

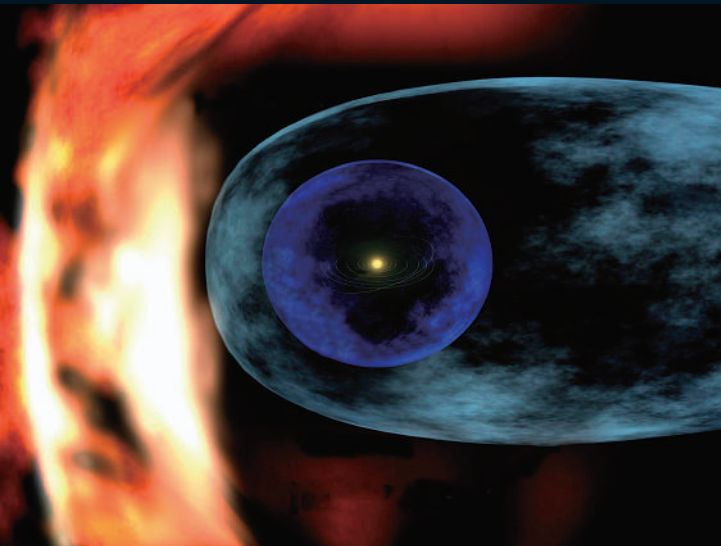
- ニュートリノ振動
- ボイジャー1号探査機
- 形状可変な境界としてのシワ構造の展開
- 感熱性高分子水溶液の相分離・ゲル化・レオロジー
- 量子多体系シミュレーションソフトウェアALPS

NO.

4

2015 | VOL. 70

B U T S U R I  
日本物理学会誌



©NASA/Goddard/Walt Feimer



日本物理学会 | [www.jps.or.jp](http://www.jps.or.jp)

# 学術会議と物理学会

岡 真 (日本学術会議物理学委員長)

日本学術会議は平成26年10月から第23期に入り、大西隆会長を再選、第三部(理工学分野)部長には物理学分野の相原博昭氏を選出しました。学術会議で中心的な役割を果たすのは30分野からなる分野別委員会で、その1つである物理学委員会<sup>\*1</sup>は、前期の伊藤早苗委員長から岡が引き継ぎました。物理学委員会は会員7名、連携会員は分科会委員も含めて物理分野全体で76名によって構成されています。会員・連携会員の任期は6年です。

日本物理学会誌の読者には、過去に、また現在も、様々な役割で日本学術会議に関わった方々が多数おられると思います。一方で、学生会員を含む若い会員の中には「学術会議って何?」という方もいるでしょう。名前は知っているでも「いったい何をしているのかなあ?」という方は結構多いかもしれません。巻頭言を書く機会を与えていただいたので、そういう疑問がちょっとでも少なくなれば、と思って筆を取りました。<sup>\*2</sup>

日本学術会議は、「我が国の科学者の内外に対する代表機関」とされ、「学者の国会」などと呼ばれることもあります。210名の会員と2,000人ほどの連携会員によって構成される様々な機能を持つ部会、委員会、分科会(名称

や段階は様々ですが、要は集まって議論をする)がその活動の中心で、その結果は提言などの文書として学術会議から発信されます。

最近、学術会議からの発信で注目されているのは、「学術の大型研究計画に関するマスタープラン<sup>\*3</sup>」です。物理学・天文学分野は多くの重要な大型計画を推進しているので、皆さんの関心も特に高いと感じます。昨年発表された「マスタープラン2014」には現在計画されている大型研究計画はほぼすべて採用されています。今期(～2017年)にも改訂が予定されています。大型研究計画候補の募集方法や重点計画の選び方などの議論が始まっていますので、広い観点から多くのご意見をいただきたいと思います。

今期の物理学委員会の重要な課題として「物理学分野の参照基準」の作成があります。これは中教審の答申に始まる大学教育改革の一環として、日本学術会議が依頼を受けて「大学教育の分野別質保証の在り方」を検討した結果、<sup>\*4</sup> 分野別の教育課程編成上の参照基準を作成することとなったものです。物理学分野(天文学を含む)の参照基準は、日本物理学会と日本天文学会の協力により作成を進めています。物理学会では物理教育委員会(須藤彰三委員長)が作成を担当しています。優れた人材を内外に輩出し、また学問の継承を進めるために、教育体制や環境を

充実することが、学術の発展にとっても重要なことは言うまでもありません。これまで主に学術研究の方向性や研究組織の在り方の議論に重点を置いてきた学術会議ですが、今後教育の分野でも積極的な発信をしていくことが必要ではないかと考えています。

学術会議第三部(理工学分野)では、学協会との連携の中心的な取り組みの一つとして、「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ<sup>\*5</sup>」を作成しています。理工学の様々な分野での2050年までの長期展望をもとに、どんなことを実現しようとしているのかを、主に図表として俯瞰するわかりやすい発信を試みています。もちろん、30年後がどんな社会になっているのか本当は想像がつかないのですが、それぞれの分野の明るい「夢」を描いた、楽しい夢ロードマップになっています。この巻頭言を読んでくださった方には、ぜひ見ていただきたいと思います。物理では取りまとめにあたり、各分野のコミュニティの方々にご尽力をいただきました。どうも有り難うございました。

最後に、物理学会の年次大会では「物理学会と学術会議との連携」を図るためのインフォーマルミーティング(年1回)を開催しています。お昼休みの短い時間ですが、学術会議を皆さんに知っていただき、意見をどんどん言っていただくための会ですので、なたでもお気軽にご参加ください。

(2015年1月17日原稿受付)

<sup>\*1</sup> 物理学委員会は、物性・一般物理、素粒子・原子核物理、天文・宇宙物理分野をカバーし、それぞれの分科会を設置しています。関連する学協会として日本物理学会のほか、日本天文学会とも連携を図っています。

<sup>\*2</sup> 学術会議と物理学会との連携の歴史や、前第22期の活動の概要は、日本物理学会誌では、伊藤前物理学委員長による巻頭言(2014年4月号)および第22期学術会議の報告(2015年3月号)に紹介されています。

<sup>\*3</sup> 提言「第22期学術の大型研究計画に関するマスタープラン(マスタープラン2014)」や他の提言等の発信は [www.scj.go.jp/ja/info/](http://www.scj.go.jp/ja/info/) に掲載されています。

<sup>\*4</sup> 大学教育の分野別質保証の在り方検討委員会(北原和夫委員長)による報告は [www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/daigaku](http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/daigaku) に掲載。

<sup>\*5</sup> 夢ロードマップ2014(2014年9月発表)は [www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-22-h201.html](http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-22-h201.html) に掲載。

## 巻頭言 Preface

### 学術会議と物理学会

Science Council of Japan and Physical Society of Japan

岡 真 …… 239  
Makoto Oka

## 現代物理のキーワード Trends

### ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—

Neutrino Oscillation—An Example of Quantum Mechanical Interference—

安田 修 …… 242  
Osamu Yasuda

## 交 流 Interdisciplinary

### ボイジャー1号探査機，太陽圏境界を越え星間空間に入る

Voyager 1 Entered the Interstellar Space

鷲見治一 …… 244  
Haruichi Washimi

## 解 説 Reviews

### 形状可変な境界としてのシワ（リンクル）構造の展開

Wrinkles as Shape-Tunable Boundaries

大園拓哉 …… 253  
Takuya Ohzono

### 感熱性高分子水溶液の相分離・ゲル化・レオロジー

Phase Separation, Gelation, and Rheology in Aqueous Solutions of Temperature-Sensitive Polymers

田中文彦 …… 260  
Fumihiko Tanaka

## 最近の研究から Researches

### 微粒子の熱放射における共振器量子電磁気学的効果

Cavity QED Effect in Thermal Radiation from a Microparticle

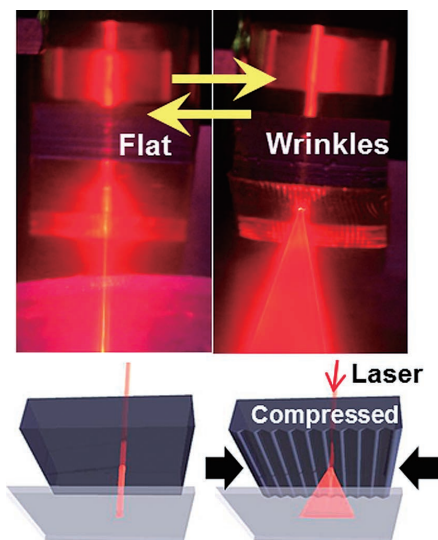
立川真樹，小田島仁司 …… 269  
Maki Tachikawa and Hitoshi Odashima

## 実験技術 Experimental Developments

### “実験技術”としての量子多体系シミュレーションソフトウェアALPS

ALPS: Software for Simulations of Quantum Many-body System as “Experiment Technology”

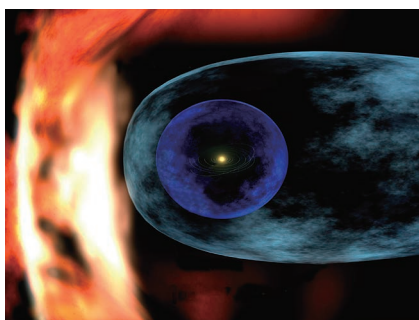
藤堂眞治 …… 275  
Syngye Todo



解説（形状可変な境界としてのシワ（リンクル）構造の展開）

光拡散状態を調節可能な構造可変リンクルにおけるレーザー光の状態制御（形状可変な境界としてのリンクルの一つの応用例）。印可圧縮ひずみに応じてフラットな状態とリンクル構造をスイッチできる構造可変リンクルの試料を用い、その背面から入射した赤色レーザー光線（波長633 nm）の光路を霧によって可視化した写真（上）とその模式図（下）。リンクルがある場合、リンクルの溝方向に直交する方向に異方的な光拡散が観られる。その拡散の拡がり角は、リンクルの溝の深さによって、すなわち加える圧縮ひずみ量によって連続的に調整でき、その拡散挙動は幾何光学によって予想されるものと一致する。

<b>JPSJの最近の注目論文から</b> 12月の編集委員会より	安藤恒也 …… 283
<b>ラ・トッカータ</b> アメリカでの就職活動記	堀内俊作 …… 285
アメリカさすらい滞在記	村瀬孔大 …… 287
<b>学界ニュース</b> 第2回湯浅年子賞「金賞」：坂東昌子氏	東島 清, 森 初果 …… 290
第2回湯浅年子賞「銀賞」：関口仁子氏	酒井英行 …… 290
2014年度文化功労者：佐藤勝彦氏	横山順一 …… 291
<b>追悼</b> 松原武生先生を偲んで	米沢富美子 …… 292
<b>新著紹介</b>	293
<b>会員の声</b>	296
<b>会誌編集委員会より</b>	296
<b>掲示板</b> ■人事公募 ■学術的会合 ■その他	297
<b>行事予定</b>	302
<b>日本物理学会誌投稿規定</b>	304
<b>会告</b> ■会費納入のお願いと未納者への雑誌発送停止のお知らせ ■2016年度会費について手続きのお願い：正会員のうち大学院学生の会費減額および学生会員（学部学生）の資格継続 ■2016年度の論文誌等購読の変更手続きのお願い ■賞および研究助成の候補者の募集について ■2015年秋季大会・講演募集掲載号 ■2015年秋季大会の企画募集 ■2015年秋季大会講演募集要項 ■託児室設置について ■Webページによる講演申込の手順（参加登録を含む） ■講演概要集原稿の書き方 ■2015年3月1日付新入会者 ■日本物理学会入会案内 ■日本物理学会入会申込書	309
<b>本会関係欧文誌目次</b>	333



#### 表紙の説明

「太陽圏」のモデル図（©NASA/Goddard/Walt Feimer）。太陽から吹き出す高速のプラズマ「太陽風」の圧力が銀河起源の星間プラズマの圧力よりも優勢な領域を太陽圏と呼ぶ。両者が平衡にある面はヘリオポーズと呼ばれ、太陽系の電磁気学的な境界とみなすことができるが、その形状は太陽系が銀河系内で運動する方向に伸びていると考えられている。1977年に打ち上げられたボイジャー1号と2号は、惑星探査を終えて太陽圏外縁部を飛行していたが、2012年にボイジャー1号では急激な宇宙線強度の変化が観測され、ついに太陽圏を脱出したと考えられている。さまざまな宇宙プラズマ現象を「実地で」観測しつつあるボイジャーと太陽圏の物理に注目が集まっている。詳細は本号に掲載されている鷲見治一氏の「交流」記事を参照のこと。

# ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—

**Keyword:** ニュートリノ振動

## 1. ニュートリノ振動とは

ニュートリノは、電氣的に中性で、弱い相互作用しかせず、かつ他の荷電粒子に比べて非常に小さい質量しか持たないため、その観測がきわめて難しい粒子である。ニュートリノの唯一の検出方法は、ニュートリノを別な粒子に衝突させて出て来る荷電粒子を観測することである。弱い相互作用により引き起こされる  $\nu + \text{中性子} \rightarrow \ell + \text{陽子}$  の反応で、負電荷のレプトン  $\ell (= e \text{ (電子)}, \mu \text{ (ミューオン)}, \tau \text{ (タウオン)})$  を生成するニュートリノは、それぞれ電子ニュートリノ  $\nu_e$ 、ミューニュートリノ  $\nu_\mu$ 、タウニュートリノ  $\nu_\tau$  と呼ばれている。これらはフレーバー固有状態と呼ばれ、実験的にはこれらのフレーバー固有状態を観測することになる。実はこれらのフレーバー固有状態は、ニュートリノの質量固有状態 (質量がそれぞれ  $m_1, m_2, m_3$  の状態  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) とは一致せず、質量固有状態の重ね合わせとなっていることが知られている。ニュートリノが量子力学的時間発展をする際、質量固有状態ではハミルトニアンが対角的であるため質量固有状態の始状態と終状態が同じとなるが、フレーバー固有状態ではハミルトニアンが非対角的となるため、始状態と終状態は一般には一致しない。簡単のため、ニュートリノが2種類しかない場合を考え、2種類のフレーバー固有状態 (ここでは仮に  $\nu_\mu$  と  $\nu_\tau$  とする) と質量固有状態 ( $\nu_1$  と  $\nu_2$  とする) が

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

と、混合角  $\theta$  で関係しているとする、エネルギー  $E$  を持つ  $\nu_\mu$  が距離  $L$  だけ飛行した後に  $\nu_\tau$  に変化する確率は

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 (\Delta m^2 [\text{eV}^2]) (L [\text{km}]) / (E [\text{GeV}])]$$

で与えられる。ここで  $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$  である。確率  $P$  が距離に関して振動的な振る舞いをするため、この現象はニュートリノ振動と呼ばれる。ニュートリノ振動は量子力学的干渉効果であり、後述するように、質量固有状態の質量二乗のわずかな差 ( $\Delta m^2 = O(10^{-4} \text{ eV}^2) \sim O(10^{-3} \text{ eV}^2)$ ) が  $10^2 \sim 10^4 \text{ km}$  という巨視的なスケールで初めて観測できるというユニークな現象である。

## 2. 物質効果

ニュートリノ振動の観測にはニュートリノの飛行距離を

長くする必要があるため、ほとんどの実験では地中を通過してきたニュートリノを観測する。物質中では、物質中の電子が、伝播するニュートリノの  $\nu_e$  成分のみと余分な弱い相互作用をするため、混合角  $\theta$  と質量二乗差  $\Delta m^2$  に補正が生じる:  $\theta \rightarrow \tilde{\theta} \equiv (1/2) \tan^{-1} [(\Delta m^2 \sin 2\theta / (\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2} EG_F N_e))]$ ,  $\Delta m^2 \rightarrow \Delta \tilde{m}^2 \equiv [(\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2} EG_F N_e)^2 + (\Delta m^2 \sin 2\theta)^2]^{1/2}$ . ここで  $G_F = 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$  はフェルミ定数,  $N_e$  は物質中の電子数密度である (反ニュートリノの場合には電子数密度の項の-符号は+となる)。この補正のことを物質効果と呼ぶ。

現実には3種類のニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態があり、それらは  $3 \times 3$  のユニタリー行列で関係付けられる。ユニタリー行列のパラメーターのうち、ニュートリノ振動現象により測定できるのは、 $3 \times 3$  の直交行列の回転角  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$  と CP 非保存を表す位相  $\delta$  の4個のパラメーターである。 $\delta$  は、ニュートリノの振動  $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$  と、ニュートリノの反粒子である反ニュートリノの振動  $\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$  に違いを出すパラメーターであり、究極的には、宇宙における物質-反物質の非対称性の生成に役割を演ずると考えられている。3種類のニュートリノの質量固有状態に対しては独立な質量二乗差は2つあり、それらを  $\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$  と  $\Delta m_{32}^2 \equiv m_3^2 - m_2^2$  とする (一般性を失わず  $|\Delta m_{21}^2| \leq |\Delta m_{32}^2|$  と仮定する)。3種類のニュートリノがある場合のニュートリノ振動の確率は一般に複雑となるが、実際には2つの質量二乗差に階層性がある ( $|\Delta m_{21}^2| \ll |\Delta m_{32}^2|$ ) ことと、一つの混合角  $\theta_{13}$  が小さいことが実験的にわかっているため、小さな  $|\Delta m_{21}^2|$  による振動と大きな  $|\Delta m_{32}^2|$  による振動が実質的に分離でき、近似的に2種類のニュートリノの振動

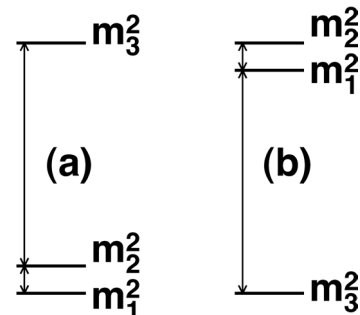


図1 現在許容されている2つの質量パターン: (a) 正常質量階層 (normal hierarchy), (b) 逆質量階層 (inverted hierarchy) はそれぞれ  $\Delta m_{32}^2 > 0$ ,  $\Delta m_{32}^2 < 0$  に対応する。

として議論できることが知られている。太陽ニュートリノの観測と KamLAND 実験（長基線原子炉の観測）から  $(\sin^2 \theta_{12}, \Delta m_{21}^2) \sim (0.3, 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2)$ 、大気ニュートリノ・加速器ニュートリノの観測から  $(\sin^2 \theta_{23}, |\Delta m_{32}^2|) \sim (0.5, 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ 、短基線原子炉の観測から  $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0.1$  であることがわかっている。ここで、 $\Delta m_{21}^2$  の符号は太陽ニュートリノの物質効果のために正であることがわかっているが、 $\Delta m_{32}^2$  の符号は、大気ニュートリノが主に  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  の振動で、物質効果がほとんど効かないために、現時点では正負どちらも許されている（図1参照）。

### 3. 今後の課題<sup>\*1</sup>

1998年のスーパーカミオカンデ以来の多くの実験結果により、現在までに3つの混合角すべてと2つの質量二乗差の絶対値が決定されている。残る未定のパラメータは質量パターンとCP位相 $\delta$ であり、これらを決定することが現在のニュートリノ物理学の重要な課題となっている。

質量パターンに関しては、ニュートリノと反ニュートリノとで物質効果の符号が異なり、物質効果は長距離で顕著であることが知られているため、長距離（ $\geq 1,000 \text{ km}$ ）の長基線実験で  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 、 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  の違いを比較すれば決定できると考えられている。

一方、CP位相 $\delta$ に関しては、実はパラメータ縮退として知られる問題がある。振動確率  $P \equiv P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  と  $\bar{P} \equiv P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  が一定のニュートリノエネルギーと基線長に対して与えられても、 $(\theta_{23}, \theta_{13}, \delta)$  を一意的に決めることは原理的にできない、という問題である。 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  からは  $\sin^2 2\theta_{23}$  の値しか求まらず、 $\theta_{23} \neq \pi/4$  ならば  $\theta_{23} < \pi/4$  か  $\theta_{23} > \pi/4$  の不定性が残る。一方、 $P = \text{一定}$ かつ  $\bar{P} = \text{一定}$ により与えられる軌跡は、 $(\sin^2 2\theta_{13}, 1/\sin^2 \theta_{23})$  平面内で二次曲線となる。質量パターンが不明の場合には、2つの質量パターンそれぞれに二次曲線があるため、上記の  $\theta_{23} < \pi/4$ 、 $\theta_{23} > \pi/4$  の不定性を考慮すると、図2のように、一般には8個の解が存在する。それぞれの点に対して $\delta$ の値が異なるため、このパラメータ縮退を解決することが必要となる。 $\delta$ の不定性に関しては、特に質量パターンの不定性による寄与が大きいため、当面は質量パターンの決定が重要な課題である。

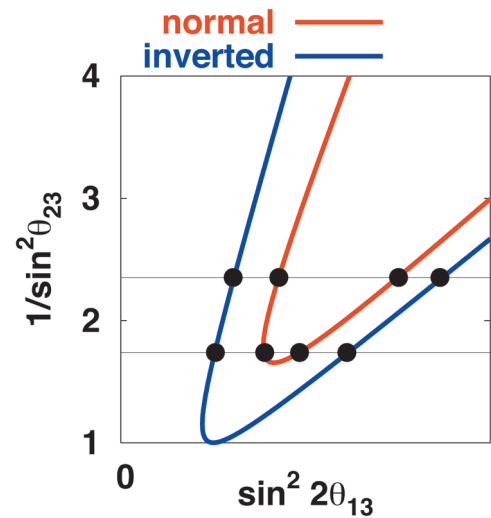


図2 パラメータ縮退： $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ 、 $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  が測定できても一般に8個の解が存在する。

### 4. ニュートリノ研究の将来

現行のT2K実験にはアップグレードの計画があるが、それら将来の高輝度長基線実験は、その統計精度の高さから素粒子の標準模型+質量のある3世代ニュートリノの枠組みからのずれを探索することにより、標準模型を超える物理の兆候を見つけることも可能にする。そのようなずれを予言する現象論的シナリオとしては、軽いステライルニュートリノ、フレーバーに依存する非標準相互作用、重い粒子の存在によるユニタリー性の破れなどが知られている。<sup>\*2</sup> ニュートリノの研究は、LHCやILCとは相補的な方法として、今後も標準模型を超える物理を探るのに重要な役割を果たすものと期待されている。

#### 参考文献

- 1) 南方久和：日本物理学会誌 **68** (2013) 723.
- 2) A. Bandyopadhyay, *et al.*: Rept. Prog. Phys. **72** (2009) 106201.

安田 修（首都大学東京理工学研究科）

（2014年6月9日原稿受付）

<sup>\*1</sup> 参考文献などの詳しいことは、例えば最近の解説<sup>1)</sup>を参照されたい。

<sup>\*2</sup> 例えば文献2の4章を参照されたい。

# ボイジャー1号探査機、太陽圏境界を越え星間空間に入る



鷲見 治一

アラバマ大学ハンツビル校宇宙プラズマ及び  
大気研究センター

ボイジャー1号及び2号探査機は1977年に打ち上げられ、星間空間（銀河系空間）の探査をめざして飛翔を続けていた。打ち上げから35年の年月を経て、ボイジャー1号は遂に、我々の住む太陽圏の境界を越えて、星間空間領域に入った。2012年7月-8月のことであり、太陽から約122 AU（1 AUは太陽地球間の距離）、光速で0.7日の距離でのことであった。星間ガス領域に入ってから現在（2014年秋）までの2年間に飛行した距離は光速で約1時間。この一步は銀河の直径約10万光年に較べればまことに小さな一步ではあるが貴重な一步である。人類が作製した探査機が、通信及び観測が可能な状態で、史上はじめて星間空間に入り、今も観測したデータを地球に送り続けている。このことは1957年のスプートニク打ち上げに始まる数々の宇宙探査の歴史の中でも特筆すべき快挙であろう。

太陽圏は太陽風プラズマが占める3次元空間領域である。太陽風プラズマは水素を主成分とする完全電離ガスであり、太陽コロナ（温度は100-200万度）を源として400-800 km/秒の超音速で惑星間空間中を放射状に拡がる。太陽風プラズマは、太陽からの距離1 AUの地球は勿論のこと、天王星や海王星などの外惑星領域をもはるかに越えて拡がり、遂には太陽系周辺の星間ガスと空間領域を分けあっている。太陽系周辺の星間ガスは水素を主成分とし温度は約6,000 K、ガスは電離度約30%の不完全電離ガスである。太陽が静止した座標系で見ると星間ガスは23 km/秒の速度で太陽側へ吹いている。そのため、太陽圏は星間風の上流側が頭で下流側が尾部の吹き流し状の形状になっている、と考えられている。

太陽圏の最外層はヘリオポーズと呼ばれている。

ボイジャー1号（以下、V1）は星間風上流側へと飛翔を続け、上述のように2012年7月-8月にヘリオポーズを越えて星間空間に入った。このことは間違いのない事実と考えられている。しかし、ヘリオポーズ近傍の状態は未だよく理解されてはいない。今までは、太陽圏と星間空間では様相が画然と異なっているはずと考えられてきた。そうであれば、V1がヘリオポーズを越えて星間空間へ入った時点で、磁場データも銀河宇宙線データも同時に大きく変化するはずであった。しかし現実のデータはその予想とは異なっていた。銀河宇宙線観測ではまず2012年4月に第1ステップ増加があり、約4カ月後の2012年8月末に決定的とも思われる第2ステップの大きな増加があった。これら銀河宇宙線観測からは第2ステップ時に、V1はヘリオポーズを通過し星間空間に入ったと考えてよさそうである。しかし磁場観測ではV1がヘリオポーズを越えて星間空間に入ったのは2012年7月半ば、銀河宇宙線第2ステップ増加の時よりも約1年半も前であった。これら観測での時間のずれが何を意味するのかは、未解決の問題として残されている。

これら観測結果の解釈での問題は、単に学問上の問題にとどまらず、銀河宇宙線がどのように太陽圏に入り込んで来るのか等、地球を取り巻く環境にも関わっている可能性もある。ボイジャー2号探査機は、おそらくは数年以内にヘリオポーズを越えると考えられているので、V1の残したヘリオポーズ通過時の問題の解決に向けて、研究の進展が期待されている。

## —Keywords—

**ボイジャー1号, 2号:**  
NASAが打ち上げた無人宇宙探査機。惑星探査ミッションを終え、現在は星間空間探査ミッションを行っている。

**太陽風:**  
一般に恒星表面からは高速のプラズマが流出しており、太陽の場合にはそれを太陽風と呼ぶ。

**太陽圏:**  
銀河系内の空間のうち、電磁的に太陽からのプラズマが優勢な空間。その外側は「星間プラズマ」が優勢であって星間空間と呼ばれる。

**ヘリオポーズ:**  
太陽圏の最外層のことで、電磁気学的な意味での太陽系境界と言える。

**磁場:**  
銀河系内の磁場の強さは数マイクロガウスである。

**銀河宇宙線:**  
太陽圏の外、銀河系の内側に起源を持つ宇宙線。超新星残骸などで加速されると考えられている。太陽圏内の磁場とプラズマは銀河宇宙線の侵入を妨げる。

## 1. はじめに

ボイジャー1号機 (V1) は太陽圏境界を越えて星間空間 (銀河系空間) に入った。このことは、1957年の人類初の人工飛翔体スプートニクの打ち上げ、及び1969年のアポロ11号による人間の月面到着に続く、宇宙探査史上においてもまた人類文化史上においても画期的な出来事と云えるであろう。

太陽圏は太陽風プラズマ流と星間ガス (銀河系ガス) との相互作用で形成され、太陽圏の最外層はヘリオポーズ (heliopause) と呼ばれている。V1はヘリオポーズを越え、史上初めて人工飛翔体による星間空間中での直接観測を行っている。大方の専門家はそのように理解している。しかし少数ながらV1は未だヘリオポーズ内にあるとの意見もある。また、V1がヘリオポーズに近づき、越えたと思われる期間に得られた観測データについては、整合性のとれた理解が得られていない点も多い。本稿ではそれらの疑問点も含めて、ヘリオポーズ周辺での観測及び現時点での解析結果を紹介していきたい。

スプートニク以来、今までの人工飛翔体による直接探査領域は地球、惑星、衛星、彗星及び惑星間空間ガス (太陽風プラズマ) など太陽圏内部に限られていた。しかし太陽圏を越える直接探査計画としては既に1964年にアメリカのNASAの企画室で「銀河プローブ」という名の銀河系空間での直接観測のアイデアが生まれている。この時期はアメリカの人工衛星打ち上げがようやく順調に進み出し、また太陽風プラズマがParker<sup>1)</sup>の主張のように太陽コロナを源として広大な惑星間空間に超音速で広がっていることが確認されてからまだ間もないころ、太陽圏がどこまで広がっているかについては未だわかっていなかった時期であった。そのような時期に銀河プローブという冒険的なアイデアが生まれ、しかもその実現に向けた努力が円滑に動き出したことは特筆すべきことであろう。1972年には既にパイオニア10号 (P10)、1973年には11号 (P11) 打ち上げが実現した。P10は木星、P11は木星及び土星の撮像に成功したが、電源不足のため太陽圏外圏に着く前 (P10は82 AU (1 AUは太陽地球間距離)、P11は45 AU) に通信が途絶えてしまった。V1及びボイジャー2号 (V2) はこれに続く計画で1977年に打ち上げられた。ちょうど1982年に外惑星がほぼ直線状に並ぶという惑星直列の時期、外惑星を連続的に探査できるという理想的な時期と偶然に重なったことも打ち上げ実現に大きく役立つこととなった。

## 2. ボイジャー探査機

V1及びV2は計画の初期には「Grand Tour」の名で、外惑星を探査して引き続き太陽圏外圏を探索し、更に星間空間へと向かう計画であった (図1)。既に1970年代初頭にはOGO5号などによる惑星間グロー (後述) の強度分布観測により、星間ガスの相対的な流れが太陽に対してどの方向から来るかが大よそ判明していて、両探査機は流れの上

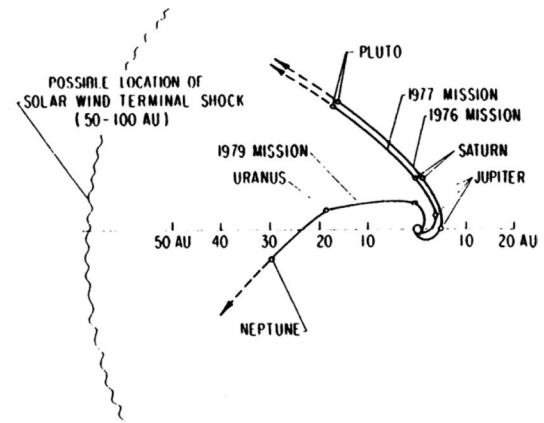


図1 Grand Tour 計画図。<sup>2)</sup> 1977年に予定通り打ち上げられ、両探査機はボイジャー1号及び2号と名付けられた。惑星探査の後、星間風上流方向へ向かい飛翔中。

流方向へ、V1は黄道面の北半球、V2は南半球へ向かうべく立案されていた。全ての惑星の近傍を通るには1976年もしくは1977年に打ち上げる必要があり、計画通りV1及びV2はともに1977年に打ち上げられた。V1の当初の計画に入っていた冥王星 (現在は惑星名簿からはずされている) 探査は、土星の衛星タイタン撮像を優先したため実現されなかったが、その他の外惑星及び衛星の探査は両探査機により実現され、木星イオ衛星での火山噴火の撮像など予想を大きく上回る成果が得られた。

2014年9月現在のV1及びV2の速度は、それぞれ17 km/s (3.58 AU/年) 及び15.5 km/s (3.26 AU/年)、距離は太陽からそれぞれ約128 AU及び約106 AUである。V1及びV2は太陽から遠く離れるので電源として太陽光発電を利用できず、プルトニウム238 (半減期87.7年) がウラン234と $\alpha$ 粒子に崩壊する際に放出される5.6 MeVのエネルギーを利用したアイソトープ熱発電機 (RTG) を、それぞれ3機搭載している。V1の打ち上げ当初の出力は470ワットで、これで観測、計算機処理、通信及び制御などの全電力を賄っている。送信電力は約30ワットである。電源の寿命は残り10年前後と推定されている。

## 3. 太陽圏

太陽風プラズマは太陽コロナの基底部で生成され、惑星間空間中を超音速で放射状に広がる。太陽コロナ温度は100-200万度であるので、太陽風プラズマは完全電離プラズマである。太陽風の速度は太陽活動静穏時で400-800 km/sであるが、太陽フレアやコロナ質量放出時には1,500 km/sに達することもある。プラズマ粒子数密度 $N$ 、動径方向速度 $V_R$ 、及び太陽からの距離 $R$ の間には、粒子数の保存則 $N \cdot V_R \cdot R^2 = \text{一定}$ が成り立ち、惑星間空間内で $V_R$ が一定なため、 $N$ は $R^{-2}$ に比例する。電磁流体力学的 (MHD) ガスの3つの基本圧力即ち、熱圧 $P (NkT)$ 、 $k$ はボルツマン定数、 $T$ は温度)、ラム圧 $(NM_p V_R^2)$ 、 $M_p$ は陽子質量)、及び磁気圧 $((1/2)\mu_0 B^2)$ 、 $\mu_0$ は真空中の磁気透磁率、 $B$ は磁



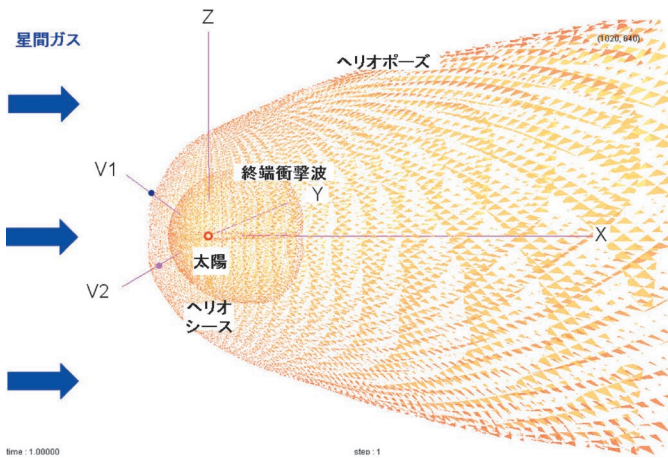


図2 太陽圏構造。太陽風プラズマは惑星間空間を超音速で拡がり、終端衝撃波面にて減速して亜音速となり、流れの向きは徐々に尾部へと向かい、吹き流し状の太陽圏構造が形成される。ヘリオポーズは太陽風プラズマと星間ガスを隔てる contact surface。終端衝撃波とヘリオポーズとの間の空間はヘリオシースと呼ばれている(レヴュー論文<sup>3)</sup>参照)。

場)のなかでは、ラム圧が突出して高い。

太陽の双極子磁場は太陽風プラズマにより外側へと放射状に引っ張り出されるため、北向き双極子磁場の場合は北半球で外向き (AWAY from the Sun)、南半球で内向き (TOWARD the Sun) の放射状磁場となり、南向き双極子磁場の場合はその逆向きとなる。双極子磁場の向きは約11年の太陽活動周期で反転する。太陽は自転しているため、惑星間空間にトロイダル磁場  $B_T$  が形成される。太陽の自転は惑星の公転と同じ向きなので、 $B_T$  の向きは、 $B_R$  の向きが AWAY/TOWARD-polarity の場合は惑星の公転の向きと逆/順方向となる。太陽からの距離  $R$  が大きくなるとともに  $B_T (\propto R^{-1})$  が  $B_R (\propto R^{-2})$  に較べて大きくなる。地球軌道付近で  $B_T$  が  $B_R$  とほぼ等しい程度であるので100 AU (光速で13.9時間) スケールの太陽圏外圏では  $B_T$  が  $B_R$  よりはるかに大きくなっている。

星間ガスは銀河系のなかでスーパーバブルと呼ばれる数10-数100光年規模の超新星残骸により形成されている。太陽周辺の星間ガス(図3ではLIC)は温度数千度、水素原子密度0.1/cc、電離度30%程度の低温低密度ガスであると考えられている。磁場強度は、銀河平均強度とほぼ等しく、 $3 \mu$  Gauss程度と考えられている。太陽に対する星間ガスの相対速度は約23 km/sで、ほぼ銀河中心方向 ( $l_{ii}=0^\circ$ ) から、ほぼ黄道面に沿って吹いてきている。この相対速度は磁気音波速度と同程度であるため、太陽圏の前面で太陽からの距離約300 AUの星間ガス中に衝撃波が形成されている可能性がある。

太陽風プラズマは、太陽からの距離80-100 AUにある終端衝撃波を経て惑星間空間領域からヘリオシース領域に入り、速度は亜音速となる。ヘリオシース中では速度は  $V_R \propto R^{-2}$  で減少し、一方  $N$  はほぼ一定である。流れの方向は動径方向から徐々に尾部方向に変わる。ヘリオシース中では太陽風プラズマのラム圧が減少し、温度が上昇して熱

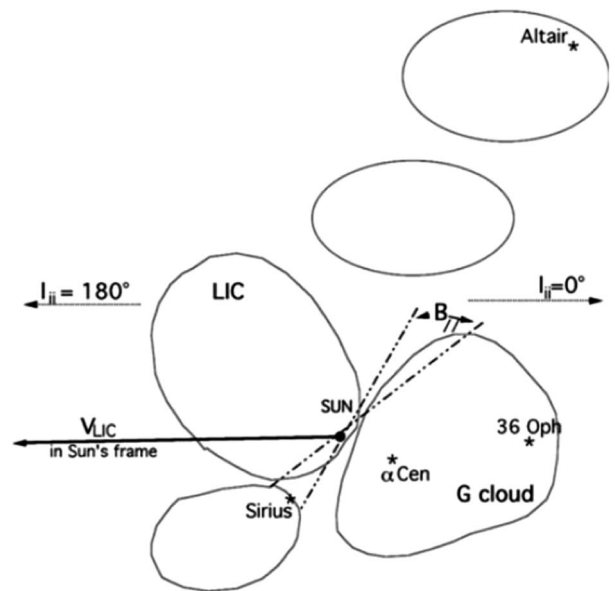


図3 太陽周辺の星間空間雲。<sup>4)</sup> 太陽はLIC (Local Interstellar Cloud) の内部にあり、境界近くに位置している。磁場の向きはHDP (本文参照) 内で星間ガス流との角度が30度から60度の間として示されている。 $V_{LIC}$  は太陽静止系で、LICが太陽に向かって動く方向を示し、銀河中心 ( $l_{ii}=0^\circ$ ) 方向から太陽に向かって示している。

圧が高くなる。速度が終端衝撃波で約1/4になるのに伴い、磁場強度は約4倍(従って磁気圧は約16倍)に上昇する。また、ヘリオシースで  $V_R$  が  $R$  の増加とともに更に減少するに伴い磁場強度は更に強まり、単純モデルではヘリオポーズ直近で磁場強度は最大になるはずであった。しかし観測では必ずしもそうはなっていない。これはV1がヘリオポーズに達するまでの期間に太陽活動及び太陽表面磁場が弱まっていることに起因しているようである。

太陽風プラズマは惑星間空間では超音速、超磁気音速で拡がっているため、太陽圏外部からは電磁流体力学的な情報が惑星間空間に入ってくる。このため、我々地球に住む者にとっては外部の状況を把握することは難しい。しかし、星間ガスの流れがどの方向から太陽に向かって流れて来るかについては、地球近傍での紫外線観測からも推定可能である。即ち、星間風中の非電離ガスはヘリオポーズで遮られずに太陽圏内に侵入し、非電離ガスの主成分である水素(H)及びヘリウム(He)は太陽に近づくと太陽光の強い照射を受け、Lyman- $\alpha$  (H1216 Å, He316 Å) の共鳴散乱が起きる。このLyman- $\alpha$  共鳴散乱は地球から見ると全天に広く輝いて見える。これを惑星間空間グローと云う。このグローの空間強度分布から星間ガスが吹いて来る方向を知ることができる。この観測がOGO5探査機などで行われ、先に述べた方向から星間ガスが流れて来ることが明らかになった。<sup>2)</sup>

現実の太陽圏構造を議論するには、以上に述べたことに加え、(1) 星間ガス中の中性水素(H)と太陽風プラズマ中の陽子( $H^+$ )との荷電交換、及び(2) 星間磁場の向きが星間ガス流に対して傾いていることに起因して生じる太陽圏構造の南北非対称性が重要であると考えられている。

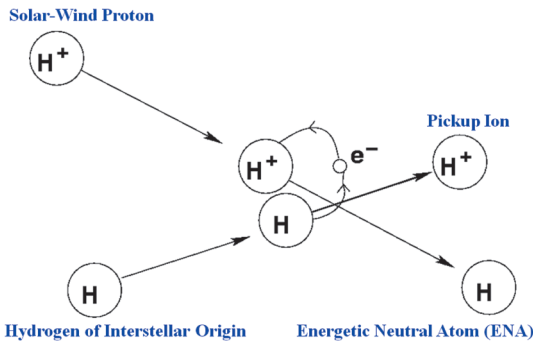


図4 星間ガスからの中性水素 (H) と太陽風プラズマの陽子 (H<sup>+</sup>) との荷電交換。

惑星間空間中で、星間空間から侵入してきたHは太陽風プラズマ (H<sup>+</sup>) との荷電交換を、図4のように起こす。この荷電交換過程ではそれぞれの粒子の速度の変化は無視できる。従って速度が星間風速度 23 km/s であったHは同じ速度のH<sup>+</sup>に変わる。この新たに生じた荷電粒子はpickup ionと呼ばれる。太陽風プラズマが終端衝撃に到達する間に太陽風プラズマ (H<sup>+</sup>) の10-20%程度が荷電交換される。pickup ionは、太陽風プラズマ粒子と同様に電場  $E (= -V_R \times B)$  を感じ、太陽風プラズマ粒子の一員となり、同じ太陽風速度 ( $= E \times B$  ドリフト速度) で外圏へと向かう。荷電交換前の太陽風は速度 $\sim 400$  km/s、温度 $\sim 10^4$  Kであるので、pickup ionが太陽風プラズマの一員となる際には速度の遅い粒子、且つ熱速度が、荷電交換前の太陽風速度と中性粒子速度の差に等しい、高温 ( $\sim 10^6$  K) の粒子として参加することになる。従って惑星間空間では荷電交換により太陽風プラズマは減速、且つ加熱される。終端衝撃波にて太陽風プラズマは高温となり、pickup ionはもともと高温成分であったのが更に高温となるので、ヘリオシース中ではpickup ionは太陽風プラズマのエネルギーの半分程度を担っていると考えられている。また速度分布はMaxwell分布とは大きく異なる。<sup>2,3,5)</sup>

21世紀に入って、太陽圏構造が軸対称ではなくて南北に非対称性があることを示す観測が出て来た。水素 Lyman- $\alpha$  共鳴散乱の青方シフトの空間分布解析によりヘリオポーズ内部でHの速度分布の中心が星間風到来方向から約12°ずれていることから、太陽圏構造に非対称性があること、星間磁場の方向が星間風方向から約40°傾いていることが示唆された。<sup>6)</sup>

星間ガス中の中性粒子は、HもHeも電磁学的な影響は直接的には受けない。しかし、Hと陽子 (H<sup>+</sup>) との共鳴的な衝突頻度が高いため、星間ガス中の陽子が受けた電磁的影響を衝突を通じてHも間接的に受け、Hの平均的な運動方向はHeのそれとは異なる。従って星間風の流れの方向としては荷電交換をしにくいHeの流れの方向を用いる。星間空間におけるHとHeの流れの方向の違いから、星間磁場の方向に制限を加えることができる。HとHeのLyman- $\alpha$  共鳴散乱空間分布の違いから、星間磁場ベクトル

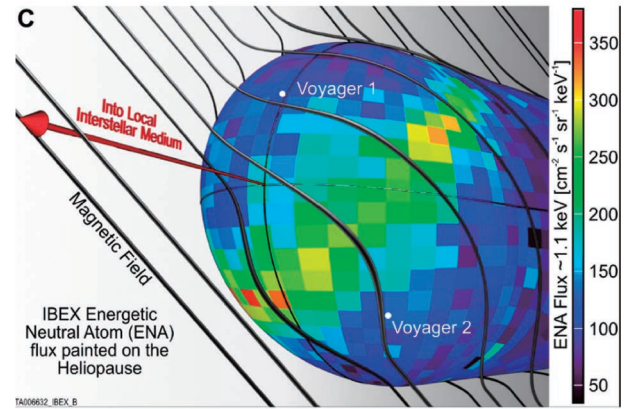


図5 IBEX観測によるヘリオポーズ近傍でのリボン状高エネルギー中性粒子観測結果と星間磁場。<sup>9)</sup>

がHDP面 (Hydrogen Deflection Plane) 内にあるべきという面が得られた。<sup>4)</sup>

V1はV2よりも太陽からの距離が約20 AU先行している。V1は2004年末に終端衝撃波を通過したのでV2の通過は飛行速度から約6年後であると計算された。しかし、星間磁場が星間流に対し傾いていることを考慮すれば、太陽圏の南北非対称性によりV2はもっと早くに終端衝撃波に到達する、との計算機シミュレーション解析<sup>7)</sup>が提示された。更に、惑星間空間衝撃波による終端衝撃波の位置の時間変動も考慮にいられたダイナミックな変動のシミュレーション解析によると、V2の終端衝撃波通過は2007年末と予報<sup>8)</sup>された。実際の通過は2007年8月末であったので、この予報は高い精度で的中したこととなった。これらにより、太陽圏構造の南北非対称性は明らかになってきた。

地球を周回して、keVオーダーの高エネルギー中性粒子を観測するIBEX (Interstellar Boundary EXplorer) 探査機は高エネルギー中性粒子 (Energetic Neutral Atom; ENA) 強度の全天マップ観測を行っている。その結果、図5に示されるように、中性粒子の強度分布には、ヘリオポーズ周縁にリボン状の強度の高い領域があることが発見された。<sup>9)</sup> この結果は星間磁場と垂直になる動径方向領域でENA輝度が高くなっていることによると理解されている。計算機シミュレーション<sup>10)</sup>でもENAリボンが再現されている。惑星間空間においては、400 km/sの陽子が荷電交換により約1 keVのENAになる。生じたENAは動径方向外向きに飛んでヘリオポーズを越え、星間空間で再び星間中性粒子と荷電交換して陽子に変わり、星間空間磁場中で旋回運動する。これらの陽子がもう一度荷電交換してENAに変わると、これらENAは星間磁場に垂直方向に向かう。これらENAが地球周辺でリボンとして観測されると考えられている。観測されたENAリボンを用いた詳しい解析により、星間磁場ベクトルはHDP面内にあり、星間風速度ベクトルから48度<sup>11)</sup>の方向に沿っていると推定されている。この観測によって太陽圏の構造及び南北非対称性が更に明確になった。

#### 4. 銀河宇宙線の輸送及び太陽圏外圏での太陽粒子加速

銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Ray; GCR) は超新星残骸を主な加速源とする高エネルギー粒子である。GCRは太陽風中の磁場の乱れにより散乱され徐々に太陽圏内部へと侵入し、同時に太陽風プラズマ流により磁場とともに外向きに流し出される。この過程はLiouvilleの式を基礎とした輸送方程式である移流拡散方程式 (convective-diffusion equation) で記述される (解説書<sup>12)</sup> 参照)。太陽11年周期活動の最盛期には、太陽磁場活動が強いため地球に到達するGCRは減少し、静穏期には増加する。GCRの地球表面への侵入が、地球大気及び地球磁場によって大幅に阻止されていることはよく知られているが、地球に到達する前に、太陽風プラズマ及び惑星間空間磁場によって $\sim 100$  MeV以下のGCRの侵入が妨げられている。

