

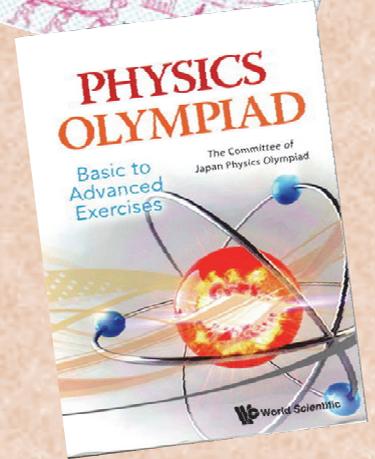
# JPhO News Letter

Japan Physics Olympiad

No. 17 2017年3月

CONTENTS

- 02 物理チャレンジ 2017 始まる
- 03 物理オリンピックへの最初の一步  
～第1チャレンジへ挑戦～
- 04 第2チャレンジ実験問題のねらい
- 05 第2チャレンジ理論問題のねらい～その2～
- 06 物理コンテスト国際連合 2016 の報告
- 07 JPhO だより ～JPhO 出版図書の紹介～
- 08 物理チャレンジ OP の博士論文



JPhO からの出版図書

第13回全国物理コンテスト

## 物理チャレンジ2017

物理チャレンジは、高校生・中学生の皆さんを主な対象として、物理の面白さや楽しさを体験してもらうことを目的とする全国規模のコンテストです。国際物理オリンピック日本代表選考を兼ねています。



参加費 無料

※物理チャレンジ2018から有料になります。

参加の流れ

参加申込み

参加手続きは、3月下旬からホームページまたは募集要項で案内します。参加申込み受付期間は、以下の通りです。

郵送：2017年4月1日(土)～5月22日(月)  
WEB：2017年4月1日(土)～5月31日(水)

第1チャレンジ

「実験課題レポート」と「理論問題コンテスト」にチャレンジします。

- 実験課題レポート(2017年6月16日(金)提出)提出後消印有効(実験課題公開中)
- 理論問題コンテスト(2017年7月9日(日)全国一斉90分間)約80会場

※理論問題コンテストの会場については、4月から公開される科学オリンピック共通事務局のホームページまたは募集要項に掲載される、会場一覧から選択してください。

第2チャレンジ

第1チャレンジの「実験課題レポート」と「理論問題コンテスト」の総合結果によって選ばれた約100名が、理論問題と実験問題にチャレンジします。

会期：2017年8月19日(土)～8月22日(火)3泊4日

開催地：岡山県青少年教育センター開谷学校  
内容：理論問題及び実験問題コンテスト(各5時間)、交流イベント、研究施設見学など  
表彰：金賞(6名)、銀賞(12名)、銅賞(12名)及び優良賞(約20名)等。

国際物理オリンピック日本代表候補者

物理チャレンジ2017成績優秀者の中から2018年にホルトガルトで開催される第49回国際物理オリンピック日本代表候補者を選出します。



特定非営利活動法人 物理オリンピック日本委員会  
NPO The Committee of Japan Physics Olympiad (JPhO)

Tel: 03-5228-7406 E-mail: info@jpho.jp HP: www.jpho.jp/

# 第13回全国物理コンテスト物理チャレンジ2017 始まる



物理チャレンジ2017 実行委員長  
埼玉大学 近藤 一史

## 物理チャレンジとは

このNews Letterの読者は、すでにご存じかもしれませんが、少し説明しておこうと思います。現在、日本は、大学入学前の高校生・中学生を対象とする7つの国際科学オリンピックに参加しています。これらは、毎年開催され、世界大会への日本代表選手を選出する国内コンテストを実施しています。国際物理オリンピックへの出場者を選出する国内大会が物理チャレンジです。しかし、物理チャレンジの目的は、国際大会への出場者の選出だけでなく、物理をより多くの人に理解してもらい、楽しんでもらうという、「物理の裾野を広げる」活動も重要な目的としています。

## まずは 第1チャレンジ

物理チャレンジは、大学入学前の高校生・中学生（小学生も参加したことがあります）なら誰でも挑戦できる第1チャレンジから参加することになります。第1チャレンジは、実験を自宅や学校などで行って結果をレポートにまとめて提出する実験課題レポートと、7月9日（日）に全国で一斉に行われる理論問題コンテストからなります。この両方に参加した人の中から、成績上位100名程度が第2チャレンジに進出します。第2チャレンジを目指すことはもちろんですが、第1チャレンジだけでも十分楽しんでもらえると思っています。

