

## 思考実験シミュレーションを導入した理科授業における 学習支援システムに関する実証的研究

高垣マユミ (児童学科・教授)

保坂和彦 (児童学科・助教授)

### I. 問題と目的

本研究は、小学校理科のカリキュラムの中から、非常に理解が困難であることが指摘されている「おもりの動きと働き（振り子の概念学習）」の単元（第5学年で扱う）を取り上げて思考実験シミュレーションを導入した学習支援システムをデザインし、教授効果を実証的に検討することを目的とする。

現行で実施されている「おもりの動きと働き」の単元は、以下の二つの問題を抱えているため、理解が非常に困難となっている。

第一の問題は、振り子の力学現象の観察の測定として扱う時間が10分の1から100分の1秒単位という点である。振れ幅の「観測時間」及び「観測位置」を目で追いながら正確なデータを取ることは、小学生の子どもたちにとっては非常に難しい（小林, 2002）。具体的には、①「個人誤差」、②「測定値の処理方法」が障害となる。

①「個人誤差」：従来の方法では、ストップウォッチを用いて振り子が10往復する時間を測り、その平均を求めて周期を算出する方法が取られてきた。しかし、小学生の子どもたちにとって、振り子の動きを目で追いながら、振り子の位置に合わせてストップウォッチをスタート、ストップするタイミングは非常に難しく、正確なデータは測定できない。個人誤差が大きく影響するため、訓練を積まないと、毎回の測定値は一定にならない。

②「測定値の処理方法」：毎回の測定値は、必ずしも一定ではない。振り子が10往復する時間を測り、平均することによって誤差をならし、かなり理想値に近い測定値は得られるものの、小学生の子どもたちにとってみれば、得られた数値が正確な周期を表したものであるのか否かを確信することができない、という結果を導く。また、途中で測定ミスが生じたり、期待する結論が導き出せなかったりした場合、もう一度始めから10往復の周期を測定し直した上で、測定値の処理を行わなければならない。こうした周期の測定方法及び処理方法の煩雑さから、必要以上に実験に時間を要することになり、何を測定しているのかその目的自体が分からなくなってしまったりする。

第二の問題は、「ひもの長さ」、「おもりの重さ」、「振れ幅の大きさ」と周期との関係についての関係把握の困難度の「ズレ」である。すなわち、「周期はひもの長さによって変わる」という考え方は比較的簡単に子どもに受け入れられる一方、「周期はおもりの重さに関係しない」、「周期は振れ幅の大きさに関係しない」という考え方は形成されにくい（加藤, 2000）。中でも、「周期は振れ幅の大きさに関係する」という先行概念は、学校教育の場で振り子の学習を受けた後も容易に変容せず、大学生まで保持され続ける場合がある（Viennot, 1979; 隅田, 1995）。

以上の教育実践上の諸問題を前提にして、本研究では、「おもりの動きと働き（振り子の概念

学習)」という領域において、認知的側面からは、「個人誤差」と「測定値の処理方法」の問題を解決する学習ツール（「振り子の測定・集計の手続きを支援する学習ツール」）を開発する。さらに、社会的側面からは、学習者が協同で、能動的に振り子の観察・実験学習を行い、その結果に基づいて自由に議論し再検討できる活動形態を導入する。ここでは、Palincsar, Collins, Marano, & Magnusson (2000) の提案するGIsML (Guided Inquiry supporting Multiple Literacies) を採用する (FIGURE 1)。GIsMLは、学習障害児を含めた多くの学習者の読解力育成に優れた教授法として広く知られている相互教授法 (Palincsar & Brown, 1984, 1986) を、理科教育向けに発展させたものであり、学習者の能動的な学習を引き出し、科学的概念の獲得に有効であることが実証的に確かめられている。

