

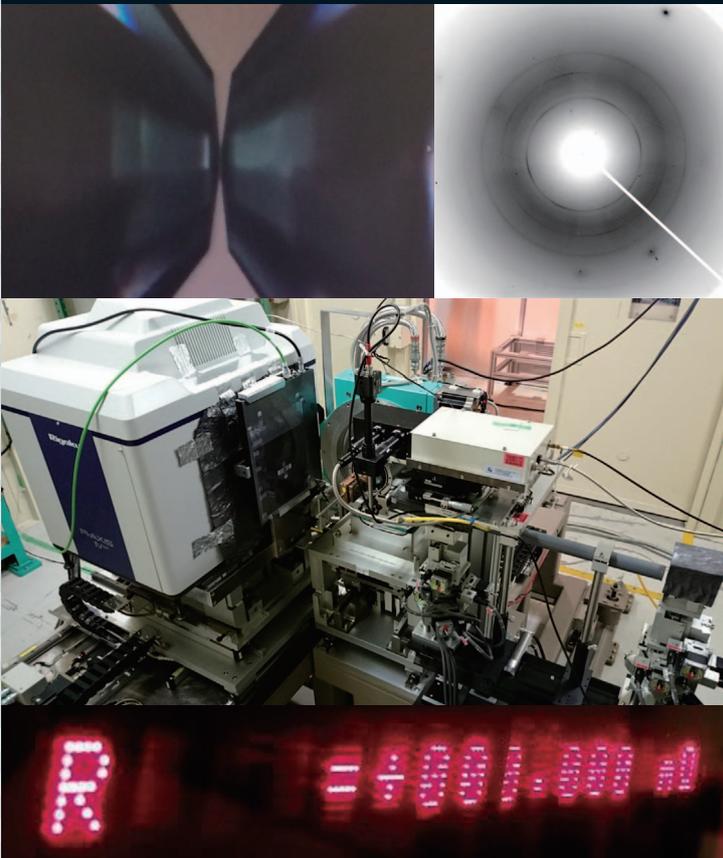
- 硫化水素からの高温超伝導
- 天然変性蛋白質
- 巻貝の殻に隠れている動物の
左右性形成メカニズムの謎

NO.

2

2016 | VOL. 71

B U T S U R I
日本物理学会誌



副会長として：学部学生と物理学会

柴田利明 〈副会長〉

学部学生と物理学会の関係について以下に書いてみたいと思います。第71期(2015年4月から2016年3月まで)の副会長を務めています。物理学会の主な目的は、研究・教育について発表をする会誌・学術誌・大会のような広場(フォーラム)を会員に提供することと、物理学の魅力を広く伝えることにあり、と思っています。物理学会は研究者、教員、技術者、学生など様々な会員から構成されていますが、内訳をみると学部学生の割合がたいへん少ないのが特徴です。現在、会員のうち学部学生は約150人で、全会員約17,000人と比べると1%程度です。春・秋の大会でも学部学生の発表は全体の発表数と比べるとたいへん少ない割合です。学部学生と物理学会のつながりをどのように強くしていくかが、今後の課題の1つだと考えています。ちなみに物理学会では学部学生は学生会員と呼ばれます。大学院学生は学生会員ではなく正会員です。

私は大学で学部学生に物理の授業をしています。その授業に出ている学生のほとんどが物理学会の会員になっていない、という現状はむしろ不思議なことだと感じており、改善の余地があると思います。物理学会は大学院学生以上の研究者のためにあるのだ、という考え方もあるかもしれませんが、学部学生の参加は物理学会を活性化するのに役立ちます。授業をしている関係から、私は学部学生を基準として物理学を考えるようになっていますが、教員や研究者が最先端のことを説明して学部学生が理解できなかつたら説明の仕方が良くないのだ、ということを示しているのです。学部学生は説明の良さ、悪さを判定してくれるたいへん優れたレフェリーでもあります。学部学

生の理解を基準にして物理学は組み立てられるのが本来の姿だと思っています。専門化されていない、基本的なことに疑問をもったり考えたりするのも学部学生の特長です。

学部学生に説明して理解してもらえたら、その次の段階として社会に広く伝えることができるので、学部学生に理解してもらえよう物理学を説明することは広報の第1歩ということもできます。

物理学は歴史が長く、研究の最先端の進展が速いので、初心者と最先端との距離がだんだん長くなっています。物理学のしきいが高くなっているとも言えます。手前の山を2つ、3つ越えてからでないと、目指す山に登れないという状況でしょう。現代物理学と言う言葉が20世紀初め頃からの物理学を指すとすると、かつては現代と呼ぶにふさわしかったが、始点が固定されているために、現在の学部学生にとっては100年以上の歴史を含むので、現代とはこんなに長いのか、という印象になっているでしょう。このような物理学の現状を鑑みると、自分が学生だった頃よりも一層、初心者に対する温かい、組織的な支援が必要であると思います。

物理学会の大会で自ら発表をすることは学生にとって大きな励みになります。大会で発表するために入会する、というのが大学院学生の場合でも入会の主な機会になっています。学部学生のためにもその環境を整えることが必要で、経済的な支援も課題です。

2016年3月の年次大会でパイロット事業として「学部学生ポスターセッション」が行われます。今回は1つの分野だけですが、将来、どのように発展するかが注目されます。学部学生か

らみると、一般講演は大学院学生のレベルであり、しきいが高いので、発表に適した場を大会の中で提供することが役立つでしょう。学部学生同士が大会の際に交流できることも重要な要素です。中学生・高校生には年次大会の際に行われるJr.セッションがあります。

将来は、卒業研究を物理学会の大会で発表するのを目指すのが学部学生にとって当然となることを期待します。大学1-3年生の中にも優れた研究をして発表できる学生がいると思います。大学よりも広い世界で発表することにより、視界が広がったような実感が得られるでしょう。

学部学生が数多く会員になって会誌が配布されるようになると、大学の教室で「今月号の会誌の記事読んだ？」という会話が学生間で交わされたり、授業の副教材として会誌の記事を使ったりすることが普通になるかもしれません。会誌の記事も、読者の一部は学部学生である、ということ意識して書かれるようになるでしょう。

物理学会の会員数は1999年を頂点として減りつつあり、15年間で10%以上減少しました。昨年と今年を比べてもこの傾向は続いています。学部学生の参加は、会員数の減少を止めるという観点からも有効です。物理学会は誰のためのものか、という問いに帰着しますが、冒頭で述べた会員のための広場には、多くの学部学生がいることが自然であると思います。実質的に学部学生に開かれた物理学会になることについて、今後、議論が盛んになっていくことを期待します。

(2015年9月14日原稿受付)

巻頭言 Preface

副会長として：学部学生と物理学会

Thoughts on Undergraduate Students and JPS as the Vice President

柴田利明 …… 73

Toshi-Aki Shibata

最近のトピックス Topics

硫化水素からの高温超伝導

High Temperature Superconductivity from Sulfur Hydride

清水克哉 …… 76

Katsuya Shimizu

現代物理のキーワード Trends

天然変性蛋白質—新しい蛋白質像—

Intrinsically Disordered Protein—A New Picture for Protein—

肥後順一 …… 78

Junichi Higo

交流 Interdisciplinary

巻貝の殻に隠れている動物の左右性形成メカニズムの謎

Left-Right Symmetry Breaking of Animal Body Plan—Research on Snails may Reveal Common Mechanisms

阿部真典, 黒田玲子 …… 80

Masanori Abe and Reiko Kuroda

最近の研究から Researches

宇宙の瞬間湯沸かし器：非平衡プラズマの分光診断で探る超新星残骸の無衝突電子加熱機構

Revealing Collisionless Heating of Electrons at the Supernova Remnant Shock Wave with X-Ray Spectroscopy of Non-Equilibrium Plasmas

山口弘悦 …… 87

Hiroya Yamaguchi

直接ギャップ半導体ヘテロ接合による二次元トポロジカル絶縁体

Topological Insulating Phase in Direct Transition Band Gap Semiconductor Heterostructures

鈴木恭一, 小野満恒二 …… 93

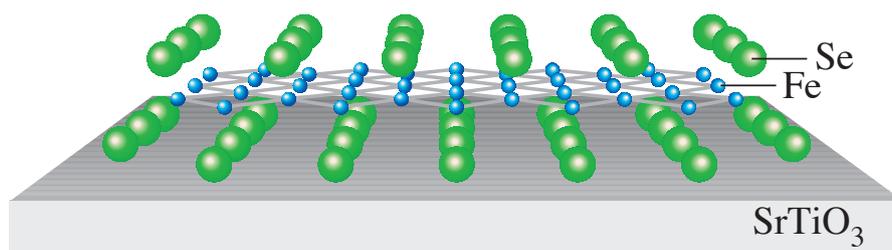
Kyoichi Suzuki and Koji Onomitsu

FeSe原子層薄膜の高温超伝導

High-Temperature Superconductivity in Atomic-Layer FeSe Films

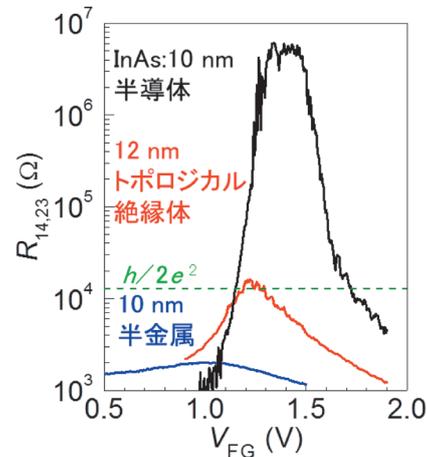
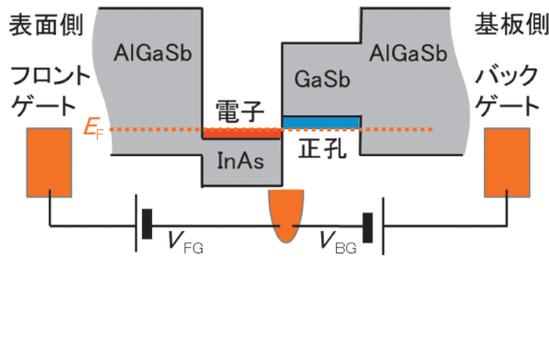
中山耕輔, 佐藤宇史, 高橋 隆 …… 99

Kosuke Nakayama, Takafumi Sato and Takashi Takahashi



最近の研究から (FeSe 原子層薄膜の高温超伝導)

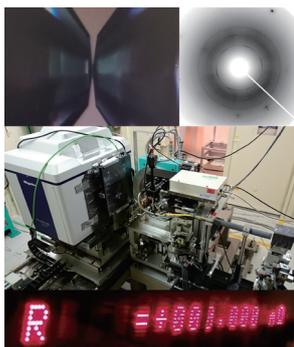
SrTiO₃ 基板上の FeSe 単層膜の構造.



最近の研究から (直接ギャップ半導体ヘテロ接合による二次元トポロジカル絶縁体)

InAs/GaSbヘテロ構造は、InAs層のわずかな厚さの違いで半金属-トポロジカル絶縁体-半導体と変化する。詳細は本号に掲載されている鈴木恭一氏らの「最近の研究から」記事を参照のこと。

物理教育は今	日本物理学会 Jr. セッション—これまでの10年, これからの10年—	松川 宏, 並木雅俊 ……	104
JPSJの最近の注目論文から	10月の編集委員会より	上田和夫 ……	108
PTEPの最近の招待・特集論文から	2015年11月号より	坂井典佑 ……	111
歴史の小径	武谷三男と坂田昌一: 交流の一断片	兩宮高久, 中根美知代, 植松英穂 ……	113
ラ・トゥッカータ	物理をやめて見えたもの	炭谷俊樹 ……	116
学会報告	2015年秋季大会 シンポジウムの報告	領域委員会 ……	118
談話室	「蜘蛛の糸」仕事をしたのはカンダタの筋力か?	後藤信行 ……	127
新著紹介			129
掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他		131
行事予定			134
会告	■第15回代議員懇談会開催のお知らせ ■第96回定時総会開催のお知らせ ■2016年1月1日付新入会者		136
本会刊行英文誌目次			139



表紙の説明

200 K を超える高い転移温度をもつ高温超伝導体が見いだされた。硫化水素分子に 150 GPa という超高压を印可することで実現する。

SPring-8の超高压ビームライン (BL10XU) の低温高压実験ステーションでは、圧力可変のダイヤモンドアンビルセルを用いた 200 GPa を超える高压と冷凍機を用いた 7 K までの低温を作り出すことができ、こういった極限環境下での粉末構造解析と電気抵抗の測定を同時に行うことが可能である。写真右方より集光された放射光 X 線ビームは中央銅色部に設置されたダイヤモンドアンビルセル (左上写真, 先端は 50 ミクロン) 内で加圧された試料に照射され、左方のディテクターで収集される。右上写真は硫化水素の 10 K, 150 GPa における X 線解像像, 下写真が交流ブリッジで同時に測定された電気抵抗である。詳細は本号に掲載されている清水克哉氏の「最近のトピックス」記事を参照のこと。

硫化水素からの高温超伝導

1. はじめに

2014年末に190 Kの超伝導がarXivに報告され周囲は騒然となった。¹⁾ 銅酸化物の最高値164 K²⁾ (高圧力下)を大きく超え、室温超伝導にいよいよ近づいたと感じられた。どのようにして彼らはその発見に至ったのか、追試の状況はどうか、発表からは半年が経過したが、これらの状況をわかる範囲でまとめてみた。

高温超伝導の実現にむけて様々な物質探索がなされているが、水素は永くそのひとつとして考えられてきた。つまり、水素を金属結晶化させることができれば、その高いフォノン振動数と電子格子相互作用によって高温(室温)超伝導体となるとAshcroftが理論予測した。³⁾ しかし、その生成に必要な超高圧力(400 GPa以上)の発生に実験技術は至っていない(1 GPaは約1万気圧)。実験の進捗に疲れた(?) Ashcroftは水素を多く含有する水素化物等に、金属水素に必要とされる圧力よりは低い圧力で高い超伝導転移温度を予測してみせた。⁴⁾ 様々な水素化物において理論計算がなされ、200 Kを超える転移温度を示す物質も提案されたが、⁵⁾ 実験的にはシラン(SiH₄)を加圧して得られた17 Kに留まっていた。⁶⁾

2. 硫化水素について

硫化水素(H₂S)は、火山ガスや温泉などに含まれ、いわゆる「硫黄臭」の素となる分子性気体である。労働安全衛生法では、特定化学物質および名称等を通知すべき危険物および有害物に指定され、その取り扱いには注意を要する。実際、我々が後で紹介する実験を行うにあたって、ボンベや減圧器の調達をはじめ、準備には相当の時間を費やした。

さて、硫化水素は2個の水素を含む分子であり、Ashcroftが提案した水素リッチなシステムのひとつといえるが、一方で水(H₂O)の類似物質としてすでに圧力下の物性研究がなされている。室温下では約27 GPaで分子解離し、⁷⁾ 96 GPa以上で、金属化する報告があるが、⁸⁾ これは分子解離にもなった単体硫黄の析出とも考えられている。単体硫黄の圧力誘起金属化と超伝導は、約80 GPaで観測されており、⁹⁾ 転移温度は160 GPaで17 Kまで上昇する。¹⁰⁾ 以上からは、硫化水素を加圧しても、分子解離してしまい単体硫黄の析出しかないように思われる。実際に、2014年の報告を受けて追試を行ったというグループからは、単体硫黄の超伝導しか観測できなかった、という話を聞いた。

3. 200 Kを超える超伝導の報告の概要

本稿を執筆中に、“Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system”と題された論文がNature誌に掲載された。¹¹⁾ 題名にもある通り、水素を重水素に置換した試料(D₂S)による同位体効果から、この超伝導はconventionalな超伝導として報告されている。以下に論文の概要を私見も含めて述べる。

理論計算から、高圧力下の高温超伝導が期待できる様々な水素化物が提案され、Eremetsらも多くの水素化物を加圧して実験を行ってきたが、⁶⁾ その中で160 GPaの圧力下において80 Kの超伝導が予測された¹²⁾ 硫化水素に注目した。実験は以下のようにして行われた。硫化水素を沸点以下の温度(約200 K)まで冷却して、液化した試料をダイヤモンドアンビルセル(DAC)の試料室に封入し、その低温のまま加圧した。¹¹⁾ 加圧により試料は直ちに固化し、色は次第に黒色化して、約50 GPaからは伝導性が観測され、約90 GPa以上では温度依存性は金属的になり、100 GPaで冷却すると、超伝導転移と思われる電気抵抗の大きな減少がみられた。その転移温度は単体硫黄において報告されていたもの^{9,10)} よりも高く、圧力によって大きく上昇し、160 GPaまでは理論予測されていた超伝導転移温度¹²⁾ と非常に良い一致をみせた。160 GPa以上の圧力では、理論予測から外れ、転移温度は引き続き上昇をみせ、約200 GPaで150 Kに達した。ここまでは試料の温度を250 K以下に保ったままで行われた実験であるが、室温まで温度を上げると異なる結果が得られた。

約150 GPaで室温まで上昇させると、試料の抵抗は3分の1程度まで減少し、何らかの相転移が室温までの温度上昇の間に起こっていると考えられる。ここから冷却を行うと、190 Kから電気抵抗が下がりはじめ、超伝導が現れた。室温まで温度を上昇させたときに生成される相(High- T_c 相)は時間とともに増加するとみられ、室温で時間をおくと転移幅がシャープになってくる。High- T_c 相の転移温度は、低温で加圧したときの相(Low- T_c 相)とは異なり、負の圧力依存性を持っていた。

重水素で置換した硫化重水素(D₂S)を用いて同様な実験を行っても、同様に超伝導が観測された。そして、硫化水素を用いた場合と比較すると超伝導転移温度は低く、170 GPa以上においては、BCSによる同位体効果の指標 $T_{c\infty}(\text{質量})^a=0.5$ に対して $a\approx 0.3$ を示した。7 Tまでの外部磁場の印加による転移温度の減少も確認され、185 Kの超伝導の場合、臨界磁場は70 T程度と外挿されている。

2014年末に投稿されたarXivにはなかったマイルストーン効果が確認できたことで、Nature誌への掲載に至ったと思われる。一般的に、100 GPaを超える高圧力下では試料のサイズは数ミクロンであり、試料からのシグナルは、試料と比較して非常に大きな体積を持つ高圧装置からのバックグラウンドシグナルに埋もれてしまい、磁気測定は困難とされている。Eremetsらは、市販のSQUIDを用いた帯磁率測定システムに組み込める程度に小型のDACを開発して、比較的大きな体積の試料で155 GPaの発生を可能にしてマイルストーン効果を観測した。ZFCでのシグナルはオンセット203 Kの超伝導転移温度を示し、電気抵抗測定の結果と良い一致を示したとしているが、FCではシグナルはほとんど見えていない。Low- T_c 相は理論予測された H_2S ¹²⁾と考えられるが、High- T_c 相は何なのか。 H_2S の分子解離で生成されると考えられるのが、水素分子(H_2)であるが、同時に行われたRaman分光では水素分子からのvibron振動は観測されないことから、水素分子が現れるような反応は起こっていないと考えられる。 $3H_2S \rightarrow H_6S + 2S$ や $2H_2S \rightarrow H_4S + S$ なども考えられるが、 $3H_2S \rightarrow 2H_3S + S$ で生成された H_3S の可能性が高い。 $(H_2S)_2H_2$ ($\approx H_3S$)が180 GPa以上で硫黄原子が体心立方格子を組む $Im-3m$ の構造をとり、200 K程度の超伝導を示す理論計算が報告されており、¹³⁾これが実験結果とほぼ一致している。したがって、このHigh- T_c 相は $Im-3m$ 構造をとる H_3S からのもので、水素が関係する強い共有結合と高い振動モードの組み合わせで実現していると考えられる。加えて、零点振動と非調和効果を考慮した計算では $\alpha \approx 0.35$ と予測され、同位体効果の実験結果をうまく説明できる。¹⁴⁾

4. 結晶構造の探索

最近、筆者のグループはEremetsらと協力し、High- T_c 相の同定のために結晶構造解析を行った。SPRING-8のBL10XUに設置された冷凍機に、硫化水素および硫化重水素を約150 GPaに加圧したDACを取り付けて、電気抵抗の温度依存性、結晶構造の温度・圧力依存性を測定した。電気抵抗測定により超伝導転移することを確認したのちに、高圧力下の試料から回折線を取得した。高強度な放射光X線を用いても水素原子からの回折線は得られないが、硫黄原子からの回折線から結晶構造が解析可能である。硫化水素および硫化重水素の試料において、 H_3S を主成分とする単体硫黄との混合物であることがわかった。構造に温度依存性はなかった。このように、 H_3S がこの高温超伝導物質であることを強く示す結果が得られている。¹⁵⁾

5. 追試の状況

Eremetsらとは独立に筆者の研究室において硫化水素ガスをDACに封入して、Eremetsらの示した通り、低温下で加圧する方法により超伝導探索実験を行っている。Eremetsらの実験よりやや低い温度の160 Kで加圧を行ったところ、150 GPaでは金属光沢が観測され、冷却すると約70 Kのオンセットを持つ超伝導が観測された。一旦、室温まで温度を上げると、Eremetsらの結果と同様にHigh- T_c 相へ転移を示す電気抵抗の減少がみられ、再冷却すると、オンセット180 Kの超伝導が再現された。転移温度幅が広い(100 Kでゼロ抵抗)が、これはEremetsらの試料でもみられ、室温での保持時間が短いためだと考えられる。DACをSPRING-8に持ち込み、結晶構造解析を行ったところ、Eremetsらの加圧した試料と同じ結果を得た。

6. まとめ

硫化水素の高温超伝導およびその結晶構造を予測しえた近年の理論計算の精度に驚かされた。本稿を執筆した時点では、われわれのグループによる電気抵抗測定に限られ、マイルストーン効果測定を含めた再現実験の報告がない。複数のグループによる再現実験を含め、他の水素化物への展開も望まれるところである。ごく最近、Eremetsらのグループから PH_3 においても約200 GPaで100 K級の超伝導が報告され、¹⁶⁾この系の可能性をあらためて認識した。水素リッチなシステムの追求によって、室温超伝導体の実現—少なくともその指針が得られる日が近いと感じている。

参考文献

- 1) A. P. Drozdov, *et al.*: arXiv 1412.0460 (2014).
- 2) C. W. Chu: AAPS Bulletin **18** (2008) 9.
- 3) N. W. Ashcroft: Phys. Rev. Lett. **21** (1968) 1748.
- 4) N. W. Ashcroft: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 187002.
- 5) Y. Wang and Y. Ma: J. Chem. Phys. **140** (2014) 040901.
- 6) M. I. Eremets, *et al.*: Science **319** (2008) 1506.
- 7) H. Fujihisa, *et al.*: Phys. Rev. B **70** (2004) 134106.
- 8) M. Sakashita, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 1082.
- 9) S. Kometani, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **66** (1997) 2564.
- 10) V. V. Struzhkin, *et al.*: Nature **390** (1997) 382.
- 11) P. A. Drozdov, *et al.*: Nature **525** (2015) 73.
- 12) Y. Li, *et al.*: J. Chem. Phys. **140** (2014) 174712.
- 13) D. Duan, *et al.*: Scientific Reports **4** (2014) 6968.
- 14) I. Errea, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 157004.
- 15) M. Einaga, *et al.*: submitted.
- 16) P. A. Drozdov, *et al.*: arXiv 1508.06224 (2015).

清水克哉〈大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター〉

(2015年9月9日原稿受付)

天然変性蛋白質—新しい蛋白質像—

Keyword: 天然変性蛋白質

1. 言葉の定義

生体内で機能を発揮することで生命活動を支えている蛋白質は、20種類のアミノ酸が多様な一次配列でつながった一本のポリペプチド鎖であり、一次配列に応じて特定の立体構造（「天然構造」と呼ばれる）に折れたたまる。蛋白質の結合部位と呼ばれる部位にパートナー分子が結合することで機能が発揮されるが、天然構造はパートナー分子との相互作用が効率的に起きるように形成される（図1(a)）。パートナー分子は、DNA, RNA, 小分子, 蛋白質など様々である。図1(a)のように蛋白質とパートナー分子が形の相補性を利用して効果的に結合する機構は「鍵と鍵穴」機構と呼ばれる。利用されるのは形だけでなく、分子表面の電荷分布の相補性などの物理化学的な性質であることもあるが、これも広い意味で「鍵と鍵穴」機構の範疇にある。蛋白質は相互作用に有利な天然構造を事前に用意してパートナー分子を待ち構えているのである。

ところが天然変性蛋白質と呼ばれる蛋白質の一群はこの範疇に入らず、溶液中でパートナー分子と離れているときは蛋白質の一部または全体が特定の立体構造を持たない状態（変性状態）にある（図1(b)）。変性状態にある領域を変性領域、立体構造を形成している領域をコア領域と呼ぶ。変性領域にパートナー分子が接触すると、結合を促進するために変性領域に立体構造が誘起される（図1(c)）。この機構を「折れたたみと共役した結合」と呼ぶ。

また、変性領域が直接結合に関与せずに、コア領域とパートナー分子の結合をサポートする場合もある。例えば図1(d)のように二つのコア領域が変性領域で繋がれている

際に、パートナー分子との結合に有利になるように変性領域が構造を形成する（図1(e)）。この場合、変性領域はパートナー分子と相互作用する以前から重要な役目を果たしている。すなわち、二つのコア領域が別々の分子であれば、それらは空間的に離れている可能性が高い。コア領域を接近させておくことで複合体の形成確率を格段に上げるのである。

2. 発端

一部または全長が変性しているポリペプチド鎖の存在は以前から知られていたが、立体構造が実験的に決定できない領域は構造生物学的に興味を引かなかった。鍵と鍵穴のスキームから見ても変性領域が機能的に重要であるとは考えにくかった。しかし、ある蛋白質の変性領域がヘリックス構造に折れたたまれつつパートナー分子と結合することをP. Wrightらが実験的に示すと状況は一変する。^{1,2)}以降、世界中の蛋白質研究者が天然変性蛋白質の研究を始め、特定の立体構造を持つ蛋白質だけが機能を持つという従来の常識が覆された。同時に、研究の対象が大きく広がった。バイオインフォマティクスの研究³⁾から、真核生物の蛋白質は平均すると2~3割ほど変性領域も持っており、細胞核内蛋白質ではこの割合はさらに増すようである。転写や翻訳を担う蛋白質の多くが天然変性蛋白質であることも分かってきた。例えばiPS細胞の初期化を担う山中因子と呼ばれる蛋白質も変性領域を持ち、この領域に立体構造が形成されることで多様なパートナー分子との複合体を生成する。⁴⁾

3. メカニズム

ゲノム全体に対する統計的解析や分子生物学的研究から、天然変性蛋白質について興味深い結果が得られているが、それらの研究の紹介は他に譲る（例えば文献5を参照）。

天然変性蛋白質の「折れたたみと共役した結合」を物理学的に眺めると、この現象が起きるためには、天然変性蛋白質の自由エネルギー地形がパートナー分子の有無で大きく変わる必要がある。系のボルツマン因子 $\exp[-E(r)/k_B T]$ が与えられたとする ($E(r)$ は系のある構造 r でのエネルギー、 k_B と T はそれぞれボルツマン定数と温度 (300 K))。 r は系の全構成原子の座標集団だが、パートナーが存在するときは $r = r_{\text{IDP}} + r_{\text{part}} + r_{\text{sol}}$ である (r_{IDP} , r_{part} , r_{sol} はそれぞれ天然変性蛋白質, パートナー分子, 溶媒分子の座標集団)。一方、パートナーが存在しないときは $r = r_{\text{IDP}} + r_{\text{sol}}$ である。ここで r_{IDP} だけを残して他の自由度でボルツマン因子を積分し分配関数 $Z_{\text{IDP}+\text{part}}(r_{\text{IDP}}, T)$ と $Z_{\text{IDP}}(r_{\text{IDP}}, T)$ を得

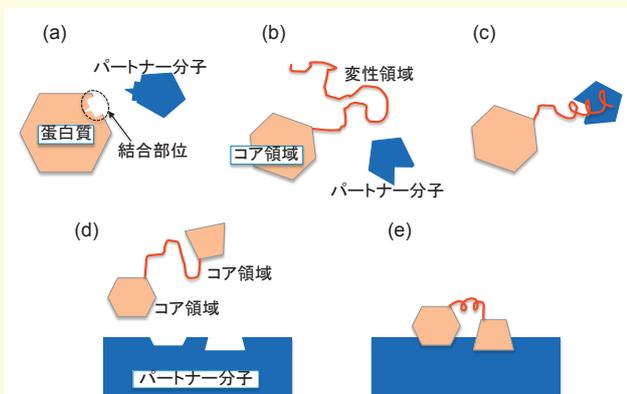


図1 (a)「鍵と鍵穴」モデルにより結合しようとしている蛋白質とパートナー分子。(b) パートナー分子と相互作用していない天然変性蛋白質。(c) パートナー分子と結合した天然変性蛋白質。(d) 二つのコア領域を変性領域が繋いでいる。この状態で溶液中を揺らいでいる。(e) パートナー分子と結合した天然変性蛋白質。コア領域とパートナー分子がうまく結合するように、変性領域に構造が形成される。

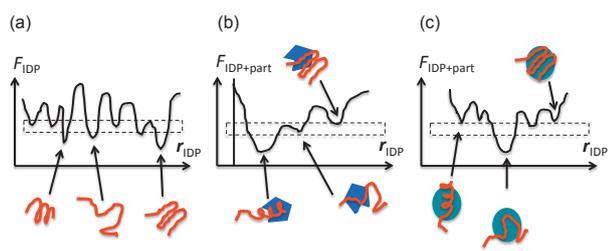


図2 (a) パートナー分子が存在しないときの天然変性蛋白質の自由エネルギー地形。(b) あるパートナー分子が存在するときの自由エネルギー地形。「折れたたみと共役した結合」が起きる。(c) 別のパートナー分子が存在するときの自由エネルギー地形。破線の囲みは室温に対応するエネルギー領域。

た(前者はパートナーが存在下, 後者は非存在下の分配関数)とすると, これらの系の自由エネルギー地形(平均力ポテンシャル)は $F_{\text{sys}}(\mathbf{r}_{\text{IDP}}, T) = -k_B T \ln[Z_{\text{sys}}]$ で与えられる (sys = IDP または sys = IDP + part)。「折れたたみと共役した結合」を説明するためには, パートナー非存在下で自由エネルギー地形上に圧倒的に安定な立体構造が存在せず(図2(a)), 存在下では特定の立体構造をとりつつ複合体が形成されて安定化される(図2(b)) 必要がある。

さて図2(a) と (b) を眺めていると一つの疑問が生じる。天然変性蛋白質は, 多様な立体構造をとりつつ複数のパートナー分子と結合しないのか? 答えは“結合する”であり, 多くの天然変性蛋白質がこの性質を持つことが分かってきた(図2(c))。この性質は「鍵と鍵穴」モデルから出てこない。例えば, DNA 修復, 細胞増殖停止, アポトーシスなどの細胞増殖サイクルを制御し, 細胞のがん化を抑制する蛋白質 p53 は, その C-末端側にある変性領域が α ヘリックス, β ストランド, コイル構造等の構造をとりつつ異なるパートナー分子と結合する。⁶⁾ 立体構造の揺らぎを最大限に利用する天然変性蛋白質ならではある。多種多様な蛋白質の間で相互作用をネットワークとして描いたとき, 多数の相互作用を集めるノードに天然変性蛋白質が位置することが多い。

4. 計算科学的なアプローチ

折れたたみと共役した結合の自由エネルギー地形は図2のようになることが想像できるが, 生体高分子系で自由エネルギー地形を解析的に得ることはほぼ不可能であり, シミュレーションを用いたアプローチになる。そのとき蛋白質の表現には大別して粗視化モデルと全原子モデルの二通りがある。

粗視化モデルでは幾つかの原子をまとめて一つの質点に置き換え, かつ溶媒は露わに考慮しない。系の単純化により本来あるべき相互作用の詳細が抜け落ちる代わりにハミルトニアンに実験結果を反映させる(例えば実験から得られた複合体構造がエネルギー的に安定になるように設定す

る)。このアプローチは Go-like モデルと呼ばれる粗視化モデルを起源としており, protein folding の研究では数々の有用な結果が得られている。このモデルを用いて, 変性領域が離れたところにあるパートナー分子を捕まえる「フライキャスティング機構」が提案されている。⁷⁾ また, 天然変性蛋白質とパートナー分子の相互作用の強さに依って, 折れたたみと共役した結合の現象を起こす駆動因子が変わることが示唆されている。⁸⁾

全原子モデルでは天然変性蛋白質, パートナー分子, 溶媒を露わに取り扱うが, 計算量が膨大になる。天然変性蛋白質とパートナー分子をすべて取り込んで計算を行い詳細な自由エネルギー地形を求めるには, まだ時間がかかりそうだが, 複合体形成に本質的な役割を果たす部分をコア領域から切り出してパートナー分子との結合の過程を再現し, 自由エネルギー地形を得るところまではきている。著者自身の研究紹介で恐縮であるが, 全原子マルチカノニカル分子力学によると, パートナー分子の有無で自由エネルギー地形が大きく変わり, 折れたたみと共役した結合が起こることが分かる。⁹⁾ 物理学では現象を単純明快に説明することが好まれるが, 全原子モデルからの結果は, 複雑である。また, 最終的に安定な複合体にたどり着くまでに, 多数の中間的な複合体構造を経ることも分かり, 何らかの本質的な因子に導かれて現象が起きているようには見えない。全原子モデルから得られる“きたない”結果と, 粗視化モデルから得られる“すっきり”した結果に整合性をつける必要がある。

5. 最後に

天然変性蛋白質は構造柔軟性を積極的に活用することで機能しており, 従来の蛋白質観を大きく変えた。真核生物の核内では様々な調節機構に関わっており, もはや生命現象を理解する上で不可欠な分子である。進化を考える上でも重要な研究対象である。最近では細胞や細胞核の中での蛋白質の振る舞いが実験・計算の両面で研究されている。今まで想像もしていなかった天然変性蛋白質の役割が, 分かるかもしれない。今後の研究の進展が待たれる。

参考文献

- 1) P. E. Wright and H. J. Dyson: *J. Mol. Biol.* **293** (1999) 321.
- 2) K. Sugase, *et al.*: *Nature* **447** (2007) 1021.
- 3) J. J. Ward, *et al.*: *J. Mol. Biol.* **337** (2004) 635.
- 4) S. Jerabek, *et al.*: *Biochim. Biophys. Acta* **1839** (2014) 138.
- 5) 西川 健: *生物物理* **49** (2009) 004.
- 6) C. J. Oldfield, *et al.*: *BMC Genomics* **9** (Suppl. 1) (2008) S1.
- 7) B. A. Shoemaker, *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **97** (2000) 8868.
- 8) K. Okazaki, *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105** (2008) 11182.
- 9) J. Higo, *et al.*: *J. Am. Chem. Soc.* **133** (2011) 10448.

肥後順一〈大阪大学蛋白質研究所〉

(2015年5月15日原稿受付)

巻貝の殻に隠れている動物の左右性形成メカニズムの謎



阿部真典

東京理科大学研究推進機構総合研究院



黒田玲子

東京理科大学研究推進機構総合研究院

動物の体は発生プログラムに基づいた、前後軸、背腹軸、左右軸の3つの体軸から構成されている。これは、海綿動物や刺胞動物などを除いた、多細胞動物の大部分を占める左右相称動物で共通の形態である。この3つの基本体軸の中で左右軸は他とは異なる性質を持っている。前後軸、背腹軸ではそれぞれで非対称な機能や役割を持っていることから分類できるわけだが、左右とは前後、背腹が決まると自動的に生じる概念的な意味合いを含んでおり、配置関係だけで特徴付けられてしまう。しかし、左右は互いに等価でありながら、同じ存在ではない。これは、右手と左手の関係で、等価な性質を持ちながら互いに重ね合わせることができない、実像と鏡像の関係で説明される。自然界にはそのような左右という概念が普遍的に存在し、動物の形態にも当てはまる。そして、多くの動物の形に見られる左右の関係には、明瞭な非対称性が見出される。外見上は左右相称に見える動物でも、その体内構造に目を向けると、各種臓器は左右非対称な配置や形態、ねじれ方をしている。しかも、その左右非対称性はランダムなものではなく、生物種によって固有の極性(左右性)が存在しており、遺伝子レベルで厳密に制御されている。決められた左右非対称な配置、形態が保たれていないと、正常に機能することができず、重篤な症状を引き起こしてしまう場合がある。

近年になって、モデル生物を中心に左右性形成メカニズムの研究が進み、徐々にその詳細が分子レベルで明らかにされつつある。そのメカニズムを比較してみると、種ごとに異なるメカニズムが数多く存在する。種を超えた普遍的なメカニズムは存在するのだろうか？生物は進化の過程でどのようにして左右性形成メカニズムに多様性を獲得してきたのであろうか。

この謎に対する手掛かりが、巻貝の殻の左右巻型に潜んでいるかもしれない。巻貝は左右性の研究材料として、他の生物種にはない優れた特徴を持っている。特に、巻貝胚の左右巻型決定のタイミングは非常に明確で、母性由来の一遺伝子座にコードされた巻型決定遺伝子の働きによって、第3卵割の割球配置の左右性が制御され、それによって左右対称性の破れが引き起こされていること、このとき決定した左右軸に従って、左右非対称な遺伝子発現が誘導され、左右非対称な巻型が形成されていることを我々は明らかにしてきた。この左右巻型形成の全体像をみると、脊椎動物の左右性形成において機能している遺伝子と共通なもの存在が確認されるし、対称性の破れを導く細胞レベルでの細胞骨格系が関与する分子メカニズムにも無脊椎動物との共通点が見出される。このことから、巻貝の左右巻型形成メカニズムの解明によって、動物個体の左右性形成の謎に迫る新たな知見が得られるかもしれないと考えている。

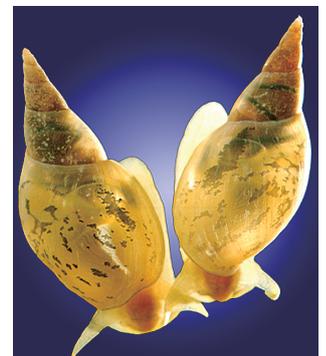
—Keywords—

左右対称性の破れ：

動物の形態に現れている左右非対称性の多くは、発生過程で左右相称な胚に左右差を生み出すメカニズムが機能することで作られており、種ごとに遺伝子によって左右性は厳密に決められている。

動物の左右性：

動物の体を構築するアミノ酸や核酸といった分子はホモキラリティーで統一されているが、個体レベルになると、その左右非対称性が逆転する現象が起きる。マクロの左右性はミクロの左右性の性質に影響を受けていないのだろうか。生命世界の左右非対称性に存在する大きな謎である。



左右両方の巻型が存在するヨーロッパモノアラガイ。

1. はじめに

自然界は様々な形をした生物であふれているが、なかでも巻貝は独特で不思議な外観をしている。背中に背負った大きな殻は、外敵からの防御や、陸上生活では乾燥から逃れるために必要なものである。一方で、その貝殻の持つ規則正しい螺旋構造と模様や色合いの美しさなどは、人を魅了してやまないものがある。今回は、このような興味深い巻貝の形において、右巻き・左巻きの違いが、どのようなメカニズムで形成されているのか、発生生物学的な観点から述べたいと思う。^{*1} そこには、我々、ヒトも含めた脊椎動物の左右非対称な形態形成メカニズムの基本的なプロセスである、発生初期での対称性の破れと、左右非対称な遺伝子発現が関与しており、動物個体の左右性形成メカニズムの解明につながる重要なヒントが隠れているかもしれないのである。まずは、これまでに明らかとなっているモデル生物の左右性形成メカニズムについて概要を述べたうえで、巻貝の左右巻型形成メカニズムの説明を試みたいと思う。

2. 脊椎動物の左右性形成メカニズム

脊椎動物における左右性の研究は複数の種で進んでおり、左右性形成の全体像が一つのモデルで捉えられている。¹⁾ 最初は1個の細胞である受精卵の状態から、細胞分裂により細胞数が増え、さらに細胞の分化が進むにつれ、胚には前後軸、背腹軸が確立していく。そして、原腸胚期に達した胚では未だ左右対称な形態をしているのだが、この時期、胚の正中において左右対称性の破れを引き起こすイベントが発生する。そこで生じた左右極性に従って、その後の発生過程で左右非対称な遺伝子発現が誘導され、左右非対称な形態形成へと繋がっていくと考えられている。このモデルは主にマウスを用いた詳細な解析によって構築されてきた。

マウスでは胎生7.5日目の胚で、腹側の表面部分にノードと呼ばれる小さなくぼみが形成される。このノードを構成している細胞にはそれぞれ1本ずつ繊毛が斜めに生えており、時計回りに回転運動を行っている。そのため、周囲の液体がかき回され、ノード内には左向き水流(ノード流)が発生している(図1)。^{*2} 驚くべきことに、この水流の向きがマウス胚の左右性を決定していることが明らかとなっている。²⁾ これは遺伝子変異体マウスの解析から見出されてきた。ノードに繊毛が形成されない、または繊毛が回転運動しない変異体のマウス胚ではノード流が観察されず、成長した個体の中には体内構造の左右性が逆転したものも現れてきた。^{3,4)} つまり、左右性がランダム化していたのである。また、実際に水流の向きが重要であることも、人工的に右向き水流を作り出し、胚の左右性を人為的に