## 部活や仲間に参加しては？

物理チャレンジは、個人戦ですので、実験課題レポートは一人一人独立して作成しなければなりません。しかし、先生のアドバイスや友達の協力を得てはいけない訳ではありません。実験を行う際に、みんなで意見を交わしたり、1人ではできない測定をお互いに協力して行ったりしても構いません。今年の実験課題はすでにホームページ上に公開されており、『**重力加速度の大きさを測ってみよう**』です。どんな方法でもかまいません。レポート提出の締め切りは6月16日（金）（消印有効）です。部活の新年度の新しい活動として、実験課題レポートに取り組んではいかがでしょうか。先生にアドバイスをもらったり、家の人と一緒に装置作りをしたり、みんなで工夫して、物理の実験を楽しんでください。

理論問題コンテストでは、まだ物理を学習していない人でも答えることができるような問題から、今まさに話題になっているような物理学の最新の課題まで、様々な問題を用意し

ています。解答はマークシート方式ですし、教科書などの資料を持ち込むこともできますので、気軽に受けることができます。問題を解くことで物理を楽しめる内容です。

## 第2チャレンジでは大学でも経験できない試験

第1チャレンジで、上位100名に入ると、第2チャレンジ（全国大会）に参加することができます。第2チャレンジは、国際物理オリンピックと同じ形式で開催されます。

実験問題では、実験部会の委員の先生方が工夫を凝らして作製した実験キットが1人に1セット与えられます。テキストに従って、実験を行い、解答します。毎年、その実験装置のユニークさは、物理オリンピックの委員ですら感心するもので、大学の物理実験でもできない貴重な経験になると思っています。右の写真は、物理チャレンジ2016の第2チャレンジで使用された実験装置です。この装置は、磁石による誘導電流の測定と、表面張力の測定という全く違った2つの実験を行うことができるよう工夫されています。過去の実験キットは実費頒布されています。物理チャレンジのホームページをご覧ください。



理論問題についても同様です。高校や大学での物理の問題とはひと味違った問題です。説明文が少々長いような気もするのですが、説明を読めば解けるようにできていて、こんなことも物理なのかと驚くような問題です。過去問はホームページに公開されています。

また、第2チャレンジは3泊4日の合宿形式で行われるので、物理に興味をもつ生徒が全国から集まり、すぐに仲良くなって、勉強法や進路などの話で深夜まで盛り上がります。ここで知り合った友達は、大学に進学してからも付き合い合っている場合が多いと聞きます。

## 参加費無料は今年度限りか？

物理チャレンジは、集合場所までの交通費や実験レポートの郵送料などの費用を除けば、すべて無料で参加することができます。しかし、来年度からは物理チャレンジは有料化する予定です。

是非、物理チャレンジに参加して下さい。

# 物理オリンピックへの最初の一步 ~第1チャレンジへ挑戦~



第1チャレンジ部会長

埼玉県立川越女子高等学校 荒木 美菜子

## 今年の干支は酉

今年のお正月の年賀状で、酉(とり・鶏)の絵を描いたり印刷したりした人も多かったことでしょう。ちなみに酉の本来の字や意味は、『果実が成熟の極限に達した状態』を表すそうです。

さて、一周年前の酉年である2005年、「第1回全国物理コンテスト 物理チャレンジ2005」が開催されました。2005年は世界物理年で、“物理”に関する多くの行事が行われた年でもあります。物理チャレンジもその記念行事の一つとして開催され、それ以来ずっと継続されています。知名度が上がって定着したのではないのでしょうか。

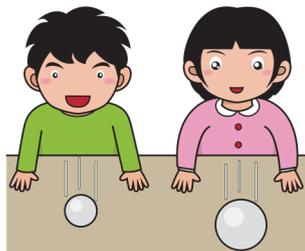


## 今年の実験課題は、『重力加速度の測定』

物理オリンピックへの第一歩、第1チャレンジの実験課題レポートの今年のテーマは「重力加速度の大きさを測ってみよう」です。

重力加速度は、高校の教科書の始めのほうに出てくる基本的な物理定数です。ということは、物理を学び始めた人や、興味を持ち始めた人でもとりかかりやすい課題であるということです。これまで、「なんだか難しそう…」と物理を敬遠していた人たちが、新たな“物理チャレンジャー”として参加してくれることを期待しています。

重力加速度の測定というテーマは、実は今年初めて出された課題テーマではありません。第1回の2005年からちょうど干支一周年して再登場です。ただし、第1回目の実験の課題内容は「単振り子の振動周期を測定し、その場所での重力加速度を求める。」でした。重力加速度の測定方法が指定された上の課題でした。もちろん、このときのレポートが学校に残っていたら参考にしても構いません。しかし、今年のテーマは、測定法を指定していませんので、いろいろな方法を試してください。



