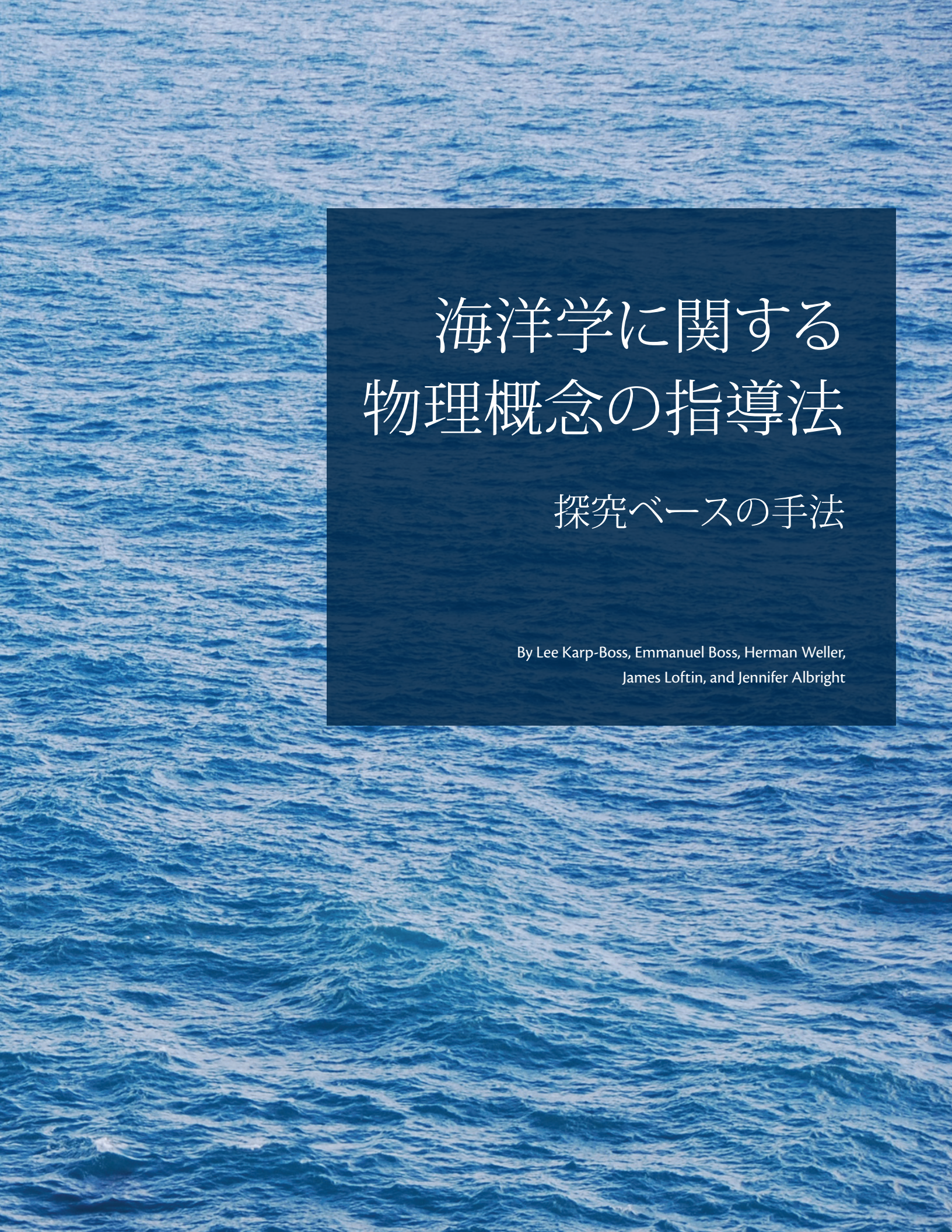




海洋学に関する 物理概念の指導法

探究ベースの手法

By Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, Herman Weller,
James Loftin, and Jennifer Albright

目次

はじめに.....	1
第1章 密度.....	4
学生の質問を促す:豊かな環境の中を散策する	12
第2章 圧力.....	14
矛盾した事象:学生の好奇心を呼び覚ます	24
第3章 浮力.....	25
学生の学びを評価する.....	31
第4章 熱と温度.....	32
チームベースの学習	42
第5章 重力波	44

Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, James Loftinは米国メイン州立大学オロノ校のSchool of Marine Sciences, Herman WellerとJennifer AlbrightはCollege of Education and Human Developmentに所属しています。筆者らは、メイン大学Darling Marine CenterのCenter for Ocean Sciences Education Excellence-Ocean Systems (COSEE-OS)に所属しています。

本プロジェクトは、米国科学財団(National Science Foundation; NSF)のDivision of Ocean Sciences Centers for Ocean Sciences Education Excellence (COSEE) (grant number OCE-0528702)の支援を受けました。本書に記載されている見解、知見、結論、推奨事項は、必ずしもNSFのものを反映したものではありません。本書のpdfファイルは、The Oceanography Society (海洋学協会)のウェブサイト (<https://tos.org/hands-on-oceanography>)から入手可能です。印刷版は、info@tos.org 宛てご請求いただけます。

©2009 The Oceanography Society

編者: Ellen Kappel, Vicky Cullen

レイアウトとデザイン: Johanna Adams

日本語への翻訳: 藤井 賢彦(北海道大学 大学院地球環境科学研究院)

営利目的でない教育的使用のために、全体または一部を転載することを許可します。The Oceanography Society (海洋学協会)では、原著者のクレジットを明記することをお願いしています。

はじめに

雑誌*Oceanography*の補遺である本書では、学生の学習意欲を高めるための教育的手法に焦点を当て、海洋学の基礎となる物理的概念を教えるための実践的な課題を収録しました。密度、圧力、浮力、熱と温度、重力波など、海洋学の基本となる物理的な概念を学ぶことができます。物理的な概念に着目した理由は2つあります。1つ目は、海洋生物に興味を持って海洋科学を志望する学生は、海洋やそこに生息する全ての生物がどのように機能しているのかを理解する上で、物理学が基本となることを知らないことが多いからです。2つ目は、既存の海洋教育やアウトリーチプログラムは、海洋科学の生物学的側面を強調する傾向があるからです。幼稚園児から高校生までを対象とした活動の多くは海洋生物学に焦点を当てていますが、海洋環境の物理的・化学的側面を教えるために開発されたものは比較的少ないのが現状です(例えばFord and Smith, 2000やDigital Library for Earth System Education Web site [DLESE; <http://www.dlese.org/library/index.jsp>]に掲載されている活動集など)。海洋は、一般的な科学教育、特に物理学にとって魅力的な背景を提供します。特定の物理的概念に関連付けるためのプラットフォームとして海洋を使用することで、理系の学生が求めがちな環境との関連性を提供することができます。

この付録に記載されている活動は、COSEE (Centers for Ocean Sciences Education Excellence)の科学者と教育専門家の協働の一環として開発されたもので、学部2, 3, 4年生を対象とした2つのコース(海洋科学専攻の学生を対象としたコースと、科学専攻と教育専攻の学生を対象としたコース)と、中学・高校の科学教師を対象とした4つの1週間のワークショップで実施されました。以下に、私たちの教育的手法を要約し、本編の構成について説明します。

検証か発見か？

私たちの科学教育の手法は、私たちが発見した3つの重要な「発見」に基づいています。「発見」と鍵括弧で強調したのは、多くの人が先に発見しているからです。しかし、私たち自身が「発見」するまでは、その重要性に気づかなかったのです。これは、生徒たちが、自分たちの住む環境を説明するのに物理学が役立つことを自ら発見していく過程と同じです。

私たちが最初に気づいたのは、大学レベルで科学を教える際の通常の方法、つまり教科書の教材を配布したり暗唱したりする方法では、科学の事実を伝えることはできても、科学が行われる方法を反映していないということでした。通常の方法

では、学生は受動的な観察者であり、探究心を持つことはほとんどありませんでした。しかし、科学とは「知識の体系」だけではありません。科学とは、思考と行動の方法であり、探究は本質的な過程です。科学を「行う」とき、私たちは予想を立て、質問と反証可能な仮説を立て、測定を行い、一般化を行い、応用によって概念を検証します。全米科学教育基準によると、「科学者が自然界についての疑問に答えを求めることで知識と理解を深めるのと同様に、生徒も一人で、あるいは他の人と一緒に科学的な探究に積極的に取り組むことで、自然界の理解を深める」のです (National Research Council, 1996)。科学の成果物(事実、概念、原理、法則、理論など)や科学者が使用する技術について教えているだけでは、生徒は探究心を持ちません。私たちの通常の科学教育方法では、科学の検証のために実験室がよく使われていました。その様式では、まず物理学の法則が紹介され、その後、実験室を使ってそれを説明しました。データを集め、プロットし、レポートを書くことに重点が置かれていました。このような演習では、ほとんどの場合、探索の要素が欠けています。

生徒たちの科学に対する好奇心や興味を刺激するためには、探究心や探求心が不可欠であることがわかってきました。実験データの異常値は、理論に合致した点よりも、教科書に載っている以上の説明を必要とするため、興味深いことが多いのです。探究的な手法は、科学的過程をより深く理解し、検証的な手法ではほとんど必要とされない批判的思考スキルを身につけるのに役立ちます。

2つ目の気づきは、教科書の内容や公式を暗記しているだけでは、根本的な物理原理を理解しているとは限らないということでした。物理学は数学的な記述で教えることができます。どのような式でどのような量が得られるかを学び、その知識は筆記試験で簡単に評価できます。しかし、この方法では、基本的な原理が少し異なる問題に適用されることを認識する能力は必ずしも育たないのです。私たちは、学生が積極的に学習に参加することで、物理的な概念をより深く理解することができることを「発見」しました。例えば、数学的な記述がモデルとなっていることを自分で「見て、感じる」ことができるような実験を行うことです。

意義のある学習体験の創造

3つ目の気づきは、生徒が得意とする学習形態、つまり「聞く」「読む」「見る」「触る」「行う」といった学習方法の組み合わせは各人によって異なる、ということです (Dunn and Dunn, 1993)。「

この教え方が私に合っているなら、生徒にも合うはずだ」という思い込みは、すべての生徒に合うとは限りません。結局のところ、アカデミアの関係者は、この教育システムで成功した少数派なのです。私たちは、多様な学習様式に対応した指導が、指導をより効果的にし、生徒の学習を向上させることを「発見」しました。また、すべての生徒が私たちの若いバージョンではないことを意識することも重要でした。科学者を動かすような好奇心、興味、態度を持たない生徒もいるでしょう。科学研究を続ける学生は少数派です。しかし、彼らはいずれ、科学的知識の消費者となり、研究資金を提供する納税者となり、投票所や公職の意思決定者となるのです。したがって、私たちには、学生の一般的な科学リテラシー、特に海洋リテラシーを向上させる責任があります。科学的、環境的、技術的な課題に必然的に直面することになる市民に必要な知識とスキルを身につけてもらう必要があるのです。

探究的な学習と教育

科学教育において「探究」とは、学習者が科学的な疑問や問題に取り組み、予想と検証を行い、証拠や情報を探し、考えられる説明をまとめ、別の説明と照らし合わせて評価し、理解したことを伝えることで解決しようとする方法を指します (National Research Council, 2000)。探究とは、『一般的に教科書に描かれている「科学的方法」のような厳格な手順よりもはるかに柔軟なものです。単に実験をするだけではなく、研究室に閉じこもるものでもありません』(AAAS, 1993)。探究型の教育・学習にはいくつかのモデルがあります (例えばHassard, 2005)。私たちの授業では、実践型の実験活動や実演を行っています。ここでは触れませんが、ケーススタディの活用、プロジェクトベースの課題、サービスラーニングなど、その他の効果的で探究心を刺激する手法も行っています。

学生に実験室での体験を提供するだけでは、必ずしも探究的な教育や学習が行われているとは言えないことに注意が必要です。例えば、伝統的な実験課題では、生徒は料理本のような手順に従うことを求められ、科学的な原理や概念を説明することができ、生徒に実験技術を教え、実地体験をさせることができますが、探究の「実践型の」側面を提供することはできません。「実践型の」手法で探究心を育むためには、生徒が質問をしたり、予想を立ててそれを検証したり、可能な限りの説明を考えたり、自分の知識をさまざまな文脈で応用したりすることが奨励されなければなりません。

生徒たちは、新しい情報を吸収するために真っ白な状態で教室に入ってくるわけではありません。むしろ、これまでの経験に基づいた様々な概念(時には誤解も)を持って授業に臨みます。探究型の手法では、生徒の知識を探り、学習の妨げとなるような誤解を見つけ出すことができます。探究は、生徒が科学を思考と行動の方法として理解するのを助け、自分の仮

定に挑戦することを促し、別の解決策や説明を求める環境を作ります。探究の過程で培われる推論、問題解決、コミュニケーションなどのスキルは、生徒が生涯にわたって活用できるものです。

探究型の指導法を採用する際の障壁のひとつは、この指導法では規定の時間内にカリキュラムのすべての内容をカバーできないのではないかという懸念でした。限られた授業時間の中で、この心配は尤もです。しかし、教育の目的が、生徒が基礎的な知識を得るだけでなく、概念を適用して統合することを学び、自立した学習者へと成長するような有意義な学習体験を促進することであるならば、私たちは探究型の手法を考慮しなければならないと考えました。しかし、この手法が学生の学習にどれほど有益であるかというフィードバックを受け、私たちは「少ない方が良い」ということに気がきました。私たちは、探究型の授業を提唱していますが、すべての教科が常に探究によって教えられるべきだとは考えていませんし、探究のすべての要素(質問の生成、証拠の収集、説明の形成、知識の他の状況への適用、説明の伝達と正当化 [National Research Council, 2000])が常に存在しなければならないとも考えていません。効果的な授業を行うためには、様々な戦略や手法 (例えばFeller and Lotter, 2009)を用いる必要があります。これらの戦略や手法は、個々の教室、個々の学習者、各教室の規模や力関係、即時のおよび長期的な学習目標などの要因に適応させる必要があります。

本書の利用法

本書は5章から成り、それぞれの章は「密度」「圧力」「浮力」「熱と温度」「重力波」の物理概念を取り上げています。それぞれの章では、背景を説明した後、実際に体験できる課題を詳細に解説しています。また、それぞれの概念の異なる側面を強調しています。これにより、生徒はそれぞれの概念を様々な角度から検討し、学んだことを新しい状況に適用し、理解を深めることができます。さらに、教育を改善し、学習を促進するために、いくつかの教育的手法を指摘しています (Feller and Lotter (2009)も参照のこと)。

これらの体験型課題は、私たちが大学レベルの授業で使用している形式で紹介しています。授業は、海洋学の入門コースを受講したことのある2年生、3年生、科学・教育学専攻の学生が中心です。これらの課題の中には、大学院生や私たちの同僚にとっても難しいものもありました。他の環境(例えば、異なる経歴を持つ学生)や他のカリキュラムでは、参考資料、教室での議論、課題の説明や解説を適切に変更することで、これらの課題を適応させることができますし、そうすべきです。私たちのワークショップに参加した科学の先生方は、中学・高校の授業でいくつかの課題をうまく適用しています。

私たちの授業では、3〜4人のチームが回る教室のステーシ

ョンで課題を行うことがほとんどです。場合によっては、一連の課題や実演を教室の全員で行い、生徒は小グループに分かれて議論を行います。小グループでの作業は、協調的な思考と学習を促進します。また、グループクイズなどでグループ間の健全な競争を促すことで、刺激とチャレンジ精神を高めることもあります。授業では、ソクラテス式の教授法を用いて、生徒にガイドとなる質問を提示します。課題の中での生徒の質問には、常に答えが用意されているわけではありません。むしろ、生徒が自分の考えや意見を吟味するように導く追加の質問をするのです。生徒は予想を立て、測定を行い、観察した現象に対する可能な説明を見つけることを求められます。生徒が活動を終えた後は、教室の全員でまとめのディスカッションを行い、グループごとに説明を求めます。生徒が自分の意見や理解を言葉で伝える時間を設けることは、私たちの手法の重要な部分です。これにより、コンセプトに対する誤解や困難を特定し、議論し、最終的に解決することができます。概念の応用や海洋過程との関連性は、議論の中で、また宿題を通して強調されます。

通常、90分の授業では、最初の1時間で4～6つの課題を行い、残りの約30分でグループ議論を行うことができます。これらの課題は、それぞれ単独でも、授業の実演としても行うことができます。ほとんどの課題には、教室や家庭で利用できる簡便で手頃な機器が必要です。一部の機器は科学教育専門店(sciencekit.comなど)で購入し、一部の機器は自分たちで製作しました。

参考文献と推薦図書

- American Association for the Advancement of Science (AAAS). 1993. *Benchmarks for Science Literacy: Project 2061*. Oxford University Press, New York, NY, 448 pp.
- Driver, R., A. Squires, P. Rushworth, and V. Wood-Robinson. 1994. *Making Sense of Secondary Science: Research into Children's Ideas*. Routledge, New York, NY, 224 pp.
- Dunn, R., and K. Dunn. 1993. *Teaching Secondary Students Through Their Individual Learning Styles: Practical Approaches for Grades 7-12*. Allyn and Bacon, Boston, MA, 496 pp.
- Duschl, R.A. 1990. *Restructuring Science Education: The Importance of Theories and Their Development*. Teachers College Press, New York, NY, 155 pp.
- Feller, R.J., and C.R. Lotter. 2009. Teaching strategies that hook classroom learners. *Oceanography* 22(1):234-237. Available online at: http://tos.org/oceanography/issues/issue_archive/22_1.html (accessed August 18, 2009).
- Ford, B.A., and P.S. Smith. 2000. *Project Earth Science: Physical Oceanography*. National Science Teachers Association, Arlington, VA, 220 pp.
- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science: Inquiry and Innovation in Middle School and High School*. Oxford University Press, 476 pp.
- Hazen, R.M., and J. Trefl. 2009. *Science Matters: Achieving Scientific Literacy*. Anchor Books, New York, NY, 320 pp.
- McManus, D.A. 2005. *Leaving the Lectern: Cooperative Learning and the Critical First Days of Students Working in Groups*. Anker Publishing Company Inc., 210 pp.
- National Research Council. 1996. *National Science Education Standards*. National Academy Press, Washington, DC, 262 pp.
- National Research Council. 2000. *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press, Washington, DC, 202 pp.

関連ウェブサイト

- Cooperative Institute for Research in Environmental Science (CIRES): Resources for Scientists in Partnership with Education (ReSciPE)
<http://cires.colorado.edu/education/k12/rescipe/collection/inquirystandards.html#inquiry>
- Perspectives of Hands-On Science Teaching
<http://www.ncrel.org/sdrs/areas/issues/content/cntareas/science/eric/eric-toc.htm>
- Teaching Science Through Inquiry
<http://www.ericdigests.org/1993/inquiry.htm>
- Science as Inquiry
<http://www2.gsu.edu/~mstjrh/mindsonscience.html>
- Science Education Resource Center (SERC), Pedagogy in Action, Teaching Methods
<http://serc.carleton.edu/sp/library/pedagogies.html>

第1章. 密度

本章のねらい

密度は物質の基本的な性質であり、中学の物理学では習いますが、大学レベルの学生のすべてがこの概念をよく理解しているわけではありません。多くの学生は、物理的な意味をあまり気にせずに定義を暗記し、試験後すぐに忘れてしまうことが多いです。海洋学では、海洋循環を研究するための手段として、水塊を特徴づけたり追跡したりするために密度を使用します。多くの過程は、隣接する水塊の密度の違いや、流体と固体の密度の違いによって引き起こされたり、反映されたりします。プレートテクトニクスと海盆の形成、深海の形成と熱塩循環、表層から深海に沈む粒子による炭素輸送などは、密度に起因する過程の一例です。以下の課題は、密度の確認、密度計算の練習、海洋過程との関連性を強調することを目的としています。

背景

密度(ρ で表す)とは、物質のコンパクトさを表す指標であり、ある空間にどれだけの質量が「詰め込まれている」かを表します。密度は単位体積 V あたりの質量 m 、すなわち $\rho = \frac{m}{V}$ (単位は kg/m^3 または g/cm^3)で表され、物質の量に依存しない属性です。水の密度は空気の密度の約1000倍です。水の密度は、常温の淡水の 998 kg/m^3 (例えばhttp://www.pg.gda.pl/chem/Dydaktyka/Analityczna/MISC/Water_density_Pipet_Calibration_Data.pdfを参照)から、塩湖の $1,250 \text{ kg/m}^3$ 近くまで変化します。大部分の海水の密度は $1,020 \sim 1,030 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあります。海水の密度は直接測定されることはなく、水温、塩分、圧力の測定値から計算されます。海洋の密度変化の幅が小さいことから、便宜上、海水の密度は $\sigma_t = \rho - 1000$ で定義される σ_t (シグマ・ティー) という量で表されます。

海水の密度の変動のほとんどは、塩分と温度の変化によるものです。塩分の変化は、一定体積の水に溶けている塩の質量の変化を反映しています。塩分が高くなると、蒸発や結氷時の塩分除去などにより、海水の密度も高くなります。温度の変化は、水の体積の変化をもたらします。流体の温度が上昇すると、分子間の距離が長くなるため、流体の体積は増加し、密度は減少します(質量は変化しません)。冷やすと分子間の距離が短くなり、流体の体積は減少し、密度は増加します。温度と密度の関係は直線的ではなく、純水の密度が最大になるのは 4°C 付近です(Denny (2007)やGarrison (2007)など、海洋学の一般的な教科書を参照のこと)。

密度, 成層化, 混合

成層とは、水塊がその密度に応じて層状になっている状態を指します。水の密度は深さに比例して増加しますが、一定ではありません。外洋域(極海域を除く)では、水柱は一般的に、上部混合層(温度が深さの関数として一定である、暖かく密度の低い水の層)、躍層(深さが増すにつれて温度が低下し、密度が急速に増加する領域)、密度の高い冷たい水から成る中深層(深さとともに密度がゆっくりと増加する領域)の3つの異なる層で特徴付けられます。一般に、外洋域の塩分の変化は、温度の変化に比べて密度への影響が小さいと言われています。つまり、外洋域の海水の密度は温度に大きく支配されているのです。一方、河川からの流入量が多い沿岸域や、氷が形成されたり融解したりする極域では、塩分が水の密度や成層の決定に重要な役割を果たしています。

成層は、植物プランクトンが生育できる光の当たる表層と、栄養分の豊富な深層水との間で、栄養塩や溶存気体の交換を行う効果的な境界を形成しています。そのため、成層は海洋の生物過程や生物地球化学過程に重要な影響を及ぼします。例えば、海洋の成層化が進むと、表面の植物プランクトン量が減少することが知られていますが、これは上方への栄養塩の輸送が抑制されるためと考えられています(Behrenfeld et al., 2006; Doney, 2006)。沈降有機物のフラックスが高い沿岸水域では、成層期間が長くなると貧酸素(低酸素)になり、魚やカニなどの海洋生物が死滅する可能性があります。

成層を混合するには作業が必要です。例えば、サラダドレッシングの瓶を一生懸命振って、油とお酢を混ぜるようなものです。風や砕波などのエネルギーを利用した混合がなければ、表層と深層の間の気体や栄養塩の交換は、分子拡散や生物による局所的な攪拌によって行われますが、これらはゆっくりとした効果の小さい伝達方法です(Visser, 2007)。混合に必要なエネルギーは、最低でも、混合流体と成層流体の間の位置エネルギーの差です。したがって、水柱が成層していればいほど、垂直方向の混合に必要なエネルギーは大きくなります(上級者は、成層した流体に比べて混合した流体の方が重心が高いという概念を用いて、この必要エネルギーを計算することができます [例えばDenny, 1993])。

密度は大規模な海洋循環にとって根本的に重要です。温度の低下(冷却)や塩分の増加(氷の生成や蒸発)によって表層水の密度が増加すると、重力が不安定になり(密度の高い水が密度の低い水の上に重なる)、表層水は深い方向に沈みま

す。沈んだ水塊は、その密度が周囲の密度と一致する深さに達すると、密度の等しい「面」に沿って水平方向に流れます。このような高密度の水の形成とそれに続く沈降の過程が、海洋の熱塩循環の原動力となっています。これは、低緯度域(紅海のアカバ湾や地中海のリオン湾など)や高緯度域(北大西洋の深層水形成など)で観察されます。上部混合層では、表層水からの熱損失(密度駆動)と風や波による強制力(力学的駆動)によって対流混合が起こります。

