

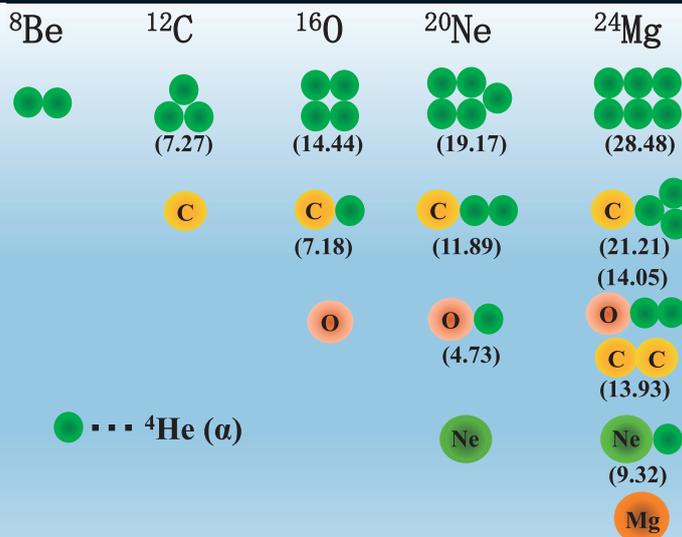
- 物理学70の不思議
- 原子核の「分子的」構造
- 脳組織の誘電率はなぜ大きいか
- 超弦理論のコンパクト化After Thirty Years
- 変わりゆく物理学研究の諸相

NO.

6

2016 | VOL. 71

B U T S U R I
日本物理学会誌



物理学会の歩き方

小林 研介 〈広報委員長 kensuke@phys.sci.osaka-u.ac.jp〉

私が物理学会に入会したのは、修士1年生の時、今から約20年前のことです。学会発表のために入会したのですが、当時の私にとっては「学会に所属すること」ということ自体が新鮮で、何となくスリリングにすら感じたことを、昨日のこのように思い出します。今、この巻頭言をお読みになっている皆さんの中にも、そのような若い方々がいらっしゃることでしょう。そこで、今回の巻頭言では、特にそのような方々を念頭に置いて、学会の活動のあらましと、学会と社会との関わりについて、ご紹介しましょう。

ここまでお読みになった皆さんの中には、「そもそも、この巻頭言は誰が書いているのだろうか」と思われる方もいらっしゃるかもしれませんが、巻頭言は10数名いる学会の「理事」が持ち回りで執筆しています。私は、昨年4月から2年間の任期で理事を務めており、この4月からは広報委員会の委員長を務めています。

対外的な広報活動については後述するとして、まずは、皆さんへの“広報”として、学会の活動の全体像をお話しましょう。学会の正式名称は「一般社団法人日本物理学会」であり、その「目的」は定款の中で以下のように定義されています：「物理学の学理およびその応用に関する研究発表、知識の交換、会員相互および内外の関連学会と連携協力を図ることにより、物理学の進歩普及を図り、もって学術の発展に寄与することを目的とする」(<http://www.jps.or.jp/outline/teikan/index.php#02>)。その目的を達成するために行うのが、私たちの学会の「事業」です。多くの事業の中でも、(1)物理学会誌の刊行、(2)年会・分科会の開催、(3)英文論文誌(JPSJとPTEP)の刊行、の3つが(予算の点でも)大きな比重を占めています。その他にも、種々の会

員向けサービスを行っています。この4月に導入された「マイページ」はサービス向上のための取り組みの1つです。会員の活動を全国的に支援するために、北は北海道から南は九州まで、10箇所の支部が設けられています。

学会は、また、社会的存在として、物理学に携わる人々を代表する「顔」の役割を担っています。そのような立場から、学会は国内外の様々な学会と連携したり、国際・国内会議の共催・協賛等を行ったり、物理教育・男女共同参画に関する議論や関係団体・機関への働きかけなどを行っています。

実は、物理学会は、上記のような活動だけでなく、より一般の方々に向けたサービスも活発に行っています。上の定義にあるように、物理学の進歩だけでなく、その普及を図ることも、学会の大事な使命だからです。私が担当している広報委員会はそのような活動を代表するものです。ここ最近、梶田先生のノーベル物理学賞、113番元素命名権獲得、重力波の直接観測など物理学に関する大きなニュースが相次ぎました。学会は、このようなニュースをすかさずホームページで取り上げ、専門家の立場から信頼できる内容を提供しようと努力しています。「物理のことを正しく知りたければ、やっぱり物理学会だね!」という風に広く認知されることを願っているのです。

さらに、学会は科学セミナー・市民向け講演会・物理教室(小中学生対象)・Jr.セッション(高校生対象)等の開催を行っています。これらは、一般の方々にも物理学の面白さを体験してもらいたい、という狙いで開催しているものです。実際に、上記のイベントには、幅広い年齢層の方が参加され、好評を博しています。これらは、(広報委員会の担当ではありませんが)学会が大切にしている広報活動の一環です。

大学や公立の研究機関で行われている研究の大部分は、国民の税金によって支えられています。なぜ、物理学の研究に税金を投じるのか? このような国民の疑問に答えるためにも、広報活動を丁寧に行う必要があります。私は、物理学に携わるものとして、日本社会における物理学のプレゼンスを維持しながら、物理学という学問を発展的に次世代に継承していくことこそが、学会の最も重要な使命だと考えています。

以上、物理学会のあらましを駆け足で紹介してきました。活動が多岐にわたっているため、全貌が分かりにくいことも事実です。学会ホームページの「学会概要」に、「主な活動」「沿革」「組織図」などについて詳しい説明が掲載されています(<http://www.jps.or.jp/outline/index.php>)。また、「事業・収支」のページには2001年度以降の事業報告・収支報告等が公開されています。皆さんの年会費や参加登録費がどのように学会の活動に活かされているのか、ご覧いただければと思います。

物理学会は、約17,000名の会員を抱える国内有数の学会です。東京都文京区湯島に置かれている学会事務局には専属の職員が15名おり(2016年3月時点)、巨大な組織を支えています。また、ここまで述べてきた多彩な活動には、毎年、約900名におよぶ会員の方々が(基本的には無給で)関わっています。本稿をご覧の皆さんにも、ぜひ、物理学会の活動と学術的・社会的使命をご理解いただければ幸いです。同時に、設立70周年・創立140周年という歴史ある本学会が、物理学に携わる皆さんの役に立つ存在であることができると願っています。物理学会は皆さんのそばにあります。

(2016年3月13日原稿受付)

巻頭言 Preface

物理学会の歩き方

Our Physical Society of Japan

小林研介 …… 345

Kensuke Kobayashi

物理学70の不思議 70 Challenges and Mysteries in Physics

ブラックホールは宇宙一明るい？ 相対論的ジェット之谜	348
テトラクォーク？ ペンタクォーク？ グルーボール？	348
マテリアルの性質を光で変える？ 光誘起相転移の挑戦	349
核融合エネルギー発電は実用化するか？	349

現代物理のキーワード Trends

原子核の「分子的」構造

Alpha Cluster States in Nuclei

板垣直之 …… 350

Naoyuki Itagaki

交流 Interdisciplinary

脳組織の誘電率はなぜ大きいのか

A Novel Account for the Large Dielectric Constant of Neural Tissue at Low-Frequency

宮川博義, 青西 亨 …… 352

Hiroyoshi Miyakawa and Toru Aonishi

解説 Reviews

超弦理論のコンパクト化 After Thirty Years

String Compactification: After Thirty Years

渡利泰山 …… 362

Taizan Watari

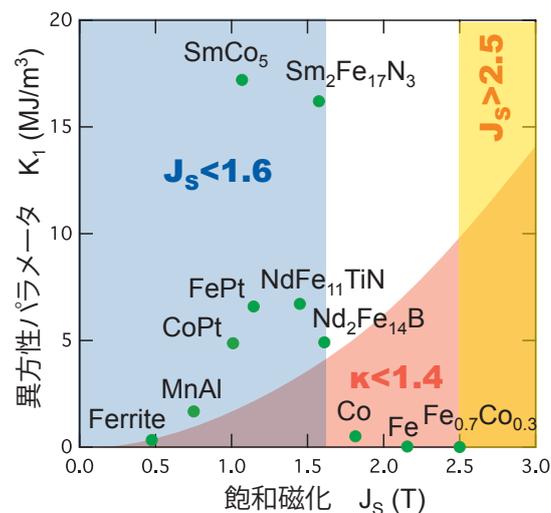
最近の研究から Researches

量子推定理論による不確定性関係の定式化

Formulation of Uncertainty Relation by using Quantum Estimation Theory

渡辺 優, 上田正仁 …… 372

Yu Watanabe and Masahito Ueda



話題—身近な現象の物理—(磁石の秘密)

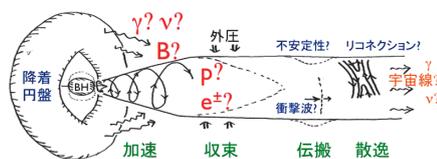
高性能な永久磁石の開発は、自家用車のモーター(左図)をはじめとした多くの応用で重要な課題となっている。右図は磁石材料の性能をまとめたものである。高性能な永久磁石材料としては、保持力に重要な磁気異方性(右図縦軸)と、飽和磁化の大きさ(右図横軸)の両方が大きいことが望ましい。これまで知られているネオジウム磁石などの磁石材料に対して、ターゲットとなる新規の永久磁石材料は、右図の白い領域に位置するものである。(左図:トヨタ自動車株式会社提供)

15

ブラックホールは宇宙一明るい？ 相対論的ジェット之谜

ブラックホール (BH) からは光すら出てこれない。これは一般相対性理論の有名な帰結である。しかし、BHは宇宙で最も明るい天体として、電波からガンマ線にわたって観測されている。とくにBHからほぼ光速で放出されるジェットは、前方から見ると非常に明るい。巨大な星を突き破るジェットからのガンマ線バースト、太陽の百万倍以上重い超巨大BHから放出される活動銀河核ジェット、連星系であるマイクロクェサー、星を潮汐破壊するBHからのジェットなど、さまざまな系でジェットが実現されている。ジェットは宇宙線の起源、銀河形成、超新星爆発、宇宙論なども密接に関係し、その物理的機構の解明は現代宇宙物理学における最重要問題の1つになっている。

問題は、重力エネルギーをいかに変換するかである。BHに降着した物質は土星のような円盤をつくり、重力エネルギーを解放する。しかし、そのままでは相対論的な(光速に近い)運動をつくれぬ。解放したエネルギーを少量の物質に渡す必要がある。それを介するのが放射なのか磁場なのか、物質が陽子なのか電子・陽電子なのか、熱い議論が続く。最も有力な機構の1つが、ブランドフォード・ツナジェット機構である。これはBHの回転エネルギーを



引き抜く過程の一種で磁場を用いる。磁場の起源・加速・収束・伝搬・散逸は互いに関係し合い、現象は何桁にもわたる。BHが物質を吸収することが、相対論的運動を実現するために本質的である可能性が高い。

ジェットの謎はさまざまな挑戦の原動力になっている。たとえば、スーパーコンピュータを含む数値計算は、磁場や放射輸送を実装しはじめている。また、電波干渉計はジェットの姿を解像しつつある。高エネルギーガンマ線の観測はBHより小さいフレアをとらえはじめており、数年後にCTA (Cherenkov Telescope Array) が感度を約10倍にする。最近IceCubeが発見した高エネルギーニュートリノは、ジェット起源の可能性もある。さらに、KAGRAなどが重力波を検出したときに、源である中性子星連星合体からのショートガンマ線バーストを探索する連繫が進んでいる。ジェット研究の未来も明るい。

井岡邦仁 (KEK), 会誌編集委員会

16

テトラクォーク？ ペンタクォーク？ グルーボール？

中性子や陽子などのバリオンは3個のクォーク (q^3) で表され、パイ中間子などのメソンはクォーク・反クォーク対 ($q\bar{q}$) で表すことができるという考え(クォークモデル)は、ゲルマンらによって1960年代に提案された。その後、このモデルを自然に説明するために、南部らとグリーンバーグによって(光の3原色を模した)カラーの自由度が導入された。今日、量子色力学(QCD)として知られている理論のはじまりである。ちょうどスピン1/2の2粒子がスピン0または1の状態をつくるように、 q^3 や $q\bar{q}$ は白または色のついた状態をつくる。QCDによれば、このうち白の状態のみがバリオンやメソン(あわせてハドロンという)として単体で存在できるというのである。 q^3 型や $q\bar{q}$ 型だけでなく、クォークの数を増やしたりグルーオンを加えたりしても、うまく組み合わせると、この「白」の条件を満たすことができる(それらをエキゾチックハドロンとよぶ)。しかし、その存在は実験的に確認されていなかった。

クォークモデルの提案から40年ほど経った2003年、高エネルギー加速器研究機構で、アップとボトムクォークからなるBメソンをつくる実験が行われた。そのBメソンが弱い相互作用で崩壊したときに生成する粒子のなかに、 $qq\bar{q}\bar{q}$



型と考えられるメソン(テトラクォーク)が見つかった。この発見を皮切りに、とくにチャームやボトムという重い種類(フレーバー)のクォークを含む系で、 $qq\bar{q}\bar{q}$ 型のメソンや $qqq\bar{q}$ 型のバリオン(ペンタクォーク)が見つかりはじめた。

重いクォークのまわりに複数ついた軽いフレーバーのクォークのふるまいと、軽いクォークでできた通常のハドロンとを比べると、これまで隠れていたカラーが「白」でない2粒子、3粒子系の性質が新たに見えてくる。一方、グルーオンは電磁相互作用における光子と異なり、自身がカラー電荷をもち、それら同士も強い相互作用をするため、クォークとともに構成子となってハイブリッド状態のハドロンをつくる可能性がある。さらにグルーオンのみでできたハドロン(グルーボール)も存在するかもしれない。

これらの未知のエキゾチックハドロンの探索とその解明は、実験・理論の挑戦となっている。それらを統一的に記述する試みから、シンプルなのに本質的に非摂動的で複雑なQCDの理解がいつそう深まると期待される。

会誌編集委員会



17

マテリアルの性質を光で変える？ 光誘起相転移の挑戦

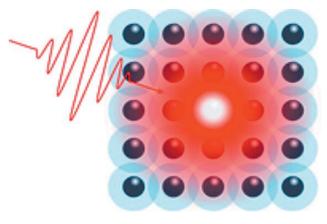
固体物質に入射した光子が多数の原子・分子の変化を生み出し、巨視的な構造変化や電子状態変化が発生する現象は、「光誘起相転移」とよばれている。この現象のおもしろさは、光励起状態が原子や電子の間に働く相互作用を介し、高い効率で多数の原子・分子の状態を変化させることにある。その結果、物質の色や構造から、誘電性や磁性、伝導といったエレクトロニクス機能まで、劇的な相変化を我々に見せてくれるのである。光による非接触なスイッチング現象は応用上も重要であるが、温度変化や化学ドーピングでは見られない新たな物質相を開拓するという、従来とは大きく異なる物性研究のアプローチを可能にした。

近年、光誘起相転移の研究は、フェムト秒レーザーの出現によって新たな局面を迎えている。フェムト秒レーザーとは、時間幅が100フェムト秒(1フェムト秒は 10^{-15} 秒)程度の光パルスに多数の光子が集中した強力なレーザーである。このような短パルス光は、温度換算で実に1万度にも達するエネルギーを、原子や分子がひとゆれするより短いわずかな間に集中して物質に与えることができる。この利点を生かし、フェムト秒スケールで状態のオン・オフができる究極の超高速スイッチ(ベタヘルツ固体スイッチ)

の探索も現在行われつつある。

そのようなフェムト秒スケールでの電子相スイッチの起源を調べる実験手法も、研ぎ澄まされてきている。

測定的时间分解能は、フェムト秒からアト秒(10^{-18} 秒)に高速化されつつある。光電子分光、X線や電子線パルスによる構造解析もフェムト秒スケールで行えるシステムが、世界中で競うように建設されている。理論的な取り組みも進んできており、光照射が系のハミルトニアンをどう実質的に変えているのかを計算する試みも行われている。これまで静的な性質を調べることで進化してきた固体物理学は、「時間軸」という新しい座標を得たことで、面目を一新しようとしている。レーザー分光技術の進展をベースに実験と理論が一体となり、新現象の発見とその理論的理解という、現象論と知識の体系化の両面から、固体物理学の謎として残っているダイナミックな側面を理解していく、新しい挑戦が進行している。



誌編集委員会

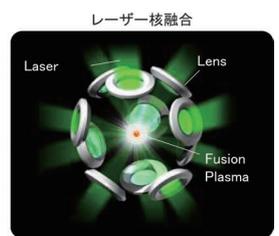
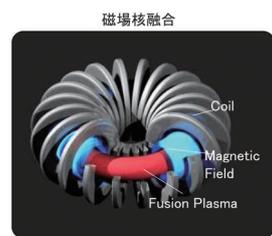
18

核融合エネルギー発電は実用化するか？

数十億年もの間、太陽が輝き続けるためには、強力かつ持続的なエネルギー源が必要である。太陽のような高温・高密度のガス球は、光を放出して温度が冷えれば圧力が下がるため、重力により収縮する。この収縮で解放される重力エネルギーで輝いていると考えられたこともあったが、それでは太陽の寿命は数千万年ということになり、すでに放射性元素を用いて推定されていた地球の年齢と矛盾した。

1915年、水素の原子核4個はヘリウム原子核よりもわずかに質量が大きいことがわかった。そのため水素の原子核4つが核融合してヘリウムの原子核1つに変われば、その質量差から $E=mc^2$ だけのエネルギーが発生するはずだ。太陽の内部は、正の電荷を持つ原子核と負の電荷を持つ電子が分かれたプラズマ状態になっている。はじめは、陽子間のクーロン力に打ち勝って核融合が起こるには、内部の熱エネルギーでは低すぎると反論された。その後、量子力学が発展して、原子核を所定の距離に近づければ、量子トンネル効果で核融合反応が所定の確率で起こることがわかり、これこそが太陽のエネルギー源だと考えられるようになった。

1950年ごろ、この核融合反応を制御して発電炉をつくるのが提案された。この核融合炉計画はよく「地上の太



(出典) 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

陽」というキャッチフレーズで端的に紹介される。原子核をビームにして互いに衝突させる方法では、ビームを十分高密度にできないのでうまくいかない。高温・高密度プラズマを実験装置内で生成し、核融合反応を長時間維持する必要がある。現在ではおもに、超伝導コイルによる高磁場でプラズマを閉じ込める方法と、高出力レーザーを用いて燃料を爆縮させる方法の2つが研究されている。

現状、磁場閉じ込め方式の1つであるトカマク型では、原理実証(科学的実証)を終了し、工学的実証段階(持続的核融合反応の実証)にある。レーザー方式では、核融合炉の選択肢を拡げる観点から、学術研究に重点をおいて研究を推進している。

誌編集委員会

原子核の「分子的」構造

Keyword: 原子核のアルファクラスター状態

1. アルファクラスター構造の再認識

原子核には、陽子2つ、中性子2つからなるアルファ (α) 粒子を単位とした、いくつかの部分系 (クラスター) に分けて考えられる「分子的」な状態が存在し、それらをアルファクラスター状態と呼ぶ。重い原子核は自発的にアルファ崩壊を起こし、原子からアルファ線が放出される現象はラザフォードによる原子核の発見以前より知られていたのであるから、この「原子核の基本的構成要素がアルファ粒子である」とする描像は、一見至極自明であるかのように思われる。しかし、1950年代より、原子核を構成する陽子や中性子 (核子) は、それ自身の相互作用によってある一体ポテンシャルを作りだし、その中を独立粒子的に運動するというシェル模型の描像が確立し、以後「核子の独立粒子運動」が原子核構造の標準的な理解として定着した。このため、4つの核子が空間的に強い相関を持つ分子的なアルファクラスターは、20世紀中ばには原子核構造の標準的描像とは考えられなくなった。

20世紀後半から、「核子の独立粒子運動」という描像とは対極的なクラスターと呼ばれる分子的構造に対する関心が再び高まっていく。最も有名な例はいわゆるホイル状態の提案と発見である。質量数 (核子数) 5と8の原子核は安定に存在しない。そのため、元素合成の際には、これらの壁を乗り越えて軽い原子核から重いものへと反応が進展する必要がある。ホイルは、3つのアルファ粒子から ^{12}C 原子核というプロセスが、星の中での元素合成で決定的に重要であることを指摘し、炭素の存在比を説明するには、 ^{12}C が3つのアルファ粒子へと分裂する閾値エネルギーのすぐ上に、3アルファ構造を持った共鳴状態が存在するはずであると予言した。この状態は、 ^{12}C の第2励起状態としてすぐに発見され、今日ではホイル状態と呼ばれている。ホイル状態がまさにこのエネルギーに存在することが、我々の世界の物質構成に決定的な役割を果たしている。

1960年代に入ってクラスター構造が再び注目を集めた理由に、このような、「核子の独立粒子運動」に立脚したシェル模型では単純に理解できない状態が発見されたことが挙げられる。例えば、非常に一般的な元素である酸素でも、その原子核 (^{16}O) の最初の励起状態が単純なシェル模型では理解できず、1960年代には「ミステリアスな状態」と呼ばれていたが、やがてこの状態は $^{12}\text{C}+\alpha$ クラスター状態として理解されるに至った。このように原子核が異なる2つのクラスターから構成される場合、クラスター間の相対運動を記述する波動関数の軌道角運動量の偶奇性

に対応して、系は正・負パリティの2つの回転帯を持つ。¹⁾ このような、正・負パリティの回転帯がエネルギー的に近接して「反転二重項」を形成することが、系が2種のクラスターからなる証拠であり、 ^{16}O の $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造のみならず、 ^{20}Ne ($^{16}\text{O}+\alpha$) や ^{44}Ti ($^{40}\text{Ca}+\alpha$) など様々な例が観測された。

2. クラスター状態の出現機構

クラスター構造は、原子核が対応した部分系に分離可能となる閾値エネルギーの近傍に現れると考えられる。これを「閾値則」と呼ぶ。それ以下のエネルギーでは、クラスター間の引力により原子核は一体となり、そこでは核子は通常の「独立粒子運動」を行うからである。原子核を励起すると、 ^4He の束縛が非常に強いために、すぐにアルファクラスターを分離可能となる閾値エネルギーへと達し、アルファクラスター状態はその近傍に現れる。例えば、 ^{12}C から1つの核子を取りだすには20 MeV程度 of エネルギーが必要であるが、逆に、3つのアルファクラスターへの分離はわずか7 MeV程度で可能であり、ここにホイル状態が現れる。このことを一般化し模式的に表したのが図1の池田ダイアグラムである。²⁾ これは、原子核がどの励起エネルギーでどのような部分系へと分離可能となるのか、その閾値エネルギーの実験値をMeV単位で示したものである。図で示された分子的構造が対応した閾値エネルギーの近傍に現れると期待され、1960年代からは重イオン加速器の進展により、アルファクラスターのみならず、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ や $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ など様々なクラスター構造が実験的に確認されている。

原子核でこのようなクラスター構造が出現するためには、アルファ粒子のような強く束縛した部分系が存在し、かつそれらのお互いの相対的な相互作用は逆に弱いという条件が必要であるが、これをもともとの核子間に働く核力の性質から理解する試みもなされている。例えば、核力には π 中間子交換を主な起源とするテンソル力の成分があるが、 ^4He に対してはテンソル力は非常に強く、この強固な束縛がアルファクラスターを良い部分系の単位たらしめる。また、池田ダイアグラムに現れる ^4He 、 ^{12}C 、 ^{16}O などはすべてアイソスピンの値として0を持つ。アイソスピンが0の系の間には、核力の中でも最も重要な、 π 中間子1つの交換が直接は作用しない。これが部分系同士の相互作用が弱くなり、分子的構造が保たれることの一因と考えられる。

池田ダイアグラムで表される閾値エネルギー近傍に現れるクラスター状態は、クラスターがお互いに緩く相互作用

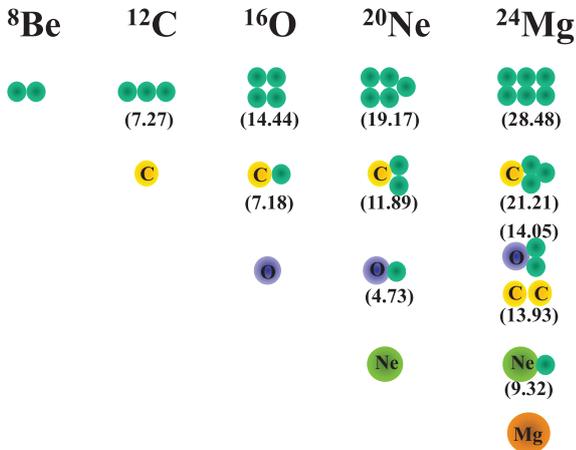


図1 池田ダイアグラム (^{24}Mg までの最初の部分).

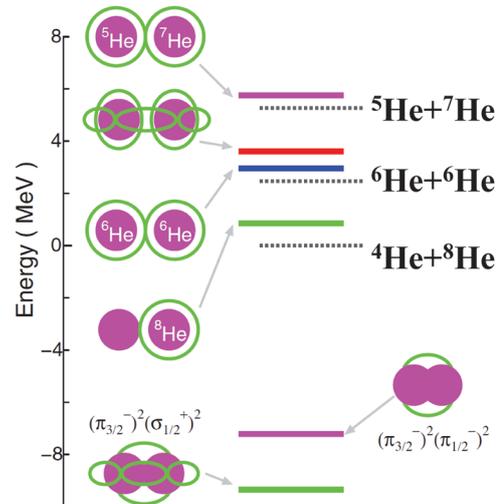


図2 ^{12}Be に現れる様々なクラスター状態. 文献5より引用.

しており、クラスターの相対的な空間配置は必ずしも幾何学的な意味で固定されていない。ホイール状態は代表的な例であり、3つのアルファクラスターの様々な幾何学的配置を量子力学的に重ね合わせることで表される。このような状態は「アルファクラスターのガスの状態」と呼ばれ、³⁾ これを特徴づける模型波動関数として2000年にTHSR波動関数が提案され、⁴⁾ これを用いて ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg など様々な系が現在非常に精力的に研究されている。

一方で近年、 β 崩壊に対して不安定な、中性子過剰核の物理が劇的に進展している。中性子過剰核では、中性子がクラスター間の糊の役割を果たし、ガスのクラスター構造とは対極的な、より幾何学的なクラスター構造が出現することが理論・実験の双方から議論されている。例えば、 ^8Be は束縛せず、直ちに2つのアルファクラスターへと分離するが、そこに中性子が1つ加わった ^9Be は中性子の糊の効果でわずかに束縛する安定な原子核であり、2つのアルファクラスターはある相対距離を保って幾何学的な構造を持つ。図2は2つのアルファクラスターのまわりに4つの中性子が運動する ^{12}Be の例である。ここでは、中性子が両方のアルファクラスターの周りを運動する「分子軌道的状態」や、片側のアルファクラスターの周りにのみ束縛された「原子軌道的状態」、さらに両方の対称性が混じり合った状態など、様々なクラスター状態が励起エネルギーの関数として現れる。⁵⁾ さらにアルファクラスターの数が増えたC同位体においても、3つのアルファクラスターが正三角形や直線など様々な幾何学的な配置を持った状態が、中性子の糊の効果で安定化することが示されている。⁶⁾ これらのクラスター状態を同定するための観測量として、最近、基底状態から励起状態へのアイソスカラー単極子遷移確率

が良い指標となるという議論がさかんになされている。⁷⁾

3. 原子核構造の統一的理解

原子核は、それぞれの核子が一体ポテンシャル中を独立に運動するシェル状態や、分子的なクラスター状態など、様々な異なった側面を持ち、励起エネルギーの関数としてその形状を変化させる。特に、原子核系で非常に強く作用する核力のスピン・軌道力項が、アルファクラスターを壊しそれぞれの核子の独立粒子運動を促進する役割を果たしており、シェル構造とクラスター構造の競合・混合を支配している。両者を含む原子核の統一的理解の構築へ向けて、精力的な研究が行われている。また近年、原子核の構造模型に適合させた有効相互作用ではなく、核子-核子散乱実験から決められる本来の核力を用いた「第一原理核構造計算」が世界各地で進展している。第一原理計算においてクラスター状態の記述が可能であるかどうかは、最近の大規模計算の進展にも関連した大きなテーマであり、原子核構造の統一的理解へ向けて様々な努力が続けられている。

参考文献

- 1) H. Horiuchi, *et al.*: *Theor. Phys.* **40** (1968) 277.
- 2) K. Ikeda, *et al.*: *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **E68** (1968) 464.
- 3) E. Uegaki, *et al.*: *Prog. Theor. Phys.* **57** (1977) 1262.
- 4) A. Tohsaki, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 192501.
- 5) M. Ito, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 182502; M. Ito: *Phys. Rev. C* **85** (2012) 044308.
- 6) 板垣直之, *et al.*: *日本物理学会誌* **64** (2009) 840.
- 7) T. Kawabata, *et al.*: *Phys. Lett. B* **646** (2007) 6.

板垣直之 (京都大学基礎物理学研究所 itagaki@yukawa.kyoto-u.ac.jp)
 (2015年11月30日原稿受付)

脳組織の誘電率はなぜ大きいのか



宮川 博義

東京薬科大学生命科学部
miyakawa@toyaku.ac.jp



青西 亨

東京工業大学総合理工学研究科
aonishi@dis.titech.ac.jp

脳機能を探る目的で神経組織から磁気共鳴機能画像法 (fMRI: functional magnetic resonance imaging), 陽電子放射断層撮影 (PET: positron emission tomography), 脳波 (EEG: electro-encephalogram), 脳磁図 (MEG: magneto-encephalogram) など様々な巨視的信号が記録されている。これらを用いた脳科学の研究成果が日常的にメディアに登場し、一見脳機能の理解が進んでいるようであるが、現実には脳科学はまだまだ未熟な段階にある。窮屈になってきた社会状況のためか、精神疾患の患者が増えているが、疾患の原因の解明あるいは治療法の開発に脳科学はまだしっかりとした貢献ができていない。

問題の一端は、細胞・分子レベルの微視的な知見と、脳・個体レベルの巨視的な知見との乖離にあるように思われる。知覚・認知・意図・意識等の高次脳機能を支えているのは、脳を構成するニューロンのミリ秒レベルの速い電気的活動であろう。ところが fMRI, PET 等はニューロンの速い活動を捕らえているわけではなく、脳活動にともなうエネルギー代謝に関わる信号を検出しているに過ぎず、十分な時間的精度を持たない。それに対し、EEG および MEG はニューロンの速い電気的活動に由来する信号を検出・記録することができる。しかし、得られる信号はやはり巨視的であり、微視的なニューロン活動との関係は不明である。例えば総合失調症の原因解明や診断

のために、発症にともなう脳波の異常を見つめようとする試みがなされていて、P300 やミスマッチ陰性電位 (mismatch negativity) といった脳電位が検討されている。残念ながらこれらの電位が、脳のどの部位の活動に起因するものであるかは明瞭でなく、ニューロンレベルのどのような異常と関連しているかもはっきりしない。脳波あるいは細胞外電位から電流源を求め、その部位のニューロン活動との関係が明確になれば研究が大きく進むのだが、それができないという現状にある。

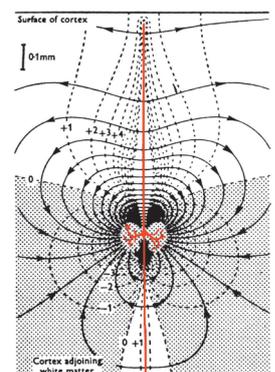
通常、神経組織の電流と電位との関係にはオームの法則が成り立ち、誘電率を考慮する必要はないと仮定して脳波の逆問題を解いている。ところが、生体組織が数 Hz 程度の低周波領域において極めて大きな誘電率 (比誘電率 10^6 以上) を示すことが古くから知られている。巨視的な脳波信号と微視的なニューロン活動との関係が不明確なのは脳組織の誘電率を考慮していないことに一因があるのかもしれない。

我々は、ある程度の長さの突起を持った細胞が生体組織中に存在すると、細胞膜の特性とケーブル特性により低周波において大きな誘電率を示しうることを理論的研究により見出した。さらに、その研究過程において、電気的な意味での「細胞外スペース」の描像を明確にし、脳波の解析の際に誘電率をあらわに考慮して細胞外電位と電流源との関係を示す一般的記述を得た。

—Keywords—

ニューロン：
ニューロンは神経インパルスと呼ばれる急激な膜電位変化を示し、神経系における情報処理の主役と考えられている。人の脳には約 900 億個のニューロンが存在するとされている。

脳波：
頭皮に置いた表面電極や脳内に刺入した深部電極を用いて細胞外電位を記録すると、電位が変動していることがわかる。これを (自発性) 脳波と呼ぶ。脳波はニューロン集団の電気的活動によって生ずると考えられており、脳活動の指標となっている。電位変動の周波数帯によって α 波 (8~13 Hz), β 波 (13 Hz 以上), θ 波 (4~8 Hz) などと分類される。



錐体ニューロンの細胞体では内向きに、樹状突起では外向きに細胞膜を横切って電流が流れる際の細胞外電位の理論計算。実線は電流、点線は等電位線を示す。無限遠を基準として負電位の領域に影をつけてある。上の線は脳表面。細胞外空間は均一であり、誘電率の寄与は無視できると仮定している。[O. D. Creutzfeldt: *Cortex Cerebri* (Oxford Univ. Press, 1995) p. 153, Fig. 4.9 より改変]

1. 脳波の逆問題

脳表(頭蓋骨上)の表面電極や、脳内に差し入れた深部電極から脳波が記録できる。脳の様々な状態に対応して特徴的な周波数での活動が観察される。脳波は通常、その主要周波数帯によって分類される。デルタ波(4 Hz以下)、シータ波(4-8 Hz)、アルファ波(8-13 Hz)、ベータ波(13 Hz以上)などがあり、さらにこれより高い周波数域の活動をガンマ波(30-50 Hz前後)などと呼ぶ。視覚刺激や聴覚刺激に応じて一過性に発生する脳波は誘発電位あるいは事象関連電位(ERP: event related potential)と呼ばれる。P300やミスマッチ陰性電位などは事象関連電位である。深部電極を用いた電位記録は細胞外電位あるいは局所場電位(local field potential)とも呼ばれる。

脳波を生成する原因となっている脳活動の正体は、ニューロンが生成する膜電流であろうと考えられている。なかでも皮質錐体細胞のように、樹状突起が同じ方向を向いて並んでおり、樹状突起上の同じ部位に同期してシナプス入力を受けているニューロンの生成する電流が大きな寄与をすることを考えられている。脳波等の細胞外電位は、記録が容易なために脳活動を観察するための手段として広く用いられている。細胞外電位記録を基に、その起源となる電流を推定する逆問題(inverse problem)の解法の一つとしてピッツ(W. Pitts)¹⁾やニコルソン(C. Nicholson)²⁾によって開発された電流源密度(CSD: current source density)解析という手法がある。細胞外電位を ϕ_{ext} 、細胞外の伝導率を σ として、電流密度 I_{CSD} を次式のようにして求めるものである。

$$\sigma \nabla^2 \phi_{\text{ext}} = -I_{\text{CSD}} \quad (1)$$

多くの物理学者もCSD解析法あるいはそれに類する手法を用いてEEGの電流源の推定を行ってきたが、微視的なニューロン活動との関係は不明なままである。たとえばEEG解析の専門家のヌネス(P. Nunez)はその古典的名著*Electric fields of the brain*のなかで「...scientists are properly concerned with details of the very neural interaction mechanisms that we have so glibly glossed over. EEG scientists working at macroscopic scales have a different set of complications to worry about.³⁾と正直に述べている。「そここのところは検討していない」というのである。このような状況の一因は、逆問題を解く際にニューロンの発生する電流が拡散する空間、通常「細胞外スペース」と呼ばれる空間の実体の検討が不十分であったことにありと筆者らは考えている(MEGはさらに深刻な状況にあり、単一ニューロンレベルにおいてさえ、どのような現象が磁気信号として検出されているのかを理解できていない)。

2. 生体組織における誘電分散

脳組織は、ほぼニューロンとグリアという2種類の細胞の集まりであると考えてよい。ヒトの脳ではそれぞれ800億個ほど存在するとされている。図1はラット大脳皮質の

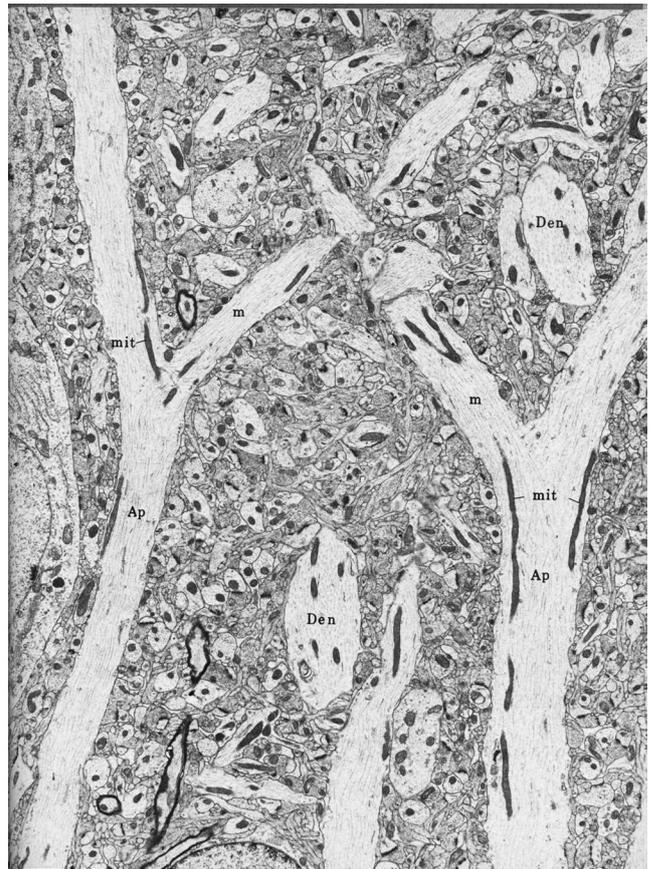


図1 ラットの皮質神経組織の電子顕微鏡像：錐体細胞の尖頭樹状突起(Ap)およびその断片(Den)、グリア細胞、血管、小胞体、ミトコンドリア(mit)、微小管(m)などがみられる。[文献4より許可を得て転載]

電子顕微鏡像であり、組織の大部分をこれらの細胞が占めていることがわかる。これらの細胞と細胞の間の空間を細胞間隙という。電子顕微鏡像では細胞間隙が見えていないように思えるが、これは電子顕微鏡での観察のために標本にほどこした処理のためであって、細胞間隙の割合は生きた組織ではおよそ20%であるとされている。

細胞の膜は約50オングストロームの厚みを持つ脂質二重層であり、イオンや極性分子を通さない。細胞内外には約300 mOsmの浸透圧の電解質溶液があり、その主なイオン種は Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- などである。細胞膜表面、細胞内原形質には多様な膜タンパクや細胞骨格を形成するタンパク質および浮遊タンパクなどがあり、その多くは電荷を帯びている。このような組織の巨視的な誘電率および伝導率は、組織に細胞外電流刺激を与えた際の細胞外電位変化の大きさと位相のずれの測定から求めることができる。

様々な誘電体において誘電率と伝導率が周波数に依存することが知られており、誘電分散(dielectric dispersion)と呼ばれている。生体組織は顕著な誘電分散を示すことが古くから知られており、1 GHzよりも高い周波数領域では比誘電率は 10^2 以下の小さな値だが、1 kHzよりも低い周波数では 10^6 を超える大きな値を示す(図2)と報告されている。⁵⁻⁸⁾ ガブリエル(S. Gabriel)ら⁹⁾は脳灰白質の比誘電率は10 Hzにおいて 10^8 程度の値であると報告している。こ

これらの比誘電率の値は純水の比誘電率（80程度）や脂質の比誘電率（5程度）に比べて極めて大きいものである。

誘電分散の原因は様々な緩和時間の物理過程による分極であり、1 GHz以上の高周波領域における誘電分散 (γ -dispersion) は、ピコ秒からナノ秒の緩和時間を持つ高速の配向分極が原因であると理解されている。¹⁰⁻¹² 低周波における誘電分散のメカニズムはまだ完全には理解されていない状況だが、異なる誘電率を持つ誘電体の界面の存在が原因の一つとして考えられており、**界面分極理論** (interfacial polarization theory) あるいは **Maxwell-Wagner 分極理論** と呼ばれる理論で説明されている。^{7, 12, 13} この理論によれば、電解質溶液の中に油やミセルのように誘電率と伝導率の異なる誘電体が分散的に混ざり合った浮遊液では、周波数が低くなるにしたがって誘電率が大きくなり、浮遊液全体の実効的誘電率は各成分の誘電率よりも大きくなる。パウリ (H. Pauly) ら¹⁴ は、この扱いを膜に包まれた球状の誘電体に拡張して誘電分散を説明し、脂質からなる薄い細胞膜の存在が MHz から kHz の周波数領域での誘電分散 (β -dispersion) の原因であるとしている。しかし、脳波の解析に重要な 1 Hz ~ 1 kHz の領域において、界面分極理論では $10^2 \sim 10^3$ 程度の比誘電率しか得られない。より低周波における誘電分散 (α -dispersion) の機序としては**対イオン分極理論** (counter-ion polarization theory) が提唱されている。^{7, 15} しかし、脳組織のように 100 ミクロン程度の長さの突起が密に存在する条件では、対イオン分極理論は 1 Hz 以下の誘電緩和の説明は可能なものの、1 Hz ~ 1 kHz の領域の誘電緩和の説明できるか否かはまだ不明である。

細胞間隙の媒質や細胞内原形質の誘電率・伝導率は電解質組成や生体高分子等の存在によって決まり、一方、細胞膜の誘電率・伝導率は膜脂質や膜タンパクの性質によって決まるであろう。しかし、多くの細胞が細胞間隙を隔てて接している生体組織の巨視的な誘電率・伝導率は、それらの単純な平均などではなく、細胞の形態や組織の構築に大きく依存し、構成要素の値とはかけ離れた値となっていて

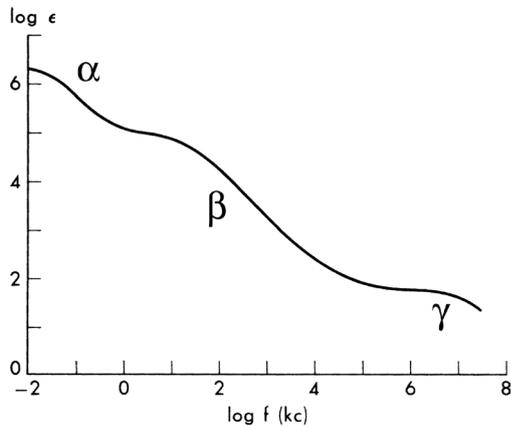


図2 赤血球浮遊液の示す誘電分散：周波数が低いほど大きな比誘電率を示す。約 1 kHz 付近の低周波数における分散を α -dispersion、約 10^6 Hz 付近の周波数における分散を β -dispersion、約 10^{10} Hz 付近の高周波における分散を γ -dispersion という。[文献5を改変]

よい。我々は、長い突起が存在する脳組織が 1 Hz ~ 1 kHz の領域で顕著な誘電分散を示し、低周波で大きな誘電率を示すことを理論的に説明するモデルを新たに提案した。¹⁶ 以下にその内容を述べる。

3. 生体組織における低周波誘電分散の説明の試み

前節に述べたように脳組織はニューロンとグリアという2種類の細胞からなるが、これらの細胞の特徴の一つは発達した突起を持つことである。ニューロンは樹状突起と軸索を持ち、長いものでは軸索だと 10 cm 以上、樹状突起で 2 mm 程もある。グリア細胞も、星状グリアでは平均 80 μ m ほどの差し渡しの球状の空間に薄い細胞膜を密に伸ばしてシナプスや血管を包み込み、ニューロンとニューロンの間を埋めている。

上述のように、脳組織が低周波において極めて大きな誘電率を示すことについて我々は、脳組織が発達した突起を持つ細胞から構成されていることが原因であるとの着想を得てモデル計算を行い、この解釈が可能であることを示した。図3にその概略を示す（詳細は原著¹⁶を参照されたい）。

脳組織を、 N 本の有限長 L のケーブル状の細胞突起が平行に並び、細胞間隙に隔てられたものとする（図3）。ケーブルの壁は細胞膜であり膜抵抗 r_{mem} (Ω cm) と膜キャパシタンス c_{mem} (F/cm) を持つものとする。ケーブル内外は長

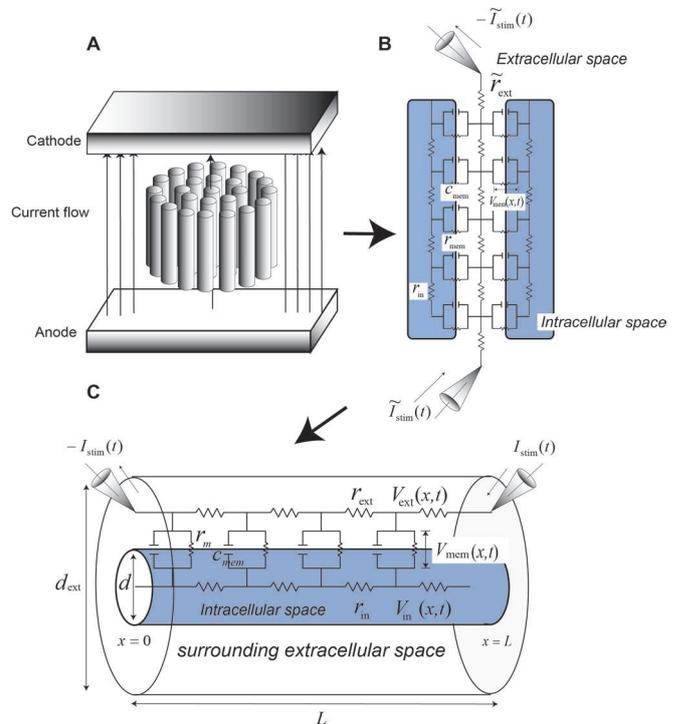


図3 神経突起が密に存在する脳組織の回路モデル：(A) 脳組織の誘電的性質をモデル化するために、細胞外に設置した電極から負荷した電流刺激に対する細胞外媒質の電気的応答を解析的に記述する。樹状突起を模した N 本のケーブルが細胞外媒質の中に平行に並んでいるものとする。細胞外は抵抗性の媒質とし、容量は無視できるものとする。(B) 性質の均一な N 本のケーブルが抵抗性の一次元細胞外空間のみを介して接続されているとする。細胞外空間に設置した電極から刺激電流 $\tilde{I}_{stim}(t)$ を負荷する。(C) 均一な N 本のケーブルを一本のケーブルに置き換えた等価モデル。[文献16より許可を得て転載]

軸方向に細胞内抵抗 r_{in} (Ω/cm) と細胞外抵抗 \tilde{r}_{ext} (Ω/cm) を持ち、キャパシタンスは無視できるものとする。このとき、細胞内外を流れる電流と膜を横切る電流についてのキルヒホッフの電流則、細胞膜のRC回路における電流保存、および細胞内外の電流と電位に成り立つオームの法則から以下の関係が得られる（詳細は文献17 p. 165 “ケーブル理論”を参照されたい）。

$$\frac{1}{r_{in}} \sum_{k=1}^N \frac{\partial^2 V_{in}^k(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{1}{\tilde{r}_{ext}} \frac{\partial^2 V_{ext}(x, t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{r_{in}} \frac{\partial^2 V_{in}^k(x, t)}{\partial x^2} = c_{mem} \frac{\partial [V_{in}^k(x, t) - V_{ext}(x, t)]}{\partial t} + \frac{1}{r_{mem}} [V_{in}^k(x, t) - V_{ext}(x, t)] \quad (3)$$

ここで x はケーブルに平行な座標、 t は時刻、 k はケーブルの番号である。それぞれのケーブル内の電位 $V_{in}^k(x, t)$ も細胞外の電位 $V_{ext}(x, t)$ も、 x 座標が同じであれば断面内の場所によらず同じであるとし、空間として一次元のみを考えている。

ケーブルの両端に電極を配置し、ケーブルに平行に刺激電流 $\tilde{I}_{stim}(t)$ を加え、その際の細胞外空間における電位応答を求めたいのだが、細胞外に電流刺激を与えることは以下の境界条件で記述できる。

$$\left. \frac{\partial V_{in}^k(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial V_{in}^k(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (k=1, \dots, N) \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial V_{ext}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\tilde{r}_{ext} \tilde{I}_{stim}(t) \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial V_{ext}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = -\tilde{r}_{ext} \tilde{I}_{stim}(t) \quad (7)$$

各ケーブルが均一で同一の刺激電流を受けているとすると、ケーブルどうしは1次元の細胞外スペースを介してのみ相互作用し、直接的には影響を及ぼしあわないので、

$$V_{in}^k(x, t) = V_{in}(x, t) \quad (8)$$

としてもよい。また、細胞内電位 $V_{in}(x, t)$ と細胞外電位 $V_{ext}(x, t)$ の差を膜電位 $V_{mem}(x, t)$ とすると、記述は以下のように簡単になる。

$$r_{mem} c_{mem} \frac{\partial V_{mem}(x, t)}{\partial t} = \frac{r_{mem}}{r_{in} + N\tilde{r}_{ext}} \frac{\partial^2 V_{mem}(x, t)}{\partial x^2} - V_{mem}(x, t) \quad (9)$$

$$\frac{r_{mem}}{\tilde{r}_{ext}} \frac{\partial^2 V_{ext}(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{r_{mem}}{r_{in} + N\tilde{r}_{ext}} \frac{\partial^2 V_{mem}(x, t)}{\partial x^2} \quad (10)$$

式(9)はケーブル方程式と呼ばれるものである。このとき、境界条件は

$$\left. \frac{\partial V_{mem}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \tilde{r}_{ext} \tilde{I}_{stim}(t) \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial V_{mem}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = \tilde{r}_{ext} \tilde{I}_{stim}(t) \quad (12)$$

$$\left. \frac{\partial V_{ext}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\tilde{r}_{ext} \tilde{I}_{stim}(t) \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial V_{ext}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = -\tilde{r}_{ext} \tilde{I}_{stim}(t) \quad (14)$$

となる。

解析解

上記の方程式の解を求めればよいのだが、境界条件が時間とともに変化する微分方程式を解くことは一般に容易ではない。そこでちょっとした工夫をする。細胞内外に電流を流す代わりに、ケーブルの両端 $x=0$ および $x=L$ から無限小の距離 Δx だけ中に入ったところの細胞内外に δ 関数状の電流密度 $\tilde{I}_{cd}(x, t)$ を置く。

$$\tilde{I}_{cd}(x, t) = \tilde{I}_{stim}(t) [\delta(x - \Delta x) - \delta(x - L + \Delta x)] \quad (15)$$

さらに変数の置き換えを行うと、上記の方程式と境界条件は以下ようになる。

$$\tau_{mem} \frac{\partial V_{mem}(x, t)}{\partial t} = \lambda_{mem}^2 \frac{\partial^2 V_{mem}(x, t)}{\partial x^2} - V_{mem}(x, t) - \lambda_{mem}^2 r_{ext} I_{cd}(x, t) \quad (16)$$

$$\frac{r_{mem}}{r_{ext}} \frac{\partial^2 V_{ext}(x, t)}{\partial x^2} = -\lambda_{mem}^2 \frac{\partial^2 V_{mem}(x, t)}{\partial x^2} - \lambda_{mem}^2 r_{in} I_{cd}(x, t) \quad (17)$$

$$\left. \frac{\partial V_{mem}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (18)$$

$$\left. \frac{\partial V_{mem}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (19)$$

$$\left. \frac{\partial V_{ext}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (20)$$

$$\left. \frac{\partial V_{ext}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (21)$$

ここで以下の置き換えを行っている。

$$N\tilde{r}_{ext} \rightarrow r_{ext}, \quad \tilde{I}_{stim}(t)/N \rightarrow I_{stim}(t), \quad \tilde{I}_{cd}(t)/N \rightarrow I_{cd}(t)$$

$$\tau_{mem} = r_{mem} c_{mem}, \quad \lambda_{mem} = \sqrt{\frac{r_{mem}}{r_{in} + r_{ext}}}$$

方程式(16)は境界条件(18), (19)の下で解が次のように解析的に求まる。

$$V_{mem}(x, t) = \frac{r_{ext} \lambda_{mem}^2}{\tau_{mem}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n - 1}{(L/2)} \cos\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \times \int_0^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\kappa_n}\right) I_{stim}(t') dt' \quad (22)$$

ここで,

$$\kappa_n = \frac{\tau_{\text{mem}}}{1 + (n\pi/L)^2 \lambda_{\text{mem}}^2} \quad (23)$$

である. $V_{\text{ext}}(x, t)$ はこの結果を方程式(17) に代入して得られる.

$$V_{\text{ext}}(x, t) = -\frac{I_{\text{stim}}(t)}{2} \frac{r_{\text{in}} r_{\text{ext}}}{r_{\text{in}} + r_{\text{ext}}} (2x - L) - \frac{r_{\text{ext}}}{r_{\text{in}} + r_{\text{ext}}} V_{\text{mem}}(x, t) \quad (24)$$

数値解

長い突起の存在を我々が低周波誘電分散の原因として意識したのは, ラット脳海馬スライス標本(新鮮なラットの脳を厚さ $400 \mu\text{m}$ 程度に薄く切り, 脳組織を人工脳脊髄液中に生かして維持したもの)に直流電場を与え, その際の細胞膜電位変化を, 錐体細胞と呼ばれるニューロンから観察し, その実験結果を解析した際であった.^{18, 19)} 解析のために海馬錐体細胞の樹状突起および細胞体を長さ $700 \mu\text{m}$, 径 $1.2 \mu\text{m}$ の単純ケーブルとした数理モデルを作成し, 直流細胞外電場に対する電位応答を求めたところ, 実験結果をうまく説明することができたのだが, その際に, 大きな二次的な電流がケーブル内を長軸方向に流れることを見出したのである.²⁰⁾ 誘電分散が起きるためには, 刺激によって何らかの緩和現象が生じて二次的な電流が流れる必要があるわけだが, 電場刺激に対して二次的にケーブル内を流れる電流を誘電緩和の機序として考えうるということに気がついたのであった.

上記のモデルでは膜比抵抗 ($R_{\text{mem}} = 30 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$), 細胞内比抵抗 ($R_{\text{in}} = 200 \Omega \text{ cm}$) および膜比容量 ($C_{\text{m}} = 1.5 \mu\text{F}/\text{cm}^2$) として, 実験的に推定された値を用いている. これらの数値を用いて脳組織の誘電率と伝導率を求めてみた. ケーブル外側にケーブルの1.2倍の径の細胞外スペースを置き, 細胞外スペースの比抵抗 R_{ext} は $100 \Omega \text{ cm}$ とした. ところで, 上記の方程式(17)の数値解はこのままでは求まらない. どこにも接地されていないために解が不定なのである. そこで, 小さいコンダクタンス g_D を介して細胞外スペースを無理やり接地した条件を作って数値解を求めた. g_D を十分に小さくすれば十分に正しい解が得られることになる. これらのパラメータを用いケーブル長 $700 \mu\text{m}$ として求めた比誘電率の周波数依存性を図4に示す.

ケーブル長 $700 \mu\text{m}$ の場合, 周波数が低くなるにしたがって比誘電率が大きくなり, 1 Hz における比誘電率は 10^8 を超える大きな値となっている. それに対し, 比伝導率は大きな周波数依存性を示さない. このような誘電緩和の特徴は, これまでに報告されている脳組織の誘電分散の特徴⁹⁾ を良く再現している. 誘電分散を特徴付ける数値として容量性電流と伝導性電流との比 ($=\omega\epsilon(\omega)/\sigma(\omega)$, storage factorともいう)を図4Cに示す. 誘電緩和が頭打ちになる周波数のあたりで容量性電流と伝導性電流との比が大きくなってピークを示している.

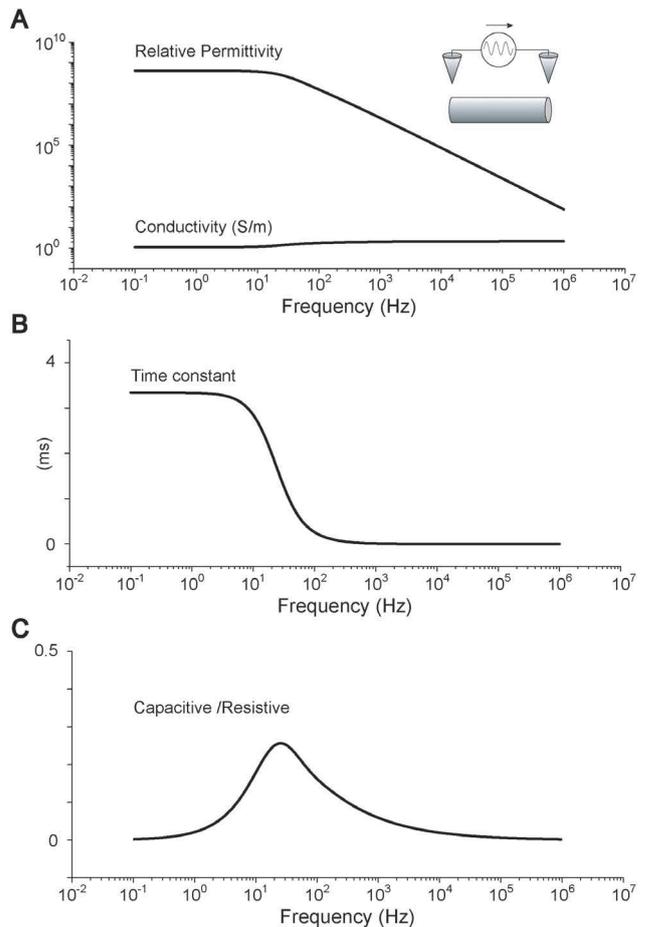


図4 単純ケーブルを含む組織の誘電的特性の計算結果: 膜比抵抗 $R_{\text{mem}} = 30 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$, 細胞内比抵抗 $R_{\text{in}} = 200 \Omega \text{ cm}$, 膜比容量 $C_{\text{m}} = 1.5 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, ケーブル長 $700 \mu\text{m}$, 径 $1.2 \mu\text{m}$. ケーブル外側にケーブルの1.2倍の径の細胞外スペースを置いた. 細胞外スペースの比抵抗 R_{ext} は $100 \Omega \text{ cm}$. (A) 比誘電率は 10 Hz 以下の低周波において 10^8 程度の大きな値をとる. 伝導率の周波数依存性は弱い. (B) 時定数の周波数依存性. (C) 各ケーブル長における容量性電流と伝導性電流との比 ($=\omega\epsilon(\omega)/\sigma(\omega)$). 低周波領域にピークができる. [文献16より許可を得て転載]

誘電分散がケーブル長にどのように依存するかを図5に示した. ケーブルが長くなるほど誘電分散が顕著になり, 低周波における誘電率が大きいことが見て取れる. ケーブル長がケーブルの径に等しい場合には誘電分散は生じていない.

細胞外スペースの大きさの影響を図6に示す. ケーブル長を $700 \mu\text{m}$ としている. 細胞外スペースが狭いほど低周波における比誘電率の値は大きい.