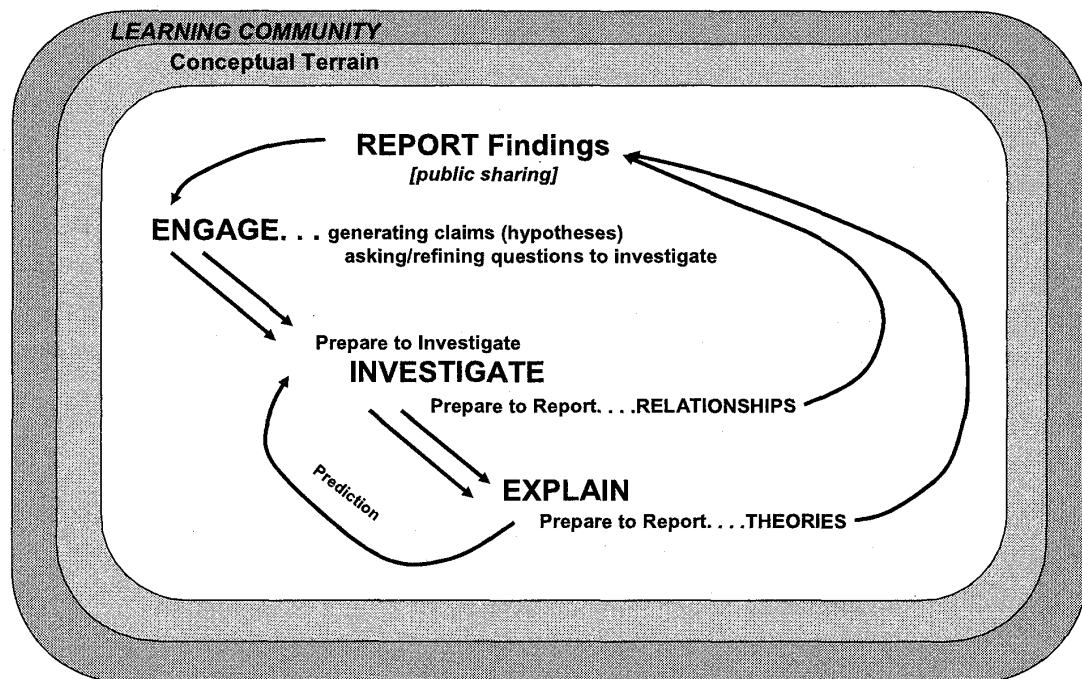


FIGURE 1 GIsML (=Guided Inquiry supporting Multiple Literacies) (Palincsar, Collins, Marano, & Magnusson, 2000)

以上より、本研究の主要な目的は、振り子の概念変化を最も促進するであろうと考えられる、「児童が振り子の運動を測定・集計する際にその手続きを支援する学習ツール」と「学習者が協同で能動的に学習に取り組む活動形態としてのGIsML」を組み合わせた学習環境をデザインし、実践授業を通して振り子の科学的概念が促進されるかどうかを検討することである。

## II. 方法

### 1. 対象児

小学校児童 5 年生 30 名。

### 2. 指導方略及び学習ツール

本研究で考案した指導方略及び学習ツールは、以下の通りである (FIGURE 2)。

①第1セッション (1h) では、ロープ製の長いブランコに乗る体験や場を設定し、日常経験を学習の起点にして体感を通して振り子の規則性を意識化させる。②第2セッション (2h~5

h) では、実験から得られたデータを収集・分析し、力学現象の中から規則性を見出させる。なお、この段階で使用する「学習ツール」は、Webカメラ・PC・振り子センサーである。振り子実験のデータをコンピュータ処理することで、「観測時間及び観測位置」を測定する際に時間軸を自由に扱うことを可能にし、「目で追うことが困難な現象」を「追体験できるスピードで可視化する」機会を与える。③第3セッション（6h～7h）では、まず、実験から得られた数値をグラフ化することで、「100分の1秒単位の微小な時間が、どのように変化していくのか」を視覚的に把握させる。児童はこれまでに誤差のあるデータを扱った経験がないため、誤差そのものの概念を理解しにくい。例えば、1.08, 1.09…と数値が並んでいても、直観的に相互の関係は把握しにくく、全体に比べれば些細な差であることに気がつきにくい。一方、グラフでは変化の様子が「線」として表されるので、相互の関係や全体との関係が直観的・視覚的に把握し易いと考えた。次に、見出した規則性に従って実験をシミュレートし、現実の力学現象と照合させる。④第4セッション（8h）では、小グループで得られたデータやアイデアを、クラス全体の場で説明させ、複数の観点から再検討する活動に積極的に関与させる。

