

日本物理学会誌

- 電子ビームを用いたラムダハイパー核の精密分光
- 鉄系高温超伝導体の超伝導対称性と電子状態相図
- ヘリウムプラズマ照射により高融点金属表面に形成されたナノ構造

BUTSURI

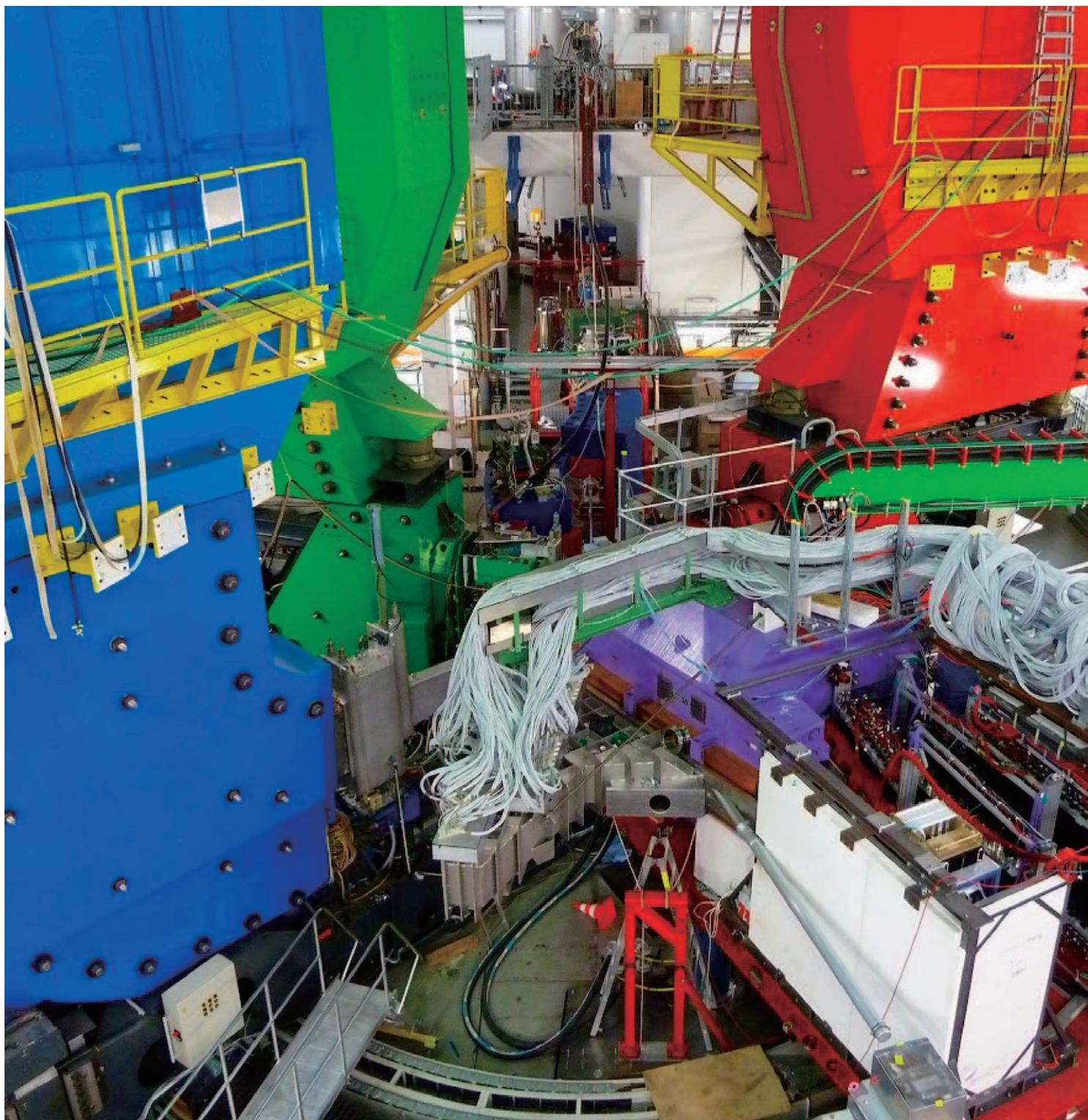
第68巻 第9号(通巻 766号) ISSN 0029-0181

昭和30年6月13日 第3種郵便物認可

平成25年9月5日発行 毎月5日発行

2013 VOL. 68 NO.

9



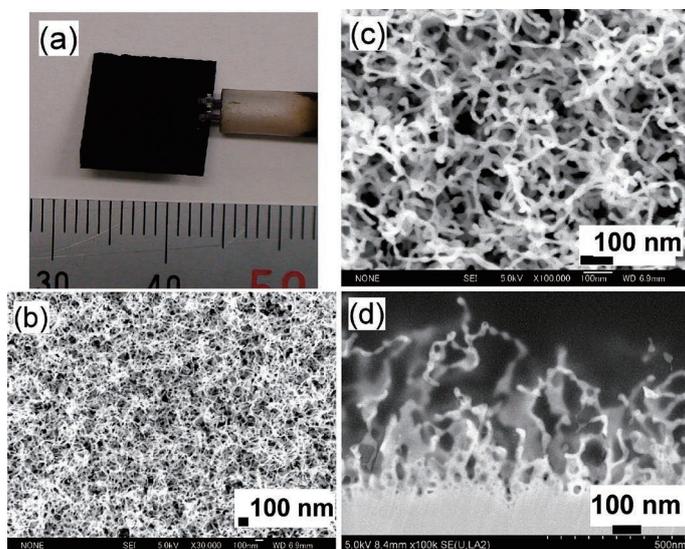
口絵：今月号の記事から		581
巻頭言	PTEPことはじめ	坂井典佑 583
解 説	電子ビームを用いたラムダハイパー核の精密分光	
	中村 哲, 藤井 優, 塚田 暁	584
	鉄系高温超伝導体の超伝導対称性と電子状態相図	芝内孝禎, 松田祐司 592
	ヘリウムプラズマ照射により高融点金属表面に形成されたナノ構造 口絵	
	高村秀一, 梶田 信, 大野哲靖	602
最近の研究から	バイオメカニクス：力学からみる生命現象 口絵	和田浩史 612
JPSJの最近の注目論文から	5月の編集委員会より	安藤恒也 617
PTEPの最近の招待・特集論文から	2013年2月号より	坂井典佑 620
学界ニュース	第3回日本学術振興会「育志賞」：高山あかり氏	高橋 隆 622
	第33回猿橋賞：肥山詠美子氏	上村正康 622
シリーズ「“ポストク”問題」	理工系ポストク・博士人材のキャリアデザインと大学院改革	
	朝日 透, 中里弘道, 鈴木清貴	623
ラ・トッカータ	フィレンツェ, ポストク体験記	毛受弘彰 628
	まずは根を張れ, 実るのはその後からだ	大関真之 630
新著紹介		632
掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他	634
行事予定		641
会 告	■オックスフォード大学出版局発行書籍の割引購入について ■2014年度の論文誌等購読の変更手続きのお願い ■2014年度の会費減額申込手続き(大学院学生・学部学生)のお願い ■2014年以降消費税税率引上げへの本会の対応について ■2013年8月1日付新入会者 ■会長任期2年制への移行と、それに伴う細則の改訂について	643
本会関係欧文誌目次		646

表紙の説明 ドイツマインツ大学A1実験室にハイパー核・ストレンジネス物理研究のために用意した電磁スペクトロメータKAOS(右手前, 紫, 総重量120トン)および常設されている高さ約10メートルの3台の電磁スペクトロメータSpek-A(赤), B(青), C(緑):マインツ大学原子核研究所のMAMI(Mainzer Mikrotron)加速器が近年, アップグレードされたことにより高品質の電子ビームを用いたハイパー核研究が可能になった。ここで, ストレンジネスが生成されたことをタグし背景雑音を抑制するために K^+ をKAOSで測定し, 同時に電磁生成されたハイパー核が標的中に静止した後, 弱い相互作用により二体崩壊して生じる π^- をSpek-A, Cで運動量分析する「ハイパー核崩壊 π 中間子分光」という新しいハイパー核分光手法の確立を目指している。詳細は本号に掲載されている中村 哲氏らの「解説」記事を参照のこと。

Graphic Page	581
Editorial	
<i>The First Year of PTEP</i>	Norisuke Sakai 583
<hr/>	
Reviews	
<i>Precision Spectroscopy of Lambda Hypernuclei Using Electron Beams</i>	Satoshi N. Nakamura, Yuu Fujii and Kyo Tsukada 584
<i>Superconducting Symmetry and Electronic Phase Diagram of Iron-Based Superconductors</i>	Takasada Shibauchi and Yuji Matsuda 592
<i>Nanostructure Formation on Refractory Metal Surfaces Irradiated by Helium Plasmas</i>	Shuichi Takamura, Shin Kajita and Noriyasu Ohno 602
Current Topics	
<i>Biomechanics: Understanding the Mechanics of Living Systems</i>	Hirofumi Wada 612
<hr/>	
JPSJ Selected Papers in the Latest Issue	Tsuneya Ando 617
PTEP Invited Papers and Special Sections in the Recent Issue	Norisuke Sakai 620
Physics Community News	
<i>3rd Ikushi Award by JSPS: Akari Takayama</i>	622
<i>The 33rd Saruhashi Award: Emiko Hiyama</i>	622
Network Pages for Professional Development of Physicists	
<i>Carrier Design and Graduate School Reform for Postdoctoral Fellows and Doctoral Students in Science and Engineering</i>	Toru Asahi, Hiromichi Nakazato and Kiyotaka Suzuki 623
La Toccata	
<i>Experience Note of Post-Doc Life in Florence</i>	Hiroaki Menjoh 628
<i>Your Root in the Ground to the Future</i>	Masayuki Ohzeki 630
Book Reviews	632
<hr/>	
Notice Board	634
<hr/>	
JPS Announcements	643

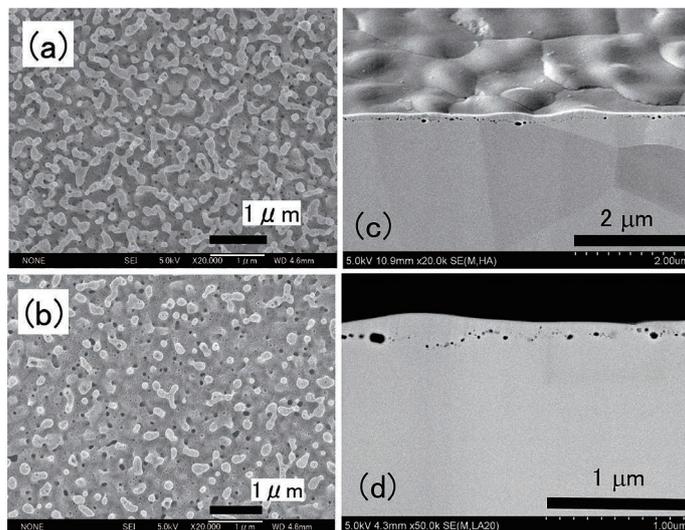
解説 「ヘリウムプラズマ照射により高融点金属表面に形成されたナノ構造」 p.602

口絵 1

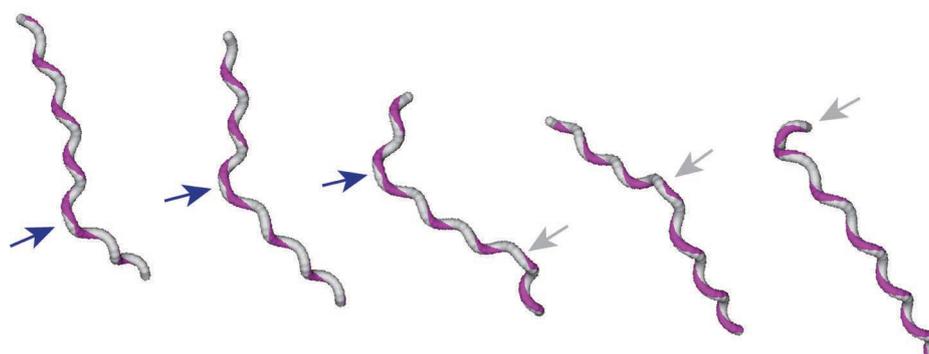


ヘリウム・プラズマ中に挿入され、表面温度 1,300 K 程度、イオン粒子束密度約 1×10^{22} 個 / (m²·s) の照射を 2 時間程度受けたタングステン (PM-W) の構造. (a) に示すように、タングステンは黒色化し、可視光を中心とした広い波長の光を吸収するので、全放射率は 1.0、すなわち完全黒体に近い。走査型電子顕微鏡で観察すると (b) 3 万倍程度では綿毛 (fuzz) のように見え、(c) 10 万倍では枝分かれした樹枝状に見える。(d) は CP 法で得られた断面であり、数十ナノメートルの繊維状タングステンの中にはヘリウム・バブルが見て取れる。このような入り組んだ構造が完全黒体化をもたらし、2 次電子放出を妨げ、スパッタリングを抑制すると考えられる。

口絵 2



口絵 1 に示した黒色化タングステンの表面温度を 1,600 K 程度以上に昇温したときに見られるプラズマ・アニーリング効果の結果が (a) と (b) である。(b) はより進んだ状態である。ヘリウム照射時間は 10–20 分程度で、イオン衝撃エネルギーは 15–20 eV と低い。さらに 1,800 K の高温にし、60 分間アニールしたタングステン試料の SEM による断面斜めと垂直観察結果が (c) と (d) である。元の繊維状ナノ構造は溶けたガラスあるいは飴のように粘性を持つ流体のように振る舞うように見える。アニーリングは進んでも表面近くの 100 nm 程度のヘリウム・バブルは生き残っているのが確認できる。



(上) 1% メチルセルロース溶液中でのスピロプラズマの運動の様子。数字は時間 (秒) (中根大介博士 (学習院大学) 撮影)。細菌の一種であるスピロプラズマは細胞全体がらせんを巻いている。全長はおよそ数ミクロン、細胞の幅は数百ナノメートル。スピロプラズマはらせんの右巻きと左巻きを動的に切り替えながら流体中を運動する。菌体の運動を、カイラリティの切り替えをアクティブに行う弾性フィラメントとしてモデル化し、周囲の流体効果を取り入れた計算を行うことで、その特徴的な運動の様子を再現することができる (下)。計算結果は、この細菌のらせん形状が最大速度を実現する形状であることを示す。

PTEP ことはじめ

坂井典佑 (PTEP編集委員長)

御承知の通り、日本物理学会の新学術誌 Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) は 2012 年 9 月から学術論文の投稿受け付けを始めました。同時に特集号の刊行を開始し、2012 年末までに、計算機科学・J-PARC・理研 RI ビーム・高エネルギー実験の 4 分野で特集号を出版しました。2013 年 1 月からは、通常号を定期的に刊行しています。PTEP がオープンアクセスジャーナルであることへの手ごたえも大きく、まだ出版から日が浅いにも関わらず特集号を初めとする論文ダウンロードのアクセス数も順調に伸びています。また、これまで Progress of Theoretical Physics (PTP) の掲載論文で無料でダウンロードできるものは限られていましたが、PTEP がオープンアクセス誌として出発する機会に、学術資産としての PTP のこれまでの全論文も、誰もが無料でダウンロードできる形で提供できることになりました。その結果、世界中から PTP 論文のダウンロードが行われ、アクセス数は飛躍的に増えています。たとえば PTP 論文の 2013 年 3 月のダウンロード数は、物理学会のサイトからの分と、オックスフォード大学出版局 (OUP) のサイトからの分とを合わせて、1 か月で 4 万件近くに達しました。これを見ても、PTEP が PTP の後継誌であることが高く評価されていると感じます。

PTEP が取り組んでいるオープンアクセスというのは、学術出版界の大きな話題であり、世界的な潮流になっています。オープンアクセスとは、学術情報が誰にも無料で公開されることですが、これには二つのレベルがあります。査読を受けていない学術情報を無料で提供するのは、グリーン・オープンアクセスと呼ばれ、物理・数学関係の分野ではプレプリント・アーカイブによって事実上実現できていると言えるでしょう。現在は、査読付き学術誌に出版された論文を無料でダウンロードできる「ゴールド・オープンアクセ

ス」が、どのようにして実現できるかが焦点となっています。

電子化が進んだ今日でも、学術論文の出版には査読・編集にも、電子プラットフォームの維持改良にもある程度の経費が掛かります。これらの出版経費をだれがどのように負担するのかが、オープンアクセスを持続的に実現するための大きな課題です。PTP や JPSJ を含めて学術誌の多くは今まで購読料(場合によっては論文掲載料)によって支えられてきましたが、購読料を取らないことがオープンアクセス誌の出発点です。したがって、掲載料など他の道に頼らざるを得ません。しかし、PTEP では出発にあたって、掲載料を免除するシステムを作り、現在は免除申請はすべて認められるようになっていきます。当初は 1 年間の免除から開始しましたが、関係者の努力のおかげで、以下に述べるように、今後 5 年を超え、10 年程度にわたって掲載料免除の仕組みに財政的見通しがつき始めたと考えています。

今年度からオープンアクセス学術誌支援に特化した新しい科学研究費が設けられ、PTEP はそれに応募しました。4 月のヒアリングでも「新しいビジネスモデルを作るように頑張ってください」といった大変心強い手ごたえがあり、5 年間の補助金内定通知を 5 月中旬に受けました。今後 5 年間、この科研費で PTEP の中長期的な基礎固めを十分に行い、持続的な出版態勢を確立することになります。

さらに、個々の研究者の研究費に頼って掲載料を負担するのではなく、公的負担によって掲載料を支払う方式が国際的に提唱され、高エネルギーの分野から実現しつつあります。セルンが主導する SCOAP³ という運動ですが、幸い PTEP はその対象誌として選定されました。その結果、プレプリント・アーカイブで hep のカテゴリーに投稿された論文は、今後、SCOAP³ が掲載料を負担してくれることになります。

一方、PTEP では他の研究分野も大変重要であり、特に今まで PTP を中心的に担ってきた理論分野では零細研究機関の研究者の方が多いことから、掲載料を今後も免除できるシステムを作ることが重要な課題です。その方策として多くのオープンアクセス誌が目指しているのは、個々の研究者でなく、有力な研究機関が直接掲載料を負担するように、スポンサー機関になって頂くことです。PTEP では、すでに出発前から、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・理研仁科加速器研究センター・京大基礎物理学研究所が研究機関として掲載料の援助を表明して下さり、大きな支えとなっています。その後も、阪大核物理研究センター・東大宇宙線研究所・東大カブリ数物連携宇宙研究機構 (IPMU) など国内の有力研究機関にお願いして快諾を得、掲載料を個々の研究者の負担としないように機関として援助できる体制が次々とできつつあります。こうした努力を今後も継続し、PTEP の基盤を広げることによって、持続的に発展できることを目指しています。

最後になりましたが、これらすべての活動は財政基盤確保のための努力に過ぎません。PTEP の真の課題は、多くの優れた学術論文を出版できるかどうかという一点にかかっています。編集委員会としては、その一助として、まず多くの研究者の関心の高いトピックスを特集や招待論文として積極的に取り上げることを計画しています。我が国の学術を実際に支える中堅研究者、そして将来を作っていく若手研究者の方々が、自信作を大いに投稿して下さるように、ぜひお願いいたします。我々はそのための基盤となる器作りのために、これからも地道に努力していく予定ですので、学会員諸兄のご協力をお願いいたします。

(2013 年 6 月 5 日原稿受付)

電子ビームを用いたラムダハイパー核の精密分光

中村 哲 〈東北大学大学院理学研究科 980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉
 藤井 優 〈東北大学大学院理学研究科 980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉
 塚田 暁 〈東北大学大学院理学研究科 980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉

ストレンジクォークを含むラムダ粒子を原子核に導入すると、どのような研究が可能になるだろうか？ ラムダ粒子はストレンジネスを持つバリオンであるハイペロンのうち最も軽い粒子である。アップ、ダウクォークから構成される核子とは異なる粒子であるため、パウリ排他律の制限を受けることなく原子核深部に埋め込むことが可能である。このラムダ粒子を構成要素として含む原子核、ラムダハイパー核の精密分光実験を行うことにより原子核深部を調べたり、核力とQCDの架け橋としてのバリオン力の研究が可能になる。ラムダハイパー核の精密分光実験は、これまで中間子ビームを用いて精力的に行われており、現在ではラムダ粒子を二個含んだダブルラムダハイパー核や、より重いハイペロンを含んだハイパー核などの分光研究も本格的に始動しつつある。一方、電子ビームを用いたラムダハイパー核分光は、1980年代後半からその重要性が認識されていたものの、実験的な困難さから、2000年ようやく開拓的なハイパー核分光実験が実現されるに至った。その後実験手法・実験装置に関して目覚ましい発展を遂げてきており、今後さらなる展開が期待されている。本稿では、電子ビームを用いたラムダハイパー核の精密分光について解説するとともに、その研究から得られる物理を紹介し、今後の展望について述べる。

1. なぜハイパー核を研究するのか？

「物質は何から出来ているのだろうか？」というのは常にどの時代においても根源的な疑問である。ラザフォードの原子核の発見によりこの疑問に対して現代物理学は「陽子と中性子から構成される原子核とその周囲に存在する電子から物質は作られる」と答えることができるようになった。原子の大きさのスケールは数オングストローム ($\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$) であるのに対し、その構成要素である原子核の大きさは数フェムトメートル ($\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$) と十万分の一である。

つまり原子とは極めて疎な物質であり、原子の振る舞いを議論する際にスケールの全く違う原子核の内部構造を考慮する必要はない。一方、原子核の構造を考えようとすると原子核を構成する核子（陽子、中性子）の大きさは1フェムトメートル弱である。つまり、原子核は原子とは違い極めて密な物質であるから原子核の振る舞いを議論する際に大きさのスケールが近い核子の内部構造を無視できるかどうかは自明ではない。そもそも核子の内部構造を議論する前に、この世で最も密度の高い物体である原子核の深部がどうなっているのかを調べるのは容易ではない。^{*1} 核子はフェルミ粒子であるから原子核深部に外部から核子を入れて構造の変化を調べようとしてもパウリ排他律により不可能であるし、逆に核子を原子核深部から引き抜き空孔を作って分光学的に研究しようとしても、自然幅が広すぎて精度の良い研究はできない。これは、核力、つまり強い相互作用によって束縛されている原子核深部に孔の空いた状

態の寿命は極めて短いためである。

そこで核子の代わりに違った粒子を原子核深部に埋め込むことを考える。陽子と中性子は電荷こそ+eと0と違い電磁相互作用的には違う粒子であるが、核力に対しては違いはほとんどなく核子という一つの粒子のアイソスピン自由度が違う状態として統一的に取り扱うことができる。現在では陽子、中性子は素粒子ではなく陽子は二個のアップクォークと一個のダウクォーク、中性子は二個のダウクォークと一個のアップクォークで構成されることが分かっている。小林・益川が予言したように世の中には6種類のクォーク（アップ、ダウン、チャーム、ストレンジ、トップ、ボトム）が存在するがこの中で核子より軽いクォークはアップ(u)、ダウン(d)、ストレンジ(s)の3つである。ストレンジクォークはアップ、ダウンに比べればずっと重いアイソスピン対称性を拡張したSU(3)フレーバー対称性で統一的に取り扱うことができる程度には軽い。^{*2}

例えば中性子のダウクォークの1個をストレンジクォークで置き換えるとアップ、ダウン、ストレンジクォークを一つずつ含む粒子ができるが、このうちアイソスピンがゼロになったものをラムダ粒子と呼ぶ。ラムダ粒子はハイペロンと呼ばれるストレンジネスを含むクォーク三個からなる粒子の中で最も軽い粒子である。このラムダ粒子は寿命が比較的長く ($\sim 260 \text{ ps} = 2.6 \times 10^{-10} \text{ 秒}$)、原子核内部に束縛させてそのエネルギー準位を研究する分光学的研究が

^{*1} 星全体が一個の巨大な原子核となっている中性子星だとその中心密度は普通の原子核の何倍にもなっているかもしれないという議論もある。そのような極限状況下ではストレンジネスが発生して天然のハイパー核が生じている可能性が高いが、直接調べることはできないので、地上における加速器を使った研究を積み重ねる必要がある。

^{*2} 強い相互作用の第一原理であるQCDにはカットオフエネルギー（約200 MeV）が存在し、これより低いエネルギー領域では結合定数が発散し、漸近的自由が支配する高エネルギー領域とは振る舞いが大きく異なる。陽子と中性子を核子という粒子のアイソスピンという自由度が違う状態として統一的に取り扱うと同様に、このQCDカットオフエネルギーより軽い質量を持つu, d, sクォークはSU(3)フレーバー対称性のもと統一的に取り扱うことができる。

可能である。これがラムダハイパー核である。

ラムダハイパー核を研究することで、原子核深部において核子やハイペロンといった粒子を独立した一つの粒子として取り扱うことができるのか、それとも内部構造であるクォークの自由度を取り入れた議論が必要なのかに関して情報を得ることができる。また、原子核にハイペロンという不純物を入れることにより通常は圧縮することができない原子核を押し縮めるなどの不純物物理の研究が可能になる。つまり、強い相互作用(核力)によって束縛された核子多体系である原子核の構造をハイペロンという不純物を用いて研究しようというのがハイパー原子核の研究目的の一つである。

ハイパー核研究の別の興味は核力、強い相互作用に関するものである。高エネルギー領域におけるQCDの成功と低エネルギー領域における豊富な核子-核子散乱実験データに基づく精密核力モデルの確立により強い相互作用の理解は急速に進みつつある。特に近年の格子QCDの発展により、強い相互作用の第一原理であるQCDを摂動計算の不可能な低エネルギー領域にまで適用するということが近い将来可能になるであろうと期待されている。しかし、計算結果として相互作用を得るだけでは十分ではなく、物理的本質をモデルという形で抉り出す核力モデルは、核力の“理解”のためには極めて重要であると言える。QCDと精密核力モデルの間に位置するのがバリオン力である。通常核力が陽子(uud)、中性子(udd)の間に働く強い相互作用をアイソスピン対称性をベースとして理解しようという試みであるならば、アイソスピン対称性をアップ、ダウンに加えストレンジネスまで含んだSU(3)フレーバー対称性へと拡張してより広い相互作用としてとらえ直すことにより核力とQCDの橋渡しをしようという試みには意味がある。

スピン1/2のバリオンはアップ、ダウクォークの世界では二種類の核子(陽子、中性子)だけであるが、ストレンジクォークまで含めればバリオン八重項(n, p, $\Sigma^+, 0, \Lambda, \Xi^+, 0$)となり、一般化が可能になると同時に複雑さも増す。核子と同様にバリオン間力も散乱実験を行って調べるのが最も簡便な方法であるが、陽子、中性子以外のバリオンは寿命の短さ、ビーム強度の問題から実験的には極めて困難である。これまでのところバリオン力についての知見は束縛状態、中でもラムダハイパー核の研究により得られたものが中心的であった。J-PARCのような大強度のK中間子ビームが得られる加速器が稼働し始めたので、核子以外のバリオンであるハイペロン散乱実験やストレンジクォークを2個含むハイパー核(ラムダ粒子2個やグザイ粒子の入った原子核)の研究が計画されており、この分野の研究が近い将来、飛躍的に発展すると期待されている。しかし、原子核乾板によるハイパー核の発見以来これまでは毎秒 10^7 程度までの強度の π 中間子ビームやそれよりは一桁弱いK中間子ビームを用いたラムダハイパー核の研究が米国

BNL-AGSや日本のKEK-PSにおいて精力的に行われバリオン力、原子核深部に関する情報を得てきた。電子ビームを用いたハイパー核研究はK, π 中間子を用いたハイパー核分光とは別の研究手法として二十世紀最後、2000年に実験が開始された。次章ではその特徴について説明する。

2. ハイパー核 ($e, e'K^+$) 反応分光

ハイパー核を生成するためには核中にストレンジネスを持ち込む必要がある。最も単純にはストレンジネスを持った粒子を打ち込んでクォーク交換反応を起こせば良い。例えばストレンジネスを持つ最も軽い粒子である K^- 中間子ビームを使い、放出される π^- を観測する(K^-, π^-)反応分光があげられる(図1a)。入射 K^- の運動量 p_{in} と放出される π^- の運動量 p_{out} を測定すればハイパー核の質量 m_{HY} はミッシングマスとして求めることができる。

$$m_{HY} = \sqrt{E_{HY}^2 - p_{HY}^2} \quad (1)$$

$$E_{HY} = \sqrt{m_{in}^2 + p_{in}^2} + m_A - \sqrt{m_{out}^2 + p_{out}^2} \quad (2)$$

$$p_{HY} = p_{in} - p_{out} \quad (3)$$

ここで m_{in} , m_{out} , m_A はそれぞれ入射粒子 K^- 、放出粒子 π^- そして標的原子核の質量であり既知である。

別の方法としては核内でストレンジネスを生成する、ということも可能である。この時、ストレンジクォークは反ストレンジクォークと同時に対生成されるので、核内にストレンジクォークを残してハイパー核を作り、余った反ストレンジクォークは K^+ 粒子の形で外部に放出してやれば良い。図1のb)で示す π^+ ビームを用いて放出される K^+ を測定する(π^+, K^+)反応、そして本稿の主題であるc)の($e, e'K^+$)反応はこの方法でハイパー核を生成している。

(π^+, K^+), ($e, e'K^+$)反応の場合も式(1)の入射、放出粒子を置き換えれば同じ式を用いてミッシングマスとしてハイパー核質量を求めることができる。ただし、($e, e'K^+$)反応の場合は入射粒子を仮想光子と考えて入射電子の運動量 p_{beam} 、散乱電子の運動量 $p_{e'}$ を用いて式(2)の $\sqrt{m_{in}^2 + p_{in}^2}$ を $E_{in} = \sqrt{m_e^2 + p_{beam}^2} - \sqrt{m_e^2 + p_{e'}^2}$ で置き換え、式(3)では $p_{in} = p_{beam} - p_{e'}$ とする必要がある。

従来のK, π 中間子ビームを用いた反応と電子ビームを

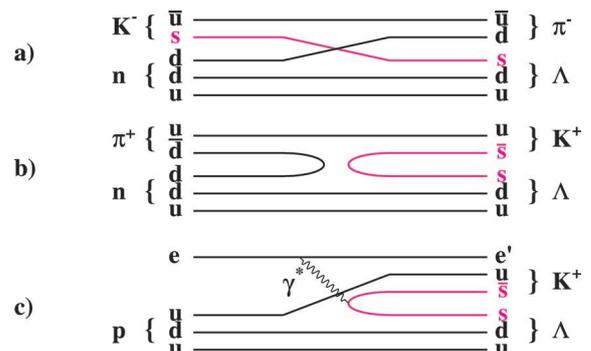


図1 a) (K^-, π^-), b) (π^+, K^+), c) ($e, e'K^+$)反応のファインマン図。a) はクォーク交換反応、b), c) はs, \bar{s} の対生成によって Λ を生成している。

用いた反応の大きな違いは中性子を Λ 粒子に変換するのか、陽子を Λ 粒子に変換するのかという点である。同じ原子核標的を用いても違った種類のハイパー核を生成することができる。このため、中間子ビームを用いてこれまでに充分研究が進んでいるハイパー核と電子ビームを用いて新たに生成したハイパー核を比較することで鏡映ハイパー核やアイソスピン多重項の研究が可能になる。特に、後述する ${}^7\text{Li}$ 標的のように軽い原子核を使う場合、陽子を減らして Λ 粒子を作ることにより ${}^7_\Lambda\text{He}$ (陽子2個+中性子4個+ラムダ粒子1個の束縛状態) といった中性子過剰ハイパー核を作ることができる。陽子を Λ に変換することには実験上のメリットも存在する。ハイパー核反応分光ではハイパー核の質量から Λ の束縛エネルギーの絶対値を求めることが可能である。この点は超高分解能でエネルギー準位間隔を測定する γ 線分光とは相補的である。束縛エネルギーの絶対値を求めるためにはミッシングマスの絶対値較正を行う必要がある。通常、 (K^-, π^-) , (π^+, K^+) 反応ではハイパー核反応分光でベンチマーク的に使われる ${}^{12}\text{C}$ の基底状態をもとにエネルギースケールの較正を行う。 ${}^{12}\text{C}$ の基底エネルギーは40年近く前の原子核乾板による6イベントのデータにより決定されており、¹⁾ 近年の実験技術をもって再測定する必要性は認識されてはいるものの未だされていない。一方、電子線分光では陽子標的を用いて、 $p(e, e'\text{K}^+)\Lambda, \Sigma^0$ 反応により良く知られた Λ, Σ^0 ハイペロンを電磁生成することができ、これらの質量を用いてエネルギースケールを正確に較正することができる。中性子標的が存在しないため、 (K^-, π^-) , (π^+, K^+) 反応でハイペロン質量を用いたエネルギー較正は不可能である。

さらに電子線ハイパー核分光には高分解能という実験的なメリットがある。 K^-, π^+ 中間子ビームは二次粒子として陽子加速器施設で得られ、ビームの品質がエネルギー分解能を制限する。将来的には運動量分散整合による高分解能ビームラインを作ることによって克服しようとしているが、これまでのところはビームの分解能が最終的なハイパー核のエネルギー分解能を約1.5 MeVと制限してきた。一方、電子ビームは運動量分解能 $\Delta p/p < 10^{-4}$ という高品質な一次ビームとして得ることができ、実験時にイベント毎に測定する必要がない。標的が薄いほど標的内のエネルギー損失のゆらぎを抑えることができるがハイパー核の収量が減るため、ビームに起因するエネルギー分解能と標的内のエネルギー損失のゆらぎに起因する分解能が同程度になるように実験をデザインするのが普通である。このため、中間子ビームを用いた (π^+, K^+) , (K^-, π^-) 反応では数mmから数cm厚(物質質量で数 g/cm^2)の標的を用いるが、電子ビームは分解能が一桁良いので、一桁薄い標的を用いて1 MeVを切る高分解能が期待できる。また、薄い標的の使用は、貴重な同位体濃縮した標的を用いることが比較的容易になるという利点ももたらす。薄い標的を用いることによりハイパー核の収量は減ってしまうが、それは電子ビー

ムの強度を上げることによって取り戻すことが可能である。

発熱反応である (K^-, π^-) 反応ではマジックモーメントと呼ばれる運動量約0.5 GeV/cのK中間子ビームを使うことにより無反跳で Λ を核内に作ることができる。運動量移行がゼロであるから生成される Λ はももとの中性子の持っていた軌道角運動量を保つことになる。一方、吸熱反応である (π^+, K^+) , $(e, e'\text{K}^+)$ 反応では生成される Λ の反跳運動量をゼロにすることはできず300–400 MeV/c程度は存在する。このため核内の核子をそっと Λ に置き換えることはできず Λ 粒子が原子核に捕獲されハイパー核を形作る確率は下がってしまうが、その一方ももとの核子の角運動量とは違う軌道角運動量に Λ を入れることができる。さらにスピン0のK, π 中間子とは違い、電子ビームつまり仮想光子を用いて Λ を生成する $(e, e'\text{K}^+)$ 反応では収量が最大となる前方にスペクトロメータを設置して測定したとしてもスピン反転確率が存在し、様々なスピン状態のハイパー核を励起することができる。ただし、多くの状態を同時に作り出してしまうため、状態を分離するためには高分解能であることが必須になる。

以上のような特徴を持った電子ビームを用いたハイパー核分光の重要性は1980年代後半から理解されていたが2000年まで精密分光実験は行われなかった。これはストレンジネスを作り出すことのできるGeV領域の電子線加速器施設が必要であること、強い相互作用でストレンジネス生成を行う (K^-, π^-) , (π^+, K^+) 反応に比べ電磁生成の反応断面積が2–3桁小さいこと、大量の電子バックグラウンドが存在する前方において散乱電子とK中間子の同時計測が必要なことなどの技術的な問題が山積みであったためである。

最初の原理実証実験は2000年当時、ラムダハイパー核を生成可能な1.5 GeV以上の高品質な電子ビームを供給できる唯一の施設であった米国ジェファーソン国立研究所(JLab)の連続電子線加速器施設(CEBAF)において行われた(E89-009実験)。

3. JLabにおけるハイパー核電磁生成実験

3.1 JLab CEBAF

JLab CEBAFは軍港として有名な米国バージニア州ノーフォークの近くに位置し、約600 m長の超伝導線形加速器を二本繋いだサーキュレーションライナックと呼ばれるユニークな加速器である。余談であるが軍関係の大型装置を製作できる機械加工業者が近くにあり、ノーフォーク港において日本から輸送した大型電磁石を荷揚げ、免税通関できることが後に我々の実験にとって大きな手助けとなった。

CEBAFは最大5周に渡って加速することにより最高エネルギー6 GeVを達成しA, B, Cの3つの実験ホールに100 μA の連続電子ビーム(マイクロバンチ2 ns)を供給することができる加速器施設である。現在はHall-Dを新設し12 GeVへとアップグレードのため改修中である。

この加速器はラムダハイパー核を生成可能な 1.5 GeV を超える高エネルギー電子ビームを高輝度で供給するだけでなく、ビームエネルギーは 10^{-4} 以上の精度で安定であり、ビームエミッタンスは $20 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ ととても小さく、ビーム径を $100 \mu\text{m}$ まで絞ってもビームの広がり角を 0.01 度に保つことができる。つまり、これはエネルギーが 200 keV の精度で分かっている電子が我々の標的上において実質的に点として取り扱えるビームとして得られることを意味している。

3.2 E89-009, 原理実証実験

JLab E89-009 実験では JLab に既存の Short Orbit Spectrometer (SOS) を K 中間子検出器として、また低エネルギー領域の原子核実験では定評のある ENGE 型 split-pole スペクトロメータを散乱電子検出器として採用し、開発項目を最小限に ($e, e'K^+$) 反応を用いたハイパー核分光実験の原理実証を目指した。²⁻⁴⁾ ストレンジネス電磁生成反応において散乱電子、生成 K^+ 中間子はどちらも前方に集中しているため K 中間子検出器と散乱電子検出器の両者をできるだけ前方に設置できるように標的直後に双極磁石 (スプリッター) を電荷分離のため設置した。JLab CEBAF からの 1.8 GeV, $0.6 \mu\text{A}$ の電子ビームは厚さ $120 \mu\text{m}$ (物質質量 22 mg/cm^2) の炭素標的に照射され散乱された運動量 $0.3 \text{ GeV}/c$ の電子が ENGE スペクトロメータ、 $1.2 \text{ GeV}/c$ の K^+ 中間子が SOS で測定された。 $0.6 \mu\text{A}$ のビーム電流値は CEBAF においては非常に弱い電子強度であるが毎秒 3.75×10^{12} 個の電子に相当する。一方、従来 (K^-, π^-), (π^+, K^+) 反応で用いられる中間子ビームの強度はせいぜい 10 MHz、つまり毎秒 10^7 個であるから、中間子ビームに比べて圧倒的に大強度である。計数率が 10 MHz を超える荷電粒子の運動量測定が如何に困難であるかを考えれば CEBAF から供給される高品質電子ビームの運動量を個別に測る必要がないということが実験にとって本質的であることが分かる。

仮想光子フラックス、そしてハイパー核収量を最大にするため散乱角ゼロ度の電子も測定するように ENGE スペクトロメータを配置した。1ヶ月以上にわたるデータ収集の結果、約 140 カウントの ^8B ハイパー核基底状態をハイパー核反応分光実験としては初めて 1 MeV を切るエネルギー分解能 0.9 MeV (FWHM) で観測することに成功した。CEBAF の高品質電子ビームを用いればラムダハイパー核の精密電磁分光実験は可能である、ということが証明されたが、同時に ($e, e'K^+$) ハイパー核分光を確立するためには実験セットアップ自体の改良が不可欠であることも明らかになった。

まず、実験前から予想されていたことではあるが制動放射とメラエ散乱による電子バックグラウンドは凄まじく、散乱電子検出器の荷電粒子計数率は 200 MHz を超えており偶発同時計数によるバックグラウンドのため、信号雑音比の悪化が大きな問題となった。さらに K 中間子スペクトロメータとして用いた SOS は分解能 ($\Delta p/p \sim 10^{-3}$)、立

体角 (スプリッターと組み合わせて 5 msr) を同時に制限しており、ハイパー核分光に特化した K 中間子検出器が必要であった。このため、我々はハイパー核電磁生成に特化した新しい高分解能 K 中間子スペクトロメータ (HKS) を開発し、散乱電子スペクトロメータの配置を最適化することにした。

3.3 第二, 第三世代実験 E01-011, E05-115

E89-009 実験により原理的には実験可能ということが分かった ($e, e'K^+$) 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験であるが、エネルギー分解能は既存の K 中間子検出器で制限され、散乱電子検出器側の高い計数率により使用可能なビーム強度、標的厚が制限、それに信号雑音比が悪化していた。

そこで本プログラムに特化した高分解能 ($\Delta p/p \sim 2 \times 10^{-4}$)、大立体角 (単体で 30 msr, スプリッターと組み合わせて 16 msr) の K 中間子スペクトロメータ High-resolution Kaon Spectrometer (HKS) を新たにデザイン・製作することにした。HKS は常伝導の四重極電磁石 2 台と双極電磁石 (最大磁場 1.6 T, 軌道半径 2.7 m, 偏向角 70 度, 中心運動量 $1.2 \text{ GeV}/c$) で構成され、検出器には粒子の飛行時間を測定するためのプラスチックシンチレータ、飛跡測定のためのドリフトチェンバー、 K^+ を p, π^+ からトリガーレベルで区別するための水、エアロゲルチェレンコフ検出器を装備している。

さらに E89-009 実験で問題となった散乱電子の高計数率に対処するために、超前方の高バックグラウンドを抑制するティルト法を導入した。我々が実験を行う 2 GeV 以下の入射エネルギーではバックグラウンドとなる散乱電子は制動放射とメラエ散乱に起因するものが主である (図 2)。

メラエ散乱は電子-電子の弾性散乱であるから測定する運動量を決めれば散乱角はそれに応じて決まる。制動放射は超前方分布であるからゼロ度付近を避けることにより抑

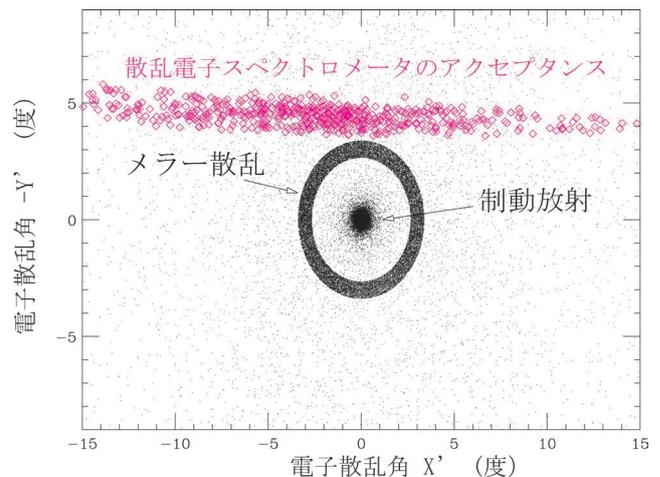


図 2 シミュレーションにより見積もった標的における電子の散乱角分布。紙面表から裏が電子ビーム方向、X 軸は電荷分離磁石の偏向面内、-Y 軸はそれらに垂直な反重力方向である。制動放射に起因する電子が超前方に、その回りに散乱電子スペクトロメータの運動量アクセプタンス内にメラエ散乱される電子がリング状に存在する。散乱電子スペクトロメータを垂直方向に 7.75 度傾け、5.6 cm 垂直移動することによりアクセプタンスをずらし背景雑音を大幅に抑制できる (ティルト法)。⁸⁾

制することができる。ハイパー核生成に寄与する電子も前方分布ではあるが制動放射電子ほどではない。これらの電子の角度分布の微妙な違いを利用し、メラー散乱の電子が入ってこない範囲で程良く前方を避けるように散乱電子検出器をスプリッターの偏向面から垂直に傾けることによりバックグラウンドを大幅に抑制することができる。このテイルト法はスペクトロメータの対称性をわざと壊すという常識外れの電磁石配置をとるため解析を困難にするが、散乱電子検出器における背景雑音を1/10,000に抑制できると期待された。

これらの工夫を施した第二世代実験E01-011では新設されたHKSとテイルト法を導入したENGEをそれぞれK中間子検出器、散乱電子検出器として使用し、2005年JLab Hall-Cにおいて CH_2 , ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{28}\text{Si}$ 標的を用いて Λ , Σ^0 , ${}^7\text{He}$, ${}^{12}\text{B}$, ${}^{28}\text{Al}$ の研究を行った。HKSが設計通りの性能を発揮し、テイルト法により散乱電子検出器のバックグラウンドがおよそ10,000分の1に抑制されたため、E89-009に比べビーム強度を50倍、標的厚を5倍にして250倍のルミノシティを用いた実験でも散乱電子検出器での計数率は数MHzに収まった。

我々の第二世代実験E01-011がJLab Hall-Cにおいてデータ収集を行っているとき、Hall-Aではイタリアを中心とする別の国際共同研究グループも($e, e'K^+$)反応を用いて ${}^9\text{Li}$, ${}^{12}\text{B}$, ${}^{16}\text{N}$ ラムダハイパー核の研究を進めた。⁹⁾彼らはHall-A常設のHigh-Resolution Spectrometer (HRS)と呼ばれるスペクトロメータを2台用いることにより K^+ と e' の同時計測を行った。HRSの軌道長は23.4 mとHKSの10 mと比べて倍以上長い。そこで K^+ の崩壊($c\tau \sim 3.7$ m)による収量の損失を抑制するために中心運動量を約2 GeV/cと高く取る必要があった。高い運動量の粒子を取り扱うため電荷分離磁石として超伝導セプトムを、 K^+ 中間子弁別機構としてリングイメージチェレンコフ検出器(RICH)¹⁰⁾を導入した。粒子識別の容易さ、立体角の大きさとエネルギー分解能ではHall-Cのセットアップが有利であるが、高エネルギーの電子ビームを使うHall-Aのセットアップでは、電子雑音をより前方に集中させることが可能であり信号雑音比の良いデータを取ることができた。¹¹⁾

