



文部科学省科学研究費助成事業

新学術領域研究（2019年度－2023年度）

# Hypermaterials News Letter Vol.3

テーマ ハイパーマテリアルとは

## CONTENTS

### 特集1 ハイパーマテリアルの歴史

竹内 伸（東京大学・東京理科大学 名誉教授）…………… 2

### 研究報告

公募班 A01 柚原 淳司（名古屋大学 工学研究科 准教授）…………… 8

計画班 A02 綿貫 徹

（量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門 次長）…………… 10

### 若手研究者紹介

鈴木 慎太郎

（東京理科大学 先進理工学部 マテリアル創成工学科 助教）…………… 12

高橋 大介（中央大学 理工学部 物理学科 科研費研究員）…………… 13

### 特集2 あなたのハイパーマテリアルから、 みんなのハイパーマテリアルへ

～領域メンバーで語り合いました～…………… 14

会議・研究会等報告…………… 16

2020年度下半期 活動記録…………… 18

受賞

開催セミナー・イベント

今後の予定



# 特集1

## ハイパーマテリアルの歴史

### 準結晶からハイパー・マテリアルまで

東京大学・東京理科大学 名誉教授 竹内 伸

#### 1. はじめに

1984年秋に D. Shechtman らによって発表された、結晶では許されない対称性を有する正20面体相の発見<sup>1)</sup>が契機となって「準結晶」という新しい構造概念が提唱されたことは、物質科学研究者の間では周知の事であろう。なお、“Quasicrystal”という命名は Shechtman らの発表直後に D. Levine と P. J. Steinhardt によって行われた<sup>2)</sup>。準周期構造物質の存在が確立した1992年になって、国際結晶学連合は「結晶」の定義を「独立な3方向への並進秩序構造」という実空間の構造の特徴に基づく定義から「本質的に不連続的な回折図形を示す固体」とフーリエ空間の特徴で定義しなおされ、“準結晶”も結晶に分類されるようになった。しかし、ここでは「準結晶」という語を古典的な「結晶」と区別して用い、筆者の主観の下にその発展の歴史をたどることとする。

「準結晶」の構造にはさまざまな表現法があるが、最も普遍的と思われるのは、高次元空間の超原子からなる結晶の断面構造として記述する**断面法**と呼ばれる方法である。直観的に理解しやすいのは、図1に示すように、水平直線の1次元実空間に対して、傾いた2次元の正方格子の各格子点に同一長さの直線の超原子を配置して、それらが実空間の直線と交わる点に配置した原子で構成される**1次元準周期格子**の例である。なお、正方格子は実空間に対して黄金比 $\tau \equiv 1.618 \dots$ という無理数の傾きを持つ。超原子の長さは一つの正方格子の対角点を通る実空間に平行な2本の線の間隔に等しい長さである。この1次元格子を構成する隣接原子間の間隔はL及びS

の2種類で、Lから始まってL→LS、S→Lの置換を繰り返して得られるSLLSLSL・・・と無限に続く非周期配列である。この配列はイタリアの数学者フィボナッチ(12世紀後半から13世紀半ば)が1202年に発行した「算術の書」の中に記述されているのでフィボナッチ列と呼ばれている。正方格子の傾きが無理数であることから原点を通る1次元実空間直線は2度と2次元正方格子点を通ることがないので、周期格子ではない点が準結晶格子である所以である。なお、断面法と同等な準周期構造の生成法として、**切断-投影法**という方法があり、1次元準結晶の場合には実空間直線と超原子の長さに対応する距離だけ離れたそれと平行な直線との間(この帯を窓、射影領域あるいは**占有領域**という)に存在する2次元正方格子点を実空間上に投影した点でも準結晶が生成される。なお、図1の実空間と直交する方向を直交空間あるいは**補空間**という。現実の正20面体相のような3次元準結晶では、3次元の実空間と3次元の補空間からなる6次元空間の結晶格子の3次元補空間に占有領域を設定することによって記述される。図1では高次元空間(この場合は2次元)の結晶軸に対して実空間(直線)が無理数の傾きを持つために準結晶が得られたが、この無理数に近い有理数であれば実空間の1次元構造はLとSのある配列が周期的に連なった結晶構造になる。準結晶の構造に近い配列の結晶を**近似結晶**と呼ぶ。そのため、特定の準結晶に関連してさまざまなレベルの近似結晶が存在し得る。実空間に対する結晶軸の傾斜が1/1の時に1/1近似結晶、2の時には2/1近似結晶、3/2の時は3/2近似結晶とよび傾斜が $\tau$ に近いほど高次の近似結晶である。

このニューズレター Vol.3では、「ハイパーマテリアルとは!？」をテーマとし、「ハイパーマテリアル」について考えてみることにしました。この「ハイパーマテリアル」という言葉は、多くの人にとっては、得体の知れないものに感じられるかもしれません。まずは、この謎めいた「新しい概念」が生まれた過程を見てみたいと思います。そうすることによって、「ハイパーマテリアル」という言葉の背景にあるものを感じ取ってもらえると思うからです。そこで今回、長年この分野の研究に携わってこられた竹内伸先生に、ハイパーマテリアルの歴史について解説いただきました。

今回の新学術領域研究の目的は、これまで研究されてきた準結晶の枠を超えて、次元性、高次元格子の種類、占有領域などを拡張して、あらゆる物質構造を統一にとらえるものをハイパーマテリアルと呼び、その概念のもとに新物質創製およびその物性解明をめざすことである。

以下、本小文ではこれまでの準結晶の発展の歴史について、筆者独自の視点で発展ステージに分けて記述する。

## 2. 発展のステージ

前述のように準結晶研究が急速に発展したのは1984年11月にアメリカで発表された Shechtman ら4名による**正20面体相**発見の論文である。(Shechtman はイスラエルの金属研究者で、実際には1982年にすでに透過電子顕微鏡で5回対称性の構造の奇妙な相を発見して科学誌に投稿していたのであるが、そのような物質はあり得ないとして掲載を拒否されていた。)ところで、新概念の誕生にはそれ以前にそれに関わるいくつかの発見や関連研究が行われていることが多い。そのステージは**胎動期**である。正20面体相の発見後もそれが新物質であると広く認識されるには数年の期間を要した。その期間をここでは**揺籃期**と呼ぶ。その後は、蔡安邦らによる新しい準結晶合金の発見に伴って、準結晶研究の第1ステージ、第2ステージ、があり、その後第2ステージで発見された希土類元素を含む一連の準結晶試料に関する新しい物性研究のステージを迎えて今日に至っている。

### 2.1 胎動期(1984年以前)

13世紀初頭に発表されたフィボナッチ配列が1次元準結晶であるのに対し、イギリスの天才物理学者 R. Penrose は、現在では2次元準結晶構造の典型としてよく知られるペンローズ・パターンを1974年に発見している<sup>3)</sup>。その後、1980年代初頭にイギリスの結晶学者 A. L. Mackay は、ペンローズ・パターンが2種類の菱形の平面充填であるのに対し、2種類の菱面体で3次元空間を充填する準格子という準結晶に相当する構造モデルを提唱していた<sup>4)</sup>。Penrose は2種類の菱形による無限平面の様な充填法を収縮変換法によって示したが、Mackay 教授は2種類の菱面体による収縮変換法による3次元空間の様な充填の可能性を示すことには成功しなかった。(3次元空間の2種類の菱面体による充填に関する収縮変換法は我が国の小川泰教授によって考案された<sup>5)</sup>。)その後、P. Kramer と R. Neri は投影法により菱面体による3次元準周期格子の生成を報告し<sup>6)</sup>、この格子はペンローズ格子の3次元版に相当するので**3次元ペンローズ格子**と呼ばれるようになった。一方、準周期系における電子状態の理論研究は、準結晶が発見される前から甲元真人らによって行われていた<sup>7,8)</sup>。金属結晶中の電子は結晶全体に広がった Bloch 状態であるのに対し、1次元準格子中では臨界状態という Bloch 状態と局在状態の中間的な状態になり、状態密度も自己相似的な特異な不連続構造になることが示されていた。このような背景の中で行われた Shechtman らの正20面体相の発見は、一躍物質科学に携わる多くの研究者の関心を引くことになった。

## 2.2 揺籃期(1984-1987)

Shechtman らの発見した Al-14at%Mn 合金の正 20 面体相は、高温の液相状態から急冷によって生成された準安定相であったので、粉末 X 線回折ピークの半値幅は広く、透過電子顕微鏡による電子回折スポットもシャープではなかった。従来物質の範疇での解釈も不可能ではなかった。特に、全体として正 20 面体に近い対称性を有する複雑な構造を有する結晶である可能性を否定することはなかなか困難であった。そのため、正 20 面体相が準結晶という新秩序構造物質であると世界的に認識されるまでに数年を要した。特に物理化学研究で偉大な業績を残した L. C. Pauling (1901-1994) は、生涯準結晶の存在を認めなかった。彼は世界中で準結晶の研究に携わっていた研究室を訪問して(筆者が東大物性研で準結晶研究に携わっていたころに筆者の研究室にも突然来訪)“準結晶はこの世に存在しないので研究を止めるように”と忠告してまわった。しかし、準結晶の存在を否定する根拠は不明であった。準結晶の存在が世界的に認識される契機となったのは、1987 年になって、当時東北大金研の増本・井上研で準結晶の研究に携わっていた蔡安邦による Al<sub>65</sub>Cu<sub>20</sub>Fe<sub>15</sub> 3 元合金での熱力学的安定相としての正 20 面体相の発見である<sup>9)</sup>。この相の粉末 X 線回折のピークは、通常の結晶のそれと同程度にシャープで、電子顕微鏡による 5 回対称軸から得られる 10 回対称の電子線回折パターンも非常にシャープで正確なものであった。かくして、ようやく新物質概念としての準結晶の存在が認識されたのである。

この僅か数年の揺籃期に行なわれた注目すべきことは、2 次元準結晶(平面的に準周期構造を持つ数層の原子層がそれと垂直な方向に周期的な積層をしている物質)の発見が続々と行われたことである。これは正 20 面体相の発見による新しい秩序構造概念が人間の意識に組みこまれることによって、従来認識できなかったものが認識できるようになるという重要な事実の証左として、極めて教訓的なことである。ただし、見えなかったものが見えるようになると言っても、電子顕微鏡がなければ発見できなかったことを考えると、近現代における科学技術の進歩が人間の視野を大きく広げているという事実も忘れてはならない。2 次元準結晶は 1985 年に発見された正 10 角形相<sup>10,11)</sup>と正 12 角形相<sup>12)</sup>および 1987 年に

