

◆ Contents

巻頭対談 ..2

元素戦略 ✕ 量子ビーム
物質科学の新しい形

◆ 施設情報

フォトンファクトリー
ビームライン建設 ..9

◆ 研究トピックス ..10

電子のガラス状態を発見

電子のスピンと軌道の絡み合っ
た共鳴状態の解明

強相関絶縁体における
歪み誘起磁化の起源を解明

グラフェンと磁性金属の界面で
起こる特異な電子スピン配列

セラミックコンデンサ中の水素
不純物による絶縁劣化のしくみ

◆ お知らせ

KEK 一般公開 ..12



物質科学の 新しい形

元素戦略×量子ビーム

細野 秀雄 教授

東京工業大学 応用セラミックス研究所 /
元素戦略研究センター

材料科学者。鉄系超電導や透明な金属、金属状態を示すセメント、など物質の新たな性質を引き出す材料研究を行っている。近年では、アンモニア合成の触媒、石灰とアルミナの化合物 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ に電子を取り込んだ「C12A7 エレクトライド」を開発、大きな話題を呼んだ。

村上 洋一 教授

KEK 物構研副所長 /
構造物性研究センター センター長

山田 和芳 教授

KEK 物構研所長

資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術の研究開発として始まった「元素戦略プロジェクト」は、平成24年度から「研究拠点形成型」として理論・材料創製・解析評価が三位一体となって進められている。この研究代表者である細野教授に、物質科学研究について伺った。

山田：僕はね、この本（「透明金属が拓く驚異の世界」細野秀雄・神谷利夫著、サイエンス・アイ新書）がきっかけで、細野先生を知り始めたんです。むちゃくちゃ面白いなと思って。で、この透明金属っていうのに、僕はすごく興味があったんですよ。

細野：この中で実用になったのがIGZO※1なんですよ。

山田：細野先生は、物質合成というのは最初からやっておられたんですか？

細野：僕は大学院時代のテーマは、ガラスの電子スピン共鳴なんですよ。ずっと「解析」なんです。だから、解析と合成っていうのが、（意識せずに）自然に移って来ちゃったんですけどね。就職したときに、阿部先生（阿部良弘 名古屋工業大学 名誉教授）っていう先生の助手になったんですけども、その先生が、竹みたいに曲がる、

セラミックスというのをちょうど作った年だったんですよ。会社の方が10人ぐらい、わーっと廊下へ並ぶんです。ああ、「材料」っていうのはこういう世界なんだ、って。それから、材料は絶対新しいものを作らなければダメだな、と言うのは、そのときもう（笑）、つくづく思いました。

山田：細野先生が、普通の物質合成をやっている人とは違うという印象を受けたのは、出てくるものが、もう、むちゃくちゃ新しい。コンセプトが新しいんですよ。透明金属もね、金属っていうのは今までの常識では透明だと思われてないんです。今度の鉄系超伝導も…、鉄って、やっぱり磁石なんですよ、僕らには（笑）。あんなの、絶対超伝導は出て来ないって。僕らは毒されているんですよ、頭が。

細野：僕は知らなかったからね、そん

なことは（笑）。

山田：中途半端に知識があると、絶対そんなことできると思わないようなことをやられるから、この人はすごいなと、僕は思いましたね。

細野：意外に、「もの」って、わかってないんですよ。僕も最近それをつくづく思うんですけどね。机に座っていて、ものを読んでいるとね、なんとなくもうやることないような気になるんですよ（笑）。で、少し動いてみると、あれ？こんなところ全然わかってないなっていうのが、わかるんですよ。いろんな可能性が残っているっていうか、かなり未開な部分が多いんだと思いますね。

山田：それから、我々が見逃している、水素。水素ってめちゃくちゃ奇妙なんだってことをね、こう…、ぱしっと言われるわけ。おっしゃられることがみ

んな目からウロコなんでね、なんでそういう発想が出てくるのかっていうところに、非常に興味があるんですけども。

細野：一番面白い元素は、たぶん水素なんですよ。

水素って、周期律表で一番左に書いてあるんですよ。でも、あれ嘘ですよ。本当は真ん中に書くんですよ、あれ。

山田：これも初めて聞くことですね（笑）。

細野：水素は、Hマイナスはヒドリドイオンって言って、有機化学ではそういう言葉が定着している。金属だと水素は（電荷）ゼロなんですよ。それで、普通のところに行くと水素はプラスになっちゃうんです（笑）。水素はプラス1、ゼロ、マイナス、全部取れるんですよ。それは、うまく工夫すると水素だけで相当面白いことが、たぶんできるんですよ。もうひとつは、実は水素が隠れている不純物っていうのが、めちゃくちゃ多いんです。酸化物って、

きれいにしていくと、最後に何が残るかって言うと、水素なんですよ。光ファイバーの歴史って、実は最後は水をどうやって抜くかという歴史だったんですよ。今はどのぐらい抜いているかっていうと、1ppbですよ。10億分の1ですよ。でもね、こういう（窓を指す）そこらへんにあるガラスっていうのは、実は、100ppmぐらい入ってるんですよ。

山田：水素が？

細野：うん。大部分はOHとしてね。普通の高純度だと言われていても、真空中で作るとききれいになるって言うでしょ？あれ、嘘なんですよ。酸化物はものすごい水素入るんですよ。それをずーっと黙ってるんですよ、実は（笑）。ところが、鉄系超伝導の時、我々は、酸素の位置をフッ素で変えて、電子をドープして超伝導体を作ったんですよ。でも、フッ素を入れていくと、希土類とフッ素と酸素の化合物ができちゃって、あるところ以上入らない。これは望みがないな…と思ってたんですけども、その時に、じゃ水素を酸素