密度は、湖の過程にとっても根本的に重要です。例えば、高緯度地方では冬になると、湖水は上から冷やされます。表層の温度が下がると密度が高くなり、上層の水が下層の水よりも密度が高くなると沈みます。沈んだ水の代わりに、表層の下にある密度の低い暖かい水が湧き出てきます。低い気温が続くと、こうした冷却と対流の過程によって、最終的には湖全体が4°C(海拔0 mにおいて淡水の密度が最大となる温度)まで冷やされます。さらに表面が冷やされると、上層水の密度が低下します。すると、湖は安定した成層状態となり、底部には密度の高い水が、上部には冷たいが密度の低い水が存在するようになります。表層水がさらに0°Cまで冷えると、凍り始めます。冷却を続けると、凍った層はさらに深くなります。

活動内容

課題1.1-1.3は密度の確認に、課題1.4-1.6は海洋過程との関連性に注目しています。課題1.1-1.3では、物体の質量、体積、密度と、沈んだり浮かんだりする性質との関係を説明します。また、これらの課題では、測定スキルを習得することができます。測定と、それに関連する精度や確度などの概念、および平均や標準偏差などの統計的な概念は、授業中に紹介したり、宿題として出したりすることができます。課題1.4-1.6では、密度、成層、混合の関係を調べ、海洋過程への応用について議論します。

授業に先立ち、各課題を各ステーションに準備します(通常、90分の授業時間であれば4〜5箇所のステーションを準備しますが、課題の選択、難易度、議論の深さは生徒のバックグラウンドによって異なります)。学生はステーション間をローテーションして課題をこなしていきます。この間、講師はグループの間を移動しながら、学生に質問を投げかけて指導します。授業の最後の30分は、まとめと議論の時間です。

課題1.1. 浮かびますか? (図1.1)

材料

- 1つはバルサ材, もう1つはリグナムバイタ材でできた, ほぼ同じ体積の2つの立方体 (sciencekit.com)
- 大きな中空の金属球 (sciencekit.com)
- デルリン球などのプラスチック球 (ホームセンターなどで購入可)
- 常温の水道水を入れた容器
- 定規またはノギス
- はかり

学生への指示

1. 物体が沈むか浮くかを決定すると思われる性質を挙げて下さい。
2. 用意されたものを触ってみて, 水に浮くものと沈むものを予想してみましょう。そのように予想した理由は何ですか? 予想した内容をグループで話し合ってみましょう。
3. あなたの予想を検証します。あなたの観察結果は, あなたの予想と合致していましたか? もしそうでなければ, どうしてそうなったかを説明できますか?
4. 観察に基づいて, あなたは上記1で挙げた性質のリストをどのように修正しますか?
5. 立方体とボールの質量と体積をそれぞれ求めます。立方体と球の体積を求める方法を複数提案することができますか? (時間が許せば, 異なる方法で得られた密度はどのように比較されるかを考察して下さい)
6. 物体の質量と, 観察された沈没・浮遊行動との間に関係があるとすれば, それはどのようなものですか? 物体の体積と, 観察された浮き沈みの振る舞いとの関係があれば教えて下さい。

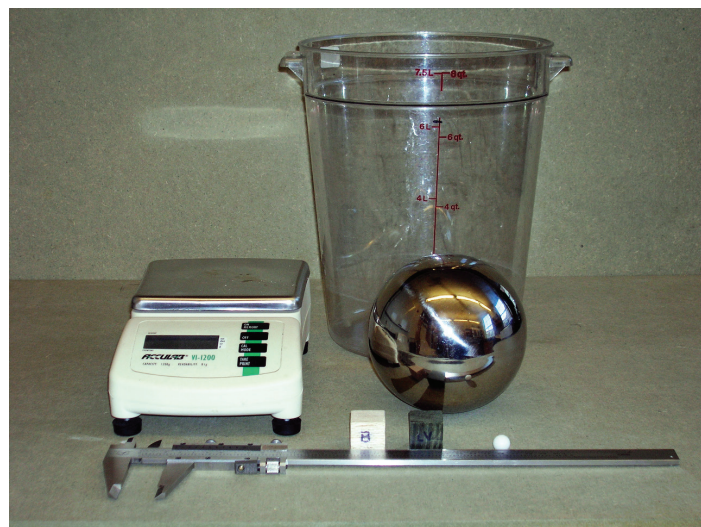


図1.1. 課題1.1.の資料

7. 立方体, ボール, 水道水の密度を計算して下さい。計算した密度と, 観察した浮き沈みの振る舞いとの間に関係があれば, 教えて下さい。

説明

この課題では, 2種類の無垢の木の立方体, 中空の金属球, 無垢のプラスチック球の4つの物体を使って実験を行います。使用する木材は, 密度が $0.1 \sim 0.17 \text{ g/cm}^3$ のバルサ材(使用する立方体の質量は 2.25 g , 体積は 16.7 cm^3 で密度は 0.13 g/cm^3)と, 密度が $1.17 \sim 1.29 \text{ g/cm}^3$ のリグナムバイタ材(使用する立方体の質量は 19.6 g , 体積は 15.2 cm^3 で, 密度は 1.29 g/cm^3)という, 密度が大きく異なる2種類の木材です。また, 小さなプラスチック球と大きな中空金属球の密度は, それぞれ 1.4 g/cm^3 (質量 1.5 g , 体積 1.07 cm^3)と 0.14 g/cm^3 (質量 144 g , 体積 1035 cm^3)です。常温の水道水の密度は約 1 g/cm^3 なので, バルサ材の立方体と金属球は浮き, リグナムバイタ材の立方体とプラスチック球は沈むことになります。

この課題では, 2つのポイントを説明します。1) 物体が浮いたり沈んだりするのは, 質量や体積だけではなく, それらの比, つまり密度に依存すること。「重いものは沈み, 軽いものは浮く」という言葉がありますが, これは誤解であることを指摘します。(2) 物体の浮き沈みは, その素材だけに依存しているわけではありません(例えば, 木は必ず浮くという誤解がよく生じます)。また, 時間が許せば, 体積測定(実測寸法や体積変位に基づく)の話を取り入れ, 第3章で紹介する浮力の概念につなげることもできます。

課題1.2. 缶は浮きますか? (図1.2)

材料

- マウンテンデュー1缶, ダイエットマウンテンデュー1缶
- 大きな容器に常温の水道水を入れたもの
- キャリパーまたは定規
- はかり
- 2リットルのメスシリンダー

学生への指示

1. 2つの缶を調べます。2つの缶の共通点と相違点を挙げて下さい。
2. 常温の水道水に入れたとき, それぞれの缶の浮き沈みの様子はなると思いますか? 予想の根拠を書いて下さい。
3. 水槽に2本の缶を入れる。缶に泡がついていないことを確認します。観察結果は, あなたの予想と一致していますか? この観察結果をどのように説明しますか?
4. それぞれの缶の密度はどのようにして決めますか? あなたのやり方を試してみして下さい。缶の密度は, 水道水の密度と比べてどうですか?

5. 密度の測定値は観察結果と一致していますか？缶と缶、または缶と水の間に密度の違いがあるのは何故でしょうか？

説明

この2つの缶を真水の入った桶の中に入れると、普通のソーダの缶は沈み、ダイエットソーダの缶は浮きます(図1.2)。私たちが使っているマウンテンデューの缶とダイエットマウンテンデューの缶の密度(缶、液体、気体を含む)を計算すると、それぞれ 1.024 g/cm^3 と 0.998 g/cm^3 です。この密度の違いは、レギュラー缶とダイエット缶に添加されている甘味料の質量の違いによるものです。通常のマウンテンデューの缶には、46 gの砂糖が含まれています。添加された砂糖の量を示すために、46 gの砂糖を計量すると、生徒たちに強い印象を与えることができます(図1.2の右側を参照)。類似した課題をインターネットで入手できます。炭酸飲料の銘柄や同じ銘柄でも缶によってばらつきがあることに注意して下さい。講師は授業の前に必ず缶を試して下さい。また、浮くはずの缶が浮かない場合は、生徒が理解しているかどうかを試すための教育的な瞬間にすることもできます。この課題は、矛盾した事象の一例です(24ページの議論を参照)。缶の見た目と感触が似ているので、生徒は沈むか浮くかの違いを期待していません。活動中、生徒からは、缶の体積をどのように測定するかという質問がよく出されます(体積置換で測定するか、缶の寸法を測定して円筒の体積を計算するか)。グループごとに同じ缶を使うので、それぞれの密度を比較します。時間が許せば、各グループに両方の方法を使ってもらい、密度の推定値を比較します。さらに、この活動を発展させて、それぞれの手法の精度を推定したり、測定精度や誤差の伝搬について議論したりすることもできます。



図1.2. 普通のソーダの缶(右)とダイエットソーダの缶(左)の密度の違いによる沈み方、浮き方の違い。

課題1.3. 海洋性地殻と大陸性地殻の密度(図1.3)

この課題は、Warren-Wilson CollegeのDonald F. Collins氏が考案したものに改良を加えたものです。

材料

- 玄武岩(海洋性地殻の代表)と花崗岩(大陸性地殻の代表)の岩石試料
- 注ぎ口のあるオーバーフロー容器と、排出された水を受けるための50 mlメスシリンダー(代わりに、大きなメスシリンダーやグラデーションラインのある容器でも構いません)
- はかり

学生への指示

1. 2つの岩石試料の密度を決定します。花崗岩と玄武岩の密度はどのように比較されますか？
2. 陸地の平均海拔は875 m、海底の平均深度は3794 mです。密度の計算と地球の構造について既に習った事柄を適用して大陸と海盆の高低差が大きいことを説明して下さい。
3. 教科書では、海洋性地殻は $2.9 \sim 3.0 \text{ g/cm}^3$ 、大陸性地殻は $2.7 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ となっています。これらの値は、あなたの測定値と比べてどうですか？もし違うのであれば、教科書に書かれている値とあなたが得た値との違いは何によるものでしょうか？
4. 地球の質量を $5.9742 \times 10^{24} \text{ kg}$ 、地球の半径を6,378 kmとして、地球の密度を計算して下さい(課題:地球の質量をどのようにして割り出しますか?)。地球の密度は、岩石の密度と比べてどうですか？地球の構造について、どのようなことがわかりますか？



図1.3. 課題1.3の資料

説明

使用する岩石試料の密度は、玄武岩(海洋地殻起源)が 2.8 g/cm^3 、花崗岩(大陸地殻起源)が 2.6 g/cm^3 です。どちらの地殻も、より高密度な地球のマントル($3.3 \sim 5.7 \text{ g/cm}^3$)の上に存在しています。大陸地殻は、海洋地殻とその上にある水の深さの平均値よりも厚く、密度が低いため、海洋地殻よりも高く、マントル上に浮いています。この課題とその後の授業での議論として、3つの問題を取り上げました。1つ目は、水の変位による不規則な形状の体積測定に関するものです。この概念は、後に行われる浮力に関する授業(第3章)につながります。次に、測定値と測定値に伴う変動性の問題です。理科系の生徒は、教科書に載っている平均値を見ることに慣れていますが、その際、不確実性や自然変動に関する統計的な情報が含まれていないことがよくあります。さらに、教科書に書かれている正確な値が得られなければ、それは間違いだと考える生徒もいます。授業の最後には、各グループの密度測定値とその方法を比較し、測定値の潜在的なばらつきの原因や、教科書の値が実際に表しているものは何なのかを話し合います(平均値や標準偏差などの統計学的な概念も、ここで取り入れることができます)。最後に、大陸地殻と海洋地殻の密度と厚さの違いがどのように地球の地形を形成しているのか、またプレートテクトニクスの過程との関係について、応用例を紹介します。地球の平均質量と平均密度の導出については、Box 1.1を参照して下さい。

課題1.4. 密度と成層に対する温度と塩分の影響(図1.4)

材料

- 仕切り板のある長方形の水槽(sciencekit.com)
- 既製の塩水(約75 gの塩を1 Lの水に溶かしたもの:コーシヤ塩は透明な溶液になるが、食卓塩で作った溶液は高濃度になると乳白色になる)が入った瓶
- 異なる2色の食品着色料
- 氷
- ビーカー

学生への指示

1. ビーカーに水道水を入れます。
2. 水槽の一方の区画にビーカーの水を、もう一方の区画に塩水瓶の水を入れます。一方の水槽には食品着色料を数滴、もう一方の水槽には異なる色の食品着色料を数滴入れます。区画の間の仕切りを外すとどうなるか予想しますか?その理由を説明して下さい。
3. 常温の水道水と塩水の密度を測って下さい。
4. 水槽の仕切りを外して、予想を検証してみましょう。どうなりますか?観察結果は、あなたが測定した密度と一致していますか?

BOX 1.1. 地球の質量と密度を求める

地球の質量は、ニュートンの法則から計算することができます。

1. ニュートンの万有引力の法則では、2つの物体が互いに及ぼす力(引力)は、その質量(m_1, m_2)の積に正比例し、2つの物体間の距離(L)の2乗に反比例します。すなわち、

$$F = G m_1 m_2 / L^2$$

と記述されます。ここで G は重力定数($G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$)です。仮に物体が地球の表面近くにあると仮定すると、惑星の半径を物体と地球の距離として用いることができます。

2. ニュートンの第2法則では、物体を地球に引き寄せる力は、その質量(m)に重力加速度(g)を掛けたものに等しくなります。ここで、地球表面の場合、 $g = 980 \text{ cm/s}^2$ となります(g 自体は、振り子の周期などから計算できます)。

ここで地球の質量を m_1 、物体の質量を m_2 とします。すると、 $F = m_2 g = G m_1 m_2 / L^2$ と表されます。従って、地球の質量は $m_1 = g L^2 / G \div 6 \times 10^{24} \text{ kg}$ となります。これを地球の体積($4/3 \pi r^3$; ここで r は地球の半径、平均6,373 kmとします)で割ると、地球の密度($5,515 \text{ kg/m}^3$ または 5.515 g/cm^3)が得られます。

5. 水槽を空にして、ビーカー1個に水道水を、ビーカー1個に氷水を入れます。ビーカーに食品着色料を数滴入れます(ビーカーごとに色を変えて下さい)。
6. 水槽の仕切り版で区切った一方にお湯を、もう一方に氷水を入れて下さい。手順3～5を繰り返します。仕切り板を外し、水槽内の新たな平衡状態を観察した後、指先を液面のの上に置き、タンクの底に向かってゆっくりと手を動かします。温度の変化が感じられますか？
7. 地球温暖化や海水の融解などの気候変動の影響は、水柱の垂直構造にどのような影響を与えるのでしょうか？考えられるシナリオをグループで話し合ってください(この問題を宿題として出してもかまいません)。

説明

この課題では、液体がその密度によって層をなすことを示します。2つの「水塊」(図1.4), すなわち塩水(青)と真水(黄),あるいは冷水(青)と温水(黄)は、最初は水槽の仕切り板で分けられています。仕切りを外すと、密度の高い水(塩水または冷水[青])は容器の底に沈み、密度の低い水(真水または温水[黄])は上に浮かんで成層化した水柱を形成します。この過程で、水槽内には内部波が形成されます(詳しくは第5章 重力波で説明します)。

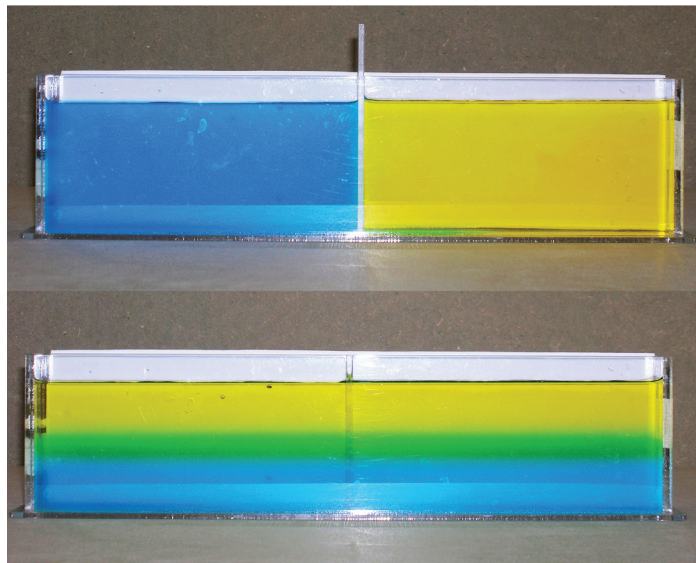


図1.4. 仕切り板除去前の水槽(上)と除去後の水槽(下)。

課題1.5. 成層化が混合に及ぼす影響(図1.5)

この活動は、カリフォルニア大学サンディエゴ校のPeter Franks氏が私たちに伝えてくれた実演に基づいています。その物理シミュレーションの詳細については、Franks and Franks (2009)を参照して下さい。

材料

- 水道水の入った水槽
- 成層化した流体が入った水槽*
- ヘアドライヤー
- 異なる2色の食品着色料
- ロングピペット

*2層の成層流体を入れた水槽を準備するには、水槽の半分から4分の3を濃い塩水で満たします(課題1.4参照)。水の上に薄い発泡スチロール(水槽と同じ幅)を置き、その上から暖かい水道水を注意深く注ぎます。その後、液体をかき混ぜずに、泡の部分を慎重に取り除きます。その他の手法については、Franks and Franks (2009)を参照して下さい。

学生への指示

1. 水面に投入された染料が、どの水槽でより混ざりやすくなるかを予想して下さい。

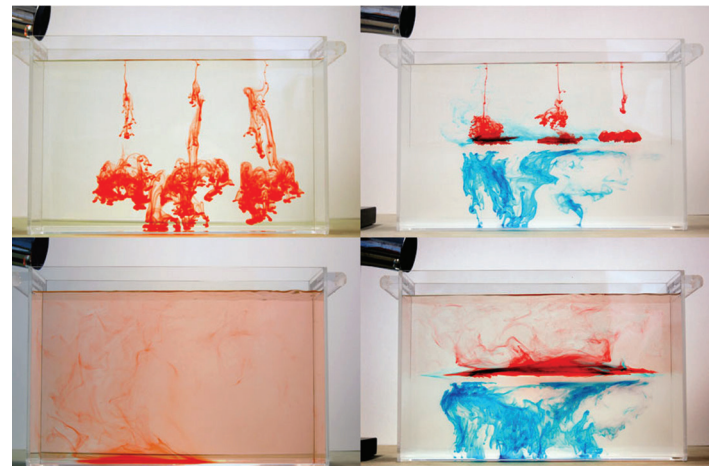


図1.5. 力学的な強制力を加える前(上)と加えた後(下)の染料入り水槽(上に平行してエアドライヤーを吹き付ける)。左側が非成層化水槽、右側が密度成層化水槽。

2. 非成層水柱のある水槽で、ロングピペットを使って食品着色料を数滴、水面に注意深く注入します。ドライヤーで水面にほぼ平行に「風」を起こし、染料の混ざり具合を観察します。
3. 二層構造の液体が入った水槽に、ロングピペットを使って、水面に食品着色料を数滴、底に別の食品着色料を数滴、丁寧に注入します。ヘアドライヤーを使って、2で発生させたのと同様の風を起こします。観察した結果を、非成層化した水槽で見た結果と比較してみましょう。
4. あなたが観察した結果を踏まえて、地球温暖化が海や湖の成層や混合に与える潜在的な影響を予想し、グループで議論して下さい。海洋生物にはどのような影響があるでしょうか？

説明

非成層水柱(図1.5 左)では、液面に添加された赤色染料は、その密度が水の密度よりもわずかに高いため、最初は沈みます(図1.5 左上)。ドライヤーの風を受けてしばらくすると、染料は水柱全体に混ざります(図1.5 左下)。一方、成層水槽(右図)では、層と層の間の急激な密度変化の領域である比重躍層が混合の有効な障壁となっています(図1.5 右上)。2つの層を混ぜるためには、より多くのエネルギーが必要となり、ヘアドライヤーで発生させた「風」では水柱全体を混ぜることができなくなります。その結果、赤い染料は上層でのみ混合され、海や湖の上部混合層と同じような状態になります(図1.5 右下)。この課題と合わせて、混合により流体の重心を上げて比重躍層の深さを増すために必要なエネルギーの計算を行うことができます(例えばDenny, 2007)。

課題1.6. 氷の下の対流(図1.6)

材料

- 着色した氷塊(水に食品着色料を加え、食品保存容器に入れて凍らせたもの)を4つ以上
- 大きな透明容器2個(水道水と海水を入れたもの、いずれも常温)*

*グループごとに容器の水を入れ替える必要があります。氷が溶けると色が水に混ざってしまい、しばらくすると流れのパターンを観察するのが難しくなります。

学生への指示

1. 水道水を入れた容器の中に、色のついた氷の塊を入れます。氷が溶けるときの液体の挙動を観察し、説明して下さい。

2. 塩水を入れた容器の中に、もう一つの色付きの氷のブロックを入れます。氷が溶けるにつれて、液体の挙動を観察し、説明して下さい。これらの観察結果を、1で観察した結果と比較します。

講師への注意: 上級者には、氷が水槽の壁の近くにあるか、水槽の中央にあるかによって、水槽内の流体の挙動が変わるかどうかを観察し、その観察結果を海洋で起こりうるシナリオ(例えば、外洋の対流性チムニー(煙突)と陸棚の上の対流)に関連付けるように指示することもできます。

説明

図1.6の左図: 水道水の中では、氷の密度は真水よりも低いため、氷塊は浮きます。しかし、氷が溶けると、冷たい着色水は、水道水よりも密度が高いため、底に沈んでいきます。すると、底にあった暖かい水が移動して湧き上がり、対流が発生して染色パターンが見えます。水槽の中央部の氷の融解は、外洋で形成される対流性「チムニー」に相当し、水槽の端部の氷の融解は、大陸棚(陸地の近く)のチムニーに相当します。このような対流過程によって形成され、維持されている海洋のチムニーは、混合水が下に向かって流れる「柱」のように見えます。ある一定の海洋・気象条件において、外洋の対流は、陸地付近の対流よりも周囲の水を巻き込む(混ぜる)傾向があります。そのため、外洋での対流では、密度の低い水が下降します。

図1.6の右図: 氷塊は密度の高い塩水に浮かんでいます。氷が溶けると、塩水の密度の方が新たに溶けた氷冷水の密度よりも大きいため、少量の染料だけが沈みます。溶けた水のほとんどは、密度の高い塩水の層の上の表層に溜まります。

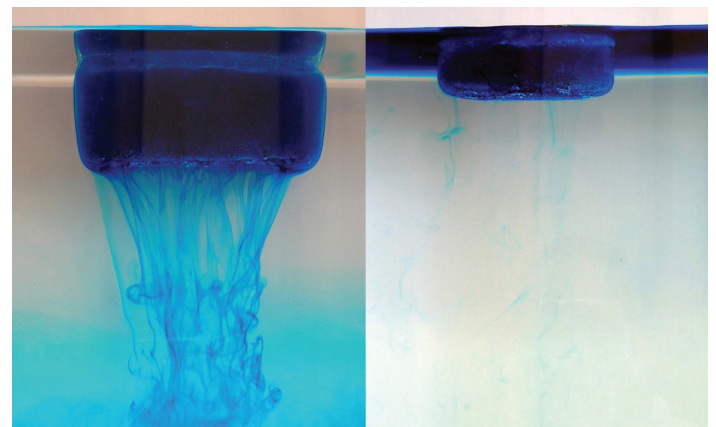


図1.6. 水道水(左)と海水(右)に入れた着色した氷塊の融解に伴う対流。

補足課題(図1.7)

時間が許せば、授業の最後に生徒にガリレオ温度計(図1.7;オンラインで安価で入手可能)、お湯の入った容器、冷水の入った容器を渡し、温度計の仕組みを説明してもらうことで、密度の概念に対する生徒の理解度を評価することができます。ガリレオ温度計は、透明な液体が入った密閉されたガラス管と、目盛り付きで液体が入ったガラス球に金属タグを付けたものです。球は、それぞれ密度が少しずつ異なり、すべて透明な液体の中に浮遊しています。密閉されているので、それぞれの体積と質量は一定であり、したがって密度も一定です。加熱したり冷却したりして変化するのは、周囲の流体の密度です。ガラス玉と透明な液体の間の相対的な密度の変化によって、ガラス球は浮かんたり沈んだりして、平衡密度に従って配置を変えます。通常、ガラス球は柱の下部と上部の2群に分かれます。そして、ボールに取り付けられた金属製の円盤から温度を読み取ります。柱の最上部に近い群の一番下の球の円盤の読み取り値が温度を示します。ガリレオ式温度計は、温水槽から冷水槽に切り替えたとき(またはその逆)、内部の液体の温度変化の速度が遅いため、温度変化を記録するのに時間がかかることに注意して下さい。この平衡化の遅さは、温度計を氷風呂に入れたときに、冷たい(密度の高い)液体が底面近くに残るため、特に顕著になります。温度計を定期的に傾けることで、待ち時間を短縮することができます。短時間に実演する場合は、2つの温度計を比較する方が良いでしょう。1つは暖かい水の浴槽に入れ、もう1つは冷たい水の浴槽に入れます。



図1.7. ガリレオ式温度計。

参考文献

- Behrenfeld, M.J., R. O'Malley, D.Siegel, C. McClain, J. Sarmiento, G. Feldman, A. Milligan, P. Falkowski, R. Letelier, and E. Boss. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444:752–755.
- Denny, M.W. 1993. *Air and Water: The Biology and Physics of Life's Media*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 360 pp.
- Denny, M. 2007. *How the Ocean Works: An Introduction to Oceanography*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 344 pp.
- Doney, S. 2006. Plankton in a warmer world. *Nature* 444:695–696.
- Franks, P.J.S., and S.E.R. Franks. 2009. Mix it up, mix it down: Intriguing implications of ocean layering. *Oceanography* 22(1):228–233. Available online at: <https://tos.org/hands-on-oceanography> (accessed April 23, 2021).
- Garrison, T.S. 2007. *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Sixth edition. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.
- Visser, A. 2007. Biomixing of the oceans? *Science* 316:838.

