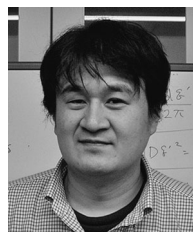


# 国際物理オリンピック 2018 ポルトガル大会報告



加藤 岳生 東京大学物性研究所

## 1. はじめに

第 49 回国際物理オリンピック (IPhO2018) は 7 月 21 日から 29 日までポルトガルのリスボンにおいて 90 カ国から 412 人の選手が参加して行われた。日本からは高校生 5 人の代表選手が参加し、金メダル 1 個、銀メダル 4 個という好成績を収めることができた。国別の成績では日本は 11 位であった。

オブザーバーの 1 人として代表選手に同行し、問題の翻訳と採点を行った。ここでは、大会のようす<sup>1)</sup>と実験問題と理論問題の内容を報告する。

## 2. 代表決定から直前研修まで

今年度の日本代表選手の選抜について、簡単にまとめておく。2017 年 7 月に行われた物理第 1 チャレンジ (参加者 1596 名)、および、8 月に行われた物理第 2 チャレンジ (参加者 101 名) で、12 人の代表候補者が選抜された。その後、秋合宿 (9 月)、冬合宿 (12 月)、および 9 月から月 1 回のペースで続けられた通信添削 (計 6 回) により、代表候補者の研修を行ったのち、2018 年 3 月の春の合宿での最終試験により、5 名の日本代表選手が選抜された。最終試験では、本番さながらの形式で理論試験 (5 時間)、実験試験 (5 時間) を 2 セット行った。

今年度、日本代表として選ばれたのは、大倉拓真 (岡山県立岡山朝日高等学校 3 年)、喜田輪 (初芝富田林高等学校 3 年)、末広多聞 (大阪星光学院高等学校 2 年)、永濱壮真 (大阪星光学院高等学校 3 年)、吉見光祐 (灘高等学校 3 年) の 5 人である。選抜後も理論問題の通信添削 (計 6 回) や大阪大学での実験研修 (5 月) が行われ、さらに

ポルトガル出発前に実験および理論の直前研修が行われた。

## 3. スケジュールと現地でのようす

今回同行した役員は、リーダーとして杉山忠男 (河合塾) と松本益明 (東京学芸大学)、オブザーバーとして真梶克彦 (筑波大学附属駒場中学・高等学校) と私、OP 委員 (日本代表 OB) の江馬英信 (東京大学理学系研究科物理学専攻修士 1 年)、さらに 2022 年の東京大会のための視察を兼ねて吉澤雅幸 (東北大学) であった。

私は海外出張のため直前研修と結団式は欠席し、直接リスボン入りした。私を除く 5 人の代表選手と 5 人の同行役員は 7 月 21 日に羽田を出発し、ドイツのフランクフルトを経由してリスボンに入った。空港では現地スタッフが迎えに来ており、代表選手と同行役員はバスで別々のホテルへと移動した。開会式および実験試験後に一旦合流の機会があったが、それ以外は代表選手と同行役員の接触は禁じられ、代表選手のスマートフォンなどの通信機器やカメラなどは試験終了まで主催

表 1 スケジュール

日付	代表	同行役員
21 日	到着	到着・受付
22 日	開会式・遠足	開会式・実験問題翻訳
23 日	実験試験	遠足
24 日	遠足	理論試験問題翻訳
25 日	理論試験・遠足	遠足
26 日	遠足	遠足
27 日	遠足	モデレーション
28 日	閉会式・パーティ	閉会式・パーティ
29 日	出発	出発

者側に預けられた。スケジュールは、表1のとおりで、おおむね例年どおりであった。実験問題の翻訳は次の日の朝まで続き、実験試験の開始時間が1時間程度遅れたが、その他はおおむね予定どおり実施された。昨年はトラブルのため行われなかったモデレーション(点数交渉)も無事に行われた。

ホテルと試験会場の間はバスもしくは地下鉄での移動となったが、移動時間は30分ほどでスムーズであった。滞在中は天気もよく、猛暑の日本と違って涼しい気候でとても快適であった。

