

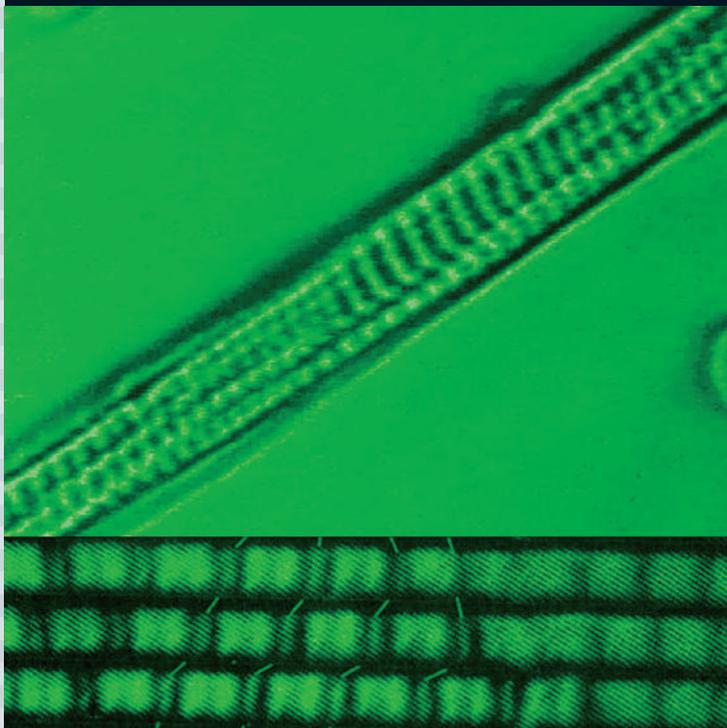
- ホログラフィー原理
- ゲージ・重力対応で探る強相関系の非平衡物理学
- 心筋収縮系にみる自励振動現象SPOC

NO.

7

2015 | vol. 70

B U T S U R I  
日本物理学会誌



# オンライン，オンライン

大槻東巳 (広報委員長，情報システム運用委員長)

3月まで刊行委員長を務め，4月からは庶務理事として広報や情報システムを担当することとなりました。また本務先では図書館長を拝命しました。3月まで雑誌を売る側だったのが急に買う側になってしまい，これを書いている4月現在，混乱しています。しかも今年の2月，3月で刊行や情報システム関係で大きな動きがありました。一つは文科省とJSTの進める学術用語集オンライン版の改訂，もう一つは内閣府の進めるオープンサイエンスです。この場を借りてその動きを整理してみようと思います。

会誌をご覧の皆さんのお手元には『学術用語集 物理学編』(文部省・日本物理学会，培風館)があるでしょうか？ この本は1990年に増訂版が出版された後，絶版になっていますが，幸い同一の内容が国立情報学研究所(NII)のオンライン学術用語集，Sciterm<sup>1)</sup>に移植されており，どなたでも無料で活用できます。Scitermは物理用語だけでなく，28の学問分野にわたる学会が各々編集した用語集をまとめています。

この『学術用語集 物理学編』やScitermはどのように使われているのでしょうか。まずものを書くとき，正確な用語を用いるのに使用します。また，自分で長い書き物をしているとき，用語を統一する基準としても便利です。日本語は漢字，ひらがな，送り仮名など表記が一意的ではない上，外来語・人名のカタカナ表記も様々です。そういう場合に，表記を統一するのに有効なツールとなります。

このScitermが廃止され，近々JSTが運営するJ-Global<sup>2)</sup>に移行するというので，文科省，JST，NIIの担当者と日本物理学会の会長・副会長と関係する理事・事務局職員とで何度か話し合いがもたれました。また刊行委員長・副委員長と事務担当者でJSTの説明会にも参加しました。こうした話し合いや，説明会によると，J-Globalに移行

するに当たって，JSTは各学会が編集した用語集に基づく縦割り検索ではなく，横断的な検索システムを構築するそうです。よい試みに見えますが，一つの利用語に対して，学会ごとに微妙に異なる複数の翻訳が表示されてしまい，用語の統一という目的からはずれてしまうのが気になります。

また，米国の教科書が使っている物理用語とこの物理用語集がずれているとの指摘もあります。融解熱を例に挙げましょう。手元の日本の高校の教科書ではlatent heat, Sciterm=『学術用語集 物理学編』ではheat of fusionとheat of meltingの併記，米国の高校・大学の教科書ではlatent heat of fusionです。<sup>3)</sup> 米国の教科書の間でも表記が統一されていない場合もあるので，どれにあわせるかは議論しなければいけません。少なくとも日本物理学会と高校物理の教科書の差異は教育の観点からも混乱をまねきます。ScitermからJ-Globalへの移行の際に，この点が修正できればよいと思います。また，『学術用語集 物理学編』は4半世紀以上改訂がなされていないので，これを機会に強化できればと思います。

一方，内閣府が進めているオープンサイエンスという試みに，日本物理学会も関わりました。「オープンサイエンス」とは何だと思っ方も多いでしょう(私も2月まで知りませんでした)。簡単に言ってしまうと，論文のオープンアクセスだけでなく，科学論文のもととなるデータのオープン化も進めようというものです。日本物理学会としては，Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) がすでにオープンアクセス雑誌となっていること，Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) も論文・期間によってはオープンアクセスになること，<sup>4)</sup> 無料で使えるarXiv.orgやInspireの活用が積極的に行われていることを内閣府の担当者に伝えました。また，こうしたオープン化の度合いは物理学の分野ご

と，例えば高エネルギー分野と物性分野で異なることを理解してもらいました。

上記に加えて，物理の論文誌には，すでに論文に対してsupplemental materialという項目があり，データのオープン化も進んでいることも伝えました。一方，内閣府はデータをオープン化してもフォーマットがばらばらで結局活用できないことを危惧し，データの規格を統一するデータキュレーター育成を念頭に置いているようです。

上で述べたオンライン用語集の改訂も，オープンサイエンスの試みも，既存のデータをただ統合しただけでは，役に立つどころかかえって混乱をまねくことが問題となっています。情報通信技術の劇的な発展により，ハードウェアは指数関数的に向上していますが，データの整備が追いついていないのが現状です。日本物理学会も，これまで蓄積してきた知識を整理し，会員の研究成果を国際的に発信するとともに，知識・成果を次世代ハードウェアに簡単に移行できる仕組みを考える必要があります。刊行委員長の経験を生かし，広報委員長・情報システム運用委員長として，これらに取り組もうと思います。

## 参考文献

- 1) [http://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta\\_pub/G0000120](http://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000120) Sciterm
- 2) <http://jglobal.jst.go.jp/>
- 3) 高校の教科書は『物理基礎』(三浦登他著，東京書籍)，米国の高校の教科書は*Conceptual Physics* (P. G. Hewitt 著，Addison Wesley)，米国の大学の教科書は*Physics for scientists and engineers* (R. A. Serway and J. W. Jewett, Jr. 著，Cengage Learning)。なお，日本の高校の教科書における英語表記は小さく見出しの横にあって，脚注にあって，気がつかない人も多いです。
- 4) JPSJでは論文が出版されてから一定の期間はオープンアクセスで，その後はライセンスが必要となります。一方，これとは逆に一定期間を経るとオープンアクセスにするという流れがあるようです。

(2015年4月22日原稿受付)

巻頭言 Preface

オンライン, オンライン  
Online, Online

大槻東巳 …… 505  
Tomi Ohtsuki

現代物理のキーワード Trends

ホログラフィー原理—ブラックホールが指し示す量子重力への道筋—  
The Holographic Principle—Lessons from Black Hole Physics—

関野恭弘 …… 508  
Yasuhiro Sekino

交 流 Interdisciplinary

ゲージ・重力対応で探る強相関系の非平衡物理学  
Gauge/Gravity Duality and Nonequilibrium Physics

中村 真 …… 510  
Shin Nakamura

心筋収縮系にみる自励振動現象 SPOC  
Auto-Oscillatory Phenomenon, SPOC, Observed in the Contractile System of Cardiac Muscle

石渡信一, 佐藤勝彦 …… 519  
Shin'ichi Ishiwata and Katsuhiko Sato

最近の研究から Researches

スピン偏極は移るよ, どこまでも: 原子気体の光ポンピングによる金属塩の核スピン偏極  
A Never Ending Series of Spin Polarization Transfer: Hyperpolarization of Metal Salt by Optical Pumping of Atomic Vapor

石川 潔 …… 530  
Kiyoshi Ishikawa

インビーム $\gamma$ 線核分光による新魔法数の発見  
Discovery of New Magic Number via In-Beam  $\gamma$ -ray Spectroscopy

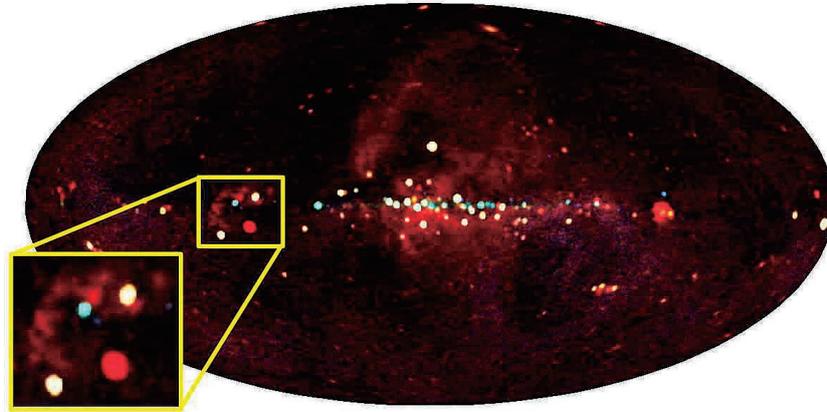
武内 聡, デービッド・ステッペンベック, 宇都野 穰 …… 535  
Satoshi Takeuchi, David Steppenbeck and Yutaka Utsuno

銀河系内で初めての極超新星の痕跡を発見か?  
The Possible Discovery of First Galactic Hypernova Remnant

木村 公, 常深 博, 富田 洋 …… 540  
Masashi Kimura, Hiroshi Tsunemi and Hiroshi Tomida

高圧ねじり加工による金属ガラスの構造若返り  
Structural Rejuvenation in Metallic Glass by High-Pressure Torsion

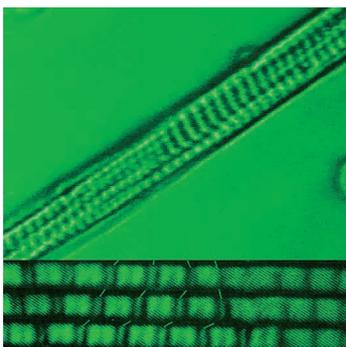
土谷浩一, 孟 凡強, 横山嘉彦 …… 544  
Koichi Tsuchiya, Fanqiang Meng and Yoshihiko Yokoyama



### 最近の研究から（銀河系内で初めての極超新星の痕跡を発見か？）

X線で見えた全天の様子。宇宙ステーションで2009年8月から観測を開始したMAXIのSSCのデータを3年分積分したもの。天の川銀河で初めて極超新星の痕跡をとらえた。

<b>JPSJの最近の注目論文から</b>	3月の編集委員会より	安藤恒也 ……	549
<b>学会報告</b>	第70回年次大会（2015年） シンポジウムの報告	領域委員会 ……	552
<b>新著紹介</b>			563
<b>AAPPSだより</b>			565
<b>研究費配分に関する教育研究環境検討委員会だより</b>			567
<b>掲示板</b>	■人事公募 ■学術的会合 ■その他		570
<b>行事予定</b>			573
<b>会告</b>	■2015年秋季大会の宿泊・交通等の案内（今回は旅行者による取扱いはありません） ■2015年秋季大会会場における託児室の設置について ■2015年秋季大会の参加登録・講演概要集（Webアクセス権および記録保存用DVD版）購入のご案内（講演申込者以外の方への案内です） ■2015年秋季大会講演概要集原稿の書き方および提出について ■2015年度科学セミナー ■賞および研究助成の候補者の募集について ■2015年6月1日付新入会者		576
<b>本会関係欧文誌目次</b>			583



### 表紙の説明

横紋筋（骨格筋、心筋）は、アクチンとミオシン分子モーターが規則的に自己集合したサルコメア（筋節）、それが直列接続した筋原線維とその束からなる、スメクチック様の液晶構造に似た階層構造を形成している。横紋筋収縮系は、収縮と弛緩の中間活性化条件下で自励振動（SPOC）する。1分子システムは確率的に動くナノマシンだが、サルコメアに組み込まれると、集団で自発振動しうる（下図：骨格筋原線維内のサルコメアが振動する位相差顕微鏡連続画像。これらの画像は、緑色で疑似カラー表示している）。一定の化学的条件下で、各サルコメアは急速な伸長と遅い短縮からなるノコギリ波状に一定周期で振動する。筋原線維では、サルコメア振動が同期したり、波として伝播したりといった様々な運動モードが現れる（上図：SPOC波が繰り返し伝播する筋原線維の束）。SPOC特性は、心拍の基盤となる可能性がある。SPOCの数値モデルを含めて、詳細は本号に掲載されている石渡信一氏、佐藤勝彦氏の「交流」記事を参照のこと。

# ホログラフィー原理

## —ブラックホールが指し示す量子重力への道筋—

**Keyword:** ホログラフィー原理

一般相対論によると、ブラックホールの地平面の内側からは、光を含めて何も脱出できない。とすると、ブラックホールに落ちた物体のエントロピーは失われるのだろうか。このような疑問をきっかけとした1970年代のBekenstein, Hawkingらの研究<sup>1,2)</sup>により、ブラックホール自体がエントロピーを持った熱力学的物体であると考えられるようになった。また、ブラックホールからの寄与を含めたエントロピーの総和が減少しない、という「一般化された熱力学第2法則」が提案された。ブラックホールのエントロピーは、事象の地平面の表面積に比例する。その自然な帰結として、量子重力の指導原理とみなされているホログラフィー原理<sup>3)</sup>が提案された。本稿では、ホログラフィー原理の生まれた経緯と現状を解説する。

### 1. ブラックホールの熱力学

ブラックホールは、重い星の重力崩壊等により形成されるが、どのような物質から形成されたかによらず、質量、角運動量、電荷のみで特徴づけられる（「ブラックホール無毛定理」）。まずこの事実が、ブラックホールと、少数の巨視的物理量で特徴づけられる熱力学的物体の類似性を示している。

3次元空間におけるブラックホールは、事象の地平面の面積 $A$ に比例したエントロピー

$$S = \frac{A}{4\ell_p^2} \quad (1)$$

を持つと考えられている。ここで、プランク長 $\ell_p = \sqrt{G\hbar/c^3} \approx 10^{-35}$  m ( $G$ はニュートン定数)は、量子重力の効果が重要になると考えられるスケールである。ブラックホールが物質を吸い込むのに伴い地平面の面積が増大することや、複数のブラックホールが合体してできたブラックホールの地平面の面積が合体前のものの和以上になるという事実は、表面積をエントロピーに関係づけることの妥当性を示唆している。<sup>\*1</sup>

熱力学的物体は、物質を吸収するだけでなく放出することができなければならないが、Hawking<sup>2)</sup>により、ブラックホールは熱的なスペクトルを持った量子的輻射を放出していることが明らかにされた。今日では、この輻射は様々な見方で理解されている。例えば、一様な加速度で運動している観測者が輻射を観測すること(Unruh効果)が知られているが、ブラックホール外部にとどまる観測者は加速度を持っており、そのために輻射を観測しているというこ

ともできる。

質量 $M$ のSchwarzschildブラックホール(回転していないブラックホール)を考えると、地平面の半径<sup>\*2</sup>は $R = 2GM/c^2$ 、面積 $A = 4\pi R^2$ 、温度 $T = \hbar c / (4\pi R)$ となり、エネルギーを $E = Mc^2$ として、熱力学第1法則 $dE = TdS$ が確かに成り立つ。<sup>1)</sup> ブラックホールのエントロピーや温度は量子的な量であり、上の式から得られる値が観測に影響するとは考えにくい<sup>3)</sup>が、理論的には大きな意味がある。

ブラックホールのエントロピーが何の状態数を表しているかは、量子重力の理論によらないと分からない。しかし、ブラックホールがエントロピーを持つなら、熱力学第2法則は、ブラックホールの寄与を含めたエントロピーは減少しない、という形に一般化すべきだろう。Bekensteinは、一般化された第2法則を支持する以下のような興味深い議論を行っている。可能な限り小さなエントロピーを持った物質として、地平面半径程度の波長を持った光子(エネルギー $\hbar c/R$ )を考え、ブラックホールがそれを吸い込んだことによるエントロピー(式(1))の増加を調べると、1のオーダー(すなわちほぼ最小単位)であることが分かる。

### 2. ホログラフィー原理

一般化された第2法則が成り立つならば、空間領域に存在できるエントロピーには上限があり、その領域の表面積 $A$ を用いて式(1)で与えられるはずである。これは、その領域の物質が重力崩壊してできるブラックホールのエントロピーと比較すれば明らかである。重力崩壊により、表面積は小さくなるが、エントロピーは減少しないからである。本稿では簡単のため球対称な場合を考えているが、一般の場合のエントロピーの上限も定式化されている。<sup>4)</sup>

示量性の量であるエントロピーが、領域の体積ではなく表面積によって制限されるというのは不思議である。ただ、これには、エントロピー(状態数)を求めるにはエネルギーのカットオフを導入する必要があり、エネルギーを最も密に詰め込んだ物体であるブラックホールについて、上で触れたようにエネルギー(あるいは質量 $M$ )とサイズ $R$ の間に特定の関係があるという事情が関係している。

一般化された第2法則を踏まえて、't HooftとSusskind<sup>3)</sup>により、「量子重力理論では、 $d$ 次元空間は、その境界(表面)に位置する $d-1$ 次元面上の自由度を用いて記述され、その自由度の数はプランク単位で測った面積(の4倍)あたり1つである」という大胆な提案がなされた。3次元の立体

的な情報を2次元面に記録する技法であるホログラフィーになぞらえて、この仮説をホログラフィー原理という。

ブラックホールは量子的輻射を放出して最終的に蒸発すると考えられており、その際、ブラックホールを構成した物質の情報が保存されるのか問題になっているが、ホログラフィー原理により情報の保存が可能になると考えられている。

### 3. ホログラフィー原理の実現：AdS/CFT対応

空間の表面に位置する基本的自由度とは何だろうか。超弦理論によると、その候補はDブレーンである。超弦理論において重力相互作用は閉じた弦の伝播によって表されるが、理論には、弦の端点が位置することのできるソリトンの物体、Dブレーンが存在する。Dブレーンは、その $N$ 体系が $N \times N$ 行列を用いて表され $SU(N)$ ゲージ対称性を持つという、通常物質とは大きく異なる性質を持っている。<sup>\*3</sup>

Dブレーンを基本的自由度として超弦理論が再構成できることが提案されており、その典型例がAdS/CFT (Anti de Sitter/Conformal Field Theory) 対応である。<sup>5)</sup> 例えば、D3ブレーン(3次元的な広がりを持ったDブレーン)の $N$ 体系は、(4+1)次元反ドジッター(AdS)空間と5次元球面の直積という時空をつくる。その時空上の超弦理論は、D3ブレーンの世界面を記述する(3+1)次元 $SU(N)$ ゲージ理論と等価だと考えられている。このゲージ理論は、重力を含まない通常場の量子論である。 $N \rightarrow \infty$ の極限が古典的重力理論に対応すると考えられている。

このゲージ理論は、ホログラフィー原理から要求される数の自由度を持っている。<sup>6)</sup> ただし、AdS空間は無限の広がりを持っており、場の量子論は無限に小さいスケールに自由度を持つので、自由度を数えるには両者を正則化する必要がある。その際、ゲージ理論が空間の境界(無限遠)において定義されており、AdSの動径方向がゲージ理論のエネルギースケールに対応するという事実が重要となる。AdSの曲率半径を $R$ 、境界方向を $x^\mu$ 、動径方向を $z(\geq 0)$ ( $z=0$ が境界)として、計量を

$$ds^2 = R^2 (\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dz^2) / z^2 \quad (2)$$

で表すと、ゲージ理論の近距離カットオフ $\Delta x > \delta$ は、動径 $z$ に対する長距離カットオフ $z > \delta$ に相当する。<sup>\*4</sup> 以下では数係数を無視するとすると、このカットオフのもとでのAdS空間の表面積は $A = R^3 / \delta^3$ となり、超弦理論から導かれる(4+1)次元プランクスケール $\ell_p$ に関する関係式( $R^3 = N^2 \ell_p^3$ )を用いると、ホログラフィー原理から要請されるエントロピーは $S = N^2 / \delta^3$ となる。<sup>\*5</sup>  $1/\delta^3$ は、近距離カットオフ $\delta$ を持った場の理論における格子点の数にあたるので、

このエントロピーは、確かに、ゲージ理論が $N^2$ 個の成分を持った行列を変数としていることと合致している。

### 4. ホログラフィー原理の展開と課題

上の議論は、単位AdS面積(プランク面積の $N^2$ 倍)あたり $N^2$ 個の自由度が存在するという意味で数勘定として正しいが、完全に満足できない点としてしばしば強調されるのは、AdS面積より小さいプランク面積の領域で何が起きているかが直接明らかになったわけではないという点である。それを明らかにするには、行列で表されるDブレーン特有の性質の理解が必要になる。AdSではない、漸近的平坦な時空、あるいは、漸近的性質が明らかでない宇宙論の時空に対するホログラフィー的記述には、行列が本質的となる。<sup>\*6</sup> また、ブラックホールで情報が蓄積されるメカニズムにも行列が重要な役割を果たすと考えられる。<sup>\*7</sup>

本稿では、ホログラフィー原理の量子重力の構成における意義に重点を置いたが、ホログラフィー原理により様々な量子多体系(ゲージ理論やその他の物性系)の性質が重力理論(超弦理論とその低エネルギー極限)を用いて解析可能になるという側面も重要である。それについては、高柳氏によるAdS/CFT対応の紹介記事<sup>5)</sup>をご覧ください。

#### 参考文献

- 1) J. D. Bekenstein: Phys. Rev. D **7** (1973) 2333; J. M. Bardeen, B. Carter and S. W. Hawking: Commun. Math. Phys. **31** (1973) 161.
- 2) S. W. Hawking: Commun. Math. Phys. **43** (1975) 199 [Erratum **46** (1976) 206].
- 3) G. 't Hooft: arXiv: gr-qc/9310026; L. Susskind: J. Math. Phys. **36** (1995) 6377.
- 4) R. Bousso: Rev. Mod. Phys. **74** (2002) 825.
- 5) 高柳 匡: 日本物理学会誌 **69** (2014) 72.
- 6) L. Susskind and E. Witten: arXiv: hep-th/9805114.
- 7) Y. Sekino and L. Susskind: JHEP **0810** (2008) 065.
- 8) T. Banks, et al.: Phys. Rev. D **55** (1997) 511; N. Ishibashi, et al.: Nucl. Phys. B **498** (1997) 467.

関野恭弘(拓殖大学工学部基礎教育系列)

(2015年4月1日原稿受付)

<sup>\*1</sup> 回転しているブラックホールに粒子を打ち込んで加速させる「Penrose過程」等、ブラックホールからエネルギー(質量)を抽出するプロセスは古典論の範疇で存在するが、その場合も表面積は減少しない。また、ブラックホールの合体前後で、重力波の放出によるエネルギーの損失により質量の和は減少しうるが、面積の和は減少しない。  
<sup>\*2</sup> これは、ニュートン力学における無限遠への脱出速度の公式 $mv^2/2 = GMm/R$ で $v=c$ とおいたものと(偶然)一致する。  
<sup>\*3</sup> 行列の対角要素がDブレーンの位置を表し、非対角要素はDブレーン間をつなぐ弦を表す。 $SU(N)$ 変換で結びつく配位は同一視される。  
<sup>\*4</sup> これは、 $\Delta x$ だけ離れた境界上の2点を結ぶ測地線が、AdSの内部に $z = \Delta x/2$ まで進入することなどから理解できる。  
<sup>\*5</sup> (4+1)次元時空を考えているので、表面積は $R^3$ に比例し、式(1)の分母は $\ell_p^3$ で置き換えられる。なお、表面積の計算には本当はAdSの境界が球面として表される座標系を使ったほうがよい。  
<sup>\*6</sup> 行列を基本的自由度とする量子重力の定式化については、文献8参照。  
<sup>\*7</sup> ブラックホールの地平面では情報が通常場の理論より速く拡散すると考えられているが、行列模型はその性質を持つと期待されている。<sup>7)</sup>

## ゲージ・重力対応で探る強相関係の非平衡物理学



中村 真

中央大学理工学部物理学科/東京大学物性研究所

今から100年あまり前、アインシュタインは特殊相対性理論、ブラウン運動、光電効果の理論を立て続けに発表した。特殊相対性理論はその後一般相対性理論に発展し、重力の基礎理論としての地位を確立した。またブラウン運動の理論はその後の非平衡物理学の先駆けとなった。この奇跡の年から100年あまりが経過した現在、超弦理論を通じて一般相対性理論と非平衡物理学が思わぬつながりを見せ始めている。

このつながりの主役はゲージ・重力対応、あるいはAdS/CFT対応と呼ばれる対応原理である。この対応は超弦理論の枠内で開発されたが、本稿の主眼は、この対応を通じて非平衡統計物理学の問題を一般相対性理論と弦理論の枠内で解析することにある。

非平衡統計物理学の構成は、現代物理学における挑戦的問題の一つである。なぜならば、平衡系においてカノニカル分布を導くような基本原理が非平衡系では成立せず、粗視化後の巨視的物理量の期待値を計算・解析することが非自明となるためである。

平衡系に外力を加えて非平衡系を構成する際に、平衡からのずれを外力による摂動で扱う線形応答理論は非常に成功を収めている。しかし、非線形領域における物理や、そもそも摂動的解析が不可能な外力の非摂動効果の問題は依然として難しい問題である。

本稿では、特に非平衡定常状態に注目し、その線形応答を超えた領域の物理をゲージ・重力対応を用いて重力理論に置き換えて解析する。重力理論に置き換える利点は、

重力理論では粗視化のプロセスが自動的に行われる点にある。従って、非平衡系の分布関数を導出する困難を回避し、巨視的物理量の期待値を直接得ることが可能となる。

具体的には、定常電流の流れる伝導体で構成した非平衡定常系における非線形電気伝導の問題、非平衡定常状態のみで見られる非平衡相転移の問題、また非平衡定常系の有効温度の問題を取り上げる。強相関絶縁体では、多くの系で負性微分電気伝導が見られるが、本稿では負性微分電気伝導をゲージ・重力対応の枠内で微視的理論に基づいて構成し、その発現メカニズムのヒントを探る。また負性微分電気伝導に関連した相転移をゲージ・重力対応で解析し、二次相転移点における臨界現象について言及する。さらに、これらの非平衡定常系における揺動と散逸を関連づける有効温度の概念が重力理論側から自然に現れることを紹介する。

これらの現象を重力理論による記述に移すと、ブラックホール時空中の高次元膜の古典力学として見るができる。また有効温度は、流体中の音波の振る舞いで考案されているアナログ・ブラックホールの物理と深く関連する。

本稿は、特定の研究分野の紹介というよりも、物性物理から一般相対性理論、素粒子理論までの理論物理学を縦断し、ゲージ・重力対応をキーワードとして物理学の新たな方向性を探ることを目指している。この方向での研究が秘める可能性と限界について、読者と一緒に考えていきたい。

## —Keywords—

## ゲージ・重力対応：

本来全く異なる理論として独立に構成されていた、ゲージ場の量子論と重力理論の間の等価性を表す対応関係。超弦理論に基づく自然な類推から、対応の存在を予想することができる。対応の数学的証明は存在しないが、多くの非自明な具体的計算により、その成立についての証拠が蓄積されている。ゲージ理論の相互作用が強くなると、対応する重力理論による記述が単純化するため、強結合ゲージ理論の解析手法として注目されている。

## 非平衡定常状態：

非平衡状態にあるが、巨視的物理量が時間変化しない状態。例えば、熱浴に接した着目系を外力で非平衡にドライブすることで構成できる。その際、外力が着目系になす仕事と、着目系から熱浴に散逸するエネルギーが釣り合うことで、非平衡でありながらも定常な状態が実現される。

## 負性微分電気伝導：

電流（電圧）の増加とともに電圧（電流）が減少する電気伝導特性。電流と電圧の比である電気伝導度はあくまで正であるが、両者の変化分の比である微分電気伝導度は負となり得る。負性微分電気伝導度を持つ素子としてはエサキダイオードやサイリスタが有名である。

## 1. はじめに

現代物理学における未踏の領域は数多くあるが、例えば非平衡系の統計物理学もその一つではなからうか。我々の日常を取り囲む現象の殆どは非平衡現象であるにもかかわらず、非平衡統計物理学の構成は現代物理学の挑戦的課題の一つである。なぜならば、平衡系で拠り所とする基本原理、例えば詳細つり合いの原理などが、非平衡系では少なくとも部分的に破れているからであり、統計分布がカノニカル分布となることも保証されていない。本稿は、この挑戦的課題にゲージ・重力対応と呼ばれる解析技術を応用する。

非平衡系の物理現象を調べるには、どのようなアプローチがあるだろうか。通常は、まず平衡系を準備する。そして、この平衡系に外力を加え、系を非平衡にドライブする。この過程における分布関数の時間発展を正確に追うことができれば、最終の非平衡状態での統計分布がわかり、非平衡状態における物理量の期待値の計算が可能であろう。

確かに、日本が誇る線形応答理論はこのような考え方に基づいて構成されている。平衡状態に弱い外力を加え、外力に対する系の応答を摂動計算する。この摂動の一次（線形）までの近似を行うのが線形応答理論であり、非常に成功をおさめている。<sup>1)</sup>

それでは、線形応答を超えた範囲で計算を行うことは可能であろうか。筆者には少なくとも二つの困難が予想される。確かに、線形応答の範囲を超えて、外力の高次の影響を調べることは原理的には可能である。ただし、実際に高次の計算が可能かという技術的問題があり、これが第一の困難である。第二の困難はもっと深刻である。摂動計算はある基準とする状態（この場合は平衡状態）まわりの漸近展開であって、摂動計算ではアプローチ不可能な非摂動効果が一般には存在する。つまり外力による非摂動効果は、原理的に上述の戦略では解明できない。このような非摂動効果の一つとして、（非平衡状態における）相転移現象が挙げられるであろう。相転移では状態が不連続に遷移するため、特定の状態まわりの摂動計算は破たんしてしまう。

本稿では、平衡系に外力を加えて実現される非平衡系について、線形応答を超えた領域の物理的性質を明らかにするための、新たなアプローチの紹介を行う。このアプローチはAdS/CFT対応、あるいはゲージ・重力対応と呼ばれる対応原理を用いたものであり、超弦理論に立脚している。なぜ超弦理論が非平衡統計物理学に寄与し得るのか、このアプローチにはどのような利点が期待され、同時にどのような限界が懸念されるのか、についてお伝えしたいと思う。

## 2. 粗視化の困難

そもそも、非平衡系の統計物理学の構成はなぜ難しいのであろうか。それは前述のように、詳細つり合いの原理などの平衡系における基本原理が成立しないからである。それでは、なぜこれらの基本原理を我々は必要としていたのであろうか。それは、粗視化を行うためであった。

多体系の物理学では、その力学的自由度が膨大な数となるため、微視的な自由度一つ一つを記述することを放棄する。そのかわり平均化、すなわち粗視化を行ったあとに現れる、少数の巨視的物理量を扱う。巨視的物理量とは、例えば温度や圧力などであり、多体系の巨視的な性質をうまく特徴づける物理パラメータとなっている。粗視化の過程で系の微視的な情報の大半は失われるが、むしろ我々の日常生活の感覚でとらえやすいのは、粗視化後の物理量であるとも言える。例えば、気体分子一つ一つの運動の微視的情報よりも、温度や圧力などの巨視的物理量の方が、日常感覚で認知しやすいであろう。このように、粗視化をすることで不要な情報を捨て、我々が扱うことのできる程度に少数の、しかしながら非常に有用なパラメータで系を記述するのが統計物理学である。

問題は、この粗視化をどのように行うかである。平衡系であれば、詳細つり合いの原理などから、物質の詳細によらず常にボルツマン分布（量子系ではボーズ分布やフェルミ分布）を用いて物理量の期待値を求められた。しかし、詳細つり合いの原理の成立が少なくともあらかじめ保証されていない非平衡系では、粗視化後の巨視的物理量の期待値を求める際に、どのような分布を用いて良いのかが定かではない。これが非平衡統計物理学の困難の一つである。

それでは、この粗視化の困難を回避して、巨視的物理量の期待値を直接求めてしまうことはできないだろうか？ 実は、これが可能であるように思える例がある。それが、次に述べる重力理論である。

## 3. 重力理論の不思議

重力がアインシュタインの一般相対性理論で記述されることは、読者もご存知であろう。この一般相対性理論は重力を時空の幾何学として捉える。例えば、星の周りで人工衛星の軌道が曲線を描くのは、星の質量が時空を歪めたためであると解釈する。歪んだ時空を運動しているため、衛星の軌道が湾曲するのである。このように解釈すれば、光の軌道でさえ、時空の歪みに応じて湾曲する。つまり光も星の重力に引きつけられるのである。それでは星の質量が非常に大きくなるとどうなるであろうか？ 光でさえも星の重力に打ち勝つことができなくなり、脱出することが不可能となる。このような、光が脱出できなくなるぎりぎりの位置を「事象の地平線」（ホライズン）<sup>\*1</sup>と呼ぶ。ここがホライズンと呼ばれる所以は、時空はあくまでその内側まで続いているが、その内側からの光はホライズンを超えて外側の観測者に届くことはないためである。外の観測者の視点では、ホライズンの内側を見ることができないことになり、ちょうど、遠くの地平線の向こう側まで世界は続いているが、その先を目視できないのに似ているためである。光が届かないのであるから、ホライズンが存在すると、それ

\*1 本文での説明はアバーレントホライズンに関するものであるが、ここでは事象の地平線との区別を省略することにする。

表1 熱力学とブラックホールの物理的類似.

	熱力学	ブラックホール
第0法則	熱平衡で $T$ 一定	定常解で $\kappa$ 一定
第1法則	$dE = TdS$	$dM = \frac{\kappa}{2\pi} \frac{dA}{4G_N}$
第2法則	$S$ は減少しない	$A$ は減少しない
第3法則	$T=0$ にできない	$\kappa=0$ にできない

こは黒く見えるであろう. このため, ホライズンを伴う巨大質量の天体をブラックホールと呼ぶ.あるいは, 一般的に, ホライズンが存在する時空をブラックホール時空と呼ぶ.

興味深いことに, このブラックホール時空の物理的性質をまとめてみると, 熱力学の法則と類似していることがわかる(表1).<sup>\*2</sup> ここで,  $T, S, E$ はそれぞれ熱力学における温度, エントロピー, 内部エネルギーであり,  $\kappa, A, M$ はそれぞれブラックホールの表面重力(ホライズンにおける重力加速度), ホライズンの面積, ブラックホールの質量である. またニュートン定数を  $G_N$  と書いた. 表1から  $(T, S, E)$  と  $(\kappa, A, M)$  の間には対応が成立していることがわかる. 従って, 表面重力を温度に, ホライズンの面積をエントロピーに見立てると, ブラックホールの性質は, あたかも熱力学の第ゼロ法則から第三法則までに符合する. しかし, この時点では単なる類似性であり, ブラックホールに熱力学が存在すると結論するのは早計かも知れない.

しかし, ホーキングがブラックホール時空上の場を量子化し, 量子化された場の粒子束を計算したことで状況は一変する. 彼の計算によれば, ブラックホールからは輻射が出ており, その輻射は熱分布をしている. この熱分布の温度は正にブラックホールの表面重力で与えられるのだ. この温度はホーキング温度と呼ばれており,

$$T = \frac{\kappa}{2\pi}, \quad (1)$$

で与えられる. 従って, 表1は単なる類似性ではなく, ブラックホールには実際に温度の概念があり, 熱力学の概念も存在していることになる.

ここで不思議なのは, 粗視化の問題である. 通常, 熱力学が現れるためには, 背後に(例えばアボガドロ数程度の)多数の自由度があり, その自由度の対数としてエントロピーが得られるはずである. あるいは, 熱力学とは, そのような莫大な微視的自由度を粗視化したあとの巨視的な物理学として現れる.

しかし一方で, 一般相対性理論でブラックホール時空を得るために行った作業は何であろうか? それは, アインシュタイン方程式と呼ばれる時空の構造を決定する方程式, つまり2階の非線形偏微分方程式を解いた「だけ」であり, その解の一つとしてブラックホール時空が得られた. 従って, アインシュタインの理論において, 粗視化をあからさ

まに行う場面はない.<sup>\*3</sup> また, アインシュタイン方程式を解く際に熱分布を知っている必要もない. 2階の微分方程式を解くだけである.

重力理論における粗視化とは何か, 背後に存在する微視的自由度とは何か, この問いに答えようとする試みから, ゲージ・重力対応が発見されたと言っても過言ではない.<sup>3)</sup>

#### 4. ゲージ・重力対応

冒頭に述べたように, 非平衡系を準備するには, まず平衡系を用意し, 外力で非平衡にドライブすればよい. 今, 重力理論では, ブラックホール時空という形で何等かの平衡系を準備することができた. あとは, この系に外力を加え, その時間発展を追えば, 系がドライブされた後の非平衡状態の記述が, 重力理論の言語で得られるのではないかと考えられる. しかしその前に, このブラックホールがどのような微視的自由度の多体系に対応しているのか, 読者は気になることであろう. この答えを与えてくれるのが, ゲージ・重力対応である.<sup>4)</sup>

ゲージ・重力対応とは, 量子ゲージ理論と高次元古典重力理論の間の対応関係である. この対応を用いると, 量子ゲージ理論の相関関数の生成汎関数(キュムラント母関数)が重力理論側の古典的作用で与えられ, ゲージ理論の演算子の期待値や相関関数の計算が重力理論の古典的計算に帰着する. つまり, 重力に置き換えることで, ゲージ理論側の経路積分(状態の足し上げ)を自動的に遂行してしまうツールであるとも言える.

この対応は, 超弦理論に立脚している. 弦理論はもともとハドロ物理学を記述するためのアイデアとして考えられたが, 弦理論が重力理論を含むことが判明して以来, 重力を含めた素粒子相互作用の統一理論の候補として発展をしてきた. 超弦理論とは弦理論にボゾンとフェルミオンの入れ替えの対称性(超対称性)を導入したものであり, その理論の枠内に重力理論(一般相対性理論)とゲージ理論<sup>\*4</sup>を含んでいる. もともと異なる理論として独立に作られた重力理論とゲージ理論が, 同一の理論の枠内で記述されるようになったため, 同じ物理現象の記述をゲージ理論で記述したり重力理論で記述したりという理論間の「移動」が可能となった. この顕著な例がゲージ・重力対応である. 従って, この対応を用いることで, 例えばゲージ理論の描像で設定された物理問題を重力理論の数学で解析する, といった書き換えが可能となる.

この書き換えは, 場の理論のボゴリューボフ変換に似て

<sup>\*3</sup> ゲージ・重力対応の枠組みでは, ブラックホール時空の動径方向はエネルギースケールを表現しており, 遠方の境界条件をもとに動径方向に沿って方程式を解く作業は, 繰り込み群を赤外方向に向かって解くことに相当している.<sup>2)</sup> この意味では, アインシュタイン方程式を解く作業の一部は, 粗視化の作業に対応していると言えなくもない.

<sup>\*4</sup> 一般相対性理論もゲージ理論の一種であるが, ここではスピンの1以下のゲージ粒子を記述する理論をゲージ理論と呼ぶことにする.

<sup>\*2</sup> 本稿では  $\hbar=c=k_B=1$  の自然単位系を用いる.

いる。ある現象を記述するには、通常、適切な基底状態（真空）を選び、その上での摂動論を構成するのが一般的である。しかし、記述する状態によって便利な真空は変わる。適切な真空で記述すれば容易に記述できる問題も、「誤った」真空で構成した摂動論を用いてしまうと、大変複雑なものになってしまう。一方、いかにその摂動論が複雑となろうとも、摂動の任意の次数まで計算する能力と、正しい真空に関する非摂動的な情報があれば、原理的には正しい物理量を再現可能である。なぜならば、ここでの問題は「記述方法」の是非であって、理論が間違っただけなら、いかなる記述方法を採用しても、得られる物理は同じはずだからである。

超弦理論においては、理論の枠組みに重力理論とゲージ理論の双方を含んでいるため、同じ物理の記述方法として、重力を基本とする真空上で記述するか、ゲージ理論を基本とする真空上で記述するかを選択肢が存在する。いずれの記述方法を採用しても、記述される物理自体は同一である。しかし、その記述の難易度や基準とする描像は、選択する真空に応じて大きく異なる。この一例がゲージ・重力対応であり、例えばゲージ理論における難解な計算を必要とする物理も、重力理論を基本とする記述方法では比較的容易に解析できてしまう場合があるのである。本稿の狙いは、この「書き換え」を非平衡系の物理に応用することである。

超弦理論を用いたこのような考察で明らかになることは、少なくともある種のブラックホール（例えば5次元の負極率時空に埋め込まれたブラックホールなど）が記述する微視的理論は、あるゲージ理論だということである。そして、本稿ではその詳細は割愛するが、対応する具体的なゲージ理論は、例えば、Dブレーンと呼ばれる超弦理論のソリトンの解を利用することで特定されている。

## 5. 非平衡定常系

それでは話題を非平衡系に戻そう。非平衡系は一般に、時間に依存する系と、時間に依存しない系とに大別することができる。非平衡物理学という挑戦的課題を扱うためには、できるだけ単純な系の研究から出発するべきであろう。そこで、ここでは巨視的物理量が時間に依存しない**非平衡定常系**を考えることにする。

### 5.1 非平衡定常系の例：電気伝導体とランジュバン系

非平衡定常系の例としては、外部電場に平行な定常電流の流れる系がある。例えば、十分大きな部屋の中に置かれた電熱線に、一定の直流電力が供給されている状況を思い浮かべてみよう。この電熱線には電流が一定の電流密度  $J$  で流れており、電熱線内の荷電粒子は電場  $E$  を受けている。この電熱線では単位体積・単位時間あたり  $J \cdot E$  の電力が消費されている。この消費エネルギーは散逸という形で熱となり、一定の割合で周囲の環境—空気で満たされた部屋—に流れ出している。消費電力に比べて周囲の環境が十分大きければ、環境の温度は事実上一定であるとして良く、

環境系は熱浴の役割を果たす。

さて、電熱線に通電した直後は、電熱線の状態は時間とともに変化するのである。例えば電熱線から外部環境に流れ出す熱流は、しばらくの間、時間とともに増えると予想される。しかし、やがて熱流は一定値に近づき、殆ど時間変化しなくなるであろう。このような最終状態では、外部電源が電熱線に対して行う仕事（熱生成）と、電熱線から環境へ逃げる熱流の収支がバランスして、電熱線という部分系では定常状態が実現している。

この定常状態にある電熱線は、非平衡定常系の一つである。確かに巨視的物理量は時間変化しないが、散逸が存在し、熱流が存在するのであるから、系は非平衡にある。従って、電熱線に外部電場  $E$  をかけるとどれだけの電流密度  $J = \sigma E$  が生じるか、つまり電気伝導度  $\sigma$  を求める問題は、非平衡物理学の問題となる。この問題は、 $E$  や  $J$  が十分小さく、両者に線形関係が成立する場合、つまり平衡状態の近傍においては、線形応答理論を用いて扱うことができる。しかし、両者の関係が非線形な領域では、線形応答理論を超えた、非平衡統計物理学の挑戦的課題の一つとなる。

本稿では非平衡定常系として主にここで述べたような電気伝導体を扱う。しかし他の非平衡定常系についても簡単に触れておきたい。非平衡定常系のもう一つの代表例にはランジュバン系がある。これは媒質中を一個のテスト粒子が一定外力を受けながら牽引される系である。この例では媒質が熱浴であり、テスト粒子が着目系である。この着目系には牽引力としての外力が作用して仕事を行っている。媒質とテスト粒子間の摩擦により散逸が発生し、系は非平衡にドライブされている。伝導体の電気伝導度に相当するこの系の輸送係数は易動度（摩擦係数の逆数）である。

### 5.2 非平衡定常系の研究のねらい

それでは、非線形領域の非平衡定常系の研究として何を指すべきであろうか。平衡系の統計物理学の存在意義は、個々の系の微視的理論の詳細に関わらず、広範囲の系に共通な巨視的物理法則を記述する点にあった。例えば熱力学の法則は、物質の微視的な詳細に関係なく、広く一般に成立していた。また、二次相転移の臨界現象には、系のごく少数の特徴で決まる普遍性が存在し、異なる物質、異なる設定での相転移が共通の枠組みで記述された。

平衡系において見られたこのような普遍性や、微視的理論の詳細によらない法則性が、非平衡状態においても、なお存在するのかどうかは非自明である。しかしながら、「一定条件の範囲内という制限付きで、しかし割と広い範囲の系について、系の微視的詳細によらずに成立する巨視的物理法則」を非平衡状況下においても探索し、それを理論的に記述し理解することが、非平衡統計物理学の一つの目的であると私は理解している。そこで、本稿では、このような「共通の性質の候補となり得る物理」を、ゲージ・重力対応の枠組みで探っていくことにする。

## 6. 非平衡定常系の重力理論による記述

非平衡定常系を重力理論で記述するには、どのようにしたら良いであろうか。まず非平衡定常状態を用意するには、外力、熱浴、着目系が必要であった。熱浴に関しては、ブラックホール時空で実現することができる。なぜならば、ブラックホール時空は有限温度の熱平衡系に対応していたからである。それでは、着目系はどのように準備したら良いであろうか。ゲージ・重力対応において、着目系はブラックホール時空中の「物体」に対応する。

この物体とは超弦理論においてDブレーンと呼ばれる高次元の膜状の物体、あるいは超弦理論の構成要素である弦そのものである。なぜこれらの物体が着目系に対応するのかを説明するためには、超弦理論の基礎からひもとく必要があり本稿の範囲を逸脱する。そこで、ここではその概要のみ紹介する。<sup>4)</sup>

ゲージ・重力対応の場合、ブラックホール時空が記述する多体系はゲージ理論における多体系である。ゲージ理論に存在する粒子はグルーオンやクォークであるが、ブラックホール時空はグルーオンの多体系に対応することがわかっている。従って、我々の熱浴は平衡状態にある多数のグルーオンからできている。<sup>\*5</sup>

着目系は熱浴、すなわちグルーオンと相互作用するものでなくてはならない。ゲージ理論においてグルーオンと相互作用するものとして、クォークがある。そこでクォークを用いて着目系を構成してみよう。ランジュバン系の場合、着目系は熱浴中を外力で牽引されるテスト粒子であるが、これはグルーオン熱浴中を牽引される一つのクォークで構成することができる。さらに、クォークの多体系を用意し、クォーク電荷に作用する外場を印加することで、クォーク電荷の輸送を議論することもできる。ここでクォーク電荷を通常の電磁気的電荷に、外場を「電場」に対比させれば、この系は(クォーク電荷の意味での)電気伝導の系となる。

超弦理論の枠組みでは、弦やDブレーンを用いて、一つのテストクォーク(弦)やクォーク多体系(Dブレーン)を構成することができる。従って、ブラックホール時空中に、これらの物体を導入することで、熱浴と相互作用する着目系を導入したことになる。

あとは、外力を着目系に作用させ、非平衡定常状態にドライブすれば良い。これはクォークとして導入した弦の、その端点を一定速度で牽引する状況、あるいはクォーク多体系として導入したDブレーン上に(クォーク電荷の意味での)電場を印加することに相当する。これらは、弦の運動やDブレーン上の電磁場を決める運動方程式を解く際に、運動速度や一定電場が存在するという「境界条件」を課すことに対応している。つまり外力は弦やDブレーンの力学に対する「境界条件」として導入される。

以上を総合すると、重力理論側で非平衡定常系を記述す

るためには、ブラックホール時空上の弦やDブレーンの力学を、外力に相当する境界条件のもとで解けば良い。この力学を記述する運動方程式は、ただかか数本の非線形偏微分方程式であり、解くことができる。ゲージ・重力対応は、非平衡系の記述を、数本の微分方程式を解く問題にまで簡略化してくれるのである。

## 7. ゲージ・重力対応の非平衡定常系への応用：負性微分電気伝導

それでは、具体的に、ゲージ・重力対応の非平衡定常系への応用例を見ていくことにする。最初の例は非線形電気伝導における負性微分電気伝導の問題である。

微分伝導度 $\sigma_{\text{diff}}$ とは、電流密度を $J$ 、電場を $E$ とした時に

$$\sigma_{\text{diff}} = \frac{\partial J}{\partial E}, \quad (2)$$

で定義される。伝導度 $\sigma = J/E$ は負になることができないが、微分伝導度は一般に負になっても構わない。実際、強相関絶縁体の絶縁破壊後の非線形電気伝導には、割と一般的に負性微分伝導が見られることが知られている。<sup>5)</sup>このような非線形電気伝導特性はサイリスタやエサキダイオードのような半導体接合で実現することができるが、強相関絶縁体の非線形電気伝導で興味深いのは、それが接合を持たない単一の物質で実現されるところにある。このような非線形電気伝導を示すデバイスは、スイッチング回路など、電子工学への応用に大きな可能性がある。

ところで、エサキダイオードの負性微分電気伝導は接合間のトンネル効果で説明でき、これが江崎玲於奈氏のノーベル賞受賞につながった。それでは、接合などの空間的構造を持たない系での負性微分電気伝導は、どのようなメカニズムで実現されるのであろうか？例えば、有機導体における負性微分電気伝導は、電流によって特定の構造の荷電秩序が消失することで生じるとする研究がある。<sup>6)</sup>物質ごとに異なるメカニズムが存在する可能性もあるが、いずれにせよ問題を整理し、理解を深めておくことは重要である。

