

日本物理学会誌

- 放射線の人体への影響
- スケール不変性 vs 共形不変性

BUTSURI

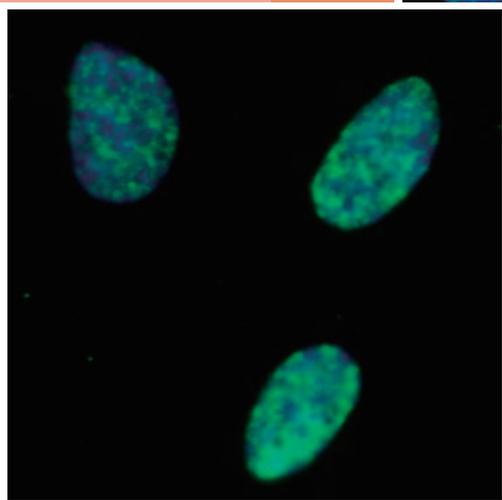
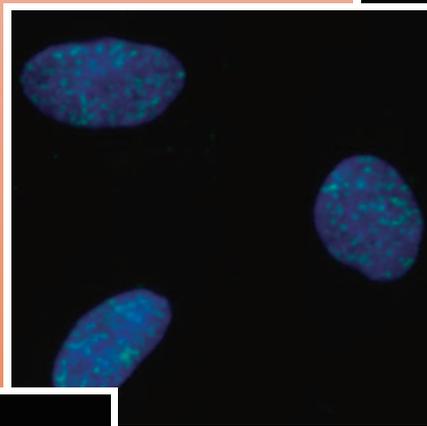
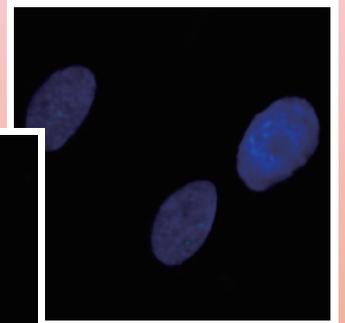
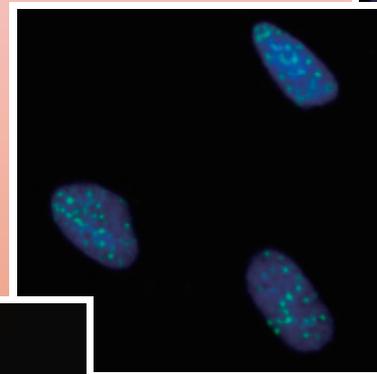
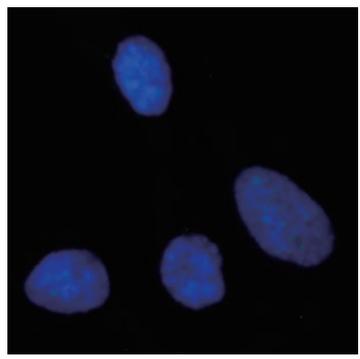
第68巻 第3号(通巻 758号) ISSN 0029-0181

昭和30年6月13日 第3種郵便物認可

平成25年3月5日発行 毎月5日発行

2013 VOL. 68 NO.

3

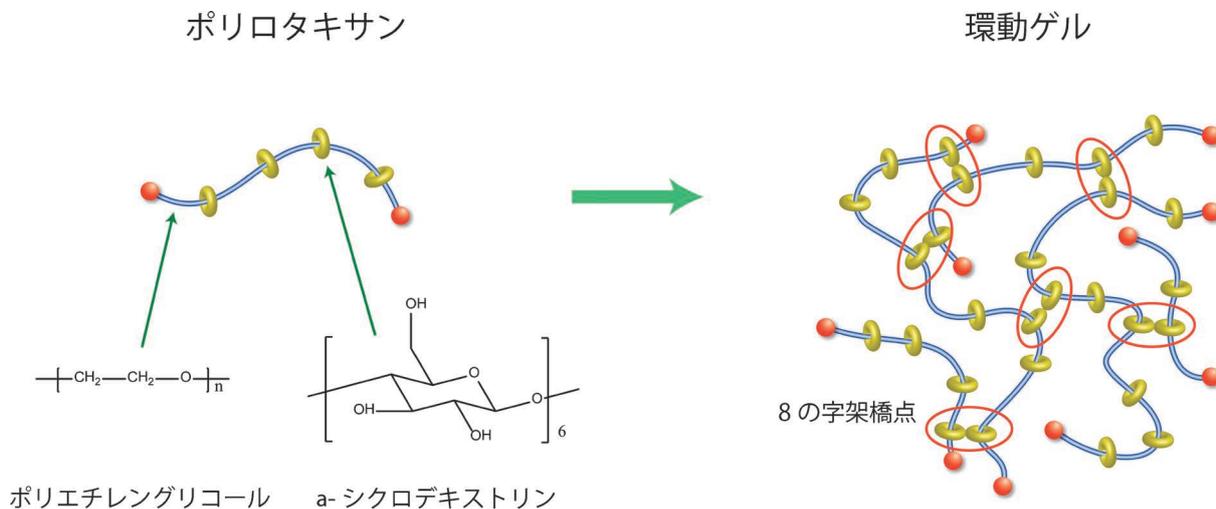


口絵：今月号の記事から		139
巻頭言	「わかる」ということ	旭 耕一郎 140
交流	放射線の人体への影響	泉 雅子 141
解説	スケール不変性 vs 共形不変性	中山 優 149
最近の研究から	紐と環から成るトポロジカルネットワークの新しいエントロピー弾性 口絵	眞弓皓一, 伊藤耕三 158
	分子骨格と吸着構造が生み出す新奇な近藤効果	南谷英美, 塚原規志, 金 有洙, 高木紀明 162
学会報告	2012年秋季大会招待・企画・チュートリアル講演の報告	領域委員会 167
JPSJの最近の注目論文から	11月の編集委員会より	安藤恒也 176
学界ニュース	第6回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞：細道和夫氏	江口 徹 179
	2012年度仁科記念賞：細野秀雄氏	福山秀敏 179
	井上邦雄氏	白井淳平 180
	初田哲男氏, 青木慎也氏, 石井理修氏	延與秀人 180
	2012年ゴードン・ベル賞：石山智明氏, 似鳥啓吾氏, 牧野淳一郎氏	青木慎也 181
	第7回凝縮系科学賞：塚崎 敦氏, 笠 真生氏	北岡良雄 182
談話室	第57回物性若手夏の学校開催報告	河底秀幸, 秋山綱紀, 大西義人 182
	第42回天文・天体物理若手夏の学校開催報告	廣井和雄 184
新著紹介		186
掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他	188
行事予定		190
会告	■第12回代議員懇談会開催のお知らせ ■第93回定時総会開催のお知らせ ■2013年秋季大会・講演募集掲載号 ■2013年秋季大会の企画募集 ■2013年2月1日付新入会者	192
本会関係欧文誌目次		196

表紙の説明 ヒト正常繊維芽細胞に3 Gy (グレイ) のX線を照射し、二本鎖切断修復の様子を見た写真である。左から、照射する前、照射後30分、2時間、8時間、24時間後に細胞を固定した写真で、DNAが青色、DNA切断末端に集まった二本鎖切断修復タンパク質が蛍光色の緑で示されている。緑色の点一つが一箇所のDNA二本鎖切断末端に相当する。X線を照射すると、ヒト細胞では1 Gy当たり約40箇所の二本鎖切断が生じる。修復反応は照射後数分から数十分以内に開始され、数Gyの照射であれば、数時間以内には大部分の二本鎖切断は再結合し、その後、経時的に修復タンパク質の集積は減少していき、24時間後にはほとんど観察されなくなる。詳細は本号に掲載されている泉 雅子氏の「交流」記事を参照のこと。

Graphic Page	139
Editorial	
<i>Comprehending Physics in an Article</i>	Koichiro Asahi 140
<hr/>	
Reviews	
<i>The Effects of Radiation on the Human Body</i>	Masako Izumi 141
<i>Scale Invariance vs Conformal Invariance</i>	Yu Nakayama 149
Current Topics	
<i>Novel Entropic Elasticity of Topological Network Formed by Ring and String</i>	Koichi Mayumi and Kohzo Ito 158
<i>Novel Kondo Effect in a Single Molecule Emerging from the Combination of Adsorption and Molecular Symmetry</i>	Emi Minamitani, Noriyuki Tsukahara, Yousoo Kim and Noriaki Takagi 162
<hr/>	
Reports on JPS Meeting	
<i>Report on Invited/Special Talks and Tutorials in the Autumn Meeting 2012</i>	Division Committee 167
JPSJ Selected Papers in the Latest Issue	Tsuneya Ando 176
Physics Community News	
<i>6th Toshiei Kimura Award for Theoretical Physics by Yukawa Foundation: Kazuo Hosomichi</i>	179
<i>Nishina Memorial Prize 2012: Hodeo Hosono</i>	179
Kunio Inoue	180
Tetsuo Hatsuda, Shinya Aoki and Noriyosi Ishii	180
<i>2012 Gordon Bell Prize: Tomoaki Ishiyama, Keigo Nitadori and Junichiro Makino</i>	181
<i>Condensed-Matter Science Prize: Atsushi Tsukazaki and Shinsei Ryu</i>	182
Forum	
<i>The Report of the 57th Condensed-Matter Physics Summer School</i>	Hideyuki Kawasoko, Koki Akiyama and Yoshito Onishi 182
<i>Report on Summer School on Astronomy and Astrophysics 2012</i>	Kazuo Hiroi 184
Book Reviews	186
<hr/>	
Notice Board	188
<hr/>	
JPS Announcements	192

最近の研究から 「紐と環から成るトポジカルネットワークの新しいエントロピー弾性」 p.158



高分子（ポリエチレングリコール）が多数の環状分子（ α -シクロデキストリン）をビーズ状に貫いた超分子構造を持つ化合物であるポリロタキサン（左図）と、ポリロタキサンの環状分子を化学結合によって架橋してつくられる環動ゲル（右図）の模式図。環動ゲル中の高分子鎖は環状分子からなる8の字架橋点を自由にすり抜けられることから、高分子網目のトポロジーはゲルの変形に伴って自在に変化する。また、網目のトポロジー変化に応じて、架橋点間に存在する環状分子の高分子鎖上における1次元配置エントロピーが変化し、環状分子に由来するエントロピー弾性が発生する。

「わかる」ということ

旭 耕一郎 (会誌編集委員長)

毎月開く会誌編集委員会の予定議題の最後には「××号の反省」という項目を挙げてあります。それぞれの号に割り当てられた編集委員が、刊行なったその号を改めて手にとり通読してきた感想を述べ、それぞれの記事はわかりやすかったか、図の配置は適切だったか、号の構成はよかったか、表紙は…、等々全員でしばしディスカッションします。最近、会誌のバックナンバーに目を通す機会が時々あり(ご存知の通り会誌の刊行後2年以上を経たものは1946年創刊当時の号から全て、Webを通して本文を自由に閲覧可能です。学会HP参照)、ずいぶん古い号の編集後記にすでに「会誌を読みやすく」との編集委員会の努力について書いてあることに気づきました。現在の編集委員会でも、記事提案の段階からこの「読みやすい記事」を意識して執筆依頼の文案を議論し、その後もそれぞれの担当委員が著者とともに工夫を重ねます。事務局編集部には代々の委員会で積み重ねられた「読みやすくするために」の議論メモが受け継がれています。このテーマは会誌にとって古くからの、またなかなか「これでよし」とならない永遠の中心テーマなのでしよう。

物理の内容を主題とした文章を読んで「わかる」とはどういうことなのでしょう。その内容が、自分の専門分野やその近傍に属するかそれとも遠い分野かで話は大きく違うと思いますが、一般的に言って「わからない」から「わかる」までには何段階かがあるように思われます。また記事の内容や読者のスタイルによって「わかる」に至る経路も一通りではなさそうです。それでも、上記のテーマに立ち向かおうとするとこれらのことになんらかのモデルを持っていることが必要になります。

そもそも物理の内容を説明した文章

を読んで「さっぱりわからなかった」という場合(あまりあってほしくないですが)、何がそうさせているのでしょうか。特に、会誌の記事の場合のように読者に少なくとも一定の共通の知識・興味基盤が前提できる場合、どうなのでしょう。自身のことを思い出してみると、(1)その記事の中で使われている分野固有の用語の意味や概念が十分つかめない、前提となる知識が自分がない、(2)内容の説明の論理展開にどこか馴染めずその正しさが自分なりに確認できない、(3)前2項は問題ないのだが文章が読みづらく、読んで理解することの利得と折り合わないと思える、などが挙がってきます。

ここに挙げた問題はごく基本的なものでありぜひとも解決されていなければならない項目ですが、幸いなことに会誌の記事においては、著者の方々の適切な対処と忍耐強いご努力ご協力もあって、ほとんどの場合クリアできているのではないかと思います(会員諸氏のご意見はいかがでしょうか)。これらがクリアできている場合、内容は少なくとも「理解できる」こととなります。ここでいう「理解した」は、「著者の言いたいことはわかる」であり、書いてあることは自分の知識、考え方に矛盾しない、ということの意味します。しかし要注意なのは、「それはそうだろうけど、だからどうした?」というレベルにとどまることもありえる点です。

これに対して私たちは、物理の書き物にもっと欲張りなことを求めていると思います。求めている「わかる」、「わかった」は、上記の意味の「理解した」ではなく、「合点がいった」、「なぜこれを問題にするのかも含めて納得がいった」ということです。ただしこのレベルの「わかった」を、会誌の10ページに満たない記事で幅広い読者に実

現することは並大抵のことではないのが現実です。その記事の専門分野やそれに近い読者にとっての「わかった」と、専門から遠い読者にとっての「わかった」はかなり異なるからなのですが、私はこのことに関して必ずしも悲観的ではありません。会誌として目指すべきは、「理解できる」記事であるのに加えて、この「わかった」が何か一つだけでも読者の中に生じる、ということではないかと思えます。記事の専門分野やそれに近い読み手にとっては、その記事がこれまでの自分の知識を統合し新たな概念を気づかせてくれるようなものである一方、専門から遠い読者にとっては、前提となる知識や概念がツボを押さえた方法で紹介され、主題である最新の成果に関して何か一つとっかかりになるポイントが見つかった、という結果を実現することは可能なのだと思います。さらに言うならば、そのようなポイントが残念なことに見つからなかった場合にも、「理解した」の状態に読者が到達することそれ自体に十分意味があります。次にそのような文章を読む際の基礎知識・概念を提供できたと思うからです。

以上のようなことを考えながら、私たち会誌編集委員会のメンバーは学会事務局編集部のスタッフとともに、毎月ある時はみんなで頭を抱え、ある時は達成感を味わい、ときにはハラハラドキドキを共有しながら、編集委員会と常時の編集作業に携わっています。最近「紙面向上ワーキンググループ」も立ち上がり、紙面のレイアウト、各欄のあり方等を含め、会誌がアクセスしやすいものとなるには時代の進展に沿ってどのような改革があり得るか、検討を始めています。今後とも会誌に対し変わらぬ御支援御協力をお願いいたします。

(2013年1月5日原稿受付)

放射線の人体への影響

泉 雅子 (理化学研究所仁科加速器研究センター 351-0198 和光市広沢2-1)

世界を震撼させた東京電力福島第一原子力発電所の事故から二年近くが経過した。原子炉は冷温停止状態に至り、事故そのものは収束に向かいつつあるが、環境中に大量に漏洩した放射性物質の回収は容易ではなく、環境や人体への影響が憂慮されている。近年の分子生物学の進展により、放射線に対する細胞応答を分子レベルで理解できるようになったが、その一方で、長期にわたる低線量被曝や内部被曝の人体への影響については情報が少なく、社会に不安と混乱を生む一因となっている。本稿では、放射線の生物影響に関してこれまで得られている知見や、放射線防護のための規制値の根拠について解説する。

1. はじめに

放射線の生物影響を研究する放射線生物学は、19世紀末のレントゲンによるX線の発見や、ベクレルやキュリーによる放射性物質の発見に始まる。^{1,2)} 当時から、放射線の被曝により火傷や脱毛などが誘発されることは知られていたが、その本質や危険性が正しく理解されないまま医療に応用されたために、多くの放射線障害を引き起こした。放射線防護の概念が生まれたのは1920年代に入ってからのもので、医療における放射線の危険性が広く認知されるようになり、国際的な基準を定めるための委員会(後の国際放射線防護委員会)が設立された。しかし、放射線の影響については完全に理解されておらず、当初、委員会が勧告した被曝許容線量は2 mGy/日という高いものであった。

第二次世界大戦後、広島・長崎の被爆者を対象とした大規模な健康調査が行われ、この貴重なデータをもって本格的なヒトの放射線障害の研究が進んだ。また、1950年代には哺乳類の細胞を試験管の中で培養する技術が確立され、実験材料として普及したことで、細胞レベルでの解析が進んだ。これらの知見を元に放射線防護の考え方も大きく変わり、1977年には国際放射線防護委員会(ICRP)が勧告する規制値やその基礎となる考え方が、現在に近いものに改められた。³⁾ さらにこの20年間は、これまで個体レベル・細胞レベルで観察されていた事象を、分子レベルで理解しようとする研究が精力的に進められている。放射線の生物影響の解析は、細胞の癌化や老化の問題とも密接に関連していることから、現在、分子生物学における最も注目を集める学問分野の一つとなっている。本稿では、最近得られた知見も交えて、放射線生物学の現状について紹介したい。

2. 放射線によるDNA損傷と細胞の防御機構

1) 放射線の生物効果とDNA損傷の種類

放射線の特徴として、わずかなエネルギーで人体に大きな影響を与えるということが挙げられる。⁴⁾ 例えば、ヒトは4 Gy (4 J/kg)*¹のX線を全身に浴びると、約半数が60日以内に死んでしまう。しかしこのエネルギーを熱エネルギーに換算すると、約1 cal/kgとなり、体温を0.001度上

げるエネルギーにすぎない。こうした放射線の効果は、体内に放射線に感受性の高い標的(DNA)があると考えると、うまく説明できる。放射線のエネルギーは、人体を構成する水、タンパク質、脂肪、核酸などすべての物質に吸収されるが、人体の設計図であるDNAに損傷を与えることで細胞の機能に影響を及ぼし、重篤な結果を引き起こし得るのである。

放射線がDNAに損傷を与える際には、直接DNA分子の電離や励起を引き起こして損傷を与える場合(直接作用)と、生体の約70%を占める水分子を介してDNAに損傷を与える場合(間接作用)がある。^{1,2,5)} 放射線が水中を通過すると水分子の電離と励起が起こり、ヒドロキシラジカル($\cdot\text{OH}$)、水素ラジカル($\text{H}\cdot$)、水和電子(e_{aq}^-)、過酸化水素(H_2O_2)、水素分子(H_2)など反応性に富むラジカルや分子が生成され、DNAと反応して直接作用と同様の損傷を与える。一般的に、X線、ガンマ線、電子線では間接作用の割合が高く(60~80%)、陽子線、中性子線、アルファ線では直接作用の割合が高くなる。^{1,2,5)}

DNAは、糖とリン酸から構成される主鎖から塩基が突き出した構造をしている(図1)。放射線により、DNA上には塩基損傷、塩基脱落、DNA鎖切断など様々な損傷が作られる。^{1,2,5)} 塩基損傷は、酸化や二重結合の切断などが起きて、化学的に塩基が変化するものである。また、塩基と糖の間の化学結合が切れると、塩基が脱落する。あるいは、DNA鎖の骨格である糖やリン酸が損傷を受けるとDNA鎖の切断が起こるが、二重鎖の片側だけに切断が起こるケース(DNA一本鎖切断)と、両側が切断されるケース(DNA二本鎖切断)がある。これらの損傷の中で、DNA二本鎖切断については細胞内に一箇所でも存在すると、ヒトでは細胞分裂が停止し、最終的には染色体異常や細胞死に至る最も重篤な損傷であり、放射線の生物影響はDNA二本鎖切断の頻度に大きく依存する。

DNA損傷の内容は、放射線の線質にも依存する。たとえば、陽子線やアルファ線のような粒子線は、物質内を通過するときその経路に沿って電離や励起を引き起こしながら進み、粒子が停止する直前にエネルギー損失が最大となる。この最大となるポイントはブラッグピークと呼ばれるが、その近傍で物質に大きなエネルギーを与えるので、

*¹ この単位から分かるようにGy, Svの単位は、すべて体重1 kg当たりの量で表記される。

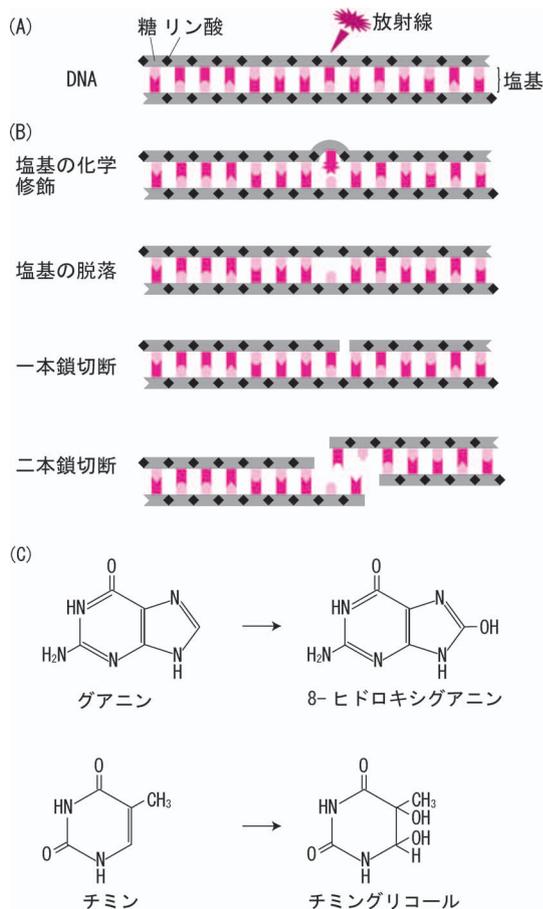


図1 DNAの構造と放射線により作られる損傷。(A) DNAの構造。(B) 放射線によりDNA上に作られる主な損傷。(C) 酸化により生成する塩基損傷の例。グアニンが8-ヒドロキシグアニンに、チミンがチミングリコールに変化する。

DNA二本鎖切断が起きやすい上、様々なタイプのDNA損傷が狭い領域に作られる。このような複雑な損傷は修復しにくいいため、生物影響が大きくなる。そこで、放射線の人体への影響を評価するときは、単なる物理的な吸収線量(Gy)ではなく、人体への影響を考慮した尺度を採用する。すなわち、放射線の種類やエネルギーに応じて荷重係数を定め、吸収線量にこれらの係数を乗じた値を等価線量(シーベルト, Sv)として用いている。^{1,2,5)} X線, ガンマ線, 電子線の荷重係数は1であり, 1 Gyは1 Svに相当する。一方, これ以外の粒子線の場合は, X線やガンマ線を基準として生物効果を比較し, 荷重係数を定めている。粒子線はX線やガンマ線と比べて上記のように生物影響が大きく, 陽子線の荷重係数は2, アルファ線は20と定められている。⁶⁾ また, 中性子線は周囲の原子核と直接反応を起こしやすいことから影響が大きく, 荷重係数はエネルギーに応じて連続関数で定められている。中性子線の荷重係数は2~20の範囲内となり, 100 keVから2 MeV付近が最も高くなる。⁶⁾

2) DNA損傷修復機構

生物は, 宇宙からの放射線や, 地表や空気中に含まれる放射性物質からの放射線を絶えず浴びており, バクテリアからヒトに至るまで, 様々なタイプのDNA損傷に対して

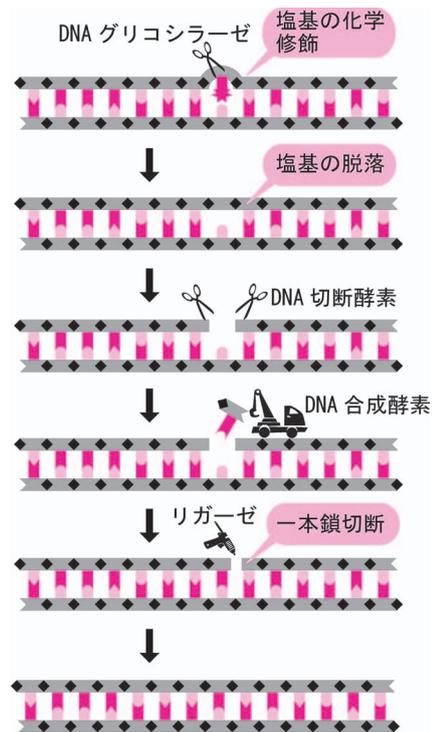


図2 塩基除去修復。

複数の修復機構を進化させてきた。⁷⁾ ヒトでは, 放射線により生じる損傷のうち, DNA二本鎖切断とそれ以外の損傷では, 修復経路が異なる。

塩基損傷, 塩基脱落, DNA一本鎖切断は塩基除去修復と呼ばれる共通の経路で修復される(図2)。^{8,9)} まず, 化学変化した異常な塩基は, DNAグリコシラーゼと呼ばれる塩基と糖の間を切断する酵素によりその構造が認識され, 切り取られる。次に, 塩基が脱落した部位のDNA鎖に, APエンドヌクレアーゼ, エクソヌクレアーゼというDNA鎖を切断する酵素が働き, この部位のDNA鎖を完全に切り除く。こうして隙間ができたところへDNA合成酵素が来て, 損傷を受けていない方のDNA鎖を鋳型にして相補鎖を合成する。最後に, DNAリガーゼと呼ばれるDNA鎖を繋げる酵素が働いて, DNA鎖の切断部分を修復する。

一方, DNA二本鎖切断は, 全く異なる経路により修復される(図3)。^{7,10)} 二本鎖切断の修復経路には二種類あるが, いずれも塩基損傷やDNA一本鎖切断の修復経路に比べると多くのタンパク質が関与する複雑な反応である。一つは非相同末端結合と呼ばれる経路で, 末端の損傷部位を取り除いて再結合させる方法である。まず, 切断したDNAの端へDNA結合タンパク質の一つであるKuタンパク質が認識して結合し, そこへDNA依存性タンパク質リナーゼ(DNA-PK), Artemis, XLF, XRCC4などと呼ばれる複数のタンパク質が逐次的に呼び込まれる。DNA-PKは集まった修復タンパク質を活性化して, 修復反応を促す。また, ArtemisはDNA末端を分解して再結合しやすく形を整え, XLFやXRCC4などは再結合のための足場を形成し, 最終的にDNAリガーゼ(Lig4)と呼ばれるDNA鎖をつな

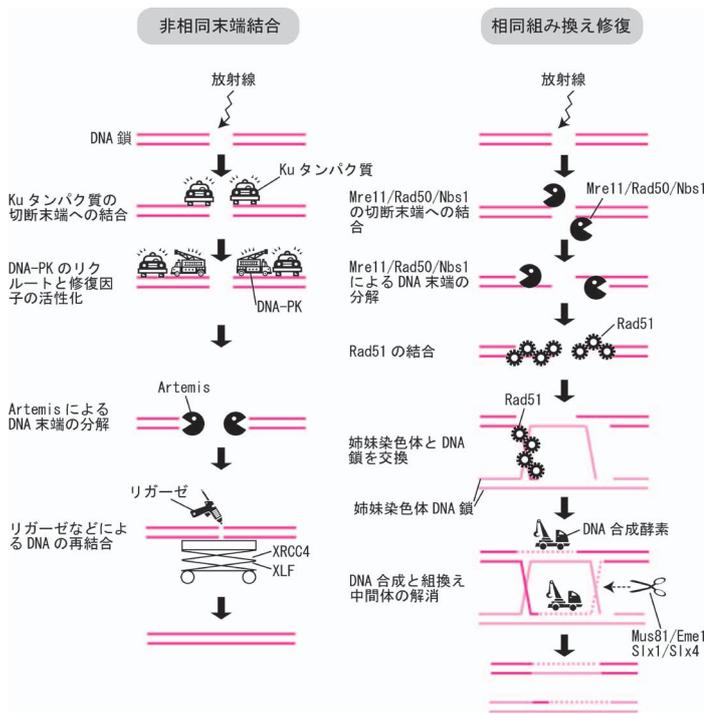


図3 DNA二本鎖切断の修復機構。DNA二本鎖切断は、非相同末端結合(左)あるいは相同組換え(右)により修復される(文献10より改変して掲載)。

ける酵素がDNA鎖を再結合する。この方法は、修復の過程で、DNAの切断末端の塩基が数個から数十個欠けてしまうことが多く、突然変異を伴いやすい修復経路である。もう一つの経路は、相同組換え修復と呼ばれる経路で、それよりさらに多くのタンパク質が関与する経路である。この経路は、DNA複製後にできる同じ遺伝情報を持つ染色体(姉妹染色分体)を鋳型にして修復する方法で、遺伝情報が正確に修復される。そのため、非相同末端結合が細胞周期のすべての時期で起きるのに対して、細胞周期の特定の時期(DNA複製が完了してから細胞分裂するまでの時期)でのみ働く。切断されたDNA末端には、まずDNA末端結合タンパク質であるMre11/Rad50/Nbs1複合体が結合し、その末端から片方のDNA鎖が分解されて一本鎖DNAが露出する。そこへ、一本鎖DNA結合タンパク質であるRad51タンパク質が結合し、姉妹染色分体の相同配列の部分を開裂して一本鎖DNAを滑り込ませ、姉妹染色分体の

相同配列部分と塩基対を形成する。このようにして互いのDNA鎖を交換した後に(このようなDNA鎖の交換は組換え反応と呼ばれる)、損傷を受けていない姉妹染色分体を鋳型にして損傷部位はDNA合成酵素により合成され、交差したDNAはMus81/Eme1, Slx1/Slx4等のDNA切断酵素により切断されて再結合し、元の遺伝情報を有する二本のDNA鎖が完成する。

ヒトなどの高等真核細胞では、相同組換え修復反応よりも非相同末端結合反応の方が優位であり、99%の二本鎖切断は非相同末端結合により修復される。¹¹⁾ 一方、出芽酵母などでは相同組換え修復反応の方が優位である。この理由は不明であるが、単細胞生物と多細胞生物の違いや、ゲノムサイズが大きく異なること(ヒトの方が200倍大きい)と無関係ではないと思われる。哺乳類は多細胞生物であり、後述するようにDNA損傷が生じたときや、DNA損傷の蓄積により前癌状態の細胞や癌細胞が発生したときに、その細胞を排除するメカニズム(チェックポイント機構や免疫機能)が働く。そして排除された細胞は、正常な細胞が分裂することにより補われる。一方、酵母は単細胞生物のため、遺伝子情報の損失は生物の死に直結する可能性が高く、多細胞生物に比べて正確に修復する必要性が高い。また、ヒトのゲノムサイズは大きく、遺伝子として使われている領域はわずか2%に過ぎない。さらに、個々の細胞内で実際に機能している遺伝子はその一部なので、突然変異が入っても細胞の生存に大きく影響を与えない場合がほとんどである。それに対して酵母はゲノムサイズが小さく無駄な部分が少ないため、正確に修復する必要性が高いと考えられる。

不正確なDNA損傷修復により引き起こされる突然変異や染色体異常は、個体レベルでは老化や癌の原因となるなど不利に働くことが多い。しかし、種の維持という観点では、有利に働いている。たとえば、突然変異により個体間の多様性が生まれ、環境が変化してもその中で生き延びる個体が出る確率が高くなり、種の維持に有利となる。また、突然変異や染色体異常は、時として新しい形質の獲得に繋がり、進化の原動力となる。さらに、老化は世代交代をもたらし、進化を促進する。

図4は、ヒト細胞に3 GyのX線を照射したときに、修復タンパク質(リン酸化型ヒストンH2AX)が生成されて

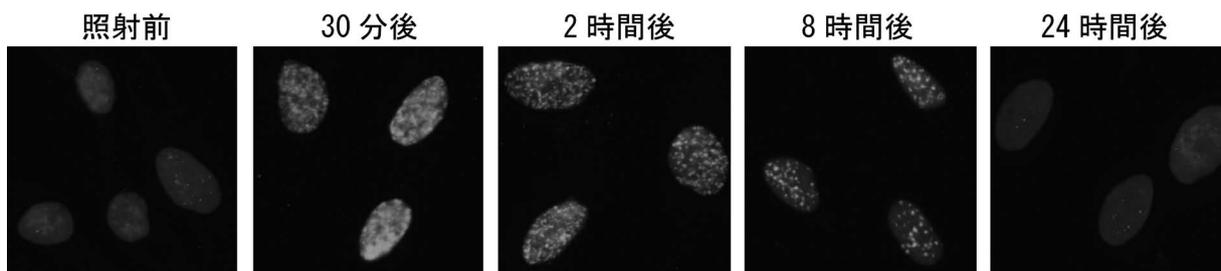


図4 ヒトRGB細胞に3 GyのX線を照射した後に経時的に細胞を固定し、DNAをDAPI色素(灰色)、DNA二本鎖切断修復タンパク質(リン酸化型ヒストンH2AX)を蛍光抗体(白色)で検出した。X線照射後、細胞内にATM(後述)の働きによりリン酸化型ヒストンH2AXが生成し、DNA損傷の周辺に集積して点状に観察される。また、この集積は時間の経過とともに減少し、24時間後にはほとんどの損傷が修復していることが分かる。

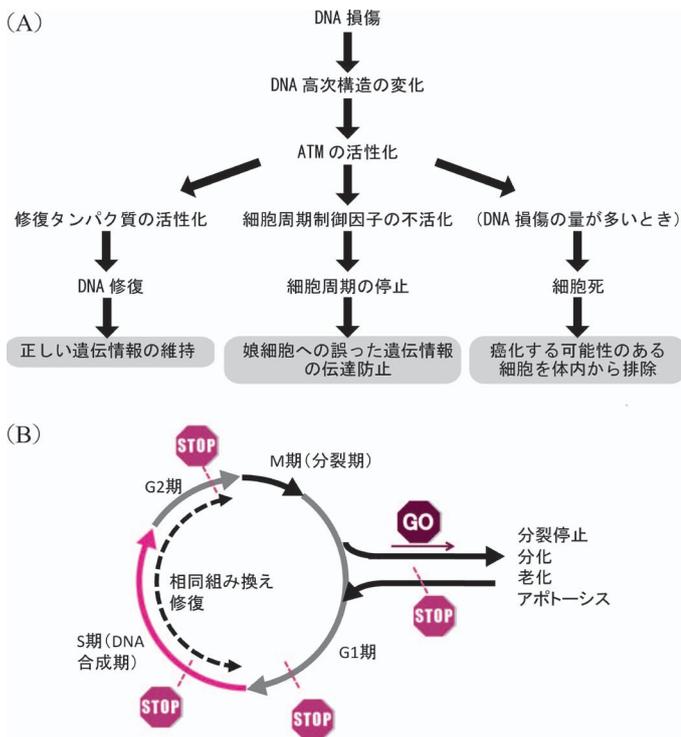


図5 チェックポイント経路と細胞周期の関係。(A) チェックポイント経路の概略(文献10より改変して掲載)。(B) 細胞周期の概略とチェックポイント機構による細胞周期の停止位置。増殖している細胞は、G1期→S期(DNA合成期)→G2期→M期(分裂期)という細胞周期を繰り返している。チェックポイント機構は、増殖中の細胞の細胞周期をG1期、S期、G2期で一時的に停止させたり(ストップサイン)、分裂停止やアポトーシスへ誘導する(ゴーサイン)。一方、分裂を停止している細胞に対しては、増殖サイクルに入るのを止める(ストップサイン)。DNA損傷修復経路のうち、相同組換え修復だけはS期とG2期に限って機能する。

二本鎖切断部位に集積し、その後、修復反応の完了とともに消失する様子を蛍光色素で可視化したものである。リン酸化型ヒストンH2AXはDNA切断末端に大量に結合してDNAの構造を変化させ、修復反応を促す機能を持っており、集積すると蛍光顕微鏡で点状に観察される(図中の白い点)。この一つの点が、一箇所のDNA二本鎖切断末端に相当する。X線を照射すると、ヒト細胞では1 Gy当たり約40箇所の二本鎖切断が生じる。¹²⁾ 照射後数分から数十分以内にDNA損傷の周囲にヒストンH2AXを含む多くの修復タンパク質が集積して修復反応を開始する。数Gyの照射であれば、数時間以内には大部分の二本鎖切断は再結合し、その後、経時的に修復タンパク質の集積は減少していき、24時間後にはほとんど観察されなくなる。

