

出前授業のための「振り子」教材の整備

舟田 敏雄^{*1*2} 岩本 大^{*1} 清水 啓介^{*1} 船津 佑介^{*1} 石本 拓也^{*3} 中道 義之^{*2*4} 大庭 勝久^{*1*2}
宮内 太積^{*2*5} 川上 誠^{*1*2} 望月 孔二^{*2*6}

Preparation and Arrangement of Education Materials of Pendulums for Service Seminar

Toshio FUNADA^{*1*2} Dai IWAMOTO^{*1} Keisuke SHIMIZU^{*1} Yusuke FUNATSU^{*1} Takuya ISHIMOTO^{*3}
Yoshiyuki NAKAMICHI^{*2*4} Katsuhisa OOBA^{*1*2} Tatsumi MIYAUCHI^{*2*5}
Makoto KAWAKAMI^{*1*2} and Kouji MOCHIZUKI^{*2*6}

Abstract: Education materials of pendulums are reexamined as a candidate for the service seminar to be held at secondary and elementary schools. A simple pendulum will be taught to the fifth grade students at elementary schools as a major subject of science, thus new feasibility studies on the teaching plans are much made in the 2009 academic year. Tracing back many education documents reported before, we may find useful clues for the plans which concern with higher level resources of PBL (Problem Based Learning) at colleges of technology. Education resources on pendulums provided at foreign universities and colleges are also revisited through the Internet. The results are summarized in this report.

Keywords: Education Materials for Service Seminar, Various Pendulums, Multimedia Education Tools

1 はじめに

小・中学校への出前授業の題材の一つとして「振り子」に取組む計画である。振り子は、身近で観察・実験できる力学現象であり、以前から小学校の教材に組み込まれている。特に2009年4月1日より小学校の「新しい学習指導要領の先行実施」が始まっており、その理科の実態を調査・研究して、その振り子の教程に出前授業を適合させる必要がある。また、小学校の教程が中学校でどのように展開され、高専の教程に繋がるのか、さらに高専の専門基礎教育との関わりをいま分析することも大きな教育改革の流れの中で重要なものと思われる。他方で、振り子は簡単に実現できる非線形現象であり、非線形力学・カオス工学の基礎教材としてむしろ新たに評価されている。その意味では、高専高学年・専攻科の専門教育の教程の高度化の一つとして、また国際的技術者教育推進の視点から、さらに学科や専門枠を越えた共同教育研究の課題として様々な工学分野の総合的視点から取組むことが求められる。本報告では、先ず小学校から高等教育までの教程と様々な取組報告・研究報告の調査状況を述べ、関連する手持ちの資料と合わせて出前授業への課題等をlist-upする。

先ず、小学校5年理科の現行の指導要領^[1]では「(3)おもりを使い、おもりの重さや動く速さなどを変えて物の動

く様子を調べ、物の動きの規則性についての考えをもつようにする。ア 糸につるしたおもりが1往復する時間は、おもりの重さなどによっては変わらないが、糸の長さによって変わる。イ おもりが他の物を動かす働きは、おもりの重さや動く速さによって変わる。」とあり、「内容の取扱い」では、「(4) 内容の「B 物質とエネルギー」の(3)については、児童がア又はイのいずれかを選択して調べるようにするものとする。(5) 内容の「B 物質とエネルギー」の指導に当たっては、2種類程度のものづくりを行うものとする。」となっていた。新指導要領^[2]では「(2) 振り子の運動」に限定され、「内容的扱い」では現行の(5)だけとなり「振り子」が必修になっている。いずれもアは「振り子の等時性」を意味しており、授業の報告や教育研究報告では「糸の長さ、錘の重さ、初期振れ角」によって振り子がどう運動するかが検討されている。新指導要領の方向は、具体的現象をよく観察し、科学的思考力を養い、その展開・応用力(ものづくり、工学技術)を培う上で効果的であるように思われる。これまでに様々な振り子教材・授業への取組^{[3],[4]}があるので、この2009年度の移行期にそれらの教育資産を再訪問してみるのには意義深いものと言えよう。それはまた、出前授業に向けて、事前調査と位置づけられる。

次に、中学校の「新しい学習指導要領[第1分野]2内容」^[5]には、(5) 運動とエネルギー: 物体の運動やエネルギーに関する観察、実験を通して、物体の運動の規則性やエネルギーの基礎について理解させるとともに、日常生活や社会と関連付けて運動とエネルギーの初歩的な見方や考え方を養う。」とあり、「ア 運動の規則性、イ 力学的エネルギー」が示されている。さらに高校課程^[6]では、力学的energy保存則を用いて様々な振り子あるいは振り子に関連する

^{*1} 電子制御工学科: Department of Digital Engineering.

