

NATIONAL  
INSTITUTE FOR  
MATERIALS  
SCIENCE

# NIMS NOW

## NIMSの 超伝導、

これまでとそれから。

NIMS Superconductivity Research  
Up to Now & From Now on

No.10

2011 DECEMBER



# NIMSの 超伝導、

これまでとそれから。

## 現実になった夢

超伝導が発見されてから1世紀。電気抵抗ゼロという、魔法のような特性を持つ物質を社会に送り出すのは、研究者の夢だった。その夢は、今ようやく、この社会に立ち現われつつある。

例えば、抵抗値ゼロの電力輸送。実現できればエネルギー問題に大きく寄与できる。すでに実証実験の段階にはいっており、もうすぐあなたの家庭や会社にも超伝導電力網からの電力が来るかもしれない。

病院での診察で受ける医療用MRI、さらに磁束量子ひとつまみで感知できる高性能磁気センサや、省電力超高速デバイスへの応用なども着実にすすんでいる。超伝導リニアモーターカーに乗って出張に出かける日もそう遠くないだろう。

そして、それから？

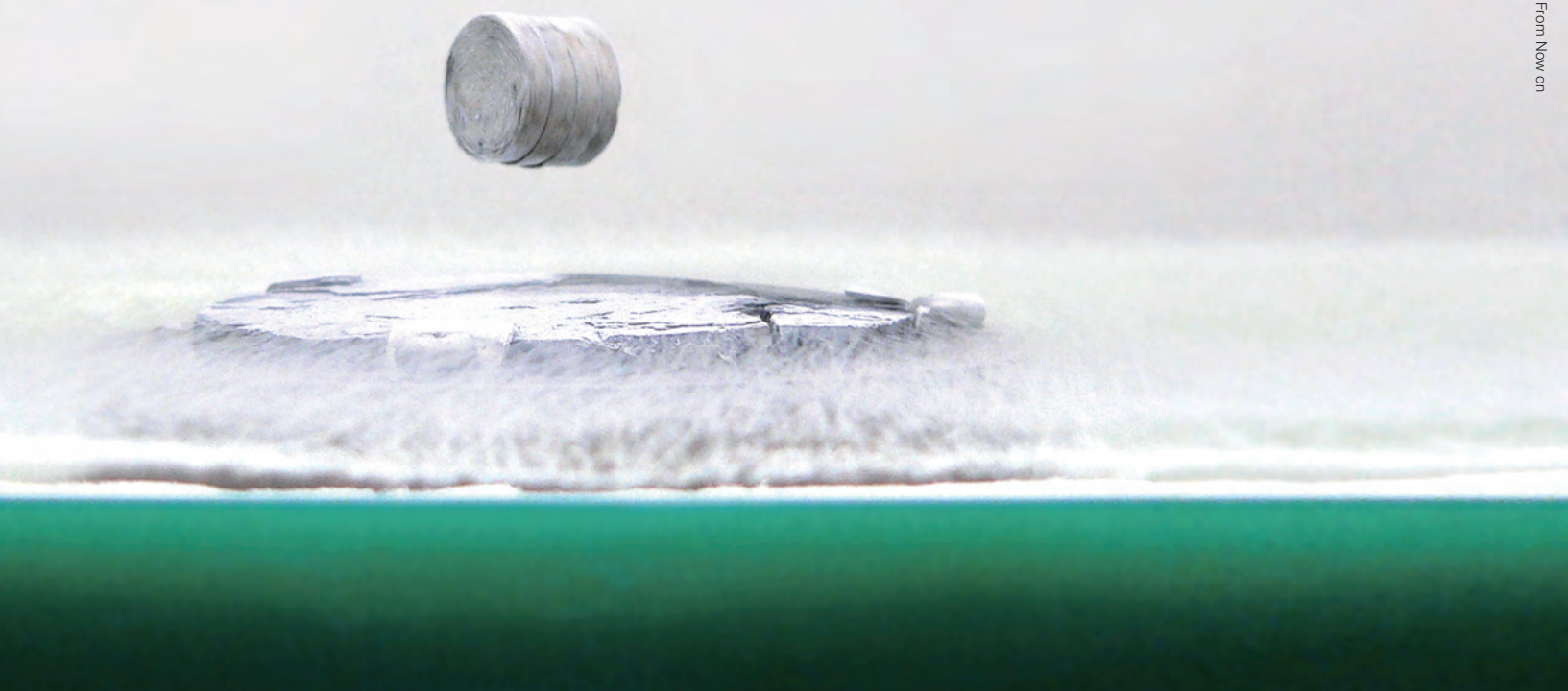
超伝導現象を応用した技術の実現は着々と進められている。しかし、超伝導現象がなぜ起こるのか、というメカニズム解明は

まだまだ不明なものが多い。というより、ほとんどわかっていないことばかりだ。なぜある物質は液体窒素より高い温度でも超伝導になるのか、常温での超伝導の可能性はあるのか、例えば電子の動き一つとっても今までの理論では説明のつかないものもあり、「なぜそうなるのか」はまだまだわかっていないのだ。

NIMSの第3期中期計画では「先端超伝導材料に関する研究」プロジェクトを新たに立ち上げた。このプロジェクトでは、すでに多くの超伝導体を開発し、社会への転用を行っているNIMSならではのノウハウを結集。基礎物性評価・メカニズム解明にフィードバックさせる。

超伝導という現象の持つポテンシャルは、まだまだ無限にある。このプロジェクトを通じた研究と応用との循環が、超伝導現象の解明へとつながり、さらなる社会への貢献や新しい知見へのブレイクスルーへとつながっていく。

## NIMS Superconductivity Research Up to Now & From Now on



# 先端超伝導材料プロジェクト NIMSにおける超伝導の歴史から新しいプロジェクトまで

環境・エネルギー材料部門 超伝導物性ユニット  
ユニット長  
宇治進也

## 超伝導に期待されるもの

超伝導とは、電流を流しても電圧が生じない(抵抗がゼロになる)現象です。そのため、超伝導材料に電気を流せばエネルギーを無駄にすることなく、電気エネルギーを遠方まで輸送できることになります。このことから、超伝導材料の利用は「省エネルギー」に大きく貢献できると期待されています。