#### 4. 試験問題について

問題および解答例の英語版と日本語版は、それぞれ IPhO2018<sup>2)</sup> や JPhO<sup>3)</sup> のホームページに掲載されている。

##### 4.1 実験問題

実験問題は、例年どおり5時間で大問2問(各10点)から成る。しかし、今年の実験問題は分量が多いばかりか、数値処理にかなりの時間が必要とされ、日本代表は戸惑ったようである。以下で各問の内容を解説する。

第1問(E1)は、「紙トランジスタ」が取り扱われた。トランジスタの特性曲線の計測は、大学の学生実験での定番である。通常は、直流電源と電圧計、電流計を用いて行えば、特性曲線を得ることはそれほど難しくはない。しかし、IPhOの実験では大がかりな装置が使えないため、電源として電池を用い、1台のマルチメータで測定するために、解析が面倒な難しい問題となった。

この問題は、FET(電界効果トランジスタ)の原理の説明、抵抗の測定および抵抗FET素子の測定、FET素子中の絶縁体(誘電体)部分を紙で置き換えた「紙トランジスタ」の測定の順となっている。図1は配布された実験器具の1つ「回路が印刷された紙片」である。黒色および灰色部分は、それぞれ高抵抗のカーボン薄膜および低抵抗の導電性インクである。問題の最初は、カーボン薄膜のシート抵抗の測定と、シートの幅が変化している段々構造における各段での電圧降下測定が

課された。これらは比較的よくできていた。

次の課題は、段構造をもつカーボン薄膜を利用して可変電圧源とし、通常のJFET(接合型電界効果トランジスタ)について特性曲線を得る実験であるが、電圧を変えて81回もの測定を行う必要があった。測定はよく行われていたが、電流測定モードでのマルチメータの内部抵抗が10Ω、ゲート電圧がゼロのときドレイン-ソース間の抵抗が50Ωと小さく、これらが数百Ω程度の抵抗を持つカーボン抵抗と並列に接続されるため、ドレイン-ソース電圧の測定値は理論値より低くなってしまう。これを考慮して電圧を校正する必要があるが、問題を読んでもその意図が伝わり難しく、多くの選手はどう解析すればよいか戸惑ってしまったようである。この課題後によくよく主題である紙トランジスタ特性の測定となるが、残念ながら、日本代表選手は手付かずであった。

第2問(E2)は、「粘弾性」の問題であった。粘弾性とは、弾性体と粘性流体の特徴を兼ね備えた物質の性質のことである。本問では、熱可塑性ポリウレタン(TPU)製の糸の応力緩和に関する実験が課された。実験装置の模式図を図2(a)に示す。TPUの糸におもりを下げ、電子てんびん