発見された正 8 角形相<sup>12)</sup>の 3 種類である。これらの内、正 10 角形相のみで多くの良質の 2 次元準結晶が得られていて、多くの研究が行われている。また、揺籃期になされた研究の内、高分解能電子顕微鏡を用いた準結晶の原子構造の直接観察の果たした役割も重要である。準結晶の原子構造は nm のスケールで極めて均一なものであることが示され、決して多重双晶構造や正 20 面体ガラスモデルのようなものではないことを明確にしている<sup>14)</sup>。

この期間に行なわれた準結晶科学の進歩として、理論的な面は主として構造を中心とした準結晶の基礎物理的側面の研究がアメリカの研究者によって精力的になされ、1987 年には“The Physics of Quasicrystals”<sup>15)</sup>という専門書が出版され、すでに準結晶物理学の基礎が築かれている。正 20 面体相の発見から僅か 2 年程度の期間で質の高い専門書を出版したことはアメリカの科学の底力を示すものであった。(我が国の最初の専門書は、1992 年に日本物理学会から発行された「物理学論文選集 II : 準結晶」<sup>16)</sup>である。)なお、我が国の研究者により執筆及び編集された準結晶に関する一般向けおよび物質研究者向けの啓蒙書<sup>17,18)</sup>、その後の英文および和文の専門書<sup>19,20)</sup>を文献リストに挙げておく。

以下は準結晶研究の発展段階を、揺籃期、ステージ I、ステージ II および新発展ステージに分けて、年表の形で紹介する。ステージ I、II はその間に研究対象となった準結晶の種類で分けられている。ということはそのステージの分かれ目で新しい準結晶の発見がなされたことを意味しているが、それは前述の Al-Cu-Fe 準結晶を発見した蔡安邦によりなされたのである。実は、今日まで研究対象となっている準結晶の殆どは蔡博士が開発した準結晶が基礎となっているという事実から“準結晶研究の歴史は蔡博士によって作られた”といっても過言ではない\*。

蔡安邦が次々に準結晶合金相を発見してきた事実は蔡博士のセレンディピティーのような特殊な能力によると考える人がいるかもしれないが、彼は準結晶の探索を(1)準結晶は Hume-Rothery 機構で安

\* 2011 年に準結晶の発見という業績に対して Shechtman 博士にノーベル化学賞が与えられたが、物質科学の新展開という観点での貢献であれば、準結晶発見後には Shechtman の貢献は殆どないので、蔡博士も共同受賞するのが妥当であったと思われる。

定化している電子化合物であるという信念から  $e/a$  の値の重要性に注目したことおよび (2) これまでに発表されている膨大な2元および3元の状態図の中の構造が同定されていない相の中に存在する可能性を信じ、(3) きわめて地道に、根気よく探索を行ってきたことによると考えられる。世界中の準結晶研究者が殆ど“物理屋”であるのに対し蔡博士が“材料屋”であって、前者が一般に(3)の素養には恵まれているとはいえないのに対して蔡博士は(3)の素養に恵まれていたことによると考えられる。

## 2.3 ステージ I (1988-1999)

ここで、準結晶の原子構造の特徴と正20面体の構造の種類について述べておく。準結晶の原子構造を概念的に表現すると、“準結晶構造と同じ対称性をもって凝集した  $55 \pm 10$  個の原子クラスターが glue atom と呼ばれる少数の原子によって互いのり付けされたクラスタの凝集構造であると表現される。(ただし、蔡型の Cd-Yb 系準結晶の構造については図のクラスタのさらに外側の層を考慮することにより glue atom なしで記述できることが知ら

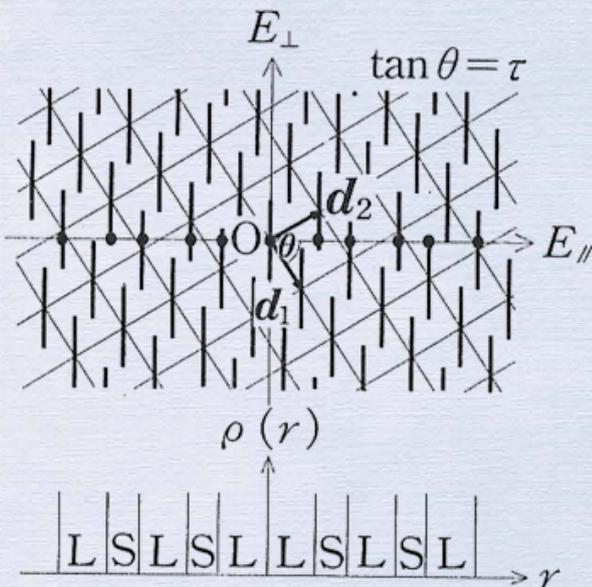


図1 1次元超原子からなる2次元正方格子から、断面法によって1次元準周期格子(1次元準結晶)を生成する模式図。 $E_{//}$ は実空間(1次元)、 $E_{\perp}$ は補空間。

れている。)それぞれの原子クラスターはいくつかの原子層の入れ籠構造になっている。現在知られている正20面体相を構成する原子クラスターにはマッカイ型、バークマン型、蔡型の3種類があり図2にそれぞれの層状構造を分解して示している。蔡型の正20面体相のクラスタの中心は正20面体対称ではない四面体シェルで占められている。ステージIにおいてはまだ蔡型クラスタからなる正20面体相が発見されていなかったため、研究に用いられたのはマッカイ型とバークマン型の正20面体相と正10角形相の準結晶である。また、このステージの中頃から金属以外の物質に関する準結晶の存在が報告されはじめ、準結晶の世界が拡大しはじめた。

## 2.4 ステージ II (2000-2010)

ステージIで研究された準結晶は3元系合金で多量の化学的不規則性を含むものであった。2000年に2元系で化学量論組成の金属間化合物として、全く新しいタイプの正20面体準結晶が蔡らによって発見された。さらにその組成近くに近似結晶相も安定相として存在することも示された。それらを構成

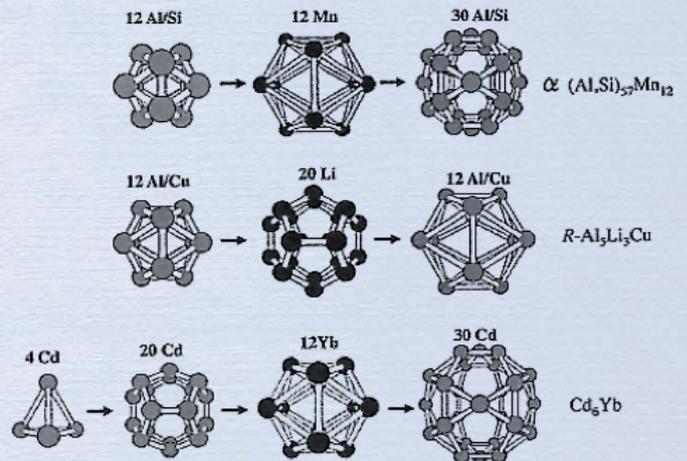


図2 上から、バークマン型、マッカイ型、蔡型の3種類の正20面体相を構成するクラスタの原子構造。それぞれ3層または4層のクラスタ殻の入れ子構造になっている。各層は蔡型クラスタの第1層以外は正20面体対称性をもつ。

する原子クラスターは図2(c)に示すような66個の原子からなる新しいタイプで、蔡型クラスターと名付けられた。蔡型クラスターの特徴は、(1)中心に対称性の異なる4面体クラスターが存在すること、(2)第3層は12個の原子が正20面体を構成しているが多くの場合、2価または3価の希土類原子であることである。その後、化学的不規則性のない準結晶の原子構造は高倉らによって精密に決定され、それが2011年に Shechtman がノーベル化学賞を受賞する一つの契機となったと言われている。このステージではこの新準結晶の開発が進み、その後クラスター第3層以外をさまざまな元素で置換した蔡型正20面準結晶に関する研究が盛んになると共に、高分子やコロイド粒子の準結晶も開発され、原子準結晶から分子準結晶、粒子準結晶と準結晶の世界が大きく広がった。

## 2.5 新発展ステージ(2011年以降)

準結晶の発見以来、準周期構造の特異な電子状態、磁気状態に起因する基礎物性の新展開が期待されてきた。しかし、準結晶の特徴的な物性も従来の結晶の物性概念で解釈可能であった。奇しくも Shechtman がノーベル賞を受賞した2011年になって、名大の出口らによって磁性希土類元素を含む正20面体準結晶で、近似結晶では見られない**特異な量子臨界現象**が発見されて、初めて結晶とは異なる準周期構造中の電子構造が関与する現象が発見された。それ以降、希土類元素を含む準結晶、近似結晶に関する基礎物性研究が隆盛になり、準結晶研究の新たなステージを迎え今日に至っている。今後の展開が大いに期待される。

右ページに、それぞれのステージでなされた重要なオリジナルな研究成果を年表の形式で紹介する。

(年表中の引用文献のリストは、本稿の末尾に掲載したハイパーリンクまたはQRコードから、本領域のウェブページにアクセスすることで、参照可能です。)

## 引用文献

- 1) D. Shechtman, I. Blech, D. Gratius and J. W. Cahn: Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 1951,
- 2) D. Levine and P. J. Steinhardt: Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 2477.
- 3) R. Penrose: Bull. Inst. Math. Appl. **10** (1974) 266.
- 4) A. L. Mackay: Sov. Phys. Crystallogr. **26** (1981) 517.
- 5) T. Ogawa: J. Phys. Soc. Jpn. **54** (1985) 3205.
- 6) P. Kramer and R. Neri: Acta Cryst. A **40** (1984) 580.
- 7) M. Kohmoto: Phys. Rev. Lett. **50** (1983) 1870.
- 8) M. Kohmoto, B. Sutherland and C. Tang: Phys. Rev. B **35** (1987) 1020.
- 9) A. P. Tsai, A. Inoue and T. Masumoto: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1505.
- 10) L. Bendersky: Phys. Rev. Lett. **55** (1985) 1461.
- 11) K. Chattopadhyay, K. S. Lele, S. Ranganathan, G. N. Subbanna and N. Thangaraj: Current Sci. **54** (1985) 895.
- 12) T. Ishimasa, H. U. Nissen and Y. Fukano: Phys. Rev. Lett. **55** (1985) 511.
- 13) N. Wang, H. Chen and K. H. Kuo: Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 1010.
- 14) K. Hiraga, M. Hirabayashi, A. Inoue and T. Masumoto: J. Phys. Soc. Jpn. **54** (1985) 4077.
- 15) "The Physics of Quasicrystals" edited by P. L. Steinhardt and S. Ostlund, published by World Scientific (1987).
- 16) 「準結晶」物理学論文選集II: 二宮敏行、竹内伸、藤原毅夫編集、日本物理学会(1992).
- 17) 「準結晶」: 竹内伸著、産業図書(1992).
- 18) 「結晶・準結晶・アモルファス」: 竹内伸、枝川圭一著、内田老鶴圃(1997).
- 19) 「Quasicrystals」: edited by T. Fujiwara and Y. Ishii, Elsevier (2008).
- 20) 「準結晶の物理」: 竹内伸、枝川圭一、蔡安邦、木村薫著、朝倉書店(2012).

