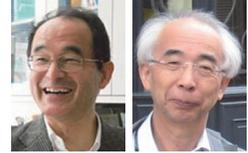


ヨーロッパ物理オリンピック 2020 オンライン大会に参加



長谷川修司
東辻浩夫

物理オリンピック日本委員会/東京大学大学院理学系研究科

物理オリンピック日本委員会/元岡山大学

1. はじめに

2020年7月の国際物理オリンピック (IPhO) リトアニア大会に向けて、日本代表選手5名を選抜して準備を進めていたが、5月になって、新型コロナウイルス感染症の伝染拡大のために中止するとのアナウンスがあり落胆していたところ、6月に、ヨーロッパ物理オリンピック (EuPhO) がオンライン大会として開催され、圏外の国からの参加も歓迎するとのアナウンスがあり、日本代表選手も参加することになった。最終的には53カ国から260名の選手が参加し、IPhOの半分程度の規模となった。7月20日に理論試験、21日に実験試験が、EuPhO本部とZoomで結んでオンライン監視のもと、16:00~21:00(日本時間)に世界同時に一斉に行われた。日本チームは名古屋駅前の貸会議室に集結し、役員による問題の翻訳から始まり、夜遅くまで試験を実施し、答案をスキャンしてPDFにし、EuPhO本部に送る作業などを行った。その結果、日本選手は、2名が金メダル、2名が銀メダル、1名が銅メダルの好成績をあげた。

本稿では、今回のEuPhOで出題された問題の概略を解説する。EuPhOの問題の特徴は、IPhOと違って問題文がきわめて短く、誘導的な小問がないため、解答の方針とプロセスを自分で見つけ出さなければならない。また、今回の実験問題は、驚いたことに、実験器具を使ったリアルな実験ではなく、コンピュータシミュレーション実験だった。「実験条件」を入力すると「測定結果」が出力されるという単純なものだが、その入力と出力の関係からブラックボックスとなっている物理系の各種パラメータを求めるという仮想実験で

あった。問題の全文、模範解答と採点基準、およびシミュレーション実験用のプログラム (Windows PC, Mac, Linux用) は、物理オリンピック日本委員会のWebページ¹⁾に、英文の問題と個人成績はEuPhOのホームページ²⁾に掲載している。

2. 理論問題

電磁気、力学、(幾何)光学の順に3問で構成され、特に力学が難しい。他は同程度であるが、光学の問題はなじみがなく、時間も十分配分できなかったためか、日本選手の得点は低かった。

2.1 ソレノイドとループ電流

図1のように、定電流電源をもつ細い長いソレノイドSと定電圧電源をもつ円電流ループLがある。(a) Sが受ける力を求めよ、(b) Sを軸方向に、Lに向かって速さ v でゆっくり動かすときのLの電流の時間変化を求めてグラフを掛け。

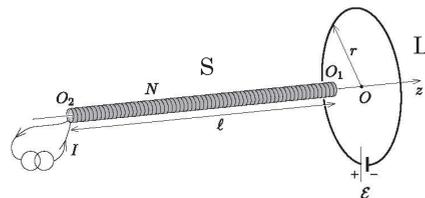


図1 ソレノイドとループ電流

(a) S, Lのどちらが受ける力(反作用)を求めてもよい。Sは微小電流ループを積み重ねた棒磁石とみなせる、Lの中心Oでの磁場はビオ・サバールの法則から求まる、などいろいろな知識を使い、多くの解法がある(他に磁場の応力からも求められる)。ただし、磁場エネルギーから求め

るには電源の仕事を考える必要がある(うっかりすると逆符号になるので注意). エネルギーからの解を誘導なしに要求したら, やや行き過ぎであらう.

(b) 誘導起電力を問い, 図2がグラフの例である. ソレノイドの端 O_1, O_2 がループ電流の中心 O を通るときに最大, 最小の起電力が生じ, 周りの時間幅は r/v 程度であることは計算なしに把握してほしいが, 日本選手は必ずしもできていなかった.