終端衝撃波通過時に太陽風プラズマ中のpickup ionが衝撃波加速により加速されて、10-100 MeVのACR (Anomalous Cosmic Ray) が生成される。しかしV1では終端衝撃波通過時にこの生成過程による強度の増加はなかった。V1が終端衝撃波通過の後に、強度が距離とともに徐々に増加することが観測された。<sup>13)</sup> その理由は、ACR生成がV1が通過した星間流上流側ではなくて、終端衝撃波面が太陽磁場に対して斜めになる側面側で起こり、生成された粒子がトロイダル磁場に沿って前面へ回り込むからであろうと推測<sup>14)</sup> されている。なお、'Anomalous'の名の由来は、10-100 MeVのエネルギー帯では太陽圏内部で、しかもpickup ionに関連して生成される高エネルギー粒子が多いことから来ている。V1ではACR生成の「現場」は観測されなかったが、5 MeV以下の「低エネルギーACR」あるいは「TSP (Termination Shock Particle)」と呼ばれる粒子の生成が観測されている。

#### 5. ヘリオポーズ周辺での観測

V1搭載のプラズマ測定装置 (PLS) は太陽圏外圏に到達する前に観測を停止している。現在観測を続けている装置はCRS (Cosmic Ray Subsystem), LECP (Low Energy Charged Particle instrument), MAG (triaxial fluxgate MAGnetometer), 及びPWS (Plasma Wave System) である。

##### 5.1 粒子フラックス観測

V1が2004年末に太陽からの距離94 AUにて終端衝撃波を越えてヘリオシース領域に入り、引き続きヘリオポーズをめざして飛翔している間、GCRは太陽からの距離の増大とともに徐々に増加を続けていた。図6に示されているように、2012.35年 (V1位置は太陽からの距離約120 AU) に、GCRが大きく増加し、その様相が変化した。これをGCR第1ステップ増加と呼ぶ。その後2012.57年からフラックスの上下が見られ、2012.65年に再び顕著な増大があった。これをGCR第2ステップ増加と呼ぶ。一方、ACRにはGCR第1ステップ増加の時に顕著な変化は見られず、

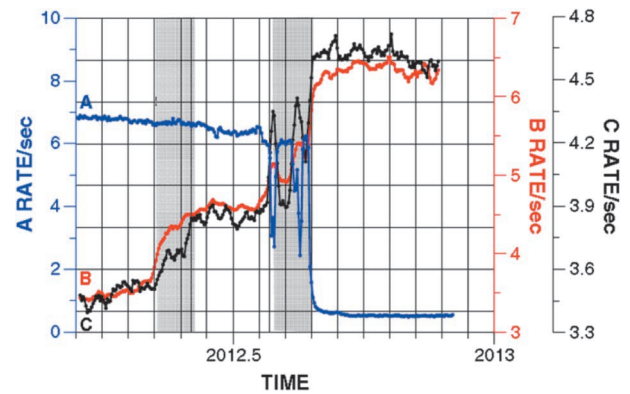


図6 V1-CRSで観測された $>0.5$  MeV陽子 (2012.65以前では主にACRとTSP) (A), 6-14 MeV GCR電子 (B), 及び $>200$  MeV GCR陽子 (C) の計数率。<sup>15)</sup> 横軸は1年を1.0とする年時刻である。

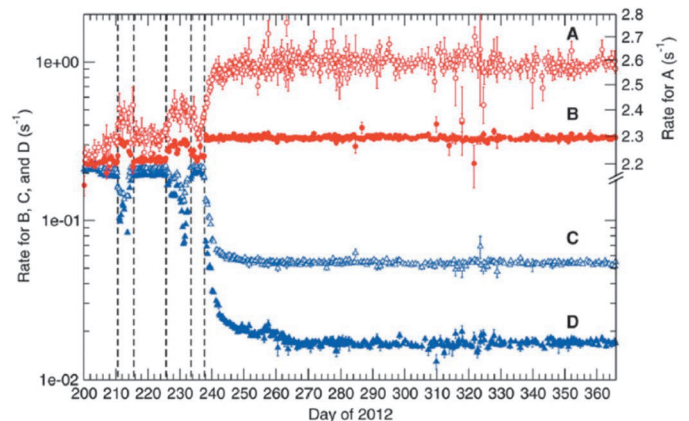


図7 V1-CRSで観測されたGCR ( $>70$  MeV陽子) (A), GCR (6-100 MeV電子) (B), 7-60 MeV陽子 (2012/238以前は主にACR) (C), 0.5-30 MeV陽子 (主にTSP) (D) の計数率。<sup>16)</sup> 横軸は2012年1月1日を1.0とする年通日。

GCR第2ステップ増加の時に急激な減少が起きた。第2ステップ以降は現在に至るまで大きな変動はない。

図7で明らかなように2012/210 (210は1月1日を1.0とする年通日で、1年を1.0とする年時刻では2012.57に相当) から各エネルギーの高エネルギー粒子強度が増減を始め、GCR第2ステップ2012/239 (2012.65) でGCR ( $>70$  MeV) は大きく増加、GCR電子 (6-100 MeV) も僅かながら増加、ACR及びTSPは大きく減少して、それ以後は顕著な変化がない。これはV1が星間空間に入り、星間空間のGCRを直接観測したこと、また太陽圏内部で生成されたACR及びTSPは星間空間の彼方へと消え去ったことを示していると考えるのが妥当であろう。

同様の観測結果が図8 (LECP観測) でも見ることができる。GCR ( $>211$  MeV) は図7のCRSでのGCR ( $>64$  MeV) と同じ時間変動を示し、またTSPも図7のACR及びTSPと同じ時刻2012.65で消滅している。

以上の粒子観測での特徴は (1) GCRは第1ステップ (2012.36) 及び第2ステップ (2012.65) の2段階の大きな増大があり、それ以降は大きな変動はない。従って第2ステップ時にV1はヘリオポーズを越えて星間空間に入り、それ以降は星間空間中のGCRを直接観測していると考えられ

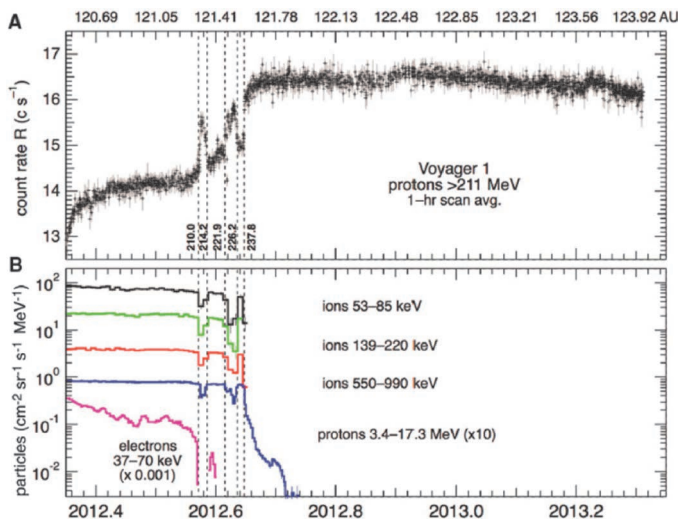


図8 V1-LECPで観測されたGCR (>211 MeV)の計数率(A)及び各種ACR及びTSPの強度(B).<sup>17)</sup> 横軸は1年間を1.0とする年時刻。

ている。(2) ACRは第1ステップの時は変動がない。第2ステップでは大きく減少し、ゼロに近い値になっていて、従って第2ステップでは太陽圏内部で生成されたACRが全て星間空間中に消失、抜け出ていると理解される。(3) GCR及びACRはともに2012.57から第2ステップまでの間は上下動を繰り返し、両者は概ね反位相である。なお、ジャイロ半径はヘリオポーズ周辺で10 MeV陽子で $\sim 0.005$  AUである。

## 5.2 磁場観測

経度角 $\lambda$ はV1の位置で $0^\circ$ としている。従って $\lambda$ は、太陽トロイダル磁場が惑星の公転と順/逆方向で、 $90^\circ/270^\circ$ (即ちTOWARD/AWAY-polarity)となる。緯度角 $\delta$ は太陽赤道面で $0^\circ$ 、北半球で正、南半球で負としている。V1による磁場観測結果(図9)を見ると、 $\lambda$ が、年時刻2011.75(図中5本の縦線のうち一番左の縦線)にTOWARD-polarityからAWAY-polarityにステップ状に変化して2012.47(左から4本目の縦線)まで続き、そこで一旦TOWARD-polarityへ戻った後、2012.56(赤色縦線)に再度AWAY-polarityらしき向きに戻った。V1観測者達は2012.56以降の $\lambda$ が、太陽磁場から期待される $270^\circ$ から $22^\circ \pm 3^\circ$ ずれていることを重視して、これはもはや太陽磁場ではなく、星間空間中の磁場であると主張している。赤線以後では $\lambda$ 及び $\delta$ の変動も小さくなっていて、確かにそれ以前とは様相が異なっている。また $\delta$ の値も $0^\circ$ ではなく $23^\circ \pm 8^\circ$ になっていて太陽トロイダル磁場とは異なっている。従って、観測者達の主張は合理的と考えられている。図9(d)には、前述のGCR計数率の第1ステップ増加(左から3本目の縦線)及び第2ステップの増加(一番右の縦線)が示されている。GCR第1ステップ増加の位置は上述した磁場観測から判断されたヘリオポーズ通過の位置(赤縦線)よりも、またヘリオポーズ通過直前のTOWARD-polarityよりも前に位置している。またGCR第2ステップ増加は磁場観測ヘリオポーズより

交流 ボイジャー1号探査機、太陽圏境界を越え星間空間に入る

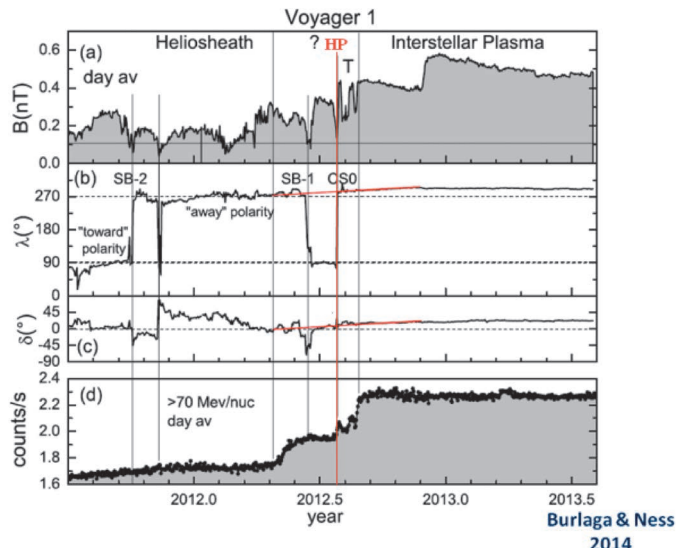


図9 V1-MAGで観測された、磁束密度(a)、磁場ベクトル方向の太陽赤道座標系での経度( $\lambda$ )(b)、緯度( $\delta$ )(c)、V1-CRSで観測されたGCR (>70 MeV/核子)の計数率(d).<sup>18)</sup> 横軸は1年間を1.0とする年時刻。

約0.1年後に位置している。ヘリオポーズ通過と第2ステップ増加の間では、磁場強度(図9(a))の変動が大きく、図6-8に示されているGCR及びACR変動の時期と一致している。この磁場強度変動が大きい期間には、磁場の方向( $\lambda, \delta$ )の変動は極めて小さい。GCR第2ステップ増加の後には、GCR計数率に大きな変動はなく、これに対応するかのように磁場強度も暫くの間はなだらかに弱くなっている。その後、2012.9に急激に増大し、V1が太陽圏外圏に到達した以降で最大の磁場強度になっている。2012.9の磁場強度の変動には、太陽からの衝撃波も影響していたようであるが、GCR計数率の変動は小さいので、大きな衝撃波だったとは考えられていない。従って、衝撃波の影響だけでこのような強い磁場が生成されることはないであろう。定常的な境界層(ヘリオポーズ)の幅が大きくそれが原因で2012.9に磁場強度最大となった可能性は否定できない。

## 5.3 波動観測

太陽風プラズマ中、もしくは星間ガス中で擾乱が大きい時は、V1-PWSでプラズマ波動が観測される。太陽面爆発等で放出された衝撃波(惑星間空間衝撃波)が、ヘリオポーズを越えて更に星間空間を外側へ伝搬し、星間ガス中に擾乱を起こす。V1で観測されるプラズマ波の周波数 $f$ と電子密度 $N_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )の間には $f = 9.0 \cdot N_e^{1/2}$  kHzという関係があるので、この関係を用いれば電子密度 $N_e$ が得られる。図10のようにヘリオポーズ周辺で密度の変化が観測されている。2013年4月-5月に観測された密度は、太陽圏内で観測される密度よりも高く、星間ガス中で予想されている密度に近い。これにより、高い電子密度が観測された2013年4月より前に、V1はヘリオポーズを越えて星間空間に入ったと理解されている。なお、電子密度が半年以上かかって序々に増加しているのはヘリオポーズに $\sim 2$  AUの幅があることを示唆している。

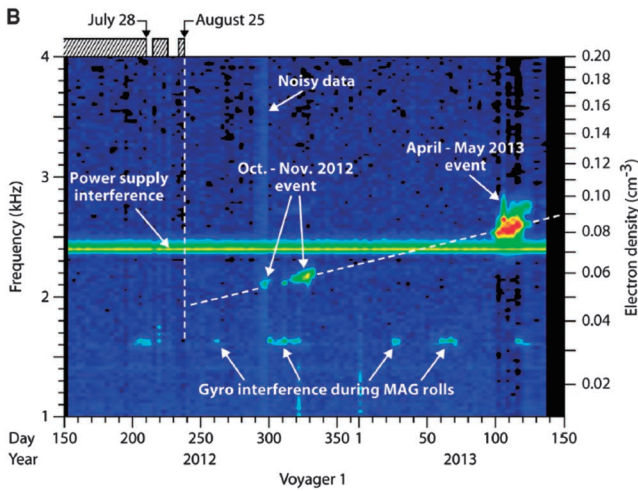


図10 V1-PWSで観測されたプラズマ観測.<sup>19)</sup> 左縦軸が波動の周波数, 右縦軸が周波数から計算された電子密度で, 横軸は年通日である. 波動の強度がカラーマップで示されている.

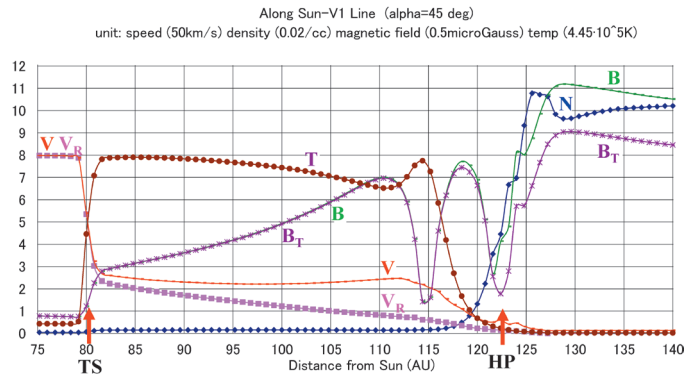


図11 シミュレーションからV1の軌道上で期待される太陽圏外圍及び星間空間の構造.<sup>20)</sup> プラズマの速度 $V$ , 動径方向速度 $V_R$ , 温度 $T$ , 密度 $N$ , 磁束密度 $B$ , トロイダル磁場の大きさ $B_T$ が, V1の太陽からの距離の関数としてプロットされている. それぞれの物理量の単位は, 図の上に表示されている. 値が示されている各ドットはシミュレーションで設定された動径方向の格子点(間隔0.8 AU)に相当している. 矢印で示された「TS」及び「HP」は, それぞれシミュレーションで得られた太陽風終端衝撃波とヘリオポーズの位置を示している.

## 6. 理論及びシミュレーション解析

太陽圏構造を巨視的に理解するには, 計算機シミュレーションが有力な手段である. ここで紹介する例では, 図9の磁場観測で示されたヘリオポーズのスケールと磁場の方向 $(\lambda, \delta)$ のシミュレーションによる再現を第1の目的として, 太陽を中心とする半径900 AU(これを外部境界とする)の球内での太陽風プラズマと星間ガスとの相互作用で得られる3次元定常解を考えている. 内部境界としては半径60 AUの球面を考える. 内部境界条件として標準的な太陽風プラズマや太陽磁場の値を与え, 外部境界球面上の星間風上流側で, 標準的な星間プラズマ, 非電離ガス及び磁場の値を与える. これらの境界条件の下で, 電磁流体力学(MHD)と流体力学(HD)3次元シミュレーションを並行して行い, 各ステップ毎に陽子と中性水素との荷電交換も計算に組み入れて, 太陽圏構造の定常解を求める. 正確な解を得るには細かい格子間隔が必要であり, この例では内部境界(60 AU)から164 AUまでは0.8 AUの格子間隔としている.

図11で, 定常解から得られた終端衝撃波及びヘリオポーズの位置が, それぞれTS及びHPで示されている. TSより内側の惑星間空間では太陽風速度 $V$ (及び $V_R$ )は400 km/sであるが, TSで約1/4に減速し, ヘリオシース内では $V_R$ が引き続き距離 $R$ とともに減少する. 一方, TSより内側で10万度程度であったプラズマ温度 $T$ はTSで約350万度に上昇する. ヘリオシース内での荷電交換は,  $V_R$ が小さくなるとともに, 太陽風プラズマを冷却するように働き, その結果 $T$ はヘリオシース内で減少している. なお,  $T$ が $R \sim 115$  AUで局所的に上昇しているのは, 磁場に磁気中性面が形成されていることに伴うものである. 第2節で述べたように, プラズマ密度 $N$ もTSで約4倍に上昇する. 磁束密度 $B$ 及びトロイダル磁場 $B_T$ はTSで約4倍に増加し, ヘリオシース内では引き続き $V_R$ の減少とともに増大している. しかし, ヘリオポーズ直前でトロイダル磁場の極性

が反転するため, 単純な増加とはなっていない(この極性反転については, 後に詳しく述べる). なお, 太陽圏外圍(深惑星間空間及びヘリオシース)では,  $B$ と $B_T$ はほぼ同じ値であり(図11では両者は重なっている), これは磁場がほぼ全てトロイダル成分で構成されていることを示している.

もし星間ガスが完全電離ガスであれば, 荷電交換は起こらずTSからHPまでは $T$ が高温のままのはずなので, HP位置を $T$ が数100万度から星間ガス温度の数千度に急減する位置として同定できる. しかし荷電交換を考慮に入れると上述のように $T$ はヘリオポーズ近くでは減少してしまっているので, HPの位置同定には使用できない. シミュレーションによるHPの位置の決定には, トロイダル磁場 $B_T$ の極小点を使用している. 図11では122.4 AUの位置で $B_T$ が極小となっている. ここでは既に $B$ と $B_T$ の値は異なり始めている. HPの位置以遠では $B$ と $B_T$ の差は更に広がっている. シミュレーションで得られたHPの位置122.4 AUはV1磁場観測で得られた位置(図9)とよく一致している. TSの位置が80 AU程度であり, V1がTSを通過した2004年末の94 AUより小さいが, これはそれ以後の約8年の期間に太陽活動が弱まっているためと理解できる.

図12は, 太陽自転軸とV1軌道ベクトル方向を含む子午面上でのプラズマ圧力, 温度, 速度, 及び磁場ベクトルの面に垂直な成分(惑星の公転方向を正とする)分布を示している. 内部境界条件として, 緯度 $60^\circ$ 以下での速度を400 km/s,  $60^\circ$ 以上では700 km/sと設定している. これに従い, 速度分布が高緯度で高速であることに対応して, ヘリオシース中の温度が高緯度で高温となっていることがわかる. また磁場の図では南北非対称性により, ヘリオポーズの近くの南半球の磁場が, 北半球へ流れる太陽風に運ばれ, 北半球でヘリオポーズ直近の領域を占めていることがわかる. この南半球からの磁場が図11の115 AUからHPまでの北半球の領域を占める磁場に相当している.

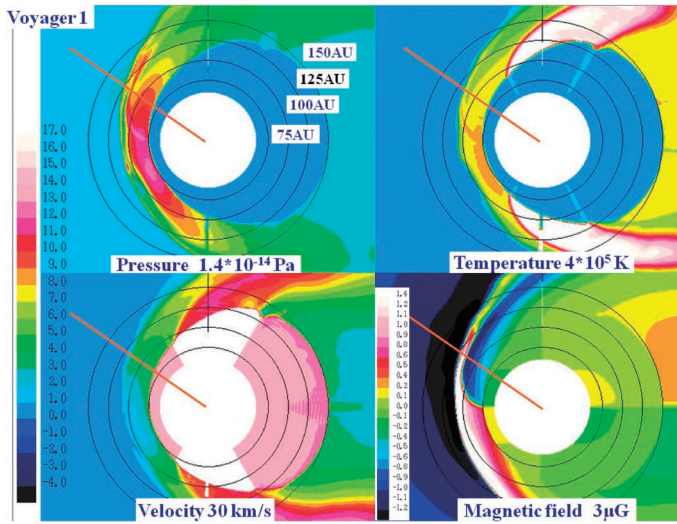


図12 シミュレーションで得られた太陽圏外圍構造の子午面図(太陽自転軸とV1軌道ベクトルを含む面での断面図)。<sup>20)</sup> 左が星間風の上流方向で、上が太陽の北極方向である。圧力(左上)、温度(右上)、速度(左下)、磁場(右下)の分布が、それぞれカラーマップで示されている。各パネルの下段に、カラスケールの数字の単位が示されている。赤線はV1軌道ベクトルを示す。

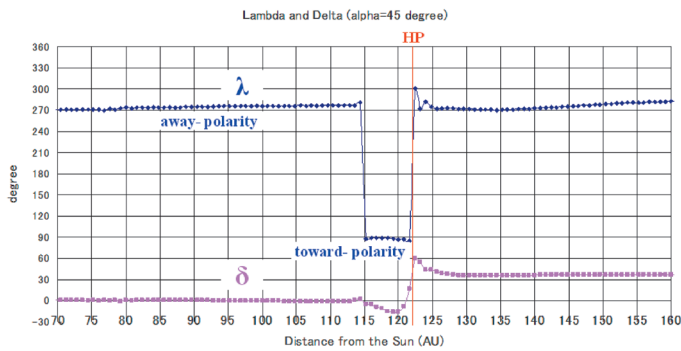


図13 シミュレーションで得られた、V1の軌道上の磁場の方向(経度 $\lambda$ と緯度 $\delta$ )。<sup>20)</sup>

図13に見られるように、シミュレーションで得られた磁場の方向は、図9の観測結果を良く再現している。磁場の極性は、ヘリオポーズの前面でのAWAY-polarityから、ヘリオポーズ直近でTOWARD-polarityに変わり、ヘリオポーズでAWAY-polarityに再度変わる。最後の極性反転後、緯度 $\delta$ は太陽磁場から期待される $0^\circ$ には戻らず、約 $30^\circ$ 程度の違いが生じている。経度 $\lambda$ も、太陽磁場から期待される $270^\circ$ との差が距離とともにゆっくりと増加していて、縦赤線以降の磁場が太陽トロイダル磁場ではないことは明白である。外部境界条件として設定した磁束密度は強度は $3\mu\text{G}$ 、星間ガス流と磁場との角は $45^\circ$ で、この磁場ベクトルの方位は $\lambda=330^\circ$ 、 $\delta=30^\circ$ に相当する。その磁場の磁力線がヘリオポーズ近くでは集積してヘリオポーズ面に沿うようになる(draping効果<sup>21)</sup>)ので、その結果として磁束密度は最大約 $6\mu\text{G}$ (図12)になり、 $\lambda$ は図13のように、きわめて太陽磁場のAWAY-polarityに近い値となっている。

## 7. 観測結果の解釈の問題点

ヘリオポーズで太陽風プラズマと星間ガスとが区別されているとすると、従来からの単純な考えでは、磁場の観測結果に基づいて判断されたヘリオポーズの位置(時刻 $\tau_B=2012.56$ )で、GCR及びACRなどの流量が同時に変化するはずであった。しかし観測ではそうになってはいない。第4節で紹介したように、GCR第2ステップ増加( $\tau_{G2}$ )は2012.65であり、この時同時にACRが急減した。従って、高エネルギー粒子観測からは、 $\tau_{G2}$ にV1がヘリオポーズを越えて星間空間に入ったと解釈されてもよいはずであった。しかし $\tau_{G2}$ は $\tau_B$ と同時刻ではなく、0.09年後であった。またGCR第1ステップ増加( $\tau_{G1}=2012.31$ )は $\tau_B$ より0.25年前であり、この時ACRが変動しなかったことも、現在のところ謎である。何故GCR増加が2段階に分かれているのかもまだ説明がついていない。2012.57から $\tau_{G2}$ までの期間にもGCR及びACRは変動を続けたが、この変動の開始時刻は厳密には $\tau_B$ と同時刻ではなく、0.01年後であった。またこの間、何故か磁場の向き( $\lambda, \delta$ )には変動がない。これらの観測事実や観測時刻の相互関係を説明するためには、従来からの「ヘリオポーズで太陽風と星間ガスとが区別される」とする考えにどのような修正が必要なのか現在問われている。この修正のためのヒントの一つが第3節で紹介した太陽圏構造の南北非対称性に伴って生成される、ヘリオポーズ周辺の複雑な磁場構造にあるとする案などが出ている。

磁場観測(図9)で、 $\tau_B(=2012.56)$ に磁場の方向がTOWARD-polarityから見かけ上AWAY-polarityに変化した際に、磁場の向きが太陽トロイダル磁場と似ていたため、観測当初はV1はまだヘリオポーズ内にはいるのではないかと受け取られ、GCR第1及び第2ステップ増加との関係も説明できず、当初は混乱が生じた。2013年末のAGU(アメリカ地球物理連合)学会と2014年の論文<sup>18)</sup>で、V1の磁場観測者達が2012.56以降の磁場の向きはAWAY-polarityの太陽磁場に似てはいるが異なっていることを示し(前節末を参照)、また図13のように、観測結果に近い磁場極性の変化がシミュレーションで再現できることから、この混乱は基本的には解決できたと考えられる。しかし磁場観測でのヘリオポーズ越えが時刻 $\tau_B$ であったとすると、GCR第1及び第2ステップ増加との関係をどう説明するかが新たな問題点となってきている。

ヘリオポーズは薄い層ではなく、0.5年( $\sim 2\text{AU}$ )にわたって密度が変化(図10)している。また磁束密度の最大値が観測されるまでにも、磁場観測でのヘリオポーズ越え( $\tau_B$ )から0.34年(図9)を要している。この密度及び磁束密度のゆっくりとした変化と、磁場のpolarityやGCR及びACRの急激な変動が、どのように共存しているのかも、興味ある未解決の課題である。

これら多くの謎は太陽圏構造の定常解で解決できる以外にも、時間的な変動に起因している可能性も含んでいると

思われる。理論シミュレーションにより、乱流や磁気渦の発生を主張する説<sup>22,23)</sup>もあるが、図9を見る限り擾乱はあるものの磁気渦の発生は見当たらない。ヘリオポーズの大きさの変動も、興味ある課題ではあるが、あまり大きくはなく、1AU/年以下であろうと考えられている。また、荷電交換効果に起因する、ヘリオポーズ面に沿う不安定性<sup>24-26)</sup>が関わっているかどうか未解決の課題である。

MHD的な観点から未解決の点をもう一つ挙げると、ヘリオシース中で観測された磁場のpolarityに疑問が残っている。第23太陽活動サイクルでは、太陽双極子磁場が南向きで、V1が通過した北半球の太陽磁場極性はTOWARD-polarityのはずである。しかししばしばAWAY-polarityが数カ月、場合によっては1年近く続くことがある。今回のV1のヘリオポーズ通過時にも2012.2からAWAY-polarityだったことは他のいくつかの事例と同様、太陽表面磁場をポテンシャル磁場近似で引き伸ばした時のpolarityと矛盾していて、説明されていない。

V1が未だヘリオポーズ内にあるという主張<sup>27)</sup>も残っており、その根拠は、観測磁場が未だAway-polarityの太陽磁場になっていること、及びV1-PWSが観測した高いプラズマ密度がヘリオシース中でも生成可能である、の2点である。しかし前者については、既に述べたように磁場線draping効果(図13)で説明がつくことであり、また後者について彼らの論文中には定量的な解析がなく、根拠は薄弱であろうと思われる。

以上のさまざまな点を監視すると、未解決な点も多いが、V1がヘリオポーズを越えて、現在は星間空間に入っていることは間違いのないことと思われる。V2は現在ヘリオシース中にあり、ヘリオポーズを超えるのは早ければ来年、遅くても数年中であろう。V2ではプラズマ計測機(PLS)も稼働しているので、その観測により、V1の残したヘリオポーズ通過時の諸問題の解決に向けて、研究の進展が期待されている。

## 8. 終わりに

ボイジャー探査機は、外惑星/衛星探査、太陽圏外圏/星間空間探査の役割に加え、我ら地球人の自己紹介資料を盛り込んだgold-plateを積んで、地球外知的生命に伝える役割も担っている。V1は、星間空間に入ってようやくこの役割を行い始めたと言える。探査機の速度が光日/50年(～光年/2万年)と、遅すぎる感があることは否めないが、悠久の未来での成功を祈念したい。また、今後の観測継続に期待し、若手研究者のこの分野への参入を歓迎したい。Bon Voyage!

## 参考文献

- 1) E. N. Parker: *Astrophys. J.* **128** (1958) 664.
- 2) W. I. Axford: *Solar Wind 3* (NASA Spec. pub., NASA SP-308, 1972) p. 609.
- 3) G. P. Zank: *Space Sci. Rev.* **89** (1999) 413.
- 4) R. Lallement, E. Quemerais, J. L. Bertaux, *et al.*: *Science* **307** (2005) 1447.
- 5) G. P. Zank, J. Heerikhuisen, N. V. Pogorelov, R. Burrows and D. McComas: *Astrophys. J.* **708** (2010) 1092.
- 6) L. Ben-Jaffel, O. Puyoo and R. Ratkiewicz: *Astrophys. J.* **533** (2000) 924.
- 7) M. Opher, E. C. Stone and P. C. Liewer: *Astrophys. J.* **640** (2006) L71.
- 8) H. Washimi, G. P. Zank, Q. Hu, T. Tanaka and K. Munakata: *Astrophys. J.* **670** (2007) L139.
- 9) D. J. McComas, *et al.*: *Science* **326** (2009) 959.
- 10) J. Heerikhuisen, N. V. Pogorelov, G. P. Zank, *et al.*: *Astrophys. J.* **708** (2010) L126.
- 11) H. O. Funsten, R. DeMajistre, P. C. Frisch, *et al.*: *Astrophys. J.* **776** (2013) 30.
- 12) 寺沢敏夫:『太陽圏の物理』(岩波書店, 岩波講座物理の世界, 2002).
- 13) E. C. Stone, A. C. Cummings, F. B. McDonald, B. C. Heikkila, N. Lal and W. R. Webber: *Nature* **454** (2008) 71.
- 14) D. J. McComas and N. Schwadron: *Geophys. Res. Lett.* **33** (2006) 4102.
- 15) W. R. Webber and F. B. McDonald: *Geophys. Res. Lett.* **40** (2013) 1665.
- 16) E. C. Stone, A. C. Cummings, F. B. McDonald, *et al.*: *Science* **341** (2013) 150.
- 17) S. M. Krimigis, R. B. Decker, E. C. Roelof, *et al.*: *Science* **341** (2013) 144.
- 18) L. F. Burlaga and N. F. Ness: *Astrophys. J.* **784** (2014) 146.
- 19) D. A. Gurnett, W. S. Kurth, L. F. Burlaga and N. F. Ness: *Science* **341** (2013) 1489.
- 20) H. Washimi, G. P. Zank, Q. Hu, T. Tanaka and K. Munakata: submitted.
- 21) M. Opher and J. F. Drake: *Astrophys. J.* **778** (2013) L26.
- 22) M. Swisdak, J. F. Drake and M. Opher: *Astrophys. J.* **774** (2013) L8.
- 23) M. Strumik, A. Czechowski, S. Grzedzielski, W. M. Macek and R. Ratkiewicz: *Astrophys. J.* **773** (2013) L23.
- 24) S. N. Borovikov and N. V. Pogorelov: *Astrophys. J.* **783** (2014) L16.
- 25) P. C. Liewer, S. R. Karmesin and J. U. Brackbill: *J. Geophys. Res.* **101** (1996) 17119.
- 26) G. P. Zank, H. L. Pauls, L. L. Williams and D. T. Hall: *J. Geophys. Res.* **101** (1996) 21639.
- 27) L. A. Fisk and G. Gloeckler: *Astrophys. J.* **789** (2014) 41.

## 著者紹介

鷲見治一氏: アラバマ大学ハンツビル校宇宙プラズマ及び大気研究センター研究員。専門はプラズマ物理及び太陽圏物理。地球環境の変遷と生命の誕生・進化・盛衰の過程に興味を持っている。

(2014年8月29日原稿受付)

## Voyager 1 Entered the Interstellar Space

Haruichi Washimi

abstract: Voyager 1 (V1) spacecraft was launched in 1977, and after 35 year voyage in the heliosphere, V1 first crossed the heliopause, the outer boundary of the heliosphere, and entered the interstellar space in July-August, 2012. This was really a great event since all previous man-made satellites in the world were localized inside the heliosphere. It is summarized and explained the V1 observed scientific data in this paper.

# 形状可変な境界としてのシワ（リンクル）構造の展開



大園 拓哉

産業技術総合研究所ナノシステム研究部門†

界面は、多くの現象に物理的境界条件として関わる。例えば、表面の凹凸構造等の形状は、その界面を通過・反射する光の特性や、その表面上に置かれた液体の濡れ現象などに強く影響する。そのため、注目する物理現象と人工パターン等の構造との相関が様々な実験系で調べられてきている。その構造に影響された現象の出力状態、例えば、光の散乱具合や液体の濡れ具合といった状態、を外部からの刺激によってダイナミックに調節できることもある。この場合の動的な調節能は新たな機能となり、工学的応用の観点では特に価値がある。この動的機能の実現のために、例えば、その現象に強く影響する物理的境界条件、すなわち表面凹凸構造自体等、が可変なシステムが利用できる。また、このシステムは様々な物理現象と表面凹凸構造の相関を効率的に評価できる基礎実験のプラットフォームとしての活用も期待できる。そのシステムの典型例としてシワ＝リンクル構造を挙げる。

ここでリンクル構造とは、柔軟で平坦な基板の上に作成された比較的硬い表面薄膜の非破壊的な座屈 (buckling) により発生する表面凹凸構造である。この座屈は弾性力学における非線形変形現象の一つであり、ここでは表面薄膜の面内方向に加えられた圧縮ひずみにより誘発される。その凹凸構造は、サイン波状の滑らかな断面形状を示し、用いる材料の力学特性 (ヤング率等) や表面薄膜の厚みなどに応じた特定の周期を有する。結果としてその表面は凹凸の2次元ストライプパターンを呈する。この周期長はサブ $\mu\text{m}$ 領域でも容易に調整でき、また試料一面にリンクルが自発形成される特徴がある。この構造の理解と応用を目指し、

周期以外にも、“凹凸の深さ” やその“凹凸構造の面内異方性”等の構造の制御に関して研究が進む。それらは、座屈を誘起する面内圧縮ひずみの“大きさ”と“面内異方性”に、それぞれ関わるのが分かってきた。筆者等は、この構造を律する圧縮ひずみが、実験的に容易に可変である点に注目し、凹凸の深さやストライプ方向の異方性の可変性を明らかにしてきた。

この周期的凹凸構造であるリンクルは、多様な現象の物理的境界条件として利用できる。特にこの形状可変性を通じて、その境界条件を変えることができ、以下のように、物理現象の状態制御を可能とする。①光拡散現象：光の波長より十分大きい周期を有するリンクルでは、その表面で透過・反射する光は幾何光学的に拡散される。よって、リンクルの深さを調節すると、光拡散の程度が制御できる。②液体毛管現象：リンクルの溝をオープンな毛細管とみなすと、溝に液体が浸透する毛細管現象の発生条件は溝断面のアスペクト比に関係するので、リンクルの深さによって毛管現象を制御できる。③液晶配向現象：ネマチック液晶は表面凹凸構造の異方性に応じて配向しうるので、リンクルの溝方向の異方性を変化させることで、液晶配向を可逆的に変えられる。④摩擦現象：摩擦力は表面の形状に依存して変わるため、リンクルの形状変化で摩擦力や摩擦状態を調節できる。

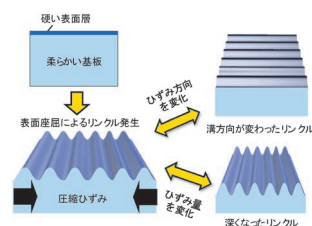
以上のように、この形状可変なリンクル構造は、多様な現象に対する可変な物理的境界条件として、その状態を変化・調節するために利用できる。また、これらの現象を元にして新たな科学的発見や応用も期待できる。

## —Keywords—

**座屈：**  
薄い膜・板 (や細長い棒) において面内方向 (もしくは長軸方向) に圧縮力が加わった場合に、力が作用していない方向へたわみ、曲がる現象。膜厚が小さい (薄い) 程に“曲がり”やすく、座屈が起こりやすいことは経験的に感じるのだが、この理由は、一般に微小変形に対して曲げを伴わない圧縮のひずみエネルギーが膜厚の1乗に比例するのに対して、曲げのひずみエネルギーはその3乗に比例するためと、定性的には理解できる。

**界面での光拡散：**  
屈折率の異なる物質間の界面において、光の波長よりかなり大きい構造がある場合、そこに入射した光は、その構造の局所的な傾きに応じて幾何光学的に屈折・反射される。その結果、透過光・反射光は構造の特徴に応じて拡散される。くもりガラスの不透明な状態等はこの現象の典型的な効果である。

**毛細管力：**  
細い管状構造 (や溝構造) の内側の液体が管に沿って浸透 (もしくは後退) する現象においてその液体の運動のために働く力。管の壁面における液体の接触角と管の断面の長さスケールに関係して決まる液体先端の気液界面の平均曲率と、液体の表面エネルギーに応じて、その力の大きさや向きが変わる。ガラス細管中の液体が重力に逆らってある所まで上昇する現象はこの力の効果として有名である。



† 2015年4月より、機能化学研究部門。



## 1. はじめに

表面や界面の形状は、それらが関わる物理化学現象に対して、バルクの物性よりも大きな影響を与える場合が多くある。例えば、凹凸による構造色や光拡散等の光学的な機能、鋭い突起構造が電界放出型電子源として働くことなどが知られる。さらに、液体の濡れ現象、液晶の表面配向現象やトライボロジーもこの表面や界面の構造が主役となる例であろう。よって科学と工学の両面から、様々な課題での表面・界面構造のそれぞれの現象への影響が調べられている。その多くの実験系では、人工的にデザイン・作製されるパターン構造を用い、研究対象としている物理現象とその構造との相関を調べることによって、境界形状の影響が明らかにされ、同時に物理現象の理解の深化や応用へと展開されている。例えば、光と界面構造の関係を明らかにした上で、くもりガラスなどの光散乱板が設計され応用に至る。さらには、その光の散乱具合を外部からの刺激によってダイナミックに調節できる調光窓等への応用展開も想定・要求されるであろう。一般に、このような動的機能は工学的応用の観点で特に価値がある。このような機構を実現する手段として、物理現象に直接強く影響する電場、磁場、温度、その他の一般的な入力外場刺激が考えられるが(液晶ディスプレイにおける電場がこの典型例であろう)、その他に、物理的な境界条件、例えば表面凹凸構造自体、が簡単な入力操作によって可変なシステムの利用があり、本稿で述べたいのは後者である。また、そのような境界形状が可変であるシステムは、様々な物理現象と表面凹凸構造の相関を効率的に評価できる基礎実験プラットフォームとしての利用も期待できる。以下では、そのシステムの典型例としてのシワ=リンクルとその構造可変性を説明し、この構造可変な境界に応じて状態変化する数例の物理現象：光拡散現象、液体毛細管現象、液晶配向現象、摩擦現象、への適用事例について概説する。

## 2. 構造可変な周期的凹凸構造：リンクル

一般にシワ(リンクル)というと、肌や布地など元来平坦であった表面が変形して生じた凹凸を想像するであろうが、本稿で扱うリンクルは、後述のように材料構成と発生過程に限定的な特徴がある。材料構成として、リンクル構造に変形する表面薄膜(薄板)が、それよりも柔らかい弾性体基板に密着した2層構造を想定する(図1)。この構造に表面方向へ加えられた圧縮応力が増加してゆく場合を考える。ここで表面膜の面内単純圧縮状態は、ある特定のひずみ以上になると不安定化し、表面膜が非破壊的に座屈(buckling)し、面外への変位が起こる、すなわち曲がる。この表面座屈現象により発生した波状構造をここではリンクルと呼ぶ。<sup>1,2)</sup> 仮に下部の柔基板がなく、表面膜のみの座屈を考えると、薄板を横から挟むと曲がる場合のように、近似的にサイン波の約半波長分の座屈形状を示す。しかし、柔基板が存在すると、その基板変形と硬い表面膜の変形が

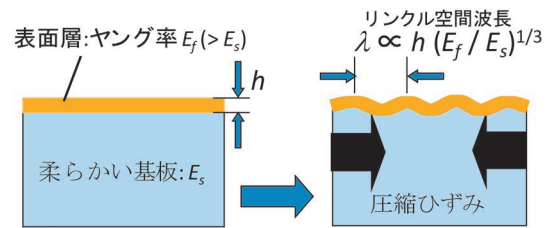


図1 リンクルの形成に必要な構造。基材のヤング率を $E$ 、硬い膜の厚みを $h$ 、発生するリンクルの空間周期を $\lambda$ 。面内圧縮ひずみによりリンクルが発生する。(出典：文献11から改変)

競合するため、特定のある短い空間波長が選択される。つまり、サイン波状のリンクルが自発形成する現象は、競合する“下部の柔基板の変形(圧縮・延伸・シア)”と“表面膜の曲げ変形”とが互いに妥協し合うことで、全体のエネルギーを極小化した結果であるといえる。従って、メカニカルな変形エネルギーに関わる表面膜の厚み( $h$ )や材料のヤング率(正確には2つの材料のヤング率の比： $E_f/E_s$ )がリンクルの特性空間波長( $\lambda$ )に関係する(図1： $\lambda \propto h(E_f/E_s)^{1/3}$ )。<sup>2)</sup> すなわち、リンクルはメカニカルな自己組織化<sup>3)</sup>により発現する空間パターンの一例といえる。(一方、表面膜の下に柔基板がない場合でも、重力の影響や、表面膜変形が何らかの境界条件により制限されているような場合には、例えば衣類、カーテン、絨毯に見られるように周期的もしくは乱雑なシワも発生しうる。)

このように、リンクルの形成に必要な要素は、“硬い表面膜が載った柔らかい基板”と“表面膜に対する圧縮ひずみの状態”のみであり非常に単純である。よって、リンクルの形成手段は図1に示した方法以外にも多くある。例えば、柔基板を延伸(屈曲でもよい)した状態で表面膜を形成させ延伸を解除する方法、化学的・熱的・光学的な刺激に応じて体積変化する材料を用い、薄膜に対する実効的な圧縮ひずみを発生させる方法等があり、多様な応用等の目的に応じて最適な作製手法を選ぶことができる。

またリンクルのストライプパターンの方向特性は、その圧縮ひずみの状態(2次元ひずみテンソル)に応じて変わる(例えば、1軸圧縮では単純な縞、等方圧縮では迷路状の複雑なパターンが発生)。最近、その空間波長が数百nmから数cm以上まで実験的に実現できることが分かり、物理学の視点から構造形成機構の研究<sup>4-8)</sup>やその制御技術や、高作製コストのトップダウン型リソグラフィーに依存せずに微細構造を得る方法としての微細加工応用、薄膜の硬さ計測等の観点等からの研究が進んでいる。<sup>9-10)</sup>

我々は、このリンクルが様々な外部摂動に対して示す凹凸構造の応答に興味を持ち、印加ひずみに応じたそれらの様々なストライプパターンやその遷移現象を主に研究してきた。<sup>11-15)</sup> 図2には、その構造可変性の概略を示す。例えばこのように、方向の揃ったリンクルを初期構造として、印加ひずみの変化で溝の深さを、また圧縮方向の変化で溝方向を、それぞれ可逆的に、しかもその凹凸周期を概して

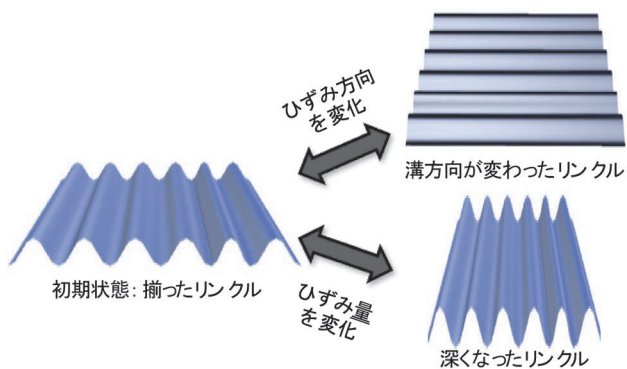


図2 外部ひずみ条件の変化によるリンクルの構造可変性(表面構造のみ表示).