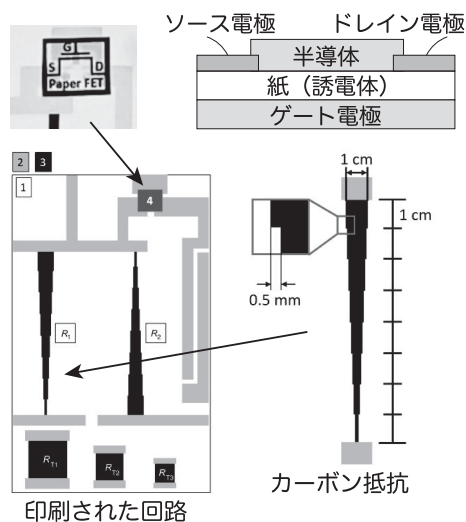


図1 実験問題の第1問

に載せる。張力の低下に伴って電子てんびんの指示が大きくなるが、この張力の時間変化を45分間測定して図2(b)のようなグラフを得ることが課題である。

粘弾性の理論は問題文に記載されてある。まず最も簡単なモデルとして、図2(c)で与えられるモデルを考える。応力 $\sigma$ は2つの成分 $\sigma_0, \sigma_1$ に分けることができる(図2(c)参照)。それぞれの応力で生じるひずみは共通であるとする( $\epsilon = \epsilon_0 = \epsilon_1$ )。成分 $\sigma_0$ は単純な弾性体(ヤング率 $E_0$ )のひずみ $\epsilon_0$ と $\sigma_0 = E_0\epsilon_0$ の関係にある。一方、成分 $\sigma_1$ によって生じる歪み $\epsilon_1$ は弾性体の歪み $\epsilon_1^e$ と粘性流体の変形 $\epsilon_1^V$ の和でかける( $\epsilon_1 = \epsilon_1^e + \epsilon_1^V$ )。応力 $\sigma_1$ は粘性流体の粘性 $\eta_1$ と粘性流の変形速度 $d\epsilon_1^V/dt$ を用いて、 $\sigma_1 = \eta_1 d\epsilon_1^V/dt$ で表される。これらの関係式より、微分方程式

$$\sigma = E_0\epsilon + \tau_1(E_0 + E_1) \frac{d\epsilon}{dt} - \tau_1 \frac{d\sigma}{dt}$$

が得られる( $\tau_1 = \eta_1/E_1$ )。実験に対応する、「歪み(変形) $\epsilon$ が一定」の条件下でこの微分方程式を解くと、

$$\sigma(t) = \epsilon(E_0 + E_1 e^{-t/\tau_1})$$

が得られる。現実の物質の挙動を記述するには、図2(d)のように $N$ 個の異なる粘弾性成分に分け

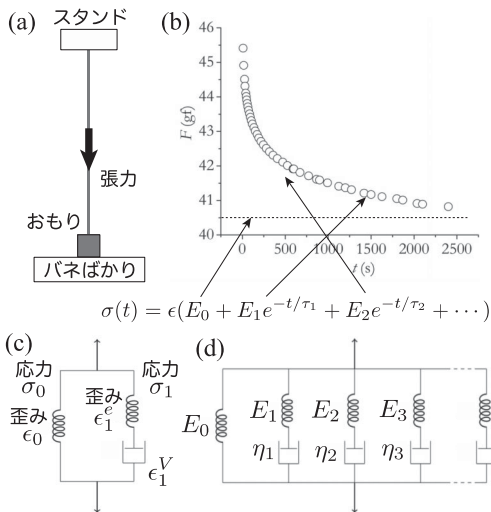


図2 実験問題の第2問

て考える。微分方程式を立てて解くことで、

$$\sigma(t) = \epsilon(E_0 + E_1 e^{-t/\tau_1} + E_2 e^{-t/\tau_2} + \dots) \quad (1)$$

が得られる( $\tau_1 = \eta_1/E_1, \tau_2 = \eta_2/E_2, \dots$ )。張力は、これに断面積 $S$ をかければ得られる。

この課題の測定は難しくはないが、一度実験を開始すると後戻りのできない測定であるため、よく理解せずに測定を始めてしまうと取り返しが付かなくなってしまう。解析では(1)式の $E_0, E_1, E_2$ を求めるが、単純に片対数グラフにプロットしても求められないため、工夫が必要である。流れとしては、長時間側のデータで(1)式の最初の2項だけを用い、 $E_1, \tau_1, E_0$ を求め、そのあとに短時間側のデータを利用して、 $E_2$ と $\tau_2$ を求める。誘導に従えば解けるが、全体の流れを捉えることのできない選手が多かった。その他にも、レーザー光の単スリット回折の原理を用いて糸の直径を求める問題もあるなど、意欲的な問題構成であったが、問題量が多すぎて、完答できない学生が続出してしまった。

#### 4.2 理論問題

理論問題は、例年どおり5時間で大問3問(各10点)を解く形式であった。題意がわかりやすく、取り組みやすい問題であったが、数値計算が煩雑な設問もあった。難易度は標準的である。

第1問(T1)は重力波に関する問題であった。重力波はアインシュタインが一般相対性理論で予言して以来、長い間、観測が待ち望まれていたが、2015年に重力波検出器LIGOがついに観測に成功したことは記憶に新しい。T1はまさに重力波観測の物理を問う問題であった。LIGOが最初に観測したこの重力波は、2つの大質量天体(ブラックホールと考えられている)の合体の際に発せられたと考えられている。ここではまず、質量 $M_1, M_2$ の天体が万有引力によって互いに円運動している状況を扱い、重力波放射によるエネルギー損失を考慮に入れて、天体間の距離 $L$ が徐々に減っていくようすを解析する(図3(a))。重力波損失は、系の四重極モーメントの時間に関する3階微分で表される。四重極モーメントの式