の位置に入れてみようかという話になった。酸素はマイナスですから、水素はこの位置にマイナスで入らないといけない。ホントにこれできるのかなあと思ってやってみると、ちょっと高圧にすると100%できるんですよ。そうすると、今まで見えていたものが全く変わっちゃうんですよ。水素が、一番…七変化なんですよ。分野によって、全然水素の扱いが違うんですよ。僕はね、偶然どの分野もあまり気にしないで見てたもんだから、それで、水素の面白さにたぶん気づいたんですよ。少し広く物質を見といた方がたぶんいろんな面白いことがあるんだよね。

山田：そこなんですよ。細野先生は、非常に斬新なアイデアを出されるのは、スタンディングポイントを、ちゃんと変えられるっていうところですよ。

※1 IGZO（イグゾー）
細野氏が開発した透明アモルファス酸化物半導体の一つで、インジウム（Indium）、ガリウム（Gallium）、亜鉛（Zinc）、酸素（Oxide）から構成される。高解像・省エネルギーの液晶ディスプレイに利用されている。

細野：僕は、学生の頃は有機化学をやりたかったんですよ。だから、有機の反応のエッセンスっていうのは、普通の有機化学のドクターぐらいのセンスは、たぶんあるはずですよ。ただ、有機合成の実験は全然できないんですけど。金属もね、実は知らなかったんですよ。僕は。鉄系超伝導が見つかった後、結果的にこれは金属間化合物なんですよね。金属間化合物っていう領域があるっていうことに初めて気がついて。ものすごいびっくりしましたよ、こんな未開な領域があるんだっていうのを。普通、酸化物なんて、バンド構造なんてちょっといじってればマンガにすぐ描けるんですよ。ところが金属間化合物になると、電子状態のバンド構造がどうなっているか、全く絵にも描けないんですよ。超伝導を始めて、金属間化合物をいじらざるを得なくなって、それで、ああいう複雑なもの

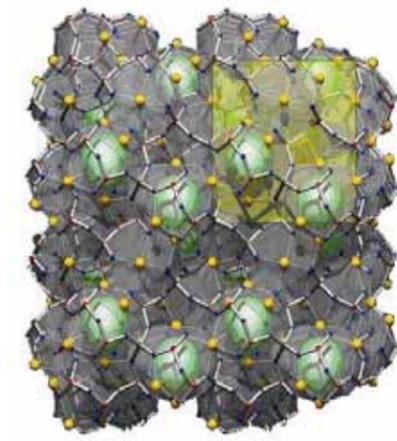
山田：ははは (笑)。

細野：不透明なんですよ。不透明だっというか、真っ黒いモノはイヤだったんですよ。

一同：(笑)

細野：ところが、もう最近不透明でも構わなくなってきたので。

山田：学生時代に新日鉄の重役の息子さんの家庭教師をやっていた時があって、晩ご飯一緒に食べたときに、「山田さん、透明な鉄ってできないんです



左図：室温・空气中で安定な C12A7 エレクトライドの構造の模式図
C12A7 エレクトライドの結晶構造は、直径が約 0.4nm の籠状をしている。黄色の部分が繰り返し最小単位である単位胞で、一辺の長さは 1.2nm

上図：C12A7 エレクトライドの単結晶。無色透明なガラスのような外観で、電気を全く流さない絶縁体だが、籠の中に電子を入れると、緑色を帯びてきて、最終的には濃緑色(試料が厚いと外観は黒色)になり、良く電気を流す状態 (100 S・cm⁻¹) に変わる。つまり、電気をよく通すセメントができたことになる。

出典：科学技術振興事業団報 第 340 号

特殊な構造の中の酸素を全部電子に置き換えると、実は金属になるんです。エレクトライドなんてものは特殊な物質だろうって、みんなに言われていたわけ。特殊じゃなくて、実は、アルカリ金属とアルカリ土類金属の高圧相は、エレクトライドだという報告が相次いでいます。高圧にするとどうなるかということ、普通の金属より、この距離が短くなるんですよ。ナトリウムの「2 原子分子」になって隙間が空くんですよ。で、この隙間に電子が入るんです。この物質、(電子が) 隙間に入った状態というのは、実は透明な絶縁体なんですよ。最近また、イギリスのグループが、金属のアルミをものすごい高圧にしてシミュレーションすると、実はこれも絶縁体になって、エレクトライドになった。で、一番単純に仮説を設けると、「金属の高圧相はエレクトライドである」という仮説が成り立つと思うね。なぜかって言うと、金属と金属の内殻同士がぶつかり合うと、外側の電子がはぎ取られるでしょう。そしたらそれは隙間に行かないといけないんですよ。

*** 中略 ***

ここからしばらくエレクトライドのバンド構造の議論、そしてさまざまな物質で見ついているエレクトライド的な電子構造についての議論が続きました。

細野：だからそういうことだね。たぶん、エレクトライドっていうコンセプトは、非常にユニバーサルなんです。山田：…こういう話って、でも、対談にならないんじゃないですか？

細野：いや、すみません (笑)。でも、マニャックとはいいつつもね、例えばリチウムとか、さきほどのカーボンとか…そういうもので、新しいものができるってところが面白いところで、「材料」って、たぶん言えるんですよ。周期律表の下の方の…、ウンウントリウム^{※2}とか、あのへんで新しいものができても、材料としてあまり意味がないですよ (笑)。ちょっと脱線しちゃうけど、わかりやすいことばかりにサイエンティストが迎合しちゃって、政治家の人を騙して説明しちゃうのは良くないですよ。本来はサイエンスがわかりやすいはずがないんですよ。だから、元素戦略って言ったときに、希少金属の研究をやっちゃいけないのかっていうことになる、非常にまずい。元素戦略の本当の目的って言うのは、