レポートを評価するポイントは、得られた値が理科年表の値に近いかどうかということではありません。測定方法のアイデアや、測定精度を向上させる工夫、得られた実験データの取り扱いなどを重視しています。値は少しずれているけれど私たちを唖らせるほどの斬新な方法で実験を行っているものや、定番の実験法だけれどいいねいに根気強くデータを取って処理しているもの、ぜひ自分なりのこだわりをもって実験して、レポートを作成してください。

## チャレンジするには

まず、参加申し込みをしましょう。申し込みはホームページから入力するだけ。または、申し込み用紙に記入して郵送しても構いません。

第1チャレンジの日程は下表のとおりです。実験レポートを郵送して提出することと理論問題コンテストを受験することの両方が必要です。どちらか一方だけでは第2チャレンジ進出のための資格が無くなります。

実験レポートの作成前に、物理チャレンジのホームページやポスター、募集要項に書かれている注意事項をしっかりと読みましょう。

参加申込	開始	4月 1日(土)	
	締切	※郵送	5月 22日(月) 必着
		※Web	5月 31日(水) 24:00
実験レポート	締切	郵送のみ	6月 16日(金)消印有効
理論問題 コンテスト	全国の各会場		7月 9日(日)

## 理論問題コンテストについて

第1チャレンジの理論問題コンテストでは、最寄りの会場を選んで受験します。会場のリストは募集要項やホームページに掲載されています。また、10人以上の参加者を募れば、自分の学校が特例会場として指定されて受験できます。

試験には、参考資料の持ち込みが可能で(ただし電子機器や通信機器は不可)、多肢選択のマークシート形式です。物理を学び始めた人にも解ける典型的な問題から、「そんなことがあるんだ〜」と物理のおもしろさを感じてもらえる問題まで多様な問題を用意しています。普段のテストとはちょっと違った問題と出会えることと思います。

## 仲間とつながろう

私は、この物理チャレンジのコンテストを通じて、物理って(ちょっと)おもしろいかも!と思っている人たちをつなげられたらいいなと思っています。

一緒に物理チャレンジのポスターを眺めたり、一緒に実験をしたり、一緒に同じ試験を受けたりすることで、仲間を作ったり、その存在を感じてほしいと思います。

さあ、ここまで読んでくれた君。早速、参加申し込みをしてくださいね。



## 第2チャレンジ実験問題のねらい



実験問題部会長  
筑波大学 大塚 洋一

### 理想的な実験問題とは？

どんなねらいで第2チャレンジの実験問題を作ったらいのだろうか、理想的な実験問題とはどんなものだろうか、実験問題部会ではこのような趣旨の議論が、ことある毎に繰り返されます。一つの理想は、実験機材は豊富に提供するものの、問題文は短く、解答へのアプローチの方法を含めてすべてをチャレンジャーの発想に委ねるというもので、これを理想とすることに賛成する人は多いでしょう。問題に対する理解、企画まで含めた、研究における実験に必要なすべての力をみることができそうだからです。ただし、物理の内容および技術的なレベルが適切でない、まったく何も進まないチャレンジャーが続出するのではないかと心配が大いにあります。

この対極の問題は、課題を多くの小問に分け、実験方法を詳しく示し、その手順に従って実験を行うというタイプになるでしょう。もちろん、解答は単純作業ではなく、データの取り方、まとめ方、解析方法、結果の考察などで、評価されることになります。

国際物理オリンピック (IPhO) の問題をみると、やや前者のタイプ寄り、問題文は短く簡潔なものが多いようです。第2チャレンジの問題はそれに比して長く、手順もかなりしっかり説明されており、後者のタイプと言っていいでしょう。IPhO 派遣候補者の選抜を行うとともに、すべてのチャレンジャーに物理実験を楽しく体験してもらうことも大切と考えるからです。チャレンジャーには中学生も含まれていますし、主体である高校2年生の多くも物理の授業が始まったばかりであることもその理由になっていると思います。しかし、2014年に前者タイプの問題を課したことがあります。「重力加速度の大きさを求めなさい」という問題で(今年の第1チャレンジも同じ課題になりました)、いくつかのヒントと様々な道具を提供するが具体的な方法は指示しないというものでした。試験終了後のアンケートには、おもしろかったという肯定的な感想が寄せられていました。さて、今年はこちらのタイプの問題になるのでしょうか。

### 実験とは？ ~圧力を測る~

実験とは、現象をつくり出し、その現象の何かを測る作業です。宇宙を対象とする場合のように現象を作り出すことはできないことはあっても、測定(観測)は必要です。この「○○を測る」という命題へのアプローチは多様であり、場合にに応じてさまざまな工夫が凝らされます。なかには本当にそれ