その他の出典

- <http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm>. COSEE-OS海洋気候ウェブインターフェイスでは、海洋蓄熱、海面温度、対流・移流熱輸送過程、気候の温暖化、温室効果に関する画像、動画、ニュース、リソースを提供しています。
- Ford, B.A., and P.S. Smith. 2000. *Project Earth Science: Physical Oceanography*. National Science Teachers Association, Arlington, VA, 220 pp.

生徒の質問を促す：豊かな環境の中を散策する

WELLER (1988)に基づく

質問は、科学的な探究に不可欠な要素であり (National Research Council, 2000), 多くの教育的メリットがあります。National Research Council (2000, 29ページ) は、学習者が「科学的な質問」をすることは、教室での探究の5つの本質的な特徴の1つであると述べています。生徒が質問することで、生徒の理解や推論について多くが明らかになり、別の枠組みや誤解を発見することができます。また、生徒の好奇心や動機が刺激され、批判的で自立的な思考スキルが身に付き、積極的に参加するようになります。しかし、通常の講義では、学生が質問をすることはほとんどなく、質問は主に講師が行います。私たちのプログラムに参加している学部4年生に、授業中に質問をしない理由を尋ねたところ、最も多かった答えは次の2つ、つまり(1)馬鹿にされるのが怖いから、(2)質問しにくい雰囲気だったから、でした。多くの学生は、これまでに教育を受けた経験から、学習者として期待される役割は、授業に出席し、ノートを取り、宿題や試験をこなすことだと考えていたと述べます。質問をするというスキルは、教育の一環として強調されたものではありませんでした。

ここでは、生徒の質問を促すための手法を紹介します。

コースの最初の授業では、生徒たちを刺激的で豊かな環境の中を散策させます。散策の目的は、自発的な質問を誘発するような、物が豊富な環境に触れることです。この手法は、幼い生徒から質問を引き出すことを目的とした、小学校で行われている並行した手法から派生したものです (Jelly, 2001)。

豊かな環境として、研究や商業目的で熱帯魚を飼育しているメイン大学の養殖施設を利用します。散策の前には、環境について何も伝えません。教科書に載っているような質問ではなく、自分が本当に興味のある質問を中心に、環境を探索しながら思いついた質問を書き出すように指示するだけです。30分ほど自由に散策した後、各生徒は自分のリストの中から気に入った質問を3〜5個選び、授業のリストに加えます。このリストは電子媒体を用いて、またはホワイトボードやフリップチャートを使って手作業で作成することができ、生徒たちは自分たちが生み出した質問の量、質、多様性を視覚的に理解することができます。養殖施設を散策した上で生徒の質問の例は以下のようなものです。「魚は遊ぶか？」

」、「藻類は産卵を促進するのか、阻害するのか?」、「極端な気象条件の中で熱帯魚をどのように輸送するのか、またその過程での死亡率は?」。

次に、生徒たちにチームを作ってもらい、各チームは似たような特徴に基づいて質問を分類してもらいます。各チームの代表者は、分類した理由を教室で説明します。このような協同学習の手法を用いた教室運営により、生徒全員がすべての質問を慎重に検討するようになり、一部の生徒による分類に対する「ボヤキ」がなくなりました。例えば、2007年に3つの小グループで作成した分類は以下の通りです。Aグループ:生物学、施設、環境、ビジネス、Bグループ:環境、魚のライフサイクル、施設/マーケティング、Cグループ:探検、生物学/生態系、技術、施設/経済。この課題で初めて、指導者のヒントなしに生データを分類した学生もいたのではないでしょう。

最後に、学生には、自分の散策の仕方、質問の仕方、分類の仕方が、科学者が研究の初期段階で行うこととどのように似ているかについての見解を述べてもらいます。また、良い科学的質問とはどのようなものか、生徒に説明してもらいます。この話題について教室で議論し、生徒が作成した質問を参照しながら、良い科学的質問の特徴を説明します。生徒たちは、「良い科学の質問とは、できるだけ具体的で、信念、政治、倫理などの科学以外の側面を含まないものであるべきだ」と答えます。また、議論では、次のような点も指摘します。良い科学の質問とは、(1)問題の本質をできるだけ具体的に示すこと、(2)「答えを仮定する」(Sagan, 1996)のではなく、質問に対する答えとして、検証可能な代替仮説を立てること、(3)疑似科学を含まないこと (Derry, 1999; Sagan, 1996)、(4)情報を得ることができないものを含まないこと (Sagan, 1996)です。科学的質問のこれらの側面については、Derry (1999), Sagan (1996, 12章, 201-218ページ), Atkins (2003, 3-4ページ)をお勧めします。最後に、学習における質問の力について説明し、授業中に質問することについての気持ちを生徒に話してもらいます。この機会を利用して、質問は授業の重要な一部であることを生徒に気づいてもらいます。

この訓練は、コースの基調となるものであり、学生が質問をすることに慣れ、最終的には学生の学習効果を高めるも

のです。この手法の延長線上に、宿題や学期末レポートの課題として、学生に自分の質問に対する答えを探してもらうこともできます。また、コースの途中で新しい話題が出てきたときに、学生の興味を引くためにも使用できます。なお、豊かな環境といっても、特別な施設である必要はありません。授業での実演、ビデオクリップ、数値シミュレーション、写真や画像などが、学生の質問を刺激するのに役立つでしょう。

引用文献

- Atkins, P. 2003. *Galileo's Finger: The Ten Great Ideas of Science*. Oxford University Press, 400 pp.
- Derry, G.N. 1999. *What Science Is and How It Works*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 328 pp.
- Jelly, S. 2001. Helping children raise questions—and answering them. Pp. 36–47 in *Primary Science: Taking the Plunge*. W. Harlen, ed, Heinemann, London, UK.
- National Research Council. 2000. *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press, Washington, DC, 202 pp.
- Sagan, C. 1996. *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark*. Ballantine Books, New York, NY, 480 pp.
- Weller, H.G. 1998. A running inquiry—Nature asked the questions during this jog. *Journal of College Science Teaching* 27:389–392.

第2章. 圧力

本章のねらい

この章の一連の課題は、生徒が流体における圧力の概念を理解することを目的としています。圧力を数式(静水圧の式、ベルヌーイの式など)で教えても、数学的志向の低い生徒には届かないかもしれません。そこで、様々な角度から圧力を考察できるような一連の課題を使用します。まず、圧力の物理的な定義を再確認し、日常生活での例を紹介しします。このような構成は、理解が不十分なことが多い概念に親しみやすい入り口を提供し、学習をより関連性のあるものにすることで生徒の動機を高めます。続いて、静水圧、圧力下での気体の圧縮性(ボイルの法則)、移動する流体の圧力(ベルヌーイの定理)の概念を、実際に体験しながら学習していきます。また、これらの原理が、海洋循環や海洋生物の適応進化など、海の諸過程にどのように関わっているかを紹介します。

背景

圧力(P)は、単位面積(A)に垂直な方向にかかる力(F)と定義され、以下のように記述されます：

$$P = \frac{F}{A}.$$

従って、圧力は、与えられた力が分配される面積に依存します。圧力はスカラーであるため、方向性がありません。圧力が物体全体で変化すると、圧力の高い方から低い方へと力が物体に作用します。一般的な圧力の単位はパスカル (Pa)であり、 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = \text{kg/m s}^2$ (N: ニュートン)です。海洋や大気に対しては、ポンド/平方インチ (psi)、バール (bar)、標準大気 (atm)などの単位も使われます。

日常的に目にする現象の中には、「圧力」を連想させるものがたくさんあります。風、鋭利な包丁や斧と鈍い包丁や斧の性能の違い、ストローを使った飲み方など、日常的に遭遇する現象の中にも圧力の概念が存在します。海面上の大気圧の大きさは105 Pa近くあります。私たちの身体には正味の力が加わっていないので、この圧力によって倒れることはありません(身体の中には等しい圧力が存在しています)。私たちの感覚は、絶対的な圧力を感知することはできませんが、圧力の変化を感知することができます(例えば、ダイビングや飛行の際に気体が充満した空洞内で発生する圧力の変化)。

学生の皆さんはあまり意識していないかもしれませんが、海でも大気でも、場所によって圧力は異なります。圧力の空間的な変化は、海流や風の原動力となります。例えば、貿易風は、通常は安定している東太平洋の高気圧域から西太平洋の

低気圧域に向かって吹いています。しかし、まだ十分に解明されていない理由により、これらの気圧配置は3~8年ごとに変化し、貿易風は弱まったり、逆になったりします。このような気圧の変化を「南方振動」と呼んでいます。南方振動に伴う赤道太平洋の海洋循環の変化は、エル・ニーニョと呼ばれる現象となり、世界的に深刻な影響を与えています。

海の圧力は、深さに対してほぼ直線的に増加します。様々な海洋生物は、特定の水深範囲での生活に適応しています。動物や他の生物の中の気体で満たされた空洞は、圧力によって圧縮されます(下記参照)。さらに、気体の溶解度は圧力によって影響を受け、人間や海洋生物の潜水生理機能に重要な影響を及ぼします。海洋生物は圧力の制約を受けるだけでなく、圧力を利用することもできます。例えば、土塁などの突起物の上を水が流れる際の圧力変化は、流れの速度を高め、懸濁物食性生物(フジツボなど)に餌を運んだり、土砂に生息する生物の巣穴に酸素を含んだ水を運んだりすることができます(下記参照)。

静水圧(静止状態の流体)

ある深さの海の圧力は、その上にある水柱と気柱の両方が及ぼす力(重さ)の結果です。この圧力は、静止している流体では、「静圧」または「静水圧」と呼ばれています。静水圧(P_h)は、流体の密度と液柱の高さ(深さ)の関数です。この関係は、静水圧方程式 $P = \rho g z$ で定義され、 ρ は深さ平均の密度、 g は重力加速度、 z は水柱の高さです(導出方法はBox 2.1を参照)。静力学方程式は、海洋循環の研究において中心的な役割を果たしています。例えば、地衡流(海洋循環やメキシコ湾流の環流)は、水平方向の圧力勾配とコリオリの加速度(地球の自転から生じる加速度)のバランスで決まります。静水圧の違いにより、流体(空気や水)の単位体積当たりの力は、圧力の高いところから低いところに向かって作用します。地球は自転しているため、流体の動きは高圧から低圧への「下り坂」ではなく(自転していない環境での流体の動きと同じ)、一定の圧力の線に沿った動きとなります。しかし、コリオリの効果が小さい赤道付近では、風や海流のほとんどが圧力勾配を下っていきます。

圧力と水深は同じ垂直座標を(一次的に)縮尺したものであるため、海中の一定水深の表面に沿った圧力の水平変化を正確に測定することは現実的ではありません。代わりに、海洋学者は力学的高さをを用いて、2つの等しい圧力基準点を選び、これらの基準点の上にある水柱の深さ方向に積分した密度を計算して比較しています。これらの2つの基準点は、等圧「面」(

BOX 2.1. 静水圧の計算方法

断面積 A 、深さ(高さ) z の水柱を想定すると、水柱の体積は Az になります。この水柱が任意の断面に及ぼす力 F は、 m を断面上の水の質量、 g を重力加速度とすると、 $F = \text{重量} = mg$ です。この質量は、密度 ρ (ここでは一定と仮定)と水の体積 V で簡潔に表すことができ、 $m = \rho V$ です。従って、 $F = \rho Vg$ となります。単位面積あたりの力(圧力) P は、 $P = \rho Vg/A = \rho(Az)g/A = \rho gz$ となります。なお、密度が深さによって変化する場合(海洋では通常1%以下の変化)は、密度(密度を深さ方向に積分し、水柱の深さで割って算出)ではなく、深さ平均密度を用います。流体の圧力を測定する際には、静力学の式が非常に便利です。圧力計(課題2.4)のような装置は、基準となる圧力(通常は大気圧)に対する圧力を測定するために使用されます。

圧力がどこでも同じである架空の面)上に位置していると仮定し、そのため、選択された深さでは水平方向の水の動きがないと仮定します。もし $\rho_1 \neq \rho_2$ (ρ_1 と ρ_2 はそれぞれ基準点1と2の深さ方向の積分密度)であれば、 z_1 と z_2 (基準点1と2の上の水柱の高さ)は異なるはずです。基準水深からの水柱の高さの違いは、海面勾配の計算に利用します。例えば、メキシコ湾流(幅約70 km)では、海面の高さは1 m以上低下します。計算された勾配は、地衡流の速度を推定するために必要な圧力勾配に比例します(例えば、http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter10/chapter10_04.htmの図10.7)。現在では、衛星海面高度計を用いて海面勾配を求めることができます。

静水圧については、他にも2つの重要なポイントがあります。1つ目は、流体を介した圧力の伝達です。流体の一部分に加えられた圧力は、流体全体に伝わります(パスカルの原理といいます)。流体内で圧力が変化したという情報は、音速(～1,500 m/s)の音波によって伝わりますが、私たちの実験室の環境(第3章の浮沈子など)では、これは一瞬のここのように思えます。水の入った風船を水中に沈めると、風船の外側の静水圧と内側の圧力が等しくなり、風船はその形と大きさを保つことができます。ダイビングで体に圧力を感じないのは、この原理によるものです(空洞を除く;後述)。液体による圧力の伝達は、油圧機器(ガソリンスタンドのカーリフト、油圧ジャッキ、重い荷物を持ち上げる建設機械など)に応用されている原理です。

気体の圧力下における圧縮性

海中では、10 mあたり1気圧(105 Pa)の割合で圧力が上昇します。そのため、深海に生息する生物や潜水する生物は、上にある水柱の重さによって大きな圧縮力を受けることになります。水と気体の主な違いは、水は非圧縮性の高い流体であるのに対し、気体は圧縮性があることです。一定量の気体の体積は、その中の圧力に反比例し(ボイルの法則と呼ばれる)、圧力が2倍になると気体の体積は半分に縮みます。人間の体はほとんどが水でできているので、水に潜っても大きく圧縮されることはありません。圧力を感じるのは、副鼻腔や耳、肺などの密閉された空洞部分だけです。プールで数メートル潜っただけで耳が痛くなるのはこのためです。水深の深いところに潜る海洋哺乳類は、肺などの空洞にダメージを与える可能性を克服するための適応策を身につけています。逆に、ボイルの法則は、水深が浅くなって圧力が下がると、気体が膨張して危険であることも示しています。水深10 m(全圧2気圧)で圧縮空気を吸って、息を止めたまま水面上がると、肺の中の空気は2倍の体積に膨張しようとしています。肺の中の空気は2倍に膨らもうとするので、一部の空気を逃がさないと肺が破裂してしまいます。同様に、多くの魚種は急激に浮上したら浮袋が損傷してしまいます。そのため、底に棲む魚の中には、鉛直方向の動きが制限され、漁具で引き上げられると死んでしまう種もいます。一方、浮袋の中の気体を急速に排出する経路を進化させているため、鉛直方向の動きに制限がない種もいます。

上の説明では、温度が一定であると仮定しました。沈んでいる物体の体積の変化に温度の変化がどのように影響するかを生徒に尋ねてみるとよいでしょう。理想気体の法則では、一定の体積の気体の場合、圧力は温度とともに増加します(ここでは、分子の運動エネルギーの議論が適しています)。しかし、海洋では、水深による温度の変化は、水深による圧力の変化(10 mごとに1気圧)よりもはるかに小さい範囲(水深全体でケルビン単位で約10 %)に留まります。したがって、気体で満たされた空洞の深さによる体積変化は、圧力に支配されます。

流体の加速:ベルヌーイの定理

流体の速度が変化すると、同時に圧力も変化します。流体の圧力と速度の関係は、ベルヌーイの定理(Box 2.2)と呼ばれ、エネルギー保存の法則やニュートンの第2法則($F = ma$)から導き出されます。海綿やホヤなどの懸濁物食性生物の多くは、周囲の水の流れを利用して揚水活動を補っているようです(Vogel, 1978)。例えば、埋没性のエビである*Callinassa filiholi*は、外部への開口部を囲むように大きな土塁を築きます。家の煙突の場合のように、土塁の上を通過する流れは(より小さい断面に対応するために)加速する必要があります。この加速と同時に、開口部の上の圧力が下がり、換気チューブ内に上昇気流が発生するのです。

活動内容

バレリーナが片足で立っている映像と、象が4足で立っている映像を見せて、どちらがより大きな圧力を床にかけているかを予想させることで、圧力についての議論を始めることがよくあります。(象の質量を6000 kg、バレリーナの質量を45kg、象の片足の半径を30cm、バレエシューズの先端の半径を1cmと仮定して)生徒に投票してもらい、圧力を計算してもらいます(力[F]は物体の重さ[質量と混同しないこと]に等しいことを思い出して下さい)。ここで、 m は質量、 g は重力加速度9.8 m/s²です)。

課題2.1と2.2では、圧力の概念をわかりやすく説明しています。静水圧は、課題2.3と2.4で示されます。これらの2つの課題は同じ原理に焦点を当てていますが、生徒たちはしばしば、両方の課題を行うことで静水圧の理解が大幅に向上したとコメントしています。生徒たちは、ある状況から別の状況に知識を移すことを「強制」され、その過程で自分の理解を再評価することになります。また、同じ原理を説明するために複数の課題を拜用することで、講師は評価の機会を増やすことができます。課題2.5と2.6は、圧力下における気体の圧縮性の概念を示すように設計されており、課題2.5は定性的な説明を、課題2.6はボイルの法則の定量的な説明を行います。ベルヌーイの定理を示すためには、課題2.7を用います。課題は、第1章で説明したように、ステーションに設置しますが、教室の実演で使用することもできます。

BOX 2.2. ベルヌーイの定理

粘性力が無視できる(摩擦損失がない)と仮定して、定常的に連続して動く非圧縮性の流体があるとします。このとき、いくつかのエネルギー形態が存在します。(1)流体の質量に関連する重力ポテンシャルエネルギー $E_p = mgz$, (2)流体の圧縮ポテンシャルエネルギー PV , そして(3)流体の速度に比例する機械的な運動エネルギー $E_k = mv^2/2$ です。全てのエネルギー形態の合計が全エネルギーです。エネルギー保存の法則から、流体に何の仕事もしなければ、流れの経路に沿った2つの点での総エネルギーは同じです。つまり、

$$m_1 \frac{v_1^2}{2} + m_1 gz + P_1 V_1 = m_2 \frac{v_2^2}{2} + m_2 gz + P_2 V_2.$$

z と密度が流れに沿って同じであれば(水平な管に同じ流体が流れている), 重力ポテンシャルエネルギーの項を無視することができます。さらに体積で割ると、以下の式が導出されます。

$$\rho_1 \frac{v_1^2}{2} + P_1 = \rho_2 \frac{v_2^2}{2} + P_2.$$

このように、流れに沿った速度の変化(加速度)は、圧力の変化に関係します。

ベルヌーイの定理は、空気力学の揚力の計算に大きな意味を持ち、飛行機(小型ジェット機のコックピット脇にあるピトー管)にも使われており、風で動く乗り物が風よりも速く進むことを可能にしています。

課題2.1. 釘のベッド(図2.1)

材料

- 正方形の木の板 2枚(同じ大きさ)。1枚の板には中央に釘を1本, もう1枚の板には釘を格子状に(15×15 本), それぞれ打っておきます。
- リングスタンド
- 同一の素材, 大きさ, 形状の風船
- 錘となるリング

リングをスタンドポールに沿って移動させたり, 風船に乗せたりするのに便利のように, リングスタンドポールに小さな透明なチューブを挿入します。ただし, 風船に乗せることができる重りであれば何でも構いません。

学生への指示

1. 風船をそれぞれの板の上に置き, ほぼ同じ力を加えたときにどうなるかを予想します。その理由を説明して下さい。
2. 自分の予想を検証します。

説明

風船を釘の上に置いたとき(図2.1左上), 掛かる力は大きな面積(風船に接触している全ての釘の頭の合計)に分散されます。その圧力は風船を破裂させるほどではありません(図2.1右上)。風船を1本の釘に乗せると, 弱い力でも風船が破裂します。これは, 力がより小さな面積(1本の釘に接触する面)に分散されるためで, 圧力が高くなると風船が破裂します(図2.1の右下)。釘の上に寝るとチクチクしても痛くないのに, 1本の釘を踏むと足に穴が開いてしまうことがあるのは同様の理由からです。まな板や斧を研ぐと切れ味が良くなるのも, 同じ理由からです。

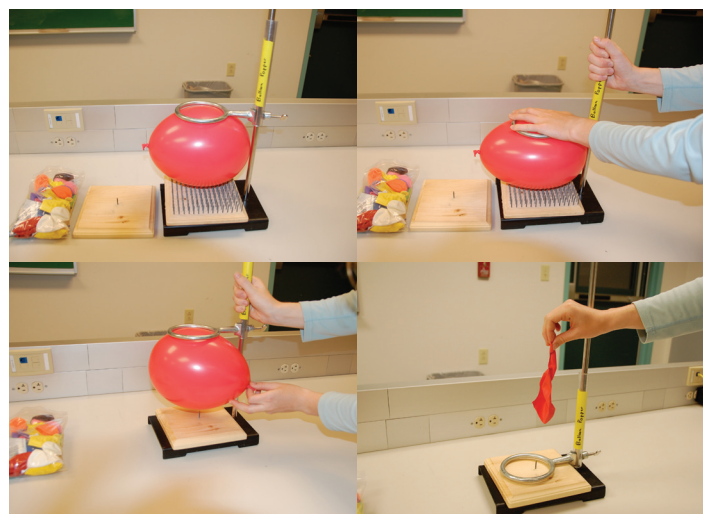


図2.1. 課題2.1の準備と, ベッド状の釘(上)と1本の釘(下)の実験。

課題2.2. 重さの認識(図2.2)

材料

- 大きな中空の鋼球(直径12.5 cm, 質量144 g; sciencekit.com)
- 小さな中空でない鋼球(直径3.2 cm, 質量129 g; sciencekit.com)
- 同じ大きさの漏斗 2個
- ボールの重さを測る天秤

学生への指示

1. 同時に2つの鋼球を手のひらに乗せます。どちらが重く感じますか?
2. ボランティアを1人選び, 目を閉じてもらいます。漏斗の中にそれぞれの鋼球を入れ, ボランティアにそれぞれの漏斗の襟元を持ってもらいます。どちらのボールが重いかを答えてもらい, その答えを記録します。別のボランティアにもこの実験を繰り返してもらいます。
3. 漏斗を持ったときの重さの感じ方は, 「フリーハンド」のときとは違いましたか? 何故ですか?
4. 鋼球の重さを測り, どちらが重いかを調べます。観察結果を説明して下さい。

説明

それぞれの鋼球を手のひらに乗せてみると, 大きな鋼球の方が小さな鋼球よりも軽く感じます。大きな鋼球が発揮する力($F = mg$)は, 小さな鋼球に比べて実際には大きいですが, より大きな面積に力が分散されるため, 圧力($P = F/A$)は小さくなり, 軽く感じられるのです。鋼球を漏斗に入れて襟元を持つと, 力が加わる表面積はどちらの鋼球の場合も同じになり, 大きな鋼球の方がわずかに重いことを天秤を使って確認できます。