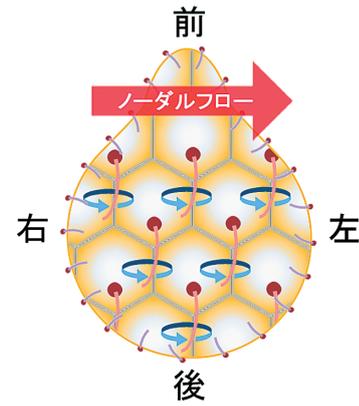


図1 マウスのノードとノード流の模式図。

逆転させたことで実証された。⁵⁾ この水流の向きは、胚の左右で非対称な遺伝子発現パターンを誘導する役割を担っており、野生型であればその左方向へのノード流に従って、左右両側に存在する側板中胚葉の左側のみで一過的な *Nodal* 遺伝子^{*3} の発現が生じる。⁶⁾ *Nodal* が機能することで様々な遺伝子の発現が誘導されるため、左右で異なる遺伝子発現パターンが形成されることになる。特に、*Nodal* によって制御されている *Pitx2* 遺伝子^{*4} の左右非対称な発現が、内臓器官の左右性形成に重要であることが明らかになっている。^{6,7)} つまり、ノード流の向きによって、*Nodal-Pitx2* の左右非対称な遺伝子発現パターンを制御することが、マウス胚における左右性形成の中心的なメカニズムなのである。しかし、ノード流の方向性がどのようにして認識されているのかは不明な点が多く、ノードの周縁部に生えた運動性を欠いた繊毛によって、物理的な水流そのものが感知されているというメカノセンサーモデルと、何らかのシグナル分子が水流によって左側に運ばれて作用するという2種類のモデルが提唱されている。^{8,9)} どちらのモデルにおいても、 Ca^{2+} がシグナルとして機能することが必要であり、ノード周縁部の繊毛における Ca^{2+} イオンチャネル^{*5} の *Pkd2* によってノード流が感知されていることが示唆されている。¹⁰⁾

左側側板中胚葉における *Nodal-Pitx2* シグナル伝達経路の活性化は、すべての脊椎動物で共通したメカニズムであると考えられているが、^{1,11)} 初期胚の対称性の破れを導くメカニズムについては、種によって多様性が見受けられる。他の脊椎動物でマウス胚のノードに相当する器官が、アフリカツメガエル胚では原腸蓋板、ゼブラフィッシュ胚ではクッパー小胞、ニワトリ胚ではヘンゼン結節である。¹⁾ アフリカツメガエルとゼブラフィッシュの胚では、マウス胚と同様の繊毛運動による一方向への水流が確認されてお

^{*1} 巻貝の殻の形は数理モデルの研究材料としても興味を惹くものである。化石でしか存在しない異常巻きアンモナイトの殻の形も数理モデルで説明することができる。³¹⁾

^{*2} 左方向への水流が生じるには、繊毛の生えたノード細胞の形状とその細胞表面上で繊毛の生えている位置も重要である。繊毛は揃って胚後方に傾くように生えている。

^{*3} *Nodal* 遺伝子にコードされた *Nodal* タンパク質は細胞外に分泌されて拡散し、細胞間でシグナルを伝達する役目を果たす。

^{*4} *Pitx2* 遺伝子は転写因子をコードしており、形態形成に関わる遺伝子群の発現を活性化させる。

^{*5} 細胞膜貫通タンパク質の一種で、受動的に Ca^{2+} イオンを透過させる働きを持っている。

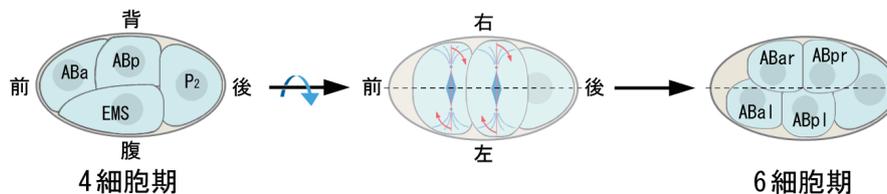


図2 線虫胚の初期卵割で観察される左右非対称な割球配置。

り、*6 ノード流モデルが機能している可能性が示唆されている。^{1,11)} しかし、ニワトリ胚においては繊毛運動が観察されず、ヘンゼン結節の周辺細胞自体が左方向へと移動して片寄ることにより、左右非対称な遺伝子発現が誘導されていることが明らかとなっている。しかも、この現象がもっと発生初期のプロトンポンプ*7の活性に制御されていたことは興味深い。¹²⁾ 同様に、以前から、アフリカツメガエル胚では初期卵割の段階で、母性由来のプロトンポンプのmRNAが割球レベルで左右非対称に局在することが観察されており、その阻害剤処理を行うと左右性が乱されてしまうことが報告されていた。¹³⁾ このように、種によって異なる対称性の破れのタイミングやメカニズムにも共通性があるかもしれない。現在、発生初期に左右対称性の破れを導く根源的な要因についての追究がなされているところである。^{11,14)}

3. 無脊椎動物の左右性形成メカニズム

無脊椎動物における左右性の研究は、主に線虫とショウジョウバエで進められているが、そのメカニズムは脊椎動物とは大きく異なっているように見える。線虫、ショウジョウバエともに脊椎動物の中心メカニズムである左右非対称なNodal-Pitxシグナル伝達経路が機能しておらず、そもそもNodal遺伝子自体がゲノム中に見つかっていない。¹¹⁾ それではどのようにして体内構造に左右性を作り出しているのだろうか。

線虫のようなシンプルな形態の動物にも、腸や生殖腺の形に左右非対称性が見受けられるが、この左右性は初期卵割の段階ですでに決定している。まず、線虫の胚では前後軸、背腹軸は4細胞期までに非対称分裂と割球配置だけで確立しているが、胚はまだ左右対称である。続いて、2つの細胞(ABa細胞とABp細胞)が左右軸方向に分裂するのだが、このとき、前後軸に沿って、左右で必ず決まった割球配置のズレを生じる(図2)。この6細胞期の左右非対称な割球の配置関係によって、線虫の左右性が決定するのである。これは、4から6細胞に分裂している胚で、割球配置を物理的に左右逆転させたところ、体内構造の左右性が逆転した鏡像体の線虫が得られたことで証明され

た。¹⁵⁾ 胚の左右で異なる割球接着パターンが形成されるために、左右非対称な細胞系譜が生じるものと考えられる。この6細胞期の左右非対称な割球配置は、紡錘体*8の傾きによって制御されているのだが、その分子メカニズムについての詳細は明らかになっていない。¹¹⁾ そこには、アクチン細胞骨格*9による制御メカニズムが関与していることが示唆されている。¹⁶⁾

一方、ショウジョウバエの左右性形成では、発生過程において胚の左右対称性を破るようなイベントが見つかっておらず、個々の左右非対称な器官は自立的に左右性を形成していると考えられている。体内構造の左右非対称性は、消化管のねじれの向きと雄性外生殖器の回転方向に現れており、その方向性は決まっているのだが、驚くことに、たった一つの遺伝子Myo31DFの変異体は、その左右性がどちらも逆転した鏡像体に成長することが報告された。^{17,18)} Myo31DF遺伝子はミオシタンパク質*10の一種をコードしており、アクチン細胞骨格との相互作用によって左右性形成に機能していることが明らかとなっている。また、消化管を構成する上皮細胞において、Myo31DFタンパク質が直接機能することによって、個々の細胞が平面的に左右非対称な形に変形していることが突き止められており、それが消化管全体の構造を一方向にねじる要因に成り得ることをシミュレーションから支持する結果が得られている。¹⁹⁾ しかし、なぜMyo31DF変異体では、消化管、雄性外生殖器のどちらにおいても、左右性がランダムになるのではなく、逆転してしまうのか、その詳細は分かっていない。そこには細胞骨格系の関与する細胞固有の左右性が関与している可能性が示唆されている。¹¹⁾

4. 巻貝の左右巻型形成メカニズム

巻貝は体内構造のみならず、外見的にも左右非対称な形をした珍しい生物である。一般的には、貝殻の頂点から見て時計回りに巻き降りていれば右巻きで、反時計回りであ

*6 ノード流モデルはすべての哺乳類で共通というわけではない。ウサギではノード流が観察されているのだが、ブタでは機能していない。^{11,12)}

*7 細胞膜貫通タンパク質の一種で、ATP加水分解エネルギー等を使って、能動的にプロトンを送り、細胞内外に膜電位やプロトン勾配を作り出すことができる。

*8 細胞分裂時に、細胞骨格の一つである微小管によって構成される分裂装置であり、2つの娘細胞に染色体を均等に分配する役割を持つ。細胞質の分裂は、紡錘体の長軸に直交するように生じるため、分裂面を決定する役割も持っている。

*9 単量体のアクチンタンパク質が重合して繊維状になったものはアクチンフィラメントと呼ばれ、主要な細胞骨格系の一つとして知られている。アクチンフィラメントは様々なタンパク質との相互作用を行うことで、細胞形態の維持や変化、細胞運動などの機能に直接関わっており、細胞の生命活動を支える重要な因子である。

*10 ミオシンはモータータンパク質の一つで、アクチンフィラメントの上を特定の方向に移動する機能を持っており、細胞分裂や細胞運動、細胞内での物質輸送などに関わっている。

れば左巻きである。左右の巻型は種によって決まっており、大多数の種は右巻きである。左巻きの種は少数派だが、そのほとんどが陸上または淡水産の巻貝であることが知られている。²⁰⁾ なぜ巻型が種によって左右どちらか一方のみに固定されているのか、なぜ海から陸上に生活環境を移した巻貝で左巻きへの進化が増えたのか、生態学的なアプローチからの進化的考察はなされているが、未だ大きな謎である。²⁰⁾ それを解明するには、発生過程で左右の巻型を決定する分子メカニズムを明らかにすることが必要である。そのメカニズムのどこかに異常が生じることで、左右の巻型が逆転してしまう可能性が考えられる。^{21,30)} そして、その鍵となるのが、たった一つの遺伝子座にコードされた巻型決定遺伝子なのである。

巻貝の左右巻型が遺伝子によって決まっていることは古くから知られていた。20世紀初頭に、ロンドン大学のBoycottとアマチュア自然史家のDiverによって、自

然界に同一種で左右両方の巻型が存在する珍しい淡水産巻貝のソトモノアラガイ (*Lymnaea peregra*) を用いた交配実験が行われた。米国の若き遺伝学者Sturtevantからの示唆もあって、この種では右巻きが優性であり、メンデルの法則に従う一遺伝子座によって巻型が決定していること、しかし、その遺伝子の表現型は自身の巻型ではなく、その個体が産んだ次世代の巻型に現れてくることが明らかにされた。^{22,23)} この母親の遺伝子型が子供の巻型を決定する特殊な遺伝様式は遅滞遺伝と名づけられた(図3)。この研究は、Watson, Click, WilkinsによるDNA構造の発見以前のことであるが、我々は、この近縁種で、これも右巻きと左巻きの両方が天然に存在するヨーロッパモノアラガイ (*Lymnaea stagnalis*) を対象に実験を行い、この種においても右巻きが優性であり、それが遅滞遺伝で子供の巻型に現れてくること、現代の遺伝子でも一遺伝子座により巻型が決定していることを、10世代にまで及ぶ連続戻し交配実験から明らかにしている。²¹⁾ この近縁の巻貝種でそれぞれ一遺伝子座にコードされた巻型決定遺伝子の正体はまだ同定されておらず、発生学における大きな謎の一つとなっている。それでも、この遺伝子の働きによる左右巻型決定の仕組みが、巻貝胚の特徴的な発生様式の中に、目に見える形で現れているのである。

巻貝の属する軟体動物の初期発生では、螺旋卵割 (Spiral cleavage) というユニークな卵割様式が観察される。最初に、受精卵は2回の卵割によって、均等な4つの割球に分裂する。次の第3卵割では、それぞれの割球が不均等に分裂することにより、動物極側には4つの小割球が、植物極側には4つの大割球が生じる。^{*11)} このとき、分裂軸が動物植物軸に対して同一方向に斜めに傾いているため、動物極側から観察すると、大割球上を小割球が一方に回転しているように見える(図4.右巻胚)。続く、第4卵割では第3卵割とは逆方向に、第5卵割では同じ方向に、交互の回転

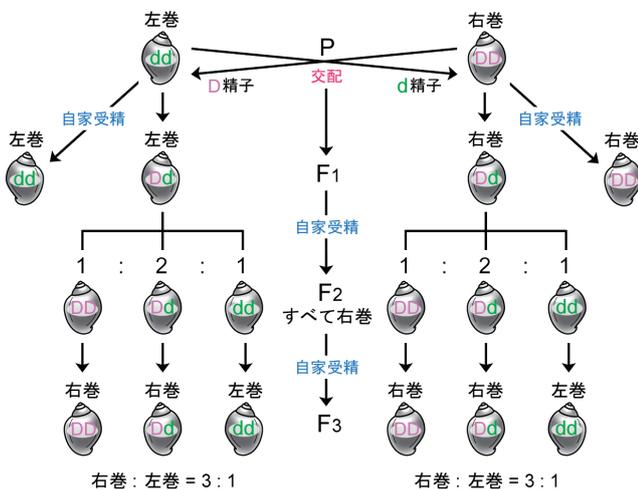


図3 モノアラガイの巻型形質に見られる遅滞遺伝。Dは優性右巻きを決定する遺伝子を、dはその劣性遺伝子を示す。モノアラガイは交配と自家受精の両方を行う。モノアラガイの殻の巻型は自身の遺伝子型ではなく、親の遺伝子型によって決まっている。

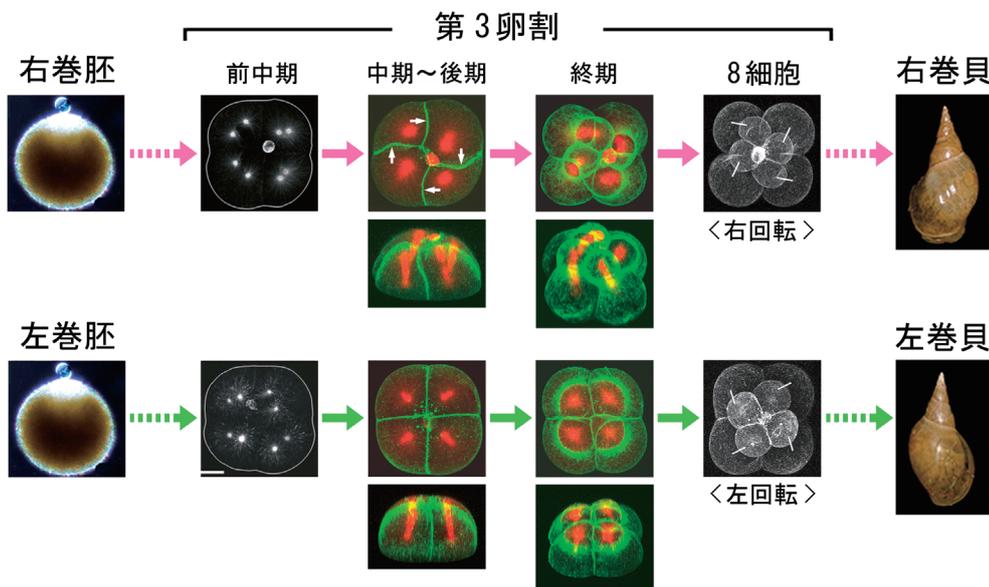


図4 ヨーロッパモノアラガイの左右巻型胚の第3卵割の比較。第3卵割の各段階の胚を固定して、細胞骨格系タンパク質を蛍光抗体染色法により蛍光標識し、動物極側から撮影した。紡錘体(赤)、アクチン細胞骨格(緑)、右巻胚特異的な細胞形態(白矢印)。

を繰り返すように分裂していく。これが螺旋卵割と呼ばれる特徴であり、特に4細胞から8細胞に分裂する第3卵割期において顕著に観察される。1894年に、コロンビア大学のCramptonは右巻種のハブタエモノアラガイ (*Lymnaea columella*) と左巻種のサカマキガイの一種 (*Physa heterostropha*) で、受精卵の卵割パターンを比較したところ、第3卵割時の小割球の回転方向がそれぞれ殻の巻型と一致しており、割球配置が互いに鏡像関係にあることを見出し報告した。²⁴⁾

では、同一種で左右の巻型が存在するヨーロッパモノアラガイの胚で、第3卵割の様子を比較するとどうなっているのだろうか？ 当研究室の柴崎らによる細胞骨格系の構造に着目した詳細な観察の結果、第3卵割の左右性はやはり巻型と一致していたのだが、その分裂の様子は大きく異なっており、巻型決定遺伝子の働きを示唆する特徴的な現象が見つかった。優性の右巻胚では分裂前から既に右旋方向に紡錘体が傾き、あらかじめ小割球が右方向に回転するように仕組みられていたのだが、劣性の左巻胚では紡錘体が胚の中心に向かって配置しており、一度、小割球が中立に真上方向に分裂した後、左方向に回転していたのである (図4)。²⁵⁾ この現象はコンジェニック系統の左右巻型胚^{*12}においても引き継がれていることを確認している。²¹⁾ また、右巻胚で観察される紡錘体の傾きは、それに先立って起きるアクチン細胞骨格依存的な右方向への細胞形態変化によって制御されており (図4. 白矢印)、アクチン重合阻害剤で処理すると、その特徴的な細胞形態は消失し、紡錘体は左巻胚と同様に中心方向に配置することも見出した。²⁵⁾ 第3卵割時では、まだ胚自身のゲノムの遺伝子発現は開始しておらず、母性由来の遺伝子によって卵割が進められている。つまり、母性由来の優性巻型決定遺伝子がアクチン細胞骨格系を制御することで、紡錘体に傾きを作り出し、小割球の分裂する方向を決定していることが示唆されたのである。これが、巻型決定遺伝子の表現型が滞滯遺伝によって次世代の巻型に現れる理由であると考えられる。では、なぜ優性の巻型決定遺伝子が機能しないと、ランダムまたは中立にならず、左巻きになってしまうのだろうか。そこには、ショウジョウバエにおいても示唆されている、細胞固有の左右性が潜在的に機能しているためなのだろうか。¹¹⁾ もしかしたら、アクチン細胞骨格動態をキーワードに無脊椎動物の左右性形成メカニズムの謎に迫ることができるかもしれないと考えている。

一方、興味深いことに、左巻種のサカマキガイ (*Physa*

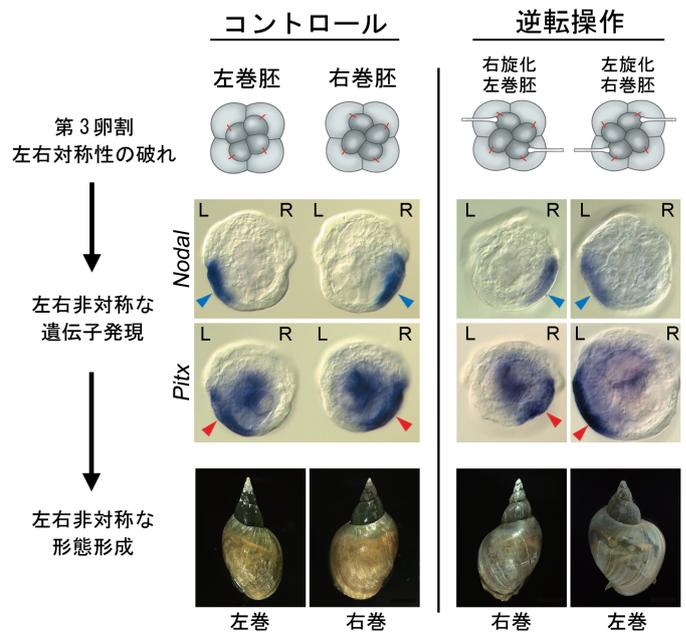


図5 巻貝の左右巻型形成のプロセス。上段) 第3卵割の割球配置とその逆転操作の模式図。中段) トロコフォア幼生期の胚を後方側から撮影した。それぞれ矢印で示された発色の見られる箇所が左右非対称に遺伝子の発現している箇所。下段) 第3卵割の方向性と巻貝の殻の巻型は一致した。

acuta) では、細胞形態の変化と紡錘体の傾きは左旋方向に生じている。²⁵⁾ つまり、右巻優性種と左巻優性種の間では、巻型決定遺伝子の関与する螺旋卵割メカニズムは同様であるが、左右逆転しているのである。ここに巻貝の左右巻型決定の分子レベルのメカニズムと進化の謎を解き明かす重要なヒントが隠されているはずである。

巻型決定遺伝子の働きが第3卵割の左右性の制御に関与していることは明らかになったのだが、実際に8細胞期の割球配置が殻の巻型を直接制御していることを証明する必要があった。これを、我々は非常にシンプルだが最も確実な方法によって実証することに成功している。ヨーロッパモノアラガイの左右巻型胚で、それぞれ第3卵割時の割球配置を微小なガラス棒を用いて物理的に左右逆転させ、これを大人の巻貝まで育てたところ、元の遺伝子型とは逆の巻型に成長したのである (図5)。^{*13} それは見た目の殻の巻型のみならず、体内構造の左右非対称性もすべて左右逆転した鏡像体であった。²⁶⁾ この逆転操作で作られさせた巻貝は産卵を行うことも可能で、生まれた次世代はすべて本来の遺伝子型の巻型に戻っていた。²⁶⁾ やはり、第3卵割は巻貝胚における左右対称性の破れのタイミングだったのである。そして、その後の左右非対称な形態形成の過程では、これも驚くべき発見であったのだが、胚の左右片側一方で *Nodal-Pitx* 遺伝子を発現させていたのである (図5)。²⁶⁾ それまでは、*Nodal-Pitx* シグナル伝達経路は、脊椎動物とホ

*11 多細胞動物の卵では、減数分裂によって極体が放出されている側を動物極、その反対側を植物極と呼んでいる。受精卵の段階ですべてに動物極-植物極軸が確立しており、巻貝胚では常にこの軸が螺旋卵割の中心に位置している。

*12 連続戻し交配によって得られたコンジェニック右巻き系統では、ゲノムの大部分が左巻き系統だが、巻型決定遺伝子を含むわずかな領域だけが右巻き系統のゲノムを引き継いでいる。つまり、右巻き系統で特異的に観察される第3卵割の特徴的な分裂の様子は、たった一つの優性の巻型決定遺伝子の有無で引き起こされていることが証明される。²¹⁾

*13 簡単のように見えて、これまで誰にもなされてこなかったのは、何よりも受精卵のカプセル外培養法が確立していなかったためである。淡水産の巻貝類の卵はアルブミンに満たされた透明なカプセルに包まれており、ここから卵を取り出してしまうと原腸胚期までに発生が止まってしまう。これを解決するために、独自のキャビラリー培養法を確立させたことが、左右逆転操作を成功させることにつながった。



図6 右巻きのサカマキガイ。左は野生型の左巻き、右は第3卵割の左右逆転操作で人為的に作出された右巻きのサカマキガイ。

ヤ、ウニといった後口動物でしか機能していないと考えられていたのだが、*Nodal* 遺伝子の見つからないショウジョウバエや線虫と共に前口動物として括られているにもかかわらず、巻貝においても機能していたのである。^{26,27)} 巻貝における *Nodal-Pitx* の発現パターンは、右巻優性種では胚の右側に、左巻優性種では左側に観察されることが別の巻貝種で報告され、²⁷⁾ 同じ年に我々も、ヨーロッパモノアラガイの胚においても同一種の優性右巻き系統では右側に、劣性左巻き系統では左側に発現し、その発現パターンは互いに鏡像対称的な関係にあることを見つけている(図5.コントロール)。²⁶⁾ そして、第3卵割の左右逆転操作胚ではその発現パターンも本来とは左右逆転していたのである(図5.逆転操作)。²⁶⁾ この左右非対称な *Nodal-Pitx* の発現が巻型形成においてどのような役割を果たしているのかは、今後明らかにしていく課題であるが、第3卵割時の割球配置によって、左右非対称な遺伝子発現パターンが制御され、それが左右の巻型につながっていくという巻貝の左右巻型形成メカニズムのプロセスを明らかにすることができた(図5)。²⁶⁾ ただし、このモデルは左右両巻型多型を持つヨーロッパモノアラガイから見出されたものであり、この巻貝種が元から左右をスイッチできるポテンシャルを持っていたために成り立つものと思われるかもしれない。そこで、天然には左巻きしか存在しないサカマキガイの胚を用いて、第3卵割の逆転右旋化操作を行ったところ、予想どおり右巻きのサカマキガイ*¹⁴が誕生した(図6)。²⁸⁾ もちろん、その個体が産んだ次世代はすべて左巻きに戻っていた。²⁸⁾ また、サカマキガイ胚の発生過程でも *Nodal-Pitx* の左右非対称発現が同様に機能しており、逆旋操作でその発現パターンも鏡像対称的に左右逆転することが突き止められた。²⁸⁾ これまでの知見によって構築された左右巻型形成メカニズムは巻貝共通である可能性が示唆されたのである。

このように巻貝胚では、発生のごく初期に螺旋卵割という左右の概念を持った卵割パターンによって、象徴的な形

*¹⁴ サカマキガイ(逆巻貝)の名前の由来は、ほとんどの巻貝種が右巻きなのに対して左巻きであることが特徴的だからである。では、右巻きのサカマキガイとは？

で左右の対称性が破れている。しかも、そこで決定した左右性は、遺伝子発現レベルから殻の巻型に及ぶまで、発生過程を通じて明瞭に現れ続けている。そのため、左右非対称な形態形成メカニズムを発生初期の段階から個体レベルに至るまで追跡して解析するうえで、着目すべき点が明確であり、優れた左右性研究のモデル生物になり得ると考えている。そして、このメカニズムがたった一つの母性由来の巻型決定遺伝子の働きによって支配されているということが驚くべき事実なのである。^{21,30)}

5. おわりに

現在、複数の生物種で左右性の研究がなされており、多くの知見が得られてきている。そこから、種を超えて機能している共通の分子メカニズムの存在が明らかになってきたのだが、一方で、種ごとに異なるメカニズムも数多く見出されてきた。その共通点と多様性からも、進化の過程で動物はどのようにして左右非対称な形態を作り出すメカニズムを獲得してきたのか、非常に興味深いテーマとなっている。¹¹⁾ そのなかでも、巻貝の左右巻型形成メカニズムの解明は、脊椎動物と無脊椎動物の間をつなぐ役割を果たすのかもしれないと考えている。まず、発生初期の割球配置で左右性が決定するメカニズムでは、細胞レベルでのアクチン細胞骨格の関与する分子メカニズムが鍵となっており、線虫やショウジョウバエの左右性形成メカニズムとの共通点が見出される。一方で、左右性決定以降の左右非対称な形態形成には、*Nodal-Pitx* の左右非対称発現が機能しており、脊椎動物の左右性形成のモデルと共通の概念で説明できるのである。このように、巻貝の殻の巻型がどのようにして形成されているのか、そこで機能する分子メカニズムを解明することによって、動物個体の左右性形成の謎に迫る新たな知見が得られるかもしれない。³⁰⁾ また、最近、左右相称動物より前の進化群に分類されている、形態的には左右の概念の無いヒドラにおいても出芽パターンに非対称性が認められ、そこで *Nodal-Pitx* シグナル伝達経路が機能しているという驚くべき報告がなされ、²⁹⁾ 左右性の起源が進化のどの段階にあるのかさらに謎が深まっている。今後、動物の左右性の研究がより多くの生物種に広がっていくことで、新たな展開が生まれてくるかもしれない。

参考文献

- 1) T. Nakamura and H. Hamada: *Development* **139** (2012) 3257.
- 2) N. Hirokawa, *et al.*: *Cell* **125** (2006) 33.
- 3) S. Nonaka, *et al.*: *Cell* **95** (1998) 829.
- 4) Y. Okada, *et al.*: *Mol. Cell* **4** (1999) 459.
- 5) S. Nonaka, *et al.*: *Nature* **418** (2002) 96.
- 6) H. Hamada, *et al.*: *Nat. Rev. Genet.* **3** (2002) 103.
- 7) 目野主税: *生化学* **80** (2008) 820.
- 8) J. McGrath, *et al.*: *Cell* **114** (2003) 61.
- 9) Y. Tanaka, Y. Okada and N. Hirokawa: *Nature* **435** (2005) 172.
- 10) S. Yoshida, *et al.*: *Science* **338** (2012) 226.
- 11) J. Coutelis, *et al.*: *EMBO Rep.* **9** (2014) 926.
- 12) J. Gros, *et al.*: *Science* **324** (2009) 941.
- 13) M. Levin, *et al.*: *Cell* **111** (2002) 77.

- 14) L. N. Vandenberg and M. Levin: *Dev. Dyn.* **379** (2013) 1.
- 15) W. B. Wood: *Nature* **349** (1991) 536.
- 16) C. Pohl and Z. Bao: *Dev. Cell* **19** (2010) 402.
- 17) S. Hozumi, *et al.*: *Nature* **440** (2006) 798.
- 18) P. Speder, G. Adam and S. Noselli: *Nature* **440** (2006) 803.
- 19) K. Taniguchi, *et al.*: *Science* **333** (2011) 339.
- 20) 浅見崇比呂: 『生態と環境』(培風館, 2007) p. 199.
- 21) R. Kuroda: *Integr. Comp. Biol.* **54** (2014) 677.
- 22) A. H. Sturtevant: *Science* **58** (1923) 269.
- 23) A. E. Boycott, *et al.*: *Phil. Trans. Roy. Soc. B* **219** (1930) 51.
- 24) H. E. Crampton: *Ann. NY. Acad. Sci.* **8** (1894) 167.
- 25) Y. Shibazaki, M. Shimizu and R. Kuroda: *Curr. Biol.* **14** (2004) 1462.
- 26) R. Kuroda, *et al.*: *Nature* **462** (2009) 790.
- 27) C. Grande and N. H. Patel: *Nature* **457** (2009) 1007.
- 28) M. Abe, H. Takahashi and R. Kuroda: *Int. J. Dev. Biol.* **58** (2014) 513.
- 29) H. Watanabe, *et al.*: *Nature* **515** (2014) 112.
- 30) R. Kuroda: *QRB Discovery* **1** (2015) DOI: 10.1017/S0033583515000098.
- 31) 近藤 滋: 『波紋と螺旋とフィボナッチ』(秀潤社, 2013) p. 20.

著者紹介

阿部真典氏: 専門は発生生物学. 分子生物学的手法を用いて, 左右巻型形成メカニズムの解明を目指している.

黒田玲子氏: 専門は化学, 分子生物学, 発生生物学, 生物物理学. キラリティーを軸に分野横断的な研究を展開している.

(2015年5月25日原稿受付)

Left-Right Symmetry Breaking of Animal Body Plan—Research on Snails may Reveal Common Mechanisms

Masanori Abe and Reiko Kuroda

abstract: The left-right (l-r) asymmetry of animal body structure including the internal visceral organs is established during embryogenesis which is regulated genetically. Recently, several unique mechanisms have been identified based on the work with different model organisms. Although diverse, they have similarities between distant phyla as well. Snails are unique as the l-r symmetry breaking occurs at a very early embryogenic stage, which is dictated by a single gene locus. They have common pathways as vertebrates towards the later developmental stage, although they exhibit mechanisms unique to invertebrates at earlier stages. Thus, snails are ideal model organisms for studying the establishment of l-r asymmetric body plan.

『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, 1. 会員番号, 2. 氏名(非会員の方は連絡先, 送付先住所)をメール(pubpub_jps.or.jp)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. 21-3 (11月15日発行) 目次

『大学の物理教育』誌に期待するもの……………須藤彰三
物理と社会シンポジウム報告
 異分野から見た物理学への期待—「物理学」分野の参照基準
 ………………須藤彰三, 田中忠芳
はじめての講義
 授業アンケートから見えてきたもの……………上野和紀
講義室
 クリッカー顛末記……………井上 慎
 有効数字のあいまいさについて……………森 貞雄
 LC共振回路で光速を測る……………北野正雄
実験室
 机の上で光速を測る……………小林弘和, 北野正雄
教育実践
 はねかえり係数の測定—平面上のコイン衝突
 ………………植松祐輝, 真梶克彦

高等学校物理におけるレポート指導……………瀧本家康
海外の動向
 北京で開催された物理教育国際会議2015
 ………………荻谷麻子, 谷口正明
連載 物理オリンピックと物理教育
 国際物理オリンピック2015インド大会報告……………吉田周平
談話室
 電磁波と電子波の対応……………梶川靖友
 教育に関する一言……………高橋卓也/牧永綾乃/大澤智興
開催情報
 『大学の物理教育』総目次 (Vol. 21)
 編集後記

宇宙の瞬間湯沸かし器：非平衡プラズマの分光診断で探る超新星残骸の無衝突電子加熱機構

山口 弘悦 (NASA Goddard Space Flight Center)

宇宙空間で発生する衝撃波は、地球上のものとは大きく性質が異なる。地球上では物質中の粒子同士が衝突することで流体の圧縮が進むが、密度の低い宇宙空間では粒子の直接衝突がほとんど起こらない。代わりに、粒子間に働く電磁場を介して圧縮が進むと考えられている。この現象は「無衝突衝撃波」と呼ばれ、太陽風から衝突銀河団、ガンマ線バーストなど、宇宙の至るところで普遍的に観測される。しかし無衝突衝撃波の具体的な発生メカニズムは未だ解明されておらず、関連する物理過程にも我々の理解が不十分なものが多い。中でも「無衝突電子加熱」と呼ばれる、衝撃波面で電子が急加熱される現象は、衝撃波物理学における最重要未解決問題の一つとされる。

本稿では、X線天文衛星「すざく」が発見した、“ティコの超新星残骸”の逆行衝撃波における無衝突電子加熱について、その詳細を解説する。集光力と分光能力に優れた「すざく」は、この天体から初めて鉄イオンの $K\beta$ 蛍光輝線を検出した。 $K\beta$ 蛍光は、内殻電離後の $3p \rightarrow 1s$ 脱励起遷移に伴う放射過程なので、M殻電子を多数残す低電離イオンのみが強い放射源となる。したがってそのスペクトルは、衝撃波加熱直後のプラズマ状態を診断する鍵となる。観測された $K\beta$ 輝線は予想外に強く、その起源である低電離鉄イオンが極めて高温の

(内殻電離を十分に起こせる)自由電子と共存することを示した。筆者らが開発した最新の原子物理モデルと流体シミュレーションを駆使して理論計算を行い、観測データと比較したところ、この超新星残骸の逆行衝撃波面において電子温度が一気に1,000倍近く上昇している事実が明らかになった。

超新星残骸の逆行衝撃波は、星間物質を伝搬する順行衝撃波と異なり、非常に磁場の弱い環境($B \ll 10^{-8}$ G)にある。一方、無衝突衝撃波に関する標準的な理論によると、電子の急加熱には最低でも星間磁場($\sim 1 \mu\text{G}$)程度の磁場強度が必要とされており、逆行衝撃波での無衝突電子加熱は極めて起こりにくいと考えられていた。今回の観測結果は、残骸内のプラズマ自身が何らかの方法で局所的な電磁場を自己増幅し、電子が効率的にエネルギーを得る環境を作り出している可能性を示唆する。

なお、本研究は初めから無衝突電子加熱の探査や測定に照準を定めたわけではなく、「超新星爆発によって生成された元素の量を精密に測定する」という主目的を果たすために非平衡プラズマの原子物理を突き詰めた結果、半ば偶然にして得られたものである。そこで本稿では、原著論文では必ずしも触れなかった、発見に至る経緯や思索の部分を中心に記述したい。

—Keywords—

衝撃波：

音速より速く動く物質が別の物質と衝突するときに形成される物理状態の不連続面。衝撃波を通過する物質は加熱と圧縮を受けるため、衝撃波の下流(後方)では上流(前方)よりも高温・高密度になる。

ティコの超新星残骸：

デンマークの天文学者ティコ・ブラーエが西暦1572年に爆発を観測した超新星の残骸。Ia型(核暴走型)の超新星残骸としては全天-X線で明るく、様々な物理過程の詳細研究に適する。

内殻電離と蛍光放射：

多数の束縛電子を持つ低電離イオンや中性原子が高エネルギー自由電子(あるいは光子)の衝突を受けると、イオン化エネルギーの高い最内殻(K殻)の電子が引き剥がされる。これによりK殻に空きができるため、外殻(L殻やM殻)電子の脱励起が生じる。その際、内殻と外殻のポテンシャル差に相当するエネルギーを持つ光子が蛍光X線として放射される。

1. はじめに

筆者の専門は、主にX線を利用した宇宙物理学の観測的研究である。本稿で紹介する観測対象は、数百年前に爆発した超新星の痕跡、「超新星残骸」だ。超新星残骸の熱的プラズマを分光観測すると、星の進化や爆発の過程で作られた重元素の種類と質量を測定できる。それらは超新星の起源や爆発メカニズムを知る重要な手がかりとなる。私は超新星の中でも特に「Ia型」と呼ばれる種族の起源解明を目指し、日々研究に取り組んでいる。

今回の本題からは外れるが、Ia型超新星について少し触れておきたい。この天体は白色矮星の暴走的核融合によって生じる爆発現象¹⁾で、可視光帯域での絶対的な明るさが天体間でほぼ一様²⁾なことから、遠方までの距離を測る「ものさし」として利用される(宇宙の標準光源)。過去にはこの性質を利用して宇宙の膨張が加速している事実が突き止められ、2011年ノーベル物理学賞の対象研究にもなった。^{3,4)}しかし「明るさが天体間でほぼ一様」であることは比較的近傍の宇宙で発生した超新星の観測から経験的に知られているに過ぎず、その物理的根拠は全くわかっていない。⁵⁾したがって、その経験則が遠方、すなわち昔の宇宙で起こった超新星にも適用できるかは実のところ自明ではないのだ。もし適用できないなら、宇宙の膨張史、ひいては宇宙年齢さえも変更されかねない。私がIa型超新星の爆発メカニズム解明を目指すのには、そういった事情がある。

しかし学生時代、この研究を始めて間もなく大きな壁にぶつかった。次いで述べるように、超新星残骸の熱的プラズマは、地上実験では再現できないほどの極端な非平衡状態にある。超新星の爆発メカニズムに制限をつけるためには重元素量の決定が大前提だが、非平衡プラズマの物理が複雑すぎてそれどころではないことに気づかされたのだ。このままでは超新星の起源解明など到底できない。そう思った筆者は、基礎に立ち返り、X線放射に関わる原子過程から正しく理解することに努めた。その甲斐あって、今ではどんなに複雑な非平衡状態でもかなりの精度で元素量を測定できるようになった。⁶⁾また、放射過程の基礎を押さえたことで、これまで見過ごされていた様々な新現象を、言わば副産物的に発見できるようにもなった。光栄なことに、それら「副産物」たる成果が評価され、2015年3月の物理学学会年次大会において若手奨励賞をいただいた。本稿執筆の機会をいただいたのもそれに関連する。奨励賞では超新星残骸の研究に関する3編の原著論文⁷⁻⁹⁾が授賞対象となったが、ここでは話題が総花的になることを避けるため、対象論文のうち最も「物理学」としての側面の強い(と筆者が判断した)研究⁷⁾1つに焦点を絞る。他の授賞対象論文や、筆者の「本業」でもあるIa型超新星に関する話題は、先日出版された『天文月報』(日本天文学会)¹⁰⁾にまとめたので、興味のある方はそちらを参照されたい。

表題の通り、本稿は「無衝突電子加熱」と呼ばれるプロセスの紹介を主目的とする。これは超新星残骸の衝撃波に

おいてプラズマ中の電子が急加熱される現象だ。しかし、筆者は初めからこの現象を狙って研究したわけではなく、非平衡プラズマの物理を突き詰める過程で偶然発見したに過ぎない。そこで本稿では、あえて通常の論文とは違った書き方をしてみたい。すなわち、衝撃波の物理や電子加熱機構の導入的な説明は後回しにして、発見に至った経緯や思索の部分を重点的に述べる。次章ではまず、非平衡プラズマの性質や、それに特徴的な原子過程について解説する。

2. 平衡プラズマと非平衡プラズマ

「平衡」という概念は様々なケースで用いられるが、本稿で扱う平衡の意味は、化学反応におけるそれに近い。すなわち、ある2状態を行き来する可逆反応 $A \rightleftharpoons B$ があるとき、右向きと左向きの反応率が等しく、 A と B の組成比が巨視的に変化しないことを指す。熱的プラズマでは、同一元素の異なる電離状態にあるイオン、例えば Fe^{15+} と Fe^{16+} などが A と B に相当し、電離過程($\text{Fe}^{z+} \rightarrow \text{Fe}^{(z+1)+} + e^-$)と再結合過程($\text{Fe}^{(z+1)+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{z+}$)の反応率が全イオン間で等しい場合を平衡、そうでない場合を非平衡と呼ぶ。以上が、いわゆる「教科書的な」説明である。