我々の解は, 固有値方程式の固有値によって定まる様々な値の時定数 κ_n (式(23)) を持つ多数の緩和過程の振る舞いの合成として記述されている. L が無限大になるとすべての固有値が縮退し, その固有値に対応する時定数は膜の時定数 $\tau_{\text{mem}} = r_{\text{mem}} c_{\text{mem}}$ に一致する. 単一の緩和過程による誘電分散についてデバイ (P. Debye) の理論²¹⁾ があり, 容量性電流と伝導性電流の比の周波数依存性にはピークが生じ, 緩和の時定数 τ によってその位置 ($f = 1/2\pi\tau$) が定まることが知られている. $L = 700 \mu\text{m}$ のケーブルについての我々の計算結果はデバイの結果に良く似ている. これは

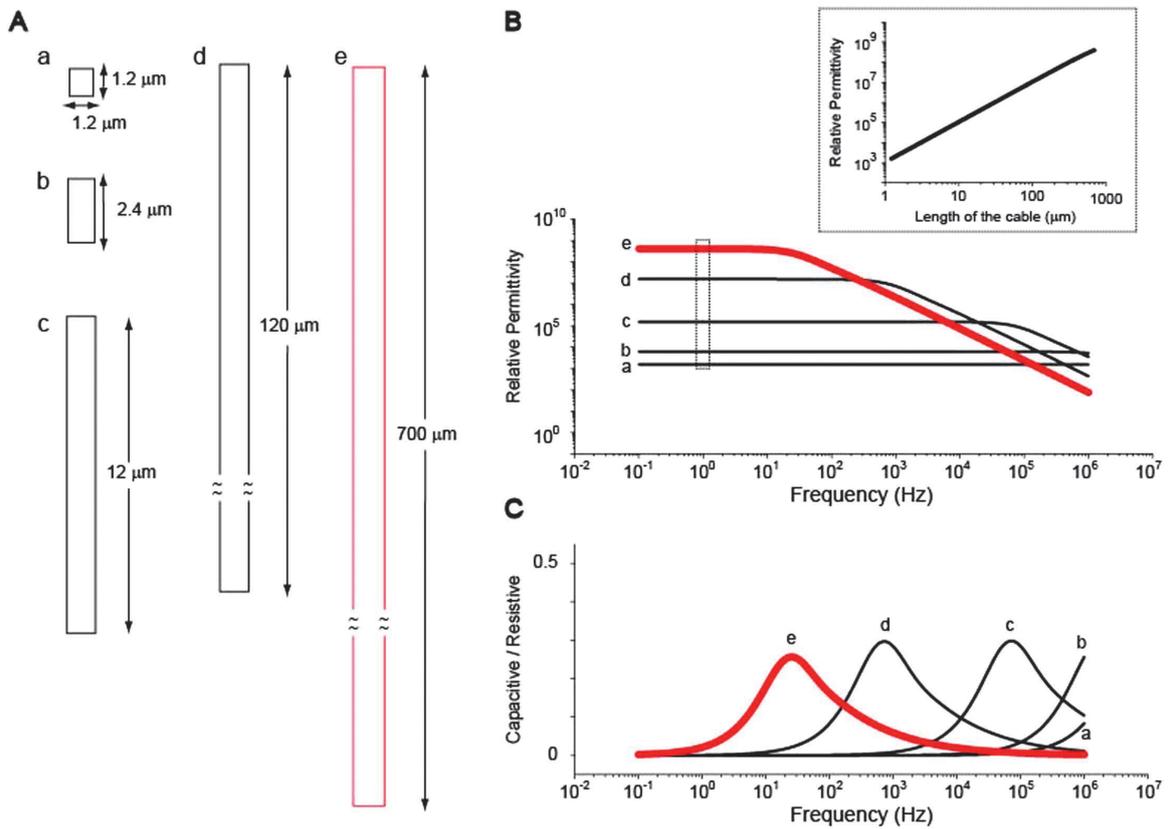


図5 低周波誘電分散とケーブル長との関係：(A) ケーブル長。(a) 1.2 μm , (b) 2.4 μm , (c) 12 μm , (d) 120 μm , (e) 700 μm 。(B) 各ケーブル長における比誘電率 $\epsilon(\omega)$ の周波数依存性。ケーブルが長いほど誘電分散が顕著になる。ケーブル長 700 μm の場合、10 Hz 以下の低周波において 10^8 程度の大きな値をとる。(C) 各ケーブル長における容量性電流と伝導性電流との比 ($=\omega\epsilon(\omega)/\sigma(\omega)$)。低周波領域にピークができる。[文献 16 より許可を得て転載]

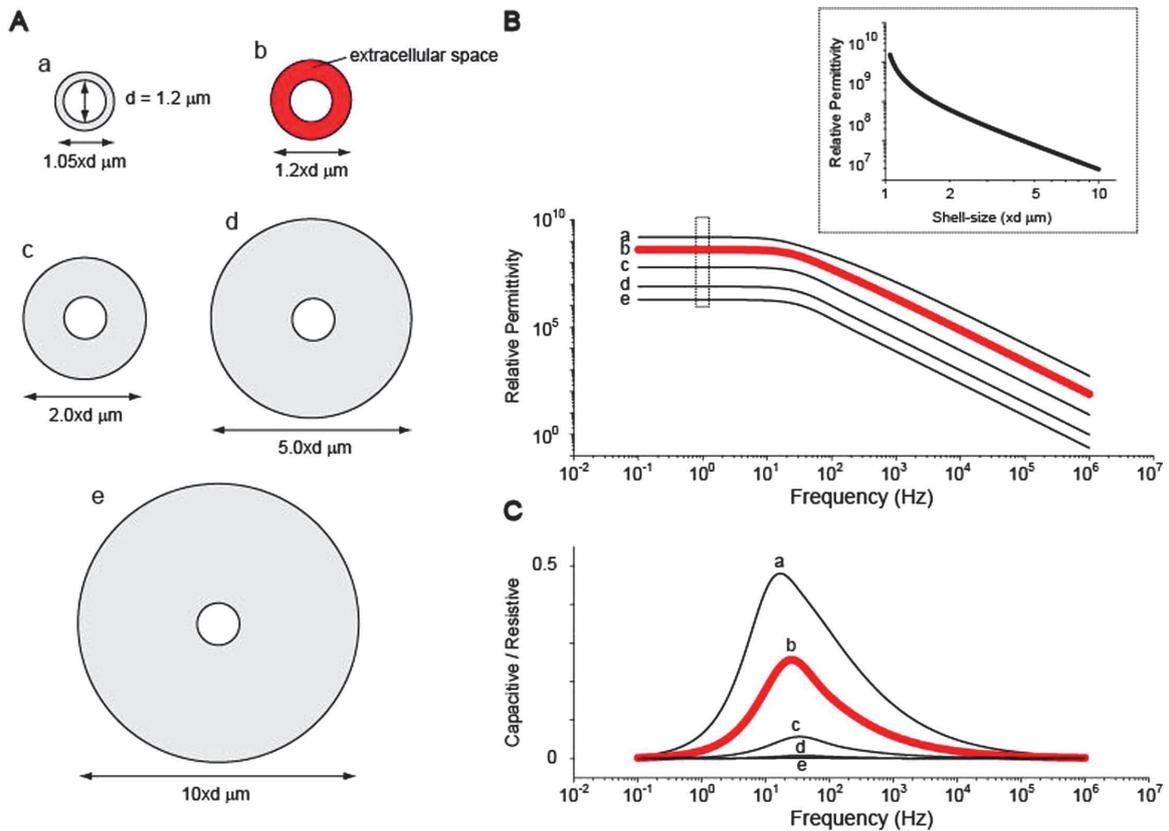


図6 低周波誘電分散と細胞外スペースの大きさとの関係：(A) 細胞外スペースの径 d_{ext} 。(a) 1.05d, (b) 1.2d, (c) 2.0d, (d) 5.0d, (e) 10.0d。(B) 各細胞外スペースにおける比誘電率 $\epsilon(\omega)$ の周波数依存性。細胞外スペースが狭いほど誘電分散が顕著になる。(C) 各ケーブル長における容量性電流と伝導性電流との比 ($=\omega\epsilon(\omega)/\sigma(\omega)$)。[文献 16 より許可を得て転載]

$L=700\ \mu\text{m}$ では空間定数 λ_{mem} に比べて十分にケーブルが長く、固有値に対応する時定数のすべてが膜の時定数 τ_{mem} に近い値となることを反映している。

我々のモデルは1次元的なケーブルであったが、実際の脳組織では、 $100\sim 1,000\ \mu\text{m}$ 程度の長さのニューロンの樹状突起およびグリア細胞の突起が様々な方向を向いて密に存在している。したがって、有限長ケーブルの存在に起因する2次的な電流の関与が、3次元のいずれの方向についても低周波誘電分散の機序として妥当であると筆者たちは考えている。

我々のモデルは、薄い被覆を持った球形の粒子を想定して作られたMaxwell-Wagner分極理論の考え方をケーブル状の膜構造の集団に拡張してMaxwell-Wagner効果を検討したものといってよい。実はこの理論を有限長のケーブルに拡張することの重要性は認識されていたのだが、¹²⁾ これまでは、解析が困難なために検討がなされなかったのである。我々は、細胞外電流刺激に対するケーブルの応答をケーブル方程式と境界条件とで記述し、方程式と境界条件とを物理的に等価な系に変換したのち、グリーン関数法によって解を得たのである。

4. CSD解析

脳波程度の周波数において脳組織が大きな誘電率を示すのであれば、脳波から逆問題を解いて電流源を求める際に誘電率を考慮する必要があると考えられる。そこで我々は誘電分散を考慮したCSD解析の手法を開発した。^{17,22)} CSD解析の一般的な表現は以下のようなものである。

$$\nabla \cdot \left(\mathbf{J}'_{\text{free}}(\mathbf{x}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}'(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right) = \mathbf{I}_{\text{CSD}}(\mathbf{x}, t) \quad (25)$$

ここで $\mathbf{J}'_{\text{free}}$ は脳組織の実効的な自由電荷電流、 \mathbf{D}' は電束密度、 \mathbf{I}_{CSD} は電流源密度である。媒質が線形であればこの式を以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{\text{CSD}}(\mathbf{x}, t) = & (2\pi) \int \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma}'(\mathbf{x}, \omega) + i\omega \boldsymbol{\epsilon}'(\mathbf{x}, \omega)) \\ & \times (-\nabla \phi_{\text{ext}}(\mathbf{x}, \omega)) e^{i\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (26)$$

ここで $\boldsymbol{\sigma}'(\mathbf{x}, \omega)$ および $\boldsymbol{\epsilon}'(\mathbf{x}, \omega)$ は、脳組織の実効的誘電率および伝導率、 $\phi_{\text{ext}}(\mathbf{x}, \omega)$ は細胞外電位のフーリエ変換である。もし、周波数 ω と実効的誘電率 $\boldsymbol{\epsilon}'$ との積が実効的伝導率 $\boldsymbol{\sigma}'$ に比べて無視できるほど小さく、かつ実効的伝導率 $\boldsymbol{\sigma}'$ が時間に依存しないならば、CSD解析の式はつぎのように極めて単純になる。

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma}' \nabla \phi_{\text{ext}}(\mathbf{x}, t)) = -\mathbf{I}_{\text{CSD}}(\mathbf{x}, t) \quad (27)$$

実効的伝導率 $\boldsymbol{\sigma}'$ が空間的に均一であれば以下のようにさらに簡単になる。これが式(1)の通常のCSD解析の表現である。

$$\boldsymbol{\sigma}' \nabla^2 \phi_{\text{ext}}(\mathbf{x}, t) = -\mathbf{I}_{\text{CSD}}(\mathbf{x}, t) \quad (28)$$

一見して式(25)が正しいはずはないと思われる向きも

あろう。Maxwellの方程式に暗黙に含まれる重要な関係として以下の総電流 (total current) $\mathbf{J}_{\text{total}}$ の保存則がある。

$$\nabla \cdot \left(\mathbf{J}'_{\text{free}} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \mathbf{J}_{\text{total}} = 0 \quad (29)$$

これはアンペールの法則の両辺のdivergenceを取ったものであり、Maxwell方程式が成立する限り厳密に成立する。式(25)はこれと矛盾しているように見える。また、通常のCSD解析の表現式(28)は形式的に電磁気学のポアソン方程式と同じ形をしているので、自明と思われる向きもあろう。しかし、式(25)は式(29)からガウスの発散定理の適用と粗視化 (coarse graining) によって導かれたものであり、式(25)が式(29)と矛盾しているように見えるのは式(25)の $\mathbf{J}'_{\text{free}}$ と \mathbf{D}' の定義が式(29)のものとは異なっているからである。

5. 細胞外スペースとはなにか

CSD解析の表現に現れる誘電率 $\boldsymbol{\epsilon}'$ や伝導率 $\boldsymbol{\sigma}'$ は、先に述べたように実効的な値であって、細胞間隙の媒質を構成する素材の特性でもなければ膜の素材のものでもない。では実効的誘電率 $\boldsymbol{\epsilon}'$ と伝導率 $\boldsymbol{\sigma}'$ とは一体なにか、言い換えれば、細胞外スペースとはなにか。以下に定性的に述べる。

生体組織内に閉じた表面 S で囲まれた体積要素 V を考える(図7)。例えば一辺が $10\ \mu\text{m}$ 程度の立方体である。その中に細胞が存在しているとする。細胞全体が体積要素 V に

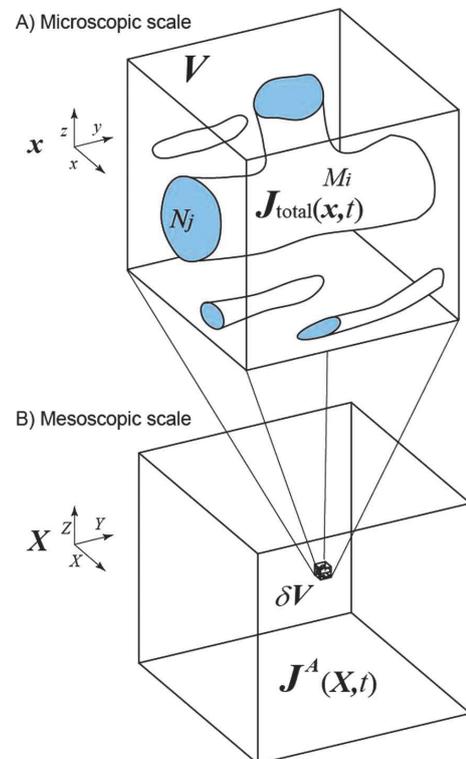


図7 細胞外スペースの粗視化：A) 体積要素 V 中の微視的な座標 $x(x, y, z)$ の各点に電流密度 $\mathbf{J}_{\text{total}}$ が定義されている。B) 体積要素 V を微小体積 δV に縮め、粗視化して中視的 (mesoscopic) な座標系 $X(X, Y, Z)$ を考える。この座標系の各点 $X(X, Y, Z)$ に新たな電流密度 $\mathbf{J}^A(X, t)$ を定義する。[文献22より許可を得て転載]

収まっている場合もあるが、一般には突起などを出して隣の体積要素にも広がっていると考える。細胞が占める部分をコア (core) と呼ぶ。体積要素 V 中に m 個のコアがあるとする。それぞれのコアの表面を M_i とする。これらのコアが表面 S を横切る部分を n 個の円盤 N_j とする。表面 S 上の全ての N_j の和を表面 S_{int} とする。表面 S から S_{int} を除いたものを表面 S_{ext} とする。体積要素 V 内のすべての M_i の和を表面 M とする。

式(29)に現れる電流 $\mathbf{J}_{\text{total}}$ についてガウスの発散定理を適用すると「細胞外で隣の空間との境界面 S_{ext} を横切って V の外へ流れ出る電流の和は、細胞表面 M を横切って細胞内から細胞外へ流れ出る電流の和に等しい」ことが言える。

$$\iint_{S_{\text{ext}}} \mathbf{J}_{\text{total}} \cdot \mathbf{n} da = - \iint_M \mathbf{J}_{\text{total}} \cdot \mathbf{n} da \quad (30)$$

ここで、空間のスケールを粗くし (coarse graining), 体積要素 V は微小体積 δV に縮まるとする。微小体積 δV の中心の座標を中視的 (mesoscopic) な座標系 $\mathbf{X}(x, y, z)$ で表す。この点 $\mathbf{X}(x, y, z)$ に新しく電流密度 $\mathbf{J}^A(\mathbf{X}, t)$ を考えると、上式の左辺は $\nabla \cdot \mathbf{J}^A(\mathbf{X}, t) \delta V$ となる。

一方、上式の右辺は面 M_i 上の各点に、面に直角な面積電流密度 $\mathbf{I}_m(x, y, z, t)$ を考え、それをすべての面 M_i にわたって足し合わせたものである。それを $\mathbf{I}_m(\mathbf{X}, t) \delta M$ とする。ここで δM は微小体積 δV 中の細胞膜である。これらを代入すると式(30)は次のようになる。

$$\nabla \cdot \mathbf{J}^A(\mathbf{X}, t) \delta V = \mathbf{I}_m(\mathbf{X}, t) \delta M \quad (31)$$

ここで体積電流密度 \mathbf{I}_{CSD} を次のように定義すると

$$\mathbf{I}_{\text{CSD}}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{I}_m(\mathbf{X}, t) \frac{\delta M}{\delta V} \quad (32)$$

式(31)は次のようになる。

$$\nabla \cdot \mathbf{J}^A(\mathbf{X}, t) = \mathbf{I}_{\text{CSD}}(\mathbf{X}, t) \quad (33)$$

新たに定義した $\mathbf{J}^A(\mathbf{X}, t)$ を実効的な自由電荷電流 $\mathbf{J}'_{\text{free}}$ と変位電流 $\delta \mathbf{D}' / \delta t$ の和と考える。

$$\mathbf{J}^A(\mathbf{X}, t) = \mathbf{J}'_{\text{free}} + \delta \mathbf{D}' / \delta t \quad (34)$$

これを式(33)に代入すると式(25)が得られるのである。

細胞外電位 $\phi_{\text{ext}}(x, t)$ を体積 V にわたって平均したものをあらためて中視的な座標における細胞外電位 $\phi_{\text{ext}}(\mathbf{X}, t)$ とする。細胞外電場 $\mathbf{E}(\mathbf{X}, t)$ は細胞外電位から次のように定義する。

$$\mathbf{E}(\mathbf{X}, t) = -\nabla \phi_{\text{ext}}(\mathbf{X}, t) \quad (35)$$

生体組織においては $\mathbf{J}'_{\text{free}}$ として伝導性電流のみを考えればよい。伝導性電流と変位電流が電場 $\mathbf{E}(\mathbf{X}, t)$ に対して線形であることを仮定すれば、 $\mathbf{J}'_{\text{free}}$ と \mathbf{D}' を次のように表すことができる。

$$\mathbf{D}'(\mathbf{X}, t) = \int \varepsilon'(\mathbf{X}, \tau) \mathbf{E}(\mathbf{X}, t - \tau) d\tau \quad (36)$$

$$\mathbf{J}'_{\text{free}}(\mathbf{X}, t) = \int \sigma'(\mathbf{X}, \tau) \mathbf{E}(\mathbf{X}, t - \tau) d\tau \quad (37)$$

ここに現れる $\sigma'(\mathbf{X}, t)$ と $\varepsilon'(\mathbf{X}, t)$ を実効的伝導率と実効的誘電率と呼ぶ。これらは本来の細胞間隙を構成する素材の誘電率と伝導率ではなく、平均化と粗視化によって定義された実効的細胞外スペースにおける伝導率と誘電率である。これらを式(25)に代入すると体積電流密度 \mathbf{I}_{CSD} は式(26)で表されることになる(ただし変数 \mathbf{X} を \mathbf{x} に置き換えている)。

神経伝達物質などの化学物質が拡散する空間という意味で細胞外スペースという言葉を使うとき、細胞外スペースとは細胞間隙のことを意味するであろう。しかし、電気的な意味での細胞外スペースはより抽象的な概念であって、細胞間隙に置かれた電極や皮膚の外に置かれた電極から人為的に電流を流した場合に、この電流が拡散する空間という概念である。このとき電流は細胞間隙を流れるばかりではなく、細胞膜を横切って近隣の細胞の内部にも流れるであろう。細胞膜を何度も横切る可能性もある。さらには細胞内膜を横切る可能性もある。このような詳細を平均化あるいは粗視化した仮想的に連続的な誘電体を考え、この空間を電流が拡散するとみなすとき、この空間を電気的な意味での細胞外スペースと呼ぶことになる。

このスペースの実体は周波数によって異なるものになる。極めて周波数の高い電流成分は細胞膜のキャパシターを素通りするので、近隣の細胞内原形質・細胞間隙を含む全空間が細胞外スペースということになる。極めて周波数の低い電流は細胞膜を避けて細胞間隙を通ることになる。これらの極端な場合を除けば、電気的な意味での細胞外スペースは、細胞間隙に加えて、隣接する細胞の細胞膜、原形質等も考慮した仮想的な空間ということになる。細胞間隙、細胞膜、細胞内原形質などを構成する素材はそれぞれ異なる誘電率・伝導率を持つが、平均化・粗視化した仮想的な細胞外スペースは、これらの個別の値とは異なる実効的あるいは見かけの誘電率 ε' ・伝導率 σ' を示すことになる。

脳波程度の周波数領域における電気的な「細胞外スペース」の性質を理解するために、細長いシリンダー状の細胞が平行に並んでおり、その中の1個が何らかのイオン電流を局所的に生成し、それとつり合った容量性電流が細胞のどこか他の部位を逆向きに流れる場合を考えてみよう(図8)。この内向きと外向きの電流を、それぞれ1次の吸い込み sink と湧き出し source と呼ぶ。簡単のため細胞間隙と細胞内原形質の誘電率は無視できるほどに小さいものとする。初めの段階では、1次電流のほとんどは細胞間隙を流れ、細胞間隙に電位勾配を発生させるであろう(図8A)。細胞間隙に電位勾配(電場)が発生すると、細胞内にも同じだけの電位勾配が発生しているわけであるから、細胞内の長軸方向に2次的に電流が流れる。この2次的電流は細胞膜を横切る電流をもたらすことになり、ある場所では湧き出

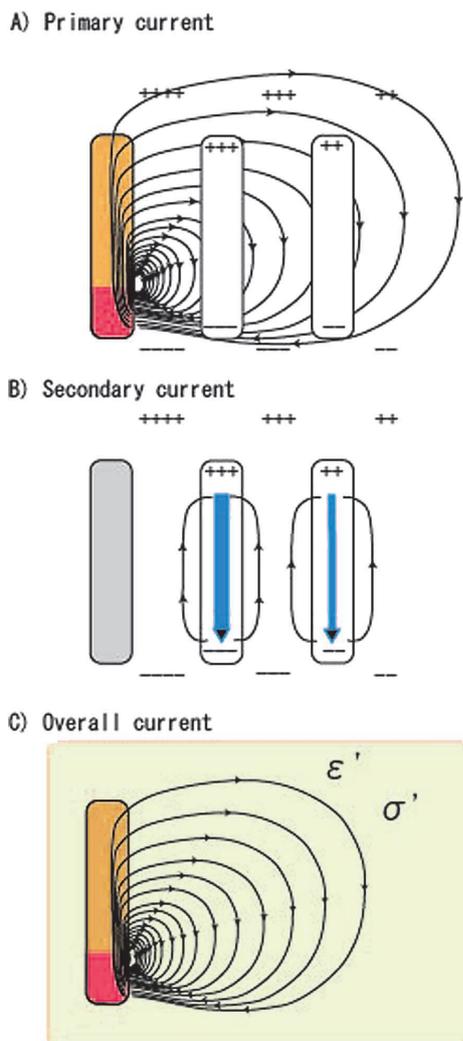


図8 実効的細胞外空間の概念：細長いシリンダー状の細胞が平行に並んでいる状況を考える。細胞間隙と細胞内原形質の誘電率は無視できるほどに小さいものとする。A) 細胞の一つが発生する電流による1次的な細胞外電流。B) 近接する細胞に2次的に長軸方向に流れる電流と、それによる細胞外電流。C) トータルの電流を「仮想的な細胞外空間」を流れるものと考えることができる。[文献22より許可を得て転載]

しとして外向きに、ある場所では吸い込みとして内向きに膜電流が流れる(図8B)。その結果、細胞膜の時定数に依存して膜電位が変化し、細胞内電位勾配が変化、さらにそのため、2次的電流の分布も変化する。2次的電流は細胞間隙を流れてループを形成するが、その方向は1次電流とは反対であり、1次電流による細胞間隙の電位変化を打ち消す方向になる。このようにして、低周波の電流であっても、細胞間隙だけではなく、膜を横切って流れることになり、そのことが細胞間隙の電位変化に反映される。その際、細胞膜の特性と細胞の形態のために、細胞間隙の電位変化に膜の時定数程度の緩和時間が生ずることになる。以上の過程の結果として得られる細胞間隙の電位変化を総体的にとらえ、誘電率 ϵ' と伝導率 σ' によって記述される特性を有する「仮想的な細胞外空間」が存在すると考えることができる。細胞間隙の電位の時間変化の遅れを実効的誘電率に起因するものとみなせば、細胞外空間は低周波において大きな誘電率を持ち、細胞外電流は容量成分を持

つという描像になる(図8C)。2次的電流は誘電体における分極電流に他ならない。隣接した細胞の存在が誘電分極のメカニズムとして働くのである。

6. 終わりに

ロゴテシス(N. K. Logothetis)ら²³⁾はサル脳の皮質でフィルター特性の測定を行い、10 Hzから5 kHzの範囲において抵抗値の変化が1.9 dB程度でしかなかったことから、「脳皮質組織はohmicな導体とみなしてよく、フィルター特性は強くない」と主張している。実は我々の計算結果が示すように、周波数に強く依存して大きな値を取る誘電率はフラットなフィルター特性と矛盾するものではない。実際の状況に近いパラメータを用いて行った我々の計算は、伝導性電流に対する容量性電流の比が10~1,000 Hzの領域において0.3程度の大きさになりうることを示している。フィルター特性がフラットであるからといって容量性電流の寄与、あるいは誘電率の寄与を無視できるとは限らないのである。EEGなどの細胞外電位の逆問題を解く際に容量成分の寄与を考慮すべきかそれとも不必要かという問題の答えは現時点では不明であり、今後、実験的に検討していくことが必要である。

(本稿の第1, 2, 4, 5節は著者らおよび井上雅司による総説²²⁾および著書¹⁷⁾の内容を要約している。第3節は毛内拡を第1著者とする2本の原著論文^{16, 20)}の内容を要約したものである。詳細は原著を参照されたい。フロリダ国際大学・東北大学加齢医学研究所のJ. Riera先生には、脳波の逆問題の専門家の立場からこの研究の可能性を指摘していただいた。京都大学化学研究所の浅見耕司先生には、誘電分散の専門家の立場からこの研究の妥当性を確認し、後押しをしていただいた。)

参考文献

- 1) W. Pitts: Investigations on synaptic transmission, in *Cybernetics: Transactions of the Ninth Conference March 20-21* (Josiah Macy, Jr., Foundation New York, 1952).
- 2) C. Nicholson: *IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-20* (1973) 278.
- 3) P. Nunez and R. Srinivasan: *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG*, 2nd Ed. (Oxford Univ. Press, 2005) p. 165.
- 4) Peters, S. L. Palay and H. Webster: *The Fine Structure of the Nervous System*, 3rd Ed. (Oxford Univ. Press, 1991) p. 74, Fig. 3-2.
- 5) K. S. Cole: *Membranes, ions, and impulses: a chapter of classical biophysics* (Univ. California Press, 1968) p. 49, Fig. 1:24; 邦訳: 岸本卯一郎, 向畑恭男訳: 『膜, イオン, インパルス』(吉岡書店, 1969).
- 6) K. S. Cole and R. H. Cole: *J. Chem. Phys.* **9** (1941) 341.
- 7) K. F. Foster and H. P. Schwan: *Crit. Rev. Biomed. Eng.* **17** (1989) 25.
- 8) Ø. G. Martinsen, S. Grimnes and H. Schwan: *Interface phenomena and dielectric properties of biological tissue, Encyclopedia of surface and colloid science* (Marcel Dekker Inc., 2002) p. 2643.
- 9) S. Gabriel, R. W. Lau and C. Gabriel: *Phys. Med. Biol.* **41** (1996) 2251.
- 10) L. D. Landau, E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevskii: *Electrodynamics of Continuous Media*, 2nd Ed. (Nauka, Moscow, 1982).
- 11) J. D. Jackson: *Classical electrodynamics*, 3rd Ed. (John Wiley & Sons, 1998).
- 12) S. Takashima: *Electrical properties of biopolymers and membranes* (IOP Pub., Philadelphia, 1989).
- 13) T. Hanai: *Kolloid Z.* **171** (1960) 23.

- 14) H. Pauly and H. P. Schwan: Z. Naturforsch. b **14** (1959) 125.
- 15) C. Bedard and A. Destexhe: Phys. Rev. E **84** (2011) 041909.
- 16) H. Monai, M. Inoue, H. Miyakawa and T. Aonishi: Phys. Rev. E **86** (2012) 061911.
- 17) 宮川博義, 井上雅司: 『ニューロンの生物物理』第二版(丸善出版, 2013).
- 18) M. Bikson, M. Inoue, H. Akiyama, J. K. Deans, J. E. Fox, H. Miyakawa and J. G. Jefferys: J. Physiol. **557** (2004) 175.
- 19) H. Akiyama, Y. Shimizu, H. Miyakawa and M. Inoue: Brain Res. **1383** (2011) 22.
- 20) H. Monai, T. Omori, M. Okada, M. Inoue, H. Miyakawa and T. Aonishi: Biophys. J. **98** (2010) 524.
- 21) P. Debye: *Polar Molecules* (Chemical Catalog, 1929).
- 22) H. Miyakawa and T. Aonishi: arXiv [q-bio.NC] (2012) 1209.4722.
- 23) N. K. Logothetis, C. Kayser and A. Oelmann: Neuron **55** (2007) 809.

著者紹介

宮川博義氏: 神経生理学. ニューロンやニューロン集団の特性がどのようにに脳機能・精神過程の実現に関わるかに興味がある.

青西 亨氏: 実験研究者と共同での神経系数理モデルの構築とその解析, データ駆動型のモデリング法の開発を行っている.

(2015年4月29日原稿受付)

A Novel Account for the Large Dielectric Constant of Neural Tissue at Low-Frequency Hiroyoshi Miyakawa and Toru Aonishi

abstract: It has been known for sometime that brain tissue show marked low-frequency dielectric dispersion and large permittivity ($>10^6$) in a frequency range of 10–100 Hz. We have shown that these properties can be due to electrically long neurites by solving equations that describe a model with a bundle of finite length cylindrical neurites subjected to oscillating extracellular electric fields. We also provide a notion of the apparent extracellular space and a generalized formulation for the EEG inverse problem that takes permittivity into account.

日本物理学会誌 第71巻 第7号 (2016年7月号) 予定目次

巻頭言

ブラックスワンをのがさない……………大槻東巳

物理学70の不思議

なぜ暗黒物質ははまだ見つからないのか

乱流は難しい?

原子核の地図はどこまで広がる?

アト物理: 超高速現象にどこまで迫れるか

現代物理のキーワード

フェルミ超流動とボース・アインシュタイン凝縮の統一描像
……………大橋洋士

解説

有質量グラビトン模型と宇宙論……………向山信治

最近の研究から

レア・イベントを捕えるための新たな分子シミュレーション

手法—アミロイド線維形成の理解に向けた取り組み—

……………伊藤 暁, 奥村久士

NEWAGE: 方向に感度をもつダークマター直接検出実験

……………中村輝石, 身内賢太郎
光誘起構造変化初期における非断熱核形成2段階ダイナミクス

……………石田邦夫, 那須奎一郎

話題—身近な現象の物理—

コーヒーの湯気: 水面に浮遊する微小水滴のダイナミクス

……………中西 秀, 市川正敏

JPSJの最近の注目論文から 3月の編集委員会より

……………上田和夫

学会報告

第71回年次大会(2016年) シンポジウムの報告…領域委員会

追悼

Leo Kadanoff先生を偲んで……………川崎恭治

新著紹介

超弦理論のコンパクト化 After Thirty Years



渡利 泰山

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構
taizan.watari@ipmu.jp

超弦理論は重力子を含む量子論になっている（つまり重力の量子化をする理論である。その理論を我らが自然が択んでいるかどうかはまた独立な問題だが）。そして、超弦理論では、時空が1+9次元になっていないといけならしい。でも、9次元のうち6次元分が十分に小さければ、既存の実験事実とは矛盾しないからOK。さらに、超弦理論の低エネルギーでは、重力子のほかに、素粒子の標準模型っぽい代物も（おおざっぱに言えば）ついに出てこないでもなさそう。だいたいうまくいっている感じ…。

一般向け科学啓蒙書によく書かれているこのお話は、ほぼ1980年代の半ばまでに専門家の間で成立してきた理解を基にしている（文献2）。それから30年ほど経った。その間、このお話はどのように深化してきたのだろう。超弦理論と現実世界との関わりという文脈でのお話の続きを紹介するのが、本稿の目標である。その他の文脈での弦理論の発展には立ち入らない。

本稿ではお話の続きを三本立てという形で切り出して紹介する。1点目は、コンパクト化って何？という点で、80年代後半から90年代後半の進展にあたる。主なメッセージを抽出しておく、空間の次元という概念自体が量子重力の理論たる超弦理論では自明なものでなくなる。そして、超弦理論の双対性の発見は、弦理論と現実世界との接点という問題を考えるうえで（も）、革命的变化をもたらした、ということである。

2点目は、弦理論の解の全体像の理解の深化。別の表現では、冒頭の「だいたいうまくいっている感じ」を精密化しようとい

う話でもある。現時点での超弦理論の理解に従うなら超弦理論には解がきわめてたくさんある、ということが知られている。それらの解の低エネルギーでのゲージ群や物質場の世代数は、個別の解ごとに種々様々であり、粒子の相互作用の結合定数の値も、様々である。ゆえに、冒頭に「素粒子の標準模型…出てこないでもなさそう」と記したのは、この種々雑多な解の中の一つとして、我々の宇宙を記述する解も多分存在するんじゃない…？という意味で理解することになる。学問分野としては、“多分”ではなしに“ちゃんと”存在を示せ、という話になる。これを示せば、超弦理論という仮説を棄却する必要がなくなるからだ。

そのためには、どうするか。コンパクト化という手法で得られる超弦理論の解の範囲内に話を限れば、まず、コンパクト化に用いる幾何と低エネルギーで実現される場の理論模型との間の翻訳関係を調べ、次に、幾何の選択肢の範囲内で素粒子の標準模型が実現できるかを調べることになる。超弦理論の双対性の発見から十数年が経った現在、ゲージ群、世代数、それにクォークやレプトンの質量、混合角のおおまかな特徴をどのように翻訳すべきか、理解が整理されてほぼ落ち着きつつある。

3点目は、超弦理論が現実に矛盾しないという消極的達成だけでなく、何か素粒子物理に新たな知見をもたらす積極的達成はないの？という話。全くないわけでもないですよ、…というのが現状である。紙幅の都合上、陽子崩壊の分岐比、右巻きニュートリノの質量、ゲージ結合定数の統一、の3つのテーマについて得られた弦理論ならではの知見を取り上げて、紹介する。

—Keywords—

コンパクト化：

高次元の時空で定義された物理理論から一部の次元が非常に小さい（コンパクト）と仮定して低次元時空の物理法則を導く手続き。古くはアインシュタインの一般相対論の発表直後にワイルらにより提案された5次元重力理論から4次元時空の重力と電磁気学の統一理論が有名。

超弦理論は通常10次元時空で定義されるため4次元時空の物理法則を導くためには6次元の空間自由度を非常に小さくする必要があり、小さな空間からその大きさに逆比例する質量（カルツァ＝クライン質量と呼ばれる）の粒子が無数に現れるので、その大きさは十分小さくしておかないと実験と矛盾する。

双対性：

記事内でも説明されるが、同じ物理現象を説明する2つの記述法があるとき、それらの記述法は互いに双対であるという。例えば電荷がない場合のマクスウェル方程式は電場と磁場を入れかえても方程式の形が変わらないので自己双対であると呼ばれる。最近良く議論されているAdS/CFT対応も双対性の一例であり、アンチ・ド・ジッター空間における重力とその境界における共形場理論が互いに双対であると考えられている。

（素粒子の）標準模型：

現在知られている素粒子は、強い相互作用と電弱統一理論を組み合わせたゲージ理論の枠組みで記述されることが実験的に確立されていて、それを標準模型と呼ぶ。最近発見されたヒッグス粒子は標準模型のなかで予言されていて見つかっていなかった最後の粒子であった。超弦理論を含む全ての素粒子理論は何らかの意味で標準模型を包含する必要がある。

1. はじめに

超弦理論と言えば、「奇跡」だとか「驚異」とかの形容詞が冠されることも多く、“Theory of Everything”と表現されたこともあった。一方で、超弦理論には何も予言がない、あんなの物理じゃない、という批判もよく聞く話である。今の現実はその中間にあるというのが筆者の意見であるが、本稿の読者はどのようにお感じになるだろうか。

なお、本稿では、超弦理論の現実世界の素粒子物理とのかかわりのみを主題とする。超弦理論が数学にもたらしつつあるインパクトや、強結合場の理論の解析にもたす手法、それに量子重力、量子情報理論にかかわる知見などについては、全く触れないし、筆者の力量を大きく超える。

リードページに記した3本立ての内容は、以下の2-4節に対応する。どれから読み始めてもそこそこ読めるようにしたつもりである。ただし2節の内容は、素粒子（非弦理論）か初期宇宙が専門の読者に有益になるようにという趣旨で書いた。3-4節はもう少し広い範囲の分野の読者を想定している。本稿の性格上、用語も論理も正確さ厳密さを欠いたものにならざるを得ない。専門家のご寛恕を乞う。

2. コンパクト化って何？

超弦理論では時空は1+9次元でなければならないと言ってしまうには、いくつかの留保をつけたいところがある。本当は1+10次元のM-理論で、とかいった、超弦理論の双対性について語る以前の段階において、である。本稿では、まず、次元とは何かという議論から始めたい。

2.1 超弦理論の「解」

超弦理論と時空とはどのような関係なのだろうか。時空の計量が $ds^2 = G_{ij}(x) dx^i dx^j$ であるとしよう。もし、弦のなす1+1次元空間（世界面） Σ 上の場の理論

$$S = \frac{1}{4\pi\alpha'} \int_{\Sigma} d^2\sigma G_{ij}(X) (\partial X^i) (\partial X^j) + \dots \quad (1)$$

が性質の良い (modular 不変性をもつ)、超対称性をもつ共形場の理論になっているならば、超弦理論はその時空の上の物理の計算をすることができる、というのがおおよその時空と超弦理論との関係である。共形場の理論になっているか否かの条件は、 G_{ij} (などの情報) についての式として表され、その中の条件式の一つとして、一般相対論のアインシュタイン方程式が得られる。ゆえに、その式の解になっている、という意味で時空が弦理論の「解」であるという表現を使うことにする。^{*1}

「1+d次元の平らな時空の計量を用いて式(1)を与えると、 $d=9$ の時にのみ超弦理論の「解」になっている」というのが、人口に膾炙した主張の正確な意味である。この主張は、それ以外の解はない、ということは意味していない。

^{*1} 弦理論の専門家は、「解」ではなく、「真空」という言葉を使う。背景時空の計量だけでなく、その上での散乱振幅など種々の観測可能量を超弦理論は扱えるからである。しかし、本稿は、時空（と低エネルギー有効理論）の決定の問題しか扱わないので、非専門家向けに直観的な言葉づかいを選んだ。

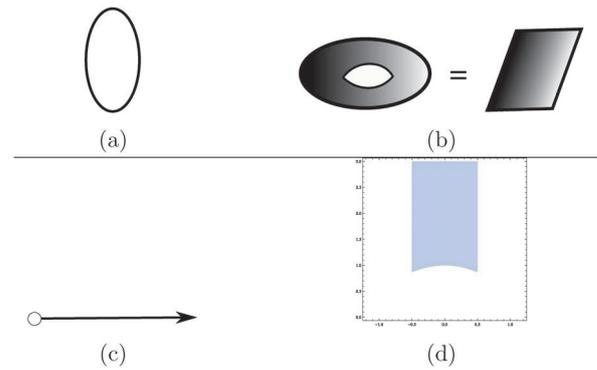


図1 内部空間 M_n の例として単純なものを挙げると、(a) S^1 (円周)、(b) T^2 (2次元トーラス) などがある。超弦理論の解として許される M_n 上の計量のとり方には、有限個の連続パラメータ分の自由度があることが知られていて、すなわち計量のとり方が有限次元の集合をなす。 $M_{n=1} = S^1$ の場合、半径 $R \in \mathbf{R}_{>0}$ がパラメータに相当し、集合としては半直線になる (c)。 $M_{n=2} = T^2$ の場合、volume (T^2) が同様に半直線をなし、それとは別に T^2 の形の自由度が許される。 T^2 は、平行四辺形の向かい合う2辺をそれぞれ貼り合わせて作ることができるので、 T^2 の形の自由度は平行四辺形の形 (高さ & 横へのひしぎ) の自由度と同じである。その「形」の集合は、(d) に示した、実2次元の灰色の領域になることが知られている (縦軸が高さ、横軸が横ずれの度合い)。

実際、実 n 次元の Riemann 多様体 M_n と平らな $1 + (9 - n)$ 次元時空 $\mathbf{R}^{1,9-n}$ からなる時空、 $M_n \times \mathbf{R}^{1,9-n}$ を用いた場合、 M_n が一定の微分幾何的性質を満たせば、超弦理論の解になることが知られている。代表的な例を挙げると、図1の $M_1 = S^1$ 、 $M_2 = T^2$ など。多様体 M_n が高次元になれば、位相的に異なるものがたくさんあるし、また M_n のトポロジーを指定しても、超弦理論の解になる Riemann 計量のとり方には有限次元の自由度が許されている。このように内部空間とその上の計量 (など) のデータを用いて解を構成するやり方と、そうやって得られる一群の解^{*2}を「コンパクト化」と言う。^{*3}

最も単純なコンパクト化の例は、内部空間を $M_{n=1} = S^1$ (円周) とするものである (時空は $\mathbf{R}^{1,8} \times S^1$)。この場合、計量のとり方 $ds^2 = R^2 (d\theta)^2$ ($\theta \in [0, 2\pi)$) に円周の半径 $R > 0$ という自由度が許されているため、コンパクト化の解の集合としては半直線をなしている (図1(c))。

しかし、この S^1 コンパクト化というクラスの解では常に内部空間が1次元だ、と言ってしまうのは多少乱暴である。確かに弦理論の解を与えるデータとして用いた数学的対象は、1次元の幾何である。しかし、我々が物理として空間の次元を認識する時、ラプラス演算子の固有値スペクトル (どのような波が許されているか) というデータを見

^{*2} 専門家が「体積固定の問題」(volume stabilization)と呼ぶもの、即ち「なぜ、そしてどのように内部空間 M_n の体積が小さく有限の値になるか」を通俗的にはコンパクト化と表現することもある。この意味での「コンパクト化」については、本稿では触れない。

^{*3} トーラスの orbifold と呼ばれる解の構成法は、コンパクト化の解のうち、 M_n の特定のトポロジーを採用し、計量に特定の極限をとったものとして理解されている。トーラス orbifold 構成法で modular 不変性を要求することは、コンパクトな内部空間 M_n 上で charge の総量がゼロであることを要求することと等価である (Bianchi 恒等式を積分したもの)。つまり、局所場の理論で理解できる自己無撞着条件である。このように理解が整理された90年代以降、⁴⁾ 弦理論の解の中でトーラス orbifold を特別によしとする理由は存在しない。

て判断していることに注意しよう。^{*4} 時空 $\mathbf{R}^{1,8} \times S^1$ 上の局所場の理論に場 = 点粒子 $\phi(x, \theta)$ があれば, $\phi(x, \theta) = \sum_{n \in \mathbf{Z}} \phi_n(x) e^{in\theta}$ と分解して, $\mathbf{R}^{1,8}$ 時空上に $n \in \mathbf{Z}$ でラベルされた無限個の粒子があるように見える; それらの粒子の質量は $m^2 = (n/R)^2$ ($n \in \mathbf{Z}$) である. このスペクトルを見て, エネルギースケール E が $E \ll M_{KK} := 1/R$ なら 1+8 次元時空, $M_{KK} \ll E$ では 1+9 次元時空と判断するのが物理の流儀である. 点粒子 (局所場の理論) を扱っている限り, 十分に高いエネルギーで物理の空間次元は数学の空間次元と一致する. しかし, 弦理論は点粒子の理論 (局所場の理論) ではない. 弦理論の S^1 コンパクト化の場合, 質量スペクトルが

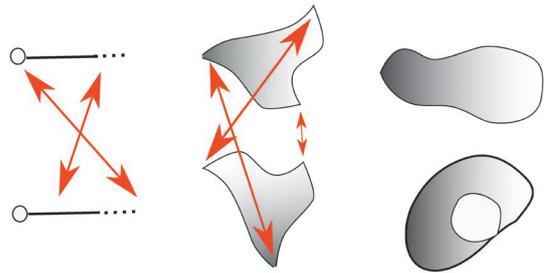
$$m^2 = \left(\frac{n}{R} + \frac{R}{\ell_s^2} w \right)^2 + \frac{4}{\ell_s^2} N, \quad n, w, N \in \mathbf{Z} \quad (2)$$

となることが知られている. ここで, ℓ_s は式(1)に登場した弦理論のパラメータであり, 長さの単位 (基準) であると考えてよい. 計量のパラメータ R が $R \gg \ell_s$ を満たすコンパクト化においては, エネルギー $E < M_s := 1/\ell_s$ に現れるスペクトルだけを見れば, 局所場の理論の $\mathbf{R}^{1,8} \times S^1$ コンパクト化の場合と同じになっている. このことを, $E \ll M_s$ では $\mathbf{R}^{1,8} \times S^1$ 時空上の局所場の理論がよい近似になっている, と表現する. しかし, パラメータ R が ℓ_s とさほど変わらない値をとる弦理論の解においては, $(n, w, N) = (n, 0, 0)$ 部分の時空上の点粒子的なスペクトルと $(w, N) \neq (0, 0)$ の部分の弦理論に特有なスペクトルが入り混じってしまい, 1+9次元上の点粒子の場の理論として近似できるエネルギー領域が存在しない.

この一例をもって明らかのように, 「古典的幾何で与えられる 1+9次元時空上の局所場の理論」という低エネルギー近似が存在するような超弦理論の解 (狭義のコンパクト化) もあるが, そのような近似が存在しないコンパクト化の解もある (例: 狭義のコンパクト化の解から内部空間の体積を小さくしていった極限として構成される弦理論の解が多く知られている³⁾). また, 超弦理論の解のすべてがそのように解釈されるのかどうかも, よくわかっていない. 式(1)には, $+\dots$ という部分がついていることに留意いただきたい. 弦理論を用いて “観測可能量” を計算するには, 1+1次元の世界面上の場の理論 (1) が $+\dots$ まで含めて全体として性質のよい共形場の理論になっていれば理論の定式化上は十分なのである. 第1項のみ, $+\dots$ の部分なしで共形場の理論になっている必要はない.

ただし, その “観測可能量” に時空の上での物理としての解釈を与えなければ, 式(1)の一部に第1項のような形のものが入っている必要がある. 現実の世界では少なくとも $\mathbf{R}^{1,3}$ 時空が観測にかかっているので, 第1項に $\mathbf{R}^{1,3}$ の計量は含めておきたい. ただ, 世界面上の共形場の理論を作るのにあたって, $\mathbf{R}^{1,3}$ 以外の場の自由度すべてを狭義のコ

定式化 1



定式化 2

図2 弦理論の解の集合と双対性の概念図. 弦理論の定式化を一つ決めるとき, そのコンパクト化の解の集合全体は, トポロジ的に異なる内部空間 M_n の場合の解の集合 (図1(c), (d)) をすべて集めたものになる. $M_n = S^1$ の場合の解の集合 (上図左端の半直線) だけでなく, 他の内部空間のとり方に対応する解の集合も含まれる (図中央, 右端). こういった解の集合が, それぞれの定式化ごとに存在する (図中, 上段下段). しかし, 超弦理論の双対性とは, 定式化1のある解が定式化2のある解と全く同じ物理を実現している, という主張である. 図中ではその2つの解を赤の矢印で結ぶことで表現した (図中左側の半直線どうしを結ぶ矢印は S^1 コンパクト化の T-duality を表す). ただし, 弦理論の異なる定式化の間で, 解の集合の間に完全な一対一対応がある, という主張ではない. 図中右の絵の間には矢印を描いていないのはそのためである. なお, 定式化1の解 (真空) であって物理量の摂動計算が困難なものが, 定式化2の解 (真空) であって摂動計算が可能なものと同じ物理系になっている. またその逆, というような双対性対応はよくある話である (中央の絵).

コンパクト化で構成する必要は厳密には理論定式化上も現象論的にもない (3.2節で補足あり).

超弦理論の解をすべて調べ上げる (あるいは, 1+1次元上の超対称共形場の理論を数え上げる), というのは簡単な問題ではない. ここ数年は, 数値的な手法も導入されており, どのような進展につながるか興味深い.

2.2 超弦理論の双対性

超弦理論には, いくつかの異なる定式化^{*5} がある. IIA型, IIB型, 混合型, と呼ばれる定式化は, おおざっぱに言えば式(1)をどのようにして超対称性をもつ共形場の理論にするか, という点で互いに異なっている. これらのうちのどの定式化をもってきても, 内部空間 M_n やその他の共形場の理論の自由度のとり方によって異なる解がたくさん構成されている. それらの解は, まず M_n のトポロジーなどの離散的なとり方によって分類され, さらに, 計量などの連続パラメータの値によって連続的な広がりをもつ解の集合をなす. 模式的には, 図2のような感じである.

超弦理論の双対性とは「ある定式化のある解の集合と, 別の定式化のまたある解の集合と, の間に1対1対応があって, 対応している解では全く同じ物理が実現してい

^{*4} 超弦理論の解の時空の次元を「超共形場の理論の中心電荷の値の2/3」と抽象的に定義することはできる. この意味においては超弦理論は10次元時空を要求する.

^{*5} 専門家の間では, 通常は単にIIA型「理論」, IIB型「理論」, などと言いつつ, IIA型「定式化」とは言わない. 本稿では, 非弦理論を専門とする読者を想定して, ほんやりと広い意味をもつ言葉「理論 (theory)」が氾濫するのを避けた. 将来弦理論の双対性がよく理解された暁には本稿の「定式化」にあたる専門用語が生み出されることになるかもしれないが, 今のところ, 双対性が理解される以前からの用語「理論」を専門家は禁欲的に使っている. なお, 超弦理論の用語「形式」(formalism/formulation) は, 本稿の「定式化」とは別の概念である.

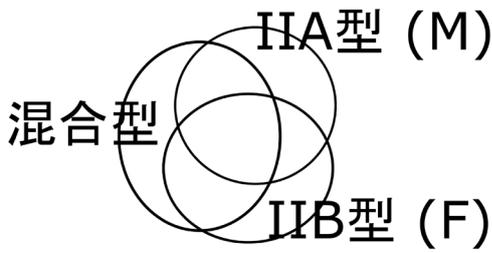


図3 超弦理論の解の集合の“全体”像. IIA型, IIB型, 混合型超弦理論といった異なる定式化の解の間に双対性があるため, 解の集合は互いに部分的に重なり合っている. 図2の中で矢印で結ばれたところを同一視した結果, この図になる. ただし, 解の全体像が本当によくわかっているわけでもないし, どのように重なり合っているか(双対性)も不明な点が多い. この絵は, あくまで現時点での雰囲気, 気分を表すものである. [なお, 図2ではバラバラに離れて描かれている個々の解の集合は, (本稿では触れない) topology changing 遷移でつながっていると専門家の間では信じられていて, そのため, この図では解の集合の全体をつなげて描いた.]

る」という主張である(図2内の矢印).^{*6} もっとも簡単な例は T-duality と呼ばれる. 式(2)で, パラメータの値が R のときの $(n, w, N) \in \mathbf{Z}$ の粒子の質量は, パラメータの値 R を ℓ_s^2/R に置き換えたときの $(w, n, N) \in \mathbf{Z}$ の粒子の質量と同じであることが見て取れるだろう. きちんとした主張を書き下すと, 半径 R の円周 S^1 を用いた $\mathbf{R}^{1,8} \times S^1$ 上の IIA 型超弦理論と半径 ℓ_s^2/R の円周を用いた $\mathbf{R}^{1,8} \times S^1$ 上の IIB 型超弦理論とは, まったく同じ物理系の異なる記述である, となる(なぜ IIA 型と IIB 型の間での対応なのか, という点は本稿では説明しない). T-duality に限らず, より一般の双対性対応の予想がなされ, さらに90年代の半ばを中心として次々に証拠があげられた. 異なる定式化の間でも少なくとも一部解どうしは物理として等価であるということは, 今では確かなものとなっている.

IIA 型超弦理論と IIB 型超弦理論の解の間の双対性は, ミラー対称性としてよく知られている. 混合型超弦理論と IIA, IIB 型超弦理論の解の間にも双対性の証拠があがっており, 全体像としては図3が現時点の理解の雰囲気だと筆者は考えている.^{*7}

この混合型と IIA, IIB 型の間での双対性という現象がなぜ驚きをもって迎えられたか, 狭義のコンパクト化で得られる解に即して説明してみよう. 弦理論のどの定式化であれ, $M_n \times \mathbf{R}^{1,9-n}$ による狭義のコンパクト化では, その解におけるエネルギー $E < M_s$ での物理を $M_n \times \mathbf{R}^{1,9-n}$ 時空の上の超重力理論を用いて近似的に記述することが可能である. エネルギースケールをさらに低く $E < M_{KK} := [\text{volume}(M_n)]^{-1/n}$ にとれば, $\mathbf{R}^{1,9-n}$ 時空の上の超重力理論での近似的記述も可能になる. この有効理論(近似的記述)が, 混合型超弦理論の解ならば, $M_n \times \mathbf{R}^{1,9-n}$ 上に重力と

$E_8 \times E_8$ もしくは $SO(32)$ のゲージ理論を入れて最小限に超対称化したものになることが知られており, 一方, IIA 型および IIB 型超弦理論の解の場合, 非可換 (non-Abelian) ゲージ場が有効理論に入っておらず, 代わりに2倍の超対称性がある. この基本的理解に沿う限り, 混合型超弦理論の解と II 型超弦理論の解は似ても似つかぬ物理を示すのであって, 双対性はまったく見えてこない.

もしこの「理解」に沿うならば, 現実の世界(標準模型)は非可換ゲージ理論を用いた有効理論になっているから, (それが超弦理論の狭義のコンパクト化で得られるのだとすれば) 混合型超弦理論を用いるべしということになる. 80年代はこの考え方が主流であった.

しかし, この「理解」には盲点がいくつかある. 90年代の半ばまでに進展した研究として, i) II 型超弦理論のソリトン解, ii) 特異点をもつ(滑らかなではない) M_n を II 型超弦理論のコンパクト化に用いた場合の物理の解析, の2点をあげることができる. この2点を取り入れたとき,^{*8} まず, II 型超弦理論の $M_n \times \mathbf{R}^{1,9-n}$ コンパクト化解に, $\mathbf{R}^{1,9-n}$ の $SO(1, 9-n)$ 対称性をもつソリトンを合わせて導入したものを考える場合, 超対称性が半分減る. これで, 超対称性に関する限り, 混合型超弦理論の解と同じ性質をもつようになる. さらに, II 型超弦理論のコンパクト化に特異点をもつ M_n を用いた場合, 非可換ゲージ場を含む低エネルギー有効理論が得られることもわかったのである. この2点の理解を得たのちには, もはや混合型超弦理論の解と II 型超弦理論の解が全く同じ物理を記述することがある, としてもさほど荒唐無稽なことではなくなる.⁵⁾

II 型超弦理論の立場に立てば, 解の集合の中でも非常に特殊な計量のとり方をしない限り, 滑らかな M_n に対応する. だから, 非可換ゲージ理論が有効理論に含まれている解はごく一部である. 同じ帰結は, 混合型超弦理論の立場からも得られる. 混合型超弦理論の解を記述する場合, 「計量などのパラメータ」の「などの」の部分に M_n 上のゲージ場の配位が含まれる. 非常に特殊なゲージ場の配位を用いた解では $E_8 \times E_8$ や $SO(32)$ のうちの大きな非可換部分群が低エネルギー有効理論の対称性として残るが, その他大半の解においては, 非可換対称性は破れて有効理論には残らない. 図2中央の絵で, 白色の領域を非可換対称性が残る解だとして読んでいただきたい.

この超弦理論の双対性の意味するところは, 直接的には個々の定式化の解の集合が互いに大きく重なっているということである(図3). また本稿の文脈では, 現実世界の物理を超弦理論のコンパクト化の解で実現するとしても, それは混合型超弦理論によるものだとはいずれも限らないということになる. よしっ, それでは IIA 型, IIB 型のコンパ

^{*6} 量子力学でも, 同じ物理に対して行列力学, 波動関数, 経路積分といった異なる定式化が可能なのだから, さほど驚くべきことではないのかもしれない. ただ, 量子力学の場合に比べて, 物理としても数学としてもかなり非自明であるが.

^{*7} 「双対性の全貌が物理としてはすでに理解されている」とはおそらく考えるべきでないのだろうと筆者は思っています. 数学としてはむろんのことですが.

^{*8} 本稿では, M-理論, F-理論の技術的詳細には触れずに概説記事を書く判断をした. この制約のため, IIA コンパクト化, IIA orientifold, M/G_2 をすべてごちゃまぜにして文章を書かざるを得ない. IIB, F-理論についても同様. この辺りは, 雰囲気はともかく意味不明, の文章になっている. 雰囲気のみを追い, 細部や論理は無視していただきたい.