元素の持っているポテンシャルをフルに引き出すって言うことが、たぶん作ったときの狙いなんです。その結果として、それが代替につながる…と言うところが、アカデミアがやる王道だと思いますよ。フルに引き出すためには、今までと同じやり方じゃ引き出せないんで、新しいアプローチがやっぱり必要なんです。各元素に対して目からウロコの発見が出れば、それは立派な元素戦略ですよ。それが、ウランであっても構わない。僕らがやった IGZO も、始めからディスプレイに使えると思って研究したんじゃないんですよ。全く違う、本当に興味本位なんです。興味本位っていうか…、あの、シリコンがあまりにも威張ってるもんだから、一泡吹かせてやりたいっていう…。

一同：(笑)

細野：その意識はあったんだけど、使えるなんて言ったことは初期には一度もないですよ。ただ、それがうまく繋がったんですよ。でも、多くものものはそうだと思いますよ。

村上：たまたまうまくできたものを、普通は見逃すこともありそうですが、



エレクトライドのバンド構造の議論に熱中する村上氏と細野氏

そういうものを見逃さないっていうことも重要だと思うんですが、そういう目の付け所っていうのもあるわけですよ。

細野：ああ。それはね、不遜な自信なんです。絶対に僕は見逃さないって言う、小さいときからそれはもう絶対的に自信があって。僕は、ほとんどの人が見逃してきたものをかなり見つけて来たと思います。

村上：何を心がけていればそういうことができるんですか？

細野：「もの」に対する執着が強いのもかもしれないな、新しいことをやるときに。それから、五感でもものを見る、っていうのがやっぱり非常に多いですよ。色が変わるとか。形が変わるとか。良く言うじゃないですか、ロボットに研究やらせればいいじゃないかって。ロボットは確かに同じことを 100 万回できるんですよ。で、人間って、一所懸命考えて、10 回ぐらいやって、失敗するとね、だいたいもうやらないです。で、次を考えるんですよ。やってうちに、なんか次のヒントが選べるんですよ。だから、それを続けていけば、そんなに失敗なんかはないんですよ。やる前から、こうやってやたらうまくいかないってやってるとね…、失敗する理由をうまく説明することがうまくなるんですよ。

村上：経験から学ぶけれども、その経験を全て信じるわけではなくて…。

細野：うん、とりあえず踏み出すけれども、やってまたその結果で考えようっていうふうに行かないと、始めから最後まで読み切れません。その代わり、僕は大学にいるからよく聞かれる

んですが、その研究を続けてやったらオリジナリティは何か、って聞かれたときに、「前がないから」。これが一番いいんですよ (笑)。それから、それができたときにどういう意味があるのか、かくかくこういう世界が開けるはずだ、と。で、利口な学生ほどそこに敏感なんです。だから、大学の先生ってある意味詐欺師みたいなもので、そうやって若いヤツをだまらかすわけですけど (笑)。でもね、本当に騙そうと思うと、騙せないんですよ。自分が本気で信じてないと。だから、自分が信じられるようにするためには、ある程度やっぱり、理論武装したり、ロジックを持っていないと無理なんですよ。そういうふうにと考えると、意外にいろんな新しいネタが転がってますよ。で、ダメだったらそのときに考えるでしょ？そのときに、きちっとした仮説を考えてやれば、その逆の仮説でまた同じことができるでしょ。そうして、やってうちになんか出て来ますよ。

村上：やってうちに、細野先生でも失敗はいっぱいあるわけですよ。失敗を乗り越えて、あるいは今のお話のように逆に考えて、成功に導く…。

細野：失敗って感じじゃないんですけどね…。あのね、ああ勘違いっていうのが、ものすごい多いんですよ (笑)。これで必ずできるはずだと思ってやってみると、全くできない、逆の結果が出るのがけっこうあるんですよ。だから始めに大胆な仮説を考えたほうが、頑張れるんですよ。始めにセコい

※2 ウンウントリウム
原子番号 113 の元素。未認定でウンウントリウムは仮の名称。



ことを考えると、ダメなんです。誰かがカルシウムでやったから、次はストロンチウムでやってやろうとか…、これ、大体ダメ（笑）。

村上：こう…、大きいストーリーをご自分で考えていくというのがお好きなわけですか？

細野：透明なアモルファスの半導体をやったときにね、こっち側（横軸）に共有結合性—イオン結合性、こっち側（縦軸）に透明—不透明って考えて、今までの物質をマップするんですよ。そしたら第二象限が全くないんですよ、半導体で。要するに、イオン結合性のものってないんですよ、半導体って言うのは。こうやって、象限に分けて考えて、いろんなものを中にプロットして見ると、意外に空白領域ってあるんですよ。そして、一つデータが出てくると、とたんに気がつくんですよ。僕はデータが出てくるまで、頭でもやもやしてただけでも、それが出たとたん、あ！ここ（第二象限）なんだ、これだ！って。

村上：そのパラメーターは何次元ぐらい行けるんですか？ 普通は二次元か三次元ぐらいで…。

細野：二次元か三次元ぐらいですよ、少なくとも僕はあんまり複雑なものはダメなんで（笑）。

村上：何をパラメーターにとるかということが、ひとつのセンスなんです。

細野：面白かったのは、やっぱり押山さん（押山 淳 東京大学大学院工学系教授）とか岩佐さん（岩佐 義宏 東京大学大学院工学系教授）とか、エレクトロニクスっていうコンセプトをこっち側が言ったとたんに、すぐ反応してくれたんですよ。岩佐さんなんかは本来有機の物質（が専門）でしょ？で、押山さんは計算でしょ。学会に行くと、全然（分野の）違う人と会うじゃないですか。それから、超伝導って分野、あれ、何でもかんでもアリじゃないですか。あれ、反則以外何でもアリだよな（笑）。何でも使えるものは使うし。僕らはセラミックスから、半導体に行ったでしょ。半導体って分野はね、ものすごく行儀がいいんですよ。それからすぐ実用になるんで、半導体って言うのは、量子力学の応用問題で、ほとんどのものはもう計算できちゃうんですよ、そういうところから超伝導に行くからね、超伝導は何でもアリで、超高压あり、とにかく何でも構わないんですよ。で、解析は徹底的にやるでしょう。物質科学として見たときに、超伝導は「極」なんです。そこからもう一度半導体に戻ってくると、あ、意外にいろんなことがあるな、と。今まで超伝導体の候補物質を半導体や電子材料として考えてもいいんじゃないかと。