## [年表中の引用文献]

[https://www.rs.tus.ac.jp/hypermaterials/achievements/newsletters/Ref\\_QCchronology\\_Takeuchi.pdf](https://www.rs.tus.ac.jp/hypermaterials/achievements/newsletters/Ref_QCchronology_Takeuchi.pdf)



## 準結晶研究発展の歴史年表

	年度	業績項目
揺籃期	1984	Shechtmanら正20面体相を発見 <sup>1)</sup> 小川泰は3次元ペンローズ格子の収縮変換ルールを発見 <sup>4)</sup>
	1985	平賀ら Al-Mn 準結晶の高分解能電顕観察から原子構造の秩序性を実証 <sup>T1)</sup> Bendersky <sup>T2)</sup> および Ranganathanら <sup>T3)</sup> 独立に正10角形準結晶相を発見 石政ら正12角形準結晶の発見 <sup>T4)</sup> Guyot-Audier が3D-Penrose-tile への修飾で Al-Mn 準結晶の構造決定 <sup>T5)</sup> Elser-Henley が射影法によりマッカイ型準結晶の構造決定 <sup>T6)</sup>
	1986	Levine と Steinhardt による“準結晶”の定義 <sup>T7)</sup> Sainfort-Dubost により最初の安定相準結晶の発見 <sup>T8)</sup>
	1987	Kuo ら正8角形相の発見 <sup>T9)</sup> 蔡らによる完全性の高い安定相準結晶の発見 <sup>T10)</sup>
	1988	Henley がエントロピーによる準結晶形成 (Random-tiling model) 提唱 <sup>T11)</sup> 蔡らによる Al-Cu-M (M=Cr,Mn,Fe) 準結晶の開発 <sup>T12)</sup> Onoda らは local rule のみでの完全な2次元準結晶の成長を示す <sup>T13)</sup>
ステージ I	1989	蔡らによる正10角形準結晶の相安定相の発見 <sup>T14)</sup> 木村らは Al-Li-Cu 単準結晶の電気伝導挙動を電子の弱局在で解釈 <sup>T15)</sup> 石井によるフェイゾン歪導入による変調構造の安定性の理論提唱 <sup>T16)</sup>
	1990	蔡らによる Al-Pd-Mn, Al-Pd-Re 合金準結晶の発見 <sup>T17)</sup> 水谷ら Al-Cu-Ru 正20面体相の電子伝導の特徴に関する研究成果 <sup>T18)</sup> 山本ら <sup>T19)</sup> , Steurer-Kuo <sup>T20)</sup> による正10角形相の原子構造の5次元解析 渋谷らによる準結晶に関する最初の高温塑性変形実験 <sup>T21)</sup> A.R.Kotan ら STM で初めて正10角形相の原子構造を直接観察 <sup>T22)</sup>
	1991	Al-Cu-Co 正10角形相の構造に関する Burkov モデルの提唱 <sup>T23)</sup> Henley が canonical-cell tiling model 提唱 <sup>T24)</sup> Dubois ら準結晶の coating 材への応用 <sup>T25)</sup> 藤原ら電子状態計算から準結晶の Fermi-level に普遍的な擬ギャップの存在を指摘 <sup>T26)</sup>
	1992	国際結晶学連合は「結晶」の定義を“原子構造の並進対称性”から“離散的な回折パターンを示す物質”に変更した。 枝川ら、準結晶合金における規則-不規則変態の発見 <sup>T27)</sup> Hafner ら Brillouin 帯-フェルミ球相互作用による擬ギャップ形成 <sup>T28)</sup>
	1993	Wollgarten ら転位機構による準結晶の塑性変形の実証 <sup>T29)</sup> 竹内ら絶対零度に向け発散する電気抵抗の観測 <sup>T30)</sup> Mayou ら準結晶中の異常な電子伝導の確立 <sup>T31)</sup> 横山ら Al-Pd-Mn 単準結晶の破壊と塑性挙動の研究 <sup>T32)</sup> Ding ら準結晶に関する弾性論を展開 <sup>T33)</sup>
	1994	蔡らが Zn-Mg-RE (RE = rare earth) 合金で秩序性の高い準結晶発見 <sup>T34)</sup> 堂寺ら正20面体準結晶の単位構造の Ising-like 高温変態の可能性計算 <sup>T35)</sup> Janot-de Boissieu はクラスターの階層構造としての準結晶発表 <sup>T36)</sup>
	1995	Wollgarten らが Al-Pd-Mn 単準結晶中の転位運動をその場観察 <sup>T37)</sup> M. de Boissieu らが散漫散乱からフェイゾン弾性定数を見積もる <sup>T38)</sup>
	1996	山本は準結晶の高次元結晶学を解説 <sup>T39)</sup> Janot は準結晶の可変領域ホッピング伝導を提唱 <sup>T40)</sup> Ebert ら STM で Al-Pd-Mn 単結晶のクラスター集合構造を検証 <sup>T41)</sup>
	1997	Feuerbacher ら Al-Pd-Mn 準結晶の塑性変形機構の研究 <sup>T42)</sup> Stadnik らは多数の準結晶の光電子分光測定から擬ギャップを検出 <sup>T43)</sup> Thiel らは低速電子線回折による準結晶の表面の原子構造解析 <sup>T44)</sup>
	1998	Steinhardt らは準結晶構造について Quasi-unit-cell model を提唱 <sup>T45)</sup> Ritsch ら Al-Co-Ni 正10角形相が高温で8種の多型の存在を示す <sup>T46)</sup>
	1999	Urban らは Al-Pd-Mn 近似結晶中に新しいタイプの転位を発見 <sup>T47)</sup>

	年度	業績項目
ステージ II	2000	蔡らは化学量論組成の新しい2元系正20面体相化合物を発見 <sup>T48)</sup> 枝川らはフェイゾン励起に起因する準結晶の高温比熱の測定 <sup>T49)</sup> 枝川らは高温での原子構造のフェイゾン動揺の直接観察に成功 <sup>T50)</sup> 佐藤らは Zn-Mg-Ho 正20面体相で反強磁性スピン相関を発見 <sup>T51)</sup> Dubois は準結晶の応用の可能性の新しい展望を示す <sup>T52)</sup> Zoorob ら12回対称準結晶で完全な光バンドギャップ形成を実証 <sup>T53)</sup>
	2001	田村らは2元系 Cd-Yb 正20面体相の異常な電気伝導挙動を示す <sup>T54)</sup> 石政らは2007年にかけて多数の3元型及び4元型の蔡型準結晶を開発 <sup>T55)</sup>
	2002	Kim らによる Mg-Zn-Y 合金の準結晶粒子強化合金の開発 <sup>T56)</sup> 田村ら Cd <sub>6</sub> Yb 近似結晶における低温での新奇な規則-不規則相変態発見 <sup>T57)</sup> Franke らは準結晶表面に epitaxial 成長により単原子層準結晶作成 <sup>T58)</sup>
	2003	阿部らは準結晶中の原子振動振幅の異常を電子顕微鏡で直接観察 <sup>T59)</sup> Gomez ら MCd <sub>6</sub> (M = Y,Ca,Rare earth) 中の Cd <sub>4</sub> 四面体の配置の研究 <sup>T60)</sup> 蔡らによる準結晶強化 Mg-Zn-Y 合金の開発 <sup>T61)</sup>
	2004	Zeng らはミセル相を scale-up することにより準結晶構造を形成 <sup>T62)</sup>
	2005	球に近い band-gap を持つ正20面体準結晶のフォトニック性の研究 <sup>T63)</sup> Thiel らは準周期方向と周期方向の摩擦係数の大きな異质性を観測 <sup>T64)</sup>
	2007	高倉らは2元系正20面体準結晶の原子構造の精密決定 <sup>T65)</sup> 林田・堂寺ら3成分ポリマー系で12回対称タイリングを発見 <sup>T66)</sup>
	2009	Steinhardt らは自然界の鉱物の中に初めて準結晶の存在を確認 <sup>T67)</sup> Talopin らは2種のナノ粒子の集合体での準結晶の自己生成を示す <sup>T68)</sup> Zheng らが高密度充填4面体からの準結晶相と結晶相の形成を示す <sup>T69)</sup>
	2010	Von Freymann らはフォトニックのための3次元ナノ構造の研究 <sup>T70)</sup> Lee らは球状ブロック共重合体液中に Frank-Kasper 相を発見 <sup>T71)</sup>
	新発展ステージ	2011
2012		出口らは磁性準結晶の量子臨界現象が近似結晶と異なる異常性を発見 <sup>T73)</sup> Goldman ら Cd <sub>6</sub> Yb 近似結晶で反強磁性 (T <sub>N</sub> =24K) を発見 <sup>T74)</sup> 藤田・寺崎らメソポーラス-シリカで12回対称準結晶を発見 <sup>T75)</sup> Kraus ら準結晶とトポロジカル絶縁体の密接な関係を示す <sup>T76)</sup>
2013		Förster ら Pt(111) 面上に BaTiO <sub>3</sub> の12回対称準結晶薄膜を作成 <sup>T77)</sup> 廣戸ら Au-SM-Gd 近似結晶における強磁性発見などの研究 <sup>T78)</sup>
2014		高際・木村による金属-共有結合変換に伴う熱電性能の変化を研究 <sup>T79)</sup> Engel ら中心力ポテンシャルで単成分の正20面体準結晶の作成に成功 <sup>T80)</sup> 堂寺らは階段状の反発を持つ hard disk による準結晶の形成 <sup>T81)</sup> 廣戸らは近似結晶で canted ferromagnetism を発見 <sup>T82)</sup> 松川ら混合原子価準結晶における原子置換による原子価変化の研究 <sup>T83)</sup> 中山・竹内は準結晶の熱伝導率の異常温度変化を利用した熱整流器考案 <sup>T84)</sup>
2015		出口ら Au-Ge-Yb 近似結晶で超伝導発見 <sup>T85)</sup> 枝川ら正10角準結晶の成長過程を電子顕微鏡内高温その場観察で解明 <sup>T86)</sup>
2018		神谷ら Al-Mg-Zn 準結晶で超伝導を発見 (T <sub>c</sub> =0.05K) <sup>T87)</sup> 田村ら3元系近似結晶において反強磁性を発見 <sup>T88)</sup>
2019		佐藤ら Au-Al-Tb 近似結晶中で渦状スピンオーダーを発見 <sup>T89)</sup> 岩崎ら Al-Si-Ru 近似結晶で半導体を実現 <sup>T90)</sup>
2020		田村ら2/1近似結晶において強磁性を発見 <sup>T91)</sup>