この「抵抗ゼロ」という性質を利用して、超伝導材料は電力輸送以外にも、超伝導磁気エネルギー貯蔵や核融合炉利用などの高効率次世代エネルギー分野、省電力超高速デバイス(超伝導デバイス)で代表されるエレクトロニクス分野、リニアモーターカーや高効率モーターなどの環境低負荷輸送分野、画像診断や生体分子構造解析など次世代医療・生化学分野など、幅広い分野での応用が可能です。(図1)

## 超伝導研究の歴史とNIMS

超伝導現象は水銀で1911年にはじめて

オランダで発見されました。その時の超伝導転移温度( $T_c$ )は4.2K※でした。その後、超伝導研究は急速な進歩を遂げ、様々な材料(合金、銅酸化物、鉄ヒ素化合物、有機物など)で超伝導が発見され、 $T_c$ も高くなってきており、現在では $T_c$ が液体窒素の沸点(77K)を超える超伝導体もいくつか発見されています。

また、 $T_c$ の上昇に伴い、既存の理論の枠組みでは説明できない新しい物理現象も数多く観測され、その現象を理解するための物性基礎理論が飛躍的に発展しています。

NIMSでは、1960年代(当時は金属材料技術研究所)からすでに超伝導材料の研究をおこなってきました。その頃の主要な研究は、Nb-Zr系金属間化合物超伝導体( $T_c=10$ K程度)の線材化に関するものでした。その後も、金属系超伝導線材に関して継続的に研究がすすめられ、1970年代には現在の実用線材である $Nb_3Sn$ ( $T_c=18$ K)の極細多芯線や $V_3Ga$ ( $T_c=14.5$ K)超伝導テープ

の製造法などで実績をあげてきました。

1984年のLa系銅酸化物高温超伝導体( $T_c=38$ K)の発見以後は、積極的に新超伝導体の探索や基礎物性研究もおこなわれるようになり、1988年の金属材料技術研究所でのBi系銅酸化物高温超伝導体( $T_c=110$ K)の発見のニュースは、驚きを持って世界に発信されました。その後もNIMSでは新超伝導体の開発、物性研究、線材化研究で多くの重要な成果をあげてきています。

## 先端超伝導材料プロジェクトの 目指すもの

現在、超伝導材料に関して、基礎研究分野から応用・実用化研究分野まで、幅広く世界的な規模で盛んに研究されています。この分野で、現在日本は世界のトップを走っていますが、油断はできません。超伝導材料の持つ大きなポテンシャルやその重要性を考えれば、研究の停滞は許されない状況にあります。



高温超伝導電力ケーブル  
(写真提供:住友電気工業株式会社)

### エネルギー分野

電力輸送  
超伝導磁気エネルギー貯蔵  
核融合炉利用



NIMS 高分解能NMRマグネット



重粒子加速器

### 医療・生化学分野

画像診断  
治療用粒子線加速器  
生体分子構造解析

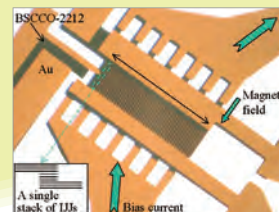
磁気浮上列車



### 輸送分野

リニアモーターカー  
高効率モーター

NIMS THz発信素子



### エレクトロニクス分野

省電力超高速デバイス  
高性能センサー

超伝導応用分野

図1 超伝導材料研究の応用分野

昨年度までにNIMS内でおこなわれてきた超伝導に関するプロジェクトでは、線材化研究が主要なテーマとなっていました。超伝導線材の性能を上げるため、多大な努力がなされてきましたが、さらなる性能向上のためには、基礎材料科学や物性物理に立脚した基礎研究との密接な協力が不可欠であるとの認識を深めています。

また、大電力輸送の様な強電分野だけでなく、弱電分野(超伝導デバイス等)も重要な応用研究と考えています。もちろん、これらの研究の上流には、超伝導研究の根幹をなす新超伝導体の開発や基礎物性評価、さらに超伝導メカニズムの解明などがあり、これらの研究を相補的・総合的にすすめることで飛躍的な研究の進歩が期待できます。

本年度からはじまった先端超伝導材料プロジェクトでは、それまでNIMS組織内で分散していた第一線の超伝導研究者38名(併任を含む)を集め、新超伝導物質開発、超伝導機構解明、デバイス・線材応用に関する基

礎的研究を総合的・包括的に実施しています。本プロジェクトの遂行により、環境・エネルギー分野で大きな貢献をしたいと考えています。

### 新規超伝導体開発から 応用基盤研究まで

本プロジェクトでは、4つのサブテーマに分けて研究をすすめています。(図2)

まず、「物質開発と基礎物性評価 P.6」では、新規超伝導物質の開発とその基礎物性評価をおこないます。NIMSでは、今までにすでに多くの超伝導体を開発しており、そのノウハウを最大限にいかして、革新的な新規超伝導体を開発したいと考えています。

「電子構造解析と超伝導メカニズム解明 P.7」では、超伝導メカニズムの解明を目指し、電子構造の精密解析をおこなっています(図3)。超伝導メカニズム解明は基礎物理に新概念をもたらすという点で学術的な価値が極めて高く、より高い $T_c$ を得るための

物質設計の大きな指針となります。

「超伝導磁束量子ダイナミクスとデバイス基礎 P.8」では、新規磁束量子現象の発現とそのメカニズム解明を手掛けており(図4)、次世代量子デバイス動作原理の提案までを狙った磁束研究を総合的におこなっています。

「線材化プロセスと応用基盤 P.9」では、新規または既存の超伝導体の組織制御、反応制御、磁束ピンニング機構解明・ピンニング制御などの研究をし、省エネルギーに大きな貢献をなし得る超伝導線材応用(図5)を目指した基盤研究をおこなっています。

これらのサブテーマ間で、相互に協力しながら研究をすすめていくことで、大きなブレークスルーを成し遂げたいと考えています。

※K(ケルビン)は絶対温度を表す単位。 $-273.15^{\circ}\text{C}=0\text{K}$ (絶対零度)とする。 $0^{\circ}\text{C}$ は $273.15\text{K}$ となる。例: $7.2\text{K}=-265.95^{\circ}\text{C}$