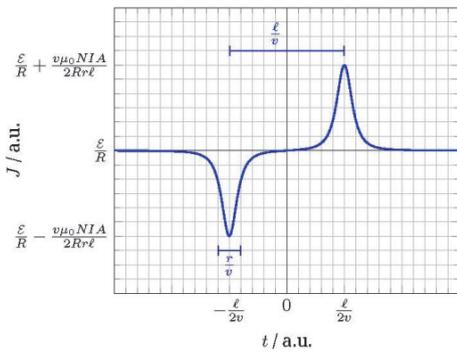


図2 誘導電流

簡潔で(a)には多様な解があり, 電磁気の理解の確認に相当で, 解法の列挙は学部の演習となる.

2.2 機械的な加速器

図3のように, 固定した円柱に糸を N 回巻き付けて, 一端におもり P を付け, 他端 Q を一定の速さ u で X 方向に引く. P が得る最大の速さを問う(重力, 糸の伸縮, 摩擦は無視).

図4左のように, 糸は円柱面を u で動き, 巻きは徐々にほどける. P の運動を糸方向とそれに垂直方向とに分けると, 垂直方向の運動方程式から, $v_{\perp} = u\phi$ が導かれ, 完全にほどける $\phi = 2\pi N$ のとき v_{\perp} は最大 $2\pi Nu$ となる. ほどけた後, Q とともに動く座標系ではこの速さで円運動するから, 実験室系では, 糸が X 方向と垂直のときに最大の速さ $(2\pi N + 1)u$ となる. 運動を糸に平行, 垂直成分に分け, 糸の方向の変化を, 成分を表す座標の向きの変化として正しく認識すること

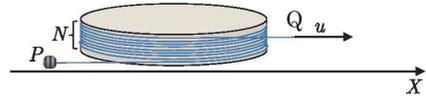


図3 機械的加速器の概略図

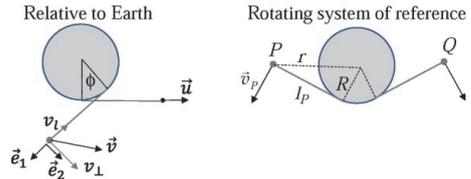


図4 実験室系(左)と回転座標系(右)

が鍵である. また, 糸方向成分に着目しても, 張力による P のエネルギー変化を経由して同じ結果が得られる.

図4右のように, 円柱軸の周りに角速度 $\omega = u/R$ (R は円柱の半径) で回転する座標系でみると, Q は軸の周りに角速度 $-\omega$ で回転する. 糸は円柱面上で動かないから, P は遠心力ポテンシャル中で定エネルギー運動をして, P の速さは $v_p = (u/R)l_p$ となる. 軸周りの P の角速度は $\omega = u/R$ であり, P と Q の運動, 糸のほどけ方は対称的になる. v_p の最大値は $l_p = (2\pi Nu)/2$ のときの値 πNu で, 実験室系に戻すと, ほどける瞬間に v_{\perp} は最大値 $2\pi Nu$ をとる(この後は上と同じ). このスマートな解答法はごく少数だろう.

きれいな結果である. 運動を成分に分ける必要には気付くが, 正しい定式化は易しくない. ほどけた後に最大になることも見落としやすい.

2.3 猫の目

図5上左のように, ヘッドライトなどで照らすと, 暗闇で猫の目が光って見える現象を光学系で模した問題である. 図5上中央と図5下のようには, レンズによる光源の像をレンズを通してカメラで見る, とモデル化する. カメラとスクリーンの距離 L , レンズの焦点距離 f と径, 写真上で直線(上向きの x 軸)に沿う光の強度(対数)のグラフ(図5上右)を与え, 光源とカメラの軸の距離 h を問う.