その後、我々HKSコラボレーションはHall-Cにおいて本プログラムに特化したHigh-resolution Electron Spectrometer (HES, 中心運動量1 GeV/c, $\Delta p/p = 2 \times 10^{-4}$)でENGEを置き換え、スプリッター磁石も大型のもので置き換えた第三世代実験E05-115を2009年に遂行し CH_2 , ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{52}\text{Cr}$ 標的を用いた実験を行った(Λ , Σ^0 , ${}^7\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{12}\text{B}$, ${}^{52}\text{V}$)。この時もE01-011で有効だったテイルト法をHESに対して採用した。

E01-011, E05-115実験では2 GeV弱、30-50 μA の電子ビーム、つまり100 kWという大強度の電子ビームを正確に標的に導き、標的で反応しなかった電子を安全にビームダンプに導く必要がある。このためE01-011実験では標的、

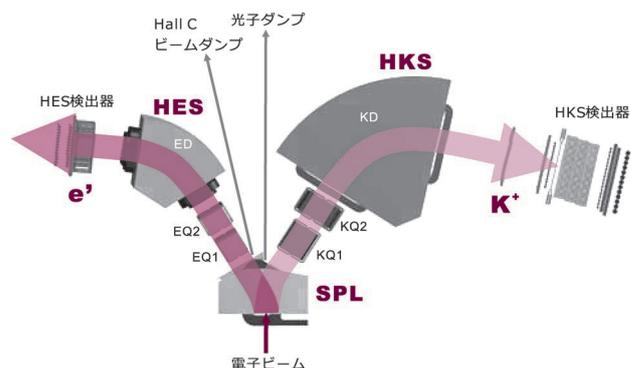


図3 E05-115実験セットアップ。スプリッター電磁石(SPL)で散乱粒子はその電荷に応じて偏向させられ、正電荷の粒子(K^+)は高分解能K中間子検出器(HKS)、負電荷粒子(e^-)は高分解能電子検出器(HES)で検出される。それぞれのスペクトロメータは四重極磁石2台と双極磁石1台からなる。

スプリッター磁石の後にポストビームラインを設置し、スプリッターで偏向される電子と標的で生成され直進する制動放射光子と合流させてHall-C実験室のメインビームダンプへと導いた。しかし、標的で反応し広がった電子がポストビームラインの電磁石やビームパイプと反応して大きなバックグラウンド源となった。このため、図3に示す第三世代実験であるE05-115実験ではスプリッター磁石の前に新たなシケインビームラインを設置し、電子ビームがスプリッターで偏向される分を予め考慮に入れて傾けたビームを標的に照射した。直進する制動放射専用のローカルビームダンプを実験室内に新たに設置する必要が生じたが、この捨てる光子を再利用することにより光子ダンプ直前に置かれたフィッションチェンバーを用いたハイパー核の寿命測定実験を同時に遂行することができた。

軽いハイパー核の寿命が真空中の Λ の寿命である260 psから200 ps程度であり、重くなるにつれ200 psあたりで一定になることが知られているが、¹²⁾ $A \sim 200$ の重いハイパー核ではこの実験結果から予想される傾向や理論予想よりずっと短い150 ps以下だという実験結果^{13, 14)}があり長年にわたって謎であった。我々JLab HKSコラボレーションによる新しい実験は鉄~ビスマス($A = 209$)標的を使って生成したハイパー核の寿命はどれも200 psで飽和しており従来傾向、理論予想と矛盾しないことを示した。¹⁵⁾

4. ($e, e'K^+$) 反応分光で得られた結果

4.1 ${}^{12}\text{B}$ ハイパー核

図4はKEK-PSで測定された ${}^{12}\text{C}(\pi^+, K^+){}^{12}\text{C}$ 反応を用いた ${}^{12}\text{C}$ ⁵⁾とJLab Hall-Cで ${}^{12}\text{C}(e, e'K^+){}^{12}\text{B}$ 反応を用いて測定した ${}^{12}\text{B}$ ハイパー核の Λ 束縛エネルギーである。 ${}^{12}\text{C}$, ${}^{12}\text{B}$ という鏡映ハイパー核の Λ がs, p軌道に入った2本の大きなピークとその間にある芯核励起状態がそれぞれのスペクトラムで観測されている。 ${}^{12}\text{C}$ 標的は取り扱いが容易であるためハイパー核分光実験ではベンチマーク的に使われ分解能の評価や、特に(π^+, K^+)では束縛エネルギーの絶対値較正に使われている。 π 中間子ビームを用いた実験ではエ

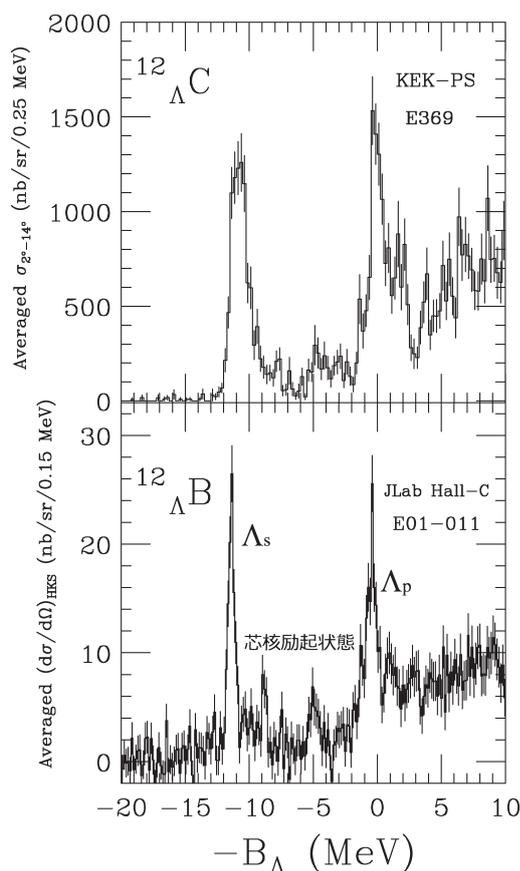


図4 KEK E369実験³⁾において $^{12}\text{C}(\pi^+, K^+)\text{C}$ 反応を用いて測定した ^{12}C とJLab E01-011実験において $^{12}\text{C}(e, e'K^+)\text{B}$ 反応を用いて測定した ^{12}B の Λ 束縛エネルギー。

エネルギー分解能が1.45 MeV (FWHM) であるのに対して、電子ビームを用いたHKS実験では0.6 MeV (FWHM) の高いエネルギー分解能が達成されており、芯核励起状態がはっきりと分離されて測定されている。また、 Λ の束縛エネルギーも原子核乾板等の他の実験結果に頼ること無く自前のデータで絶対値較正が行われた。 ^{12}B 基底状態の束縛エネルギーに関してはHKS実験の測定結果とまったく独立な測定手法による原子核乾板の結果⁷⁾は測定誤差の範囲で一致している。

4.2 ^7He ハイパー核と ΛN 相互作用の荷電対称性

近年、 ΛN 相互作用の荷電対称性の破れ (Charge Symmetry Breaking; CSB) が話題になっている。もともとは質量数4のアイソスピン二重項ハイパー核 $^4\text{H}(\text{pnn}\Lambda)$ と $^4\text{He}(\text{ppn}\Lambda)$ の Λ 束縛エネルギーが基底状態で350 keV、第一励起状態で240 keV差があることに議論は発している。クーロン相互作用に起因する束縛エネルギーの違いは50 keV以下と見積もられているのでこの差は有意に大きい。核力の世界において陽子と中性子は同等であると考えられるが、 Λ と陽子、中性子の間の相互作用には差がある、ということの意味しておりこれを ΛN 相互作用の荷電対称性の破れ (CSB) と呼んでいる。通常核において ^3H と ^3He の束縛エネルギーの差はクーロン力の補正後、約70 keVとなることと比べれば ΛN 相互作用のCSBが遥かに大きい

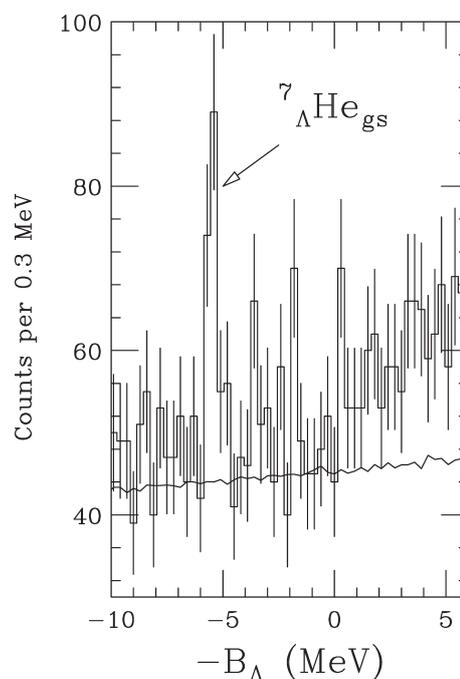


図5 ^7He の Λ 束縛エネルギー。 $B_\Lambda=0$ が束縛閾値で $-B_\Lambda<0$ の束縛領域である $-B_\Lambda=-5.68$ MeVに ^7He の基底状態がはっきりと見える。 $-B_\Lambda>0$ 領域には Λ の準自由生成反応による構造が見える。⁶⁾ 図中の実線は無相関の K^+ と散乱電子を使って見積もった偶発同時計数背景雑音である。

ことが分かる。

この原因として ΛN - ΣN 結合による ΛNN 三体力の影響など様々な理由が考えられるが、現在のところ完全な理解は得られておらず現象論的に ΛN ポテンシャルにCSB項を導入することにより質量数4のハイパー核アイソ二重項の束縛エネルギーを再現している。近年、クラスター計算の発展により $\alpha\text{NN}\Lambda$ という四体系として質量数7のハイパー核アイソ三重項の計算が可能になった。¹⁶⁾ この系は ΛN 相互作用のCSBを観測する上で極めて重要なものであるが、これまで知られていた Λ 束縛エネルギーは原子核乾板で測定された $^7\text{Li}^*(T=1)$ 、 ^7Be に関するものだけであった。質量数7ハイパー核アイソ三重項の最後である ^7He は原子核乾板を用いてその存在は確認されていたがデータの質、量が共に不十分であったため、これまで束縛エネルギーは得られていなかった。

^7He は芯核が ^6He という中性子ハロー核であり、それに Λ が束縛した極めてユニークなシステムである。 ^7He 標的は存在しないため (π^+, K^+) 、 (K^-, π^-) 反応でこのハイパー核を生成することはできないが $^7\text{Li}(e, e'K^+)\text{He}$ 反応を用いれば精密分光が可能である。さらに、 $(e, e'K^+)$ 反応では陽子標的を使ってエネルギースケールの絶対値較正が可能なることも実験的に極めて重要である。

我々HKSコラボレーションはこの反応を用いて図5のように ^7He 基底状態をはっきりと観測し、 Λ 束縛エネルギーを初めて

$$B_\Lambda = 5.68 \pm 0.03 (\text{stat}) \pm 0.25 (\text{sys}) \text{ MeV}$$

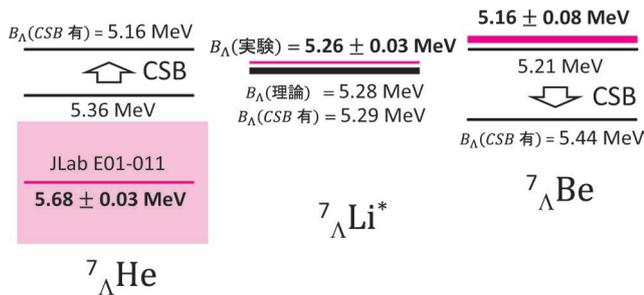


図6 質量数7, アイソスピン1のハイパー核三重項の Λ の束縛エネルギーの測定値(${}^7_\Lambda\text{He}$, ${}^7_\Lambda\text{Li}^*$, ${}^7_\Lambda\text{Be}$)とクラスター計算によるCSBを考慮した計算値と考慮しない計算値.¹⁶⁾ 原子核乾板により測定された ${}^7_\Lambda\text{Li}$ の基底状態はアイソスピン0であるのでハイパー核 γ 線分光により測定されたアイソスピン1の状態の励起エネルギーを使って ${}^7_\Lambda\text{Li}^*$ の実験値を求めた.¹⁷⁾

と測定することに成功した。⁶⁾ これにより ${}^7_\Lambda\text{He}$, ${}^7_\Lambda\text{Li}^*$, ${}^7_\Lambda\text{Be}$ のデータが揃い実験結果と理論予想を系統的に比較することが可能になった。

図6は今回, 初めて実験データが揃った質量数7, アイソスピン1のハイパー核三重項の Λ 束縛エネルギーと精密クラスター計算によるCSBを含まない計算結果とCSBを取り入れた計算結果である。¹⁶⁾ 質量数 $A=4$, アイソスピン二重項である ${}^4_\Lambda\text{H}$, ${}^4_\Lambda\text{He}$ の Λ 束縛エネルギーの差を説明するために現象論的に導入されたCSBを考慮すると, $A=7$, $T=1$ ハイパー核の実験結果を説明するのとは逆の効果を生じており非常に興味深い。

この結果は, これまで考えられてきた ΛN ポテンシャルにおける現象論的なCSB効果が単純に過ぎるか, CSBの議論の発端になった過去の ${}^4_\Lambda\text{H}$, ${}^4_\Lambda\text{He}$ の実験値を独立な実験で改めて測定し直す必要があることを示唆している。

質量数4のハイパー核に関する実験的な努力としてはヘリウム標的を用いた ${}^4\text{He}(e, e'K^+){}^4_\Lambda\text{H}$ 反応分光実験や次節で説明するラムダハイパー核崩壊 π^- 分光による ${}^4_\Lambda\text{H}$ の精密測定, さらにJ-PARCで大強度の K^- ビームを用いたハイパー核 γ 線分光による ${}^4_\Lambda\text{He}$ 1^+ 状態の励起エネルギーの精密測定等が現在計画, もしくは進行中である。これらの新たな測定と理論的努力¹⁸⁾により, 現在は未だ十分に理解されているとはいえない ΛN 相互作用のCSB効果について近い将来, 深い理解が得られると期待されている。

5. 電磁生成したラムダハイパー核の崩壊 π^- 分光

ここまでラムダハイパー核の分光研究手法として適当な反応でハイパー核を生成し, ミッシングマスとしてその質量を測定するという反応分光を議論してきたが, 生成したラムダハイパー核の崩壊生成物を測定することでエネルギー準位を研究することが可能である。

最も成功した例はKEK-PS, BNL-AGSで精力的に行われ, 現在J-PARCにおいてさらなる展開が期待されているラムダハイパー核の精密 γ 線分光である。この手法では(K^-, π^-)反応もしくは(π^+, K^+)反応により生じたラムダハイパー核が脱励起する際に生じる γ 線を測定することに

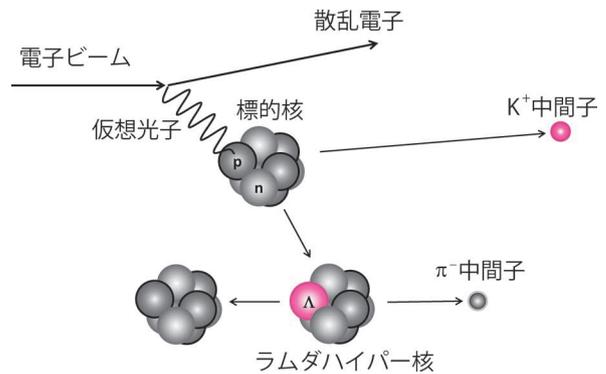


図7 電磁生成されたラムダハイパー核の崩壊 π^- 分光概念図。

よりラムダハイパー核の励起エネルギーを数keVという超高分解能で測定することが可能である。¹⁹⁾

近年, ラムダハイパー核の崩壊生成粒子を測定するという手法の1つとして新しく考えられたのがラムダハイパー核の弱崩壊から生じる π^- を精密測定する, という実験である。²⁰⁾ 図7のように生成された後, 脱励起し基底状態になったラムダハイパー核の中には弱い相互作用により π^- を放出して二体崩壊 ${}^A_\Lambda Z \rightarrow {}^A(Z+1) + \pi^-$ をするものがある。標的中で運動エネルギーを失い静止したハイパー核から π^- が二体崩壊で放出された場合, この運動量 P_π (90~140 MeV/c)を正確に測定し

$$M({}^A_\Lambda Z) = \sqrt{M({}^A(Z+1))^2 + P_\pi^2} + \sqrt{m_\pi^2 + P_\pi^2}$$

という関係を使えば, 娘核である通常核と π^- の質量は十分な精度で知られているので ${}^A_\Lambda Z$ の質量を求めることができる。 π^- だけの測定だとハイパー核が関与しない様々な反応からの背景雑音が問題になるので K^+ を同時測定してストレンジネスが生成されたイベントを選び出す。この測定法で, 最終的なエネルギー分解能に寄与するのは π^- の運動量だけであるので, K^+ 中間子は「 K^+ 中間子である」という粒子識別さえ正しくできれば運動量分解能は必要ない。原理的にはハイパー核を生成する反応はどんな方法であっても構わず, 直接生成されなくても, 適切な反応により励起状態として作られたハイパー核がフラグメンテーションを起こし, その後, 静止して二体崩壊しても良い。

しかし, 実験をデザインする上で, 標的の厚さは重要である。標的が厚すぎると π^- 中間子の運動量損失のゆらぎが大きくなり分解能が悪くなる。一方, 標的が薄すぎると生成したハイパー核が標的内で静止しない。 $(e, e'K^+)$ で達成された600 keV程度のエネルギー分解能よりも良い100 keV以下の分解能を目指し, 基底状態のエネルギーを数10 keVの精度で決定しようとする数10 mg/cm²程度の物質量の標的が適当である。このように薄い標的で十分な数のハイパー核を作って K^+ と π^- の同時計数を行うためには強力な電子ビームを用いることができる $(e, e'K^+)$ 反応を用いるのが良い。この手法では K^+ と同時に測定される単色の π^- を全てハイパー核からの崩壊と考えるので, い

きなり重い標的を使うとあまりに多くのハイパー核が観測されて区別がつかなくなる可能性がある。そこでまず軽い標的から実験を開始し、その後重い標的へと研究を進めるのが良い。ハイパー核の弱二体崩壊からの π^- は既にKEK-PS,²¹⁾ DAΦNE²²⁾で測定されているがこれまで精密分光の手段として使われたことはなく実験として成立することを実証する必要がある。

JLab CEBAFは現在12 GeVアップグレードのため2015年まで長期シャットダウン中であるが、マインツ大学のMAMI-C加速器はアップグレードにより1.5 GeVまでの電子ビームを供給することができるようになり、電子を用いたハイパー核研究が可能になった。マインツ大学において($e, e'K^+$)反応分光を用いたラムダハイパー核分光を本格的に展開するためにはK中間子スペクトロメータの分解能の向上、高計数率に耐える粒子検出器の整備等、開発要素が大きい。100 MeV/cの π^- を数10 keV/cの高分解能で測定できるSpek-A, Cの2台のスペクトロメータが存在しており、K中間子スペクトロメータKAOSもK中間子をタグする目的には十分な性能を既に達成している。

このため、120 μm 厚(22.4 mg/cm²)の⁹Be標的を用いた原理実証実験をマインツ大学MAMI-Cにおいて2011年より開始した。K中間子をタグするKAOSは前方、 π^- を精密測定するSpek-A, Cは背景雑音が少ない後方に設置した。

2011年に行った最初の実験では統計量が足りず決定的な結論を導くことはできなかったが、 K^+ と同期した何本かの単色 π^- を測定することができた。その後、K中間子スペクトロメータに入る膨大な e^+ バックグラウンドをスペクトロメータ磁石直後にある鉛ブロックで抑制するというセットアップを採用して2012年秋にデータを収集した。これはK中間子の分解能が最終的なハイパー核の分解能と関係ない、ということを使った本手法でのみ可能な常識外れの背景雑音抑制法である。現在、データ解析を進めている。

6. まとめと今後の展望

($e, e'K^+$)ラムダハイパー核分光は2000年にジェファソン研究所Hall-CにおいてE89-009実験によりその可能性が示され創始された。その後、東北大学を中心とする国際共同研究グループにより開発されたHKS, HESといった大型磁気スペクトロメータを用いてHall-Cにおいて遂行した第二、第三世代実験およびHall-Aにおける実験により、ラムダハイパー核精密反応分光の一手段として確立した。本稿では比較的軽いハイパー核である¹² $\Lambda^0\text{B}$, ⁷ $\Lambda^0\text{He}$ に関して紹介したが、その他のハイパー核についても解析が進んでいる。今後²⁸ $\Lambda^0\text{Al}$ や⁵² $\Lambda^0\text{V}$ といったp殻領域を超えたより重いハイパー核に関する結果が待ち望まれている。

現在、ジェファソン研究所の電子ビーム加速器CEBAFは12 GeVアップグレードのためシャットダウン中であるが、12 GeVアップグレード後に広い質量数領域に渡る包括的なハイパー核分光実験を推進するためHKS-HES コラ

ボレーションとHall-Aハイパー核コラボレーションが共同で次世代実験を検討中である。

また、アップグレードによりハイパー核研究が可能になったマインツ大学のMAMI-C加速器においては比較的フレキシブルなビームタイムを駆使して、電磁生成したハイパーフラグメントの崩壊 π^- 分光実験というまったく新しい研究手段の確立を目指し研究を進めている。

本格的利用の始まったJ-PARCにおいて高輝度の K^-, π^+ 中間子ビームを用いたハイパー核研究が展開しつつある今、確立した高性能な検出器が存在するジェファソン研究所とフレキシブルなビームタイムを利用したマインツ大学の二ヶ所の電子線施設において電子ビームを用いたラムダハイパー核の研究を強力に推進することによりハイパー核研究が飛躍的に発展すると期待できる。

本プログラムはL. Tang, J. Reinhold, S. A. Wood, A. Margarian, 三好敏喜, 岡安雄一, 松村彰彦, 川間大介, 後神利志, 里嘉典, 住浜水季, 丸田朋史氏をはじめとするHKS-HES CollaborationによるJLabにおける研究と、J. Pochodzalla, P. Achenbach, 永尾翔氏をはじめとするA1 Hypernuclear CollaborationによるMAMI-Cにおける研究により進められてきたものです。これまでの実験と一緒に推進してきた国際共同研究グループのメンバー、JLab, MAMIのスタッフ、現在将来計画と一緒に検討しているJLab Hall-A Hypernuclear CollaborationのF. Garibaldi, J. J. LeRose, P. Markowitz氏、また理論的に研究を支えて頂いた元場俊雄, 肥山詠美子, P. Bydovsky, 故M. Sotona氏に感謝いたします。HKS, HESスペクトロメータの光学設計時には加藤静吾氏に、標的作成ではD. Meekins, 菅井勲氏に多大なご助力を頂きました。

最後になりましたが、これまで長年にわたり上記の国際共同研究グループの運営、研究推進に大きな貢献をされた東北大学の故橋本治教授に深く感謝し、ご冥福をお祈りします。

参考文献

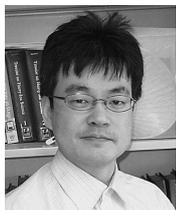
- 1) P. Dłuzewski, *et al.*: Nucl. Phys. A **484** (1988) 520.
- 2) 藤井 優, 三好敏喜, 橋本 治: 日本物理学会誌 **59** (2004) 772.
- 3) T. Miyoshi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 232502.
- 4) L. Yuan, *et al.*: Phys. Rev. C **73** (2006) 044607.
- 5) H. Hotchi, *et al.*: Phys. Rev. C **64** (2001) 044302.
- 6) S. N. Nakamura, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 012502.
- 7) M. Juric, *et al.*: Nucl. Phys. B **52** (1973) 1.
- 8) S. N. Nakamura, *et al.*: Nucl. Phys. A **754** (2005) 421c.
- 9) M. Iodice, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 052501; F. Cusanno, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 202501.
- 10) M. Iodice, *et al.*: Nucl. Instr. Meth. A **553** (2005) 231.
- 11) F. Garibaldi, *et al.*: Jour. Phys. Conf. Ser. **299** (2011) 012013.
- 12) H. Ota, *et al.*: Nucl. Phys. A **639** (1998) 251c.
- 13) H. Ohm, *et al.*: Phys. Rev. C **55** (1997) 3062.
- 14) W. Cassing, *et al.*: Eur. Phys. J. A **16** (2003) 549.
- 15) X. Qiu, *et al.*: to be published; arXiv 1212.1133.
- 16) E. Hiyama, *et al.*: Phys. Rev. C **80** (2009) 054321.
- 17) H. Tamura, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 5963.
- 18) E. Hiyama and Y. Yamamoto: Prog. Theor. Phys. **128** (2012) 105.
- 19) O. Hashimoto and H. Tamura: Prog. Part. Nucl. Phys. **57** (2006) 564.

- 20) A. Margaryan, L. Tang, L. Yuan, S. N. Nakamura and J. Reinhold, *et al.*: Exp. Proposal E08-012, Jefferson Lab (2007).
 21) H. Tamura, *et al.*: Phys. Rev. C **40** (1989) R479.
 22) M. Agnello, *et al.* (FINUDA Collaboration): Phys. Lett. B **681** (2009) 139.

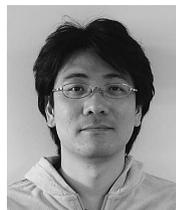
著者紹介



中村 哲氏： 専門は実験核物理。原子・分子から素粒子実験まで幅広く興味はあるが今はハイパー核電磁分光の確立に全力投入。



藤井 優氏： 専門は実験核物理。現在は、ハイパー核からのオージェ中性子分光の実現に挑戦中である。子育て真っ最中。



塚田 暁氏： 専門は実験核物理。現在は主にドイツマインツ大学におけるストレンジネス物理の研究を行っている。

(2013年2月6日原稿受付)

Precision Spectroscopy of Lambda Hypernuclei Using Electron Beams

Satoshi N. Nakamura, Yuu Fujii and Kyo Tsukada

abstract: Adding a strange quark to a nucleus, deep inside of the nucleus and the baryon force which bridges nuclear force and QCD could be studied. Spectroscopic study of Lambda hypernuclei, which have the lightest strange baryon Λ , has been extensively performed with meson beams such as K^- s and π^+ s. A new experimental technique, the study of hypernuclei with electron beams, has been recognized important from the '80s, however experimental difficulties prevented the experiment until year 2000. With a decade of efforts at JLab, Λ hypernuclear spectroscopy with electron beams has been established and further progresses are expected at JLab and Mainz. This article reviews spectroscopic study of Λ hypernuclei with electron beams and future prospects.



鉄系高温超伝導体の超伝導対称性と電子状態相図

芝内 孝禎

〈京都大学大学院理学研究科 606-8502 京都市左京区北白川追分町 〉

松田 祐司

〈京都大学大学院理学研究科 606-8502 京都市左京区北白川追分町 〉

最近発見された鉄原子とヒ素原子で構成される2次元ネットワークを含む新しい超伝導物質は、銅酸化物が唯一の高温超伝導体ではないことを明らかにした。これらの物質に共通した高い超伝導転移温度は結晶格子の振動を媒介とした従来型の超伝導発現機構では説明できない。一方で、転移温度は低い非従来型発現機構を持つ超伝導体の代表例としては、 f 電子を含む重い電子系と呼ばれる物質があるが、新しい鉄系超伝導体の電子状態相図はこの重い電子系の相図とも共通している点も多い。このように鉄系高温超伝導体は、新しい非従来型超伝導研究の舞台となる物質群を提供したと言える。これらの非従来型超伝導体は、電子相関、量子相転移、非フェルミ液体、新奇秩序状態といった凝縮系物理学における主要テーマを含んでいる。鉄系高温超伝導体が発見され約5年が経過したが、最近では高品質な単結晶を用いた精密測定が可能となり、この系の磁気状態、電子状態、超伝導状態の詳細が明らかになってきた。

1. はじめに

超伝導転移は物理学における最も劇的な現象の一つである。超伝導は未だに多くの未解決問題を含んだ量子力学的多体問題であり、その解明は現代物理学の中心的課題の一つとなっている。超伝導は結晶中を動き回る2つの伝導電子に引力が働くことにより電子対が形成され、それらが対凝縮を起こすことにより生ずる。これはフェルミ粒子であった電子が対を組むことにより擬似的にボーズ粒子とみなすことができるようになり、厳密な言い方ではないがボース・アインシュタイン凝縮を起こすとみなすことができる。通常の超伝導体では電子対形成は結晶格子の振動(フォノン)を媒介として起こる。

超伝導研究におけるここ4半世紀で最も重要な出来事は何と言っても銅酸化物高温超伝導体の発見¹⁾であろう。現在のところ、最高の転移温度は高圧下で液体窒素温度(77 K)を大きく上回る153 Kとなっている。²⁾ 2006年に東工大の細野グループによりランタン、鉄、リン、酸素の化合物が約4 Kで超伝導になることが報告された。³⁾ 同グループは2008年2月後半にリンをヒ素に置き換え酸素の一部をフッ素に置き換えたところ転移温度が26 Kにまで上昇することを発表した。⁴⁾ 転移温度がここまで上昇すると世界中の物理学者が注目し、研究は一気に盛り上がった。そしてその2ヶ月後には転移温度は56 Kまで上昇した。⁵⁾ その後の膨大な研究で鉄系超伝導体において様々な興味あ

る現象が次々と発見された。しかしこの新超伝導体の発見の最も重要な意義はおそらく、銅酸化物が唯一の高温超伝導体ではないことを明らかにしたことであろう。この系の示す高い超伝導転移温度は従来のフォノン機構では説明できず、非従来型の超伝導発現機構を持つ系であることは間違いない。一方で、転移温度は低いものの超伝導研究の中心的課題の一角を占める物質群として、 f 電子を含むいわゆる重い電子系超伝導体がある。Ceを含む希土類化合物やUを含むアクチノイド化合物では、高温で局在していた f 電子が近藤効果により伝導電子と混成し、低温で真空の電子の数百倍に達する有効質量を持った伝導電子が形成される。⁶⁾ このような重い電子はしばしば超伝導に転移を起こすが、その超伝導発現機構は従来型のものではないことがわかっている。

このように鉄系高温超伝導体は、非従来型超伝導の代表例である銅酸化物、重い電子系化合物に新しい非従来型超伝導研究の舞台となる物質群を提供したと言える。⁷⁻¹³⁾ これら3つの系に共通した特徴は、いずれの系も電子間に働く強いクーロン反発力に由来する電子相関効果が、超伝導発現機構や超伝導転移温度以上のノーマル状態の電子状態に重要な役割を果たす、いわゆる強相関電子系であるという点である。銅酸化物も鉄系化合物も超伝導の舞台となるのは2次元原子面であるが、大きな違いは銅酸化物では母物質がモット絶縁体であり単一軌道によりフェルミ面は構成されていたのに対し、鉄系超伝導体の母物質は反強磁性金属であり鉄原子の d 軌道に由来する多軌道自由度そして軌道間のクーロン相互作用が存在することである。したがって2つの高温超伝導体を比較対照することにより、高温超伝導の謎を解き明かすのに必要な手がかりが見つかるかもしれない。また新しい鉄系超伝導体は超伝導相が磁気秩序相と隣接しているなど重い電子系化合物と共通している点も多い。しかしながら重い電子系は一般に3次元的で複雑なフェルミ面を持っており、その軌道成分もよくわかっていないことが多い。また近藤効果に由来する様々な相互作用の競合のため磁気構造も複雑になることが多い。これに対し鉄系化合物は、重い電子系と比べるとはるかに単純な2次元のフェルミ面を持っており、その軌道成分もよくわかっている。また磁気構造も単純であり物質依存性がほとんど無い。さらに超伝導転移温度も高いため重い電子系ではなかなか観測できなかった臨界現象等がより明確に見える可能性がある。したがってその超伝導発現機構や電子状態の解明は、これまで多くの謎を含んでいた重い電子系の物理の理解にもつながることが期待できる。いずれにせよ、これらの非従来型超伝導体は、電子相関効果、絶対零度における量子相転移、超伝導と他秩序との競合と共存、通常の金属の示すフェルミ液体的振る舞いから大きく外れた非フェルミ液体的振る舞いなど、凝縮系物理学における多くの未解決の主要テーマを含んでいる。

本稿では鉄系超伝導体のなかで最もよく研究がなされて

いるBaFe₂As₂を母物質とする系を中心に、その超伝導状態、電子状態相図、特に超伝導ドーム中の量子臨界点と超伝導転移温度以上の温度で起こる電子ネマティック相にテーマを絞り解説を行いたい。BaFe₂As₂系の利点は、他の系と比べて比較的大型の単結晶を作製できるだけでなく、元素置換や圧力印加により磁気秩序相、高温超伝導相から通常金属相にいたる相図の広範囲をカバーできることである。特にAsをPで置換したBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂では、¹⁴⁾ 相図の広範囲でランダウ量子化に伴う量子振動が観測されるなど、¹⁵⁾ 系を純良に保ったまま電子状態を変化させることが可能であり、高温超伝導の発現機構を探るモデル物質として注目されている。

2. 母物質

鉄系超伝導体の電子状態の特徴は、電子軌道とスピンの織りなす多彩な物性と言える。⁷⁻¹³⁾ これまで様々な結晶構造を持つ鉄系超伝導体が発見されているが、共通した特徴は以下の点である。

1. 超伝導は基本的に鉄原子の四角格子とその上下に位置するニクトゲン(ヒ素, リン)またはカルコゲン(セレン, テルル)で構成される2次元面で起こる(図1(a)-(c)).
2. 電子構造(フェルミ面)は擬2次元的であり、一部の例外を除き、ブリルアンゾーンの中心に位置する

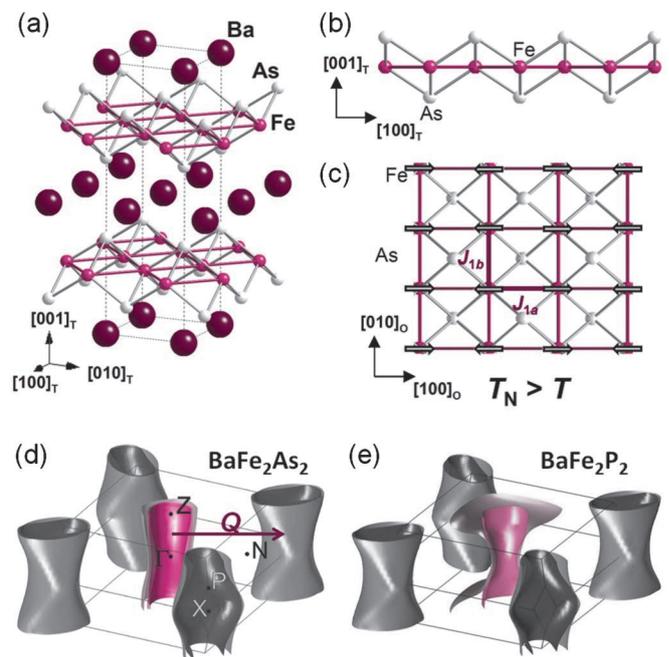


図1 BaFe₂As₂の結晶構造と電子構造。(a): 結晶構造の俯瞰図。点線は単位胞を示す。(b): 正方晶の[010]方向から見た鉄ヒ素平面。(c): 斜方晶反強磁性相における[010]方向から見た鉄ヒ素平面とスピン構造(矢印)。(d): バンド計算による正方晶非磁性相でのフェルミ面。細線はブリルアンゾーン。矢印は反強磁性波数ベクトルを示す。ゾーンセンターにホール面があり、ゾーン境界に電子面がある。(e): 比較のためにBaFe₂P₂のフェルミ面を示す。BaFe₂As₂と比較して電子面はほぼ変化がないが、ホール面が大きく湾曲している。ホール面の数はBaFe₂As₂が3枚に対してBaFe₂P₂では2枚となっているが、ホール面と電子面の体積が一致した補償金属の条件はともに満たしている。

ホール面と、境界に位置する電子面から構成される (図1(d)).

3. 高温超伝導相は磁気秩序相に隣接しており、多くの場合両者は重なり合う。磁気転移直上で正方晶から斜方晶への構造相転移が起こる。

まず母物質である BaFe_2As_2 の電子状態を議論しよう。 BaFe_2As_2 は銅酸化物高温超伝導体のオーバードープ領域と同程度の比較的強い電子相関を持った物質であり、¹⁶⁾ これは鉄系高温超伝導体の様々な母物質の中では中間的に強い電子相関である。¹⁷⁾ BaFe_2As_2 は $T_s = 135$ K で正方晶から斜方晶への構造相転移を起こし、同時に $T_N = 135$ K で $0.9\mu_B$ を持った反強磁性金属¹⁸⁾ に転移を起こす。図1(d)に反強磁性転移を起こす前のバンド構造を示す。 T_N 以下での磁気構造は正方晶における波数ベクトル $\mathbf{Q} = (\pi, \pi, 0)$ で特徴づけられ、スピンの斜方晶の長軸である a 軸方向に反強磁性的に b 軸方向に強磁性的に整列したコリニアー構造を持つ (図1(c))。母物質の磁気構造と磁気励起は、単純な局在モデルでも遍歴モデルでも説明できていない。¹³⁾ 実際局在モデルに立ち、中性子非弾性散乱の実験で観測された磁気励起スペクトラムを説明しようとする、最近接鉄原子の交換相互作用定数 J_{1a} , J_{1b} に $J_{1a} > 0$, $J_{1b} < 0$ の大きな異方性が出てくる (反強磁性の場合 $J > 0$ とした) が、これだけ大きな異方性は、斜方晶転移に伴う 1% 以下の面内格子ひずみでは説明できない。一方、遍歴モデルでは電子面とホール面の $(\pi, \pi, 0)$ 方向のネステイングにより磁気構造が決定されるが、類似したバンド構造を持つ FeTe 系で実現される 2 倍周期のコリニアー spin 構造が説明できない¹⁹⁾ だけでなく、中性子非弾性散乱の実験結果では、ゾーン境界における高エネルギー側で遍歴電子系特有のランダウ減衰は観測されない。¹³⁾ さらに磁気モーメントの大きさも、バンド計算の値よりも小さい。角度分解光電子分光 (ARPES)²⁰⁾ や X 線二色性 (X-ray Linear Dichroism; XLD)²¹⁾ の実験によれば、正方晶では縮退しているはずの xz 軌道と yz 軌道を占有する電子数が、少なくとも反強磁性状態では異なっていることが観測され、軌道秩序が起こっていることが示されている。したがって磁気的性質を理解するためにはこのような軌道秩序を考慮する必要があるであろう。

母物質にホールや電子をドーピングすることにより高温超伝導が現れる。ホールドーピングは例えば Ba を K に置換することにより、電子ドーピングは例えば Fe を Co や Ni で置換することにより実現できる (図2)。ホールドーピング系 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ では、 $x = 0.45$ あたりが最適ドーピングとなり ($T_c = 38$ K), $x \geq 0.6$ で電子面が消失する²²⁾ が、超伝導は $x = 1$ でも生き残る。電子ドーピング系 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ では $x = 0.07$ あたりが最適ドーピング ($T_c = 22$ K) となり $x \sim 0.15$ で超伝導は消失する。電子ドーピングの場合 As を Se に置き換えることにより 122 構造に近い化学組成を持った $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ においてホール面を持たない $T_c = 31$ K の高温超伝導が実現できる。²³⁾ BaFe_2As_2 系では、As を等価な個数の P に置換しても高温超

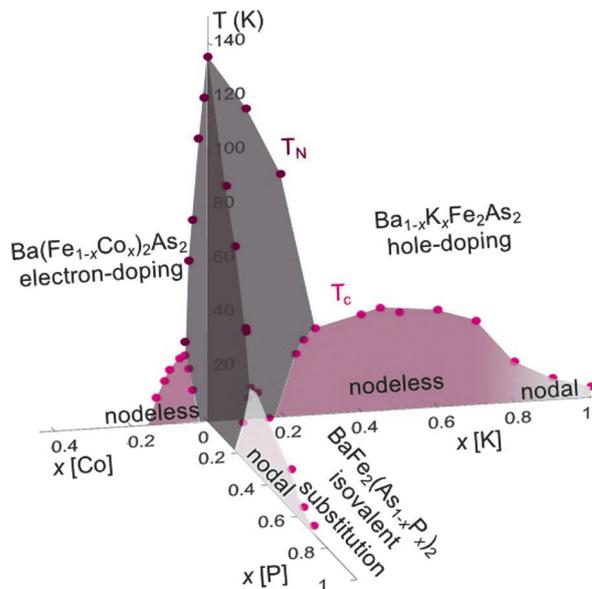


図2 BaFe_2As_2 を母物質とした3種類の超伝導相図と超伝導ギャップのノード構造。簡単のため反強磁性転移温度 T_N と超伝導転移温度 T_c のみを示している。

伝導が発現する。このような等価置換系は、いわゆる補償された金属状態にあり、電子数とホール数が常に等しい。この系ではバンド計算によると、P置換によりホール面の3次元性が増してゆき (図1(d), (e)), $x = 0.3$ 近傍で反強磁性秩序が完全に抑制され最大の超伝導転移温度 $T_c = 31$ K が現れる¹⁴⁾ (図2)。

3. 超伝導ギャップ構造と対称性

超伝導に転移するとフェルミ面近傍の電子の励起スペクトラムに有限のギャップが現れる。この超伝導ギャップ構造は、超伝導対形成機構と密接に関係している。従来型の超伝導体では、等方的にギャップの開く s 波超伝導対称性を持っている。これに対し銅酸化物や重い電子系超伝導体の多くは、超伝導ギャップ関数の符号がフェルミ面の特定の方向で反転しその結果ギャップがゼロとなるノード構造が現れる。特に銅酸化物では超伝導波動関数が結晶格子の4回対称性を破る d 波超伝導状態が実現される。

前述したように、格子振動を媒介とした従来の機構では鉄系超伝導体の高い転移温度を説明することは不可能であると考えられている。これまでに、スピン揺らぎに基づく機構と軌道揺らぎに基づく機構が提案されており、現在でも実験と理論の両面から多くの議論がなされている。¹²⁾ 前者のスピン揺らぎによる超伝導は、銅酸化物高温超伝導体でも議論されたものであり、超伝導電子対の形成に関わる相互作用が波数 \mathbf{q} に対する依存性を持つ動的帯磁率 $\chi(\mathbf{q})$ で記述される。²⁴⁾ 鉄系超伝導体の場合、電子面とホール面のネステイングに関連してこの2つの面を結ぶ反強磁性ベクトル $\mathbf{Q} = (\pi, \pi, 0)$ 付近 (図1(d)) で $\chi(\mathbf{q})$ は最大となる。^{25,26)} ここで $\chi(\mathbf{q})$ は正であり相互作用は斥力となり、このような斥力相互作用で超伝導が起こるのは一見不思議

である。しかしながらフーリエ変換により実空間で考えると、この波数に依存する相互作用はオンサイトでは正の斥力となるが、異なるサイト間(オフサイト)では負の引力となり得るため、電子間の反発が強い状態での超伝導の有効な候補の一つとなる。このとき、超伝導の秩序パラメータである超伝導ギャップは \mathbf{Q} ベクトルでつながる波数の位置で符号を反転させるため、鉄系超伝導体の分離したフェルミ面を持つ電子状態の場合、ホール面と電子面の間で符号が反転する s_{\pm} 状態が期待される。²⁵⁻²⁸⁾ 一方、後者の軌道揺らぎの機構では、電子格子相互作用に加えて、平均場近似を超えた多体効果(パーテックス補正)によって強制的および反動的軌道揺らぎが生じることが示されている。この時、軌道揺らぎを媒介とする、符合反転のない s_{++} 状態が期待される。^{29,30)} この場合、相互作用はオンサイトで引力となる。さらに過剰にホールや電子をドープした系では電子面とホール面のネスティングが弱くなるが、これらの系では d 波超伝導が安定化する可能性も理論的に指摘されていた。³¹⁾

では実験ではどうであろうか。まず超伝導ギャップにノードがあるかどうかを議論しよう。鉄系超伝導体の純良単結晶が作製された後すぐに、ギャップの大きさはフェルミ面によって異なるが、ノードは持たないフルギャップ状態が実現されていることが、磁場侵入長の測定で初めて示され、³²⁾ その後ARPES、核磁気共鳴、熱伝導、等の様々な実験で確認された。¹²⁾ しかしながらその後の研究で、ギャップ構造は物質によって多様な振る舞いを見せることがわかってきた。実際、実験結果を見てみると、 BaFe_2As_2 系に限ってもギャップ構造は物質に大きく依存する(図2)。例えば電子ドープ系の $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ではノードのないフルギャップの構造を持つ³³⁾のに対して、等価置換系の $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ では超伝導領域全体でラインノードを持つギャップ構造を示すことが磁場侵入長、^{34,35)} 熱伝導、³⁴⁾ 比熱³⁶⁾の測定から明らかとなっている。さらにホールドープ系の $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ では最適ドープ付近ではフルギャップである³⁷⁾が、 $x \geq 0.8$ のオーバードープ領域でラインノードを持つギャップ構造に変化する。³⁸⁾ 最近の実験結果では、電子面とホール面を持つ系では、理論的にも指摘されたように、²⁶⁾ 鉄平面からのニクトゲンの高さがある値よりも小さくなるとノードが現れる傾向にあることがわかってきた。³⁹⁾

ノードを持つギャップ構造が一部の物質で見つかったことから、この系の超伝導が少なくとも一部で秩序パラメータの符号反転を伴っていて、斥力(オフサイトの引力)の相互作用が存在している非従来型の超伝導であることは確実となる。このような1つの系においてギャップ構造が様々に変化することは、他の超伝導体では報告されていない極めて特徴的な振る舞いである。ノード構造についても少し詳しく議論しよう。超伝導波動関数がノードを持つ場合、波動関数が結晶の対称性を破る場合と破らない場合