そこで、一つの問題設定を行う。接合などの空間的構造を持たない系で、荷電秩序などの構造変化も伴わずに負性

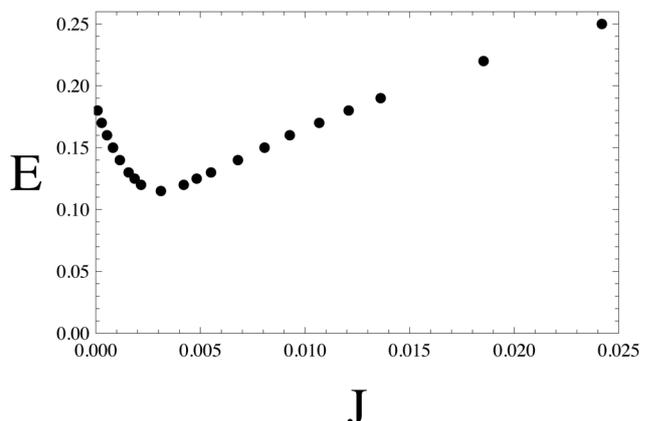


図1 D3-D7モデルが示す $J$ - $E$ 特性の一例。(文献7より転載。)

\*5) ここで、系は非閉じ込め相にあるものとする。

微分電気伝導を実現することはできるだろうか？ またその場合、どのようなメカニズムが重要となるのであろうか？

この問いに対して、ゲージ・重力対応は一つの例を与えてくれる。図1は、筆者がD3-D7モデルと呼ばれるゲージ・重力対応を用いて求めた負性微分伝導の一例である。<sup>\*6,7)</sup> この系は、非閉じ込め相にあるゲージ粒子の多体系であり、クォーク（電荷のキャリアに相当）やグルーオン（熱浴の構成粒子に相当）は格子を形成することなく、言わば、均一なガス状の状態にある。このモデルでは相互作用の強い極限をとっており、無限体積系を扱うため、系に流れる電流は非バリスティックな電流である。図の $J$ - $E$ 曲線における $E$ の最小値は絶縁破壊の臨界電場を表す。電場が十分小さい領域では系は絶縁体であるが、臨界電場以上の外部電場を印加すると絶縁性が破壊され、電流が流れる。この絶縁破壊は、外部電場による正負電荷粒子の対生成によるものと解釈できる。電流密度をコントロールパラメータとして電場の値を逐次読み取ると、低電流密度領域で傾きが負の負性微分伝導が現れる。この振る舞いは、強相関絶縁体で見られる非線形電気伝導と定性的に類似のものである。なお、この系に電荷をドーピングして電荷の対生成以外の寄与による電流を流すことも可能であるが、そこからは負性微分伝導が生じないことが解析的に示される。

少し具体的に式を見てみよう。このモデルでの非線形電気伝導度は次の式で与えられる。<sup>8)</sup>

$$\sigma = \sqrt{aT^2 \sqrt{E^2 + b} \cos^6 \theta(E) + cp^2(E^2 + b)^{-1}}, \quad (3)$$

ここで、 $a, b, c$ 、はモデルに依存する係数、 $T$ は熱浴の温度、 $\rho$ は系の電荷密度である。 $\theta(E)$ はモデルのダイナミクスで決まるが、この値はキャリアの対生成に必要なエネルギースケール～バンドギャップに連動している。 $\theta(E)$ は $E$ に応じて変化し、電気伝導度は $E$ の複雑な関数として与えられている。 $\rho$ に依存する平方根中の第2項は、あらかじめ系にドーピングされた電荷が外部電場を受けて流れる電流の寄与を与えている。一方、第1項はキャリア密度をゼロにしても残る項であり、外部電場により対生成された正負電荷対による電流の寄与を表している。一見してわかるように、平方根中第2項のキャリア密度依存項からは負性微分電気伝導は得られない。従って、この系では平方根中第1項で表される外部電場によるキャリア対生成が負性微分伝導の発現に重要な寄与をしていることが結論される。

もちろん、負性微分伝導を示す実際の具体的な物質において、このモデルと同様のメカニズムが働いているとは限

らない。しかし、次のような主張を行うことは可能であろう：

外部電場の印加で正負キャリア対を生成することのできる系では、負性微分伝導を実現できる可能性がある。

このような視点で、サイリスタのような働きをする単一の物質から成る素子を探す（あるいは構成する）ことは意味を成すのではなかろうか。少なくとも、ゲージ・重力対応は、そのような振る舞いをする具体的微視的モデルが存在することを示している。

## 8. ゲージ・重力対応による新奇な非平衡相転移の発見

このモデルの非線形電気伝導特性をさらに詳細に調べると、興味深い現象が見出される。図2は、熱浴の温度を様々な値にとった場合の $J$ - $E$ 特性である。（文献9より転載。）点Aでは $J$ の増加に伴い、負性微分伝導（NDC）から正の微分伝導（PDC）へスムーズに移行している。言わばNDCからPDCへのクロスオーバーが見られる。一方、点Gでは $J$ の変化でNDCからPDCのブランチへ移行する際に、伝導度の値が不連続に転移している。言わば、一次相転移である。そして熱浴の温度がちょうど $T_c$ の時、NDCからPDCへの移行にあたって伝導度は連続に変化するものの、微分伝導度が不連続に転移している（点B）。これは言わば二次相転移である。点Bは臨界点 $J=J_c, T=T_c$ に対応し、微分伝導度が発散している。この臨界点近傍において伝導度の飛びを秩序変数に見立てた場合、平衡系の二次相転移に類似の臨界現象が見られており、例えば $\beta \sim 0.5$ という平均場理論での値に近い臨界指数が得られている。<sup>9)</sup>

ここで特徴的なのは、これら全ての転移は、電流密度が非ゼロの非平衡定常状態の非線形領域において起きている

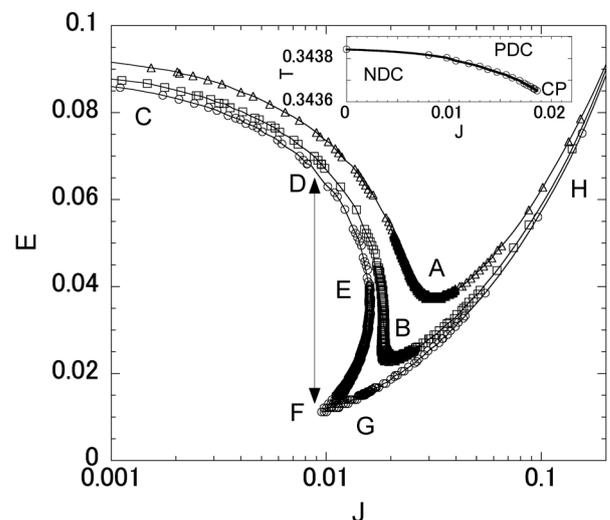


図2  $T = 3.4379 \times 10^{-1} > T_c$  (丸印),  $T = 3.4365 \times 10^{-1} = T_c$  (四角),  $T = 3.4337 \times 10^{-1} < T_c$  (三角) における $J$ - $E$ 曲線。挿入図は相図を表し、CPは臨界点を示す。（文献9より転載。）

\*6 本稿で示す図の軸上の単位は自然単位系を採用しているが、実際の値は理論パラメータの設定で任意に変化する。例えば熱浴の温度を5[K]、荷電粒子間の有効相互作用をクーロン型と見立てた場合の微細構造定数を $O(1)$ 、理論のエネルギースケールをミリeVに設定すると、このモデルの絶縁破壊点は $J \sim 10^{-4}$  [mA/mm<sup>2</sup>]、 $E \sim 0.5$  [V/m]の程度となる。

ことである。電流ゼロの平衡状態、あるいは線形応答に限った解析では、決してこの転移を検出することはできない。また、たとえ非線形領域までの摂動計算が可能であったとしても、状態の転移に関しては摂動的解析が適用できない。ゲージ・重力対応では、非線形領域における $J$ - $E$ 特性の非摂動的解析が可能であるために、このような相転移の検出が可能となった。

それでは、実際にこのような相転移が現実の物質でも観測され得るのであろうか？ 筆者はそのチャンスはあると考えている。平衡系の経験では、二次相転移における臨界現象は系の詳細によらず広範囲の系で性質が共有されていた。ここで見出された非平衡二次相転移の臨界現象についても、微視的モデルの相違を超えて現実の様々な物質系と性質が共有されている可能性を期待したい。現在、筆者は強相関係の非線形電気伝導を実験的に研究しているグループと連絡をとりあい、検討を重ねている。

## 9. 非平衡定常系の有効温度

それでは、このような非線形電気伝導や非平衡相転移の物理におけるエッセンスは何であろうか？ また、これらの現象を記述するためには、どのような物理パラメータを採用するのが便利であろうか？ このような問いに答えるための試みとして、非平衡定常系の有効温度について述べたい。

平衡系を記述する重要なパラメータに温度があった。それでは非平衡定常系にも温度概念が存在するのであろうか？ もちろん、非平衡定常系は熱浴に接しているため、熱浴の温度 $T$ は常に系のパラメータの一つとして存在している。実際8章では熱浴の温度 $T$ を系のパラメータとして積極的に使用した。しかし、温度と類似の役割を担う非平衡定常系特有の物理量が他に存在しないだろうか？ 実は7章、8章で扱った系には、熱浴の温度 $T$ に加え、着目系の有効温度 $T_{\text{eff}}$ が存在していることがわかる。ゲージ・重力対応において、この有効温度の記述に重要な役割を果たすが、次で述べる「アナログ・ブラックホール」である。

### 9.1 アナログ・ブラックホール

読者の中には、流体における音波のホーキング輻射に関する研究を耳にしたことのある方もおられるであろう。<sup>10)</sup> これは次のような系である。まず流体を準備し、ある流速で流体を流す。ただし、下流に向かうに従って流速が増大するように設定し、やがて流速がその流体中の音速を超えるようにしておく。このような設定では、十分下流域で発せられた音波は、流れに逆らって上流まで伝搬することができなくなる。流速がちょうど音速と一致する点を「ホライズン」と呼ぶことにすれば、ホライズンよりも下流からの音波は、ホライズンよりも上流に伝搬することができない。これはブラックホールにおける光の伝搬とホライズンとの関係に似ている。実際、ホライズン近傍の音波の線形波動方程式は、ブラックホール時空上のスカラー場の波動

方程式と全く同じとなる。従って、音波を量子化すると、ブラックホールの場合と同様に、「音波のホーキング輻射」が発生し、この意味で、この流体系のホライズンに関連した「ホーキング温度」が存在することになる。

このような系は、「アナログ・ブラックホール」と呼ばれ、一般相対性理論におけるブラックホールとしばしば対比される。「ホライズン」の存在や、「ホーキング輻射」、「ホーキング温度」の存在という意味では、通常のブラックホールに大変類似しているが、一方で、通常のブラックホールとは全く異なる側面もある。例えば通常のブラックホールが立脚する基礎理論は一般相対性理論であるが、上記の流体によるアナログ・ブラックホールが立脚するのはナビエ・ストークス方程式である。従って、通常のブラックホールと同様に「ホーキング温度」に関連した熱力学の法則までもが成立しているという保証はない。

### 9.2 非平衡定常系の有効温度

興味深いことに、ゲージ・重力対応で非平衡定常系を記述すると、熱浴を構成する一般相対性理論のブラックホールに加え、着目系を記述するアナログ・ブラックホールが新たに現れる。<sup>11)</sup> 先ほどの流体の例では非自明な流速分布が存在することが重要であった。ゲージ・重力対応におけるアナログ・ブラックホールでこの「流れ」に相当するものは何であろうか？ 実は、これは非平衡定常系における散逸である。非平衡定常系では外力により着目系に注入される仕事が散逸として熱浴に放出されるが、このエネルギーの流れを重力側で記述すると、無限遠方(正確には、時空の境界)から注入されたエネルギーが熱浴を記述するブラックホールに向かって流れ込み、やがてブラックホールに吸収される流れとして記述される。このエネルギー流を計算すると、正確に単位時間あたりの散逸(例えば、電気伝導の系では $J \cdot E$ )に一致している。重力側には、このようにブラックホールに流れ込むエネルギー流があり、この影響で、熱浴のブラックホールとは別に、アナログ・ブラックホールが構成されるのだ。

このアナログ・ブラックホールのホライズン(有効ホライズンと呼ぶことにする)は熱浴を記述するブラックホールのホライズンの外側に位置し、一般に両者の位置は(散逸のない平衡系でない限り)一致しない。それでは両者のホーキング温度はどうであろうか。アナログ・ブラックホールでのホーキング温度を有効温度と呼び $T_{\text{eff}}$ と書くことにすると、一般に散逸がゼロでない限り $T \neq T_{\text{eff}}$ である。<sup>\*7)</sup> つまり、このようにゲージ・重力対応で記述される非平衡定常系には、 $T$ と $T_{\text{eff}}$ の二種類の「温度」が存在している。

両者の大小関係を調べることは興味深い。直観的には $T < T_{\text{eff}}$ であることを予想する読者も多いかも知れないが、具体的に解析してみると $T > T_{\text{eff}}$ となる多くの例を作るこ

<sup>\*7)</sup>  $T$ と $T_{\text{eff}}$ の相違は外力の2次のオーダーであり、線形応答の範囲では相違を見ることができない。

とができる。<sup>11)</sup> このような例では、着目系を外力で非平衡にドライブすることで、「温度」が熱浴よりも下がるのである。もちろん、これは何らかの基本的な物理法則に反するものではない。高温の物質と低温の物質を接合すると、エネルギーは高温側から低温側に流れるという常識は、エントロピー増大則から導くことができる。しかし、エントロピー増大則は孤立系について成立する法則であり、我々の非平衡定常系のように、外力の供給源と結合している開いた系にはそのまま適用できない。さらにそもそも線形応答を超えた非平衡領域においてエントロピーが定義でき、その増大則が成立するかどうか非自明である。従って、我々の非平衡定常系において  $T > T_{\text{eff}}$  を排除する基本原理は無い。

それでは、この有効温度の物理的な意味は何であろうか。流体におけるアナログ・ブラックホールのホーキング温度は、音波、つまり流体の「揺らぎ」で検出されることを思い出して欲しい。ゲージ・重力対応におけるアナログ・ブラックホールのホーキング温度は、非平衡定常状態における物理量の揺らぎ、例えば電流密度などの揺らぎで検出される。この揺らぎと有効温度の関係を解析すると、ちょうど、この有効温度が非平衡定常状態における揺動と散逸を結びつけていることがわかる<sup>11)</sup>：

$$G^{\text{sym}}(\omega) = -\coth(\omega/2T_{\text{eff}}) \text{Im} G^{\text{R}}(\omega), \quad (4)$$

ここで  $G^{\text{sym}}(\omega)$ 、 $G^{\text{R}}$  はそれぞれ非平衡定常状態における、物理量の揺らぎ(ワイトマン関数)および散逸(遅延グリーン関数)の角周波数  $\omega$  による表示である。これは平衡系の揺動散逸関係式を非平衡定常状態に拡張したものと解釈される。従って、我々がアナログ・ブラックホールを通して見る  $T_{\text{eff}}$  は、非平衡定常系における揺動散逸関係式を特徴づけるパラメータであり、非平衡定常状態における揺らぎの様々な相関関数の特徴づけるパラメータであると言える。従って、少なくとも、揺らぎに関係した物理量の記述においては  $T_{\text{eff}}$  が有益な役割を果たす可能性がある。また揺らぎ(ノイズ)も散逸も、ともに測定可能量であるから、実験的に  $T_{\text{eff}}$  を測定することも原理的には可能である。もともと、ゲージ・重力対応において有効温度の議論がなされる以前から、揺動散逸関係式を用いて有効温度を定義する試みは非平衡統計物理学の研究において議論されていた。<sup>12)</sup> ゲージ・重力対応では、この有効温度の定義を、アナログ・ブラックホールという全く別の視点から我々に示してくれる。

ところで、有効温度と熱浴の温度の大小関係は何が決定しているのだろうか？ 筆者らの最近の研究<sup>13)</sup> では、外部電場による正負電荷の対生成の効果が有効温度を熱浴の温度よりも高める働きをしていることがわかっている。逆に、対生成が抑制される設定では、熱浴温度よりも有効温度を下げるのが容易となる。現在、さらに深い理解に向けて研究を行っている。

## 10. 今後の展望

ここまで、ゲージ・重力対応を用いた非平衡定常系の解析手法について述べてきた。この方法は、従来とは全く異なるアプローチであり、重力理論特有の新たな視点を提供してくれる。また線形応答領域を超えて、外力の非摂動効果も含めて解析することを可能にしてくれる。

### 10.1 ゲージ・重力対応を用いるにあたっての懸念

一方で、ゲージ・重力対応が成立する微視的理論は、ある意味理想化された理論であり、現時点では様々な制約がついている。まず、ゲージ理論と重力理論はそれぞれ超弦理論に埋め込み可能なものでなければならない。<sup>\*8</sup> そのようなゲージ理論の多くは超対称ゲージ理論である場合が多く、現実の世界には存在しない様々な粒子を含んでいる。またゲージ・重力対応における計算を容易にするために、通常、ゲージ理論側のゲージ群のランク  $N_c$  を無限大にとり (large- $N_c$  極限)、相互作用も大きい極限(強結合極限)をとる。このように微視的理論のレベルでは、現実世界の特定の微視的理論ではなく、ゲージ・重力対応が適用しやすい理想化した理論を採用していることになる。この理想化は、非平衡統計物理学へ応用する立場では、有利な理想化なのであろうか、それとも不利な理想化であらうか。

### 10.2 ゲージ・重力対応を応用するにあたっての考え方

まず、ゲージ・重力対応の成立に超対称性は本質的ではないと考えられており、超対称性を持たないゲージ理論に対する重力対応も存在している。また、超対称ゲージ理論で対応を構成しても、有限温度や有限密度を導入した時点で超対称性そのものは破れてしまう。従って、モデルがもともと有していたかも知れない超対称性は、非平衡定常状態においては既に破れており、本稿で紹介した内容は、超対称性成立時のみに存在する特殊な現象であるとは言えない。

一方、用いた微視的理論の粒子構成は現実世界に存在するものと異なっているという事情は常に存在する。しかしながら、もともと統計物理学の主眼は、(例えば平衡系の熱力学の法則のように)微視的理論の詳細を超えて広範囲の系に共通な巨視的物理量の法則性を見出すことにあった。従って、ゲージ・重力対応で採用した微視的理論が、現実の系と同じ巨視的物理量の法則性を共有しているか否かが焦点となる。これについては先験的に結論を述べることはできないが、その可能性を期待することはできる。

また、微視的理論が上記のように理想化された理論であることは、有利な理想化となっている可能性もある。例えば、本稿で紹介したモデルでは、もとの理論の超対称性のおかげで共形不変性が存在し、荷電粒子間の相互作用がQCD的なものではなく、むしろ物性系になじみやすいQED的なクーロン型となっている。また理論の強結合極

<sup>\*8</sup> 必ずしも超弦理論に埋め込み可能ではないモデルを現象論的に用いる流儀もあるが、本稿ではミクロとマクロをいかにつなぐかに主眼を置くこととし、その意味で超弦理論に埋め込むことで微視的理論との対応が明白となるモデルに焦点をあてる。

限を採用しているが、これは構成粒子の平均自由行程や相互作用の時間スケールを短くし、粗視化、すなわち巨視的物性との階層性の想定を正当化している。ゲージ群のランク  $N_c$  を大きくとる極限は、物性理論におけるスピン系の球形模型のように、自由度を大きくして解析を容易にする役割がある。

本稿で目指す応用上の一つの焦点は、模型の単純さにあるかも知れない。例えば、スピン系を記述するイジング模型を考えてみよう。実際、イジング模型と厳密に同じハミルトニアンを持つ系は現実には存在しない。イジング模型は複雑な現実系を極限まで単純化した模型である。しかし、その単純さゆえに、スピン系の相転移の本質を可視化し、豊富な物理を単純に語りかけてくれる。物理の本質のみを抽出した単純なモデルであるからこそ、成功を取めていると言えるであろう。

それでは、ここで用いる微視的理論はどうであろうか。確かに、理論に含まれる粒子の種類は現実には存在するゲージ理論のそれよりも余分な粒子が含まれている。しかし、そのおかげで相互作用は単純化している。このため、重力理論に置き換えた場合の時空は、(典型的には AdS 時空と呼ばれるような) 単純な時空となっている。仮に、現実系と厳密に同じ微視的理論の重力対応を構成しようとするならば、重力理論側は、より複雑なものとなるであろう。

本稿の試みがイジングモデルのような成功を取めるのか、それとも、「綺麗だが現実系とは異なる」模型として終わるのか、現時点ではわからない。しかし、それを見極めるまで研究を進めることに、意味があるのではないかと考える。

今から 100 年前、アインシュタインは相対性理論、ブラウン運動、光電効果、の理論を立て続けに発表し、ブラウン運動の理論はその後の非平衡物理学の先駆けともなった。その奇跡の年から 100 年あまりが経過し 21 世紀となった今、一般相対性理論と非平衡物理学が超弦理論を介して思わぬ結びつきを見せている。あらためてアインシュタイン

の業績に畏敬の念を感じざるを得ない。

## 参考文献

- 1) 線形応答理論の成立およびその後の発展に関しては、「特集：線形応答理論から 50 年—非線形・非平衡の物理学」日本物理学会誌第 63 巻第 10 号 (2008) の各記事が大変参考になる。
- 2) 福岡将文：日本物理学会誌 56 (2001) 195.
- 3) ブラックホールの熱力学やその微視的自由度の解明についての解説としては、夏梅 誠：日本物理学会誌 54 (1999) 178; 重森正樹：日本物理学会誌 61 (2006) 506.
- 4) ゲージ・重力対応や関連する超弦理論の用語などの解説としては、今村洋介：日本物理学会誌 55 (2000) 188; 酒井忠勝：日本物理学会誌 60 (2005) 876; 夏梅 誠：日本物理学会誌 62 (2007) 689; 杉本茂樹：日本物理学会誌 68 (2013) 524.
- 5) T. Oka and H. Aoki: Lect. Notes Phys. 762 (2009) 251.
- 6) 森 初果, 寺崎一郎, 森 健彦：化学 60 (2006) 12.
- 7) S. Nakamura: Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 1105.
- 8) A. Karch and A. O'Bannon: JHEP 0709 (2007) 024.
- 9) S. Nakamura: Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 120602.
- 10) 奥住 聡, 阪上雅昭：日本物理学会誌 63 (2008) 845.
- 11) ゲージ・重力対応における有効温度の振る舞いを系統的に調べた研究としては、S. Nakamura and H. Ooguri: Phys. Rev. D 88 (2013) 126003.
- 12) L. F. Cugliandolo: J. Phys. A: Math. Theor. 44 (2011) 483001; 原田崇広：日本物理学会誌 64 (2009) 445.
- 13) H. Hoshino and S. Nakamura: Phys. Rev. D. 91 (2015) 026009.

## 著者紹介

中村 真氏：専門は素粒子理論。ゲージ・重力対応を物性物理学やクォーク・ハドロン物理学に応用することに力を入れている。趣味は山岳登攀やピアノ演奏。

(2012 年 9 月 6 日原稿受付)

## Gauge/Gravity Duality and Nonequilibrium Physics Shin Nakamura

abstract: The gauge/gravity duality is a map between a quantum gauge theory and a higher-dimensional gravity. The description of many-body dynamics of the gauge particles can be highly simplified in the gravity side through the duality. This advantage has been recently applied to describe the non-equilibrium non-linear phenomena, such as negative differential conductivity of the gauge theory. We overview how it works.

# 心筋収縮系にみる自励振動現象 SPOC



石渡 信一

早稲田大学理工学術院物理学科



佐藤 勝彦

北海道大学電子科学研究所

筋収縮運動の仕組みは、生物物理学や生理学が最も長く取り組んできた研究テーマの一つである。筋肉は力を出して収縮（短縮）する。骨格筋は手足の運動装置として、心臓は血液を体中に循環させるポンプとして働き、そして、内臓筋は胃や血管壁として蠕動運動などを担う。運動機能という点では、骨格筋は随意筋（生物の意思で働く）、心臓と平滑筋は不随意筋（自律神経に支配されて働く）と呼ばれる。一方、構造の面からは、骨格筋と心筋は横紋筋、内臓筋は平滑筋に分類される。液晶構造と対比させると、横紋筋はスメクチック（Smectic）、平滑筋はネマチック（Nematic）様である。つまり、横紋筋は太いフィラメント（分子モーターであるミオシン分子の線維状重合体に、弾性タンパク質（タイチン/コネクチン）などが結合した複合体）と細いフィラメント（アクチン分子の重合体に、トロポミオシンやトロポニンという、アクチンの状態を制御するタンパク質が結合した複合体）が規則正しく配列したサルコメア（筋節）構造を作り、それが周期的に配列している。それに対して、平滑筋は2種類の筋フィラメントが一定方向に配列しているが、横紋筋のような周期性はない。このように、筋収縮系は生体液晶ともいえる。

さて本稿のテーマである横紋筋収縮の仕組みに関する研究は、1954年に二人のHuxleyによって“滑り運動機構”が提唱されて以来、それを分子レベルで検証する歴史だった。数十年にわたって筋生理学の研究が主体だったが、1980年代になって、1

分子生物学が勃興し、1本のアクチンフィラメント（FA）の蛍光顕微鏡による可視化や、ミオシン分子モーターを吸着したガラス基板上をFAが一方向に“滑り運動”する実験系が開発され、さらに、ミオシンやアクチンの構造決定などと相まって、ミオシン分子モーターの首振り機構（レバーアーム機構）が基本的に正しいことが証明されてきた。純粋なFAとミオシン、それにATP（アデノシン3リン酸）だけだと、FAはATPが枯渇するまで滑り続け、On（収縮）-Off（弛緩）の制御ができない。しかし1960年代にEbashiらによって、アクチン調節タンパク質のトロポニン（ $\text{Ca}^{2+}$ 結合タンパク質）・トロポミオシン複合体が発見され、制御の基本的仕組みが解明された。つまり、筋収縮システムはOn-Offの2状態をとり、その制御は $\mu\text{M}$ 付近の $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の変化によって決まるというものである。こうして、筋収縮と制御の仕組みに関する生物物理学的研究は、分子間・分子内レベルの研究を残すのみとなったかにみえた。

ところが筆者のグループは、筋収縮系（細胞膜・内部膜を除去した筋線維・筋原線維のこと）がOn-Offの中間活性化条件の広い範囲にわたって自発的に振動収縮し、サルコメア振動が互いにシンクロしたり、筋原線維に沿って伝播することを発見し、この現象を自発的振動収縮（SPontaneous Oscillatory Contraction: SPOC）と名付けた。本稿では、SPOC現象の概略を述べ、心拍における生理的意義の可能性を論じたのち、SPOCの数理モデルを概説する。

## —Keywords—

### 筋収縮：

筋肉は構造上、心筋・骨格筋などの横紋筋と、血管などの平滑筋に分類される。横紋筋は、太い（ミオシン）フィラメントと細い（アクチン）フィラメントに構造タンパク質が液晶的に配置した、サルコメア（筋節）と呼ばれる数 $\mu\text{m}$ サイズの構造単位の繰返し構造体である。サルコメアが直列に連結した線維を筋原線維、その束を筋線維、そしてこれら膜系を含まないタンパク質集合体を“筋収縮系”と呼ぶ。筋収縮系では、ATPを加水分解する“力学酵素”のミオシン分子モーターとアクチンが相互作用し、“滑り力”を発生する。この相互作用の制御因子が $\text{Ca}^{2+}$ である。筋細胞が興奮すると、膜小胞から $\text{Ca}^{2+}$ が放出され、制御タンパク質トロポニンに結合し、トロポミオシンを介してアクチンの状態をOnにする。その結果、ミオシンが発生するカパルスがアクチンに伝わり、その合力が筋収縮系の両端に伝わる。こうして、収縮（On）・弛緩（Off）は $\text{Ca}^{2+}$ 濃度で制御され、筋収縮系は2状態のいずれかをとるとというのが、筋生理学の通説である。

### 自励振動：

非振動的な入力の下で、その系自体の特性によって自発的に振動を起こす現象。今回の話題では、ATPや $\text{Ca}^{2+}$ 濃度などの化学的環境や外力などが一定の状況下で、サルコメアが収縮（短縮）・弛緩（伸展）を繰り返すため、自励振動と呼べる。

本記事の長さは通常の解説記事の規程を超過しておりますが、編集委員会の判断によりこのまま掲載しています。

## 1. はじめに

生物は実に様々な運動装置と運動様式を備えている。<sup>3,4)</sup> その多様さは、我々の想像を超える。一方、我々人類も、様々な運動装置を作り運動様式を工夫してきた。その仕組みは、滑り、回転、伸縮、流れなどの基本的運動パターンを活用したもので、摩擦(潤滑)、粘性・弾性、構造相転移といった物理に根ざしたものである。また、運動装置は適切にコントロールしなければ役に立たない。そのために、様々な制御装置と制御機構が工夫されている。それは物理学と工学の結晶ともいえるだろう。静・動力学、電磁気学、流体力学といった物理学が運動装置作りには欠かせないし、必要なエネルギー(入力)と力学的仕事(出力)の比であるエネルギー効率の見積もりには熱力学を必要とする。

ところで、自然界に存在する運動装置は、人智を超える多彩なデザインを持つ。おそらく、未だに知られていない奇妙なデザインを持つ運動装置や運動様式が存在するに違いない。ここで、自然界が生み出した運動装置と、人類が英知を尽くして作り上げた自動車との共通点の存在には注目すべきものがある。この交流欄で紹介する筋収縮系の運動の心臓部を担うアクチン・ミオシン分子モーターは、自動車であればエンジンに相当する。自動車エンジンの性能を決めるのは、その原理を担う物理学だが、筋収縮系エンジンの物理は未だ完全には理解できていない。

自動車を自在に動かすためには、エンジンを如何に制御するか、その制御方式の巧妙さが必須である。自動車エンジンの場合は、それはガス燃焼を決めるプラグによる発火のタイミングであり、それを有効に連動させるメカニクス(工学的デザイン)である。通常のエンジンは往復ピストン運動だが、それを車輪の回転運動に変換するためのメカニクスにも工学的な工夫がある。筋収縮系にも、同じような天然の工(たくみ)が存在する。持論を述べれば、天然の工は、人智の及ぶ範囲を超える。しかし面白いのは、その方式が違っていても、ものを自在に動かす上での必要十分条件、つまり、エネルギー源、動力源(エンジン)、制御方式、力伝達方式(小さな運動から大きな運動への増幅、並進運動と回転運動の変換など)といったものは、人工のものも、天然のものも共通だということである。何一つ欠けてもいけない。自動車と筋収縮系とを対比させると、“エネルギー源”はガソリンの燃焼に対してATPの加水分解、“動力源”はエンジンに対してアクチン・ミオシン分子モーター系、“制御方式”はアクセル(ブレーキ)+電気回路+コンピュータに対して神経回路・細胞興奮+(Ca<sup>2+</sup>イオンなどを介した)制御タンパク質、そして、“力伝達方式”は工学的に工夫された並進運動をタイヤの回転運動に変換する動力伝達装置と、サルコメア(筋節)と呼ばれるミクロンサイズの収縮単位を1万個以上直列につなぐことによって、ミクロの分子モーター集合体の運動速度を1万倍以上に増幅する超分子装置、といった具合である。

さて本題に入ろう。我々の身体の中で、際立った運動装

置といえば、骨格筋である。これは随意筋で、自分の意志によって任意に動かすことができる。そして、構造上は同じ横紋筋に分類されるが、心筋は不随意筋である。ここでは、心筋の運動特性に焦点をあて、筋収縮系の持つ運動様式について解説することにしよう。

まず、運動様式を解説する上で必要な、横紋筋の構造についての基本的知識をまとめる(図1)。骨格筋は多数の筋細胞が融合して巨大化する。人体の骨格筋の中で、長いものは数10 cmにもなる(大腿筋など)。一方、心筋細胞は基本的に単核細胞なので、長さは数10 μmしかない。いずれの筋細胞も、直径約1 μmの筋原線維の束からなる。その筋原線維は、長さ数μmのサルコメアが直列に接続した周期構造体である。サルコメア内では、太い(ミオシン)フィラメント(thick filament)と、細い(アクチン)フィラメント(thin filament)が規則的に配列し、その両者の重なり部分(Overlap領域)に存在するミオシン頭部(分子モーター)がアクチンと結合し(これをクロスブリッジと呼ぶ)、収縮力を発生する。その結果、サルコメアは長さ方向に短縮するが、それとともに、太さ方向には広がる。上腕の“力こぶ”を見るとわかるが、筋組織の体積はほぼ一定に保たれる。<sup>13)</sup>

骨格筋は随意筋なので、自分の意志で休めるが、心筋は不随意筋であり、収縮(短縮)・弛緩(伸長)の2状態間を休みなく行き来し、働き続ける。心筋は振動し続ける筋システムである。心拍のリズムは、心臓の上部に存在するペースメーカー細胞群(洞房結節)が発する規則的な電気的パルスが生み出している(図2)。電気パルスは電気伝導

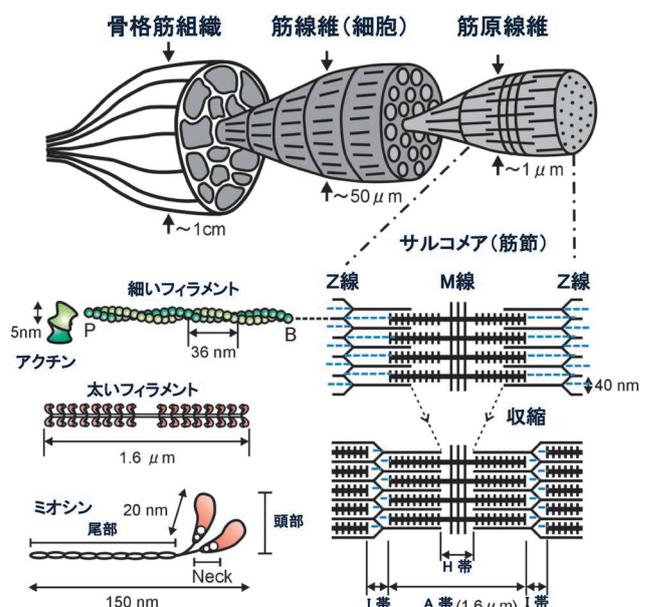


図1 横紋筋(骨格筋)構造の階層性。心筋も骨格筋と同様、横紋筋なので、筋原線維(Myofibril)以下の階層構造はほとんど同じ。筋線維(Muscle fiber)は細胞膜に包まれた筋細胞だが、骨格筋は多核細胞で、一般に細長いのに対して、心筋は通常短い単核細胞である。それが長さ方向には介在版(Intercalated disk)と呼ばれる仕切りを介して次の細胞と結合して長い筋組織を作るが、途中で枝分かれ構造(図2(e))も含む3次元配置をなして、複雑な心臓の壁や心室内の筋肉組織を作っている。

系を経て心臓の各部の細胞群に伝わり、それによって細胞膜が電的に「興奮」し、細胞内にある筋小胞体 (SR) に伝わって、SR 内部に蓄えられている  $\text{Ca}^{2+}$  が細胞質に放出される。その結果、細胞質内の遊離  $\text{Ca}^{2+}$  の濃度が上昇してトロポニンに  $\text{Ca}^{2+}$  が結合する。すると、細いフィラメントの構造が変化して On 状態になり、ATP の加水分解産物である ADP と無機リン酸 (Pi) を結合しているミオシン頭部がクロスブリッジを形成できるようになる。その結果、収縮力が発生する。電気パルスとパルスの間では、細胞膜の電的興奮が収まり、上とは逆の過程、つまり、SR 膜に存在する  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase (ポンプ) が ATP を消費しつつ能動輸送によって、細胞質から SR 内部へと  $\text{Ca}^{2+}$  をくみ上げる。その結果、細胞質内の遊離  $\text{Ca}^{2+}$  濃度は臨界値 (約  $1 \mu\text{M}$ ) 以下になるために、 $\text{Ca}^{2+}$  はトロポニンから解離し、細いフィラメントは Off 状態に戻る。そのため、クロスブリッジの形成が妨げられ、システム全体が Off 状態になる。骨格筋は、それと対をなす拮抗筋の収縮によって、受動的に引き伸ばされる (筋線維の機能は短縮力発生にあり、伸長機能はない)。また、心筋の場合には、血液が流入することによって、筋線維が受動的に引き伸ばされることになる (ここで注意すべきは、流入に必要な圧力は、元をただせば心筋収縮力によるが、体中を循環する過程で、血管平滑筋の収縮力なども活用している)。筋収縮系の On-Off 状態の制御は、電気パルスの発生 (休止) → 細胞膜を経た SR 膜

の興奮 (休止) → SR から細胞質への  $\text{Ca}^{2+}$  の放出 (SR への取り込み) → トロポニンへの  $\text{Ca}^{2+}$  結合 (解離) → 細いフィラメントの活性化 (不活性化) → ミオシン分子モーターとの相互作用 (抑制) → 力発生 (弛緩) と、その逆過程 (括弧内) という、逐次的な制御方式によって行われるというのが定説となっている。

## 2. SPOC が現れる条件：3次元相図

筋収縮系の状態は、MgATP, MgADP (ATP, ADP とともに Mg イオンと結合した複合体がミオシン酵素の基質となる)、Pi 濃度や、pH, イオン強度、温度、そして  $\text{Ca}^{2+}$  濃度などに依存する。一定濃度 (1 mM 程度) の MgATP 存在下での  $\text{Ca}^{2+}$  (X 軸)、Pi (Y 軸) と MgADP (Z 軸) 濃度に対する 3次元相図と、Pi と MgADP 濃度に対する 2次元相図を、それぞれ図 3(a) と (b) に示す (他は生理的溶液環境、つまり pH は 7.0, 塩濃度は 0.2 M 程度で一定、温度も一定で、通常は室温)<sup>9,10,14</sup> 3次元相図で、粗いメッシュの手前側は収縮相、灰色曲面の後ろ側が弛緩相、その 2つの相に挟まれた領域が、サルコメアの自発的振動がみられる SPOC 相である (SPOC 現象の特徴は次章で述べる)。心筋細胞内では、数 mM の MgATP が存在し、数 mM の Pi と 0.1 mM 程度の MgADP が存在する。その上で、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度が変動することによって、On-Off 制御が行われる。つまり、生理的環境は XY 平面近傍にあり、中間の  $\text{Ca}^{2+}$  濃度のところに SPOC 相がある (X 軸上の SPOC を Ca-SPOC と呼ぶ。心筋収縮系の Ca-SPOC に関する最初の報告は Fabiato による<sup>15</sup>)。)

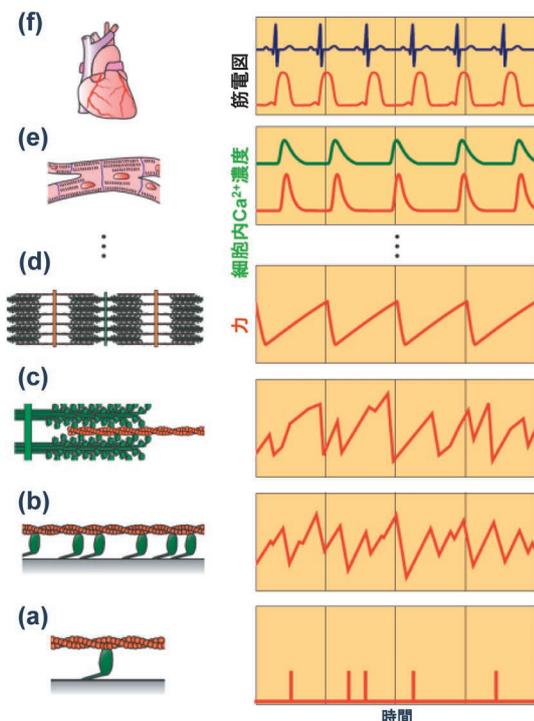


図2 横紋筋 (心筋) 収縮機能の階層性。ミオシン分子モーターは確率的ナノマシンとして働く (a), (b) が、分子集合体としてのサルコメア (c), (d) は自発的振動運動を行い、階層構造が細胞集団 (e) から臓器 (f) へと上がるにつれて高次の秩序運動を行う。右側の図は、各階層に見られる化学・力学過程 (a), (b) は力パルスの時系列, (c), (d) は SPOC 運動時における発生力の時間経過, (e) は  $\text{Ca}^{2+}$  濃度と力発生の時系列) と、電気・力学過程 ((f) は心電図と力発生の関係) の時間経過。この図は、各パラメーターについて、各階層間での時間的な対応関係は考慮していない。

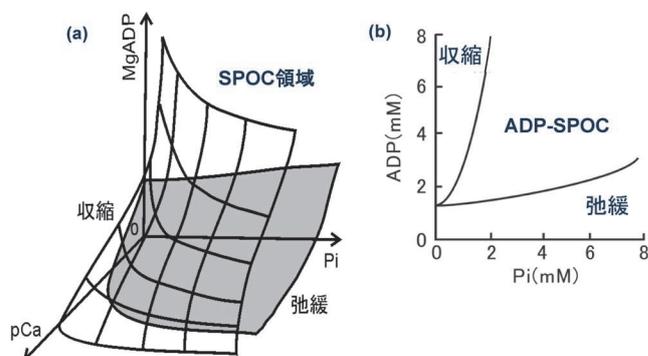


図3 筋収縮系における SPOC は収縮、弛緩と並ぶ第三の状態。 (a) 一定の MgATP 濃度のもとで、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度 (X 軸)、無機リン酸 (Pi) 濃度 (Y 軸)、MgADP 濃度 (Z 軸) に対する筋収縮系の 3次元状態図。大きな網目曲面の手前側が収縮領域、灰色の曲面の後ろ側が弛緩領域、収縮・弛緩領域に挟まれた中間の領域が SPOC 領域。すなわち、SPOC は収縮と弛緩の中間の活性化領域に存在する第三の状態。とくに、X 軸上で存在する SPOC を Ca-SPOC と呼ぶ。生理的環境下では、ADP 濃度は非常に低く (0.1 mM 以下)、Pi 濃度は数 mM なので、SPOC は XY 平面付近で発生する可能性が高い。 (b) 3次元相図のうち、YZ 平面上の相図。この 2次元相図上の SPOC 領域で生じる SPOC をとくに ADP-SPOC と呼ぶ。Z 軸に沿って MgADP 濃度が増加して、MgATP 濃度の数倍 (骨格筋の場合)、あるいは、ほぼ同じ濃度 (心筋の場合) を超えると、弛緩状態から収縮状態に転じる。その後、Z 軸上の MgADP 濃度のところに Pi が加わると、ADP-SPOC 領域に入る。つまり、心筋の方が ADP-SPOC 領域が非常に広いことがわかる。いずれにしても、SPOC は一定の化学環境下で発生することから、BZ 反応などの化学振動ではない。注意すべきは、SPOC は一定の化学環境下でしか発生しないのではなく、SPOC 領域内であれば、化学環境が変動しても SPOC は発生する (化学環境の変動周期と SPOC 周期との関係についての詳細は、今後の研究に俟つ必要がある)。

YZ平面上では、実線の曲線に仕切られた広い領域をSPOC相が占める(図3(b)). YZ平面上のSPOCをADP-SPOCと呼ぶが、これは生理的には実現されないであろう溶液条件である。しかし、Ca-SPOC相とADP-SPOC相とは、両極端だが一つのSPOC相に含まれること、そして、周期はCa-SPOCの方が一桁短いSPOCパターンが同等なことから、SPOCの仕組みは共通するはずである。心筋と骨格筋の違いは、心筋ではCa-SPOC領域が広いこと(骨格筋ではOffからOnへの転移が鋭いので、Ca-SPOCが発生する中間活性化条件が安定に得られず、Ca-SPOCは発生しにくい)、そして、Z軸上で弛緩相から収縮相に転じる転位点(厳密にはある幅を持つ)が低い位置にあり、ADP-SPOC領域が広い、つまり、逆に骨格筋は生理的環境下ではSPOCしにくい、ADP-SPOC領域は十分に広く、安定にSPOCが発生すること、心筋と比べて単一の筋原線維を調製しやすいことから、SPOCの仕組みについては、我々は好んで骨格筋のADP-SPOC特性を研究してきた。この辺の感覚は、実験系や実験条件が生理的か非生理的かを問わず、生物機能の仕組みを明らかにする上で適してさえいれば良いという、物理的センスと方法に重きをおく生物物理ならではのものである。

### 3. SPOC とは何か : SPOC 特性

SPOCとは何か。3次元相図のSPOC領域の中のイオン環境に固定すると、筋原線維の中の各サルコメアは振動を始める。その連続写真と模式図を図4に示す。各サルコメア長(SL)が、ゆっくりとした収縮相と、素早い伸長相か

らなるノコギリ波状に自励振動する。隣接するサルコメアに次々と伸長相が伝播するSPOC波も現れる。SL振動の時空間的広がりについては、筋原線維に沿って伝播するモード(Metachronal wave mode: 複数箇所から発生した波が、ある距離をおいて同じ方向に同じ速度で伝播することもある。とくに、筋原線維の東で発生しやすい)、複数の箇所から湧き出た波が逆方向に伝わってぶつかるモード(Disrupted mode: 通常はぶつかって消滅する)、SL振動があちこちランダムに発生するモード(Out-of-phase mode)、そして、筋原線維中のサルコメアが一斉に同期して振動するモード(In-phase mode: これは外力を一定に保ち、長さだけが振動するようにした条件、isotonic(等張性)条件で発生する<sup>16)</sup>)に分類される。

SPOCは、収縮と弛緩の中間の活性化条件で存在する、筋収縮系の一つの状態である。では、その筋生理学的な運動特性はどのようなものか。幾つか整理しよう。筋原線維の力発生・収縮特性を調べる際には、加える力と筋原線維の長さをどのように制御した上での特性かを明確にする必要がある。力と長さとの関係を計測する境界条件として、isometric(筋長一定、外力変化: 等尺性)、isotonic(外力一定、筋長変化: 等張性)に加えて、筋長と外力が同時に変化するauxotonic(張力変動性)条件の3つの条件が存在する。骨格筋は力を発生して収縮するときでも、それほど長さは変動しないが、心筋は、まさしくauxotonic条件で、力と長さの両方が変動することによってポンプ機能を果たし、血液を送り出しては汲み上げる。

Isometric条件下で、 $Ca^{2+}$ 濃度によって活性化レベルを調整した場合の、発生張力とサルコメア長(SL)の関係を見てみよう(図7参照<sup>17)</sup>)。  $Ca^{2+}$ 濃度が十分に高くOn状態の場合には、張力とSLの関係は線形、つまり2種類の筋フィラメントのOverlap長にほぼ比例して大きくなる。この力発生特性が、筋生理学的な“滑り運動機構”の基盤となっている。サルコメアの発生力は、細いフィラメントと相互作用するミオシン分子モーター(クロスブリッジ)の数に比例するというのだ。ところが、活性化レベルが下がり、中間の $Ca^{2+}$ 濃度になると、最大張力を発生するSLは、Overlap長に比例せず、むしろOverlap長が短く、SLが長い側にシフトする。このような非線形性が生じる仕組みとして、我々は、クロスブリッジの形成確率が2種類の筋フィラメント間距離(格子間隔)に依存すること、弛緩条件では格子空間の体積はSLによらずほぼ一定に保たれる<sup>13)</sup>という2つの条件を仮定すると、非常に良く説明できるというモデルを提案した。<sup>18)</sup> さらに我々は、この中間活性化条件でサルコメアが自励振動すること、そのために、筋原線維の両端で計測する力が大きく減少する場合があることを発見した。<sup>17)</sup> 平均のSLが同じでも、平均発生力が大きいことも小さいこともある。この結果は、すでに30年前に、筋原線維の太い東からなる筋線維(除膜収縮系)を用いて、中間活性化条件では力発生特性が不安定になるこ

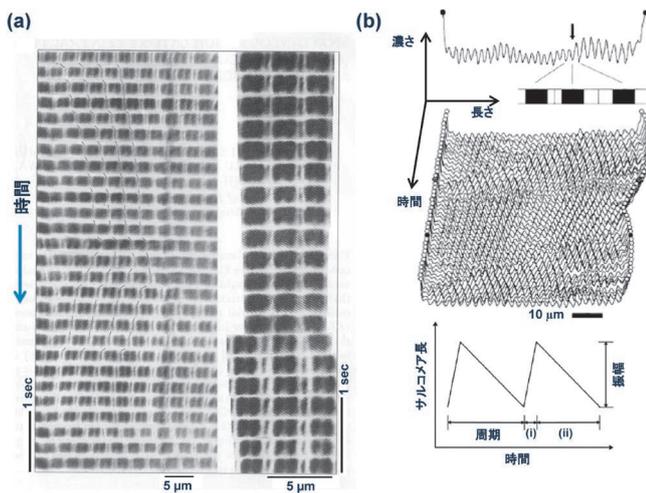


図4 SPOCにおける振動波形。(a) ADP-SPOCにおいてウサギ骨格筋筋原線維内で見られるサルコメア振動の時間経過(位相差顕微鏡写真)。左図: 左側から右側に向けて、サルコメア振動の伸長相が伝播していることがわかる(SPOC波)。右図: 左図の筋原線維の真ん中付近にある3つのサルコメアを切り出して並べたもので、各サルコメア長の振動波形が素早い伸長相とゆっくりとした短縮相からなるノコギリ波状であることがわかる。(b) 筋原線維の一端を硬いガラス微小針、他端を柔らかいガラス微小針に固定した場合のADP-SPOC波形。auxotonic(張力変動性)で、筋原線維に沿ってSPOC波が一方向に伝播している様子がみえる(文献36を改変)。柔らかい針の曲げから、張力振動の大きさを計測することができる。Ca-SPOCも振動パターンはADP-SPOCと全く同じだが、振動周期がほぼ一桁短く心拍周期に近い点が異なる。

とを, Endoが報告していた.<sup>19,20)</sup> それがサルコメアの振動によるものだという事は当時わかっていなかったが, 我々は, その張力不安定性の原因が, サルコメアの自励振動にあることを見出した.<sup>17)</sup>

SPOC状態での発生力があまり小さいとなると, 以下で考察する生理的意義について疑問が生じる. しかし小さな発生力は, 多くのサルコメアの振動が同調しないことによることに注意しよう. サルコメア SPOCを同調させることができれば, 中間活性化条件であっても, それなりの平均力の周りで振動させることができる.