### 竹内 伸

理学博士  
東京大学・東京理科大学 名誉教授

#### 略歴

1960年 東京大学 理学部 物理学科卒業  
1960年～1969年 金属材料技術研究所 (現 物質・材料研究機構) 研究員  
1969年～1996年 東京大学 物性研究所 所員  
助教、教授を経て、1991—1996 同所長  
1996年～2006年 東京理科大学 基礎工学部 教授  
2006年～2010年 東京理科大学 学長  
2010年～2013年 東京理科大学 近代科学資料館 館長  
2014年～2017年 同顧問

#### 主な受賞歴

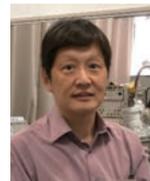
日本金属学会功績賞 (1975年)  
村上記念賞 (2001年)  
本多記念賞 (2009年)  
瑞宝中叙章 (2015年)

公募班

A01

## 金属酸化物からなるハイパーマテリアル

柚原 淳司 名古屋大学 工学研究科 准教授



私たちは現在、「金属酸化物からなる新たなハイパーマテリアルを創製し、その構造解明に迫る」という目標を掲げて、Ba-Ti-O系の準結晶及び近似結晶の構造解明、そして、これまでにない新たな金属酸化物超薄膜準結晶の探索に取り組んでいます。ところで、私自身の研究活動を振り返りますと、原子核工学科の出身であったこともあり、元々、高エネルギー加速器を用いたラザフォード散乱分光(RBS)法を主力手段として、半導体表面上の吸着原子の振る舞いに関する研究を行っていました。その後、原子核出身の私が大変興味を持ったのが、トンネル効果を利用した顕微鏡いわゆる走査型トンネル顕微鏡(STM)でした。当時、半導体や金属表面上に二次元合金を創製し、原子スケールでSTM観察することで、原子の大きさの違いから元素を特定し、バルクでは合金化しない2種類の元素が、固体表面上では規則合金や全率固溶体合金を形成することを明らかにしました。

その後、Al系金属間化合物からなる二次元準結晶表面構造の解明のため、STMによる原子分解能観察に取り組みました。実は、準結晶は結晶よりも何倍も原子像を得るのが難しいです。高分解能STM観察に欠かせない重要な要素の一つとして、原子スケールまで尖った金属探針が挙げられます。金属探針を作る際、探針先端が原子スケールで2箇所まで尖っている、いわゆるダブルチップが形成されることがしばしばあります。この場合、探針先端の2箇所から同時にトンネル電流が流れます。周期構造であれば、最も高い探針からの周期構造に加えて、二番目に高い探針からの周期構造をゴーストノイズとして重ねたものがSTM像として得られ、空間分解能が落ちた原子像が得られます。一方、準周期構造の場合は、規則性はあるが周期性はないという特徴のため、ダブルチップの影響があると、一向に原子像を得ることができず大変苦労しました。今になって振り返りますと、準結晶表面は、我々の走査型トンネル顕微鏡の高分解能観察技術の向上に大いに貢献してくれました。

2013年、ドイツ、ハレ大学のW. Widdra先生らは、白金単結晶表面上におけるBa-Ti-O系ペロブスカイト型酸化物超薄膜の研究において、準結晶薄膜を偶

然見つけました<sup>[1]</sup>。翌年の1月には、北海道で開催された表面・ナノ科学シンポジウム(SSNS'14)にて招待講演がありました。白金単結晶表面上で酸化物準結晶を創製できたとの発表で当時は大変驚きとともに感動しました。余談ですが、W. Widdra先生は、原子核工学科出身であり、表面科学の研究者であり、準結晶の研究を行うという偶然にも私と似たようなバックグラウンドの先生であり、国際会議でお会いするといつも懇意にしております。当時、私たちの研究グループでは、準結晶を自ら創製したことがなく、外部から譲り受けた準結晶を試料として利用していました。本講演をきっかけに、自ら準結晶を作製したいと思うようになりました。そこで当時、Al系金属間化合物準結晶の構造解明に取り組んでいた大学院生を説得し、酸化物準結晶の創製研究に取り組んでもらうことになりました。先行研究では、準結晶のみならず、近似結晶の創製に成功しており、また、大変きれいな高分解能STM像や低速電子回折(LEED)パターンが報告されていました。さらに、X線回折と密度汎関数理論に基づく計算機シミュレーションにより、近似結晶の基本クラスタの構造モデルも提案されていました<sup>[2]</sup>。しかしながら、結晶構造を決定する際に重要な物理量である化学組成や原子密度は、直接的に明らかにされていませんでした。

そこで私たちは、Pt(111)表面上におけるBa-Ti-O系超薄膜からなる近似結晶相、準結晶相、結晶相のSTM像やLEEDパターンの観察に加えて(図1)、非破壊で原子密度の定量分析が可能なRBS分析(図2)と表面敏感なオージェ電子分光法やX線光電子分光を併用することで、化学組成や原子密度を明らかにする研究に取り組みました<sup>[3]</sup>。超高真空チャンバー内で真空加熱を繰り返しますと、チタン原子が減少し、それに伴い、近似結晶相から準結晶相に相転移することを明らかにしました。近似結晶を構成するタイルは四角形と三角形で構成されています。一方、準結晶を構成するタイルは、四角形と三角形に加えて細長いひし形が必要であることがSTM像から判明しております。先行研究では、これらのタイルの格子点にチタン原子があると提案されています(図3)。細長いひし形タイルを含む方が



格子点の密度が高くなるため、この格子点に全てのチタン原子があると、我々の実験結果と矛盾することが判明しました<sup>[3]</sup>。現在、Pt(111)表面上に様々なBa-O系超薄膜を創製し、この表面上のチタン原子の原子密度を変化させることで、近似結晶相及び準結晶相と化学組成や原子密度の関係性を明らかにする研究に取り組んでおります<sup>[4]</sup>。今後、クラスターの構造モデルの提案を行い、計算機シミュレーションにてその妥当性を検討し、構造解明したいと考えております。

参考文献

[1] S. Förster, K. Meinel, R. Hammer, M. Trautmann, and W. Widdra, *Quasicrystalline Structure Formation in a Classical Crystalline Thin-Film System*, Nature **502**, 215 (2013).

[2] S. Förster, M. Trautmann, S. Roy, W. A. Adeagbo, E. M. Zollner, R. Hammer, F. O. Schumann, K. Meinel, S. K. Nayak, K. Mohseni, W. Hergert, H. L. Meyerheim, and W. Widdra, *Observation and Structure Determination of an Oxide Quasicrystal Approximant*, Phys. Rev. Lett. **117**, 095501 (2016).

[3] J. Yuhara, K. Horiba, R. Sugiura, X. Li, and T. Yamada, *Growth and Composition of an Ultrathin Ba-Ti-O Quasicrystal Film and Its Crystalline Approximant on Pt(111)*, Phys. Rev. Materials **4**, 103402 (2020).

[4] X. Li, K. Horiba, R. Sugiura, T. Yamada, and J. Yuhara, *Growth of Ba-O ultrathin films on Pt(111) followed by Ti incorporation to prepare oxide crystalline approximants and quasicrystals*, Appl. Surf. Sci. **561**, 150099 (2021).

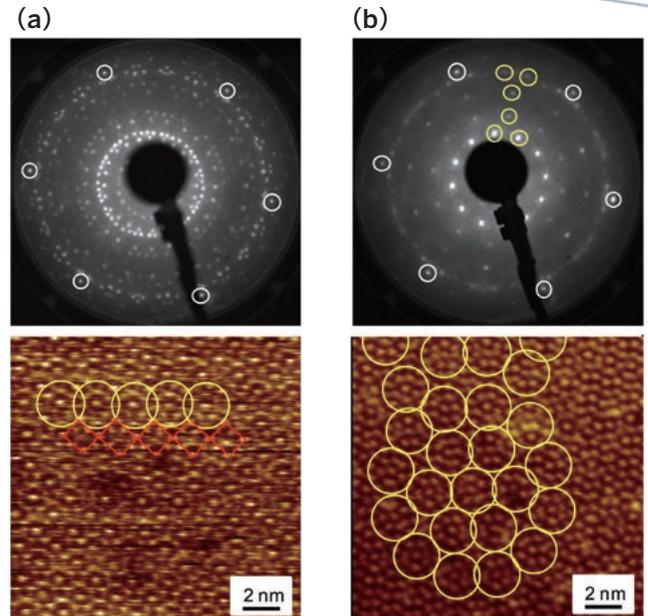


図1 (a) 近似結晶及び(b)準結晶のLEEDパターンとSTM像

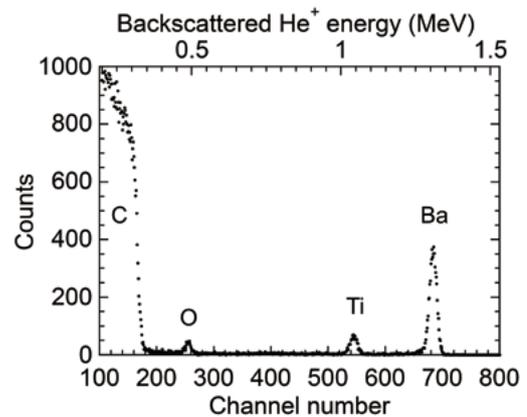


図2 グラファイト基板上に蒸着したBa-Ti-O系超薄膜のRBSスペクトル

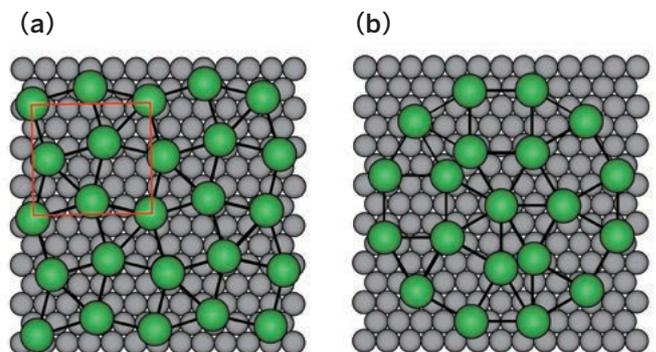


図3 構造モデル (a) 近似結晶 (b) 準結晶



綿貫 徹 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門 次長

## (1) 研究略歴

放射光 X 線を用いた計測法の開発およびその利用研究に従事。放射光を用いた、低温高圧下 X 線回折法や高圧下 X 線吸収分光法、高速原子二体分布関数測定などに加えて、最近では、コヒーレント X 線回折法の開発に携わる。ハイパーマテリアルでは、近似結晶の低温高圧下の相転移や価数揺動準結晶の創成などの研究を実施。本プロジェクトでは、コヒーレント X 線回折法によるハイパーマテリアルの観察を担当。