<指導方略>

<学習ツール>

第1セッション 1h	ふりこで遊ぼう <ターザンロープにのろう> ターザンロープ(体育館の天井から吊るされたロープで、手足を使って登る運動をする器具)にぶら下がり、振り子の動きを体感する。体感を通して、振り子の規則性を意識化する。
2h	<ふりこであそぼう> ふりこリズムを使い、ふりこを運動させると一定のテンポで往復運動していることを、音＝リズムとして体感する。 ふりこの周期を変えるものは何かを予想する。
第2セッション 3h(長さ) 4h(重さ) 5h(振れ幅)	ふりこの周期を変えるもの <ふりこの周期を変える実験> 調べたいものだけを変数として、周期の変化を調べる。 ふりこの運動から得られたデータをPCでデジタル処理しながら、様々な条件を設定して、データを蓄積していく。
第3セッション 6h	ふりこシミュレーション <グラフから分析しよう> エクセルを用いて表を作成し、得られたデータをグラフ化する。 グラフから周期の規則性を発見する。
7h	<周期1秒のふりこ時計をつくるには> 6時までに見出した規則性に基づき、データを予測しながら、シミュレーションを行う。 周期1秒のふりこ時計をつくり、シミュレーションを通して、ふりこの周期を変えるものは何かを話し合う。
第4セッション 8h	まとめ <ふりこの実験をふりかえろう> グループの結果を、クラス全体の場で話し合う。

**ふりこリズム**  
「赤外線発信部と受光部の間をさえぎるとそのたびに反応し、音がなる装置」を使い、振り子は一定のリズムを刻むことを音で認識する。

**Webカメラで撮影する。**  
PCによるビデオ編集ソフトを使い、録画・再生を行う。再生画面の時間表示から、周期を測定する。

**エクセルの表に数値を入れると自動的にプロットされ、2点以上になると平滑曲線のグラフが表示される。**

**Webカメラで撮影する。**  
PCによるビデオ編集ソフトを使い、録画・再生を行う。再生画面の時間表示から、周期を測定する。

**エクセルの表の平滑曲線から規則性を読みとり、データを予測しながらシミュレーションする。**

**ネットワーク上にあるこれまでの結果の実験履歴や、他のグループの結果と比較しながら、話し合いを行う。**

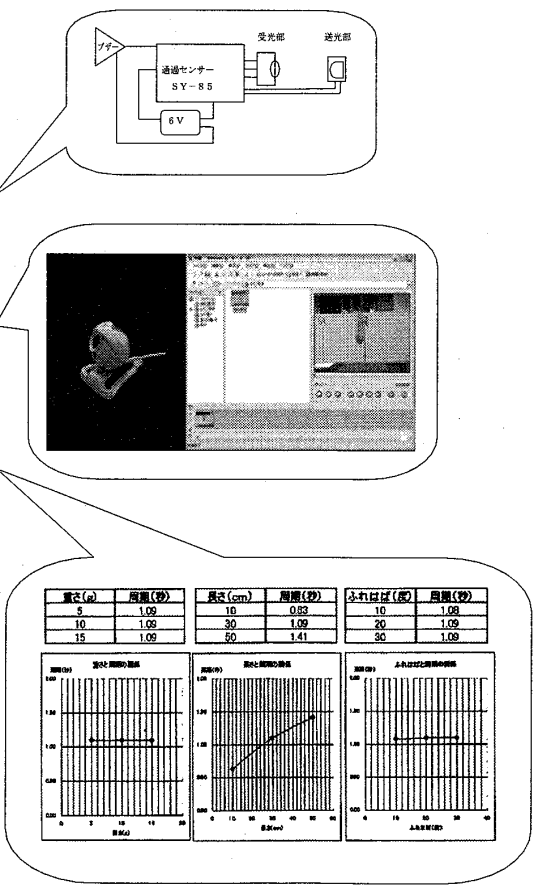


FIGURE 2 指導方略及び学習ツール

### 3. 学習形態

Palincsar, Collins, Marano, & Magnusson (2000) が示した学習形態であるGIsML (Guided Inquiry supporting Multiple Literacies) の①～④のプロセスを経る。①探究：新しい課題や現象に直面したとき、小グループにおいて何度も実験・観察の経験を繰り返して慣れ親しみ、課題や現象に対する理解を深めた上で、予測を生成する。②調査：小グループにおいて、予測を検証するために必要な器具・用具が集められ、実験・観察のデータが収集、記録される。③説明：課題や現象に対する調査結果を小グループで議論し、互いの多様な考えを取り入れながら、理論を構築する。④報告：小グループで得られたデータやアイデアを、クラス全体の公の議論の場において、「理論チャート」に基づきながら、口頭、描画化、図式化等の多様な方法を用いて説明し、理論を再構築する。なお1～7hでは「探究」、「調査」、「説明」のサイクルを繰り返し、8hでは「報告」を実施した。