図2.2. 課題2.2の資料(左)と実験(右)。

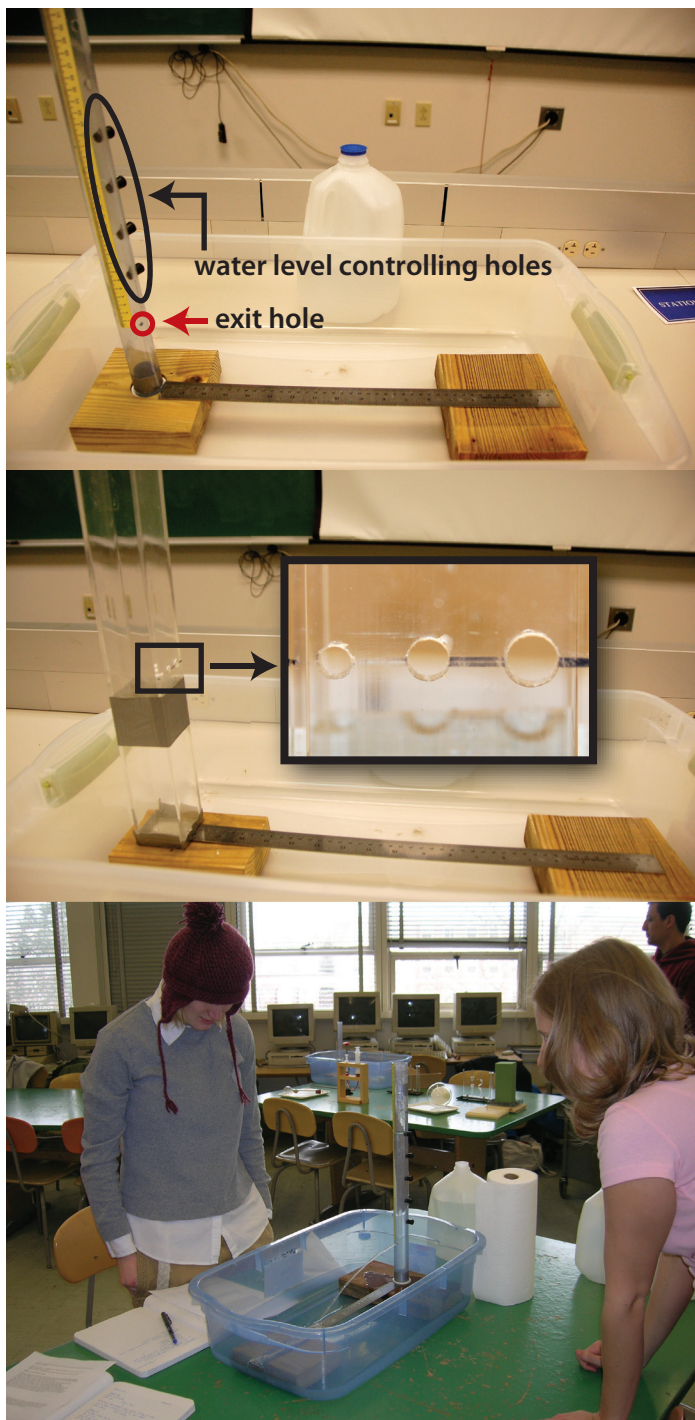


図2.3. 課題2.3の資料, パートA (上)とパートB (中)。パートAに取り組む生徒たち (下)。

課題2.3. 位置について, よーい, ドン! (図2.3)

材料

- 底面近くに小さな出口穴を1つ開け, それに沿って7つの大きな穴を開け, ゴム製のストッパーで塞いだパイプ (図2.3上)。穴の中心の間の距離は5 cm (変えても構いません)。2リットルのソーダ瓶の中央部分をテープで留めたものを使って, この課題の簡略版を行うことができます (Sharon Franks, UCSD, 私信, 2009年6月)。
- 同じ高さに3つの異なるサイズの穴を開けたパイプ (図2.3中)
- 大型水槽
- 定規
- 水を入れた水差し
- ペーパータオル

学生への指示

課題に先立ち, 静力学の方程式を復習させ, 以下のような指示を生徒に与えます (静力学の方程式についての議論は, 以下のパートAを行った後に行うのが効果的かも知れません)。

パートA

1. 底面近くに小さな出口穴が1つ, ゴム製のストッパーで塞がれた大きな穴がいくつかある管があります。下の出口の穴を指で覆い, 上の大きな穴の1つから水が流れ出るまで (穴からストッパーを外した後) 同時に管を満たすことで, 出口の穴から上の水柱の高さを固定することができます。定規が管の底に垂直に置かれていることを確認して下さい。
2. この装置を使う前に最初の大きな穴の高さ (底から) までチューブに水を入れ, 出口の穴から指を離すと, 何が起これると思いますか? あなたの予想を, 流体に働く力の観点から説明して下さい。出口の穴から出る水の高さを高くするとどうなると思いますか? 何故ですか?
3. 自分の予想を検証します。まず, 一番下の大きな穴からゴム栓を外します。同時に, 出口の小さな穴に指を掛けて, 栓のあった穴から水が流れ出るまで管内に水を入れます。定規を使って, 出口の穴の上的水柱の高さを測ります。次に, 出口の穴から指を離して水を出しながら, 出口の穴の上的水柱の高さが同じになるように, パイプに水を入れ続けます。最初に定規に当たったときの水の噴出し具合を確認して下さい。ストッパーを元に戻し, 次の4つの穴についても同じ手順を繰り返し, 1つずつ穴を埋めていきます。
4. それぞれの穴について, 水が定規に当たる距離を水柱の高さの関数としてプロットします。このデータは, 2での予想と一致していますか?
5. 穴が大きければ, 同じ穴でも水が進む距離は変わりますか? 何故ですか?

パートB

1. (直径の異なる3つの穴が開いている)2本目のパイプを手に取り、3つの穴を全て指で覆い、パイプの中に水を入れます。定規をパイプの底に垂直に置きます。穴を1つずつ開けていき、水が最初に定規に当たる距離を測ります。観察結果は、上記のパートAの5での推論と一致していますか？

この課題をさらに発展させて、貯水池の概念を説明することができます(入力と出力を持つ大きな貯水プールで、水の入力と出力の差によって高さ[体積]が変化します)。

説明

パートA

水柱の重さにより、出口の穴の高さで、水に圧力が掛かります(穴の高さでのチューブの断面積を想像して下さい)。この圧力は、穴の外の圧力(大気圧)に比べて高いため、指を離すと水が吹き出してきます。出口の穴の上にある水柱の高さが高くなると、出口の穴の内側と外側の圧力差が大きくなり、水がより遠くまで噴き出します。静水圧は、穴の上の水柱の高さに比例することを思い出して下さい(空気の圧力の寄与は穴の両側で同じです)。

パートB

(摩擦が重要になる)非常に小さな穴を除けば、穴の大きさによって水が進む距離が大きく変わることはありません。この問題を数学的に解決する方法(上級者向け)は、圧力($P = \rho gz$)を単位体積 V あたりの位置エネルギー($PE = mgz$, ここで m は質量)と考えることです。すると、 $PE/V = mgz/V = \rho gz$ となります。水柱から水が吹き出すと、そのエネルギーのほとんどが運動エネルギー($KE/V = \rho v^2/2$, ここで v は穴に垂直な方向の速度とする)に変換されます。エネルギー保存則から、 $\rho v^2/2 = \rho gz$, すなわち $v = \sqrt{2gz}$ となり、ある流体の速度、ひいては移動距離は、穴の大きさには関係なく、柱の高さ(z)の関数になることが分かります。

流体が噴出する距離は、力学を学んだ学生にはお馴染みの簡単な議論から予想できます。 H を地上からの穴の高さ、距離 $L = vt$ とすると、流体は穴を出てから $t = \sqrt{2H/g}$ 秒後に地上に到着します。実際には、穴の側面との摩擦や、地面に到達するまでに流体が通過する空気との摩擦により、距離は計算値よりも多少短くなります。

課題2.4. 圧力計と均圧管(図2.4)

材料

- U字型圧力計(金物店で入手可能な物品で制作:透明なプラスチック製の管を3つに切り分けたものと、管をつなぐためのエルボ(継手) 2個
- 水
- 油
- 平衡管1:異なる形状のアームを持つ平衡管 (sciencekit.com)
- 平衡管2:異なる直径のアームを持つ平衡管 (sciencekit.com)

学生への指示

この課題に先立ち、生徒たちはニュートンの第2法則を復習しました。この法則を流体に適用すると、他の力がない場合、流体は高圧から低圧に向かって流れることを意味します。

パートA

1. U字型の圧力計に水を入れるとどうなるか予想してみましょう。2本のアームの水位はどうなりますか?何故ですか?予想した圧力計の断面図をスケッチし、その理由を説明して下さい(ヒント:水が静止している(管に沿って流れていない)場合、各アームの底の間の圧力の違いについて何か言えますか?)。各アームの水位線がはっきり見えるようになるまで圧力計を満たし、観察結果と予想した結果を比較します。
2. 片方のアームに油(約5cmの層を作るのに十分な量)を入れると、それぞれのアームの液面はどうなると思いますか?その理由は?変化が予想される場合は、新しい平衡状態の定性的な図を描いて下さい。
3. 油を入れて下さい。観察結果は、あなたの予想と一致していますか?説明して下さい。

パートB

1. 異なる形状のアームを持つ平衡管(平衡管1)を使います。器具に水を部分的に入れたときに、それぞれのアームの水位が(他のアームと比べて)どのくらいになるかを予想して下さい。予想した内容を定性的に図示し、その理由を説明して下さい。
2. 自分の予想を検証して下さい。
3. 観察結果は、あなたの予想と一致していますか?そうでない場合、あなたの説明をどのように修正しますか?

パートC

- 異なる直径のアームを持つ平衡管(平衡管2)を使います。装置に水を入れたときに、それぞれのアームの水位が(他のアームと比べて)どのくらいになるかを予想して下さい。予想した内容を定性的に図示し、その理由を説明して下さい。
- 自分の予想を検証して下さい。
- 観察結果は、あなたの予想と一致していますか? そうでない場合、あなたの説明をどのように修正しますか?

説明

パートA

圧力計は、流体の高さに基づいて圧力を測定する装置です。最も形が単純な圧力計は、液体で満たされたU字型の管です。圧力計の各アーム内の水位は、気柱と水柱がアームの底に及ぼす圧力によって決まります。圧力計の一方のアームが満たされると、系が平衡に達して圧力計内に流れがなくなるまで、もう一方のアームに水が流れ込みます。つまり、両方の管の底部の圧力は等しくなります ($P_1 = P_2$, $P_1 = g\rho_{\text{water}}z_1 + P_{\text{air}}$, $P_2 = g\rho_{\text{water}}z_2 + P_{\text{air}}$, 従って $z_1 = z_2$)。このとき、両腕の水柱の高さは同じになります。一方のアームの水の上に油を加えると、マノメーターは新たな平衡状態に達します。つまり、 $P_1 = P_2$, $P_1 = g(\rho_{\text{water}}z_{\text{water1}} + \rho_{\text{oil}}z_{\text{oil}})$, $P_2 = g\rho_{\text{water}}z_{\text{water2}}$ となります。 $\rho_{\text{oil}} < \rho_{\text{water}}$ なので、水と油を入れたアームの液柱は、水だけを入れたアームの液柱よりも高くなければなりません(両者の気圧は同じ)。

この課題は、海面の傾斜を計算するために力学的高さを使った手法や、積算密度と水柱の高さの関係を調べる際の例えとして引き合いに出すことができます。U字型の装置の底面は、水が動いていない基準高に相当します。油と水の境界線よ

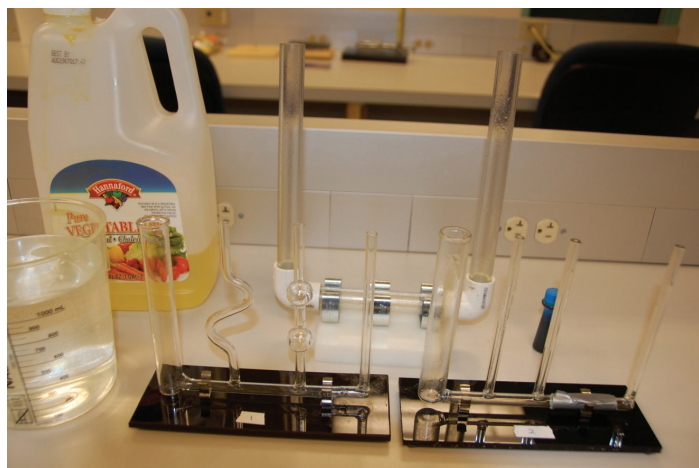


図2.4. 課題2.4で使用した材料。背景に見えるのは、U字型の圧力計 (パートA)。手前にあるのは、異なる形状のアームを持つ平衡管(左)と、異なる直径のアームを持つ平衡管 (右)。

り上のどの高さでも、装置の2つのアームの間には圧力差が存在します(従って、底よりも上でアームを接続した場合、系が新たな平衡に達するまで、流体は油と水を含むアームから水だけを含むアームに流れます)。

パートB

圧力計のアームの形状や断面積は、水位に影響しません。各アーム内の水(またはその他の流体)の柱の高さは、圧力と流体の密度 ($z = P/\rho g$) の関数です。したがって、流体が柱に導入され、系が平衡状態に達した後は、各アームの底部の圧力は等しくなり(流れがない)、水の高さは、その形状にかかわらず、各アームで同じになります。この観察により、ある深さの圧力がプールでも湖でも同じ圧力になる理由が説明できます(プールと湖の上の大気圧が同じだと仮定した場合)。

パートC

同じ原理が、直径の異なるアームを持つ平衡管にも当てはまります。水柱の高さは各アームで同じになります。唯一の例外は、平衡管2の最も細い腕の部分で、ここでは別の力が重要になります。ガラスの縁の表面張力が、水をより高い位置に引き上げるように作用するのです(この観察は、表面張力と毛細管現象に焦点を当てた別の授業につながるパズルとして使用することができます)。

課題2.5.縮む風船(図2.5)

材料

- 食品を保存するための真空容器(台所用品店などで販売)
- 圧力装置(2リットルのソーダ瓶に手動ポンプを取り付けたもの。ソーダ瓶の炭酸維持に使用され、多くの食料品店で手に入る)
- 同じ大きさの2つの風船(1つには空気、もう1つには水を入れる)。
- マシュマロ(“Peeps”は学生のお気に入り)とその他の実験対象物(みかん、プチトマトなど)

学生への指示

1. それぞれの風船の圧力が下がったときの影響を予想します。
2. 空気の入った風船を真空容器に入れ、手動ポンプを使って容器内の空気を抜きます。風船はどうなりますか?バルブを解放して、容器の中に空気を戻します。風船はどうなりますか?
3. 水を入れた風船を使って、この実験を繰り返します。圧力の影響は2つの風船で異なりますか?何故ですか?

- あなたの観察に基づくと、容器を真空にしたときにマシュマロ(及びその他の実験対象物)はどうなると思いますか？
- 自分の予想を検証して下さい。
- バルブを開放し、マシュマロを観察します。観察結果を説明して下さい。
- 2つ目の圧力装置を調べます。この装置の中で空気を入れた風船の挙動についての観察結果を、真空容器の中で空気を入れた風船の挙動と比較・対照してみてください。この装置と真空容器の違いは何ですか？

以下のことに挑戦してみましょう。

- 空気の入った風船をソーダ瓶に入れるには？
- この装置を使って、空気に重さがあることをどのように証明できるでしょうか。

説明

真空容器から空気を抜くときのように、空洞を持つ物体は、周囲の圧力が下がると膨張します(図2.5左上図)。水は大部分が非圧縮性の流体であるため、水の入った風船の大きさは、低圧の時と大気圧の時で同じになります。プチトマトには空洞がないので、水風船と同じような挙動をします。一方、みかんやマシュマロには空洞があるので、真空状態にすると膨らみます。バルブを離すと、容器内に空気が戻り、圧力が高まり(大気圧になるまで)、みかんやマシュマロは縮みませんが、その過程で素材の構造が変化していくので、必ずしも元の大きさにはなりません(例えば、マシュマロの空洞は合体します)。

ソーダ瓶に空気を入れて加圧すると、風船の周囲の圧力が高まり、風船が縮んで体積が小さくなります(内圧が上昇します。図2.5の右下と左下を参照)。圧力バルブを解放すると、空気の入った風船は元の大きさに戻ります。

挑戦: 空気の入った風船をボトルに挿入するには、風船の開口部をボトルの開口部の周りに置き、風船とボトルの壁の間にストローを挿入するためのわずかなスペースを残します。風船に息を吹き込むと、ボトル内の空気がストローを通して外に逃げ、風船が膨らみます。小さな結び目を作って、風船を瓶の中に押し込みます。この装置を使って、大気圧下で瓶の重さを量り、その後、瓶の中に空気を入れて再び重さを量ることで、空気に無視できない質量があることを示すことができます(質量はgで割って求めますが、これは天秤に搭載されたコンピュータチップが自動的に行ってくれます)。



図2.5. (上) 課題2.5の材料。(中) 空気を入れた真空容器のテスト。(下) 大気圧下での空気入り風船(左)と、ボトルに空気を送り込んだ後(圧力が上がった状態、右)。

課題2.6.気体の圧縮性(図2.6)

材料

- 気体の圧縮性を測定する装置(Arbor Scientific社製、または自家製のものでも簡単に組み立てられます。密閉された60 mlのシリンジの断面積は1平方インチです)。
- 質量の分かっている重り(ここでは2.5ポンドのバーベルの重りを使用しています)。

学生への指示

1. 大気圧の条件下で、シリンジ内の空気の体積を記録します。
2. 装置の上に2.5ポンドの重りを置くと、注射器の中の空気の体積はどうなると思いますか？注射器内の圧力はどのくらいですか？
3. 重りを追加し続けると、注射器の中の空気の体積はどうなりますか？15ポンドの重りを乗せるまでに何パーセント変化しますか？
4. あなたの予想を検証して下さい。注射器の上部に2.5ポンドの重りを置き、空気の体積を記録します。追加の重り(合計5ポンド、10ポンド、15ポンド)を置き、追加した質量ごとに空気量の変化を記録します。何が観察されましたか？
5. 付加質量とシリンジ内の空気の体積をプロットします。体積は付加質量にどのように依存しますか？あなたの予想と一致していますか？空気を圧縮すると、温度の変化を感じますか？期待すべきでしょうか？
6. 注射器にすべての重り(15ポンド。注射器の断面は～1平方インチであることに注意)を乗せたとき、大気圧(地表の1平方インチに14.7ポンドの質量がかかる圧力)と比べて、注射器内の圧力は何パーセント増加しましたか？15ポンドの重りを加えたとき、(温度は変化しないと仮定して)注射器の体積は何パーセント変化しましたか？
7. あなたのデータを使うと、フリーダイバーが10 mまで潜ったときの肺の容積はどのように変化すると思いますか？圧力は10 mごとに1気圧ずつ増加します)。

注:この設定に適したメートル法の重りを見つけるのは困難です。この活動は、単位変換の練習にもなります。

説明

この課題では、通常の大気圧下では、シリンジ内の空気の体積は46 mlです。温度 T が一定の理想気体では、気体の体積 V は気体にかかる圧力に反比例して変化します(ボイルの法則: 温度が一定の条件下では、圧力 P と気体の体積 V の積は一定。つまり、 $PV = \text{一定}$ 、 $P = \text{一定}/V$)。従って、重りの追加(圧力の増加)により、注射器内の空気の体積は減少します。注射器に15ポンドの質量を加えると、圧力は(通常の大気圧に比べて)約2倍になり、ボイルの法則から予想されるように、注射器内の空気の体積は半分になります。同様に、フリーダイバーが水深10 mまで潜ると、体感圧力は水面に比べて2倍になります。その結果、肺の容積は半分になります。注射器の中の気体は、圧縮されることで加熱されると思われますが、室内との温度交換ではほとんど変化しないため、温度が一定であるという仮定が成り立ちます。この課題は、日常生活ではほとんど意識することのない大気の重さをよく実証しています。



図2.6. (上) 課題2.6の材料。(下) 上に15ポンドの重りを載せた装置。

課題2.7

ベルヌーイの定理を示すために、生徒に長いビニール袋(ベルヌーイバッグ; Arbor Scientific; 図2.7)を渡します。一人の生徒には袋の開いた方を、もう一人の生徒には閉じた方を持ってもらい、床と平行になるように水平に持ってもらいます。そして、1回の空気の噴出だけで袋を満たすことができるかどうかを尋ねます。多くの生徒は、袋を唇に当てて、何度も息を吹き込んでしまう傾向にあります(図2.7上段)。もっと効果的な方法は、袋の開口部に遠くから息を吹き込むことです(図2.7下段)。そうすると、開口部付近に速度の速い低圧領域ができます。この局所的な低圧によって、圧力の高い周囲の大気から空気が取り込まれ、すべての空気が袋の中に急速に流れ込みます。袋には弾力性がないので、(満杯でなければ)噴出した空気に対する抵抗はほとんどありません。

参考文献と推薦図書

- Denny, M.W. 1993. Chapters 3 and 4 in *Air and Water*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Faber, T.E. 1995. Chapter 1 in *Fluid Dynamics for Physicists*, Cambridge University Press.
- Hewitt, P.G. 2008. Chapter 7 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Addison Wesley.
- Richardson, D., ed. 2005. *The Encyclopedia of Recreational Diving*, 3rd ed. PADI, Santa Margarita, CA.
- Vogel, S. 1996. Chapters 3 and 4 in *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 484 pp.

その他の出典

- Sorbján, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society, Washington, DC. 気象学の概念に基づいて設計された実践的な実験集。第3章では「圧力」を取り上げています。実験に加えて、歴史的な物語、重要な発見への言及、有名な科学者や悪名高い科学者の物語などが含まれています。
- Julius Sumner Miller - Physics - Bernoulli: ベルヌーイの定理の一連の実演を収録したYouTube動画です。
- Part 1: <http://www.youtube.com/watch?v=KCcZyW-6-5o>
- Part 2: <http://www.youtube.com/watch?v=wwuffpiYxQU&feature=related>



図2.7. (上) 袋を唇に当てて充填しようとする生徒。(下) 袋の開口部を大きく開けておき、開口部に向かって遠くから息を吹きかけると、一吹き of 空気で袋を満たすことができる。

矛盾した事象：学生の好奇心を呼び覚ます

生徒の注意を引き、考えを喚起し、探究心を起こさせるために、教育者は時々、矛盾した事象を利用します(Hassard, 2005; Chiappetta and Koballa, 2006)。このような事象は驚きをもたらし、生徒は「何が起きているのだろう」と疑問に思います。矛盾した事象の例として、課題 2.2 があります。生徒は小さい鋼球の方が「重い」と感じていましたが、それぞれの鋼球の質量を測定したところ、大きい鋼球の方が重いことを発見して驚きました。この発見は、圧力と重量の概念を再考するきっかけとなり、力と圧力(単位面積当たりの力)の違いを理解するのに役立ちます。様々な科学の概念に関連する矛盾した事象の概要は、インターネットや科学教育の教材で簡単に入手できます。例えば、Liem (1987) は、小学生から大学生までの理科教育のために、スケッチ、質問、説明のついた簡単な材料を使った400以上の矛盾した事象をまとめています。

効果的な矛盾した事象は、指示をほとんど必要としません。例えば、授業開始時に、講師が2リットルの透明なソーダの空き瓶にお湯を静かに4分の1ほど入れ、数秒間お湯を振り回して瓶全体を温めた後、瓶からお湯を注ぎ、キャップをしっかりとねじ込み、生徒の目の届くところに瓶を置いておきます。講師がロールプレイをしている間に、ボトルは何箇所か内側につぶれていきます。すると、生徒たちは興味津々で、ボトルや水について質問を始めます。講師は、生徒が質問したり、ボトルがつぶれた原因について仮説を立てたりしているうちに、理想気体の法則や、温度・圧力・体積の関係についての議論に発展させることができます。

予期せぬ出来事という形で生徒にパズルを提示することで、知識や直感に基づく先入観に挑戦し、好奇心を刺激し、解決策を見出そうとする動機を高めることができます。探究心が発見につながる過程で、生徒は新たなレベルの認知的理解に到達し、より優れた問題解決能力を身につけることができます(Piaget, 1971)。具体的には、映画、出来事の説明、野外での観察(例えば、岩石の逆磁力)などで、興味深いパラドックスを提示することができます。矛盾した事象は、特定の教育的目標を達成するために使用することができます。授業を開始して生徒の注意を引き、生徒から質問を引き出し、生徒の誤解を特定して対処

し、授業終了後も生徒に過程や問題について考え続けさせ、生徒が似ているが予想外の現象を説明するために学んだことを適用できるかどうかを検証し、正式な授業評価の一部として使用することができます。矛盾した事象が提示された場合、生徒がその事象について考え、議論し、説明しようとする十分な時間を確保することが重要です。

参考文献

- Chiappetta, E.L., and T.R. Koballa Jr. 2006. *Science Instruction in the Middle and Secondary Schools: Developing Fundamental Knowledge and Skills for Teaching*, 3rd ed. Pearson/Merrill Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 320 pp.
- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science*. Oxford University Press, 496 pp.
- Liem, T.L. 1987. *Invitations to Science Inquiry*, 2nd ed. Science Inquiry Enterprise, Chino Hills, CA, 488 pp.
- Piaget, J. 1971. *Biology and Knowledge*. University of Chicago Press, Chicago, IL.

