

NTT

技術ジャーナル

新機能物質・材料創製研究の最前線

Functionalization
Secondary ion mass spectrometry
Molecular beam epitaxy
Electron impact emission spectroscopy
Wide-bandgap semiconductors
Creation of novel materials
Reflection high-energy electron diffraction
Solar water splitting
Magnetic oxide
Rare-earth oxide
High-temperature superconductivity
Atomic-resolution microscopy
Scanning transmission electron microscopy
Metal-organic vapor phase epitaxy
Chemical vapor deposition
Crystal orientation control
Atomic-layer materials
Transmission electron microscopy
Device fabrication
Erbium
Photoluminescence
Cuprates
Cubic boron nitride
Fourier transform infrared spectroscopy
Atomically-controlled thin-film growth
Spin-orbit coupling
Nanowire
Gallium phosphide
Power devices
Metal-organic vapor phase epitaxy
Atomic-resolution microscopy
Scanning transmission electron microscopy
Metal-organic vapor phase epitaxy
Chemical vapor deposition
Crystal orientation control
Atomic-layer materials
Transmission electron microscopy
Device fabrication
Erbium
Photoluminescence

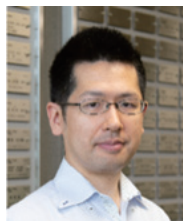
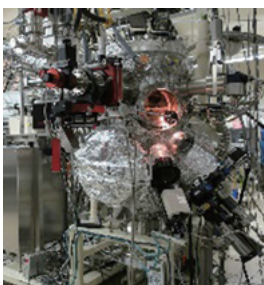
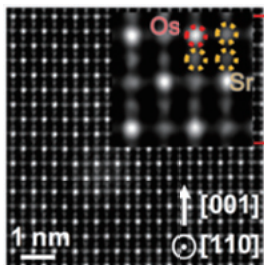
■グループ企業探訪
ドコモ・システムズ

■from NTTコミュニケーションズ
高速なソフトウェアルータを内製するという最先端技術への新たな挑戦

8 2019
Vol.31 No.8

特集

新機能物質・材料創製研究の 最前線



NTTにおける新機能物質・材料創製研究の概要 6

最高の強磁性転移温度を持つ新絶縁物質 Sr_3OsO_6 の創製 12

磁氣的純化されたエルビウム希薄添加酸化物結晶の作製と光物性
——量子情報操作プラットフォームをめざして 16

2次元伝導面を持つ高温超伝導体の基本物質のMBE成長と
原子分解能観察 20

原子層物質のCVD成長技術 25

新機能ワイドギャップ半導体材料の開拓 29

ウルツ鉱型GaPナノワイヤの結晶成長
——太陽光による水素生成デバイスへ向けて 35

主役登場 平間 一行 (NTT物性科学基礎研究所) 40

from ★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル

外国人の日本語会話学習を支援する
「Japanese Language Training AI」 41

グループ企業探訪



ドコモ・システムズ株式会社 48

「dDREAMS」でオフィスワークの効率化と
働き方改革を実現

from ◆NTTコミュニケーションズ

高速なソフトウェアルータを内製するという
最先端技術への新たな挑戦 52

Event Reports



ニコニコ超会議2019
「日本電信電話ミカランド・NTT超未来研究所6」出展報告 55

グローバルスタンダード最前線

■デジタルトランスフォーメーション時代に
生き残るためには
——標準化機関TTCから見た技術トレンドと課題 ... 61

Focus on the News 66

NEWS 73

特許紹介 76

イベント 77

読者の声 78

9月号予定

編集後記

本誌掲載内容についてのご意見、ご要望、お問い合わせ先
一般社団法人電気通信協会内 NTT技術誌事務局
TEL (03) 3288-0608
FAX (03) 3288-0615
E-mail jimukyoku2008@tta.or.jp

本誌ご購入のお申し込み、お問い合わせ先
一般社団法人電気通信協会 ブックセンター
TEL (03) 3288-0611
FAX (03) 3288-0615
ホームページ <http://www.tta.or.jp/>

■企画編集 日本電信電話株式会社
〒100-8116 東京都千代田区大手町1-5-1
大手町ファーストスクエア イーストタワー
NTTホームページ URL <http://www.ntt.co.jp/>

■発行 一般社団法人電気通信協会
〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋2-1-1
如水会ビルディング6階
TEL (03)3288-0608 FAX (03)3288-0615
URL <http://www.tta.or.jp/>

©日本電信電話株式会社 2019

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●
※本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェアなどの名称は、各社の商標または登録商標です。

■表紙デザイン：高橋デザインルーム

新機能物質・材料創

新物質創製

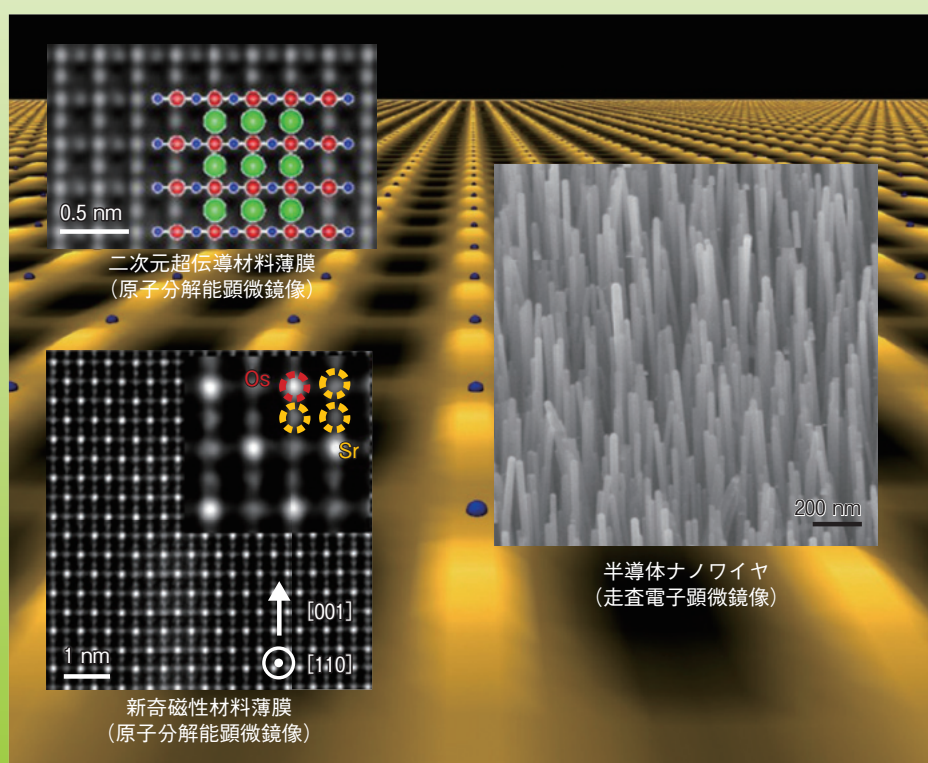
薄膜材料

原子層物質

ナノワイヤ

物性制御

NTT物性科学基礎研究所では、高品質薄膜結晶の作製技術や、高度な加工・測定・分析技術を蓄積・発展させ、これらの技術をベースとした新規材料の探索や新機能素子の実現、さらには物理的考察による学理の構築へ向けた研究に取り組んでいる。本特集では、近年創出された顕著な成果について紹介する。



NTTの新機能物質・材料創製研究

製研究の最前線

■ NTTにおける新機能物質・材料創製研究の概要

6

酸化物や窒化物をはじめとする無機材料に焦点を当て、二次元構造薄膜、原子層物質、さらには一次元的なナノワイヤに関する最新の研究の概要を紹介する。

■ 最高の強磁性転移温度を持つ新絶縁物質 Sr_3OsO_6 の創製

12

世界で初めて合成・発見された、電気を通さない物質（絶縁体）の中で、最高の温度（780℃以上）で磁石としての性質（強磁性）を示す新物質 Sr_3OsO_6 について紹介する。

■ 磁氣的純化されたエルビウム希薄添加酸化物結晶の作製と光物性 ——量子情報操作プラットフォームをめざして

16

Er（エルビウム）の母体結晶として優れた性質を持つ希土類酸化物のSi基板上への高品質エピタキシャル成長とドーピング、およびその光学的性質について紹介する。

■ 2次元伝導面を持つ高温超伝導体の基本物質のMBE成長と原子分解能観察

20

高温超伝導体をはじめとする複合酸化物の最高品質薄膜を実現する酸化物分子線エビタキシー技術と原子分解能を持つ顕微鏡観察、格子定数エンジニアリングについて紹介する。

■ 原子層物質のCVD成長技術

25

高品質グラフェン単結晶の大面积化、および結晶方位制御によるh-BN（六方晶窒化ホウ素）の高品質化技術について紹介する。

■ 新機能ワイドギャップ半導体材料の開拓

29

独自の手法によるc-BN薄膜の成長技術と、実際のパワーデバイス応用に不可欠なドーピングによるc-BN薄膜の電気伝導性制御について紹介する。

■ ウルツ鉱型GaPナノワイヤの結晶成長 ——太陽光による水素生成デバイスへ向けて

35

塩素によるエッチングとガリウム原料の繰り返し供給による手法で作製した積層欠陥のないウルツ鉱型GaPナノワイヤについて紹介する。

主役登場

平間 一行（NTT物性科学基礎研究所）

新機能材料研究が切り拓く新しい世界

40

NTTにおける新機能物質・材料創製研究の概要

NTT物性科学基礎研究所では、原子・分子レベルで物質の構造や配列を制御することにより新しい物質や機能を創造し、物質科学分野での学術貢献を行うとともに、情報通信技術変革の種を創出することをめざして、広範な物質を対象に研究を進めています。本特集では、その中から酸化物や窒化物をはじめとする無機材料に焦点を当て、厚さがマイクロメートル程度以下の薄膜、続いてナノメートル以下の原子層の厚みで機能を発現する二次元構造物質、さらには一次元的なナノワイヤに関する最新の研究成果を紹介します。

やまもと ひでき^{†1} ことう ひでき^{†2}

山本 秀樹 / 後藤 秀樹

NTT物性科学基礎研究所^{†1}
NTT物性科学基礎研究所 所長^{†2}

新機能物質・材料創製研究の重要性

新しい物質・材料の創製は、学理の構築を通じて自然科学の発展に貢献するとともに、応用面では、素子の高性能化や新機能素子の実現、ひいては素子の設計思想にブレークスルーをもたらし、社会に大きなインパクトを与えてきました。これは、酸化物超伝導物質の創製（1987年物理学賞）、フラーレン（炭素原子が60個集まったサッカーボール様の分子）の発見（1996年化学賞）、グラフェン（原子1層分の厚さの究極に薄い黒鉛）の作製（2010年物理学賞）、窒化物半導体を用いた青色発光ダイオードの実現（2014年物理学賞）へのノーベル賞授与に端的に示されています。実際、現代のエレクトロニクスを根底から支えるSi（シリコン）の集積回路に対し、微細化の限界（ムーアの法則の限界）の問題を克服するため、これまで使われてこなかった元素や新材料を用いるさまざまな提案や取り組みがありますし⁽¹⁾、SiやGaAs（ヒ化ガリウム）に比べ新しく開発された材料が、大容量高速通信に貢献している例として、超高速で動作するInP（リン化インジウム）を用いた光変調器⁽²⁾を挙げるこ

もできます。

さて、新しい機能を持つ物質の創製や、素子の作製をめざすことを考えましょう。欲しいものはこれまでに実現していない機能ですから、いずれにしても「挑戦」＝「基礎研究」からのスタートになりますが、大きく分けて2つのアプローチが考えられます。1番目は、全く新しい物質（化合物）を創製するアプローチ、2番目は、すでに知られている物質・材料の品質を磨くと同時に、それらをnm（1mmの100万分の1）のレベルで加工したり組み合わせたりするアプローチです。NTT物性科学基礎研究所では、自ら開発・蓄積してきた最先端の材料創製装置・技術を活用し、その両方のアプローチで物質・材料研究に取り組んできています。本特集では、そのような取り組みから生まれた最先端の研究結果を紹介します。なお、紙面の都合上、今回の特集では対象を無機材料に限定し、導電性高分子や生体材料などのソフトマテリアル（有機材料）に関する、2016年の特集記事⁽³⁾以降の進展に関しては、割愛させていただきます。

薄膜試料による物質・材料の創製

■薄膜試料

新しい物質の合成に挑戦と聞くと、ビーカーやフラスコの中で原料を反応させたり、さまざまな元素や化合物からなる原料粉を混ぜて炉の中で焼いたりといった光景を想像されるかもしれませんが、私たちが取り組んでいるのは、薄膜（はくまく）成長によるアプローチです。厳密な定義はありませんが、薄膜とは、厚さが0.1 nm（原子1層分の厚さ）から10 μm（1 μmは1 mmの1000分の1）くらいの薄い膜の形状をした試料のことです。また、専門外の方には必ずしも耳慣れない言葉かもしれませんが、薄膜試料を「成長」という言い方をします。これは、私たちがターゲットにしている薄膜試料が、基板と呼ばれる単結晶（原子が規則正しく並んで結晶化しているもの）の土台の上に、原子や分子を1層ずつ結晶成長させてつくる単結晶薄膜であるためです。

■薄膜成長手法

私たちは主に2つの手法を用いています。

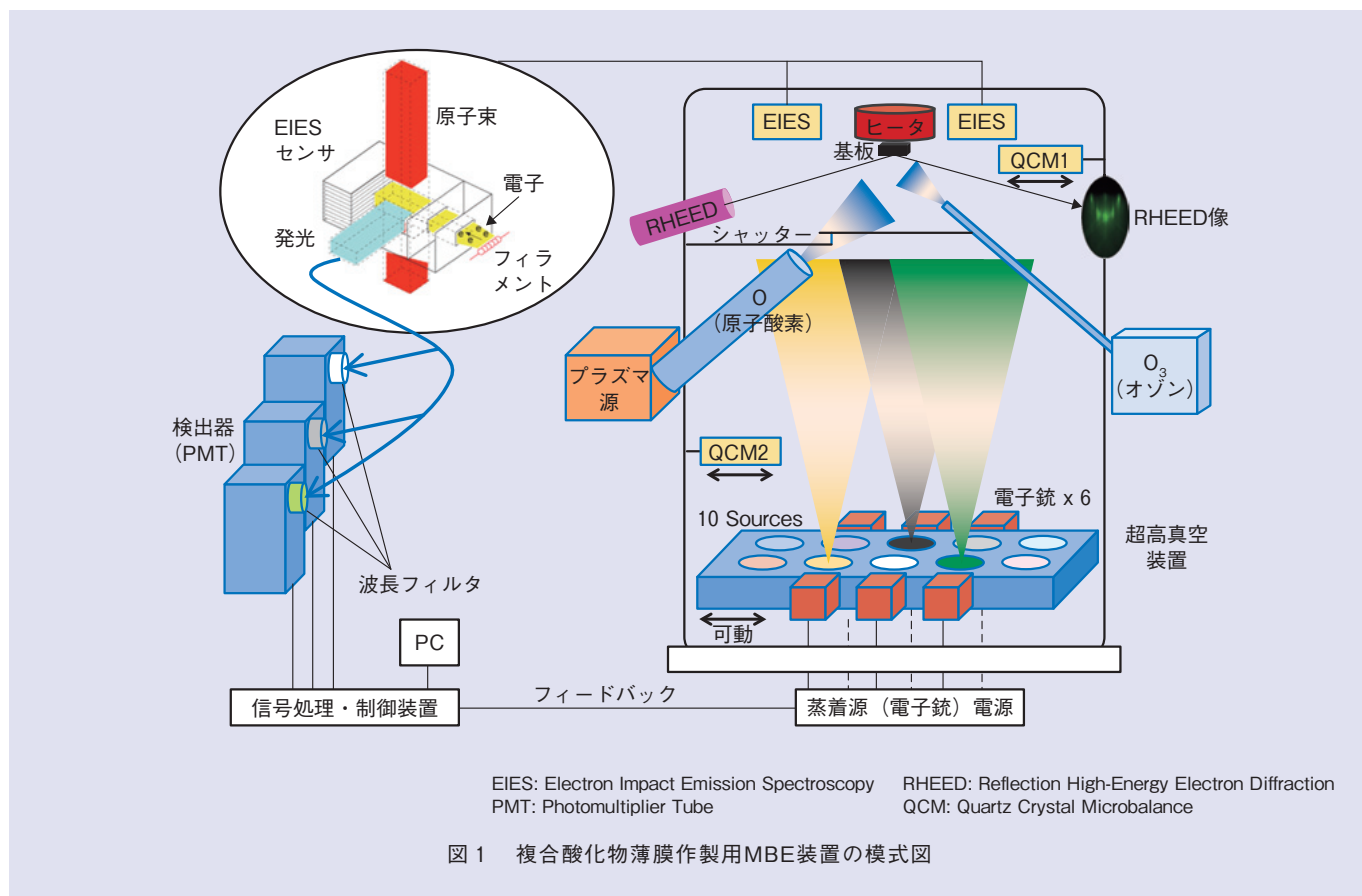
- ① MBE法：MBE（Molecular Beam Epitaxy：分子線エピタキ

シー) 法⁽⁴⁾(図1)では、極めて真空度が高い(常圧の10兆分の1程度)真空装置の中で、ねらった化合物の薄膜を構成する元素を、原子または分子の形で供給し、加熱した基板の上で反応させて薄膜を形成します。ここでエピタキシーとは、「何かの上に秩序を持って並ぶ・並べる」という意味

で、単結晶基板の上に、結晶の方向をそろえて薄膜を成長することから、この用語が使われています。

② MOVPE法: MOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy: 有機金属気相エピタキシー) 法(図2)では、薄膜を構成する元素を含む有機金属原料とアンモニアなどのガス原料を、窒素や水素

などのキャリアーガスとともに反応管中に流し、やはり加熱した単結晶基板上に薄膜を形成する手法です。この手法は、目的によっては原料に有機金属を用いない場合もあり、より広くはCVD (Chemical Vapor Deposition: 化学気相成長) 法というカテゴリーに分類されます。



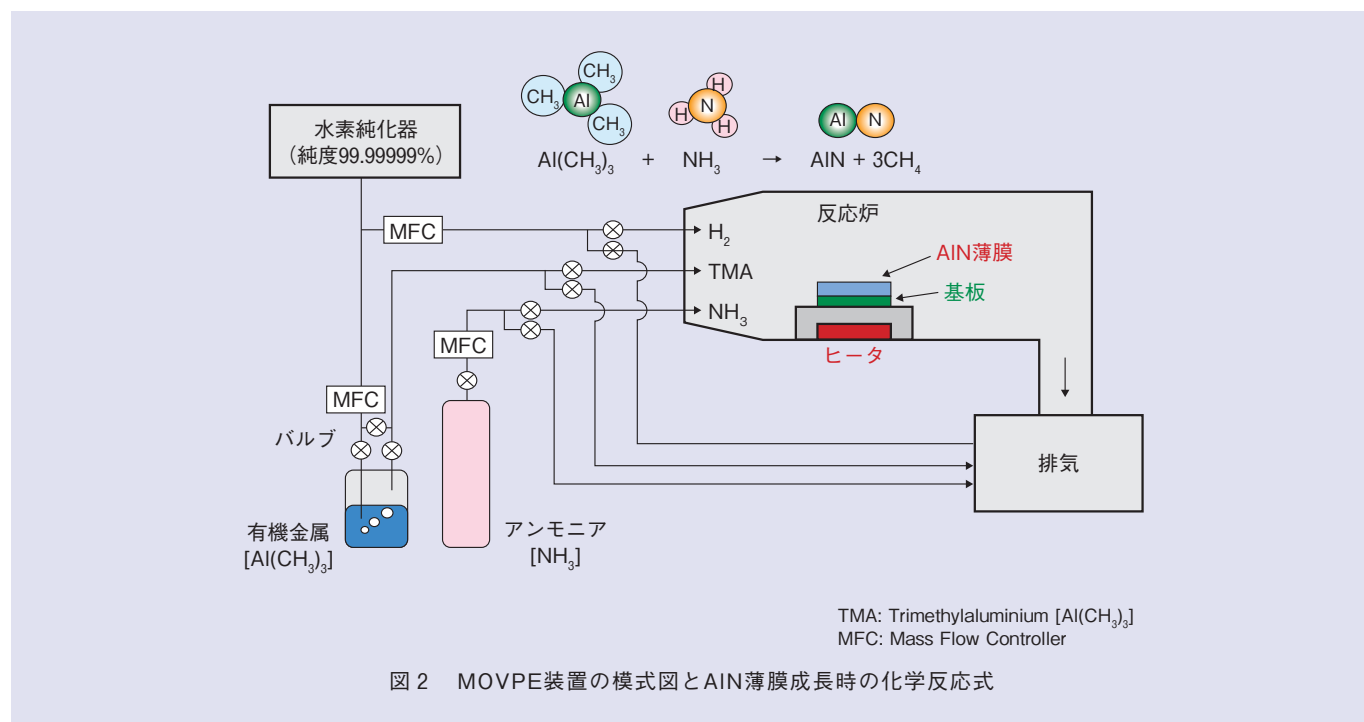


図2 MOVPE装置の模式図とAlN薄膜成長時の化学反応式

MBE法も、CVD法も、すでに知られている物質の高品質薄膜や、異なる既知の物質の薄膜どうしを積み重ねた接合・超格子を作製する目的で開発された手法ですが、前者のほうがより熱力学的な平衡条件から離れた条件下での薄膜成長手法であるため、自然界に存在しない全く新しい物質を探索するには向いています。実際、本特集記事に登場する新物質 Sr_3OsO_6 （酸化オスミウムストロンチウム）や、通常は高圧下のみで合成可能な IL-CaCuO_2 （無限層構造酸化銅カルシウム）関連

物質と c-BN （立方晶窒化ホウ素）、それから Er （エルビウム）を希薄ドーピングした酸化物の薄膜はMBE法でつくられています。

一方、CVD法、MOVPE法は、より熱力学的な平衡条件に近い条件で成膜することができるため、結晶中の転位密度を低くできる（高品質化しやすい）メリットがあり、 GaN （窒化ガリウム）などの窒化物半導体ベースの発光素子やトランジスタの作製等に広く用いられています。本特集記事中の、原子層厚で新しい物性を発現するグラ

フェンや h-BN （六方晶窒化ホウ素）などの層状物質と、 GaP （リン化ガリウム）のナノワイヤは、こちらの手法で作製されたものです。

MBE法を用いた新物質創製

NTT物性科学基礎研究所は、MBE法を用いて全く新しい化合物の創製に取り組んでいる世界でも極めて先進的な研究機関です。MBE法自体は、1960年代後半に考案された薄膜成長手法で、 GaAs などの代表的な半導体の薄膜成長や素子構造の作製に用いら

れてきました。

では、私たちのMBE装置のどのような特長が新物質創製を可能にしているのか、この点について説明します。図1は、典型的なMBE装置ではなく、金属元素を2種類以上含む複合酸化物の薄膜を成長するための独自のMBE装置の模式図です。この装置の最大の特長は、金属元素の供給量をリアルタイムでモニタし、供給源にフィードバックをかけることで、それぞれの金属元素を長時間安定に供給できる点にあります。供給量のモニタにはEIES (Electron Impact Emission Spectroscopy: 電子衝撃発光分光法) という手法を用います。具体的には、加熱されて蒸着源から飛び出した原子の束に電子を衝突させ、その際に原子束から出てくる光(発光)の波長と明るさを検出します。微量の原子からの発光ですので、人間の目では見ることのできない弱い光信号となりますが、元素によって発光波長が異なる光をうまく分離・増幅して電気信号に変換することで、元素ごとにどれくらいの原子が供給されているかの情報を得ることができます。ここで、発光波長が元素によって異なることは、理科で習った炎色反応を思い出すと良いでしょう。炎色反応の場合は、電子を衝突させる代わりに物質を炎の中で熱します

が、その際、例えばBa(バリウム)は黄緑色、Sr(ストロンチウム)は紅色といった具合に、元素ごとに異なる色が観察されます。打ち上げ花火で鮮やかな色合いが見られるのは、玉に仕込む元素の配合をさまざまに変えて、この炎色反応を利用しているためです。

私たちの酸化物用MBE装置のもう1つの特徴は、真空中で酸化が行えるよう、通常は O_2 分子の形で存在する酸素ガスを、反応性の高いO原子や O_3 (オゾン)ガスの形で供給できる点です。この酸素ガスの部分を、N(窒素)原子に変えることで、c-BNのような窒化物の薄膜成長を行うこともできます⁽⁵⁾。さらに、現在では標準的に装備されている装置ですが、RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction: 反射高速電子回折) という、電子線を基板や薄膜の表面すれすれに入射して構造を調べる装置を使って、薄膜をつくりながらリアルタイムに、どんな結晶構造や結晶性を持つ物質ができていくかを調べることができることもMBE法の特長です(RHEEDと原理は異なりますが、NTTではMOVPE法のほうでもリアルタイムに観察できる仕組みにしています)。このような特長を活かし、供給する元素の比、基板の種類、基板上での反応温度、酸化

力の強さといったパラメータを系統的に変化させて成膜することで、MBE法を用いた新物質探索が可能となり、実際、新しい超伝導体^{(6),(7)}や磁性体⁽⁸⁾を創製してきています。

薄膜試料を用いた新物質の探索やその物理・物性の研究が可能になった背景には、分析・評価技術の著しい進歩もあります。MBE法で作製する薄膜試料は、原子や分子の層にして、せいぜい数100層積み重なった程度の厚みしかありませんから、一昔前までは、新しい物質を作製しても、その物性や特性を調べることは困難でした。しかし現在では、原子1つひとつを観測できる走査型の透過電子顕微鏡や、1mmの3000分の1程度の厚さの試料の磁石としての性質を調べることができる超高感度な磁気特性測定装置などが開発され、本特集記事に代表される研究に、日々活用されています。薄膜を用いた物質探索を、従来のバルク試料の場合と比較すると、使用する原料の量が少なく(省資源)、高いスループット(高速)でスクリーニングでき、さらに次に述べる素子化と相性が良いというメリットがあります。

物質の機能材料化・素子化

さまざまな物質が示す多様な物性を活用して、何らかの機能を持つ素子を

つくるためには、単にある物質が存在したり、その薄膜が作製できたりするだけでは不十分です。ここでは、典型的な半導体素子として、以前に本誌に紹介させていただいた、世界最短波長で発光するAlN（窒化アルミニウム）を用いたLED⁹⁾を例にとり、物質を機能材料化・素子化するプロセスについて説明します（図3）。用いた成膜手法は、MOVPE法です。AlNという電気を（ほとんど）流さない化合物（絶縁体）の存在は古くから知られており、物質自体は新物質ではありませんが、この物質を、機能を発現する半導体材料として使えるようにするには、新物質探索に匹敵する研究の積み重ねが必要です。

まず、フェーズIとしてAlN自体の結晶品質を向上させる必要があります。これは、一般に、結晶の領域が小さくその方向がそろっていない多結晶状態や、結晶の周期的構造の一部に乱れが生じる結晶欠陥などがあると、その物質が結晶として持つ本来の機能を発揮できないためです。

次にフェーズIIとしてドーピング制御が必要です。LEDを作製するには、あるいはもっと一般に半導体の特性を活かすには、母体の半導体（ここではAlN）に意図的に不純物元素を導入して、プラスの電荷を持つ正孔とマイナ

スの電荷を持つ電子が別々の領域（p型領域とn型領域）に存在する状況をつくる必要があります。したがって、フェーズIIでは、結晶品質を大きく劣化させることなくp型もしくはn型として機能する半導体層をつくるために、どの元素をどのように導入するかを集中的に研究することになります。

最後にフェーズIIIとして、図3に示すような積層構造をいかに上手につくるかという研究が必要になります。例えば、積層された各層の厚みをどれ

くらいにすれば良いか、超格子層と書かれた部分の積層の繰り返しを何周期にすれば良いかといった点を最適化していく必要があります。そのうえで、リソグラフィーやエッチングなどを用いて素子構造に加工し、ようやく機能を発現する素子となります。

さらに新しい物性を発現する 材料の創製に向けて

以上のことから、材料研究が多大な労力と時間を要し、さまざまな課題に

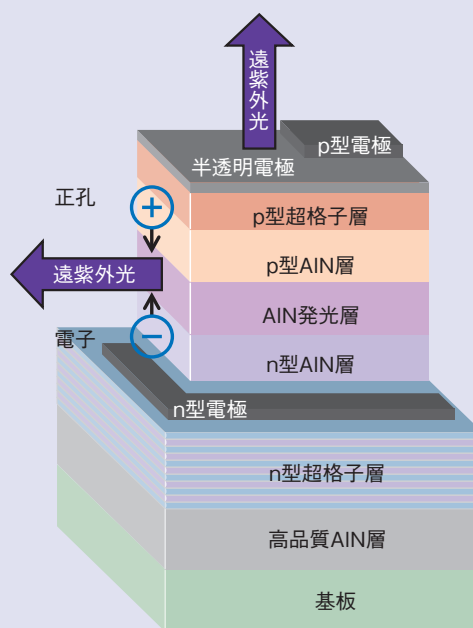


図3 AIN発光ダイオード（LED）の素子構造

長期的に取り組む必要がある、「継続は力なり」タイプの研究⁽¹⁰⁾であることが理解いただけたかと思います。特にフェーズゼロに相当する、世の中に存在しない物質で魅力的な性質を持つ化合物を創製する研究は、スタンフォード大学のビーズレー名誉教授の言葉を借りれば、「聖杯 (Holy Grail)」を探し求める営みといえ、現場も、研究リソースを準備する側も大変です。しかしながら、材料研究は、正しい方法論でアプローチしていれば、常に「あっと驚く」何かを創出するポテンシャルを持つ夢の大きな研究でもあります。例えば、仮に室温で超伝導性(電気抵抗がゼロになる)を示す実用的な材料を見つけることができれば、全くロスのない直流給電の実現や、チップ内・チップ間配線のロスレス化などの破壊的イノベーション⁽¹¹⁾につながることでしょう。

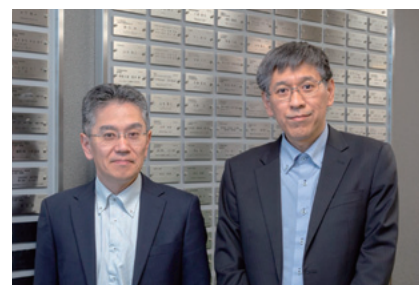
材料研究は、①実験を行って個々の物質を合成・測定したうえで、②理論や③数値計算に立脚した研究と協働して、その物質の分子構造、結晶構造、電子構造などを決定し、それから機能を発現する材料や素子をつくるという手順で進められてきました。これに対し、近年は第4の材料科学とも呼ばれるマテリアルズ・インフォマティクス(MI)の手法を用い、欲しい機能から

逆に物質を予測するというアプローチもさかんになってきました。MIでは、膨大なデータベースと機械学習の手法を用い、ある機能を持つ物質の化学式や構造を予測します。MIの真の実力と可能性を見極めるには、今後の研究の進展を待たなければなりません⁽¹²⁾、物質・材料の薄膜合成技術という私たちの強みに、MIという新しいアプローチも加えて、物質・材料研究をさらに推進していきたいと考えています。

■参考文献

- (1) 長谷川：“ナノエレクトロニクスと表面科学,” 表面科学, Vol.29, No.2, p.63, 2008.
- (2) 長谷・脇田・小木曾・山崎・井田・野坂：“超100 Gbaud光伝送を可能とする超高速光フロントエンドデバイス技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.31, No.3, pp.27-31, 2019.
- (3) 特集：“バイオ・ソフトマテリアル研究の最前線,” NTT技術ジャーナル, Vol.28, No.6, pp.10-39, 2016.
- (4) H. Yamamoto, Y. Krockenberger, and M. Naito: “Augmented methods for growth and development of novel multi-cation oxides,” Proc. of SPIE, Vol.8987, 89870V, pp.1-11, 2014.
- (5) 平間・谷保・山本・熊倉：“イオンビームアシストMBE法による立方晶BN (c-BN) 薄膜のヘテロエピタキシャル成長,” 応用物理, Vol.85, No.4, pp.306-310, 2016.
- (6) H. Yamamoto, Y. Krockenberger, and M. Naito: “Epitaxial Growth of Superconducting Oxides,” Epitaxial Growth of Complex Metal Oxides, pp.95-127, Woodhead Publishing, Cambridge, 2015.
- (7) 内藤・山本：“高温超伝導ルネサンスノンドープ超伝導体の発見と新しい電子相図,” 日本物理学会誌, Vol.73, No.4, pp.204-213, 2018.
- (8) Y. K. Wakabayashi, Y. Krockenberger, N. Tsujimoto, T. Boykin, S. Tsuneyuki, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto: “Ferromagnetism above 1000 K in a highly cation-ordered double-perovskite insulator Sr_2OsO_6 ,” Nat. Commun., Vol.10, No.535, pp.1-8, 2019.