#### 4. SPOCの生理的意義

筋収縮系が示す自励振動特性は, 生理的に意味があるだろうか. それとも, 生体筋組織から切り出して, 膜系を除去した上に, 非生理的な環境に置かれたことによる人工産物だろうか. まだいずれかを定める決定的な証拠はないが, 生理的な意義を期待させる幾つかの状況証拠がある. 1) 非生理的環境下でみられるADP-SPOCだけでなく, 生理的環境で発生するCa-SPOCにおいても, その心筋SPOCの周期が, 各動物(ネズミ, ウサギ, イヌ, ブタ, ウシ)の静止心拍と非常に良い比例関係にある<sup>21,22)</sup>(図5: ちなみに未発表データだが, 動物倫理委員会の許可のもとに調べたヒト心筋のSPOC特性は, ブタのそれに近い). SPOC波の伝播速度も, 心臓の静止心拍と良い相関がある. この相関関係の最大の要因は, ミオシン分子モーターの運動特性に依っていることがわかっている.<sup>21)</sup> すなわち, ミオシンには大別して速筋タイプと遅筋タイプの2種類のアイソフォーム(アミノ酸組成が異なるが, ミオシンに分類されるものの集合)があり, ネズミ心筋のミオシンは速筋タイプの割合が多く, ウシ心筋では遅筋タイプのミオシンの割合が多い. つまり心拍の違いが, 心筋を構成するタンパク質分子モーターの運動特性に帰着できる可能性を示している. 実際, SPOC振動数は, 各心筋から精製したミオシンの滑り運動速度と良く相関することが見出された.<sup>21)</sup> 2) 心筋細胞内のCa<sup>2+</sup>濃度は時々刻々変動しているが, その最大値は, 丁度SPOCが発生するような, 中間活性化条件に相当する濃度にしか達しない. この性質は骨格筋とは大きく異なる. 骨格筋の場合, On状態のCa<sup>2+</sup>濃度は10 $\mu$ Mという高いレベルに達する. 心筋におけるこの事実は, 長年に亘って心筋生理学者に知られているが, その意味は解明されていない. 3) 心拍は決して決まった周期を持っているわけではない. ヒトの場合, 静止心拍が1/sだとしても, 運動したり緊張したりすると, その数倍の範囲で自在に増加する. 心拍は決して固定されたものではなく, 必要に応じて適切に変動する. 一方SPOC周期も, 決して一定のものではない. SPOC周期は, ある一定の物理的(温度や外力など)・化学的(イオン環境など)環境下ではほぼ一定だが, 外力が周期的に変動すると, SLの振動はそれに同期する(未発表). 力学刺激に限らず, 熱パルスなどの

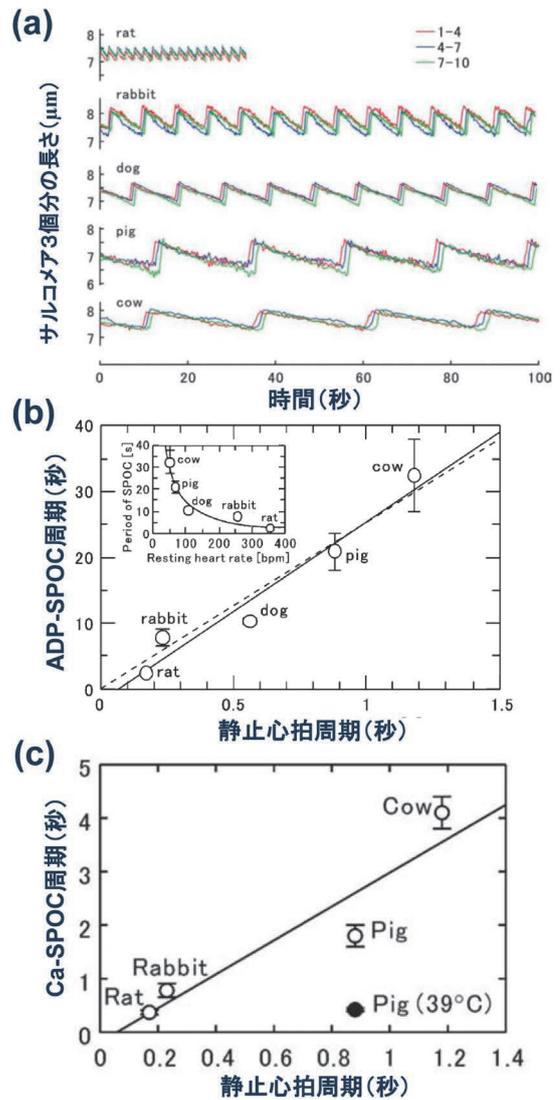


図5 心筋収縮系 SPOC 周期と動物の静止心拍との相関(室温). 各種動物から抽出した心臓の除膜筋線維に見られた SPOC 波形 (a) と, SPOC 周期と動物の静止心拍周期との関係 (b), (c). (a), (b) ADP-SPOC (挿入図は SPOC 周期と心拍との関係: 文献 21 を改変), (c) Ca-SPOC (文献 22 を改変).

外部刺激が加わると, SPOCはその刺激に引き込まれ, 同じ周期で振動する(未発表). 応答できる周期の範囲も数倍以内であり, その点でも生理的応答性とほぼ一致する. 4) 心臓が病的状態になると, ペースメーカーが生み出す電気刺激の周期と同調しない自励振動が発生することがある. 心室細動などがそれに当たる. これは筋収縮系に固有の振動が表に現れた結果かもしれない. 病態になると, 筋収縮系に固有の自励振動特性(SPOC特性)が暴走し始めるのかもしれない. これは大胆な仮説だが, それが正しいなら, 筋収縮系の自励振動特性は, 心拍機構にとってなくてはならないものはずである. 進化の歴史を経て出来上がった“生物機能”にとって, 暴走の危険を凌駕するほどの利点がなくてはならない.

上記の1), 2), 3)は, 筋収縮系が持つSPOC特性が心拍機構の基盤になっている可能性を期待させる. つまり, 筋収縮系はそれ自体が自励振動系であって, その構造と構成要素の特性として, 各心臓に固有の振動周期が備わってい

る。しかも、外部からの周期的刺激(力や熱などの物理的  
刺激だけでなく、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度などの化学的刺激)に同期して  
振動周期を調節することができる。

SPOCは一定の化学的環境で発生する。しかし、生体中  
の心臓では、ペースメーカー細胞群(洞房結節)が発する  
周期的な電気シグナルに応じて、細胞内の $\text{Ca}^{2+}$ 濃度は変  
動している。では、SPOCが心拍の基盤として心筋収縮系  
に備わった特性だとして、 $\text{Ca}^{2+}$ の役割は何だろうか。そ  
の一つの可能性として、我々は、 $\text{Ca}^{2+}$ の役割はSPOCにお  
けるサルコメア振動を同調させるためのトリガーであるとい  
う仮説を提唱している。<sup>10)</sup>  $\text{Ca}^{2+}$ 濃度が一定の条件で見  
られるSPOCでは、各サルコメアの振動周期は、各動物の  
心拍と強く相関する。<sup>21,22)</sup> しかし、多くのサルコメアの振  
動は、必ずしも互いに同調しない。SPOC波が発生したり、  
振動位相がバラバラだったりする。その場合は、心筋細胞  
の長さは必ずしも大きくは変動しない。ところが、全ての  
サルコメアが同調して振動すれば、長さの変化は10%に  
も達する。それに伴って、張力の変動も十分な大きさにな  
る。<sup>16)</sup>

心筋収縮系に備わったSPOC特性が心拍の基礎として存  
在するか否かは、今後の研究に委ねられる。生きた生物個  
体中での心拍動態をサルコメアレベルで解析する研究も進  
んでいる。しかし、何を明らかにすれば、SPOCの生理的  
意義の有無を明らかにできるのか、生きた個体の中で働く  
心拍の中で、何を示せば、それがSPOC特性の現れである  
ことを証明できるのか、そのための戦略から構想  
する必要がある。手ごわい課題だと言えよう。

その一方で、横紋筋収縮に見られるSPOC現象を理解し  
ようという数理モデルが、海外のグループからも幾つか提  
案されている。<sup>23-26)</sup> そのほとんどは抽象的なモデルであ  
る。<sup>23-25)</sup> また、具体的モデルもあるが、それは筋収縮・制

御機構に関する生理学的・構造学的特性を取り入れた、多  
くのパラメーターを導入したモデルとなっている。<sup>26)</sup> とく  
に、サルコメア内部にタイチン(Titin)/コネクチン(Con  
nectin)由来の弾性要素<sup>27,28)</sup>を取り入れることで自励振動  
を再現しているが、我々は、タイチン/コネクチン由来の  
内部弾性はSPOCにとって本質的でないことを、実験的に  
証明している。一方、最近我々のグループが構築したモデ  
ル<sup>11,12)</sup>は、実体に即し、かつ、上でまとめたSPOC特性  
のほとんどを説明できるという点で、他のモデルよりも優  
れていると考えている。それを以下にまとめよう。

## 5. SPOCの仕組みを理解するための数理モデル

SPOCモデルを構築するのに必要な筋収縮系の模式図を  
図6に示す。図6(a),(c)のように、太い(ミオシン)フィ  
ラメント(赤)と細い(アクチン)フィラメント(緑)は3  
次元空間内に規則正しい六角格子を作っている。筋収縮は、  
それらが互いに滑り合うことによって生じる。ここでは簡  
単のために、一組のアクチン・ミオシンフィラメントに着  
目し(図6(b))、そのダイナミクスによって、一つのサル  
コメアのダイナミクスが記述されるとする。この設定は、  
アクチン・ミオシンフィラメントが作る格子構造は短軸方  
向に一樣であり、同じサルコメア内のすべてのアクチン・  
ミオシンフィラメントの組は同じように働くと仮定するこ  
とと等価である。

一本のミオシンフィラメントからは複数(両端側にそれ  
ぞれ150個程度)のミオシン頭部が突き出ており、そのミ  
オシン頭部は隣接するアクチンフィラメントに結合してク  
ロスブリッジを形成する。そして、ATP加水分解のエネル  
ギーによってその形状を変形させ(パワーストローク)、<sup>6,29)</sup>  
滑り力を発生する。実際のミオシン頭部の力発生  
のプロセスは複雑だが、<sup>4,30)</sup>我々はその詳細は考慮せず、

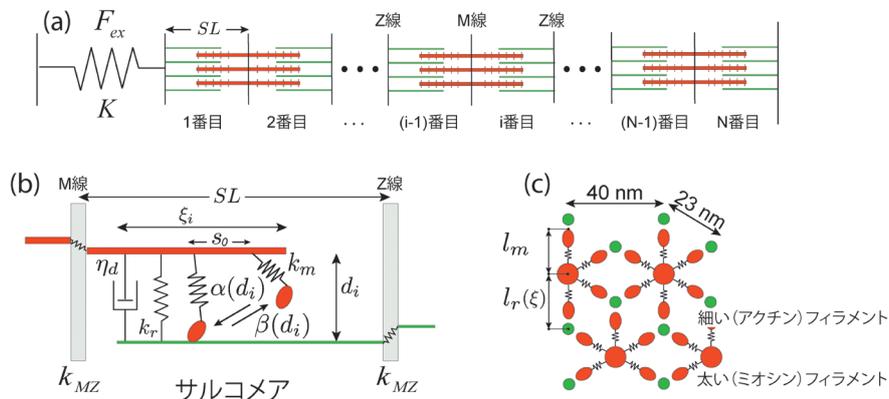


図6 モデルの模式図。(a) 筋原線維の構造と外力の図。筋原線維はサルコメアと呼ばれるZ線で区切られた単位構造が直列に接続した構造体である。筋肉の最小単位は厳密な意味ではM線とZ線とで区切られている半サルコメアであり、我々はそれを一つの単位とする。(本稿ではサルコメアとは半サルコメアのことを指す。)サルコメアはM線、Z線を通じて隣のサルコメアと直列に連結している。外力 $F_{ex}$ はバネ定数 $K$ の線形バネで与えられる。(b) サルコメアのモデルリングの図。サルコメア内には約1,000本のアクチン・ミオシンフィラメントがあり、互いに相互作用して滑り運動が起こっているが、簡単のために一組だけを考える。ミオシン頭部はアクチンフィラメントに結合している(クロスブリッジ)状態と解離している状態だけをとるとし(2状態モデル)、その状態は遷移速度 $\alpha$ と $\beta$ で確率的に変化する。我々のモデルの特徴は、両フィラメントの短軸方向の距離(格子間隔 $d$ )のダイナミクスを考慮し、 $d$ が $\alpha$ と $\beta$ に影響することをあからさまに取り入れた点である。(c) 格子の断面図。ミオシン・アクチンフィラメントがオーバーラップしている領域を短軸方向に輪切りにしたときの模式図。ミオシンフィラメント(赤)は三角格子を組み、その周りをアクチンフィラメント(緑)が六角格子を組み取り囲んでいる。ミオシン頭部はミオシンフィラメントから突き出ており、アクチンフィラメントに確率的に結合する。(文献12からの抜粋。)

現象論的に広く受け入れられている、いわゆる2状態モデル(ミオシン頭部がアクチンと結合している状態と解離している状態だけを考えるモデル)<sup>5)</sup>を採用する。我々のモデルの設定は以下のようである。<sup>11, 12)</sup>

(1) ミオシン頭部はアクチンと結合する状態と、解離した状態の2状態をとり、その結合・解離は確率的に繰り返される。

(2) 結合・解離の確率は、サルコメア内の遊離  $\text{Ca}^{2+}$  の濃度だけでなく、その時の格子間隔(ミオシンフィラメントとアクチンフィラメントの短軸方向の距離: 格子定数)  $d$  にも依存する。

(3) 収縮力は、結合しているミオシン頭部の数(割合)に比例して発生する。滑り運動が生じているときには、それと同時にアクチン・ミオシンフィラメント間に摩擦力(分子摩擦力と呼ぶ)も発生する。<sup>5, 31)</sup>

(4) 筋フィラメント(アクチン・ミオシンフィラメント)の長軸方向に加わる力は、各時刻でつり合っている。

(5) 各筋フィラメントの短軸方向に加わる力も考慮する。その力のつり合いからその時刻での格子間隔  $d$  が決まる。

設定(1), (3), (4)は既存の2状態モデルですでに取り入れられ、広く受け入れられているものであり、設定(2), (5)が今回のモデルに初めて導入された、本モデルに特徴的な設定である。これらの設定は以下のような数式で表される。

設定(1)(2)は、クロスブリッジの数の分率(結合ミオシンの数/全体のミオシンの数)を  $P$  とすると

$$\frac{dP_i}{dt} = \alpha(d_i)(1-P_i) - \beta(d_i)P_i \quad (1)$$

と書くことができる。ここに  $\alpha, \beta$  はそれぞれミオシン頭部がアクチンフィラメントに結合する速度定数と解離の速度定数である。設定(2)から  $\alpha, \beta$  はその時の格子間隔  $d$  に依存する。各変数の添え字  $i$  は  $i$  番目のサルコメアのそれぞれの量であることを意味している。クロスブリッジの割合は、格子間隔  $d$  が小さくなると単調に増えると仮定して、 $\alpha, \beta$  を以下のように設定する(これはあくまでも第一近似である)。

$$\alpha(d_i) = -\alpha_1(d_i - d_0)\Theta(d_0 - d_i) \quad (1.1)$$

$$\beta(d_i) = \beta_0$$

ここに  $\alpha_1, d_0, \beta_0$  はある正の定数。 $\Theta(x)$  はヘビサイト関数( $x \geq 0$  のとき  $\Theta(x) = 1$ ,  $x < 0$  のとき  $\Theta(x) = 0$ )。式(1.1)の設定では  $\alpha_1$  の大きさを変化させることによって、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度などに応じた筋収縮系の活性度を表すことができる。例えば弛緩状態(結合ミオシン頭部が存在しない状態)は  $\alpha_1 = 0$  であり、フル活性化状態( $\text{Ca}^{2+}$  濃度が十分に高い状態)は十分大きな  $\alpha_1$  で表すことができる。

設定(3), (4)の長軸方向の力のつり合いの式は

$$a \frac{\xi_i}{s_0} P_i - \eta_m \frac{\xi_i}{s_0} P_i \frac{d\xi_i}{dt} - F_{\text{ex}} = 0, \quad (2)$$

と書ける。第1項は結合ミオシン頭部が作る活性張力、第2項は結合ミオシン頭部の滑り運動に伴う分子摩擦力を表す。 $s_0$  はミオシンフィラメントに沿った隣り合うミオシン頭部間の距離、 $\xi_i$  はアクチンフィラメントとミオシンフィラメントの間の重なり部分(Overlap領域)の長さである(図6(b))。サルコメア長  $SL_i$  と  $\xi_i$  は、 $\xi_i = 0$  のときのサルコメア長  $SL^{(0)}$  (定数で、通常の骨格筋や心筋の場合は  $3.6 \mu\text{m}$  程度)を通じて  $SL_i = SL^{(0)} - \xi_i$  という関係式で結ばれる。ここで結合ミオシン頭部の総数は  $\xi_i P_i / s_0$  と表されることに気づくことは有益である。 $a, \eta_m$  はそれぞれ一個の結合ミオシン頭部が発生する平均の活性張力と分子摩擦力の強さを表す定数である。 $F_{\text{ex}}$  は外から筋原線維に加わる外力で、それが線形バネによる場合は、バネ定数  $K$  に比例する。式(2)では筋収縮系を構成しているタンパク質(例えばアクチン・ミオシンフィラメント)の慣性力やタンパク質と周りの溶媒(例えば水)との粘性力は式(2)に含まれる力に比べて数桁小さいので無視することができる。

外力  $F_{\text{ex}}$  の形は実験の状況によって決まり、筋生理学における伝統として、上述のように、isotonic(等張性)、auxotonic(張力変動性)、isometric(等尺性)の3つの条件があるが、これらの条件は一つの式

$$F_{\text{ex}} = F_0 + K \sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi}) \quad (3)$$

にまとめることができる。ここに  $N$  は筋原線維を構成しているサルコメアの総数、 $F_0$  は  $F_{\text{ex}}$  中の一定外力を表す定数、 $\bar{\xi}$  はサルコメアが定常状態として  $F_0$  の力を出すときのアクチン・ミオシンフィラメントのOverlap長。 $K$  は筋原線維につながれている外部の物質の硬さを表す定数(弾性係数、バネ定数)。式(3)で  $K \rightarrow +0$  とすると isotonic 条件になり、 $K \rightarrow +\infty$  とすると isometric 条件になる。 $K$  が有限のときに auxotonic 条件になる。

設定(5)のサルコメア内の短軸方向の力のつり合いの式は

$$k_r(l_r(\xi_i) - d_i) + k_m P_i \frac{\xi_i}{s_0} (l_m - d_i) - \eta_d \frac{dd_i}{dt} + V(d_{i-1}, d_i, d_{i+1}) = 0 \quad (4)$$

と書ける。この式から  $d$  の発展方程式が得られる。我々はここで短軸方向に加わる力を4種類に分解した。(1)格子の弾性要素の伸び縮みによって発生する力(第1項)、(2)クロスブリッジの弾性による力(第2項)、(3)格子間隔が変化する際に受ける粘性抵抗力(この力は小さいと推測される)(第3項)、(4)隣接するサルコメア間で格子間隔が異なるときに、その差に応じて発生する力(第4項)。第1項と2項の力が存在することは、分子量の大きい糖(デキストラン)などを溶媒に加え、筋線維に加わる浸透圧を変化させる実験によって確かめられている。<sup>13)</sup> 第3項と4項は我々の仮説である。第1項の  $l_r(\xi_i)$  はクロスブリッジがないとき、すなわち弛緩条件でフィラメント間のOverlap長

が $\xi_i$ のときの格子定数を表している。筋細胞では格子体積一定、つまり $SL \times (l_r)^2$ が一定であることが確認されており、除膜した筋収縮系でも、体積一定ではないが、 $l_r$ は $SL$ の減少関数であることがわかっている。<sup>13)</sup> 従って、簡単に

$$l_r(\xi_i) = l_{r0} + l_{r1}\xi_i \quad (4.1)$$

とする。 $l_{r0}$ ,  $l_{r1}$ は正の定数。式(4)第2項の $l_m$ はミオシン頭部の平均長であり、ミオシン頭部はその平均長の周りでブラウン運動していると仮定する。従って、 $d$ の値が $l_m$ より大きくても、クロスブリッジの形成は可能である。クロスブリッジの数が多くなると、格子間隔は $l_m$ に近い値をとる。第2項の係数の $P_i\xi_i/s_0$ は、この力がクロスブリッジの総数に比例することを表している。このことは、クロスブリッジの総数が少なくなると第1項の格子の弾性力が支配的になることを意味する。第4項 $V(d_{i-1}, d_i, d_{i+1})$ はZ線、M線を通じての格子間隔の相互作用を表す。先にも述べたように、アクチン・ミオシンフィラメントは規則正しい正六角三角格子を組んでいるので、ある一つのサルコメアが隣り合うサルコメアと異なる格子間隔を持っているとき、それらは互いに同じ格子間隔になるように相互作用すると考えられる。その性質を満たす最も簡単な形として

$$V(d_{i-1}, d_i, d_{i+1}) = k_{MZ}((d_{i-1} - d_i) + (d_{i+1} - d_i)) \quad (5)$$

を採用する。 $k_{MZ}$ はサルコメア間の連結の強さを表す定数。式(1)-(5)をまとめると

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} P_i \\ \xi_i \\ d_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha(d_i)(1-P_i) - \beta(d_i)P_i \\ (\alpha\xi_i P_i - F_0 s_0)/\eta_m \xi_i P_i \\ (k_r(l_r(\xi_i) - d_i) + k_m P \xi_i (l_m - d_i)/s_0)/\eta_d \end{pmatrix} + k_{MZ} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ (d_{i+1} + d_{i-1} - 2d_i)/\eta_d \end{pmatrix} + K \sum_{j=1}^N \begin{pmatrix} 0 \\ (\bar{\xi} - \xi_j)s_0/\eta_m \xi_i P_i \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

となる。式(6)に適切な境界条件(例えばノイマン条件)と初期条件を与えると $P_i$ ,  $\xi_i$ ,  $d_i$ に対して解くことができ、各サルコメアの物理量(サルコメア長 $SL_i$ , 活性張力 $\alpha\xi_i P_i/s_0$ )と、筋原線維全体の動きを知ることができる。式(6)を以下筋原線維モデルと呼ぶ。筋原線維モデルの右辺第1項はサルコメア単体での動力学を表しており、第2項は隣りのサルコメアとの相互作用(local coupling: 局所結合)、第3項は筋原線維上に存在するすべてのサルコメアとの相互作用を表している(global coupling: 大域結合)。第3項が現れる理由は式(2)で外力 $F_{ex}$ が各サルコメアで常に共通となっているところにある。例えば、一つのサルコメアがある時刻に急激に伸張したとすると、式(3)から $F_{ex}$ は小さくなるが、その効果は式(2)を通じてほかのサルコメアに瞬時に伝わる。筋原線維の動力学においては、サルコメア

の質量(慣性)は無視できるほど小さいので、筋原線維に沿った力の伝達速度は非常に大きいとみなすことができる。大域結合が現れることは、構成要素が力を通じて相互作用している系の大きな特徴である。

## 6. 筋原線維モデルによる長さ-張力関係と自励振動(SPOC)の再現

式(6)で記述されるモデルが、よく知られている筋収縮系の力学特性を表しうるかを調べるため、まず $N=1$ ,  $k_{MZ}=0$ ,  $K=0$ として(サルコメア一個の場合)、 $Ca^{2+}$ 濃度(筋収縮系の活性度; $\alpha_1$ の値)を変えたときの、長さ-張力関係(length-tension relationship)を求めた(図7)。フル活性化のとき( $\alpha_1=55$ )は、実験で観測されるように、アクチン・ミオシンのOverlap長に比例して活性張力が大きくなるのがわかる。中間活性化のとき(例えば $\alpha_1=6$ )は、長さ-張力関係は非線形曲線を描くようになる。これは我々のモデルでは、サルコメア長が短くなると格子構造由来の弾性特性によって格子間隔は広がり、式(1)の $\alpha$ を通じてクロスブリッジの分率 $P$ が減少し、クロスブリッジの総数( $\xi_i P_i/s_0$ )が減るためである。中間活性化状態のときには $SL$ が短くなると、Overlap長が増加するにもかかわらず、活性張力が小さくなることは実験的に古くから知られており、<sup>19,20)</sup> 我々のモデルはこの長さ-張力関係の非線形性を自然に説明することができた。ここで、長さ-張力関係の曲線と外力 $F_{ex}(=F_0)$ との交点が定常状態での $SL$ である。その交点が2つあり、かつ長さ-張力曲線の傾きが負となる領域のうち左側の交点(図7の赤線領域)では、その定常状態は不安定であることが線形安定性解析からわかっている。<sup>11)</sup> 図7(a)で $\alpha_1=22$ ,  $F_0=4.0$ における赤線領域の場合には、明らかに安定な定常状態が存在しない。この条件下では筋収縮系は収縮と弛緩を自発的に繰り返す(自励振動(SPOC)を示す: 図8)。

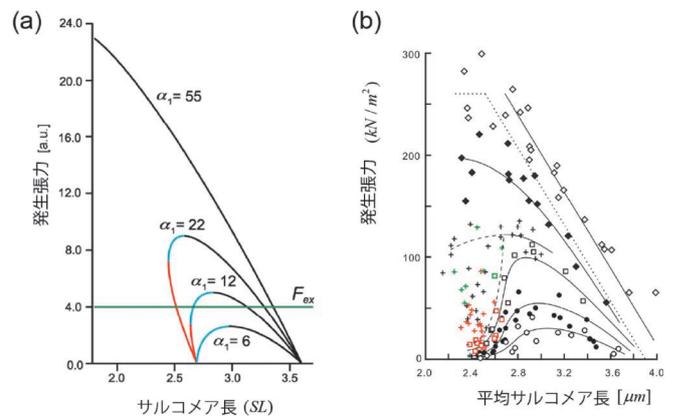


図7 筋原線維の平均サルコメア長-平均張力関係。(a) 筋原線維モデル(式(6))による長さ-張力関係(文献11の図を一部改変)。(b) 実験(ウサギ骨格筋)で得られた長さ-張力関係。菱形印(白抜き)がpCa4.5(On状態)でのデータ。+印がpCa6.1、四角印(白抜き)がpCa6.2(ともに中間活性化状態)でのデータで、緑印と赤印のところで自励振動が発生している。下から上に向かって $Ca^{2+}$ 濃度を上げ(pCa値を下げ)、活性化レベルを上げている。(文献17の図を一部改変。)

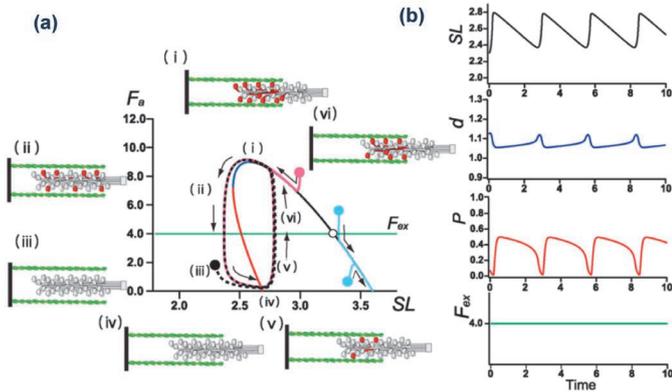


図8 サルコメアモデル(式(6))で得られるサルコメア自励振動(SPOC)の特徴。筋原線維モデルで $N=1$ ,  $K=0$ とした場合に当たる。(a)長さ-張力空間での状態の軌道と各点での筋肉の状態の模式図。(b)各変数の時系列。格子間隔 $d$ の変化に合わせてクロスブリッジの割合 $P$ が急激に変化していることがわかる。(文献11から転載。)

我々のモデルが自励振動を起こす仕組みは言葉で表現すると以下ようになる。

- (1) 筋収縮系の作る活性張力が、与えられた外力 $F_0$ より大きいときには、筋収縮系は収縮する(図8(a), 赤丸)。
- (2) 筋収縮系が短縮するにつれ、アクチン・ミオシンフィラメントの格子構造は式(4.1)の $l_r$ を通じて間隔を広げようとする。
- (3) フル活性化状態では( $\alpha_1$ が十分に大きな値のときは)、クロスブリッジの数が多いため、サルコメアが短縮してもクロスブリッジ由来の弾性力が格子の弾性力とつり合って、格子構造の弾性力が上回ることなく、ミオシン頭部の平均長 $l_m$ と格子構造の平衡距離 $l_r$ との中間の値に保たれ、どこかの $SL$ で安定化する。
- (4) 中間活性化状態では( $\alpha_1$ が中間の値のときは)、クロスブリッジの数が比較的に少ないため、 $SL$ が短縮するにつれて格子の弾性力が支配的になり、 $d$ が少しずつ大きくなる。
- (5)  $d$ が大きくなると、式(1)を通じてクロスブリッジの割合 $P$ が減る。 $P$ の減りが大きいとクロスブリッジの総数 $\xi P/s_0$ も減る。
- (6) クロスブリッジの総数が減ると、式(4)を通じてさらに $d$ は大きくなる。
- (7) (5)-(6)の負のフィードバックによって、ある $SL$ (ある $\xi$ )でクロスブリッジの数は一気にほとんどゼロになる(図8(b))。そのため、活性張力が $F_0$ を下回るので $SL$ は急激に伸張する。
- (8)  $SL$ が伸張すると、式(4.1)の $l_r$ を通じて $d$ が小さくなる。
- (9)  $d$ が小さくなると、式(1)を通じてクロスブリッジの結合確率が増大し、クロスブリッジ数が増える。
- (10) その結果、活性張力が $F_0$ を超えることになり、再び収縮相に転じ、(1)の状態に戻る。

クロスブリッジの解離は収縮状態から急激に起こるので、 $SL$ の時系列は、ノコギリ波状の波形となる(図8(b))。 $k_r$ ,  $\alpha_1$ の値を変えたときのサルコメア状態の2次元相図が、図9に与えられている。 $k_r$ を変えたときの振る舞いは、実験

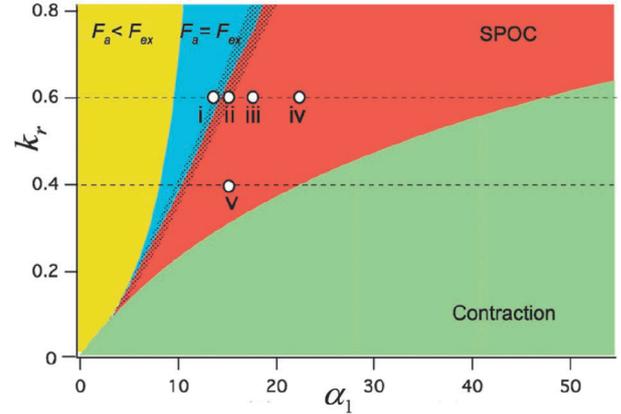


図9 サルコメアモデル(式(6))で得られるサルコメアの状態図(相図)。 $N=1$ ,  $K=0$ としたときの $\alpha_1$ ( $Ca^{2+}$ 濃度)と $k_r$ (格子の硬さ)に対する相図。黄色領域:弛緩, 青色領域:弱い収縮(i:減衰振動), 赤色領域:自励振動(ii:小さな振幅の三角波的振動, iii-v:ノコギリ波状のSPOC波形で振幅が増大), 緑色領域:収縮。(文献11から転載。)

的には検証されていないが、骨格筋と比べて心筋のサルコメア中のZ線は太く堅牢に見えることから、 $k_r$ の値が大きいたことが推測される(事実、AFMによる弾性率測定によって支持される<sup>32)</sup>)。そうすると、図9の相図からSPOC領域が広いことが示唆され、心筋収縮系の方が骨格筋と比べてSPOC条件が満たされやすいという実験結果と一致する。一方、様々な $Ca^{2+}$ 濃度(異なる $\alpha_1$ の値)における筋原線維の状態は調べられており、その結果は、図9の相図と定性的によく一致している。<sup>10)</sup> 其上、 $\alpha_1$ が弛緩条件の近傍の値の場合(図9の(ii)領域)、サルコメア振動の波形は、ノコギリ波状から三角波状に近くなり、かつ振幅が小さくなるということが、モデルによって予測された。そこで、注意深く溶液条件を弛緩条件に近づけて観察したところ、自発振動が抑制され弛緩しているとみられていた低活性化条件で、三角波に近い微弱なサルコメア自励振動が生じていることが発見できた(未発表)。つまり、このモデルには予測能力もあったということである。

## 7. 筋原線維上でのSPOC振動パターンの再現

先の解析で式(6)に従う単体のサルコメアが自励振動することはわかったが、それが直列につながった構造(筋原線維)では振動パターンはどうなるだろうか? 実験では、auxotonic条件では筋原線維上を走る進行波(traveling wave)が観測され、isotonic条件では同相同期状態(in-phase synchronization)が観測されるが、式(6)はそれらを再現できるだろうか? これらの問いに答えるために式(6)で $N>1$ としてサルコメアが複数連結した場合について検討した。 $N=1$ のときに自励振動が起こる $F_0$ ,  $\alpha_1$ の値を採用し、連結サルコメア数 $N$ と外力のバネ定数 $K$ の値を変化させて定常の振動パターンを調べた(図10, 11)。その結果、 $K$ をゼロから大きくしていくと(isotonic条件から、auxotonic, isometric条件へと変えることに対応)、実験で観測されるのと同じように、同相同期、進行波、分断された進行

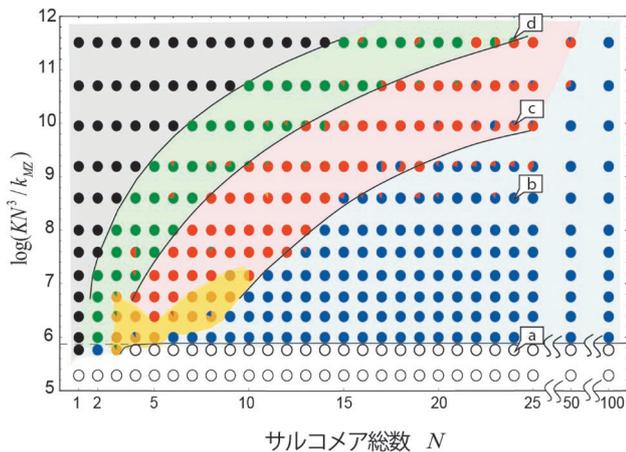


図10 筋原線維モデル(式(6))で得られた振動パターン相図。白印(領域): in-phase, 青印(領域): 伝播波, 赤印(領域): 分断波, 緑印(領域): out of phase, 黒印(領域): 収縮。黄色領域などの詳細は文献12を参照。(a)-(d)は、そこでの振動パターンを図11に示す。(文献12の図を一部改変。)

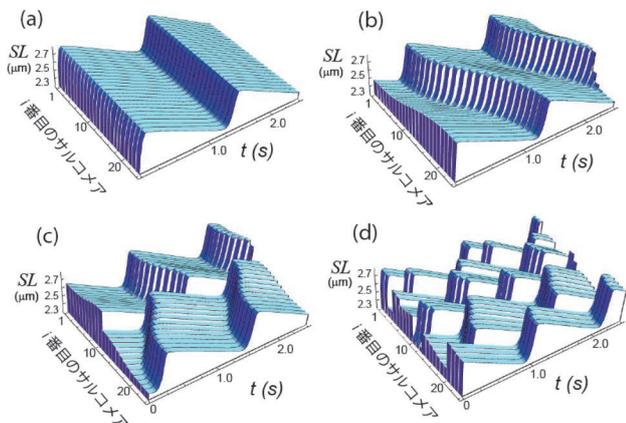


図11 筋原線維モデル(式(6))で得られた代表的な振動パターン。(a)-(d)は図10でのパラメーターに対応。(文献12の図を一部改変。)

波(分断波), 非同相同期状態(out of phase synchronization: サルコメア振動が同期せずランダムに発生する状態)の振動パターンが現れた(図11)。この相図の傾向は、定性的に実験結果と一致していた(相図の厳密な形については、今後実験的に検証する必要がある)。

## 8. 位相方程式への縮約

筋原線維上に現れる振動パターンの本質を捉えるために、相互作用項は小さいとして式(6)を位相方程式に縮約した。<sup>12)</sup> この縮約によって、式(6)で記述される連結振動子の位相の力学は、各振動子(サルコメア)の位相 $\phi_i$ だけで記述される<sup>33,34)</sup>:

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega_0 + k_{MZ}(B(\phi_i - \phi_{i+1}) + B(\phi_i - \phi_{i-1})) + K \sum_{j=1}^N A(\phi_i - \phi_j) \quad (7)$$

$\omega_0$ はサルコメア単体のときの振動数であり、 $A(\phi)$ と $B(\phi)$ は式(6)から計算される位相差 $\phi$ に依存する結合関数である。 $A$ と $B$ は、それぞれ大域結合、局所結合を表してい

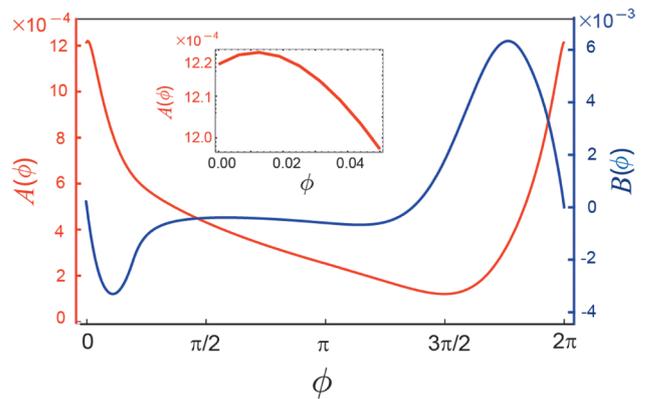


図12 筋原線維モデル(式(6))から導かれる位相方程式(式(7))の結合関数。挿入図は $A$ の $\phi=0$ 付近での拡大図。(文献12の図を改変。)

る。 $F_0=20$ ,  $\alpha_1=19$ のときの結合関数を図12に示した。 $B'(0) < 0$ ,  $A'(0) > 0$ であることから(図12), 振動子の局所連結は吸引的な相互作用(位相をそろえようとする作用)であることがわかり、大域結合は排他的な相互作用(位相差を拡大しようとする作用)であることがわかる。この結果は、局所的には規則正しい格子の連結から位相をそろえようとする傾向を持ち、<sup>35)</sup> 大域的には位相をずらしてサルコメアにかかる外力を小さくしようとする傾向を持つ筋原線維の性質と一致する。式(7)から求められる定常振動パターン(相対位相差のプロファイル)は式(6)のそれとよく一致する。つまり筋原線維上に現れるいろいろな振動パターンは、局所的には位相をそろえようとする相互作用と、大域的には位相を乱そうとする相互作用の拮抗の結果であることがわかる。局所・大域結合(Local-global coupling)は、一般的に、自発的な力の変化によって振動している要素が相互作用するとき、必然的に現れる相互作用である。心筋の振動パターンにもその効果が含まれていることが期待される。

本研究テーマの共同研究者、島本勇太・大瀧昌子・福田紀男・蔵本由紀の各氏に感謝します。

## 参考文献

- 1) A. F. Huxley and R. Niedergerke: Nature **173** (1954) 971.
- 2) H. E. Huxley and J. Hanson: Nature **173** (1954) 973.
- 3) 原田慶恵, 石渡信一編著:『1分子生物学』(化学同人, 2014).
- 4) 石渡信一編著:『生体分子モーターの仕組み—シリーズ・ニューバイオフィジックス4』(共立出版, 1997).
- 5) A. F. Huxley: Prog. Biophys. Biophys. Chem. **7** (1957) 255.
- 6) A. F. Huxley and R. M. Simmons: Nature **233** (1971) 533.
- 7) S. Ebashi and M. Endo: Prog. Biophys. Mol. Biol. **18** (1968) 123.
- 8) N. Okamura and S. Ishiwata: J. Muscle Res. Cell Motil. **9** (1988) 111; Erratum in: J. Muscle Res. Cell Motil. **10** (1989) 93.
- 9) S. Ishiwata and K. Yasuda: Phase Transitions **45** (1993) 105.
- 10) S. Ishiwata, Y. Shimamoto and N. Fukuda: Prog. Biophys. Mol. Biol. **105** (2011) 187.
- 11) K. Sato, M. Ohtaki, Y. Shimamoto and S. Ishiwata: Prog. Biophys. Mol. Biol. **105** (2011) 199.
- 12) K. Sato, Y. Kuramoto, M. Ohtaki, Y. Shimamoto and S. Ishiwata: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 108104.
- 13) B. M. Millman: Physiol. Rev. **78** (1998) 359.
- 14) N. Fukuda, H. Fujita, T. Fujita and S. Ishiwata: Pflugers Arch. **433** (1996) 1.
- 15) A. Fabiato and F. Fabiato: J. Gen. Physiol. **72** (1978) 667.
- 16) K. Yasuda, Y. Shindo and S. Ishiwata: Biophys. J. **70** (1996) 1823.

- 17) Y. Shimamoto, M. Suzuki and S. Ishiwata: *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **366** (2008) 233.
- 18) S. Ishiwata and F. Oosawa: *J. Mechanochem. Cell Motil.* **3** (1974) 9.
- 19) M. Endo: *Nat. New Biol.* **237** (1972a) 211.
- 20) M. Endo: *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* **37** (1972b) 505.
- 21) D. Sasaki, H. Fujita, N. Fukuda, S. Kurihara and S. Ishiwata: *J. Muscle Res. Cell Motil.* **26** (2005) 93.
- 22) D. Sasaki, N. Fukuda and S. Ishiwata: *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **343** (2006) 1146.
- 23) F. Jülicher and J. Prost: *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 4510.
- 24) A. Vilfan and T. Duke: *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 114010.
- 25) S. Günther and K. Kruse: *New J. Phys.* **9** (2007) 417.
- 26) D. A. Smith and D. G. Stephenson: *Biophys. J.* **96** (2009) 3682.
- 27) T. Funatsu, H. Higuchi and S. Ishiwata: *J. Cell Biol.* **110** (1990) 53.
- 28) T. Funatsu, *et al.*: *J. Cell Biol.* **120** (1993) 711.
- 29) H. E. Huxley: *Science* **164** (1969) 1356.
- 30) B. Alberts, *et al.*: *Molecular Biology of the Cell 5E* (Garland Science, 2008) Chap. 16.
- 31) K. Tawada and K. Sekimoto: *J. Theor. Biol.* **150** (1991) 193.
- 32) N. Akiyama, Y. Ohnuki, Y. Kunioka, Y. Saeki and T. Yamada: *J. Physiol. Sci.* **56** (2006) 145.
- 33) A. T. Winfree: *J. Theor. Biol.* **16** (1967) 15.
- 34) Y. Kuramoto: *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence* (Springer, Berlin, 1984).
- 35) Y. Shimamoto, M. Suzuki, S. V. Mikhailenko, K. Yasuda and S. Ishiwata: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **106** (2009) 11954.
- 36) T. Anazawa, K. Yasuda and S. Ishiwata: *Biophys. J.* **61** (1992) 1099.

#### 著者紹介

**石渡信一氏**：早稲田大学理工学術院物理学科，早稲田バイオサイエンスシンガポール研究所 (WABIOS)。専門は生物物理学，とくに生物運動の仕組み，生体構造の形成機構。編著書は『生体分子モーターの仕組み』(共立出版)，『生物物理学ハンドブック』(朝倉書店)，『1分子生物学』(化学同人) など。

**佐藤勝彦氏**：北海道大学・電子科学研究所。専門はソフトマター，生物物理学。パッシブな物質とアクティブな力の結合が生み出す複雑な自然現象に興味を持っている。

(2014年10月22日原稿受付)

#### Auto-Oscillatory Phenomenon, SPOC, Observed in the Contractile System of Cardiac Muscle Shin'ichi Ishiwata and Katsuhiko Sato

abstract: The contractile system of striated muscle (skeletal and cardiac muscles) is a higher-ordered biological machine that generates the contractile force. It is usually considered that the contractile system of muscle takes either contraction or relaxation state, depending on the concentration of  $Ca^{2+}$ . However, we have found that there exists the third state, *i.e.*, an auto-oscillatory state termed SPOC (SPontaneous Oscillatory Contraction), in which each sarcomere spontaneously oscillates showing a saw-tooth waveform composed of slow shortening and rapid lengthening phases, and the elongation phase is propagated to the adjacent sarcomeres in succession, one by one (SPOC wave). The SPOC state is realized at the intermediate activation conditions in between contraction and relaxation, which was demonstrated by constructing the three-dimensional state diagram showing contraction, relaxation, and SPOC states against the concentrations of  $Ca^{2+}$ , Pi (inorganic phosphate), and MgADP (adenosine di-phosphate) at the fixed concentration of MgATP (adenosine tri-phosphate). Here we describe the characteristics of SPOC obtained in our group and the theoretical model that can explain almost all the properties of SPOC observed not only in each sarcomere, but also in a myofibril as a whole. Finally, we discuss the possibility that the SPOC properties play an essential part in a heartbeat.