クト化の解ももっと真面目に調べてみよう、という研究が90年代後半から始まるのだが、それも双対性の本質をとらえていたとは言い難い。筆者の意見では、現実世界に見えている手がかり—非可換ゲージ理論や物質場の相互作用の形など—の主たる特徴(代数的側面)は、どの定式化を用いて記述されるべきかという問いに情報を提供するものではない、ということが教訓であるべきだと思う。

では、現実世界からの手がかりをどう活かせばいいのか、というのは次節の主題となる。但し、「どの定式化を用いるのがよいのか」という点については、この節で一言補足しておこう。たとえ複数の定式化が共通の解の集合の記述を与えてとしても(図2)、それぞれの定式化において、その解の集合のあるパラメータ領域においては観測可能量の解析が容易であり(摂動展開の近似がよい)、他のある領域では解析が苦手、という事情がある。定式化1の得意領域や苦手領域は、定式化2のそれらとは異なっていることが通例である。だから、図3のように解の集合が重なっていても、定式化Aを用いて解析したくなる領域、定式化Bを用いて解析したくなる領域という概念はなお意味があるのである。そして、どの定式化を用いるのがよいかという問いは主として定量的(パラメトリック)なもの。現実世界の標準模型における代数的な情報ではなく、観測可能パラメータの連続的にとりうる値を論ずるときに重要である、ということになる。標準模型の湯川相互作用定数(quark, leptonの質量を決める数値)がその代表例となる。この内容も、次節で述べる。

3. 解の集合の全体像と翻訳

3.1 場の理論の「模型」と超弦理論の「解」

現実世界の物理は、TeV以下のエネルギーの範囲では、場の量子論という理論的枠組みに、いくつかのデータ(=模型)を付加的に与えることで近似的に記述できることがわかっている。「模型」とは、ゲージ群のとり方、どのような種類の物質場がどれだけあるか、どのような相互作用があるか、その結合定数の値、といったデータからなる。素粒子物理の標準模型というのはその意味での模型である。それに対し、場の量子論は、模型のデータを用いて、種々様々な散乱振幅、確率、相関関数などの観測可能量を計算する一般的技術である。

量子重力の効果が無視できなくなるような高エネルギーになれば、場の量子論では近似のよい計算ができなくなり、場の量子論を超える理論的枠組みが必要になる。超弦理論はその理論的枠組みの候補である。超弦理論を十分に低いエネルギーでの物理現象に適用すれば(ほとんどの解においては)場の量子論+一般相対論と同じになることが知られているから、候補としての最低限の条件は満たしている。

超弦理論において異なる解を採用すれば、低エネルギーでは場の量子論の異なる模型が実現する。超弦理論の安定な解は非常にたくさん知られており、さらに、現時点で広

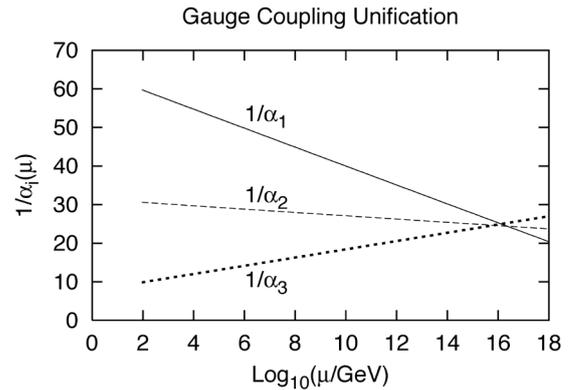


図4 標準模型の3つのゲージ結合定数がエネルギースケールによって実質的にどのように変わるかを示す図。μ~10¹⁶ GeV くらいの高エネルギーで、電磁気、弱い力、強い力の結合定数が実質的にほぼ同じになることが見てとれる。

く受け入れられている弦理論の理解の中には、それらの解のうちどれを「採用」すべきかという原理が存在しない。どの解でも「あり」であるから、場の量子論の非常に多くの模型が、超弦理論の立場からも「あり」ということになる。場の量子論という理論的枠組み自体は、その上に組み込む「模型」にほとんど何の制約も与えないが、超弦理論という理論的枠組みも非常にたくさんの「解」を許しているので、結局「模型」を予言する能力はきわめて低い。^{*9}

超弦理論は低エネルギーでの素粒子物理模型については何も知見をもたらさない!と叫んで忘れてしまうのも一法であるが、そこを粘って頑張るとどうなるか、というのが4節の主題である。その議論に入る前に、ここでは弦理論の解の集合の中で標準模型っぽいものはどのような位置を占めるか、ということの大雑把に見ておくことにしよう。

3.2 狭義のコンパクト化と大統一模型

標準模型のゲージ群SU(3)×SU(2)×U(1)の結合定数は、TeVスケール以下の実験によって精度よく測定されている。その値をもとにして、繰り込み群方程式を使えば、それらの結合定数が高エネルギーでどのような値をとるか推定できる。標準模型の粒子に加えてTeV-10³ TeV くらいのエネルギースケールのどこかから上のエネルギー領域で最小限の粒子が現れて超対称標準模型になる、という仮説のもとでは、繰り込み群を用いた結合定数の計算は図4のようになる。SU(3), SU(2), U(1)の3つの結合定数がM_{GUT}~10¹⁶ GeVあたりではほぼ等しくなることから、1-10³ TeVスケールでの超対称化とM_{GUT}での大統一、というセットの仮説が、魅力ある可能性として素粒子理論の世界では主な研究テーマの一つとなっている。^{*10}

しかし、この仮説には「二重項-三重項分離問題」と呼

^{*9} たとえばSO(1,9) Lorentz対称性をもつ解に限る。というような追加条件を課したときには、ごく少数の解しか該当しないのだが、SO(1,3) Lorentz対称性をもつものに限るという条件では大量の解が残る。

^{*10} LHC実験では、このうち1-数TeVの範囲に超対称化に必要な粒子があった場合に、発見できる可能性がある。現時点では、その兆候は見られない。

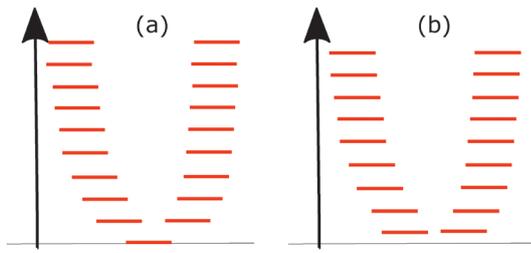


図5 内部空間のトポロジーを用いた「二重項-三重項間分離問題」の解決法。内部空間が存在すれば、高次元時空の上の場は(内部空間上の波動関数でモード分解することにより) $\mathbf{R}^{1,3}$ 時空上の無限個の場(粒子)として理解されることになる。それら無限個の粒子の質量を縦軸にとって表せば、この(a), (b)のようになる。ヒッグス場の二重項と三重項が同じ内部空間を共有していると、この(a), (b)のように大雑把には同じ質量スペクトルになるという点で、高いエネルギーまですべてを見ると「対称性が回復している」と言える。しかし、内部空間上の π_1 や H^2 などのトポロジーを活かして、ヒッグス場の二重項部分は(a)、三重項部分は(b)のような質量スペクトルにすることが可能である。この場合、低エネルギー部分のスペクトルは、二重項と三重項とで全く違う。この図では、質量スペクトルの一段分が $M_{\text{GUT}} \sim 10^{16}$ GeV くらいであることを想定している。

ばれる困難がある。高いエネルギーでゲージ群が統一して大きな対称性をなすならば、物質場の間にもその大きな対称性が高いエネルギーでは回復するはずである。標準模型の quark, lepton といった物質場の間にもその大きな対称性を回復させるのは容易(群の表現論)であるが、ヒッグス場に関しては一筋縄ではいかないのである: 標準模型のヒッグス場は、電弱 SU(2) 対称性の二重項であって、量子色力学の SU(3) 対称性とは無縁である。しかし、SU(2) も SU(3) 対称性も含むような大きな対称性が高エネルギーで実現するならば、少なくとも SU(3) 三重項のヒッグス場も高いエネルギーには存在しなければならない(つまり質量が大きい)。統一模型という仮説は、二重項部分のヒッグス場は 100 GeV 程度の低いエネルギーに存在するが、三重項部分のヒッグス場は M_{GUT} のような高いエネルギーにあるということを仮定せざるを得ない。この一見不自然に見える追加の仮定をどのように自然に実現するか、が「二重項-三重項間分離問題」である。

超弦理論の狭義のコンパクト化による解では、実6次元の内部空間 $M_n=6$ がある。この内部空間があれば、「二重項-三重項間分離問題」に非常にきれいな解決が得られるのである。内部空間がある状況では、 $\mathbf{R}^{1,3}$ Minkowski 時空上の粒子のスペクトルが図5(a), (b)のような無限のタワーをなす。ヒッグス場の二重項部分の粒子スペクトルが(a)で、三重項部分が(b)であるならば、図5を遠くから眺めたときに(高エネルギーでは)どちらも同じに見える(対称性がある)のではないだろうか? その一方で、スペクトルの一番下の部分を見れば、両者は明らかに違う。このようにして、「二重項-三重項間分離問題」は解決されるのだ。両者のスペクトルの違いは、内部空間 M_6 上のトポジカルに非自明なゲージ場の配位の直接的な帰結として得られる。^{*11}

^{*11} 基本群 $\pi_1(M_6)$ などを利用するものを Wilson line, コホモロジー群 $H^2(M_6)$ を利用するものを flux breaking と言う。トーラス orbifold で discrete Wilson line と呼ばれるものは後者に該当するので要注意。

この場合、 M_6 の長さスケール ($M_{KK}^{-1} = \text{volume}(M_6)^{1/6}$) を M_{GUT}^{-1} 程度にとる必要があり、これはプランク長 $M_{\text{Pl}}^{-1} \sim 1/(2 \times 10^{18} \text{ GeV})$ より有意に長い。

前節では「超弦理論の解は狭義のコンパクト化ということかたちを必ずしもとらない」ということを説明した。トップダウン的発想では、ある程度の大きさをもった内部空間 ($M_{KK} \ll M_s$) が存在すると考える必要はないのである。しかし、ゲージ結合定数の繰り込み計算にサポートされた「超対称+統一」のボトムアップ仮説を信じる立場からすると、とにかく狭義のコンパクト化の形の解に特に注目を払う価値がある(脚注17参照)、ということになる。本稿では、以下、この立場を基本的にとる。

3.3 代数的情報, 位相的情報, モジュライ

超弦理論の「解」と低エネルギーでの場の量子論の「模型」との間には対応関係があるはずだが、それはどのような関係だろうか。それがわかれば、現実世界が採用している「模型」が弦理論の「解」の集合の中でどのような位置を占めるかが見えてくる。これをもう少し技術的に簡単な問題に置き換えて、超対称統一「模型」が狭義コンパクト化の形の「解」の集合の中でどのような位置を占めるかを考えてみよう。これは、本質的には、模型のデータをコンパクト化の解を構成する幾何的データに対応させる翻訳問題である。既知の模型のデータを実験では直接手を出せない幾何データに翻訳をすることが理論物理として進歩にあたるかどうかは評価の分かれるところであろうが、まずはやってみるのである。

コンパクト化の形の解を与えるデータは、どの超弦理論の定式化を用いるのであれ、代数的情報, 位相的情報, そして幾何のモジュライからなる。このうち前二者は通常離散的に選ぶものであり、一方モジュライは図1(c), (d)のように連続的な値をとる(3.5節で補足あり)。ゆえに、場の理論の模型を構成する情報も上記の三種類に分けることが、この翻訳問題の根幹である。

ゲージ群の結合定数や湯川相互作用の値は、幾何モジュライの値に対応する(quarkやleptonの質量と混合角, CP位相は、すべて湯川相互作用から導かれる)。いかにも連続的に値をとれそうなものだから、何も不思議はないだろう。次に位相的情報の代表例は、物質場の世代数である。コンパクト化の解に話を限るならば、どのような弦理論の定式化を用いるのであれ、世代数は内部空間上の指数定理だとか、内部空間の部分多様体の交差形式だとか、(見かけは多少違えども)結局は位相的情報で直接与えられている。異なる弦理論の定式化では見かけの異なる位相的公式で世代数が与えられるが、物理としては結局同じ、というのが弦理論の双対性の意味するところの一部でもある。だから、どのような位相的公式で与えられるか、ということだけでなく、世代数は位相的情報である、ということの方が実態のある重要なことなのである。

低エネルギー模型でのゲージ群 G_0 のとり方、どんな種

類(表現)の物質場があるか、といったことはコンパクト化のデータのうちの代数的情報に該当する。 G_0 に対応するLie代数の代数構造は、混合型弦理論で定式化されている解ならばカレント代数として組み込まれているし、II型超弦理論の解ならば、内部幾何の実2次元部分多様体のトポロジカル和として組み込まれている(M-理論, F-理論の言葉でいえば)。数学的对象としてどのような姿をとろうとも、代数構造としては一致して物理としては同じ、というのがまたも双対性の意味するところである。

それに比べてやや非自明であるが、ゲージ相互作用以外にどのような相互作用があるか(どのような相互作用はないか)という模型の情報も、コンパクト化の形の解の代数的情報である場合が多い。古典的例を挙げれば、中間子と核子の相互作用である。中間子と核子の系には $G_0 = \text{SU}(N_f)$ のアイソスピン対称性が明白にあるが、もし「背後に $G = \text{SU}(N_f) \times \text{SU}(N_f)$ 対称性がある、それが G_0 に破れている」と仮定するならば、中間子の存在そのものや中間子と核子の間の相互作用の形まで理解できるというのが60年代のアイデアである。この背後の対称性 G は、現在では左巻きquarkと右巻きquarkの場の対称性として標準模型の中で理解されているが、このような後年の実験結果を待つことなく、 G がどのように定式化されるかを指定せずとも、低エネルギーの既知の物理を基にして、まだ見ぬ対称性 G を推測することは可能なのである。この教訓に基づき、どのような湯川相互作用があるかという情報(相互作用の値ではなく)は、代数的情報に含めることにする。^{*12, *13}

3.4 翻訳

上に説明した指針にそって、超対称 $\text{SU}(5)$ 統一模型のデータを弦理論のコンパクト化の解のデータに翻訳してみよう。まず、代数的情報から始めよう。top, charm, upのquarkの湯川相互作用が $G \rightarrow G_0 = \text{SU}(5)$ の対称性の破れから出てくるためには、 G は E_6 を含まねばならないことがわかる(文献7参照)。この代数構造を実現することは、IIA型, IIB型超弦理論にD-ブレーンやorientifold planeを用いたくらいでは不可能なのだが、これらの定式化の拡張版(それぞれM-理論, F-理論という)および混合型弦理論の中では可能であることが知られている。

次に、位相的情報である。現実世界では物質場の世代数が3であることがわかっているが、この情報は弦理論のどのような解がこの世界を記述するかという問いにほとんど役に立たない。コンパクト化の解から抽出できる一つの位

相的データが、(他のどんな整数値でも理論的には構わないのだけれど)たまたま3であったために、現実世界には三世代分の物質場がある、と現在理解されているところの超弦理論は言っているようである(4.3節に補足あり)。

最後に、モジュライの情報。ここでは、ゲージ結合定数の値には言及せず、湯川相互作用の値の定性的な性質(フレーバー構造)の翻訳について現在わかっていることをまとめておく。IIA型弦理論の拡張版定式化でよく記述されるコンパクト化の領域(図3右上のあたりという感覚)では、確かにtop, charm, upのquarkの湯川相互作用が出るには出るのだが、その相互作用係数の値については、現実世界で知られているような質量の階層性を示さない、という指摘がなされている。⁷⁾この困難を回避する方法は現在まで見つかっておらず、今のところ、図3右上のあたりは現実世界に似た超対称 $\text{SU}(5)$ 模型とは無縁といってよい。

図3右下や左側, IIB型弦理論の拡張版や混合型弦理論のコンパクト化でよく記述される解の領域であっても、ランダムに選べば、湯川相互作用の係数の値に期待する階層性などの性質は存在しないことがわかっている。ただし、右下の領域の解に関しては、「解の計量のどのパラメータをどのようにとれば、現実世界のような質量や混合角のパターン(フレーバー構造)が得られるか」がここ数年の研究で解明されている。^{*14}一方、図中左の方の領域では、そのうち、トーラスorbifoldと呼ばれる特殊なクラスの解では現実世界のフレーバー構造を再現するモジュライの値のとり方がよく調べられている。しかし、左の方の領域では、コンパクト化という解のクラス全体で系統的にフレーバー構造を調べるのが技術的に困難であり(よいアイデアが見つかっていない)、トーラスorbifold以外にどれくらい現実世界っぽい解があるのか、よくわかっていないのが現状である。

3.5 フラックスコンパクト化

3.3節では、コンパクト化の解のモジュライデータは連続的な値をとる、と書いた。これは実質的にはそんなに間違っていないが、正しくない部分もある。その狭間の部分をもう少し丁寧に説明しよう。ここでは、内部空間の計量の情報のうち、形を決める情報の部分にのみ話を限る。形の情報としては、図1(b)において、 T^2 を展開した平行四辺形の形の縦横比や、どれだけ横ずれしているか、みたいなものをイメージすれば十分である。

超弦理論は重力理論であるから、時空の計量が有効理論の場として含まれているのは当然であるが、その計量以外にもいくつかの場が含まれている。それらの場がコンパクト

^{*12} ただし、弦理論のコンパクト化の場合、物質場の世代数は位相的情報であって、代数的情報には直結しないことに注意が必要である。中間子-核子の場合には $\mathbf{R}^{1,3}$ 時空の上での対称性の破れであったが、コンパクト化の場合には $M_6 \times \mathbf{R}^{1,3}$ 時空上の対称性 G から $\mathbf{R}^{1,3}$ 時空上の対称性 G_0 への破れである。世代数は $\infty - \infty$ を指数定理を用いて決定しなければならず、対称性の代数の変化だけでは決まらない。

^{*13} 中間子-核子の場合と同じく、これは仮説である。湯川相互作用が $G \rightarrow G_0$ 対称性の破れから自然に期待されるものではなく、別の機構(たとえばブレーンインスタントン)により発生するという可能性は排除できない。仮説の正否を決定するのは、あくまで実験である。

^{*14} 右下の領域の解においては、標準模型の物質場 $(q, u^c, e^c) = \mathbf{10}$ や $(d^c, \ell) = \bar{\mathbf{5}}$ の波動関数は内部空間 M_6 内のリーマン面 C_{10} や C_5 に局在化している。アイデア1は、 C_{10} が $g=1$ であり、かつ $j(C_{10})$ の値が大きいと仮定する。これで湯川固有値の階層性も、quark混合角の小ささも同時に再現できる。アイデア2は、 C_{10} や C_5 が既約でなくなる極限をとることで固有値の階層性を再現する。混合角を小さくするには、さらなる微調整が必要。⁸⁾

トな内部空間の上でトポロジカルに非自明な形をとることが理論的に許されていて、そのようなコンパクト化の解を、フラックスコンパクト化と言う。フラックス（トポロジカルに非自明な場の配位）が入っている場合、計量のうちの形の情報は勝手な値をとることはできなくなる。この仕組みを例えるならば、「新聞紙の山をビニールひもで縛れば、新聞紙の山は型崩れしない」ということ。型崩れすると、ひもの長さが長くなり、ひもの張力がもとの形に復元させるのである。ひもの張力は、フラックスがもつエネルギーのたとえである。

この仕組みによって定まる内部空間の形は、フラックスのトポロジカル配位によって決まる。この決まり方もまた、新聞紙-ひも模型を少し拡張した、図6のようなおもちゃ模型でイメージすることができる。図中、単位格子内の面積を一定に保ったまま格子点は動き得るとしたうえで、この格子点の間に輪ゴムをはめたとしよう。輪ゴムのはめ方

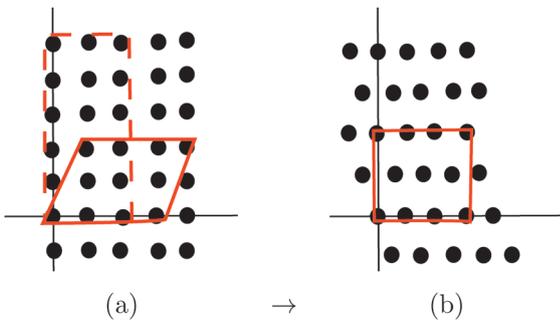


図6 フラックスコンパクト化で内部幾何の形が決定される仕組みを、おもちゃ模型で表す。単位格子の面積を一定に保ちつつも格子の形は変化する。という設定を考える。そのうえで、輪ゴムを格子点にかけると。輪ゴムのかけ方には、図(a)に示すように位相的に異なるやり方が何通りもある(赤色実線、破線など)。ただし、ひとたび輪ゴムのかけ方を指定すれば、輪ゴムの周長を最短にする格子の形は決まってしまう。図(b)の単位格子の面積は(a)の時と変わらないが、赤色実線で示した周長は(b)の場合に最短となっている。赤色破線の形に輪ゴムをかけた場合には、格子の形は図(b)とは別のものになる。

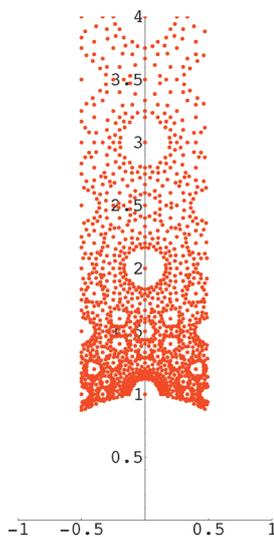


図7 文献9の rigid Calabi-Yau 模型で、位相的に異なるフラックスの配位を調べ上げ、それに対応するモジュライ(形)の値を求めてプロットしたもの。各点が、異なるフラックスの位相的配位に対応。文献9から改変。

(位相的配位)の違いによって安定解となる単位格子の形は変わってくるのが簡単にわかる。弦理論でのフラックスコンパクト化が内部空間の形を決める仕組みも、これとほぼ同じである。

フラックスの位相的配位にはいろいろなとり方が可能だから(輪ゴムのたとえ参照)実現される内部空間の形もいろいろである。その結果、フラックスコンパクト化の安定解として得られる幾何の形(モジュライパラメーターの値)の集合を求めると、たとえば単純な内部幾何の例では、図7のようになる。これは厳密には連続分布ではないが、実質的には連続分布と考えて差し支えない。そのため、図1(d)や図2では(図7のような)点集合を連続集合として扱った。しかし、フラックスの位相的配位を一つ定めた場合にはもはや値を連続的に変えた解が存在するわけではないことには留意が必要である。このことの帰結を4.2節と4.3節で論じている。

4. 超弦理論から得られた知見

超弦理論にはたくさんの「解」があって、その解の中から一つを選び出す原理が今のところ存在しない。そのため、低エネルギーでどのような場の理論の「模型」になるかを予言する能力がほぼないのに等しい。実験から得られた知見をインプットに用いて、それらの解を絞り込んでみて、その末に弦理論から何も知見をもち帰ることができないのだとしたら、それは実に残念なことである。本節では、残念には終わらせまいとする試みをいくつか紹介する。

超弦理論は量子重力効果をきちんと計算できる枠組みなのであるから、重力による補正効果が本質的に重要になってくるような物理現象をテーマに選ぶのが、この目的での正攻法である。通常そのようなものとしてあげられるのは、インフレーション(もしくは宇宙の熱史)の物理、超対称性の破れ(とくに重力伝達機構)の2つ、それにもう少し枠を広げて、QCD axionも合わせて数えてもよいかもしれない。インフレーションと axion に関しては、いろいろな研究結果はあるのだが、物理学会誌に解説記事が書かれる適切な時点であると筆者は考えていない。また、超対称性の破れを超弦理論で扱うことに関しては、研究がまだほとんど始まっていない。(超対称な部分によやくカタがついてきた状況なのだから、)このような理由により、本稿では重力がかかわる素粒子現象は割愛して、もう少し簡単に手を出せる試みとその結果(経過)を記すにとどめる。

4.1 陽子崩壊の特徴的な分岐比

陽子は核子の中で最も軽い。標準模型の範囲内では核子数を変える相互作用が存在しないが、統一模型には核子数が保存されない相互作用が含まれているから、陽子ももっと軽い粒子に非常に稀に崩壊しても不思議ではない。

陽子が陽子よりも軽い粒子に崩壊するとしても、その軽い粒子の組み合わせ(終状態)は複数の可能性がある。それぞれの終状態につき、決まった値の崩壊率 $\Gamma(p^+ \rightarrow \pi^0 + e^+)$,

$\Gamma(p^+ \rightarrow \pi^+ + \bar{\nu})$, $\Gamma(p^+ \rightarrow K^+ + \bar{\nu})$ 等をもつ. いろいろな終状態について崩壊率を実験的に求めることができれば, 核子数を保存しない相互作用の詳細に迫る貴重な情報を得ることができる. 但し, これまでのところ, どの終状態への崩壊であれ, 崩壊率が有意に正の値であるという実験的証拠がなく, 将来への期待にとどまっている.

文献10は次のことを指摘した. まず, 図3の右上付近に位置する超弦理論の解で超対称統一モデルを実現する場合, quarkやleptonなどの物質場は, ゲージ場に比べて, 内部空間の中でも実3次元分狭い領域に局在している.*15 次に, 陽子崩壊 $p^+ \rightarrow \pi^0 + e_L^+$ を引き起こす実効的相互作用 $\Delta\mathcal{L} = c\psi^\dagger \psi^\dagger \psi\psi$ の4つのフェルミオン ψ はすべて同じ点に局在しているが, $p^+ \rightarrow \pi^0 + e_R^+$ と $p^+ \rightarrow \pi^+ + \bar{\nu}$ を引き起こす同様の実効的相互作用では, 4つのフェルミオンが2つずつ内部空間の別の点に局在しているということ.*16 そして, 最後に, 前者の相互作用では, 物質場が完全に実3次元分局在化していることから, 相互作用の係数 c が, 紫外1次発散をしていることを導いた(実3次元空間上のグリーン関数は1/距離). 実際の発散は, 弦理論の弦の張力のエネルギースケール M_s で丸め込まれて, c は有限の値をとる. それでも, 前者の相互作用の c は, 後者のそれに比べて M_s/M_{GUT} くらい大きいだろうと結論した.*17 実験の文脈では e_L^+ と e_R^+ を区別するのは容易でないだろうが, $\Gamma(p^+ \rightarrow \pi^0 + e^+)/\Gamma(p^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu})$ の比の値が ($\mathbf{R}^{1,3}$ 時空上の場の理論で作られた統一模型の場合にくらべて) 大きくなるだろうというのが実質的予言になる. 弦理論のたくさんある解の個々の性質の詳細に立ち入らずに一般的な結果を導いた, 鮮やかな結果である.

3.4節の議論では, 図3の右上あたりの解では現実世界のようなフレーバー構造を統一模型ではうまく再現できない, ということ述べた. だから, 上の鮮やかな結果自体をそのまま現実世界には適用することはできなさそうである. しかし, その考え方をそのまま流用して, 図3右下あたりの解について同様の議論をすることができる. この場合, 物質場の局在化の度合いは実2次元分であり, 紫外発散は \log , なので, $\ln(M_s/M_{\text{GUT}})$ 程度に相互作用係数 c が大きくなることが予想され, あまり大きな崩壊率の比の変化は見られないだろうという結論になる.¹¹⁾

4.2 右巻きニュートリノの質量

次はニュートリノの質量の話題. SuperKamiokande による大気ニュートリノ振動の観測で, 標準模型の左巻き

ニュートリノにはゼロではない質量があることがわかった. 実験から直接わかるのは「質量の二乗」の差, Δm_{atm}^2 であって質量そのものではないが, 少なくとも $\sqrt{|\Delta m_{\text{atm}}^2|}$ かそれ以上の質量をもつ左巻きニュートリノが一つはあることがわかる. この質量がマヨラナ型であると仮定すると,

$$M_{\text{unit}} \sim (174 \text{ GeV})^2 / \sqrt{|\Delta m_{\text{atm}}^2|} \approx 6 \times 10^{14} \text{ GeV} \quad (3)$$

程度以下のエネルギースケールに, 何か新たな(標準模型には含まれていない)粒子が存在するはずだということが示唆される(場の量子論のユニタリ性).

シーソー仮説は, この新たな粒子が右巻きニュートリノであるとする. 右巻きニュートリノは標準模型や統一模型のゲージ場とは相互作用しない. ゆえに, この粒子は大きな一たとえば M_{GUT} くらいの一質量をもってもゲージ対称性に抵触しない. そしてその仮定を受け入れれば, 左巻きニュートリノの質量は自動的にとても軽くなるのだ.

この仮説を理論的に追及するならば, 右巻きニュートリノの質量の値として何が「自然」かを突き詰めたいところである. 上記 M_{unit} というエネルギースケールは, ゲージ結合定数の統一が実現するエネルギー $M_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$ と同じだということにはやや苦しい, ということにも留意が必要である. 局所場の理論の理論的枠組みの中でこの「自然さ」にかかわる問いを追及をするのは困難なのだが, 超弦理論の枠組みではどうなのだろうか.

超弦理論の解の集合の中で超対称統一模型の性質を満たすものの研究は, 図3右下あたりに位置するものを中心に進んでいる. そのあたりの解について, 以下のことがわかった.¹²⁾ まず, i) 内部空間の計量のうち「形」の変形の自由度にあたる場が右巻きニュートリノに期待される性質をもつこと, ii) それらの場は $M_R \sim M_{\text{GUT}}^2/M_s^2$ 程度の質量をもつこと, iii) そのような場の自由度の数は, たいていの内部空間の場合, $\mathcal{O}(100)$ とかもっとそれ以上に多いこと. だから, 超弦理論の右下あたりの解としては, 右巻きニュートリノの質量は M_{GUT} よりは数ケタ低いこと(脚注17参照). そして, それらが大量にあること, が普遍的であるとわかる.

この観察は, 4.1節と同じく, 超弦理論の個々の解の詳細には立ち入らず, 多数の解に当てはまる一般的性質を抽出するアプローチである. そして, そのような理論的に導かれた右巻きニュートリノの質量 M_R が, 実験+場の理論のユニタリ性から求まる質量上限値という非自明なテスト ($M_R \leq M_{\text{unit}}$) をクリアすることがわかったのである.

4.3 解の集合の統計調査

超弦理論の(近似的に超対称性をもつ)解の集合は, よく目を凝らしてみれば, 図2,3のようではなく, 図7のようになっている(3.5節). これは, 解を一つ, 二つ, と数えることができることを意味する. 解の総数が有限であるならば, 何割の解において宇宙定数の値がxxxか? 物質場の世代数の平均値は?といった統計的な問いを well-

*15 IIAの言葉を用いると, D6-ブレーンを内部空間 M_6 中の実3次元サイクルに巻きつけたものの上をゲージ場が伝播し, 物質場はそれらの3次元サイクルの交差点に局在している. ゆえに, 実余次元3の局在である. なお, IIBの場合は, D7-ブレーンのゲージ場が M_6 中の実4次元サイクルに巻きついていて, 物質場は, その中のリーマン面(実2次元サイクル)に局在している. そのため, 実余次元2の局在である.

*16 $SU(5)$ の表現論の言葉を使うと, $10^+ \cdot 10^+ \cdot 10 \cdot 10$ と $10^+ \cdot 5^+ \cdot 10 \cdot 5$ の違いを言っている. e_L^+ と $(\bar{\nu}, e_R^+)$ の生成演算子は, それぞれ 10^+ と 5^+ に含まれている.

*17 M_s は, $M_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$ と $M_{\text{Pl}} \sim 2 \times 10^{18} \text{ GeV}$ の間くらいにあると考えるとよい.

defined に立てることができる。その問いの答えから何を学ぶのかについてはよく考えなければならないが、

近年の研究¹³⁾で、超弦理論の解の集合のうち、超対称 SU(5) 統一模型になる部分集合に限った場合、世代数は正規分布になることがわかった。中心値は世代数=0、分散は $\mathcal{O}(1)$ である。現実世界の |世代数|=3 を説明しているとは言い難いが、大きく乖離してもいない。また、SU(3) \times SU(2) \times U(1) ゲージ群をもつ部分集合に限った場合、SU(5) 統一模型に (3.2 節で説明した方法で) 破れを導入した形のものが増えるという示唆も得られている。これは、ゲージ結合定数の統一が現実世界でおきていることの説明だといえなくもない。

明らかになってきたことは都合のよい話ばかりでもない。ゲージ群 G_0 の模型になる解の数が、 G_0 に激しく依存するのである。ある内部空間 M_6 のトポロジを指定した場合、 $G_0 = \text{SU}(5)$ の解に比べてゲージ群がまったくない解の数が e^{1000} 倍ほどある。他の M_6 のトポロジを指定した場合には、SU(5) ゲージ群になるような解が全く存在せず、SU(5) よりかはるかに大きい G_0 をもつ解しか存在しない。このテーマは現在進展中なのでどのような結論に落ち着くか明らかでないが、このような議論が定量的になされるようになってきている。

参考文献

- 1) 本稿は非専門家向けの概説を主目的としているため、この分野に本格的に参入したいという方を想定した文献リストにはなっていません。

参入したいけどどこから手を付けたら、という方はお気軽に身近な専門家や筆者までご相談ください。

- 2) たとえば P. Candelas, G. T. Horowitz, A. Strominger and E. Witten: Nucl. Phys. B **258** (1985) 46 や文献 6, そしてこれらの論文の引用文献など。
- 3) E. Witten: Nucl. Phys. B **403** (1993) 159.
- 4) P. S. Aspinwall, *et al.*: Nucl. Phys. B **416** (1994) 414; *ibid.* **420** (1994) 184; J. Distler, *et al.*: *ibid.* **481** (1996) 289; D. E. Diaconescu and J. Gomis: JHEP **0010** (2000) 001.
- 5) C. Vafa and E. Witten: Nucl. Phys. B **431** (1994) 3; E. Witten: *ibid.* **443** (1995) 85; A. Sen: JHEP **9709** (1997) 001; B. S. Acharya and E. Witten: hep-th/0109152.
- 6) E. Witten: Nucl. Phys. B **258** (1985) 75; *ibid.* **268** (1986) 79.
- 7) R. Tatar and T. Watari: Nucl. Phys. B **747** (2006) 212.
- 8) J. J. Heckman and C. Vafa: Nucl. Phys. B **837** (2010) 137; H. Hayashi, *et al.*: JHEP **1008** (2010) 036.
- 9) F. Denef and M. R. Douglas: JHEP **0405** (2004) 072.
- 10) T. Friedmann and E. Witten: Adv. Theor. Math. Phys. **7** (2003) 577.
- 11) M. Wijnholt: arXiv: 0809.3878 [hep-th]; R. Tatar and T. Watari: arXiv: 0806.0634 v3 [hep-th].
- 12) R. Tatar, *et al.*: Nucl. Phys. B **823** (2009) 1.
- 13) A. P. Braun and T. Watari: Phys. Rev. D **90** (2014) 12; 121901; T. Watari: JHEP **1511** (2015) 065.

著者紹介

渡利泰山氏： 専門は素粒子論。

(2015年11月30日原稿受付)

String Compactification: After Thirty Years

Taizan Watari

abstract: Status summary of study in string compactification, with primary focus on how the real-world physics can be accommodated, and what we can learn from such study.

量子推定理論による不確定性関係の定式化

渡辺 優 〈京都大学基礎物理学研究所 yuwata@yukawa.kyoto-u.ac.jp〉

上田正仁 〈東京大学理学系研究科 ueda@phys.s.u-tokyo.ac.jp〉

不確定性関係は量子力学の本質を端的に表現する関係式として知られているが、その意味するところは見かけほど単純ではない。不確定性関係の研究はハイゼンベルクがガンマ線顕微鏡で電子の位置と運動量の測定精度に関する思考実験を行ったことにはじまる。ガンマ線で電子の位置を Δx の精度で測定すると、測定の反作用を受けて運動量が Δp だけ不確定になり、両者が不確定性関係

$$\Delta x \Delta p \geq h/2$$

を満足するという主張である。この不確定性関係は、測定器の役割が物理量の測定結果に本質的な役割を果たすというボーアの相補性を端的に表現したものであると解釈できる。一方、標準的な量子力学の教科書で議論される、物理量の標準偏差の間に成立する不確定性関係は「互いに非可換な物理量が同時に定まった値を持つことはできない」という量子状態の非決定性を表している。これは、測定の相補性の数学的な証明であると間違っで紹介されることもある。しかし、相補性と非決定性は全く異なった概念である。実際、後者は任意の波動関数に対して数学的に不等式が証明できる概念であるが、前者は誤差とは何か、擾乱とは何かを指定してはじめて具体的な意味を獲得する。不確定性関係が今なお最先端の研究対象として議論されているのは、誤差と擾乱に関して万人に共通する認識が未だ確立されていないからである。

ハイゼンベルクのガンマ線顕微鏡の議論は、粒子を古典的に扱った半古典論であるため、現代的な量子測定理論の枠内で考え

た場合に、誤差と擾乱の間にどのような不確定性関係が成立するのだろうかという自然な疑問が沸き起こる。しかしながら、量子測定理論では測定される対象系だけでなく測定器も量子力学にしたがうため、対象系の量子揺らぎだけでなく測定器の量子揺らぎも測定結果に影響し、その解析は単純ではない。一般の測定過程について、測定器の出力と対象となる物理量の間関係を明らかにし、対象について有意な情報を取り出す合理的な方法は何か、という問題が生じる。このような問題に対して解答を与えるのが量子推定理論である。

量子推定理論の観点からは、測定誤差は測定によって得られたフィッシャー情報量の逆数として与えられる。フィッシャー情報量は統計学における最も重要な量の一つであり、測定データから推定された物理量の推定精度を与える。すなわち、物理量の変化に対応して、測定値がどれだけ変化するかという感度を与える量である。

測定の反作用の影響で、測定過程はユニタリではなくなり、非可逆な過程となる。そのような非可逆な過程では情報量は単調減少するため、測定過程の非可逆性を失われた情報量として特徴付けられる。したがって、擾乱は対象系の持つフィッシャー情報量の損失として定式化できる。

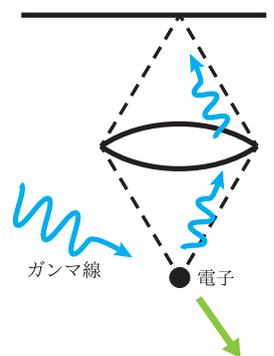
我々は、このように定式化された誤差と擾乱の積の下限が交換関係で与えられるというトレードオフ関係を見出した。こうして、ハイゼンベルクが思考実験で指摘した測定誤差と擾乱の間の不確定性関係が量子推定理論の観点から定量的に示された。

—Keywords—

ハイゼンベルクの思考実験：
ハイゼンベルクは自身の提出した量子力学の行列理論の物理的な意味を考察するために、いくつかの思考実験を提示した。最も有名なものは1927年の論文で議論された「ガンマ線顕微鏡の思考実験」である(下図)。この思考実験では、電子の位置を正確に測定するためには、波長の短い光(=ガンマ線)が必要であることを述べた上で、そのような波長の短い光は大きな運動量を持つために電子の運動量を大きく変えてしまい、電子の運動量を不確定としてしまうことが論じられた。

フィッシャー情報量：
確率分布関数に現れるパラメータに関して、分布関数を持っている情報量を表したものの、フィッシャー情報量が大きいほど、パラメータに対する原理的な推定精度が向上する。

量子推定理論：
統計学における推定理論を量子力学に拡張した理論。実験の観測データから、物理系についての推定や得られる情報の限界について考察する。



ガンマ線顕微鏡の思考実験の模式図。電子から散乱されるガンマ線を観測することによって電子の位置を測定する。

1. はじめに

標準的な量子力学の教科書で議論される2つの物理量 A と B の標準偏差 $\sigma(A)^2 := \langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2$ の間に成立する不確定性関係

$$\sigma(A)\sigma(B) \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle| \quad (1)$$

は測定される系そのものの量子揺らぎの性質を記述している。ここで、 $\langle A \rangle$ は系の密度演算子 ρ を用いて $\langle A \rangle := \text{Tr}[\rho A]$ で与えられる。ケナード・ロバートソンの関係式^{1,2)} と呼ばれる不等式(1)は、位置と運動量のような非可換な観測量が、量子揺らぎのため同時に決まった値をとれないという量子状態の非決定性を表している。これに対して、ある物理量 A を測定すると、一般にそれとは共役な物理量 B に測定の反作用が及ぶ。このため A を精度よく知ろうとすればするほど B への擾乱が大きくなる。ハイゼンベルク³⁾ がガンマ線顕微鏡の思考実験で考察したのは、この測定精度と測定の反作用による擾乱の間のトレードオフ関係である。このことから、互いに非可換な物理量の測定精度の間にもトレードオフ関係の存在が予想される。この問題を現代的な量子測定理論の枠内で考えた場合に、誤差と擾乱の間にもどのような不確定性関係が成立するのだろうかという自然な疑問が湧き起こる。しかしながら、実際にどのように擾乱が及ぶかは測定過程の詳細に依存するために、このプロセスの分析は単純ではない。特に、測定器の出力結果から知りたい物理量についての情報を得る合理的方法は何かという問題に直面する。2章で述べるように、量子推定理論における不偏推定量あるいは一致推定量の構成方法は、まさにこのような問題に対する答えを与えてくれる。^{4,5)}

ボアが指摘したように、⁶⁾ 量子論が古典論と決定的に異なる点は、量子系の性質は系と測定器との相互作用を通じて発現し、測定結果は古典的な(重ね合わせではない)値として出力される。したがって、我々は古典的な出力値から測定前と後の量子状態を推定しなければならない。この問題は量子測定における相補性と呼ばれ、これまで多くの研究がなされてきた。量子測定理論においては、測定対象だけでなく測定器も量子力学にしたがうため、測定結果や測定の反作用を受けた状態には測定器の量子揺らぎも影響する。アーサーズとグッドマン⁷⁾ は、対象系の任意の量子状態 ρ に対して、測定器のメーターを記述する物理量 M_A と測定対象の物理量 A との間に、関係式

$$\text{Tr}[(\rho \otimes \omega) U^\dagger M_A U] = \langle A \rangle \quad (2)$$

が成り立つ場合を考えた。ここで、 ω は測定器の初期状態、 U は対象系と測定器との間のユニタリ相互作用を表す。条件(2)は、系の任意の初期状態に対してメーターの期待値が物理量の期待値と一致することを要請している。任意の ρ に対して条件(2)が満足される測定は不偏測定と呼ばれ、不確定性関係を考える上で重要な役割を果たす。このとき、測定結果の揺らぎ $\sigma'(M_A)^2 := \text{Tr}[(\rho \otimes \omega) U^\dagger M_A^2 U]$

$-\text{Tr}[(\rho \otimes \omega) U^\dagger M_A U]^2$ には対象系と測定器の量子揺らぎが合算され、測定結果の揺らぎの積の下限が

$$\sigma'(M_A)\sigma'(M_B) \geq |\langle [A, B] \rangle| \quad (3)$$

のように、ケナード・ロバートソンの不等式(1)と比べて2倍になる。このとき、測定過程による揺らぎの増分

$$\varepsilon_{\text{AG}}(A)^2 := \sigma'(M_A)^2 - \sigma(A)^2 \geq 0 \quad (4)$$

は不偏測定の場合の測定誤差と見なすことができ、これに対して次のトレードオフ関係が成り立つ。⁷⁾

$$\varepsilon_{\text{AG}}(A)\varepsilon_{\text{AG}}(B) \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle| \quad (5)$$

小澤は不偏性が成立しないような一般的な量子測定過程においては、誤差と擾乱の間に不等式(5)のようなトレードオフ関係は成立せず、系の量子揺らぎも含めたより一般的な不確定性関係

$$\varepsilon_0(A)\eta_0(B) + \varepsilon_0(A)\sigma(B) + \sigma(A)\eta_0(B) \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle| \quad (6)$$

が成立することを示した。⁸⁾ また、実験的検証もなされた。^{9,10)} ここで、

$$\varepsilon_0(A)^2 := \text{Tr}[(\rho \otimes \omega) (U^\dagger M_A U - A)^2] \quad (7)$$

$$\eta_0(B)^2 := \text{Tr}[(\rho \otimes \omega) (U^\dagger B U - B)^2] \quad (8)$$

は小澤によって導入された誤差と擾乱である。不偏測定でない場合は M_A と A の間に相関が生じるため式(7)で定義された誤差は一般には式(4)とは一致しない。

不偏測定でない簡単な例として、測定結果が g 倍に増幅された測定

$$\text{Tr}[(\rho \otimes \omega) U^\dagger M_A U] = g \langle A \rangle \quad (9)$$

を考えてみよう。このとき、不偏性の条件(2)が成立しないので、不等式(5)は成立しないが不等式(6)は数学的に成立する。しかし、この場合は増幅率で割った $g^{-1}M_A$ を改めてメーターを記述する物理量とみなせば不偏性は回復し、不等式(5)も成立する。¹¹⁾ 実際、量子光学では、出力信号を増幅率 g で割った量で雑音を評価し、入力等価雑音と呼ばれる。¹²⁾

一般の測定過程においては、測定値と物理量との対応関係は非自明であり、測定値をどう変換すれば不偏性を満足するようなメーター本来の物理量を構成できるかという問題が生じる。この問題に答えを与えるのが量子推定理論である。後に述べるように、量子推定の基本的な問題意識は、未知の状態の物理量の期待値を測定結果からどのように推定するのか、また、そのときの推定精度はいくらか、というものである。したがって、上の例ではメーターの値を増幅率 g で割った値が本来推定したい物理量となる。不偏性を要請する推定理論では、このようなスケールリングが自然な形で取り入れられる。我々は、量子推定理論を用いて誤差と擾乱を定式化することで、誤差と擾乱の積が満たすト

リードオフ関係を導出した。ここで導入された誤差と擾乱には推定論的に有意な情報(測定の不可逆性など)が含まれており、その結果、誤差と擾乱の積の下限が交換関係で与えられる。以下ではこれらについて述べる。

2. 量子推定理論による誤差および擾乱の定式化

ハイゼンベルクがガンマ線顕微鏡の思考実験を行った当時は、一般の量子測定過程を記述する数学的手法は存在していなかった。しかし、現在では一般の量子測定過程を数学的に記述する手法が確立されており、量子情報や量子制御、量子光学などでよく用いられている。¹³⁻¹⁵⁾ 一般の量子測定過程は測定演算子(クラウス演算子)と呼ばれる演算子の集合 $\mathbf{K} = \{K_{i,j}\}$ を用いて表される。¹⁶⁾ ここで、測定演算子の1つ目の添字 i は測定結果を識別するラベルであり、2つ目の添字 j は測定結果からは区別することのできない量子状態の変化を識別するラベルである。量子状態 ρ に対して測定 \mathbf{K} を行った場合、 i 番目の測定結果を得る確率 p_i は、

$$p_i = \sum_j \text{Tr}[K_{i,j} \rho K_{i,j}^\dagger] \quad (10)$$

によって与えられ、 i, j について平均された測定後の量子状態 ρ' は

$$\rho' = \sum_{i,j} K_{i,j} \rho K_{i,j}^\dagger \quad (11)$$

で与えられる。

物理量 A の誤差の無い測定(射影測定)は、 A のスペクトル分解に対応する射影演算子 P_i が測定演算子となっている場合、すなわち、 $\mathbf{K} = \{P_i\}$ に対応する。測定演算子を用いることで、誤差を含んだ一般の測定過程をも記述することが可能になる。

独立かつ同一の(independent and identically distributed; i.i.d.) 未知の量子状態 ρ が n 個与えられた場合に、 $\langle A \rangle$ を測定結果から推定することを考える。このとき、測定データとして意味のあるものは、各々の測定結果 i が得られた回数 n_i だけであり ($n = \sum_i n_i$)、推定値はそれらの関数 $A^{\text{est}}(n_1, n_2, \dots) := A^{\text{est}}(\mathbf{n})$ となる(この測定データから推定値への関数は推定量と呼ばれる)。測定が不偏性条件(2)を満たす場合、 $\langle A \rangle$ の推定量は、 M_A の固有値 m_i を用いて

$$A^{\text{est}}(\mathbf{n}) = n^{-1} \sum_i n_i m_i \quad (12)$$

で与えられる。すなわち、測定値 $\{m_i\}$ の頻度平均によって $\langle A \rangle$ を推定することができる。なぜなら、推定量の期待値が $\mathbb{E}[A^{\text{est}}] = \langle A \rangle$ を満たすからである。このような推定は不偏推定と呼ばれる。ここで、 $\mathbb{E}[A^{\text{est}}] := \sum_{\mathbf{n}} A^{\text{est}}(\mathbf{n}) p(\mathbf{n})$ 、また、 $p(\mathbf{n})$ は各測定結果 i が n_i 回得られる確率である。このとき、推定量の分散は $\mathbb{V}[A^{\text{est}}] := \mathbb{E}[(A^{\text{est}})^2] - \mathbb{E}[A^{\text{est}}]^2 = n^{-1} \sigma'(M_A)^2$ となる。したがって、式(4)で与えられていた測定過程による揺らぎの増分は、

$$\varepsilon_{\text{AG}}(A)^2 = n \mathbb{V}[A^{\text{est}}] - \sigma(A)^2 \quad (13)$$

と書き直せることがわかる。

不偏測定の場合は不偏推定量を構成することは容易であるが、一般の測定においては不偏推定量が存在するとは限らず、不偏性の代わりに確率収束性 $A^{\text{est}} \xrightarrow{p} \langle A \rangle$ などで代用することが多い。このような推定量は一致推定量と呼ばれる。一致推定量の中で最適な、つまり分散が最小となる推定方法として、最尤推定法(Maximum Likelihood Estimator; MLE)と呼ばれる最適な推定方法が知られている。¹⁷⁾ 更に、任意の測定に対して、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \mathbb{V}[A^{\text{MLE}}] \geq \sigma(A)^2 \quad (14)$$

が成り立つことが、後で述べるフィッシャー情報量とそれが満たす量子クラメル・ラオ不等式から示せる。^{18, 19)} このことは、量子揺らぎを超えた精度で物理量 A を測定することができないことを意味している。また、不等式(14)の等号は A に対応する射影測定によって達成される。したがって、定義(13)に対応して、任意の測定 \mathbf{K} における物理量 A の測定誤差は

$$\varepsilon(A; \mathbf{K}) := \lim_{n \rightarrow \infty} n \mathbb{V}[A^{\text{MLE}}] - \sigma(A)^2 \quad (15)$$

で定義できる。^{20, 21)} つまり、図1で模式的に表したように、誤差を推定量の分散と量子揺らぎの差として定義する。なお、この測定誤差は、 A に対応する射影測定の場合にはゼロとなる。

最尤推定量の分散は、以下のように

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \mathbb{V}[A^{\text{MLE}}] = \mathbf{a} \cdot \mathbf{J}(\mathbf{K})^{-1} \mathbf{a} \quad (16)$$

と求めることができる。¹⁸⁾ ここで、ベクトル \mathbf{a} は、例えば測りたいスピンの向きのように、物理量 A を特徴付けるパ

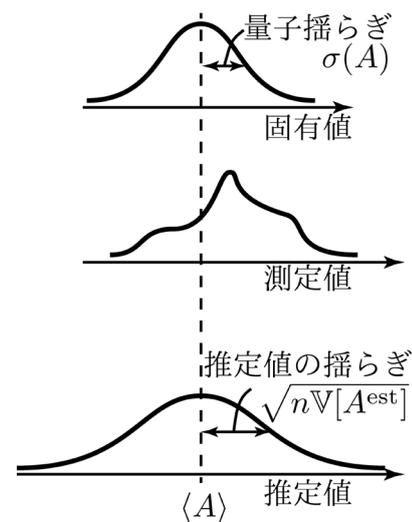


図1 量子推定の考え方を表す模式図。物理量 A は一般に系に固有の量子揺らぎ $\sigma(A)$ を持つ(上段)。 A の測定値には一般には様々なノイズが含まれており、そのままでは知りたい物理量の期待値 $\langle A \rangle$ についての情報が得られない(中段)。量子推定理論により不偏推定量や一致推定量(本文参照)を構成することで、 $\langle A \rangle$ についての情報が得られる(下段)。測定が誤差を含む場合には、推定値の分布の幅 $\sqrt{n \mathbb{V}[A^{\text{est}}]}$ は物理量そのものの量子揺らぎ $\sigma(A)$ より増加し、両者の差が測定誤差を特徴付ける。文献20より引用。

ラメータであり、量子状態を特徴付けるベクトル θ (例えば、系のスピンの向き) を用いて $a_i := \partial \langle A \rangle / \partial \theta_i$ で与えられる。また、 $J(\mathbf{K})$ はフィッシャー情報量 (フィッシャー情報行列) と呼ばれ、

$$[J(\mathbf{K})]_{jk} := \sum_i \frac{\partial \log p_i}{\partial \theta_j} \frac{\partial \log p_i}{\partial \theta_k} p_i \quad (17)$$

と定義される。フィッシャー情報量 $J(\mathbf{K})$ はラベルの付け替えなどの可逆なデータ処理では不変であるが、一般の情報処理過程 (マルコフ写像) に対しては単調減少する。これが $J(\mathbf{K})$ が情報量と呼ばれる所以である。また、式(17) はパラメータ θ がわずかに変化した際の確率分布の変化を表しており、確率分布空間 (統計多様体) の計量となっている。物理的には、量子状態がわずかに変化した際に確率分布 $\{p_i\}$ がどれだけ変化するかを表しており、測定の感度を表すものと解釈できる。

最尤推定量の分散はフィッシャー情報量を用いて表せるが、他方、量子揺らぎは、

$$\sigma(A)^2 = \mathbf{a} \cdot J_Q^{-1} \mathbf{a} \quad (18)$$

と書き直すことができる。ここで、 J_Q は量子フィッシャー情報量、特に対称対数微分 (Symmetric Logarithmic Derivative; SLD) フィッシャー情報量と呼ばれ、

$$\frac{\partial}{\partial \theta_j} \rho = \frac{1}{2} (\rho L_j + L_j \rho) \quad (19)$$

の解として定義される演算子 $\{L_j\}$ を用いて、

$$[J_Q]_{jk} := \frac{1}{2} \text{Tr} [\rho (L_j L_k + L_k L_j)] \quad (20)$$

と定義される。演算子 L_j は古典フィッシャー情報量に現れる量 $\partial \log p_j / \partial \theta_j$ の量子版であると解釈できる。また古典フィッシャー情報量の単調性に対応した性質として、量子フィッシャー情報量はユニタリ操作に関して不変であり、一般の量子ダイナミクスに関して単調減少する。

古典フィッシャー情報量は確率分布から定義されるため測定 \mathbf{K} に依存しているのに対し、量子フィッシャー情報量は量子状態だけから定まる。量子と古典のフィッシャー情報量の間には、量子クラメル・ラオ不等式と呼ばれる不等式 $J_Q \geq J(\mathbf{K})$ が成り立つ。¹⁹⁾ これは、系に内在している情報量以上の情報を測定によって得ることができないことを意味し、それらの差は測定が射影測定からずれて誤差を含むために生じるものと解釈できる。式(15) で定義された測定誤差は以下のように情報論的に捉えられる。

$$\varepsilon(A; \mathbf{K}) = \mathbf{a} \cdot [J(\mathbf{K})^{-1} - J_Q^{-1}] \mathbf{a} \quad (21)$$

これは、量子状態 ρ についての情報をどれだけ測定結果という古典的な量として取り出せたかを表している。

測定過程による状態変化 $\rho \mapsto \rho'$ (式(11) 参照) は、測定の反作用の影響でユニタリではなく、かつ非可逆になる。このとき、系の持つ情報量は減少するため、系の持つ量子フィッシャー情報量の変化は測定の反作用の非可逆性を特

徴付けるものとなる。そこで、我々は、測定過程 \mathbf{K} による物理量 B への擾乱を測定の反作用によって失われた量子フィッシャー情報量

$$\eta(B; \mathbf{K}) := \mathbf{b} \cdot [J_{Q, \mathbf{K}}^{-1} - J_Q^{-1}] \mathbf{b} \quad (22)$$

として定義した。^{21, 22)} ここで、 $J_{Q, \mathbf{K}}$ は、測定後の量子状態 ρ' から計算される量子フィッシャー情報量である。 $\eta(B; \mathbf{K})$ は、操作論的には測定後の状態 ρ' から $\langle B \rangle$ を推定した際の推定量の分散と初期状態 ρ における B の量子揺らぎの差

$$\eta(B; \mathbf{K}) = \lim_{n \rightarrow \infty} n \mathbb{V}[B^{\text{MLE}}] - \sigma(B)^2 \quad (23)$$

として表すことができる。この擾乱は、測定過程が B に対して反作用を及ぼさない場合、すなわちユニタリな過程や B についての射影測定の場合にゼロとなる。

3. 誤差と擾乱のトレードオフ関係

ここまでで定式化した誤差 $\varepsilon(A; \mathbf{K})$ と擾乱 $\eta(B; \mathbf{K})$ の間に、我々は次のトレードオフ関係が成り立つことを示した。^{21, 22)}

定理1. 任意の有限次元ヒルベルト空間において、全ての量子状態 $\rho > 0$ 、物理量 A, B の組に対して、任意の量子測定過程 \mathbf{K} は以下の不等式を満たす。

$$\varepsilon(A; \mathbf{K}) \eta(B; \mathbf{K}) \geq \frac{1}{4} |\langle [A, B] \rangle|^2 \quad (24)$$

この不等式は、どのような量子測定を行っても、誤差と擾乱の積は交換関係を下回ることはできないことを示している。このことは、小澤が導入した誤差と擾乱が $\varepsilon_0(A) \eta_0(B) < |\langle [A, B] \rangle|/2$ を満たす場合でも、交換関係を越えて物理的に有意な情報が得られることはなく、したがって、互いに非可換な物理量は交換関係による制約を超えた精度では推定できないことを意味している。

しかしながら、この不等式(24) の下限を達成する測定は一般には存在しない。例えば、 $\rho = I/d$ (d はヒルベルト空間の次元) の場合、交換関係はゼロとなるが、左辺をゼロにすることはできない。したがって、不等式(24) よりも強い不等式が存在するはずであり、それに答えるのが次の定理である。

定理2. 2次元ヒルベルト空間において、全ての量子状態 $\rho > 0$ 、物理量 A, B の組に対して、任意の量子測定過程 \mathbf{K} は

$$\varepsilon(A; \mathbf{K}) \eta(B; \mathbf{K}) \geq \sigma(A)^2 \sigma(B)^2 - C(A, B)^2 \quad (25)$$

を満たし、かつ、等号を達成する測定が全ての (ρ, A, B) の組に対して存在する。

ここで、 $C(A, B) := \langle AB + BA \rangle / 2 - \langle A \rangle \langle B \rangle$ は物理量 A, B の対称化相関である。2つの物理量の間には一般には相関が存在するため、揺らぎの積からその部分を差し引いた量

が誤差と擾乱の積の下限を与える解釈できる。この下限はシュレーディンガーの不等式²³⁾によって交換関係よりも大きいことが知られている。

$$\sigma(A)^2\sigma(B)^2 - C(A, B)^2 \geq \frac{1}{4} |\langle [A, B] \rangle|^2 \quad (26)$$

なお、不等式(25)は $\rho=I/2$ の場合については文献24, 25によって示された。定理2は2次元ヒルベルト空間に対してのみ証明が成されているが、高次元のヒルベルト空間についても、物理量 A と B が同時ブロック対角化できない場合には不等式(25)が満足されることが数値的には確認されており、定理2の高次元への一般化ができるのではないかと期待される。

4. おわりに

我々は互いに非可換な物理量の期待値の推定問題という観点から不確定性関係を定式化した。量子論は本質的に確率的であることから、その測定結果からどのようにして有意な情報を取り出せるかを考える必要がある。そのような問題に対して答えを与えるのが量子推定理論であり、不確定性関係以外にも様々な応用が期待される。

本稿のはじめに不確定性関係は大きく二種類に分けられることを述べた。一つは共役な物理量へ擾乱無しに物理量を精度よく測ることはできないという測定の相補性、もう一つはケナード・ロバートソンの不等式やシュレーディンガーの不等式に代表される量子状態の非決定性である。我々が示したトレードオフ関係(25)と、シュレーディンガーの不等式(26)を並べてみると、

$$\begin{aligned} \varepsilon(A; \mathbf{K})\eta(B; \mathbf{K}) &\geq \sigma(A)^2\sigma(B)^2 - C(A, B)^2 \\ &\geq \frac{1}{4} |\langle [A, B] \rangle|^2 \end{aligned} \quad (27)$$

となり、測定の相補性と状態の非決定性、および、交換関係の間に階層構造があることが見て取れる。こうして、量子推定を量子測定理論に組み合わせることによって測定の相補性が数学的な不等式として定式化された。これは量子論的実在が確率的な測定結果(からの推定)を通じて発現する⁶⁾というボーアの思想を具現化したものと言えよう。

参考文献

- 1) E. H. Kennard: Z. Phys. A **44** (1927) 326.
- 2) H. P. Robertson: Phys. Rev. **34** (1929) 163.
- 3) W. Heisenberg: Z. Phys. A **43** (1927) 172.
- 4) A. S. Holevo: *Probabilistic and Statistical Aspects of Quantum Theory* (North-Holland, Amsterdam, 1982).
- 5) M. Hayashi: *Quantum Information: An Introduction* (Springer Verlag, 2006).
- 6) N. Bohr: Phys. Rev. **48** (1935) 696.
- 7) E. Arthurs and M. S. Goodman: Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 2447.
- 8) M. Ozawa: Phys. Rev. A **67** (2003) 042105.
- 9) J. Erhart, *et al.*: Nature Physics **8** (2012) 185.
- 10) S.-Y. Baek, *et al.*: Scientific Reports **3** (2013) 2221.
- 11) M. Kitano: arXiv: 0803.4377 (2008).
- 12) 松岡正浩: 『量子光学』(裳華房, 2000).
- 13) M. A. Nielsen and I. L. Chuang: *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2000).
- 14) H. M. Wiseman and G. J. Milburn: *Quantum Measurement and Control* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2010).
- 15) C. W. Gardiner and P. Zoller: *Quantum Noise* (Springer Verlag, 2004).
- 16) K. Kraus: Ann. Phys. **64** (1971) 311.
- 17) E. Lehmann and G. Casella: *Theory of Point Estimation* (Springer Verlag, 1983).
- 18) H. Cramér: *Mathematical Methods of Statistics* (Princeton Univ. Press, 1946).
- 19) S. L. Braunstein and C. M. Caves: Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 3439.
- 20) Y. Watanabe, T. Sagawa and M. Ueda: Phys. Rev. A **84** (2011) 042121.
- 21) Y. Watanabe: *Formulation of Uncertainty Relation between Error and Disturbance in Quantum Measurement by Using Quantum Estimation Theory* (Springer, 2014).
- 22) Y. Watanabe and M. Ueda: arXiv: 1106.2526 (2011).
- 23) E. Schrödinger: Proc. Prussian Acad. Sci. Phys. Math. Sect. **XIX** (1930) 293.
- 24) Y. Kurotani, T. Sagawa and M. Ueda: Phys. Rev. A **76** (2007) 022325.
- 25) T. Sagawa and M. Ueda: Phys. Rev. A **77** (2008) 012313.

(2014年10月2日原稿受付)

Formulation of Uncertainty Relation by using Quantum Estimation Theory

Yu Watanabe and Masahito Ueda

abstract: We formulate error and disturbance in quantum measurement in terms of the classical Fisher information and the quantum Fisher information. The error formulated here characterizes the accuracy of the estimate of the expectation value of an observable. The disturbance characterizes the irreversibility of the measurement process. We show that the product of the error and disturbance is bounded from below by the commutator of the observables. We also find the attainable bound of the product.

磁石の秘密

赤井久純 (東京大学物性研究所 akai@issp.u-tokyo.ac.jp)

1. はじめに

磁石は鉄を引きつける。磁石で自動車をくっつけて持ち上げることは易しい。磁石クレーンは30トンの鉄をくっつけて持ち上げることができる。また、地球は大きな磁石である。しかし、磁石クレーンも地球も電磁石である。つまり電流が流れていないかぎり磁石の性質を示さない。永久磁石は電池を必要としない磁石である。外部から電流を流さなくてもいつまでも強い磁石としての性質を示す。このような性質を示す物体を永久磁石と呼ぶ。

電流が磁場を作ることは200年近く昔から知られている。アンペールがアンペールの法則を発見したのは1820年のことであり、身近な法則として良く理解されている。近代科学技術におけるアンペールの法則の応用はその直後にはじまった。ヘンリーにより、小さなガルバニ電池を電源として約1トンの鉄を吸い付けることのできる磁石や電磁石エンジン「リトル・マシーン」が開発されたのが1831年、発電機の発明は1832年、電気モーターの発明は1834年のことである。これらはすべて電磁石の利用である。

電磁石に較べると、永久磁石の歴史ははるかに古い。マグネットの名前の由来とも言われるマグネシア(現ギリシアの一地方、マグネシウムやマンガンもこの地名に由来)で磁石が発見されたのは紀元前600年頃のことである。また紀元前239年に編さんされた『呂氏春秋』によれば中国では春秋戦国時代にすでに方位磁石として永久磁石が利用されていた(ちなみに紀元前2400年頃、伝説上の皇帝である黄帝が常に南を示す指南車を用いたことになっているが、これには磁石は使われていなかったとされている)。

しかし、永久磁石の本質的な理解が進んだのは量子力学が現れてからであり、人工的に永久磁石が作られるようになったのも20世紀になってからである。電磁石が古典的な電磁気学により良く理解されるのに対して、物質の磁性は古典力学によって説明することができない。すなわち量子効果が巨視的に発現した現象であり、それだけに長い間、人々の理解を阻んできたと言える。人々にとって永久磁石は永い間、宗教的ないしはまじない的な要素さえ持っていたのである。

したがって量子力学によって、物質に基本的な性質として磁性というものが存在し、電子がスピンの属性を持つことが理解されたことは本質的であった。これらの認識をもとに磁性研究が典型的な量子力学の一大分野として発展したことは周知の事実である。

だからと言って、現在、永久磁石が良く理解されていて、

それに基づいて新しい磁石が作られているかという点、そういう訳ではない。物質の固有の性質の一つである強磁性と永久磁石の性質は別物であり、前者は後者の必要条件ではあるが、それだけでは永久磁石とはならないからである。例えば強磁性体である純鉄は決して永久磁石にはならないし、最強の永久磁石であるネオジム磁石の主相であるNd₂Fe₁₄B単結晶も強磁性体ではあるがそのままではやはり永久磁石ではない。

永久磁石は室温以上の磁気転移点と大きな磁化、大きな磁気異方性を持った物質がミクロンサイズの粒構造を作ることによってはじめて発現する。すなわち物質の固有の性質(物性)ではなく、物質と巨視的と言って良い構造の組み合わせがもたらす性質である。このような複合的性質は物性物理学では多くの場合、副次的な性質としてむしろ取り除く努力がなされるものであるし、物性値を与えるものではないことから、あまり積極的に扱われてこなかった。しかし、その基礎科学としての重要性は近年よく認識されるようになってきており、今後の物性物理学の寄与が期待されている。

テクノロジーの発展にともなう環境問題、エネルギー問題、資源問題と関連して、小型で強力な高性能永久磁石の開発は国内外を問わず、ここ数年極めて盛んである。例えばハイブリッドカーを見てみるとそこには電気モーター、発電機を初めとする装置の部品として100個以上の永久磁石が使われている。小さい体積で強い磁場を作ることができて、自動車のエンジンルームのような高温下でもその強い磁石としての特性を保つことができる永久磁石の開発は今、最も重要な科学技術の課題の一つである。それには工業的な磁石の作り込みだけではなく、物性物理学を含む幅広い学問分野の参画が必要とされる。以下では、永久磁石の問題とは何かを物性物理学の観点から見ていきたい。

2. 永久磁石とは

永久磁石は長期にわたって磁化が保持される磁性物質である。永久磁石を外部磁場の中において磁場 H の大きさを変化させて磁化(磁気分極) J を測定すると、およそ図1(左)に示すような振る舞い(J - H 曲線)を示す。十分大きな磁場を加えて磁化を一旦飽和させそこから磁場を減少していき、 $H=0$ になったときになお磁石が示す磁化 J_0 を残留磁化、そこから磁場の向きを変えて逆磁場を加えていったとき磁化が反転する磁場 H_C を保磁力と呼ぶ。磁化のかわりに磁石内の磁束密度 B を磁場 H に対してプロットする

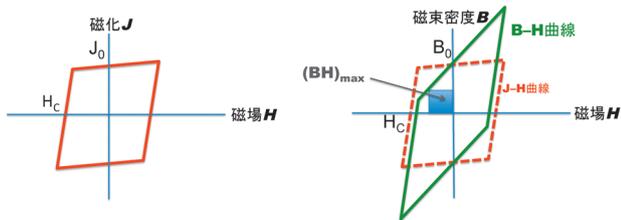


図1 J-H曲線およびB-H曲線.

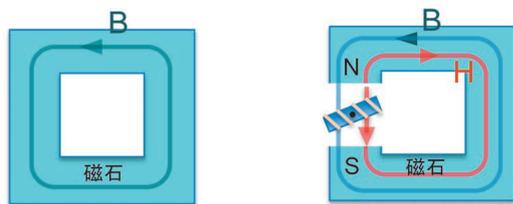


図2 閉じた磁気回路(左)と実際に用いられる永久磁石の配置(右).