- (9) 谷保・嘉数：“波長210 nm遠紫外発光ダイオードの高効率化,” NTT技術ジャーナル, Vol.22, No.6, pp.10-13, 2010.
- (10) 横浜：“材料基礎研究への取り組み,” NTT技術ジャーナル, Vol.22, No.6, pp.8-9, 2010.
- (11) クリステンセン：“イノベーションのジレンマ,” 翔泳社, 2000.
- (12) 田中・世古：“マテリアルズ・インフォマティクスの現状と将来展望,” セラミックス, Vol.50, No.7, pp.517-522, 2015.



(左から) 後藤 秀樹/ 山本 秀樹

物質・材料研究には、技術の開拓やノウハウ・知見の蓄積に、地道で継続的な努力を必要としますが、その分、創出された成果には迫力があります。最終的な目標は、NTT研究所の理念の後半の「実用化により世に恵を具体的に提供する」ことですが、まずは前半の「知の泉を汲んで研究」のレベルで1つでも多くの「世界初」「世界一」をお届けできるよう、しっかり取り組みたいと思います。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
機能物質科学研究部
TEL 046-240-3360
FAX 046-270-2362
E-mail hideki.yamamoto.np@hco.ntt.co.jp

最高の強磁性転移温度を持つ 新絶縁物質 Sr_3OsO_6 の創製

NTT物性科学基礎研究所では長年にわたり開発・蓄積してきた独自の酸化物合成技術によって、電気を通さない物質（絶縁体）の中で、最高の温度（780℃以上）で磁石としての性質（強磁性）を示す新物質 Sr_3OsO_6 〔Sr（ストロンチウム）、Os（オスミウム）、O（酸素）からなる物質〕を世界で初めて合成・発見しました。これは、絶縁体の強磁性転移温度（キュリー温度）を88年ぶりに更新する成果であり、室温以上の高温で安定に動作する磁気素子への応用が期待されます。

わかばやし ゆうき

若林 勇希

Yoshiharu Krockenberger

たにやす よしたか

やまもと ひでき

谷保 芳孝 / 山本 秀樹

NTT物性科学基礎研究所

強磁性絶縁体

物質の原子が持つ磁化が整列し、物質全体として大きな磁化を持ち磁石として振る舞う性質を強磁性と呼びます（図1）。ここで、図中の各矢印が原子の磁化を表しています。また、磁石には電気を通すものと通さないものがあり、後者は強磁性絶縁体と呼ばれます。強磁性絶縁体には、人類が最初に発見した磁石で、方位磁針として使われた磁鉄鉱などがあります。それらは現在でも、永久磁石や高周波用素子として、スマートフォン、自動車、PCといったありとあらゆるものに使用され、テクノロジーの発展を根底から支えています。近年では、電子の持つ磁気的な性質と電気的な性質を同時に活用して素子的高速動作や低消費電力動作を実現するスピントロニクス素子の研究がさ

かんになり、この素子の材料としても強磁性絶縁体が有望視されています。

近年の素子の電子化の潮流とあいまって、実用素子への要求性能は高まる一方であり、動作温度もその例外ではありません。車載用素子や、火災現場での災害用ロボット等を思い浮かべていただくと、室温にとどまらずより高温での安定動作が求められることが、理解いただけるでしょう。しかしながら、磁気素子の高温での安定動作の可否を決める主要な因子であるキュリー温度（その温度以上では強磁性が失われる温度）は、1930年代のフェライト磁石^{*1}開発以降、90年近く更新されておらず、高いキュリー温度を持つ次世代の強磁性絶縁体の実現と、その探索指針の構築が待たれています。

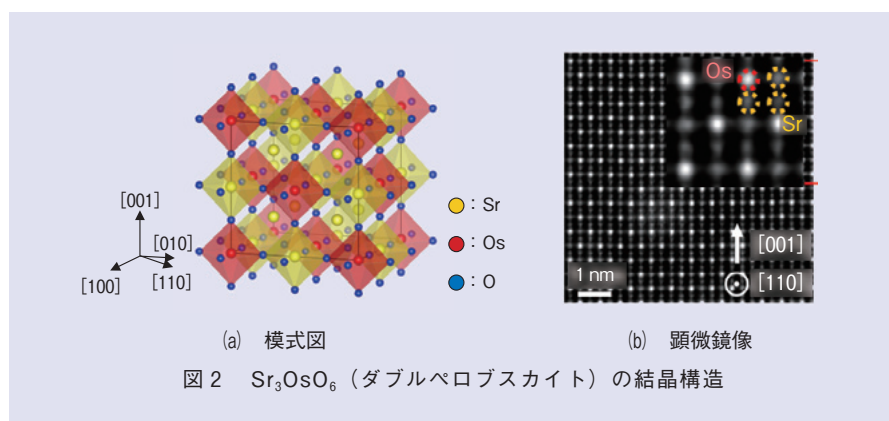
新物質 Sr_3OsO_6 の単結晶薄膜合成

原子が格子を組んで規則正しく配列している固体を結晶と呼びます。このような結晶化した試料のうち、どの部分においても原子配列が同じで、構造の乱れの少ないものは単結晶と呼ばれます。次に試料の厚みが原子層厚からおおむね数十 μm （1 μm は1mmの1000分の1）と薄いものは薄膜（はくまく）と呼ばれます。単結晶薄膜は、それを支える土台となる単結晶（基板と呼ばれます）の上に作製されます。素子化へ向けた微細加工を行うためには、物質をナノメートル単位の厚さを持った単結晶薄膜の形で合成することが必要不可欠です。本研究では、ダブルペロプスカイトと呼ばれる結晶構造を持つ Sr_3OsO_6 の単結晶薄膜を、分子線エピタキシー法によって創製しました⁽¹⁾。 Sr_3OsO_6 の結晶構造の模式図を図2(a)に示します。黄丸、赤丸、青丸はそれぞれSr（ストロンチウム）、Os（オスミウム）、O（酸素）原子を示しています。この物質は、本研究以前に



図1 強磁性と常磁性の模式図

*1 フェライト磁石：1930年代に日本で開発、工業化された現在世界でもっとも大量に使用されている強磁性絶縁体です。酸化鉄を主成分にコバルトやニッケル、マンガンなどが混合されているものが多くあります。



は知られていなかった全くの新物質です。結晶中での原子の代表的な配列の仕方には名前が付けられており、「結晶構造」と呼ばれます。「ダブルペロブスカイト構造」はその結晶構造を表す名称の1つで、ペロブスカイト構造の仲間です。ペロブスカイト構造は、陽イオンを2つ以上含む酸化物に広く見られる結晶構造で、この構造を持つヨウ化物や塩化物が、次世代太陽電池としてさかんに研究されています⁽²⁾。高品質な薄膜を合成するには、合成時に Sr_3OsO_6 を構成するそれぞれの元素の供給量を精密に制御することが重要になります。従来、3000℃以上の融点を持つOs原子の供給量の精密制御は困難とされていましたが、供給する原子の量を原子からの発光を利用してモニタし、高出力電子線蒸着源の出力

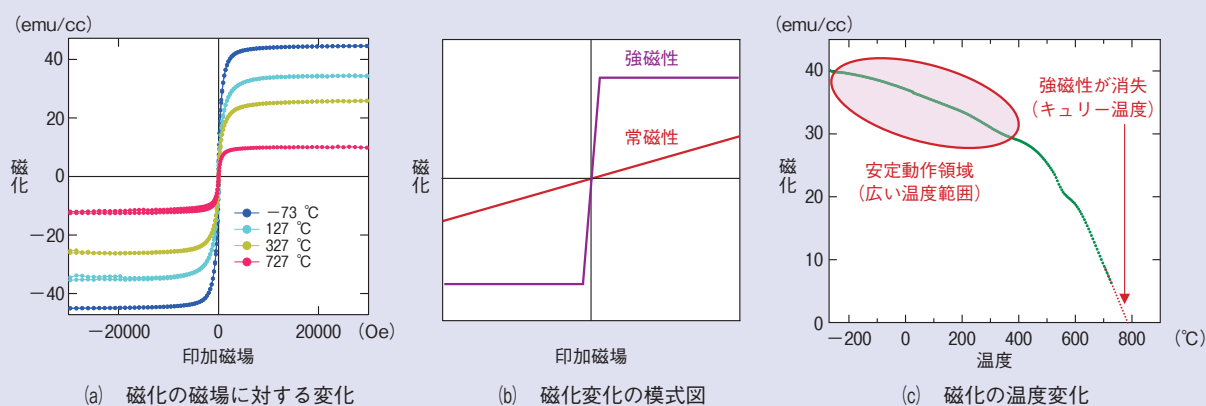
にリアルタイムでフィードバックすることにより、Sr原子とともにOs原子の供給量の精密制御に成功しました。この技術の確立により、原子レベルでSrとOsが規則的に配列した超高品質な Sr_3OsO_6 薄膜の合成が可能となりました。合成した Sr_3OsO_6 の、原子レベルに拡大された顕微鏡像(透過型走査電子顕微鏡像)を図2(b)に示します。[110]結晶方向から見た像で、原子レベルでSrとOsが図2(a)のとおり規則的に配列していることが分かります。

超高温(780℃以上)まで保持される Sr_3OsO_6 の強磁性

前述のように、私たちは、長年にわたり開発・蓄積してきた独自の酸化物合成技術によって、最高のキュリー温度を持つ新物質 Sr_3OsO_6 を世界に先駆

けて合成・発見しました(図2)。試料を作製した後、まず電気的な特性を調べたところ、電気抵抗率は、室温で75Ωcmと、金属であるAu(金)やCu(銅)などに比べて約 10^9 倍(10億倍)大きく、温度の低下とともに指数関数的に増加する、絶縁体として特徴的な振る舞いを示しました。また、分光学的な測定によって、この物質が、約2.65 eVのバンドギャップを持つことも判明しました。これらのことから、 Sr_3OsO_6 が絶縁体であることが分かりました。

次に、磁気的性質を調べました。印加した磁場に対する Sr_3OsO_6 の磁化の変化を図3(a)に示します。727℃という非常に高い温度でも磁化を示し、図3(b)に示すような強磁性での磁化の振る舞いを有することが分かります。 Sr_3OsO_6 の磁化の温度変化を図3(c)に示します。印加磁場は2000 Oeです。400℃ほどの高温まで磁化の変化が緩やかなことが分かります。このことから、温度変化に対して動作特性の変化が少なく、高温でも安定に動作する高機能磁気素子への応用が期待されます。さらに、強磁性が消失するキュリー温度は780℃を超え、これは、絶縁体のキュリー温度を88年ぶりに100℃以上更新するものであり、長年の磁性材

図3 Sr_3OsO_6 の磁気的性質

料研究の歴史を塗り替える成果といえます。

実験に加え、東京大学の常行真司教授らの研究グループと共同で行った密度汎関数理論^{*2}に基づく計算により、 Sr_3OsO_6 の強磁性絶縁状態が、5d遷移元素であるOsの大きなスピン軌道相互作用に由来することが明らかになりました。スピン軌道相互作用とは、原子核の周りの電子の公転によって生じる軌道磁気モーメントと、電子の自転によって生じるスピン磁気モーメントの間の相互作用（図4）のことで、周

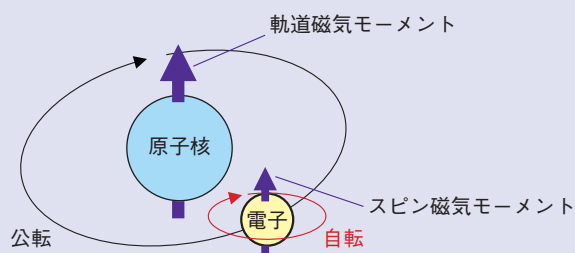
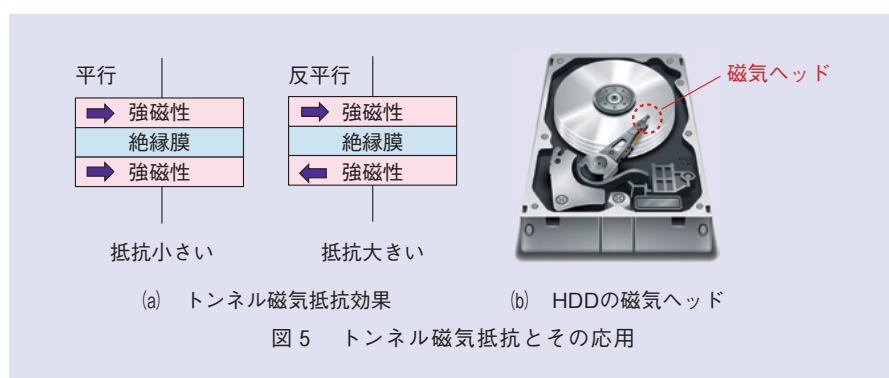


図4 スピン軌道相互作用

期表の下の方に位置する元素の方が大きなスピン軌道相互作用を持ちます。周期表の上の方に位置するFe（鉄）やCo（コバルト）を主成分とするフェライト磁石や、FeやCoそのものからつくられた磁石ではスピン軌道相互作用の影響は小さいですが、

Sr_3OsO_6 では、周期表の下の方に位置するOsの大きなスピン軌道相互作用が重要な役割を果たしています。これは、高温での強磁性の発現機構に新たな知見を呈示するもので、学理の構築へ貢献するとともに、今後、スピン軌道相互作用が大きな元素を活用した

*2 密度汎関数理論：電子の電荷密度 $n(r)$ が空間座標 r の関数として正しく与えられれば、物質中の電子の持つエネルギーが $n(r)$ から計算できるという理論のことです。



新物質開発へとつながることが期待されます。

本物質は新物質であるだけでなく、素子化に向けた微細加工と相性の良い単結晶薄膜の形で合成されました。このため、室温以上の高温で安定に動作する磁気ランダムアクセスメモリや磁気センサといった、高機能磁気素子の開発につながるものと期待されます。

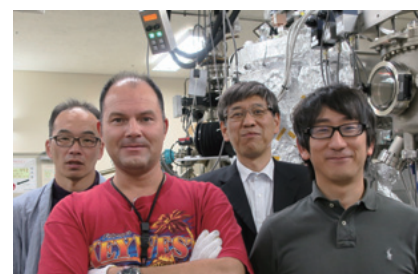
今後の展開

放射光施設^{*3}などの利用で可能となる先進的な分光手法を用いて、新物

質 Sr_3OsO_6 の電子状態に関するさらに詳細な知見を得ることで、強磁性体の学理の構築への貢献をめざします。また、高温で安定に動作する高機能磁気素子の実現に向けて、 Sr_3OsO_6 を材料に用いた素子を作製し、トンネル磁気抵抗効果の実証などに取り組んでいきます。トンネル磁気抵抗は、2つの強磁性体に挟まれた絶縁膜のトンネル抵抗が、強磁性体層の磁化の向きの平行、反平行により変化する現象です（図5 (a)）。トンネル磁気抵抗効果はハードディスクドライブ（HDD）の磁気ヘッド（図5 (b)）、磁気ランダムアクセスメモリ、磁気センサといった磁気素子へ幅広く応用されています。そのため、 Sr_3OsO_6 を用いたトンネル磁気抵抗効果を実証できれば、高温で安定に動作する高機能磁気素子実現に向けた大きな一歩となります。

参考文献

- (1) Y. K. Wakabayashi, Y. Krockenberger, N. Tsujimoto, T. Boykin, S. Tsuneyuki, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto: "Ferromagnetism above 1000 K in a highly cation-ordered double-perovskite insulator Sr_3OsO_6 ," Nat. commun., Vol.10, No.535, 2019.
- (2) M. Liu, M. B. Johnston, and H. J. Snaith: "Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition," Nature, Vol.501, pp.395-398, 2013.



（後列左から）谷保 芳孝/ 山本 秀樹
（前列左から）Yoshiharu Krockenberger/
若林 勇希

高品質な酸化物合成技術を活かして、世の中を変えるような新しい物質を合成したいという夢を持って日々研究に取り組んでいます。技術を極めた先に大きな発見があると信じて、着実に前進していきたいと思っています。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
機能物質科学研究部
TEL 046-240-3360
FAX 046-270-2362
E-mail yuuki.wakabayashi.we@hco.ntt.co.jp

*3 放射光施設：リング状の超高真空の通路に極めて高速に加速された電子を走らせ、外部磁場によりその軌道を曲げた際に放射される紫外線、X線などの光（シンクロトロン放射光）を利用できる実験施設です。さまざまな波長を持つ光が極めて高い強度で得られるため、目的に応じた波長の光を選択的に取り出し、高感度な分光測定による詳細な物性評価や分析が可能です。

磁氣的純化されたエルビウム希薄添加酸化物結晶の作製と光物性 ——量子情報操作プラットフォームをめざして

希土類元素であるEr（エルビウム）は通信波長帯光子による量子情報操作のプラットフォームとして期待されています。しかしEr添加母体結晶の高品質エピタキシャル成長が困難なことや量子操作の性能を決定する量子情報の保持時間が理論的に予測されるものよりはるかに短いことなどが問題でした。本稿ではErの母体結晶として相性の良い希土類酸化物、特に量子情報保持時間の短寿命化の主要因である核スピンを除去（磁氣的純化）した母体酸化物結晶（CeO₂：酸化セリウム）に着目し、その薄膜のSi基板上への高品質エピタキシャル成長と光学的性質について紹介します。

たわら たけひこ いなば ともひろ
俵 毅彦 / 稲葉 智宏

NTT物性科学基礎研究所

Er希薄添加酸化物とその量子状態 操作プラットフォームとしての応用

均一な固体結晶中に添加された希土類原子は、母体材料の違いなどの外部環境や温度に左右されない確定的、離散的かつ揺らぎの少ない理想的なエネルギー量子準位を形成することが古くから知られています。これは希土類原子特有の電子配位、すなわち外界から電氣的に遮蔽された4f電子軌道を有するためです。近年このような優れた希土類原子の量子準位を、量子情報通信における量子情報操作デバイスのプラットフォーム、特に光量子メモリ等へ応用する研究がさかに行われています。ここで量子情報操作とは、量子情報の伝達を担う光子をいったん物質中の電子に転写し、その電子状態に何らかの演算を加え、再びその情報を持つ光子として放出するものです。このとき情報が転写される物質の電子状態（量子準位）は、エネルギー的な揺らぎが小さい（量子情報を失うまでの時間が長い）必要があります。この要請を満たす物質として希土類原子は優れているのです。特に希土類元素の1つであるEr（エルビウム）は唯一通信波長帯光（波長1.55 μm ）との相互作

用が可能です。そのため既存の光ファイバ網を用いた量子光通信を考えた場合、量子情報操作デバイスのプラットフォームとしてEr添加結晶は非常に有望であるといえます⁽¹⁾。

では具体的にどのようなEr添加結晶が求められるのでしょうか。まずErは“希薄”に添加される必要があります。その理由は添加されたEr原子どうしの距離が近いとEr原子間でエネルギー、つまり量子情報のやり取りをしてしまい、瞬時に情報を失ってしまうからです⁽²⁾。そのため十分にEr原子間の距離を離す（希薄化する）必要があります。またErを添加する母体結晶は、Erの量子準位の形成、特に量子準位の揺らぎの程度に強く影響を与えます。例えば母体結晶を構成する各原子が核スピンを持つ場合、大きな磁氣的揺らぎが発生し、量子準位の揺らぎは大きくなります。これも量子情報を短時間で失ってしまう要因です。さらに効率的な量子情報操作をするためには、母体結晶に光を強く閉じ込めErとの相互作用を高める必要があります。これにはSi（シリコン）フォトリソで培われてきた光回路（光共振器、導波路、合波・分波デバイス等）作製技術が有用です。そのため母体結

晶はSi基板上に薄膜として形成されることが望まれます。

このような磁氣的揺らぎが少なく、かつSi基板上に薄膜として結晶成長可能な材料候補として希土類酸化物薄膜があります。希土類酸化物の結晶構造はSiと同じ立方晶構造をとり、しかもその格子定数がSiのちょうど2倍に一致します。これはSi基板上にエピタキシャルに成長できる可能性があることを示しています。さらに数多くある希土類原子の中でもCe（セリウム）は、唯一核スピンを持ちません（図1）。すなわちCeは磁氣的揺らぎがなくErの量子状態に影響を与えない優れた特徴を持ちます。ちなみに酸素も核スピンを持つ同位体の天然存在比は非常に小さいため、希土類酸化化合物であるCeO₂（酸化セリウム）がSi基板上でのEr添加母体結晶としてもっとも有望であるといえます。しかしCeO₂は研磨剤や還元触媒などとして研究されてきた物質であるものの⁽³⁾、これまで量子情報操作プラットフォームをめざしたErの添加母体結晶として、かつSi基板上のエピタキシャル結晶薄膜としての研究例はありませんでした。

Er希薄添加CeO₂薄膜の結晶成長

Er希薄添加CeO₂はMBE (Molecular Beam Epitaxy: 分子線エピタキシー) 法を用いて、表面が清浄化されたSi (111) 基板上に640 °Cで30 nmの膜厚で成長しました⁽⁴⁾。また希土類原料は高純度 (>99.99%) のErおよびCe金属を用い、O* (酸素原子ラジカル) で酸化することにより希土類酸化膜を成膜しました。添加母体となるCeO₂の高品質結晶を得るためには、形成された薄膜が化学量論的組成 (ストイキオメトリ, 今の場合Ce : O = 1 : 2) を持つように、CeとO*の供給比を調節する必要があります。そのため一定のO*供給量の下、Ceの供給量を変化させ結晶品質を調べました。結晶成長後のRHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction: 反射高速電子回折) を図2に示します。Ce供給量が少なく酸化力が過剰な場合 (図2 (a), (b)) ではアモルファス状態を示すハローパターンを、またCe供給量が多く酸化力不足となっている場合 (図2 (d), (e)) では多結晶状態を示すリングパターンが現れています。一方で図2 (c) では表面が平坦かつ単結晶成長していることを示すストリークパターンが観察され、このCe供給量でストイキオメトリに近い薄膜が形成されていることが分かります。またこのCe/O*供給比を一定に保ったまま、それぞれの供給量を増やした場合 (図2 (f)) においても、ストリークパターンが維持されることも分かりました。このため、Erを希薄添加する際に、母体CeO₂結晶の結晶成長速度を変えることによって、結晶品質は一定に保ったまま、Er濃度を変化させることができます。

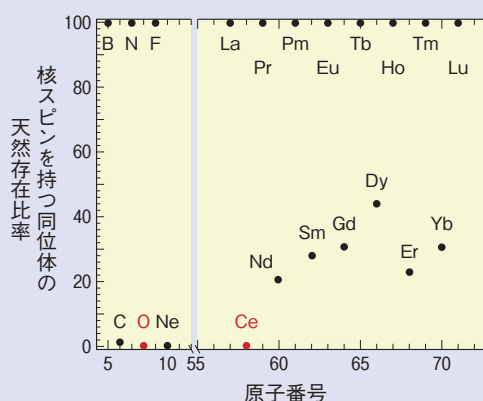


図1 各原子の核スピンを持つ同位体の天然存在比率

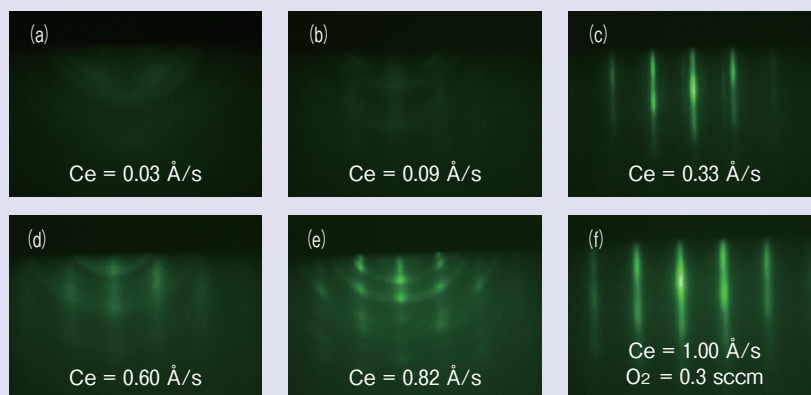
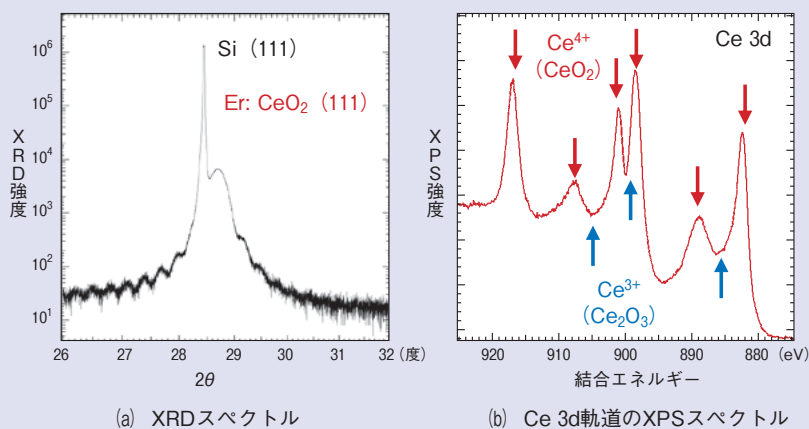


図2 結晶成長後のRHEED像

CeO₂には私たちがターゲットとしている立方晶fluorite構造CeO₂だけでなく、立方晶bixbyite構造Ce₂O₃や六方晶構造などの複数の結晶構造が存在します。上記のRHEEDではこの結晶構造の違いまでは判別できないため、X線回折法 (XRD) とX線光電子分光法 (XPS) を用いて、結晶構造をさらに詳細に調べました。図3 (a) のXRDスペクトルから見積もられる結晶格子間隔は3.11 Å (オングストローム)*となり、これは立方晶CeO₂に一致し、六方晶構造は存在しないことを示しています。さらに結晶が均一かつ原子レベルで平坦に成長できている際

に観測される周期的なサテライトピークの間隔から、成長した酸化セリウムの膜厚が26.4 nmであることが分かり、これは想定した成長膜厚とほぼ一致します。また図3 (b) のCe 3d軌道のXPSスペクトルから見積もられるCe原子の荷電状態はすべてfluorite構造CeO₂の場合のCe⁴⁺であり、bixbyite構造Ce₂O₃の場合のCe³⁺は存在しないことを示しています。以上のことから成長したCeO₂薄膜は所望の立方晶fluorite構造のCeO₂であることが実証されました。

* オングストローム: 原子, 分子の大きさや, 可視光の波長などを表わす長さの単位。1 Å = 10⁻¹⁰ m

図3 CeO₂の構造特性

成長したEr添加CeO₂の断面TEM (Transmission Electron Microscopy: 透過型電子顕微鏡) 像を図4に示します。この結果から、表面が非常に平坦であることに加え、結晶欠陥や異なる結晶構造相のない非常に結晶品質の高いEr添加CeO₂薄膜結晶が得られていることが分かります。このように高品質Er添加CeO₂の薄膜結晶のSi基板上へのエピタキシャル成長が初めて実現されました。

Er添加CeO₂薄膜結晶の光学特性

高品質Er添加CeO₂薄膜結晶の光学特性について調べました。PL (Photoluminescence: フォトルミネッセンス) の励起波長依存性のカラープロットを図5に示します。PL測定は試料へレーザ照射することでエネルギーを与え試料中の電子を高いエネルギー (励起) 状態に移させ、この励起電子が低いエネルギー状態に戻るときに発する光を観測するものです。ここでは添加Er濃度は4% (図5(a)) から1% (図5(c)) まで変化させ、温度4Kで測定しています。いずれのEr添加濃度に

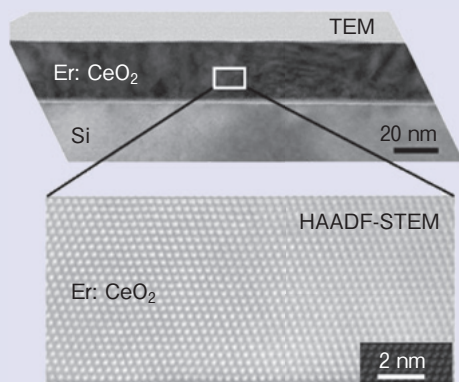
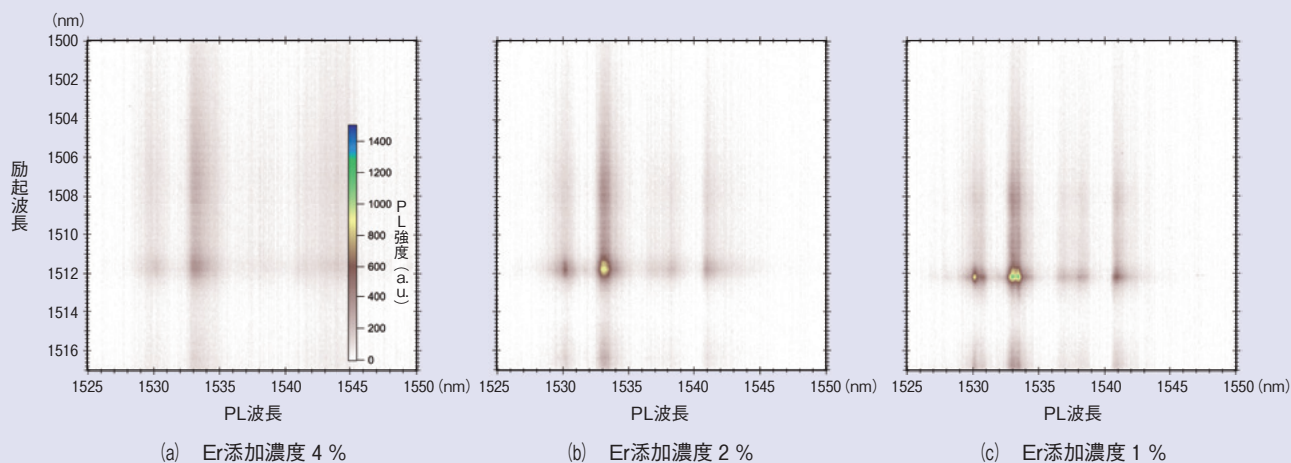
図4 成長したEr添加CeO₂の断面TEM像