保ったまま、変えることができる(途中の状態はヒステリシスが顕著な場合もある<sup>13,15</sup>). マクロスケールにおいては、我々の皮膚をつまみ、応力をかけ、リンクルを形成させることで同様な現象が観られ、その可変性が想像しやすいであろう。しかしこの可逆的で非線形な構造変化は、従来の微細加工によって作製された構造には通常見られない。つまり、従来の表面凹凸構造の多くは静的であり、たとえ外部ひずみが加わっても大よそ線形にひずむだけであるのに比べて、このリンクルの特殊な構造可変性は、特に微細スケールでの構造において、注目すべき特徴である。

以下では、このリンクルを形状可変な境界として用い、その境界形状に応じて状態変化する数例の物理現象：光拡散現象、液体毛細管現象、液晶配向現象、摩擦現象、へ展開する例を概説する。

### 3. 透過・反射光の状態の操作：光拡散制御

一般に固(液)-気境界では屈折率が急激に変化するもので、特に構造がある場合には、光(電磁波)は境界面から特異的な作用を受ける。例えば、可視光程度の周期構造に由来する構造色を示すモルフォ蝶や無反射機能を示すモスアイ構造等是有名である。<sup>16)</sup> このように微細な凹凸構造は人工物においても、界面における回折や屈折といった、光への作用を示すために光学部材としても利用されている。また、その特徴的な構造周期がサブミリメートル程度以上であれば、光拡散板や光ファイバーの動波路結合等に用いられるマイクロレンズアレイ、その光拡散による像のひずみを利用したほかし用の型板ガラス、ランダムな凹凸構造による散乱を利用したくもりガラスなど多岐に使われている。このような幾何光学で説明できる光散乱の状態を、リンクルの構造可変性によっても以下のように調節できる。

この目的のため、サブミリメートル程度の凹凸構造周期を呈する構造可変リンクルを、透明-半透明な高分子材料を用いて作製した。リンクルを発生させるために、小型万力を用いて1軸圧縮ひずみを印可し、1方向に揃ったリンクル構造の可逆的発生および、ひずみによる深さ制御を行う。このように構造を変化させると同時に、素子に可視光

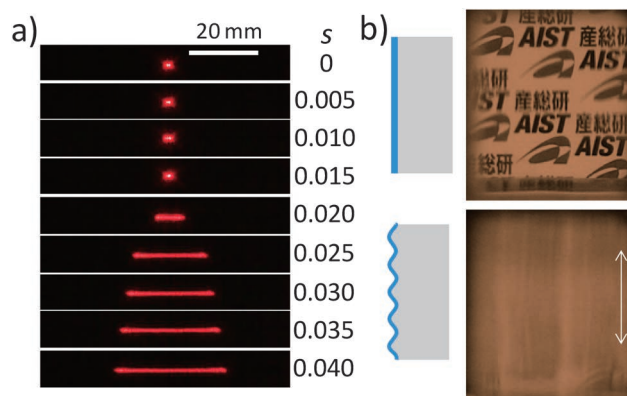


図3 (a)異なるひずみ $s$ 、すなわち異なるリンクル深さにおける、レーザー光の透過スポット像。ここで、ひずみ $s=0.02$ 以上でリンクルが発生している。(b)上：ひずみなし( $s=0$ )での通常の透過像、下：ひずみあり( $s=0.05$ )でのぼけた像。矢印の方向は1軸圧縮ひずみ方向を示す。

(波長：633 nm)を入射させた場合の透過光の散乱特性<sup>17)</sup>を観察した(図3(a))。試料にひずみを加えていくと、レーザー透過スポットが、リンクル構造の発生と同時に1方向に伸び、光拡散が起こっていることを示し、またその光拡散の程度は、印加ひずみを調節することによって、可逆的に制御できることが分かった。この結果は幾何光学の計算とも一致した。さらに図3(b)には、本サンプルを透かして見える像のぼかし効果を示す。レーザー光拡散の結果からも予想できるように、リンクルの溝方向に直交する方向(すなわち、圧縮方向)に像が拡がり、かつ結像できなくなることが分かる。この像の非結像の度合い(ボケ度合い)はリンクルのアスペクト比が上がる程、もしくは実像とリンクルの距離が遠くなる程に大きくなることも確認した。

ここでは、弾性体の変形に基づいた構造可変リンクルを用いることで、可視透過光に対して透明状態と1軸散乱状態をスイッチングできることを示した。スイッチングは試料に印可するひずみで制御でき、その拡散角もひずみに応じて連続的に変えられる。よって、この表面は、調光窓材や光学素子などへ向け、チューナブルな拡散板として利用可能である。また、拡散光状態の変化を検知することで、建材などのひずみセンサーとしての利用も考えられる。また、反射光に対しても非常に類似した定性的な結果が得られている。<sup>17)</sup>

### 4. 微小スケール液体形状操作：毛細管力制御

ハスの葉の撥水現象に代表されるように、凹凸構造が液体の濡れに及ぼす影響は大きい。その基礎的理解は、微細な溝構造による液体の濡れや保持等、表面制御技術にも関連し重要である。特に、有機エレクトロニクスや微粒子分散技術の発展に伴い、液体材料に特化した微細構造の作製法としてインクジェット技術など、表面上への液体の微細パターン化技術の需要も高まり、濡れ現象の制御が求められている。またマイクロ流路技術など、微小スケールでの液体の流動制御や形状制御も基盤技術として注目される。

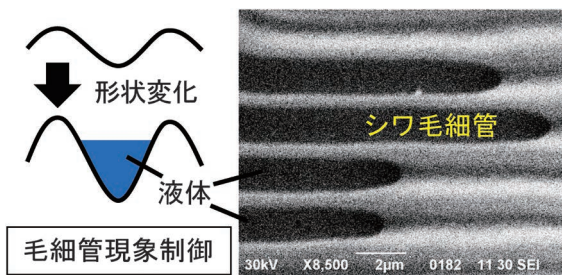


図4 溝の深さを変化させることで毛細管力を誘起し、液体が溝のみに浸透する。(右：非蒸発性のイオン液体の浸透状態の電子顕微鏡写真)。

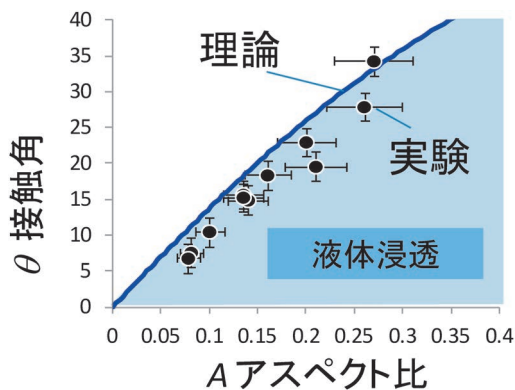


図5 リンクル上での毛細管力の発生による浸透現象の閾値曲線。接触角とアスペクト比(溝の深さ/周期)が右下の着色領域内の場合にリンクルの溝に毛細管力が発生する。(出典：文献18から改変)

以下では、その一例として、微小スケールでの構造可変リンクルの溝における毛細管現象を紹介し、その結果を微小スケールでの液体の形状操作技術に活用する例<sup>18)</sup>を紹介する。

ここでは、リンクルの溝が液体に対してオープンな毛細管(閉じた管ではない)として働くことに注目する。まず、数ミクロンの幅(周期)のリンクル表面にそれと比べて大きいサイズの液滴をのせた状態で圧縮ひずみを加えていき、リンクルの溝を徐々に深くする。するとある条件で溝に一定の幅(空間波長と同程度:  $\mu\text{m}$ )で液体が浸透を始める(図4)。これは溝部分の濡れ界面(3相線)付近の気液界面において、毛細管力が発生した結果と解釈できる。つまり、形状可変性(溝の深さの変化)を利用した毛細管力の発生制御を示している。一般の毛細管現象の発生条件は、液体と毛細管表面の接触角にも依存する。今回の場合も、液体と表面材質の組み合わせに応じた接触角が、毛細管力が現れる条件に影響するはずである。そこで、様々な液体に対して、その毛細管力の発生条件を調査した結果、図5に示す一般的な相図を得た。定性的に予想されるように、溝への浸透条件は接触角が高い程、深い溝を要することが分かる。またこの結果は、表面エネルギーを考慮に入れた理論から得られる浸透条件ともよく合致する<sup>18)</sup>(ここで、液柱の先端が  $dx$  の距離を進んだ場合の表面エネルギー変化が  $dE = \gamma D dx$  と書け、ここで  $\gamma (> 0)$  は液体の表面エネルギー、 $D$  はリンクルの幾何形状と平衡接触角から数値的に計算で

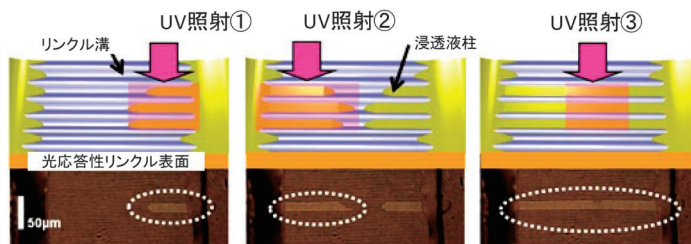


図6 光応答性リンクル上で、部分的な照射により平衡接触角の低下を促し、浸透した液体柱の形成位置を自在に制御する例。この例は、左と右の液溜めを、その間の複数の溝に段階的に液柱を形成することで、繋ぐ操作。(出典：文献20から改変)

き、結局  $D$  の正負によって液柱が自発的に進展するか否かを評価している)。よって、この一般的な相図を用いることで、浸透ポンプや、様々な液体の溝に浸透させた微小液体柱のアレイ(ラインアンドスペースパターン)の作製も可能となる。詳細は省くが、この液体パターンはさらに、金属のナノリボン構造を作製する鋳型としても用いることができる。<sup>19)</sup> また、この相図からは溝構造の可変性だけでなく、接触角を変化させることで毛細管力を制御できることが読み取れる。実際に、光に応答して表面エネルギーが変化し、平衡接触角を変えられるリンクル構造を用いると、照射した場所のみ毛細管力を発生させることができ(図6)、液体の空間的に精緻な微細操作法としても利用できる。<sup>20)</sup>

さらにリンクルの形状可変性を利用すると、溝に安定化された液体の微細形状を変化させることができ、例えば、液体柱が存在する状態で、その溝方向に付加的に1軸圧縮ひずみを加えることで、分断してドット状(液滴)にも成形できる。<sup>21)</sup> このドットは  $10^{-18}$  L 程度の体積になり、反応場や貯蔵庫としての微量化学システム、バイオチップ、光学素子としての利用が期待できる。また、溝に浸透する液体として液晶を用いると、その特殊な境界条件に応じて液晶内部に様々な新規の自己組織化配向構造が形成され、<sup>22-25)</sup> さらにそれらは気体試料に対して高感度かつ簡便なキラルセンサー<sup>26)</sup>(ガス中のキラルの有無とその掌性の検知)として利用できるまでに発展している。

このように、液体に対する境界条件である微細表面構造の変化により液体形状が微小スケールで操作できるという新しい概念は、既存の液体パターンニングやマイクロ流路技術分野との融合により新しい実用応用が期待できる。また科学的にも、特殊な微小領域の閉じ込められた液晶を含めた液体の内部状態を調査するための利用が期待できる。

## 5. 液晶の表面配向方向の制御：液晶配向スイッチング

液晶配向技術は、広く普及している液晶ディスプレイ装置はもとより液晶の科学研究においても重要な基礎要素である。ここでは構造可変のリンクルを利用したネマチック液晶配向およびその配向方向を変更する新技術に触れる。

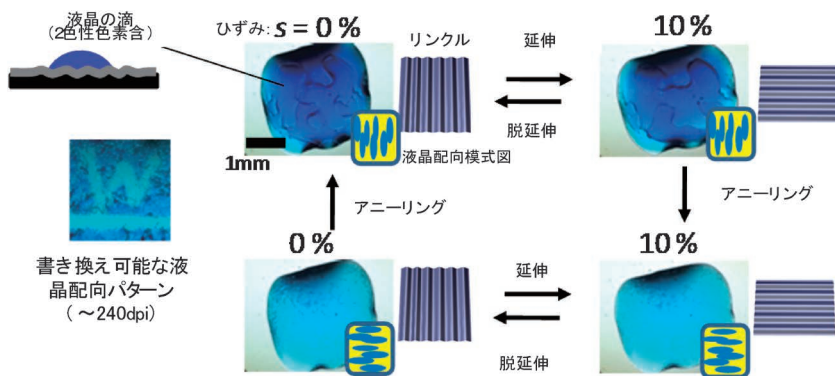


図7 リンクルの溝方向変化とアニーリングを組み合わせた液晶配向変化サイクル. 右のサイクルでは室温で溝方向を90度変化させた後、液晶相転移温度以上でアニーリングし室温までクエンチすることで液晶配向方向を繰り返し変えることができることを示す. 色の濃さが液晶配向方向と対応している. 左の写真では、局所的な加熱による部分的配向方向変化を起こし配向の微細パターン化を行った例を示す. (出典：文献28から改変)

ネマチック液晶の配向技術として、電場などバルク液晶に直接作用させる方法と、その界面（境界条件）からの配向誘起法が知られている。後者の界面配向の起源は主に2つあるとされ、①分子レベルでの異方性（例えば界面の高分子鎖の向きなど）が各液晶分子に作用し、配向方向が規定されるマイクロ機構と、② $\mu\text{m}$ 程度以下の溝状の異方的凹凸構造の近傍で、液晶弾性エネルギーを下げるために溝方向に配向するマクロ機構とがある。<sup>27)</sup> よって、溝方向が揃ったリンクルは、②の機構を通じて液晶配向させる境界面として利用できる。ここで、液晶配向方向を決定するリンクルの溝方向の変可性を用いて（通常の液晶ディスプレイ等とは異なり、非電磁氣的に）液晶配向を変化させることを試みた。しかしながらこの場合、一度配向すると、その配向方向が界面付近における塑性的要因によって固定化されてしまう効果、いわゆる表面配向メモリー効果、が強いため、溝方向を単純に変えても、液晶方向が溝方向へ向きなおす現象は見られなかった。そこで、等方相温度における熱アニーリングを行うと、上記のメモリーがリセットできることを見出し、その操作を組み入れることで、変化させた溝方向への液晶の再配向を促すことができた（図7）。<sup>28)</sup> 一般に、液晶配向変化は、電場や磁場で行うことが多いが、この方法は、液晶に対する物理的境界条件である（通常変えられるとは思われていなかった）表面形状を変化させることでバルク液晶の配向方向を変化させられる点で、液晶配向の全く新しい制御技術である。また、この概念を応用し、溝方向変化と光による空間的な局所加熱を利用したアニーリングとを組み合わせると、液晶配向の微細パターン化（偏光に対する色/光透過率のパターン化）ができることも分かり、書き換え可能な情報書き込み媒体（感熱紙）としての利用の可能性を示した。<sup>28)</sup>

## 6. リンクル構造上での摩擦力：可変摩擦力

一般に、固体間の摩擦現象は2つの表面の力学的相互作用に基づくため、その表面形状は摩擦のダイナミクスや摩擦力そのものに大きく影響する。工学的に重要なトライボロジーとしては、発電や輸送体などパワートレインにおける硬い材料間の課題があるが、近年、タイヤや構造部材のマルチマテリアル化等のように樹脂等のソフトマテリアル

の界面現象も重要になってきている。<sup>29)</sup> また、ヤモリの足先に存在する柔軟で微細な突起の構造とその変形能が、天井をも歩行できる接着能に寄与する、という点を工学的に模倣したヤモリテープの例<sup>30)</sup>に代表されるように、バイオミメティクスの観点でも表面構造を有するソフトマテリアル界面のトライボロジー研究が注目されている。また、指先の触覚においては指紋のような柔軟な凹凸構造の接触・変形<sup>31)</sup>がその移動速度<sup>32)</sup>とともに重要であるとされ、ヒューマンマシンインターフェースの観点で研究されている。このように柔らかい周期的凹凸構造は、大きな変形と構造に由来する特異的なひずみ分布が介在し、それらが非線形に摩擦現象に影響するために、複雑な効果が期待される。この最後の節では、柔らかく変形できる凹凸界面での摩擦現象のモデル系として、リンクル上での摩擦挙動と構造変化による摩擦挙動制御について紹介する。

先行例として、柔らかい類似のリンクル状構造での摩擦は米国から報告がある。<sup>33)</sup> それによると、凹凸構造が存在すると、凹凸がない場合に観測された高い摩擦力の原因であるSchallamach波<sup>34), \*1</sup>が抑制される結果、平均摩擦力が下がるという。この例では、Schallamach波の発生と凹凸構造の関係に着目している。しかしSchallamach波が元来顕著に観られないような材料表面（凝着しにくい材料）の場合に、柔らかい凹凸構造が摩擦に対してどう影響を及ぼすかは自明ではなかった。よって、この点を系統的に調査するため、同じサンプルにおいてその凹凸構造を可逆的に調節可能な可変リンクルを用い、シワの個々の凹凸の変形や摩擦圧子との位置関係と摩擦力の振動的現象の対応を調べた。<sup>35)</sup> 実験には、pin-on-plate型の摩擦試験機を用い、その摩擦界面の変形は、反射型顕微鏡を用いて、摩擦力の測定と同時に観察した（図8）。

図9は、深さの異なるリンクルに対し、それぞれ異なる垂直荷重で得られる摩擦プロファイルと観察像の典型例を示す。まず観察像からは、サンプル表面の変形領域が荷重に伴って予想通り増大することが分かる。大きく変形する

\*1 Schallamach波：みかけの接触界面において、直接接触している部分以外のはがれた部分が、みかけの接触面内で移動する波はSchallamach波と呼ばれており、ゴムのような軟らかな弾性体と、硬い基板の摩擦でよく見られる。

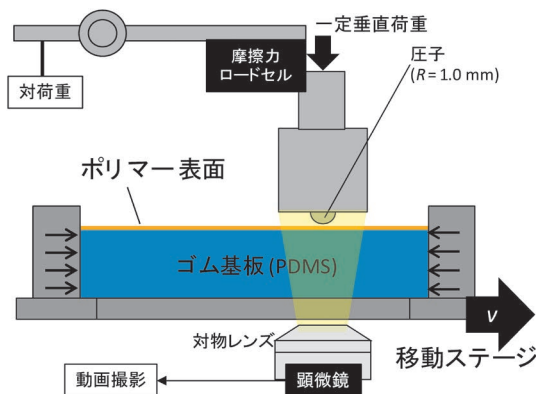


図8 倒立反射型顕微鏡に組み込んだpin-on-plate型の摩擦試験機の概略。(出典：文献35から改変)

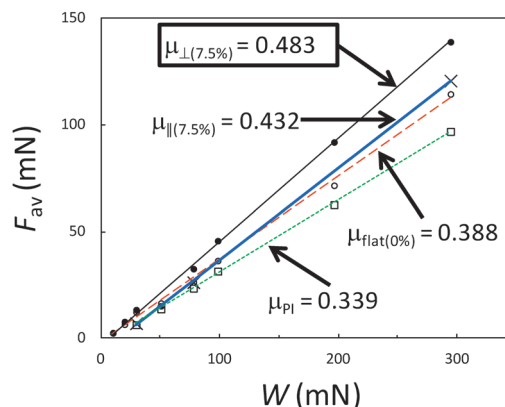


図10 様々な表面状態での摩擦力  $F$  の時間平均値の垂直荷重  $W$  に対するプロット。直線で近似した摩擦係数を図中に示している。(出典：文献35から改変)

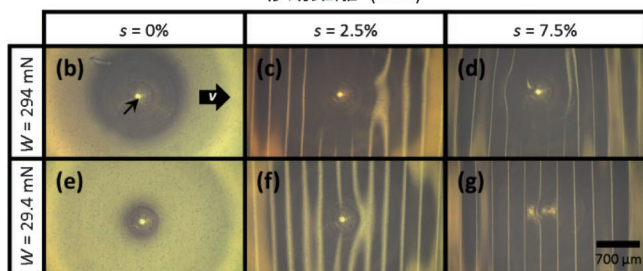
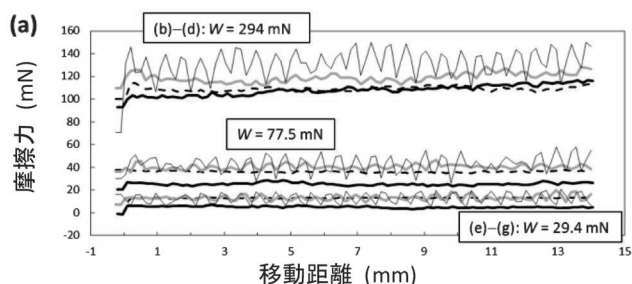


図9 典型的な摩擦力プロファイルと接触状態の像。(a) 3つの異なる深さのリンクル上での、3種類の垂直荷重  $W$  における摩擦プロファイル。より深いリンクルにおいて摩擦力振動がより明確になる。(b)–(g) 3つの異なる深さのリンクル上での、2種類の垂直荷重  $W$  における摩擦中の像の例。(出典：文献35から改変)

リンクルの凸部の数は荷重によって1~2から2~3個まで変わる。また、摩擦プロファイルからは、リンクルがない平坦な場合に、Schallamach波に由来する顕著な摩擦振動は、そもそも観測されないことが分かる。さらに、平均摩擦力も荷重に伴い増加することや、摩擦方向に対してリンクルが垂直に配列している場合にリンクルの周期に応じた摩擦力振動も確認できる。また、この振動の振幅はリンクルのアスペクト比(溝の深さ/周期)の増加とともに増大する。摩擦力の平均値  $F_{av}$  に対する荷重依存性を図10に示す。最も深いリンクル(印かひずみ:  $s = 7.5\%$ )と平坦表面、および平坦ガラスにリンクルと同じ表面ポリマー(PI)フィルムを接着した表面の摩擦係数( $\mu$ )を比較すると、摩擦方向に対してリンクルが垂直( $\mu_{\perp}$ ) > 平行( $\mu_{\parallel}$ ) ~ 平坦( $\mu_{flat}$ ) > PIフィルム( $\mu_{PI}$ )の大小関係となった。まず、 $\mu_{flat} > \mu_{PI}$  からPIフィルムの下地の影響、すなわち、柔らかい基板の変形に起因する大きな摩擦散逸の効果が読み取れる。次に、 $\mu_{\parallel} \sim \mu_{flat}$  であるが、リンクルに平行な場合と平坦な場合で

は、摩擦プロファイルにおいても、ともにSchallamach波の影響が顕著ではないことから(ここでは図示していない<sup>35)</sup>)、定性的に同様な摩擦挙動と考えられる。

一方、 $\mu_{\perp} > \mu_{\parallel}$ の結果は、摩擦方向に対してリンクル方向が垂直の場合に見られる摩擦プロファイルの振動と関連させて理解する必要がある。この場合、摩擦力の振動とリンクルの変形を関連付けて解析すると、圧子が凸部を押し潰していく場合に摩擦が増加していき、凸部を超えると摩擦が徐々に減少することが分かった(明確な鋸歯状プロファイルを示すstick-slipとは異なる)<sup>35)</sup>。よってこの平均摩擦の増加は、凹凸のかみ合わせによって摩擦力が増大するクーロンインターロックの効果<sup>36)</sup>で主に説明できることが分かる。しかし、これまでのクーロンインターロックのモデルでは、あまり大きな変形は考えておらず、より詳細な解釈は課題として残り、理論面での今後の進展を期待している。それでも本結果は、リンクルの凹凸構造を変化させることで、摩擦異方性の発生や摩擦力の約20%を可逆的に制御できることを示し、すなわち、摩擦性能をスイッチングできる表面として、構造可変リンクルのトライボロジー分野での応用可能性を示している。今後はそのような応用を見据え、圧子サイズや材質、摩擦速度や、4章での溝部に存在する液体の潤滑作用、リンクル表面材質<sup>37)</sup>等を含め系統的に調査していく予定である。

## 7. おわりに

メカニカルな自己組織化により発生する表面凹凸構造であるリンクルを紹介し、その形状可変な境界表面を用いて、以下のいくつかの物理現象への構造境界条件としての影響とその境界形状の変化によってその現象の状態がどのように変調されるかを概説した。リンクル構造の変化に応じて、第一に、光路が幾何光学的に変更されることで光散乱の程度が制御でき、第二に、その凹凸の溝において液体に働く毛細管力が変わり、液体の溝への浸透現象が制御でき、第三に、液晶と接触させると、液晶弾性エネルギー最小化に要請される溝方向への液晶配向が(熱アニーリングと組み

合わせることで) 変更でき, 第四に, 横移動する摩擦圧子と凹凸構造の相互作用が変わるため, 摩擦振動プロファイルおよび摩擦力が調整できる. さらに, 特に毛細管力を制御する技術を基礎にすることで, 液体の微細パターン化の方法や, キラルガス検知の方法など, 新しい技術要素も予想外に得られた. また, 可変なリンクル構造に基づく本稿で挙げた複数の現象や機能は, 生物系においてその表面の微細な構造が様々な多機能性(例えば, 撥水性, 意匠性, 熱交換特性等)を有している点に関連性がある. この多機能性は, 例えば生物が自然環境で活動する上での, 様々な目標を同時に達成する場合に特に重要である. またこの多機能性を踏まえた工学設計指針の観点は, 最近盛り上がりを見せる, 自然からの学びを工学やものづくりに活用する取り組み(バイオミメティクス)においても注目すべきであろう. また本稿の例以外でも, リンクルのような物理的境界の形状を変化させることによって物理状態が変更できる現象は多くあるだろう. 今後, 科学的もしくは工学的により有意な結果を生む系の実現にこの形状可変なリンクルが利用されることに期待している.

本稿の内容の一部は以下の主な共同研究者の協力に基づき成されたもので, ここに感謝する: 物部浩達氏, 清水洋氏, 内田就也氏, 横山浩氏, 福田順一氏, 山口留美子氏, 福田伸子氏, 山本貴広氏, 鈴木航祐氏, 武仲能子氏, 北畑裕之氏, 平井悠司氏, 下村政嗣氏, 山口智彦氏.

#### 参考文献

- 1) H. G. Allen: *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels* (Pergamon, New York, 1969).
- 2) N. Bowden, S. Brittain, A. G. Evans, J. W. Hutchinson and G. M. Whitesides: *Nature* **393** (1998) 146.
- 3) 下村政嗣, 山口智彦, 編: 『自己組織化ハンドブック Handbook of Self-Organization』(NTS出版, 2009).
- 4) D. Moldovan and L. Golubovic: *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 2884.
- 5) R. Huang and Z. Suo: *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 1135.
- 6) E. Cerda and L. Mahadevan: *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 74302.
- 7) N. Uchida: *Physica D* **205** (2005) 267.
- 8) F. Brau, *et al.*: *Nat. Phys.* **7** (2011) 56.
- 9) C. M. Stafford, *et al.*: *Nat. Mater.* **3** (2004) 545.
- 10) J. Genzer and J. Groenewold: *Soft Matter* **2** (2006) 310.
- 11) T. Ohzono and H. Monobe: *J. Colloid Interface Sci.* **369** (2012) 1.
- 12) T. Ohzono and M. Shimomura: *Phys. Rev. B* **69** (2004) 132202.
- 13) T. Ohzono and M. Shimomura: *Langmuir* **21** (2005) 7230.
- 14) T. Ohzono, S. Matsushita and M. Shimomura: *Soft Matter* **1** (2005) 227.
- 15) T. Ohzono: *Chaos* **19** (2009) 033104.
- 16) Y. Uozu: in *Design for Innovative Value towards a Sustainable Society* (2012) pp. 915-917.
- 17) T. Ohzono, K. Suzuki, T. Yamaguchi and N. Fukuda: *Adv. Opt. Mater.* **1** (2013) 374.
- 18) T. Ohzono, H. Monobe, K. Shiokawa, M. Fujiwara and Y. Shimizu: *Soft Matter* **5** (2009) 4658.
- 19) T. Ohzono, H. Monobe, N. Fukuda, M. Fujiwara and Y. Shimizu: *Small* **7** (2011) 506.
- 20) H. Monobe, T. Ohzono, H. Akiyama, K. Sumaru and Y. Shimizu: *ACS Appl. Mater. Interfaces* **4** (2012) 2212.
- 21) T. Ohzono and H. Monobe: *Langmuir* **26** (2010) 6127.
- 22) T. Ohzono and J. Fukuda: *Nat. Commun.* **3** (2012) 701.
- 23) T. Ohzono and J. Fukuda: *Soft Matter* **8** (2012) 11552.
- 24) T. Ohzono, J. Fukuda, K. Suzuki and T. Yamaguchi: *Phys. Rev. E* **86** (2012) 030701 (R).
- 25) T. Ohzono, Y. Takenaka and J. Fukuda: *Soft Matter* **8** (2012) 6438.
- 26) T. Ohzono, T. Yamamoto and J. Fukuda: *Nat. Commun.* **5** (2014) 3735.
- 27) D. W. Berreman: *Phys. Rev. Lett.* **28** (1972) 1683.
- 28) T. Ohzono, H. Monobe, R. Yamaguchi, Y. Shimizu and H. Yokoyama: *Appl. Phys. Lett.* **95** (2009) 014101.
- 29) 山口哲生, 森下真年, 土井正男: *日本物理学会誌* **66** (2011) 443.
- 30) A. K. Geim, *et al.*: *Nat. Mater.* **2** (2003) 461.
- 31) Y. Nonomura, *et al.*: *J. R. Soc. Interface* **71** (2012) 1216.
- 32) E. Wandersman, R. Candelier, G. Debrégeas and A. Prevost: *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 164301.
- 33) C. J. Rand and A. J. Crosby: *J. Appl. Phys.* **106** (2009) 064913.
- 34) A. Schallamach: *Wear* **17** (1971) 301.
- 35) K. Suzuki, Y. Hirai and T. Ohzono: *ACS Appl. Mater. Interface* **6** (2014) 10121.
- 36) M. J. Adams, B. J. Briscoe and T. K. Wee: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **23** (1990) 23.
- 37) T. Ohzono, Y. Hirai, K. Suzuki, M. Shimomura and N. Uchida: *Soft Matter* **10** (2014) 7165.

#### 著者紹介

大園拓哉氏: 2000年東工大・生命理工卒(工学博士), NIST(米), 理研を経て, 現在, 産総研にて研究職,(経産省, 研究開発専門職兼務). 自己組織化リンクル構造を基盤に液晶・液滴・摩擦・光機能などのソフトマター研究に従事. 最近は科研費新学術領域「生物規範工学」(No. 24120003)に従事.

(2014年9月7日原稿受付)

#### Wrinkles as Shape-Tunable Boundaries

##### Takuya Ohzono

abstract: Recently, spontaneously formed wrinkles on hard coating-capped elastomer surfaces have attracted the attention of both the scientific and applied research communities, because of their simple fabrication process and practical potential in diverse applications as a shape-tunable boundary. The depth and stripe orientation of the wrinkle can be controlled by applying compressive strain. Our group has focused on tuning the structure of wrinkles by exerting additional strain. This is almost impossible for micropatterns fabricated on a hard, *e.g.*, Si wafer; therefore, our technique is based on a soft substrate and the non-linear response of the system to external strain. The dynamic shape-tunability of the micropatterns shows potential for new applications, in which switching states of a system could be induced by a change in the physical boundary conditions, namely, the shape of wrinkles. This article summarizes our recent work on shape-tunability of wrinkles and the application of shape-tunable wrinkles to tunable optical diffusion, liquid manipulation, liquid crystal alignment, and tunable friction. Our research demonstrates that shape-tunable wrinkles provide new physical boundary conditions that can control the states of the bounded material and of phenomena that occurs at/through the interface. We expect that many other systems that interact with the tunable boundary will lead to the discovery of new phenomena and technologies.

# 感熱性高分子水溶液の相分離・ゲル化・レオロジー



田中文彦

東京農工大学農学研究院環境資源物質科学専攻,  
神奈川県産業技術センター

水溶性高分子ポリイソプロピルアクリルアミド (PNIPAM) は、昇温により 32°C 付近でランダムコイルから粒状高分子 (グロビュール) に転移する逆コイル-グロビュール転移 (iCG 転移) を引き起こす。転移温度が体温に近く、高温で凝集する非常に鋭い逆転移であるため PNIPAM は感熱 (感温) 高分子と呼ばれ、医学、薬学、工学などに広く応用されている。

PNIPAM の感熱性の分子論的起源は永く謎であったが、我々は最近水和の協同性に由来する鎖のシャープな脱水和が原因であることを指摘し、高分子の協同水和の理論モデル化を行った。このモデルに基づく水和量、鎖の平均両末端間距離、相分離線などの計算により、実測された iCG 転移の特性と、そのマクロな現れである高温相分離現象 (LCST) を説明するのに成功した。相分離を示唆する LCST 曇点曲線は、第 2 溶媒の混合、加圧、金属塩の添加などに敏感に反応して移動するので、iCG 転移や相分離の制御法には多くの可能性がある。このような特性を有する PNIPAM を架橋剤を用いて化学架橋したマクロおよびマイクロゲルも当然ながら感熱性を有し、32°C 付近で急激な体積相転移が起こる。

水溶性高分子の両末端を疎水基 (短いアルキル鎖やフッ化炭素鎖) で疎水化すると、末端基の疎水凝集により会合したミセルを架橋点とする高分子ネットワークが形成される。両末端疎水化水溶性高分子はテレケリック会合高分子と呼ばれている。鎖の分子量を揃えると構造が均一なネットワークが形成されるので、疎水会合や可逆ゲルのレオロジー研究に格好のサンプルとなり、これまで多くの研究が行われてきた。末端疎水化 PNIPAM (tel-PNIPAM) の水溶液中の会合構造は階層性を有し、希薄溶液中で

のフラワーミセル、準濃厚領域でのミセル架橋ネットワーク、高温スピナル領域で現れるメソグロビュール (100 nm 程度の巨大会合体)、さらに高温でのメソグロビュールのフラクタル凝集構造などがあり、光散乱実験、中性子散乱実験、DSC 測定、蛍光測定などにより詳細が研究されている。

テレケリック会合高分子のミセル架橋点では末端鎖の引き抜きや会合による解離-再結合を繰り返すことができるため、ネットワーク全体としては連結しているにも拘わらず、ブリッジ鎖と末端自由鎖 (ダンダリング鎖) の間の転換による特異な運動様式で流動することができる。このような 2 状態間の鎖の組み替えによる流動を記述するために、ゴム弾性理論を動力学に拡張した「組み換え網目理論」を構築した。これにより、架橋ミセルの熱揺動や拡散、主鎖のコンホメーション変化などが溶液の粘弾性に及ぼす効果を精密計算し、レオロジー測定結果と比較することができるようになった。

溶液は線型領域では単一緩和時間を持つマクスウェル流体のように振る舞い、緩和時間は末端鎖の結合解離時間で支配されること、剪断速度とともに粘度が上昇するシックニング現象の原因がブリッジ鎖の非線型伸長によること、剪断開始流においては流動による硬化現象や応力極大現象が生じること、高剪断速度領域で流動によるネットワークの破断が見られること、などが明らかになった。

本稿では新規に合成した (tel-)PNIPAM を用いて、相分離とレオロジーについて汎用水溶性高分子 PEO と比較しながら系統的に行った研究を紹介し、水溶性高分子に関する最近の研究動向を解説するものである。

## —Keywords—

**コイル-グロビュール転移:** 溶液中の高分子鎖は、溶媒との相互作用により全体が広がったコイル状態や、凝縮したグロビュール状態を取る。コイル-グロビュール転移とは、溶媒の温度や PH 等を変化させることにより、高分子鎖がコイル状態からグロビュール状態へ変化することである。

**良溶媒・貧溶媒:** 溶液中の高分子が、高分子鎖内部の相互作用を無視できる理想鎖の状態と比較して広がった状態を取り溶解し易い溶媒を良溶媒、凝集した状態を取り溶解し難い溶媒を貧溶媒と呼ぶ。

**曇点:** 濃度が均一で透明な一様相から、温度を変化させ共存曲線にぶつかると相分離が起こり、均一な溶液とは異なる濃度の相が少量現れ溶液が濁る。この温度を曇点と言う。

**上限臨界相溶温度、下限臨界相溶温度:** 共存曲線より高温側で均一な相となる場合の相転移温度を上限臨界相溶温度、低温側で均一な相となる場合の相転移温度を下限臨界相溶温度と言う。

**フラワーミセル:** テレケリック鎖が鎖末端の疎水基の凝集により形成する自己ループ (花弁に対応) がさらに何個か凝集して形成する花型のミセル。会合数 (花弁数) は疎水基の凝集力によるが、通常 10~20 程度である。

## 1. はじめに

近年、環境への負担軽減のため、有機溶媒の使用を極力避けた水溶性高分子の機能化に興味を持たれている。水溶性高分子は合成高分子と天然高分子に大別でき、それぞれさらに中性（非イオン性）高分子と高分子電解質に分けられる。本稿では中性合成高分子に焦点を絞り、高温で凝集する非常に急激な逆コイル-グロビュール転移（iCG転移）のために鋭い感熱性を示すポリイソプロピルアクリルアミド（PNIPAM）（図1右上）を取り上げ、汎用水溶性高分子ポリエチレンオキシド（PEO）（図1右下）と比較することにより、その特異な溶液物性の分子論的起源を探る。（図中の  $n$  は高分子の重合度（鎖上のモノマー個数）を表し、以下本稿では記号  $n$  は重合度の意味で用いる。）

PNIPAM, PEOその他の主な水溶性高分子（ポリビニルアルコール（PVA）、ポリビニルメチルエーテル（PVME）、メチルセルロース（MC）など）はすべて下臨界相溶温度（LCST）を持つ高温相分離型の水溶液となり、溶解性、ゲル化能、外力や流動場への応答、イオンとの相互作用、圧力効果などに関し、それぞれの個性に応じて多くの目的に供されている。これらの個性は鎖上で隣り合う水和水（束縛水）間の相互作用による水和水の協同性という視点からみると系統的に整理することができる。

以下では、まず単一鎖のコンホメーション転移、張力-伸長曲線、水和水構造の解析から始め、多鎖問題である溶液の相分離、曇点曲線の位置と形、混合溶媒効果、環境応答としての塩添加、加圧などによる曇点曲線の変形と移動、疎水化による機能化、ゾル-ゲル転移、レオロジー特性について、理論予測と実験データとの比較検討を通じて機能材料としての感熱性高分子の可能性を探索する。

## 2. 純水中の感熱性高分子—水和水と相分離—

高分子水溶液はしばしば奇妙な液-液相分離領域を持つ相図を示す。例えば、PEO水溶液は中間温度領域で閉じたループ型の相分離領域（相分離ループ）を示し、ループの境界である共存線は分子量に敏感に依存し、分子量の増加とともにループは拡大する。<sup>1,2)</sup> ループの上限に存在す

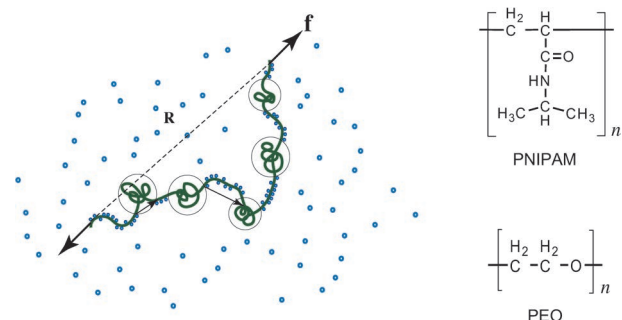


図1 (左) 協同水和水により真珠の首飾り型コンホメーションをとるPNIPAM鎖。真珠部分は疎水基で凝集した部分鎖、コイルの部分は水和水したランダムコイル状の部分鎖である。両末端に張力  $f$  をかけて伸長すると、グロビュールから部分鎖が引き抜かれ水和水する。(右) PNIPAM, PEOの化学構造。

る上限臨界相溶温度（UCST）が高分子量の極限で通常のテータ温度に漸近するのは対照的に、ループの下限に存在するLCSTは、逆テータ温度に漸近する。また、相分離ループは4 kbar程度の圧力で急激に拡大し、高分子は常温で水に溶解しなくなる。<sup>3,4)</sup>

このようなPEO水溶液に特異な相挙動は、溶媒である水分子が高分子鎖へ水和水（水素結合）することが原因であることが実験理論両面から示された。<sup>3-5)</sup> その後、分子動力学シミュレーションにより、PEO鎖は常温では平均的に11<sub>2</sub>（11モノマーで2ターンの周期）構造の緩いヘリックス構造をとり、ヘリックスのピッチ（ $\approx 1.7$  nm）が水分子の大きさと一致するため、水分子は2個のプロトンが鎖上で隣接する2個の酸素原子を両手で掴むような構造で水和水することが示された。<sup>6)</sup> 自由に運動している水分子（自由水）と対比させて、結合している水分子を水和水と呼ぶ。PEOの場合、水分子はヘリックスのポケットにランダムかつ互いに独立に吸着するので協同性は現れない。水和水は水分子間の水素結合と競合し、それほど強固なものではないので、ループ型相分離領域に対応する温度領域（100～200°C）では非結合性のファンデルワールス（vdW）相互作用が支配的で、低温凝集型の通常メカニズムにより相分離する。しかしながら、温度の低下とともに水和水が増加し、水和水が強固なものになるので、鎖は水分子の衣を着た複合分子となり、環境体である水に馴染んで溶解する（再帰溶解）。また加圧すると水和水の一部が消滅し、総数が減少するために相分離領域が拡大する。<sup>3,7)</sup>

### 2.1 PNIPAM鎖の温度誘起コイル-グロビュール転移

これに比べて、感熱性高分子PNIPAMは側鎖に疎水性のイソプロピル基を有するので、水分子がその根元付近のアミド基に水素結合する際に協同性が現れる。すなわち、1個の水分子が水和水すれば、その場所の疎水基が移動し、隣接するアミド基に水分子が結合し易くなり、水素結合の連鎖が形成される傾向が生じる。逆に、脱水和水の場合には水分子がランダムに1個ずつ解離するのではなく、連鎖として集団脱水和水するため、露出したイソプロピル基の疎水凝集が急激に進行する。このような連鎖性的水和水は協同水和水と呼ばれる。<sup>8)</sup>

図1(左)に示すように、高分子は脱水和水により疎水凝集したグロビュールを水和水膨潤したランダム鎖で結合した真珠の首飾りのようなコンホメーションを取る。<sup>8,9)</sup> 我々は、鎖に沿ってモノマー  $\zeta$  個からなるグロビュールが  $i_\zeta$  個と、モノマー  $\zeta$  個からなる水和水コイルが  $j_\zeta$  個が、交互に並んだモデルを用いて単一鎖のコンホメーション転移の解析を行った。<sup>8,10,11)</sup> 鎖は指数  $i \equiv \{i_1, i_2, \dots\}$  と指数  $j \equiv \{j_1, j_2, \dots\}$  で指定され、分配関数は

$$Z_n(T) = \sum_{i,j} \frac{(\sum i_\zeta)! (\sum j_\zeta)!}{\prod i_\zeta! \prod j_\zeta!} \prod_\zeta (\lambda_\zeta)^{i_\zeta} (\eta_\zeta)^{j_\zeta} \quad (1)$$

である。右辺の組み合わせ因子は  $(i, j)$  で指定された連鎖



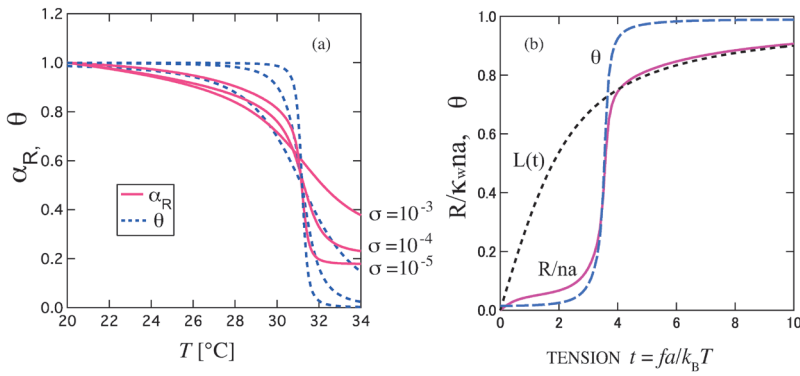


図2 (a) 水溶液中でのPNIPAM鎖の膨張因子 $\alpha_R$  (実線)と水和 $\theta$  (点線)を温度に対してプロットしたものである。協同性パラメータ $\sigma$ の値を変えて計算値をグラフにしてある。協同性が強いほど変化がシャープになる。(b) 真珠の首飾りコンホメーションの張力-伸長曲線。グロービュールの引き抜き領域で張力にプラトーが生じる。 $L(t)$ は基準にしたランジバン鎖。張力 $f$ はモノマーのサイズ $a$ を用いて無次元化してある。

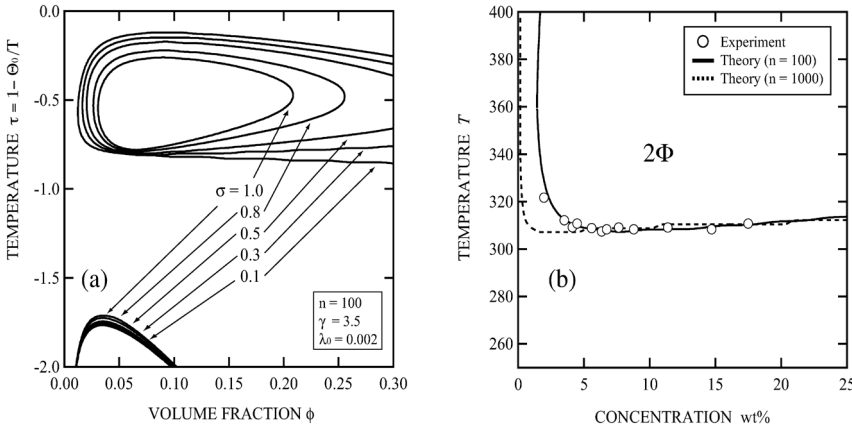


図3 (a) 連鎖性水和によるLCST相分離線の平坦化。濃度は高分子の体積分率 $\phi$ で表示してある。協同性パラメータ $\sigma$ を減少させると、ループ型の相分離領域が箱型の相分離領域に変わる。箱型ではLCST (箱の底辺にあたる)の分子量依存性が弱い。理論計算で用いたパラメータは $n=100$ ,  $\psi=1.0$ ,  $\lambda_0=0.002$ ,  $\gamma=3.5$ である (詳細は文献8参照)。(b) スピノダル線の実測 (Azevedo 他<sup>15)</sup>)と協同性水和に基づく理論計算との比較。

を鎖上に交互に配置させる方法の数である。グロービュール1個当たりの自由エネルギーは、 $\gamma$ を表面張力とすると $\Delta f_\zeta = -\epsilon_0 \zeta + \gamma \zeta^{2/3}$ の形になるので、その統計重率は $\eta_\zeta(T) = e^{-\gamma \zeta^{2/3}} \lambda(T)^\zeta$ となる。 $(\epsilon_0$ はモノマーの凝集エネルギー、 $\lambda(T) \equiv e^{\beta \epsilon_0}$ ,  $\beta \equiv 1/k_B T$ )。一方、水和部分に関しては水素結合のエネルギーを $-\epsilon$ 、隣接した水和分子間の相互作用のエネルギーを $-\Delta\epsilon$ とすると、水素結合連鎖一つ当たりの統計重率はZimm-Bragg型<sup>12)</sup>  $\eta_\zeta = \sigma \eta(T)^\zeta$ となる。ここで、 $\sigma \equiv \exp(-\beta \Delta\epsilon)$ は協同性のパラメータ、 $\eta(T) \equiv \exp[\beta(\epsilon + \Delta\epsilon)]$ は会合定数(水素結合の結合定数)である。隣接分子間に相互作用のない場合は $\sigma=1$ でPEOにみられるようなランダムな水和に帰着し、 $\sigma$ の値が小さくなるほど協同性が増す。

自由エネルギーを最小にする連鎖分布(最確分布) $(i, j)$ を求め、水和度 $\theta \equiv \sum_{\zeta=1}^n \zeta \langle j_\zeta \rangle / n$ と平均末端間距離 $\langle R^2 \rangle$ を求めると、図2(a)のようになる。 $\langle R^2 \rangle$ は20°Cにおける値で規格化した鎖の膨張因子 $\alpha_R$ に直してプロットした。協同性が強くなるほど( $\sigma$ が小さくなるほど)転移が急激になることが見てとれる。 $\langle R^2 \rangle$ については実験結果<sup>13)</sup>と良好な一致をみた。

このようなランダムコイル部分とグロービュール部分の共存する鎖の末端に張力 $\mathbf{f}$ が作用すると(図1左)、グロービュール部分から鎖が引き抜かれ、両者の割合が変化する。引き抜かれた部分は溶媒である水と接触して水和されるので、張力が一定値のままでグロービュール部分からランダムコイル部分にセグメントが移行することになる。鎖長が同

一であれば、グロービュール状態での末端間距離よりも水和ランダムコイルの末端間距離の方が大きいので、張力により鎖は全体として伸長し、張力曲線にプラトーが現れる(図2(b))。プラトーの出現は、PNIPAM鎖を用いたAFM測定でレイリー不安定性の現れとして実験的に確認されていた。<sup>14)</sup>

## 2.2 PNIPAM水溶液の相分離

次に、溶液の相分離を調べるためにフローリー-ハギンズの高分子溶液理論に水和の効果を取り入れた会合溶液の自由エネルギー

$$\beta \Delta F = N_{fw} \ln \phi_{fw} + \sum_{i,j} N(i, j) \ln \phi(i, j) + \beta \sum_{i,j} \Delta A(i, j) N(i, j) + \chi(T) \phi(1-\phi) \Omega \quad (2)$$

を考察する。ここで、 $N_{fw}$ は自由水の分子数、 $\phi_{fw}$ はその体積分率、 $N(i, j)$ は溶液中に存在するインデックス $(i, j)$ で指定された水和タイプの高分子鎖の数、 $n(i, j)$ 、 $\phi(i, j)$ はその分子量と体積分率、 $\Delta A(i, j)$ は式(1)から得られる単鎖の自由エネルギー、 $\Omega \equiv V/a^3 = nN + N_0 = \sum n(i, j) N(i, j) + N_{fw}$ は格子セルの総数( $N$ は高分子の本数、 $N_0$ は溶媒分子数)、 $\chi(T)$ は背景に存在するvdW相互作用を表すフローリーの相互作用パラメータである。

自由エネルギーから化学ポテンシャルを求めると、相平衡条件やスピノダル条件を解析することができる。化学ポテンシャルは水和の平衡条件 $\Delta\mu(i, j) = \Delta\mu(1, 0) + (\sum \zeta j_\zeta) \Delta\mu_0$ を満たす。図3(a)には水和の協同性により相分離(スピノ

ダル) ループがどのように形状を変えるかを理論計算した結果を示す. すなわち,  $\sigma$ が減少するにつれて相分離ループの底の部分が平らになり,  $\sigma=0.3$ あたりでほとんど水平になることが分かる. この水平部分はPNIPAM水溶液で観測される平坦なLCSTに対応する. このような考えに基づいてスピノダル線の理論計算と実験結果を比較した結果を図3(b)に示す. 分子量にはあまり依存せず, 20 wt%程度まで平坦なLCST曇点曲線が得られ, 実験データをうまく再現することが確認された.