第3章. 浮力

本章の狙い

この課題は、浮力の基本的な原理を理解してもらうために作られました。ほとんどの生徒は、浮力という言葉聞いたことがあり、海やプール、お風呂に入るときに浮力を感じたことがあるでしょう。アルキメデスの原理を暗記している人もいます。しかし、これまでの経験から、浮力に関する問題を問われると、生徒はしばしば苦戦することが分かっています。ワシントン大学で行われた研究によると、多くの理工系専攻の学生は、(標準的な指導方法である)静力学を教える物理学入門の授業を受けても浮力を理解しておらず、さまざまな物体の浮き沈みを予想したり説明したりすることができないという結果が出ています (Loverude et al., 2003)。

浮力の導入は、密度(第1章)と圧力(第2章)の実験を終えた後に行います。密度の実験では、さまざまな物体の密度に応じた沈み方や浮き方を調べましたが、その原理については調べませんでした。ここでは、前2回の授業で学んだことを応用して、沈む・浮くの原理をさらに探っていきます。

背景

物体が流体に浸されると、流体は物体のために「場所を空ける」ように変位します。例えば、バスタブに入ると水位が上がります。物体が完全に水没したときに移動する水の量は、物体自身の体積と同じです(例えば、課題1.3の岩石の体積の測定を思い出して下さい)。水に浸かった物体には2つの力がかかります。(1)下向きの力-重力(物体の質量が大きいほど大きくなる)と、(2)上向きの力-浮力(流体の密度が大きいほど大きくなる)です。下向きの重力が上向きの浮力よりも大きい場合は沈み、そうでない場合は浮きます。

浮力は、流体が物体に与える圧力の不均衡から生じます。圧力は深さに比例して増加するため、浸された物体の底部は上部よりも高い圧力を受け、物体は上向きの力を受けます。その結果、上向きの力は押し出された流体の重さと同じになります(アルキメデスの原理)。空気中の物体の重さが液体の重さよりも大きければ沈み、小さければ浮くことになります。

数学的には、この2つの相反する力(ニュートンの第2法則に基づいて)次のように書くことができます。

$$F_{\text{bouyancy}} = m_{\text{fluid}} g = \rho_{\text{fluid}} V_{\text{displaced}} g$$

and

$$F_{\text{gravity}} = m_{\text{object}} g = \rho_{\text{object}} V_{\text{object}} g.$$

ここで、 m_{fluid} と m_{object} は置換された流体と物体の質量、 g は重力加速度定数、 ρ_{fluid} と ρ_{object} は流体と物体の密度、 $V_{\text{displaced}}$ と V_{object} は置換された水と物体の体積を表します。物体が完全に浸かっている場合、 $V_{\text{displaced}} = V_{\text{object}}$ となります。密度の定義から、 $m = \rho V$ を思い出して下さい。

この2つの力の差によって、物体が沈むのか、浮くのか、中性浮力を保つのかが決まります。

$$\Delta F = F_{\text{gravity}} - F_{\text{bouyancy}} = V_{\text{object}} g (\rho_{\text{object}} - \rho_{\text{fluid}})$$

ここで、 $\Delta F > 0$ のとき物体は沈み、 $\Delta F < 0$ のとき物体は浮きます。そして、 $\Delta F = 0$ のとき、物体はその深さに留まります(中性浮力、つまり $\rho_{\text{object}} = \rho_{\text{fluid}}$)。つまり、木でも鉄でもコンクリートでも、船を浮かせるためには、船そのものよりも重い水の量を排出させることが重要なのです。

海洋への応用

浮力は、海洋力学における4つの主要な力のうちの1つであり(他の3つは重力、風応力、摩擦)、浮力を理解することは、密度によって駆動される循環を理解する上で重要です。例えば、海洋の大規模な熱塩循環は、高緯度と低緯度の水温差に起因する浮力の緯度差に起因しています。冷却と蒸発は海水の密度を高めるため、これらの条件を受けた表層水は浮力が小さくなり、沈む傾向にあります。一方、地球温暖化や降水は海水の密度を低下させるため、これらの条件を受けた表層水は浮力が大きくなり、海面に浮く傾向があります。

物体が海水やマグマなどの液体中に浮く高さは、物体が受ける重力と浮力のバランスによって決まります。例えば、地球の地殻プレートは、アセノスフェア(岩流圏)の上に平衡状態(「アイソスタシー」(地殻平衡)と呼ばれる浮力平衡)で浮かんでいます。浮力の均衡が崩れると、新たな浮力の均衡に達するまで、物体は沈んだり浮かんだりします。この過程を「アイソスタティック・レベリング」と呼びます。アイソスタティック・レベリングの影響は、形成されたばかりの地殻が冷えて下の海嶺に重さを加えている(重力の力が大きくなっている)海洋中央部の海嶺付近や、最近大きな氷河が溶けた(重力の力が小さくなっている)大陸プレート上で見ることができます。地殻プレートの浮力平衡の変化は、そのプレートに関連する海岸に沿って海面の相対的な上昇または下降を引き起こします。

多くの海洋生物は、浮力の調整という課題に直面しています。蛋白質、結合組織、骨格、貝殻などは、いずれも海水の密度よりも高い密度を持っています。体内密度の高い生物は、最適

な成長領域よりも下に沈んだり(例えば、植物プランクトンは光合成領域よりも下に沈みます)、圧力、光、温度の変化にさらされたりします。このような問題に対処するため、海洋生物は浮力を制御するための様々な戦略をとってきました。例えば、重いイオンと軽いイオンの選択的交換、脂肪や脂質の蓄積、気体を充填した空洞の利用などが挙げられます。

また、浮力は、ボート、船舶、潜水艦、自律型水中ロボット(AUV)などの設計においても基本的な原理であり、AUVは海洋技術・探査の最先端を担っています。自律型のグライダーやフロートは、温度、塩分、光学などのさまざまなセンサーを搭載し、体積を変化させることで浮力を変化させ、水柱内を上下に移動します。内部の非圧縮性タンクと外部の膨張性浮袋の間で流体を交換するのが動作原理です。この浮力調整方法を採用したフロートのイラストは、http://www.argo.ucsd.edu/FrHow_Argo_floats.htmlを参照して下さい。

課題内容の説明

この授業では、まず、水に浸かった物体に働く力について簡単に紹介または復習し、その後、生徒は小グループに分かれて以下の課題を行います。2つの課題(3.1と3.2)はアルキメデスの原理を定量的に表したもので、生徒は物体の質量、それが移動する体積の質量(浮力に比例)、そして沈むか浮くかの挙動の関係を探ります。生徒には両方の活動を行ってもらいます(順番は問いません)。これにより、浮力の原理を強化し、ある状況で学んだ知識を別の状況に移植する練習をし、理解度を確認することができます。他の2つの課題(3.3と3.4)は、私たちが「オープンな探究」と呼んでいるもので、生徒はあまり指導を受けずに、密度と圧力に関する前の授業(本書の1章と2章)で学んだ知識を統合して応用し、与えられた現象を説明してフロートを作ることが求められます。水生環境への応用については、授業の最後に行われる復習と議論のセッションで議論されます。課題は、1章と同様、ステーションに設置します。

課題3.1. 助けて!(図3.1)

材料

- アルキメデスの箱(1cmごとに横方向のグラデーションマークがついている箱)
- ばねばかり
- 5gと10gの重り
- 水の入った容器
- リングスタンド
- 定規
- はかり

注:専用ボックス、ばねばかり、重りは全てsciencekit.comから入手しました。

学生への指示

1. 箱が貨物船だと仮定します。乗組員であるあなたは、船を沈めずに積める最大の貨物重量(g)を決める必要があります。最大積載量の時点では、箱(船)は完全に沈んでいます、ギリギリまで沈んでいて、上部が水面に触れている状態です。浮力とアルキメデスの原理について知っていることに基づいて、あなたはどのようにして最大積載量を決定しますか?その理由を説明して下さい(ヒント:空気中と水中[完全に浸かっている状態]での物体の重量と、置換される水の体積について考えてみて下さい。予想に役立つ測定値を得るために、ばねばかりと定規を使用して下さい。ばねばかりは、リングスタンドに取り付け、フックで箱を固定して使用します)。
2. 予想した最大量の荷物を箱(船)に入れて蓋を閉め、水の入った容器の中に積んだ船を入れて、完全に浸かっているが沈んでいないかどうかを観察して、予想を検証します。

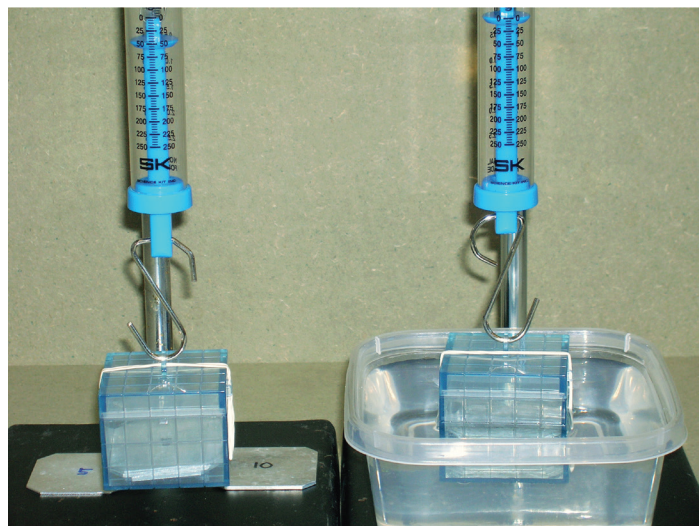


図3.1. 課題3.1の空気中(左、机の上に2つの重りを置いた状態)と水中(右)の実験装置。

3. 予想が正しかった場合、空気中での船と貨物の質量は？水中での船と貨物の質量は？置換された水の体積と質量はどのくらいですか？
4. 予想が外れた場合(ボートが沈んだり、水面に浮かんだりした場合は、予想を修正して再度検証します。
5. 最大許容貨物重量が分かったら、貨物に25 gを追加して、箱を水に入れます。あなたの船はどうなりますか？何故ですか？
6. 空気中の船と貨物の新しい重量は？水中での船と貨物の重さを予想して下さい。ばねばかりを使って、水中での船と貨物の重さを測ります。測定値はあなたの予想と一致していますか？
7. 置換された水の重さは？空気中の船と貨物の重さと水中の船と貨物の重さと比べるとどうですか？
8. 水の中に沈んだものが軽く感じる理由を説明できますか？

講師の方へ：アルキメデスの原理に基づいて最大貨物量を予想するのに苦労している生徒には、次のようないくつかのステップで問題に取り組むことを提案して下さい。

1. 重りのない状態の箱の質量と体積を測り、計算します。25 g単位で重りを追加します。追加する度に測定します。
 - a. 水の外での箱の重さ(ばねばかりを使用)
 - b. 水中での箱の重さ
 - c. 箱の、水に浸かっている部分の高さ(箱の各マークは1 cm)。

それぞれの増量ごとに、箱によって置換された水の体積を計算します。

2. 水に浸した箱の部分の高さを、箱に加えた重りの関数としてプロットします。箱と重り(空気中)の質量と、移動した体積の間に何かパターンがありますか？それぞれのケースで、水中の箱の重さはどのくらいですか？

これらのステップを終えたら、上記のステップ3～4を行ってもらいます。

説明

この活動で使用する箱は、底面が $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} = 25\text{ cm}^2$ で、高さが4 cmです。従って、その体積は 100 cm^3 (蓋を含む)です。空の箱の重さは25 gなので、密度は 0.25 g/cm^3 です。箱が完全に沈むと、箱の体積(100 cm^3)分の水が出てくるので、出てきた水の重さは 100 g ($1\text{ cm}^3 \doteq 1\text{ g}$)となります。アルキメデスの原理により、箱が沈んでもいないし、浮いてもいないときは、 $F_{\text{buoyancy}} = F_{\text{gravity}}$ となり、 $F_{\text{buoyancy}} = \rho_{\text{water}} V_{\text{displaced}} g$ となります。このとき、 ρ_{water} と g は一定なので、 F_{buoyancy} は変位量に比例します。箱を沈めずに追加できる最大の質量は75 gです($m_{\text{box}} + m_{\text{weights}} = 25\text{ g} + 75\text{ g} = 100\text{ g}$)。箱がほとんど浮いていない状態では、 F_{gravity} は F_{buoyancy} と等しくなります($F_{\text{gravity}} = mg$ を思い出して下さい)。

この課題を25 g単位で少しずつ行っていくと、下の表のように、空気中の物体の質量、置換された水の量(浸水深)、水中の物体の見かけの質量の関係を詳しく調べることができます。

添加質量 (g)	空気中の 総重量(箱 + 重り) (g)	水中の重 量 (g)	浸水深 (cm)	置換した 水の容積 (cm^3)
0	25	0	1	25
25	50	0	2	50
50	75	0	3	75
75	100	0	4	100

アルキメデスの原理により、箱の重さが浮いた水の重さを上回ると、箱は沈みます。従って、さらに25 gを加えて、箱+空気中の重りの合計質量を125 gにすると、置き換えられた体積の質量(100 g)よりも大きくなり、「船」は沈みます。水中の箱+重りの重さは25 gで、これは重力と浮力の差に比例します。

g は一定なので、箱と水の質量だけを考えますが、質量と重さを混同してはいけないことを生徒に強調します(重さ = mg)。また、浮いている物体の場合と沈んでいる物体の場合の違いを生徒に明示的に説明することも重要です。どちらの場合も、浮力の大きさは、移動する水の質量に等しくなります。しかし、浮いている物体の場合、移動する体積(浮力)は、物体の重さを流体の密度で割った値で決まり、完全に沈んでいる物体の場合、移動する体積は物体の体積で決まります(密度は関係ありません)。

課題3.2. アルキメデス・ボール(図3.2)

材料

- アルキメデス・ボール(sciencekit.com)
- 60 ml注射器
- チューブ(パイプ)
- はかり
- キャリパー
- 水の入った容器
- 「未知の液体」と表示された糖液入りの容器

学生への指示

1. プラスチックボールを潜水艦とします。潜水艦が中性浮力を持つように、ストッパーだけが水面上に来るようにしたいとします。中性浮力を得るためには、どのくらいのバラスト水を入れればよいかを計算して下さい。ヒント：どこから手をつけていいかわからない場合は、潜水艦と、水に浸かっているときに働く力を描いてみましょう)。



図3.2. 課題3.2のための装置。

2. 水の入った容器にボールを入れ、注射器で真水を吸い込んで、予想(計算)を確認します。注射器のマークは、ボールに加えられる水の量を示しています。実験で得られた体積は、計算結果と一致していますか？
3. 未知の液体の中に「潜水艦」を入れ、潜水艦が中性浮力になるまで未知の液体を引き込みます。未知のバラスト液を吸い込むのに必要だった量から、未知の液体の密度は淡水の密度と比べてどうだと考えますか？

説明

この活動で使用するボールの密度は 0.7 g/cm^3 で、水の密度 (1 g/cm^3)よりも小さいため、ボールは浮きます。ボールの体積は一定なので、この「潜水艦」を中性浮力(完全に沈んだ状態)にするには、注射器で空気を抜いて水に置き換え、質量を加えるしかありません。このボールの質量は 124.5 g 、体積は 176 cm^3 です。ボールが完全に沈むと、 176 g の重さの水 $176 \text{ ml (cm}^3)$ が排出されます。従って、ボールの密度を水の密度と同じにする(つまり、ボールを中性浮力にする)ためには、約 52 g (約 52 ml)の水道水を加える必要があります。「未知の液体」の中にボールを入れてみると、中性浮力を得るために必要な水の量が多いことがわかります。これは、未知の溶液(例えば砂糖水)が真水よりも密度が高く、潜水艦に働く浮力が大きくなることを示しています。

課題3.3. フロートを設計する(図3.3)

材料

- 真水や塩水を入れた容器
- 2つのビーカーまたは深めの水槽
- フィルム容器または小型のガラス瓶
- 重り(ワッシャー、小銭など)
- その他の雑貨: 風船、輪ゴム、テープ、飲料用ストロー、水槽用プラスチックチューブ、グルーガンと接着剤、ペーパークリップ、ダクトテープ、プチプチ、パイプクリーナー、注射器、コルク、緩衝材(全てが必要というわけではなく、これらはあくまでも例です)。
- はかり
- キャリパーまたは定規
- グラデュエーション・シリンダー
- 成層流体のある水槽(海水・淡水)

注: 水槽内の塩水は、冒頭で紹介した塩水の容器と同じものを使用して下さい。

学生への指示

あなたは、メイン湾の様々な流体力学的特性(例えば温度、塩分)や生物地球化学的特性(例えば酸素、クロロフィル蛍光、濁度)を測定するセンサー(ワッシャー)を搭載する2つの自律型フロートを設計するよう求められています。1つのフロートは海面を漂うことができ、キャップの上部が水面のすぐ上に来る

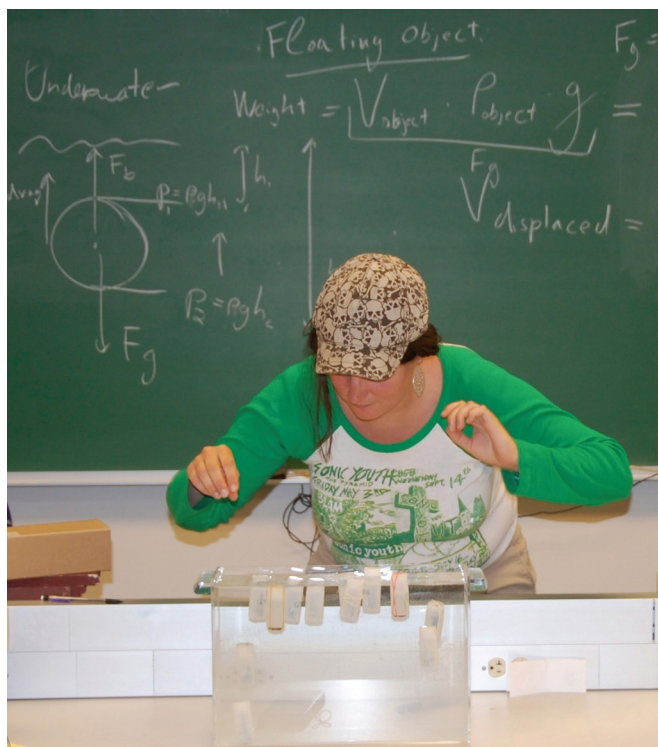


図3.3. 課題3.3を検証している学生が、成層水槽に「浮かんで」いる様子。

ように浮く必要があります。もう1つのフロートは密度躍層(密度が最も変化する場所)で水槽の底に触れないように浮かせます。

あなたの最初の目標は、概念実証としてフロートの試作品を設計し、プログラマナー(クラスメート)に提示することです。あなたの手元には、表面水(淡水)と深層水(塩水)の入ったバケツがあります。発表では、フロートの設計と、沈むか浮くかを判断するための方法について説明して下さい。授業の最後には、成層した水槽の中で、あなたの試作品の1つが実際に水面に留まり、もう1つが密度躍層に浮かんでいることを証明してもらいます。

説明

この課題は、授業に健全な競争心を持ち込むために使用します。私たちの経験では、ほとんどの生徒は最初にこの問題を試行錯誤します。そこで私たちは、アルキメデスの原理を使ってこの問題に取り組むよう、質問を使って促します。授業の最後に、グループでの議論の一環として、各チームは成層水の入った大きな水槽でフロートを試します(生徒が容器に使ったのと同じ塩水を使うようにして下さい)。

課題3.4. 浮沈子(図3.4)

フランスの哲学者、数学者、科学者であるルネ・デカルトにちなんで名付けられた古典的な科学実験です。この実験では、浮力(アルキメデスの原理)と気体の圧力と体積の関係(理想気体の法則)が示されます。

材料

- 水道水(色付きのものがよい)を入れた炭酸水のペットボトル
- 金属製のナットやワッシャーが付いたプラスチックピペット

注:浮沈子の作り方については、例えば<http://www.raft.net/ideas/Pipette%20Diver.pdf>を参照して下さい。

学生への指示

1. ボトルを絞ります。瓶の中で半閉鎖ピペットが沈むのは何故ですか?ボトルを離すとピペットが上昇するのは何故ですか?
2. ピペットの挙動を圧力とアルキメデスの原理の観点から説明して下さい。

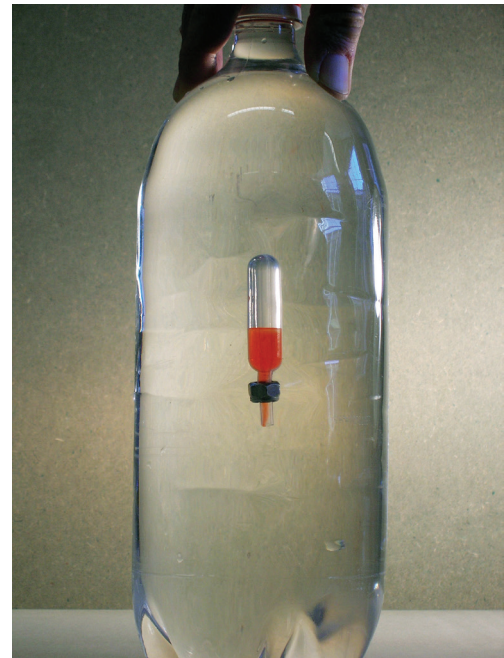


図3.4. 浮沈子。

説明

パスカルの法則によれば、流体に加えられた圧力は流体全体に伝わります。ボトルを絞ると、ボトル内の圧力が高まり、その中にある開放ピペットの圧力も高まります。瓶の中のピペットには空気が入っています。圧力の上昇により、ピペット内に閉じ込められていた空気の体積が減少し、ピペット内で水が上昇して空気の一部と入れ替わります(理想気体の法則を思い出して下さい)。ここで、 P は圧力、 V は体積、 n は気体のモル数、 R は普遍的な気体定数です。温度が一定の場合、圧力が高くなると体積が小さくなります)。水の密度は空気の密度よりも大きいため、ピペット系(ピペット+気泡+水)の密度が十分に高まり、ピペットが沈みます。

補足課題(図3.5)

評価として、今回の授業と前回の授業で学んだ密度と圧力に関する小テスト(p.31参照)と、問題解決のための課題を行います。課題では、よく知られた問題を提示します。「池に浮かぶボートの上に大きな石があります。あなたがその石を海に投げて沈めたとき、池の水位は上がるか、下がるか、それとも変わらないか?」

この問題を解くには、岩がボートの中にあるために置換された水の体積($V_{displaced_b}$)と、岩が完全に沈んだときに置換された体積($V_{displaced_s}$)を比較する必要があります。どちらが大きいですか?まず、ボートの中にある岩の場合を考えてみると、アルキメデスの定理により、岩の重さ(上昇も沈下もしない)と置換された水の重さが等しいことから、 $m_{object}g = m_{displaced_b}g$

gとなります。また、密度の定義から、 $m_{\text{object}} = \rho_{\text{object}} V_{\text{object}}$ 、 $m_{\text{displaced}} = \rho_{\text{fluid}} V_{\text{displaced}}$ となります。これらの2つの情報を組み合わせると、岩がボートに乗っているときに移動した体積が得られます。すなわち $V_{\text{displaced}_b} = V_{\text{object}} \rho_{\text{object}} / \rho_{\text{fluid}}$ です。ここで、岩が沈んでいる場合を考えると、置換された水の体積は、岩自身の体積と同じになります。つまり $V_{\text{displaced}_s} = V_{\text{object}}$ です。最後に、岩を海に投げ捨てたときに水位がどうなるかを予想するために、2つの変位量をその比率で比較すると、 $V_{\text{displaced}_b} / V_{\text{displaced}_s} = \rho_{\text{object}} / \rho_{\text{fluid}}$ となります。岩は水に沈むので、 $\rho_{\text{object}} > \rho_{\text{fluid}}$ となり、 $V_{\text{displaced}_b} > V_{\text{displaced}_s}$ となります。つまり、ボートの中の岩が置換する水の体積は、沈んだ岩が置換する体積よりも大きいのです。従って、岩を海に捨てると、池の水位が下がります。注：ボートの自重による水の置換量は、岩が入っていてもいなくても同じなので、役割はありません。