図5 PLの励起波長依存性のカラープロット

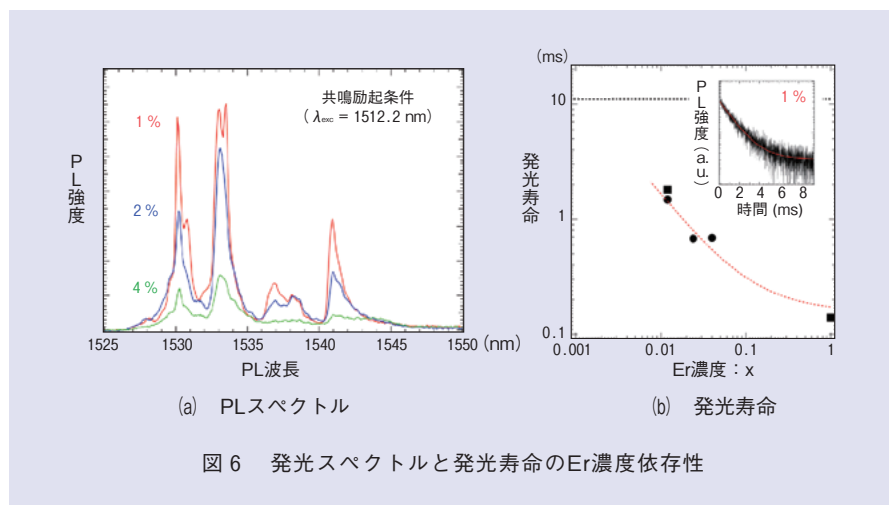


図6 発光スペクトルと発光寿命のEr濃度依存性

においても、励起波長（縦軸）1512 nm に対してPL波長（横軸）1533 nmに鋭い発光が出現していることが分かります。これは希薄添加されたEr原子が母体CeO₂結晶中のCeサイトを確かに置換するとともに光学的に活性化していることを表しています。言い方を換えれば、このEr濃度範囲ではEr原子が結晶格子間に存在したりErクラスターを形成したりしていないことを意味しています。複数の発光ピークが現れているのは、CeO₂母体の持つ結晶場により添加Erのエネルギー準位が分裂しているからです。

この発光スペクトルを詳細に比較したものが図6 (a)です。いずれのEr濃度においても同じ波長に発光ピークが現れていると同時に、Er濃度が低くなるほど発光強度は増大しています。これはEr濃度が低くなるにつれEr原子どうしの距離が離れ母体結晶中で孤立化することで、Er-Er原子間相互作用によるエネルギー移動を伴う非発光過程が抑制される（発光効率が增強される）ためです。この添加Erの希薄化による非発光過程の抑制は発光寿命にも変化をもたらします。発光寿命のEr濃度依存性を図6 (b)に示します。

発光寿命は照射する励起レーザをパルス化し、レーザ照射後に現れる試料からの発光の強度変化を時間領域で測定するものです（図6 (b)の挿入図）。図6 (b)からEr濃度の減少に伴い発光寿命が長寿化しているのが分かります。また図中の点線はこれまでに量子光学結晶として用いられてきたYSi₂O₅母体結晶に0.001%の極希薄Erを添加したときの発光寿命（約11 ms）を示していて、Er-Er原子間相互作用を無視できる固体中のErの真の発光寿命と考えられます。今回用いたEr添加CeO₂ではEr最低濃度が1%でしたが、あと一桁程度添加濃度を下げることでEr-Er間相互作用を完全に抑制し、Er原子を固体中で完全に孤立化させることができると考えられます。このように発光特性においても、確定的なエネルギー状態の形成やEr濃度低下による発光効率の増強と寿命の長寿化などが観測され、結晶構造的だけでなく光学特性的にも高品質なEr希薄添加CeO₂薄膜を得ることに成功しました。

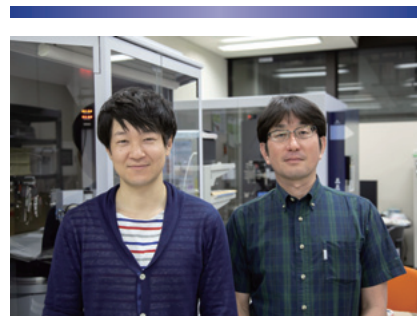
今後の展開

今回得られた高品質Er希薄添加

CeO₂薄膜では量子情報の保持時間が従来の添加母体結晶に比べ長寿化していることが期待されます。今後結晶表面に光導波路構造等を作製することにより、この保持時間を評価するとともに通信波長帯光によるオンチップでの量子状態操作の実現をめざします。

参考文献

- (1) T. Tawara, H. Omi, T. Hozumi, R. Kaji, S. Adachi, H. Gotoh, and T. Sogawa: "Population dynamics in epitaxial Er₂O₃ thin films grown on Si(111)," Appl. Phys. Lett., Vol.102, No.24, 241918, 2013.
- (2) T. Tawara, Y. Kawakami, H. Omi, R. Kaji, S. Adachi, and H. Gotoh: "Mechanism of concentration quenching in epitaxial (Er_xSc_{1-x})₂O₃ thin layers," Opt. Mat. Express, Vol.7, No.3, pp.1097-1104, 2017.
- (3) E. J. Schelter: "Cerium under the lens," Nat. Chem., Vol.5, No.4, p.348, 2013.
- (4) T. Inaba, T. Tawara, H. Omi, H. Yamamoto, and H. Gotoh: "Epitaxial growth and optical properties of Er-doped CeO₂ on Si(111)," Opt. Mat. Express, Vol.8, No.9, pp.2843-2849, 2018.



(左から) 稲葉 智宏/ 俵 毅彦

希土類原子は私たちの周りですさまざまなカタチで利用されていますが、その量子光学応用は比較的新しい研究分野です。希土類原子の持つユニークな特徴がどのように活かされ、この研究分野がどこまで発展していくのかとても楽しみです。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子光物性研究部
量子光デバイス研究グループ
TEL 046-240-3683
FAX 046-270-2342
E-mail takehiko.tawara.tn@hco.ntt.co.jp

2次元伝導面を持つ高温超伝導体の基本物質のMBE成長と原子分解能観察

銅酸化物超伝導体は、常圧下で最高の超伝導転移温度を有する物質群です。無限層構造と呼ばれる構造は、その銅酸化物超伝導体を構成する基本構造で、超伝導発現機構解明の鍵を握りますが、この構造単独ではバルクの単結晶を作製することができません。NTTでは、独自に培ってきた酸化物分子線エビタキシー技術を用いてこの物質の単結晶薄膜を作製するとともに、原子分解能顕微鏡など最先端の測定技術と組み合わせて、いまだ定説のない高温超伝導発現機構の解明に挑んでいます。

い け だ あ い
池 田 愛

Yoshiharu Krockenberger

た に や す よ し た か や ま も と ひ で き
谷 保 芳 孝 / 山 本 秀 樹

NTT物性科学基礎研究所

超伝導材料研究の進展

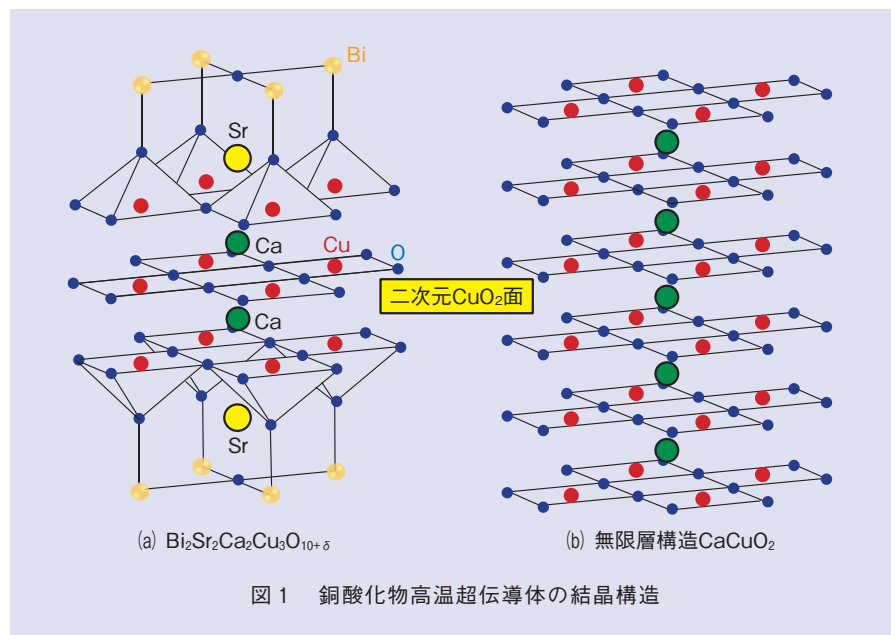
超伝導は、直流電流を電気抵抗による損失なし（ロスレス）に流すことができる夢の技術へつながる現象ですが、長らくマイナス140℃以下に冷やさなければ発現しない現象でした。現在では、ドライアイスの昇華点よりも高いマイナス70℃程度で超伝導転移する H_3S （硫化水素）という物質が発見され⁽¹⁾、続いて、 LaH_{10} （水素化ランタン）が、室温近くで超伝導的な振る舞いを示したという報告も学術誌に

掲載されています⁽²⁾。しかしながら、どちらの場合も物質自体の合成に加え、合成した物質を超伝導を発現する特定の結晶構造に保つために、地球深部での圧力に匹敵する超高压（約200万気圧）が必要とされるため、室温近傍での超伝導性をロスレス配線や機能素子のかたちで活用するには茨の道が待っているといわざるを得ません。

これまでに発見されている超伝導物質の中で、常圧下で最高の超伝導転移温度を示す物質群に銅酸化物超伝導体と呼ばれるものがあります。この物

質群には、液体窒素温度（マイナス196℃）以上で初めて超伝導性を示した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ や、さらに約20℃超伝導転移温度（ T_c ）が高い $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ 等の物質が含まれ、主に海外で超伝導ケーブルや、携帯電話の基地局用のバンドパスフィルタとして実用化されています。しかしながら、この銅酸化物超伝導体でなぜ、高い超伝導転移温度が実現するのかについて万人が納得するような理解は得られておらず、このことが、常圧下で安定で、より高い超伝導転移温度を持つ物質の探索指針の構築を妨げています。

超伝導の機構解明は道半ばですが、高い T_c を持つ銅酸化物超伝導体に共通に含まれる結晶構造的な特徴は知られています。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ の結晶構造を図1(a)に示します。真ん中の平面型のCu（銅）とO（酸素）から構成される層（ CuO_2 面）を、上下からCa（カルシウム）、OがCuにピラミッド型に配位した層、Sr（ストロンチウム）、そしてBi（ビスマス）とOの層が、順々に挟み込むような構造をしています。このうち、BiとOからなる層を除く構造は、超伝導転移温度が100 K（マイナス173℃）以上の銅酸



化合物が共通に持つ構造です。この構造の中で、 CuO_2 面という二次元的な伝導面を電気が流れることによって超伝導が発現するのですが、Cuが2+の陽イオンに、Oが2-の陰イオンになりやすい性質を持つことから、 CuO_2 全体では、電荷中性条件が保てず、 CuO_2 面だけを単離した（すなわち、 CuO_2 面だけからなる）物質をつくることはできません。しかし、図1(a)中の CuO_2 面の上下にあるCaとともに取り出した CaCuO_2 や、そのCaをSrに変えた SrCuO_2 という構造は取り出すことができ、無限層構造という名前が付いています（図1(b)）。この無限層構造の銅酸化物の合成には、バルクでは5万気圧程度の高压が必要で、多結晶試料しか合成できませんが、薄膜では、単結晶の形で作製することができます。また、いったん作製してしまえば、常圧下でも安定に存在できます。銅酸化物超伝導体のエッセンスともいえる構造だけを抜き出した無限層構造物質は、超伝導機構にもっとも直截的に迫ることができる研究対象と考えられるため、私たちはその薄膜成長と物性測定に精力的に取り組んでいます。

最高品質薄膜を実現する 酸化物分子線エピタキシー技術

NTTでは、半導体の分野では馴染みの深いMBE（Molecular Beam Epitaxy：分子線エピタキシー）法を、数種類の金属元素と酸素から成る複合酸化物薄膜の成長に応用したオリジナルな技術確立してきました⁽³⁾。本特集記事の『最高の強磁性転移温度を持

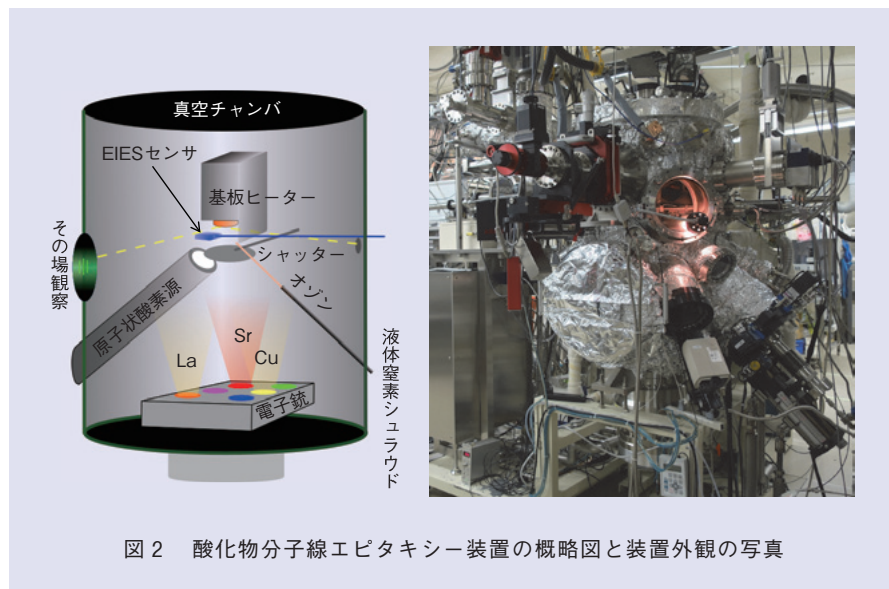


図2 酸化物分子線エピタキシー装置の概略図と装置外観の写真

つ新絶縁物質 Sr_3OsO_6 の創製』は、この技術を用いて新物質を創製した例ですが、元々は、存在が知られている複合酸化物の高品質な薄膜をつくるために開発された技術です。

酸化物MBE装置の概略図と写真を図2に示します。薄膜成長は直径が約70 cm、高さが約150 cmの大きな真空チャンバ内で行われます。チャンバの底に金属原料をそれぞれ格納するポケットがあり、約10 kVに加速した電子線をそれぞれの原料金属に衝突させて加熱することで蒸発させ、対向位置に設置した基板上に供給します。供給量の精密制御にはEIES（Electron Impact Emission Spectroscopy：電子衝撃発光分光）法を用いています。この原理については本特集記事『NTTにおける新機能物質・材料創製研究の最前線』⁽⁴⁾に説明があります。酸化物MBEの特徴は、超高真空中でも金属を酸化できるように分子酸素（ O_2 ）

よりも活性な（酸化力が強い）酸化源を備えていることで、無限層構造銅酸化物の薄膜成長には原子酸素（O）を使います。「酸化力が強い」とは、「より強く周りの電子を引き付ける」と言い換えられます。原子酸素は、不対電子を2個持っているため、近くにいる金属から電子を奪うことで電子対を形成し、安定化する傾向を強く持ちます。この性質を利用すると、 10^{-9} 気圧という非常に低い圧力（高真空）下でも酸化反応（化学反応）を起こすことができます。加えて、無限層構造銅酸化物と格子定数の近い基板を用いると、エピタキシーの効果でバルク合成では実現できない無限層構造銅酸化物の単結晶薄膜を作製することができます。

この技術を用いて、私たちはまず、無限層構造を持つ $\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{CuO}_2$ の薄膜作製に取り組みました⁽⁵⁾。2価のSr（ Sr^{2+} ）の一部を3価のLa（ La^{3+} ）に

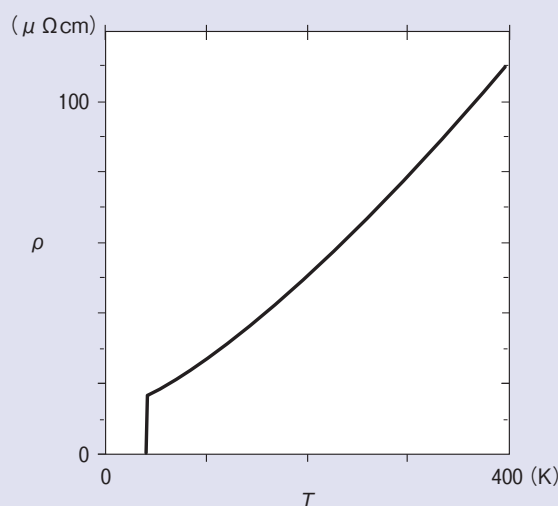


図3 酸化物分子線エピタキシー法によって作製した無限層構造 $\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{CuO}_2$ 超伝導薄膜の電気抵抗率の温度依存性

置換しているのは、このほうが超伝導試料が得やすいためです。 $\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{CuO}_2$ 薄膜の抵抗率の温度依存性を図3に示します。抵抗率は、400 K (127 °C) から温度の低下とともに低くなっていき、約40 K (マイナス 233 °C) で突然ゼロになる(超伝導転移が起こる)ことが分かります。無限層構造を持つ超伝導薄膜の作製に関する報告は他機関からもあります⁽⁶⁾が、私たちの薄膜は、以下の点で、世界中のどの研究機関で作製された試料より優れた特性を示しています。

- ・シャープな超伝導転移(抵抗率の突然の減少からゼロになるまでの温度幅 $\Delta T_c < 1 \text{ K}$)
- ・常伝導状態での低い抵抗率(欠陥のない、理想的な CuO_2 面1枚あたりの抵抗率とほぼ一致)
- ・400 Kから超伝導転移温度に至るまで、終始金属的な振る舞い(温

度が下がるほど抵抗が小さくなる) 本試料は、超伝導機構を議論するうえで礎となる、電気伝導特性などの物性データをもっとも信頼性の高いかたちで提供する、最高品質の試料といえます。

原子分解能を持つ顕微鏡観察と格子定数エンジニアリング

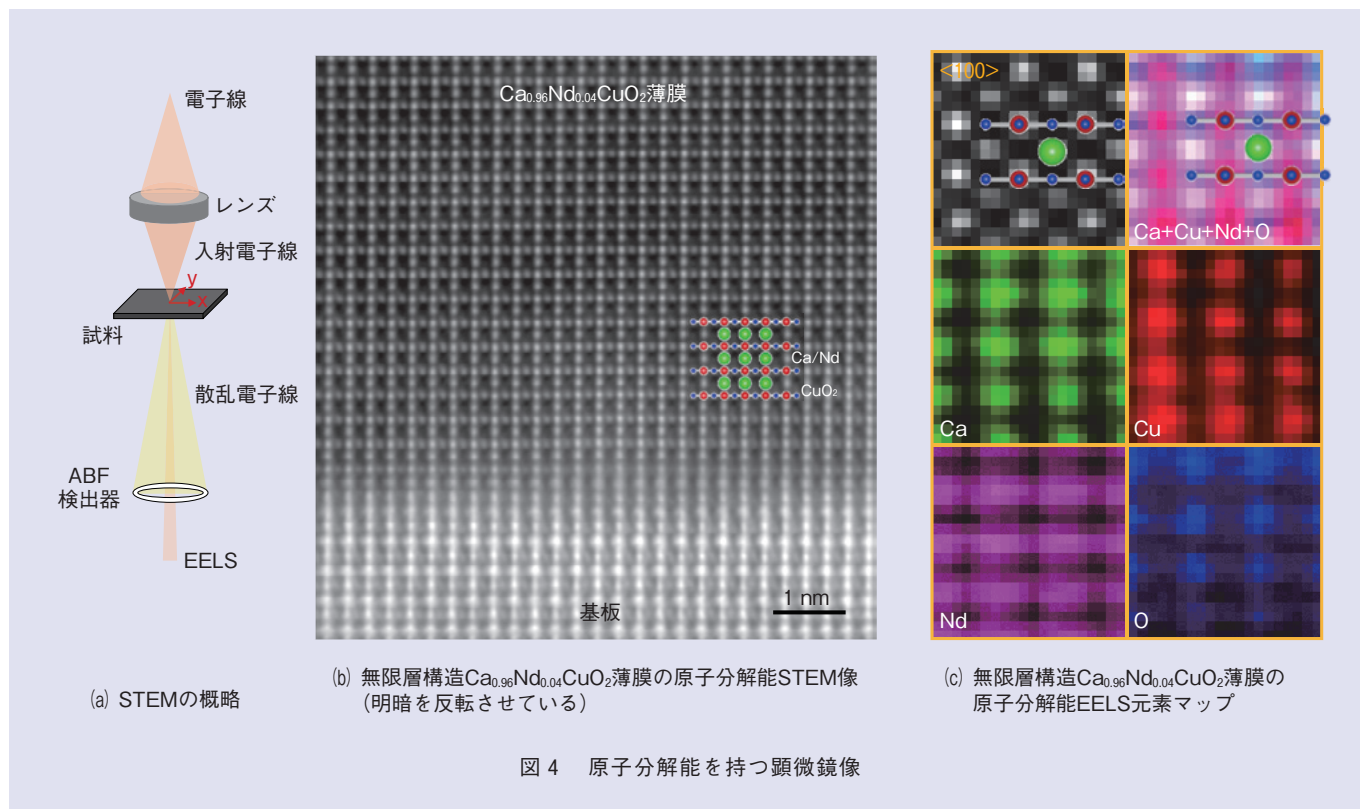
次に、無限層構造 CaCuO_2 の薄膜作製とその物性研究について説明します。図1で示したように、 CaCuO_2 という物質は高い超伝導転移温度を持つ銅酸化物超伝導体の結晶構造からそのまま抜き出した組成と構造を持ちます。しかしながら、 SrCuO_2 とは異なり、研究例は限定的でした。これは、主にバルク試料作製上の困難に起因しています。私たちは、前述の $\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{CuO}_2$ にならい、 CaCuO_2 に対しても、2価のCa (Ca^{2+}) の一部を

3価のNd (Nd^{3+}) に置換した $\text{Ca}_{1-x}\text{Nd}_x\text{CuO}_2$ 薄膜を作製し、超伝導化を試みましたが、 Nd^{3+} を約6%置換 ($x = 0.06$ に相当) しても超伝導は発現しませんでした⁽⁷⁾。そこで、超伝導膜と非超伝導膜で、二次元伝導面である CuO_2 面の構造にどのような違いがあるのかを明らかにするために無限層構造銅酸化物薄膜の CuO_2 面の直接観察に挑みました。

原子1つひとつを可視化するために、最先端技術であるSTEM (Scanning Transmission Electron Microscopy: 走査透過電子顕微鏡) 法を用いました。STEMの模式図を図4(a)に示します⁽⁸⁾。この技術では、原子の大きさ[$\sim 1 \text{ \AA}$ (オングストローム)^{*1}]まで絞った電子線を試料上で走査させ、原子から散乱された電子をプローブすることで、原子の位置を高精度に知ることができます。原子1つひとつが並んでいる様子を観察する(原子分解能観察)ためには、試料に照射する電子線のビーム径を原子の大きさより小さくすることが重要であり、それを可能にする球面収差補正装置が付いたSTEM装置がNTT厚木研究開発センタにあります。

この技術を用いて断面を観察した $\text{Ca}_{0.96}\text{Nd}_{0.04}\text{CuO}_2$ 薄膜のSTEM像を図4(b)に示します。図中、明るいところが、原子が存在する位置に相当し、Ca/Nd, Cu, そしてO原子1つひとつが球状に見えています。これらの原

*1 オングストローム: 原子、分子の大きさや、可視光の波長などを表す長さの単位。
 $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$



子は規則正しく配列しており、MBE法で作製した $\text{Ca}_{0.96}\text{Nd}_{0.04}\text{CuO}_2$ 薄膜は単結晶性を有していることが分かります。この原子分解能観察により、超伝導の舞台である CuO_2 面が二次元的につながっていることも分かりました。

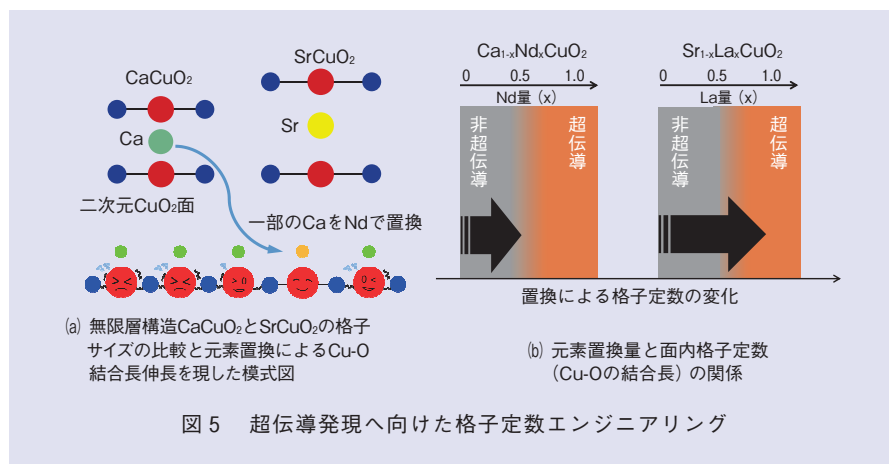
図4(b)では原子の配列がグレースケールで表されていますが、さらにEELS (Electron Energy Loss Spectroscopy: 電子エネルギー損失分光)^{*2}

という方法を用いると元素を識別することができます。元素ごとにEELS強度をマッピングしたものを図4(c)に示します。元素ごとに、原子1つひとつが明瞭に観測されており、その並びは無層構造と完全に一致していることが分かりました。

図4で示されたCuとOの間隔を測定することで、 $\text{Ca}_{0.96}\text{Nd}_{0.04}\text{CuO}_2$ の格子定数を評価することができます。非超伝導 $\text{Ca}_{0.96}\text{Nd}_{0.04}\text{CuO}_2$ の面内格子定数(CuとOの結合長の2倍)は0.386 nmと見積もられ、Nd置換をすることで薄膜の格子定数が約0.001 nmだけ伸びていることが分かりました。La置換することで超伝導化する $\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{CuO}_2$ は、Laを置換すること

で格子定数が約0.002 nm伸長することが分かっている⁽⁹⁾、2価のCa、あるいはSrを、3価のNd、あるいはLaで置換することで面内格子定数が長くなる傾向は共通です。しかしながら、各構成元素のイオンの大きさが異なること、そして、置換量も異なることから、面内格子定数の変化量が異なります。このため、超伝導・非超伝導と物性を分ける面内格子定数のしきい値があるのではないかと推測されます。既述のとおり、面内格子定数は、CuとOの結合長の2倍に相当します。図5(a)に模式的に示すように、 Ca^{2+} イオンは Sr^{2+} イオンより小さいので、 CaCuO_2 の方が SrCuO_2 よりも元々のCuとOの結合長が短いという違いが

*2 EELS: ビーム径を原子の大きさまで絞った電子線(電子ビーム)を物質に入射した際、電子の持つエネルギーの一部が、電子ビームが当たった原子内で起こるさまざまな励起過程に消費されるため、電子ビームはその分のエネルギーを失って物質から出てきます。このエネルギー損失量は各元素に固有であるため、電子ビームを走査させてエネルギー損失量を測定することで、どこに何の元素があるのか知ることができます。



あります⁽¹⁰⁾。さらに、Ca_{1-x}Nd_xCuO₂では、Nd置換量を6%よりも増やすと物質合成が難しくなってしまうSr_{0.9}La_{0.1}CuO₂と同程度(>10%)までは置換することができません。このことがCa_{1-x}Nd_xCuO₂の超伝導化を阻んでいると考えられます。銅酸化物高温超伝導体の基本構造である無限層構造銅酸化物の研究で得られたこの知見は、銅酸化物における超伝導発現に格子定数(CuO₂面内のCuとOの結合長)エンジニアリングが重要であることを示唆しています。

今後の展開

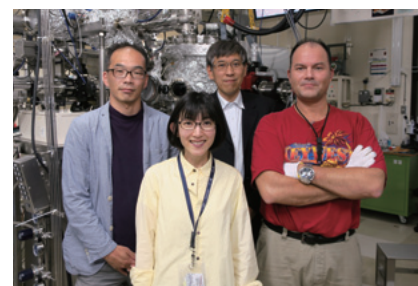
高温超伝導機構解明の鍵を握る無限層構造銅酸化物の研究は、高品質試料の作製に高い壁があります。私たちは、NTT独自の薄膜成長技術の強みを最大限活かしてこの壁を越え、発見から30年以上経過してなお、物性物理学の最大の謎であり続ける高温超伝導発現機構の神秘に迫りたいと考えています。さらに、二次元的であるというCaCuO₂の構造上の特徴を利用し、

CaCuO₂と異種酸化物との人工超格子を作製するアプローチ⁽¹¹⁾で、自然界には存在しない新規の層状超伝導材料の創製をめざします。

参考文献

- (1) A. P. Drozdov, M. I. Erements, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, and S. I. Shylin: "Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system," *Nature*, Vol. 525, No. 7567, pp. 73-76, 2015.
- (2) M. Somayazulu, M. Ahart, A. K. Mishra, Z. M. Geballe, M. Baldini, Y. Meng, V. V. Struzhkin, and R. J. Hemley: "Evidence for Superconductivity above 260 K in Lanthanum Superhydride at Megabar Pressures," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 122, No. 2, 027001, 2019.
- (3) H. Yamamoto, Y. Krockenberger, and M. Naito: "Multi-source MBE with high-precision rate control system as a synthesis method *sui generis* for multi-cation metal oxides," *Journal of Crystal Growth*, Vol. 378, pp. 184-188, 2013.
- (4) 山本・後藤: "NTTにおける新機能物質・材料創製研究の概要," *NTT技術ジャーナル*, Vol. 31, No. 7, pp. 6-11, 2019.
- (5) Y. Krockenberger, K. Sakuma, and H. Yamamoto: "Molecular Beam Epitaxy and Transport Properties of Infinite-Layer Sr_{0.90}La_{0.10}CuO₂ Thin Films," *Appl. Phys. Express*, Vol. 5, No. 4, 043101, 2012.
- (6) L. Maritato, A. Galdi, P. Orgiani, J. W. Harter, J. Schubert, K. M. Shen, and D. G. Schlom: "Layer-by-layer shuttered molecular-beam epitaxial growth of superconducting Sr_{1-x}La_xCuO₂ thin films," *J. Appl. Phys.*, Vol. 113, No. 5, 053911, 2013.
- (7) A. Ikeda, Y. Krockenberger, and H. Yamamoto: "Molecular beam epitaxy of electron-doped infinite-layer Ca_{1-x}R_xCuO₂ thin films," *Phys. Rev. Mater.*, Vol. 3, 064803, 2019.