と図1(右)のようになる。これをB-H曲線と呼ぶ。磁束密度 B 、磁場 H と磁化 J の関係は $B = \mu_0 H + J$ である。

図2に示すように永久磁石は減磁場の無い閉じた磁気回路(左)で使うことはできず、実際に使われる状況(右)では常に減磁場中に置かれている。減磁場とは磁石の磁化を減少させる方向に加えられた外部磁場であるが、今の場合、磁石自身が作る反磁場^{*1}によって減磁場が生じている。また、モーター等を動かそうとすれば、必ずモーターの回転子が作る減磁場にさらされる。この状況では磁石はB-H曲線のなかの第2象限にあることになる。このとき実現できるBHの最大値は $(BH)_{\max}$ (あるいは最大エネルギー積)と呼ばれ、この系が保持することのできる最大磁気エネルギーに比例するため、永久磁石の性能を表す指標として用いられる。

$(BH)_{\max}$ を大きくしようとすれば図1(右)から分かる通り、まず J_0 が大きくなる必要がある。さらに、磁石が理想的な長方形型のJ-H曲線を示す場合でさえ、 $\mu_0 H_c$ が $J_0/2$ より大きくなければ J_0 の大きさから期待される $(BH)_{\max}$ を実現することができない。永久磁石の磁化曲線とマクロなサイズの強磁性体単結晶の磁化曲線との決定的な違いは単結晶では H_c が0に近いことである。

このことを説明する前に、磁気異方性について説明しておく。強磁性体には安定な磁化の方向がある。例えば純鉄では磁化は[100]方向を向くときが一番安定でありこの方向を磁化容易軸と呼ぶ。純鉄の磁化の方向を[110]方向に向けるためには $\mu_0 H$ が0.06 T程度の磁場を[110]方向(磁化困難軸)に加える必要がある(図3)。その起源はスピン軌道相互作用^{*2}であるが、そのような磁化の向きによるエネルギーを現象論的に導入して結晶磁気異方性エネルギーと呼ぶ。このようなエネルギーを考えることは鉄などの大きな磁化を持つ物質についてはほぼ正しい。

*1 磁石が磁石自身の内部に作る磁場を反磁場と呼ぶ。磁石を小部分に分割して、それらの小磁石が磁石内の任意の部分(その部分からの寄与は含まない)に作る磁場を足し合わせたものになる。端を持つ磁石では磁束密度と反対の方向を向くのでこの名前がついている。

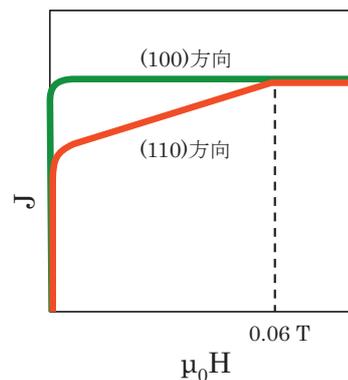


図3 磁化曲線の模式図。横軸は外部磁場、縦軸は磁化。

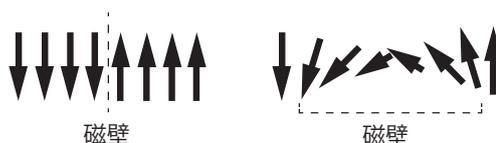


図4 厚さを持たない磁壁(左)と厚さを持つ通常の磁壁(右)。

いま、鉄の磁化が磁化容易軸[100]方向を向いているとしよう。磁化を反転するためには外部から逆磁場を加えて磁気異方性エネルギーの山を乗り越えて鉄の磁化を[100]方向に持っていかなければならない。このために必要な磁場を異方性磁場 H_A と呼ぶ。山を乗り越えると一気に磁化は反転して不可逆的にエネルギーを放出するのでヒステリシスループを描くことになる。保磁力 H_c は異方性磁場 H_A に一致しそうに思えるが、マクロなサイズの強磁性体ではそうではない。磁化反転は磁化が一斉に反転することにより起こるのではなく、磁壁^{*3}が移動することによって起こるからである。ある結晶軸の一つの方向(例えば六方晶の結晶で c 軸)のみが磁化容易軸になっている場合を一軸磁気異方性と呼ぶ。一軸磁気異方性を持つ強磁性体を考えよう。図4(左)に示すようにある面の左側で下を向いていた磁化がそれより右側では上を向いていたとするとそこに磁壁があることになる。磁壁のすぐ右にある面の磁化を180度回転させれば磁壁は一格子間隔だけ右に移動したことになるが、それに要する磁場は概ね異方性磁場 H_A に一致する。

しかし、磁壁のあるところでは磁気モーメントの強磁性的な配列がくずれてしまい、強磁性的配列を安定化する磁気モーメント間の相互作用(交換相互作用)エネルギーが上昇する。この上昇を軽減するために磁壁はある厚さを持つようになり、その中の各面の磁化は徐々に回転している。このとき磁壁内の各面での磁化は磁気異方性と交換相互作用によるトルクがつりあうところまで回転しており、各面

*2 電子が電荷を持った原子核の周りで運動するとき、電子から眺めると自分自身の周りであたかも正の電荷を持った原子核が動いて電流を作っているように見える。この電流が作る磁場と電子の持つ固有の磁気モーメントとの間に生じる相互作用をスピン軌道相互作用と呼ぶ。本質は相対論的効果である。

*3 磁壁とは磁壁の両側で磁化の方向が変化しているような面であり、方向変化としては180度磁壁や90度磁壁がある。

の磁化をそこから少し回転させるだけで磁壁全体としての移動が起こる。そのような回転においても越えなければならない山がありエネルギーの散逸も起こるが、それに必要な磁場は H_A よりはるかに小さく、磁壁の移動が何らかの原因で制限(磁壁のピンング)されない限り、磁壁移動による磁化反転に必要な磁場の大きさ H_C は小さな値になる。一つの極限として磁気構造を連続体に置き換える模型(普通このような模型で磁壁の運動は考えられる)では磁壁ピンングや系の不均一性がない限り磁壁の移動に摩擦は無く磁壁移動に必要な磁場はゼロとなる。

したがって、大きな H_C を得ようとすると、磁壁が動かないか、あるいはそもそも磁壁が存在しない状況を作る必要がある。後者の状況は強磁性体を微粒子化することによって達成できる。それは次のような事情による。磁壁が存在する理由は、強磁性体を作る静磁エネルギーを下げるためには、交換相互作用の上昇を犠牲にしても全体の磁化を下げる方が有利になるからである。交換相互作用の上昇は磁壁面の面積に比例するが静磁エネルギーは体積に比例するために、磁性体の体積が十分小さくなると、交換相互作用の寄与が大きくなり、磁壁を作らない方がより安定になる。このような状況が起こる粒子の最大半径を単磁区粒子臨界径と呼び、それより小さい強磁性体粒子は単磁区構造(一つの磁区からのみなる磁気構造)をとる。単磁区粒子臨界径はサブミクロンからミクロン程度の大きさである。

このような微粒子を集めて、上手に粒子のまま結晶軸をそろえて固化(焼結)できれば、全体の磁化の反転にはそれぞれの単磁区微粒子の磁化反転となり、 H_A に近い大きな保磁力 H_C が得られるだろう(大きすぎる H_C は着磁に困るという点を考えておく必要があるが)。異方性磁石と呼ばれる強い永久磁石はそのような発想のもとで開発されてきた。

しかし、実際には H_C は H_A より一桁程度小さい値しか得られない。現在最強の磁石といわれるネオジウム磁石でも H_C は H_A の20%程度である。 H_C が H_A に比べて遥かに小さくなる原因は色々指摘されている。例えば焼結された微粒子が互いに磁気的に分離されていない、微粒子の表面に反磁場や欠陥により異方性の弱められたところがありそこに磁化反転部分が核生成して磁壁が侵入してしまう、等である。これらを防ぐために、磁壁が磁石内で移動しないような効果的なピンングセンターを作る、粒界物質が粒子間の磁気的結合を効果的に遮断するようにする、磁壁侵入の防波堤となるような上手な組織を作る等の方法が考えられている。

ネオジウム磁石では様々な工夫が成功し、ハイブリッド車用モーターが動作するような過酷な環境下でも使える永久磁石が実現されている。しかし、より良い永久磁石の開発はなお必要とされており、そのためには何が、どのようにして H_C や J_0 を下げていくかを知り、どのようにすればそれを防げるのかという物理的根拠のある処方箋を得る必要がある。

3. 現在の永久磁石

図5に過去100年にわたって開発されてきた実用永久磁石の性能を横軸に年を、縦軸に $(BH)_{max}$ をとって示した。SmCo₅を代表とする希土類磁石が開発された1970年頃に境に急激に $(BH)_{max}$ が上昇したことがわかる。1974年に依らによって開発されたその当時の世界最強の磁石Sm₂Co₁₇系に続き、ネオジウム磁石として知られるNd₂Fe₁₄Bが1983年に佐川らによって開発され、それが30年以上にわたって最強磁石としての座を守っている。

Nd₂Fe₁₄Bを主相に持つネオジウム磁石の $(BH)_{max}$ は460 kJ/m³であり、保磁力も室温で1.2 T程度と、 $\mu_0 H_C$ が $J_0/2$ より大きいという条件を十分満たしている。しかし、ハイブリッド車に対応する200°C以上では保磁力は0.2 T以下に減少してしまう。また、キュリー温度(磁気転移温度)は585 K (312°C)であり、使用温度に比べて十分高いとは言えない。保磁力が高いことは単に可能な最大の $(BH)_{max}$ を実現するために必要なだけでなく、反磁場や外場等の要因によって永久磁石が減磁してしまうことを防ぐ上でも重要である。

H_C の有限温度での減少に関しては、Ndを一部Dyで置き換えることによって、高温での保磁力の減少を抑える工夫がなされている。これによって保磁力は3 T程度にまで上昇し、高温でも十分な保磁力を保てる。しかし、Dyが希少元素であること、資源が地理的に偏在していることに加えて、Dyの磁気モーメントは磁化と逆方向に配列し、Dyを添加することにより磁化 J_0 が小さくなってしまふことが問題となり、最新の技術ではDyの含有量をかなり減らすことに成功している。

4. 永久磁石デザインの戦略

小型で強力な高性能永久磁石の開発は国内外を問わず、ここ数年極めて盛んである。その中で、電子状態理論の観点から永久磁石をデザインしていく機運が高まっている。前章までに、永久磁石についてその機能発現の機構と現在の永久磁石のかかえる問題についてみてきたが、それらをふまえて、一体、電子状態理論の観点から何ができるかを考えてみる。

とりあえず、電子論的な観点から議論しやすいのは結晶

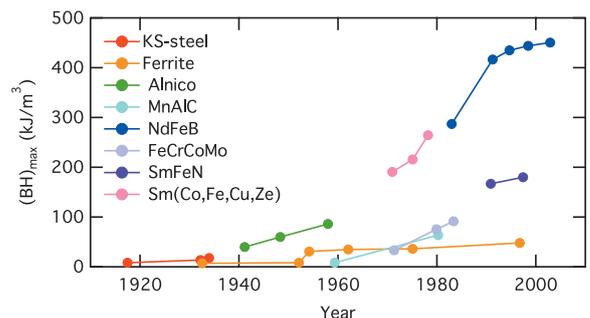


図5 永久磁石の歴史。横軸は年、縦軸は最大エネルギー積。

の強磁性である。例えば、ネオジム磁石ではその主相であるNd₂Fe₁₄B結晶の物性である。前章までに見てきた通り、Nd₂Fe₁₄B結晶はそれだけでは永久磁石にはなってくれない。したがって、それだけを考えるのは片手落ちであるが、永久磁石としてのネオジム磁石にはNd₂Fe₁₄Bの物性が当然のことながら強く反映されるために、全くの見当はずれでもない。

ネオジム磁石に反映されるNd₂Fe₁₄Bの重要な物性は飽和磁化とキュリー温度である。実際にネオジム磁石内にどれだけのNd₂Fe₁₄B主相が充填されているかというファクターはあるが、飽和磁化はほぼNd₂Fe₁₄Bの磁化で説明される。また、キュリー温度についても、物性理論の観点から問題を残してはいるが、守備範囲と言える。副相の出現や他の添加元素についても、それらの磁化やキュリー温度への影響を考えていくことは電子論の範疇である。

現在まで、電子論で（あるいは他のどんな理論でも）取り扱いに困るのが保磁力である。現象論的には $H_C = \alpha H_A$ を仮定し α として実験的に得られる値を用いて解析が行われるが、電子論としてはとりあえず作り込みによって到達できそうな値 $\alpha = 0.1 \sim 0.2$ 程度が存在することを前提に、もっぱら磁気異方性磁場 H_A の大小でもって保磁力の大小を占うことになる。

したがって、電子論として第一にねらっていくべき方向としては結晶として、(1) 磁化 J の大きなもの、(2) キュリー温度 T_C の高いもの、(3) 磁気異方性磁場 H_A の大きなもの、を探ることである。それらの中から次の段階として、結晶の相安定性、磁性の温度依存性の観点から見て好ましいものを探していくことになる。

現実の物質を対象とする電子論では、密度汎関数法と呼ばれる厳密な理論を出発点にとって、そこに幾つかの近似を行うことによって、基底状態における電子状態（電子・スピン密度）を決める。基底状態での J はまさにスピン密度であるし、 H_A も磁化の方向を磁化容易軸から傾けたときの基底状態エネルギーから決めることができる。 T_C については、電子状態計算の結果をハイゼンベルク模型のようなスピンモデルに対応させる、あるいは近似的に電子系の統計和を計算する等の統計力学的手法で評価される。十分に注意深く計算すれば半定量的な結果（ T_C の値について数10%の誤差）が得られる。 T_C の組成や構造に対する依存性に対してはその系統性だけを見ることによってもう少し信頼性の高い結論を得ることができる場合が多い。相安定性や磁性の温度依存性についてはより高度な評価が必要であり、従ってより不定な要素が入ってくる。

どのような大きさの J と H_A を狙えばよいかということに関して硬さパラメータと呼ばれる量が指標としてしばしば用いられる。まず磁気異方性定数 K_1 を導入する。一軸磁気異方性を仮定し、磁化容易軸からの磁化の傾きを θ として、磁氣的なエネルギーの変化 E_A を最低次の近似で $E_A = K_1 \sin^2 \theta$ と書いたとき、 K_1 を磁気異方性定数と呼ぶ。

もちろん、高次の項も存在するが、とりあえず K_1 のみを考える。磁化容易軸に沿って逆磁場 H を加えるとき、磁場との相互作用エネルギーは $J_0 H \cos \theta$ となる。ただし磁化の大きさは磁化の方向によらないと仮定している。結局、エネルギーは θ の関数として $E = K_1 \sin^2 \theta + J_0 H \cos \theta$ となる。

この関数は $\theta = 0$ で極値をとるが $2K_1 = J_0 H$ で2階微分が符号を変える。したがって、これをみたく磁場 H_A で磁化反転が起こることになる。実際の磁石では保磁力 H_C は H_A より小さいので、 H_C は $H_C = \alpha H_A = 2\alpha K_1 / J_0$ と書ける。第2章で説明したように、与えられた J_0 で許される理論上の $(BH)_{\max}$ を実現しようとする、 $\mu_0 H_C$ が $J_0/2$ より大きくなければならなかった。このことを用いると $\mu_0 K_1 / J_0^2 > 1/(4\alpha)$ が満たさなければ理論上許される $(BH)_{\max}$ が実現できないことがわかる。この不等式の左辺を κ^2 とおき、 κ を硬さパラメータと呼ぶ。これを硬さと呼ぶ理由は、磁石が磁化の大きさに見合うだけの磁気異方性を持ち、したがって硬い磁石（永久磁石）の材料として使えるかどうかの指標になるからである。もし $\alpha = 0.25$ が磁石の作り込みにより実現できるならば、 κ に対する条件は、 $\kappa > 1$ となる。作り込みに対する条件を半分に緩めて $\alpha = 0.125$ にとると $\kappa > 1.4$ の硬さが必要となるが、これはNd₂Fe₁₄Bでは低温で実現されている。

この κ と J を用いて、ネオジム磁石と同等以上の性能を持つ永久磁石を得ようとする、 $J > 1.6 \text{ T}$ かつ $\kappa > 1.4$ を200°C以上の温度領域で満たす材料をデザインする必要がある。また、証明があるわけではないが、知られている物質のうち最大の磁化を持つFe_{0.7}Co_{0.3}合金の磁化を超える $J > 2.5 \text{ T}$ は実現できないだろう。^{*4}

図6は代表的な永久磁石の飽和磁化（磁場を加えて得られる最大磁化）の値 J_S と K_1 を、横軸に J_S 、縦軸に K_1 を取ってプロットしたものである。1.6 T < J_S < 2.5 Tかつ $\kappa > 1.4$ の領域は白抜きになった部分に相当する。ネオジム磁石を超える磁石はこの部分に位置し、その中でも右上に行く方が永久磁石としてはより好ましい性質を備えたものになるはずである。

このターゲット領域に近いものとしてNdFe₁₁TiNとSm₂Fe₁₇N₃がある。前者はTiをFeで置き換えることができれば確実にターゲット領域に入る。最近、薄膜においてこれを実現するNdFe₁₂Nの合成が成功しており、新しい永久磁石への期待が高まっている。Sm₂Fe₁₇N₃はネオジム磁石より僅かに磁化で劣るものの、磁気異方性は大きく永久磁石としての良好な性質が見て取れる。 T_C もネオジム磁石より高い。一時、期待を集めたが、高温で分解してしまうために焼結磁石を作ることができず、今のところ等方的な

^{*4} 磁化を増やすためには、体積当たりの磁性原子の数を増やす必要があるが、磁性原子の数を固定して体積を減少しようとする、必要な凝集エネルギーを得るために磁気モーメントを減らして、電子の運動エネルギーの上昇を抑えるしかない。最大の磁化は、すべての構成元素を磁性原子にした上で、原子あたりの電子数を最適化して得られるが、それをほぼ実現しているのがFe_{0.7}Co_{0.3}合金と考えられる。

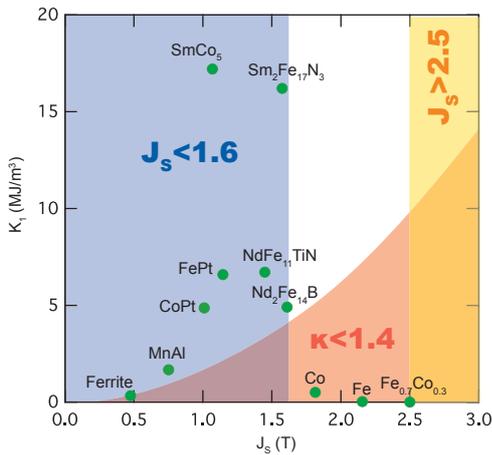


図6 磁気異方性 K_1 と飽和磁化 J_s で整理した永久磁石。白抜きの部分がネオジム磁石を超える永久磁石のターゲット領域になる。

ボンド磁石（接合材で磁石粉を固化したもの）としての用途しかない。

電子論の観点からは、新しい磁石デザインの正攻法は軽希土類を少量含み、なるだけFeの含有率の高い安定な化合物を電子状態計算に基づいて探すことであろう。希土元素を含まないという観点からは希土類を用いることは避けたいところであるが、磁気異方性を得るために希土類ほど即効性のある元素はない。もちろん、希土元素や環境非調和物質を一切含まない永久磁石開発を視野に入れておく必要があり、そのような方向を目指したデザインの努力を惜しんではならない。

5. 電子論の問題点

前章で電子論による磁石デザインの可能性を述べたが、希土類磁石に関しては、電子状態計算は次のような困難を残している。希土類元素は開殻f構造を持っている。つまり14個あるf状態が部分的に電子によって占められている。このような状態は普通、結晶中に広がりバンドを形成するが、f状態は大きな遠心力ポテンシャルのために、原子位置に良く局在しており、結晶中でも原子の波動関数の性格を良く保っている。そのため、各スピン毎に7重に縮退した狭いバンドを作る。その状態をf電子が部分的に占めようとすると、f状態はフェルミレベルより上に飛び出す（完全に空になる）ことも、下に沈む（完全に占められる）こともできず、フェルミレベルの位置にあるとしなければならない。しかしこのように計算された希土類金属の凝集エネルギーは、f状態がフェルミレベル位置にあることを反映して、現実よりずっと大きくなってしまふ。分光学的にも、フェルミレベルの位置にf状態がピン留めされるといふ結論は正しくない。

先に述べたように、第一原理電子状態計算は通常、密度汎関数法を出発点とする。しかし、そこで与えられる処方箋を厳密に実行することはできず（もしできたとすれば多体問題が解けたことになってしまう）、なんらかの近似を

行わなければならない。現在まで最も成功している近似の一つは局所密度近似あるいはその単純な拡張であるが、このような近似を用いて密度汎関数法の処方箋を実行すると、どうしても上に述べたような結論になってしまう。

そのような事情で、4f状態が重要な役目をはたす希土類磁石に対しても、局所密度近似を用いた計算は正しい結果を与えないことが予想される。様々な補正の方法が試されているが、その予言能力は保証されず、決定的と言える処方箋は今のところない。実験と比較しつつ色々な物理量を計算する、あるいは機能発現の物理的機構を電子論的に考察する等のアプローチで希土類磁石の物理を明らかにして行く方向の努力が続けられているが、究極的にはf状態を正しく扱うことのできる手法を開発する必要があり、将来に向けられた最も重要な課題の一つといえる。

これまで見てきたように永久磁石の性質は物性と半巨視的な構造が複合して発現する。永久磁石材料を電子状態の計算から出発して開発していくとき、ある段階からこれを検証する超大規模計算によるシミュレーションを避けて通ることはできない。それに耐えうる大規模計算機が必要になってくることは言をまたない。

6. まとめ

磁石はどこにでも転がっているものであるが、その理解は難しい。その根底に横たわるのは物質の磁性である。それ自身、量子効果の巨視的な発現であり、直感的な理解を妨げる。さらに、それを具体的に利用できる形にしておくためには様々な物理機構を利用しなければならない。永久磁石の保磁力は磁気異方性の20%にも満たない。特殊な条件下でも50%を超えることはない。複雑な要因が絡み合って、保磁力を下げているわけであるが、それらの理解とそれによる良い磁石の開発は重要なだけでなく、おおいに好奇心をかきたてる物理の問題でもある。

現在、日本では元素戦略の一貫として永久磁石の機能発現の解明と、新しい永久磁石材料の開発のための研究が進められているが、本稿ではその背景にある物理を電子論の観点を軸に紹介した。さらに詳しく永久磁石について知りたい人のために永久磁石についての記述が詳しい標準的な教科書、永久磁石に特化した教科書、最近の総合報告、磁石に関する話題を把握するのに便利な一般書をあげておく。¹⁻⁴⁾ 永久磁石に興味を持つ研究者が少しでも増えるきっかけになることを願っている。

参考文献

- 1) J. M. D. Coey: *Magnetism and Magnetic Materials* (Cambridge Univ. Press, 2010).
- 2) 佐川真人, 浜野正昭, 平林 眞編著:『永久磁石』(アグネ技術センター, 2007).
- 3) S. Hirotsawa: *J. Magn. Soc. Jpn* **39** (2015) 85.
- 4) 宝野和博, 本丸 諒:『すごい!磁石』(日本実業出版社, 2015).

(2015年10月14日原稿受付)

自然科学への橋渡しとしての理科教育 —物理学会 Jr. セッションに参加して—

田中香津生 (東京大学大学院総合文化研究科 tanaka@kaduo.jp)

私は広尾学園中学校・高等学校において自発的な物理探求を啓発するために、授業内の課題や特別授業を通して教育的な取り組みを行ってきた。ここではその取り組みについて、および、そのうち一部の探究活動に対する発表の場となった Jr. セッションについて参加校側から紹介する。

1. はじめに

私は研究活動と並行して、2012年から2年間広尾学園中学校・高等学校において中等教育に携わった。その中で、様々な形態で生徒の科学的探究活動を啓発し、そのうち二つの研究グループについては日本物理学会の第10回 Jr. セッションにおいて発表を行った。いずれの研究テーマも授業や放課後に行われる講座の活動の中から自発的に生まれたものだった。実際学校現場において、どのような形で生徒の研究意識が生まれ、物理学会 Jr. セッションがどのように位置づけられるかについて、参加学校側の視点で紹介する。

2. ケース1 授業内から始まった研究活動例

研究テーマ「深海生物の構造研究に向けた高圧装置の開発」¹⁾を Jr. セッションにて発表した高校2年の加藤は、物理の授業をきっかけとして探究活動をはじめた。本章ではどのような形で探究活動を物理の授業の中で啓発したかについて紹介する。中学および高校の授業内で行う実験は通常、すべての道具を事前に用意し手順も細かい指示が書かれたプリントを配布することで行うことが多い。また、実験結果や考察はワークシートを配布し空欄に埋める形で記

入する。これは1コマないしは2コマの短い時間の中で、確実に実験を終わらせ結果のフィードバックまで行うためである。反面、実験計画を立案し装置を組み立てるという重要な要素を組み込むことができない。そこで目的のみを指定し器具の準備や条件設定等は全て自分で考え、自宅で実験を行う「お家レポート」という課題を授業内で課した(図1)。例えば高校1年に提示した「斜面運動から任意の物体の動摩擦係数を測定し、できるだけ摩擦の小さい物体を探す」という課題レポートを例にとってみる。本課題は授業内で告知し2週間後を締切として設定した。各生徒は実験に必要な道具を自分で用意し自宅で実験を行い、期限までにレポートを提出する。この際家族や友達と協力して行うことは認めており、多くの生徒が何らかの協力を得て実験を行っていた。

一般的な実験授業では、事前に斜面台、記録テープ、測定対象となる物体をグループごとに用意するが、本課題では一切必要な道具を用意しないため、測定に十分な長さや角度を持つ斜面を自分で用意することになる。そのため生徒によっては公園のすべり台を利用したり様々な環境における実験が生まれた。この中で斜面の長さや角度は、すべり時間の測定精度を考えたときにどの程度にすべきかといった最適化を自然と行うようになる。

このような自由度の高い実験の懸念点は、測定方針や解析に大きく間違いがあった場合にすぐにフォローできない点である。本課題においてはこれを防ぐためにインターネット上に各測定値と計算した動摩擦係数を入力すると計算が正しく行われているかを自動判定するチェックシートを用意した(図2)。レポート提出の数日前までにこのチェックシート上で計算が正しくできているかをチェックすることを課し、問題があった場合は放課後等に相談を受け付けることでほぼすべての生徒が大きく解析を間違えたままレポートを作成することを防ぐことができた。

その上で、レポートでは不確かさの評価を特に重視した。多くの中学高校での実験の目的自体が「正確な実験」を行うことになっている(図3)。理論検証実験では、例えば試行回数からおおまかに統計的な不確かさを見積もり、不確かさの範囲で実験値と理論値が矛盾ないといえるかどうかを考察するように指導し、検証実験の正しい意味を理解させた。

加藤の場合、本課題において「物体に2種類のシートを貼ることで、異なる材質面の摩擦係数を比較する」、「同じ

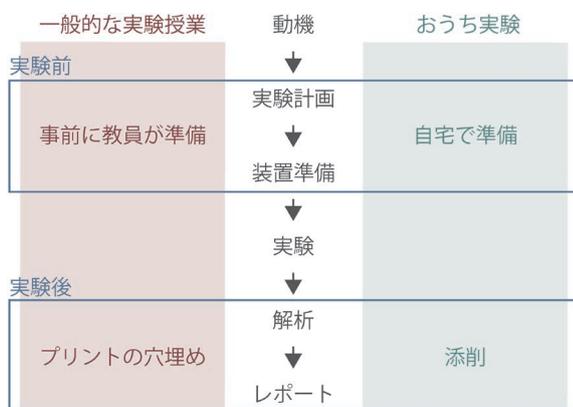


図1 お家レポートでは、実験を自宅で行うことで実験準備や実験計画等を自らの手で行う。またレポート添削では不確かさの議論をできるだけ重視した。

friction-report-h1-7 ☆ ■

File Edit View Insert Format Data Tools Add-ons Help All changes saved in Drive

fx

	A	B	C	D	E	F	G
1		氏名	落とした距離(m)	落ちるのにかかった時間(s)	斜面の角度(degree)	動摩擦係数	判定
2	0		2	2	30	3.3	NG
3	1		1.8	0.81	35	0.016	OK
4	2		2.5	1.11	37	0.234	OK
5	3		1.8	0.82	35	0.03	OK
6	4		0.8	0.9	30	0.32	OK
7	5		0.8	1.25	18	0.21502492	OK
8	6		0.45	0.5	30	0.15	OK
9	7	氏名	1.2	3.2	30	0.5	OK
10	8						自動判定
11	9		0.634	0.73	30	0.29	OK
12	10		0.9	1.07	30	0.39	OK
13	11		0.9	1.1	45	0.7402857143	OK
14	12		2	2.3	30	0.4844	OK
15	13		0.9	1.1	30	0.402	OK
16	14		0.45	0.5	30	0.1529978213	OK
17	15		0.4	0.65	30	0.3542466753	OK
18	16		3.5	1.75	35	0.48	OK

図2 動摩擦係数の計算チェックシート。スマートフォンやPC等からアクセスし、提出期限までに本シートで計算がされているかを確認したうえでレポートを提出することを課した。

不確かさの計算より
 $331\text{ m/s} \leq \text{音源の音速} \leq 351\text{ m/s}$

理論値, 今回の実験結果の値もこの範囲内
 今回の実験は正確であった。

図3 音速を測定する実験レポートの考察の例。理論値と比較することでいかに実験が正確だったかを考察している。このように、実験は物理値を求めるものではなく実験の正確性を確かめるものと勘違いしたレポートは非常に多い。



図5 加藤が構築した高圧チェンバー。近所の金物屋などをまわり、必要な部品を調達して製作した。



図4 加藤の斜面実験のセットアップ。家族に協力してもらい専用のスロープを製作した。

シートにおいて物体の質量を重くすることで、重さの違いを比較する」という二つの独立したパラメータについて比較する実験を行い、きわめて優れたレポート課題を提出した(図4)。加藤は物を作ったり自ら実験をするということ

には関心が強かったが、それまでの教育課程においてこのような実験遂行能力を評価される機会がなかったため、物理に面白みを見出せずいわゆる「物理嫌い」の生徒であった。高校における物理はしばしば計算能力のみが評価対象となるため、このような自主性の高い実験課題を与えることで物理嫌いの多くの生徒に面白さを発見させられたことは大きな成果であった。私は加藤に学校の物理の授業とは独立して自分がやってみたい研究を自分なりに行うことを薦め、様々な研究発表の機会を紹介することにした。

加藤は深海生物に関心があったため、高圧下における構造を調べることを目的として高圧装置を構築することにし、チェンバーおよび最大加圧4 MPaの水圧ポンプを用意した(図5)。本装置の予備実験として複数の種類のペットボト

ルに圧力をかけ、炭酸水のペットボトルなどは耐圧性能が高いことを確かめた。また、同じ等脚目でありながら、生息地が陸地、海辺、深海とそれぞれ異なる、ダンゴムシ、ワラジムシ、グソクムシの違いを調べるために、JAMSTECの職員および漁業組合の方々の協力を得てサンプル採取のために漁船に同乗する等の活動も行った。このような研究活動の発表機会の場として、物理学会Jr.セッションを紹介し、実際に発表を行った。

3. ケース2 放課後講座から始まった研究活動例

研究テーマ「理科で考えるサイコロの「確からしい」という言葉²⁾」をJr.セッションにて発表した中学3年の宮脇と村山は、特別講座「自由研究」をきっかけとして探究活動をはじめた。本章では特別講座の中でどのように探究活動を啓発したかを紹介する。

本校ではいわゆる夏休みの自由研究に相当するものがなかったため、自主的な探究活動を啓発するために毎週土曜日に「自由研究」という特別講座を生物の教員と共に開講した。本講座では中学2、3年を対象とし、2か月程度の期間の中で自分なりにテーマを見つけ、探究活動を行い、発表することを目的とする。初回の講座では、普段疑問に思っていることをブレインストーミング形式で20程度挙げ次の講座にそのうち一つについてどのようにその疑問を調べられるかを考え調査方法を立案する。さらに十分な計画が決まったところで調査を開始する。

その中の一つが中学3年2名による「理科で考えるサイコロの「確からしい」という言葉」というテーマで行われた。二人は数学の確率の単元で「サイコロの目が出る確率はすべて等しいものとする」という仮定をされることに疑問を持ち、実際に様々な環境で出る目の確率が等しいかを

調べることにした。通常サイコロは1の目が深く掘ってあるため他の目に比べて出る確率が高いが、本テーマでは特に水の中という異なる環境による違いに着目し調べた。実験のために学校の大きなゴミ箱を1か月ほど借り、朝の朝礼がはじまる前や放課後などを利用して、六千回分サイコロを振った。この結果から水中では空中に比べて1の目が出る確率が半分以下になることが明らかになった。

本実験結果を発表する機会として本講座の終了後に継続した実験を行い、毎日新聞社主催の自然科学観察コンクールにレポートを応募した。さらに、水中と空中で目の出方が異なる原因を調べるために高さ2mの亚克力筒に水を充填し、その中をおちるサイコロの軌跡を観察した(図6)。この結果も踏まえて、さらなる発表の機会として物理学会Jr.セッションを紹介し、実際に発表を行った。

4. 物理学会Jr.セッション当日の様子

2014年度の物理学会Jr.セッションでは午前中にポスターセッション、午後には口頭発表というプログラムであった。本校の2グループはどちらもポスター発表だったため、それぞれ二つのグループがポスターの前に立ち他校の学生や物理学会員等幅広い層に説明を行っていた(図7-9)。ポスター発表は全部で45校グループが参加しており、100人を超える中高生が会場で活発に議論を行っていた。多数の生徒が参加している学校はローテーションを組んで他の学

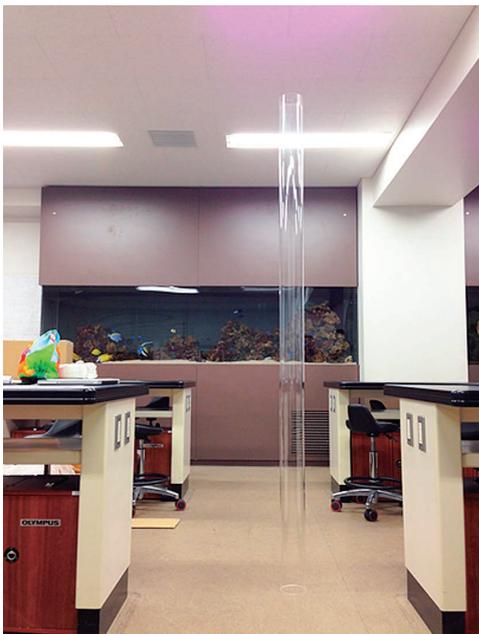


図6 サイコロ実験用の高さ2mの亚克力筒。



図7 物理学会員にポスター内容を説明する高校2年の加藤。



図8 サイコロが水中をおちる様子の特徴をiPadを用いて説明する中学3年の宮脇。

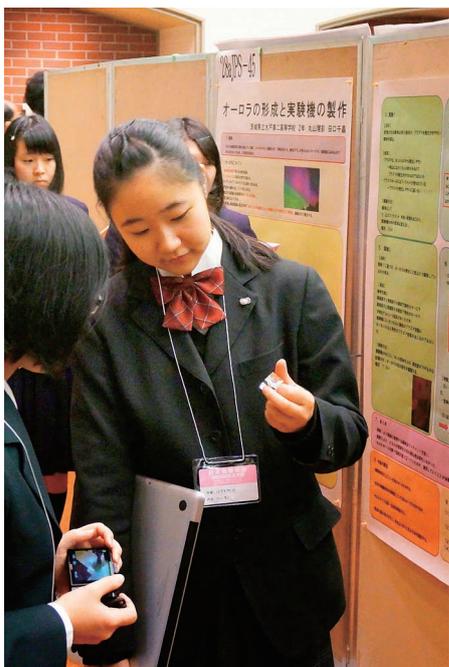


図9 実際に実験で用いたサイコロを用いて説明する中学3年の村山。

校のポスターを見てまわっていたが、本校のグループはそれぞれ1名および2名のためほとんど他の学校の発表を見れなかったのが残念であった。例えば2013年度ではポスター会場と口頭発表会場が別で設けられていたため、休憩時間などを利用して他のポスターを見ることができたが、本年度は同会場で行ったため、ポスター発表時間のみの形式だったのが惜しい点であった。とはいえ、水中の物体の運動に関する発表を行っている学校の生徒と本校の水中のサイコロを実験した生徒がそれぞれの研究について紹介したり、後半はうまくコミュニケーションが取れていた。また、物理学会員の方々からの普段学校内の実験授業では問われないような実験の物理的意義に関する質問、不確かさに関する質疑に対して、苦労しながら生徒は懸命に答えていた。

午後は全9グループが口頭発表を行った。ポスターセッションと同様に参加生徒だけでなく多くの物理学会員が聴きにこられており、活発に質疑が行われていた。その後東海大学の木村教授による講演があり、一日通して中学高校の探究活動から最先端の研究までを触れることのできるプログラムになっていた。特に他校の探究活動について話を聞く機会は生徒にとってなかなか得られないため、これだ

け多くの学校がそれぞれ深い探究活動を行っていることに驚いていた。

5. 物理学会 Jr. セッションに参加をしてみよう

私は広尾学園において、お家レポートや、自由研究の特別授業等を通して現象に疑問を持ち、それを自ら検証する力を養う授業開発に取り組んできた。現状では多くの中学・高校における実験授業はその時間的拘束から実験を行うまでの準備を自主的に考えさせることができず、正確な実験を行うための操作方法の取得に閉じられている。そこで自宅で行う課題にしたり、特別講座という形で課外時間を有効に活用することで、問題意識を持った事象に対する探求活動の啓発になるという手応えを感じられた。また、それらの取り組みの中から高い実験遂行能力を持つ生徒を発見することができた。このように、自主性の高い実験授業を広く展開することで既存の物理嫌いの生徒に対して物理の楽しさを再発見させられると感じられた。また、このような取り組みの中で発見した生徒の一部に対して授業外での研究活動を啓発することができた。

このような研究活動の発表の機会はJSEC 高校生科学技術チャレンジのようにいくつか存在しているが、物理学会 Jr. セッションはその中でも高校生だけでなく多くの物理学会員と触れ議論ができる貴重な機会であった。現在 Jr. セッション参加校の多くが、科学部であったりSSH（スーパーサイエンスハイスクール）のプログラムの一環であったり主体であるが、このような個人の研究活動の発表機会の場として広く認知されるとより多くの学生の科学的意欲を啓発できると思われる。例えば小中学生を対象とした自然科学観察コンクールでは、例年1万以上の応募があるが優秀賞の多くが個人の疑問から発せられた探究活動である。このような探究活動を啓発している中高教員および物理研究者の皆様に Jr. セッションの存在およびその潜在的価値を知っていただきたい。最後に物理学会員の方々にはぜひ Jr. セッションの発表の場にお越しいただき中高生の発表を見ていただきたい。

参考文献

- 1) 加藤之愛留：日本物理学会誌 **69** (2014) 3月増刊号 140.
- 2) 村山華子，宮脇里奈：日本物理学会誌 **69** (2014) 3月増刊号 144.

(2015年11月18日原稿受付)

上田和夫 (JPSJ編集委員長 e-mail: ueda@jps.or.jp)

「隠れた秩序」内で発現するカイラル*d*波超伝導

ウラン化合物 URu_2Si_2 は 17.5 K で「隠れた秩序」と呼ばれる正体不明の2次相転移を起こし、そのメカニズムは四半世紀にわたって世界中で研究されている。本研究ではその秩序相内で起きるエキゾチック超伝導 ($T_c = 1.4$ K) に焦点を当て、極低温比熱の温度・磁場・磁場方位依存性から超伝導ギャップが水平ラインノードを有するユニークな構造をしていることを明らかにした。この結果により、 URu_2Si_2 がカイラル*d*波型というこれまでに例のないタイプの超伝導体であることが決定的となった。

ウラン化合物 URu_2Si_2 は 17.5 K で磁気や構造の明確な変化を伴わない正体不明の2次相転移を示す。この相転移は「隠れた秩序」と呼ばれ、そのメカニズムは固体物理学における難解な問題の一つとなっている。興味深いことに、「隠れた秩序」という特殊な環境下にもかかわらず低温 1.4 K で超伝導が発現する。この超伝導は従来型とは異なることが明らかになっており、エキゾチックな対形成メカニズムが期待されている。そのメカニズムを解明する上で、電子間の引力相互作用と密接に関連する超伝導ギャップ対称性の特定は欠かせない。 URu_2Si_2 のギャップ対称性に関して、低温で上部臨界磁場が強く制限されること、超伝導状態で時間反転対称性の破れが示唆されること、比熱や熱伝導率などの熱力学量が低温で温度のべき乗に比例することなどを基に大変珍しい $k_z (k_x + ik_y)$ 型のスピナー重項カイラル*d*波超伝導の可能性が提案されている。一方で、このカイラル*d*波超伝導は水平ラインノードとポイントノー

ドを有するユニークなギャップ構造 (図1左挿入図) をとることが期待されるが、複数あるバンドのうち重いバンドにおいて前者の兆候が先行研究の熱力学測定で観測されず、未解決の問題となっていた。

最近、東京大学物性研究所のメンバーを中心とする研究グループは、高純度の URu_2Si_2 単結晶試料を用いて極低温比熱の温度・磁場・磁場方位依存性を詳細に調べ、重いバンドの超伝導ギャップに水平ラインノードが存在していることを明らかにした。この結果により URu_2Si_2 がカイラル*d*波型というこれまでに例のないタイプの超伝導体であることが決定的となった。本成果は日本物理学会が発行する英文誌 JPSJ の 2016 年 3 月号に掲載された。

一般に、超伝導ギャップを超えて励起される準粒子の量は低温比熱測定から検出することができる。低エネルギーの準粒子励起は超伝導ギャップ構造に大きく依存するため、低温比熱の温度・磁場依存性から超伝導ギャップがゼロとなるノードの有無を、磁場方位依存性からそのノードの位置を特定することが可能である。本研究では、ギャップ構造を決定する上で障壁となる不純物散乱効果や熱励起効果を抑えるために、高純度な単結晶試料を用いて極低温まで角度分解磁場中比熱測定が行われた。その結果、先行研究では見られなかったギャップノードの存在を支持する比熱の $H^{1/2}$ 的振る舞いがいずれの磁場方向でも明確に観測され (図1左)、さらに *ac* 面内回転磁場中で比熱が結晶構造を反映した単純な2回対称の振動ではなく肩構造を伴う特徴的な磁場方位依存性を示すことが明らかとなった (図1

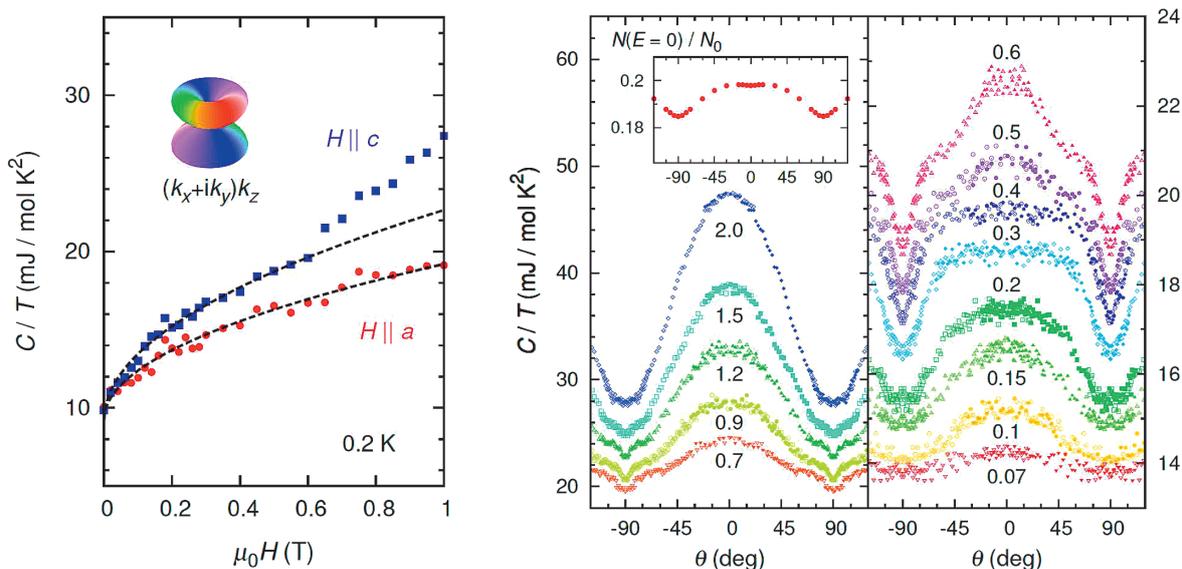


図1 (左) URu_2Si_2 の低温比熱の磁場依存性。挿入図はカイラル*d*波超伝導のギャップ構造。(右) $T = 0.2$ Kにおいて様々な磁場下で測定した比熱の *ac* 面内磁場方位依存性 (磁場の単位はテスラ)。挿入図はカイラル*d*波超伝導を仮定した微視的理論計算による準粒子状態密度 (低温比熱に対応) の角度依存性。計算結果は低磁場 (例えば 0.3 T) での実験結果をよく再現している。

右). また, カイラル d 波超伝導を仮定した微視的理論に基づく計算結果 (図1右挿入図) との比較により, この肩構造が水平ラインノードの存在によって生じていることが示された. これら一連の研究結果により, URu_2Si_2 はカイラル d 波超伝導体であることが結論づけられている.

超伝導が様々なメカニズムで起き得ることは現在では周知の事実であり, その個々のメカニズムを解き明かしていくことが転移温度の高い超伝導体の開発にも繋がっていく. 本研究で結論づけられた URu_2Si_2 のカイラル d 波超伝導はこれまでにない全く新しいタイプの超伝導であり, なぜ「隠れた秩序」の中で発現したのか, そのメカニズムを今後明らかにしていくことで超伝導研究の更なる発展が期待される.

原論文

Evidence for chiral d -wave superconductivity in URu_2Si_2 from the field-angle variation of its specific heat

S. Kittaka, Y. Shimizu, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Ōnuki, Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida: *J. Phys. Soc. Jpn* **85** (2016) 033704.

〈情報提供: 橘高俊一郎 (東京大学物性研究所)
榊原俊郎 (東京大学物性研究所)
町田一成 (岡山大学)〉

News and Comments

Locating Horizontal Line of Zero on the Fermi Surface

K. Izawa: *JPSJ News and Comments* **13** (2016) 02.

JPSJ フレンドシップミーティング

日本物理学会第71回年次大会 (2016年) では, 3月21日にJPSJフレンドシップミーティングを開催しました. 昨年からはじめたJPSJ Outstanding Referees (JPSJ 読者賞) の第二回授賞式が, 最初に行われました. 続いて, JPSJ の近況報告が行われた後, 2015年にJPSJの注目論文に採択

された論文の中から下記の論文について講演が行われました. 今回も参加者は約100名に達し, 大変盛況に終えることができました.

JPSJ Outstanding Referees 2016を受賞された方々は以下の通りです (敬称略, 50音順).

網塚浩 (北海道大学), 楠瀬博明 (明治大学), 榊原俊郎 (東京大学), 佐々真一 (京都大学), 佐藤憲昭 (名古屋大学), 田島節子 (大阪大学), 広井善二 (東京大学), 堀田貴嗣 (首都大学東京), 三宅和正 (豊田理化学研究所), 柳瀬陽一 (京都大学)

講演題目等は以下の通りです.

「バクテリアの紐状成長における複雑な折り畳み過程の定量化」脇田順一 (中央大学)

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

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2016年1月に掲載可となった中から2016年2月の編集委員会を選んだ “Papers of Editors’ Choice” (JPSJ 注目論文) を紹介します. なお, 編集委員会での選考では読者等の論文に対する評価を重要な要素としております.

この紹介記事は国内の新聞社の科学部, 科学雑誌の編集部に電子メールで送っている「紹介文」をこの欄のために少し書き直したものです. 専門外の読者を想定し, 「何が問題で, 何が明らかになったのか」を中心にした読み物であるので, 参考文献などはなるべく省いています. なお, 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. 内容の詳細は, 末尾に挙げる論文掲載誌, または, JPSJ のホームページの「Editors’ Choice」の欄から掲載論文をご覧下さい (掲載から約1年間は無料公開). 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.

坂井典佑 (PTEP編集委員長 norisuke.sakai@gmail.com)

1次元 Kardar-Parisi-Zhang 方程式：高さ分布と普遍性

ここ数年、「KPZ方程式」や「KPZ普遍性」というキーワードが注目を集めている。しかもその現れ方は「KPZ方程式に厳密解が見つかった」「KPZ普遍性が実験でも確認された」「ランダム行列にも関係するようだ」「KPZ方程式を定義したM. Hairerがフィールズ賞を受賞した」といった具合で、かなりバラエティに富んでいる。

ここでいうKPZは、Kardar, Parisi, Zhangの3人の名前の頭文字を並べたもので、元々界面の成長を記述するモデルとしてノイズ有り非線形偏微分方程式を彼らが導入し、それがその後彼らの名を冠して呼ばれるようになった。(KPZというと、Knizhnik, Polyakov, Zamolodchikovの3人の頭文字を並べたものもあるので注意が必要である。)

このKPZ方程式の導入は1986年のことであったが、当時からフラクタルやスケーリングとの関係で注目されて盛んに研究され、くりこみ群やシミュレーションの結果を元に大枠での理解はかなり進み、1990年代半ばまでにはすでにある意味成熟して活発な分野でなくなったように見えた。方程式が非線形であるため解析的にできることが限られている(ように思われた)ことや、普遍的と予想された指数が実験でなかなか見つからなかったことも影響していたかもしれない。いずれにせよKPZ方程式を、そのような時代状況を含めて以前から知っている人にとっては、近年KPZ方程式が話題になっていると言われても、最初は「なぜいまさらKPZ方程式?」と思われるのも当然と言える。

近年になってKPZ方程式が改めて注目されるようになったといっても、以前の研究を知らない世代が別の文脈で同じ方程式を見出して以前と同様の興味を持って研究している、というわけではない。KPZ方程式に関する問題が、実は全く別の問題と関係していることが見出され、その対応を進展させる中で以前の研究では思いもよらなかった深い理解が得られるようになり、そこから全く新たな進展が起こっているのである。(ただし近年の進展は2次元中の1次元的界面の成長に関するものが中心である。)

この対応の主要な結論を一言でいうと、「KPZ方程式で記述される界面の高さの普遍的な分布は、ガウシアン・ユニタリ・アンサンブル(GUE)と呼ばれるランダム行列の最大固有値分布と等しい」となる。1990年代半ばまでの研究においては、主としてスケーリングの指数に興味が集まっていたのに対し、近年の研究においては、より詳細な「高さ分布」という情報が得られるようになってきたのである。独立な多数の要素から成る系の揺らぎがガウス分布するこ

とはよく知られているが、相互作用のある非平衡系における分布をこのように明示的に求めることができたのは、驚くべきことである。

前段落で述べたことは、一見極めて数学的な内容に聞こえるかもしれない。難しい問題に取り組むのが好きな理論家が数学的に美しい対応関係を見つけたという話に聞こえたかもしれない。しかし現象の普遍性を信じると、界面成長でランダム行列の最大固有値分布が得られるという結果は、実験でも見出されてしかるべきである。実際にそのような実験が行われ、理論の予言は見事に確認された。

KPZ方程式を厳密に扱う理論は、ランダム系、レプリカ法、可積分系、多変数直交多項式、確率解析といった様々な分野を巻き込みながら、その後も発展を続けている。また、元々KPZ方程式は界面成長を記述する目的で導入されたが、その普遍的な性質はより一般の1次元系でも見出されるという予想が提出され、異常熱輸送の問題とも関連して盛んに研究されている。

以上述べてきたように、KPZ方程式にまつわる研究は近年拡大してきており、そのため関連するキーワードを耳にする機会も増えている。しかし、問題は、研究の発展が急速で多岐にわたるため、その全体像をつかむことが難しいことである。本論文は、KPZ方程式そのものについても知らない読者に対し、近年の進展まで含めて一通りの内容を伝えるコンパクトなレビュー論文である。若い研究者はもちろん、1990年代半ばまでの状況を知っている人にとっても、有用な文献となると思われる。

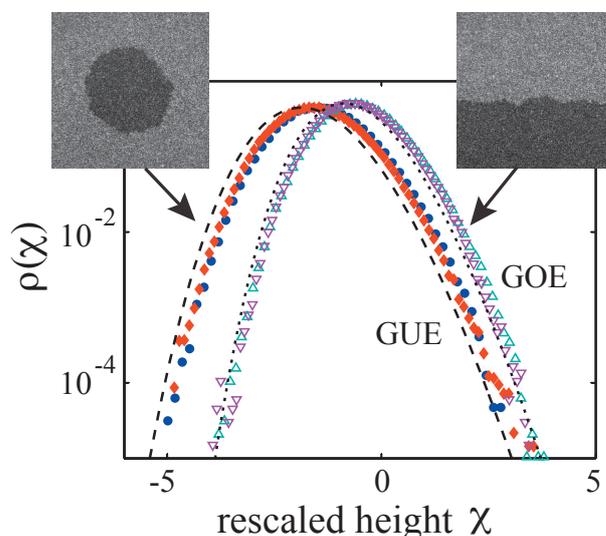


図 界面成長観測データ(黒点線・破線)とランダム行列の最大固有値分布(色○△等)(Takeuchi, et al.: Sci. Rep. 1 (2011) 34より)

原論文 (2016年2月21日公開済)

The one-dimensional Kardar-Parisi-Zhang equation: height distribution and universality

T. Sasamoto: Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 022A01 (2016)

DOI: 10.1093/ptep/ptw002

〈情報提供：笹本智弘 (東京工業大学准教授)〉

ここでは日本物理学会が発行している Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) の Invited Papers または Special Section で 2016年2月号に掲載されたものを紹介しています。この紹介記

事は国内の新聞社の科学部、科学雑誌の編集部に電子メールで送っている「紹介文」をこの欄のために少し書き直したものです。専門外の読者を想定し、「何が問題で、何が明らかになったのか」を中心にした読み物ですので、参考文献などはなるべく省いています。内容の詳細は、PTEPのホームページから閲覧・ダウンロードして下さい。PTEPはオープン・アクセス誌であり、閲覧・ダウンロードは無料です。PTEP編集委員会では、興味深いトピックスについて、Invited Papers または Special Section の提案を受けて審議し、原稿を依頼しています。これによって、PTEPと物理学への関心を高めることを目指しています。物理学会会員からのPTEPへの自信作の投稿を期待します。

応用物理 第85巻 第6号 (2016年6月号) 予定目次

解説

光と電場による有機導体とイオン伝導体の電気伝導制御
.....飯森俊文, 太田信廣
誘電体によるトポロジカルフォトリソグラフィ.....胡 暁

最近の展望

ナノインプリントリソグラフィの現状と今後の課題.....中川 勝

研究紹介

熱放射顕微法によるグラフェン成長のリアルタイム観察
.....斉木幸一郎, 寺澤知潮
フォトリソグラフィによるテラヘルツ波の操作と応用
.....富士田誠之
グラフェンを用いた発光型バイオセンサ.....古川一暁, 上野祐子
光学迷彩とメタマテリアル.....雨宮智宏, 荒井滋久

基礎講座

真空度測定のコツ.....市村正也

Inside Out

南から北へ、それとも北から南へ?.....ウィリアムJ・ムンロ

連載

科学を詠む[®] 科学技術と人間.....松村由利子
書評

国立天文台：環境年表 平成27-28年.....櫻井啓一郎

Science As Art

THzTHz—てふてふ—.....富永依里子

ターニングポイントの視座—連載のはじめに

高岩 義信 (高エネルギー加速器研究機構社会連携部情報資料室史料室 takaiwa@post.kek.jp)

2015年は終戦後70年を刻む年として様々な記憶を掘り起こす動きがあったが、本学会にとっては今年2016年が、日本数学物理学会から日本数学会と分離する形で1946年に再発足して70年を数える年となる。また両学会の原点である東京数学会社の創設から数えると、来年の2017年が140周年となり、1946年はちょうどその折り返し点になる。

日本物理学会ではこの機会にその歴史を振り返る企画を検討し、その一環として物理学史資料委員会との共同企画により、物理学会誌で記念記事を連載することとなった。

これまで例えば、1977年の日本数学物理学会(およびその前身)創設100年または1996年の日本物理学会の戦後スタート50年を記念する企画があった。今回は「物理学史資料委員会」が企画に加わるので、歴史的・社会的な状況の変化が研究活動にもたらしたターニングポイント(転換点)を考えるとという観点から物理学会と物理学の研究の歴史を顧みるシリーズとし、とくにその経緯を示す史料(歴史的資料)の存在に注目して、その保存状況や価値に触れる機会も提供したい。

このシリーズは隔月の連載で1年かけて掲載する予定である。学会創生期から戦後にかけてのあいだの、顕著なトピックスを取りあげ、以下に示すような記事で構成する。

今やこの時期の出来事は歴史的な視点による批判的な検討が可能であろうと思われる。学術研究を支える制度は、時とともに社会の変化に対応する必要に迫られ、また学問領域の拡大・流動による変遷もある。その中で日本物理学会は過去において、何を核として物理学者コミュニティの組織化を維持し、変化に対してイニシアティブをもってあらたな方向性を打ち出そうとしてきたかを顧みておくことは意義があると思われる。それが、今後の研究環境の変化にも対応していくためのヒントとなることに期待する。

学会創設から新物理学の潮流 日本の開国以来、欧米列強に伍して近代的な科学技術を組織的に取り入れ普及させるための制度を形成する必要があった。

・「日本の近代学問の礎として：物理学の黎明期から東京数学会社設立」

「数学物理学会」のような組織が生まれたこと自体が日本の物理学研究の源流を形作った大きな遺産である。それによって学問の領域と研究者の活動環境の境界を定めた。

・「量子力学が導いた新しい風」

学問領域の拡大や社会的要請による研究活動の活性化は、定められた研究環境からの逸脱を促す契機となる。学問の府である大学の権威のみによらずに大学外の研究機関(理化学研究所)との協同という新たな形が生まれてくる。

太平洋戦争終結の前後 太平洋戦争終結は、日本の社会の大転換点であった。

・「島田実験所という研究プロジェクト：戦時科学動員は何をもたらしたのか」

物理学の研究も転換点を迎えたが、戦前・戦中からの継続性にも注目すべきものがある。その一つの例として「総動員体制」のもとで進められた基礎科学振興と軍事協力研究は、大学の枠を超える密な研究交流を進める要因となった。海軍の島田実験所で行われた研究は戦後への影響において注目すべきものがある。このような活動は戦後の活発な研究者コミュニティ組織化の礎となったと考えられる。

・「独り立ちした物理学会」

終戦後の混乱のさなかの新しい学会組織への移行は何を目指していたのか、また国内の状況の影響をどう捉えて方向を定めていたのだろうか。当時の学会または関係者の資料によってそれが垣間見られるだろう。物理学会の原点における状況を知ることで、学会の今後の運営に対する基本方針を検討するのに有用な情報が得られるかもしれない。

戦後の出発 戦後、再設定された物理学会には当時の研究者の活動についての規範が色濃く折り込まれている。それが現在の物理学会の思考様式を陰に陽に規定している。そのような規範の捉え方は変遷しており、それが物理学会ひいては物理学研究の、現在にもつながる転換点をあぶりだすものにとらえることができるであろう。

・「『学問の民主化』とは何だったのか」

戦前の日本では「民主主義」が十分に成熟しておらず科学の進展が阻まれていたとの認識から、民主的な研究活動の運営が科学の進歩に寄与するとして行われた様々な運動を資料によって検証する。

・「共同利用研究所は物理研究をどう変えたのか—変わりゆく研究機関」

民主的な研究活動の運営実現のため検討されたのが共同利用研究所(施設)であったが、実現された研究機関と、それによって提供された研究環境をどう評価したらよいか検討する。

・「平和問題と原子力：物理学者はどう向き合ってきたのか」

戦時体験は物理学者に重荷を負わせることになった。物理学の知識による兵器の開発と新たなエネルギー資源の獲得可能性のジレンマの当事者となった。兵器開発は明らかに軍への協力であるがどのような物理学研究テーマも潜在的に軍事に転用可能であるとの危惧を生じさせるからである。

(2015年12月1日原稿受付)

日本の近代学問の礎として： 物理学の黎明期から東京数学会社設立

並木雅俊 〈高千穂大学 namiki@takachiho.ac.jp〉

1. はじめに

日本には物理学思想は生まれなかったが、現在の意味での「科学」や「物理」などの言語は19世紀の日本において誕生した。

19世紀は、欧州において、科学の守備範囲の拡大、言語「科学者」の派生、大学が科学を研究教育の対象とするなど、科学が閉じられた社会から開かれた社会へと大衆化された世紀でもある。日本の科学受容の時期は、科学の創造期以後であったが、比較的早く学会が創設され、世界水準に追いつくのも早かった。本小文で、日本において、物理学が天文・暦学の研究として受容され、医学の基礎として学問の一つとなったこと、それに本会の前身である日本数学物理学会に至るまでを述べる。

2. ニュートン力学の受容¹⁾

物理学は、明治5年(1872年)の学制発布以前は、主に、窮理学と言われていた。窮理は、『易経』にある窮理尽性(徹底的に理を窮める)から生じている。地動説(太陽中心説)に基づき、また惑星が楕円軌道上を運行することを述べた天文学書の翻訳である本木良永^{*1}『星術本原太陽窮理了解新制天地二球用法記』²⁾(1792~1793)の書名に「窮理」がある。この太陽窮理は、コペルニクス体系、すなわち太陽中心説^{*2}を意味している。本木は、惑星の運行の理を窮め尽くした説として窮理を用いて表現したのであろう。厳密には使用法は異なっているが、以後、窮理学が自然哲学を意味する言語として使われるようになった。

『プリンキピア(自然哲学の数学的諸原理)』に基づく惑星運行は、本木の影響を受けた志筑忠雄^{*3}『暦象新書』(1798~1802)で論じられている。『暦象新書』は、オックスフォード大学のJ. Keillがラテン語で執筆した書をオランダのJ. Lulofsが蘭訳した *Inleidinge Tot de Waare Natuuren Sterrekunde* を主な拠りどころとして執筆された。志筑は、

この書でケプラーの法則を概説し、楕円軌道を円軌道と比較検討、地球の自転による遠心力の大気や大海への影響などを論じ、また中心力における質点の運動論と本格的な物理を展開した。³⁾『暦象新書』は、ケプラーの法則をニュートンの運動の法則から理解することを目的とした日本初の力学の書である。志筑は、Lulofs 蘭訳本と20歳頃に出会い、数理の基づく抽象的な思考とその方法論を理解するのに20年以上を費やした。幾何の基礎力もなく、依って立つところとなる学問をもっていなかった日本人が、西洋の自然哲学を受容するには大変な苦労があったのだろう。

『暦象新書』は当時の日本人の能力を超えた書であるが、『解体新書』(1774)のように漢語で書かれたものではなく日本語であったため、写本により学者間にゆっくりと伝わった。この書の影響により、町人学者として知られる唯物論者の山方蟠桃(1748~1821)『夢之代』(1802~1820)、帆足万里(1778~1852)による実験と数学の重要性を論じた『窮理通』(1836)が出版された。天文・暦学からではあったが、真理探究のための窮理学のスタートであった。

3. 医学の基礎としての窮理学

日本は、天文・暦学よりは遅れたが蘭方医学を受容した。^{*4} 日本の物理学は蘭方医学の基礎学として受容され、流布した。⁴⁾

伊予松山藩侍医・青地林宗(1775~1833)は、日本最初の物理書『気海観瀾』(1825)を著した(刊行(板版)は1827年)。気海は、大気、大海の意味である。青地は、伊予松山藩侍医である父青地快庵より漢方医学を学んだ後、蘭方医を志した。江戸に出て通詞・馬場佐十郎(1787~1822)の弟子となり蘭学を習得し、文政5年(1822年)に幕府天文台の訳官となった。『気海観瀾』は、オランダのJ. Buijsが初学者のため執筆した *Natuurkundig schoolboek* (格物総凡, 1798)を基にして漢語で執筆した刊行本である。力学、熱、音、光、電気、A. Lavoisierの舎密が解説されており、初級ではあるが一般物理の内容が網羅されている。

青地の娘婿^{*5}に川本幸民(1810~1871)がいる。川本は、漢方医学を学んだ後、江戸で足立長雋(1775~1836)に蘭学を学び、足立の薦めで義兄となる蘭方医・坪井信道

^{*1} 本木良永(1735~1794)は、長崎・出島の阿蘭陀通詞として著名な本木家の三代目、わが国に地動説を翻訳紹介したことで知られている。『星術本原太陽窮理了解新制天地二球用法記』は、イギリスに商社が販売する天球儀・地球儀に付けた英文の説明書(1766年)のオランダ語訳で、寛政の改革の主導者である老中・松平定信が良永に命じ、寛政5年(1793年)に献上された著である(刊行物とはなっていない)。