3) チェックポイント機構

真核細胞は、DNA損傷の修復機構に加えて、DNAの損傷を常に監視し、生体をDNA損傷から積極的に守るためのチェックポイント機構を備えている。¹³⁾ チェックポイント機構は核内のDNAに異常がないか監視し、損傷が発生すると細胞の増殖を止めたり細胞死(アポトーシス)を誘導する機構である。

チェックポイント機構は、ATMと呼ばれるタンパク質リン酸化酵素を頂点とした数多くのタンパク質が協働して

いる(図5)。^{10,14)} ATMはDNA損傷に伴うDNAの高次構造の変化を感知し、その下流にある複数のタンパク質にリン酸基を付与する。¹⁵⁾ リン酸化を受けたタンパク質は、高次構造が変化して活性化され、様々な生理活性を発揮できるようになる。ATMの標的の一つはDNA修復酵素であり、複数のDNA修復酵素の活性を亢進し、DNA修復反応を促進する。また、ATMは細胞周期の進行を止めるタンパク質を活性化し、修復反応が完了するまで細胞増殖を停止させる。これは、DNAに損傷を残したまま細胞が分裂増殖し、誤った遺伝情報が次世代に引き継がれて突然変異を起こしたり、染色体異常を起こすことを防ぐためである。さらに、DNA損傷の量が多く細胞の修復能力を超えている場合は、細胞死を引き起こすタンパク質を活性化して、積極的に細胞死を誘導する。¹⁶⁾ このことにより、有害な突然変異を持つ可能性のある細胞が、個体から排除される。

ATMに先天性の異常を持つ毛細血管拡張性運動失調症(Ataxia Telangiectasia: AT)の患者は、進行性の運動失調を示すのみではなく、放射線に高感受性で染色体異常の頻度が高い。また、発癌率が高く、早老症状や免疫不全も呈するなど重篤な臨床症状を示し、多くが10代から20代で亡くなる。このことは、チェックポイント機構が生体にとって極めて重要な役割を果たしていることを示している。

3. 個体レベルでの放射線影響

1) 確率的影響と確定的影響

放射線の人体への影響は、しきい値が無いと考えられている確率的影響と、しきい値がある確定的影響に分けられる(図6)。^{1,2,5,10)} 確率的影響は、線量が大きくなるほど発生の確率が増すが、症状の重篤さとは無関係である。一方、確定的影響は線量が大きいほど障害の重篤さが増す。

確率的影響とは、発癌と遺伝的影響のことであり、DNA修復時のエラーに起因する。たとえば、ある種の塩基損傷は本来とは異なる塩基と塩基対を形成するので、除去されないうままDNA複製が起こると突然変異につながる。また、DNA二本鎖切断が非同末端結合により修復されると、末端部分でいくつかの塩基が欠落して突然変異を起こす。あるいは、再結合が正しく行われないと、染色体の一部が失われたり、別の染色体とつなぎ合わされて、様々なタイプの染色体異常が引き起こされる。こうした突然変異や染色体異常が蓄積した結果、細胞増殖のコントロールが失われて癌が発生する。また、遺伝的影響とは、突然変異や染色体異常が生殖細胞で起こり、放射線の影響が次世代で現れる事象である。

ヒトの場合は、広島・長崎の被爆者を対象とした調査から、100 mSvの被曝で発癌による死亡率が0.5%増加し、それ以上では線量に比例して発癌率が増加することが明らかになっている。¹⁷⁾ この被爆者を対象とした調査は、被曝線量の推定が正確であること、数十万人を対象とした大規模な調査であること、さらには追跡の完全性から、世界的

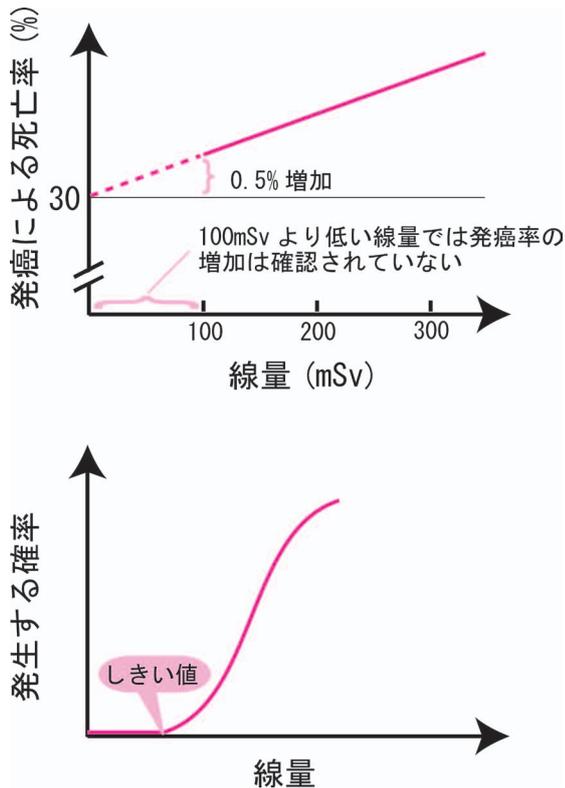


図6 確率的影響(上)と確定的影響(下)(文献10より改変して掲載)。

に最も信頼性の高い疫学的調査とされており、放射線防護の基盤となるデータとして採用されている。一方、このデータからは、100 mSv未滿の線量では発癌率の上昇は確認されておらず、100 mSv未滿の線量で発癌率が上がるかどうかについては明確な結論が得られていない。マウスなどのように寿命の短い実験動物のデータをヒトに適用するには無理があり、10 mSvのリスクを評価するためには500万人規模の疫学的調査が必要とも見積もられており¹⁸⁾ 現状では低線量のリスク評価は容易ではない。しかし、しきい値の存在が証明されていない以上、安全性を考慮してしきい値は無いと仮定して(しきい値無し直線モデル)、被曝の様々な規制値が設定されているのが実状である。

放射線による発癌のリスクは、被曝した年齢、性差によっても異なる。²⁾ 一般的に、幼児・小児期に被曝した場合の発癌率は、同じ線量を成人で被曝したときに比べて2~3倍高い。また、女性は男性よりもリスクが高い。後者の理由は不明であるが、DNA修復能力の差ではなく、ホルモンなどの差に起因するのではないかと考えられている。また、被曝から発癌までは、通常10年以上の長い年月を必要とする(晩発影響)。癌は、たった一個の遺伝子の突然変異で生じることはなく、増殖に関わる遺伝子のうち5~6個に突然変異が同時に入ることにより生じる。しかし、一度の被曝で、これらの遺伝子すべてに突然変異が入る確率は低く、多くの場合、被曝による影響に加えて加齢による突然変異が加わり発癌に至るため、長い時間を要する。

遺伝的影響については、当初、ショウジョウバエやマウ

表1 成人の確定的影響の発症1%のしきい値。

一回のX線短時間被曝における線量 (Gy)	
男性一時的不妊	0.15
男性永久不妊	3.5-6.0
女性永久不妊	2.5-6.0
白内障	5.0
造血機能低下	0.5
致命的骨髄不全	1.5
脱毛	4.0
火傷	3.0-6.0

スなどの実験動物で報告された。しかし、被爆二世を対象とした大規模な調査が長年にわたり行われているが、現在のところ被爆二世とそれ以外の人の中で、染色体異常の頻度、流産率(染色体異常は流産の主要な原因の一つである)、発癌率の差は検出されておらず、ヒトではまだ確認されていない。¹⁹⁻²¹⁾

確定的影響には、火傷、脱毛、血球細胞の減少、不妊、白内障などが該当し、それぞれしきい値が存在する(表1)。^{6,22,23)} 確定的影響は、チェックポイント機構が作動して一時的あるいは恒久的に増殖を停止した細胞や、アポトーシスにより死ぬ細胞が、ある一定量に達したときに初めて臨床的所見が認められる現象である。たとえば、体内の血球系の細胞は、絶えず骨髄幹細胞の細胞分裂により新たに作り出される一方で、寿命に達した細胞は死滅し、ほぼ一定量に保たれている。被曝により、相当数の骨髄幹細胞の細胞分裂がチェックポイント機構により停止したり、アポトーシスにより死滅して新たな血球細胞の供給が減少すると、血球細胞の減少という臨床症状としてとらえられるようになる。

人体は様々な種類の細胞から構成され、(1)常に分裂増殖を繰り返している細胞(骨髄、消化管、生殖腺、皮膚など)、(2)通常は分裂していないが、必要に応じて分裂増殖する細胞(肝臓、腎臓など)、(3)完全に分化して分裂能を失った細胞(神経、筋肉など)に分けられるが、一般的に未分化で盛んに増殖している細胞ほど放射線感受性が高く、完全に分化して分裂能を失った細胞は感受性が低い。^{1,2,5)} これは、分裂増殖をしている細胞ではDNA損傷が起こると、誤った遺伝情報(突然変異や染色体異常)が次世代に引き継がれないよう、細胞周期を停止したりアポトーシスを誘導する経路が積極的に働くためである。放射線障害による死亡は、骨髄が再生できなくなることにより引き起こされ、4 Svで半数のヒトが、7 Svで全員が死亡する。この段階では、骨髄移植により治療可能であるが、被曝量が10 Svを超えると消化管の幹細胞の再生が不能となり、治療は困難となる。

2) 線量率効果

放射線の生物効果は、被曝線量だけではなく線量率(単位時間当たりの線量)にも依存している。^{1,4)} 細胞内には、元々、還元型グルタチオン、システイン、アスコルビン酸などのように活性酸素を吸収する物質や、スーパーオキシ

ドディスムターゼ、ペルオキシダーゼなど活性酸素を分解する酵素が存在する。そこで、同じ線量を被曝しても、低い線量を時間をかけて被曝すると活性酸素の効果が薄れることに加え、DNA修復機能が十分に機能したり、免疫機能により前癌状態の細胞が効率よく排除されると考えられる。実際に、同じ線量を被曝した場合でも、低線量率で時間をかけて照射する方が、高線量率で照射したときに比べて生物効果が軽減されることが、哺乳類の培養細胞やマウスを使った複数の実験から示されている。^{24,25)} また、地球上には自然放射線量の多い地域が複数有り、そこに居住する人たちの年間被曝量は10 mSvに達するが、これらの地域の住民は、末梢白血球の染色体異常の頻度がやや高いものの、低放射線地域と比較して、発癌率、流産率、先天異常の発生率に差は認められておらず、累積被曝線量が600 mSvを超えても発癌率が上がっていないことが確認されている。^{26,27)} もし、確率的影響にしきい値がなく、確率が線量に比例するのであれば、どんなに微量の放射線でもその影響は蓄積するはずであるが、実態は異なる。国際放射線防護委員会も2007年の勧告の中で、低線量率での被曝や微量放射線のリスクを、しきい値無し直線モデルに従って発癌のリスクを評価するよう勧告はしているが、不確実性が大きく、必ずしも適切ではないことも指摘している。⁶⁾

3) 外部被曝と内部被曝

被曝の形態は、体外の放射線源から被曝する外部被曝と、飲食や呼吸などにより体内に摂取した放射性物質から被曝する内部被曝とに分けられる。^{1,2,5,28)} 外部被曝が問題となるのは、X線やガンマ線などの透過力が高い放射線についてであり、線源から距離を取ること、適切な遮蔽を設けること、被曝の時間を短くすることが重要になる。一方、内部被曝の場合は、透過力が弱い放射線ほど放射線のエネルギーをすべて体内で失うため、その影響が大きくなる。内部被曝は、放射性物質が減衰または排出されるまで組織や器官を絶えず照射すること、被曝量の正確な測定が困難であること、体内に沈着してしまった場合は放射性物質を排泄させる手段が無いことなどから、同じ核種、同じ数量の核種の外部被曝よりも危険性ははるかに高く、ベクレルからシーベルトに換算する実効線量係数にもそれが反映される。^{5,28),*2}

内部被曝の影響は、放射線自体の半減期だけでなく、その物質が生体内にどれくらい取り込まれやすいのか、どれくらいの期間生体内にとどまっているのか(生物学的半減期)、特定の器官に蓄積されやすさに依存する。^{5,28)} これら生体内での挙動は放射性物質の化学型や物理的性質にも依存する。たとえばトリチウムの化合物では、水であれば全身に分布し排泄されやすいが、DNAの前駆体(チミンなど)であれば遺伝子に取り込まれ、排泄は困難となる。また、一般的にコロイド状になっている場合は、細網

内皮系と呼ばれる免疫系の細胞が異物として貪食するので、リンパ腺、肺胞、骨髄、肝臓などに蓄積しやすい。

2011年3月に東京電力福島第一原子力発電所で起きた事故に伴い放出された放射性核種にはヨウ素、セシウム、ストロンチウム、プルトニウムなどがある。放射性ヨウ素は甲状腺機能亢進や甲状腺癌の治療薬として用いられてきたことから、体内での動態について他の核種に比べて詳細な情報が得られている。それによれば放射性ヨウ素は甲状腺に蓄積するが、甲状腺の機能が活発な乳幼児ほど影響が大きく、40歳以上ではほとんどリスクはないと考えられている。²⁸⁾ また、日本人は日頃から海藻などを摂取しているため血中のヨウ素濃度が比較的高く、生物学的半減期は約1ヶ月である。チェルノブイリ事故後、汚染地域で子供の甲状腺癌が増えたのは大量の放射性ヨウ素を取り込んだことが原因であるが、この地域は内陸部のため日頃からヨウ素が欠乏していたために、より効率的に放射性ヨウ素を取り込んでしまった可能性が指摘されている。今回の原発事故直後に、原発周辺地域の小児約1,000人を対象に行った内閣府の調査によれば、甲状腺等価線量の最高値は35 mSvであり、甲状腺癌のリスクが高まるとされる100 mSvを下回っていた。²⁹⁾ チェルノブイリ事故後のウクライナやベラルーシでの甲状腺等価線量の平均値が0.15~3 Sv程度であったことを考えると、³⁰⁾ 今後、国内で小児の甲状腺癌が増加することはないと予測されている。

生活空間に関して言えば、現在、原発由来の主要な放射線源は物理的半減期の長いセシウムである。セシウムの体内での挙動はカリウムと似ており体全体に分布するが、生物学的半減期は約三ヶ月であり比較的短期間で排泄される。²⁸⁾ 一方、ストロンチウムの挙動はカルシウムと似ており、骨に沈着するので生物学的半減期は数十年とされている。²⁸⁾ 一般的に30歳を過ぎると骨の代謝が遅くなるが、成長期の子供は取り込みやすく、一度沈着すると長期にわたり影響を受けることになる。プルトニウムは消化管からの吸収は少なく、呼吸器系から摂取されるケースが多いが、生物学的半減期は器官により40年から100年と長い。²⁸⁾ なお、国と福島県が事故後に実施した調査によれば、飛散したストロンチウムやプルトニウムの量はセシウムに比べて少なく、ストロンチウムの降下物は東北・関東の10都県で観察されたものの、その量はセシウムの19,000分の1から600分の1程度であり、過去の大気圏内核実験による影響に比べても小さいということが判明した。³¹⁾ またプルトニウムについては、飛散した地域は原発周辺に限られており、事故発生前に観測されていたプルトニウムの測定値の範囲内に収まるレベルであった。³²⁾

4. 事故後の被曝限度の規制値と今後のリスクについて

日本は自然放射線量の低い地域であり、自然放射線による被曝量は1.5 mSv/年であり(世界平均は2.4 mSv/年)、医

*2 逆に言えば、シーベルトで表した数字が同じであれば、内部被曝、外部被曝にかかわらず、影響の大きさは同じである。

療被曝は平均2.3 mSv/年である。²⁾ これらの被曝を除き、平常時の公衆の許容量は1 mSv/年と定められている。これに対して職業被曝の許容量は100 mSv/5年である。^{1,2,5)} 職業被曝においては、18歳から65歳まで一様に連続して被曝すると仮定し、発癌による死亡率は5.5%/Svでしきい値は無いとして、発癌リスクを算出している。そして、被曝による死亡率の増加や18歳時における平均余命の損失が、自然災害や不慮の事故など他のリスクと比較して受け入れられる線量として、100 mSv/5年が定められている。

今回の原発事故を受けて国際放射線防護委員会は、公衆の非常事態収束後の被曝限度を1~20 mSv/年の範囲で設定することを勧告した。この上限の20 mSv/年という値は、職業被曝限度(100 mSv/5年)を参考にしており、現在、政府もこの値を採用して避難区域などを設定している。しかし、放射線の確率的影響にはしきい値がないと仮定されているので、事故を受けて急遽数値が引き上げられたことに不安を感じている人も少なくないように思われる。また、少しでも余計な放射線を被曝したくないと人々が考えるのももっともなことである。

それでは、今後一般住民が受ける可能性のある20 mSv/年という線量は、どの程度のリスクなのだろうか。20 mSv/年は白血球が減ったり、髪の毛が抜けるといった確定的影響が出る線量ではない。懸念されるのは確率的影響(将来の発癌率の増加)である。20 mSv/年を50年間被曝し続けたときの積算線量は1 Svなので、被曝者のデータを元にするると発癌リスクは5.5%となる。¹⁶⁾ しかし、前述のように生物効果には線量率も影響を与えることを考えると、発癌リスクはこの値より小さくなることが予想される。^{24,25)}

実は我々の体内では、酸素呼吸により反応性の高い活性酸素が常に発生しており、放射線を被曝しなくともDNAは絶えず損傷を受けている。⁸⁾ これまでに、DNA修復に必要なタンパク質を先天的に欠損する症例が複数報告されているが、患者は放射線を浴びなくても、高発癌性、重篤な奇形、発達異常を示す。^{13,33)} この事実は、放射線を浴びなくても体内でDNA損傷が発生していることを示唆している。実際、代謝によるDNA一本鎖切断や塩基修飾の数は、それぞれ1個の細胞で1日当たり数千箇所から数万箇所に達し、二本鎖切断も0.1~10箇所程度生じていると考えられている。⁷⁾ 人体は約70兆個の細胞から構成されているので、毎日、天文学的な数のDNA損傷が体内で作られ、修復されることが繰り返されている。これらの損傷は、放射線による損傷と同様に修復され、一部が修復過程で突然変異を引き起こす。突然変異を起こすと、もはや遺伝情報は修正されることはないので、加齢とともに細胞内には突然変異が蓄積していく。突然変異は細胞内の遺伝子にランダムに生じるが、細胞増殖に関わる遺伝子に突然変異が生じて、細胞増殖にブレーキがかからなくなった状態が癌である。発癌率は年齢の5~6乗に比例して上昇することから、

同一細胞内で細胞増殖に関わる遺伝子のうち5~6個に突然変異が入ることが癌の原因と考えられている。³⁴⁾ こうした自然発癌の主要な要因は代謝による活性酸素であり、日本人の癌の罹患率が高いのは、長生きの代償に他ならない。一方、1年間かけて20 mSvのガンマ線を被曝したときの、1日当たりの塩基損傷は0.02箇所/細胞、DNA一本鎖切断は0.05箇所/細胞、DNA二本鎖切断の頻度は、0.002箇所/細胞程度と見積もられており、⁷⁾ 代謝により生じた活性酸素によるDNA損傷の影響に比べて放射線による影響はかなり少なく、より大きな日常的なリスクや喫煙・運動不足などの生活習慣によるリスクに埋もれてしまう可能性が高いと予想される。

食品中の放射性物質については国内に規制する法律がなかったが、事故後、原子力安全委員会で示された指標を元に暫定規制値が設けられた。当初設定された規制値は、セシウムについては5 mSv/年、ヨウ素については甲状腺での等価線量が50 mSv/年に達しないように算出されていた。しかし、食品の国際規格を作成しているコーデックス委員会の指標が1 mSv/年であること、多くの食品からの検出濃度が時間の経過とともに低下傾向にあることから、平成24年4月より年間の線量の上限をストロンチウム、プルトニウムなども含めて1 mSvとする新たな基準値を採用している。³⁵⁾ 新しい基準では、食品を飲料水、牛乳、乳児用食品、一般食品の4群に分け、世代を1歳未満、1~6歳、7~12歳、13~18歳、19歳以上、妊婦の6群に分け、それぞれの世代の摂取量を考慮し、いずれの世代においても年間の総摂取量が1 mSvを超えないように設定されている。

5. 今後に向けて

放射性物質による汚染は広域にわたっており、完全な除染は容易ではない。長期間にわたる低線量放射線のリスクについては、限られたデータから危険性を推測せざるを得ないこと、内部被曝のモニタリングは困難なことから、空間線量の高い地域では被曝線量を最小限に留めるための実効性のある対策を講じていくことが重要である。また、原子炉は冷温停止に至ったが、最終的な原子炉の廃止措置には数十年という長い年月が予定されている。原発敷地内は依然として線量が高く、作業環境は厳しい状況にあり、作業員の被曝線量の低減化や作業性向上のための対策も急がれる。

今後の震災からの復興の過程で、原子炉の廃止措置のための技術的支援、代替エネルギーの開発、放射線のモニタリング、除染のための技術的支援など、科学技術が貢献しうる課題は多数存在する。また、これらの過程の中で、研究に携わる者が国民に対して正しい科学的情報を提供し、分かりやすく伝えていく努力も必要である。そしてこれらの活動が、震災と原発事故により失われた科学者・技術者に対する国民の信頼を取り戻すことにも繋がることを期待したい。

最後に、執筆にあたり数々の有益な助言を頂きました理

化学研究所仁科加速器研究センターの阿部知子博士に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山口彦之:『放射線生物学』(裳華房, 1995).
- 2) 江島洋介, 木村 博編:『放射線生物学』(オーム社, 改訂2版, 2011).
- 3) ICRP: *Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26*, Ann. ICRP **1**(3) (1977) pp. 1-53.
- 4) E. J. Hall 著, 浦野宗保訳:『放射線科医のための放射線生物学』(篠原出版新社, 第4版, 2002).
- 5) 日本アイソトープ協会編:『ラジオアイソトープ基礎から応用まで』(丸善, 1993).
- 6) ICRP: *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103*, Ann. ICRP **37** (2-4) (2007) pp. 1-332.
- 7) A. Ciccio and S. J. Elledge: *Mol. Cell* **40** (2010) 179.
- 8) S. Maynard, *et al.*: *Carcinogenesis* **30** (2009) 2.
- 9) L. Gros, *et al.*: *Oncogene* **21** (2002) 8905.
- 10) 泉 雅子: *ぶんせき* **441** (2011) 527.
- 11) M. Takata, *et al.*: *EMBO J.* **17** (1998) 5497.
- 12) M. M. Vilenchik and A. G. Knudson: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **100** (2003) 12871.
- 13) M. F. Lavin and S. Kozlov: *Cell Cycle* **6** (2007) 931.
- 14) K. Savitsky, *et al.*: *Science* **268** (1995) 1749.
- 15) C. J. Bakkenist and M. B. Kastan: *Nature* **421** (2003) 499.
- 16) N. D. Lakin and S. P. Jackson: *Oncogene* **18** (1999) 7644.
- 17) D. L. Preston, *et al.*: *Radiat. Res.* **160** (2003) 381.
- 18) D. J. Brenner, *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **100** (2003) 13761.
- 19) S. Izumi, *et al.*: *Br. J. Cancer* **89** (2003) 1709.
- 20) Y. Yoshimoto, *et al.*: *J. Rad. Res.* **32** (1991) 327.
- 21) M. Otake, *et al.*: *Radiat. Res.* **122** (1990) 1.
- 22) ICRP: *Nonstochastic Effects of Ionizing Radiation. ICRP Publication 41*, Ann. ICRP **14**(3) (1984) pp. 1-33.
- 23) UNSCEAR: *UNSCEAR 1988 Report. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation* (UNSCEAR, 1988).
- 24) I. Furuno-Fukushi, *et al.*: *Int. J. Radiat. Biol.* **70** (1996) 209.
- 25) S. Tanaka, *et al.*: *Radiat. Res.* **160** (2003) 376.
- 26) M. A. Barcinski, *et al.*: *Am. J. Hum. Genet.* **27** (1975) 802.
- 27) R. R. K. Nair, *et al.*: *Health Phys.* **96** (2009) 55.
- 28) 佐伯誠道編:『環境放射能—挙動・生物濃縮・人体被曝線量評価』(ソフサイエンス社, 1984年).
- 29) 原子力安全委員会:『福島県における小児甲状腺被ばく調査結果について』(2011年5月12日, 第31回原子力安全委員会 資料第4-3号).
- 30) UNSCEAR: *UNSCEAR 2008 Report Vol. II Effects of Ionizing Radiation* (UNSCEAR, 2008).
- 31) 文部科学省:『都道府県別環境放射能水準調査(月間降下物)におけるストロンチウム90の分析結果について』(2012年7月24日, 報道発表資料).
- 32) 福島県災害対策本部:『福島県における土壌の放射線モニタリング調査結果』(2012年4月).
- 33) S. Matsuura, *et al.*: *Nat. Genet.* **19** (1998) 179.
- 34) B. Alberts, *et al.*: *Molecular Biology of the Cell* (Garland Science, 2007) 5th ed.
- 35) 厚生労働省:『乳及び乳製品の成分規格等に関する省令の一部を改正する省令, 乳及び乳製品の成分規格等に関する省令別表の二の(一)の(1)の規定に基づき厚生労働大臣が定める放射性物質を定める件及び食品, 添加物等の規格基準の一部を改正する件について』(2012年3月15日, 食安発0315第1号).

非会員著者の紹介

泉 雅子氏: 1992年お茶の水女子大学大学院博士課程修了。現在, 理研仁科加速器研究センター専任研究員。真核細胞のDNA複製・修復機構について研究している。

(2012年8月30日原稿受付)

The Effects of Radiation on the Human Body

Masako Izumi

abstract: The nuclear reactor of Fukushima power plant finally reached cold shutdown after its world-shaking accident. However, many people are still deeply concerned about the radiation effects on the human body and environment since there is no effective way to decontaminate the radioactive materials in the environment. Recent progress in biology enables us to understand how radiation affects the human body at the molecular level. On the other hand, the biological effects of low-dose radiation and the internal exposure in the long term are controversial since only a limited number of reports are available. Here I review the history and recent progress of radiation biology as well as the ground for the regulation by the government.

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

(参照: 本誌 47 (1992) 4号会告)

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

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

アメリカ合衆国における複製については, 下記 CCC
に連絡して下さい。

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

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

スケール不変性 vs 共形不変性

中山 優 (California Institute of Technology 1200 E California Blvd, Pasadena, CA 91125)

スケール不変性は高エネルギー物理から物性理論まで幅広い応用がある対称性である。特に相対論的な系では、スケール変換は共形変換と言う時空の各点でのスケール変換を許すような拡張ができる。数学的には理論のスケール不変性は共形不変性を意味しないのであるが、両者の違いを巡って長年議論が交わされてきたようである。この解説では二つの対決を通して、いかにスケール不変性が共形不変性に拡張されるかを最近の活発な研究成果を踏まえて議論したい。

1. 対決：15パラメタ！

時は1970年代後半。旧ソ連のドゥブナ市でとある国際会議が開かれる。テーマは物理におけるスケール不変性。主催者の一人、ボゴリューボフ (N. N. Bogoliubov) と言えば、繰り込み群の創始者の一人でありスケール不変性の概念を場の量子論に持ち込んだ大家である。ノーベル賞物理学者のウィルソン (K. Wilson) は、彼の有名な教科書¹⁾の最も神秘的な一章に魅了されて、繰り込み群の研究を始めた後に回顧している。

会議もたけなわ、西側のある物理学者がKGBならば「扇動的な」と形容するであろう一つの質問を投げかける。「スケール不変と共形不変とは何が違うのですか？」講演者は黙ってしまう。しかし、議長であるボゴリューボフはすかさずマイクを取り、厳かに答える。「数学的には違いはない。しかし、若い人が奇をてらった言葉を使おうと、共形不変と言うのである」と。一人の若い東側の物理学者はこの答に憤る。すかさず立ち上がって「15パラメタ！」と叫ぶ。しかし、叫びは聞き入れられることはなく、会議の散会が告げられた。

この若い物理学者とは、ミグダル (A. A. Migdal) であり、共形不変性の応用において優れた業績を残している。このエピソードは彼の自伝²⁾に見られるが、驚くことに、この会議から30余年たった現在においても、スケール不変性と共形不変性の関係は議論的になっている。本解説では、冒頭の二人の対決をごく最近の発展を元に再考したい。

2. 繰り込み群とスケール不変性

繰り込み群の考え方は高エネルギー物理学から物性理論まで20世紀の理論物理学の大きな柱であった。ウィルソンによって近代的な形で定式化された繰り込み群³⁾を一言で表現するとすると、スケール変換と粗視化である。高エネルギーの情報を積分し、有用なパラメタだけを残して繰り込んでしまうことで、低エネルギーの有効理論を実現する。繰り込み群の終着点である低エネルギー有効理論は高エネルギーの微細な情報に依存せず、普遍的な振る舞いをすると期待するわけである。そして、その普遍的な低エネルギーの有効理論はスケール不変な繰り込み群の赤外固定点で記述される。スケール変換を何度も繰り返していくうちに、理論に内在していたスケールと言う概念が消えてしまう：あるエネルギースケールに特別な物理があったら、

そのエネルギースケール以下まで理論を繰り込んでしまえばよい！

スケール不変性の物理への応用は幅広い。繰り込み群の見方を物性論に應用すると、臨界現象の分類は、場の量子論・多体系の赤外極限での普遍的な振る舞いを決定する繰り込み群の固定点の分類と同一視される。また、高エネルギー実験での紫外でのビヨルケンスケール則に代表される漸近自由性の考え方もスケール不変性(とその破れ)に基づいている。宇宙論でも、最近精密測定が行われている宇宙背景放射の揺らぎはスケール不変性を持っているようである。そもそも、私たちが根源的な究極理論を知らなくても、身の回りの現象を場の量子論を使って説明できるのは、繰り込み群で得られる普遍的な有効作用の概念が成立するからであろう。

このようにして、ウィルソンの繰り込み群の見方からすると、粗視化に従って理論の情報をどんどん繰り込んでいくのだから、繰り込み群の終着点としてスケール不変性が登場するのは自然に思えるし、赤外極限が固定点として存在するのもまったく不自然ではない。しかし、この素朴な期待はどれだけ正しいのであろうか？

翻って、ウィルソンを魅惑したというボゴリューボフの教科書の繰り込み群の神秘的な章を眺めてみると、繰り込み群の漸近的な振る舞いの一つの可能性として、赤外固定点の他に繰り込み群が極限周期を持つ可能性が示唆されている。極限周期が存在するということは、繰り込み群が固定点を持つと言う素朴なアイデアが破綻しているということの意味している。高いスケールの自由度を繰り込んで粗視化したのにもかかわらず、また、元の理論に戻ってしまうと言うのである！彼の教科書にはこのような繰り込み群を持つ実際の模型は示されていないが、現在では、非相対論的な例で(例えばエフィモフ効果など)存在することが知られている。

実は、相対論的な場の量子論においては、ユニタリ性や因果性と言った妥当と思われる仮定の下に、この素朴な粗視化のアイデアは精密化できることが期待されている。これから見ていくように、(1+1)次元の相対論的場の量子論におけるザモロジコフ (A. B. Zamolodchikov) の c -定理⁴⁾あるいはその高次元への拡張が、繰り込み群の流れに沿って単調減少する関数を定義し、「自由度」が粗視化に伴って減少すること、繰り込み群は赤外で固定点を持つ

ことなどを正当化するのである。近年の場の量子論の著しい発展の一つは、長年未解決であった、(1+3)次元におけるザモロジコフのc-定理の拡張(カーディー(J. Cardy)のa-予想⁵⁾と呼ばれる)について物理的・直観的な証明が提案されていることである。これについては6節で触れたい。この発展は冒頭の対決とも深くかかわってくるのである。

3. 共形不変性と共形場の理論

この解説の読者は、対称性と保存則は全ての物理学の基礎であると同感していただけたらと思う。場の量子論においては、理論がある変換の下で不変であるときに、保存するカレントが存在することが期待される(ネーターの定理)。繰り込み群の固定点で現れるスケール変換不変性に対応する保存カレントから話を始めよう。

相対論的な場の量子論において、時空の並進不変性とローレンツ変換不変性(あわせてポワンカレ不変性と呼ぶ)はネーターの定理によって、保存する対称エネルギー・運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ の存在を保証する。スケール変換に対応するカレントはそのエネルギー・運動量テンソルの特別な性質として理解できる。今、そのトレースが

$$T_{\mu}^{\mu} = \partial^{\mu} J_{\mu} \quad (1)$$

とビリアルカレントと呼ばれるカレント J_{μ} の発散で表されるとしよう。すると、この時、保存するスケールカレント $D_{\mu} = x_{\nu} T_{\mu}^{\nu} - J_{\mu}$ をさらに作ることができて、理論はスケール変換 $x^{\mu} \rightarrow \lambda x^{\mu}$ に対して不変である。繰り込み群の固定点ではこのスケールカレントが存在しているはずである。

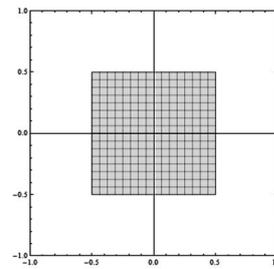
一方、冒頭で議論的になった共形変換、共形不変性とはどのような対称性であろうか? 共形変換は平坦な時空の計量を全体の共形因子をのぞいて変えない(つまり $ds^2 \rightarrow f(x) ds^2$)変換で、並進、ローレンツ変換、スケール変換に加えて、特殊共形変換

$$x^{\mu} \rightarrow \frac{x^{\mu} + v^{\mu} x^2}{1 + 2v^{\mu} x_{\mu} + v^2 x^2} \quad (2)$$

で生成される。直観的に言うと、時空の各点ごとで局所的なスケール変換を施していると見なすことができる。この変換は角度を変えない等角写像である(図1参照)。

理論が共形変換に対して不変である条件は、エネルギー・運動量テンソルがトレースレス $T_{\mu}^{\mu} = 0$ であることが知られている。より正確には、エネルギー・運動量テンソルに任意性があるために、先ほど導入したビリアルカレント J_{μ} が何らかの2階のテンソルの発散 $J_{\mu} = \partial^{\nu} L_{\mu\nu}$ と書けることが条件となる。この場合、 $L_{\mu\nu}$ を使って、エネルギー・運動量テンソルを、例えば(1+3)次元では

$$\begin{aligned} T_{\mu\nu} &\rightarrow T_{\mu\nu} \\ &+ \frac{1}{2} (\partial_{\mu} \partial_{\rho} L_{\nu}^{\rho} + \partial_{\nu} \partial_{\rho} L_{\mu}^{\rho} - \partial^2 L_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu} \partial_{\rho} \partial_{\sigma} L^{\rho\sigma}) \\ &+ \frac{1}{6} (\eta_{\mu\nu} \partial^2 L_{\rho}^{\rho} - \partial_{\mu} \partial_{\nu} L_{\rho}^{\rho}) \end{aligned} \quad (3)$$



スケール変換 ↓

共形変換 ↓

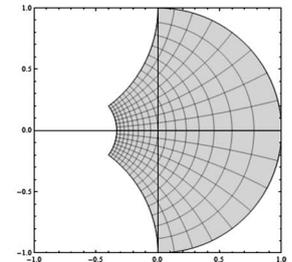
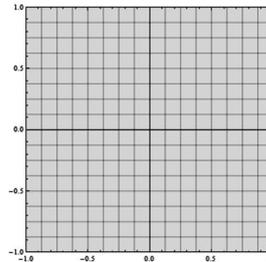


図1 スケール変換と共形変換の違い。筆者の知覚はスケール変換で不変であっても共形変換で不変でないため、両者が等価であるとは簡単には認識できないが…

と改良してトレースレスにでき、保存する特殊共形変換カレント

$$K_{\mu}^{(\rho)} = (\rho_{\nu} x^2 - 2x_{\nu} (\rho_{\sigma} x^{\sigma})) T_{\mu}^{\nu} \quad (4)$$

を作ることができる。ここで、 ρ_{μ} は式(2)の v^{μ} に対応する無限小パラメタである。

共形対称性を持つ場の量子論のことを共形場の理論(Conformal Field Theory, CFTと略することが多い)と呼ぶが、共形対称性は理論に対して強い制限を与える。特に(1+1)次元では、ピラソロ対称性の表現論を用いて最小共形場理論と呼ばれるクラスの理論は完全に分類することができる。高次元でも、理論のスペクトラムや相関関数に強い制限を与えることができる。たとえば、スケール次元 Δ を持つスカラー演算子 $O(x)$ の真空3点関数は共形場の理論において

$$\langle O(x_1) O(x_2) O(x_3) \rangle = \frac{c_{000}}{(x_1 - x_2)^{\Delta} (x_2 - x_3)^{\Delta} (x_3 - x_1)^{\Delta}} \quad (5)$$

という形を取るが、スケール不変性だけではこの形まで決定することはできない(他にどんな項が書けるか考えてみると楽しい)。

$d=1+3$ 次元では、共形変換は15個のパラメタを持ち、10個のポワンカレ変換と1個のスケール変換のパラメタに加えて、式(2)におけるベクトルパラメタ v_{μ} から4個の特殊共形変換が加わっている。これが、冒頭で叫ばれた「15パラメタ!」の意味である。決して11ではない!