^{*2} 専攻科: Advanced Engineering Course.

^{*3} 東芝テック株式会社, オートID・プリンタ事業本部, 技術統括部, 第三技術部, TOSHIBA TEC CORPORATION, Hardware Design Group, Engineering Dept.III.

^{*4} 総合情報センター: Information Technology Center.

^{*5} 機械工学科: Department of Mechanical Engineering.

^{*6} 電気電子工学科: Department of Electrical & Electronics Engineering.

現象が挙げられている．但し，中学・高校課程では energy を理解することに主眼がおかれ，具体的に振子を課題としている授業例は少ないように見受けられる．しかし，課題研究等ではむしろ様々な振子への教育的取組が行われており，世界物理年を機会に始まった物理チャレンジ^[7] のようなコンテスト等，賛同できるものも多い．

ここでは，振子に係る教材と教程の調査状況を示し，振子の実験学習教材を分析し，応用的な振子の例や数値解析結果を示し出前授業での活用を検討する．そして，小中学校の教育と技術者教育との接続を図り，振子を用いた高専高学年並びに専攻科研究の課題や工学的応用を述べる．

2 振子教材

検索で見出した振子教材情報に基づき，「振子の種類」と「振子の利用法」を次の小節に示す．また，外国の高等教育機関で提供している振子教材と国内の教材を比較する．

2.1 代表的な振子

- (1) 単振子，(2) 二重振子，(3) 円錐振子/球面振子
- (4) 物理振子 (剛体振子)，(5) 倒立振子/倒立二重振子
- (6) Blackburn 振子 (Y 字型振子)，(7) V 字型振子
- (8) 2 本 (点) 吊り振子/3 本 (点) 吊り振子
- (9) 4 本 (点) 吊り振子/多点吊り振子
- (10) サイクロイド振子，(11) フーコー (Foucault) 振子
- (12) ボルダ (Borda) の振子，(13) バネ振子
- (14) 連成振子/弁慶振子，(15) 三段振子
- (16) Newton's Cradle (カチカチボール，衝突振り子)
- (17) ケーターの振子，(18) Wilberforce 振子
- (19) ブランコの運動 (Mathieu 方程式)
- (20) 振子の二足歩行モデル/多関節機構
- (21) クレーン，マニピュレータ

ここでは前述の振子の日本語呼称の番号を英語呼称に対応させた．呼称が同じであっても実体が異なるものやある呼称が幾種類も指す場合があり，用語には注意を要する．

振子の利用法

- (a) 下げ振り (b) 計時 (振子時計)
- (c) 重力測定 (d) 地震計
- (e) 回転・振動 (f) 制振 (震)，免振 (震)

科学 (理科) では通常 (b)，(c)，(d) が挙げられるが，工学的な応用 (ものづくり) の立場から (a)，(e)，(f) を加えた．

2.2 外国の高等教育機関の「振子」教材

高等教育でのカオスの解説として The Pendulum Lab.^[8] が有名である．振子に関する歴史的研究から様々な振子の分類に関しては “Pendulums in Physics Education”^[9] を参考にした．また，The International Pendulum Project (IPP)^[10] が設けられており，その活動に注目して情報収集している．

- ◇ Ballistic pendulum (Blackwood pendulum)
- ◇ Bifilar pendulum → (8)，◇ Blackburn pendulum → (6)

- ◇ Colliding pendulums (Newton's cradle) → (16)
- ◇ Conical pendulum → (3)
- ◇ Coupled Pendulums (Pendulum snake) → (14)
- ◇ Cycloidal pendulum → (10)，◇ Damped pendulum
- ◇ Double pendulum → (2)，◇ Elastic pendulum
- ◇ Foucault pendulum → (11)，◇ Inverted pendulum → (5)
- ◇ Kater pendulum → (17)，◇ Physical pendulum → (4)
- ◇ Ring pendulum，◇ Simple pendulum → (1)
- ◇ Spring-mass pendulum → (13)，◇ Torsion pendulum
- ◇ Two-dimensional pendulum，◇ Variable gravity pendulums
- ◇ Wilberforce pendulum → (18)