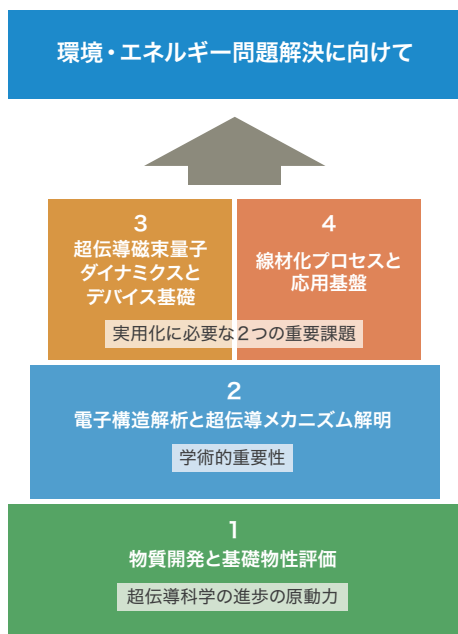


図2 研究サブテーマ構成

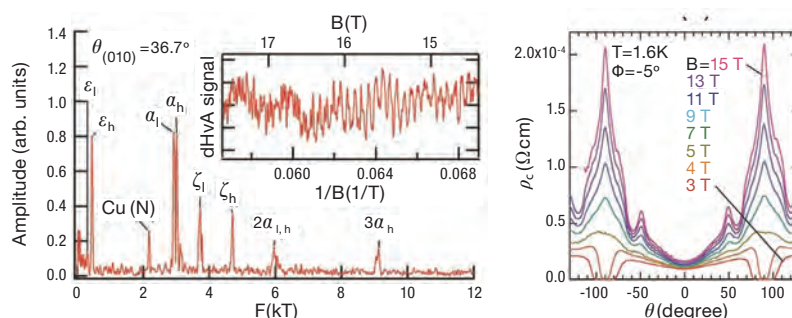


図3 鉄系超伝導体の磁化の量子振動とそのフーリエ変換スペクトル(左)と角度依存磁気抵抗振動(右)。これらのデータの解析から超伝導体の電子構造を決定できる

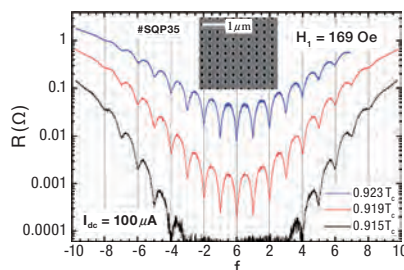


図4 ナノアンチドット構造をもつNbN超伝導体の抵抗の磁場変化。ドット構造の周期性に依存するボルテックス的特徴的なダイナミクス(抵抗振動現象)が観測される



図5 NIMS Bi系高温超伝導テープ線材銀及び銀合金基材の中に、超伝導体(Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>のフィラメントが分散している

## 新規超伝導物質開発を目指して

環境・エネルギー材料部門 超伝導物性ユニット  
材料開発グループ グループリーダー  
今井基晴

### 超伝導科学における物質合成の重要性

新超伝導物質の発見は超伝導に関する新概念を創出し、超伝導科学を進歩させる重要な原動力となります。また発見された新物質の超伝導機構の解明には、組成・結晶構造や基礎的な物性特性(超伝導臨界温度( $T_c$ )、臨界磁場( $H_c$ )、比熱)の精密測定や、キャリアー濃度、元素置換等による超伝導相図の決定などが必要となります。

そのためには正確な基礎物性評価に耐え得るような高品質試料が必要となります。また既知の超伝導体であっても、純良な単結晶が得られていないために研究が進展していない場合も多くあります。

これらのことを踏まえ、本サブテーマにおいては、新超伝導物質の探索はもとより、元素置換などによる既知物質の物質パラメーター(組成、化学圧力、キャリアーや濃度など)を最適化することで $T_c$ をさらに上昇させたり、精密物性測定に資するための高品質試料の合成などをおこなっています。さらに合成した試料の基礎物性を評価し、日本の超伝導研究の更なる活性化及び超伝導科学の進歩に資することを目的としています。

### 高温高压下での超伝導物質合成

本サブテーマの一つの特徴として、大気

圧での合成法(常圧合成法)の他に、高温合成法、ソフト化学合成法を駆使している点が挙げられます。今まで、これらの方法を用いて、金属間化合物や遷移金属酸化物などにおいて、通常の常圧合成では得られないような新規物質の合成をしてきました<sup>1,2)</sup>。

以下では高温高压を用いた超伝導物質合成について充填スクッテルダイト化合物 $La_xRh_4P_{12}$  ( $0 < x < 1.0$ )を例にして説明します。

大気圧で合成できるRh-P系化合物の中にスクッテルダイト化合物 $RhP_3$ という化合物が存在します。結晶構造を図1(a)に示します。この化合物ではRh原子を中心としてP原子が八面体をつくり、その頂点を結ぶことで結晶構造ができています。この八面体の間には大きな空隙が存在します。高温高压を用いることによりはじめて、この空隙にLa原子を充填し、図1(b)に示すような充填スクッテルダイト化合物 $La_xRh_4P_{12}$ を合成することができます(Rh $P_3$ を4倍すると $Rh_4P_{12}$ になります)。

$La_xRh_4P_{12}$ は、超伝導を示す充填スクッテルダイト化合物中で一番高い超伝導臨界温度 $T_c$ を持つ化合物です<sup>3,4)</sup>。我々はこの化合物において合成する高温高压条件を変えることによりLa濃度が変わり、それを反映

して $T_c$ 等の物性値も変化することを明らかにしました。

図2に4.0 - 9.4GPa、1370, 1470 Kで合成したときの $La_xRh_4P_{12}$ のLa濃度 $x$ の合成圧力依存性を、図3に $T_c$ の合成圧力依存性を示します。図2の破線は $x$ を表しています。La濃度は $x=1.0$ で5.88%になります。この結果から、合成圧力の上昇とともに $La_xRh_4P_{12}$ のLa濃度 $x$ が増加し $T_c$ が上昇することが分かりました。

この研究は、先端プロセスユニット超高温高压グループとの共同開発としておこなわれています。

以上のように、本サブテーマでは高温高压合成を一つのキーワードとして研究を遂行していく予定です。

#### 引用文献

1. E. Takayama-Muromachi, Chem. Mater. 10, 2686 (1998).
2. K. Takada, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi, F. Izumi, R.A. Dilanian, T.Sasaki, Nature 422, 53 (2003).
3. I. Shirotni, S. Sato, C. Sekine, K. Takeda, I. Inagawa, T. Yagi, J. Phys. Condens. Matter 17, 7353 (2005).
4. M. Imai, M. Akaishi, E. H. Sadki, T. Aoyagi, T. Kimura, I. Shirotni, Phys. Rev. B75, 184535 (2007).