村上：ちょっと議論がずれるかもしれ

ませんが、たぶん超伝導やっている人は、やっぱり超伝導っていう現象自体が、やっぱりすごく魅力的なんだと思うんですよ。先生の場合は、そういう意味で、どういうところにサイエンスやっている魅力が一番感じられますか？

細野：僕はね、今は材料やってるからね…「世の中の困難を解決する」。もう必ずこれ。僕は面白いだけじゃやらない。僕はもともとケミストリー（化学）なんだけれども、材料っていう分野に就職して入っちゃったから、材料っていうのが自然に自分の「着物」になっちゃったんですよ。材料ってどういう分野かって言うと、使えなきゃダメなんです。今すぐに使えるかどうかは別にしてね。で、使えるっていうのは2つ意味があるんです。一番目は、会社に役に立つこと。産業だよな。二番目は、僕は公害の世代に育っているから、会社に役に立つことがイコール世の中の役に立つことって、そういう認識はないんですよ。だから、世の中の社会的困難の解決に繋がるっていうこと。この2つは、やっぱり僕は大事だと思いますよ。材料っていうのは、結果的にそこに繋がらないと、「材料」じゃないんですよ。たぶんそれは「物質」なんです。ただ、材料はあんまり狭く捉えちゃうと、画期的な材料ってできないんです。基礎（科学）まで

取り込まないと。すぐに役に立つ材料っていうのは会社がやってると思うんですよ。見込みはあるんだけど、10年ぐらい研究やらせてくれる材料っていうのは、たぶん一番いい。ただ結果的に、

世の中に役に立つか、社会的困難を解決しない限り、それは材料じゃない。

それは非常に僕は強い信念ですね。

村上：それは良くいつも言われますよね。研究者とか学生に。

細野：初めはそう思ってなかったんですよ。自分の子供が産まれて初めて、ああ材料やって良かったな、と。子供は、親がいないといないわけですよ。で、彼女達が大人になったときに、どういう社会になるかなと思ったときに、やっぱり責任があるわけですよ。世の中を支えていくところに貢献するのは、やっぱりいいな、と思えましたよ。猫なんて1ヶ月でだいたい自立するわけですよ。人間だけですよ、3年ぐらい自立しないのは。そうすると、餌くれなかったら死んじゃうわけですよ。そうしたときに、ああ、少しはこれやんなきゃいかん、世の中のことを真面目に考えなきゃいかんなど。僕は若い頃ずっと公害の研究っていうのには相当に影響されてたから、（社会的困難を解決するのは）非常に大事だと思ってたんだけど、研究始めたら、もう面白かったらいいって感じになっちゃったんだけど、子供が産まれたときに、やっぱりそりゃいかんなんて。原点に戻った感じがしてね。だから、元々そういう指向がたぶん僕は強いんですよ。ただ、この間、暗黒物質の村山さん（村山 斉 東京大学数物連携宇宙研究機構機構長）と話したとき、役に立たななきゃだめだって言ったら、彼はすごく怒っちゃったんだけどね（笑）。

一同：（笑）

細野：だから、暗黒物質のことってないんだからって（笑）。ただ、あれは役に立つのはね、文化として役に立つんだよね。それは確かに意味があるんだよね。ただ、材料の場合は、花より団子で、文化じゃ食えない。日本って、製造業で食ってるでしょ。それを



支えてるのは材料なんです。だから、お金を稼いでいる分野、なんですよ。その分野がどうやって食べられるようにするかっていうのは、我々も、研究費をもらっている以上、責任が、あるんですよ。累積で勘定すると、橋が1個架かるぐらいのお金（研究費）もらってるのに（笑）、何したかなと思うとね、薄ら寒い気分もあるんですよ。だけど、IGZO 出たんでね（笑）、少しは借りを返したかなと思ってるんだけどね。

山田：若い人は、最初からそういう意識を持たないといけませんかね？

細野：いや、持つ必要ないと思う。僕は、若い人は興味ドリブンの方がいいと思う。始めから、戦時研究みたいなミッションオリエンテッドって、面白いですかね？

山田：面白いとは思わないですけど（笑）。

細野：田中一宜さん（産業技術総合研究所フェロー）は、僕がすごく尊敬してる人なんだけど、田中さんが非常にうまいこと言ったのは、プロジェクトリーダーというのは、そういう生臭い政治的なものを全部そこで止めるものだ。それで、下の人にはもうちょっと自由にやらせるもんだって。それが、マネジメントだ。全くそう思いますが、研究の現場がどうなってるかっていうと、mustじゃ動かないですよ。wantじゃなくちゃ、なかなか動かない（笑）。でも、現場はどっちでもいいんですよ、うまく動けば。それを全体的にはある方向にドリブンしてかなきゃいけないのは、確かだけでも。