## (2) ハイパーマテリアルでの研究目標

### 研究目標の概要

ハイパーマテリアルは、原子レベルのミクロから十分なバルクとみなせるマクロまでが自己相似型の階層構造で繋がれる点に大きな特徴を持つ。そのため、ミクロとマクロの間のメゾスケールに着目することが、ハイパーマテリアルの特性を理解することに役立つと考えられる。このメゾスケール観察に有効な方法の一つがコヒーレント X 線の利用である。

我々は、特に、ブラッグコヒーレント X 線回折法を開発しつつ、ハイパーマテリアルに適用することを計画して研究開発を進めている。同手法では、バルク体内部のドメイン構造や内部歪を 10 nm 程度の空間分解能で観察することができ、また、これを時分割計測することにより、これら内部構造のダイナミクスを観察することができる。例えば、Cd-Yb 正二十面体型準結晶では、 $\tau^6$ -inflated cluster の直径が 24 nm であり、この半径程度以上の階層の観察が可能となる(図 1)。本手法を用いて、ハイパーマテリアルの相転移の特徴の理解や、ハイパーマテリアル形成メカニズム解明に繋げることを目指している。

## コヒーレント X 線の利用

コヒーレント X 線とは、波面の揃った X 線である(ここでは空間コヒーレンスのみに着目し、時間コヒーレンスについては触れない)。X 線の発光点が小さいほど、また、発光点から離れるほど波面の揃った X 線は取出しやすくなる。第3世代放射光源の SPring-8 ではこの条件が満たされており、我々が実験を行っている実験ステーションでは、10  $\mu\text{m}$  程度の領域まで X 線の波面が揃っている。そのため、バルクとみなせる  $\mu\text{m}$  程度のサイズに至るまで、その内部構造の情報を平均化せずを得ることができる(図 2)。因みに、実験室の X 線回折装置では、波面の揃った領域のサイズは数 10 nm 程度であり、それ以上の大きさの構造情報は平均化される。

我々は、ブラッグ回折にこのコヒーレント X 線を利用して、通常の X 線構造解析では、多数のブラッグ点の強度分布からユニットセル内の原子配列を得る。それに対して、ブラッグコヒーレント X 線回折では、ブラッグ点一つが逆格子空間にスペックルパターンと呼ばれる内部構造を持ち、そこにメゾスケールの構造情報が含まれる(図 3 左)。また、コヒーレント X 線回折として、通常登場する小角領域の回折を取得する方法では、密度コントラストや屈折コントラストに感度があるのに対して、ブラッグコヒーレント X 線回折では、原子配列に関するコントラストに感度があるため、密度差として検知できない物質内部のドメイン構造や内部歪などの情報が得られる。

## イメージング

ブラッグコヒーレント X 線回折はイメージングに利用できる。実際に、BaTiO<sub>3</sub> 誘電体ナノ粒子の観察を行った例が図 3 である。一つのブラッグ反射のスペックルパターンを逆格子空間において 3 次元的に取得し、ここから実空間の 3 次元像を得たものであ

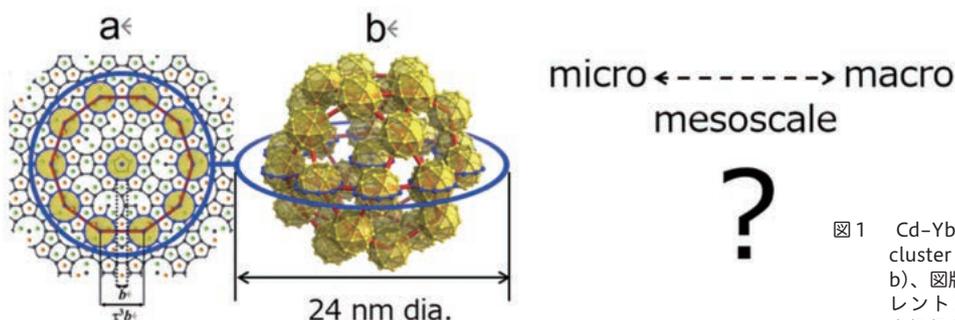


図 1 Cd-Yb 正二十面体型準結晶の  $\tau^6$ -inflated cluster の断面図(左図 a) と 3 次元構造(左図 b)、図版提供者: 高倉洋礼博士(北大)。コヒーレント X 線回折では、 $\tau^6$ -inflated cluster の半径程度以上のメゾスケール領域を観察。

る。直方体型の外形が再現されているほか、原子配列に関するコントラストに感度があることから、粒子内部の数10nm程度の幅のドメインが並んだ構造も捉えられている。

逆空間情報から実空間への像回復には、位相回復計算を用いている。イメージングでは、X線のレンズを用いて直接結像する方法もあるが、逆格子空間を広くカバーできる高NAのX線レンズは技術的に困難である。その点、位相回復計算では、レンズをなくしてこの制限を回避することにより、実効的に高NAの光学系を組み、高い空間分解能の観察が可能となる。且つ、X線の透過力を活かして、物体の内部構造の3次元観察も可能となる。

我々は、この手法を用いて、マクロスケールで高い対称性を持つ準結晶において、メソスケールで低対称化した構造が発生していないかの観察や、近似結晶の高次構造として現れるドメイン構造観察に適用することを計画している。例えば、通常の回折では同一ブラッグ点を生じるため区別できないメロヘドラル双晶のドメインでも、コヒーレントX線回折では区別してイメージングすることができる。

### ダイナミクス計測

ブラッグコヒーレントX線回折を時分割計測するX線光子相関分光法を、ほぼ同一のセットアップで実施することができ、それにより、観察対象の内部構造のダイナミクスを計測することが可能となる

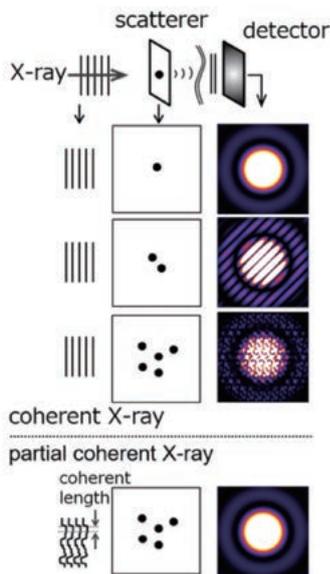


図2 コヒーレントX線 (coherent X-ray) が照射された場合と、コヒーレンス長が短いX線 (partial coherent X-ray) が照射された場合の回折パターン の模式図、図版提供者：大和田謙二博士(量研)。

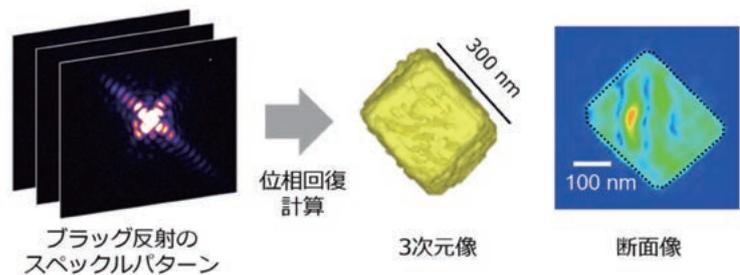


図3 BaTiO<sub>3</sub>誘電体ナノ粒子からのブラッグ反射のスペックルパターン(左、ImageJで描画)と、位相回復計算によって得られた実空間における外形像と断面像(右、VESTA3で描画)、図版提供者：大和田謙二博士、他(量研)。

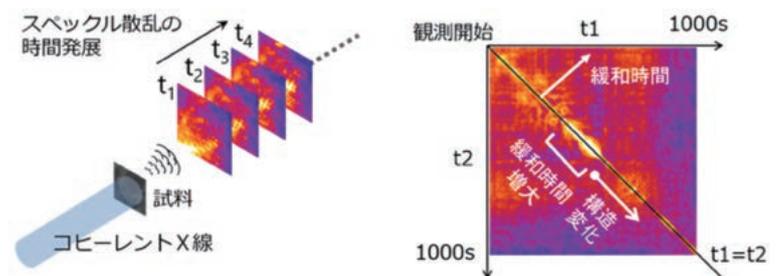


図4 スペックルパターンの時分割計測の概念図(左)。高分子膜から水分が抜けていく過程を観察した、スペックルパターンの二時間相関関数(右)、図版提供者：大和田謙二博士(量研)。

(図4左)。最高時間・空間分解能は1 msec, 10 nm程度であり、中性子非弾性散乱よりも低周波数で長波長の領域をカバーするものである。例えば、ハイパーマテリアルの相転移近傍の構造揺らぎについて、中性子非弾性散乱実験との相補的な利用により、ミクロからマクロに至る各階層構造でのダイナミクスが通貫して理解されるようになることを期待している。

この手法は、定常状態のダイナミクス観察だけでなく、一方向性の現象の観察にも適用可能である。図4右は高分子膜から水分が抜けていく過程において、膜内のナノ構造の動きを観察したものである。スペックルパターンの相関関数を時間経過毎にプロットしたものであり(二時間相関関数)、大きな構造変化が起こる直前に緩和時間の長い揺らぎが現れる過程が捉えられている。

ハイパーマテリアルの形成過程でも同様の観察が可能であり、その適用を計画している。今年度には1100°Cに至る高温での測定を可能とするシステムを導入しており、ダイナミクス観察の中心となる高温実験の見通しが立ったところである。

本研究は、量研の大和田謙二氏、町田晃彦氏、菅原健人氏、押目典宏氏、上野哲朗氏、河野秀俊氏、広島大学の安部友啓氏、黒岩芳弘氏、山梨大学の上野慎太郎氏、藤井一郎氏、和田智志氏の協力のもと実施しています。

# 若手研究者紹介

## 鈴木 慎太郎

東京理科大学 先進工学部  
マテリアル創成工学科 田村研究室 助教



この度は若手紹介ということでこのような機会をいただきありがとうございます。まずは簡単に研究略歴を紹介させていただいただけましたらと思います。

私は修士より東京大学 物性研究所 中辻研究室に在籍し、価数揺動を示す $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>について、その物性に対する元素置換効果<sup>[1]</sup>を中心に研究を行って参りました。この系は $\alpha$ 型、 $\beta$ 型の2つの形状が存在し、特に $\beta$ 型は価数揺らぎに由来する異常金属状態・超伝導を外場チューニング無しで発現する系<sup>[2]</sup>として注目を集めております。(これと似た異常金属状態がAu-Al-Yb系準結晶で見られることは、良く知られていることかと思えます<sup>[3]</sup>。)卒業後、同研究室での研究員を経て、東京理科大学 先進工学部 マテリアル創成工学科 田村研究室に移り、磁性・強相関ハイパーマテリアルの探索やその物性について現在は研究を行っております。簡単に現在の研究内容について以下に記述させていただきます。