### 3. 混合溶媒中の感熱性高分子

#### 3.1 混合溶媒の基本的問題

高分子の成形加工プロセスではしばしば混合溶媒が用いられる. 溶媒を混合すると, それぞれの溶媒を混合組成で平均したような性質とは全く異なる新しい性質が現れる. 2種溶媒の混合に限ると, 混合効果は以下の3ケースに要約される. (1) 共良溶媒: 貧溶媒A, Bを混合することで良溶媒となる場合, (2) 共貧溶媒: 良溶媒A, Bを混合することで貧溶媒となる場合, (3) 臨界溶媒: 部分相溶する溶媒A, Bの臨界相溶点近傍の溶媒で良貧いずれの効果もある場合.

#### 3.2 PNIPAM鎖の共貧溶媒性

PNIPAMの水溶液では第2溶媒(メタノール, THFなどの良溶媒)を混合するとLCST曇点曲線が急激に低温側にシフトする.<sup>16-18)</sup> それぞれ単独では良溶媒であるが, 混合すると貧溶媒になるこの奇妙な現象は**共貧溶媒性**と呼ばれている. 共貧溶媒性の原因としては, (1) 溶媒間に量論的な水素結合複合体が形成され, 高分子が溶媒領域から排除

される(溶媒複合体形成), (2) 高分子鎖への水素結合に溶媒間で競合が生じる(競争的水素結合), (3) 水と第2溶媒との臨界点近傍で組成が揺らぐため高分子の凝集を強める(臨界揺動), などの説がある. メタノールの場合には(1)の複合体は水-メタノール間の水素結合(w-m)によるペンタゴン構造で, (2)では高分子-水(p-w), 高分子-メタノール(p-m)の水素結合の競合である. (3)はTHFの場合に可能性が指摘されている. 現在, 溶液, 架橋ゲル, ミクロゲル, 物理ゲルなどについて共貧溶媒性に関する多くの研究が進められている.

PNIPAMの場合, LCSTが極小となる溶媒組成が高分子の分子量に敏感に依存し, メタノール側に移動する(図5(b))ので, 共貧溶媒性が一定組成の溶媒複合体による(1)のメカニズムによるものとは考え難い. 我々は協同性のある選択吸着の考えに基づいて, 共貧溶媒性の分子論的起源を探った. 水/メタノール混合溶媒ではメタノール組成の増加とともに吸着分子が水からメタノールに置換されるが, 水素結合に協同性がある場合には分子を1個ずつ順に置換することが困難のため, 溶媒組成のわずかな差が鎖上では非線型に拡大される. その結果, 競合の最も強くなる組成では, 両者の吸着力が拮抗するため, いずれの溶媒も吸着困難になり, 鎖は脱水と状態で疎水性の凝集をする.

このような考えのもとに溶媒置換の競争吸着モデルを構築し, 鎖のコンホメーションを調べた.<sup>10,11)</sup> 溶媒A, B分子と水素結合した高分子鎖の状態を, 長さ $g$ 個の結合溶媒分子列の数を表す連鎖長の数分布 $\mathbf{j}^{\alpha} = \{j_1^{\alpha}, j_2^{\alpha}, \dots\}$ , ( $\alpha = A, B$ )により記述し, 結合状態 $(\mathbf{j}^A, \mathbf{j}^B)$ である高分子鎖の数を $N(\mathbf{j}^A, \mathbf{j}^B)$ と表記することにする.(結合していないモノマーは上記のグロービュール部分*i*に対応する.) 高分子鎖に水素結合している溶媒分子の数と一本の高分子鎖上の水素結合サイト総数 $n$ との比として, 水素結合率

$$\theta_{\alpha}(\mathbf{j}^{\alpha}) \equiv \sum_{\zeta=1}^n \zeta j_{\zeta}^{\alpha} / n \quad (\alpha = A, B) \quad (3)$$

を定義する. 結合された溶媒分子も含めた鎖のセグメント数は $n(\mathbf{j}^A, \mathbf{j}^B) \equiv n[1 + n_A \theta_A(\mathbf{j}^A) + n_B \theta_B(\mathbf{j}^B)]$ となる. また, 結合している溶媒分子の総数は $N_{b\alpha} = n \sum_{\mathbf{j}^A, \mathbf{j}^B} \theta_{\alpha}(\mathbf{j}^{\alpha}) N(\mathbf{j}^A, \mathbf{j}^B)$ である.

A成分を水, B成分をメタノールとして, 図5(a)では水と和度, メタノール和度の平均値(破線)と平均末端間距離

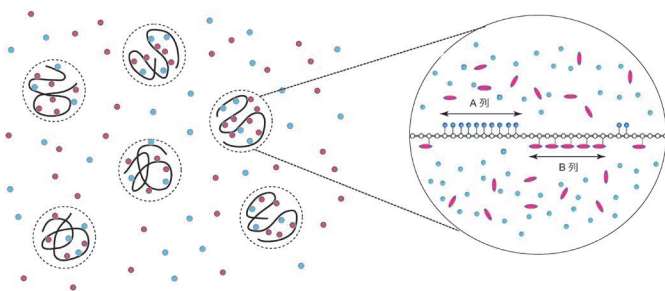


図4 水素結合性混合溶媒中の高分子による選択吸着のモデル. 溶媒成分間で競合が起こり, 水素結合に協同性がある場合には共貧溶媒性が出現する.

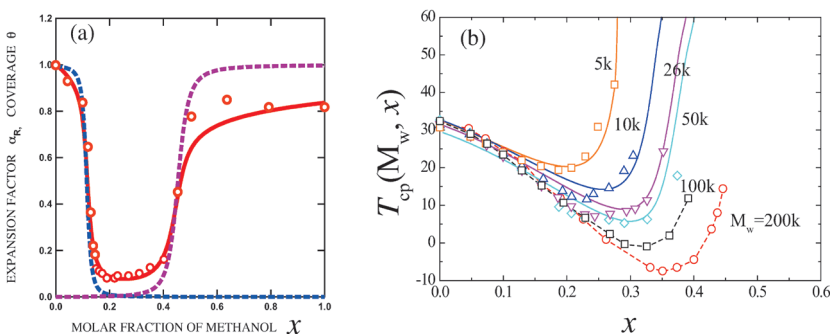


図5 (a) 水/メタノール混合溶媒中のPNIPAM鎖の末端間距離の膨張因子(実線)と水と和度(青点線), メタノール和度(赤点線)をメタノールのモル分率 $x$ に対してプロットし, 実験データ(丸印)<sup>19)</sup>と比較したもの. 鎖の分子量から $n=10^5$ , 溶媒の体積比を2とした. (b) LCST曇点曲線をメタノール組成に対してプロットし, 実験(記号)と理論計算(線)を比較したもの. 高分子の濃度は1 wt%に保つ. 各曲線は異なる分子量に対応する. 高分子量試料ほど相分離領域の拡大が著しい.

に関する膨張因子(実線)をメタノール組成に対してプロットし、理論計算<sup>10,11)</sup>と巨大分子を用いた実験結果(丸印)<sup>19)</sup>とを比較検討してある。メタノールのモル分率が0.15あたりで急に脱水和しコイルは収縮する。凝集状態がモル分率0.4あたりまで続き、その後メタノールの本来の良溶媒性が回復して鎖は急激にコイル状態にもどる。競合組成で吸着総量が激減する様子が明らかで、この領域で実質的に溶媒置換が進行している。

### 3.3 PNIPAM水溶液の共貧溶媒性と相分離領域の拡大

PNIPAM水溶液のLCST型曇点曲線は、良溶媒性の第2溶媒(共溶媒)の混合により急激に低温シフトする。<sup>16-18)</sup> 図5(b)中の記号はPNIPAMの水/メタノール混合溶媒中の曇点曲線を異なる分子量の高分子について測定したものである。混合系ではp-w, p-m, w-mの3種の水素結合が競合するが、曇点温度が最低になるメタノール組成は高分子の分子量に依存するので、メタノールと高分子との相互作用(p-m)が主要因であることが分かる。メタノールは良溶媒なので、過剰領域では本来の良溶媒性を回復する。

これらの共貧溶媒性相分離挙動を説明するため、式(2)に習って高分子P、主溶媒A、共溶媒Bの3成分高分子溶液モデルに溶媒分子と高分子との協同性水素結合を取り入れた溶液モデルを用いて相分離の解析を行った。<sup>20)</sup> 水素結合に関する会合平衡条件を用い、ギブスの安定性限界条件よりスピノダル線を求めてメタノールの体積分率 $v_m$ (モル分率 $x$ )の関数として計算し、実験と比較した<sup>20)</sup>(図5(b)の細線)。

純水中の相分離ループからはLCSTの共貧溶媒性を反映した相分離領域の下方シフト(LCST共貧溶媒性)がみられ、低温領域の相分離ドームでは急激な相分離領域の上方拡大(UCST共貧溶媒性)がみられた。LCSTが最小になるメタノール組成をPNIPAMの分子量に対してプロットすると、高分子量の極限ではLCSTと低温側のUCSTが融合した二重臨界点(DCP)が出現し、さらに高分子量では砂時計型の相分離領域になる。

このようなPNIPAM鎖を化学架橋したゲルでは、通常の温度誘起体積相転移の他に共貧溶媒性に基づく溶媒誘起再帰体積相転移が観測される。溶液と異なる点は、ネットワークの弾性に基づく自由エネルギーが存在する、連鎖長の上限が架橋点間分子量で制限されることなどで、鎖の選択吸着、競合水素結合、混合エントロピーの変化などの概念はそのまま有効であることが分かった。<sup>21)</sup>

## 4. テレケリック会合高分子水溶液の相分離とゾル-ゲル転移

PEOやPNIPAMの両末端を疎水基(アルキル鎖)で修飾した水溶性高分子(テレケリック会合高分子)では、主鎖部分への水和と、末端疎水基の凝集によるミセル形成とが共存する。ミセルは高分子の架橋点となるので、疎水凝集によりネットワークが形成される。水和が疎水基の凝集を

妨げる場合には、架橋のために脱水和が必要なので高温でゲル化する。水和と疎水凝集が干渉しない場合には低温でゲル化する。いずれの場合も高温で相分離するLCST型相分離現象が見られる。

### 4.1 相分離とゲル化の共存

我々は、新規に合成されたtel-PNIPAMを用いた熱測定、<sup>22)</sup>曇点測定、<sup>22)</sup>蛍光測定、<sup>23)</sup>光散乱、<sup>24)</sup>レオロジー測定、<sup>25)</sup>中性子散乱、<sup>26)</sup>等の実験結果を参考にして、tel-PNIPAM水溶液の凝集構造や相分離現象、ゾル-ゲル転移について、詳細は省略するが、水和高分子溶液の自由エネルギーの式(2)に末端鎖間多重架橋を取り入れた会合溶液の自由エネルギーによる解析を行った。<sup>27)</sup>

その結果、低濃度では単鎖ループが凝集した花型のミセル(フラワーミセル)が出現し、濃度増加とともにミセル間を結合するブリッジ鎖が増加し、ある臨界濃度でネットワークが系全体にパーコレートしたゲル構造に至るゾル-ゲル転移が存在することが分かった。また、水和度 $\theta$ や連鎖長 $\zeta$ 、会合体の分子量分布、ゲル化点、スピノダル線を計算し、実験結果と比較した。図6は高分子の分子量によりLCST線(実線)とゾル-ゲル転移線(点線)がどのように変化するか調べた結果で、PEOのランダム水和(左図)とPNIPAMの協同水和(右図)の違いが著しい。<sup>27)</sup> 疎水性の末端会合により平均分子量が増加するために混合エントロピーが減少し、ホモポリマーと比べて相分離領域が拡大する(会合誘起相分離)。

主鎖がPEOの場合(図6左)の曇点曲線の低温側へのシフトについては一挙に100°C程度下がることが実測されている。これに連動して低温側のUCSTスピノダル線が上昇してくるので、両者がちょうど接触する二重臨界点に対応する分子量が存在することが予測される。また、同一長の末端鎖 $n=12$ について異なる分子量の主鎖の曇点シフトを観測すると、低分子量ほど低温シフト量が多い、つまり

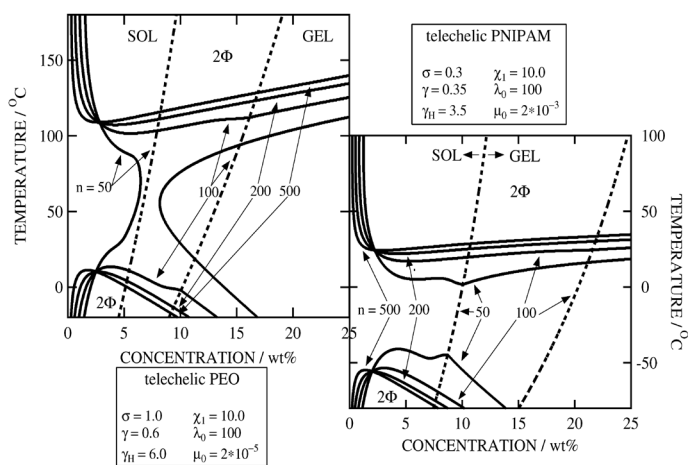


図6 (左)異なる分子量のtel-PEO水溶液における相転移の理論計算。曇点曲線(実線)、ゾル-ゲル転移線(点線)。末端会合による曇点の低下は低分子量鎖の方が大きい。最小分子量( $n=50$ )ではLCSTとUCSTが合体して砂時計型の相分離領域になっている。(右)同、異なる分子量のtel-PNIPAM水溶液における相転移の理論計算。tel-PEOとは異なり、低下量は少なく、二重臨界点は出現しない。

相分離し易いことが知られている。このような分子量に関する逆転現象は、低分子量の主鎖ほど末端鎖の数濃度が大きくなるので平均的に大きな会合体を形成するということが説明できそうである。

一方、tel-PNIPAM水溶液(図6右)に関しては、末端疎水化によるLCSTの低下は5-10°C程度に留まる。<sup>22,24)</sup> DSC吸熱ピークの位置は32°Cでホモポリマーと同一なので、iCG転移温度は疎水化により変化しない、すなわち末端会合により感熱性は影響を受けないことが分かる。

#### 4.2 溶液の会合構造

tel-PNIPAM水溶液では、相図変化に加えて特徴的な溶液の会合構造や物性が発現される。tel-PNIPAM水溶液の超小角中性子散乱(USANS)強度の温度変化(10~40°C)と濃度変化(1, 10, 50 g L<sup>-1</sup>)の測定結果<sup>26)</sup>を説明するために、PNIPAMの感熱性を考慮したフラワーミセルと、それらがさらに会合した高次構造(メソグロビュール)形成に対するモデルを構築し、実験結果の解析を行った。<sup>26)</sup> 図7に実験結果(○印, 濃度  $c = 10 \text{ g L}^{-1}$ )とモデル計算(細線)の比較を示す。USANSデータと理論結果が非常によく一致していることが分かる。詳細な解析により以下のような構造形成が起こっていることが明らかとなった。

10~20°C領域では会合数30程度のフラワーミセルを形成し、コアの周りでPNIPAMの密集した領域(中間領域)があり、その外側にPNIPAMが膨潤したシェル領域がある。

20~30°C領域では、温度上昇に伴う脱水和により中間領域へのPNIPAMの凝集が進行し、フラワーミセルが2~3

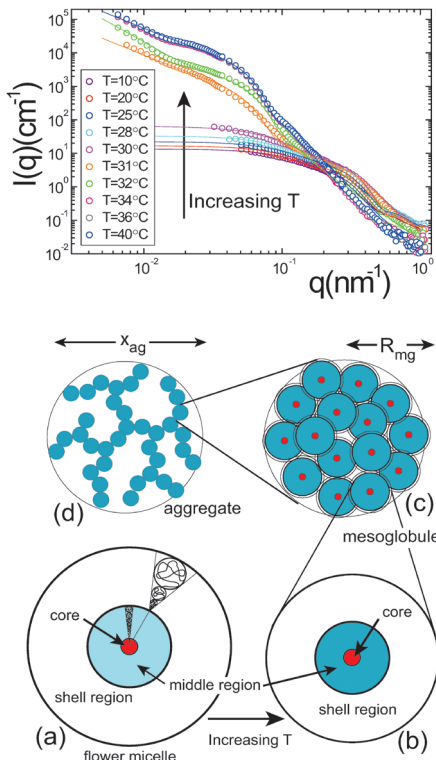


図7 テレケリックPNIPAM重水溶液の中性子散乱測定(記号)と理論解析(細線)。(上図)濃度  $c = 10 \text{ g L}^{-1}$  溶液の散乱強度 ( $T = 10 \sim 40^\circ\text{C}$ )。 (下図) (a) (b) フラワーミセル, (c) メソグロビュール, (d) フラクタル会合体。

解説 感熱性高分子水溶液の相分離・ゲル化・レオロジー

個程度集まった凝集体を形成する。

31~32°C領域では、ミセルが80個程度凝集したメソグロビュールを形成し、温度上昇とともにメソグロビュール中でミセルが融解する。また、メソグロビュールが更に凝集し、フラクタル次元2程度の凝集構造を形成する。

34~40°C領域では、メソグロビュール及びその高次凝集体が安定して存在する。このため溶液は白濁するだけでマクロな相分離には至らない。

#### 5. テレケリック会合高分子水溶液のレオロジー

テレケリック会合高分子水溶液は、常温、準濃厚領域(1~5 wt%)においてゲル形成に伴って興味深い粘弾性を示す。ネットワーク中の1本の鎖に注目すると、熱運動や変形、流動による外力の影響で3状態の間の組み替え運動が起こっている。すなわち、隣接架橋点を結合するブリッジ鎖、片末端が架橋点から引き抜かれ自由に運動する自由末端鎖(ダングリング鎖)、および両末端が同一の架橋点に結合したループ鎖の間の組み替え運動である。3状態の中でネットワークの張力を伝播できるのはブリッジ鎖だけであり、他の2状態は溶媒との弱い摩擦力を出すだけである。このため、ブリッジ鎖は弾性的有効鎖と呼ばれている。

このように、準濃厚領域での際だった粘弾性はブリッジ鎖の張力によるものなので、図8に示すようにネットワーク中の1本のブリッジ鎖に注目し、そのブラウン運動を記述するランジバン運動方程式をたて、これを末端ベクトル  $\mathbf{r}$  の指定されたブリッジ鎖の確率分布関数  $\psi(\mathbf{r}, t)$  と片末端が解離したダングリング鎖の確率分布関数  $\phi(\mathbf{r}, t)$  に対する時間発展方程式に変換することにより、組み替えネットワークの2状態遷移基本方程式を得た。<sup>28,29)</sup> (ループ鎖は粘弾性の絶対値を低下させるだけで、緩和や剪断速度依存性には効かないので省略した。)

ブリッジ鎖の生成消滅を記述する方程式は

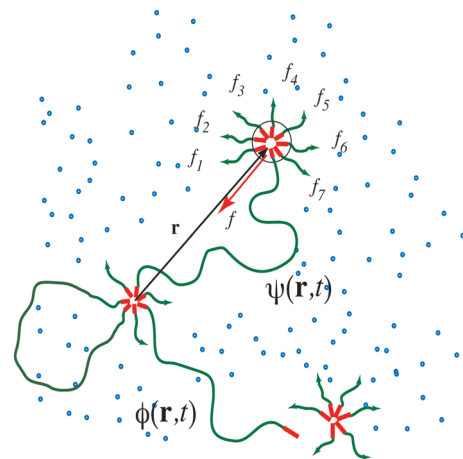


図8 テレケリック会合高分子ネットワーク中のブリッジ鎖、ダングリング鎖、ループ鎖の間の流動による変換。ブリッジ鎖の末端にあるミセルに注目して、そのブラウン運動を張力を用いて記述する。

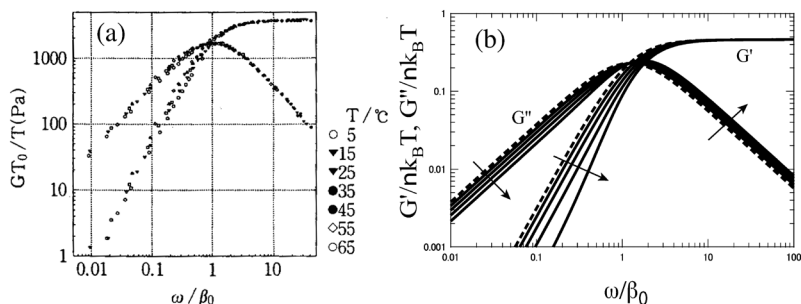


図9 (a) tel-PEO (C16/35) 3 wt% 水溶液の複素弾性率.<sup>30)</sup> 異なる温度での測定データを振動数軸に沿って平行移動し、基準温度 (5°C) のデータに重ねてマスター曲線を得る. (b) 架橋点 (疎水凝集ミセル) の揺動と拡散を取り入れて計算した複素弾性率. 揺動により低振動数領域でのソフトニングと同時に、高振動数領域での損失弾性率の微小な増加が見られる (矢印).

$$\frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{v}(t) \psi(\mathbf{r}, t)] = -\beta(\mathbf{r}) \psi(\mathbf{r}, t) + \alpha(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}, t) \quad (4)$$

となる. ここで、 $\beta(\mathbf{r})$  はブリッジ鎖の解離確率、 $\alpha(\mathbf{r})$  はダンダリング鎖からブリッジ鎖への再結合確率、

$$\mathbf{v}(t) = \bar{\mathbf{v}}(t) - D[\nabla \ln \psi(\mathbf{r}, t) + \mathbf{f}/k_B T + \nabla \ln(\beta(\mathbf{r})/\alpha(\mathbf{r}))] \quad (5)$$

はベクトル  $\mathbf{r}$  の時間変化で、アフィン変形の部分は変形テンソル  $\hat{\lambda}(t)$  を用いて  $\bar{\mathbf{v}}(t) = (d\hat{\lambda}(t)/dt) \cdot \hat{\lambda}(t)^{-1} \mathbf{r}$  と表せる. 拡散定数  $D \equiv k_B T / \zeta_m$  で表された拡散項はミセルの揺動による拡散効果である. 鎖の張力  $\mathbf{f}$  は非線型伸長効果を取り入れるため

$$\tilde{f}(\tilde{r}) \equiv \frac{fa}{k_B T} = 3\tilde{r} \left[ 1 + \frac{2}{3} A \frac{\tilde{r}^2}{1 - \tilde{r}^2} \right] \quad (6)$$

の形に仮定した. 振幅  $A$  は非線型伸び切り効果を表し、 $A=0$  はガウス鎖に、 $A=1$  はランジバン鎖になる. ( $\tilde{r} = r/na$  は全長で規格化した末端距離.) また、ブリッジ鎖の解離確率は張力による引き抜き効果を取り入れて、2次の結合  $\beta(\mathbf{r}) = \beta_0(T) [1 + g\tilde{f}(\tilde{r})^2]$  の形を仮定する. ダンダリング鎖  $\phi(\mathbf{r}, t)$  の時間発展も同様な方程式で書けるが、鎖の緩和時間が十分に速ければ、平衡分布と仮定して良いだろう.

### 5.1 線型粘弾性

図9(a)には tel-PEO 水溶液<sup>31)</sup> の実測粘弾性マスター曲線を示す. 線型複素弾性率は架橋寿命  $\tau$  を緩和時間とする単一緩和のマクスウェル液体に近い. 基準温度 (5°C) にデータを重ねることにより、緩和時間は末端鎖解離のためのポテンシャル障壁  $\Delta F$  (C16 の場合は  $\approx 64 \text{ kJ mol}^{-1}$  程度) で決まる活性化タイプの温度依存性を示すことが分かった. 弾性率の絶対値は弾性的有効鎖の平均数に比例し、高濃度では総鎖数の約60%が有効鎖である. 図9(b)には、拡散項を含む式(4)を数値計算して求めた複素弾性率を示す.<sup>29)</sup> ブラウン運動の効果は低振動数領域でのソフトニングと、高振動数領域での損失弾性率の微小な増加に見られる.

### 5.2 非線型粘弾性

次に、非線型定常粘性率を調べるため、剪断流動場  $\lambda_{x,y}(t) = \dot{\gamma}t$  のもとで基本方程式(4)の定常解を求めた. 任意の剪断速度  $\dot{\gamma}$  で解析解を求めることは困難なので、アフィン網

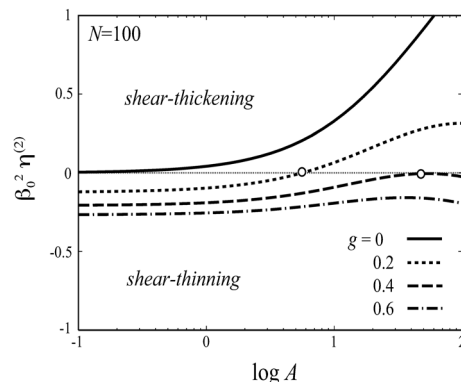


図10 張力の非線型性パラメータ  $A$  に対してプロットした非線型粘度係数. 各曲線は主鎖と末端鎖の崩壊確率の間の結合係数  $g$  を変化させてある.

目に関する数値計算と平行して  $\dot{\gamma}$  によるべき展開で級数解を求める. その結果、非線形定常粘性率  $\eta(\dot{\gamma})$  は、 $\dot{\gamma}$  の関数として増大し (剪断シックニング)、極大を示した後に急激に減少することが分かった. また、 $\dot{\gamma}$  の大きい領域では一般に線形複素粘性率  $\eta(\omega)$  よりも大きいので、いわゆる **Cox-Merz 則** ( $\omega = \dot{\gamma}$  で比較すると線型と非線型の違いが現れず、 $\eta(\omega) = \eta(\dot{\gamma})$  となる経験則) が破れていることになる.

シックニングの理論判定には非線型粘度の展開式

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta(0) + \eta^{(2)} \dot{\gamma}^2 + \dots \quad (7)$$

における最低次の係数  $\eta^{(2)}$  の符号を調べ、 $\eta^{(2)} > 0$  の場合にはシックニング、 $< 0$  の場合にはシニングと判定した. 図10にはこの粘度係数を張力の非線型振幅  $A$  の関数としてプロットしてある.<sup>32)</sup> 結合定数  $g=0$  の場合には張力の強さに関係なく熱運動による解離確率のみで決まるので、非線型性ととも  $\eta^{(2)}$  が単調に増大し、常にシックニングが起こりやすくなる. しかし、有限の  $g$ 、例えば  $g=0.2$  の場合をみると、非線型性の弱い、すなわちガウス鎖に近い主鎖の場合には  $\eta^{(2)}$  は負から正に符号を変えている. これは柔らかい鎖ではシニングが起こり、鎖が固くなるとともにシックニングに変わることを意味している.

### 5.3 剪断開始流

次に、時間依存する流動 (遷移流動) について調べよう. 遷移流動には開始流、停止流、これらの組み合わせなどがあり、研究目的により種々の手法が駆使されている. ここでは長時間静置して平衡状態にある溶液に、時刻  $t=0$  で一定の剪断速度の剪断流を開始した場合について考察する.

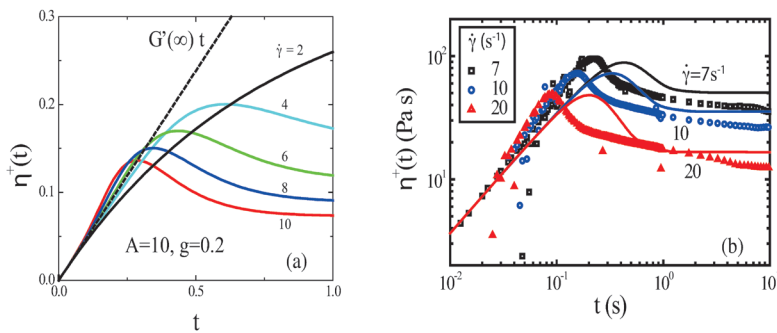


図11 (a) 剪断開始流における応力の流動硬化とオーバーシュート (理論計算). (b) tel-PEO 水溶液の剪断開始流中における剪断応力の時間発展について実験結果と理論を比較したものの。

このような初期状態のもとで組み替えアフィン網目の基本方程式の数値解析を行った。<sup>29,33)</sup> 図11(a)には剪断応力を $\dot{\gamma}$ で割って求めた粘度の時間依存を示す。

初期過程では高振動数極限の弾性率 $G'(\infty)$ の傾きで応力が増大し、時間経過とともにこのベースラインから上方に離れ上に凸型の曲線に変化する。すなわち線型弾性よりも高い弾性を示すので、この現象は**流動硬化**と呼ばれている。流動硬化が起こるためには剪断速度がある程度大きくなければならない。(この図では $\dot{\gamma}=6.0$ 程度となっている。)その後、応力は極大値に達した後に定常値に漸近する。応力の極大現象は**応力オーバーシュート**と呼ばれる。応力オーバーシュートも剪断速度が臨界値(この図の場合 $\dot{\gamma}=3$ )以上でないと出現しない。長時間極限の値(図11(a)の右端軸を切る点)は剪断速度とともに単調に減少しているのでシニング領域に属する。このようにして、応力オーバーシュートは定常粘度シニング領域に特徴的な過渡現象であると推測される。図11(b)はtel-PEO水溶液の剪断開始流下における応力の時間発展について、実験データ(記号)と数値計算(実線)とを比較したものである。<sup>33)</sup> 剪断速度の増加とともに流動硬化と応力極大が著しくなる様子が分かる。

これらのtel-PEOの結果とは対照的に、tel-PNIPAMでは主鎖の感熱性のためにiCG転移点近くまで温度を上げると感熱性のレオロジー応答が期待できる。この場合、末端鎖の解離時間に加えて、鎖のコンホメーション転移の特徴的時間が現れ、2つの時間スケールの違いにより両者が結合した2つの独立な運動モード(遅いモードと速いモード)が出現する。このモデルによる複素弾性率の理論計算の結果、マクスウェル要素とフォークト要素を直列に結合したバーガースモデル(4パラメータモデル)になることが示され、現象論に現れるパラメータと分子パラメータの関係が導出された。<sup>34)</sup> コンホメーション転移のタイムスケールが早い極限では遅いモードの緩和時間は末端基の解離時間に漸近し、速いモードは消失する。相転移と分子運動が複雑に絡んだ感熱レオロジーの研究は今後の課題である。

## 6. おわりに

感熱性高分子の水溶液に注目し、水和が分子コンホメーション、相転移、レオロジーにどのように反映するか概観

した。<sup>35)</sup> これらはこれまで単にそのように考えると多くの観測結果が矛盾なく説明できるという、いわば状況証拠的な説明にすぎなかったが、最近四方ら<sup>36-38)</sup>により広い振動数領域の誘電緩和測定による水和度 $\theta$ の定量評価法が確立され、測定結果と比較できるようになった。この測定法で生体高分子を含む多くの水溶性高分子の水和絶対量の温度変化がデータベース的に蓄積されるようになり、水溶性高分子の研究は新フェイズに突入した感がある。本稿で述べた水和の協同性や溶媒置換の概念は、そのままタンパク質の変性の問題などの生体高分子の問題として読み替えが可能である。

一方、スピノダル線や選択吸着係数などは自由エネルギーの2階微分であるギブス行列要素で表せるが、これらの中には水和量 $\langle\theta\rangle$ のみならず、その揺らぎ量 $\langle(\Delta\theta)^2\rangle$ が含まれているので、揺らぎの直接測定が待たれる。さらに、iCG転移に要する時間、粘弾性を特徴付ける時間などの運動論的な問題の解析には、水和-脱水和の動的過程の直接測定も重要であり、これらについては今後の発展を待ちたい。

本研究は筆者が長年にわたり多くの研究者と共に行ったもので、そのすべての方々に感謝致します。特に、古賀毅氏、F. M. Winnik氏、松山明彦氏、庄司雅彦氏、印出井努氏には研究推進のための核心部において協力していただきました。改めて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) G. N. Malcolm and J. S. Rowlinson: *Trans. Faraday Soc.* **53** (1957) 921.
- 2) S. Saeki, N. Kuwahara, M. Nakata and M. Kaneko: *Polymer* **17** (1976) 685.
- 3) R. L. Cook, J. H. E. King and D. G. Peiffer: *Phys. Rev. Lett.* **69** (1992) 3073.
- 4) T. Sun and J. H. E. King: *Macromolecules* **31** (1998) 6383.
- 5) A. Matsuyama and F. Tanaka: *Phys. Rev. Lett.* **65** (1990) 341.
- 6) K. Tasaki: *J. Am. Chem. Soc.* **118** (1996) 8459.
- 7) S. Bekiranov, R. Bruinsma and P. Pincus: *Phys. Rev. E* **55** (1997) 577.
- 8) Y. Okada and F. Tanaka: *Macromolecules* **38** (2005) 4465.
- 9) X. Ye, Y. Lu, L. Shen, Y. Ding, S. Liu, G. Zhang and C. Wu: *Macromolecules* **40** (2007) 4750.
- 10) F. Tanaka, T. Koga and F. M. Winnik: *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 028302.
- 11) F. Tanaka, T. Koga, H. Kojima and F. M. Winnik: *Macromolecules* **42** (2009) 1321.
- 12) B. H. Zimm and J. K. Bragg: *J. Chem. Phys.* **31** (1959) 526.
- 13) S. Fujishige, K. Kubota and I. Ando: *J. Phys. Chem.* **93** (1989) 3311.
- 14) B. J. Haupt, T. J. Senden and E. M. Sevick: *Langmuir* **18** (2002) 2174.
- 15) R. G. de Azevedo, L. P. N. Rebelo, A. M. Ramos, J. Szydłowski, H. C. de Sousa and J. Klein: *Fluid Phase Equilibria* **185** (2001) 189.

- 16) H. G. Schild, M. Muthukumar and D. A. Tirrel: *Macromolecules* **24** (1991) 948.
- 17) F. M. Winnik, M. F. Ottaviani, S. H. Bossmann, M. Garcia-Garibay and N. J. Turro: *Macromolecules* **25** (1992) 6007.
- 18) F. M. Winnik, M. F. Ottaviani, S. H. Bossmann, W. Pan, M. Carcia-Gaibay and N. J. Turro: *Macromolecules* **26** (1993) 4577.
- 19) G. Zhang and C. Wu: *J. Am. Chem. Soc.* **123** (2001) 1376.
- 20) F. Tanaka, T. Koga, H. Kojima, N. Xue and F. M. Winnik: *Macromolecules* **44** (2011) 2978.
- 21) H. Kojima and F. Tanaka: *Soft Matter* **8** (2012) 3010.
- 22) X.-P. Qui, F. Tanaka and F. M. Winnik: *Macromolecules* **40** (2007) 7069.
- 23) P. Kujawa, F. Segui, S. Shaban, C. Diab, Y. Okada, F. Tanaka and F. M. Winnik: *Macromolecules* **39** (2006) 341.
- 24) P. Kujawa, F. Tanaka and F. M. Winnik: *Macromolecules* **39** (2006) 3048.
- 25) P. Kujawa, H. Watanabe, F. Tanaka and F. M. Winnik: *Eur. Phys. J. E* **17** (2005) 129.
- 26) T. Koga, F. Tanaka, R. Motokawa, S. Koizumi and F. M. Winnik: *Macromolecules* **41** (2008) 9413.
- 27) Y. Okada, F. Tanaka, P. Kujawa and F. M. Winnik: *J. Chem. Phys.* **125** (2006) 244902.
- 28) F. Tanaka and S. F. Edwards: *Macromolecules* **25** (1992) 1516; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **43** (1992) 247; 272; 289.
- 29) F. Tanaka and T. Koga: *Macromolecules* **39** (2006) 5913.
- 30) T. Annable, R. Buscall, R. Ettelaie and D. Whittlestone: *J. Rheol.* **37** (1993) 695.
- 31) 正確には短鎖 PEO を数本ウレタン結合でつないだ高分子で HEUR (hydrophobic ethoxylated urethane) と呼ばれる。C16/35 は末端炭素数 16 個、分子量  $35 \text{ kg mol}^{-1}$  の意味。
- 32) T. Indei and F. Tanaka: *Macromol. Rapid Comm.* **26** (2005) 701.
- 33) T. Koga, F. Tanaka, I. Kaneda and F. M. Winnik: *Langmuir* **25** (2009) 8626.
- 34) F. Tanaka: *J. Soc. Rheol. J.* **141** (2013) 179.
- 35) 紙幅の制限により本稿では割愛した理論計算の詳細、パラメータの評価の一部については、F. Tanaka: *Polymer Physics—Applications to Molecular Association and Thermoreversible Gelation* (Cambridge Univ. Press, 2011). 田中文彦『高分子系のソフトマター物理学』(培風館, 2013) を参照して頂きたい。
- 36) Y. Ono and T. Shikata: *J. Am. Chem. Soc.* **128** (2006) 10030.
- 37) Y. Ono and T. Shikata: *J. Phys. Chem. B* **111** (2007) 1511.
- 38) T. Shikata, M. Okuzono and N. Sugimoto: *Macromolecules* **46** (2013) 1956.

## 著者紹介

田中文彦氏： 専門は高分子物理学, 統計力学, レオロジー. 特に水溶性高分子や物理ゲルの相転移および粘弾性の理論モデル化.

(2014年9月27日原稿受付)

## Phase Separation, Gelation, and Rheology in Aqueous Solutions of Temperature-Sensitive Polymers

Fumihiko Tanaka

abstract: The recent status of studies on the temperature-sensitive water-soluble polymers is briefly reviewed. The concept of cooperative dehydration, defined as simultaneous dissociation of the water molecules bound to a polymer chain in correlated sequences, has been applied to study the collapse transition and LCST phase separation of temperature-sensitive polymer, poly(*N*-isopropylacrylamide), in water and in mixed solvents of water and methanol. The transition becomes sharper as the cooperativity of hydration (dehydration) increases. The sharp depression by the LCST cononsolvency in the mixed solvents is shown to be caused by the competitive hydrogen bonding of water and methanol onto the polymer chains. The degree of hydration and of methanol binding, preferential adsorption coefficients, LCST cloud-point depression are theoretically calculated and compared with the experiments. The transient network theory is developed to study the dynamic-mechanical modulus, nonlinear stationary viscosity, time development of the shear stresses under start-up shear flows, etc. in networks formed by self-assembled telechelic hydrophobically-modified water-soluble polymers. The initial slope, flow hardening, and overshoot of the shear stress are studied in detail in relation to nonlinear stretching of the elastically active chains in the network.

### 『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

『大学の物理教育』は、年3回(3月、7月、11月)発行で年間購読料(個人)は1,000円です。購読ご希望の方は、1. 会員番号、2. 氏名(非会員の方は連絡先、送付先住所)をメール(pubpub@jps.or.jp)またはFax(03-3816-6208)でご連絡下さい。

また、本誌ホームページのURLは次の通りですので、どうぞご覧下さい。

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

『大学の物理教育』編集委員会

### Vol. 21-1 (3月15日発行) 目次

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

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

# 微粒子の熱放射における共振器量子電磁気学的効果

立川 真樹 〈明治大学理工学部物理学科〉

小田島 仁司 〈明治大学理工学部物理学科〉

1900年にPlanckが導出した放射法則は、19世紀末から続いた熱放射の論議に決着をつけるとともに、量子物理学への道を切り開いた。今日、一般的な熱計測法がPlanckの放射法則を礎に成立しており、基礎科学から熱工学にわたる広範囲で応用されている。白熱球などマクロな物体からの熱放射のスペクトルは、厳密には物質の化学組成や放射面の粗さに依存するものの、多くの場合、黒体もしくは灰色体のそれで近似できる。しかし、放射体が次第に小さくなり放射波長と同程度かそれ以下になっても、Planckの放射式は成立するであろうか？ ミクロの極限である原子の発光スペクトルは、原子固有の線スペクトルである。放射体を小さくした場合、熱放射はどのように放射体自身の個性を獲得していくのだろうか？

意外なことに、Planckの発見から100年を経た現在に至るまで、熱放射のサイズ効果を明確にした実験は行われていない。微粒子を対象とした実験の本質的な難しさによるのかもしれない。微粒子からの熱放射スペクトルを観測するためには、高温の微粒子を熱的に孤立した状態で空間に保持しなければならない。何らかの支持を用いれば熱的接触が不可避で、支持体自身からの熱放射が微粒子の微弱な信号を覆い隠してしまう。また、粒径が不均一な集団からの信号を観測したのでは、個々のスペクトル構造は平均化されて特徴を失ってしまう。そこで我々は、光トラップにより高温の微粒子を空中に浮遊させ、単一の微粒子からの熱放射スペクトルを計測する新たな実験法を開発した。

我々の光トラップは、波長 $10\ \mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザー光の定在波を利用したもので、トラップ領域に生じる上昇気流により重力の一部を相殺してトラップの安定度を向上させている。そこにアルミナ、酸化チタンなどの誘電体微粒子を捕捉すると、トラップ光を吸収して高温になり白熱する。このとき微粒子は融点を超えて液滴となっており、表面張力で球形をなしている。蒸発によって縮小していく高温微粒子からの熱放射の可視・近赤外スペクトルを観測すると、単調な黒体様のものから徐々に規則的な鋭いピークを持つ形に変化する。この周期的なスペクトルは、Whispering Gallery Mode (WGM) と呼ばれる誘電体微粒子の光共振器モードに共鳴した構造であることが明らかになった。

物質が自然放出を起こす確率は、その空間の電磁場のモード密度に比例する。モード密度が離散的になる有限の空間では、特定の周波数で自然放出の増強・抑制が起こる。誘電体球のWGMは境界で全反射を繰り返しながら周回する電磁波によるモードで、非常に高いQ値を持つ。今回観測されたピーク構造は、WGMに同調した周波数で熱放射が増強されたもので、共振器量子電磁気学的効果を通して、誘電体微粒子の熱放射に放射体の形状や大きさの個性が現れることを示している。

微小な熱放射体は火災や星間ダストなど自然界にも豊富に存在しており、熱放射のサイズ効果の解明は自然現象の正しい理解に欠かせない。さらに、サイズ効果を積極的に利用すると、波長選択性や指向性など、熱放射の特性を制御することも可能になる。

—Keywords—

## Planckの放射法則：

絶対温度 $T$ の壁で囲まれた空洞と熱平衡状態にある電磁波のスペクトルを表す式で、空洞放射・黒体放射を記述する。その導出には、エネルギー量子の考え方が用いられている。スペクトルは温度 $T$ のみに依存し、壁の材質・空洞の形や大きさによらない。実際の物体からの熱放射スペクトルは、Planckの放射式に放射率 $\epsilon$ を乗じた形で表される。 $\epsilon$ が1より小さく一定とみなせる放射体を灰色体という。

## 共振器量子電磁気学 (共振器量子電力学)：

共振器内では、電磁場の空間分布やモード密度が大きく変化する。このような状況下において量子化された電磁場と原子の相互作用を研究する分野。

## Whispering Gallery Mode (WGM)：

光のwhispering gallery modeは、誘電体球や誘電体ディスクの内部を境界面で全反射しながら円周に沿って周回する電磁波による固有モードである。“Whispering Gallery Wave (WGW)”という言葉は、囁き声の円形の壁に沿って遠くまで伝わる現象に由来しており、Rayleigh卿によってはじめて解き明かされた。北海道大学のO. Wright教授がWGWに関する素晴らしいweb pageを公開している (<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-WG.html>)。



## 1. はじめに

太陽や白熱球など、高温の物体が電磁波を放出する熱放射は、私たちにとってとても身近な現象である。可視光線は照明に使われてきたし、赤外域の熱放射は暖房や温度計測に利用されている。一瞬で体温がわかる子供用の耳温度計も、実は熱放射を検出している。

熱放射の研究が盛んになったのは19世紀末、製鉄業や陶磁業において炉の温度を正確に知る要請があったといわれている。熱力学や電磁気学に基づく放射理論の変遷の背景では、赤外から紫外に至る広い波長域で電磁波の強度を正確に測るための実験技術の進展が大きな役割を果たしていた。<sup>1)</sup> Wienの放射則が長波長側で実験と一致しないことを知らされたPlanckが、それを是正する新たな放射則を提案したのは1900年のことである。<sup>2)</sup> Planckの放射則には、エネルギー量子の仮説が包含されており、やがてそれが光量子の概念につながっていく。量子力学の誕生の契機となった重要な発見が、溶鉱炉のようなマクロな系のスペクトルに潜んでいたというのが面白い。

炉のような空洞に充填し、壁や中の物体と熱平衡になった電磁波を、小さな覗き穴から取り出すと、そのスペクトルは空洞内の電磁波のエネルギー分布を反映する。Planckの放射式は、熱平衡状態における電磁場のエネルギー密度を与える式であり、Planckの放射則に従う熱放射を空洞放射または黒体放射と呼ぶ。黒体とは、入射方向・偏光状態によらず入射するすべての波長の電磁波を完全に吸収する理想的な物体をいうが、空洞壁に空いた小さな穴は黒体とみなすことができる。空洞に対して穴が十分に小さければ、穴に入射した光は空洞内壁で反射を繰り返すうちに減衰して、再び穴から外に出ることがない。箱や缶に小さな穴をあけて、いろいろな方向から眺めてみるとよい。どこからどう見ても穴は漆黒に見える。プランクの放射則によると、温度 $T$ の熱平衡状態において周波数 $\nu$ から $\nu+d\nu$ に含まれる単位体積当たりの電磁波のエネルギーは、

$$u(\nu) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu \quad (1)$$

で与えられる。 $h$ ,  $c$ ,  $k_B$ はそれぞれ、プランク定数、光速度、ボルツマン定数である。導出には有限サイズの空間を想定し、周期的境界条件や完全導体壁の境界条件を課して空間内の電磁波のモードを規定する。電磁波の波長に対して空間が十分大きい極限のもとにモード密度を計算し、各モードの平均エネルギーをカノニカル分布に従って求めることで、エネルギー密度のスペクトルが得られる。その際、各モードのエネルギーが光量子の整数倍しかとりえないことを仮定する。

こうして得られた空洞放射のスペクトルは温度のみに依存しており、空洞の形や壁の材質など放射体の個性をいっさい反映しない。これは、熱平衡状態の電磁波のエネルギースペクトルがユニークに決まると考えれば自然なこと