(A_{1g} 対称性)との2種類が考えられる。前者の場合、ノード構造は超伝導対形成をもたらす主たる相互作用の対称性によって決定されており、波数空間におけるノードの位置は「対称性により守られて(symmetry protected)」いる。例えば銅酸化物の $d_{x^2-y^2}$ 波の場合は、面内で 90° 回転させると符号を反転させ、 $\pm 45^\circ$ 方向に必ずノードが存在する。後者の場合、 90° 回転させても符号は変わらないが、相互作用によっては高次の波数依存性を持つことが許されるため、波数の大きな領域での符号反転が現れる場合がある。^{26,27,29,40)} この場合、相互作用の構造の詳細に依存するノード構造が「偶然に(accidental)」現れる可能性がある。これは、前者の場合の対称性によって決まった位置にノードが現れることと対照的に、後者の場合はノードの位置が対称性では決まらず、例えば組成などの変化によってノード位置が変わり得て、さらにはノードが無くなることも同じ対称性の中で可能である、という意味でaccidentalという言葉が使われる。前者と後者の違いを決定づけるのは不純物効果である。不純物は超伝導を破壊する方向に働くが、前者の場合、不純物によってノードを取り除くことができないのに対し、後者の場合、凝縮エネルギーの損を減少させて超伝導状態を維持しようとして、ギャップを等方的にならそうとする力が働きノードが消えてしまうことがある。⁴¹⁾ このような例としてボロカーバイドがある。^{42,43)}

したがって鉄系超伝導体の内でフルギャップであるものは、面内で回転操作をさせた時に符号が変化していないことを意味し、結晶の対称性を破らない s 波の A_{1g} 対称性であることを意味するが、ノードのあるものについては、その対称性を決定するために波数空間におけるノードの位置を特定する必要がある。P置換系では磁場侵入長、磁場中熱伝導率、比熱の測定結果の比較から、^{44,36)} ゾーン端の電子面にノードが位置しゾーン中心のホール面はフルギャップになった拡張型 s 波の A_{1g} 対称性が示唆された。特に熱伝導度の磁場中角度回転の実験では電子面にループ状のラインノードが存在することが指摘されている。⁴⁴⁾ ARPES測定ではこの結果を支持するホール面がフルギャップであるという結果^{45,46)}と、ホール面のZ点近傍に水平ノードがある⁴⁷⁾という2つの結果が報告されている状態である。しかし、いずれにしても、対称性としては A_{1g} 対称性であることは間違いなさそうである。また最近では電子線照射により導入された不純物によりノードは消失し超伝導ギャップは等方的になるという結果が得られており、⁴⁸⁾ このこともノード構造は「偶然に」現れたと解釈できる。

次に過剰にホールや電子をドープした系では前述したように d 波超伝導が安定化する可能性も理論的に指摘されていた。しかしながら過剰ホールドープ系の KFe_2As_2 では、最近のレーザーARPESの実験から、ノードはゾーン中心の3枚のホール面の1枚にのみ8個存在するが、超伝導ギャップ関数は結晶の対称性を破らない A_{1g} 対称性という結果が発表された。⁴⁹⁾ 過剰電子ドープの $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ では、や

はり ARPES の結果よりゾーン中心の小さな電子面でフルギャップとなっていることが示され,⁵⁰⁾ こちらも A_{1g} 対称性であると考えられる。このように、超伝導ギャップ構造については物質により多様性を示すが、対称性という観点からは少なくとも統一的に A_{1g} 対称性が鉄系超伝導で実現していると考えられる。

A_{1g} の対称性を持つとすると、最も大きな問題は鉄ヒ素系超伝導体では、超伝導ギャップ構造が s_{\pm} なのか s_{++} なのかということである。これらの2つの超伝導状態のどちらが実現しているかは現在でも議論が続いている問題である。¹²⁾ これらを区別する実験として、トンネル顕微鏡による準粒子干渉,⁵¹⁾ 中性子スピン非弾性散乱,^{52,53)} 不純物効果等の実験^{54,55)} などが行われているが、現在のところ決定的な実験結果はない。ここでこれらの2つの状態は群論の規約表現では同じ A_{1g} 対称性に属するため、お互いにそれぞれの状態を完全に排除するものではないことに注意されたい。このため、現実では物質により2つの寄与の効き方が異なっていて、オンサイトの引力である軌道揺らぎとオフサイトの引力である反強磁性揺らぎのどちらの引力がより重要かは物質の詳細により、例えば組成や物質群で異なる可能性も指摘されている。したがって、先に述べたノードの存在は軌道揺らぎによるオンサイトの引力の重要性を否定するものではない。⁵⁶⁾

鉄系超伝導発現機構の解明には超伝導ギャップ構造の解明、特に s_{\pm} なのか s_{++} なのか、そしてノードの位置はどのかなのかを明らかにすることが不可欠であり、理論と実験が連携して物質による変化を詳細に調べる取り組みが重要となるであろう。

4. 超伝導ドーム内の量子臨界点

通常の金属では、電気抵抗などの輸送係数や比熱などの熱力学量の温度変化はランダウのフェルミ液体論によって良く記述できることが知られている。これに対し強相関電子系では、物理量の温度変化がしばしばフェルミ液体論から大きく逸脱した非フェルミ液体的な特異な振る舞いを示すことがある。例えば電気抵抗は従来の金属では低温で温度の二乗に比例するが、強相関電子系ではしばしば温度に比例した温度依存性を示す。非フェルミ液体的振る舞いは、量子臨界点に由来する量子臨界現象の側面であると考えられこれまで盛んに議論されてきた。通常の相転移は、温度による熱揺らぎの効果によって引き起こされる。一方で絶対零度においても圧力、元素置換、磁場といった非熱的なパラメーターを変化させることにより、熱的な揺らぎ効果のない(エントロピーの項を含まない)相転移が起こる。このような相転移は量子相転移と呼ばれ、相転移が2次である場合は相転移点は量子臨界点と呼ばれ、その近傍ではハイゼンベルグの不確定性原理に由来する「量子揺らぎ」が重要な役割を果たす。この場合、量子臨界点では系を記述する波動関数は、秩序状態と無秩序状態の絡み合った複

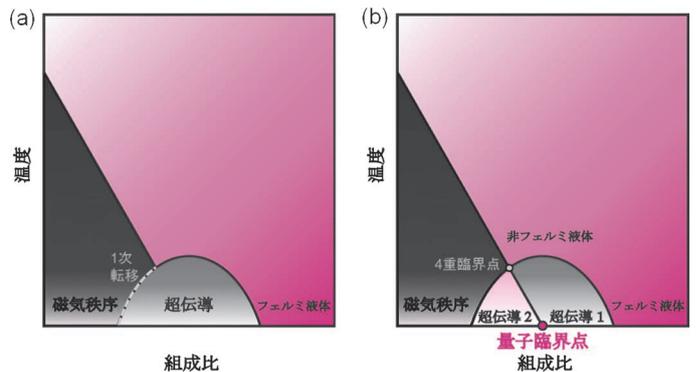


図3 反強磁性近傍の非従来型超伝導体の2種類の一般的な相図。(a): 磁性相と超伝導相が共存しない場合。(b): 磁性相と超伝導相が共存する場合。後者のみ超伝導ドーム内に量子臨界点(Quantum Critical Point; QCP)が存在し、2種類の超伝導相が現れる。後者では全ての相転移が2次転移であるのに対し、前者では超伝導と磁性相の境界は1次転移となる(破線)。

雑なものとなっている。重要なことは、絶対零度の量子臨界点の影響が相図上で臨界点を中心に扇状に拡がり、有限温度の広い領域にわたってしまうということである。^{57,58)} この領域は量子臨界領域と呼ばれ、様々な物理量がフェルミ液体理論から外れた特異な温度依存性を示すようになる。このため量子臨界点の理解が、様々な異常な物理現象の解明に重要であると考えられている。もう一つ重要なことは非従来型の超伝導がその非フェルミ液体的振る舞いを示す領域のすぐ近くで出現することが多いということである。このことは量子臨界点の存在が超伝導の発現に対しても重要な役割を果たしているのではないかと自然な発想をもたらす。

しかしながら、量子臨界点と非フェルミ液体的振る舞いと非従来型超伝導の関係を直接実験的に明らかにすることは極めて困難である。その最も大きな理由の一つとして、超伝導のドームが相図上に現れ、量子臨界点が超伝導ドームのなかに隠れてしまうからである。この場合、図3(a)、(b)に示したような2つのシナリオが考えられる。まず図3(a)のように量子臨界点がドーム中に存在しなかった場合である。この場合、臨界点が超伝導転移のために消えてしまったのか元々存在しなかったのかは不明となり、超伝導転移温度以上で非フェルミ液体的な振る舞いが観測されたとしてもその起源が量子臨界点に直接関係したものかどうかははっきりしなくなる。これに対して図3(b)に示したように量子臨界点が超伝導ドーム中に存在する場合、量子臨界点に由来する臨界量子揺らぎが非フェルミ液体的な振る舞いの起源であることに疑いはないであろう。さらに量子臨界点はドーム内の量子相転移の存在を示しており、このことは2つの対称性の異なる超伝導相(超伝導1, 超伝導2)がドーム中に存在することを意味する。この場合、2つの相は超伝導と別の秩序が共存する相と超伝導のみ存在する相と考えるのが自然である。別の言い方をするとドーム内の量子臨界点の存在は、超伝導と他秩序が微視的に均一に存在しうることを示す直接的な証拠になると考えられ

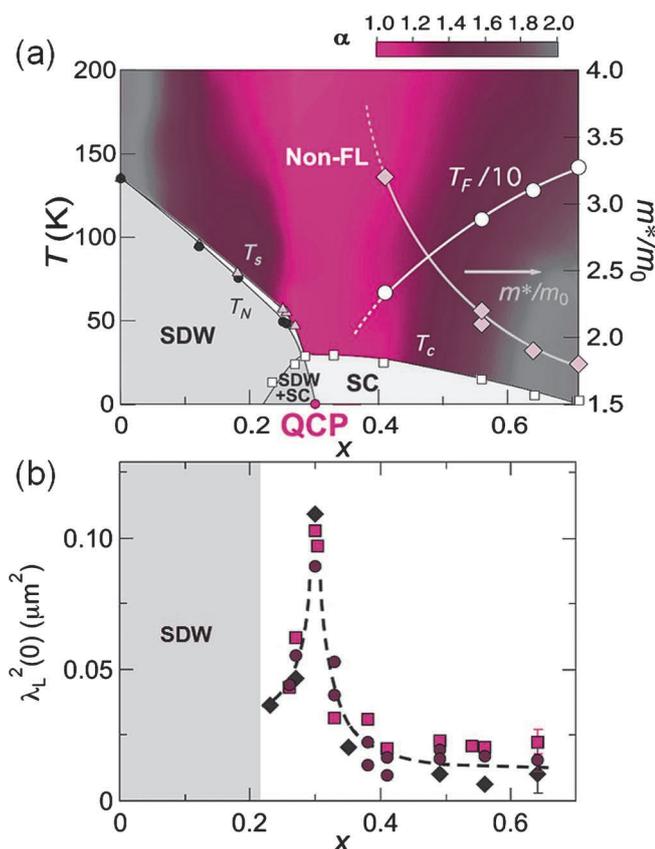


図4 BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂単結晶試料における電気抵抗率の温度依存性により決定された温度-組成相図と磁場侵入長の組成依存性。(a): 電気抵抗率の温度依存性の冪 α を相図上に色で示したもの。電気抵抗率は構造転移温度 T_s で極小値、反強磁性(SDW)転移温度 T_N で極大値、超伝導(SC)転移温度 T_c でゼロとなる。¹⁴⁾ また量子振動より見積もった¹⁵⁾有効質量(右軸)および有効フェルミ温度も示してある。(b): 絶対零度でのロンドン磁場侵入長 $\lambda_L(0)$ の2乗(有効質量に比例する量)の組成依存性。3種類の異なる実験手法で決定した値を異なる印で示している。³⁵⁾

る。これに対して図3(a)の場合は超伝導は他の秩序とは共存できないことになる。このようにどちらの相図になっているかを明らかにすることは、超伝導発現機構や非フェルミ液体的振る舞いの起源だけでなく、超伝導が磁気秩序などの異なる秩序と微視的に共存しうるかという問題と密接に関わっている。

しかしながら超伝導ドーム中に量子臨界点が存在するかどうかは、これまでの銅酸化物、重い電子系化合物を含むすべての非従来型超伝導物質における最も大きな謎の一つであった。これは超伝導状態では多くの物理量がゼロになってしまうことだけでなく、超伝導と磁気秩序のミクロな共存を実験的に明らかにすることは非常に困難であるからである。実際、あるプローブで測定するとミクロに共存しているように見えても他のプローブで見ると相分離のように見えてしまうことが多々ある。

最近の実験でBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂系において、初めて超伝導ドーム内部の量子臨界点の存在が明らかになった。³⁵⁾ まず超伝導ドームの外側の電子状態を議論しよう。図4(a)に電気抵抗率を $\rho = \rho_0 + aT^\alpha$ でフィット(ρ_0 は残留抵抗率)したときの温度に対する冪 α を示す。赤色は α が1に近く非フ

エルミ流体的振る舞いを示す領域、灰色は α が2に近くフェルミ流体的振る舞いを示す領域を示す。図4(a)からわかるように $x \sim 0.30$ を中心に非フェルミ流体的振る舞いの領域が扇状に広がっているように見える。さらに核磁気共鳴の実験によると、P原子核のspin格子緩和時間 T_1 は2次元反強磁性金属特有の温度依存性、 $1/T_1 T = A + C/(T + \theta)$ を示すことが示されている。⁵⁹⁾ ここで A は反強磁性成分以外の寄与でありほとんど温度変化しない。 C はキュリー定数に相当する量、 θ はワイス温度である。BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂では、 θ は $x > 0.3$ で正であり、 $x \sim 0.3$ でゼロとなり $x < 0.3$ で有限温度での反強磁性転移に対応して負となることが示された。このことは $x \sim 0.3$ では絶対零度まで反強磁性相関が成長し続けることを意味し、反強磁性臨界点の存在を示唆している。さらに前述したようにBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂系では、As原子をP原子で置換しても強い散乱体として働かないため、超伝導ドームを含む $0.4 \leq x \leq 1$ の広い範囲にわたってランダウ量子化に伴う量子振動が観測され、¹⁵⁾ フェルミ面の詳細な情報を得ることができる。 $x = 1$ ではフェルミ面は局所密度近似(LDA)法によるバンド計算の結果とほぼ一致しているが、⁶⁰⁾ x の減少とともにLDA計算の結果から大きくずれ始める。図4(a)中に電子面の量子振動から決定した有効質量 m^* と断面積 F から求めた有効フェルミ温度 $T_F = \hbar_e F / (m^* k_B)$ を示す。有効質量は x の減少とともに増大し、フェルミ温度は大きく減少する。このような有効質量の増大はARPESによっても観測されている。⁶¹⁾ これらの結果は x の減少に伴い電子相関の効果が重要になっていることを示しており、 $x \sim 0.3$ における量子臨界点の存在を支持している。しかしながらこれらの結果はあくまで超伝導ドームの外側からの外挿であり、超伝導ドームの中に量子臨界点が存在しているのかどうかは結論できない。

超伝導電子の状態を直接的に反映した物理量にロンドン磁場侵入長 λ_L がある。単純には、 λ_L は、超伝導電子の密度 n_s 、質量 m_s と $\lambda_L^{-2} = \mu_0 n_s e^2 / m_s$ の関係がある。図4(b)に絶対零度における磁場侵入長の値 $\lambda_L(0)$ の詳細な x 依存性を示す。磁場侵入長の絶対値は3種類の異なる方法で決定した。³⁵⁾ できるだけ均一な試料で測定するため試料はすべて $300 \times 300 \times 100 \mu\text{m}^3$ 程度の小さいものを用い、すべての試料で比熱、磁化、表面インピーダンス測定によりほぼ100%に近い体積分率を示すシャープな超伝導転移を確認している。図4(b)から3種類の方法で決定した $\lambda_L(0)$ はすべて同じ振る舞いを示し、 $x = 0.3$ で急峻なピーク構造を示している。磁場侵入長の増大は単純には超伝導電子の有効質量 m_s の増大を意味する。ここで強調したいのは、“絶対零度における m_s ”が、 $x > 0.3$ の超伝導側と $x < 0.3$ の磁気秩序相側の両側から $x = 0.3$ に近づくにつれ発散的に増大しているということである。したがって、この質量増大の原因は絶対零度における2次相転移に由来する量子揺らぎによってもたらされると考えるのが自然である。つまりこの結果は、量子臨界点が $x = 0.3$ に存在することを直接的に示し

ていると考えられる。

超伝導ドーム中の量子臨界点の存在は、これまで重い電子系超伝導体^{62,63}や銅酸化物⁶⁴⁻⁶⁶では盛んに議論がされて来ていたが結論は出ておらず、これだけ明瞭に観測できたのはこの系が初めてである。この結果は、超伝導ドームより上で観測された非フェルミ液体的振る舞いの起源がドーム内の量子臨界点による臨界揺らぎによるものであることを強く示唆するものである。さらに絶対零度における2次の量子相転移の存在は、磁気秩序相転移線と超伝導ドームが交差するところは4重臨界点となっていて、2次相転移線が超伝導ドーム中に存在することを意味している(図3(b))。このことは超伝導ドーム内に2つの対称性の異なる相が存在することを示している。この場合、超伝導のみ存在する相(ゲージ対称性の破れ)と超伝導と反強磁性の共存する相(ゲージ対称性+並進対称性+時間反転対称性の破れ)の2種類の相が存在すると考えるのが自然であろう。実際、最近の核磁気共鳴の結果から、 $x < 0.3$ では磁気秩序の存在が示されており、⁶⁷この量子臨界点が磁気量子臨界点であることを支持している。つまり量子臨界点の存在は、非従来型超伝導が磁気秩序とミクロなレベルで共存している強い証拠を与えている。さらに磁気量子臨界点近傍で超伝導転移温度が最大となっている⁶⁸ことは、量子臨界揺らぎが超伝導転移温度を上昇させる一因となっていることを示唆している。

このような超伝導ドーム中の量子臨界点は、現在までのところBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂でのみ観測されている。実際、電子ドーピング系でBa(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂においては $\lambda_L(0)$ は単調なドーピング依存性を示すのみでピーク構造は観測されていない。^{69,70}この理由として、電子ドーピング系には量子臨界点が存在しないこと⁷¹や試料の不均一性等が考えられる。またこれとは別に最近、超伝導ギャップのノード付近の準粒子の質量が量子臨界性揺らぎによって増大するため、⁷²ノードの存在が量子臨界点に伴う異常を顕著にすることが示唆されている。⁷³また銅酸化物ではホール濃度 $p_0 \sim 0.19$ に量子臨界点の存在が長い間議論されてきたが、⁶⁴⁻⁶⁶ $\lambda_L(0)$ はBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂とは対照的に p_0 でブロードな最小値を示すのみである。⁷⁴このことは仮に銅酸化物の超伝導ドーム中に量子臨界点が存在するとしても、鉄系超伝導体とはかなり性質の異なるものであることを示唆しているように思われる。

5. 電子ネマティック相

電子間相互作用により、今までにない様々な複雑な電子相が現れることが近年明らかとなってきている。その最も驚くべき相の一つに「電子ネマティック」相と呼ばれるものがある。⁷⁵ネマティックという言葉は液晶の秩序相の一つから由来しており、ネマティック液晶においては、重心の位置はばらばらであるが、棒状分子の方向は全体として異方性を持ちある方向を向いている状態となっている。こ

のような状態は、並進対称性は破っていないが回転対称性を破った秩序状態であると考えられる。これに対して、電子ネマティック秩序という言葉は、若干曖昧さを含むが広義の意味で結晶格子から期待される回転対称性を電子系が自発的に破るような非自明な状態を呼んでいる。電子は金属中では液体のように動き回ることができるため、その多体系としての応答が異方性を示す場合を液晶の異方性になぞらえたものである。例えば、正方晶の結晶を持つ系では、格子は面内で4回対称性を持っているが、電子ネマティック相では電子系が結晶の4回対称性を破った2回対称性を持ち1次元的な方向性を示す。このような電子ネマティック相は、これまで銅酸化物高温超伝導体のストライプ相や擬ギャップ相、^{76,77}Sr₃Ru₂O₇の磁場中相、⁷⁸重い電子系超伝導体URu₂Si₂の隠れた秩序相⁷⁹など、様々な電子系において議論されており、電子間の強いクーロン斥力に加えて、スピンや多軌道自由度のもたらす新奇な秩序相ということが出来る。

鉄系超伝導体では、これまで温度が T_s 以下の斜方晶相において一軸圧力により非双晶化した単結晶での電気抵抗率測定^{80,81}や光学伝導度、⁸²角度分解光電子分光⁸³の測定が行われ、顕著な面内異方性が報告されている。興味深いことにこの異方性は、これまで正方晶相と考えられてきた T_s 以上の温度域においても存在しており結晶の4回対称性が破れた状態、即ちネマティック状態が実現している可能性が示唆される。しかしながらこれらの実験はすべて一軸圧力による非双晶化の下で行われているので、この系において電子系のネマティック秩序状態が正方晶相で実現されているのか否かを明らかにするには、 T_s 以上の温度域において一軸圧力による非双晶化を行わずに自発的な対称性の破れを調べる必要がある。さらには、4回対称性の破れが相転移現象として理解されるのか、また、超伝導の発現とどのように関係するのかを明らかにする必要性があり、これには熱力学的な物理量を通じた相図上の広い範囲にわたる系統的实验が必要になる。

このような観点から最近高精度の磁気トルクによる面内異方性測定が行われた。⁸⁴磁気トルクは自由エネルギーの角度微分に対応する熱力学量であり、体積 V の試料に対して磁場 H を ab 面内で回転させた場合には(図5(a))、 a 軸からの磁場角度を ϕ とすると磁気トルク τ は次のような2回対称の形を持つ。⁷⁹

$$\tau_{2\phi} = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 V [(\chi_{aa} - \chi_{bb}) \sin 2\phi - 2\chi_{ab} \cos 2\phi] \quad (1)$$

ここで χ_{ij} は帯磁率テンソルで磁化 $M_i = \sum_j \chi_{ij} H_j$ により定義される。系の対称性が正方晶から期待される4回対称性を持つ場合、 $\chi_{aa} = \chi_{bb}$ かつ $\chi_{ab} = 0$ であるため、トルクの2回対称成分はゼロとなる。一方で電子あるいは磁気状態が自発的に4回対称性を破るような場合、 $\chi_{aa} \neq \chi_{bb}$ あるいは $\chi_{ab} \neq 0$ となり、磁気トルクの面内角度依存性には、対称性の破れの方向に応じた2回対称性振動が観測されることになる。

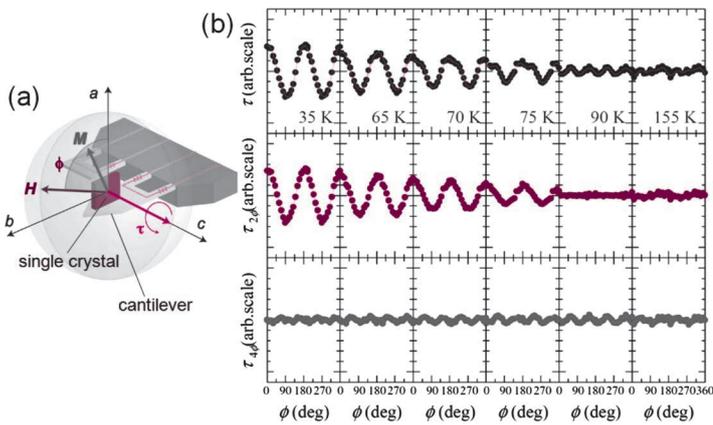


図5 BaFe₂(As_{0.67}P_{0.33})₂微小単結晶試料における磁気トルク測定による4回回転対称性の破れの検出。⁸⁴⁾ (a): 微小カンチレバー上の試料に磁場 H を ab 面内に印加した時の磁化 M とトルク τ の模式図。(b): 様々な温度におけるトルク τ の面内角度 ϕ に対する変化 (上段)。フーリエ変換を用いて2回対称成分 (中段) と4回対称成分 (下段) を取り出したものにより、2回対称成分が $T^* \approx 85$ K 以下で出現していることがわかる。

このように磁気トルクは異方性を直接検出するプローブであり、トルクの面内異方性測定は、系の回転対称性の破れを調べる上で非常に強力な手段である。これまで低温相における双晶ドメインは数 μm から数十 μm 程度の大きさであることが報告されており、双晶形成による異方性の打ち消しが不完全な微小単結晶試料において磁気トルク測定を行うことで、非双晶化を行わずとも自発的な回転対称性の破れが観測可能となる。なお、磁気トルク測定は微小カンチレバーを用いることにより (図5(a)) 非常に高分解能測定を達成できるため、このような微小試料の測定が可能である。その結果、BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ の広い組成領域で、 T_s よりも高温の T^* 以下で有限の2回対称成分が観測された (図5(b))。この2回対称成分の振動は $\tau_{2\phi} = A_{2\phi} \cos 2\phi$ の形を持っていることから、有限の χ_{ab} が現れていることに対応する。これは、鉄-鉄方向への異方性が T^* 以下において発達していることを意味しており、電子系が1次元的な方向性を持つ電子ネマティック相を自発的に形成していることを示唆する。ここで金属の帯磁率は状態密度を反映したパウリ常磁性を示すが、帯磁率が異方的となることは、電子状態の対称性の低下を意味する。この電子ネマティック状態は図6に示すように、 T_s が消失した超伝導相まで拡がり超伝導が消失するあたりで T^* での異常は観測できなくなる。

このようなネマティック転移は電子系の自己組織化とも捉えることができ、電子系と格子系との結合が有限に存在すれば、結晶構造にも2回対称性を反映した斜方歪みが出現することが期待される。放射光X線回折による高次ブラッグピークを用いた詳細な単結晶構造解析⁸⁴⁾によると、 T^* 以上の高温で観測された鋭いブラッグピークは、 T^* 以下で半値幅が広がりはじめピーク強度は低くなる (T_s 以下の温度領域では明確な2つのピークに分裂する)。このように磁気トルクにより示唆された電子ネマティック転移温度において、わずかながら斜方歪みを伴う格子異常が明瞭

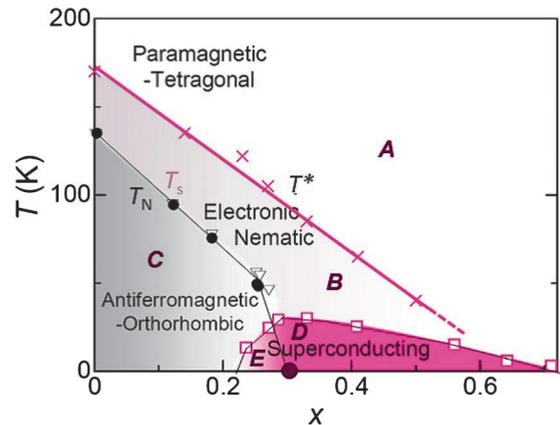


図6 種々の測定から新しく提唱されたBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂の温度-組成相図。4回回転対称性が保たれていた状態 (A相: 正方晶常磁性相) から、 T^* 以下で回転対称性が破れたネマティック状態となり (B相: ネマティック常磁性相)、より低温で並進対称性と時間反転対称性が破れた反強磁性相 (C相) またはゲージ対称性が破れた超伝導相 (D相) へと転移する。超伝導ドーム内には量子臨界点 ($x=0.3$) を境に超伝導と反強磁性が共存する相 (E相) が存在し、ドーム内に異なる2つの相がある。

に観測されている。なお、最近これに類似したわずかな斜方晶歪みの発達が別の鉄系超伝導体SmFeAs(O_{1-x}F_x)の粉末X線回折においても見出され報告がされている。⁸⁵⁾

これらの磁場中トルク測定およびゼロ磁場における構造解析が同じ T^* で異常が現れる結果は、 T^* において4回回転対称性の破れた“熱力学的な相”へ相転移していることを明確に示すものである。 T^* で電子系が回転対称性を破る状態へ転移した後、より低温の T_s で斜方晶歪みが増大するのは、有限の電子格子結合のため、格子系の構造相転移が磁性物理で使われる概念である「メタ転移」のように秩序パラメータが有限で大きさのみを変化させる異常となるためと考えると理解しやすい。⁸⁴⁾ このようにして得られた電子状態相図 (図6) は、先の磁場侵入長の結果と合わせると、BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ で少なくとも5つの異なる相を示すことを意味している。

鉄系超伝導体におけるこのような4回対称性の破れの起源として、スピンネマティックといわれる磁気モーメントは消失しているがスピン空間の回転対称性が破れた状態⁸⁶⁾ と、軌道秩序によるもの⁸⁷⁻⁸⁹⁾ などが提案されている。スピンネマティックモデルを出発点とする場合、これは磁気秩序相の高温側の熱的スピン揺らぎにより誘起されると考えられており、基本的に長距離磁気秩序の存在する $x < 0.3$ の組成域での4回対称性の破れを与える。一方でネマティック相は磁気秩序が消失し反強磁性揺らぎが抑制された $x > 0.3$ の超伝導ドームの上にもまで拡がっており、スピンネマティックモデルでどこまで実験結果を説明できるかは不明である。これに対し T^* でFe原子の d_{xz} 軌道と d_{yz} 軌道の占有に不均衡が生じるような軌道秩序が起きていると考えるならば、今回観測された電子系のネマティック転移との整合性は良い。

最近行われた様々なP濃度におけるARPESの実験によると、⁹⁰⁾ 磁気トルク実験の T^* 近傍の温度において d_{xz} 軌道

と d_{xz} 軌道の非等価なエネルギーシフトが起こることが報告されており、この結果は軌道秩序の存在を示唆している。さらに T^* に近い温度でフェルミ面に部分的にギャップが開き状態密度が減少するいわゆる擬ギャップが現れることも示された。この擬ギャップの存在は最適組成近傍の試料において光学伝導度スペクトル測定からも報告されている。⁹¹⁾ また電子ドープ系 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ においても、XLD,²¹⁾ 光学伝導度スペクトル,⁹¹⁾ ポイントコンタクト分光⁹²⁾ 等の実験において T_s よりも高い温度で電子系に何らかの異常が起こることを示唆する実験が報告されている。一方で、これらの異常が観測された温度では、超音波弾性定数 C_{66} ^{93,94)} や電気抵抗の弾性応答⁸¹⁾ の異常は観測されていない。このことは、 T^* において反強的な軌道秩序⁹⁵⁾ が生じていると考えれば理解できるかもしれない。つまり、反強的な軌道秩序が起こるとフェルミ面が折りたたまれて部分的なギャップを開くことが予想されるが、超音波などの長波長 ($q \sim 0$) のプローブでは検知しづらい可能性がある。いずれにせよ軌道秩序が起こっているのであれば、どのようなタイプの軌道秩序であるのか、そしてそれと超伝導の関係はどうなっているのか、また電子ネマティック相と擬ギャップの形成がどのように関連付けられるのか、さらに様々な種類が存在する鉄系高温超伝導体全般に共通して現れるものであるかどうかなど、今後明らかにしなくてはいけない点が山積している。

6. 今後の展望

鉄系高温超伝導体が発見され約5年が経過し、高品質な単結晶を用いた精密測定が可能となり、この系の磁気状態、電子状態、超伝導状態の詳細が明らかになってきた。一方で超伝導発現機構、磁性、電子状態相図は未だに未知な部分が多い。この系の電子状態の特徴は、電子軌道とスピンの織りなす多彩な物性と言え、現実の系では軌道とスピンの両者には有限の結合が存在し、どちらも超伝導発現機構や特異な電子状態相図に寄与していると考えるのが自然である。しかしながらある現象を見たときそれが軌道とスピンのどちらが主でどちらが従で引き起こされたのかということがいつも議論になる。この“Which came first, the chicken or the egg?”の問題は常に鉄系高温超伝導体の物理につきまとう問題である。また鉄系高温超伝導体は、新しい非従来型超伝導研究の舞台となる物質群を提供したと言えるが、他の強相関電子系とどのような共通の物理が存在するのか、今後の研究が一層重要になると考えられる。今後その理解が進み、鉄系超伝導の機構解明、さらには新奇な物性物理の舞台の発掘へと繋がることを期待したい。

共同研究者である、家 哲也、石田憲二、池田浩章、伊豫 彰、永崎 洋、岡崎浩三、笠原 成、北野晴久、穴戸寛明、下志万貴博、辛 埴、杉本邦久、寺嶋孝仁、利根川翔、中井祐介、橋本頭一郎、深澤英人、福田竜生、藤森 淳、水上雄太、山下 穰、吉田鉄平、渡邊大樹、D. N. Basov,

A. E. Böhrer, A. Carrington, A. I. Coldea, R. W. Giannetta, A. H. Nevidomskyy, M. A. Tanatar, R. Prozorov の皆様に感謝いたします。また、有田亮太郎、黒木和彦、紺谷 浩、遠山貴巳、花栗哲郎、E. Abrahams, A. V. Chubukov, I. Eremin, D. L. Feng, R. M. Fernandes, P. J. Hirschfeld, I. I. Mazin, S. Sachdev, J. Schmalian, Q. Si, H. H. Wen の皆様には頻りに有益な議論をして頂きました。

参考文献

- 1) J. G. Bednorz and K. A. Müller: *Z. Phys.* **64** (1986) 189.
- 2) N. Takashita, A. Yamamoto, A. Iyo and H. Eisaki: *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 023711.
- 3) Y. Kamihara, *et al.*: *J. Am. Chem. Soc.* **128** (2006) 10012.
- 4) Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano and H. Hosono: *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 3296.
- 5) C. Wang, *et al.*: *Europhys. Lett.* **83** (2008) 67006.
- 6) 重い電子系の物理の最近の発展については、*固体物理* **47** (2012) 509—特集：重い電子系の物理の最近の発展。
- 7) 鉄系超伝導体の初期のレビューとして、*日本物理学会誌* **64** (2009) 807—小特集：鉄系超伝導体。
- 8) 前田京剛、今井良宗、高橋英幸：*固体物理* **46** (2011) 453.
- 9) K. Ishida, Y. Nakai and H. Hosono: *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 062001.
- 10) J. Paglione and R. L. Greene: *Nat. Phys.* **6** (2010) 645.
- 11) G. R. Stewart: *Rev. Mod. Phys.* **83** (2011) 1589.
- 12) P. J. Hirschfeld, M. M. Korshunov and I. I. Mazin: *Rep. Prog. Phys.* **74** (2011) 124508.
- 13) P. Dai, J. Hu and E. Dagotto: *Nat. Phys.* **8** (2012) 709.
- 14) S. Kasahara, *et al.*: *Phys. Rev. B* **81** (2010) 184519.
- 15) H. Shishido, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 057008.
- 16) M. M. Qazilbash, *et al.*: *Nat. Phys.* **5** (2009) 647.
- 17) Z. P. Yin, K. Haule and G. Kotliar: *Nat. Mater.* **10** (2011) 932.
- 18) K. Matan, R. Morinaga, K. Iida and T. J. Sato: *Phys. Rev. B* **79** (2009) 054526.
- 19) W. Bao, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 247001.
- 20) T. Shimojima, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 057002.
- 21) Y. K. Kim, *et al.*: arXiv: 1112.2243.
- 22) W. Malaeb, *et al.*: *Phys. Rev. B* **86** (2012) 165117.
- 23) 例えば、H.-H. Wen: *Rep. Prog. Phys.* **75** (2012) 112501.
- 24) D. J. Scalapino: *Phys. Rep.* **250** (1995) 329.
- 25) I. I. Mazin, D. J. Singh, M. D. Johannes and M. H. Du: *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 057003.
- 26) K. Kuroki, *et al.*: *Phys. Rev. B* **79** (2009) 224511.
- 27) S. Graser, T. A. Maier, P. J. Hirschfeld and D. J. Scalapino: *New J. Phys.* **11** (2009) 025016.
- 28) H. Ikeda, *et al.*: *Phys. Rev. B* **81** (2010) 054502.
- 29) H. Kontani and S. Onari: *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 157001.
- 30) S. Onari and H. Kontani: *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 137001.
- 31) R. Thomale, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 117001.
- 32) K. Hashimoto, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 017002.
- 33) M. A. Tanatar, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 067002.
- 34) K. Hashimoto, *et al.*: *Phys. Rev. B* **81** (2010) 220501(R).
- 35) K. Hashimoto, *et al.*: *Science* **336** (2012) 1554.
- 36) Y. Wang, *et al.*: *Phys. Rev. B* **84** (2011) 184524.
- 37) K. Hashimoto, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2010) 207001.
- 38) D. Watanabe, *et al.*: arXiv: 1307.3408.
- 39) K. Hashimoto, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 047003.
- 40) A. Chubukov: *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **3** (2012) 57.
- 41) V. Mishra, *et al.*: *Phys. Rev. B* **79** (2009) 094512.
- 42) Y. Matsuda, K. Izawa and I. Vekhter: *J. Phys.: Condens. Matter* **18** (2006) R705.
- 43) H. Kontani: *Phys. Rev. B* **70** (2004) 054507.
- 44) M. Yamashita, *et al.*: *Phys. Rev. B* **84** (2011) 060507(R).
- 45) T. Shimojima, *et al.*: *Science* **332** (2011) 564.
- 46) T. Yoshida, *et al.*: arXiv: 1301.4818.
- 47) Y. Zhang, *et al.*: *Nat. Phys.* **8** (2012) 371.
- 48) Y. Mizukami, *et al.*: unpublished.

49) K. Okazaki, *et al.*: Science **337** (2012) 1314.
 50) M. Xu, *et al.*: Phys. Rev. B **85** (2012) 220504.
 51) T. Hanaguri, S. Niiitaka, K. Kuroki and H. Takagi: Science **328** (2010) 474.
 52) D. S. Inosov, *et al.*: Nat. Phys. **6** (2010) 178.
 53) J.-P. Castellán, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 177003.
 54) M. Sato, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2009) 014710.
 55) Y. Nakajima, *et al.*: Phys. Rev. B **82** (2010) 220504.
 56) 大成誠一郎, 紺谷 浩: 日本物理学会誌 **68** (2013) 231.
 57) 例えば, S. Sachdev and B. Keimer: Phys. Today **64** (2011) 29.
 58) E. Abrahams and Q. Si: J. Phys.: Condens. Matter **23** (2011) 223201.
 59) Y. Nakai, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 107003.
 60) B. J. Arnold, *et al.*: Phys. Rev. B **83** (2011) 220504(R).
 61) T. Yoshida, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 117001.
 62) T. Park, *et al.*: Nature **440** (2006) 65.
 63) G. Knebel, *et al.*: Phys. Rev. B **74** (2006) 020501.
 64) 永崎 洋, 遠山貴己: 固体物理 **46** (2011) 439.
 65) D. M. Broun: Nat. Phys. **4** (2008) 170.
 66) R.-H. He, *et al.*: Science **331** (2011) 1579.
 67) T. Iye, *et al.*: Phys. Rev. B **85** (2012) 184505.
 68) P. Walmsley, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 257002.
 69) R. T. Gordon, *et al.*: Phys. Rev. B **82** (2010) 054507.
 70) L. Luan, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 067001.
 71) H. Luo, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 247002.
 72) K. Hashimoto, *et al.*: Proc. Natl. Acad. Sci. USA **110** (2013) 3293.
 73) A. Levchenko, M. G. Vavilov, M. Khodas, and A. V. Chubukov: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 177003.
 74) J. L. Tallon, *et al.*: Phys. Rev. B **68** (2003) 180501.
 75) 例えば, E. Fradkin, *et al.*: Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **1** (2010) 153.
 76) Y. Kohsaka, *et al.*: Science **315** (2007) 1380.
 77) R. Daou, *et al.*: Nature **463** (2010) 519.
 78) R. A. Borzi, *et al.*: Science **315** (2007) 214.
 79) R. Okazaki, *et al.*: Science **331** (2011) 439.
 80) J.-H. Chu, *et al.*: Science **329** (2010) 824.
 81) J.-H. Chu, H.-H. Kuo, J. G. Analytis and I. R. Fisher: Science **337** (2012) 710.
 82) M. Nakajima, *et al.*: Proc. Natl. Acad. Sci. USA **108** (2011) 12238.
 83) M. Yi, *et al.*: Proc. Natl. Acad. Sci. USA **108** (2011) 6878.
 84) S. Kasahara, *et al.*: Nature **486** (2012) 386.
 85) A. Martinelli, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 227001.
 86) R. M. Fernandes, *et al.*: Phys. Rev. B **85** (2012) 024534.
 87) F. Kruger, S. Kumar, J. Zaanen and J. V. Brink: Phys. Rev. B **79** (2009) 054504.
 88) W. Lv, J. Wu and P. Phillips: Phys. Rev. B **80** (2009) 224506.
 89) C. Lee, W.-G. Yin and W. Ku: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 267001.
 90) T. Shimojima, *et al.*: arXiv: 1305.3875.
 91) S. J. Moon, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 027006.
 92) H. Z. Arham, *et al.*: Phys. Rev. B **85** (2012) 214515.

93) T. Goto, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 073702.
 94) M. Yoshizawa, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 024604.
 95) H. Kontani, T. Saito and S. Onari: Phys. Rev. B **84** (2011) 024528.

著者紹介



芝内孝禎氏: 専門は固体電子物性。特に強相関電子系に現れる非従来型超伝導状態などの異常量子相に興味がある。



松田祐司氏: 専門は低温物理学。強相関電子, 非従来型超伝導, 量子スピン系等に興味がある。

(2013年3月5日原稿受付)

Superconducting Symmetry and Electronic Phase Diagram of Iron-Based Superconductors

Takasada Shibauchi and Yuji Matsuda

abstract: The new iron-based high temperature superconductors knocked the cuprates off their pedestal as a seemingly unique class of high-temperature superconductors. High transition temperatures in these materials cannot be explained by the conventional phonon-mediated mechanism of superconductivity. The electronic phase diagrams of iron-based superconductors have a lot in common with those of heavy-fermion superconducting materials, which are prototypical of unconventional superconductors although their transition temperatures are rather low. Thus the iron-based superconductors have provided a new platform of the studies of unconventional superconductivity, which include important subjects of condensed matter physics such as electron correlations, quantum phase transition, non-Fermi liquid properties, and novel ordered phases. We review important aspects of magnetic, electronic and superconducting properties in the iron-based materials recently revealed from several precise measurements by using high-quality single crystals.

本誌を複製される方に (Notice about photocopying)

(参照: 本誌 **47** (1992) 4 号会告)

本誌に掲載された著作物を複製したい方は, (社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り, 日本物理学会が複写権等の行使の委託をしている次の団体から許諾を受けて下さい。
 (In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright clearance by the copyright owner of this publication.)