山田：時間もなくなってきたので、最後に。我々は物構研という、測定や解析を担う研究所なわけですけど、

先生の、材料、あるいは物質合成という立場から、物構研に期待することをお聞かせいただけますか。

物質観を養うのは、解析なんです。

よ。どんな分光学をやっていたかによって物質観が変わっちゃうように思うね。僕は解析が重要とわかったのは、IGZOをやった時。薄膜っていうのは、XPS（X線光電子分光）、UPS（紫外光電子分光）では、表面がきれいではないとダメですよ。それでSPRING-8にハードX線（硬X線光電子分光）というbulk sensitiveな分光法ができたから測ってみない？って。じゃあ、何の役に立つかわかんないけど、測ってみよう。それで、そのとき出たデータを見て、え、なんだこれ？って。実は光が当たったときにTFT（薄膜トランジスタ）のしきい値がシフトする大問題があったんですよ。そのオリジン（起源）はこれだ！って。Samsungの人がこの問題で困っていると言ったときに、ぱっとそのデータが出て、それを学会で発表して、みんな、劣化の原因が初めてわかったんですよ。非常にそれが早かった。あのデータがなかったら、たぶん、有象無象で全然ダメですよ。あのハードX線のデータは、みんながやる前に…やる前っていうか、役に立つなんてことを考えずに実は測ったんですよ。それは、基本的には手法のeffectiveさなんです。ハードX線ってbulk sensitiveなもの（手法）であったから出たんで、どんなに頑張ってもあの手法じゃないと出ないですよ。



例えば、軽い元素はX線で測るとわからないけど、中性子で測るとわかってしまうとか…、こういう本質的な「手法の強さ」っていうのがあるんですよ。それが、言われてから測るんじゃなくて、もしかしてこれ重要かなと思うものは測っておかないと、いざというときに対処のしようがない。必要になる前に、本質的に新しい手法っていうのは、測っておいた方がいいですよ。

村上: この元素戦略プロジェクトのいいところは、そうやって物質合成と測定っていうところが、本当に寄り添ってすぐにフィードバックできるようなやり方を目指しているんで、今までの物質開発とは違った強みが出て来るのかなって思いますね。

細野: そうですね。それから日本の「材料」ってやっぱり、強いんですけども、もう風前の灯火なんです。中国が強いから。韓国もどんどん強くなってきてるしね。ところが日本は、さっきのハードX線じゃないけど…。我々がハードX線で見つけたときに、Samsungは韓国の放射光施設を全部漁ったんだけど、どこにもハードX線(の装置)がなかったんです。日本ってやっぱりそういう意味では、強いんですよ。インフラが。それで、いろんな人が…基礎をやってる人もいて、基礎も強いしね。で、狭い距離にわっといって。だから、スピードでうまく団結してやれば勝てるんですよ。材料

の場合、半年に1回マシンタイムがあるっていうのは、あんまり意味がないんですよ。半年も経つと状況が変わっちゃうからね。だから、測定と解析、測定と合成っていう、これになるべく速く回るように。それから必要な情報をこっから見たりあっちから見たりして、立体的に取ってしまえば、そうすればすごく日本って強みがあるんですよ。そういう意味じゃこの元素戦略を機会にね…、元素戦略ってちょっと、名前がすごいので(笑)僕はこれを「innovative material science for sustainable society」って英語に訳してますけど(笑)

山田: 物構研には、要するに、非常にタイムリーに測れるようなそういうシステムを作らないと…。

細野: もうひとつは、これがうまくいった例を1つ出せば、みんな元気になるんですよ。基礎の人も応用の人も。こういうのって絵をたくさん描いて見せてもダメなんです。いつもそうですよ、始めにどんなきれいな絵を描くかということばかり考えてね。絵なんかいらんんですよ。要するに見事な結果がありゃいいんです。1つうまくいった結果があれば、それがひな形になるんですよ。物構研とかNIMS(物質・材料研究機構)と一緒にやって、とにかくひとつだけ、日本発の材料と日本発の計測が揃ってやったからできたんだっていう結果が欲しい。これは

さすが日本だという結果が。そうすれば、ああこういうやり方があったかとみんな思うじゃないですか。そうしたら、マテリアルサイエンスそのものがこの形になりますよ。

村上: あと理論の役割も重要だと思うんですよ。

細野: 絶対に必要ですよ。計測と理論と合成っていうのは三位一体ですよ。で、超伝導っていう分野はずっとこれをやってるの。競争が激しくなったら必ずこうなるんですよ。そういう意味では超伝導は、やっぱり、物質科学の一番の「極」なんです。

村上: 元素戦略のそういう基本的な3つ、物質合成、計測、理論っていうものをちゃんと形にしたっていうのは、非常に良かったですね、最初にそういう枠組みを作ったというのが。

細野: あればね、福山先生(福山 秀敏 東京理科大学 副学長、元素戦略プロジェクト立ち上げ当時)。を巻き込んだのが良かったんだね。福山先生が相当熱心に関与してくれたんですよ。やや、理論偏重気味ではあるけど(笑)。

村上: ははは(笑)

細野: そんなこと言うと怒られちゃう(笑)。でも、本当に良かったですよ。新しいサイエンス、新しいマテリアルサイエンスの形態だね。

施設情報

放射光ビームライン BL-2 Li電池やユビキタス元素による材料開発を目指し、建設を開始

BL-2は、フォトンファクトリーの創設時から、挿入光源(アンジュレーター)による高輝度の軟X線を使用できるビームラインとして、さまざまな研究に利用されてきた。現在、株式会社日立製作所との共同研究により、このビームラインのグレードアップが行われている。このビームラインの特徴は、長い直線部に2台のアンジュレーターをタンデムに設置することにより広いエネルギー領域が利用できることで、軽元素から希土類まで幅広い元素の元素選択的な分光実験が可能になる。リチウムイオン電池などのエネルギー変換材料や、ユビキタス元素(ありふれた元素)による機能性材料などの研究を推進する。春に旧ビームラインの撤去が行われ(前号:「フォトンファクトリーの春休み」参照)、この夏には新しいビームラインの建設が行われている。秋からは一部のエネルギー領域の実験を再開し、来年春に予定されている2台目のアンジュレーター設置後に本格的な利用実験の開始を目指している。