3 振子に関わる教程

初等・中等教育における振子教材とそれに関する授業あるいは課題研究等を調査した．

3.1 小学校 5 年の理科「単振子」

様々な教育の取組や教材研究等が Internet 上に公開されており，その幾つかは次に示される．

- ◇ K B (Kneading Board) を活用した理科授業の実践-第 5 学年「ふりこの動きとおもりのはたらき」の単元において- 茨城県阿見町立本郷小学校 教諭 宮本直樹
<http://kb.nime.ac.jp/example/2006/pdf/e5-rika-furikonougoki.pdf>
 理科学習指導案 <http://kb.nime.ac.jp/example/2006/pdf/e5-rika-furikonougoki-shidouan.pdf>
- ◇ さいたま市内の教員が作成した学習指導案の中から参考となるものを収集 http://www.saitama-city.ed.jp/03siryo/sidouan/e/e_rika.html
- ◇ 富山県総合教育センター: “デジタル理科室へようこそ” 小学校の理科室 力学 おもりの動きとはたらき (ふりこ) 小学校 <http://rika.el.tym.ed.jp/cms/>



Fig.1 Role of bobs of pendulum and on slider for science learning material made by HAKUBUN. Photo is the catalog of KAWASHIMA KYOZAI. <http://members3.jcom.home.ne.jp/kawashimakyouzai/science/science.htm>

教材例として，市販教材を Fig.1 に示す．この教材は「移行措置対応教材」であるので，振子と衝突による運動量交換の両方の実験ができるよう工夫されている．また，「V 型ふりこなので，横ブレせずにふりこが振れる」と注意書きしてある．この教材を入手することが出来たので，研究室

で実験して出前授業に備えている．振り子教材への取組^{[3],[4]}に見られるように，振り子の等時性を観察して科学的に認識できるようになると，初期振れ角が大きいとき振動周期が長くなることを観察で気づく小学生が多い．

小学校 5 年の単振り子は，当学科の工学数理の教程では次のようになる．質量 m の錘を長さ L の糸で支持点に繋ぎ，鉛直軸から測る糸の傾き角を θ ($\theta \equiv \theta(t)$, t : 時間) と表す．初期 ($t = 0$) に θ_0 ($0 < \theta_0 < \pi/2$) だけ傾けて静かに放すと，錘は振り運動する．この運動は，運動方程式 $mL^2\ddot{\theta} = -mgL \sin(\theta)$ の初期値問題として記述できる．この数値解析結果は，Fig.2-4 に示される．それらは，微小振幅の仮定の下で「振り子の等時性」が成り立つならば，12 周期が観察される時間 ($0 \leq t \leq 2\pi \times 12$) での計算結果である．初期角度 $\theta_0 = \pi/6$ (Fig.2) の場合と大きな角度にあたる $\theta_0 = \pi/3$ (Fig.3) の場合，位相面図では差異がはつきりせず，また周期は 12 弱と 11 強の程度で僅かな差である．さらに，弛まない糸 (あるいは質量を無視できる棒) の場合 $\theta_0 = 0.9\pi$ (Fig.4) の結果では，周期が長くなり，振動波形も異なることが分かる．

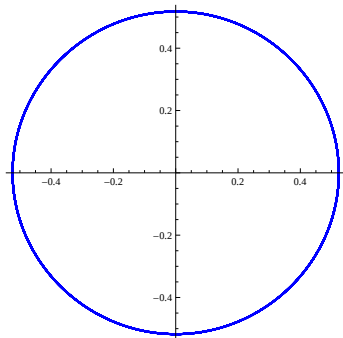


Fig.2a Phase portrait of $(\theta(t), \dot{\theta}(t))$ in $0 \leq t \leq 2\pi \times 12$ for $\theta(0) = \pi/6$.

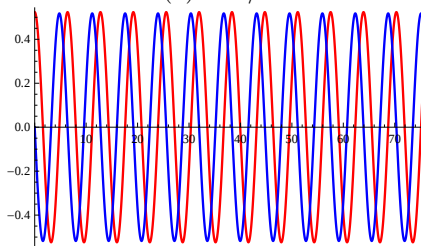


Fig.2b Time sequence of $\theta(t)$ and $\dot{\theta}(t)$ versus t in $0 \leq t \leq 2\pi \times 12$ for $\theta(0) = \pi/6$.