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
 一般社団法人学術著作権協会
 電話 03-3475-5618 Fax 03-3475-5619 info jaacc.jp

アメリカ合衆国における複製については, 下記 CCC に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.
 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
 Phone 1-978-750-8400 Fax 1-978-646-8600

なお, 著作物の転載・翻訳のような, 複製以外の許諾は, 直接日本物理学会へご連絡下さい。

ヘリウムプラズマ照射により高融点金属表面に形成されたナノ構造

高村 秀一 〈愛知工業大学工学部 470-0392 豊田市八草町八千草 1247 〉

梶田 信 〈名古屋大学エコトピア科学研究所 464-8603 名古屋市千種区不老町 〉

大野 哲靖 〈名古屋大学大学院工学研究科 464-8603 名古屋市千種区不老町 〉

タングステンに代表される高融点金属のヘリウム損傷はヘリウム・バブル形成を中心にその物性への影響が核融合科学において調べられてきた。しかしある温度範囲では表面形態が著しく変化し、繊維状のナノ構造が綿毛のように形成されることが最近見いだされ、注目を浴びている。タングステン繊維形状の温度特性や繊維内のナノバブルの存在から、その形成過程には粘性を考慮した流体力学的視点が関わっているようである。このようなナノ構造がプラズマと向き合うと2次電子放出の抑制、スパッタリングの著しい減少、完全黒体に近い放射冷却、プラズマ塊衝撃に対する耐性などの新たな表面特性が生み出される。また、50年来の課題であったプラズマ中の単極アークの制御の観点から放電・プラズマ物理に新風を吹き込んでいる。ナノ構造はヘリウム効果によるものだけではなく、多様な粒子入射条件下で類似の構造が種々の固体材料に見られるのも興味深い。また、このような構造は産業応用へのポテンシャルを内在しているのではないと思われる。本稿ではこれら学際的視点から解説を試みている。

1. はじめに

核融合エネルギーの利用に向けた努力が国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画を機軸に進められている。克服すべき幾つかの課題の一つに炉周辺部に流れ出すおびただしいプラズマ熱・粒子の制御がある。¹⁾ このような高熱流のプラズマと向き合える材料は限られ、現在のところ ITER ではタングステン (以下 W と省略) と黒鉛が候補として挙げられている。当初は、両者を炉内で使い分けて、段階を追って W に集約していこうという考え方であった。黒鉛はこれまで炉壁材料として核融合プラズマ実験装置において使われてきた実績と信頼があったからである。しかし、重水素と共に核融合反応の燃料である放射性のトリチウム (三重水素) が黒鉛内部に多量に残存することが問題となり、将来の原型炉も見据えて、ITER では最初から黒鉛を廃して W を採用しようという動きが出てきて、W に対する研究が一気に加速し始めた。特にダイバータと呼ばれる高熱流プラズマが集中するプラズマ対向壁における W の特性が現在脚光を浴びているという状況にある。

ヘリウム (以下 He と省略) は核融合反応の結果生まれるアルファ粒子 (生まれた時のエネルギー: 3.5 MeV) そのものである。閉じ込められたプラズマの高温を維持するためにそのエネルギーをプラズマに与え、最終的にヘリウム灰としてダイバータ領域において水素プラズマに10%程度混ざる形で存在する。これらがダイバータ板で中性化して炉外へ排出される。主要なプラズマ対向壁であるダイバータ板へは 10^{23} 個/($m^2 \cdot s$) 程度の大量の He 粒子束が襲来する。プラズマと固体表面が接する境界では、図1にその電位分布を示すようにプラズマ・シースと呼ばれる空間電荷層が形成される。²⁾ 問題にしているプラズマは身軽な負電荷を持つ電子と重くて動きのゆっくりした正イオンとで構成されており、壁への電荷流入平衡 (浮遊条件と呼ばれることもあり、正味の電流が流れ込まない状態) のため、プ

ラズマ電位 ϕ_p に対して、壁は負の電位 ϕ_w を持つ。このため、移動度の大きい電子による過剰な負電流を制限する。逆にこの電位差により正イオンは壁に向かって加速されて、壁表面に衝突する。前述の He イオンも同様であり、熱エネルギーに加えてこのシース電圧による加速分が壁への衝撃エネルギーとなる。ダイバータ領域におけるプラズマ温度にも依るが、この衝撃エネルギーは 100 eV 前後以下程度であり、そのため He は金属表面からせいぜい数十 nm 程度の侵入長を持つに過ぎない。しかし表面の障壁ポテンシャルを乗り越えれば表面近くではあるが固体内部に入り込み、拡散する。これらの He が He 照射効果と呼ばれる多様な現象を固体表面に生み出すことになる。

本解説では、He 損傷の中でも想定されるダイバータ壁の動作温度領域にある W の表面に形成される繊維状あるいは樹枝状のナノ構造に焦点を当て、その形状、形成機構、そしてプラズマと向き合ったときの特性について解説を試みる。He がもたらすこのような「損傷」は固体中の欠陥形成であり、He のかわりに中性子の場合には原子炉内機器の損傷とも共有する性質である。また、意図的に電子

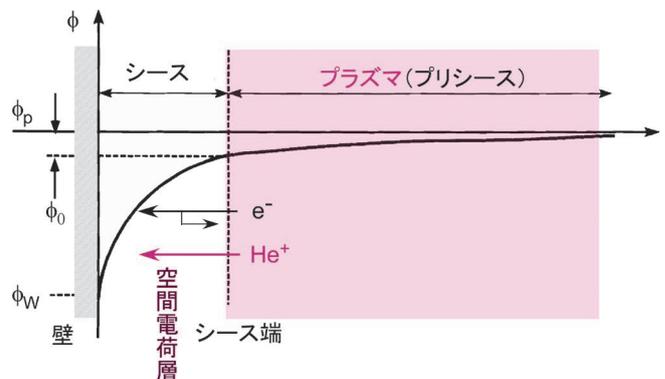


図1 プラズマ対向壁と、それに向き合うプラズマとの境界領域。プラズマ・シースはイオンの正電荷が優勢な空間電荷層である。プラズマ電位 ϕ_p と壁の電位 ϕ_w の差がシース電圧となる。 ϕ_0 はシース端の電位である。

ビーム入射やイオン打ち込みにおいて現れる、各種物質の状況にも類似する。これらの場合においては規則的なナノ構造が形成されることがあり、この点についても触れる。形成機構における粘性流体力学的扱いを含めて、プラズマ、放電、固体物性、流体等の広い分野の方々に興味を感じていただければ、筆者の望むところである。

2. 金属表面におけるナノ構造形成

2.1 バブル/ホールの形成

核融合において特有のガス種である He の材料への照射効果は、固体の格子の転移やバブル形成に関連してこれまで調べられてきている。³⁾ 一方で、中性子が材料原子と (n, α) の核変換することによって He を生成し、その結果材料の照射硬化やそれに伴う、低温での脆化を促進するという観点からも調べられてきている。前者に関しては、He の重照射によりマイクロなバブルやホールの形成にまで至っている。バブルが表面にまで達するとホールとなって現れると考えられる。図2はその典型的な例である。⁴⁾ 森下氏の解説を引用する形で説明しよう。⁵⁾ He 原子は閉殻構造を持っていることが出発点である。「金属中に打ち込まれた He 原子は金属中の格子間位置において居心地が悪く (形成エネルギーが高い)、居心地のよい位置を見つけるために、素早く格子間を駆け巡っている (移動エネルギーが低い) ことになる。…居心地のよい場所というのは原子空隙やボイドおよび表面・粒界・転移などにある空隙の部分と言われている。」金属原子と He 原子の相互作用ポテンシャル・エネルギーは両者間のどの距離においても正の値であり、He-He の間のそれよりも大きい。「He 原子が周囲を金属原子で囲まれるよりは、He 原子で囲まれた方が系のエネルギーが小さくなる可能性を示している。すなわち He 原子は金属内でバラバラに存在するよりも、集合化したほうがエネルギー的に有利である。…このような欠陥集合体の形態を He バブル (気泡) と呼ぶ」。

実際に第一原理計算により W の単一空格子の中に幾つの He 原子が入り得るかエネルギー的考察がされている。そこでは少なくとも 14 個の He が含まれることが核融合研の中村氏のグループによって調べられている。⁶⁾ またバブルの拡散、結合、表面での気孔化に関して、これらの基礎反応率を与えて、小さな初期バブル分布条件の下、それ

	$2.6 \times 10^{21} / \text{m}^2$ $3.7 \times 10^{21} / \text{m}^2$	$0.9 \times 10^{22} / \text{m}^2$ $1.2 \times 10^{22} / \text{m}^2$	$0.8 \times 10^{22} / \text{m}^2$ $1.1 \times 10^{22} / \text{m}^2$	$0.8 \times 10^{22} / \text{m}^2$ $1.1 \times 10^{22} / \text{m}^2$
照射量				
イオン粒子束				
照射時間	7200 s	7200 s	7200 s	7200 s
表面温度	2100 K	2600 K	2200 K	2950 K
表面	W1 ~30 eV	W2 ~10 eV	W3 ~5 eV	W4 ~1 eV
断面				

図2 W 表面に形成された He バブル/ホール。W1~W4 はイオンの入射エネルギーの違い。⁴⁾

解説 ヘリウムプラズマ照射により高融点金属表面に形成されたナノ構造

らのダイナミクスを追っていく運動論的モンテカルロ法を用いて He バブルの時間発展挙動が調べられている。⁷⁾ このシミュレーションは W 中に生成された He バブルが W 中を熱的に動きまわり合体して大きくなり図2に示すような構造を生み出すことをよく再現している。W の場合は高温の 1,600 K 程度以上においてこのようなバブル/ホール (ボイド) を形成することがわかっている。このような構造を生み出す入射 He イオンの閾値エネルギーもプラズマの性質をうまく活用して調べられており、約 6 eV という極めて小さなエネルギーが表面のエネルギー障壁を乗り越えるのに必要であると考えられている。^{2,8)} 高温で形成されるバブル/ホールを表面を持つ W の表面特性として光学反射率の低下や光吸収の増加、熱伝導の低下が調べられている。^{2,9,10)} 前者の光学特性の変化は高融点金属鏡面をプラズマや炉内壁計測用に核融合炉内に設置する光学反射鏡として用いる場合の懸念材料として調査されつつある。

図3は He 照射の有無による W 材料を溶接するために必要なレーザーエネルギーの閾値の変化を示したものであり、照射損傷 W はその閾値が極めて低くなっている。用いられた Nd-YAG レーザーはパルス幅が 5-7 ns と極めて短いこととプラズマ負荷ではない点は留意する必要がある。損傷表面をサブサーフェイスとみなすと、その層の熱伝導が悪くなった点とレーザー光の吸収率の増大の双方から説明されよう。¹⁰⁾

2.2 繊維状ナノ構造形成の観測

核融合炉において W 表面にマイクロなバブル/ホールが成長形成されるのは、プラズマの崩壊 (ディスラプション)

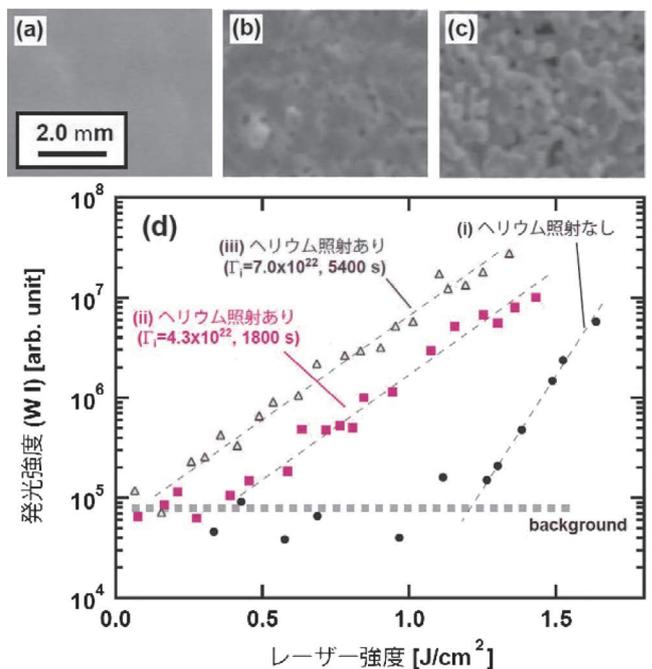


図3 バブル/ホールが形成された W 表面の熱伝導異常に基づくレーザーアブレーションの発生。バブル/ホール形成によりレーザーエネルギー閾値の減少を示す。¹⁰⁾ (a) は水素プラズマ照射後、(b) と (c) はヘリウム・水素混合プラズマ照射後の表面 SEM 画像。(a)~(c) はそれぞれ (i), (ii), (iii) に対応する。

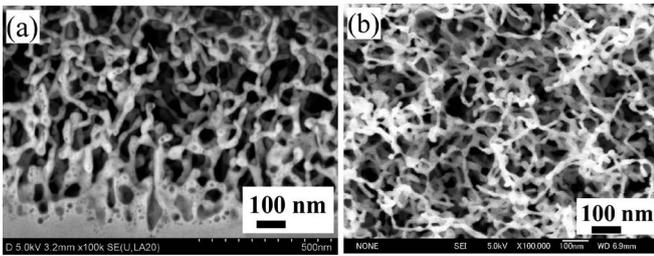


図4 W表面に形成されたナノ構造. 断面図(a)と、上面図(b). 繊維状のWファイバーの太さは数十nm程度. ファイバーの中や根元にはHeの詰まっている小さな多数のナノバブルが見てとれる.(フルカラー口絵参照.)

が起こった時とか閉じ込め周辺部に蓄えられているプラズマ・エネルギーが周期的に解き放たれるELMと呼ばれるパルス熱負荷の場合に想定されるような高温であろう. 定常プラズマ負荷で考えられている, もう少し低温, 具体的には1,000-1,400 K程度においてはWの表面形態はバブル/ホールの場合から一変する. 図4にFE-SEMで撮影された例を示す. 不思議なことに繊維状のWファイバーの森が形成される. 少し低倍率の通常のSEMで観測するとファイバーの集合体が綿毛のように見えるので, 「fuzz」と呼ばれることもある. 名古屋大での我々のグループが初めて黒鉛に被覆されたW表面においてこれを発見した.¹¹⁻¹³⁾ 広い波長にわたる光を吸収してしまうので肉眼では真黒に見える. これより10年前, 1997年にマイクロなバブル/ホールを偶然発見した10 cm角のW試料へも, 円筒ヘリウムプラズマを照射していたことが想起される. この際同心状に外側ほど温度が下がっている, 中心は溶融していたのがその外側にバブル/ホール領域があり, ついで繊維状ナノ構造, そして無損傷の領域が存在していたはずであった. 当時, 空間分布にわたって詳細に観察を行っておれば, ナノ構造形成研究の展開は10年早く進展したと悔やまれる.^{2,14)} いずれにしてもこの不思議な形態は多くの研究者の関心を引くと共に, その形成は核融合炉壁として危惧された. 何故ならばこの構造が熱的・機械的に脆弱であり, 表面溶融を助長したりダスト等になって炉心にWを混入することになりかねないと考えられたからである.¹⁵⁾

繊維状ナノ構造の成長に関して, 実験的にサブサーフェイスとしての層厚の成長速度が時間の平方根に比例すること¹³⁾やバブルを含むファイバーの形態¹⁶⁾などが詳しく調べられた. 金属表面に打ち込まれたHeは前述したようにバブルを形成し易い.^{5,17,18)} 従ってバブルに由来していると思われる繊維状ナノ構造はWに限らず広く金属に見られるのではないかと考えられる. これに関して初期的な報告がある.^{16,19,20)} 愛工大でもコンパクトなプラズマ発生装置²¹⁾を用いてモリブデンのナノ構造形成が確認されている. ファイバーの太さがWの場合の2倍程度太く, 形成される温度の上限はWより低く1,000 K程度, 下限は780 K程度であることが熱電対計測でわかっている.

2.3 種々の物質におけるナノ構造形成の例

ここで, 種々の物質表面における, fuzzとは違った形で

はあるがナノスケールの構造形成に触れて, 現象を広く共有したい. 次の4種類に分類することを試みた. (1) 電子線照射,^{22,23)} (2) ボイド形成,²⁴⁾ (3) ボイド格子,^{25,26)} (4) スパッタリング.²⁷⁻²⁹⁾ まず(1)については, 0.4-1 MeVの電子線を金(Au)結晶に照射することによってナノホールが結晶方位に沿って構造形成することが見出されている. この現象は電子線が「置換衝突連鎖による表面空孔の長距離移動」をもたらすことによって, ナノパターンを形成するとしている. また, 200 keVの電子線照射を受けたシリコン結晶は室温以下において数nmサイズのシリコンナノホールの整然としたアレイを生成し, 空間フーリエ成分が十分識別できる規則正しさを有している.

(2) 60 keVのSnイオンをGaSb結晶に打ち込んだ時, ボイドの形成により蜂の巣状のセルが形成される点の特徴である. 壁の厚さ10 nmのセルの高さが100-200 nmにもなり, 断面を一見するとWのナノ構造に類似的である.

(3) 2 MeVの窒素イオンを高純度のMoに照射するとボイドが規則正しくb.c.c.の格子状に配列することが観測されている. このような3次元の超格子がMoのみならず, W, Nb, Taなど多様な金属で観測されており, ボイドとボイドの間の弾性相互作用などを基礎に物理機構が研究されている.

(4) 高い配向性を持つ黒鉛や単結晶Siへ数keVの希ガスイオンを打ち込むと, 規則性のあるナノメータ・リップルが波長40-70 nmで現れる. これはスパッタリングの角度依存性や結晶面によるスパッタ収率の違いがこのようなリップルや規則的なマイクロのピラミッドを作り出していると考えられている.

(1)~(4)以外にもGeをSi表面に厚さ0.6 nm程度薄く堆積させた場合に自己アフィンなフラクタル・パターンが観測されたりしている.³⁰⁾

3. ナノ構造の温度変化などに対する応答

W表面に形成されたナノ構造は外部条件の変化に対してロバストなのだろうか. 核融合炉壁の場合には, たとえ装置が定常運転されていても, 前述した周期的パルス熱負荷にさらされたりするため, 表面温度の時間的変化を経験することになる. このような温度履歴効果のためのモデル実験においてナノ構造形成後試料のバイアス電位をプラズマ電位に近づけ, プラズマ電子熱流によって過渡的に昇温した結果を図5に示す.³¹⁾ 昇温のためのプラズマ照射時間よりもどれだけ高い温度に保持されたかに表面形態は敏感であることがわかる. 特徴的な点は繊維状Wファイバーが太く短くなる点である. まったく同じではないが, 類似の表面形態がトカマク型核融合プラズマ実験装置 Alcator C-ModのWダイバータ領域の壁において観測されているのは興味深い.³²⁾ 気泡を含んだ飴のような応答は, ナノ構造の形成機構を考える上で強い示唆を与えるものと考えられる.

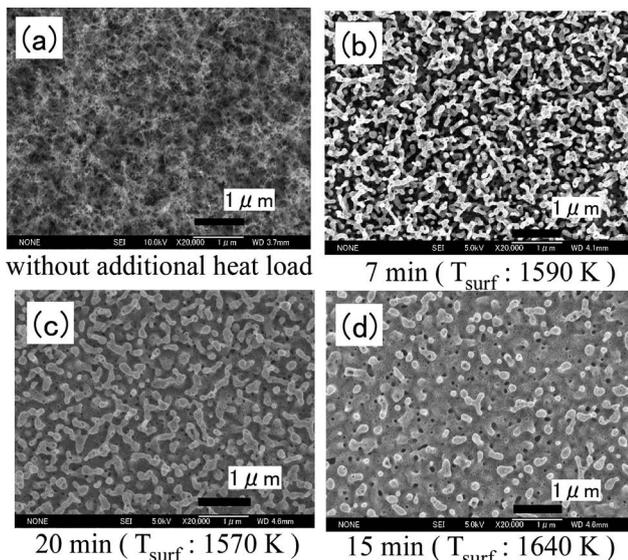


図5 W表面に形成されたナノ構造の温度履歴効果。³¹⁾ ナノ構造形成のためのHeイオン粒子束は $8.6 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、イオン・エネルギーは45 eV。(d)の場合のイオン追加フルーエンスは $1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 、その時のイオン・エネルギーは25 eV。(フルカラー口絵参照。)

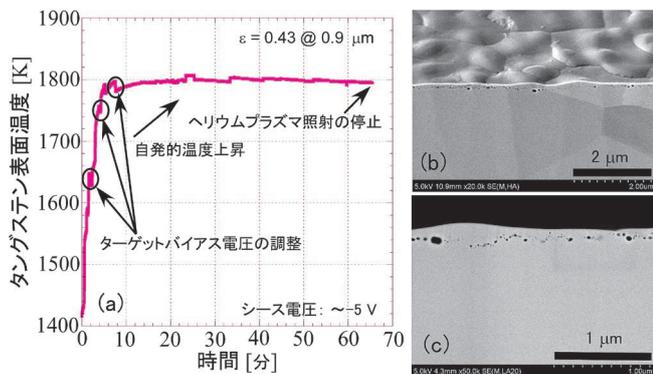


図6 ナノ構造に対するプラズマ・アニーリングの効果。³⁵⁾ (a)は時間経過、(b)と(c)はアニーリング終了後の斜めから並びに断面のSEM画像。(フルカラー口絵参照。)

このモデル実験を発展させたものが修復の試みである。^{33,34)} ナノ構造形成温度より数百度高温に保持し、言わばプラズマを用いたアニーリングを実施した結果を図6に示す。³⁵⁾ この場合Heプラズマを採用したとしてもHeイオンの入射エネルギーを著しく小さくして表面の障壁エネルギーを超えない状況で、プラズマ電子の熱流によって昇温することが可能である。後でプラズマの熱伝達係数の項で詳しく紹介するが、プラズマ電位近くにまでWターゲット板の電位を持ち上げることによって実現される。表面にはもはやファイバーは認められず数ミクロンの大きさ(結晶粒塊)で仕切られたやや起伏のある表面が見えるのみである。しかし断面を観察すると表面から約100 nmの深さに、Heバブルがしっかりと残存しており、バブルのロバスト性がこのような面でも見られる。このような表層は熱伝導が物質の固有値から著しく小さいサブサーフェイス層として働く可能性が残る。

そもそも繊維状ナノ構造の形成はHeバブルが出発点で

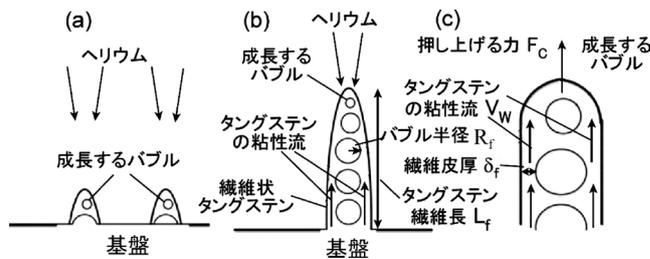


図7 繊維状ナノ構造形成に関する粘弾性モデル。

あることに間違いはない。バブルができるためには金属内にHeが入り込むことにより始まる。もし、このようなナノ構造が核融合の達成に危険であるとしたら、形成抑制の方策を考えなければならない。すなわちHe原子が金属中に侵入するのを防ぐことが考えられる。我々は一つの試みとして、W表面に炭素膜を形成してその結果を調べたところ、100 nm厚の炭素膜は完全にナノ構造形成を抑制することがわかった。¹⁵⁾ Heイオンの飛程を考えれば当然であろう。オールW炉壁に何故炭素を持ち込むかという点は議論のあるところであるが、熱的溶融防護の役割も含めて、意外と炭素はこのような形で核融合炉内材料として生き残るかもしれない。また、炭化タングステン(WC)へ化学変化することが異なる効果を持つであろうか。ITERの場合は第一壁にBeを採用しているの、これが炭素の役割を果たしてWのナノ構造は形成しないかもしれない。しかしBeも金属であるのでHeバブルはできるのであろうか。

4. 繊維状ナノ構造の形成モデル

前節では繊維状ナノ構造形成はあたかも気泡を含んだドロドロした水飴のような性質で起こっていることが感覚として捉えられたかと思う。ナノ構造形成に関して粘弾性的モデルがKrusheninnikovによって提案された。³⁶⁾ 彼は必ずしも固体物性の専門家ではないが、実験事実^{13,16)}を注意深く検討し、Wを連続体とみなしてこのモデルに行き着いたと考えられる。彼の論文に沿ってこれを紹介しよう。W粘性流を記述する非圧縮性の流体方程式

$$\nabla \cdot \bar{\sigma} = \mu(T) (\nabla \cdot \nabla V + \nabla \nabla \cdot V), \quad (1)$$

を出発点とした。ここで $\bar{\sigma}$ は応力テンソルであり V はWの流れの速度、 $\mu(T)$ はその粘性率であり、活性化エネルギー eE_μ を用いてアレニウスの

$$\mu(T) = \bar{\mu} e^{eE_\mu/kT}, \quad (2)$$

と書かれる温度依存性がある。Wの場合、 $E_\mu = 0.71 \text{ eV}$ 、 $\bar{\mu} = 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。³⁷⁾ 低温では粘性が大きく、物質の大局的な移動はないが、高温では粘性が低下すると、大きな移動すなわちクリープが重要になる。 $T = 1,000 \text{ K}$ では $\mu \sim 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ となり、この値はガラスが軟化しかけたくらいの粘性率に相当する。

図7に基づいて説明しよう。(c)においてファイバーを

押し上げる力 F_c と半径 R_f のバブル内の He 圧力 P_{He} との関係は

$$F_c = P_{He} \pi R_f^2. \quad (3)$$

γ を W の表面張力とすると

$$P_{He} \approx \frac{2\gamma}{R_f}. \quad (4)$$

ファイバーの皮 (厚み δ_f) の部分での応力は次のように評価される。

$$\sigma_0 \approx \frac{F_c}{2\pi R_f \delta_f} \approx \frac{2\gamma}{2\delta_f} \quad (5)$$

式(5)を式(1)に代入して、 V_W がファイバーに沿って (ℓ の方向) 変化せずファイバーの径方向に直線的に変化するとすれば

$$\frac{\partial \sigma_{\ell}}{\partial \ell} \approx \frac{\sigma_0}{L_f} = \mu_W \frac{V_W}{\delta_f^2}, \quad (6)$$

ここで L_f は図7(b)に示されているようにファイバーの長さを示すので、 $V_W = dL_f/dt$ である。したがって式(5)より

$$L_f(t) = \sqrt{\frac{2\gamma\delta_f}{\mu_W} t} \quad (7)$$

となり、実験的に見出されている、ナノ構造の層の厚みが \sqrt{t} に比例することと符合する。¹³⁾

本モデルではファイバーには He がほぼ満ちていると仮定し、ファイバーの成長のためにはヘリウム粒子束に下限があるとして、1,500 K では $\Gamma_{He}^{min} \approx 10^{22}$ 個/($m^2 \cdot s$) が得られ、実験値に近いと述べている。しかし閾値の振る舞いが実験的に明確に示されているわけではないので、注意が必要である。

一方、温度に関しては、高温になると脱捕捉によりバブルからの He の供給が減少する。このバランスから本モデルでは成長が停止する温度として

$$T \geq T_h \approx \frac{e(E_{tr} - E_{th})/\kappa}{\ln\left(\frac{V_{th}^h \bar{\mu} R_f}{\gamma \delta_f}\right)} \quad (8)$$

を与えている。 $E_{tr} \approx 3-5$ eV は捕捉ポテンシャルであり、 $V_{th} \approx 10^3$ m/s は He 原子の熱速度である。 $T_h \sim 2,000$ K をこの式から得ている。実験値に近い。

以上の塑性変形モデルを検証するには、理論的には分子動力学を用いたシミュレーションが、³⁸⁾ 実験的には多様な金属においてナノ構造形成のための温度範囲と粘性係数との関係や必要な He 粒子束密度を明らかにすることであろう。文献38においては、せん断応力負荷条件下で He 密度増大による降伏強度の低下が示され、また W の流れは He クラスタをバブルへと合体凝縮していくことを促進することも明らかにしている。

上記モデルからは前述のようにファイバーはヘリウムでほぼ満たされていることが予想されるが、He 量を評価すると期待したほどの量ではないという報告がある。加えて、このモデルではファイバーへの He 供給はベースから行わ

れることになるが、ファイバーのジャングルの中を He は如何にしてベースに到達できるのかという困難もある。これらの観点を満足する理論モデルが望まれるところである。³⁹⁾

5. ナノ構造形成タングステンの表面特性

5.1 2次電子放出の抑制

プラズマ対向壁としてプラズマと向き合う W の特性を、特にナノ構造形成がどのような効果をもたらすかという観点から次に見ていこう。図8(a)は W ターゲットが He プラズマ照射を受け始めた時点時刻 $t=0$ として、ターゲットに流れる電流と放射温度計で測定されたターゲットの表面温度の時間変化を示す。⁴⁰⁾ まず $t=0$ で浮遊電位が -40 V で、その時の表面温度が $1,470$ K。電位の基準は真空容器であるが、プラズマ電位はそれより約 $+5$ V 高い。この状況は図8(c)の A 点に相当する。数分経過した後、ターゲットのバイアス電位を外部から -50 V に設定した時点が B 点で、イオンが優勢なバイアス電流が流れる。(b₁)に示すように熱伝達係数が下がるので $1,410$ K と表面温度が下がる。これが B 点。30分経過するとバイアス電流が零、すなわちバイアス電位 -50 V が浮遊電位に丁度一致し、その後電子が優勢なバイアス電流に変化し、熱伝達係数すなわち入力パワーに大きな変化がないにもかかわらず温度は $t=130$ 分で $1,180$ K まで低下する。これが C 点に相当する。こ

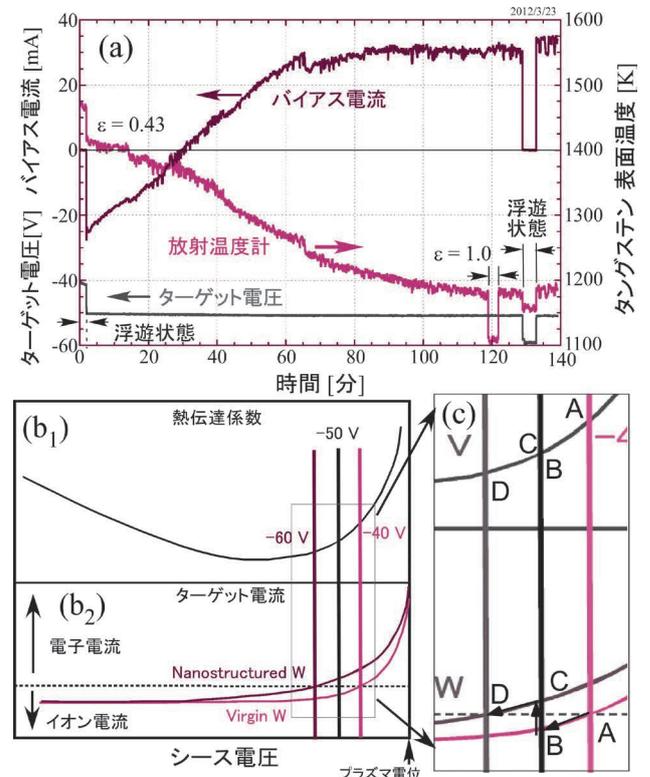


図8 (a) He 照射を受け始めてからナノ構造が形成されるまでのターゲットに流れる電流とターゲットの表面温度の時間変化。ターゲットは最初、電的に浮遊状態の後、 -50 V の一定のバイアス電位を加え、経過の最後の方で一時的に浮遊状態になっている。(b₁)は熱伝達係数のシース電位依存性の概容、(b₂)はターゲットの電圧・電流特性の概略図を示す。⁴⁰⁾

ここで再び浮遊状態にすると浮遊電位は当初より20 V深い、-60 Vとなり、みかけの温度(分光放射率 $\epsilon=0.43$)も熱伝達係数の下がりに対応して1,160 Kとなる。これがD点を表す。同じ浮遊条件で比較すると310 Kの温度低下がナノ構造形成によってもたらされる。これは、次節で紹介するように黒色化した表面からの黒体放射が著しく増加したことによる。

一方、浮遊電位の著しい低下は何を意味するのであろうか。図8(b₂)に示すように浮遊電位とはターゲットに流入するイオン電流と電子電流がバランスする電位である。無損傷Wは、実験で使用されたプラズマ発生装置AIT-PID²¹⁾の特徴であるエネルギーの高いプラズマ電子の衝撃を受けて2次電子を出し、正味の電子電流を減らしているので、⁴¹⁾ターゲット電位を本来の-60 Vより浅くしてバルクのプラズマ電子が入りやすいようにして電流バランスを取ろうとしていたのである。

しかしW表面にナノ構造が成長すると、Wファイバーのジャングルから2次電子は抜け出して、プラズマの領域に出てくるのが難しくなり、⁴²⁾本来の浮遊電位に近づこうとして-60 Vになると考えられる。すなわちナノ構造は2次電子放出を抑制する機能を持つことになる。⁴³⁾核融合の立場からは、2次電子放出の抑制はプラズマ熱流入を抑える効果を持つので、好ましい機能が現れたといえることができる。

図8(a)で時刻120分に放射温度計の分光放射率を1.0として測定したのは、この時点では分光放射率は放射温度計の検出赤外線波長0.9 μm に対しても、無損傷Wにおいて正しい0.43よりも黒体である1.0に近いということに基づく。従って浮遊状態での真の温度は1,100 K以下となり、正しい表面温度低下分は370 Kにも達する。

詳しくは述べなかったが、2次電子放出は高速電子によってもたらされるものが主要であるが、Heのような希ガスイオン入射によっても放出することを確認している。⁴⁰⁾運動論的放出以外にHeイオンの電離ポテンシャル・エネルギーを吸収してオージェ効果で放出されるものも含まれていると考えている。⁴⁴⁻⁴⁶⁾これらの電子の放出もナノ構造形成で抑制される。

このような電子放出は少なくとも仕事関数に相当するエネルギーを奪って行われるはずであるので、粒子バランスだけではなく、Wターゲットのエネルギー収支にも影響するはずである。この点については5.3節で再び議論を深めたい。

5.2 黒色化したナノ構造形成Wの全放射率の評価

これまでにも繊維状ナノ構造を形成した金属は黒色化していることを述べてきた。ここでは全放射率の定量的な評価を紹介する。そもそも高温物体からの放射はプランクの放射則によって記述される。この中には分光放射率 $\epsilon(\lambda, T)$ を含み、これは温度 T と波長 λ の関数である。プランクの式を波長にわたって積分することにより、全放射率 $e_t(T)$

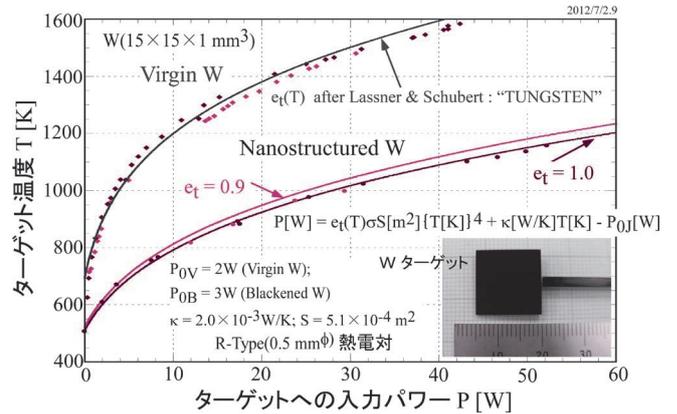


図9 電子ビームによるWターゲットへの入射パワー P とR型熱電対で測定されたWの温度 T の関係。極細熱電対からの熱伝導損失とプラズマ生成用陰極からの熱入力をそれぞれ κT と P_0 としてパワーバランスに追加している。これらは互いに相殺し、全体として10%程度の寄与しかない。¹⁵⁾

を求めることができる。

$$e_t(T) = \frac{\int_0^\infty \epsilon(\lambda, T) (2hc^2/\lambda^5) (d\lambda/e^{hc/\lambda kT} - 1)}{\sigma T^4} \quad (9)$$

ここで σ はシュテファン・ボルツマン定数、 h はプランク定数、 c は光速である。損傷のないWの分光放射率と全放射率は既に知られている。⁴⁷⁾この全放射率を用いると、表面からの放射パワー密度 P_r はシュテファン・ボルツマンの関係式

$$P_r = e_t(T) \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (10)$$

より求めることができる。ちなみに1,000 Kでの無損傷Wの全放射率は0.14、1,500 Kで0.20である。式(9)を用いて光学的にナノ構造Wの全放射率を測定する試みが梶田等によってなされている。^{10, 48)}本稿では電子ビームを用いて、加速電圧とターゲット電流の積から算出される既知の入力パワー P と熱電対で測定された温度 T から全放射率 $e_t(T)$ を評価した結果を紹介する。図9にその詳細を示す。¹⁵⁾横軸はW板に入射された電子ビームパワー P であり、縦軸は板面に平行の小穴に挿入された熱電対によって測定されたWのバルクの温度 T である。W板は厚さが1 mmと薄いので、これは表面の温度であると見なすことができる。マーク点が実験結果を示す。パワーバランスを

$$P_r = e_t(T) \sigma S T^4 + \kappa T - P_{0J} \quad (11)$$

と書いて得た曲線も併せて示されている。右辺第1項は式(10)に相当する。 S は巨視的な幾何学的表面積である。第2項は熱電対を通しての熱伝導、第3項はターゲットから約13 cmの位置にあるプラズマ生成のためのLaB₆陰極(温度約1,500 K)からのわずかな熱入力を表す($J = V$ or B)。第1項以外は全体で約10%以下の寄与しかない。用いられたR型熱電対は熱伝導損失を小さくするため直径0.5 mmの極細シーズのものが採用されている。

無損傷Wの P - T 特性は全放射率に関する既存のデータ⁴⁷⁾を用いて再現できることが確認された。一方、黒色

化したWについても同様の実験が行われ、得られたP-T特性を式(11)で再現するには全放射率を1.0にする必要があり、ナノ構造形成Wはほぼ完全黒体であることが確認された。

同じ温度を得るにはナノ構造形成Wは無損傷Wに比して約6倍のパワーをつぎ込まなければならないことがわかる。逆に同じパワーでは温度差は400 K程度になることがわかる。

5.3 プラズマ・シースを介しての熱伝達係数の評価

プラズマ・シースを介して固体表面に流入するプラズマ粒子パワー $P = P_e + P_i$ を電子温度 T_e とイオン粒子束 I^+/e の積で割って得られる無次元量を熱伝達係数 δ と定義する。すなわち

$$\delta = \frac{P_e + P_i}{T_e \cdot (I^+/e)} \quad (12)$$

すでに図8(b₁)に概略的な熱伝達係数のプラズマ・シース電圧依存性を示した。熱伝達係数は核融合におけるプラズマ熱流制御においては、重要な意味を持つ物理的指標である。²⁾ マクスウェル分布したプラズマの場合には、この熱伝達係数の最小をもたらすシース電圧は浮遊電位とほぼ一致し、プラズマは自ら熱絶縁性を持つと考えられている。しかしこれまで議論してきたように2次電子放出があったり、プラズマ粒子のエネルギー分布がマクスウェル分布からずれたりすると、この好ましい性質が破られることは、図8で見てきた通りである。理解を深めるために、図1に示すプラズマと壁の間に形成されるプラズマ・シースの電位関係をもう一度見よう。シース電圧 $\phi_p - \phi_w$ が大きくなるとプラズマ電子は固体壁に到達できなくなり、イオンの衝撃エネルギー P_i が熱流の主体となる。一方、壁電位 ϕ_w が浅くなると、電子にとってポテンシャル障壁が低くなり、電子熱流 P_e が主要となる。壁へ衝突するイオンは持っていた運動エネルギーをすべて壁に与えるのではなく、どれだけかは反射するときにも残す。この割合をイオンのエネルギー反射係数 R_{iE} と呼ぶ。

上述のプラズマ熱流入に加えて、入射イオンが壁表面で表面再結合して、電離ポテンシャル・エネルギーを壁に解放する分を加えた、熱伝達係数に関する簡単な評価結果を2電子温度Heプラズマに対して、高温電子成分の割合をパラメータに示したのが図10である。⁴⁹⁾ ただし、ここでは $R_{iE} = 0$ 、すなわちイオンの衝撃エネルギーはすべて壁に吸収されると仮定している。

では実際にはどうなのだろうか。その結果を、ナノ構造形成Wと無損傷Wの両方において高エネルギー電子成分を含む非マクスウェル分布Heプラズマに対して実験的に求めた結果が図11である。⁴⁹⁾ まずナノ構造形成Wに注目すると、図10の中の高エネルギー密度比 $\alpha \sim 5\%$ の曲線と比較的良く一致している。ただし、 R_{iE} は0ではなく、0.25程度と評価される。 R_{iE} は別にデータ・ベースがあり He \rightarrow W の垂直入射に対しては問題にしているエネルギー範囲で

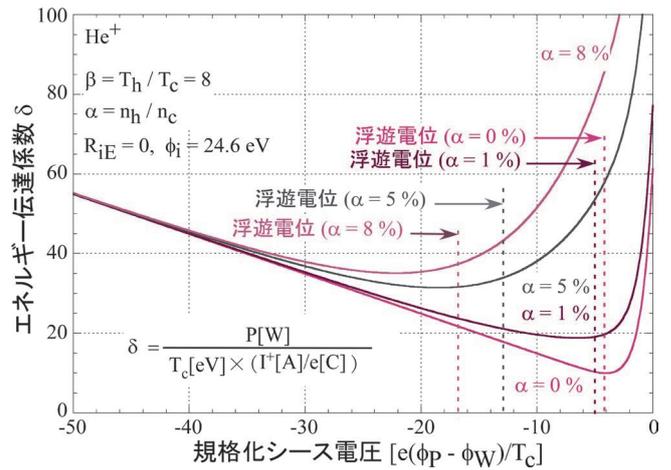


図10 二電子温度プラズマに対するエネルギー伝達係数 δ の規格化シース電圧依存性に関する単純な理論。 ϕ_i は He の電離ポテンシャル。イオンのエネルギー反射係数 R_{iE} は0と仮定している。パラメータ α は高温電子成分の割合。

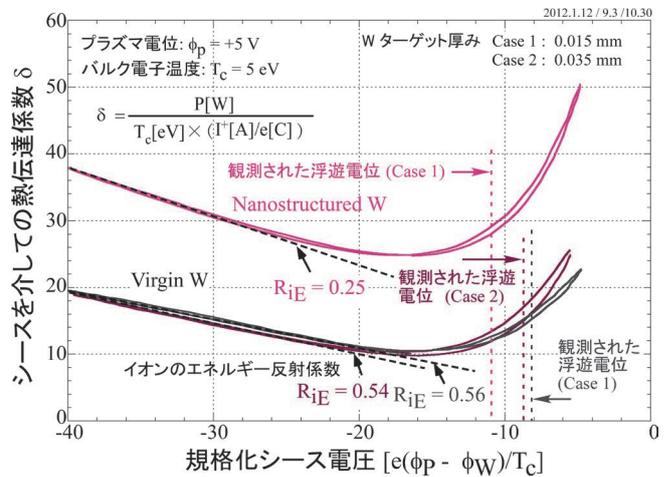


図11 プラズマ・シースを介しての熱伝達係数の規格化シース電圧依存性。対象としたターゲットは無損傷Wとナノ構造が形成されたW。Heプラズマは低温電子温度が5 eV、高温電子温度は30 eV。高温電子成分の割合は8%程度。高温電子成分のエネルギー分布はマクスウェル分布ではなく、100 eV以上のエネルギーの電子がない、エネルギー・カットオフのある分布。⁴⁹⁾

0.38-0.45程度である。⁵⁰⁾ この値と比較すると小さくなっている。この理由は、表面のナノ構造の存在によると考えている。すなわちファイバーに何回か入射イオンが衝突して十分にその運動エネルギーを壁に与える可能性が増加するためと考えられる。

一方、無損傷Wの熱伝達特性はどうであろうか。イオンのエネルギー反射係数 R_{iE} は0.55程度とやや大きい。これは斜め入射の効果を考慮すると、上述の文献値から大きく逸脱しているわけではなさそうである。問題なのは全シース電圧にわたってナノ構造形成Wの熱伝達係数 δ の値の約半分程度になっている点である。一つには R_{iE} が2倍になっているのでイオンの熱流束が半分近くになっていることが原因の一つである。しかし浅いシース電圧で電子熱流束が主要な領域でも開きが大きい。2次電子放出に伴ってWから仕事関数分 (4.5 eV) だけエネルギーをWから奪

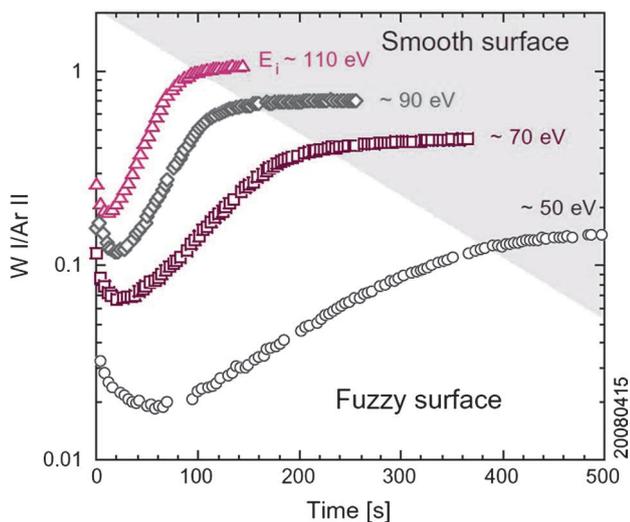


図12 Arによるナノ構造形成Wのスパッタリング特性。スパッタリングに伴う原子発光線WI (波長429.4 nm) 強度とイオン線ArII (波長434.8 nm) 強度の比の時間依存性。パラメータはArイオンの衝撃エネルギー。時間的に変化しなくなった部分が平らなW表面からのスパッタリングに相当する。ArIIで規格化しているのはプラズマパラメータの変動を相殺するためである。⁵¹⁾

い取るので冷却されることを考慮する必要がある。これは電子熱流領域で δ を低下させる方向に働く。オージェ効果による電子放出に対しても同様である。これらを考慮しても両者の差はまだ残りそうである。

5.4 その他の諸特性

プラズマ・シースを介しての熱伝達特性は前節で詳述したところである。一方、繊維状ナノファイバーが密集している“fuzz”と呼ばれている層をサブサーフェイスとみなして、その層の熱伝導度特性を「プラズマ熱負荷」条件で求めた例はまだなさそうである。1 ms程度の時間幅のパルス・レーザー照射によって無損傷Wでは表面が溶融しない程度のパワーでも“fuzz”層の先端部が溶融している例が2.1節で紹介したバブル・ホールの場合と同様に調べられており、実効的熱伝導係数が無損傷バルクWのそれより桁違いに小さくなっているようである。¹²⁾ やはりプラズマでのパルス熱負荷によるサブサーフェイスの熱伝導実験が望まれるところである。何故ならば細かい議論になるかもしれないが、サブサーフェイスへの光子の入り方とプラズマ粒子の入り方が異なるのではないかという危惧からである。

次に物理スパッタリング収率への影響に注目する。おもしろいことに図12に示すように収率が格段に減少することである。⁵¹⁾ 2次電子が繊維状ファイバーのジャングルから抜け出せないのと同様に、スパッタされたW原子がファイバーにひっかかって付着し出てこれないという解釈で良さそうである。^{40, 51, 52)} その時点でのWのSEM断面図と上面図13を図4に示した元来のナノ構造Wと比べてみて欲しい。

3番目の特性は大きなプラズマ熱衝撃に対する応答である。プラズマ銃という高いイオン温度を持つプラズマ塊を

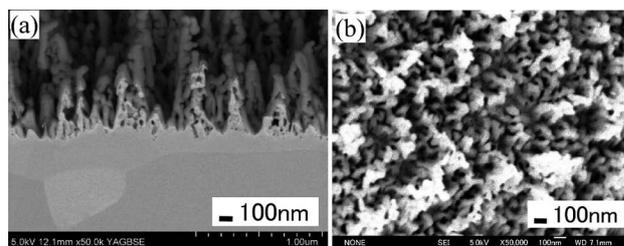


図13 スパッタリング収率が極小になる時点におけるナノ構造形成Wの断面図(a)と上面図(b)のSEM写真。⁴⁰⁾ 元来のナノ構造WのSEM画像である。図4と比較されたい。

打ち出しW表面にぶつける装置を用いて行われている。このようなプラズマ塊を無損傷Wにぶけると、熱衝撃によって無損傷Wにわれ目(クラッキング)が入るのに対し、同じプラズマ衝撃条件下においてナノ構造Wはクラッキングが現れない耐性を示す。^{53, 54)} この特性や、前述のスパッタリングの抑制、黒体輻射冷却の向上、2次電子放出抑制による浮遊電位が浅くなること⁵⁵⁾を防ぐ特性などは核融合にとって望ましい特性と言えよう。