図6のように, 写真は, スクリーン上の光源 S

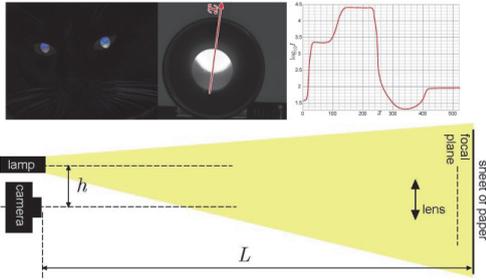


図5 「猫の目」を模す光学系

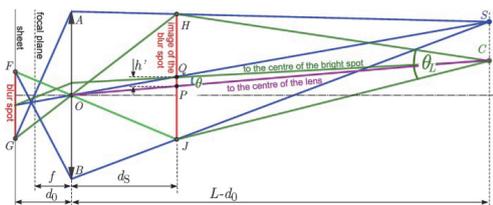


図6 幾何光学の作図

のぼけた像 (FG) の実像 (HJ) である。レンズで集光された部分とレンズの影でない部分 (x の大きな横軸右端) の明るさの比から、レンズとスクリーンの距離 d_0 が決まり、実像の位置 d_s が求まって h を得る。必要なのは、レンズの公式と集光による明るさの変化、平面幾何であり、難しくない。

あるいは、カメラの位置 C に点光源 S' を置くと、図 7 のように、 S の像 (上の円、円周は加筆) と同形で、 $h = SC$ に比例して下にずれた像をスクリーンにつくる。このことに着目し、比例関係を利用して d_0 から h を得る方法もある (図 6 と図 7 で、像の相対的な位置などの対応は正確でない)。

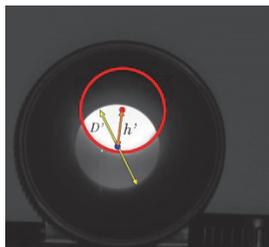


図7 光学系で模した「猫の目」像

3. 実験問題

実験問題は以下の 2 題である。いずれも、どのような方針で問題にアタックするか、解決の糸口を見つけれられるかが最大のポイントであろう。

3.1 ラザフォード散乱実験

図 8 のように、固定された電荷 Q に対して電子を入射させると、クーロン力によって散乱される。入射軌道方向を z 軸とし、 $z = -\infty$ での電子の入射座標 (x_i, y_i) とエネルギー E を入力すると、その電子がスクリーン ($z = 0$) 上で検出される位置 (x_f, y_f) を出力するプログラムが与えられている。さまざまな入射座標とエネルギーで電子を入射させて、検出位置のデータから電荷 Q の位置座標 (x_Q, y_Q, z_Q) と電気量 Q を求めることが課題である。

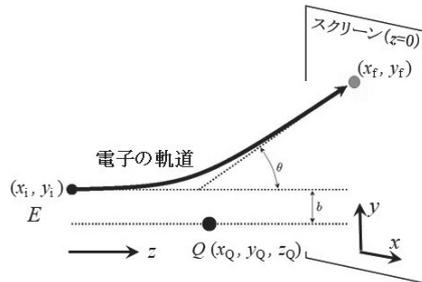


図8 実験配置の模式図

まず、クーロン力は中心力なので、電子の入射座標 (x_i, y_i) を固定して入射エネルギー E だけを変えて数回実験すれば、その電子のスクリーン上での到着位置 (x_f, y_f) は、 (x_Q, y_Q) を通る直線上に乗ることに気づく必要がある。図 9 はある日本選手の解答であるが、5 つの入射位置 $(x_i, y_i) = (0, 0), (1, 1), (3, -3), (4, -4), (5, 5)$ でこの実験を行って、スクリーン上でのそれぞれの電子の到着点をプロットし、それらを結んだ直線が交差するところが散乱体の固定電荷 Q の位置 (x_Q, y_Q) となる。このようにして x_Q と y_Q が求められる。