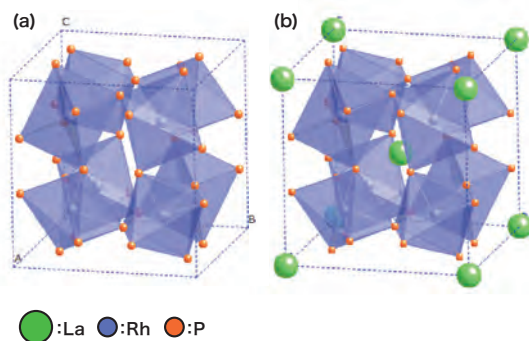


図1 (a) $RhP_3$ と(b) $LaRh_4P_{12}$ の結晶構造

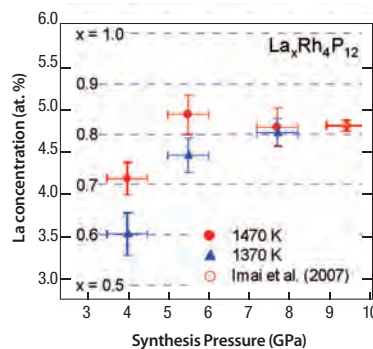


図2  $La_xRh_4P_{12}$ のLa濃度の合成圧力依存性

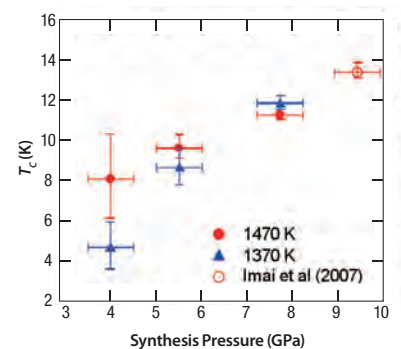


図3  $La_xRh_4P_{12}$ の超伝導臨界温度 $T_c$ の合成圧力依存性

## 超伝導メカニズム解明を目指して

環境・エネルギー材料部門 超伝導物性ユニット 量子物性グループ  
寺嶋太一

NIMS ポスドク研究員  
栗田伸之

### 強磁場を利用して超伝導のメカニズム解明に挑む

2008年に日本で発見された鉄とヒ素を含む鉄系超伝導体は、絶対温度55度(摂氏-218度)と比較的高い温度で超伝導になり、新聞などでも報道され話題になりました。開発のすすんでいる銅酸化物高温超伝導体の強力なライバルになるかもしれません。

これらの物質はどうして高い超伝導転移温度を持つのか？ その機構を解明することは、科学として重要であるだけでなく、究極の目標である室温における超伝導を目指して、さらに新たな超伝導体を探索する指針を得るためにも本質的な研究です。

私たちは、NIMSの強磁場研究施設に設置された世界でもトップレベルの強磁場磁石を活用して、この問題に挑んでいます。以下に最近の研究成果を二つ紹介します。

### 鉄系超伝導体に高圧を加える

どのような条件で超伝導が発現するのか

を知ることは機構解明への第一歩です。そこで、鉄系超伝導体の一種EuFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>に高圧力を加えた場合、どのような変化が起きて超伝導が発現するかを詳細に調べました(図1)。常圧ではT<sub>0</sub>と記した温度以下で結晶格子が歪み、鉄の電子が反強磁性という磁気的な状態になり、超伝導にはならないのですが、圧力をかけると温度T<sub>0</sub>が徐々に低下し、2万5千気圧以上の高圧力では温度T<sub>0</sub>の異常は起きず、代わりに絶対温度約30度で超伝導が発現します。しかしながら、さらに高圧力3万気圧以上では超伝導は消失してしまうことがわかりました。また、この超伝導はEu(ユーロピウム)の反強磁性状態と共存している珍しいタイプのものであることがわかりました。

### 強磁場で量子振動を観測する

超伝導は電気伝導を担う伝導電子がペアを組むことにより起こる現象ですから、次のステップは、超伝導発現に際し電子状態(電

子がどのような状態、性質のものであるか)がどのように変化しているのかを知ることです。そのために、私たちは強磁場磁石を使って量子振動を観測します。量子振動とは、絶対零度に近い超低温で金属に強い磁場を加えると、磁場の変化に応じて金属の磁化や電気抵抗が振動する現象です。

図2に鉄系超伝導体BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の電気抵抗を絶対温度0.2度で磁場17テスラの強磁場まで測定した例を示します。約7テスラ以上の高磁場で見られる抵抗のうねりが量子振動です。これを解析し、理論と比較することにより、電子状態を最も端的に示すフェルミ面や電子と電子の間の相互作用の強さなどを知ることができます。

こうした研究を通じて、私たちは超伝導メカニズムの解明に貢献します。

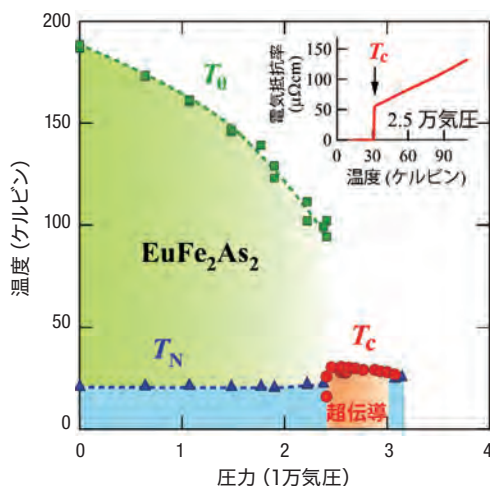


図1 鉄系超伝導体EuFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の高圧相図。温度T<sub>0</sub>で格子が歪み、鉄が反強磁性状態になる。限られた圧力範囲の温度T<sub>c</sub>以下で超伝導が発現する。温度T<sub>N</sub>はEuが反強磁性状態になる温度で、これは超伝導が発現する圧力でも存在する。挿入図は電気抵抗の温度変化で見た超伝導転移。温度T<sub>c</sub>以下で電気抵抗がゼロになる。