- (8) 幾原: "原子分解能STEMと結晶界面・表面・転位の直接観察," *固体物理*, Vol. 52, No. 12, pp. 761-770, 2017.
- (9) N. Ikeda, Z. Hiroi, M. Azuma, M. Takano, Y. Bando, and Y. Takeda: "Synthesis and superconducting properties of the infinite-layer compounds Sr_{1-x}Ln_xCuO₂ (Ln = La, Nd, Sm, Gd)," *Physica C: Superconductivity*, Vol. 210, No. 3-4, pp. 367-372, 1993.
- (10) Y. Krockenberger, A. Ikeda, K. Kumakura, and H. Yamamoto: "Infinite-layer phase formation in the Ca_{1-x}Sr_xCuO₂ system by reactive molecular beam epitaxy," *Journal of Applied Physics*, Vol. 124, No. 7, 073905, 2018.
- (11) D. D. Castro, M. Salvato, A. Tebano, D. Innocenti, C. Aruta, W. Prellier, O. I. Lebedev, I. Ottaviani, N. B. Brookes, M. Minola, M. M. Sala, C. Mazzoli, P. G. Medaglia, G. Ghiringhelli, L. Braicovich, M. Cirillo, and G. Balestrino: "Occurrence of a high-temperature superconducting phase in (CaCuO₂)_n/(SrTiO₃)_m superlattices," *Phys. Rev. B*, Vol. 86, No. 13, 134524, 2012.



(左から) 谷保 芳孝/ 池田 愛/
山本 秀樹/
Yoshiharu Krockenberger

基礎研究と応用研究開発では、フェーズの違いはあれど、これまで存在しない新しいものを自らの手でつくり上げるときの興奮、情熱は変わらないと思っています。新しい機能を持った材料を創製することで未来の社会に新たな可能性を与えられるよう尽力します。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
機能物質科学研究部
TEL 046-240-3290
FAX 046-240-4718
E-mail ai.ikeda.sg@hco.ntt.co.jp

原子層物質のCVD成長技術

グラフェンや六方晶窒化ホウ素 (h-BN) などの原子層物質は、従来のエレクトロニクス材料を凌駕する電気・光学特性さらには新奇物性を有するなど、既存デバイスの高性能化のみならず新機能デバイス創製の可能性を秘める次世代のエレクトロニクス材料です。産業応用に向けて、原子層物質を大面積で高品質に作製する手法の確立が望まれています。本稿では、高品質グラフェン単結晶の大面積化、結晶方位制御によるh-BNの高品質化技術を紹介します。

Shengnan Wang

たにやす よしたか

谷保 芳孝

NTT物性科学基礎研究所

原子層物質

原子層物質は原子1個もしくは数個分の厚みしかない層状の物質です(図1)。代表的な原子層物質であるグラフェンはC(炭素)原子が蜂の巣のような六角形格子状に連なった構造からなり、厚さが原子1個分しかない究極的に薄い単原子層の物質です⁽¹⁾。グラフェンは、線形分散の電子のエネルギーバンドを有し、非常に大きな電荷移動度(電気伝導性)や赤外から可視光の広い領域で波長無依存の大きな光吸収性などユニークな特性を示します。さらには、物質中最大級の熱伝導性、機械的強度を有しています。

グラフェン以外にも、 MoS_2 (硫化モリブデン)、 MoSe_2 (セレン化モリブデン)、 MoTe_2 (テルル化モリブデン)、 WS_2 (硫化タンゲステン)、 WSe_2 (セレン化タンゲステン)、 WTe_2 (テルル化タンゲステン)などの遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC: Transition Metal Dichalcogenides)や、半導体デバイスに用いられるSi(シリコン)やGe(ゲルマニウム)の原子が層状に配列したシリセンやゲルマネンなど数多くの原子層物質が存在します。例えば、TMDCは単層が原子3個分の厚

みの物質で、バンドギャップが層数によって変化する特異な物性を有する半導体です。また、TMDCは大きなスピン軌道相互作用に由来するスピニに依存した電気伝導や偏光特性を有しています。

h-BNは、周期表で炭素の両隣りのB(ホウ素)とN(窒素)からなる化合物であり、グラフェンと同じく六角形格子状の結晶構造からなる単原子層物質です。h-BNは約6 eVの大きなバンドギャップを持つ絶縁体であり、絶

縁膜やトンネル障壁として機能します。さらに、h-BN上にグラフェンやTMDCを積層すると、グラフェンの電荷移動度が向上すること、TMDCの発光強度が増加することが報告され、h-BNは原子層物質の性能を最大限に引き出すために欠かせない物質です。

現代社会を支えるシリコン半導体デバイスの微細化が限界に近づきつつある中、原子層厚で機能を発現できる原子層物質への期待が高まっています。さらに、原子層物質には、金属、超伝

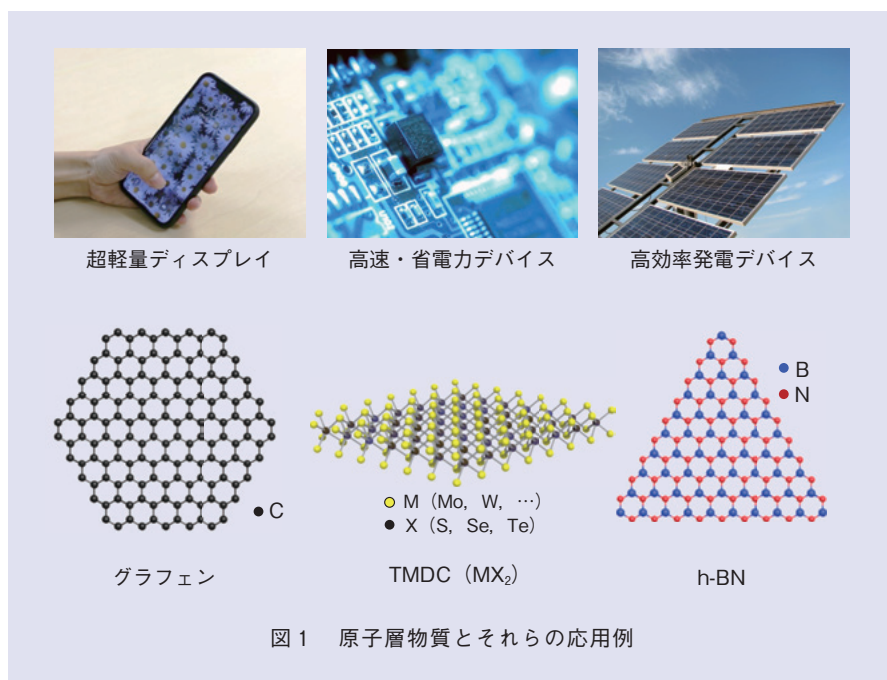


図1 原子層物質とそれらの応用例

導体、磁性体から半導体、絶縁体まで多種多様な電子材料が存在し、また、光学的機能はテラヘルツから赤外・可視・紫外の広い光領域をカバーしています。そこで、軽くて曲げられるフレキシブルデバイス、高速・省電力の超小型トランジスタ集積回路や大容量メモリ、高効率の発光デバイス・発電デバイス、小型軽量の超高感度センサなど、高度情報化社会の発展に資するデバイスへの原子層物質の応用が期待されています。

原子層物質の作製手法

原子層物質の作製方法として、剥離転写法や薄膜成長法など各種提案があります。図2に示しますように、剥離転写法は、天然に存在する、もしくは、人工的に合成された微結晶（粉末）から粘着テープを用いて原子層を劈開し、Si等の基板上に転写する方法です。コンスタンチン・ノボセロフとアンドレ・ガイムの両博士は、この簡便な方法でグラファイト（黒鉛）からグラフェン1層分を引き剥がして、グラフェンの特異な物性を実証し、ノーベ

ル物理学賞を受賞しています。本手法により、原子層物質の基礎物性が次々と解明されるとともに、デバイス応用の可能性が示されてきました。しかし、本手法で得られる原子層物質の大きさは、微結晶のサイズにより制限されるため一般的に数 $10\mu\text{m}$ と小さいうえ、手作業での剥離転写のため再現性とスループットに乏しく、集積デバイスの産業化には不向きです。そこで、剥離転写法に代わり、原子層物質を高品質かつ大面積に再現性良く形成する技術の開発が望まれています。

薄膜成長法の1つである化学気相堆積法（CVD: Chemical Vapor Deposition）は、ガス状の原料を加熱した基板上に供給し、化学反応により物質を合成する手法です。原料はガス状で供給されるため大きな基板にも全面に均一に広がることから、CVDは大面積成長に適しており半導体デバイスの量産製造プロセスで広く利用されています。原子層物質でもCVD成長の技術開発は進められています。現状では、原子層物質を大面積基板の全面に形成できるものの、結晶方位のそろっていない結

晶粒が合体した多結晶のため品質は低く、また、各結晶粒の大きさは剥離転写法と同程度の数 $10\mu\text{m}$ と小さいなど課題があります。本稿では、NTT物性科学基礎研究所が取り組んでいる原子層物質CVDに関して、グラフェン単結晶の大面積化技術、h-BNの結晶方位制御技術を紹介します。

グラフェン単結晶の大面積化技術

グラフェンのCVD成長の概略を図3(a)に示します。銅基板を反応炉内に導入後、Ar（アルゴン）や H_2 （水素）、もしくはこれらの混合ガス中で成長温度（約 1000°C ）まで加熱します。その後、銅基板表面に自然に形成されている Cu_2O （亜酸化銅）などの酸化膜をエッチング（除去）するためのアニールを行い、炭素原料である CH_4 （メタンガス）を導入して、グラフェンの成長を開始します。成長を開始すると、銅基板表面のいたる所でグラフェンの結晶核が形成します。成長を継続すると、グラフェンの結晶核サイズは拡大し（結晶核が大きくなると結晶粒と呼びます）、近くの結晶粒と合体することで、グラフェンは銅基板表面全体を覆います。核形成密度が低いほど、近接する結晶核間の距離が離れることから、大きな結晶がつくられます。核密度は成長温度、原料供給量などのグラフェンの成長条件に依存することが知られています。

一方、グラフェンは酸化膜上では核形成せず、酸化膜が除去された銅表面上で核形成します。ガス種によって酸化膜のエッチング速度は異なり、Arガスよりも還元性の高い H_2 ガスのほうが酸化膜のエッチング速度は大きく

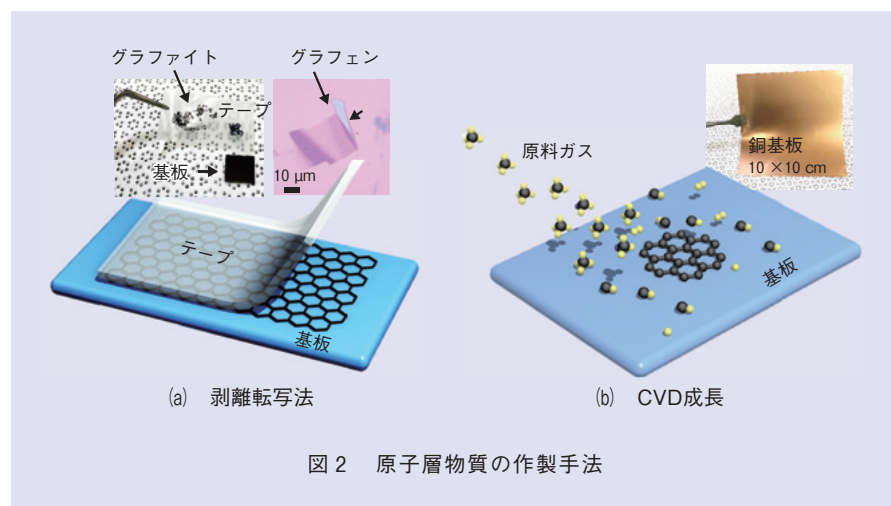
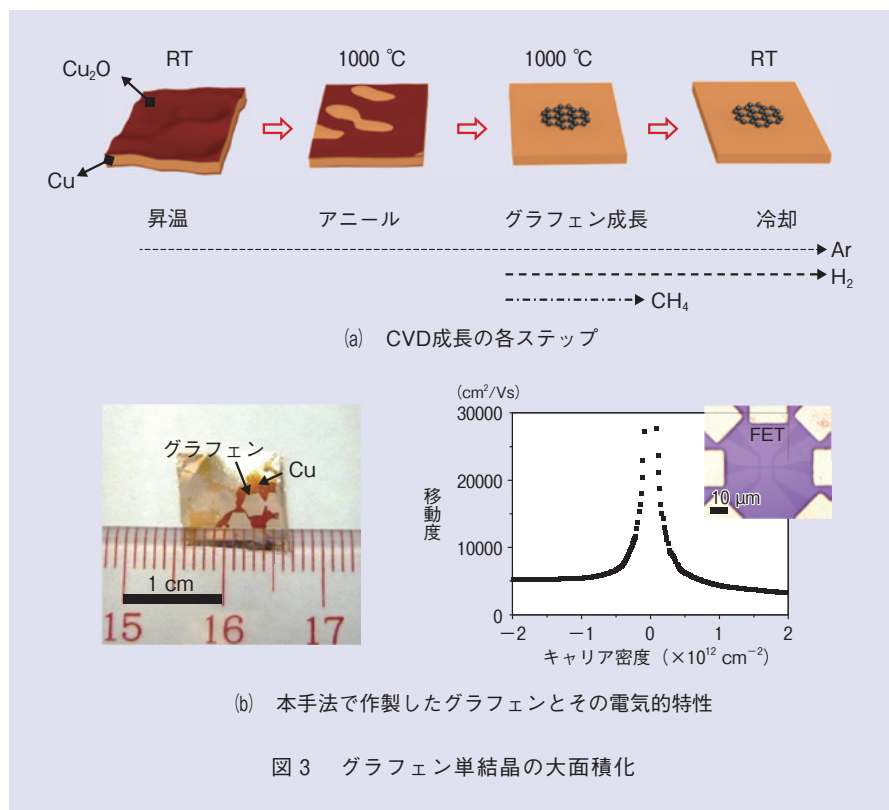


図2 原子層物質の作製手法



なります。グラフェン成長前の銅基板のアニールをArガスのみで行い、銅基板表面の酸化膜を完全に除去せず被覆状態をアニール時間により調整したところ、グラフェンの核形成密度を精密に制御できるようになり、図3(b)に示しますように従来よりも100倍大きい、ミリメートルサイズのグラフェン単結晶を作製することに成功しました⁽²⁾。本グラフェンを用いて電界効果トランジスタ (FET: Field Effect Transistor) 構造を試作したところ、従来のCVD手法で作製した数10 μm サイズのグラフェンよりも電荷移動度は10倍近く高く、また、剥離転写法のグラフェンを用いて作製したFETと同程度の特性が得られました。これらの結果は、本手法が高品質のグラフェン単結晶の大量化に有望であることを示してい

ます。

h-BNの結晶方位制御技術

h-BNは、グラフェンと同様に、銅基板上にCVD法を用いて成長しました。BNを合成する場合、原料には H_6BN (アンモニアボラン) を用いました。一般的に、CVD成長する物質の結晶方位は基板の結晶構造、結晶面方位に強く依存します。銅は面心立方格子構造の結晶です。市販されている銅基板は多結晶ですが、CVD成長のアニール過程において、銅基板は加熱により再結晶化します。再結晶化では、多結晶の結晶粒どうしが合体して大きくなり、また、基板表面では結晶粒の特定の結晶面が現れています。例えば、銅の代表的な結晶面の(001)、(101)、(111)面上では、結晶面の回転対称性

を反映して、結晶方位が2方向または4方向にそろった多方位のh-BNが形成します。結晶方位の異なる結晶粒どうしが合体する場合、それぞれの結晶粒は原子レベルで結合できず、粒界に欠陥が発生します。

100種類以上の異なる結晶面上に成長したh-BNの結晶方位を系統的に調査したところ、(101)面から傾いた結晶面上にh-BNを成長した場合、図4(a)右側の顕微鏡像に示しますように、三角形のh-BN結晶粒がすべて同じ方向を向いた、結晶方位が一方向にのみ配向する単一方位のh-BNが成長することを発見しました⁽³⁾。理論計算から、傾いていない(101)面上では原子が安定に吸着できる格子位置が2パターンあるためh-BNの結晶方位が2方向を取り、(101)面から傾いた結晶面上では結晶表面の対称性が破れることから安定な吸着位置は1パターンとなり単一方位のh-BNが形成することを明らかにしました。この単一方位に配向するメカニズムは、h-BNだけでなく、すべての原子層物質に適用できる原理になります。

図4(b)はh-BNの電気抵抗をミクロスケールで評価した結果です。単一方位h-BNは多方位h-BNよりも電気抵抗が高く、良好な絶縁性を有することが分かりました。多方位h-BNでは、結晶方位の異なる結晶の粒界で欠陥に起因して電流が流れやすく、絶縁性が悪くなっています。単一方位のh-BNでは、結晶核どうしが原子レベルでシームレスに結合するため結晶性が高く、均一な絶縁性を示します。

図4(c)に示しますように、基板全面を単層h-BNが覆うまでCVD成長を

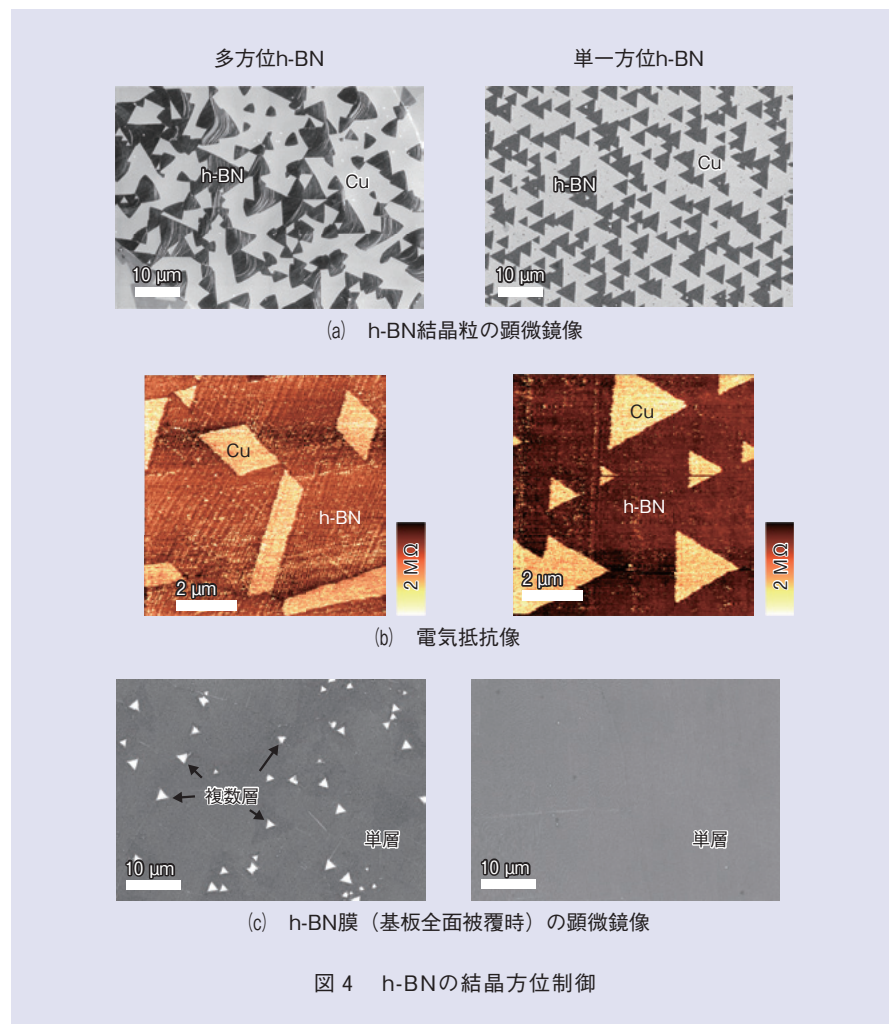


図4 h-BNの結晶方位制御

継続すると、多方位の場合には所々に複数層のh-BNが意図せず形成してしまい不均一な膜になりますが、単一方位に制御することで単層のみの均一性の高いh-BN膜を形成することができます。絶縁性に優れ、均一性の良いh-BNは、原子層物質デバイスの安定動作、性能向上に欠かせないことから、本手法はh-BNの基盤技術になることが期待されます。

今後の展開

原子層物質のデバイス応用に向けては、多種多様な原子層物質それぞれの

CVD技術を高めていく必要があります。最近、原子層物質を積層した縦型ヘテロ構造において、それぞれの層の結晶方位の差（回転角）に依存して物性値が大きく変化したり、異なる電子状態に転移（相転移）したりすることが分かってきました。この原子層物質特有の現象を利用した新機能デバイスを創製するには、CVD成長した大面積h-BN上に所望の機能を発現できる原子層物質を回転角制御してCVD成長する技術が必要になってきます。さらに、単原子層面内で異なる物質を自由自在にCVD成長する横型ヘテロ成

長技術を確立できれば、1次元ヘテロ界面や面内超格子構造に由来する新たな物理現象の発見につながっていくことが期待できます。

参考文献

- (1) 日比野：“グラフェン研究への取り組み,” NTT技術ジャーナル, Vol.25, No.6, pp.6-8, 2013.
- (2) S. N. Wang, H. Hibino, S. Suzuki, and H. Yamamoto: “Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition Growth of Millimeter-Scale Single-Crystalline Graphene on the Copper Surface with a Native Oxide Layer,” Chem. Mat., Vol.28, No.14, pp.4893-4900, 2016.
- (3) S. N. Wang, A. E. Dearle, M. Maruyama, Y. Ogawa, S. Okada, H. Hibino, and Y. Taniyasu: “Catalyst - Selective Growth of Single - Orientation Hexagonal Boron Nitride toward High - Performance Atomically Thin Electric Barriers,” Adv. Mater., Vol.31, No.24, 1900880, 2019.



(左から) Shengnan Wang/
谷保 芳孝

NTT独自技術で創製した物質やナノ構造に秘められた新奇物性を解き明かし、新物質の学理の構築、新機能デバイスの提案により、物質科学・工学の最前線を開拓していきます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
機能物質科学研究部
TEL 046-240-3497
FAX 046-240-4718
E-mail yoshitaka.taniyasu.ry@hco.ntt.co.jp

新機能ワイドギャップ半導体材料の開拓

ワイドギャップ半導体であるc-BN（立方晶窒化ホウ素）は、半導体の中でもっとも高い絶縁破壊電界を有しており、高効率なパワーデバイスを実現できる材料として高い可能性を秘めています。NTT物性科学基礎研究所では、独自の成長技術を開発することによって、c-BN薄膜の高品質ヘテロエピタキシャル成長を初めて実現しました。本稿では、その成長技術と、実際のパワーデバイス応用に不可欠なドーピングによるc-BN薄膜の電気伝導性制御について紹介します。

ひらま かずゆき たにやす よしたか
平間 一行 / 谷保 芳孝
やまもと ひでき くまくら かずひで
山本 秀樹 / 熊倉 一英

NTT物性科学基礎研究所

ワイドギャップ半導体の パワーデバイス応用

ワイドギャップ半導体は、現在主流の半導体材料であるSi（シリコン）やGaAs（ヒ化ガリウム）では実現できない、低電力損失のパワーデバイスへの応用が期待されている材料です。パワーデバイスは、システムの要求に合わせて電力を直流から交流、交流から直流へと変換したり、直流電圧の昇圧・降圧、交流の周波数変換を行ったりする、電力変換デバイスです。こうしたデバイスは身の回りのいたるところで使われており、例えば、100 Vの交流をPCや携帯端末の駆動・充電に適した20 V前後の直流に変換するACアダプタもパワーデバイスの1つです。パワーデバイスのある特定の電圧で動作させたときの、半導体材料ごとの電力損失の傾向を図1に示します。電力損失は、そのデバイスの動作時の抵抗値（オン抵抗）で決まり、使われている半導体材料のキャリア濃度に反

比例し、電流パスの長さに比例します。絶縁破壊電界^{*1}が高い半導体材料ほど、キャリア濃度をより高濃度に、また電流パスもより短くすることができるため、SiやGaAsと比べて、約1桁もしくはそれ以上の高い絶縁破壊電界を有するワイドギャップ半導体を用いると、オン抵抗を3桁以上小さくすることができます。その結果、電力損失（エネルギー損失）が小さく、省エネ

ルギー・高効率なパワーデバイスが作製できるようになります。代表的なワイドギャップ半導体はSiC（炭化シリコン）とGaN（窒化ガリウム）です。これらの材料を用いたパワーデバイスは、すでに実用化が進んでおり、例えばSiCは、架線の直流電圧を交流に変換してモーターを駆動する鉄道車両用のインバータなどに使用され始めています。

（任意単位）

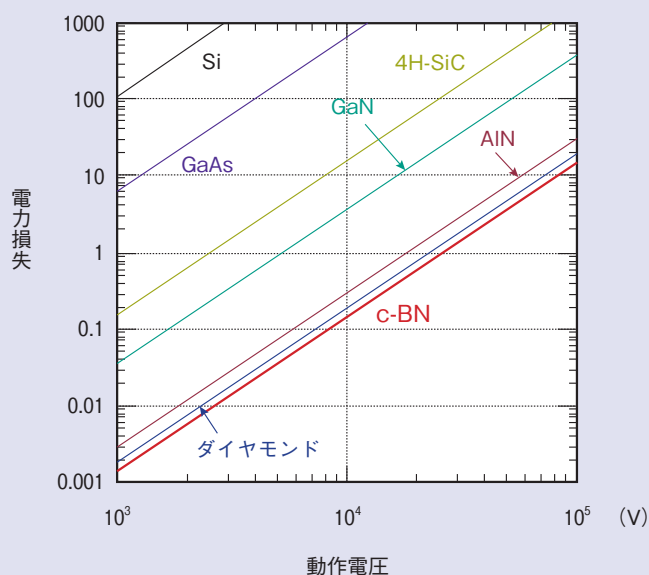


図1 各半導体材料でパワーデバイスを作製したときの動作電圧と電力損失の関係

*1 絶縁破壊電界：絶縁体や半導体材料に印加する電界強度を大きくしていくと、ある電界強度以上で急激に大電流が流れるようになります（絶縁破壊が起こります）。絶縁破壊が起こり始める電界強度を絶縁破壊電界といい、その大きさは材料によって異なります。

NTT物性科学基礎研究所では、次世代のワイドギャップ半導体として注目を集めているc-BN（立方晶窒化ホウ素）、AlN（窒化アルミニウム）、ダイヤモンドの研究を行っており、本稿では、半導体中でもっとも高い絶縁破壊電界を有しているc-BNについて紹介します。c-BNを利用したパワーデバイスは、ほかの半導体材料のパワーデバイスと比べて、同じ電圧で動作させたときの電力損失をもっとも小さくすることができます（図1）。SiやGaAsと比べると、動作時の電力損失を4桁以上（実用化が進んでいるSiCやGaNと比べても、さらに1桁以上）低減できるポテンシャルがあります。こうした電力損失の小さい（高効率の）

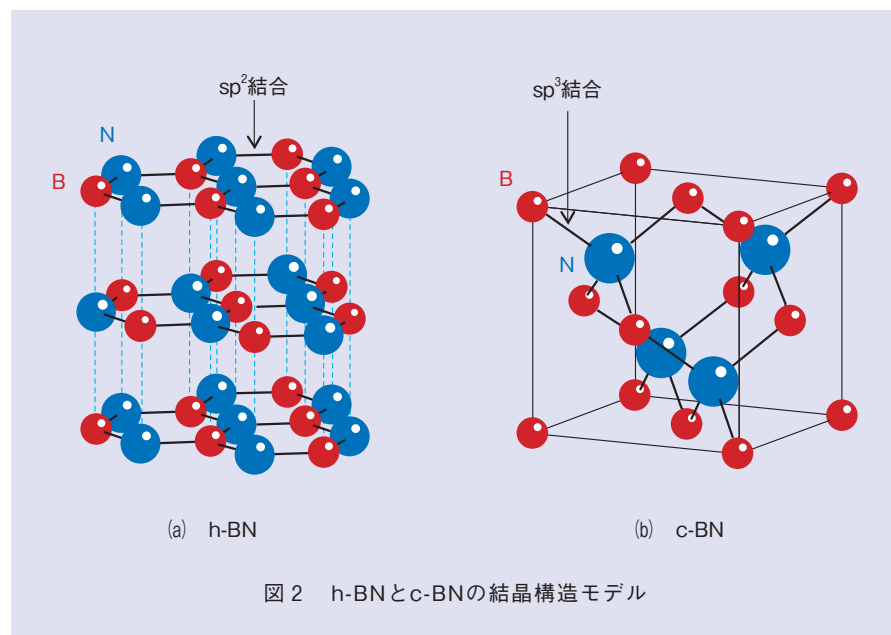
パワーデバイスを、電気自動車や鉄道、また太陽光・風力発電に応用できれば、地球規模でのエネルギー利用の高効率化や資源の有効利用につながり、持続可能な社会の実現に貢献できると考えています。

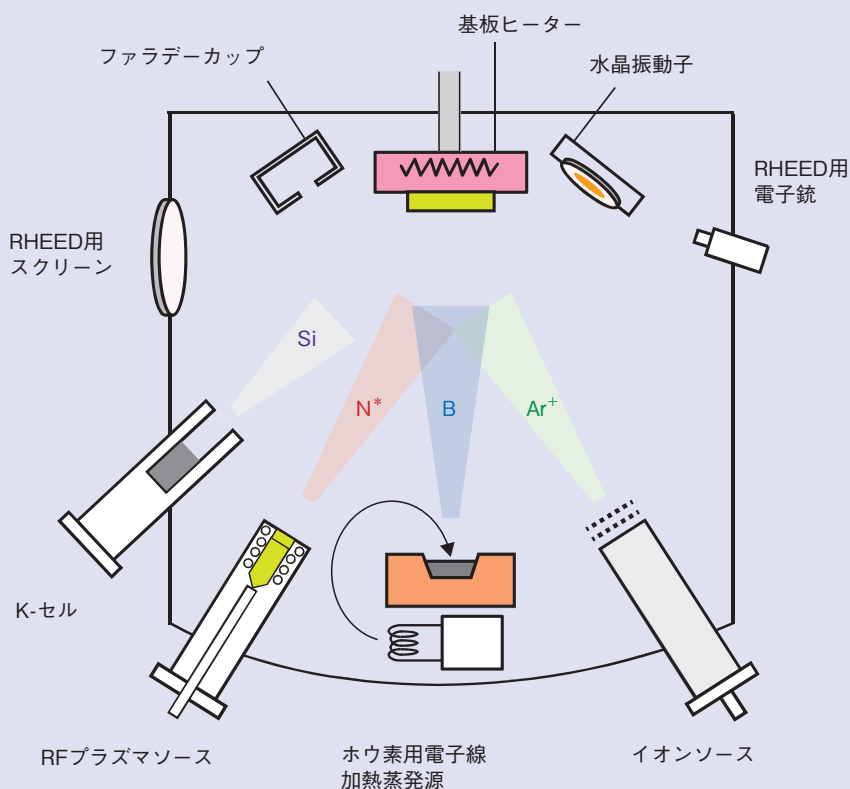
独自の手法によるc-BN薄膜の成長

BN（窒化ホウ素）は、ホウ素と窒素からなる化合物であり、ホウ素と窒素の結合の仕方や積層の周期の違いによって結晶構造が異なります。代表的な結晶構造は、グラファイトに似た層状構造のh-BN（六方晶窒化ホウ素）と、閃亜鉛鉱構造のc-BNです（図2）。h-BNは、層内は sp^2 と呼ばれる共有結合、層間はファンデルワールス結合に