4. スケール不変性は共形不変性を示唆するか?

数学的にはスケール変換は共形変換の単なる部分群であるので、ある若い物理学者が主張したようにスケール不変性は共形不変性を意味しない。しかし、驚くべきことに、スケール不変性を持つ相対論的な場の量子論はほとんど常

に共形不変性を持っているということが経験事実としてわかってきた。特に、(1+1)次元の相対論的場の量子論では次の定理が成り立つ(ザモロジコフ・ポルチンスキーの定理^{4,6)}。

定理：(1+1)次元のスケール不変な場の量子論において、理論が(1)ユニタリで、(2)相対論的不変(特に因果的)(3)スケール変換の固有値が離散的であるとすると、理論は共形不変である。

簡単に略証を与えてみよう。

(1+1)次元では、理論をユークリッド化 $(\sigma, t) \rightarrow (\sigma, i\tau)$ した上で、複素座標 $z = \sigma + i\tau$ を用いると便利である。すると、エネルギー・運動量テンソルは $T = T_{zz}$ と $\Theta = T_{\mu}^{\mu}$ が独立な成分である。さらに、エネルギー・運動量テンソルの保存則は $\bar{\partial}T + 4\partial\Theta = 0$ となる。ザモロジコフ⁴⁾に従い、次のエネルギー・運動量テンソルの真空2点関数を考えてみる

$$\begin{aligned} F(|z|^2) &= z^4 \langle T(z, \bar{z}) T(0) \rangle, \\ G(|z|^2) &= z^3 \bar{z} \langle \Theta(z, \bar{z}) T(0) \rangle, \\ H(|z|^2) &= z^2 \bar{z}^2 \langle \Theta(z, \bar{z}) \Theta(0) \rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

ポワンカレ不変性から、 F, G および H は2点間の距離 $|z|^2 = z\bar{z}$ だけのスカラー関数である。

ここで、次の特別な線形結合

$$C = 2 \left(F - \frac{1}{2} G - \frac{3}{16} H \right), \quad (7)$$

を c -関数と呼び、その繰り込み群の応答を調べよう。エネルギー・運動量テンソルの保存則から

$$\dot{C} \equiv \frac{dC}{d \log |z|^2} = -\frac{3}{4} H \leq 0. \quad (8)$$

ここで、不等号は理論のユニタリ性から示される2点関数の正値性による。このようにして、 c -関数は繰り込み群の流れに沿って単調減少であるが、これをザモロジコフの c -定理と呼ぶ。

この意味深な不等式はスケール変換性と共形変換性の等価性も示している。今、理論がスケール不変であったとしよう。ハミルトニアン⁷⁾のスケール次元を1とすると、その密度であるエネルギー・運動量テンソルのスケール次元は(1+1)次元での標準的な値2を取ると期待される。この時、スケール不変性の仮定から F, G , および H は定数であり、定義(7)によって $\dot{C} = 0$ である。すると、式(8)から H はゼロであり、定義から

$$H = z^2 \bar{z}^2 \langle \Theta(z, \bar{z}) \Theta(0) \rangle = 0 \iff \Theta(z, \bar{z}) = 0. \quad (9)$$

であることがわかる。ここで、因果律とユニタリ性、および、スペクトラムの離散性を用いて \iff を導出した。しかるに、エネルギー・運動量テンソルのトレースはゼロであるから、前節で議論したように、理論は共形不変である(証明終)。すなわち、ボゴリューポフの言明は(1+1)次元では正しい(ただし奇をてらった議論が必要であると言えるかもしれない)!

以下の節で議論する繰り込み群の解析と見比べるために、今、固定点の近くで、 $\Theta = \beta^I \mathcal{O}_I$ と理論に現れるスカラー演算子 \mathcal{O}_I で展開できるとしよう。5節で議論するように β^I は繰り込み群に表れるベータ関数と解釈できる。すると、スケールのない理論において距離と繰り込み群スケールは $|z| \sim \mu^{-1}$ と同一視できることから、

$$\frac{dC}{d \log \mu} = \frac{3}{2} G_{IJ} \beta^I \beta^J \quad (10)$$

という式が、距離 $|z|^2$ の対数微分を繰り込みスケール μ での対数微分に置き換えることで得られる。ここで、 $G_{IJ} = |z|^4 \langle \mathcal{O}_I(z, \bar{z}) \mathcal{O}_J(0) \rangle$ はザモロジコフ計量と呼ばれる正值の量である。

高次元では素朴な形でのザモロジコフ・ポルチンスキーの定理の拡張には反例が存在する。⁷⁾ たとえば、 $d > 1+3$ 次元の自由なマックスウェル理論を考えてみよう。 $F_{\mu\nu}$ 場の強さの反対称テンソルとして、保存するエネルギー・運動量テンソルは

$$T_{\mu\nu} = F_{\mu\rho} F_{\nu}^{\rho} - \frac{\eta_{\mu\nu}}{4} F_{\rho\sigma} F^{\rho\sigma} \quad (11)$$

であるから、そのトレースは

$$T_{\mu}^{\mu} = \frac{4-d}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} = \frac{4-d}{8} \partial_{\mu} (A_{\rho} F^{\rho\mu}) \quad (12)$$

と計算できる。ここで、 $d = 1+3$ なら直ちに共形不変であることに注意する。一般の次元でも、自由場理論であるからスケール不変性が期待でき、エネルギー・運動量テンソルのトレースは確かに(運動方程式 $\partial^{\mu} F_{\mu\nu} = 0$ を使った上で)ビリアルカレント $J_{\mu} = ((4-d)/8) A^{\rho} F_{\rho\mu}$ の発散になっている。しかし、このビリアルカレントは $J_{\mu} = \partial^{\nu} L_{\nu\mu}$ として表すことはできず、理論は共形不変でない。実際、 $O = F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$ として3点関数を計算すると、式(5)の形ではない。この理論はもちろん、ユニタリでポワンカレ不変、かつスケール変換の固有値は離散的であるので、上の定理の拡張が $d > 1+3$ 次元では成り立たないことがわかる。ただし、この理論においてスケール変換カレントはゲージ不変でないことに注意しておこう。もちろん、理論のスケール変換に必要なカレントを積分したスケールチャージはゲージ不変である。

(1+3)次元でスケール不変性から共形不変性が示せるかどうかは未だに完全な決着がついていない。しかし、(1+1)次元の類推が成り立つとすれば、ザモロジコフの c -定理のようなものが高次元でも重要な役割を果たすと思われる。6節で、 c -定理の(1+3)次元理論への拡張である a -定理に関連して、摂動論ではスケール不変性と共形不変性の等価性が(1+3)次元でも示唆されていることを議論したい。

5. 具体例と応用

古典的な(1+3)次元の相対論的場の理論では、ユニタリ性と摂動論的繰り込み可能性を課すと、全てのスケール

不変な理論は、共形不変であることが可能な作用を全部書き下すことでわかる。そのため、問題は、量子論的にスケール不変な固定点が共形不変性を示すかどうか?である。特に、量子効果、あるいは繰り込み群の効果と言ってもよいが、によって古典的なスケール不変性は簡単に壊れてしまい、量子論的な固定点でのみスケール不変性が実現される。

一般に、量子論的補正によるスケール変換性の破れは、エネルギー・運動量テンソルのトレースを

$$T_{\mu}^{\mu} = \beta^I \mathcal{O}_I + \beta_a \partial^{\mu} \mathcal{J}_{\mu}^a \quad (13)$$

とスカラー演算子 \mathcal{O}_I とそのベータ関数 β^I 、および、ベクトル演算子 \mathcal{J}_{μ}^a とそのベータ関数 β_a で展開して得られる。(スカラー演算子に対応する) ベータ関数 β^I と言うのは、演算子 \mathcal{O}_I に対応する結合定数 g^I が繰り込み群に沿ってどれだけ変化するかを表しているとして直観的に理解できる。

ここで、量子論的にスケール変換で理論が不変であると

$$T_{\mu}^{\mu} = \beta^I \mathcal{O}_I + \beta_a \partial^{\mu} \mathcal{J}_{\mu}^a = \partial^{\mu} J_{\mu} \quad (14)$$

と運動方程式などの演算子恒等式を使ってビリアルカレントの発散として書けるということである。一方3節で議論したように、共形不変性はより強い要求、 $J_{\mu} = \partial^{\nu} L_{\mu\nu}$ を要請したのであった。

今、仮に $\partial^{\mu} \mathcal{J}_{\mu}^a = 0$ とすると、スケール変換で不変であるが共形不変でない理論において、 $\beta^I \mathcal{O}_I = \partial_{\mu} J^{\mu}$ であるから、 β^I はゼロでない値を取り続ける。すなわち、 μ を繰り込み群のスケールとしたとき、 $(dg^I(\mu)/d \log \mu) = \beta^I(g^I)$ から、結合定数 g^I は繰り込み群の流れに沿って常に変化せざるを得ない。特に摂動論の計算からは、ユニタリな理論での β^I の固有値は(もしゼロでなければ)スケール変換不変であるが共形変換不変でない点の近傍で純虚数であり、結合定数は周期的な挙動を示す。これによって、スケール不変であるが共形不変でない理論は、一般的に繰り込み群が極限周期を持つ(図2参照)。

こうして、ポゴリユーボフの教科書でも「魅惑的な」と言及されている極限周期を持つ繰り込み群の流れは、皮肉にも、スケール不変性と共形不変性が等価でない時に現れることがわかる。誤解を避けるために付け加えておくと、この場合でも仮定により理論はスケール不変であり、たとえ結合定数が周期的に変化しても物理は変わらないのである。しかし、こんなことが実際に起こるのであるか? (1+1)次元では先のザモロジコフ・ポルチンスキーの定理によって禁止されていた。我々が一番興味がある(1+3)次元ではどうであろうか?

ここで、これまでの抽象的な議論を具体的な例で見よう。(1+3)次元の場の量子論として、いわゆる「コンフォーマルウィンドウ」にあるQCDと言う模型を考えてみる。例えば、SU(3)のゲージ群を持つQCDは質量のないフレーバー(クォーク)の数 N_f が十分少なければ、我々が

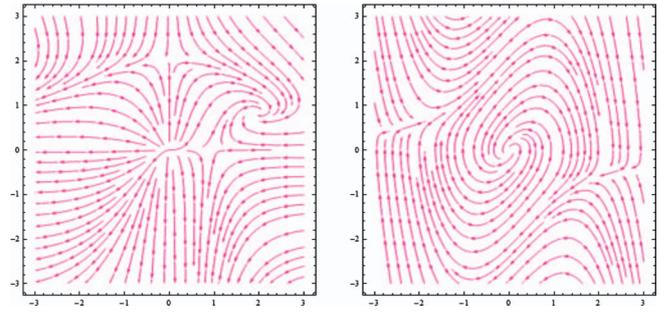


図2 繰り込み群の挙動の例。左側は典型的な紫外固定点と赤外固定点を持つ繰り込み群の流れ。右側は紫外固定点に加えて繰り込み群が極限周期を持つ場合。

実験事実として知っているように閉じ込めを起こすのであるが、仮想的にクォークの数を増やしてみよう。すると、ベータ関数の形が変化し、非自明なゼロ点を持つ可能性がある。この状況をコンフォーマルウィンドウと呼ぶのである。実際、摂動論でエネルギー・運動量テンソルのトレースが2ループの近似で

$$T_{\mu}^{\mu} = \beta(g) \text{Tr} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} \\ \beta(g) = -\frac{g^3}{48\pi^2} (33 - 2N_f) - \frac{g^5}{(16\pi^2)^2} \left(102 - \frac{38}{3} N_f \right) + \mathcal{O}(g^7) \quad (15)$$

と計算できるが、もし、 $\beta(g)$ がクォークの数 N_f を増やして非自明なゼロ点を持つ状況を作ることができると、赤外極限で非自明な固定点を持ち、スケール不変である。実際、 $N_f = 16$ とすると、ベータ関数は g の小さいところでゼロ点を持ち、理論は赤外固定点を持つと考えられている。

さらに強いことに、この場合、可能な赤外固定点ではスケール不変であるだけでなく共形不変でもある。と言うのは、もし $\beta(g) \neq 0$ であれば、この式の右辺を何らかのカレントの発散として書くことは不可能であるからである。つまり、スケール不変性の要求は $\beta(g) = 0$ を意味し、共形不変性の要求と等しくなるのである。ただし、この議論は摂動論に基づいていることに注意しよう。実際、非摂動的にはエネルギー・運動量テンソルの右辺に式(15)の項以外が現れる可能性を排除できないからである。そのため現時点では「コンフォーマルウィンドウ」にあるQCDが非摂動的に共形不変であるかどうかの厳密な証明は与えられていない。

筆者は(1+3)次元でもスケール不変な理論は共形不変であると予想するが、スケール不変が共形不変を意味する一般論が存在するとして、何か面白い応用があるだろうか? もちろん、共形不変性はとても強い対称性なので、場の量子論の予言に対する強い非摂動的な制限を与える(例えば、式(5)のような条件)。しかし、ここでは趣向を変えて、(1+1)次元の場合の一つの数理的な応用を述べよう。

(1+1)次元の非線形シグマ模型において、 X^I をターゲット

ットスペースの座標とした時に、1ループのベータ関数はターゲットスペースのリッチテンソルで与えられることはよく知られている。つまり、共形不変性はリッチ平坦性を要求する： $T_{\mu}^{\mu}=R_{ij}(X)\partial^{\mu}X^i\partial_{\mu}X^j$ 。さて、同じ1ループの近似で、スケール不変な理論のターゲットスペースは準アインシュタイン多様体、すなわち $V_i(X)$ をターゲットスペース上のあるベクトル場として

$$R_{ij}(X)=D_iV_j(X)+D_jV_i(X) \quad (16)$$

であることを要求する（ここで D_j はターゲットスペース上の共変微分）。ベクトル場 V_i の引き戻し $V_i(X)\partial_{\mu}X^i$ がビリアルカレントの役割を果たしているわけである。これは、リッチ平坦性よりも弱い要求となっている。しかし、ザモロジコフ・ポルチンスキーの定理によれば、多様体がユークリッド型の計量を持ち（ユニタリティ）、コンパクトである（スペクトルの離散性）とすると、準アインシュタイン多様体は必ずリッチ平坦でなければならない。そして、この数学的命題は正しい。この幾何学的証明はここでは与えないが、リーマン幾何の定理が繰り込み群の構造から理解できることは面白いであろう。

6. a -定理をめぐる

(1+1)次元のスケール変換性と共形変換不変性の等価性を示す上で鍵となっていたのが、ザモロジコフの c -定理である。この定理によって相対論的場の量子論では繰り込み群が非可逆で赤外固定点は共形不変であるということが約束されていたのであった。

(1+3)次元では c -定理に代わる定理の候補は a -定理、あるいはカーディーの a -予想⁵⁾として知られている。その主張は、繰り込み群の流れに従って単調減少する関数 $(da(g(\mu))/d \log \mu) \geq 0$ を満たす $a(g(\mu))$ が存在し、さらに、その $a(g(\mu))$ は繰り込み群の固定点で共形アノマリー a と一致するというものである。共形アノマリーとは理論を曲がった時空に置いたときに現れるエネルギー・運動量テンソルのトレースに対する異常項であり、(1+1)次元の共形場の理論に対して

$$\langle T_{\mu}^{\mu} \rangle = -\frac{c}{12} R \quad (17)$$

と与えられる。ここで、 R はリッチスカラーであり、 c はセントラルチャージと呼ばれる量で、繰り込み群の固定点ではザモロジコフの c -関数 (7) に等しい。一方、(1+3)次元の共形場の理論の共形アノマリーは

$$\langle T_{\mu}^{\mu} \rangle = \frac{a}{16\pi^2} (\text{Euler}) - \frac{c}{16\pi^2} (\text{Weyl})^2 \quad (18)$$

と与えられる。ここで、 $\text{Euler} = R_{\mu\nu\rho\sigma}^2 - 4R_{\mu\nu}^2 + R^2$ 、 $\text{Weyl}^2 = R_{\mu\nu\rho\sigma}^2 - 2R_{\mu\nu}^2 + (1/3)R^2$ と曲率テンソルで表される。このうち、 a が繰り込み群に沿って単調減少するというのが主張である。なおこれからの議論では、(1+3)次元の c はあまり重要な役割を果たさない。

a -定理の摂動論的な証明はオスボーン (H. Osborn) によって与えられた⁸⁾。今、式(13)において $\partial^{\mu}J_{\mu}^a=0$ であったとすると、摂動的繰り込み可能な理論において、局所的な繰り込み群の無矛盾性から

$$\frac{da(g(\mu))}{d \log \mu} = \chi_{UV} \beta^U \beta^V \quad (19)$$

を示すことができる⁸⁾。もし、 χ_{UV} が正値であるとする、この式は (A) a -定理は正しく、(B) a に下限があれば繰り込み群は赤外固定点を持ち、(C) 固定点ではベータ関数が消え共形不変である、ということを示している。これは、4節で示した式(10)の(1+3)次元バージョンである。ただし、摂動論で χ_{UV} が正値であることは具体的な計算からわかっているが、非摂動的に正値かどうかはこの議論では何も言うことができない点は異なる。(1+1)次元では、 χ_{UV} をザモロジコフ計量と同一視でき、理論のユニタリ性がその正値性を保証していたのであった。(1+3)次元のオスボーンの議論から正値性が言えないのは、そもそも、局所的な繰り込み群の無矛盾性は理論がユニタリかどうかにかかわらず成り立つべきであり、このような不等式を得るにはより精密な情報が必要となるからである。そのため、摂動論を超えた範囲での「コンフォーマルウィンドウ」に関してはこの議論は無効である。

しかし、弱い形の a -定理が成り立つべきだということは、最近になって物理的な証明がコマルゴツキー (Z. Komargodski) とシューウィンマー (A. Schwimmer) によって提案されている⁹⁾。弱い形の a -定理とは紫外固定点での a_{UV} と赤外固定点での a_{IR} には、 $a_{UV} - a_{IR} \geq 0$ という不等式が成り立つと言う主張であり、ここでは、簡単に彼らの議論の要点を紹介したい。

まず、ウォームアップとして(1+1)次元の繰り込み群を考えよう。設定としては紫外で固定点にあった理論に対して有効な摂動（例えばスカラー場の質量項 $m^2\phi^2$ ）を加えてスケール不変性を破った場合を考える。有効な摂動によって生じた繰り込み群の非自明な流れを調べようというわけである。今、理論に現れるスケールを $\Lambda \rightarrow \Lambda e^t$ と仮想的な場「ディラトン」 $\tau(x)$ を導入して書き換えてあげること、見かけ上局所スケール不変を回復させてあげることができる。局所スケール変換に対してディラトン場は $\tau \rightarrow \tau + \omega$ のように変換し、この変換性が有効な摂動を見かけ上共形変換不変にするのである。たとえば、質量項の場合は、 $m^2\phi^2$ を $m^2 e^{2\tau}\phi^2$ とすれば、局所的なスケール不変性が回復する。この仮想的な対称性は、(もともとのスケール不変性は破れてしまっても) 繰り込み群の流れに沿って常に保たれていることに注意する。さて、このディラトンを時空に依存する場と思うと、繰り込み群の影響から赤外極限でその運動項が生じることがわかる。赤外極限でももとの理論が共形不変な固定点（その有効作用を S_{CFIR} と書こう）に流れるとすると、ディラトンを含めた(1+1)次元の全作用は

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{CFTIR}} + 2 \int d^2x (c_{\text{UV}} - c_{\text{IR}}) (\partial_\mu \tau)^2 \quad (20)$$

となる。ここで、重要なことは、仮想的な対称性を課したことによって運動項の前の係数が理論の紫外極限と赤外極限での (1+1) 次元における共形アノマリー c の値の差 $c_{\text{UV}} - c_{\text{IR}}$ で完全に決まってしまう点である。非常に直観的に言うと、 $c_{\text{UV}} - c_{\text{IR}}$ の自由度の分を繰り込み群に沿って積分してしまったので、それに相当する量子効果がディラトンの運動項として現れたと解釈できる。

さて、低エネルギー有効理論として、式(20)を眺めると、ディラトンの運動項は正でないユニタリ性・因果性と矛盾することになる。つまり、 $c_{\text{UV}} - c_{\text{IR}} \geq 0$ である。実は、(1+1) 次元の議論では、ディラトンの有効作用の繰り込みの詳細を調べることで、すぐ後で述べる (1+3) 次元の場合に比べてより強い結論を導くことができる。ディラトン τ は理論のエネルギー・運動量テンソルのトレースと結合するから、 $(\partial_\mu \tau)^2$ の繰り込みは、その真空2点関数 $\langle T_\mu^\mu(x) T_\mu^\mu(0) \rangle$ から得られ、式(8)およびそれと等価な

$$\frac{dc(g(\mu))}{d \log \mu} = G_{UV} \beta^l \beta^j \quad (21)$$

がディラトンの運動項の繰り込み群方程式として導かれる。これは4節で紹介したザモロジコフの議論と物理的内容は完全に等価である。

この議論は (1+3) 次元にも拡張できる。同じようにして、ディラトンの有効作用を赤外極限で評価すると

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{CFTIR}} + f^2 \int d^4x e^{-2\tau} (\partial_\mu \tau)^2 + 2(a_{\text{UV}} - a_{\text{IR}}) (\partial_\mu \tau)^4 \quad (22)$$

であることが示される。ここで、 f は以下の議論では重要でないディラトンの崩壊定数である。(1+1) 次元の場合と比較して、今度は $(\partial_\mu \tau)^4$ の係数が共形アノマリーの差 $a_{\text{UV}} - a_{\text{IR}}$ で完全に決まってしまうところが著しい結果である。

今、ディラトンの2体・2体散乱を考える。散乱振幅が因果的でユニタリ性を保持するためには分散関係の式 $a_{\text{UV}} - a_{\text{IR}} = (f^4/\pi) \int_{s>0} (\sigma(s)/s^2)$ と光学定理による $\sigma(s) \geq 0$ を利用して、ディラトンの4階微分相互作用の符号が非負でないといけなことがわかる。同じ結論は $a_{\text{UV}} - a_{\text{IR}}$ が負の場合に、 $\tau = c^\mu x_\mu$ といった非自明な背景でディラトンの伝播を考えると光速を超えてしまい因果律と矛盾することからも得られる。つまり、 a -定理が成立していないと、場の量子論の構成自体が自己矛盾するというわけである。

ルーティン・ポルチンスキー・ラタッチ (M. A. Luty・J. Polchinski・R. Rattazzi) は赤外極限の理論がスケール不変(必ずしも共形不変とは限らない)に近い場合に、ディラトンの2体・2体散乱振幅、すなわち、 a の変化分がどのようなカットオフ依存性を示すか調べた。¹⁰⁾ 彼らの結論は、ベータ関数が十分小さく $\partial^\mu \mathcal{J}_\mu^a = 0$ である時、ディラトンの2体・2体散乱振幅の依存性は

$$\frac{da(g(\mu))}{d \log \mu} = \chi_{UV} \beta^l \beta^j \quad (23)$$

となるというものである。これは、摂動論的な a -定理そのものであり、 a が繰り込み群の流れに沿って減り続けるという不条理を避けるためには、理論は赤外固定点を持ち、固定点ではベータ関数が消え共形不変でなければならないと結論できる。ただし、このアプローチでも χ_{UV} が正であるのは摂動論においてのみ証明できる。

7. 対決再び

前節の一般論は、ユニタリで因果的であれば、スケール不変であるが共形不変でない (1+3) 次元の場の量子論は摂動論の範囲では不可能であることを示しているように思われる。実際、場の量子論の計算を2ループの範囲で行うと、これまで調べられた全てのスケール不変な理論は共形不変であった。しかし、UCサンディエゴのフォルティン・グリンシュタイン・ステルジオ (J. F. Fortin・B. Grinstein・A. Stergiou) が次の驚くべき発見をした。¹¹⁾ 今、(1+3) 次元のスカラー・フェルミオン・ゲージ場がスカラー4点相互作用 $\lambda_{ijkl} \phi^i \phi^j \phi^k \phi^l$ 、湯川相互作用 $y_{iab} \phi^i \psi^a \psi^b$ とゲージ相互作用によって互いに結合しあう模型を考え、ベータ関数を最小引き算繰り込み処方¹²⁾で3ループの範囲まで計算する。そこで、彼らは \mathcal{O}_I を上記の相互作用項として

$$\beta^l \mathcal{O}_I = \partial^\mu K_\mu \quad (24)$$

なる非自明な K_μ と結合定数たちが存在するか調べた。

3ループの計算は非常にテクニカルであるが、彼らの計算結果は K_μ がゼロでない解が存在することを示していた。彼らの例では、 Q_{ij} をある反対称行列として、 $K_\mu = Q_{ij} \phi_i \partial^\mu \phi_j$ と保存しないスカラーの回転を表すカレントを取ってくると、3ループで式(24)を非自明に満たすことができるというのである。今、この左辺のベータ関数の計算が、エネルギー・運動量テンソルのトレースを与えているとすると、彼らが見つけた結合定数の値では理論はスケール不変であるが共形不変でないということになっている。実際、彼らのベータ関数を用いて結合定数の変化を調べると、5節で議論したように極限周期を持っているのである。というのは、スケール変換を表すカレントには、エネルギー・運動量テンソルからなる正準なスケール変換を生み出す項の他に、 K_μ が含まれていて、理論を不変にするスケール変換をすると、同時にスカラーを回転させることになり、結合定数がそれに伴って見かけ上周期的に変化するからである。

彼らの理論はユニタリで因果的であると考えられているから、前節の一般論が適用されているべきである。しかも、彼らの計算は摂動論によっていて、極限周期でのベータ関数の値は十分小さく、高次の補正は無視でき、前節の摂動論の「証明」は効力を失っていないはずである。これが、21世紀に再現されたボゴリューボフとミグダルの対決「スケール不変性は共形不変性を意味するか？」である。一体、

この理論は15個の対称性で不変であるのかそれとも高々11個であるのか？ 前節の一般論とこの具体例は明白に矛盾している！

筆者はこの矛盾は次のように解消されていると考えている（詳しい解説は文献12の付録に見られる）。まず、スケール不変性の条件は

$$T_\mu^\mu = \beta^l \mathcal{O}_l + \beta_a \partial^\mu \mathcal{J}_\mu^a = \partial^\mu J_\mu \quad (25)$$

であったことを思い出そう。ここで、 β^l はUCサンディエゴのグループの3ループの計算を採用することにしよう。重要なのは、 $\beta_a \partial^\mu \mathcal{J}_\mu^a$ の項である。この項は普通のスカラー結合定数の繰り込みからは求められない量である。幸いなことにこの項があまり問題にならないのは、例えば、コンフォーマルウィンドウにあるQCDではそもそも摂動論的にはそのような項は書けないし、他の場合でも知られている繰り込み処方では2ループまでゼロである。しかし、今の場合、この項が非常に重要な役割を果たす。実は、彼らは最新の論文¹³⁾で3ループでこの項を計算して、ゼロでないことを確かめている。さらに、この3ループの計算は、彼らが主張する極限周期上で、まさしく $\beta_a \partial^\mu \mathcal{J}_\mu^a = -\partial^\mu K_\mu$ と一致していることがわかった。

ということは、エネルギー・運動量テンソルのトレースとして、式(24)ではなく、式(25)を採用したとすると、赤外固定点で $\beta^l \mathcal{O}_l = \partial^\mu K_\mu$ と $\beta_a \partial^\mu \mathcal{J}_\mu^a$ がキャンセルし、実は彼らの理論は共形不変である。このことを具体的な繰り込み群の流れとしてみる時には、

$$B^l \mathcal{O}_l = \beta^l \mathcal{O}_l + \beta_a \partial^\mu \mathcal{J}_\mu^a \quad (26)$$

として、不変なB関数を定義して、このB関数に従って、 $(dg^l/d \log \mu) = B^l(g(\mu))$ と繰り込み群の流れを定義する。すると、赤外固定点が存在して、理論は共形不変なのである。ここで、そもそも、右辺を $\partial^\mu J_\mu$ の形に書き直すことができるためには、 $\partial^\mu \mathcal{J}_\mu^a$ が \mathcal{O}_l で展開できることに注意しよう。

よく知られたベータ関数に対して、ここで定義されたB関数と言うのは、おそらく見慣れない読者も多いと思うのでもう少し補足してみたい。例えば、 $L_{\text{int}} = \lambda_{ijkl} \phi^i \phi^j \phi^k \phi^l$ と相互作用があるスカラー理論では、運動方程式から、 $\partial^\mu (Q_{ij} \phi^i \partial_\mu \phi^j) = Q_{ij} \lambda_{ijkl} \phi^i \phi^j \phi^k \phi^l$ となるので、一部の特殊な形をした相互作用項は（運動方程式を適用した上で）カレントの全微分となっている。よって、理論の繰り込みを行う際に、もともとの $\lambda_{ijkl} \phi^i \phi^j \phi^k \phi^l$ として $Q_{ij} \lambda_{ijkl} \phi^i \phi^j \phi^k \phi^l$ だけ繰り込むのか、 $\partial^\mu (Q_{ij} \phi^i \partial_\mu \phi^j)$ として繰り込むのかは自由度（ある種のゲージ自由度）がある。この自由度をなくすために、不変なB関数が式(26)のように定義されたわけである。

実際の繰り込みの計算では、繰り込み処方を決めた時に、（適当なゲージで定められた）ベータ関数を計算しているのか不変なB関数を計算しているのか非自明である。実際、摂動計算に現れるカウンタータームとしては、 $\beta^l \mathcal{O}_l$ と $B^l \mathcal{O}_l$ のどちらを採用しても理論は有限に繰り込むことができる。

違いは全微分であるから有効作用には寄与しないからである。しかし、上記の議論が示しているように、共形不変性を議論するために必要なのはB関数である。共形不変の概念は、繰り込み群の定義の自由度によらないので、不変なB関数が現れるのは尤もである。

ご存知のように、ベータ関数にはそもそも繰り込み群の処方による曖昧さが存在していた。普通はこの処方の曖昧さは、結合定数空間の一般座標変換 $g^l \rightarrow \tilde{g}^l(g^l)$ として理解されている。今の場合、それに加えて、結合定数空間上のゲージ変換の自由度が存在しているのである。（これは筆者が研究しているホログラフィの見方からはより自然である。）

こうして、UCサンディエゴのグループが反例として与えた3ループの繰り込み群の流れは、適切な処方に切り替えることで（あるいは、繰り込み群の流れを正しく再定義すると）、共形不変であることがわかった。これ自身は非自明である。実際、式(25)においてユニタリな理論におけるファインマンダイアグラムによる摂動論に由来しない勝手な β 関数と \mathcal{J}_μ^a をでっちあげると、それがビリアルカレントを持たない保障はないからである。例えば、 $4-\epsilon$ 次元では、1ループの2成分スカラー理論でも、虚数の結合定数を許せば、非自明な J_μ が存在し、（ \mathcal{J}_μ^a は1ループでゼロであり）、理論はスケール不変であるが共形不変でない「極限周期」が存在する（この場合、非ユニタリ性から、周期的でなく指数的な振る舞いを示す）。

実は、6節で議論したa-定理と言うのは、この不変なB関数に対して成り立っていたということがわかっている。6節の議論を、あるいはオスボーンの局所的な繰り込み群の無矛盾性条件をより精密に行い直すことによって、a-関数の変化はB関数を使って

$$\frac{da(g(\mu))}{d \log \mu} = \chi_{UV} B^l B^l \quad (27)$$

と書けることがわかる。つまり、aが定数を取るならば、 χ_{UV} が正値である限り、 $B^l = 0$ つまり、共形不変である。筆者のホログラフィによる計算も式(27)を支持している。

8. 終わりに：イジング模型からホログラフィまで

スケール不変性と共形不変性にまつわる二つの対決を解説してきたわけであるが、どんな対決にしてもどちら側を応援したい気持ちになるかは過去の経験によるであろう。（1+1）次元では、スケール不変性が共形不変性に持ち上がるというのは場の量子論の定理であると述べた。それにもかかわらず、ユークリッド化した場の量子論に対応する具体的な統計模型を持ってきて、それが臨界点上で連続極限を取ると共形不変性を満たすかどうかを示すのは至難の技である。2次元においてですら、いくつかの統計模型に対して共形不変性を示したスミルノフ(S. Smirnov)による数学的証明は2010年のフィールズメダルの対象になっ

ている。この困難さを見ると共形不変性がスケール不変性から導かれるとは信じがたいかもしれない。

3次元のイジング模型は臨界点上で共形不変であろうか？ 筆者の知る限り、統計模型からのアプローチで共形不変性を示すのは手がかりすらない状態である。一方、場の量子論的なアプローチとして、 ϵ 展開の摂動論はベータ関数のゼロ点を探すので共形不変性を示唆しているし、そもそも1成分スカラー模型では摂動論ではビリアルカレントの候補は存在しない。しかし、 ϵ 展開は漸近展開で収束しないし、非摂動的な効果によってビリアルカレントの候補が現れる可能性についてはまったく見当もつかない。

最近になって、3次元のイジング模型を臨界点上で共形不変であると「仮定」した上で、共形不変性が予言する一般論を用いて、イジング模型の性質、例えば臨界指数などを決定しようとする試みがなされている。¹⁴⁾ この試みは非常に成功を取っていて、臨界指数の決定に関しては既存の他のどの理論的手法よりも精密に予言することができ、実際の値（つまり実験値）と整合しているのである。つまり、3次元のイジング模型は臨界点上で共形不変性を持っているはずである！

本解説では3次元統計模型に対応した(1+2)次元の場の量子論について何も言及していなかった。(1+2)次元では共形アノマリーが存在しないので共形アノマリーを基礎とするc-定理、a-定理のアプローチは困難に思える。しかし、場の量子論の自由度を数える、そして、適切に定義された自由度が繰り込み群に従って減少するべきだという考えはそれほど的是をはずしていないと思われる。実際、共形アノマリーの代わりに、球面上での分配関数やエンタングルメント・エントロピーを用いるという考えが模索されている。さらに、これから述べるホログラフィの議論は次元によらずに成り立っている。

さて、筆者自身はこの対決に対して少なくともこの解説中ではレフェリー的な中立な立場を取ってきたのであるが、個人的にはスケール不変性は共形不変性を示すべきだと考えていた。それは、筆者自身のホログラフィによる経験が大きい。¹⁵⁾ 任意の場の量子論に対して、1次元高い時空の重力理論を対応させるというホログラフィ原理が成立すると信じて、a-定理をはじめ、スケール不変性と共形不変性の関係は、重力理論のダイナミクスの帰結として統一的に理解できるのである。

ホログラフィによる繰り込み群では、繰り込み群のスケールを新しい座標だと考える。(1+3)次元の場の量子論に対しては、もともと、 (t, x, y, z) のミンコフスキー時空の座標に、ホログラフィック座標： $r = \log \mu$ を加えて、(1+4)次元の重力理論を考えるわけである。場の量子論のスカラー演算子 \mathcal{O}_I に対する結合定数 g^I は、(1+4)次元理論のスカラー場 $\Phi^I(x_\mu, r)$ 、場の量子論のベクトル演算子 \mathcal{J}_μ^a に対応する結合定数は、(1+4)次元理論のベクトル場 $A_\mu^a(x_\mu, r)$ に同一視される(ベクトル場の添字 M も t, x, y, z

に加えて r の値を取る)。

7節で重要な役割を果たしたスカラー演算子とベクトル演算子を統一視する関係 $\beta^I \mathcal{O}_I = \partial^\mu K_\mu$ は(1+4)次元のスカラー場とベクトル場がゲージ変換で関係している、つまり $\Phi \rightarrow e^{i\Lambda} \Phi$ および $A_M \rightarrow A_M + \partial_M \Lambda$ で理論が不変であるということの意味している。このゲージ自由度がちょうど7節で議論したベータ関数の曖昧さと関係している。というのは、ホログラフィック方向(r 方向)にスカラー場の値が変化することが繰り込み群で結合定数が変化することを意味するわけであるが、このゲージ変換はスカラー場の変化(の一部)はゲージ変換でベクトル場の変化と移り変わることができるということの意味しているからである。この時、(1+4)次元のベクトル場 A_M にヒッグス機構が働き、(1+3)次元のカレント K_μ が保存しないことをホログラフィックに表現しているのである。

さて、この(1+4)次元の重力理論には、ホログラフィックa-関数というものを定義できる。時空の計量を

$$ds^2 = e^{2a(r)} (\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu) + dr^2 \quad (28)$$

とすると、ホログラフィックa-関数は

$$a(r) = \frac{\pi^2}{(\alpha'(r))^3} \quad (29)$$

と定義されるが、アインシュタイン方程式からホログラフィックa-関数の振る舞いが

$$\frac{da(r)}{dr} = \frac{\pi^2}{(\alpha'(r))^4} G_{\mu\nu} D^\mu \Phi^I D_\nu \Phi^I \geq 0 \quad (30)$$

と導かれる。今、スカラー場が正の運動エネルギーを持っているとするとザモロジコフ計量に対応する $G_{\mu\nu}$ は正値であり、ホログラフィックa-関数は繰り込み群に従って単調減少である。これは、a-定理に他ならない。スカラー場 Φ^I の r 方向の微分は、ホログラフィの辞書では、対応する結合定数 g^I のベータ関数と解釈できる。既に述べたとおり、ベータ関数の曖昧さはここでは、 r 方向のゲージ自由度として実現されている。もちろん、物理的な式、(30)はゲージ不変であり、a-関数の減少度はゲージによらないわけである。また、繰り込み群の固定点では、 $D_\mu \Phi^I = 0$ で a は定数であり、重力理論は、アンチ・ド・ジッター(AdSと略されることが多い)対称性を持つ。このアンチ・ド・ジッター対称性は、いわゆるAdS/CFT対応によって場の量子論の共形不変性と等価である。

このようにして、ホログラフィでは、繰り込み群が重力理論のダイナミクスとして実現される。場の量子論において重要な役割を果たしたユニタリ性や因果性は、重力理論のある種のエネルギー条件、端的に言って時空の安定性と因果律を保証する条件、として理解できる。

3次元イジング模型が共形場の理論で記述されるとすると、私の知る限りでは最小の a を持っている。ホログラフィによって対応する重力理論は、量子重力として作ることのできる最小のアンチ・ド・ジッター空間であるはずであ

る。イジング模型は(1+3)次元の量子重力の極限的な情報を教えてくれるであろうか？量子重力によって3次元イジング模型がホログラフィ的に解かれる日を夢想しながらこの辺りで筆を置きたい。

参考文献

- 1) N. N. Bogoliubov and D. V. Shirkov: *Introduction to the Theory of Quantized Field* (John Wiley and Sons Inc, 1980) 3rd ed.
- 2) A. Migdal: The 12th Claude Itzykson Meeting (2007)—Ancient History of CFT.
- 3) K. G. Wilson and J. B. Kogut: Phys. Rept. **12** (1974) 75.
- 4) A. B. Zamolodchikov: JETP Lett. **43** (1986) 730 [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **43** (1986) 565].
- 5) J. L. Cardy: Phys. Lett. B **215** (1988) 749.
- 6) J. Polchinski: Nucl. Phys. B **303** (1988) 226.
- 7) S. El-Showk, Y. Nakayama and S. Rychkov: Nucl. Phys. B **848** (2011) 578.
- 8) H. Osborn: Nucl. Phys. B **363** (1991) 486.
- 9) Z. Komargodski and A. Schwimmer: JHEP **1112** (2011) 099.
- 10) M. A. Luty, J. Polchinski and R. Rattazzi: arXiv: 1204.5221 [hep-th].
- 11) J.-F. Fortin, B. Grinstein and A. Stergiou: arXiv: 1206.2921 [hep-th].
- 12) Y. Nakayama: arXiv: 1208.4726 [hep-th].
- 13) J.-F. Fortin, B. Grinstein and A. Stergiou: arXiv: 1208.3674 [hep-th].
- 14) S. El-Showk, M. F. Paulos, D. Poland, S. Rychkov, D. Simmons-Duffin and A. Vichi: arXiv: 1203.6064 [hep-th].