別解として、 x_i と E を固定して、 y_i のみを変えて実験してみて、 $y_f = y_i$ となる y_i を見つけ出

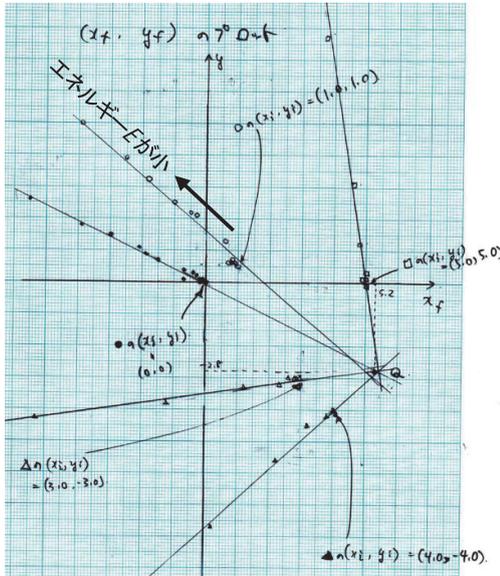


図9 スクリーン上での検出位置

せば $y_Q = y_1$ となるので、 y_Q を求められる。同様に、 x_1 のみを変えて実験すれば x_Q を求められる

次に z_Q と電気量 Q を求めるには、問題文で与えられているラザフォードの散乱公式

$$b = \frac{(kqQ/2E)}{\tan(\theta/2)}$$

から、たとえば、同じ散乱角 θ を与える衝突係数 b とエネルギー E の組み合わせをいくつか探せば、電荷 Q とスクリーンまでの距離 z_Q を求められる。

このプログラムには、入力データである入射座標 (x_1, y_1) と入射エネルギー E の設定値に、乱数によって多少の誤差を含ませているので、出力結果にはいかにもリアルな実験データのようにばらつきが出る。その結果、測定誤差まで求めることが要求されている。

日本選手の5名は、このシミュレーションの物理をよく理解しておおむね良好な成績をとった。ラザフォードの散乱公式にこだわって解こうとすると前半部分は解けないだろう。

3.2 連成バネ振動子のブラックボックス

図10のように、箱(質量 m_1) の中に、2つのおもりと(質量 m_2 と m_3) バネ(バネ定数 k_1 と k_2) から構成される連成バネ振動子が上面からぶら下がっている。シミュレーションプログラムの入力として、この箱に、ある時間だけ一定の加速度 a を与えて上下に動かす。そのとき箱を吊り下げている力 F の大きさが時間の関数として出力される。いろいろなパターンで指定した時間だけ指定した加速度を与えて実験し、出力される F の時間変化から3つの質量 m_1, m_2, m_3 と2つのバネ定数 k_1 と k_2 を求めるのが課題である。

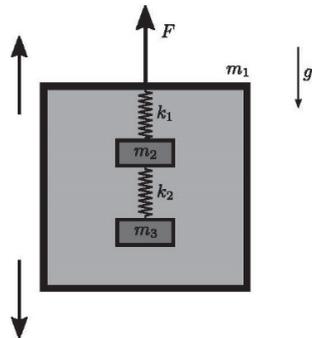


図10 ブラックボックスの構造の模式図

まず、明らかに加速度 $a = 0$ のときの F は、 $F_0 = (m_1 + m_2 + m_3)g$ であるので質量の総和を求められる。次に有限の上向き加速度 a を与えた直後は、箱だけ動いておもりはまだ動いていないと考えられるので、そのときの力 F の F_0 からの増加分は $F - F_0 = m_1 a$ である。この力の増加分を測定して箱の質量 m_1 を求められる。それと F_0 から $m_2 + m_3$ の値も算出できる。

次に、短時間 t だけ a で上向きに加速し、すぐに同じ時間 t で $-a$ で減速した直後は、上のバネのみが at^2 だけ伸びている状態と考えられるので、この加減速の操作をする前後の力 F の差 ΔF を測定すれば $\Delta F = k_1 \times at^2$ となる。これから k_1 を求められる。