希土類を正二十面体サイトに含むことのできるTsai型準結晶・近似結晶の発見に伴い、希土類としてGdやTbを用いることにより磁性探索が、Ybを用いることによりf電子の局在-遍歴二重性とハイパーマテリアルの構造並びに物性との関連性に対する研究がそれぞれ精力的に行われています。特に準結晶における磁気秩序が未だ報告されておらず、これに迫るため高次近似結晶における磁性あるいは準結晶での磁性を発現する条件について精力的に探索が進められている状況です。

このうち磁気秩序発現の条件については、Au-Al-Gd系1/1近似結晶において1原子当たりの平均価電子数( $e/a$ )をAu/Al比の調整により増加させることにより、反強磁性-強磁性-スピングラスと基底状態が移り替わることが報告されていました<sup>[4]</sup>。こうした指針を参考に更なる物質探索を行うことにより、強磁性・反強磁性を示す2/1近似結晶の発見に成功しました<sup>[5,6]</sup>。特に強磁性2/1近似結晶は、過去に強磁性を示すことが報告された1/1近似結晶に対し $e/a$ を維持したまま部分元素置換を施すことにより見いだされたこと、並びに他のTsai型ハイパーマテリアル結晶群についても近似度を問わずAu-Al-Gd系と同様の傾向を示すこと<sup>[7]</sup>から、構造安定性に $e/a$ が関係するHume-Rothery化合物とされる

ハイパーマテリアルにおいて、その磁性もまた $e/a$ で記述可能であることが示唆されました(図1)。これらの系では正二十面体位置への磁性元素の配置に由来する特異な磁気構造も期待されます。こうした点にも関心があり、1つの正二十面体クラスターに対するモンテカルロシミュレーションを行い、磁性元素間の相互作用変化に伴う磁気構造の状態について計算をいたしました<sup>[8]</sup>。

また、強相関系ハイパーマテリアルとしては、Yb系と電子-ホール対応の関係にありながらこれまであまり研究されてこなかったCe系近似結晶を対象に研究を行っております。Ag-In-Ce系にて基底状態がスピングラスでありながら低温での比熱が6 J/mol-K<sup>2</sup>に至る振る舞いが見えている<sup>[9]</sup>ことから、組成変化による相互作用のチューニングに関心が持たれます。そこでAu-Ga-Ce系1/1近似結晶を対象に物質探索を行ったところ、この系が非常に広い単相領域を持つことが分かり、その構造や物性の組成依存性も明らかになりつつある状況です。

今後は、クラスター内外の相互作用や、磁性ハイパーマテリアルに対する $e/a$ ルールの有効範囲といった点を含む磁性ハイパーマテリアルに対する詳しい理解や、量子性の強いハイパーマテリアルを対象に新奇物性の探索を目指し研究を行って参りたく考えております。

最後になりますが、本項にて紹介した研究成果は東京理科大学の田村先生、石川技術員、学生の櫻井晶、稲垣和樹、吉田昌平、元売明瑞紗をはじめとした田村研究室の皆様、並びに、東京理科大学の山田先生、杉本先生、名古屋大学の出口先生をはじめとした共同研究者の皆様との研究による成果となります。ここに深く御礼申し上げます。

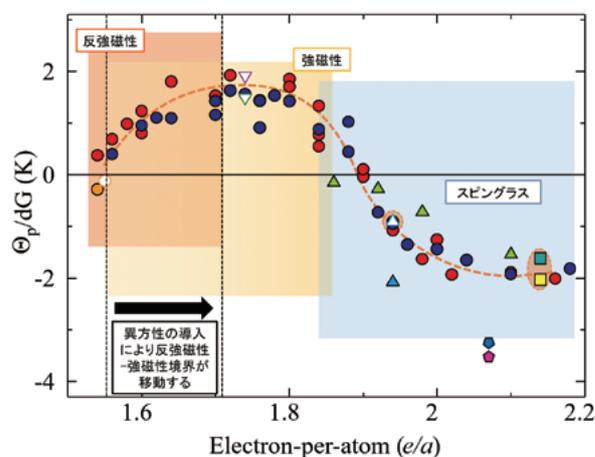


図1 Tsai型における多様な合金系が従う相図。合金系を問わず $e/a$ の増加に伴い反強磁性-強磁性-スピングラスと磁気基底状態が変化する他、その常磁性キュリー温度が1つの曲線により描かれる<sup>[7]</sup>。

- [1] S. Suzuki, K. Takubo et al., *Phys. Rev. Research* **3**, 023140 (2021).
- [2] S. Nakatsuji et al., *Nat. Phys.* **4**, 603 (2008) .. Y. Matsumoto et al., *Science* **331**, 316 (2011) .. T. Tomita et al., *Science* **349**, 506 (2015).
- [3] K. Deguchi et al., *Nat. Mat.* **11**, 1013 (2012).
- [4] A. Ishikawa et al., *Phys. Rev. B* **98**, 220403 (R) (2018).
- [5] S. Yoshida, S. Suzuki et al., *Phys. Rev. B* **100**, 180409 (R) (2019).

- [6] K. Inagaki, S. Suzuki et al., *Phys. Rev. B* **101**, 180405 (R) (2020).
- [7] S. Suzuki et al., *Mat. Trans.*, **62**, 298 (2021).
- [8] S. Suzuki, R. Tamura and T. Sugimoto, *Mat. Trans.*, **62**, 367 (2021).
- [9] K. Imura et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 093702 (2017)

## 若手研究者紹介

### 高橋 大介

中央大学 理工学部 物理学科  
素粒子理論研究室 科研費研究員



素粒子理論の観点から準結晶の物理に切り込むという領域メンバーの中でも際立って個性的立ち位置にある中村真先生のもとで、物性理論出身ではあるものの素粒子物理学者や数理物理学者と共同研究を重ねてきた私が本領域で果たすべき使命は、想定外の研究成果を出すこと、そして、新たな異分野交流の種を蒔くこと、であると考えます。以下に、現実的な遂行可能性はあまり気にせず未着手のものも含め、思いつくままにありうる研究テーマを挙げましょう。

まず、自発的対称性の破れの観点から、真の準結晶は単に複数の非整合な周期を持つ準周期的状態たち(例えば固体中の電荷密度波や導電性高分子・超伝導体中の FFLO 相) — 「準結晶の物理」(竹内・枝川・蔡・木村)第2章に従い、今これらのグループを非整合結晶と呼びましょう — とどう区別されるでしょう。両者とも運動量空間において整数係数線形独立な等間隔デルタ関数ピークを持つ点では共通しています。……それは、秩序変数空間の離散性と稠密性、そして秩序変数空間内における運動の局在性です。

通常の周期固体において秩序変数空間内の運動は原子全体の連続な並進や回転からなり、全ての原子が一斉に動きます。実はこの性質は上に述べた非整合結晶でも本質的に同じで、ただ秩序変数空間の次元が高いだけです。ゆえに素励起等の低エネルギー物理学の大枠は変更を受けません。このような高次の連続対称性の破れより生じるギャップレスモードは我々の業界では擬南部ゴールドストーンモードと呼びます。一方で、真の準結晶においては秩序変数空間内で互いに隣接する状態たちは不連続かつ局所的に移り合い、この特徴が低エネルギー物理を質

的に違うものになっています(いわゆるフェイゾンフリップ)。この違いによりフェイゾンの実験的に知られる基本的性質、例えば拡散性、を説明するために、何らかの散逸機構を有効的に入れた解析が行われてきました。というのも絶対零度・基底状態近傍の線形解析では局在励起しか得られないためです。これをできるだけシンプルな物理で理解するのはもしかしたらチャレンジングで面白いかもしれません。有限温度効果や散逸を陽に仮定しないのであれば、非線形物理から知見を援用するのが一つの選択でしょう。すると例えば戸田格子等の可積分系の物理や、格子系の熱伝導の数値的研究と繋がりが出てきます。Fermi-Pasta-Ulam の再帰現象が準結晶系でどうなるかという問題にも繋がるでしょう。

戸田格子の名を出しましたが、可積分系や高次元幾何学、関数論との関係はどうでしょう。まず真の準結晶ではないですが、非整合結晶の物理でも、関数論と理論物理の間にはテータ関数という魅力的な接点があります。例えば一次元準周期的 FFLO 相、二次元準周期的渦格子中のトカチェンコモードといったテーマが考えられるでしょう。これらの課題を通して可積分系の数理物理学者と新たな交流を切り開くことも考えられます。

また、準結晶の研究の視点をもう少し拡張し、ユークリッド空間では実現できない離散回転対称性を持つ結晶を双曲空間(ポアンカレ円板)上で考えることもできます。ここでもポアンカレ円板を普遍被覆に持つテータ関数の応用が期待できるかもしれません。スピン系の臨界現象の双曲空間での先行研究がある他、最近では電気回路による等価模型の実現、ゲージ重力対応の新しい適用からも注目されています。

以上、既存テーマの枠組みにとらわれない一方で、新学術の一員になることで得た新しい人間関係も大いに利用し、今まで知る機会が乏しかった準結晶の実験的な基本事実について質問をぶつけるなどして、自由に研究していきたいと思えます。

# 特集2

## あなたのハイパーマテリアルから みんなのハイパーマテリアルへ ～領域メンバーで語り合いました～

2020年12月9日 第5回 領域会議 Web 懇親会にて

「ハイパーマテリアル」は、「準結晶や近似結晶など補空間を含む高次元空間（ハイパースペース）で統一的に記述される物質群（マテリアル）」という本新学術領域の研究概念を端的に表現する言葉として生み出されました。生まれて間もないこのキーワードは、この先も研究者の間で大切に育てられ、成長していきます。

今回は、この領域の研究者たちがそれぞれの胸の内にある「ハイパーマテリアル」について語りあいました。ひとりひとりがる「ハイパーマテリアル」を領域メンバー、そしてさらに、領域外のみなさんとも共有し、多様な視点からこの言葉の可能性を探っていきましょう。

ハイパーマテリアルは、準結晶を始めとした高次元構造を背景に持つ系の一群を指していて、非常に多くの系を対象としていると思っています。結晶の定義の議論を持ち出すまでもなく、この新しい視点は基礎と応用の両面からこれまで見落とされていた多くの基本的枠組みに疑問を呈し、光をあてます。このような新しい舞台の上でどのようなことができるのか、楽しませていただいています。

橋爪 洋一郎 先生 (計画班 A04)

3次元（時間軸を入れると4次元？）で生きている我々にとって、4次元以上で表されるインコメ、6次元で表される準結晶を扱うのは非常に厄介ですが、まずは慣れの問題かも知れないと言う気がして来ました。その中で見えて来る構造と物性（特にフォノン&スピン）が織りなす多様（期待！）な相関に興味があります。