^{*2} 不動の星を恒星、惑い星を惑星と訳したのもこの書である。

^{*3} 志筑忠雄(中野柳圃, 1760~1806)は、中野忠次郎として生まれ、阿蘭陀通詞の志筑本家の養子となり、7代目を継いだ。通史見習いとなったがこれを辞して天文・歴の研究家となった。本木の弟子と云われているが真偽は不明。「鎖国」の造語は、志筑である。言葉は、実施あるいは発見の後(「放射能」「電子」など)に生まれることが多い。

^{*4} 中国は、西洋天文学を受け入れたが西洋医学は受け入れなかった。

^{*5} 青地には5人の娘があり、長女は蘭方医の坪井信道、二女は蘭方医・蘭学者の伊東玄晃、三女は摂津三田藩医の、四女は蘭方医・蘭学者の高野長英(1804~1850)に嫁いだ。

(1795~1848)^{*6}の日習堂に入門した。川本は、義父(青地)の『気海観瀾』と同種の書名である『気海観瀾広義』を刊行した(大部であるため、刊行は1851年から1856年にわたった)。『気海観瀾広義』の主なる原本は、版が異なるが、『気海観瀾』と同じBuijsの『格物綜凡』である。『気海観瀾』は『格物綜凡』の一部であって、他の部分は除かれている。川本は、『格物綜凡』すべての刊行を試みた。これを成し遂げるために、川本はE. Buysの*Volks Nuttuurkunde*(農学窮理, 1811)やJ. N. Isfordingの*Natuurkundig Handboek voor Leelingen in de Heel-en Geneskunde*(医科必読格物書, 1826)などを参考にして、『気海観瀾広義』を完成させた。また青地の書と違って、漢語は序文のみで基本は日本語で執筆されている。『気海観瀾広義』は、自然哲学を中心に据えているが、化学、動物、植物、鉱物、天体も対象としており、また、いたるところで病気や健康に関連付けている。全体を通して、現代の「理科」に対応するが、医学の基礎としての立場は保たれている。

窮理が医学の基礎であることを明確に述べている書が、広瀬元恭(1821~1870)の『理学提要』(1856)である。広瀬は医学に基礎学がなくてはならないとし、1に窮理、2に解体、3に生理、4に病理、5に薬性、6に舎密、^{*7}7に古賢の経験と学ぶ順序を定め、「窮理の学は、先ずこの構成造立の理を明にするなり」と窮理を基礎の基礎とした。原本は、川本が参考としたIsfordingの『医科必読格物書』である。『理学提要』は、漢語で執筆され、出版された。広瀬は、甲斐(天領地)の儒医・広瀬恭平の二男、地元にある時習館で漢学を学んだ後、江戸に出て、坪井信道の日習堂に入門し、蘭方医学と蘭学を学んだ。川本幸民と緒方洪庵(1810~1863)は兄弟子にあたる。京都で蘭方医として開業、また時習堂を開き、『理学提要』はそこでの講義ノートをもとにして書かれた。

Isfording『医科必読格物書』は、緒方が『医学入門物理約説』(完成年不明)としてまとめている。⁵⁾ 広瀬の『理学提要』は、川本ばかりか、緒方の影響⁶⁾も受けての執筆であった。『気海観瀾』『気海観瀾広義』それに『理学提要』により、窮理(理学)は、医学の基礎学として学問上位置づけられ、蘭方医の間で普及した。

4. 窮理熱

緒方洪庵の適々斎塾(適塾)の塾生に福沢諭吉(1834~1901)がいる。在塾期間は、福沢が20歳から23歳の頃^{*8}である。福沢が適塾で学んだのは医学、生理学、窮理学、築城法、舎密である。適塾を福沢の最終学歴とすると、福沢は理系出身者となる。福沢が理系人であることは、咸臨

丸に乗って渡米(1860年)したとき、アメリカ人がガルバーニの鍍金法、砂糖の清浄法などを自慢げに説明した際も、福沢はこれらをすでに学んでいたため驚くことはなかった⁷⁾ということ、また2度目の渡米(1867年)の際に、G. P. Quackenbosの*Natural Philosophy*(1866)を土産として76冊も購入したことからわかる。

福沢は、慶応4年(1868年)^{*9}に『訓蒙窮理図解』を出版した。内容は『気海観瀾』『気海観瀾広義』それに『理学提要』とそう変わらないが、温気、空気、水、風、雲雨、電雪露霜氷、引力、昼夜、四季、日蝕月蝕など身近な10のテーマから構成され、読みやすい文章(漢字にはルビがふってある)、それに巧みに図が用いられており、初学の者を誘うのに十分な要素がある。前述のQuackenbosも参考にしているが、最も参考としたのはM. Swiftの*First Lessons on Natural Philosophy*(1867)である。

序文に「物の理に暗ければ、身の養生も出来ず、親の病気に介抱の道も分からず、子を育てるに教えの方便もなし」と記し、窮理学を万学の基礎とし、これを学ぶことが一身独立の道であると、窮理リテラシーを説いている。^{*10}

『訓蒙窮理図解』刊行後、Swiftの本に表紙を付けただけの『理学初歩』(1867、翻刻)、部分訳の『挿訳理学初歩』(1871)、『理学初歩直訳』(1872)、『理学初歩図解』(1872)、それに『訓蒙窮理図解』に刺激を受けての『窮理発蒙』(1872)、『理学問答』(1872)、『窮理問答』(1873)などと窮理書が多く発行され、窮理熱と呼ばれる現象が起きた。明治となって、鎖国から開国となり、日本に近代がやってきた。富国強兵・殖産興業が掲げられたが、技術や工業が未熟であったため、それらの基礎学であると捉えて窮理を知ろうという気運が高まったと考えられる。福沢の影響も大きかった。福沢は、「東洋になきものは、有形において数理学と、無形において独立心と、この2点である」と述べ、数理学(数学的自然科学、すなわち物理学)の重要性を唱えた。

5. 用語の定着

「自然」は、仏教用語であり、長い歴史をもった言葉である。サンスクリット語の“svabhāva”は「自分の在り方」を意味している。奈良時代初期に編纂された『常陸風土記』(713)には「おのずから」と訓じられ、空海(774~835)『十住心論』では「じねん」という呉音で発音され、形容詞または副詞として用いられていた(名詞ではなかった)。このため、蘭学“natuur”の翻訳は問題を抱えていた。「自然」は、蘭語“natuur”の訳語となる前から伝統的な意味をもった日本語であったこと、ニュートン力学の「自然」が日本

^{*6} 坪井信道の孫は考古学者・坪井正五郎(1863~1913)であり、正五郎の二男は『ファインマン物理学(力学)』の訳者でもある坪井忠二(1902~1982)である。また坪井信道は織田信長の子孫(7世)でもある。

^{*7} 蘭医・宇田川榕菴(1798~1846)が蘭語“chemi”を「舎密」と訳した。

^{*8} 福沢は、安政2年(1855年)3月9日に入塾、安政5年(1858年)10月に江戸出府している。

^{*9} 序文のおわりに、「慶応4年戊辰初秋」とある。明治と改元されたのが同年(1868年)9月8日であるので、慶応4年の8月下旬から9月初旬に書かれた。

^{*10} 福沢は、1882年3月22日の時事新報社説「物理学の要用」において、物理学は万学の基礎であるとの意見を述べている。福沢のこの学問観は一貫している。

の自然観になかったことが意味の混在を起こした。蘭語“natuur”の語源は、ラテン語の“natura”であり、その語源はギリシャ語の“physis”である。“physis”は、「誕生」「生長」「生成」が本来の意味であった。これらを培ったヨーロッパにおける「自然」は、F. Bacon (1561～1626) の自然支配の理念と R. Descartes (1596～1650) の機械論自然観が根底となり、I. Newton (1642～1727) の法則的「自然」を受けた I. Kant (1724～1804) の「すべての現象の総括」を経て、⁸⁾ 現在の意味をもつ言葉となった。⁹⁾

“science”を「科学」と訳したのは、“philosophy”を天道・人道を解明する学として「哲学」¹⁰⁾と訳した西周(1829～1897)とされている。しかし、その出典である知説四(1874)¹¹⁾には「事実を一貫の真理に帰納し、またこの真理を序で、前後本末を揚げ、著わして一の模範となしたるものを学(サイエンス)という」とある。ここで用いられている「学」は、事実から原理を帰納して得た真理に基づいた論理規則から得られた理論を“science”と述べているので、間違いなく現在の「科学」を意味している。¹²⁾ 井上毅(1844～1895)が1871年に「農科学」、福沢が1873年に「文学科学」と使っているが、いずれも「分科の学」の意味での使用である。いつ誰かがはっきりしていないのであるが、明治10年(1877年)には、“science”の訳を「科学」あるいは「理学」としている本が見られるようになった。

「物理」が“physics”の訳語として定着してきたのは、明治5年(1872年)からである。「物理」は、それまで、物の道理を解明するという意味で使われていた。貝原益軒は、物についての知識を集め、それを正確に順序だてて記述することが「物理之学」構築の一步となると考え、道理と物理を峻別していた。川本幸民『気海観瀾広義』の最初に「費西加者。窮物理之学也」とある。文部省は明治4年(1871年)7月に設置された。文部省は、R. G. Parker^{*11)} *First Lessons in Natural Philosophy designed to teach the Elements of the Science* (1870) を、教科書編輯寮の官吏・片山淳吉(1837～1887)^{*12)}に翻訳させ『物理階梯』(明治5年10月)を出版した。“Natural Philosophy”を窮理ではなく、物理と訳している。^{*13)} この本の出版以後、窮理、格物は徐々に物理となった。

6. 大学の誕生

江戸期の学問の中心は儒学^{*14)}である。しかしながら、

*11) Parker は、ボストンの中等学校校長である。

*12) 片山は、丹後国田辺藩士、慶応義塾で学んだ後、幕府開成所、慶応義塾教員、大学(文部省前身)少助教を経て、編輯寮勤務となり、教科書編集に従事した。

*13) 初版の題言に「物理」とするところに「理学」「窮理」が多く使われていたこと、本文においても解説が不十分であったこともあり、改正増補版の際に訂正した。

*14) 日本における学問的態度は朱子学を中心とした儒学の確立によって形成されたとされている。朱子学は、南宋の朱熹(1130～1200)によって樹立された儒学の体系である。日本には鎌倉時代に伝来し、応仁の乱により地方に広まり、江戸時代になると家康、秀忠、家光、家綱と4代の将軍に仕えた林羅山(1583～1657)により幕府教学となった。

儒学は国家を治めるための学問であり、そもそも外来思想であると捉え、この外来思想が入る前の日本の古^{いにしへ}を明らかにするため『新古今和歌集』『万葉集』などを解説することから国学が生まれた。国学は、本居宣長(1730～1801)により大成された。本居は、『古事記』『日本書紀』を通じ、天地の理を知り得ているのは日本古来の神のみで不可知であると説き、継承者の平田篤胤(1776～1843)は復古神道を唱えた。民衆社会を中心に広まり、幕末の尊王攘夷運動の中で影響力を増した。幕末・明治初期は、漢学(儒学)、国学、洋学があり、教育の基盤をどこに置くか、という問題が生じた。¹³⁾

漢学の中心は外神田台にある幕府家臣の学問所である昌平黌(昌平坂学問所)^{*15)}であったが、幕府崩壊後、閉鎖され、昌平学校として復興した。昌平学校は、翌年(明治2年)7月^{*16)}に大学校設立(開成学校、兵学校、医学校は分校)すると、国学を第1とした皇漢合併の本校となるが、国学派と漢学派の抗争となり、同年12月には大学となり、開成学校から大学南校、医学校から大学東校と改称された2つの洋学校との3校が一体となった。しかし、明治3年2月に制定された大学規則の洋学重視により、国学派と漢学派が結束して、洋学派と抗争が起きて、明治3年7月、大学本校の閉鎖となった。

幕末の洋学の中心は、開成所と医学所であった。開成所^{*17)}は、洋学摂取のため幕府が安政4年(1857年)に設けた蕃書調所が組織拡充された洋学の研究教育の場である。教授および教授並等に、川本幸民、西周助(周)、津田真一郎(真道、1829～1903)、箕作秋坪(1826～1886)、箕作貞一郎(麟祥、1846～1897)、杉純道(亨二、1828～1917)、加藤弘蔵(弘之、1836～1916)、神田孝平(1830～1898)等がいた。新政府は開成所を開成学校、医学所を医学校と復興し、これらはそれぞれ大学南校、大学東校と名称が変わった。大学南校の専門学科は理科・法科・文科・兵科である。理科は、格物学、器械学、星学、化学、動植物学、幾何学、地質学の科目からなる。

明治4年7月に文部省がおかれ、大学南校→南校→第一大学区第一番中学→開成学校→東京開成学校、また大学東校→東校→第一大学区医学校→東京医学校と名称を変えるごとに専門教育機関として進展した。この間、開成学校は神田錦町に、東京医学校は本郷に移転した。明治10年(1877年)4月、太政官の達により、2校は合併し、東京大学となった。しかし、校舎は別々、法理文の3学部の総理を加藤弘之、医学部の総理を池田謙斎(1841～1918)と2人が任せられ、管理・行政面も事務機構も別であり、システムとしての一体感はなかった。理学部は、化学科、数学・

*15) 孔子の郷地である魯国の昌平郷に擬して名づけられた。現在の湯島聖堂と東京医科歯科大学を合わせた地にあった。

*16) 改暦された明治5年(1872年)12月以前は、旧暦(太陽太陰暦)で表記した。

*17) 開成所の名は、『易経』にある「開物成務(知識を開いて世の中の事業を成就させる)」からなる。

物理学および星学科, 生物学科, 工学科, 地質学および採鉱学科の5つの学科から構成された(数字・物理学および星学科が, 数学科, 物理学科, 星学科と3つに分離されたのは明治14年(1881年)であった)。

7. 明六社

日本初の学術組織は, 明治6年(1873年)7月に結成された明六社である。明六社は, 社則を定め, 定期的な会合の開催, 社員の論文を掲載した『明六雑誌』¹⁴⁾を発行, さらに公開演説会も開催した。これらは, 現在の学会における定款, 大会, 会誌および論文誌の発行, それに公開講座の開催に対応するのであるから, 学会とも考えられる。しかし本部(事務局)はなく, 結成当初は森の自宅, それ以後は築地の洋食店精養軒が会合場所とされていた。

アメリカから帰国したばかりの外務官僚の森有礼(1847~1889)と佐倉藩大参事で洋学者の西村茂樹(1828~1902)が呼びかけ, 津田真道, 西周, 中村正直(1832~1891), 加藤弘之, 箕作秋坪, 福沢諭吉, 杉亨二, 箕作麟祥が賛同して社員となった。ほとんどが開成所の教授陣であり, 幕臣から政府陣営への転身である。『明六雑誌』では, 政治, 外交, 経済, 社会, 科学など百科に至って論じた。資金は, 雑誌販売により賄った。しかし, 明治8年(1875年), 政論雑誌や新聞弾圧のため政府の言論取締りの強化に伴い『明六雑誌』も対象となった。それに福沢を除き, 社員のほとんどが政府関係者であり, 取り締まる側と取り締まれる側が同一であるということが起こった。福沢の提案により43号発刊後発刊停止とした。明六会は, 社員数が増加しているが, 『明六雑誌』発刊停止, それに親睦団体としての性格が強まったことにより, 別の学者組織が望まれ, 1879年に東京学士会院(日本学士院の前身)が設立された。明六会の初期の社員のほとんどが会員となり, 福沢が初代会長となった(しかしながら, 学者職分論を唱えていた福沢は政府や文部省の関わりに矛盾を感じて, たった半年で辞任した)。

8. 東京数学会社設立

東京数学会社は, 1877年(明治10年)9月, 湯島昌平館(旧昌平坂学問所)において設立集會が開催され, 発足した。¹⁵⁻¹⁷⁾「会社」とあるが明六社の「社」同様に“society”の訳である。^{*18)}日本の学会としては3番目の設立である(東京医学会社が1875年4月に設立^{*19)}が, アメリカ物理学会(1899年)より22年, アメリカ数学会の前身であるニューヨーク数学会(1888年)より11年早い。設立集會の

出席者は117名であり, 7割(83名)が和算家であった。会員は入社金1円と毎月会費20銭以上1円を支払う常員^{*20)}と例会出席ごとに20銭支払う臨時員の2種類があり, 常員となったものは55名であった。常員の中に村岡範為(1853~1929), 仏語物理学科^{*21)}学生の寺尾寿(1855~1923), それに東京大学理学部教授の菊池大麓^{*22)}(1855~1917)がいる。また海軍関係者が多いのは, 航海・測量・砲術における数学使用者であったことと呼びかけ人の影響があったと思われる。

呼びかけ人は, 神田孝平と柳檜悦(1832~1891)である。神田は, 美濃不破郡に生まれ, 開成所教授並を経て, 当時は文部少輔である(明六会社員であった)。洋学に造詣が深く, 数学者というより開明官僚である。柳は, 安濃津藩江戸下屋敷に生まれ, 関流和算家に学び, 長崎海軍伝習所を経て, 海軍に出仕, 海軍大佐・水路局長であった。2人とも数学の普及と教育に情熱をもっており, 2人が社長(社長2人制)となった。文部官僚と海軍将校が中心となつての発足であった。また, 毎月第1土曜日午後1時からの例会の開催と『東京数学会社雑誌』を例会の日に発行することを決めた。

神田は, 1877年11月に発行された『東京数学会社雑誌』第1号巻頭題言に「此般数学会社ヲ開立スルノ目的ハ益々斯学ヲシテ開進セシメンコトヲ欲スルニ在リ此学ヲ開進セシメンコトヲ欲スルノ目的ハ実理ヲシテ大ニ人間ニ明ナラシムルニ在リ蓋シ数ハ理ノ証ナリ証明ナラザレハ理顕レス苟理ノ顯レンコトヲ求メバ数ソレ講明セザル可ケンヤ…公衆一般数学ノ開進ヲ以テ目的トス…」と設立目的を記載した。^{*23)}

会社の活動として, 「訳語会」の設置(1880年)がある。“number”, “quantity”など多くの語の訳語が定まったが, 結論を得るのに苦勞した語もあった。“mathematics”は, 菊池が「物の理を論ずる学が物理学なら, 数の理を論ずる学は数理学とすべし」と主張したため決議に時間を要した。「物理訳語会」は, 山川健次郎(1854~1931)の発案で明治16年(1883年)に発足した。山川は, 明治9年(1876年)に東京開成学校教授補となり, 翌年大学設置に伴い東京大学教授補, 明治12年(1879年)に東京大学理学部教授となった。日本人初の物理学教授である。山川の入社は, 明治15年8月に承認されている。^{*24)}社員券(会員番号)は

^{*20)} 会費に幅をもたせているが, 20銭32名, 30銭5名, 40銭3名, 50銭10名, 1円8名とほぼ6割が20銭であった。

^{*21)} 仏語物理学科は開成学校時代に設置され, その時の入学者が卒業した1880年7月まで残った。第1回卒業生の寺尾は仏語物理学科卒業であり, 第5回卒業生の田中館愛橘は物理数学星学科卒業である。

^{*22)} 菊池は, 当時22歳であった。菊池の父は箕作秋坪である(秋坪は蘭医・蘭学者の箕作阮甫(1799~1863)の養子で, 秋坪は実家の菊池姓を二男の大麓に嗣がせた)。箕作麟祥は従兄弟である。また, 長岡半太郎は麟祥の女婿であり, 菊池の四男は菊池正士(1902~1974)である。

^{*23)} 実用を重んじていること, 数の研究が理を窮めるに重要な役割を担っていること, 明解な論理であること, それに市民にその重要性を伝えることが会の目的であると述べている。

^{*24)} 山川の入社と一緒に, 柳の退社が承認されている。大学卒業生が増えるごとに, 会社内の大学人の割合が増加し, 時代が変わってきた。

^{*18)} J. C. ヘボン『和英語林集成』(1867)では“society”は仲間, 組, 連中, 社中であり, 柴田・子安『英和字彙』(1873)では会, 会社, 連衆, 交際, 合同, 社友であり, 中村正直翻訳『自由之理』では政府, 仲間連中, 世俗, 仲間, 会社であった。

^{*19)} 陸軍軍医総監の松本良順(1832~1907)らが中心となつて結成した。現在の日本医学会は1902年を創設としており, 医学会社とはつながりはない。

80号であった。この頃(1882年)から、『東京数学会社雑誌』の内容に変化がみられる。初期の頃は、和算の影響もあって問題掲載が主であり、記事は啓蒙がほとんどで論文といえるものはなかったが、関数論を論じた沢田吾一「相属関数ノ説」(1884年)は解説論文ではあるが、自立への一歩がみられるものもあった。留学からの帰国者や東京大学を卒業した社員が増えたためである。

9. 東京数学物理学会

この間、会社、大学に多くのことが起こった。明治17年(1884年)、菊池の発案により決議され、東京数学会社は東京数学物理学会と改組・改称された。菊池の案は、数学者だけで会を運営することが困難であること、物理学は数学と密接な関係があること、すでに社員に物理学を専門とする者が少なくないことによる。この頃から、菊池の影響が増し、また物理学研究者が増えたこともあり、和算家と軍関係者が学会から離れ、^{*25} 大学関係者が中心となっていく。初代委員長は、菊池が得票数では1位であったが、海外出張が予定されていることを理由に辞退したため、次点の村岡が選出された。明治19年(1886年)3月に帝国大学令が公布され、東京大学は、工部大学校^{*26}と統合され、帝国大学と改組された。法・医・工・文・理の5つの分科大学が置かれた。理科大学は、数学科、星学科、物理学科、化学科、動物学科、植物学科、地質学科の7学科が設けられた。

東京数学物理学会の雑誌『東京数学物理学会記事』は、『東京数学会社雑誌』を継承して、第2巻までは縦書きであったが、第3巻(1886年)からは横書きとなり、記事はローマ字あるいは欧文で記されるようになった。また、学会名に‘物理’が入ったため、物理学の論文が増えてきた。それに、第3巻第1号に掲載されている北尾次郎「流体力学の研究」は質の高い論文であり、東京数学会社の初期からすると勢いをもって世界水準に近づいていることがわかる。

東京数学物理学会の委員長は、村岡の後は順に、山川、菊池、山川、菊池、山川、菊池、寺尾、藤沢利喜太郎(1861~1933)、菊池、田中館愛橘(1856~1952)、菊池、寺尾、菊池、田中館、長岡半太郎(1865~1950)、田中館、長岡、大森房吉(1868~1923)、藤沢、田中館、長岡、田中館、長岡、田中館、長岡、田丸卓郎(1872~1932)、田中館、高木貞二(1875~1960)、長岡、中村清二(1869~1960)、吉江琢児(1874~1947)、田村、平山信(1867~1945)、そ

して長岡が担った。全員が大学人であり、ほとんどが物理学者であることがわかる。会員数は東京数学物理学会2期の82名から大正7年の期では439名と増加した。年会での講演数は、明治30年あたりまでは数学の方が多いがその後は物理の方が多くなっている。長岡の期の大正8年(1919年)1月1日に日本数学物理学会となり、1945年12月15日の臨時総会において数学、物理学の関係者の自由な活動を制約する場合も起こってきたため解散が決議^{*27}されるまで継続した(決議時の会員数2,582名)。日本物理学会は、1946年4月28日、東京帝国大学^{*28}で開催された設立総会により設立した。会員1,253名での船出であった。

参考文献

- 1) 蟹江幸博、並木雅俊：『文明開化の数学と物理』(岩波書店、2008)。
- 2) http://www.wul.waseda.ac.jp/kotenseki/html/ni05/ni05_02335/
- 3) 野村正雄：『『暦象新書』下巻の読解』物理学史ノート8号(2003) pp. 45-61。『暦象新書』Web版は次にある。http://archive.wul.waseda.ac.jp/kosho/ni05/ni05_02384/ni05_02384_0001/ni05_02384_0001_p0002.jpg
- 4) 辻 哲夫：『日本の科学思想』(中央公論、1973)；佐々木力：『科学論入門』(岩波書店、1996)；中山 茂：『近世日本の科学思想』(講談社、1993)。また、『気海観瀾』と『気海観瀾広義』は、『復刻 日本科学古典全書2(第6巻)』(朝日新聞社、1978)に収録されている。
- 5) 緒方富雄：『緒方洪庵伝』(岩波書店、1942) 34頁に「イスホルジグ原著エベン蘭訳(1826年刊)の、医学生のための自然科学教科書を訳したもので、かなり大部のものである」とある。また、『理学提要』は、『復刻 日本科学古典全書2(第6巻)』(朝日新聞社、1978)に収録されている。
- 6) 鬼丸智彦：『京都時習堂：幕末の蘭医・八瀬元恭の生涯』(アーカイブス出版、2008)。
- 7) 福沢諭吉：『福翁自伝』(岩波書店、1950)。
- 8) 伊東俊太郎：『一語の辞典 自然』(三省堂、1999)。
- 9) 新村 出編：『広辞苑第4版』(岩波書店、1991)には、「人工・人為になったものとしての文化に対し、人力によって変更・形成・規整されることなく、おのずからなる生成・展開によって成りいである状態」とある。
- 10) 大久保利謙：『西周全集第1巻』289頁「百一新論」(1874)。
- 11) 山室信一、中野目徹：『明六雑誌(中)』(岩波書店、2008)。「知説四」は、明六雑誌22(1874)に掲載されている。
- 12) 周 程：『「科学」の中日源流考』(思想、2011年6月号) pp. 112-136。「science」を「科学」としたのは日本であるが、すぐにアジア圏に伝わった。中国では、日本から科学という語が輸入されるまでは、「science」の訳は「格致」であった。
- 13) 大久保利謙：『日本の大学』(玉川大学出版会、1997)。
- 14) 『明六雑誌』は全43号、156篇の稿がある。山室信一、中野目徹：『明六雑誌』(岩波文庫、上1999、中2008、下2009)。また、大久保利謙：『明六社』(講談社、2007)がある。
- 15) 日本物理学会編：『日本の物理学史(上)』(東海大学出版会、1978)。
- 16) 日本の数学100年史編：『日本の数学100年史(上)』(岩波書店、1983)。
- 17) 薩日 娜：哲学・科学史論叢9(2007) 1-27—明治初期日本数学会における伝統数学と西洋数学の競争。

(2015年12月4日原稿受付)

^{*25} 和算家の退会は学会名に物理を入れたこと、軍関係者の退会は菊池と確執があった柳の退会が主な原因であろう。

^{*26} 明治政府は、明治4年8月、工部省に工学寮を設置した。明治10年1月に工学寮を廃止し、工学校を工部大学校と改称した。工部大学校第1期卒業生が工学会を設立(1879年)した。工学会は、現在の日本工学会の前身である。

^{*27} 1945年10月に理事長・清水武雄が数学と物理学の進歩を促すために学会に分離することを提案した。

^{*28} 帝国大学は、京都帝国大学設立(1897年6月)に伴い、東京帝国大学と改称された。菊池は東京帝国大学初代総長であり、山川は2代と4代総長である。

第32回井上學術賞： 島野 亮氏

岩井伸一郎

(東北大理 s-iwai@m.tohoku.ac.jp)

東京大学低温センターの島野亮氏が「超伝導体のヒッグスモードの発見」により2015年度井上學術賞を受賞された。同賞は、自然科学の基礎的研究で特に顕著な業績を上げた50歳未満の研究者に贈呈されるものである。島野氏の受賞について心よりお祝いを申し上げるとともに、その受賞理由となった業績について簡単に紹介したい。近年のレーザー技術の飛躍的な発展、特に単一サイクルの高強度テラヘルツ光や赤外光の技術革新は、「固体の強電磁場物理」という新しい研究の国際的潮流を形成しつつある。こうした先端光源の強電場や磁場は、固体中の電子やスピンを、非摂動的に激しく駆動することによって、摂動的な光励起ではあり得なかった新たな応答を期待させる。島野氏は、光強電場物理の対象として、ヒッグスモードと呼ばれる超伝導体の秩序変数のゆらぎに注目した。一般に、超伝導体などの、自発的対称性の破れた系において、秩序変数のゆらぎは位相と振幅の二つの集団励起モードを持つ。振幅モードは、素粒子物理とのアナロジーからヒッグスモードと呼ばれている。最近では冷却原子系の光格子上の冷却ボース気体においても観測され、ヒッグス物理は今最もホットな分野の一つである。しかし、i) ヒッグスモードは、線形応答としては光と直接結合しない、ii) 秩序変数に比べて遥かにエネルギースケールの大きな可視光で励起すると、格子温度が上昇し、ヒッグスモードのコヒーレントな駆動を阻害してしまう、などの理由から、光による励起は困難とされてきた。島野氏らは、高強度のテラヘルツ光を用い、BCS超伝導状態にある窒化ニオブの超伝導ギャップ(2 Δ , Δ は秩序変数)近傍を直接励起し、余剰光子エネルギーの小さな準粒子を瞬時に高密度生成することによって、秩序変数 Δ が周期 $h/(2\Delta)$ で時間軸上を振動する様子を見事に捉えた。さら

に、島野氏は、このヒッグスモードとテラヘルツ光の非線形相互作用によって、テラヘルツ光の第三高調波が発生することを発見した。これらの成果は、超伝導体の外場制御として全く新しいものであるだけでなく、テラヘルツ非線形光学の新しい可能性を拓くものであり、超伝導の物理、非線形光学分野における今後の波及効果は計り知れない。今後ますます発展するであろう固体の強電磁場物理において、その潜在的な可能性を極めて劇的かつ具体的に示した例として高く評価されている。島野氏は、これまでも、半導体、強相関電子系酸化物、有機伝導体など幅広い分野の光物性において先駆的な成果を上げており、特にテラヘルツ分光の有効性をいち早く理解し開拓してきた。関連する分野に対して、これから一層貢献されることを祈念する。

(2016年3月7日原稿受付)

2016年日本国際賞： 細野秀雄氏

福山秀敏 (東理大 fukuyama@rs.kagu.tus.ac.jp)

東京工業大学応用セラミックス研究所教授、元素戦略研究センター長 細野秀雄氏に2016年日本国際賞が授与されました。心より祝意を表します。日本国際賞は科学技術分野で国際的に優れた業績を上げた研究者に贈られますが、細野氏は材料開発分野での貢献が対象となっています。氏はミクロな電子物性の理解を踏まえ常識を破る数々の新機能物質の開拓と電子材料を創出されてきました。前者の例として「鉄系高温超伝導」の発見および「無機エレクトライド」の開発、また後者の例として高電子移動度で省エネ性の高い液晶や有機ELディスプレイとして実用化されているインジウム・ガリウム・亜鉛・酸素系薄膜トランジスタがあります。鉄系超伝導LaFeOAsの発見は従来超伝導とは無縁で磁石の象徴である鉄を主成分とし、透明p型半導体、LaCuOCh (Ch=S, Se)の実現をきっかけとしてCu⁺サイトの磁性遷移金属イ

オンによる置換を意図して合成したLaFeOP系を経てのことですが、これは新物性追求の際の物質探索過程として大変興味があります。一方、初めて室温大気中で安定なエレクトライドC12A7発見の経緯はよりドラマチックです。¹⁾ 隣のセメント講座での学生実験の野次馬的観察から始まり、CaO、Al₂O₃から構成されるセメントの主成分の一つで、かご状構造を持つこの系の焼結体セラミックが室温で強いESRシグナルを持つことを自ら発見し、その起源がかごの内部で運動しているO₂であることを早くに突き止めていました。それを踏まえバルク透明酸化物についてのJST-ERATOプロジェクトへの採択を機会にこの系の薄膜・単結晶に注目しました。酸化・還元という雰囲気の違いでかごの中にO⁻ないしはH⁻が包接されること、および後者での紫外線照射によるバルク電子伝導の確認を経て、Ca処理による表面でのCaO形成によるケージ内酸素の電子との置換により遂に「セメントへの伝導性付与、さらに超伝導発見」に成功されました(この研究は常圧下でのアンモニア合成の新しい方法の提案へと展開されていると理解しています)。この経緯は研究課題の展開の仕方とそこでの人材育成、それに対する適確なファンディングの在り方(山中伸也・細野秀雄両教授はJST理事長であった北澤宏一氏から大きな援助を受けたと聞いています)等、国の研究推進体制に重要な示唆を与えています。好奇心に基づく基礎研究の成果としての学術的シーズと社会・産業の現場でのニーズの実効的な繋がりを志向した研究活動は、常々の発言「論文を書くためだけの研究はしない、社会への貢献を常に意識している」を見事に実現しておられ誠に稀有であり、久保亮五「基礎と応用の区別はない、大事なことは瑣末かそうでないかだけ」、本多光太郎「産業は学問の道場」の思想の具現と思っています。

参考文献

- 1) 細野秀雄：未来材料7 (2007) 11号p. 84.
(2016年3月15日原稿受付)

坂井光夫先生を偲んで

石原正泰 (理研仁科センター ishihara@ribf.riken.jp)

東京大学名誉教授、元東京大学原子核研究所(核研)所長の坂井光夫先生が2015年12月28日に逝去されました。享年95歳でした。坂井先生は原子核構造研究の先達として顕著な学術業績を挙げる一方、戦後日本の原子核研究の復興と国際化に精力的に取り組み、同分野の発展に大きな足跡を残されました。

坂井先生は東京帝国大学在学時より嵯峨根遼吉教授に師事し、被占領下の苦難な時代においても、同研究室にて研鑽を積んでおりましたが、1951年に至って画期的な転機が訪れます。戦後第2回目のフランス政府給費留学生として渡仏し、ジョリオ・キュリー(Joliot Curie)が主宰するコレージュ・ド・フランスの原子核研究室での生活が始まります。それに引き続く3年有余にわたる欧米での研究生活を通じて、坂井先生は、世界の研究の最前線、先進的研究者を支える合理精神、西欧社会の基礎科学に寄せる信頼感などを肌身で学び、その後の研究活動や精神生活の大きな糧にされました。

坂井先生は、帰国後、創立期の1955年から1982年の退官に至るまで、核研一筋の研究生活を送られました。先ず、1956年頃より $\beta\gamma$ 核分光研究の開拓に取り組みます。先生のアイデアによるINS-III型、-IV型分析器は、セクター型二重収束の磁極を世界に先駆けて導入した電子線分析器で、それにより、同時計測や角度相関を多用する高度な $\beta\gamma$ 核分光が実現し、核構造研究を飛躍させました。

1960年代中期からは、森永晴彦先生の発案によるIn-beam γ 分光が世界を席卷しました。Ge検出器の出現以前であった当時、坂井グループはここでもいち早くRACEおよびM-RACEと呼ばれる電磁分析器を開発して、内部変換電子線による高分解能のIn-beam

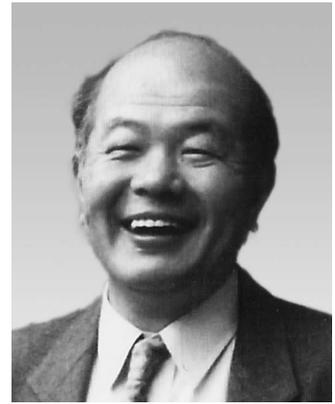
分光法を確立しました。特にスピン同定のために電子線の角度異方性を観測した手法は、反応生成核のスピン整列を世に先駆けて利用したもので、その波及効果は甚大でした。

かくして、十数年にわたり世界最先端の研究を展開した一連のoff-line, on-line分光プログラムは、次世代に花開いた多彩な核構造研究の萌芽を育む一方、それらを担うべき有為の研究者も多数輩出して、わが国における原子核研究発展の礎を築きました。

これらの核分光研究を通じて坂井先生が一貫して追及したテーマは原子核の主要な集団運動様式である振動と回転の間の対応関係でした。両者をつなぐ転移領域で、バンド構造の特長が一方から他方へと緩やかに推移していく連続性にいち早く着目した坂井先生は、回転バンドを模した“疑似バンド”の概念を導入して中重核の励起単位を整理・分類し、集団運動を統一的に記述する方途を探りました。この問題提起はやがて有馬・イアケロ(Iachello)による「相互作用するボゾン模型(IBM)」として結実し、集団運動の理解に画期をもたらすこととなりました。

坂井先生の関心は核内核子の運動を規定する殻模型にも向けられました。重い原子核内に深く束縛されている核子が実際に単一粒子軌道を占める有様を、最初に実験的に検証した深部核子ホール状態の研究は特に著名です。

坂井先生は、また、日本の原子核研究の国際化にも情熱を注がれました。有馬朗人先生などと協力して開催した、1967年の原子核構造国際会議、および1977年の原子核物理国際会議は、戦後の廢墟から復興した日本の核物理学界が世界へのデビューを果たす象徴的な機会となりました。また、常々若手研究者の育成や国際性啓発に意を払い、1967年から約20年間にわたって、「菊



池サマー・スクール」や「原子核物理日仏コロキウム」を定期的に開催されました。

坂井先生は1968年から1978年にわたり、核研の第四代所長を務められました。その間に陣頭に立って推進した次世代施設NUMATRONの建設計画は、実現には至らなかったものの、その波及効果は目覚ましく、高エネルギー重イオン加速器の世界的な建設ラッシュを招来して、核物質研究、RIビーム物理などの新分野の発展を促す一方、重粒子線癌治療という応用分野の開拓にも途を開きました。

さらに、1971年から1976年にかけては、高エネルギー物理学研究所、核物理研究センター、宇宙線研究所が続々と誕生します。それらの設立に際して、母体ともいべき核研の所長であった坂井先生が鋭意尽力された姿は今に至るも語り草になっております。

坂井先生は旧制高校に育ち、ゲーテを好み、絵画や詩歌に親しんだロマンティストで、「人生は美しい」という老ファーストの心境よろしく、晩年に至るまで新しい科学的発見に挑み続けられました。

坂井先生は、奥様である仏文学者のフランソワーズ・ブロック女史と共に、永年にわたり日仏文化交流にも尽力され、その功により、1984年にはレジオン・ドヌール勲章を授与されました。

謹んでご冥福をお祈りいたします。

(2016年3月16日原稿受付)

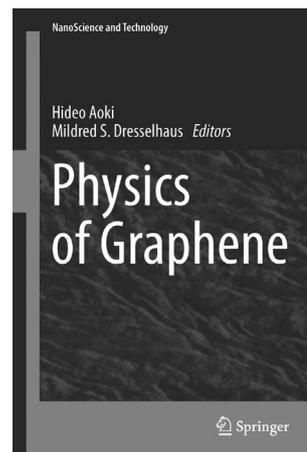
H. Aoki, M. S. Dresselhaus, Eds.

Physics of Graphene

Springer Int. Pub. Switzerland, Cham, 2014, xii + 350p, 24 × 16 cm, 129.99€ (NanoScience and Technology) [専門・大学院向]

ISBN 978-3-319-02632-9

長田 俊人 〈東大物性研〉



最初の原子層物質(2次元結晶)であると同時に固体中で初めて実現した質量ゼロのDirac電子系であるグラフェンは、2010年のNobel物理学賞の対象となるなど大きな関心を集めている。グラフェンの電子物性については、既にM. I. Katsnelsonの教科書(*Graphene*, Cambridge Univ. Press, 2012)が存在するが、本書は最新の話題までを含む、より専門性の高い教科書になっている。

本書は、以下の実験5編、理論5編の独立なレビューから構成されており、グラフェン物理の主要な問題をバランス良くカバーしている。

まずChapter 1で、本分野を先導してきたP. Kimらが、Dirac電子系を特徴づけるBerry位相あるいは擬スピン(副格子)自由度について解説し、それがLandau量子化やKleinトンネリングを通じて、磁気抵抗の量子振動や電子波のFabry-Perot干渉にどのように現れるかを紹介している。

Chapter 2ではEva Y. Andreiらが、電子正孔パドル、Landau準位、エッジ状態、歪効果、捩れ二層系などのグラフェン系の各種エネルギー構造について、走査型トンネル分光法(STS)

のデータを用いて解説している。

Chapter 3では、カーボン系の大御所で編者であるMildred S. Dresselhausらが、グラフェンの輸送特性を、グラファイト、層間化合物(GIC)、ナノチューブなどと比較した歴史的観点から概説している。

Chapter 4では、M. Potemskiらによりグラフェンのバンド間・Landau準位間遷移による強磁場磁気光学に関する実験がまとめられている。

Chapter 5では、K. Ensslinらのグループにより、狭窄構造により形成されたグラフェン面内量子ドット系における帯電効果に関連した話題が解説されている。

Chapter 6では越野と安藤が、グラフェン系の電子状態と基礎物性について、有効質量近似に基づくDirac型方程式を用いて理論的にレビューしている。

Chapter 7では初貝と編者の青木が、蜂の巣格子のカイラル対称性と、その帰結であるゼロモードのエッジ状態やLandau準位構造について、トポロジ的観点から解説している。

Chapter 8では、T. Chakrabortyらがグラフェンの特異な分数量子Hall効

果について、Haldane流の擬ポテンシャルを用いた議論を行っている。

Chapter 9では、野村とAllan H. MacDonaldらが、Zeeman効果と相互作用による縮退した $n=0$ Landau準位の自発的な対称性の破れと、発現する秩序状態について議論している。

Chapter 10では、E. McCannとV. I. Fal'koが、非弾性散乱とバレー間およびスピン軌道散乱の大小関係により、弱局在と反局在がどのように起こるかを理論的に議論している。

以上のように、各レビューとも本分野の第一線で活躍する実験・理論の専門家が、十分な紙数を用いて基礎から最新の研究までを詳細かつ丁寧に解説した内容になっている。グラフェン物理のadvancedな教科書として、研究の概要を知りたい読者、個々の問題の理解を深めたい読者にとってお薦めしたい一冊である。

(2015年12月15日原稿受付)

園田英徳

今度こそわかるくりこみ理論

講談社, 東京, 2014, x+197p, 21×15 cm, 本体2,800円 (今度こそわかるシリーズ) [専門・大学院向]

ISBN 978-4-06-156603-3

鈴木 博 (九大院理)

Kenneth G. Wilsonにより創始された, いわゆる Wilson流くりこみ群に関する日本語の解説書である. 素粒子理論の現代的な話題, 例えば, カットオフを持つ低エネルギー有効理論, 格子ゲージ理論によるゲージ理論の非摂動的構成, 非自明な赤外固定点を持つ場の理論, ラグランジアンが存在を仮定しない共形場理論などの文脈では, 固定点, 臨界指数, 有意 (relevant), 無意 (irrelevant), 「境界線上」(marginal) な演算子, 臨界部分空間, 普遍性などといった Wilson流くりこみ群の概念が既知のものとして頻繁に用いられる. Wilson流くりこみ群には Wilson と Kogut による有名な講義録があるが, これは初学者には分かりやすいものではないと思う (評者も修士の時に挫折した覚えがある). これは一つには, 朝永以来の摂動的なくりこみ理論が理論的に完成している (このために素粒子標準模型では不定性のない予言が可能である) 一方, この Wilson流くりこみ理論は, (評者の印象では) 素粒子理論の基礎をなすゲージ理論に対して万人の満足のいく形では完成していないことにも理由があるように思われる. このことから, 通常の場合の理論の教科書では Wilson流くりこみ理論は

表面的にのみ取り扱われることが多い. しかしながら, 上記のように Wilson流くりこみ群の概念が “常識的” なものとなるに伴い, Wilson流くりこみ群の現代的でわかりやすい解説書は誰もが待ち望んでいたものと思う.

本書は, Wilson流くりこみ群研究の第一人者の手によるものである. ここでは, スカラー場理論を題材として, Wilsonのくりこみ群変換に基づいて如何に場の理論の連続極限が実現されるかというステップが, 途中の数式の変形も含めて非常に丁寧に提示されている. 誤植も少ない. 大部ではないが労作であり, 「読者があまり苦勞せずに Wilsonのくりこみ群を理解できるよう」という著者の狙いは成功していると思う. Wilson流くりこみ理論のエッセンスが要領よくまとめられており, 繰り返し味わって読むべき良書と感じた. ただし読者は, 「今度こそわかる」というタイトルを鵜呑みにしてこの一冊の本だけでくりこみが学べると考えてはいけない. まず, 標準的な場の理論の教科書で通常摂動的なくりこみ理論とくりこみ群に親しんでから, この本に取り組むべきであろう. 相対論的場の理論の摂動的なくりこみにすでに親しんでおり, これと Wilson



流くりこみの関係に特に興味がある読者は, 各章を 1→2→7→3→4→5→6→8→9→10 という順序で読むのも論理がとらえやすいのではないかと感じた. この時「この本で言う $t \rightarrow \infty$ の連続極限とは, 運動量カットオフ Λ を μe^t とした通常のくりこみに他ならない」ということを常に念頭に置きながら読み進めるとよい. 最後に, 第8章の終わりのところで, Gauss 不動点まわりの連続極限のさらに連続極限として Wilson-Fisher 不動点まわりの連続極限を得る, という話が出てくるが, これはちょっと難しい印象を受けたので, もう少し詳しい説明があってもよかった.

(2015年12月22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.

国際交流—第6回ジェンダーサミット (GS6) と環太平洋 Women in Physics (AAPPS-WIP) ワークショップ2015の報告—

2015年8月26-28日に、韓国ソウル市にあるプラザホテルで、第6回ジェンダーサミット (Gender Summit 6: GS6)¹⁾ が開催され、合わせて同市内のアンバサダーホテルで環太平洋 Women in Physics ワークショップ2015 (Association of Asia Pacific Physical Society: AAPPS-WIP, 8/26) が開かれた。ジェンダーサミット (GS) は、2011年、欧州委員会の genSET プロジェクトの1つとしてスタートし、ジェンダーを含めた多様な視点による研究・技術の発展と、より良い社会の構築を目指して進められている。GS1およびGS2はブリュッセルで開催され、その後欧州のみにとどまらず、GS3は北米ワシントンDC、GS5は南アフリカケープタウン、GS6は初めてのアジア地域として韓国ソウルで開催されるなど、世界的に高まる男女共同参画活動と連携して開かれてきた。ソウルGS6では、世界40カ国から589人(日本からは43人)のSTEMM (Science, Technology, Engineering, Mathematics and Medicine) の研究・技術・教育関係者、ジェンダー関係の社会科学研究者、政策担当者、企業経営者、研究助成機関、出版関係者など、世界の産官学界から幅広い人材が集結し、討議を行った。

GS6会議のタイトルは、“経済活動の活性化と研究および技術の推進：

ジェンダーイノベーションを通じた社会への貢献 (Better Science & Technology for Creative Economy: Enhancing Societal Impact through Gendered Innovations in Research, Development and Business)”で、ジェンダーを視点とし、経済活動の活性化とリンクした科学・技術の推進が大きなテーマの1つであった。例えば、鎮痛剤の研究開発、大腸の内視鏡検査、および車のシートベルト設計は男性体型のみを基準として進められ、一方、骨粗鬆症診断方法は女性のみを基準としており、ジェンダーを視点した研究・技術・ビジネスには課題と発展性があることが指摘された。セッションは、(1)ジェンダーイノベーションを通じた研究の質の向上、(2)ジェンダーイノベーションを推進する科学政策の展開、(3)STEMMにおけるジェンダーの多様性を進める政策との連携、(4)ジェンダーを基盤とした技術を通しての社会経済の発展の拡充、(5)科学、技術、政策ネットワークを通してのジェンダーイノベーションに加え、パラレルセッションとして (a)STEMM能力の多様性の促進：K-12(幼稚園から12歳までの)科学教育、(b)ダイバーシティーに関する意見交換などで、計105件の口頭および72件のポスター発表があった。最後に、Heisook Lee 議



図1 環太平洋 Women in Physics (AAPPS-WIP) 2015会議の集合写真。日本物理学会からは、藤井会長、板倉明子(男女共同参画推進委員長)、鹿野豊(男女共同参画推進委員)、森初果(日物応物男女共同参画連絡会責任者)が参加した。

長から会議の提言が出され、参加者がサインで賛同の意を表した。

本学会の男女共同参画における国際活動は、2012年より応用物理学会と連携して、日物応物男女共同参画連絡会²⁾で行っている。GS6およびAAPPS-WIPワークショップの参加および講演に関しては、事前に連絡会会議で打ち合わせを行い、日本物理学会から藤井会長をはじめ4名(女性2名、男性2名)と応用物理学会から2名(女性2名)の計6名が参加し、招待講演および口頭発表6件、そしてポスター発表3件を行った。藤井会長は、AAPPS-WIPワークショップおよびGS6のダイバーシティーセッションで、日本物理学会の活動全般と、国際交流活動の1つとして日物応物男女共同参画連絡会を紹介され、世界でも珍しく日本では2つの物理学会があること、そして両学会が連携して国際交流活動を担っていく重要性を述べられた。森初果(日物応物連絡会責任者)は、GS6の招待講演で、韓国との国際交流に端を発し、2004年のスタート時より委員会が企画および運営に参加している国内次世代育成プログラム「女子中高生の夏の学校」と「女子中高生関西科学塾」を紹介した。板倉明子(日物男女共同参画推進委員長)と鹿野豊(日物)は、ダイバーシティーセッションおよびAAPPS-WIPワークショップで、「日本物理学会の男女共同参画推進委員会の活動」を紹介し、社会の持続性および物理の発展においてワーク・ライフバランスの取れた働き方やジェンダーの多様性が重要であることを述べた。根本香絵氏(応物)は、応物における男女共同参画活動について、これまでのパイオニア的活動と今後の課題について述べた。GS6のポスター発表で、鹿野豊(日物)は、年次大会の物理と社会セッションで委員会が企画したシンポジウム「物理における多様なキャリアパス」を、板倉明子(日物)は、「日本物理学会男女共同参画推進委員会の取り組み」を、河西奈保子氏(応物)が、「応用物理学会における男女共同参画推進活動」について報告した。

2002年以来、Women in Physicsにつ

いての国際交流は継続されているが、日本物理学会の会長と一緒に参加するのは初めてで、関係者に与えたインパクトは非常に大きかった。AAPPS-WIP ワークショップ2015には、6か国から27名が参加され、そのうち男性研究者が10名と4割近くだったことは初で、これまでとは視点の異なる男性研究者からの質問で議論は大変盛り上がった。

ソウルGS6も、物理研究者だけが集まる Women in Physics 国際会議とは

大きく異なり、他分野の理系はもとより文系の社会科学の研究者、出版関係者、政策担当者が参加され、議論できたことは大きな収穫だった。

GS10は、2017年5月、一橋講堂(東京)において、JST、日本学術会議、およびPortia(GSの母体)の主催で開かれる予定で、現在、日本物理学会も日物応物男女共同参画連絡会として準備委員会に参加している。ジェンダーを視点とした質の高い研究や技術開発の発展を目指し、実際のアクションや

将来の展望に繋げるような活動を行う予定である。

会員の皆様には、物理学の発展を目指した男女共同参画国際交流活動について、今後ともご理解とご協力を賜りたいと存じます。

参考文献

- 1) <http://gender-summit.com/>
- 2) <http://danjo.jps.or.jp/post.html>

(文責：森 初果, 鹿野 豊, 板倉明子, 2016年3月17日原稿受付)

『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. 22-1 (3月15日発行) 目次

国際物理教育委員会 ICPE	新田英雄	物理学実験における Active Learning-Passive Teaching	中村統太, 富田裕介
はじめての講義		グループ討論を取り入れた量子力学の授業	太田寛人, 畠山 温
工学部初年度学生の力学	右近修治	海外の動向	
講義室		ミャンマーにおける物理学実験教育ワークショップ	中村 琢, 伊藤宏紀, 仲澤和馬
小学校教員志望学生の物理分野の弱点—全国学力・		連載 物理オリンピックと物理教育	
学習状況調査を用いた学力調査	寺島幸生	物理第2チャレンジ参加者のその後—2011年から2014年の	参加者について
高等学校物理基礎における有効数字学習についての教科書分析	瀧本家康	教育に関する一言	近藤泰洋
実験室		開催情報	安藤俊一
元素単体の常磁性と反磁性の簡易実験	沢田 功	編集後記	
教育実践			
弦の振動と音楽—科学の普遍性と適用限界を伝える実験教育	本堂 毅, 須藤彰三, 関根 勉		
講義演習授業における Active Learning-Passive Teaching			
	中村統太		

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.php> にありますので, それに従ってお申込み下さい。webからのお申込みができない場合は, e-mail: kejiban@jps.or.jp へお送り下さい。必ず Fax 03-3816-6208 へも原稿をお送り下さい。Faxがありませんと, 掲載できない場合がございます。HP掲載をご希望される場合は, 上記URLの「2. ホームページ掲載」をご参照下さい。本欄の各項目の内容につきましては, 本会は関与致しかねますのでご了解下さい。

人事公募

人事公募の標準書式(1件500字以内)

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

■産業技術総合研究所関西センター博士研究員

1. 博士研究員(第一号契約職員)1名
2. 電池技術研究部門ナノ材料科学研究グループ
3. 大規模並列計算機を用いた金属材料の粒界・界面・欠陥の第一原理計算。
4. 2016年夏以降早期
5. 年度末更新可能性有, 最大4年
6. 密度汎関数理論に基づく第一原理計算で研究を行った経験があること。並列計算機を用いた経験があること。採用時において博士号取得後7年以内であること。
7. ○履歴書 ○博士号取得を証明できる書類 ○今迄の研究概要をまとめたもの ○業績リスト(誌上発表, 口頭発

表, 知的財産権, その他)

8. 2016年夏頃(適任者決定次第)
9. ①563-8577池田市緑が丘1-8-31 産業技術総合研究所電池技術研究部門採用担当
②同部門 香山正憲 電話0727-51-9641 m-kohyama@aist.go.jp
10. 封筒に「契約職員(第一原理計算)応募書類在中」と朱書し送付。

■青山学院大学理工学部教員

1. 教授又は准教授1名
2. 物理・数理学科
3. 宇宙物理学実験。着任後は, 理工学部共通科目, 物理・数理学科専門科目, 卒業研究, 大学院理工学研究科, 及び他学部向け教養科目の授業を担当して頂く。
4. 2017年4月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者。着任と同時に博士前期課程の学生を指導でき, 私学教育の現状を理解し, 熱心に取り組む方。キリスト教に理解のある方。
7. ○履歴書 ○業績リスト(主要論文に印) ○主要論文別刷5編 ○研究計画 ○教育に対する抱負と卒業研究の指導計画 ○推薦書1通 ○照会可能者1名以上の氏名, 連絡先
8. 2016年6月24日(金)必着
9. 252-5258相模原市中央区淵野辺5-10-1 青山学院大学理工学部物理・数理学科 古川信夫 電話042-759-6292 furukawa@phys.aoyama.ac.jp
10. 封筒に「人事応募(宇宙物理学実験)」と朱書し簡易書留で送付。電子応募の場合は予め相談。応募書類不返却。

■京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻准教授

1. 准教授1名
2. 物理学第二分野素粒子論研究室
3. 素粒子論
4. 決定後早期
5. なし
7. ○履歴書(着任可能時期明記) ○研究業績概要 ○研究業績リスト ○主要論文別刷(コピー可)5編以内各2部 ○研究計画
8. 2016年6月24日(金)必着
9. ①606-8502京都市左京区北白川追分町 京都大学理学研究科5号館内 物理・宇宙物理学系学系系長 田中耕一郎
②川川 光 電話075-753-3834 hkawai@gauge.scphys.kyoto-u.ac.jp 又は

畑 浩之 電話075-753-3878

hata@gauge.scphys.kyoto-u.ac.jp

10. 封筒に「素粒子論准教授応募書類」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。

■愛媛大学教員

1. 准教授又は助教1名
2. 宇宙進化研究センター
3. 宇宙物理学。宇宙物理学の先端研究(宇宙進化研究センター教員と協力して研究できる方)。学部及び大学院における教育。宇宙進化研究センターの運営。
4. 2016年10月1日以降早期
5. 准教授:なし(定年65歳), 助教:任期5年(テニュアトラック)
6. 博士号取得者又は着任迄の取得見込者
7. ○履歴書 ○研究歴(2,000字以内) ○業績リスト(著書, 原著論文, 総説, その他論文等に分類) ○主要論文別刷3編以内 ○研究計画書(2,000字以内) ○教育に対する抱負(2,000字以内) ○外部資金獲得状況(代表, 分担の別及び研究費総額) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先
8. 2016年6月30日(木)必着
9. 790-8577松山市文京町2-5 愛媛大学宇宙進化研究センター 栗木久光 電話089-927-9582 Fax 089-927-8430 awaki@astro.phys.sci.ehime-u.ac.jp
10. 封筒に「親展」と朱書し簡易書留で送付。履歴書, 論文別刷, 照会可能者の連絡先以外の書類をPDFで上記アドレスへ提出。

■岐阜大学工学部准教授

1. 准教授1名
2. 電気電子・情報工学科(電気電子コース)
3. 超高圧力による新たな電子物性現象の発現とその物性評価及び応用
4. 2016年10月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書(写真, 電話, e-mail含) ○研究業績リスト(原著論文, 査読付国際会議論文, 著書, 受賞, 特許, その他の順に分類) ○教育実績 ○競争的外部研究費取得状況(代表・分担の別明記) ○主要論文別刷又はコピー5編以内 ○今迄の研究と教育の概要(研究業績を参照して2,000字以内) ○研究と教育に対する抱負(2,000字以内) ○照会可能者2名の連絡先(電

話, e-mail)

- 2016年7月11日(月)必着
- 501-1193岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部電気電子・情報工学科電気電子コース 藤原裕之 電話058-293-2691 fujiwara@gifu-u.ac.jp
- 封筒に「准教授応募書類」と朱書き簡易書留で送付。応募書類不返却。詳細は <http://www.eng.gifu-u.ac.jp/denkinden-shi-jyohou/2016/04/post-2.html> 参照。

■奈良女子大学大学院自然科学系物理学領域助教

- 助教1名
- 素粒子論研究室
- 素粒子論
- 2017年1月1日以降早期
- なし
- 博士号取得者, 又は着任後早期に取得可能な方
- 履歴書 ○業績リスト ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○研究業績概要(A4, 2頁以内) ○研究計画概要(A4, 2頁以内) ○本学における物理教育に対する抱負(A4, 約1頁) ○推薦書2通又は照会可能者2名の氏名, 連絡先 ○応募書類の内, 「推薦書2通又は照会可能者2名の氏名と連絡先」以外はPDFをCD-ROMに保存したのも併せて送付
- 2016年8月1日(月)必着
- ①630-8506奈良市北魚屋西町 奈良女子大学大学院自然科学系物理学領域 宮林謙吉
②高橋智彦 tomo@asuka.phys.nara-wu.ac.jp 電話/Fax 0742-20-3374
- 封筒に「素粒子論助教応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類不返却。本学HP掲載の本公募に関する詳細情報 (<http://www.nara-wu.ac.jp/koubo.html>) を必ず参照。

■大阪大学大学院基礎工学研究科教授

- 教授1名
- システム創成専攻電子光科学領域光エレクトロニクス講座
- 原子・分子・光物理学, レーザー冷却, 量子光学, 量子シミュレーション, 量子情報処理等を含む広義の量子エレクトロニクス分野の研究, 大学院・学部における教育・研究指導
- 2017年4月1日以前
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書 ○研究業績 ○主要原著論

文5編の別刷と要旨 ○競争的資金 ○受賞 ○今迄の研究概要 ○着任後の研究及び教育の抱負 ○照会可能者2名以上 ○外部評価, 実質的に指導した博士後期課程学生の人数と進路

- 2016年8月15日(月)必着
- 560-8531豊中市待兼山町1-3 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻電子光科学領域 北川勝浩 電話06-6850-6320 qeprof@ee.es.osaka-u.ac.jp
- 応募書類は公募文 (<http://www.es.osaka-u.ac.jp/ja/offering/recruitment/>) を必ず参照の上, 簡易書留で送付。当領域詳細は <http://www.ee.es.osaka-u.ac.jp> 参照。本学では女性の応募を歓迎。

■株式会社アイズファクトリー正社員

- データサイエンティスト2~3名
- プロダクト推進部自動進化研究グループ
- 数理学, 情報処理等の分野・領域で, データ解析に係る知識又は経験があり, ビジネスへの応用に関心のある方を求む。仕事内容: 自社プロダクトの開発に係る解析手法・ツールの調査及び研究業務を担当。
- 要相談
- なし(常勤)
- 大学院修士課程修了又は同等以上
- 履歴書(写真貼付) ○職務経歴書(職歴がない方は, アルバイト経験や, 研究内容等の資料があれば提示) ○在留資格のコピー(外国籍の方)
- 2016年9月30日(金)
- 101-0054 東京都千代田区神田錦町1-23 宗保第2ビル 株式会社アイズファクトリー人事担当者 電話03-5259-9004 bs@isfactory.co.jp <https://bodais.jp/>
- 応募書類は郵送, 又はメール添付で送付。

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208回研究会/第56回化合物新磁性材料専門研究会

主催 日本磁気学会
日時 2016年6月9日(木)
場所 中央大学駿河台記念館330号室(東京都千代田区神田駿河台3-11-5)
内容 スピントロニクスでは, MgOやCoFeBに代表される材料でHDD磁気ヘッド及び不揮発性メモリ等, 数々の製品が生み出され実用化されている。一方, スピントロニクスデバイスへの高記録密度化並びに省電力化等, 更なる要求は尽きる事なく, 次世代製品群を生み出す為の新しい材料の開発が進められている。次世代新材料開発の最先端を9名の講師の先生方が紹介。講演は, サブテーマ毎に「垂直磁化材料」, 「スピン軌道トルク, スピンホール, トポロジカル」, 「電圧書き込み, 電気磁気効果, スキルミオン」及び「ホイスラー, ハーフメタル」と題して, スピントロニクスにおける次世代材料の最先端を紹介。

定員 60名
参加費 5,000円(資料代込), 学生無料, 資料代のみ2,000円
申込 当日受付
連絡先 東京都千代田区神田駿河台1-8-11 日本磁気学会事務局 杉村 電話03-5281-0106 msj@bj.wakwak.com http://www.magnetics.jp/event/research/topical_208/

■第22回結晶工学スクール(2016年)

主催 応用物理学会結晶工学分科会
日時 2016年8月3日(水)~5日(金)
場所 産総研臨海副都心センター別館(135-0064東京都江東区青海2-3-26)
内容 結晶成長, 構造解析, 電子・光物性に関わる基礎的内容を厳選し, (1)優れた講師陣, (2)教科書を作成, (3)質問コーナー設置等の特徴とする。講義のレベルは, 大学院生, 企業の研究・開発に新たに参加される方々だけでなく, 既に研究者として活躍されている方々にも十分に利用して頂けるものとなっている。

定員 150名
参加費 35,000円(1日のみ20,000円), 学生20,000円(1日のみ10,000円)
参加申込締切 2016年7月13日(水)
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 岡山昇平 電話03-5802-0863 Fax 03-5802-6250 okayama@

jsap.or.jp <http://annex.jsap.or.jp/kessho/2016/school160803.html>

■共鳴と非エルミート量子力学

主催 共鳴と非エルミート量子力学実行委員会
共催 大阪大学核物理研究センター, 東京大学生産技術研究所
日時 2016年8月3日(水)~5日(金)
場所 大阪大学核物理研究センター (567-0047茨木市美穂ヶ丘10-1 電話06-6877-5111)
内容 量子力学における共鳴状態の研究は、ハドロ物理、核物理、原子・分子物理、量子光学、物性物理等の様々な分野で急速な発展を遂げている。特に、開放量子系の非エルミートな有効ハミルトニアン・有効リウビリアンという立場からの研究が盛ん。そのような研究を行っている研究者の間で分野を横断する交流を図り、更なる研究の進展を目指す。理論だけでなく実験研究者の参加も歓迎。

定員 100名

参加費 15,000円, 学生10,000円

参加申込締切 2016年6月15日(水)

連絡先 153-8505東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 羽田野直道 nhorg@iis.u-tokyo.ac.jp <http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/hatano/resonance16/>
その他 関連したワークショップとして翌週にProgress in Quantum Physics with Non-Hermitian Operatorsを開催。

■量子力学と非エルミート演算子

主催 PHHQ16実行委員会
共催 京都大学基礎物理学研究所
日時 2016年8月8日(月)~12日(金)
場所 京都大学基礎物理学研究所 (606-8502京都市左京区北白川追分町 電話075-753-7000)
内容 物理における非エルミート演算子の重要性が広く認識されつつある。PT対称性のある非エルミート系は実験も行われるようになった。他にもQuasi-Hermitian系・Pseudo-Hermitian系や開放量子系、流体力学や確率過程でも非エルミート演算子の研究が盛ん。これらの研究をしている多くの研究者の国際的交流を図り、更なる研究の発展を目指す。数学研究者・理論研究者・実験研究者等広い分野の参加者を歓迎。

定員 100名

参加費 15,000円, 学生10,000円

参加申込締切 2016年6月15日(水)

連絡先 153-8505東京都目黒区駒場4-6-1

東京大学生産技術研究所 羽田野直道 nhorg@iis.u-tokyo.ac.jp <http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/hatano/PHHQ16/>

その他 関連したワークショップとして前週にResonance and non-Hermitian quantum mechanics 2016を開催。

■第29回コンピューショナル・マテリアルズ・デザイン (CMD) ワークショップ

主催 阪大ナノデザインセンター, 阪大院物理, 東理大, 阪大QEDRI
日時 2016年9月5日(月)~9日(金)
場所 大阪大学基礎工学研究科 (560-8531豊中市待兼山町1-3 電話06-850-6342)
内容 効率性, 環境調査性が要求される21世紀の研究開発で重要な役割を果たす第一原理計算に基づいた新物質の理論設計手法に関するチュートリアルを含むワークショップ。密度汎関数理論に基づいた第一原理計算手法の理論の講義, 応用例の紹介とプログラムの実習を行う。

定員 40名

参加費 無料(宿泊費, 食事代, 旅費等は受講生負担)

参加申込締切 2016年7月24日(日)

連絡先 560-8531豊中市待兼山町1-3 阪大ナノデザインセンター CMD実行委員事務局 下司雅章 cmd@insd.osaka-u.ac.jp 電話/Fax 06-6850-6342

その他 CMDワークショップ実行委員長: 小口多美夫(阪大産業科学研究所)。詳細は<http://phoenix.mp.es.osaka-u.ac.jp/CMD/>参照。

■第32回分析電子顕微鏡討論会

主催 日本顕微鏡学会分析電子顕微鏡分科会
日時 2016年9月6日(火)~7日(水)
場所 幕張メッセ (261-0023千葉市美浜区中瀬2-1 電話043-296-0001)
内容 チュートリアルでは分析電顕の基軸的手法(EDS, EELS)の他, 試料作製について解説がなされる。トピックスでは「微量元素の分析」, 「分析電子顕微鏡の最先端」に関して当該分野で活躍する研究者の講演が行われる。一般講演も募集。詳細はHP参照。

定員 なし

参加費 6,000円, 学生無料

事前参加申込締切 2016年8月26日(金)

連絡先 819-0395福岡市西区元岡744 村上恭和 電話/Fax 092-802-3497 murakami@nucl.kyushu-u.ac.jp <http://eels.kuicr.kyoto-u.ac.jp/bunseki2016/>

■第51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

主催 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会

日時 2016年9月7日(水)~9日(金)

場所 北海道立道民活動センター かでる2.7 (060-0002札幌市中央区北2条西7丁目 電話011-204-5100)

内容 フラーレン, カーボンナノチューブ, ナノパーティクル, グラフェン等の化学, 物理, 材料, 工学, 応用, 実用等の研究発表

定員 350名

参加費 10,000円, 学生5,000円

申込 当日受付

発表申込・予稿原稿提出締切 2016年7月14日(木)予定

連絡先 113-8656東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻丸山研究室 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会事務局 島田智子 電話/Fax 03-3830-4848 fntg@photon.t.u-tokyo.ac.jp <http://fullerene.jp.org/>

■第57回高圧討論会

主催 日本高圧力学会

日時 2016年10月26日(水)~29日(土)

場所 筑波大学大学会館(つくば市天王台1-1-1)

内容 高圧力の科学と技術に関する次の分野: (1) 高圧装置・技術 (2) 固体物性 (3) 固体反応 (4) 流体物性 (5) 流体反応 (6) 地球科学 (7) 生物関連 (8) 衝撃圧縮(但し, (4), (5), (7)には溶液, 界面, 及び食品を含む)。その他, 数件程度のシンポジウムを予定。特別講演: 山内正則氏(KEK)

参加費 5,000円, 学生2,000円(当日申込は各1,000円増)

講演申込締切 2016年7月14日(木)

事前参加登録締切 2016年9月23日(金)

連絡先 530-0001大阪市北区梅田1-11-4 923-674号 (株)ポラリス・セクレタリーズ・オフィス内 第57回高圧討論会事務局 Fax 020-4665-8596/06-6345-7931 touronkai57@highpressure.jp

その他 詳細は<http://highpressure.jp/new/57forum/>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

■公益財団法人住友財団2016年度基礎科学研究助成

対象研究 理学(数学, 物理学, 化学, 生物学)の各分野及び複数分野の基礎研究で萌芽的なもの(各分野における工学の基礎となるものを含む)

応募資格 若手研究者, 所属が営利企業(兼務含)の場合には不可

助成内容 総額1億5,000万円(1件当たり最大500万円), 約90件

応募締切 e-mail: 2016年6月16日(木), 郵送: 2016年6月30日(木)

問合せ先 105-0012東京都港区芝大門1-12-16 住友芝大門ビル2号館 住友財団 電話03-5473-0161 Fax 03-5473-8471 sumitomo-found@msj.biglobe.ne.jp http://www.sumitomo.or.jp/

その他 財団HPから申請書をダウンロードし必要事項を記入の上, e-mailと郵送の両方で送付。

■公益財団法人住友財団2016年度環境研究助成

対象研究 一般研究: 環境に関する研究(分野不問). 課題研究: 2016年度募集課題「喫緊の環境問題解決のための学際研究または国際共同研究」

応募資格 研究者の所属が営利企業(兼務含)の場合には不可

助成内容 総額1億円. 一般研究: 8,000万円(1件当たり最大500万円), 約50件. 課題研究: 2,000万円(1件当たり最大1,000万円), 2件(予定).