で測ることができるのだろうかという疑問に思うような方法もあります。例えば、気体の圧力(=力/面積)です。トリチェリの実験で使われたのはガラス管に入れられた水銀で、水銀の高さ(重さ)から圧力を知ります。圧力容器についている丸型の圧力計(ブルドン管)は圧力によって金属管が変形すること、つまりフックの法則に基づいて力を測っているのですが、この変形を大きく増幅する見事な工夫がなされています。圧力が小さくなると、力による方法は難しくなります。たとえば、0.1 Pa から 1000 Pa 程度の気体の圧力を測るのに使われるピラニ圧力計(真空計)は、金属管の中に直径  $25\mu\text{m}$  の白金線が1本張られているだけというとてもシンプルな構造をしています。なぜこれで圧力が測れるのでしょうか。ここではあえて説明をしません。すこし考えてから、調べてみてください。きつとなるほどと感嘆するでしょう。もっと低い圧力  $10^{-10}$  Pa から  $10^{-2}$  Pa で使われる電離真空計では気体分子の密度に相当する量を調べます。いずれも力を測っているわけではないので、圧力の値を知るためには較正(キャリブレーション)という手続きが必要になります。

### 実験とは？ ~温度を測る~

考えてみると、温度も直接測定することが難しい量です。日常使うアルコール温度計や水銀温度計はそれぞれの物質の熱膨張を利用したものです。デジタル式温度計も物質の電気抵抗が温度で変わることを利用したもので、これらは明らかに「温度」を測ったものではありませんので、較正が必要です。温度を直接知ることができるのは気体温度計です。これは理想気体の法則に基づいて、気体の圧力から温度を知るという方法です。しかし、実在気体は理想気体ではないので、厳密な意味では温度を決めていることにはならず、したがって何らかの補正が必要です。温度は  $Q = T \cdot \Delta S$  という式で定義されます。つまり熱量  $Q$  を加えたときのエントロピーの増加量  $\Delta S$  を測れば、本当に温度  $T$  を測ったということが出来ます。そんな方法が使われることがあるのでしょうか。実は低温のフロンティアである  $10^{-9}$  K 以下の超低温ではそのようにして温度が決定されています。むしろ、これ以外の方法で決めることはできないのです。

最後に、第2チャレンジに対する戦術的アドバイスを一つ。実験課題の解答時間は理論課題と同じ5時間です。長いようですが、例年、時間が足りなく最後まで至らない人が多数います。まず問題をざっと見て、複数の問題の解答順や時間配分の見当をつけてから始めることをお勧めします。

## 第2 チャレンジ理論問題のねらい ~その2~



理論問題部会長  
元岡山大学 東辻 浩夫

第2 チャレンジ理論問題のねらいについては JPhO News Letter No.14 にも書きましたので、ここでは、できるだけ相補的な観点から説明します。ねらいの一つは、物理として面白い(興味深い)現象や、日常、あるいはニュースで接する自然現象などの理解につながり、物理に一層興味をもってほしいということです。別のねらいに、問題に取り組むことによって、チャレンジャーの皆さんの物理の世界をより深く、より広げてほしいということがあります。以下は後者の主な点です。

### 微分・積分を自由に使う

1 変数関数の簡単な微分・積分は高校の数学の範囲です。ところが物理の教科書では、微分をあらわに使いません。例えばファラデーの電磁誘導の法則は、起電力  $V$  を磁束  $\Phi$  の微小な変化  $\Delta\Phi$  と微小な時間  $\Delta t$  の比で  $V = -\Delta\Phi/\Delta t$  と書いてあり(物理としては正しい)、 $\Delta t \rightarrow 0$  の極限である時間微分で  $V = -d\Phi/dt$  とは表していません。

また、力学でも、微分を含む方程式で現象を表し、軌跡などはその解(積分)であるとする、初期条件との対応などが簡明になるはずですが、微分・積分を用いた表現を避けています。それなりの経緯があるのですが、(皆さんには当てはまりませんが)物理は公式を暗記する科目である、という誤った印象を与える原因の一つになっているように感じます。チャレンジャーの皆さんには微分・積分を自由に使っていただきたいと思います。

また、物理現象が起きるのは3次元の空間と時間からなる4次元の場なので、物理量は一般に4変数の関数です。多くの場合、適当な一様性を仮定して、空間1、時間1の2変数の関数として単純化しますが、それでも微分・積分をどの変数について行うかについても注意してください。