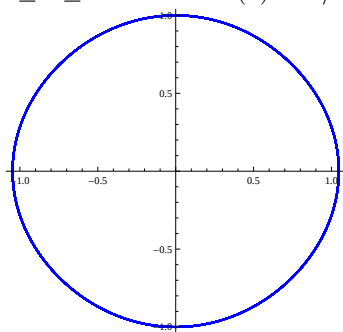


Fig.3a Phase portrait of $(\theta(t), \dot{\theta}(t))$ in $0 \leq t \leq 2\pi \times 12$ for $\theta(0) = \pi/3$.

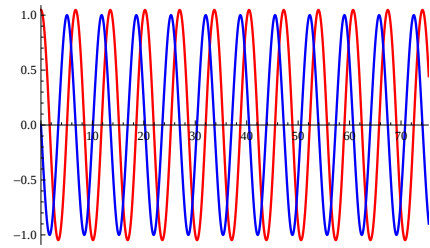


Fig.3b Time sequence of $\theta(t)$ and $\dot{\theta}(t)$ versus t in $0 \leq t \leq 2\pi \times 12$ for $\theta(0) = \pi/3$.

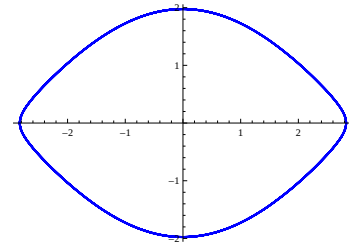


Fig.4a Phase portrait of $(\theta(t), \dot{\theta}(t))$ in $0 \leq t \leq 2\pi \times 12$ for $\theta(0) = 0.9\pi$.

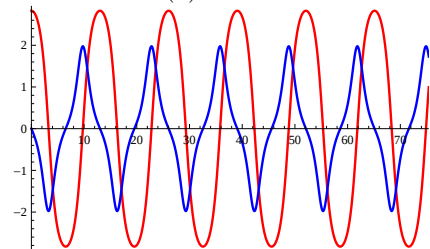


Fig.4b Time sequence of $\theta(t)$ and $\dot{\theta}(t)$ versus t in $0 \leq t \leq 2\pi \times 12$ for $\theta(0) = 0.9\pi$.

前述の単振り子の運動方程式を積分して，力学的 energy E の保存則が導かれる：

$$E = \frac{m}{2} L^2 \dot{\theta}^2 + mgL (1 - \cos(\theta)) \quad (3.1)$$

これを書き換えて，初期角度 θ_0 と最下点 ($\theta = 0$) の区間で積分し，半周期 T は次式で求められる：

$$T(\theta_0) = 2 \int_0^{\theta_0} \left[\frac{2g}{L} (\cos(\theta) - \cos(\theta_0)) \right]^{-1/2} d\theta \quad (3.2)$$

周期は $2T$ であるが，計算結果の数値を評価し易くするため， T の値を用いる．種々の初期角度に対する T の値は，小振幅から大振幅の振動について，Table 1 に示される．

Table 1 Half period $T(\theta_0)$. For the infinitesimal amplitude oscillation of a simple pendulum, $T(0) = \pi$.

$T_1(0.0001) = 3.14159265$	$T_1(0.1) = 3.14355726$
$T_1(\pi/6) = 3.19628400$	$T_1(\pi/3) = 3.37150071$
$T_1(\pi/2) = 3.70814935$	$T_1(0.9\pi) = 6.51060588$

3.2 中学校理科「energy と単振り子」

中学 3 年生の課題研究「振り子の振動伝達について」^[11] (Fig.5) を取り上げる．この課題は連成振子の共振による energy 伝達に関するもので，よく観察して実験結果をまとめている．この実験課題は，中学・高校生向けの「第 4 回全国物理コンテスト 物理チャレンジ 2008 (<http://www.phys->

challenge.jp/img/pdf/poster2008.pdf) の第 1 チャレンジ実験課題」にもなった．なお，後掲の Fig.8 の系も参照されたい．

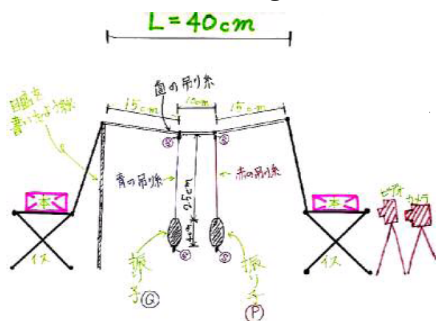


Fig.5 Apparatus sketch of coupling pendulum oscillation made by Miharuru Yamada.^[11]