#### 日本物理学会誌 第70巻 第8号 (2015年8月号) 予定目次

##### 巻頭言

日本物理学会 Jr. セッションは楽しい! .....松川 宏  
現代物理のキーワード

ラシュバ効果—2次元電子系のスピン軌道相互作用...有賀哲也  
シリーズ「国際光年 IYL2015 に寄せて」

##### 序言

光学を革新したレーザーの創造性とその発展.....霜田光一  
解説

To be, or not to be —吸収状態をめぐる非平衡臨界現象の物理学  
.....竹内一将

##### 最近の研究から

低温アモルファス氷表面における水素原子の拡散  
—宇宙における分子進化の鍵—  
.....羽馬哲也, 香内 晃, 渡部直樹

微弱な磁気双極子相互作用によるボース・アインシュタイン  
凝縮体スピンの空間構造形成: 磁性気体としての

冷却 Rb 原子 .....衛藤雄二郎, 斎藤弘樹, 平野琢也

近接する2つの物体間の「力」と「電流」の関係.....杉本宜昭

3Dプリンターが拓く新しい物理学の可能性

.....古川英光, 川上 勝, 牧野真人, 齊藤 梓  
JPSJの最近の注目論文から 4月の編集委員会より

.....上田和夫  
学会報告

第70回年次大会 (2015年) 招待・企画・チュートリアル講演  
の報告.....領域委員会

ラ・トッカータ

Recollections of the Matsubara-ken, 1965-6..... Anthony J. Leggett  
学界ニュース

第105回恩賜賞・日本学士院賞: 細野秀雄氏.....伊藤 満  
第105回日本学士院賞: 香取秀俊氏.....洪 鋒雷

牧島一夫氏.....河合誠之  
科学技術分野の文部科学大臣表彰

##### 追悼

鈴木敬愛先生を偲んで.....小泉大一

##### 新著紹介

# スピン偏極は移るよ、どこまでも： 原子気体の光ポンピングによる金属塩の核スピン偏極

石川 潔 (兵庫県立大学大学院物質理学研究科)

ガラス容器内の熱い気体原子を分光する際、容器内壁における原子のスピン状態の緩和が、分光計測の精度や感度を低下させる。そのため、壁で電子や核のスピンダイナミクスを妨げずに原子を反射するような緩和防止膜が研究されている。一方、表面において原子の状態が変化するので、反作用として、衝突相手である壁のスピン状態も変化はすだ。しかし、壁はマクロな環境であり、その反作用を調べるのは難しい。これまでは、反射した偏極原子の状態を観測し、表面をうかがい知るのみだった。最近、表面膜材料の核磁気共鳴により、原子がスピン偏極を表面に移す現象を発見した。以来、表面におけるスピン偏極の注入を調べ、超偏極物質の生成を試みている。

一般に、核磁気共鳴では熱平衡状態にある非常に小さなスピン偏極率の核スピン集団を観測する。その微弱な信号を飛躍的に増大させるため、物質を核スピン偏極させる手法が数多く開発されている。その中でも、光の角運動量を使う方法は低温を必要とせず、熱い物質をスピン偏極できる。光ポンピングの難しい物質には、あらかじめ光でスピン偏極した物質から、スピン相互作用により角運動量を移すことも可能だ。このスピン交換光ポンピングの例として、超偏極希ガスがある。核スピン偏極率が高いので、偏極標的として基礎物理実験に供され、磁気共鳴画像診断の造影剤や磁力計に応用される。本稿では、これに類似の、原子が物体表面に接触したときのスピン偏極の移行を紹介する。レーザー光により希薄な原子気体をスピン偏極し、液体や固体と接触させると、表面をとおし、これら凝縮体がスピン偏極する。圧倒的な数差にも関わらず、凝縮体の核スピン集団が偏極するのは、スピン源となる気体原子集団に、常に光から角運動量が供給されるからである。

実験では、電子のゼーマン分裂が原子内のスピン結合(電子と核の超微細相互作用)より大きくなる磁場で、ガラス容器中のセシウム原子を光励起する。スピン偏極原子は、気体中を拡散運動しながら、セシウム塩表面に達し、価電子を放出、イオンになる。表面では、結晶のイオンと入れ替わるか、同種核間のスピン交換で偏極を結晶に移すことにより、角運動量を注入する。数秒間光を照射すれば、セシウム塩にスピン角運動量が蓄積(セシウム核がスピン偏極)するので、その核磁気共鳴信号を観測する。結晶だけでなく、熔融塩やガラスにもスピン注入できる。知る人ぞ知る、とても単純な実験だ。重要な要素は、原子の高磁場光ポンピング、表面におけるスピン偏極注入、物質内のスピン拡散である。

残念なことに、原子の偏極電子がスピン注入に関与しない。そのため、異種核へ偏極移行するような汎用性はなく、気体原子と凝縮系イオンは同種核でなければならない。特徴は、スピン注入するので、表面強調の磁気共鳴計測が可能なことである。その結果、表面でも核スピン偏極が長生きすることがわかった。これまで仮定してきた気体に対するスピンの境界条件(壁において熱平衡状態)を見直す必要がある。さらに、角運動量を担うイオン自身が、核スピン偏極を失わずに埋め込まれるのにも驚いた—四重極緩和につながる電子軌道の歪は生じないのか? スピン緩和時間の短い液体の方が、偏極率が高くなる—結晶表面の液体薄膜の存在がスピン注入に重要か? このように、新たな知見が得られるほど、疑問が湧きあがる。結晶中のスピン偏極イオンが角運動量を輸送するので、イオンの移動度の大きな超イオン伝導体を使えば、スピン輸送という応用が期待できる。

## —Keywords—

### 核スピン偏極:

多数の原子やイオンがあるとき、核スピン $I$ の磁気量子数 $I_z$ について、 $P_I = \langle I_z \rangle / I$ を核スピン偏極率という。すべてのスピンの量子化軸に平行なとき $P_I = 1$ である。核スピン偏極率が熱平衡状態より十分に増大していることを、超偏極と呼ぶこともある。本研究では、スピン間に相関のない系を扱っている。核スピン偏極は、NMR分野では単に分極と呼ばれるが、物理一般には、分極は「誘電分極」のように電気的性質を指すことが多い。また、polarized lightは「偏光」が定着している。スピン分極でもよいが、本稿では「スピン偏極」または、単に「偏極」を使った。

### 光ポンピング:

原子や分子に光を照射し、特定のエネルギー準位に状態密度を集めること。自然放出や原子衝突による緩和過程を含む状態遷移を繰り返し、複数の状態を循環しているうちに、原子がある特定の状態になる。本研究では、電子スピン偏極率 $P_S \approx \pm 1$ 、核スピン偏極率 $P_I \approx \pm 1$ の状態に、気体原子をポンピングしている。

### スピン交換光ポンピング:

原子遷移に共鳴する光の発生が困難など、光ポンピングの難しい原子や分子をスピン偏極する手法。光ポンピングの容易な原子のスピン偏極を、衝突などにより目的物質に移す。電子のスピン交換相互作用によるスピン交換に限らず、電子-電子、電子-核、核-核の組み合わせで、スピンの向きを交換する手法も含む。

## 1. はじめに

歳のせいかな、最近、昔聴いた先生の語りが脳裏に浮かんでくる。高校の先生は、水の表面は液体なんだ、とつぶやいた。大学1年の物理化学で、気液平衡状態を習った。希薄な気体と液体や固体は、界面で平衡状態にある。界面が平面の場合に比べ、小さな液滴の蒸気圧が高くなるのを知った。<sup>1)</sup> 大学2年の無機化学では、熱したイオン結晶に電場を加えるとイオンが電気伝導のキャリアになる、今ではよく知られた話を聞いた。聴衆である学生の反応はさっぱりだが、先生の目が輝いていた。電磁気学で習ったガウスの法則は、原子集団における角運動量の保存則として再登場した。最近よくある目的指向で役に立つ教育ではなかったが、異なる人々から異なる機会に与えられた古い記憶が頭の中でつながり始めた。できの悪い私は30年以上前の講義の内容を、研究をとおして、やっと理解する。

上のような詳細に解明された物理を基礎とし、本稿で紹介するのは、金属蒸気の光ポンピングにより、凝縮系(古典的な固体や液体)のスピンの状態を操作(に至ってないが)する実験である。<sup>2,3)</sup> 気体原子系のスピン偏極が表面をとおり、凝縮系と平衡状態にある。光子の集団からもらった角運動量が、気体原子系に湧きだし、気体中を流れ、表面で凝縮系に移動し、さらに輸送される。輸送された先で何が起きているか、まだ知らない… いつまでも続くとも錯覚するスピン偏極の移行と輸送の過程を、流れの上流から下流に向かい、順に解説する。いまだ定性的な説明に留まる部分は、研究の現状を表している。

## 2. 実験の背景

ガラス製の容器に封入した原子を分光する際、容器内壁にある多数の分子や常磁性電子との相互作用による、気体原子の電子や核のスピン緩和を抑えることが必要になる。その対策として、ガラスの材質やコーティングによる内壁表面の改質など、多くの労力が費やされるが、有意の緩和が残るのが現実である。スピン緩和が精密計測に邪魔だから、壁のない環境を作るもよし。不可避だから、スピン緩和を利用するもよし。我々は後者を選んだ。光ポンピングは、光子の角運動量(だけではないが)を原子に移す。原子遷移に共鳴するレーザー光を照射した場合、原子系のみに着目すると、まるで容器内いたる所で角運動量が湧き出ているように見える。一方、壁では原子の内部状態(スピン状態)が熱平衡状態に向かって緩和するので、0次近似では壁は境界条件「スピン状態=熱平衡状態」を課す。容器内は、金属原子の蒸気(約 $10^{-2}$  Pa)と緩衝ガス(約 $10^3$  Pa)の混合気体なので、金属原子は拡散運動(平均自由行程 $\sim 10\ \mu\text{m}$ )により壁に到達する。つまり、容器内の原子を分光すると、自然と拡散スピン流が壁に向かって流れ、壁は原子系の角運動量を吸い込むことになる。多くの場合、壁は裸のガラス、スピン緩和防止膜、金属膜などである。金属膜中は、伝導電子の磁場揺動により核スピン緩和時間

が短い(Korringa relaxation,  $T_1 \sim 1$  ms)。実際、原子気体のスピン流により金属膜の核スピン偏極率を変化させるには至っていない。それなら、緩和時間の長い物質を壁にしたら気体原子と壁のスピン状態はどうなるだろう。その小さな疑問が本研究の転換点だった。しかし、有機分子によるスピン緩和防止膜は、衝突してきた原子のスピン緩和を防止するが、自らの緩和時間は長くない。そこで、時間的にも空間的にもスピン角運動量をため込めるだろう、アルカリ塩に目をつけた。

偏極原子線を物質に照射し、反射する原子状態の光検知により、表面を調べることができる。その変形として、偏極原子を固体に打ち込み、スピン偏極を注入する方法が考えられる。この思考実験では、原子線のスピン偏極率、原子密度、原子速度、基板材質や温度を制御し、基板の核磁気共鳴(NMR)信号を検知する。しかし、打ち込む衝撃で瞬時にスピン緩和すると信じられているのに、試してみたい好奇心だけでは、開発する装置は複雑すぎる。そこで本研究では自由度は少ないが、単純な装置を用いた。<sup>2)</sup> 図1(a)のように、セシウム(Cs)金属とCs塩(CsH, CsCl, CsIなど)を封入した円筒ガラス容器を磁場中に設置し、レーザーで金属蒸気を光ポンピングしながら、Cs塩の<sup>133</sup>Cs NMR信号を観測する。最初にCs塩を選んだのは、金属蒸気圧が比較的高い(0.1 Pa @ 100°C)、図1(b)に示すようなエネルギー準位なので既存の光源で励起できる、固体中で核スピン緩和時間が長い(CsH 250 s, CsCl 600 s @ 100°C)<sup>4,5)</sup> からである。当初、円筒の内壁にCs塩を付着させていたが、金属蒸気に接する表面積を広げるため、のちに粉末試料やガラスウールに分散させた試料を使った。<sup>6)</sup>

固体または液体へのスピン偏極の注入は、それら物質に偏極原子を埋め込むだけでなく、相互作用をとおしてスピン偏極を移すことによっても可能になる。目的物質の核スピンを反転させるためには、スピン源と目的物質、双方の核スピンのエネルギー分裂を一致させる必要がある。同種

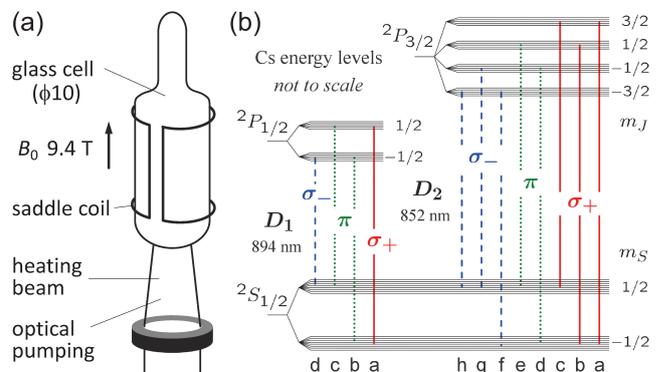


図1 (a) 典型的なガラス容器周辺の光学配置とNMRコイル。ポンピング光と加熱レーザー光を照射し、容器に近接させたコイルでNMR信号を検知する。(b) Cs原子のエネルギー準位。基底状態、励起状態とも電子のゼーマン効果で大きく分裂し、それぞれの電子準位が核スピンの向きに対応した構造をもつ。それぞれのバンド遷移は偏光 $\sigma_+$ ,  $\pi$ ,  $\sigma_-$ を吸収するが、最も吸収率の大きな偏光を図に記す。本文では、 $D_1(n)$ , ( $n$ : a-d)や $D_2(m)$ , ( $m$ : a-h)のように、縦線下の記号を遷移の名称とした。

の核であれば、静磁場だけで歳差運動 (precession) の周波数が一致する。異種核であれば、振動磁場による章動 (nutation) 周波数を一致させる。ここでは、前者の方法で、偏極が移るのをただひたすら待つという単純な原理を採用した。Cs核は、金属、中性原子、結晶中イオンのように異なる形態で存在するが、それぞれのNMR周波数が異なるので、イオンを選択的に観測できる。Cs核の磁気双極子モーメントが正なので、外部磁場の向きに対し、熱平衡状態の核スピン偏極率は正である ( $P_f \sim 1 \times 10^{-5}$  for  $^{133}\text{Cs}$  @  $100^\circ\text{C}$ ,  $9.4\text{ T}$ )。過渡信号 (時間変化) をフーリエ変換する際の位相は、熱平衡状態の信号 (周波数スペクトル) が正 (上に凸) になるように選ぶ。スピン注入により増大した信号も同位相で変換し、核スピン偏極の符号と大きさを比較する。

### 3. 気体原子の高磁場光ポンピング

光ポンピングに関連する原子の光学遷移は電気双極子遷移なので、光の電磁場だけで電子スピン  $S$  や核スピン  $I$  の向きを変えられない。電子スピンを操作するにはスピン軌道相互作用  $\zeta S \cdot L$ 、核スピンには超微細 (hyperfine) 相互作用  $AS \cdot I$  を必要とする。光ポンピングは、偏光を使えば地磁気程度の低磁場で、電子も核もスピン偏極できるのが特徴である。そのため、高磁場で光ポンピングする利点が見えにくい。むしろ、核スピン偏極の鍵である超微細相互作用が摂動になるので、高磁場は核スピン偏極に適さないと考えられていた。ところが、高感度NMRをめざしたスピン交換光ポンピングでは、磁気双極子の歳差運動による誘導起電力が高くなる高周波信号を検知するため、核スピン偏極率を多少犠牲にしても、超伝導磁石内で光ポンピングする機会が増えた。我々も、少量の薄膜中Cs核を検出するため、高磁場で光ポンピングしNMR計測した。幸い、高磁場ではゼーマン分裂が大きく、ドップラー幅の大きな熱い蒸気でも、波長によって光学遷移を選択的に励起し、電子と核のスピン偏極を独立に制御できた。<sup>3,7,8)</sup> さらに、緩衝ガス (窒素分子) との衝突は、スピン緩和ではなく、むしろ核スピン偏極に役立つことがわかった。<sup>3,9,10)</sup>

図2は、 $D_1$ 線と $D_2$ 線 (図1(b)参照) に共鳴するレーザーで光ポンピングしながら観測したNMR信号と、壁に向かって流れる気体中の拡散核スピン流の計算値である。ゼーマン分裂した $D_2$ 線の8遷移のうち、 $D_2(a)$ と $D_2(h)$ は、それぞれ $\sigma_+$ と $\sigma_-$ 偏光しか吸収しない。散乱などで他の偏光が混入しても、スピン流は弱くなるが符号は変化しない。この2本のどちらかで励起した場合、信号の符号は (図に示していないが) 電子スピン流では説明できず、一方、図2のように核スピン流と一致する。他の遷移では、励起の偏光が乱れているとすれば、核スピン流で符号を説明できる。<sup>3)</sup> 調べてみると、 $D_2(c)$ と $D_2(f)$ では、複数の偏光を吸収しうるが、どの偏光で励起しても核スピン偏極の向きは変わらない。したがって、これら $D_2(a)$ 、 $D_2(c)$ 、 $D_2(f)$ 、

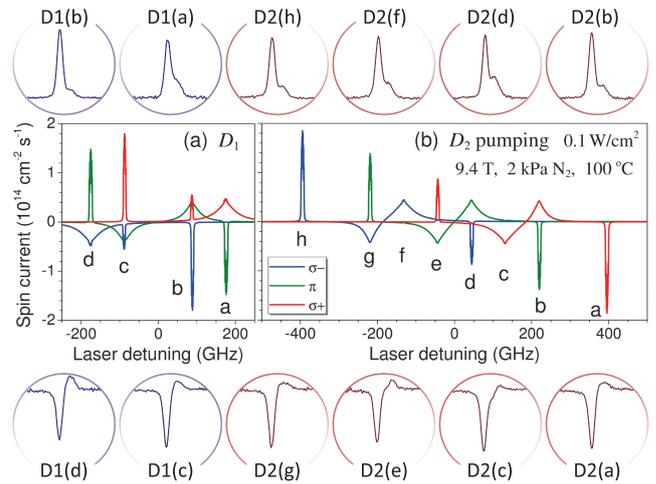


図2 気体 (Cs金属蒸気+窒素ガス) 中の拡散スピン流の計算値とCsClの $^{133}\text{Cs}$ NMR信号。(a)  $D_1$ 線 (b)  $D_2$ 線の各偏光によるポンピングで誘起される、円筒容器の内壁に向かって流れる核スピン流 (縦軸は  $h$  を単位とした)。幅の広いスペクトルは、原子衝突による状態遷移がポンピングサイクルに含まれていることを表す。図中の記号 (a-h) は光学遷移を、線の色は照射する偏光を表す (図1(b)参照)。誘起されるスピン流の大きさは、必ずしも各遷移の遷移確率に比例しない。例えば、 $D_2(a)$ 、 $D_2(h)$  遷移による核スピン流は十分に大きい。それぞれの遷移の中心周波数の光でCs原子を励起しながら観測したNMR信号を、上下の丸の中に示す。横軸は、ラジオ周波数 (52.5 MHz付近) の幅5 kHzに対応する。重なった共鳴線のうち左 (低周波) 側が液体、右側が固体Cs塩の信号である。

$D_2(h)$  は、偏光の乱れに対しロバストな遷移である。これが、凝縮系へのスピン注入における高磁場光ポンピングの長所である。そもそも、この実験では偏光が乱れやすい。表面におけるスピン注入なので、表面近傍の気体原子のスピン偏極が最も重要になる。それなのに、表面におけるスピン緩和のため、近傍の気体原子のスピン状態は常に熱平衡状態に近く、光ポンピングが完了しない。したがって、表面近くの原子が励起光を吸収し発光が続くため、偏光が乱れる。さらに、粗い表面で励起光が散乱され、偏光が乱れることも無視できない。以上のように、偏光が乱れても原子をスピン偏極できることが、凝縮系へのスピン注入成功の鍵だった。

### 4. 表面におけるスピン偏極の注入

アルカリ塩は、色中心 (color center) の光物性に関し教科書にも載るイオン結晶である。格子欠陥の常磁性電子を電子スピン共鳴することにより、極低温下で動的核 (スピン) 偏極が可能である。<sup>11)</sup> これを知っていたので、我々が固体NMR信号増大に成功した当初、Cs原子の偏極電子が結晶の欠陥に捕獲され、超微細 (super hyperfine) 相互作用により核スピンが偏極するシナリオを期待した。<sup>2)</sup> 原子は偏極電子の供給源であって、電子と核の相互作用ならば、核種の組み合わせに縛られないスピン偏極法になるからである。しかし、前節で説明したように、固体信号の符号が気体原子の核スピン偏極と相関していることから、偏極電子はスピン注入に寄与していないことがわかる。それにしても、イオン結晶やガラス表面でCsイオンの核スピン偏極が有意に残っている実験結果は、にわかに信じがたい。気体原

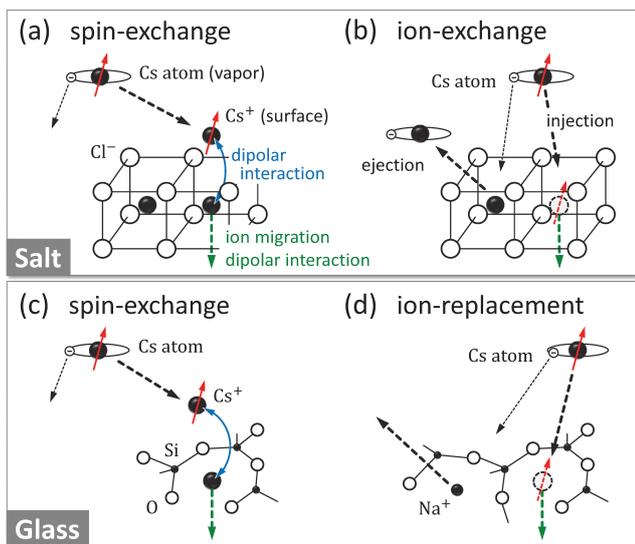


図3 試料表面におけるスピン注入機構。黒丸に赤色矢印はCs<sup>+</sup>の核スピンを示し、矢印のない丸は熱的スピン状態にあることを示す。Cs原子は表面近傍で電子を放出しイオンになる。(a) Cs塩のCs<sup>+</sup>との磁気双極子相互作用によるスピン交換 (spin exchange)。(b) Cs塩のCs<sup>+</sup>と原子交換。厳密には、原子がイオン化したのち入れ替わるイオン交換 (ion exchange)。(c) ホウケイ酸ガラス中にCs<sup>+</sup>が存在すればスピン交換。(d) ガラス中の他イオン (Na<sup>+</sup>) とのイオン交換 (ion replacement), または、単純に偏極Cs<sup>+</sup>が埋め込まれる。

子の分光では、境界条件として核スピン偏極率 $P_I=0$ とすることに、これまで矛盾を感じたことがなかったからだ。<sup>12)</sup> しかし、次のように考えることができる。Cs原子の基底状態の電子はs軌道なので、スピンと軌道の結合がなく、電子スピン緩和が遅い。核スピン緩和は、おもに電子スピンとの結合によって生じる。イオンは価電子がないので、核スピン緩和が非常に遅くてもよい。表面において核スピン偏極がゼロでないというスピン注入の条件は、満たされているようだ。結晶の融点以上の温度になると注入効率が上がり、次節で説明するイオン拡散の効果もあり、NMR信号は非常に大きくなる。表面が液体であることも重要なようだ。一方、結晶の融点以下でも表面は液体薄膜で覆われているはずだが、まだ、薄膜由来の確たる信号は得られていない。

図3に示すように、核スピン偏極が凝縮系に注入されるのは、偏極イオンが固体に埋め込まれる(b)と(d)、または、スピン相互作用により偏極が注入される(a)と(c)の2種類の機構による。前者は、注入する相手がCs塩であれば、結晶表面にあるCsイオンとの交換、ホウケイ酸ガラスであれば、Naイオンとの交換が期待できる。いずれも、NMR計測する核は気体原子と同種である。後者について、高磁場では磁気双極子相互作用によるスピン偏極移行レートは同種核間で有意になり、<sup>13)</sup> やはり、同種核を計測する。このように、Cs原子を光ポンピングしCs塩をNMR計測する場合、同時に機能する2つの機構を独立に観測できない。実験的に区別するため、安定性の全く異なるイオン結晶のCsH(約200°Cで解離するのでイオン交換レートが大きい)とCsCl(融点645°C、沸点1,297°Cの安定な結晶)で比較し

最近の研究から スピン偏極は移るよ、どこまでも

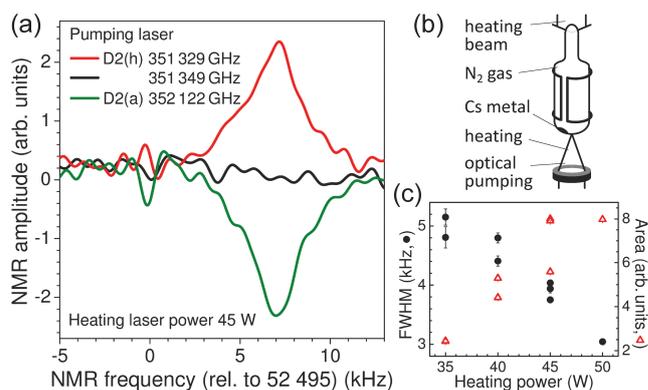


図4 (a) ナトリウム-ホウケイ酸ガラス中の偏極Cs<sup>+</sup>のNMR信号。励起レーザーはD<sub>2</sub>(h) (赤色, 正), D<sub>2</sub>(a) (緑色, 負) に共鳴させた。励起光を原子遷移から離調すると、気体原子も注入されるイオンも熱平衡状態なので、信号(黒色)は雑音レベル以下になる。(b) 下から励起光(1.2 W)と加熱レーザー光(数W)、上から加熱レーザー光(35-50 W)を照射した。(c) Cs NMR信号の線幅とスペクトル面積(∞偏極イオン数)の加熱レーザー強度依存性。励起光の焦点付近のガラスが軟化すると、運動による平均化により線幅が狭くなるとともに、注入される偏極イオンが増加する。

たところ、どちらも同様に核スピン偏極した。<sup>3)</sup> これは、イオン交換以外の機構、つまり、スピン交換(相互作用によるスピン注入)の存在を示す。一方、Csイオンがほとんど含まれないホウケイ酸ガラスでは、相互作用によるスピン注入は起こりえないにも関わらず、図4のように、ガラス中のCsイオンによる大きなNMR信号が観測された。<sup>14)</sup> これは、偏極原子が表面近傍でイオン化し、ガラスに埋め込まれたことを示す。以上より、核スピン偏極もその原子核のイオンも物質に注入されることが、実験で確かめられた。

## 5. 金属塩内部のスピン拡散

結晶内部では、表面と同様、同種核間の双極子相互作用と偏極イオンの運動によりスピン偏極が拡がる。<sup>15)</sup> 前者は通常のスピン拡散で、温度について緩やかに変化する。後者は、温度依存性が大きく、高温で支配的になる。<sup>16,17)</sup> どちらも古典的な拡散現象なので、1つの拡散係数にそれぞれの温度依存性を入れ、広い意味でスピン拡散とする。十分に厚い試料の核スピン緩和時間を $T_1$ 、拡散係数を $D$ とすると、スピン拡散長を $\sqrt{DT_1}$ として、スピン偏極は表面から内部に向かい指数関数的に減衰するように定常分布する。<sup>4)</sup> このスピン拡散長に注目すると、Cs塩のスピン拡散は、次のような温度( $T$ )依存性を示すと考えられる。

イオン結晶の緩和時間は、フォノンのラマン散乱により上限が決まる( $T_1 \propto T^{-2}$ ).<sup>4,11)</sup> 相互作用による拡散が支配的な低温では、拡散係数が小さく、スピン偏極が表面から浅く留まり、表面強調NMR計測が可能になる。表面ではスピン偏極が飽和( $P_I \leq 1$ )しているだろう。表面と内部におけるスピン交換レートは、それぞれの相関時間 $\tau_c$ に比例する。<sup>13)</sup> したがって、温度上昇とともにスピン拡散長は緩やかに減少し、結晶の平均的なスピン偏極率も小さくなる。さらに高温にすると、イオンの運動により拡散係数が(ラ

マン散乱による  $T_1$  減少を補う以上に) 指数関数的に増大し、スピン拡散長が増加する。融点を越え Cs 塩が液体になると、イオンの拡散係数  $D$  は急激に増大し、さらに温度とともに大きくなる。並進運動は十分に速い ( $\omega_I \tau_c \ll 1$ ) ので、緩和時間の温度依存部分を取り出すと  $T_1 \propto D$  であり、したがって、スピン拡散長は  $D$  に比例して長くなる。つまり、Cs イオンが表面のスピン偏極を速やかに内部に運ぶ。表面でスピン偏極が飽和しないので、固体の場合に比べ、液体全体の偏極率は大きくなる (図 2 参照)。ただし、緩和時間が短い ( $T_1 \leq 10$  s) ので、<sup>5, 15)</sup> スピン偏極を長時間蓄えられない。以上の溶融塩の性質を考慮すると、気体と固体の間で、薄膜の液体にスピン偏極を仲介させるのが良いだろう。

今後、イオンの並進運動によってスピン偏極を輸送することを目標とした場合、 $T_1$  と  $D$  の積だけではなく、それぞれを大きくする必要がある。結晶中の Cs イオンは  $T_1$  が長かったが、移動度が小さかった。おそらく、超イオン伝導体のスピンドイナミクスを調べることが重要である。固体でありながらイオン移動度の大きな Li 塩や Ag 塩が候補である。それぞれの金属原子は、ハードルは高いが、レーザー光ポンピングが可能である。

## 6. おわりに

気体 Cs 原子を光ポンピングすると、固体や液体の Cs 塩やガラス材料にスピン角運動量が大量に移ることを、<sup>133</sup>Cs NMR 信号によって示した。また、高磁場光ポンピング、表面や内部のスピン偏極移行と輸送の機構を解説した。これまで、光ポンピングしやすく電気四重極緩和の小さい Cs 核で原理検証してきたが、Cs イオンは大きくて重い。その代わりに、緩和時間が長く移動度の大きな Li イオンや Ag イオンだったら、核スピン偏極の実用的な輸送が可能になるだろうか。今後の研究に期待する。最後に、研究の機会を与えてくれたプリンストン大学 W. Happer 先生に感謝します。

## 参考文献

- 1) P. Atkins and J. Paula: *Atkins' Physical Chemistry, 10th ed.* (Oxford Univ. Press, Oxford, 2014); 『アトキンス 物理化学 第 8 版』(東京化学同人, 2009).
- 2) K. Ishikawa, B. Patton, Y.-Y. Jau and W. Happer: *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 183004.
- 3) K. Ishikawa, B. Patton, B. A. Olsen, Y.-Y. Jau and W. Happer: *Phys. Rev. A* **83** (2011) 063410.
- 4) K. Ishikawa: *Phys. Rev. A* **84** (2011) 033404.
- 5) <sup>133</sup>Cs 核 ( $I=7/2$ ) は電気四重極子モーメントが小さいので、立方晶ではスピン緩和時間が長い。例えば、RbCl 結晶の <sup>85,87</sup>Rb 核 (約 0.3 秒 @ 室温)

に比べ、緩和時間は 3 桁以上異なる。

- 6) K. Ishikawa: *Phys. Rev. A* **84** (2011) 013403.
- 7) B. A. Olsen, B. Patton, Y.-Y. Jau and W. Happer: *Phys. Rev. A* **84** (2011) 063410.
- 8) 基底状態の超微細相互作用 (係数  $A$ ) に比べ電子のゼーマン分裂 ( $\Delta$ ) が大きくなり、摂動展開係数が  $A/2\Delta=1$  になる磁場は 0.04 T である。遷移を分裂させ選択励起するためには約 0.5 T を必要とし、そのときの角運動量は良い近似である。
- 9) W. Happer, Y.-Y. Jau and T. G. Walker: *Optically Pumped Atoms* (Wiley-VCH, Weinheim, 2010).
- 10) 低磁場では超微細分裂の大きさ (クロック周波数) を変化させる衝突が、高磁場では電子と核間で角運動量を交換させる。つまり、緩衝ガス中では、原子内の電子と核がスピン交換しながら、原子とともに角運動量が拡散する。この現象を、電子スピン流と核スピン流が結合して流れているとみなす。
- 11) A. Abragam: *The Principles of Nuclear Magnetism* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1961); 『核の磁性』(吉岡書店, 1966).
- 12) 気体原子を光ポンピングしたとき、表面において原子からイオンに角運動量が流れるので、 $P_I(\text{Cs 原子}) > P_I(\text{Cs イオン})$  である。NMR 計測により  $P_I(\text{Cs イオン}) > 0$  がわかったので、表面でも有意に核スピン偏極率  $P_I(\text{Cs 原子}) > 0$  である。
- 13) 核スピン  $I, S$  間の磁気双極子相互作用による  $S$  から  $I$  へのスピン移行レートは、次のように表される。<sup>11)</sup>

$$\left(\frac{\mu_0 \gamma_I \gamma_S \hbar}{4\pi}\right)^2 I(I+1) \left\{ \frac{3}{4} J^{(2)}(\omega_I + \omega_S) - \frac{1}{12} J^{(0)}(\omega_I - \omega_S) \right\}$$

ここで、 $\omega_I$  と  $\omega_S$  は磁気共鳴周波数、 $J^{(i)}(\omega) \propto \tau_c / (1 + \omega^2 \tau_c^2)$  の比例係数はスピンの相対的な運動や位置関係による。高磁場では、共鳴周波数が接近する同種核間の移行レートが有意になる。移行レートの温度依存性は、特性時定数  $\tau_c$  のそれに由来する。有機分子のプロトン間のスピン移行に比べ、Cs 核間では  $\gamma^2 I(I+1)$  による因子分 ( $6.6 \times 10^{-3}$ ) だけ小さい。

- 14) K. Ishikawa: *J. Magn. Reson.* **249** (2014) 94.
- 15) K. Ishikawa: *Phys. Rev. A* **84** (2011) 061405(R).
- 16) 前田康二, 竹内 伸: 『結晶欠陥の物理』(裳華房, 2011).
- 17) 格子欠陥の形成とホッピングのエンタルピーの相乗効果により温度依存性が大きい。不純物イオンにより結晶に空孔が生成する場合、低温でも空孔密度は高いが加熱しても空孔は増加せず、イオン伝導度の温度変化は小さい。結果、不純物起因のイオン拡散と相互作用によるスピン拡散は判別が難しい。

(2014 年 11 月 28 日原稿受付)

## A Never Ending Series of Spin Polarization Transfer: Hyperpolarization of Metal Salt by Optical Pumping of Atomic Vapor

Kiyoshi Ishikawa

abstract: Optical pumping of atomic vapor provides hyperpolarization of alkali-metal salts. Laser irradiation induces electron and nuclear spin currents in the gas phase, spin transfer between gaseous atoms and condensed matter, injection of spin polarized carriers, and spin polarization transport in the materials. In this paper, spin injection optical pumping for cesium salts are performed by optical pumping of cesium vapor. The technique can be applied to a variety of different metal salts.

インビーム $\gamma$ 線核分光による新魔法数の発見武内 聡<sup>†1</sup> 〈東京工業大学大学院理工学研究科〉デービッド・ステッペンバック<sup>†2</sup> 〈理化学研究所仁科加速器研究センター〉

宇都野 穰 〈日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター〉

電子とともに原子を構成している原子核は陽子と中性子（あわせて核子という）から成り立っている。天然には約270種類の「安定核」と呼ばれる原子核が存在し、軽い核では陽子と中性子の数はほぼ同数である。そのバランスが崩れて不安定になると、放射線を放出してより安定な原子核に変化する。このような原子核を「不安定核」と呼び、これまでに約3,000種類が知られている。原子核の性質は陽子と中性子の数によって特徴付けられるが、この数が2, 8, 20, 28, 50, 82, 126になると原子核は硬くなって励起しにくい状態になる。これを「魔法数」と呼んでいる。1949年メイヤーとイェンゼンは安定核の構造を説明するために、それぞれ殻構造理論を提唱し魔法数を説明した。電子の場合と同様に、核子も量子力学に従ってとびとびのエネルギーを持った軌道（殻）を占有する。軌道がそれぞれ決まった数の核子で満たされ、次の軌道までのエネルギーが大きいときに魔法数が出現することを示した。

1970年代、加速器技術が発展し不安定核を対象とした実験が盛んに行われるようになった。安定核で見られた中性子数20の魔法数が軽い不安定核領域で消失していることが明らかになったが、メイヤーとイェンゼンによって提唱された殻構造理論だけでは説明できなかった。また、中性子数が過剰な酸素同位体では中性子数16が新たに魔法数となることが明らかになった。これらの事実がきっかけとなって魔法数に対する様々な実験研究・理論研究が行われるようになった。殻構造理論に適切な有効相互作用を加えることで新たな魔法数を予測することも行われている。現在では、実

験と理論で様々な現象を検証して殻構造が不安定核領域で変化する原因を解き明かし、安定核と不安定核を統一的に理解することが原子核物理学で一つのテーマとなっている。

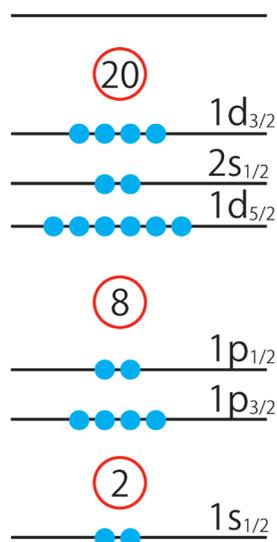
原子核が魔法数を持つかどうかを調べるためには、第一励起エネルギーの測定が一つの有効な方法である。例えば<sup>40</sup>Caのように魔法数を持つ原子核の場合、第一励起エネルギーは陽子数（中性子数）が同じ同位体（同中性子体）に比べて大きな値を持つ。調べたい原子核を励起しエネルギーを測定することで、魔法数を持つか判断できる。原子核を励起する方法はいくつかあるが、効率よく第一励起状態を生成する重イオンビームの破碎反応が有効である。励起エネルギーの測定は、励起状態から基底状態へ遷移する際に放出される $\gamma$ 線と反応前後の原子核を識別するインビーム $\gamma$ 線核分光法によって行う。ここで紹介する研究では、2001年に予測された中性子の魔法数34を持つとされる<sup>54</sup>Caに対して破碎反応とインビーム $\gamma$ 線核分光法を合わせた実験を行った。

<sup>54</sup>Caの励起状態から放出された $\gamma$ 線のスペクトルには、2,043 keVのエネルギーを持つピークが観測された。このエネルギーは第一励起エネルギーに相当し、周辺の不安定核と比べると有意に大きな値であることがわかった。そのため、<sup>54</sup>Caでは二重閉殻構造が実現しており、陽子数20だけでなく中性子数34も魔法数になっていることがわかる。この結果は中性子数34が魔法数であるとする理論計算でよく説明され、不安定核領域に存在する<sup>54</sup>Caで新しい魔法数34が出現することが明らかになった。

## —Keywords—

## 原子核の魔法数：

原子中の電子配置と同じように、原子核中の陽子と中性子それぞれの配置も殻模型で良く記述される。電子の場合の魔法数、つまり閉殻を形成する際の電子数（希ガスの原子番号）は、2, 10, 18…だったが、安定な原子核の場合は、陽子数、中性子数それぞれ2, 8, 20…のようになることが知られている。陽子数と中性子数の両方が同時に魔法数となる原子核は二重魔法数（二重閉殻）の原子核と呼ばれる。



<sup>†1</sup> 執筆時の所属：理化学研究所仁科加速器研究センター

<sup>†2</sup> 執筆時の所属：東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター

## 1. はじめに

1949年にメイヤーとイェンゼンがそれぞれ殻模型を提唱し、天然に存在する安定な原子核の構造を説明した。<sup>1,2)</sup> 原子核の中ではフェルミ粒子である核子（陽子と中性子の総称）が量子力学に従ってとびとびのエネルギーを持つ軌道を占有し、それぞれの軌道にはそれぞれ決まった数の核子が入ることができる。軌道が核子で満たされ、次の軌道までのエネルギーギャップが大きいと、魔法数が出現する。殻模型はこの魔法数をよく説明し、原子核構造の理解が大きく進んだ。1970年代に入ると加速器を使った実験技術の発展により、天然には存在しない不安定核の実験的研究が進められ、マグネシウムやナトリウムなどの中性子過剰な原子核では中性子数  $N=20$  の魔法数が消失していることがわかった。<sup>3)</sup> 近年には、安定線から離れた<sup>42</sup>Si（陽子数  $Z=14$ ）原子核が中性子魔法数  $N=28$  から期待される性質を失い、大きく変形していることが確認された。<sup>4,5)</sup> 一方、新たな魔法数も出現する。酸素の同位体では、中性子数が  $N=16$  まで増えると閉殻構造が現れることが明らかにされた。<sup>6,7)</sup> どちらの現象も、原子核の殻構造が陽子数・中性子数のバランスによって変化し得るものであることを示している。<sup>8,9)</sup> より広い観点から原子核の構造を理解するために、中性子過剰あるいは陽子過剰な「エキゾチック核」と呼ばれる不安定核での魔法数のふるまいを研究することが盛んに行われるようになった。最近注目されているのは、中性子過剰なカルシウム近傍の原子核である。第一 $2^+$ 状態<sup>\*1</sup>の励起エネルギーや $\gamma$ 遷移確率が測定され、殻構造変化を示す成果が得られている。例えば、<sup>52</sup>Ca ( $Z=20$ )、<sup>54</sup>Ti ( $Z=22$ )、<sup>56</sup>Cr ( $Z=24$ ) についての実験<sup>10-15)</sup> やカルシウム同位体の質量測定<sup>16)</sup> から、中性子数  $N=32$  でエネルギーギャップが大きくなっていることが示され、新しい魔法数  $N=32$  の存在が明らかになった。

2001年東京大学のグループが、カルシウム同位体では  $N=34$  も魔法数になることを予測した。<sup>17)</sup> 図1に示すように、陽子軌道  $\pi f_{7/2}$  にある陽子数の減少に伴って、陽子と中性子の間に働くテンソル型の有効相互作用による引力が減少し、中性子軌道にギャップが現れる。<sup>18)</sup> 先に触れた  $N=32$  の魔法数も同様の機構で説明される。しかし、 $N=34$  の閉殻性は中性子数が同じ34でも、<sup>56</sup>Ti核<sup>13,19)</sup> や<sup>58</sup>Cr核<sup>15,20)</sup> を対象とした実験では報告されなかったため、魔法数が本当に出現するか議論の対象となっていた。<sup>21,22)</sup> 実際、<sup>54</sup>Ca ( $N=34$ ) の第一 $2^+$ 状態の励起エネルギーは1~4 MeVと広い範囲で理論予測がなされていたため、<sup>18-20,23-28)</sup> 実験的検証が期待されていた。そこで  $N=34$  の魔法数の存在を明らかにするために世界各国の研究施設が実証を試みたが、<sup>54</sup>Caを人工的に生成することが困難であり、その実

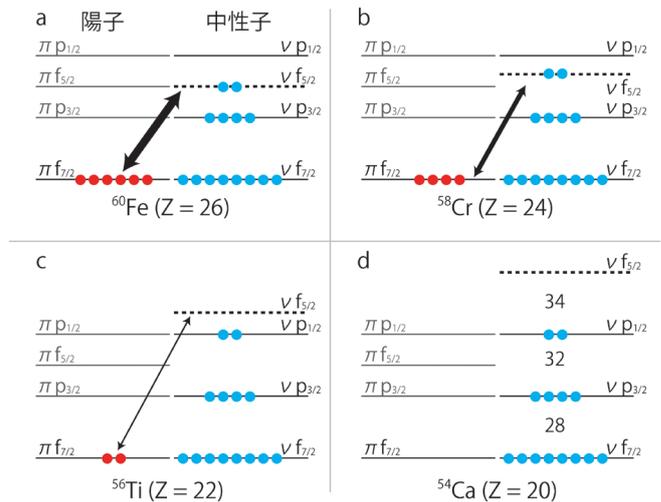


図1 陽子軌道  $\pi f_{7/2}$  と中性子軌道  $\nu f_{5/2}$  間に特に強く働くテンソル型の有効相互作用（両矢印）による殻構造の変化と、それがもたらす中性子数  $N=34$  の同中性子体の配位。a-c) <sup>60</sup>Fe から <sup>56</sup>Ti にかけて  $\pi f_{7/2}$  軌道から陽子がなくなると、陽子-中性子間の相互作用の強さが減り、中性子軌道の  $\nu f_{5/2}$  が  $\nu p_{3/2} - \nu p_{1/2}$  に対してエネルギーが高くなる。結果として、 $N=32$  のギャップが現れる。d) さらに陽子が減った<sup>54</sup>Caでは、図に示すように  $N=34$  のギャップができる。

現は理化学研究所仁科加速器研究センター RI ビームファクトリー (RIBF)<sup>29)</sup> の大強度ビームを10年以上待たなければならなかった。2007年の稼働以来行われた様々な加速器の高度化により、世界最高強度の重イオンビームが供給されるようになった。このような背景のもと、2012年理化学研究所や東京大学などの国際研究グループは、<sup>54</sup>Caの第一 $2^+$ 状態の励起エネルギーを決定する実験を行った。<sup>30)</sup>

## 2. RIBFで行ったインビーム $\gamma$ 線核分光実験

原子核が魔法数を持つかどうかを調べるためには、第一 $2^+$ 状態の励起エネルギー  $[E_x(2^+)]$  を決定することが有効である。一般に魔法数を持つ原子核の  $E_x(2^+)$  は他の原子核に比べて高い。従って、<sup>54</sup>Caの原子核をなんらかの方法で励起し、励起状態から基底状態へ遷移する際に放出される $\gamma$ 線のエネルギーを測定すれば、魔法数についての議論が可能となる。この研究では<sup>54</sup>Caを生成・励起して脱励起 $\gamma$ 線を観測するために、二段階破碎反応とインビーム $\gamma$ 線核分光法を用いた。

まず中性子数が<sup>54</sup>Caと同じ  $N=34$  である<sup>55</sup>Sc ( $Z=21$ ) と<sup>56</sup>Tiを二次ビームとして生成する。核子あたり345 MeVまで加速された重イオンビーム<sup>70</sup>Znを一次標的であるベリリウム標的に照射し、破碎反応を起こす。このとき様々な原子核が生成されるが、BigRIPSと呼ばれる超伝導RIビーム生成分離装置<sup>31)</sup> を用いて<sup>55</sup>Scと<sup>56</sup>Tiを選び出し二次ビームとする（図2参照）。BigRIPSは双極電磁石や超伝導四重極電磁石、エネルギー減衰板やビームラインカウンターなどで構成され、個々の粒子の飛行軌道、各焦点面間の飛行時間、磁気剛性、検出器でのエネルギー損失を選別し測定することができる。これらの情報から粒子の陽子数、質量-電荷比を求め識別を行った。<sup>55</sup>Scと<sup>56</sup>Tiのエネルギーは核

\*1 陽子・中性子が共に偶数個から構成される原子核の多くは、第一励起状態のスピン・パリティは $2^+$ であり、その状態は原子核の殻構造や形などを反映する。

\*2 陽子が占有する軌道を $\pi$ 、中性子が占有する軌道を $\nu$ と表す。

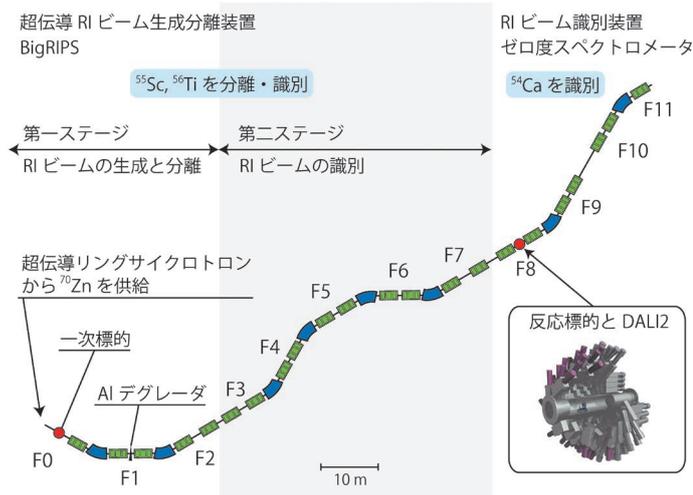


図2 実験施設の全体図。超伝導リングサイクロトロンから供給される $^{70}\text{Zn}$ を一次ビームとして一次標的(ベリリウム)に照射する。破碎反応で得られる粒子を超伝導RIビーム生成分離装置BigRIPSで分離・識別し、二次ビームである $^{55}\text{Sc}$ と $^{56}\text{Ti}$ を選択する。反応標的のベリリウムはF8焦点面に設置され、脱励起 $\gamma$ 線は高感度 $\gamma$ 線検出装置DALI2で測定する。二次反応の後に生成される $^{54}\text{Ca}$ は粒子識別装置ゼロ度スペクトロメータで識別される。

子あたり約220 MeV、ビームの強度はそれぞれ約700 Hzと7 kHzであった。これらの二次ビームを実験ポートのF8焦点面に設置された10 mm厚のベリリウム標的に照射した。ここで二回目の破碎反応が起こる。 $^{55}\text{Sc}$ または $^{56}\text{Ti}$ から陽子一つまたは二つはぎ取られ、 $^{54}\text{Ca}$ の励起状態が効率よく生成される。励起状態から基底状態へ遷移する際に放出される脱励起 $\gamma$ 線は、標的を囲むように設置された高感度 $\gamma$ 線検出装置DALI2<sup>32)</sup>で測定した。DALI2は186個のNaI(Tl)検出器で構成され、 $\gamma$ 線のエネルギーと放出角度を測定することが可能である。 $\gamma$ 線を放出して基底状態となった $^{54}\text{Ca}$ は、ゼロ度スペクトロメータ<sup>31)</sup>と呼ばれるRIビーム識別装置によって同定された。

### 3. $^{54}\text{Ca}$ の励起準位

#### 3.1 $\gamma$ 線エネルギースペクトルと励起準位構造

二段階破碎反応で生成された $^{54}\text{Ca}$ と同時に測定された $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを図3.aに示す。光速の約50%で飛行する $^{54}\text{Ca}$ から放出される $\gamma$ 線はドップラー効果の影響を受け、放出角度によってそのエネルギーが変化する。図3では、ドップラー効果による変化をDALI2で測定した $\gamma$ 線の放出角度を使って補正している。エネルギースペクトルに見られるいくつかのピークは、 $^{54}\text{Ca}$ の $\gamma$ 遷移に相当する。今回の実験のような核子をはぎ取る反応では、第一 $2^+$ 状態が励起される、あるいは第一 $2^+$ 状態を経由する脱励起が起こる可能性が高い。そのため、第一 $2^+$ 状態から基底状態への遷移が強い $\gamma$ 線ピークとして観測される。実際に図3に示す2,043 keVのピークがそれであり、このことから $^{54}\text{Ca}$ の第一 $2^+$ 状態の励起エネルギーが2,043(19) keVであることがわかった。

$^{54}\text{Ca}$ を含むカルシウム同位体の $E_x(2_1^+)$ を図4.aに示す。

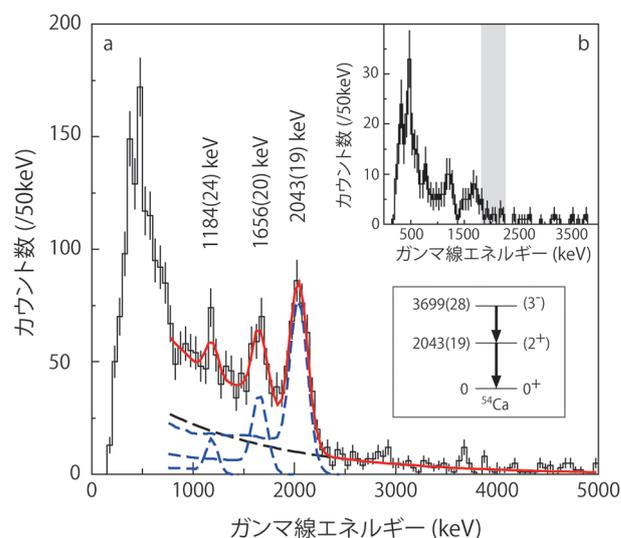


図3 a)  $^{55}\text{Sc}$ ,  $^{56}\text{Ti}$ の破碎反応によって生成された $^{54}\text{Ca}$ から放出される $\gamma$ 線のエネルギースペクトル。青と黒の破線はそれぞれシミュレーションコードGEANT4<sup>33)</sup>による応答関数とバックグラウンドを示す指数関数を表し、赤い実線がフィッティングの結果を表す。実験で得られた励起準位を励起状態のエネルギーとスピン・パリティとともに右下に示す。b) 2,043 keVの $\gamma$ 線と同時に観測された $\gamma$ 線スペクトル。同時測定を解析する際に決めたエネルギー範囲を灰色で示す。

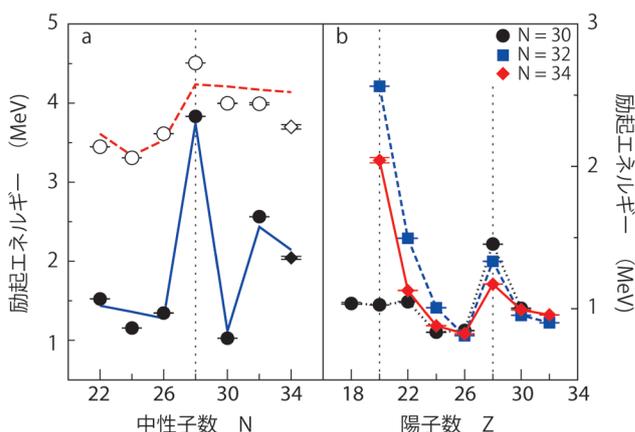


図4 a) カルシウム同位体の第一 $2^+$ 状態と第一 $3^-$ 状態の励起エネルギー。丸とひし形が実験値を示し、黒が第一 $2^+$ 状態で白が第一 $3^-$ 状態を表す。実線と破線は殻模型による計算値。N=28の点線は中性子の魔法数を示す。b) 中性子数N=30, 32, 34の同中性子体の第一 $2^+$ 状態の励起エネルギー。直線で同中性子体ごとの実験値を結び示す。Z=20と28にある点線は陽子の魔法数を示す。

前に触れたように、魔法数を持つ原子核の $E_x(2_1^+)$ は他の同位体に比べて高いことが知られており、一般的には軌道間のエネルギーギャップが大きいことに相当する。実際に安定核である $^{48}\text{Ca}$ の場合、陽子と中性子の魔法数Z=20とN=28の影響を受け、 $E_x(2_1^+)$ は3,831 keVと高い。N=32の $^{52}\text{Ca}$ も中性子数が二つ少ない $^{50}\text{Ca}$ に比べて $E_x(2_1^+)$ が大きく、N=32の準閉殻構造が現れている<sup>10,11,16)</sup>と考えられている。 $^{54}\text{Ca}$ も同様に他の中性子魔法数を持たないカルシウム同位体に比べて高いことから、N=34で閉殻構造が現れている、すなわち魔法数の出現を示している。

次に中性子数が同じ同中性子体毎にはどのような変化がみられるのか。図4.bにアルゴン(Z=18)からゲルマニウ

ム ( $Z=32$ ) までの  $E_x(2_1^+)$  を中性子数  $N=30, 32, 34$  について示す。陽子数が魔法数であるカルシウム ( $Z=20$ ) とニッケル ( $Z=28$ ) 同位体を見ると、中性子数  $N=30$  では、 $^{50}\text{Ca}$  の  $E_x(2_1^+)$  は  $^{58}\text{Ni}$  よりも約  $0.4\text{ MeV}$  小さいが、 $N=32$  の  $^{52}\text{Ca}$  は  $^{60}\text{Ni}$  よりも約  $1.2\text{ MeV}$  大きい。これは、 $Z=20$  で  $N=32$  の殻ギャップが大きくなっていることを表している。同様に、 $^{54}\text{Ca}$  の  $E_x(2_1^+)$  が他の  $N=34$  同中性子体と比べて大きくなっているのは、カルシウムで  $N=34$  が新たな閉殻構造をもたらすことを示している。以上のように同位体と同中性子体で励起エネルギーを系統的に比較すると、 $^{54}\text{Ca}$  では陽子数  $Z=20$  と中性子数  $N=34$  の二つの魔法数を併せ持つ二重閉殻構造であることがわかってくる。