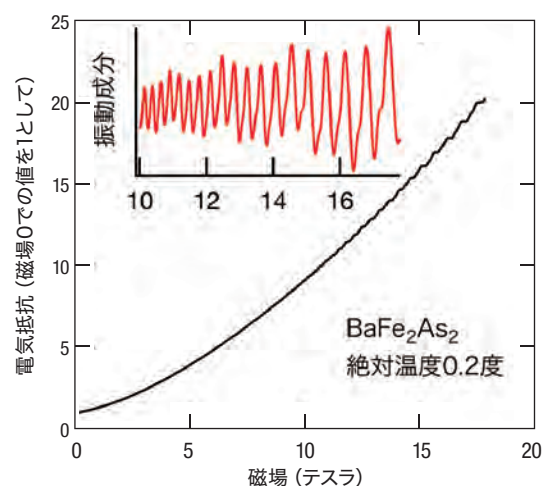


図2 鉄系超伝導BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の電気抵抗に現れた量子振動。挿入図はなめらかなバックグラウンドを差し引いて量子振動成分だけをとりだしたものの。

てらしま たいち 博士(理学)。1993年金属材料技術研究所入所。1997年10月～翌9月米国国立強磁場研究所に滞在。2011年4月環境・エネルギー材料部門超伝導物性ユニット量子物性グループ主席研究員。  
くりた のぶゆき 博士(理学)。2007年3月東京大学大学院理学系研究科 博士号(理学)取得。2007年4月～7月、米国ロスアラモス国立研究所ポスドク研究員。2009年8月NIMSポスドク研究員。

## 磁束量子制御による新規量子機能

環境・エネルギー材料部門  
超伝導特性ユニット ポルテックスタイナミクスグループ  
平田和人

### “振幅”と“位相”を制御する

超伝導・超流動は量子力学現象の一つで、その現象を実際に目で見る事ができる唯一の物理的現象です。超伝導は基本的に“振幅”と“位相”というパラメーターによって特徴づけられ、“振幅”と“位相”を制御することが超伝導現象、そして、応用を決定づけます。

“振幅”は超伝導の臨界電流、或いは、電荷の数に関連し、主に超伝導送電、超伝導磁石などの強電応用に、“位相”は位相制御による量子ビットや磁束量子フローデバイスなどの弱電系のデバイスで重要となります。

“位相”を担う、或いは、制御するものとして、“磁束量子”があります。磁束量子は、量子化された磁力線の周りに超伝導電流が渦のように流れているので、その構造から「渦糸」とも呼んでいます。通常、一様な超伝導体中にある磁束量子はその中心を一周すると位相が $2\pi$ 変わります。一様な場合とは異なり磁束量子は $2\pi$ からずれた値となります。

### 位相制御のために、 磁束量子自体の動きを制御する

位相を制御するには幾つかの方法があります。例えば、異なった超伝導体を接続し、その超伝導状態の違いから接続面に半整数の磁束量子を生成する方法や、強磁性体物質を超伝導体で挟む方法などがあります(図1)。最近ではマルチバンド超伝導体間の接合も興味を持たれています。

磁束量子自体の動きを制御するためには、超伝導試料に人工的なナノスケールの周期的な空孔を微細加工で導入する方法などがあります。(図2 a)。これらの素子構造を、微細加工を駆使して作製し、素子に磁場・電流・マイクロ波などを外部からかけることによって磁束量子の動きを制御できます。図2(b)に示すように導入した空孔格子の効果が磁束量子フロー抵抗に現れていることがわかります。この制御のためには結晶欠陥などの少ない高品質な超伝導単結晶が必要で、材料開発グループとの連携が必要となります。

また、これら素子内の磁束量子の動きを観察することも重要であり、そのために

STM装置、STM-SQUID装置、磁気光学装置などの開発をおこなっています。そして、磁束量子内の電子構造を観察して超伝導機構を調べたり、磁束量子の動きを動的に捉え、そのダイナミクスを探ります。当グループ内には理論グループが含まれており、磁束量子ダイナミクスのシミュレーション、素子構造・動作原理の提案、或いは、測定結果の解析などの観点から研究を支援します。

### ナノ加工技術を駆使して ジョセフソン磁束量子の動きを制御する

ジョセフソン接合内にある磁束量子はジョセフソン磁束量子と呼ばれ、非常に高速で光に近い速度で移動できるため、ナノ加工技術を駆使してジョセフソン磁束量子の動きを制御すると、従来の電子素子に比べ非常に高速、かつ、省エネルギー磁束量子素子を実現することが期待できます。銅酸化物高温超伝導体固有のジョセフソン接合を利用した、大強度テラヘルツ発振の実現(P.4図1参照)や磁束量子を利用した機能素子の提案をおこないます。

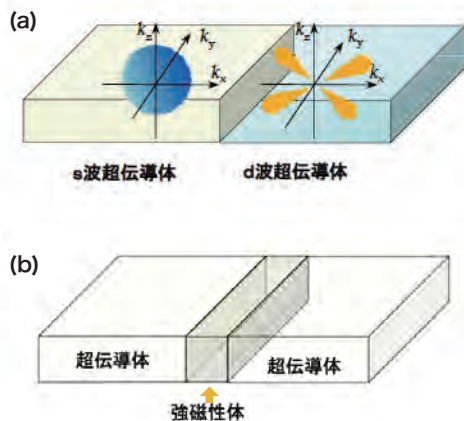


図1 超伝導の位相制御の例。(a) 異なった超伝導体接合、(b) 強磁性体を挟んだ超伝導接合

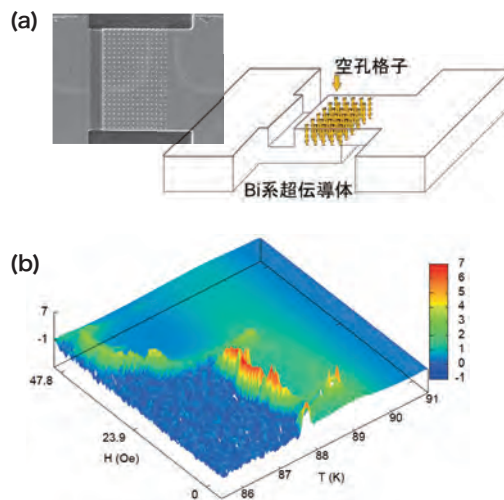


図2 空孔格子構造を有するBi系超伝導体。(a)は模式図と模式図上から撮った実際の試料写真。格子間隔は $1\mu\text{m}$ である。(b)は磁束量子フロー抵抗の対数温度微分を温度-磁場に対してプロットした図である。赤い部分が急峻な抵抗変化を示しており、相転移が起こっていると予想される