より結合しており、常温常圧下ではもっとも安定な結晶相（常温常圧安定相）です。一方、c-BNは、 sp^3 と呼ばれる共有結合のみからなる高温高压安定相であり、常温常圧下では準安定な結晶相です。半導体のデバイス応用のための薄膜の作製では、主に、キャリア濃度や膜厚を精密に制御可能な気相成長法が利用されていますが、一般的な気相成長法の成長温度と成長圧力の範囲（1400℃以下、1気圧以下）では準安定相であるc-BNの成長は困難です。気相成長法においても、試料表面にイオンを照射（イオンアシスト）しながらBN薄膜を成長することで、高温高压安定相である sp^3 結合相の形成が可能になりますが、熱力学的安定相である sp^2 結合相が混入しやすいため、これまでに報告されているBN薄膜には sp^3 結合相と sp^2 結合相の両方が混在していました。

NTT物性科学基礎研究所では、 Ar^+ イオン照射（イオンアシスト）を利用した独自の気相成長手法（イオンビームアシストMBE法）を開発し（図3）、気相成長法でありながら sp^2 結合相を含まないc-BN薄膜のエピタキシャル成長に成功しました。c-BN薄膜の原料であるホウ素は電子線加熱蒸発源から供給しました。窒素は、 N_2 （窒素分子ガス）ではなく、高周波プラズマ下で生成する、反応性の高い原子状の N^* （窒素ラジカル）として供給して





います。同時に、イオンソースからは Ar^+ イオンを加速させて供給しています。各原料とイオンの供給量は独立に制御することが可能です。薄膜成長の土台となる基板には、c-BNと格子定数の近いダイヤモンド(001)基板上を用いています^{(1), (2)}。

まず、成長中の Ar^+ イオン照射の有無によるホウ素と窒素の結合様式の違いを説明します。成長後のBN薄膜の

FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 透過吸収測定^{*2}の結果を図4に示します。Ar⁺イオン照射を行わずに成長したBN薄膜のFT-IR スペクトルでは、sp³結合に由来する吸収ピークはみられず、1380 cm⁻¹と780 cm⁻¹近傍にsp²結合に由来する吸収ピークのみがみられました。この結果は、すべてのホウ素と窒素の結合がsp²結合であることを意味しており、

熱力学的に安定なsp²結合のBN薄膜が成長していることが分かります。一方、Ar⁺イオン照射を行いながら成長した場合では、sp²結合の吸収ピークはみられず、1070 cm⁻¹近傍にsp³結合に

*2 FT-IR透過吸収測定：サンプルに赤外光 (IR) を照射し、透過した光と入射した光量の差から、サンプルに由来する赤外光の吸収を評価する測定手法。検出器で検出した広い波長範囲のIRを一括してフーリエ変換 (FT) することでスペクトルに変換しています。

由来する吸収ピークのみがみられます。このことから、すべてのホウ素と窒素の結合は sp^3 結合になっており、 sp^2 結合を含まないBN薄膜となっていることが分かります。このように、 N^* によるホウ素の窒化だけではホウ素と窒素の結合はすべて sp^2 結合となりますが、同時に Ar^+ イオンを照射することで sp^3 結合のみを選択的に形成することが可能です。成長中のイオン照射によって sp^3 結合が形成されるメカニズムはいまだ明らかではありませんが、イオン照射による運動エネルギーまたは運動量を受けて高いエネルギー状態になったホウ素と窒素どうしが結合して直接 sp^3 結合を形成しているか、 sp^2 結合が運動エネルギーまたは運動量を受けて sp^3 結合になっているかのどちらかだと考えています。

原子配列の規則性の有無が分かる断面透過電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) 観察の結果を図5に示します。 sp^3 結合のみのBN薄膜は、基板として用いたダイヤモンド(001)基板上に均質に成長しています。薄膜部分の制限視野電子線回折のパターンは、理論的に予測されたc-BN(001)の制限視野電子線回折パターンと、スポットの位置と間隔の点で一致することから、形成された薄膜が、単結晶のc-BN(001)薄膜であること、また、ダイヤモンド(001)基板の原子配列を引き継いでエピタキシャル成長し

(任意単位)

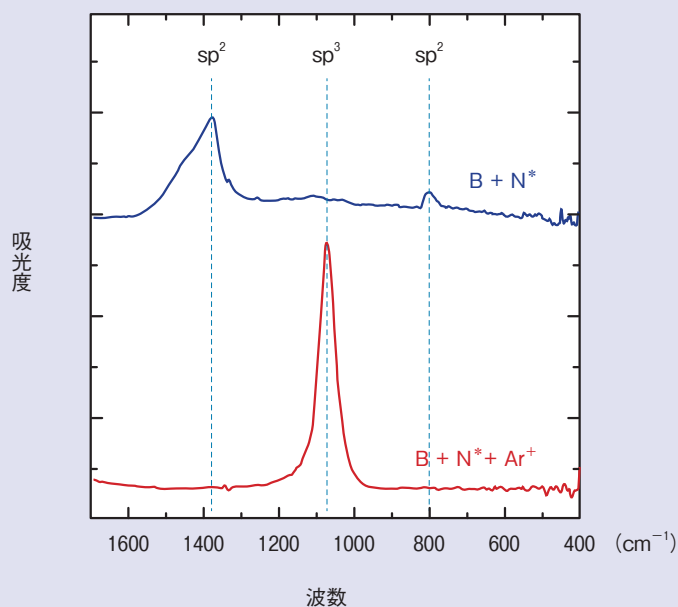


図4 イオン照射の有無によるFT-IR透過吸収スペクトルの違い

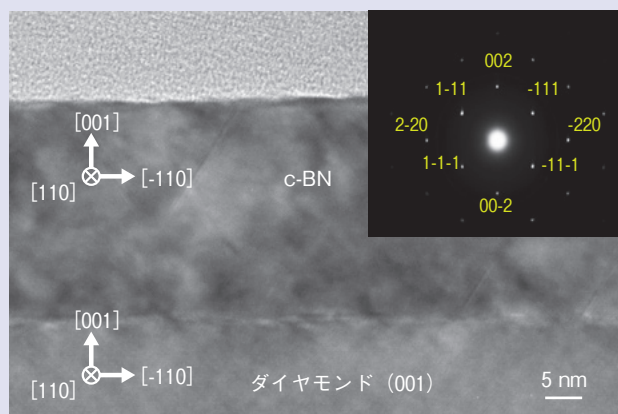


図5 断面TEM像とc-BN領域の制限視野電子線回折像

ていることが明らかになりました⁽³⁾。

c-BN薄膜の電気伝導性制御

デバイスを作製するためには、単にc-BNの高品質薄膜を成長するだけでなく、そこにアクセプタやドナーになる不純物をドーピングして、p型やn型半導体をつくる必要があります。そこでまず、n型c-BN薄膜の成長を目的として、c-BN中でドナーとなることが知られているSiをドーピングしました。Siは、c-BN薄膜成長中にクヌーセンセル（K-セル）^{*3}から供給し

ています。

シリコン濃度（[Si]）が $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のc-BN薄膜のキャリア濃度の温度依存性を図6に示します。室温と500℃におけるキャリア濃度は $2.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ および $6.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、温度に対してキャリア濃度が単調に増加しています。電荷中性条件の式によるフィッティングから見積もった、ドナーのイオン化エネルギー（ E_D ）、ドナー濃度（ N_D ）、アクセプタ濃度（ N_A ）は、それぞれ、0.20 eV、 $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ です。 N_D が、[Si] とほ

ぼ一致していることから、ドーピングしたSi原子のほとんどがホウ素サイトを置換してドナーとして働いていると考えられます。また、フィッティングから得られた E_D の値（0.20 eV）は、c-BNと同様に次世代のワイドギャップ半導体として期待されているダイヤモンドやAlNへドーピングした際の E_D よりも小さい値です。 E_D の値が小さいほど、室温でドナーがイオン化しやすく、高いキャリア濃度が得られることから、c-BNを用いると、ダイヤモンドやAlNよりも低損失なパワーデバイスが作製できると期待できます。

室温におけるSiドープc-BN薄膜の抵抗率のSiドーピング濃度依存性を図7に示します。比較のために、意図的なドーピングを行っていない（ノンドープ）c-BN薄膜のデータも記載しています。ノンドープc-BN薄膜は抵抗率が $\sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ であり、非常に高い絶縁性を示しますが、Siドーピングした $[\text{Si}] : 1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のc-BN薄膜では、約 $260 \Omega \cdot \text{cm}$ の低い抵抗率が得られました。この値は、エピタキシャルc-BN薄膜では現在もっとも低い値です。Si濃度の増加によってc-BN薄膜の抵抗率が系統的に減少していることから、Siドーピングによって、n型c-BN薄膜の電気伝導性を制御できる

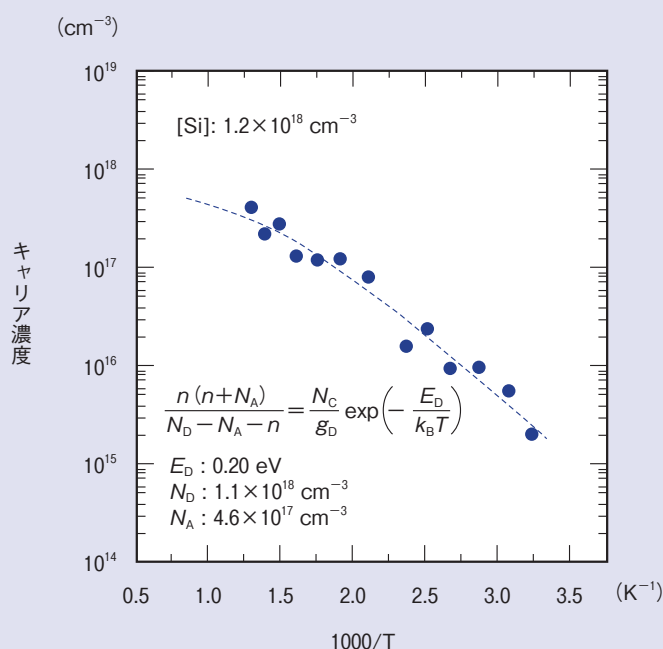


図6 Siドープc-BN薄膜のキャリア濃度の温度依存性

*3 クヌーセンセル：原料の分子線の供給量を高精度かつ安定に制御可能な抵抗加熱蒸発源。

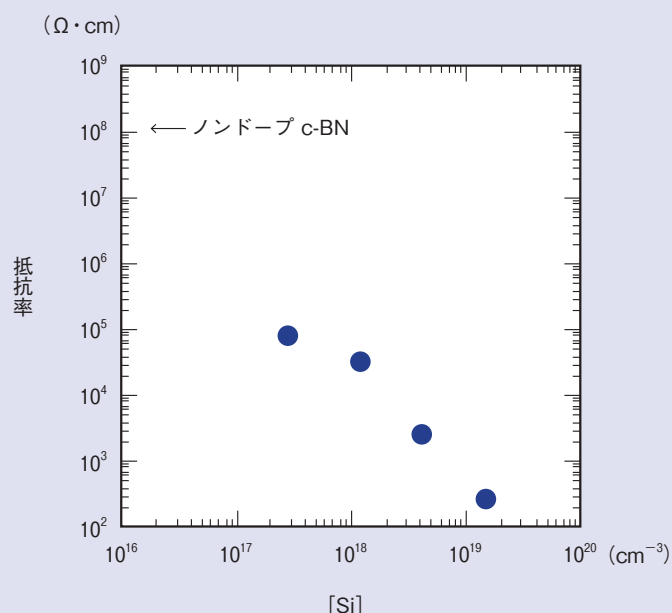


図7 Siドープc-BN薄膜の抵抗率のSiドーピング濃度依存性

といえます。電気伝導性制御は実際のデバイス応用にとって必要不可欠であり、c-BN薄膜のデバイス応用への道を大きく拓く成果です。

今後の展開

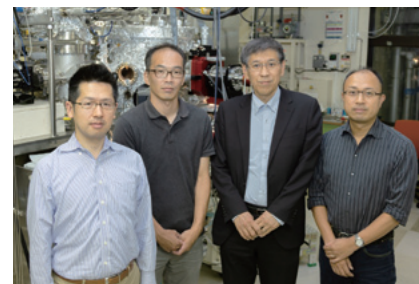
本稿では、NTT物性科学基礎研究所が精力的に取り組んでいる新材料研究のうち、c-BN研究の現状について紹介しました。高品質薄膜の成長とドーピング制御の研究の積み重ねにより、現在までに、デバイス応用の足掛かりとなるn型c-BN薄膜の電気伝導性の制御が可能になりました。今後、

c-BN薄膜のさらなる結晶性の向上とともに、p型ドーピングや、トランジスタ等のデバイスを作製する研究を通じて、実用化に向けた基盤技術の確立に取り組んでいきます。

参考文献

- (1) 平間・谷保・山本・熊倉：“イオンビームアシストMBE法による立方晶BN (c-BN) 薄膜のヘテロエピタキシャル成長,” 応用物理, Vol.85, No.4, pp.306-310, 2016.
- (2) K. Hiram, Y. Taniyasu, S. Karimoto, H. Yamamoto, and K. Kumakura: “Heteroepitaxial growth of single-domain cubic boron nitride films by ion-beam-assisted MBE,” Appl. Phys. Exp., Vol.10, No.3, 035501, 2017.
- (3) K. Hiram, Y. Taniyasu, S. Karimoto, Y. Krockenberger, and H. Yamamoto: “Single-crystal cubic boron nitride thin films grown by ion-beam-assisted molecular beam

epitaxy,” Appl. Phys. Lett., Vol.104, No.9, 092113, 2014.



(左から) 平間 一行/ 谷保 芳孝/
山本 秀樹/ 熊倉 一英

c-BNは、高効率のパワーデバイスへの応用が期待できる産業上重要な半導体材料ですが、一方で、その物性や結晶成長機構はいまだ完全には解明されていません。今後は、独自のc-BN成長技術をさらに高めてパワーデバイス応用の研究を加速させながら、そうした学術的な課題の解決にも取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
機能物質科学研究部
TEL 046-240-3356
FAX 046-240-4929
E-mail kazuyuki.hirama.gz@hco.ntt.co.jp

ウルツ鉱型GaPナノワイヤの結晶成長 ——太陽光による水素生成デバイスへ向けて

GaP（リン化ガリウム）は環境にやさしい間接遷移型半導体材料ですが、ナノワイヤ成長によりウルツ鉱型の直接遷移型を作製できます。NTT物性科学基礎研究所では塩素によるエッチングとガリウム原料の繰り返し供給による手法で積層欠陥のないウルツ鉱型GaPナノワイヤの成長に成功しました。これまで、ウルツ鉱型のGaPナノワイヤを用いて、p型ナノワイヤ光カソード電極での太陽光による水素生成の試みやpin型ナノワイヤ太陽電池の作製、評価等を行いました。

たての こうた^{†1,2} くまくら かずひで^{†1}

舘野 功太 / 熊倉 一英

NTT物性科学基礎研究所^{†1}
NTTナノフォトニクスセンタ^{†2}

太陽光による水素生成ナノワイヤデバイス

持続可能な社会の実現に向け、無尽蔵でクリーンな太陽光から直接私たちの生活に必要なエネルギーを得る手法の研究開発が進んでいますが、中でも1972年にFujishimaらが初めて報告した半導体光電気化学的手法による水や二酸化炭素の還元技術⁽¹⁾は、備蓄可能な燃料や有機物質を生成する技術として有望であり、現在も研究が活発に進められています。水を太陽光によって酸化還元する反応は生成物が水素と酸素であるもっともシンプルなものです。この反応では光を吸収して生じるキャリアが向かうカソードとアノードのエネルギー差は水分解に必要な1.23 eV以上（熱力学的に必要なエネルギー）でなければなりません。また、使用する材料は、毒性が低い、地球上に多く存在する、反応中に腐食せずに安定である等を考慮して選定する必要があります。光電気化学的な機能を持つものとして微小粉体の光触媒が研究されていますが、今のところ太陽エネルギー変換効率は1～2%程度で良くありません。また、カソードとアノードの反応を分離して、水素と酸素が分

離できるようなデバイスが実用上は理想的です。

この点を考慮した私たちのめざすデバイスを図1に示します⁽²⁾。ガスを分離するため、透明なチューブ状の構造を作製します。チューブにはミクロン長のpin型半導体ナノワイヤが密に存在します。チューブの内側にn型半導体アノード、外側にp型半導体カソードが露出するように構成され、半導体が太陽光を吸収すると、生成した電子は水素イオンとカソードで反応して水素を生成し、正孔は水とアノードで反応して酸素を生成します。水素と酸素

が分かれて発生し送り出されるため、回収が容易となります。個々の半導体ナノワイヤはそれぞれ独立に光吸収し水分解に寄与するため、いくつかが不能になっても全体の効率を高く維持することができます。また、ナノワイヤは径が非常に小さいため、格子の大きさが違う材料でも軸方向に結晶成長することができます。したがってバンドギャップの異なる材料をタンデムに接合し、太陽光の広い波長範囲で光吸収させることが可能となります。このようなチューブ状の構造は、基板表面上に垂直にナノワイヤを結晶成長した

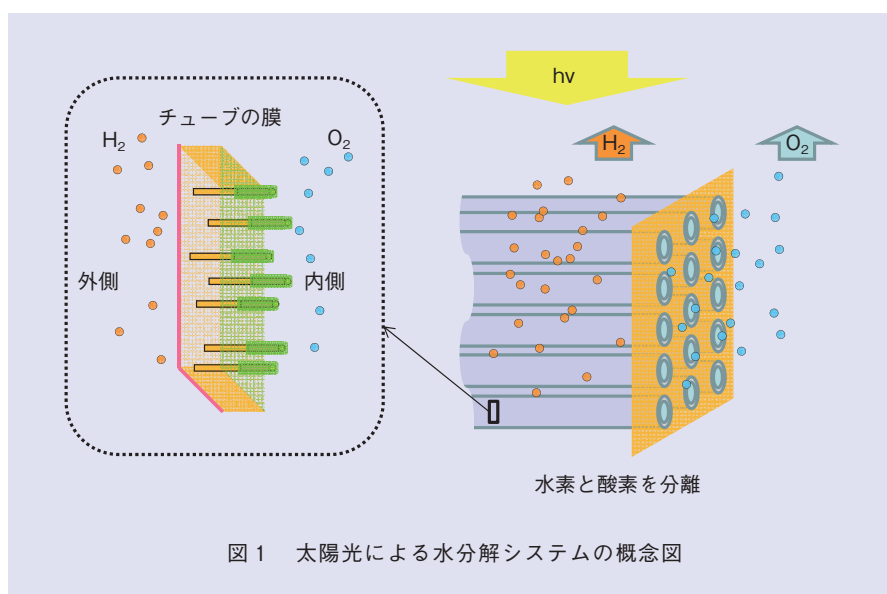
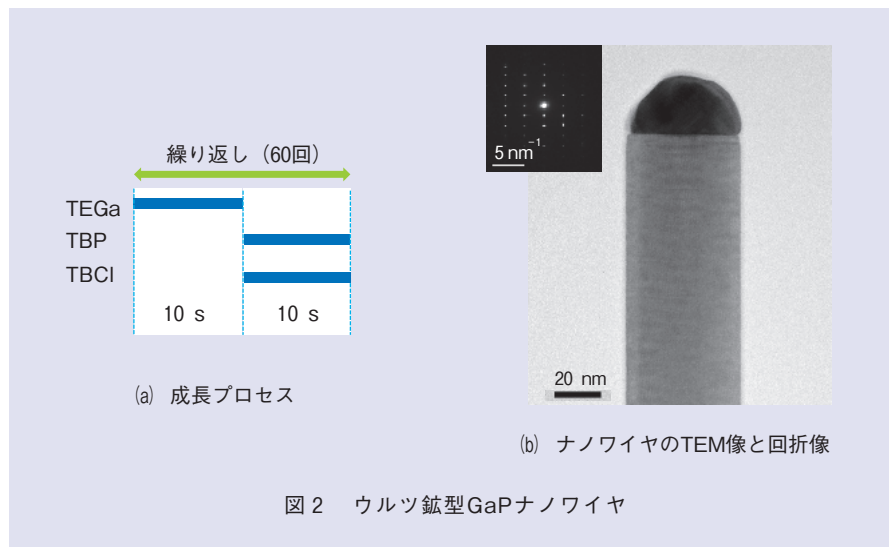


図1 太陽光による水分解システムの概念図



後、ナノワイヤを均一に透明樹脂で埋め込み、ナノワイヤ先端をエッチングで露出し、基板からナノワイヤごとと樹脂を剥離することで作製可能です。

上記の目標のデバイスを実現するためにはたくさんの課題があります。ナノワイヤの成長においては、良好な構造で長さや太さをそろえ、高密度に形成する必要があります。また、異種材料をタンデムに成長する技術やドーピング制御技術も必要です。チューブ作製においては、透明性の高い樹脂やナノワイヤの腐食を防止する保護膜、ナノワイヤ端で反応を促進する助触媒の開発等も必要です。目標デバイスまでの道程は長いのですが、本稿では、これまで私たちが研究してきた、ウルツ鋳型のGaP（リン化ガリウム）ナノワイヤの成長と、p型n型ドーピング、ナ

ノワイヤ電極の水分解、太陽電池作製について紹介します^{(3),(4)}。

ウルツ鋳型GaPナノワイヤ

GaPは間接遷移型のⅢ-V族半導体であり、電子伝導特性や光吸収特性が劣るため、高性能なデバイスに利用することはありません。しかしながら、地球上に豊富に存在する元素で構成されるため、安価で大面積が必要な太陽電池や光電気化学的に水分解や二酸化炭素還元等を行う光電極の材料としては向いています。また、バンドギャップも2.1 eVあることから、電極などでの電圧の損失が小さければ無バイアスで水分解が可能です。GaPは閃亜鉛鋳型が安定に存在しますが、最近、ウルツ鋳型にすると直接遷移型になるとの理論計算の報告があり、実際、ヨーロッ

パの研究グループは実験によりウルツ鋳型のナノワイヤの結晶成長に成功し、光励起発光強度の増大を報告しています⁽⁵⁾。私たちもVLS（Vapor-Liquid-Solid）法^{*1}という手法を用いてウルツ鋳型のGaPナノワイヤの成長に成功しました⁽⁴⁾。GaP基板上に金微粒子を分散し、結晶成長装置内400～500℃で原料ガスを供給することにより行いました。私たちはTBCl（ターシャリブチルクロライド）という塩素のエッチング原料を用い、Ⅲ族のGa原料であるTEGa（トリエチルガリウム）とⅤ族の原料であるTBP（ターシャリブチルフォスフィン）を交互に供給する手法で積層欠陥のないウルツ鋳型のGaPナノワイヤの成長に成功しました（図2（a））。ウルツ鋳型のナノワイヤのTEM（Transmission Electron Microscope：透過型電子顕微鏡）像、電子線回折パターンを図2（b）に示します。このナノワイヤは長さ500 nm程度で、使用した金微粒子の直径は40 nm程度です。TEM像では金微粒子が半球状の黒い物質としてナノワイヤ先端にみられます。電子線回折パターンは典型的なウルツ鋳型の配列パターンです。TEM像から途中に欠陥

*1 VLS法：ナノワイヤの成長法の1つで、金属微粒子を触媒とした気相雰囲気中の結晶成長法です。Au-GaPのナノワイヤの場合、触媒のAu微粒子は気相（Vapor）原料からのGaやPを溶解し液状（Liquid）になっています。そこから固体（Solid）のGaP結晶が成長します。

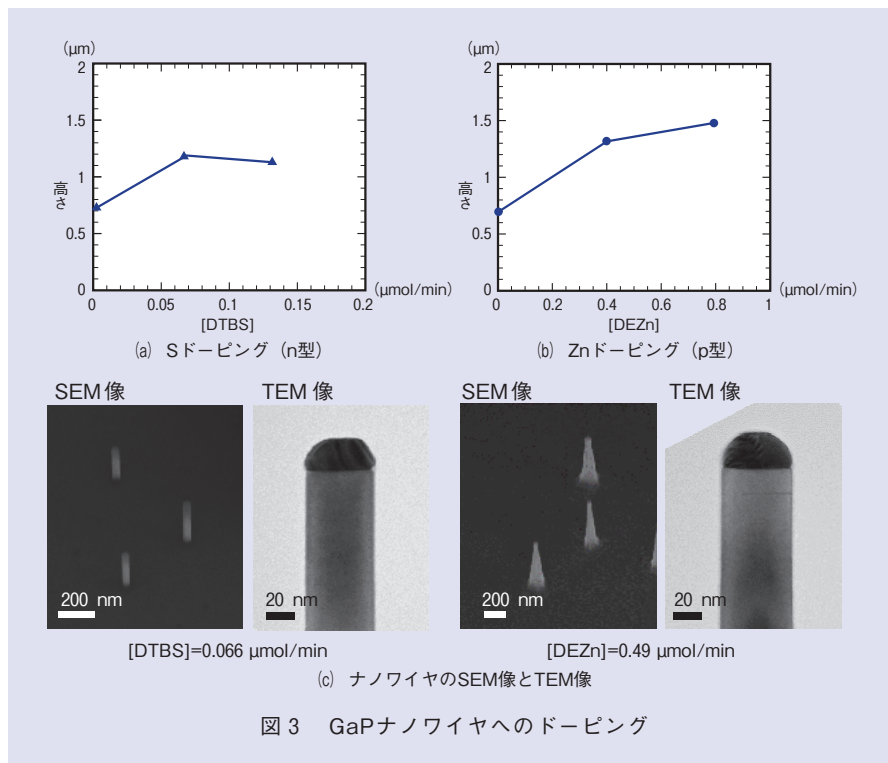


図3 GaPナノワイヤへのドーピング

などのないスムーズな側壁を持つナノワイヤであることが分かります。

ナノワイヤのドーピング

さらにp型のドーパントであるZn（亜鉛）、n型のドーパントであるS（硫黄）を成長中に加えることを試みました。ここでp型のドーピング原料はDEZn（ジエチル亜鉛）、n型はDTBS（ジターシャリブチルスルフィド）を用いました。流量に対するナノワイヤの長さの関係を表すグラフと、ナノワイヤのSEM（Scanning Electron Microscope：走査型電子顕微鏡）像とTEM

像を図3に示します。ドーピングによってナノワイヤの長さが変化し、特にp型のは原料の流量を増やすと長くなる傾向があり、また、裾が広いテーパ状となりました。このことからデバイス作製するうえでは、ドーピング量と成長速度の変化を考慮する必要がありますことが分かります。TEM像からはドーピングによりいくつか積層欠陥がみられましたが、どちらもウルツ鉱型のナノワイヤを成長することができました。不純物濃度とキャリア濃度はSIMS（Secondary Ion Mass Spectrometry：2次イオン質量分析

法)^{*2}と電気化学的手法によるMott-Schottkyプロット^{*3}より求めました。ナノワイヤが成長したサンプルを樹脂もしくはSiO₂（二酸化ケイ素）膜をスパッタ蒸着することにより埋め込み、平均的な濃度として測定しました。いずれのサンプルもドーピング原料の流量により変化し、流量を大きくするとナノワイヤ中の不純物濃度、キャリア濃度は増加することを確認しました。また、不純物濃度、キャリア濃度ともに10¹⁸cm⁻³程度の濃度を得ることができました。用いた測定手法は分散した多数のナノワイヤの平均的な情報を得ているため、より正確な測定のために1本のナノワイヤの測定法を今後考えていきます。

ナノワイヤ光電極

太陽光による水素生成を確認するためp型n型のウルツ鉱型GaPナノワイヤ光電極の光電気化学的測定を行いました。カソード電極であるp型サンプルを用いた結果を図4に示します。ここではp型のGaP基板と、p型GaPナ

*2 SIMS：基板にイオンビームを照射し、スパッタリングされてイオン化した原子や分子を質量分析により測定する分析法です。スパッタリングにより基板が削られるため、深さ方向の元素濃度分析が可能です。

*3 Mott-Schottkyプロット：半導体電極の電気化学測定において、電位に対して微分容量の二乗の逆数をプロットすることで傾きからキャリア濃度を求めることができます。微分容量はインピーダンス測定により求めます。

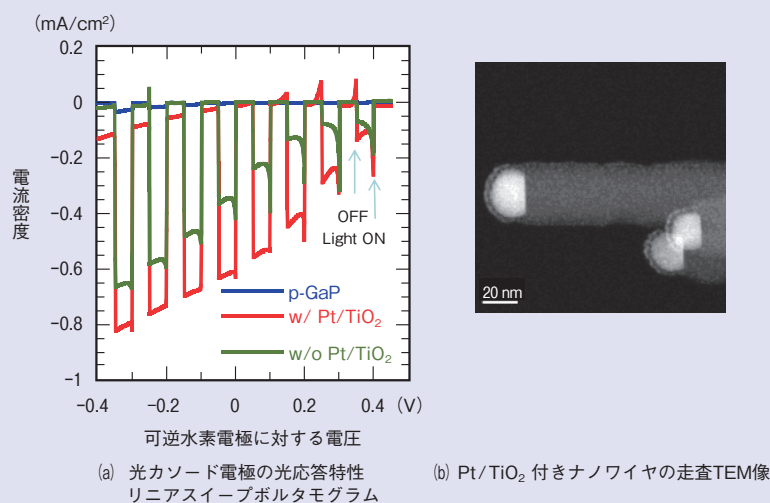


図4 ナノワイヤ光電極

ノワイヤで保護膜のTiO₂（二酸化チタン）と助触媒のPt（白金）微粒子を付けたものと付けていないものとで比較しています。Pt/TiO₂を付けたGaPナノワイヤの構造を図4(b)に示しますが、薄膜のTiO₂がナノワイヤを均一に被覆し、Ptの微粒子が分散して形成されている様子が分かります。測定は疑似太陽光（ソーラーシミュレータ，AM1.5G）を用いて、電圧を走査しながら光のON/OFFを繰り返して電流測定しています。電解液は0.5 M H₂SO₄ 水溶液を用い、対極はPt電極を用いました。GaP基板のサンプルに比べてGaPナノワイヤサンプルの光電流出力が大きいことが分かりました。また、Pt微粒子を分散したTiO₂

付きナノワイヤサンプルではナノワイヤの劣化がないことも確認しました。密度は70~110 μm⁻²と比較的高密度まで評価しましたが、長さが1 μm以下で長くできなかったことと、長さにはばらつきがあることに起因して光電流自体は予想よりも低い値でした。n型のナノワイヤにおいても同様の測定を行いました。保護膜を付けたサンプルであっても腐食による劣化が確認されました。今後最適な保護膜を調べ、また、光電流出力を上げるための最適なナノワイヤ構成を設計していこうと考えています。

ナノワイヤ太陽電池

最終的にめざす太陽光による水分解

素子はpin型フォトダイオードであるため、pin型ナノワイヤを成長して太陽電池特性を調べてみました。pin型ナノワイヤの成長後のSEM像と、太陽電池作製後に疑似太陽光を用いて測定した光電流-電圧特性を図5に示します。太陽電池はナノワイヤの成長した基板表面をALD（原子層堆積法）で5 nmアルミナを堆積させた後に樹脂で埋め込んで平坦化し、ナノワイヤ先端をエッチングで露出してから基板裏面とサンプル表面に電極を形成するといった工程で作製しました。サンプル表面の透明電極はITO（スズドープ酸化インジウム）を用いました。p, i, n層の長さはそれぞれ330 nm, 1300 nm, 330 nmに設計しました。p型層は前述のようにドーピングによりテーパー状となるため、模式図のような底の径の大きな構造となります。測定結果を次式のようなダイオードモデルでフィッティングしました。

$$J = J_{sc} - (V - R_s J) / R_p - J_0 \exp(q(V - R_s J) / (n k T) - 1)$$

ここでqは電荷，kはボルツマン定数，Tは絶対温度，J_{sc}は短絡電流密度，R_sは直列抵抗，R_pは並列抵抗，J₀は飽和電流密度，nは理想係数です。またJ=0の電圧は開放電圧V_{oc}です。結果はJ_{sc}=0.6 mA/cm²，V_{oc}=0.32 V，J₀=4.63×10⁻⁸ A/cm²，n=1.33，R_p=6.5 kΩ cm，R_s=40 Ω cmとなり、このサンプルの変換効率は0.11%となりました。

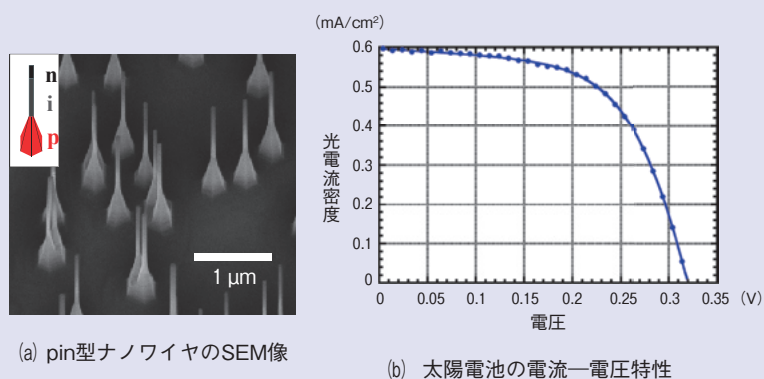


図5 ナノワイヤ太陽電池

た。この低い効率はナノワイヤの密度が低い ($9.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$) ことが影響しています。ナノワイヤ1本で換算すると $J_{sc} = 160 \text{ mA/cm}^2$ となります。このようにナノワイヤ1本で大きな光電流が見積もられるのは、ナノワイヤが周囲の光を集める効果によるためです。このことから、ナノワイヤ太陽電池を最適に設計することにより、GaPにおいても高効率な太陽電池の実現が期待されます。

今後の展開

ナノワイヤ光電極やナノワイヤ太陽電池の結果から、ウルツ鉱型のGaPナノワイヤを太陽光による水分解に利用する方向性がみえてきました。ナノワイヤは光を効率良く吸収し、大きな光電流が期待できますが、水分解に十分な2 V程度の大きな開放電圧はpin型

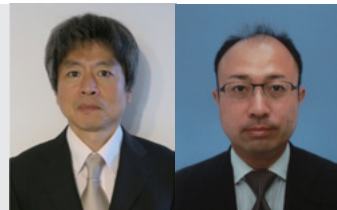
ダイオード1つでは難しいと考えられるため、ダイオードを直列にしたタンデム型を検討しています。また、腐食を防止する保護膜の材料を調べる必要があります。特にアノード側では電解液を弱アルカリにするなどの手法も必要になってくると考えられます。さらに助触媒の検討も必要です。現在、効率の良いPt等の貴金属が助触媒として広く使用されています。貴金属は希少元素であるため、将来的に他の材料に替えていく必要があります。腐食防止と助触媒の課題は難題ですが、今後とも挑戦していこうと考えています。

参考文献

- (1) A. Fujishima and K. Honda: "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode," *Nature*, Vol.238, No.5358, pp.37-38, 1972.
- (2) 館野・小野・熊倉: "光反応装置," 特願, 2017-024024.
- (3) K. Tateno, Y. Ono, and K. Kumakura: "Photo-electrochemical Properties of Wurtzite Galli-

um Phosphide Nanowires Grown on GaP (111) B Substrates," *SSDM 2016*, PS-13-12, Tsukuba, Japan, Sept. 2016.