図 3.a の  $2^+ \rightarrow 0^+$  遷移の他に、 $1,656(20)\text{ keV}$  と  $1,184(24)\text{ keV}$  にも弱い遷移が観測された。 $2^+$  状態を経由しているかどうかを調べるために、 $2,043\text{ keV}$  の  $\gamma$  線が検出されたイベントを選んで  $\gamma$ - $\gamma$  同時計数解析を行った (図 3.b 参照)。その解析の結果とそれぞれの  $\gamma$  線の強度から、 $1,656\text{ keV}$  の  $\gamma$  線は  $3,699(28)\text{ keV}$  の励起状態から  $2^+$  状態への遷移であることがわかった。一方  $1,184\text{ keV}$  の  $\gamma$  線ピークは統計量が不十分であるものの、 $2,043\text{ keV}$  の第一  $2^+$  状態と  $3,699\text{ keV}$  の励起状態の間に別の励起状態が存在し、それを經由した遷移に伴う  $\gamma$  線である可能性が考えられる。

次に、実験で得られた  $^{54}\text{Ca}$  の  $3,699\text{ keV}$  状態はどのようなスピン・パリティ ( $J^\pi$ ) を持つのだろうか。そのエネルギーを偶々核のカルシウム同位体に対する第一  $3^-$  状態の励起エネルギー [ $E_x(3_1^-)$ ] とともに図 4.a に示す。 $^{52}\text{Ca}$  の実験及び  $E_x(3_1^-)$  の傾向を合わせて考えると、 $^{54}\text{Ca}$  の  $3,699\text{ keV}$  の  $J^\pi$  は  $3^-$  である可能性がある。米国の国立超伝導サイクロトロン研究所 (NSCL) で測定された  $^{52}\text{Ca}$  の実験では、正パリティ状態ではなく  $3^-$  状態を直接励起するプロセスが報告されている。<sup>11)</sup> 同様の反応を測定した  $^{54}\text{Ca}$  でも同じように励起が起こるものと期待されるため、励起された  $3,699\text{ keV}$  状態の  $J^\pi$  は  $3^-$  であると考えられる。

### 3.2 殻模型による解釈

得られた実験データはどう定量的に理解されるか。ここに紹介する殻模型計算により説明する。殻模型計算とは、メイヤーとイェンゼンの殻模型を基礎に置き、核子間の有効相互作用を導入することによって配位混合や殻構造の変化を取り入れたものである。計算では殻模型空間として  $sd$ - $pf$ - $sdg$  軌道を選び、図 1 に示されたテンソル力を含み、かつ安定核近傍の実験値を再現する現象論的な有効相互作用を用いた計算を行った。<sup>34)</sup> この殻模型計算によれば、図 1 に示した  $^{52}\text{Ca}$  に現れる  $N=32$  のギャップと  $^{54}\text{Ca}$  に現れる  $N=34$  のギャップは同程度の大きさである。その結果、それぞれの大きさを反映した  $^{52}\text{Ca}$  と  $^{54}\text{Ca}$  の  $E_x(2_1^+)$  も同程度の大きさとなる。さらに  $^{52}\text{Ca}$  では基底状態の相関エネルギーが大きいため、結果として  $E_x(2_1^+)$  が  $^{54}\text{Ca}$  よりも大きくなり、最終的に実験との定量的一致を見る。

$3^-$  状態はどうなっているのか。図 4.a に示すように、計

算値は実験データよりも約  $0.4\text{ MeV}$  ほど高いだけであり、 $3,699\text{ keV}$  状態を  $3^-$  とした  $J^\pi$  の同定をサポートしている。もちろん、この状態が  $4^+$  である可能性は棄却できないが、一連の殻模型計算だけでなく三体力を考慮した計算<sup>28)</sup> にもあるように、 $4^+$  状態のエネルギーは約  $4.5\text{ MeV}$  であると計算されており、実験値よりも  $1\text{ MeV}$  程度大きい。これらを総合すると、 $3,699\text{ keV}$  状態の  $J^\pi$  を  $3^-$  とする推定には十分な根拠があると言える。

## 4. $^{53}\text{Ca}$ の励起準位

中性子が一つ少ない  $^{53}\text{Ca}$  にも  $N=34$  の閉殻構造が反映する。図 5.a に示すように、 $^{55}\text{Sc}$  と  $^{56}\text{Ti}$  の破碎反応から得られた  $^{53}\text{Ca}$  の  $\gamma$  線エネルギースペクトルには、 $1,753(15)\text{ keV}$  と  $2,227(19)\text{ keV}$  にピークが観測された。 $1,753\text{ keV}$  の  $\gamma$  線はこれまでに報告されていない遷移であり、 $2,227\text{ keV}$  の  $\gamma$  線は  $\beta$  崩壊の実験<sup>35)</sup> で報告された  $2,220\text{ keV}$  に一致する。二つの  $\gamma$  線は、図 5.b に示すように同時に観測されず、それぞれ  $1,753\text{ keV}$  と  $2,227\text{ keV}$  の励起状態から直接基底状態へ遷移する際に放出されたものだと考えられる。

実験データから直接  $^{53}\text{Ca}$  の  $J^\pi$  を決定することはできないが、殻模型に基づいて考えてみる。最外殻の中性子が占有する軌道を  $vp_{1/2}$  とする最も簡単な殻模型に従うと、 $^{53}\text{Ca}$  の基底状態は  $1/2^-$  という  $J^\pi$  を持つ。 $\beta$  崩壊の実験<sup>35)</sup> と  $^{54}\text{Ca}$  の場合と同様な殻模型計算をもとにすると、 $1,753\text{ keV}$  と  $2,227\text{ keV}$  状態の  $J^\pi$  は  $5/2^-$  と  $3/2^-$  であると推定され、他の理論計算<sup>24, 25, 28)</sup> と一致している。これらの励起状態をそれぞれ、 $N=34$  ( $vp_{1/2} \rightarrow vf_{5/2}$ ) と  $N=32$  ( $vp_{3/2} \rightarrow vp_{1/2}$ ) のギャップをまたいだ中性子の励起によると考えれば、 $N=32$  と  $N=34$  のエネルギーギャップは約  $2\text{ MeV}$  であることになり、 $^{53}\text{Ca}$  の実験データは  $^{52}\text{Ca}$  と  $^{54}\text{Ca}$  の実験結果と、それにより予想される閉殻構造を裏付けている。

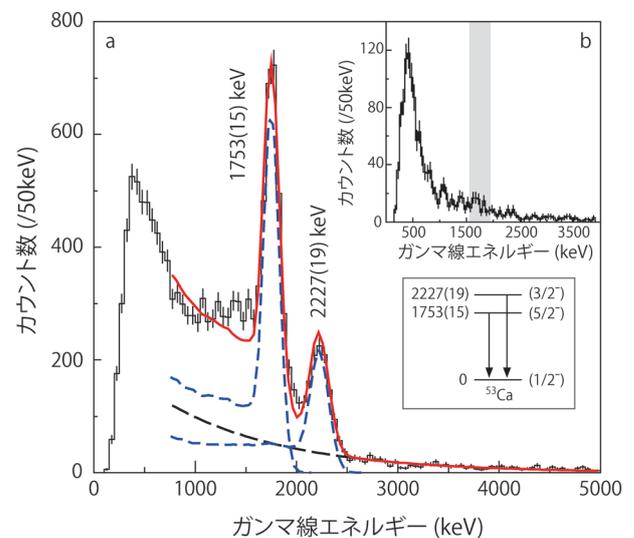


図 5 a)  $^{55}\text{Sc}$ ,  $^{56}\text{Ti}$  の破碎反応によって生成された  $^{53}\text{Ca}$  から放出される  $\gamma$  線のエネルギースペクトル。b)  $1,753\text{ keV}$  の  $\gamma$  線と同時に観測された  $\gamma$  線スペクトル。他の表示は図 3 に従う。

## 5. おわりに

この研究は、カルシウム同位体に新しい魔法数  $N=34$  が現れるか、という長年の疑問に答えを出した。陽子数と中性子数のアンバランスによって安定核とは異なる魔法数が出現し、また従来から知られる魔法数が消滅することは、軽い核の領域でいくつか知られつつある。最近の例としては、最初に述べたシリコンだけでなくマグネシウムの同位体でも  $N=28$  の魔法数が消失し、原子核が大きく変形しているという実験結果もある。<sup>38)</sup> ここに紹介した研究では、第一励起  $2^+$  状態などのエネルギーを核反応で得られる高速励起核からの  $\gamma$  線を測定する、という方法がとられている。質量測定などとともに、不安定核の研究には有力な実験手法である。今後も RIBF を中心とした加速器施設で実験が行われ、様々な常識を覆す結果が得られる可能性がある。これから得られる研究成果が殻構造の変化を明らかにするだけでなく、原子核そのものの理解、原子核物理学の発展に貢献すると期待している。

最後に、この研究のために尽力された共同研究者の皆さん、本稿執筆にあたり助言を下された本林透氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) M. G. Mayer: Phys. Rev. **75** (1949) 1969.
- 2) O. Haxel, J. Jensen and H. Suess: Phys. Rev. **75** (1949) 1766.
- 3) C. Thibault, *et al.*: Phys. Rev. C **12** (1975) 644.
- 4) B. Bastin, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 022503.
- 5) S. Takeuchi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 182501.
- 6) A. Ozawa, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 5493.
- 7) R. V. F. Janssens: Nature **459** (2009) 1069.
- 8) T. Otsuka, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 232502.
- 9) Y. Utsuno, *et al.*: Phys. Rev. C **86** (2012) 051301(R).
- 10) A. Huck, *et al.*: Phys. Rev. C **31** (1985) 2226.
- 11) A. Gade, *et al.*: Phys. Rev. C **74** (2006) 021302(R).
- 12) R. V. F. Janssens, *et al.*: Phys. Lett. B **546** (2002) 55.
- 13) D.-C. Dinca, *et al.*: Phys. Rev. C **71** (2005) 041302(R).
- 14) R. Chapman, S. Hinds and A. E. MacGregor: Nucl. Phys. A **119** (1968) 305.
- 15) A. Büger, *et al.*: Phys. Lett. B **622** (2005) 29.
- 16) F. Wienholtz, *et al.*: Nature **498** (2013) 346.
- 17) T. Otsuka, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 082502.
- 18) M. Honma, T. Otsuka and T. Mizusaki: RIKEN Accel. Prog. Rep. **41** (2008) 32.
- 19) N. S. Liddick, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 072502.
- 20) J. I. Prisciandaro, *et al.*: Phys. Lett. B **510** (2001) 17.
- 21) R. V. F. Janssens: Nature **435** (2005) 897.
- 22) H. L. Crawford, *et al.*: Phys. Rev. C **82** (2010) 014311.
- 23) T. R. Rodríguez and J. L. Egido: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 062501.
- 24) M. Rejmund, *et al.*: Phys. Rev. C **76** (2007) 021304(R).
- 25) L. Coraggio, *et al.*: Phys. Rev. C **80** (2009) 044311.
- 26) K. Kaneko, *et al.*: Phys. Rev. C **83** (2011) 014320.
- 27) J. D. Holt, *et al.*: J. Phys. G **39** (2012) 085111.
- 28) G. Hagen, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 032502.
- 29) Y. Yano: Nucl. Instrum. Methods B **261** (2007) 1009.
- 30) D. Steppenbeck, *et al.*: Nature **502** (2013) 207.
- 31) T. Kubo, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 03C003.
- 32) S. Takeuchi, *et al.*: Nucl. Instrum. Methods A **763** (2014) 596.
- 33) S. Agostinelli, *et al.*: Nucl. Instrum. Methods A **506** (2003) 250.
- 34) Y. Utsuno, *et al.*: Prog. Theor. Phys. **196** (Suppl.) (2012) 304.
- 35) F. Perrot, *et al.*: Phys. Rev. C **74** (2006) 014313.
- 36) T. Ohnishi, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 083201.
- 37) S. Agostinelli, *et al.*: Nucl. Instrum. Methods A **506** (2003) 250.
- 38) P. Doornenbal, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 212502.

## 非会員著者の紹介

デービッド・ステッペンベック氏： 東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター特任研究員(執筆時)。現在は日本学術振興会外国人特別研究員として独立行政法人理化学研究所仁科加速器研究センターに所属。専門は、原子核物理実験。インビーム  $\gamma$  線核分光実験による中性子過剰核の核構造研究が主なテーマ。

(2014年3月24日原稿受付)

## Discovery of New Magic Number *via* In-Beam $\gamma$ -ray Spectroscopy

Satoshi Takeuchi, David Steppenbeck and Yutaka Utsuno

abstract: The atomic nucleus is a finite quantum system composed of protons and neutrons. In a way similar to electrons in an atom, protons and neutrons in the nucleus exhibit shell structures. In the case of stable nuclei, which exist naturally in the Universe, large energy gaps persist between shells that fill when the proton or neutron number equals 2, 8, 20, 28, 50, 82 or 126. However, far from the line of  $\beta$  stability, these magic numbers can change in nuclei that contain a large excess of neutrons. While some of the traditional shell closures disappear, other new ones are known to present themselves. Here, we report on a study of the exotic nucleus  $^{54}\text{Ca}$  using proton removal reactions from  $^{55}\text{Sc}$  and  $^{56}\text{Ti}$  projectiles at the RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory. The results indicate a doubly magic structure for  $^{54}\text{Ca}$  and, accordingly, provide the first experimental evidence for a new subshell closure at neutron number 34.

## 銀河系内で初めての極超新星の痕跡を発見か？

木村 公 〈宇宙航空研究開発機構〉

常 深 博 〈大阪大学理学研究科〉

富田 洋 〈宇宙航空研究開発機構〉

国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに搭載した全天X線監視装置 (MAXI: Monitor of All-sky X-ray Image) の観測により、白鳥座方向に“極”超新星爆発の痕跡を見つけました。この爆発は、通常の超新星爆発の100倍も大きなもので、その規模から“極”超新星だと推定されました。我々の住む天の川銀河では、極超新星もその痕跡もこれまで見つかっておらず、今回が天の川銀河内での世界初の発見となります。MAXIに搭載されているX線CCDスリットカメラ (SSC) は、MAXIの観測開始 (2009年8月) 以来全天にわたって広がっている高温領域を観測してきました。その全天観測マップから白鳥座の方向に大きく広がった高温領域を確認し、これを解析した結果、およそ2-3百万年前に爆発した“極”超新星の痕跡の可能性が高いとの結論に達しました。銀河には超新星爆発によって作られた高温ガスがたくさんあり、X線カメラで撮影するとバブル (泡) のように見えています。わたしたちの住む天の川銀河以外の銀河では、超新星爆発で作られるバブルよりもさらに大きなバブル (スーパーバブル) が見つかっています。私たちの銀河内にもこれまでのX線観測によってスーパーバブルの存在が予測されていましたが、その見かけが大き過ぎて、これまでの視野の狭い望遠鏡では上手く観測できませんでした。これに対して、全天を観測できるX線カメ

ラMAXI-SSCの登場により、宇宙に広がった超高温領域の分布の観測が可能になりました。今回、SSCにより地球から宇宙を見上げた際の半径の角度が11度にもなる白鳥座の大構造を調べたところ、重金属からの輝線を検出し、その温度が270万度にもなることやその全エネルギー・大きさなどを測定しました。これらの結果、白鳥座の高温領域は、2-3百万年前に通常の超新星爆発の100倍ものエネルギーによって作られたことが判りました。これは、太陽質量の数十倍の星が極超新星 (ハイパーノバ) 爆発を起こした結果だと解釈できます。通常の超新星爆発は我々の銀河では約50年に一度程度起こるといわれています。しかし、ハイパーノバは10万年から100万年に一度しか起こらないと予想されており、非常に珍しい現象です。しかも、その巨大な爆発エネルギーは、銀河全体の進化に大きな影響を与えます。ハイパーノバは、宇宙で最大の爆発であるガンマ線バーストを起こし、超高エネルギー宇宙線の起源天体に関連し、強い重力波も出すと考えられています。今回の観測は、そのような珍しい現象の痕跡を世界で初めて我が銀河系内で発見できたこととなります。この痕跡は可視光では見えないため、目で見ることではできません。しかし、2-3百万年前の爆発の瞬間は満月と同程度に輝いたと予想されま

### —Keywords—

#### 超新星爆発：

質量が太陽質量の8倍以下の恒星は、進化の最後に核融合が止んで (燃え尽きて) 白色矮星になるが、それ以上の大質量星は燃え尽きると重力崩壊による大爆発を起こす。スペクトル中の吸収線によって、Ib, Ic, II型に分類される。また、白色矮星が赤色巨星と近接連星系をなす場合、巨星から白色矮星への質量降着により白色矮星の質量が太陽質量の1.4倍になると、炭素の核融合が暴走して超新星爆発を起こす。スペクトルからIa型に分類される。

#### 超新星残骸：

超新星爆発による衝撃波が周囲に広がることで、超新星残骸と呼ばれる天体が残る。電波からガンマ線に至る様々な波長で観測される。メシエカタログの第1番 (M1) 「かに星雲」が有名。この超新星爆発は、藤原定家の明月記にも記録があり、1054年の爆発後、現在では10光年の大きさに広がっている。もっと古いものでは、はくちょう座の「網状星雲」は50光年、オリオン座の「バーナードループ」は300光年の広がりを持つ。

#### X線天文衛星：

初のX線天文衛星であるウフルが1970年に打ち上げられ、1978年のアインシュタイン観測機からX線撮像が始まる。その後のX線天文衛星の撮像視野角は1°以下で、高解像度化、高感度化を競っている。ちなみに視野角1°は全天の約4万分の1の領域である。

## 1. はじめに

恒星がその一生を終えるときには幾つかのパターンがあり、その内の一つが超新星爆発です。この爆発によって生じた衝撃波は周囲に広がっていくにつれ、星間物質をかき集め、膨張していきます。この運動エネルギーの一部は熱エネルギーに変換され、やがて、星間物質は数千万度のプラズマになり、超新星爆発後も数万年間にわたってX線などで輝きます。銀河にはこのようなプロセスによって作られた高温プラズマがたくさんあり、X線カメラで撮影するとふくれあがった泡（バブル）のように見えています。わたしたちの住む天の川銀河以外の銀河では、超新星爆発で作られるバブルよりもさらに大きなバブル（スーパーバブル）が見つかっています。このようなスーパーバブルは単独の超新星爆発では足りないほどの大きな熱的エネルギーを持っておりその生成過程にはいくつかのシナリオが提案されています。

- ・中心にOBアソシエーションと呼ばれる、O型星やB型星などの大質量星を10-100個程度含んだ星団があり、そこからの吹く星風が周りの星間物質をかき集めながら温め、X線を放射し、大きな構造を形成する。
- ・OBアソシエーション内で一つの超新星爆発が起き、その衝撃波が周りの物質を圧縮し、また新たなOBアソシエーションを作る。これを数回繰り返して、大きな構造を形成する。
- ・一つの大質量星が、普通の超新星爆発の100倍程度のエネルギーの極超新星爆発を起こし、その衝撃波が星間物質をかき集め、大きな構造を形成する。

一般的には以上三つのシナリオが考えられます。1990年に打ち上げられた、ヨーロッパのX線天文衛星ROSATによって得られた結果などから、銀河系にもスーパーバブルのような大きなX線の構造があることは知られていましたが、その放射過程が熱エネルギーなのか非熱エネルギーなのか、また、熱エネルギーとしたら全エネルギーはいくらか、さらにはどのくらいの距離にあるのか、などほとんどわかっていませんでした。そのため、単純に近くにあるため、大きく見える普通の超新星残骸なのか？ それとも遠くにあり、普通の超新星残骸では説明できないほど大きなエネルギーを持った構造体なのか？あるいは磁場や荷電粒子の絡んだ非熱エネルギーによるものかわかっていませんでした。一般的なX線天文衛星は星などの点源を見ることに適した設計をしているため、その集光能力は素晴らしいのですが、視野が狭く、前述した、大きく広がった構造体の全体像を把握するには適していません。そこで、我々は国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された、全天X線監視装置MAXIをつかい、この大きな広がった構造体を観測しました。

## 2. MAXIとは？

Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) は国際宇宙ステーション

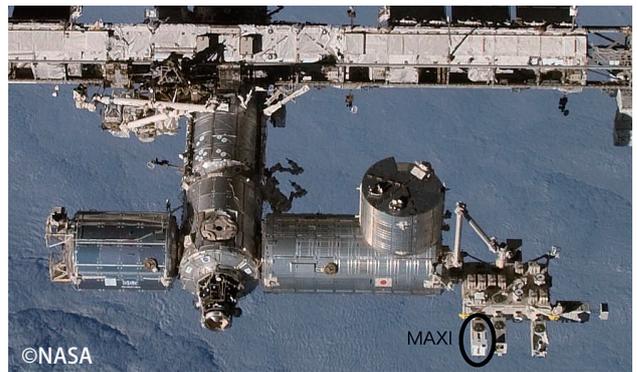


図1 国際宇宙ステーションの写真。黒い丸で囲まれた部分にMAXIが取り付けられている。

ーション「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームに取り付けられた、X線観測装置です。<sup>1)</sup> 図1はスペースシャトルから撮影された国際宇宙ステーションの写真で、黒丸で囲まれた部分がMAXIです。MAXIには二種類のX線カメラが搭載されており、一つは比例計数管を利用したGas Slit Camera (GSC) もう一つは、X線CCDを利用したSolid State-slit Camera (SSC) です。GSCは2-30 keVのX線に対して感度を持っており、 $1.5^\circ \times 160^\circ$ の細長い視野を持っています。ISSは約90分で地球を一周しますので、それに従ってGSCの細長い視野が全天をスキャンします。SSCも同様に、 $1.5^\circ \times 90^\circ$ の細長い視野を持っています。実際には太陽の影響などで、一回のスキャンで全天をスキャンすることはできませんが、半年程度のデータをためることによって、全天を見ることができます。また、SSCは0.5-10.0 keVのX線に対して感度を持ち、そのエネルギー分解能も高いことから、そのX線の放射機構や、さらには放射している天体の元素組成なども明らかにすることができます。この広い視野や高い輝線分解能は上記の大きな構造を観測し、その起源を解明するのに適しています。

## 3. MAXI/SSCで見えるはくちょう座の広がった構造

図2はMAXI/SSCのデータを約3年分積分することによって得られた全天図で赤は0.7-1.7 keV、緑は1.7-4.0 keV、青は4.0-7.0 keVのエネルギーバンドを表しています。<sup>2)</sup> 画像は銀河中心方向を中央に銀河平面を水平方向にとり、銀河座標にしたがって表示してあります。この画像の中でも140個程度の点源が検出されていますが、それ以外にも幾つかの広がった構造が見えています。白い実線で囲ってある領域にある、馬蹄型の構造が今回注目した、はくちょう座の広がった構造です。

このはくちょう座の構造自体は、1980年にHEAO-I衛星によって発見されており、<sup>3)</sup> Cygnus superbubbleと名付けられました。しかし、現在まで、その距離、温度、エネルギー源、元素組成や起源などが全くわかっていませんでした。

今回、我々はMAXI/SSCのデータとROSATのデータと

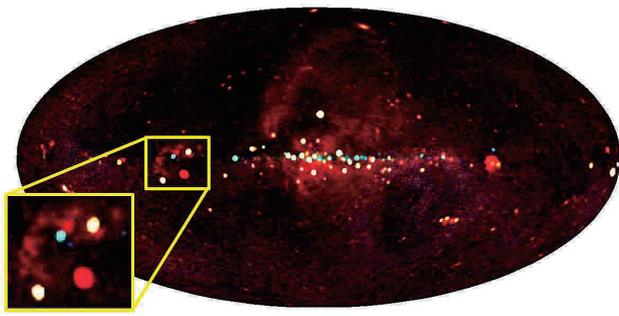


図2 MAXI/SSCで得られた全天図。銀河座標で示しており、数々の点源のなかに幾つかの大きな構造が見て取れる。赤：0.7-1.7 keV, 緑：1.7-4.0 keV, 青：4.0-7.0 keV。

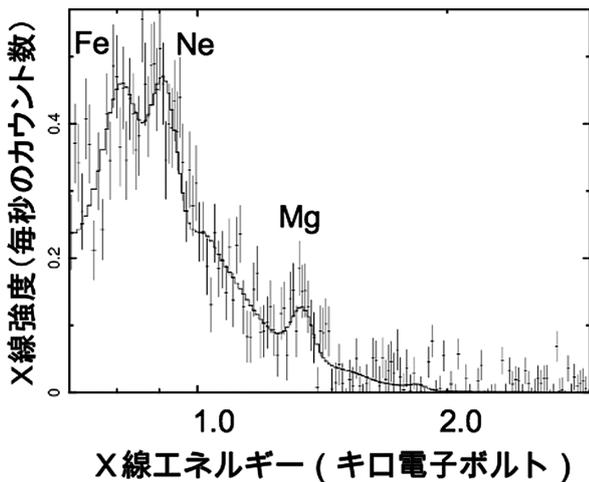


図3 はくちょう座の広がった構造から得られたX線スペクトル。

用い、このはくちょう座の方向の半径  $11^\circ$  の領域の解析を行いました。図3はその領域から得られたX線スペクトルです。実線は高温プラズマからの制動放射と重元素からの輝線の重ね合わせである、衝突電離平衡プラズマからの放射スペクトルモデル(ベストフィット)を表しています。スペクトルフィットには、ROSATとSSCの両方のデータを用いていますが、図を見やすくするため、MAXI/SSCのスペクトルのみ示してあります。スペクトルからはMg, Ne, Feからの輝線が見えていることから、この構造からのX線放射が薄いプラズマからの熱的放射であり、その温度が約270万度 ( $kT=0.23$  keV) であることが初めてわかりました。またこのモデルからMg, Ne, Feなどの元素組成は太陽組成の0.26倍であることもわかりました。このような低い組成は同じはくちょう座方向にあるはくちょう座ループなどの超新星残骸などで観測された星間物質の組成などもよく一致します。

次に、この構造までの距離の推定を星間吸収の値を用いて行いました。天体から放射されたX線は星間物質の吸収を受け減衰します。その減衰具合を星間吸収量と呼び、天体までの水素の量で表すことができます。X線スペクトルから星間吸収量を測ったところ、 $N_H=3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  となりました。この値はこの構造と同じ方向にあるOBアソシエーションであるCygnus OB2を日本の天文衛星「すざく」

で観測した値<sup>4)</sup>  $N_H=(2-4) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  に非常によく似ているため、この構造はCygnus OB2付近にあると考えられます。銀河内のどの方向にどれぐらいの水素が分布しているかは電波などの観測で測られているため、X線で測定した水素の量から、天体までの距離を推定することができます。Cygnus OB2までの距離は1.5 kpc (約5,000光年) ですので、この構造までの距離も同程度と推定できます。はくちょう座の方向には数々のOBアソシエーションがありますが、Cygnus OB2はその中で最も星の数が多く、明るいアソシエーションです。

#### 4. はくちょう座の広がった構造の起源

構造の温度、距離などがわかると、様々なパラメーターが計算できます。まずは実際の大きさですが、距離が5,000光年で半径  $11^\circ$  であるため、実際の大きさは半径1,000光年程度になります。この構造が持つ熱的エネルギーを計算するためには、この構造の奥行きを推定する必要があります。今回、この馬蹄型の構造は奥行きが縦横と同じぐらいであるトーラスのような形であると仮定しました。その結果、この構造が持っている熱的エネルギーは  $9 \times 10^{51}$  ergs程度であるということがわかりました。Cygnus OB2からの星風が持っているエネルギーは  $(1-2) \times 10^{39}$  ergs/s程度ですから、Cygnus OB2からの星風が  $(2-3) \times 10^6$  年程度吹き続ければ、エネルギー的にははくちょう座の構造を形成することができる計算になります。 $(2-3) \times 10^6$  年は一般的なOBアソシエーションの寿命と同程度です。しかしCygnus OB2は構造の中心からずれているため、Cygnus OB2からの星風ではこの綺麗な馬蹄型の構造ができるとも考えにくいのです。一方、この大構造の周りにある他の小規模なOBアソシエーションを考えても、この構造を形成するにはエネルギーが足りません。

一般的な超新星爆発は  $\sim 10^{51}$  erg程度のエネルギーを持っています。その後、超新星残骸として輝きますが、そこに残っている熱エネルギーは大体  $10^{49}$  erg、つまり爆発エネルギーの1%程度であることが知られています。これを今回の構造に当てはめ、爆発エネルギーを逆算すると、 $\sim 10^{54}$  erg程度になります。このエネルギーは予測されている、極超新星爆発のエネルギー<sup>5)</sup> と一致します。よって、はくちょう座の構造の起源は一発の極超新星爆発か、1,000発の連続超新星爆発ということになります。過去のシミュレーションなどからOBアソシエーションで起こる超新星爆発の頻度が予測されており、 $2 \times 10^5$  年に一回程度とされています。この頻度で千回起こすには  $2 \times 10^8$  年もかかってしまいます。この間、最初に爆発したときに形成された構造は冷えてしまい、X線では見えなくなってしまいます。つまり、これだけの大きさの構造を0.2 keVで保っておくことは連続超新星爆発では無理ということになります。以上のことから最初にあげた、三つのシナリオの内、星風説と連続超新星爆発説ではこの構造は作れないという結論に

なり、残りの極超新星爆発説がはくちょう座の構造の起源であるといえます。

## 5. まとめ

極超新星爆発は一つの銀河で10万年から100万年に一度しか起こらないと予想されており、非常に珍しい現象です。銀河系外では極超新星は8個、極超新星の痕跡は2個見つかっています。極超新星は爆発時に非常に明るく輝くため発見数が多いのですが、その痕跡は暗く、普通の超新星残骸との区別もつきにくく、発見が困難です。したがって、痕跡の探索にはイメージ性能のよいハッブル宇宙望遠鏡などが用いられています。極超新星爆発は宇宙で最大の爆発であるガンマ線バーストを起こし、超高エネルギー宇宙線の加速や重力源に関連し、強い重力波も出すと考えられている魅力的な現象ですが、詳しいことはまだわかっていません。今回の観測は、そのような珍しい現象の痕跡を世界で初めて我が銀河系内で発見できたこととなります。今回は、はくちょう座の構造に注目しましたが、図2を見るとわかるように、まだ幾つかの構造を見ることが出来ます。例えば、一番大きな、図の中心にある非常に大きな構造です。この構造もその距離、起源などがわかっていませ

ん。これも今回と同じような手法を用いて現在解析中です。

## 参考文献

- 1) 富田 洋：日本物理学会誌 **65** (2010) 886.
- 2) M. Kimura, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **64** (2013) 14.
- 3) W. Cash, G. Garmire and G. Riegler: *Astrophys. J.* **238** (1980) L71.
- 4) M. Yoshida, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **63** (2011) S717.
- 5) B. Paczyński: *AIPC* **428** (1998) 783.

(2013年4月18日原稿受付)

## The Possible Discovery of First Galactic Hypernova Remnant

Masashi Kimura, Hiroshi Tsunemi and Hiroshi Tomida

abstract: The Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) is the first astronomical mission operated on the International Space Station. The solid-state slit camera (SSC) is X-ray CCDs which have been monitoring high temperature diffuse emission in our Galaxy. We confirmed the diffuse structure in the Cygnus region known as Cygnus superbubble (CSB) and analyzed its spectrum. As a result CSB is most likely a Hypernova remnant. Hypernova is an explosion of star which is 100 to 1,000 times larger than supernova. This is the first hypernova found in our Galaxy.

## 物理教育 第63巻 第2号 (2015) 目次

### 査読論文

#### 研究報告

福島県内外の高校生個人線量比較……………原 尚志, 他  
中3を対象にした幾何光学におけるTutorialsの実践

……………岸 翔太, 他  
ILDsによる概念理解に対する学習者の動機づけの影響

……………北村貴文, 谷口和成

#### 論説

拘束条件のある物体系の内力のする仕事……………小林幸夫

#### 研究短報

トーンホールを持つ音響管の共振振動数—理論値と実験値との  
比較— ……………東 徹, 齋藤志保

マイコンのタッチセンサ機能を用いた微小静電容量測定  
……………出口幹雄

#### 私の工夫・私の実践

自作すつとびボールが高く飛ぶ時と飛ばない時の理由  
……………成見知恵

力学講義における考查問題の別解を利用した学習内容の  
まとめ方……………細田宏樹

### 企画

小中の物理教育：生徒の原体験不足を意識した中学校物理分野  
の観察・実験……………星野聡徳

若手教師の声：生徒の力を引き出す授業目指して……………荻谷麻子  
授業さいこう

企画「授業さいこう」の再開について……………編集委員会  
授業案を作成するときに考えてきたこと……………喜多 誠

#### 《新潟支部特集》

理科教育における探究的指導法……………市橋 浩  
生徒のアクティブ・ラーニングを促す探究的理科指導法

—国際比較研究を基に— ……………土佐幸子  
現象とモデルと実感をつなぐ光学台の実験

……………山本 岳, 渋谷浩一  
反転授業による視覚化と応用力の強化……………遠山貴洋

新潟県のSSH指定校における相互交流のための取組  
……………本田 崇

談話室：芥川龍之介氏の「蜘蛛の糸」を読んで……………松野聖史  
学会報告：平成26年度大学入試センター試験 物理I及び

理科総合A問題に対する意見……………入試検討委員会

# 高圧ねじり加工による金属ガラスの構造若返り

土谷 浩一 (物質・材料研究機構)

孟 凡強<sup>\*1</sup> (アイオワ州立大学)

横山 嘉彦<sup>\*2</sup> (Apple)

金属の融体を冷却すると凝固して多結晶体となる。融体のような非晶質状態を室温まで凍結しようとするとき100万K/秒もの超急冷が必要である。しかし特定の化学組成の合金では10K/秒程度のゆっくりした冷却速度でも非晶質状態での凝固が可能であり、金属ガラスと呼ばれている。金属ガラスの開発により、ある程度の大きさの非晶質状態の合金が得られるようになり、応用だけでなく基礎研究でも新しい展開が進んでいる。非晶質合金は結晶のような原子配列の3次元長距離秩序を有しないため、粒界や転位などの格子欠陥が存在しない。結晶の場合は0.1%程度の弾性変形後、転位の移動により数10%にも及ぶ塑性変形を示すことが知られているが、非晶質の場合はその変形機構の詳細は明らかではない。金属ガラスを室温で変形すると2%程度の弾性変形後、帯状の狭い領域に塑性変形が集中する剪断帯が試験片を斜めに横切るように一気に伝搬して破断することが破断面の観察などから知られている。金属ガラスの構造部材への応用拡大にはこの塑性変形の集中とその伝搬をどのように抑制するかが重要である。本研究では、 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 金属ガラスに超強加工法の一つとして知られる高圧ねじり加工 (High-Pressure Torsion, 以下HPT, 下図参照) により擬静水圧下で

大きな剪断歪みを付与し、それによる変形挙動の変化についてナノインデンテーション法を用いて調べた。

その結果、HPT加工により硬さと弾性率が大きく低下するとともに、構造緩和エンタルピーが大きく増加し、このエンタルピー変化と硬さ・弾性率の変化の間には良好な相関が見られることが明らかになった。さらに、ナノインデンテーションの圧痕周囲に見られる剪断帯の数が減少することも明らかになった。

HPT加工による金属ガラスの構造変化については放射光を使った動径分布関数の測定で調べた。その結果、金属ガラス中の原子配列はHPT加工によって、より液体や気体に近いランダムかつ均一な構造に向かって変化したということが明らかになった。この構造変化は結晶化や構造緩和とは逆の傾向であり、“構造若返り (structural rejuvenation)” と呼ばれる。構造若返りは不安定位置にある原子密度の増加であり、そのような原子は応力や温度のような外場の刺激によってより安定な位置へ容易に移動、つまり構造緩和する。このような局所的な原子配列の変化のためにHPT加工後の金属ガラスでは加工前よりも硬さも弾性率も低下し、変形の局在化も抑制されると考えられる。

—Keywords—

**非晶質 (状態) :**

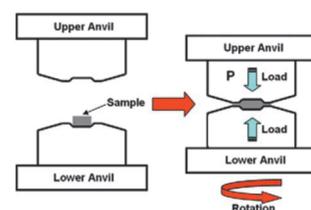
アモルファス状態とも呼ばれ、原子や分子が長距離秩序を持たずに固化した状態のこと。ちなみに“amorphous”は、ギリシャ語で定まった形のないという意味のamorphosに由来する。

**弾性変形と塑性変形 :**

弾性変形では外力を取り除くと元の形状に戻るが、塑性変形では元の形状には戻らずにひずみが残存する。弾性限界とは弾性変形から塑性変形へと移行する変形量 (ひずみ) のことであり、塑性変形をしようする能力は塑性変形能と呼ばれる。一般に、金属は大きな塑性変形能を有し、延性や展性に優れる。弾性限界が高くかつ塑性変形能が大きな材料は、塑性変形しにくくかつ想定外の大きな力が加わってもすぐには破壊に至らないので構造用材料として優れる。

**強加工法 :**

バルク状態の試料に非常に大きな (剪断) 塑性変形を与えることで結晶欠陥密度の著しい上昇をもたらすことで金属材料の組織微細化や高強度化を計る方法。この記事で紹介しているHPT法以外にも、棒状試料に対して経路が“く”の字状に折れ曲がった金型への圧入・引き抜きを繰り返すECAP (Equal Channel Angular Pressing) 法、圧延した板状試料を切断・積層後に再圧延する過程を繰り返すARB (Accumulative Roll-Bonding) 法などがある。



高圧ねじり加工の模式図

<sup>\*1</sup> 執筆時の所属：物質・材料研究機構

<sup>\*2</sup> 執筆時の所属：東北大学金属材料研究所

## 1. はじめに

通常の金属材料は融点以上に加熱して溶解した後、冷却すると凝固して多結晶体となる。しかしカリフォルニア工科大学のデュエー (Duwez) とその大学院生らは、Au-25 mol%Si 合金を非常に高速 ( $\sim 10^6$  K/s) で冷却すると結晶化が起らず、液体状の構造が室温まで凍結された非晶質合金が得られることを発見した。<sup>1)</sup> しかしこの合金では非晶質状態は非常に不安定で、室温で24時間放置するだけでも結晶化し、そのためデュエー自身も当初はこれが非晶質であることに懐疑的であった。<sup>2)</sup> その後、非晶質構造の安定性が非常に高く、10 K/s 程度のゆっくりとした冷却速度でも非晶質状態が得られる合金探索の研究が活発に行われた。これらの合金群は金属ガラスと呼ばれている。非晶質合金には結晶のような原子配列の3次元的長距離秩序が存在しないため、粒界や転位などの格子欠陥も存在しない。そのため、結晶質材料と比べて高い強度と耐食性を有する。また同程度の強度の結晶材料と比較した場合、弾性率がその1/2程度という特徴もある。結晶の場合は転位の移動により塑性変形が起こることが知られているが、非晶質の場合はその塑性変形を司る因子については不明点が多い。これまで、Argon による Shear Transformation (STZ) モデル<sup>3)</sup> や Spaepen による自由体積モデル<sup>4)</sup>、江上らによる結合交換 (bond exchange) モデル<sup>5)</sup> などが提案されているが、その詳細は明らかではない。典型的な金属ガラスをガラス転移温度  $T_g$  よりも充分低い温度で変形すると2%程度の弾性変形後、剪断帯が試験片を斜めに横切るように伝搬して一気に破断する。金属ガラスの構造部材への応用拡大にはこの塑性変形の局在化をどのように抑制するかが重要であり、ナノ結晶相を分散したり、化学組成の不均一性を利用して剪断帯を枝分かれさせることで歪みを分散させる方法などが研究されている。<sup>6)</sup> 一方でより微細なレベルで原子配列を制御することで前述の変形機構の解明や機械的性質の改善につながる知見が得られることが期待される。本研究では、金属材料の強加工法の一つとして知られる高圧ねじり加工 (High-Pressure Torsion, 以下では HPT と表す)<sup>7)</sup> を Zr 系金属ガラスに適用して局所構造を変化させ、それによる力学特性や変形挙動の変化について調べた。<sup>8)</sup>

## 2. 実験方法

試料には傾角鋳造法で作製した  $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$  金属ガラスの直径 10 mm の円柱状インゴットを用いた。この化学組成の金属ガラスのガラス転移温度 ( $T_g$ ) は 705 K、結晶化開始温度 ( $T_x$ ) は 769 K であり、 $\Delta T = T_x - T_g$  で定義されるガラス生成能が 64 K とガラス状態の安定度が高い。このインゴットから厚さ 0.85 mm の円盤状試料を切り出し、高圧ねじり加工に供した。高圧ねじり加工では試料を対向するアンビルの間に置き圧縮応力を加えながら一方のアンビルを回転させることで試料に大きな剪断歪みを付与できる。この時の剪断歪みは単純な幾何学的考察により以下の式で表される。

$$\gamma = \pi r N / t \quad (1)$$

ここで  $r$  は試料の半径、 $N$  はアンビルの回転数、 $t$  は試料の厚さである。実際には試料の厚さが上下アンビルの凹みよりも少し厚くなっており、圧縮時に試料の一部が塑性変形してアンビル間の間隙にはみ出すため、静水圧に近い条件で加工が行われ、試料の割れが抑制される。そのため、金属間化合物などの脆性材料に対しても大きな変形を加えることができる。

この方法で加工した試料について、その力学的性質をナノインデンテーション法により調べた。この方法は Berkovitch 型と呼ばれる三角錘の微小圧子を一定の荷重速度 (0.25 mN/s) で試料に押しつけながら侵入深さを測定するもので、材料の局所的な力学挙動を調べることができる。

## 3. 実験結果

図 1(a) にはナノインデンテーション法で得られた荷重と押し込み深さの関係を示した。<sup>8)</sup> HPT 加工前の最大押し込み深さは約 170 nm であるが、アンビル回転数  $N$  が増えるとともに徐々に増加しており、試料が軟化しているのがわかる。また図 1 の囲みに示したように、負荷時の曲線をよく見ると一定の加重で大きな変位が生じる pop-in が見られる。この pop-in は HPT 加工前の試料で最も頻繁に起こり、アンビル回転数  $N$  の増加とともに次第に頻度が減少する。金属ガラスの変形で見られる pop-in 挙動については剪断帯

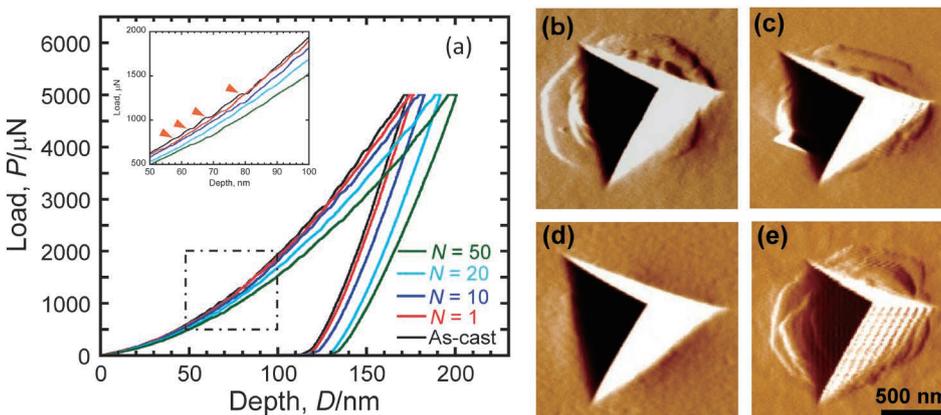


図1 鋳造後 (As-cast)、HPT 加工後の試料の加重-押し込み深さ曲線。囲み図は一点鎖線部分の拡大。pop-inの主なものを矢印で示した。(b)-(e) HPT 加工前後のナノインデンテーション圧痕のSPM像。(b) HPT 加工前。(c)  $N=10$ 。(d)  $N=50$ 。(e)  $N=50$  加工した後 673 K で1時間緩和処理後。(文献8より許可を得て転載。Copyright (2012) AIP Publishing LLC.)

形成との関連が指摘されている。<sup>6)</sup>

図1(b)-(e)はナノインデンテーション後の圧痕の走査プローブ顕微鏡像である。図1(b)に示したHPT加工前の試料では三角錘状の圧痕の周囲に円弧状の段差が多数観察される。これは負荷時に形成された剪断帯と考えられる。剪断帯の数はアンビル回転数とともに次第に減少して、50回転加工後の試料(図1(d))では全く見られなくなり、HPT加工による構造変化により変形の局在化が抑制されたことを示し、前述のpop-in頻度の減少ともよく対応する。

加重-変位曲線からOliverとPharrらの方法<sup>9)</sup>で求めた硬さと弾性率の変化をアンビルの回転数 $N$ に対してプロットしたのが図2である。<sup>8)</sup>加工前の硬さは6.1 GPa、弾性率は103.9 GPaであるが50回転のHPT加工により、硬さが4.9 GPa、弾性率が76.1 GPaと非常に大きく減少した。通常の結晶性金属材料では加工硬化により硬さは上昇するし、弾性率が変化することは無いので、この現象は極めて特異である。

金属ガラスを室温から加熱していくと $T_g$ で過冷却液体に変化し、 $T_x$ で結晶化が始まる。しかし $T_g$ に至る前の温度

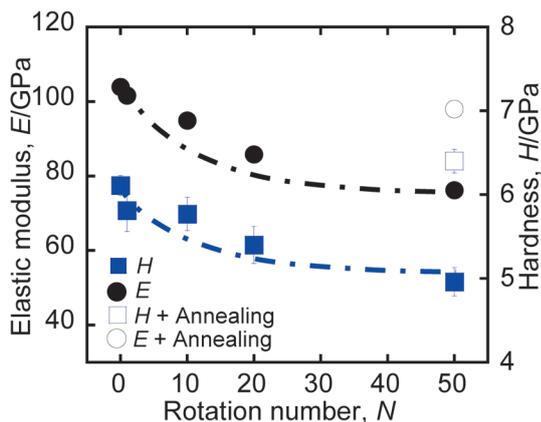


図2 ナノインデンテーションで測定された弾性率( $E$ )と硬さ( $H$ )のアンビル回転数による変化。□と○は673 Kで1時間緩和処理後の値。(文献8より許可を得て転載。Copyright (2012) AIP Publishing LLC.)

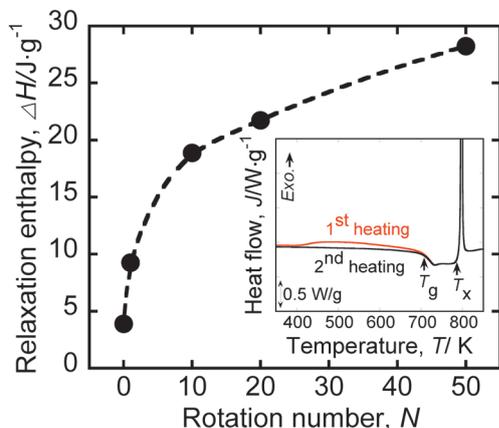


図3 構造緩和エンタルピーとアンビル回転数の関係。囲み図は $N=50$ の試料についてのDSC曲線。 $T_g$ と $T_x$ はそれぞれガラス転移温度と結晶化開始温度を示す。(文献8より許可を得て転載。Copyright (2012) AIP Publishing LLC.)

域で、急凝固時に導入された自由体積(結晶材料の空孔に対応する)の消滅や短範囲規則構造の発達などの原子配列の変化が起こる。これは構造緩和と呼ばれ、密度が増加するとともに弾性率や磁気特性などにも影響を与えることが知られている。<sup>10)</sup>構造緩和は、よりエネルギーの低い状態への遷移なので熱の放出が起こる。この熱量を構造緩和エンタルピーという。そこで、HPT加工が構造緩和に与える影響を示差走査型熱量測定(DSC)により調べた。その結果を図3に示す。<sup>8)</sup>囲み図にはDSC曲線の例を示してある。測定ではHPT加工後の試料について、まず743 Kまで加熱後すぐ室温まで冷却し、その後、結晶化ピーク温度以上873 Kまで加熱した。囲み図のDSC曲線において、1回目の加熱時では400~700 Kの温度範囲でブロードな発熱反応が見られるが2回目の加熱時にはそれが見られない。これはHPT加工で導入された構造変化が1回目の加熱で緩和したためと考えられる。そこで、2つの曲線ではさまれた部分の面積から構造緩和のエンタルピーを計算してアンビル回転数 $N$ に対してプロットしたのが図3である。このように緩和エンタルピーは特に10回転までに顕著な増加が見られ、その後は比較的緩やかに増加する。つまりHPT加工は金属ガラスの原子配列をより不安定化することを示している。また373 K程度までの高温で変形するとこの構造緩和エンタルピーはさらに高くなることが報告されている。<sup>11)</sup>図2に示した硬さ・弾性率の減少と構造緩和エンタルピーの間には良好な相関が見られ、<sup>8)</sup>力学特性の変化はHPT加工による構造変化と密接な関係があると推測される。

このようにHPT加工は金属ガラス内部に何らかの構造変化をもたらし、それが硬さや弾性率という力学特性に大きく影響することが明らかになった。HPT加工による構造変化の詳細はDmowskiらにより放射光を使った動径分布関数の測定で調べられている。<sup>12)</sup>その結果を図4に示した。図の破線は圧縮応力のみ負荷後でねじり加工前の試料の動径分布関数である。この曲線は特定の距離にある原子の存在確率を示しており、気体のように原子が完全にラン

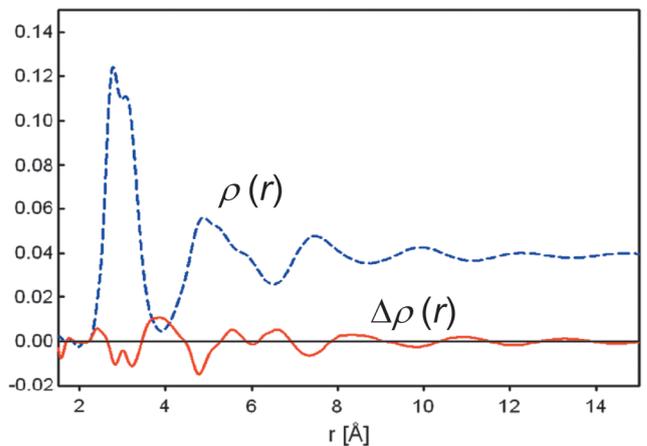


図4 HPT加工による対分布関数(PDF)の変化。<sup>12)</sup>破線:ねじり加工前のPDF。実線:10回転加工後のPDFと破線のPDFの差(5倍に拡大して表示)。(文献12より許可を得て転載。Copyright (2010) Elsevier.)