最後に、適当に加速して減速して箱を静止(または等速直線運動)させて、バネを自由に振動さ

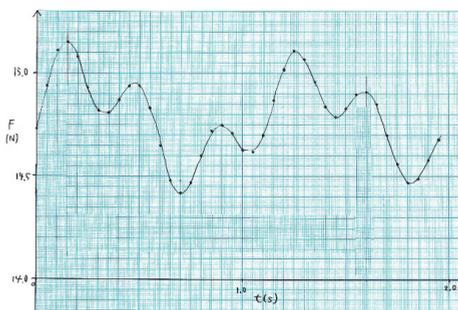


図 11 自由振動しているときの力 F の時間変化

せる。そのときの連成バネ振動子の2つの固有振動数を求め、上記の結果と合わせて残りの m_2, m_3, k_2 の値を求められる。しかし、2つの固有振動数を求めるための式は4次方程式となり、その解を求めるにはかなりの数学的な技巧が必要とされるので、最後まで解答できた日本選手はいなかった。

図 11 は日本選手の解答であるが、2つの固有振動数が、力 F の時間変化として測定されているのがわかる。これから2つの固有振動数を求められるが、それから連成バネ振動子のおもりの質量やバネ定数まで導出することはできなかった。

連成バネ振動子の系なので、固有振動数が2つ出てくることは容易に想像でき、実際、適当な加減速を箱に与えれば容易に振動させることができ、2つの固有振動数を求められる。しかし、それだけでは、5つの未知数(3つの質量と2つのバネ定数)を求めることはできない。前半でやったように、箱をちょっと加速して動かした瞬間の状態ではおもりが動いていないはずだとか、上のバネだけが伸びて下のバネはまだ伸びていないはずだ、といった物理的なイメージをもっていないと実験の方針が立たない。どう操作したらいいのかまったく指示がない問題なので難問といえる。

4. おわりに

EuPhO に参加した日本代表選手はつぎのと通りの成績をあげた。小野祐(甲陽学院高等学校3年生)金メダル、辻圭汰(岐阜県立岐阜高等学校

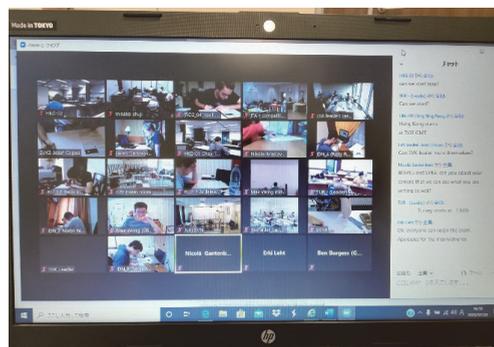


図 12 Zoom を使った試験監督のもとでの試験

3年生)金メダル、北川陽斗(滝高等学校3年生)銀メダル、平石雄大(海陽中等教育学校6年生)銀メダル、佐々木保昂(東大寺学園高等学校3年生)銅メダル。IPhO の半分程度の規模に拡大した EuPhO で全員メダル獲得の好成績をあげた代表選手たちに拍手を送りたい。

今回、オンライン試験という初体験の形式であったが、滞りなく実施することができた。日本チームは、1か所に5名の選手と6名の翻訳担当役員が集まって臨んだが、国によってはコロナ禍のための外出規制が厳しいために、選手の自宅でも個別に試験に参加していた。いずれも図 12 のように Zoom システムを使った EuPhO 本部による試験監督のもとで行われた。選手の手元が写るようにカメラの角度を調節しなさいなどの細かい指示が試験監督から個別に飛んでいた。また、試験直後に手書きの答案をスキャンして PDF を作成して EuPhO 本部にネット経由で送る方式も問題なく実行できた。現地開催と違って選手間の交流は全くないが、オンラインを活用したニューノーマルの一つの形としての可能性を感じた。

参考文献

- 1) 国際物理オリンピック日本委員会のホームページの IPhO 過去問 http://www.jpoh.jp/syllabus_w.html
- 2) ヨーロッパ物理オリンピック 2020 のホームページ <https://eupho.ee/eupho-2020/>

連絡先 E-mail: shuji@phys.s.u-tokyo.ac.jp
totsuji-09@t.okadai.jp