まず、生徒たちに問題について個人で考える時間を与え、その後、水位が上がるとするか、下がるとするか、それとも変わらないと思うかを投票してもらいます。それぞれの選択肢には必ず投票してもらいます。そして、その「票」に応じて生徒たちをグループ分けします。各グループは、自分たちの予想を裏付ける論拠(物理的な説明)を考え、教室の全員の前で発表しなければなりません(または、その過程で予想を修正する必要があることが分かります)。

各グループが発表した後、予想を検証します(必要なものは、子ども用のおもちゃのボート、重りまたは大きな石、水を張った水槽です)。水を張った透明な水槽に子どものおもちゃの船を入れ、重りや大きな石を載せます。水槽の水位に印をつけ、重り(石)を水の中に落とし、新しい水位に印をつけてもらいます(図3.5)。

このような評価では、生徒は「試されている」というプレッシャーを感じることはありませんが、自分の知識を適用し、理解のギャップを見つけ、そのギャップを埋めるためにより良い説明を求めることを強いられます。講師は、グループの間を移動しながら説明を行い、各生徒の関与の度合いを評価し、問題点を指摘します。問題があると判断された概念は、後に実演で確認されます。別の評価方法として、Loverude et al. (2003)で述べられている5つのブロック問題を用いることもできます。

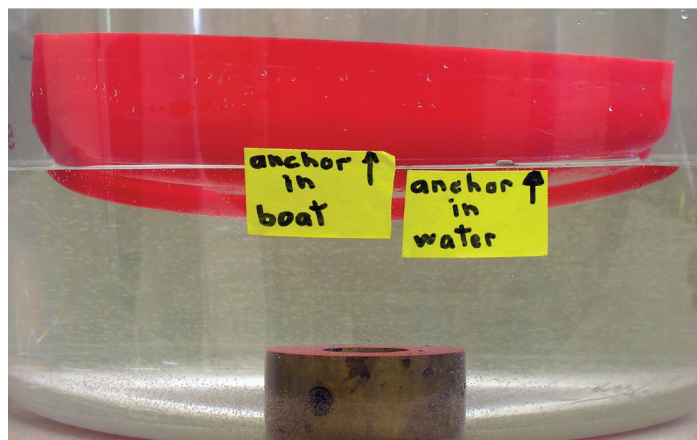


図3.5. 重りをボートに入れたときの水位(「anchor in boat」と表示)と、重りを水に沈めたときの水位(「anchor in water」と表示)。

参考文献およびその他の推奨文献

- Denny, M.W. 1995. Chapters 3 and 4 in *Air and Water*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Hewitt, P.G. 2008. Chapter 7 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.
- Loverude, M.E., C.H. Kautz, and P.R.I. Heron. 2003. Helping students develop an understanding of Archimedes' Principle. I. Research on student understanding. *American Journal of Physics* 71(1):178–1,187.
- Vogel, S. 1996. Chapters 3 and 4 in *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

その他の出典

- Sorbian, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society, Washington, DC. (気象学の概念に基づいて設計された実践的な実験集。第7章で「浮力」を取り上げています。実験だけでなく、歴史的な話や重要な発見の紹介、有名な科学者や悪名高い科学者の話なども掲載されています)

学生の学びを評価する

生徒の学習状況を評価することは、教育において不可欠であると同時に、時に困難な側面でもあります。紙と鉛筆を使った試験は一般的な評価方法ですが、これらは知識のより深い理解、統合、応用よりも、より多くの暗記をテストする傾向があります。管理者、社会、そして生徒自身が成績を出すことを求められるため、教育者はしばしば単純な形式の客観的試験（例えば、多肢選択式）に頼ってしまいます。しかし、試験の結果では、何故学生が成功したのか、あるいは失敗したのかが分からないことがあります。学生がどれだけ学習しているかではなく、どれだけよく学習しているかを判断することが目的であるならば、教育目標を全面的に反映した評価方法を採用するべきであると言えるでしょう（例えばFink, 2003）。ペーパーテストが正式な教育にふさわしくないというわけではありません。私たちは自分の授業で小論文の試験や多肢選択式の試験を行っています。しかし、私たちは、学生の学習だけでなく、教育者としての私たちの有効性を評価するために、より幅広い評価方法を検討し、使用すべきであると主張しています。これらの方法には、正式な評価（例えば、研究論文、実験室での活動、口頭発表、口頭試験）と非公式な評価（例えば、授業中の学生の行動や議論への参加を観察すること）が含まれます（Hassard, 2005; Feller and Lotter, 2009）。この短いエッセイにおける私たちの目的は、評価手段の包括的なレビューを提供したり、最良の評価方法を指摘したりすることではありません。むしろ、私たちの経験を共有し、読者が評価の価値について考え、学習を強化するために教室でどのように効果的に使用できるかを喚起することが目的です。実施方法は、学習目標、教室の生徒数、生徒の背景、教室の設定などによって異なるはずです。期待される同じ学習成果を測定するために、複数の異なる方法を使用することで、評価と評価の信頼性を高めることができます。

非常に大規模な教室では、実践型や探求型の活動、多肢選択式試験や短答式試験以外の評価方法を実施することは難しくなりますが、多肢選択式試験などの伝統的な評価を能動的な学習過程の一部として活用する方法もあります。Fink (2003)に倣って、毎週多肢選択式の小テストを学生に渡し、最初は個人で回答してもらいます。個人の小テストを回収した後、今度は3～4人のチームで小テストを受けてもらいます。その際、各回答についてチーム内で合意を得る必要があります。直接的なフィードバックのために、各チームに既成のスクラッチ式解答用紙（宝くじのようなもの。<http://www.epsteineducation.com/multichoice.php>

参照）を渡します。生徒たちは、自分たちが選んだ答えが正解（星印）なのか不正解（空欄）なのかを示すために、表紙をスクラッチします。この過程では、生徒は自分の理解を再確認し、ストレスの少ない、より協力的な環境で自分の考えを伝えることができます。私たちは、学期を通して同じチームを維持することが多いです。健全な競争心を養うために、各チームが週ごとに獲得したポイント数（正解数に基づく）を記録し、学期末には優勝チームにピザパーティをプレゼントしています。

もうひとつの手段は、学生が自分の学習を評価するリフレクティブ・ジャーナルです。最初は実験ノートを使った伝統的な方法を試してみましたが、学生の反応は芳しくありませんでした。ジャーナルは学習を振り返るものではなく、情報や事実の収集になってしまったのです。しかし、ウェブベースのブログに切り替えたところ、学生の反応は非常に良かったのです。生徒はそれぞれブログを作成します（例えばwww.blogger.com）。このメディアはより快適で親しみやすいものでした。生徒は毎週、学んだ新しい概念についてコメントしたり、理解の弱点を指摘したり、質問を投げかけたり、授業で役に立った点や役に立たなかった点を指摘したりすることを促すガイド的な質問に答えます。講師のみがブログにアクセスするか、講師が各生徒に毎週フィードバックを行います。振り返りブログは、指導戦略や期待される学習成果と生徒の理解度を一致させるために使用できる即時のフィードバックを講師に提供します。また、ブログを利用することで、学生は授業後に教材について批判的に考えるようになり、授業終了時だけでなく、定期的に学生の理解度を評価する手段となります。

推薦図書

- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science*. Oxford University Press, 476 pp.
- Feller, R.J., and C.R. Lotter. 2009. Teaching strategies that hook classroom learners. *Oceanography* 22(1):234–237. Available online at: http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/22_1.html (accessed August 12, 2009).
- Fink, L.D. 2003. *Creating Significant Learning Experiences: An Integrated Approach to Designing College Courses*. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 320 pp.

第4章. 熱と温度

本章のねらい

海洋がどのように機能し、気候にどのような影響を与えているかを理解するには、熱力学の基本原則を十分に理解することが不可欠です。熱力学は、学生が日常的に慣れ親しんでいる科学科目のひとつです。しかし、学生が授業に持ち込む経験的な知識には、特定して対処しなければならない誤解が混じっています (Carlton, 2000)。誤解の例としては、熱と温度の区別がつかない、熱を伝えれば必ず温度が上がるという考えがある、潜熱の概念を誤解している、などが挙げられます (Thomaz et al., 1995)。また、地球の熱フラックスが最大になる時間帯と平均気温が最も高くなる時間帯、海や湖の熱フラックスが最大になる月日と平均水温が最大になる月日など、熱フラックスが最大になる時期と温度が最大になる時期の混同もよくある誤解です。本章の一連の課題の目的は、熱力学の基本的な概念を確認し、海洋過程への応用に生かすことです。熱力学は広大な分野であり、その全ての側面を網羅しようとはしません。ここでは、熱伝導(伝導、放射、対流)、潜熱、熱膨張の概念に焦点を当てます。これらの実験活動は、2回の授業で完結します。

背景

温度とは、ある基準に対する物体の温かさや冷たさを示す量です。温度は、物質中の原子や分子の運動に伴う平均運動エネルギーに比例します。温度の測定には、一般的に摂氏スケール(°C)が用いられます。これは、海面気圧での凝固点(または三重点)を0°C、沸点を100°Cと任意に設定した純水の物理的性質に合わせて校正されたものです。華氏(°F)スケールは、水の沸点が212°F、凝固点が32°Fとなるように調整されています。摂氏を華氏に変換するには、1.8を乗じて32を加えます($^{\circ}\text{F} = 1.8 \times ^{\circ}\text{C} + 32$)。ケルビンスケール(Kと表記)は絶対温度スケールと呼ばれ、そのゼロ点は-273.16°Cに相当します($\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$)。温度は直接測ることはできませんが、異なる物質に対する温度の影響から間接的に測ることができます。一般的な温度計は、液体の体積変化(水銀やアルコールを封入した電球型温度計など)や、物質の電気抵抗の変化(セラミックやポリマー製のサーミスタなど)によって温度を測定します。

熱とは、ある物質から別の物質へ移動する内部(運動および位置)エネルギーと定義されます(例えばHewitt, 2008)。熱的に接触している物質の熱伝達、常に高温の物質から低温の物質に向かいます。しかし、この法則は、内部エネルギーの大きい物質から小さい物質に熱が移動することを意味するも

のではありません。温度は物質の内部エネルギーに直接比例するものではなく、温度は内部エネルギーの運動の部分(位置の部分ではない)の尺度に過ぎないからです。エネルギー保存とは、系の間で熱が移動する際に、一方の系で失われたエネルギーを他方の系が獲得することを意味します。熱にはエネルギーの単位があります。SI(メートル法)系では、ジュールという単位を使用します。一般的な熱の単位としては、BTU(British Thermal Units)、カロリー(1カロリー = 4.18ジュール)などがあります(注:食品関係のカロリー[大文字のC]は1000キロカロリー、つまり1キロカロリーに相当します)。

物質によって、熱を蓄えることができる熱容量は異なります。物質の熱容量は、その物質の温度を1°C上げるのに必要な熱量と定義されます。また、比熱容量(Q_s)は、単位質量あたりの熱容量です。水は液体の中で最も高い比熱容量を有し、 $Q_s = 4186 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ (= 1000 kcal/kg°C)です。空気の比熱容量は水の約4分の1で、 $Q_{s,air} = 1006 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ です。この水と空気の熱容量の差は、比熱が質量を基準にしていること、水の密度が空気の密度の約1000倍であることを考えると、さらに顕著です。したがって、同じ体積であれば、水の温度を1°C上げるためには、空気に比べて約4000倍のエネルギー(熱)が必要になります。同様に、水が冷えるときには、同じ体積の空気が冷えるときの4000倍の熱が放出されます(以下のウェブサイト <http://www.jpl.nasa.gov/video/index.cfm?id=827>で、水と空気の熱容量の違いを動画で紹介しています)。また、水の比熱は、岩石や土の比熱よりもはるかに高いのです。

水の熱容量が大きいこと、熱容量の小さい大気や陸地に比べて、温度変化が小さくても大量の熱を吸収したり放出したりすることができます。そのため、海洋は地球の温度が急激に上昇したり下降したりしないようにする重要な熱緩衝材の役割を果たしています。沿岸部が内陸部に比べて昼夜や季節による温度変化が小さいのは、この緩衝作用によるものです。陸地は、同じ条件の太陽放射の下では、海よりも早く暖まり、冷えます。

太陽エネルギーフラックスの緯度変化は、温度の大きな緯度変化をもたらします。海洋は、大量の熱を蓄えたり放出したりするだけでなく(水の熱容量が大きいこと)、気温の高い赤道域から気温の低い極域へ熱を輸送する(メキシコ湾流などの海流を経由して)など、地球の気候を調整する上で重要な役割を果たしています。海流や風による熱輸送がなければ、緯度による温度差はかなり大きくなります。以下では、熱輸送のメカニズムについて、課題を交えて詳しく紹介します。

熱伝導のメカニズム

2つの物質の間に温度差がある場合、熱は放射、伝導、対流によって一方から他方へと移動します。一般的には、複数の熱伝達メカニズムが同時に進行します。

放射とは、電磁波が放出され、放出された物体からエネルギーが放出され、他の物体に吸収されることによる熱の移動を指します。全ての物体はエネルギーを吸収し放出します。熱の吸収率は、物質の特性と、入射する放射と相互作用する表面の形状に依存します（課題4.1参照）。入射エネルギーの吸収率が放出エネルギーの吸収率よりも大きい場合、物体の温度は上昇します（放射以外の熱伝達メカニズムがないと仮定した場合）。エネルギーの吸収率が放出率よりも小さい場合は、物体の温度は下がります。エネルギーの吸収率とエネルギーの放射率が等しくなると、物体は平衡温度に達します。

放射されるエネルギーの量と質（波長）は、物体の温度のみに依存します。物体の温度と放射エネルギーの関係を表す概念モデルに「黒体」があります。黒体とは、表面に到達した全ての電磁放射を完全に（100 %）吸収する物体のことです。電磁波が反射したり通過したりしないため、黒体は黒く見えるのです。黒体が単位面積、単位時間あたりに放射するエネルギー E は、温度 T （単位はケルビン）の4乗に比例し、 $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ とすると $E = \sigma T^4$ と表されます（ステファン・ボルツマンの法則）。この関係は、物体の温度が2倍になると、放射される熱量は16倍になることを意味します。

放射線は1つの波長で発生するのではなく、複数の波長のスペクトルで発生します。スペクトルのピーク（放射強度が最も高くなる周波数または波長）は、温度と反比例の関係にあります（ウィーンの法則）。そのため、温度が高くなると、放射線のピーク波長は短波長側に変位します。例えば、太陽から地表へのエネルギーの伝達は、主に放射線によって行われています。太陽の表面温度は6000 Kで、放射のピークは可視波長域（比較的短波長）にあります。地球の表面や大気も放射線を放出していますが、その温度は太陽よりも低く（300 K程度）、放射のピークはかなり長い波長（赤外線）です。この概念は、温室効果を理解する上で重要です。大気は、入射または反射する短波長の太陽放射に対しては透明ですが、地表や大気から放射される長波（赤外線）に対しては透明ではありません。そのため、太陽からのエネルギーは地表に届き、陸や海で吸収されます。

一方、放射された長波のエネルギーは、大気中の気体に吸収され、大気が「毛布」の役割を果たすことで閉じ込められてしまいます¹。

伝導とは、物理的に接触している温度の異なる2つの体の間で熱が移動することを指します。熱は、分子の振動と衝突によって伝わります。暖かい物体のより速い振動の分子は、冷たい物体のより遅い振動の分子と衝突し、その結果、より速い振動の分子からより遅い振動の分子にエネルギーが正味で伝達されます。伝導による熱伝達率は、熱が流れる面積（面積が大きいほど伝達率が高くなる）と温度勾配（勾配が急なほど伝達率が高くなる）に比例します。また、材料の熱伝導率（熱を伝える能力）にも左右されます。

対流と移流は、海洋と大気における熱伝達の主要な形態です。対流は流体中でのみ発生し、分子レベルでの相互作用ではなく、流体の鉛直方向の動き、すなわち流れを伴います。対流は、流体の密度の違い、つまり浮力の違いによって生じます。対流現象の例としては、マグマの加熱・冷却により地殻変動を引き起こすマントルの流れ、太陽熱の偏りによる大気の循環（極と赤道の間など）、高緯度域の表層水の冷却により生じる地球規模の海洋コンベアベルトと深層水塊の形成、昼夜の温度差による海洋上層部の鉛直混合などが挙げられます（詳細はGarrison (2007)などの海洋学の一般的な教科書を参照）。なお、移流とは、通常、水の流れに伴う熱の水平方向の移動を指します（例えば、メキシコ湾流）。

潜熱

物体が熱を得ると、物体の温度が上昇する場合と、温度の測定可能な変化を伴わずに物体の状態が変化する場合（例えば、氷が溶けて水になる）の2つの場合があります。ほとんどの物質には、固体から液体へ、液体から気体へという2つの状態変化があります。物質の状態を変化させるのに必要な熱を、融解潜熱（固体から液体に変化する場合）と気化潜熱（液体から気体に変化する場合）と呼びます。水の融解潜熱と気化潜熱はそれぞれ約334 J/g、約2260 J/gと高いです。この値の高さは、地球の気候に以下のような多くの重要な影響を及ぼします。

1) 極地では、冬に水が凍ると、大気や周囲の液体の水に潜熱が加わります。夏には、水が溶けることで、海洋や大気から熱が奪われます。潜熱の付加や除去は、凍った水の温度

¹ 温室効果の文脈では、2つの誤解を明らかにする必要があります。1) 温室という言葉は、実際には誤解を招きやすいのです。温室が暖かいのは、主に対流が抑制されるからであり、温室内の空気が長波放射を放出・吸収するからではありません（別の例えとして、晴れた日に窓を閉めて駐車した車と、窓を開けて駐車した車とでは、車内がどれだけ暑くなるかを考えてみましょう）。2) 温室効果は本質的に有害な現象ではなく、温室効果がなければ地球は寒冷化してしまいます。しかし、人為的な影響は、地球の大気や自然な断熱性を著しく高め、地球の表面温度をさらに上昇させます。

変化ではなく相変化であるため、これらの地域では海面温度（と気温）の季節変化は比較的小さいのです。飲み物を冷やすための角氷について考えてみましょう。氷がすべて溶けて初めて飲み物の温度が上がり始めます。

2) 海洋から蒸発した水は、大気中に潜熱を運びます。この潜熱は、水が凝縮して雲を形成する際に放出され、大気を暖めます。大きな湖や海が28～30℃以上の温度になることが少ないのも、蒸発が主な理由です。

人体は、水の高い気化潜熱を利用しています。少量の蒸発で体を大きく冷やすことができ、これが発汗時の体験です。皮膚から蒸発した水は、皮膚自体から蒸発するためのエネルギーを得て、皮膚の温度を下げます。暑い夏の日にはプールから上がると肌寒く感じるのもこの現象によるものです。よくある誤解は、水を100℃に加熱しないと蒸発しないというものですが、干したタオルや雨の水たまりが低温でも「乾く」ことは認識されています。液体の中では、分子がさまざまな速度でランダムに動いています。その結果、分子同士がぶつかり合い、ある分子は運動エネルギーを得て、ある分子は運動エネルギーを失うことになります。ある分子は、得られた運動エネルギーが十分であれば、液体から抜け出して気体になります。残った分子は動きの遅い分子です。このように、液体中の分子の平均運動エネルギーは、速い分子が「脱出」して液体が冷やされると減少します。加熱すると、液体中の分子の平均運動エネルギーが高くなり、統計的に多くの分子が液体から「脱出」するのに必要なエネルギーを得ることになります。冬のメイン州などでは、気温が雪の融点以下であるにもかかわらず、雪が「消えて」しまう現象がよく見られます。

熱膨張

ほとんどの物質は、加熱されると膨張し、冷却されると収縮します。また、ほとんどの物質は、温度が上がると、分子の振動が速くなり、互いに離れて大きな空間を占めるようになります。一方、冷やすと、分子の振動が遅くなり、分子同士の距離が縮まります。なお、4℃以下の淡水は、冷やすと実際に膨張しますが、これは水の異常性と呼ばれる現象です。熱膨張は、液体温度計の原理になっています。海洋では、10年から100年単位の時間規模で、熱膨張が海面上昇に大きく寄与すると考えられています。しかし、熱効果は10年単位の気候関連の変動に影響されるようで、海面上昇に対する熱膨張の長期的な寄与を推定することは困難です (Lombard et al., 2005)。現在の推定では、熱膨張は観測された海面上昇の25 %から50 %寄与していると考えられています。

課題内容

授業ではまず、3～4人の小グループに分かれて、「熱」と「温度」を定義してもらいます。その後、集まって定義を話し合い、熱輸送のメカニズム（熱はどのようにして「流れる」のか）を確認します。そして、熱の吸収と放出（課題4.1）、熱伝導（課題4.1～4.3）、潜熱（課題4.4、4.5）、蒸発と温度の関係（課題4.6）、熱膨張（課題4.7、4.8）などの概念を、実際に手を動かしながら探究心を持って説明します。課題や授業での議論では、これらの概念の基本原則を伝え、海洋や気候の過程における意義を強調します。

課題4.1. 放射熱伝達と放射線の吸収(図4.1)

材料

- 同じ大きさの缶を2つ、黒と光沢のあるものを1つずつ(それぞれの缶の蓋には、温度計を差し込める穴が開いていること)。
- 温度計 2個
- 加熱ランプ(ここでは150 Wの白熱球を使用)

注:既製の放射線キットは、sciencekit.comで入手できます。

学生への指示

1. 光っている缶と黒い缶があります。2つの缶に同じ光源を当てた場合、缶の中の温度は同じになりますか?それは何故ですか?
2. 缶に挿入した温度計の初期温度を記録して下さい。
3. どちらの缶も光源からの距離が同じになるようにします。光を当てて、温度計を観察してみましょう。何が分かりましたか?自分の観察結果をどのように説明できますか?この系では、熱はどのように伝達されていますか?
4. 非常に長い時間ライトをつけていた場合、ライトがついている限り温度は上がり続けますか?それは何故ですか?この系では、どのようなメカニズムで熱が移動しているのでしょうか?
5. 今回の活動で学んだ原理が、地表での電磁波の吸収や地球の温度調節にどのように応用されると思いますか?

この課題は、水が入っている缶と入っていない缶を比較したり、扇風機を使って対流を促進したりと、(例えば、評価手段として)変更することができます(水が加熱ランプに触れないように注意して下さい)。

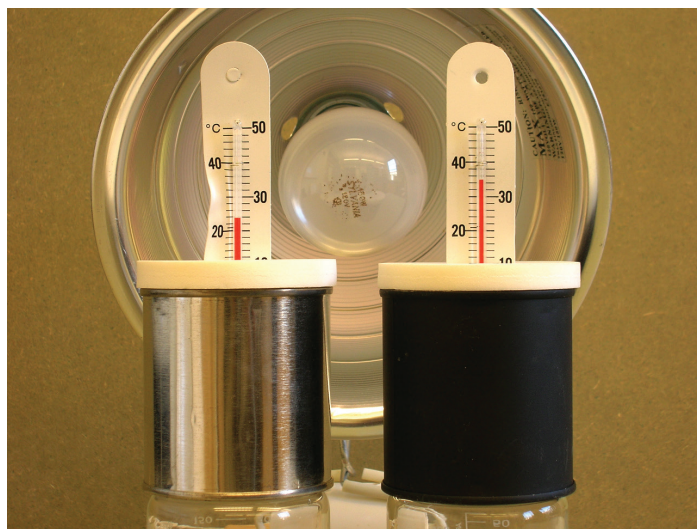


図4.1. 課題4.1の準備。温度計は、黒い缶と光沢のある缶が光源にさらされた後の温度差を示しています。

説明

2つの缶に同じ光源を当てても、2つの温度計は同じ温度を示しません(図4.1)。光沢のある缶は、黒い缶よりも多くの放射エネルギーを反射するため、熱の吸収量が少なくなります。黒い缶の方が早く熱せられます。缶の温度は無限に上昇するわけではなく、短波放射の獲得量と長波放射の損失量、さらに伝導による周囲の空気への熱の損失量が等しくなると、安定した最終温度に達します。

課題4.2. 伝導(図4.2)

材料

- 常温での3種類の素材:木、金属、布

学生への指示

1. 3つの素材は全て、かなり長い間、常温に置かれています。触らずに、それぞれの温度を予想して下さい。温度によって感じ方は同じですか、それとも違いますか?それは何故ですか?
2. それぞれの素材に簡単に手を当ててみて下さい。それはあなたの期待と一致していますか?全ての素材が常温下であったことを考えると、あなたはその観察結果をどのように説明しますか?
3. 人間の神経系(及び他の生物の神経系)が温度を感知することについて、観察からどのようなことが分かりますか?
4. 海洋の中では、いつ、どこで、伝導が働くと思いますか?