これらの特性に反して核融合にとって望ましくない特性も残念ながらある。それは繊維状ナノ構造形成Wがプラズマと向き合った時に発生する単極アーク⁵⁶⁾の誘発である。^{57, 58)} 単極アークとはプラズマと向き合う壁が局所的陰極と大局的陽極の両方を兼ねる特有の放電形態である。²⁾ 真空アークや核融合プラズマ発生装置において、そのアーク痕跡より発生が認められ、比較的良好に知られているが、制御された形で単極アークを発生させることは大変難しいことであった。しかし最近、本解説で対象にしている繊維状ナノ構造形成Wにプラズマを介して局所的にレーザー照射すると、照射点から単極アークがスタートすることが認められた。⁵⁷⁾ レーザーによってナノファイバー先端が熱せられ、プラズマ熱流とシース電界とが相俟って、ショットキー効果を含む熱-電界効果による局所的電子放出が、単極アークをトリガーしていると考えられる。W表面の陰極点から電子が放出されてプラズマ側へと加速される。一方、プラズマ電子がイオンよりもやや過剰にW板全体に戻ってくることで回路が閉じる。²⁾ このような単極アークはWの溶融・蒸発をもたらし、閉じ込められた高温核融合プラズマにとって $Z=74$ のような高い原子番号の不純物は著しい放射をもたらし、プラズマを冷却してしまうので、その混入が極めて忌み嫌われるところである。しかし、放電物理の観点からは、⁵⁹⁾ いわゆるレトログレード運動といて $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ と逆方向にアーク・スポットが移動し、斜め磁場の場合に「鋭角の原理」に従って表面上ある角度を持つこと、⁶⁰⁾ エクトンと呼ばれるおびただしい量の電子放出、⁶¹⁾ それからアーク痕のフラクタル次元の解析⁶²⁾など、この伝統的な分野に新風が吹き込まれている。

ナノ構造形成金属はその特異な表面形態を利用して、産業応用も考えられよう。フラットな面に比して表面積が桁違いに大きくなるので、触媒としては使えないか。この場

合はWも良いがPtやTiであれば可能性は広がるであろう。⁶³⁾ ナノ構造の高い光吸収特性を利用して太陽熱発電のための太陽熱吸収体として用いられるかもしれない。ナノファイバーは基板の金属から容易に削ぎ落とすことができるので、その1本1本を用いて、電子放出体としての機能を持たせることができるかもしれない。

6. まとめ

Wを中心に金属へのHe照射損傷の一つとしての繊維状ナノ構造について、その形態、温度履歴効果、プラズマ・アニーリング効果、熱的特性等についてまず述べ、それらに基づいてファイバーの形成機構の代表的な理論を紹介した。Heが金属中でバブルを形成することはよく知られていたが、それが何故繊維状に伸展していくかについては、単なる塑性変形を超えた、粘性流体的な扱いが功を奏しているように見える。狭い専門領域だけではなく、近接する学問領域にまたがる視野が必要ではないだろうか。このモデルはファイバーの成長時間、成長のための表面温度範囲、異種金属での可能性についても指針を与えるものである。しかしすべてを説明できるわけではないので、更なる展開が望まれる。

一方、ナノ構造形成はHe効果によるものだけではなく、多様な原因で類似の構造が金属半導体材料に見られてきているので、簡単にこれらについても触れた。両分野が互いに関心を共有することによって新しい学問分野形成への刺激になれば幸いである。

第5節ではプラズマと向き合った繊維状ナノ構造を持つ金属の興味深い表面特性について幾つか指摘した。特に核融合エネルギー開発にとって、Wはプラズマ対向高熱流機器材料の本命と考えられているので、取り上げた現象に多くの関心が寄せられている。何故なら損傷をもたらすHeは核融合反応生成物の一つだからである。その中でも黒体放射による表面冷却効果の増大、2次電子放出の抑制、物理スパッタリング収率の低下、熱衝撃クラッキング耐性の向上は核融合炉に用いられるプラズマ対向壁としては好ましい特性であるのに対して、サブサーフェイスとして、熱伝導の低下と単極アークの誘発は、危惧されている性質であることを指摘した。成長の抑制には炭素薄膜が有効であることにも触れた。一方で、この特異な表面形態を逆手に取って、産業応用への可能性についても言及した。

本研究は著者(高村)が共著者と共に名古屋大学在職時代から現愛知工業大学在職にわたっての研究に基づくものを中心にまとめたものである。中国科学技術大学の叶民友教授、米国UCSDの西島大輔博士、兵庫県立大学の菊地祐介准教授、米国UCSDのKrashennnikov教授、東京理科大学の高橋昭如准教授には、種々の側面から議論していただいた。

本解説を書くにあたって、チャンスを与えていただいた筑波大学プラズマ研究センター片沼伊佐夫准教授と異分野

での類似形態の指摘をしていただいた物理学会誌編集委員会に感謝致します。九州大学田辺哲朗教授には類似現象に関する資料を多く戴きました。ここにお礼申し上げます。

本稿は、著者の好みの角度から紹介したものであり、決して一般的、網羅的と言えない部分があり、至らない点は著者の非力の故であり、この点についてはご容赦願いたい。

参考文献

- 1) V. Philipps: J. Nucl. Mater. **415** (2011) S2.
- 2) 高村秀一:『境界領域プラズマ理工学の基礎』(森北出版, 東京, 2010).
- 3) 吉田直亮, 森下和功, 岩切宏友, 高村秀一, 長谷川晃, 武藤俊介: プラズマ・核融合学会誌 **81** (2005) 12—小特集「核融合材料のヘリウム損傷」.
- 4) 高村秀一: プラズマ・核融合学会誌 **81** (2005) 25—低エネルギー高粒子束ヘリウム/重水素プラズマ照射によるタングステン表面のメゾスケール損傷.
- 5) 森下和功: プラズマ・核融合学会誌 **81** (2005) 13—金属における低エネルギーヘリウムイオン照射効果.
- 6) A. Takayama, A. M. Ito, S. Saito, N. Ohno and H. Nakamura: Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 01AL03.
- 7) S. Sharafat, A. Takahashi, K. Nagasawa and N. Ghoniem: J. Nucl. Mater. **389** (2009) 203.
- 8) D. Nishijima, M. Y. Ye, N. Ohno and S. Takamura: J. Nucl. Mater. **329–333** (2004) 1029.
- 9) M. Y. Ye, S. Fukuta, N. Ohno, S. Takamura, K. Tokunaga and N. Yoshida: J. Plasma Fusion Res. **3** (2000) 265.
- 10) S. Kajita, N. Ohno, S. Takamura, W. Sakaguchi and D. Nishijima: Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 261501.
- 11) S. Takamura, N. Ohno, D. Nishijima and S. Kajita: Plasma Fusion Res. **1** (2006) 051.
- 12) S. Kajita, S. Takamura, N. Ohno, D. Nishijima, H. Iwakiri and N. Yoshida: Nucl. Fusion **47** (2007) 1358.
- 13) M. J. Baldwin and D. P. Doerner: Nucl. Fusion **48** (2008) 035001.
- 14) M. Y. Ye, S. Takamura and N. Ohno: J. Nucl. Mater. **241–243** (1997) 1243.
- 15) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: 24th Fusion Energy Conf. EX P5-06, San Diego, USA, 2012—Cooling Characterization and Mitigation of He-Defected Tungsten with Nanostructured Surface.
- 16) S. Kajita, W. Sakaguchi, N. Ohno, N. Yoshida and T. Saeki: Nucl. Fusion **49** (2009) 095005.
- 17) 岩切宏友: プラズマ・核融合学会誌 **81** (2005) 19.
- 18) 吉田直亮: プラズマ・核融合学会誌 **81** (2005) 31.
- 19) S. Kajita, T. Saeki, Y. Hirahata and N. Ohno: Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 01AH02.
- 20) S. Kajita, T. Saeki, N. Ohno, M. Tokitani, T. Hatae and W. Sakaguchi: J. Nucl. Mater. **417** (2011) 838.
- 21) S. Takamura: IEEE Trans. E.E. Eng. **7**(S1) (2012) S19.
- 22) 庭瀬敬右: 顕微鏡 **41** (2006) 160—特集: ビーム誘起・励起効果, 「電子線照射による金属表面ナノ構造の自己組織化」.
- 23) S. Takeda, K. Koto, S. Iijima and T. Ichihashi: Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 2994.
- 24) N. Nitta, M. Taniwaki, Y. Hayashi and T. Yoshiie: J. App. Phys. **92** (2002) 1799.
- 25) J. H. Evans: Nature **229** (1971) 403.
- 26) K. Krishan: Nature **287** (1980) 420.
- 27) S. Habenicht, W. Bolse, K. P. Lieb, K. Reimann and U. Geyer: Phys. Rev. B **60** (1999) R2200.
- 28) G. W. Lewis, G. Kiriakides, G. Carter and M. J. Nobes: Surf. Interface Anal. **4** (1982) 141.
- 29) L. Tanovic, N. Tanovic, G. Carter, M. J. Nobes, C. Cave and N. Al-Ouadi: Vacuum **45** (1994) 929.
- 30) D. K. Goswami, K. Bhattacharjee and B. N. Dev: Surf. Sci. **564** (2004) 149.
- 31) S. Takamura, T. Miyamoto, Y. Tomida, T. Minagawa and N. Ohno: J. Nucl. Mater. **415** (2011) S100.
- 32) G. M. Wright, D. Brunner, M. J. Baldwin, R. P. Doerner, B. Labombard, B. Lipschultz, J. L. Terry and D. G. Whyte: Nucl. Fusion **52** (2012) 042003.

- 33) S. Takamura and T. Miyamoto: Plasma Fusion Res. **6** (2011) 1202005.
- 34) S. Kajita, N. Yoshida, R. Yoshihara, N. Ohno, T. Yokoshi, M. Tokitani and S. Takamura: J. Nucl. Mater. **421** (2012) 22.
- 35) T. Miyamoto, S. Takamura and H. Kurishita: Plasma Sci. Technol. **15** (2013) 161.
- 36) S. I. Krasheninnikov: Phys. Scr. **T145** (2011) 014040.
- 37) J. P. Barbour: Phys. Rev. **117** (1960) 1452.
- 38) S. I. Krasheninnikov, *et al.*: 24th Fusion Energy Conf., TH/3-2, San Diego, USA, 2012—On Edge Plasma, First Wall, and Dust Issues in Fusion Devices.
- 39) S. I. Krasheninnikov: private communication.
- 40) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: Nucl. Fusion **52** (2012) 123001.
- 41) K. Inai, K. Ohya, G. Kawamura and Y. Tomita: Contrib. Plasma Phys. **50** (2010) 458.
- 42) J. Kawata and K. Ohya: J. Plasma Fusion Res. **70** (1994) 84.
- 43) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: Plasma Fusion Res. **5** (2010) 039.
- 44) H. D. Hagstrum: Phys. Rev. **104** (1956) 309.
- 45) P. Mahadevan, J. K. Layton and D. B. Medved: Phys. Rev. **129** (1963) 79.
- 46) F. M. Propst and E. Leuschner: Phys. Rev. **132** (1963) 1037.
- 47) E. Lassener and W. D. Schubert: *Tungsten* (Kluwer Academic/Prenum Pub., New York, 1999).
- 48) S. Kajita, N. Ohno, T. Yokochi, N. Yoshida, R. Yoshihara, S. Takamura and T. Hatae: Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012) 105015.
- 49) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: Trans. Fusion Sci. & Technol. **63**, No. 1T (2013) 225.
- 50) 自然科学研究機構核融合科学研究所, 原子・分子データ・ベース: <http://dbshino.nifs.ac.jp/index-j.html>
- 51) D. Nishijima, M. J. Baldwin, R. P. Doerner and J. H. Yu: J. Nucl. Mater. **415** (2011) S96.
- 52) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: Proc. 38th EPS Conf on Plasma Phys. O1-302, Strasbourg, France, 2011—Outstanding Properties of Tungsten Material with Fiber-form Nanostructured Subsurface for the Wall of Fusion Reactor.
- 53) D. Nishijima, Y. Kikuchi, M. Nakatsuka, M. J. Baldwin, R. P. Doerner, M. Nagata and Y. Ueda: Fusion Sci. Technol. **60** (2011) 1447.
- 54) Y. Kikuchi, D. Nishijima, M. Nakatsuka, K. Ando, T. Higashi, Y. Ueno, M. Ishihara, K. Shoda, M. Nagata, T. Kawai, Y. Ueda, N. Fukumoto and R. P. Doerner: J. Nucl. Mater. **415** (2011) S55.
- 55) A. Bergmann: Nucl. Fusion **42** (2002) 1162.
- 56) A. E. Robson and P. C. Thonemann: Proc. Phys. Soc. **73** (1959) 508.
- 57) S. Kajita, S. Takamura and N. Ohno: Nucl. Fusion **49** (2009) 032002.
- 58) M. Tokitani, S. Kajita, S. Masuzaki, Y. Hirahata, N. Ohno, T. Tanabe and LHD Experiment Group: Nucl. Fusion **51** (2011) 102001.
- 59) S. Kajita, N. Ohno, N. Yoshida and S. Takamura: 30th ICPG A3, Belfast UK, 2011—Tungsten Erosion by the Initiation of Unipolar Arcs in Nuclear Fusion Devices.
- 60) R. L. Boxman and V. N. Zhitomirsky: Rev. Sci. Instrum. **77** (2006) 021101.
- 61) S. A. Barengolts, G. A. Mesyats and M. M. Tsvetoukh: Nucl. Fusion **50** (2010) 125004; S. Takamura, N. Ohno, M. Y. Ye and T. Kuwabara: Contrib. Plasma Phys. **44** (2004) 126.
- 62) S. Kajita, N. Ohno, S. Takamura and Y. Tsuji: Phys. Lett. A **373** (2009) 4273.
- 63) S. Kajita, T. Yoshida, D. Kitaoka, R. Etoh, M. Yajima, *et al.*: J. Appl. Phys. **113** (2013) 134301.

著者紹介



高村秀一氏： 1971年、名古屋大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学。1973年工学博士。専門はプラズマ理工学ならびに核融合プラズマの基礎。2007年3月名古屋大学定年退職、同名誉教授。現在、愛知工業大学工学部教授。

梶田 信氏： 2005年、東京大学大学院工学研究科博士課程修了、博士(工学)の学位を取得。専門はプラズマ計測およびプラズマ材料相互作用。プラズマ照射材料の応用研究にも興味を持っている。現在、名古屋大学エコトピア科学研究所准教授。

大野哲靖氏： 1988年九州大学大学院総合理工学研究科博士後期課程中退。1993年博士(理学)。専門は、核融合周辺プラズマ物理。現在、名古屋大学大学院工学研究科教授。

(2013年2月18日原稿受付)

Nanostructure Formation on Refractory Metal Surfaces Irradiated by Helium Plasmas

Shuichi Takamura, Shin Kajita and Noriyasu Ohno

abstract: Helium defects on plasma-facing refractory metals like tungsten have been studied in fusion sciences from the view point of the effects on metal surface properties, concentrating on the bubble formation. However, the surface morphology over the lower surface temperature range was found recently to be changed drastically, something like cotton down or arborescence, sometimes called as "fuzz". The formation process, although still open problem, would be discussed in terms of viscoelastic model with the effect of surface tension, taking account of its thermal properties and nano-bubbles inside the thin fibers. Some physical surface characteristics like electron emission, radiation emissivity and sputtering are quite influenced by its forest-like structure. Unipolar arcing has been newly studied by using such a surface structure which makes its initiation controllable. In the present report, other examples of nanostructure formation in a variety of particle incident conditions have been introduced as well as the possibility of its industrial applications to enhance interdisciplinary interests.

バイオメカニクス：力学からみる生命現象

和田浩史 (立命館大学理工学部物理科学科 525-8577 草津市野路東1-1-1)

生物に現れる様々なかたちや運動の仕組みを、遺伝情報ではなくマクロな力学の法則に求める分野をバイオメカニクスと呼ぶ。バイオメカニクス自体は古典的な研究分野であるが、微視的な理解が主流を占める現代の生命科学や生物物理学のなかでは、むしろ新鮮でユニークなアプローチといえるかもしれない。本稿では「らせん」というキーワードを縦糸にして、筆者が携わってきた二つの具体的な研究例を紹介する。ひとつは細菌の運動について、もうひとつは植物の形態についてである。分子の働きを次々と識別していく分析的手法とは少し異なる角度から生命現象に光を当てようと企てている。その努力の一部をなるべく平明な表現で説明したいと思う。

1. はじめに

物理学者は泡や液滴をみると、そのかたちを表面張力などの熱力学的な性質をもとに手際よく分類し、その動きを流体力学的なやり方で説明する。¹⁾ところが、生き物を目の当たりにすると様子はずいぶんと異なる。生き物の動きやかたちは、進化であるとか遺伝であるとか、もっと複雑な「なにか」が作用した結果であるという考えを、我々はあれこれと心に抱え込んでしまう。そして大抵の場合、さしあたり生物のかたちや動きまで物理でやることもあるまい、と感じる。

生物のダイナミズムをそれ以上不可分な要素に分解すれば、分子モーターの構造と機能、複雑な化学反応回路の壮大なコヒーレンスである。²⁾たしかに、これはほとんど絶望的に複雑かつ奇妙な超巨大自由度システムといえる。ところが、同じ現象を適当な距離を置いてぼんやり眺めてみると、生き物が示す運動や変形のパターンは紛れもなく力学の法則にしたがっている。その動きは質量や運動量などの少数の保存則にしたがっているし、系の対称性は運動を分類する重要な手がかりとなる。³⁾このような視点から生物をみると、意外にも生命現象のある側面はマクロな物理学にもとづいて理解できるのかもしれない、という期待が膨らむ。本稿で扱うのはそのようなアプローチにもとづく生物物理学、あるいはバイオメカニクスと呼ぶべき研究例である。⁴⁾「らせん (helix)」というキーワードを縦糸にして、筆者が実際に関わってきた二つの研究例について紹介する。まずは微生物、とくに細菌 (bacteria) の運動性 (motility) から話を始めたい。というのも、motility 研究は物理学者のために用意された生命科学へのエントリーポイントといっても過言ではないからである。我々はいまや、細胞の大きさとかたち、位置と速度、そして細胞の生み出す力や変形を正確に測定することができる。⁵⁻⁹⁾そしてそれらの物理量にもとづいて定量的な予測と検証を行うことができる。^{10,11)}生命科学の研究者が牽引してきた motility の研究において、物理学の活躍の場がいま、急速に拡大しているのである。^{15),*1}

2. 泳ぐバクテリア

腸内細菌として我々にもなじみの深い大腸菌 (*E. coli*) は、徹底した基礎研究が確立している現代生物学のモデル生物である。大腸菌は細胞表面から鞭毛と呼ばれる細長いらせん状のフィラメントを多数突き出しており、この鞭毛を根元にあるプロトン駆動の回転モーターを用いて高速回転させることで、スクリューのように水中を推進する。¹⁶⁾この運動は、ちょうどワインのコルク抜きに例えられる。周囲の流体から作用する摩擦抵抗が回転モーターのトルクを並進運動へと変換するからだが、この原理がうまく機能するには鞭毛のらせん形状が不可欠である。

ところで、微生物は我々が知るよりもはるかに「流れにくい」水をかき分けながら運動している。その理由は、微生物のサイズ (~数 μm) である。水には粘性があるため、この小さな生き物がいくら周囲の水をかき回しても、流れが複雑に乱れることはない。流れの様子は水の粘性が支配的な、いわゆる低レイノルズ数の流れになる。¹⁷⁾そのような物理的状況でいかにして推進力を生成、維持、制御するかという問題は、基礎科学的に興味深いだけでなく工学的にも重要である。¹⁸⁾微生物を観察すると実に多彩な運動が観測されるが、それらはしばしばこの問題に想像力豊かな解答を与えてくれる。

以下では細胞全体がらせんを巻くスピロプラズマ (*Spiroplasma*) という細菌について紹介する。一般に、細菌の細胞は頑丈な細胞壁に囲まれているが、スピロプラズマには細胞壁がない。この際立った特徴ゆえスピロプラズマは菌体の大きな変形が可能である。この特性が運動に重要な役割を果たす。スピロプラズマの活発な動きは、70年代の発見当初から微生物学者たちの関心を引いてきたが、¹⁹⁾菌体表面には鞭毛など既知の推進装置が全く見当たらないため、運動のメカニズムは長い間謎に包まれていた。²⁰⁾ところが2005年、この細菌がらせんのカイラリティ (chirality) を周期的に切り替えることで周囲に流れ場を生成し、推進力を得ているという観測結果が報告された。²¹⁾一般に右巻きと左巻きのらせんが共存すると、その接続部は鋭く折れ曲がる²²⁾ (以下、これをキンクと呼ぶ)。図1の顕微鏡写真には、細胞の先頭部から生じたキンクが終端部へと伝搬していく様子が明確に捉えられている。そして後方へのキ

*1 細菌から魚や鳥まで、流れを利用して運動する動物の力学研究は生物物理学における伝統的な一分野であり、重要な概念が数多く積み上げられている。¹²⁻¹⁴⁾

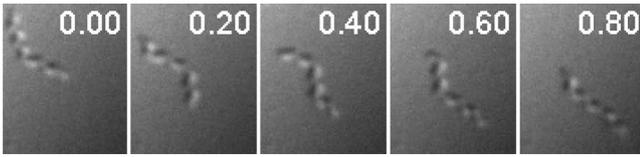


図1 1%メチルセルロース溶液中でのスピロプラズマの運動の様子。数字は時間(秒)。中根大介博士(学習院大学)のご好意による。

シクスの伝搬に伴って、細胞は流体中を前進する。

シクスの伝搬から細胞の重心運動がどのように生じるのであろうか？ それを明らかにするため、我々は連続体力学にもとづいてこの細胞運動のモデル化を試みた。細胞は全体として細長いhelixであり、十分大きなアスペクト比(全長/断面サイズ >20)は、細胞を曲げ(bend)弾性とねじれ(twist)弾性を示す弾性棒(elastic rod)として記述することを許す。以下ではまず、ストークス(Stokes)流体(低レイノルズ数の流れ)に囲まれた弾性棒の動力学を記述する基本的な枠組みを駆け足で紹介する。弾性棒あるいはフィラメント(filament)の力のつりあいは、その中心線に関するキルヒホッフ(Kirchhoff)方程式²³⁾

$$\mathbf{F}_s + \mathbf{f}_{\text{ext}} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_s + \mathbf{t} \times \mathbf{F} + \mathbf{m}_{\text{ext}} = \mathbf{0}, \quad (2)$$

で記述される。ただし s は棒の一端から測った弧長パラメータ、 \mathbf{F} , \mathbf{M} は棒の断面にかかる内部力と内部モーメント、 \mathbf{t} は中心線の単位接線ベクトル、 \mathbf{f}_{ext} と \mathbf{m}_{ext} は棒に作用する外力およびトルク(流体から受ける摩擦抵抗など)である。また $\mathbf{F}_s = \partial \mathbf{F} / \partial s$ と約束する。線形弾性論によると、円形断面を持つ弾性棒の内部モーメント \mathbf{M} とひずみ $\mathbf{\Omega} = \mathbf{\Omega}_\alpha \mathbf{e}_\alpha$ は次の構成関係式で結びつく²³⁾：

$$\mathbf{M} = A(\mathbf{\Omega}_1 - \kappa) \mathbf{e}_1 + A\mathbf{\Omega}_2 \mathbf{e}_2 + C(\mathbf{\Omega}_3 - \tau) \mathbf{e}_3, \quad (3)$$

ここで A , C はそれぞれ曲げおよびねじり弾性率と呼ばれ、棒を構成する材料のヤング率 Y 、ポアソン比 ν および棒の半径 a によって $A = \pi a^4 Y / 4$, $C = A / (1 + \nu)$ で与えられる。²³⁾ κ および τ は基底状態でのひずみの値(棒の元々の形状)であり、それぞれ自発曲率および自発捻率と呼ぶ。 $\kappa = \tau = 0$ はまっすぐの棒に対応する。半径が R でピッチが P であるような一様なヘリックスに対しては

$$\kappa = \frac{4\pi^2 R}{P^2 + 4\pi^2 R^2}, \quad \tau = \frac{2\pi P}{P^2 + 4\pi^2 R^2}, \quad (4)$$

である。また、ピッチ角 ψ は $\tan \psi = 2\pi R / P = \kappa / \tau$ で定義される(図2)。 \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 は棒の断面内に取られた直交単位ベクトルであり、 $\mathbf{t} = \mathbf{e}_3$ とともに棒の中心線の各点における直交座標系を構成する。この座標系は(一般化された)フレネ(Frenet)方程式($\mathbf{e}_\alpha)_s = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{e}_\alpha$ によってひずみと結びついている。^{*2} 最後に、変形に伴って受ける周囲の流体からの抵

^{*2} この式は棒の中心線に沿って直交座標系がどのように回転するかをあらわすkinematicsの関係式であり、その「回転率」が棒の変形のひずみ率(曲率およびねじれ)を与える。

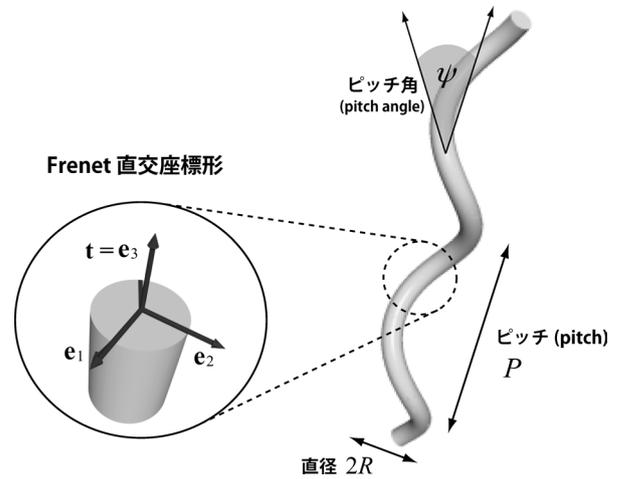


図2 細長い弾性棒(とくにらせん)の形状を記述するパラメータとフレネ座標系。

抗 \mathbf{f}_{ext} は、その変形の数 $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}}$ に比例するが、同時にいわゆる流体力学的な相互作用によってフィラメント全体からの寄与を含む非局所的な力である。この動的な相互作用(あるいはそれに起源を持つ形状依存の摩擦抵抗)を利用して微生物は推進力を得るという点は、低レイノルズ数における生物流体力学の要諦である。¹⁸⁾ ともかくそのようにして、 \mathbf{f}_{ext} は決まる。少し長くなったが、これでモデルが閉じる。

さて、スピロプラズマはらせんの向きを右から左、再び左から右へと切り替える。これをモデルに取り入れるために上の一般的な枠組みを一カ所だけ変更する。すなわち、自発捻率 τ として $-\tau_0$ (左巻き)と τ_0 (右巻き)をつなぐシクスのプロファイルを持ち、体長に沿って一定速度 V_0 で伝搬するようなものを考える。したがって τ はいまや定数ではなく、弧長 s と時間 t のどちらにも依存する。系は弾性変形のエネルギーを最小にすべく変形を行うが、この τ が定める基底状態が時間的に変動するため、結果としてフィラメントの自発的な運動が励起される。その結果、フィラメントの重心は一方向に運動していく(図3)。

モデルに現れるすべてのパラメータは実験的にその値が測定されており、²¹⁾ 理論にフリーパラメータはない。こうなると、むしろ現実にはできないパラメータ変化が可能になる点が理論の強みである。例えば、泳動の速さ V_{cell} はらせんのピッチ角 ψ とともにどのように変化するのであろうか。図3はその結果を示している。速さ V_{cell} は中間のピッチ角に明確な最大値を持つが、この最適ピッチ角は実際のスピロプラズマのそれ(35°)にびたりと一致する。^{*3} 生物は、その生活環境における機能や行動にもっとも適したかたちをとっているのである。このように、適応という生物の特性は力学の視点から納得することも可能である。

ここで筆者が強調したいのは、推進を生み出す「仕組み」である。²⁶⁾ そもそもらせんの向きを切り替えるには、細胞

^{*3} ピッチ角以外の他の様々なパラメータも motility を最適化するように選ばれている。^{28, 29)}

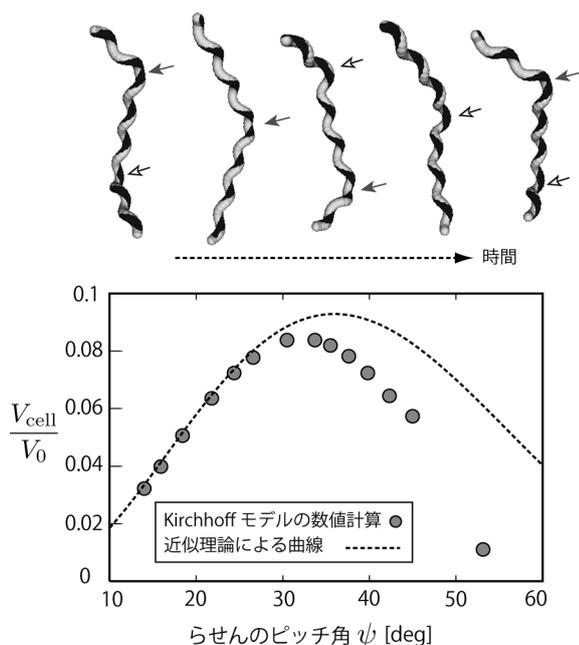


図3 (上) フィラメントの運動の様子。キंकはフィラメントの上から下へ向かって伝搬し、重心は上へ向かって進んでいく(図では重心をそろえて表示している)。(下) 推進速度のらせんピッチ角 ψ 依存性。理論曲線の詳細は文献26を参照。

は自分の体を右または左のどちらか一方にねじらなければならない。そのため、キंकの場所を起点にして両側のらせんはその長軸のまわりにはほぼ剛体的に回転するが、そのとき二つの回転方向は互いに逆向きである。²⁷⁾ところで、キंकを挟んで向かいあうらせんはお互い逆向きのカイラリティを持つことを思い出そう。これらが互いに逆向きに回転するならば、流体中でそれぞれのらせんがスクリュの原理で生み出す推進力は、どちらも同じ向きとなる。しかも、この推進方向はらせんの左右の順番に関わらずキंकの伝搬方向とはつねに逆向きである。このようにして、細胞は一方向へ泳いでいく。無駄のない、実にエレガントなポティエデザインとは言えないだろうか。⁴⁾

3. 植物におけるねじれのパターン

スピロプラズマのようにねじれた細胞構造を持つ生き物は、奇妙な例外ではないかと思われるかもしれない。しかし生物を観察すると、左右の対称性はいたるところで破れている。DNAのらせん構造に始まり、カタツムリの殻、人体における心臓の配置など、枚挙にいとまがない。このような生物のかたちのパターン選択に、力学はどのような役割を果たしているであろうか？これに関して筆者が取り組んでいる植物の研究例を紹介する。バクテリアから植物というはずいぶんと飛躍があると感じられるかもしれないが、どちらの細胞も細胞壁を持ち、そのメカニクスには共通点が多い。^{30), *5)}(このようなアクロパティックな話題

*4 細菌運動のエネルギー変換効率は概して低く、たかだか数%以下である。運動に費やすエネルギーは代謝や分裂に要するエネルギーの総量からすればわずかであり、これは深刻な問題ではない。

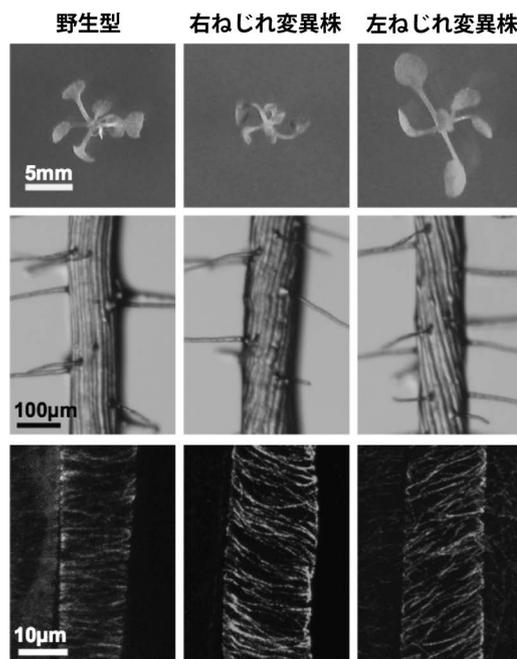


図4 シロイヌナズナの根の表面に現れる階層的なねじれの関係。上段：シロイヌナズナ。中段：その根の表面。表皮細胞が縦にならぶ筋としてみえる。下段：表皮細胞の細胞壁の内側にある微小管の配向。白くみえるのが微小管の束。橋本教授(奈良先端科学技術大学院大学)のご好意による。

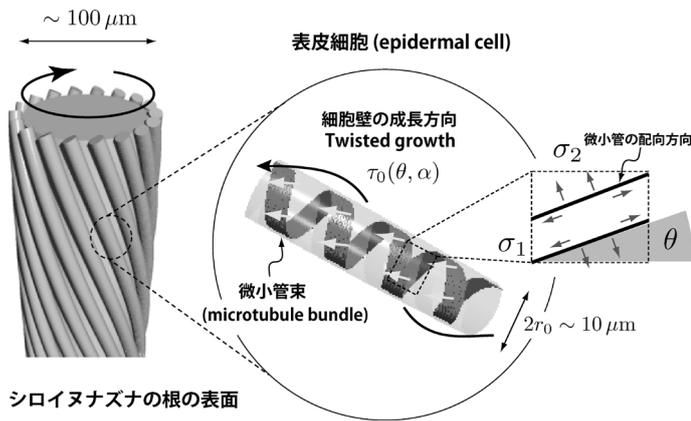
変更ができる点も、生物の力学だけに注目する研究の強みのひとつである。)

図4をご覧ください。これはシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*)^{*6)}の根の表面における表皮細胞パターンの左右対称性の破れを示している。左端の野生型では根の成長方向に沿って平行に表皮細胞(細長い縦縞)が規則正しく配列している(図4中段左)。ところが、ねじれ変異株ではこの表皮細胞のパターンが右または左にゆるやかにねじれる(図4中段中央および右)。表皮細胞の細胞壁の内側では、微小管の束が液晶的な配向を形成して細胞壁を裏打ちしているのだが、興味深いことに、ねじれ変異株ではこの微小管の配列が、右巻きの変異株では左巻きに、左巻きの変異株では右巻きにねじれている(図4下段中央および右)。³¹⁾他方、野生型では微小管束は閉じた円形であり、らせん性を持たない(図4下段左)。すなわち、らせん構造は階層的であり、各階層のらせんはちょうど作用反作用のように逆巻きの関係にある。³²⁾

巨視的スケールにこのような単純な関係がある限り、そこにはきっと分子に依存しない力学的あるいは幾何学的な原理が作用しているに違いない(と考えたい)。紙面の関係上、中心となるアイデアだけ概説する。モデルの鍵となる概念が「成長(growth)」である。まず、表皮細胞は器官の成長とともに急速に軸方向へ一次元的に成長する。一方で微小管のネマティックな配向は細胞壁の形成に先行し、

*5 とはいえ、細菌と植物では細胞壁を構成する物質が全く異なる。細菌の細胞壁はpeptidoglycanを、植物の細胞壁はcellulose繊維を主成分とする。

*6 *Arabidopsis*は植物学におけるモデル生物であり、その全ゲノムが解読された最初の植物でもある。



シロイヌナズナの根の表面

図5 Arabidopsisの根の表面にみられるねじれの機構に対するモデル。

かつ細胞壁の構成材料であるセルロース繊維の沈着方向を導くことが知られている。³³⁾ したがって、もし微小管の配向が表皮細胞の長軸周りに少しでもねじれているならば、表皮細胞自身がその成長軸の周りにゆっくりとねじれながら成長する³⁴⁾ (図5)。しかも二つのらせんのカイラリティは反対向きである。これは成長がもたらす純粋に幾何学的な関係であり、その自発捻率は

$$\tau_0(\theta, \alpha) = -\frac{1}{r_0} \frac{\alpha \sin 2\theta}{1 + \alpha \cos 2\theta}, \quad (5)$$

と計算される。³⁷⁾ ここで r_0 は細胞の半径、 θ は微小管の配向角度、 $\alpha = -(\sigma_1 - \sigma_2)/(\sigma_1 + \sigma_2)$ は成長率の異方性をあらわし、 σ_1 と σ_2 は平面の二つの主軸方向への成長率 (単位時間あたりの面積拡大率) である (図5)。実際に観測される表皮細胞 (およびその集合である組織) の形状は、力学的な力のつりあいをみたすものでなければならない。したがって、成長とともに系にはいわゆる残留応力 (residual stress) が蓄積され、^{35, 36)} これが器官スケールにマクロならせんパターンを駆動する (表皮細胞が根の周辺に巻き付くようにしてねじれ (torsion) を生じる: 図5)。このようにして、細胞以下のレベルにおいて微小管束の液晶的配向に生じたわずかな対称性の破れが力学を通してスケールアップされ、ついには巨視的ならせんパターンとして観測される。³⁷⁾

4. まとめ

本稿では、力学と幾何学を頼りに生物の問題にアプローチする研究例を紹介した。言うまでもなく、分子や遺伝子の研究は生物科学の根幹であり、その重要性はいくら強調してもしすぎることはない。その一方で、分子や遺伝子がどうあれ、生物の示すマクロなカタチと運動はごく少数の物理法則と幾何学的関係によって厳格に規定される。この短い解説を通じて、いくつかの場合にはそのような視点も無駄ではないと感じていただけたなら、幸いである。

本稿に通底する科学観は新しいものではなく、ダーシー トムソンによる古典『*On Growth and Form*』²⁴⁾ 以来、おそらく様々な分野で培われてきた科学精神である。トムソン

自身の言葉を引用するならば、²⁵⁾ 「我々は…物理学や数学の法則に従わない生物のかたちが存在しないことを実感として認識しなければならない」し、「生物であれ、無生物であれ、物体のかたちや変形はすべて力の作用の結果として説明される」のである。現代の生物科学では分子や遺伝子に関する膨大なデータベースが整備されているが、そこから大きな物語を紡ぎ出すには、多様な分子を機会論的に組み立てるボトムアップの手法と、巨視的な物理法則をたよりに単刀直入に核心に迫るトップダウンの手法がうまく結びつかなければならない。本稿で紹介した研究例はどちらも特定の生物と現象に注目しているが、生物の持つ「生き生きとした」感触を損なわないようなモデル研究があるとしたら、それは対象の持つ複雑さのある程度は温存しつつ背後にあるメカニズムを探求するようなものだろう。筆者はそう考える。生命科学と力学の境界上には見落とされてきた無数の興味深い問題群がある。それらに光を当て、掘り起こしていくには「力の関係」を主役にした研究を強調しなければならない、と筆者は思う。実験と理論の緊密な共同作業が喫緊の課題である。³⁸⁾ 物理では「アクティブマター」研究として、このような研究分野が大きく花開きつつある。^{39, 40)}

スピロプラズマは Roland R. Netz 教授との共同研究である。中根大介博士は図1を提供して下さった。橋本隆教授には図4および有益な助言をいただいた。これらの方々には深く感謝する。

参考文献

- 1) ドウジェンス, プロシャール-ヴィアール, ケレ共著, 奥村 剛訳: 『表面張力の物理学』 (吉岡書店, 2003).
- 2) R. Philips, J. Kondev and J. Theriot: *Physical Biology of the Cell* (Garland Science, 2009).
- 3) T. Ohta and T. Ohkuma: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 154101.
- 4) Y. C. Fung: *Biomechanics; Mechanical Properties of Living Tissues* (Springer-Verlag, New York, 1993).
- 5) M. Miyata, W. S. Ryu and H. C. Berg: *J. Bacteriol.* **184** (2002) 1827.
- 6) D. Nakane and M. Miyata: *J. Bacteriol.* **194** (2012) 122.
- 7) Y. T. Maeda, J. Inose, M. Y. Matsuo, S. Iwaya and M. Sano: *PLoS ONE* **3** (2008) e3734.
- 8) K. Matsumoto, S. Takagi and T. Nakagaki: *Biophys. J.* **94** (2008) 2492.
- 9) H. Tanimoto and M. Sano: *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 248110.
- 10) K. Drescher, J. Dunkel, L. H. Cisneros, S. Ganguly and R. E. Goldstein: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **108** (2011) 10940.
- 11) S. Wang, L. Furchtgott, K. C. Huang and J. W. Shaevitz: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **109** (2012) E595.
- 12) 東 昭著: 『生物の動きの辞典』 (朝倉書店, 1997).
- 13) S. Childress: *Mechanics of Swimming and Flying* (Cambridge Univ. Press, New York, 1981).
- 14) J. Lighthill: *SIAM Review* **18** (1975) 161.
- 15) C. W. Wolgemuth: *Physics* **4** (2011) 4.
- 16) H. C. Berg: *E. coli in Motion* (Springer-Verlag, New York, 2004).
- 17) G. I. Taylor: *Proc. R. Soc. London Ser. A* **209** (1951) 447.
- 18) E. Lauga and T. R. Powers: *Rep. Prog. Phys.* **72** (2009) 096601.
- 19) R. E. Davis and J. F. Worley: *Phytopathology* **63** (1973) 403.
- 20) R. Gilad and A. Porat and S. Trachtenberg: *Mol. Microbiol.* **47** (2003) 657.
- 21) J. Shaevitz, J. Y. Lee and D. A. Fletcher: *Cell* **122** (2005) 941.
- 22) H. Hotani: *J. Mol. Biol.* **106** (1976) 151.
- 23) B. Audoly and Y. Pomeau: *Elasticity and Geometry* (Oxford Univ. Press, 2010).

24) D'Arcy W. Thompson: *On Growth and Form* (Dover, New York, 1992).
 25) ダーシー・トムソン著, 柳田友道, 他訳: 『生物のかたち』(東京大学出版, 1973).
 26) H. Wada and R. R. Netz: *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 108102.
 27) R. E. Goldstein, A. Goriely, G. Huber and C. W. Wolgemuth: *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 1631.
 28) J. Yang, C. W. Wolgemuth and G. Huber: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 218102.
 29) H. Wada and R. R. Netz: *Phys. Rev. E* **80** (2009) 021921.
 30) A. Boudaoud: *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 018104.
 31) S. Thitamadee, K. Tsuchihara and T. Hashimoto: *Nature (London)* **417** (2002) 193.
 32) T. Ishida, S. Thitamadee and T. Hashimoto: *J. Plant Res.* **120** (2007) 61.
 33) T. I. Baskin: *Annu. Rev. Cell. Dev. Biol.* **21** (2005) 203.
 34) P. A. Roelofs: *Adv. Bot. Res.* **2** (1966) 2.
 35) E. K. Rodriguez, A. Hoger and A. D. McCulloch: *J. Biomech.* **27** (1994) 455.
 36) A. Goriely and M. Ben Amar: *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 198103.
 37) H. Wada: *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 128104.
 38) D. G. Drubin and G. Oster: *Mol. Biol. Cell* **21** (2010) 2099.
 39) M. Sano, M. Y. Matsuo and T. Ohta: *Non-equilibrium Soft-Matter Physics*, ed. S. Komura and T. Ohta (World Scientific, Singapore, 2012) およびその

参考文献.
 40) 北畑裕之, 義永那津人, 永井 健, 住野 豊: *日本物理学会誌* **67** (2012) 385.

(2013年4月22日原稿受付)

Biomechanics: Understanding the Mechanics of Living Systems

Hirofumi Wada

abstract: Biomechanics seeks to understand mechanisms underlying shapes and motions of various living systems based on the continuum mechanics without much relying on molecular and genetic information. While it is a traditional research field with very classical tools, it may currently emerge as a somewhat unique approach among other dominant microscopic studies in modern sciences. Here we give two specific examples of such biomechanical studies. A common keyword is "helix"; The first one is a bacterial motility, the other is a morphology of plant organs.