- 15) Y. Nakayama: Int. J. Mod. Phys. A **25** (2010) 4849; Eur. Phys. J. C **72** (2012) 1870; Gen. Rel. Grav. **44** (2012) 2873.

著者紹介



中山 優氏：専門は超弦理論・場の量子論。ボゴリューボフの教科書の神秘的な一章に魅せられた一人。

(2012年9月15日原稿受付)

Scale Invariance vs Conformal Invariance

Yu Nakayama

abstract: Scale invariance plays a central role in physics. In relativistic field theories, scale invariance may be enhanced to a larger symmetry known as conformal invariance. Mathematically speaking, scale invariance does not imply conformal invariance, but there have been a lot of debates over the distinction. In this article, I discuss how scale invariance can be enhanced to conformal invariance by summarizing recent developments.

日本物理学会誌 第68巻 第4号 (2013年4月号) 予定目次

口絵：今月号の記事から

巻頭言

論文閲読のすすめ……………安藤恒也

交流

南部・ゴールドストーンボソンの統一的理解
……………渡辺悠樹, 村山 斉

解説

時刻・周波数標準の遠距離比較伝送技術の現状と将来
……………井戸哲也, 藤枝美穂

実験技術

原子分解能ホログラフィー……………林 好一

最近の研究から

ヒ素の化学を利用した鉄系超伝導体の新物質開発
……………野原 実, 工藤一貴

鉄系超伝導体における「軌道の物理」の新展開
……………大成誠一郎, 紺谷 浩

JPSJの最近の注目論文から 12月の編集委員会より

……………安藤恒也

談話室

誤解されているブラケット—共役演算子をめぐって…北野正雄
第52回生物物理若手の会夏の学校報告 ……柴崎宏介

2012年度原子核三者若手夏の学校開催報告
……………嶋田健悟, 川名清晴, 鈴木裕貴, 高橋将太

国際会議

第20回少数粒子系物理国際会議FB20
……………相良建至, 肥山詠美子, 民井 淳

追悼

金森順次郎先生を偲んで……………寺倉清之

新著紹介

紐と環から成るトポロジカルネットワークの新しいエントロピー弾性

眞弓 皓一* (東京大学大学院新領域創成科学研究科 277-8561 柏市柏の葉5-1-5)

伊藤 耕三 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 277-8561 柏市柏の葉5-1-5)

ポリロタキサンは、複数の環状分子に紐状高分子が貫いたネckレス状の超分子複合体である。ポリロタキサン中の環状分子が線状高分子上を自由にスライドできることから、ポリロタキサンは紐状高分子の形態エントロピーに加えて、環状分子の軸高分子上における一次元の配置エントロピーを有している。本稿では、ポリロタキサン中における環状分子の配置を小角中性子散乱法によって観察した実験結果と、ポリロタキサンの架橋体であるトポロジカルネットワーク(環動ゲル)の新しいエントロピー弾性について述べる。

1. はじめに

一般に、ソフトマターの物性はエントロピーによって支配されている。¹⁾ 特に、長い紐状の分子である高分子は、低分子と比較して非常に大きな内部エントロピーを有するため、その影響が物性に顕著に現れる。これは、高分子鎖は熱揺らぎによって、紐が小さく丸まった状態からまっすぐに伸び切った状態まで、様々な形態をとることができるからである。高分子特有の物性には、この形態エントロピーが大きく関わっている。²⁾ 例えば、1本の高分子鎖の両末端を持って引き伸ばすとバネのように復元力が生じ弾性を示す。³⁾ 金属バネの弾性は、原子配列が変わることで生じる内部エネルギー変化に起因するのに対して、高分子材料の弾性は大部分が形態エントロピーに支配されることが知られている。²⁾ セグメントが N 個連結してできた高分子鎖の場合、高分子鎖の形態は末端からもう一方の末端に至る N ステップのランダムウォークとみなすことができる。従って、高分子鎖の形態は粒子のブラウン運動とのアナロジーが成立し、高分子鎖の末端間距離が R となる状態数 $W(R)$ はガウス関数となる⁴⁾ :

$$W(R) \propto \exp\left(-\frac{3}{2Nb^2} R^2\right) \quad (1)$$

よって、ヘルムホルツの自由エネルギーは R^2 に比例する。

$$F(R) \propto \ln W \propto R^2 \quad (2)$$

力は自由エネルギーの微分によって与えられるため、高分子鎖の復元力は末端間距離に比例し、金属バネと同様な弾性を示すことが分かる。この高分子鎖のエントロピー弾性を1分子鎖ではなく、巨視的な材料で発現させるには、無数の高分子鎖を共有結合で架橋してネットワーク状にすればよい。架橋高分子のうち、高分子網目の中に水などの溶媒を含んだ材料をゲルと呼ぶ。架橋高分子は大変形可能な弾性体という稀有な力学特性を有しており、ゴム・タイヤをはじめとして我々の生活に不可欠な材料となっている。

近年、非共有結合を巧みに利用して分子構造を制御することによって、新しい機能性高分子材料を開発する試みが

盛んである。⁵⁾ 特に、分子の幾何学的構造を研究する分野はトポロジカル超分子 (mechanically interlocked molecules) と呼ばれ、^{6,7)} 筆者らはその中で、図1左に示したポリロタキサンに着目している。⁸⁾ ポリロタキサンは、複数の環状分子に線状高分子が貫いたネckレス状の分子複合体である。ポリロタキサン中の環状分子は、高分子鎖と幾何学的に拘束されながらも、軸高分子上を自由にスライドする運動自由度を有している。従って、ポリロタキサンの物性は、高分子鎖の形態エントロピーに加えて、環状分子の軸高分子上における一次元の配置エントロピーにも影響を受けることになる。通常の高分子には存在しない環状分子の配置エントロピーがどのような物性を生み出すかは、ソフトマター物理学にとって大変興味深い問題である。

環状分子の軸高分子上におけるスライド運動を利用したポリロタキサンの応用例としては、pHや光照射などの外場によってポリロタキサン中の環状分子の位置を制御する単分子スイッチや、⁹⁾ 環状分子に薬物を担わせたドラッグデリバリーシステム¹⁰⁾ などがある。このような分子レベルのデバイスに対して、巨視的な機能性材料としては、ポリロタキサンの環状分子間を架橋した環動ゲル(図1右)が挙げられる。¹¹⁾ 環動ゲルの最大の特徴は架橋点にある。化学ゲルと呼ばれる通常の高分子ゲルでは、高分子同士は直接共有結合によって架橋されているのに対して、環動ゲルでは環状分子からなる8の字型の架橋点によって高分子鎖が連結されている。環動ゲル中の8の字架橋点は高分子鎖上をスライドして運動することができるため、あたかも滑車のような役割を果たし、ゲル内部の応力を緩和する。その結果、環動ゲルは従来の架橋体とは異なる特異な力学

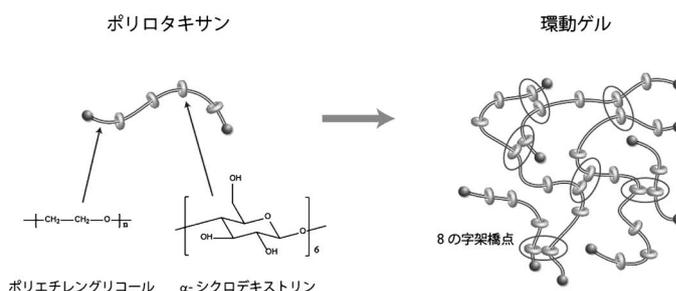


図1 ポリロタキサンと環動ゲル。(フルカラー口絵参照。)

* 現所属：ESPCI Paris Tech, laboratoire PPMD, UMR7615, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris, France

物性を示す。¹²⁾

環動ゲルの力学物性を理解するためには、ポリロタキサンの分子レベルにおける微視的構造やダイナミクスを把握する必要がある。特に、環状分子の軸高分子上における配置は重要となる。本稿ではまず、ポリロタキサンの分子構造をコントラスト変調中性子小角散乱法によって調べた結果について紹介する。さらに、環動ゲルの力学物性を記述する分子論について述べる。特に、環状分子の配置エントロピーが生み出す新しいエントロピー弾性について詳しく解説する。

2. ポリロタキサンの微視的構造

ポリロタキサンを用いて様々な機能性材料を作製する応用研究が進められている一方で、ポリロタキサンの分子構造は十分に明らかになっていなかった。著者らは、環状分子である α -シクロデキストリン (CD) と線状高分子であるポリエチレングリコール (PEG) からなるポリロタキサンの分子構造をコントラスト変調中性子小角散乱法によって調べた。

コントラスト変調中性子小角散乱法は、多成分系のナノ構造を解析する上で非常に有効な手法である。¹³⁾ ポリロタキサン溶液は、環状分子、軸高分子、溶媒の3成分系であるため、ポリロタキサン溶液の散乱関数 $I(Q)$ は以下のように3つの部分散乱関数の和として表される (Q は波数ベクトルの大きさ)：

$$I(Q) = \Delta\rho_C^2 S_{CC}(Q) + \Delta\rho_P^2 S_{PP}(Q) + 2\Delta\rho_C\Delta\rho_P S_{CP}(Q) \quad (3)$$

ここで $S_{PP}(Q)$ は軸高分子の形態、 $S_{CC}(Q)$ は環状分子の構造、 $S_{CP}(Q)$ は軸高分子と環状分子の相互相関を表す部分散乱関数である。実験によって得られる溶液全体の散乱関数 $I(Q)$ から部分散乱関数 $S_{ij}(Q)$ を抽出することができれば、各成分に関する構造情報を分離して知ることができる。式(3)中の $\Delta\rho_i$ は成分 i と溶媒との散乱長密度差であり、各成分の散乱コントラストを表す (C:環状分子, P:高分子)。中性子散乱の場合、試料に含まれる軽水素を重水素に置換することで化学的な性質をほとんど変えることなく散乱長密度を大きく変化させることができる。部分散乱関数を得るためには、試料中の各成分を重水素化して散乱コントラストを変化させた複数の溶液について散乱関数 $I(Q)$ を測定し、式(3)に基づいて連立方程式を解けばよい。我々は、軸高分子および溶媒を重水素化することによって、計8点の散乱コントラストでポリロタキサン溶液の散乱関数 $I(Q)$ を測定し、各部分散乱関数 $S_{ij}(Q)$ を算出した。¹⁴⁾ 図2に成分分解の結果を示す。まず、相互相関を表す $S_{CP}(Q)$ は正の値となり、この正の相関はポリロタキサン中の環状分子と軸高分子とが互いに幾何学的に拘束されていることを意味している。ポリロタキサンのトポロジカルな超分子構造を裏付ける決定的な実験的証拠である。次に、軸高分子の形状を表す $S_{PP}(Q)$ と環状分子の構造を表す $S_{CC}(Q)$ が

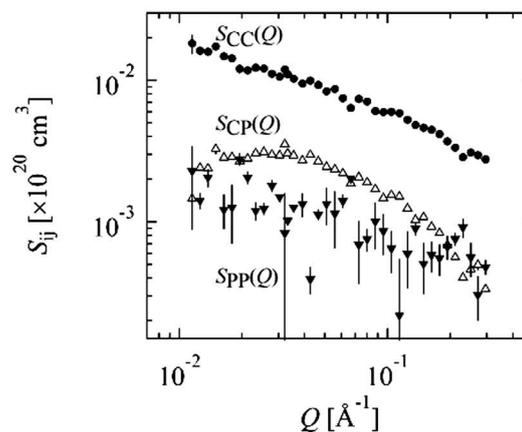
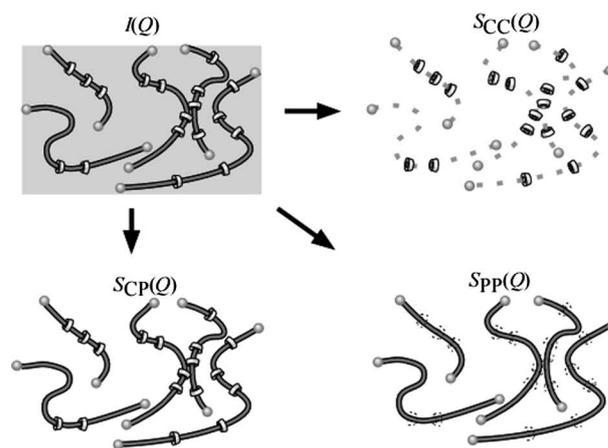


図2 ポリロタキサン溶液の部分散乱関数：環状分子の自己相関 $S_{CC}(Q)$ (●), 軸高分子の自己相関 $S_{PP}(Q)$ (▼), 環状分子と軸高分子の相互相関 $S_{CP}(Q)$ (△)。

～ほぼ同様の Q 依存性を示していることから、ポリロタキサン中の環状分子は軸高分子上にランダムに配列していることが分かった。また、各部分散乱関数のモデル関数を算出し、実験結果を解析したところ、ポリロタキサンのセグメント長は 46 \AA であることが明らかになった。¹⁵⁾ これにより、環状分子を含まない軸高分子単独のセグメント長の約2倍の値であり、環状分子の存在によって軸高分子が伸びた形態をとることが定量的に示された。

3. トポロジカルネットワークのエントロピー弾性

ポリロタキサンの架橋体であるトポロジカルネットワーク (環動ゲル) は、新しい高分子架橋体として注目を集めている。環動ゲルの8の字架橋点はゲル内部で滑車のように振る舞い、変形によって生じる内部応力をゲル全体に均一に分散する (滑車効果)。¹¹⁾ 高分子鎖が共有結合によって直接架橋された通常の化学ゲルでは、架橋点間分子量に大きな分子量分散があるため、ゲルを変形させると短い鎖に力力が集中し、ネットワーク構造が小さな応力で破壊されてしまう。これが一般の化学ゲルが力学的に脆弱である原因となっている。一方、環動ゲルの場合、8の字架橋点を通じて分子鎖の短い部分に他の部分から鎖が供給される

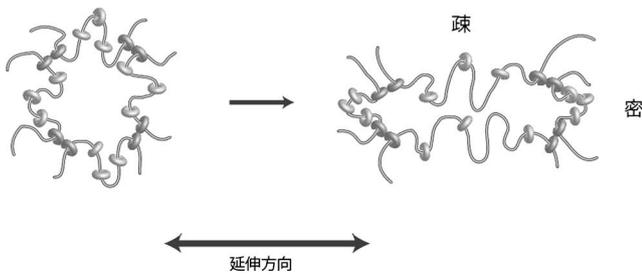


図3 一軸伸長による環状分子の空間分布変化.

ことで架橋不均一性を解消できるため、化学架橋ゲルに比べて高分子鎖の破断が起りにくいと考えられる。環動ゲルの滑車効果は、ゲル変形下における小角中性子散乱実験によって実証された。¹⁶⁾ 一般に、架橋点が固定された化学ゲルを変形させると、網目の小さい箇所と大きい箇所との間でひずみが生じ、構造不均一性が增大する。しかし、環動ゲルの場合は、ゲルを一軸伸長させてもそのような不均一構造は現れず、滑車効果による構造の均一化が観察された。

環動ゲルの力学物性を記述する分子論モデルとしては、3 Chain Modelを元にしたFree Junction Modelが提案されている。¹²⁾ これは、環動ゲル内部の高分子鎖が8の字架橋点をすり抜けてスライドすることに着目して、延伸に平行な方向の鎖と垂直な方向の鎖の間でセグメントのやり取りを許容したモデルである。架橋点が固定された通常の化学ゲルでは、延伸方向の高分子鎖は引き伸ばされ、延伸と垂直方向の鎖は圧縮されるため、高分子の形態エントロピーが減少して復元力が発生する。一方、環動ゲルの場合、8の字架橋点を通して延伸と垂直な方向から延伸方向へ高分子セグメントの移動が起こり、高分子鎖の変形が緩和されるため、化学ゲルに比べて生じる応力が小さくなると考えられる。そこで、Free Junction Modelに従って一軸伸長時のヤング率(初期弾性率)を実際に算出してみると、ヤング率はゼロとなった。つまり、鎖が架橋点を完全に自由にすり抜けられる場合には、高分子鎖に由来する復元力すなわちエントロピー弾性は生じないことになってしまう。

トポロジカルネットワークは紐状高分子と環状分子から成っており、環動ゲルの変形時には、高分子の形態エントロピーだけではなく、環状分子の配置エントロピーも変化する可能性がある。¹⁷⁾ 環状分子の配置エントロピーは、架橋点間に存在する未架橋の(自由な)環状分子によってもたらされる。先述のように、環動ゲルを一軸延伸すると、延伸方向に鎖が供給されるため、延伸方向の鎖は長く、延伸と垂直方向の鎖は短くなる。従って図3のように、延伸と垂直方向の環状分子は密に、延伸方向の環状分子は疎になり、架橋点間の環状分子の空間分布に不均一性が生じてエントロピーが低下する。その結果、元の均一な空間分布に戻ろうと復元力が働く。環状分子の圧縮による応力の発生は、架橋点間の環状分子を気体分子、架橋点間の軸高分子鎖をピストンと見なせば、空気ばねとのアナロジーが成立する。この環状分子の配置エントロピーによる弾性は、

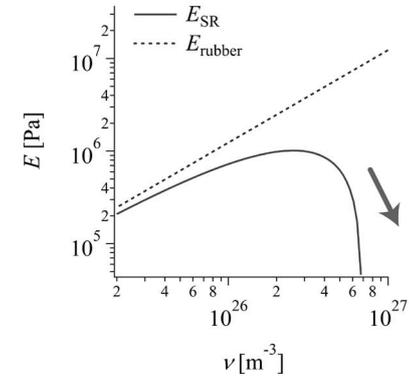
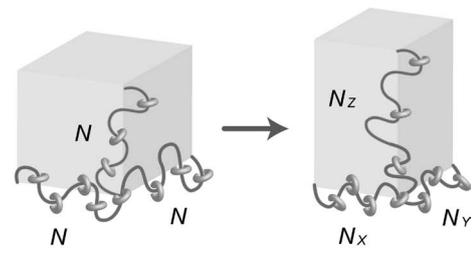


図4 3 chain modelの模式図と弾性率の架橋密度依存性.

通常の紐のみからなる高分子材料には見られない新しいエントロピー弾性である。

そこで、先程のFree Junction Modelに環状分子の配置エントロピーを導入してみる。図4に示したような、 x, y, z 方向の3つの鎖から成る1つの単位格子に着目する。それぞれの鎖のセグメント数は初期状態では等しく N とする。各方向にそれぞれ $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 倍の変形が加わることで8の字架橋点を通したセグメントのやり取りが起こり、セグメント数が N_x, N_y, N_z に変化したとする。この時、単位格子内のセグメント数の合計は一定であるとする。ここで、変形後における高分子および環状分子のエントロピーを求めてみよう。Free Junction Modelにおける高分子鎖の形態エントロピーは文献12より、定数部分を除いて

$$S_{\text{Polymer}} = -\frac{3}{2} k_B \sum_i^{x,y,z} \left[\lambda_i^2 \frac{N}{N_i} + \ln N_i \right]. \quad (4)$$

一方、環状分子の配置エントロピーは、架橋点間の鎖上に存在する環状分子の数を n 個とし、1つの高分子セグメント上に配置できる環状分子の数を1個とすると、

$$S_{\text{CD}} = k_B \ln \prod_i^{x,y,z} N_i C_n \quad (5)$$

となる。¹⁸⁾ ゲルの変形によって高分子の移動が起こり、系全体のエントロピー $S = S_{\text{Polymer}} + S_{\text{CD}}$ が最大になるようなセグメントの配分が実現されることになる。上述の通り、架橋点間に環状分子がない場合は、高分子セグメントの移動は完全に自由に行われ、ゲルのヤング率はゼロとなる。しかし、架橋点間に環状分子がある場合、高分子セグメントの移動によって、短くなった鎖上で環状分子の圧縮が起こるため、高分子鎖の移動が抑制され、ゲルの弾性率は有限の値を示す。環動ゲルのヤング率 E_{SR} は、ゲルの変形によるエントロピー変化から以下のように解析的に計算するこ

とができる¹⁸⁾ :

$$E_{SR} = 3\nu k_B T - 9\nu k_B T \frac{1 - f_{eff}}{(2N - 3)f_{eff} + 3} = E_{Rubber} - \Delta E \quad (6)$$

ここで、 T はゲルの絶対温度、 ν は架橋点間を結ぶ網目鎖の数密度(以下では架橋密度と呼ぶことにする)、 f_{eff} は架橋点間における環状分子の充填率である。架橋点が固定された化学ゲルについて、同様の3 chain modelを用いて弾性率を計算すると $E_{Rubber} = 3\nu k_B T$ となる。従って、式(6)より環動ゲルの弾性率 E_{SR} は、固定架橋点の化学ゲルの弾性率 E_{Rubber} に比べて、架橋点のスライドによる効果 ΔE だけ小さいことが分かる。

環動ゲルの弾性率の特徴は、架橋密度依存性に顕著に表れる。図4に環動ゲルの弾性率 E_{SR} の架橋密度 ν に対する依存性を示す(架橋前におけるポリロタキサンの環状分子充填率 $f=0.25$, セグメント長 $b=1$ nm)。ここで最も特筆すべき点は、環動ゲルの弾性率はある架橋密度を超えたところで増加から減少に転じることである。通常の化学ゲルの弾性率は架橋密度に比例することが知られており、このような架橋密度依存性はゴム弾性では説明できない。架橋密度に対する弾性率の減少は環状分子のエントロピー弾性を考慮することで初めて解釈が可能となる。ここで重要なのは、 f_{eff} が架橋密度に依存するという点である。架橋する前のポリロタキサンの環状分子充填率を f とすると、架橋が進むにつれて架橋点間の充填率 f_{eff} は f から減少する(架橋点1つにつき環状分子2個が使われるため)。最終的には、全ての環状分子が架橋点に使われて f_{eff} は0になる。従って環動ゲルでは、高架橋密度領域において、架橋点間に環状分子がほとんど存在しなくなり、架橋点を通じた高分子セグメントの移動が自由になるため、弾性率が小さくなるのである。高架橋密度領域における弾性率の減少は、実際に環動ゲルを用いた実験でも観察されている。¹⁸⁾

4. まとめと今後の課題

コントラスト変調中性子小角散乱実験によって明らかになったように、ポリロタキサン中の環状分子は軸高分子上にランダムに分散しているため、環状分子の配置エントロピーは十分に大きく、ポリロタキサンの物性に影響を与えることが分かる。実際に、ポリロタキサンの架橋体である環動ゲルの力学物性は、環状分子の配置エントロピーを考慮することで実験結果を矛盾なく記述できる。

今後の課題としては、環動ゲルの動的力学物性の解明が重要となる。コントラスト変調中性子スピンエコー実験の結果から、環状分子のスライド運動は高分子鎖のセグメント運動に比べて十分遅いことが分かっている。¹⁹⁾ 従って、スライド運動は環動ゲルの力学測定によって観察できる可能性がある。その際、架橋点における高分子鎖のスライドが起こる周波数を境に、架橋点が固定された状態における弾性率 E_{Rubber} から架橋点が動くことができる状態における弾性率 E_{SR} への緩和が起こるはずである。¹⁷⁾ 実際に、その

ような緩和が実験的に見出されており、緩和時間が架橋点間分子量の3乗に比例するという結果が得られている。²⁰⁾ 以上から分かるように、環動高分子とは滑車効果によって紐と環のエントロピーが動的に結合した新しい弾性体とみなすことができる。

本稿で紹介した研究は、東京大学物性研究所の柴山充弘氏、日本原子力研究開発機構の遠藤仁氏、NIST中性子研究センターの長尾道弘氏、ユーリッヒ中央研究所のDieter Richter氏、伊藤研究室の板東晃徳氏、手塚正彦氏との共同研究である。この場を借りて感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) 土井正男:『ソフトマター物理入門』(岩波, 2010).
- 2) 高分子学会編:『基礎高分子科学』(東京化学同人, 2006).
- 3) 中嶋 健, 西 敏夫:熱測定 **33** (2006) 183.
- 4) 久保亮五:『ゴム弾性』(裳華房, 1996).
- 5) A. Ciferri: *Supramolecular Polymers* (Taylor & Francis, 2005).
- 6) J. P. Sauvage and C. Dietrich-Buchecker: *Molecular Catenanes, Rotaxanes, and Knots* (Wiley-VCH, 1999).
- 7) F. M. Raymo and J. F. Stoddart: Chem. Rev. **99** (1999) 1643.
- 8) A. Harada, A. Hashizume and Y. Takashima: Adv. Polym. Sci. **201** (2006) 1.
- 9) S. A. Nepogodiev and J. F. Stoddart: Chem. Rev. **98** (1998) 1959.
- 10) T. Ooya and N. Yui: J. Control. Rel. **58** (1999) 251.
- 11) Y. Okumura and K. Ito: Adv. Mater. **13** (2001) 485.
- 12) K. Ito: Polym. J. **39** (2007) 489.
- 13) J. S. Higgins and H. C. Benoit: *Polymers and Neutron Scattering* (Clarendon Press, 1994).
- 14) K. Mayumi, H. Endo, N. Osaka, H. Yokoyama, M. Nagao, M. Shibayama and K. Ito: Macromolecules **42** (2009) 6327.
- 15) H. Endo, K. Mayumi, N. Osaka, K. Ito and M. Shibayama: Polym. J. **43** (2011) 155.
- 16) T. Karino, Y. Okumura, C. Zhao, T. Kataoka, K. Ito and M. Shibayama: Macromolecules **38** (2005) 6161.
- 17) K. Ito: Polym. J. **44** (2011) 38.
- 18) K. Mayumi, M. Tezuka, A. Bando and K. Ito: Soft Matter **8** (2012) 8179.
- 19) 眞弓皓一:『ポリロタキサンの分子ダイナミクスと環動ゲルの力学物性』(東京大学 博士学位論文, 2011).
- 20) K. Kato and K. Ito: Soft Matter **7** (2011) 8737.

非会員著者の紹介

眞弓皓一氏: 1983年生まれ。2007年東京大学工学部物理工学科卒。2011年東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻博士課程修了。現在、EPCPI Paris Tech 博士研究員。専門は、高分子物性。

(2012年1月21日原稿受付)

Novel Entropic Elasticity of Topological Network Formed by Ring and String

Koichi Mayumi and Kohzo Ito

abstract: Polyrotaxane (PR), in which cyclic molecules are threaded into a linear polymer chain, has been applied to various functional nanomaterials. A typical example of the functional materials is slide-ring gel (SR gel), prepared by cross-linking the cyclic molecules on different PRs in solution. In this article, we propose a novel model for the mechanical properties of SR gels, which suggests that the origin of the elasticity of SR gels is not only the entropy loss of the axial polymer chains but also that of the cyclic molecules resulting from their sliding motion along the polymer chain.

分子骨格と吸着構造が生み出す新奇な近藤効果

南谷 英美
塚原 規志
金 有洙
高木 紀明

〈理化学研究所 351-0198 和光市広沢2-1 〉

〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 277-8561 柏市柏の葉5-1-5 〉

〈理化学研究所 351-0198 和光市広沢2-1 〉

〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 277-8561 柏市柏の葉5-1-5 〉

代表的な量子多体効果の一つ、近藤効果が現れる興味深い物質群として金属表面上の分子が挙げられる。最近、我々はAu(111)面上の鉄フタロシアニン分子でスピン自由度と軌道自由度が絡み合った珍しい近藤効果が生じていることを発見した。さらにその由来が、分子骨格と吸着構造が合わさって生じる局所的な対称性であることを明らかにした。これらの結果は、表面において、吸着分子の特徴を活かした新奇な多体電子状態・スピン状態を作りうる可能性を示している。

1. はじめに

近藤効果は、物性物理の教科書でもよく取り上げられる、著名な物理現象の一つである。1930年代に希薄磁性合金における電気抵抗極小現象として発見され、1964年に近藤淳博士により理論の基盤が築かれて以来、50年近く理論・実験の両面から精力的に研究が進められている。^{1,2)} 近藤効果の魅力の一つは多様性にあると考えられる。近藤効果はオリジナルの希薄磁性合金だけでなく様々な物質で現れ、さらに、各物質の特性と結びつくことによって興味深い物性を生じる。^{3,4)} 特に近年、微細加工技術の発展により、ナノ構造において多彩な近藤効果を実現し観測できる可能性が飛躍的に広がっている。例えば、量子ドットでは、閉じ込められた電子の持つ局在スピント、リード電極の伝導電子の相互作用によって近藤効果が生じる。量子ドットでは、閉じ込める電子数や接続するリードの数を変えることや、量子ドット同士を結合することによって、多様な理論模型に対応する状況を作り出すことができるため注目を集めている。⁵⁾

もう一つ、注目すべきは走査トンネル顕微鏡 (scanning tunneling microscope: STM) を用いた、金属表面における近藤効果の観察である。⁶⁾ STMは探針と表面間の電子のトンネル現象を利用した高空間分解能の表面観察が可能であると同時に、トンネル電流をバイアス電圧で微分して得られる微分コンダクタンスが1粒子励起スペクトルに相当することを活かし、表面の電子状態を高いエネルギー分解能で観察することもできる。この電子状態観察手法は走査トンネル顕微分光 (scanning tunneling spectroscopy: STS) と呼ばれる。近藤効果が生じている場合、近藤効果の特徴づける温度スケール (近藤温度: T_K) 以下では、基底状態が近藤・芳田1重項と呼ばれる多体状態になる。^{7,8)} 近藤・芳田1重項が存在する場合、1粒子励起スペクトルのフェルミエネルギー近傍に鋭いピーク形状 (近藤ピーク) が現れる。そのため、この状態をSTS観察すると、得られるスペクトルのフェルミエネルギー近傍に特徴的なピークまたはディップ形状が現れる。ピークでなくディップ形状が現

れることもあるのは、探針から表面に電子がトンネルする際に、近藤効果を引き起こす局在準位を経由する経路と、表面に直接トンネルする経路があり、それらが干渉するファノ効果が生じるためである。^{9,10)}

STMによる近藤効果観察の端緒は、Au(111)面上のCo等、金属表面上の単一磁性原子において開かれた。^{11,12)} その後、磁性原子が複数ある場合のRKKY相互作用と近藤効果の競合、^{13,14)} 金属表面を絶縁層で被覆した場合の磁気異方性と近藤効果の共存¹⁵⁾ など、表面ナノ構造の特性を活かした近藤効果と他要素の相関解明へと広がりつつある。中でも我々が着目しているのが、金属表面上の分子における近藤効果のSTM観察である。2000年代以降、金属表面上の遷移金属フタロシアニン・ポルフィリン類における近藤効果発見の報告が相次いでいる。^{16,17)} これらの対称性の良い分子では、近藤効果に関与する中心金属原子の電子状態は配位子場によって決定されている。そのため特定の軌道やスピン状態に由来する、理論・実験の両面で興味深い近藤効果が実現している可能性が高い。さらに、表面に吸着している分子の特長として、STMによる分子操作や化学反応によって、配位子場を変調し、近藤効果を制御することや、物理パラメータと近藤効果の関係を探ることが可能になる。これらの観点から、Au(111)面上の鉄フタロシアニン (Fe-phthalocyanine: FePc) での近藤効果について、理論・実験の共同研究を行った結果、スピン自由度に加えて軌道自由度が関与する珍しいタイプの近藤効果が生じていることを発見した。¹⁸⁾

2. Au(111) 面上の FePc における近藤効果

近藤効果を生じる分子はいくつか存在するが、その中でもFePcに注目した理由は、この分子が特徴的なスピン状態を持つからである。気相状態でのFePc分子は D_{4h} の対称性を持ち、中心のFe原子が $(3d)^6$ の電子配置と $S=1$ のスピン3重項状態を持つことがよく知られている。より詳細な電子構造、つまり、配位子場によって分裂した3d軌道にどのように電子が配置してスピン3重項状態を形成して

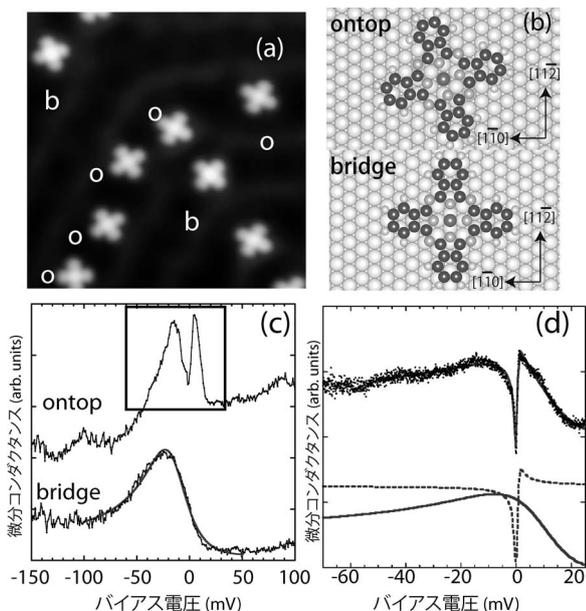


図1 (a) Au(111)面上のFePcのSTMトポグラフィ像。温度0.4 K、トンネル電流 $I_t = 100$ pA、バイアス電圧 $V_b = -0.1$ V の条件で測定した。o はオントップ構造を、b はブリッジ構造を表す。(b) DFT から得られた安定な吸着構造。最安定構造がオントップ構造、2 番目に安定な構造がブリッジ構造に対応する。(c) Fe 原子上で測定したSTS スペクトル。ブリッジ構造での実線は、半値幅 24.9 meV のピークに対するファノ関数によるフィット曲線を示している。(d) オントップ構造におけるSTS スペクトルの拡大図。下方の実線と点線はそれぞれ、半値幅 19 meV のピークと半値幅 0.6 meV のディップに対するファノ関数によるフィットを表している。上方のスペクトルデータ内の実線は、この2つの関数の和を示している。