次はもっと原子過程寄りの視点で、平衡と非平衡の性質を考えよう。上記の電離・再結合過程の反応率は、プラズマの温度に強く依存する。そのためプラズマが平衡に達すると、イオン存在比は温度に対して一意に決まる(図1: 鉄イオンの例)。図をよく見ると、取りうる電離階数は電子温度(自由電子の内部エネルギー)と各殻のイオン化ポテンシャルのバランスで決まっていることがわかる。一方、非平衡プラズマではこの関係が崩れる。中でも顕著なのが若い超新星残骸で、プラズマの温度が10 keV近く(約1億度K)に達しながらも、ネオン状やアルゴン状^{*1)}などの低電離イオンが多量に存在するのだ。言い換えると、超新星残骸には(1) K殻のポテンシャルより高い運動エネルギーを持つ自由電子と、(2) L殻やM殻に多数の束縛電子を持つイオンが共存することになる。この共存状態によって実現するのが、衝突内殻電離と蛍光放射である(図2)。蛍光放射X線はイオンの電離度によって異なるエネルギー(波長)を示すため(次章図3参照)、プラズマの物理状態を知る鍵となる。

では、この非平衡状態はどれくらいの時間続くだろうか。重元素のイオンは自由電子の衝突を受けることで徐々に電離するので、電離の進み具合は電子密度に依存する。つまり、電離平衡のタイムスケールは電子密度(n_e)と時間(t)の積でよく記述され、ひとこえ $n_e t \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ で平衡に達することが知られる。¹¹⁾宇宙空間の典型的な密度は 1 cm^{-3} かそれ以下なので、プラズマの形成後3万年以上は非平衡状態が継続することになる。これは、X線で観測される超

*1) 例えば Fe^{16+} は束縛電子を10個持ち、ネオン原子と同じ電子配位をとるため「ネオン状鉄イオン」と呼ばれる。他の電離状態に対しても、同様の表現が用いられる。

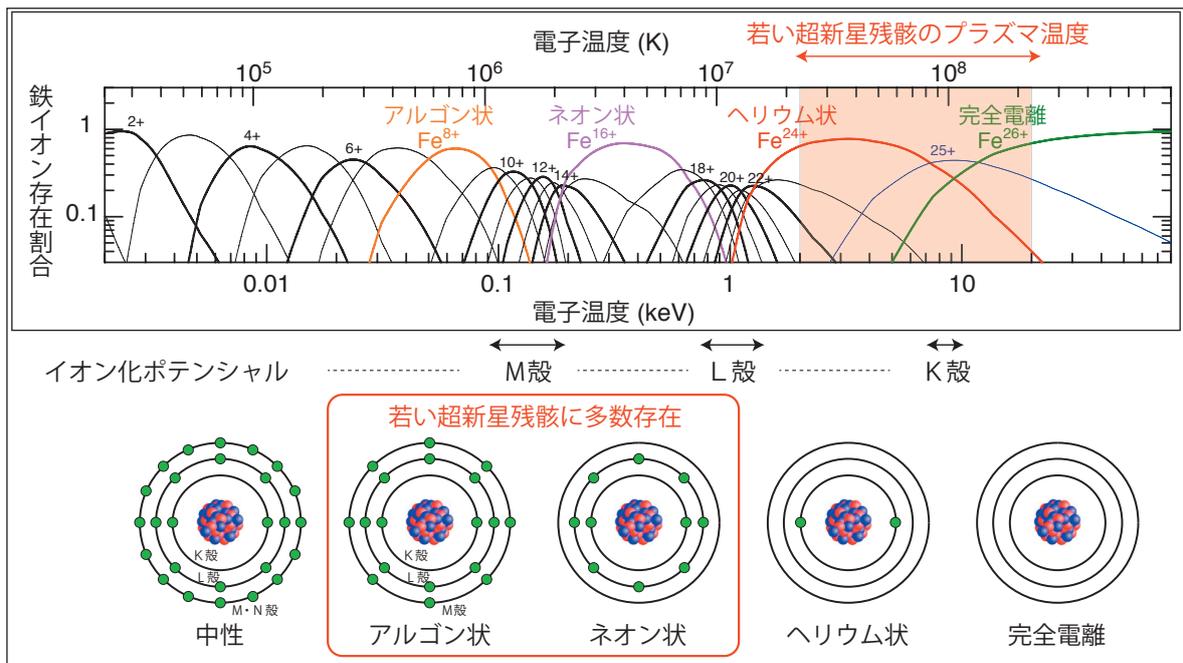


図1 平衡プラズマにおける鉄イオンの電離状態と電子温度の関係。各殻(主量子数)の典型的なイオン化ポテンシャルを中段に示す。

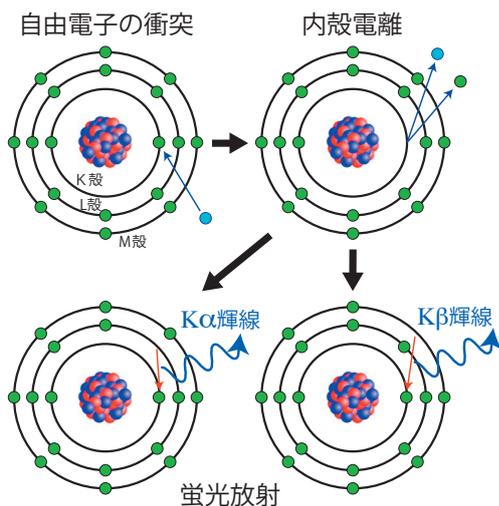


図2 非平衡プラズマに特有な「内殻過程」の概略。

新星残骸の年齢(数百~数千年)と比べて十分に長い。一方、地上の実験設備では、どんなに高性能の真空ポンプをもってしても達成できる密度に限りがあるため、過渡状態は数秒未満で終わってしまう。超新星残骸は、非平衡プラズマ研究の優れた「実験室」という側面も持つのだ。

3. 「すざく」が見たティコ(Tycho)の超新星残骸

本題に入ろう。今回紹介するのは、偉大な観測天文学者、ティコ・ブラーエが西暦1572年に爆発を記録した超新星の残骸である。この天体(以後Tychoと呼ぶ)は、標準的なIa型の超新星だったことが知られており^{12,13)}この種族の残骸としては全天-X線で明るい。そのため、X線天文衛星なら必ず一度は観測する超新星残骸の代表格でもある。日本の衛星「すざく」も先例に漏れず、2005年の打ち上げ

後まもなくTychoを観測した。¹⁴⁾「すざく」の特長は、検出器のエネルギー分解能と望遠鏡の集光力に裏付けられた、史上最高の輝線検出能力である。¹⁵⁾Tychoの観測結果にはそれが如実に現れ、クロムやマンガン、ニッケルなど、従来の衛星では捉えることのできなかった微弱な輝線を初めて検出した(図3(a))。これに触発されたのか、Tychoの初期成果を見た多くの研究者が、こぞって他天体からもクロムやマンガンの輝線を探し始めた。しかし筆者には他にどうしてもひっかかることがあった。それは、同じく「すざく」が初検出した鉄Kβ輝線の存在である。クロムやマンガンの輝線がIa型超新星で作られることは古くから知られていたもので、その輝線が検出されたことは(もちろん興味深いが)物理的に不思議ではない。しかし鉄Kβ輝線の検出は、物理的観点から不可解だった。理由を述べる。

前章で触れた通り、輝線のエネルギーはイオンの電離度によって決まる。Tychoの鉄Kα輝線のエネルギーは6.43 keVであり、ネオン状の鉄イオン(Fe¹⁶⁺)に相当する。これは「すざく」の観測以前からよく知られていた事実だ。¹⁶⁾一方Kβ輝線は、最内殻電子の電離後にM殻からの脱励起遷移によって生じる蛍光放射である(図2)。不思議に思われまいだろうか。ネオン状のイオンにはM殻電子が一つも残っていないので、普通に考えればKβ蛍光放射は起こらないはずなのだ。より定量的な議論のため、Kβ/Kα強度比の理論値を電離階数ごとに計算し、結果を図3(b)に示した。^{*2} 予想される強度比は、中性の鉄で約12%、そ

*2 「天文学」を専門とする筆者がこういった計算を行えるようになったのは、ロシアラモス国立研究所、スミソニアン天体物理学センター、NASAゴダード宇宙飛行センターなど、米国の機関に在籍する理論原子物理学者との緊密な共同研究によるところが大きい。それを可能にしてくれた日本の海外学振制度には大変感謝している。

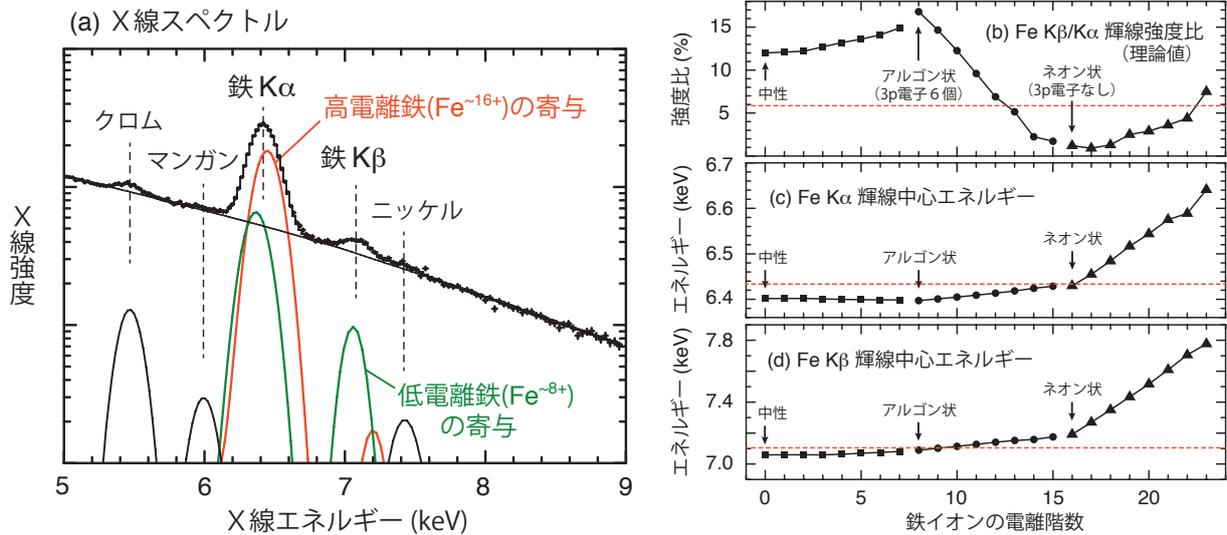


図3 (a) 「すざく」によるティコ (Tycho) の超新星残骸のX線スペクトル。赤線と緑線はそれぞれ、ネオン状程度の高電離鉄とアルゴン状程度の低電離鉄の寄与を示す。(b) 温度5 keVのプラズマにおける鉄輝線 $K\beta/K\alpha$ 強度比 (理論値)。赤破線はTychoのスペクトル (図3(a)) から求められた観測値。同じく、(c) 鉄 $K\alpha$ 輝線、および (d) 鉄 $K\beta$ 輝線の中心エネルギー。それぞれ電離階数に依存する様子がわかる。

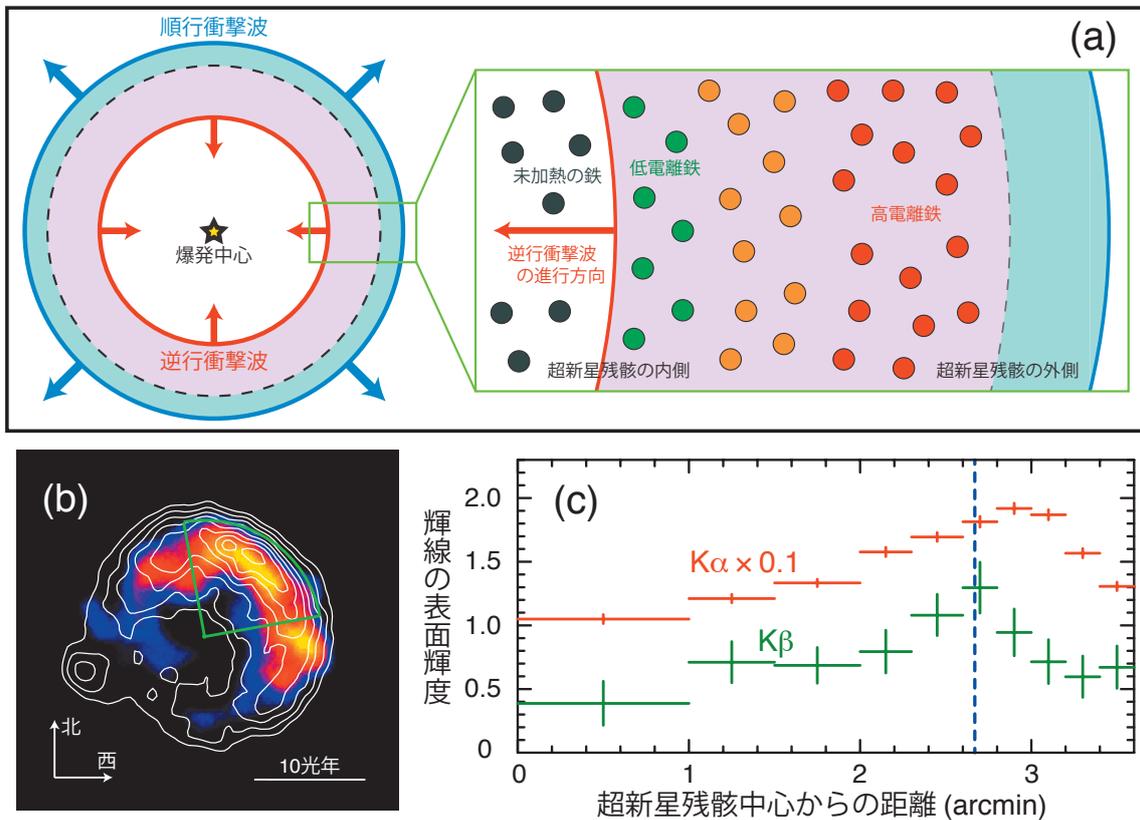


図4 (a) 若い超新星残骸の衝撃波構造。順行衝撃波は星間物質を、逆行衝撃波は爆発噴出物 (元の星の構成物質) を、それぞれ加熱する。したがって2つの衝撃波面に挟まれた領域でのみ、物質は高温状態になる。(b) 「すざく」によるTychoの超新星残骸の輝線バンドイメージ。等高線およびカラーは、それぞれ鉄 $K\alpha$ 輝線と $K\beta$ 輝線の強度を示す。(c) 図4(b)の扇状領域 (緑線) 内で調べられた両輝線の表面輝度プロファイル。縦軸の単位は $[10^{-6} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}]$ 。 $K\beta$ 輝線のピークが $K\alpha$ より内側にある様子がはっきりとわかる。青破線は本研究により特定された逆行衝撃波面の現在位置。

こからゆるやかに上昇し、M殻の3p電子を失うアルゴン状より上で急激な減少に転じる。ネオン状に至ると1%程度まで落ちることが確認できた。Tychoのスペクトルから観測された強度比は約6%なので、アルゴン状とネオン状のほぼ中間に相当する。

次に、 $K\beta$ 輝線のエネルギーを計算すると (図3(d))、非

常に興味深い結果が得られた。観測値の7.1 keVは、 $K\beta$ 輝線が最も出やすいアルゴン状イオンに相当したのだ。6.43 keVの $K\alpha$ 輝線が高電離鉄 (Fe^{-16+}) を起源とするのに対し、 $K\beta$ 輝線は低電離鉄 (Fe^{-8+})、すなわち $K\alpha$ とは異なる電離度のイオンから発せられていたのである (図3(a))。先述の通り、鉄 $K\beta$ 輝線は「すざく」の初期観測によって

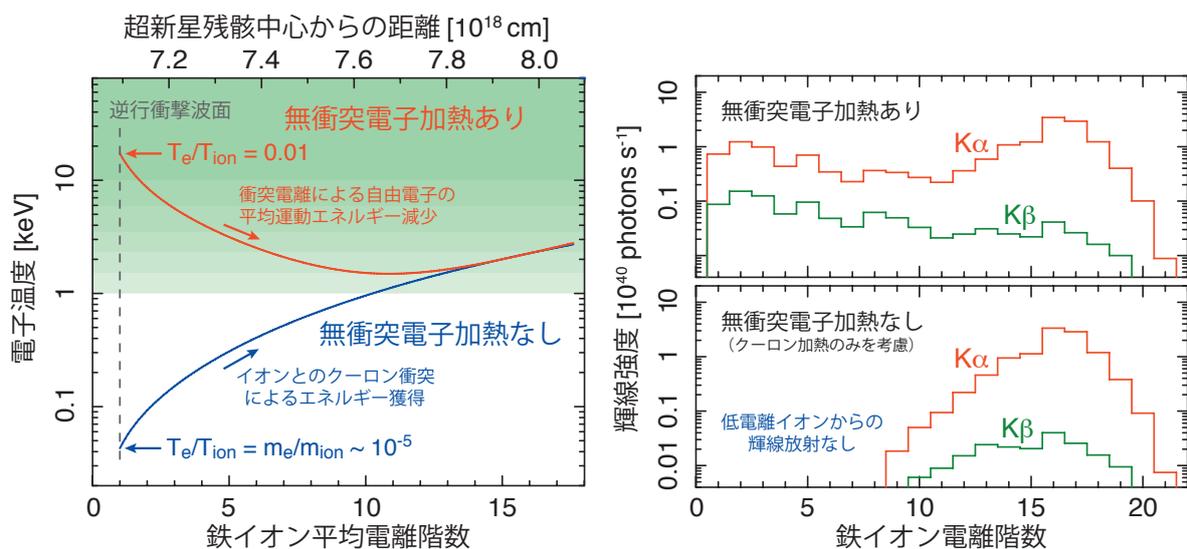


図5 (左) 数値計算により求められた、Tychoにおける電子温度と鉄イオン電離度の関係。対応する残骸の半径を上部に示す。鉄イオンの内殻電離は、緑色の温度域でのみ起こる(高温ほどより起こりやすい)。無衝突電子加熱を考慮しない場合(青線)、衝撃波直後の電子温度が低く、内殻電離を起こせない。一方、 $\beta = T_e/T_{ion} = 0.01$ 程度の無衝突電子加熱を考慮すると(赤線)、低電離イオンと高温電子の共存が成り立ち、観測と整合する。(右) 無衝突電子加熱がある場合(上)とない場合(下)それぞれで予想される輝線強度を電離階数ごとに表示。前者の総和が観測スペクトル(図3(a))と一致することが確認された。

検出されたので、¹⁴⁾ 多くの人が早い段階からこのスペクトルを目にしていた。しかし、その物理的意味が追究されることはなかった。「同一元素の輝線は常に同一のイオンに起源を持つ」という先入観があったのかもしれない。

さて、スペクトル分析の結果は鉄K β 輝線がK α 輝線に比べ、より若い(最近加熱された)プラズマに由来することを示している。この解釈に間違いがなければ両輝線の空間的な輝度分布に違いが現れるはずだ。図4(a)に示すように、Tychoのような若い超新星残骸には「順行衝撃波」と「逆行衝撃波」の2種類の衝撃波が存在し、爆発によって放出された鉄などの重元素は後者によって加熱される。¹⁷⁾ 逆行衝撃波は残骸の外側から内側に向かって伝搬するので、内側のプラズマほど電離度が低くなる。よってK β 輝線の輝度分布は、K α 輝線よりも内側にピークを持つと予想される。この推論の正しさは、詳細なイメージ解析によって証明された(図4(b), (c))。従来の衛星がK α 輝線までしか検出できなかった¹⁸⁾ことを考えると、「すざく」の優れた感度のおかげで、我々は初めて超新星残骸の最奥まで到達できたとも言える。

4. 無衝突電子加熱プロセスの発見

強い鉄K β 輝線の検出には、さらに重要な物理的意味が隠されていた。それが本稿の主題、逆行衝撃波における無衝突電子加熱である。まずは宇宙空間の衝撃波について簡単に特徴を述べたい。衝撃波は、物質が音速より速く動けば、地球上でも宇宙空間でも同様に発生する。しかしミクロな視点に立つと、宇宙の衝撃波は地球上のものとは大きく性質が異なる。地球上では流体中の粒子同士が衝突することでその圧縮が進むが、密度の低い宇宙空間では粒子の直接衝突がほとんど起こらない。代わりに、粒子間に働く電

磁場を介して気体が圧縮すると考えられている。^{19, 20)}これが「無衝突衝撃波」である。無衝突衝撃波は、太陽風²¹⁾から衝突銀河団、²²⁾ガンマ線バースト²³⁾など、宇宙の幅広い階層で普遍的に観測されるものの、その発生メカニズムは未だ明らかになっていない。

衝撃波加熱とは、流体の並進運動エネルギーが熱(内部エネルギー)に変換される過程である。したがって加熱後の温度(kT_i)は衝撃波速度(V)に依存し、 $kT_i = (3/16)m_i V^2$ と表される。^{*3)} 低密度の極限たる無衝突衝撃波では電子-イオンの間のクーロン衝突がほとんど起こらないので、原理的には上記の式が粒子種ごとに成り立つ。¹⁹⁾ すなわち、質量(m_i)の小さい電子はイオンと比べてはるかに低い温度を持つ。Tychoの場合、逆行衝撃波の速度は約 $5,000 \text{ km s}^{-1}$ と知られるので、²⁴⁾ 上式に従うと衝撃波直後の電子温度は $\sim 0.03 \text{ keV}$ となる。ここで問題が発生する。観測されたような強い鉄K β 輝線を得るには、低電離の鉄イオンがあるだけではダメで、共存する自由電子がイオンの内殻電子を叩き出す必要がある。しかし 0.03 keV のプラズマには、K殻ポテンシャル($\sim 7 \text{ keV}$)より高いエネルギーを持つ電子は明らかに存在できない。衝撃波通過後の自由電子は、イオンとのクーロン衝突を通じて徐々に熱エネルギーを獲得するものの、それと同時にイオンの電離も進んでしまう。つまり超低電離イオンと高温電子の共存は、簡単には実現しないのである。事実、プラズマの温度変化と電離進行の関係をTychoのケースについて数値計算すると、図5(左)青線のように、鉄がケイ素状(Fe^{12+})まで電離する頃ようやく電子が内殻電離を起こせる温度($kT_e > 1 \text{ keV}$)に達することがわかった。これでは観測され

*3) 但し、宇宙線加速の効率がが高く、非熱的粒子に多量のエネルギーが注入される場合、熱的プラズマの温度(左辺)はこれより低くなりうる。

た低電離（アルゴン状）輝線を説明できない。

ここで必要となるのが「無衝突電子加熱」と呼ばれるプロセスだ。流体が衝撃波面を通過する際、電子-イオン間のエネルギー交換がやはり電磁場を介して行われ、実際の電子温度は上式の予想より高くなること、理論的に示唆されている。^{20,25)} 太陽風や超新星残骸の順行衝撃波の観測からはその存在が実際に確認されており、状況によっては電子とイオンの両温度が即座に釣り合うこともある。^{21,26,27)} この効果を取り込んでみよう。衝撃波直後の電子と鉄イオンの温度比 ($\beta = T_e/T_{\text{ion}}$) をパラメータとして残骸の熱的進化を解き、予想される蛍光輝線スペクトルを観測 (図3(a)) と比較した。その結果、 $\beta \approx 0.01$ のときに最もよく観測を再現することが判明した (図5)。無衝突電子加熱が行われない場合は $\beta = m_e/m_{\text{Fe}} \sim 10^{-5}$ なので、Tycho の逆行衝撃波では電子温度が一気に3桁上昇したことになる。これが、「宇宙の瞬間湯沸かし器」と題した所以である。

本研究結果は、超新星残骸の順行衝撃波だけでなく、逆行衝撃波でも無衝突電子加熱が効率的に行われることの初の観測的証明となった。これは電子加熱機構、ひいては無衝突衝撃波の発生機構そのものに強い制限を与えると考えている。なぜなら超新星残骸の逆行衝撃波は、順行衝撃波とは性質的に大きく異なるからだ。例えばTychoの場合、逆行衝撃波は順行衝撃波と比べてマッハ数が1桁高く、磁場が2桁以上低い。⁷⁾ 無衝突衝撃波に関する従来の標準的な理論によると、電子の急加熱には最低でも星間磁場程度 ($\sim 1 \mu\text{G}$) の磁場強度が必要とされており、順行衝撃波のみこの条件が満たされると考えられていた。^{20,25,28)} 今回の観測結果は、残骸内のプラズマ自身が何らかの方法で局所的な電磁場を自己増幅し、そこで電子にエネルギーを与えていることを示唆する。その機構についての詳細は、筆者の原著論文⁷⁾ かそこで引用した理論論文^{29,30)} 等をご参照いただければ幸いである。

5. おわりに

本研究を通して得た教訓がいくつかある。ひとつは、「観測データを注意深く見渡せば予想外の物理が引き出せる」ことだ。この記事が出版される頃には、「すざく」の後継機ASTRO-Hがいよいよ観測を開始する。この衛星を用いたサイエンスの検討はX線天文のコミュニティー全体でかなり入念になされているが、筆者自身は「あまり目標を絞り過ぎると重要な発見を見落とすのでは？」という懸念を持っている。何がその衛星のベストサイエンスかは、実データを見るまでわからない。あらかじめ定めた目標だけには縛られず、柔軟にデータと向き合いたいところだ。そしてもうひとつが、分野横断的な研究の重要性である。観測系の天文学は、特定の波長でコミュニティーとして閉じる傾向が非常に強い。より深く、より効率的に物理を突き

詰めるためには、波長を越えた連携、あるいは天文学の枠組みを越えた連携研究をもっと推進する必要があるように思う。

参考文献

- 1) K. Nomoto, *et al.*: *Astrophys. J.* **286** (1984) 644.
- 2) M. M. Phillips: *Astrophys. J.* **413** (1993) 105.
- 3) S. Perlmutter, *et al.*: *Astrophys. J.* **517** (1999) 565.
- 4) A. G. Riess, *et al.*: *Astron. J.* **116** (1998) 1009.
- 5) D. Maoz, *et al.*: *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **52** (2014) 107.
- 6) H. Yamaguchi, *et al.*: *Astrophys. J. Lett.* **801** (2015) L31.
- 7) H. Yamaguchi, *et al.*: *Astrophys. J.* **780** (2014) 136.
- 8) H. Yamaguchi, *et al.*: *Astrophys. J. Lett.* **785** (2014) L27.
- 9) H. Yamaguchi, *et al.*: *Astrophys. J. Lett.* **705** (2009) L6.
- 10) 山口弘悦: *天文月報* **108** (2015) 795.
- 11) K. Masai: *Astrophys. Space Sci.* **98** (1984) 367.
- 12) C. Badenes, *et al.*: *Astrophys. J.* **645** (2006) 1373.
- 13) O. Krause, *et al.*: *Nature* **456** (2008) 617.
- 14) T. Tamagawa, *et al.*: *Publ. Astron. Soc.* **61** (2009) S167.
- 15) K. Koyama, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (2007) S23.
- 16) U. Hwang, *et al.*: *Astrophys. J.* **497** (1998) 833.
- 17) C. F. McKee: *Astrophys. J.* **188** (1974) 335.
- 18) J. S. Warren, *et al.*: *Astrophys. J.* **634** (2005) 376.
- 19) L. Spitzer: *Shock Waves in Collisionless Plasmas* (1971).
- 20) P. J. Cargill and K. Papadopoulos: *Astrophys. J. Lett.* **329** (1988) L29.
- 21) S. J. Schwartz, *et al.*: *J. Geophys. Res.* **93** (1988) 12923.
- 22) M. Markevitch and A. Vikhlinin: *Phys. Rev.* **443** (2007) 1.
- 23) P. Meszaros and M. J. Rees: *Astrophys. J.* **476** (1997) 232.
- 24) A. Hayato, *et al.*: *Astrophys. J.* **725** (2010) 894.
- 25) J. M. Laming: *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **127** (2000) 409.
- 26) J. C. Raymond, *et al.*: *Astrophys. J.* **275** (1983) 636.
- 27) C. E. Rakowski, *et al.*: *Astrophys. J.* **590** (2003) 846.
- 28) P. Ghavamian, *et al.*: *Astrophys. J. Lett.* **654** (2007) L69.
- 29) M. Balikhin, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 1259.
- 30) M. Gedalin, *et al.*: *Phys. Rev. E* **77** (2008) 026403.

(2015年8月2日原稿受付)

Revealing Collisionless Heating of Electrons at the Supernova Remnant Shock Wave with X-Ray Spectroscopy of Non-Equilibrium Plasmas

Hiroya Yamaguchi

abstract: Although collisionless shocks are ubiquitous in astrophysics, their fundamental properties are still poorly understood. In particular, the process known as collisionless electron heating is one of the main open issues in astrophysical shock physics. Here we present Suzaku deep observations of Tycho's supernova remnant, revealing the first robust evidence for efficient collisionless heating of electrons at the reverse shock of a young supernova remnant. This discovery has been achieved by the detailed spectroscopic diagnostics of non-equilibrium plasmas using our state-of-the-art atomic physics models. We detect Fe $K\beta$ ($3p \rightarrow 1s$) fluorescence emission at ~ 7.1 keV, which is expected only from low-ionization plasma where Fe ions still have multiple $3p$ electrons. Comparison with our hydrodynamical simulations requires the electron temperature at the reverse shock front to be more than 10 keV, about 1,000 times higher than expected from Coulomb collisions alone.

直接ギャップ半導体ヘテロ接合による 二次元トポロジカル絶縁体

鈴木 恭一 〈NTT 物性科学基礎研究所〉

小野満恒二 〈NTT 物性科学基礎研究所〉

近年、トポロジカル絶縁体と呼ばれる新しい物質群が注目を集めている。トポロジカル絶縁体は、通常の絶縁体・半導体と同様にバンドギャップが開いたエネルギーバンド構造をもち、かつ、化学ポテンシャルがバンドギャップ中に位置するため「絶縁体」である。一方で、そのバンド構造から「トポロジカル数（ドーナツの穴のような量）」が定義でき、真空や通常の絶縁体と異なる非自明な値をもつ。このため、トポロジカル絶縁体では内部から外部へ向かってエネルギーギャップが開いた状態を滑らかにつなげることはできず、トポロジカル数を変えるために境界となる場所でエネルギーギャップがゼロにならなければいけない。その結果2次元（3次元）トポロジカル絶縁体の境界線（表面）上に伝導チャンネルが現れる。トポロジカル絶縁体は、「絶縁体」と名前が付いていながら電気を流すことができるのである。

歴史的には2次元トポロジカル絶縁体がHgTe/HgCdTeヘテロ構造において最初に実現された。その後、多くの3次元トポロジカル絶縁体が発見され、現在も活発な研究が行われている。3次元トポロジカル絶縁体の研究が進展する一方で、2次元トポロジカル絶縁体の研究の進展は遅かった。それは、HgTe/HgCdTeヘテロ構造の作製が難しいためである。

そのような状況で、最近になり直接遷移型エネルギーバンド構造をもつ半導体で構成されるInAs/GaSbヘテロ構造を用いて、人工的な2次元トポロジカル絶縁体の実現が試みられるようになってい

InAs/GaSbヘテロ構造では構成要素となるInAs, GaSbともに通常の半導体である。InAsの伝導帯とGaSbの価電子帯がエネルギー的に重複しており、ヘテロ界面を通して混成することでトポロジカル絶縁体のエネルギーバンド構造を実現する。しかしながら、このエネルギーバンド構造はエネルギー重複について非常に敏感であり、重複が大きすぎると半金属となり、重複がないと半導体となる。InAs/GaSbヘテロ構造では、HgTe/HgCdTeヘテロ構造と同様に各層の厚さを変えることで、量子閉じ込めを利用したエネルギー重複の制御が可能であるが、これに加えて、表面側と基板側に付けたゲートによる外的なエネルギー重複の制御も可能である特徴をもつ。

トポロジカル絶縁体の確認は、量子スピンホール効果による伝導度の量子化を観測するのが最良であるが、量子化を妨げる様々な障害がある。筆者らは、エネルギー重複の最適化されたInAs/GaSbヘテロ構造試料において非局所抵抗測定を行い、隣り合った非局所抵抗比が電流端子の配置に依存せず一致することからトポロジカル絶縁体の実現を示した。本手法は、内部領域が絶縁で伝導がエッジチャンネルに支配されていることを非常に単純に証明できる。III-V族半導体は産業的に普及しており、InAs/GaSbヘテロ構造によるトポロジカル絶縁体の実現は、高度に発展した半導体技術の利用を可能とし、今後、トポロジカル絶縁体の詳細な物性解明とデバイス応用の促進が期待される。

—Keywords—

2次元トポロジカル絶縁体：量子スピンホール系とも呼ばれる。バルクが外界とは異なるトポロジの絶縁体となり、その境界である試料端に、互いに逆向きのスピンをもつ対向した電子流であるエッジチャンネルを形成する。トポロジによる物質の分類は、量子ホール絶縁体の研究に始まり、2次元トポロジカル絶縁体、3次元トポロジカル絶縁体、トポロジカル結晶絶縁体、トポロジカル超伝導体と広がっている。いずれもバルクと外界との境界に強固に保護された伝導チャンネルをもつ。

半導体ヘテロ（接合）構造：異なる半導体を接合させた層構造。結晶成長方向に沿って伝導帯および価電子帯のポテンシャル構造を人工的に制御でき、もとの半導体やその混晶にはない特性が得られる。特に、III族元素とV族元素を組み合わせた化合物半導体のヘテロ構造は、産業的に広い用途をもち、結晶成長や微細加工方法が発展している。

半金属：伝導帯の下部と価電子帯の上部が化学ポテンシャル（フェルミ準位）をまたいだエネルギーバンド構造をもち、電子と正孔が同時に存在する。単体ではBiやSbが知られている。

1. はじめに

近年トポロジーの観点から物質の分類を見直す動きが盛んになり、トポロジカル絶縁体 (TI) という新たな物質の存在が明らかになってきた。¹⁾ TI内部 (バルク) の絶縁状態は外界の絶縁状態とはトポロジーが異なる。トポロジーが異なる状態間は連続的に移り変わることができないため、TI内部の絶縁状態は外界へ続くことができず、境界において必然的に絶縁状態が壊れ、伝導チャネルが現れる。この伝導チャネルは3次元TIでは表面を取り囲む表面状態、2次元TIでは試料端を周回するエッジチャネルと呼ばれ、特異な電気伝導を引き起こすことが知られており、現在、TIの研究は注目を集めている。

TIは、スピン-軌道相互作用の強い物質系において、内部に図1(a)に示したような、価電子帯と伝導帯がエネルギー的に重複し反交差 (バンド反転) によりバンドギャップが開いた (エネルギー) バンド構造をもつ。一見、半導体のバンド構造と似ており、化学ポテンシャル (フェルミ準位: E_F) がバンドギャップ中にあると絶縁体となるが、波動関数の性質から決まる非自明なトポロジカル数によって通常の絶縁体と区別される。外界 (真空) のトポロジカル数は通常の絶縁体と同じであり、その結果、外界との境界では図1(b)のように伝導帯と価電子帯をつなぐディラック電子的な分散が現れる。時間反転対称性により、この分散は青と赤の矢印で示したように互いに逆向きのスピンをもち、逆方向の運動量をもつ。本稿で取り上げる2次元TIの場合、この分散と E_F の交点がエッジチャネルに対応し、ヘリカルと呼ばれる逆向きのスピンをもつ対向した電子の流れの縮退となる (図1(c))。エッジチャネル内では、スピン反転を伴う後方への弾性散乱は禁制となり、エネルギー散逸のない伝導 (量子化伝導)²⁾ が予測される。実際に、HgTe/HgCdTeヘテロ構造により形成された2次元TIにおいて、量子スピンホール効果と呼ばれる量子化伝導度に非常に近い伝導が観測されている。³⁾ これらのことから、

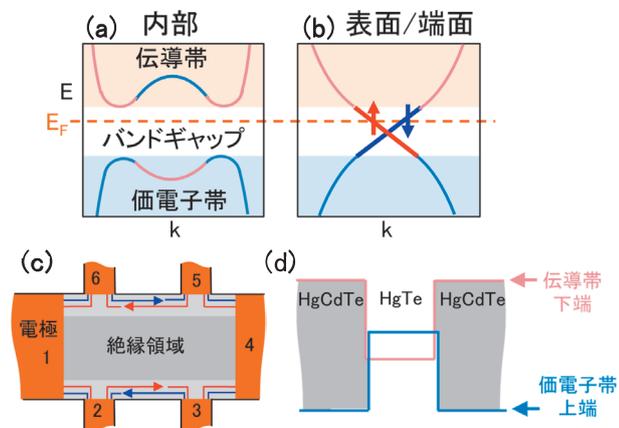


図1 (a) トポロジカル絶縁体 (TI) 内部および (b) 表面/端面のバンド構造。伝導帯と価電子帯を結ぶ分散 (赤線、青線) の赤、青の矢印は、スピンの互いに逆向きであることを意味する。(c) 2次元TIのエッジチャネル。(d) HgTe/HgCdTeヘテロ構造のバンド構造。HgTe層で伝導帯と価電子帯が反転している。

TIは特異な物性としての興味のみならず、省電力デバイスやスピンドバイスとしての応用も期待されている。

これまでTIであることが実験で確認された物質は全て、元々その物質自体にバンド反転をもつ。例えば、HgTe/HgCdTeヘテロ構造の場合、図1(d)に示したように、HgCdTe障壁層で挟まれているHgTe層において伝導帯-価電子帯の反転が起こっている。この反転はHgTe層の厚さで制御され、しきい値以下に薄くなると量子閉じ込め効果によりバンド反転が解消されて通常の半導体バンド構造となる。一方、TIの研究が進むにつれて、半導体であるInAsとGaSbについて、ヘテロ接合による2次元TI実現の可能性が示された。⁴⁾ 現在、我々を含めていくつかのグループがTIの実現を報告している。⁵⁻⁸⁾ 従来のTIが産業的になじみの薄い材料で、作製可能な研究機関も限られていたのに対して、InAsやGaSbは汎用的なIII-V族半導体であり、結晶成長技術やプロセス技術も広く普及している。今後、高度に発展した半導体技術を利用することで、TIの詳細な基礎研究やそのデバイス応用が期待される。本稿では、これまでの我々の研究を中心としたInAs/GaSbヘテロ構造によるTIの実現とその確認方法について述べる。

2. InAs/GaSbヘテロ構造

InAsもGaSbも直接遷移型バンドギャップをもつIII-V族半導体であり、そのヘテロ接合は、分子線エピタキシー法により半導体ヘテロ接合の黎明期より実現されてきた。⁹⁾ 我々が用いた両側をAlGaSb層で挟んだInAs/GaSbヘテロ構造のバンド構造を図2(a)に示す。一般に、InAsまたはGaSb系のヘテロ構造では、格子整合の良いAlGaSbが障壁層として使われる。InAs層は伝導帯に関して量子井戸となり、GaSb層は価電子帯に関して量子井戸となる。量子閉じ込めが弱い場合、InAsの伝導帯下端はGaSbの価電子帯上端より最大で150 meV低いエネルギーとなる。どちらもスピン-軌道相互作用の強い材料であり、InAsの伝導帯とGaSbの価電子帯が界面を通したトンネリングにより混成することでバンド反転が起こり、先に示した図1(a)のようなTIバンド構造を形成する。しかしながら、このTIバンド構造の実現は以下に示すように伝導帯-価電子帯のエネルギー重複に大きく依存する。

InAsの伝導帯は面内でもともと等方的な分散関係を示すが、GaSbの価電子帯には異方性がある (図2(b)).¹⁰⁾ ヘテロ構造においてInAsの伝導帯とGaSbの価電子帯のエネルギー重複が大きいと、GaSbの異方性の影響が強まり、混成によりエネルギーギャップは開くが、そのエネルギー位置は波数ベクトルの方向により異なる。その結果、エネルギーに対する状態密度を考えるとバンドギャップが開いていない半金属となる (図2(c))。逆に、伝導帯-価電子帯のエネルギー重複がない場合は半導体バンド構造となる (図2(e))。エネルギー的にバンドギャップが開いたTIのバンド構造 (図2(d)) を実現するためには、エネルギー重

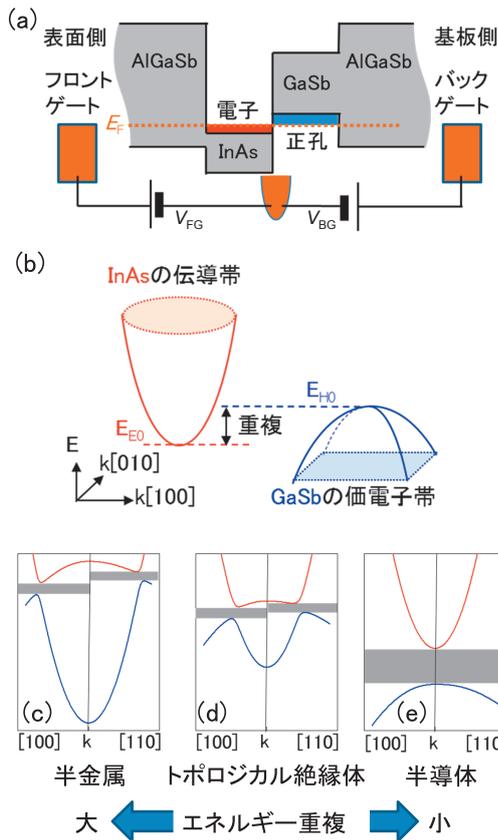


図2 (a) InAs/GaSbヘテロ構造のバンド構造。(b) InAsとGaSbの分散関係。(c)-(e) エネルギー重複の違いによるバンド構造の移り変わり。(c) 半金属、(d) TI、(e) 半導体。