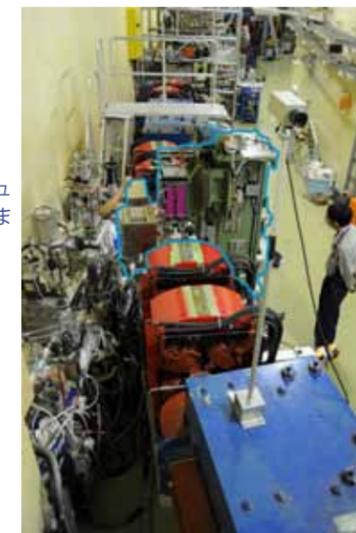
建設中の BL-2



分光器を設置している様子

放射光ビームライン BL-15 今秋に完成 ナノテク・ソフトマター材料研究を推進

前号の物構研ニュース「フォトンファクトリーの春休み」で、旧ビームラインの撤去と基礎工事の様子をご紹介したBL-15に、この夏新しいビームラインが建設されている。光源加速器には、このビームラインに高輝度の光を供給する光源となる新しい短周期アンジュレーターが設置された。



設置された短周期アンジュレーター(右図、青線で囲まれた部分)

また、実験ホールには、実験ハッチが建設され、その中に実験装置が順次設置されていく予定である。秋からは、XAFS法と小角散乱法という2つの手法で1つの材料を複合的に調べるビームラインの利用が可能になり、ナノテクノロジー材料やソフトマター材料などの、空間的に不均一な組成を持つ材料の研究が推進される。



2013年2月。BL-15B、15Cの2つのビームラインが撤去された。



2013年7月。手前から順に、青色:メインハッチ、ピンク: XAFS用実験ハッチ、黄色:小角散乱用実験ハッチ。

元素戦略プロジェクトと KEK 物構研

元素戦略プロジェクトは、資源に乏しい我が国の産業競争力を強化するために、希少元素を用いない革新的な代替材料の創製を目的としたプロジェクト。平成19年度から、「産学官連携型」として文部科学省・経済産業省との連携プロジェクトとして実施され、基礎研究から実用化までの研究を展開し、優れた成果を生み出しつつある。平成24年度からは、この成果をさらに強化するため、「研究拠点形成型」として、材料創製(合成)と電子論(理論)および解析評価(計測)の3つのグループの研究ネットワークを形成する体制で、10年間(予定)の新たなプロジェクトが開始した。磁石材料、触媒・電池材料、電子材料、構造材料の4つの材料領域において、代表研究者の強力なリーダーシップのもと、拠点を中核として形成する共同研究組織の密接な連携・協働によって推進する。

KEK物構研の構造物性研究センター(CMRC)では、物構研の最大の特徴である、放射光・中性子・ミュオン・陽電子というマルチプローブを駆使した物質科学研究を牽引してきている。元素戦略プロジェクトにおいては、細野教授を拠点代表者とする電子材料領域ではCMRCセンター長でもある村上洋一教授のグループが、それぞれ連携機関の一つとして「解析評価」の役割を担っている。物質の機能を決定する元素の役割を解明し、ユビキタス元素(ありふれた元素)の性質をフル活用した新しい電子材料・磁性材料創製の有力なツールとして、Photon Factory、物質・生命科学実験施設(MLF)で生み出される物構研のマルチプローブは大きな期待を受けている。



Photon Factory MLF/J-PARC

元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>における異分野協働の研究体制

研究トピックス

物構研、および PF、MLF の共同研究・共同利用による研究成果

■ もっと詳しく
KEK ニュースルーム
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/>

電子のガラス状態を発見

東京大学大学院工学系研究科の賀川史敬 講師、大学院生 佐藤拓朗氏、十倉好紀 教授らの研究グループは、最先端研究開発支援プログラム (FIRST) 事業の一環として、三角格子を持つ層状有機化合物 θ -(BEDT-TTF)₂RbZn(SCN)₄ (以下 θ -RbZn) を急冷すると電子がガラス状態を形成することを発見した。

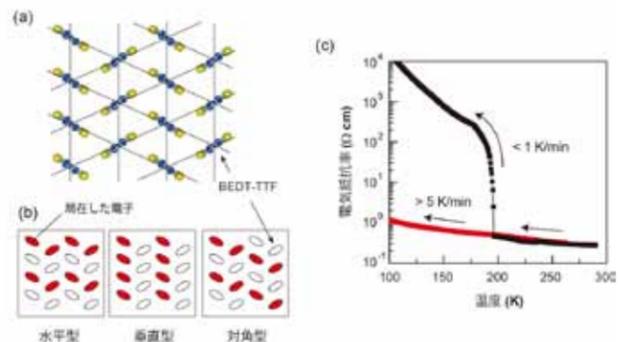
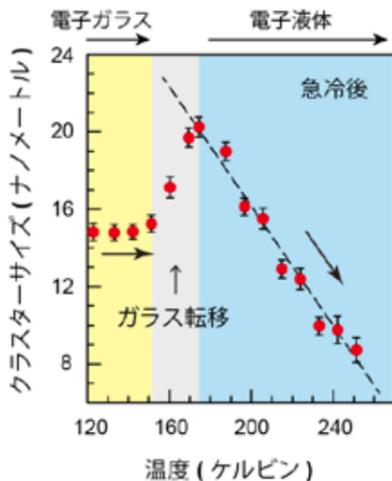