- (4) K. Tateno, G. Zhang, S. Sasaki, M. Takiguchi, and K. Kumakura: "Wurtzite GaP nanowire grown by using tertiarybutylchloride and used to fabricate solar cell," *JJAP*, Vol.58, No.1, 015004, 2019.
- (5) S. Assali, I. Zardo, S. Plissard, D. Kriegner, M. A. Verheijen, G. Bauer, A. Meijerink, A. Belabbes, F. Bechstedt, J. E. M. Haverkort, and E. P. A. M. Bakkers: "Direct Band Gap Wurtzite Gallium Phosphide Nanowires," *Nano Lett.*, Vol.13, No.4, pp.1559-1563, 2013.

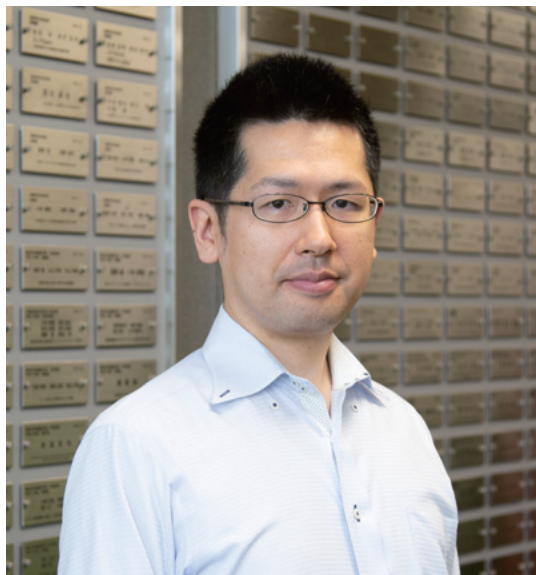


(左から) 館野 功太/ 熊倉 一英

半導体ナノワイヤはいろいろな分野への応用の可能性があります。水素生成デバイスで特徴のある性能を引き出し、将来の水素社会へ貢献できるデバイスを実現していきます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
機能物質科学研究部
TEL 046-240-3107
FAX 046-240-4729
E-mail kouta.tateno.zf@hco.ntt.co.jp



主役登場

新機能材料研究が切り拓く 新しい世界

平間 一行

NTT物性科学基礎研究所
主任研究員

私が所属しているNTT物性科学基礎研究所の薄膜材料研究グループでは、強みである結晶成長技術を活かして、新機能材料の探索・創製や、そのデバイス応用の研究を行っています。その中で私は、c-BN（立方晶窒化ホウ素）という半導体材料の作製と高品質化、そして、その材料をパワーデバイスへ応用する研究に携わっています。

パワーデバイスとは、電力を直流から交流、交流から直流へと変換したり、直流電圧の昇圧・降圧等を行ったりすることができる、「電力変換」の機能を持つデバイスです。電力変換デバイスでは、デバイスを構成する半導体材料の絶縁破壊電界が高いほど、電力損失が小さく、変換効率が高くなります。したがって、半導体中でもっとも高い絶縁破壊電界を有していると考えられているc-BNを用いれば、極めて高効率なパワーデバイスの実現が期待できます。パワーデバイスは消費電力や発電効率を左右するキーデバイスであるため、今後、世界的に普及が進むと予想される電気自動車や、太陽光・風力発電に、c-BNを材料とするパワーデバイスを利用できるようになれば、省エネルギー化や、創エネルギーの高効率化を通じて、地球規模での持続可能な社会の実現に貢献できると考えています。

その一方で、c-BNは、結晶成長が非常に難しい半導体材料でもあります。一般的に半導体の産業応用では、下地基板の上に、下地と同じ結晶面・結晶方位を持つ半導体を薄膜として成長させるエピタキシャル成長法が利用されています。これまで、実に多くの研究機関が、このc-BN薄

膜のエピタキシャル成長に挑んできましたが、成功した例はほとんどありませんでした。

私が入社後に配属された研究グループは窒化物半導体に関して豊富な知見と優れた成膜技術を持っていました。c-BNは窒化物半導体の1つである一方、ダイヤモンドと同じ結晶学的な特徴や物性を持っている材料でもあります。そこで学生時代にダイヤモンド半導体の研究を行っていた私の経験と、グループの強みを活かせると考え、c-BN研究を立ち上げました。c-BNの原料の1つであるホウ素を非常に精度良く安定して供給できる成膜装置をグループメンバーが扱っており、そのメンバーのサポートが得られたことも幸運でした。成功までには、実験機器の追加導入やさまざまなパラメータを系統的に変化させて粘り強く実験を繰り返す必要がありましたが、その過程で得られた知見を基に、c-BN成長に必要な条件が視覚的に分かる成長相図も構築できました。この成長相図は、探検家にとっての地図のようなもので、高品質なc-BN薄膜にたどり着くための道筋が示されていると同時に、c-BNの成長機構の解明という結晶成長学的な（学問的な）価値を持つものであり、c-BN研究の発展に寄与するものと自負しています。

今後も、NTT物性科学基礎研究所がc-BNをはじめとするさまざまな材料の研究拠点となり、学術と産業の両面で貢献できるよう、日々尽力していきたいと思っています。



ドコモ・システムズ株式会社

「dDREAMS」で オフィスワークの効率化と 働き方改革を実現

ドコモ・システムズはNTTドコモのビジネスインフラに関する事業で培ったスキル・ノウハウを活用し、オフィスワーク向けクラウド型企業情報システム「dDREAMS」で企業のOA業務の効率化を推進する。今回は同社の西川清二社長に「dDREAMS」の特長や今後の展開についてお話を伺った。

オフィスワーク向けクラウド型 企業情報システム「dDREAMS」

◆事業概要を教えてください。

ドコモ・システムズは、1985年、NTTをはじめとする4社の合併により設立され、その後、2000年にNTTドコモの情報システム関連の戦略子会社としてドコモグループの一員となりました。

以降、最先端のモバイルサービスを提供するための強固なビジネスインフラや、spモードなどの世界最大級のIT基盤を、確かなセキュリティ環境のもとで企画、開発、運用しています。

さらに、もう1本の柱となる事業が、ドコモのビジネスインフラに関する事業で培ったスキル・ノウハウを活用した、一般企業様向けクラウドソリューション事業です。その中心にあるオフィスワーク向けクラウド型企業情報システム「dDREAMS」は現在、NTTグループをはじめとする約23万人を超えるビジネスユーザにご利用いただいています。

◆「dDREAMS」事業について教えてください。

オフィスワーク向けクラウド型企業情報システム「dDREAMS」の事業は、NTTグループ向けと一般企業様向けの2つに大きく分かれます。

「dDREAMS」は、もともとドコモが自社開発し2002年4月に導入した企業情報システムです。その後10年以上にわたり開発・最適化を繰り返し、ドコモグループ6万人の日常業務になくてはならないシステムとしてグループの発展を支えてきました。そして2014年7月にクラウドサービスとして提供を開始し、現在、NTTグループ企業57社、一般企業176社にご利用いただいています。



ドコモ・システムズ 西川清二社長

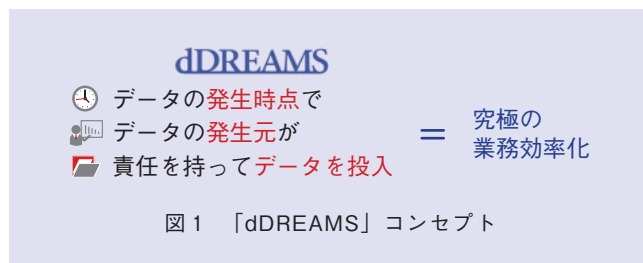
特にNTTグループ企業の事業運営に貢献するため、次のような観点で、今日もたゆまぬブラッシュアップを重ねています。

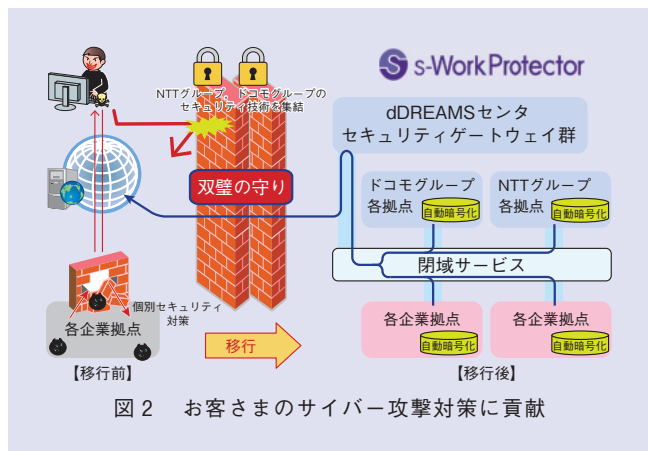
- ・ 事業環境の変化に対応するITガバナンス強化
- ・ 高度化・多様化する脅威に対する統一的かつ高度なセキュリティ強化
- ・ 厳格かつ統一的なコンプライアンス強化
- ・ グループ内IT投資重複の徹底排除によるコスト効率化
- ・ ワークスタイルの高度化による業務効率の向上

◆「dDREAMS」の特長を教えてください。

「dDREAMS」の特長は、オフィスワークの効率化をお客さま目線（利用者観点）で徹底的に追求し、間接業務の削減によるコスト削減、申請・承認フローの透明化によるコンプライアンス強化などを実現するサービスだということです。さらに、モバイルキャリア「ドコモ」であることの強みを活かして、スマートフォンやタブレット端末から、場所を選ばずどこでも使用できる利便性に優れていることです。

「dDREAMS」は、“データの発生時点で”、“データの発生元が”、“責任をもってデータを投入する”，これが究極の業務効率化につながるというコンセプトを基に構築されています（図1）。例えば、社員の作業延長線上で自然





にデータ入力完了する、つまり自分のスケジュールに予定（出張、勤務時間、休暇等）を登録することにより、リアルタイムにワークフローを介して申請、承認され、その後旅費が支払われ、給与計算が行われ、休暇管理が行われる仕組みになっています。ドコモグループにおける業務効率化、コスト削減効果の一例を紹介すると、**旅費申請関連業務の稼働時間は52%減、支払い業務等の業務委託コストは73%減、電子化による紙コストは96%減**という実績があります。

「dDREAMS」各単体機能を一般企業へ展開

◆具体的な取り組みを教えてください。

「dDREAMS」は、2014年7月にクラウドサービスとしてスタートしましたが、まずはNTTグループの次期共通系システム（業務フロント・人事給与）として最優先に提案させていただきました。一般企業向けの展開は2017年から本格開始しています。

さらに、2018年からは「dDREAMS」各単体機能を【sシリーズ】として提供を開始しました。

【sシリーズ】

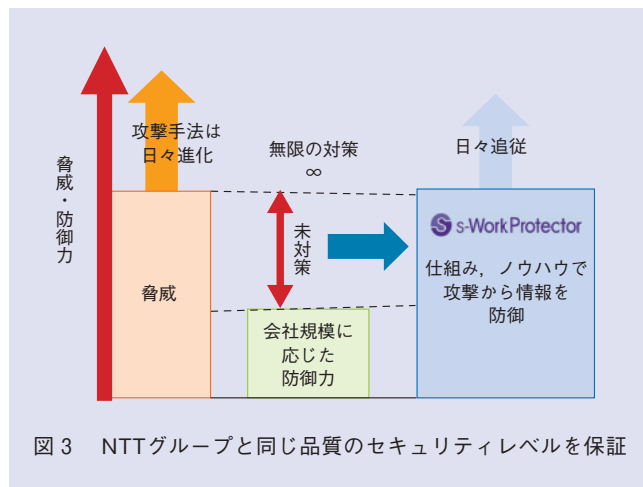
- ・ 仮想デスクトップサービス（s-WorkSquare）
- ・ クラウド型Web会議システム（s-Meeting）
- ・ 統合セキュリティサービス（s-WorkProtector）
- ・ 労働時間適正化システム（s-WorkController）

これにより、お客さまが求める機能だけを手軽にご利用いただけるようになりました。

◆今後の展開を教えてください。

NTTグループ向けについては、未導入の会社へも引き続き柔軟に提案を続けていきます。また、すでにご利用いただいている会社につきましても、その業務運営について徹底的に考察し、効率化を追求し、お客さまにとって最適な提案に取り組んでいきます。

既存システムと並行してご利用いただいているお客さまのさらなる業務効率化に貢献するためには、「dDREAMS」の大きな強みである、「スケジュール起点の業務執行」の



メリットを提案し、「「dDREAMS」の利用深化」による効率化、業務適正化を実現するお手伝いをさせていただきたいと考えています。

また、「働き方改革」の1つであるテレワークの推進でも貢献したいと考えています。テレワークに必要な情報基盤（仮想デスクトップサービス）、Web会議、ビジネスチャットの積極的なご利用などを提案していきたいと思っています。

一般企業様向けの展開としては、前述の「働き方改革」推進に加えて、巧妙化するサイバー攻撃対策に貢献していくことです（図2）。NTTグループ・ドコモグループで培った力（スキル・ナレッジ）。それは、NTTグループ・ドコモグループ23万5千人が利用するセキュリティ基盤そのものです。

標的型メールに代表される巧妙化する攻撃手法は日々進化し、多様化しています。これに追随するには限りない投資と高い技術および、24時間365日の運用力が必要であり、もはやセキュリティ対策を一企業で実施することは限界に至っています。

セキュリティに100%はありませんが、お客さま企業が「dDREAMS」と同じ傘の下に入っただけであれば、**NTTグループと同じ品質のセキュリティレベルを保証し、将来にわたり、インターネットの脅威からの安心をご提供できると確信しています（図3）。**

◆将来のめざすところは何か。

将来的な「dDREAMS」のめざすところとして、「日本のセキュリティゲートウェイ」「テレワークソリューションのトップカンパニー」となること。つまり、セキュリティとテレワークで日本社会を牽引し、貢献することです。この大きな夢のために、社員1人ひとりが日々、最新のIT専門力を磨き上げ、研さんを重ねています。

最後に、これからも安心・安全なサービスを提供するために、営業～開発～運用といった担当横断マネジメントを実施し、常にお客さま目線でサービス品質の持続的向上、安定稼働の継続を実施していきます。

OA業務効率化をめざすNTTグループの「dDREAMS」の導入を支援

クラウド事業部

プロモーション部 アカウソトサービス担当

担当課長 九鬼 和子さん

◆ご担当されている業務について教えてください。

「dDREAMS」主管の事業部である弊社のクラウド事業部、その中で私は現在、NTTグループを担当する営業部に所属しています。特にNTTグループの中でも持株帰属系会社様を担当させていただいています。

2002年にドコモがグループ全体の業務改革の観点から「dDREAMS」の前身であるDREAMSを構築し、当時私はドコモグループ内で利用を浸透させるためにシステムの機能や使い方の説明をする仕事をしておりまして、社員が慣れるまでは本当に大変でしたが、3年くらい経つと「DREAMSがないとスケジュールも精算もできない」といった声が聞こえてくるほど、ドコモグループの中ではDREAMSがないと生活できないところまで広めることができました。



九鬼和子さん

2016年からこの「dDREAMS」を本格的にNTTグループに導入いただくことになりましたが、NTTグループ内では独自に構築されたソフト等が多岐にわたることから、機能がすべてそろったフルセットではなく、フロント機能といわれているスケジュールをメインとしてご利用いただくという取り組みになりました。

2019年5月の時点で、今後の予定も含めてNTTグループでは57社に導入、約16万人の社員の皆様にご利用いただいています。

◆NTTグループへの「dDREAMS」導入のお話を伺えますか。

2016年、NTTグループの次期共通系システム（業務フロント・人事給与）として、スケジュール・勤務管理、給与支払いをグループの共通システムとしてご利用いただくというプロジェクトがスタートしました。

システムの切替は大きな作業であり、エンドユーザの方にも大きな負担がかかります。最初のお客さまから約1年半程度かけて各社には順次、システムを導入いただきました。弊社は社員数も少ないのですが、全社を挙げてお客さまの拠点に出向いて現地支援を行い、少しでもスムーズに

で導入いただけるよう工夫をいたしました。

とはいえ、いろいろトラブルもあり、大変で迷惑をおかけしましたし、やはり使い慣れたシステムが一番いいに決まっていますから、当初は多くの苦言をいただきました。それでも最近は少しずつ、「いいよね」と言ってくれるお客さまが増えてきました。ドコモグループでも「空気のように」なるまでには5年くらいかかりましたから、少しずつ便利に使っていただけたらありがたいです。



最近ではセキュアな環境で「働き方改革」を実現するために「dDREAMS」の基本サービスだけではなく、「仮想デスクトップ」「チャット機能」など、オプションサービスにも目を向けていただけるようになっていきます。

◆「dDREAMS」をさらに広めていくうえで課題はありますか。

同じNTTグループ会社であっても、勤務形態や給与体系はかなり異なります。そのため、クラウドサービスとはいえ、個別に調書を作成いただき、その調書をベースとしてサービスを提供するというかたちになります。規模にかかわらずある程度のカスタマイズが必要になるので、これをいかに効率良く行うのが課題になっています。

また近年、NTTグループの中では新たな会社の立ち上げや、グループ統廃合による再編成が非常に多く、私が担当している中でも、エネルギー系の会社やメディカル系の会社、街づくり事業を行う会社ができたりしています。今までは「dDREAMS」の導入には半年程度の時間をいただいていたのですが、会社の設立がスピーディになり、4月にお話をいただいて、「九鬼さん、7月から使いたいんだよ」と相談を受けることもあります。「他のシステムではなく「dDREAMS」を！」というご要望を頂戴し嬉しいところではありますが、私どもとしてはお話をいただいてから導入までの期間の短さが目下の悩みどころとなっています。

OA業務をグループ全体で「dDREAMS」に共通化することによって、統廃合や再編成で社員が新しい会社に行ってもそのまま業務をスタートできて、社員のストレスを軽減するばかりか業務の効率化にもつながること、これが当初の次期共通系のあるべき姿でもあるため、なんとかご要望にこたえられるよう奮闘しています。

今後は、組織や制度の変更にいかに柔軟かつ迅速に対応できるシステムに進化していくかということがNTTグループ向けの「dDREAMS」の課題だと思っています。

◆今後の展望について伺えますか。

現在の「dDREAMS」はタブレット版が標準となっておりますが、先々を見据えて、インストールやアップデー

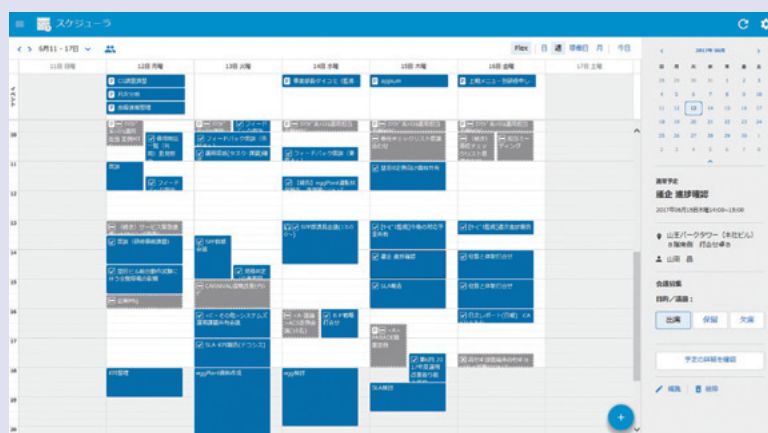


図4 昨年12月にリリースしたWeb版スケジュール

トが不要な、Webベースの仕組みに徐々に変更していきたいと思います（図4）。インフラに依存せず、どこにいても携帯電話とタブレットがあれば作業ができる、そういう環境をご提供できれば、と考えています。

私が担当しているNTTグループのお客さまは、いろいろな優れた技術をお持ちです。「うちの技術を“dDREAMS”で活用できないだろうか？」というお話をいただくこともあり、開発のメンバーと一緒にデモを拝見したりしています。私たちがご提供するサービスをただご

利用いただくのではなく、お互いにWin-Winになるような「橋渡し役」ができれば、なにより嬉しいです。NTTグループの方々には時にはご迷惑をかけ、お叱りをいただくこともあります。そこから多くを学ばせていただいています。今後もさらなる信頼関係を築いていけるよう、お客さまのお困りごとに対して、目先のことでなく、将来まで見据えた提案ができるような営業担当になりたいと思いますし、チームのメンバーも同じ思いで、日々研さんしています。

ドコモ・システムズ ア・ラ・カルト

■富士山環境保護活動

ドコモ・システムズでは社員やビジネスパートナーとその家族が参加する、富士山環境保護活動を約20年続けており、今年は富士宮市の西臼塚で外来種の駆除と森づくりの活動を実施（写真1、2）。単に作業だけではなく、その作業にどのような意味があるのか講師に解説していただくミニセミナーもあり、学びのある活動ということで子どもたちからも喜ばれているそうです。



写真1



写真2

■桜の写真の投稿コンテスト

毎年、春になると社内コミュニケーションサイト「oasis」で桜の写真の投稿コンテストが開催されています（写真3、4）。旅先でふとスマホで撮影したような写真もある中、専門家と見まがうほどの写真も投稿され、周囲の社員から「見ました！」と声をかけられたりするなど、社員どうしのコミュニケーションにも一役買っているそうです。



写真3

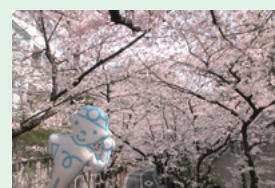


写真4

高速なソフトウェアルータを内製するという最先端技術への新たな挑戦

NTTコミュニケーションズ技術開発部では、将来のソフトウェア制御の需要を予見した通信基盤に寄与できるソフトウェアルータ（コードネーム：Kamuee）を内製開発してきました。Kamueeは新規アルゴリズムPoptrieにより大規模経路数においても高速な性能を発揮できることが大きな特長です。複雑なユーザ要求を迅速に実現するソフトウェア・ネットワーク管理をめざして、開発を続けています。

背景

NTTコミュニケーションズ（NTT Com）の技術開発部は、会社のサービス戦略に基づき、グローバル市場での競争優位を獲得できる技術開発戦略の策定と、その戦略に基づいた「開発」「検証」「育成」を行います。将来有望な技術を調査・研究開発し、通信事業・サービスに貢献することがミッションです。そのような活動では、新しい技術や機能を通信ネットワークに追加して試すことが必要になることもあります。通信ネットワークへの新しい技術の追加は、自らソフトウェアを書き起こす、あるいはオープンソースソフトウェアを改変し利用すること等で実現できます。

ソフトウェアルータ開発

ソフトウェアを使ったネットワークでは、長年の間、性能が課題でした。従来のソフトウェアは、ハードウェアのネットワーク機器に比べ、100倍程度の性能の開きがありました。パケット転送において、ソフトウェアルータでは数 Gbit/s程度の速度しか出せませんが、ハードウェアルータでは数100 Gbit/s程度の速度が出ます。また、Linuxの経路検索の性能は2 Mpps（Million lookup per second: 100万検索毎秒）程度ですが、TCAM（Ternary Content Addressable Memory）という経路検索専用のハードウェアメモリを使えば、200 Mpps程度の性能が発揮できます。しかし、TCAMを使うには、ユーザが自由に機能を追加することが困難なハードウェアルータを利用するしかありませんでした。また、このような性能の差異は、長年の間、研究開発者が考案した新しいアイデアを実際のネットワークで利用するための、大きな障壁となっていました。

最近になって、このようなハードウェアとソフトウェアの性能の差は少なくなってきました。経路検索性能のみな

らず、パケット転送の性能においても、DPDK（Data Plane Development Kit）^{*1}、netmap^{*2}、XDP（eXpress Data Path）^{*3}などのオープンソースソフトウェアのおかげで、数10 Gbit/sから数100 Gbit/sの域まで達しています。また、NTT Com 技術開発部も協力した東京大学の研究プロジェクトでは、ソフトウェアでTCAMに匹敵する200 Mppsを実現するスマートなアルゴリズム、Poptrieが新しく生み出されました。これらのソフトウェアの進歩から、近年になって、ソフトウェアルータを用いて低遅延広帯域な通信基盤を構築することも夢ではなくなってきました。

Poptrieが実用に耐え得ることを実証するため、また、新しい機能を迅速に通信ネットワーク基盤に追加したり、ソフトウェアによる柔軟なネットワーク制御を実現するため、私たちは2015年からソフトウェアルータkamueeの開発を始めました。

実験室内のベンチマーク測定では、良好な数値が得られています。計測器（トラフィックジェネレータ）を利用したベンチマークの測定結果を図に示します。kamueeをハイエンドサーバ（CPU: Skylake Platinum 2基）に搭載し、100 Gイーサネット（100 GbE: Mellanox ConnectX-5）を4本、計測器と直結し、ランダム終点IPアドレスのパケットを大量に計測器からkamueeに送り、パケットが転送されて戻されたものの総量を計測しました。100 GbE 1ポートにつき12のCPUコアを割り当て、全部で48コア以上を利用しています。図のx軸はイーサネットフレームのサイズ、y軸は転送に成功したトラフィック量（単位：

*1 DPDK：OSのネットワーク機能等をバイパスし、高速にパケットIOを可能とするソフトウェアフレームワーク。

*2 netmap：DPDK同様にOSのネットワーク機能等をバイパスし、パケットIOを可能とするソフトウェアフレームワーク。

*3 XDP：Linux Kernelの機能で、TCP/IP等のプロセスにパケットが渡される前にパケットを処理可能とするソフトウェアモジュール。

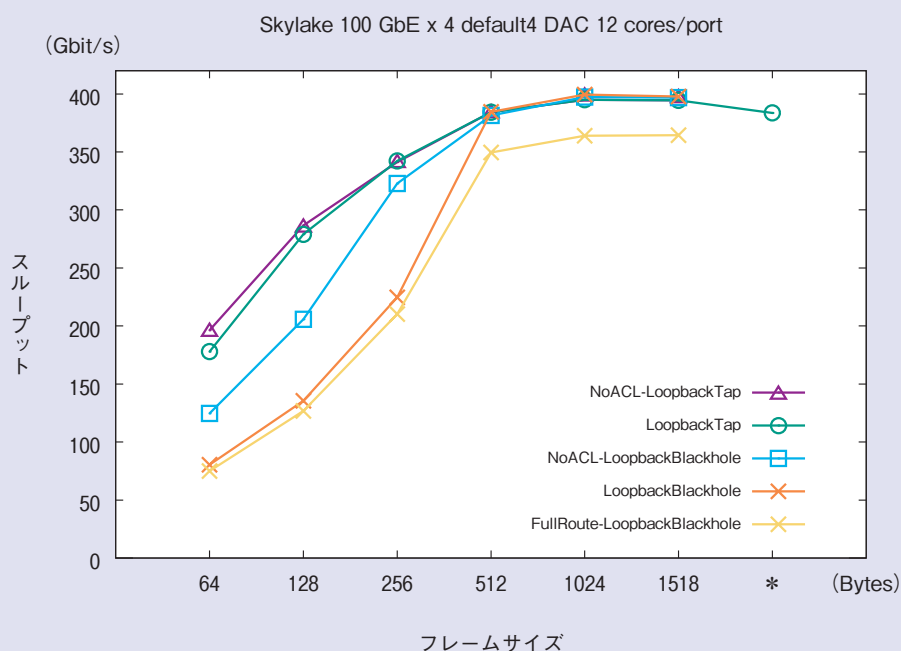


図 ベンチマークの測定結果

Gbit/s) です。もっとも性能の良い設定 (NoACL-LoopbackTap) では、64Bショートフレーム、経路数4の設定で、196.33 Gbps/292.16 Mppsを達成しました。もっとも性能の悪い、現実的な設定 (FullRoute-LoopbackBlackhole) でも、64Bショートフレーム、経路数612,916の設定で、74.87 Gbps/111.41 Mppsを達成しています。フレームサイズが512以上の場合では、全設定の中で最悪のものでも、349.60 Gbps/82.14 Mppsを実現しました。また、経路数4のもの (LoopbackBlackhole) と経路数612,916のものを比較すると、全フレームサイズを通じて性能の低下がわずかなものであることが、図から見て取れます。これらは驚くほど良好な値であり、ソフトウェアルータの見込みのある能力を指し示しています。