複の最適化が必要となる。このエネルギー重複を制御する方法は二つあり、一つはHgTe/HgCdTeヘテロ構造と同様に層厚を変えることで、InAs層およびGaSb層を薄くすると量子閉じ込めが大きくなり、エネルギー重複が小さくなる方向に働く。二つ目は、表面側と基板側の両方向からゲート電圧をかけポテンシャルに傾きを与えることで、これに関しては後で述べる。

各層の厚さが最適化されTIバンド構造が実現されたとすると、次に、バンドギャップ中への E_F の配置が必要となる。一般に、半導体デバイスでは絶縁膜を間に挟み、チャンネル層と表面に形成した金属(ゲート)間に(フロント)ゲート電圧をかけることで E_F のエネルギー位置を制御する。しかしながら、InAs/GaSbヘテロ構造ではAlGaSb障壁層の絶縁性が悪いため、長い間、良好なフロントゲート制御が実現できていなかった。ようやく近年になり絶縁膜作製技術が進歩し、プラズマ促進化学気相成膜法(PECVD)や原子層堆積法(ALD)等を用いることで、半導体表面上に Si_xN_y 、 SiO_2 や Al_2O_3 といった良質なゲート絶縁膜が作製できるようになり、InAs/GaSbヘテロ構造においても E_F のフロントゲート制御が可能となった。我々は、ALDにより作製した Al_2O_3 ゲート絶縁膜を用いることで、¹¹⁾ 価電子帯からバンドギャップ領域を通して伝導帯までの、非常に広い領域にわたるゲート電圧による E_F の制御を実現して

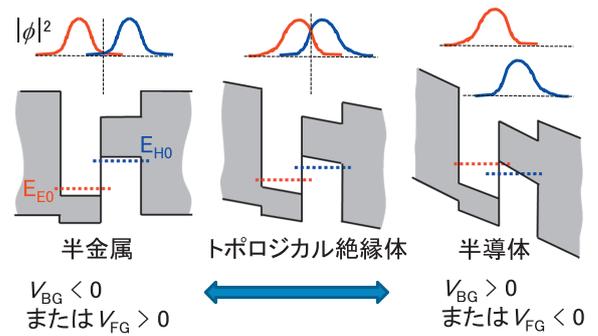


図3 ゲート電圧によるポテンシャル傾きの変化と波動関数の重なり。正のバックゲート電圧または負のフロントゲート電圧により、InAsの伝導帯とGaSbの価電子帯のエネルギー重複が小さくなる方向に働き、半金属-TI-半導体の遷移が可能。

いる。また我々は、基板側の超格子緩衝(絶縁)層を最適化することで、伝導性基板をゲートとして用いるバックゲート制御についてもフロントゲートと同等の非常に広いエネルギー領域にわたる E_F の制御を実現している。フロント、バックゲート共に正のゲート電圧をかけると電子濃度が増える方向、つまり E_F は価電子帯側から伝導帯側に移動する。

InAs/GaSbヘテロ構造の大きな特徴の一つが、TIバンド構造形成に参与する伝導帯と価電子帯が空間的に離れていることである。先に述べたHgTe/HgCdTeヘテロ構造の場合、伝導帯-価電子帯の反転がHgTe層で起こっているため、TIの実現はHgTe層の厚さのみで決定され外的にこれを変えることはできない。これに対して、InAs/GaSbヘテロ構造は、ゲート電圧によりポテンシャルを傾けることで、伝導帯-価電子帯のエネルギー重複およびバンド反転を制御でき、外的に半金属-TI-半導体の遷移が可能となる。フロントゲートに負の電圧、またはバックゲートに正の電圧をかけると、ヘテロ構造内部のポテンシャルは図3のように変化し、伝導帯、価電子帯共に閉じ込めが大きくなる方向に作用する。その結果、エネルギー重複が小さくなり、半金属バンド構造からTIを通して半導体へ移り変わることが期待される。同時に、電子と正孔の波動関数の重なりも大きくなる方向に作用し、TI状態においてより大きいバンドギャップが開き、特徴ある伝導特性の実現が容易になることが期待される。我々は、ゲートによる半金属-TI-半導体の制御に関しても取り組んでおり、これまでに半金属-TIの遷移を実現している。¹²⁾

3. トポロジカル絶縁体の確認

3次元TIでは、スピン分解角度分解光電子分光(ARPES)を用いて直接表面のバンド構造を観察することでTIか否かを確認できるが、2次元TIの場合、エッジチャンネルは線状であるので、表面やバルクの測定を得意とするスピン分解ARPESは使えない。最良の確認方法は量子化伝導度の観測であるが、実際には後述するような様々な障害があり正確な量子化伝導の実現は難しい。前述のHgTe/HgCdTe

ヘテロ構造においても観測された抵抗値は量子化で期待される値に対して数%の揺らぎがあり、量子ホール効果のホール抵抗の精度 (10^9 分の 1)¹³⁾ とは比べ物にならない。そのため、InAs/GaSb ヘテロ構造においては伝導度の試料幅依存性、⁵⁾ 走査 SQUID による電流の空間分布測定、⁷⁾ アンドレーエフ反射によるエッジチャンネルのスピンの偏極測定等⁸⁾ の各種伝導測定を組み合わせることで TI の確認がなされている。しかしながら、これらの報告では内部領域にも伝導が残っており、エッジチャンネル伝導のみを取り出した報告はなかった。¹⁴⁾

これに対して我々は、次に示すような縦抵抗および非局所抵抗の測定により、TI の特徴である内部領域が絶縁で伝導がエッジチャンネルに支配されていることを確認した。⁶⁾ 図 1(c) のような 6 端子構造を使用し、電極 i - j 間に電流 I_{ij} を流して電極 k - l 間の電圧 V_{kl} を測定したときの縦抵抗および非局所抵抗を $R_{ij,kl} = V_{kl}/I_{ij}$ とする。

まず、InAs 層の厚さを変えたエネルギー重複の異なる各試料の縦抵抗について述べる。図 4(a) は、GaSb 層の厚さが 10 nm と同じで InAs 層の厚さが 10, 12, 14 nm と異なる 3 つの試料について、フロントゲート電圧 (V_{FG}) を掃引したときの縦抵抗 $R_{14,23}$ の測定結果である。バックゲート電圧 (V_{BG}) は 0 V に固定している。予想されるバンドギャップの大きさは最大 4 meV 程度⁵⁾ であるので、測定は 0.25 K で行っている。エッジチャンネルの平均自由行程は数 μm と言われていることから、電極間隔 $2 \mu\text{m}$ の 6 端子素子を用いている。これらの試料では、低 V_{FG} 側では E_F が価電子帯側にある。 V_{FG} の増大につれて E_F が伝導帯側に移り、途中、バンドギャップ領域を通過するときに縦抵抗がピークとなる。TI が実現されエッジチャンネル伝導が量子化すると、内部領域は絶縁で、隣り合った電極間の伝導度が e^2/h (抵抗は h/e^2) となるので、縦抵抗のピーク値は、理想的には $h/(2e^2) \approx 12.9 \text{ k}\Omega$ となる。

閉じ込めの小さい 14 nm の試料では、縦抵抗のピーク値が約 2 k Ω と低い。これは、InAs の伝導帯と GaSb の価電子帯のエネルギー重複が大きく、バンドギャップが開いていない半金属であることを示している。逆に、閉じ込めの大きい 10 nm の試料では、縦抵抗ピーク値が数十 M Ω とほぼ

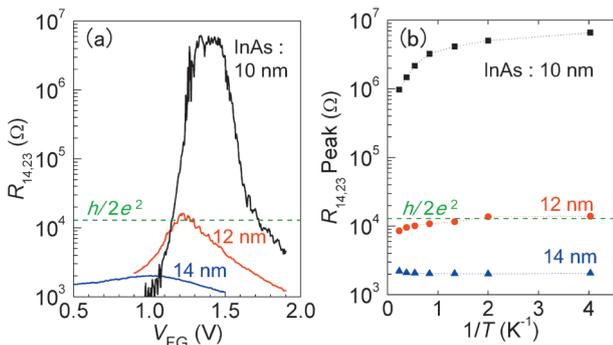


図 4 (a) InAs 層厚の異なる試料の縦抵抗の測定結果. (b) 同縦抵抗ピークの温度依存性.

絶縁体となっており、エネルギー重複が消失した半導体バンド構造となり、バンドギャップ中に E_F が位置していることがわかる。これらに対して、12 nm の試料では縦抵抗ピークが量子化で期待される 12.9 k Ω (図 3(b)) に近く、この結果だけでは断定できないが、TI となっていることが示唆される。

図 4(b) に示した縦抵抗ピークの温度変化からも同様のことが読み取れる。バンドギャップが存在すれば、高温側 (左側) ではギャップを超えた熱励起により伝導キャリアが増大し抵抗ピークが小さくなる。逆に、低温領域では熱励起が抑制され抵抗ピークが大きくなるはずである。しかし、14 nm 試料では温度依存性がほとんどないことから、この試料はバンドギャップが開いていない半金属であることがわかる。一方、12 nm 試料と 10 nm 試料では、高温領域で温度の低下に伴い抵抗値が増大していることからバンドギャップの存在がわかる。10 nm 試料が低温領域で絶縁体となるのに対して、12 nm 試料では低温においても伝導度は有限で、抵抗値も比較的 12.9 k Ω に近いところに収束している。

次に、非局所抵抗について述べる。図 5(d), (e) は TI 状態における等価回路で、伝導は量子化が不完全なエッジチャンネルを通してのみ起こることから、隣り合った電極間が任意の抵抗で結ばれている。電流経路を変えて非局所抵抗を測定し、電流経路の異なる非局所抵抗比をさらに比べれば、それらは各抵抗値に依存せず一致することになる。例えば、電流を電極 1-6 間に流した場合 (図 5(d)) の非局所抵抗比 $R_{16,23}/R_{16,34} (= V_{23}/V_{34})$ と電極 6-5 間に流した場合

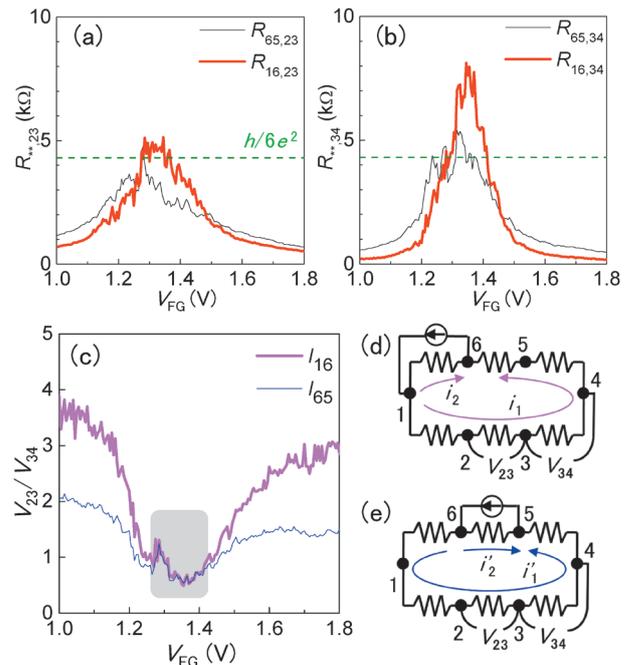


図 5 (a) InAs 層厚 12 nm 試料の非局所抵抗 $R_{16,34}$ と $R_{65,23}$ の測定結果. (b) 同 $R_{16,65}$ と $R_{65,23}$. (c) 電流入出力端子が異なる場合の、隣り合った非局所抵抗比 (電圧比). (d), (e) TI 状態の等価回路. 隣り合った電極端子が任意の抵抗で結ばれている.

(図5(e))の非局所抵抗比 $R_{65,23}/R_{65,34}$ は一致するはずである。

12 nm 試料について非局所抵抗測定を行った結果を図5に示す。図5(a)は非局所抵抗 $R_{16,23}$ および $R_{65,23}$ で、図5(b)は非局所抵抗 $R_{16,34}$ および $R_{65,34}$ である。量子化で期待される非局所抵抗のピーク値は $h/(6e)^2 \approx 4.3 \text{ k}\Omega$ であるが、測定された非局所抵抗ピークはこの値からずれている。それにも拘わらず、これら電流経路の異なる非局所抵抗比、つまりそれぞれの電流に対する電圧比 (V_{23}/V_{34}) を比べると、抵抗ピークとなる V_{FG} 付近で微細な構造を含めて完全に一致する(図5(c))。このような一致は、すべての電極配置の組み合わせで確認されており、内部領域が絶縁で伝導がエッジチャネルを通して起こっていることが明確に示されている。逆に、低 V_{FG} 側と高 V_{FG} 側で比が一致していないのは、 E_F が価電子帯または伝導帯にあるので、正孔または電子がキャリアとなり内部領域の伝導が存在することを示している。また、温度4.3 Kにて同様の測定を行うと抵抗ピーク電圧付近であっても非局所抵抗比の一致は得られない。これは、熱励起されたキャリアが内部領域で伝導を引き起こしていることを意味する。

14 nm 試料について同様の測定を行っても非局所抵抗比の一致は得られず、半金属状態であるがゆえに、 E_F がどのエネルギー位置にあっても内部領域で伝導が存在していることがわかる。また、10 nm 試料では抵抗ピーク付近は試料が完全に絶縁となっているため、非局所抵抗自体が観測されない。¹⁵⁾

エッジチャネル伝導の確認に加えて、12 nm 試料の非局所抵抗比が一致するゲート電圧領域においては、その測定された非局所抵抗値とその比を用いることで、各端子間の抵抗値を独立に求めることができる。実際に求めた各端子間抵抗は、ゲート電圧の変化 (E_F のエネルギー位置) に対して、 h/e^2 を基準として半分から倍程度で揺らいでいることがわかった。⁶⁾ 量子化伝導を妨げる要因については次節で考察する。

4. 量子化伝導の障害

2次元TIの量子化伝導(量子スピンホール効果)の観測が困難な理由の一つは、ヘリカルなエッジチャネルに起因する。量子化したエッジチャネル伝導としては、磁場中の2次元電子系(または正孔系)で観測される量子ホール効果が有名である。¹³⁾ 量子ホール効果の場合、エッジチャネルの流れは磁場の向きに依存して時計回りまたは反時計回りの一方向(カイラル)となり、途中で電圧測定の電極が挿入されても後方散乱は起こりえず、この電極に接続している全エッジチャネルのポテンシャルは電極も含めて等しくなるので、正確な伝導度の測定が可能となる。¹⁶⁾ 一方、2次元TIの場合、エッジチャネルは対向した流れの縮退であるので、電極においてスピン緩和が起こり後方散乱が可能となる。そのため、エッジチャネル伝導自体が量子化し

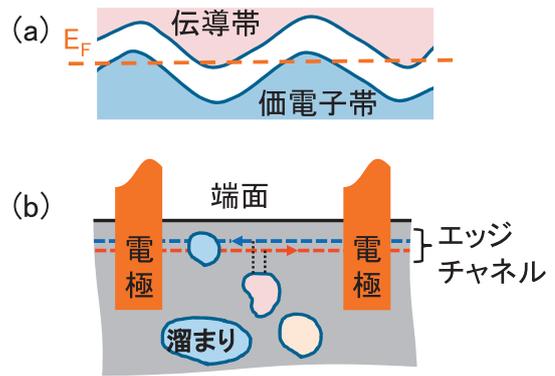


図6 (a)空間的なポテンシャル揺らぎ。伝導帯および価電子帯がところどころでフェルミレベルを超えるため、電子、正孔溜まりが発生する。(b)電子、正孔溜まりにより妨げられる量子化伝導。

いても、測定において電極とエッジチャネルの接続抵抗や電極の内部抵抗の影響が避けられない。

もう一つは伝導度自体の量子化の不完全性である。バンドギャップに空間的なポテンシャル揺らぎがあると、試料内のところどころに電子や正孔溜まりが発生する(図6(a), (b))。この溜まりがエッジチャネル上にあると、あたかも電極として働き後方散乱を可能とするため、端子間の伝導度が低下する。また、エッジチャネル近傍にこの溜まりが存在すると、エッジチャネルとトンネル結合し、電子が溜まりに留まっている間にスピン緩和が起き、やはり後方散乱を可能にする。¹⁷⁾ さらに、電子、正孔溜まりの密度が高いと、エッジチャネルを介さない電極と溜まりを通した電流パスが生じ、エッジチャネルの伝導が不明確になる。AlGaSb障壁を用いたInAs/GaSbヘテロ構造では、AlGaSb層に深い電子トラップ準位が存在することが知られている。¹⁸⁾ E_F が移動するにつれてこれらのトラップ準位は電子を收容または放出する。その結果、エネルギーに依存した空間的なポテンシャル揺らぎが生じ、ゲート電圧に対する縦抵抗や非局所抵抗に図4、図5に見られるような細かい構造が現れる。

5. 今後の展望

これまで2次元TI(トポロジカル絶縁体)が実現されていたHgTe/HgCdTeヘテロ構造は、作製可能な研究機関が非常に限られていたため、2次元TIの実験に関する報告は少なく、その特性には不明な部分が多い。今回、InAs/GaSbヘテロ構造でTIが実現できたことで、エッジチャネル伝導のさらなる解明が進むと考えられる。また、結晶品質の改良、試料構造の最適化、新たな測定方法の考案等により、量子化伝導にさらに近づくことが可能と考えている。

InAsは磁性体や超伝導体との接合に相性が良いことで知られる。磁性体との接合により、エッジチャネルのスピン偏極の詳細な理解と、これを利用したスピントロニックデバイスへの応用が期待される。また、2次元TIと超伝導体の接合ではマヨラナフェルミ粒子の生成が予測されてい

る.⁸⁾ マヨラナフェルミ粒子は、量子コンピューティングにおける擾乱に強い量子ビットとして期待されており、今後の進展が期待される。

本研究により、3次元物質(バルク)としてTIとなっていない物質を組み合わせ、ヘテロ接合により人工的に2次元TIを実現することができた。これを契機に、半導体に限らず様々な物質の組み合わせが試され、いずれ室温より大きなバンドギャップをもつ2次元TIが現れることが期待される。

本研究にあたり、村木康二氏、原田裕一氏、石川由人氏、室伏祐昭氏のご協力に感謝いたします。本研究はJSPS科研費(26287068)の助成を受けています。

参考文献

- 1) 解説・総説として: M. Z. Hasan and C. L. Kane: Rev. Mod. Phys. **82** (2010) 3045; X. L. Qi and S.-C. Zhang: Rev. Mod. Phys. **83** (2010) 1057; Y. Ando: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 102001; 村上修一, 平原 徹, 松田 巖: 日本物理学会誌 **65** (2010) 840; 野村健太郎: 日本物理学会誌 **69** (2014) 286; 森本高裕, 古崎 昭: 固体物理 **50** (2015) 297.
- 2) M. Büttiker: Phys. Rev. Lett. **57** (1986) 1961.
- 3) M. König, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 031007, and references therein.
- 4) C. Liu, T. L. Hughes, X.-L. Qi, K. Wang and S.-C. Zhang: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 236601.
- 5) I. Knez, R.-R. Du and G. Sullivan: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 136603.
- 6) K. Suzuki, Y. Harada, K. Onomitsu and K. Muraki: Phys. Rev. B **87** (2013) 235311.
- 7) E. M. Spanton, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 026804.
- 8) V. S. Pribiag, *et al.*: Nature Nanotech. **10** (2015) 593.
- 9) H. Sakaki, L. L. Chang, G. A. Sai-Halasz, C. A. Chang and L. Esaki: Solid State Commn. **26** (1978) 589.
- 10) M. Lakrimi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 3034.
- 11) K. Suzuki, *et al.*: Appl. Phys. Express **4** (2011) 125702.
- 12) K. Suzuki, Y. Harada, K. Onomitsu and K. Muraki: Phys. Rev. B **91** (2015) 6.
- 13) K. v. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper: Phys. Rev. Lett. **45** (1980) 494.
- 14) 最近になり、特殊なドーピングを施した試料において量子化伝導度に

近い値が観測されている。L. Du, I. Knez, G. Sullivan and R.-R. Du: Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 096802.

- 15) 鈴木恭一, 小野満恒二, 原田裕一, 村木康二: 電子情報通信学会技術研究報告 ED2013-136, SDM2013-151 (2014) pp. 25-30.
- 16) M. Büttiker: Phys. Rev. B **38** (1998) 9375.
- 17) J. I. Väyrynen, M. Goldstein and L. I. Glazman: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 216402.
- 18) F.-C. Wang, W. E. Zhang, C. H. Yang, M. J. Yang and B. R. Bennett: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 1417.

非会員著者の紹介

小野満恒二氏: NTT物性科学基礎研究所低次元構造研究グループ主任研究員。専門は、分子線エピタキシャル装置による化合物半導体の結晶成長と電子デバイス応用。最近ではエピタキシャル成長したMoSe₂の特性評価にも力を入れている。

(2015年5月19日原稿受付)

Topological Insulating Phase in Direct Transition Band Gap Semiconductor Heterostructures

Kyoichi Suzuki and Koji Onomitsu

abstract: InAs/GaSb heterostructures, which are comprised of direct transition band semiconductors, are promising for a new type of two-dimensional topological insulator (TI). Due to the hybridization between the adjacent InAs conduction and GaSb valence bands, conduction-valence band inverted structures are formed artificially. This is in contrast with the other topological insulators (TIs) confirmed so far, which have the band inversion in their materials by nature. We confirmed a two-dimensional topological insulating phase in InAs/GaSb heterostructures by means of nonlocal resistance measurements. By taking advantage of highly-developed semiconductor technologies, the investigation of fundamental properties in two-dimensional TIs and of their applications will be promoted. In addition, our results open the possibility of new TIs emerging from the combination of various materials.

日本物理学会誌 第71巻 第3号 (2016年3月号) 予定目次

巻頭言

皆様の支援の中で育つPTEP坂井典佑
現代物理のキーワード

物質における対称性を破って電気と磁気をつなぐ.....木村 剛
解説

トポロジカル相と電子相関—イリジウム酸化物を中心に—
.....山地洋平, 今田正俊
解ける量子力学模型と直交多項式.....小竹 悟

最近の研究から
表面超構造超伝導体—実験的検証とジョセフソン渦の観測—
.....内橋 隆

話題—身近な現象の物理—
渋滞のサイエンスとその解消法.....西成活裕

JPSJの最近の注目論文から 11月の編集委員会より
.....上田和夫

学会報告

2015年秋季大会 招待・企画・チュートリアル講演の報告
.....領域委員会

科学研究費

平成27年度科学研究費助成事業(科研費, 基盤研究等)
審査結果報告.....白濱圭也, 迫田和彰

学界ニュース

平成27年度文化勲章: 梶田隆章氏竹内康雄
2015年度仁科記念賞: 笠 真生氏, 古崎 昭氏村上修一
本林 透氏, 櫻井博儀氏大塚孝治

Breakthrough Prize for Fundamental Physics 受賞

新著紹介

FeSe 原子層薄膜の高温超伝導

中山 耕輔 〈東北大学大学院理学研究科, 高度教養教育・学生支援機構〉

佐藤 宇史 〈東北大学大学院理学研究科〉

高橋 隆 〈東北大学原子分子材料科学高等研究機構, 大学院理学研究科〉

鉄系高温超伝導体の1つである FeSe を1層(原子3個分の厚さ)だけ SrTiO₃ 基板上に作成すると、超伝導転移温度 (T_c) が 100 K に達する可能性が報告され、大きな注目を集めている。FeSe バルク試料の T_c は約 8 K であり、単層にすることで T_c が一桁も上昇することになる。また、これまで発見されたバルク鉄系高温超伝導体における T_c の最高値 (56 K) をも遙かに凌駕している。はたして、この高温超伝導は本物だろうか? この点を明らかにするため精力的な研究が行われており、これまでに中国と米国の3つの研究グループが独立に FeSe 単層膜の作成に成功し、いずれも超伝導の発現を支持する結果を報告している。このことから、超伝導が発現していることは間違いないと考えられる。しかし、FeSe 単層膜の作成が難しいことに加えて、作成した単層膜が大気中で不安定なことなどから、正確な T_c の決定は難しいのが現状である。これまでに報告された T_c は、20 K から 100 K 以上まで大きなばらつきがあり、“高温”超伝導が起きているかについて統一的な見解は得られていない。

もし単層膜で高温超伝導が実現しているとする、自然に浮かぶ疑問は、「バルク体から単層膜まで、どのように超伝導が変化するか?」である。この点について、2層以上の多層膜では超伝導が完全に消失するという興味深い結果が報告されている。単層膜の上にもう1層 FeSe 膜を追加しただけで、なぜ劇的な T_c の変化が起こるのか、また、それが本質的な変化であるのかどうかは明らかになっていない。この問題の解決は、「なぜ FeSe 単層膜が高温超伝導を示

すか?」を理解する上で極めて重要である。

本稿では、膜厚を系統的に変化させた FeSe の高品質薄膜を SrTiO₃ 基板上に作成し、角度分解光電子分光法 (Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy; ARPES) を用いて電子状態のその場観察を行った研究について紹介する。1番目の重要な成果として、単層膜において超伝導の発現を示す超伝導ギャップを直接観測し、その温度変化から、 T_c が約 60 K であることを見出した。この T_c は、バルク FeSe の 8 K を遙かに超えて高温超伝導と呼べるほど高い。2番目の成果として、FeSe 薄膜の表面に K 原子を吸着させることで、薄膜中の電子量を広い範囲にわたって制御できることを見出した。この手法を用いて、これまで超伝導を発現しないとされてきた多層膜においても $T_c \sim 50$ K の高温超伝導を発現させることに成功した。3番目の成果として、超伝導相図の膜厚・ドープ量依存性を確立した。膜厚が薄いほど T_c は高く、FeSe と SrTiO₃ との界面が高温超伝導の実現に重要な役割を果たしていることを明らかにした。また、電子ドープ量に対して、 T_c がドーム型を示すことも見出した。さらに、単層膜で電子量を増やすことで、60 K よりも高い T_c が実現される可能性を示した。

このように、SrTiO₃ 上の FeSe 薄膜は、さらなる高温超伝導の探索や、二次元超伝導の研究に魅力的なプラットフォームを提供する。また、FeSe に限らず他の超伝導体においても、それを原子層薄膜化することで、バルクを超える高い T_c を実現する可能性もあり、今後さらなる研究の進展が期待される。

—Keywords—

鉄系高温超伝導体:

2008年に、東京工業大学の細野教授らの研究グループによって発見された超伝導体 LaFeAsO_{1-x}F_x とその類型物質のこと。発見当初 26 K であった T_c は、元素置換や圧力印加、および異なる結晶構造を持つ類型物質の発見によって短期間で上昇し、2008年の末には Gd_{1-x}Th_xFeAsO において最高値 56 K が報告された。類型物質は、いずれも Fe を含む二次元伝導面を持っており、FeSe は二次元伝導面だけからなる最も単純な結晶構造を持つ。56 K という T_c は、銅酸化物高温超伝導体(常圧における T_c の最高値が 135 K) に次いで高い値である。

角度分解光電子分光:

結晶の表面に紫外線を照射して、外部光電効果により結晶外に放出される電子(光電子)のエネルギーと運動量を同時に測定する実験手法のこと。物質中の電子の状態(電子構造)を直接決定することができる。ARPES (Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy) と呼ばれる。近年その分解能が急速に向上し、超伝導ギャップの直接観測も可能になった。また最近、電子のスピンまでも観測できるようになった。

1. はじめに

SrTiO₃ 上の FeSe 単層膜 (図 1) における高温超伝導の可能性は、2012年に精華大学 (中国) の Xue 教授らのグループによって指摘され、¹⁾ それを契機に精力的な研究がスタートした。¹⁻⁶⁾ これまでに報告された T_c は 20 K から 100 K 以上までばらついており、現時点では未だ T_c の最終決定には至っていないものの、原子レベルの薄膜にすることで T_c 以外にどのような変化が起こるかについて、既にいくつか重要な知見が得られている。第一に、格子定数の大きい SrTiO₃ と FeSe が結合することで、比較的薄い FeSe 膜では面内方向に引張り歪みが生じることが分かっている。^{1,4)} 一方、グラフェン上で作成された FeSe 単層膜では引張り歪みは生じないが、超伝導は発現しない。⁷⁾ このことから、引張り歪みの導入が何らかの理由で超伝導の発現に有利に働くことが推測される。第二に、単層膜でのみ FeSe 内の電子が SrTiO₃ の格子振動と相互作用しているという報告がある。⁸⁾ これは、界面での電子-格子相互作用が高温超伝導発現の引き金になること⁹⁾ を示唆するものである。第三に、単層膜では SrTiO₃ からの電荷移動によって電子がドーピングされており、²⁾ バルク試料とはキャリア量が大きく異なっていることも分かっている。以上の3点は、単層膜で期待される高温超伝導のメカニズムや、多層膜で超伝導が消失する起源を解明する上での重要な手掛かりとして注目されているが、何が高温超伝導の発現に最も重要な要素かは明らかになっていない。我々は、特にキャリア量の違いに着目して研究を行った。

一般に、キャリア量の制御は高温超伝導実現の鍵である。銅酸化物高温超伝導体や鉄系高温超伝導体の母物質の多くは非超伝導体で、反強磁性秩序を示す。この母物質に電子またはホールをドーピングして磁気秩序を抑制、あるいは完全に消滅させることで初めて超伝導が発現する。ドーピング量の増加に伴って T_c は徐々に上昇し、ある最適ドーピング値で最高の T_c を示した後、下降に転じる。その結果、電子相図にはドーム型の超伝導領域が現れる。FeSe 単層膜でも同様に、高温超伝導の実現には電子ドーピングが不可欠であることが分かっている。^{3,4)} しかし、電子相図が徹底的に調べられているバルク高温超伝導物質に比べて、FeSe 薄膜ではその電子相図の解明と理解が進んでいないのが現状である。その最大の原因は、これまでの研究では、薄膜への電子ドーピング手法が SrTiO₃ 基板からの電荷移動を利用するものだけであり、この手法では超伝導相全体にわたって電子量を制御することが困難なためである。特に、SrTiO₃ から

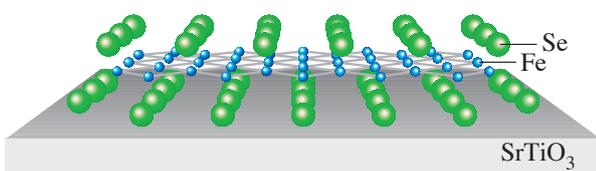


図1 SrTiO₃ 基板上的 FeSe 単層膜の構造。

供給された電子のほとんどは1層目の FeSe に局在してしまい、2層目以上の FeSe 膜には行き渡らない可能性があり、多層膜ではさらに問題が深刻となる。⁴⁾ 事実、2層以上の多層膜では超伝導は観測されていない。翻って、「逆に、十分な電子量を供給することで、単層膜以外でも高温超伝導が起きるのではないか?」という疑問と期待が生ずる。これに答えるためには、高ドーピング領域まで系統的に電子量を制御可能な、従来とは質的に異なる新しいドーピング手法の確立が不可欠となる。

2. FeSe 単層膜の高分解能 ARPES

FeSe 原子層薄膜は大気中では不安定であることが知られている。表面をアモルファスシリコン (Si) やセレン (Se) の保護膜で覆った後、大気中に取り出して電気抵抗測定などを行った研究例も数多くあるが、このような試料では比較的lowめの T_c が報告されている。100 K を超える T_c は、超高真空中におけるその場 (*in situ*) 電気抵抗測定からの報告であり、⁵⁾ 高温超伝導発現の真偽を議論する上では、薄膜の作成と T_c の評価を、試料を大気に晒すことなく、同一の真空槽内で行うことが望ましいと考えられる。この実験的要請に応えるため、我々は、現有の高分解能光電子分光装置に連結させて試料作成真空槽を建設し、そこで分子線エピタキシー法 (MBE 法) により高品質 FeSe 薄膜を作成し、試料を真空槽内で移送して光電子分光装置内に導き、高分解能 ARPES を用いて電子状態の精密測定を行った。^{10,11)}

まず、単層膜における高温超伝導の検証を行った結果を紹介する。図2(a)に、FeSe 単層膜で測定したフェルミ準位 (E_F) 上の ARPES 強度を2次元的な波数の関数としてプロットした結果を示す。明るい部分が実験的に得られたフェルミ面を示しており、ブリルアンゾーン境界の M 点を中心とした比較的大きなフェルミ面 (以下、 γ フェルミ面と呼ぶ) が存在することが分かる。図2(b), (c) に示したのは、 Γ 点と M 点近傍 [図2(a) 中の青および緑の線上] で測定した ARPES 強度を、結合エネルギーと波数の関数としてプロットしたもので、実験的に決定したバンド分散である。図2(c) から、 γ フェルミ面を形成しているのは電子的バンドであることが分かる。また、FeSe バルク試料^{12,13)} で観測されている E_F を切る Γ 点中心のホールのバンド (α バンド) は、 E_F を切らずにより離れた高結合エネルギー側に位置していることが分かる [図2(b)]。この結果は、FeSe 単層膜が as-grown の状態で既に電子ドーピングされていることを示しており、以前の報告²⁾ と一致する。 γ フェルミ面の大きさからキャリア濃度 (n_c) を見積もると、Fe 原子1つあたり約0.12 electrons となり、この余剰キャリアは基板の SrTiO₃ から供給されていると考えられる。

次に、超伝導ギャップの温度依存性から T_c の評価を行った。図2(d)に、 γ バンドのフェルミ波数で測定した ARPES スペクトルの温度変化を示す。 $T = 13$ K では、超伝導ギャップが開いていることに対応して、 E_F 近傍のスペク

トルの立ち上がりの中点が E_F に対して高結合エネルギー側にシフトしており、さらに、結合エネルギー20 meV近傍にコヒーレントピークが現れている。超伝導ギャップの温度変化を詳細に調べるため、スペクトルを E_F に対して対称化し、フェルミ-ディラック分布関数の寄与を取り除いた“対称化スペクトル”を図2(e)に示す。低温では超伝

導ギャップの存在を示すdip構造が E_F に存在しており、温度の上昇とともに徐々にギャップが閉じ、最終的に60 K程度でギャップが消失していることが見て取れる。以上の結果は、SrTiO₃上のFeSe単層膜の T_c が60 Kに達することを示しており、高温超伝導の発現を支持している。また $T_c \sim 60$ Kという値は、*in-situ* ARPESを用いた先行研究の結果⁴⁾と良く一致しており、信頼性の高い結果であると言える。一方で、電気抵抗測定から指摘された100 K超の T_c には届いていない。この点については後で議論する。

3. FeSe多層膜のキャリア量制御と高温超伝導

次の問題は、高温超伝導の発現が単層膜に限られた現象かどうかである。この点を明らかにするため、膜厚を系統的に変化させた試料のARPES測定を行った。代表例として、3層FeSe薄膜[図3(a)]におけるフェルミ面マッピングの結果とバンド分散を図3(b), (c)に示す。単層膜とは異なり、3層膜のフェルミ面は Γ 点中心の α ホール面と、M点から少し離れた位置にある電子面(ϵ)から構成されていることが分かる。 Γ 点のホールキャリアとM点近傍の電子キャリアがほぼ補償しているように見えるため、*as-grown*の3層膜表面では、SrTiO₃からの電子ドーピングの影響は無視できるほど小さいと考えられる。また、単層膜で観測された γ 面を単純にエネルギーシフトしただけでは ϵ 面の存在を説明できないことから、ノンドーピング領域では秩序状態が生じ、電子構造の再構成が起きていることが示唆される。⁴⁾ 後で示すように、この*as-grown*の3層FeSe膜では、低温(13 K)でも超伝導は観測されない。

それでは、多層膜でも十分な電子ドーピングを行い、秩序状態を抑制することができれば、高温超伝導は起こるだろうか？ 我々は、電子ドーピングの手段として、これまでの

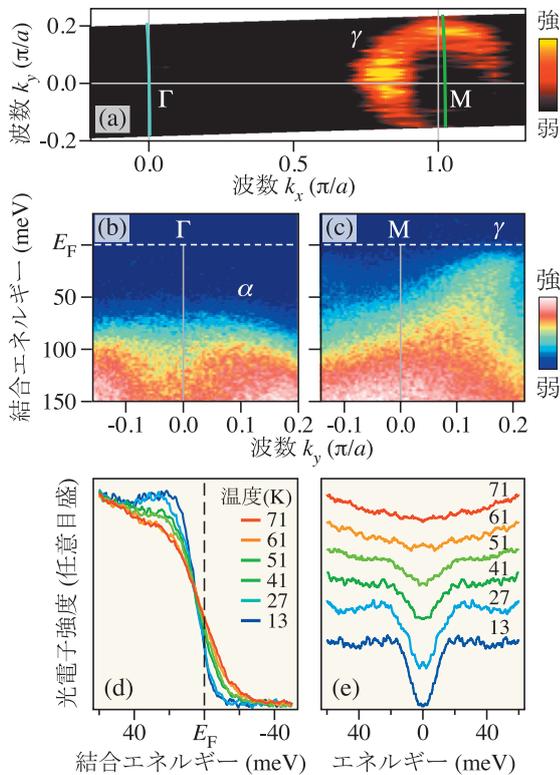


図2 (a) FeSe単層膜において、 $T=30$ Kで測定したフェルミ単位(E_F)上のARPES強度。(b), (c) (a)中の青および緑の線に沿って測定したARPES強度。(d) γ バンドのフェルミ波数で測定したARPESスペクトルの温度依存性。(e) (d)のスペクトルを E_F に対して対称化したもの。

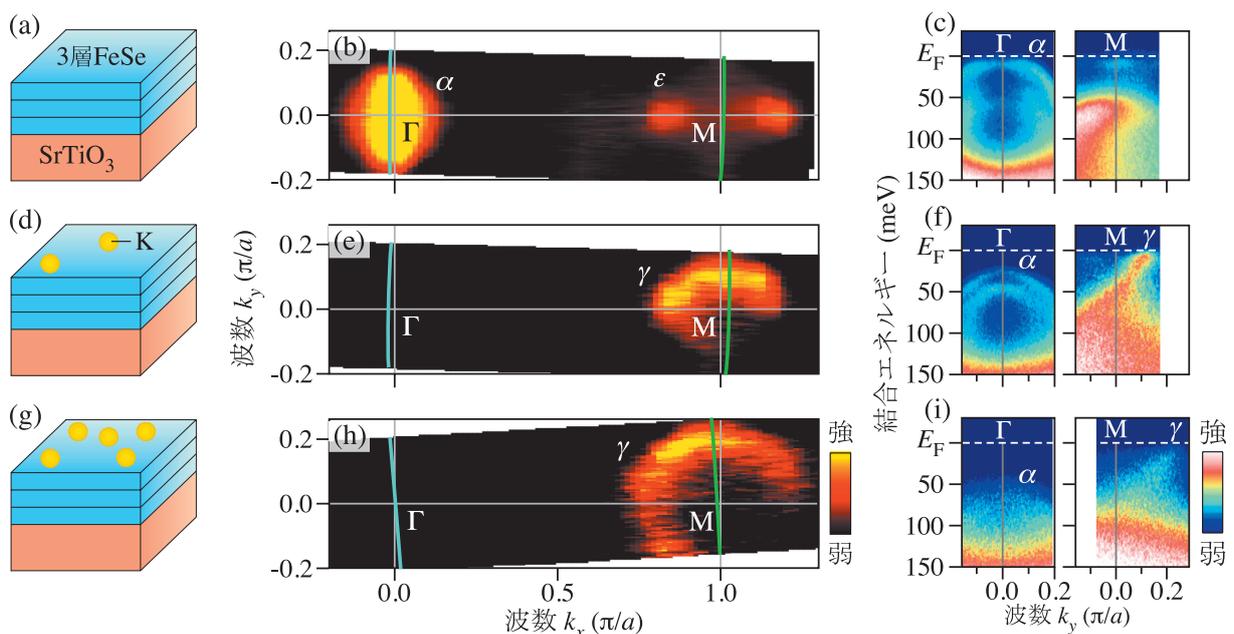


図3 (a) SrTiO₃上の3層FeSe薄膜の模式図。(b) 3層膜において、 $T=30$ Kで測定した E_F 上のARPES強度。(c) (b)中の青および緑の線に沿って測定したARPES強度。(d)-(i) (a)-(c)と同じ。ただし、(d)-(f)は少量のK原子を表面に吸着させた3層膜で、(g)-(i)は過剰にK原子を吸着させた3層膜に対応する。