## 次世代超伝導線材開発～省エネルギー電力輸送への道～

環境・エネルギー材料部門 超伝導線材ユニット  
ユニット長  
北口 仁

### 超伝導送電ケーブルの可能性

地球規模での環境問題や人口増加、地下資源燃料枯渇が心配されています。将来の電力系統においては、多様な電源や送配電の技術を組み合わせて利用することで、安定かつ高効率な運用を実現していかねばなりません。その中で、「電気抵抗ゼロ」という超伝導の特質は、省エネルギーに直結するために大いに期待されています。

エネルギー分野での超伝導応用技術の本質・魅力は、他の技術では達成できないような高いエネルギー密度を機器として実現することです。例えば、送電ケーブルであれば、超伝導でなければ運ぶことができないような高い電流密度かつ低損失で電流を輸送できることです。

また、モーターや発電機のような磁場応用機器では、超伝導でしか実現できないような高い磁場をコンパクトかつ低運転コストで実現することです。

これらを実現していくために、機器の中で

電流を流す超伝導材料には、より一層高い性能が求められています。

### 着々とすすむビスマス系 高温超伝導線材の高性能化

電気を流す用途には、やはり、いわゆる「電線」のような材料が最も適しています。そのために、様々な超伝導線材（一般的には、金属の中に細い糸状にした超伝導物質を多数詰め込んだような複合線材）が開発されています。

この線材が無限の電力を損失なく運ぶことができれば夢のような話ですが、現実には多くの制限が存在します。特に、十分に低い温度に冷やさねばならないこと、超伝導状態で流すことの出来る電流に上限（この上限を臨界電流 $I_c$ と呼びます）のあることが大きな制約です。

超伝導材料の開発は、この制約への挑戦です。より高い温度で使えること、より多くの電流を抵抗ゼロで運べることを目指しています。

私たちは、豊富で安価な液体窒素を用いて冷やすことで超伝導状態となるビスマス系高温超伝導酸化物線材を中心として研究・開発にとりこんでいます。

ビスマス系高温超伝導線材の高性能化は着々とすすめられており、図に示すように、液体窒素温度、外部磁場なしで、臨界電流は $1\text{mm}^2$ あたり $200\text{A}$ を超えています。冷却コストを考慮しても超伝導送配電が経済的にも十分に成立すると見込まれるので、世界各国で「高温超伝導電力ケーブル」の開発がすすめられ、一般家庭や企業に実際に電力を供給している系統に組み込んだ実証試験が実施されるどころまできています。今後、超伝導送電が広がっていくためには、線材性能の一層の向上が必要です。

私たちは、ビスマス系高温超伝導酸化物線材の臨界電流を、現状の $1\text{mm}^2$ あたり $200\text{A}$ 程度から、今後数年で $300\text{A}$ 、将来的には $400\text{A}$ にすることを目標としています。

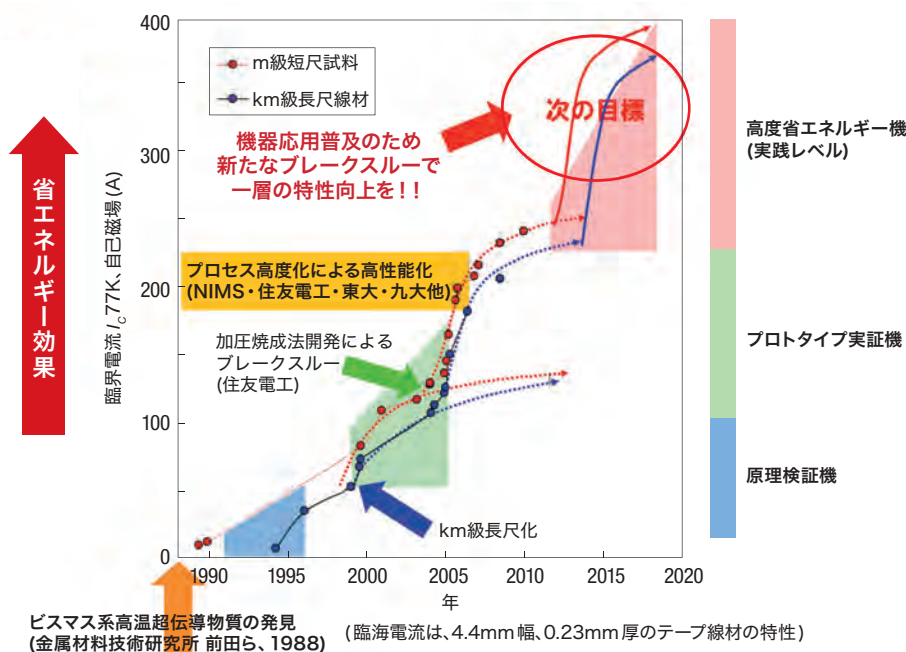


図 ビスマス系高温超伝導線材発展の歴史と展望

# 高誘電体ナノシート

## ナノのオーダーメイドで組成・構造・特性を自由自在

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)  
ナノマテリアル分野 ソフト化学ユニット  
ソフト化学グループ  
長田 実

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)  
ナノマテリアル分野 ソフト化学ユニット ユニット長  
NIMSフェロー  
佐々木 高義

### 高性能誘電体をいかに極小サイズで作るか

私たちがいつも使っている携帯電話やパソコンでは、コンデンサ、メモリなど誘電体から作られた電子素子が数多く使われています。現在の電子素子では高機能化を目的とした微細・集積化がすすめられており、高性能の誘電体をいかに極小サイズで作るかが重要となっています。