この振子の連成振動は，著者等も先に simulation 結果を報告したもの^{[12],[13]} であり，要点は以下に示される．Fig.6 の振子系の運動を記述するために，点 O を原点とし，線分 OR に沿って水平方向に x 軸，鉛直下方を y 軸とし，鉛直面内に取ったデカルト座標系 (x, y) を用い，点 R の位置を $x_0 = (x_0, 0)$ と表す．各質点の位置を $x_{Pi} \equiv x_{Pi}(t) = (x_{Pi}, y_{Pi})$ ($i = 1, 2, 3, 4; t$: 時間) と表し，鉛直軸から測った各系の傾き角度をそれぞれ $\theta_i \equiv \theta_i(t)$ と表すと，平面極座標系 (r, θ) を用いて，4 つの質点の位置は次のような関係式で表される：

$$\begin{cases} x_{P1} = L_1 \sin(\theta_1), & y_{P1} = L_1 \cos(\theta_1), \\ x_{P2} = x_{P1} + L_2 \sin(\theta_2), & y_{P2} = y_{P1} + L_2 \cos(\theta_2), \\ x_{P3} = x_0 + L_3 \sin(\theta_3), & y_{P3} = L_3 \cos(\theta_3), \\ x_{P4} = x_{P3} + L_4 \sin(\theta_4), & y_{P4} = y_{P3} + L_4 \cos(\theta_4) \end{cases} \quad (3.3)$$

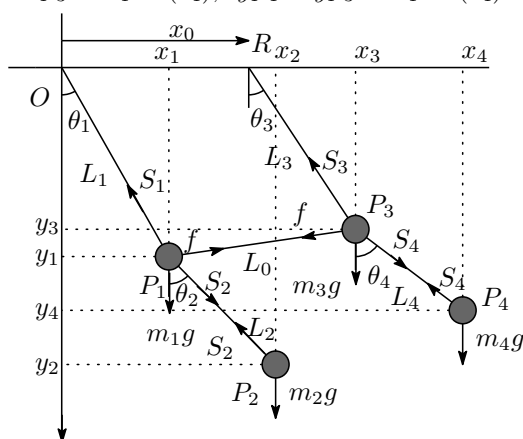


Fig.6 Coupled oscillation of four pendulums with a spring which yields the restoring force expressed as

$$f = -k(x_{P1} - x_{P2} - L_0).$$

この系 (Fig.6) の運動を記述する Lagrange 関数 $\mathcal{L}$ は，デカルト座標系を用いて，次のように表される：

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{m_1}{2} (\dot{x}_{P1}^2 + \dot{y}_{P1}^2) + \frac{m_2}{2} (\dot{x}_{P2}^2 + \dot{y}_{P2}^2) \\ & + \frac{m_3}{2} (\dot{x}_{P3}^2 + \dot{y}_{P3}^2) + \frac{m_4}{2} (\dot{x}_{P4}^2 + \dot{y}_{P4}^2) \\ & - \frac{k}{2} \left(\sqrt{(x_{P1} - x_{P3})^2 + (y_{P1} - y_{P3})^2} - L_0 \right)^2 \\ & + m_1 g y_{P1} + m_2 g y_{P2} + m_3 g y_{P3} + m_4 g y_{P4} \end{aligned} \quad (3.4)$$

この右辺の第 1-4 項は各質点の運動 energy を表し，第 5 項はバネに蓄えられる弾性 energy，第 6-9 項は重力による potential energy である．この系の力学的 energy (運動 energy と potential energy の和) は保存量である． $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 1$, $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_0 = 1$, $k = 1$ と設定し，初期値を $\theta_1(0) = 0.03$, $\theta_2(0) = \theta_3(0) = \theta_4(0) = 0$, $\dot{\theta}_1(0) = \dot{\theta}_2(0) = \dot{\theta}_3(0) = \dot{\theta}_4(0) = 0$ と取ると，(3.4) 式から導出した運動方程式の数値計算結果は Fig.7 に示される． $\theta_1(t)$ と $\theta_2(t)$ は同じ位相で振動し， $\theta_3(t)$ と $\theta_4(t)$ は同じ位相で振動する．前者の 2 つが振動するとき，後者の 2 つはほぼ止まっている状態が計算結果に現れており，前者と後者で振動の交代を繰り返す．

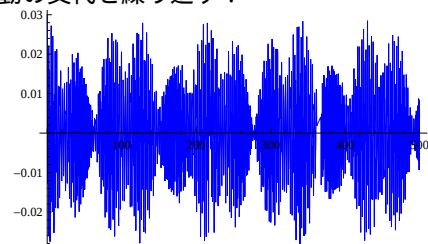


Fig.7a $\theta_1(t)$ versus time t ($0 < t < 500$).