内製開発の利点

私たちはソフトウェアルータを内製開発することには、たくさんの利点があると考えています。まず、ソフトウェ

アルータを所有し、それをさまざまなハードウェアプラットフォームに移植 (ポータリング) することで、ベンダロックインを回避することができます。ベンダロックインの回避は、競争によるハードウェアのコストダウンや、マルチベンダ製品の利用による信頼性の向上などの利益が見込めます。また、ルータを自作することによって初めて、ネットワーク基盤の課題を深く理解したり、解決することができます。社内への技術の蓄積がなされ、それを利用した良質なサービスや、顧客の要望の解決を実現することができます。

新たなチャレンジ

現在私たちは、SRv6^{*4}という技術を身近に利用できるようにするための開発を続けています。SRv6は近年期待

*4 SRv6: ネットワークをSegmentで表現し、シンプルで柔軟な制御を実現するSegment Routingというルーティング手法でIPv6を活用するという技術。

されているルーティング技術で、通信経路の自由な指定を可能にします。通信経路の情報（パス情報）を広大な IPv6 アドレスの内部にエンコードするため、ルータ（中継機器）の負担を軽減し、ソフトウェアによるネットワーク制御（SDNへの連結）も容易であるという利点があります。内製ソフトウェアルータKamueeにSRv6機能を構築することによって、NTT ComのISP（Internet Service Provider）ネットワークや、顧客のネットワークで、SRv6という高機能、キャリアグレードネットワークの性能、ソフトウェアによる便利な管理形態などを、同時に実現できます。

今後の方向性

ISPの基幹ネットワークで利用されるような、キャリアグレードのルータには、高速に経路を検索して100 Gbit/sを超えるクラスの高速転送機能が求められますが、そのためには数千万円から1億円程度の費用がかかる高価な専用機器が必要となります。

NTT ComのKamueeは汎用PCサーバにソフトウェアを内製開発することでこれらの専用機器並の機能を実現しました。Kamueeの商用販売計画は現在検討中ですが、Kamueeを実装する汎用PCサーバの価格としては数百万円レベルの費用となるなど、飛躍的にコストを削減させる可能性があります。

また、完全国産内製開発ソフトウェアであり、すべてのソースコードをNTT Comが把握しているため、セキュリティ上の問題や、バグ発生時の対応のしやすさなどのメリットもあります。

2018年のInterop Tokyo 2018のShowNetにおいて、高い転送性能が求められる5台のバックボーンコアルータのうちの1台を担いました（写真1）。メジャーベンダのハードウェアルータと肩を並べ、5ポートの100 GbEでフルルートを扱えるソフトウェアルータとして実際に運用に使えることを実証しました。また今年のInterop Tokyo 2019のShowNetにおけるSRv6対応ルータとして展示しました。

今後さらなる機能追加開発や実証実験等により実績を積み重ねたうえで、商用化開発を行い、NTT Com自社サービス網への導入、他社通信事業者・通信機器メーカーなどのサービス開発や、お客さまへのソリューション提供な



写真1 Interop Tokyo 2018のShowNetにおいて運用したソフトウェアルータ

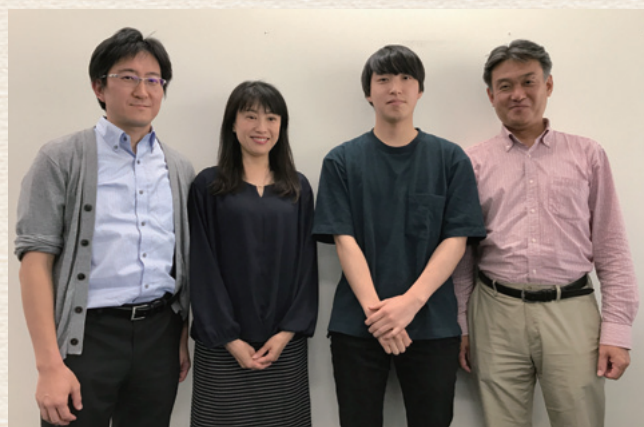


写真2 Kamuee開発メンバー

ど、さまざまな場面での活用を検討していきます。

このように私たちは、高機能かつスマートなソフトウェアによるネットワークの管理を実現する、次世代の通信基盤の構築を、ソフトウェアルータの実現を通じて、進めていきます（写真2）。

◆問い合わせ先

NTT コミュニケーションズ
技術開発部
TEL 03-6733-8631
FAX 03-5439-0483
E-mail kamuee-contact@ntt.com

ニコニコ超会議

コラボレーション

情報発信

ニコニコ超会議2019「日本電信電話ミカカランド・NTT超未来研究所6」出展報告

もちづき たかよし†1 かとう ひでお†1 せがわ とおる†1 むらもと あつゆき†1 たかやま あきら†2
 望月 崇由 /加藤 英男 /瀬川 徹 /村元 厚之 /高山 陽 /
 たまおき まさひろ†2
 玉置 真大

NTT研究企画部門†1 /NTTドコモ†2

NTTは、2019年4月27～28日に幕張メッセで開催された「ニコニコ超会議2019」に6回目の出展となるNTTブース「日本電信電話ミカカランド・NTT超未来研究所6」を出展しました。ここでは、本ブースの展示について紹介します。

日本電信電話ミカカランド・NTT超未来研究所6のコンセプト

「ニコニコ超会議」とは登録会員数6000万人を超える「ニコニコ動画（通称：ニコ動）」のすべて（だいたい）を地上に再現するニコニコ最大の参加型催事イベントです。日本のサブカルチャーを代表するコンテンツをはじめ、さまざまなエンタテインメントが一堂に会し、素人から著名人まで垣根なく出演者が集まります。NTTでは2013年7月より株式会社ドワンゴが提供するniconico（ニコニコ動画・ニコニコ生放送）等とNTTの研究所が持つ技術の高度化や適用領域の拡大によるサービスの進化、より効率的なサービス提供を図ることを目的に業務提携しており2014年4月に初めて「NTT超未来研究所」を出展しました。

6回目の出展となる今年は、NTTの最新技術から、AI（人工知能）「corevo[®]」、VR（Virtual Reality）、視覚や触覚といった人間の五感、光ファイバに関連した出展、現実とバーチャルの織りなすステージを通じて、「もし今の最先端技術をテクノロジー黎明期の80年代に使ったら」というコンセプトでブースを構築しました。

今年も、コラボレーションパートナーとの共同展示に加え、NTTドコモからも5Gを利用して、より魅力的な世界を創り上げる最新技術やコンテンツなどを出展しました。最先端の技術とそれにつながる昭和から平成の展示を通じて、今年も規模を拡大し、過去最大のスケールでNTTの技術を分かりやすく紹介しました。

なお、NTTでは本ブースに加え、2016年から引き続き、ICTを用いた新たな歌舞伎「超歌舞伎 Supported by NTT 今昔饗宴千本桜（はなくらべせんぼんざくら）」に超特別協賛しました。超歌舞伎は今年で4回目となり、超高臨場感通信技術「Kirari!」の技術進化を取り入れ、超歌舞伎ではおなじみとなった“分

身の術”をさらにパワーアップさせるほか、現場を超える再現をめざした新たな演出として“変身の術”の実現にチャレンジしました。また、2018年の「積思花顔競 一祝春超歌舞伎賑一」にて、初音ミクが舞台上を練り歩き大きな反響をいただいた「両面透過型多層空中像表示装置」が、今年は国際展示場ホール内に登場し、初音ミクがホール内を練り歩き、超歌舞伎公演に花を添えました。

展示内容紹介

■超水分補給：AIロボオアシスでミカカ水、ゲットだぜ！

ロボットそれぞれに得意不得意がありますが、NTTのAI「corevo[®]」により、それらをつなげて協力し合えるようにすると、もっとロボットが身近な世の中になります。今回はNTTの音声認識・合成技術を搭載した、おしゃべり好きなロボット「SotaTM」と、モノを取ってくるのが得意なトヨタの生活支援ロボット「HSR（Human Support Robot）」を、NTTのクラウド対応型インタラクティブ制御技術「R-env:連舞[®]」でつなげることで、ここでしか手に

入らない「ミカカ水」をロボットたちがお客さまに手渡ししました（写真1）。

■NTT研究所×ヒメヒナ電子分体研究所：VTuberなりきりAI計画

参加者の皆様がヒメヒナになりきって入力した会話データを使って、人気VTuberヒメヒナのAIを作成しました。来場したお客さまにはヒメヒナAIとの会話をお楽しみいただきました。今回NTTブースとVTuber Fes Japan 2019 が開催されたホールの両方で体験できることで、相互の来場者の行き来を増やす新しい試みとなりました。

■超錯覚：超歌舞伎がリアルに見える件

鮮明な2D映像がメガネをかける と3D映像になる新たなステレオ映像生成技術「Hidden Stereo」と、光の投影と視覚メカニズムの科学的知見を応用して、印刷物などの止まった対象にさまざまな動きの印象を与えることのできる技術「変幻灯®」を活用して、超歌舞伎のポスターに彩りを与えました。不思議な視覚体験にじっとポスターを見入るお客さ

まが多く、好評を得た展示となりました。

■超高臨場：16K超ワイドで君こそラグーマン！

NTTが研究開発を進める超高臨場感通信技術「Kirari!」の中の「サウンド映像合成・伝送技術」による14 mの超ワイド映像を使って、ジャパンラグビートップリーグに所属するNTTコミュニケーションズシャイニングアークスとNTTドコモレッドハリケーンズの選手たちと一緒に、超高臨場バーチャルラグビー体験を可能としました。お客さまの横を走り一緒にトライを決めるバーチャルラグビーに大人も子どもも夢中になっていました（写真2、3）。

■当時は超速報：モールス！特訓教室2 ～魂のテレグラム編～

今回はテレグラム、英文モールスを体験していただきました。150年の歴史を持つモールス符号、トンとツーによる通信は、現代のデジタル通信にも通じるものです。打鍵器で実際にモールス信号を打ってもらい体験を通じて、電気通信の歴史に触れていただきました。

■超大移動：昔の交換機と海底ケーブル中継機、幕張に来た結果…

平成のはじめまで実際に使われていた最後のアナログ機械式交換機であるクロスバ交換機と、果てしなく続く海底で弱くなった信号をパワーアップさせる海底ケーブル信号中継機の2つの巨大展示を行い、圧倒的なスケールでお客さまの目を引いていました。

■超復活：彼方からのケータイたち

1985年にはバブル時代の象徴ともいわれるショルダーホンから、現在に至るまでに発売された携帯電話を一堂に集めました。ショーケースの前で「これこれ、私使ってた」と会話する姿が見受けられ、お客さまにノスタルジーを感じさせる展示となりました。

■超触感ラボ！

普段、意識することなく行っている「触る」という触覚をテーマに、公衆電話、スマホ、食やスポーツに分けて展示しました。

(1) 公衆電話編

人気につき、今年も引き続き振動でコミュニケーションをする公衆電



写真1 超水分補給：AIロボオアシスでミカカ水、ゲットだぜ！



写真2 超高臨場バーチャルラグビー体験



写真3 シャイニングアークスとレッドハリケーンズの選手たち

話の展示をしました。本展示は第20回文化庁メディア芸術祭で審査委員会推薦作品にもなりました。電話器の番号ボタンを押すことで、相手に「ズキューン」「パーン」などのオノマトペ（擬音語・擬態語の総称）で表されたさまざまな触感スタンプを送ることができ、送られたスタンプはお腹と背中に装着された振動スピーカーを介して相手に伝えることができます。さまざまな振動の組合せでメッセージを伝える、身体で感じる新しい伝え方を体験してもらいました（写真4）。

(2) スマホ編

未来のスマートフォンをイメージして、表現豊かな振動を、同時にたくさん感じさせることができる触覚のあるスマホを展示しました。映像、音声だけではなく、振動まで合わせたコンテンツをモバイルで楽しむ、スポーツの映像を振動付きで鑑賞したり、没入感のあるエンタテインメントを楽しんだり、実感あるコミュニケーションをしたり、新しいモバイル体験をしてもらいました。

(3) グルメ編

コンテンツ配信に触覚情報を含めることで、映像や音声にとどまらない近未来の鑑賞体験をつくり出すことができます。そして実は、食べる感覚（＝食感）にも触覚情報がたくさんあり、パリッとせんべいを食べる振動、すると蕎麦をすすする振動、それらも触覚情報として送り、美味しそうに食べている人の食感を、映像と振動するクッションを抱きかかえてもらうことで、お客さまに感じてもらいました。

(4) スポーツ編

スポーツのエッセンスを、触覚を通して体験してもらう展示をしました。選手の感覚や動きのリズム、会場の盛り上がりや、身体的な体験に置き換え、机を叩くことで、テニス観戦を一緒にしたときの振動を共有する体験をしてもらいました（写真5）。

■超ゾクゾク！：Comptics×VRでグッ！ときてハッ！としろ！

SXSW（South by Southwest）2019にて好評を博したComptics×VRの展示をしました。体感型コンテンツのデザイン・シェアを可能に

するCompticsシステムを活用し映像体験の拡張や、今まで体験したことのない世界を切り取り体験に落とし込んだブースとなりました。バーチャル空間における音楽ライブや、さまざまなシーンをお客さまに視覚と触覚の体感コンテンツとしてお楽しみいただきました。

■超視覚測定：シカクノモリ シーズン2

「シカクノモリ」を訪れる旅人となって「光の強弱を見るチカラ」「複数の動く物を目で追いかけるチカラ」を使いながらゲームを進めることで「見るチカラ」の測定結果を確認できる展示をしました。また、誰でも気軽にプレイできる「イージーモード」とゲーム性が高くチャレンジングな「ハードモード」の2つを用意しました。ゲームを使って日常生活の中で気軽に「見るチカラ」を測定可能な「シカクノモリ」により、将来の皆様の視覚を守るものになるかもしれません（写真6）。

■ぼこぼこ不思議：磁性触覚ってなんだ！？ワークショップ

一見何もない壁を特殊なシートで



写真4 超触感ラボ！（公衆電話編）



写真5 超触感ラボ！（スポーツ編）



写真6 超視覚測定：シカクノモリ シーズン2

なぞると凸凹を感じます。その原理は2枚の薄い磁性ゴムシートどうしをこすり合わせることで、シート表面は平らであるのに、まるでボコボコとした凹凸がシート間にあるかのように感じられるというものです。磁石という身近な素材を使い、不思議なボコボコを自分でデザイン・体験できるワークショップを開催しました。多くのお客さまに楽しみながら磁石の不思議を体験してもらいました（写真7）。

■ゆらゆら不思議：挑戦！錯視セカイ★ビルダーズ！

模様の組み合わせ方で多様な目の錯覚「錯視」を創り出すことができる「錯視ブロック」を組み立てる展示で、見る角度によって、目に映る模様の組み合わせとともに錯視の強さが変わる不思議な立体をつくることのできるワークショップを体感してもらいました。出来上がった作品を写真撮影することによって、さらに見え方が変化することも楽しんでもらいました。



写真7 ぼこぼこ不思議：磁性触覚ってなんだ！？ワークショップ

■プロペラなし！超安全！：羽根のないドローン

羽根のないドローンは、ヘリウムガスを充填された風船によって浮遊し、さらに「空気ポンプ」として動作可能な超音波振動モジュールによって推進力を生み出し飛行します。従来のドローンは、空中を移動する際に必要となるプロペラや羽ばたく翼などが人や物に衝突すると、大きな怪我や破損につながる可能性があるという課題がありました。羽根のないドローンでは、それらのパーツの代わりに、人が触っても安全な微小な振動により風を起こす超音波振動モジュールを活用することにより、飛行時の音が静かで、安全なドローンを実現しました。羽根のないドローンの技術解説とともに、操縦するデモを体験してもらいました（写真8）。

■超没入！超絶叫！：超広視野角VRゴーグル

人間の視覚の特性に合わせた特殊なレンズを搭載した超広視野角VRゴーグルを体験してもらいました。スマートフォンを取り付けて利用す



写真8 プロペラなし！超安全！：羽根のないドローン

る一般的なVRゴーグルは、視野角が狭く、穴から映像を覗いているように感じられます。本VRゴーグルは、視野の中心領域ではくっきりと、周辺部分はぼんやりと映像を見えるという人間の視野特性を活用し、凸レンズに加えその周りに高倍率の特殊な構造のレンズを配置することで、あたかもその場にいるかのような没入感の高いリアルなVR映像を体験することを可能としました。

■超ふれあいVR：セバスちゃん握手会で萌えろ！

「ドコモAIエージェントAPI」非公式キャラクター、バーチャルメイドAI - セバスちゃんとの握手会を開催しました。バーチャル空間に入ってセバスちゃんとの握手会に参加してもらい、握手だけでなく、なでなでやお話しもしてもらうことが可能な展示となりました。本展示は「ドコモAIエージェントAPI」の音声認識技術、自然言語処理、音声合成技術を活用してAIキャラクターとの未来の握手会体験を提供し、「音声対話技術」と「VR」を融合した世界をお客さまに楽しんでもらいました。

■夢の5G：超実況ジオラマスタジオ！

TVやネットで放送されているスポーツ中継が、将来は自宅や外出先等ユーザが今いる場所にリアルタイムAR（Augmented Reality）として目の前に出現し、競技の映像や選手の動き等のさまざまな情報を観たい角度から自由な視点で楽しむことが

できるようになります。選手情報などをスマートフォンやタブレットにARで表示させる「情報の見える化」や、等身大の選手のプレイを立体的に目の前に出現させて観戦するなど、リアルタイムARによる情報の取得、および自宅のリビングやスポーツBAR、スタジアム等のさまざまな場所での自由視点によるスポーツ観戦を高速・大容量、低遅延の5Gが可能にする展示を体験してもらいました（写真9）。

■超高出力?!：レーザー光で君も金属加工職人!

これまでは短い距離しか伝送できなかった高出力のシングルモードレーザー光を、通信用光ファイバで数十～数百メートル先まで届けられるようになりました。この技術のおかげで、離れた場所の金属加工を可能としました。今回は実物ではなく、精密加工に適した高出力レーザー光を模擬したレーザー照明を使って、車のドアをいかに素早く正確に切断できるかという体験ゲームを展示しました。



写真9 夢の5G：超実況ジオラマスタジアム！

スタジオミカカ

ステージ・スタジオブースでは「スタジオミカカ」と題して、さまざまな催しを実施しました。ブース内ステージではバーチャルと現実を織り交ぜながら、NTTの技術を分かりやすく紹介し、また、バーチャルの世界をつくり出す様子をスタジオ形式で公開しました。イベントの内容や、つくり上げられたバーチャル世界はニコニコ動画の「公式チャンネル」と「R&Dチャンネル」の2つの放送で生配信し、イベントの裏も表も見えるかたちでお客さまを楽しませることができました。番組コンテンツとして「開発りサーチ！ミカカTV！」ではバラエティ形式のライトなトークをバーチャル双子

YouTuberおめがシスターズと一緒にゼミナール形式でNTTの技術を解説し、「NTT大辞典」では研究員の赤裸々な姿に迫るトークショーをお送りしました。「マー素晴らしー！」では芸人の井上マーさんと声優の杉山理穂さんのコンビでブースの様子を楽しくお伝えしました。各日の最後には「ミカカスペシャルライブ! ミュージックタッチダウン」と題して、NTTの無線触覚通信技術と電鍵を使って、新しいライブ体験を展開していきました（写真10）。

ノベルティ

今年はノベルティを6点準備しました。毎月届いていた日本電信電話からのラブレターを可能な範囲で再現したオリジナル手ぬぐい「みかか



写真10 スタジオミカカ



写真11 日本電信電話ミカカランド・NTT超未来研究所6 スタッフ

からのラブレターてぬぐい」を作成しました。また、平成の時代を懐かしく感じていただくために、技術史料館オリジナルペーパークラフトとして、「日本電信電話ミカカランド」オリジナルのショルダーホンとカード式公衆電話の2つをご用意しました。NTT東日本提供の公衆電話の使い方を分かりやすく伝える「公衆電話使い方チラシ&シール」を配布しました。「VTuberなりきりAI計画」のブースでは、超会議限定の「ヒメヒナオリジナルステッカー」をNTTブースとVTuber Fes Japan 2019でそれぞれ異なるバージョンを配布し、「16K超ワイドで君こそラガーマン!」のブースでは、体験いただいたお客さまにNTTコミュニケーションズシャイニングアークスとNTTドコモレッドハリケーンズの

マフラータオルセットを、「AIロボオアシスでミカカ水、ゲットだぜ!」のブースでは、「ミカカ水」をロボットが手渡しで配布しました。

出展を終えて

「日本電信電話ミカカランド・NTT超未来研究所6」は、多くのスタッフの協力のもと、ブースを体験いただいた方が過去最高の約5万人弱となりました。今年は、NTTドコモを含む最新の展示やNTTコミュニケーションズシャイニングアークス、NTTドコモレッドハリケーンズの両ラグビーチームの応援もあり、全体として一体感ある展示を実現することができました。最新の技術に加え、公衆電話や交換機、海底ケーブルといった「NTT（電

話屋）らしさ」のある展示も、お客さまを惹きつけることができました。今回得られた反響やアドバイスを今後の研究開発にフィードバックし、来場いただいた皆様の大きな期待にこたえられるよう一層努力していきます（写真11）。



(左から) 村元 厚之/ 瀬川 徹/
加藤 英男/ 望月 崇由/
高山 陽/ 玉置 真大

ニコニコ超会議は、NTT R&Dの日頃の研究成果をかたちにして紹介し、普段あまりリーチする機会の少ない若年層やネットユーザを中心としたお客さまにNTTの最新研究成果を体験いただくことで、貴重なフィードバックを得ることができる数少ない機会となっています。文章だけでは伝えきれない最先端の技術を体験することができるNTT R&Dのイベントにぜひお越しください。

◆問い合わせ先

NTT研究企画部門
R&D推進担当
E-mail rdplan-pr@ml.hco.ntt.co.jp



デジタルトランスフォーメーション時代に生き残るためには ——標準化機関TTCから見た技術トレンドと課題

かねこ まい ※

金子 麻衣

NTT東日本

一般社団法人情報通信技術委員会 (TTC) は、総務省認定の標準化機関として30年以上にわたり情報通信分野における標準の作成やその普及に貢献してきました。情報通信を取り巻く環境が、デジタルトランスフォーメーション (DX) の進展など劇的に変化する中で、TTCに求められる役割も変わりつつあります。グローバル市場における日本企業の現状と課題を示すとともに、今後のビジネス戦略の参考としていただくために、最新の技術トレンドとTTCの取り組みについて解説します。



■TTCとは

一般社団法人情報通信技術委員会 (TTC) は、総務省により認定された情報通信分野における標準化機関です。情報通信ネットワークにかかわる標準を作成することにより、情報通信分野における標準化に貢献するとともに、その普及を図ることを目的とした団体です。

TTCは会員制度を採用しており、現在、NTTグループをはじめとする情報通信分野、IT関連企業等98社が参加しています。会員になると、専門委員会に参加して標準化活動を行うことができるほか、セミナーやイベントに無料もしくは特別料金で参加することが可能です。専門委員会活動やイベ

ント等を通じて、会員企業どうしの交流も活発に行われています。

■専門委員会を通じたTTCの標準化活動

総務省電気通信システム委員会の決定により、ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) *1の全SG (Study Group) *2 (SG3とSG9を除く) とTSAG (Telecommunication Standardization Advisory Group) *3に対して、日本からの寄書 (提案文書) の事前審議を行い、日本の対処方針案を作成するとともに、必要に応じて日本寄書の提案を電気通信システム委員会に対して行うアップストリーム活動を付託されています。また、ITU-Tの勧告A.5 *4、A.6 *5によりITU-T勧告が標準文書を参照できる組織として認定を受けるとともに、ITU-TとTTCとの間での情報交換ができる関係の組織として認定されており、これらの一連の活動はTTC内の専門委員会が行います。

通信網のレイヤ構造に基づく5つの技術領域に対し、18の専門委員会が組織され、技術分野やテーマ別に、最新の技術分野・テーマについて情報収集を行うとともに、標準化に関連する議論を行っています。専門委員会以外に、サブワーキング (SWG)、アドホックグループ、連絡会があります (図1)。

■TTCの標準化事例

2018年に勧告化 (標準化) された、標準化事例を2つ紹介します。1 番目

は、イマーシブテレプレゼンス技術「Kirari!」のILE (Immersive Live Experience) で、スポーツ競技やエンタメ系公演等を遠隔地へリアルタイムに伝送し、超高臨場感ライブ体験を実現する技術です。日本からの提案で、サービスシナリオやフレームワーク等が標準化されました。2 番目は、宇宙線が主たる原因で発生する地上の通信装置の誤動作であるソフトウェア対策に関する設計・試験・評価の方法および品質基準を定めた国際標準です。ソフトウェアとは、永久的にデバイスが故障するハードエラーではなく、デバイスの再起動等によって回復する一時的な故障のことです。ソフトウェアの原因となる中性子を発生させる施設ができたことで、通信装置への影響を測定できるようになり、設計や評価指標が求められていました。そこで、日本から積極的に提案をして、「標準は従うものではなくつくるもの」という戦略を体现した事例となります。

*1 ITU-T: ITUは国際連合の専門機関の1つで、電気通信分野の各国の標準化と規制の確立を担います。ITU-Tは部門の1つで、通信分野の標準策定を担当しています。

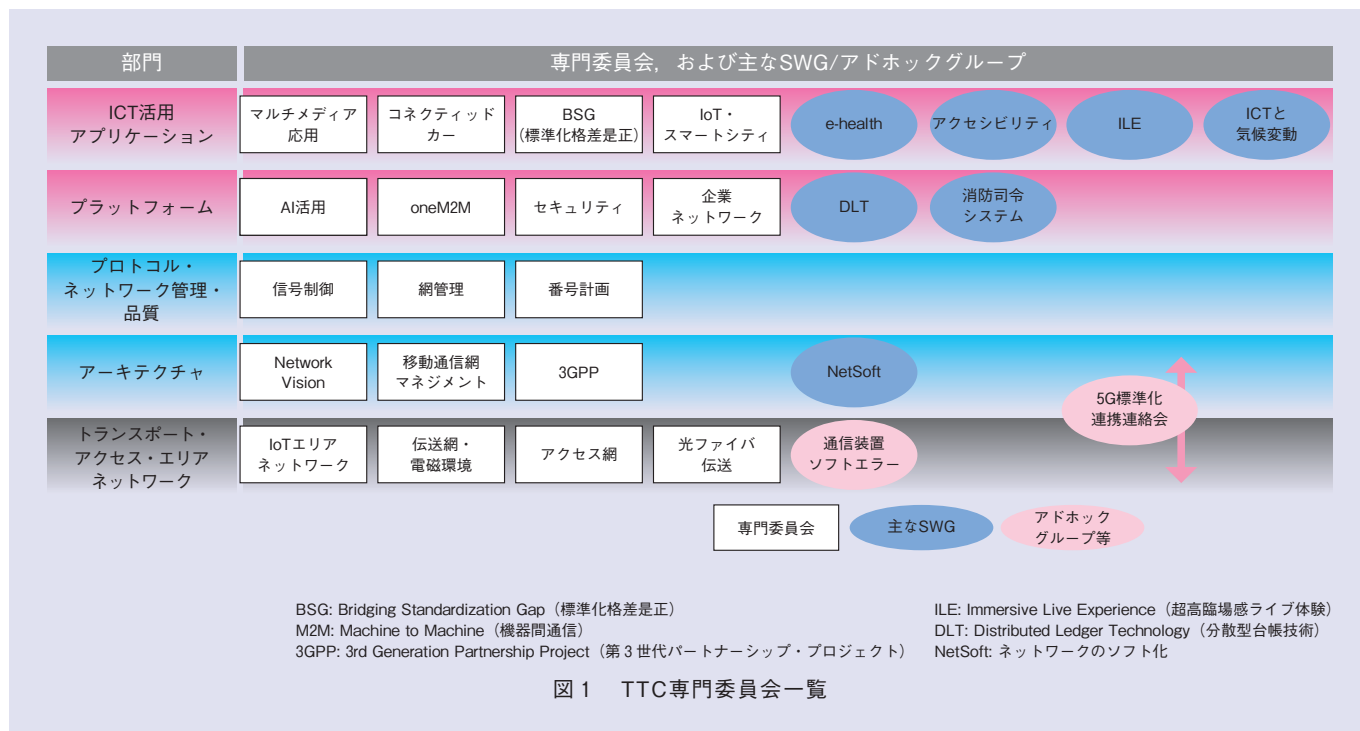
*2 SG: テーマ別に組織されている研究員会。

*3 TSAG: SGと並列の位置付けで、標準化活動の管理運営面に関する各種の助言を行います。

*4 勧告A.5: 他の標準化機関の標準をITU-T勧告に参照引用するための一般的手続き。

*5 勧告A.6: 各国や地域標準化機関とITU-Tとの間の情報交換や協力のための手続き。

※ 現、一般社団法人情報通信技術委員会

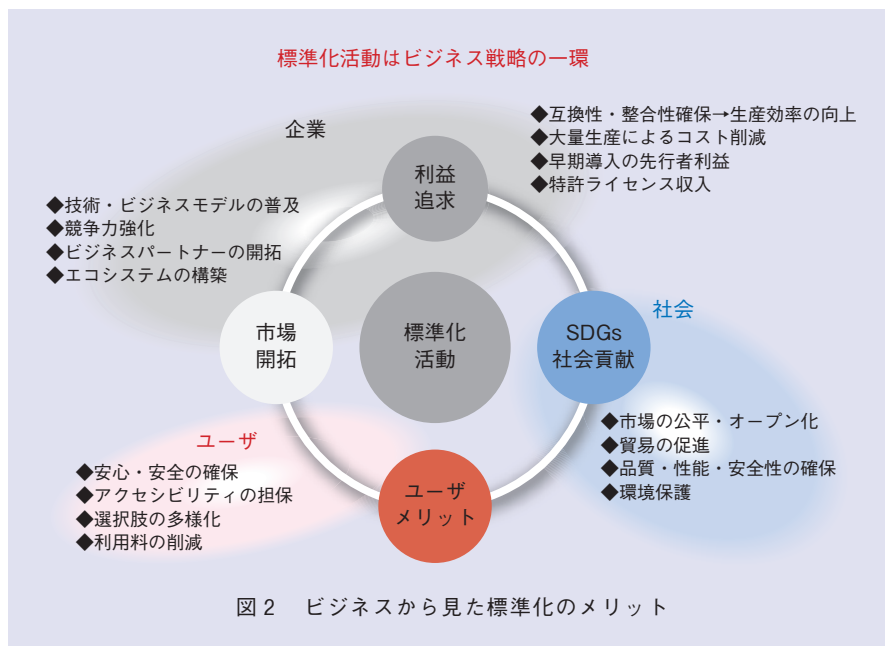


標準化の意義

■ビジネスから見た標準化のメリット

標準化は、ビジネス戦略の一環で多くのメリットをもたらします。企業側は標準化によって、互換性・整合性が担保されるため、生産効率の向上を図ることができます。また、規格化されたことで量産化と単純化が進み、コスト削減につながります。さらに、標準化技術をいち早く取り入れることで、先行者利益につながり、ライセンス収入等も見込めます。最終的には、技術やビジネスモデルが普及することで競争力が向上し、ビジネスパートナーにも恵まれ、結果的に関係者全員が利益を得ることができるエコシステムを構築することも可能です。