松下 能孝 先生 (計画班 A02)

単元素準周期薄膜の成長過程やハイパーマテリアル表面における化学反応が補空間とどのように関係するのか、という点に興味を持っています。

野澤 和生 先生 (計画班 A03)

「ハイパー」という接頭辞は、小さなお子さんにも理解してもらえる言葉だと思います。そのような意味で、「ハイパーマテリアル」は、これまで私達が準結晶や近似結晶に秘められた、一言では説明しづらい面白さを表してくれています。この領域を通して、ハイパーマテリアルの面白さや、謎に包まれた性質を明らかにするために、従来の固体電子論の拡張に取り組みます。

竹森 那由多 先生 (計画班 A03)

「固体物理学の授業で学んだ結晶の形態から外れた規格外の物質であり、まだ物性の詳細が分かっていない物質」といった意味で、「想像を超えた形態の物質～未知の物性の宝庫～」

井手上 敏也 先生 (公募班 A01)

ソフトマテリアル分野では、未知の世界の未到達な構造であり、さらにはソフトハイパーマテリアルとしての特異な性質が潜んでいるのか？大いに期待をもって取り組んでいます。

山本 勝宏 先生 (公募班 A01)

ハイパーマテリアルは、良く分からないけど色々な不思議が詰まっている宝箱。

ハイパーマテリアルが一体何かを明らかにすることがこの新学術の目的。

田村 隆治 先生 (計画班 A01)

自分の世界観を変えてくれる物質。目に見える世界（物理空間）の裏に、より高次元の秩序が隠されていることへの不思議を感じます。

門馬 綱一 先生 (計画班 A02)

私にとって、ハイパーマテリアルは秩序と無秩序の間にあるものです。これまで、構造形成やパターン形成の理論的研究を行ってきましたが、単純な結晶構造が主な対象でした。ハイパーマテリアルは複雑な構造でありながら、隠れた秩序を持っており、この隠れた秩序を理論的にどのように抽出するのかは大きな挑戦だと考えています。また、現実の材料で様々な構造を観測できることも、理論との比較が可能となる大きな魅力だと思います。

義永 那津人 先生 (公募班 A03)

私にとって、ハイパーマテリアルとは、私を想定外の研究内容に導いてくれる不思議な研究対象です。

私は超弦理論の専門家であり、もともと準結晶はおろか周期的結晶すら無縁の研究をしておりませんでした。しかし、ハイパーマテリアルとのご縁を頂いてから準結晶について考察するうちに、場の理論の観点からも、いくつか興味深いテーマを設定可能であることに気づきました。

ここで得られたアイデアは、ハイパーマテリアルの物理に触れなければ一生縁が無かったアイデアかも知れません。

中村 真 先生 (計画班 A04)

ある物質を語る軸として、物性（機械物性、超伝導性）や運動（流動性、粘性）などいろんな軸があると思いますが、ハイパーマテリアルの場合には「構造」こそがその軸だと思います。

ハイパーマテリアルとは、「普通の結晶とは違う秩序をもつ物質」だと私は考えます。（この定義だと、液晶なんかもハイパーマテリアルに含まれてしまいますが）

松本 正和 先生 (公募班 A02)

ワクワク

不思議

バンド計算を専門としてきた私はこれまでの研究で、周期性の拘束から逃れたい欲求を育んできました。私にとってハイパーマテリアルは、周期と非周期をつなぐ新しい概念の創出が期待できる研究の舞台です。

鈴木 通人 先生 (公募班 A04)

私にとってのハイパーマテリアルは、「未来」です。まだ真っ白なキャンパスで、色々な人が集まって新しいモノを生み出す舞台です。新しい概念の「ハイパーマテリアル」が本当の意味で誕生するための産婆さんのような役割を担えるよう研究を進めたいと考えています。

出口 和彦 先生 (計画班 A04)

ハイパーマテリアルは、新たな学理を生み出すプラットフォームであり、固体物理学の飛躍的な発展に寄与する物質群だと考えます。

高際 良樹 先生 (計画班 A04)

非平衡物性の分野では、これまであまり注目されてこなかった系ですが、通常の結晶とは異なる新しい特性を示す可能性があり、大きな興味を持って研究に取り組んでいます。

村上 雄太 先生 (公募班 A04)

私にとって“ハイパーマテリアル”とは、「従来の概念・認識を超越したマテリアル (物質・材料)」であると理解しています。それは、構造であったり、物性であったり、機能であったり、とにかく従来の物質概念では理解できない物質・材料群を指すものです。

本プロジェクトにおいて、ハイパーマテリアルの代表格である“準結晶”の構造を持つ合金を触媒材料として新奇な表面・反応特性を是非見出したいと思い研究に取り組んでいます。

亀岡 聡 先生 (公募班 A04)

多数の原子からなる固体はしばしば小さな宇宙と表現される。ハイパーマテリアルは6次元空間上で定義された宇宙であり、3次元空間上で生きている我々はその一部を見ているに過ぎない。先日はやぶさ2のカプセルが無事回収されたとニュースになっているが、我々もハイパーマテリアルに向かってロケットを打ち込んで、得られる小さなカプセルから頑張って6次元空間を想像しているだけなのかもしれない。ロケットの代わりに中性子を打ち込んで、カプセルの代わりに散乱された中性子の弱々しい信号からハイパーマテリアルの物性を研究するのが我々の役割だろう。

那波 和宏 先生 (公募班 A04)

シンプルな2次元多粒子系である超伝導ボルテックスのダイナミクスの実験を通して、hidden orderの探索や運動による秩序化といった普遍的現象を調べています。「ハイパーマテリアル」というネーミングに惹かれ応募しました。まったく異分野のボルテックスマターの研究から、特異な普遍的秩序をもつ準結晶の世界に迫っていかれたらと思っています。

大熊 哲 先生 (公募班 A04)

「固体の性質が構造や次元によってどのように特徴付けられるか？あるいは翻って、ある性質が現れる時、背後にどのような構造や次元が広がっているか？」という問いにチャレンジできる格好の舞台です。

杉本 貴則 先生 (計画班 A04)

私にとって、ハイパーマテリアルとは、36年前に魅了されたものが、美しく成長した姿です。1983年4月に出会ったペンローズ・パターンに対応する物質が、1984年の11月に発見の報告があった時、大変な衝撃を感じました。その直後に出された準結晶の概念に関する論文を、感動しながら貪り読みました。その後、金属準結晶の異常な高電気抵抗率を見出し、半導体準結晶を探し始めて30年が経ちました。準結晶が、より大きく発展したハイパーマテリアルの概念が生まれようとしており、半導体準結晶の創製によって、そこに貢献したいと思っています。

木村 薫 先生 (計画班 A01)

言葉をおぼえつつある息子が「ミカンのかわ」から「かわ」という概念を「本体を覆う外殻部分」であると学習し、最近では「ヨーグルトのかわ」、「せんべいのかわ」、「新幹線 (のおもちゃ) のかわ」というように対象を容器や包装などに拡張して使われている。

適切な名前を付けることは、人が物事を識別し理解する過程であって、新しい概念は新しい名前で呼ぶ必要がある、という考えを強くした。

「ハイパーマテリアル」という名前は準結晶に代表される非周期結晶の特徴を端的に表した良い言葉だと感じている。

この新しい名前が物質科学分野で広く受け入れられ定着するよう、私も微力ながら尽くせればと思う。

吉澤 俊介 先生 (公募班 A02)

準結晶および近似結晶の結晶構造に関するテーマで学位をとりました。その後、継続してハイパーマテリアルを研究していたわけではありませんが、ハイパーマテリアルは、頭の片隅にいつもある存在です。

湯蓋 邦夫 先生 (公募班 A02)

当方は長年 (と言っても大学院修了後からですが) 強相関希土類化合物の光電子分光を通じた4f電子状態の研究をしています。光電子スペクトルの解釈やそれを通じた4f電子状態の議論では4fサイトの並進対称性の必要性が問題になることがあります。この観点はハイパーマテリアルの電子状態研究でも多分根源的に共通項が見出せるのかな、と勝手に考えております。また、私にとってハイパーマテリアルは突然飛び込むことになった異分野です。なかなか慣れず話を聞いてもすぐに理解できるわけではないですが、聞くお話が新鮮で単純に面白いと感じています。このような新参者に貴重な機会を与えていただけて感謝しているところです。

関山 明 先生 (公募班 A04)

私にとってのハイパーマテリアルは、terra incognita (未開の大地) です。

私自身、この新学術領域から準結晶の研究をスタートしたということもありますが、並進周期性を基に構築されてきた物理では理解できない大地を発見したいと思っています。

松浦 直人 先生 (計画班 A02)

## 未来と希望

## 挑戦

これまで主に並進対称性のある量子スピン系を数値対角化を使ってその対称性が破れた秩序状態や、秩序が溶けた量子スピン液体等を研究してきた私にとって、ハイパーマテリアルとは、この並進対称性が使えない代わりに、五回対称性等の新しい対称性を扱う必要があることから、新しい対称性への挑戦という感じです。

坂井 徹 先生 (公募班 A04)

# 会議・研究会等報告

## 第5回 領域会議

Zoomにて開催

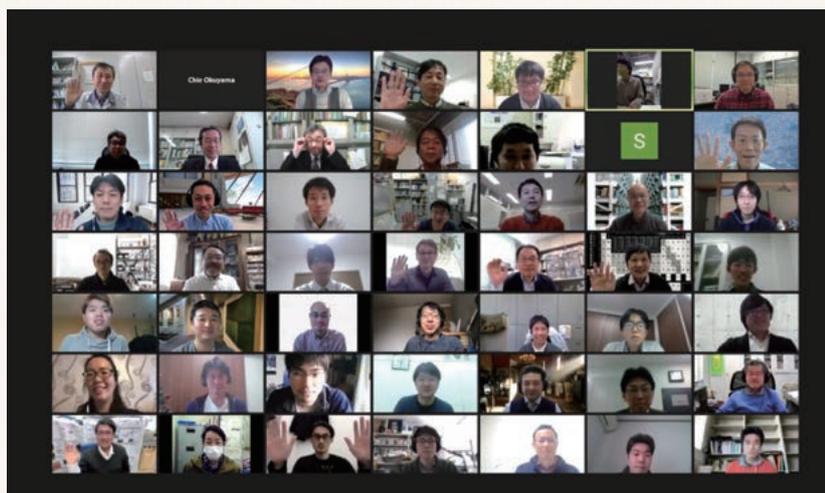
開催日：2020年12月8日～10日

第5回 Web 領域会議を開催し、総勢59名の研究者・学生の皆様にご参加いただきました。A01からA04までの計画班と公募班の先生方より新学術領域に関する研究の現状を発表することで、領域内の交流の促進を図りました。各日の午前・午後の発表後には、Zoomによる個別ディスカッション・セッションを行いました。口頭発表での各発表者が一人一室に入り、その他の参加者が発表者の部屋を訪ねて、質疑応答や議論をしました。また、Web 懇親会では、「あなたの中のハイパーマテリアルからみんなのハイパーマテリアルへ」というテーマで参加者にインタビューし、「自分の中のハイパーマテリアル」につ