SrTiO₃ 基板からの電荷移動という受動的な方法ではなく、より積極的かつ制御可能な方法である“K原子吸着法”を考案した。これは、as-grownのFeSe薄膜表面に、真空中でK原子を蒸着レートを制御して吸着させるものである。図3(d)-(f)に示すように、わずかにK原子を吸着するだけで、 Γ 点の α 面が消失する。同時に、M点近傍の ε 面も消失し、代わりにM点中心の γ 面が出現する。この結果は、「K吸着によりFeSe層へ電子がドーピングされ、その結果として秩序状態が抑制される(消失する)」というシナリオで良く説明できる。また、K原子の吸着量をさらに増やすと、電子面が大きくなることが分かる[図3(g)-(i)]。図3(e), (h)に示したフェルミ面からキャリア数を見積もると、それぞれ $n_e \sim 0.07, 0.15$ (electrons/one Fe atom)となっており、単層膜のキャリア量($n_e \sim 0.12$)を上回る電子ドーピングが実現されていることが分かる。

K吸着によってドーピング量の系統的な制御が可能になったことから、次に、多層膜における高温超伝導の探索を行った。図4(a)に示すように、as-grownおよびK吸着した3層膜のそれぞれのフェルミ波数において低温で測定したARPESスペクトルを比較すると、スペクトルの立ち上がりの中点が、as-grown($n_e \sim 0$)では E_F 上に位置するのに対して、K吸着した $n_e \sim 0.07, 0.11, 0.13$ の試料では明らかに高結合エネルギー側にシフトしており、エネルギーギャップが開いていることを示している。ギャップの存在は、対

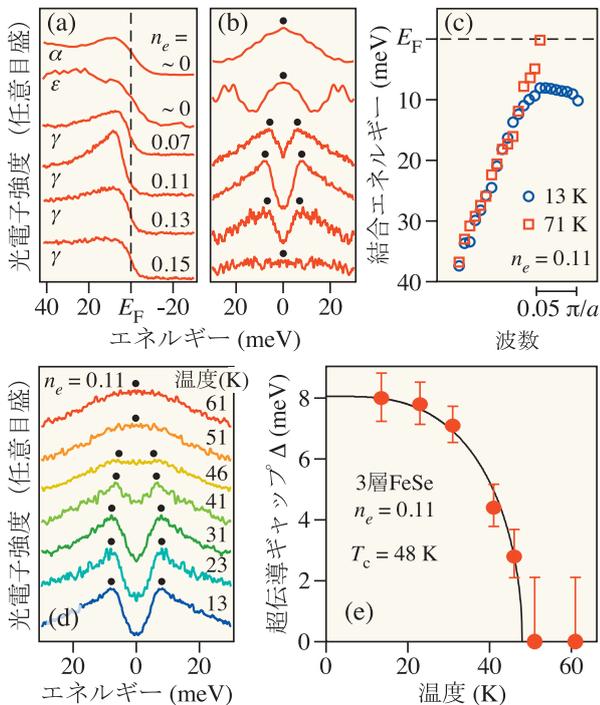


図4 (a) 3層FeSe薄膜(電子量 $n_e \sim 0$)の α バンドと ε バンド、および、K吸着した3層膜($n_e \sim 0.07, 0.11, 0.13, 0.15$)の γ バンドのフェルミ波数において測定したARPESスペクトル。測定温度は、 $n_e \sim 0$ の試料が30 Kで、その他は13 K。(b) (a)中のスペクトルを対称化したもの。ドットはピーク位置のガイド。(c) γ バンドの分散形状の温度依存性。(d) γ バンドのフェルミ波数における対称化スペクトルの温度依存性。(e) (d)中のピーク位置から見積もった超伝導ギャップの温度依存性。黒線は、BCS理論式を用いて実験結果をフィッティングした結果。

称化スペクトルで、よりはっきりと観測できる[図4(b)]。Bogoliubov準粒子の分散形状¹⁴⁾から予想される通り、低温(13 K)におけるバンドが、ちょうど常伝導状態(71 K)のフェルミ波数で折り返すことから[図4(c)]、観測したエネルギーギャップは超伝導ギャップであると結論される。一方で、 $n_e \sim 0.15$ の試料では、超伝導ギャップは観測されおらず、電子をドーピングすぎると超伝導が抑制されることを示している。観測した超伝導ギャップの大きさ(Δ)は、 $n_e \sim 0.07, 0.11, 0.13$ において、それぞれ $\Delta = 6.3 \pm 1.0, 8.0 \pm 0.8, 6.3 \pm 1.0$ meVとなっており、 $n_e \sim 0.15$ ではほぼ0となる。この結果は、超伝導相がドーム型であることを示している。最適ドーピング近傍の組成($n_e \sim 0.11$)の T_c を見積もるため、温度変化測定を行い[図4(d)]、対称化スペクトルのピーク位置から見積もった超伝導ギャップサイズの温度依存性をBCS理論で予想される関数を用いてフィッティングを行った結果[図4(e)]、 $T_c \sim 48$ Kを得た。この結果は、3層膜においても高温超伝導が発現することを示している。また、2層、4層膜でもK吸着によって超伝導を発現させることに成功し、単層から4層という広い膜厚領域において超伝導が発現することを見出した。

4. FeSe薄膜の電子相図

超伝導のキャリア量・膜厚依存性について、より詳細な議論を行うため、単層、3層、および20層膜の超伝導ギャップの電子量依存性を決定し、その結果を図5に示した。単層および3層膜での超伝導ギャップの最大値は、それぞれ $\Delta = 19.2 \pm 1.5$ と 8.0 ± 0.8 meVであり、多層膜から単層膜に向かって超伝導ギャップサイズが大きくなっていくことが分かる。また、20層膜ではキャリア量を $n_e \sim 0.15$ まで変化

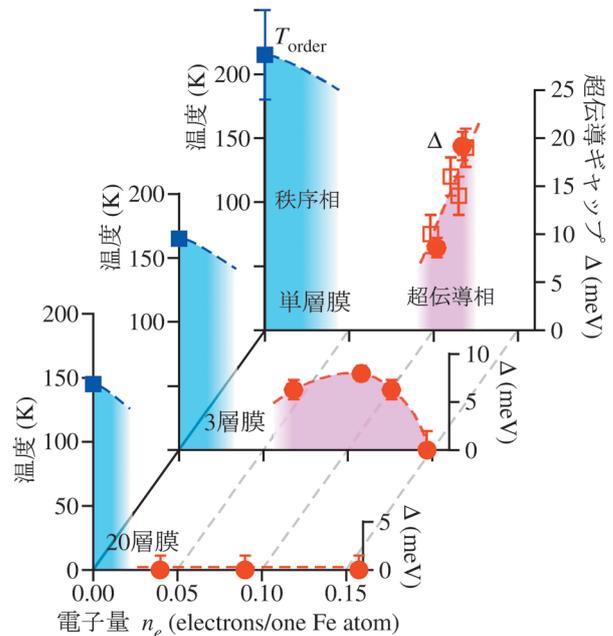


図5 実験的に決定した超伝導ギャップサイズ(図中の赤丸)のドーピングおよび膜厚依存性。赤い中抜き四角は先行研究の結果。³⁾ 青い四角は、ノンドーピング領域において報告されている秩序状態の転移温度(T_{order})。⁴⁾

させても、13 Kまでは超伝導は観測されなかった。これらの結果は、膜が薄いほどペアリングが強くなることを示している。このような振る舞いは、超伝導体においては一般的ではない。例えば、多くの単体金属では、超薄膜領域で超伝導の抑制が観測されている。¹⁵⁾ 今回見出した超伝導ギャップの膜厚依存性は、FeSeとSrTiO₃の界面における相互作用が、高温超伝導発現に重要な役割を果たしていることを示唆するものである。

界面におけるどのような相互作用が高温超伝導に寄与しているかを同定するには、今後さらなる研究が必須であるが、ここでは現時点で考えられる点についてまとめる。今回の実験結果で、この問題を議論する上で重要な手掛かりは、「3層膜においてドーム型の超伝導相が存在する」ことである。例えば、FeSe薄膜の高温超伝導機構の1つとして、FeSeの電子とSrTiO₃の格子振動との相互作用の重要性が指摘されている。^{8,9)} しかし、キャリア量の微小変化($n_e \sim 0.11$ から ~ 0.15)によって、SrTiO₃の格子振動や、それとFeSe電子との結合定数が劇的に変化するとは考えづらい。従って、電子-格子相互作用のみで過剰ドープ領域における超伝導の抑制を説明するのは難しく、別の要因が高温超伝導発現に深く関わっていることが推測される。我々は、ノンドープ領域で観測される秩序状態に関連した揺らぎが、その候補になりうると考えている。これまでの研究から、膜厚が薄いほどFeSeにかかる引張り歪みが大きく、それに伴って、ノンドープ領域における秩序(反強磁性秩序、あるいは軌道秩序)が強固になることが報告されている。⁴⁾ そのため、適度に電子をドープした単層膜において、スピン揺らぎや軌道揺らぎが最も強くなり、その結果 T_c が高くなることが考えられる。この場合、過剰ドープ領域における超伝導の抑制は、揺らぎの抑制あるいは消失に関連付けることができるだろう。この議論をさらに深めるためには、秩序の種類と同定や、揺らぎの強さの決定が不可欠である。

最後に、単層膜における T_c が100 Kを超える可能性を報告した*in-situ*電気抵抗測定⁵⁾との対応について簡単に議論する。本研究では、3層膜における最適ドープ量が、 $n_e \sim 0.12$ であることを見出した。単層膜でも最適ドープ量が同じであれば、ARPES結果から期待される T_c の最高値は約60 Kであり、電気抵抗測定の結果とかけ離れた値となる。一方、単層膜の最適ドープ量が、より高ドープ側に位置する可能性もある。事実、図5の相図から分かるように、単層膜の超伝導ギャップは $n_e \sim 0.12$ まで単調に増加を続けているため、単層膜にさらに電子をドープすることで T_c が60 Kを超え100 Kに向けてさらに上昇することも考えられる。

5. おわりに

本稿では、SrTiO₃上のFeSe薄膜の*in-situ* ARPES測定を行い、高温超伝導の発現を電子状態の立場から検証した結果について紹介した。特に、K原子を吸着するという簡単な手法により、キャリア濃度を系統的に幅広く制御できたことは重要である。これにより、FeSe多層膜において初めて高温超伝導を誘起しただけでなく、超伝導機構の解明に向けた出発点となる電子相図について、その全体像を明らかにすることができた。今後、薄膜と基板の組み合わせや、キャリア量を調整・制御することで、さらに高い T_c の実現が期待される。

本研究は、宮田康成、菅原克明(東北大学)の各氏との共同研究です。また、Q. Xue(精華大学)、X. Ma、L. Wang、F. Li、W. Zhang(以上、中国科学院)の各氏には、薄膜作成方法について有益な助言をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Q. Y. Wang, *et al.*: *Chin. Phys. Lett.* **29** (2012) 037402.
- 2) D. F. Liu, *et al.*: *Nature Commun.* **3** (2012) 931.
- 3) S. L. He, *et al.*: *Nature Mater.* **12** (2013) 605.
- 4) S. Y. Tan, *et al.*: *Nature Mater.* **12** (2013) 634.
- 5) G.-F. Ge, *et al.*: *Nature Mater.* **14** (2015) 285.
- 6) Y. Sun, *et al.*: *Sci. Rep.* **4** (2014) 6040.
- 7) C.-L. Song, *et al.*: *Phys. Rev. B* **84** (2011) 020503(R).
- 8) J. J. Lee, *et al.*: *Nature* **515** (2014) 245.
- 9) Y. Y. Xian, *et al.*: *Phys. Rev. B* **86** (2012) 134508.
- 10) Y. Miyata, *et al.*: *Nature Mater.* **14** (2015) 775.
- 11) I. I. Mazin: *Nature Mater.* **14** (2015) 755.
- 12) J. Maletz, *et al.*: *Phys. Rev. B* **89** (2014) 220506(R).
- 13) K. Nakayama, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **113** (2014) 237001.
- 14) H. Matsui, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 217002.
- 15) D. B. Haviland, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **62** (1989) 2180.

(2015年7月31日原稿受付)

High-Temperature Superconductivity in Atomic-Layer FeSe Films

Kosuke Nakayama, Takafumi Sato and Takashi Takahashi

abstract: We report angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) study on atomic-layer FeSe films grown on SrTiO₃ substrate. We observed that a monolayer film shows superconductivity with the onset temperature of 60 K. We also found that potassium (K) deposition onto the film enables the systematic control of carrier concentration. By using this method, we have succeeded in converting non-superconducting as-grown multilayer films into a high-temperature superconductor. We have established the electronic phase diagram of FeSe film and revealed an important role of interface for realizing the high-temperature superconductivity.

日本物理学会 Jr. セッション

—これまでの10年, これからの10年—

松川 宏[†] 〈青山学院大学 〉

並木雅俊[†] 〈高千穂大学 〉

1. はじめに

日本物理学会春季大会期間中に Jr. セッションを開催していることはご存じの方も多いただろう。Jr. セッションでは、中等教育（高等学校、高等専門学校（3年生以下）、中学校）の場において、物理を中心とした理科の研究を行っている生徒に口頭発表あるいはポスター発表をしてもらう。そして、大会参加会員、Jr. セッション参加の他校の生徒と引率の先生方との議論、交流をもとに物理の考え方、研究の進め方に触れてもらい、視野を広げ、生徒の研究の発展と心の成長に寄与することを目指している。

Jr. セッションは、2005年の年次大会において初めて開催され、今年（2015年）で10周年を迎えた。この期に、これまでの10年間を振り返るとともに、Jr. セッションの現状、および現在抱えている課題を見つめ、今後の進むべき道について考えたい。

2. Jr. セッションのはじまり

Jr. セッションは、アインシュタイン奇跡の年100周年を記念した2005年世界物理年に、本会の世界物理年委員会事業の一つとして企画された。¹⁾ 物理を学ぶ楽しさを伝えること、それに中等教育と本会との架け橋の基礎となることを目的として、第60回年次大会（東京理科大学野田キャンパス、2005年3月24日～27日）第3日目午後実施された。²⁾ 本会としては、高校生などの研究発表の場を設けた初めての試みであった。

実施は、物理教育分科を中心に募った実行委員、それに事務局と日本宇宙フォーラムの協力により行った。広報は、物理教育関係者への口コミ、本会ホームページ、それに主な高校にポスターとチラシの送付により行った。応募は31件であった。当初、1次審査合格者に口頭発表を行ってもらうことを想定していたが、実行委員会での議論により、提出レポートから伝わる情熱を大切に、9件を口頭発表とし、それ以外の22件をポスター発表とした。

口頭発表とポスター発表は、委員が予想していたよりはるかに高度でしっかりとした内容であった。日頃指導されている先生方の努力の賜物であろう。優秀者に対し、大賞（1件）、優秀賞（2件）、奨励賞（6件）、それに世界物理年日本委員会から特別賞（1件）を贈った。大賞は、三滝雅

俊（立命館高校）「水によってタイル間に生じる力：光触媒を使うとくっつく力は強くなる」であった。動機、装置の自作、先行研究調査、考察、プレゼンテーションのいずれもすばらしく、和達三樹会長（当時）が「彼は何者なんだ」と驚きの言葉を発されたことを覚えている。

3. 継続されることとなった Jr. セッション

Jr. セッションに引率参加された先生方からの意見やアンケート結果から、世界物理年事業1回限りではなく継続希望がみられたことを理事会に報告した。Jr. セッション継続の可否は、物理教育委員会において審議され、その答申をもとに理事会が継続を決定した。理事会は、Jr. セッション委員会を設置し、この委員会が Jr. セッションに関わる審議と経費削減も考慮した実務を担うこととなった。

Jr. セッションは、物理教育分科だけが担うのではなく学会全体で担う業務であること、その雰囲気づくりのため素核宇ビームと物性の計19の領域代表に第1次審査に関わっていただくこととなった。また経費削減のため、実施は学会内部で行うこととした。賞を贈ること、順位付けを行うことの議論から、口頭発表に選ばれた研究はすべて優秀賞とし、ポスター発表は選考によりポスター優秀賞とした。

第2回 Jr. セッションの応募は33件（高校32件、中学校1件）であり、第61回年次大会（愛媛大学・松山大学、2006年3月27日～30日）3日目午後、愛媛大学グリーンホールで開催された。³⁾ 書類選考により、口頭発表を10件、ポスター発表を23件とした。プログラムは、口頭発表5件、ポスター発表、口頭発表5件、講評・表彰式とした。高校生向け講演会は行わなかった。

4. 定着に向けて

2007年度の年次大会は秋開催となるため、Jr. セッションの開催をいつにするかが議論となった（本会の大会運営には、北海道大学が開催地となる年度の年次大会は秋季となるの慣例がある）。Jr. セッションを秋の年次大会開催とすると高校等の授業期間と重なるため春季大会とすることはすぐに決定できたが、素核宇ビーム領域と物性領域のいずれの大会で開催するかは決定は困難であった。結局、会長の所属する大会とした。

また、表彰することに対して慎重論もあったが、引率の

[†] 日本物理学会 Jr. セッション委員会

表1 第3回～第11回Jr.セッションの開催地、開催日、最優秀賞一覧。第4-6回については文献4-6も参考のこと。

回数	開催場所	開催日	最優秀賞	
			受賞者	受賞テーマ
第3回	首都大学東京	2007年3月27日	島根県立松江東高校	宍道湖の蜃気楼の分析
			奈良女子大学附属中等学校	0からつくる：みかんで動く新しいロボットの開発
第4回	近畿大学	2008年3月25日	広島大学附属高校	コーヒーマーカーのガラス容器内に液滴ができるのはなぜか
			茨城県立水戸第二高校	銅金属葉のフラクタル成長とボロノイ分割
第5回	立教大学	2009年3月28日	静岡県立清水東高校	蜃気楼モデルと屈折率分布の研究
第6回	岡山大学	2010年3月21日	茨城県立水戸第二高校	化学振動はどのように止まるのか
第7回	新潟大学	2011年7月24日	高知工高专	分粒現象に関する研究：長時間観測システムの製作と観察
第8回	関西学院大学	2012年3月24日	鹿児島県立錦江湾高校	桜島の噴火に伴う火山雷の特性評価とそのモデルの提唱
第9回	広島大学	2013年3月27日	広島県立広島国泰寺高校	水噴流による水輸送増進効果
第10回	東海大学	2014年3月28日	大阪府立春日丘高校	反磁性磁化率をはかる：永久磁石による磁場勾配力と重力とを直交させた測定法の開発
第11回	早稲田大学	2015年3月22日	福岡県立小倉高校	「レオナルドの橋」を人が渡れるか

先生によるきちんとした評価を行っていただきたいとの意見、それに表彰は高校生等の成長につながると考え、最優秀賞、優秀賞、奨励賞を授与することとした。

それに加えて、①ポスター発表をプログラムに組み入れること、②表彰のための評価会議の時間を確保すること、③参加生徒向け講演を行うことが方針として決まった。これらのことから開催時間を午後のみから終日とした。また、会員にJr.セッションの内容を知っていただくため(大会参加会員の参加が容易となるように)Jr.セッションプログラムを大会プログラム冊子に掲載するようにした。

第3回から第11回までのJr.セッションの開催地、開催日、最優秀賞を表にした(表1)。これらの最優秀賞受賞者は、すべて理科部、科学部、あるいは物理部などで活動してきた生徒たちであった(第1回の大賞受賞は個人研究であった)。最優秀賞のテーマを見ただけでも、じつに多様であることがわかるだろう。このような多様性が本会Jr.セッションの特徴であり誇るべき点であると考えている。受賞対象の学校、テーマも多様である。また身近な物理に関する発表も確かに多いが、その中には審査委員が発表を聴いて初めて知る物理現象も多い。そして、それらの現象の観測をもとに推論を立て、その推論を検証するさらなる実験を行っている。そのような発表からは審査委員も大いに刺激を受け、興味がそそられる。またこの表から、水戸第二高校は2度受賞であるが、全体として西高東低であることもわかる。

特記事項を少し記す。第6回での最優秀賞は、小沼瞳ほか(茨城県立水戸第二高校)「化学振動はどのように止まるのか」であったが、この研究は、会場でコメントをした会員の薦めもあって論文として掲載された。⁷⁾

第7回は、第66回年次大会(新潟大学、3月25日～28日)の2日目、口頭発表13件とポスター発表18件で実施する予定であった。しかし、年次大会が東日本大震災の影響により中止⁸⁾となり、Jr.セッションは延期され、およそ4か月遅れて年次大会が開かれるはずであった新潟大学におい



図1 Jr.セッションのこれまでの発表件数および参加校数の推移。

て開催された。⁹⁾ 実施予定であった3月では高校3年生の発表予定者の発表を可とするなどしたが、口頭発表9件、ポスター発表12件、ポスター掲示のみ3件となった。延期したにもかかわらず130名ほどの参加があり、元気なJr.セッションであった。

第11回は、口頭発表10件、ポスター発表67件であった。¹⁰⁾ 発表件数においても、参加生徒数において過去最高の270名であった。

これまでの発表件数および参加校数の推移を図1に示す。¹¹⁾ 特に近年、発表件数が急激に増加していることがわかる。これは、高校で2012年からカリキュラムが変わって理科教育が重視されるようになったこと、2002年より始まったスーパーサイエンス高校(SSH)の影響があること、不況により将来の就職を中高生のうちから特に保護者が考えるようになり理工系志望者が増えたことなどが考えられる。

5. 現状

発表件数の増加に対応するため、2014年度委員会において審査方法を一部変更した。2014年までは1次審査はJr.セッション委員会委員25名と各領域代表19名からなる

全審査委員がすべての応募レポートを審査する形で行ってきた。このため2014年は審査委員一人が50件以上の審査を行うことになり、審査委員に極めて多大な労力を要求することとなった。また、この段階では、提出されたレポートの完成度はそれほど高くなく、これも審査委員の労力を増す。このような状況に対応するため2015年からはより多くの審査委員の方に1次審査をお願いし、かつ各審査委員の担当件数に上限を設けた。これにより応募研究全体を把握することは難しくなったが、各応募レポートをより詳細に検討することができるようになったと考えている。また中高生の研究は指導される熱心な先生方のご努力によって可能となっている。そのため2013年からそのご努力を称えるため物理教育功労賞を設け、これまで13名の中学・高校の先生方に授与している。

1次審査の対象となるレポートはその段階では完成度がそれほど高くないものも多い。これは論文形式に不慣れた生徒が多いこととともに、高校までの国語教育にも大きな問題があるのではないかと考えている。しかしJr.セッション当日の発表は内容とともにそのプレゼンテーション能力、議論の仕方などのすばらしさに驚かされるものが多い。会員からの厳しい質問にも怯むことなく、しっかりと自分たちの研究のオリジナリティを主張し、また他校の近い研究を行っているグループとは詳細な議論を行っている。レポート提出から発表までの短期間での発展は伸び盛りの中高生の成長の速さを示すものであるとともに、物理学会Jr.セッションよりも前に他の場で発表しているものも多く、経験を積んだ成果もあると考えられる。そして発表する生徒も議論する生徒も、大いに楽しんでいる。¹²⁾

6. 今後の課題

ここまで、これまでのJr.セッションを振り返り現状を報告してきた。ここで現在の課題を考えてみたい。まず第1にあげられるのが時間の不足である。先にも記したように生徒たちはお互いの間の議論を楽しんでいる。そのような議論を奨励するため今回から近いテーマのポスター発表は近い場所で行ってもらおうようにした。しかし、その議論の時間がなかなかとれないのである。特に遠方からのポスター発表への参加校は参加者も少ないため自分たちの発表にかかり切りになり、他校のポスターを見に行けず議論もできない。また口頭発表においては限られた時間のため、議論の時間も制約を受ける。

本会のJr.セッションでは、参加校と生徒の奨励のため賞を与えているが、審査委員は会員であり、大会では自らの講演を行い、関連の講演も聴かなければならない。Jr.セッションの開催日数を増やすのは現実的ではないと思われる。何とか一日に納め議論の時間も多くとるため、口頭発表の件数を減らし、ポスター発表を2部制にするなどの案が考えられる。また、全発表が終わった後の最終審査は参加生徒が特別講演を聴いている間に行っているが、これ

の時間的制約も厳しく、実際、審査が間に合わずスケジュールが遅れることが何度もあった。効率的な審査方法の確立も課題である。また、審査基準も問題である。Jr.セッションにおいてどのような内容をよしとするかは審査委員の物理の考え方、価値観に依存する部分もある。しかし審査する限りは客観性が必要である。現在はその客観性を担保するため、一件あたりの審査委員の数をある程度確保し、いわば大数の原理によって客観的な審査が保証されることを期待している。しかし、研究の価値が多数決で決まるわけではない。そのため審査委員特別賞を設けて対応しているが、その賞の選考基準が問題となる。対象となる研究もSSH校などで大学の指導を受けているものや、先輩から何代にもわたって同じテーマを掘り下げて研究を行っている場合もある。それらをどのように評価するかは各審査委員の判断に任せられ、それなりにうまく機能しているように思われるが、今後より一層発表件数および審査員の人数が増えると再考が必要かもしれない。現在、前回のJr.セッション参加者を対象にアンケートを実施しており、それも参考に今後の進め方を考えていきたい。

このように現在、いくつかの課題を抱えてはいるものの、本会のJr.セッションは概ね成功しているといえるだろう。では今後はどのような方向へ進むべきであろうか。上記の課題の克服は当然、果たさなければならない。それとともに物理学会の中でのJr.セッションの位置づけも考える必要があろう。本会理事会では現在Jr.会友制度の導入を検討中である。これはJr.セッション参加者を中心として、物理への興味を育み物理あるいは広く自然科学に理解のある人を一人でも多く育てようという趣旨に基づく制度である。Jr.セッションやJr.会友制度により大学において物理を志望する人、ひいては物理学会会員が増えればそれに越したことはない。しかし、Jr.セッションは単に物理志望者を増やすことを目的とするべきではないと考えている。Jr.セッションへ向けての研究、レポートの作成、発表の準備、参加などを通して受けた刺激、論理的な考え方が、中高生が将来どのような道に進もうと必ず役に立つものとなることを目的とすべきであろう。

現在、Jr.セッションでは発表する生徒たちもそれを聴く我々物理学会員もJr.セッションを楽しんでいる。そのようなことが可能であるのも、様々な現象もしっかり実験・観察を行い基礎に戻って論理的に考えていけば中高生も我々と同じ土俵の上で議論ができるという物理という学問の力であろう。中高生と我々お互いへの刺激、楽しさ、多様性、そしてそのような物理の力を広く知ってもらうことは今後とも大切にしていきたいと考えている。

これからの10年で日本の社会、この世界がどのように変わっていくか、まったく予断を許さない。しかし、現象をしっかり観察しそこから推論を立てそれを検証する、その成果を論理的に他者に伝える、という力が今後ますます重要となることは間違いのないであろう。今後10年の内に

はJr.セッションを通してそのような力を育てた人たちが社会の様々な場所で活躍し、またJr.セッションの審査員にも加わってくれることを期待している。

Jr.セッションに参加され、ご指導をされた先生方、それに後援して下さった開催地の教育委員会、審査等にご協力いただいた学会員の皆様に感謝いたします。会員の皆様には参加等を通じて一層のご協力をいただければ幸いです。またホームページもご覧いただければありがたく存じます。¹¹⁾

参考文献

- 1) 並木雅俊：日本物理学会誌 **59** (2004) 855.
- 2) 並木雅俊：日本物理学会誌 **60** (2005) 415; 澁谷 聡：大学の物理教育 **11** (2005) 81; 武石みゆき：大学の物理教育 **11** (2005) 83.

- 3) 並木雅俊：日本物理学会誌 **61** (2006) 536.
- 4) 江尻有郷：日本物理学会誌 **64** (2009) 129.
- 5) 北本俊二, 並木雅俊：日本物理学会誌 **65** (2010) 356.
- 6) 味野道信, 並木雅俊：日本物理学会誌 **66** (2011) 936.
- 7) H. Onuma, A. Okubo, M. Yokokawa, M. Endo, A. Kurihashi and H. Sawahata: J. Phys. Chem. A **115**(49) (2011) 14137—Rebirth of a Dead Belousov-Zhabotinsky Oscillator.
- 8) 並木雅俊：日本物理学会誌 **66** (2011) 593.
- 9) 北本俊二, 松尾正之：日本物理学会誌 **67** (2012) 406.
- 10) 松川 宏：日本物理学会誌 **70** (2015) 585.
- 11) 日本物理学会 Jr. セッションホームページも参照のこと。
<http://www.gakkai-web.net/butsuri-jrsession/>
- 12) 参加した生徒から受けた質問をまとめて回答集をつくった。
<http://www.gakkai-web.net/butsuri-jrsession/2016/answer.html>
日本物理学会編：『知っておきたい物理の疑問 55』(講談社ブルーバックス, 2011).

(2015年6月8日原稿受付)

上田和夫 (JPSJ編集委員長)

無磁場でも現れるグラフェンのホール電流

グラフェンのフェルミ準位付近の電子はニュートリノと同じWeyl方程式に従って運動する。この系に基板の効果などによりバンドギャップができると、電子がギャップに比例した有効磁場を受け、無磁場にも関わらず、ホール効果が発生する。誘起されるホール電流はブリュアン域のK点とK'点の寄与が互いに逆方向を向いているため、通常のホール測定では観測できないが、非局所抵抗などによりその存在が確認される。最近、この谷ホール伝導率が不純物散乱により大きく増大し、散乱強度の弱い極限が散乱のない場合と全く異なることが理論的に明らかになった。

グラフェンは炭素原子が六角形のハチの巣格子に並んだ単原子層物質である。有効質量近似あるいは $k \cdot p$ 近似によると、グラフェンのフェルミ準位付近の電子の運動は、質量ゼロの相対論的粒子であるニュートリノと同じWeyl方程式で記述される。この方程式はディラック方程式の相対論的な極限(静止質量が無視できる)に相当するため、ディラック・フェルミオンあるいはディラック電子とも呼ばれる。この粒子はカイラリティを持つために、通常は単一で存在することができず、必ず異なるカイラリティの粒子と対で存在する。グラフェンの場合、この対は六角形のブリュアン域の頂点K点とK'点付近の状態に対応する。シリコンやゲルマニウムなどの多谷構造半導体の場合と同様に、それらは谷とも呼ばれる。

ハチの巣格子の単位格子に含まれる2個の炭素原子をA, Bとする。通常、A, Bは等価であり、その場合、図1(a)に示すようにフェルミ・エネルギー付近で円錐状の分散($\epsilon = \pm \gamma k$, ϵ はエネルギー、 k は波数、 γ は速度に比例するパラメーター)を持つ。一方、適当な基板の上では、それら

が等価ではなくなり、A, Bの間にポテンシャル差が生じる。それを 2Δ とすると、図1(b)に示すように、 $2|\Delta|$ のギャップが生じる。

この場合に、電子の速度演算子に対する運動方程式を計算すると、通常の相対論的ディラック方程式で現れるZitterbewegungを表す項と、 Δ に比例する有効磁場によるローレンツ力を表す項が得られる。前者はバンド間光学遷移を引き起こす。一方、後者のために、電子は、磁場がないのに、サイクロトロン円運動を行う。したがって、電界を印加し電流を流すと、電界と垂直方向にホール電流が流れる。ただし、K点とK'点では有効磁場の方向が逆になるため、ホール電流の方向も逆になり、通常のホール効果のように、電流垂直方向にホール電圧が発生することはない。無磁場で発生するK点とK'点のホール伝導率を谷ホール伝導率、その現象を谷ホール効果と呼ぶ(トポロジカル・ホール効果と呼ばれることもある)。

ギャップ中のホール伝導率が $\pm e^2/2h$ に量子化されることは、1984年の石川健三氏の計算などによりすでに知られていた。散乱体などのない理想的な場合、バンド内ではエネルギーに反比例してホール伝導率が減少することが簡単な計算で分かる。最近、この谷ホール伝導率に対する不純物散乱効果の詳細な理論解析が行われ、日本物理学会が発行する英文誌JPSJの2015年11月号で報告された。それによると、バンド内での谷ホール伝導率は散乱体の存在により大きく増大し、ギャップ中の $e^2/2h$ を大幅に上回る最大値をとったのち、緩やかに減少する。さらに、この増大は散乱体の強度あるいは濃度が零の極限でも存在し、散乱体がないと仮定した結果と全く異なっている。もちろん、実際の系には必ず散乱体があるので、散乱体がない場合の

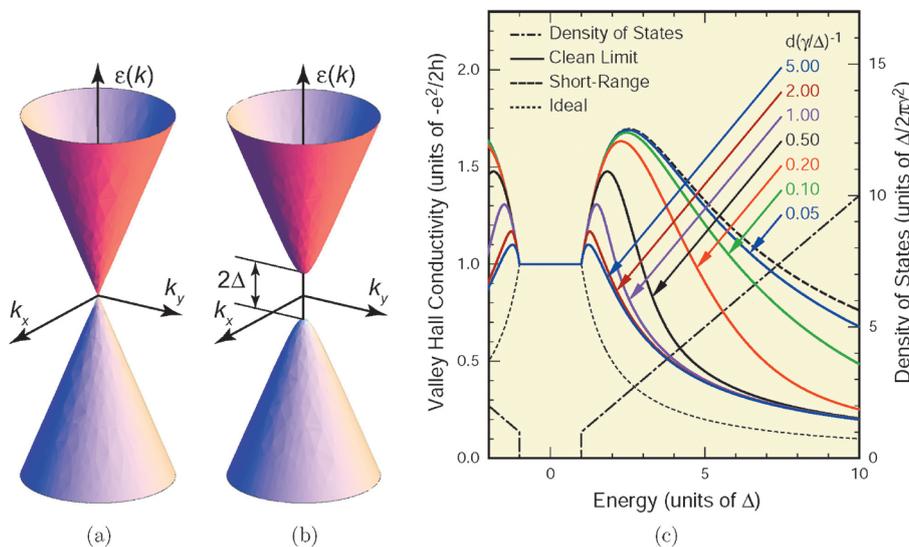


図1 (a) グラフェンの円錐状の分散関係。(b) 単位格子のA, B炭素原子の間にポテンシャル差 2Δ を導入したときの分散関係。 $2|\Delta|$ のギャップが生じる。(c) 到達距離 d のガウス型ポテンシャルを持つ散乱体の場合の弱散乱極限における谷ホール伝導率。ギャップ中では $e^2/2h$ に量子化される。バンド内では全く散乱体を仮定しない場合(点線)に比べて大きく増大する。

結果は正しくない。

図1(c)は到達距離 d のガウス型ポテンシャルを持つ散乱体の場合に、その散乱強度が小さい極限の谷ホール伝導率である。バンド内ホール伝導率は短距離散乱体の場合に最大で、到達距離の増加に従い減少するが、長距離散乱体の極限でも散乱体がない場合とは大きく異なっている。このように、散乱体が全く存在しない場合と、存在するがその強度をゼロにした場合とで結果が異なるのは、輸送係数ではあり得ることである。たとえば、半導体スピントロニクスで注目されている2次元Rashba系でのスピン・ホール伝導率はその一例である。スピン・ホール伝導率は散乱体が全くないと仮定するとユニバーサルな非零値となるのに対し、散乱体の存在を仮定すると完全に消失し、それは散乱強度を零にしても変わらない。したがって、Rashba系ではスピン・ホール伝導率が存在しない。

谷ホール効果は、通常のホール効果の測定方法では観測できない。しかし、スピン・ホール効果が逆スピン・ホール効果により観測できるように、谷ホール効果も非局所抵抗の測定によって観測することができ、その実験結果の例も報告され始めている。単層グラフェンでは、ほぼ同一の格子定数を持つBN基板を用いて小さいギャップを生じさせ、非局所抵抗で谷ホール効果の存在が確認されている。また、2層グラフェンでは面垂直方向の電界でギャップを発生させ、非局所抵抗が観測されている。もちろん、何らかの方法でK点とK'点の電子密度が異なる谷分極を引き起こすことができれば、谷ホール伝導率をホール測定で直接観測することも可能である。実際、新しい原子層物質である MoS_2 では、光により谷分極を引き起こすことにより、谷ホール効果が観測されている。

谷ホール効果はグラフェン特有の興味深い物性と密接に関係している。たとえば、後方散乱の消失やKleinトンネル効果を引き起こす非自明なベリー位相、ベリー曲率と有効磁場、デルタ関数特異性を持つ反磁性帯磁率、ギャップの符号の異なる境界の1次元伝導チャンネル、ギャップ(質量項)による谷内時間反転対称性の破れ、などがあげられる。上記以外にも、グラフェンにはまだ明らかにされていない新しい現象がありそうである。もちろん、谷ホール伝導率が存在するときの電流分布の問題などもこれから明らかにしていく必要がある。

原論文

Theory of Valley Hall Conductivity in Graphene with Gap

T. Ando: J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 114705.

〈情報提供：安藤恒也(東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻)〉

News and Comments

Valley Hall Conductivity in Gapped Graphene Enhanced by Scattering Even in the “Clean Limit”

M. Yamamoto: JPSJ News and Comments **12** (2015) 11.

バクテリアの紐状成長における複雑な折り畳み過程の定量化

納豆菌を仲間とする枯草菌を寒天上で培養すると、美しいフラクタル成長パターンが見られる。どのようなプロセスを経て、ミクロなバクテリア細胞からマクロなフラクタル構造が形成されるのであろうか。枯草菌はある環境下において、細胞分裂を繰り返すものの、細胞の分断は起こさず、1本の細長い紐状に伸びていく。指数関数的に長さを増すこの細胞鎖は、折り畳み過程を繰り返しながら次第に寒天培地上を覆い尽くしていく。中央大学理工学部の本田(大学院生)らは、ビデオ画像を丹念に調べ、この折り畳み過程の定量化を行い、非線形微分方程式系での記述に成功した。

系の対称性、すなわち変換に対する不変量の研究は物理学における中心課題の一つである。時間経過、空間並進、および回転はいずれも変換と見なせるが、これらの変換に対する不変量がそれぞれエネルギー、運動量、および角運動量に他ならない。フラクタル(自己相似)図形と、連続相転移に伴う臨界現象は、縮小や膨張といった系のスケール変換に対して不変な(あるいは共変な)系として特徴付けられる。図1はシャーレ内の寒天培地上に接種した(納豆菌を仲間とする)枯草菌のコロニー成長に見られるパターンの写真である。この画像データから、フラクタル次元とよばれるスケール不変量を見積もることにより、バクテリアのこの美しい成長パターンは拡散律速凝集過程(DLA)と同じユニバーサリティー・クラスに属することが実験的に検証されている。しかし、極端に小さなスケールではスケール不変性は破れるはずである。バクテリア・コロニーは、所詮ある大きさの細胞の集まりだからである。(枯草菌は直径0.5~1.0ミクロン、長さ2~5ミクロンの棒状の細胞からなる。)それでは、ミクロなバクテリア細胞の集まりから、どのようなプロセスを経てマクロなフラクタル構造が形成されるのであろうか。

バクテリアを寒天培地に接種すると、誘導期とよばれる不活性期間を経たのち細胞分裂を始め、指数関数的に細胞

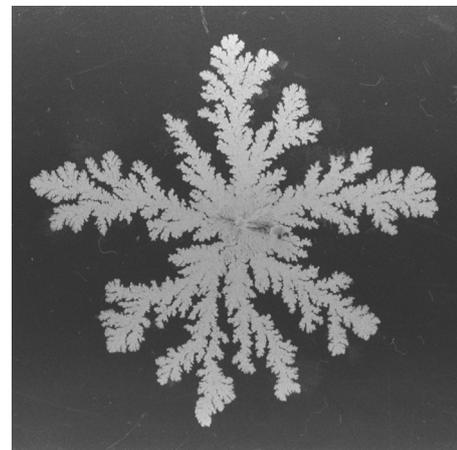


図1 枯草菌コロニーの示すDLA的フラクタル・パターン。

数を増やし(対数期),最終的には細胞数が飽和した定常期に至る.枯草菌は,寒天は固いが栄養は豊富であるような環境下では,対数期において一定の倍加周期で細胞分裂を繰り返すものの,細胞の分断は起こさず,寒天培地上を1本の細長い紐状に伸びていくことが以前から知られていた.その途中で複雑な折り畳みが繰り返され,ある場合には特異な高次構造が形成される.特に,アリゾナ大のメンデルソンらは,彼らがマクロファイバーとよぶヘリックス構造の形成とその運動を長年に亘って研究していた(例えば,Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 1627参照).中央大学理工学部の松下・脇田研究グループは,フラクタル物理学の観点からバクテリア・コロニーのパターン形成を系統的に研究してきた.過去の一連の論文においても,しばしば枯草菌培養初期の紐状成長に関する記述が見られる.光学顕微鏡による鮮明なビデオ撮影もなされていた.全長が指数関数的に伸びる一繋りの細胞鎖が折り畳み過程を繰り返しながら,次第に寒天培地上を覆い尽くしていく様子が記録されている.1次元構造から2次元平面上のフラクタル構造が自己組織的に形成されるプロセスをどのようにして定量的に捉え,物理として記述することができるのか,根本的問題であった.