図 (a) θ -RbZn の BEDT-TTF 相の結晶構造。(b) 想定される様々な電子結晶の配列パターン。 θ -RbZn において低温で実際に実現するのは水平型の配列パターン。(c) 電気抵抗率の温度依存性。1K/min 以下で徐冷した場合は 200K で電子が結晶化し、電気抵抗が増大するが、5K/min 以上で急冷した場合は、電子の結晶化は起こらず、電気抵抗は比較的低抵抗状態を保つ。

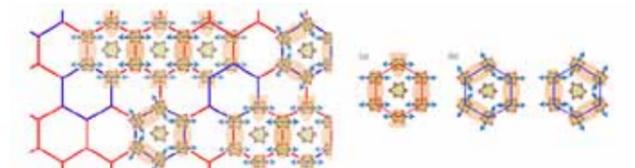
液体中の原子や分子は通常、低温にすると凍って周期性を持った結晶を組むが、中には急冷によって周期性を持たないガラス状態へと凍結するものも存在する。電子同士が強く相互作用し合う強相関電子系では、液体のように遍歴していた電子が、低温で結晶化して局在する現象がしばしば観測される。このような振る舞いは通常の液体の結晶化と一見似ているが、結晶化が急冷によって妨げられてガラス化する現象は電子系ではこれまで知られていなかった。今回、研究グループは電気抵抗の揺らぎを 10 μ 秒の分解能で測定すると共に



X 線回折実験を行うことで、急冷下で電子が 10 ~ 20nm のクラスターを形成しつつガラス化することを発見した。また、電子がガラス化する過程は、液体がガラス化する過程と似ており、両者の間には普遍的なメカニズムが働いている可能性が示された。
Nature Physics, DOI: 10.1038/NPHYS2642

電子のスピンと軌道の絡み合った 共鳴状態の解明

大阪大学大学院基礎工学研究科の若林裕助准教授、東京大学物性研究所 中辻知准教授を中心とする、高輝度光科学研究センター、理化学研究所 (SPring-8) との共同研究グループは、蜂の巣構造を基本骨格とする銅化合物 (図) において、電子の持つ自由度であるスピンと軌道が量子力学的に混ざった状態に特徴的な構造の観測に成功した。



ハニカム構造で期待される電子軌道の秩序状態
弱い電子軌道の秩序 (a) によるハニカム構造の中に、(b) の秩序が混在し、かつ (b) は 2 つの状態が混在している。

研究グループは、フォトンファクトリーの BL-3A を用い、数 nm 範囲でのみ銅イオンの電子軌道が整列していることを観測。その温度依存性を磁性と比較した結果、電子の軌道とスピンの強く絡み合いながら揺らいだ状態が実現していることを明らかにした。この状態は、軌道が高い温度で秩序化し、その環境に合わせて磁性が低温で秩序化する通常見られる状態と大きく異なっている。蜂の巣構造など、ある種の幾何学的な構造は、単純な秩序構造と辻褄が合わず、フラストレーションを持ったまま極低温まで秩序を形成しない。そのような物質の中では、通常生じない新しい状態が生まれることが理論的に予想されており、本結果は、このような新しい状態の一つを実験的に確認したことに相当する。

Nature Communications, DOI: 10.1038/ncomms3022

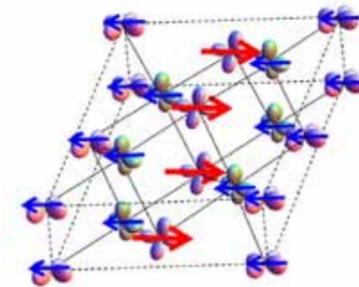
強相関絶縁体における歪み誘起磁化の起源を解明

東京大学大学院の藤岡 淳 助教、十倉 好紀 教授らの研究グループは、KEK 物構研の山崎 裕一 助教、中尾 裕則 准教授、熊井 玲児 教授、村上 洋一 教授らと共同で、本来非磁性である強相関電子系 LaCoO₃ を薄膜化して歪みを加えることにより、電子のスピン・軌道が秩序化し自発磁化が生じる事を明らかにした。

電子同士が強く相互作用し合う強相関電子系では、ナノメートルスケールの電子の自己組織化が広く観測される。例えば磁石による磁化は、物質内の電子のスピンが秩序化した結果である。このような秩序は、物質の温度、電子のバンドの充

研究グループでは、スピン状態の制御によってスピン・軌道自由度の秩序化を引き起こして磁性を操ることを目的に、非磁性絶縁体として知られるペロブスカイト型 LaCoO₃ に着目した。LaCoO₃ 薄膜の磁性を磁化測定によって調べ、結晶構造を KEK のフォトンファクトリーの放射光 X 線回折、赤外分光を用いて調べた。その結果、自発磁化が生じる温度 94 K より高い温度 126 K で磁化の温度依存性に異常が見られ、結晶構造相転移が生じる事が分かった。そして、物質を構成しているイオンのスピン状態が僅かな結晶歪みによって変化してスピンの秩序化が引き起こされている事を突き止めた。以上の結果から可能性が高いと思われるスピン・軌道秩序パターンを図に示した。

本研究により、磁性を持たない物質であってもスピン状態が可変の元素を含んでいれば僅かな結晶歪みによって磁性体へ転化させられるメカニズムの一つが解明された。また、本メカニズムの利用により、高感度歪みセンサー開発の可能性が考えられる。