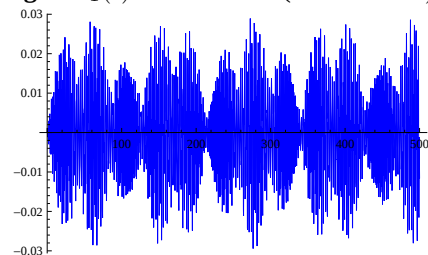


Fig.7b $\theta_3(t)$ versus time t ($0 < t < 500$).

これらの結果の「連成振子の共振現象」(Fig.7) と先の実験^[11] との振動の機構の類似点が確認できたと言えよう．

3.3 高校の物理学教材

「物理 II」の教科書^{[14]–[16]} について，力学の教程を調査した．高校でも課題研究等には興味深い報告がある．参考書として，「楽しむ物理実験」^[17] と「いきいき物理わくわく実験」^[18] が挙げられる．また「物理チャレンジは，20 歳未満で大学などの高等教育機関に入学する前の青少年を対象とした全国規模の物理コンテストです．世界物理年（2005 年）を記念して第 1 回全国物理コンテスト「物理チャレンジ 2005」が開催され，以後毎年開催しています．「高校物理」を履修していなくても挑戦することができて，物理の楽しさ面白さに触れられるのが物理チャレンジの魅力です．」^[7] と紹介されており，科学技術へのチャレンジを促す「実験」と「理論」の課題の一つに振子が出されている．

なお，日本のフーコー振り子調査リスト^[19] が公開されており，振子現象への関心を高めるために様々な装置・施設が設けられていることも記しておく．

3.4 高専の「出前授業」と「振子」教材

長野高専の「出前授業の実践報告」^[20] を参考とした．各高専でいろいろな出前授業が取組まれており，力学的な振子

のみならず「磁気振子の原理と実演」(平成 18 年度沼津高専出前授業, 中学生全学年対象, 高野明夫教授)がある。

3.5 大学サイエンス実験教育「連成振子」^{[21],[22]}

『初学を導くに専ら物理学を以てして, 恰も諸課の予備となす』この言葉は, 明治 15 年に福澤諭吉が『物理学之要』に記したもので, 当時ではいち早く自然科学に対する理念が記されていた。//出典 福澤諭吉『物理学之要』(明治 15 年) //

この取組について「平成 17 年度特色ある教育支援プログラムで選定された「文系学生への実験を重視した自然科学教育」は, 慶應義塾大学日吉キャンパスに在籍する文系 4 学部(文・経済・法・商)の学生を対象とする実験重視の自然科学教育を実践する取組である。」^[21]と紹介されており, 建学の理念としての文系学部の学生教育での物理学の位置づけが注目される。

具体的な実験課題に Fig.8 の「連成振子」^[22]がある。

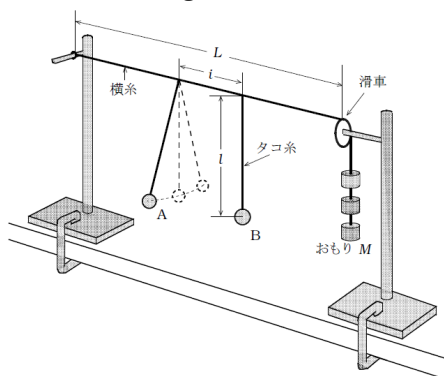


Fig.8 Apparatus for the coupling oscillation of pendulums.

3.6 Pendulum snake^{[23],[24]}

10 個の振子からなる実験装置 (Fig.9) の右端の振子は糸の長さが一番長く, 左側の振子の糸は順次短くなっている。右端の振子は 30 秒間に 15 回振動し, そこから左隣の振子は 30 秒間に 16 回振動し, 左端の振子は 30 秒間に 24 回振動するように, 単振子の周期の式 $T_1 = 2\pi\sqrt{L/g}$ に基づいて糸の長さを調整する。初期に錘を一斉に上げて静かに放すと, 相互作用せず, 各錘は振子の固有周期で振動する。周期が互いに最小公倍数となる振子同士は位相が揃う時がある。また, 全く揃わずカオス的に見える時もある。