このように、市場がオープンになることで社会的には貿易が促進し、環境や基準を満たすよう定めることで安心



と安全性の向上にもつながります。ユーザにとっても、安全性が担保されるのはもちろんのこと、標準化された仕様によってさまざまな企業が参画し、多様な商品が市場に出回ること

選択の幅も広がります。まさに標準化は三方良しの戦略なのです(図2)。

■標準化の戦略的な使い分け

標準はデジュール、フォーラム、デファクトの3つに分類され、目的に



よって戦略的な使い分けが必要です。

(1) デジュール

デジュールは、ITUに代表的される公的機関により定められた標準で、TTCもデジュールに分類されます。グローバル市場と開発途上国への影響力が絶大ですが、各国の主管庁が関与することから、場合によって審議調整に時間がかかることがあります。

(2) フォーラム

フォーラムは、複数の企業で結成され、スピーディな標準策定が可能になります。代表例はIETF (Internet Engineering Task Force) *⁶、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) *⁷やW3C (World Wide Web Consortium) *⁸です。先進企業中心の力関係によって標準化が影響されるので、小規模企業や開発途上国には不利な側面があります。

(3) デファクト

デファクトは、Windows OSに代表されるように、膨大なリソースをかけて市場に広めていく事実上の標準化です。標準化によって市場にオープンにする協調領域と、競争力向上の観点で標準化しない競争領域のバランスを考慮して、戦略的に標準化を行うことが重要です。

■役割が拡大する標準化

市場が成熟し、顧客ニーズが多様化した現代において、革新的なサービスをつくりあげすることは一段と難しく、ICTの発展で加速する時代の変化についていくことは容易なことではありません。今までは自社の経営資源を活か

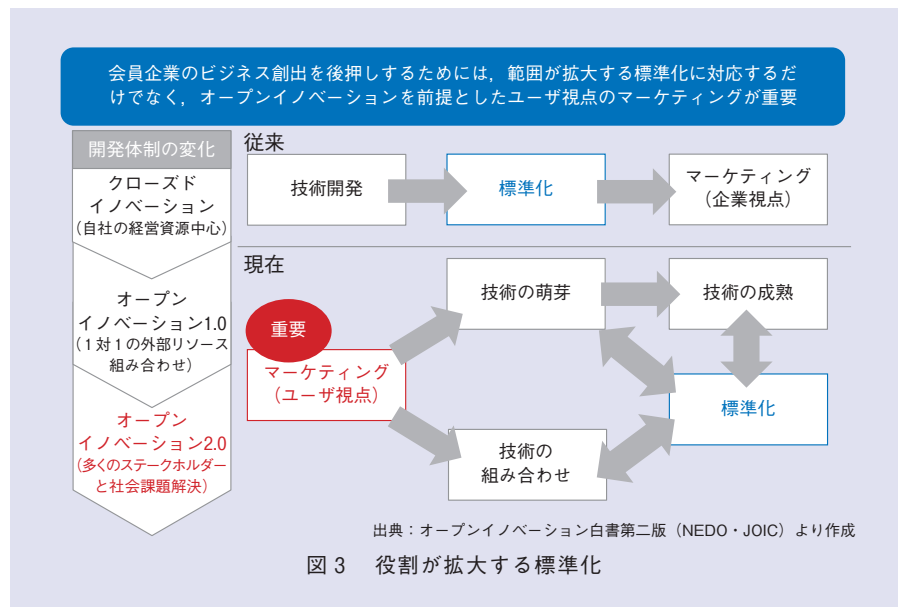


図3 役割が拡大する標準化

した技術開発から標準化を実現し商品化をするという流れでしたが、自社単独でのサービス創出に限界を感じ、企業の枠を超えてともにサービスをつくり上げていくオープンイノベーションを志向し、利用者の課題やあるべき姿からサービスを考えるユーザ起点の開発体制にシフトしています。これにより、TTCの役割も技術だけでなく、マーケティング面から企業を支援する活動に変化しています (図3)。



■企業に求められるDX&SDGs

IoT (Internet of Things)、ビッグデータ、AI (人工知能) 等社会のあり方に影響を及ぼすテクノロジーの進化で異業種連携などが加速し、産業構造の転換も著しく、既存事業のデジタル化のみならずデジタルを活用したビジネスモデルの転換を意味する「デジタルトランスフォーメーション (DX)」が進展しています。また、国連が掲げる持続可能な開発目標 (SDGs: Sus-

tainable Development Goals) の達成は、グローバル市場の共通認識となっており、日本企業にとっても、達成に向けた活動の推進が急務となっています (図4)。

■グローバル市場における日本企業の現実

グローバル市場における日本企業の現状は厳しい状況にあります。30年前、世界時価総額ランキング上位50位中、日本企業が32社を占めていましたが、2018年はトヨタの1社のみで、逆に米国が32社を占めています (表1)。IT系企業が上位に並び、中国企業の台頭も明らかです。

■CES2019にみるトレンド

米国ラスベガスで開催している世界最大規模の家電見本市CES (Consumer Electronics Show) 2019では、イノベーションアワードの受賞で韓国サムスンが他を圧倒しました。日本は、展示ブースの出展も含めて存在感はほとんどありませんでした。会場には既存技術を組み合わせたものが目立ち、日本で少し前に流行したロボット

*⁶ IETF: インターネット技術の標準化を推進する任意団体です。
 *⁷ IEEE: 電子通信関連の仕様を標準化する団体です。
 *⁸ W3C: Web技術の標準化を行う非営利団体です。



や美容家電にセンサを付け足したようなプロダクトが多数出展されていました。何もイノベーション=最先端技術というわけではありません。既存技術の組み合わせや焼き直しで上手に見せることも、イノベーションといえるのです。

■ITU-T参加企業の動向

デジュール標準の代表格である

ITU-Tの会員が急上昇しています。量子通信、デジタル通貨、MVNO (Mobile Virtual Network Operator)、OTT (Over The Top) など従来のIT通信系が半分以上を占める中、保険会社や自動車等の異業種も加入し、参加企業種別の範囲が拡大しています。2017年以降の日本の加入は4社(キヤノン、村田製作所、ソフトバンク、

IIJ) ですが、中国は13社、米国は15社と桁が違います。ITU-Tの国別寄書数では、中国からの寄書が27%でトップ、次に韓国11%、米国10%、日本4%と続きます。中国は企業だけでなく政府も積極的に活動に参加しています。

■世界のSDGs対応

世界のSDGs対応でリーダー的な企業50社に日本は選ばれていません。米国が圧倒的に多く、ヨーロッパで半数、アジアでは香港、シンガポールの企業が含まれています。業種では医療系、インフラ、化学メーカーが多くなっています。SDGsの取り組みでも日本は後塵を拝しており、SDGsのルールづくりは、欧米を中心に進行していくといわざるを得ません。

2019年度重要技術分野と取り組み状況

TTCでは、ITU-Tの動向を常にウォッチしています。ITU-Tは、「Smart ABC (AI-Banking-Cities): ICTを革新的に利用して生活の質、

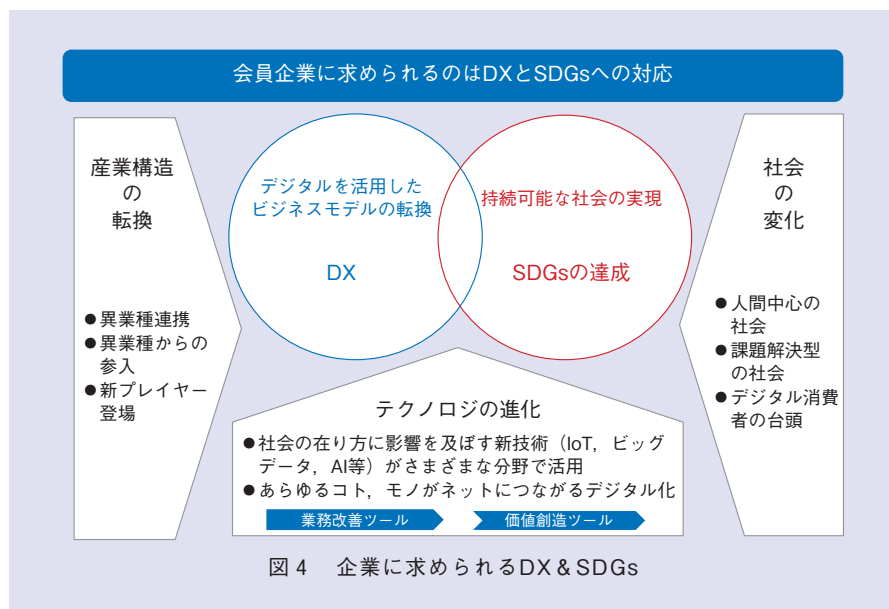


図4 企業に求められるDX & SDGs

表1 世界時価総額ランキング比較

	1989年			2018年		
	企業名	国名	業種	企業名	国名	業種
1	NTT	日本	通信	アップル	米国	IT
2	日本興業銀行	日本	銀行	アマゾン・ドット・コム	米国	IT
3	住友銀行	日本	銀行	アルファベット	米国	IT
4	富士銀行	日本	銀行	マイクロソフト	米国	IT
5	第一勧業銀行	日本	銀行	フェイスブック	米国	IT
6	IBM	米国	コンピュータ	バークシャー・ハザウェイ	米国	投資
7	三菱銀行	日本	銀行	アリババ・グループ・ホールディングス	中国	IT
8	エクソン	米国	石油	テンセント・ホールディングス	中国	IT
9	東京電力	日本	電力	JPモルガン・チェース	米国	銀行
10	ロイヤル・ダッチ・シェル	英国	石油	エクソン・モービル	米国	石油
11	トヨタ自動車	日本	自動車	ジョンソン・エンド・ジョンソン	米国	ヘルスケア
12	GE	米国	自動車	ビザ	米国	金融

出典：週刊ダイヤモンド 2018年8月25日号より作成



表2 ITU-TのトレンドとTTCの活動

DX時代の新規ビジネス、ICTサービスの開発推進		
MaaS	コネクティッドカー専門委員会	・自動車関連の通信技術、次世代モビリティサービス、およびクルマを使った災害時の対応等具体的に検討
ILE	マルチメディア応用専門委員会 (ILE)	・NTTのKirari!の要素技術で超高臨場感メディア同期技術「Advanced MMT」はさまざまな映像サービスの実現に活用可能
Eヘルス	マルチメディア応用専門委員会 (E-health)	・最新のマルチメディアICTを用いた遠隔医療やICT健康保健の作業項目の標準化を推進 ・Safe listening (聴覚障害を防ぐ音量制限機能等) のダウンストリームを実現
量子通信、AI等新たな標準化テーマへの対応		
量子関連	セキュリティ専門委員会	・有識者を招いた勉強会や情報処理学会と共同セミナーを開催
デジタル通貨		・サブワーキングを開設し、検討を開始
AI	AI活用専門委員会	・AIを活用したユースケースの事例を収集・解析
Network2030を見据えた将来インフラ構築に貢献		
Network2030・5G	Network Vision専門委員会	・OTTサービスと産業間連携、オープンAPI等将来のネットワークの方向性を議論中
社会課題の解決に向けたSDGsへの貢献		
SDGs	国際連携・協調	・SDGsの達成に向けて、経営幹部向けや一般のTTCセミナーを開催、TTC活動との関係を整理するなど先取りした対応を実施 ・TSAG会合で、SGの課題と17のゴールとのマッピングを示し、根拠の明確化を提案。マッピングガイドライン案を日本から寄書提案予定
スマートシティ	IoT・スマートシティ専門委員会 oneM2M専門委員会	・IoTおよびスマートシティのユースケースや実施事例を解析・把握し、国内企業へ展開

サービスの効率性、競争力を向上させていく」というスローガンを掲げ標準化を推進しています。標準化ホットトピックは、①光ファイバの新しい規格、②5G、③OTT事業者とネットワーク事業者の連携フレームワーク等、④ビデオストリーミング等のQoS（ネットワーク品質）とQoE（ユーザ体感品質）、⑤パーソナルヘルス実現に向けた相互運用性、⑥スマートシティ実現に向けたKPI（Key Performance Indicator）の6つです。

今後、ITU-Tでも議論が本格化すると想定されるトレンド（コネクティッドカー、量子通信・暗号、デジタル通貨・ブロックチェーン、AI、Network 2030 beyond 5G）にも着目し、専門委員会でさまざまな活動を行っています（表2）。



日本企業が時代の変革に対応できる人材を育成する一助になればと、オープンイノベーション的アプローチで革新的サービスのユースケースを創出する実践的な研究会を立ち上げました。全5回のプログラムは、サービス創出過程で必要なアイデアを生み出す思考法を身に付けるとともに、ユーザ視点でサービスを開発・提供する企業のキーマンからイノベーション事例を聞いたり、異なる組織に属する参加者との協働を通じたオープンイノベーション体験からなります。本施策は、拡大する標準の役割に対応するために2018年から始めた試みです。



日本企業はグローバル市場において、競争力とSDGs対応の両方の観点で遅れをとっていると言わざるを得ません。革新的サービス開発、グローバル市場への展開、異業種のキャッチアップやオープンイノベーションの推進に、TTCを活用いただければ幸いです。ここでは紹介できなかった標準化に関する情報や、最新技術情報等詳細は、TTCホームページ⁽¹⁾をぜひご覧ください。

■参考文献

(1) <https://www.ttc.or.jp/>

光通信波長帯ナノワイヤレーザの室温動作に成功 ——通信用微小レーザ光源の光回路集積に道

NTTは、独自に開発した半導体ナノ構造形成方法を用いて髪の毛の100分の1程度の太さの高品質なナノワイヤレーザ構造を作製し、ナノワイヤではこれまで実現されていなかった光通信波長帯での室温レーザ発振に成功しました。さらにナノワイヤ構造を厳密に制御することで通信波長帯1300～1600ナノメートル全域での室温レーザ発振も実現しました。本技術は、光集積回路実現に向け最大の難関であった微小レーザ光源の直接形成と光ファイバ通信網とのシームレスな接続を可能にすると期待されます。

なお、本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成金の助成を受けて行われました。

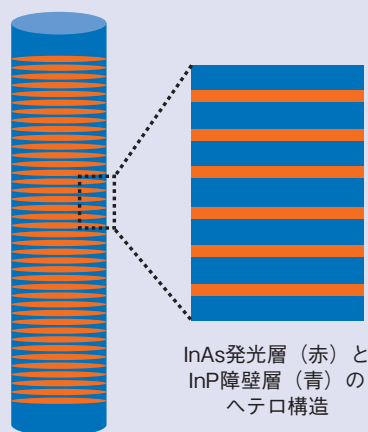
■研究の成果

今回研究チームは、従来の金や銀の異種金属を用いず、発光・障壁層構成原子と同元素である（不純物になる心配のない）インジウム金属を触媒とする自己触媒ナノワイヤ成長法を開発しました。この手法を用い、発光層に

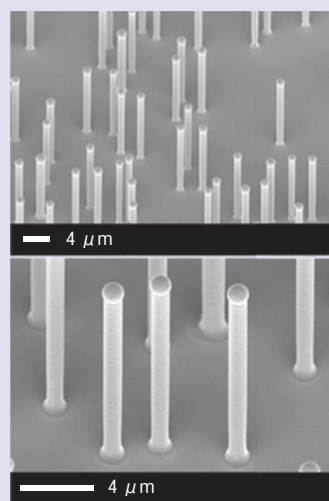
インジウムヒ素（InAs）、障壁層にインジウムリン（InP）というそれぞれ触媒金属+単一元素からなる多層膜ナノワイヤレーザ構造を作製しました（図）。これは通常二次元ヘテロ構造では大きな格子不整合のために作製不可能な層の組合せです。この構造からの光励起による発振特性を調べたところ、通信波長帯である1570ナノメートル付近でナノワイヤ構造としては初めて室温でレーザ発振を観測しました。また発光層の厚さのみを精密に変化させることでレーザ発振波長が1300～1600ナノメートルで制御可能であることも実証しました。これは現在用いられている光通信波長をほぼカバーします。

■今後の展開

ナノワイヤ構造は格子不整合の影響を受けにくい特性から、異種の半導体基板上への作製も可能です。今回実現した自己触媒ナノワイヤ成長法を、今後シリコンフォトニクスに代表される光集積回路でもっとも大きな課題となっている微小レーザ光源の直接形成に展開していきます。シリコン光回路上に直接光通信波長ナノワイヤ



(a) InP/InAs多層膜ナノワイヤレーザの模式図



(b) 実際に作製したナノワイヤレーザの電子顕微鏡写真

図 作製した多層膜ナノワイヤレーザ構造

レーザが実装できれば、光配線やコネクタにおける光損失が飛躍的に低減されるだけでなく、既存の光ファイバ網との波長変換等を必要としないシームレスな接続が可能になります。また発光層をさらに微小化することで単一光子や量子もつれ光子対発生源へ発展させ、量子光集積回路として研究がさかんになりつつあるシリコン量子フォトニクス の光源としての展開もめざします。

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157

E-mail science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

URL <http://www.ntt.co.jp/news2019/1902/190223a.html>

インパクトのある基礎研究成果をNTTのサービスにつなげることが夢

Zhang Guoqiang

NTT物性科学基礎研究所
量子光デバイスグループ

研究者 紹介

この研究を始めたのは約9年前です。その当時「自己触媒法」による高品質なInP/InAs半導体ナノワイヤ構造の作製というアイデアを思いつきました。もしこれが実現できれば、さまざまな高性能な光デバイス応用が可能になるはずだと非常に興奮したことを覚えています。しかしその作製は簡単なものではなく、このテーマを進めることへの周囲の反応も良いものではありませんでした。実は私も成功する自信は全くありませんでしたが、チャレンジングな研究テーマに取り組み、誰にも成し得ない結果を出すと心に決め、研究に没頭しました。

最初に取り掛かったのはナノワイヤでInP/InAsヘテロ構造（異なる半導体が順に積層された構造）を作製することです。これはLEDやレーザなどで基本となる重要な構造です。積層した半導体層から結晶の欠陥を取り除く高品質化も重要な課題でした。これらの実現には非常に長い時間が必要でしたが、その結果、極低温で初めてナノワイヤからの通信波長帯レーザ発振の観測に成功し、間もなくして今回の成果となる室温での発振も実現しました。このときは我ながら驚くとともに、このテーマを選んだことが間違いではなかったと確信しました。

現在は実際のデバイス応用、具体的には光集積回路の微小光源への応用に向け、電流注入によるレーザ動作や半導体基板上でのナノワイヤ配列制御などに取り組んでいます。私の夢は大きなインパクトのある基礎研究成果をNTTの製品やサービスにつなげていくことです。基礎研究の立場からNTTの事業に貢献できるよう、これからも研究を楽しみたいと思っています。



Focus on the News

NTTと東北新社、二番工房が触覚体験のデザイン・シェアを可能にするCompticsを活用した共同実験を開始 ——世界最大規模のビジネスとコンテンツの祭典「SXSW2019」にプロトタイプを出展

NTT、(株)東北新社、(株)二番工房は、NTTが開発を進めている触覚コンテンツの体験・作成・共有システムCompticsを活用した体感型コンテンツの創造をめざし、2019年2月より検証を開始しました。

NTTと東北新社、二番工房は、米国テキサス州オースティン市で行われる、音楽・映画・インタラクティブをテーマとする世界最大規模のビジネスとコンテンツの祭典、「サウス・バイ・サウスウエスト2019 (SXSW 2019)」において開催されるオフィシャルイベント「Trade Show」(2019年3月10～13日)に出展しました。

■背景

NTTはSXSW2018においてCompticsのビジョンを提示してフィードバックを得ることを目的として第一世代のプロトタイプを展示し、米国オースティンの地で映像制作のトップカンパニーである東北新社および二番工房と出会いました。連動させるコンテンツとストーリーテリングの強化が課題であったNTTと、映像体験の拡張や映像制作に限らず新規事業を検討していた東北新社および二番工房は、2019年2月より三者の共同実験を開始し、Compticsのめざす体感型コンテンツの体験・作成・

共有という世界の実現に向けた検討を進めてきました。第二世代のプロトタイプとして、東北新社および二番工房が制作した映像に合わせて、NTTが触覚のタイムラインを制作し、Compticsでの出力を実現しました。その価値検証の1つとして世界中のテクノロジー・映像・音楽関係者が集まるSXSW2019に出展することにより、体験レベルのフィードバックを収集し、2019年12月まで改良と検証のプロセスを進めます。

各社の役割分担は以下となります。

- (1) NTT
 - ・ Compticsの提供
 - ・ 触覚コンテンツの提供
- (2) 東北新社、二番工房
 - ・ ストーリーテリング
 - ・ 映像・サウンドコンテンツの提供

■SXSW2019出展内容

NTTは今回Compticsを活用した2つのコンセプトをNTTの単独、およびNTTと東北新社、二番工房との共同の各々で展示しました。

- (1) Participative Costume by NTT
Compticsを活用した新たな体験として、体験型ミュー



図1 Participative Costumeコンセプトイメージ

異国の地で始まった異業種コラボレーション

担当者 紹介

石井 鳳人

株式会社二番工房
チーフプロデューサー

物語は2018年3月米国テキサス州のオースティンという街から始まります。オースティンで開催されたSXSW2018というイベントに訪れた私は和田敏輝研究員と触覚デバイス Comptics に会うこととなります。会期中の4日間で開催されるトレードショーという展示イベントがあります。一度はトレードショーの会場を訪れていたものの、どうしてももう一度行かなくてはならないという衝動にかられ、最終日の終わりがけギリギリで再び会場を訪れたのでした。会場のドアをくぐり抜け、導かれるように歩いていくとNTTブースにたどり着きました。それまで触覚デバイスというものを見たことも触れたこともなかった私に、丁寧にそして熱く説明をしてくださる和田研究員。私は「この技術にはコンテンツの体験を変える可能性がある！」と思い、日本に帰国してからコンテンツへの応用について議論を重ねていきます。そして、出会いから1年後のSXSW2019にCompticsを活用したVRコンテンツを共同で出展するまでに至ったのです。今回の件を通し、お互いほぼ接点を持つことのない別業種どうしの人間が何かを一緒に取り組むことからイノベーションが生まれる可能性があるということを改めて実感しました。和田研究員の「熱意」と「行動力」、私の「好奇心」と「信念」が日本から遠く離れたテキサスの小さな街で2人が出会えた奇跡の所以だと思っています。この物語はまだまだ始まったばかりです。続きを楽しみにしててください。



新しい文化の醸成をめざしたコラボレーション

研究者 紹介

和田 敏輝

NTTデバイスイノベーションセンタ
ライフアシストプロジェクト ウェアラブルアプライアンス応用DP
研究員

このプロジェクトをたどっていきと行き着くのは、当時の指導者小野一善主任研究員と始めたテーマ企画です。当時、機能的価値と体験価値、エンジニアリングとデザイン、センシングとアクチュエーションの関係性に興味を持っていました。在籍していたグループはセンシングチームでしたが、センシングは何かを実現するための手段であり、我々はその先の情報提示や実世界への働きかけ（アクチュエーション）という部分にフォーカスして新しい体験価値をデザインできないかと研究開発を進めてきました。

その後、センシングと同じインタフェースを活用し、ハプティクスをコンピュータ上で作成し、体験するだけでなくインターネット上で共有することもできる世界をめざすというコンセプト“Comptics”へと進化させました。そして、インサイトやネットワークを得るため、石井鳳人さんとの出会いにもつながるSXSW2018にも出展しました。現地では、ハプティクスを自由に操られるとしたらどう使うか？という問いを投げかけながら、映像や音楽などのコンテンツとハプティクスの融合を展示しました。そんな投げかけに対し、映像体験の拡張を検討されていた石井さんがこたえてくれたわけです。

本プロジェクトME-HADA works with Compticsでは、ヘッドマウントディスプレイならではの体験を組み込むことも目的の1つとして、日常生活で体験したことのないシーンを映像とサウンド、ハプティクスで表現しています。特にその部分に関しての評価は良好で、今後のコンテンツづくりの参考に十分になる知見が得られつつあります。

最終的には、プロだけではなく一般の方がコンテンツを簡単につくって共有することもできるような仕組みの実現とそれに伴う行動様式の変化や、新しい文化を育むようなことができると素敵だなと思っています。



超伝導量子ビットによる高感度・高空間分解能電子スピン共鳴に成功 ——マイクロメートル領域での電子スピンの高感度検出

NTTは、超伝導磁束量子ビットを用いて少数電子スピンを含む微小体積の試料に対して分析を行える電子スピン共鳴の実証に成功しました。

電子スピン共鳴は物質中の電子スピンの性質を調べるための分析手法の1つで、分子構造の解析等に広く使われています。しかしながら、通常の電子スピン共鳴装置で分析を行うには 10^{13} 個程度の大量の電子スピンを含んだ試料が必要で、試料の体積も数ミリリットル（ $\sim [1\text{ cm}]^3$ ，一辺1 cmの立方体）程度必要です。そのため、分析を行える試料には制限があります。

超伝導磁束量子ビットは高感度な磁場センサとして機能します。今回の成果は、この磁場センサで小さな磁石としての性質を持つ電子スピンを検出することで電子スピン共鳴が行えることを示したもので、0.05ピコリットル（ $\sim [4\text{ }\mu\text{m}]^3$ ，一辺4 μm の立方体）の試料中の400個程度の電子スピンを検出可能です。微小体積中に少数スピンを含む試料に対する新たな電子スピン共鳴法を開発したことは、材料分析の手法として基礎科学分野から材料評価・生体分析・医療応用まで、幅広い分野に貢献

すると考えられます。

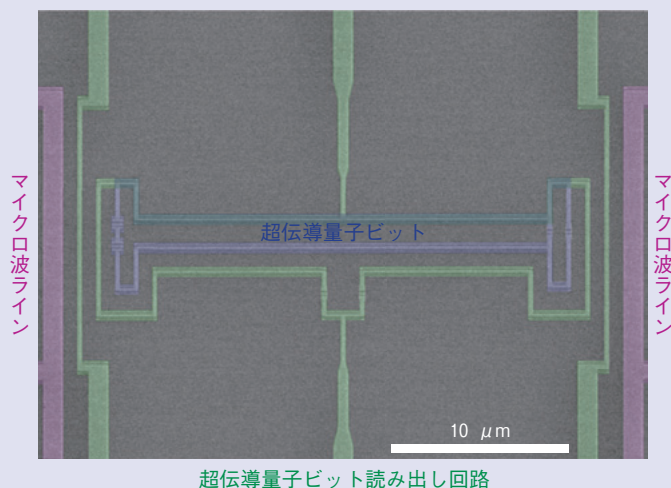
■技術のポイント

(1) 超伝導磁束量子ビットによる感度向上

超伝導磁束量子ビットは高感度磁場センサとしてよく使われている超伝導量子干渉素子（SQUID）よりも1000倍程度高い感度を持ちます。電子スピン共鳴装置の感度は測定装置等によるノイズの大きさと検出した信号の大きさを比較することで定量化しますが、実験に用いた装置のノイズを評価し、1秒間の信号を平均化することで400個程度の電子スピンを検出できることが分かりました。

(2) 超伝導磁束量子ビットによる空間分解能向上

超伝導磁束量子ビットのループサイズの大きさは設計で自由に変えることが可能です。NTTで行った電子スピン共鳴の空間分解能は、超伝導磁束量子ビットのループサイズで決まっているので、そのサイズを小さくするだけで空間分解能を向上できるという特徴があります。今回は、ループ構造の大きさが 24×2 マイクロメートル程度の素子を用いて実験を行い（図），0.05ピコリット



※青色のループが超伝導量子ビット

図 超伝導磁束量子ビットの電子顕微鏡写真

ルの検出体積を実現しましたが、さらなる小型化による空間分解能の向上も可能です。

(3) 磁化検出型電子スピン共鳴による2軸掃引

通常の電子スピン共鳴装置は、試料を共振器に入れ、その共振周波数に固定したマイクロ波を照射し、磁場を掃引した際の信号強度の変化を測定することで電子スピン共鳴を行います。そのため、共振器の共振周波数以外で電子スピン共鳴を行うことは困難です。それに対し、NTTでは超伝導磁束量子ビットを磁場センサとして用いることで共振器を使わずに電子スピン共鳴を行います。そのため、照射するマイクロ波周波数には制限がなく、磁場とマイクロ波周波数の2つのパラメータを掃引した電子スピン共鳴を行うことが可能です。2軸の掃引を行うことでより広い範囲での電子スピン共鳴スペクト

ルが取得できるため、材料パラメータの精緻化が可能になります。

■今後の展開

今後は実験系や素子の最適化等により電子スピン共鳴のさらなる高感度化をめざします。また、超伝導磁束量子ビットのアレイ化により電子スピン共鳴イメージングをめざします。

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157

E-mail science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

URL <http://www.ntt.co.jp/news2019/1903/190329b.html>

超伝導量子技術の極限計測への応用

樋田 啓

NTT物性科学基礎研究所

量子電子物性部 超伝導量子回路研究グループ

研究者
紹介

これまで、私たちの研究グループでは量子プロセッサ（超伝導磁束量子ビット）と量子メモリ（電子スピン）との間で量子情報をやり取りする研究を行ってきました。この研究では、量子情報を蓄える媒体として電子スピンを利用しましたが、超伝導磁束量子ビットを磁場センサとして動作させることで、電子スピンの性質を探ることも可能になります。

本研究では、超伝導磁束量子ビットを高感度な磁場センサとして動作させ、試料に含まれる電子スピンの性質を電子スピン共鳴という手法により調べました。電子スピン共鳴の適用範囲は物理学のみならず、化学・生物学・地学等にも及びますが、通常の電子スピン共鳴装置では多くの電子スピンを含むmm以上のサイズの試料を分析対象とします。今回の成果は、少数のスピンのみを含むμm程度の試料で電子スピン共鳴による分析が可能であることを示したもので、電子スピン共鳴の適用範囲を大きく広げることになります。

本研究で用いた試料は結晶中の不純物由来の電子スピンという「硬い」材料でしたが、測定対象とする試料に原理的な制約はありません。超伝導磁束量子ビットで測定できる試料の大きさは10 μm程度が典型的な値で、これは細胞の典型的な大きさと同程度です。この特徴を活かし、今後は単一細胞内の金属イオンの状態を超伝導磁束量子ビットによる電子スピン共鳴で調べるなど、「やわらかい」材料の測定にも取り組んでいきたいと考えています。