### 4. 手続き

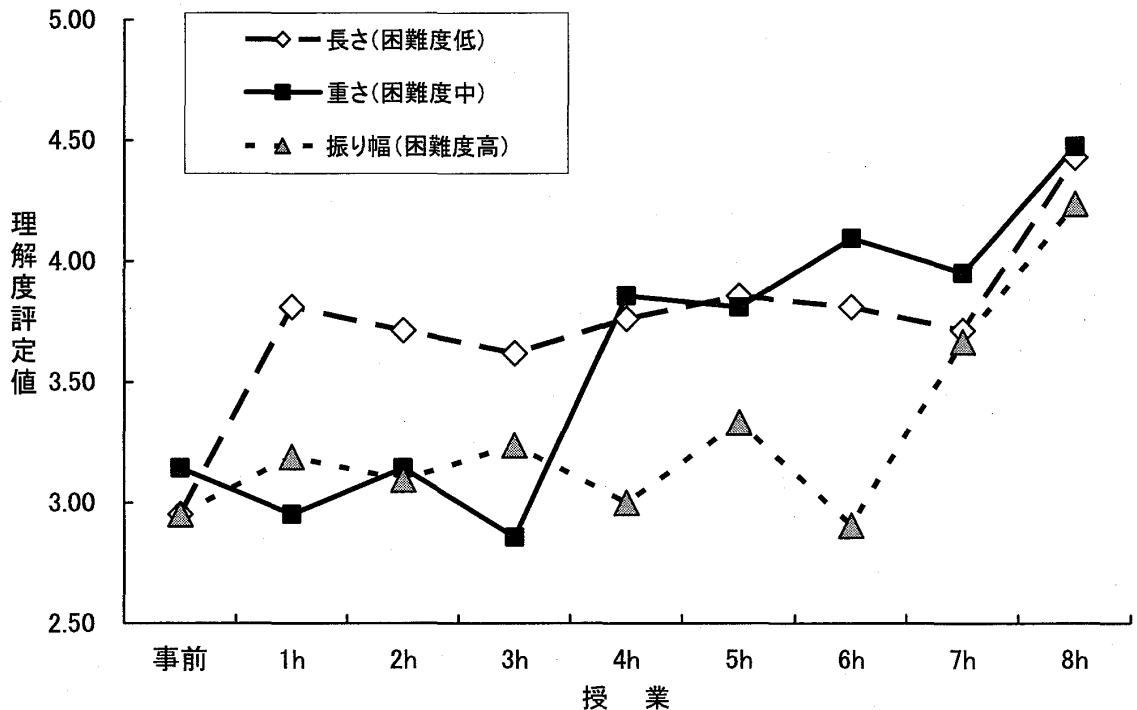
授業は、振り子の実験に関する8時間の授業が実施された。授業の内容については、1グループに1台のビデオカメラ及び1台のデジタルボイスレコーダーを設置し、映像・音声をすべて採取した。実験装置として、各グループに1台の振り子、PC、Webカメラを設置した。教師はグループ用のPCを理科室専用ネットワークに参加させファイルサーバに保存することで、各グループの情報をクラス全体で共有し、プロジェクターに投影できるようにした。

## Ⅲ. 結果と考察

学習の理解度を検討するため、事前テスト及び各授業後の事後テストにおいて、「ひもの長さ」「おもりの重さ」「振れ幅の大きさ」のそれぞれが振り子の周期を変化させる要因になるか、5件尺度上で評定するよう教示した。「おもりの重さ」「振れ幅の大きさ」については「とてもそう思う」を1点、「ややそう思う」を2点、「どちらでもない」を3点、「あまりそう思わない」を4点、「全然そう思わない」を5点とした。また、「ひもの長さ」については「とてもそう思う」を5点、「ややそう思う」を4点、「どちらでもない」を3点、「あまりそう思わない」を2点、「全然そう思わない」を1点とし、理解度評定値を算出した。理解度評定値は、得点が高いほど理解が深まっていることを示す。なお、事前テストから8hまでのいずれかの授業を受けなかった児童を除いた21名を分析対象とした。