である。大きな空間を仮定したことで、その境界の個性は消えてしまったと思えばいい。実際の物体からの熱放射は、物質の化学組成や放射面の粗さに依存する。しかし、およそマクロな物体を対象とする限り、熱放射のスペクトルは広い波長範囲で連続的なものとなる。これは、マクロな物体が関わる大きな空間の電磁波のモードが、周波数軸上に連続的に分布していることによる。

では、空洞の大きさが観測している放射の波長に比べて十分に大きくない場合にはどうだろうか？ 電磁波のモードは空間の形や大きさ、境界条件に依存する。同じ温度の熱平衡状態であっても、熱放射スペクトルは放射体の形状や大きさによって異なるのではないだろうか。熱放射はミクロに見れば、熱励起された原子が光を自然放出する現象である。自然放出レートは原子あるいは量子準位に固有の量ではなく、原子が置かれた環境によって変化する。共振器中の原子の自然放出が電磁波モードとの共鳴・非共鳴に対応して増強されたり抑制されたりする現象は、古くからPurcell<sup>3)</sup>やKleppner<sup>4)</sup>が予言しており、いくつかの巧妙な実験によって実証されている。<sup>5,6)</sup> 熱放射においても、電磁波のモードに制限がつくような状況では、この共振器量子電磁気学<sup>7)</sup> (cavity QED) 的な効果が放射特性に現れないだろうか。

このような問題提起のもと小論で紹介するのは、ミクロンサイズの誘電体微粒子からの熱放射である。電磁波の伝播を許す誘電体は、それ自体が光共振器として作用する。特に球の場合には、境界面で全反射しながら円周に沿って周回するWhispering Gallery Mode (WGM) と呼ばれる特徴的な固有モードが存在し、非常に高いQ値を持つ。<sup>8,9)</sup> 我々は、光トラップを用いて高温微粒子を空中に捕捉し、単一の微粒子からの発光スペクトルを観測することに成功した。その結果、ミクロンサイズの誘電体球からの熱放射は、WGMに共鳴した離散的な周波数で選択的に起こること、つまり熱放射においてもcavity QED効果が顕在化することが明らかになった。<sup>10)</sup> 誘電体微小球は、物質と電磁場のエネルギー交換を議論する有限サイズの系として理想的なモデルである。我々の実験の経過を紹介しながら、微粒子のスペクトルが投げかける古くて新しい問題について考えてみよう。

## 2. 高温微粒子の空中浮遊

放射体の共振モードを通して熱放射スペクトルにサイズ・形状効果が現れることを予見した論文はいくつか散見されるが、<sup>11-13)</sup> 意外なことにPlanckの発見から100年以上を経た現在に至るまで、それを実証した実験は我々の知る限り皆無である。サイズ効果を実験で検証するためには、高温の微粒子を熱的に孤立した状態で空間に保持しなければならない。何らかの支持を用いれば熱的接触が避けられず、支持体自身からの熱放射が微粒子の微弱な信号を覆い隠してしまう。こうした状況が微粒子の熱スペクトル計測

を難しくしていたのではないだろうか。そこで我々は、光トラップを用いて微粒子を空中に浮遊させて熱的にも空間的にも孤立させ、単一の微粒子の分光計測を実現することにした。トラップ技術には1個の微粒子の挙動を連続観測できるという強みがある。粒径や形など粒子の条件を厳密に特定できる上に、集団平均をとるとならされ見逃されてしまうような微細なスペクトル構造を明確に捉えられる。

光トラップは、レーザー光が微粒子や原子・分子に及ぼす力学効果を利用して、これらの粒子を捕捉する技術である。電磁波が物体に及ぼす力には、光の進む向きに働く放射圧と光の強度勾配の方向に働く勾配力(光双極子力)がある。<sup>14)</sup> 今回採用した光の定在波によるトラッピングでは、このうちの勾配力を利用する。光電場の向きに分極する微粒子は、光強度の強くなる向きに勾配力を受ける。このため、光の定在波中では電場の腹に向けて3次元的に復元力が働く。<sup>15,16)</sup>

我々の光トラップでは、対向する波長 $10\ \mu\text{m}$ 帯の炭酸ガスレーザー光を焦点が重なるようにレンズで集光して定在波を形成している。このトラップは、もともとは微結晶の遠赤外分光や分子の空間捕捉を目的として開発されたものである。実験装置の詳細については文献17を参照されたい。捕捉対象の微粒子は、赤外レーザー光の熱効果(レーザーアブレーション)を用いてトラップ内で生成する。微粒子が凝集した粗い粉末試料を上空のトラップ領域に導入すると、粉末はトラップレーザー光を吸収し、ミクロン程度の微粒子に分解して四方八方に飛散する。トラップは数kPaの希薄ガスを封入した真空槽内に設置されている。分解した微粒子のうち、粘性抵抗によって減速されレーザー光内にとどまったものが捕捉される。一般に気相中での光トラッピングは、浮力が弱く重力の影響が避けられないこと、気流による擾乱を受けることから、液体中よりもはるかに難しい。ところが、この光トラップの安定性は非常に高く、閉じ込め時間は1時間に及ぶこともある。トラップ機構を詳細に調べたところ、赤外光の吸収によるレンズの発熱によりトラップ領域に一樣な上昇気流が発生し、その粘性抵抗が重力の一部を相殺してトラップの安定性が向上

することが明らかになった。<sup>17)</sup> 我々はこのトラップを flow-assisted optical trap と呼んでいる。なお、希薄ガスの中で粒子が光を吸収する場合には、電磁波からの直接的な力学作用や気流の他に、表面温度の不均一によるラジオメトリック力<sup>18)</sup>が作用しうる。吸収微粒子のトラップのメカニズムは、熱的な効果も含めて慎重に吟味すべき課題である。

アルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )、ジルコニア( $\text{ZrO}_2$ )などの酸化物イオン結晶は、中赤外領域に格子振動に起因した吸収帯を持ち、炭酸ガスレーザーの波長は吸収バンドの裾に位置している。これらの粉末をトラップに導入したところ、捕捉された微粒子が炭酸ガスレーザー光を吸収して高温になり白熱することが明らかになった。図1の画像は白熱するアルミナ微粒子をCCDカメラで記録したものである。微粒子は数十秒から数分間にわたって徐々に発光を弱めながら空間に静止し続ける。発光粒子の大きさを測定するためには、マクロレンズで真空槽外に実像を結びデジタル顕微鏡で観測する。CCDのblooming現象を防ぐために、背後から一樣な弱いレーザー光を照射し熱放射自体は干渉フィルターで減衰させることで粒子の影を撮像したところ、発光微粒子は数 $\mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ 程度の粒径を持つことがわかった。

### 3. 高温微粒子からの熱放射スペクトル<sup>10)</sup>

微粒子の発光スペクトルは、時間とともに刻一刻変化していく。捕捉直後の比較的強い発光を呈するアルミナ微粒子の可視から近赤外域のスペクトルを図2(a)と(b)に示す。(a)はCCDイメージセンサーを備えた分光器で、(b)はInGaAsイメージセンサーを備えた分光器で測定したもので、検出素子の分光感度の差でS/Nにかなり差があるが、同じ微粒子からの2つの波長域のスペクトルである。スペクトルは $1.15\ \mu\text{m}$ 付近にピークを持つ連続的なもので、黒体放射のスペクトル形によくフィットする。放射温度は $2,540\ \text{K}$ と見積もられるが、これはアルミナの融点 $2,327\ \text{K}$ をはるかに超えた高温である。つまり、アルミナは融液となっており表面張力で球形をなしている。

この高温液滴は蒸発によって徐々に縮小し、放射も弱く

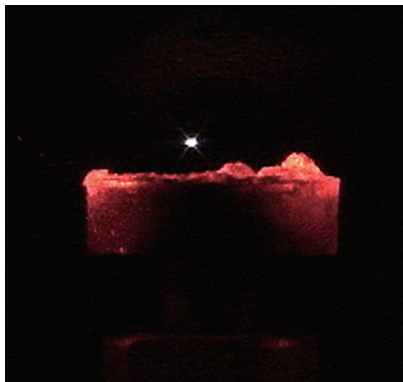


図1 トラップ内で白熱するアルミナ微粒子。下方の試料皿に粉末をのせて上方へ打ち上げる。

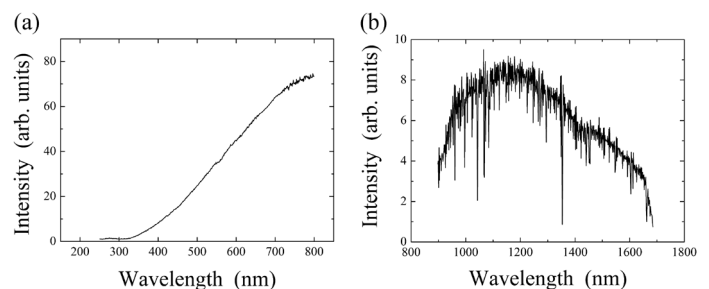


図2 比較的大きなアルミナ微粒子からの熱放射スペクトル。(a) CCDイメージセンサーを備えた分光器による可視域の測定。(b) InGaAsイメージセンサーを備えた分光器による近赤外域の測定(いくつかの鋭い切れ込みはノイズによるもの)。

なっていく。それに伴って熱放射スペクトルには劇的な変化が現れる。図3(a)~(c)は1つのアルミナ微粒子が蒸発により縮小していく過程で観測された可視域のスペクトルである。まず、連続スペクトルに重畳して周期的な構造が現れだす(図3(a))。さらに縮小するとはじめに見えたピークが2つに分裂し(図3(b))、粒子が小さくなるにつれてはっきりした周期構造に変化していく(図3(c))。図3(d)は、今回観測できた中で最も小さいアルミナ微粒子のスペクトルで、粒径は $2.5\ \mu\text{m}$ と推定される。スペクトルのピーク構造は、粒径の縮小とともにコントラストを増し、その背景となる連続スペクトルは減衰していく。またピークには大きさの異なる2系列があり、各系列内のピーク間隔は単調に増加していく。そしてこれら一連の現象は、酸化チタンやジルコニアでも同様に観測されるので、物質固有のものとは考えにくい。

序論の腰を折るようだが、実は我々は最初から熱放射の cavity QED 効果を狙ってこの実験を始めたわけではなかった。たまたま光トラップのサンプルとして使用したアルミナ微粒子が発光したとき、どうせ黒体放射だろうと高を括っていた。ところが迷光などの artifacts の可能性が排除されるにつれて、信号が本質的に思えてくる。こうなると、スペクトルの正体を探る謎解きほど面白いものはない。

はじめにヒントをくれたのは、光トラップの発明者でもある Ashkin らによる 1977 年の実験結果だった。<sup>19)</sup> 彼らは、微小な油滴を放射圧で浮遊させる実験において、特定の光源周波数で放射圧が増大することを見出した。さらに、放射圧が増大する周波数は微小球の固有モードの周波数に一致しており、2つの系列からなることが明らかになった。<sup>20)</sup> 誘電体球の電磁波モードは古くから詳細に解析されており、動径方向に電場成分を持たない TE 波と磁場成分

を持たない TM 波の2種類のモードが存在する。<sup>8)</sup> 特に Whispering Gallery Mode (WGM) と呼ばれるモードは、非常に高い Q 値を持つことも知られている。<sup>9)</sup> 熱放射に見られる2系列の鋭い離散スペクトル群は、これらの固有モードに関係があるのではないだろうか？

そこで、周期的なピークの周波数間隔  $\Delta\nu$  と粒径  $d$  の相関を調べてみると、周波数間隔は粒径に反比例することが明らかになった。後述するように、誘電体の屈折率を  $n$  とすると WGM の free spectral range は  $\Delta\nu = c(\pi nd)^{-1}$  と表される。実験データはアルミナ融液の屈折率<sup>21)</sup>を代入した理論式と定量的にもよく一致しており、微粒子の熱放射スペクトルに現れた共鳴構造が微粒子自身の光共振器モードであることが判明したのである。

#### 4. WGM による自然放出確率の変調

微粒子の波長選択的な熱放射は、熱励起された原子集団が、自由空間モードではなく誘電体微粒子の内側の有限空間の固有モードにエネルギーを放出する現象である。ここで、誘電体球の電磁波の固有モード、特に重要になる WGM について紹介しておこう。

whispering gallery : 「囁きの回廊」は、円形の壁に囲まれた空間において、壁際で囁いた声が遠くの壁際にいる人によく聞こえるという現象で、ロンドンのセントポール寺院や北京の天壇公園の回音壁が有名である。セントポール寺院の whispering gallery に関心を持った Rayleigh<sup>22)</sup> は、簡単な幾何学的な考察から、壁に反射しながら周回する音波は、壁に沿った限られた空間に閉じ込められるため、自由空間よりも減衰が少ないことを示し、遠くまで届く囁きに物理的な根拠を与えた。これが Whispering Gallery Wave (WGW) である。国内では、神戸国際会館 11 階のガーデンレストラン(図4(a))が格好の whispering gallery になることを、筆者が体験済みである。近くに行かれた際には、ぜひ立ち寄られるとよい。

光の WGM は、誘電体の球や円柱の境界面で全反射を繰り返しながら内部を周回する電磁波によるモードで、誘電体の固有モードのうちある特徴的な指数を持つものをいう。誘電体球内部の電磁場のモードは、極座標表示を用いて以下のスカラーポテンシャルで表せる。<sup>9)</sup>

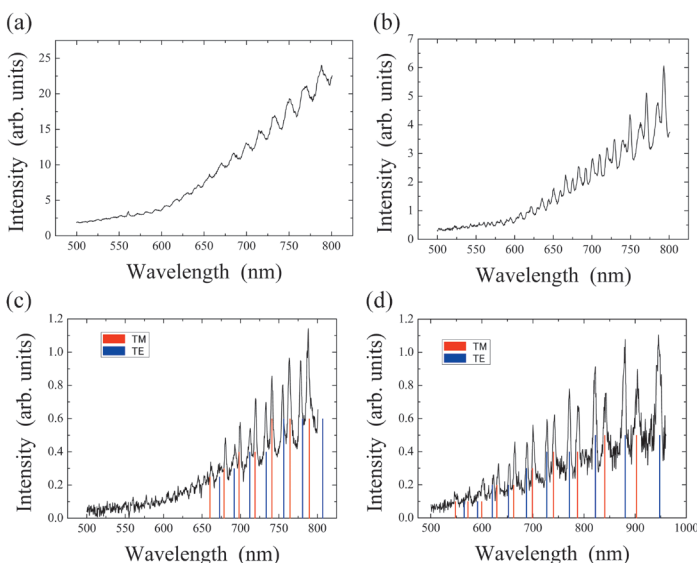


図3 (a)~(c) 蒸発による縮小に伴うアルミナ微粒子の熱放射スペクトルの変化。スペクトルから推定される粒子直径は、(a)  $6.8\ \mu\text{m}$ 、(b)  $5.8\ \mu\text{m}$ 、(c)  $4.8\ \mu\text{m}$ 。(d) 観測されたなかで最も小さいアルミナ微粒子の熱放射スペクトル。推定粒子直径は  $2.5\ \mu\text{m}$ 。(c)と(d)中、赤線と青線は計算により得られた TM モードと TE モードの固有波長を示す。

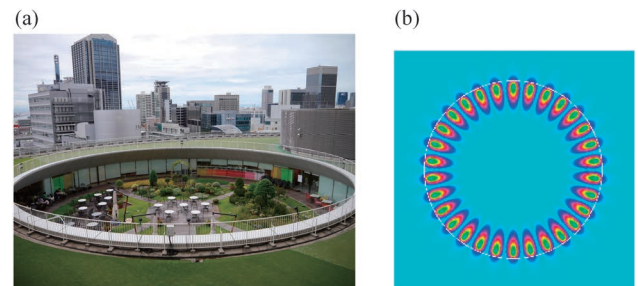


図4 (a) 神戸国際会館の「囁きの回廊」。(b)  $(l, m, q) = (15, 15, 1)$  の WGM の電場強度分布。

$$U(r, \theta, \varphi) = CP_l^m(\cos \theta) (kr)^{1/2} J_\nu(kr) e^{im\varphi} \quad (2)$$

ここで、 $k$ は誘電体内の波数、 $C$ は任意定数である。 $P_l^m(\cos \theta)$ はルジャンドル陪関数で $m$ は $-l$ から $l$ までの整数をとる。 $J_\nu(kr)$ はベッセル関数で $\nu=l+1/2$ である。各モードの電磁場はポテンシャルの空間微分で与えられ、TEモードとTMモードに分けられる。符号の異なる $m$ は、反対周りに周回する波を表しており、これらが重なって定在波を形成する。一方、球の外側には遠方で球面波に漸近する電磁場が存在しており、境界において電場・磁場の接線成分が連続であるという条件を課すことにより、各モードの固有周波数が決定する。1組の $(l, m)$ に対して境界条件を満たす周波数の解は無数に存在するので、新たな指数 $q (=1, 2, \dots)$ で指定する。 $q$ は動径方向の強度の極大値の数に対応している。固有周波数は $m$ に依らず $2l+1$ 重に縮退している。

音のWGMのように赤道面の境界付近に局在しながら周回する波に対応するのは、大きな $l$ と小さな $q$ 、 $|m| \approx l$ のモードである。図4(b)には、 $(l, m, q) = (15, 15, 1)$ のWGMの電場強度分布を示した。波長に比べて球が十分大きくなると、全反射を繰り返すという幾何光学的なイメージが適切になる。このとき固有周波数は、およそ波長の整数倍が円周になるという条件で決まるので、モード間隔は近似的に $\Delta\nu = c(\pi nd)^{-1}$ となる。TMモードとTEモードが分離するのは、偏光によって全反射の際の位相シフトが異なるためである。

アルミナ微粒子の熱放射スペクトルに現れたピークは、図3(c)のスペクトルでは $q=2$ で $l=24-30$ の系列、図3(d)のスペクトルでは $q=1$ で $l=11-20$ の系列であり、いずれもWGMに共鳴した周波数であることが確認できた。十数 $\mu\text{m}$ 以下の微粒子について、 $q=1-5$ の系列が観測されたが、粒径が小さくなるにつれて、徐々に小さな $q$ のWGMに帰属する系列が支配的になっていった。<sup>10)</sup>

WGMに向けて選択的に熱放射が起きる現象を、物質の内部状態の詳細に立ち入らずに、2準位系と光の相互作用から考察してみよう。励起準位の原子が、周波数 $\nu \sim \nu + d\nu$ の光子を1つ放出して基底準位に遷移する単位時間当たりの確率は、次式で与えられる。<sup>23)</sup>

$$w_{if}(\nu) d\nu = \frac{|\langle f|H|i\rangle|^2}{\hbar^2} m(\nu) g(\nu) d\nu \quad (3)$$

ここで、 $H$ は原子と光の相互作用ハミルトニアン、 $m(\nu)$ は空間の電磁波のモード密度、 $g(\nu)$ は原子のスペクトル密度である。たとえば、自由空間中に原子が孤立している場合、電磁波のモード密度は周波数の2乗に比例して連続的かつ緩やかに変化するので、放出される光のスペクトルを決定づけるのは原子自身の固有スペクトルである。上式を周波数に関して積分するとEinsteinのA係数が得られ、これは原子の準位に固有の量と思われがちである。しかし、原子が有限サイズの共振器の中に閉じ込められた場合、原

子の固有スペクトルと離散的な電磁波のモードが整合した場合には遷移確率は増強され(Purcell効果)、<sup>3)</sup>不整合の場合には抑制される。<sup>4)</sup>

誘電体は可視域ではほぼ透明で吸収スペクトルは平坦である。したがって、粒径が小さくなり電磁波のモード密度が離散的になると、電磁場のスペクトル構造が直接放出光のスペクトルに反映される。Q値が高い低損失のモードほど共振スペクトルは狭帯域で高いピークを持ち、それに同調した周波数で自然放出確率は増加する。一方、共振モードから離調した周波数帯ではモード密度が小さくなり、自然放出は抑制される。WGMが高いQ値を持つことは、光路が全反射により閉じることから直感的に推測できるが、実際には反射面が曲率を持つために誘電体外部に漏れ出す電磁波が存在し、粒径が小さいほど顕著になる。表面や内部の不均一性による散乱損失が無視できるとすると、媒質自身の吸収と界面からのリークによる損失によって共振の幅が決まる。

WGMによって自然放出確率が影響されることは、微小球にドープした色素からの蛍光スペクトルにWGMに共鳴した複数のピークが重畳する現象<sup>24)</sup>や、微小液滴中のイオンの発光寿命そのものが変化すること<sup>25)</sup>からも確認されている。また、WGMの高いQ値と小さいモード体積を利用して単一モードの光子と原子の強い結合状態をつくり、種々のcavity QED効果を検証しようとする実験も盛んに行われている。<sup>26, 27)</sup>光と原子の相互作用の量子力学的な側面は、こうした高度な実験技術で検証されるだけでなく、意外に身近な所、例えば花火や噴火の炎のなか、あるいは微小な塵の漂う宇宙空間<sup>28)</sup>に潜んでいるかもしれないのである。

## 5. 今後の展望

最後に、現時点での我々の興味をいくつかあげておきたい。有限可算個の電磁波モードと物質が熱平衡状態にあるとき、自由空間を前提に求められている放射法則は修正を迫られる。物体から放射される総放射パワーは、マクロな物体では表面積に比例し、ミクロな物体になると体積に比例するようになることは想像できる。では、表面に局在したWGMが支配的な微小球ではどうであろうか？最近の理論研究<sup>13)</sup>で、有限サイズの放射体ではStefan-Boltzmannの法則に補正項が付加されることが予測されているが、境界の形、境界が誘電体界面か完全導体壁かの違いによって結果が変わり、これは結構デリケートな問題である。

高温の微小融液が十分均一で内部や表面からの散乱が小さければ、観測される放射特性は電磁場理論にかなり忠実と期待できる。固有モードの放射強度と外部への結合を定量的に評価すると、観測された熱放射スペクトルの全貌が再現されるはずで、そこには物体の屈折率や消衰係数の情報が直接現れる。燃焼科学やロケット工学などの分野<sup>29)</sup>では何十年も前からそのニーズがあったにもかかわらず、

2,000 Kにもなる高温物体の光学定数を正確に測る手段は確立されていない。高温液滴のトラッピングは計測手段としてのポテンシャルを持っており、高温での相転移や結晶構造の理解にも貢献するのではないだろうか。

そして、やはり魅力的なのは、熱放射を制御する可能性である。一般に熱放射は、非常に広帯域でインコヒーレントな質の悪い光と考えられている。しかし、今回観測された現象は、微小な放射体のサイズや形状を選ぶことにより、その熱放射特性を制御できることを示している。微粒子の固有モードによる周波数選択性に加え、放射体の対称性を選ぶことにより、特別な方向へ指向性を持たせることもできる。最近、マクロな物体の表面に周期的な微細加工を施し、フォトニック結晶や空洞共振器として作用させることによって赤外域で熱放射を制御する試みが注目を集めている。<sup>30-33</sup> 誘電体微粒子による制御は、WGMによる非常に鋭い波長選択性を持つこと、可視域まで含むより広帯域な制御を可能にするところに特徴がある。

こうした興味のもとに、現在我々は中赤外域でのスペクトルの観測に取り組んでいる。熱放射が微小誘電体球の固有モードで選択的に行われているとすれば、その遮断波長より長い波長の電磁波は放射が抑制されているはずで、熱放射にもかかわらず可視域にエネルギーが偏在した高効率の発光体を実現していることになる。これを検証したいのだが、FTIRなど既存の分光計は、刻一刻変化する微粒子の微弱な中赤外域の放射を検出するには感度が不足しており、ヘテロダイン検出法など何らかの技巧をこらさなければならぬ。Planckの放射式の確立には、LummerやRubensによる赤外域での精密なスペクトル計測が大きく寄与していた。<sup>1)</sup> 彼らは100年以上も前に、熱雑音に影響される長波長測光の難しさを多くの技術革新により乗り越えて、真理に近づいたのである。我々の力量は偉大な先人たちに遠く及ばないが、彼らの姿勢を倣いつつ研究を続けていくことは、何とも楽しいことである。

#### 参考文献

- 1) 熱放射の実験研究が理論構築に果たした役割については、小長谷大介：『熱輻射実験と量子概念の誕生』（北海道大学出版会、2012）に詳しい。
- 2) M. Planck: Verh. Dtsch. Phys. Ges. **2** (1900) 202; 237.
- 3) E. M. Purcell: Phys. Rev. **69** (1946) 681.
- 4) D. Kleppner: Phys. Rev. Lett. **47** (1981) 233.

- 5) P. Goy, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **50** (1983) 1903.
- 6) R. G. Hulet, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **55** (1985) 2137.
- 7) S. Haroche and D. Kleppner: Physics Today **42** (1989) 24.
- 8) J. A. Stratton: *Electromagnetic Theory* (McGraw-Hill, 1941).
- 9) A. N. Oraevsky: Quantum Electronics **32** (2002) 377.
- 10) H. Odashima, *et al.*: Phys. Rev. A **80** (2009) 041806(R).
- 11) S. C. Ching, *et al.*: J. Opt. Soc. Am. B **4** (1987) 1995.
- 12) S. Lange and G. Schweiger: J. Opt. Soc. Am. B **11** (1994) 2444.
- 13) A. M. García-García: Phys. Rev. A **78** (2008) 023806.
- 14) 鳥井寿夫：『基礎からの量子光学』（松岡正浩ら監修、オプトロニクス社、2009）。
- 15) S. Friebe, *et al.*: Phys. Rev. A **57** (1998) R20.
- 16) P. Zemánek, *et al.*: Opt. Lett. **24** (1999) 1448.
- 17) T. Ochiai, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) L957.
- 18) V. G. Shvedov, *et al.*: Opt. Express **17** (2009) 5743.
- 19) A. Ashkin and J. M. Dziedzic: Phys. Rev. Lett. **38** (1977) 1351.
- 20) P. Chýlek, *et al.*: Phys. Rev. A **18** (1978) 2229.
- 21) J. M. Adams: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **7** (1967) 273.
- 22) J. W. Strutt (Baron Rayleigh): *The Theory of Sound, vol. II* (Macmillan and Co, London, 1878).
- 23) 霜田光一、矢島達夫編著：『量子エレクトロニクス(上)』（裳華房、1972）。
- 24) R. E. Benner, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **44** (1980) 475.
- 25) H.-B. Lin, *et al.*: Phys. Rev. A **45** (1992) 6756.
- 26) D. W. Vernooy, *et al.*: Phys. Rev. A **57** (1998) R2293.
- 27) D. J. Alton, *et al.*: Nat. Phys. **7** (2011) 159.
- 28) 高橋忠幸ら：応用物理 **68** (1999) 1049.
- 29) E. J. Mularz and M. C. Yuen: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **12** (1972) 1553.
- 30) H. Sai, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **82** (2003) 1685.
- 31) F. Kusunoki, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) 5253.
- 32) M. U. Pralle, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **81** (2002) 4685.
- 33) M. De Zoysa, *et al.*: Nature Photonics **6** (2012) 535.

(2014年7月31日原稿受付)

## Cavity QED Effect in Thermal Radiation from a Microparticle

Maki Tachikawa and Hitoshi Odashima

abstract: Although Planck's law of blackbody radiation well describes spectral profiles of thermal radiation from macroscopic objects, it is not applicable to particles of size comparable to optical wavelengths. We experimentally demonstrate that thermal radiation from a micron-sized dielectric particle depends sensitively on its size and shape through the cavity quantum-electrodynamic effect. Our flow-assisted optical trapping levitates a single molten droplet of dielectric materials such as  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  to enable its emission spectroscopy. As the particle becomes smaller, a blackbody-like spectrum turns into a spectrum dominated by multiple peaks resonant with whispering gallery modes of the microsphere, showing that the spontaneous emission rate is modified by the discrete mode density.

# “実験技術”としての量子多体系シミュレーションソフトウェア ALPS



藤堂 眞治

東京大学大学院理学系研究科,  
東京大学物性研究所

スーパーコンピュータやワークステーションが計算物理における「実験装置」であるとすると、シミュレーションソフトウェア（プログラム）はそれらを使いこなすための「実験技術」と言える。将来の研究成果につながる「技術」は、個々の研究者あるいは研究グループが、門外不出のものとして日々磨きあげていくべきである。このような立場に立つと、シミュレーションに使うプログラムは、これまでの経験と知識に基づき「速く」「信頼できる」ものを自分で一から作るのが当然であり、できあいをブラックボックスとして使うのは研究として認められないということになる。

コンピュータの計算速度は年とともに指数関数的に伸びている。シミュレーションの手法もそれ以上の速さで進化している。例えば、量子磁性、高温超伝導など、電子相関の強い量子多体系に対する代表的な手法の一つである量子モンテカルロ法は、状態更新のアルゴリズムにおいて、近年、多くの本質的な改善がなされ、バイアスのない最も精密な数値解析手法となっている。それに伴い、アルゴリズムはますます複雑化している。プログラム開発や並列化、チューニングのためのコストは増加し、研究者の「専門化・固定化」も大きな問題となっている。その一方で、実験家の間でも、日常的なツールとしてのシミュレーションの需要が高まっている。このような状況のもと、計算機実験の技術開発や整備は、もはや個人の素養に頼るだけではなく、コミュニティ全体で取り組み共有していくべき段階にきているのは明らかである。

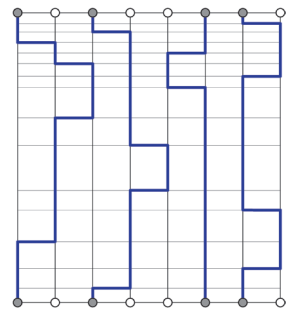
本稿では、計算物性物理、量子統計物理分野におけるそのような取り組みの一つである「ALPS」を紹介する。ALPS (Algorithms and Libraries for Physics Simulations) は、量子スピン系、電子系など強相関量子多体系の有効モデルのシミュレーションのためのオープンソースソフトウェアの開発を行う国際共同プロジェクトである。ALPS では、主に、量子統計物理分野のシミュレーションの共通基盤となるライブラリやデータ解析ツールを開発すると同時に、最新のアルゴリズムに基づく質の高いアプリケーションプログラムの提供を目指している。ALPS には、厳密対角化、古典・量子モンテカルロ法、密度行列くりこみ群、動的平均場近似など、量子多体系の有効モデルに対する標準的あるいは先進的なアルゴリズムを用いたアプリケーションが用意されており、興味あるモデルの特性や計算したい物理量に応じて、最適なアプリケーションを選ぶことができる。

ALPS のようなコミュニティコードを用いることで、計算物理の専門家でなくとも、様々なモデルについて手軽にシミュレーションを始めることができる。それだけでなく、新たなプログラムやアルゴリズムを開発する際のリファレンスコードとして、あるいは計算物理教育の題材、シミュレーション結果の共有やアーカイブ化のためのツールとしての活用など、ハイエンドのスーパーコンピュータによる大規模シミュレーションだけでなく、計算物理の裾野を広げていくためにも、このようなコミュニティコードの整備・知識共有は、今後ますます重要となっていくに違いない。

—Keywords—

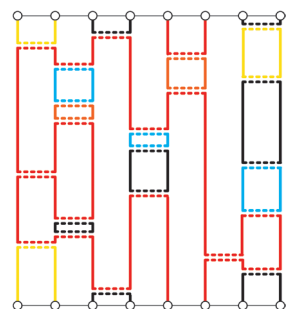
経路積分表示：

量子力学にしたがう系では、演算子の非可換性（不確定性原理）のため、モンテカルロ法に必要となるボルツマン因子の定義は自明ではない。量子モンテカルロ法では、経路積分の考え方に基づき、 $d$ 次元の量子系を  $(d+1)$ 次元の古典系におきかえる。図に一次元量子スピン系に対する経路積分表示の例を示す。縦軸は「虚時間」と呼ばれ、スピンはこの方向にゆらいだ「世界線」（青線）で表現される。



量子モンテカルロ法における世界線更新：

経路積分により得られた世界線のサンプリングには、ループアルゴリズムあるいはワームアルゴリズムと呼ばれる非局所的な更新手法が用いられる。ループアルゴリズムでは、ステップ毎にスピン配位とループ（図）を交互に更新していく。効率のよい更新には、リンクリストやグラフ操作などの専門知識が必要とされ、その理解や習得には相当な訓練が必要である。



## 1. はじめに

世界最初の汎用コンピュータ ENIAC の誕生から約 70 年、最先端のスーパーコンピュータの演算性能は 100 兆倍以上の進化をとげた。最初の TOP500 リスト<sup>\*1</sup> が公開された 1993 年以降の約 20 年間だけを見ても、約 60 万倍の性能向上である。この計算機の圧倒的な進化により、現在では、10 万原子系の第一原理電子状態計算<sup>1)</sup> あるいは 1,000 万長距離相互作用原子系の古典分子動力学計算<sup>2)</sup> など、超大規模系をより精密にシミュレーションすることが可能となっている。しかしこの大規模化・高精度化に貢献したのは計算機の演算性能やネットワーク性能の向上だけではない。基礎方程式を解くための計算科学的な理論「アルゴリズム」の発展も同等あるいはそれ以上に重要なファクターである。

量子多体系においては、量子ゆらぎや相互作用の競合により、量子磁性、高温超伝導、重い電子系、トポロジカルな量子秩序、あるいはそれら量子相の間の量子臨界現象など、強相関系特有の様々な興味深い物性が現れる。このような系では、強い相関の効果を解析的に扱うことが困難であることも多く、直接的な数値計算がしばしば本質的な役割を果たすようになってきている。物性基礎論、量子統計物理の分野では、量子磁性体や電子系など量子多体系の本質を抽出した有効模型として、反強磁性ハイゼンベルグ模型や横磁場イジング模型、ハバード模型、 $tJ$  模型といったいわゆる「量子格子模型」を考えることが多い。これら量子格子模型に対する数値シミュレーション手法もこの四半世紀で大いに発展した。代表的な例を挙げると、密度行列くりこみ群<sup>3)</sup> 古典あるいは量子モンテカルロ法、テンソルネットワークに基づく変分的手法<sup>4)</sup> などがある。特に、量子モンテカルロ法における非局所更新法<sup>5,6)</sup> や拡張アンサンブル法<sup>7)</sup> 量子不純物問題に対する連続虚時間モンテカルロ法<sup>8,9)</sup> のように、従来と比べ何桁もの高速化や精度の改善が達成された例もある。

物性基礎論、量子統計物理の分野では、常に新しいアルゴリズムが提案され、その有用性の検証とより困難な問題への応用が試みられている。研究の現場では、現実の物質で観測される現象を説明するための「有効模型」の抽出～アルゴリズム開発～実装と最適化～結果の解析～実験や有効理論へのフィードバック、といった研究のサイクルが多く少人数のグループで行われることも多い。今日では、分野固有の「コミュニティコード」の利用も徐々に進んできてはいるが、依然多くの場合、研究グループ毎、あるいはシミュレーションを行う模型毎に異なったコードが使われているのが現状である。

独自コードが多いということは、計算に用いるパラメータの入力やシミュレーション結果の出力についても、独自形式のものが多いことを意味する。その結果、統一的な形

でのデータの保存・検索が困難となり、第三者が開発したツールを用いた解析や連成計算(2つ以上の異なるアプリケーションを組み合わせたハイブリッド計算)などを進める上で大きな障害となる。最先端のアルゴリズムは複雑さの度合いを増している。プログラミングや並列化、チューニングなどに要するコストも増大してきており、この分野においても個人を超えて組織的にソフトウェア開発を進めることがもはや不可欠である。

その一方で、実験家の間でも、日常的なツールとして計算機によるシミュレーションが使われることが多くなってきた。そのような場で求められているのは、最先端のスーパーコンピュータ向けに極度にチューニングされた「レーシングカー」ではなく、多くの場合、取り回しが容易で高い信頼性と生産性を備えた「ファミリーカー」である。また、ソフトウェアそのものだけでなく、マニュアルやチュートリアル、利用に関する充実したサポートも求められている。そのような需要に応えるには、開発者だけでなくユーザのコミュニティの育成が鍵となってくる。

## 2. ALPS プロジェクト

ALPS (Algorithms and Libraries for Physics Simulation)<sup>10-12)</sup> は、2003 年に開始された国際共同プロジェクトである(図 1)。ALPS プロジェクトの目標は、主に、量子統計物理学分野のシミュレーションに共通するライブラリやデータ解析ツールを開発・公開することで新たなプログラムコードの開発を容易にすると同時に、最新のアルゴリズムを用いた質の高い「コミュニティコード」の提供を通じて、アルゴリズムの複雑化や研究者の特定のアルゴリズムへの専門化・固定化といった今日の計算科学における大きな課題

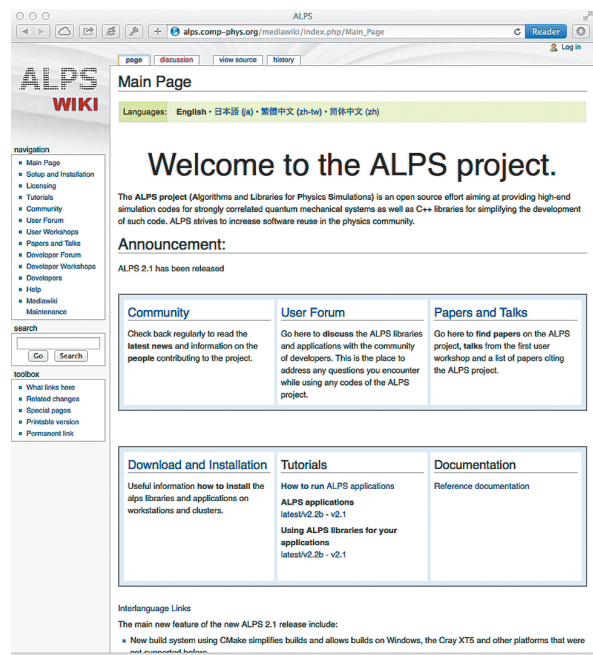


図 1 ALPS プロジェクトウェブページ <http://alps.comp-phys.org/>. 主要なページには日本語版も用意されている。

\*1 <http://www.top500.org/>

を解決することにある。この目標に向けて、ALPS プロジェクトでは、以下に説明するような共通データ形式の制定やライブラリ、アプリケーションプログラム、ツールの整備などを進めている：

- XMLやHDF5に基づく共通データ形式の提案
- シミュレーション結果の読み込み, 抽出, 加工, プロットなどを行うデータ解析ツールの整備
- 再利用が容易で高性能な, 量子格子模型シミュレーションに共通するC++ライブラリ開発
- 量子格子模型に対する標準的あるいは先進的なアルゴリズムを網羅したアプリケーション群の提供
- Linux, Mac OS X, Windows など, 様々なアーキテクチャ上でALPSをコンパイル・インストール, さらにバイナリインストーラを作成するための環境整備
- ALPSプロジェクトに貢献することで, 学術的な評価を得られるようにするためのライセンス整備
- ALPSライブラリやアプリケーションの利用方法を学ぶためのチュートリアル整備
- ウェブページ, メーリングリスト, ワークショップ, 講習会によるALPSの普及とコミュニティ形成

ALPSは幅広い利用者層をターゲットとしており, 計算物理の専門家でなくとも, 標準的あるいは先進的なアルゴリズムに基づくアプリケーションソフトウェアをブラックボックスとしてすぐ使える環境の整備を行っている。理論家は, 格子模型に対する新しいアルゴリズムや新しい理論をテストしたり, 自前のコードのデバッグ用のリファレンスデータ作成に利用することができる。あるいは, 実験家は物質のモデリングにこれらのアプリケーションを利用し, 実験結果とシミュレーション結果をフィッティングすることで, 相互作用定数など物質のミクロな情報を得ることが可能になる。また, 学部学生や大学院生は, ALPSを用いて具体的な問題についてシミュレーションを実行することにより, 学習対象の知識を深めたり, ALPSのソースコードを読むことで, 計算物理における最先端の手法の詳細を効率よく学ぶことができる。あるいは, 計算科学的には, ソース公開によりシミュレーションの再現性が向上し, 計算結果のアーカイブ化の動きが進むと期待される。

ALPSのソースコードは, ALPSライブラリライセンスおよびALPSアプリケーションライセンスに基づき公開されている。これらのライセンスはGPL (GNU Public License) を基本としており, 非営利的な学術目的の場合, 無料でALPSを利用できる。ダウンロードしたソースコードや, ユーザーが変更を施したコードは同じライセンスの下で再配布可能となっている。なお, 研究の過程でALPSライブラリやALPSアプリケーションを利用し, その成果を公表する場合には, ALPSを利用したことについての謝辞と関連する文献<sup>12)</sup>の引用をお願いしている。

表1 代表的な格子模型と利用可能なALPSアプリケーション。厳密対角化 (fulldiag, sparsediag) は全ての模型に使えるが, 系のサイズは強く制限される。一次元の模型に対しては, 密度行列くりこみ群 (dmrg, tebd) も利用可能である。

模型	アプリケーション
ハイゼンベルグ模型	loop[1], dirloop_sse
XY 模型	loop[1], dirloop_sse
横磁場イジング模型	loop[2]
ボーズハバード模型	dirloop_sse, worm[3]
ハバード模型	hirshfye, interaction, hybridization
t-J 模型	hirshfye, interaction, hybridization
古典スピン模型	spinmc
ボツツ模型	spinmc

[1] 磁場なし, かつ, フラストレーションがない場合に有効。

[2] フラストレーションがない場合に有効。

[3] 強磁場あるいは強い斥力がある場合に有効。

### 3. ALPS アプリケーション

以下では, ALPSをどのように使うのかを見ていくことにする。ALPSには様々なアルゴリズムに基づくアプリケーションが用意されており, 興味のある模型の特性や計算したい物理量に応じて, 最適なアプリケーションを選択する。表1に代表的な格子模型とそれぞれに対して利用可能なALPSアプリケーションを示す。ALPSでは, 全てのアプリケーションで, ほぼ共通の入出力ファイル形式が利用できる。そのため, 一つのアプリケーションの使用方法を習得すれば, 同様の手順で他のアプリケーションも使うことができる。また, 一つの模型の様々な側面を複数の異なるアプリケーションで調べることも簡単である。第4節で「向き付きループアルゴリズム量子モンテカルロ法 (dirloop\_sse)」を用いたシミュレーションの実行例を示すが, ここではまず, どのようなアプリケーションが用意されているのか紹介する。

#### 3.1 厳密対角化

ALPSには2種類の厳密対角化アプリケーションが用意されている。完全対角化プログラム fulldiag は, ハウスホルダー法を用いて量子格子模型の全てのエネルギー固有値と固有状態を計算する。これにより, 任意の温度における物理量を数値誤差の範囲で厳密に計算することができる。一方, 疎行列対角化プログラム sparsediag は, ランチョス法を用いて, 基底状態と少数の低励起状態を求めるアプリケーションである。どちらも, 全磁化などの保存量や系の並進対称性などを利用して, 扱うヒルベルト空間の次元を削減することができる。それにより, より大きな系をより高速に対角化することが可能となっている。また, 任意の局所的な演算子の期待値, 対角および非対角演算子の相関関数, 構造因子などの測定が可能である。<sup>\*2</sup>

<sup>\*2</sup> 現在のところ, 対角化自体はプロセス並列化されておらず, 扱える系の最大サイズは1プロセスから参照できる共有メモリ量により制限される。現在の超並列スーパーコンピュータの広大なメモリ空間を活かし, より大規模な系の対角化を行えるよう, 並列固有値ソルバライブラリ Rokko (<https://github.com/t-sakashita/rokko/>) と, それに基づく並列厳密対角化パッケージALPS/Baristaの開発も進めている。



### 3.2 古典モンテカルロ法

古典モンテカルロ法プログラム spinmc は、メトロポリス法あるいはクラスターアルゴリズムを用いて、古典スピン模型のモンテカルロシミュレーションを行うアプリケーションである。磁場中のイジング模型、XY 模型、ハイゼンベルグ模型、ポッツ模型を扱うことができる。

### 3.3 量子モンテカルロ法

ALPS には 4 種類の量子モンテカルロ法アプリケーション (loop, dirloop\_sse, worm, qwl) が実装されている。それぞれ、リードページ右側の *Keywords* 欄にあるような複雑な手続きにより計算効率を質的に向上させるための重要な工夫がなされている。調べたい対象にどのアプリケーションがふさわしいかについてはアプリケーションの説明を読む必要がある。ここでも大切なことは、入力形式が統一されているため、単一の入力ファイルで、どの方法も試すことができるという点である。簡単にそれぞれの特徴を説明する。

loop は、連続虚時間ループアルゴリズム<sup>6)</sup>と呼ばれる方法に基づくプログラムである。系が時間反転対称性を持つ場合 (零磁場中の量子ハイゼンベルグ模型や横磁場イジング模型など) に最も力を発揮し、様々な 2 点相関関数 (グリーン関数を含む) を計算することができる。また、MPI 並列化されたバージョンも用意されている。dirloop\_sse は、SSE (Stochastic Series Expansion) 表示に基づく向き付きループアルゴリズム<sup>5)</sup>のプログラムである。相互作用と競合する外部磁場や負符号を伴わない (= 対角的な) フラストレーションがある系、またハードコアボーズハバード模型などに対しては、loop に比べ効率よくシミュレーションできる。worm は、連続虚時間表示のワームアルゴリズム<sup>13)</sup>と呼ばれる方法に基づくプログラムである。非常に強い磁場が存在する場合などに有効である。qwl は、量子 Wang-Landau アルゴリズム<sup>7)</sup>の実装であり、通常量子モンテカルロ法では測定が難しい自由エネルギーやエントロピーといった量を計算することができる。

### 3.4 密度行列くりこみ群

密度行列くりこみ群 (DMRG: Density Matrix Renormalization Group) プログラム dmrg は、一次元系および擬一次元系の基底状態および低励起状態を計算するアプリケーションである。<sup>3)</sup> 任意の局所的な物理量や 2 点相関関数の測定が可能である。さらに、ALPS バージョン 2 以降では、TEBD (Time-Evolving Block Decimation) に基づくプログラム tebd も追加されている。tebd では、行列積表現による基底状態波動関数が得られ、局所的な物理量の期待値や相関関数に加え、エンタングルメントエントロピーや異なる時刻における波動関数の重なり積分なども計算できる。

### 3.5 動的平均場近似のための量子モンテカルロ法ソルバ

動的平均場近似 (DMFT: Dynamical Mean-Field Theory) は、系の自己エネルギーの波数依存性を無視することで、格子上的多体フェルミオン模型を自己無撞着な局所自己エネルギーの下での不純物問題に帰着する近似手法である。

この不純物問題を解く手法として、従来の Hirsch-Fye 法に基づくプログラム hirshfye、相互作用展開表示に基づく連続虚時間モンテカルロ法 interaction、混成状態展開に基づく hybridization の 3 つの量子モンテカルロ法ソルバ<sup>8,9)</sup>が用意されている。特に、hybridization は多軌道模型を扱うのに適している。

## 4. ALPS アプリケーションプログラムの実行

図 2(a) に示す一次元鎖上の反強磁性ハイゼンベルグ模型を例に挙げて、ALPS アプリケーションの実行方法を説明する。考える系のハミルトニアンは

$$\mathcal{H} = J \sum_{i=1}^L \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_{i+1} - h \sum_{i=1}^L S_i^z, \quad \mathbf{S}_{L+1} = \mathbf{S}_1 \quad (1)$$

である。 $\mathbf{S}_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$  は、 $S = 1/2$  のスピン演算子である。この模型は、たとえば  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$  のような一次元性の強い量子磁性体<sup>14)</sup>の磁気的性質をモデル化したものである。この模型の磁化密度  $m(h, T) = \langle \sum_i S_i^z \rangle / L$  を外部磁場  $h$  の関数として求めてみよう (磁化過程)。ここでは例として、システムサイズ  $L = 32$ 、温度  $T = 0.05J$ 、エネルギーは  $J$  を基準に測ることとし、 $J = 1$  とする。

ALPS の入出力は、XML 形式、あるいは HDF5 形式と呼ばれるファイル形式<sup>\*3</sup>で行われるが、実際に作成する必要があるのは以下で説明する簡易形式の入力パラメータファイルである。

### 4.1 入力パラメータファイル

ALPS ではシミュレーション全体を「ジョブ (job)」と呼ぶ。通常、一つのジョブの中で、パラメータを変えているいろいろな場合の計算を行う。それぞれのパラメータセットに対する計算を「タスク (task)」と呼ぶ。<sup>\*4</sup> 例として考える模型に対する入力パラメータファイルを表 2 に示す。

表 2 で中括弧 { } で囲まれた部分がそれぞれのタスクのパラメータである。また、全てのタスクに共通するパラメータは、中括弧の外にまとめて記述する。ここでは、途中省略したものも含め 26 個のタスクを定義しているが、格子構造、<sup>\*5</sup> モデル (ハミルトニアン)<sup>\*6</sup> などのパラメー

<sup>\*3</sup> 前者はテキストベースのファイル形式であり、構造化された文書を作成するのに適している。ウェブページを記述する HTML と同様、「タグ」を使って、文章の構造とその内容を記述していく。ALPS の入力パラメータはこの形式を用いて記述される。一方、HDF5 はバイナリ形式で、シミュレーション結果はこの形式で保存される。

<sup>\*4</sup> さらに、各「タスク」でその同じパラメータセットを用いて複数の「ラン (run)」を実行することもできる。たとえば、乱数の初期値 (種) だけが異なる計算を多数実行するような場合がこれにあたる。

<sup>\*5</sup> 正方格子、三角格子、蜂の巣格子、単純立方格子、面心立方格子などの格子があらかじめ定義されている。XML を用いて、ユーザが独自の格子を定義することもできる。格子の定義には、直接、グラフ (有限個の格子点とその間をつなぐ相互作用ボンドの集合) を指定する。あるいは、ユニットセルの構造と格子全体のサイズ、境界条件を指定することで、周期的な格子構造も作成できる。

<sup>\*6</sup> スピン量子数の大きさ、相互作用の異方性などは、パラメータ local\_S, Jxy で指定できる。モデルとしては、(フェルミオン/ボーズ/ハードコアボーズ/スピンレス) ハバード模型、 $t$ - $J$  模型、近藤格子模型などがあらかじめ定義されている。独自のモデルを定義するには、系の持つ量子数、それに作用する対角あるいは非対角の演算子を導入した上で、一体および二体の相互作用を数式の形で記述する。

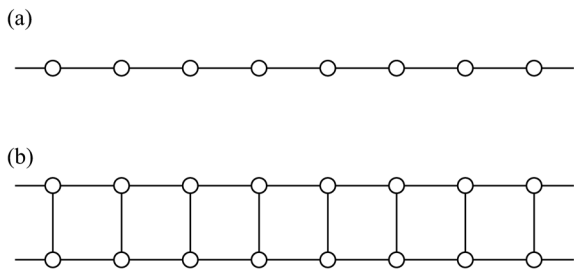


図2 一次元鎖 (a) とはしご格子 (b).