日本物理学会誌 第68巻 第10号 (2013年10月号) 予定目次

口絵: 今月号の記事から

巻頭言

「会誌が変わります」……………宮下精二

最近のトピックス

AMS-02の初期成果: 過剰な宇宙線陽電子……………灰野禎一

解説

重イオン核融合反応と超重元素……………萩野浩一, 有友嘉浩

バリオン間相互作用模型とバリオン多体系

……………Th. A. Rijken, 山本安夫

最近の研究から

超高エネルギー宇宙線観測の現在: テレスコープアレイ実験の

結果……………佐川宏行, 荻尾彰一, 常定芳基

JPSJの最近の注目論文から 6月の編集委員会より

……………安藤恒也

PTEPの最近の招待・特集論文から 2013年3月号より

……………坂井典佑

学界ニュース

第54回藤原賞, 第53回東レ科学技術賞: 香取秀俊氏

……………安田正美

2013年Yodh Prize: 永野元彦氏……………手嶋政廣

第3回IUPAP Young Scientist Prize in Statistical Physics:

沙川貴大氏, 竹内一将氏……………田崎晴明

2013年IUPAP C4 Young Scientist Awards: 石原安野氏

……………吉田 滋

ラ・トッカータ

中国の宇宙基礎科学を垣間見る……………松岡 勝

歴史の小径

三村剛昂と広大理論物理学研究所……………小長谷大介

新著紹介

会員の声

応用物理 第82巻 第9号 (2013年9月号) 予定目次

小特集: 冷却技術が開く量子操作

今月のトピックス

2013年応用物理学会秋季学術講演会注目講演……………益 一哉

関西支部の大改革……………河田 聡

巻頭言: レーザー冷却と科学技術……………盛永篤郎

総合報告: 冷却原子気体の最近の話題……………上田正仁

解説: 量子ドットの集団コヒーレンスと量子情報技術への応用

……………早瀬潤子

最近の展望

量子オプトメカニクスの実現へ向けて……………金本理奈

フォトリック結晶ナノ共振器のオプトメカニクスへの応用

……………野村政宏

研究紹介

ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた磁力計

……………衛藤雄二郎, 平野琢也

原子気体におけるボース・アインシュタイン凝縮体の位相操作

……………熊倉光孝

古典論からみた機械振動子の共振器冷却: 半導体ナノメン

ブレンの冷却機構……………宇佐見康二

基礎講座: グラフェン: 何もの? まず透明電極から

……………長谷川雅考

ホットとひといき

量子の世界に潜むお化けの話……………小芦雅斗

リフレッシュ理科室から量子エレクトロニクス……………岡島茂樹

安藤恒也 (JPSJ編集委員長)

日本物理学会が発行している Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の論文で2013年4月に掲載可となったものの中から2013年5月の編集委員会を選んだ“Papers of Editors' Choice” (JPSJ注目論文) を以下に紹介します。図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているため不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。論文は掲載から約1年間は無料公開しています。また、関連した話題についての解説やコメントがJPSJホームページの「News and Comments」覧に掲載される場合もありますので、合わせてご覧ください。JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味深い論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思っています。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。なお、今月は本年の2月号に掲載された特集“Special Topics: Frontier of Condensed Matter Physics using Synchrotron Radiation”についても紹介いたします。

重陽子加速器による中性子を用いた放射性同位体生成

150種以上の放射性同位体 (RI) は、医療の診断・治療に最も多く利用され、産業、研究・教育等にも幅広く利用されている。実際、テクネチウム ^{99m}Tc (^{99m}Tc) は、脳等の特定臓器に集り易い ^{99m}Tc 標識医薬品から放出される ^{99m}Tc のガンマ線を検出して、がん等の三大生活習慣病や認知症の診断に、我が国で年間90万件利用されている。半減期6時間の ^{99m}Tc は、半減期66時間のモリブデン99 (^{99}Mo) から生成されるため、 ^{99m}Tc の利用には、最低1週間に一度新しい ^{99}Mo が必要であり、 ^{99}Mo の安定確保は不可欠である。我が国は、 ^{99}Mo を含む多くのRIが海外から輸入されている。ところが、数年前、世界需要の90%以上の ^{99}Mo を高濃縮ウラン235 (^{235}U) の核分裂反応で製造してきた海外の研究用原子炉が、高経年化で長期間運転が停止した結果 ^{99}Mo が不足し、我が国を含め世界の医療現場が支障をきたした。これを契機に、これら原子炉が、高経年化に加え、核不拡散上問題がある高濃縮 ^{235}U を使用していることから、加速器等の代替え方法により、 ^{99}Mo を将来にわたり安定確保する製造法の検討が世界中で始まった。

そんな中、加速器から得られる高速中性子と ^{100}Mo の原子核反応断面積の中性子エネルギー依存性 (図1参照) を調べ、 ^{99}Mo を生成する $(n, 2n)$ 反応断面積が、11~18 MeV で一番大きいことに着目して ^{99}Mo を生成する新方式が、永井・初川により提案された。

ところで、 ^{99}Mo 問題の解決には、提案される製造システムで、①需要量に見合う ^{99}Mo が製造でき、しかも②放射線医薬品基準 (放薬基) を満たす高純度の ^{99m}Tc が分離精製できることが、まず求められる。更に、製造システムには、 ^{99}Mo 以外の医療用RI及び一度の中性子照射で同時に複数のRIが製造できる能力が、費用対性能比の視点から期待される。しかし、これらの要請を満たす製造システムは、未だ提案されたことは無い。

最近、日本原子力研究開発機構の永井泰樹グループリー

ダーらは、(株)千代田テクノル、住友重機械(株)、富士フイルムRIファーマ(株)と共同で、加速器からの高速中性子を用いて ^{99}Mo 等の多様なRI生成研究開発を進め、上記要請を満たすRI製造を可能にする新たな製造システムを提起した。この研究成果は、日本物理学会発行の英文学術誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2013年6月号に掲載された。

大量の ^{99}Mo 製造には、高強度の高速中性子が必要である。重陽子は、陽子と中性子が弱く束縛した原子核であり、炭素等の標的と反応すると、同じエネルギーの陽子に比べ、10倍以上高強度の高速中性子が生成される。そこで、重陽子加速器の現状を踏まえ ^{99}Mo の製造量を評価したところ、1台の加速器で我が国の ^{99}Mo 需要の10%程度を製造できることが分かった。(なお、加速器技術の進展により数年後には、1台で20~25%の製造が期待される)。一方、 ^{99m}Tc の純度に関しては、原子力研究開発機構の加速器で得られる14 MeV中性子を ^{100}Mo 試料に照射して製造され

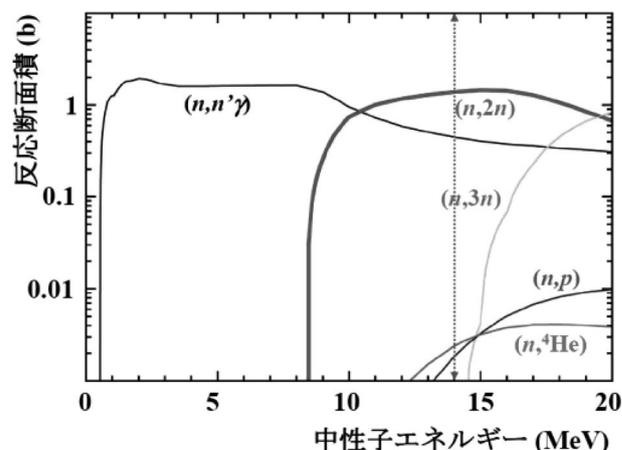


図1 中性子を ^{100}Mo に照射した時に起こる全ての原子核反応の断面積の中性子エネルギー (単位はメガ電子ボルト MeV) 依存性。 ^{99}Mo を生成する $(n, 2n)$ 反応断面積が11~18 MeV で一番大きい。 (n, n') は非弾性散乱反応でRIは生成しない。 $(n, 3n)$ 、 (n, p) 及び $(n, ^4\text{He})$ 反応では、 ^{98}Mo (安定)、 ^{100}Nb (半減期3秒) 及び ^{97}Zr (半減期16.9時間) が生成される。

るRIについて、放射線検出器で測定された。その結果、⁹⁹Mo以外はごく微量の不要RIしか製造されないことが、そして、この⁹⁹Moから熱分離精製され抽出された^{99m}Tcの品質は、放射性核種純度及び化学純度共に、放薬基を満たすことが示された。また、一度に複数のRIが同時に製造されることは、高速中性子の持つ試料中の高い透過力のため、串刺しにした異なる試料に高速中性子を照射することで示された。そして、単一性能の重陽子加速器で、⁹⁹Moを含む多様なRIを十分な量製造できることは、試料の質量が100程度以下では、高速中性子照射に対して陽子やHeを放出する原子核反応断面積が50~500 ミリバーン(10⁻²⁷ cm²)と大きいことをもって示された。以上の研究成果を踏まえ、重陽子加速器で高速中性子を生成するサイクロトロン施設とRI分離精製室から成る、多様RI製造システムが提案された。このシステムは、原子炉あるいは陽子加速器を用いる従来のRI製造システムと全く異なる。単一性能の重陽子加速器で得られる高速中性子を用いて、従来製造できなかった新しいRIも製造できること、施設が小規模であること、運転操作が容易であること、高濃縮²³⁵Uを用いないこと等から本RI製造システムは、世界に普及し、医療・産業・学術研究等に資するものと期待される。

原論文

Generation of Radioisotopes with Accelerator Neutrons by Deuterons

Y. Nagai, K. Hashimoto, Y. Hatsukawa, H. Saeki, S. Motoishi, N. Sato, M. Kawabata, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 064201.

〈情報提供：永井泰樹（日本原子力研究開発機構原子力エネルギー基盤連携センター）
橋本和幸（日本原子力研究開発機構原子力エネルギー基盤連携センター）〉

パリティの局所的な破れが誘起するエキゾチック超伝導

物理学において「対称性の破れ」は重要な概念である。興味深い物理現象の多くは何らかの対称性の破れに起因する。逆に、対称性の自発的破れは何らかの内部自由度の表出である（小林-益川理論がそうであったように）。そして、対称性から導かれる結論は系の詳細に依らず常に厳密であるため、高い予言能力を持つ。

現在の物性物理学では「パリティ（空間反転対称性）」が重要な役割を果たしている。超伝導研究においても、超伝導相を幾つかの対称性によって分類するが、パリティは最も基本的な対称性の一つである。そんな中、「パリティの破れた超伝導」の研究が行われるようになったのは比較的最近のことである。エーデルシュタインによる先駆的な研究が80年代から行われていたものの、ウィーン工科大学のパウアーらによる重い電子系超伝導体CePt₃Siの発見（2004年）が空間反転対称性の破れた超伝導に対する研究

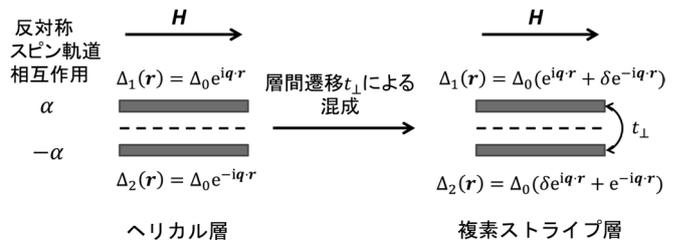


図1 2層系における複素ストライプ相の模式図。点線は空間反転中心を示す。反対称スピン軌道相互作用と秩序変数の層依存性も示した。

の実質的な幕開けである。現在までの研究により、クーパー対のパリティ混成や磁気電気効果、ヘリカル超伝導、トポロジカル超伝導など様々な観点から興味深い特徴を持つ超伝導であることが分かっている。このような特徴は（ラシュバ型スピン軌道相互作用に代表される）反対称スピン軌道相互作用によりもたらされる。

さて、固体物理学の世界には、空間反転対称性が大局的に保たれているものの局所的には破れている結晶構造が数多くある。ここでは例として多層系を考えよう。図1に示す2層系では大局的な空間反転対称性が保存されている。しかし、空間反転中心は層間に存在し、各層に注目すると空間反転対称性が欠如している。この場合、反対称スピン軌道相互作用は空間的に非一様となる（図1の左側参照）。では、このような「パリティの局所的な破れ」に由来する超伝導はどのようなものだろうか？

最近、新潟大学とスイス連邦工科大学の研究グループは、局所的な空間反転対称性の欠如に由来する新種のエキゾチック超伝導相が存在することを明らかにし、複素ストライプ相と名付けた。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の2013年7月号に掲載された。

図1に複素ストライプ相の直観的な説明を示す。まず、層間遷移を無視し、各層が独立な場合を考える。それぞれの層では空間反転対称性が欠如しているため、反対称スピン軌道相互作用が現れる。そこに平行磁場を印加すると、クーパー対が重心運動量を持つヘリカル超伝導相が実現することが知られている。しかし、反対称スピン軌道相互作用が層間で符号を変えるため、クーパー対の重心運動量も層間で逆符号をとる。実際には層間遷移があるので、上下の層の秩序変数が混成し、ストライプ構造に複素位相が掛かった秩序変数が実現する（図1の右側参照）。これが複素ストライプ相の直観的な理解である。本研究で行われた計算結果は、複素ストライプ相が広い磁場領域において実現することを予言した。また、垂直磁場を印加した場合にはペア密度波という別のエキゾチック超伝導状態が安定になる。2次元の重い電子系として注目を集めているCeCoIn₅とYbCoIn₅の人工超格子における最近の実験は、これらの超伝導相が実現していることを示唆している。これは本研究の理論的な予言を裏付けるものである。

これまでの超伝導研究は大局的な対称性に基づいて分類

されてきた。一方で、局所的な対称性の破れに由来する超伝導相の存在は見逃されてきた。本研究はその存在を明らかにしたものである。局所的な空間反転対称性の欠如した結晶構造を有する物質は無数に存在するため、多層系に限らず様々な物質を対象とした研究が始まりつつある。また、超伝導の枠を超えて磁性や量子伝導などにおいても非一様な反対称スピン軌道相互作用が生み出す興味深い現象があると考えられる。今後は、局所的な空間反転対称性が破れた系における新奇量子凝縮相の研究が理論・実験両面において活発に行われることが期待される。

原論文

Complex-Stripe Phases Induced by Staggered Rashba Spin-Orbit Coupling

T. Yoshida, M. Sigrist and Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 074714.

〈情報提供：吉田智大(新潟大学大学院自然科学研究科)
柳瀬陽一(新潟大学自然科学系准教授)〉

Special Topics: Frontier of Condensed Matter Physics Using Synchrotron Radiation

物性研究を主たる目的とした大型実験施設である放射光施設が現れてから、本年度で約30年(例えば:KEK-PF

1982), さらに、いわゆる第3世代といわれる高輝度の放射光施設が建設されてから十数年(ESRF 1994, APS 1996, SPring8 1997)が経過しました。その結果、物質科学の広い研究分野において、これらの施設を用いた数々の新しい研究成果が輩出しており、また今後もその果たす役割の重要性は計り知れないところです。そこで、これらの放射光施設において得られた、物理学の広い分野における最新の研究成果をまとめて紹介することは、JPSJの多くの読者の興味を引き、また、これらの研究者が今後の研究を進めていくうえで有益な情報源となると考え、本特集を企画しました。

本特集においては、JPSJのカバーする分野において、最近強いインパクトを与えた研究を、代表的な実験手法ごとにできるだけバランスよく選び、各論文は、得られた物理の面白さを中心に、実験手法を含め、専門でない読者にもわかりやすく説明するレビュー論文とすることを目指しました。全部で16編の論文を2013年82巻2月号に収録しました[DOI: 10.7566/JPSJ.82.021001-021016]。

企画担当編集委員：水木純一郎(関西学院大学)、藤森淳(東京大学)、村上洋一(KEK)、神木正史(JPSJ専任編集委員)

『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

『大学の物理教育』は、年3回(3月、7月、11月)発行で年間購読料(個人)は1,000円です。購読ご希望の方は、お電話(03-3816-6201)またはFax(03-3816-6208)でご連絡下さい。

また、本誌ホームページのURLは次の通りですので、どうぞご覧下さい。

<http://www.jps.or.jp/book/kyoikushi/>

『大学の物理教育』編集委員会

Vol. 19-2 (7月15日発行) 目次

日本物理学会における物理教育への取り組みについて	ス波弘行
講義室	
生命科学部における物理学の授業	高須昌子
日本各地で見られる「理科の時代」の物理授業筆記	
—「実験で自然に問うた」欧米の物理授業の影響—	
	小林昭三
大学生にみられる仕事の概念に対する誤解の現状とその解決法	
	細田宏樹
キュリー夫人の幻の実験授業—温度計実験の推理—	
	吉祥瑞枝
教育実践	
出前授業を通じた大学院生の科学コミュニケーション能力養成	
—理学系大学院生の特徴と傾向—	中野享香

教育報告	
物理学教育法の研究に基づいた教育効果改良—マクダーモット、	
シェーファー両教授を招いて—	
	古澤彰浩, フォン シー キト, 正島宏祐
領域13シンポジウム「物理オリンピックと日本の物理教育」	
報告	田中忠芳
図書室	
『自然は方程式で語る 力学読本』	大野栄三
教育に関する一言	岸本 功
開催情報	
編集後記	

日本物理学会が発行している Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) の Invited Papers で 2013 年 2 月号に掲載されたものを以下に紹介します。

この紹介記事は国内の新聞社の科学部、科学雑誌の編集部に電子メールで送っている「紹介文」をこの欄のために少し書き直したものです。専門外の読者を想定し、「何が問題で、何が明らかになったのか」を中心にした読み物であるので、参考文献などはなるべく省いています。なお、図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているので不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「PTEP 招待論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。

内容の詳細は、末尾に挙げる PTEP のホームページから閲覧・ダウンロードして下さい。PTEP はオープン・アクセス誌であり、閲覧・ダウンロードは無料です。

PTEP 編集委員会では、興味深いトピックスについて、Invited Papers の提案を受けて審議し、原稿を依頼しています。これによって、PTEP と物理学への関心を高めることを目指しています。物理学会会員からの PTEP への自信作の投稿を期待します。

ミューオンが電子に転換する過程を探索する COMET 実験

ミューオンが電子に転換する過程を探索する COMET (Coherent Muon to Electron Transition) 実験が、J-PARC 陽子加速器施設で実験開始に向けて最近大きく進展している。本論文はこの現状と今後の見通しを報告している。

平成 24 年に欧州 CERN 研究所の LHC 実験においてヒッグス粒子が発見され、素粒子物理学が活況を呈しているが、ヒッグス粒子以外の新粒子は発見されておらず、素粒子標準理論を超える新しい物理現象のヒントは未だ得られていない。このような状況を踏まえ、新しい物理現象のヒントを得るために、稀な崩壊過程を探索する実験が注目を集めている。加速器では直接生成できない大きな質量の新粒子の存在を、量子補正による効果を使って研究するのが稀崩壊探索実験である。この量子効果は非常に小さいので、標準理論では禁止されている過程を研究対象にするのが最善である。そのような研究対象の一つとして、ある種の荷電レプトンが別種の荷電レプトンに変換する過程 (たとえば、ミューオンが電子に転換する過程) が考えられている。これは、荷電レプトン・フレーバーが保存しない過程 (CLFV = Charged Lepton Flavor Violation) である。

ニュートリノ振動実験の結果は、ニュートリノが別種のニュートリノに変換し、レプトン・フレーバー保存が破れていることを示している。しかし、このニュートリノ振動の効果を考慮しても、標準理論で予測される CLFV の分岐比は 10^{-54} 以下である。すなわち、標準理論では CLFV はほとんど禁止されているので、CLFV が実験的に観測されれば、それは曖昧さなしに新しい物理現象の発見を意味する。一方、現在考えられている多くの新しい理論モデル、たとえば、超対称性理論、Little Higgs 理論、余剰次元理論、TeV ニュートリノシーソー理論などのモデルでは、次世代

の探索実験が目標とする実験精度の範囲内で CLFV が起きると予言している。

CLFV 探索実験のためには荷電レプトンを多く生成することが重要だが、この点でミューオンはタウレプトンよりはるかに有利である。ミューオンの CLFV としては、ミューオンが電子と光子に崩壊する過程 ($\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊) と、ミューオン原子でミューオンが電子に変わる過程 (μe 転換過程 $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$, N は原子核) の 2 つの過程が重要である。前者はスイスの PSI 研究所の MEG 実験で探索が続けられ、後者は COMET 実験でその探索が開始されようとしている。

一般に、CLFV を引き起こす物理メカニズムは、光子を伴う相互作用と光子を伴わない相互作用に識別される。光子を伴う相互作用が優位である場合は、 $\mu \rightarrow e\gamma$ が観測され、 μe 転換過程も (仮想光子と核子の電磁相互作用で) $\mu \rightarrow e\gamma$ の数百分の 1 の分岐比で観測される。また、光子を伴わない相互作用が優位な場合は、 $\mu \rightarrow e\gamma$ は観測されなくても、 μe 転換過程は観測され得る。

μe 転換過程を探索するには負電荷ミューオンを使ってミューオン原子を生成する。ミューオン原子の基底状態にいるミューオンが $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$ 反応を起こすと、約 105 MeV の運動エネルギーを持つ電子が 1 個放出される。この電子を測定することによって、 μe 転換事象を同定する。このように 105 MeV のエネルギーの電子を 1 個測定するだけでよいので偶然事象バックグラウンドがほとんどなく、ミューオンビーム強度による制限を受けずに実験感度を大幅に向上できるのは、 μe 転換過程実験の利点である。

COMET 実験は茨城県東海村の J-PARC 大強度陽子加速器施設のハドロンホールで遂行され、 3×10^{-17} の 1 事象発見実験精度で μe 転換過程を探索する。この実験精度は現在の実験上限値を約 10,000 倍上回る。COMET 実験のレイ

COMET Phase-I

COMET Phase-II

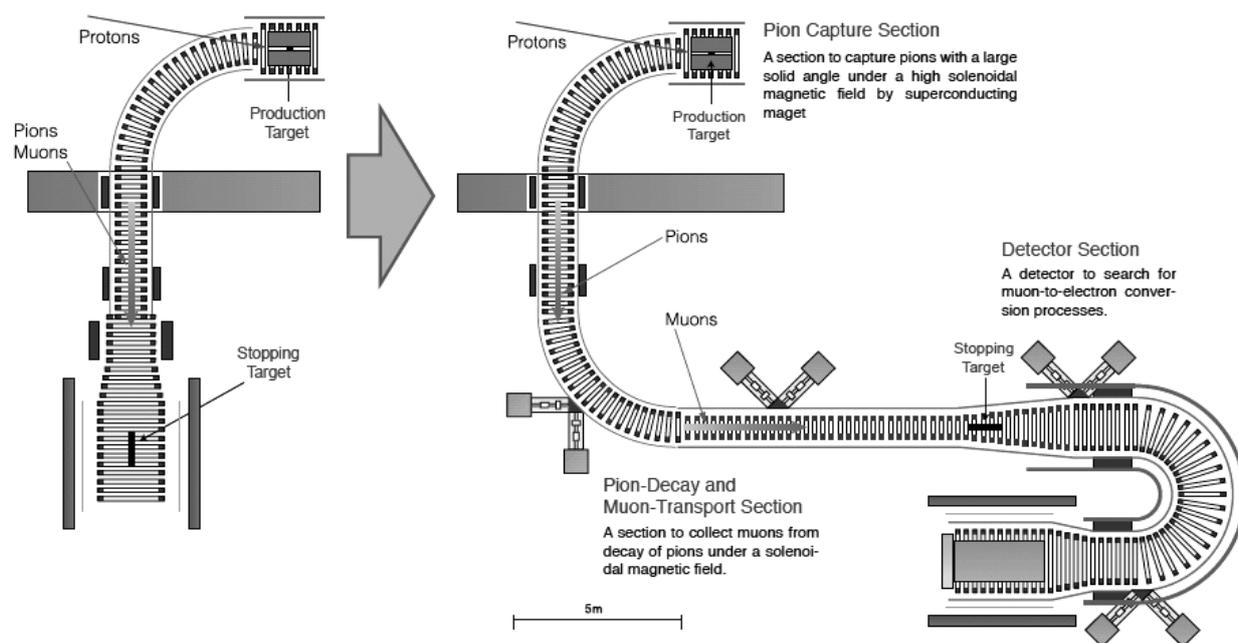


図1 COMET Phase-I (左図) と COMET Phase-II (右図) の実験レイアウト。

アウトを図1(右図)に示す。J-PARCの主リングからの陽子ビームをパイオン生成標的に照射し、発生したパイオンをソレノイド磁場で捕獲する。180度湾曲ソレノイドから構成されるミュオン輸送部内でパイオンはミュオンに崩壊し、このミュオンを効率良くミュオン静止標的に輸送し静止させる。ここで、湾曲ソレノイドは電荷と運動量を識別できるので、低エネルギーの負電荷ミュオンのみを選択し輸送する。ミュオン静止標的内の静止ミュオンから発生した電子の中から、180度湾曲ソレノイドからなる電子輸送部で105 MeV領域の電子のみを選択し、検出器部に輸送する。検出器は、真空中に置かれたストローガス飛跡検出器とシンチレーション結晶からなる電子カロリメータから構成され、 μe 転換過程の電子の運動量とエネルギーを同定する。2×10⁷秒のデータ取得期間で、総量2×10¹⁸個のミュオンを蓄積して実験目標を達成する。米国フェルミ加速器研究所でも、同じような探索実験

($\mu 2e$ 実験)が準備されており、国際競争となっている。

最近、時間的・予算的な観点から、COMET実験をPhase-IとPhase-IIの2段階で推進する方針が決まった。平成24年度補正予算でその建設費が認められたPhase-Iでは、ミュオン輸送部の最初の90度湾曲部までを製作する(図1左図)。COMET Phase-Iでの実験感度は、現在の実験上限値を約100倍程度向上した実験精度、すなわち、 3×10^{-15} の1事象発見実験精度であり、2016年からの実験開始を目指している。もし μe 転換過程が発見されれば、ヒッグス粒子発見に次ぐ素粒子物理学の大発見となるであろう。

原論文 (2013年2月4日公開済み)

A search for muon-to-electron conversion at J-PARC: the COMET experiment, Yoshitaka Kuno, on behalf of the COMET collaboration: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 022C01 (2013).

(情報提供: 久野良孝 (大阪大学理学研究科))

第69期 (2013年3月31日~2014年3月31日) 理事・監事

会 長	斯波 弘行	副会長(次期会長)	兵頭 俊夫
庶務理事	石田 憲二・伊藤 好孝・柴田 利明・田村 裕和・松川 宏・三沢 和彦・本林 透		
	森 初果		
会計理事	川村 光・柴田 利明(兼任)・野崎 光昭・松川 宏(兼任)		
会誌編集委員長	宮下 精二	JPSJ 編集委員長	安藤 恒也 PTEP 編集委員長 坂井 典佑
刊行委員長	高野 宏	監 事	藤井 保彦・渡邊 靖志

第3回日本学術振興会「育志賞」：高山あかり氏

高橋 隆 (東北大院理)

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 (現在：同原子分子材料科学高等研究機構) の高山あかりさんが、第3回日本学術振興会「育志賞」を受賞しました。育志賞は、天皇陛下の即位20年に当たり、社会的に厳しい経済環境の中で、勉学や研究に励んでいる若手研究者を支援・奨励するため、天皇陛下より同振興会に贈られた下賜金を基に平成22年度に創設されたもので、将来我が国の学術研究の発展に寄与することが期待される優秀な大学院博士後期課程学生を顕彰することで、その勉学及び研究意欲を高め、若手研究者の養成を図ることを目的としています。高山さんは物理学会からの推薦を受けて応募し、第3回の今回は全分野で16名が受賞しました。日本学士院で行われた授賞式では、高山さんが受賞者を代表して、秋篠宮両殿下の前で受賞の挨拶を行いました。

高山さんの受賞業績は、「超高分解能スピン分解光電子分光による2次元ラッシュバ電子系の研究」で、これまで困難とされていた光電子分光 (ARPES) における電子スピンの検出を、新型の高効率ミニモット検出器を開発することで可能とし、世界最高の分解能を持つスピン分解 ARPES 装置を開発したものです。高山さんは開発した装置を用いて、ラッシュバ効果によりスピン分裂したビスマス表面バンドを直接観測し、理論では予言されていなかった詳細な電子・スピン構造を明らかにしました。この高分解能スピン分解 ARPES 装置の開発の成功は、物質の電子構造をエネルギー、運動量に加え、さらにスピンにまで分解して高精度で実験的に決定することを可能にしたもので、今後の物性物理の進展に

大きく寄与するものと期待されます。

今回の高山さんの受賞が、本会の学生および若手会員の大きな励みになるものと思います。

(2013年6月10日原稿受付)

第33回猿橋賞：肥山詠美子氏

上村正康 (理研)

第33回猿橋賞は、肥山詠美子氏 (理化学研究所仁科加速器研究センター准主任研究員) に授与された。授賞対象の研究は「量子少数多体系の精密計算法の確立とその展開」である。

物理学には、少数多体系 (3体以上) のシュレーディンガー方程式を精密に解くことに帰着する課題が多い。精密さ故に新しい物理的知見が得られる場合が多々ある。肥山氏は、3体系変分法「ガウス関数展開法」を発展させて、種々の異なる粒子から成る系や複雑な相互作用に対しても適用し易く、且つ修得し易い方法 (無限小変位ガウスローブ関数展開法) を発案し、4体、5体系の精密計算を実行可能にした (日本物理学会誌 **61** (2006) 27 参照)。肥山氏は、この方法を核物理 (特に、ハイパー核物理、ハドロン物理、少数核子系物理)、宇宙核物理、エキゾテック原子分子物理、冷却原子物理など多彩な分野の課題に適用し、多くの成果を上げてきた。

中でも特に評価が高いのはハイパー核物理学における業績である。ハイパー核とは、通常の原子核にハイペロン (奇妙さの自由度をもつバリオン) が1個または複数個混入した原子核である。ハイパー核物理学の主たる研究目的は、核子 (N) とハイペロン (Y) から成るバリオン多体系のダイナミクスの解明、および $Y-N$ 間、 $Y-Y$ 間の相互作用の解明である。軽いハイパー核は、核子・核子クラスター・ハイペロン (特にラ

ムダ粒子、 Λ) を構成粒子とする少数多体系と見なせる場合が多く、上記の精密計算法が威力を発揮してきた。肥山氏は、 $Y-N$ 間散乱実験データが僅少であり、 $Y-Y$ 間は皆無であることを考慮して「多体系のダイナミクスの分析から、構成粒子間の相互作用を解明して行く」という戦略、従来の常識とは逆向きの戦略、を提唱し、新しい研究の潮流 (今や定着) を生み出した。

その流れを牽引した肥山氏の研究例を2, 3示す。i) スピン軌道力は $N-N$ 間では大きく、核物理の基礎を成すが、 $\Lambda-N$ 間では非常に小さいことをラムダ・ハイパー核 ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ と ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ のエネルギー準位の定量的予言で示し、その準位が米国 BNL の実験で検証された。ii) エネルギー準位を予言した未発見中性子過剰ハイパー核 ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ が、米国 JLAB の実験において観測され、理論・実験の比較から、 $\Lambda-N$ 間力の荷電対称性の破れが非常に小さいことが判明した。iii) KEK の乾板実験のデマチャナギイベントとヒダイベントが、それぞれダブルラムダ・ハイパー核 ${}^{10}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ の第一励起状態、 ${}^{11}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ の基底状態の観測であることを理論的に同定し、 $\Lambda-\Lambda$ 間相互作用に対して情報を与えた。

肥山氏は、KEK、J-PARC、JLAB、GSI などの世界の主要な原子核実験施設の重要なハイパー核実験において、実験提案の段階から協力し、結果の予言・結果の解析を行って、貴重な貢献をして来た。この活躍の原動力は、肥山氏自身が発展させた使い易い精密計算法の素早い活用と国内国外の実験家との密接な協力関係であろう。研究分野のレビュー論文6編の執筆、国際会議での招待講演35回にも見られるように、肥山氏はハイパー核物理学・少数多体系物理学の中心的推進役の一人である。今後の一層のご活躍を祈念する。

(2013年6月10日原稿受付)

理工系ポストク・博士人材のキャリアデザインと大学院改革

朝日 透 〈早稲田大学博士キャリアセンター*1〉

中里 弘道 〈早稲田大学博士キャリアセンター*2〉

鈴木 清貴 〈早稲田大学博士キャリアセンター*3〉

1. 「博士の就職難」の違和感

「博士の就職難」が喧伝されるようになってすでに久しい。文部科学省がポストドクターのキャリア対策に本格的に乗り出した「科学技術関係人材のキャリアパス多様化促進事業」(2006年)の頃から、博士号取得者の就職状況がマスメディアの注目するところとなり、「就職活動に苦勞する博士号取得者」との切り口でたびたび報道されるようになった。近年の文部科学省『学校基本調査』では、修士課程修了者の博士課程進学率の減少が明確になっており、日本の学術研究の基盤を衰退させかねない事態として懸念されている。修士課程修了者が博士課程進学を躊躇する理由の一つとして、「博士号取得後のキャリアパス」に対する固定観念と関係していることは想像に難くない。キャンパスにおいて、学生たちが「博士課程に進んだら就職口がない」と囁くのを耳にすることは少なくない。また、最近では世相を反映して、大学の多くがベアレンツデーと称する保護者会を開催しているが、そのような場で保護者から「子供が博士課程を志していて不安だ」という相談を受けたりすることもある。しかし、果たしてそれは本当だろうか。

むろん、全国の大学教員ポスト数は限られており、少子高齢化による学生数の減少で専任教員ポストを獲得するまでのハードルがますます上がっていることは事実である。それでも、大学で多くの博士の就職活動を見ているわれわれの立場からは、メディアが繰り返し伝える「博士の就職難」の内容には違和感を感じる事が少なくない。すぐに気づくことだが、メディアによる「博士の就職難」の報道には定型がある。すなわち、博士号取得者は自ら

の専門研究に強い執着を持つが、アカデミアでポストに就くことには絶望的な困難がある。一方、博士号取得者の受け入れ先として期待されていた民間企業は、博士を「視野が狭く、組織では扱いにくい人材」とみなし、採用に消極的である、というものである。しかし、このようなメディアの言説には二つの意味で違和感が拭えない。

一つは、このような見方が事実を単純化しすぎてはいないかという点である。一口に博士といっても、文系と理系、さらに専門分野によってキャリアパスの様態は大きく異なる(文部科学省科学技術政策研究所『一博士人材の将来像を考える—理学系博士課程修了者のキャリアパス』2010年5月)。博士号取得者は自らの専門研究に執着していて視野が狭い、ということも割引いてみる必要がある。客観的なデータからは、博士人材の多くはアカデミア以外のキャリアパスも視野に入れており、また博士のキャリアパスは現実に多様化しつつあることが看取されるのである(文部科学省科学技術政策研究所『ポストドクター等の研究活動・生活意識調査』2008年10月、同『一博士人材の将来像を考える—理学系博士課程

修了者のキャリアパス』2010年5月)。

もう一つの違和感は、より重要なこととして、繰り返される「博士の就職難」の報道が、その「悲惨さ」を強調するだけで、これまでの文部科学行政の政策的妥当性を十分に検証するには至らず、博士人材の育成において直面している問題を社会でどのように共有してゆくのか、少子高齢化時代における大学院教育の将来をどうすべきか、といった社会的連帯の醸成や教育改革の議論に寄与していないということである。現状では「悲惨な博士」の報道は、直面する問題の解決を促すというよりも、ただ流行りの「若者残酷物語」として消費されているに過ぎないように思われる(「高学歴ワーキングプア」といった造語は、マスメディアでまさにそのような文脈で流通しているといえる)。

博士の「悲惨さ」が繰り返し語られることで、奇妙な逆説的状况が浮き彫りにされている。それは、大学で最高の業績証明となる博士号の取得者が、まるで社会的に無力な、弱者のように描写されることである。彼らは大学制度において優秀な業績を示したから博士号を取得したのではなかったか。そ

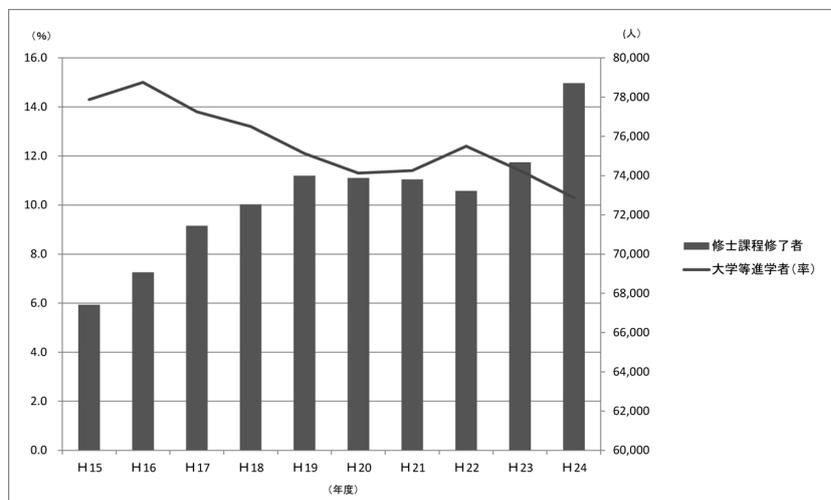


図1 修士課程修了者と進学率(文部科学省『学校基本調査』をともに作成)。

*1 センター長

*2 副センター長

*3 事務局次長

の「優秀な」彼らが、なぜ、自身の人生も切り拓くことができずに立ちすくんでいるのか、そんな疑問が生じるのである。これまで、学術研究の業績が常に社会的地位を保証してきたかどうかは検討の余地があるものの、現代社会において、制度上最高位の業績証明を得た者が、社会の中で希望の無い悲惨な境遇にあるということは、やはり奇妙なこととして受け止められるのである。結果として、そんな「無力な」博士たちに対して、しばしばあざけりに似た視線が向けられることになっている。博士を弱者であるかのように語るのは少なからず倒錯がある。むしろ、いま必要なのは、むやみに博士人材のキャリアパスの「悲惨さ」を強調することではなく、大学で教育や研究を行うことの社会的意味を見つめ直し、現今の社会経済状況における博士人材の役割を確認することだろう（その文脈でようやく、ワーキングプアのような一般的な労働問題と博士の就職難は、区別しつつも包摂して考えるべき問題として捉えられることになる）。さらに、日本の科学技術の未来を考えるならば、より長期的な視野に立って、若い世代に博士課程進学希望と憧れを抱かせるようなメッセージを発信してゆくことが重要になってくるだろう。当然、そのメッセージは、大学の指導教員たちの甘言や大学院パンフレットの宣伝文句のようなものではなく、若い世代に向けて、その将来設計と目標を具体的に指し示すものであるべきである。

実際、博士人材のキャリア支援の現場で携わっている立場から言うと、博士人材の就職は、本人が意識的に行動し大学が適切な支援を行えば、決して悲惨などではなく、大きな飛躍につながるというのが実感である。2006年の文部科学省「科学技術関係人材のキャリアパス多様化促進事業」を契機として、博士人材のキャリア支援は全国で展開され、これまで様々な試行錯誤を行い、その一部は確実に成果をあげてきた。そろそろ、この博士人材のキャリアパスの問題を、不毛な「悲惨さ」一辺倒ではなく、社会の共通課題として捉え、具体的な教育改革の議論へと

結びつけてゆくべき時期ではないか。そして大学は、その建設的議論を率先してリードしてゆくべきなのではないか。

2. 早稲田大学における博士人材の養成

本学ではこれまで、社会の多様な場面で活躍できる博士の育成を目標として取り組みを進め、具体的な成果をあげてきた。本学における博士人材の養成を、まずは制度面の整備状況から見てみる。本学の博士後期課程では、将来大学で教員として研究を先導し学生の教育にあたる博士人材と、産業界など大学以外の社会の様々な場面でその専門知識を活かして活躍できる博士人材の養成を両輪として推進している。

本学は、若手研究者の育成と学内の研究教育活動の活性化を目的に、若手研究者が任期付き教員（原則3年間）の資格で、自立した研究環境において研究活動に専念できる機関として、2006年9月に高等研究所（Waseda Institute for Advanced Study; 略称 WIAS）を設立した。また2007年には、文部科学省「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」事業に私立大学として初めて採択され、WIASで理工系研究者を対象としたテニユア・トラック制度を導入した。この制度によって、若手研究者は任期付きながら自立した研究環境において研究者としての経験を積み、厳正な審査を経てテニユア（専任）教員となる道筋を与えられるようになった。このテニユア・トラック制度によって専任教員職に就いた者は4名（2013年5月現在）であり、WIASは先端的な研究領域の開拓を図るとともに、将来、本学の研究教育の中核を担う人材の養成を進めることができている。

また本学は、文部科学省21世紀COEプログラム「多元要素からなる自己組織系の物理」、「実践的ナノ化学教育研究拠点」、「プロダクティブICTアカデミアプログラム」、「超高齢社会における人とロボット技術の共生」、及びグローバルCOEプログラム「実践的ナノ化学教育研究拠点」、「アンビエントSoC教育研究の国際拠点」、「グローバル ロボット アカデミア」など

博士後期課程学生を対象とした人材育成教育研究プログラムにも採択され、博士後期課程学生に対する国際水準の専門力養成と先端研究を相乗的に連携して推進できる環境整備が大きく進展した。さらに、2012年には、理工学術院先進理工学研究科の4専攻（物理学及応用物理学専攻、応用化学専攻、化学・生命化学専攻、生命医科学専攻）が文部科学省「卓越した大学院拠点形成支援補助金」の採択を受けた。本事業により、各専攻で博士後期課程学生に研究活動の支援継続と研究環境の整備を実施、教育研究レベルを充実させている。

このような将来大学の教員として研究と教育に従事する人材の養成と並行して本学が近年注力して取り組んでいるのが、産業界など大学以外の場で活躍できる博士人材の養成である。まず2006年の「科学技術関係人材のキャリアパス多様化促進事業」の採択を受け、理工学術院にポスドク・キャリアセンターを設置、民間企業など大学の教員職以外のキャリアパスを希望するポスドクターの支援を開始した。ポスドク・キャリアセンターでは民間企業や公的研究機関出身のキャリアコーディネータが理工系研究科に所属する博士号取得者を中心にその一人ひとりと面接を行い、就職活動に関わる自己分析を助け、必要に応じて企業の紹介や面接対策の個別指導を行った。また、博士号取得者が実務を行ううえで役立つ知的財産の知識や英文ライティングの秘訣、ベンチャー起業ノウハウなどについてのセミナーを開催した。さらに、博士人材のキャリアについての意識改革を進めるため、博士号取得者本人のみならずその指導教員も対象として、啓発セミナー等を実施した。2008年の補助事業終了までに、ポスドク・キャリアセンターのキャリア支援を受けたポスドクター62名が就職を決めた。

また、社会が求める博士人材の養成を一層拡大・深化させるため、2008年に文部科学省「イノベーション創出若手研究人材養成」事業（現「ポスドクター・キャリア開発事業」）に応募し採択された。本事業では、今後求

められる博士の人物像を「実践的博士人材」と呼び、「実社会に起点を置き、社会変革を惹起しうる未来・技術・モデルを描き、高い専門力を武器に挑戦できる人材」と定義した。そして、理工学術院に新たに博士キャリアセンターを設置、博士課程在学者と博士号取得後5年以内の若手ポストドクターを養成対象として「実践的博士人材養成プログラム」を展開した(博士キャリアセンター新設に伴い、ポスドク・キャリアセンターは博士号取得後5年以上が経過した、シニア層のポストドクターを支援することとなった)。本プログラムにおいて博士キャリアセンターは、博士人材の個別のキャリア支援を行うと同時に、「実践的博士人材」の理念に基づいて構想された人材養成プログラムを学内において先行的に実施し、そこで得られたノウハウを全学的な大学院改革にフィードバックする役割を担った。この「実践的博士人材養成プログラム」の取り組みの詳細については次節で触れる。さらに、2010年に文部科学省「実践型研究リーダー養成事業」の採択を受け、博士キャリアセンターを拠点として「社会問題解決リーダー育成のための文理相乗連携プログラム」を開始した。本事業は博士課程学生を対象として、将来のリーダーを養成するための演習モデルを開発することを目的としたものである。本学では、特に文理融合モデルの確立を目標とし、チームの構成員を文系・理系の修士・博士課程学生から募り、文理の壁を超えて教員がチーム編成や選抜審査に関わり、専門外の有識者から専門知識を新たに習得したり、海外の研究機関などで実習したりして、大学院教育で養われた専門力を社会的課題の解決に結びつける訓練を進めている。

さらに、本学は2012年に文部科学省「博士課程教育リーディングプログラム」に採択された。本プログラムでは、全世界的に喫緊の課題となっているエネルギー・資源の問題に取り組む「エナジーネクスト」リーダーとしての博士人材の養成を標榜している。5年の一貫した学位プログラムの下、選抜されたプログラム履修生への経済的

な支援や、国内外の企業における長期インターンシップなど特色ある取り組みを通じて、社会から要請されるエネルギーや環境などの科学技術・課題を把握し、イノベーションの創出に先導的に挑戦できる理工系博士人材を養成している。本プログラム一期・二期の履修生として既に29名が選抜されている。本学では、「博士課程教育リーディングプログラム」で得られた人材養成のノウハウを全学的な大学院改革に結びつけてゆくため、2014年4月に5年一貫制博士課程のみからなる大学院先進理工学専攻を新設することを目指している。

3. キャリアデザインの構築支援—「実践的博士人材養成プログラム」の事例から

前述したように、本学では文部科学省「ポストドクター・キャリア開発事業」の補助を受け、2008年より「実践的博士人材養成プログラム」を開始し、産業界のニーズとアカデミアのシーズのバランスのもとに、学生一人ひとりに対応したテラーメイドによる養成プログラムを実施してきた。以下、5年間の文部科学省補助事業における実績を示すとともに、それぞれの取り組みの諸相を解説する。

(1) プログラム登録

「実践的博士人材養成プログラム」は、2008年の開始以来、それぞれ延べ358名の博士課程学生、77名のポストドクターの登録者を得た。本学では、プログラムの広報を、博士キャリアセンターのサイトをはじめとするインターネット、学内説明会、などを通じて行った。まず、教員層に本プログラムの意義を理解させ、指導教員から博士学生に本プログラムに参加するよう促してもらうことが重要であった。当初、指導教員によっては、指導学生が専門研究以外の活動に時間を割くことに否定的な態度を取るケースがみられた。そのような場合は、センター所属の教員が直接、その指導教員と面談を行い、本プログラムの意義を説明し、学生の参加への許可を引き出した。指導学生がプログラムへ参加することを否定的にみる教員は、プログラムが実績を積

み重ね、学内でその意義が周知されてゆくにつれ、少なくなっていく。プログラム登録に関して特筆すべきは、他大学・他機関から5年間で延べ104名の参加登録があったことである。文部科学省補助事業のフレームワークでは、採択機関はその地域で博士人材のキャリア支援を行うハブとしての性格も期待されていたため、本学ではかかる他の大学や研究機関に所属する博士課程学生、ポストドクターの参加希望を積極的に受け入れた。他大学・他機関から申し込んで来た学生は、本プログラムで当初から本学と提携関係にあった慶應義塾大学、東京理科大学所属の学生を除くと、そのほとんどが自らインターネット等を使って本学のキャリア支援の取り組みを探し出し、プログラム参加を希望してきた者であった。この事実は、博士課程・ポストドクターのキャリア支援に対するニーズが広く存在していること、しばしば「視野が狭い」とされる博士人材の中に、チャンスを求めて積極的に情報収集に努める層が存在するというを示している。また、文部科学省の補助事業として、本事業では全国で本学を含めた33校が採択され、各校毎に個別の取り組みとして展開されたが、博士人材のキャリア支援のニーズが採択校の拡がりよりも広範に存在しているという事実は、採択校による個別の取り組みという方法が全国的なキャリア支援事業として最善であったか、再考を迫るものであるといえる。

(2) 実践カリキュラム

「実社会に起点を置き、社会変革を惹起しうる未来・技術・モデルを描き、高い専門力を武器に挑戦できる人材」としての「実践的博士人材」に求められるのは、専門性の高さに加えて、イノベーションの創出に向けて、様々な人々と連携しながらプロジェクトを力強く主導してゆく力である。かかる能力を博士学生やポストドクターに身に付けさせるために、本学では博士人材向けの講義科目(実践カリキュラム)を開始した。実践カリキュラムは、イノベーションを創出するために必要なマネジメント、ネゴシエーションの考え方や基本スキルを学ぶ博士実践特論