最近,中央大学の本田らは,対数期初期におけるビデオ画像1枚1枚を丹念に調べ直すことを始めた.細胞鎖の画像から手作業で「一筆書き」の曲線をトレースし,折り畳み過程の結果,各時刻で2重線になっている部分の長さ,3重以上になっている部分の長さを,その時点でまだ折り畳みが生じていない単線部分の長さとともに測り,数値データに整えた.すでに周囲で形成されている複雑な折り畳み構造を「平均場」と見なし,その中において,図2に示したいくつかの単純な素過程だけに着目するという粗視化を行い,単線,2重線,および3重以上の部分の長さの時間発展を記述する非線形方程式系を考案した.その解析的な積分解は,いくつかのパラメータ・フィッティングを行うことにより,上述の実測データをよく再現することができた.フィッティングで得られたパラメータの値は,図2で示した素過程のうち,[2]や[3]といった副次構造への遷移率に単純な法則性があることを示唆する.この成果は日本物理学会が発行する英文誌JPSJの2015年11月号に掲載された.

図2の折り畳み素過程は,遺伝情報ではなくマクロな力学法則によって生物の形や運動の仕組みを解明しようとするバイオメカニクスで実現できるかもしれない(和田浩史(立命館大学理工学部):日本物理学会誌**68**(2013)612参照).またこの図は,バクテリアといった生物系を離れて,平面上に置かれたワイヤーのたわみ形状の相図に関する

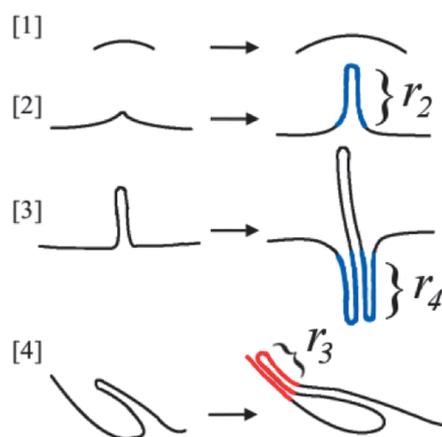


図2 細胞鎖の折り畳み過程における素過程.

チューリッヒ工科大のストゥープらの論文(Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 094101),マサチューセッツ大のデメリーらの薄膜の折り畳み動力学の論文(Phys. Rev. E **90** (2014) 042401),あるいは,パリ高等師範学校のレヒノウトらの「折り紙」の力学に関する研究論文(Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 244301)に掲載されている写真や図を思い起こさせる.相転移・臨界現象の研究は,動的臨界現象の解明を経て,現在,非平衡系においても著しく進展している.同様に,フラクタル物理学もそのダイナミクス解明へと発展していくのであろう.

原論文

Self-elongation with sequential folding of a filament of bacterial cells

R. Honda, J. Wakita and M. Katori: J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 114002.

〈情報提供:香取眞理(中央大学理工学部)
脇田順一(中央大学理工学部)〉

News and Comments

Living Filaments All Over the Surface

H. Wada: JPSJ News and Comments **12** (2015) 12.

ここでは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2015年9月に掲載可となった中から2015年10月の編集委員会が選んだ“Papers of Editors' Choice”(JPSJ注目論文)を紹介しています.なお,紹介文は物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」でも公開しています.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,合わせてご覧下さい.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.

特集：超対称ゲージ理論の構造

量子力学では同種粒子が区別できませんが、二つの粒子について状態が対称的なボース粒子と、反対称的なフェルミ粒子があります。このボース粒子とフェルミ粒子の間の対称性が超対称性です。現在のエネルギーでの実験結果からは超対称性を示す実験事実は得られていませんが、超弦理論や標準模型を超える統一理論で重要な役割を果たすと予想されています。

場の量子論は量子電磁力学や電弱統一理論の成功に見られるように、結合定数が小さい場合には、結合定数のべき級数展開を用いた摂動論によって、実験事実との見事な一致が得られています。しかし、結合定数が大きくなった場合にどのように非摂動的な効果を取り入れるかという問題は場の量子論の現段階での最重要課題のひとつです。超対称性を持つ理論を考えることで、この非摂動効果に関して今まで他の方法では得られなかった重要な成果が得られました。本特集は、超対称ゲージ理論での非摂動的取り扱いの最近の進展、特に我が国の研究者による重要な貢献を取り上げています。

この10年間程で超対称性ゲージ理論の研究には大きな進展がありました。場の量子論を経路積分で表すと、しばしばその積分に連続的な対称性が働いています。その時、積分の値を対称変換の固定点からの寄与の和で表すことができる場合があります。これを局所化 (localization) の方法と呼んでいます。特に、超対称理論では、超対称性の一部を保ちながら理論を変形しても超対称性に守られている物理量の値は変形パラメータに依りません。この事実を用いて計算しやすいパラメータ領域で評価することにより、経路積分の値が固定点からの寄与だけで厳密に表せ、局所化の方法で厳密な答えが得られます。こうした固定点からの寄与の和は一般に組み合わせ論的な表式で記述することができます。

1982年にWittenはモース理論を超対称理論に応用して、積分の寄与が変換の固定点だけで厳密に得られることを示しました。曲がった時空でもこの方法を適用できるように、曲がった時空での超対称性の定式化が近年工夫されました。Wittenのモース理論の応用を曲がった時空上の超対称理論へ一般化したのが局所化の方法と考えられます。また、この局所化の方法を共形不変な理論に適用すると、理論のindexを求める計算にも応用することができます。超対称性を部分的に保存する状態をBPS状態と呼びます。このBPS状態を数え上げる際に、超共形理論のindexは重要な情報を与えます。局所化の方法を用いてNekrasov, Pestun, Kapustinなどは様々な次元の超対称ゲージ理論で理論を厳

密に解き、その非摂動的な振る舞いを明らかにしました。

数年前にはAGT (Alday-Gaiotto-Tachikawa) 予想と呼ばれる、2次元リュービル理論と4次元超対称ゲージ理論の新しい双対関係が発見されました。2次元理論と4次元理論の間に理論の繰り込みまで含む正確な対応関係が見つかったのは初めてで、この発見は大きな反響を呼びました。4次元のSeiberg-Witten理論を超弦理論のブレーン構成で解釈する手法では6次元の基礎理論が2次元のリーマン面に巻き付いて、2次元リュービル理論と4次元Seiberg-Witten理論に分離します。このとき、ゲージ理論のS双対性がリーマン面の写像類群に対応するため、4次元理論と2次元理論の双対関係が現れるものと考えられます。また、リュービル理論の相関関数が行列模型を用いて記述されることは良く知られていますので、これを通じて行列理論の有効ポテンシャルとSeiberg-Witten理論の有効ポテンシャルが一致することが推測されます。

この特集企画ではこうした一連のゲージ理論の新しい発展に重要な寄与を行った細道, 今村, 立川, 糸山, 吉岡氏の招待論文を掲載しました。また、M理論との関係で特に重要なABJM理論 (物質場と結合した3次元Chern-Simons理論) について、最近そのインスタントン振幅を無限次にわたって足し上げるという重要な結果を得た初田, 森山, 奥山氏のレビューも掲載しました。

原論文

The localization principle in SUSY gauge theories

K. Hosomichi: Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 11B101. doi: 10.1093/ptep/ptv033

A review of the TN theory and its cousins

Y. Tachikawa: Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 11B102. doi: 10.1093/ptep/ptv098

Developments of theory of effective prepotential from extended Seiberg-Witten system and matrix models

H. Itoyama and R. Yoshioka: Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 11B103. doi: 10.1093/ptep/ptv124

Exact instanton expansion of the ABJM partition function

Y. Hatsuda, S. Moriyama and K. Okuyama, Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 11B104. doi: 10.1093/ptep/ptv145

Index calculation by means of harmonic expansion

Y. Imamura: Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 11B105. doi: 10.1093/ptep/ptv167

〈情報提供：江口 徹 (立教大学数理物理学研究センター 特任教授)〉

ここでは日本物理学会が発行している Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) の Invited Papers または Special Section で 2015 年 11 月号に掲載されたものを紹介しています。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すので、参考文献などはな

べく省いています。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 または Special Section 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。

物理教育 第 63 巻 第 4 号 (2015) 目次

特別講演

はやぶさ探査機と小惑星イトカワ：小惑星イトカワの粒子から分かったこと……………野口高明

査読論文

研究報告

永久磁石の“片側磁極”だけを用いたホール効果……………安森偉郎, 他
4°C の水の性質を示す実験……………小川直久, 他
Physics by Inquiry の理念と日本の物理教育への示唆……………石井恭子, 山田吉英

私の工夫

光通信実験セットにおける受光素子としての発光ダイオードの動作状態の測定……………長谷川 誠
小学校教員を目指す学生のための一つの取組み……………平島由美子

企画

企画・物理教育研究の現代の潮流……………編集企画小委員会
物理教育研究の現代の潮流：物理教育研究の国際的な動向と日本の課題……………村田隆紀
若手教師の声：これまでの教師生活を振り返って……………大西ハルカ

《近畿支部特集》

特集にあたって：科学館を基礎とする科学教育……………中田博保
大阪市立科学館を通しての科学教育……………大倉 宏
神戸市立青少年科学館を基礎とする科学教育—実践と提案—……………原 俊雄
京都市における科学館等と連携する科学教育……………八木陸郎
きのくにサイエンスラボ (KSL) の科学普及活動について……………藤田利光
滋賀県における科学館を通しての科学教育……………神山 保
奈良地区における科学館および科学の祭典事情……………見目正克
談話室：光電効果で光子を吸収するのは電子か？……………三門正吾
図書紹介：「先生、物理っておもしろいんですか？」……………石井登志夫
ワンポイント
頭髪を使った帯電実験について……………櫻井勇良
電磁気学は右派優勢？……………藤田利光
大会報告：第 32 回物理教育研究大会 (福岡) 報告……………副島雄児
学会報告：2015 年度 日本物理教育学会 評議員会報告

武谷三男と坂田昌一：交流の一断片

雨宮 高久 〈日本大学理工学部〉

中根美知代 〈日本大学理工学研究所〉

植松 英穂 〈日本大学理工学部〉

武谷三男(1911-2000)が1942年に提示した、「武谷三段階論」¹⁾と呼ばれる科学方法論がある。これは、「物理学の発展が現象論的段階、実体論的段階、本質論的段階という三つの段階において行われる」として、物理学の発展法則を捉えたものである。「歴史の中に先端研究のヒントが見て取れる」とも読み取れる武谷三段階論は、物理学者の関心を物理学史へと振り向かせるひとつの契機となった。そして、武谷三段階論の理解者の一人として、武谷とともに素粒子論グループにおける指導者的役割を果たした坂田昌一(1911-1970)の名を挙げることができる。²⁾

武谷は1911年に福岡で生を受ける。1931年に京都帝国大学へ入学し、1934年には既に構想にあった三段階論の考えに基づき、卒業論文「原子核物理学はどのように研究すべきか」を提出した。^{3,4)}その後、湯川秀樹や坂田と一緒に中間子論の研究⁵⁾に携わったほか、日本科学史学会の創設に際しては発起人の一人となった。⁶⁾終戦後は、鶴見俊輔らと『思想の科学』を創刊したほか、⁷⁾原子力問題にも積極的に取り組み、1953年から1969年には立教大学理学部教授を務めている。⁸⁾

坂田も武谷と同じ1911年に、東京で生まれた。1933年に京都大学理学部物理学科を卒業後、理化学研究所の研究生となるが、坂田と武谷はこの時期に知り合ったとされている。これ以降、大阪帝国大学理学部副手、助手、講師や京都帝国大学理学部講師の職を歴任した坂田は、1942年からは名古屋帝国大学理学部教授に就任し、新制国立大学として名古屋大学(以下、名大)が発足した後も理学部教授の職を務めた。⁹⁾

武谷三男著作集の編集責任者であった星野芳郎は、武谷三段階論の論理をもっともよく理解し把握していたのは坂田であり、彼が提唱した二中間子論(1942年)やC中間子論(1946年)、坂田模型(1955年)等の業績は「素粒子の世界に対する認識が現在どこまで到達しておりどのような段階にあるかを、まことに的確につかんで打ちだした理論である」と論じている。¹⁰⁾また、武谷本人も三段階論に対する坂田の協同は大きく、¹¹⁾彼の「科学史に対する進歩的な御理解も高く評価したい」と述べている。¹²⁾

坂田と武谷は早くから頻繁にやり取りを行っており、坂田が武谷に宛てた書簡は名大坂田記念史料室(SMAL)に保管されている。¹³⁾また、武谷が博士論文を提出したのが名大であることも、坂田と武谷の関係性をうかがわせる。

本稿では、坂田記念史料室や名大中央図書館に所蔵されている書簡や武谷の学位論文を調査して得られた、これまで余り注目されてきていない彼らの交流の一端について紹介する。

1. 武谷による「科学史研究所」創設の提案

坂田記念史料室に残されている1945(昭和20)年9月4日付の坂田が武谷に宛てた書簡¹⁴⁾を見ると、次のような一節がある：

…科学史研究所の件、大いに賛成です。出来る限り御援助致したいと思ひます。富士見へ力学の発達史に就いての講義をしに来て下さる事大変結構で願っても無いことです。今夏休といふ譯でもありませんが戦争の疲労回復のため休暇にふつていますので御都合が附けば月末頃にでも来て頂けると幸ですが、余り早過ぎて御迷惑でせうか。若し来て頂ける様でしたら日程を御知らせ下さい…。この書簡が送付された当時、名大理学部物理学教室は長野県諏訪郡富士見村に疎開し、国民学校内に分室を構えていた。他方、武谷は板橋(東京)にいたため、坂田とは書簡を通しての交流を行っていた。¹⁵⁾なお、同書簡の冒頭は「武谷学兄 御手紙誠に嬉しく拝見致しました」と始まるため、武谷がこれ以前に「科学史研究所」の創設を提案した書簡を坂田宛に出していたことがうかがえる。しかし、同内容に関する武谷→坂田書簡は、坂田記念史料室には所蔵されていないようである。

武谷が「科学史研究所」の創設を坂田に提案した理由だが、この頃の武谷は1942(昭和17)年にニュートン力学の形成過程について分析した結果を論文として発表し、自然認識の論理的な順序としての三段階論の本格的な構築へ向けて邁進している時期であった。¹⁶⁾また一方で、同時期に刊行された天野清¹⁷⁾の著書『熱輻射論と量子論の起源』¹⁸⁾を武谷は以下のように大変高く評価していた：

…ここにまれに見るすぐれた著書を得た事はわれわれの心からの喜びである。…100頁にわたる歴史的解説は天野氏の膨大な史料、蘊蓄、正しい歴史的的方法によってできたオリジナルな研究であってその比を見ないすぐれたものである…。¹⁹⁾

彼は続けて、日本の科学を強行的に前進するためには、着実な科学史研究が緊急に必要であり、天野の研究は「わが国の科学史研究の水準を高めるもの」として喜び絶えない

と評している。

以上から、武谷による「科学史研究所」創設提案の背景には、日本における科学史研究の水準を高め、それがひいては自身の主張する三段階論の裏付けとなり、さらには日本の科学、特に物理学の研究を推進させる起爆剤になるという彼の意図が垣間見られる。

なお、1945年9月17日付の坂田→武谷書簡²⁰⁾には、
…先達名古屋から京都迄足を延ばして来ました。京都はすごい賑ひ方ですが相変わらず食物は駄目です。湯川さんが一度貴兄と連絡したい由言つて居られましたので御住所を御知らせして置きました。この際新日本文化建設のために理論物理学研究所²¹⁾の様なもの建設したい意向の様で貴兄の御意見を話しました所科学史研究もその中へ包含する様に計画したいと言つて居られました…。との記述も見られ、湯川も武谷の科学史研究に理解を示していたことがうかがえる。

2. 武谷による富士見での講演

1945年11月16日、武谷は坂田の依頼を受け、富士見にて力学の発展・形成に関する講演を行った。²²⁾ 同講演に際して、武谷は無給の名古屋大学講師という身分を与えられている。坂田→武谷の1945年10月2日付書簡に同封された公務旅行証明書には、武谷の身分が「名古屋帝国大学理学部講師」と記されている。²³⁾ このことについて、西谷正は「旅費などの便宜をはかるため、坂田の配慮で講師にしたのであろう」と述べている。²⁴⁾ 坂田からすれば、武谷の講演は「今後の研究方針に関する示唆を与えるもの」として捉えていたため、何としても武谷を富士見に招聘したかったようである。そのためか、1945年10月16日付の武谷宛ての書簡では大勢の学生にも武谷の講演を聴かせたいので、5~6時間分の話を用意してほしいと要請している。²⁵⁾

武谷は11月16日に「科学史ノ方法」²⁶⁾と題する講演を行い、翌17日に「物質ト場」²⁷⁾ さらに18日にも「技術論」²⁸⁾について話をしている。坂田のノートには、この時の武谷の講演内容が細かくメモされていた。それによると、「科学史ノ方法」は1942年に発表した論文「ニュートン力学の形成について」に、東京文科大学（現在の筑波大学）物理学科で講義したガリレオ・ガリレイによる動力学の展開についての歴史を併せた内容になっていた。

なお、この時の坂田らの議論を踏まえた結果が、1946（昭和21）年に論文「ガリレイの動力学について」として雑誌『科学』に発表された。また、「物質ト場」、「技術論」の講演も後に論文としてまとめられ、それぞれ雑誌に投稿されている。²⁹⁾

3. 武谷の博士論文

武谷の講演を踏まえてか、1945年の坂田のノートにある「素粒子論研究団の構成」には、武谷の名前を確認でき

る。³⁰⁾ 坂田は武谷が主張する科学史や方法論の研究を理解し、名大理学部物理学教室素粒子論研究室（E研）の研究課題として、武谷指導のもとで「方法論・科学史」を取り上げようとしていた。1947年に教室会議での承認を得て、科学史・科学論研究室（W研）³¹⁾が物理学教室のなかに発足するが、坂田は武谷をW研ではなく、E研の客員教員として位置づけていたのはそのためであろう。

他方、武谷は1949（昭和24）年1月10日に「量子力学の形成と論理」というタイトルで、名大にて理学博士号を取得している。この博士論文取得の経緯については、1949年5月に名大が新制総合大学として発足する際に、坂田が文学部哲学科の中に科学哲学の講座を設けて、職のない武谷を招聘しようとしたことに関係があるという。³²⁾

ところで、武谷の博士論文のタイトルは提出までに何度か変更されていることが坂田の日記から見て取れる。³³⁾ それによると、1948（昭和23）年5月15日の段階では「ニュートン力学の形成過程」というタイトルで、武谷は博士論文を提出する予定であった。そして、論文の構成としては、既に発表されていた「ニュートン力学の形成について」と「ガリレイの動力学について」という2つの論文に、「量子力学の形成と論理」を加えた3稿が上記の順に挙げられていた。しかし、1948年7月29日の記録では、タイトルが「理論物理学の形成の論理」に変更され、主論文の筆頭が「量子力学の形成と論理」に改められていた。これは、武谷の著書『量子力学の形成と論理』³⁴⁾が同年6月に出版されたことで、論文の構成が変更されたためと推察される。その後、10月9日の教授会で学位審査を通過し、武谷は名大にて物理学史に関する内容で理学博士号を取得した第一号となった。なお、名大中央図書館や国立国会図書館等の検索データベースに登録されたタイトルが「量子力学の形成と論理」となっているのは、武谷自身が最終的に提出した博士論文が同タイトルのためであるという。そのため、武谷の博士論文は量子力学史のみを取り扱ったように見えるが、実際にはガリレイやニュートンに関する三段階論をも含めた内容で提出されていた。

4. 交流の一影響：まとめに代えて

以上、本稿では武谷と坂田の交流について、その一断片を見てきた。この後、武谷は集中講義³⁵⁾を名大理学部物理学教室で行ったことはあるものの、同教室の専任教員にはなっていない。一方、名大理学部物理学科・理学専攻科物理学専攻では、「自然科学史」（学部）や「物理学史序説」（大学院）といった講義が1950年代には設置されていた。物理学史に関する講義が物理学科の専門教科として設置されている例はそれほど多くはなく、これらの講義が開講された背景には、本稿で紹介した坂田と武谷の交流がその端緒になったものと考えられる。

最後に本稿執筆に際して、名大の棚橋誠治先生と岡本祐幸先生には坂田記念史料室所蔵史料の調査や史料内容の本

稿掲載に際して御協力および御承諾を頂いた。また、西谷正先生には武谷に関する史料や有益な情報を御教示頂いた。紙面を借りて御礼申し上げます。

文献と注

- 1) 武谷三男の「三段階論」について書かれたものはいくつかあるが、武谷自身の考え方よりも、解説者の解釈が前面に出てきている場合も多い。武谷自身の著作を読むことが、彼自身の論理を正確に理解する上で何よりも求められることを改めて強調したい。そのほか、武谷三段階論の影響については、以下の文献等を参照のこと：南部陽一郎：日本物理学会誌 57 (2002) 2—素粒子物理の青春時代を回顧する；矢野忠：徳島科学史雑誌 (2005) 1—武谷三男と三段階論；牧 二郎：素粒子論研究 63 (別冊) (1981) S-16—素粒子論の発展と哲学；坂田・名古屋模型の展開をめぐって。
- 2) 西谷 正：『坂田昌一の生涯—科学と平和の創造』(鳥影社, 2011) 66-68 頁。
- 3) 武谷三男：『弁証法の諸問題 武谷三男著作集 1』(勁草書房, 1968) 26-27 頁—現代物理学と認識論。
- 4) 西谷 正：日本科学史学会東海支部例会発表 (2015 年 4 月 18 日)—武谷三男の戦前・戦中。
- 5) H. Yukawa and S. Sakata: Proc. Physico-Mathematical Soc. Jpn. 19 (1937) 1084—On the Interaction of Elementary Particles. II; H. Yukawa, S. Sakata and M. Taketani: Proc. Physico-Mathematical Soc. Jpn. 20 (1938) 319—On the Interaction of Elementary Particles. III; H. Yukawa, S. Sakata, M. Kobayasi and M. Taketani: Proc. Physico-Mathematical Soc. Jpn. 20 (1938) 720—On the Interaction of Elementary Particles. IV.
- 6) 道家達将：学術の動向 1 (1996) 58 (特に 59-60 頁)—第 1 回 日本科学史学会の創設。
- 7) 考える人：plain living & high thinking (2009) 43—特集 日本の科学者 100 人 100 冊。
- 8) <http://www.civic.ninohe.iwate.jp/100W/02/010/>—日本の科学者・技術者 100 人 武谷三男。
- 9) 前掲 2), 355-369 頁。
- 10) 星野芳郎：前掲 3), 420 頁—解説。
- 11) 武谷三男：前掲 3), 32-33 頁—現代物理学と認識論。
- 12) 武谷三男：前掲 3), 96 頁—ガリレイの動力学について。
- 13) <http://www.eken.phys.nagoya-u.ac.jp/introduction/sakata/sakata-j.html>—名古屋大学坂田記念史料室。
- 14) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 04 WP 01—坂田昌一→武谷三男書簡 sealed letter Sep. 4, 1945.
- 15) 前掲 2), 102-103 頁。
- 16) 武谷三男：前掲 3), 80-95 頁—ニュートン力学の形成について。
- 17) 天野清の経歴については、以下の文献を参照のこと：計量史研究 29 (2007) 101—特集 天野清生誕 100 周年記念。
- 18) 天野 清：『熱輻射論と量子論の起源：ウィーン、プランク論文集 (科学古典叢書 1)』(大日本出版, 1943)。
- 19) 武谷三男：前掲 3), 77-79 頁—熱輻射論と量子論の起源—天野清訳編 ウィーン、プランク論文集書評—。
- 20) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 04 WP 02—坂田昌一→武谷三男書簡 sealed letter Sept. 17, 1945.
- 21) 広島大学旧理論物理学研究所のこと。同研究所については、例えば次の文献を参照のこと：小長谷大介：日本物理学会誌 68 (2013) 685—三村剛昂と広大理論物理学研究所。
- 22) 西谷の著書には (前掲 2), 114 頁), 武谷は 11 月 17 日に富士見高原に来たとあるが、11 月 16 日にも講演を行っていることから、同日以前に武谷は既に富士見に到着していたと考えられる。
- 23) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 04 WP 03—坂田昌一→武谷三男書簡 sealed letter Oct. 2, 1945.
- 24) 前掲 2), 115 頁。
- 25) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 04 WP 04—坂田昌一→武谷三男書簡 sealed letter Oct. 16, 1945.
- 26) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 01 NB 11—科学史ノ方法 by M. Taketani, dated Nov. 16, 1945.
- 27) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 01 NB 12—物質ト場 by M. Taketani, dated Nov. 17, 1945.
- 28) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 01 NB 13—技術論 by M. Taketani, dated Nov. 18, 1945.
- 29) 武谷三男：前掲 3), 314-326 頁—物質と場の対立；武谷三男：前掲 3), 125-141 頁—技術論。
- 30) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 45 01 NB 20—A memo 素粒子論研究室 (団) 組織。
- 31) 科学史・科学基礎論研究室 (W 研) については、次の文献等を参照のこと：前掲 2), 402 頁；高林武彦：『一物理学者の想い—学問・詩・批評—』(日本評論社, 2000) 187-188 頁；勝木 渥：日本物理学会講演概要集 59 (2004) 319—名古屋大学物理学部科学史研究室 (W 研) の設立事情。
- 32) 前掲 2), 154 頁および 416-417 頁。
- 33) 坂田記念史料室所蔵史料 ID 48 01 NB 01—Notebook "Diary and Schedule: 1948, SHOICHI SAKATA" (Jan. 16, 1948-Mar. 14, 1949)。
- 34) 武谷三男：『量子力学の形成と論理』(銀座出版, 1948)。
- 35) 例えば、武谷は 1972 年に名古屋大学で集中講義を行っている：西谷正氏との私信 (2014 年 4 月 1 日)。

非会員著者の紹介

中根美知代氏：日本大学理工学研究所研究員。ハミルトン・ヤコビ理論の形成過程を中心に、数理学の歴史を研究している。数学科向け数学会教育の整備にも関心を持っている。

(2014 年 4 月 22 日原稿受付)

物理をやめて見えたもの

炭谷 俊樹 〈神戸情報大学院大学〉

私は物理学者の道に挫折、経営コンサルティング会社で10年間経験を積んだ後独立して子ども向けのスクールを設立、その後大人を含めた幅広い年齢での探究型人材の育成に取り組んできた。以下その経緯を振り返ってまとめてみた。物理学の研究を続けておられる読者の皆様からすると、挫折した者が何をと言われかねないが、何らかの参考になれば幸いである。

1. 物理学者としての挫折と経営コンサルタントへの転身

私は小学3年の頃アインシュタインの一般相対性理論に興味を持ち、「重い星の周りは時空が曲がっていて光でさえも曲がるのだ」という話を聞いて頭にそのイメージが浮かび、「なんて美しい理論なんだ!」と感動、「僕もアインシュタインのような物理学者になってノーベル賞をもらおう」と決めた(笑)。その夢はその後20年近く続き、東大理学部物理学科そして大学院に進学して素粒子論を専攻した。子どもの頃からトポロジーに興味があった私は、同期の学生と自主的にトポロジーを勉強しているうちに、Chiral Anomalyとトポロジーが関係あることに気付き、M1の最後の頃、Atiyah-Singerの指数定理の論文をむさぼり読み、Anomalyと指数定理の関係で私の初めての論文を書いた。書いている時は夜も眠れず、食事も食べないようなフロー状態が数日続いた。当時はこういう研究は珍しかったのか素粒子論の世界で話題を呼び、日本物理学会で基調講演までさせていただいた。

一見好調なスタートを切ったように見えた私の物理学者生命はあっという間に終焉を迎えることになる。当時この分野ではE. Wittenが精力的に論文を発表していた。彼の着想や知識は素晴らしく、全く歯がたたないと感じた。なんとかしなくてはと留学することを検討し、米国の大学院にアプリケーションを出した。しかし結果は不合格であった。私は「井の中の蛙」であることを思い知らされた。

反省するに、①視野が狭く物理や数学の理論以外の世界を知らず発想が貧困だった②日本国内しか知らず海外経験がなかった③自分の強みをアピールすることができなかった。の3点があげられる。他の分野の研究をすることや、就職することも検討した。大手メーカーの先輩を訪問したが、仕事の話を通らず、「寿司食わせるからうちに来い」という感じでびんとこなかった。自分が仕事に求めることを「グローバルな活躍の機会が有る」「年功序列ではなく実力主義である」などいくつかの条件に整理し、ゼロベースで探しなおすことにした。その結果出会ったのが経営コン

サルティング会社「マッキンゼー」であった。当時は全く無名であったため、指導教官の藤井保徳先生をはじめ、親も友人も皆「炭谷はおかしくなったのでは?」と心配されたが、私はこの会社は面白い、伸びるに違いないと確信していた。果たして私が入社した1986年から日本支社長の大前研一の本が次々とベストセラーとなり、マッキンゼー、大前研一はマスコミの脚光を浴びた。

2. Problem Solving Approach (PSA)

マッキンゼーと大前研一から何を学んだか。それはProblem Solving Approach (PSA)という手法に尽きる。社会や社内に存在する解決すべき課題を発見し、問題の本質的要因を分析し、解決策を探索する一連の手法であり、その応用範囲はビジネスにかぎらず、一般の社会課題にも適用される。事実の情報を集めて分析する科学的手法である。ただしビジネスは人間が対象なので、自然科学ほどは厳密に検証ができず、かなりの推論や曖昧さを許す。理論物理出身の私としてはつつい厳密性にこだわってしまい、新入社員の時は「お前は細かすぎる」と先輩に怒られたものだが、次第に慣れていった。数学は基本的に小学校で習った四則演算しか使わない。それ以上難しい数学を使うと、とたんに誰もわからなくなるので、たとえ複雑なことであっても、できるだけひも解き、シンプルにわかりやすく伝える工夫はかなり鍛えられたと思う。

当初はビジネスの数学的、科学的側面の方により興味があったが、論理的に正しそうな提案であっても、関わる人のやる気次第でうまく行ったり行かなかったりすることを見るにつけ、次第に人間の気持ちややる気ということに私の興味がシフトしていった。

3. デンマークでの経験とスクール設立

そんな私にとって大きな転機となったのが、2年間のデンマーク勤務である。入社時から海外勤務の機会を狙っていたが、海外でのコンサルティングは言語面、文化面の違いもあり難易度が高く、なかなかチャンスが来なかった。ようやく7年目に北欧事務所勤務のチャンスをもたらえた。2年以上の海外勤務は私が初めてのケースであり、実際に難しいことだらけであったが、とてもよい経験になった。デンマーク人は人との比較や競争を好まず、自分らしさを大切にす。小学中学でのペーパーテストによる成績比較は法律で禁止されている。その結果として人より何かができないからやる気を失うということはなく、子どもから老人まで、また障害者でも皆が活き活きとしている。また社

会問題に対しても誰もが自分の意見をはっきり持っている。私が住んでいた1992-94年頃はEC統合が重要課題であったが、誰もが「自分は賛成、反対、なぜならば」という自分の意見をわかりやすく説明してくれた。

私の長女が2歳から4歳に通った幼稚園も大きな経験となった。私と似てシャイで人と交わりづらかった長女が、私の子ども時代のように「もっと友達と遊びなさい、しゃべりなさい」といわれるのではなく、「あなたは観察力が素晴らしいわね」と認められることによって自信をつけ、自ら主体的に学ぶ探究型学習者となった。その娘は現在カナダの大学で職員として働いている。

帰国後、主体的学びを活かしてくれる幼稚園を見つけられなかった私は1996年、マッキンゼーを退社して「ラーネット・グローバルスクール」という文部科学省無認可のスクールを設立し、探究型の子どもたちを育ててきた。20年近く立ち、その卒業生たちが社会に出て大活躍し始めており、今後ますます楽しみである。

4. 大人の探究型人材育成

一方で子どもの教育に親の影響が大きいことがわかり、1997年から大前研一氏とともに探究型ビジネスリーダーの育成のプログラムの開発に取り組んだ。株式会社ビジネス・ブレイクスルーの事業として行ってきたが、2005年には専門職大学院の認可を受け、私自身は教授に就任した。同年には株式上場となり、上場会社が大学を経営するというユニークな存在になった。2010年には大学の認可も受け、実務型の大学、大学院として発展を続けている。

2010年には探究型人材育成を実施したいという「神戸情報大学院大学」に学長として招聘され、情報技術を活用した社会課題解決を標榜する「探究実践 (Tankyu Practice) : Social Innovation by IT and yourself」というコンセプトでカリキュラム展開した。すると予想外なことにアフリカなどの途上国で大いに評価され、留学生が一気に増えて生徒数は倍以上となった。

最近「グローバル人材、探究型人材、アクティブラーニング」などのテーマでの講演依頼が後を絶たない。

5. 物理学を学んだことは役に立ったか？

この質問をよく受ける。答えはいエスともノーとも言える。コンサルティングや学校経営の仕事の中で、私が最も

評価されたのは「思い込みにとらわれることなく、事実の情報を集め、分析し、本質的な要因を突き止める力」、および「複雑な事象であっても構造的・大局的に捉えて整理して捉える力」であった。この点においては、物の世界を法則や理論で統一的に捉えようとする物理学を学んだことが大いに役に立ったと思う。

一方で、科学的思考、論理的思考については、意外に思われるかもしれないが、コンサルティング会社マッキンゼーで鍛えられたことの方が大きい。日本支社でも鍛えられたし、ヨーロッパで仕事をした時にはさらに深いレベルを求められて苦勞した。

逆にコンサルティング会社で学んだPSAの手法を知っていれば物理学の研究ももっと見通しよく進められたのではと思う。西洋諸国ではPSAのような論理的・科学的な問題解決手法が小・中・高校から教えられており、大学に入った時点で日本と相当の差が付いている。文部科学省もこのことによりやく気づいたようで、大学入試改革などが始まっているが、私はこの教育が数十年は遅れていると感じており、日本企業の経営力の弱さにも影響している。

物理の世界で学べなかったことは、人間の気持ちを扱う部分である。人材育成の成功要因は「何のために学ぶのか」といった動機付けの要素が大きい。競争だけで引っ張ることはできない。自分の夢や達成したいことと結びつけて学ぶ探究型の学びが必要であり、それについてはビジネスや子どもの教育の世界で多くの経験を積むことができた。

物理だけの狭い視野であった私が、他の分野に転身して初めて見えたもの、できたことがあったので、今では物理に挫折したことも糧になったと感じている。

非会員著者の紹介

炭谷俊樹氏： 神戸情報大学院大学学長、ラーネット・グローバルスクール代表、ビジネス・ブレイクスルー大学大学院客員教授。1960年神戸生まれ。アインシュタインに憧れ、物理学者の道を目指すも挫折。経営コンサルティング会社マッキンゼーにて10年間日本企業および北欧企業のコンサルティングに携わる。新人コンサルタント採用・研修の責任者も担当。デンマークの社会や教育に感銘したことがきっかけとなり、阪神淡路大震災後の1996年、神戸で子どもの個性を活かす「ラーネット・グローバルスクール」を創設。企業のビジネスリーダー育成講師も務め、2005年よりビジネス・ブレイクスルー大学大学院経営学研究科教授。2010年からは神戸情報大学院大学学長として探究型教育を実践している。著書：『第3の教育』（角川書店）；『ゼロから始める社会起業』（日本能率協会マネジメントセンター）；『実践 課題解決の新技術』（PHP研究所）。

(2015年8月5日原稿受付)

2015年秋季大会 シンポジウムの報告

領域委員会

([A] 登壇者氏名 [B] 報告)

素粒子実験領域, 素粒子論領域「新発見に迫るフレーバー物理」 戸本 誠 (名大理)

[A] はじめに (齊籐直人: J-PARCセンター/KEK), フレーバー物理の意義と理論的課題 (遠藤 基: 東大理), J-PARCにおける中性K中間子稀崩壊で探る新物理 (南條創: 京大理), J-PARC ミューオンによるフレーバー実験 (東城順治: 九大理), J-PARC ニュートリノ実験の今後 (坂下 健: KEK素核研), B中間子で探る新物理 (石川明正: 東大理), τ で探る新物理 (早坂圭司: 名大KMI), Flavor physics at CERN (中田達也: スイス連邦工科大学ローザンヌ校)

[B] 素粒子物理学の進歩には, 高エネルギー衝突で新粒子を直接探索する「エネルギーフロンティア」と大強度ビームによる精密測定・稀な現象の探索により新粒子の間接的な効果を探る「インテンシティフロンティア」が両輪の役割を果たしてきた。国内で進行中の加速器実験は後者を志向しており, 粒子の種類(フレーバー)が他の種類にわずかな割合で変換する新しい物理プロセスの測定を目指している。その成功には理論家との密接な協力が欠かせない。今回のシンポジウムでは, J-PARC加速器で現在データ収集を行っている実験(KOTO, T2K)と準備中の実験(COMET, DeeMe, g-2/EDM), SuperKEKB加速器のために建設中の実験(Belle-II)の現状と今後の見通しについて, 中堅の研究者による熱のこもった報告が行われた。それに先立ち理論家である遠藤氏から, 10テラ電子ボルトという具体的なエネルギースケールでの新しい物理が様々な粒子のフレーバー変換の測定によっていかにカバーされるかについて明快な講演がなされた。最後に, 欧州で長年研究を続けてこられた中田氏により, CERN研究所で行われているフレーバー物理の実験についての講演があった。CERNのLHC加速器では世界最高エネルギーの陽子陽子衝突による実験が行われている。そこでB中間子崩壊の測定を行うLHCb実験の責任者を務められた中田氏は, CERNで過去に行われたフレーバー実験の歴史から説き起こし, LHCb実験の実現に到る経緯, 実験の最初のフェーズで得られた成果と今後期待される発展について包括的な報告をされ, 風格を感じさせた。(報告: 小松原健(KEK))

素粒子実験領域, 素粒子論領域, ビーム物理領域「国際リニアコライダー計画: 実現に向けて」 西田昌平 (KEK)

[A] ILC計画の現状(川越清以: 九大理), ILCの物理(理論)(松本重貴: Kavli IPMU), ILCの物理(実験)(倉田正

和: 東大ICEPP), ILC加速器(横谷 馨: KEK加速器), ILC施設設計の現状(佐貫智行: 東大理), ILC計画の実現に向けて(駒宮幸男: 東大理)

[B] 本シンポジウムは国際リニアコライダー(ILC)の物理的意義と計画の状況を多くの会員と共有するために企画している。今回はILCに関する有識者会議の中間まとめ公表後の開催となり, 200名を超える出席者でその関心の高さが伺えた。川越氏によるILC計画の現状についての説明に続き, 松本氏と倉田氏による理論, 実験両側面からILCの物理に関する講演があった。松本氏は有識者会議での物理の議論を念頭に講演され, LHCで何も見つからなかった場合でもなおILCは重要であることが言及された。その後横谷氏がILC加速器の開発状況, 特に2年前に提出された技術設計書からの進展を中心に紹介した。ILC加速器が技術的にはすでに建設可能であることが強く示された。続いて佐貫氏により, 北上サイトの地質調査の状況や施設配置案の検討状況が示され, 現地に即した設計が着実に進んでいることが感じられた。最後に駒宮氏により国内外, 産業界, 政界の状況説明があり, 続いてILC承認に向けての必要なステップが示された。以上, 今回はとくに有識者会議での物理の議論や現地施設設計の様子を会員と共有することができ, 充実したシンポジウムとなった。(報告: 吉岡瑞樹(九大理))

理論核物理領域, 実験核物理領域「ドリップライン近傍のハイパー核と不安定核」

肥山詠美子(理研), 萩野浩一(東北大)

[A] はじめに(萩野浩一: 東北大), RIビームを用いたテトラ中性子系の実験的研究(下浦 亨: CNS), 中性子過剰ラムダハイパー核H6Lの研究(福田共和: 大阪電通大), 重イオンビームで探るドリップライン近傍のハイパー核: nnLambda候補を含む最近の結果と将来計画(齋藤武彦: GSI), ヘリウム同位体の励起と核子相関(堀内渉: 北大), 軽い中性子過剰核における共鳴現象(明 孝之: 大阪工業大), Unbound states in neutron-rich nuclei in at SAMURAI(大津秀暁), 軽いラムダハイパー核電磁分光実験により探る ΛN 荷電対称性の破れ(中村 哲: 東北大)

[B] ドリップライン近傍における中性子過剰・陽子過剰原子核の構造の研究は, RIBFなどを拠点として大きく発展を遂げている。一方, ハイパー核物理分野においてもコアの原子核が中性子過剰原子核にラムダ粒子を付加した中性子過剰ラムダハイパー核の研究が数年間において活発に

なされてきている。そこで、本シンポジウムでは、不安定核物理分野とハイパー核物理分野の研究者たちが一堂に介し、それぞれの分野の最近の研究内容を紹介することにより、分野融合を促進することをねらいとして、シンポジウムを開催した。シンポジウムでは、Heアイソトープの理論的研究、テトラ中性子系の実験的発見、酸素アイソトープの最新の実験が報告された。また、ハイパー核分野では、軽い中性子過剰核に Λ 粒子を付加すると、 ΛN 相互作用の引力のために、コアの原子核のエネルギー準位が安定化するという現象を活用して、より中性子過剰原子核の構造を明らかにするという研究が報告された。このように普段はオーバーラップのない2分野が議論することによって、今後の2分野の研究発展が大いに期待される。