児童の理解度が授業を受けることによって変化したかどうかを検討するために、「ひもの長さ」「おもりの重さ」「振れ幅の大きさ」のそれぞれについて、反復測定データのための1要因分散分析を行ったところ、3つ全ての評定値について、時間経過の主効果が有意であった（「ひもの長さ」： $F(8,20) = 2.37, p < .05$ 、「おもりの重さ」： $F(8,20) = 8.14, p < .001$ 、「振れ幅の大きさ」： $F(8,20) = 3.00, p < .01$ ）。それぞれの理解度評定値について、どの授業で変化が起こったかを明らかにするために下位検定を行った。その結果を示したのがFIGURE 3の下表である。それぞれの学習内容の理解が深まった時間的位置が、先行研究によって示されている「ひもの長さ」「おもりの重さ」「振れ幅の大きさ」の相対的な理解の困難度と一致していることも確かめられた。従って、本研究では、以下、「ひもの長さ」を理解の困難度低、「おもりの重さ」を困難度中、「振れ幅の大きさ」を困難度高課題と呼ぶことにする。

従来の教科書に沿った通常の授業を受けた場合、問題と目的の項で述べた通り、特に困難度



		事前	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h
ひもの長さ (困難度低)	Mean	2.95	3.81	3.71	3.62	3.76	3.86	3.81	3.71	4.43
	(SD)	(1.33)	(1.10)	(0.93)	(1.00)	(1.44)	(1.46)	(1.43)	(1.24)	(0.85)
おもりの重さ (困難度中)	Mean	3.14	2.95	3.14	2.86	3.86	3.81	4.10	3.96	4.48
	(SD)	(1.28)	(1.25)	(1.21)	(1.21)	(0.71)	(0.96)	(1.02)	(0.84)	(0.96)
振り幅の大き さ(困難度高)	Mean	2.95	3.19	3.10	3.24	3.00	3.33	2.90	3.67	4.24
	(SD)	(1.25)	(0.91)	(1.44)	(1.41)	(1.41)	(1.46)	(1.41)	(1.17)	(1.11)

\*\* $p < .01$  \* $p < .05$

FIGURE 3 困難度の高さ（振り子の3要素）別にみた各授業の事後テストの理解度評定値

高課題の「振れ幅の大きさ」に関する、周期は振れ幅の大きさに関係するという先行概念は、授業を受けた後も容易に変容しないことが報告されている。その実態を定量的に測定している研究はほとんどないが、振り幅の大きさに関する先行概念は、授業直後の5年生の約60%が固執し、大学生になっても文系の約70%、理系の約30%に保持され続ける場合がある（加藤, 2000; Viennot, 1979; 隅田, 1996）という報告との比較が可能である。ただし、従来研究においては、周期は振れ幅の大きさに関係すると思うか否かを、「思う」か「思わない」かの2値的にしか判断させていない。一方、方法の項で述べたように、本研究では「とてもそう思う」、「ややそう思う」、「どちらでもない」、「あまりそう思わない」、「全然そう思わない」の5件法の測度で判断させ、理解度をより明確に把握した。先行研究の数値と比較すると、本研究の授業を受けた場合、「振れ幅の大きさ」の理解度評定値が8hにおいて5点であった者（「周期は振れ幅の大きさに関係すると思うか」について「全然そう思わない」という理解に十分に達した者）は、61.9%（13名）に達し、先行概念に固執する者は38.1%（8名）に留まった。加えて、8hにおける「振れ幅の大きさ」の理解度評定の平均値は、「ひもの長さ」や「おもりの大きさ」とほぼ同じ値を

示し（「ひもの長さ」4.43, 「おもりの大きさ」4.48, 「振れ幅の大きさ」4.24）, 理解度評定値が5点に達した人数もほぼ同じ割合を示した（「ひもの長さ」61.9%（13名）, 「おもりの大きさ」71.4%（15名）, 「振れ幅の大きさ」61.9%（13名））。この結果は, 従来から最も理解が困難とされる「振れ幅の大きさ」の理解が, 困難度低課題の「ひもの長さ」や困難度中課題の「おもりの大きさ」と同レベルまで深まったことを, より明確な測度によって示している。