### 概念を整理する: 保存則が重要

物理ではいろいろな保存則が現れます。着目する現象で何が保存し、何が保存していないかを見極めれば、具体的な値はすぐには分からないとしても、おおよその理解ができるといってもよいくらい、保存則は重要です。この観点で各分野を見直してみてください。中でも全体にわたるものとしてエネルギー保存則があります。力学的エネルギー、熱、コンデンサーやコイルに蓄えられる電気的エネルギー、原子核反応

において現れる質量変化に伴うエネルギーなどがそれぞれの分野で説明されていますが、エネルギーがいろいろな形をとって保存されていることを理解してほしいというのは、しばしば作題の動機になります。

### 新しい概念を理解する

問題作成には教科書を参照するなどして、導入には高校の物理に十分配慮しますが、高校の延長線上ですぐ近くにある新しい概念の理解を期待することがあります。

例えば力学では、教科書にある回転運動の向心加速度・向心力に加えて、回転のエネルギー、さらには角運動量とその保存、力のモーメント(トルク)、慣性モーメントです。これらにより日常の経験が物理としてより身近になります。

熱学では、そのような概念としてエントロピーがあります。高校の教科書には熱力学第2法則や不可逆変化が書かれていますが、「参考」としてエントロピー増大があっても定義がされていません。定義も(曖昧という意味ではありません)多様性があり、エントロピーは易しくはない概念ですが、きちんと定義して、高校の物理から少しだけ踏み出してその性質を理解してほしいと思います。

### 近似計算ができる

条件を単純にして、近似を不要にすることも多くありますが、近似計算を要求することもあり、よく二項定理の展開式をただし書きにします。複雑な現象の核心を見つけるには比較と近似が重要です。比較する量が同じ次元であるべきことに注意して、分數式、三角関数、指数・対数関数など、簡単な関数については微量に関する展開が難なくできてほしいと思います(微分の応用です)。



## 物理コンテスト国際連合 2016 の報告



実験問題部会・実験研修部会

東京学芸大学 松本 益明

2016年9月26日から30日までインドネシアのバンテン州タンゲランで開かれた 7th Congress of the World Federation of Physics Competitions (WFPhC) 2016 に参加して参りました。バンテンとかタンゲランと聞いてぴんと来る方はほとんどいないかと思いますが、インドネシアの首都ジャカルタの隣で、スカルノ・ハッタ国際空港があり、ジャカルタ中心部には車で1時間程ですので、日本でいえば千葉県のような感じでしょうか。会議が開催されたホテルの周りには元々ジャングルだったのかと思いますが、現在は切り開かれて道路や土地が整備され、図1のように広大な空き地のあちこちで住宅街や商業用高層ビル、教育施設等の建設が進んでいます。

### 物理コンテストは学校現場に何を提供できるのか?

今回の会議のテーマは“*What can Physics Competitions offer to Schools?*”で、翻訳すると「物理コンテストは学校現場に何を提供できるのか?」でしょうか。物理コンテストの代表は International Physics Olympiad (IPhO) ですが、その他にも国際的な物理コンテストとして International Junior Science Olympiad (IJSO), International Young Physicists' Tournament (IYPT), Asian Physics Olympiad (APhO) などがあり、その代表を決めるために物理チャレンジのような国内コンテストが各国で行われています。それらのコンテストが学校現場に何を提供できるかというものです。参加者は20人ほどの小さな会議でしたが、オーストリア、ドイツ、スウェーデン、スロベニア、アメリカ合衆国、インド、インドネシア等の代表が集まり、各国での取り組みについて熱心に議論が行われました。私は日本での IPhO 代表の選抜方法について説明し、第1チャレンジでの実験レポート課題や第2チャレンジでの実験課題について、内容や解答例などを紹介しました。とても興味を持っていただき、ぜひ英語の論文としてまとめて欲しいとのことでした。今回紹介された物理競技会で興味を持ったものに IYPT があります。IYPT では5人ずつのメンバーで編成された3チームによって1つの試合が行われます。試合の1年前にホームページ (<http://www.iypt.org>) に掲載された17問の課題から1問を選んで、2つのチームが対戦し、第3のチームが評価します。課

題の指示は数行の簡単なもので、どう実現するかはチーム次第。3チームの議論や評価をレフェリーが判定して点数を付け、勝負が決まります。トーナメント形式ですので何度も試合に勝ち抜くことが必要で、英語で議論しますので、IPhO とはまた異なる能力も必要です。シンガポールで来年行われる第15回大会に日本は不参加ですが、将来はぜひ参加して欲しいとのことでした。