説明

皮膚よりも熱い物や冷たい物に触れると、伝導による熱の移動を経験します。常温の物質で伝導性の良い物(金属片など)は、触ると冷たく感じます。これは、熱がすぐに逃げてしまうため、触った部分が体温まで熱くならないからです。一方、導電性の低い物(布など)は、熱が局所的に伝わり、手からの熱の移動が遅いため、暖かく感じます。一般に、固体は液体よりも優れた伝導体であり、液体は気体よりも優れた伝導体です。金

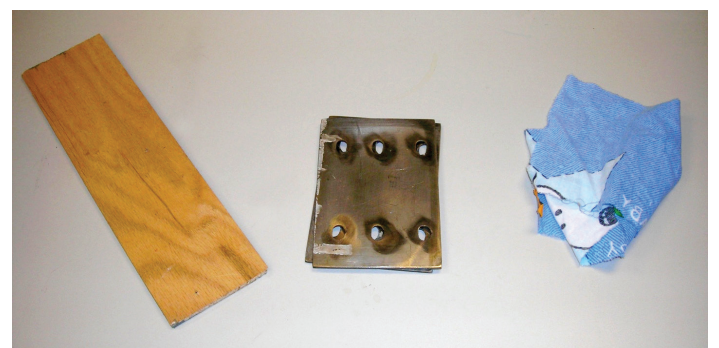


図4.2. 課題4.2の材料。

属は熱伝導率が非常に高く、空気や脂は熱伝導率が非常に低いです。タイルの床はカーペットの床よりも寒く感じますが、どちらも常温です。タイルはウールよりも熱伝導率が高いので、素足からの熱の移動はじゅうたんよりもタイルの方が速くなります。海の中では、熱伝導はそれほど重要ではありません。しかし、海洋生物と周囲の水のような液体と固体、海洋と大気のような液体と気体など、性質の異なる物質の境界面では必ず伝導が起こります。

課題4.3. 対流(図4.3)

材料

- 対流装置(自作またはsciencekit.comより入手)
- 食用色素(2色)
- 氷水の入った容器
- お湯の入った容器

学生への指示

1. 装置内に水を入れて下さい(水平管に気泡が入らないようにして下さい)。
2. 右の柱を暖め、左の柱を冷やした場合、水平管の中の水がどの方向に流れると考えられますか？
3. 右の柱をお湯の入った容器に、左の柱を氷水の入った容器に入れます。2つの柱に数滴の染料を加え(それぞれの柱に異なる色)、水の循環が予想と一致するかどうかを観察します。
4. 装置の1列だけを温める(または冷やす)場合は？試してみてください。
5. この課題で、どのような海洋と大気の過程を示すことができますか？

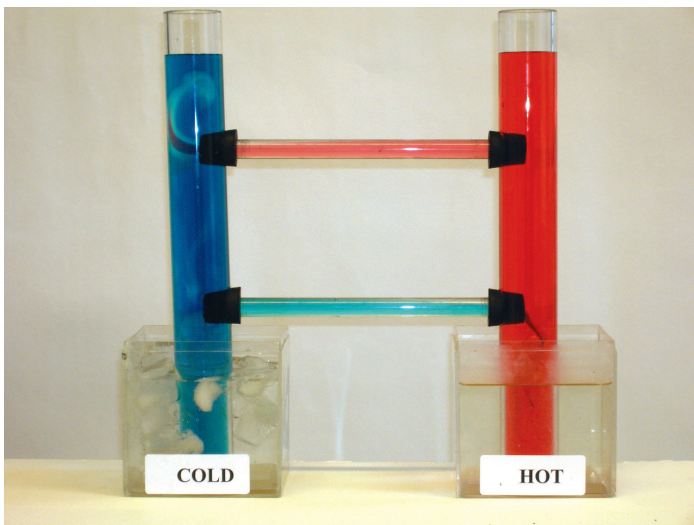


図4.3. 対流装置。対面する流体の密度の違いにより、暖かい水(赤)は上に、冷たい水(青)は下に流れることに注意。

説明

装置の一方の柱を暖め、もう一方の柱を冷やすと、垂直な管の底に密度差が生じ、圧力勾配が発生します。密度差が生じると、水塊は密度平衡状態になるまで沈んだり上昇したりします。水塊が密度平衡状態になると、圧力勾配に応じて水平方向に移動し始めます。圧力勾配とは、水の密度が高いところと低いところで、密度の鉛直分布が異なるために生じる静水圧のことです。冷たい水は密度が高いため、下側の連結管に沿って移動し、暖かい水は上側の連結管に沿って移動します(図4.3)。片方の柱だけを冷やしたり暖めたりしても、圧力勾配が小さくなるため、それほど劇的には見えないかもしれませんが、同じ効果が得られます。この課題は、密度による海洋循環(例えば、全球的なコンベアベルト)をよく表しています。他の実演と同様に、誤解を招かないように、例え話のどこが破綻しているかを生徒に注意してもらうことが重要です。例えば、全球的なコンベアベルトは水面での冷却によって生じるものですが、この実演では冷却と加熱は底面から行われます(一方、大気は下から加熱されるので、大気の浮力による循環の方がより適切な例えとなります)。この課題は、第1章と合わせて使用することもできます。

課題4.4. ヒートパック(図4.4)

材料

- 水の入った容器 2個
- 再利用可能なヒートパック(Arbor Scientific社製)を常温で使用
- 温度計 2台
- 腕時計またはストップウォッチ

注:通常、この課題は教室での実演として行います。複数のグループでこの課題を行う場合は、安価なヒートパックをいくつか用意する必要があります。パックが作動して中の物質が固まった後、液相に戻すために約20分間加熱する必要があります。

学生への指示

1. ヒートパックを観察し、感じ、描写します(例えば、素材や温度など)。
2. 容器に常温の水を入れ、それぞれの初期温度を記録します。
3. ボタンを押してヒートパックを作動させ(爪を立てずに指の腹を使って下さい)、一方の容器に入れます。もう一方の容器は比較のための対照容器とします。
4. すぐに両方の容器の開始温度を記録します。
5. 各容器の温度を1分に1回、10分間記録し続けます。
6. 2つの容器に、水温の違いは観察されましたか？水温の変化の原因は何ですか？このパックの効果は？(ヒント:パック



図4.4. 課題4.4の資料。

の中の素材は、パックを作動させる前と後で同じように見えましたか?)

7. 今、この課題で観察したこと(相変化とそれに伴う周辺海域の温度変化)に類似した海洋や大気のプロセスは何でしょうか?

説明

活性化したヒートパックを水に入れると、水の温度が上昇し始めます。一方、対照容器(ヒートパックなし)の水温は一定です。ヒートパックの中には酢酸ナトリウムの過飽和水溶液が入っています。ヒートパックを作動させると、核生成の中心が形成され、酢酸ナトリウムが結晶化し始め、蓄積されたエネルギーが熱として放出されます。放出された熱はパックから水に伝導し、流体の運動(対流・移流)によって容器内の水に熱が分散されます。パックの中身を液相に戻すには、パックを加熱する(エネルギーを投入する)必要があります。この課題は、相変化に伴う熱の放出を示すものであり、氷の形成や雲の凝縮の際に放出される潜熱の文脈において授業で議論することができます。

課題4.5. 熱の流れと潜熱(図4.5)

材料

- 蓋付きの小さなプラスチック容器。発泡スチロールのカップの中に入るくらいの大きさにします。容器の上部に、温度計が入る大きさの穴を開けます。
- 発泡スチロール製のカップ。断熱性を高めるために、いくつかのカップを互いに入れ子にします。プラスチック容器の中の水の量と発泡スチロールカップの中の水の量が同じになるように、カップに水の量を示す線をつけます。
- デジタル温度計 2つ

- 取付金具と台を備えたリングスタンド
- 熱い水道水、氷水、氷

学生への指示

1. 実験装置の図(図4.5)を描き、小さなプラスチック容器に氷の入った冷たい水(氷なし)を入れ、発泡スチロールのカップに熱い水を入れた場合の熱伝導の方向を矢印で示して下さい。小さなプラスチック容器の中の水の温度はどうなりますか?発泡スチロールのカップの中の水の温度はどうなりますか?
2. プラスチック製の小さな容器に、氷水を上まで入れます(氷は入れません!)。容器内の水の初期温度を記録します。この容器を取付金具に取り付けます。
3. 発泡スチロール製カップのマークした線まで水道水を入れます(容器内の水の量とカップ内の水の量が同じになるように)。カップ内の水の初期温度を記録します。
4. 取付金具のアームを下にスライドさせ、小さな容器をお湯の中に浸すようにカップの中に入れます。4分間、30秒ごとに容器とカップの温度を記録します。温度計の棒を使って、カップと容器の水を混ぜながら測定を行い、温度勾配が生じないようにします(つまり、軽くて温かい水が、冷たくて重い水の上に溜まって浮いてしまわないようにするのです)。
5. 容器とカップの温度を時間の関数としてプロットします。観察結果は、あなたの予想と一致していますか?より長い時間が経過した後、温度勾配はどのようにになると予想しますか?



図4.5. 課題4.5の準備。

- 実験を繰り返すとしましょう。今度は、小さなプラスチック容器に氷と水を入れ、カップには熱い水道水を入れます(まだやらないで下さい!)。この設定でも、同じような温度変化が見られると思いますか?それは何故ですか?
- 小さな容器に氷と水を上まで入れます(約60 %の氷と40 %の水)。容器内の水の初期温度を記録します。
- ステップ4と5を繰り返します。ステップ5で見たのと同じ傾向が見られますか?それは何故ですか?

説明

熱は、伝導によって高温の物質から低温の物質に伝わります。この実験では、発泡スチロール製のカップの中の熱い水から、カップの中央にあるプラスチック容器の中の冷たい水に熱が伝わります。その結果、カップの中の水は(熱が奪われて)温度が下がり、内側のプラスチック容器は(熱が得られて)温度が上がります。長い時間が経過すると系は平衡状態になり、発泡スチロールカップの水と容器の水の間に温度勾配はなくなります。プラスチック容器に氷と水を入れ、カップにお湯を入れると、熱伝導は先ほどと同じ方向に進みますが、お湯の温度が下がる一方で、水と氷の温度には変化が見られません(氷を溶かすために熱が投入されるため)。氷が全て溶けて初めて、プラスチック容器の中の水の温度が上昇し始めます。

課題4.6. 振り回し式乾湿計(湿度計)(図4.6)

材料

- 振り回し式乾湿計 (sciencekit.com)

学生への指示

- 振り回し式乾湿計は、濡れた布に包まれた温度計(湿球)の温度と乾球の温度を比較することで、相対湿度を測定することができる装置です。2つの温度計の間の温度は、湿度の関数としてどのように変化すると考えられますか?2つの測定値に差があるのは何故でしょうか?
- 乾湿計を20秒間振って、2つの温度計の間に温度差があるかどうかを記録します(生徒には少なくとも3つの測定値を取り、中央値を求めるようにします。このデータは後で測定値についての議論に使用します)。

この課題の後、生徒たちに湿度の概念について議論してもらい、湿度(蒸し暑さ)、蒸発、及び周囲温度の間に予想される関係を説明してもらいます。この議論に続いて、生徒は、与えられた周囲温度で湿度を決定するためにどのように乾湿計を使用できるかを説明できるようになる必要があります(メーカーが提供する表を使用した場合と同様です; 図4.6)。

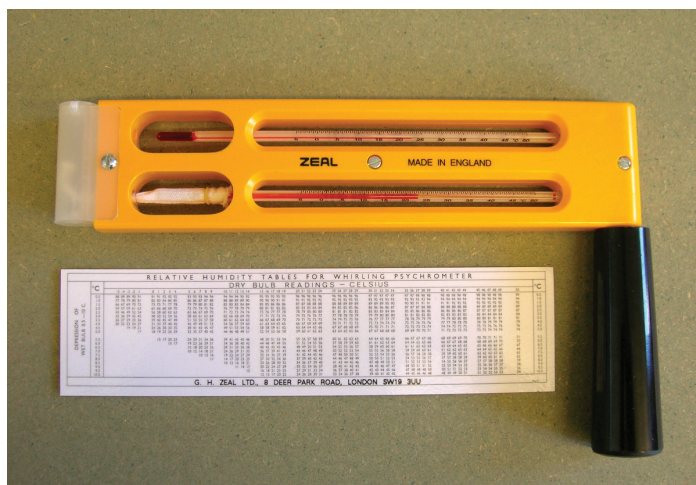


図4.6. 振り回し式乾湿計とその換算表。

説明

振り回し式乾湿計は、2つの温度計を一緒に取り付けることで構成されています。1つは通常の温度計で、もう1つは湿球温度計(湿った布の「靴下」を球にかぶせたもの)です。計器を回転させると、(新鮮な空気に触れた)濡れた布から水が蒸発し、濡れた球体の温度計が冷やされます。液体の蒸発による冷却(これは部屋の相対湿度に依存します)と、周囲の空気からの伝導による熱の獲得とが平衡になったときに、湿球の温度も平衡に達します。周囲の空気が乾燥していれば、蒸発量が多くなり、2つの温度計の温度差が大きくなります。空気が水蒸気で飽和している場合は、蒸発による冷却は起こらず、2つの温度計の間に温度差はありません。

課題4.7. 熱膨張(図4.7)

材料

- フラスコ
- 一穴ストッパー
- 長いガラス管
- お湯の入った容器
- 食品着色料
- ラボテープ

学生への指示

- ボトルを着色水で満たします。水がチューブの長さの3分の1まで上がってくるまで、栓を押し下げます。水面にテープで印をつけます。
- フラスコをお湯の入った容器に入れると、管内の水位はどうなると思いますか?何故ですか?
- お湯を張った容器にフラスコを入れます。ガラス管内の水位を3分以上観察します。新しい水位をマークします。それ

はあなたの予想と一致していますか？

4. この活動で学んだことを応用して、海水が暖かくなった場合に海の体積がどうなるかを予想し、説明して下さい。海面にはどのような影響があるでしょうか。
5. 海面に影響を与える他の過程は？課題：陸地の氷の融解と海水の融解は、海面に同じ影響を与えるでしょうか？それは何故ですか？あなたの予想をどのように検証しますか？

説明

流体を加熱すると通常は膨張し、冷却すると通常は収縮します（4℃以下の水などの重要な例外を除いて）。水銀温度計やエタノール温度計はこの原理で動いています。地球温暖化によって海の温度が上昇すると、海水が膨張し、海盆の水量が増加することで海面が上昇します。このほか、氷河や陸氷の融解による水の追加や、アイソスタティック・レベリングによる地殻プレートの上昇・下降なども海面変化の要因となります。海水が溶けても海面は変化しません。何故なら、氷山によって置換される水の体積と、氷山が溶けるときに追加される水の体積が等しいからです。この概念を示すために、生徒に大きな氷の塊を水槽に入れてもらい、氷が溶ける前と後の水位を記録してもらいます。注：氷が水を十分に冷やして大きな収縮を起こした場合、「海面」の変化が観察されることがあります。



図4.7. フラスコをお湯に浸した後の課題4.7の準備。

課題4.8. 棒を反転させる(図4.8)

材料

- ガラスビーカー 2つ：冷水(20℃以下)と温水(～40℃)を入れたビーカー
- 逆密度棒 1セット(アルミ棒, プラスチック棒)(Arbor Scientific社製)
- 温度計
- 氷(水を冷やすために必要な場合もある)
- ホットプレート(オプション, 熱い水道水でも可)

学生への指示

1. 冷たい水の入ったビーカーに棒を入れると、棒はどうなりますか(浮く／沈む)。その予想の根拠は何ですか？
2. 冷水を入れたビーカーに棒を入れます。棒に気泡がついていないことを確認します。
3. 観察結果は、あなたの予想と一致していますか？棒を少なくとも5分間観察して下さい。
4. 今度は、お湯を入れたビーカーを使って、この実験を繰り返します。少なくとも3分間、棒を観察します。何が起きているですか？
5. 冷たい水と暖かい水の中での棒の挙動の違いをどのように説明しますか？グループで、あなたが観察したことについて、考えられる説明を話し合しましょう。

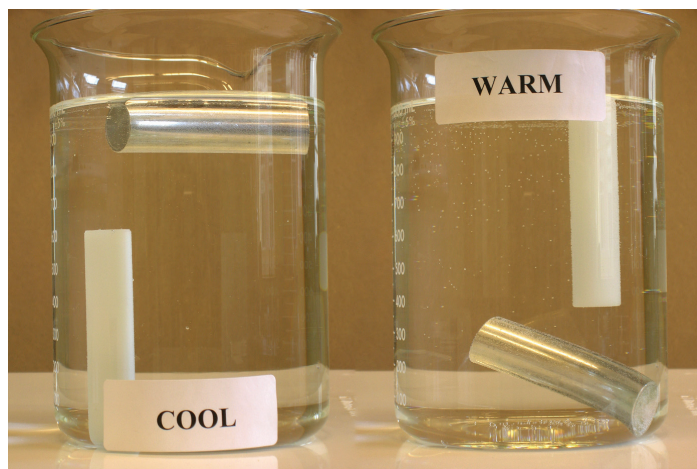


図4.8. アルミニウムとプラスチックの棒を冷水と温水に浸したもの。

説明

この課題では、1本の棒はアルミニウム製、もう1本の棒はポリ塩化ビニル(PVC)製を用いています。冷たい水の中に棒を入れると、最初はどちらも冷たい水よりも密度が低いので浮きます。時間が経つと、塩ビ製の棒が冷えて収縮し、密度が変化します。棒の密度が水の密度を上回ると、塩ビは沈みます。アルミの棒も冷たくなりますが、アルミは同じ温度変化でも塩ビよりも伸び縮みする量が少ない(つまり「熱膨張係数」が小さい)ので、アルミの棒の密度は塩ビのそれよりも小さくなります。そのため、アルミ棒の密度は温度変化の影響を受けにくく、アルミ棒は浮いたままになります。お湯の中に入れると、今度は水の密度がアルミ棒の密度よりも低くなり、棒が沈んでしまいます。塩ビ棒も最初は水よりも密度が高く、沈みますが、暖まると大きく膨張します。その結果、密度が減少します(ここでも質量は一定ですが、体積は増加します)。密度が水よりも低くなると、浮きます。この課題は、第1章でも使用できます。

補足課題

多くの学生が、日射量が最大となる時間帯(正午頃)と、気温が最大となる時間帯(数時間後の午後)を混同していることに気がつきました。同様に、日射量が最小または最大に近い1年で最も日が短い日や最も日が長い日を、海や湖の気温や水温が(平均して)最も低いまたは高い時期と混同しています(湧昇などの水温に影響を与える非放射性的の過程は無視しています)。この問題は、温度と温度変化率の混同に起因します。温度の変化率は、熱フラックスに比例します(相転移がない場合)。授業では、水温と時期をプロットしたときのイメージを定性的な絵で表現してもらいます。その後、GOMOOSのウェブサイト (<http://www.gomoos.org/gnd/> など、リアルタイムの海面温度を提供しているサイト)で、年間の海面温度(週または日の平均値)と時間をプロットし、水や空気の温度が最大になる時間帯を観察してもらいます。授業では、温度と、熱フラックスに伴う温度変化率の違いについて説明します。例えば、メイン州の放射熱フラックス(つまり温度変化率)は、平均して12月に最も低く、6月に最も高くなります(1年で最も日が短い日と長い日に関連しています)。しかし、海洋や大気は、放射熱フラックスが最小値(または最大値)にならなくても、12月以降は熱を失い続け、6月以降は熱を獲得し続けます。そのため、12月以降も水温は下がり続け、6月以降も上昇し続けます。獲得熱量と損失熱量が等しくなれば、水温の変化は止まります(最大値または最小値になります)。メイン湾では、平均海面水温の最大値

は6月ではなく9月です。同様に、1日の中で最も暑い時間帯が、入射日射量が最大に近い正午ではなく、その数時間後であることも説明できます。生徒の中には、車のアクセルペダルを踏んだときの最大加速と、車の速度が最大になるとき(加速過程と減速過程が等しくなった後)の時間差を例えに挙げる人もいます。加速度(速度の時間変化率)が、熱フラックス(相転移がないと仮定すれば、温度の時間変化率に比例します)のアナログです。

参考文献

- Carlton, K. 2000. Teaching about heat and temperature. *Physics Education* 35:101–105.
- Garrison, T.S. 2007. *Oceanography: An Invitation to Marine Science*, 6th ed. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.
- Gill, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 662 pp.
- Hewitt, P.G. 2008. Chapters 8 and 9 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.
- Lombard, A., A. Cazenave, P.Y. Le Traon, and M. Ishii. 2005. Contribution of thermal expansion to present-day sea level rise revisited. *Global and Planetary Change* 47:1–16.
- Thomaz, M.F., I.M. Malaquias, M.C. Valente, and M.J. Antunes. 1995. An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature. *Physics Education* 30:19–26.