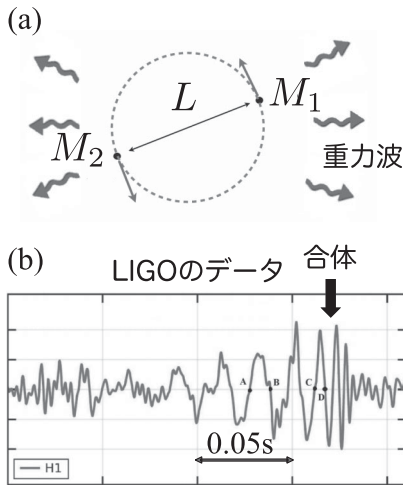


図3 理論問題の第1問

は問題文に記載されているため、地道な計算によって評価できるが、四重極モーメントを初めてみる参加者は戸惑ったと思われる。幸い、日本代表は春の合宿で重力波に関する問題に取り組んでおり、落ち着いて取り組むことができた。

問題後半では、観測データ(図3(b))から2天体の質量を計算することが要求された。観測データから近似的に回転の振動数を割り出し、その時間変化をみて、理論式から質量を割り出すこととなる。問題文で与えられる合体の時刻から、合体直前の天体の速度も問われた。解析すると、太陽質量のおよそ30倍の質量をもつ天体2つが、衝突直前には光速の2割程度で運動するという驚くべき結果になる。完成度の高い問題であるので、大学の力学の授業において題材として適切であると思われる。

第2問(T2)は素粒子実験に関する問題である。スイスのジュネーブ郊外にある世界最大の高エネルギー物理学のための加速器施設「大型ハドロン衝突型加速器(LHC)」では、陽子を13 TeVのエネルギーまで加速させて正面衝突させ、そのときに生じるさまざまな素粒子を観測することで、新粒子の探索や素粒子の標準理論の検証を行っている。T2は、このLHCに設置されてい

るATLAS観測装置に関する問題である。観測装置内部には強い磁場がかかっているため、軽い素粒子はローレンツ力により大きく曲げられ、チェレンコフ放射により渦巻き運動をする(図4(a))。問題の前半では、この運動を相対論的力学によって解析する。チェレンコフ放射の公式は与えられているので、単位時間あたりのエネルギー損失を計算し、運動方程式と組み合わせて運動を解くことになる(考え方は重力波の問題に似ている)。本問は超相対論的極限(粒子の速度が光速に近い極限)を取り扱うことが特徴であるが、解法への誘導がうまくできていて、解答を進めると自然とこの極限操作に気がつくようになっている。相対論的力学は日本代表が伝統的に弱い分野であるが、添削や合宿において特に重点的に研修を行っており、今回はよくできていた。問題の後半はATLASが捉えたトップクォークが崩壊するイベントに関する問題である(図4(b))。この問題のポイントは、ニュートリノが物質との相互作用が弱いためATLASで観測されないことにある。そのため、他の粒子の運動量から、見え