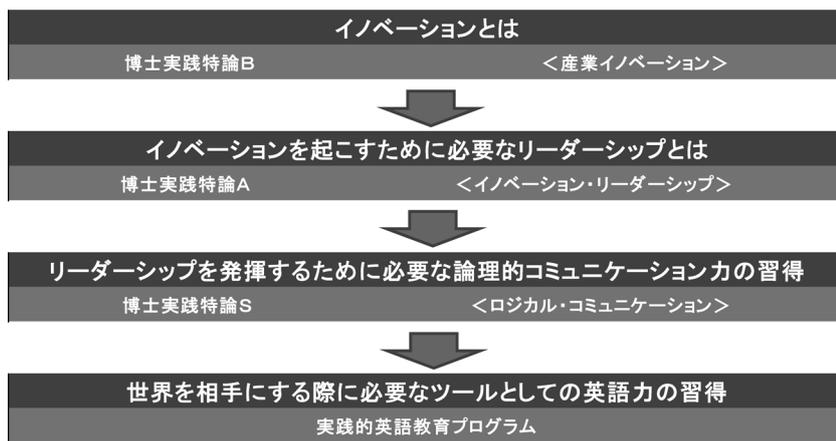


図2 実践カリキュラムのスキーム。

A (イノベーション・リーダーシップ)、研究開発戦略、技術開発動向、イノベーションの実例などについて産官学の実情と考え方を学ぶ博士実践特論B (産業イノベーション)、有力企業の幹部研修等で豊富な実績を持つコンサルティング企業から講師を招き、心理学に基づく交流分析や英語によるプレゼンテーションの訓練を行う博士実践特論S (ロジカル・コミュニケーション)、グローバル化した実務環境で不可欠な、実践的な英語力を身に付ける実践的英語教育プログラムで構成されており、大学の講義日程に沿って開講した。これらの講義科目は相互に結びつき、体系化されている。すなわち、最初に博士実践特論Bでイノベーションとは何かを学び、次にイノベーションを起こすために不可欠なリーダーシップについて博士実践特論Aで学ぶ。そして、リーダーシップを発揮するために必要な論理的コミュニケーション能力を博士実践特論Sで習得し、さらに国際的な舞台でかかる能力を発揮するために必要となる英語力を実践的英語教育プログラムで研鑽するという具合である。

このような博士人材向けのスキルアップ講座を実施するに際して問題となるのは、日常研究や後輩の指導で忙しい博士課程の学生たちをいかに継続的に参加させるかということである。本学では履修の利便性を考え、ほとんどの講義を夜間または土曜日に開講している。また、ポストドク・キャリアセンターの頃からの経験として、博士課程の学生たちは博士論文の執筆や研究室の業務で多忙な中で、講義に参加する

メリットがあるかシビアに見極めるといことがわかっていて、そのため、各講義は受講生の声をよくヒアリングし、研究にも役立ち効果が実感できる実践的内容となるよう意識した。このようなカリキュラム設計が功を奏し、2008-2013年度の5年間の実践カリキュラムの参加者数は、博士課程学生が延べ717名、ポストドクターが延べ114名という高実績を示した。実践カリキュラムの講義が受講生から高い支持を受けたことの証左は、カリキュラム修了者の有志が、自主的な勉強会「特論会」を立ち上げたことにも表れている。「特論会」では、出身専攻の異なる受講生が、講義で学んだ内容や共通の問題、関心についてそれぞれの専門を超えた討論を行っている。「特論会」は本プログラムの同窓会的な位置づけともなっており、プログラム修了後、様々な分野で活躍する博士人材のネットワークづくりに寄与している。学生の関心の高まりを受けて、本学では2009年4月より博士実践特論の各科目を大学院の正式科目と位置付けた。博士キャリアセンターの先駆的取り組みが大学院の正式カリキュラムにフィードバックされたかたちとなり、博士人材がキャリアデザインを構築する支援活動が大学院教育改革に反映された第一歩となった。

(3) インターンシップ

文部科学省補助事業「ポストドクター・キャリア開発事業」は、民間企業における博士人材の長期インターンシップを事業の中核としている。本学も博士課程学生やポストドクターを選抜

し、国内外の民間企業や公的研究機関において3ヶ月以上の長期インターンシップを実施した。かかるインターンシップは、民間企業出身の5名のキャリアコーディネータが、インターンシップを希望する博士人材を個別に担当し、個々の状況に合わせたテラーメイドの対応を行うことで進められた。キャリアコーディネータは、インターンシップの実施に関して、研修を希望する博士人材の適性とインターンシップに臨む自主性を観察しつつ、その指導教員と協議・調整を行い、同時に研修先となる国内外の企業や公的研究機関との打診・交渉を行った。キャリアコーディネータによってインターンシップ実施の条件整備が行われた博士人材は、学外の有識者から成る選考委員会によって審査され、最終的な研修実施の可否が判断された。キャリアコーディネータによる調整—選考委員会の審査というプロセスを経ることで、受け入れ企業に対して養成対象者とインターンシップの研修内容の質を担保することができた。本学では、5年間の文部科学省補助期間中に延べ80名の博士人材を長期インターンシップに派遣した。中でも、派遣総数の35% (28名) が海外の企業・研究機関で研修を行ったことは、本学のプログラムの特徴となっており、これは世界水準で活躍できる博士人材の育成を目指す「実践的博士人材」の理念が反映された結果となっている。

スウェーデンの企業連合で研修を行った物理学及応用物理学専攻の博士課程学生は、次のように語っている。

「実は研修を受けたおかげで、外国で生活したいと思うようになりました。活発にディスカッションを行い、新しいアイデアを生み出す力に溢れた海外の研究者に刺激を受けましたし、言語は違えど人はどこでも同じだということが分かり、働く場所の制限が自分の中で無くなったんです。」(『実践的博士人材のためのキャリアガイド2011』早稲田大学博士キャリアセンター)

(4) キャリア相談

就職希望者の相談も、キャリアコーディネータが個別に担当を決め、対応

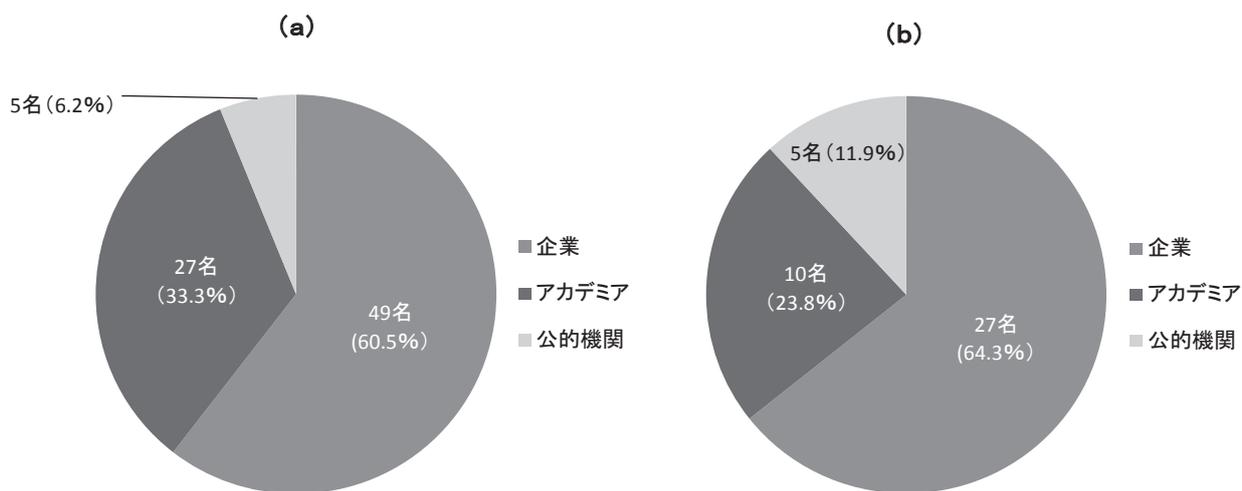


図3 キャリア相談実施者就職状況。(a) 博士課程学生。(b) ポストドクター。

した。キャリア相談においてキャリアコーディネータの役割が重要だったのは、キャリアコーディネータが、就職希望者本人も気づいていない適性や、研究内容の応用可能性を指し示すことができたことである。産業界で長年の経験を持つキャリアコーディネータは、キャリアパスについて博士人材がしばしば陥りがちな視野狭窄の状況を正し、就職先候補を拓げることに貢献した。また、博士人材の採用に前向きな民間企業に呼びかけ、学内を会場として民間企業と博士人材が出会う「マッチング会」を毎年開催した。「マッチング会」は博士人材に採用における企業の着眼点を理解させる貴重な機会となる一方、企業担当者にも博士人材の個々の資質や研究内容を直接知らしめる場となり、参加した博士と民間企業の双方から好評を博した。2008-2012年度の5年間で、博士キャリアセンターが実施したカリキュラム、インターンシップ、キャリア相談の対象者のうち、81名の博士学生、42名のポストドクターが就職を決めた。そのうち、博士学生の約60%、ポストドクの約65%が民間企業へ就職している。

(5) 補助事業終了後の展開

本学は文部科学省「ポストドクター・キャリア開発事業」の初年度(2008年度)採択校であり、補助事業は2013年3月に終了した。以後は大学の自主的取り組みとして博士キャリアセンターはポストドク・キャリアセンターと並

び活動を継続する。実践カリキュラムの各科目は、正式講義科目として大学院カリキュラムの中で継続実施されている。また、インターンシップについては研修実費を受け入れ企業が負担するかたちで継続できるよう複数の連携企業と交渉を進めている。キャリアデザイン構築に関してもキャリアコーディネータによる対応を継続する。しかし、補助事業期間中は他大学・他機関の博士人材を受け入れてきたが、今後は原則として本学の在籍者のみが対象となる。私立大学は運営コストを原則として学費収入から支出しているため、自主運営となった後は、他大学・他機関出身者を養成することは名目上の限界がある。しかし、先述したように文部科学省補助事業の採択校以外からもキャリア支援を求める声は少なくなく、これについては国に何らかの対策を求めたい。

4. 結びにかえて

最後に、博士人材のキャリアパスの問題と大学院改革について付言しておきたい。

博士人材のキャリアパスの問題は、単に労働市場の需給バランスだけでなく、大学における権威主義、ネポティズム、世代間格差の問題と密接につながっている。博士人材は、指導教員への礼節は軽んずるべきではないが、その顔色を過剰にうかがうことなく自らの将来について考えられるようになる

べきであるし、研究と業務の合間に情報収集や就職活動を行ったりする十分な余裕が与えられるべきである。何より、自分の将来は自分自身が決定権を持つという自由の確信を持てるようになるべきである。

博士人材が社会の多様な場で活躍できるために大学がなすべきなのは、単に産業界のニーズに直結したカリキュラムを準備することではない。必要なのは、若手研究者が主体的に大学の研究教育活動に関わり、そこからさらに社会への貢献を目指すようになるための環境づくりである。そしてこれこそが、博士人材のキャリア支援の取り組みが、大学院改革に必然的に結びついてゆく所以でもある。

本稿の作成に際しては、文部科学省科学技術政策研究所第1調査研究グループの三須敏幸上席研究官、株式会社日本総合研究所総合研究部門社会・産業デザイン事業部コンサルタントの鐘ヶ江靖史氏、早稲田大学博士キャリアセンター事務局長の高橋浩教授から情報の提供をいただいた。記して感謝申し上げます。

非会員著者の紹介

鈴木清貴氏：1970年、東京生まれ。早稲田大学嘱託職員。2006年より、ポストドクや博士学生など若手研究者のキャリア支援事業に従事。2006-2008年早稲田大学ポストドク・キャリアセンター事務局、2008-2012年同博士キャリアセンター事務局担当。

(2013年5月17日原稿受付)

フィレンツェ，ポスドク体験記

毛受弘彰 〈名大院理〉

1. はじめに

イタリアでのポスドク生活を終えて、日本に帰ってから2年が過ぎた。私のイタリアでの生活の話は少々古いのだが、何かの参考になればと思い、本稿を執筆させてもらった。私は、名古屋大学で博士号を取得したあと、2009年7月から2010年末まで約1年半をイタリア国立原子核物理研究所 (INFN) のフィレンツェセクションでポスドク研究员として過ごした。INFNは、イタリア各地にセクションがあり、イタリア国内の素粒子物理学、原子核物理学および宇宙線物理学の研究を一手に担っている。私は、日本とイタリアを中心としたLHC加速器実験の1つであるLHCf (LHC forward) に参加しており、当時の指導教員にイタリア人の共同研究者からINFNのポスドク公募の話がまわってきたのが事の始まりである。まずは、このイタリアへ移ることを決めたときの話から始めていきたい。

2009年初めのある日、博士論文執筆に追われていた私は、指導教員に呼ばれ「INFNのポスドク内定通知が来た。今、ここでイタリアに行くかどうか決めてくれ」と、その場で即決することを求められた。当時、私はこのINFNの他にも日本のポスドク公募に申請しており、その公募と比べると、このイタリアのポスドクは給料がとても低い。ご多分にもれずリーマンショックのあおりを受けて父親が無職状態に近かった私を、この選択はとても悩ませた。しかし、最終的には指導教員の「ご両親も君が世界で飛躍することを望んでいる」という何の根拠も無い説得に応じ、イタリア行きをその場で決めた。いまにして思えば、この決定は大正解である。イタリアでの研究生生活は、研究者としての視野を広げただけではなく、私の人生観にも大きな影響与えた。とはいえ、親のすねをかじってばかりだったことに後ろめたさを感じていた私は、この決断をどう両親に報告しようかと数日間悩んだのを覚

えている。

2. 最初の壁

イタリアで研究生生活を始めようとする人皆が遭遇する最初の壁が、VISAと滞在許可の取得である。イタリアのこの手の役所手続きは、とにかく分かりにくく、とても時間がかかる。そして、頻繁に手続きのルールが変更されるのだ。私の場合は、滞在許可書の取得にとっても苦労した。滞在許可書は、イタリア入国後すぐに取得しなければならないもので、イタリアでの銀行口座の開設にも必要になってくる。フィレンツェ到着後、INFNの事務のおばちゃんに勧められるままに、その年から可能になったWeb上での申請を行うことになった。「あなたがフィレンツェ地区で最初のWeb申請者よ」と言われ、今思えばすでに危険サイレンが鳴りまくっていたのだが、まだまだイタリア初心者だった私にはそれを感じとることはできなかった。申請後、いつまでたっても手続きは進まず、何度役所に問い合わせても「進行中だ、もう少し待て」と言われるばかり。半年が過ぎようとする頃、しびれを切らして滞在許可申請窓口で直接赴く普通の申請方法に切り替えることになった。窓口まで行ってみると、そこはすでにアフリカ、南アメリカ、中国からの移民でごった返していた。事前に指定されていた予約時間など全く意味をなさず、整理券を片手に10時間待たされ、ようやく申請をすませることができた。多くの労力と時間を費やして滞在許可書カードを取得できた時には、すでにイタリア入国から8ヶ月がたっていた。この4ヶ月後には、入国後1年を迎え、滞在許可書更新のためにまた何時間も窓口で待たされるはめになった。

イタリアでのスタートアップ時には、言葉の問題もあり、事務手続き、アパートの契約など、当時のボスやINFNでのポスドク仲間にお世話になりっぱなしだった。彼らの手助けなしでは、

イタリアで生活を始めることは不可能だったと思う。こんなことばかり書いていると、イタリアにマイナスイメージばかりがついてしまうが、次からはイタリア、フィレンツェの魅力を書きたい。

3. 華の都，フィレンツェ

ルネサンス発祥の地、フィレンツェ。そこは文化の街。街の中央に位置する巨大なドゥオーモ (大聖堂)、ビーナスの誕生を有するウフィツェ美術館、その他にも街の中の至る所に教会、美術館、博物館がある。感覚的には京都に近いかもしれないが、歩ける距離のなかにこれらが集まっており、より密集している感じだ。イタリアに移る前に、名大名誉教授の村木先生より、「研究だけでなく、文化を学んでこい。歴史も勉強する必要がある」との助言をいただいていたので、高校の世界史の教科書と数冊のルネサンスの歴史についての文庫本をイタリアに持って行った。この助言はとても役に立った。歴史的な事件の舞台となった広場、メディチ家ゆかりの建物や、旧市街を取り囲む城壁跡、歴史を少し勉強したおかげで街の至る所を興味深く、楽しむことができた。他にもフィレンツェの周りには、ピサ、シエナ、ルッカ、サンジャミアーノ、アレツォといった魅力的な街が多い。

もう一つのイタリアの大きな魅力が料理だ。長い海外生活において、現地の料理が自分の口にあうかどうかは重要なポイントの一つ。この点は、安心してよい。イタリアのレストランはどこもおいしい。フィレンツェの名物料理は、ピステッカフィオレンティーノ (フィレンツェ風Tボーンステーキ) をはじめとした肉料理。サラミ、生ハム、ソーセージ。どれもとてもおいしい。逆に、魚料理は壊滅的だ。おいしい魚料理を食べようと思ったら、高い金を払うしかない。これは、イタリアの都市は地域性がはっきりしているためである。フィレンツェはイタリア中央部の盆地に位置する肉文化の街だが、海沿いの街に行けばおいしい魚料理を安い料金で堪能することができる。

4. INFNでのポストドク生活

INFN フィレンツェセクションは、フィレンツェ中心部からバスで30分ほど行った隣街にある。フィレンツェ中心部の華やかさとはうってかわって、INFNの周りには農地が広がる、静かでいい街だ。私のアパートもこの街にあった。観光地ではないので、ほとんどの人は英語をしゃべることができない。そんななかでアパートの大家さんが英語に堪能だったのはとてもラッキーだった。いろいろと手助けしてもらったり、クリスマスのランチにおよばれしたりした。余談だが、イタリアのクリスマスにはサンタクロースは出てこない。部屋にキリスト生誕を再現した人形をかざり、25日に家族そろってランチを楽しむというのが伝統的なクリスマスのスタイルだ。INFNでは朝8時から9時頃に仕事が始まり、午後7時にはほとんど人がいなくなる。皆、夕方には家に帰って、家族と時間を過ごす。独身のポストドクは実家に住んでいる地元出身者がほとんどだった。イタリア人は地元指向がとても強く、多くの人が地元で大学や職場を探す。ヨーロッパの他の国に比べ、イタリアのポストドクの給料はとても低い。それでもイタリア国内、地元に残る人が多いのは、キリスト教の精神が社会基礎を作っており、家族と一緒に過ごすことをとても大切にしているからだと思う。

LHCf実験は、LHC加速器の陽子-陽子衝突最前方領域(ビーム軸方向)に生成されるガンマ線や中性子のエネルギー、横軸運動量を測定する。最前方に生成される粒子は、エネルギーフラックスが大きく、超高エネルギー宇宙線と地球大気が衝突してできる空気シャワーの発達を正しくシミュレーションする上で重要な要素の1つである。フィレンツェでのポストドク時代は、ち

ょうど測定を行った時期にあたり、その準備に追われていた。フィレンツェは実験サイトであるジュネーブのCERN研究所まで飛行機で1時間半と近く、これは大きなメリットだった。必要が生じたらすぐに国内出張のような感覚で向かうことができるので、日本にいた時に比べるとかなり心に余裕がもてた。LHCf実験の測定期間は他のLHC実験に比べるととても短い。これは、我々のターゲットがHiggs探索のようなレア事象ではなく、“普通”の衝突にあるからだ。LHC加速器が3.5 TeV陽子ビームで本格可動し始めた2010年3月末からルミノシティが高くなる前の7月までで測定を終えた。私はDAQ担当としてこの測定期間中ずっとCERN研究所に滞在していたが、イタリア人メンバーは1週間程度の短期滞在を何度も繰り返していた。

5. イタリア人とコーヒー

イタリア人とコーヒーは切っても切り離せないものだ。イタリアでコーヒーといったらエスプレッソ、しかも他の国のそれと比べてまた一段と濃い。カップの底にほんの少し入ったエスプレッソに砂糖を入れ、それをスプーンでかき回しながらおしゃべりを楽しみ、クイツと飲むのだ。INFNのビルの一階にも、一杯0.4ユーロで飲めるコーヒー自動販売機がある。そこはINFNの人のたまり場だ。朝8時半頃は技官のおっちゃん達といった具合に、誰かしらがおしゃべりとコーヒーを楽しんでいる。在籍していた研究室では、午前10時くらいになると誰かが「カフェ！」と言い出し、みんなでぞろぞろとコーヒーマシンの場所に向かって行く。お金は誰かがまとめて払い、交代で奢りがあった。おしゃべりの話題は、実験の進み具合、物理、政治、

家族、食べ物と多岐にわたり、時に激しい議論になる。イタリア人同士のそれは、喧嘩しているようにしか見えない。週末が近づいた金曜にそこでボスによく聞かれたのが「今週末はどこに遊びに行く予定だ」。そこで、「データ解析をやりようと思っているんだ」なんて言えば、すぐに「NO!! 週末にそんなことはするな」と言われてしまう。日本にいた頃は、博士論文執筆中だったこともあり、「週末=静かに研究できる時間」が染み付いていた自分には、イタリアに来てこれが一番のカルチャーショックだった。ボスは、研究室のメンバーの研究だけでなく、日々の生活、家族にも気を配る。まるで研究室が家族で、ボスは父親のような存在だった。ボ스에促されて、週末にフィレンツェの街中やトスカナ地方の街を巡るうちに、それがすっかりと自分の趣味になってしまった。

6. おわりに

海外研究者と共同研究する上で、相手の考え方やスタンスを理解しながら進めていくことはとても大事である。日本人とイタリア人では考え方が違う部分が多い。文化や歴史は彼らの考え方にリンクしており、一緒に研究を進める上でそれらを学ぶことはとても手助けになった。これから海外での研究生生活を送る人は、ぜひ現地の歴史と文化も学んできてほしい。また海外に出ることを検討している人には、イタリアも選択肢に入れてほしい。役所手続きの煩わしさもあるが、それを補う魅力を備えた国だと思う。

フィレンツェにこの6月からまた同僚が一人移る。Good Luck and Enjoy Italy!!

(2013年4月17日原稿受付)

まずは根を張れ、実るのはその後からだ

大関 真之 (京大院情報)

10ヶ月海外を楽しんで来なさい。こう言われたら本気で遊び、思い出を沢山作ってくることでしょ。10ヶ月で結果を出してこい。そう言われたらきつと焦るでしょう。

この文章では私のローマでの滞在中で巻き起こったこと、それを皆さんに紹介します。若い読者の方々は、成功者の秘訣みたいなものがきつと書かれているものと期待して、目を輝かせながら読むかもしれません。でもここに書くのは、そんなものではありません。あしからず。

ローマとの縁は、修士2年生のとき、憧れの国際会議に初めて参加したときからだ。人生初の英語発表。事前の練習は全くうまくいかず、指導教官にギブアップ宣言をしたくらいで、「君にはこれだけの国税を投入しています。」と叱られながらも、なんとかやりきったことを覚えている。当時貯めていたお金でイタリア製の財布を帰り道に買ったことも良い思い出である。会議では周りとは違う雰囲気紳士のひとときが目立っていた。スプリングラスを始め統計力学の分野で広く知られる Giorgio Parisi 氏そのひとである。

時は流れて、その Parisi 氏からローマ大学物理学科の研究者として働かないかという話が舞い込んで来た。数日間という短いものではなく、今度は10ヶ月という比較的長い期間である。

イタリアでは長期滞在者(8日以上で長期!)にはVISAとは別に滞在証明書というものを到着後3ヶ月以内に発行して受け取らなければいけないという法律がある。ローマ到着後まもなく、その滞在証明書の発行機関である警察署に出向いた。すぐさま発行されるかと思いきや、大学で記入した情報そのままを封入した“滞在証明書発行キット”というものを貰えるだけだった。別にそのキットに何を記入することもなく、ただ郵便局において必要な値段の切手・印紙の類を付けて警察署に送り返す。もちろん書類の送付だ

けではまだ駄目で、後日決められた日時に、次はローマ郊外の警察署で身体測定や入国の目的等を申告する。警察署に到着すると門には何人もの書類不備や遅刻等で跳ね返された人であふれかえっており、軍人が銃を構えて門を守っていた。そこをかき分けて軍人に向かって大声を張り上げて自分の存在をアピールするのはなかなか勇気のいることである。ちなみに英語は全く通じなかった。イタリア語で入国目的等を伝えている合間に「物理学の研究?放射線か。大変だな。」と言われたことが印象深い。一連の問答を終えた後に、7月のいついつ“きっかり”にこの警察署に行けと言われた。今でもあの“esatto (exact)”の発音は忘れない。まったく当てにならない厳密解であった。4月の入国からすれば3ヶ月ギリギリであるから、もちろん貰い損ねたら法律違反となる。律儀に厳密解に従った。

私:「滞在証明書を受け取りに来ました。」警察官「番号は?」私「〇〇番。」警察官「まだ出来ていないみたいだ。来週来ると良いよ。」

一翌週、

私「滞在証明書まだ?」警察官「番号は?」私「〇〇番。」

警察官「まだ出来ていないみたいだ。来週来ると良いよ。」

一翌週、

私「滞在証明書まだ?」警察官「番号は?」私「〇〇番。」

警察官「まだ出来ていないみたいだ。来週来ると良いよ。」

一翌週…以下同文。

皆さんご存知の通り、等差数列の和は発散する。結局帰国の日まで私は滞在証明書を見たことがない。ちなみにローマ滞在中からの帰国はドイツ経由で、そこでの出国審査のやり取りは自分でも秀逸であったと思う。

審査官「イタリアに長期で居たなら滞在証明書をもっているはずだ。見せる。」

私「イタリア人がそんな律儀に仕事すると思う?」

審査官「……………通っていいよ。」

と通してくれた。

いざ書き始めたら色々思い出して手が止まらないものだ。滞在費用等全ての経費がローマ大学から支出される予定であったが、これについても事務手続きに翻弄された。銀行口座の開設を行った後で、すぐに事務に口座の届け出をした。もちろん到着した月にすぐ支払われるとは思っちゃいない。しかし翌月になっても一向に支払われなかった。翌々月の末でも支払われず、さすがに頭に来て、大学事務室に乗り込むと、事務員は「手続きの遅延なんてあり得ないわ、私は知らない!」とシラを切った。その方の手元にあるキーボードの下に口座の届け出の書類が挟まっているのを見て、私はがっかりした。それを指差して怒鳴りつけてようやく7月の月末にこれまでの分が振り込まれた。

上記の通り遅延こそしたものの滞在中費用も先方が捻出していたのだから、私のローマ大学の滞在中はちゃんとした待遇のものだったと思っている。いや、そう思いたい。そう思いたいと敢えて言う理由は、発行された大学のIDの裏には、「この者には土日・夜間の大学構内への入構を禁ずる。」と書いてあり、憤慨したことがあるからだ。他の研究者は違うIDカードで、彼らには夜間用の鍵も渡されていた。もしかして実はちゃんとした研究者として扱われていなかったのか?今でも謎だ。貸与されたデスクトップPCはCPUファンが轟音を立てて使用もままならなかった。もちろん修理を頼んだ。修理はPCを傾けて音が鳴らないところを探すという対応で済まされた。共用ネットワークプリンタがその轟音の鳴るPCでしかアクセス出来ず、皆に迷惑をかけつつ、やっと印刷して論文を読んでいた。しかし多くの場合、午前中にしかプリンタを認識しなかった。驚いたことに年末年始は全く認識しなかった。最終的には個人でプリンタを買って家で印刷する始末。いたるところで不満の残る生活であった。

実際の研究生生活についても戸惑いに



図1 ローマ大学正門前。毎日の通勤風景である。



図2 左から Federico Richi-Tersenghi 氏、Giorgio Parisi 氏、筆者、銀行員を怒鳴りつけてくれた Ulisse Ferari 君。

包まれた。日本の研究室やプロジェクトであれば、決まったグループでの定例会等があるだろう。しかしローマ滞在が始まってから一度も定例会の類いはなかった。これまでの経験から定例会等の参加を通じて問題意識を共有し、それに沿った研究を遂行するには自信があり、その経験を生かしてイタリアでも挑戦しようと思ったのだが、一気にその方針は崩れ去った。しかし Parisi 氏が唸る研究をしてやろうと、ある程度完成するまでは！と一人の世界に入り込み、空回り運転をし続けてしまった。正直私のイタリア修行は当初、完全に失敗だった。

何もかもが翻弄された生活であったから余計感じるのだが、日本であればこうだっただろう、こんなことなかったはずなのに。と文句ばかりを口にするような毎日となった。いつの頃からか、帰れるまであと何ヶ月だ、と指折り数え始めていた。ずっと日本中心の考えを持ち続けていた。今思うに、そこが失敗の原因だったと思う。

夜間及び土日に入構禁止というのを良いことに、というよりどうすることも出来ないからというべきか、同居人達が音楽学校の学生だったので、音楽仲間と夜な夜な食事やコンサートにはよく出かけた。週末の夜は教会コンサートに行った。ようやく職を手に入れたという上機嫌のイタリア人には車を飛ばしてもらい、ローマ郊外の露天風呂にも行った。本当のテルマエ・ロマエである。自転車も買って郊外を走り回った。スペイン人の友人とロッククライミングにも出かけた。別の研究員仲間には誕生日祝いパーティで得意の

料理を振る舞った。物理学者対抗ゲーム世界大会では見事に優勝した。研究成果が出るまでは外に観光に行かない、などと決め込んでいたのを改めて、写真をとにかく撮りまくった。その写真は今でも自分の個人HPに利用している。とにかくとにかくイタリアを楽しんだ。楽しむほかなかった。毎日ピザと生ハム、そして赤ワイン。

結局何も研究は完成を迎えず、滞在期間の半分強はとうに過ぎていた。しかし、イタリアに染まり始めた新しい自分にとっては、そんなこだわりはどうでもよくなっていた。久しぶりに Parisi 氏に会った時に、こう話しかけた。「あなたと研究がどうしてもしたい。何も出来ていないけど、とにかく議論をさせてくれ。」と。忙しく次の会議へと歩みを進めていた彼は立ち止まり、「Si, Certo (ああ、もちろんだ。)」と答えてくれた。彼の部屋に朝一番で入り、今後の研究の方向性を決めることに成功した。チョークだらけの指で鼻をこすって、真っ白な顔になっていく統計力学の巨人の顔は忘れられない。車で逆走をしてしまう、ちょっとあり得ない人だと言うのは内緒だ。そんな小話も周り打ち解けてやり取りが出来るようになってから伝え聞いた。それからは定期的に議論をするようになった。変なこだわりを捨てたあの時からだろうか、この時にはすっかりイタリアの研究員である“Masayuki Ohzeki”になっていたと思う。日本人の衣を脱ぎ捨てたのは、イタリアに根を張って生活を始めたからだろう。

この原稿のタイトルを、再び見てほしい。これから異なる土地で修行をす

る人に是非伝えたいことだ。まずは現地人の生活にどっぷり浸かり、地元を忘れて、心の底からその土地に染まってほしい。そこから見える世界に生きることで、ようやく始まり、ゆくゆくは活躍が出来るのだと思う。ここで表現を弱めたのは、自分自身が満足いく活躍が出来たとはさすがに思えないからである。総じては失敗であった。でも楽しかった。

帰国してから早一年、個人的にイタリアを訪れる機会に恵まれ、懐かしくなっただけでこの原稿をしたためている。ああ、そういえば思い出した。ローマ滞在最終日にスリにあったのだ。その時盗まれたのは、なんと初めての国際会議の帰りに買ったあのイタリア製の財布である。ちなみに計算ノートや書籍等、重いので別送して帰国したがどれも届かなかった。全ての思い出をローマに残した格好だ。最終日前日には銀行員のミスで日本に預金全額を送金する前に口座を閉鎖されて、「金がないじゃん」と言われて大立ち回りをした。最後までイタリアらしいではないか！

え？ 結局今はどう思っているのかって？ もし10ヶ月海外で修行をして来なさい、といまそう言われたら喜んで行けるかな。

え？ イタリアでの研究は結実したのかって？ 嫌だね～日本はせわしくて。イタリア人らしく、赤ワインでも昼間から飲みながら、のんびりやりましょうよ。

(2013年2月27日原稿受付)

坂本真人

量子力学から超対称性へ；超対称性のエッセンスを捉える

サイエンス社，東京，2012，vii+190p，26×18 cm，本体2,476円（SGCライブラリ-96）

[専門～学部向]

ISSN 4910054701227

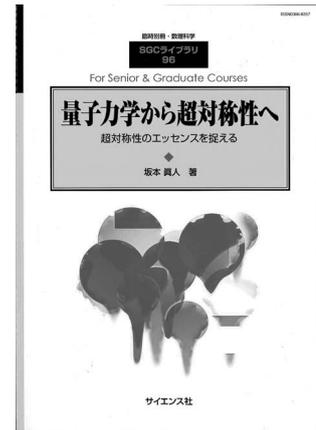
杉野文彦（岡山光量子科学研）

超対称性理論は通例，場の量子論を学部・大学院で習得後，進んだトピックスとして学ぶものだが，本書は量子力学を勉強した学部学生でも超対称性の本質を捉えることができるよう意図して書かれた，これまでにないユニークな教科書である。

第1章の対称性についての概説の後，第2章では円周上の自由粒子の量子力学から超対称性の基本構造を説き起こし，第3章で超対称性の一般的性質，ウィッテン指数， $N=2$ 超対称性に触れている。第4章では，ウィッテン模型と呼ばれる $N=2$ 超対称量子力学を題材にして，前章で触れた内容の詳細な解説が行われる。特に，4.8節で自由粒子と非自明ポテンシャル中の粒子が超対称性で結ばれることが議論され，続く第5章では超対称性および形状不変性を用いることで厳密に解ける量子力学系が無限個構成される。この内容は素粒子論研究者でもあまり目にする機会がなく，評者も興味深く読ませていただいた。

第6章で対称性と保存量，ネーターの定理の一般論について触れた後，第7章ではラグランジアン形式のウィッテン模型において具体的に超対称電荷を求め，ワード-高橋関係式，ニコライ変換を解説している。超対称性が引き起こす力学的側面としては，7.13節の経路積分表示でのウィッテン指数の計算において，励起状態の「ボーズ」的自由度と「フェルミ」的自由度が相殺することが述べられている。第8章では超対称性が明白な超空間と超場を用いてウィッテン模型が再定式化される。本書を読み終え先へ進む読者に向けて，様々なトピックスが最後の第9章で挙げられている。

式の導出は極めて丁寧に書かれている。誤植はほとんどないが，7.12節においてのみ超対称変換の演算子表示(7.91)の符号が反対である（そうしないと(7.36)，(7.52)と整合しない）こと，および(7.99)の右辺の因子の根号の中を E ではなく $2E$ とすべきところに関係する誤植が気になった。この点に



注意すれば学部生・大学院生が個人や自主ゼミで読み進めることも可能だろう。

扱っているのは超対称場の理論ではないので，本書での超対称性は真にボーズ粒子とフェルミ粒子を結びつけるものではない。しかし，場の量子論の無限大の自由度の取り扱いに煩わされることなく，超対称性の本質が解説されている良書だと思う。超対称性に興味のある初学者やアドバンスな量子力学を学びたい方に入門書としてぜひお勧めしたい。なお付録Aには，超対称場の量子論の基本的性質がまとめられている。

(2013年3月13日原稿受付)

川村嘉春

相対論的量子力学

裳華房，東京，2012，xii+353p，22×16 cm，本体4,600円（量子力学選書）[専門～学部向]

ISBN 978-4-7853-2510-7

松尾 衛（原子力機構）

まず，全353ページのうち，1/3を占める付録の充実が驚く。本編第I部で相対論的量子力学の理論構造，第II部で散乱問題を通じた理論検証が，付録では，初学者向けに特殊相対論と量子力学のまとめ，上級者向けにポアンカレ群の表現論，スピノル解析，様々な時空におけるスピノルが扱われている。

全体を通じて，物理的要請とその数学的実現方法が明確に提示され，計算例では丁寧な式変形とともに，計算結

果の物理的解釈が明瞭に解説される。長い計算を伴う場面では，迷子にならぬよう，最終結果が先に示され，後にその計算過程が解説されるといった構成上の工夫が随所に見られ，初学者への配慮が行き届いている。著者がゼミや講義を通じて，迷える学生さん相手に，手を変え品を変え助言を与えてこられた姿が容易に想像できる。解説上のノウハウが惜しみなく盛り込まれ，自習書に適している。



付録前半は，荷電粒子の特殊相対論的力学と量子力学の対称性にこだわった速習講座である。第I部では，ディラック方程式の導出，ローレンツ変換

性、解の物理的性質、非相対論的極限、水素原子のエネルギー準位、CPT変換を通じた負エネルギー解の解釈といった理論構造理解のための重要事項が押さえられる。第II部では、様々な散乱過程における散乱断面積の最低次の摂動計算を経て、異常磁気モーメントとラムシフトの計算に到達する。グリーン関数や正則化の丁寧な解説と相俟って、場の量子論に向けた最高度の準備が完了する。

一方、場の量子論の既習者にも役立つ。近年、高エネルギー物理学分野に限らず、相対論的量子効果が広く研究されている。電子状態計算や量子化学計算ではディラック方程式に基づく計

算が行われる。微細加工技術の進展により、グラフェンやカーボンナノチューブはもとより、ナノスケールで制御された物質系において、低次元時空や曲がった時空が有効的に実現され、その電子物性の理解に相対論的量子力学が駆使される。こうした様々な時空の物性を研究する上で足がかりとなるのが、本編および付録に記された、ポアンカレ群の表現論、共形代数、超対称性変換、スピノル解析、D次元ミンコフスキー時空におけるディラック、ワイル、マヨラナ、マヨラナワイルスピノルの存在条件や四脚場の議論である。かつては本書のカバーする内容を参照するために複数の文献を行き来する

必要があった。文献ごとに異なる単位系、E-B/E-H対応、計量の取り方の違いに苦勞したことを思い出す。今回の書評をよい機会に、早速、私の座右の書となった、本書で相対論的量子力学を学べる初学者が、正直うらやましい。(2013年3月15日原稿受付)

本欄では物理に関する新著を中心に、隠れた良書や学会員にとって有意義な本などを紹介していきます。紹介書籍の表紙画像につきましては、出版社の許可を得られたもののみ掲載しております。

図書リスト

最近の寄贈書

- H. Kragh: Niels Bohr and the Quantum Atom; The Bohr Model of Atomic Structure 1913-1925
Oxford Univ. Press, Oxford, 2012, vi + 410p, 25 × 18 cm, \$62.99
ISBN 978-0-19-965498-7
- L. Susskind and G. Hrabovsky: The Theoretical Minimum; What You Need to Know to Start Doing Physics
Basic Books, New York, 2013, xi + 238p, 22 × 15 cm, \$26.99
ISBN 978-0-465-02811-5
- マイケル・ニールセン著、高橋 洋訳：オープンサイエンス革命
紀伊国屋書店、東京、2013、398p、20 × 14 cm、本体2,200円
ISBN 978-4-314-01104-4

- マイケル・D・フェイヤー著、丑田公規、吉信 淳訳：絶対微小；日常生活を量子論で理解する
化学同人、京都、2013、xii + 403p、19 × 13 cm、本体2,800円
ISBN 978-4-7598-1546-7
- 江沢 洋監修、上條隆志、松本節夫、吉埜和雄編：《ノーベル賞への第一歩》物理論文国際コンテスト；日本の高校生たちの挑戦
亀書房、千葉、2013、xxi + 322p、26 × 18 cm、本体2,700円
ISBN 978-4-535-78579-3
- 岸野正剛：納得しながら量子力学
朝倉書店、東京、2013、vi + 215p、21 × 15 cm、本体3,200円（納得しながら学べる物理シリーズ1）
ISBN 978-4-254-13641-8
- 幸田清一郎、小谷正博、染田清彦、阿波賀邦夫編：大学院講義物理化学第2版；I. 量

- 子化学と分子分光学
東京化学同人、東京、2013、xiv + 272p、26 × 18 cm、本体4,200円
ISBN 978-4-8079-0800-4
- 畠山力三、飯塚 哲、金子俊郎：プラズマ理工学基礎
朝倉書店、東京、2012、vii + 180p、21 × 15 cm、本体2,900円
ISBN 978-4-254-22881-6
- 廣野喜幸：サイエンティフィック・リテラシー；科学技術リスクを考える
丸善出版、東京、2013、x + 218p、21 × 15 cm、本体2,000円
ISBN 978-4-621-08645-2
- 日本表面科学会編：表面科学の基礎
共立出版、東京、2013、xii + 227p、21 × 15 cm、本体3,500円（現代表面科学シリーズ第2巻）
ISBN 978-4-320-03373-3

掲示板

毎月1日締切(17:00必着)、翌月号掲載。但し1月号、2月号は前々月の20日締切。修正等をお願いする場合があります。締切日よりなるべくお早目にお申込み下さい。書式は<http://www.jps.or.jp/books/keijiban.html>にありますので、それに従ってお申込み下さい。webからのお申込みができない場合は、e-mail: keijiban@jps.or.jpへお送り下さい。必ず Fax 03-3816-6208へも原稿をお送り下さい。Faxがありませんと、掲載できない場合がございます。HP掲載をご希望される場合は、上記URLの「2. ホームページ掲載」をご参照下さい。本欄の各項目の内容につきましては、本会は関与致しかねますのでご了解下さい。

人事公募

人事公募の標準書式(1件500字以内)

1. 公募人員(職名、人数) 2. 所属部門、講座、研究室等 3. 専門分野、仕事の内容(1行17字で7行以内) 4. 着任時期(西暦年月日) 5. 任期 6. 応募資格 7. 提出書類(書類名の前に○印をつけ簡潔に、1行17字で6行以内) 8. 公募締切(西暦年月日、曜日) 9. ①書類送付先(郵便番号、住所、所属、担当者名) ②問合せ先(郵便番号、住所、所属、担当者名、電話、Fax、e-mail等、必要と思われるもの。①と同じ場合は省略) 10. その他(1行17字で5行以内)

■名古屋大学大学院理学研究科助教

1. 助教1名
2. 素粒子宇宙物理学専攻宇宙物理研究室(U研) X線グループ
3. X線天文学(実験)。飛翔体を用いた高エネルギー天体の観測的研究、及び宇宙X線観測装置の開発研究、大学院・学部の教育と研究指導。
4. 決定後早期
5. 2018年3月末、再任可
6. 博士号取得者、又は着任時迄の取得見込者
7. ○履歴書(写真貼付、e-mail、着任可能時期明記) ○研究業績リスト ○主要論文別刷3編以内各2部(コピー可) ○研究業績概要 ○着任後の研究計画 ○推薦書又は意見書2通
8. 2013年9月30日(月)必着

9. ①464-8602名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院理学研究科・素粒子宇宙物理学専攻物理学教室 犬塚修一郎
②同専攻 田原 譲 電話052-789-2554 tawara_u.phys.nagoya-u.ac.jp
10. 封筒に「宇宙物理研究室助教応募書類(又は推薦書、意見書)」と朱書し簡易書留で送付。応募書類原則不返却。本学は男女共同参画を推進しており、詳細は<http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/declaration/positive/>参照。

■広島工業大学工学部助教

1. 助教1名
2. 都市デザイン工学科(物理学担当)
3. 専門分野:物理学。担当科目:基礎物理学、物理学実験、基礎物理演習(所属学科以外の授業も担当)。
4. 2014年4月1日
6. 博士号取得者。本学の教育方針を理解し、基礎教育及び研究に熱意のある方。上記分野の研究業績があり、学協会でも活動しておられる方。大学院(博士前期課程)の基礎科目の授業を担当可能な方。
7. ○履歴書 ○健康診断書 ○推薦書1通及び照会可能者2名の氏名、所属、連絡先 ○教育研究業績一覧表 ○論文別刷又はコピー ○着任後の初年次教育と物理学実験の指導に関する抱負 ○今迄の研究業績概要及び着任後の研究の抱負
8. 2013年9月30日(月)必着
9. 731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1 広島工業大学事務局総務部 中畑佳二 電話082-921-3123 Fax 082-921-8934 y.nakahata.pg@it-hiroshima.ac.jp
10. 提出書類及び選考方法等詳細は<http://www.tsuru-gakuen.ac.jp/>参照。

■日本大学文理学部准教授

1. 准教授1名
2. 物理学科
3. 光物性又は半導体を中心とする実験物理学分野の研究。学部学生を対象とする物理学の講義・学生実験の担当。学部・学科運営に関する業務。
4. 2014年4月1日
5. なし
6. 博士号取得者。物理学系の科目の講義及び学生実験の担当が可能であること。
7. ○履歴書(写真貼付) ○教育・研究業績書(A4、書式自由) ○主要著書或いは論文3部の別刷又はコピー ○

- 研究概要と今後の予定(2,000字以内)
○教育に関する抱負(2,000字) ○外部資金獲得状況 ○照会可能者2名の氏名、所属、連絡先
8. 2013年9月30日(月)
9. ①156-8550東京都世田谷区桜上水3-25-40 日本大学文理学部物理学科事務室
②同学部・物理生命システム科学科橋本拓也 takuya_chs.nihon-u.ac.jp
10. 封筒に「教員応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。学科の詳細は<http://w3p.phys.chs.nihon-u.ac.jp>参照。

■東京大学物性研究所教員

1. 教授又は准教授1名
2. 極限コヒーレント光科学研究センター
3. 物性研究所が長年培ってきた真空紫外線や軟X線領域の極限レーザーを用いた光科学を更に発展させ、超高分解能光電子、時間分解光電子、スピン分解光電子等の先端的レーザー光電子分光を用いて、強相関、新物質、新しい量子状態等の物性研究を精力的に進める。
4. 決定後早期
5. 満56歳に達する年度の初めに任期制に入り、任期は5年。再任は1回を限度。
7. ○履歴書(略歴可) ○業績リスト(重要論文に○印) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○研究業績概要(約2,000字) ○研究計画書(約2,000字) ○推薦書又は意見書1通、或いは照会可能者2名の氏名、連絡先
8. 2013年9月30日(月)
9. ①277-8581 柏市柏の葉5-1-5 東京大学物性研究所総務係 電話04-7136-3207 issp-somu@kj.u-tokyo.ac.jp
②極限コヒーレント光科学研究センター 辛 埴 電話04-7136-3380 shin_ssp.u-tokyo.ac.jp
10. 封筒に「極限コヒーレント光科学研究センター教授(又は准教授)応募書類在中」を朱書し書留で送付。応募書類等不返却。