応募締切 e-mail: 2016年6月16日(木), 郵送: 2016年6月30日(木)

問合せ先 105-0012東京都港区芝大門1-12-16 住友芝大門ビル2号館 住友財団 電話03-5473-0161 Fax 03-5473-8471 sumitomo-found@msj.biglobe.ne.jp http://www.sumitomo.or.jp/

その他 財団HPから申請書をダウンロードし必要事項を記入の上, e-mailと郵送の両方で送付。

■2016年度仁科記念賞候補者推薦依頼

対象 広い意味の原子物理学及びその応用に関し, 優れた研究業績をあげた比較的若い研究者を表彰。

顕彰 賞状, 賞牌及び副賞(50万円/1件)を贈呈

推薦方法 以下の書類各1部をe-mail又は郵送にて送付。書類形式は電子ファイル(Word(拡張子.doc)又はpdf)が望ましい。

○仁科記念賞推薦票(A4, 1枚, 様式自由, 本財団HPに様式有): 候補者の氏名(英文表記付す)・年齢・所属・職・連絡先(勤務先電話・e-mail等), 業績題目(和文及び英文), 業績要旨(約10~20行), 推薦者氏名・所属・職・連絡先(自宅又は勤務先所在地・電話・Fax・e-mail), 候補者と推薦者との関係を記載 ○推薦理由書(A4, 約2~3枚, 参考となる論文リスト含, 共同研究の場合は各候補者の役割分担を記載), 略歴(推薦者が分かる範囲にて可) ○特に対象となる業績の論文5編以内

推薦締切 2016年8月31日(水)

送付先 113-8941東京都文京区本駒込2-28-45 仁科記念財団 電話03-3942-1718 nishina-koubou@nishina-mf.or.jp

その他 詳細は <http://www.nishina-mf.or.jp> 参照。

■島津科学技術振興財団平成28年度研究開発助成

対象 科学技術, 主に科学計測及びその周辺の領域における基礎的な研究。

応募資格 原則, 国内の研究機関に所属する45歳以下の新進気鋭の研究者. 国籍不問。

助成内容 総額1,200万円(100万円以下/件)

応募方法 当財団HPから申請書をダウンロードし, 必要事項を記入の上, 当財団宛に直送。

応募締切 2016年9月30日(金)必着

問合せ先 604-8445京都市中京区西ノ京徳大寺町1番地 公益財団法人島津科学技術振興財団事務局 電話 075-823-3240 Fax 075-823-3241 ssf@zaidan.shimadzu.co.jp http://www.shimadzu.co.jp/ssf/

■会員専用コンテンツ

正会員, 学生会員は本会Website (<http://www.jps.or.jp/>) のマイページよりアクセスしてください。会員専用コンテンツには, 日本物理学会誌電子版, 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。

○会誌電子版は, 賛助会員等も本会Websiteよりご利用可能です。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。)

6月ユーザ名 : 16Jun
パスワード: Maria478

7月ユーザ名 : 16Jul
パスワード: Niels592

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
2016年 6/5~10	Rare Earths 2016 in Sapporo, JAPAN	札幌市	70-11
6/6~7	2016年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム	仙台市	71-2
6/9	第208回研究会/第56回化合物新磁性材料専門研究会	東京	71-6
6/9~10	第19回超イオン導電体物性研究会	山形市	71-5

開催月日	名 称	開催地	会誌巻号または世話人
2016年 6/12~16	The 11th Int. Conf. on Coatings on Glass and Plastics	Braunschweig (ドイツ)	70-8
6/17	実用顕微評価技術セミナー2016	東京	71-5
6/19~23	Joint RCBJSF-IWRF Conf.	松江市	70-11
6/19~24	The 14th Int. Symp. on Nuclei in the Cosmos	新潟市	70-8
6/20~24	12th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs	済州島(韓国)	71-4
6/23~24	第41回光学シンポジウム	東京	71-2
6/26~30	Compound Semiconductor Week 2016 (第28回インジウム燐および関連材料に関する国際会議および第43回化合物半導体に関する国際シンポジウム)	富山市	70-12
6/27~7/15	Int. Workshop on Tensor Networks and Quantum Many-Body Problems	柏市(千葉)	71-3
7/5~7	第61回表面科学基礎講座	東京	71-4
7/6~8	第35回電子材料シンポジウム(EMS-35)	守山市(滋賀)	71-5
7/29	第44回薄膜・表面物理セミナー(2016)「最先端バイオイメージング技術の基礎と応用」	東京	71-4
7/29~8/2	第61回物性若手夏の学校	志賀高原(長野)	71-5
8/3~5	第22回結晶工学スクール(2016年)	東京	71-6
8/3~5	共鳴と非エルミート量子力学	茨木市(大阪)	71-6
8/8~11	第9回固体におけるスピン関連現象の物理と応用に関する国際会議(PASPS 9)	神戸市	71-3
8/8~12	量子力学と非エルミート演算子	京都市	71-6
8/25	第6回講習会「X線反射率法による薄膜・多層膜の解析」	つくば市(茨城)	71-3
9/5~9	第29回コンピューショナル・マテリアルズ・デザイン(CMD)ワークショップ	豊中市(大阪)	71-6
9/6~7	第32回分析電子顕微鏡討論会	千葉市	71-6
9/7~9	第51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	札幌市	71-6
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
9/26~28	日本流体力学学会年会2016	名古屋市	71-4
10/10~13	Asian Conf. on Nanoscience and Nanotechnology 2016	札幌市	71-5
10/16~21	7th Int. Symp. on Practical Surface Analysis	Daejeon(韓国)	71-5
10/26~29	第57回高圧討論会	つくば市(茨城)	71-6
10/28~30	第64回レオロジー討論会	豊中市(大阪)	71-5
2017年			
3/17~20	日本物理学会第72回年次大会(大阪大学)	豊中市(大阪)	日本物理学会
9/12~15	日本物理学会2017年秋季大会(宇都宮大学)(素核宇)	宇都宮市(栃木)	日本物理学会
9/21~24	日本物理学会2017年秋季大会(岩手大学)(物性)	盛岡市(岩手)	日本物理学会
10/22~26	The 8th Int. Symp. on Surface Science	つくば市(茨城)	71-5
2018年			
3/22~25	日本物理学会第73回年次大会(東京理科大学)	野田市(千葉)	日本物理学会
9/14~17	日本物理学会2018年秋季大会(信州大学)(素宇)	松本市(長野)	日本物理学会

編集後記

思えば1年前、前任の先生から編集委員という大層なお役目を仰せつけられたときには、ただただ戸惑うばかりでした。おそろおそろ出席した編集会議では、ありとあらゆる分野の記事の提案にみな興味津々な様子で聞き入りつつも、疑問点はけっしてゆるがせにしない、真剣で熱のこもった議論に、正直少し気圧されてしまいました。ですが、それとともに彷彿とよみがえってきたのは、かつてとある物理科学雑誌の編集の仕事に携わっていたとき、やはり編集会議の場でくり広げられていた先生方の楽

しげな議論にわくわくしていた気持ちでした。いまやこの月1回の集まりは自分にとって、物理学のさまざまな分野のいまをたっぷりと感じることのできる、かけがえない機会となっています。

ただ、学会誌は商業誌とは違い、学会員に向けて必要かつ有益な情報を伝えるために学会が発行する機関誌です。掲載する記事や執筆者、読者の選定など、さまざまな面での公平性はもちろんのこと、とりあげた記事の傾向や具体的内容がそのまま学会の意向であるかのように受け止められる可能性などにも配慮しなくてはなりません。ともすれば堅苦しく感じられるこのような

一面に気づかされたときには、あらためて身が縮まる思いがしました。

それでもやはり、商業誌のようにはいかない点はあるにしても、手にとった人を読む気にさせ、実際に喜んで読んでいただけるような有意義で魅力的な記事をお届けしたいという、作り手の熱い思いにまったく変わりはありません。そう思ってあらためて見直してみると、解説記事のリードページや、「現代物理のキーワード」や「身近な現象の物理」といった気軽に読める欄を設けたりといった誌面の工夫にも、これまでの編集委員の方々の思いがにじみ出ているようです。

4月号から連載がはじまった記念企画「物理学70の不思議」は、ご覧いただいていますでしょうか？ その短い記事の1本1本が、まさにそのような熱意のぶつかり合いのなかから生まれてきたものなのです。好評なご感想もお寄せいただいております。本当に励みになっています。

そして今月号からは、学会設立70周年を記念するもう1つの記念企画、「変わりゆく物理学研究の諸相」がはじまります。来年は物理学会の原点、東京数学会社の創設140年でもあり、物理学会の創設はその道のちょうど半ばにあたることから、この連載ではとくに歴史の折り返し点に着目し、日本の物理学研究のこれまでを振り返ります。科学研究の現場にいますと、どうしても前方を見据えるのに手一杯になり、過去の

ことなどにはあまり興味がわかないという方もいらっしゃるかもしれませんが、そのような方にもちょっとだけ足を止めて、いま歩いていらっしゃる道を俯瞰してみたくなるように、物理学史資料委員会の皆様には企画の段階から執筆にいたるまで、ときに何度も手直しをお願いするなど、多大な労力を費やしていただいています。全6回、隔月での掲載を予定しております。どうぞご期待ください。

田島俊之 <toshiyuki.tajima@nao.ac.jp>

編集委員

森川 雅博 (委員長), 長谷川修司,
浅井 朋彦, 井澤 公一, 井上 貴史,
今村 卓史, 枝川 圭一, 江藤 幹雄,
片山 郁文, 岸根順一郎, 栗田 玲,

桑本 剛, 小林 由佳, 鈴木 康夫,
須山 輝明, 田島 俊之, 田中 良巳,
田沼 肇, 初田真知子, 藤井 芳昭,
藤崎 弘士, 間瀬 圭一, 松本 重貴,
望月 維人, 矢向謙太郎, 浅野 勝晃,
板橋 健太, 藤山 茂樹, 李 哲虎
(支部委員)

飯塚 剛, 川口 由紀, 酒井 彰,
田嶋 直樹, 根本 祐一, 野村 清英,
星 健夫, 松井 広志, 水野 義之,
溝口 幸司

新著紹介小委員会委員

浅野 勝晃 (委員長), 安藤 康伸
石原 安野, 宇田川将文, 大西 宏明,
岡田 邦宏, 貴田 徳明, 越野 和樹,
小鍋 哲, 小山 知弘, 高岩 義信,
竹内 一将, 中村 真, 西浦 正樹

第72期 (2016年3月31日~2017年3月31日) 理事・監事

会 長	藤井保彦	副 会 長	川村 光		
庶 務 理 事	板倉明子・小形正男・香取浩子・小林研介・高須昌子・永江知文・肥山詠美子 村上修一				
会 計 理 事	井上邦雄・小林研介(兼任)・澤 博・永江知文(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	大槻東巳	監 事	三宅康博・林 青司		

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71巻 第6号 (平成28年6月5日発行) 通巻805号

©日本物理学会 2016

Butsuri

発行者 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル 8F

白 勢 祐 次 郎

印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

発行所 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル 8F

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。

■平成28年熊本地震被害による会費免除申請

今回の平成28年熊本地震で被災された会員の方々に、心からお見舞いを申し上げます。

本会では、既に2016年度会費を納めていただいていた会員の中で、今回被害に遭われて今後の会費の納入が困難な状況の方に対し2017年度会費を免除させていただきます。つきましては、申請書(414ページを参照ください)に地震・火災等で自ら居住する住宅(学部学生及び大学院学生は実家の住宅)が損壊したことを証明する書類(公的機関の罹災証明、被災証明)を添えて学会事務局までお申し出ください。

また、申し込みは9月30日到着分までとさせていただきますのでご注意ください。

なお、ホームページでも同様のご案内をしております。申請書ならびに罹災・被災証明の郵送先および問合せ先:

〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22
一般社団法人日本物理学会 会員係 宛
電話: 03(3816)6201(代表) Fax: 03(3816)6208
e-mail: kaiin@jps.or.jp

■2016年秋季大会の宿泊・交通等の案内

4, 5月号会告で案内しましたように2016年秋季大会は以下の通り開催されます。宿泊・交通等の案内は本号後付広告欄をご覧ください。なお、本会ホームページにも案内の詳細が掲載される予定です。

○素粒子、核物理、宇宙線・宇宙物理領域関係

会期: 2016年9月21日(水)~24日(土)
会場: 宮崎大学木花キャンパス(宮崎市学園木花台西1-1)
交通: 宮崎交通バス
宮崎駅前バスセンターより約50分前後
宮交シティより約35分前後
取扱旅行代理店: トラベルワン
*詳細は本号後付広告欄C-2を参照

○物性領域関係

会期: 2016年9月13日(火)~16日(金)
会場: 金沢大学角間キャンパス(金沢市角間)
交通: 北陸鉄道バス
金沢駅より約35分前後
取扱旅行代理店: 東武トップツアーズ金沢支店
*詳細は本号後付広告欄C-3を参照

■2016年秋季大会会場における託児室の設置について

本年秋季大会においても両会場で託児室を設置する予定です。詳しくは本会ホームページで案内しますので、そちらをご覧ください。

■2016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(講演申込をされた方以外への案内です。ただし、講演申込をされた方で新たに講演概要集を購入される方は含みます。)

2016年秋季大会の参加登録と講演概要集の事前、クレジットカード払いおよび現地での登録・購入方法、およびそれぞれの締切期日は下記表記載の通りです。

なお、大会前に講演概要集をご覧いただくには、Webアクセス権の購入が必要です。Webでの公開は1年間です。

また、Webアクセス権以外に記録保存用DVD版も用意しました。ただし、本DVDは秋季大会の全日程終了後の発送(郵メール便にて9月26日頃)となり、大会前に事前にお手元には届きませんのでご注意ください。またWebアクセス権を合せてご購入いただくと割安になります。

参加登録と講演概要集購入方法 (次の4つの方法があります。申込時期が異なります。)	
1.	期日前登録・購入(2016年6月16日~8月1日)
2.	期日後Web登録・購入(2016年9月1日~宮崎大学会期最終日の12時)(会期中も可能)
3.	現地現金登録・購入(会期中)
4.	請求・見積書等による購入(講演概要集記録保存用DVD版購入のみで、上記1~3.項での方法による購入は出来ません。)

なお、詳しくは次のそれぞれの項目をご覧ください。また、それぞれの参加登録費と講演概要集頒価は下記一覧表をご覧ください。

1. 期日前登録・購入(2016年6月16日~8月1日)

- 次の特典があります。
- ・割引あり
 - ・数種の支払い方法
 - ・Webによる領収書発行

個人会員の方	
Webによる方法	<p>申込URL: http://www.toyoag.co.jp/jps/index.html 会員番号: 5桁の数字とアルファベット 注: 入会申込中の方は“N99999”, 協定学会会員の方は“K99999” とそれぞれ会員番号欄に記入する。 申込期間: 6月16日(木)~8月1日(月) *お支払い方法としてクレジットカードを選択した場合は、Web上での電子決済が可能です。 注1: 領収書発行用URLは、2016年8月3日までに入金確認できた方には8月5日に、それ以降に入金確認できた方には8月23日に、各自メールアドレス宛に連絡します。 注2: 概要集記録保存用DVD版は2016年9月26日頃にゆうメール便にて発送いたします。 注3: 請求・見積書等による申込は出来ません。</p>
Web以外による方法	<p>次の記入事項をA4サイズまでの用紙にご記入の上、次の申込先宛にFaxまたは郵送でお送りください。 申込・支払締切: 2016年6月16日(木)~7月22日(金) 記入事項: ①氏名 ②氏名ふりがな ③会員番号 ④所属(団体/部署) ⑤事前参加登録内容および金額 ⑥講演概要集購入申込内容および金額 ⑦支払(銀行送金のみ)内容(銀行名, 支店名, 振込日) ⑧参加票・概要集DVD版の郵送先(会誌と同じ場合は“会誌と同じ”)と明記のみ) 送金先: みずほ銀行 新橋支店 普通口座 2444796 口座名 シャ)ニホンブツリガツカイ タイカイセン ヨウ 申込先: 〒102-0072 東京都千代田区飯田橋1-5-8 アクサンビル トーヨー企画(株)内 日本物理学会受付センター Fax: 03-3262-6705</p>

	<p>注1：領収書は入金確認後、2016年7月末頃に郵送いたします。</p> <p>注2：概要集記録保存用DVD版は2016年9月26日頃にゆうメール便にて発送いたします。</p> <p>注3：請求・見積書等による申込は出来ません。</p>
賛助会員、非会員の一般・学生の方	
参加登録	<p>取扱いはしていません。</p> <p>2. 項の「期日後Web登録・購入」、または参加当日、直接、会場の総合受付で参加登録費(表参照)をお支払いください。</p> <p>* 請求・見積書等による申込は出来ません。</p>
講演概要集(Webアクセス権および記録保存用DVD版)購入	<p>事前購入が出来ます。</p> <p>申込方法： 上記表中「個人会員の方」欄の「Web以外による方法」欄に記載の方法でお申込ください。(銀行送金に限ります。)</p> <p>注1：領収書は2016年7月末頃に郵送いたします。</p> <p>注2：概要集記録保存用DVD版は2016年9月26日頃にゆうメール便にて発送いたします。</p> <p>注3：請求・見積書等による申込は出来ません。</p>

2. 期日後Web登録・購入(2016年9月1日～宮崎大学会期最終日12時)(会期中も可能)

* 本登録は、大会現地での現金取扱い額を少なくするためと、クレジットカード払いへの要望に応えたもので、第69回年次大会から実施しています。なお、本登録は、受付でカードを提示し決済する方式ではなく、予めWeb上で決済を完了していただく方式です。

次の特典があります。

- ・割引あり
- ・Webから登録し、決済。現金不要。
- ・Webによる領収書発行

個人会員・賛助会員、非会員の方、すべて同じ扱いです。	
参加登録	<p>Web登録URL：http://www.toyoag.co.jp/jps/index.html 会員番号：5桁の数字とアルファベット 注：入会申込中の方は“N99999”， 協定学会会員の方は“K99999”， それ以外の方は“R99999” とそれぞれ会員番号欄に記入する。</p> <p>取扱い期間： 2016年9月1日(木)～宮崎大学会期最終日12時</p> <p>総合受付で参加登録をされる前(最終日は両会場ともに12時)までに、上記Web登録URLにアクセスしていただき、クレジットカードによる支払いを済ませ、その際に発行される受付番号を記載した画面をプリントアウトし、総合受付に提出してください。引換に参加票をお渡します。</p> <p>**おおよその流れ**</p> <ol style="list-style-type: none"> ① Web登録URLにアクセス ② クレジットカードでの支払い ③ 発行された受付番号をプリントアウト ④ プリントアウトした用紙を持参し総合受付に提出 ⑤ 用紙と引換に参加票を受理 <p>* 領収書は参加票裏面への印刷ではなく、Web上での発行となっています。詳しくは、本項目の最後の注1をご覧ください。</p>

	<p>なお、現地受付時にプリントアウトしたものを提出できない場合は、総合受付に備付けの専用用紙に予め受付番号、氏名等を記入後、総合受付に提出し、同時に受付番号が表示された画面を表示できる携帯電話、スマートフォン、タブレット、ノートPCのいずれかを併せて提示してください。専用用紙と引換に参加票をお渡します。</p> <p>**プリントアウトできない場合のおおよその流れ**</p> <ol style="list-style-type: none"> ①と②は上記と同じ ③ 受付備付けの専用用紙に受付番号、氏名等を記入 ④ 専用用紙を受付に提出し、併せて受付番号を確認できるスマートフォン等の画面を提示 ⑤ 専用用紙と引換に参加票を受理 <p>* 領収書は参加票裏面への印刷ではなく、Web上での発行となっています。詳しくは、本項目の最後の注1をご覧ください。</p> <p>**請求書の発行はいたしません。</p> <p>注1：領収書発行用URLは、9月7日までに決済が完了した方には9月9日に、それ以降の方は9月29日に、各自メールアドレス宛に連絡します。</p> <p>注2：請求・見積書等による申込は出来ません。</p>
講演概要集(Webアクセス権および記録保存用DVD版)購入	<p>Web登録URL：(上記参加登録と同じ) 会員番号：(上記参加登録と同じ) 取扱い期間：(上記参加登録と同じ)</p> <p>総合受付で概要集を購入される前(最終日は12時)までに、上記Web登録URLにアクセスしていただき、クレジットカードによる支払いを済ませ、その際に発行される受付番号を記載した画面をプリントアウトし、現地概要集販売係に提出してください。Webアクセス権を購入された方には、購入完了後(数分後)、申込されたメールアドレス宛にWebアクセス権を記載したURLをお送りします。なお、記録保存用DVD版を購入された方には、宮崎大学大会終了後10月11日頃にゆうメール便にて発送いたします。</p> <p>**おおよその流れ**</p> <ol style="list-style-type: none"> ① Web登録URLにアクセス ② クレジットカードでの支払い ③ 発行された受付番号をプリントアウト ④ プリントアウトした用紙を持参し概要集販売係に提出 ⑤ 用紙と引換にWebアクセス権を購入した場合は個別のアクセス権を記載した用紙を受取り、半券部分に氏名・電話番号等を記入し、当該部分を切り取り受付に渡す。 <p>* 領収書はWeb上での発行となります。詳しくは、本項目の最後の注1をご覧ください。</p> <p>なお、現地購入時にプリントアウトしたものを提出できない場合は、総合受付に備付けの専用用紙に予め受付番号、氏名等を記入後、同時に受付番号が表示された画面を表示できる携帯電話、スマートフォン、タブレット、ノートPCのいずれかを併せて提示してください。Webアクセス権を購入された方は、引換に個別のWebアクセス権を記載した用紙をお渡します。記録保存用DVD版を購入された方は、宮崎大学大会終了後10月11日頃にゆうメール便にて発送いたします。</p> <p>**プリントアウトできない場合のおおよその流れ**</p> <ol style="list-style-type: none"> ① Web登録URLにアクセス ② クレジットカードでの支払い ③ 専用用紙に記入 ④ プリントアウトした用紙を持参し概要集販売係に提出

⑤ 用紙と引換に、Webアクセス権を購入した方は個別のアクセス権を記載した用紙を受取り、半券部分に氏名・電話番号等を記入し、当該部分を切り取り受付に渡す。記録保存用DVD版を購入された方は、宮崎大学大会終了後10月11日頃にゆうメール便にて発送いたします。

*領収書はWeb上での発行となります。詳しくは、本項目の最後の注1をご覧ください。

*請求書の発行はいたしません。

注1：領収書発行用URLは、9月7日までに決済が完了した方には9月9日に、それ以降の方は9月29日に、各自メールアドレス宛に連絡します。

注2：概要集記録保存用DVD版は、10月11日頃にゆうメール便にて発送いたします。

注3：請求・見積書等による申込は出来ません。

3. 現地現金登録

現金による支払いのみで、割引等のサービスはありません。

大会に参加される場合 (個人会員・賛助会員、非会員の方、すべて同じ扱いです)	
参加登録	参加当日、直接、総合受付で現金にて参加登録費をお支払い下さい。 *請求書の発行はいたしません。
講演概要集(Webアクセス権および記録保存用DVD版)購入	直接、会場の総合受付で現金にてご購入ください。ただし、ご購入前に、専用の申込書に予め必要事項のご記入をお願いします。 注1：Webアクセス権を購入された方には、個別URLを記載した用紙をお渡ししますので、半券部分に氏名、電話番号等をご記入の上、当該部分を切り取り受付にお渡しください。なお、URLの再発行はいたしませんので、くれぐれも紛失されぬようご注意ください。 注2：概要集記録保存用DVD版は10月11日頃にゆうメール便にて発送いたします。 注3：請求・見積書等による申込は出来ません。
大会に参加されない場合 (個人会員・賛助会員、非会員の方、すべて同じ扱いです)	
講演概要集購入(記録保存用DVD版のみ)	次の事務局宛にお申込ください。 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8F 日本物理学会事務局 講演概要集頒布係 Fax: 03-3816-6208 Tel: 03-3816-6201 E-mail: pubpub@jps.or.jp 注：記録保存用DVD版は大会終了10月以降、順次発送いたします。

4. 請求・見積書等による購入(講演概要集記録保存用DVD版のみ)

請求・見積書等を必要とする場合は、上記1.~3.項(事実前・期日後・現地)での購入はできません。詳しくは、上表記載の事務局宛にお問い合わせください。

《参考表》

参加登録費および講演概要集頒価一覧表

参加登録費	期日前登録 (8月1日まで)	期日後事前Web登録 (9月1日から宮崎大学会期最終日12時まで)	会期中現地登録 (現金払いのみ)
会員 一般	6,000円*	6,500円*	7,000円*
学生[注1]およびシニア会員	3,500円*	3,750円*	4,000円*
賛助会員	(本取扱いはありません)	6,500円*	7,000円*
非会員一般	(本取扱いはありません)	7,500円**	8,000円**
非会員学生[注1]	(本取扱いはありません)	5,000円**	6,000円**

講演概要集(全領域収録)	期日前登録 (8月1日まで) (送料・手数料込)	期日後Web登録 (9月1日から宮崎大学会期最終日12時まで) (送料・手数料込)	会期中現地登録 (現金払いのみ) (送料・手数料込)	会期終了後 および請求・見積書による購入 (事務局に申込)
Webアクセス権のみ購入	1,000円	1,250円	1,500円	
Webアクセス権と記録保存用DVD版購入	1,500円	1,750円	2,000円	
記録保存用DVD版のみ購入	1,000円	1,250円	1,500円	1,500円+200円(送料・手数料)[注2]

*消費税の扱い

参加登録費：*不課税，**消費税込。

講演概要集：Webアクセス権・DVD版の頒価、および送料・手数料ともに消費税込。

[注1] 学生とは

学部学生、大学院生等もすべて学生の取り扱いとなります。本会の会員種別の学生会員のことではありません。

[注2] 送料・手数料は2部まで(ごと)を1単位として同一料金です。お支払い方法等は次のメールアドレスまでお問合せください。

お問合せ先 (E-mail) : pubpub@jps.or.jp

■2016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

前号会告掲載の「講演概要集の書き方」をご参照の上、各自の講演番号が決定しましたら(6月中旬頃本会よりメールにて通知)、pdf原稿にて下記提出先URLを参照および締切厳守の上、原稿の送信をお願いいたします。

原稿提出締切：2016年7月25日(月)14時必着

原稿提出先：<http://www.toyoag.co.jp/jps/index.html>

■第11回日本物理学会若手奨励賞について

第11回(2017年)の日本物理学会若手奨励賞を募集致します。

若手奨励賞に関しましては<http://www.jps.or.jp/activities/awards/wakate.php>をご参照ください。受賞記念講演会は第72回年次大会(2017年3月、大阪大学)において行われます。募集の詳細は各領

域のホームページを参考にしてください。実施要綱については http://www.jps.or.jp/activities/awards/wakate_youkou.php に、募集から受賞記念講演までの大まかなスケジュールについては <http://www.jps.or.jp/activities/awards/schedule/schedule2017.html> に記載されています。

■賞および研究助成の候補者の募集について

下記の賞および研究助成の候補者を募集します。各推薦要項に従い、2016年8月5日(金)までに(必着) 本会事務局宛に推薦書(賞は他薦に限る。助成は自薦)をお送り下さい。

*推薦書の送付先:

〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8階
一般社団法人日本物理学会 受賞候補等推薦委員会
電話 03-3816-6201

特に指定のない場合、受賞候補者の本会への推薦には、本会のホームページ (<http://www.jps.or.jp/>) の「受賞候補者等推薦のお願い」の中から推薦書(本会内・選考用書式)をダウンロードしてお使い下さい。

(なお、推薦いただいた候補者が選考の結果、本会から推薦することが決まりましたら、改めて財団所定の用紙で財団へ提出用の推薦書をご作成いただくこととなります。)

また、研究助成候補者の本会への推薦については、各財団所定の用紙をお使い下さい。

(1) 第57回(平成28年度)東レ科学技術賞

- 対象: 本会に関する分野で、下記のいずれかに該当する方
 - ①学術上の業績が顕著な方
 - ②学術上重要な発見をした方
 - ③効果が大きい重要な発明をした方
 - ④技術上重要な問題を解決して、技術の進歩に大きく貢献した方
- 内容: 賞状、金メダルおよび賞金500万円
- 件数: 2件以内。本会からの推薦も2件以内
- その他
 - a. 候補者は、必ずしも本会会員であることを要しません。
 - b. 本会から主催団体・公益財団法人東レ科学振興会へ推薦された候補者は、その年度および次の年度にわたって選考の対象となります。そのため、本会が平成27年度に推薦した候補者については、平成28年度候補者として再度推薦の必要はございません。ただし、平成27年度の推薦以降において追加すべき顕著な業績又は発表や受賞があり加筆が必要な場合は再提出いただいても構いません。
 - c. 受賞者は、原則として1件1人とし、特に複数であることを必要とする場合は理由を明確にしてください。
 - d. この科学賞は、所得税法(第9条第1項第13号二)の規定により非課税となっています。

(2) 第57回(平成28年度)東レ科学技術研究助成

- 対象: 本会に関する分野で国内の研究機関において自らのアイデアで萌芽的研究に従事しており、かつ今後の研究成果が科学技術の進歩、発展に貢献するところが大きいと考えられる若手研究者(原則として推薦時45歳以下)、本助成が重要な研究費と位置づけられ、これにより申請研究が格段に進展

すると期待されることが要件。

- 内容: 総額1億3千万円、1件3千万円程度まで。
- 件数: 10件程度。本会からの推薦2件以内
- その他
 - a. 候補者は、必ずしも本会会員であることを要しません。
 - b. 東レ科学振興会では専門分野の異なる選考委員全員が選考に関与します。そのため、推薦書の内容は異なる分野の研究者にも理解できるように記述して下さい。
 - c. この助成金は、研究目的を達成するために有効に使用されるものであれば、どのような用途で申請されても結構です。ただし、原則として間接経費、管理経費、共通経費は助成の対象になりません。また、助成金受領決定後、その用途を変更される場合は、事前に東レ科学振興会の承諾が必要です。助成研究の期間は、特別の事情がない限り助成金受領決定の次年度から3年以内です。
 - d. 助成金の受領者は、研究終了時まで毎年「助成研究年次報告書」を、また研究終了時に、「助成研究終了報告書」を東レ科学振興会に提出していただきます。
 - e. この助成金は、所得税法(第9条第1項第13号二)の規定により非課税となっています。

(3) 第48回(2016年度)内藤記念科学振興賞

- 対象:
 - ①人類の健康の増進に寄与する自然科学の基礎的研究において、独創的テーマに取り組み、進歩発展に顕著な功績を上げた研究者。
 - ②候補者は単独とするが、異なる研究グループによる共同研究の場合には、連名であっても良い。
 - ③候補者の再度の推薦は差し支えない。
- 内容: 正賞: 金メダル、副賞: 1,000万円を贈呈
- 件数: 本会からの推薦は1件

(4) 第37回女性科学者に明るい未来をの会「猿橋賞」

- 対象: 本年11月30日に50歳未満で、自然科学の分野で、優れた研究業績を収めている女性。
- 内容: 賞状、副賞として賞金30万円
- 件数: 1年1件(1名)

(5) 第48回(2016年度)内藤記念海外学者招聘助成金(後期)

- 援助の趣旨
人類の健康の増進に寄与する自然科学の基礎的研究に独創的・先駆的に取り組み、国際的に高い評価を得ている外国の研究者を、日本国内で開催される定例的な学術集会(年会や季会)に招聘する際の費用を補助するもの。
- 対象期間、助成額、件数
招聘時期: 2017年7月1日~2017年12月1日
エリア 助成額
中東・アフリカ 80万円
米国・カナダ(西海岸除く)、ヨーロッパ、南米 60万円
米国・カナダ西海岸、オーストラリア、ニュージーランド 50万円
東南アジア、インド 30万円
中国、台湾、韓国 20万円
10件以内

- 3) 対象者の資格
当該学術集会の組織委員長
- 4) 推薦者
本会・会長
- 5) 推薦可能件数
本会から1件
- 6) 推薦書用紙
財団のホームページ <https://www.naito-f.or.jp/> にて登録・作成してください。

■ 2017年～2018年開催 藤原セミナー募集のお知らせ

公益財団法人藤原科学財団では、科学技術の振興に寄与することを目的として、2017年～2018年の間に「藤原セミナー」の開催を希望する研究者から下記募集要項に基づいて申請を受け、選考の結果、採択を決定したもののついてセミナー開催に必要な経費を援助いたしております。

選考委員は次のとおりです。廣川信隆(委員長)、関谷剛男、伊賀健一、小間 篤、小林 誠(敬称略、順不同)又、必要に応じて専門委員が委嘱されることがあります。

セミナー開催を希望される方は財団までご申請下さい。

記

1. 対象分野 自然科学の全分野
2. 応募資格 わが国の大学等学術研究機関に所属する常勤の研究者
3. 開催件数 2件以内
4. 開催費用援助額 1件につき12,000千円以内(総額24,000千円以内)
上記金額には、間接経費・管理経費は対象になりません。
5. セミナーの要件
 - (1) セミナーは、国際的にも学問的水準の高いものとし、そのテーマはなるべく基礎的なもので、関連分野を含めた発展に寄与するものであること。但し二国間会議、定期的に行われる国際会議、およびその準備会議、サテライト会議は対象としない。
 - (2) 参加者は、50～100人程度とし、外国人研究者が参加者の5分の1程度含まれること。なお、国内外の優れた研究実績を有する若い専門研究者の参加を奨励する。
 - (3) セミナーの開催対象期間は、**2017年1月1日～2018年12月31日**
 - (4) セミナーの開催地は、日本国内であること。
 - (5) セミナー開催日数は、2～4日以内とする。
 - (6) 参加者が、セミナー開催期間中、起居を共にすることを原則とし、計画された講演・討論のほか、個人的な討論など自由な雰囲気での学問的な交流と人間的接触を深め、永続する協力の基盤を作るようなものであること。
6. 申請受付期間
2016年(平成28年)4月1日(金)～同年7月31日(日)(必着)

7. 財団が支給する経費

セミナー開催に直接必要な経費として財団が認めたもので、その費目は次のとおりとする。

- (1) 準備費
準備費は、セミナー開催の準備のために必要な国内外旅費、印刷製本費、通信運搬費、会議費、賃金、消耗品費、雑役務費等とする。

- (2) 海外参加者旅費
海外からの参加者旅費は、航空賃、滞在費及び必要な場合は交通費とし、次の基準により援助することができる。

- ① セミナー参加を特に要請する者については、旅費全額
- ② その他の参加者のうち必要な者については、旅費の一部
- (3) 国内参加者旅費

国内参加者旅費は、交通費(出発地から開催地までの往復鉄道賃等)、日当及び宿泊料とし、次の基準により援助することができる。

- ① セミナー参加を特に要請する者については、旅費全額
- ② その他の参加者のうち必要な者については、旅費の一部
- (4) セミナー経費

セミナー経費は、セミナー開催期間中に必要な組織責任者等の旅費、印刷製本費、通信運搬費、会議費、レセプション経費、賃金、消耗品費、雑役務費等とする。

8. 申請の方法

セミナー開催希望者は、「藤原セミナー開催申請書」(1通)を、所属組織長を経由して財団に提出すること。なお、主な参加予定者については、セミナーのテーマに関する主要論文(5名以内1人につき1篇、コピーで可)を添付のこと。

9. 選考及び通知

財団の藤原セミナー委員会(前記の選考委員で構成)で選考のうえ、その結果を2016年(平成28年)10月中旬に申請者ならびに所属組織長に通知する。

10. 開催責任者とその義務

申請が採択された場合は、申請者がセミナー開催責任者となる。セミナー開催責任者は、セミナーを企画し、運営し、次の事項を処理するとともに財団との連絡にあたる。

- (1) 実施計画書の提出……………(セミナー開催日の2カ月前迄)
- (2) 実施報告書及び収支計算報告書の提出
……………(セミナー終了後3カ月以内)
- (3) 準備から終了に至るセミナー開催に関するすべての事項

11. 申請書提出先・連絡先

〒104-0061 東京都中央区銀座3-7-12
公益財団法人 藤原科学財団
TEL (03)3561-7736 FAX (03)3561-7860
藤原科学財団ホームページ <http://www.fujizai.or.jp>
※開催申請書がWordファイルとPDFにて掲載されています。

開催にあたっては下記ホテルでの会議場、宿泊などを財団で幹旋しますのでご相談下さい。
苦小牧市……………グランドホテルニュー王子

平成28年熊本地震被災会員の会費免除申請書

一般社団法人日本物理学会会長 藤井 保彦 殿

私は今回の平成28年熊本地震により、以下のように被災しましたので、2017年度会費の免除を申請いたします。

2016年 月 日

氏 名： _____

会員番号： _____

E-mail： _____

電話番号： _____

連絡先住所： _____

勤務（通学）先・住所： _____

自宅住所： _____

被災状況：地震、火災等による自宅損壊の程度などの説明

添付書類： 罹災証明書 被災証明書

その他連絡事項： _____

（このページをA4判の用紙にコピーしてお使い下さい）

■一般社団法人 日本物理学会 第15回代議員懇談会報告

標記懇談会を第71回年次大会会場において、次の通り開催した。
日 時：2016年3月19日(土) 17時30分～19時20分

場 所：東北学院大学 泉キャンパス 1号館 4階 大会議室(宮城県仙台市泉区天神沢二丁目1-1)

出席者：雨宮健太, 伊藤正久, 上坂充, 大槻東巳, 大友季哉, 大西明, 菊池満, 酒見泰寛, 澤博, 柴田利明, 須藤彰三, 瀬戸秀紀, 遠山貴己, 長嶋泰之, 野田幸男, 花咲徳亮, 兵頭俊夫, 細川伸也, 松井哲男, 八幡和志, 吉信淳

他に、第71期理事として、香取浩子、小林研介が出席。

司 会：第71期会長 藤井保彦

懇談内容：

1. 総会議案資料説明

第96回総会議案についての説明が藤井保彦会長、松井哲男理事から行われ、また、総会報告事項等についての説明が、藤井保彦会長、大槻東巳理事から行われた。

2. 設立70周年(2016)・創立140周年(2017)記念事業について

藤井保彦会長から、標記記念事業について説明された。

上記の懇談テーマに関連して、出席代議員から、総会への(書面以外の)出席人数や総会開催日と役員任期との分離の可能性、収支差額の黒字分の活用方法、会員減少への懸念、新会員システムのマイページについて等の質問や意見が出された。

■一般社団法人 日本物理学会 第96回定時総会

日 時：2016年3月31日(火) 14時00分～16時15分

場 所：一般社団法人 日本物理学会 会議室
(東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル4階会議室)

当日出席者：上坂 充 上床美也* 大槻東巳 加藤岳生* 澤 博 柴田利明* 中澤知洋* 波田野彰* 兵頭俊夫* 細川伸也* 松井哲男 山崎 真* 八幡和志* 林 青司*

* = 当日議決権行使者

(他にオブザーバーとして 新垣恒道氏 高須昌子氏, 理事・監事として 香取浩子 小林研介 藤井保彦が出席)

議 長：会長 藤井保彦

総会成立宣言

本日現在の代議員総数：120名

本総会の定足数：61名(総代議員の半数以上かつ総代議員の議決権の過半数)

本総会の投票者数：82名(議決権行使書および委任状を含む総会終了時の数)

有効投票数 73名

無効投票数 9名

有効投票数内訳：当日議決権行使者 10名

書面による議決権行使者 55名

委任状 8名

議事

議事録署名者の選任

本総会の議事録署名者として、藤井保彦会長 香取浩子理事 澤博理事が選任された。

第1号議案：第72～73期理事の選任

予め代議員に送付した資料に沿って会長から説明が行われた。採決を行った結果、次の票数により候補者全員が第72～73期理事に選任された。

井上邦雄氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

大槻東巳氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

川村 光氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

高須昌子氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

永江知文氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

肥山詠美子氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

藤井保彦氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

村上修一氏 可：73 否：0 白票：0 計：73

第2号議案：第72～73期監事の選任

予め代議員に送付した資料に沿って会長から説明が行われた。採決を行った結果、次の票数により林青司氏が第72～73期監事に選任された。

可：71 否：0 白票：2 計：73

第3号議案：第72期会長の選定

予め代議員に送付した資料に沿って会長から説明が行われた。採決を行った結果、次の票数により、藤井保彦氏が第72期会長に選定された。

可：73 否：0 白票：0 計：73

第4号議案：第72期副会長の選定

予め代議員に送付した資料に沿って会長から説明が行われた。採決を行った結果、次の票数により、川村光氏が第72期副会長に選定された。

可：73 否：0 白票：0 計：73

第5号議案：2015年貸借対照表および正味財産増減計算書の承認

予め代議員に送付した資料に沿って会長及び会計理事から説明が行われた。質疑応答の後に採決を行った結果、次の票数により標記議案が原案通り承認された。

可：73 否：0 白票：0 計：73

第6号議案：名誉会員の承認

予め代議員に送付した資料に沿って会長から説明が行われた。質疑応答の後に採決を行った結果、次の票数により標記議案が原案通り承認された。

梶田隆章氏 可：73 否：0 白：0 計：73

上記議案の他に報告事項として、

1. 2015年(1月～12月)事業報告

2. 公益目的支出計画実施報告書

3. 2016年(1月～12月)事業計画、予算書

が、それぞれ予め代議員に送付した資料等に沿って説明が行われた。

以上をもって、議長の閉会宣言により第96回定時総会を終了した。

また、大会での学部生のポスターセッションや科学セミナーの有料化、本会と応用物理学会の関係等について、出席者より意見や質問が出された。

■第71回年次大会(2016年)報告

2016年3月19日(土)~22日(火), 東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市泉区天神沢二丁目1-1)で開催した。

○開催領域: 素粒子論領域, 素粒子実験領域, 理論核物理領域, 実験核物理領域, 宇宙線・宇宙物理領域, ビーム物理領域, 領域1~13, 物理と社会

○参加登録者数: 5,392名

会 員: 5,219名(一般3,017名, 学生2,202名)

非会員: 173名(一般64名, 学生109名)

○講演数: 3,867件

(原著講演3,611件, シンポジウム講演186件, 招待・企画・チュートリアル講演21件, 若手奨励賞受賞記念講演47件, 総合講演2件)

○論文賞表彰式・総合講演:

期 日: 3月20日(日)9:00~11:55

場 所: イズミティ21大ホール(仙台市泉区中央2-18-1)

論文賞表彰式: 第21回論文賞表彰 5篇

総合講演:

1. 「グラフェンと関連原子層物質の物理的興味」安藤恒也(東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻)
2. 「ニュートリノ振動とニュートリノの質量 —スーパーカミオカンデの観測から—」梶田隆章(東京大学宇宙線研究所)

参加者数: 約1,000名

○市民向け講演会:

期 日: 3月20日(日)13:30~16:10

場 所: イズミティ21大ホール(仙台市泉区中央2-18-1)

入場料: 無料

プログラム:

一般相対性理論100年・国際光年2015「宇宙と時間」

1. 「ニュートリノで探る素粒子と宇宙」中畑雅行(東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設長)
2. 「地下で測る宇宙のさざなみ?重力波検出実験KAGRA」神田展行(大阪市立大学大学院理学研究科教授)
3. 「粒子線天文学への期待」梶田隆章(東京大学宇宙線研究所長)

参加者数: 約500名

○日本物理学会設立70周年・創立140周年記念展示会

本会は1877年に前身の「東京数学会社」として創立され, その後「東京数学物理学会」(1884年), 「日本数学物理学会」(1919年)と改称して活動した後, 1946年に現在の「日本数学会」, 「日本物理学会」とし分離独立(設立)しました。本年が設立から70周年, 来年は創立から140周年を迎え, それを記念して, 創立以来139年の歴史を, 史料や物品を交えて紹介するとともに, 設立以来70年間の各領域(現在19領域)の関係する分野での主たる研究ハイライトの紹介等を行い, 来場者の意見も反映できる「来場者参加型」展示を行いました。

日 時: 3月19日(土)~22日(火)午前

会 場: 東北学院大学泉キャンパス体育館(ポスターセッション, 企業展示会場)

○託児室

8家族10名(延べ19名)利用

○講演取消: 75件

19aAH-2, 19aAU-9, 19aAX-14, 19aBH-3, 19aBS-7, 19aBT-10, 19aPS-91, 19pAB-12, 19pAM-2, 19pBA-11, 19pBC-10, 19pBK-7, 19pBS-15, 19pBT-5, 19pPSA-19, 19pPSA-43, 19pPSB-37, 20pAL-13, 20pAN-6, 20pAX-2, 20pAY-3, 20pAY-11, 20pBT-2, 20pPSA-42, 20pPSB-17, 21aAG-3, 21aAQ-3, 21aAQ-6, 21aAR-1, 21aAR-4, 21aAW-7, 21aAX-3, 21aAX-10, 21aAZ-11, 21aBT-2, 21aBT-13, 21aCB-4, 21aCC-1, 21aCD-1, 21aPS-4, 21aPS-10, 21aPS-45, 21pAE-10, 21pAP-7, 21pAP-8, 21pAS-2, 21pAZ-3, 21pAZ-6, 21pBC-9, 21pBC-13, 21pBD-2, 21pBD-5, 21pBD-8, 21pBL-5, 21pBT-14, 21pBW-3, 21pBW-7, 21pCE-5, 21pPSB-38, 22aAB-2, 22aAG-5, 22aAG-10, 22aAH-5, 22aAK-2, 22aAL-9, 22aAU-10, 22aAZ-3, 22aCA-4, 22aPS-5, 22aPS-90, 22pAC-2, 22pAL-2, 22pBL-5, 22pBU-11, 22pCE-3

○登壇者変更: 41件

19aAA-2 吉田 齊(大阪大学), 19aAE-8 中川諒季(阪教大物理), 19aAS-5 長谷川雅也(KEK), 19aAX-7 兵藤哲雄(京大基研), 19aBL-7 日高宏之(北大), 19pAR-4 寺崎一郎(名大院理), 19pBA-3 野村健太郎(東北大金研), 19pBE-2 雨宮健太(高エネ機構), 19pBF-5 山本潤(京大院理, JST CREST), 19pBN-3 求幸年(東大工), 19pBT-4 福島孝治(東大総合文化), 19pPSB-43 上牧 瑛(東北大院工), 20pAS-4 鹿野田一司(東大工), 20pAX-3 笹野匡紀(理化学研究所), 20pBB-9 堀米亮司(東学大), 20pBC-10 櫻井敬博(神戸大), 20pBM-1 椋田秀和(阪大院基礎工), 20pCD-1 土田秀次(京大院工), 21aAR-2 岡本耀平(京大院理), 21aCA-13 福田大輔(岡山大理), 21aCD-13 尾崎圭太(神戸大), 21pAM-7 原秀明(岡大極限量子), 21pAR-3 石田武和(大阪府大工), 21pAZ-5 大嶋晃敏(中部大学), 21pBB-7 堤潤也(産総研), 21pBB-12 田島裕之(兵庫県立大物質理), 21pBH-7 渡邊紳一(慶大理工), 21pBJ-5 松枝圭一(東北大通研), 21pBN-6 横谷尚睦(岡大院自然), 21pBW-2 前多祐介(九大理), 22aAF-4 寺内正己(東北大多元研), 22aAG-5 押山淳(東大院工), 22aAR-9 阿部聡(金沢大理工), 22aAX-9 北口雅暁(名大理), 22aAY-8 矢田圭司(名大工), 22aAZ-4 蒲原尚吾(富山大理), 22aBA-7 高橋陽太郎(東大院工), 22aBE-10 田嶋尚也(東邦大理), 22aBL-9 榊原寛史(鳥取大工), 22aPS-69 吉森明(新潟大理), 22pBM-10 石田憲二(京大院理)

○講演者追加: 17件

19aAF-9 長谷川和男(J-PARC), 19pAT-1 友田健太郎(神戸大), 19pAU-3 川村光(阪大院理), 19pBU-3 徳田悟(東大新領域), 19pPSB-41 正本祐輔(東大理), 20pAH-13 石田明(東大理), 20pAH-14 石田明(東大理), 21aAR-3 高木丈夫(福井大工), 21aBN-12 西田尚央(千葉大院理), 21aPS-32 石山聖也(千葉大院理)・後藤雅人(千葉大院理)・大橋幸記(東北大工)・川股隆行(東北大工), 21pAK-12 Heller Mark Andre(東北大)・Carow-Watamura, Ursula(東北大)・池田憲明(立命館大), 21pBM-9 植田拓也(名工大院工), 21pCC-1 Yuan Yao(東大物性研), 22aAF-5 石川健一(広大理, 理研AICS)・藏増嘉伸(理研AICS, 筑大数物, 筑大計科セ), 宇川彰(理研AICS)・山崎剛(理研AICS筑大数物筑大計科セ) for PACS Collaboration, 22aAM-11 稲田聡明(東大理), 22aCB-9 K. F. F. Law(阪大レーザー研)・A. Morace(阪大レーザー研)・余語覚文(阪大レーザー研)・松尾一輝(阪大レーザー研)・大島亜弓(阪大レーザー研)・坂和洋一(阪大レーザー研)・近藤康太郎(東工大原子炉)・E. d'Humieres(仏ボルドー大)・V. Tikhonchuk(仏ボルドー大)・J. J.