### さまざまな実験装置のデモ

会議では講演だけでなく、学校で使用されている実験装置の紹介もあり、インドで開発された小型マイケルソン-モーレー実験装置や、米国での斜面落下装置などが紹介されました(図2)。コの字型のレールに様々な大きさの鉄球を転がす時の速さの違いを求める問題ですが、どういう条件の時に最も速くなるか分かるのでしょうか。摩擦や回転を無視する理論ではすべてが同じ速さのはずですが、現実にはそうなりません。実験すると一目瞭然ですが、理論的に説明するのはかなり難しいと思いました。

インドネシアは昔から日本との結び付きが強い国です。日系デパートも数多く、会場のホテルから2kmほどの所にも昨年開店したばかりの日系スーパーのショッピングモールがありました。宗教上の理由で豚肉やお酒はだめな人が多いようですが、大勢の地元の方々がラーメン、牛丼、お寿司、焼き鳥、お好み焼きなどを食べています。自動車は右ハンドルでほとんどが日系企業製です。ジャカルタ中心部を走る電車はかつて常磐線などで使われていた車両で、注意書きが日本語のままといったものを見ると不思議な感じがしました。女性グループアイドルやモンスターを集めるスマホゲームなども人気で社会的・文化的な交流は既に盛んにおこなわれています。教育水準も高いので、今後、教育の面でも結び付きを強めていきたいと感じました。



図1 ホテルの部屋から見た風景と、参加者と一緒に撮影した写真。



図2 実験紹介の様子。様々な大きさのボールを転がします。

# JPhO だより ～JPhO 出版図書の紹介～

## 物理チャレンジ 独習ガイド (丸善出版)

力学・電磁気学・現代物理学の基礎力を養う 94 題

特定非営利活動法人物理オリンピック日本委員会編・杉山忠男著

物理オリンピック日本委員会では、物理コンテスト「物理チャレンジ」を 2005 年より毎年実施し、そこで選抜された 5 名を、2006 年より、国際物理オリンピックに派遣してきました。本書は、それらの経験を基に、これから物理チャレンジ (第 1 チャレンジ, 第 2 チャレンジ) に挑戦しようと考えている中学生, 高校生, 高等専門学校生などが、物理の基礎を身に付けることができるように書かれたテキストです。



本書では、力学、電磁気学、現代物理学を取り上げ、熱物理と波動を扱っていませんが、それらの基礎は、力学と電磁気学にあるので、これらを十分に理解すれば、熱物理と波動の理解も容易になるでしょう。また、後述する「世界水準の物理入門」で扱われた物理を、もう少し丁寧に詳しく説明しています。なお、本書では、ある程度の説明をした上で、微分・積分を高校生にとって無理のない範囲で用いています。

トーマス・ポベイ著

## 難問・奇問で語る 世界の物理 (丸善出版)

特定非営利活動法人 物理オリンピック日本委員会訳

本書は、オクスフォード大学やケンブリッジ大学での入試面接で出題された問題などを題材としながら、ポベイ教授が自由に思考を広げて書いたエッセイ集です。原著者自身が述べているように、ちょっと物理好きの多くの方が、自由に思考の翼を広げ、「遊び心」をもって友人らと大いに議論して楽しんでください。ここで扱われている問題には、形式的な計算で答えが得られる類の問題はほとんどありませんが、内容は高校の教材に沿ったものであり、難解な物理学の問題はありません。しかし、自ら問題を単純化し、理想化して解いていく柔軟な思考力を必要とします。このような思考力は、理工系を目指す高校生あるいは理工系の大学生が将来行うことになる研究で役立つでしょう。

また、オクスフォード大学、ケンブリッジ大学の入試面接では、出された問題を受験者と面接官が議論しながら考察を進めます。ほとんどペーパー試験だけで合否を決定している日本の大学入試との違いに驚かされます。



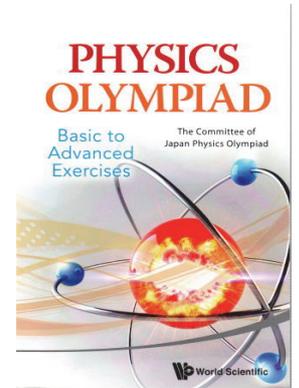
## PHYSICS OLYMPIAD (World Scientific)

Basic to Advanced Exercises

The Committee of Japan Physics Olympiad

本書は、先に出版した後述の「世界水準の物理入門」を基にしながら、物理チャレンジの問題を中心に、新たに多くの問題や解説を加えて英文で書き下されたものです。物理の基礎の解説に加えて、国内大会である第 1 チャレンジと第 2 チャレンジ理論問題の中で特に興味深い問題が紹介されています。また、実験基礎として、データ整理の方法が説明され、さらに関連した問題が与えられます。さらに付録として、初歩的な物理数学の要点を解説しています。これらの英文での記述により、本書は、日本での物理オリンピックに向けた研修のレベルと選抜方法を、世界に知らしめる役割を果たしています。このことは特に、発展途上国で、強い関心をもって受け止められているようです。