■核融合科学研究所教員

[I]

1. 准教授1名
2. ヘリカル研究部装置工学・応用物理研究系放射線安全工学研究部門
3. 研究所における放射線安全管理や放射線教育を中心となって進める事、低レベル放射線計測装置の高性能化と計測法開発及び放射線安全機器に関する研

究を主導的立場で推進する事、将来の核融合炉の放射線安全に関わる技術課題を抽出して、その解決の為に要素研究を大学等との共同研究を中心として幅広く推進する事を求める。

4. 決定後早期
5. 5年、再任可
6. 博士号取得者等
7. ○履歴書 ○研究歴 ○就任後の抱負 ○推薦書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷約5編各6部
8. 2013年10月4日(金)17時必着
9. ①509-5292土岐市下石町322-6 核融合科学研究所長 小森彰夫
②管理部総務企画課人事・給与係 電話0572-58-2012
10. 封筒に「ヘリカル研究部装置工学・応用物理研究系放射線安全工学研究部門(准教授)公募関係書類」と朱書き書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/index-j.html>参照。

【II】

1. 准教授1名
2. ヘリカル研究部高密度プラズマ物理研究系不純物輸送研究部門
3. 核融合科学研究所ではヘリカル型核融合炉に向けた学術基盤の構築と環状プラズマの総合的理解の為に大型ヘリカル装置(LHD)計画を推進している。プラズマ中の不純物の制御は核融合炉を成立させる為の決定的な条件となる。これらの不純物の挙動等の周辺プラズマの物理とその制御にかかわる研究を専門分野とし、LHDを用いた実験研究に取り組む。

- 4, 5, 6, 7, 9は【I】に同じ。
8. 2013年10月21日(月)17時必着
10. 封筒に「ヘリカル研究部高密度プラズマ物理研究系不純物輸送研究部門准教授公募関係書類」と朱書き書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/index-j.html>参照。

【III】

1. 准教授1名
2. ヘリカル研究部プラズマ加熱物理研究系電子加熱物理第一研究部門
3. マイクロ波によるプラズマ加熱。具体的には、電子サイクロトロン共鳴帯の電磁波とプラズマとの相互作用を利用し、核融合炉につながる高密度プラズマ加熱法(ECH)の研究を行う。大型ヘリカル装置の大電力ECH加熱実験に参画し、国内外の研究者との共同研究を、リーダーシップを発揮して推進すると共に、必要な大電力ECHシス

テムの開発研究を行う。

- 4, 5, 6, 7, 9は【I】に同じ。
8. 2013年10月31日(木)17時必着
10. 封筒に「ヘリカル研究部プラズマ加熱物理研究系電子加熱物理第一研究部門(准教授)公募関係書類」と朱書き書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/index-j.html>参照。

【IV】

1. 助教2名
2. ヘリカル研究部高温プラズマ物理研究系及びプラズマ加熱物理研究系
3. 核融合科学研究所で推進している大型ヘリカル装置計画において実験に従事し、乱流輸送と閉じ込め物理の解明を目指した研究を乱流計測器と物理解析手法の研究開発と共に進める事、又は電子サイクロトロン共鳴加熱システムの高性能化研究開発とプラズマ性能の向上を目指した加熱物理研究を行う事を求める。

4, 5, 6, 9は【I】に同じ。

7. ○履歴書 ○研究歴 ○就任後の抱負 ○推薦書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷各6部
8. 2013年11月7日(木)17時必着
10. 封筒に「ヘリカル研究部助教公募関係書類」と朱書き書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/index-j.html>参照。

■首都大学東京理工学研究科教員

【I】

1. 助教1名
2. 物理学専攻(宇宙物理実験)
3. X線天文学、高エネルギー宇宙物理の観測的研究。宇宙物理実験研究室に所属し協力して研究を行う。
4. 2014年4月1日以降早期
5. 5年(更新1回、更新後任期5年)。労働契約法改正に伴い変更になる可能性有。
6. 着任時点の博士号取得者
7. ○履歴書(様式有) ○研究業績リスト ○主要論文別刷・コピー5編以内各1部 ○研究業績概要(研究、教育、外部資金、社会貢献含。約2,000字) ○活動計画(研究、教育、社会貢献含。約2,000字) ○照会可能者2名の氏名、肩書、連絡先 ○履歴書様式はhttp://www.houjin-tmu.ac.jp/recruit_teacher/tmu.htmlより取得可(他は様式不問)
8. 2013年10月7日(月)必着
9. ①192-0397八王子市南大沢1-1 首都大学東京総務部人事課人事制度係
②公募全般：同上 電話042-677-1111

(ex. 1027) kyoinsaiyo_jmj.tmu.ac.jp,
専門分野：物理学専攻 政井邦昭 電話 042-677-2502 info-raxa_phys.se.tmu.ac.jp

10. 封筒に「教員公募書類(2507物理・宇宙物理実験)在中」と朱書き簡易書留で送付(宅配便可)。本学はダイバーシティに配慮しており、女性の積極的な応募を歓迎。

【II】

1. 准教授又は助教1名
2. 物理学専攻
3. 物性理論。今迄の経験は問わないが、冷却原子系及びその関連分野の理論研究に積極的に協力できる方が望ましい。
4. 2014年4月1日
5. 准教授：5年(更新有。准教授としての任用期間は15年以内)、助教：5年(更新1回。更新後の任期は5年)
6. 女性に限る。准教授：大学院博士後期課程の教育・研究指導を担当できる方。助教：着任時に博士号取得済の方。
7. ○履歴書(様式有) ○研究業績リスト ○主要研究論文別刷・コピー5編以内各1部 ○研究業績(約2,000字) ○活動計画(約2,000字) ○照会可能者2名の氏名、連絡先
- 8, 9①は【I】に同じ。
9. ②公募全般：【I】に同じ。専門分野：物理学専攻 政井邦昭 電話042-677-2502 info-apcm_phys.se.tmu.ac.jp
10. 封筒に「教員公募書類(2508物理・物性理論)在中」と朱書き送付。労働契約法改正に伴い、任期及び再任に関する事項については変更になる可能性有。詳細はhttp://www.houjin.tmu.ac.jp/recruit_teacher/tmu.html参照。

■分子科学研究所准教授

1. 准教授若干名
2. 協奏分子システム研究センター階層分子システム解析研究部門
3. 生体系に見られるように、分子が協調して機能発現する仕組みの解明に意欲ある研究者。
4. できる限り早期
5. なし
7. ○推薦書(自薦は不要) ○履歴書(所定様式、HP参照) ○研究業績概要(A4, 2頁以内) ○研究構想(A4, 2頁以内) ○業績リスト(所定様式、HP参照) ○主要論文10編以内の別刷又はプレプリント各2部(特に重要な論文3編に印)
8. 2013年10月10日(木)消印有効

9. 444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38
自然科学研究機構岡崎統合事務センター
総務課人事係 電話0564-55-7113
r7113 orion.ac.jp
10. 詳細は<http://www.ims.ac.jp/jinji/index.cgi>参照。

■自然科学研究機構岡崎統合バイオサイエンスセンター教授

1. 教授1名
2. 未定
3. 分子科学に基づいて生命科学の基礎研究を進める研究者。分子科学研究所と連携を密にしつつ研究を進める。
4. できる限り早期
5. なし
7. ○推薦書(自薦は不要) ○履歴書(所定様式, HP参照) ○研究業績概要(A4, 2頁以内) ○研究構想(A4, 2頁以内) ○業績リスト(所定様式, HP参照) ○主要論文10編以内の別刷又はプレプリント各2部(特に重要な論文3編に印)
8. 2013年10月10日(木)消印有効
9. 444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38
自然科学研究機構岡崎統合事務センター
総務課人事係 電話0564-55-7113
r7113 orion.ac.jp
10. 詳細は<http://www.ims.ac.jp/jinji/index.cgi>参照。

■岡山大学大学院自然科学研究科助教

1. 助教1名
2. 数理物理学専攻物理学講座
3. 物性実験。極低温・高圧・強磁場の極限環境下での磁性・超伝導研究を小林達生教授と協力して推進する。
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者(2014年3月迄の取得見込者含)
7. ○履歴書 ○研究業績概要書 ○研究業績目録 ○主要論文3編以内の別刷又はコピー ○研究計画と教育に関する抱負(約2,000~4,000字) ○最近3年間の国際会議講演及び国内会議講演のリスト ○照会可能者2名の氏名, 連絡先, e-mail ○応募者の所属, 連絡先, e-mail ○各2部
8. 2013年10月15日(火)必着
9. ①700-8530 岡山市北区津島中3-1-1
岡山大学理学部物理学科 市岡優典
②同学科 小林達生 電話086-251-7826 kobayashi science.okayama-u.ac.jp

10. 封筒に「助教応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。詳細はhttp://www.gnst.okayama-u.ac.jp/other/koubo_index.html参照。

■大阪大学極限量子科学研究センター教授

1. 教授1名
2. 量子基礎科学大部門
3. 電子・光・磁気・バイオ等を用いた新機能の創出とエレクトロニクス基盤技術を基にした極限的な、量子デバイス・システム・計測等への応用
4. 2014年1月1日又はできるだけ早期
6. 博士号取得者で、先端エレクトロニクス領域の開拓、基礎工学研究科・基礎工学部の協力講座として、大学院、学部教育・研究指導に情熱のある方。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(学術論文, 国際会議論文, 著書, 解説, 特許等を区分。できれば、主要論文約5編にインパクトファクタを付記) ○主要論文約5編の要旨と別刷(コピー可) ○競争的資金の獲得状況リスト ○受賞等のリスト ○今迄の研究・教育経過の概要と着任後の研究教育の展望(A4, 約2~3枚) ○照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先 ○その他, 特記事項
8. 2013年10月15日(火)必着
9. ①560-8531 豊中市待兼山町1-3 大阪大学極限量子科学研究センター 戸部義人
②基礎工学研究科システム創成専攻電子光学領域 占部伸二 06-6850-6325 urabe ee.es.osaka-u.ac.jp
10. 封筒に「教授応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。

■大阪府立大学大学院理学系研究科助教

1. 助教1名
2. 物理学専攻物性理論グループ
3. 広い意味での物性理論, 非平衡統計力学。
4. 2014年4月1日
5. 5年, 研究業績や教育能力等の評価によりテニユアの資格を獲得する事が可能
6. 着任時に博士号を有し, 取得後10年以内の者
7. ○履歴書 ○業績リスト ○主要論文5編以内 ○論文概要 ○研究業績概要 ○研究計画 ○教育に関する抱負 ○推薦書2通(又は照会者2名の連絡先)
8. 2013年10月15日(火)必着

9. ①599-8531 堺市中区学園町1-1 大阪府立大学総務部総務人事課
②物理学専攻 細越裕子 電話072-254-9699 yhosso p.s.osakafu-u.ac.jp
10. 応募書類は封筒に「物理系, テニユア・トラック助教 応募書類在中」と朱書し書留で送付。応募書類不返却。詳細は<http://www.osakafu-u.ac.jp/staff/index.html>参照。

■大阪大学大学院理学研究科助教

1. 助教1名
2. 物理学専攻基礎物理学講座
3. 素粒子理論
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者, 又は着任時迄の取得見込者
7. ○履歴書(可能な着任時期も明記) ○研究業績概要 ○研究計画と教育に関する抱負 ○業績リスト(共著者名を記入, 主要業績に印) ○主要論文別刷又はコピー約3編 ○意見書3通以上
8. 2013年10月18日(金)必着
9. ①560-0043 豊中市待兼山町1-1 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻 山中卓 apkoubo phys.sci.osaka-u.ac.jp
②橋本幸士 電話06-6850-5731
10. 封筒に「素粒子理論助教公募関係」と朱書し簡易書留で送付。意見書は応募書類とは別に直接専攻長宛にe-mail又は郵送されるよう手配のこと。意見書以外の応募書類一式はPDFにしてCD-ROM又はUSBメモリに保存したのも併せて提出。本学は男女共同参画を推進。

■東京工業大学大学院理工学研究科准教授

[I]

1. 准教授(テニユアトラック)1名
2. 基礎物理学専攻
3. 専門分野: 宇宙物理学実験(重力波観測)。職務: 研究, 学生の研究指導, 大学院・学部における講義。
4. 2014年4月1日
5. 最長5年(テニユア審査により任期なし教員採用有)
6. 応募締切時点で40歳未満且つ理工学分野での博士号取得後10年以内。本学以外で2年以上の研究・教育に関する勤務経験。
7. ○CV(推薦者3名の連絡先も記入) ○業績一覧 ○研究業績概要 ○研究計画 ○主要論文別刷5編

8. 2013年10月18日(金)
9. ① <http://www.tenure-track.titech.ac.jp/> にて応募要項詳細及び応募方法を確認の上、Online Applicationにて書類をアップロード
②東京工業大学テニユアトラック制度事務局 電話03-5734-7627 tt.apply jim.titech.ac.jp
10. 詳細は9①のHPで確認のこと。特に6. 7.

[II]

1. 准教授1名
2. 物性物理学専攻量子基礎実験講座
3. 物性実験。学部(理学部物理学科)、及び大学院の講義(英語含む)を担当。
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書 ○研究歴(研究内容の概要含む、A4、約2枚) ○研究計画書(A4、約2枚) ○業績リスト(主要論文3編に印) ○主要論文別刷3編以内 ○推薦書1通、及び推薦者と異なる照会可能者1名の氏名、連絡先(e-mail)
8. 2013年12月16日(月)必着
9. ①152-8551東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻 藤澤利正
②同専攻 吉野淳二 電話03-5734-2076 jyoshino phys.titech.ac.jp
10. 封筒に「量子基礎実験講座准教授応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類原則不返却。スタートアップの為の資金について学内支援制度があり、その制度を利用できる可能性がある。

■高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所教員

[I]

1. 准教授1名
2. 構造物性グループ
3. 主にX線回折・散乱実験を用いた構造物性研究の推進と、関連するビームライン及び実験装置の性能向上及び維持管理に努め、大学共同利用研究の支援を行う。更に物構研・構造物性研究センターに併任し物構研で利用できるプローブを相補的に用いた先端的構造物性研究を推進する。
4. 2014年4月1日
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書 ○研究歴 ○着任後の抱負(公募内容全般に対するもの) ○発表

論文リスト ○主要論文別刷5編以内
○その他参考資料(外部資金獲得状況、国際会議招待講演、受賞歴等) ○推薦書又は参考意見書(物質構造科学研究所長 山田和芳宛)

8. 2013年10月25日(金)
9. ①305-0801つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構総務部人事労務課人事第一係
②放射光科学第一研究系 熊井玲児 電話029-864-6024 reiji.kumai kek.jp

[II]

1. 助教1名
2. 物質化学グループ
3. 主にX線マイクロビームを用いた放射光X線吸収分光法や蛍光X線分析法による物質化学研究を推進する。又、関連するビームライン及び実験装置の性能向上及び維持管理に努め、大学共同利用研究や産業利用を推進する。
- 4, 5, 6, 7, 8, 9①は [I] に同じ。
9. ②放射光科学第二研究系 足立伸一 電話029-879-6022 shinichi.adachi kek.jp

[III]

1. 准教授1名
2. 中性子科学研究系
3. 中性子科学研究系(KENS)に所属し、J-PARCにおける偏極中性子分光器(BL23)の建設とこれを用いた物質科学研究を主導する。又、本所における大学共同利用や大学連携、更に構造物性センターとの連携を推進し、その中でリーダーシップを発揮する。
4. 決定後早期
- 5, 6, 7, 9①は [I] に同じ。
8. 2013年10月31日(木)
9. ②中性子科学研究系 大友季哉 電話029-284-4897 toshiya.otomo kek.jp

[IV]

1. 特任助教1名
- 2, 4, 8は [III] に同じ。
3. 光・量子融合連携研究開発プログラム(JST)の下、J-PARC/MLFにおけるトライボロジーに関連する研究と中性子反射率計及び中性子スピネコー分光器の実験・開発に従事する。物構研・構造物性研究センターの併任とし、ミュオン等他のプローブを相補的に用いて本プロジェクトに関わる研究を推進する。
5. 1年更新、最長4年迄
6. 博士号取得者、又は着任迄に取得が確実な者
- 7, 9①は [I] に同じ。

9. ②瀬戸秀紀 電話029-879-6228 hideki.seto kek.jp

[V]

1. 特任助教1名
2. ミュオン科学研究系
3. 光・量子融合連携研究開発プログラム(JST)の下で、主にミュオンスピン回転法を用いての摩擦・潤滑に関わる実験研究・開発に従事する。又、構造物性研究センターの併任とし他のプローブを相補的に用いて本研究プロジェクトに関わる研究を推進する。
- 4, 5, 6, 8は [III] に同じ。
- 7, 9①は [I] に同じ。
9. ②ミュオン科学研究系 門野良典 電話029-284-4896 or 4898(秘書) ryosuke.kadono kek.jp

[VI]

1. 博士研究員1名
- 2, 4, 9②は [III] に同じ。
3. 大強度陽子加速器施設物質・生命科学実験施設(J-PARC/MLF)において、高エネルギー加速器研究機構が建設し運用中の中性子科学実験装置(BL05, BL06, BL08, BL09, BL12, BL16, BL21)を用いた中性子科学研究を展開すると共に、その装置の高度化を進める。又は、スピネコー装置、偏極中性子分光器の建設を推進する。
5. 単年度契約で3年迄延長可
6. 応募時点の博士号取得者、又は着任迄に取得が確実な者
7. ○履歴書 ○研究歴 ○発表論文リスト ○着任後の抱負 ○主要論文別刷3編以内 ○推薦書又は参考意見書(物質構造科学研究所長 山田和芳宛)
8. 2013年11月15日(金)
- 9①は [I] に同じ。

■茨城大学理学部准教授

1. 准教授1名
2. 物理学領域(宇宙)
3. 宇宙物理学(理論)又は観測天文学。本学に在籍する教員と協力し、学部・大学院・全学共通教育での講義・実験・演習等の教育や学部及び大学院生に対する研究指導を積極的に行い、研究を独立して意欲的に推進できる方。学部及び大学院の運営にも積極的に貢献頂ける方。
4. 2014年4月1日
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書(様式自由) ○研究業績リスト(査読付原著論文、国際会議集録、

著書、総説、その他に分類) ○今迄の研究概要と今後の研究計画 ○教育への抱負 ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○照会可能者2名(国内外不問)の氏名、連絡先(e-mail含)

- 2013年10月28日(月)必着
- ①310-8512水戸市文京2-1-1 茨城大学理学部 吉田龍生
②同上 電話029-228-8354 yoshidatmx.ibaraki.ac.jp
- 封筒に「物理学領域教員(宇宙)応募書類在中」と朱書し簡易書留にて送付。応募書類不返却。選考過程で必要と判断した場合、インタビューを実施することがある(旅費等自己負担)。

■理化学研究所研究員

- 研究員1名
- 東原子分子物理研究室
- 原子分子物理に関連する実験研究。
- 2014年4月1日以降早期
- 定年制職員(60歳定年)
- 博士号取得者。1年以上の海外研究歴を有することが望ましい。
- 履歴書(写真貼付) ○今迄の研究概要及び成果、今後の抱負と研究計画(A4, 合計約5枚) ○研究業績一覧 ○主要論文別刷3編以内 ○獲得外部資金リスト ○現職の所属長を含む推薦書2通(内、最低1通は日本以外に籍を置く研究者からのもの。現職の所属長から推薦書をもらうのが困難な場合は、第3者による推薦書)
- 2013年10月31日(木)17時必着
- ①351-0198和光市広沢2-1 理化学研究所情報基盤棟3階 外務・研究調整部研究調整課
②全般: rps-saiyo25 riken.jp, 専門分野: 東 俊行 toshiyuki-azuma riken.jp
- 封筒に「東原子分子物理研究室研究員応募書類在中」と朱書し簡易書留又は書留で送付。詳細はhttp://www.riken.jp/careers/researchers/20130801_13/参照。

■福井大学大学院工学研究科教員

- 講師又は助教1名
- 物理学専攻物性電磁物理講座
- 磁性又は磁気共鳴に関する実験的研究。現スタッフと協力でき、地方大学の状況について理解しつつ熱意をもって教育研究に取り組む人材を求める。物理学専攻と物理工学科の授業及び研究指導の他、他学科や他学部の基礎教育科目を担当することもある。

- 2014年4月1日
- 講師: なし。助教: 5年(任期終了後、審査により昇任可)
- 博士号取得者又は着任時迄の取得見込者。
- 履歴書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷5編以内各1部(コピー可) ○今迄の研究内容と今後の研究計画(約2,000字) ○今後の教育に関する抱負(約2,000字) ○科学研究費補助金採択状況及び他の競争的研究資金獲得状況 ○推薦書1通又は照会可能者2名の氏名、連絡先
- 2013年10月31日(木)必着
- ①910-8507福井市文京3-9-1 福井大学大学院工学研究科物理学専攻 橋本貴明 hasimoto u-fukui.ac.jp
②同専攻 菊池彦光 kikuchi u-fukui.ac.jp
- 封筒に「物理学専攻教員応募書類在中」と朱書し簡易書留にて送付。本学は男女共同参画を推進している。

■宮城教育大学教育学部教員

- 准教授又は講師1名
- 理科教育講座
- 物理学(物性物理学又は宇宙物理学)、学部・大学院の教育と研究指導及び全学初等課程の物理教育を担当。
- 2014年4月1日
- 博士号取得者又は同等以上の業績を有する者で、教育大学の学生・現職教員に対する教育に理解と熱意がある者。
- 履歴書(市販品、写真貼付) ○研究業績リスト ○主要論文別刷5編以内(コピー可、各約500字の要旨) ○科研費等外部資金獲得状況一覧(代表・分担明記) ○研究概要と計画(約2,000字) ○教育指導経験概要と学生教育・教員養成に対する抱負(約2,000字) ○照会可能者2名の氏名、連絡先
- 2013年10月31日(木)必着
- ①980-0845仙台市青葉区荒巻字青葉149 宮城教育大学総務課人事係 電話022-214-3307
②同理科教育講座 福田善之 電話022-214-3411 fukuda_staff.miyakyo-u.ac.jp
- 封筒に「物理学教員応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。詳細は<http://www.miyakyo-u.ac.jp/about/other/ct2.html>参照。

■東京農工大学大学院助教

- 助教1名
- 先端物理工学部門
- 主に超伝導材料を対象とする物性実験。当該部門の内藤方夫教授と協力し教育・研究活動を行う。材料合成、輸送測定、超伝導素子作製等に意欲的に取り組める方。
- 決定後早期
- 5年、再任不可
- 博士号取得者か着任迄の取得見込者、又は研究上の業績が取得相当と認められる者
- 履歴書(写真貼付) ○業績リスト ○主要論文別刷又はコピー5編以内 ○研究概要と着任後の教育・研究への抱負(A4, 合計約2枚) ○推薦書又は照会可能者2名の氏名、連絡先
- 2013年10月31日(木)必着
- 184-8588小金井市中町2-24-16 東京農工大学大学院物理システム工学専攻内藤方夫 電話042-388-7229 minaito cc.tuat.ac.jp
- 応募書類一式は簡易書留で送付。

■島根大学大学院総合理工学研究科助教

- 助教1名
- 物理・材料科学領域
- 有機エレクトロニクス、分子性固体の物性に関する実験的研究。大学院総合理工学研究科物理・材料科学コースに関わる専門科目及び物質科学科(物理分野)に関わる専門科目及び共通教養科目。
- 2014年4月1日
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(研究費獲得実績、学会活動・社会活動実績含) ○主要論文別刷3編以内(コピー可) ○研究概要と着任後の研究計画(合計約2,000字) ○教育に関する実績と今後の教育に関する抱負(合計約2,000字) ○照会可能者2名の氏名、連絡先
- 2013年11月1日(金)必着
- ①690-8504松江市西川津町1060 島根大学大学院総合理工学研究科 服部泰直
②同研究科物理・材料科学領域 田中宏志 電話/Fax 0852-32-6386 h.tanaka riko.shimane-u.ac.jp
- 封筒に「物理・材料科学領域助教応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。

応募書類原則不返却。

■福岡工業大学情報工学部教員

1. 准教授又は助教1名
2. 情報通信工学科
3. 物理学分野、専門基礎科目(物理学)及び関連科目の担当(主な科目:物理学, 量子工学, 自然現象とシミュレーション, 電磁気学, 学生実験(回路実験等)等)。
4. 2014年4月1日
5. なし(定年65歳)
6. 博士号取得者。専門分野の研究業績があり、大学院の教育、研究指導が可能な方。情報通信工学分野に何らかの関連がある研究を行っており、卒業研究を担当できる方。
7. ○履歴書 ○研究業績リスト ○論文別刷 ○今迄の研究概要と今後の研究計画 ○本学における教育に対する抱負 ○卒研テーマ案 ○特記事項 ○照会可能者2名 ○電子ファイル等のデジタルデータも提出
8. 2013年11月1日(金)必着
9. ①811-0295福岡市東区和白東3-30-1福岡工業大学教務課 本行義洋
②情報工学部情報通信工学科 バロリ・レオナルド 電話092-606-4970 Fax 092-606-0758 barolli_fit.ac.jp
10. 封筒に「情報通信工学科教員(物理学)応募書類在中」と朱書き送付。本学では、助教も独立した研究室を持ち、研究費も配分される。卒研テーマ例を含む詳細はhttp://www.fit.ac.jp/daigaku/koubo/kyoin_kobo/参照。

■北海道大学大学院工学研究院応用物理学部門教員

[I]

1. 准教授1名
2. 光波動量子物理学分野(光量子物理学研究室)
3. レーザー制御技術に基づいた光量子科学, 量子エレクトロニクスに関する実験研究。大学院では応用物理学専攻に関連する講義等, 学部では応用理工系学科に関する講義等を担当。
4. 2014年4月1日以降早期
5. なし
6. 着任時点の博士号又はPh.D.取得者。十分な研究実績と指導能力があり, 独創的な研究を推進できると共に, 教育に熱心な方。
7. 所定の書式・詳細は<http://www.eng.hokudai.ac.jp/faculty/recruit/>参照。

8. 2013年11月25日(月)必着
9. ①060-8628札幌市北区北13条西8丁目北海道大学工学系事務部総務課(人事担当) 電話011-706-6156, 6117, 6118
②同大学院工学研究院応用物理学部門 足立 智 電話011-706-6709
adachi-s_eng.hokudai.ac.jp
<http://www.eng.hokudai.ac.jp/faculty/>
10. 封筒に「応用物理学部門教員公募25-11」と朱書き書留で送付。応募書類原則不返却。応募書類は教員選考の目的以外不使用。

[II]

1. 助教1名
2. 凝縮系物理学分野(生物物理学研究室)
3. 応用物理学・生物物理学。電子顕微鏡, グラフェン, 培養ニューロン, 非線形ダイナミクス等に関する研究。
4. 2014年4月1日
5. 5年(任期満了前に, 業績審査の上, 任期の定めのない助教に移行する場合は)
6. 着任時点で博士号又はPh.D.取得者
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績 ○教育実績 ○最近5年間の主要論文3編の写し各1部 ○今迄の研究内容と今後の研究計画(約2,000字) ○教育に対する抱負(約1,000字) ○照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先 ○履歴書・研究業績・教育実績に関しては所定の書式を<http://www.eng.hokudai.ac.jp/faculty/recruit>からダウンロードして使用
8. 2013年11月29日(金)
9. ①[I]と同じ。
②同大学院工学研究院応用物理学部門 郷原一寿 電話011-706-6636
gohara_eng.hokudai.ac.jp
10. 封筒に「応用物理学部門教員公募25-16」と朱書き書留で送付。応募書類原則不返却。

学術的会合

学術的会合の標準様式(1件500字以内)

掲載されている例を参考にして, 次の項目中, 必要なものを簡潔に作成して下さい:
○会合名 ○主催 ○日時(西暦年月日, 曜日) ○場所(会場名の後に括弧して郵便番号, 住所, 電話) ○内容(1行18字で12行以内) ○定員 ○参加費(物理学会員, 学生の参加費) ○申込締切(講演, 参加, 抄録, 原稿提出の別を明記) ○連絡先(郵便番号,

住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等)
○その他(1行18字で5行以内)

■数学協働プログラム2013年度ワークショップ

日時 2013年9月2日(月)~2014年3月18日(火)

場所 全国各地

内容 統計数理研究所・数学協働プログラム(文部科学省委託事業:数学・数理学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出の為の研究促進プログラム)2013年度ワークショップとして, 審査の結果, 9件を採択した。各ワークショップの開催情報は<http://coop-math.ism.ac.jp/event/schedule>参照。

連絡先 190-8562立川市緑町10-3 情報・システム研究機構統計数理研究所数学協働プログラム事務局 電話050-5533-8472 coop-math-sec_ism.ac.jp <http://coop-math.ism.ac.jp/>

■第8回高崎量子応用研究シンポジウム

主催 日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所

協賛 日本物理学会

日時 2013年10月10日(木)~11日(金)

場所 高崎シティギャラリーコアホール(370-0829高崎市高松町35-1 電話027-328-5050)

内容 イオン照射研究施設(TIARA), 電子線及びコバルト60ガンマ線照射施設等において実施された研究の成果の発表, 利用者や利用を計画している研究者が情報交換・討論を行うことにより量子ビーム応用研究の推進と施設の有効利用を図ることを目的として開催。今回は当研究所の50年の歩みを振り返る特別セッションも予定。

定員 360名

参加費 無料

事前申込締切 2013年9月30日(月)(e-mail又はFax)

連絡先 370-1292高崎市綿貫町1233番地 日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所放射線高度利用施設部業務課 電話027-346-9600 Fax 027-346-9690 taka-sympo_jaea.go.jp <http://www.taka.jaea.go.jp/>

その他 締切日以降は当日受付にて対応。HPへの詳細内容掲載は9月以降。

■日本希土類学会第31回講演会

主催 日本希土類学会

協賛 日本物理学会

日時 2013年11月15日(金)13:30~
場所 ホテルルブラ王山(名古屋市千種区
覚王山通8-18)
内容 薩摩 篤<名大院工> 貴金属担体・
固体ルイス酸としての酸化セリウムのユニークな性質, 石原一彰<名大院工> 安価で高活性なランタン触媒の開発とエステル交換反応への展開, 小林久理真<静岡理工科大> 希土類磁石材料物質の基礎(磁気物性発現機構と今後の新物質開発の指針)

定員 未定

参加費 8,000円, 学生2,000円(要旨集込)

参加申込締切 2013年11月1日(金)

連絡先 565-0871 吹田市山田丘2-1 大阪
大学大学院工学研究科応用化学専攻内
日本希土類学会事務局 電話06-6879-
7352 Fax 06-6879-7354 kidorui chem.
eng.osaka-u.ac.jp

その他 懇親会: 同日17:30よりホテルル
ブラ王山にて(会費: 11/1迄に払込済の
方7,000円, 当日8,000円)

■第29回量子情報技術研究会(QIT29)

主催 電子情報通信学会量子情報技術時限
研究専門委員会(委員長: 枝松圭一<東
北大>)

日時 2013年11月18日(月)~19日(火)

場所 早稲田大学西早稲田キャンパス63
号館2階04-05会議室(169-8555 東京都
新宿区大久保3-4-1)

内容 量子情報, 量子計算, 量子暗号等広
く量子情報技術に関わる理論的研究, 実
験的研究, 計算機科学的研究, 数学的研
究, 及び, その他関連分野(申込状況に
より査読有).

定員 150名

参加費 事前振込: 6,000円, 学生1,000円.
当日払い: 7,000円, 学生2,000円(懇親
会費別途)

申込 <http://staff.aist.go.jp/s-kawabata/qit/> よ
り

口頭講演申込締切 2013年10月4日(金)

ポスター講演申込・予稿原稿提出締切
2013年10月18日(金)

参加申込締切 2013年10月25日(金)

連絡先 qit29 list.waseda.jp 中里弘道<早
大理工>, 湯浅一哉<早大理工>, 青木隆
朗<早大理工>, 和久井健太郎<情通機構>

■第3回分子シミュレーション国際会議 (ICMS2013)

主催 分子シミュレーション研究会

後援 日本物理学会

日時 2013年11月18日(月)~20日(水)

場所 神戸国際会議場(神戸市中央区港島
中町6-9-1)

内容 平成25年度分子シミュレーション
討論会を兼ねる。溶液・気液界面・固液
界面・ミセル・脂質膜・タンパク質・ク
ラスレート等のような, 分子シミュレ
ーションで取扱可能な全ての系を対象とす
る研究発表, 更に量子計算との錬成
(QM/MM等)から粗視化モデル, 超並列
計算手法等, 様々な方法論的進展の情報
交換を行う場として企画。組織委員・実
行委員一同, 皆様の参加を心よりお待ち
する。

参加費 早期登録50,000円, 学生25,000円

早期登録締切 2013年9月15日(日)

連絡先 530-0001 大阪市北区梅田1-11-4
大阪駅前第4ビル5階 (株)日本旅行
電話06-6342-0212 Fax 06-6342-0214
icms_2013 nta.co.jp

その他 詳細は [http://web.apollon.nta.co.jp/
icms2013/](http://web.apollon.nta.co.jp/icms2013/) 参照。

■光と磁気の融合研究に関する国際会議 (MORIS2013)

主催 日本磁気学会

協賛 日本物理学会

日時 2013年12月2日(月)~5日(木)

場所 大宮ソニックシティ国際会議室
(330-8669 さいたま市大宮区桜木町1-7-
5 電話048-647-4111)

内容 新しい記録技術の実現に向けて, 光
と磁気の技術を融合したデバイス応用技
術に関する物理, 材料, 技術を専門的且
つ総合的に討議する。

参加費 事前登録: 45,000円, 学生/退職
者7,000円。当日登録: 50,000円, 学生/
退職者8,000円

アブストラクト投稿締切 2013年9月14日
(土)

事前参加登録締切 2013年11月15日(金)

JMSJ論文投稿締切 2013年11月29日(金)

連絡先 101-0052 東京都千代田区神田小
川町2-8 三井住友海上小川町ビル5階
日本磁気学会事務所内 MORIS2013 事務
局 電話03-5281-0106 msj bj.wakwak.
com

■ International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013 by FIRST Program

主催 東京工業大学

日時 2013年11月21日(木)~22日(金)

場所 The Grand Hall (108-0075 東京都港
区港南2-16-4 品川グランドセントラ
ルタワー3F 電話03-5463-9971)

内容 鉄系を中心とした超伝導体, 及びエ
レクトロイドを用いた化学反応に関する
研究成果を報告し当該分野における次の
研究展開を議論する国際ワークショップ。
海外からを含め12件の招待講演, 一般
講演, ポスター講演に加え, FIRST細野
プロジェクトの最新成果報告から構成。
次世代を担う若手研究者を活性化する為,
参加旅費補助のプログラムも設ける。

定員 350名

参加費 無料

申込 [http://www.supera.titech.ac.jp/ns22013/
index.html](http://www.supera.titech.ac.jp/ns22013/index.html) より

講演申込締切 2013年10月10日(木)

参加事前登録締切 2013年11月19日(火)

連絡先 226-8503 横浜市緑区長津田町
4259 S2-13 東京工業大学 NS22013 事
務局 藤津 電話/Fax 045-924-5127
ns2-2013 lucid.msl.titech.ac.jp

■第32回法政大学イオンビーム工学研究 所シンポジウム

主催 法政大学イオンビーム工学研究所

日時 2013年12月4日(水)

場所 法政大学小金井キャンパスマルチマ
ディアホール(184-8584 小金井市梶野町
3-7-2)

内容 招待講演, 口頭発表, ポスター発表。
イオンビーム技術の電子材料やその他材
料への応用, 分析技術等の研究成果を討
論する。

定員 150名

参加費 無料(予稿集・論文集は当日受付
にて1,000円で販売)

口頭発表・ポスター発表申込及び予稿(和
文)原稿締切 2013年11月4日(月)

論文(英文)原稿締切 2013年12月4日(水)

連絡先 184-8584 小金井市梶野町3-7-2
法政大学イオンビーム工学研究所 西村,
天本(事務) 電話042-387-6094
Fax 042-387-6095 ion-sympo ml.hosei.
ac.jp [http://www.ionbeam.hosei.ac.jp/
sympo/symposium.html](http://www.ionbeam.hosei.ac.jp/sympo/symposium.html)

その他 聴講のみの参加は直接会場へ(申
込不要)。詳細は順次HPに掲載予定。

■研究会「バイオ・メディカルフォトリニク ス: 基礎と応用の最前線」

主催 応用物理学会量子エレクトロニクス
研究会

協賛 日本物理学会(予定), 日本光学会
(予定), レーザー学会

日時 2013年12月20日(金)~22日(日)

場所 上智大学軽井沢セミナーハウス
(389-0111 長野県北佐久郡軽井沢町大字

長倉8-30 電話0267-42-2545)
 内容 異なる研究基盤を持つ研究者が光との相互作用を通じて交流し、最新の成果のみならず、この分野の今後の展開についてじっくり議論することで、更なる発展を希求する。実施形態はチュートリアル講演1件、招待講演16件(各40分)、ポスター発表。
 定員 60名
 参加費 28,000円、学生10,000円(宿泊費・食費含)
 申込 <http://annex.jsap.or.jp/qe/>にて
 参加申込締切 2013年11月18日(月)、定員に達し次第締切
 連絡先 113-8656東京都文京区本郷7-3-1

東京大学 小関泰之 電話 03-5841-0426
 ozeki ee.t.u-tokyo.ac.jp

.....
その他

助成公募の標準様式 (1件500字以内)

○名称 ○対象 (1行18字で7行以内)
 ○助成内容 ○応募方法 (1行18字で4行以内) ○応募締切 (西暦年月日、曜日)
 ○詳細問合せ先 (郵便番号、住所、所属、担当者名、電話、Fax、e-mail等)

その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

■会員専用ページ：ユーザ名とパスワード
 本会 web site (<http://www.jps.or.jp/>) の会員専用ページには、各種変更届、刊行委員会報告、過去の大会プログラム等の情報を掲載しています。アクセスするためのユーザ名とパスワード(今月と来月分)は次の通りです。(英数字は半角入力、大文字小文字は区別されます。)
 9月ユーザ名 : 13Sep
 パスワード : Max686
 10月ユーザ名 : 13Oct
 パスワード : Philipp566

行事予定

[詳しくは表中の右欄記載の会誌各巻号の揭示板欄(*印は会告欄)をご参照下さい.]

開催月日	名 称	開催地	会誌巻号または世話人
2013年			
9/2~3/18	数学協働プログラム2013年度ワークショップ	全国各地	68-9
9/3~6	The 6-th Asian Summer School and Symposium on Laser-Plasma Acceleration	木津川市(京都)	68-6
9/9~13	The 5th Int. Conf. on Recent Progress in Graphene Research 2013	東京	68-3
9/9~13	The 15th Int. Conf. on Ion Sources	千葉市	68-4
9/11~12	プラズマシミュレータシンポジウム2013	土岐市(岐阜)	68-8
9/20	第63回東レ科学講演会「脳と心の内側を観る」	東京	68-8
9/20~23	日本物理学会2013年秋季大会(高知大)(素粒子、核物理、宇宙線、宇宙物理)	高知市	日本物理学会
9/23~24	第23回格子欠陥フォーラム「電池材料中の格子欠陥」	淡路市(兵庫)	68-8
9/23~27	第9回プラズマ応用科学国際シンポジウム(ISAPS'13)	Istanbul (Turkey)	68-3
9/25~28	日本物理学会2013年秋季大会(徳島大)(主として物性)	徳島市	日本物理学会
9/28~30	Summer School 数理物理 2013「量子場の数理」	東京	68-6
9/29~30	フューチャー・フェロエレクトロニクス第5回誘電体若手夏の学校	直島町(香川), 瀬戸内市(岡山)	68-8
10/5	第18回久保記念シンポジウム「量子物理学の明日」	東京	68-8
10/10~11	第8回高崎量子応用研究シンポジウム	高崎市(群馬)	68-9
10/16~17	第56回表面科学基礎講座	吹田市(大阪)	68-7
10/23~26	第34回Tex Users Group年次大会	東京	68-6
11/15	日本希土類学会第31回講演会	名古屋市	68-9
11/18~19	第29回量子情報技術研究会(QIT29)	東京	68-9
11/18~20	第3回分子シミュレーション国際会議(ICMS2013)	神戸市	68-9
11/18~21	第12回国際シンポジウム「物質の起源と銀河の進化」(OMEG12)	つくば市(茨城)	68-6
11/20~22	第39回固体イオニクス討論会	熊本市	68-8
11/21~22	Int. Symp. on Single Biomolecule Analysis 2013	京都市	68-6
11/21~22	Int. Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013 by FIRST Program	東京	68-9
11/26~28	2013年真空・表面科学合同講演会 第33回表面科学学術講演会・第54回真空に関する連合講演会	つくば市(茨城)	68-7
12/2~5	光と磁気の融合研究に関する国際会議(MORIS2013)	さいたま市	68-9
12/4	第32回法政大学イオンビーム工学研究所シンポジウム	小金井市(東京)	68-9
12/17~19	第27回数値流体力学シンポジウム	名古屋市	68-8
12/20~22	研究会「バイオ・メディカルフォトンクス：基礎と応用の最前線」	軽井沢町(長野)	68-9
2014年			
3/27~30	日本物理学会第69回年次大会(東海大学)	平塚市(神奈川)	日本物理学会
9/7~10	日本物理学会2014年秋季大会(中部大学)(物性)	春日井市(愛知)	日本物理学会

開催月日	名 称	開 催 地	会誌巻号または世話人
2014年 9/18~21 10/14~18	日本物理学会2014年秋季大会(佐賀大学)(素粒子, 宇宙線, 宇宙物理) 日本物理学会2014年秋季大会(ハワイ)(核物理)	佐賀市 ハワイ島	日本物理学会 日本物理学会 ・アメリカ物 理学会合同
11/2~6 2015年	The 7th Int. Symp. on Surface Science	松江市	68-4
9/16~19 9/25~28	日本物理学会2015年秋季大会(関西大学)(物性) 日本物理学会2015年秋季大会(大阪市立大学)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	吹田市(大阪) 大阪市	日本物理学会 日本物理学会

編集後記

4月から編集委員に加わりました。よろしくお願ひ致します。

新米編集委員として所信表明を行うことが期待されているような気もしますが、まずは恐縮ですが、私事から始めたいと思います。私には小学3年生と1年生の子供達がいるのですが、長男は電車、次男はクワガタに夢中になっています。長男は、暇があったら時刻表を見ていて、私が出張に行くと言うと、普段以上の集中力を発揮して乗り換えを調べてきます(ただし最速便ではないことがあるので、後でこっそり自分で調べるのですが)。一方、次男は、クワガタの図鑑をボロボロになるまで読んでいて、私が全く知らないようなクワガタの性質を嬉々として説明してきます。おかげで、いつの間にかパリーフタマタクワガタなどの名前を憶えてしまいました。調べたり考えたりする行動は研究そのもので、子供達は興味があることには労力を惜しみません。

子供達を見てみると、研究の原点はやはり面白いと思う気持ちなのだと思えます。おそらく私だけではないと思いますが、研究をしていると、面白さ以外にも論文数や引用数などの成果が求められる上に、研究以外の会議などで時間を取られて多忙になり、気づいたら事務処理的に論文

を書いているということがゼロではありません。また、自分の研究分野の中で権威を示すために過去の研究を少し改変して何本も論文を書き続ける人や、論文が書けるからという理由で、自分が全く信じていない理論を用いて論文を書く人もいるような気がします。子供達からすると全く理解できない世界だと思いますが、大人達も今一度子供の心に戻って本当に面白いことは何なのかと問い直しても良いのかもしれない。

同時に、日本のように面白い研究ができる環境があるというのは本当に幸せなことだと感じます。研究したくても研究できないところ(や時刻表やクワガタの図鑑が欲しくても手に入らないところ)は世の中にまだまだ存在します。せっかく得られた面白い研究結果なのだから、なるべく多くの人に知ってもらわなければもったいないことです。物理学会誌はその面白さを多くの人に伝える重要な役目を担っているのだと思います。

子供達になぜ電車やクワガタがそんなに面白いのかと聞いてみたことがあります。小学生なので答えはまだまだ支離滅裂なのですが、楽しそうに話しているのを聞いていると何となくこちらも楽しくなってくる。面白さは伝わってくるのです。こちらも負けじと、宇宙のことを話して面白いと言わせようとしています。時にはフーン分か

んな〜いとそっぽを向かれることも…編集委員としてはそのようなことがないように、子供達が感じているような面白さや興奮をそのままお伝えできればと思います。

井岡邦仁 <

編集委員

宮下 精二(委員長), 森川 雅博,
有田亮太郎, 井岡 邦仁, 石岡 邦江,
板橋 健太, 伊藤 克司, 岡田 邦宏,
沖本 洋一, 角野 秀一, 片沼伊佐夫,
加藤 岳生, 小島智恵子, 佐藤 丈,
鈴木 陽子, 関 和彦, 竹内 幸子,
常定 芳基, 西野 晃徳, 野口 博司,
長谷川太郎, 平山 博之, 藤山 茂樹,
古川はづき, 目良 裕, 山本 隆夫,
多田 司

(支部委員)

朝日 孝尚, 石井 史之, 奥西 巧一,
岸田 英夫, 小山 晋之, 酒井 彰,
野村 清英, 松井 広志, 水野 義之,
山崎 祐司

新著紹介小委員会委員

多田 司(委員長), 雨宮 高久,
大江純一郎, 桂 法称, 加藤 進,
小芦 雅斗, 合田 義弘, 竹延 大志,
中川 賢一, 平野 哲文, 宮原ひろ子,
村山 能宏, 吉越 貴紀, 渡邊 紳一

日本物理学会誌 第68巻 第9号 (平成25年9月5日発行) 通巻766号
Butsuri

発行者 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8F
印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8
発行所 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8F

©日本物理学会 2013

白 勢 祐 次 郎
株式会社 国 際 文 献 社

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

郵便振替 00120-4-167544 定価 1部2,400円 年額25,000円

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。