ダムに分布する場合は平均密度に対応する1本の水平な直線になり、結晶のように原子が周期的に分布している場合は特定の原子間距離で鋭い極大を示す。非晶質固体の動径分布関数は図4の破線のように約3Åの第1極大、約5Åの第2極大といったいくつかのブロードなピークを示しながら原子間距離の増加とともに平均密度に漸近する。このような特徴は原子配置が完全にランダムではなく、短距離あるいは中距離の規則性を有していることを示している。この試料に10回転のHPT加工をした時の動径分布関数の変化が実線で示されている。この線はねじり加工前(破線)の動径分布関数の変化を5倍に拡大したものである。両者を比較すると実線は加工前の動径分布関数がピークを示す位置では負の値を、またピーク間位置では正の値を示している。つまりHPT加工は原子密度を本来の安定位置から不安定位置へと移動させることを示している。つまり金属ガラスの原子配列はHPT加工によって、より液体や気体に近いランダムかつ均一な構造に向かって変化したということがわかる。このような構造変化は結晶化や構造緩和とは逆の傾向であり、“構造若返り (structural rejuvenation)” と呼ばれる。動径分布関数の谷間に対応する原子位置は局所構造における原子間ポテンシャルの鞍点に対応する不安定位置であり、応力や温度のような外場の刺激によってより安定な位置へと容易に移動すると考えられる。このような局所的な原子配列の変化のためにHPT加工後の金属ガラスでは加工前よりも硬さも弾性率も低下し、変形の局在化も抑制されると考えられる。通常、金属ガラスにおける構造若返りは、例えばマクロな剪断帯生成・伝搬による局所的かつ急激な温度上昇により引き起こされると考えられている。<sup>13)</sup> Panらは圧縮変形で導入された剪断帯内部の硬さの低下を報告しており、<sup>14)</sup> 剪断帯内部での構造若返りがHPT加工の場合と同様な力学特性の変化を起こすことを示している。しかしHPT加工後の試料では圧縮や引張りなどの単軸変形や圧延で見られるような表面に段差を伴うようなマクロな剪断帯は観察されていない。この点については宮崎らが分子動力学法で検討し、HPT加工における剪断応力と圧縮応力の組み合わせが歪みの局在を抑制する効果があることを報告している。<sup>15)</sup> さらに、HPT加工中の試料全体の温度上昇をアンビル内部に設置された熱電対や赤外線カメラにより測定したがいずれの結果も20~30K程度であることを示しており、構造若返りが主として剪断変形によって引き起こされたことを示唆している。このような剪断応力による構造若返りについてはコロイダル・ガラスについての報告がある。<sup>16)</sup>

また、HPT加工により構造若返りさせた試料をガラス転移温度以下の温度で熱処理することで原子配列は加工前の状態に近い準安定状態へと構造緩和する。この構造緩和が変形挙動に与える影響を調べるために50回転加工した試料を673Kで1時間熱処理後ナノインデンテーション法により硬さと弾性率を測定した結果を図2に示した。硬さ

(□)、弾性率(○)ともにHPT加工前とほぼ同程度の値が得られた。また、図1(e)に示したように圧痕周囲に剪断帯が見られるようになり、特性的にもHPT加工前の状態が復元されたことを示している。このような構造変化と変形局在化の関係はShiらによる分子動力学シミュレーションの結果とも良く対応している。<sup>17)</sup>

#### 4. おわりに

高圧ねじり加工で強加工した金属ガラスの力学的性質をナノインデンテーション法で調べたところ、硬さや弾性率が大きく低下する他、金属ガラス特有の変形の局在が抑制されることなどが明らかになった。これらの特性変化は金属ガラスの局所構造の変化と関連があり、擬静水圧下での剪断変形による“構造若返り”に起因するらしいことが示された。

金属ガラスはマイクロモータのギアに既に応用されている他、医療デバイスなどの様々なナノ~マイクロデバイスの応用が期待されている。<sup>18)</sup> このような微少部品を結晶性金属で作製しようとする結晶の諸性質の異方性のために特性のばらつきが大きくなるだろう。それに対して金属ガラスは等方的な特性を示すため、一定した特性が実現できると期待される。マイクロ加工について従来は粘性流動が得られるガラス転移温度以上での微細パターン転写による成形が研究されているが、“構造若返り”を利用することで常温でのナノ~マイクロスケールでのパターン転写が実現できる可能性がある。

本研究は東北大学金属材料研究所(新素材共同研究開発センター)との共同研究の成果である。また本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究(研究領域提案型)」“バルクナノメタル”(課題番号22102004)の支援の下で行われたものである。

#### 参考文献

- 1) W. Klement, R. H. Willens and P. Duwez: *Nature* **187** (1960) 869.
- 2) P. Duwez: in *Glassy Metals*, eds. H. J. Guntherodt and H. Beck (Springer-Verlag, Berlin, 1981) p. 19—Metallic Glasses—Historical Background.
- 3) A. Argon: *Acta Metall.* **27** (1979) 47.
- 4) F. Spaepen: *Acta Metall.* **25** (1977) 407.
- 5) Y. Suzuki, J. Haimovich and T. Egami: *Phys. Rev. Lett.* **35** (1987) 2162.
- 6) C. A. Schuh, T. C. Hufnagel and U. Ramamurty: *Acta Mater.* **55** (2007) 4067.
- 7) A. P. Zhilyaev and T. G. Langdon: *Prog. Mater. Sci.* **53** (2008) 893.
- 8) F. Q. Meng, K. Tsuchiya, S. Li and Y. Yokoyama: *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 12914.
- 9) W. C. Oliver and G. M. Pharr: *J. Mater. Res.* **7** (1992) 1564.
- 10) Y. Yokoyama, Y. Akeno, T. Yamasaki, P. K. Liaw, R. A. Buchanan and A. Inoue: *Mater. Trans.* **46** (2005) 2755.
- 11) F. Q. Meng, K. Tsuchiya and Y. Yokoyama: *Mater. Trans.* **55** (2014) 220.
- 12) W. Dmowski, Y. Yokoyama, A. Chuang, Y. Ren, M. Umemoto, K. Tsuchiya, A. Inoue and T. Egami: *Acta Mater.* **58** (2010) 429.
- 13) F. Shimizu, S. Ogata and J. Li: *Acta Mater.* **54** (2006) 4293.
- 14) J. Pan, Q. Chen, L. Liu and Y. Li: *Acta Mater.* **59** (2011) 5146.
- 15) 宮崎成正, 譯田真人, 尾方成信: 日本金属学会春期講演大会講演概要 (2014) 414.
- 16) V. Visanoff and F. Lequeux: *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 657011.

- 17) Y. Shi and M. L. Falk: Acta Mater. **55** (2007) 4317.  
 18) Y. Saotome, S. Okaniwa, T. Zhang and A. Inoue: J. Metast. Nanocryst. Mater. **24-25** (2005) 291.

**非会員著者紹介**

**土谷浩一氏**： (研)物質・材料研究機構元素戦略材料センターセンター長。Ph.D. 専門はチタン合金、金属間化合物などの金属材料物性。  
**孟 凡強氏**： アイオワ州立大学 AMES 研究所博士研究員。博士(工学)。専門は金属ガラス、マグネシウム合金の特性制御。  
**横山嘉彦氏**： 前東北大学金属材料研究所附属新素材共同研究開発センター准教授。工学博士。専門は金属ガラスや高エントロピー合金の開発。

(2014年6月25日原稿受付)

**Structural Rejuvenation in Metallic Glass by High-Pressure Torsion**

**Koichi Tsuchiya, Fanqiang Meng and Yoshihiko Yokoyama**

abstract: Effect of high-pressure torsion (HPT) deformation on mechanical properties was investigated on  $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$  bulk metallic glass by nanoindentation. HPT deformation resulted in the structural rejuvenation and pronounced decreases in hardness and elastic modulus. These changes were also accompanied by the transition of deformation mode from localized shear band formation to homogeneous deformation, as well as by a decrease in the frequency of pop-ins. Annealing of the deformed BMG led to the restoration of the localized deformation, hardness and elastic modulus; thus the transition is reversible. The observed reversible transition can be attributed to a change in the local atomic environment in the rejuvenated volume and the relaxed one.

**『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、送付先住所も)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/books/kyoikushi/>

『大学の物理教育』編集委員会

**Vol. 21-1 (3月15日発行) 目次**

クラスターから輩出する物理……………永宮正治  
**はじめての講義**  
 講義のむずかしさを知る……………宮地悟代  
 教えることの難しさ……………西岡圭太  
 物理ができないとはどういうことなのか……………関野恭弘  
**講義室**  
 カルノー機関と等温等圧過程……………齋藤嘉夫  
 電磁気の単位系について……………園田英徳  
 外部電場中に置かれた導体の分極……………谷林 衛, 谷林 慧  
 有効数字教育の変化とその影響……………大多喜重明, 長井清香  
**教育実践**  
 物理の“しきい”を下げる試み—「力学」教育の現場から  
 ………………佐々木 進

**連載 物理オリンピックと物理教育**  
 物理チャレンジ「第1チャレンジ」の取り組みと課題  
 ………………鈴木 勝  
**談話室**  
 重心・慣性モーメントの計算公式は物理外か?  
 —戦中派(満92歳)の述懐……………中野嘉弘  
**教育に関する一言**……………赤羽 明  
**開催情報**  
**寄贈書リスト**  
**編集後記**

安藤恒也 (JPSJ編集委員長)

鉄系超伝導体における電子軌道対称性の破れ

2008年に神原、細野らによって発見された鉄系超伝導体は、結晶構造、超伝導を引き起こす化学置換、磁性・超伝導相図の多様性のため、統一的理解を目指した研究が続けられている。そして研究が進むにつれ、格子の自由度とFeサイトの軌道とスピンの自由度が複雑に絡み合っている系であることが認識されるようになってきた。つまり、鉄系超伝導体は結晶場、電子軌道、電子スピンという固体物理の全ての「役者」が登場する研究舞台を提供していることがわかる。したがって、この物質系における30 Kを超える高い転移温度を持つ超伝導を解明するためには、それぞれがどのように関係し合っているかを理解する必要がある。

京都大学、並びにフランス (Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, LNCMI-CNRS) のメンバーからなる研究グループは、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ のAsサイトを同価数のPで置換した系 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ に着目し、単結晶 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.96}\text{P}_{0.04})_2$ において(FeAs)面内の異方性を $^{75}\text{As}$ 核の核磁気共鳴(NMR)実験よりマイクロな観点から調べた。その結果、構造転移以上の正方晶の温度域において $^{75}\text{As}$ -NMRの共鳴線が低温で見られる斜方晶軸に沿って2回対称性を示すことを見出した。室温で見られる僅かな2回対称性は、低温になると大きくなり160 Kあたりから顕著になる。この160 Kは磁気トルク<sup>1)</sup>や光電子分光<sup>2)</sup>の測定から2回対称性や擬ギャップ、Feの軌道秩序が報告されている温度とほぼ一致しており、巨視的測定ばかりではなく微視的測定からも正方晶温度域で2回対称性が現れていることが明らかになった。

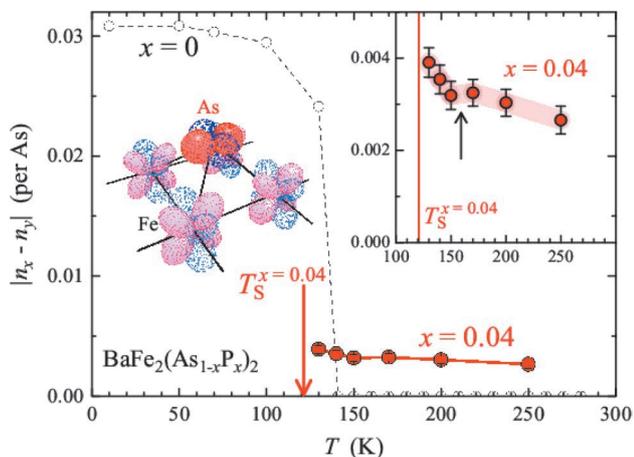


図1 Asサイトの電場勾配の異方性から求めた $4p_x$ ,  $4p_y$ 軌道の電子占有数の差 $|n_x - n_y|$ の温度依存性。点線は $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  ( $x=0$ )。右上挿入図は $x=0.04$ のデータの拡大図。左下図はFeとAsサイトの電子軌道の概念図。

$^{75}\text{As}$ -NMRの共鳴線幅は、 $^{75}\text{As}$ 核を取り巻く電場勾配の大きさによって決まっており、今回の場合はAsサイトの $4p_x$ ,  $4p_y$ 軌道の電子の占有率に依存する。実験結果をこのモデルに基づいて解析したところ、 $4p_x$ と $4p_y$ 軌道の電子の占有数の差は構造転移が起こる温度では全体の15%程度であることがわかった。またAsサイトの $4p_x$ ,  $4p_y$ 軌道はFeサイトの $3d_{xz}$ ,  $3d_{yz}$ 軌道と結合していることより、Feサイトの軌道の分裂はAsサイトの電場勾配の測定を通して観測できることが示された。また、今回の微視的な測定から室温付近の温度でも既に2回対称性が現れていることが明らかになったが、これに関して同研究グループは、Pを置換することにより物質の持っている2回対称性の動的性質が静的になり観測しやすくなった可能性を指摘し、電荷密度波を示す1D-NbSe<sub>3</sub>の実験結果<sup>3)</sup>との類似性を指摘している。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の2015年4月号に掲載された。

構造や磁気状態を調べる測定に比べ、軌道状態を調べる測定手法は少ない。本研究は、核サイトの電場勾配の測定が電子の軌道状態を知るよいプローブになることを示した。今回の実験からも明らかになった軌道状態と構造や磁気の転移の関係、160 Kの異常は相転移なのかそれとも高温からのクロスオーバーなのか等の問題は、今後更なる実験によって明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) S. Kasahara, *et al.*: Nature **486** (2012) 382.
- 2) T. Shimojima, *et al.*: Phys. Rev. B **89** (2014) 045101.
- 3) C. Berthier, D. Jerome and P. Molinier: J. Phys. C **11** (1978) 797.

原論文

Emergence of Orbital Nematicity in the Tetragonal Phase of  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$

T. Iye, M.-H. Julien, H. Mayaffre, M. Horvatic, C. Berthier, K. Ishida, H. Ikeda, S. Kasahara, T. Shibauchi and Y. Matsuda: J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 043705.

(情報提供：石田憲二 (京都大学大学院理学研究科)  
松田祐司 (京都大学大学院理学研究科)  
池田浩章 (立命館大学理工学部))

News and Comments

Orbital Participation in Nematicity

M. Yoshizawa: JPSJ News Comments **12** (2015) 03.

## 反対称スピン軌道相互作用の量子臨界磁気ゆらぎによる「くりこみ」効果

原子スペクトルの多重項構造を理解する中で、電子がスピン自由度を持つことと、そのスピン自由度と軌道自由度の間に“スピン軌道相互作用”と呼ばれる相互作用があることが明らかにされた。この間の事情は、朝永振一郎の名著『スピンはめぐる』の中で詳述されており、その相互作用の起源は特殊相対論的效果であることが述べられている。すなわち、図1(a)のように静止系の磁場は運動系でみると電場となり(速さ $v$ が光速 $c$ に比べて小さいときローレンツ力の式に帰着する)、図1(b)のように静止系の電場 $E$ は電子に乗った座標系では磁場 $\tilde{B} \equiv -(\mathbf{v} \times \mathbf{E})$ を与える。電子はスピン $s$ に起因する磁気モーメント $-2\mu_B s$ を持っているのでゼーマンエネルギー $-2\mu_B[s \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{E})]$ が生じる。これがスピン軌道相互作用の物理的起源である。電場が中心力場の場合には(電子の加速度運動の効果まで考慮すると)角運動量 $l$ を含んだ $\lambda_{so}(s \cdot l)$ のような(トーマス因子まで含んだ正しい)形になる。この結果はディラックの相対論的場の理論によっても導かれた。

さて、結晶が反転中心を持たない場合には、固体中のバンド電子が感じるスピン軌道相互作用として、反対称スピン軌道相互作用と呼ばれる項が存在することが知られている。たとえば、正方晶で $c$ 軸( $z$ 軸)方向に反転対称性がない場合には、そのハミルトニアン $H_{ASSO}$ は第二量子化表示で

$$H_{ASSO} = \alpha \sum_{\mathbf{k}, \sigma, \sigma'} b_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger [\gamma(\mathbf{k}) \cdot \sigma_{\sigma\sigma'}] b_{\mathbf{k}\sigma'}$$

$$\gamma(\mathbf{k}) \equiv (\sin k_y a, -\sin k_x a, 0)$$

と表すことができ、ラッシュバ型のスピン軌道相互作用と呼ばれる。 $b_{\mathbf{k}\sigma}$ は波数 $\mathbf{k}$ 、スピン成分 $\sigma$ のバンド電子の消滅演算子を、 $\sigma$ はパウリ行列ベクトルを、 $a$ は $ab$ 面内の格子定数を表す。これは元々、界面や表面の2次元電子系の場合に、上記の1電子に対するスピン軌道相互作用を与える表式 $2\mu_B[s \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{E})]$ において、 $\mathbf{v}$ をバンド電子の速度に対応させ、電場 $E$ が界面に垂直( $z$ 軸に平行)な場合に得られたものである $[(\mathbf{v} \times \mathbf{E}) // (v_y, -v_x, 0)]$ の関係に注意。しかし、対称性の考察からバルクの系に対しても適用できる。 $z$ 軸方向に反転対称性がない場合には $z$ 軸方向に局所的な電場が発生し、その効果は結晶全体でならしたときにも生き残るのである。この項の効果は反転対称中心を持たない正方晶の重い電子系超伝導体CePtSi<sub>3</sub>などでも非自明な超伝導の性質を理解するのに重要な役割を演じている。また、

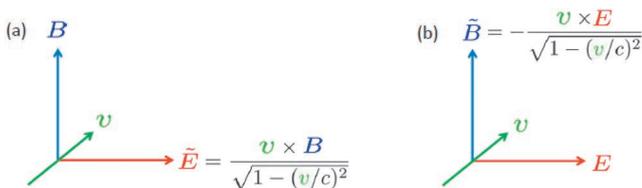


図1 電場と磁場のローレンツ変換: ~の付いた量は速度 $v$ で運動する系でのもを表す。

最近研究の発展がめざましいトポロジカル絶縁体の表面やキラル磁性体の物理においても重要な役割を果たしている。

一方、上記CePtSi<sub>3</sub>やCeRhSi<sub>3</sub>などでは加圧により磁気秩序が消失する臨界圧近傍で量子臨界磁気ゆらぎが発達し、種々の物理量に非フェルミ液体的振る舞いが現れることが知られている。最近、大阪大学基礎工学研究科物質創成専攻のメンバーを中心とする研究グループは、量子臨界磁気ゆらぎが反対称スピン軌道相互作用に大きな影響を与えることを初めて理論的に指摘した。詳細な計算の結果、量子臨界点近傍ではフェルミ面が顕著に変形を受けるとともに、分離した二つのバンドの質量のくりこみ効果が逆になることを示し、それらはドハース・ファンアルフェン効果により観測可能であることを提唱した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の2015年4月号に掲載された。

反対称スピン軌道相互作用 $\alpha\gamma(\mathbf{k}) \cdot \sigma$ は一般に臨界磁気ゆらぎによりくりこみの効果を受けるが上記論文では、図2(b)に示されるようなファイマン図形に対応する最低次の効果が求められた。その結果、図3(a)に示すように、磁気ゆらぎの効果がないときは、反対称スピン軌道相互作用によってフェルミ面が点線から青と赤の二つに分離するだけであるが、反強磁性臨界点に近づくときゆらぎの効果によって、図3(b)のように反強磁性ベクトル $Q$ で結びつけられるフェルミ面上の点(ホットスポット)付近でその分離は急激に減少する。また、強磁性臨界点近傍では一様に青と赤のフェルミ面の分離が増大する。また、フェルミ面の有効質量は臨界ゆらぎにより発散的なくりこみの効果を受けるが、青と赤のバンドで符合が逆になる。これらの効果は初めて得られた非自明なものであり、ドハース・ファンアルフェン効果により原理的には観測可能である。その意味で、理論研究者のみならず、実験研究者の興味をひく

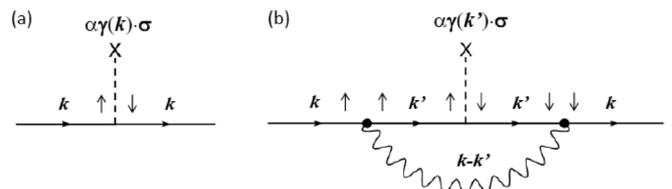


図2 (a) 反対称スピン軌道相互作用。(b) 臨界磁気ゆらぎによる補正項の最低次項。

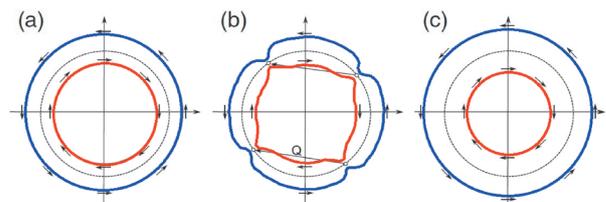


図3 反対称相互作用によるフェルミ面の分裂の様相。(a) 臨界磁気ゆらぎの効果がないとき。(b) 反強磁性臨界ゆらぎの効果による変形( $Q$ は反強磁性ベクトル)。(c) 強磁性臨界ゆらぎによる変形。矢印はスピンの方向を表す。

と考えられ、今後の研究の展開が期待される。

### 原論文

Deformation of the Fermi Surface and Anomalous Mass Renormalization by Critical Spin Fluctuations through Asymmetric Spin-Orbit Interaction

Y. Fujimoto, K. Miyake and H. Matsuura: J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 043702

〈情報提供：三宅和正（豊田理化学研究所，大阪大学基礎工学研究科）〉

### News and Comments

Renormalization Effect of the Antisymmetric Spin-Orbit Interaction through Spin Fluctuations

T. Takimoto: JPSJ News Comments **12** (2015) 04.

### JPSJ フレンドシップミーティング

日本物理学会第70回年次大会（2015年）では、3月22日にJPSJフレンドシップミーティングを開催しました。ここでは、まず、今年開始したJPSJ Outstanding Referee (JPSJ 読者賞) の授賞式が行われました。次に、2014年にJPSJに出版された注目論文の中からヘッドエディター会議で選ばれた2件の論文についての講演が行われました。今回も参加者は80名を超え、たいへん盛況に終わることができました。

JPSJ 読者賞を受賞された方々は以下のとおりです（敬称略）。

石田憲二（京都大学）、小形正男（東京大学）、北沢英明（物材機構）、倉本義夫（東北大学）、紺谷浩（名古屋大学）、瀧川仁（東京大学）、寺崎一郎（名古屋大学）、

播磨尚朝（神戸大学）、松下貢（元中央大学）、米満賢治（中央大学）

講演題目等は以下のとおりです。

急冷が生み出す電荷自由度のガラス化—物性と相変化メモリ機能性— 賀川史敬（理研CEMS）

T. Sato, F. Kagawa, K. Kobayashi, A. Ueda, H. Mori, K. Miyagawa, K. Kanoda, R. Kumai, Y. Murakami and Y. Tokura: Systematic Variations in the Charge-Glass-Forming Ability of Geometrically Frustrated  $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>X Organic Conductors, J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 083602.

クラリネットのレジスターキーと二重遅延模型— 高橋公也（九工大機械情報）

K. Takahashi, K. Goya and S. Goya: Mode Selection Rules for Two-Delay Systems: Dynamical Explanation for the Function of the Register Hole on the Clarinet, J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 124003.

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2月に掲載可となった中から2015年3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。なお、今回は、早稲田大学で開催された第70回年次大会のフレンドシップミーティングについても紹介いたしました。



図1 2015年JPSJ Outstanding Referee授賞式.

## 第70回年次大会(2015年) シンポジウムの報告

## 領域委員会

([A] 登壇者氏名 [B] 報告)

物理と社会「パグウォッシュ会議2015年長崎開催に向けて—核の被害のない世界と科学者の社会的責任—」  
稲垣知宏(広大情報メディア)

[A] パグウォッシュ会議2015年長崎開催に向けて(稲垣知宏:広大情報メディア), 福島原発事故の教訓と科学者の社会的責任:2015年パグウォッシュ会議に向けて(鈴木達治郎:長崎大RECNA), パグウォッシュと湯川精神…科学者の責任再考(坂東昌子:NPO法人あいんしゅたいん), 核の脅威:原爆被爆被害を通して(川野徳幸:広大平和科学研究セ), 物理学者の社会的責任シンポジウムからパグウォッシュ会議に向けて(吉野太郎:関学大総合政策), 総合討論

[B] 核兵器廃絶と戦争の廃止をめざすパグウォッシュ会議世界大会が, 2015年, 長崎市で開催される。パグウォッシュ会議には, 湯川, 朝永をはじめ物理学者が積極的に関わってきており, 多くの会員に興味を持ってもらうことを目的に本シンポジウムを開催した。/パグウォッシュ2015組織委員長鈴木氏の講演では, 津波と地震に対する福島事故以前の検討状況, 使用済み燃料の持つリスク等について説明があった。また, 国民の信頼回復に向けて, 特に独立・不偏の第三者機関設立の重要性が強調された。/2005年のパグウォッシュ会議広島開催に際して物理学者有志による提言をまとめられた坂東氏は, 湯川の核に対する思い, NPO法人あいんしゅたいんの取り組みを紹介され, 多くの物理学者が誤解しているであろう事実, 市民と一緒に学ぶ姿勢の大切さに言及された。/川野氏は, 原爆の健康面での被害について概観し, 晩発生放射線傷害という原爆の特徴について説明された。また, 健康面だけではなく, 社会・経済生活面での被害, 精神面での被害について言及された。/吉野氏は, 物理学会で開催された核に関するシンポジウムについて概観後, 1992年の近藤駿介氏と高木仁三郎氏の議論等について紹介された。また, 若い物理学者にとって物理学の研究・教育を社会の動きの中で考えることが可能かといった問いかけがあった。/総合討論では, 科学的根拠を持って議論することの重要性, 科学的根拠に基づくだけでは扱いにくい問題, 物理学者も政策アドバイザーになると仮定した活動が必要等, 多様な観点からの議論があった。

物理と社会「物理から拓がる多様なキャリアパス」

鹿野 豊(分子研CIMoS), 野尻美保子(KEK素核研), 森 初果(東大物性研)

[A] 趣旨説明(鹿野 豊:分子研CIMoS), イノベーション・ナショナルシステム改革と若手研究者のキャリアパス(角南 篤:政策研究院), 物理学会におけるキャリアパスへの取り組みの紹介(栗本 猛:富山大理), キャリアの売り込み方と, キャリアの保ち方(板倉明子:物材機構), 最初から科学の情報発信を志していた私が物理研究の現場で得たもの(横山広美:東大院理), 物理学からノンアカデミックへのキャリアパス~ポスドクから行政職への転職~(宮下 哲:JST CRDS), 全体討論(野尻美保子:KEK素核研), 終わりに(森 初果:東大物性研)

[B] 本シンポジウムは日本物理学会男女共同参画推進委員会の活動の一環として開催された。政策研究大の角南氏より, 現在, 安倍政権が推進している科学技術政策から若手研究者のキャリアに対する議論が霞が関の官庁の中でどのように行われているのか? という臨場感のこもった話を紹介していただいた。日本物理学会キャリア支援センターセンター長の栗本氏より物理学会としてのキャリアパスに関する現在の活動が紹介された。物材機構の板倉氏より物材機構内での事例を含め, どのような人材を必要としているのか? という事例が紹介された。そして, 東大の横山氏よりどうして科学コミュニケーションのキャリアを目指したのか? という個人の体験談を語っていただいた。最後に, JSTの宮下氏よりどのような経緯でJSTに転職し, 現在の役職の中で物理学がどのように役に立っているのかという体験談を紹介していただいた。各登壇者を変え, KEKの野尻氏の進行で全体討論が進められた。その中で, 物理学を通じたキャリア形成によるポジティブな面が強調され, それを社会との関係性の中で更に活かしていかなければならないという課題が浮き彫りとなった。本シンポジウムは参加者一人一人が前向きにキャリアパスについて考える機会になった。

物理と社会(後援:日本学術会議)「異分野から見た物理学への期待:「物理学」領域の参照基準」

理事会提案:藤井保彦(日本物理学会副会長), 世話人:須藤彰三(東北大院理)

[A] 趣旨説明(須藤彰三:東北大院理), 参照基準策定の意義(北原和夫:東理大), 数学と物理(森田康夫:東北

大高教機構数学), 工学と物理(中村道治: 科学技術振興機構理事長), 科学史・科学哲学と物理(野家啓一: 東北大学高教機構哲学), 物理学と物理教育(兵頭俊夫: 高エネ研)

[B] 日本物理学会では, 日本学術会議の要請により「物理学」領域の参照基準の素案を策定している. 本シンポジウムでは, 物理学の意義と社会的役割を知る目的で, 物理学と関連の深い数学, 工学, 哲学, 物理教育の立場から物理学の役割と期待に関して講演して頂いた.

はじめに, 日本物理学会・物理教育委員長須藤彰三より趣旨説明と策定中の参照基準の中から物理学の定義に関して紹介があった. 続いて, 日本学術会議・大学教育の分野別質保障の在り方検討委員会委員長として参照基準を取りまとめている北原和夫氏から, 参照基準策定の意義と他分野の策定状況に関する報告があった. 日本学術会議・数理科学分野の参照基準検討分科会委員長を務めた森田康夫氏から数学の歴史を振り返りながら物理学との関連, そして, 数理科学分野では定義に関する意見の一致が得られなかったことが報告された. 中村道治氏は, 科学と社会の視点から日本の技術開発と科学技術振興機構の施策を紹介し, 日本国内での物理学と工学の交流促進を呼びかけた. 日本学術会議・哲学委員会委員長を務めた野家啓一氏は, 物理学概念の発展の歴史と共に近年の脳科学の発展にともなう心身の相互作用, 科学に問いかけることはできるが科学だけでは解決できない問題等, 物理学と現代社会の関係について報告した. 兵頭俊夫氏は, 長年の教育経験に基づき「数式を使わない物理は物理か?」等の問いかけを行いながら, 批判的思考等の教育における重要な考え方を紹介した.

約100名の参加者があり, 質疑応答も活発に行われた. 日常, 物理学に接しながら, その教育や研究の社会的役割や意義を問うことは極めて少ない. 本シンポジウムで, 異なった分野の視点から物理学の意義と役割を考える機会を得た成果は大きいと判断される.

#### 素粒子実験領域, 素粒子論領域, 実験核物理領域, 理論核物理領域, 宇宙線・宇宙物理領域 「ニュートリノ研究の新たな展開」 戸本 誠 (名大理)

[A] はじめに(中家 剛: 京大理), ニュートリノ, GUTそして陽子崩壊(前川展祐: 名大KMI), ニュートリノ質量の探索(高田昌広: 東大/Kavli-IPMU宇宙), マヨラナニュートリノ—ダブル $\beta$ 崩壊探索—(清水 格: 東北大), 大気ニュートリノと陽子崩壊—Super-KからHyper-Kへ—(塩澤真人: 東大宇宙線研), J-PARCニュートリノ実験で探るニュートリノCPの破れ—T2KからHyper-Kへ—(石田 卓: KEK素核研), ニュートリノ天文学1—超新星, 太陽, 暗黒物探索, 重力波検出—(小汐由介: 岡山大理), ニュートリノ天文学2—高エネルギー宇宙ニュートリノ—(石原安野: 千葉大理), ニュートリノの質量とCPの破れ, ダブルベータ(柳田 勉: 東大/Kavli-IPMU素論)

[B] 近年, 超高エネルギー宇宙ニュートリノの発見とミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動発見という大きな進展があり, ニュートリノ研究分野がますます活性化してきている. さらに, 昨今の宇宙進化の精密観測からニュートリノ質量の測定も夢ではなくなっている. これらの発見や観測を機に, 高エネルギーニュートリノ天文学の確立, ニュートリノCP対称性測定, ニュートリノ絶対質量の測定において, 次の大きな展開が期待されている. 本シンポジウムでは, 今後のニュートリノ研究の動向を俯瞰する目的で, ニュートリノ質量の起源, ニュートリノ振動とCP測定, ニュートリノと物質優勢宇宙の起源の関係, ニュートリノ天文学における新観測, 等について, 理論, 実験, 観測の各方面から研究の現状とその展望の講演を企画した. 特に, 柳田の講演は本シンポジウムの総括に近く, 次期ニュートリノ実験と宇宙ニュートリノ観測への期待を大いに奮い立たせた. 本シンポジウム開催により, ニュートリノ研究の次の目標がより明確化し, 次期プロジェクトの必要性を学会員で共有することができた. シンポジウム開催は非常に有意義な結果となった. (報告: 中家 剛(京大理))

#### 素粒子実験領域, 素粒子論領域, 理論核物理領域, 実験核物理領域, 領域1「光と原子を使った基礎物理学」

古賀真之(東北大RCNS)

[A] 開催趣旨説明(酒見泰寛: 東北大), ニュートリノ質量分光—現状と展望(笹尾 登: 岡山大), 光を使って真空を探る(難波俊雄: 東大ICEPP), 遷移周波数の精密測定による基礎物理定数の時間変化探索(杉山和彦: 京大), Probing the TeV scale and beyond with EDMs(久野純治: 名大), EDMの実験的探索の現状(旭 耕一郎: 東工大), 光と反粒子を使って対称性を探る(早野龍五: 東大理)

[B] 近年の原子物理学・量子光学における発展は目を見張るものがあり, これらの成果を利用した基礎物理学の探求が注目されている. 原子集団の量子干渉性を利用し, 光随伴ニュートリノ対放射の稀事象を増幅して観測するニュートリノ質量分光は, ニュートリノ質量階層構造に迫る計画として活発な議論が行われた. またX線自由電子レーザーを用いた光子・光子散乱による真空の非線形効果観測, そしてレーザー冷却イオンを用いた原子時計技術による基礎物理定数の時間変化について最新状況が報告された. 時間反転対称性の破れの探索を目指して, 原子核・原子・分子の永久電気双極子能率(EDM)実験が活発に進められているが, これは特定の量子多体系において素粒子EDMが大きく増幅されることに着目したものであり, 理論・実験の最新結果と将来計画が報告された. さらにCERN・反陽子減速器におけるASACUSA, ATHENA実験を中心に, 物質・反物質の対称性を探る反水素原子の分光実験に向けた挑戦に関して講演が行われた. いずれも従来の枠にとらわれない独創的な手法により, 基礎物理の分野

で革新的な進歩をもたらす可能性がある。今回、220名を超える参加者のもと、素粒子実験・素粒子論・実験核物理・理論核物理・領域1の合同で分野を越えて研究の展望を議論し、今後の分野の進展へと繋げるシンポジウムとなった。(報告: 酒見泰寛(東北大))

#### 素粒子実験領域, 実験核物理領域, 宇宙線・宇宙物理領域 「実験のための最先端コンピューティング」

古賀真之(東北大RCNS)

[A] はじめに(坂本 宏: 東大素セ), 分散計算機環境を駆使するエネルギーフロンティア—LHC-ATLAS 実験でのコンピューティング(中村智昭: KEK 計算セ), 日本を中心とした世界規模分散計算モデルへの道のり—Super-KEKB-Belle II 実験でのコンピューティング(上田郁夫: 東大素セ),  $e^+e^-$  エネルギーフロンティア新時代の環境—ILC-ILD 実験でのコンピューティング(宮本彰也: KEK 素核研), 75 GB/s 生データに挑戦! 次世代LHC 重イオン衝突実験におけるパイプラインデータ処理と世界分散計算機網—LHC-ALICE 実験でのコンピューティング(中條達也: 筑波大), ビームタイム—週間の加速器実験に求められるフレキシブルな計算機環境—RIKEN-RIBF でのコンピューティング(磯部忠昭: 理研), 大規模地上ガンマ線望遠鏡群が産み出す観測ビッグデータへの挑戦—CTA でのコンピューティング(中嶋大輔: 東大宇宙線研), 目指せ重力波「予報」! —KAGRA でのコンピューティング(神田展行: 大阪市大), 今後の見通しとまとめ(佐々木節: KEK 計算セ)

[B] コンピューティングは最先端科学においてより重要な役割を果たし, これまでは不可能であった実験観測を可能にしている. そういった経験を関連領域の代表的なプロジェクトに紹介してもらい, 今後の展望を議論することを目指した. 素粒子実験領域から LHC-ATLAS, Belle II, ILC, 実験核物理から LHC-ALICE と RIKEN-RIBF, 宇宙線・宇宙物理から CTA と KAGRA の報告を受け, それぞれに対して活発な議論があった. 例えば, 世界規模の分散解析に必要な国際ネットワークがどのように提供されているか, プロジェクトに受益者負担を求めるとそれが終了したとき国際回線の維持も不可能になる. 最先端科学の推進のため研究基盤として国際回線を国が責任を持って長期的安定的に維持発展させることを求める意見が強く出された. ソフトウェアの高度化に対し, 世界規模での共同開発を進めるべきであるという意見も多く出された. まとめに続く議論では, 特に今後必要となってくるコンピューティングを支える人材育成をどう進めるかが話し合われた. 学部の間からしっかりとプログラミングを教え, 高い知識と能力を持った若手を育て上げるには物理学会規模での取り組みが必要であること, そのような若手が分野で正しく評価され, 研究を続ける意欲を持ち続けられるキャリアパスを用意する必要性などが議論された. 彼らの活躍の場として長

期的には領域をカバーする共同のデータセンターの構築も視野に入れるべきとの意見も出された. また逆に直ちに取組むべきこととして, 領域でコンピューティングスクールを開催することが提案された. 非常に有意義な議論が行われ, 同様のシンポジウムを定期的に開催することも検討することとなった.(報告: 坂本 宏(東大素セ))

#### 理論核物理領域, 実験核物理領域「Heavy quark production in high energy collisions: Japan-Korea exchange program」

平野哲文(上智大理工)

[A] Introduction (Tetsufumi Hirano: Sophia Univ.), Heavy flavour observables at ALICE (Min Jung Kweon: Inha Univ., Korea), The recent heavy quark result from CMS heavy ion collisions (Yong Sun Kim: Korea Univ., Korea), Heavy quark production at RHIC (Takashi Hachiya: RIKEN, Radiation Lab.), Charmonium production in heavy ion collisions (Sungtae Cho: Kangwon National Univ., Korea), Charmed hadron spectroscopy at Belle (Yuji Kato: Nagoya Univ.), Hadron and Nuclear Systems with Heavy Quark (Shigehiro Yasui: Tokyo Tech.)

[B] 高エネルギーハドロン・原子核衝突反応では, チャームクォークやボトムクォークといった重いクォークが様々な側面で重要な役割を果たす. 本シンポジウムは, 原子核分野における日韓交流プログラムのもとで, ここ近年の高エネルギー重イオン衝突反応の現状や, 新しく発見されたエキゾチックハドロンの物理を概観し, 当該分野の今後の動向を探る目的で企画された. 前半で Kweon 氏 (ALICE 実験), Kim 氏 (CMS 実験), Hachiya 氏 (PHENIX 実験) より, 高エネルギー重イオン衝突反応における最新の実験結果, 特に重クォークの生成やクォーク・グルーオン媒質中での輸送, またこの媒質中におけるクォークコニウム生成の抑制に関するものが示された. Cho 氏は重イオン衝突反応における様々なハドロン生成の概観を行った後, 理論の立場からウィグナー関数に基づくクォークコニウム生成の議論を行った. 一方で, Kato 氏 (Belle 実験) は, 従来のクォークモデルでは単純に説明のつかない4つ以上のクォーク・反クォークからなるエキゾチックハドロンの生成を議論した. 最後に Yasui 氏は重いクォーク特有の対称性の観点から既存のハドロン, エキゾチックハドロン, 核媒質中の重い中間子に対する統一的記述の紹介を行った. 韓国側の参加者も含め, 各講演後は活発な質疑応答が行われた. なお, 本シンポジウムのスライドは <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/indico/event/813/> で公開されている.

#### 実験核物理学領域, 理論核物理領域, 素粒子実験領域「多彩な実験プラットフォームによるハドロンの本質的自由度の探求」

三輪浩司(東北大理)

[A] 趣旨説明(中野貴志: 阪大RCNP), Belle II 実験によるハドロン物理の展望(宮林謙吉: 奈良女子大), SPring-8

大強度光子ビームで展開するハドロン物理 (村松憲仁: 東北大 ELPH), 高エネルギー原子核衝突で探るハドロンの基礎構造 (志垣賢太: 広島大(院)理), J-PARC 高運動量ハドロンビームで探るハドロンダイナミクス (野海博之: 阪大 RCNP), ハドロン励起状態の本当の自由度はなにか? (岡 真: 東工大理工)

[B] このシンポジウムでは120名程度の参加者に対し, 多様なハドロンの存在形態やダイナミクスを統一的に理解するハドロンの本質的自由度の探求に対する様々な実験と理論の発展と最新の結果, そして, これまでの実験施設の性能を質的にも量的にも凌駕する, 多彩なハドロン実験プラットフォームでの将来の研究に向けた展望が講演者により示され, それに対する活発な議論が行われた. 実験的研究としては, 宮林氏により Belle で発見された XYZ 粒子のレビューと将来の課題, 村松氏によりレーザー電子光ビームを用いた LEPS/LEPS2 での実験のレビュー, 志垣氏により高エネルギー原子核衝突実験の現状とこれからの課題, 野海氏により J-PARC の高運動量ビームラインを用いてこれから行われる予定の媒質効果を探る実験とチャームバリオン分光実験の紹介が行われた. 最後に岡氏により, これまでの理論的研究に基づいた, 将来の展望が示された. ハドロンの本質的内部自由度の追求には, 励起状態を含む新種のハドロンや, 軽いクォークを重いクォークに置換えたハドロンの測定, 高温・高密度化でのハドロンの性質の変化等, 新たな測定が必要かつ有効であることが再認識された.

#### 実験核物理学領域, 理論核物理学領域, ビーム物理学領域

##### 「Future direction of gamma-ray spectroscopy (ガンマ線分光の新展開)」 矢向謙太郎 (東大 CNS-SHARAQ)

[A] Opening Address (Eiji Ideguchi: RCNP), Gamma-ray spectroscopy of hyper nuclei using a ( $K^-$ ,  $\pi^-$ ) reaction at J-PARC (Takeshi Koike: Tohoku Univ.), Perspectives of gamma-ray spectroscopy of fast exotic beams at the RIBF (Pieter Doornenbal: RNC), Gamma-ray spectroscopy with exotic targets and/or low-energy RI beams (Nobuyuki Imai: CNS, Univ. of Tokyo), Decay spectroscopy at RIBF (Hiroshi Watanabe: Beihang Univ.), X-ray and gamma-ray spectroscopy with a DC muon beam (Akira Sato: Osaka Univ.), Gamma-ray spectroscopy at J-PARC ANNRI and its perspective (Yosuke Toh: JAEA), Development of tracking Ge detector at RCNP (Nori Aoi: RCNP)

[B] 近年, RIBF や J-PARC 等の新たな加速器施設が稼働し始め, それぞれの研究に必要な要求を満たすように開発された高機能ガンマ線検出器による核分光研究が新たな局面を迎えている. そこで本シンポジウムではガンマ線分光を用いた様々な研究の現状と将来の発展について, 約100名の参加者を得て, 活発な議論を行った. 最初に井手口氏による趣旨説明がなされた後, 小池氏により J-PARC

でのハイパー原子核のガンマ線核分光実験と今後の研究に関する講演があった. 次に RIBF での研究展開の話題として Doornenbal 氏による Fast RI ビームでの実験研究, 今井氏による  $^{178}\text{Hf}$  高スピンアイソマターゲットを用いた研究計画, 渡邊氏による Decay spectroscopy の研究展開についての講演, 議論がなされた. 次に応用研究として佐藤氏により RCNP で開発されている DC ミューオンビームライン MuSIC での研究と将来展望, 藤氏による原子力機構中性子ビームラインでの中性子核反応測定装置 (ANNRI) での研究に関する講演があった. 最後に青井氏が RCNP でのガンマ線トラッキング型 Ge 検出器の開発について講演し, 新型のガンマ線検出器開発を全国規模での研究協力で行ってはどうかとの提案がなされた.