Santos (仏 ボルドー大)・Y-T. Li (中国 科学院)・Ph. Korneev(NRNU MEPHI (露)), 22aPS-97 馬籠純 (山梨大生命環境) 小林拓 (山梨大生命環境)

○講演者削除：2件

20pAT-3 岡村隆 (関学理), 22aCB-9 砂原淳 (阪大レーザー研) 長井隆浩 (阪大レーザー研)・池之内孝仁 (阪大レーザー研)・柳川琢省 (核融合研)・坂上仁志 (核融合研)・白神宏之 (阪大レーザー研)

○講演題目変更：13件

19aAX-8 Chiral partner structureに基づく反Dメソンの、核物質中での質量変化, 19aPS-80 スピンアイス化合物 ($Dy_{2-x}Ho_xTi_2O_7$)における乱れの磁気緩和に与える影響, 19pBU-10 振動子と興奮性素子の混在する集団のダイナミクスV, 20pAL-5 $Z_2 \times Z_6$ orbifold上のDプレーンインスタントンが生成するニュートリノマヨラナ質量, 20pAS-9 分子性ディラック電子系における秩序状態の可能性, 20pAT-3 量子異常を含む系の流体方程式, 21aAT-10 Gravitational wave background from string network, 21pAK-12 Off-shell Covariantization of Higher Gauge Theories based on QP-manifold, 22aAM-11 X線自由電子レーザー施設SACLAでの真空回折の探索, 22aAY-2 常磁性に誘起された異方的トポロジカル超伝導, 22aBJ-2 測定依存局所実在論とCHSH不等式の一般化, 22aCB-9 シリンダー状ターゲットへのレーザー内面照射によるキロテスラ級超強磁場の生成と磁気

リコネクション実験への応用, 22pBJ-5 スピン渦誘起ループ電流量子ビットと外部電流カップラー

○講演移動：5件

19pAU-10→22aBC-9, 19pBW-3→19pBW-15, 19pCC-5→19pCC-6, 21aAA-7→21aAA-5, 21aBF-9→21aBF-10

■第71回年次大会の忘れ物

次の忘れ物がありました。心当りの方は学会事務局までお問い合わせ下さい。(保管は会期終了時から半年限りで、以後は処分します。)

○プログラム・書類15 ○レーザーポインター・マウス2 ○PCコネクタ・アダプタ12 ○衣類・小物13 ○腕時計1 ○傘29 ○筆記具・文具25 他

■第12回Jr.セッション

期 日：3月21日(月・祝)8:55~16:50

場 所：東北学院大学泉キャンパス礼拝堂および体育館

講演数：102件(ポスター発表のみ)

参加者数：約400名

表 彰：最優秀賞2件, 優秀賞5件, 奨励賞17件

なお、上記表彰とは別に、物理教育功労賞として、生徒さんたちの指導に長年あたられた先生4名を表彰した。

2015年1月1日～12月31日 会計報告書

貸借対照表

2015年12月31日現在

(単位:円)

科 目	当 年 度	前 年 度	増 減
〔資産の部〕			
【流動資産】			
現金	176,034	148,496	27,538
普通預金	137,944,870	221,848,653	△83,903,783
当座預金	9,680,828	11,737,202	△2,056,374
定期預金	100,000,000	0	100,000,000
郵便振替貯金	13,199,302	12,985,265	214,037
未収会費	1,691,580	1,484,860	206,720
未収金	13,241,964	13,539,648	△297,684
前払金	3,860,420	2,883,872	976,548
仮払金	10,000	12,380	△2,380
流動資産合計	279,804,998	264,640,376	15,164,622
【固定資産】			
(基本財産)			
定期預金	187,000	187,000	0
基本財産合計	187,000	187,000	0
(特定資産)			
退職給付引当資産	80,800,539	75,630,229	5,170,310
学術会合引当資産	54,009,889	56,405,112	△2,395,223
若手活動支援引当資産	8,649,973	8,799,222	△149,249
事務所高度化引当資産	42,196,913	39,336,665	2,860,248
米軍資金凍結金預金	3,109,809	3,109,189	620
国際交流引当資産	70,806,410	71,659,999	△853,589
教育・社会連携活動引当資産	62,886,217	69,057,209	△6,170,992
次世代出版引当資産	122,172,308	123,605,684	△1,433,376
学術雑誌刊行事業引当資産	75,134,251	82,564,380	△7,430,129
PTEP刊行事業引当資産	66,606,795	65,233,528	1,373,267
その他積立資産	10,757,752	12,713,681	△1,955,929
特定資産合計	597,130,856	608,114,898	△10,984,042
(その他固定資産)			
什器備品	22,273,096	17,828,844	4,444,252
その他有形固定資産	7,400,454	7,400,454	0
リース資産	3,593,603	0	3,593,603
減価償却累計額	△16,917,840	△14,317,266	2,600,574
ソフトウェア	11,030,219	12,956,974	△1,926,755
ソフトウェア仮勘定	16,200,000	0	16,200,000
電話加入権	189,200	189,200	0
借室敷金	12,680,100	12,680,100	0
保証金	0	1,800,000	△1,800,000
その他投資	900,000	1,260,000	△360,000
その他固定資産合計	57,348,832	39,798,306	17,550,526
固定資産合計	654,666,688	648,100,204	6,566,484
資産合計	934,471,686	912,740,580	21,731,106
〔負債の部〕			
【流動負債】			
未払金	17,527,488	21,042,525	△3,515,037
前受金	30,343,085	31,813,218	△1,470,133
預り金	4,228,331	5,918,598	△1,690,267
リース債務	718,704	0	718,704
仮受金	2,351,030	2,333,230	17,800
賞与引当金	1,930,376	2,056,722	△126,346
流動負債合計	57,099,014	63,164,293	△6,065,279
【固定負債】			
長期未払金	2,040,696	0	2,040,696
長期リース債務	2,575,440	0	2,575,440
退職給付引当金	81,700,539	76,890,229	4,810,310
固定負債合計	86,316,675	76,890,229	9,426,446
負債合計	143,415,689	140,054,522	3,361,167
〔正味財産の部〕			
【指定正味財産】			
科学研究費補助金(JPSJ)	6,249,495	8,712,631	△2,463,136
科学研究費補助金(PTEP)	4,508,257	4,001,050	507,207
定期預金	187,000	187,000	0
指定正味財産合計	10,944,752	12,900,681	△1,955,929
(うち基本財産への充当額)	(187,000)	(187,000)	(0)
(うち特定資産への充当額)	(10,757,752)	(12,713,681)	(△1,955,929)
【一般正味財産】	780,111,245	759,785,377	20,325,868
(うち特定資産への充当額)	(586,373,104)	(595,401,217)	(△9,028,113)
正味財産合計	791,055,997	772,686,058	18,369,939
負債及び正味財産合計	934,471,686	912,740,580	21,731,106

正味財産増減計算書
2015年1月1日から2015年12月31日まで

(単位：円)

科 目	当 年 度	前 年 度	増 減
〔一般正味財産増減の部〕			
〔経常増減の部〕			
〔経常収益〕			
【基本財産運用益】			
基本財産受取利息	18	26	△8
【特定資産運用益】			
特定資産受取利息	158,195	196,793	△38,598
【受取入会金】			
受取入会金	4,707,000	4,449,000	258,000
【受取会費】			
正会員受取会費	171,723,030	172,504,430	△781,400
賛助会員受取会費	7,355,833	7,490,000	△134,167
【事業収益】			
学術の会合事業収益	69,054,288	62,134,952	6,919,336
会誌・資料刊行事業収益	76,919,190	77,698,672	△779,482
その他事業収益	1,026,000	756,000	270,000
【受取補助金等】			
受取科学研究費補助金（JPSJ）	18,663,136	9,387,369	9,275,767
受取科学研究費補助金（PTEP）	17,792,793	22,014,945	△4,222,152
受取地方公共団体補助金	0	400,000	△400,000
受取科学研究費補助金（公開）	1,110,631	1,149,690	△39,059
【受取負担金】			
受取負担金	42,503,114	49,443,340	△6,940,226
受取別刷作成費負担金	1,457,816	1,551,204	△93,388
受取名簿作成費負担金	0	10,300	△10,300
【受取寄付金】			
一般寄付金収入	24,000	24,000	0
【雑収益】			
受取利息	322,161	86,319	235,842
受取国外配布送料	497,450	519,200	△21,750
過年度会費等回収益	2,054,840	1,970,200	84,640
雑収益	5,139,274	4,865,068	274,206
経常収益計	420,508,769	416,651,508	3,857,261
〔経常費用〕			
【事業費】			
給料手当	79,014,314	91,872,306	△12,857,992
職員通勤費	2,588,454	2,344,133	244,321
臨時雇賃金	5,179,485	5,365,674	△186,189
退職給付費用	2,630,327	3,064,464	△434,137
福利厚生費	7,367,436	7,904,875	△537,439
広告宣伝費	4,538,275	7,474,799	△2,936,524
会議費	1,245,694	939,804	305,890
旅費交通費	15,841,126	16,253,803	△412,677
通信運搬費	18,911,309	19,930,989	△1,019,680
減価償却費	6,007,168	5,436,867	570,301
消耗什器備品費	29,040	326,243	△297,203
消耗品費	990,384	1,097,796	△107,412
印刷製本費	85,523,112	96,141,513	△10,618,401
光熱水料費	796,924	594,056	202,868
賃借料	12,664,989	15,296,165	△2,631,176
保険料	59,880	71,928	△12,048
諸謝金	2,343,750	1,969,841	373,909
委託費	31,341,469	28,867,329	2,474,140
租税公課	1,570,800	2,471,140	△900,340
負担金	1,172,341	1,337,718	△165,377
回収不能損	190,000	0	190,000
保守料	4,365,678	4,929,517	△563,839
清掃費	325,620	311,732	13,888
支払手数料等	2,672,781	2,285,182	387,599
雑費	1,403,368	2,806,306	△1,402,938

科 目	当 年 度	前 年 度	増 減
【管理費】			
人件費	△60,367,595	△62,767,293	2,399,698
給料手当	45,219,777	46,585,168	△1,365,391
職員通勤費	1,354,626	1,524,067	△169,441
臨時雇賃金	302,110	442,750	△140,640
退職給付費用	2,179,983	2,072,356	107,627
福利厚生費	11,311,099	12,142,952	△831,853
経費	△51,041,582	△42,409,962	△8,631,620
減価償却費	2,942,011	2,429,268	512,743
会議費	409,814	340,539	69,275
旅費交通費	2,566,744	2,402,428	164,316
通信運搬費	3,098,607	3,324,749	△226,142
消耗什器備品費	277,759	9,580	268,179
消耗品費	167,512	203,130	△35,618
修繕費	0	99,360	△99,360
印刷製本費	1,470,675	1,162,621	308,054
光熱水料費	948,770	869,203	79,567
賃借料	16,204,669	15,967,177	237,492
保険料	540,768	540,125	643
諸謝金	1,684,800	2,048,834	△364,034
租税公課	4,095,609	2,493,868	1,601,741
委託費	8,250,822	3,558,701	4,692,121
負担金	952,258	456,100	496,158
回収不能損	5,760	2,250	3,510
保守料	2,577,424	2,761,097	△183,673
清掃費	575,100	514,800	60,300
支払手数料等	2,812,827	2,946,882	△134,055
雑費	1,459,653	279,250	1,180,403
經常費用計	400,182,901	424,271,435	△24,088,534
当期經常増減額	20,325,868	△7,619,927	27,945,795
税引き前当期一般正味財産増減額	20,325,868	△7,619,927	27,945,795
当期一般正味財産増減額	20,325,868	△7,619,927	27,945,795
一般正味財産期首残高	759,785,377	767,405,304	△7,619,927
一般正味財産期末残高	780,111,245	759,785,377	20,325,868
〔指定正味財産増減の部〕			
【受取補助金等】			
受取科学研究費補助金（JPSJ）	16,200,000	8,712,631	7,487,369
受取科学研究費補助金（PTEP）	18,300,000	4,001,050	14,298,950
受取地方公共団体補助金（公開）	1,200,000	0	1,200,000
【一般正味財産への振替額】			
一般正味財産への振替額	△37,655,929	△5,815,995	△31,839,934
当期指定正味財産増減額	△1,955,929	6,897,686	△8,853,615
指定正味財産期首残高	12,900,681	6,002,995	6,897,686
指定正味財産期末残高	10,944,752	12,900,681	△1,955,929
正味財産期末残高	791,055,997	772,686,058	18,369,939

正味財産増減計算書内訳表

2015年1月1日から2015年12月31日まで

(単位：円)

科 目	実施事業等 会計	その他会計					法人会計	内部取引 消去	合計
		英文誌 刊行事業	学術的 会合事業	教育・社会 連携事業	その他 事業	小計			
〔一般正味財産増減の部〕									
〔経常増減の部〕									
〔経常収益〕									
【基本財産運用益】									
基本財産受取利息	0	0	0	0	0	0	18		18
【特定資産運用益】									
特定資産受取利息	0	0	0	0	0	0	158,195		158,195
【受取入金】									
受取入金	0	0	0	0	0	0	4,707,000		4,707,000
【受取会費】									
正会員受取会費	0	0	0	0	0	0	171,723,030		171,723,030
賛助会員受取会費	0	0	0	0	0	0	7,355,833		7,355,833
【事業収益】									
学術的会合事業収益	0	0	69,049,188	0	5,100	69,054,288	0		69,054,288
会誌・資料刊行事業収益	18,178,668	52,699,892	0	0	6,040,630	58,740,522	0		76,919,190
その他事業収益	0	0	0	1,026,000	0	1,026,000	0		1,026,000
【受取補助金等】									
受取科学研究費補助金 (JPSJ)	0	18,663,136	0	0	0	18,663,136	0		18,663,136
受取科学研究費補助金 (PTEP)	0	17,792,793	0	0	0	17,792,793	0		17,792,793
受取科学研究費補助金 (公開)	0	0	1,110,631	0	0	1,110,631	0		1,110,631
【受取負担金】									
受取負担金	0	42,503,114	0	0	0	42,503,114	0		42,503,114
受取別刷作成費負担金	0	1,304,936	0	0	0	1,304,936	152,880		1,457,816
【受取寄付金】									
一般寄付金収入	0	0	0	0	24,000	24,000	0		24,000
【雑収益】									
受取利息	0	0	704	0	0	704	321,457		322,161
受取国外配布送料	0	0	0	0	0	0	497,450		497,450
過年度会費等回収益	0	0	0	0	0	0	2,054,840		2,054,840
雑収益	2,898,400	191,893	310,281	398,500	803,254	1,703,928	536,946		5,139,274
経常収益計	21,077,068	133,155,764	70,470,804	1,424,500	6,872,984	211,924,052	187,507,649		420,508,769
〔経常費用〕									
【事業費】									
給料手当	15,449,703	32,097,222	19,980,814	7,928,961	3,557,614	63,564,611	0		79,014,314
職員通勤費	455,495	1,105,873	572,684	318,872	135,530	2,132,959	0		2,588,454
臨時雇賃金	767,910	0	4,387,575	24,000	0	4,411,575	0		5,179,485
退職給付費用	748,644	356,600	969,218	383,251	172,614	1,881,683	0		2,630,327
福利厚生費	2,305,267	3,345,664	1,548,624	115,906	51,975	5,062,169	0		7,367,436
広告宣伝費	0	4,532,955	5,320	0	0	4,538,275	0		4,538,275
会議費	205,003	228,652	551,605	143,715	116,719	1,040,691	0		1,245,694
旅費交通費	817,880	2,038,423	7,333,444	4,346,515	1,304,864	15,023,246	0		15,841,126
通信運搬費	13,823,378	2,047,179	2,546,975	92,064	401,713	5,087,931	0		18,911,309
減価償却費	916,002	4,718,006	373,160	0	0	5,091,166	0		6,007,168
消耗什器備品費	0	3,888	25,152	0	0	29,040	0		29,040
消耗品費	0	28,954	760,306	199,293	1,831	990,384	0		990,384
印刷製本費	33,870,454	36,880,135	13,267,563	394,557	1,110,403	51,652,658	0		85,523,112
光熱水料費	189,753	512,295	94,876	0	0	607,171	0		796,924
賃借料	2,998,481	4,203,927	5,373,479	89,102	0	9,666,508	0		12,664,989
保険料	0	8,630	47,250	4,000	0	59,880	0		59,880
諸謝金	0	0	2,240,567	103,183	0	2,343,750	0		2,343,750
委託費	5,267,923	13,495,584	12,477,314	5,778	94,870	26,073,546	0		31,341,469
租税公課	0	1,284,900	0	200	285,700	1,570,800	0		1,570,800
負担金	0	52,353	111,040	385,000	623,948	1,172,341	0		1,172,341
回収不能損	0	190,000	0	0	0	190,000	0		190,000
保守料	398,772	3,767,526	199,380	0	0	3,966,906	0		4,365,678
清掃費	103,680	170,100	51,840	0	0	221,940	0		325,620
支払手数料等	0	1,155,313	1,517,468	0	0	2,672,781	0		2,672,781
雑費	7,890	122,631	1,261,691	0	11,156	1,395,478	0		1,403,368
【管理費】									
人件費	0	0	0	0	0	0	△60,367,595		△60,367,595
給料手当	0	0	0	0	0	0	45,219,777		45,219,777
職員通勤費	0	0	0	0	0	0	1,354,626		1,354,626
臨時雇賃金	0	0	0	0	0	0	302,110		302,110
退職給付費用	0	0	0	0	0	0	2,179,983		2,179,983
福利厚生費	0	0	0	0	0	0	11,311,099		11,311,099
経費	0	0	0	0	0	0	△51,041,582		△51,041,582
減価償却費	0	0	0	0	0	0	2,942,011		2,942,011
会議費	0	0	0	0	0	0	409,814		409,814
旅費交通費	0	0	0	0	0	0	2,566,744		2,566,744
通信運搬費	0	0	0	0	0	0	3,098,607		3,098,607

科 目	実施事業等 会計	その他会計					法人会計	内部取引 消去	合計
		英文誌 刊行事業	学術的 会合事業	教育・社会 連携事業	その他 事業	小計			
消耗什器備品費	0	0	0	0	0	0	277,759		277,759
消耗品費	0	0	0	0	0	0	167,512		167,512
印刷製本費	0	0	0	0	0	0	1,470,675		1,470,675
光熱水料費	0	0	0	0	0	0	948,770		948,770
賃借料	0	0	0	0	0	0	16,204,669		16,204,669
保険料	0	0	0	0	0	0	540,768		540,768
諸謝金	0	0	0	0	0	0	1,684,800		1,684,800
租税公課	0	0	0	0	0	0	4,095,609		4,095,609
委託費	0	0	0	0	0	0	8,250,822		8,250,822
負担金	0	0	0	0	0	0	952,258		952,258
回収不能損	0	0	0	0	0	0	5,760		5,760
保守料	0	0	0	0	0	0	2,577,424		2,577,424
清掃費	0	0	0	0	0	0	575,100		575,100
支払手数料等	0	0	0	0	0	0	2,812,827		2,812,827
雑費	0	0	0	0	0	0	1,459,653		1,459,653
経常費用計	78,326,235	112,346,810	75,697,345	14,534,397	7,868,937	210,447,489	111,409,177		400,182,901
当期経常増減額	△57,249,167	20,808,954	△5,226,541	△13,109,897	△995,953	1,476,563	76,098,472		20,325,868
他会計振替額	△57,249,167	20,808,954	△5,226,541	△13,109,897	△21,321,821	△18,849,305	76,098,472		0
税引き前当期一般正味財産増減額	0	0	0	0	20,325,868	20,325,868	0		20,325,868
当期一般正味財産増減額	0	0	0	0	20,325,868	20,325,868	0		20,325,868
一般正味財産期首残高	0	0	0	0	759,785,377	759,785,377	0		759,785,377
一般正味財産期末残高	0	0	0	0	780,111,245	780,111,245	0		780,111,245
〔指定正味財産増減の部〕									
【受取補助金等】									
受取科学研究費補助金 (JPSJ)	0	16,200,000	0	0	0	16,200,000	0		16,200,000
受取科学研究費補助金 (PTEP)	0	18,300,000	0	0	0	18,300,000	0		18,300,000
受取地方公共団体補助金 (公開)	0	0	1,200,000	0	0	1,200,000	0		1,200,000
【一般正味財産への振替額】									
一般正味財産への振替額	0	△36,455,929	△1,200,000	0	0	△37,655,929	0		△37,655,929
当期指定正味財産増減額	0	△1,955,929	0	0	0	△1,955,929	0		△1,955,929
指定正味財産期首残高	0	12,713,681	0	0	187,000	12,900,681	0		12,900,681
指定正味財産期末残高	0	10,757,752	0	0	187,000	10,944,752	0		10,944,752
正味財産期末残高	0	10,757,752	0	0	780,298,245	791,055,997	0		791,055,997

財務諸表に対する注記

1. 重要な会計方針

- (1) 固定資産の減価償却の方法
固定資産の減価償却については定額法を採用しております。
- (2) 引当金の計上基準
 - ・賞与引当金
賞与引当金は、従業員への賞与の支払に備えるため、従業員に対する賞与の支払い見込み額のうち、当事業年度に帰属する金額を計上しております。
 - ・退職給付引当金
従業員の退職給付に備えるため、当事業年度末における支給見込額を計上しております。
- (3) 消費税等の会計処理
消費税及び地方消費税の会計処理は、税込方式によっております。

2. 基本財産及び特定資産の増減額及びその残高

基本財産及び特定資産の増減額及びその残高は、次のとおりです。
(単位：円)

科 目	前期末残高	当期増加額	当期減少額	当期末残高
基本財産				
定期預金	187,000	0	0	187,000
小 計	187,000	0	0	187,000

特定資産				
退職給付引当資産	75,630,229	5,170,310	0	80,800,539
学術会合引当資産	56,405,112	11,239	2,406,462	54,009,889
若手活動支援引当資産	8,799,222	1,756	151,005	8,649,973
事務所高度化引当資産	34,927,913	14,839,357	7,570,357	42,196,913
米軍資金凍結金預金	3,109,189	620	0	3,109,809
国際交流引当資産	71,659,999	23,814	877,403	70,806,410
教育・社会連携活動引当資産	69,057,209	13,747	6,184,739	62,886,217
次世代出版引当資産	123,605,684	24,624	1,458,000	122,172,308
学術雑誌刊行事業引当資産	82,564,380	16,448	7,446,577	75,134,251
PTEP刊行事業引当資産	65,233,528	1,373,267	0	66,606,795
減価償却引当資産	4,408,752	0	4,408,752	0
その他積立資産	12,713,681	35,700,000	37,655,929	10,757,752
小 計	608,114,898	57,175,182	68,159,224	597,130,856
合 計	608,301,898	57,175,182	68,159,224	597,317,856

3. 基本財産及び特定資産の財源等の内訳

基本財産及び特定資産の財源等の内訳は、次のとおりです。
(単位：円)

科 目	当期末残高	(うち指定正 味財産から の充当額)	(うち一般正 味財産から の充当額)	(うち負債に 対応する額)
基本財産				
定期預金	187,000	(187,000)	(0)	(0)
小 計	187,000	(187,000)	(0)	(0)

財産目録
(2015年12月31日現在)

(単位：円)

特定資産				
退職給付引当資産	80,800,539	(0)	(80,800,539)	(80,800,539)
学術会合引当資産	54,009,889	(0)	(54,009,889)	(0)
若手活動支援引当資産	8,649,973	(0)	(8,649,973)	(0)
事務所高度化引当資産	42,196,913	(0)	(42,196,913)	(0)
米軍資金凍結金預金	3,109,809	(0)	(3,109,809)	(0)
国際交流引当資産	70,806,410	(0)	(70,806,410)	(0)
教育・社会連携活動引当資産	62,886,217	(0)	(62,886,217)	(0)
次世代出版引当資産	122,172,308	(0)	(122,172,308)	(0)
学術雑誌刊行事業引当資産	75,134,251	(0)	(75,134,251)	(0)
PTEP刊行事業引当資産	66,606,795	(0)	(66,606,795)	(0)
その他積立資産	10,757,752	(10,757,752)	(0)	(0)
小計	597,130,856	(10,757,752)	(586,373,104)	(80,800,539)
合計	597,317,856	(10,944,752)	(586,373,104)	(80,800,539)

4. 実施事業資産の状況等

実施事業資産の前期末及び当期末残高は、次のとおりです。

(単位：円)

資産の名称	前期末残高	当期末残高
什器備品(※)	2,055,763	2,859,182
その他有形固定資産(※)	894,579	894,579
リース資産(※)	0	552,862
ソフトウェア	1,908,729	1,908,729
減価償却累計額(※)	△2,605,973	△3,464,988
電話加入権(※)	29,108	29,108
合計	2,282,206	2,779,472

※什器備品、その他有形固定資産、リース資産、減価償却累計額(ソフトウェアに係る部分を除く)及び電話加入権は、複数の会計区分で共用する資産であり、従事職員数割合により按分した残高を計上しております。

5. 引当金の明細

(単位：円)

科目	期首残高	当期増加額	当期減少額		期末残高
			目的使用	その他	
賞与引当金	2,056,722	1,930,376	2,056,722	0	1,930,376
退職給付引当金	76,890,229	4,810,310	0	0	81,700,539
合計	78,946,951	6,740,686	2,056,722	0	83,630,915

6. 補助金等の内訳並びに交付者、当期の増減額及び残高

補助金等の内訳並びに交付者、当期の増減額及び残高は、次のとおりです。

(単位：円)

補助金等の名称	交付者	前期末残高	当期増加額	当期減少額	当期末残高	貸借対照表上の記載区分
平成26年度科学研究所補助金(研究成果公開促進費)	独立行政法人日本学術振興会	12,713,681	0	12,713,681	0	
平成27年度科学研究所補助金(研究成果公開促進費)	独立行政法人日本学術振興会	0	35,700,000	24,942,248	10,757,752	指定正味財産
合計		12,713,681	35,700,000	37,655,929	10,847,121	89,369 流動負債

附属明細書

1. 基本財産及び特定資産の明細

「財務諸表に対する注記」に記載しているため、記載を省略しております。

2. 引当金の明細

「財務諸表に対する注記」に記載しているため、記載を省略しております。

貸借対照表科目	金額
〔資産の部〕	
【流動資産】	
現金預金	
現金	165,631
九州支部現金残高	10,403
みずほ新橋258	25,971,015
みずほ新橋351	1,232,910
みずほ新橋JPSJ科研費	1,537,516
みずほ新橋PTEP科研費	2,698,267
みずほ新橋大会専用	12,475,645
三井住友信託830(大野)	352,376
三井住友信託849(田中館)	81,557
英)三菱東京UFJ 本郷	88,816,393
三井住友銀行 本店営業部	2,209,950
支)北洋銀行 北七条支店	92,293
支)七十七銀行 本店営業部	228,981
支)第四銀行 本店営業部	12,661
支)三井住友銀行 本山支店	651,988
支)福井銀行 田原町支店	229,780
支)京都中央信金 百万遍支店	65,251
支)三井住友銀行 豊中支店	237,301
支)西中国信金 山口大前支店	221,367
支)四国銀行 朝倉支店	391,457
支)福岡銀行 箱崎支店	438,162
みずほ新橋 当座預金	9,680,828
三井住友信託089-03	100,000,000
郵便貯金 東京貯金センター	13,199,302
未収会費	1,691,580
未収金	13,241,964
前払金	3,860,420
仮払金	10,000
流動資産合計	279,804,998
【固定資産】	
(基本財産)	
定期預金	187,000
基本財産合計	187,000
(特定資産)	
退職給付引当資産	
退)三菱東京UFJ 虎ノ門	25,923,169
退)三菱東京UFJ 虎中央	2,855,000
退)三井住友信託 定期	50,000,000
退)三井住友信託 普通	2,022,370
その他積立資産	
みずほ新橋 科研費(JPSJ)	6,249,495
みずほ新橋 科研費(PTEP)	4,508,257
学術会合引当資産	
学術 みずほ銀行新橋支店	54,009,889
若手活動支援引当資産	
若手 みずほ銀行新橋支店	8,649,973
事務所高度化引当資産	
事)みずほ銀行新橋 普2748	27,363,245
事・英)備品償却引当資産	14,833,668
米軍資金凍結金預金	
米)みずほ銀行 定期	3,109,809
国際交流引当資産	
国交 三井住友信託 普通	88,271
国交 三信信国際交流基金	50,000,000
国交 みずほ 普通756	20,718,139
教育・社会連携活動引当資産	
教・社みずほ新橋 定051	11,881,632
教・社三井住友信 定8054	50,000,000
教・社三井住友信 普873	364,035
教・社三井住友 274	640,550
次世代出版引当資産	
英)次世代出版引当資産	122,172,308

学術雑誌刊行事業引当資産	
(英) 刊行事業推進引当資産	75,134,251
PTEP刊行事業引当資産	
(英) PTEP刊行事業引当資産	66,606,795
特定資産合計	597,130,856
(その他固定資産)	
什器備品	22,273,096
その他有形固定資産	7,400,454
リース資産	3,593,603
減価償却累計額	△16,917,840
ソフトウェア	11,030,219
ソフトウェア仮勘定	16,200,000
電話加入権	189,200
借室敷金	12,680,100
貸付金	900,000
その他固定資産合計	57,348,832
固定資産合計	654,666,688
資産合計	934,471,686
[負債の部]	
【流動負債】	
未払金	17,527,488
前受金	30,343,085
預り金	4,228,331
リース債務	718,704
仮受金	2,351,030
賞与引当金	1,930,376
流動負債合計	57,099,014
【固定負債】	
長期未払金	2,040,696
長期リース債務	2,575,440
退職給付引当金	81,700,539
固定負債合計	86,316,675
負債合計	143,415,689
正味財産	791,055,997

正味財産増減計算書

(2015年1月1日から2015年12月31日まで)

実施事業等会計	(単位：円)		
科 目	当 年 度	前 年 度	増 減
[一般正味財産増減の部]			
[経常増減の部]			
[経常収益]			
【事業収益】			
会誌・資料刊行事業収益	18,178,668	22,262,592	△4,083,924
【雑収益】			
雑収益	2,898,400	2,248,468	649,932
経常収益計	21,077,068	24,511,060	△3,433,992
[経常費用]			
【事業費】			
給料手当	15,449,703	15,630,251	△180,548
職員通勤費	455,495	470,717	△15,222
臨時雇賃金	767,910	668,310	99,600
退職給付費用	748,644	696,560	52,084
福利厚生費	2,305,267	2,224,301	80,966
会議費	205,003	158,632	46,371
旅費交通費	817,880	838,020	△20,140
通信運搬費	13,823,378	13,741,969	81,409
減価償却費	916,002	813,453	102,549
消耗什器備品費	0	5,940	△5,940
印刷製本費	33,870,454	32,166,094	1,704,360
光熱水料費	189,753	173,842	15,911
賃借料	2,998,481	3,062,808	△64,327
委託費	5,267,923	4,753,935	513,988
保守料	398,772	396,003	2,769
清掃費	103,680	102,960	720
雑費	7,890	5,330	2,560

経常費用計	78,326,235	75,909,125	2,417,110
当期経常増減額	△57,249,167	△51,398,065	△5,851,102
他会計振替額	△57,249,167	△51,398,065	△5,851,102
税引き前当期一般正味財産増減額	0	0	0
当期一般正味財産増減額	0	0	0
一般正味財産期末残高	0	0	0
正味財産期末残高	0	0	0

正味財産増減計算書

(2015年1月1日から2015年12月31日まで)

その他会計	(単位：円)		
科 目	当 年 度	前 年 度	増 減
[一般正味財産増減の部]			
[経常増減の部]			
[経常収益]			
【事業収益】			
学術的会合事業収益	69,054,288	62,134,952	6,919,336
会誌・資料刊行事業収益	58,740,522	55,436,080	3,304,442
その他事業収益	1,026,000	756,000	270,000
【受取補助金等】			
受取科学研究費補助金 (JPSJ)	18,663,136	9,387,369	9,275,767
受取科学研究費補助金 (PTEP)	17,792,793	22,014,945	△4,222,152
受取地方公共団体補助金	0	400,000	△400,000
受取科学研究費補助金 (公開)	1,110,631	1,149,690	△39,059
【受取負担金】			
受取負担金	22,003,144	32,234,871	△10,231,727
受取別刷作成費負担金	1,304,936	1,322,584	△17,648
その他受取負担金	20,499,970	17,208,469	3,291,501
【受取寄付金】			
一般 寄付金収入	24,000	24,000	0
【雑収益】			
受取利息	704	750	△46
雑収益	1,703,928	1,345,902	358,026
経常収益計	211,924,052	203,415,612	8,508,440
[経常費用]			
【事業費】			
給料手当	63,564,611	76,242,055	△12,677,444
職員通勤費	2,132,959	1,873,416	259,543
臨時雇賃金	4,411,575	4,697,364	△285,789
退職給付費用	1,881,683	2,367,904	△486,221
福利厚生費	5,062,169	5,680,574	△618,405
広告宣伝費	4,538,275	7,474,799	△2,936,524
会議費	1,040,691	781,172	259,519
旅費交通費	15,023,246	15,415,783	△392,537
通信運搬費	5,087,931	6,189,020	△1,101,089
減価償却費	5,091,166	4,623,414	467,752
消耗什器備品費	29,040	320,303	△291,263
消耗品費	990,384	1,097,796	△107,412
印刷製本費	51,652,658	63,975,419	△12,322,761
光熱水料費	607,171	420,214	186,957
賃借料	9,666,508	12,233,357	△2,566,849
保険料	59,880	71,928	△12,048
諸謝金	2,343,750	1,969,841	373,909
委託費	26,073,546	24,113,394	1,960,152
租税公課	1,570,800	2,471,140	△900,340
負担金	1,172,341	1,337,718	△165,377
回収不能損	190,000	0	190,000
保守料	3,966,906	4,533,514	△566,608
清掃費	221,940	208,772	13,168
支払手数料等	2,672,781	2,285,182	387,599
雑費	1,395,478	2,800,976	△1,405,498
経常費用計	210,447,489	243,185,055	△32,737,566
当期経常増減額	1,476,563	△39,769,443	41,246,006
他会計振替額	△18,849,305	△32,149,516	13,300,211
税引き前当期一般正味財産増減額	20,325,868	△7,619,927	27,945,795

当期一般正味財産増減額	20,325,868	△7,619,927	27,945,795
一般正味財産期首残高	759,785,377	767,405,304	△7,619,927
一般正味財産期末残高	780,111,245	759,785,377	20,325,868
〔指定正味財産増減の部〕			
【受取補助金等】			
受取科学研究費補助金 (JPSJ)	16,200,000	8,712,631	7,487,369
受取科学研究費補助金 (PTEP)	18,300,000	4,001,050	14,298,950
受取公共団体補助金 (公開)	1,200,000	0	1,200,000
【一般正味財産への振替額】			
一般正味財産への振替額	△37,655,929	△5,815,995	△31,839,934
当期指定正味財産増減額	△1,955,929	6,897,686	△8,853,615
指定正味財産期首残高	12,900,681	6,002,995	6,897,686
指定正味財産期末残高	10,944,752	12,900,681	△1,955,929
正味財産期末残高	791,055,997	772,686,058	18,369,939

負担金	952,258	456,100	496,158
回収不能損	5,760	2,250	3,510
保守料	2,577,424	2,761,097	△183,673
清掃費	575,100	514,800	60,300
支払手数料等	2,812,827	2,946,882	△134,055
雑費	1,459,653	279,250	1,180,403
経常費用計	111,409,177	105,177,255	6,231,922
当期経常増減額	76,098,472	83,547,581	△7,449,109
他会計振替額	76,098,472	83,547,581	△7,449,109
税引き前当期一般正味財産増減額	0	0	0
当期一般正味財産増減額	0	0	0
一般正味財産期末残高	0	0	0
正味財産期末残高	0	0	0

正味財産増減計算書

(2015年1月1日から2015年12月31日まで)

法人会計

(単位：円)

科 目	当 年 度	前 年 度	増 減
〔一般正味財産増減の部〕			
〔経常増減の部〕			
〔経常収益〕			
【基本財産運用益】			
基本財産受取利息	18	26	△8
【特定資産運用益】			
特定資産受取利息	158,195	196,793	△38,598
【受取入会金】			
受取入会金	4,707,000	4,449,000	258,000
【受取会費】			
正会員受取会費	171,723,030	172,504,430	△781,400
賛助会員受取会費	7,355,833	7,490,000	△134,167
【受取負担金】			
受取別刷作成費負担金	152,880	228,620	△75,740
受取名簿作成負担金	0	10,300	△10,300
【雑収益】			
受取利息	321,457	85,569	235,888
国外配布送料収益	497,450	519,200	△21,750
過年度会費等回収益	2,054,840	1,970,200	84,640
雑収益	536,946	1,270,698	△733,752
経常収益計	187,507,649	188,724,836	△1,217,187
〔経常費用〕			
【管理費】			
人件費	△60,367,595	△62,767,293	2,399,698
給料手当	45,219,777	46,585,168	△1,365,391
職員通勤費	1,354,626	1,524,067	△169,441
臨時雇賃金	302,110	442,750	△140,640
退職給付費用	2,179,983	2,072,356	107,627
福利厚生費	11,311,099	12,142,952	△831,853
経費	△51,041,582	△42,409,962	△8,631,620
減価償却費	2,942,011	2,429,268	512,743
会議費	409,814	340,539	69,275
旅費交通費	2,566,744	2,402,428	164,316
通信運搬費	3,098,607	3,324,749	△226,142
消耗什器備品費	277,759	9,580	268,179
消耗品費	167,512	203,130	△35,618
修繕費	0	99,360	△99,360
印刷製本費	1,470,675	1,162,621	308,054
光熱水料費	948,770	869,203	79,567
賃借料	16,204,669	15,967,177	237,492
保険料	540,768	540,125	643
諸謝金	1,684,800	2,048,834	△364,034
租税公課	4,095,609	2,493,868	1,601,741
委託費	8,250,822	3,558,701	4,692,121

独立監査人の監査報告書

平成28年2月17日

一般社団法人 日本物理学会
会 長 藤井保彦 様

はやぶさ監査法人
代表社員 公認会計士 稲葉喜子 ㊞
業務執行社員

当監査法人は、一般社団法人日本物理学会の平成27年1月1日から平成27年12月31日までの事業年度の貸借対照表及び損益計算書（公益法人会計基準に基づく「正味財産増減計算書」をいう。）並びにその附属明細書（以下「財務諸表等」という。）について監査を行った。

財務諸表等に対する理事者の責任

理事者の責任は、我が国において一般に公正妥当と認められる公益法人会計の基準に準拠して財務諸表等を作成し適正に表示することにある。これには、不正又は誤謬による重要な虚偽表示のない財務諸表等を作成し適正に表示するために理事者が必要と判断した内部統制を整備及び運用することが含まれる。

監査人の責任

当監査法人の責任は、当監査法人が実施した監査に基づいて、独立の立場から財務諸表等に対する意見を表明することにある。当監査法人は、我が国において一般に公正妥当と認められる監査の基準に準拠して監査を行った。監査の基準は、当監査法人に財務諸表等に重要な虚偽表示がないかどうかについて合理的な保証を得るために、監査計画を策定し、これに基づき監査を実施することを求めている。

監査においては、財務諸表等の金額及び開示について監査証拠を入手するための手続が実施される。監査手続は、当監査法人の判断により、不正又は誤謬による財務諸表等の重要な虚偽表示のリスクの評価に基づいて選択及び適用される。監査の目的は、内部統制の有効性について意見表明するためのものではないが、当監査法人は、リスク評価の実施に際して、状況に応じた適切な監査手続を立案するために、財務諸表等の作成と適正な表示に関連する内部統制を検討する。また、監査には、理事者が採用した会計方針及びその適用方法並びに理事者によって行われた見積りの評価も含め全体としての財務諸表等の表示を検討することが含まれる。

当監査法人は、意見表明の基礎となる十分かつ適切な監査証拠を入手したと判断している。

監査意見

当監査法人は、上記の財務諸表等が、我が国において一般に公正妥当と認められる公益法人会計の基準に準拠して、当該財務諸表等に係る期間の財産及び損益（正味財産増減）の状況をすべての重要な点において適正に表示しているものと認める。

利害関係

一般社団法人日本物理学会と当監査法人又は業務執行社員との間には、公認会計士法の規定により記載すべき利害関係はない。

以上

2016年2月20日

監査報告書

一般社団法人 日本物理学会
会長 藤井保彦 様

監事 波田野 彰 ㊟
監事 三宅 康博 ㊟

一般社団法人日本物理学会（以下、「当法人」という）の2015年1月1日から2015年12月31日までの事業報告、計算書類、これらの附属明細書、公益目的支出計画実施報告書その他理事の職務執行について監査を行いましたので、法令及び定款の規定に基づき本監査報告書を作成し、以下のとおり報告いたします。

1. 監査の方法の概要

理事及び事務局職員等と意思疎通を図り、また、理事会その他重要な会議に出席し、理事等からその職務の執行について報告を聴取し、関係書類を閲覧し、業務及び財産の状況を調査しました。また、独立監査人からの書面による監査報告を確認しました。

2. 監査の結果

- (1) 事業報告及びその附属明細書は法令及び定款に従い、当法人の状況を正しく示していると認めます。
- (2) 理事の職務の執行に関する不正の行為又は法令若しくは定款に違反する重大な事実は認められません。
- (3) 当法人の業務の適正を確保するために必要な体制の整備等についての理事会の決議の内容は相当です。
- (4) 計算書類とその附属明細書は当法人の財産および損益の状況を全ての重要な点において適正に表示しています。
- (5) 公益目的支出計画実施報告書の内容は、法令に従い、当法人の公益目的支出計画の実施状況を正しく示しているものと認めます。

以上

2015年事業報告 (2015年1月1日～12月31日)

1. 事業概要
2. 各事業詳細資料
 - 2-1. 学術講演会の開催・後援等
 - 2-2. 国際交流・協力活動
 - 2-3. 物理学に関する普及・啓発活動
 - 2-4. 本会の目的達成のために重要な活動
 - 2-5. 刊行物(実施事業を含む)

(附属明細1) 処務詳細資料

- ・総会・役員会等に関する事項
- ・契約・入札・他に関する事項

(附属明細2) 会員の異動状況

(附属明細3) 事務局の現況

1. 事業概要

主な活動内容は

- 1) 会長任期2年制への移行に伴う学会活動の安定運営を図る
- 2) 学会活動を支える組織・財政基盤の整備
- 3) 会員サービスの向上のための新しいデータベース(会員システム)の整備
- 4) 日本物理学会誌の充実
- 5) 英文誌刊行事業の整備
- 6) 大会のあり方についての検討
- 7) 支部活動の活性化と支援
- 8) 物理学関連の教育、人材活用・支援を通じた社会連携
- 9) 社会への物理学情報の発信力強化と学会活動の広報
- 10) 他学協会・団体との連携の強化
- 11) 国際的活動体制の強化
- 12) その他

である。以下にそれぞれを概観する。

- 1) 会長任期2年制への移行に伴う学会活動の安定運営を図る
本事業年度4月からの第71期より会長任期2年制度がスタートし、その1年目の副会長を初めて理事会が選出した。その際、会長の専門分野(物性)と異なる分野(素核宇)の副会長を選出した。また、新規理事に女性2名が就任するとともに、各種委員会委員の男女比、所属機関、専門分野の適切なバランスを図り、学会活動の活性化を図ることに注力した。会長2年目の第72期に向けてさらに同様の努力を払う。
第72期副会長(第73・74期会長予定者)の選挙を開始し、本年度中に代議員による候補者選出が滞りなく進行し、次年度早々(2016年2月)に会員選挙により最終候補者が決定し、第96回定時総会(2016年3月31日)に付議される予定である。
- 2) 学会活動を支える組織・財政基盤の整備
前事業年度より、本会財政の健全化に向けて2016年からの年会費一律1,000円の値上げを会員に丁寧に説明してきたが、第95回定時総会(2015年3月31日)でその値上げが承認された。また、大会参加登録費についても、講演概要集のWeb化による会員の利便性の向上を図るために一律1,000円の値上げを行った。これら一連の措置により、会員へのサービス向上と活発な学会活動を支える財政基盤が整備されつつある。
会員数は、年間約100名程度(主に院生以外の一般会員)の漸減が続いているが、長期会員については退会ではなく、シニア会員への種別変更を積極的にお願している。一方、大学院修了後に退会する会員を主たる対象とした会友(仮称)や、Jrセッション参加者や物理チャレンジ参加者等を対象とするジュニア会友(仮称)等の制度導入について鋭意検討を重ねている。
事務局職員については、定年(63歳)後再雇用制度に伴う適切な給与について審議し決定した。また、職員昇格や採用に伴う関連委員会と手続きの整備を行った。
- 3) 会員サービスの向上のための新しいデータベース(会員システム)の整備
会員管理業務の効率化と、会員サービスの向上を目的に、会員システムの構築を行っている。前年度までに、事務局での会員管理業務フローを整理し、IT機能として要求される事項を確定させてきた。今年度は、システムソフトウェア業者向けに、RFP(request for proposal)を作成し、入札を経て発注業者の決定を行った。その後、4月より業者との詳細な打ち合わせを行い、会員システム開発は順調に進んでいる。2016年3月

末を日途にシステム導入し、2016年4月からの本格稼働を目指す。

4) 日本物理学会誌の充実

分野が細分化しすぎると生産性がなくなるので、できるだけ分野横断的な視点で特集を組んで統合的な物理を目指した。例えば、「物理学70の不思議」(本会創立記念)を企画した。物理学の各分野の最先端と課題を紹介する企画で、長期的視野に立った問題や挑戦を集めた。執筆は原則編集委員。さらなる発展として、この「物理70の未解決問題」で収集した重要な物理をつなぐ形で、特集を企画していこうとしている。

その他特集としては以下のものがある：

- ・一般相対論特集：(2月号)1915年に完成した一般相対論の100年記念特集。一般相対論ミニマムの記事を含め、多くの分野の人の興味を引くようにした。
- ・「X線・粒子線回折による構造解析」の小特集：9月号では、X線回折、中性子線回折、反射高速電子回折(RHEED)および全反射陽電子回折(RHEPD)、生体物質の構造解析を取り上げた。
- ・シリーズ「国際光年IYL2015に寄せて」：8月号から始め、レーザー、励起子(エキシトン)、光合成などの記事とともに、12月号では望遠鏡の話の親しみやすい記事を用意した。

親しみやすい物理を徹底するため、「身近な物理のシリーズ」を充実させた。たとえば、「マガンの群れの集団動力学(9月号)」、「カエルのうたに耳をすませば(10月号)」、「超音波洗浄とそのルミネッセンス(12月号)」など。

最後に、編集委員会の構成については、各記事提案に対して、他分野からの議論を徹底するようにした。また、ディスカッションの時間を取って、分野横断的なテーマに対するブレンストーミングや特集の議論などを始めた。さらに、支部委員、新著紹介小委員会委員を取り込んで、記事の提案や議論に参加してもらうための技術的な準備を行った。

5) 英文誌刊行事業の整備

2013年に本格スタートしたPTEPについては優れた論文が多数掲載されるようにPTEP編集委員会およびPTEP企画委員会と共に努力を続けた。また機関支援の働きかけをより一層強化した。その結果、新たに3機関が支援機関に加わった。これと並行して、2015年度分の交付が決定された科研費(オープンアクセス刊行支援)を有効活用し、PTEPの国際的認知度向上を計った。

JPSJについては、2013年に導入したプラットフォーム Atypon Literatum上でのオンラインサービスをさらに充実させた。また、事業の財政状況について引き続き注視し、2015年度の事業収支はほぼ均衡した。紙媒体をなくすこと、オープンアクセスに移行することなど、今後の方針について検討を続けるためJPSJ将来計画検討WGの設置を決めた。

さらに、物理学分野の国際会議のプロシーディングスを日本から出版するため、2014年にスタートした新雑誌「JPS Conference Proceedings」の刊行を充実させ、2015年度は5冊を刊行した(初年度の2014年度は3冊)。JPSJ、JPS Conference Proceedingsは2014年から交付された科研費(国際情報発信強化)を有効活用し、両雑誌の国際競争力を高める事業を行った。

6) 大会のあり方についての検討

第70回年次大会(2015年)より、大会参加登録費の値上げと概要集の電子化を実施した。値上げについては大きな混乱もなく、円滑に移行できたものの概要集電子化については会員から改善要望があがった。Web

アクセスについては、概要のダウンロード方法の改善を行うなど、利便性の向上を図った。DVD資料配布については事前送付の要望があったものの、参加費や原稿締め切り時期との関係があり、今後も継続して検討していくこととした。

学部学生の発表の機会を増やすため、学部学生向けポスターセッションの新設提案があり、第71回年次大会にパイロット事業として核物理領域に限ったポスターセッションを実施することとなった。

各領域での活動を支援する方法を模索するため、各領域での若手奨励賞選考方法、メールサーバーの運用体制、ポスター賞・学生賞などの実態調査を行った。

この他、領域運営委員連絡責任者を決めるなどして合同シンポジウムの日程調整を円滑に行えるような仕組みを導入した。

本会名誉会員である南部陽一郎先生の訃報を7月に受けて、理事会では大阪市立大学における秋季大会（素核宇宙ビーム）で南部陽一郎先生追悼特別セッションを行うことを決めた。大阪市立大学の実行委員会の協力を得て、9月26日（土）昼に江口徹氏が「南部先生の思い出」と題する講演を行った。

聴衆は約400名であった。

7) 支部活動の活性化と支援

支部活動の活性化のために2014年より支部長会議を年2回開催することとしたが、今年度も年2回の支部長会議、及び物理学会秋の分科会（物性会場）において支部長懇談会を開催し、役員名簿、活動報告、次年度の企画予算などの確認を行った。また、各支部が所属する支部会員へ同報メールを送るシステムが2014年に整備されたが、運用する支部が徐々に増加している。支部間の横の連絡を充実させるために整備した支部役員宛の一斉メールの運用等も定着してきた。これらの施策がほぼ定着しており、今年度は大きな問題は見受けられなかったため、次年度の支部長会議は年1回（春）の開催とすることとした。

8) 物理学関連の教育、人材活用・支援を通じた社会連携

科研費配分状況調査を行い、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研究費が集中していることを、委員会便り「科研費（基盤研究S, A, B, C）配分状況調査報告」として日本物理学会誌70号（2015）に掲載した。

2022年に国際物理オリンピックが日本で開催されることを受けて、物理オリンピック日本委員会（JPhO）から日本物理学会あてに理事の推薦依頼があり、日本物理学会の理事1名（物理教育委員長）がJPhOの理事を兼務する体制とした。今年度から、JPhOとの連携協力を更に密に取っている。JPhOは、オリンピック事業の他にも、全国の物理好きな中高生を対象としたコンテスト形式の物理チャレンジを行っている。これは、国際物理オリンピックの国内予選を兼ねているものである。本会も次世代人材育成の一つとして、物理チャレンジ事業にも協力した。

Jr.セッションを一層充実させ、特に幅広い中高生の参加を促した。その目的のためにも、中高の理科教員への会費減額などのサービスの検討を続けている。あわせて、サポーターの制度を設け物理志望者、物理ファンの拡大を図る。特にJr.セッションの参加者は、大学卒業時まで無料でサポーターとしてのサービスを受けられるなどの制度の検討を続けている。

委員会活動の現状を鑑み、JABEE委員会の廃止および当該委員会職務の物理教育委員会への委譲を決定した。

男女共同参画推進活動として、1) 国内では男女共同参画学協会連絡会、海外ではAAPSやGenderSummit6において外部との交流を継続的に進めた。これらの一部は、日物産物連絡会を介して、応用物理学と連携して行った。2) 物理教育委員会やJr.セッション委員会など他の委員会とも連携して次世代育成を行った。3) 年次大会におけるシンポジウムを開催して、男女共同参画のみではなく、キャリアパス全体について議論した。

キャリア支援センターと物理人材活用委員会の今後の体制を検討するため、キャリア支援センターの運営委員を71期から8名に増やした。

9) 社会への物理学情報の発信力強化と学会活動の広報

科学セミナー、公開講座、Jr.セッションなど、これまで行ってきた社会への物理学情報の発信力強化を進めた。

また、会誌への記事掲載、イベントへの参加などを通して、社会に質の高い物理学情報提供に努めた。

これらの目的を達するためにHPの抜本的な整備の検討を行った。また、海外の物理研究者向けに英文HPを運用する準備を始めた。

毎年ノーベル物理学賞受賞者発表後に、本会ホームページを訪れる多数の一般市民がいることから、発表直後から理事会で組織的な対応を行い、できるだけ短時間（1日以内）でホームページに学会として分かり易い受賞者と受賞内容を紹介する体制を構築した。これは受賞者の国籍によらず毎年行う予定であるが、2015年は本会の梶田隆章会員が受賞者のお一人であったので情報の伝達が極めて迅速に行われ、同時に本会

として同会員に祝意を伝達した。

10) 他学協会・団体との連携の強化

日本学術会議は「分野別の教育課程編成上の参照基準」を策定することを提案し、2010年11月より参照基準策定作業を始めた。物理学分野においては、日本物理学会が素案の策定を依頼され、本会物理教育委員会が2012年の第68期から検討を始めた。その原案は、2015年6月に理事会の承認を経て、日本学術会議へ提出した。

2015年は国際光年（IYL2015）として国内外で多くのイベントが実施されたが、本会は国内の主催団体（日本学術会議総合工学委員会ICO分科会）に協賛するパートナー（プラチナ）として参画し、本会大会でのシンポジウムや一般市民向けの科学セミナーや公開講座に「光と物理」に関連するテーマを掲げた。また本学会誌に、関連するシリーズ記事を掲載した。

4月から再発足した日本学術会議「放射線・放射能測定データ・アーカイブズ・ワーキンググループ」に本会として参加し（委員：担当理事、会長・副会長：オブザーバー）、具体的な活動計画を策定中である。

4月に設置された内閣府「オープンサイエンス推進に関するフォローアップ検討会」に会長が委員として参加し、オープンジャーナルのみならずオープンデータに関する議論を行っている。

11) 国際的活動体制の強化

8月にソウル（韓国）で開催されたAAPS Women in PhysicsワークショップとGender Summit 6に、会長と男女共同参画推進委員（担当理事を含む3名）が参加し、本会の活動を紹介するとともに、各国の関係者と特に今後の活動について意見交換した。

協定を結んでいる学協会との関係強化の努力を継続した。本年度は、ポーランド物理学会からの招待により第43回ポーランド物理学会および第10回Informal Physical Societies Exchange Conference (IPSEC X)に参加し、ヨーロッパ物理学会およびその構成学会（10学協会が参加）との交流を行った。

本会の国際化を図るために不可欠な定款・細則・内規の英訳に取り掛かった。これは2016年4月から稼働予定の会員システムでの外国人会員の入会手続きと連動するものでもあり、同日日からホームページに掲載予定で作業は進行している。

12) その他

・2014年ノーベル物理学賞受賞者の非会員（2名）と2014年文化功勞者（会員1名）を、名誉会員として第95回定時総会（3月31日）に推挙し承認された。

・2016年は、本会設立（1946年）から70周年（1877年創立からは139年）の節目に当たることから、比較的小規模な記念事業を行うことになった。そのため、学会誌の特集シリーズ記事掲載、年次大会での学会展示コーナー設置などの企画提案が行われ準備を始めた。

2. 各事業詳細資料

2-1. 学術講演会の開催・後援等

2-1-1-1. 第70回年次大会

開催領域：素粒子論領域、素粒子実験領域、理論核物理領域、実験核物理領域、宇宙線・宇宙物理領域、ビーム物理領域、領域1～13、物理と社会

会期：3月21日（土・祝）～24日（火）

会場：早稲田大学早稲田キャンパス（東京都新宿区西早稲田1-6-1）

講演数：4,047件

内訳：原著講演3,799件、シンポジウム講演177件、招待・企画・チュートリアル講演24件、日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演45件、総合講演2件）

参加登録者数：6,094名

内訳 会 員：5,775名（一般5,331名、学生2,244名）

非会員：319名（一般112名、学生207名）

託児室：8家族10名（延べ19名）

2-1-1-2. 秋季大会

【素粒子・素粒子実験・核物理・宇宙線・宇宙物理領域関係大会】

会期：9月25日（金）～28日（月）

会場：大阪市立大学杉本キャンパス（大阪市住吉区杉本3-3-138）

講演数：912件

内訳：原著講演848件、シンポジウム講演43件、招待・企画講演20件

参加登録者数：1,358名

内訳：会 員：1,300名（一般831名、学生469名）

非会員：58名（一般12名、学生46名）

託児室：申込なし

南部陽一郎先生追悼特別セッション

日時：9月26日（土）12:50～13:20

会場：基礎教育実験棟1F階段教室

座長：柴田利明（副会長）

講演題目：南部先生の思い出 30分

講演者：江口 徹 (立教大)

参加者数：約400名

*理事会において本セッションの開催を急遽決定し、実行委員会の協力のもと実施。

【物性領域関係大会】

会期：9月16日(水)～19日(土)

会場：関西大学千里山キャンパス(吹田市山手町3-3-35)

講演数：2,701件

内訳：原著講演2,581件, シンポジウム講演103件, 招待・企画・チュートリアル講演17件

参加登録者数：3,858名

内訳：会員：3,666名(一般2,189名, 学生・院生1,477名)

非会員：192名(一般37名, 学生・院生155名)

託児室：3家族3名(延べ6名)

2-1-2. 各種国内会議

154件の国内会議の共催・協賛・後援を行なった。

2-2. 国際交流・協力活動

2-2-1. 国際会議の共催

会議名：第21回二次元電子系国際会議第17回半導体超構造国際会議合同国際会議(EP2DS-21/MSS-17)

主催：第21回二次元電子系国際会議/第17回半導体超構造国際会議合同実行委員会

会期：2015年7月26日(日)～7月31日(金)

場所：仙台国際センター

本会代表運営委員：勝本信吾(東大物性研)

参加者数：510名

会議名：第25回相対論的原子核原子核衝突国際会議(QM2015)

主催：QM2015組織委員会

会期：2015年9月27日(日)～10月3日(土)

場所：神戸ファッションマート

本会代表運営委員：初田哲男(理研)

参加者数：650名

なお、上記2件の国際会議以外に28件の国際会議の協賛・後援等を行なった。

2-2-2. その他の国際活動

• AAPPS(アジア・太平洋物理学連合)メンバー学会としての活動

・ AAPPS委員会の開催(日本物理学会・応用物理学会合同)

・ AAPPS理事会への委員派遣

・ AAPPS Bulletin編集委員会への委員派遣

・ AAPPS Bulletin編集委員会会議のWeb会議開催の協力

・ 会誌・HPへのAAPPS活動の掲載

• APS March Meeting 2016 ブース出展(3月)

• 海外からの投稿者へのJPSJ掲載料金援助(一部)

2-3. 物理学に関する普及・啓発活動

2-3-1. 科学セミナー

企画名：物理学と光 ～光の基礎と最先端研究～

会期：8月20日(木), 21日(金)

会場：東京大学駒場キャンパス数理学研究科棟大講義室

演題：光とは何か?～光の物理学～ 外9件

聴講料：無料

聴講者数：190名(8/20), 174名(8/21)

※講師より許可された講演はビデオ撮影し、本会ホームページ上で講演動画を公開した。

2-3-2. 公開講座

【理事会企画】

企画名：結晶と粒子線回折—ブラッグ反射100年

会期：11月7日(土)

会場：東京大学本郷キャンパス小柴ホール

演題：生体高分子のX線結晶構造解析—分子構造から生体機能へ—外3件

聴講料：無料

聴講者数：169名

※講師より許可された講演はビデオ撮影し、本会ホームページ上で講演動画を公開した。

2-3-3. 第11回Jr.セッション(主に高校生による講演発表会)

期日：3月22日(日)

場所：早稲田大学早稲田キャンパス 国際会議場 井深大記念ホールおよび会議室(第70回年次大会年次大会会場)

講演発表数：77件

内訳(口頭発表：10件, ポスター発表：67件)

2-3-4-1. 年次大会市民向け講演会

第70回年次大会(早稲田大学早稲田キャンパス)

期日：3月21日(土・祝) 14:00～16:30

場所：早稲田大学早稲田キャンパス国際会議場井深大記念ホール

入場料：無料

プログラム：

一般相対性理論100年・国際光年2015「宇宙と時間」

1. 「アインシュタインと宇宙論」佐藤勝彦(大学共同利用機関法人自然科学研究機構)

2. 「日時計から光格子時計まで」安田正美(独立行政法人産業技術総合研究所)

参加者数：約700名

2-3-4-2. 秋季大会市民向け講演会

秋季大会(大阪市立大学)

期日：9月23日(水, 祝) 15:30～18:30

場所：大阪国際会議場12階特別会議場

プログラム：市民科学講演会

佐川宏行(東京大学宇宙線研究所)「宇宙線：宇宙からやってくるミクロなメッセンジャー」

飯嶋 徹(名古屋大学大学院理学研究科)「素粒子：スーパーBファクトリー加速器で挑む新しい素粒子世界」

藤川和男(東京大学名誉教授)「ヒッグス粒子：真空とは何か、質量はどう生まれたのか」

参加者数：約100名

秋季大会(関西大学)

期日：9月20日(日) 13:30～15:45

場所：関西大学千里山キャンパス100周年記念会館

プログラム：

石川正司(関西大学化学生命工学部)「蓄電技術によるエネルギー高効率利用社会の幕開け」

吹田 浩(関西大学文学部)「古代エジプト文明の技術」

参加者数：約100名

2-3-5. その他

• 物理教育シンポジウム

企画名：なぜ物理学を学ぶのか —参照基準の策定に向けて—

会期：3月15日(日)

会場：東京大学本郷キャンパス 小柴ホール

演題：物理系人材の特色とそのキャリアパス 外3件

聴講料：無料

聴講者数：68名

• 第70回年次大会理事会企画シンポジウム(早稲田大学早稲田キャンパス)

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

会期：3月21日(土)

講演数：6件

• 第20回日本物理学会論文賞

5編の論文を表彰した。

授賞論文の代表者にはケース入り賞状と賞状の電子ファイルを贈呈した。

• 第9回日本物理学会若手奨励賞

46名の受賞者を決めた。

授賞者にはケース入り賞状を贈呈した。

• 自然の不思議—物理教室

共同主催：日本物理教育学会・国立科学博物館

開講日(計6回)：6月6日(土), 6月27日(土), 7月18日(土), 8月1日(土), 8月15日(土), 9月6日(日)

講座名：ストロークレーン! 外5回

場所：国立科学博物館(上野本館地球館3階実験実習室)

対象：小学5年生～中学3年生

※各回の教室の様子や実験の一部を、写真付きで本会ホームページに公開した。

• 世田谷区中学生講座(才能の芽を育てる体験学習：サイエンス・ドリーム)

主催：世田谷区教育委員会(当会は協賛)

開講日(計3回)：10月17日(土), 11月7日(土), 12月5日(土)

講座名：音を閉じ込めてみよう! 外2回

場所：国立大学法人電気通信大学

対象：世田谷区立中学校の生徒

※当会物理教育委員会・委員が講師を務めた。

※各回の教室の様子や実験の一部を、写真付きで本会ホームページに公開した。

• 基礎実験講習会(高校物理の授業に役立つ基本実験講習会：東京会場)

主催：物理教育研究会 (APEJ)、日本物理学会
共催：日本物理教育学会、応用物理学会
後援：学術図書出版社
会期：7月19日(日)～7月20日(月・祝)
会場：麻布高等学校
実験項目：力学的エネルギーの保存 外9項目
対象：現職の物理(理科)教員、物理(理科)教員を志望する学生他
※本会支部(北海道支部、東北支部、新潟支部、大阪支部、九州支部)
においても日本物理教育学会、物理教育研究会(APEJ)他との共催
等により札幌、仙台、新潟、大阪、福岡で開催した。

2-4. 本会の目的達成のために重要な活動

2-4-1. キャリア支援センター

キャリア支援センターのこれまでの活動を報告すると共に物理系人材の可能性について述べる講演を、日本物理学会物理教育委員会が主催した第5回物理教育シンポジウム、および日本物理学会第70回年次大会での物理と社会シンポジウムで行った。

センター主催のキャリア支援イベントとして下記を行った。

- 私立中高向け「理系教員選考会」
1月11日(日) お茶の水女子大学理学部
1月25日(日) 神戸大学百年記念館
教員志望の物理系人材のために、2014年春からの採用をめざして私立の中高の担当者と理系人材が直接面談する機会を設けた。参加者はお茶の水女子大学で約180名、神戸大学で約80名であった。
例年11月ごろに行っていた「理工系(物理関連分野)人材のためのキャリアフォーラム」については、就職協定の変化を考慮して2016年1月(東京)と2月(大阪)に開催することとした。
2016年1月に「ビッグデータやデータサイエンスに関わる学生/研究者、企業の異分野異業種交流会」を物理学会共催で実施するので、その準備をした。
これらのイベント以外には、Webやメールを通じたキャリア支援関連情報の広報活動を行った。

2-4-2. 協力活動

- 「日本技術者教育認定機構(JABEE)」関係
 - ・JABEE物理・応用物理学関連分野における2015年度認定継続審査を実施
 - ・JABEE理事、認定・審査調整委員会、審査事務連絡会、拡大運営委員会の各委員等を派遣
- 男女共同参画関係
 - ・学会誌の「男女共同参画推進委員会だより」で広報活動を実施
 - ・シンポジウム「物理から広がる多様なキャリアパス」(日本物理学会年次大会)開催
 - ・女子中高生夏の学校2015の企画、運営、および参加
 - ・第13回男女共同参画学協会連絡運営委員会とシンポジウム参加
 - ・日物・応物男女共同参画連絡会覚え書き締結
 - ・AAPPS-WIP workshop2015, Gender summit6(ソウル)4名参加
- 受賞候補等推薦委員会関係
 - ・平成28年度文部科学大臣表彰科学技術賞、第12回(平成27年度)日本学術振興会賞、第6回(平成27年度)日本学術振興会育志賞、2015年度山田科学振興財団研究援助、第42回(2014年度)内藤記念講演助成金(春季)、第32回(2015年度)井上学術賞、第17回サー・マーティン・ウッド賞、平成27年度島津賞、第13回(平成28年度)本多フロンティア賞、第28回(平成27年度)松尾学術研究助成、第56回(平成27年度)東レ科学技術研究助成、第21回(2016年)日本物理学会論文賞の各賞・助成に候補者・候補論文を推薦
- その他
 - ・特定非営利活動法人物理オリンピック日本委員会理事派遣
 - ・世界工学会議WECC2015実行委員会への委員派遣

2-4-3. 物理系学術誌刊行センター(PCPAP)

応用物理学会と協同して運営を行った。

2-4-4. 支部活動

- 2015年秋季大会関西大学会場にて支部長懇談会(9月18日)を、本会事務局会議室にて支部長会議(第1回：7月29日/第2回：11月30日)を開催した。
- 支部例会、支部特別企画等
次のとおり、各支部において適宜開催した(支部主催事業等、主な事業を記載)。

【北海道支部】

- 役員会
…会期：12月17日(木)、会場：北海道大学
- 北海道支部講演会(計7回)
…会期：2月20日(金)/4月1日(水)/7月3日(金)/8月5日(水)/9月2日(水)/9月8日(火)/10月13日(火)、会場：北海道大学/室

蘭工業大学

- 高校物理の授業に役立つ基本実験講習会in北海道
…会期：1月7日(水)、会場：札幌北高等学校、主催：日本物理教育学会北海道支部/日本物理学会北海道支部

【東北支部】

- 役員会
…会期：8月27日(木)、会場：東北大学
- 出前授業(計12回)
…会期：2月12日(木)/6月12日(金)/9月4日(金)/9月18日(金)/10月20日(火)/10月20日(火)/10月23日(金)/11月5日(木)/11月6日(金)/11月10日(火)/11月13日(金)/12月10日(木)、会場：宮城県仙台第三高等学校/福島県立安積高等学校/岩手県立福岡高等学校/宮城県石巻高等学校/宮城県角田高等学校/青森県立青森高等学校/宮城県古川高等学校/仙台市立青陵中等教育学校/茨城県立水戸第一高等学校/宮城県仙台第二高等学校
- 高校物理の授業に役立つ基本実験講習会in仙台
…会期：12月12日(土)、会場：福島県立安積高等学校、主催：日本物理教育学会東北支部、共催：日本物理学会東北支部/物理教育研究会(APEJ)/福島県高等学校教育研究会理科部会県南支部、後援：学術図書出版社

【新潟支部】

- 役員会
…会期：12月5日(土)、会場：新潟大学
- 新潟支部例会
…会期：12月5日(土)、会場：新潟大学
- 高校物理の授業に役立つ基本実験講習会
…会期：11月22日(日)、会場：新潟大学、主催：物理教育研究会(APEJ)/日本物理学会新潟支部/新潟大学/新しい理科教育を研究する会、後援：日本物理教育学会/学術図書出版社/新潟県高等学校教育研究会理科部会/新潟県理化学協会

【北陸支部】

- 役員会(計2回)
…会期：8月1日(土)/11月28日(土)、会場：福井大学/金沢大学
- 支部総会
…会期：11月28日(土)、会場：金沢大学
- 北陸支部定例学術講演会
…会期：11月28日(土)、会場：金沢大学、主催：日本物理学会北陸支部、協力：金沢大学
- 特別講演会(計9回)
…会期：1月27日(火)/2月3日(火)/4月10日(金)/6月22日(月)/7月2日(木)/11月16日(月)/12月8日(火)/12月9日(水)/12月25日(金)、会場：富山大/石川四高記念館/福井大/金沢大学/北陸先端科学技術大学院大学

【名古屋支部】

- 中部表面科学シンポジウム
…テーマ：「有機材料表面研究の最近の動向」、会期：1月31日(土)、会場：名城大学、主催：日本表面科学会、後援：応用物理学会東海支部/日本真空学会東海支部/日本物理学会名古屋支部/応用物理学会薄膜・表面物理分科会/応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会