いるかについては複数の説があり、長らく実験・理論の両面から議論されてきた。最近、X線吸収分光・X線磁気円二色性測定の結果から、 D_{4h} の既約表現のうち 3E_g と ${}^3B_{2g}$ が混ざりあった状態が有望であるとされている。¹⁹⁾ 著者らは特に 3E_g 状態の寄与に注目している。この状態ではFeの3d軌道は $(d_z)^1(d_{xy})^2(d_{xz}/d_{yz})^3$ のように占有され、FePcのスピ状態は、Feの d_z 軌道と、二重縮退した d_{xz}/d_{yz} 軌道によって担われる。この特色が、後述する特徴的な近藤効果の由来であると考えている。

まず、STMによって得られたトポグラフィ像を示す。トポグラフィ像から、Au(111)面上のFePcには2つの安定な吸着構造があることが分かった。一つは、Fe原子がAu原子の真上に配置するオントップ構造である。もう一つはFe原子が2つのAu原子の隙間上に配置するブリッジ構造である。このオントップ構造とブリッジ構造が安定であるという傾向は、密度汎関数理論(density functional theory: DFT)による計算結果とも一致した。トポグラフィ像ではオントップ構造とブリッジ構造の違いは中心のFe原子部分の明るさが微妙に異なるだけであるが、Fe原子上で測定されたSTSスペクトルは2つの構造で大きく異なる。ブリッジ構造ではSTSスペクトル中に、半値幅 24.9 meV のピーク形状が一つ、フェルミエネルギー近傍に表れる。オントップ構造では、半値幅 19 meV のピーク形状に加えて、その内側に半値幅 0.6 meV のディップ形状が存在する。オントップ構造で現れるディップ形状は、温度に強く依存す

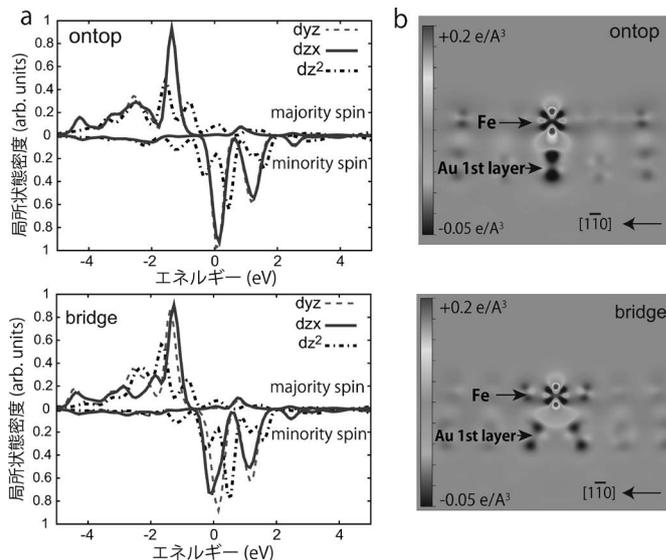


図2 a) オントップ・ブリッジ構造における、 d_{xz} , d_{yz} , d_{z^2} 軌道に射影したFe原子における局所状態密度。オントップ構造では、 d_{xz} , d_{yz} 成分は軌道縮退に伴い重なっている。b) 各吸着構造における差電荷分布の断面図。図1b)、図2b)の描画はVESTA²³⁾で行った。

ることが確認されている。²⁰⁾ これらのピーク形状が近藤効果に由来するのか、そして、なぜ吸着構造によってSTSスペクトルが大きく異なるのかを解明するために、DFTと数値くりこみ群(numerical renormalization group: NRG)を用いた理論研究を行った。

初めに、オントップ構造とブリッジ構造で、電子状態がどのように異なるのかをLDA+U法²¹⁾を援用したDFT²²⁾を用いて調べた。図2a)にFe原子の d_{xz} , d_{yz} , d_{z^2} 軌道に射影したFe原子における局所状態密度を示す。気相分子においてスピン3重項状態を担うこれらの軌道は、Au(111)表面に吸着した際に表面の伝導電子と混成するが、スピン偏極を保っている。オントップ構造とブリッジ構造で大きく異なる点は、 d_{xz} 軌道と d_{yz} 軌道の縮重度である。オントップ構造ではこの2つの軌道に由来するピークはほぼ重なり、軌道が縮退していることを示している。一方、ブリッジ構造では、 d_{xz} 軌道成分と、 d_{yz} 軌道成分のピーク位置は100 meVほど異なっており、軌道縮退は解けている。 d_{xz}/d_{yz} 軌道とは対照的に、 d_{z^2} 軌道成分は、オントップ・ブリッジ構造で同様の形状をとっている。吸着に伴いピークが分裂していることは、 d_{z^2} 軌道がAu(111)表面と強く混成していることを示している。

d_{xz}/d_{yz} 軌道の縮重度がオントップ構造とブリッジ構造で異なる原因は中心のFe原子の近傍にて電子が感じるポテンシャルの対称性の違いである。図2b)に示すように、オントップ構造ではFe原子は真下のAu原子とのみ強い相互作用を持ち、その結果Fe原子近傍のポテンシャルは4回対称性を保つ。一方、ブリッジ構造ではFe原子は、最近接の2つのAu原子と相互作用を持ち、Fe原子近傍のポテンシャルの対称性は2回対称性へと低下する。

これら局所電子状態の解析から、Au(111)表面上のFePc

が持つ $S=1$ のスピン状態に対して、以下のような二段階の近藤効果が生じているモデルが考えられる。第一段階の近藤効果は Au(111) と強い混成を持ち、高い近藤温度を生じる d_{z^2} 軌道を用いて起きる。オントップ構造とブリッジ構造に共通するピーク形状はこの第一段階目の近藤効果に由来する。第二段階の近藤効果は、 d_{z^2} 軌道より Au(111) との混成が弱い d_{xy}/d_{yz} 軌道にて起きる。この第二段階の近藤効果がオントップ構造でのみ観測され、ブリッジ構造では観測されないのは、 d_{xy}/d_{yz} 軌道の縮重度の違いによると考えられる。特に、軌道が縮退している場合には、スピン自由度と軌道自由度の絡み合った SU(4) 近藤効果が生じる可能性がある。

3. SU(4) 近藤効果

2重縮退した局在軌道が金属の伝導電子と相互作用する場合の、基本的な有効模型は以下に示す形の2軌道アンダーソンモデルである。

$$\begin{aligned}
 H = & \sum_{m=1,2\sigma} E_{m\sigma} d_{m\sigma}^\dagger d_{m\sigma} + \sum_m U_C n_{m\downarrow} n_{m\uparrow} \\
 & + \sum_{m \neq m' \sigma \sigma'} U'_C n_{m\sigma} n_{m' \sigma'} + \sum_{m=1,2k\sigma} \epsilon_k c_{m k \sigma}^\dagger c_{m k \sigma} \\
 & + \sum_{m=1,2k\sigma} V_{mk} c_{m k \sigma}^\dagger d_{m\sigma} + h.c. \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 $E_{1\sigma}(E_{2\sigma})$ はスピン σ を持つ局在軌道のエネルギーを、 $d_{m\sigma}^\dagger(d_{m\sigma})$ はその軌道での電子の生成(消滅)演算子を、 $n_{m\sigma} = d_{m\sigma}^\dagger d_{m\sigma}$ は占有数を表す。 $c_{m k \sigma}^\dagger(c_{m k \sigma})$ は各軌道と混成する伝導チャンネルにおける電子の生成(消滅)演算子を表している。 U_C は同じ軌道内でのクーロン反発力を、 U'_C は異なる軌道間でのクーロン反発力を表している。 V_{mk} は伝導電子と局在電子間のトンネル行列要素であり、混成強度が $\Delta_{mk}(\epsilon) = \pi \sum_k |V_{mk}|^2 \delta(\epsilon - \epsilon_k)$ によって定義される。以下、簡単のため $U_C = U'_C = U$ とし、混成強度の波数依存性を無視し、 $V_{mk} = V_m$ とする。この2軌道アンダーソンモデルにおいて、 V_m を摂動とみなし、二次摂動を考える。得られた項に対し、軌道自由度についてもパウリ行列による表示を導入し、擬スピンとして表すことを考える。局在軌道についての擬スピン演算子 T の成分を、 $T^+ = T^x + iT^y = \sum_\sigma d_{\sigma 1}^\dagger d_{\sigma 2}$ 、 $T^- = T^x - iT^y = \sum_\sigma d_{\sigma 2}^\dagger d_{\sigma 1}$ 、 $T^z = \sum_\sigma n_{\sigma 1} - n_{\sigma 2}$ のように定義すると、局在軌道における生成消滅演算子の積は、擬スピン演算子 T とスピン演算子 S の積によって表すことができる。例えば、 $d_{\downarrow 1}^\dagger d_{\uparrow 2} = T^+ S^-$ のように変換することができる。²⁴⁾ 伝導電子についてもチャンネルの自由度を擬スピン演算子によって、 $\tau = (\tau^x, \tau^y, \tau^z)$ のように表し、スピン演算子を s で表すと、二次摂動によって得られる有効ハミルトニアンは

$$\begin{aligned}
 H = & J_1 \{s \cdot S + \tau \cdot T + 4(s \cdot S)(\tau \cdot T)\} \\
 & + J_2 \{(1 + 4s \cdot S)(\tau^x T^x + \tau^y T^y)\} \\
 & + J_3 \{s \cdot S(\tau^z + T^z)\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

の形で書ける。ここで

$$\begin{aligned}
 J_1 = & \frac{V_1^2 + V_2^2}{2} \left(\frac{1}{E_d + U} - \frac{1}{E_d} \right), \\
 J_2 = & \frac{(V_1 - V_2)^2}{2} \left(\frac{1}{E_d + U} - \frac{1}{E_d} \right), \\
 J_3 = & (V_1^2 - V_2^2) \left(\frac{1}{E_d + U} - \frac{1}{E_d} \right)
 \end{aligned}$$

である。混成強度が軌道によらない $V_1 = V_2$ の場合、最初の項のみが残る。この際、有効ハミルトニアンは SU(4) 対称性を持ち、SU(4) 近藤効果と呼ばれる新奇な状態を生じる。SU(4) 近藤効果の発現には、縮退した軌道に磁気モーメントが存在する状況を必要とするため、これまで実験的には、カーボンナノチューブ量子ドット²⁵⁾ や縦型量子ドット²⁶⁾ 等の限られた系でのみ存在が確認されてきた。

SU(4) 近藤効果の最も大きな特徴は高い近藤温度である。近藤温度の上昇は交換相互作用に対するスケール方程式²⁷⁾ から確認できる。SU(4) 近藤模型 $H = J \{s \cdot S + \tau \cdot T + 4(s \cdot S)(\tau \cdot T)\}$ におけるスケール方程式は、 $dJ/d \ln D = -4\rho J^2$ となる。ここで ρ は伝導電子のフェルミレベルでの状態密度である。このスケール方程式から交換相互作用 J が発散する条件を求めることで近藤温度は、 $T_K^{(SU(4))} \sim \exp(-1/4\rho J)$ と見積もることができる。 $V_1 \neq V_2$ の場合や、局在軌道のエネルギーに差がある場合などではハミルトニアンの持つ対称性は SU(4) 対称性から SU(2) 対称性へ低下する。この場合、スケール方程式は $dJ/d \ln D = -2\rho J^2$ となり、近藤温度も $T_K^{(SU(2))} \sim \exp(-1/2\rho J)$ となる。^{28,29)} 2つの場合を比較すると、SU(4) 対称性を保っている場合の近藤温度が著しく高いことが見て取れる。

4. 分子の軌道縮退がもたらす新奇な近藤効果

この顕著な近藤温度の違いは、図1(c)に示した、オントップとブリッジ構造での STS スペクトルの差異を説明しうる。つまり、オントップ構造では d_{xy}/d_{yz} 軌道縮退による SU(4) 近藤効果が起きているが、ブリッジ構造では軌道縮退が解け SU(2) 近藤効果しか起こり得ないため第二段階の近藤温度が実験温度を下回っているという仮説を考えることができる。この仮説を確認するために、NRG を用いて、軌道縮退しているオントップ構造と、 d_{xy}/d_{yz} 軌道間にエネルギーの差があるブリッジ構造での STS スペクトルを計算し、スペクトル幅から近藤温度を評価した。図3(a)に示すように、ブリッジ構造では STS スペクトルの幅がオントップ構造に比べ、非常に細くなる。実験的に得られた STS スペクトルの幅と温度依存性からは、オントップ構造での近藤温度は 2.7 K と考えられる(図3(b)).²⁰⁾ 計算で得られたオントップとブリッジ構造におけるスペクトルの幅の比からブリッジ構造の近藤温度を見積もると 0.2 K となり、実験温度が 0.4 K の今回の測定では、ブリッジ構造での第二段階の近藤効果が観測できないと考えられる。オントップ構造にて SU(4) 近藤効果が生じているもう一つの有力な証拠は、STS スペクトルが磁場の方向に依存

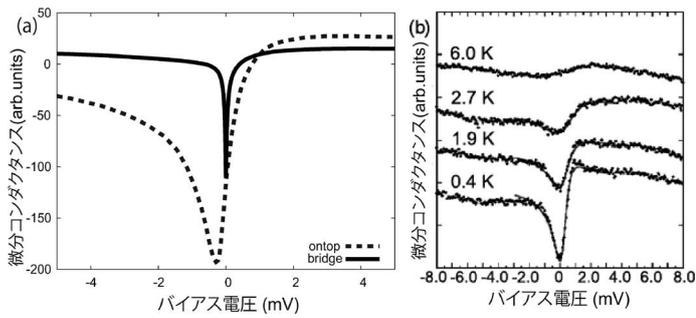


図3 (a) NRGを用いたオントップ・ブリッジ構造におけるSTSスペクトル計算結果。DFT計算の結果から、二軌道アンダーソンモデルのパラメータをオントップ構造で $E_{1\sigma} = E_{2\sigma} = -0.67D$ 、 $\Delta = 0.0103D$ 、 $U_c = U'_c = 0.3D$ と見積もった。 D は伝導電子のバンド幅である。また、ブリッジ構造に対しては、軌道間のエネルギー差が $E_{1\sigma} - E_{2\sigma} = 1.5\Delta$ となるように設定した。(b) オントップ構造でのSTSスペクトルにおいて観測される半幅0.6 meVのディップ形状の温度依存性。

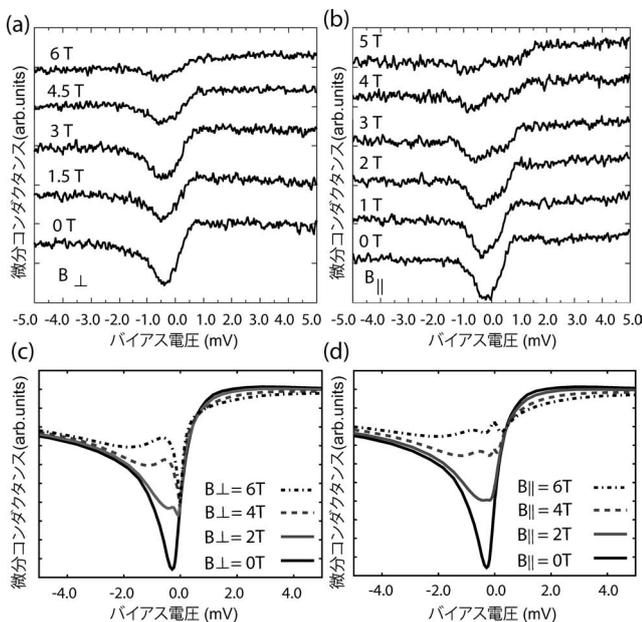


図4 磁場下におけるSTSスペクトルの実験結果とNRG計算結果。(a) 面直磁場下での実験結果。(b) 面内磁場下での実験結果。(c) 面直磁場下での計算結果。(d) 面内磁場下での計算結果。

性を持つことである。Au(111)面上のFePcは、スピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントの双方を持つため、磁場下ではスピンと軌道双方のゼーマン効果によるエネルギーレベルのシフトが生じる。また軌道磁気モーメントには異方性があり、主に面内方向を向いていることが報告されている。^{19,30)} そのため、分子面直方向の磁場ではスピン磁気モーメントによるゼーマン効果が、面内方向の磁場ではそれに加えて軌道磁気モーメントによるゼーマン効果が近藤効果に影響すると考えられる。分子面に垂直、並行な磁場下での近藤ピークのSTS観察と、NRGによるシミュレーション結果を図4に示す。有限温度下での近藤ピークの広がり等を考慮すると、実験結果とシミュレーション結果は同様の傾向を示している。特に面直磁場下では、フェルミエネルギー近傍に磁場印加時にもディップ形状が残り、面内磁場下ではディップ形状が分裂するという特徴がよく

一致している。面直磁場ではスピン磁気モーメントによるゼーマン効果によってスピン自由度に由来する近藤効果が抑制されるため、スピン+軌道SU(4)近藤効果から軌道SU(2)近藤効果へのクロスオーバーを生じる。面直磁場印加時の、フェルミレベルにピーク形状を保ちつつ減衰していくという振る舞いは、このクロスオーバーを反映している。一方、面内磁場下ではスピンと軌道自由度の両方に由来する近藤効果が抑制される。その結果、4 T以上の磁場下では近藤ピークの分裂が生じる。

5. まとめと展望

本研究では、Au(111)表面上のFePcにおいて、スピンと軌道の自由度が絡み合った珍しいタイプの近藤効果を見出した。実験で観測された、特徴的なSTSスペクトルの吸着構造による差異や磁場方向に対する依存性は、Feの d_{xz}/d_{yz} 軌道の縮退によるSU(4)近藤効果によってよく説明できる。これは吸着状態と分子構造が合わさって生まれる対称性が量子多体効果にはっきりとした影響を与える珍しい例である。本研究で得られた結果は、表面において分子と基板の組み合わせを選ぶことによって、分子の特性を活かした独自の多体電子状態・スピン状態を作ることができる可能性を示しており、更なる理論的・実験的研究が望まれる。今後の研究の発展として、分子薄膜を形成した際にどのような現象が起きるかという点が挙げられる。FePcについては、Au(111)面上に1 MLの薄膜を形成した際に、分子間のRKKY相互作用によって近藤ピークの形状が変化するという実験結果が得られている。²⁰⁾ 近藤効果とRKKY相互作用の競合による量子相転移が存在するのか、重い電子が実現するかなど、興味深い点が残されており、今後の進展が期待される。

なお、この研究は東京大学の川合眞紀氏および大阪大学の松中 大介氏との共同研究です。研究を進めるにあたりまして、東京大学の上田和夫氏と大阪大学の笠井秀明氏には有意義な御議論をいただきました。各氏に深く御礼申し上げます。また、本研究は科学研究費補助金および旭硝子財団研究助成の一環として進められたものです。

参考文献

- 1) J. Kondo: Prog. Theor. Phys. **32** (1964) 37.
- 2) A. C. Hewson: *The Kondo Problem to Heavy Fermions* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993).
- 3) J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) No. 1, special topics section "Kondo Effect-40 Years after the Discovery."
- 4) 上田和夫, 大貫惇睦: 『重い電子系の物理』物理学選書23 (裳華房, 2009).
- 5) 樽茶清悟, 佐々木智, W. van der Wiel: 日本物理学会誌 **60** (2005) 110.
- 6) 笠井秀明: 日本物理学会誌 **54** (1999) 702.
- 7) 近藤 淳: 『金属電子論—磁性合金を中心として—』物理学選書16 (裳華房, 2010).
- 8) 芳田 奎: 『磁性』(岩波書店, 1998).
- 9) U. Fano: Phys. Rev. **124** (1961) 1866.
- 10) H. Kasai, W. A. Diño and A. Okiji: Surf. Sci. Rep. **43** (2001) 1.
- 11) J. Li, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 2893.
- 12) V. Madhavan, *et al.*: Science **280** (1998) 567.

- 13) P. Wahl, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 056601.
- 14) E. Minamitani, *et al.*: Phys. Rev. B **82** (2010) 153203.
- 15) A. F. Otte, *et al.*: Nat. Phys. **4** (2008) 847.
- 16) A. Zhao, *et al.*: Science **309** (2005) 1542.
- 17) Y. Fu, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 256601.
- 18) E. Minamitani, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 086602.
- 19) J. Bartolomé, *et al.*: Phys. Rev. B **81** (2010) 195405; S. Stepanow, *et al.*: *ibid.* **83** (2011) 220401.
- 20) N. Tsukahara, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 187201.
- 21) S. L. Dudarev, *et al.*: Phys. Rev. B **57** (1998) 1505.
- 22) G. Kresse and J. Furthmüller: Phys. Rev. B **54** (1996) 11169.
- 23) K. Momma and F. Izumi: J. Appl. Crystallogr. **41** (2008) 653.
- 24) K. I. Kugel' and D. I. Khomskii: Sov. Phys.-JETP **37** (1973) 725.
- 25) P. Jarillo-Herrero, *et al.*: Nature **434** (2005) 484.
- 26) S. Sasaki, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 017205.
- 27) P. W. Anderson: J. Phys. C: Solid State Phys. **3** (1970) 2436.
- 28) M.-S. Choi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 067204.
- 29) J. S. Lim, *et al.*: Phys. Rev. B **74** (2006) 205119.
- 30) 純粋な 3E_g 状態を考えると, FePc 分子の軌道磁気モーメントに面内の異方性はない. 面内の軌道磁気モーメントは ${}^3B_{2g}$ 状態など, 他の多重項状態が混ざり合った結果出てくるものと考えられる. 4 回対称性の下では, どの多重項状態においても d_{xz} 軌道と d_{yz} 軌道が縮退している点は共通しており, 異なるのは d 軌道における電子数である. そのため, 近藤効果における他の多重項が混ざる影響は, これらの d 軌道の電子数の変化として現れると考えられる. 占有電子数が大きく変わらない限り, 電子数が変化する効果は交換相互作用の強度変化として取り込むことができる. よって, 基底状態の主たる成分が 3E_g 状態である場合には, 縮退した d_{xz}/d_{yz} 軌道に存在する局在スピンによる SU(4) 近藤効果が有効模型の候補として妥当であると考えている. これらの仮定に基づいた今回の理論計算結果は実験を良く再現しているが, FePc の多重項に関する詳細や, SU(4) 近藤効果の安定性との関係については更なる研究が必要である.

非会員著者の紹介

塚原規志氏: 東京大学大学院新領域創成科学研究科 川合・高木研究室助教. 専門は走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた表面の実験的研究. 特に最近 STM による分子磁性の解明に力を入れている.

高木紀明氏: 東京大学大学院新領域創成科学研究科 川合・高木研究室准教授. 専門は表面物性の実験的研究. 最近, 吸着分子における磁性ならびに振動や, シリコン原子のハニカム構造, シリセンに関する研究を中心にこなしている.

(2012 年 12 月 7 日原稿受付)

Novel Kondo Effect in a Single Molecule Emerging from the Combination of Adsorption and Molecular Symmetry

Emi Minamitani, Noriyuki Tsukahara, Yousoo Kim and Noriaki Takagi

abstract: A single molecule on a metallic surface is one of intriguing materials in which the Kondo effect occurs. Recently, we found that the novel type of Kondo effect, SU(4) Kondo effect, emerges in Fe-phthalocyanine molecule on Au(111). The origin of this SU(4) Kondo effect is local symmetry arising from the combination between molecular framework and adsorption geometry. These results indicate the possibility to construct unique many-body electronic and spin states at surface by utilizing molecular characteristic.

2012年秋季大会 招待・企画・チュートリアル講演の報告

領域委員会

招待講演

素粒子実験領域「Belleの最新の物理結果」

提案者：武内勇司（筑波大数理物質系）

[A] 原 康二（KEK素核研）

[B] 約10億個のチャーム・反チャームクォーク対事象などを含む、フレーバー物理に貴重な高統計データが記録されている。Belle実験では、この全データを用いた物理解析が進んでおり、本講演では、2012年の最新結果について報告が行われた。

B中間子に関する物理解析では、Bファクトリー実験でのみ解析可能である複数のニュートリノを含むB中間子崩壊の全データによる解析結果が報告された。特にタウとタウニュートリノへの純レプトン崩壊では、昨年までの崩壊分岐比測定結果では、CKMグローバル解析による標準理論予測値と 2.8σ レベルの差があり注目されていたが、新しい結果では標準理論予測との差が小さくなり、統計誤差の範囲で一致する結果となった。

D中間子の解析では、D反D混合解析の解析結果が行われ世界最高精度の測定結果が得られた。また、D中間子のK中間子対と π 中間子対の直接的CP対称性の破れの差について、全データによる解析が行われ、LHCb, CDF, BaBar実験の報告と同様に 2.1σ の有意度でゼロからの差が見られるという結果が得られた。世界平均では 4.9σ の有意度でゼロから離れており、その理論的解釈が議論を呼んでいる。Ds中間子の崩壊定数の世界最高精度の測定も報告され、QCD理論計算と一致していることが示された。このようにBelle実験では全データを用いた様々な新しい物理結果が得られている。今後もCP対称性の破れなどに重要な物理解析が進行しており、その結果が期待される。

実験核物理領域、理論核物理領域「(私心) 不安定核から何を学べるのか?」

提案者：山口貴之（埼玉大理）

[A] 谷畑勇夫（阪大RCNP, 北京航空航天大学）

[B] 谷畑勇夫氏は昨年度フンボルト賞を受賞した。これを機に谷畑氏に現在の不安定核ビームによる原子核物理について俯瞰して頂いた。不安定核ビーム技術は80年代LBLに於いて、高エネルギー2次ビーム法として発明された。さらに90年代Louvain-la-Neuveに於いて、低エネルギービームの再加速が世界で初めて行われた。これらを道具として不安定核が持つ3つの特徴、すなわち陽子と中性子の比を変えられる事、束縛エネルギーを変えられる事、そして陽子と中性子各々のフェルミ面の差を変えられる事を活かして、様々な原子核構造研究、宇宙核物理学、基礎物理学ならびに応用研究がなされてきた。講演ではそれらの多岐にわたる研究の中で核構造に着目し、不安定核の核子分布

半径、ソフトな励起($E1$ モードやpigmy共鳴)、新魔法数の出現、核配位の詳細が議論された。核子分布半径の研究を通して発見された「中性子ハロー構造」は谷畑氏ご本人によるものである。核配位の詳細に関して、最近注目を浴びているテンソル力の重要性について議論された。不安定核に於いてテンソル力は粒子軌道を変化させる。 ^{11}Li に於けるs波とp波の混合はテンソル力によって理解される。また、鏡映核の磁気モーメントから得られるアイソスカラーสปิน期待値には、テンソル力による2次の配位混合の効果が顕著に現れている。テンソル力によって魔法数の変化も理解する事が出来る。谷畑氏が考える今後の不安定核ビームによる核物理の展開は多岐に及ぶ。その可能性から実験核物理のさらなる発展が期待される。

実験核物理領域、理論核物理領域「炭素12のホイル状態とその励起～超高分解能スペクトロメータで探る α 凝縮相～」

提案者：山口貴之（埼玉大理）

[A] 伊藤正俊（CYRIL）

[B] 本招待講演には、実験・理論双方からの100名を超える大変多くの聴衆が集まり、盛況のなか講演が行われた。講演は、ホイル状態に関する歴史的経緯と何故この状態が多くの人々に興味を持たれ続けてきたかという一般的な導入部から始まった。よくまとまった導入部であり、日本人研究者がこの分野において果たしてきた役割にも適宜触れられていた。特に若い聴衆にとっては研究の背景を知る良い機会であったはずである。阪大核物理研究センターのグランドライデン磁気分析装置の特徴を最大限に活かした(α, α')反応による実験手法について触れられたあと、本講演の見せ場であるホイル状態の 2^+ 励起に関する世界で初めての実験結果が紹介された。伊藤氏は、自らの実験データを他の実験と比較することにより 2^+ 状態のエネルギー幅について矛盾のない統一的な見解が得られたと結論し、長年にわたり続けられてきた論争に一旦の決着をつけたことを印象づけた。講演の最後の部分では、(α, α')反応と崩壊 α 測定を組み合わせた最新の結果を紹介し、10 MeV付近の 0^+ 状態が2つの状態により構成されていること、その一つが今回見つかった 2^+ 状態のバンドヘッドである可能性が議論された。講演は聴衆の強い関心を喚起したことは疑いなく、講演後数件の質問と今回の結果がクラスタ理論で未解決の問題の手がかりを与える上で重要であるという理論研究者からの力強いコメントが寄せられた。

実験核物理領域, 理論核物理領域「RHICでのQCD高温相(クォーク・グルーオン・プラズマ)の検証」

提案者: 佐藤 進 (原子力機構先端基礎セ)

[A] 秋葉康之 (理研仁科加速器研究センター・理研BNL研究センター実験研究グループリーダー)

[B] 本講演は, 米国ブルックヘブン研究所 (BNL) の衝突型重イオン加速器 (RHIC) による重イオン衝突実験で発見された超高温高密度物質, 「クォーク・グルーオンプラズマ (QGP)」に関する秋葉康之氏による招待講演である。秋葉氏は, RHIC-PHENIX 実験グループの副スポークスマンであり, 同氏の RHIC における QCD 高温相の検証などの業績により, 2011 年に仁科記念賞を受賞された。講演ではまず, ビックバン宇宙論と QGP, 高エネルギー重イオン衝突による実験による QGP 生成, 格子 QCD ゲージ計算による理論予測の解説があった後, 日本の研究機関が大きく寄与した PHENIX 実験について紹介された。続いて RHIC で見られた QGP の性質は, 当初の予測を大きく覆す「完全流体」に近い液体状になっていることや, QGP 生成を強く示唆するジェット抑制現象について, さらに秋葉氏が主導したレプトン対の測定装置を用いて, 電子・陽電子対不変質量分布を利用した独創的な光子測定手法の説明があった。これにより初めて RHIC における衝突初期温度の測定に成功し, クォーク・グルーオンプラズマ生成の傍証を得た。最後に最近の研究進展や, 秋葉氏が主導し, 2011 年より稼働を開始した PHENIX 実験シリコン飛跡検出器 (VTX) と次期アップグレード計画 (sPHENIX 実験) などの将来展望についても触れられた。本講演には約 50 名の聴衆が集まり, 大変盛況のうちに終わった。

宇宙線・宇宙物理領域「Black holes in modified gravity」

提案者: 井口英雄 (日大理工)

[A] 田中貴浩 (京大基研)

[B] 近年の修正重力理論に関する研究の進展について, 特に重力波等による, 修正理論の効果の検出可能性に重点をおいて講演が行われた。修正重力理論としては, Randall-Sundrum のブレーンワールド理論, Einstein dilaton Gauss-Bonnet 理論, Dynamical Chern-Simons 理論, Massive bigravity 理論等が採りあげられた。これらの修正重力理論における, ブラックホールの性質や重力波の振る舞いについて大変わかりやすい解説が行われた。内容は非常に充実したものであったが, このため講演時間は若干不足気味にも感じられた。会場はほぼ満席で立ち見ができるほどの盛況であった。質疑応答では, 非常に活発な議論が展開され, 修正重力理論への関心の高さが伺えた。

領域2「光科学の導入によるプラズマ研究の新しい展開」

提案者: 田中雅慶 (九大総合理工)

[A] 荒巻光利 (名大工)

[B] プラズマ基礎研究は大きく変わろうとしている。最新

のレーザー技術を導入することによって, 従来不可能とされたパラメータの実現や原子を操作する新しい実験が可能になっている。本招待講演では, この分野で先駆的な研究を展開している名古屋大学工学研究科の荒巻光利氏に最近の成果について講演していただいた。

プラズマ研究の実験技術は現在マクロなレベルに留まっているが, 荒巻氏の一連の研究は, 我々の実験技術がメソスケールのレベルまで到達したことを意味し, 今後のプラズマ研究を大きく変えるものと期待される。講演では

○レーザー冷却を用いた温度制御された強結合プラズマの研究

○ホールバーニングを利用したドップラーシフトの超高精度計測

○ホールバーニングとゼーマン効果を利用したプラズマ内部磁場の高精度その場計測について解説していただいた。

強結合プラズマの実験に関しては, レーザー冷却によって固相から気相まで5桁にわたって温度制御された強結合状態を生成できることが報告された。さらに, 通常のプラズマにおいても, 考えられている以上に頻繁に強結合状態が出現する可能性のあることが示された。

ホールバーニングを利用した超高精度計測に関しては, ラムディップと呼ばれるマーカーを波長基準に採用することで 10^{-7} 以上の精度でドップラーシフト計測が可能であることが報告された。具体的な応用としては, プラズマ中の遅い中性粒子の流れ場を初めて可視化したこと, また, 同じ原理をゼーマン効果と組み合わせることによって強い背景磁場 (103 ガウス) 中で地球磁場程度の (10^{-1} ガウス) 磁場変化を測定できることなどが報告された。

講演には多くの参加があり活発な質疑応答が行われた。

領域2「コンプレックスプラズマにおける微粒子構造形成」

提案者: 安藤 晃 (東北大院工)

[A] 石原 修 (横浜国大院工)

[B] 微粒子プラズマ研究は, 2次元自己組織化やボイド形成などマクロ構造の研究や微粒子帯電量の大きさを利用したポテンシャル場の研究, 励起される波動研究など幅広い研究が展開されている。

本招待講演では, 宇宙塵に始まり, 半導体製造装置内のダストとしての微粒子生成とその挙動など歴史的な研究背景の説明があり, プラズマとダストの様々な相互作用を研究目的としたコンプレックスプラズマ研究への展望が語られた。

微粒子によるバウショック形成実験や YCOPEX 装置や YD-1~3 装置をつかった一連の研究において観測された2次元格子波動現象や極低温条件下でのダストプラズマの挙動をビデオで紹介すると共に, 鎖形成, 螺旋構造に関するシミュレーション, また微粒子と電荷の相互作用や分極効果, 1次元, 2次元格子などコンプレックスプラズマ中の

低次元集団運動に関する理論研究など、興味深い研究が幅広く展開されている状況について解説された。

領域2の研究者だけでなく物性関係の研究者も含め多くの聴衆の関心を集める講演で、質疑も活発に行われた。

領域6, 領域9「ランダム媒質と微小重力下の固体⁴He結晶成長」

提案者：上羽牧夫(名大院理)

[A] 奥田雄一(東工大院理工)

[B] 固体⁴Heは超流動相から成長する極めてクリーンな結晶で、温度の低下とともに成長の速度は発散的に増大する。講演では、この動的な固体成長について対極的な2つの媒質・環境における実験紹介があった。はじめに、SiO₂微粒子がランダムな空間を形成するアエロジェル中の結晶成長の様子について、高温で熱活性化型の速度で連続的に結晶成長するタイプと、低温で巨視的サイズの固体が瞬間的に成長する雪崩のタイプがあることが紹介された。この乱れた環境での結晶成長の形態や機構が考察され、雪崩のタイプについては、その機構が量子固体核生成を実験的に解明する観点からも大変注目されることが指摘された。

一方固体⁴Heは理想的な量子結晶であるが、巨視的なサイズの固体は重力によって大きな変形を受けると考えられる。それを防ぐため、ジェット機のパラボリックフライトで作られた、微小重力における更に理想的な環境下における結晶面(ファセット)の観察実験などが紹介された。微小重力下の結晶成長や結晶形は地上実験とは明白に異なり、エネルギー的に安定なファセットが大きくなる。この他に、小さな結晶粒が焼失し、大きな結晶粒に取り込まれて結晶成長していく様子(オストワルト熟成)など、明瞭な動的結晶成長が動画等を駆使して紹介された。

領域6, 領域3, 領域11「2次元ヘリウム3研究の最近の進展」

提案者：桃井 勉(理研)

[A] 佐藤大輔(東大院理)