##### 宇宙線・宇宙物理学領域, 素粒子論領域「超高エネルギーガンマ線天文学と Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画」

三代木伸二 (東大宇宙線研)

[A] はじめに (窪 秀利: 京大理), Status of the CTA project (Hofmann Werner: マックス・プランク研核物理), CTA-Japan の状況と今後の戦略 (手嶋政廣: 東大宇宙線研/マックス・プランク研物理学), CTA で迫る物理 (井岡邦仁: KEK・理論センター), 宇宙線の起源に迫る (中森健之: 山形大理), 暗黒物質に迫る (松本重貴: 東大 Kavli IPMU), GeV ガンマ線観測 (Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡) と CTA (深沢泰司: 広島大理), X線観測と CTA (高橋忠幸: ISAS/JAXA)

[B] 超高エネルギー (TeV) ガンマ線天文学は, 1989年の解像型大気チェレンコフ望遠鏡によるかに星雲の初検出以来, 現在では TeV ガンマ線源は150個近くに達した. しかし, これらは氷山の一角に過ぎず, 未知の高エネルギー現象がさらに存在すると考えられる. 本シンポジウムでは, まず窪氏の趣旨説明の後, 次期計画とそのサイエンス, 多波長天文学との連携について, 様々な角度から議論を行った. はじめに, Hofmann 氏に国際共同プロジェクト CTA 計画の現状を報告して頂いた. CTA 計画は, 大口径 (23 m)・中口径 (10-12 m)・小口径 (4 m) の3種類のチェレンコフ望遠鏡群を大規模に展開し, 広いエネルギー領域 (20 GeV から 100 TeV 以上) のガンマ線を従来より1桁深い感度で検出することを目指している. 現在, 開発研究, 鍵となるサイエンスの議論が精力的に行われ, サイトも絞られてきている. 次に手嶋氏が日本も100名近くのメンバーが開発研究やサイエンス目標の定量的な選定に参加しており, 大口径望遠鏡の鏡や焦点面光検出器の開発を中心に進めているという報告をされた. 続いて井岡氏が, TeV ガンマ線で迫る3つのサイエンス, 宇宙線の起源・ブラックホール駆動する高エネルギー現象・ダークマターについて概観した後, 宇宙線電子やニュートリノ, 重力波との連携が重要であるということをお話された. 中森氏は, 超新星残骸における宇宙線の加速について, CTA から生み出さ

れるデータで迫る場合、電波やX線のデータも合わせることで、どのような観測戦略が有効であるかについて定量的に議論された。さらに松本氏は、ダークマター候補として最近注目を集めている弱い相互作用をするWIMPを探索するには、TeVガンマ線観測による間接観測が最も重要であるということを確認された。深沢氏は、Fermiガンマ線宇宙望遠鏡によって、数年間蓄積されたGeVガンマ線の観測結果を示され、特にCTA大口径望遠鏡の観測エネルギーと重なっている領域のガンマ線のデータは、CTAの観測戦略を練る上で重要な情報をもたらすという話をされた。最後に、高橋氏は、打ち上げ間近のX線天文衛星ASTRO-Hによる観測とCTAとの連携が、超新星残骸などにおける宇宙線の加速過程を解明する上で極めて重要であることを強調された。100名を超える参加者があり、今後の連携や展開について活発な議論があった。本シンポジウムのスライドはWEBで公開している(一部は後日公開予定)。http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/JPSCR/

#### 宇宙線・宇宙物理領域、理論核物理領域「超新星爆発モデルの進展と今後の展望」 三代木伸二(東大宇宙線研)

[A] はじめに(小汐由介:岡大理), 超新星爆発メカニズムモデルの最近の進展(山田章一:早大), 超新星爆発3次元シミュレーション(滝脇知也:理研), 超新星爆発による重力波信号とニュートリノ信号(諏訪雄大:京大/マックスプランク), 超新星爆発による重力波の検出(横澤孝章:大阪市大), 超新星ニュートリノの理論予測(中里健一郎:東京理科大), 超新星ニュートリノの検出(池田一得:東大宇宙線研)

[B] シンポジウム「超新星爆発モデルの進展と今後の展望」では、超新星爆発の理論的な進展と観測の現状、今後の展望について、第一線で活躍されている研究者に最新の成果を報告していただいた。まず早稲田大の山田さんからは、超新星爆発のメカニズムについての解説や研究の歴史、現在の状況についてのレビューがされた。続いて理研の滝脇さんからは、最近の大きな成果である超新星爆発の3次元モデルについての詳細な研究内容が報告された。続く京大の諏訪さんからは、現時点で考える超新星爆発機構のサマリーおよび重力波発生メカニズムやニュートリノなど他の信号との相関研究が紐解く物理についての展望が示された。休憩をはさみ大阪市大の横澤さんからは、超新星爆発における重力波検出手法や相関研究の最新結果について報告がなされた。東京理科大の中里さんから最新の超新星背景ニュートリノの観測予測値についての報告がなされた後、東大宇宙線研の池田さんには超新星ニュートリノ観測の現状と将来の展望についてレビューをしていただいた。それぞれの発表内容が有機的につながっていたことから、質疑応答も活発に行われ、議論が深まり、有意義なシンポジウムであった。

#### ビーム物理領域、実験核物理領域「先進加速器と高機能放射線検出器の相乗効果～西川記念シンポジウム～」

山本尚人(名古屋大学)

[A] はじめに(上坂 充:東大), 可搬型高エネルギーX線源と高感度MeV X線検出器(上坂 充:東大), 小型中性子源と高機能中性子検出システム(清水裕彦:名大), 高機能シンチレータ結晶およびその大口径化技術の開発(吉川 彰:東北大), ダイヤモンド検出器(金子純一:北海道大), ナノ材料シンチレータの開発(浅井圭介:東北大), 極短電子・放射光計測システム(冨澤光宏:高輝度光科学研究セ)

[B] 関連学会で分かれて研究発表されていた、加速器と放射線検出器の最前線の研究を一同に会し、今後の研究開発の相乗効果を狙い、シンポジウムを運営した。はじめに、可搬型電子リニアック MeV-X 線源の開発と非破壊検査用 MeV-X 線専用高感度カメラの必要性・開発状況(藤原:東大), 小型加速器型中性子源と好感度検出システム(広田:名大)の、まさに相乗効果の現場の話があった。そのあと、高感度・高速シンチレータの結晶からの開発、数MeV中性子検出用ダイヤモンド検出器、ペロプスカイト系高速・高エネルギー放射光用シンチレータ開発、短パルス電子ビームの計測(ストリークモード、干渉計モード、電気光学モード)の最先端の講演があった。X線カメラにおいて、医療透視用、PET用、福島対応コンプトンカメラ程度の市場性がないと企業は動かない。開発段階からの両分野の協力の重要性が指摘された。他領域からの方々の質疑も見られた。KEK初代所長西川哲治先生を記念した、加速器と放射線検出器利用の融合のシンポジウムの第一歩を踏み出すことができたことは有意義だったと感ずる。

#### 領域1「放射線物理過程に見る実験・シミュレーション解析の最新動向」 土田秀次(京大院工)

[A] はじめに(千葉敦也:原子力機構高崎), シミュレーションの切り口(中川幸子:岡山理大理), PIXE分析ソフトにみる放射線物理(春山洋一:京都府大人環), 中エネルギーイオン散乱及びラザフォード後方散乱分析用シミュレーションプログラムの開発(西村智朗:法政大イオン工), PHITSコードの放射線物理計算とその利用(岩瀬広:高エネ研放射科セ), 標的物質密度のランダム性に起因するエネルギー損失の揺らぎ—新しい概念「random inhomogeneity」の導入—(戸崎充男:京大院RIセ)

[B] 本シンポジウムでは、粒子線励起X線分析やイオン散乱・ラザフォード後方散乱のスペクトル解析ソフト及び粒子・重イオン輸送シミュレーションソフトの開発者やユーザーを介して、それぞれの計算コードで扱う放射線物理過程に着目した議論の展開を図った。趣旨説明に続く5講演では、まず、実験と計算の相補性におけるシミュレーションの役割や数理モデルを構築する上での概念について、中川氏(岡山理大理)に解説頂いた。PIXE用分析ソフトに

取り込まれる物理過程や最先端ソフトに関する報告や陽子・重粒子・中性子など様々な種類の粒子を取り扱えることが特徴のモンテカルロコードPHITSの開発状況やその利用例について報告があった。また、MEISやRBSのエネルギースペクトル解析用ソフトについては、阻止能やストラグリング、散乱断面積等の計算条件を選択することで高精度な解析結果が示された。さらに、物質構造の不均一が原因で起こる「エネルギー損失の揺らぎ」に対する新しい物理概念を取り入れることでRBS共鳴ピークプロファイルの解析結果の高精度化が示された。複数の異なるシミュレータや分析ソフトを一度に解説し、情報を交換する機会は少なく、ある意味異色のシンポジウムではあったが、一定の成功を取めたと言える。(報告：千葉敦也(原子力機構高崎))

### 領域3, 領域7, 領域5「スピン分光法の最近の現状と展望」

菊池彦光(福井大工)

[A] はじめに(菊池彦光:福井大工), 有機エレクトロニクス材料およびデバイスのESR(黒田新一:名大工), ヘテロスピン単分子磁石の設計, 開発, 計測(石田尚行:電通大情報理工), マイクロカンチレバーを用いた超高感度高周波ESR測定(大道英二:神戸大理), ダイヤモンド窒素格子欠陥中の電子スピンを用いた計測手法(鹿野 豊:分子研), IV族半導体における伝導キャリアのスピン緩和時間(秋元郁子:和大小工), 多周波パルスESR分光法の物性物理への応用(中村敏和:分子研)

[B] 最近進展をみせているスピン分光法で、何が出来るか? 何が分かるかを、専門としない研究者にも分かるように紹介し、物性研究の方向性を議論することを目的とした。

「はじめに」では、電子スピン共鳴の進展や現状などを交え開催趣旨を説明した。黒田新一氏(名大)からは、デバイス応用が期待されている有機エレクトロニクス材料の電場誘起ESR研究が紹介された。石田尚行氏(電通大)には、ヘテロスピン単分子磁石の開発ならびに物性を設計指針から含め講演頂いた。大道英二氏(神戸大)からは、マイクロカンチレバーを用いた非常に高感度高周波ESRの装置・計測開発が紹介された。鹿野豊氏(分子研)からは理論の立場から、スピン計測手法の提案ならびに開発が紹介された。光の回折限界を超える分解能でのイメージングや単一分子NMRの可能性についての講演があった。秋元郁子氏(和大小)からは、IV族半導体に対するサイクロトロン共鳴法の詳細な解析により、緩和メカニズムそのものにせまる研究結果が報告された。中村敏和氏(分子研)からは、多周波パルスESRや光誘起時間分解法による研究結果が紹介された。広く物性物理への応用も期待される。

同会場で直前に行われたJPSのフレンドシップミーティングが長引いたために、シンポジウムの開始が5分強遅れた。のべ120名程度の参加者があった。

### 領域3, 領域8, 領域11「スピン系の磁場誘起量子相・トポロジカル相の新展開」

坂井 徹(原子力機構SPRING-8)

[A] はじめに(坂井 徹:原子力機構SPRING-8), スピネル型フラストレート系の超強磁場誘起量子相(宮田敦彦:フランス強磁場セ), 固体酸素の磁場誘起相転移(小林達生:岡山大理),  $\text{SrCo}_2\text{P}_2$ における二次元遍歴電子系のメタ磁性転移(今井正樹:京大理),  $\text{LiCuVO}_4$ におけるマグノン束縛対とネマティック相の探索(那波和宏:東大物性研), フラストレート磁性体における磁場誘起スピンネマティック相の理論(桃井 勉:理研), DMRGによる磁場誘起相転移の計算法と応用例(柴田尚和:東北大大理), フラストレーション系の新奇スピントロップの理論(中野博生:兵庫県立大物質理), キラル磁性体におけるトポロジカル位相物体の磁場制御(岸根順一郎:放送大)

[B] 近年、スピン系・強相関電子系の分野において、磁場によって誘起される巨視的な量子現象が注目されている。最近では、強磁場発生技術や磁場中での測定技術の進歩に伴い、これまでに見られなかった飽和磁場付近でのスピンネマティック相や固体酸素の強磁場相などが発見され、その理論的メカニズム解明が急がれている。一方、京コンピュータに代表される次世代型大規模スーパーコンピュータの整備や、数値シミュレーション技術により、新しい大規模数値解析に基づく理論予想として、新奇な磁場誘起量子相や磁場誘起トポロジカル相が提唱され、検証実験の提案に期待がかかっている。このような状況で、実験・理論両面からのホットな話題を提供していただき、今後の展望を議論するために、シンポジウムを実施した。現在ホットな話題が多いことから、150人近い聴衆が集まり、強磁場技術や理論予測の細部にいたるまで、深く掘り下げた議論が展開された。とくに最近強磁場下で発見されたスピネル系のスピンネマティック相については、理論的なメカニズムも解明され、理論・実験が連携した理想的な成果として流布された。本シンポジウムをきっかけに、今後の大きなブレイクスルーにつながることを期待したい。

### 領域4, 領域1, 領域5「固体と光の融合:量子状態の制御と観測」

高瀬恵子(NTT物性基礎研)

[A] 趣旨説明(高瀬恵子:NTT物性基礎研), 固体の集団励起を介したマイクロ波-光量子変換(宇佐見康二:東大先端研), 表面弾性波フォノンによるGaAs量子ドットの電子状態制御(藤澤利正:東工大理工), 半導体ヘテロ構造とフォトニック結晶を用いた光状態制御(浅野 卓:京大工), 超伝導NbNにおけるヒッグス・モードのTHz波検出と超伝導状態の光操作(島野 亮:東大低セ, 東大理), 偏光分光実空間マッピングによる分数量子ホール液体の相転移の解明(遊佐 剛:東北大大理), ダイヤモンドNVセンターにおける単一のスピン・光子・電荷間の制御(水落憲和:阪大基礎工), Si短チャンネルMOS素子にお

ける欠陥準位制御と電子スピン共鳴(大野圭司:理研)

[B] 近年, 固体中の電子状態やスピンを光やフォノンにより制御・検出する技術や, 反対に, 固体を用いて光を制御する技術などが新たに開発されている. さらに, そのような革新的技術開発により, エキゾチックな物理状態が観測されている.

本シンポジウムでは, 固体と光の融合と題して, 7人の先生方にご講演いただいた. 東大の宇佐見氏には超伝導やマグノンを用いた共振器量子電気力学(cavity QED)の実験, 東工大の藤澤氏には量子ドットを用いたフォノン版cavity QEDの実験をお話いただいた. 京大の浅野氏には, 固体を用いた光の制御としてフォトニック結晶の研究をご講演いただき, 応用例として太陽電池の効率向上への研究もご紹介いただいた. 次に, 東大の島野氏には, 独自で開発されたTHz波パルス技術を用いて観測された超伝導の秩序変数の振幅モード(ヒッグス・モード)についてお話しいただき, 東北大の遊佐氏には, 自前の極低温偏光分光顕微鏡を用いた分数量子ホール液体の実空間観測と相転移の機構についてお話いただいた. その後, 阪大の水落氏には, ダイヤモンド中の欠陥準位であるNVセンターを用いたフォトン制御, 理研の大野氏にはシリコン中の欠陥準位であるダンダリングボンドを用いた電子スピン共鳴についてご講演いただいた.

シンポジウムは300人程度収容できる教室で開催され, 立ち見の方もいらっしゃるほど盛況であった. 質疑応答や議論も活発に行われ, 関連分野への波及効果が期待されるものとなった.

#### 領域5, 領域9「先端的時間分解光電子分光法の開発と光機能性界面のリアルタイム観測」

松田 巖(東大物性研)

[A] はじめに(松田 巖:東大物性研), EUVレーザーを用いた時間分解角度分解光電子分光(齋藤智彦:東理大理), 水溶液の時間角度分解光電子分光(鈴木俊法:京大院理化学), 時間分解光電子分光の進展:エネルギー・運動量空間における超高速時間分解分光(谷村克己:阪大産研), 時間分解光電子分光で調べる光誘起相転移(渡辺雅之:京大院人間・環境), 表面バンドエンジニアリングによる酸化チタン光触媒の活性制御(小澤健一:東工大理工), 機能性有機分子薄膜の2光子光電子分光(洪田昌弘:慶大理工), フェムト秒レーザーを利用した時間分解光電子顕微鏡による光キャリアダイナミクスの直接観察(福本恵紀:東工大理工)

[B] 光電子分光法は多種多様な物質の電子状態(化学状態)を直接調べることができ, その時間分解測定はさらに電子の動的過程もリアルタイムで捉えることができる. 時間分解光電子分光実験は赤外~紫外線パルスレーザーを用いてこれまで実施されてきたが, 最近では高輝度放射光や高次高調波レーザーなどの真空紫外線~X線パルス光源を

活用した新しい利用研究も報告されてきた. そこで本シンポジウムではこれら先端的時間分解光電子分光法の開発や時間分解光電子分光による光機能界面研究などにおいて著しい成果を上げられた研究者に集まっていただき, それぞれの実験技術及び研究内容についてご講演いただいた. ブルリアンゾーン全領域のバンド分散やナノ空間領域の局所的非平衡キャリア, そして溶液系の電子状態など, 時間分解測定は今やこれらをフェムト秒の時間分解能で実施できるようになった. 時間分解光電子分光法は固体・表面などの物質における光励起キャリアダイナミクスの理解に重要な役割を果たしてきており, これら新技術を組み合わせることにより今後さらに発展することが期待された. 会場には108名の参加者が集まり, また立ち見も目立つほど盛況なものとなった.

#### 領域7, 領域8「分子性固体におけるキャリアドーピングの新展開」

伊藤哲明(東理大理)

[A] はじめに(伊藤哲明:東理大理), キャリアドーピングされた有機Mott絶縁体 $\kappa$ -(ET)<sub>4</sub>Hg<sub>2.89</sub>Br<sub>8</sub>におけるMottness(大池広志:理研CEMS), 有機Mott絶縁体のFET構造による電子相制御(山本浩史:分子研, 総研大, 理研), ドナー/アクセプタ界面を有する有機半導体トランジスタ(竹谷純一:東大新領域), ESR法による結晶性共役高分子の高ドーピング状態における金属相の観測(田中久暁:名大院工), キャリアドーピングしたカーボンナノチューブにおける励起子光物性(宮内雄平:京大エネ研, 名大院理), グラフェンにおける電子密度変調によるプラズモン伝播制御(熊田倫雄:NTT物性基礎研)

[B] 近年, 分子性物質においていくつかの研究分野でキャリアドーピングの技術・物理が急速に発展してきている. この結果, 無機系で議論されてきた物理に対して分子性物質から重要な知見が与えられたり, あるいは分子性物質系特有の現象が観測されたりするなど, 大きな進展が得られつつある状況である. この中でも特に, ①有機Mott絶縁体系, ②有機半導体系, ③カーボンナノチューブ・グラフェンの炭素系におけるキャリアドーピングの進展が目覚ましい. これらの進展はそれぞれの研究分野で個々に議論されてきていたが, 本シンポジウムでは, これら異なる分野の研究者が一堂に会して講演を行い(①有機Mott絶縁体系:大池, 山本, ②有機半導体系:竹谷, 田中, ③ナノチューブ・グラフェンの炭素系:宮内, 熊田), 分野を横断した討論が行われた.

参加者は最大時約90名であったが, 講演の詳細に踏み込む活発な議論が展開された. これらにより, 有機物におけるキャリアドーピングの発展の現状が概括でき, 今後のさらなる研究の活性化の地となったと考えられる. また本シンポジウム課題と直接関係する領域7のみならず, キャリアドーピングという共通の物理を研究対象とする領域8の研究者にとっても有益な情報を与えることができたとい

う点でも意義のあるシンポジウムであったと思われる。

### 領域8, 領域3「スピン軌道物理の新展開—Kitaev型異方的相互作用が創出する新奇な物性」

求 幸年(東大院工)

[A] 趣旨説明(求 幸年:東大院工), 新規イリジウム酸化物のKitaev磁性(高山知弘:マックスプランク研究所), ハニカム格子イリジウム酸化物の第一原理的研究(山地洋平:東大工量子相), イリジウムスピネル( $\text{Cu, Zn Ir}_2\text{S}_4$ )の特異な磁気基底状態とスピン軌道相互作用(小嶋健児:KEK物構研), Kitaevスピン液体への有限温度相転移(那須讓治:東工大理工),  $\text{CaIrO}_3$ におけるKitaev型異方的相互作用の実証(大串研也:東北理), Kitaevモデルにおける光誘起トポロジカル量子相の理論(佐藤正寛:青学理工)

[B] 本シンポジウムは, 近年大きな注目を集めている電子相関とスピン軌道相互作用の競合や協調によるスピンと軌道が絡んだ現象のうち, 進展が著しいKitaev型異方的相互作用がもたらす新しい物理を俯瞰的な視点から議論し, 実験・理論研究のさらなる飛躍を促す目的で企画された。4dや5d電子が主役となる遷移金属化合物を中心に, 我が国発の最新の研究成果が, 若手を含む様々なバックグラウンドをもつ聴衆に理解できるよう工夫された形で紹介された。実験と理論の講演が交互になされることで, 各講演者が将来期待している新展開を具体的に語り合うことに重点が置かれた。実験の講演では, イリジウム酸化物・スピネル・ポストペロブスカイトといった多彩な系において, 多くの新規物質の開発やKitaev型異方的相互作用の検証に関する研究の最前線が紹介された。それらに呼応する形で理論側からは, 第一原理的なアプローチに基づく野心的な取り組みや, 量子スピン液体の有限温度の性質, 光で誘起される新しいトポロジカル相の提案など, 実験研究を刺激する講演がなされた。各講演に対して, 実験・理論両サイドからの議論が質疑応答時間を超えて盛り上がったことから, Kitaev型異方的相互作用という新しい視点からのスピン軌道物理への注目の高さがうかがわれた。

### 領域8「励起子絶縁体とその周辺の新展開:新物質, BEC-BCSクロスオーバー, 圧力誘起超伝導」

溝川貴司(東大新領域)

[A] はじめに(溝川貴司:東大新領域), 励起子相:予言から半世紀, 新物質相としての可能性(福山秀敏:東理大理),  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ は励起子絶縁体か?—物性概観—(高木英典:東大院理),  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ における圧力誘起半導体—金属転移と超伝導(松林和幸:東大物性研), エキシトニック絶縁体の圧力相転移と結晶構造(澤 博:名大院工), 高圧下 $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ の光学伝導度と電子状態(岡村英一:神大院理),  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ の励起子ボーズ・アインシュタイン凝縮および関連物質の理論(太田幸則:千葉大院自然)

[B] シンポジウムは福山氏による励起子絶縁体に関する

包括的な講演から始まり, 半世紀の歴史を持つ励起子絶縁体研究の経緯から近年の候補物質, さらには $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ やグラフェンに強磁場で誘起される励起子絶縁体的状態について議論された。続いて高木氏が, トランスポート・比熱・光学スペクトル等の物性測定と圧力・置換効果から,  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ において328 K付近で見られる相転移が励起子絶縁体転移として解釈できる(逆にそれ以外の解釈は難しい)という明快な結論を示した。さらに松林氏は, 高圧下で $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ の励起子絶縁体状態を抑制することによって発現する超伝導を報告した。休憩後の後半では, 澤氏が $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ の圧力下の構造変化に加えて, 常圧下の精密構造解析によって $\text{TiSe}_2$ と $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ の励起子絶縁体相での反強的誘電分極を報告し聴衆に衝撃を与えた。一方で岡村氏は, 高圧下の精密な光学測定によって超伝導相に隣接する圧力領域まで励起子相となっていることを示した。最後に太田氏が,  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ について電子間相互作用と電子格子相互作用を考慮した微視的なモデルによって励起子絶縁体描像の下に種々の測定結果が説明できることを示し, さらに, コバルト酸化物等の励起子絶縁体転移の可能性について言及した。200名程度の聴衆と講演者との間で活発な議論が行われ, 古典的なテーマである励起子絶縁体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「銅酸化物におけるノン・ドープ超伝導の可能性に迫る」

黒木和彦(阪大理)

[A] はじめに(黒木和彦:阪大理), 高温超伝導ルネサンス—銅酸化物母物質はモット絶縁体か?(内藤方夫:農工大工), 低エネルギーミュオンで見た $T'$ 相非ドープ銅酸化物の超伝導と磁性(門野良典:KEK物構研), 電子ドープ系の有効モデルとしての弱相関ハバードモデル超伝導(小形正男:東大理・理論), 電子型 $T'-214$ 高温超伝導体における超伝導と短距離秩序の共存(足立 匡:上智大理工), ARPESで見た銅酸化物における反強磁性相関(藤森淳:東大理・実験), 中性子散乱でみる磁気相間の電子・ホール非対称性(藤田全基:東北大金研), ドープされたモット絶縁体としての電子ドープ系高温超伝導体(遠山貴巳:東理大理)

[B] キャリアードープされていない銅酸化物高温超伝導体の母物質はモット絶縁体であると考えられてきた。しかし, 近年, 頂点酸素を有しない $T'$ 型結晶構造においては, 母物質にて超伝導になる可能性が論じられている。本シンポジウムでは, このノン・ドープ超伝導の可能性について迫ることを目的とした。

黒木による趣旨説明の後, まず内藤が $T'$ 型銅酸化物の薄膜に基づいた実験結果から, 四配位構造におけるノン・ドープ超伝導を提唱するに至った経緯について講演し, 最近の進展まで含めた発表を行った。続いて門野が低エネルギーミュオンを用いた実験結果について講演し,  $T'$ 型薄膜における超伝導がバルク的な性格を持つものであることを

説いた。小形は理論的な立場からT型とT'型結晶構造によるノン・ドープ状態の違いを配位数の差に起因する相互作用の大きさの違いから論じた。後半では、まず足立がT'型結晶構造を持つ単結晶試料に対する輸送係数と $\mu$ SR測定について発表し、短距離磁気秩序と超伝導が共存した系であることを論じた。藤森は足立らの試料に対するARPES実験について講演し、磁気的な性質の電子・ホール非対称性、ならびに広範囲な電子ドープ域にわたって超伝導転移温度が変化しないことを発表した。藤田はas-grownのT'型物質の中性子散乱実験について講演し、 $x=0$ における磁気励起はT型と同じく2次元反強磁性ハイゼンベルグ模型で記述されることや、磁気励起の電子・ホールの非対称性について述べた。最後に遠山が理論模型における磁気励起の計算結果から、強相関係として見た電子ドープ系について論じた。

シンポジウムでは約200人ほどの参加者が集まり、ときには質問の時間を超過して、活発な議論がかわされた。

### 領域9, 領域5「表面光励起とダイナミクス」

荒船竜一(物材機構)

[A] 趣旨説明(荒船竜一:物材機構-MANA), 時間依存第一原理計算による先端の実験技術の理解: Heイオン顕微鏡から高強度レーザーまで(宮本良之:産総研), 相界面での光誘起キャリア移動ダイナミクス(山下晃一:東大工)有機薄膜での電子励起と緩和過程(宗像利明:阪大理), トポロジカル絶縁体表面状態の電子ダイナミクス(小森文夫:東大物性研), サブ10 fs超短パルスレーザーを用いた時間分解表面振動分光(片山郁文:横国大工), 半導体表面空乏層のプラズモン・フォノンダイナミクス(石岡邦江:物材機構), 金属表面における超高速電子-格子結合ダイナミクス(松本吉泰:京大理)

[B] 近年, パルスレーザーを用いた二光子光電子分光法や和周波発生等の実験手法や, 時間依存密度汎関数法を用いた理論手法の発展により, 光によって励起された状態の緩和過程をフェムト秒・ピコ秒の時間スケールで追跡することが可能になっている。これらの技術はバルク物質だけではなく, 表面系に対しても強力なツールであり, 表面での化学反応ダイナミクスや光誘起相転移, 非平衡下での物理現象を解き明かす基盤技術となる。本シンポジウムでは最新の実験・理論手法の現状とその表面系への展開可能性について本分野を牽引する研究者に最近の進展を講演頂いた。

本シンポジウムでは理論に関する講演が2件, 実験に関する講演が5件であった。対象とする系は, 吸着分子系から, グラフェン, 半導体, トポロジカル絶縁体までバリエーションに富んでおり, 表面系においてのダイナミクスの直接計測の重要性が普遍的であることを示したものとなっている。領域9と領域5を跨ぐだけではなく, 普段物理学会では発表を行わない研究者からの講演もあり, 様々な角度から活発な議論がなされた。参加者はおおよそ80-90名程度であり, 分野横断的な議論・交流のきっかけが作られ, 今

後新たな研究分野への展開が期待される。

### 領域10, 領域6「J-PARCにおける中性子・ミュオン実験の現状と展望」

鈴木淳市(CROSS)

[A] はじめに(鈴木淳市:CROSS), J-PARC/MLFの完成がもたらす物性物理学の進展と今後の展開(新井正敏:原子力機構, J-PARC), チョッパー分光器による研究領域拡大の展望(伊藤晋一:KEK, J-PARC), 中性子反射率による動的ポリマーブラシの構造解析(横山英明:東大新領域), ミュオン特性X線による隕石試料の非破壊分析(寺田健太郎:阪大理)

[B] はじめに, 鈴木が, 「MLFは物理学をはじめとする諸科学分野の学術研究や産業利用分野の開発研究における物質の構造やダイナミクスの解析に変革や新展開をもたらすことを目的に建設された。シンポジウムでは, 大強度のパルス中性子およびミュオンの実現により生まれた変化と新たな展開に関する講演とMLFの特徴を活かした研究に関する講演を軸に, 今後の中性子およびミュオン実験の可能性や展望について総合的な議論を行う。」と趣旨を説明した。その後, 新井氏が, 完成したMLFの性能と今後の展開について, 超伝導体や磁性体の磁気励起の観測や低分子液体の相関関数 $G(r, t)$ の導出等を例に報告した。伊藤氏は, チョッパー分光器による研究領域の拡大として, 中性子ブリルアン散乱や中性子による電子励起の観測の進展について報告した。横山氏は, 中性子反射率法による動的ポリマーブラシの高密度なブラシ形成の観測とその構造を説明する熱力学的モデルについて報告した。最後に, 寺田氏が, 隕石ができた環境を隕石に含まれるマイナー鉱物のミュオン特性X線分析により明らかにする研究について報告した。

### 領域10, 領域9「機能発現サイトの原子スケール立体構造解明 —無機から蛋白まで—」

高橋敏男(東大物性研)

[A] はじめに(高橋敏男:東大物性研), 光電子ホログラフィ, 蛍光X線ホログラフィによる局所原子構造解析の最近の発展(大門 寛:奈良先端大), X線CTR散乱で見える遷移金属酸化物表面の特異な物性(若林裕助:阪大), 半導体の欠陥・局所構造と物性(米永一郎:東北大), 無機材料および半導体デバイスにおける機能発現サイトの解明と制御(筒井一生:東工大), 有機エレクトロニクス・超伝導における局所構造の重要性(久保園芳博:岡山大), ヘモグロビンにみるヘム蛋白質の超精密活性制御機構(柴山修哉:自治医科大), 第一原理電子状態計算による局所構造とその電子的・化学的性質の解明(森川良忠:阪大)

[B] 無機材料, 有機材料, バイオ材料, 蛋白などにおいては, ほとんどの場合に特定の機能発現サイトが物性や反応に関与しているにもかかわらず, そのような機能発現サイトは3次元的な並進対称性を持たないために通常のX線回折の手法が使えず, 原子スケールでの構造が分かっていないことが多い。このため物性や反応のメカニズム・現象

に関する理解が進んでいない。

このような現状を踏まえて、本シンポジウムでは、測定手法としては光電子ホログラフィ、蛍光X線ホログラフィ、X線CTR散乱に焦点を合わせ、それぞれ手法の開発にたずさわってこられた講演者に最近の発展を踏まえて手法の特徴およびその応用研究について講演して頂いた。続いて、機能発現サイトの物性や反応の観点から研究を推進されている講演者に、それぞれ問題点を踏まえて最近の研究を紹介して頂いた。講演者の中には複数の学会非会員も含まれ、多様な観点からの講演、およびそれに続く討論がなされた。会場もほぼ満席になる盛況であった。講演・討論を通して相互理解を深めることができ、今後の原子分解能で機能発現サイトを研究する分野の進展を図る上で有意義なシンポジウムとなった。

#### 領域 11, 領域 3, 領域 9「『京』が拓いた物性物理」

渡辺宙志 (東大物性研)

[A] 趣旨説明及び京の課題採択 (藤堂真治: 東大院理), 磁石材料の微細構造界面特性解析と新化合物探索 (合田義弘: 東工大総合理工), 京コンピュータを使った大規模並列密度行列繰り込み群法による強相関係の研究 (曾田繁利: 理研 AICS), 二次元SU(N) ハイゼンベルグモデルにおける脱閉じ込め量子臨界現象 (原田健自: 京大情報), 「京」で見たりチウムイオン電池の電解液分解反応 (袖山慶太郎: 京大, NIMS), 近接場光励起に基づく光・電子機能性ナノ物質の理論設計 (信定克幸: 分子研理論・計算), 総合討論 (渡辺宙志: 東大物性研)

[B] ポスト「京」への準備が進む中、本シンポジウムはこれまでに「京」で得られた成果を紹介することで、物性物理分野におけるスパコンの役割と今後のあり方について議論することを目的に企画された。藤堂氏による趣旨説明の後、合田氏から磁石材料の計算結果と、SPRING-8など実験との連携について講演があった。磁石はミクロな物性とマクロな構造がカップルした本質的にマルチスケールな系であり、その解析には大規模計算が必須となる。曾田氏からは密度行列繰り込み群 (DMRG) による大規模計算について紹介があった。DMRGは通常の取り扱いが困難な強相関係をターゲットとするが、特に二次元系で大きくなる計算コストをどのように解決するかは非自明な問題である。原田氏からは脱閉じ込め転移という通常のランダウ描像では説明できない新しい相転移の研究が報告された。「京」規模の計算により初めて明らかとなった有限サイズ効果を見出し、脱閉じ込め転移研究に新たな指針を与えるものであった。袖山氏からはリチウムイオン電池の電解液への添加物が界面に生成される膜に与える影響と高濃度電解液についての研究が報告された。電解液で起きうる反応は多岐にわたるため「京」でもその全ては計算できず、どの反応経路に着目するかは物理のセンスが問われる。信定氏からは近接場光励起を取り扱うために、理論及び計算コードを

ゼロから開発した事例が紹介された。近接場光励起を利用することで全く新しいデバイスの開発が可能であり、その設計のためにも「京」そしてポスト「京」の計算能力が必須であることが述べられた。総合討論では、これからの人材育成における課題や、HPCへの期待などが議論された。物性物理分野に限っても多彩な研究が行われており、活発な討論もあって今後のさらなる計算物性物理の発展を期待させるシンポジウムとなった。

#### 領域 11, 領域 3, 領域 6, 領域 9, 領域 10「マテリアルズインフォマティクスの現状と将来」 寺倉清之 (物材機構)

[A] 趣旨説明 (寺倉清之: 物材機構), データ駆動型材料研究 (マテリアルズインフォマティクス) の推進 (立松慎也: 文科省), 物質科学データの機械学習 (津田宏治: 東大新領域), 第一原理計算に基づいたマテリアルズインフォマティクス (田中 功: 京大工), スパースモデリングと物性物理 (岡田真人: 東大新領域), 物性物理へのデータ駆動型アプローチ (福島孝治: 東大総合科学), 材料選択と材料設計を支えるデータベースの展望 (徐 一斌: 物材機構), マテリアルズインフォマティクスへの期待 (細野秀雄: 東工大元素セ)

[B] マテリアルズインフォマティクスが我が国で注目を浴びようになったのは、残念ながら我が国内部からの声によるのではなく、米国で2011年に口火を切ったMGI (Materials Genome Initiative) による。ただし、こうしたデータ駆動型研究の重要性は時代の流れの必然でもあり、例えば情報システム研究機構の北川機構長によると、「データ中心科学」が「第4の科学」として位置付けられている。シンポジウムは趣旨説明に続いて、文科省から、世界での関連の研究の現状の紹介と、文科省としてこのような研究をどのように位置づけて推進しようとしているかの説明があった。その後、データ駆動型研究の一翼を支えるデータ解析の手法としての機械学習の概念と適用例、データ解析における重要な概念としてのスパースモデリングの意義が説明された。また、材料科学と物性物理でのデータ駆動型研究の例がいくつか報告され、それが持つ今後の物質・材料研究での意義、および課題が述べられた。また、こうした研究の底辺にあるデータベースについて、物材機構での活動の過去・現在の紹介に加えて、今後のデータベースのあり方が説明された。参加者は、およそ200人に及ぶと思われ、大変盛況であった。

#### 領域 11, 領域 3, 領域 4, 領域 8, 領域 9, 領域 10「第一原理計算手法の現状と展望」 小口多美夫 (阪大産研)

[A] はじめに (小口多美夫: 阪大産研), 相対論的電子状態計算手法の現状と展望 (小田竜樹: 金沢大理工), 第一原理多体摂動論の前線 (中村和磨: 九工大工), 実空間差分法に基づいた電気伝導計算手法 (塚本 茂: FZ Jülich), オーダーN第一原理電子状態計算手法による複雑界

面構造の大規模計算(尾崎泰助:東大物性研),第一原理計算の産業応用—新たな Computer-Aided Engineering—(渋谷陽二:阪大院工),プローブ量子・正ミュオンの第一原理計算(中西 寛:阪大院工)

[B] 現在,第一原理計算は物性物理学の分野に限らず,化学分野,材料科学の広範な分野及びそれらとの学際分野において必須な研究手法となってきた。また,社会における重要な課題の解決に向けて取り組まれている大型プロジェクトの中でも第一原理計算は中心的な役割を演じている。例えば,物性・機能の具体的なターゲットの実現を目指す再生可能エネルギー関連プロジェクトや元素戦略プロジェクト, J-PARC, SPring-8 及び京コンピュータ等の大型施設を活用したプロジェクトを挙げることができる。このような現状を踏まえ,今後を展望する際にキーとなる観点は何かであろうか。計算は必ずモデルや近似の上において,如何に現実系にそれらを近づけるかがその重要なものとなるであろう。現実系に近づく要素としては,“時間と空間の自由度”と“近似のレベル”の2つの方向性を考えることができる。また,現実系(実験現場側)の視点から第一原理計算の手法を開発することも重要となる。本シンポジウムでは「如何に現実系に近づけるか」を中心課題として講演が構成された。会場は160名ほどの席数であったがほぼ満席となり,会場からの質問やコメントが活発になされ充実したシンポジウムとなった。

## 領域 12, 領域 6, 領域 10「プロトネーションイントウダークネス:生体分子機能理解の為の水素位置情報」

秋山 良(九大理),吉田紀生(九大高等研)

[A] はじめに(秋山 良:九大理),光の下で見えたプロトネーション:ロドプシンの話題を中心に(神取秀樹:名工大),生体高分子中性子結晶構造解析によるプロトネーション研究のすゝめ(田中伊知朗:茨城大),プロトン輸送性ロドプシンにおける低障壁水素結合の役割(神山勉:名大理),ヒドロゲナーゼの反応水素が見えるか?(樋口芳樹:兵庫県立大),第一原理計算によるタンパク質の  $pK_a$  と構造機能相関(重田育照:筑波大物理),水素核量子性を取り入れた凝縮系の分子動力学シミュレーション(金 賢得:京大理)

[B] 『はじめに』で生体分子の解離性官能基がプロトン化されているか否かが機能上重要であることが紹介された。続く神取の講演では,振動分光実験を用いたロドプシンの機能解析を通じて上記の重要性が具体的かつ明確に示された。しかし,光が有効に使える場合は限られている。暗闇の中での研究も期待されているのである。そこで,高精度 X線回折実験による水素分解反応のヒドロゲナーゼでの触媒作用の解析が,樋口により紹介された。ただ, X線回折にも課題があり,樋口らのグループも中性子線を用いたアプローチを開始している。田中の講演で,線源の開発等により中性子線回折実験の問題が解決しつつあることが具体

例と共に紹介された。それらの課題の中で低障壁水素結合の問題が議論され始めた。プロトン輸送性ロドプシンでのケースが神山により議論された。理論研究では,連続誘電体モデルを用いた量子化学によるアプローチが重田により紹介され,  $pK_a$  の予測値に一定の法則性があることが示された。媒質モデルの充実等が期待される。一方,媒質側に焦点を当てた水素位置情報のシミュレーション法の開発について金が発表した。蛋白質等への適用が期待される。シンポジウムは数件の関連一般講演の後に開催された。参加人数は70名程度であった。

## 領域 13「物理教育研究に基づく授業方式の事例研究—「チュートリアル」

覧具博義(農工大),新田英雄(東学大教育),  
谷口和成(京教大教育)

[A] チュートリアルとはどのような授業法か(山田吉英:福井大教育),チュートリアルの実践から見えてきたこと(植松晴子:東学大教育),パネル討論:谷口和成(京教大教育),山田吉英(福井大教育),植松晴子(東学大教育);モデレータ:岸澤真一(拓殖大)

[B] 物理教育の質の向上を目指して,アクティブ・ラーニング(AL)型授業方式への関心が高まっている。このシンポジウムは,物理教育研究(Physics Education Research,略称PER)に基づいて開発されたAL型授業方式の一つである,新しい形のチュートリアル,すなわち(頭文字が大文字で表記される)Tutorials,に焦点をあわせて,これを日本の大学で実践している2名の研究者の講演を軸に構成された。

講演1で山田氏は,Tutorialsを,その原点とも言えるワシントン大学のMcDermottらによる“Tutorials in Introductory Physics (TIP)”を中心に解説した。Tutorialsでは学生が3-5名ずつグループを構成しその中で議論しながらワークシートの推論問題に取り組む。教員やTAのファシリテータは教室内を巡回し議論の迷走に軌道修正のための介入をするが,正答を示唆するなどの誘導を注意深く避け学習者主体での概念理解を促す。

講演2では,植松氏が4年前から実施している東学大の物理学演習へのTutorialsの本格導入について報告した。ここでは,メリーランド大学の物理教育研究グループが認知的な配慮を強化して開発した“Open Source Tutorials (OST)”を,日本の大学環境に適合するよう改訂して用いている。概念理解の向上はFCIを用いた履修前後の調査に明瞭に表れている。ファシリテータのトレーニングの重要性が強調された。

講演に引き続き,自らもAL授業を実践している谷口氏と岸澤氏がパネリストおよびモデレータとして加わって,聴衆を交えての質疑と討論が行われた。90名前後の多数の参加者を得て熱心な討論が行われた。

(2015年5月8日原稿受付)

J. Casalderrey-Solana, H. Liu, D. Mateos, K. Rajagopal and U. A. Wiedemann

## Gauge/String Duality, Hot QCD and Heavy Ion Collisions

Cambridge Univ. Press, New York, 2014, vi + 460p, 25 × 18 cm, \$90.00 [専門・大学院向]  
ISBN 978-1-107-02246-1

菅本晶夫 (お茶大理)

2011年にプレプリントサーバーで見つけたこの本の原稿を、私は無謀にもテキストとして、2011年4月から7月まで、修士課程の院生相手に講義を行った。実は前年度に素粒子論研究室の学部学生4名の「RHICとQGP」をテーマとする卒研指導を行った。RHICとはBNLにあるRelativistic Heavy Ion Collisionを行う加速器の名であり、QGPとはQuark Gluon Plasmaである。4名の学生はとても良くできたのでこの課題を見事にこなした。その内2名はお茶大大学院に進み、2名は他大学の大学院へ進学したが、2名が他大学から入学したので、計4名の修士1年生を相手に講義を行ったのである。

目標は素人向けの前半、即ち第1章～第5章 (heavy ion phenomenology, finite temperature QCD, gauge/string duality) であり、専門家向けの後半第6章～第9章は講義しないという方針にした。本となった現在でも前半は同じ第1章～第5章であるが、後半は第6章～第10章となり、第7章が加わった。

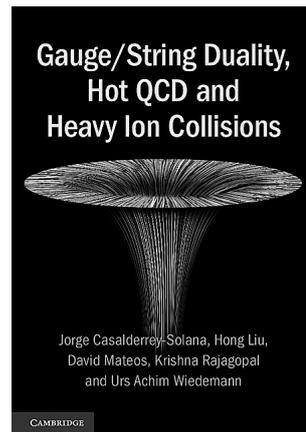
この本は、RHICおよびLHC (Large Hadron Collider) における金あるいは鉛の原子核衝突実験で明らかになった

QGPの発生とその性質を説明することから始まる。発生したQGPはほぼ完全流体であるが、原子核が正面衝突からずれて衝突する場合には独特の流れ (elliptic flow) が発生することから「ずり粘性」(shear viscosity) の値を測定したこと、QGP中を走るquarkがエネルギーを失うこと (jet quenching) 及びクォークonium (quarkと反quarkの複合粒子) の発生がQGPによって抑制されること等が解説される。流体力学を相対論的に記述するためにLandau-Lifshitzの教科書『流体力学』(東京図書)の内容を、jet quenchingを理解するためにEikonal近似、Glauber模型、Landau-Pomeranchuk-Migdal理論等を、文献を頼りに補足説明した。

最近の物理は狭くなって、これらの知識を知らなくても済ませる人も多いが、この本はそれを許さない。従って、講義をしてとても勉強になった。

次に強結合にあるゲージ理論が古典的重力理論で記述できるという「ゲージ/重力双対性」が素人にも分かるように解説される。

2011年の6月末にKEKの夏梅誠さんが「超弦理論の応用—物理諸分野でのAdS/CFT双対性の使い方」(サイエン



ス社SGCとして出版)という集中講義をしてくれたので、学生さんにはそれを聞くように伝えて講義ではゲージ/重力双対性は割愛した。

加筆された第7章では、流体のエネルギー運動量テンソルを重力理論から見るとどうなるかを議論している。平衡状態から大きく外れた場合にも適応できるとするなど、今後の物理に新しい風が吹く予感がある。

この本は決して易しい本ではなく骨があるが、様々な物理がQGPを理解するために寄与していることを明確に示している。そのどれもが重要な物理である。自分の得意な分野から入って、他の分野の最近の発展を理解したいとする人には最適の本である。

研究につながる様々なアイデアをこの本から得ることができるだろう。

(2014年12月28日原稿受付)

福間将文, 酒谷雄峰

## 重力とエントロピー；重力の熱力学的性質を理解するために

サイエンス社, 東京, 2014, vi + 211p, 26 × 18 cm, 本体2,546円 (SGCライブラリ-112) [専門・大学院向]

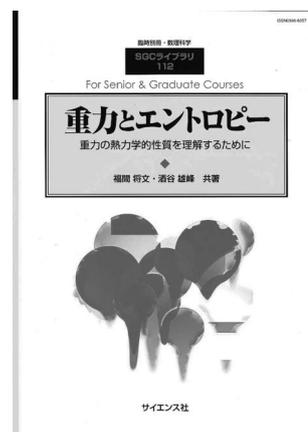
ISSN 4910054701043

磯 暁 (KEK・総研大)

2015年はアインシュタインが一般相対性理論を提案して100年の節目にあたる。この長い歳月を経て、一般相対性理論は天体物理学や宇宙物理学で精密に検証されてきただけでなく、GPSなど私たちの生活をも陰で支えて

いる。重力波も近いうちに観測されるだろう。

このように確立された基本理論でありながら、一般相対性理論で記述される重力理論にはまだ大きな謎が残されている。それがホーキングにより指摘



された、重力理論、特にブラックホールが存在する時空のもつ不思議な熱力学的性質である。ホーキングは一般相対性理論の幾何学的な性質から、ブラックホールが温度やエントロピーという熱力学的量を持ち、熱力学第一法則（エネルギー保存則）や第二法則（エントロピー増大則）が成り立つことを示した。さらにこの時空上で場の量子論を考えることで、ブラックホールが、幾何学的考察から導入された温度と同じ温度の輻射（ホーキング輻射）を放出することも明らかにした。一様な加速度運動をする観測者は有限温度に励起されること（ウンルー効果）も知られている。

これらの事実は、一般相対性理論が記述するマクロな時空の背後に、何らかの微視的な（すなわち統計力学的な）自由度が存在することを示唆する。実際、超弦理論を使ったブラックホールエントロピーの導出はこの考え方を支持しており、超弦理論が実在する証拠と考える研究者もいる。また、一般相対性理論から熱力学を導出するという論理を逆転させ、熱力学から一般相対性理論を導出しようという提案（ヤコブソン）もなされている。これらの成功にもかかわらず、重力がもつ熱力学的性質の真の意味はまだ謎に包まれている。

重力理論の熱力学的性質を理解するためには、測地線や超曲面の幾何学、重力の正準形式などの理解が欠かせな

い。しかしこれらの話題は少々高度であり、通常の一般相対性理論の教科書ではあまり扱われていない。本書では、これらの基本的な手法を丁寧に説明しながら、時空の熱力学の一般論までを解説している。1章で測地線束の満たすRaychaudhuri方程式やブラックホール時空の数学的性質を扱い、4章で重力の正準形式を解説している。エネルギーや角運動量といった重力理論の熱力学的量は、局所的な一般座標不変性に付随する保存量（ネーター電荷）である。このため、電磁理論の保存量である電荷がそれを囲む境界領域での電場の表面積分（ガウスの定理）で書けるように、重力の保存量も境界面での積分で表される。そこで重力理論の理解には境界項の扱いが本質的である。4章では、重力理論の境界項をラグランジュ形式（Gibbons-Hawking項）とハミルトン形式（Regge-Teitelboim電荷）の2通りの見方で扱い、後者の例として3次元漸近的AdS空間での無限次元対称性にまで言及している。また、ユークリッド化の手法による時空の熱力学を、小正準統計集団の立場から基礎付けたYorkらの仕事の解説もあり面白い。5章では、1章と4章をベースにしてブラックホール熱力学の一般論が展開される。特に、ネーター電荷としてブラックホールエントロピーを解釈するWaldの方法が丁寧に解説されている。これは重力を熱力学的に解釈する上での要でありながら、日本語

で書かれた解説は少なく貴重である。

これ以外の章は、上記の流れを補完する章となっておりそれぞれ独立に読める。逆にこのことに気付かないと、2章、3章で躓き、基本的な流れを見失う読者もいるかもしれない。2章では相対論的流体力学の観点からみたエントロピー、3章は曲がった時空の場の量子論における熱力学的性質（ウンルー効果）を扱っている。6章では、超弦理論、Dブレーンの解説とそれを用いたブラックホールエントロピーの導出が明快に示されている。

このように本書は、重力がもつ熱力学的な性質を理解するための基本的な手法と概念が網羅されたツールブックである。同様なツールブックには、E. Poisson: *A Relativist's Toolkit; The Mathematics of Black-Hole Mechanics* (Cambridge Univ. Press, 2007) が隠れた“あんちょこ”として知られているが、本書はPoissonの本よりも高度で深みがあり幅広いトピックスを扱っている。記述も緻密で、腰を落ち着けて読めば必要な手法と概念を理解できるだろう。

(2015年1月18日原稿受付)

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

## 図書リスト

### 最近の寄贈書より

- S. Akama: *Elements of Quantum Computing; History, Theories and Engineering Applications* Springer Int. Pub. Switzerland, Cham, 2015, IX + 126p, 24 × 16 cm, 99.99€ ISBN 978-3-319-08283-7
- L. Amendola and S. Tsujikawa: *Dark Energy; Theory and Observations* Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2015, xiv + 491p, 25 × 18 cm, \$65.00 ISBN 978-1-107-45398-2
- M. Bonitz, J. Lopez, K. Becker and H. Thom-

- sen, eds.: *Complex Plasmas; Scientific Challenges and Technological Opportunities* Springer Int. Pub. Switzerland, Cham, 2014, xiii + 491p, 24 × 16 cm, 99.99€ (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Vol. 82) ISBN 978-3-319-05436-0
- M. Hayashi, S. Ishizaka, A. Kawachi, G. Kimura and T. Ogawa: *Introduction to Quantum Information Science* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2015, ix + 332p, 24 × 16 cm, 74.99€ (Graduate Texts in Physics) ISBN 978-3-662-43501-4

- S. Nakamura, S. Pearton and G. Fasol: *The Blue Laser Diode; The Complete Story, 2nd Revised and Enlarged Ed.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2015, XVI + 368p, 24 × 16 cm, 194.99€ ISBN 978-3-540-66505-2
- T. Numai: *Fundamentals of Semiconductor Lasers, 2nd Ed.* Springer Japan, Tokyo, 2015, xivi + 289p, 24 × 16 cm, 129.99€ (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 93) ISBN 978-4-431-55147-8
- M. Ohtsu: *Dressed Photons; Concepts of Light-Matter Fusion Technology*

- Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2014, x + 324p, 24 × 16 cm, 129.99€ (Nano-Optics and Nanophotonics)  
ISBN 978-3-642-39568-0
- M. Ohtsu and T. Yatsui, eds.: Progress in Nanophotonics 3  
Springer Int. Pub. Switzerland, Cham, 2015, xiv + 208p, 24 × 16 cm, 99.99€ (Nano-Optics and Nanophotonics)  
ISBN 978-3-319-11601-3
- T. Y. Seong, J. Han, H. Amano and H. Morkoc, eds.: III-Nitride Based Light Emitting Diodes and Applications  
Springer Science + Business Media Dordrecht, Heidelberg, 2013, xiii + 390p, 24 × 16 cm, 139.99€ (Topics in Applied Physics, Vol. 126)  
ISBN 978-94-007-5862-9
- K. Shudo, I. Katayama and S. Ohno, eds.: Frontiers in Optical Methods; Nano-Characterization and Coherent Control  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2014, xii + 228p, 24 × 16 cm, 99.99€ (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 180)  
ISBN 978-3-642-40593-8
- A. Takayama: High-Resolution Spin-Resolved Photoemission Spectrometer and the Rashba Effect in Bismuth Thin Films  
Springer Japan, Tokyo, 2015, xii + 83p, 24 × 16 cm, 99.99€ (Springer These; Recognizing Outstanding Ph.D. Research)  
ISBN 978-4-431-55027-3
- S. Todoroki: Fiber Fuse; Light-Induced Continuous Breakdown of Silica Glass Optical Fiber  
Springer Japan, Tokyo, 2014, xiii + 58p, 24 × 16 cm, 59.99€ (NIMS Monographs)  
ISBN 978-4-431-54576-7
- S. Uchida: High Temperature Superconductivity; The Road to Higher Critical Temperature  
Springer Japan, Tokyo, 2015, x + 92p, 24 × 16 cm, 79.99€ (Springer Series in Materials Science Vol. 213)  
ISBN 978-4-431-55299-4
- M. Yamada: Theory of Semiconductor Lasers; From Basis of Quantum Electronics to Analyses of the Mode Competition Phenomena and Noise  
Springer Japan, Tokyo, 2014, xi + 303p, 24 × 16 cm, 99.99€ (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 185)  
ISBN 978-4-431-54888-1
- P. J. ファイベルマン著, 西尾義人訳: 博士号だけでは不十分; 理系研究者として生き残るために  
白洋舎, 東京, 2015, 177p, 19 × 13 cm, 本体 1,800 円  
ISBN 978-4-8269-0179-6
- E. Maor, E. Jost 著, 高木隆司監訳: 美しい幾何学  
丸善, 東京, 2015, vi + 199p, 24 × 23 cm, 本体 2,700 円  
ISBN 978-4-621-08921-7
- S. H. Strogatz 著, 田中久陽, 中尾裕也, 千葉逸人訳: ストロガッツ非線形ダイナミクスとカオス; 数学的基礎から物理・生物・化学・工学への応用まで  
丸善, 東京, 2015, xvii + 523p, 21 × 15 cm, 本体 6,300 円  
ISBN 978-4-621-08580-6
- 尾鍋智子: 通じる! 科学英語論文・ライティングのコツ  
大阪大学出版会, 大阪, 2015, iv + 158p, 21 × 15 cm, 本体 1,800 円  
ISBN 978-4-87259-498-0
- 梶谷 剛: 結晶構造学基礎編; 空間群から粉末構造解析まで  
アグネ技術センター, 東京, 2015, iv + 119p, 21 × 15 cm, 本体 2,000 円  
ISBN 978-4-901496-78-0
- 梶谷 剛: 結晶構造学上級編; 結晶物性学の理解をめざして  
アグネ技術センター, 東京, 2015, v + 179p, 21 × 15 cm, 本体 2,600 円  
ISBN 978-4-901496-79-7
- 齋藤理一郎: フラーレン・ナノチューブ・グラフェンの科学; ナノカーボンの世界  
共立出版, 東京, 2015, xi + 163p, 21 × 15 cm, 本体 2,160 円 (基本法則から読み解く物理学最前線 5)  
ISBN 978-4-320-03525-6
- 田中宏幸, 竹内 薫: 素粒子で地球を視る; 高エネルギー地球科学入門  
東京大学出版会, 東京, 2014, vi + 186p, 21 × 15 cm, 本体 2,800 円  
ISBN 978-4-13-063712-1
- 玉置孝至: ループ量子重力理論への招待; 入門から新たな進展に向けて  
サイエンス社, 東京, 2015, v + 141p, 26 × 18 cm, 本体 2,222 円 (SGC ライブラリ -115)  
ISSN 4910054700350
- 西澤泰二: 状態図・七話  
アグネ技術センター, 東京, 2015, ii + 103p, 21 × 15 cm, 本体 2,400 円  
ISBN 978-4-901496-76-6
- 日本学術振興会「科学の健全な発展のために」編集委員会編: 科学の健全な発展のために; 誠実な科学者の心得  
丸善, 東京, 2015, vii + 141p, 21 × 15 cm, 本体 900 円  
ISBN 978-4-621-08914-9
- 林 光男: 完全独習電磁気学; 古典電磁気学の形成から量子電磁気学まで  
講談社, 東京, 2015, xi + 337p, 21 × 15 cm, 本体 3,800 円  
ISBN 978-4-06-153289-2
- 寄藤文平: 元素生活 (文庫版)  
化学同人, 京都, 2015, 211p, 15 × 11 cm, 本体 700 円  
ISBN 978-4-7598-1595-5

## AAPPS だより

### AAPPS-DPP 設立とその活動報告

AAPPS (アジア太平洋物理学会連合: <http://www.aapps.org/>) は高部会員の AAPPS 便り (2005 年) にあるように, グローバル化が進む 21 世紀において世界第 3 極の物理学会連合を担う

組織で, アジア太平洋物理学国際会議 (APPC) の開催や機関誌 (AAPPS Bulletin) を発行しています. APPC は長い歴史があるにもかかわらず, 2013 年幕張メッセで開催した APPC-12 が

日本で開催された最初の APPC でした. 永宮 AAPPS 会長兼 APPC 組織委員長 (当時) を中心に APPC-12 ではこれまでの記録を上回る 1,290 名の参加を得たことはすでに報告されているところです. プラズマ物理関係では, 領域 2, 天文学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 応物プラズマエレクトロニクス分科会等の協力を得て 306 編の発表が行われました.