【京都支部】

- 役員会
…会期：7月10日(金)、会場：京都大学
- 親子理科実験教室(計12回)
…会期：4月19日(日)/5月17日(日)/6月14日(日)/5月31日(日)/6月21日(日)/7月26日(日)/8月8日(土)/8月9日(日)/8月22日(土)/8月23日(日)/11月1日(日)/12月6日(日)、会場：京都大学、主催：知の人材ネットワーク・あいんしゅたいん/日本物理学会京都支部/京都大学理学部
- シンポジウム 科学としての科学教育実践編2015
…テーマ：「時をかける科学者…親と子がともに学ぶ」、会期：12月23日(水)、会場：京都大学、主催：知の人材ネットワーク・あいんしゅたいん/日本物理学会京都支部/京都大学理学部
- Wolfgang Weiss博士講演会
…テーマ：「欧米での低線量放射線影響の国家プロジェクト動向について」、会期：5月28日(木)、会場：京都大学、主催：日本学術振興会研究開発専門委員会・先導的研究開発委員会「放射線の影響とクライシスコミュニケーション」/日本物理学会大阪支部/日本物理学会京都支部/知の人材ネットワーク・あいんしゅたいん
- サロン・ド・科学の探索(第5回)
…テーマ：「パグウォッシュ会議長崎開催によせて」、会期：2月15日(日)、会場：NPO法人あいんしゅたいん事務所、主催：基礎科学

研究所 (NPO法人知的人材ネットワーク・あいんしゅたいん附置機関), 共催: 日本物理学会京都支部

・科学普及員研修会 (2015年第2回)

…会期: 6月27日(土), 会場: NPO法人あいんしゅたいん事務所, 主催: 知的人材ネットワーク・あいんしゅたいん/共催: 日本物理学会京都支部

【大阪支部】

・大阪支部懇談会

…会期: 6月17日(日), 会場: 大阪大学

・支部講演会 (計3回)

…会期: 3月30日(月)/10月20日(金)/11月20日(月), 会場: 大阪府立大学, 大阪市立大学, 理化学研究所

・「青少年のための科学の祭典」大阪大会 (サイエンスフェスタ2014)

…会期: 8月23日(土)・24日(日), 会場: ハービスホール, 主催: 「青少年のための科学の祭典」大阪大会実行委員会/日本科学技術振興財団・科学技術館/日本物理教育学会近畿支部/大阪市教育委員会/大阪市立科学館/関西サイエンス・フォーラム/読売新聞社/大阪科学振興協会

・第31回湯川記念講演会

…会期: 10月11日(日), 場所: 大阪大学, 演題: 「宙の夜明け - フェーストスターと超巨大ブラックホールの謎」外1件, 主催: 大阪大学総合学術博物館湯川記念室, 共催: 日本物理学会大阪支部, 後援: 日本物理教育学会近畿支部

・Wolfgang Weiss博士講演会

…詳細は京都支部と同内容

・大阪支部公開シンポジウム

…テーマ: 「光と物理の過去・現在・未来: 国際光年」, 会期: 12月20日(日), 会場: 大阪大学, 主催: 日本物理学会大阪支部, 後援: 兵庫県教育委員会/大阪府教育委員会/和歌山県教育委員会/大阪市教育委員会

・高大連携物理教育セミナー

…テーマ: 「SEEDSプログラム発足記念「高大接続とAO入試」」, 会期: 8月3日(月), 会場: 大阪大学, 主催: 大阪大学理学研究科大阪大学基礎工学研究科, 共催: 日本物理教育学会近畿支部/日本物理学会大阪支部, 後援: 兵庫県教育委員会/京都府教育委員会, 協賛: 大阪府高等学校理化教育研究会

・ふしぎと遊ぼう! 青少年のための科学の祭典2015大阪大会 サイエンスフェスタ

…テーマ: 「科学・技術と私たちの暮らし〜防災・安全・環境・エネルギー〜」, 会期: 8月22日(土)~23日(日), 会場: 梅田・ハービスホール, 主催: 「青少年のための科学の祭典」大阪大会実行委員会/日本科学技術振興財団・科学技術館/日本物理教育学会近畿支部/日本物理学会大阪支部/大阪市教育委員会/大阪市立科学館/関西サイエンス・フォーラム/読売新聞社/大阪科学振興協会, 後援: 文部科学省他

・高校物理の授業に役立つ基本実験講習会

…会期: 12月20日(日), 会場: 兵庫県立御影高等学校, 主催: 日本物理教育学会近畿支部/日本物理学会大阪支部

【中国支部】

・役員会 (メール会議)

…会期: 3月16日(月)~3月17日(火)

・応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会

…日時: 8月1日(土), 会場: 徳島大学, 主催: 応用物理学会中国四国支部/日本物理学会中国支部・四国支部/日本物理教育学会中国四国支部/日本光学会中国四国地区, 共催: 徳島大学, 助成: 徳島県観光協会

・第19回物理教育研究会

…日時: 2月21日(土), 会場: 広島県情報プラザ, 主催: 広島県物理教育研究推進会, 後援: 広島県高等学校教育研究会理科部会物化部/日本理科教育学会中国支部/日本物理学会中国支部/日本物理教育学会中国四国支部/公益社団法人 日本理科教育振興協会

・サイエンスワールド2015

…日時: 10月18日(日), 会場: 山口大学, 主催: 山口大学理学部, 協力: 山口大学教育学部理科講座, 後援: 情報処理学会中国支部事務局/電子情報通信学会中国支部/中国四国植物学会/日本物理学会中国支部 他

【四国支部】

・役員会

…会期: 8月1日(土), 会場: 徳島大学

・応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会

…詳細は中国支部と同内容

・学術講演会

…会期: 12月18日(金), 会場: 愛媛大学

・第23回かがわけん科学体験フェスティバル

…会期: 11月15日(土), 会場: 香川大学, 主催: 科学体験フェスティバル実行委員会/香川大学/一般財団法人四国産業・技術振興センター, 協賛: 日本物理学会四国支部 他

・サイエンスカフェ (ノーベル物理学賞2015記念)

…会期: 11月23日(月), 会場: 徳島大学, 主催: 日本物理学会四国支部, 後援: 徳島新聞社/四国放送/NHK徳島放送局

【九州支部】

・役員会 (計2回)

…会期: 4月10日(金)/12月5日(土), 会場: 九州大学/九州工業大学

・支部例会

…会期: 12月5日(土), 会場: 九州工業大学

・特別講演会

…会期: 12月5日(土), 会場: 九州工業大学, 演題: 「より高い転移温度をもつ新超伝導体を求めて」

・高校物理の授業に役立つ基本実験講習会 in 福岡

…会期: 11月23日(月・祝), 会場: 西南学院高等学校, 主催: 福岡県高等学校物理部会/日本物理学会九州支部/日本物理教育学会九州支部, 共催: 物理教育研究会(APEJ)/科学教育ネットワーク in 福岡/NPO法人理科カリキュラムを考える会

2-4-5. 情報・資料公開

・図書雑誌および物理学史資料の供覧

必要に応じて実施した。

・会誌の寄贈交換: 国内, 国外

2-5. 刊行物 (実施事業を含む)

2-5-1. 日本物理学会誌

【公益目的支出計画実施事業】

第70巻第1号~12号を刊行した。A4冊子版, 月刊,

	総数	月平均	月予定数
ページ数	1,210	101	100
刊行部数	202,550	16,879	17,000

【特別購読数】国内: 232 国外: 3

2-5-2. JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN (JPSJ)

Vol. 84 No. 1~No. 12を刊行した。A4冊子及び電子版。

	総数	月平均	月予定数
ページ数	2,637	220	266
冊子刊行部数	6,080	506	500

【掲載論文】

Letter 81, Full Paper 278, Short Note 20, Addenda 1, Comments & Reply 0, Erratum 3, Invited Paper 3, Special Topics 16

【電子版の2015年1月-12月論文総ダウンロード数 323,335】

【電子版ダウンロード, 国内外の比率】国内40%, 海外60%

【特別購読数】国内 175 (オンライン版 58, 冊子版117)

国外 375 (オンライン版 194, 冊子版 181)

2-5-3. PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS (PTEP)

Volume 2015 Issues 1~12を電子版で発行した。

掲載論文数: Paper 155 Letter 19 Errata 6

特集論文・招待論文 13

【電子版の2015年1月-12月論文総ダウンロード数】 58,950

2-5-4. JPS Conference Proceedings

Vol. 4 Proceedings of the International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2012" (nanoPHYS'12)

e-ISBN: 978-4-89027-107-8, 37論文, CD-ROM版作成

Vol. 5 Proceedings of Computational Science Workshop 2014 (CSW2014)

e-ISBN: 978-4-89027-108-5, 28論文

Vol. 6 Proceedings of the Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014)

e-ISBN: 978-4-89027-110-8, 229論文

Vol. 7 Proceedings of CST-MISC Joint Symposium on Particle Physics—from Spacetime Dynamics to Phenomenology—

e-ISBN: 978-4-89027-111-5, 13論文

Vol. 8 Proceedings of the 2nd International Symposium on Science at J-PARC—Unlocking the Mysteries of Life, Matter and the Universe—

e-ISBN: 978-4-89027-112-2, 215論文

【電子版の2015年1月-12月論文総ダウンロード数 35,059】

【電子版ダウンロード、国内外の比率】国内33%、海外67%

2-5-5. 講演概要集

第70回年次大会(第70巻第1号) (全領域掲載)

Web版 2015年3月5日から1年間公開

DVD版 2500部

※ほかに年次大会のプログラムとして3月増刊号158ページ(本文)17,850部を刊行した。

2015年秋季大会(第70巻第2号) (全領域掲載)

Web版 2015年9月1日から1年間公開

DVD版 2000部

※ほかに秋季大会のプログラムとして8月増刊号144ページ(本文)17,000部を刊行した。

2-5-6. 大学の物理教育(B5判)

第21巻1号(3月), 2号(7月), 3号(11月)を刊行

各号の刊行部数1, 2, 3号1,600部

年間総ページ数164ページ

(附属明細1) 処務詳細資料

総会・役員会等に関する事項

3-1-1. 総会(開催日)

第95回定時総会(3月31日)

3-1-2. 監事会(開催日)

2月14日

3-1-3. 理事会等(開催日)

• 理事会

1月10日 2月14日 3月13日 3月31日 4月11日 5月16日
6月13日 7月11日 8月8日 9月12日 10月10日 11月14日
12月12日

• 会計理事会議

2月9日 4月20日 11月2日

• 予算編成ワーキンググループ会議

8月10日 11月2日

• JPSJ専任編集委員選考委員会

9月12日

• 会員システム選定委員会

(2014年12月22日) 1月10日 1月20日 1月26日 2月6日

• 会員システムPT会議

2月25日 (他, 進捗状況報告会等)

• 会員・会友ワーキンググループ会議

4月11日 11月14日

• 2016年科学セミナーワーキンググループ会議

10月28日

• 学会史展示TF会議

11月10日

3-1-4. 委員会等(開催日)

• 刊行委員会

2月25日 4月28日 6月11日 8月26日 10月20日

• 会誌編集委員会

1月24日 2月21日 3月28日 4月18日 5月23日 6月20日

7月18日 8月22日 10月3日 10月24日 11月21日 12月19日

• 新著紹介小委員会

1月28日 3月18日 5月20日 7月22日 9月2日 11月4日

• 「物理学70の不思議」班長団

8月1日

• 電子化・契約検討ワーキンググループ会議(会誌)

1月20日 2月17日 3月9日 3月19日 5月12日 9月15日

• JPSJ編集委員会

1月16日 2月10日 3月16日 4月15日 5月13日 6月10日

7月15日 8月12日 9月9日 10月14日 11月17日 12月14日

• PTEP編集委員会

2月24日 5月1日 6月30日 8月21日 11月20日

• PTEP企画委員会

7月14日

• 受賞候補等推薦委員会

2月7日 7月11日 9月12日

• 物理教育委員会

2月13日 3月15日 5月8日 6月12日 10月9日 12月11日

• 大学の物理教育編集委員会

1月11日 2月14日 2月28日 5月16日 6月13日 6月27日

8月24日 9月12日 10月10日 10月24日

• 男女共同参画推進委員会

2月28日 6月2日 9月14日

• 領域委員会

5月21日 11月17日

• 事務局運営委員会

2月28日 5月16日 8月5日 10月10日 12月2日

(その他メール審議1回)

• AAPPS委員会

7月14日 12月15日

• 選挙管理委員会

3月9日 7月21日

• 物理学史資料委員会

3月7日 7月25日 12月5日

• Jr.セッション委員会

2月7日 8月7日

• 第20回日本物理学会論文賞選考委員会

2月12日

• 広報委員会・HP運営小委員会合同委員会

5月26日, 10月27日

• HP運営小委員会

2月14日

• 研究費配分に関する教育研究環境検討委員会

3月23日

• JABEE委員会

12月11日

契約・入札・他に関する事項

• 主な新規契約に関する事項

契約月日	相手方	契約の種類等	期間等
2015/7/21	応用物理学会	業務委託	2015/1/1~2015/12/31
2015/2/9	(有)ミューリサーチ	JPSJの掲載予定論文原稿の英文校閲業務	2015/4/1~2017/3/31 (納入期間)
2015/3/13 2015/4/13	(株)マクスラシステムズ	コンサルティング業務請負契約等	2015/3/9~2015/11/30 2015/4/3~2016/3/31
2015/4/1	(株)講談社	デジタルの利用および出版権設定契約	2015/4/1~2020/3/31
2015/4/13	(株)ノブワークス・アヘッド	システム開発委託契約等	2015/4/13~2016/3/31
2015/5/28	トムソン・ロイター・ブローフェッショナル(株)	Citation Notice Service	2015/6~2016/3 配信分
2015/5/13	China Academic Journals (CD Edition) Electronic Publishing House Co., Ltd	A&I Metadata Feed License Agreement	2015/5/13~2015/12/31
2015/9/15	(株)国際文献社	日本物理学会誌の組版・印刷・製本・電子版製作	2016年1月号~2020年12月号までの出版分
2015/9/30	国立研究開発法人 科学技術振興機構	オンライン学術用語集(物理学編)用語データの科学技術情報サービス等への利用	2015/10/1~2016/3/31

• 入札に関する事項

• 日本物理学会誌の組版・印刷・製本・電子版製作
公示日2015年5月15日 説明会2015年5月28日 応札締切日2015年6月19日

• 会員システムの構築 一式 (公示日 2014年11月11日 説明会2014年11月19日)
応札締切日 2015年1月9日

• 許可, 認可および承認に関する事項(なし)

• その他の事項

• 第71~72期代議員選挙(信任投票)を行った。

(附属明細2) 会員の異動状況

会員種別	会 員 数		増 減
	2014年12月31日 現在	2015年12月31日 現在	
正会員	16,168 ¹⁾ (内：大学院生数 2,535)	16,066 ²⁾ (内：大学院生数 2,590)	- 102 (内大学院生数 + 55)
学部学生会員	195	175	- 20
賛助会員	94 (214口)	91 (209口)	- 3 (- 5口)
計	16,457	16,332	- 125

¹⁾ うち名誉会員 17, シニア会員 677.

²⁾ うち名誉会員 19, シニア会員 637.

(附属明細3) 事務局の現況 (2015年12月31日現在)

職員15名は事務局と物理学系学術誌刊行センターに分かれており、派遣職員等を含む人員配置の内訳は以下の通りである。

事務局	職員13名 アルバイト1名 派遣職員3名
刊行センター	職員2名 派遣職員2名 JPSJ専任編集長1名 JPSJ専任編集委員1名 PTEP専任編集長1名

一般社団法人 日本物理学会
2015年事業報告附属明細書
(2015年1月1日～12月31日)

・記載すべき事項 特になし

(第96回定時総会報告事項2)

2. 公益目的支出計画実施報告書

【2015年度(2015/1/1から2015/12/31まで)の概要】

1. 公益目的財産額	789,332,713 円
2. 当該事業年度の公益目的収支差額 ((1) + (2) - (3))	249,336,948 円
(1) 前事業年度末日の公益目的収支差額	192,087,781 円
(2) 当該事業年度の公益目的支出の額	78,326,235 円
(3) 当該事業年度の実施事業収入の額	21,077,068 円
3. 当該事業年度末日の公益目的財産残額	539,995,765 円
4. 2の欄に記載した額が計画に記載した見込み額と異なる場合、その概要及び理由	
<p>事業初年度は9月～12月の4ヶ月間のみであったため、当初提出した計画の記載額と異なる額となった。</p> <p>また、2012事業年度以後の各事業年度は、月締めごとの会員数の減少による会誌印刷部数の減少等により、印刷費の減少等があったため、計画よりやや収支差額が小さくなった。</p> <p>また、前年度より会誌印刷業者との契約更改により印刷費が減少したが、広告収入の減少や今後の事業展開により収支バランスが変化する可能性があり、現状では収支差額の恒常的な低減は見込んでいない。長期的に見て、公益目的支出計画の実施期間に影響はないと考える。</p>	

【公益目的支出計画の状況】

公益目的支出計画の完了予定事業年度の末日	(1) 計画上の完了見込み	平成35年12月31日
	(2) (1) より早まる見込みの場合	

	前事業年度		当該事業年度		翌事業年度
	計画	実績	計画	実績	計画
公益目的財産額	789,332,713 円				
公益目的収支差額	280,015,424 円	192,087,781 円	350,019,280 円	249,336,948 円	420,023,136 円
公益目的支出の額	94,035,856 円	75,909,125 円	94,035,856 円	78,326,235 円	94,035,856 円
実施事業収入の額	24,032,000 円	24,511,060 円	24,032,000 円	21,077,068 円	24,032,000 円
公益目的財産残額	509,317,289 円	597,244,932 円	439,313,433 円	539,995,765 円	369,309,577 円

【実施事業(継続事業)の状況等】

事業番号	事業の内容
継1	日本物理学会誌の編集・刊行

(1) 計画記載事項

事業の概要	
<p>〈事業内容〉</p> <p>本事業では、会誌(日本物理学会誌)を毎月刊行し、約18,000人の会員(賛助会員を含む)および会員外の希望者に配布する。</p> <p>会誌には、物理学に関する最新の動向・話題についての解説・展望、歴史的話題、会員からの提案・意見、理事会からの周知事項、外部からの求人、助成金、賞の公募などの掲載依頼情報などが掲載され、会員と学会を結び、社会に対しては物理学と学会の最新の情報を発信・周知する役割を果たす。</p> <p>会誌の編集に当たるのは、理事を委員長とする編集委員会であり、50名以上の会員がボランティアで、毎月の編集会議を経て編集作業に当たる。編集結果を受けて会誌担当職員2名が刊行に向けた作業を行い、外部の企業に委託する印刷・製本の工程を経て発送される。</p> <p>〈事業実施のための財源〉</p> <p>会誌広告収入等</p> <p>〈外部委託業務〉</p> <p>印刷・製本・発送</p>	
(1) 当該事業に係る公益目的支出の見込額	94,035,856 円
(2) 当該事業に係る実施事業収入の見込額	24,032,000 円

(2) 当該事業年度の実施状況

事業の実施状況について	
<p>〈事業実施状況〉</p> <p>当該事業年度において、会誌（日本物理学会誌）を毎月刊行し、約18,000人の会員（賛助会員を含む）および会員外の希望者に配布した。会誌には、物理学に関する最新の動向・話題についての解説・展望、歴史的話題、会員からの提案・意見、理事会からの周知事項、外部からの求人、助成金、賞の公募などの掲載依頼情報などが掲載され、会員と学会を結び、社会に対しては物理学と学会の最新の情報を発信・周知する役割を果たした。</p> <p>会誌の編集には理事を委員長とする編集委員会があたり、毎月の編集会議を経て、50名以上の会員がボランティアで編集作業を行った。編集結果を受けて会誌担当職員2名が刊行に向けた作業を行い、外部の企業に委託する印刷・製本の工程を経て発送された。</p> <p>〈事業実施のための財源〉</p> <p>会誌広告収入等</p> <p>〈外部委託業務〉</p> <p>印刷・製本・発送</p>	
(1) 当該事業に係る公益目的支出の額	78,326,235円
(2) 当該事業に係る実施事業収入の額	21,077,068円
(3) ((1) - (2)) の額	57,249,167円
(4) 当該事業に係る損益計算書の費用の額	78,326,235円
(5) 当該事業に係る損益計算書の収益の額	21,077,068円
(1) 及び (2) に記載した額が計画に記載した額と異なる場合、その内容及び理由	
<p>前年度より、会誌印刷業者との契約更改により印刷費が減少したため、支出額が見込より減少しているが、広告収入の減少や今後の事業展開により収支バランスが変化する可能性があり、現状では収支差額の恒常的な低減は見込んでいない。</p> <p>長期的に見て、公益目的支出計画の実施期間に影響はないと考える。</p>	

【実施事業（継続事業）の状況等】

(3) 実施事業資産の状況等

番号	資産の名称	時価評価資産の算定日の時価	移行後に取得した場合の取得価額	前事業年度末日の帳簿価額	当該事業年度末日の帳簿価額	使用の状況
イ	什器備品	603,188円	—円	91,635円	828円	一部資産を2012年5月11日付で除却した。 一部資産を2015年8月1日付で除却した。 上記以外は計画記載どおり引き続き当該事業で使用している。
	ソフトウェア (会誌審査システム)	—円	1,638,000円	627,764円	300,164円	2011年度に購入し、引き続き当該事業で使用している。
	電話加入権等	96,420円	—円	29,108円	29,108円	一部資産を2012年5月11日付で除却した。 上記以外は計画記載どおり引き続き当該事業で使用している。
	建物付属設備	—円	894,579円	685,706円	607,379円	事務局の移転により2012年度に購入し、引き続き当該事業で使用している。
	什器備品	—円	2,036,301円	620,646円	1,162,001円	2012年度・2013年度・2015年度に新たに購入し、引き続き当該事業で使用している。
	リース資産	—円	552,862円	—円	506,790円	2015年度に新たに契約を交わし、引き続き当該事業で使用している。
	ソフトウェア	—円	270,729円	227,347円	173,201円	2014年度新たに購入し、引き続き当該事業で使用している。

【実施事業（継続事業）の状況等】

事業番号	事業の内容
継1	日本物理学会誌の編集・刊行

【実施事業収入の額の算定について】

損益計算書の科目	(1) 損益計算書の収益の額	(2) 実施事業収入の額	(2) の額の算定に当たっての考え方
会誌・資料刊行事業収益	18,178,668 円	18,178,668 円	会誌広告収入と著作権収入であり、ともに実施事業の収入とする。
雑収益	2,898,400 円	2,898,400 円	消費税の還付相当額であり、実施事業の収入とする。
計	21,077,068 円	21,077,068 円	

【公益目的支出の額の算定について】

損益計算書の科目	(1) 損益計算書の費用の額	(2) 公益目的支出の額	(2) の額の算定に当たっての考え方
その他	78,326,235 円	78,326,235 円	異なる費用科目はないため、(1) と (2) は同額である。
計	78,326,235 円	78,326,235 円	

【公益目的支出計画実施期間中の収支の見込みについて】

(1) その他の主要な事業について

変更の内容及び公益目的支出計画の実施に対する影響等
特になし

(2) 資産の取得や処分、借入について

実施内容（計画の変更内容）及び公益目的支出計画の実施に対する影響等
特になし

【引当金等の明細】

(1) 実施事業に係る引当金

番号	引当金の名称		目的		事業番号
	期首残高	当期増加額	当期減少額		
			目的使用	その他	
1	退職給付引当金		職員の退職に備えるため		継1
	13,707,983 円	748,644 円	円	円	
2	賞与引当金		職員への賞与給付に備えるため		継1
	259,582 円	281,332 円	259,582 円	円	

(2) (1) 以外の引当金のうち、算定日において計上していたもの

番号	引当金の名称		目的		期末残高
	期首残高	当期増加額	当期減少額		
			目的使用	その他	
1	退職給付引当金		職員の退職に備えるため		67,243,912 円
	63,182,246 円	4,061,666 円	円	円	
2	賞与引当金		職員への賞与給付に備えるため		1,649,044 円
	1,797,140 円	1,649,044 円	1,797,140 円	円	

(3) 「その他支出又は保金が義務付けられているもの」としたものの

なし

2016年事業計画書
(2016年1月1日～12月31日)

I. 概要

前事業年度(2015.1.1～2015.12.31)途中にスタートした会長の2年任期制(2015.3.31～2017.3.31)が2年目に入る。引き続きこの改定に伴う各種学会活動を注視し事務局の安定した運営に努める。昨年度の定時総会(2015.3.31)において決議された本2016事業年度からの会費改定が実施されるので、事務的取扱いに万全を期すとともに、会員へのサービス向上を図り、引き続き会員数の増加や各種学会活動の経費節減に努力する。また本学会活動の駆動力であるセンター・各種委員会を活性化するために、統廃合も視点に見直しを行い、適切な委員構成と規則類の整備を行う。

会員へのサービス向上のための新しい会員システムは、入札により製作者者が決定し、2015年末より試験運用が開始され、2016年4月から稼働を開始する予定である。会員個人のマイページ機能を設け、会員と学会の連絡、会員相互の情報交換などの便宜性向上を図る。

全会員に配布する学会誌を、より魅力的な記事や有用な情報を提供するように努めるとともに、科研費事業の支援を受けているPTEP(2013-2017)、JPSJ(2014-2018)の英文誌について、長期的に安定した優れた論文投稿の確保、購読の維持拡大を図り、購読状況等を的確に判断しながら次のステップに備える。

年次大会・秋季大会については、各領域間の情報交換や共同企画等が進みつつあり、また国際化を目指した具体的なプログラム編成などが行われてきたが、これらの活動を一層推進する。また講演概要集のWeb化による参加者の情報アクセス利便性向上を図るとともに、大会運営の収支バランスの健全性に注視する。

物理教育やキャリア支援等の充実を図るとともに、会員・非会員に向けた各種のアウトリーチ活動を展開し社会との一層の連携を図る。また、国内外の学協会や団体との連携を強化し、物理学会の国際的な発信力を高める。

日本物理学会は1877年創立の東京数学会社を起源とする一方、本年は1946年に社団法人として設立されて70周年を迎えるので、これを記念した記念事業を実施する。

2016事業年度の事業計画の諸項目は次の通りである：

- 1) 学会活動を支える組織・財政基盤の整備
- 2) 会員サービス向上のための新しい会員システムの整備
- 3) 学会誌の充実と英文誌刊行事業の整備
- 4) 大会のあり方についての検討
- 5) 物理学関連の教育、人材活用・支援を通じた社会連携
- 6) 社会への物理学情報の発信力強化と学会活動の広報
- 7) 国内外の学協会・団体との連携の強化と国際化
- 8) 設立70周年記念事業

II. 経営・財務状況の概略

本学会の事業規模・財務状況は、2011年以降を例にとると、凡そ以下のように記述できる。(単位：百万円)

学会全体(大会、会誌、英文誌、各種講演会など本学会活動の全て)

2011年	経常収益：397	経常費用：401	経常増減：△4
2012年	経常収益：381	経常費用：416	経常増減：△36
2013年	経常収益：411	経常費用：459	経常増減：△48
2014年	経常収益：417	経常費用：424	経常増減：△8

うち英文誌刊行事業(JPSJ、PTEP*1及びJPS-CP*2)刊行事業。大部分は刊行センターでの活動に関わる)

2011年	経常収益：101	経常費用：93	経常増減：+8
2012年	経常収益：81	経常費用：98	経常増減：△17
2013年	経常収益：110	経常費用：131	経常増減：△20
2014年	経常収益：129	経常費用：131	経常増減：△2

*1：PTEP刊行事業は2012年特別号より開始した。

*2：JPS-CP刊行事業は2014年より開始した。

財務状況

2011年	資産合計：984	負債合計：195	正味財産合計：789
2012年	資産合計：918	負債合計：170	正味財産合計：749
2013年	資産合計：926	負債合計：152	正味財産合計：773
2014年	資産合計：913	負債合計：140	正味財産合計：773

※負債合計：退職給付引当金、前受金、未払金等の合計

※資産合計＝負債合計＋正味財産合計となる。

学会全体の収支は、2008年から2011年の間は大きく変化することなく、ほぼ収支均衡で推移してきたが、2012年は事務局移転等、2013年はAPPC12開催等の要因もあり大幅な赤字決算となった。財政問題検討WGで検討した結果、近年の赤字は一過性のもではなく、会員の減少による収入減や昨今の学会活動の多様化にともなった支出増による構造的なものと判断し、それに対する抜本的対策として、会費改定(2016年～)や大会参加登録料の改定(2015年～)、英文誌購読料の価格改定(2015年～)とともに、諸経費の節減を図っている。正味財産の増減は前年比10%以内である。

III. 事業実施上の重点

2016年度の事業計画で、上記諸項目に対応する重点実施事項を以下のよう定める。

1) 学会活動を支える組織・財政基盤の整備

前事業年度(2015.1.1～2015.12.31)途中にスタートした会長の2年任期制(第71-72期：2015.3.31～2017.3.31)が2年目に入るとともに、第73-74期会長予定者が副会長として就任する。引き続きこの改定に伴う各種学会活動を注視し事務局の安定した運営に努める。

昨年度第95回定時総会(2015.3.31)で承認を得た2016事業年度からの会費の改定(一律¥1,000の値上げ)によって得られる財政的な効果を鑑みて、実施計画との整合性を取れるよう万全の態勢を整える。また第70回年次大会(2015.3.21-24)から、参加登録料の改定(一律¥1,000の値上げ)と講演概要集のWeb化等を行ったので、これら一連の措置により会員への負担増とサービス向上に対する満足度との関連について慎重に情報収集し、活発な学会活動を支える一層の財政基盤の整備を図る。

本学会活動の駆動力であるセンター・各種委員会を活性化するために、統廃合も視点に見直しを行い、適切な委員構成と規則類の整備を行う。また、本会の規則類の相互の関係を検討し、整合性のある、わかりやすい規則にし、必要に応じて規則の要点をHPに掲載する。

学会の日常活動を支えている事務局が職員にとって働きやすい環境であるように注視し、適切な業務分担や人員配置を行う。特に会員システムの新規導入に伴う職員の業務変化に注視する。

支部活動の活性化支援のために、年2回の支部長会議の開催や、支部ごとに会員に対して同報メールを送付するシステムの運用を行っている。また、支部活動の状況が他の支部へ迅速に伝達できるよう仕組みも稼働している。このような施策がすべての支部で有効に活用できるように、支援していく。さらにまた、海外で活動する会員グループについても国内支部と同様に支援するための施策について検討する。

2) 会員サービス向上のための新しい会員システムの整備

会員管理業務の効率化と、会員サービスの向上を目的に、会員システムの構築を行っている。2014年に作成したシステムソフトウェア業者向けのRFP(request for proposal)をもとに、入札により発注業者を決定し、2015年は株式会社ノブワークス・アヘッド社と業務委託、およびシステム開発委託の契約を締結した。その後、会員システムプロジェクトチームを中心に、会員システムの詳細設計を行っている。2016年3月末を目途にシステム導入・テストを終え、2016年4月からの本格稼働を目指す。

3) 学会誌の充実と英文誌刊行事業の整備

会誌がより有用で魅力的なものであるように、特に以下の点に注力したい。1. 社会の人々と価値を共有できるところまで深い物理を求めて、編集委員会で議論を重ねる。2. 際限なく細分化していく物理分野を階層的につなぎ、基礎物理の再構成を求めて、編集委員会で議論を重ねる。3. 物理ファンの層を広げる。会誌の視覚的な魅力も増大させる。4. 物理教育に携わる方々と協調して、探求型の教育を目指すのに有用な情報を提供する。5. 社会の中で遊離しない物理のコミュニティーを目指すべく誌面を充実させる。6. 物理の様々な分野の専門家が集う編集委員会においてブレインストーミングを含めた自由な異文化交流を図り、個性的な特集編集につなげる。7. 「会員の声」「談話室」などを通じて、会員間のコミュニケーションを活発化させてゆく。本年は本会設立70周年に当たるので記念記事の連載を行う。

JPSJについては、2014年から移行したAtypon Literatum上でのオンラインサービスをさらに充実させる。JPSJの出版事業全体の状況、とくにオープンアクセス化への対応、紙媒体の発行中止の可否、購読契約数の推移を含む財政状況の見直しなどを検討する。物理学分野の国際会議のプロシー

ディングを日本から出版するため、2014年から発行を開始したJPS Conference Proceedingsの刊行を充実させる。2014年から交付されている科研費（国際情報発信強化）を有効活用し、JPSJ、JPS Conference Proceedingsの国際学術雑誌としての認知度を高める。

2013年に本格スタートしたPTEPについては今後も優れた論文が多数掲載されるように努力を続けると共に、支援機関獲得への働きかけをより一層強化する。これと並行して、交付が決定された科研費（オープンアクセス刊行支援）を有効活用し、PTEPの国際的認知度向上を計る。

4) 大会のあり方についての検討

・2015年から開始した概要集の電子化サービスの提供方法や価格設定等の1年経過後の状況（不都合等の有無）確認と必要があれば再検討を行う。

・年次大会での学部学生ポスターセッションパイロット事業を推進し、学部学生の発表機会の提供と学生会員の拡大を試みる。

5) 物理学関連の教育、人材活用・支援を通じた社会連携

2015年までの理工系（物理関連分野）人材のためのキャリアフォーラムや私立中高向け「理系教員選考会」を継承し、ビッグデータを扱う人材の活用などの可能性も検討する。

中高校生の物理学への興味をより促進させるために、Jrセッションを一層充実させる。Jrセッションの参加者が年々増加していることから、発表方法や審査方法の見直しを図り、さらに幅広く中高校生が参加できるように体制を整える。

大学における物理教育の充実を図るために、引き続き、「大学の物理教育」を年3回発行する。

物理オリンピック日本委員会との連携協力をさらに密に取っていくとともに、2022年に国際物理オリンピックが日本で開催されることを受けて設立された国際物理オリンピック日本大会準備委員会との協力体制について、具体策を検討する。

他の学協会と連携して物理教育の一層の充実を図るために、毎年開催している物理教育シンポジウムを、今年は日本物理教育学会との共同開催も視野に入れて企画する。

女子中高生夏の学校、関西科学塾など、女子中高生の理科学進学を促進する教育プログラムに積極的に協力し、大学に進学してくる前の世代に対しても理科教育・物理教育の充実を図る。

積極的に国際シンポジウムに参加し、国際交流を行うことで、すでに日本より女性研究者割合の高い海外の研究環境など、日本の物理分野でも取り入れられるものを調査・検討する。

6) 社会への物理学情報の発信力強化と学会活動の広報

科学セミナー、公開講座、市民科学講演会、Jrセッションなど、これまで行ってきた社会への物理学情報の発信力を強化する。また、会誌への記事掲載、イベントへの参加などを通して、社会に質の高い物理学情報を提供する。これらの目的を達するためにHPの整備を検討し、活用する。また、海外の物理研究者向けに英文HPを運用する。

2014年にノーベル物理学賞受賞会員が3名増えたことを反映し、前年に日本物理学会を紹介するパンフレットやクリアファイルの改訂を行ったが、さらに2015年に1名増えたので再改訂を行い、これらを有効に利用した広報活動を行う。

7) 国内外の学協会・団体との連携の強化と国際化

刊行センターの運営では応用物理学会と連携し、AAPPSの運営ではAAPPS理事会と協力する。本年度はAPPC13（プリズベン）が開催されるので、学会としての適切な対応を行う。物理教育に関しては日本物理教育学会、国際物理オリンピックに関しては物理オリンピック日本委員会と協力して活動を行うため関係を維持、発展させる。

これまで国外の11物理学会と相互協定・覚書を締結しているが、会員の便宜供与を図るべくこれらを再点検し周知を図る。

日本学術会議は「分野別の教育課程編成上の参照基準」を策定することを提案し、2010年11月より参照基準策定作業を始めたが、物理学分野においては、日本物理学会が素案の策定を依頼され、本会物理教育委員会が2012年の第68期から検討を開始した。そして前期2015年6月に参照基準（日本物理学会案）を日本学術会議に提出し、審議が行われ、本2016年度公表される予定である。本会は引き続き日本学術会議に協力して大学における物理学教育の向上を図る。

8) 設立70周年記念事業

日本物理学会は1877年創立の東京数学会社を起源とする一方、本年は1946年に社団法人として設立されて70周年を迎えるので、学会誌で記念記事のシリーズ掲載を行うとともに、年次大会では展示ブースを設け会員に本会の歴史的發展を紹介するなどの記念事業を実施する。

IV. 実施予定事業

1. 学術的会合

1-1. 年次大会・秋季（春季）大会

1-1-1. 第71回年次大会

会期：3月19日（土）～22日（火）

会場：東北学院大学泉キャンパス（仙台市泉区天神沢2-1-1）

1-1-2. 秋季大会

1-1-2-1. 素粒子論、素粒子実験、理論核物理、実験核物理、宇宙線・宇宙物理の各領域

会期：9月21日（水）～24日（土）

会場：宮崎大学木花キャンパス（宮崎市学園木花台西1-1）

1-1-2-2. 上記以外の領域（主に物性関係）

会期：9月13日（火）～16日（金）

会場：金沢大学角間キャンパス（金沢市角間町）

1-2. 日本学術会議関係シンポジウム

関係する学術会議の活動に連携・協力する。

1-3. 国際会議の共催等

他学協会等主催の国際会議等で、共催・協賛・後援等の要請のあるものについては理事会で審議のうえ決定して実施。

1-4. 国内会議等の共催・協賛・後援

他学協会等主催の国内会議等で、共催・協賛・後援等の要請のあるものについては理事会で審議のうえ決定して実施。

1-5. 支部例会、支部特別企画等

次のとおり、各支部において適宜開催する。

北海道支部

・役員会

…会期：未定、場所：北海道大学

・支部講演会

…毎月1回程度、場所：北海道大学・室蘭工業大学等、参加者：各回20～40名程度、主催：日本物理学会北海道支部

・高校物理の授業に役立つ基本実験講習会

…会期・場所：未定、参加者：約25名、主催：日本物理教育学会北海道支部／日本物理学会北海道支部

東北支部

・役員会

…会期：5月、場所：東北大学

・出前授業

…年間15回程度、場所：未定（各高等学校）、主催：日本物理学会東北支部、後援：宮城県教育委員会

・高校物理の授業に役立つ基本実験講習会

…会期：11月、場所：未定、主催：日本物理教育学会東北支部、共催：日本物理学会東北支部／物理教育研究会（APEJ）、後援：学術図書出版社

新潟支部

・役員会

…会期：12月10日（土）12:30～12:55、場所：新潟大学理学部

・新潟支部例会

…会期：12月10日（土）13:00～16:00、場所：新潟大学理学部、参加者：約110名

・高校物理の授業に役立つ基本実験講習会

…会期：11月中旬、場所：新潟大学駅南キャンパス、参加者：約30名、主催：物理教育研究会（APEJ）／日本物理学会新潟支部／新潟大学／新しい理科教育を研究する会、共催：日本物理教育学会

北陸支部

・役員会

…8月初旬及び支部例会開催時（計2回／年）、場所：富山大学

・北陸支部例会（支部総会・定例学術講演会）

…会期：11月下旬～12月上旬、場所：富山大学、参加者：約30名（支部総会）・約200名（定例学術講演会）、主催：日本物理学会北陸支部

・特別講演会

…年間6回、場所：富山大／富山県立大／金沢大／北陸先端大／福井大、参加者：各回20名程度、主催：日本物理学会北陸支部

名古屋支部

・名古屋支部定例打ち合わせ会

…会期：1月、場所：名古屋大学

・市民講演会

…会期：10月、場所：名古屋大学、主催：日本物理学会名古屋支部

京都支部

・支部委員会

…会期7月～8月、場所：京都大学、参加者：約10名

・親子理科実験教室

…会期：年間複数回、場所：NPO法人あいんしゅたいん事務所、主催：NPO法人あいんしゅたいん／日本物理学会京都支部／京都大学理学部

- ・市民講座
 - …会期：11月，場所：京都大学百周年時計台記念館（大ホール），参加者：約500名，主催：京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻，共催：日本物理学会京都支部
- ・科学普及員シンポジウム（科学のための科学教育）
 - …会期：12月，場所：京都大学大学院理学研究科セミナーハウス，主催：NPO法人あいんしゅたいん／日本物理学会京都支部／京都大学理学部
- ・科学普及員研修会
 - …会期：年複数回，場所：NPO法人あいんしゅたいん事務所，主催：NPO法人あいんしゅたいん／日本物理学会京都支部
- ・科学交流セミナー
 - …会期：未定，場所：未定，主催：日本物理学会京都支部（他団体と共同主催を予定）

大阪支部

- ・大阪支部懇談会
 - …会期：4月，場所：大阪大学，参加者：約10名
- ・大阪支部講演会シリーズ
 - …年間8～10回程度，場所：申請者の希望場所，参加者：約20～50名，主催：日本物理学会大阪支部
- ・第32回湯川記念講演会
 - …会期：10月，場所：大阪大学中之島センター，参加者：約150名，主催：大阪大学総合学術博物館湯川記念室，共催：日本物理学会大阪支部，後援：日本物理教育学会近畿支部
- ・大阪支部公開シンポジウム
 - …会期：12月，場所：大阪近辺，参加者：約200名，主催：日本物理学会大阪支部，協賛：日本物理教育学会近畿支部
- ・高校物理の授業に役立つ基本実験講習会
 - …会期：12月，場所：大阪教育大学附属高校天王寺校舎，参加者：約40名，主催：日本物理教育学会近畿支部／日本物理学会大阪支部，協賛：大阪府高等学校理化教育研究会／奈良県高等学校理化学会／京都府理化協会，後援：奈良県教育委員会／兵庫県高等学校教育研究会科学部会
- ・青少年のための科学の祭典2016大阪大会サイエンス・フェスタ
 - …会期：8月，場所：梅田近辺，参加者：約500名，主催：「青少年のための科学の祭典」大阪大会実行委員会／公益財団法人日本科学技術振興財団・科学技術館／日本物理教育学会近畿支部／日本物理学会大阪支部／大阪市教育委員会／大阪市立科学館／関西サイエンス・フォーラム／読売新聞社／公益財団法人大阪科学振興協会

中国支部

- ・総会
 - …会期：7月31日（日），場所：岡山大学
- ・2016年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
 - …会期：7月31日（日），場所：岡山大学，参加者：約200名，主催：応用物理学会中国四国支部／日本物理学会中国支部／日本物理学会四国支部／日本物理教育学会中国四国支部／日本光学会中国四国地区
- ・第20回物理教育研究会
 - …会期：2月20日（土），場所：広島大学学士会館，参加者：約80名，主催：広島県物理教育研究推進会，後援：広島県高等学校教育研究会理科部会物化部／日本理科教育学会中国支部／日本物理学会中国支部／日本物理教育学会中国四国支部／日本理科教育振興協会
- ・サイエンスワールド2016
 - …会期：未定，場所：山口大学，参加者：約500～800名，主催：山口大学理学部，後援：情報処理学会中国支部事務局／電子情報通信学会中国支部／日本物理学会中国支部／日本化学会中国四国支部／日本分析化学会中国四国支部／中国四国植物学会／日本動物学会中国四国支部／山口地学会 他

四国支部

- ・2016年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
 - …詳細は中国支部と同様
- ・学術講演会
 - …年間5回程度，会期：未定，場所：未定，参加者：各回約30名，主催：日本物理学会四国支部
- ・かがわけん科学体験フェスティバル
 - …会期：未定，場所：香川大学，参加者：約2,300名，主催：科学体験フェスティバル実行委員会／香川大学／一般財団法人四国産業・技術振興センター，共催：香川県／公益財団法人かがわ産業支援財団／日本物理学会四国支部

九州支部

- ・役員会
 - …会期：3月・4月・11月，場所：九州大学伊都キャンパス
- ・九州支部例会
 - …会期：12月，場所：福岡大学，参加者：約100名，主催：日本物理学会九州支部，共催：日本物理教育学会九州支部
- ・特別講演会
 - …会期：12月，場所：福岡大学，参加者：約100名，主催：日本物理学会九州支部，共催：日本物理教育学会九州支部
- ・高校物理の授業に役立つ基本実験講習会
 - …会期：11月，場所：西南学院高等学校，主催：福岡県高等学校物理部会／日本物理学会九州支部／日本物理教育学会九州支部，共催：物理教育研究会(APEJ)／科学教育ネットワークin福岡／NPO法人理科カリキュラムを考える会

1-6. 学術講演会その他の催し

- 1-6-1. 第12回Jr.セッション
 - 会期：3月21日（月・祝）
 - 会場：第71回年次大会会場（東北学院大学泉キャンパス）
- 1-6-2. 物理教育シンポジウム
 - テーマ：未定
 - 会期：3月27日（日）
 - 場所：東京大学 小柴ホール
- 1-6-3. 科学セミナー
 - テーマ：未定
 - 会期：8月を予定
 - 場所：東大駒場キャンパスを予定
- 1-6-4. 公開講座（科研費補助金研究成果公开发表（B）を申請）
 - 対象：高校生，大学生，（小学校・中学校・高等学校等の）理科教員，一般
 - 1-6-4-1. 理事会企画
 - テーマ：一般相対性理論と宇宙 —重力波研究の最前線—（予定）
 - 会期：11月26日（土）（予定）
 - 場所：東京大学 伊藤謝恩ホール（予定）
- 1-6-5. 市民向け講演会
 - 年次大会，秋季大会開催時に高校生・一般市民向けの講演会を開催する。
- 1-6-6. 楽しい物理教室
 - 国立科学博物館，日本物理教育学会との共催で，年6回開催
 - 対象：小学高学年・中学生
 - 場所：国立科学博物館（東京・上野）
- 1-6-7. 世田谷区中学生講座
 - 世田谷区教育委員会に協賛して，年3回程度開催
 - 対象：世田谷区立中学校の生徒
- 1-6-8. 基礎実験講習会（高校物理の授業に役立つ基本実験講習会）
 - 物理教育研究会（APEJ），日本物理教育学会，応用物理学会との共催で7月頃に東京で開催
 - また，本会支部（北海道支部，東北支部，新潟支部，大阪支部，九州支部）が日本物理教育学会他との共催により札幌，仙台，新潟，大阪，福岡で開催
- 1-6-9. 女子中高生夏の学校2016
 - 主催：国立女性教育会館
 - 日時：未定
- 1-6-10. 学協会連絡会シンポジウム
 - 主催：男女共同参画学協会連絡会
 - 日時：未定
- 1-6-11. 理事会企画シンポジウム
 - 主題：物理学・天文学分野の参照基準
 - 会期：未定
 - 会場：第71回年次大会会場（東北学院大学泉キャンパス）
- 1-6-12. 年次大会シンポジウム（男女共同参画・物理教育・Jr.セッション）の3委員会共同企画）
 - 主題：ダイバーシティの中での物理教育
 - 会期：未定
 - 会場：第71回年次大会会場（東北学院大学泉キャンパス）

2. 刊行関係

- 2-1. 日本物理学会誌
 - 第71巻1号～12号 月刊 A4判 毎号約100ページ 各16,800部発行
 - なお，年次大会・秋季大会のプログラムを3月および8月に増刊号としてそれぞれ発行予定。
- 2-2. Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)
 - Vol. 85 No. 1～12 冊子版：月刊 A4判 毎号約266ページ 各450部発行。
 - 電子版：随時公開

- 刊行業務は応用物理学会と共同運営する物理系学術誌刊行センターが行う。
- 2-3. Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP)
Vol. 2016 Issue 1~12. 毎月1号の定期的な刊行で、各号の中の論文は随時公開。電子版のみのオープンアクセスジャーナルとして無料公開。
 - 2-4. 大学の物理教育
年3回(3月, 7月, 11月)各1,600部発行。
 - 2-5. JPS Conference Proceedings
Proceedings of the 7th International Workshop on Very High Energy Particle Astronomy in 2014 (VHEPA2014) [出版時期: 2016年1月頃]
Proceedings of the International Symposium for Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2014) [出版時期: 2016年1月頃]
Proceedings of the International Workshop on the Physics of Excited Nucleons (NSTAR2015) [出版時期: 2016年3月頃]
Proceedings of the 10th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in Few-GeV Region (NuInt15) [出版時期: 2016年5月頃]
Proceedings of the 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015) [出版時期: 2016年6月頃]
 - 2-6. 刊行物に関するブース出展
APS March Meeting (米国ボルチモア)への日本物理学会ブースの出展を予定(3月中旬)。
 - 2-7. その他
下記の研究資料等を発行し会員等の希望者に有料または無料で頒布する。
 - 2-7-1. 講演概要集
年次大会・秋季大会の講演概要集(全領域)のWeb版(アクセス権頒布)と記録保存用DVD版(有料)の頒布
 - 2-7-2. 公開講座テキスト(無料)
2016年度に開催する公開講座のテキスト
 - 2-7-3. 科学セミナー資料(有料)
2016年度に開催する科学セミナーの講演資料の実費を徴収
 - 2-7-4. 会員名簿
刊行物としては発行しない。新会員データベースで名簿機能を持たせる。
 3. 国際交流・協力関係
 - 3-1. オーストラリア・ヨーロッパ・ドイツ・韓国・台湾・香港・メキシコ・ポーランド・アメリカ・イギリス等の物理学会、その他の諸団体と

- の交流・協力
- 3-2. 中国物理学会との連携強化に努力
 - 3-3. AAPPS (Association of Asia Pacific Physical Societies: アジア太平洋物理学会連合)の活動と運営への積極的参加
 - 3-4. AsPEN (Asian Physics Education Network: アジア物理教育ネットワーク)への協力
 - 3-5. 開発途上国へのJPSJ掲載料金援助およびJPSJ等の寄贈
 - 3-6. IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics: 国際純粋・応用物理学連合)への協力
 - 3-7. UNESCO PAC (UNESCO Physics Action Council)への協力
 - 3-8. Gender Summit 2017準備委員会
日程: 未定
 - 3-9. APPC13 (The 13th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS: 第13回アジア太平洋物理会議)2016年オーストリアにて開催への協力
 - 3-10. ASEPS (Asia-Europe Physics Summit: アジア欧州物理サミット)への協力
4. 図書・雑誌の供覧および物理学史資料の利用
本会所蔵の図書・雑誌を会員の利用に供する。また本会所蔵の物理学史資料の利用希望に応じる。
 5. 表彰
 - 5-1. 日本物理学会論文賞
JPSJおよびPTEP (PTP)掲載論文の中から5篇以内を選び表彰する。
 - 5-2. 日本物理学会若手奨励賞
2006年の篤志家からの寄付金をもとに賞状などの諸経費を賄っていることを関係者に周知する。
 - 5-3. 物理教育功労賞
Jr.セッションに参加・指導された先生を対象に、表彰基準に該当する先生個人に対し表彰する。
 6. キャリア支援センター
引き続き、キャリア支援センターを中心に関係協力機関と連携して物理系博士人材のキャリア支援活動を継続する。主な活動予定は、物理系人材向けのキャリア支援イベントを開催することと、Web等を通じたキャリア支援関連情報の広報活動である。
 7. その他
 - 7-1. 理事会で適当と認められた事業
各種委員会等での検討をもとに理事会で承認した事業等。

正味財産増減予算書内訳表

2016年1月1日から2016年12月31日まで

(単位:円)

	実施事業等会計	その他会計	法人会計	合計
〔特定資産運用益〕				
特定資産受取利息	0	0	197,000	197,000
〔受取入金〕				
受取入金	0	0	4,449,000	4,449,000
〔受取会費〕				
正会員受取会費	0	0	188,292,000	188,292,000
賛助会員受取会費	0	0	7,385,000	7,385,000
〔事業収益〕				
学術的会合事業収益	0	69,448,100	0	69,448,100
会報資料刊行事業収益	18,022,000	56,571,900	0	74,593,900
その他事業収益	0	756,000	0	756,000
〔受取補助金等〕				
受取科学研究費補助金 (JPSJ)	0	17,325,000	0	17,325,000
受取科学研究費補助金 (PTEP)	0	17,475,000	0	17,475,000
受取科学研究費補助金 (公開)	0	1,200,000	0	1,200,000
受取地方公共団体補助金	0	9,300,000	0	9,300,000
〔受取負担金〕				
受取別刷作成費負担金	0	1,326,000	230,000	1,556,000
受取負担金	0	53,200,000	0	53,200,000
〔雑収益〕				
受取利息	0	0	60,000	60,000
国外配布送料収益	0	18,000	519,000	537,000
過年度会費等回収益	0	0	1,970,000	1,970,000
雑収益	2,248,000	1,348,000	508,000	4,104,000
【経常収益】	20,270,000	227,968,000	203,610,000	451,848,000
〔事業費〕				
給料手当	17,287,000	69,269,000	0	86,556,000
職員通勤費	481,000	2,153,000	0	2,634,000
臨時雇賃金	669,000	4,549,400	0	5,218,400
福利厚生費	2,390,000	5,518,000	0	7,908,000
退職給付費用	696,000	1,987,000	0	2,683,000
会議費	160,000	951,750	0	1,111,750
旅費交通費	844,000	18,240,535	0	19,084,535
通信運搬費	14,566,725	5,795,062	0	20,361,787
消耗什器備品費	6,000	206,000	0	212,000
消耗品費	0	1,103,600	0	1,103,600
印刷製本費	32,542,614	56,881,226	0	89,423,840
広告宣伝費	0	3,186,000	0	3,186,000
光熱水料費	152,072	676,036	0	828,108
賃借料	2,661,535	20,700,468	0	23,362,003
災害保険料	0	33,000	0	33,000
諸謝金	0	2,808,172	0	2,808,172
租税公課	0	2,470,000	0	2,470,000
委託費	5,128,200	32,678,000	0	37,806,200
負担金	0	1,369,000	0	1,369,000
保守料	691,419	4,523,502	0	5,214,921
清掃費	89,867	272,934	0	362,801
支払手数料等	0	3,292,464	0	3,292,464
雑費	5,000	3,519,500	0	3,524,500
減価償却費	1,209,052	4,700,826	0	5,909,878
〔管理費〕				
給料手当	0	0	53,659,000	53,659,000
職員通勤費	0	0	1,492,000	1,492,000
臨時雇賃金	0	0	443,000	443,000
退職給付引当金増加額	0	0	2,159,000	2,159,000
福利厚生費	0	0	13,981,000	13,981,000
会議費	0	0	391,000	391,000
旅費交通費	0	0	2,188,420	2,188,420
通信運搬費	0	0	3,154,457	3,154,457
消耗什器備品費	0	0	30,000	30,000
消耗品費	0	0	303,000	303,000
修繕費	0	0	100,000	100,000

	実施事業等会計	その他会計	法人会計	合 計
印刷製本費	0	0	1,529,540	1,529,540
光熱水料費	0	0	912,435	912,435
賃借料	0	0	16,018,683	16,018,683
災害保険料	0	0	445,100	445,100
諸謝金	0	0	1,598,000	1,598,000
租税公課	0	0	2,508,000	2,508,000
委託費	0	0	9,663,543	9,663,543
支払負担金	0	0	452,800	452,800
保守料	0	0	4,191,711	4,191,711
清掃費	0	0	539,199	539,199
支払手数料等	0	0	2,967,000	2,967,000
雑費	0	0	51,052	51,052
減価償却費	0	0	5,453,337	5,453,337
【経常費用】	79,579,484	246,884,475	124,231,277	450,695,236
【当期経常増減額】	-59,309,484	-18,916,475	79,378,723	1,152,764
【税引前当期一般正財増減】	-59,309,484	-18,916,475	79,378,723	1,152,764
【当期一般正味財産増減】	-59,309,484	-18,916,475	79,378,723	1,152,764

本会刊行英文誌目次

JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY
OF JAPAN, Vol. 85, No. 5, 2016

LETTERS

General

Path-Integral Monte Carlo Study on a Droplet of a Dipolar Bose–Einstein
Condensate Stabilized by Quantum Fluctuation Hiroki Saito
*Electromagnetism, optics, acoustics, heat transfer, classical mechanics,
and fluid mechanics*

Periodic Radiation Patterns and Circulating Direction of Lasing Light by
Quasi Whispering Gallery Mode in Hexagonal GaN Microdisk
..... Tetsuya Kouno, Sho Suzuki, Masaru Sakai,
Katsumi Kishino, and Kazuhiko Hara

*Condensed matter: electronic structure and electrical, magnetic, and
optical properties*

Phenomenological Magnetic Model in Tsai-Type Approximants
..... Takanori Sugimoto, Takami Tohyama,
Takanobu Hiroto, and Ryuji Tamura

High-Pressure Synthesis and Superconductivity of Ag-Doped Topological
Crystalline Insulator SnTe ($\text{Sn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Te}$ with $x = 0-0.5$)
..... Yoshikazu Mizuguchi and Osuke Miura

FFLO Excitonic State in the Three-Chain Hubbard Model for Ta_2NiSe_5
..... Takemi Yamada, Kaoru Domon, and Yoshiaki Ōno

Coherence Effects of Caroli–de Gennes–Matricon Modes in Nodal
Topological Superconductors
..... Yasumasa Tsutsumi and Yusuke Kato

Asymmetric Magnon Excitation by Spontaneous Toroidal Ordering
..... Satoru Hayami, Hiroaki Kusunose, and Yukitoshi Motome

Multiple Antiferromagnetic Spin Fluctuations and Novel Evolution of T_c
in Iron-Based Superconductors $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)(\text{O}_{1-y}\text{F}_y)$ Revealed by
 ^{31}P -NMR Studies Takayoshi Shiota, Hidekazu Mukuda,
Masahiro Uekubo, Fuko Engetsu, Mitsuharu Yashima,
Yoshio Kitaoka, Kwing To Lai, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki,
Shigeki Miyasaka, and Setsuko Tajima

Chiral Surface Modes in Three-Dimensional Topological Insulators
..... Kiminori Hattori and Hiroaki Okamoto

Analysis of Dirac Point in the Organic Conductor α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$
..... Yoshikazu Suzumura

FULL PAPERS

General

Accuracy of Weak-Form Discretisation and Extension of Recursive
Transfer Method for Scattering Problems Governed by Fourth-Order
Differential Equation Hatsuhiro Kato and Hatsuyoshi Kato

Atomic and molecular physics

Analysis of Collisional Cross Sections of Rydberg nS and nD States of
Ultracold Caesium Atoms Zhigang Feng, Jingyuan Miao,
Kejia Zhao, Difei Li, Zhijun Yang, Fan Wu, Zhaochun Wu,
Jianming Zhao, and Suotang Jia

The Investigation of Angular Effects of Laser Polarization on the
Photodetachment of H^- near a Spherical Cavity
..... Muhammad Haneef, Fakhr-E-alam,
Bakhtawar, and Jehan Akbar

*Electromagnetism, optics, acoustics, heat transfer, classical mechanics,
and fluid mechanics*

Density Dependence of Charge-4 Vortex Splitting in Bose–Einstein
Condensates Hitoshi Shibayama, Akinori Tsukada,
Takahisa Yoshihara, and Takeshi Kuwamoto

Condensed matter: structure and mechanical and thermal properties

Enhanced Si–O Bond Breaking in Silica Glass by Water Dimer: A Hybrid
Quantum–Classical Simulation Study Takahisa Kouno,
Shuji Ogata, Takaaki Shimada,
Tomoyuki Tamura, and Ryo Kobayashi

Study for the Effect of Continuously Applied Load on a Compressed Ag
Nanoparticle at Room Temperature by Atomic Scale Simulations ...
..... Lin Zhang

*Condensed matter: electronic structure and electrical, magnetic, and
optical properties*

Muon Spin Relaxation and Neutron Diffraction Studies of Cluster-Glass

States in $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{RuO}_3$ Ikuto Kawasaki, Kenji Fujimura,
Isao Watanabe, Maxim Avdeev,
Kenichi Tenya, and Makoto Yokoyama
Blueshifted Flat Dispersion Relation of Exciton–Polariton Condensates in
a CuBr Microcavity Masaaki Nakayama,
Katsuya Murakami, and DaeGwi Kim
Increase of Phase Retrapping Effects in the Switching Rate from the Finite
Voltage State of the Underdamped Intrinsic Josephson Junctions ...
..... Haruhisa Kitano, Yusaku Takahashi, Daiki Kakehi,
Hikaru Yamaguchi, Shin-ichiro Koizumi, and Shin-ya Ayukawa
Insight into Nearest Neighboring Three- and Four-Electron Processes in a
One-Dimensional Correlated Lattice System Hanqin Ding and Jun Zhang
Observation of Flux-Grown α - Fe_2O_3 Single Crystal at the Morin
Transition by ^{57}Fe Synchrotron Radiation Mössbauer Diffraction ...
... Takaya Mitsui, Shin Nakamura, Naoshi Ikeda, Kosuke Fujiwara,
Ryo Masuda, Yasuhiro Kobayashi, and Makoto Seto

SHORT NOTES

A Cluster-Size Averaging Model for Strongly Discontinuous Percolation
..... Yuhei Yamada and Yoshihiro Yamazaki

ERRATA

Erratum: “Excitation Mechanisms in Moderate-Energy Na^+ –He and K^+ –
He Collisions” [J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 014301 (2015)]
..... Shigetomo Kita, Takehito Hattori, and Noriyuki Shimakura

Progress of Theoretical and Experimental Physics Vol. 2016, No. 3, 2016

Letters

Theoretical Astrophysics and Cosmology

Possible confirmation of the existence of the ergoregion by the Kerr
quasinormal mode in gravitational waves from a Population III
massive black hole binary
..... Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, and Takashi Nakamura
The detection of quasinormal mode with $a/M=0.95$ would prove a
sphere 99% soaking in the ergoregion of the Kerr space-time
..... Hiroyuki Nakano, Takashi Nakamura, and Takahiro Tanaka

Papers

General and Mathematical Physics

Piecewise-linear Bonhoeffer-van der Pol dynamics explaining mixed-
mode oscillation-incrementing bifurcations
..... Kuniyasu Shimizu and Naohiko Inaba

Theoretical Particle Physics

Next-to-minimal R -symmetric model: Dirac gaugino, Higgs mass and
invisible width Hiroaki Nakano and Masaki Yoshikawa
AdS/CFT and local renormalization group with gauge fields
..... Ken Kikuchi and Tadakatsu Sakai
Probing heavy neutrinos in the COMET experiment
..... Takehiko Asaka and Atsushi Watanabe

Reconstruction of the standard model with classical conformal invari-
ance in noncommutative geometry Masaki J. S. Yang
Genus one super-Green function revisited and superstring amplitudes
with non-maximal supersymmetry H. Itoyama and Kohei Yano

Nuclear Physics

Probing QCD phase structure using baryon multiplicity distribution
..... Atsushi Nakamura and Keitaro Nagata

Theoretical Astrophysics and Cosmology

Bianchi type III and Kantowski–Sachs domain wall cosmological mod-
els in the $f(R, T)$ theory of gravitation
..... S. D. Katore and S. P. Hatkar

Beam Physics

Amplitude-dependent orbital period in alternating gradient accelerators
..... S. Machida, D. J. Kelliher, C. S. Edmonds, I. W. Kirkman,
J. S. Berg, J. K. Jones, B. D. Muratori, and J. M. Garland

Instrumentations and Technologies for Physics

Particle identification performance of the prototype aerogel RICH
counter for the Belle II experiment S. Iwata et al.