実験核物理学領域、理論核物理学領域「スピン・アイソスピン応答研究の新たな地平」 中野健一（東工大院理）

[A] はじめに（上坂友洋：理研仁科セ）、スピン・アイソスピン応答から学ぶテンソル力の凄さ（土岐 博：阪大RCNP、実験）、 π 中間子原子：励起エネルギー 140 MeV のガモフテラー遷移（早野龍五：東大理）、 r -プロセスにかかわる中性子過剰核のベータ崩壊（西村俊二：理研仁科セ）、ミュオンをプローブとした原子核応答（嶋 達志：阪大RCNP、実験）、偏極移行測定による双極子励起モードの研究（若狭智嗣：九大院理）、中性子-陽子対振動（吉田賢市：新潟大院自然）、荷電交換反応による新モード探索（矢向謙太郎：東大CNS）

[B] 原子核応答のうち、ベータ崩壊の研究から始まったスピン・アイソスピン応答の研究は、後に核内のパイオン自由度等との密接な関連が指摘されるなど、原子核物理学に話題を提供し続けてきた。ベータ崩壊寿命測定や荷電交換反応といった従来手法に加えて新たな手法が試みられると同時に、近年は r 過程元素合成やテンソル力に関連した新しいデータが得られ、研究の方向性も多様化している。この機会に理研RIBFや阪大RCNPなどでの研究展開を報告し合い、スピン・アイソスピン応答研究の切り口で議論した。はじめに上坂氏により趣旨説明があり、土岐氏により三十余年のスピン・アイソスピン研究の歴史とテンソル力の重要性に関する講演があった。次に早野氏により π 中間子原子研究と核媒質中のカイラル対称性の部分的回復について、そのエッセンスが示された。理研RIBFにより一気に視界が開けた r -プロセスの研究が西村氏から紹介され、ニュートリノ-原子核反応にもつながるミュオンを用いたJ-PARCでの研究計画が嶋氏から提示された。後半は、吉田氏が中性子-陽子対相関により誘起される新しいタイプのスピン・アイソスピン振動について講演し、若狭氏と矢向氏がそれぞれRCNP、RIBFでの荷電交換反応測定から得られた新しい励起モードに関する話題を紹介した。シンポジウムは、ハドロン物理から宇宙核物理までを横断するスピン・アイソスピン物理の興味深さを浮き彫りにし、聴衆

に今後の発展を予期させることに成功したと言える。

実験核物理学領域・理論核物理学領域「重イオン深部非弾性散乱の基礎と応用」 矢向謙太郎（東大CNS-SHARAQ）

[A] 多核子移行反応による $N=126$ 中性子過剰核の生成に関する実験的研究（渡邊 裕：KEK・和光原子核科学セ）、TDHFの現状と新しい反応機構（関澤一之：ワルシャワ工科大物理）、ガンマ線核分光法による重い中性子過剰核の核構造研究—KISSへの期待と展望—（渡邊 寛：北京航空航天大学）、原子力機構における融合核分裂・準核分裂および多核子移行反応の実験研究（廣瀬健太郎：原子力機構先端基礎セ）、Langevin方程式を用いた核分裂過程のshell効果の解析（有友嘉浩：近畿大理工）、TDHFで見たfission（岩田順敬：東大原子核研究セ）、ノックアウト($p, 2p$)反応を用いた核分裂閾値エネルギーの測定（笹野匡紀：理研仁科センター）

[B] 低エネルギー重イオン反応における深部非弾性散乱は、その反応機構の解明とともに重い原子核領域におけるドリップライン近傍未知核の構造を調べるための有用なプローブとして、最近研究が活発化している。本シンポジウムでは、多核子移行反応から準核分裂に至る深部非弾性散乱機構の理論的理解と、応用への展望について議論を深める機会として、理論及び実験の側面から最新の研究トピックスを取り上げた。理論的研究からは、TDHFでみた多核子移行反応の定量的記述の進化（関澤氏）や核分裂過程記述における課題（岩田氏）及び散逸揺動理論による核分裂過程における殻効果研究の進展状況（有友氏）について報告がなされた。また実験的研究からは、JAEAでの核子移行反応を用いた準核分裂過程の研究（広瀬氏）、GANILのVAMOSスペクトロメータによる重い反応系での多核子移行反応断面積の定量的研究（渡邊裕氏）、理研RIBF施設に設置されたKISSによる中性子過剰未知重原子核領域での核構造研究の可能性（渡邊 寛氏）及びSAMURAIを用いた核分裂障壁に対する新たな研究方法（笹野氏）などの報告と紹介がなされた。会場には原子核実験・理論両分野から70名程度の研究者が参加し、活発な議論を行うことができた。

宇宙線・宇宙物理領域、素粒子実験領域、素粒子論領域「宇宙線起源の解明にむけた新展開」

田島宏康（名大・ISEE）

[A] 趣旨説明（田島宏康：名大STE研）、Fermiガンマ線観測による宇宙線起源研究（内山泰伸：立教大理）、Exploring the Galaxy at VHEs with H.E.S.S. (Pol Bordas：MPIK)、硬X線・軟ガンマ線観測がもたらす宇宙線起源解明の新展開（高橋忠幸：宇宙研）、超高エネルギー宇宙線観測による宇宙線起源探査（萩尾彰一：阪市大理）、超高エネルギーニュートリノ観測による宇宙線起源探査（吉田 滋：千葉大理）、宇宙線起源研究の展望（藤田 裕：阪大理）

[B] 2013年にFermi衛星のガンマ線観測によって超新星残骸で宇宙線陽子が加速されている決定的な証拠が得られて以来、PeVニュートリノの観測、超高エネルギー宇宙線の非等方性の可能性など、新展開を迎えつつある宇宙線観測・研究を、X線からガンマ線、超高エネルギー宇宙線、超高エネルギーニュートリノなどの多波長、多粒子観測、および理論的側面から概観した。シンポジウムには100名超の参加者があり盛況であった。とくに、Pol Bordas氏による講演では、この夏にICRCで報告されたばかりのPeV陽子起源と思われるガンマ線源に関する話題もあり、宇宙線起源探究の最先端を概観できる非常に良い機会となった。

宇宙線・宇宙物理領域, 素粒子実験領域, 素粒子論領域「一般相対性理論100年の歩み」 三代木伸二(東大)

[A] 一般相対性理論と宇宙論(前田恵一:早大先進理工), 宇宙論を実証する(羽澄昌史:KEK素核研CMB, 東大カブリ), ブラックホールと高エネルギー宇宙(井岡邦仁:KEK素核理セ), ブラックホールの観測と相対論(粟木久光:愛媛大院理工), 数値相対論の展開(柴田大:京大基研), 一般相対性理論とその検証の理論(浅田秀樹:弘前大理工), 一般相対性理論の実験的基礎(黒田和明:東大宇宙線研)

[B] SB会場で行われました。聴衆の数は平均で約220名でした。

一般相対性理論は、アインシュタインによる1915年の提唱以来、さまざまな理論的研究や検証実験を経てきました。それ以来、多くの発展的成長を遂げ、現在においても、物理学や数学の最先端の研究分野に引き継がれています。今回、100年目の2015年を記念して、一般相対論に関係する世界のトップの研究をされている研究者にお集まりいただきました。そのおおまかな内容は、順に、宇宙論の理論、宇宙論の観測、高エネルギー天体の理論、高エネルギー天体の観測、コンピューターシミュレーションによる数値相対性理論、一般相対性理論の検証実験のための理論、一般相対性理論の検証実験です。そして、今後の重力の研究の可能性、その物理学的意義について議論していただきました。

それぞれが、密接に関係する分野であったこともあり、聴衆から多数の質問ができました。だいたい一講演に5つほどです。素粒子実験領域、素粒子論領域との合同であったため、素粒子分野の方の質問も目立ちました。講演者も別の講演者へ質問されるなど、分野を超えた有機的な議論が活発に行われました。印象的だったのは、他分野の多くの方が、重力実験の将来計画たとえば、重力波の実験など(KAGRA実験など)に対して、大きな期待を持っていることでした。ほとんど批判的な意見は聞かれませんでした。この分野の将来性を感じられるシンポジウムとなりました。

ビーム物理, 領域10「新奇な電子ビーム源とこれをプローブとした物性研究の展開」 羽島良一(原子力機構)

[A] 趣旨説明(羽島良一:原子力機構), 超伝導高周波加速方式TEMの開発(東直:東大), 相対論的パルス電子を用いた超高速電子回折装置(楊金峰:阪大), 高強度フェムト秒レーザー加速電子線源とそれを用いた超高速電子線回折・偏向法(阪部周二:京大), 高性能スピン偏極電子源の開発とその応用(金秀光:KEK), 軌道角運動量を持った電子波を利用した電子顕微鏡(齋藤晃:名大), LaB₆ナノ構造冷陰極点電子源及び電子顕微鏡への応用(唐捷:物材機構)

[B] 近年、新たな特性や形態を持った電子ビーム源が考案され、装置の開発と評価が始まっている。本シンポジウムは、これら新奇な電子ビーム源の研究者とその潜在的な利用者が議論を深めるよい機会となった。加速器やレーザーの先端技術を利用して短い時間幅(フェムト秒からピコ秒)を持った電子パルスを発生し、電子顕微鏡、電子線回折に利用するアイデアについて3件の講演があった。これらは、短パルス性を利用した動的な構造解析をフェムト秒領域まで拡大することを目的とした研究である。スピン偏極電子源は、超格子半導体の光陰極に偏極したレーザーを照射することで、スピン偏極した電子を取り出すものである。既製品のLEEMと組み合わせると、磁区構造の実時間観測に成功している。特別に設計されたゾーンプレート、グレーティングに電子ビームを通すことで、電子波のらせん自由度を制御することが可能となっており、磁気二色性の観測、微粒子のマニピュレーションなどへの利用を目指した取り組みが進んでいる。電子顕微鏡の輝度向上のための冷陰極点電子源の開発では、LaB₆表面の原子層の制御が鍵であることが示された。

領域2「高強度ペタワットレーザーとX線自由電子レーザーを活用したプラズマ科学の展望」

藤岡慎介(阪大レーザー研)

[A] 主旨説明(藤岡慎介:阪大レーザー研核融合グループ), SACLAとハイパワーレーザーとの融合(藪内俊毅:理研), SACLAを利用した高エネルギー密度科学研究(犬伏雄一:高輝度光科学研究セ) J-KARENレーザーのアップグレードとプラズマ科学研究(近藤公伯:原子力機構関西) LFEXレーザーを利用したプラズマ科学研究(余語覚文:阪大レーザー研量子グループ) X線天文学で見る極限物理とレーザー地上実験(榎戸輝揚:京大院理) 高強度パワーレーザーとXFELを利用した高圧物性科学(尾崎典雅:阪大院工) まとめ(米田仁紀:電通大レーザー)

[B] 藪内氏からは、X線自由電子レーザーSACLAの施設内で立ち上げ中の0.5PWレーザーと利用研究への期待が紹介された。犬伏氏は、SACLAでの8keVのX線の誘導増幅、高強度レーザーを利用したX線レーザーの増幅などを紹介した。近藤氏からは、原子力研究開発機構関西

光科学研究所のJ-KARENレーザーの1PWに向けたアップグレードの状況が紹介された。イオン加速やコヒーレントX線発生分野での成果を目指している。余語氏からは、世界最大のPWレーザーである大阪大学のLFEXレーザーでの成果が紹介された。大エネルギーを利用し、エネルギー・スケーリングを上回るイオン加速の実現や、キロジュール級のTWレーザーとの組み合わせという特徴を生かした研究が進められている。様々な極限物理現象を我々に見せつけてくれる宇宙プラズマ現象について、榎戸氏から紹介頂いた。極限電磁場下にあるイオンからのX線放射を地上で精緻に計測する重要性が紹介された。尾崎氏からは、レーザー駆動の高圧パルスで物質を圧縮し、ダイナミックな構造変化をX線レーザーでプローブした成果が紹介された。米田氏は、装置の先進性に頼るのではなく、プラズマ物理の本質に迫ることの重要性を強調して、締め括られた。

領域3, 領域7, 領域8, 領域11「量子スピン液体の最近の発展」

野尻浩之(東北大金研)

[A] はじめに(野尻浩之:東北大金研), 量子スピン液体研究の歴史と有機三角格子系における進展(鹿野田一司:東大工), 有機三角格子系における量子スピン液体状態の低温磁気トルク(磯野貴之:物材機構), $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ におけるスピンと軌道自由度の協奏による量子状態(木村健太:阪大基礎工), 動的ヤーンテラー効果によるスピン軌道液体(那須譲治:東工大理工), 2次元ハバード模型におけるスピン液体の可能性:ハニカム格子と三角格子を中心として(柚木清司:理研), ランダムネスが誘起する3角・カゴメ格子上の量子スピン液体相(下川続久朗:阪大)

[B] 本シンポジウムでは、高温超伝導の発現機構のひとつとして提唱されて以来、理論・実験両面から精力的に研究されてきた量子スピン液体研究の最近の進展について報告がなされた。その中で、近年、注目されている三角格子反強磁性体・カゴメ格子反強磁性体などのフラストレーション系を中心に、スピン以外の電荷や軌道自由度、歪み、乱れといった他の要素を取り入れることで、スピン液体状態が安定化するかどうかといった点について突っ込んだ意見が交わされた。講演では、冒頭、鹿野田により、スピン液体研究の歴史と現状についてまとめと最近のET系有機導体における実験について紹介がなされ、学生を含む幅広い会員が研究の到達点を把握する上で有用であった。実験面の報告としては、磯野による有機三角格子、木村によるスピン-軌道系が報告され、理論面としては、那須が動的ヤーンテラー効果を、柚木が大規模数値計算の結果を、下川が乱れによる量子スピン液体について報告した。現実的なモデル物質についての実験と理論がかみ合った議論が行われたことが有意義な点であり、今後、関連諸分野の研究者にとってさらなる研究展開の契機となることが期待される。

領域4, 領域3, 領域8「新奇トポロジカル物質・トポロジカル現象の探索, 新展開」

野村健太郎(東北大金研)

[A] はじめに(野村健太郎:東北大金研・理論IMR), Classification of three dimensional Dirac semimetals (Bohm-Jung Yang:RIKEN), パイロクロア格子遷移金属酸化物におけるワイル電子(山地 洋:東大院工), ワイル半金属のスピン輸送の理論(田口勝久:名大院工), スピンポンピング法によるトポロジカル絶縁体へのスピン注入とスピン-電荷変換(塩見雄毅:東北大金研), 3次元トポロジカル絶縁体薄膜における量子ホール効果(吉見龍太郎:東大院工), 3次元トポロジカル絶縁体の表面状態における電流誘起スピン偏極の電氣的検出(安藤裕一郎:京大院工)

[B] 波動関数のトポロジーで特徴づけられる物質群であるトポロジカル物質の研究は、より絶縁性の高いトポロジカル絶縁体を探索するという研究の初期段階から、トポロジカル絶縁体特有の表面ディラック励起によって生じる量子輸送現象を実証していく段階に移りつつある。また、ワイル半金属やディラック半金属など、バルクにギャップレス状態を持つ半金属物質でありながら、非自明な波動関数のトポロジーを有する系が発見され、より広い物質にわたる探索も進められてきている。本シンポジウムでは、現在、この分野で活躍されている新進気鋭の若手研究者に、理論・実験双方の観点から、これら新奇トポロジカル物質・現象の探索、新展開について報告をしていただいた。前半の理論家によるセッションでは、Bohm-Jung Yang氏によるディラック半金属のトポロジカルな分類理論、山地洋平氏による強相関系におけるワイル半金属の理論、田口勝久氏によるワイル半金属における新しい輸送現象の講演が行われた。また後半の実験家におけるセッションでは、トポロジカル絶縁体表面のディラック励起に起因する現象として、塩見雄毅氏によるスピン注入、吉見龍太郎氏に量子ホール効果、安藤裕一郎氏による電流誘起スピン偏極の各実験結果が報告された。本シンポジウムには250人以上の聴衆が集まり、活発な議論が展開され、トポロジカル物質に対する関心の高さがうかがいしれた。

領域5, 領域1, 領域4「国際光年における光と学術—光物理学の方向性を探って—」

江馬一弘(上智大理工)

[A] はじめに:趣旨説明(江馬一弘:上智大理工), 光エネルギー変換と半導体光物理学の将来(金光義彦:京大化研), 光エレクトロニクスとナノ物理学によるフロンティアの共創(荒川泰彦:東大生研), 量子計算への展開:コヒーレントイジングマシン(山本喜久:内閣府ImPACT), 超精密計測への展開:新しい時間をつくる(香取秀俊:東大工), 放射光と高調波レーザー物理学の将来(辛 埴:東大物性研), 光物性物理学実験の将来(谷村克己:阪大超高压電顕セ), 全体のまとめ—光と学術—(田中耕一郎:京大理)

[B] 国際光年である2015年, 光科学や光技術の重要性

と将来性があらためて見直されている。学術面だけに限っても、光技術は非常に広い分野で用いられ、科学の進展になくてはならないものになっている。そこで、「光と学術」および「光物理学の将来」というキーワードの下で、その方向性を見定めることを目的としたシンポジウムであった。

本シンポジウムは大きく分けて4部構成をとった。最初の2件は“半導体と光”という切り口であり、太陽電池応用を中心とした半導体研究の現状と将来展望、および、ナノ構造を中心とした光エレクトロニクス全般にわたる展開を解説および展望して頂いた。次の2件は“量子エレクトロニクスと光”という切り口であり、主に領域1で活躍されている研究者に、量子情報や超精密計測の現状を紹介して頂き、将来への展開を議論した。次の2件は“分光技術・物性物理と光”という切り口で、主に領域5で活躍している研究者に、放射光物理学や光物性物理学実験全般にわたる将来展望を語って頂き、日本の光物性物理学の歴史を再認識するとともに、将来の方向性を議論した。最後に「全体のまとめ—光と学術—」として、領域5の方向性について、参加者とともに議論した。

参加者は約250名であり、定員218名の会場では座りきれずに、立ち見が多数見られるほど盛況であった。領域5以外からの参加者も多くみられ、領域の枠を越えた意義のあるシンポジウムとなった。

領域5「金属状態の超高速コヒーレンス制御と励起ダイナミクスの新展開」

沖本洋一(東工大理工)

[A]はじめに(沖本洋一:東工大理工), 超伝導のコヒーレント量子ダイナミクス:理論からみた最近の進展(辻直人:理研), 単一サイクル瞬時強電場による超高速コヒーレント電子駆動(岩井伸一郎:東北大理), 負温度状態, 相互作用反転と動的局在について(米満賢治:中大理工), 高温超伝導擬ギャップの準粒子ダイナミクス(戸田泰則:北大工), 梯子型銅酸化物におけるキャリアコヒーレンス制御による高速光スイッチング(深谷亮:KEK), 理論からみた光キャリアの高速制御(石原純夫:東北大理), 半金属およびディラック電子系における超高速発光(末元徹:東大物性研)

[B]本シンポジウムでは、「金属を光励起したらどうなるか」というコンセプトの下、有機金属、銅酸化物超伝導体、グラフェンといったエキゾチックな金属群に注目し、光と物質のコヒーレンスによって実現する金属の新奇極端非平衡状態の最新の実験と理論の研究成果について発表、議論を行った。会場はほぼ満席となり、活気に満ちた議論がなされた。まず辻(理研)は、本シンポジウム全体のオーバービューを述べたのち、東大の島野らにより活発に研究が行われている超伝導状態のヒッグスモード研究についての分かりやすい現状報告と理論的展開が述べられた。岩井(東北大理)は、自ら開拓している長短パルス光源技術を用いて、有機電荷移動錯体の金属状態が光励起によって局

在する様子が、最新の実験結果と共に報告された。このような高強度パルスによる金属状態の抑制の理論的見解は、米満(中央大)によって詳細に解説された。それによると、岩井らの実験で見えた光局在現象は、電荷移動錯体中の電子格子相互作用が本質であり、この現象が古くから半導体で見られる動的局在とは一線を画するものであることが述べられた。戸田(北大工)は、高温超伝導体を光励起することにより超伝導擬ギャップの対称性が見えることを示し、超伝導状態の光励起研究の重要性が示された。深谷(KEK)と石原(東北大理)は、高温超伝導体の一つである梯子型銅酸化物の金属状態が光励起で局在することを実験的、理論的に明らかにした。最後に末元(東大物性研)は、様々なエキゾチック半金属の発光ダイナミクスについて報告し、系の励起状態のキャリアの性質が時間分解発光測定により明らかにされていく様子が丁寧に示された。また金属の励起状態を調べる意義について展望も述べられた。金属の励起状態という一見地味なテーマではあるが最新の知見を含んだ本シンポジウムは、本物理学会における今後の新しい動的物性展開へ向けて意義があったものと考えられる。

領域6, 領域1, 領域8「多自由度性が織りなす異方的超流体の新しい物理」

白濱圭也(慶應大理工)

[A]はじめに(白濱圭也:慶應大理工), 超音波で探る超流動 ^3He のヒッグスモードと表面マヨラナ状態(野村竜司:東工大理工), 光格子中冷却原子気体に現れるヒッグスモード(福原武:理研CEMS統合物性), 超流動 ^3He と冷却原子気体で広がるトポロジカル超流動の物理(水島健:阪大院基礎工), 超流動 $^3\text{He-A}$ のカイラリティと固有マグナス力(池上弘樹:理研CEMS量子情報), URu_2Si_2 のカイラル超伝導と巨大ネルンスト効果(松田祐司:京大院理), 多自由度超流体における界面对消滅と射影された自発的対称性の破れ(竹内宏光:阪市大院理)

[B]液体 ^3He , 強相関電子系, 光格子中冷却原子気体などで実現される異方的超流体では、その多自由度性を反映して、複数の対称性破れや多様な集団励起などの量子現象が発現する。また、トポロジカル超伝導の概念が提案され、 ^3He やルテニウム酸化物がその候補として注目されると共に、新しい異方的超伝導体の探索研究も盛んに行われている。このような異方的超流動・超伝導の新しい研究潮流を俯瞰して、今後の発展の方向を議論する目的で本シンポジウムは企画された。

講演は最近の研究動向を反映して、トポロジカル超伝導・超流動とその界面に期待されるマヨラナ粒子について(野村・水島氏), カイラル超流体である $^3\text{He-A}$ 相と URu_2Si_2 における輸送現象測定によるカイラリティの同定(池上・松田氏), 多自由度超流体に特有なヒッグスモード等の集団励起や界面对消滅に関する研究(野村・福原・水島・竹内氏)と、多彩だが共通した問題意識に貫かれた内容となった。各講演はいずれも非専門家向けで大変わかりやす

く、約150名の聴衆からは活発な質疑応答があった。異方的超流体は過去20年以上にわたり物性物理の中心的研究課題であり、今後も新しい視点からの発展が日本から生まれることを期待させるシンポジウムとなった。

領域7, 領域4「グラフェン・二次元薄層物質スピン物性の新展開」

榎 敏明 (東工大理工)

[A] はじめに (榎 敏明: 東工大理工), グラフェン素子を用いたスピン緩和時間測定結果の再考察 (大谷義近: 東大物性研・大谷研究室), 水素装飾グラフェンのスピン軌道相互作用と位相破壊抑制 (春山純志: 青学大理工), 水素化グラフェンにおける逆スピホール効果 (中村壮智: 東大物性研・勝本研究室), デイラック電子系へのスピン注入 (野村健太郎: 東北大金研), グラフェン関連原子層物質の高分解能ARPES (高橋 隆: 東北大WPI-AIMR), 二層グラフェンにおける空間反転対称性の電氣的制御によるバレーホール効果 (島崎佑也: 東大工)

[B] グラフェンに端を発した二次元単原子層物質の研究は、van der Waals工学として今や多様な物質に広がりを見せている。しかしグラフェン中のスピンは単層物質ならではの種々の阻害要因から期待ほど緩和長も大きくなく、スピン物性・スピントロニクス応用の研究も大きくは進展していないのが現状である。一方で、最近グラフェン表面を微量の水素原子で装飾することで面垂直方向の対称性を破壊すると巨大なスピン軌道相互作用(SOI)が出現するという驚くべき実験報告がなされた。軽元素である炭素・水素結合で巨大なSOIが出現することは興味深く、軽元素の2Dトポロジカル絶縁体(TI)の観点からも重要である。さらにSiC上グラフェンでの巨大スピン拡散長の報告などもあって、今、グラフェンのスピン物性は新たな段階に来ている。これらを踏まえて本シンポジウムでは、グラフェン微量水素装飾によるSOIの導入実験やそのスピン物性・諸量子現象との相関、強磁性電極からのグラフェンへのスピン注入と高抵抗トンネル膜に基づく新たなスピン緩和長の算出、グラフェンへのマイクロ波照射によるスピン流生成とTIスピントロニクス、バレーホール電流(擬スピン)の電圧制御、グラフェン・TI物質電子状態のARPESによる観察などグラフェン・TI物質中のスピンに関する最新の成果を一同に発表し、その正当性や新奇性についての議論を行った。

水素修飾グラフェンへのSOI導入については、電子線照射による欠陥発生の影響や電極パターンの効果、ARPESとSOIギャップの相関、などが活発に議論され、今後のこの分野の発展にとって有意義なシンポジウムとなった。

領域7, 領域8「強相関係での電荷揺らぎの物理の新展開」

π 電子系とd電子系

山本浩史 (分子科学研)

[A] はじめに (山本浩史: 分子研), 分子性物質におけるダイマーモット絶縁体状態と電荷秩序状態の拮抗による

電荷揺らぎと超伝導 (佐々木孝彦: 東北大金研), 分子性スピン液体の熱容量—スピン, 電荷, 格子— (中澤康浩: 阪大院理), 電荷揺らぎが引き起こす新奇な磁性と誘電性: ダイマーモット系有機物を中心に (中 惇: 東北大院理), d電子系の電荷揺らぎを含んだ超伝導 (小形正男: 東大院理), 非平衡を利用する多バンド超伝導体の開発と軌道・電荷揺らぎの可能性 (前田京剛: 東大総合), 放射光分光で見る強相関遷移金属化合物の電荷移動不安定性 (溝川貴司: 早大先進理工), まとめ (福山秀敏: 東理大理)

[B] 近年、強相関電子系でみられる超伝導や量子スピン液体と「電荷揺らぎ」との関係が関心を集めている。 π 電子系では、ダイマーモット絶縁体におけるダイマー内電荷揺らぎがスピン間の反強磁性相互作用を実効的に弱める効果や、超伝導相に隣接する電荷整列相の臨界挙動などについて、理論・実験の両面から解析が進められている。d電子系では、金属原子と配位子との間におきる電荷移動励起がエキシトニックな揺らぎを持っている可能性が議論されており、特に電子ドープ銅酸化物、FeSe系超伝導体と、 NiGa_2S_4 のようなスピンドイスオーダー系で、表面に現れる物性に対する電荷揺らぎやCDWの関与が議論されている。シンポジウム前半では π 電子系の超伝導物質に関する光学スペクトル (佐々木氏), 量子スピン液体に関する熱測定 (中澤氏), および理論的考察 (中氏) が紹介された。また後半ではd電子系の超伝導物質に関する理論 (小形氏), 薄膜実験 (前田氏) およびスピンドイスオーダー系に関する光電子測定 (溝川氏) が紹介され、最後にこれらの話題を俯瞰的に眺めたうえで現状のまとめが述べられた (福山氏)。まだこの話題における共通の物理を探る試みは端緒についたばかりであり、物質の違い (π 電子かd電子か)・表に現れる現象の違い (超伝導・量子スピン液体・強誘電・マルチフェロイック)・測定手段の違いなどをまたいだ議論が深まるには時間がかかる印象であったが、問題意識の共通化をはかることにより、新たな物性物理分野の広がりが予感されるシンポジウムであった。今後このような機会を継続的に持つことにより、より広範な展開が期待される話題であることが確認された。

領域8, 領域3「複合自由度が生み出す巨大エントロピーとその制御」

森 茂生 (阪府大院工)

[A] はじめに (森 茂生: 阪府大院工), フラストレーションとエントロピー (川村 光: 阪大院理), フラストレート系金属磁性体の磁気体積熱効果 (竹中康司: 名大工), Ag_2Ch (Ch=Te, Se, S) で観測される異常熱伝導度とそれを利用した固体熱流制御材料の創製 (竹内恒博: 豊田工業大), 巨大負熱膨張の理論: 金属間電荷移動と電荷秩序の観点から (妹尾仁嗣: 理研), 鉛ペロブスカイトの系統的な電荷分布変化 (東 正樹: 東工大応セラ研), 軌道・電荷整列物質と熱物性 (勝藤拓郎: 早大先進理工), スピントロニクスオーバー酸化物と光誘起現象 (沖本洋一: 東工大)

院理工)

[B] 電荷, スピン, 軌道, 結晶格子といった様々な自由度が絡み合う電子相では, 相転移に際して, 巨大なエントロピー変化を生じることがある. このエントロピー変化は, 巨大な負熱膨張や熱量効果をはじめとする特異な熱・体積機能を発現させる. 関連した最近のトピックスとして, フラストレーション効果による「高エントロピー状態」の存在と, それによる特異な物性が注目を集めている. 熱輸送, 熱電変換, 熱膨張・形状・歪の制御などの熱・体積機能は, 工学的視点からも, 極めて関心が高いテーマである. そこで, 電子相ならびにその相転移をエントロピーの視点で眺め, 新しい物理的描像や新物質・新機能の開拓を展望することを本シンポジウムの目的とした. シンポジウムは川村氏によるフラストレーション系での高エントロピー状態と物性発現に関する包括的な講演からはじまり, 竹中氏による逆ペロブスカイト型酸化物における磁気体積熱量効果の報告, 竹内氏によるカルコゲナイト物質での固体熱流制御に関する話題, 妹尾氏, 東氏によるペロブスカイト型酸化物における電荷分布変化と熱膨張特性に関する理論と実験の報告, 勝藤氏による電荷, 軌道自由度と熱物性に関する研究, 沖本氏による光誘起相転移によるスピנקロスオーバー現象の発表が行われた. 250名程度の聴衆と講演者の間で活発な討論が行われ, エントロピーと熱・体積機能の研究の今後の発展と深化を期待させる有意義なシンポジウムであった.

領域8, 領域4「近藤効果研究の進展—近藤論文50周年記念シンポジウム—」

柳澤 孝 (産総研)

[A] はじめに(柳澤 孝:産総研), 近藤効果の意義と展開(倉本義夫:KEK物構研), 重い電子系の物理の進展(大貫惇睦:琉球大理), 磁気自由度に起因しない近藤効果(三宅和正:豊田理研), 非クラマース $4f^2$ 配位系における非フェルミ液体的挙動と四極子近藤効果(鬼丸孝博:広島大院先端研), 量子ドットにおける近藤位相の検出(樽茶清吾:東大工), 量子ドットにおける近藤物理学の進展(江藤幹雄:慶應大理工)

[B] 希薄磁性合金における抵抗極小現象を解明された近藤博士の論文が出版されたのは1964年であり, それから50年が経過した. 50年の進展を振り返り, 今後の発展を展望することを目標としてシンポジウムを開催した. 「はじめに」と題して最初に近藤効果についての概略を説明した. 「近藤効果の意義と展開」において, 倉本先生により近藤効果の理論の展開について講演があった. 近藤効果はBCS理論, 分数量子ホール効果と共に物性物理の3大問題を成し, これらの理論と肩を並べる重要性を持っていることが強調された. 大貫先生による「重い電子系の物理の進展」において, $CeCu_6$ 等の初期の研究から最近の進展まで30年にわたる展開が講演された. 三宅先生による「磁気自由度に起因しない近藤効果」では, 近藤効果の理論の発展

として, 2単位近藤効果, 電荷近藤効果などが取り上げられ, 最近の進展が述べられた. 次の講演「非クラマース $4f^2$ 配位系における非フェルミ液体的挙動と四極子近藤効果」において, 鬼丸先生により, Pr化合物などの多極子近藤効果についての最近の進展が詳しく示された. 「量子ドットにおける近藤位相の検出」において, 樽茶先生により量子ドットにおける近藤効果について, 化合物における近藤効果との違いも強調されながら, 詳しく講演された. 近藤効果において基本的である, $\pi/2$ の位相のずれの測定について講演がなされた. 最後の講演「量子ドットにおける近藤物理学の進展」では, 江藤先生により量子ドットにおける近藤効果の理論的側面が説明された. 非平衡系における近藤効果など最近の進展についても講演された. 今回のシンポジウムにおいては, 460人定員の講堂が一杯となり, 多くの方々に興味を持っていただけた. 講演者の先生およびシンポジウムに来られた皆様に感謝いたします.

領域9, 領域3「表面界面数原子層の磁気物性」

三浦良雄 (京都工繊大)

[A] 趣旨説明(三浦良雄:京都工繊大), 高輝度・高スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡による磁区挙動の動的観察(安江常夫:大阪電通大), 偏極準安定He原子線による最表面スピンの観測(山内 泰:物材機構), 鉄薄膜表面・界面での磁気キャンピング(福谷克之:東大生研), 深さ分解X線吸収分光法を用いた表面・界面の磁性と構造の観察(雨宮健太:高工研物構研), XMCDから見た磁気接合界面における軌道磁気モーメントと垂直磁気異方性の相関(岡林 潤:東大理), 界面磁性の電界効果:第一原理計算(中村浩次:三重工大), 磁気異方性の電界制御とその応用(金井 駿:東北大通研)

[B] まず安江氏よりスピン偏極低エネルギー電子顕微鏡を用いたCo/Ni多層膜における磁区挙動の実空間・実時間観測に関して報告がなされ, 積層過程における磁化の動的振る舞いが議論された. 次に, 山内氏より偏極準安定He原子線を用いた磁性体最表面のスピン測定の結果があり, 固体内部と表面でスピン偏極が異なることを示された. 続いて, 福谷氏より内部転換メスバウアー分光を用いた実験から鉄薄膜表面・界面において磁気キャンピングが生じることが報告された. 更に, 雨宮氏より深さ分解X線吸収分光法を用いた表面・界面の磁性と構造の観察についての報告がなされ, 歪みと磁気異方性の関係などが議論された. 後半では, まず岡林氏よりXMCDによる Co_2FeAl/MgO 界面での軌道磁気モーメントと垂直磁気異方性の相関について報告がなされ, 界面垂直磁気異方性の起源がFe-Oの化学結合にあることが示された. 続いて, 中村氏が界面磁性の電界効果に関する第一原理計算の結果を報告され, 薄膜のキュリー温度が電界で制御可能であることを示された. 最後に, 金井氏が磁気異方性の電界制御に関して応用の立場から講演され, 低消費電力スピントロニクス素子の実現

に向けて磁気異方性の電界制御が有力であることを示された。本シンポジウムではすべての講演で活発な議論が行われ、討論の時間を超えても質問が出るほどであった。シンポジウムへの参加人数は概ね120名以上最大で150名程度であり当初の見込み通りであった。

領域9, 領域5「The stream and prospects of condensed matter physics in subsurface region using novel spectroscopy」 坂本一之(千葉大院融合)

[A] Introduction(坂本一之:千葉大院融合ナノ), Atomic-Orbital-Excited Diffraction as Local Electronic Property Analysis Method(松井文彦:奈良先端大), Operando XPS Observation of Electrode Surfaces During Electrochemical Reactions(小笠原寛人:SLAC, National Accelerator Laboratory), Potential of FEL in FIR-THz region(入澤明典:阪大産研), Ultrahigh-Resolution Chemical and Magnetic Imaging by Laser-based Photoemission Electron Microscopy(谷内敏之:東大物性研), Two-dimensional ARPES mapping using a new electron lens with dual deflectors(高橋和敏:佐賀大SLセ), Polarization-dependent hard x-ray photoemission by simultaneous measurements with the s and p polarization configurations(K.-D. Tsuei:National Synchrotron Radiation Center, Taiwan), Epoch-making high resolution and high efficiency spin-2D-ARPES by momentum microscopy(菅 滋正:Peter Grunberg Institut, Forschungszentrum Juelich GmbH)

[B] 本シンポジウムは、種々の物質の極めて重要な物性を決定するのに不可欠である、固体の詳細な電子構造・スピン状態や局所原子構造などこれまで知ることができなかった情報の測定を可能にしている、近年の高機能分析器や光源の目覚ましい発展にスポットを当て、分析器の従来の使用法を超えた測定方法や全く新しいタイプの分析器を用いた研究、超高輝度光源を用いることによる新しい研究など、新規分光法による最新の物性研究の現状とその展開の可能性について7つの話題提供をしていただきました。領域9の研究者のみでなく、分光研究者が多数在籍する領域5など他領域の研究者の興味を幅広く惹くことができ、また、複数の領域の共同開催とすることと英語での講演を行うことで分野横断的で国際的な議論・交流のきっかけを作ることも期待して開催いたしました。時間を大幅に超える活発な質疑応答や多くの立ち見の聴衆などから、当初の目的を達成した成功したシンポジウムであったと確信します。

領域10, 領域5「誘電体と先端光工学」

塚田真也(島根大教育)

[A] はじめに(塚田真也:島根大教育), キラル光磁性体における第二高調波偏光面角度の90度光スイッチング(所 裕子:筑波大数理論物質所研究室), KTNの巨大電気光学効果とその応用(今井欽之:NTT デバイスイノベーション

センター), 光第2高調波顕微鏡で見るフェロイックス物質における分域構造(横田紘子:千葉大院理), 光散乱分光測定をめぐる最近の話題—角度分解偏光ラマン分光を中心に(藤井康裕:立命館大理工), 広帯域光散乱分光法で探るナノ結晶のトロイダル強誘電性と秩序形成ダイナミクス(武貞正樹:北大院理), テラヘルツ時間領域分光で見る電子状態, 格子状態—超伝導, 非調和フォノン, ソフトモード—(森 龍也:筑波大数理論物質小島研究室), メタマテリアルによるテラヘルツ電磁波の制御(武田三男:信州大理)

[B] 光と物質の相互作用に関する研究は、戦後のレーザー技術により学問と産業応用が両輪となって急速に進歩してきた。物性研究においては光を用いて構造相転移のソフトモードや結晶の対称性の破れを観測して広い時間スケールで相転移の機構を明らかにしてきた。本シンポジウムでは特定の物質に拘らず、光と物質の相互作用に関する最近の成果を「光で物質を操る」(所)・「物質で光を操る」(今井, 武田, 所)・「光で物質を観る」(武貞, 藤井, 森, 横田)の3つの視点から選び、分野を横断した討論が行われた。

光誘起相転移現象を用いた第二次高調波の偏光制御といった光で物質を操り物質で光を制御するような研究をはじめ、強誘電体の臨界現象を巧みに利用したOptical Coherence Tomographyのような基礎と応用をつなぐ話など領域10や5では普段聞けないような講演があり、光と物性の関係について活発な議論がなされた。光学測定技術に関しても局所的な構造を観れるような最近の話題が豊富に盛り込まれており、試料作製から装置まで様々な角度から議論がなされた。これらの物質や光学測定技術を組み合わせることにより、今後、光と物質の相互作用に関する研究がより発展することが期待された。

領域10「最先端電子線計測が明らかにするナノスケールの構造と物性」 箕田弘喜(農工大)

[A] はじめに(箕田弘喜:農工大), 環境制御球面収差補正TEMが拓く材料分析の新展開(竹田精治:阪大産研), 原子分解能TEM/STEMによる材料分析の現状(大島義文:北陸先端大), 新世代電子線ホログラフィーが拓く物性分析の世界(谷垣利明:日立製作所), 高エネルギー分解能EELSが拓く材料の化学状態分析の可能性(倉田博基:京大化研), 軟X線発光分光が拓く材料分析(寺内正巳:東北大多元研), ローレンツTEM法による磁性材料解析の現状と今後の展開(森 茂夫:大阪府立大工), スピン偏極透過電子顕微鏡が拓く材料解析の可能性(栗原真人:名大エコトピア)

[B] 近年、透過電子顕微鏡(TEM)のレンズや光源、エネルギーフィルターの開発が進み、空間分解能やエネルギー分解能が目覚ましく向上した。これにより固体、とりわけナノスケール構造体の詳細な電子構造・エネルギー状

態を原子分解能で分析することが可能になってきた。本シンポジウムでは、近年開発された顕微鏡装置や、従来とは異なる環境や観察条件での分析法を使って進められているTEMによる最新の物性研究の現状とその可能性について報告された。構造評価の空間分解能については、高真空中ばかりでなく低真空環境下でも0.1 nm以下になっており、ほとんど全ての原子について分析が可能になってきている。分光解析の精度も向上し、原子種の分析にとどまらず、その化学状態変化の分析も可能になりつつある。さらに、物性解析に関連しては、材料の磁性や誘電特性の解析精度が向上しただけでなく、電場や磁場の空間分布のナノスケールの分析も可能になってきている。さらには、時間分解能も向上し、スピン緩和状態の過渡現象の解析の可能性が見えてくるといった報告があった。会場からも数多くの質問が出て、活発な討論が行われた。

領域 11, 領域 6, 領域 12「塑性固体のダイナミクス：その非線形応答、なだれとレオロジー」

大槻道夫 (島大総理)

[A] 雪崩の内部構造と運動 (西村浩一：名大院環境), 可換砂山モデルの数理 (香取眞理：中大理工), 高速&低速地震の動的プロセス (井出 哲：東大理), 固体摩擦におけるアバランチ (山口哲生：九大工), 超伝導渦糸固体のプラスチックフローと動的相転移 (大熊 哲：東工大院理工), ジャミング転移およびガラス転移に伴う粘性発散と