APPC-12での実績を踏まえ、永宮先生の依頼を受けて、アジア太平洋物理学学会連合下で最初の部門としてプラズマ物理部門(DPP; Division of Plasma Physics)を立ち上げました。DPP設立にあたっては、日本物理学会、応用物理学会、中国物理学会(北京)、オーストラリア物理学会、韓国物理学会、インド物理学会、台湾物理学会、シンガポール物理学会、香港物理学会、マレーシア物理学会、ネパール物理学会、タイ物理学会、フィリピン物理学会から100名弱の賛同者を集めて、AAPPS理事会に提案書を上奏し、2014年1月のAAPPS理事会で設立が承認されました。AAPPSの部門規定にのっとり、部門長候補者を提案することが条件とされており、創設提案書のメンバーの互選により私が初代の部門長を引き受けることになりました。

それをうけて、日本物理学会前総務



図1 第1回チャンドラセッカル賞受賞者：一丸節夫先生。

理事の永井治男氏の尽力により2014年2月1日にはホームページ(<http://aappsdp.org/AAPPSDPPF/index.html>)を立ち上げました。1年間で3,000人以上の訪問者を迎えており、会員への重要なニュースソースとなっています。2014年2月27日には分野別副部門長：Liu Chen(中国)、A. Sen(インド)、白谷正治(日本)、Z. Sheng(中国)、D. Ryu(韓国)、M. Hole(オーストラリア)、事務局長：L. Hau(台湾)、事務局(永井治男、今寺賢志)を選出、2015年1月30日にL. Hauをスペースプラズマ担当の副部門長に、タイのT. Onjunを事務局長に入れて、ASEANからも執行部入りを致しました。2014年3月6日から会員登録(会費は無料、要会員推薦者：<http://aappsdp.org/AAPPSDPPF/join.html>)を開始しました。会員数は2015年2月18日で1,265名となっております。日本物理学会会員の一層の入会をお待ちしております。また、DPPのロゴを7月17日に決定、会員への情報伝達方法として、2014年4月22日から会員全体へのメーリングサービスを行っています。

さらに、2014年4月9日にはプラズマ物理部門の最高助言機関としてI-HAC(International Honorary Advisory Committee: 議長P. Kaw(インド))を組織化し、I-HACへの最初の諮問として、4月17日にはプラズマ物理学に関する顕著な業績に対して贈るS.チャンドラセッカル賞の設立を諮問いたしまし

た。答申は5月8日に出され、設立に向けて作業を開始し、中国成都の西南物理研究所傘下の会社とスポンサー契約を結び、7月30日には会員にスプラマニアン・チャンドラセッカル賞の設立と候補者の推薦を全会員に募りました。10月31日までに日本、中国、オーストラリア、台湾から応募があり、選考委員長には韓国の元ポステック加速器センター長Won Namkung教授を選定し、インド、中国、韓国、オーストラリアから各2名、台湾1名を選出して厳正な審査を行って頂き、名誉ある第1回チャンドラセッカル賞受賞者として一丸節夫東大名誉教授が選定されました。ちなみに、日本からの選考委員には三間國興阪大名誉教授、寺澤敏夫東大宇宙研教授にお願い致しました。

磁場核融合研究や太陽表面のフレアなどで研究されているプラズマは、クーロン力による位置エネルギーに比べて運動エネルギーが圧倒的に大きな弱結合プラズマです。一方、天体中心部のプラズマや固体中の電子ではクーロン力による位置エネルギーが運動エネルギーより大きくなります。このようなプラズマを強結合プラズマと呼びます。また、実験室プラズマとして良く知られている強結合プラズマにはダストプラズマやトラップ中のイオン系があります。

一丸節夫教授は、当該分野の理論体系を創設した研究者であり、米国物理学学会の著名な論文誌Reviews of Mod-



下列左より、H. Y. Choi(韓)、M. Raharti(インドネシア)、C. R. Chang, R. Robinson(豪)、S. Nagamiya(日、機関誌編集長)、S. Kim(韓、AAPPS会長)、G. L. Long(中、AAPPS副会長)、M. Kikuchi(日、DPP chair)、S. P. Chia(マレーシア)、Y. Kuramoto(日、物理学会)、X. Zhu(中)；上列右より：S. P. Kim(韓、AAPPS事務局)、S. X. Du, N. Q. Liem(ベトナム)、H. J. Choi, M. Iwamoto(日、応物学会)、L. Tang(香港)、S. C. Haur, F. J. Kao(台湾)、L. C. Kwek, S. Nam.

ern Physics に 1982 年に掲載された氏の強結合プラズマ理論に関する総合報告は引用回数が 900 回弱を数えます。また、その適用の例としては金属密度域の電子液体の静的及び動的特性、強結合プラズマにおける結晶構造からガラス構造への転移理論、高密度水素の金属絶縁体転移を含む状態図の理論などを構築されました。また、強結合プラズマにおける特有の現象として、核融合反応率の増幅現象についても正確な評価を行い、白色矮星中心部における反応などに適用されています。

一丸節夫教授は、天体プラズマ研究においても重要な貢献をされ、恒星質量ブラックホールや中性子星のようなコンパクト天体を含む連星系における高温・高密度の降着プラズマの物理過程を解明し、もって降着するプラズマに投入される巨大な重力エネルギーが X 線を中心とした豊富な電磁放射に変換される機構を解明されました。

本賞は毎年 1 名選考致しますが、授賞式と受賞講演は 2016 年 12 月 4-8 日にオーストラリアブリスベンで開催される APPC-13 で行います。

プラズマ物理部門では、今後独自の国際会議や年会の開催を想定してはいますが、すでに多くのプラズマ関係の国際会議が行われていることを踏まえ、会員に有益な国際会議として West Lake Symposium (杭州), Asia-Pacific Transport Working Group Conference (日中韓), East Asia Plasma School and Workshop (日中韓), アジア太平洋プラズマ理論国際会議, 総研大冬のプラズマ学校 (核融合研), ASEAN プラズマ・核融合学校 (タイ) を講師の派遣を含めて共催/協賛しており、今後拡大していく予定です。

AAPPS の各部門は理事会に活動報告を行うことが規定されており、2015 年 2 月 6-7 日にソウルで開催されたアジア太平洋物理学会連合理事会で第

1 号部門としてその活動報告を行いました。理事会には、金 AAPPS 会長兼韓国物理学会会長をはじめアジア・オセアニア各国の物理学会長もしくは会長経験者が一同に集まっており、今後のアジア連携にとって重要な組織となります。今回の理事会では、第 2 号部門として Division of Astrophysics, Cosmology and Gravitation (DACG) も提案され、今後 AAPPS 傘下の部門形成が進むことが予想されます。

プラズマ物理部門では、今後も活動の幅を広げるとともに、アジア太平洋地区のプラズマ物理分野の糾合に向けて活動を続けて参ります。物理学会会員のより一層の入会とご協力をお願いできればと思います。

菊池 満 AAPPS-DPP 部門長、  
領域 2 元代表

(2015 年 3 月 31 日原稿受付)

## 研究費配分に関する教育研究環境検討委員会だより

### 科研費 (基盤研究 S, A, B, C) 配分状況調査報告

#### 1. はじめに

2004 年 4 月に国立大学が法人化され、その後 10 年間にわたり毎年全法人に課せられている一律係数による運営費交付金の削減<sup>\*1</sup>ならびに研究経費の競争原理強化は、教育研究環境の変化をもたらし、この影響は公立大学、私立大学にも及んでいる。本委員会では、この変化を、(I) 会員アンケート集計結果報告<sup>\*2</sup>、(II) 科研費の配分状況調査から見えるもの<sup>\*3</sup>、(III) 図書館アンケートによる雑誌購読状況<sup>\*4</sup>の 3 点から分析し、学会誌上で報告した。報告 (II) では、法人化前後の 2003-2007 年

度の物理学の科研費を調査し、その科研費が大規模大学に多く配分されている現実も見えてきた。そこでこの報告では基盤研究 (C) の総額を増やし採択率を大幅に上げる措置の提案を行った。

本委員会では、継続して科研費配分に注目してその後の配分状況の変化を調査してきた。ここでは法人化前後 15 年間の採択件数の推移と最近 6 年間の配分金額の変化について、その調査結果を報告する。

#### 2. 科研費配分の変化

調査は前回の方式を踏襲し、科研費の採択課題および配分額については [KAKEN] 科学研究費補助金データ

ベース<sup>\*5</sup>を利用して検索し、研究者数は researchmap<sup>\*6</sup>を利用して組織別の人数を算出した。

図 1 は広領域「数物系科学」で「物理学」を研究分野とした基盤 S、基盤 A、基盤 B、基盤 C の“新規”採択件数の年度変化である。<sup>\*7</sup> 2000-2014 年

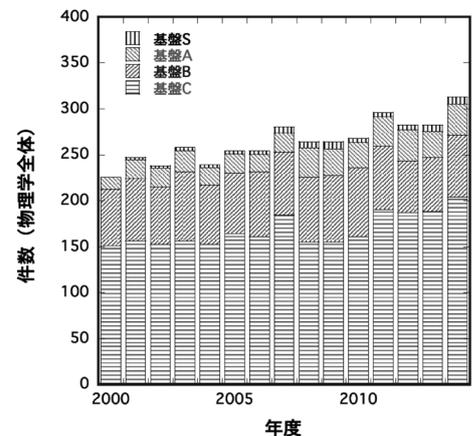


図 1 「物理学」を研究分野とした基盤 S、基盤 A、基盤 B、基盤 C の新規採択件数の年度変化である。

\*1 当初は効率化係数 (全法人 1%)、2011 年度以降は大学改革促進係数 (附属病院を有しない法人 1%、附属病院を有する法人 1.3%) による削減。

\*2 日本物理学会誌 64 (2009) 863.

\*3 日本物理学会誌 64 (2009) 951.

\*4 日本物理学会誌 65 (2010) 49.

\*5 <http://kaken.nii.ac.jp>. 国立情報学研究所が文部科学省、日本学術振興会と協力して作成・公開している。

\*6 <http://researchmap.jp/search/>. 研究者情報登録・更新は、原則として研究者 (または機関管理者) が行う。

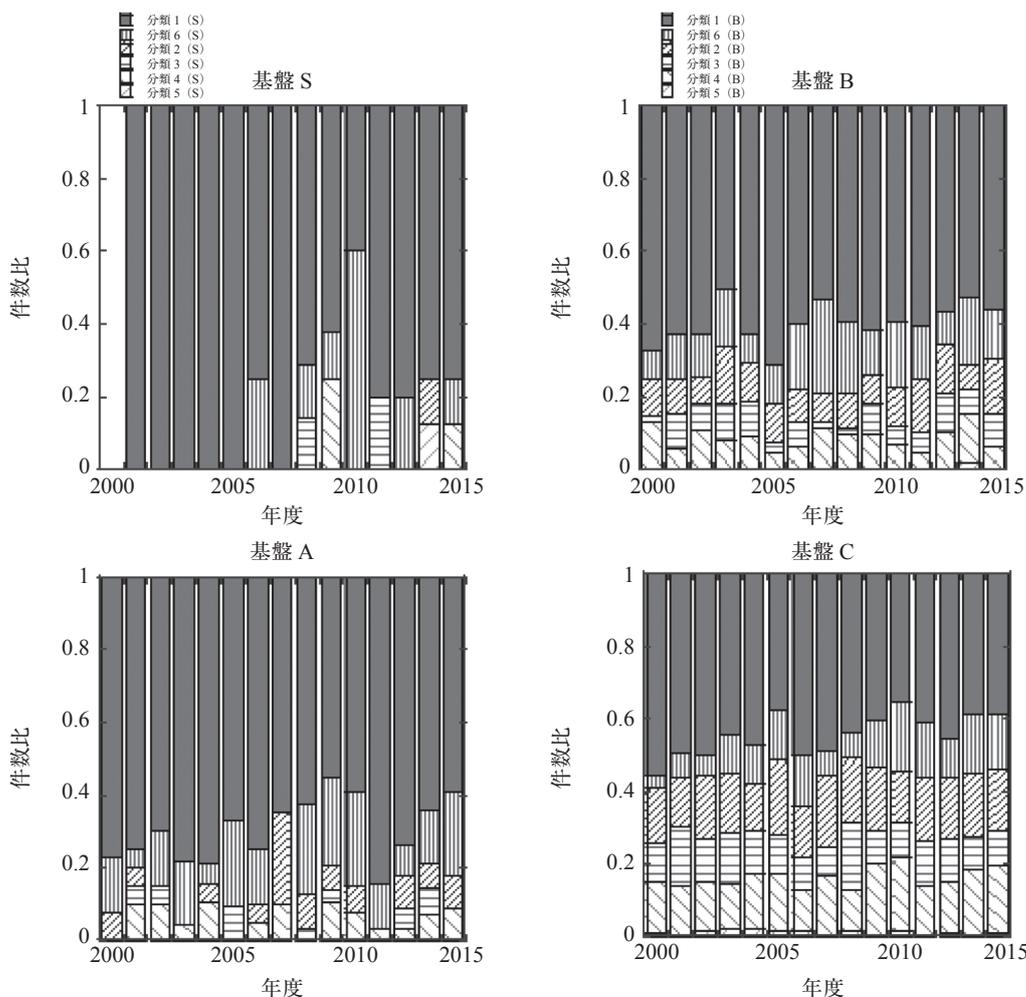


図2 基盤S、基盤A、基盤B、基盤Cの新規採択件数の受け入れ機関分類毎の割合。

度の15年間に新規採択件数は約1.65%/年の割合で緩やかに増加している。特に基盤Cは前回の調査報告<sup>\*7</sup>の前2007-2010年度と後2011-2014年度の各4年間の平均で比較すると、約16%増加している。一方国立大学法人の運営費交付金は2004年度(法人化初年度)と2014年度とを比較すると10.4%、約1,300億円減少したが、<sup>\*8</sup> 科研費総額はその半分よりも遙かに少ない500億円程度しか増加していないことに留意したい。<sup>\*9</sup>

### 3. 研究機関規模・種別の特徴

前回の調査では大学・研究機関を下

記のように分類し、この分類ごとに採択件数・配分額を調査した。今回も同じ分類方法で、各種別の変化を調べた。個別の大学・研究機関のリストはホームページを参照されたい。<sup>\*10</sup>

(分類1) 国公立大規模大学：1995年以前から博士課程がある12大学。<sup>\*11</sup>

(分類2) 国公立大学中規模大：2007年時点で理学部、理工学部で博士課程のあった25国公立大学。<sup>\*12</sup>

(分類3) 国公立大学小規模大：その他の国公立大学。

(分類4) 私立大学：2014年時点で

のKAKENデータベース研究機関一覧に挙げられている私立大学。

(分類5) 短大、高専。

(分類6) 独立行政法人、国立研究所、大学共同利用機関の研究組織(24機関)。<sup>\*13</sup>

(分類7) 民間等の研究機関。

(分類8) その他。

に分類した。統廃合、新設のため前回調査時に比べて若干の変化はある。

図2は基盤S、基盤A、基盤B、基盤Cそれぞれについて、新規に採択された件数の各分類の割合である。前回の2003-2007の調査と同様に大規模大学が占める割合は高く、特に2005年以降は独立行政法人、大学共同利用機関が増加しているのが特徴である。前回の指摘にあるように高額の研究費ほどこの傾向は顕著である。大規模研究機

<sup>\*10</sup> <http://danjo.jps.or.jp/bunrui.pdf>

<sup>\*11</sup> 北大、東北大、筑波大、東大、東工大、首都大、名大、京大、阪大、大阪市立大、広大、九大。

<sup>\*12</sup> 茨城大学、愛媛大学、大阪府立大学、岡山大学、お茶の水女子大学、鹿児島大学、金沢大学、横浜市立大学、兵庫県立大学(姫路工業大学)、熊本大学、高知大学、神戸大学、埼玉大学、佐賀大学、静岡大学、島根大学、信州大学、千葉大学、富山大学、奈良女子大学、新潟大学、弘前大学、山形大学、山口大学、琉球大学。

<sup>\*13</sup> 主なものは、理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構、自然科学研究機構の各研究所等。

<sup>\*7</sup> 前回は新規と継続の合計件数を調査した。今回は新規のみの調査だったので採択件数は大幅に減少している。

<sup>\*8</sup> 国立大学協会「平成27年度国立大学関係予算の確保・充実について(要望)」

<sup>\*9</sup> [https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/27\\_kdata/data/1-1/1-1\\_h26.pdf](https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/27_kdata/data/1-1/1-1_h26.pdf): 日本学術振興会科研費データ

関(1)大規模大学と(6)全国共同利用研, 独立行政法人の研究機関)が得た科研費件数は, 前回調査時(2003-2007)と最近(2010-2014)の各5年の平均は基盤Sが100%⇒89%, 基盤Aが85%⇒85%, 基盤Bが74%⇒72%, 基盤Cが55%⇒55%であり, 件数の少ない基盤Sを除くとほとんど変化していないといえる。中小規模国立大学, 私立大学の研究者による科研費採択件数の割合は依然として小さい。

#### 4. 研究者あたりの科研費

前節の議論では科研費の総件数を見てきたが, 研究者あたりの基盤研究S, A, B, Cの配分額の平均を見てみよう。配分額は2009-2014年に新規に採択された課題が, 2014年度までに配分された金額を各機関分類(1)-(6)ごとに集計した(分担者への分担金は追跡していない)。その結果を図3に示す。分類1は全配分金額の61%, 分類2は8%, 分類3は5%, 分類4は9%, 分類6は16%を得ている。さらに研究者数は, 前述のresearchmapデータベースにおいて, 研究分野を物理学として登録している各大学・各研究機関の研究者を科研費データベース検索と同じ方法で検索した。結果は2014年2月時点で分類(1)1399名, 分類(2)459名, 分類(3)411名, 分類(4)1,048名, 分類(5)252名, 分類(6)647名となる。前三者については前回の調査時とほとんど変化していない。配布された科研費を分子とし, この研究者数を分母と

したものを図3の中に年平均金額を並べて示す。研究者あたりの科研費は, この6年間の年平均で分類(1)190万円, 分類(2)80万円, 分類(3)56万円, 分類(4)37万円, 分類(5)2万円, 分類(6)110万円となる。すなわち, 1研究者あたりの科研費は大規模国立大学に比べて, 小規模大学, 私立大学ではその2-3割程度に止まることになる。なお, 前回の報告にも記されているように, 科研費が大規模研究機関に集中する傾向は特に物理学分野で顕著である。

#### 5. おわりに

今回の調査で,

[1] 物理学分野の科研費の採択件数と配分額はこの15年間で増加しているものの, 大規模国立大学と独立行政法人・全国共同利用研究機関等に集中している傾向は前回の調査時と変わらない,

[2] 前回提案した基盤Cについては, この間件数については16%の増加があったものの, 増加分が中小規模大学, 私立大学の増額にはあまりつながらなかったことが明らかになった。

国立大学法人の運営費交付金はこの10年で10%以上減少しており, 競争的資金がなければ研究どころか, 学生教育にも支障をきたすことが現実となってきている。大学の物理学研究者・教員にとっては主な競争的資金は科研費であるが, その増額は運営費交付金減少の半分にも満たない。しかも,

運営費交付金の減額は国立大学法人大学のすべてにはほぼ一律の割合でかかってくる一方, 物理学分野の科研費は大規模国立大学と独立行政法人・全国共同利用研究機関等に集中している現状は変わらない。当初は運営費交付金額の減少は科研費の間接経費の配分で補われると期待されていたが, 中小規模国立大学には減少の負担のみが重くかかっている。

大学教員にとって研究費は学生・人材育成のための資金と表裏一体である。最新の科学技術への関わりなしには教育はできないからである。中小規模大学や私立大学の中には卒業研究のための最低限の機器や消耗品, 資料の調達にも苦勞しているところもある。日本全体の科学技術の底力を上げる努力の基幹としてこの問題を捉える必要がある。科研費の審査では, どうしてもポジティブフィードバックがかかりやすく, このままでは中小規模大学や私立大学への科研費の配分状況は今後もあまり変化しないであろう。この状況に変化をもたらすためには何らかのアクション, 例えば, 基盤Cの採択件数, 採択率をさらに上げる, またURA (University Research Administrator) 等研究推進支援のための厚い手当などが必要ではないだろうか。

今回は, 基盤研究のみの科研費を調査報告を行ったが, その他の特別推進研究, 特定領域研究, 新学術領域等の大型科研費も重要な研究資金となっている。これらは領域横断的であり, 物理学のみの抽出が難しいため今回の報告からは外した。さらに競争的資金としては科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST・さきがけ)や国家課題対応型研究事業等の大型のプロジェクトがある。これらの多くはトップダウン方式での課題が選定されるため, 中小規模の大学, 地方大学, 私立大学には情報さえも来ないことがあり, 研究資金の格差をもたらす一因となっている。今後, これらの外部資金をも含めた継続的な調査が重要と考える。

最後にここに用いた科研費データは, 69-70期委員が手分けして相互チェックをしながら調べたものであるが, 完

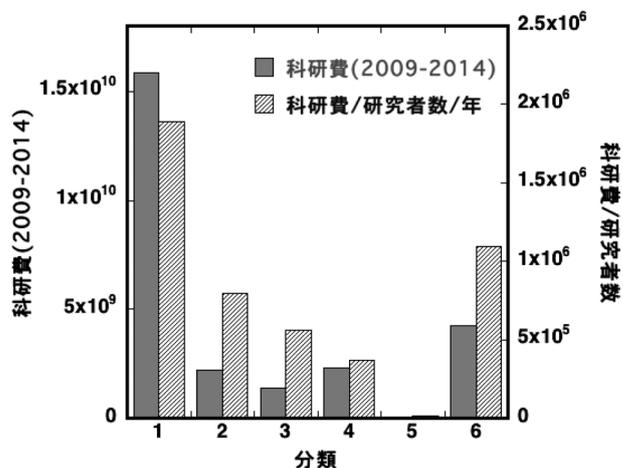


図3 受け入れ機関分類(1), (2), (3), (4), (5), (6)の2009-2014年度の物理学分野の基盤(S), (A), (B), (C)の配分総額, および研究者一人あたりの平均配分額。

全ではない。特に研究期間の途中で組織が変更した場合は、新規課題としてスタートした時点での組織により分類をしたが、ダブルカウントの可能性はある。見落としがないよう、総数でチェックしたところによると誤差は

1%以下と思われる。一方研究者数については、本人または機関での自主的な登録を原則としているため、中小規模の大学、地方大学では登録されていない可能性がある。しかしこのことはここに示された格差を拡大こそすれ結

論を変えるものではない。

(文責：研究費配分に関する教育研究環境検討委員会委員(69-70期)：磯田誠、佐野雅己、鳥養映子、松永守、森初果、瀧澤誠、和田元、笹尾真実子)

## 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/kejiban.html>にありますので、それに従ってお申込み下さい。webからのお申込みができない場合は、e-mail: [kejiban@jps.or.jp](mailto:kejiban@jps.or.jp)へお送り下さい。必ず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)

### ■東北大学WPI-AIMR 研究員

1. 助教、ポスドク若干名
2. ソフトマテリアルグループ(Prassides研)
3. 合成及び化学組成-結晶構造-電子特性の相関を明らかにする為の構造解析と物性評価に関して責任を持って主体

的に遂行して頂く。

4. できるだけ早期
5. 助教：2年(評価により2019年3月31日まで延長の可能性有)、ポスドク：1年(評価により3年まで更新可)
7. ○写真付履歴書 ○業績リスト ○主要論文別刷5編 ○今迄の研究概要 ○研究に関する将来計画と抱負 ○照会可能者3名の氏名、連絡先
8. 適任者が決まり次第
9. Kosmas Prassides [k.prassides@wpi-aimr-tohoku.ac.jp](mailto:k.prassides@wpi-aimr-tohoku.ac.jp)
10. 提出書類は全て英語で作成しe-mailで提出。詳細は必ず[http://www.wpi-aimr-tohoku.ac.jp/jp/about/staff/20150507\\_000557.html](http://www.wpi-aimr-tohoku.ac.jp/jp/about/staff/20150507_000557.html)参照。

### ■分子科学研究所助教

1. 助教1名
2. 生命・錯体分子科学研究領域生体分子機能研究部門
3. 物理化学的又は生体分子科学的アプローチにより、タンパク質・複合糖質又はそれらの複合体の立体構造・ダイナミクス・相互作用・機能の解明を基盤とする生命分子科学研究に意欲のある研究者。主として当該研究部門を兼務する岡崎統合バイオサイエンスセンター加藤晃一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保有者
7. ○推薦書(自薦の場合不要) ○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. 2015年7月10日(金)消印有効
9. 444-8585 岡崎市明大寺町西郷中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/2014/>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。

### ■京都大学基礎物理学研究所教授

1. 教授1名
3. 宇宙物理学(理論)
4. 決定後早期
5. 特に設けない(少なくとも約5年は本研究所に在職し、約15年経過後の異動を推奨)
7. ○履歴書 ○発表論文リスト(主要論文5点以内に印) ○研究歴(研究成果の説明) ○就任した場合の研究計画 ○着任可能時期 ○主要論文(発表論文リストで印を付けた論文のpdf又はアーカイブ番号を指定) ○他薦の場合は更に推薦書
8. 2015年7月20日(月)必着
9. ① [ap.jinji@yukawa.kyoto-u.ac.jp](mailto:ap.jinji@yukawa.kyoto-u.ac.jp) (推薦書の郵送可：606-8502京都市左京区北白川追分町 京都大学基礎物理学研究所長 佐々木節) ② 同研究所 藤田裕子 電話075-753-7009 [fujita@yukawa.kyoto-u.ac.jp](mailto:fujita@yukawa.kyoto-u.ac.jp)
10. e-mailの件名は「宇宙物理学教授応募」と記載。詳細は<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/info/detail.php?NID=221>参照。

### ■東京理科大学理学部第二部物理学教員

1. 准教授又は講師1名
2. 神楽坂キャンパス(但し、勤務地変更を命ずることがある)
3. 専門分野：物性理論。担当科目：物理学に係る授業科目。
4. 2016年4月1日
6. 以下の条件を全て満たす方。(a) 博士号を有し、独立した研究室を主宰できる方。(b) 二部(夜間部)の教育に熱意を持ち取組める方。(c) 学部及び大学院の教育に熱意を持ち取組める方。
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 ○今

迄の研究概要(約1,000字)と採用後の研究計画・抱負(約1,000字) ○理学部第二部(夜間部)における教育に対する抱負(約1,000字) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先(電話, e-mail明記) ○学位記の写し又は学位取得証明書

- 2015年7月31日(金) 必着
- 162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3 東京理科大学理学部第二部物理学科 梅村和夫 電話03-5228-8228 koubo\_2b@rs.tus.ac.jp
- 東京理科大学では女性人財を積極的に育成, 活用し, 活躍を支援する大学となることを目標としている. 女性の積極的な応募を期待.

#### ■新潟大学理学部物理学科准教授

- 准教授1名
- 高エネルギー物理学研究室
- 高エネルギー物理, 学部・大学院における教育・研究及び学科, 学部等の運営.
- 2015年11月1日以降早期
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書 ○研究業績リスト(学位論文, 原著論文, プロシーディングス, 著書, 総説等を区別) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○主要研究業績概要(2,000字以内) ○着任後の研究計画と教育に関する抱負(2,000字以内) ○その他特記事項(科研費等外部資金獲得状況, 招待講演, 受賞歴, 大学院生指導実績等) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先 ○上記の印刷物と履歴書以外のPDFが保存された電子媒体(CD-R等)を提出
- 2015年7月31日(金) 必着
- ①950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050番地 新潟大学自然科学系総務課学系庶務係  
②理学部物理学科高エネルギー物理学研究室 宮田 等 電話/Fax 025-262-6185 miyata@hep.sc.niigata-u.ac.jp
- 封筒に「高エネルギー物理学准教授人事応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付. 応募書類等提出物不返却. 詳細は<http://www.gs.niigata-u.ac.jp/~scitech/gakugai/koubo.html>参照.

#### ■高エネルギー加速器研究機構准教授

- 准教授各1名
- 加速器研究施設
- 【加速器15-1】放射光源加速器(PFリング, PF-AR, ERL)のビーム診断シ

ステムの開発研究において中核的な役割を担う. 【加速器15-2】SuperKEKBの為のリング電磁石電源システムに関する開発研究・建設・コミッショニングにおいて中核的役割を担う. 【加速器15-3】電子陽電子入射器・エネルギー回収型リニアック(ERL)・超伝導RF試験施設(STF)におけるデジタル低電力高周波制御の開発研究, 及び電子陽電子入射器のコミッショニングにおいて中核的役割を担う. 15-1~3はそれぞれ, 将来計画に必要な加速器技術の開拓の研究に従事.

- 2016年4月1日以降早期
- なし
- 履歴書 ○研究歴 ○発表論文リスト(和, 英文別葉, 提出論文別刷に○印) ○主要論文別刷5編以内 ○推薦書又は意見書 ○今後の研究に関する抱負
- 2015年7月31日(金)
- ①305-0801 つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構人事労務課人事第一係  
②加速器研究施設 山口誠哉 電話029-864-5689 Fax 029-864-3182 seiya.yamaguchi@kek.jp
- 書類選考の上, 面接を行う.

#### ■立教大学理学部物理学科教員

- 教授又は准教授1名
- 理論物理学研究室
- 素粒子物理学の理論的研究, 物理学科専門科目, 物理学専攻専門科目, 理学部共通科目, 全学共通カリキュラム科目の授業担当, 及び卒業研究, 大学院生の研究指導.
- 2016年4月1日
- なし(定年65歳)
- 博士号取得者. 研究教育に熱意を持ち, 指導力を発揮できる研究者であること. 学科, 学部, 大学の運営に積極的に参加する意思を持つ方.
- 履歴書(連絡先(電話, e-mail)を明記) ○業績リスト(査読論文, その他に分割) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○競争的資金導入実績 ○研究に関する業績の概要と計画(約2,000字) ○教育に関する経験と抱負(約2,000字) ○照会可能者2名の氏名・所属・連絡先(電話, e-mail等)
- 2015年8月31日(月) 必着
- ①171-8501 東京都豊島区西池袋3-34-1 立教大学理学部物理学科 田口 真  
②同上 田中秀和 電話 03-3985-2612

tanakah@rikkyo.ac.jp

- 封筒に「素粒子理論教授准教授応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付. 別途, 主要論文以外の応募書類のpdf(10MB以下, 件名「素粒子理論教員応募(応募者氏名)」)をitp-jinji@rikkyo.ac.jpに送付. 応募書類原則不返却. 必要に応じて面接を行う.

#### ■東京大学大学院工学系研究科講師

- 講師1名
- 物理学専攻
- 広い意味での物性物理, 統計物理, 又は量子情報の理論的研究. 当専攻において独立した研究室を主宰し, 研究・教育にあたる.
- 決定後早期
- 約5年を目途に転出を推奨
- 博士号学位取得者
- 履歴書(連絡用e-mail明記) ○今迄の研究概要(約2,000字) ○研究・教育に対する抱負(約2,000字) ○業績リスト(論文, 著書, 総説) ○国内外招待講演リスト ○教育実績 ○その他参考となる実績リスト(受賞・新聞発表, 学会活動, 社会貢献, 外部資金獲得状況等) ○主要論文別刷又はコピー5編 ○推薦書(又は意見書)2通又は照会可能者2名の氏名, 連絡先
- 2015年8月31日(月) 必着
- ①113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学工学系研究科物理学専攻教務室 嵯峨直樹 電話03-5841-6800 office@ap.t.u-tokyo.ac.jp  
②同専攻 長谷川達生 電話03-5841-6841 t-hasegawa@ap.t.u-tokyo.ac.jp
- 書類は封筒に「教員応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付. 応募書類原則不返却.

#### ■京都大学化学研究所教授

- 教授1名
- 附属先端ビームナノ科学センター粒子ビーム科学研究領域(大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻協力講座)
- 次世代に繋がる新しい高エネルギー科学(量子ビーム科学, 放射線科学, 高強度レーザー科学, 中性子科学, 素粒子・原子核科学等を包含)の開拓. 挑戦的な研究(実験)を中長期的展望をもって実施できる意欲的な方.
- 決定後早期
- 10年(再任有)
- 博士号を有し, 且つ大学卒業後11年

以上を経た、又は同等以上の学識・経歴があると認められる者

- 以下は概略、詳細はHP参照 ○履歴書(写真付) ○研究業績リスト(主要論文10編に丸印) ○主要論文10編の別刷又はコピー各2部 ○業績の達成経過と今後の抱負 ○照会可能者2名の氏名、所属、連絡先 ○その他参考資料
- 2015年8月31日(月) 必着
- ①611-0011京都市宇治市五ヶ庄 京都大学化学研究所担当事務室 時任宣博  
②阪部周二 電話0774-38-3291 sakabe laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp
- 最終選考において面接を実施する。研究業績リストの全論文の別刷等の追加資料を求めることがある。

#### ■大阪大学大学院理学研究科准教授

- 准教授1名
- 附属先端強磁場科学研究センター
- センターの萩原教授と協力して強磁場施設を利用した物性実験を推進できる方。物理系第二研究部門(伝導系)の責任者として、学内外との共同研究も強力に進められる方。学生の教育にも熱意を持って取り組む方。
- 決定後早期
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書(写真貼付) ○業績リスト(HP参照) ○研究業績概要 ○主要論文別刷約5編(コピー可) ○研究計画と教育の抱負(A4で3頁以上) ○照会可能者2名以上の氏名、連絡先
- 2015年8月31日(月) 必着
- ①560-0043豊中市待兼山町1-1 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻 田島節子  
②附属先端強磁場科学研究センター 萩原政幸 電話06-6850-6685 hagiwara ahmf.sci.osaka-u.ac.jp
- 封筒に「先端強磁場科学研究センター准教授応募書類在中」と朱書し応募書類と書類のPDF(CD-ROM又はUSBメモリに保存)を併せて簡易書留で送付。応募書類原則不返却。本学は男女共同参画を推進している。

#### ■岩手大学理工学部教員

[I]

- 教授1名
- 物理・材料理工学科数理・物理コース(2016年度の全学改組により設置予定

の学科。文部科学省の認可結果等が当該公募の採用条件等に影響することはない。), フロンティア材料機能工学専攻(博士前期課程)

- (1) 数理学分野(応用数学分野, 物理数学分野), (2) 担当科目: 基礎ゼミナール, 複素解析, 応用解析学等の専門科目。
- 2016年4月1日
- なし
- (1) 博士号取得者。(2) 日本語で教育と大学運営に対応できる者。(3) 地方大学の現状を理解して教育・研究及び大学運営に対応できる者。(4) 数理学と物理学の連携に貢献できる者。
- 履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(学術論文とそれ以外を分類) ○学術論文別刷10編以内 ○研究業績概要, 着任後の教育と研究に対する抱負 ○科学研究費等外部資金取得状況 ○照会可能者2名の氏名、連絡先
- 2015年9月30日(水) 必着
- 020-8551盛岡市上田4-3-5 岩手大学工学部マテリアル工学科 松川倫明 電話019-621-6358 matsukawa iwate-u.ac.jp
- 書類審査及び面接(旅費自己負担)。封筒に「物理・材料理工学科数理・物理コース教員応募書類在中(教授)」と朱書し簡易書留で送付。書類返却不可。

[II]

- 助教1名
- 物理・材料理工学科数理・物理コース(2016年度の全学改組により設置予定の学科。文部科学省の認可結果等が当該公募の採用条件等に影響することはない。)
- 高エネルギー物理学(特に液体アルゴンTPCを用いた加速器ニュートリノ実験, 又は国際リニアコライダーでの先進的研究の推進に大きく寄与して頂ける方)。
- 4, 5, 8は[I]に同じ。
- 博士号を有するか着任時期迄の取得見込者。日本語が堪能な方。地方大学の現状を理解して教育・研究及び大学運営に対応して頂ける方。
- 履歴書 ○研究業績リスト(査読付学術論文とそれ以外を分類) ○主要学術論文別刷5編以内(コピー可) ○外部資金の取得及び受賞歴状況の一覧 ○研究経歴と研究概要, 今後の教育・研究に対する抱負(各約1,000字) ○推薦書又は照会可能者2名の氏名、連絡先

- 020-8551盛岡市上田4-3-5 岩手大学工学部電気電子・情報システム工学科 成田晋也 電話019-621-6374 narita iwate-u.ac.jp
- 封筒に「教員応募書類在中(数理・物理 助教)」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。

## 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9回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール

主催 応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会

日時 2015年9月1日(火)~3日(木)

場所 国立中央青少年交流の家(412-0006 御殿場市中畑2092-5)

内容 プラズマエレクトロニクス研究を始めたばかりの初学者を対象として、一流の講師陣を招きプラズマエレクトロニクスへの理解を深めて頂く為の講習会。プラズマ生成・制御等、幅広い分野に関する専門講座を開講。講述内容は、初学者が基礎学理をしっかりと理解した上で、当該分野における最新科学の話題にも触れられるように構成されており、経験豊富な講師陣からは、エピソード等を適時交えた講義を頂き、受講生の興味を喚起する。最新動向や指導者に必要とされる資質について学ぶ機会を提供する特別講座も行う。

定員 60名

参加費 48,000円, 学生22,000円

申込 <http://annex.jsap.or.jp/plasma/>より

参加申込締切 2015年7月30日(木)

連絡先 113-0034東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル7階 応用物理学会分科会担当 小田康代 電話03-5802-0863 Fax03-5802-6250 oda jsap.or.jp

### ■2015年日本液晶学会講演会・討論会

主催 日本液晶学会

日時 2015年9月7日(月)~9日(水)  
 場所 東京工業大学すずかけ台キャンパス  
 (226-8503横浜市緑区長津田町4259)

内容 会合内容: 液晶に関する物理・化学・基礎・応用全般に関する事柄の講演と討論。討論会前日の9月6日(日)に同会場で「液晶交流会」を開催。液晶交流会は「液晶サマースクール」の志を引き継いだ行事であり、液晶研究又は産業に携わる方々を対象とし、液晶に関わる化学、物理、評価等に関する基礎を学べるだけでなく、若手研究員の交流の場となる。

定員 500名

参加費 事前: 8,000円, 学生4,000円。当日: 10,000円, 学生5,000円

事前参加登録締切 2015年7月31日(金)(液晶交流会含)

連絡先 橋本雅司(hashi-m\_josai.ac.jp), 佐々木健夫(sasaki\_rs.kagu.tus.ac.jp)

### ■第6回社会人のための表面科学ワークショップ講座

主催 日本表面科学会

日時 2015年9月24日(木)~25日(金)

場所 東京理科大学森戸記念館第1会議室  
 (162-8601東京都新宿区神楽坂4-2-2 電話 03-5225-1033)

内容 大学で表面科学の基礎を学ぶ機会を逸した方やもう一度基礎から学び直したい方を主な対象として、表面がなぜ重要なのかを大学学部レベルの基礎知識を基に解きほぐして解説する。

定員 70名

参加費 30,000円, 学生9,000円(教科書代, 配布資料代, 消費税込)

参加申込締切 2015年9月18日(金)

連絡先 113-0033東京都文京区本郷2-40-13 本郷コーポレーション402 日本表面

面科学会事務局 電話03-3812-0266

Fax 03-3812-2897 shomu sssj.org

http://www.sssj.org

その他 詳細はhttp://www.sssj.org参照。

### ■第36回日本熱物性シンポジウム

主催 日本熱物性学会

日時 2015年10月19日(月)~21日(水)

場所 東北大学片平キャンパス(980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

内容 物質の熱力学的性質, 熱・物質輸送, 熱輻射, 熱物性の計測・応用, 物質・エネルギーと自然・生活環境に関する熱物性科学・工学及びその関連領域に跨った研究論文の発表講演会を開催。

参加費 事前: 6,000円, 学生2,500円。当日: 7,000円, 学生3,500円

連絡先 980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 東北大学多元物質科学研究所 安達正芳 電話022-217-5830 Fax 022-217-5178 info\_jstp2015.com

### ■2015年真空・表面科学合同講演会/第35回表面科学学術講演会・第56回真空に関する連合講演会

主催 日本表面科学会, 日本真空学会

日時 2015年12月1日(火)~3日(木)

場所 つくば国際会議場(305-0032つくば市竹園2-20-3 電話029-861-0001)

内容 [講演分類] 表面科学(表面物性, 表面反応, 表面構造, 表面分析・評価技術, 半導体・磁気・電子・光デバイス材料, 低次元・ナノ物質, ソフトマター, 環境・エネルギー材料, その他), 真空(真空科学・光学, 表面工学, 表面科学, 応用表面科学, 薄膜, プラズマ科学, ナノ構造, 電子材料・プロセス, その他)。

参加費 7,000円, 学生5,000円

参加申込 当日受付

講演申込締切 2015年7月21日(火)17時  
 要旨原稿受付締切 2015年9月24日(木)17時

連絡先 113-0033東京都文京区本郷2-40-13 本郷コーポレーション402 日本表面

面科学会事務局 電話03-3812-0266

Fax 03-3812-2897 taikai15 sssj.org

http://www.sssj.org

その他 詳細はhttp://www.sssj.org参照。

## その他

### 助成公募の標準様式 (1件500字以内)

○名称 ○対象 (1行18字で7行以内)

○助成内容 ○応募方法 (1行18字で4行以内) ○応募締切 (西暦年月日, 曜日)

○詳細問合せ先 (郵便番号, 住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等)

その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

### ■会員専用ページ: ユーザ名とパスワード

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

7月ユーザ名 : 15Jul

パスワード: Niels984

8月ユーザ名 : 15Aug

パスワード: Owen797

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			
7/7~10	第10回近接場光学に関するアジア太平洋会議 (APNFO10)	函館市(北海道)	69-11
7/10~11	第18回超イオン導電体物性研究会	徳島市	70-5
7/13~15	日本結晶学会講習会「粉末X線解析の実際」	東京	70-5
7/14~16	NIMS Conf.	つくば市(茨城)	70-3
7/22~24	第21回結晶工学スクール(2015年)	豊中市(大坂)	70-6
7/24	第53回化合物新磁性材料専門研究会	東京, 東海村(茨城)	70-6
7/27~30	1st INT. CONF. ON APPLIED SURFACE SCIENCE	上海(中国)	70-2

開催月日	名 称	開 催 地	会誌巻号または世話人
2015年			
7/27~31	第60回物性若手夏の学校	岐阜市	70-4
7/30~8/1	東京大学物性研究所短期研究会「ガラス転移と周辺分野の科学」	柏市(千葉)	70-5
8/3~6	Int. Workshop on Molecular Architectonics	斜里町(北海道)	70-5
8/3	市民講座「原子層科学~ベンゼンから、カーボンナノチューブ、グラフェンまで」	京都市	70-6
8/10~12	流体若手夏の学校2015	南知多町(愛知)	70-6
8/27	第5回X線反射率測定の見習い講習会	つくば市(茨城)	70-2
8/31~9/4	第27回コンピューショナル・マテリアルズ・デザインワークショップ	豊中市(大阪)	70-6
9/1~2	第31回分析電子顕微鏡討論会	千葉市	70-6
9/1~3	第9回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール	御殿場市(静岡)	70-7
9/7~9	第49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	北九州市(福岡)	70-6
9/7~9	2015年日本液晶学会講演会・討論会	横浜市	70-7
9/16~19	日本物理学会2015年秋季大会(関西大学)(物性)	吹田市(大阪)	日本物理学会
9/23~25	第63回レオロジー討論会	神戸市	70-5
9/24~25	TMU Int. Symp. on "New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure"	八王子市(東京)	70-4
9/24~25	第6回社会人のための表面科学ベーシック講座	東京	70-7
9/25~28	日本物理学会2015年秋季大会(大阪市立大学)(素核宇)	大阪市	日本物理学会
9/26~28	日本流体力学会年会2015	東京	70-4
9/28~10/2	5th Int. Conf. on Quantum Cryptography, Updating Quantum Cryptography and Communications 5	東京	70-4
10/12~16	9th Int. Conf. on Reactive Plasmas/68th Gaseous Electronics Conf./33rd Symp. on Plasma Processing	Honolulu	70-6
10/19~21	第36回日本熱物性シンポジウム	仙台市	70-7
10/25~30	10th Int. Symp. on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '15	松江市	70-2
11/2~4	第54回電子スピンスイエンズ学会年会	新潟市	70-6
11/5~7	生物・医学を物理する:放射線と物理, 医療を物理する, 生命システムのモデリング	京都市	70-6
11/10~12	第56回高圧討論会	広島市	70-6
12/1~3	2015年真空・表面科学合同講演会/第35回表面科学学術講演会・第56回真空に関する連合講演会	つくば市(茨城)	70-7
2016年			
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
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

## 編集後記

問題をかかえた建築物をリフォームして問題を解決するというテレビ番組がある。多くの場合、築年数の長い住宅で、狭く薄暗い中で暮らしている家族が抱える不満や不便を、匠と呼ばれるスペシャリストに依頼して解決するものである。無論、バラエティー番組なので、そこには演出のたぐいが入っているのだから、純粋なドキュメントではありえないのだけれども、問題を解決する過程をドキュメンタリータッチでまとめたものである。

多くのリフォーム依頼者が間取りが不便であるとか、使い勝手が悪いであるとかいった、漠然とした不満や改善の希望を抱えている。なかには相当長い時間にわたって、不満や不便を受け入れ、気にはなりつつも、忙しいとか、予算がないとかいった

事情で、行動に移せなかったのだろう、と推察されるものもある。

リフォーム前には、住居のみならず依頼者自身の表情にさえ暗さが漂うなか、匠の様々な工夫やアイデアと共に、リフォームが始まる。時には古い住宅を解体してみても初めて発覚するような構造的な欠陥が潜んでいる場合もあるので、注意が必要だ。そのような困難な状況を、匠がリフォームという制約の中で、依頼者の実情を斟酌し、緻密な計算の元に、自らの理想と現実(予算)を摺り合わせて、改革していく過程は、おもしろい。最後には、家も家族の表情も一転し、明るさを取り戻した情景が描かれる。

69巻1号からの会誌のリフォームはそこまでの大改革ではないのかも知れない。「解説」や「最近の研究から」をはじめとする良質な記事の数々を生み出してきた欄の

本質は変わらず、ただその枠組みに少しのエッセンスが加わった。そのエッセンスには、分野間の横串や、初学者への導入としての役割といった様々な成分が込められている。また、出版の形自体も、紙という長い歴史を持つデバイスに加え、ネットワーク上の電子情報という全く新たな特性を持つ形も加わった。

会誌にとって、編集委員長はいわば匠。編集委員長も代を重ね、私のご指導を仰いだ中では、森川雅博先生(お茶の水女子大学)は、3人目の匠となります。森川委員長を含め3人の委員長の鮮やかな指揮、優秀な編集委員の方々の熱のこもった議論、そして縁の下から支える事務局のみなさんのご活躍を、ここで詳しく解説したいところですが、大変残念なことに紙面が尽きてしまいました。リフォームが良い効果を発揮して、物理学界により明るい未来が訪れ

ることを祈りつつ筆をおきます。

板橋健太〈

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

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,

### 第 71 期 (2015 年 3 月 31 日~2016 年 3 月 31 日) 理事・監事

会 長	藤井保彦	副 会 長	柴田利明		
庶 務 理 事	板倉明子・小形正男・大槻東巳・香取浩子・小林研介・櫻井博儀・須藤彰三 松川 宏				
会 計 理 事	小林研介(兼任)・澤 博・松井哲男・松川 宏(兼任)				
会誌編集委員長	森川雅博	JPSJ 編集委員長	上田和夫	PTEP 編集委員長	坂井典佑
刊 行 委 員 長	小林富雄	監 事	波田野彰・三宅康博		

#### 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、学著協に委託しておりません。

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

日 本 物 理 学 会 誌 第 70 卷 第 7 号 (平成 27 年 7 月 5 日発行) 通巻 792 号

©日本物理学会 2015

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。