いて率直な思いを語っていただきました。ご参加頂いた皆様、ありがとうございました。



竹内先生(東京大学・東京理科大学 名誉教授)にもご参加いただきました。



参加者全体写真

## 材料の微細組織と機能性 第133委員会 第246回研究会(先進材料研究会)

Zoomにて開催

開催日：2020年12月14日

枝川 圭一(東京大学)

日本学術振興会産学協力委員会の1つである第133委員会は昭和36年の発足以来、材料科学分野での産学協力を目的として国内研究会、国際シンポジウム、論文集の発行等の活動を続けてきました。国内研究会では、その時々における我が国の材料科学分野のホットな話題が取り上げられて開催されてきましたが、今回、第246回研究会として、ハイパー

マテリアルが取り上げられ、本新学術領域から4名が講師として参加し、オンラインで開催されました。聴衆としては、第133委員会の大学関係、企業関係の多数のメンバーが参加し、活発な質疑応答・議論がなされました。第133委員会は令和3年3月末で活動を終了し、これが最後の研究会となりました。

## プログラム

東京大学 枝川 圭一 「はじめに」

座長 出口 和彦(名古屋大学)

◆東京理科大学 田村 隆治 「ハイパーマテリアルについて」

◆東京大学 木村 薫

「熱電材料の高性能化機構と半導体準結晶の利点：高性能熱電材料と高温超伝導材料を目指して」

座長 田村 隆治(東京理科大学)

◆統計数理研究所 吉田 亮

「データ駆動型物質・材料研究を駆動する統計的機械学習の先進技術：準結晶への応用など」

◆名古屋大学 出口 和彦

「準結晶を含む広義の結晶を対象とした新奇物性探索：磁性と超伝導を中心として」

## 第25回 準結晶研究会(第2回ハイパーマテリアル若手研究会)

Zoomにて開催

開催日：2021年3月3日～5日

準結晶研究会は長年に亘り、東北大学の蔡安邦先生が毎年開催されて来られました。一昨年に蔡先生がお亡くなりになり、昨年度は、新学術領域「ハイパーマテリアル」が始まったことから、その第2回領域会議が、第24回準結晶研究会を兼ねて開催されました。今年度の準結晶研究会はオンラインで開催し、領域内外から70名の研究者・学生の皆様にご参加頂きました。今回は準結晶研究会の中に若手セッションを作り、新学術領域の若手研究会を兼ねて、従来の準結晶研究会のように多くの学生の方にも発表いただきました。若手研究者(39才以下)の発表の中から優秀な発表をされた以下の方々に「第1回蔡安邦賞」を授与しました。2日目には名古屋大学 佐藤憲昭先生による講義「準結晶における電子物性」、3日目には統計数理研究所 吉田亮先生による

講義「ハイパーマテリアルズ・インフォマティクス：データ科学の基礎と応用」をしていただきました。ご参加頂いた皆様、ありがとうございました。

### 第1回蔡安邦賞

#### 【若手研究者の部】

竹森 那由多

(岡山大学 異分野基礎科学研究所 特任助教)

「弱相関準周期超伝導体の理論研究」

#### 【学生の部】

岩瀬 智也

(新潟大学 大学院自然科学研究科)

「超音波による Au-Al-Yb 準結晶と近似結晶の弾性定数の温度・磁場依存性」



# 2020年度下半期 活動記録

## 受賞

### 第17回 日本熱電学会 学術講演会において、 優秀講演賞を受賞

受賞者： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
助教 北原 功一 (A01班)  
受賞題目： Al-Cu-Ir 系近似結晶の熱電特性に対するバンド  
間効果  
受賞日： 2020年9月30日

### 第17回 日本熱電学会 学術講演会において、 優秀ポスター賞を受賞

受賞者： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
博士課程2年 岩崎 祐昂  
指導教官： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
教授 木村 薫 (A01班)  
受賞題目： Al-Si-Ru 系近似結晶半導体における Cu ドープ  
効果  
受賞日： 2020年9月30日

### 日本物理学会 2020年 秋季大会において、 学生優秀発表賞を受賞

受賞者： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
博士課程2年 岩崎 祐昂  
指導教官： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
教授 木村 薫 (A01班)  
受賞題目： Al-Pd-Co 系1/1近似結晶の電子状態解析 II  
受賞日： 2020年10月19日

### 第14回 物性科学領域横断研究会において、 若手奨励賞を受賞

受賞者： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
博士課程2年 岩崎 祐昂  
指導教官： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
教授 木村 薫 (A01班)  
受賞題目： バンドエンジニアリングによる Al-Si-Ru 系近似  
結晶半導体の創製  
受賞日： 2020年12月5日

### 科学技術への顕著な貢献2020 (ナイスステップな研究者)に選出

受賞者： 国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
統合型材料開発・情報基盤部門  
主任研究員 桂 ゆかり (A03班)  
業績名： 論文から過去の実験データを集めることで大規  
模材料物性データベース Starrydata を構築  
—材料科学にデータ科学を取り入れたマテリア  
ルズ・インフォマティクスに貢献—  
受賞日： 2020年12月15日

### The 5th Asian Conference on Thermoelectrics (ACT5) & The 6th Southeast Asia Conference on Thermoelectrics (SACT6) において、The Best Oral Presentation を受賞

受賞者： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
助教 北原 功一 (A01班)  
受賞題目： Interband Contribution to Thermoelectric Properties of  
Al-Cu-Ir Quasicrystalline Approximant  
受賞日： 2020年12月17日

### The 5th Asian Conference on Thermoelectrics (ACT5) & The 6th Southeast Asia Conference on Thermoelectrics (SACT6) において、The Best Oral Presentation を受賞

受賞者： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
博士課程2年 岩崎 祐昂  
指導教官： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
教授 木村 薫 (A01班)  
受賞題目： Effect of Cu doping on Thermoelectric properties of  
Al-Si-Ru semiconducting quasicrystalline approximant  
受賞日： 2020年12月17日

### 第26回(2020)日本物理学会論文賞を受賞

受賞者： 名古屋大学 大学院理学研究科  
講師 出口 和彦 (A04班)  
論文題目： Superconductivity of Au-Ge-Yb Approximants with  
Tsai-type Clusters  
受賞日： 2021年1月23日

### 第1回 蔡安邦賞(若手研究者の部)を受賞

受賞者： 岡山大学 異分野基礎科学研究所  
特任助教 竹森 那由多 (A03班)  
受賞題目： 弱相関準周期超伝導体の理論研究  
受賞日： 2021年3月3日

### 第1回 蔡安邦賞(学生の部)を受賞

受賞者： 新潟大学 大学院自然科学研究科  
修士課程2年 岩瀬 智也  
指導教官： 新潟大学 大学院自然科学研究科  
准教授 根本 祐一  
受賞題目： 超音波による Au-Al-Yb 準結晶と近似結晶の弾  
性定数の温度・磁場依存性  
受賞日： 2021年3月3日

# 開催セミナー・イベント

## 第10回 ハイパーマテリアル・セミナー

開催日時：2020年10月1日  
開催方法：Zoomによるビデオ会議  
講演題目：コヒーレントX線回折を用いたナノ粒子イメージング  
講師：綿貫 徹氏(量子科学技術研究開発機構 次長)

## 第11回 ハイパーマテリアル・セミナー

開催日時：2020年10月15日  
開催方法：Zoomによるビデオ会議  
講演題目：Quasiperiodic systems and appearance of the fractal structure in continuous phase transitions  
講師：Rasoul Ghadimi氏(東京理科大学 理学部 応用物理学科 PD)

## 第12回 ハイパーマテリアル・セミナー

開催日時：2020年11月26日  
開催方法：Zoomによるビデオ会議  
講演題目：構造類似性に基づいた結晶構造予測  
講師：草場 穰氏(総合研究大学院大学 複合科学研究科 統計科学専攻)

## 第13回 ハイパーマテリアル・セミナー

開催日時：2021年1月12日  
開催方法：Zoomによるビデオ会議  
講演題目：ファンデルワールス結晶ナノ構造とハイパーマテリアル  
講師：井手上 敏也氏(東京大学 大学院工学系研究科 助教)

## 第14回 ハイパーマテリアル・セミナー

開催日時：2021年2月1日  
開催方法：Zoomによるビデオ会議  
講演題目：準周期系の超伝導  
講師：酒井 志朗氏(理化学研究所 上級研究員)

## 第15回 ハイパーマテリアル・セミナー

開催日時：2021年2月24日  
開催方法：Zoomによるビデオ会議  
講演題目：準結晶特有の動的性質の探索  
講師：村上 雄太氏(東京工業大学 理学院 助教)

## 総括班によるサイトビジットを実施

開催日時：2021年2月22日、3月2日、3月11日  
内容：総括班による公募班メンバーを対象としたサイトビジットを実施しました。

## 今後の予定

<b>2021年</b>	6月7日～8日	IRN theory session をオンラインで開催予定。
	6月21日～25日	Aperiodic2021 Workshop: Aperiodic order and Physical Properties for beginners (International School for Hypermaterials) をオンラインで開催予定。
	10月3日～7日	Kick-off meeting of the International Research Network APERIODIC をカリー・ル・ルエ(フランス)で開催予定。
	11月26日～27日	第15回 物性科学領域横断研究会を東京理科大学 葛飾キャンパスで開催予定。
	12月14日～17日	MRM2021 シンポジウム B-1 ハイパーマテリアル(第7回領域会議)をパシフィコ横浜ノースで開催予定。
(開催時期 調整中)		第1回領域国際会議 (Aperiodic2021 Sapporo) を北海道大学 工学部フロンティア応用科学研究棟 鈴木章ホールで開催予定。



# Hypermaterials

新学術領域研究「ハイパーマテリアル：補空間が創る新物質科学」  
ハイパーマテリアル News Letter **Vol.3**

---

編集委員 出口 和彦  
松浦 直人  
山田 庸公  
室 裕司  
藤田 伸尚  
吉田 亮  
枝川 圭一

発行：新学術領域研究「ハイパーマテリアル」事務局  
〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1 東京理科大学 基礎工学部 材料工学科 田村研究室  
TEL. 03-5876-1410

Email [hyper-office@rs.tus.ac.jp](mailto:hyper-office@rs.tus.ac.jp)

領域ウェブサイト <https://www.rs.tus.ac.jp/hypermaterials/index.html>

発行日：2021年5月31日