表2 一次元反強磁性ハイゼンベルグ模型の磁化過程の計算のための入力パラメータ.

LATTICE = "chain lattice" // [1]
MODEL = "spin" // [2]
J = 1 // [3]
L = 32 // [4]
T = 0.05 // [5]
THERMALIZATION = 8192 // [6]
SWEEPS = 65536 // [7]
{ h = 0 } // [8]
{ h = 0.1 }
{ h = 0.2 }
{ h = 0.3 }
// 中略
{ h = 2.5 }

[1] 格子が一次元鎖 (図2(a)) であることを示す. 他にもいろいろな格子が指定可能である. 例えば, はしご格子では "ladder", 正方格子では "square lattice" のように指定する.

[2] モデルがハミルトニアン (1) の形をしていることを示す. モデル毎にどのようなパラメータが指定できるか決まっている. ここでは結合定数  $J$  と外部磁場  $h$  を指定する.

[3] 反強磁性ハイゼンベルグ相互作用の結合定数  $J$ .

[4] 系のサイズ (スピン数).

[5] 温度.

[6] 平衡化のための初期緩和モンテカルロステップ数.

[7] 測定を行うモンテカルロステップ数.

[8] 外部磁場  $h$ .

タは共通で, 外部磁場の強さ ( $h$ ) だけが異なるものとなっている.

## 4.2 シミュレーションの実行

それではシミュレーションを実行しよう. 入力パラメータ (表2) のファイル名を chain とする. ALPS では, パラメータセットを記述した XML 形式の入力用ファイルがそれぞれのタスク毎に必要な (タスク XML ファイル). 加えて, そのファイル名の一覧を記述したマスタファイル (ジョブ XML ファイル) も用意しなければならない. XML ファイルはテキストファイルであるので, エディタを用いて作成することも可能であるが, パラメータやタスクの数が多い場合には, 煩雑で間違いも起こりやすい. ALPS では, 表2の簡易形式のパラメータファイルから, 必要な XML ファイルを自動的に生成するツール parameter2xml を用意している. parameter2xml ツールは以下のように実行する.

```
parameter2xml chain
```

chain が変換されて, chain.in.xml, chain.task1.in.xml, chain.task2.in.xml, chain.task3.in.xml, ... という名

前の一連の XML ファイルが生成される. 最初のファイルがジョブ XML ファイルで, 残りがタスク XML ファイルである.

ここでは, 向き付きループアルゴリズム量子モンテカルロ法 (dirloop\_sse) を使いシミュレーションを行う. シングルプロセスで実行するには以下のコマンドを用いる.

```
dirloop_sse chain.in.xml
```

MPI による並列処理が可能な環境では,

```
mpirun -np 4 dirloop_sse --mpi chain.in.xml
```

のように実行することで, それぞれのタスクが並列に実行される.\*7 実行時間などの情報はタスク XML ファイル (\*.out.xml) に出力される. また, 物理量などの計算結果はバイナリ形式で HDF5 ファイル (\*.out.h5) に格納される. あるいは, 実行時に

```
dirloop_sse --write-xml chain.in.xml
```

のように, --write-xml オプションを付けておけば, 同時に XML ファイルにも計算結果を出力することができる. XML ファイルは, ウェブブラウザで開いて計算結果を見ることができて便利である.

さらに, 格子による系の励起構造の違いを比較するため, はしご格子 (図2(b)) に対するシミュレーションも実行しよう. 具体的には, 表2において, LATTICE パラメータを "ladder" に変更した入力ファイルを ladder という名前で保存し, 上と同様の手順でシミュレーションを実行すればよい.

## 5. Python によるデータ解析

次に得られたデータの処理に関して説明する. XSLT (Extensible Stylesheet Language Transformations) プロセッサを用いて, 出力された XML ファイルから, データの抽出を行うことができる. しかしながら, 条件付き抽出やソーティング, 複数の物理量を組み合わせた量の計算などを行うには XSLT は柔軟さに欠ける. そこで, ALPS では, Python\*8を用いて, シミュレーション結果を解析するためのライブラリ (モジュール) pyalps を用意している. pyalps を用いることで, HDF5 形式のファイルからの物理量の読み込み, モーメント法による相関長の計算などの非線形な演算, Matplotlib を用いたグラフの作成などを行う

\*7 この例のように, 個々のタスクの計算規模が小さな場合には, 実行時に --Tmin=15 オプションを付けることで全体の実行時間を短縮できる.

\*8 Python はオープンソースの強力なオブジェクト指向動的プログラミング言語である (<http://www.python.org/>). クリーンで読みやすい文法と, 広範囲におよぶ標準ライブラリによる, ポータビリティと高い生産性が最大の特徴となっている. インタプリタ型のスクリプト言語であり, データ解析などのインタラクティブな操作に特に向いている. 標準ライブラリに加え, 数値計算用の NumPy パッケージや SciPy パッケージ, グラフ描画のための Matplotlib ライブラリなど, 科学技術計算に必要とされる機能も一通り提供されている.

表3 シミュレーション結果から磁化密度 (Magnetization Density) の値を抽出し、外部磁場 ( $h$ ) の関数としてプロットする Python スクリプト plot.py の例.

```
import pyalps
import pyalps.plot as alpsplot
import matplotlib.pyplot as pyplot
data = pyalps.loadMeasurements(pyalps.getResultFiles(),
    'Magnetization Density')
magnetization = pyalps.collectXY(data, x='h',
    y='Magnetization Density', foreach=['LATTICE'])
pyplot.figure()
alpsplot.plot(magnetization)
pyplot.xlabel('External Field $h$')
pyplot.ylabel('Magnetization Density $m$')
pyplot.ylim(0.0,0.5)
pyplot.legend(loc='best')
pyplot.show()
```

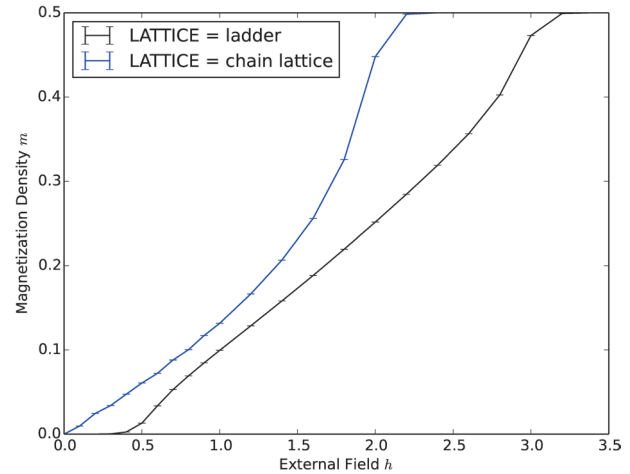


図3 量子モンテカルロ計算により得られた一次元反強磁性ハイゼンベルグ模型の磁化過程. 一次元鎖 [chain lattice, 図2(a)], はしご [ladder, 図2(b)] の二通りの格子構造に対する結果を示す.

ことができる.

前節のシミュレーションにより得られたデータファイルから磁化過程をプロットする Python スクリプト (plot.py) を表3に示す. 以下のように実行することで, 図3の磁化過程がプロットされる.

```
python plot.py
```

一次元鎖 (青) の場合, 零磁場においてギャップレスであるため, 低磁場で磁化がほぼ線形に増加することが分かる. 一方, はしご格子 (黒) では, 基底状態と第一励起状態との間に有限のエネルギーギャップ ( $\Delta \approx 0.5J$ ) が開いているため, 磁化の立ち上がりが抑えられ, 指数関数的になっている.

なお, pyalps には, ALPS アプリケーション用の入力 XML ファイルを作成する機能, ALPS アプリケーションを実行する機能なども備わっており, Python の中だけで, パラメータセットの作成~シミュレーション~結果のプロットを完結することも可能である.

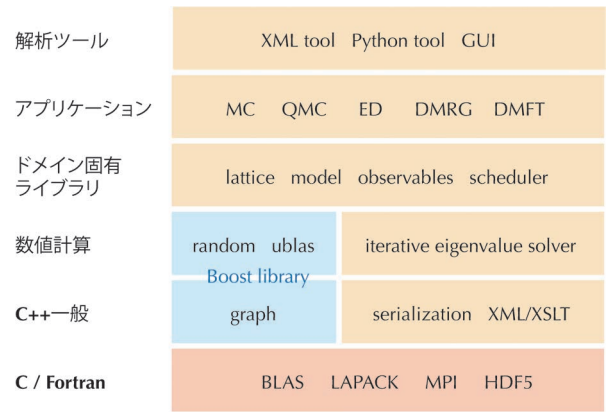


図4 ALPSの階層構造. 橙色の枠の部分, ALPSプロジェクトで開発されているライブラリ, アプリケーション, ツールを示している.

## 6. ALPSの階層構造

ここで, 簡単にALPSのソフトウェアの構成について説明しておこう. ALPSのソフトウェアは, 図4に示す階層構造からなっている. ALPSは, LAPACK, MPI, HDF5<sup>\*9</sup>といった既存のライブラリの上に構築されている. また, 格子の基本となるグラフ構造や, Mersenne Twister 擬似乱数発生器などについては, C++のオープンソースライブラリ Boost<sup>\*10</sup>を用いている. ALPSでは, これらの基盤の上に, 次のようなライブラリを実装している:

- C++の機能拡張: C++のオブジェクトをハードディスクに保存したり, ネットワークを通じて転送するためのシリアライゼーションライブラリ. XMLの読み書きを行うためのライブラリ. 数式処理のためのライブラリ
- 線形数値計算: 共役勾配法, ランチョス法などの反復法ソルバライブラリ
- 量子格子模型に固有のライブラリ: XMLを読み込み周期的な格子構造や任意のグラフを作り出す格子ライブラリ. XMLを用いて量子数や演算子, ハミルトニアンなどを定義し, その行列表現を生成するモデルライブラリ. モンテカルロ法により生成されたサンプルから, ビンニング解析やジャックナイフ解析により, 平均値やエラーバー, 自己相関時間などを計算するライブラリ. モンテカルロシミュレーションなどの「パラメータ並列」を自動的に行い, 負荷バランスやチェックポイントリスタート機能を提供するスケジューラライブラリ

これらのライブラリはC++におけるテンプレートメタプログラミング, ジェネリックプログラミングのテクニックを用いて実装されており, 高い柔軟性, 再利用性, 高信頼性, 高性能を同時に実現している. これらの基盤の上に, 一連のALPSアプリケーション (3章) や解析ツール (5章) が実装されている.

\*9 <http://www.hdfgroup.org/HDF5/>

\*10 <http://www.boost.org/>

## 7. ALPSのインストール

### 7.1 ソースからのコンパイル

ALPSのソースコードは、ALPS ウェブページ (図1) から自由にダウンロードできる。ソースコードは主にC++を使って書かれている。ALPSのコンパイルには、C++コンパイラに加え、クロスプラットフォームのビルド自動化ツールCMake,<sup>\*11</sup> Boost C++ ライブラリ、HDF5 ライブラリが必要である。また、ALPSアプリケーション (3章)の多くは線形計算ライブラリLAPACKを用いている。データ解析 (5章) には、PythonとPythonパッケージ (Numpy, Scipy, Matplotlib) が必要である。さらに、tebdアプリケーション (3.4節) には、Fortran コンパイラが必要である。

標準的なUNIXやLinux環境では、OSのパッケージ管理ツールを用いてこれらのツールやライブラリをインストールすることが可能である。また、Mac OS Xでは、MacPortsパッケージ管理システムを利用してそれらをインストールすることもできる。

ツールやライブラリをあらかじめインストールした上で、ALPSのソースコードを展開し、CMakeを実行する。ライブラリやコンパイラが自動検出できない場合は、CMakeのオプションで指定する必要がある。CMakeの実行が無事終了するとMakefileが生成されるので、`make install`を実行する。

### 7.2 バイナリインストーラ

CMakeの特徴の一つは、UNIX/Linux用のMakefileだけでなく、WindowsのVisual C++ソリューションファイルやMac OS XのX Codeプロジェクトファイルを生成し、簡単にバイナリインストーラを作成することができる点にある。作成済みのバイナリインストーラはALPSウェブページからダウンロード可能で、ダブルクリックするだけでALPSをインストールすることができる。また、Debian GNU Linux用のバイナリパッケージも、後述のMateriApps LIVE!のページからダウンロードできる。

また、国内の主なスーパーコンピュータシステムへのインストールも進めている。あらかじめインストールされているシステムでは、環境変数の設定を行うだけで、ALPSを使うことが可能となる。2014年6月時点では、スーパーコンピュータ「京」、各大学の情報基盤センター (東京大学、京都大学、九州大学など)、東京大学物性研究所の共同利用スーパーコンピュータなどへのインストールが完了している。

### 7.3 MateriApps LIVE!

CMakeを用いることで、多くの環境でほぼ自動的にALPSのインストールが行えるようになってきている。しかしながら、非標準的な環境ではインストールが失敗する場合もある。一方で、必ずしも全ての人々が、ALPSがインストールされたスーパーコンピュータを利用できるわけでも



図5 MateriApps LIVE! USBには、OS、エディタ、解析ツールなどとともにALPSがあらかじめインストールされている。

ない。計算物質科学の研究コミュニティーであるCMSI (計算物質科学イニシアティブ)<sup>\*12</sup>では、分野振興活動の一貫として、国内外の物質科学アプリケーションのポータルサイトMateriAppsの整備を進めている。<sup>\*13</sup> さらに、MateriAppsで取り上げているアプリケーションのうち、特に国内で積極的に開発されているものをあらかじめインストールしたDebian Live USB「MateriApps LIVE!」(図5)を開発・公開している。<sup>\*14</sup> ALPSをはじめとする物質科学のアプリケーション、OS (Debian GNU/Linux)、エディタ、解析ツールなど、使い始めるのに必要な環境は全て1本のUSBメモリに収められており、ノートPCなどで手軽にシミュレーションを開始することができる。MateriApps LIVE!は、Intel64、AMD64アーキテクチャのCPUを備えたWindows PC、最近のApple MacBookで動作する。MateriApps LIVE! USBは、CMSIの学会展示会場やアプリケーション講習会などで配布されている。また、ウェブページからイメージファイルをダウンロードし、自分でUSBに書き込むことも可能である。

## 8. チュートリアル・講習会

ALPSウェブページには、上記以外にも、ALPSアプリケーションを用いた様々な計算例がチュートリアル の形で準備されている。チュートリアルは英語と日本語の両方で用意されている。XMLを用いて格子やモデルを定義する方法や、ユーザプログラムから格子ライブラリやモデルライブラリ、並列計算のためのALPSスケジューラなどの機能を利用する方法についても解説されている。また、ALPSの利用に関するワークショップや講習会も開催している。国内では、CMSI神戸拠点のある神戸の理化学研究所計算科学研究機構において、定期的に講習会を開催している。講習会では、ALPSライブラリやアプリケーションの概要やPythonに関する講義の後、実際に量子モンテカルロ法や厳密対角化のアプリケーションを用いて実習を行う。講習会の説明資料は、全てMateriAppsで公開されて

<sup>\*12</sup> <http://cms-initiative.jp/>

<sup>\*13</sup> <http://ma.cms-initiative.jp/>

<sup>\*14</sup> <http://cmsi.github.io/MateriAppsLive/>

<sup>\*11</sup> <http://www.cmake.org/>

いる。今後は神戸以外でも定期的に講習会を開催していく予定である。

## 9. おわりに

本稿では、量子格子模型の汎用シミュレーションパッケージALPSについて概観した。現代の計算物理学において、最先端のアルゴリズムは複雑さの度合いを増し、個人が完全に一からプログラムを書き上げることはますます困難となってきた。超並列計算機・マルチコアアーキテクチャに対応するためのハイブリッド並列化やキャッシュチューニング、並列計算における通信の最適化などアプリケーションの高度化に要するコストも増大している。その一方で、計算物理の裾野は着実に広がっている。使いやすさ、信頼性、生産性を備えたシミュレーションソフトウェアが強く求められている。大規模シミュレーションのための最先端アルゴリズムの実装、理論家や実験家にとって有用なシミュレーションツールの開発、という2つの大きなニーズを両立するには、個人や研究室の単位を超えた、組織的な開発がもはや不可欠である。その意味からも、シミュレーションソフトウェアの技術は、理論家の副次的な道具としてではなく、コミュニティ全体で整備し共有する「実験技術」とみなされるべきステージにあるといえる。

近年、サイエンス主導で最先端のスーパーコンピュータの計画・開発を進める「コデザイン (co-design)」の手法の重要性が認識されてきている。2020年頃にエクサフロップス級<sup>\*15</sup>の実現を目指す「ポスト京コンピュータ計画」も始動しているが、それぞれの計算科学分野における主要なアルゴリズムを網羅したコミュニティコードは、新規アーキテクチャ評価のためのベンチマークの役割も果たす。計算科学と計算機科学による「コデザイン」の足がかりとしても、今後ますます重要となってくるに違いない。

<sup>\*15</sup> 毎秒  $10^{18}$  回の浮動小数点数演算性能。

## 参考文献

- 1) Y. Hasegawa, *et al.*: *Proceedings of 2011 International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis* (ACM, New York, 2011)—First-principles calculations of electron states of a silicon nanowire with 100,000 atoms on the K computer.
- 2) Y. Andoh, *et al.*: *J. Chem. Theory Comput.* **9** (2013) 3201.
- 3) U. Schollwöck: *Ann. Phys.* **326** (2011) 96.
- 4) J. Jordan, R. Orús, G. Vidal, F. Verstraete and J. Cirac: *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 250602.
- 5) N. Kawashima and K. Harada: *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 1379.
- 6) S. Todo: *Strongly Correlated Systems: Numerical Methods* (*Springer Series in Solid-State Sciences*), ed. A. Avella and F. Mancini (Springer-Verlag, Berlin, 2013) p. 153.
- 7) M. Troyer, S. Wessel and F. Alet: *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 120201.
- 8) A. Rubtsov and A. Lichtenstein: *JETP Lett.* **80** (2004) 61.
- 9) P. Werner, A. Comanac, L. de' Medici, M. Troyer and A. J. Millis: *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 076405.
- 10) F. Alet, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.* **74** (2005) 30.
- 11) A. Albuquerque, *et al.*: *J. Magn. Magn. Mater.* **310** (2007) 1187.
- 12) B. Bauer, *et al.*: *J. Stat. Mech.: Theor. Exp.* (2011) P05001.
- 13) N. V. Prokof'ev, B. V. Svistunov and I. S. Tupitsyn: *Sov. Phys. JETP* **87** (1998) 310.
- 14) T. Ami, *et al.*: *Phys. Rev. B* **51** (1995) 5994.

(2014年6月19日原稿受付)

## ALPS: Software for Simulations of Quantum Many-body System as "Experiment Technology"

### Syngye Todo

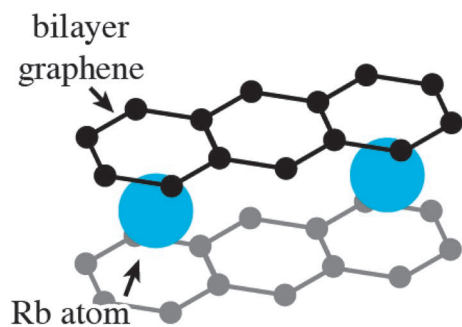
abstract: The ALPS (Algorithms and Libraries for Physics Simulations) project, an international collaboration to develop open-source software for the simulation of strongly correlated quantum many-body systems, is presented. The ALPS provides common libraries and evaluation tools useful for simulations of the quantum lattice models, as well as high-quality application programs based on the state-of-the-art algorithms. The programs enable non-experts to start carrying out numerical simulations by using the standard and important algorithms for quantum lattice models: the exact diagonalization, the classical and quantum Monte Carlo, the density matrix renormalization group (DMRG), and the dynamical mean-field theory (DMFT). The ALPS software is available from the ALPS web site at <http://alps.comp-phys.org/>.

安藤恒也 (JPSJ編集委員長)

## 2層グラフェン層間化合物における強い電子フォノン相互作用の観測

グラファイトは、その原子層間に様々な原子や分子を取り込むことが知られている。このグラファイト層間化合物は、元々のグラファイトや挿入された原子・分子には無かった多彩な物性を示すことが知られており、様々な基礎・応用研究が行われてきた。例えば、Li原子を挿入した $C_6Li$ は、2次電池の負極材として既に産業応用がなされている。また、アルカリ金属を挿入した $C_8X$  ( $X=K, Rb, Cs$ )は、母体のグラファイトや挿入されたアルカリ金属では観測されない超伝導を発現する。最近、カルシウム (Ca) を挿入した $C_6Ca$ が10 K以上の高い超伝導転移温度を示すことが発見され、より高い超伝導転移温度を持つグラファイト層間化合物の開拓が精力的に進められている。

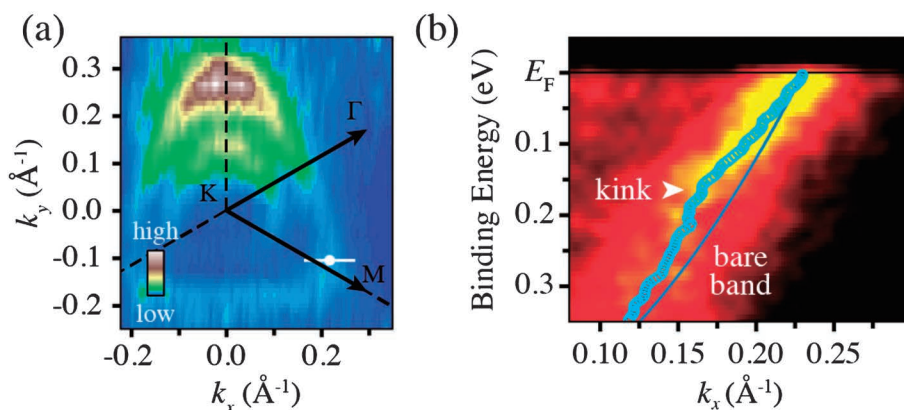
一方、グラファイトの1原子シートであるグラフェンは、質量ゼロのディラック電子を持つという予測から、その検証実験と、さらに超高速電子素子への応用展開が急ピッチで進んでいる。層間化合物という立場からは、2枚のグラフェンシートの上に金属原子が挿入された“2層グラフェン層間化合物” (図1) が、グラファイト層間化合物の最も薄い極限と言える。マイクロなサンドイッチであるこの2層

図1 2層グラフェン層間化合物 $C_8RbC_8$ の結晶構造。

グラフェン層間化合物では、グラファイト (3次元) からグラフェン (2次元) への変化で見出された様々な特異な現象 (例えば、ディラック電子) の出現などに見られるように、3次元グラファイト層間化合物では無かった新たな特異物性の出現が期待される。例えば、次元性と超伝導との関係や、フォノンとの相互作用による特異物性の発現など、グラフェンを舞台とした2次元ディラック電子系における新たな物性の開拓が期待できる。さらに、2次電池の負極材として用いることで、従来のバルク体に比べて遥かに高速な充電速度を持つマイクロ電池としての産業応用も提案されている。

このたび、東北大学原子分子材料科学高等研究機構および同大学院理学研究科の研究グループは、超伝導を示すグラファイト層間化合物 $C_8Rb$ を最も薄くした2層グラフェン層間化合物 $C_8RbC_8$ を作製することに成功し、その電子状態を角度分解光電子分光 (ARPES) によって調べた。その結果、フェルミ準位近傍の電子バンドにおいて、電子とフォノンとの強い相互作用による“折れ曲がり (キंक) 構造”が存在することを見出し、 $C_8RbC_8$ 中ではパイ電子と面内および面直方向に振動する格子振動 (フォノン) が強く相互作用していることを見出した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of Physical Society of Japan (JPSJ) の2014年12月号に掲載された。

本実験での試料は以下のように作製された。(1) Arガス中でSiC単結晶を加熱して、その表面に2層グラフェンを作成する。(2) グラフェンの層数が2枚であることをARPESで確認する。(3) 超高真空中で2層グラフェン薄膜を90 K程度に保ちながらRb原子を蒸着する。(4) Rb原子が2枚のグラフェン層間に入り込み、試料が確かに2層グラフェン層間化合物であることを、低速電子線回折等で確認する。図2(a)は、ARPESによって決定したパイ電子が

図2 (a)  $C_8RbC_8$ のフェルミ面と (b) フェルミ準位近傍の電子バンド構造。

作るフェルミ面である。このフェルミ面の代表的な波数(図中白線)で測定した電子バンド分散を図2(b)に示す。結合エネルギー約170 meVにおいて、放物線的バンド分散からずれたキंक構造が観測される。このキंक構造は、面内フォノンとの相互作用によるものと結論された。詳細な数値解析の結果、相互作用の強さに関係する結合定数が波数に強く依存していること、さらに、強い相互作用を示す波数において、面内フォノン以外に面直フォノンまたはRbのフォノンとも相互作用していることを見出し、面直フォノンが相互作用の異方性に重要な役割を果たしていることを明らかにした。今回観測されたパイ電子とフォノンとの強い相互作用は、グラフェン層間化合物の超伝導等の特異物性に密接に関連するとみられ、今後の研究展開が期待される。

### 原論文

Anisotropic Electron-Phonon Coupling in Rb-Intercalated Bilayer Graphene

J. Kleeman, K. Sugawara, T. Sato and T. Takahashi: J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 124715.

〈情報提供：菅原克明(東北大学原子分子材料科学高等研究機構)

高橋 隆(東北大学原子分子材料科学高等研究機構, 東北大学大学院理学研究科)〉

### News and Comments

Insight into Electron-Phonon Coupling in Doped Graphene

T. Yokoya: JPSJ News Comments **12** (2015) 01.

### 招待論文「ビスマス中ディラック電子の輸送現象と反磁性」

Transport Properties and Diamagnetism of Dirac Electrons in Bismuth

Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 012001.

固体中の電子の運動が、相対論的量子力学におけるディラック方程式によって記述できる場合がある。ビスマスがそれに該当するという認識は半世紀前からあった。そこでは小さな有効質量および強いスピン軌道相互作用に起因する大きな反磁性や磁場による様々な量子効果が出現し、固体物性の基礎的理解に大きな役割を果たしてきた。近年ではグラフェンを始め、有機導体 $\alpha$ -ET<sub>2</sub>I<sub>3</sub>、鉄ヒ素系超伝導体などにおいて質量ゼロのディラック電子(ワイル電子と呼ぶべきもの)が実現していることが明らかになり、ディラック電子特有の性質が興味を集めている。本招待論文では、ビスマスについて特にバンド間磁場効果に焦点を当て、反磁性、弱磁場ホール効果、スピンホール効果、磁気光学効果や完全スピン偏極電流といった具体的な物性についての最近の新たな展開とその統一的理解を紹介している。さらに久保公式、k,p理論、グリーン関数に基づく量子輸送現象の理論、ビスマスや反磁性研究の歴史的経緯などの基礎的事項についても解説している。ディラック電子系はスピン軌道相互作用の強い系に共通する本質的な問題を最も単純明快に理解できる恵まれた環境を提供しており、広くスピン軌道相互作用の一般的性質に興味のある読者にとっても有用な解説となるであろう。

ここでは日本物理学会が発行している Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の論文で2014年11月に掲載可となった中から2014年12月の編集委員会が選んだ“Papers of Editors' Choice”(JPSJ注目論文)を紹介しています。なお、紹介文は物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」でも公開しています。論文は掲載から約1年間は無料公開しています。また、関連した話題についての解説やコメントがJPSJホームページの「News and Comments」覧に掲載される場合もありますので、合わせてご覧下さい。JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味深い論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思っています。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。なお、今月は、2015年1月号に掲載された招待論文「ビスマス中ディラック電子の輸送現象と反磁性」についても紹介しました。

### 応用物理 第84巻 第4号(2015年4月号) 予定目次

総合報告：融合学理イオントロニクス……岩佐義宏, 下谷秀和  
解説

多接合太陽電池の診断・設計と発光絶対値・発光量子効率の  
評価……秋山英文

肌の分光断層画像……中村崇市郎, 平山平二郎

最近の展望：シリコン・ゲルマニウムにおける

スピントロニクス……齋藤秀和

#### 研究紹介

ナノスーツ法：バイオミメティクスが拓く電子顕微鏡観察の  
新地平……下村政嗣, 針山孝彦

表面ラベルグレーティング法による高分子フィルムの表面歪み  
解析……安戸 厚

基礎講座：電気計測(静特性)のコツ ……小寺哲夫  
ホッとひといき

ネバネバしたナノの世界を制御する……佐々木成朗  
ナノチューブのゼーバック効果を自由自在に制御する

……柳 和宏  
応用物理と遊びの“おもしろい”話 ……白井暁彦

連載：科学を詠む④……松村由利子

## アメリカでの就職活動記

堀内俊作 〈Virginia Tech〉

近年、海外での研究経験が重要視されているが、実際に海外で常勤職の就職活動をした若い研究者は未だ多くはないと思う。ポストドクではなく常勤職の就職活動は、各国の特色をより強く反映するのが実情である。今後、海外での常勤職を希望する研究者の数が増えるであろうことを踏まえて、今回私がアメリカでの就職活動から経験したことをまとめた。

### “Every talk is a job talk”

私が就職活動を始めた頃、よく耳にした言葉である。そしてこの助言は、就職活動において正しかった。

私の分野である宇宙物理の常勤職の公募は、American Astronomical SocietyやINSPIRESといったオンラインのデータベースに、毎年9月頃から掲載され、11月から12月に締め切りが集中する。私は締め切りのおよそ一カ月前から申請書類の作成に取りかかったのだが、実は、そのかなり前から就職活動は始まっていたのである。つまり、学生時代の初めての発表などは別として、少なくとも大学院修了からポストドク開始以降の発表は全て就職につながる面接発表と認識しておいた方が良いのである。

アメリカの研究大学・研究所（カーネギー分類によると、アメリカには108の研究大学・非常に高い研究活動の研究所がある）の常勤職に応募するのに必要な書類は、自由形式の履歴書、過去の研究のまとめ、将来の研究計画、教育の抱負、最低でも3通の推薦書（助教ポジションなら5、6通が適切らしい）、カバーレター、の6点である。ここまでの必要書類の形式レベルでは、日本とさほど変わりはない。

99% (!) の場合は電子的に応募できるので、応募プロセスは簡単である。それゆえ、各公募に世界中から何百もの応募が集まるようである。応募された何百もの上記書類から、選考委員会はランク付けされたショート・リストを作成するのだが、ここで高い評価を受けるのが第一関門である。

多くの場合、選考委員は異なる専門分野の6人程度から構成される。分担するとはいえ、何百もの応募書類を読むので、国際会議などで発表を聞いたことがあったり、会議で出会ったり、さらに議論したことのある応募者は、書類に頼らなくても能力や実績を正しく評価される可能性が圧倒的に高い。

推薦書の数が多いのもアメリカ特有で、申請書類全体の中でもとりわけ重要とされる。自分の専門分野の第一人者にはじまり、研究の詳細について述べることのできる共同

研究者に至るまで、様々なタイプの推薦書を用意するのが一般的である。

また、履歴書から明らかに外国人であると分かる場合、書類審査の段階で英語での教育やコミュニケーション能力が懸念される可能性が高いので、英語力を間違いなく証明してもらえよう、推薦者にサポートを頼んでおくのも重要である。

細くなるが、私の場合、履歴書はヘッダーを多用して分かり易くまとめ、研究のまとめや計画は図や参考文献を含めて3ページ以内にした。ページ指定が無い場合が多いが、長いと多忙な委員には読んでもらえない心配があるからである。そして書類を同僚や指導教官などに見てもらい、コメントをもらえば、書類は完成である。

### The Campus Interview

ショート・リストの上位6~8位までに残れば、いわゆる「キャンパス面接」に招待される。キャンパス面接は、二日間程度の場合が多いが、稀に一日や三日、または複数にまたがる場合もある。そして、このキャンパス面接は長時間である。私の面接初日は、朝7:30の学科長との朝食から21時に夕食が終わるまで、約14時間の長い一日であった。後から分かったことだが、キャンパス面接とはこういうスケジュールなのである。

大学側から見ても、候補者の出張費はもちろん、食事、そして面接に関わる全ての教員の時間を考えると、かなりの投資である。人選はどの組織にとっても、将来を左右する大事な意思決定なのである。特にアメリカの研究大学にとって大事なものは、新任教員にスタートアップ資金を与えるのが一般的であり、各大学の財政状況にもよるが、この資金は各学科の教員の外部資金（グラント）から少しずつプールされて成り立っていることだ。つまり、大きなグラントを取れる有力な人材を採ることは、将来の人選におけるスタートアップ資金源ともなるだけでなく、学科の盛衰にも関係する。そのためにはスタッフ一丸となって、人選への投資や時間は惜しまない、ということなのだろう。

### The job talk

キャンパス面接で最も重要なものは、“job talk”と呼ばれる発表である。多くの大学では1時間程度のコロキウム発表として扱われるが、実際にはコロキウムと似て非なる代物である。それでも、コロキウムと同じく、自分の分野に焦点を置き、複雑な概念を他分野の専門家や学生に理解し易く説明する必要がある。研究者としてだけでなく、有望



な教育者にもなれることを、応募先大学の教員に納得させる必要があるからである。

コロキウムと違うのは、より自分の仕事に焦点を置き、興味深い研究をしている面白い人物であることをアピールしなければならない点だ。これらは、外部資金を集められる最先端研究を行うよき同僚になれることを納得させることにつながるからである。

Job talk は、応募先学科の教員全員に平等に評価してもらえる唯一の機会なので、自己ベストの発表ができるように練習して挑むことになる。以前ポスドクをしていた大学の先生曰く、「100時間準備しても足りない」らしい。私は実際に100時間練習したかは覚えていないが、結果的にはスライドの内容はもちろん、話の内容を完全に暗記してしまうまで練習した。

ところで、よくユーモアを交え、笑いを誘いながら発表する大切さが指摘される。明るさや面白さをアピールするのは有益であるが、それよりも、私は聴衆の目をしっかり見て、ハッキリと分かり易く発表する技量の方が大事であると感じた。とはいえ、経験上ユーモアは自分自身をもリラックスさせる効果があるので、私はわざとらしく無い形でジョークを導入した。リラックスした方が質疑応答もマイペースに運べるので、ジョークはちょっとした刺激で、発表をコントロールするタイミングにもなったと思う。

また、スタイルは各大学や分野によって異なるが、Job talkに加えて、セミナー形式や選考委員への発表等の機会があることも多い。

セミナー形式の発表の場合は、コロキウムでカバーしきれない研究の詳細や、別の研究テーマの貢献などをアピールするチャンスである。ポスドク時代に数えきれないくらいしてきたセミナー発表の経験が役に立つ。選考委員への発表の場合は、研究計画や研究グループの展望などを伝える絶好のチャンスである。ここでは、どこから幾らの研究資金を集め、どのような研究テーマで何人の学生を指導できるかなど、なるべく具体的に話すのがポイントだった。

## After the job talk

Job talk 後は、応募先学科の教員との30分程度の1対1の面接が続く。二日間のキャンパス面接の場合、総勢15人程度と面接することになる。面接相手は、応募先学科の教員がメインだが、稀に応募先学科以外の教員との面接もあった。例えば、数値計算を使った研究を行っている場合、大学のスパコンを運営している教員との面接が含まれていたりする。

面接は相手のスタイルによって様々な形式を取る。研究の話だけを30分フルにする人もいれば、学生をどう教育するか聞いてくる教員もいる。中には周囲の生活水準をアピールする教員もいた。また、部屋に入るなり「私は選考には一切関わりはありません」と断った上で、「当大学の育児休業について説明させてください」と大学のwork life

balanceについて30分説明を受けた教員との「面接」もあった。

こういうこともあるので、事前に相手の研究テーマや主要論文だけではなく、役職に目を通しておくことも大事かも知れない。研究談の場合、面接はセミナー訪問でしばしば行われる議論と似ていることが多かった。普段からセミナー発表を精力的に行い、英語での議論に慣れておき、また、様々な分野へ興味をもってアンテナを張っておくのが一番の準備だと思う。

面接の場合、各面接官が議論後に直ちに選考委員に評価を送るのが一般的なもので、気は抜けない。英語で上手くスタートを切れるように、自分の研究を30秒でアピールするelevator pitch (エレベーターに乗り合わせた人に伝える設定) や、内容を少し膨らませた1分バージョンなり3分バージョンなどを用意しておくとう便利である。

意外にも有意義なのが、学生と話せる機会であった。私一人に対して十人程度の大学院生が一堂に会して話をする場で、ここでは私が面接をする立場になる。選考判断に直接は寄与しないと思われるが、学生の視点からみた学科の強みや今後の課題などを知ることができ、学生の質も自分の目で判断できる機会であった。

昼食・夕食はもちろん、場合によっては朝食もスケジュールに含まれる。けっこう美味しいレストランへ案内されることが多く、さらに面接や発表で疲れているのでしっかり食べたいところだが、食べてばかりの候補者はカフェインの入っていないコーヒーほどにも役に立たない。私の大学の受け入れ教官からも「面接では食べるより積極的に会話に参加する」ようにアドバイスされた。要は、面接中は二日間「ON」状態を維持する、ということである。体力も大事な要素である。

余談であるが、アメリカのキャンパス面接は2,3月の真冬に行われることがほとんどなので、いわゆる「想定外」にも対応できるような念入りな準備が大事である。悪天気に遭って傘がなかった、スーツが汚れてしまった、などの対策も前もって準備しておく必要がある。

私が面接した2014年は、アメリカ東海岸が大雪に見舞われた年で、幸い私は晴れ男なので面接日も当然のように晴天であったが、他の候補者は大雪のため大学が閉鎖され、二日間のキャンパス面接が四日間に延びたケースもあったと聞いている。

最後に、日本人として面接にはスーツにネクタイ以外は考えられなかったが、アメリカでは聴衆よりフォーマルであれば正装する必要はなく、ネクタイを締めないシャツとジャケットのacademic formal attireで十分な場合が多い。とくに西海岸ではそういう習慣が強い。実際、私もネクタイについて「ずいぶんかしこまった服装ですね」とコメントされたことがある(ここは、「ほんの普段着ですよ」と冗談で返せば良い)。

## It's communication

キャンパス面接は、行動・発言のすべてが評価対象となる過酷な48時間である。しかし、一方で応募先研究機関のことを知る機会でもある。自分の将来展望に合致している組織か、スタッフのチームワーク、研究面への様々なサポート、研究評価や昇進の標準、学生の質や授業数、生活費、等々、相手から質問される以上にこちらからも質問できるように多くの質問を用意しておくことである。大学を案内されているとき、昼ご飯へ向かうとき、等々、雑談の時間は意外に多い。実際、「Do you have any questions for

me?」とよく聞かれた。

今回のキャンパス面接を通して感じたことは、面接といえども、最終的には人と人の会話であるということである。面接中に「キャンパス面接に呼ばれた時点であなたの研究の評価は十分高いです。今日はお互いを人として知り合う機会だと思ってください」と言われ、硬水が紅茶の味に及ぼす効果を科学的に分析し語り合った面接もあった。楽しい議論であり会話だったので、自宅に戻ってから、自然に感謝メールを書いた次第である。

(2014年9月15日原稿受付)



ラ・トッカータ  
*La Toccata*

# アメリカさすらい滞在記

村瀬孔大 (プリンストン高等研究所)

## 1. はじまりはコロンバス

アメリカに来たのは2010年の春である。海外学振研究員としてオハイオ州立大学宇宙天体素粒子物理センター(CCAPP)に着任した。「なぜ、オハイオ?」とよく聞かれたが、いくつかの理由があった。私はカミオカンデで小柴先生がノーベル賞を受賞されたことが大きなきっかけとなって宇宙ニュートリノの研究を始めた。ホストであったJohn Beacom教授(現CCAPPセンター長)は、後継であるスーパーカミオカンデにガドリニウムを加えて感度を上げるという提案をするなど、関連分野で著名な仕事をいくつもしており、充実した議論が期待できた。また暗黒物質の有力候補「WIMP」の名付け親の一人であるSteigman名誉教授をはじめ宇宙と素粒子の境界領域を専門とする研究者が多数集まっており、研究の幅を広げていきたいと考えていた私の目的に合っていた。隣接する天文学科のスタッフも強力で、毎朝30分行われるコーヒータイムでは非常に活発な議論がなされていた。

理由はそれだけではない。2007年に出席した2つの国際会議で、IceCubeニュートリノ実験のメンバーで当時ペンシルバニア州立大学(PSU)のポストドクであったCarsten Rott氏(現成均館大学助教)と仲良くなった。翌年私がMészáros教授を訪ねてPSUに滞在した際に連絡したのだが、彼は既にCCAPPに移ってしまっていた。しかしたまたま暗黒物質についての研究会がCCAPPで行われることになっており、そこでの講演を持ちかけられたのである。当時まだ関連論文は書いていなかったが、PeV(=10<sup>15</sup>eV)以上の質量を持つ暗黒物質からのニュートリノの話をした。そのときJohnにも初めて会った。Johnは私が3本目の論文を書いたときにメールをくれて以来覚えてくれていて、翌

2009年に改めて数カ月CCAPPに滞在することになった。彼はアメリカ人とは思えないほど几帳面で、今に至るまで親身になって色々なアドバイスをしてくれることになる。コロンバスに到着したときも彼は空港まで迎えにきてくれ、アパートの契約に付き添ってくれただけでなく、シャワーの使い方までわざわざ説明してくれたことには驚いた。滞在中に海外学振をCCAPPに出すよう勧められた。海外学振では、アメリカやヨーロッパで次のポストドクをする際に半年間の空白期間を埋めなければならないという問題が生じるが、彼は半年分の雇用と潤沢な研究費を保証してくれた上で3年延長の可能性も示唆してくれたのは非常に有り難かった。CCAPPの同僚も気のいい人たちばかりであった。英語もろくに話せず、車の購入や家探しなど右も左もわからない私を、Carstenや1年先輩のCCAPPポストドクであった堀内俊作氏(現バージニア工科大学助教)が大いに助けてくれた。堀内氏の勧めでアパートを選んだが、徒歩圏内には日本食の店もあり、後に妻がアメリカに来たときに非常に役立つことになった。

以上のように研究環境は恵まれているはずだったが、研究はスムーズにいかなかった。プライベートでそれどころではなかったというのもあるが、生活リズムの変化も大きかった。私は学生時代は完全な夜型で深夜に研究して明け方に帰宅する生活をしてきた。しかしアメリカではそれができない。深夜に駐車場をうろつくことは危険を伴うし、24時間営業のコンビニなどないので気軽に買い食いもできない。自宅の仕事をする習慣がなかったせいもあり、実働時間が激減してしまった。様々なトラブルも経験した。最初の冬に雪のせいで自動車事故にあった。雪の降りしきる中たどたどしい英語で保険会社に電話をかけるのは大変

であった。それからひと月も経たないうちに、突然歯がとれるというトラブルにも見舞われた。親知らずが虫歯になっていたらしい。慌てて医者に行ったが、海外学振の保険では歯の治療はカバーされておらず、結局日本に帰るまで治療ができなかった。2011年3月に入籍をしたが、震災の影響で帰国ができなかった。それでも妻のおかげで、式と披露宴を行うことができた。新婚旅行から帰る頃にはもう秋になっていた。

アメリカに来てまだ1年。当初ポストクの公募に応募する予定はなかった。満身に仕事をしないうちに年月だけ過ぎていたからだ。CCAPPにあと3年いてよかったので切迫した状況でもない。しかし同じ研究機関に5年もいるのは良くないように思われた。そこで競争率は高いが宇宙分野で権威のあるNASA関連のfellowshipだけ出しておくことにした。(1研究機関に原則1人という縛りはあるが)どこを選んでよく、カリフォルニアへの憧れもあって当初はカリフォルニア工科大学などを希望していたのだが、お目当ての研究者が異動してしまったことなどもあり、最終的にプリンストン高等研究所(IAS)を第1希望にした。IASは太陽ニュートリノの研究などで世界的に著名なBahcallがかつて在籍していた場所であり、宇宙ニュートリノ研究には縁の地であった。現在高エネルギー宇宙物理が専門のスタッフはいないものの、優秀なポストクが集まっており、様々な分野の人がいて私には魅力的であった。また、多人数の英語での議論には依然ついていけず日常会話にも不自由していた私は、英語ができないことで当時多少いじけていた。プリンストンには行ったこともなかったが、例え一人ぼっちになっても研究を続けられる場所に行こう、というネガティブな考えをしていた。幸運なことに、Hubble Fellowに採用され、第1希望であるIASに行くことができた。