日本での科学オリンピックへの取り組みを、世界に向けて本格的な英文書として出版しているのは、物理だけです。



## オリンピック問題で学ぶ 世界水準の物理入門 (丸善出版)

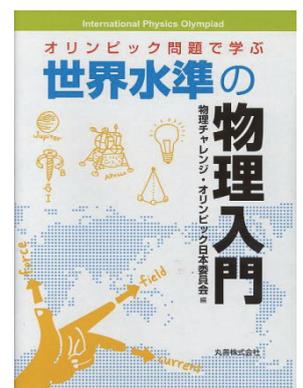
物理チャレンジ・オリンピック日本委員会編

国際物理オリンピックでは、理論問題と実験問題にそれぞれ 5 時間が与えられ、挑戦者は、問題を読み解く思考力、課題を解決する戦略性、長時間考え抜く耐久力、解答手順を明解に記述する表現力などが問われます。

国内大会である物理チャレンジとしての第 1 チャレンジと第 2 チャレンジも、国際物理オリンピックの出題意図を汲んで実施してきました。

本書は、第 1 チャレンジ、第 2 チャレンジで出題された理論問題の中から選りすぐりの問題と、国際物理オリンピックで出題された興味深い問題に解答・解説を付して、一人でも多くの中・高校生が、物理の本当の面白さを味わって欲しいと願って 1 冊にまとめたものです。

本書の問題にチャレンジして物理の面白さを味わいながら実力を付けて、みなさんが物理チャレンジ (第 1 チャレンジ, 第 2 チャレンジ), そして国際物理オリンピックに挑戦することを願っています。



# 物理チャレンジ OP の博士論文 一群れの秩序とゆらぎ



物理チャレンジ 2006,2007, 国際物理オリンピック 2007 参加  
 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程 3年 西口 大貴

## “群れ”に普遍的性質は存在するだろうか？

鳥や魚の群れ、細胞集団やバクテリアコロニーなどが織り成す華麗な「群れ運動」の中に、普遍的な物理法則は存在するのだろうか？ 群れの中の1匹1匹は自分の近くしか見えないのに、なぜ群れ全体として統制のとれた振る舞いを示せるのだろうか？ これらの問いを動機として、生き物に代表される自ら動く物体（＝自己駆動粒子）の集団運動の統計的性質の探求が、非平衡統計物理学の一分野として、ここ20年ほどの間に盛り上がりを見せている。従来の統計物理学は、原子や分子といったミクロな要素が集まってできる気体や固体などの物質を扱うことで、ミクロな要素の詳細に依らないマクロな普遍的性質を抜き出すことに成功してきた。この発想を元に、自ら動くアクティブな要素の集団を一種の物体（＝アクティブマター）とみなし、群れの構成要素に依らないマクロな普遍性が探求されてきた。アクティブマターは、系の構成要素が自らエネルギーを消費しながら動き回っているため、常に本質的に非平衡な状態にあり、理論的な扱いが難しく面白い題材である。

群れの運動に普遍性があるならば、本質を抽出した単純な数理モデルにもその普遍性が存在するはずだという発想のもと、数多くの数値・理論研究が進められた。最も基本的なモデルは Vicsek モデルと呼ばれ、個々の粒子が自分の近くの粒子だけを見渡して、その平均の向きに進むことを繰り返すものである（図1）。Vicsek モデルでは、粒子同士は短距離相互作用しかしなくともかかわらず、粒子が無遠慮まで向きを揃えて、かつ、クラスターを作らずに一様に分布する「一様な長距離秩序相」を示す。このような長距離秩序は、2次元（以下）の平衡系ではあり得ないことが理論的に証明されており、群れの非平衡性を反映する重要な性質として関心が持たれている。さらに、この長距離秩序相は、系の回転対称性が自発的に破れて「群れの進む向き」が生じるという数学的構造を反映して、べき的な相関や、それに伴う、「異常に大きな密度ゆらぎ (giant number fluctuations, GNF)」の存在が理論的に予測されていた。これらの性質は、理論が系の対称性のみに基づいているという構成上、モデルの詳細に依らない強い普遍性を持つと考えられている。実際、これらの理論予測の普遍性は、様々な数理モデルのシミュレーションにより確認されており、群れの持つべき基本的かつ重要な性質とみなされてきた。