塑性流動 (川崎猛史：名大理), シアシックニングサスペンションの流れ (瀬戸亮平：OIST)

[B] 粉体などの高密度状態の粒子系は塑性固体として振る舞い、摂動に対して脆く、微小な外場の印加で大規模な崩壊が発生する。この雪崩的な非線形応答は、物質の塑性和密接に関係しており、その特異的なレオロジーの起源となっている。広範な分野に関連する塑性固体の理論的な理解は未だに不十分なままである一方、『なだれ』をキーワードに統一的な観点から理解できるとの期待が高まってきていることから、分野の活性化を目指して、関連研究者を一堂に集めたシンポジウムを開催した。

当日は大槻による趣旨の説明から始まり、前半では、最初の講演者の西村による雪氷系の雪崩の最近の進展の報告、香取による砂山の可解モデルでの解析的な取り扱いの提案、井出による地震に関する最新の研究の紹介が行われた。後半では、山口による固体摩擦系でのなだれ現象の紹介、大熊による超伝導渦糸系での現象のユニバーサリティの報告、川崎によるジャミング転移の新規なスケーリングの導入を経て、瀬戸によるシアー・シックニングの研究の流れのまとめがなされた。聴衆は約200名あり、講師の時間オーバーがあり、その結果、質疑応答の時間が短めなきらいがあったが、様々なバックグラウンドを持つ講師が集まり、新しい方向性を示したという意味で成功したシンポジウムだったといえる。

(2015年11月11日原稿受付)

本誌の複写をご希望の方へ

日本物理学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を(一社)学術著作権協会(以下、学著協)に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、学著協より許諾を受けて下さい。

※企業等法人で、(公社)日本複製権センター(学著協が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合を除く(社外頒布目的の複写については、学著協の許諾が必要です)。

※複写以外の許諾(著作物の転載等)に関しては、学著協に委託していません。

直接、日本物理学会(E-mail: pubpub_jps.or.jp)へお問合せ下さい。

※日本国外における複写について、学著協が双務協定を締結している国・地域においてはその国・地域のRRO(海外複製権機構)に、締結していない国・地域においては学著協に許諾申請して下さい。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 3F

Fax: 03-3475-5619 e-mail: info_jaacc.jp

「蜘蛛の糸」仕事をしたのはカンダタの筋力か？

後藤 信行 (長崎大JFP)

1. はじめに

10年程前、科研費報告書「文学を取り入れた物理学講義」¹⁾を作成し、そこに、教材の一つとして、芥川龍之介の小説「蜘蛛の糸」のパロディを載せたが、そのとき、長崎大学の物理教員の間で茶を飲みながら議論したことがあった。カンダタが一人蜘蛛の糸を登るとき、重力場に対して仕事をしたのは、カンダタの筋力か、それとも蜘蛛の糸の張力か、その後、他大学の物理教員まで巻き込み、カンダタ演ずるテレビゲーム「ドラクエ」を凌ぐ壮絶なバトルとなったが、「筋力派」も「張力派」も、双方一歩も譲らず、結局、決着はつかず、そのままになっていたの、今回、「張力派」の一人として、この話題を紹介したい。

2. 思考実験

蜘蛛の巣は、中心から放射状に張られた縦糸と螺旋状に張られた横糸からなるが、縦糸と横糸では蜘蛛の糸の性質が異なる。カンダタが蜘蛛の糸を登ることができるためには、お釈迦様が垂らした蜘蛛の糸は粘着性のない縦糸でなければならないだろう。それを知ってか、知らずにか、もし、お釈迦様が横糸のほうを垂らしたとすれば、カンダタが蜘蛛の糸を登ろうにも、粘着性のため、糸が手足に絡まり動けなくなり、最後は糞虫のように宙ぶり状態となるに違いない。そこで、次のA、Bのような状況を想定してみた。

A：蜘蛛の糸に絡まって身動きできないカンダタをお釈迦様が引き上げる。

B：極楽から垂らされた蜘蛛の糸をカンダタが登る。

「筋力派」は、次のように主張する。「Aの場合はお釈迦様が引き上げるので、お釈迦様の筋力が仕事をするが、Bの場合はカンダタが蜘蛛の糸を下にぐいと引っ張って自分の重心を引き上げるのだから、カンダタの筋力が仕事

をする。」この筋力派の主張は、ごく自然で常識的であるが、物理用語の意味や定義は日常で使うものと必ずしも一致しない。

物理学では、仕事を次のように定義している。「力が働いて物体が移動したときに、物体の移動した向きの力と移動した距離との積を、力が物体になした仕事という(広辞苑)」

仕事の定義からすれば、Bの場合も、仕事をするのはカンダタの重心に働いている力でなければならない。さらに、その力の働く向きはカンダタが移動する向き、つまり、上向きに働いていなければならない。カンダタが糸を下に引っ張る力の反作用が仕事をするが、それは蜘蛛の糸の張力に他ならない。Aの場合もBの場合も、仕事をしたのは蜘蛛の糸の張力である。

3. 運動方程式

しかし、我々「張力派」は、黄門様の印籠のように、仕事の定義だけをかざして、筋力派の考えに異を唱えているのではない。定義よりも重要なのは運動方程式である。カンダタの質量を M 、蜘蛛の糸の張力を F 、カンダタの上向きに移動する速さを v 、重力加速度の大きさを g とすると、カンダタの重心の運動方程式は、Aの場合もBの場合も

$$M \frac{dv}{dt} = F - Mg \quad (1)$$

と表される。お釈迦様の筋力やカンダタの筋力は登場しない。両辺をカンダタの重心の位置座標 x で積分すれば、蜘蛛の糸の張力 F がした仕事 W が求まる。

$$\int_1^2 F dx = M \int_1^2 \frac{dv}{dt} v dt + Mg(x_2 - x_1) \quad (2)$$

ここで式(2)の右辺第一項は重心の運動エネルギーの増加分になるが、始状態1および終状態2でカンダタが静止していれば、カンダタの途中の運動の如何にかかわらず、この値は0であり、

蜘蛛の糸の張力がした仕事は右辺第二項の重力場のエネルギーの増加分だけとなる。

お釈迦様がカンダタを引き上げようと、カンダタが自分の体を変形させながら蜘蛛の糸を登ろうと、さらに、カンダタが登っている蜘蛛の糸を、お釈迦様が引き上げようと、カンダタの重心の運動方程式にその違いは現れない。当然、運動の法則に齟齬しないように定義された仕事にも、お釈迦様の筋力やカンダタの筋力などが入りこむ余地はない。

4. 質点系の力学

それでも、筋力派は次のように反論してくる。「Aの場合は、カンダタは身動きできないので、カンダタを質点として取り扱うことができるが、カンダタが手足のみならず、尺取り虫のように体全体を屈伸させながら登るBではカンダタを質点とはみなせないではないか。」

なるほど、しかし、それは張力派にとっては思う壺であり、これで勝負の行方が見えてきた。図1のように、人が床の上で屈んだ状態から立ちあがる場合、人の体をパーツに分けて考えてみよう。各パーツには筋力が働き合っているが、脳の指令によって筋力の強さを自在に調節し、腰や膝の関節の角度を変化させることによって人は立ちあがる。しかし、その筋力は内力であり、体を変形させる役目をするが、重心の運動方程式には登場しない。今度の場合、蜘蛛の糸の張力の役目をしているのは床からの抗力 R である。この

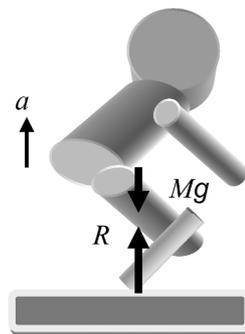


図1 屈んだ状態から立ち上がる。

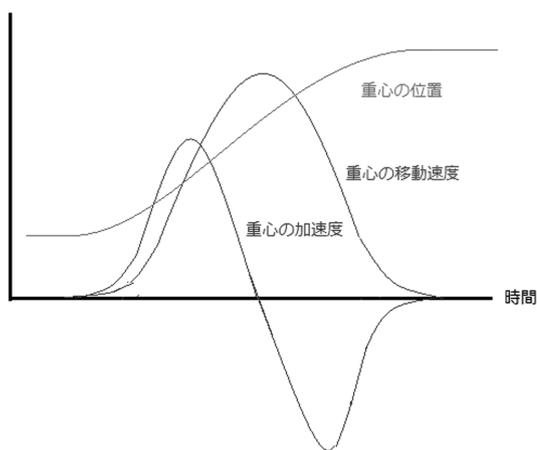


図2 立ち上がるときの重心の位置・速度・加速度。

場合も抗力 R が重心に働き仕事をするため、人の位置エネルギーが増す。

この場合、重心の位置の時間変化が与えられれば、図2のように、重心の位置を時間で次々に微分することによって、重心の速度 v も、加速度 a も簡単に求まる。また、蜘蛛の糸の張力と同じく、抗力 R は、 $R = Ma + Mg$ であるから、その時間変化の様子も分かる。

また、逆に初期条件と抗力さえ分かれば、重心の加速度も、速度も、さらに位置エネルギーの変化の様子も分かる。すなわち、重心運動に関する限り、その加速度も、速度も位置も、初期条件が与えられていれば、抗力 R がどのように変化するかで決まる。抗力 R の変化を実際に観測するには、アナログの体重計の上で屈みこんだ状態から立

ち上がればよい。

質点系の力学は、複数の質点からなる系において、質点間に内力が作用し合い、さらに外力が働いているとき、系の重心の運動方程式は外力だけで決まり、内力はすべて作用反作用の法則によって打ち消し合うことを教えている。²⁾

人の体の場合のように、変形可能な連続体の場合には、体がどのように変形するかは外力だけでなく、すべての内力を知らなければならないが、体の重心運動だけなら、外力だけで決定され、筋力など余計な力を考える必要はない。重心運動に筋力などを持ち出すのは議論を混乱させ、解決の糸口を見失うだけである。

しかし、筆者は、外力が働いている

場合に、筋力は一切重心運動と無関係などと主張しているのではない。筋力は体の変形運動に対して仕事をし、体を変形させることによって、張力や抗力に仕事をさせていると考えるべきである。

5. おわりに

量子論や相対論ならともかく、初等力学の基本原則であるにもかかわらず、この話題を持ち出すと、大学の物理教員の間でも、珍しく議論が紛糾する。最初に、カンダタの重心の運動方程式はと問われれば、誰もが式(1)と答え、容易に仕事の式(2)に辿りつき、筋力云々という議論にはならないだろう。ところが、最初からいきなり、仕事をしたのは張力か筋力かと問われれば、物理のプロ集団でも、つい筋力と答えてしまい、あとは、粘着性のある横糸のほうを登ろうとしたカンダタのように、もがけばもがくほど、支離滅裂な議論に陥るようである。しかし、迷路からの出口を発見したとき、多くの先人達が苦勞のすえ創り上げた力学の理論体系の美しさが見えてこよう。

参考文献

- 1) 後藤信行 (科学研究費補助金 (基盤研究C) 研究成果報告書, 平成 17-18 年度). いろいろな所に配布した結果, 現在, 既に残部はないが, 内容は筆者のホームページ: 「文学と日常に学ぶ自然界のしくみ」に公開中.
- 2) 例えば, 原島 鮮: 「力学」(裳華房, 1985).

(2015 年 7 月 13 日原稿受付)

松原隆彦

宇宙論の物理〈上〉

東京大学出版会, 東京, 2014, xiv + 315p, 22 × 16 cm, 本体 3,800 円 [大学院向]

ISBN 978-4-13-062615-6

松原隆彦

宇宙論の物理〈下〉

東京大学出版会, 東京, 2014, x + 339p, 22 × 16 cm, 本体 3,800 円 [大学院向]

ISBN 978-4-13-062616-3

小林 努 (立教大理)

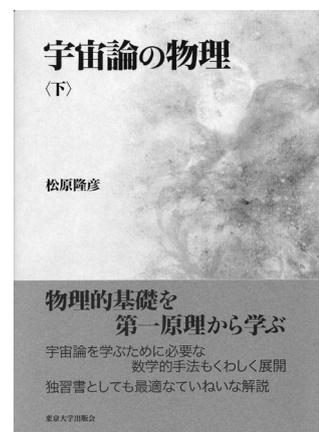
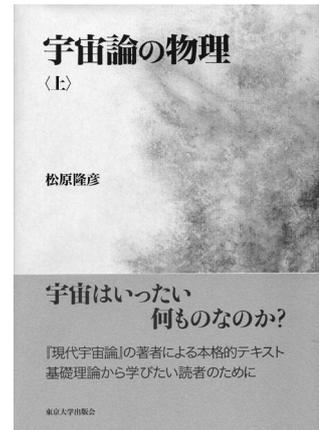
日本語による宇宙論の教科書のスタンダードとも言うべき『現代宇宙論—時空と物質の共進化』(東京大学出版会)の著者・松原隆彦氏によって新たに執筆された教科書が本書である。上下二分冊の本書は、分量的には前作の約2倍。これを前作の詳細版、あるいは前作からアップデートされた宇宙論の最新の教科書と思って手に取ると、想像とは違うという印象を抱くだろう。本書は、宇宙論の学習ないしは研究を始めるにあたって必要となる物理学の基礎知識を得るための教科書なのである。

宇宙論には、基礎として固有の理論体系があるわけではない。土台はあくまで電磁気学、量子力学、統計力学、流体力学、一般相対論、場の理論、原子核・素粒子物理学などといった通常の物理学の知識である。これらのうち、本書では学部3年生までに習う程度の知識は仮定し、その上でさらに必要となる事項やそれらの知識の宇宙論における適用方法が詳細に述べられている。上巻と下巻とで扱われている題材の傾向がやや異なるので、以下で順番に内容を紹介する。

上巻では、まず全体の三分の一程度が一般相対論とそれにもとづく一様等方宇宙のダイナミクスならびに宇宙の熱的進化史の解説に充てられている。そして、残りの三分の二が場の理論と素粒子標準模型の説明に使われている。

まったく宇宙論に携わらない人々も一度はどこかで触れる内容が多く含まれている。ほとんどすべての結果について第一原理から導出する、という姿勢が徹底されているので、理論指向の強い読者にフィットする議論の展開の仕方と思われる。一般相対論から素粒子標準模型まで豊富な内容を含むとなると、どこを取っても中途半端で消化不良に陥る教科書になってしまうのではないかという不安があるし、実際に内容の薄いそのような教科書も存在するわけだが、本書に関して言えば、心配無用である。もちろん、それなりに厚い教科書とは言えページ数に限界はあるのだから、一般相対論や場の理論の専門的な教科書と比べて扱う内容に制限はある。しかしながら、宇宙論分野の研究に参入しようと考えている学生にとってまずは必要にして十分な知識がまとめられ、第一原理から導出するという方針のもと消化不良なく吸収できるという点で、非常に価値のある教科書と言えよう。評者は早速、上巻を卒業研究のゼミのテキストとした。優秀な学生もゼミの準備に相当の時間を費やしているようなので、適切なレベルの教科書なのだろうと思っている。

さて、下巻に移るとやや趣が変わり、密度揺らぎの生成と進化を取り扱う宇宙論的摂動論の解説となる。上巻の内容と比較して専門的ではあるが、マイクロ波背景放射の温度揺らぎ・大規模



構造の観測を通して宇宙論の検証をおこなう上で習得しておかなくてはならない重要事項である。宇宙論的摂動論に関しては、英語の専門的な教科書・レビュー論文がすでに多数あるが、日本語で読めるものとしては最も詳細な部類に入る。

以上のように、本書は、宇宙論の学習・研究に必要な基礎物理学の知識が十分な論理的整合性をもってまとめられた良書である。今後、当該分野に参入する学部4年生・大学院生の誰もが持つ教科書になるであろうと評者は予想している。

(2015年6月27日原稿受付)

W. Horton

Turbulent Transport in Magnetized Plasmas

World Scientific, Singapore, 2012, xvi + 501p, 26×18 cm, \$150.00 [専門・大学院向]

ISBN 978-981-4383-53-0

渡邊 智彦 (名大理)

周知のように、核融合研究は、半世紀以上におよぶ努力のもとに営々と進められ、核燃焼プラズマの実現を目指したITER実験が(建設が順調に進めば)2020年代に開始される予定である。この間、プラズマの密度や温度に代表される閉じ込め性能の向上を阻んできた最大の要因が、本書の主題となるプラズマ中の異常輸送、すなわち、乱流輸送である。

非定常・非線形現象の代表例である乱流は、プラズマ中では電磁場揺動と結合し、非平衡な系の輸送を駆動する。さらに核融合や宇宙の無衝突プラズマでは、流体近似も成立せず、分布関数にもとづいた運動論的記述が不可欠となる。そのため、この問題に対する理論的に有効なアプローチは極めて限られる。

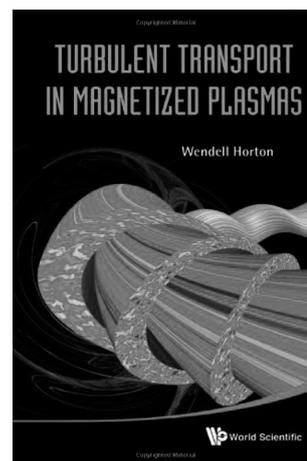
本書には、この困難な問題に対する著者の半世紀近くにわたる格闘の歴史が刻まれている。W. Horton先生は、テキサス大学においてプラズマ乱流輸送の理論研究に長年携わってきた、この分野の第一人者である。40有余年のキャリアにおいて、ドリフト波と呼ばれる磁場中でのプラズマ波動とその不安定性理論において数多くの業績を挙げられた。また80年代以降は、非線形理論や計算機シミュレーションにも取り組まれ、プラズマ乱流研究全般にわたって多彩な業績を残されている。本書は、これらの研究業績を縦系に、

また、旧ソ連、欧州、日本の研究者との交流を横糸にして織りなされた、プラズマ乱流輸送の専門書である。

構成としては、第1章で核融合研究の歴史を振り返り、引き続き数章で実験計測の紹介を交えながらドリフト波の基礎理論について説明している。トラス・プラズマを対象とした乱流輸送のより専門的な話題は後半で扱われ、第9章の不純物輸送、第13章のイオン温度勾配不安定性、第14章の電子温度勾配駆動乱流、第15章の磁気リコネクション等が取り上げられている。

本書の特徴は、欧米の大規模な核融合プラズマだけでなく、基礎的な実験室プラズマや、我が国のトカマクおよびヘリカル型プラズマ等を含む多彩な実験に言及しつつ、なお著者自身の研究や着想を軸として、乱流輸送の幅広いテーマをカバーしている点にある。この力技は、Horton先生ならではの。また、磁気流体理論の限界と二流体理論や運動論の必要性についても、やや詳しく論じられている。一方、最近話題のゾーナル流や運動量輸送には、あまり紙面が割かれていない。

本書はプラズマ波動理論の基礎知識を仮定しており、この分野の初学者よりも専門家向けの構成となっている。また、著者の所属は核融合理論分野における日米科学技術協力の中心機関であり、Horton先生には、日本のプラズ



マ理論研究者の多くが知遇を得た。この国際協力の成果は、本書の重要な構成要素をなしている。表紙絵は、我が国の共同研究者(評者を含む)による乱流シミュレーション結果をデザインしたものであり(これも長年にわたる友好の証と感謝している)、第12章および第13章で議論される。最後に、敢えて本書の難点を挙げるとすれば、共通した内容(イオン温度勾配不安定性等)を含む節が別々に繰り返されるため、全体的な構成が把握しにくいことである。ただ、これも著者の語り口を彷彿とさせ、また印象深い。

(2015年7月24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。

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.php>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)

■理化学研究所特別研究員

1. 特別研究員1名
2. 創発物性科学研究センター量子情報エレクトロニクス研究部門量子機能システム研究グループ
3. 半導体量子ドット列の作製と開放系としての動特性の研究。1, 2次元量子ドット列を用いた電子相関現象のモデル化とエミュレーション実験。
4. 2016年1月1日以降早期
5. 単年度契約の任期制職員(評価により2018年3月迄再契約可)
6. 博士号取得者、又は取得見込者
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト ○主要論文別刷 ○今迄の研究内容の概要と今後の抱負 ○照会可能者からの推薦書又は意見書1通又は2

通(推薦者の氏名、所属、身分、電話、e-mail記載) ○結果通知先(住所、Fax、e-mail等) ○上記応募書類のPDFを作成しメール添付にて送付

8. 候補者決定次第
9. 理化学研究所創発物性科学研究センター量子情報エレクトロニクス研究部門量子機能システム研究グループ 樽茶清悟 tarucha_riken.jp
10. 詳細は(日本語)http://www.riken.jp/careers/researchers/20151214_2/, (English) http://www.riken.jp/en/careers/researchers/20151214_2/参照。

■分子科学研究所助教

1. 助教1名
2. 光分子科学研究領域光分子科学第二研究部門
3. レーザー光を用いて原子・分子及びその集合体の量子ダイナミクスを精密に観測・制御するための研究に意欲的に取り組む実験研究者。同部門の大森賢治教授と協力して研究を行う。
4. できる限り早期
5. 6年を目途に転出を推奨
6. 修士課程修了者又は同等以上の学力を有する者
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, 3頁以内、今後の抱負を含めてもよい) ○業績リスト(所定様式、HP参照) ○主要論文5編以内の別刷又はプレプリント各2部
8. 2016年2月10日(水)消印有効
9. 444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38番地 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
10. 詳細は<http://www.ims.ac.jp/recruit/2015/>参照。本研究所は男女雇用機会均等法を遵守し男女共同参画に取り組んでいる。

■核融合科学研究所ヘリカル研究部教員

[I]

1. 准教授1名
2. 核融合理論シミュレーション研究系統合シミュレーション研究部門
3. 大規模乱流シミュレーションに基づいた乱流輸送モデルの研究開発を行い、統合シミュレーションコード体系の構築に貢献すると共に、大型ヘリカル装置(LHD)プラズマやヘリカル炉核燃焼プラズマの乱流輸送解析を通じて、観測結果の物理的理解・定量的予測、

プラズマの高性能化や炉設計に貢献する事を求める。

4. 決定後早期
5. 5年、在任中の業績評価により再任可
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. 2016年2月19日(金)17時必着
9. 核融合科学研究所管理部総務企画課人事・給与係 電話0572-58-2012
10. 封筒に「核融合理論シミュレーション研究系統合シミュレーション研究部門(准教授)公募関係書類」と朱書し、郵送の場合は簡易書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

[II]

1. 教授1名
2. プラズマ加熱物理研究系イオン加熱物理第二研究部門
3. 重水素負イオンビーム源の性能向上を主導すると共に、背景となる水素負イオン生成メカニズム解明を含めた研究を国内外の共同研究として推進する事を求める。イオン源の安定性、堅牢性も重要な要素となる為、水素負イオン源の開発・運転経験を持つ事が望まれる。重水素実験の安全管理に対しても積極的に関与すると同時に、専門的な知見を継承する若手研究者の人材育成にも積極的に貢献できる教授を求める。
4, 5, 6, 7, 9は[I]と同じ。
8. 2016年3月4日(金)17時必着
10. 封筒に「プラズマ加熱物理研究系イオン加熱物理第二研究部門(教授)公募関係書類」と朱書し、郵送の場合は簡易書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

[III]

1. 助教(年俸制)1名
2. 装置工学・応用物理研究系水素同位体応用研究部門
3. 重水素実験に関わる放射線安全管理機器、特にトリチウム回収除去システムの高性能化と信頼性向上及び処理システムにおけるトリチウムの挙動に関する研究の推進、安全管理に関わる業務として、放射線管理及び放射線教育を求める。核融合炉燃料サイクルに必要な水素同位体の回収分離精製技術における課題抽出とその解決に向けた開発研究の推進、国内外の大学・研究機関等との共同研究を中心とした、学際研究の推進も求める。
4, 5, 6, 9は[I]と同じ。

- 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3編各4部
- 2016年3月18日(金)17時必着
- 封筒に「装置工学・応用物理研究系水素同位体応用研究部門(助教)公募関係書類」と朱書し、郵送の場合は簡易書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

■技術研究組合FC-Cubic研究員

1. 研究員若干名
2. 技術研究組合FC-Cubic研究所
3. 専門分野：電気化学、表面化学、材料化学、無機化学、触媒材料、触媒反応、高分子材料、燃料電池。仕事の内容：固体高分子形燃料電池の普及拡大を目的とした基盤技術開発。電極触媒材料、電解質材料、膜電極接合体(MEA)の性能発現機構及び劣化機構の解明に向けた、評価技術及び解析技術に関する基盤技術の開発を担当して頂く。
4. 応相談
5. 2020年3月31日迄
6. 修士号又は博士号取得者。基礎科学に関する十分な知見を有すること。基礎的な英語力を有すること。他の研究者と円滑にコミュニケーションを図ることができること。燃料電池の普及や水素社会の実現に関心を持っていること。
7. ○履歴書 ○今迄の職務・研究の概要(A4, 2頁以内) ○業務推進部宛e-mail又は郵送
8. 2016年2月29日(月)
9. 135-0064東京都江東区青海2-3-26 技術研究組合FC-Cubic 業務推進部 青木 亮 電話 03-3599-2357 contact fc-cubic.or.jp
10. 書類不返却。提出された書類は本応募の選考以外には一切使用しない。

■早稲田大学理工学術院教員

1. 専任講師、准教授、又は教授1名
2. 先進理工学部応用物理学科
3. 物性理論。従来の枠だけにとらわれず、新しい研究対象、方法の開拓にも意欲的な方。大学院も兼任。日本語及び英語での講義が可能な方。各自独立して研究室を運営。
4. 2017年4月1日以降(状況により着任時期調整)
5. なし(定年は早稲田大学規則に従う)
6. 博士号を有し、私立大学の教育と研究に情熱を持つ方。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リ

スト ○主要論文別刷5編以内 ○研究歴と研究概要 ○着任後の研究計画と教育への抱負 ○照会可能者2名の氏名、連絡先 ○その他参考資料 ○以上の書類を紙媒体(各1部)と電子媒体(各書類のpdfが入ったCD)で提出(詳細はHP参照)

8. 2016年4月22日(金)必着
9. ①169-8555新宿区大久保3-4-1 早稲田大学先進理工学部応用物理学科 原山卓久
② bussei2017 koubo.phys.waseda.ac.jp <http://www.phys.waseda.ac.jp/WP/>
10. 封筒に「物性理論公募書類在中」と朱書し、簡易書留で送付。書類不返却。

■中央大学理工学部物理学科教員

1. 准教授又は助教A(本学独自の制度で、独立して研究グループを営む任期のない教員職)1名
2. 理論系研究室
3. 物性理論。専門科目に加えて他学科向けの基礎科目も担当。
4. 2017年4月1日
5. なし
6. 博士号取得者又は着任迄に取得見込者で、大学院生及び学部生の教育・研究を指導でき、本学科のメンバーと協力しつつ、教育・研究及び学内運営に熱意をもって取り組み、独立した研究室を運営できる方。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト ○主要論文コピー3編 ○今迄の研究概要(2,000字以内) ○着任後の研究計画(1,000字以内) ○教育に対する抱負(1,000字以内)
8. 2016年5月31日(火)必着
9. 112-8551東京都文京区春日1-13-27 中央大学理工学部物理学科 若林淳一 電話 03-3817-1785 waka.phys.chuo-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)

■第43回ニューセラミックスセミナー「創エネルギーに貢献するセラミックス」

主催 ニューセラミックス懇話会、大阪府技術協会

日時 2016年2月23日(火)10:00~16:45
場所 大阪産業創造館6階会議室E(541-0053大阪市中央区本町1-4-5 電話 06-6264-9800)

内容 エネルギー需給システムの経済評価—化石燃料費ゼロの社会—/エネルギーハーベスティングの動向/圧電セラミックスを用いた振動発電技術の開発/圧電厚膜を用いた振動発電素子の特徴と応用/熱から電気を取り出す夢の材料—熱電変換材料—/熱電変換技術と発電への応用

定員 60名

参加費 15,000円、学生2,000円

参加締切 定員になり次第

連絡先 594-1157大阪府和泉市あゆみ野2-7-1 大阪府立産業技術総合研究所内ニューセラミックス懇話会事務局 電話 0725-53-1919 Fax 0725-53-2332 newceramicsf dantai.tri-osaka.jp <http://tri-osaka.jp/dantai/ncf/>

■共用・計測合同シンポジウム2016—先端計測の開発と共用のシナジーによるイノベーション—

主催 物質・材料研究機構

日時 2016年3月4日(金)9:00~17:40

場所 物質・材料研究機構千現地区第一会議室他(305-0047つくば市千現1-2-1 電話 029-859-2000)

内容 「微細構造解析プラットフォーム・ワークショップ」では、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業「微細構造解析プラットフォーム」が推進するナノテクノロジー共用基盤の構築と生み出されたイノベーションについて、研究成果や活動状況を報告。「NIMS先端材料計測シンポジウム2016」では、NIMS「先端材料計測技術の開発と応用プロジェクト」が推進する先端材料計測基盤の開発状況、最新成果を広く発信する場としたい。

定員 100名

参加費 無料

連絡先 305-0047つくば市千現1-2-1 物質・材料研究機構 先端の共通技術部門 奥澤恵子(先端材料計測技術プロジェクト事務局) 電話029-859-2000(ex.3883)

jointsympo2016 nims.go.jp <http://www.nims.go.jp/publicity/events/jointsympo2016.html>

■第4回対称性・群論トレーニングコース

主催 日本結晶学会, 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所

日時 2016年3月7日(月)~11日(金)

場所 高エネルギー加速器研究機構4号館 セミナーホール(305-0801つくば市大穂1-1 電話029-864-5196)

内容 結晶学は構造科学研究の柱であるにもかかわらず, 研究分野の細分化や解析ツールの進化に伴いブラックボックス化しているところがある. 本トレーニングコースでは「空間群や対称性と結晶構造の関係がピンとこない」「構造解析の後にもう一步議論を深めたい」と日頃お感じの方々に結晶学と直結する対称性や群論の知識を学んで頂くことを目的とし, 結晶学で重要な根本原理と幾何学との関係を軸に講義と演習を繰り返しながら進行.

定員 約35名

参加費 無料

参加締切 定員になり次第

連絡先 305-0801つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 高橋良美 電話029-864-5196
tyoshimi post.kek.jp <http://pfwww.kek.jp/trainingcourse/4th/>

■2016年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム

主催 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会

日時 2016年6月6日(月)~7日(火)

場所 東北大学片平さくらホール(980-8577 仙台市片平2-1-1 電話022-217-4905)

内容 高性能計算機システムの研究者と, 計算科学の研究者や高性能計算機システムのユーザとの合同の研究発表及び情報交換の場として開催. 将来の産業・科学技術の発展に重要なHPC技術について,

単なる計算機システム側とユーザ側という個別の立場に留まらず, 双方向の活発な議論とそのフィードバックにより, 先進的な計算機システムとその応用技術を創出し, 時代に即した新しい価値を持つ技術を育てることを狙いとす. 学際的なハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学の研究のなご一層の発展を目指して, 多数の投稿・参加をお願いします.

連絡先 HPCS2016事務局 hpcs2016 sighpc.ipsj.or.jp <http://sighpc.ipsj.or.jp/hpcs/>

■第41回光学シンポジウム

主催 日本光学会

共催 応用物理学会フォトニクス分科会

日時 2016年6月23日(木)~24日(金)

場所 東京大学生産技術研究所An棟コンベンションホール(153-8505東京都目黒区駒場4-6-1)

内容 光学システム及び光学素子の設計, 製作, 評価に関連した講演を中心に, 日本光学会の活動の全分野が対象. 実際的な問題に踏み込んだ講演を歓迎. 問題提起の講演も可.

定員 HP参照

参加費 HP参照

講演申込 [optsymp41-spk myosj.or.jp](http://optsymp41-spk.myosj.or.jp)(光学シンポジウム実行委員会講演担当)宛

講演申込締切 2016年3月7日(月)必着

予稿提出締切 2016年4月18日(月)必着

連絡先 コニカミノルタ(株) 光学事業本部U&C事業部開発部 野村英司 電話042-660-9371 [optsymp41-aud myosj.or.jp](http://optsymp41-aud.myosj.or.jp) http://myosj.or.jp/event2/opt_symp

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

■第10回大阪大学近藤賞

内容 我が国におけるレーザーエネルギー学において(1)研究推進の為の基盤技術の改善・発展, 技能的支援に顕著な貢献のあった技術者, (2)優れた研究業績をあげた若手研究者を対象に大阪大学総長から表彰状と副賞(上限20万円/1件)を授与.

応募資格 (1)技術貢献賞: 年齢不問(現職であることが望ましい). 顕著な技術を完成させレーザーエネルギー学に貢献した複数の技術者も対象. (2)論文賞: 受賞年度(2016年3月31日現在)において満40歳未満. 但し, 出産, 育児休暇により研究を中断する等の事情があった場合は年齢制限を42歳未満迄緩和.

応募締切 2016年2月22日(月)必着

問合せ先 565-0871大阪府吹田市山田丘2-6 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 中井光男 mitsuo ile.osaka-u.ac.jp

その他 応募方法等詳細は<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/jp/information/openings.html#kondosyo>参照.

■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.)

2月ユーザ名 : 16Feb

パスワード: Erwin885

3月ユーザ名 : 16Mar

パスワード: Richard337

ユーザ名とパスワードは巻頭言の前の広告ページにもあります.

行事予定

[詳しくは表中の右欄記載の会誌各巻号の掲示板欄(*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
2015年 9月(～16年 3月)	一般相対性理論誕生100年記念市民講演会	弘前(青森), 仙台, 新潟, 神岡(岐阜), 長岡(新潟), つくば(茨城), 東京, 名古屋, 京都, 大阪, 広島	70-9
2016年 2/15	KAST教育講座「走査型プローブ顕微鏡の最新活用術」	川崎市(神奈川)	70-11
2/20～22	第50回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム	東京	70-12
2/23	第43回ニューセラミックスセミナー「創エネルギーに貢献するセラミックス」	大阪市	71-2
2/27	第40回日本顕微鏡学会関東支部講演会「顕微鏡が切り拓く最先端科学—Leading edge of science advanced by microscopy」	東京	71-1
2/28～3/2	10th Int. Conf. on Optics-photonics Design & Fabrication	Ravensburg-Weingarten(ドイツ)	70-10
2/29	データシェアリングシンポジウム「科学の発展への起爆剤～データ駆動型科学の推進に向けて～」	東京	71-1
2/29～3/4 3/4	第28回コンピューショナル・マテリアルズ・デザイン(CMD)ワークショップ 共用・計測合同シンポジウム2016—先端計測の開発と共用のシナジーによるイノベーション—	茨木市(大阪) つくば市(茨城)	70-12 71-2
3/7～11	第4回対称性・群論トレーニングコース	つくば市(茨城)	71-2
3/15～16	量子ビームサイエンスフェスタ	つくば市(茨城)	71-1
3/19～22	日本物理学会第71回年次大会(東北学院大学)	仙台市	日本物理学会
5/11～13	第5回最先端の顕微鏡と理論計算に関する国際シンポジウム(AMTC 5)	名古屋市	71-1
6/5～10	Rare Earths 2016 in Sapporo, JAPAN	札幌市	70-11
6/6～7	2016年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム	仙台市	71-2
6/12～16	The 11th Int. Conf. on Coatings on Glass and Plastics	Braunschweig(ドイツ)	70-8
6/19～23	Joint RCBJSF-IWRF Conf.	松江市	70-11
6/19～24	The 14th Int. Symp. on Nuclei in the Cosmos	新潟市	70-8
6/23～24	第41回光学シンポジウム	東京	71-2
6/26～30	Compound Semiconductor Week 2016(第28回インジウム燐および関連材料に関する国際会議および第43回化合物半導体に関する国際シンポジウム)	富山市	70-12
9/13～16	日本物理学会2016年秋季大会(金沢大学)(物性)	金沢市	日本物理学会
9/21～24	日本物理学会2016年秋季大会(宮崎大学)(素核宇)	宮崎市	日本物理学会
2017年 3/17～20	日本物理学会第72回年次大会(大阪大学)	豊中市(大阪)	日本物理学会
9/21～24	日本物理学会2017年秋季大会(岩手大学)(物性)	盛岡市(岩手)	日本物理学会
2018年 3/22～25	日本物理学会第73回年次大会(東京理科大学)	野田市(千葉)	日本物理学会
9/14～17	日本物理学会2018年秋季大会(信州大学)(素宇)	松本市(長野)	日本物理学会

編集後記

4月から新著紹介小委員会からのオブザーバーとして編集委員会に参加させていただいている関係で、編集後記を書くことになった。この編集後記を執筆している今は12月の中頃、筆者の所属する学科では四年生の卒業研究を行う研究室を決めるための研究室紹介なるイベントが開催される。学科の先生方が、約90名の三年生を相手に、自分の研究、もしくは研究室の魅力をアピールするという場で、各発表に先生の人柄が出ていたりして、教員が聞いていてもなかなか面白い。時折最新の研究動向などにも言及があったりして刺激を受けることができる。「最先端の装置を使えます!」、「世界記録超えを目指します!」、「アットホームな雰囲気です!」などと、主張する点も人それぞれである。

当然自分も発表しなければならぬわけだが、これがなかなか難しい。まずは自分が卒業研究を行う時に何を考えていたかを思い出してみる。遠い昔の話で記憶もおぼろげなのだが、確か「光よりも早いものはないのだから光を使いたいなあ」、「レーザーって格好いいな」、「現実の世界に近ければ(光物性)潰しがきくかな?」などと考えていたような気がする。こんな不真面目ではまるで発表の参考にはならないのであった。

では、自分はなぜ物理学を志したのか。これに関しては幾分かましな答えができそうな気がする。物理は万物の最も基本的な部分を明らかにする学問であり、普遍性を目指したものであると思ったからだった。宇宙のような想像もできないような小さなスケールから、原子のような非常に小さな

スケールまで、同じ学問が適用できるのである。これはやはり驚くべきことで、自分でもそういうものを勉強し、願わくはその発展に少しでも貢献したいと思ったわけだ。ということで、今回はその初心を思い出し、研究室紹介で自分の研究の普遍性に関して話してみようと思った。

とはいえ、長年タコツボ研究を行ってきた身としては、突然そう考えてもなかなか何を話していいのかわからない。私にとってはそういう時こそ、日本物理学会誌の定番である。春から編集委員会にも出るようになって、もっと勉強せねばと思っていたこともあり、幾つかの記事に目を通して勉強することにした。読んでみると、周りの別分野の記事にも興味が出てきたりしてついこのめり込んでしまう。いつも学会誌が届いたらべらべらと目次を見るだけで、本棚にしまうというのが日常化していたが、もったいないことをしていたものだった。学会誌をもっと読んでいけば、編集委員会での議論にももう少し貢献できるのかもしれない。ともかく、にわか勉強で口にした物性と素粒子論の相似性が、どこまで三年生の心に響くのか。それに関しては、この記事が日の目を見るころには明らかになっているであろう。

そんな私が楽しみにしている記事がある。もう少ししたらはじまる「物理学70の不思議」というシリーズだ。学部生や大学院生など、物理学の世界に足を踏み入れようとしている人達に、今物理学の最先端で何が不思議と思われていて、興味を持たれているのかという点を、70のトピックについてわかりやすく解説するという企画だ。はじめはいろいろと議論もあったのだが、だんだんと形が見えてくるととても面白い

企画だと思う。時折こういう形で総括のような記事があると、一読者としても大変ありがたい。本道のコアな記事への入り口にもなるし、物理学の普遍性を再認識し、研究の幅を広げられるかもしれない。もしかしたら研究室紹介に使える話もあるかもしれない。是非読者の皆さんにも注目していただき、楽しんでほしいと思う。この企画も含めて、まだまだ編集委員会での議論には貢献できていないので、もう少し編集委員らしい仕事をしないといけないと思いつつ筆をおく。

片山郁文〈 〉

編集委員

森川 雅博(委員長), 長谷川修司,
石岡 邦江, 今村 卓史, 沖本 洋一,
加藤 岳生, 岸根順一郎, 栗田 玲,
桑本 剛, 鈴木 康夫, 須山 輝明,
高須 昌子, 田島 俊之, 田中 良巳,
田沼 肇, 常定 芳基, 藤井 芳昭,
松尾 泰, 松本 重貴, 水崎 高浩,
南 龍太郎, 目良 裕, 望月 維人,
李 哲虎, 渡邊 康, 片山 郁文,
板橋 健太, 藤山 茂樹

(支部委員)

飯塚 剛, 石井 史之, 奥西 巧一,
黒岩 芳弘, 酒井 彰, 中村 光廣,
野村 清英, 松井 広志, 水野 義之,
溝口 幸司

新著紹介小委員会委員

片山 郁文(委員長), 浅野 勝晃,
安藤 康伸, 宇田川将文, 大西 宏明,
郡 宏, 越野 和樹, 小山 知弘,
西浦 正樹, 長谷川秀一, 廣政 直彦,
間瀬 圭一, 三輪 光嗣, 山本 貴博

日本物理学会誌 第71巻 第2号 (平成28年2月5日発行) 通巻800号

©日本物理学会 2016

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

白 勢 祐 次 郎

印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

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

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。