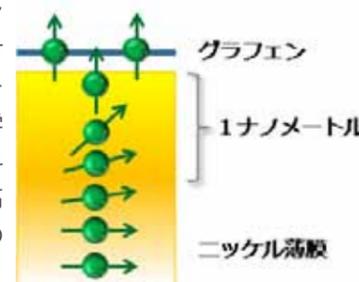


スピン・軌道秩序パターンの一例。矢印、ローブはそれぞれ電子のスピンと軌道を表す。実線は Co の結晶格子を表す。

Physical Review Letters, DOI:10.1103/PhysRevLett.111.027206

グラフェンと磁性金属の界面で起こる特異な電子スピン配列

JAEA 先端基礎研究センターの松本吉弘任期付研究員、境誠司グループリーダー、千葉大学大学院融合科学研究科の小出明広氏、藤川高志教授、KEK 物構研の雨宮健太教授らは、グラ



フェンと磁性金属 (ニッケル) 薄膜の接合体について、界面の近傍で生じる電子スピンの特異な配列状態の存在を明らかにした。

グラフェンは、スピン情報の伝達に優れた性質から、次世代スピントロニクス of 基盤材料として注目されている。スピン素子に用いるには、電子スピンの向きに偏りを持つ磁性金属などから、グラフェンにスピン偏極した電子を移動 (スピン注入) させる必要がある。その際に電子のスピン偏極を保つことなど、スピン注入効率の向上が応用の実現に向けた課題となっている。スピン注入は、磁性金属等のスピン注入源とグラフェンの接合面 (界面) を介して行うため、効率的なスピン注入源の設計には界面の電子スピン状態の理解が重要となっている。

今回、当研究チームは、原子層スケールの分解能で表面から深さ分解 X 線磁気円二色性分光法を用いて、グラフェンと磁性金属 (ニッケル) 薄膜の接合体を分析した。通常、磁性金

属の薄膜はスピンの向きが面内方向に配列する。しかし、本研究の結果、グラフェンとニッケル薄膜の界面では、界面からわずかに数原子層の領域で、電子スピンの配列の向きが面内方向から面に垂直な方向 (面直方向) に回転していることが明らかになった。これまでのスピン注入源では、このような界面に特有の電子スピン配列状態は考慮されておらず、スピン注入を妨げる原因になっていた可能性がある。今後、本成果を新たな設計指針とすることで、グラフェンへの高効率スピン注入の実現に道を拓くことが期待できる。

Journal of Materials Chemistry C, DOI: 10.1039/C3TC30872C

セラミックコンデンサ中の水素不純物による絶縁劣化のしくみ

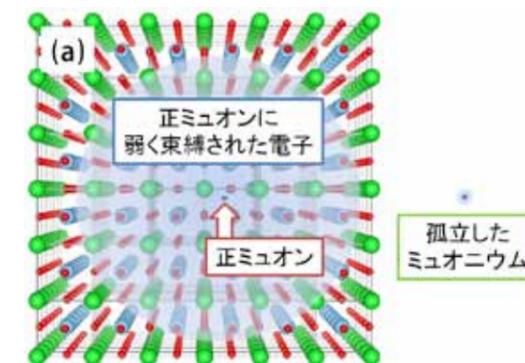
JAEA 先端基礎研究センターの伊藤 孝 研究員、髭本 亘 研究主幹と KEK 物構研の下村 浩一郎 准教授、幸田 章宏 研究機関講師、および J-PARC センターの研究グループは、代表的なセラミックコンデンサ材料であるチタン酸バリウム (BaTiO₃) に混入した微量の水素不純物が絶縁劣化を引き起こすメカニズムを明らかにした。

積層セラミックコンデンサは現代のエレクトロニクス産業に不可欠な基本電子部品の一つであり、パソコンやスマートフォンなどの電子機器に多く使用されている。BaTiO₃ は積層セラミックコンデンサの主原料となる誘電材料で、微量の不純物や格子欠陥によって電気的性質が大きく変化するため、そのメカニズムの理解と制御は重要な課題となっている。

本研究では、積層セラミックコンデンサの焼成過程で混入する可能性の高い水素に着目した。BaTiO₃ の結晶に正ミュオンを打ち込み、電子 1 つと束縛した状態のミュオニウムを模擬的な水素不純物と見なし、ミュオンスピン回転・緩和法により正ミュオン周辺の局所的な電子状態を調べた。

その結果、-190℃ 以下で正ミュオンのまわりに電子が束縛され、その軌道は単位格子数十個に渡って広がっていることが分かった (図 (a))。電子軌道の広がり、孤立したミュオニウムより数十倍も大きく、電子の束縛が非常に弱いことを示す。また温度上昇に伴い、弱く束縛されていた電子が熱エネルギーを得ることで結晶中を動きまわられる状態になることも分かった。結晶中を動きまわる電子は、電気伝導に関与し、BaTiO₃ の絶縁性の低下につながる。実際の水素不純物も、同様のメカニズムにより電子を放出し、絶縁性の低下を招くと考えられる。この知見に基づいて、チタン酸バリウム系セラミックコンデンサの製造過程から水素混入の可能性を排除することにより、コンデンサの性能向上が期待される。

Applied Physics Letters, 103, 042905 (2013)



イベント予定

9/8 (日)

KEK 一般公開

KEK のつくばキャンパスを公開。普段は見ることのできない実験施設を見学、講演や体験イベントなど科学技術に直接触れることができます。

特別講演 14:00 ~ 15:00 (研究本館)

「チョコレートの物理学
- おいしさをつくる技術 -」
上野 聡 (広島大学大学院 教授)

講演 13:00 ~ 13:45 (4号館)

「遺伝子ってなんだろう？」
千田 俊哉 (KEK 物構研 教授)



展示・施設公開

フォトンファクトリー

今年は "暮らしの中の元素" をテーマに、身体を作っている元素、便利な元素など、私たちの身近にある元素を調べて活用している研究を紹介します。展示をめぐりながら、クイズ"元素ハンター"に挑戦!

ERL 開発棟

次世代光源として開発している ERL の実証機であるコンパクト ERL を初公開! 建設中の姿を見ることができるのは、今年だけです。