[B] 佐藤氏により、グラファイト上の吸着ヘリウム原子固体の薄膜が示す物理について、最新の正確な測定結果が報告された。成果は大きく分けて2つある。一つ目は、吸着固体相を下地のグラファイトに対し整合状態から密度を変えた場合に起きる、整合・不整合転移の様子を詳細に調べ、整合相と不整合相の相分離が起きる有限の領域を経てから不整合相へと転移することを明らかにした。もう一つは、整合固体相および不整合固体相の核磁性においてスピンの多体交換相互作用が重要であることを正確に示し、交換相互作用の正確な値の評価をした。今回の研究が、今後の2次元固体ヘリウム3の核磁性の理論・実験両面からの研究の更なる進展を引き起こすきっかけになることが予想される。

当日は、低温の専門家から磁性の専門家まで広い分野の聴衆が集まり、その数は100人を超えていた。また、講演後活発な質疑応答がなされた。

領域7, 領域4, 領域5「カーボンナノチューブにおける励起子多体相関」

提案者：松田一成(京大エネ研)

[A] 小鍋 哲(筑波大数理)

[B] 現在、カーボンナノチューブの物性とその応用に大きな関心が持たれており、本学会でも多くの重要な研究成果が発表されている。そのような中、小鍋哲氏はこれまで精力的にカーボンナノチューブの光物性の理論研究を進めており、これまでの一連の研究成果について、広く議論を行うため講演いただきました。なお本招待講演は、カーボンナノチューブの光物性研究が主に発表・議論されている領域7と合わせて、本学会で関連する領域4, 領域5との合同で行われました。

講演では、カーボンナノチューブの光物性を理解する上で重要な素励起子である励起子(電子と正孔の束縛状態)や、それらが関与する光物性に関するレビューから始まり、励起子とキャリアなどの他の自由度とが相関した、いわゆる励起子多体相関が引き起こす特異な光物性について理論研究の成果を講演いただきました。具体的には、カーボンナノチューブにおける、1.「欠陥誘起によるスピン三重項励起子発光」、2.「励起子とキャリア散乱の抑制」、3.「多重励起子生成現象」などのメカニズム解明に向けた理論的なアプローチについて、総合的に講演いただきました。講演会場には多くの聴衆を集め、講演終了後の質疑応答においても活発な議論が行われ、関連する研究を広く議論する場として本招待講演が非常に有意義なものとなった。

領域7「単一分子計測に基づく π スタック系における電子輸送過程の解明」

提案者：草部浩一(阪大基礎工)

[A] 木口 学(東工大理工)

[B] Aviram-Ratnerによる単一分子に生じる整流特性発現機構提案以来、分子を電子デバイスの素子中心に置く分子エレクトロニクス技術は、ダイオード、トランジスタ、分子スイッチの多様な実現として結実し、さらなる研究展開が世界的に行われている。この分野における我が国の優位性は、DNAシーケンス決定など最先端の技術革新にも見られるように、分子分光技術の高度化がその基盤にある。講演者の木口氏は、複数分子間の電子輸送を介する量子伝導決定に斬新な発想を与え、その優れた計測技術、試料調整の妙技を繰る。この分野における若手の第一人者の一人と目されている。氏による今回の講演から、 π スタック系の優れた量子伝導特性が紛れのない観測結果であることを学ぶことができた。そこでは、化学的な構造同定と物理測定結果を用いて、明瞭な量子トンネル過程の決定が論理的に行われている。さらに他のブレイクジャンクションを用いた典型的な実験結果との比較、量子伝導シミュレーションとの比較を通して、この系の特性が導き出された。初日早朝からの講演にも関わらず、この分野の著名研究者を含む多数の参加者が会場に集まり、詳細な議論と有益な情報交換がなされた。

領域7 [Many-body theory of graphene and nanostructured materials]

提案者：斎藤 晋 (東工大)

[A] Steven G. Louie (Department of Physics, University of California, Berkeley)

[B] 本招待講演は、大会3日目の午後のセッション冒頭にて、45分間の講演として開催された。広めの会場であったにもかかわらず満席の状況で、会場後方に、かなりの人数の「立ち見」の聴講者がでる盛況であった。

内容は、グラフェンとカーボンナノチューブを中心とした nanostructured materials (ナノ構造体) の電子構造研究に関するものであった。講演者が開拓してきたグリーン関数法に基づく電子構造計算手法による準粒子エネルギーの定量的予測研究は、近年、角度分解光電子分光実験の高精度化により、理論と実験の比較による詳細電子物性解明において、さらなる重要性を増している。特に、今回、発表対象としたグラフェン系・ナノチューブ系などのナノ構造体においては、バルクと異なる多様な電子構造が実現されるため、定量的電子構造計算研究が重要な役割を果たしている分野である。講演では、グリーン関数法 (GW法) を用いた準粒子エネルギー予測に加えて、ペーテ・サルピーター方程式による電子・正孔相互作用による励起子効果の定量的記述について、詳しく報告がなされた。さらに、キュムラント展開法という、これまでGW法において取り込めていなかった高次の摂動項を取り込む手法を第一原理電子構造計算に導入することにより光電子分光実験において観測される集団励起モードに起因するピークの定量的な記述が可能となったという、最新の研究成果についても、報告がなされた。これらの広範かつ重要な報告に対して、活発な質疑が交わされた。

領域8 [鉄ヒ素系超伝導の隠れた量子臨界点とネマティック相転移]

提案者：石田憲二 (京大院理)

[A] 芝内孝禎 (京大院理)

[B] 鉄ヒ素系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ において、講演者のグループで最近行っている、2つの実験結果について報告がなされた。一つは磁気トルクの面内角度依存性と放射光を用いた高分解能構造解析による、正方晶結晶が持つ4回回転対称性の破れである。これらの測定により従来正方晶・斜方晶構造相転移が起きていると考えられていた温度 T_S よりも高い温度 T^* から4回対称性が破れ2回対称性になり、「電子ネマティック」相転移が起きていることを示した。もう一つの結果は、超伝導電子の有効質量と直接関係している物理量である磁場侵入長の絶対零度における値 (0) が $x=0.30$ で急激に長くなり、 x 依存性に対し鋭いピーク構造になることを明らかにした。この結果はこの組成で量子臨界点が存在し、その量子ゆらぎによって超伝導電子の有効質量が増大していることを意味しており、超伝導ドーム内に量子臨界点を挟んで2つの異なる超伝導相が存在していることを指摘した。

これらの実験結果から、 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の相図は、高温正方晶、電子ネマティック相、反強磁性相、磁気・超伝導相、超伝導相の5つの相からなることが指摘された。これらの結果は、鉄ヒ素系超伝導体を理解するうえで重要となる実験結果であり、理論研究との整合性や122系以外での相図との関係など、今後の研究に大きな影響を与える内容である。なお本講演は会場を埋め尽くす大勢の聴衆の前で行われ、講演後活発な質疑応答がなされた。

領域8 [URu₂Si₂の隠れた秩序：第一原理計算に基づく解析]

提案者：三宅和正 (阪大院基礎工)

[A] 池田浩章 (京大院理)

[B] 重い電子系は、スピンと軌道が絡み合った多自由度系であり、多種多様な興味深い物性を示す宝庫となっている。中でも、 URu_2Si_2 における17.5 Kの2次相転移は不可思議で、1985年に発見されて以来、4半世紀を過ぎた今日でも、その秩序変数は明らかではなく「隠れた秩序」と呼ばれる。現在、その同定は、重い電子系研究分野の中心テーマの1つに数えられる。また、最近、Science誌に掲載された「4回対称性の破れ」の報告をめぐって、秩序変数の同定に関する議論が盛んになっている。

池田氏は、昨年6月3日にNature Physics誌(8巻、528-533ページ)に出版された論文で、 URu_2Si_2 の複雑なバンド構造から有効な遍歴模型を抽出し、どのような(多極子)揺らぎが発達するかを議論している。講演では、その内容を中心にして、隠れた秩序変数がrank-5(32極子)の E^- 状態である可能性が高いことを紹介し、他の理論との関係についても、比較的公平に議論した。今後の展開として、そのバンド構造が一般に複雑な「重い電子系」に対して、バンド構造を反映した遍歴模型に基づいた議論の有効性を例示したことは興味深く、今後の波及効果も期待され講演を聞いた会員にとって有益なものとなったように思われる。講演の聴衆は150名余りと盛況で、講演の後の議論も時間をオーバーする盛り上がりを見せた。

領域8 [Development of pulsed magnetic fields and application to solid-state physics]

提案者：後藤輝孝 (新潟大自然)

[A] Sergei Zherlitsyn (Dresden High Magnetic Field Laboratory)

[B] Dresden 強磁場研究所でパルス強磁場磁石の開発の中心研究者である Sergei Zherlitsyn 博士による講演であった。ユーロでは European Magnetic Field Laboratory (EMFL) を構築しており、ゲルノーブル、トゥールーズ、ナイメーゲン、ドレスデンの強磁場施設を統合した国際共同利用の現状を述べた。さらに日本、米国、中国などの強磁場施設の開発にも言及した。特に、ドレスデンにおける100 Tを目指す非破壊パルス磁石の開発の現状について詳しく述べ、2012年1月26日に94.2 Tを達成した道程についても説明

があった。ドレスデン強磁場施設の将来計画についても述べられた。また、Zherlitsyn 博士が構築したパルス強磁場中での超音波計測の現状と、固体物理学への応用が示された。特に、スピンプラストレーション系 CdCr_2O_4 , ZnCr_2S_4 やスピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の多彩な超音波物性は聴衆の興味を引いた。さらに、 $\text{UCu}_{0.95}\text{Ge}$ の原子空孔による弾性異常や $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (TGG) における磁気音響 Faraday 効果の結果についても述べた。このように、Zherlitsyn 博士は、様々な課題を克服し、非破壊型パルス磁石の開発を進め、超音波計測、磁気計測、輸送現象などの物性実験へ応用し、直流常伝導磁石よりも十分に大きい磁場を、低いコストで建設し運用できることを強調した。最後に、パルス強磁場は物性研究にも大きな成果をもたらすことは確実であることを強調した。今後の日本との超音波をはじめとした国際共同研究にも大きな役割を果たすと期待される。講演は、初日9月18日の最初の講演 18aGA-1 であったが、Zherlitsyn 博士の招待講演には100人を超える聴衆が来場し、大きな意義があった。

領域8「鉄系超伝導体における軌道揺らぎおよび超伝導発現機構」

提案者：平島 大 (名大理)

[A] 大成誠一郎 (名大工)

[B] 鉄系超伝導体に関する最近の理論研究の発展について、講演者の仕事を中心に紹介された。鉄系超伝導体では、磁性転移に先立ち構造相転移が起き、その近傍では軌道揺らぎの存在を示唆する弾性定数 C_{66} の著しいソフトニングが観測される。これらの実験事実は、超伝導メカニズムに深く関わる可能性がありながら、乱雑位相近似 (RPA) による解析では再現されず、重要な未解明問題であった。単一軌道模型では、RPA を超えた多体効果である「バーテックス補正 (VC)」の重要性が、守谷・川畑理論などによって、かねてから指摘されてきた。講演者は、多軌道ハバード模型における VC を詳細に解析して、VC のうち Azlamazov-Larkin 項が軌道揺らぎを著しく増大することを見出した。多軌道ハバード模型において VC を自己無撞着に計算し (SC-VC 法)、構造相転移に対応する軌道秩序が VC により出現することを説明した。

さらに講演者は、この系の超伝導発現機構を議論した。RPA では、スピン揺らぎにより電子面とホール面の超伝導ギャップの符号が異なる $s \pm$ 波状態が予言される。一方、(VC がもたらす) 軌道揺らぎは、符号反転のない $s++$ 波状態の実現を予言する。代表的な鉄系超伝導体では、超伝導状態に対する不純物効果は非常に小さいため、 $s++$ 波状態と整合する。なお比較的乱れが少ない系では、スピン揺らぎと軌道揺らぎの拮抗によってラインノード s 波が出現する可能性を指摘し、 $\text{BaFe}_2(\text{As}, \text{P})_2$ における角度分解光電子分光および熱伝導の実験結果の説明を行った。最後に講演者は、 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ におけるネマティック状態 (電子状態の面内回転対称性の自発的低下) も、VC による軌道秩

序として説明される可能性を指摘した。

領域9, 領域10「表面・ナノ構造と物質移動」

提案者：横山 崇 (横浜市大生命ナノ)

[A] 高柳邦夫 (東工大理工)

[B] 高柳氏は、電子顕微鏡の高機能化とそれによる物性測定を先駆的に行っている。今回、最近開発された世界トップレベル (50 pm) の分解能を持つ電子顕微鏡や、それによって得られた多くの成果について報告された。特に、この顕微鏡を用いることで、軽元素であるリチウムイオンの検出が可能になった。顕微鏡像の明暗を詳しく解析することで、薄膜中に何層のリチウムが存在しているかを分析できるようになったと報告された。また、今後の展開として、電子線ホログラフィーなどのような電子の位相変化を利用した新しい電子顕微鏡の可能性についても述べられた。高柳氏は昨年度、学士院賞を受賞したこともあり、この招待講演では、多くの聴衆が熱心に聴講していた。

領域10「マルチフェロイック材料 BiFeO_3 単結晶育成とその特性」

提案者：横田紘子 (千葉大理)

[A] 伊藤利充 (産総研)

[B] マルチフェロイックは、磁性・誘電性などの複数の Ferro が共存し、それらの結合によって生じる新規な物性・機能への期待から、基礎・応用の両面で注目されている。その中でも、 BiFeO_3 は室温でマルチフェロイックス (強誘電性・強弾性・らせん反強磁性) を示す数少ない物質であり、大きな可能性を有している。基礎物性の解明には大型で高品質な単結晶の育成が必要であるが、安定した育成条件が得られず、これまで大型結晶の育成には至っていない。これは、単結晶育成に広く適応される従来の FZ 法において、不均一溶解を誘発し安定育成が困難であったことに起因する。さらに、 BiFeO_3 では漏れ電流が生じやすく、強誘電性の測定や利用が困難であった。これらの問題を打破するため、講演者らは、複数のレーザダイオードによって集光性を向上させた FZ 炉を開発し、初めてこの材料の育成を行った。この結果、原料棒はほとんど融液にアタックされず、長時間安定な結晶育成を実現し、大型単結晶の成長に成功した。これは熔融ゾーンにのみにレーザが照射され、成長 (鉛直) 方向の温度勾配を急峻にすることが可能になると同時に、周方向に等間隔でレーザ照射されるため、水平周方向の加熱均一性も向上したためである。さらに、育成時の雰囲気ガス中の酸素分圧による漏れ電流の制御を試みたところ、明確な相関関係があり、酸素分圧を下げる と何桁にも及んで漏れ電流を抑制できることを明らかにし、単結晶においても薄膜同様、漏れ電流が結晶中の酸素量に敏感であることを示した。この大型で高品質な単結晶によって、方位の制限なしに様々な物性測定が可能となり、この研究分野における今後の研究加速が期待できる。

領域 10「新強誘電体の物質開発の現状と将来」

提案者：武貞正樹（北大院理）

[A] 伊藤 満（東工大応用セラミックス研）

[B] シュレディンガーが1912年に「Ferroelectricity」を提唱してから今年で丁度100年を迎える。最初の強誘電体はロッシェル塩で米国のValseckにより1920年に発見された。その後現在に至るまで、酸化物では、ペロフスカイト物質群に加えて複合ペロフスカイト、タングステンブロンズ、層状ペロフスカイトなどまた水溶性結晶では、水素結合系物質群、硫酸グリシン (TGS)、硫酸系物質群や亜硝酸ナトリウムなど、様々な系で強誘電体が発見されてきた。多様な物質系における強誘電性相転移の研究から、秩序無秩序型相転移では Ising モデルで代表される統計力学の典型的な応用例として、またペロフスカイト酸化物や硫酸系物質が示す変位型相転移ではソフトモードの概念の提唱、他にも、反強誘電性相転移、インコメンシュレート相転移、リラクサー、マルチフェロイックスなどこれまで本領域は、多彩で豊かな物理を育んできた。これまでの100年の研究の歴史を振り返れば、物質科学において新たな物質系の開拓が、次の新しい世代の研究を左右する事は言うまでもない。本領域では、この節目の年にチュートリアル講演（60分）で100年の歴史を概観し、さらに今後の物質科学の発展に重要な役割を果たす新しい強誘電体の物質開発について現状と将来が本招待講演（30分）で発表された。本講演では、これまで用いられてきたペロフスカイト構造のトレランスファクターと強誘電性発現の関連性に対する見直し、また新物質開発方法や元素置換の物理的意味、さらに非ペロフスカイト型新強誘電体の物質開拓の最前線について言及され、広く物性物理学分野の研究者や、これからを担う若手研究者や学生諸氏にとっても非常に有益な講演となった。

企画講演

素粒子論領域「幾何的ゲージ理論」

提案者：酒井忠勝（名大）

[A] 山崎 雅人（Princeton Center for Theoretical Science, Princeton University）

[B] 近年、超対称ゲージ理論の非摂動効果をめぐり、目覚ましい発展が起こっている。例えば、局所化と呼ばれる手法により、超対称ゲージ理論の分配関数やある種の相関関数が、摂動論によらずに厳密に計算できるようになってきた。また、超対称でかつ共形対称性をもつ場の理論が数多く発見された。これらは、ラグランジアンにより記述されない、強結合の場の理論であり、かつそれらが双対性と呼ばれる変換のもとで対応することが分かってきた。

これらの研究において、山崎氏は世界に注目される若手研究者として、多くの成果をあげている。

今回の企画講演では、それらご自身の業績に加え、最近の超対称ゲージ理論の様々な発展に関して、幅広く講演を

行った。非常に明快な講演であったおかげで、多くの聴衆の興味を引きつけ、講演後の質疑の時間には活発な議論が行われた。

素粒子論領域「ヒッグス機構の背後の理論」

提案者：戸部和弘（名大）

[A] 北野龍一郎（東北大）

[B] LHC実験は順調にデータを蓄積し、その解析も順調に進み、最近ついに、ヒッグス粒子らしき新しい粒子の発見が報告された。その質量はATLAS, CMSグループとも125 GeV くらいを示唆し、そのLHCでの生成率や崩壊率とともに、理論的にもさまざまな議論を巻き起こしている。その一方で、順調に蓄積されたデータからは、新しい物理を示唆する兆候は未だ報告されておらず、標準模型を超える新しい理論に対しては厳しい制限が付きつつある。このような現在の状況で、この先どのように標準模型を超える新しい理論を考えていくべきなのかを、議論することは非常に重要になっていると言えるだろう。

北野氏は、標準模型を超える新しい理論の有力候補として考えられている超対称性理論を軸にして、さまざまな興味深い理論を提唱したり、その重要な現象を指摘、解析したりするなど、この分野で注目されている若手研究者の一人である。今回の企画講演では、標準模型の強い相互作用を記述するQCDのダイナミクスを見直すことから、標準模型のヒッグス機構の背後にあるダイナミクスについて、彼がもっとも面白いと思っている可能性について講演を行った。非常にホットなトピックだったため非常に多くの聴衆が集まり、北野氏の講演も非常に明快で興味深いものであったために、講演後は多くの質問が出て、活発な議論が行われた。

素粒子実験領域、実験核物理領域、宇宙線・宇宙物理領域

「大面積・高時間分解能 Resistive Plate Chamber の開発」

（富田）、「高エネルギー実験のための SOI 技術を用いた

PIXOR (Pixel OR) 半導体検出器の研究開発」

提案者：川崎健夫（新潟大理）

[A] 富田夏希（京大院理）、小野善将（東北大院理）

[B] 本講演は、2012年「測定器開発優秀修士論文賞」に選考された受賞者に受賞論文についての講演を行ってもらうために企画提案されたものです。会場には幅広い分野から数多くの聴衆が集まって若い受賞者を見守る中、受賞講演が行われました。いずれも、厳しい選考を勝ち抜いた優秀な論文内容を明快に伝えるとともに、受賞者の測定器開発へ取り組み、熱意が感じられる、澁刺とした講演で、受賞者の将来の活躍を確信させる大変素晴らしいもので、会場からも惜しめない拍手を受けていました。本講演は、まさに「測定器開発に携わる学生の奨励、測定器開発分野の充実と裾野の拡大」という賞の趣旨に添う内容であり、今後とも論文賞とともに続けていきたいと思わせるものでした。

素粒子実験領域「アトラス実験の最新結果Ⅰ(標準模型の精密測定とBSM探索)」

提案者：武内勇司(筑波大数理物質系)

[A] 陣内 修(東工大)

[B] 世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器LHCでの国際共同実験ATLASの最新の結果の報告を受けて議論を行った。陣内氏はLHCでの実験でトップクォークの精密測定や、2ベクターボゾン生成、トップの単独生成などの稀な事象の測定が進んでいること、超対称性粒子の探索が進んでいるが現時点では兆候が見えていないことを報告した。約150人の参加者を得て、新粒子探索等での細部にかかわる質疑等もあり、アトラス実験の実験成果と意義を多くの研究者と共有できた。

素粒子実験領域「アトラス実験の最新結果Ⅱ(ヒッグス粒子探索)」

提案者：武内勇司(筑波大数理物質系)

[A] 田中純一(東大素セ)

[B] 世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器LHCでの国際共同実験ATLASの最新の結果の報告を受けて議論を行った。田中氏は7月に発表されたヒッグス粒子の考えられる粒子の発見に関する詳細説明とその粒子に関して現在までに何がわかっているか、これからどのような測定を進めるかを議論した。約150人の参加者を得て、新粒子探索等での細部にかかわる質疑等もあり、アトラス実験の実験成果と意義を多くの研究者と共有できた。

素粒子実験領域「COMET Phase Iでの物理」

提案者：川崎健夫(新潟大理)

[A] 坂本英之(大阪大)

[B] J-PARCにおけるミューオン-電子転換事象探索実験COMETは世界最高感度でのミューオンLFV現象の探索を目指した実験である。現在、COMET実験グループは段階的に実験装置を建設することにより目標感度に到達することを計画中である。本講演では、大阪大学坂本氏に、COMET Phase Iで展開できる物理に関して詳細な報告をお願いした。講演では、COMET Phase I計画に関して、実験室の建設計画の簡単な紹介の後、どこまで物理感度を高めることができるのかに関する説明が行われた。この算出は実データとシミュレーションにより行われたもっとも精度の良いものであり、Phase IによりCOMET実験は 7.0×10^{-15} の分岐比上限値(90%信頼度)を達成できるものと期待されている。同時にデータ収集中の検出器の運転条件、予想されるバックグラウンドについての評価も示され、上記感度を問題なく達成できるであろうことが示された。またPhase I後のPhase IIにおける測定器配置と目標実験感度(6.0×10^{-17})についての報告も行われた。

素粒子実験領域「MEG将来計画」

提案者：川崎健夫(新潟大理)

[A] 岩本敏幸(東大素粒子センター)

[B] スイスポールシェラー研究所におけるMEG実験は2011年に $\mu \rightarrow e\gamma$ 上限値をアップデートした後も順調にデータ収集を続けている。同時に将来の実験感度の大幅な向上を目指して、検出器アップグレードのための開発研究が進行中である。本企画講演ではMEG実験遂行において中心的役割を果たしている東京大学岩本氏に現状のレビューと将来計画の詳細の説明をお願いした。講演では、実験の主要検出器である液体キセノンガンマ線検出器、陽電子スペクトロメータ飛跡検出器の双方に関して、実データに基づいて詳細なアップグレードの計画を検討していることが報告された。現在の測定器でのデータ収集は2013年まで継続されるが、これによりMEG実験は実験感度(6×10^{-13})を達成できる見込みである。一方、検出器アップグレードを行えば、更に3年間のデータ収集を行うことにより、これを一桁近く上回る実験感度(5×10^{-14})を達成できる見込みである。

実験核物理領域「(p, n)反応の全偏極移行量測定から探る核内中間子相関の研究」

提案者：山口貴之(埼玉大理)

[A] 堂園昌伯(理研仁科加速器研究センター)

[B] 本講演は原子核談話会新人賞受賞に伴う講演である。ガモフテラー型反応 $^{12}\text{C}(p, n)^{12}\text{N}(g_s, 1^+)$ の全偏極移行量を広い運動量移行領域で測定し、パイ中間子モードとロー中間子モードの断面積を分離して測定した研究に関して講演いただいた。実験はRCNPにおいて行い、新たな中性子偏極計NPOL3を開発し、エネルギー分解能500 keVという世界最高レベルの分解能を達成することにより高純度で目的とする状態を測定することに成功した。

実験核物理領域「sd殻領域に渡るN=Z偶々原子核からのアイソスカラー・アイソベクター型スピン-M1遷移の研究」

提案者：山口貴之(埼玉大理)

[A] 松原礼明(理研仁科加速器研究センター)

[B] 本講演は原子核談話会新人賞受賞に伴う講演である。磁気モーメントやガモフテラー遷移強度が多くの原子核に対して理論予想より少なく(クエンチング)、この原因が Δ 粒子(デルタ粒子)への励起ではなく多粒子多孔子への励起が主であるということが90年代以降の精密測定により明らかになってきたが、GT遷移と荷電対象な遷移であるM1遷移強度において同様のクエンチングが存在するかどうかに関して講演いただいた。sd殻N=Z偶偶核のM1遷移強度をRCNPにおいてスピン部分を抽出しアイソスカラー成分とアイソベクター成分に分けて測定することに成功し、アイソスカラー成分にはクエンチングがないことを初めて示した。

実験核物理領域「300 MeV/u における ($t, {}^3\text{He}$) 反応を用いた beta+型荷電ベクトル型スピン単極共鳴状態の研究」

提案者：山口貴之(埼玉大理)

[A] 三木謙二郎(阪大RCNP)

[B] 本講演は原子核談話会新人賞受賞に伴う講演である。300 MeV/u における ($t, {}^3\text{He}$) 反応という新しいプローブによる荷電ベクトル型スピン単極共鳴 (IVSMR) に関して講演いただいた。IVSMR はスピン、アイソスピンの振動を伴う原子核の密度振動モードであり、原子核の圧縮率とも関連する極めて興味深い状態である。理研 RIBF における SHARAQ スペクトロメータを用いて ($t, {}^3\text{He}$) 反応を用いることにより IVSMR の存在を初めて明らかにした。

領域8「ラットリングと超伝導」

提案者：榊原俊郎(東大物性研・新物質科学研究部門)

[A] 廣井善二(東大物性研・物質設計評価研究施設)

[B] この企画講演は、廣井氏らの論文“Rattling-Induced Superconductivity in the β -Pyrochlore Oxides AOs_2O_6 ”が日本物理学会第17回論文賞を授賞したのを記念して提案されたものである。講演では、一連の β 型パイロクロア AOs_2O_6 ($A = \text{Cs, Rb, K}$) における超伝導転移温度が種々の手段によって評価されたアルカリ原子のラットリング振動数と相関しており、転移温度の増大がラットリングエネルギーの低下に伴う電子-格子相互作用の増大として理解されることが紹介された。また、最近の研究結果として、 $\text{A}_x\text{V}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ ($A = \text{Ga, Al}$) における超伝導転移温度と A 原子のラットリング振動との相関についても紹介された。本講演には300人を超える参加者があり、広く関心が持たれたように思う。

領域8「スピン起源の強誘電性」

提案者：榊原俊郎(東大物性研)

[A] 有馬孝尚(東大新領域)

[B] この企画講演は、有馬氏の論文“Ferroelectricity Induced by Proper-Screw Type Magnetic Order”が日本物理学会第17回論文賞を授賞したのを記念して提案されたものである。講演では、磁性強誘電体における電子スピン自由度に起因する電気分極発生の必要条件に関して、対称性の考察による分かりやすい説明があった。続いて、サイクロイド型らせん磁性体における強誘電性の理論の紹介があり、スピン軌道相互作用の1次の効果であることが説明された。次に、講演者自身の仕事であるネジ型らせん磁性体における強誘電性の機構が紹介され、スピン軌道相互作用の2次の効果であることが説明された。また最近の実験的進展も紹介された。会場は300人を超える参加者があり、関心の高さが伺えた。

チュートリアル講演

領域2「高エネルギー粒子とグローバルMHDモードとの相互作用研究の最前線」

提案者：市村 真(筑波大)

[A] 東井和夫(核融合科学研究所)

[B] 磁場閉じ込め核融合研究では、ITERを初めとする燃焼プラズマにおける課題が加速的に進展している。その中で、D-T反応により生成される高エネルギーの α 粒子の閉じ込めは、燃焼維持と炉壁損傷の回避に直結する最重要課題のひとつであり、このような高エネルギー粒子によって励起される不安定性と高エネルギー粒子との非線形な相互作用の研究が世界中の実験装置で進められている。

東井氏による本チュートリアル講演では、まず、高エネルギー粒子閉じ込めの重要性和高エネルギー粒子輸送へ影響を与えるグローバルMHDモードであるアルベン固有モードの物理的な基礎過程の丁寧なレビューが行われた。その後、2次元と3次元トラスプラズマで観測されたアルベン固有モードの代表的な実験観測を例として、高速イオンの速度空間と実空間分布の構造変化に基づく物理的解釈が紹介された。講演の後半では、最新の研究成果として、周波数が時間的に掃引する非線形現象とその理論解析や $n=0$ モードを含めた低周波数モードとその励起過程などに関する成果が紹介された。最後に、これまでの進展として、何がどこまで理解されているか？残っている未解決問題は、なにか？が整理されて、講演がまとめられた。本講演の内容は、単に核融合プラズマの一つの研究課題にとどまらず、プラズマ中の波動-粒子相互作用というプラズマ物理のもっとも基本的な課題としての理解を深める講演であった。そのため、広く興味関心を集め、70名以上が集まり、質疑も活発に行われた。

領域7, 領域3「スピン液体の理論」

提案者：宇治進也(物材機構)

[A] 小形正男(東大理)

[B] 近年、いくつかの2次元分子性物質で絶縁体(電荷の自由度はない)ながら、スピンの自由度が残り、さらに比熱や熱伝導度が低温で温度に比例する項(ガンマ項)をも持つ物質が発見されました。この状態はあたかもスピン状態の素励起がフェルミディラック分布に従うかのように見え(フェルミ液体と類似)、スピンの長距離秩序がないという意味で「スピン液体」と呼ばれ、その起源の解明がこの分野での重要課題となっています。かなり以前から、長距離秩序を持たず、低温までスピン自由度が残る系の理論的研究は行われており、そのもっとも有名な理論モデルは、高温超伝導酸化物の超伝導状態を記述するものとして提唱された経緯もある、resonating valence bond (RVB) 状態でしょう。もちろんそれ以外にも多くの理論提案が行われて来ましたが、なかなか難解で専門外の者(とくに実験家)には理解しづらい状況にあるかと思えます。そこで、それらの理論モデルを概観し、それらの相違点や最近の実

験結果との対応について、部外者にも分かりやすく解説していただくということで、本チュートリアル講演を企画させていただきました。本講演者である小形先生には様々なスピン液体理論の分類とその特徴について平易に解説していただき、なかなか好評だったと感じています。特にどのモデルが励起にギャップを持つか、またはガンマ項を持ちうるのか？という分類表は、実験家にも分かりやすく大変すっきりとした内容でした。講演会場として200人教室を利用しましたが、満席で多くの立ち見が出るほどでした。講演時間が1時間と比較的長いにも関わらず、講演は冗長にならず、非常に興味深く聴講させていただきました。討論時間があまり取れなかったのが、少し残念でした。

領域 10, 領域 8「強誘電体と物理学—100年の歴史に学ぶ強誘電体—」 提案者：塚田真也（島根大学）

[A] 高重正明（明星大学）

[B] Ferroelectric という概念が提唱されて2012年でちょう

ど100年の節目を迎えた。そこで、強誘電体の登場当時の物理学会の状況から、強誘電体がどう物理学と関わってきたか、高重先生に講義して頂いた。「分極反転が起こることとは、きわめて多くの要素が複合化した結果であり、そこに、ある種の偶然性から生み出されるような芸術の中の美に似たものを感じる。」といった言葉には非常に重みがあり、100人を超える聴講者が高重先生の講演に聞き入った。

本講演後に伊藤満氏（東工大）から招待講演「新強誘電体の物質開発の現状と将来」があり、強誘電体物理学の次の100年について、議論が深められた。聴講者の中には、領域10のみならず、領域8や領域5で発表されている方々も見られ、チュートリアル講演として成功したと考えている。聴講者は100人以上あり、席に座れない方がいた。提案者が数えた時点では、106人（内13人が立ち見）がいた。

（2012年11月13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、お電話（03-3816-6201）またはFax（03-3816-6208）でご連絡下さい。

また、本誌ホームページのURLは次の通りですので、どうぞご覧下さい。

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

『大学の物理教育』編集委員会

Vol. 18-3 (11月15日発行) 目次

近頃の学生さん……………家 泰弘
講義室
 高等学校の物理教科書—新学習指導要領のもとでどう変わったのか、高校生たちはどう学ぶのか—…筒井和幸, 下田 正
 大学入試が若者たちの学びに与える影響…下田 正, 筒井和幸
 磁性実験とそのためのモーゼ効果の確認……………沢田 功
教育報告
 サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト「放射線から見る科学と技術の最先端」実施報告
 ……………内田聡子, 小鍛治優, 田村圭介
 作って・測って・判断できる放射線教育システムの構築—国民的素養としての放射線教育をめざして—
 ……………中川和道, 川茂唯順, 竹谷 篤, 足利裕人
 国際物理オリンピック引率者としての所感……………村下湧音

物理教育世界会議2012参加報告……………安田淳一郎
 2011年IUPAP-ICPEメダルを受賞して—その意味を考える—
 ……………川勝 博
 物理学・物理教育の新しい芽をアジア太平洋地域から
 —第12回アジア太平洋物理学会（APPC12）のご案内—
 ……………笹尾真実子
 科学リテラシー普及のために—科学普及員研修制度の確立—
 ……………廣田誠子
教育に関する一言……………山田弘明/岡村直利/赤羽 明
開催情報
寄贈書リスト
『大学の物理教育』総目次 (vol. 18)
編集後記

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2012年10月に掲載可となったものの中から2012年11月の編集委員会を選んだ“Papers of Editors' Choice” (JPSJ注目論文) を以下に紹介します。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、図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているもので不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。

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ください(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、合わせてご覧ください。

JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味深い論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思います。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。

BiS₂ 超伝導層を有する新しい層状超伝導物質を発見

層状物質では二次元的な結晶構造に由来した特異な電子状態が実現する。そのため、高温超伝導をはじめとした非従来型超伝導機構や特異な磁性などが発現するため、盛んに研究されてきた。銅酸化物高温超伝導系や鉄系超伝導系も層状物質であり、超伝導が発現する“超伝導層”と超伝導層間を絶縁する“ブロック層”の積層構造をとる。銅酸化物系においてはCuO₂面が共通の超伝導層を形成し、CuO₂面の枚数およびブロック層の構造を変化させることで様々な高温超伝導体が発見された。銅酸化物系におけるCuO₂面のような共通の超伝導層を発見することは、新超伝導物質の探索に大きな指針を与える。

最近、首都大学東京電気電子工学専攻のメンバーを中心とする研究グループは、ビスマス (Bi) および硫黄 (S) から構成されるBiS₂層を有する一連の層状超伝導物質系を発見した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2012年11月号に掲載された。

LaOBiS₂は図1(a)に示すように2枚のBiS₂層とLa₂O₂ブロック層が積層した構造をとり、Bi³⁺の半導体である。ブロック層の酸素を一部フッ素で置換することでBiS₂層に電子がドーピングされ、LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂は超伝導転移温度 (T_c)

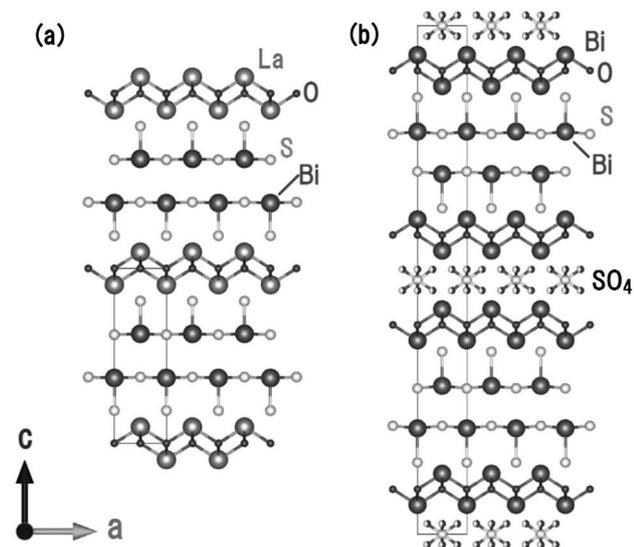


図1 (a) LaOBiS₂の結晶構造. (b) Bi₄O₄S₃の結晶構造.

