、わからなかったこと」（結晶編集室（仮）より）。