今回私たちは、このキー技術となる誘電体ナノ結晶にドーパントを均一にドーブし、誘電特性を制御する技術を開発しました。

ある目的の特性を持った電子材料をつくる時、ドーピングといって、結晶本体とは異なる元素(ドーパント)を少し入れ、構造と特性を微調整する技術がよく使われます。このドーピング技術は、ナノ結晶の特性制御でも有効な手法と期待されていますが、これまでの手法では、ナノ結晶の望みの格子位置へドーパントを入れて、安定化させることは困難でした。これは、ドーパントをナノ結晶に導入することができても、ドーパントの量がナノ結晶ごとでバラバラになったり、ナノ結晶が非常に小さいため、ドーパントが格子内の狙った位置で落ち着く前に再び外へ出るのが比較的に容易なためです。

### 誘電特性を制御するため、ドーピング後にナノシート化する

こうした問題点を解決するため、私たちは発想の転換をし、層状結晶を使って、ドーパントの量を自在に制御したナノ結晶をつくる技術を開発しました(図a)。

層状酸化物では、機能ブロックとなる酸化層に異種元素をドーピングすることにより、特性を自在に制御できることが知られています。また、私たちのグループでは、層

状酸化物を層1枚までバラバラにはく離し、酸化物層1枚のシート状ナノ結晶(ナノシート)をつくる独自技術を確立しています。

今回、私たちは、ドーピングとナノシート化という2つの性質を利用できるユニークな物質として、チタン・ニオブ層状酸化物に注目し、チタンとニオブの金属比を系統的に変化させた層状酸化物(図b)から、ドーパントの量と構造を精密に制御したナノシートの作製(図c)に成功しました。

### Ti<sub>2</sub>NbO<sub>5</sub> ナノシートで、誘電率320の世界最高性能を実現

この技術を応用して、ニオブ元素を高濃度でドーピングして、構造を大きく歪ませた新しいナノシート(Ti<sub>2</sub>NbO<sub>5</sub>)を作製したところ、このナノシートが厚み1nm(原子数個分に相当)で世界最高性能(誘電率320)の誘電体として機能することを見いだしました。チタン酸バリウムなど、従来の高誘電体薄

膜は、膜厚を50 nmレベルまで小さくすると、誘電率が低下するというサイズ効果の問題があり、膜厚50 nm程度が薄膜として安定に動作する限界でした。それに対して、今回発見したナノシートは極薄で従来の高誘電体よりも20倍以上高い誘電率を持っており、この特性を応用すれば、現在、携帯電話やパソコンに入っているコンデンサやメモリをナノサイズして、500倍以上高容量にすることも可能です。

今回は誘電体をターゲットにしましたが、層状結晶とドーパント元素の組み合わせは自由自在で、磁性元素や希土類元素をドーピングすることで、磁石の性質を持たせたり、LEDのような発光素子にしたり、スイッチやセンサなどに使える材料を作ることができます。こうした材料の中から、将来、携帯電話やパソコンで活躍する材料が出てくることが期待されます。

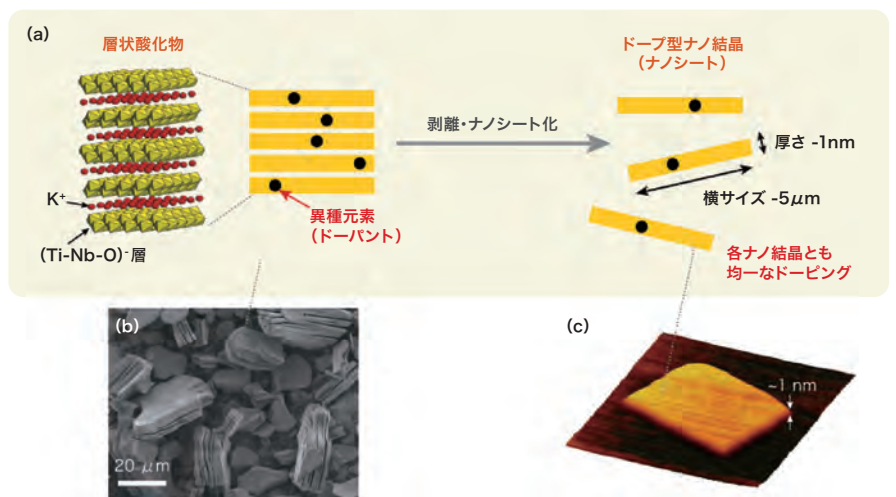


図 ドーパントの量と構造を精密に制御したナノシートの作製手法  
(a)ドーピング型ナノ結晶の作製手法のスキーム図、(b)出発物質の層状酸化物の電子顕微鏡写真、(c)ドーピング型ナノ結晶の原子間力顕微鏡像



おさだ みのる(左) 博士(理学)。1998年東京工業大学大学院総合理工学研究所博士課程修了。理化学研究所基礎科学特別研究員、JSTさきがけ研究員などを経て、2003年NIMS入所。現在、MANA研究者、早稲田大学-NIMS連係大学院准教授。  
ささき たかよし(右) 理学博士。1980年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。同年、無機材質研究所(現、NIMS)入所。現在、NIMSフェロー、MANA主任研究者。

## 第11回 NIMSフォーラム

## 明日をつくる材料イノベーション・ここに集結

NIMSは、2011年10月26日(水)、東京国際フォーラムにて「第11回 NIMSフォーラム」を開催しました。このフォーラムは、NIMSの研究成果を機構内外のより多くの方にとってもらうため、平成13年のNIMS設立以来、開催しているものです。第三期中期計画を開始した本年度は、『明日をつくる材料イノベーション・ここに集結』をテーマに、第一期(2001年～)、第二期(2006年～)の間に培った科学技術力とその研究成果を主に展示・紹介。700名近い来場者に好評を博しました。また今回は、新しい試みとして機構外部で活躍されている方をお招きし、特別講演をおこないました。また、併せて機構からもグリーン分野の研究成果講演を2件おこないました。

## 開会挨拶・オーラルセッション

NIMS潮田理事長による開会挨拶、文部科学省研究振興局の倉持隆雄局長による来賓挨拶に続き、オーラルセッションでは、今年度からスタートした第三期中期計画におけるNIMSの姿を紹介。4つの研究部門と1センター、また国内外の様々な研究機関のハブとなる研究拠点についても紹介しました。