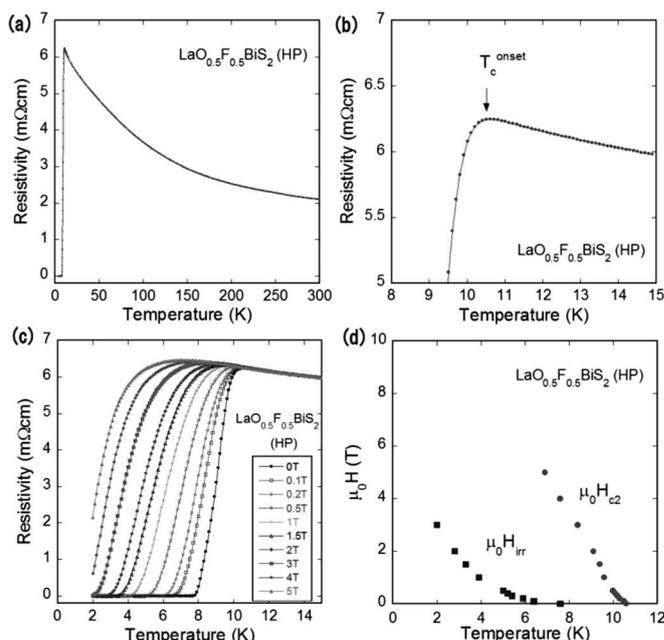


図2 LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂ (高圧アニール試料) の超伝導特性. (a), (b) 電気抵抗率の温度依存性. (c) 磁場中電気抵抗率の温度依存性. (d) 磁場-温度相図.

が10 K以上の超伝導体となる。これまでに、Laサイトを他のランタノイド元素(Ce, Nd, Pr, Yb)で置き換えた物質においても電子ドーピングにより超伝導が発現すると報告されている。また、図1(b)に示すような厚いブロック層を持つ物質においても超伝導が発現する。Bi₄O₄S₃は二枚のBiS₂層の間にBi₄O₄(SO₄)_xブロック層が存在し、SO₄サイトが欠損することでBiS₂層に電子がドーピングされ、4.5 Kの超伝導体になる。これまでに発見されている物質についてまとめると、BiS₂系超伝導体は2枚のBiS₂層とブロック層の積層構造を取り、母相の半導体に電子をドーピングすることで超伝導が発現する。

比熱測定や圧力下電気抵抗測定からBiS₂系は半導体的な伝導の近傍で起こる低キャリア超伝導であると示唆されており、これはHfNCI系と非常に類似している。また、鉄系超伝導のように局所構造の変化によりT_cが大きく変化することもわかってきた。今後、さらに高いT_cを持ったBiS₂系超伝導物質が発見されることが強く期待されるとともに、超伝導発現機構も今後の興味深い研究対象である。

原論文

Superconductivity in Novel BiS₂-Based Layered Superconductor LaO_{1-x}F_xBiS₂

Y. Mizuguchi, S. Demura, K. Deguchi, Y. Takano, H. Fujihisa, Y. Gotoh, H. Izawa and O. Miura: J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 114725.

〈情報提供：水口佳一(首都大学東京電気電子工学専攻) 高野義彦(物質・材料研究機構)〉

ナノ・メゾ系のスピン電荷制御：近藤効果が誘発する電気分極

有意な電気磁気効果を示すマルチフェロイック物質は、スピン電荷制御を利用したエレクトロニクス技術への応用が期待され、新物質探索やその物性研究が活発である。最近、三角形の構造を有するバルクのモット絶縁体で生じる電気磁気効果の新しい機構が提案された。そこでは、スピン状態の変化が電気分極を誘起する可能性が理論的に提示され、それを示唆する実験も報告されている。この誘起電気分極の発現機構には一般性があり、三角形というループ形状が重要である。

一方、メゾスコピック系やナノ物質系の分野では、量子ドットと呼ばれる人工原子を中心とする微細構造形成技術がめざましい進歩を遂げている。最近では、量子ドットを直線上に配置するだけでなく、より複雑な幾何学的構造をもつ多重量子ドット系の創製が可能となり、ドットを介したリード間の電気伝導特性にもさらなる多様性が期待されている。その中でも図1に示すような正三角形に配置された三重量子ドットの基底状態は、各ドットに1個の電子が局在するような状況において、4重に縮退しているという特徴をもつ。この縮退は正三角形という幾何学的対称性から生じている。量子ドット構造体を一つの磁性不純物

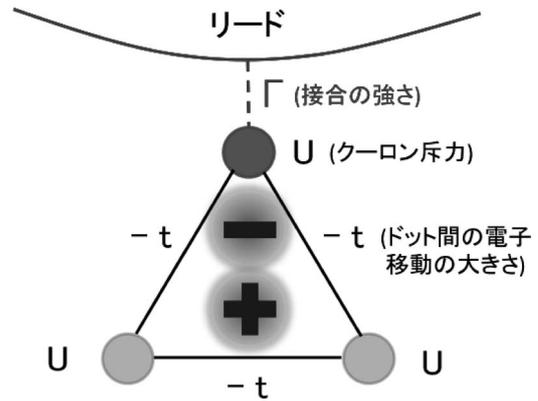


図1 近藤効果による誘起電気分極。ドット・リード接合(赤色)が生み出す近藤効果によって、正三角形ドット上の電荷分布に偏極が生じる。

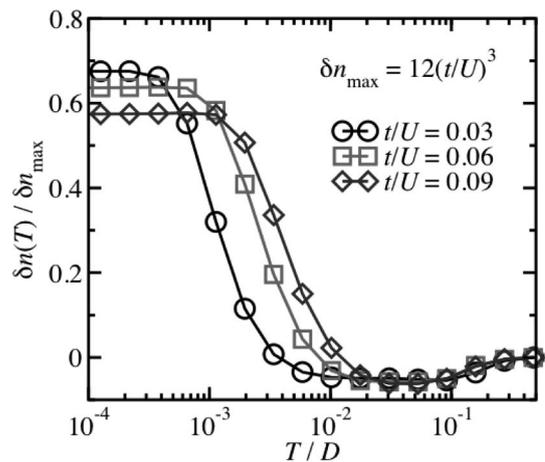


図2 誘起電気分極の温度変化。ある温度で電気分極が急激に増大する。電気分極の飽和は電荷移動の大きさtに強く依存する。

とみなして金属リードを伝導電子系と考えると、このドット・リード接合による近藤効果に起因した、制御可能な新しい物性が期待できる。

静岡大学と愛媛大学の共同研究グループは、人工原子系でのスピン電荷制御の一つとして、近藤効果が生み出す誘起電気分極の新しい機構を提案した。ループを形成する正三角形上の局在スピンの等価性が近藤効果によって失われ、その結果、ループ内に電荷移動が引き起こされる点に、この誘起電気分極機構の本質がある。温度が下がるにつれてリードと接合したドット上のスピン自由度が近藤効果により消失していき、それにとまってドット系全体のスピン自由度も消失する。同時に、図2に示すように誘起した電気分極が急激に増大する。誘起電気分極の大きさはドット・リード接合の強さにも依存し、本研究で定量的に検討されている。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2012年12月号に掲載された。

1964年の近藤論文によって電気抵抗極小現象の本質が解明され、同時に電子相関の基本問題として近藤効果の研究が活発になってから半世紀が過ぎようとしている現在、近藤効果は新技術への応用に積極的に利用される時代が到

来したといえる。特に、本研究で提案された量子ドット構造体に誘起される電気分極は、ドット上のスピン制御と直接に連動しており、マルチフェロイックという新しい視点をナノテクノロジーに導入する点で、今後の研究に新展開をもたらすであろう。

原論文

Emergent Electric Polarization by Kondo Effect in a Triangular Triple Quantum Dot

M. Koga, M. Matsumoto and H. Kusunose: J. Phys. Soc.

Jpn. **81** (2012) 123703.

〈情報提供：古賀幹人（静岡大学教育学部）

松本正茂（静岡大学理学部）

楠瀬博明（愛媛大学理工学研究科）〉

講演会：JPSJ 注目論文から—JPSJ フレンドシップミーティング

2013年3月27日（水）第68回年次大会のXH会場で、2012年の注目論文2件の講演を企画しましたので、ふるってご参加をお願いします。

[1] 12:40-13:00 BiS₂層をもつ新しい超伝導体Bi₄O₄S₃とLaOBiS₂

首都大¹, 産総研², 電通大³, 神戸大⁴, 物材研⁵ 水口佳一¹, 井澤宏輝¹, 三浦大介¹, 藤久裕司², 後藤義人², 鈴木雄大³, 白井秀和³, 黒木和彦³, 小手川恒⁴, 藤 秀樹⁴, 出村郷志⁵, 出口啓太⁵, °高野義彦⁵

[2] 13:00-13:20 有機導体を用いたディラック電子系の熱物性測定

東大物性研 鴻池貴子

応用物理 第82巻 第3号(2013年3月号) 予定目次

特集：震災と応用物理

今月のトピックス

2013年応用物理学会春季学術講演会 注目講演 ……宮崎誠一
TMR効果の中核としたスピントロニクス応用の進展

……………湯浅新治

応用物理学会の国際化に向けて（後編） …… Oliver Wright, 他

巻頭言：福島原発事故に学ぶ；学会に望むこと……………北澤宏一

総合報告：大規模災害での情報通信の役割と今後の技術開発

……………上西祐司

解説

東日本大震災後の科学技術の方向性……………奥和田久美

超省エネエコロジーデバイスの動き……………高須秀視

最近の展望

光センシングによる防災情報システムの展望……………村山英晶

科学と政策とのさらなる連携に向けて……………神成淳司
地震に伴う電磁気現象と地震予知の展望……………早川正士

研究紹介

災害に強い半導体工場への取り組み……………林出吉生

非冷却赤外線カメラの開発と防災応用……………川野勝弥, 遠藤 健

討論の広場

原子力発電と共存するための技術と課題……………山名 元

原子力発電に依存しないエネルギー技術と課題……………石井 彰

再生可能エネルギーの普及動向と留意点……………櫻井啓一郎

基礎講座：超高効率を目指す次世代太陽電池……………山口真史

第6回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞： 細道和夫氏

江口 徹 (立教大理)

京都大学基礎物理学研究所 GCOE 特定准教授細道和夫氏が「曲がった空間上の超対称ゲージ理論の厳密解」の業績に対して、第6回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞を受賞した。

細道氏は、3次元超対称ゲージ理論の解析、とくに超対称理論に特有な局所化原理を用いた厳密解の構成で優れた業績をあげ、11次元の究極理論とされる M 理論の構成要素である M2 ブレーンや M5 ブレーンの理論の研究に重要な寄与を与えた。

その主なものとしては、まずチャーン・サイモンズゲージ場と物質場の結合する高い超対称性を持った3次元の場の理論を群論的な考察に基づいて系統的に構成した仕事がある。それまで注意を払われていなかった部類の理論に先駆的に取り組んだもので、ABJM モデルなど M2 ブレーンの理論の発展を切り拓く契機を作った。

次に、歪んだ3次元球面上の超対称チャーン・サイモンズ理論に局所化の方法を適用し、歪みのパラメータを含む理論の厳密な分配関数を求めた。このパラメータは M5 ブレーン上の理論が4次元ゲージ理論と2次元リュービル理論に分解する様子を表す Alday-Gaiotto-立川対応に現れるパラメータに類似しており、M5 ブレーン上の理論が3次元超対称ゲージ理論と3次元の双曲幾何学とに分解する状況を記述する例を与える。更に、細道氏は曲がった時空上の超対称性を特徴づける方程式を拡張して超対称性理論をより一般の空間上に構成する枠組みを研究した。

細道氏は、以上のように超弦理論・M 理論の進展において優れた研究業績をあげており、今後も超弦理論・場の量子論の国内外での研究をリードして活躍することが期待される。木村利栄理論物理学賞にふさわしい研究者である。

過去の木村利栄理論物理学賞の受賞

者は、以下の URL を参照。

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kimuratr/p/kimurasho/index.htm>

(2012年12月20日原稿受付)

2012年度仁科記念賞： 細野秀雄氏

福山秀敏 (東理大)

2008年初めの層状オキシニクタイト LaFeAsO_{1-x}F_x 超伝導体 (臨界温度 26 K) の発見に対して細野秀雄氏が2012年度仁科記念賞を受賞された。

鉄ニクタイト (以下 FePn と略記) での高温超伝導出現の報告は、それまで「磁性」のシンボルであった鉄元素が高温超伝導の担い手にもなりうることを明らかにした画期的な発見であった。2か月後には臨界温度は 55 K に達し、高い転移温度を持つ高温超伝導物質の探索において、もはや銅酸化物系が唯一無二の存在ではなくなった。FePn 系高温超伝導体は、銅酸化物同様に層状構造を持つが、当初の (1111) 構造 (LaFeAsO など) ばかりでなく、短期間のさわめて活発な研究活動の結果、(122) (BaFe₂As₂ など)、(111) LiFeAs、(11) (FeSe など) さらに多様なペロブスカイト層を持つ積層型超伝導体が発見され、大きな広がりを持つ「物質群」が出現した。

FePn 系の発見は他の顕著な超伝導体同様に固体電子論にも新しい視点を提示している。1957年の超伝導 BCS 理論以後 Higher T_c を求めて多くの努力がなされてきたが、代表例を発見年代順にあげると、Nb₃Sn 等の A15 型化合物、銅酸化物、MgB₂、そして今度の FePn である。A15 型化合物は 1986 年銅酸化物が発見されるまでの最高の $T_c \sim 23$ K を示し、超伝導相転移温度近傍にある構造相転移との関連に注目が集まり電子格子相互作用に基づく BCS 機構の範囲で考察された。銅酸化物は強相関モット絶縁体にキャリアがドーブされた状況で出現しており BCS 機構では全く理解できない。銅酸化物の母物質では正方対称結晶のために縮退が解けた Cu 原子の $d_{x^2-y^2}$ 軌

道に起因する単一バンドに1個電子が存在し (half-filled single band) そのためにモット絶縁体が出現している。このモット絶縁体母物質にホールがドーブされた状況で超伝導が発現している。この状況での電子間引力はモット絶縁体で反強磁性を引き起こす超交換相互作用であると考えられている。2001年秋光によって発見された MgB₂ は層状構造を持ち Mg から移動した電荷が hexagonal ネットワークを構成する B 層で強い電子格子相互作用の影響を受けた典型的な BCS 機構の例として理解されており、電子相関の顕著な痕跡は見当たらない。

上記を踏まえて FePn の特徴を LaFeAsO_{1-x}F_x を例にして考えると、母物質 ($x=0$) では Fe²⁺ (d^6) で単位胞あたりの電子数は偶数でありバンド絶縁体となるはずであるが実際は金属性を示しかつ 150 K 近傍で構造相転移 (T_S) および反強磁性転移 (T_N) が金属性を保ったまま出現する。金属性の原因は半金属状態となっているため (フェルミエネルギー近傍には複数の d バンドが存在しそれに伴い複数のフェルミ面を持つ) である。 $x \neq 0$ で電子がドーブされることに伴い構造相転移および反強磁性が消滅し超伝導が出現する。このように超伝導出現の舞台には複数のエネルギーバンドが関与しそれらは反強磁性の原因となる電子相関の影響を受けかつ構造相転移の原因である電子格子相互作用が重要な役割を果たしている。すなわち「電子相関および電子格子相互作用が強い多バンド系」であり、これはいままでにない状況である。固体中電子が持つ固有の性質「電荷・スピン・軌道」すべてが明確な役割を持っておりまさに “Actors are ready” である。実際臨界温度のドーブ量依存性に2つのピークがあることを細野氏みずから発見し超伝導発現には複数の機構が関与している可能性を指摘している。

固体化学の専門家である細野氏が物理現象として象徴的な位置を占める「超伝導」において大きな発見を達成されたことは極めて印象的であり仁科記念賞にふさわしいばかりでなく特別である。氏は加えて透明酸化物半導体

・金属や室温で安定なエレクトライドの実現、さらにエレクトライドのアンモニア合成触媒への応用という従来からの物質観に大きな変革をもたらす発見を短期間に実現されている。細野氏がこれからどのような新物質を発見されるか期待はさらに膨らむ。

(2012年11月29日原稿受付)

2012年度仁科記念賞： 井上邦雄氏

白井淳平 (東北大ニュートリノ
科学研究センター
)

地球は誕生から46億年も経つのにその内部は依然高温である。観測によれば地球表面から放出される熱量は 47 ± 2 TW (1 TW = 1兆ワット) で大型の発電用原子炉15,000台分の熱出力に相当する。発生する熱エネルギーはマントルを対流させ、大陸の移動、地震や火山活動を引き起こすとともに、地磁気発生のものである。それは誕生以来の地球の進化における最も基本的で重要な物理量である。この熱源として古くから地球内部に含まれる放射性元素(特に ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)の崩壊熱が重要であると考えられてきたがこれを直接確かめることは不可能であった。実際地球内部の研究は地震波の測定や隕石の分析など間接的な手段で行われてきた。しかしこれらの放射性元素は崩壊過程にベータ崩壊が含まれ、放出されるニュートリノ(反電子ニュートリノ)は地球をすり抜けて出て来るので、検出できれば放射性元素の量や分布を直接知ることができる。それは人体のPET診断と同様、地球の内部構造を探る全く新たな眼をもたらすことを意味する。

この地球反ニュートリノの検出による地球の熱源の解明と化学組成を探るアイデアは昔から考えられてはいたがそのエネルギーは低く(検出信号は2.6 MeV以下)膨大なバックグラウンドの中から検出することはまず不可能と考えられていた。カムランド実験は岐阜県飛騨市神岡町の地下1,000メートルに建設された超高純度かつ世界最

大(1,000トン)の液体シンチレータを有するニュートリノ検出器である。2002年の実験開始以来、反電子ニュートリノに特有な反応(逆ベータ崩壊反応)を使って遠方の原子炉から飛来する反電子ニュートリノの振動現象を世界で初めて捕らえることに成功し、振動パラメータの精密測定に大きく貢献した実験である。カムランド実験は東北大学ニュートリノ科学研究センター長であった鈴木厚人氏(現:高エネルギー加速器研究機構長)の強力なリーダーシップのもとに開始されたが、当初より地球反ニュートリノの検出は重要な目標として位置づけられていた。カムランドではウランとトリウム起源の反電子ニュートリノの一部を捕らえることが可能である。バックグラウンドの詳細な解析が行われ、ついに2005年にNatureに掲載された。¹⁾それはニュートリノを用いた地球内部のウラン、トリウムの初の直接測定であり、地球物理学者の反響は大きく「革命」であるとさえ言われた。今回受賞の井上邦雄氏は当初より解析グループのリーダーとしてグループをまとめ観測を成功に導くとともに、その後も蓄積されたデータから地球の化学組成に関するモデルに制限を与えることに成功した。これは小柴昌俊先生が開拓された「ニュートリノ天文学」に続く「ニュートリノ地球物理学」の創成として誠に意義深く、ニュートリノ研究が素粒子・原子核および宇宙物理学以外の分野で初めて役に立った快挙と言える。地球反ニュートリノは2010年、イタリアの実験グループ(Borexino)でも検出された。²⁾このことは異なる地域での観測によりニュートリノ発生源の分布を知ることができることから、地球内部の断層診断が現実になったことを意味する。³⁾これを受け一層の精密観測を目指す計画が検討されつつあり国際会議でも活発に議論されている。⁴⁾

井上氏は、現在カムランドを改造し大量のキセノン同位体核(^{136}Xe)を用いてニュートリノのマヨラナ性を世界トップクラスの感度で検証する「カムランド禅」実験を強力に推進中である。⁵⁾昨秋より始まったカムランド禅のデータ解析から地球反ニュートリノ

の観測はカムランド禅でも継続可能であることが示された。地球反ニュートリノ観測の最大のバックグラウンドは原子炉反ニュートリノであるが、全国のはほとんどの原子炉が停止を余儀なくされるなか、バックグラウンドが少ない高品質のデータの蓄積によりさらなる成果が期待される。今回の受賞は同じカムランドグループの一員として誠に喜ばしく、今後一層の成果を目指してグループ一同気を引き締めているところである。

参考文献

- 1) T. Araki, *et al.*: Nature **436** (2005) 499.
- 2) G. Bellini, *et al.*: Phys. Lett. B **687** (2010) 299.
- 3) The KamLAND Collaboration: Nature Geoscience **4** (2011) 647.
- 4) The 5th International conference on neutrino geoscience in Takayama, Japan on March 21-23, 2013, <http://www.awa.tohoku.ac.jp/geoscience2013/>.
- 5) A. Gando, *et al.*: arXiv: 1211.3863[hep-ex].

(2012年12月11日原稿受付)

2012年度仁科記念賞： 初田哲男氏, 青木慎也氏, 石井理修氏

延與秀人 (理研仁科加速器研センター
)

2012年度仁科記念賞が「格子量子色力学に基づく核力の導出」の業績に対し、初田哲男氏(理化学研究所)、青木慎也氏(筑波大学)、石井理修氏(筑波大学)に授与された。

今より遡ること80年前の1932年に中性子が発見され、原子核は中性子と陽子からなるという仮説がHeisenbergによって提唱された。仁科芳雄は理研仁科研究室の室員だった朝永振一郎とともに陽子と中性子を結び付ける力を解明しようと考えた。1933年に東北帝大における日本物理学会での湯川秀樹の講演「核内電子に関する一考察」を聞いた仁科は「電子の代わりにボーズ統計に従う粒子を考えれば問題が解決するのではないか」とコメントしたという。この時、朝永と湯川の間に議論があったようで、1933年に朝永から湯川へ宛てた書簡の中で「式中のポテンシャルを $Ae^{-\mu r}$ にしたのは仙台でやりました」との記述がある。朝永

は実験データと λ の関係で悩んでいたようだ。そして1935年に湯川のノーベル賞受賞論文、「On the interaction of elementary particles. I.」が出版される。 λ の起源を交換されるボーズ粒子の質量に帰着させた核力の解明、そして素粒子物理学の誕生である。

仁科は予言された「中間子」の存在を実証すべく実験を行う。1937年7月に宇宙線の中に陽子の質量の1/6~1/7の新粒子を発見したとの報を湯川、N. Bohr等に送っている。後に坂田昌一の二中間子論によって決着がつくこの μ 粒子の発見の投稿順番は、NeddermeyerとAndersonが1937年3月30日、理研組が8月28日、そしてStreetとStevensonが10月6日である。仁科の核力研究に対する強い思いは、仁科を2台目のサイクロトロン建設に駆り立てた。1937年の仁科のメモに「大サイクロトロン建設費試算」総額28万円がある。仁科の夢を乗せたまま完成直後に東京湾に破棄されたこの悲劇の加速器は、今日、理研RI Beam Factory, KEK B-Factory, J-PARC, SPring-8, SACLAを擁する加速器大国日本の原点である。

核力研究はその後1951年のR. Jastrowによる斥力芯の発見、武谷三男の多重中間子交換の指摘、南部陽一郎による重い中間子 ω の存在予言とその発見により定性的に完成する。実験データによる精緻化・定量化が現象論的に進み、原子核物理学の発展の基礎を築くものの、核力そのものを定量的に基礎原理から構築する努力は停滞する。1966年に南部によって提案された量子色力学QCDは核力の真の基礎原理たるべきものであるが、南部をして1997年に「現在でも核力の詳細を基礎原理から導くことはできない。(中略)むしろこれは無理な話である」とまで言わしめた、美しくかつ複雑な基礎原理である。

南部の悲観論を格子量子色力学(格子QCD)の手法で打ち破ったのが今回の受賞業績である。当時理研はコロンビア大と共同で格子QCDの手法に最適化した計算機QCDOCを開発し、特にCP保存を破るK中間子希崩壊の本格的な計算を始めたところであった。

ここで重要なのが $\pi\pi$ 散乱振幅を求めることであり、筑波のCP-PACSと競争で計算していた。散乱振幅の計算手法が核子間散乱にも使えるとの発想が今回の仕事の味噌であり核力ポテンシャルをQCDで定式化するための出発点である。当時、理研BNL研究センターの科学諮問委員の任にあった小林誠の指導もありQCDOCの汎用型であるBlue Gene/LがKEKに導入され、必要とされる長大な数値計算を支えた。結果は斥力芯を伴う見事な核力のポテンシャル曲線を示した。強い相互作用の理論の新しい地平が開けた瞬間である。

スーパーコンピュータ「京」での今後の発展も大いに期待される。ハイペロンを含むバリオン間相互作用は基礎原理に基づき統一的に理解され、ハイパー核物理と不安定核物理は同じ土俵で議論できるものになるであろう。超新星爆発が起る際の核力の振る舞いも理解されるであろう。核力研究の新時代が訪れたと言える。

受賞者、初田哲男、青木慎也、石井理修の三氏はこの仕事以前には三人の共著論文が無い。この新しい発想のもとに立ちあがり、三氏の専門分野と得意技が見事に調和した業績となった。初田の修士論文は、相対論的クォーク模型に基づく核力の仕事であり、湯川が拓いた核力の問題を追及した玉垣良三の手ほどきを受けたものである。仁科と湯川が核力に賭けた情熱が70年の時を超え、再度見事に結実した。まさしく仁科記念賞に相応しい業績である。

(2012年12月17日原稿受付)

2012年ゴードン・ベル賞： 石山智明氏、似鳥啓吾氏、 牧野淳一郎氏

青木慎也(筑波大計算科学研究センター)

筑波大学計算科学研究センターの石山智明研究員らの研究グループが、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」によるダークマターシミュレーションで「大規模計算を非常に高い実効性能で実現した」ことが評価され、

ゴードン・ベル賞を受賞しました。

石山研究員、理化学研究所計算科学研究機構の似鳥啓吾研究員、東京工業大学の牧野淳一郎教授は、「京」(ピーク性能10.62ペタフロップス:1秒間に1.062京回演算)を用い、約2兆個のダークマター粒子の宇宙初期における重力進化の計算を行いました。石山研究員らは、文部科学省「HPCI戦略プログラム分野5—物質と宇宙の起源と構造」の研究活動として専用のアプリケーションを開発し、「京」全体の約98%を用いて実効性能5.67ペタフロップスを達成しました。このような大規模計算によりダークマターの重力進化を詳細に解明することは、宇宙の星や銀河の形成過程を明らかにするだけでなく、ダークマター粒子の観測方法の改良にもつながります。

ゴードン・ベル賞(ACM Gordon Bell Prize)は、米国のゴードン・ベル氏により、並列計算機技術開発の推進のため1987年に創設されました。米国計算機学会(ACM, 1947年設立)によって運営され、毎年11月に開催される国際会議SCで、並列計算の科学技術への応用で最も優れた成果を上げた論文に与えられます。

日本はこの分野では世界をリードしています。牧野教授は、専用計算機GRAPEシリーズを開発し、それを用いたダークマターやブラックホールの計算などにより、95年、96年、99年、00年、01年、03年と実に6回も受賞してきました。また、昨年は筑波大学などの研究グループがやはり「京」を用いた研究成果でゴードン・ベル賞を受賞しています。

昨年までは複数の論文が受賞していましたが、今年(から)は1本の論文に絞られたので、今回の受賞はより一層の価値があります。加えて、最終候補に残った米国のグループが同じくダークマター粒子の計算で石山研究員らの結果を上回る14ペタフロップスを実現したにもかかわらず、実際の計算効率では一粒子あたりの計算速度が米国グループの約2.4倍だったことが評価されての受賞となりました。単にピーク性能が高い計算機を使ったのではなく、効率的なアプリケーションの開

発にかかわる日本の研究者の底力を見せました。

今回の受賞は、多くのゴードン・ベル賞を受賞した牧野教授らに象徴される日本の大規模科学技術計算の優位性が、石山研究員、似鳥研究員ら若い研究者に受け継がれてきていることを示すものであり、今後明るい展望を拓くものと言えます。

(2012年12月25日原稿受付)

第7回凝縮系科学賞： 塚崎 敦氏，笠 真生氏

北岡良雄〈阪大院基礎工〉

凝縮系科学研究分野の若手研究者を奨励することを目的として秋光純氏と

福山秀敏氏により創設された凝縮系科学賞の第7回受賞者に、実験部門で塚崎敦氏（東京大学大学院新領域創成科学研究科）、理論部門で笠真生氏（イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校）が選ばれた。

塚崎氏の受賞業績は、「高品質 ZnO 薄膜の作製と酸化物エレクトロニクスへの応用」。同氏は、ワイドバンドギャップ半導体、酸化亜鉛 (ZnO) において、電流注入によって発光する pn 接合を初めて実現した。酸化物エレクトロニクスと漠然と呼ばれていた分野が「物質科学ならびにエレクトロニクスとしての応用分野における明瞭な研究対象」となることを示すとともに、酸化物が電子技術材料として確立されるために必要な研究の指針を与えた。

笠氏の受賞業績は、「トポロジ

を用いた固体電子状態分類学の確立」。これまで全貌が明らかではなかった固体中電子の量子波動関数の持つトポロジ的性質について、同氏は、3つの対称性（時間反転対称性、粒子・正孔対称性、カイラル対称性）を用いてその普遍クラスが10個のクラスで尽きていることを見出した。その結果、系の次元に応じてトポロジカルに非自明な絶縁体および超伝導体を特徴づける群を決定することが可能となり、世界で初めて「トポロジカル周期表」を完成させ、新しい電子状態を探索する指針を与えた。

今後の凝縮系科学分野における若手の更なる活躍を期待したい。

(2012年11月28日原稿受付)

談 話 室

究内容についての興味が乏しい学生は少なくない。分野横断型の本夏の学校は若手研究者、特に研究を始めたばかりの修士課程の学生にとって、異分野の友人を作るよいきっかけになりえると考えられる。

第57回物性若手夏の学校開催報告

河底秀幸 〈東大院新領域〉

秋山綱紀 〈東工大院理工〉

大西義人 〈京大院理〉

1. 物性若手夏の学校の特色

物性若手夏の学校は物性物理学の研究に従事する全国の若手研究者が一堂に会する場として、1956年の開校以来長きにわたり開催され続けてきた。修士課程の学生が参加者の半数以上を占めており、物性物理学の基礎から最先端の研究までを概括できるよう講義・セミナーが催されている。また参加者自身が主体的に発表を行い、発表経験の乏しい学生にとっての学会発表へ向けた実践的な練習の機会としても大いに役立つ。本夏の学校では経験豊富な博士課程の学生も参加し、発表での白熱した議論が修士課程の学生に刺激を与えている。博士課程の学生自身にとっても異分野の後輩との交流は自身の研究の再認識・教育面のスキルの向上に役立っている。

物性若手夏の学校以外にも多くの研究会・サマースクールが開講されているが、他の研究会とは異なる物性若手夏の学校の最大の特徴として参加者の所属分野の多様さが挙げられる。本夏の学校の参加者の研究対象は物性分野におけるほぼ全ての領域をカバーし、さらに化学分野や工学分野など多岐にわたる。そのため、様々な視点を持った若手研究者間で熱い議論を交わし、相互に刺激を与え合う「異分野間交流」の場として他の研究会とは一線を画する。「異分野間交流」は、様々な分野への興味喚起・専門外の聴衆への配慮・いかなるテーマにおいても活発に議論する姿勢といった研究者としての素養を培うためには必要不可欠である。しかし実際には、同じ建物内の他研究室の学生との交流はなく、その研

2. 概要

2012年度の物性若手夏の学校は、2012年8月6日（月）～10日（金）の5日間、岐阜県岐阜市のホテルパークで開催された。参加者は192名（男性：175名、女性：17名）であり、参加者の研究分野の分布は図1のようになっ

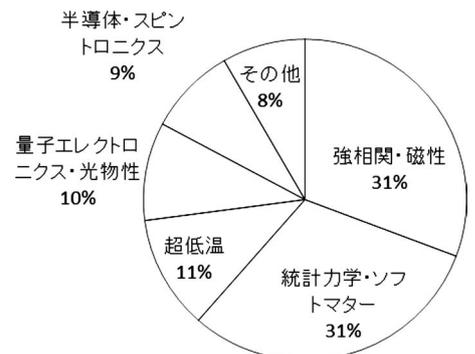


図1 参加者の研究分野の分布。

た。プログラムは、参加者が今後研究を進めていく上で不可欠なスキルを磨くべく、「学習」「発表」「交流」の3つを柱に構成されている。講義・集中ゼミが「学習」、ポスターセッション・分科会が「発表」、グループセミナー・懇談会が「交流」にそれぞれ対応している。

まず、学習企画である座学形式の講義・集中ゼミを紹介する。講義は8月7日～9日の午前3時間を使い、各分野の基礎的な内容をじっくりと学び、集中ゼミは8月9日の午後3時間を使い、最新の研究の話題を中心に発展的な内容を学んだ。講師の先生は、スタッフ内で候補を出し、依頼をする形で決定した。今回の講義でお呼びした先生は、上田和夫先生「強相関電子系における量子臨界現象と超伝導」、蔡兆申先生「ジョセフソン接合での巨視的量子コヒーレンスとその波及効果」、西森秀稔先生「量子アニーリングの数理」、波多野恭弘先生「非平衡統計力学：熱的系から非熱的系へ」、村上修一先生「スピン流の物理とトポロジカル絶縁体」、柳瀬陽一先生「エキゾチック超伝導ミニマム」の6名であった。また、集中ゼミでは、有光敏彦先生、石田憲二先生、勝本信吾先生、島伸一郎先生、島野亮先生、松本正和先生の6名をお呼びした。

続いて、発表企画であるポスターセッション・分科会を紹介する。ポスターセッションは8月8日・9日午後の2時間、分科会は8月8日午後の4時間を用いて行った。ポスターセッションは、文字通りポスター発表の企画であり、例年多くの参加者が発表を行う。分科会は、分野別に部屋を分けて行う口頭発表の企画である。参加者の発表に先立ち、各分野の最先端で活躍されている若手研究者による30分の招待講演を交えて、一人当たり発表10分・質疑応答5分という形式で行った。講演件数は、ポスターセッションが84件、分科会が37件と多くの発表が活発に行われた。

最後に、交流企画であるグループセミナーと懇談会を紹介する。グループ

セミナーは物性若手夏の学校独自の企画であり、8月9日午後の4時間半を用いて、5～8人くらいのグループで自分の研究の概要と成果について発表・議論を合した。各グループは研究分野の異なる人で構成され、学年も偏ることがないようにした。参加者には異分野の人にも分かりやすい発表を心掛けてもらった。様々な研究分野を知ること、参加者に異分野間交流の重要性に気付いてもらうことを意図した。例年のグループセミナーは広い部屋を区切って行っていたが、議論が白熱し、他のグループの議論の妨げになるという声もあったため、今回は各々の宿泊部屋で開催した。スタッフが各部屋を巡回して様子を確認しに行ったが、どの部屋でも概ね例年通りの白熱した議論が展開されていた。懇談会では、8月6日～9日の夜2時間半、研究の話はもちろん、研究室の様子や将来のキャリアビジョンなども含めて、様々なことを語り合った。参加者同士で刺激し合い、今後の研究へのモチベーションの向上につなげることが、ここで一番の目的である。なお、懇談会には各企画でお呼びした講師の先生にも御参加頂いた。

2012年度は京都大学基礎物理学研究所・東京大学物性研究所・東北大学金属材料研究所・材料科学技術振興財団からの援助、日本物理学会・応用物理学会・日本化学会からの後援、各協賛企業・個人からの支援を受けて、無事に物性若手夏の学校を開催できたことに、準備局員一同感謝申し上げます。

3. 新しい取り組み

懇談会中の参加者の交流を促進する目的で「自己紹介カード」というものを導入した。これは、名前・所属・研究分野などを記載した名刺のようなものである。懇談会中に参加者同士で交換することで、初対面の人との会話をより楽しんでもらうことを期待した。実際、物性若手夏の学校最終日に行ったアンケートで「名刺交換があったおかげで色々な人と喋る機会が増えて、話しかけやすくなりました」などのコ

メントもあり、導入した効果はあった。

第57回物性若手夏の学校準備局には、遠方から参加者を増やすべく、交通費援助を拡充しようという声があった。そこで、物性若手夏の学校準備局の収入源の内の「協賛金」というものに着目した。これは、物性若手夏の学校の趣旨に賛同して頂いた企業や個人からの広告宣伝費や寄付金である。これまで「協賛金」のほとんどが企業からの出資で、個人からの寄付金はわずかであった。そのため、この個人からの寄付金で参加者への交通費援助を充実させるべく、物性若手夏の学校準備局OB・OGへ寄付金の募集を行った。