Fig.9 Pendulum snake.^{[23],[24]}

4 振子 model の工学的応用例

本研究で実験装置の設計計画上で参考にしている制振・免振例を紹介する。浜松市のアクトタワー (<http://www.act-tower.co.jp/amenities/antishake.html>) では振子により塔の制振を行っている。台北の高さ約 400 m の Taipei 101's 730-Ton Tuned Mass Damper (<http://www.popularmechanics.com/technology/industry/1612252.html>) では, 660 トンの大きな錘を支えている振子型動吸振器の効果で, 理論上は風力による振動を最大 40% 抑制できる。地震や振動災害に対して, 免震システム^[25]や一般住宅制振用振子式同調型制振装置^[26]の開発があり, 地震の防災に関する取組は「プロジェクト「TOUKAI (東海・倒壊) - 0 (ゼロ)」^[27]にみられる。また, ユニークな「心地よい揺れに関する研究」^[28]が人間工学の最近の研究課題として注目され, 新たなロッキングチェアの開発が進められていることは興味深い。

5 振子の運動の学習環境デザインの研究^[29]

振子の運動の学習環境デザイン^[29]も先行して検討されており, 教育心理学的視点での研究として貴重である。ここでは振子の各課題の困難度により, (1) 理解の困難度が低い課題 (振子の紐の長さ), (2) 困難度が中程度の課題 (錘の重さ), (3) 困難度が高い課題 (振れ角の大きさ, 初期角度)と分類されている。さらに, 小集団あるいはクラス全体の討論で理解を再構築する場での「社会的参照」や教師による「情報の信頼性」等の興味深い分析が報告されている。

そのような視点から見ると, 実験ごとに初期角度を変える場合, ある実験と別の実験とに時間差があり小学生の記憶に依存するところが大きくなる。また, 様々な報告にも示されているように「繰り返し simulation する」ことによって「予測精度を上げる」手法が取られて来ている。それに対し, 三段振子(「ふりこの動きとおもりのはたらき」の宮本直樹先生の資料)と Pendulum snake^{[23],[24]}等に見られる「複数の振子の同時実験」により現象を観察すれば, 小学生の理解率・認識率の向上が期待され, 学習効果がさらに上がるものと思われる。

6 おわりに

今回の「出前授業のための「振子」教材の調査と整備」は, 各卒業研究で取組み, 実験, 計測, 理論解析, simulation を分担して, 言わば「共同技術者教育 (Cooperative Engineering Education)」を目指した取組であることは特に意義深い。卒業研究の進捗状況に応じて, 異分野の学問交流, 共同作業・資源利用や研究情報・成果の共有あるいは共著論文作成等を進め, 将来的な「共同技術者教育」の在り方を探り積み上げて行きたい。出前授業に関する調査・研究は, さらに次報^[30]で扱う。本報告の一部は, 先に講演発表したもの^[31]であることを付記する。