NIMS 潮田理事長によるNIMSの説明



文部科学省研究振興局 倉持隆雄局長

## 特別講演:「スマートグリッド・スマートコミュニティと電気自動車」

日産自動車株式会社ピークル・インフォメーションテクノロジー事業本部でプログラム・ダイレクターとして活躍する野辺継男氏をお招きした特別講演。未来の電気自動車とその社会についての講演は多くの示唆に富み、聴講者は熱心に耳を傾けていました。また講演後の質疑応答でも、多くの質問が寄せられ、会場は熱気に包まれました。



日産自動車株式会社の野辺継男氏



オーラルセッション会場の様子

## 研究成果講演

野辺氏の講演に引き続き、NIMSグリーン分野の研究成果講演が2件おこなわれました。高田和典MANAナノイオニクスユニット長による「全固体リチウム電池」、魚崎浩平MANAナノ界面ユニット長に

よる「固液界面構造の高分解能その場計測」。それぞれ環境・エネルギーに寄与するNIMSの最新の研究成果として、来場者は興味深く聴講されていました。



高田和典 MANA ナノイオニクスユニット長



魚崎浩平 MANA ナノ界面ユニット長

## ポスターセッション

ポスターセッションでは、61枚のポスターで「チタン酸固化体によるセシウム閉じ込め」、「次世代半導体ナノ構造太陽電池」、「未来の医療に役立つ“スマート”バイオマテリアル」など、NIMSならではの研究成果

を紹介。また、今後の発展が期待される10件の研究トピックのミニ講演も設けました。研究者との直接対話による情報交換を望む来場者たちで、会場は熱気に包まれていました。



ポスター会場でのミニ講演の様子



賑わいを見せるポスターセッション会場

## 1 中川文部科学大臣がNIMSをご視察

11月19日(土)、中川正春文部科学大臣がNIMSの並木地区と桜地区を視察されました。室町英治理事によるNIMS概要説明の後、宝野和博ユニット長が希少元素を使わないネオジム磁石開発を紹介。NIMSと民間企業との連携について中川大臣から質問があり、民間企業からの研究資金や産業界との長期的なビッグプロジェクトに関し活発な意見交換がなされました。その際、中川大臣は「NIMSが独立行政法人のモデルケースとなるように取り組んでほしい」とコメント

されました。

並木地区の視察では、国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)のMANAファウンドリと高効率燃料電池の実験室、サイアロン蛍光体開発の実験室を訪問され、外国人研究者とも親しく懇談されました。

その後、NIMS外部の研究者にも開放している共用設備のうち、桜地区に設置された世界最大級の核磁気共鳴装置(NMR)、超高圧電子顕微鏡を視察されました。その後、実験室でインフラ設

備の戦略的な設置方策などについて討議がなされました。



超伝導送電ケーブルをご覧になる中川大臣

## 2 台湾 工業技術研究院機械システム研究所所長、日本ウクライナ科学技術協力委員会メンバーがNIMSを訪問

11月9日(水)、台湾 工業技術研究院(ITRI)機械システム研究所(MSL)の呉 東権所長が陳 来勝副所長他所員3名とともにNIMSを訪問されました。工業技術研究院は6,000名以上の研究者を抱える日本の産業技術総合研究所にあたる台湾の公的研究機関です。6ヶ所ある中核研究所のうちの一つ、機械システム研究所は、機械関係

の工業技術の研究開発を担当しています。

ご一行は潮田理事長への表敬訪問をされ、その後の千現、並木両地区のラボツアーでは研究者と積極的な意見交換がなされました。

また、11月18日(金)には日本ウクライナ科学技術協力委員会(第2回会合)ウクライナ代表団団長のボリス・ヴィクトロヴィチ・グリニョフ ウクライナ科学・イノベーション・情報化第一副長官(兼:ウクライナ科学アカデミー付属シンチレーション物質研究所所長)とアンドレイ・ラグリア ウクライナ・ナノプログラム委員長(兼:ウクライナ科学アカデミー付属材料科学問題研究

所副所長)がNIMSを訪問されました。

お二人は理事らとNIMSの概要や、ご自身の研究所について懇談され、研究交流や大学院制度の利用などについて意見交換がなされました。千現、並木両地区のラボツアーでは研究者からの研究についての説明を熱心にお聞きになりました。



日本ウクライナ科学技術協力委員会・ウクライナ代表団グリニョフ団長(右)とラグリア副所長(左)



潮田理事長(左)と台湾機械システム研究所所長(右)

## 3 NIMS イブニングセミナーを開催

10月28日(金)、東京・竹橋の学術総合センターで「NIMSイブニングセミナー」が開催されました。平成23年度のNIMSイブニングセミナーは、(社)日本工学会の共催および(財)総合工学振興会の協賛で開催され、長井寿中核機能部門長をオーガナイザーに、元素戦略、ナノ物質、計算科学などの材料研究最前線を紹介するものです。

自の視点から講演がおこなわれました。講演後の質疑応答では多くの質問が寄せられましたが、さらにその後おこなわれたゼミでは、参加者が講師との対話を通して各テーマについて議論し、元素戦略についての理解を深めました。11月25日には「ナノ物質(フラウレン、ナノチューブ)の最前線」と題して先端材料プロセスユニットの宮澤薫グループリーダーの講演がおこなわれました。

第1回セミナーでは、約40名の来場者に対し、元素戦略材料センターの原田幸明グループリーダーが講師となって、「元素戦略概論」について独

NIMSウェブサイト上から随時申込可能。 >> <http://www.nims.go.jp/publicity/evening-seminar/>



レクチャー風景



ゼミの様子

## 4 つくば科学フェスティバル2011に出展

11月5日(土)と6日(日)の2日間、NIMSは「つくば科学フェスティバル」(主催:つくば市、つくば市教育委員会 於:つくばカピオ)に、「いろいろな材料で学びながら遊んでみよう!」をテーマとして出展いたしました。

昨年に引き続き「つくば環境フェスティバル」との同時開催となりました。

NIMSは真ちゅう板に刻印で名前などを彫る「オリジナルキーホルダー作り」と、色・重さ・性質の異なる10種類の金属棒が何の材料でできているのかヒントをもとに当てる「材料の名前当てクイズ」をおこなうとともに、DVDや冊子等でNIMSについて紹介しました。2日間でのべ450人以上

がNIMSブースを訪れ、キーホルダー作りやクイズを楽しむ親子で一日盛況でした。



つくば科学フェスティバル会場の様子