4. 集え、若き物性科学者

冒頭でも述べたように、物性若手夏の学校の特色は「異分野間交流」である。異分野の研究に携わる参加者と交流し、普段の研究生活では気付けない斬新な発想や、研究自体に対する新たな価値観を知ることで、参加者の研究に対するモチベーションを向上させることが最大の狙いである。特に「異分野間交流」という観点からは、物性物理の世界の全体像をまだ掴めきれていない修士課程の学生の方や、研究を進める中で視野を広く持つことが重要だと感じている博士課程の学生の方にとって、貴重な経験ができる場であろう。

これまで物性若手夏の学校について本稿で概観してきたが、より詳しく知りたい点がある場合は、物性若手夏の学校準備局（メールアドレス：info@cmpss.jp）、もしくは身近にいる過去の物性若手夏の学校の参加者に聞いてほしい。第58回も多くの参加者が集い、物性若手夏の学校が賑わうことを切に願う。

非会員著者の紹介

河底秀幸氏：1987年東京都生まれ、2010年東京大学工学部応用化学科卒、現在同大学院新領域創成科学研究科物質系専攻博士課程在学中、専門は物性物理学実験。

(2012年10月1日原稿受付)

第42回天文・天体物理若手夏の学校開催報告

廣井和雄 (京大院理)

第42回天文・天体物理若手夏の学校(主催:天文・天体物理若手の会、後援:日本天文学会)が、2012年8月1日(水)から4日(土)にかけて、福井県の三国観光ホテルにて開催されました。参加者数は夏の学校が始まって以来初めて400人を超え、試験的に導入した、ポスターだけではなく持ち込みの装置を用いたプレゼンを行える展示ブースが好評を博すなど大変な盛況となりました。その一方で、参加者の増加により運営を行うのがいよいよ困難となりつつあることや、研究会としての質の低下が指摘されている夏の学校をこのまま続けてよいのかという提言が全体会議の場でされるなど、いろいろと課題も見つかることとなりました。本稿では、2012年度の夏の学校の活動内容について簡単に報告したいと思います。

1. 夏の学校について

夏の学校は、天文・天体物理若手の会の主要な活動の一環として、天文学・天体物理学を研究する若手研究者のために毎年開催されている研究会です。運営は若手研究者自らが担っており、全国を5地域に分け毎年交代で事務局を構成し、執り行っています。2012年度は主に京都大学、総合研究大学院大学、愛媛大学、鹿児島大学、熊本大学、九州大学らの院生によって運営が行われました。夏の学校は、日本国内の若手研究者に研究発表と交流の場を提供することによって、「研究・研究発表能力を向上させること」、「若手研究者同士の交流を促進させること」、「研究会の運営経験を積むこと」の3つを主な目的としています。近年の夏の学校は、研究分野ごとに分かれた分科会講演や若手研究者からの公募によって決まる全体企画、ポスターセッションなどから構成されており、昨今の参加者数の増大を受けて現在は3パラレルセッション制を導入しています。また、利便性や交流のしやすさなどを

考慮し、合宿形式を採用しています。とはいえ、企画・運営の全ては事務局に一任されており、夏の学校がより良い研究会となるよう、毎年運営方針の検討が行われています。

2. 会場と参加者数について

2012年度の事務局は、近年増加している参加者数を考慮し、大きな3つの会議場と多数の宿泊部屋を持つことを必須条件として、その上で会場使用料や立地、設備などを考慮して会場選定を行い、最終的に最も条件の良い福井県の三国観光ホテルを採用しました。三国観光ホテルは収容人数が最も多いところのひとつではありましたが、それでも参加登録の段階で想定以上の申し込み数があり、部屋を追加で開放してもらうなどして対応する必要がありました。最終的な参加者数は招待講師24名を含めて総計406人に達し、夏の学校が始まって以来初の400人超えとなりました。若手研究者にとって、夏の学校に参加すべき重要な研究会であると考えられていることが示唆されます。しかし嬉しい反面これ以上参加者数が増えると、開催場所の選択肢がなくなることや開催期間の増加などによって金銭的負担が多くなったり、あるいは事務局の管理能力を超えてしまったりするという懸念もあります。

3. 企画内容について

夏の学校で行われる企画内容はその年の事務局によって決定されます。2012年度も概ね2011年度と変わらず、招待講師による講演を含んだ分科会講演、若手研究者から提案された後に公募によって決定される全体企画、ポスターセッションから主に構成されていました。

2012年度の分科会講演の分け方は、2011年度の参加者アンケートの結果を考慮して再編され、「重力論・相対論」、「コンパクトオブジェクト」、「宇宙素粒子」、「太陽・恒星」、「銀河・銀

河団」、「星間現象」、「星形成・惑星系」、「観測機器」という8つの分け方が採用されました。終了後のアンケートの結果では、8割の参加者が「分け方は適切」と回答し、大きな問題はないようでしたが、『人数差が大きい』『分野が広すぎる』などという意見もありました。講演数は、招待講演24件、口頭講演215件、ポスター講演112件となり、参加者数と同じく過去最大規模となりました。参加者の8割が発表を行っている計算であり、積極的に参加する姿勢を見て取ることができます。内容としては、質問もよく飛び交い、活発な議論が行われていたという発表がある一方で、準備不足によるレベルの低い発表があったと指摘する意見も少なからずありました。

招待講演については、最先端の研究に触れることができるということで、いずれの講演も満員御礼となり、非常に人気のある企画となっています。特に2012年度は、一部の分科会でポスドクが招待講師として呼ばれており、学生参加者は自分の将来像を描きかけにもなりました。講師との交流は、講演の質疑応答の時間だけではなく、懇親会の場などでも積極的に行われており、白熱した議論が行われている様子も見られました。

2012年度の全体企画は「見せてもらおうか、修士・博士の実力とやらを?」というタイトルのもと、立場の異なる3名の招待講師に「大学院政策の背景」「社会で必要とされている思考スキル」「天文の研究で身につくもの」というテーマでそれぞれ講演をしていただき、その後、講師と学生とで大学院重点化などの大学院政策や社会情勢が変わりゆく中で修士・博士といった大学院卒の資格が社会的にどのような意味を持つのかということに関してパネルディスカッションを行いました。普段考えたこともないテーマのためか、最初こそ質問も少なく議論もおとなしかったものの、次第に白熱していき、最後には時間が足りないという意見が出るほどでした。学生が将来のキャリアパスを考える良い機会になったと思われます。

ポスターセッションでは従来のもの



図1 参加者全員による集合写真.



図2 分科会講演の様子.



図3 事務局部屋の様子.

に加え、ポスターだけではなく装置を持ち込んで展示・宣伝を行ってもらうという展示ブースの設置を試験的に導入しました。2012年度はKAGRAで有名な重力波グループの方に干渉計を設置してもらいプレゼンを行っていただいたところ、非常に多くの参加者から好評をいただきました。会場の広さには制限があり、毎年多くのグループに展示ブースを設置してもらうことは困難かもしれませんが、一つの研究発表方法として今後検討していただくの手ごたえを感じることができました。

4. 補助金について

夏の学校では、開催地と学生の所属機関との距離による旅費負担の差を緩

和することを目的として、旅費補助を行っています。これは、遠方の学生や財源を持たない修士院生などが金銭の面で平等に参加できるようにするもので、できるだけ多くの若手研究者に研究推進の機会を提供することを夏の学校は重要視しているからです。旅費補助のほぼ全ては、夏の学校の趣旨に賛同してくださった研究機関、団体、企業、研究者個人からの寄付によって賄われています。ここで全ての名前を挙げることはできませんが、2012年度も非常に多くの皆様から援助をしていただき、事務局員一同大変感謝しております。その期待に応えられるよう、若手研究者全員で夏の学校をより良い研究会にしていこうと思います。

5. 夏の学校の今後について

2012年度の夏の学校期間中に行われた天文・天体物理若手の会総会の場で、近年研究会としての質の低下を指摘されている夏の学校の存在意義、今後の運営方針を若手研究者全員で考える機会がありました。会議の場では積極的に意見が飛び交い、若手研究者らにとって夏の学校が非常に大事な研究会であること、より良い研究会とするためにそれぞれが能動的に参加する姿勢が求められていることを再確認しました。2012年度の事務局も、分科会の区分けを適切に改編したり、展示ブースを試験的に導入したり、若手の会事務局と協力して若手の会会員の利益を守り、また同時に会員数の増加を図るために夏の学校の参加費差別化を試験的に導入したりと、夏の学校の研究会としての質の向上を目指して多くの改革に着手しました。この姿勢は2013年度の夏の学校事務局にも引き継がれており、2012年度以上の成果が出るものと期待されます。

最後になりましたが、第42回夏の学校の開催にあたり、多くの機関や企業、研究者の皆様にご多大なるご支援・ご協力をいただきましたこと、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また、この夏の学校というイベントを大きな第一歩として、我々若手研究者一同は一人前の研究者となれるよう努力してまいりますので、今後とも引き続きご支援を賜りますようお願い申し上げます。

非会員著者の紹介

廣井和雄氏：1984年大阪生まれ。2008年京都大学理学部卒。現在同大学院理学研究科博士後期課程3年在席。専門はX線天文学。

(2012年10月31日原稿受付)

西尾成子

科学ジャーナリズムの先駆者；評伝 石原 純

岩波書店, 東京, 2011, xviii + 348p, 20 × 16 cm, 本体 3,400 円 [一般向]

ISBN 978-4-00-005213-9

永平 幸雄 (大阪経済法科大)



石原純の名前を知っている人は少ない。次のように紹介すれば、読者の想像がつくであろうか。石原純 (1881-1947) は、1909 (明治 42) 年に日本初の相対論関係の論文を、1911 (明治 44) 年に日本初の量子論の論文を書いた理論物理学者である。また彼は科学ジャーナリストの先駆者でもあり、『岩波理化学辞典』初版 (1935 (昭和 10) 年) の編者、雑誌『科学』の編者も務めた。他方、アララギ派の歌人としても作品を発表しており、その才能は多岐にわたる。

石原は、1906 (明治 39) 年に東京帝国大学理科大学理論物理学科を卒業後、長岡半太郎の研究室に入り、当時まだ評価の定まらない状態にあった相対性理論、量子論の研究を行った。1911 (明治 44) 年東北帝国大学理科大学助教授に就任すると翌年ヨーロッパ留学 (3 年間) に出発する。プランクやアインシュタインのもとで学び、帰国後、東北帝国大学教授となった。しかし、東

北帝国大学教授在職時に、同じアララギ派の美貌の歌人、原阿佐緒と恋愛事件を起こして新聞で騒がれ、教授職を辞する。

これを契機に、石原は科学ジャーナリストの道を歩む。当時、日本でもアインシュタイン・ブームが起りはじめていた。石原は相対性理論の平易で明快な解説書を多数発刊し、その普及に努めた。

本書を読むことで、石原純という物理学者を通して、20 世紀初頭に古典物理学から現代物理学が誕生し、種々の論争を伴いながら成長していく過程と、その流れに日本の物理学者たちがどのように関わっていったかが、よく見てとれる。

さらに本書から、科学ジャーナリズムの果たす重要な意味にも気づかされる。石原の著した相対性理論の優れた解説書は、後の日本の理論物理学を担う、湯川秀樹、朝永振一郎、坂田昌一らに物理学へ進む志を与えた。朝永は、

中学校時代にアインシュタイン来日や石原純の著書に大きな影響を受けたと、後に雑誌で記述している。^{*}

ただ、著者自身も述べているように、歌人としての石原の叙述は物足りない。その面の充実があれば、石原という人物および石原の生きた時代をさらに豊かに描き出すことができたであろう。

本書は 2012 年の第 15 回桑原武夫学芸賞を受賞しており、現代物理学がどのようにして誕生し、成長していったかを生き生きと叙述した良書である。一読をお勧めする。

(2012 年 9 月 10 日原稿受付)

^{*} 『自然』1962 年 10 月号。

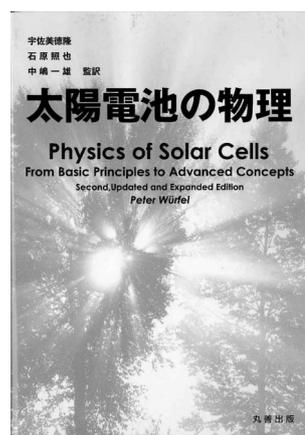
P. Würfel 著, 宇佐美徳隆, 石原照也, 中嶋一雄監訳

太陽電池の物理

丸善出版, 東京, 2010, xv + 283p, 21 × 15 cm, 本体 5,400 円 [大学院・学部向]

ISBN 978-4-621-08253-9

田島 裕之 (東大物性研)



原子力発電から自然エネルギーへの移行を考えるときに、太陽電池は欠かせない技術である。その意味で本書は時節柄に適した本ということができよう。著者である、カールスルーエ大学 (ドイツ) の Peter Würfel 教授は太陽電池の分野に 20 年以上携わってきた研究者であり、「環境学」の観点を含む、通常の物理学の教科書とは異なるユニークな視点で太陽電池の物理が書かれているのが印象的である。

本書のもう一つの特徴は、Würfel 教授自身がまえがきに書かれているよう

に、半導体デバイスの立場よりも、「熱力学的アプローチ」を駆使して、太陽電池の特性を議論している点にある。この点は、半導体デバイスの本で太陽電池に関して勉強した筆者にとっては、新鮮であった。以下各章の内容を具体的に見ていく。

「エネルギー経済の問題」と題された第一章では、化石エネルギーの推算、温室効果の問題が、物理学の観点から書かれている。特に興味深かったのは、現在の勢いで化石燃料を利用していくとどのような問題が生じるかについて

書かれた部分で、物理学者らしい冷静な視点からの分析が書かれている。最近、シェールガスやメタンハイドレート等、新エネルギーの開発が話題になっているが、本章を読めば、これらの「間に合わせ技術」だけでは、100～

500年以内に地球全体が深刻な事態に〈確実に〉陥ることは一目瞭然であるう。

第二章は、光に関連する統計熱力学の話が書かれている。ここでの話は、量子統計の知識を持った学生にとっては復習に近い話になっている。

第三章は半導体の基礎が書かれており、固体電子物性を学んだ者にとっては、理解は容易である。

第四章は、本書の特徴がよく出ており、熱力学的見地から太陽電池の基礎を論じた章である。

第五章は半導体デバイスの基礎、第六章は太陽電池の基礎が、書かれている。これらの章に書かれている内容は、多くの半導体デバイスの教科書と共通しており、知識を持った読者にとっては理解しやすいと思われる。

第七章、第八章は、反射をできるだけなくするための構造、薄膜太陽電池、タンデム型太陽電池、2段階励起等、実用技術に関連した物理がコンパクトに述べられている。

太陽電池の学理は広い分野にわたっておりそれらを網羅することは容易で

ないが、本書は特に無機系の実用的な太陽電池を念頭に置いて、丁寧に書かれた本であるといえよう。

(2012年10月15日原稿受付)

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

図書リスト

最近の寄贈書

B. V. Somov: Plasma Astrophysics, Part I; Fundamentals and Practice 2nd edition

Springer, New York, 2012, xxvi + 498p, 24 × 16 cm, 181.85€

ISBN 978-1-4614-4282-0

B. V. Somov: Plasma Astrophysics, Part II; Reconnection and Flares 2nd edition

Springer, New York, 2012, xxi + 504p, 24 × 16 cm, 181.85€

ISBN 978-1-4614-4294-3

A. Altland and B. Simons 著, 新井正男, 井上純一, 鈴浦秀勝, 田中秋広, 谷口伸彦訳: 凝縮系物理における場の理論(下) 第2版

吉岡書店, 京都, 2012, 485p, 21 × 15 cm, 本体8,000円

ISBN 978-4-8427-0361-9

フランク・クローズ著, 陣内 修監訳, 田中 敦, 棚橋志行, 田村栄治訳: ヒッグス粒子を追い: 宇宙誕生の謎に挑んだ天才物理学者たちの物語

ダイヤモンド社, 東京, 2012, 471p, 19 × 13 cm, 本体1,900円

ISBN 978-4-478-02348-8

フィリップ・ボール著, 林 大訳: かたち: 自然が創り出す美しいパターン

早川書房, 東京, 2011, 430p, 20 × 14 cm, 本体2,500円

ISBN 978-4-15-209240-3

フィリップ・ボール著, 塩原通緒訳: 流れ: 自然が創り出す美しいパターン

早川書房, 東京, 2011, 302p, 20 × 14 cm, 本体2,300円

ISBN 978-4-15-209256-4

フィリップ・ボール著, 桃井緑美子訳: 枝分かれ: 自然が創り出す美しいパターン

早川書房, 東京, 2012, 301p, 20 × 14 cm, 本体2,500円

ISBN 978-4-15-209278-6

大泊 巖: 日本の科学技術: 振興の主役は国民

早稲田大学出版部, 東京, 2012, ix + 168p, 19 × 13 cm, 本体1,400円

ISBN 978-4-657-12017-5

坂本真人: 量子力学から超対称性へ: 超対称性のエッセンスを捉える

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

ISSN 4910054701227

桜井邦朋: 宇宙プラズマ物理学

恒星社厚生閣, 東京, 2012, vii + 153p, 21 × 15 cm, 本体2,500円

ISBN 978-4-7699-1286-6

白鳥紀一, 近 桂一郎: 磁性学入門

裳華房, 東京, 2012, ix + 345p, 22 × 16 cm, 本体4,700円

ISBN 978-4-7853-2919-8

出川 通: 平賀源内に学ぶイノベーターになる方法

言視舎, 東京, 2012, 206p, 26 × 18 cm, 本体1,500円 (イノベーションのための理科少年シリーズ6)

ISBN 978-4-905369-42-4

日本表面科学会編: 表面物性

共立出版, 東京, 2012, vi + 258p, 21 × 15 cm, 本体3,500円 (現代表面科学シリーズ第3巻)

ISBN 978-4-320-03371-9

長谷部信行, 桜井邦朋編: 人類の夢を育む天体「月」: 月探査機かぐやの成果に立ち

恒星社厚生閣, 東京, 2013, x + 244p, 21 × 15 cm, 本体2,800円

ISBN 978-4-7699-1292-7

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

■京都大学基礎物理学研究所教員

[I]

1. 准教授1名
3. 宇宙物理学(理論)
4. 2013年7月1日以降早期
5. 5~10年
7. ○履歴書 ○発表論文及び業績リスト(主要論文5点以内に○印) ○研究歴(研究成果の説明) ○就任後の研究計画 ○着任可能時期 ○主要論文(発表論文リストで○印を付けた論文のpdf又はアーカイブ番号を指定) ○他薦の場合は推薦書
8. 2013年3月22日(金)必着
9. ①ap-prof yukawa.kyoto-u.ac.jp 推薦書のみ郵送可: 606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学基礎物理学研究所 九後太一

②同研究所 藤田裕子 電話075-753-7009 fujita_yukawa.kyoto-u.ac.jp

10. e-mailの件名は「宇宙物理学准教授応募」と記載。詳細は<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/info/detail.php?NID=175>参照。

[II]

1. 助教1名
3. 原子核理論
- 4, 7, 8, 9②は[I]と同じ。
5. 3~6年
9. ①nt-jinji yukawa.kyoto-u.ac.jp 推薦書のみ郵送可: 606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学基礎物理学研究所 九後太一
10. e-mailの件名は「原子核理論助教応募」と記載。詳細は<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/info/detail.php?NID=176>参照。

■新潟大学理学部助教

1. 助教1名
2. 物理学物性実験グループ
3. 物性物理学実験。強相関系を対象として, 低温・強磁場・圧力下での物性研究を超音波実験グループと共に協力して推進。学部及び大学院での教育を担当し, 熱意をもって教育研究に取り組む。
4. 2013年6月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書 ○研究業績リスト(学位論文, 原著論文, プロシーディングス, 著書等区別) ○論文別刷3編(コピー可) ○研究業績概要(A4, 2枚以内) ○研究計画と教育の抱負(A4, 2枚以内) ○特記事項(外部資金, 招待講演, 受賞, 特許, 院生指導実績等) ○照会者2名の氏名, 連絡先 ○以上の印刷物と履歴書以外を保存した電子媒体
8. 2013年4月1日(月)必着
9. ①950-2181新潟市西区五十嵐2の町8050 新潟大学理学部物理学科長 小池裕司
②同学科 根本祐一 電話025-262-6136 nemoto_phys.sc.niigata-u.ac.jp
10. 封書に「助教応募書類在中」と朱書きし簡易書留で送付, 書類選考後, 面接による最終選考を行う。詳細は<http://www.niigata-u.ac.jp/top/personnel.html>参照。本学は男女共同参画を推進している。

■産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門研究員

1. 博士型任期付研究員1名
2. 活性種計測技術研究グループ
3. 産総研計測・計量標準分野の共通基盤的先端計測分析技術として, 超高速レーザー分光法の開発に関する研究。これを用いた太陽電池材料・デバイスのナノ状態・反応解析や先端分析機器公開利用の推進に従事。
4. 2014年4月1日
5. 5年(定年制職員への登用審査有)
6. 2006年4月以降の博士号取得者(着任迄の取得見込者含)
7. ○Webからの事前登録後, 以下を提出 ○提出書類チェック表 ○履歴票 ○研究業績リスト ○修士論文及び博士論文の要約 ○研究業績2~3点 ○「研究業績2~3点」の要約 ○今迄の研究概要 ○今後の抱負 ○推薦状1通以上
8. 2013年4月12日(金)又は同年4月26日(金)(併願の有無による)
9. ①305-8568つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2事業所つくば本部・情報棟7F 産業技術総合研究所研究職員採用委員会事務局
②活性種計測技術研究グループ 中村健 ken.nakamura@aist.go.jp
10. 詳細はhttp://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/boshu.html参照。封筒に「公募選考採用応募書類在中」と「公募番号(計測フロンティア-2)」を朱記し送付。書類不返却。

■電気通信大学大学院情報理工学研究科教員

1. A: 准教授1名, B: 助教1名
2. 先進理工学専攻
3. 有機エレクトロニクス, 光バイオ, ナノフォトンクス等に関する分野で, 光と関わる機能や技術によりヒトの活動に利する応用を目的とする光科学
4. 2013年8月1日以降早期
5. A: 任期なし, B: 4年(審査後准教授昇任可)
6. 博士号取得者(Bは取得後10年以内)
7. ○応募申請書 ○主要論文5編以内 ○研究概要と研究計画(各A4, 約2枚) ○教育に関する抱負(A4, 2枚) ○照会可能者(A: 国内外各2名, B: 2名) ○准教授及び助教の両方への応募は不可
8. 2013年4月26日(金)必着

9. ①182-8585 調布市調布ヶ丘1-5-1 電気通信大学大学院情報理工学研究科先進理工学専攻 中村 整
②同専攻 桂川真幸 電話042-443-5475 katsura pc.uec.ac.jp
10. 詳細は <http://www.uec.ac.jp/about/advertisement/> 参照.

■大阪大学産業科学研究所教授

- 教授1名
- 第1研究部門量子システム創成研究分野
- 量子物性の開拓から材料・デバイス開発, システム構築に至るイノベーションの階層を跨ぐ, 幅広い視点に立った研究を展開する人材を広く求める. 対象とする研究領域は, スピン系や光量子の物性, 新規ナノ材料, 共鳴トンネルや量子情報をベースとした高機能デバイス, 及びそれらを統合・集積した量子システム等.
- 2013年度内早期
- 博士号を有し, 学部, 大学院の教育研究指導を担当できること
- 履歴書(写真貼付) ○連絡先 ○研究業績リスト(原著論文, 総説, 書籍, 特許等. 重要な論文(10編以内)には*印を付し, 掲載雑誌のIFと当該論文の被引用回数を付記. 研究代表者として受けた外部資金(課題名・期間・総額等), 受賞歴, 国際会議等での招待講演等のリスト) ○研究概要(図表含め4頁以内) ○応募理由と抱負(2頁以内) ○主要論文3編のPDF
- 2013年4月30日(火)
- 567-0047 茨木市美穂ヶ丘8-1 大阪大学産業科学研究所第1研究部部門長 松本和彦 k-matsumoto sanken.osaka-u.ac.jp
- 提出書類は全てを1つのPDFとして作成し, e-mailに添付し送信.

■東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 准教授

- 准教授1名
- 物理学教室
- 計算物性物理学
- 2013年8月1日以降早期
- 計算物性物理学の教育, 研究に加え, HPC(ハイパフォーマンス・コンピューティング)分野の研究者と学際的な連携を行いつつ, 計算物理学の教育研究拠点形成に貢献できる方
- 履歴書(写真貼付) ○業績リスト ○研究業績概要 ○研究計画ならびに

教育に関する抱負 ○主要論文別刷5編(コピー可, 各5部)

- 2013年5月7日(火)必着
- 113-0033 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻宮下精二, 物理学教室事務室 電話03-5841-4242
- 封筒に「計算物性物理学准教授応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付. 本研究科では男女共同参画を積極的に推進している. 詳細は <http://www.s.u.tokyo.ac.jp/ja/overview/gender/promotion.html> の理学系研究科男女共同参画基本計画を参照.

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)

■IGERセミナー「強相関電子系の非線形伝導」

主催 グリーン自然科学国際教育研究プログラム
日時 2013年3月14日(木)13時30分~18時頃
場所 名古屋大学理学部B館5F B501教室(464-8602名古屋千種区不老町)
内容 分子性導体や遷移金属酸化物における電荷秩序やモット絶縁相に電場を印加すると非線形伝導が観測される. 本研究科では, この現象に関する最新の研究成果を基に, 今後の理論・実験の課題と展望を総合的に議論する. 主な講演者は, 野上由夫, 中村 真, 岡 隆史, 阿波賀邦夫, 松下未知雄, 岡崎竜二. 若干のショートトークの時間を設け, 講演希望者を募集.

定員 150名
参加費 なし
連絡先 464-8602名古屋千種区不老町名古屋大学理学部研究科物理学教室 寺崎一郎 電話/Fax 052-789-5255 terra cc.nagoya-u.ac.jp
その他 講演希望の方は寺崎まで連絡.

■The 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research 2013

主催 RPGR2013組織委員会
日時 2013年9月9日(月)~13日(金)
場所 東京工業大学蔵前会館(152-8551東京都目黒区大岡山2-12-1)
内容 グラフェンに関する以下の科学/技術領域・分野を中心とする成果の公表・議論. 結晶物理, 電子物性, 分光, 表面分析, 熱伝導特性, 結晶成長・合成, デバイス・プロセス・用途開発, 二次元物質等.
定員 300名
参加費 45,000円, 学生25,000円(事前登録:40,000円, 学生20,000円)
発表申込及び予稿集原稿締切 2013年6月23日(日)
参加登録申込締切 2013年6月30日(日)
連絡先 産業技術総合研究所ナノチューブ応用研究センター 長谷川雅考 電話029-861-5686 Fax 029-861-4522
rpgr2013-ml aist.go.jp
その他 詳細は <http://www.chemistry.titech.ac.jp/~kiguti/RPGR2013> 参照.

■第9回プラズマ応用科学国際シンポジウム (ISAPS '13)

主催 プラズマ応用科学会
日時 2013年9月23日(月)~27日(金)
場所 ホリデイイン・イスタンブールシテイ (Turgut Ozal Cad. 189 (Millet Cad.), Topkapi, 34280 Istanbul, Turkey 電話+90-212-530-99-00)
内容 プラズマ応用, 特にプラズマによる先進材料の創製, マイクロエレクトロニクス分野への適用, 環境問題への適用を主テーマに開催し, プラズマ応用科学に関わる多分野の研究者を対象とする.
参加費 60,000円, 学生30,000円(2013年5月15日迄の事前登録:55,000円, 学生25,000円)
原稿提出締切 2013年5月15日(水)
連絡先 567-0047 茨木市美穂ヶ丘11-1 大阪大学接合科学研究所 小林 明 電話/Fax 06-6879-8694 kobayasi_jwri.osaka-u.ac.jp

その他

助成公募の標準様式(1件500字以内)

○名称 ○対象(1行18字で7行以内)
○助成内容 ○応募方法(1行18字で4行

以内) ○応募締切(西暦年月日, 曜日)
○詳細問合せ先(郵便番号, 住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等)

その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

■第13回材料科学技術振興財団山崎貞一賞候補者募集

対象 「材料」「半導体及び半導体装置」「計測評価」「バイオサイエンス・バイオテクノロジー」の分野で, 論文の発表, 特許の取得, 方法・技術の開発等を通じて, 実用化につながる優れた創造的業績を

あげている人(複数人可・総計3名以内). 国籍は問わず, 日本国内において業績をあげた人. 過去に応募されたことのある人でも再応募可能.

顕彰 各分野に賞状及び副賞(18金メダル・賞金300万円)を贈呈

応募締切 2013年4月末日必着

書類請求先・提出先 157-0067 東京都世田谷区喜多見1-18-6 材料科学技術振興財団山崎貞一賞事務局 電話03-3415-2200 Fax 03-3415-5987 prize mst.or.jp http://www.mst.or.jp/prize/

その他 詳細はHP参照.

■会員専用ページ: ユーザ名とパスワード

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

3月ユーザ名 : 13Mar

パスワード: George248

4月ユーザ名 : 13Apr

パスワード: Owen837

行事予定

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

開催月日	名 称	開催地	会誌巻号または世話人
2013年			
3/4~8	第22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	神戸市	67-12
3/11~13	第44回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム	東京	67-12
3/11~13	JAEA Synchrotron Radiation Research Symp. "Magnetism in Quantum Beam Science"	佐用町(兵庫)	68-2
3/13	統計数理研究所共同研究集会「社会物理学の展望」	東京	68-1
3/14	IGER セミナー「強相関電子系の非線形伝導」	名古屋市	68-3
3/14~15	第一原理計算コードOpenMX, QMAS, TOMBOセミナー	池田市(大阪)	68-1
3/23~28	スプリング・サイエンスキャンプ2013	日本各地	68-2
3/26~29	日本物理学会第68回年次大会(広島大)	東広島市(広島)	日本物理学会
4/15~19	第11回国際フェライト会議(ICF11)	宜野湾市(沖縄)	67-10
5/12~16	17th Int. Symp. on Intercalation Compounds	仙台市	67-12
5/13~14	日本磁気学会第2回岩崎コンファレンス「時代を先取りする永久磁石の学理と工学への展開」	東京	68-1
5/23~24	第30回希土類討論会	北九州市(福岡)	67-12
5/27~28	第28回量子情報技術研究会	札幌市	68-2
6/2~7	The 19th Int. Conf. on Solid State Ionics	京都市	67-12
6/24~27	第8回微粒子磁性国際会議	Perpignan(フランス)	67-12
7/14~19	第12回アジア太平洋物理会議(APPC12)	千葉市	68-2
8/1~6	量子液体・量子個体に関する国際シンポジウム(QFS2013)	松江市	68-1
8/5~9	2013年強相関電子系国際会議(SCES2013)	東京	67-12
9/9~13	The 5th Int. Conf. on Recent Progress in Graphene Research 2013	東京	68-3
9/20~23	日本物理学会2013年秋季大会(高知大)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	高知市	日本物理学会
9/23~27	第9回プラズマ応用科学国際シンポジウム(ISAPS'13)	Istanbul(Turkey)	68-3
9/25~28	日本物理学会2013年秋季大会(徳島大)(主として物性)	徳島市	日本物理学会
2014年			
3/27~30	日本物理学会第69回年次大会(東海大学)	平塚市(神奈川)	日本物理学会
9/18~21	日本物理学会2014年秋季大会(佐賀大学)(素粒子, 宇宙線, 宇宙物理)	佐賀市	日本物理学会
10/14~18	日本物理学会2014年秋季大会(ハワイ)(核物理)	ハワイ島	日本物理学会・アメリカ物理学会合同

編集後記

編集後記を担当するに当たり、編集委員会の場で担当号の記事全てに目を通し総括を行うようにとの連絡を頂き、少々慌てている次第です。「物理学の発展に伴い、物理学界がカバーする領域は急速に広がり、物理学会誌に掲載される記事の専門分野が極めて多岐に渡っている現在、その全てをきちんと理解することは一人の人間ではほとんど不可能である。」とは便利なフレーズです。今回は開き直って、自分の専門から離れた記事については、これで何とかその場を凌ごうと思っております。しかし勿論？心の底では、今更ながら自分の勉強不足を痛切に感じております。

20年以上も昔ですがまだ私が学生の頃、岩波書店から『現代物理学の基礎』という格調の高い物理学の教科書シリーズが刊行されました。この中のいくつかは最近復刻されましたので、目にされた若い会員の方もいらっしゃるかと思います。ただ今と違い当時は、それぞれの本の中には気鋭の先生方が書かれたエッセーを収めた小さな冊子と一緒に挟まれておりました。この中に、確か著者は小出昭一郎先生だったと思うのですが、「優雅な物理学の時代」というタイトルの小文がありました。細かな内容は忘れてしまいましたが、今でも鮮明に覚えているのは「…この講座のかなりの部分を本当に読みこなせるような読者はこの限りではないが…」と断った上で、当時のオーバードクター問題について、現在にも通じる箴言を述べられている件です。

私は古典力学、熱統計、量子力学といった基本から固体物理、宇宙物理、生物物理

まで広くカバーするこの素晴らしいシリーズ中の一冊を勉強するのも四苦八苦でしたので、このエッセーの内容は非常に耳の痛いものでした。しかしバブル全盛の当時、幸せなことにそんな私でも博士課程まで何とか修了した後は、ある企業に採用して頂くことができました。そして入社してみたら、これは個人的には非常に意外だったのですが、そこには物理学で培った論理的な思考を武器に、様々な問題の解決に力を発揮される有能な方々が沢山在籍されておりました。勿論企業では取り組む問題のジャンルは選べません。しかしこうした方々は、学生時代の狭い自分の専門にとらわれることなく、様々な問題に興味を持って積極的に取り組まれており、物理学を修めた方のポテンシャルの高さやバイタリティ、フレキシビリティの大きさには驚かされるばかりでした。

ですが企業が10年近くも過ごした後に、大学に職を得て時間が経つうちに、自分の興味はまた狭い専門にシュリンクしてきているように感じます。ただし現在の自分の狭い専門の中でさえ物理学の進歩は急速で、物性のごく限られたことをやっていた学生時代には、恐らく一生関係ないだろうと思っていたゲージ場の理論なども、ある程度は理解しておくことがこれからは必要ではないのかなあと思うようなトピックスも出てまいりました。これにはワクワクすると同時に、もっと学生時代にちゃんと勉強しておけばよかったなあと後悔することしきりです。でも仮に今の自分が学生時代に戻れたとしても、自分の興味ある研究分野に如何に関係してくるかを知らずに闇雲に新しい分野を“勉強”するのはさぞかし苦

痛だろうと思います。この点で、実際の物理学の研究の最前線で今何がどのように面白いのかを生き生きと会員に広く伝える物理学会誌の役割は重要だと思います。編集委員会に出席させて頂いておりますと、多くの編集委員、著者、閲読者の方々が、学会誌のひとつひとつの記事に多大なご努力を払われていることが良くわかります。こうした努力の賜物の一つであるこの号が、少しでも皆様のご興味を引くものになればと願っております。

平山博之 (<)

編集委員

旭 耕一郎 (委員長), 宮下 精二,
有田亮太郎, 板橋 健太, 伊藤 克司,
遠藤 仁, 小川 了, 片沼伊佐夫,
北島 昌史, 小島智恵子, 佐藤 丈,
島野 亮, 鈴木 陽子, 竹内 幸子,
田中 秋広, 谷本 久典, 田村 忠久,
樽家 篤史, 西野 晃徳, 長谷川太郎,
平山 博之, 藤谷 洋平, 藤山 茂樹,
古川はづき, 宮本 良之, 山本 隆夫,
加藤 岳生

(支部委員)

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

新著紹介小委員会委員

加藤 岳生 (委員長), 雨宮 高久,
木村 元, 榊田 創, 柴田 絢也,
竹延 大志, 多田 司, 多田 朋史,
中川 賢一, 村山 能宏, 森川 雅博,
矢向謙太郎, 吉越 貴紀, 渡邊 紳一

第68期 (2012年3月24日~2013年3月31日) 理事・監事

会 長	家 泰弘	副会長 (次期会長)	斯波 弘行		
庶務理事	伊藤好孝・嘉規香織・高野 宏・田村裕和・千葉順成・松川 宏・三沢和彦 本林 透				
会計理事	千葉順成 (兼任)・野崎光昭・播磨尚朝・松川 宏 (兼任)				
会誌編集委員長	旭 耕一郎	JPSJ 編集委員長	安藤恒也	刊行委員長	瀧川 仁
監 事	鹿兒島誠一・渡邊靖志				

日本物理学会誌 第68巻 第3号 (平成25年3月5日発行) 通巻758号

©日本物理学会 2013

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。