中学・高校課程の理科/物理学の教材・資料を本校教養科

の勝山智男教授に提供頂いた。ここにお礼申し上げます。

本研究遂行にあたり、本校の校長リーダーシップ経費による支援を受けたことをここに記して、柳下福蔵校長に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 文部科学省: “小学校学習指導要領 (平成 10 年 12 月告示, 15 年 12 月一部改正) 第 4 節 理科”
http://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/990301/03122601/005.htm
- [2] 文部科学省: “新しい学習指導要領 第 2 章 各教科 第 4 節 理科” http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/syo/ri.htm
- [3] 出口 考彦, 山田 仙人, 細田 宏樹: “23pZP-9 学校教育における振り子教材の研究 I” 日本物理学会講演概要集 55(1-2) (2000), 317.
- [4] 細田 宏樹, 出口 考彦: “23pZP-10 学校教育における振り子教材の研究 II” 日本物理学会講演概要集 55(1-2) (2000), 317.
- [5] 文部科学省: “新しい学習指導要領 中学校学習指導要領 第 2 章 各教科 第 4 節 理科” http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/chu/ri.htm
- [6] 文部科学省: “高等学校学習指導要領 (本文)” 平成 21 年 3 月 http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/kou/kou.pdf
- [7] 物理チャレンジ <http://www.phys-challenge.jp/>
- [8] F. Elmer: “The Pendulum Lab”
<http://monet.unibas.ch/~elmer/pendulum/>
- [9] C. Gauld: “Pendulums in Physics Education”
<http://www.arts.unsw.edu.au/pendulum/gauldBibliography.pdf>
- [10] The International Pendulum Project (IPP)
<http://www.arts.unsw.edu.au/pendulum/index.html>
- [11] 山田 美悠 (南部中学校 3 年): 平成 15 年度 小柴記念賞 中学校の部 努力賞受賞 『振り子の振動伝達について』
<http://www.toyohashi.ed.jp/koshiba/h15sakuhin/furiko/furiko.html>
- [12] 望月 孔二, 舟田 敏雄, 石本 拓也, 鈴木 健宏, 鈴木 寛里: “PSD による簡易計測システム試作のための振り子運動の基礎解析” 沼津高専研究報告 第 42 号 (2008), pp.57-66.
- [13] 望月 孔二, 舟田 敏雄, 石本 拓也, 鈴木 健宏, 小代田 和己, 鈴木 寛里, 川上 誠: “PSD による簡易計測システム試作のための振り子運動の基礎解析 (2): 数値解析” 沼津高専研究報告第 43 号 (2009), pp.55-62.
- [14] 三浦 登, 他 19 名: “物理 II” 東京書籍, 2008.
- [15] 兵頭 俊夫, 他 19 名: “高等学校 物理 II” 三省堂, 2006.
- [16] 大槻 義彦, 小牧 研一郎, 長岡 洋介, 原 康夫: “物理 II” 実教出版, 2006.
- [17] 東京理科大学サイエンス夢工房編: “楽しむ物理実験” 朝倉書店 2003.
- [18] 愛知物理サークル, 岐阜物理サークル 編著: “いきいき物理わくわく実験” 新生出版 1994.
- [19] 日本のフーコー振り子調査リスト Foucault pendulum in Japan <http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~yoshiya/foucault/list2.html>
- [20] 古川 万寿夫: “出前授業の実践報告 - 平成 18 年度の理科教育活動の場合-” 長野工業高等専門学校紀要第 42 号 (2008) 2-1.
- [21] 慶應義塾大学日吉キャンパス特色 G P 「文系学生への実験を重視した自然科学教育」
<http://www.sci.keio.ac.jp/gp/73DA2AE5.html>
- [22] 慶應義塾大学 日吉物理学教室: “連成振り子”
<http://www.sci.keio.ac.jp/gp/87B7D75A/23416F13/EB723133.pdf>
- [23] P. Doherty: “Pendulum snake – From order to chaos and back again –” <http://www.exo.net/~pauld/activities/pendulums/pendulumsnake.html>
- [24] Pendulum snake: http://www.exo.net/~donr/activities/Pendulum_Snake.pdf
- [25] 川口 衛, 立道 郁生: “並進振り子原理を用いた免震システムの開発: その 1 原理と免震床の実大実験” 学術講演梗概集. B-2, 構造 II, 振動, 原子力プラント (2000), pp.635-636.
- [26] 背戸 一登, 湯手 雄次, 土井 文夫, 松本 幸人, 小島 由紀夫: “一般住宅制振用振り子式同調型制振装置の開発研究: 第 1 報:3 階建て模型による検討” 運動と振動の制御シンポジウム講演論文集 2001(7), pp.421-424.
- [27] 静岡県総務部防災局防災情報室: “プロジェクト「TOUKAI (東海・倒壊) - 0 (ゼロ) の概要”
<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/chosa/toukai0/toukai0gai.htm>
- [28] 川島 豪: “心地よい揺れに関する研究: アクティブロッキングチェアにおける心地よい揺れ (機械力学, 計測, 自動制御)” 日本機械学会論文集 C 編 69 (2003), pp.219-226.
- [29] 高垣 マコミ, 田原 裕登志, 富田 英司: “理科授業の学習環境のデザイン—観察・実験による振り子の概念学習を事例として” 教育心理学研究 54 (2006), pp.558-571.
- [30] 川上 誠, 舟田 敏雄, 岩本 大, 清水 啓介, 船津 佑介, 石本 拓也, 中道 義之, 大庭 勝久, 宮内 太積, 望月 孔二: “出前授業のための「振り子」教材の整備: 工学的拡張と応用” 沼津高専研究報告 第 44 号 (2010), in press.
- [31] 中道 義之, 舟田 敏雄, 岩本 大, 清水 啓介, 船津 佑介, 大庭 勝久, 宮内 太積, 川上 誠, 望月 孔二: “出前授業のための「振り子」教材の調査と整備” 第 29 回高専情報処理教育研究発表会 論文集第 29 号, pp.12-15.