以上より, 従来の結果と比較すると, 本研究が開発・導入したGIsMLと振り子の測定・集計の手続きを支援する「学習ツール」を組み合わせた学習環境は, 振り子の力学的理解の促進に有効であったと考えられる。

本研究でデザインした学習環境の有効性としては, 以下の二つの要因が考えられる。

第一には, 「理解の困難度が高い課題（振り幅の大きさ）」の場合, 7hでは, 本研究で考案した「学習ツール」を用いて, 学習者がシミュレーションを繰り返す過程で, 『予測精度』に言及する説明活動が盛んに行われていたことが挙げられる。このとき, 「予測」とは, これからどのような現象が起こるかを考えることであるが, これに対し, 「理論」とは, 予測と一致するあるいは一致しない現象に直面した時に, なぜそのような現象が起こったのかを, これまでの経験や観察・実験を根拠にしながら考えることと定義される（Herrenkohl, Palincsar, DeWater, & Kawasaki, 1999）。7hで用いた学習ツール（FIGURE 1）は, <予測→データ→理論>→<予測→データ→理論>…と, 何度も予測に立ち返り, 予測精度を上げて「理論を解釈し直す」というシミュレーションを繰り返すことを容易にした。このシミュレーションは, 重要な科学的概念（振り子の速さは一定ではない）に目を向ける契機を与え, 先行概念（「振り子の速さは一定である」）の変化に重要な働きをもつ可能性が考えられる。

第二には, 本研究では, GIsMLの学習形態を用いて, 「小集団」での観察・実験や討論を通じた理論構築を踏まえた上で, 8hにおいて「クラス全体の討論」で理論を再構築する場を設定したことが挙げられる。8hのクラス全体の討論の場は, 理論とデータを関連づける「理論チャート」を使用した。この理論チャートは, 成員間相互の思考の参照点（成員たちの考えを対象化し, 相互に比較するための場所）として有用な役割を果たしていた。すなわち, 成員間において理論チャートとして蓄積した1h～7hの小集団における毎時間の実験履歴をレビューすることで, それまでの予測, 結果, 8hに至るまでの考えの修正過程等を可視化することができた。この理論チャートを拠り所として, クラス全体の討論過程では, この小集団が協同で能動的な学習を通して蓄積したデータと, 大多数のグループが提示したデータとは一致しているか, 理論の修正の方向性は正しいか否か, を確かめるという『社会的参照』の説明活動が能動的に行われていたことが確認された。

以上より, 本研究では, 振り子の概念学習の単元において, 学習ツール及びGIsMLの学習支援システムを導入し, 実際の理科授業において, どのような学習環境を設定すれば理解が促進されるのか, という極めて実践的な知見を提言した点で, 理論上も実践上も大きな意義があると思われる。

#### IV. 引用・文献

Herrenkohl, L.R., Palincsar, A.S., DeWater, L.S., & Kawasaki, K. 1999 Developing scientific communities in classrooms : A sociocognitive approach. *The Journal of the Learning Sciences*, 8, 451-493.

加藤尚裕 2000 振り子の特性に関する概念形成の研究—自由試行を中心にして—理科教育学研究, 40, 1-

11. (Kato, T. 2000 Characteristic concept formation and teaching the principles of the pendulum in the elementary school: The case of “messing about”, *Journal of Research in Science Education*, 40, 1-11.)
- 小林辰至 2002 実験観察に対する目的意識をどのように醸成するか 理科の教育, 51, 東洋館出版社 Pp.4-7.
- 文部省 1999 小学校学習指導要領解説理科編.
- Palincsar, A.S., & Brown, A.L. 1984 Reciprocal teaching of comprehension-fostering and comprehension-monitoring activities. *Cognition and Instruction*, 1, 117-175.
- Palincsar, A.S. 1986 The role of dialogue in providing scaffolded instruction. *Educational Psychologist*, 21, 73-98.
- Palincsar, A.S., Collins, K., Marano, N., & Magnusson, S.J. 2000 Investigating the engagement and learning of students with learning disabilities in guided inquiry science teaching. *Language, Speech, and Hearing Services in the Schools*, 31, 240-251.
- 隅田学 1996 振り子の運動の実験・観察に関する認知的考察 科学教育研究, 36, 17-27. (Sumida, M., 1995 Cognitive insights into practical work on pendulums motion in school science. *Journal of Research in Science Education*, 19, 111-120.)
- Viennot, L. 1979 Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1, 205-221.