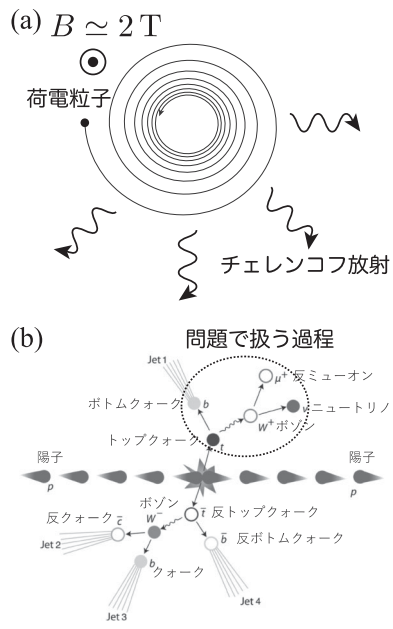


図4 理論問題の第2問

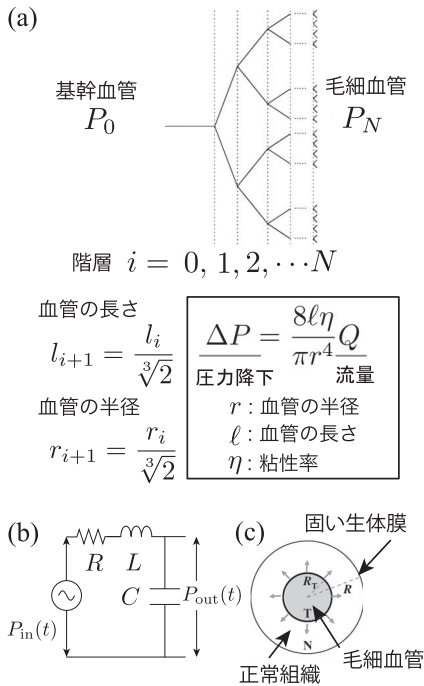


図5 理論問題の第3問

ていないニュートリノの運動量を推測する必要がある。実際に2次方程式を解くことで、ニュートリノの運動量の情報を補完できるが、立式と数値計算はかなり面倒なものであり、この処理をすばやく確実にできるかどうかは鍵となった。

第3問(T3)は物理オリンピック問題としては珍しく、生体中の血液流の物理についての出題である。内容は電気回路とのアナロジーを用いるため難しくはないが、後半の計算はかなり面倒である。まず前半では、基幹血管からつぎつぎと血管が枝分かれし毛細血管にいたるまでの血流と圧力低下(図5(a))を、オームの法則との類似性(血流 $\leftrightarrow$ 電流, 圧力低下 $\leftrightarrow$ 電圧低下, 図中の囲み参照)によって解析する。面白いのは次の設問で、心臓の送り出し運動を交流電圧とみだててその応答を議論する部分である。血管の弾性がキャパシタンス, 血液の運動エネルギーがインダクタンスの役割を果たすことに注目して, 交流回路と似た解析を行う(図5(b))。この設定は電磁気学の交

流がわかっていれば解けるので, 大学において, 一風変わった演習問題として使えると思われる。後半では生体組織にできた腫瘍の物理が扱われた。腫瘍は周りの正常な細胞を圧迫するため, 腫瘍内部は高い圧力が生じる(図5(c))。もし腫瘍だけを選択的に高温にすることができれば, 腫瘍の組織だけを破壊することが可能である。問題では腫瘍と周りの生体組織の圧縮弾性率(体積弾性率)と熱伝導率を用いて, 腫瘍のみを温め続けたときの密度の変化や熱伝導, 圧力つりあい, 血管破壊のメカニズムなどが解析された。設定は明確であるもの, 後半で2次方程式がでてくるため, すばやくかつ正確な数式処理が要求される。

## 5. おわりに

今回の日本代表選手の成績は, 金メダル1つ, 銀メダル4つという好成绩であった。しかしながら, 全体的な成績や選手層の厚さという点で, 上位の国々, 特に金メダル5つを獲得した中国やインドとは依然大きな差がある。この差は, 国内での選手選抜システムの違いや学生の意識の違いが背景にあると考えられ, 短期間で改善することは難しいであろう。

しかし, 日本でも大学の推薦入試で利用されるなど, 徐々に物理オリンピックの知名度が上がっている。2022年東京大会に向けて, より広報活動を強化し, 多くの方々に物理オリンピックの活動を知っていただきたいと切に願う。すでに来年度のイスラエル大会に向けて, 代表候補者の研修活動を開始している。来年度以降も好成绩を維持できるよう, 研修活動を頑張っていきたい。

本事業は, 科学技術振興機構, 日本物理学会, 応用物理学会などからの支援を受けて実施されました。

## 参考文献

- 1) <http://www.jpho.jp/>
- 2) <http://ipho2018.pt/content/exams>
- 3) [http://www.jpho.jp/syllabus\\_w.html](http://www.jpho.jp/syllabus_w.html)

連絡先 E-mail: kato@issp.u-tokyo.ac.jp