## 2. プリンストンへ

IASはかつてEinsteinやOppenheimerが在籍した私立の理論研究所であり、現在もWitten教授をはじめ豪華なメンバーを擁する。よく勘違いされるがプリンストン大学とは密接な関係があるものの独立の機関である。宇宙物理では天体力学などで有名なScott Tremaine教授と宇宙論で著名なZaldarriaga教授に加え、Sunyaev客員教授(Max-Planck天体物理学研究所所長)など大物研究者が誰かしら滞在している。日本からは福来先生(IPMU教授)がビジターとして毎年来られ、浅学な私は色々と勉強をさせていただいた。プリンストン大学にも錚々たる教授陣が揃い、IASと大学それぞれに各地から気鋭の研究者がひっきりなしにやってくるため、国際会議で出張して逆に後悔したことも多い。

日本人研究者は一時期IASに私を含めて最大5名がメンバーとして在籍していた。大学に行けば更に日本人ポストクや大学院生がいて、日本からのビジターもしばしばやって来るので、コロンバスで日本人の知り合い=堀内氏夫妻

であった私たちには革命的な変化であった。私が着任してすぐ、妻は出産のために日本に帰国したが(直後にハリケーンが来て東海岸では大きな被害が出たため間一髪で帰国であった)、2013年3月に第1子も産まれ、何事もなくスタートを切ることができた。プリンストンではその落ち着いた環境で、じっくりと研究を行う予定であった。しかし当初の予定は大幅に変わることになる。

2013年5月にマディソンで行われた国際会議に招待されて参加したのだが、そこでIceCubeの新しい結果が発表された。前年のニュートリノ国際会議でPeVのエネルギーを持つニュートリノ2事象が石原氏(現千葉大学特任准教授)により報告されていたが、その時点では統計的有意度は高くなかった。それが5シグマにいかないまでも4シグマに達したのである。いつだったか昼食の折に高名なFreeman Dyson名誉教授と雑談をする機会があり、そのときBahcallの昔話をしてくれたことがあった。Bahcallが宇宙分野で5シグマ以上の「発見」のその後を調べたところ、約半分は消えていたようだ。勿論バックグラウンドがきちんと理解されているかなどで話は変わるので、額面通りに話を受けたわけではない。とはいえ新しい実験結果にすぐさま反応して論文を書くタイプではない私の腰は重かった。しかしIceCubeによる発見の前に自身が作った理論モデルのいくつかの予言とデータは無矛盾であり、これまで期待していた物理現象が見えてきている可能性があった。またIASがかつてBahcallらが在籍した場所であったこと、日本人の寄与が顕著なニュートリノ関連分野においてIceCubeによる高エネルギーニュートリノの発見でも千葉大学の吉田滋教授をはじめとする日本チームの貢献が大きかったことも励みになり、理論屋として自分が言えることを論文にまとめることにした。ウィスコンシン大学でポストクをしているAhlers氏を以前CCAPPに招いた縁で、たまたま会議後の1週間IceCubeグループのお膝元に滞在することになっていた。そこで議論から論文が一つ生まれた。また帰りの飛行機でもともと重要だと思っていたガンマ線のデータが思ったより強力であることに気づき、機内で計算してこれも論文にした。その翌週から日本に出張だったが、CCAPPの同僚との論文とKEKの井岡邦仁准教授と進めていたレター論文を合わせて4本の論文を完成させた。(うち1本はIceCubeグループの許可を得る必要があったために投稿が3カ月遅れてしまったが。)以降、国際会議やセミナーへ招待される頻度も増えた。個人的には当たり前の主張に思われたが、それでも皆を納得させるには多少の労力を要し、不定性の大きい天体物理学におけるシンプルな議論の重要性を思い知った。

そうこうするうちにプリンストンに来て1年が過ぎ、ちょうどその頃私はアムステルダム大学の安藤真一郎助教のところ滞っていた。そこでふと進路の話になったのだが、安藤氏に海外でのスタッフの公募に書類を出すように勧められた。私は日本での公募にはいくつか出したこと

があったが、面接には何度か呼ばれたものの採用まで至っていなかった。更に競争率の高いアメリカで、未だに英語も満足に使用せず、プレゼン能力もお粗末な私が通用するとはとても思えない。しかし、Johnをはじめ他のシニアの研究者からも勧められ、妻からも一応の許可が得られたので、州立大学を中心にアメリカの4つの公募に応募した。

結果的にPSUの物理学科助教の面接に呼ばれることになった。アメリカの面接は日本のものとは大きく異なる。15-30分間の面接を1度だけ行うのではなく、セミナーをした上で、1日から2日かけて一人30分程度で片っ端から1対1で面接をしていくのである。相手の分野も素粒子、宇宙、物性と様々で、学科長や学部長、学生とも話をし、昼食と夕食も面接を兼ねている。私は日本での面接しか経験がなかったが、自身の研究分野がマッチしていないことを面接で指摘されたり、発表の導入部分にあった写真に文句を言われたりと圧迫感を感じることも多かったので、厳しい面接が当たり前だと思っていた。ところが、逆にアメリカの面接は皆が親切で大学の良いところばかりを説明してくるので、その違いに驚いて色々と勘ぐってしまい怖くなってしまったほどであった。もっとも節々にエッジの効いた質問が飛んでくるので最後まで気が抜けなかったが、

まさか採用されると思っていたが、幸運にもオファーをもらうことができた。その後苦労したのは交渉である。給与については必要なかったが、研究費については一応交渉を試みた。しかし塩梅が全くわからず、ScottやJohnに意見を聞きながら、何とか希望を通すことができた。またその結果、あと1年弱IASにいていいことになった。このあたり融通が効くところはアメリカならではだろう。

### 3. そしてまだ続くアメリカ生活

今この記事を書いている時点で、ちょうどHIBビザが下りて、日本に一時帰国する計画を立てているところである。アメリカに来た当初はここで5年以上過ごす可能性は

低いと思っていた。英語も不得手で博士号取得時ほぼ無名でアメリカに渡った日本人研究者が、まだやっけていけるのは、Johnをはじめ多くの人に恵まれたからである。しかし何より感謝したいのは家族のサポートだろう。アメリカでの生活は日本と大分勝手が違う。子供の病気で病院に行くにせよ、予約に手間取ったりしていちいち苦勞をするし、医療保険も高い。サービスも日本と比べると残念なことが多い。結婚するまで海外経験もろくになかった妻には大きな負担である。加えて、私の出張が多いため子供の世話は任せきりになり、これまで非常に苦勞をかけてしまっている。その上、せっかく友人ができたところでこれから新しい場所に異動するのである。今後は子供の教育の問題もあるし、期待より不安の方が大きいのは明らかだ。妻ほどではないだろうが、私も来年から英語で授業をしたり、競争的資金を獲得していかなければならず、全て経験ゼロからのスタートで不安だらけである。

異国での生活には研究以外のことで時間を使う大変な部分があるだろう。とはいえ、もっと多くの若い日本人が海外に出てほしいと私は思っている。研究者の個性や行われている研究も日本よりもずっと多様で学ぶことは非常に多い。日本では好まれないような研究スタイルもアメリカでは通用したりする。宇宙分野でアメリカで活躍する日本人ポストドクやスタッフがまだ少なく、もっと存在感がほしいと思うのは私のへりくだった希望であろうか？

IASの私のオフィスは図書室の隣で、図書室にはBahcallの写真が飾ってある。私自身はBahcallに会ったことはないが、写真が笑っているように見えたなら仕事をきっちりやった日で、怒っているように見えたならその日は十分に働かなかったのだと心の中で判定している。怒っているように感じられた日の方が多いのだが、残り僅かなプリンストン生活を研究に打ちこんで、笑って新天地に赴けるようにしたい。

(2014年11月18日原稿受付)

## 第2回湯浅年子賞「金賞」： 坂東昌子氏

東島 清\*〈阪大〉

森 初果〈東大物性研〉

坂東昌子氏(愛知大学名誉教授)が、「対称性の自発的破れに隠れた局所対称性の研究ならびに女性研究者と若手研究者の支援活動」により、第2回湯浅年子賞「金賞」を受賞された。この賞は、自然科学の研究に顕著な業績を挙げ、さらに自然科学の社会的普及活動あるいは同分野の女性研究者を増大させる活動に大きく貢献した女性に与えられるものである。

坂東氏は、専門の素粒子論の分野で、標準模型成立へ向けての素粒子現象論から、量子色力学に基づくクォーク模型、カイラル対称性の自発的破れ、テクニカラー模型、さらには、ニュートリノ振動模型、大統一理論まで、素粒子論の発展とともに歩んだ広範な範囲の仕事をしている。その中でも、今回の賞の対象とされた業績の学問部分は、「対称性の自発的破れに隠れた局所対称性の研究」である。これは、現実のベクトル中間子 $\rho$ メソンが、量子色力学におけるカイラル対称性の自発的破れに伴う非線形表現の隠れた局所対称性のゲージ場のダイナミカルな実現例になっていると指摘したものである。<sup>1)</sup> $\rho$ メソンの結合の普遍性などの実験事実を整合的に説明する新しい考え方で、1960年頃のJ. J. 桜井の現象論的試みの25年後の正当化を与えたばかりでなく、広く自然界のゲージ不変性やゲージ場の起源に対して汎用的な考え方を提供する点で大きな注目を集めたのである。坂東氏が、超対称な場合も含めて非線形表現および隠れた局所対称性についての一連の仕事をまとめた総合報告<sup>2)</sup>は広く読まれ900超の引用を誇っている。これらの仕事は、氏の他の多くの論文と同様、それぞれ数名の研究者達との共同研究であるが、どれも坂東氏の基礎物理に対する的確な

問題意識の下に、氏が中心になってグループを構成して成し遂げられた研究であることに注意したい。

また、坂東氏は、1960年代から約半世紀、女性研究者及び若手研究者に対する支援活動を精力的に続けている。

2002年のIUPAP(国際純粋・応用物理学連合)における第1回Women in Physicsパリ会議の参加に向けて、会員アンケートの実施、および「女性研究者問題」および「研究者環境問題」を視点とした解析に取り組んだ。さらにこれらの課題解決のため、日本物理学会男女共同参画推進委員会を立ち上げ、また男女共同参画学協会連絡会議の設立に尽力した。国に対しても積極的に女性研究者支援を働きかけた結果、第3期科学技術基本計画等に女性の活躍促進が盛り込まれ、女性研究者の環境改善および増加に繋がった。また、「研究者環境問題」の中でポストドクターの問題にも着目し、日本物理学会のキャリア支援センターの設立に尽くした。

以上のように、顕著な研究業績を挙げ、さらに女性および若手研究者の支援活動に大きな功績を残した坂東昌子氏の本受賞に、心よりお祝いを申し上げます。

### 参考文献

- 1) M. Bando, T. Kugo, S. Uehara, K. Yamawaki and T. Yanagida: Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 1215.
- 2) M. Bando, T. Kugo and K. Yamawaki: Phys. Rept. **164** (1988) 217.

(2014年12月11日原稿受付)

## 第2回湯浅年子賞「銀賞」： 関口仁子氏

酒井英行〈理研仁科加速器研究センター〉

東北大学大学院理学研究科の関口仁子准教授が湯浅年子賞「銀賞」を受賞されました。今回の受賞は、関口仁子氏の原子核物理学における三体核力に関する実験的研究が評価されたものです。核力は、湯川秀樹博士が予言しノーベル賞受賞となった中間子交換理

論に基づいて2つの核子(陽子と中性子の総称)間に働く二体力として理解する努力がされてきましたが、その一方で、原子核の密集性から核子が3つ集まって相互作用する「三体核力」の存在も藤田・宮沢らによって1957年に予言されていました。しかしながら実験的な検証が難しく長らく研究が進展していませんでした。

関口氏は、世界に先駆け中間エネルギー領域(70-300 MeV)において、重陽子と陽子の弾性散乱の微分断面積やスピン依存量を理化学研究所や阪大核物理センターにおいて系統的に測定し、厳密な理論計算との比較から三体核力の顕著な寄与を示すことに成功しました。特筆すべきは、関口氏が達成した測定値の絶対精度で、新手法を開発することで微分断面積の系統誤差2%以下を実現させたことです。この精度を達成することで三体核力の寄与をはっきりさせることができたのです。

この成果は、三体核力の理論的取り扱いや原子核の研究に大きなインパクトを与えました。現在では、原子核物理分野において、三体核力を含めて原子核を理解しなければならないという視点は当然のものとなっています。例えば、中性子過剰核の束縛条件や中性子星など高密度核物質の状態方程式の理解などは三体核力の寄与を考慮することが必須となっています。

関口氏は、現在までほとんど実験的に解明されていない荷電スピン依存性や四核子系における三体核力の寄与などについて、更に三体核力の研究を進めておられます。

湯浅年子博士は、かつてこの三体核力の効果を実験的に検証するために、少数核子系散乱実験を続けておられました(例えば、日本物理学会誌64巻12号「小特集:湯浅年子誕生100年」の桑折範彦氏や尾立晋祥氏らの記事)。湯浅博士が先鞭をつけられた三体核力の研究を進展させたという意味でも関口仁子氏の今回の受賞は正に湯浅賞に相応しく、今後も国際的活躍が一層期待されています。

(2014年12月8日原稿受付)

\* 阪大理事・副学長

## 2014年度文化功労者： 佐藤勝彦氏

横山順一（東大院理  
）

日本物理学会会長を第53期（1997-98年）、第60期（2005-6年）の2期に亘って務めた佐藤勝彦東京大学名誉教授が2014年度の文化功労者の顕彰を受けた。佐藤氏は1968年に京都大学理学部物理学科を卒業後、同大学院、助手を経て1982年に東京大学理学部助教授に就任、1990年に同教授に昇任し、宇宙物理学理論の研究と人材育成に邁進し、世界最高水準の一大研究グループを築いた。その後、学内ではビッグバン宇宙国際研究センター長、理学部長・大学院理学系研究科長、学外においては上述の通り本会会長、国際天文学連合宇宙論部会長等の要職を歴任し、現在は大学共同利用機関法人自然科学研究機構長として、わが国の学術振興に重要な役割を果たしている。

佐藤氏は、素粒子物理学を宇宙の極限環境に応用し、素粒子宇宙物理学・素

粒子的宇宙論という新しい研究分野を開拓した先駆者で、天体物理・宇宙論双方において世界的な業績を上げていく。まず、のちに素粒子の電弱相互作用の理論として確立することになったワインバーグ・サラム理論を重力崩壊型超新星爆発に適用し、超新星ニュートリノが10秒間程度中心部に閉じ込められることを示した。これはカムイオカンデによる超新星1987Aのニュートリノ観測によって実証された。遠宇宙からのニュートリノがはじめて検出されたこのイベントは、後に小柴昌俊氏にノーベル賞をもたらすことになっただけでなく、わが国の宇宙物理学の研究が、観測においても理論においても、世界最高峰にあることを如実に示した瞬間であったといえよう。佐藤氏はまた、宇宙論・天体物理からニュートリノ質量や世代数をはじめとする各種素粒子の性質を制限し、今日の素粒子論的宇宙物理学の方法論を確立した。さらに、相互作用の大統一理論に基づき、真空の相転移にともなう、宇宙が何十桁も指数関数的に膨張すること

を示し、ビッグバン宇宙論をインフレーション宇宙論へと発展させた。その際、宇宙の大規模構造の種となり得る揺らぎが生成可能なこと、磁気モノポール問題が解決可能であること、また急激な宇宙膨張によって因果関係を持ち得る宇宙の地平線が十分広がることにより、大きな領域にわたって一様な物質宇宙が実現することを示した。さらに、この相転移の進行にともなう、宇宙が自己相似的に多重発生することを示した。これは「唯一絶対の宇宙」という古典的な宇宙観を、「多種多様な宇宙の中でのわれわれの宇宙」という考え方に変更することを迫った、画期的なものである。

こうして佐藤氏の業績を振り返ってみると、正しい動機を持ち、正しい理論を用いて研究を行うことがいかに大切であるかを、学び取ることができる。これは後進に大きな指針を与えるものであるといえよう。

（2014年12月24日原稿受付）

### 日本物理学会誌 第70巻 第5号（2015年5月号）予定目次

#### 巻頭言

新たなステージに向かう男女共同参画活動……………森 初果

#### 現代物理のキーワード

見えないクォーク・グルーオンを見る……………福嶋健二

#### 交流

宇宙環境と地球の気候—太陽圏システムの物理学—

……………宮原ひろ子

#### 解説

アクティブマターの非線形ダイナミクス……………太田隆夫

#### 最近の研究から

ドーピングしたトポロジカル絶縁体における超伝導とマヨラナ粒子

……………山影 相, 矢田圭司, 佐藤昌利, 田仲由喜夫

超流動, ボース・アインシュタイン凝縮, 密度ゆらぎ

……………加藤雄介, 渡部昌平

熱的な量子純粋状態を用いた統計力学の定式化

……………杉浦 祥, 清水 明

JPSJの最近の注目論文から 1月の編集委員会より

……………安藤恒也

#### ラ・トッカータ

ユーリッヒ滞在記……………小林秀樹

第44回天文・天体物理若手夏の学校開催報告 ……千秋 元

第59回物性若手夏の学校開催報告 ……吉田賢典, 西口大貴

2014年度原子核三者若手夏の学校活動報告

……………宮本貴也, 加藤洋崇, 小林良彦, 白井純哉

第54回生物物理若手の会夏の学校報告 ……山田大智

#### 追悼

追悼：永野元彦氏……………手嶋政廣

#### 新著紹介

## 松原武生先生を偲んで

米沢富美子\* ◇

2014年12月15日、松原武生先生が93歳で他界されました。哀惜の念を込めて追悼文を書かせて頂きます。

## (1) ご経歴

松原先生は、1921年大阪生まれ。43年大阪帝国大理卒（永宮健夫先生の門下）、北大理教授を経て、55年京大基研（基礎物理学研究所）物性部門の初代教授に就任。60年には京大理教授、84年同定年、翌年に岡山理科大教授、92年同退職。

専門は、超伝導、超流動、磁性、誘電体などの物性物理学の基礎理論で、量子統計力学の発展に大きな寄与をされました。戦後日本の物性論と統計力学を牽引したリーダーの一人。日本の研究者に論文発表の場を提供すべく、休刊中の和文学術誌『物性論研究』を確井恒丸教授と共に『物性研究』として63年に復刊されました。この雑誌の恩恵を受けた若手研究者は、数知れません。

先生は、紫綬褒章、勲二等瑞宝章などを受賞なさっています。また73年には、本会の第29期会長に選出されました。

## (2) 温度グリーン関数

松原先生には上述の各専門分野でいくつもの業績がありますが、代表的なお仕事は量子統計力学における「温度グリーン関数の導入」でしょう。温度グリーン関数を使うと有限温度における多体系のミクロな記述が可能になり、数々の問題に応用されて成果を収めました。例えば、ランダウのフェルミ流体理論で現象論的に導入された準粒子の概念に、統計力学的基礎づけを与えることができます。また、アプリコソフらによって示されたように、BCS理論におけるクーパ対の存在をグリーン関数で表現することも可能です。

研究成果の真価はしばしば、その波及効果の大きさに測られますが、その意味で温度グリーン関数の拡がりには計り知れないものがあります。そして温

度グリーン関数は今や、量子的多体問題や量子統計力学の基本的な方法として、完全に定着しています。国産のこの成果は、日本の研究者たちを力づけました。

## (3) お人柄

負けず嫌いで、誇り高く、それでいて本質的にシャイで、ちょっぴり甘えん坊。それが松原先生です。そのシャイな笑顔が人懐こく、周りの者を魅了しました。

京大基研は湯川秀樹教授のノーベル賞受賞（49年）を記念して53年に創設されたもの。その基研で物性初代の教授に招聘された件について、「僕はなあ、湯川さんに呼ばれたんやでえ」とこっそり話して下さったことがあります。その事実を、誇りとし励みとしておられました。一途さは、先生の身上です。

先生のご葬儀の後、ご長女の高田啓子さまからメールを頂きました。

「父は、岡山理科大を途中で退職しましたが、それは母の介護のためでした。寝たきりになった母を、7年余り、ほとんど父が一人で介護しました。私が心から父を尊敬したのは、この時です。また、葬儀の際、父が『愛されキャラ』であったことも、みなさんに教えて頂きました。」

## (4) 語録

先生が1960年に京大理学部物理学科で研究室を開設されたとき、私は初代の学生になりました。実に幸運だったと、しみじみ思うこの頃です。先生には、物理の内容もさることながら、研究者としての心意気を徹底的に叩き込まれました。

先生が折に触れて話されたお言葉のあれこれを私は拾い集め、「松原語録」と称して大切にしています。例えば次のようなお言葉があります。

## ①「若い頃は借金してでも勉強しろ」

若い時の吸収力は大きいから時間を大切に使えという教えです。私はこのお言葉を拡大解釈し「お金で時間を買



晩年、ミルクカップを手にご機嫌な朝。

う」主義を貫いてきました。もう若い現在の、お金で買える時間はなくなり取得しています。それで積算した借金はいつ処理するか。それを先生にお聞きするのは、忘れたままです。

②「時間とエネルギーを三等分して、『テーマ探し』『研究の実施』『論文書き』に均等に充てよ」

2番目の「研究の実施」を研究の全てだと思ひ込む傾向があるが、実際には「テーマ探し」も「論文書き」も同様に重要だという教えです。

## ③「プレゼンには最高の体調で臨め」

アスリートがオリンピックで最高の記録を出すべくその日に向けて体調管理するように、プレゼンは最高の状況を準備するのが聞く人への礼儀だ、と強調されました。要するにプロの気概を教わったわけです。

松原先生は、私の人生においてあらゆる面で「至上の師匠」だったといえます。先生の数々のお言葉を聞いてから半世紀が過ぎましたが、私は今も「松原語録」をパワーポイントに書き、若い人たち相手の講演などで紹介しています。先生の代表的なご業績「温度グリーン関数」同様、先生の教えは私たちのなかで、そしてずっと若い世代の人たちのなかで、これからも生き続けていくことでしょう。

(2015年1月18日原稿受付)

\* 慶應義塾大学名誉教授

山本義隆

## 世界の見方の転換 1；天文学の復興と天地学の提唱

みすず書房，東京，2014，xxxi+356+41p，20×14 cm，本体3,400円 [学部・一般向]

ISBN 978-4-622-07804-3

山本義隆

## 世界の見方の転換 2；地動説の提唱と宇宙論の相克

みすず書房，東京，2014，v+342+38p，20×14 cm，本体3,400円 [学部・一般向]

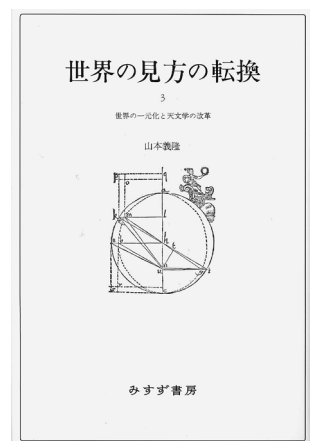
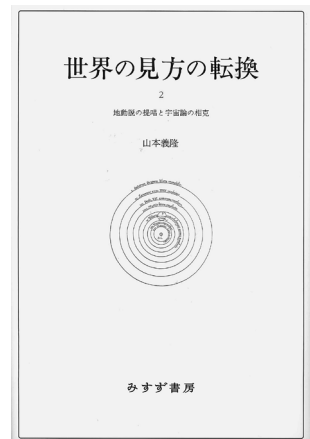
ISBN 978-4-622-07805-0

山本義隆

## 世界の見方の転換 3；世界の一元化と天文学の改革

みすず書房，東京，2014，vii+429+111+XXVIIIp，20×14 cm，本体3,800円 [学部・一般向]

ISBN 978-4-622-07806-7



横山雅彦

著者は近年ルネッサンス時代の科学技術文化についての研究を深め、『磁力と重力の発見』3巻(2003)と『16世紀文化革命』2巻(2007)という2冊の大著を相次いで発表し、広範囲な読者層から注目を浴びた。そしてシリーズ第三作目の本書も期待に違わぬ力作となっている。

本書の「あとがき」によれば、本書は以前の2著とともに三部作をなすものという。しかし三部作といっても、あらかじめ三部作の構想を着想し、その構想にしたがって次々と執筆していったものではない。第一作の執筆過程で、第二作の構想が生まれ、また第二作に対する鋭い書評が第三作を生み出す契機になったことは、氏自身率直に認めている。そのため、この三部作にはかなりの重複部分が存在し、時にそれが互いに整合的ではない場合も見受けられる。しかしそれはこの三部作の欠点などではなく、むしろ著者の長年にわたる思索と執筆の過程で生じた発展的不整合性となっている。

前口上は以上で止め、内容紹介に移りたいが、1,000頁を超える著作を3,500字程度(これが評者に与えられた文字数である)で、どのようにしたらよいか大いに悩ましい問題である。本書は、煮詰めて言えば、15世紀中葉のポイルバッハとレジオモンタヌスによるプトレマイオスの天動説的な数理天文学の復活から、コペルニクスによる太陽中心説(地動説)の提唱と

ティコ・ブラーエによる観測天文学の発展を経て、ケプラーによる惑星運動の三法則の確立までの歴史である。

本書には大きな特色が三つある。まず第一に、題名がコイレの大著のように『天文学革命』、あるいはそれに類したものではなく、『世界の見方の転換』という、一見聞き慣れない題名になっているが、そこには著者なりの自負がこめられているのである。この時代は同時に地理上の大発見の時代であり、これによって近代的な地理学が形成されるわけであるが、地理学は当時天文学と不離の関係にあり、しかも古代ギリシャの数理地理学を集大成したのも、同じプトレマイオスであってみれば、そのインパクトをも視野の中に収めなければ、「天文学革命」を十分に記述することはできないというのが著者独自の見解である。したがって「世界の見方」という言葉には、天文学的世界の見方と地理学的世界の見方という意味が同時にこめられているわけである。シリーズ第2作と重複する部分があるにもかかわらず、本書において、地理学的な諸問題が再述ないし発展させられているのは、そのような理由による。そしてこれは大きな成功を収めているように思われる。評者は特にゲンマ・フリジウスの仕事についての分析から学ぶところが多かった。オランダは16世紀後半から17世紀初頭にかけて、メルカトル、ステヴィン、ベークマンのような近代科学の先

兵ともいふべき第一級の人物たちを生み出し、それがデカルトやパスカルの仕事へと継承されるのであるが、その発端となったのがゲンマ・フリジウスであることを著者から初めて学んだのである。

本書の第二の特色は、ルネッサンス



時代の天文学的、地理学的思想の発展を、社会文化的なコンテクストと相即的に述べていることである。再びコイレの場合を例に挙げれば、コペルニクスもケプラーもいわばアイデアの世界の人物として、極端に言えば思考機械として登場するにすぎないが——付言すれば、それはそれなりに充分興味深いのだが——、本書の登場人物は当時の社会文化的環境の中で生き生きと描かれていることである。その描写がもっとも成功していると思われるのは、レギオモンタヌスとメラニヒトンについてである。レギオモンタヌスは、ヨーロッパ人でギリシャ語をきちんと学んだほとんど第一世代の科学者に属するが、彼はギリシャ生まれの大学者でヨーロッパに亡命し、カソリックの枢機卿にまで出世したベッサリオンの誘いに従い、その随行員になってイタリアに赴き、きわめて恵まれた環境でギリシャ語を習得できたのであった。レギオモンタヌスの主著は師のポイルバッハとの共著である『アルマゲスト綱要』であるが、それが画期的な著作となったのは、著者らの才能もさることながら——特にレギオモンタヌスは神童の誉れが高かった——、レギオモンタヌスが直接ギリシャ語の原典『数学集成(アルマゲスト)』を十分に読みこなしえたからであった。後に、イタリアから祖国ドイツに戻った彼は、当時ドイツで発明されたばかりの活版印刷術の大いなる可能性に注目し——彼より少し若いレオナルド・ダ・ヴィンチが活版印刷術にほとんど無関心だったのに比べると、大きな違いである——、南北ヨーロッパの交流の要衝の地でもあり、また精密品産業の一大中心地でもあったニュールンベルグに居住地を定め、天文観測に勤しむとともに天文学関連の出版活動に専念した。これによって彼は、ドイツにおける天文学研究の礎を築いたのである。その

後、16世紀前半に天文学研究の重要性を大学制度としても確立したのが、宗教改革者ルッターの右腕として活躍し、「ゲルマニアの教師」とまでたたえられたメラニヒトンである。この二人の活動によって、16世紀における天文学研究はいわばドイツの独擅場となったのである。著者によるこのあたりの記述は、社会文化史的にもユニークであり、繰り返し読むに値する。

第三の特色は、天文学研究における占星術の果たした役割の強調である。天文学史ではリップ・サービスとして占星術の意義について触れるのが慣例となっているが、著者はプトレマイオスの『テトラビブロス』やケプラーによる占星術改革をもその貪欲な胃袋でこなしうえて、議論を展開している。評者は占星術については具体的にはほとんど何も知らないが、興味深く読むことができた。

以上のように評者は本書を高く評価する者であるが、賞賛だけでこの書評を終えるわけにはいかない。本書を幾度か読み返し、時には原著で著者の引用をチェックした評者としては、疑問に感じたいくつかの点を率直に指摘しておくこともその義務の一部と考えるのである。そこで、紙数の関係もあるので、ここでは細部に関する二つの事柄を批判的に見てみることにしよう。

(1) 著者は第一章の註13(I, p. 41)において、「等化点」(エカント)に関して「equantまたはaequantはラテン語の動詞aequareから16世紀に造られた言葉であり……」と記しているが、実は13世紀のサクロボスコがすでにその『天球論』においてこの言葉を使用しており、さらに15世紀のポイルバッハもその『惑星の新理論』において使用している。著者自身これらの著作をラテン語で直接読んでいるはずであるが、それを見落としているのは、不可解である。おそらくこの言葉は翻訳の

時代の12世紀にアラビア語からラテン語に移入されたものなのではないだろうか。

(2) つぎにコペルニクスの太陽中心説において重要な役割を果たしていることが近年ますます強調されるようになったsymmetriaの概念について、著者はこの言葉をときには「均衡」(たとえばII, p. 369)と訳し、またときには「対称性」(III, p. 872)と訳している。だが著者はこの概念がルネッサンス時代にどのような意味内容を有していたのかについてはまったく触れていない。しかし美術史においてはよく知られているように、この概念は美の本質を指す概念であり、全体と部分、部分と部分の間の「適正な比例ないし関係」を表現する概念だったのである。当時の社会的、学問的常識に真っ向から対立する太陽中心説は、最高の職人(=芸術家)たる神によって創造された世界は美的に優れたものであり、驚嘆すべきsymmetriaが存在すべきであるというコペルニクスの予断的な信念に支えられて初めて形成されえた理論だったのでないだろうか。

以上、細部に関する批判点を二つ挙げたが、これらは本書の力作たる所以をほとんど損なうものではない。この半世紀ほどの間に16-17世紀の天文学革命を主題とする大作が国外でも3冊出版された。一つはA.コイレ『天文学革命』(フランス語原版, 1961)であり、もう一つはH.ブルーメンベルク『コペルニクスの宇宙の生成』(ドイツ語原版, 1975; 邦訳, I, II, III, 2002-2011)であり、3冊目はR. Westman: The Copernican Question (2011)である。いずれも特色のある(あるいは癖の強い)力作であるが、本書はこれらの3冊と較べてもけっしてひけを取らない著作であると言えよう。

(2014年9月15日原稿受付)

阿原一志

## 計算で身につくトポロジー

共立出版, 東京, 2013, ix + 213p, 21 × 15 cm, 本体2,800円 [専門〜学部向]

ISBN 978-4-320-11039-7

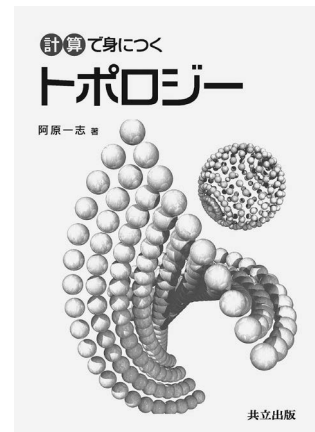
鈴木淳史 (静岡大)

本書は, 非専門家を念頭に予備知識をほぼ必要とせず, ホモロジー群の解説を行っている. 記述は非常に具体的であり, まさに計算で身につくというタイトルにふさわしいものになっている.

近年, 物理の諸分野において, ホモロジーや圏論などといった従来の物理数学の枠組みで教えられてこなかった種々の概念に出くわす機会が非常に増え, 分野によっては必須というような状況になりつつある. 学校で習わなかったことは, 理解できても使いこなすのは大変難しいといった意味の文章を, あるところで読んだことがあるが, 確かにその通りである. このギャップを埋めるためには, 経験を積むしか無いのだが, 抽象的な内容になればなるほど, なかなか具体的な例を取り扱うのは難しいし, 自分で適切な例を設定すること自体が大変である. コホモロジーは, 微分形式等に基づいているので手を動かしやすいが, ホモロジーは図形に根ざしているために大変である. 一時, 物理学科の学生の間でよく読まれた『物理学者のためのトポロジーと幾何学』(C. ナッシュ・S. セン著, マグロウヒル) などでもあまり丁寧な

例をあげて説明してあるとはいいかねるように思う. その点, この本はまず適切な例を具体的に計算させて納得させた上で次に進む, という体裁をとっており, 独学者にとって大変ありがたいものとなっている. また計算の詳細も丁寧に記されており, こちらの計算間違いで疑心暗鬼に陥ることが無いように配慮されている. ホモロジー代数の解説書として, 従来, 『ホモロジー代数』(河田敬義著, 岩波基礎数学) が名高い. そこでの蛇の補題の証明も2ページ半ほどあり, 数学書としては比較的詳細に記述されたものであるが, 本書ではホモロジー群を  $H_0$  と  $H_1$  に限定しているにもかかわらず, 6ページも使った大変に丁寧なものとなっている. 他の記述の丁寧さも推して知るべし, であろう.

本書は二部構成となっており, 第一部ではグラフの (すなわち  $H_2$  以上を考えない) ホモロジー群について, 第二部では曲面の (すなわち  $H_2$  まで考える) ホモロジー群について閉曲面の分類定理まで解説を行っている. 初学者にとっては (数学書にありがちな) いきなり  $H_n$  まで議論する, となっていないところがウレシイ.



本書でこれらの基礎知識を身にしみこませた上で, さらに進んだ教科書, 例えば前述の『ホモロジー代数』など読み進めると理解が深まるのではないか. また, この本の調子でもう少し進んだ話題まで丁寧に説明してほしい, とお考えの方は本著者が共著者のひとりになっている『パズルゲームで楽しむ写像類群入門』(阿原一志・逆井卓也著, 日本評論社) など手にとられてはいかがか.

(2014年9月26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.



## 放射線被曝による発がんは線量に比例するか？

宮沢弘成 ◊

本誌泉雅子氏の交流「放射線の人体への影響」<sup>1)</sup>に対し山田耕作氏が、低線量の場合の扱いが不当であると疑問を述べ、<sup>2)</sup>泉氏は、この問題には相反する様々な意見が世間にあると返事している。<sup>3)</sup>

問題は、低線量被曝の場合、それによるがん発生が線量に比例するか？ すなわち応答が閾値無し線形 (Linear Non-Threshold, 略してLNT) であるか、否か？ ということである。これについては嘗て本誌の「会員の声」欄でも大いに討論されたが、議論が収束しなかった。3年ほど前に当時の編集委員長が、この問題はまだ結論の出ない、物理学の専門領域を超えた問題である、との判断により、誌上討論が打ち切られた。<sup>4)</sup>

LNT問題に相反する意見が世間に生じたのは問題設定が不十分のためである。放射線による発がんは被曝線量だけで決まるのではない。他の多くの変数、条件に依存

するのであり、発がんの線量依存性は被曝の状況により異なる。したがって、いかなる場合にLNTが成立するかを明らかにすべきである。

被曝による発がんの量は人体の状態によって大いに異なる。全く健全の人は放射線を浴びても容易にはがんにならない。1本の放射線がある細胞のDNAを傷つけても、細胞のもつ修復機能により回復してがんにはならない。放射線被曝でがんが生じるには、1本が傷つけたDNAに、その回復前にもう1本(以上)が作用しなければならない。この割合は、強度の被曝を除き、小さい。また2本以上の放射線による過程であるから、入力に対する応答は線形ではない。

普通の人は放射線を浴びなくても、発がん物質の摂取、発がん性ウイルスの作用、などの刺激によりがんとなる。人間の死亡の約3割はがんによるものである。このような自然発がんの要因をもつ人が被曝した場合は、1放射線の入射でもがんを発生させ得る。それが自然要因と協力してがん発生となし得るのである。この場合は1放射線でがんが発生するので、入力と発がんは線形応答となる。実際のがん発生状況では多くの要因が絡んでくるので、応答に関して物理的議論をする場合はそれらを精査

しなくてはならない。

### 参考文献

- 1) 日本物理学会誌 68 (2013) 141.
- 2) 日本物理学会誌 68 (2013) 692.
- 3) 日本物理学会誌 68 (2013) 693.
- 4) 日本物理学会誌 66 (2011) 864.

(2014年1月12日原稿受付)

放射線の低線量被曝の場合にがん発生率に閾値があるかどうかに関する議論は、物理学の専門領域を超えた問題であるとの判断から、本欄における議論を打ち切りとしています(本誌66(2011)864)。本誌、泉雅子氏の交流「放射線の人体への影響」(本誌68(2013)141)の掲載後も、会誌編集委員会の立場は変わっていないことをお知らせいたします。泉雅子氏の解説はこの問題に関する専門分野での理解を紹介したもので、閾値の有無に関しては結論されていません。本欄への投稿(本誌68(2013)692)は掲載記事への意見として掲載されました。また、本号の投稿記事はそれらに関する意見として掲載します。(会誌編集委員会)

- 1) 広く会員にとって関心があると思われる話題についての個人的な意見や感想を述べた投書を掲載します。
- 2) その内容に関する責任は投稿者が負います。

## 会誌編集委員会より

### 「会員の声」運用指針について

本誌「会員の声」欄では、広く会員にとって関心があると思われる話題についての個人的な意見や感想を述べた投書を掲載しています(投稿規定)。

近年のインターネットを用いたウェブサイトやソーシャルネットワーキングサービスの発達を受け、人々が個人的な意見や感想を社会に発信し、議論を交わすことはかつてよりはるかに容易となりました。しかし「会員の声」欄にはインターネット上で情報発信とは異なる、会員どうしの相互

交流に資する役割があると考えています。編集委員会では本欄において、会員にとって有益な、かつ焦点を絞った議論が活発に、幅広い年代の会員によって行われることを望んでいます。

70期会誌編集委員会では、本欄の活性化を目的とし、そのあり方を検討してきました。若い世代の会員でも高い敷居を感じることなく率直な意見が交わされるためには、文字数にして1,000字程度の、焦点や論点の絞られた記事が適当と評価しています。このため、本欄記事の字数制限を1,500字に変更することとしました。

「会員の声」欄記事の内容に関する責任は投稿者が負いますが、採否は編集委員会での議論を踏まえ、委員長が判断していま

す(投稿規定)。編集委員会では各投稿について、会員の関心やメリットの多寡について意見交換しますが、会員間の円滑なコミュニケーションをうながすため、他者への誹謗中傷の恐れはないか、専門的関読を要する投稿になっていないか、特定の個人や団体の著作やブログ等の宣伝となっていないか、などの点に留意し、文体や表現の妥当性と併せて議論しています。

なお、1,500字に収まりきれない投稿については、従来どおり閲読を経た上で「談話室」「話題」等、他欄に掲載することが可能です。

会誌編集委員会

## 掲示板

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

## 人事公募

### 人事公募の標準書式(1件500字以内)

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

### ■東京大学宇宙線研究所助教

1. 助教1名
2. 重力波推進室
3. 大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)プロジェクトにおいて現重力波推進室メンバーと協力して神岡にて低温鏡を用いたKAGRAの重要な装置部分の建設・調整に責任をもってあたり、装置完成後はKAGRAを共同利用施設として運用し、重力波のサイエンスの推進に貢献できる方求む。
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者(確実取得見込者含)
7. ○履歴書(市販の様式相当、博士号の有無・取得見込、e-mailを必ず記入) ○研究歴(A4,3枚以内) ○業績リス

ト(論文リスト、口頭での発表を含めた研究発表リスト等)及び主要論文別刷3編以内(提出する論文については論文リストに印) ○着任可能時期 ○着任後の研究計画(A4,3枚以内) ○意見書又は推薦書2通 ○意見書以外はe-mailにPDF添付送信 ○意見書は作成者から締切日迄に直接PDFで送信し当方からの受信連絡を必ず確認

8. 2015年4月27日(月)17時必着
9. ①application [icrr.u-tokyo.ac.jp](http://icrr.u-tokyo.ac.jp)  
②宇宙線研究所 梶田隆章 電話04-7136-3100 [kajita@icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:kajita@icrr.u-tokyo.ac.jp)

### ■岡山大学大学院自然科学研究科教員

1. 准教授又は講師1名
2. 数理物理学専攻物理学講座
3. 物性理論. 市岡優典教授と協力して教育研究を推進する。
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書 ○学会及び社会における活動 ○教育に関する経歴書 ○研究業績概要書 ○研究業績目録 ○主要論文5編の別刷又はコピー ○研究計画と教育に関する抱負(2,000~4,000字) ○最近3年間の国際会議講演及び国内会議講演のリスト ○最近5年間の外部資金のリスト ○照会可能者2名の氏名、連絡先、e-mail ○応募者の所属、連絡先、e-mail、希望職位 ○各2部
8. 2015年4月27日(月)必着
9. ①700-8530岡山市北区津島中3-1-1 岡山大学理学部物理学科 岡田耕三  
②同学科 市岡優典 電話086-251-7806 [ichioka.okayama-u.ac.jp](http://ichioka.okayama-u.ac.jp)
10. 年俸制適用. 封筒に「教員応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。詳細は[http://www.gnst.okayama-u.ac.jp/other/koubou\\_index.html](http://www.gnst.okayama-u.ac.jp/other/koubou_index.html)参照。

### ■埼玉大学大学院理工学研究科助教

1. 助教1名
2. 物質科学部門・物質基礎領域(学部担当は理学部物理学科)
3. 物性理論、学部・大学院の物理学の講義、演習等。
4. 2015年10月1日
5. 5年(任期中の審査により任期のない助教となることできる)
6. 着任時35歳未満の博士号取得者。
7. ○履歴書(写真貼付) ○業績調査書 ○主要論文別刷3編以内 ○研究概要と

抱負(約2,000字)、教育に対する抱負(約1,000字) ○照会可能者2名(指導教員と直属の上司を除く)の氏名、職名、連絡先 ○推薦書1通

8. 2015年5月7日(木)
9. 338-8570さいたま市桜区下大久保255 埼玉大学大学院理工学研究科物質科学部門物理学コース長 谷井義彰 [tanii.phy.saitama-u.ac.jp](mailto:tanii.phy.saitama-u.ac.jp)
10. 封筒に「教員応募書類在中(物理・助教)」と朱書し推薦書以外の提出書類のPDFを電子媒体で添付し簡易書留で送付。応募書類不返却。給与は年俸制。スタートアップ資金を配分予定。書類選考後、面接とセミナーで選考。履歴書・業績調査書の様式は<http://www.saitama-u.ac.jp/recruit/index.html>からダウンロード。詳細は<http://www.saitama-u.ac.jp/recruit/20150316-1.pdf>参照。

### ■京都大学大学院人間・環境学研究科助教

1. 助教1名
2. 相関環境学専攻物質相関論講座物質性相関論分野
3. 光電子分光法を中心とした固体物性実験. 人間・環境学研究科、総合人間学部及び全学共通教育での物理系実験・演習・講義科目を担当。
4. 2016年4月1日迄の早期
5. なし
6. 博士号取得者。又は着任から1年以内に取得見込であること。
7. ○以下の書類を各6部(内5部はコピー可)提出すること ○履歴書(高等学校卒業以降) ○研究業績リスト ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○今迄の研究概要(A4,約1,500字) ○研究・教育への抱負(A4,約1,500字) ○照会可能者1名の氏名、連絡先
8. 2015年5月8日(金)必着
9. ①606-8501京都市左京区吉田二本松町 京都大学大学院人間・環境学研究科 高橋由典  
②相関環境学専攻物質相関論講座 吉田鉄平 [yoshida.teppey@kyoto-u.ac.jp](mailto:yoshida.teppey@kyoto-u.ac.jp)
10. 封筒に「物質性相関論分野(341)助教応募書類在中」と朱書し書留郵便で送付。提出書類不返却。

### ■新潟大学理学部物理学科教授

1. 教授1名
2. 物性理論研究室
3. 物性物理. 学部・大学院における教育・研究及び学科、学部等の運営。

4. 2015年9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, 総説等を区別) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○主要研究業績概要(2,000字以内) ○着任後の研究計画と教育に関する抱負(2,000字以内) ○その他特記事項(科研費等外部資金獲得状況, 招待講演, 受賞歴, 大学院生指導実績等) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先 ○上記の印刷物と履歴書以外のPDFが保存された電子媒体(CD-R等)を提出。
8. 2015年5月8日(金)必着
9. ①950-2181新潟市西区五十嵐2の町8050番地 新潟大学自然科学系総務課学系庶務係  
②理学部物理学物性理論研究室  
大野義章 電話/Fax 025-262-6275  
y.ono phys.sc.niigata-u.ac.jp
10. 封筒に「物性理論教授人事応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類等提出物不返却。詳細は<http://www.gs.niigata-u.ac.jp/~scitech/gakugai/koubo.html>参照。

#### ■分子科学研究所助教

1. 助教1名
2. 生命・錯体分子科学研究領域生体機能研究部門
3. 構造生物学的又は分光学的な手法を用い, 金属タンパク質の構造機能相関の解明に意欲的に取り組む研究者。主として当該研究領域の青野重利教授と協力して研究を行う。
4. できる限り早期
5. 6年を目途に転出を推奨
6. 修士課程修了者又は同等以上の学力を有する者
7. ○推薦書(自薦は不要) ○履歴書(所定様式, HP参照) ○研究業績概要(A4, 3頁以内。今後の抱負を含めてもよい) ○業績リスト(所定様式, HP参照) ○主要論文5編以内の別刷又はプレプリント各2部
8. 2015年5月10日(日)消印有効
9. 444-8585岡崎市明大寺町西郷中38番地 自然科学研究機構岡崎統合事務センター総務課人事係 電話0564-55-7113
10. 詳細は<http://www.ims.ac.jp/recruit/2014/>参照。

#### ■鹿児島大学理工学研究科(理学系)准教授

1. 准教授1名
2. 物理・宇宙専攻 物性理論講座
3. 非平衡・非線形科学(力学系理論, 統計物理学を基盤とする研究手法を用い, 物理学を中心とした自然現象の解明を目指す研究。小規模の実験や実験データの統計科学的モデリングを含むもの可)。
4. 2016年4月1日迄の早期
5. なし
6. 博士号取得者。現スタッフと協力して教育, 研究, 大学運営に取り組む方。
7. ○履歴書 ○業績目録 ○競争的資金取得状況 ○今迄の研究概要 ○今後の研究構想 ○教育経験と教育に対する抱負 ○照会可能者2名の連絡先 ○応募者連絡先
8. 2015年5月15日(金)必着
9. ①890-0065鹿児島市郡元1-21-35 鹿児島大学理工学研究科 物理・宇宙専攻 藤井伸平  
②同専攻 秦 浩起 電話099-285-8076 hata sci.kagoshima-u.ac.jp
10. 封筒に「物性理論講座・教員応募書類」と朱書き簡易書留相当で送付。応募書類不返却。選考過程で行う面接の経費は自己負担。詳細は[https://www.kagoshima-u.ac.jp/about/150223rikouri\\_koubo.pdf](https://www.kagoshima-u.ac.jp/about/150223rikouri_koubo.pdf)を必ず確認。

#### ■琉球大学理学部教授

1. 教授1名
2. 物理系物質基礎学講座
3. 物性理論(強相関, 磁性, 低温等)。専門教育及び共通教育を担当。
4. 2015年10月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者。大学院博士課程を担当できる方。現有スタッフと協力して研究できる方。教育, 研究, 学科運営に積極的な方。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究概要及び今後の研究計画(各A4, 約2枚) ○業績リスト(口頭発表等含) ○主要論文約5編の別刷又はコピー, 及び要約 ○教育に対する抱負(A4, 約1枚) ○教育経験・管理運営・社会貢献・国際連携等の概要 ○照会可能者2名の氏名, 連絡先(電話, e-mail等)
8. 2015年5月18日(月)必着
9. ①903-0213沖縄県西原町千原1番地 琉球大学理学部物質地球科学科物理系

梯 祥郎

②眞榮平 孝裕 電話098-895-8508  
maehira sci.u-ryukyu.ac.jp

10. 封筒に「応募書類在中」と朱書き, 簡易書留で送付。選考過程で講演等をお願いする(旅費等自己負担)。本学は男女共同参画を推進している。詳細は[http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/ryukyu\\_phys\\_kobo2015.pdf](http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/ryukyu_phys_kobo2015.pdf)参照。

#### ■理化学研究所研究員

[ I ]

1. 定年制研究員1名
2. 放射光科学総合研究センター・田中次世代X線レーザー研究室
3. 放射光やXFEL施設における光源装置の高度化を目指した研究開発を推進。具体的には, 永久磁石の高性能化と関連技術の高度化による光生成効率の飛躍的な改善, 及び構造の効率化による超軽量且つコンパクトな装置の実用化を目指す。従来の永久磁石方式とは異なる, 全く新たな原理に基づく放射光源の開発や, それらを利用したXFEL手法の開拓を推進。
4. 2015年10月1日(木)
5. なし
6. 関連分野の博士号取得者。1年以上の海外研究歴を有することが望ましい。放射光・XFEL施設での研究経験不問だが, SPring-8及びSACLAにおける光源開発に意欲的に取り組んで頂ける方を求む。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績一覧 ○主要論文別刷5編以内 ○現職の所属長を含む推薦書2通 ○今迄に獲得した外部資金リスト(書式自由) ○今迄の研究概要と今後の抱負
8. 2015年5月22日(金)17時
9. ①351-0198和光市広沢2-1 理化学研究所情報基盤棟3階 外務・研究調整部 研究調整課  
②rps-saiyo25 riken.jp

[ II ]

1. 准主任研究員約1名
2. 勤務地は研究実施上の適性によって決定
3. 研究分野は特定しない。応募者自身の自由な発想に基づく研究分野を開拓して頂く。
4. 2016年4月1日
5. 常勤, 60歳定年
6. 長期的視野を持つ次世代の科学技術分野を創成できる自律的研究者で研究室を主宰するのに十分な能力と研究業績

を有する方。(博士号取得後10年未満程度)

- 9, 9 ①詳細は<http://www.riken.jp/careers/researchers/20150401/>参照.
8. 2015年6月30日(火)17時
9. ②351-0198 和光市広沢2-1 理化学研究所 外務・研究調整部 准主任研究員事務局 riken-acs25 riken.jp
10. 応募はオンラインで受付。電話による問い合わせ不可。

#### ■愛媛大学大学院理工学研究科助教

1. 助教1名
2. 物質生命工学専攻機能材料工学コース 固体物性学講座
3. 材料物性工学(実験系), 磁性材料・熱電変換材料等の新規機能材料の合成及び材料物性の研究
4. 2015年9月1日以降早期
5. 5年(テニュア・トラック制度適用. 詳細は<http://ts.adm.ehime-u.ac.jp/>参照)
6. 博士又はPh.D.の学位を有する方(取得見込者含)
7. ○履歴書 ○研究業績 ○教育業績 ○その他の業績 ○今後の活動の抱負 ○今迄に獲得した研究助成一覧 ○主要研究業績別刷5編以内 ○照会可能者3名以内の氏名, 役職, 連絡先
8. 2015年5月22日(金)必着
9. ①790-8577松山市文京町3番 愛媛大学大学院理工学研究科物質生命工学専攻機能材料工学コース 武部博倫  
②同コース 平岡耕一 電話089-927-9885 Fax 089-927-9885 hiraoka.koichi.mk ehime-u.ac.jp
10. 詳細は<http://www.ehime-u.ac.jp/information/employment/index.html>参照.