しかし不思議なことに、理論予測に対応する長距離秩序相は、理論の“普遍性”に反して、実験では全く得られていなかった。生物の群れに動機付けられて研究が進んだにもかかわらず、現実の生物は空間的に局在化したクラスターを作ったり、長距離で向きが揃わずに渦構造を作っ

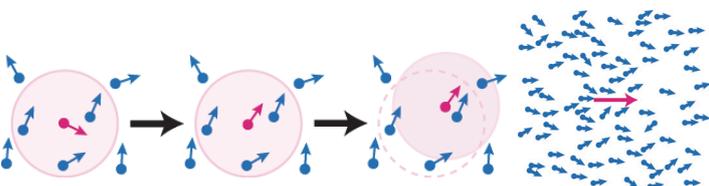


図1. Vicsek モデルにおいて各粒子は、相互作用半径内の粒子の平均（＋ノイズ）の向きに進んで行く。高密度あるいは低ノイズで、ゆらぎながらも群れ全体が向きを揃えて進んで行く長距離秩序相が得られる。

まったりと、理論や数理モデルに対応する一様な長距離秩序相を示さない。鳥や魚の群れでは、彼ら（彼女ら）にお願いしてパラメータを変えて実験することなど困難なため、制御しやすいバクテリアを用いて実験がおこなわれてきた。バクテリアは、鳥や魚に比べて非常に多くの数を用意できるため、統計的性質を見るアクティブマターの実験には適している。しかし、バクテリアの実験で頻繁に観察されるのは、やはり長距離秩序相ではなく、短距離でのみ向きが揃うものの、全体としては群れの向きがカオス的に変動し渦も大量に存在する乱流のような状態であった。生物を用いた実験だけではなく、粉体やコロイドを自己駆動させる実験もおこなわれ、私自身もコロイド系の実験に取り組んだが、長距離秩序相は得られていなかった。

## 細長いバクテリアの集団運動で理論予測を実証

私は、この理論と現実の乖離の謎は、バクテリアやコロイドの実験系における、衝突時に向きを揃える排除体積相互作用と、向きの揃った状態を不安定化する流体相互作用の兼ね合いにあると考えた。そして、長距離秩序相を実現するために、流体相互作用の弱い状況で、通常のバクテリアやコロイドに比べて非常に細長い粒子の集団挙動を調べてみようと考えた。これは、バクテリア（大腸菌）を通常の10倍の長さ20μm程度にまで伸長させ、2枚の壁の間の2μm程度の非常に薄い擬2次元の流体層に閉じ込めるといって、特殊な状況を作り上げることで実現した。結果として、既存の実験系では乱流状態しか得られなかったバクテリアで、一様な長距離秩序相を実現した（図2）。バクテリアの向きが無遠慮まで揃っていると見せることは、新たな解析手法を導入することで定量的に明らかにできた。さらに、べき的な相関やGNFも観測できた。したがって、これは、理論予測を実現する初の実験系の発見となった。結果として、数多くの数値計算や理論研究に基盤を与えられただけでなく、本実験系と他の系の違いを考察することにより、既存の他の実験系でも条件を検討すれば長距離秩序相を実現できるという新たな可能性を示唆できた。

実験で得られた結果には、理論の近似計算の結果と食い違う箇所もあり、これからの理論的發展にも期待がかかる。また、今後はアクティブマターの物理学で得られた集団運動の物理的知見を、生物学的・生態学的・進化論的意味へとつなげていくことにも取り組んでいきたいと考えている。

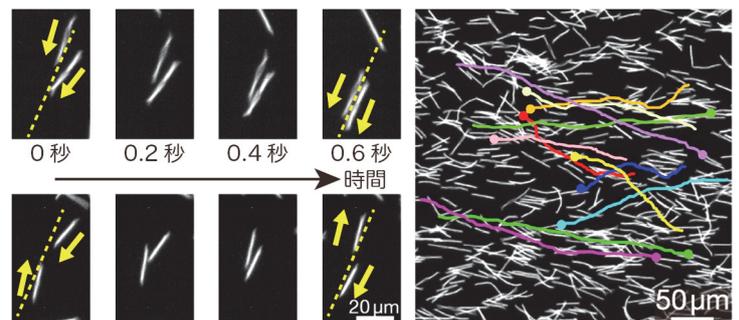


図2. 細長いバクテリアを擬2次元系に閉じ込めると、衝突により徐々に向きを揃えていき、高密度では左右に向かうバクテリアが約半数ずつ共存する「無限遠まで向きの揃った長距離秩序相」が得られる。数匹のバクテリアの運動の軌跡を例として示してある。

[Nishiguchi, *et al.* Phys. Rev. E **95**, 020601(R) (2017)]