その他の出典

- Sorbjan, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society, Washington, DC. 気象学の概念に基づいて設計された実践的な実験集。第4章では「熱」を取り上げています。実験に加えて、歴史的な物語、重要な発見への言及、有名な科学者や悪名高い科学者の物語などが含まれています。
- <http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm>. COSEE-OS海洋気候ウェブインターフェイスでは、海洋蓄熱、海面温度、対流・移流熱輸送過程、気候の温暖化、温室効果に関する画像、動画、ニュース、リソースを提供しています。

チームベースの学習

協同学習とも呼ばれるチーム学習は、生徒が少人数のグループで学習目標を達成するために行う教育手法です。学生は、仲間との会話、ブレインストーミング、アイデアの発表と弁護、概念的な枠組みへの疑問などの機会を得ることができます。この手法では、講師は講義をするのではなく、ファシリテーターやコンテンツの専門家としての役割を果たします。チーム学習は、問題解決能力、コミュニケーション能力、批判的思考能力を高めることができます。さらに、生徒の自尊心と他者と協力する能力を高め、学習に対する態度を改善することができます (Slavin, 1981)。この戦略については多くのことが書かれており、海洋学者が書いた協同学習に関するお薦めの本もあります (McManus, 2005)。オクラホマ大学のチームベースの学習に関するウェブサイトには、豊富な情報が掲載されています (<http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/>)。ここでは、協同学習の重要な要素を紹介することを目的としています。何故なら、この戦略は、私たちが提唱する探究型の教育と学習の手法にうまく統合されるからです。

チームベースの学習は、教室や研究室でも、教室外でも、学生が授業の課題をこなすために利用することができます。様々な形があります (例えば Hassard, 2005; Joyce and Weil, 2009)。例としては以下のようなものがあります。

- シンク・ペア・シェア。生徒はまず質問や問題について自分で考え、その考えを隣の席の生徒と議論します。その後、各ペアが自分の考えを教室で共有します。
- ラウンドテーブルまたはサークルオブナレッジ。3人以上のグループで、与えられた問題についてブレインストーミングを行い、自分のアイデアを記録します。その後、各グループがそのアイデアを教室で発表します。
- ジグソー。チームに分かれて、各生徒は学習課題の1つの側面を調べることになります。その後、生徒は自分のテーマをチームメンバーに教えます。同じテーマを与えられた生徒は、自分のチームに発表する前に「エキスパート・グループ」を作り、ブレインストーミングや議論を行うことができます。
- 建設的な論争をする。チームまたはペアの生徒が、ある問題の反対側に割り当てられます。各チームは、自分たちの主張を調べ、準備し、発表します。すべてのチームが発表した後、教室でその問題について議論します。

必須要素

チームベースの学習にどのような戦略を用いるかにかかわらず、この手法を成功させるためにはいくつかの重要な要素が必要です。まず、講師は個人とグループの学習に対する説明責任を促し、グループの時間は社交の場ではなく、グループの学習目標を達成するために使われるようにしなければなりません。第二に、講師は学習チームの学生の中に相互依存関係を築く必要があります、学生は「運転手とヒッチハイカー」のような状況は受け入れられないことを知らなければなりません。チームメイトは、チームの成功が各メンバーの個人的な学習に依存していることを知り、グループの任務を完了するためにはお互いが必要であると感じなければなりません (つまり、共に「のるかそるか」)。この最初の2つの要素は、任務の分割、役割の割り当て、フィードバックの提供、個人の学習成果の評価によって達成することができます。また、「運転手とヒッチハイカー」のような状況を避けるために、チームのメンバーをランダムに配置し、教室での議論ではグループを代表して主導的な役割を担うようにします。

もう一つの重要な要素は、生徒が協力的なスキルを学び、身につけなければならないということです。このスキルには、効果的に協力するためのスキル (例えば、積極的に話を聞く、タスクを継続する、要約する、アイデアを記録する) と、グループの「精神」を維持するためのスキル (例えば、お互いに励まし合う、フィードバックを与える) が含まれます。最後に、生徒は自分たちがどれだけチームとして機能しているかを振り返る機会を与えられるべきです。グループがどのように機能しているか、また、どのように協調的なスキルを使っているかは、個人、チーム全体、または教室全体で評価することができます。

私たちの経験では、これまで協同学習に参加したことのない学生は、他のチームメンバーによって自分の成績が左右されるのではないかと懸念し、最初はこの手法を好まないようです。そこで、学生には、グループのプロジェクトや機能性についての相互評価が、最終的な成績に一定の割合で寄与することを伝えています。チームの相互評価は、各メンバーが個別に行いますが、学生は自分の評価が他のメンバーに伝わらないことを保証されています。学生は、次のような質問 (例えば Angelo and Cross, 1993) を用いて、チームがどれだけうまく協力したかを評価するよう促されます。

- ・ 今回の課題で、あなたのグループはどのように協力しましたか？
- ・ グループメンバーのうち、ほとんどの時間、積極的に参加した人は何人いましたか？
- ・ ほとんどの場合、グループワークのために十分な準備をしていたグループメンバーは何人いましたか？
- ・ グループで学んだことの中で、一人ではおそらく学べなかったであろう具体的な例を一つ挙げて下さい。
- ・ 他のグループのメンバーがあなたから学んだことの中で、おそらく他では学べなかったであろう具体的な例を1つ挙げて下さい。

また、それぞれの学生には、以下のような質問を通して、自己評価をしてもらいます。

- ・ グループでの作業はどのくらい快適でしたか？
- ・ 積極的に参加しましたか？
- ・ チームメンバーの話をどれだけ聞きましたか？
- ・ 他のチームメンバーが教材をよりよく理解できるように、どの程度まで手助けしましたか？
- ・ アイデアや概念を理解できないとき、チームメンバーに助けを求めましたか？

最後に、各学生は、自己を除く各チームメンバーの課題への貢献度(100点満点)を評価し、その評価の説明をするよう求められます。相互評価のための評定式に関する情報は、Team Based Learningウェブサイト(http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/?page_id=176)に掲載されています。

チームは生徒が形成(自己選択)することもあれば、講師が形成(ランダムまたは意図的に)することもあります。自分で選んだチームや無作為に割り当てられたチームは、異質ではなく、また能力も同等ではないグループになる可能性があります。原則として、グループは、グループとしての成功を実感できるだけの期間、一緒にいる必要がありますが、チームの力関係が逆効果になるほどの期間ではありません(例えば、チームメンバーが固定された役割になってしまう場合など)。また、グループの大きさも様々です。小規模なグループでは、一般的に各メンバーの参加率が高く、必要とされるソーシャルスキルも少なく、グループはより迅速に作業することができます。大規模なグループでは、より多くのアイデアが生み出され、作成されるグループレポートの数は少なくなります。

ただ単に生徒に「一緒にやろう」と言うだけでは十分ではありません。動機を与え、健全な競争意識を持たせることで、生徒のやる気、関与、チームへの貢献度を高めることができます。報酬の仕組みには、チームポイント(最も多くのポイントを獲得したチームが勝利)、基準達成(チームメンバー全員が85点以上の得点を獲得するなど、あらかじめ設定された基準を達成したチームが報酬を受け取る)、チーム改善(生徒が過去のパフォーマンスを改善してチームに貢献する)などがあります。チーム改善の場合は、達成度の高い人も、平均的な人も、低い人も同じようにベストを尽くすことが求められ、チームメンバー全員の貢献が評価されます。

参考文献

- Angelo, T.A., and K.P. Cross. 1993. *Classroom Assessment Techniques: A Handbook for College Teachers*, 2nd ed. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 448 pp.
- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science*. Oxford University Press, 476 pp.
- Joyce, B.R., and M. Weil. 2009. *Models of Teaching*, 8th ed. Allyn and Bacon, 576 pp.
- Michaelsen, L.K., and R.H. Black. 1994. Building learning teams: The key to harnessing the power of small groups in higher education. Pp. 65–81 in *Collaborative Learning: A Sourcebook for Higher Education*, vol. 2. S. Kadel and J. Keehner, eds, National Center on Postsecondary Teaching, Learning, & Assessment, University Park, PA.
- McManus, D.A. 2005. *Leaving the Lectern: Cooperative Learning and the Critical First Days of Students Working in Groups*. Anker Publishing Company Inc., 210 pp.
- Slavin, R.E. 1981. Synthesis of research on cooperative learning. *Educational Leadership* 38(8):655–660.

第5章. 重力波

本章のねらい

本章の課題の目的は、一般的な波動、特に重力波に慣れ親しむことです。共鳴、固有振動数、静振などの概念を実演します。また、授業の議論では、測定とその統計、寸法解析などの話題が強調されます。

背景

波は海でも湖でもいたるところに存在し、特に表面の重力波は海岸でよく見られる光景です。重力波は、風から海への運動量の伝達、砕波による混合の促進、浜辺の浸食、浜辺での浮遊物の蓄積など、さまざまな海洋過程において重要な役割を果たしています。レクリエーションや大衆文化における重要性（サーフィン）やその破壊力（津波）は、内陸部に住む学生にとっても身近なものです。しかし、このような波は、大学や高校で調和運動を教える際にはほとんど使われていません。

課題内容の説明

授業ではまず、生徒たちに身近な波や海に関連する波について説明してもらいます。ほとんどの生徒は、表面重力波、津波、音、光などに精通しています。スリンキーを使って、横波と縦波の違いを説明します（例えばHewitt, 2008）。波長、周波数、振幅、周期、伝搬（または位相）速度、媒質中の粒子の移動方向など、波の記述子について説明します。また、波によって運ばれるもの（エネルギー、情報）と運ばれないもの（媒質の構成要素。例えば、泡の破片は波が通過する際に上下に揺れるが、波の周期に合わせて大きく伝播することはない）についても説明します。例として、観客が立って順番に手を挙げたときに得られるスタジアムの観客の波の例を挙げています。この波は観客の中を伝わっていくので、観客が席に座ったままで情報が伝達されていく様子がよく分かります。授業の前に読み物を用意して（例えばDenny (1993)の第13章）、生徒に波に慣れ親しんでもらい、毛細管現象や内部波などの追加的な話題を授業中に探究できるようにすれば、時間を節約できるでしょう。以下の活動は、教室が一斉に行う順序として提示されており、生徒は3~4人の小グループに分かれて着席し、議論を行います。

課題5.1. 波の速さと水深(図5.1)

材料

- 底面から1.5 cmと6 cmのところに印をつけた長方形の水槽 (sciencekit.comより)。
- ストップウォッチ
- 水の入った容器

手順と説明

まず、振幅の小さい（高さ $\ll$ 波長の）波の速さに影響を与える特性は何かを考えてもらいます。通常、提案される量は、重力 (g , 重力加速度 [復元力], 次元 L/T^2), 波長 (λ , 次元 L), 深さ (H , 次元 L), 密度 (ρ , 次元 ML^3) です。次元解析をするだけで (Box 5.1参照), 波の伝搬速度は $\sqrt{gH}$ か、 H/λ の任意の関数の $\sqrt{g\lambda}$ 倍に比例することを思いつきます。一般に、波長が伝播する深さよりも小さい波（深層波, $\lambda \ll H$ ）は、海底との相互作用がなく、その速度は波長に依存します（分散波といいます）。波長が伝播する深さよりも大きい波（浅瀬の波, $\lambda \gg H$ ）は底面と相互作用し、深さが伝播の要因になると考えられます（これを「非分散波」と呼びます）。波長の長い波は、より深く浸透します（波の浸透する深さと、表面から深さへの振幅の減少は、いずれもその波長に比例します）。波は界面にありますが、波に伴う運動は深部で感じられます。波の速度が流体の深さに依存するかどうかを調べるために、次のような課題を行います。

生徒の各グループは、小さな長方形の水槽 ($L = 30$ cmの長さ) を受け取ります。水槽には深さ1.5 cmの水が入っています。生徒たちは、水槽の片側を机から持ち上げて波を起こし、そ



図5.1. 波の速度と波の深さ。水深1.5 cmまで水を入れた水槽で、「水撥ね」の回数を測定します。

BOX 5.1. 次元解析

次元解析は、観測された現象とそれに関連する物理変数との間に存在する可能性のある関係を探るために用いられる強力な手法です。ほとんどの物理量は、長さ (L)、質量 (m)、時間 (T)、電流 (I)、温度 (t) の5つの次元の組み合わせで表すことができます。

例えば、ブランコの周期を決める物理的特性を知りたいとします。ブランコの物理的特性は、その質量 (m) とロープの長さ (L) です。ブランコに作用する復元力は重力です (重力加速度 g [L/T^2] に関連しています)。これらすべての変数を使って、ブランコの周期に関連する時間の次元を得るにはどうすればよいのでしょうか。この次元を得るための唯一の組み合わせは $\sqrt{L/g}$ です。意外なことに (一部の人にとっては)、この単純な分析は、ブランコの質量が何の役割も果たしていないことを示唆しています。この結果は、経験的に簡単に検証することができます。

次元解析は、流体力学全般、特に地球流体力学において、支配的な数学的記述が複雑かつ非線形であることから、非常に有用です。次元とスケーリングを利用することで、現象を研究するための方程式を (項を「スケールアウト」することで) 単純化することができます。

れを元に戻し、5秒間の間に波が壁を往復した回数を記録するように求められます (この間に約6回の水撥ねが起こります; 図 5.1)。そして、この情報をどのようにして速度の指標にするかを学生に考えてもらいます (タンクの長さ $\times$ 単位時間当たりの水撥ね回数 = $30 \text{ cm} \times 6/5 \text{ 秒} \div 0.36 \text{ m/s}$ に対し、次元解析から算出された速度: ($\sqrt{gH} = 0.38 \text{ m/s}$)。予想される不確かさは 10~20% のオーダーです (反応時間と、最後に摂動の位置を特定する精度を考慮した場合)。その後、水槽を水深 6 cm まで満たします。波の伝播の測定を繰り返すと、5秒間に約12回跳ね返ることが分かります (速度 $\div 0.72 \text{ m/s}$ に対し、次元解析から算出された速度: ($\sqrt{gH} = 0.76 \text{ m/s}$)。観測結果が初期の波長の振幅 (グループ間で異なります) に依存しないことに注目しましょう。水槽の中の波は 60 cm の波長を有しています ($\lambda \gg H$)。

理論的な予測 ($\sqrt{H}$ 依存性) が正しければ、水深を4倍にすれば波の速度が2倍になり、従って (実際に観測されたように) 5秒間に移動する距離も2倍になるはずであるという事実を議論します。複数のグループが参加した場合や反復を行った場合には、速度の平均値や中央値、分散の尺度やその不確か実性など、結果の統計的記述子を導入して計算することができます。

この段階で、「津波は深い波なのか、浅い波なのか」を問います。津波の横方向の広がり、地震で破壊された断層帯の長さ (約10万 m) で決まり、海の最大水深は約1万1000 m とかなり小さいので、浅瀬の波と言えます。では、何故これほど

の破壊力があるのでしょうか。速度が水深に依存する ($\sim\sqrt{H}$) ことを考えると、表面の重力波は、水深が浅くなって波長が短くなると減速します。つまり、浅瀬の波の「前」は、深さが浅くなると「後」よりもゆっくりと伝わっていくのです。波の浅瀬化が進むと、波の急峻さが増し (谷と頂上が近づきます)、最終的には波が砕けます。外洋では時速数百 km、高さ数 cm の津波も、岸に近づくと時速は遅くなり、高さは何 m にもなることがあります。

また、浅瀬では波の速度が遅くなるため、波が斜めになって海岸に到達すると、波の屈折が起こります。波の屈折とは、スネルの法則でよく知られているように、伝搬速度の変化によって波面の方向が変わることです。波が海岸に斜めに近づき、海底を感じると、水深の浅い部分の「波列」は水深の深い部分に比べて速度が遅くなり、水深の等高線に沿った形になります。波の屈折については、Google画像検索を利用すると、ウェブ上に多くの優れた画像が掲載されています。

課題5.2. 内部波 (図5.1)

材料

- 仕切りのある長方形のタンク (sciencekit.comより)
- ストップウォッチ
- 容器 2つ: 1つには真水、もう1つには塩分 (または糖分) を含んだ着色水 (約75 g のコーシャーソルトを1Lの水道水に溶かしたもの)

手順と説明

同じ長方形の水槽を使って、密度の異なる流体の界面(例えば、海洋の成層。課題1.4参照)で発生する内部波を実演し、議論します。水槽はプラスチック製の仕切りを入れて2つに分けることができます。一方には淡水を、もう一方には塩分(または糖分)を含んだ着色水を入れ、仕切りを外したときに何が起こるかを予想してもらいます(課題1.4も参照)。仕切りが取り除かれると、密度の高い液体が密度の低い液体の下に流れます。それぞれの区画の液体が水槽の反対側に到達すると、色の異なる2つの液体の界面に沿って内部波が前後に伝わります(図5.2)。このときの波の速度を測定してみると、先ほどの2つの表面重力波よりもかなり遅いことが分かります。海洋では、砕け散る内部波は、混合層の底部や急峻な地形の周辺で熱や栄養塩を混合する役割を果たしています(例えばKunze and Llewellyn Smith, 2003)。また、内部波は、植物プランクトンが成長するのに十分な光を得ることができるように、暗闇の中にあった水を表面近くの太陽に照らされた位置にまで上昇させることができます。同じ励起エネルギーと波長であれば、内部重力波の振幅は表面重力波よりも著しく大きいのです。これは、表面重力波の水と空気の密度対比に比べて、内部波では水の層間の密度対比が小さいため、一定の波高に対する重力復元力(及び、波に関連する位置エネルギー)が小さくなるためです(内部波の別の図解は、Franks and Franks, 2009を参照)。

この段階で、静振と共振の概念を導入します。水槽の仕切り板を持ち上げて2層系を擾乱すると、最初は多くの波が励起されます。しかし、水槽の形状に合った(共鳴した)波だけが残ります。その結果、1つの波が特定のリズムで水槽内を往復して

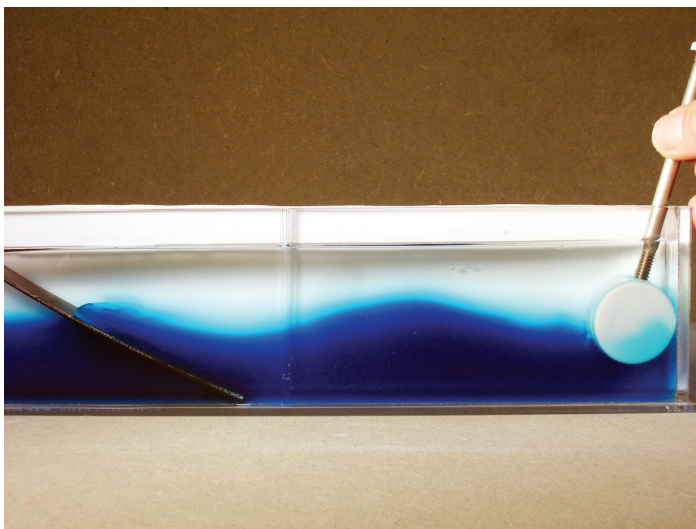


図5.2. 内部波。密度の異なる2つの流体(密度の高い青い水と、密度の低い透明な水)の界面に発生する内部波。水槽の右側には共振を実演するためのパドル(本文参照)が、左側には浅い地形を模したプラスチック片が置かれています。

伝わっていくことになります。楽器の弦や空気室の大きさに応じて異なる原音が得られるのと同じように、実験水槽や湖、湾などの水盤の形状によって、強制力を加えたときにどの波が励起されるか、また嵐の通過などによってどの波が解放されるかが決まります。これらの波は、水槽の「自然」モードであり、「静振」と呼ばれ、その周波数は「自然」周波数と表現されます。固有振動数で水槽を強制的に動かすと、これらの波が励起される現象を“共振”と呼びます。共振を実証するために、波かき棒(高さ2 cmほどのプラスチック製で、水槽と同じ幅のもの。図5.2)を使います。成層した水槽の中で、先ほど励起した波の周期に合わせて、パドルを下げたり上げたりします。つまり、周期の短い強制力(1秒程度の頻度でパドルを下げたり上げたりする)を加えると、表面重力波が形成されます(こぼれないように注意して下さい)。周期の長い強制力(10秒程度の頻度でパドルを下げたり上げたりする)を加えると、内部波が発生します。水槽の一端にプラスチック片を斜めに挿入すると、浅い地形が再現され、砕けた内部波を観察することができます(図5.2)。

課題5.3. 浮力振動(図5.3)

材料

- 成層流体(底に塩水、上に淡水)を入れた、背の高いメスシリンダー
- 2つの流体の界面付近で動かないように、バラストとして粘土を付けたピンポン玉(またはバラストとしてワッシャー [重り]を入れた試験管)

手順と説明

海で見られる最も高い周波数の内部波である浮力振動は、メスシリンダーと目盛り付きのフロート(図5.3左パネル)、またはバラストとして粘土を取り付けた重り付きのピンポン玉(図5.3右パネル)を使って簡単に実演できます。濃い塩分を含んだ水を導入し、淡水と重ね合わせます。浮遊物は2つの層の境界に導入され、細い棒で下に押し下げることで振動させます。振動の周波数(浮力またはBrunt-Vaisalla振動数と呼びます)は、2つの層の密度のコントラストの関数です。次元解析から予想されるように、振動数は密度勾配の平方根に比例します。学生は、異なる密度勾配を持つメスシリンダー内の振動のタイミングを測ることで、この依存性を調べることができます。上級者には、この問題の数学的記述を紹介することができます。この数学は比較的簡単で(1次元の波動方程式で事足ります)、やりがいがあります(例えばGill, 1982)。

流体波のテーマは広大で魅力的です(例えばLeBlond and Mysak, 1978, Lighthill, 1978 の上級向け教科書を参照して下さい)。流体は、表面張力から、音、光、重力波、さらには渦状の

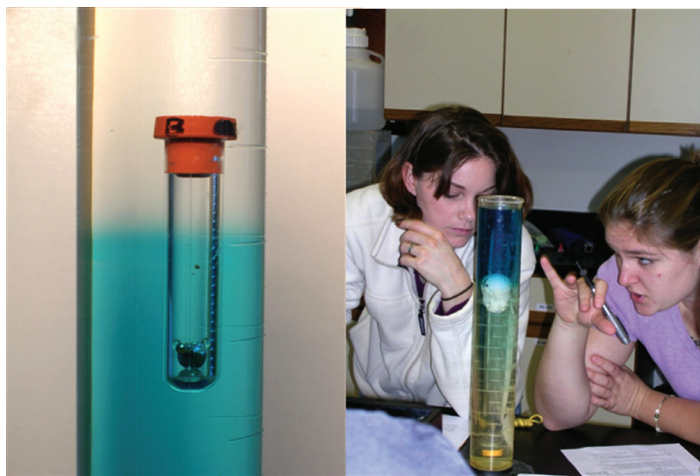


図5.3. 浮力振動。中程度の密度の物体が、密度の高い底部の流体と密度の低い上部の流体の層の間に置かれています。この物体を押し下げると、流体の密度の差に依存した周波数で振動します。

惑星波(地球の自転の影響を受けた角運動量の大きい大規模な波)に至るまで、さまざまな波を担保しています。波は流体の情報伝達物質であるため、強制力の変化(例えば、海上の風のパターンの変化)は波の励起につながります。例えば、ラ・ニーニャ/エル・ニーニョ現象では、太平洋赤道域の貿易風が大きく弱まります。この変化により、赤道に沿って西から東に伝播するケルビン波が励起され、海面の高さを示すリモートセンシング画像(例えば<http://oceanmotion.org/html/impact/el-nino.htm>)で観察することができます。海洋生物への影響は、リモートセンシングで取得された海色データ/画像でも観察されます(例えば<http://svs.gsfc.nasa.gov/stories/el-nino/index.html>)。

参考文献

- Denny, M.W. 1993. *Air and Water: The Biology and Physics of Life's Media*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 360 pp.
- Franks, P.J.S., and S.E.R. Franks. 2009. Mix it up, mix it down: Intriguing implications of ocean layering. *Oceanography* 22(1):228–233. Available online at: <https://tos.org/hands-on-oceanography> (accessed April 23, 2021).
- Gill, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, Orlando, FL, 662 pp.
- Hewitt, P.G. 2008. Chapter 12 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.
- Kunze, E., and S.G. Llewellyn Smith. 2003. The role of small-scale topography in turbulent mixing of the global ocean. *Oceanography* 17(1):55–64. Available online at: http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/17_1.html (accessed August 13, 2009).
- LeBlond, P.H., and L.A. Mysak. 1978. *Waves in the Ocean*. Elsevier Oceanography Series, 20. Elsevier, Amsterdam, 602 pp.
- Lighthill, J. 1978. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 504 pp.

その他の出典

- Duxbury, A.C., A.B. Duxbury, and K.A. Sverdrup, 2000. Chapter 9 in *An Introduction to the World's Oceans*, McGraw-Hill.
- Garrison, T., 2009. Chapter 9 in *Essentials of Oceanography*, 5th ed., Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA.
- Pinet, R. 2000. Chapter 7 in *Invitation to Oceanography*. Jones and Bartlett Publishers Inc., Sudbury, MA.
- Pond, S., and G.L. Pickard, 1983. Chapter 12 in *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press.
- Thurman, H.V. 1997. Chapter 9 in *Introductory Oceanography*. Prentice Hall.
- Waves, Tides and Shallow-water Processes*. The Open University, Pergamon Press.
- Movies of internal waves in continuously stratified fluids: http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/iw/index.htm
- Movies of shear-induced breaking internal waves (Kelvin-Helmholtz instability): http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/kh/1/res.htm

謝辞

私たちの科学教育の手法は、科学者、教育専門家、そして長年一緒に仕事をしてきた科学の先生方との共同作業によって生まれ、育まれてきました。他の学際的な協働と同様、統合された共同の教育活動を確立するには、時間と粘り強さが必要でした。慣れない職業文化に身を投じ、馴染みのない用語に慣れることも必要でした。しかし、学生や私たちにとって数え切れないほどのメリットがあるため、努力する価値は十分にありました。私たちは、この協働を促進し、支援してくれた米国科学財団のCOSEEプログラムと、*Oceanography*の補遺に資金を提供してくれたことに感謝します。また、これらの課題の開発に参加し、有益なフィードバックを提供してくれた学生や先生方にも感謝しています。ご協力頂いたAnnette deCharon氏、議論を盛り上げてくれたJohn Thompson氏に感謝します。Sharon Franks, Robert Feller, Tonya Claytonの各氏には、徹底的なレビューと素晴らしいコメントをいただき、原稿を大幅に改善することができました。最後に、Ellen Kappel氏のサポートと熱意がなければ、この文書の出版は実現しませんでした。彼女とVicky Cullenの献身的で卓越した編集作業、そしてJohanna Adamsのレイアウトとデザインに感謝します。

—Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, Herman Weller,
James Loftin, and Jennifer Albright

[HTTPS://TOS.ORG/HANDS-ON-OCEANOGRAPHY](https://tos.org/hands-on-oceanography)



THE OCEANOGRAPHY SOCIETY

JAPANESE VERSION | APRIL 2021