#### ■名古屋大学大学院教員

##### [I]

1. 准教授又は助教(助教の場合はテニュアトラック教員)1名
2. 理学研究科物質理学専攻(物理系)物性理論研究室(S研)
3. 物性理論(広い意味の固体電子論. 新しい研究領域や研究テーマの開拓に意欲的な方. 他のスタッフと協力して研究室運営及び研究・教育を行う.)
4. 2016年4月1日以降
5. 准教授はなし. 助教は5年(テニュアトラック制度により審査を経て講師(任期なし)へ昇任可). 詳細は<http://www.nagoya-u.ac.jp/extra/kisoku/act/frame/frame110001177.htm>参照.
6. 博士号取得者又は着任迄の取得見込者

7. ○履歴書 ○業績リスト ○今迄の研究概要 ○着任後の研究計画 ○教育に対する抱負 ○主要論文5編以内各1部 ○照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先 ○希望職位及び着任可能時期 ○以上を電子化して収納したUSBメモリ
8. 2015年5月22日(金)必着
9. ①464-8602名古屋千種区不老町 名古屋大学理学部物理学教室 清水裕彦  
②同教室 河野 浩 電話052-789-5593
10. 封筒に「S研教員応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付.

##### [II]

1. 助教(テニュアトラック教員)1名
2. 情報科学研究科計算機数理学専攻情報数理モデル論講座
3. 数理情報学(量子計算理論, 量子情報理論, 量子測定理論, 機械学習, 数理統計学, 統計的データ解析, 組合せ最適化, アルゴリズム, 及びその関連分野)
4. 2015年10月1日以降早期
5. 原則5年
6. 原則博士号取得者(取得見込者含)
7. ○履歴書 ○業績等のリスト ○今迄の研究概要と今後の研究計画 ○教育に関する実績と抱負 ○照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先 ○主要論文3編の別刷又はコピー ○着任可能時期についてのメモ ○その他, 選考時に参考になる資料や項目があれば添付可
8. 2015年5月29日(金)必着
9. 464-8601名古屋千種区不老町 名古屋大学大学院情報科学研究科計算機数理学専攻 松原 洋 電話052-789-4834 yom is.nagoya-u.ac.jp
10. 封筒に「情報数理モデル論講座教員公募関係」と朱書き簡易書留で送付. 研究科の詳細は<http://www.is.nagoya-u.ac.jp/>参照. 本公募は「国際公募」. 本学では採用に関して男女共同参画に配慮しており, 女性の積極的な応募を期待.

#### ■大阪市立大学大学院理学研究科准教授

1. 准教授1名
2. 数物系専攻 宇宙・高エネルギー物理学講座
3. 宇宙線物理学実験
4. 2015年10月1日
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書(指定様式) ○研究業績リ

- スト(a: 査読付原著論文, b: 査読付国際会議プロシーディングス, c: 著書, d: 解説・総説, e: 特許, f: 招待講演・受賞, g: その他) ○主要論文別刷5編以内 ○今迄に受けた科研費等外部資金リスト ○研究業績概要 ○着任後の研究計画 ○教育経験 ○教育に対する抱負 ○その他参考となる資料 ○照会可能者2名の氏名, 連絡先
8. 2015年5月22日(金)
9. 558-8585大阪市住吉区杉本3-3-138 大阪市立大学 法人運営本部職員課
10. 必ず[http://www.osaka-cu.ac.jp/ja/about/jobs\\_faculty/faculty](http://www.osaka-cu.ac.jp/ja/about/jobs_faculty/faculty)参照.

#### ■宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教育職

1. 女性又は外国人を対象に准教授又は助教を1ないし2名
2. 宇宙科学研究所の5研究系の何れか
3. 宇宙科学に関する学術研究で優れた成果を創出すると共に宇宙科学プロジェクトにも積極的に貢献する. 更に大学等の研究者と協調して研究を遂行すると共に大学院生の教育・指導を行う.
4. 決定後早期
5. なし(63歳定年制)
6. 博士号取得者. 助教の場合は2015年3月末取得見込者含.
7. ○履歴書 ○研究歴 ○論文リストと主要論文別刷 ○今迄の研究概要 ○今後の研究計画(希望職位(准教授/助教)を明記)と宇宙科学プロジェクトへの貢献の抱負 ○外部研究資金獲得実績 ○他薦の場合は推薦書2通, 自薦の場合は照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先
8. 2015年5月29日(金)必着
9. ①252-5210相模原市中央区由野台3-1-1 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所科学推進部人事係  
②研究総主幹 満田和久 電話050-3362-3621 mitsuda.kazuhisa jaxa.jp
10. 必ず[http://www.jaxa.jp/about/employ/pdf/edu\\_2015\\_02.pdf](http://www.jaxa.jp/about/employ/pdf/edu_2015_02.pdf)を確認

#### ■物質・材料研究機構構成年制職員(正職員)

1. (1) 研究職: 分野別公募各1名(6分野), 物質・材料一般(分野不問)若干名(女性枠有). (2) エンジニア職: 分野別公募各1名(2分野)
3. 研究職: (1) 量子物性理論, (2) 固体電気化学, (3) 実用超伝導線材の材料科学, (4) セラミックス合成, (5) 燃

料電池又は水素利用関連材料, (6) ハイブリッド材料 (CFRP等), (7) 物質・材料一般, (8) 物質・材料一般 (女性のみ応募可). エンジニア職: (1) 機械加工・機械加工指導, (2) システム運用管理 (社内システムエンジニア).

8. 2015年5月31日(日)

9. ②305-0047つくば市千現1-2-1 物質・材料研究機構企画部門人材開発室 電話029-859-2555 nims-recruit nims.go.jp

9①, 10. 業務(研究)内容, 応募資格, 応募方法, 着任時期等の詳細は<http://www.nims.go.jp/employment/permanent-staff.html>参照.

#### ■岐阜大学工学部准教授

1. 准教授1名
2. 電気電子・情報工学科応用物理コース
3. 物理学, 応用物理学 (主に生物物理及び高分子物理とその工学的応用)
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者. 上記専門分野において優れた研究業績を有し, 学部及び大学院博士課程における教育・研究及び組織運営に対して十分な能力と熱意のある方. 工学部の基礎教育及び全学の大学入試における重要業務を担う能力と意欲のある方. 国際的に活躍できる英語コミュニケーション能力を有し, 英語による指導ができる方.
7. HP参照
8. 2015年6月1日(月)必着
9. ①501-1193岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部電気電子・情報工学科応用物理コース 亀山 敦  
②同コース 寺尾貴道 電話058-293-2701 terao gifu-u.ac.jp  
<http://www.eng.gifu-u.ac.jp/ouyoubutsuri/2015/02/post-4.html>

### 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)

#### ■食品ハイドロコロイドセミナー2015

主催 食品ハイドロコロイド研究会  
日時 2015年5月21日(木) 13:10~17:10  
場所 京都大学化学研究所共同研究棟大セミナー室 (611-0011 宇治市五ヶ庄 電話0774-38-3745)

内容 食品ハイドロコロイド分野は学問的にも産業の為にも重要であるが, 多くの手法の習得が必要になるケースが多々ある. 初心者が食品ハイドロコロイドへの理解を深め, 研究を進める上で新しい手法を学ぶ際の敷居を低くする為に有益な解析法を集めた.

定員 100名  
参加費 5,000円, 学生1,000円  
連絡先 108-8477東京都港区港南4-5-7 3号館208室 東京海洋大学海洋科学部食品生産科学部門 松川真吾 電話03-5463-0581 Fax 03-5463-0581 sympo.food.hydrocolloids.org

#### ■第26回食品ハイドロコロイドシンポジウム

主催 食品ハイドロコロイド研究会  
日時 2015年5月22日(金) 9:30~17:20  
場所 京都大学化学研究所共同研究棟大セミナー室 (611-0011 宇治市五ヶ庄 電話0774-38-3745)

内容 食品の製造・加工・調理におけるハイドロコロイドの基礎と応用, 咀嚼・嚥下, 消化・吸収に関する話題を取り上げる. 企業の方をはじめ, 医薬領域において第一線で活躍の方の幅広い分野の講演.

定員 100名  
参加費 5,000円, 学生1,000円  
申込 <http://food.hydrocolloids.org/sympo>より  
連絡先 108-8477東京都港区港南4-5-7 3号館208室 東京海洋大学海洋科学部食品生産科学部門 松川真吾 電話03-5463-0581 Fax 03-5463-0581 sympo.food.hydrocolloids.org

#### ■日本磁気学会第202回研究会「エネルギーに関連する磁性材料の現状とその展開」

主催 日本磁気学会  
日時 2015年5月26日(火) 10:40~16:20  
場所 中央大学駿河台記念館330号室 (東京都千代田区神田駿河台3-11-5)  
内容 パワーエレクトロニクスの急速な進展により, 磁性材料に所望される特性も変化してきた. それに伴い解析技術も発

展してきた. 現在及び今後の磁性材料の供給・評価・活用に関して, 活発に活躍されている研究者を講師に招き, 研究会を開催する. 多くの方の参加をお待ちする.

定員 60名  
参加費 3,000円(資料代込), 学生無料(資料代1,000円)  
申込 当日受付  
連絡先 101-0052東京都千代田区神田小川町2-8 日本磁気学会事務局 杉村 電話03-5281-0106 msj\_bj.wakwak.com [http://www.magnetics.jp/event/research/topical\\_202/](http://www.magnetics.jp/event/research/topical_202/)

#### ■ISSP International workshop "New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics"

主催 東京大学物性研究所・新学術領域「ナノスピントロニクス」  
日時 2015年6月1日(月)~19日(金)  
場所 ワークショップ: 東京大学物性研究所 (277-8581 柏市柏の葉5-1-5). シンポジウム: 柏の葉カンファレンスセンター (277-0871 柏市若柴178-4 柏の葉キャンパス148街区2)  
内容 この滞在型ワークショップでは, 密接に関連する2分野であるスピントロニクスとメソスコピック系物理をとりあげ, 世界の最前線で活躍している海外の理論研究者を招待し, 国内の研究者と十分な時間をかけて議論を行う. 期間中に国際シンポジウム (6月10日~12日) を開催し, 関連する周辺領域の話題もとりあげ, 全国の理論・実験研究者による最新の成果報告を行う.

定員 なし  
参加費 無料(懇親会費別途)  
講演申込締切 2015年4月24日(金)  
参加登録締切 2015年5月25日(月)  
連絡先 277-8581 柏市柏の葉5-1-5 東京大学物性研究所 加藤岳生 npsmp2015-sec issp.u-tokyo.ac.jp  
その他 詳細は <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/public/npsmp2015/>参照.

#### ■第43回薄膜・表面物理セミナー (2015) 「次世代・革新二次電池技術の最前線~薄膜・表面研究者にもわかる電池の基礎から将来展望まで~」

主催 応用物理学会薄膜・表面物理分科会  
日時 2015年6月8日(月)  
場所 早稲田大学西早稲田キャンパス55N号館 (169-8050 東京都新宿区大久保3-4-1)

内容 二次電池技術の最前線について、電気化学を専門としない物理系の薄膜・表面研究者にとってもわかりやすく概観し、将来を展望する研究会として企画。二次電池を必要とする社会的要請やその理解のための電気化学の基礎から現在活発に研究・開発が進行している各種二次電池技術の現状に至るまでを第一線の講師の皆様から紹介頂く。

定員 100名

参加費 15,000円、学生3,000円

参加費振込締切 2015年6月1日(月)

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

### ■第59回表面科学基礎講座

主催 日本表面科学会

日時 2015年6月30日(火)~7月2日(木)

場所 東京理科大学神楽坂キャンパス1号館17階大会議室(162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3 電話03-3260-4271)

内容 「表面・界面分析の基礎と応用」について、初心者、若手研究者、技術者を対象として、入門的且つ具体例を解説する事を目的としている。

定員 100名

参加費 40,000円、学生10,000円

参加申込締切 2015年6月24日(水)

連絡先 113-0033 東京都文京区本郷2-40-13 本郷コーポレイション402 日本表面科学会事務局 電話03-3812-0266 Fax 03-3812-2897 shomu sssj.org その他 詳細はhttp://www.sssj.org参照。

### ■第60回物性若手夏の学校

主催 物性若手夏の学校

日時 2015年7月27日(月)~31日(金)

場所 岐阜長良川温泉ホテルパーク(500-8009 岐阜市湊町397-2)

内容 物性若手夏の学校は毎年全国から大学院生を中心とする200名程度の若手研究者が参加するサマースクール。全国の若手研究者が一堂に会し、講義やセミナーを通じて最先端の研究に触れ合い、相互のディスカッションを通じて刺激を与え合う機会を提供する場。

定員 200名

参加登録締切 2015年5月31日(日)

連絡先 info cmpss.jp http://cmpss.jp/index.html

その他 2015年5月1日より参加登録開始。

### ■TMU International Symposium on "New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure"

主催 首都大学東京大学院理工学研究科

日時 2015年9月24日(木)~25日(金)

場所 首都大学東京南大沢キャンパス(192-0397 八王子市南大沢1-1 電話042-677-1111)

内容 BiS<sub>2</sub>系層状超伝導体、1-2-20系化合物や充填スクッテルライト化合物等のカゴ状構造物質、フラストレート系、空間反転対称性の破れた系等の幾何学的に特徴のある結晶構造を持つ物質で発現する磁性や超伝導に関する最近の研究成果について発表と討論を行う。招待講演を含む口頭発表約30件とポスター発表約80件。招待講演者についてはHP参照。

定員 120名

参加費 無料

参加申込・抄録締切 2015年5月1日(金)

原稿提出締切 2015年9月4日(金)

連絡先 192-0397 八王子市南大沢1-1 首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻 堀田貴嗣 電話042-677-2516 Fax 042-677-2483 hotta phys.se.tmu.ac.jp http://www.comp.tmu.ac.jp/heavy-fermion/

### ■日本流体力学会年会2015

主催 日本流体力学会

日時 2015年9月26日(土)~28日(月)

場所 東京工業大学大岡山キャンパス(152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

内容 物理、気象、機械、航空、建築、土木、等様々な分野の流体力学研究者が一堂に会する講演会で、分野横断的な交流に重点を置く。

参加費 事前参加登録費：9,000円、学生3,000円。当日参加登録費：10,000円、学生4,000円。

講演申込締切 2015年6月14日(日)

原稿提出締切 2015年7月25日(土)

事前参加登録締切 2015年8月21日(金)

連絡先 日本流体力学会年会2015実行委員会 nenkai15 navier.mes.titech.ac.jp

### ■5th International Conference on Quantum Cryptography, Updating Quantum Cryptography and Communications 2015

主催 情報通信研究機構、国立情報学研究所、電気通信大学

日時 2015年9月28日(月)~10月2日(金)

場所 一橋大学一橋講堂学術総合センター2階(101-8439 東京都千代田区一ツ橋

2-1-2 電話03-4212-3900)

内容 量子暗号と関連分野における国際的な研究コミュニティ醸成を目的とした学術会議。これに先立つ9月28日午前に量子情報通信の現状と今後どのように社会へ恩恵をもたらすかを紹介する為の国際会議を併せて開催。両会議中には量子情報の著名研究者による一般向けパブリックレクチャー、研究者・技術者向けラボツアー(情報通信研究機構)等の開催も予定。

定員 250名

参加費 50,000円、学生30,000円(予定)

口頭発表投稿締切 2015年4月27日(月)

早期登録締切 2015年7月31日(金)

連絡先 QCrypt2015/UQCC2015実行委員会事務局 qcrypt2015 ilcc.com 又は 情報通信研究機構 武岡正裕 電話042-327-7471 Fax 042-327-6629 takeoka nict.go.jp, http://2015.qcrypt.net/, http://2015.uqcc.org/

### 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

#### ■科学技術ソフトウェア研究者等の国際会議への参加支援(平成27年度)

対象 国外で開催される科学技術ソフトウェア、計算科学、計算機科学、シミュレーション技術等の分野の国際会議発表者に対して参加費・旅費等を支援する。

公募人員 若干名

助成費用 1件につき、10万円を限度

公募資格 大学又は大学院に在籍する学生

応募締切 第1回：2015年6月15日(月)、

第2回：2015年10月9日(金)

問合せ先 319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 高度情報科学技術研究機構総務部 鈴木 電話029-282-8352

Fax 029-282-0625

その他 詳細はhttp://www.rist.or.jp お知らせコーナーを参照。



■会員専用ページ：ユーザ名とパスワード

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。)

4月ユーザ名 : 15Apr

パスワード: Guglielmo935

5月ユーザ名 : 15May

パスワード: Gustav837

ユーザ名とパスワードは巻頭言の前の  
 広告ページにもあります。

## 行事予定

[詳しくは表中の右欄記載の会誌各巻号の揭示板欄(\*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
2015年			
5/15~17	第11回ESR入門セミナー	八王子市(東京)	70-3
5/21~22	第32回希土類討論会	鹿児島市	69-12
5/21	食品ハイドロコロイドセミナー2015	宇治市(京都)	70-4
5/22	第26回食品ハイドロコロイドシンポジウム	宇治市(京都)	70-4
5/25~26	第32回量子情報技術研究会(QIT32)	豊中市(大阪)	70-2
5/25~29	第9回超高速表面ダイナミクス国際シンポジウム(USD9)	守山市(滋賀)	70-2
5/26	日本磁気学会第202回研究会「エネルギーに関連する磁性材料の現状とその展開」	東京	70-4
6/1~19	ISSP Int. workshop "New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics"	柏市(千葉)	70-4
6/5	平成27年度日本材料科学会学術講演大会	東京	70-1
6/8	第43回薄膜・表面物理セミナー(2015)「次世代・革新二次電池技術の最前線~薄膜・表面研究者にもわかる電池の基礎から将来展望まで~」	東京	70-4
6/29~7/3	第16回ナノチューブ科学と応用に関する国際会議(NT15)	名古屋市	70-2
6/30~7/2	第59回表面科学基礎講座	東京	70-4
7/3	日本真空学会関西支部&日本表面科学会関西支部合同セミナー2015「半導体デバイスの明日を担う新規材料開発の現状と展望」	豊中市(大阪)	70-3
7/7~10	第10回近接場光学に関するアジア太平洋会議(APNFO10)	函館市(北海道)	69-11
7/14~16	NIMS Conf.	つくば市(茨城)	70-3
7/27~30	1st INT. CONF. ON APPLIED SURFACE SCIENCE	上海(中国)	70-2
7/27~31	第60回物性若手夏の学校	岐阜市	70-4
8/27	第5回X線反射率測定講習会	つくば市(茨城)	70-2
9/16~19	日本物理学会2015年秋季大会(関西大学)(物性)	吹田市(大阪)	日本物理学会
9/24~25	TMU Int. Symp. on "New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure"	八王子市(東京)	70-4
9/25~28	日本物理学会2015年秋季大会(大阪市立大学)(素核宇)	大阪市	日本物理学会
9/26~28	日本流体力学会年会2015	東京	70-4
9/28~10/2	5th Int. Conf. on Quantum Cryptography, Updating Quantum Cryptography and Communications 2015	東京	70-4
10/25~30	10th Int. Symp. on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '15	松江市	70-2
2016年			
3/19~22	日本物理学会第71回年次大会(東北学院大学)	仙台市	日本物理学会
9/13~16	日本物理学会2016年秋季大会(金沢大学)(物性)	金沢市	日本物理学会
9/21~24	日本物理学会2016年秋季大会(宮崎大学)(素核宇)	宮崎市	日本物理学会

## 編集後記

私が勤務する首都圏の中堅私大では、1月と2月は(他大学の例にもれず)卒業論文や学位論文の指導に忙しい。1月も終わりに近いある日、研究室の卒研8人の発表練習に長時間付き合った後、居室でメールを確認したところ、この編集後記の執筆依頼が届いていた。どのような内容で書こうか悩んだが、今一番の懸案である卒業研究の指導に関することから書き始めようと思う。

私の学科では、毎年6~8人の4年生が各研究室に配属されて卒業研究を行う(修士課程に進む学生の数は年にも依るが、私の研究室では今年5人が内部進学する)。こう学生が多いと研究テーマを捻り出すのも一苦勞であるが、新米研究室主催者の私にとってそれ以上に悩ましいのは、それぞれの学生の性格や気質、資質に合わせて成長を引き出す指導方法の模索である。例えば、「学生のやる気と興味を引きだし」、「自ら主体的に考える学生を育てる」ことは理想の教育の一つであり、これは教員人事の公募で求められる「教育の抱負」に書く決まり文句になっている(私だけか)。

幸い、私の学生は、与えた研究課題に興味を持って一生懸命に取り組んでいる。しかし、「主体的に考えているか?」と問われると、まだまだそうとは言えない。それは、私の指導にも大きな原因がある。「分からない」と聞きに来られればすぐに答えを教えてしまうし、「プログラムがうまく動かない」と言われればバグを探し出して教えてしまう。たまに、こうすれば良いの

では?とアイデアだけ伝えて学生に考えさせようとしても、うまく行っていない様子を見ると、もどかしくなってしまう。「もう、俺に貸してみろ」となってしまう。そうなる学生たちは、研究の泥臭い部分や大きな壁を経験することなく、研究成果を得ることになる。これは現代っ子である彼らに「研究は楽しい」と思わせ、物理に対する興味を引き出すことには役立っていると思われるが、弊害として「自分で試行錯誤してみよう」とか「研究テーマの周辺について自分で掘り下げてみよう」といった主体性や能動性を確実に削いでしまっている。私としては「卒研生に高いレベルのことを求めるのは酷」とか「限られた時間内である程度のをまとめさせないといけない」とか、「まずは研究に興味を持たせることが先決」とか色々な言い訳を考えるのだが、学生を信じて見守るという根気のいる作業からただ逃げているだけという気がしてならない。まわりを見回してみると、人材を輩出している研究室の先生方は、学生に自ら考え・悩むことを上手に、そして忍耐強く課していることに気が付く。

そんな私は、学会誌が手元に届くと、学生部屋のテーブルに置いておく。学生たちも時々パラパラと目を通して、様々な研究内容に関する珠玉の記事は、学生の視野を広げ、興味をかきたてる。特に、まだ学会員にもなっていない学部学生には、例えば、海外での滞在記や新著紹介、そして公募情報ですら研究の世界を伺い知る新鮮で貴重な情報となっているように見受けられる。それは、彼らに「自分で調べてみよう・考えてみよう」と思わせる良い取掛か

りと刺激を与えているように思われる。日本物理学会誌は、研究者たちのための洗練された読み物と貴重な情報源としてのみならず、まだ学会員ですらない若い学部学生を刺激し、育てる役割も担っているのではないだろうか。記事執筆の際には、学部学生の読者にも分かりやすいことを意識しながらリードページやイントロを書いてみるのも良いかも知れない。

望月維人〈〉

### 編集委員

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

### (支部委員)

奥西 巧一, 黒岩 芳弘, 小山 晋之,  
酒井 彰, 中村 光廣, 野村 清英,  
前田 史郎, 松井 広志, 水野 義之,  
山崎 祐司

### 新著紹介小委員会委員

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

日本物理学会誌 第70巻 第4号 (平成27年4月5日発行) 通巻789号

©日本物理学会 2015

Butsuri

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

白 勢 祐 次 郎

印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

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

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。

日本物理学会誌は会誌編集委員会の依頼による寄稿と、会員からの投稿とからなる。その採否は会誌編集委員会で決定する。また、内容、表現などについて会誌編集委員会が修正を依頼することがある。原稿は原則として電子データとする。

## 1. 各欄の主な内容と執筆要領

以下の刷上りページ数には本文のほか、図表およびリードページ(1ページ)を含める。1d, 1fには著者紹介を、また1a, 1d~1oの著者が非会員の場合は非会員著者の紹介をつける。

### 1a. 巻頭言(3段組:刷上り1頁)

日本物理学会長等、日本物理学会の運営に対して責任ある立場の人が物理学会の現状、方針等についてその所信を述べる。原則、依頼原稿とし毎月掲載する。

### 1b. 最近のトピックス(2段組:刷上り2頁)

国内外の物理学の最近の大きな発見や発展を速報として紹介する。著者自身の成果の発表の場ではない。著者名と所属は末尾に掲載する。

### 1c. 現代物理のキーワード(2段組:刷上り2頁)

物理学の現状を読み解くため、あるキーワードを中心として、周辺も含めた研究の動向を紹介する。他領域研究者や学部学生にも分かるよう平易な筆致で紹介する。国外の研究動向を紹介してもよい。著者自身の成果の発表の場ではない。著者名と所属は末尾に掲載する。原則として毎月掲載する。

### 1d. 交流(2段組:刷上り5~9頁, リードページ・英文抄録・著者写真・著者紹介有)

細分化の進んだ各分野間の理解を深めるため、また初学者の啓蒙のため、厳密さを多少犠牲にしても各分野の現状、特に興味のある点、近い将来の問題点を平易に説明する。

### 1e. 特別企画

編集委員会の企画により、特集、講座、座談会等を取り上げる。執筆要領はその都度定める。

### 1f. 解説(2段組:刷上り5~9頁, リードページ・英文抄録・著者写真・著者紹介有)

1つの主題について、専門外の会員に対する入門的な説明から説き起こし、専門的な最近の成果まで解説する。原著論文発表の場ではない。

### 1g. 最近の研究から(2段組:刷上り3~5頁, リードページ・英文抄録有)

最近の重要な研究の中から、なるべく広い範囲の会員が興味を持つ話題を取り上げて紹介する。特に専門外の会員にも研究の要点が分かるように書くことが望ましい。

### 1h. 実験技術(2段組:刷上り2~8頁, 4頁を超える場合はリードページ・英文抄録・著者写真有)

広い範囲の人々にとって興味のある実験法について、その原理と技術上の問題点、それが貢献できる物理の分野などを明らかにする。

### 1i. 話題(2段組:刷上り2~4頁)

広く会員の関心をひくニュースや話題、大型実験装置の立ち上げ報告、多くの会員が興味を持つ国際会議やイベントの報告、物理で説明できる身近な現象、珍しい実験結果や計算結果などを紹介する。原著論文を発表する場ではない。

### 1j. 物理教育は今(2段組:刷上り1~4頁)

物理教育の改革に役立つよう、会員に教育の現状と問題点、海外事情、改善に向けた取り組みなどを紹介する。新しい教育方法の実践、物理学の授業で使用している演示用実験器具、ビデオなどの教材も紹介する。

### 1k. JPSJの最近の注目論文から(2段組:1つの論文につき刷上り1頁)

毎月のJPSJ掲載論文(レター論文、本論文および招待論文)の中からJPSJ編集委員会が選んだ注目論文を取り上げる。研究の背景と意義、その内容の簡単な説明をする。原稿は、論文の著者の原案をもとにJPSJ編集委員長が書く。

### 1l. PTEPの最近の招待・特集論文から(2段組:1つの論文につき刷上り1頁)

毎月のPTEP招待・特集掲載論文を紹介する。研究の背景と意義、その内容の簡単な説明をする。原稿は、論文の著者の原案をもとにPTEP編集委員長が書く。

### 1m. 歴史の小径(2段組:刷上り1~2頁)

物理学史上の様々な話題をあまり専門的でない読み物として掲載する。

### 1n. ラ・トッカータ(2段組:刷上り1~2頁)

今までの欄に収まらない人間的な事柄や、普通の解説書には見られない研究上のテクニックなどを紹介する。若手研究者の海外滞在体験記、大学訪問記、夏の学校報告などを紹介する。原則として依頼原稿とする。(欄名の由来は「触れ合い」を意味するイタリア語。)

### 1o. 談話室 (3段組: 刷上り1~2頁)

会員にとって興味ある話題, 研究・教育に関するちょっとした事柄, 随筆, シニアな先生から若手へのアドバイス, 会員の動静などを掲載する。

### 1p. 新著紹介 (3段組: 1つの書籍につき刷上り1/4~1/2頁)

- 1) 内外の新しい出版物の中で, 特に会員の興味をひくと思われるものを紹介し批評する。
- 2) 書き方は最初に著者名, 題名, 出版社, 出版地, 出版年, 頁数, サイズ, 価格, 叢書名などを記載する。

例: F. Scheck

#### Mechanics

Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1990, xiv+431p, 24×16 cm, 本体9,520円

- 3) 批評に対する原著者の反論は, 原則として1回掲載することができる。ただし, 刷上り1/2頁以内とする。

### 1q. 学界ニュース (3段組: 刷上り1/4~2頁)

物理学コミュニティにおける主なニュースを取り上げる。会員の受賞なども含める。受賞記事の掲載基準については別に決めるガイドラインによる。

### 1r. 追悼 (3段組: 刷上り1/2~1頁)

- 1) 物理学の各分野への貢献の大きかった会員, 名誉会員。
- 2) 日本物理学会の運営に貢献の大きかった会員, 名誉会員。
- 3) 日本の物理学界に貢献の大きかった内外の物理学者および関連分野の学者。

### 1s. 会員の声 (1,500字以内)

- 1) 広く会員にとって関心があると思われる話題についての個人的な意見や感想を述べた投書を掲載する。
- 2) 採否は編集委員会での議論を踏まえ, 委員長が判断する。その内容に関する責任は投稿者が負う。

### 1t. 掲示板 (500字以内)

- 1) 人事公募, 学術的会合の予定, 助成金の公募, その他の通知などを掲載する。その配列は所定の様式による。
- 2) 掲載希望の原稿は毎月1日締切とし, 原則として翌月号に掲載する。ただし, 1月号, 2月号は前々月の20日締切とする。また, 掲載にあたり字句の修正を行うことがある。
- 3) 原則として投稿はWebフォームおよびFAXによる。
- 4) 内容に関する責任は投稿者が負う。

## 2. 原稿作成上の注意

2a. 用紙と字詰め: A4判用紙に横書きとする。原稿は各欄に応じて3段組または2段組で掲載され, 刷上り1頁あたりの目安は図表がない場合, 3段組が17字×50行×3列, 2段組が26字×50行×2列である。

2b. 長さについて: 指定枚数を超過した場合には原則として短縮を求める。ただし, 図・表等は指定枚数に含める。

2c. 書き方: 電子データを原則とする。黒色, 横書きとし, 専門用語以外は原則として常用漢字・新仮名づかいを用いる。不必要な外国語の使用は避ける。外国語の固有名詞のうち『文部省学術用語集 物理学編』に掲載されているものは原則として片仮名を用いる。

2d. 術語について: 日本語として十分定着している術語はそれに従う。そうでないと思われるものはカッコ内に原語を付記する。専門分野にしか通用しない略語には説明をつける。また, 単位については原則としてSI単位を用いる。

### 2e. 字体の指定

- 1) 印刷すべき本文以外の指定や注意書きはすべて赤で書く。
- 2) 指定がない場合は原則として本文は立体, 数式はイタリックで印刷する。本文中でイタリックにすべきもの(物理量を表す記号・変数・物理量や番号を表す添字など)は, 例えばRは $\mathbf{R}$ のように, 文字の下に $\underline{\quad}$ と赤で指定する。数式中の立体にすべきもの(演算記号  $[\log, \ln, \sin, \exp(e), \lim, d$  (微分),  $\text{Re}, \text{Im}, \text{Tr}]$ ・虚数単位  $[i, j]$ ・元素記号・単位・言葉の意味を表す添字など)は, 例えばlogは $\overline{\log}$ のように,  $\overline{\quad}$ と赤で指定する。
- 3) 文中ボールドとすべき文字(表題・セクション名・文献などの見出し, 特別な文字など)は文字の下に $\underline{\underline{\quad}}$ と赤で指定する。ボールド・イタリックとすべき文字(ベクトルなど)は $\underline{\underline{\quad}}$ と赤で指定する。
- 4) ギリシア文字は明瞭に書き, ギ(赤)の記号で指定する。花文字は花(赤), テンソルはサンセリフ(赤)と指定する。
- 5) 数式は印刷に便利のように注意し, 特に文中に式を挿入する場合には $a/b, \exp(t/r)$ のような表記法を用いる。二重添字, eの肩にのる字の添字などは避ける。
- 6) 添字・本文中の文献番号などは赤で $\vee, \wedge$ と上ツキ, 下ツキを指定する。
- 7) 0(ゼロ)とO(オー), 1(イチ)とI(エル),  $\times$ (カケル)と $\times$ (エックス),  $\phi$ (ファイ)と $\phi$ (プサイ)など紛らわしいものははっきり書き, 特に誤りやすい場合には片仮名をつける。C, K, O, P, S, W, X, Y, Zなどのように大文字と小文字の区別が困難なものについては, 必要に応じ赤で $\text{\textcircled{C}}$ または $\text{\textcircled{D}}$ と指定する。

2f. 用語解説: 会誌の記事を学生や非専門家にもわかりやすくするために, 専門用語などに関しては用語解説の項を設けて簡単な説明をすることが推奨される。ただし, 解説すべき用語の数が少ない場合などは, 脚注を使って説明してもよい。

- 1) 用語解説は本文末、参考文献の前に入れるものとする。
- 2) 用語解説で説明される用語に関しては、文中、最終文字の右肩にダガー(†)を印すこととする。

## 2g. 参考文献

- 1) 文献引用の範囲は、それが必要かつ十分であるように留意する。私信のような一般の人が入手しにくい文献は引用することをできるだけ避け、その代わりに、それらの出所と具体的内容を本文中または脚注に簡潔に記すことが望ましい。
  - 2) 文献の引用は Abraham,<sup>1)</sup> Brubaker,<sup>2,3)</sup> Cahn<sup>4-6)</sup> などのように通し番号をつけ、論文の末尾に一括して示す。1つの番号には1つの論文が引用されることが望ましい。
  - 3) 参考文献の書き方は著者名、誌名、巻、年、頁の順とする。毎号頁の改まる雑誌については号数を入れ、巻数はボールドの指定をする。雑誌名の省略及び欧文の書き方は Journal of the Physical Society of Japan のスタイルを踏襲する。単行本の書名のうち日本語のものは『 』でくくり、欧文のものはイタリックの指定をする。日本語の場合は人名、書名とも省略しない。次の例の形式にならう。  
吉田善章：日本物理学会誌 **48** (1993) 73.  
T. Saito, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **54** (1985) 231.  
C. N. Yang and T. T. Chou: *Proc. 6th Int. Symp. Polarization Phenomena in Nuclear Physics, Osaka, 1985*, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **55** (1986) 53.  
森 正武：『数値解析』(共立出版, 1973) p. 83.  
G. F. Smoot: *Primordial Nucleosynthesis and Evolution of Early Universe* (Kluwer Academic, 1991) p. 281.
  - 4) 参考文献に文献の標題を入れる場合には、出典の書誌的事項の後にダッシュ(—)を入れ、そのあとに標題を記載する。
- 2h. 脚注：脚注は\*<sup>1</sup>, \*<sup>2</sup>, \*<sup>3</sup>などの記号で記し、脚注と赤で書く。
- 2i. 表：表は表1、表2のように通し番号をつけ、説明文を続ける。また、他の文献から引用する場合には引用文献を記載する。
- 2j. 図、写真：図および写真には図1、図2と通し番号をつけ、説明文を続ける。図を他の文献から転載または修正して転載する場合には必ず出典を明記し、著者および発行者に転載許可を得ること。
- 2k. 校正：掲示板以外のものは著者校正を原則とするが、場合により省略することもある。
- 2l. 別刷：1a~1j, 1m~1oおよび1rの記事の別刷は50部を希望する著者に寄贈する。50部を超える部数を希望する著者に対しては、50部単位で別刷を作成し、50部を超える分については $(1,100+8x)p$ 円を著者負担とする。ただし、 $p$ は頁数( $p \leq 3$ の場合は $p=3$ )、 $x$ は50部を超える50部単位の希望部数、カラー印刷の場合は20%割増とする。その他の記事は原則として別刷を作らない。なお別刷には表紙をつけない。
- 2m. 他の文献からの転載：他の文献から文章、図、表をそのまま転載する場合は、著作権の問題があるので、必ず著者および発行者の書面による許可(自著の場合にも必要)を求めなければならない。
- 2n. 謝辞：必要な場合は原稿作成に関わるものに限定し、小見出しをつけずに簡潔に記載する。1g(最近の研究から)、1h(実験技術)以外は、研究資金の出所は原則書かない。

## 3. 著作権

### 3a. 会誌に掲載された寄稿等の著作権

会誌に掲載された寄稿・投稿等(以下寄稿等という)の著作権は日本物理学会に帰属する。著者は、当学会および当学会が会誌の利用を許諾した第三者に対し、本著者人格権を行使しない。著者は、寄稿等が、①第三者の権利を侵害していないこと、②二重投稿ではないこと、および③共同著作物である場合には、会誌への投稿を行うにあたり、当該共同著作物の他の著者全員の同意を取得していることを保証する。

### 3b. 会誌に掲載された寄稿等の利用

- 1) 会誌に掲載された寄稿等の全部または一部を他の出版物に転載し、翻訳し、あるいはその他の利用をしようとする者は、別表の基準に従って日本物理学会の承認を得、またその寄稿等が会誌に掲載されたものであることを明記(出所明示)し、著作者の了解を得なければならない。
- 2) 著者は、会誌に掲載された自分の寄稿等の全部または一部を学術情報として著作者自身で利用する場合には、別表の基準に従うものとする。
- 3) 日本物理学会は、いかなる媒体や手段においても、著作物の全部または一部を公開する権利を有するものとする。

## 4. 原稿提出先

113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8F

butsurei-toukou@jps.or.jp

日本物理学会誌編集委員長

問合せ先電話番号 03-3816-6201

## (別表) JPSJ・会誌・大会概要集・大学の物理教育・JPS Conference Proceedings掲載論文 利用許諾基準

2014年4月改訂, 2011年8月改訂, 2006年10月改訂, 2005年10月施行, 2005年7月22日制定								
	許諾申込主体	利用対象	形式	媒体等	学会への申請	条件	学会への報告義務	注
1	著者	自己の論文の全部または一部	閲読が完了した「著者最終稿」の電子ファイル	個人のサーバ	不要	A, B, E, F	不要	個人のサーバとは、搭載された全内容について著者がアップロードや削除を他人の同意なしに行えるサーバを指す。
2	同上	同上	掲載物(電子ファイル)	研究者仲間へ電子的手段で配布	不要	C	不要	
3	同上	同上	掲載物(紙版, 電子ファイル)	研究報告書(不特定多数に配布しないもの)	不要	A	不要	
4	同上	自己の論文の図および表	無修正のまま	Review article	不要	A	不要	Review article 以外は、書面による申請が必要。
5	同上	自己の論文の全部または一部	閲読が完了した「著者最終稿」の電子ファイル	雇用機関のサーバ	必要[#1]	A, B, E, F	要(サーバ搭載のURLを連絡)	・雇用機関サーバとは、アップロードや削除を著者個人が直接コントロールできないものを言う ・営利目的の広告の場合は許可が必要
6	同上	同上	掲載物(紙版)	雇用機関の被雇用者の論文のみからなる論文集, 紀要, 本など: 雇用機関内部で使用または広報用だが非営利で無料配布のもの	不要	A	同上	・雇用機関外部への販売の場合には許可が必要
7	「著者または雇用機関」以外の第三者	掲載論文の全部または一部	掲載物(紙版, 電子ファイル)	本や論文, 論文選集(電子媒体を含む)	要	A, B, D	サーバ搭載の際はURLを連絡	・営利目的と判断された場合は、課金することもある
8	2次情報出版者	書誌情報など			要			条件(有料/無料など)は個別交渉

「条件A」: コピー権表示を含み一切変更しないこと。部分引用の場合は、完全な引用情報を付すこと。

「条件B」: JPSJ, JPS Conf. Proc. においては、JPSJオンライン版の当該論文にリンクすること。

「条件C」: 研究者個人宛の1対1の発送のみ。メーリングリスト、その他の複数宛先への一斉送信は禁止。

「条件D」: 著者の承諾も必要。

「条件E」: 掲載物(電子ファイル, 紙面のスキャンデータ等)のサーバ搭載は認めない。「著者最終稿」の搭載にあたっては、共著者の承諾を得ること。

「条件F」: 著者最終稿の場合も公開は電子版ないしは紙版の刊行後とすること。

## 注記

#1: 雇用機関が許諾申込主体の場合でも、著者本人からの許諾申込が必要。

#2: 複数の機関にまたがる研究プロジェクト(チーム)は雇用機関に準ずる。

#3: マイクロフィルム, CD-ROM等の電子媒体などは紙版に準じて扱う。

#4: 引用および引用情報を含む図や表などの論文の一部を転載する場合には、完全な引用情報を含んで転載すること。

#5: 利用許諾された論文等は、(共)著者および日本物理学会へ帰属する著作権を尊重して利用すること、また、サーバ搭載の論文を管理すること。

#6: 本基準は2011年8月1日以降の申請に適用する。

#7: 本基準について問い合わせや許可願いは右記までお願いします: JPSJ, JPS Conf. Proc.: permission@jps.or.jp その他: pubpub@jps.or.jp

# 会誌サプメンタルマテリアル掲載規定

[2014年11月 会誌編集委員会]

1. 会誌記事の科学的内容に関連して、読者の理解を助け、読者の便益を図るために、会誌記事の著者がウェブ上でサプメンタルマテリアルを公開することを認める。
2. サプメンタルマテリアルは会誌記事の付録として位置づけられ、関連する記事の物理的内容の本質的部分については記事本体で無矛盾に書かれているべきである。このため、単に制限ページ数を超過した原稿の一部をサプメンタルマテリアルとするような運用は行わないこととする。
3. サプメンタルマテリアルには記事と関連した画像・動画、数式の詳細な導出などを掲載することができる。ソースコード、実行ファイルは認めない。但し、これらを配置した外部サイトへの誘導は記事本体の参考文献として行うことができる。サプメンタルマテリアルのフォーマット、受付方法等については細則に定める。
4. サプメンタルマテリアルを掲載できる会誌記事の欄名は以下の通りである。最近のトピックス、現代物理のキーワード、交流、解説、最近の研究から、実験技術、話題、物理教育は今、歴史の小径、特集等、特別企画については、会誌編集委員会で都度定める。
5. サプメンタルマテリアル掲載の採否は、前記1. から4. までの基準に照らして会誌編集委員会で決定する。また、内容、表現などについて会誌編集委員会が修正を依頼することがある。
6. サプメンタルマテリアルの掲載は会誌の発行と同時にを行うこととし、公開後の変更は原則認めない。公開期間は細則に定める。
7. サプメンタルマテリアルの著作権および利用については、日本物理学会誌投稿規定3. に従うものとする。また、著者は、サプメンタルマテリアルに付随した個人情報を含む自身の情報について、日本物理学会がウェブ公開を目的として利用、提供することに同意する。
8. サプメンタルマテリアルの公開は著者に通知することなく停止する場合がある。サプメンタルマテリアルの提供遅滞、中断、停止又は公開により著者に発生する紛争・損害等について、日本物理学会はいかなる責任も負わないものとする。