

# 思考実験を通じた内的モデル修正の検討

## Cues to construct new internal model via thought experiments

頓部 有以子<sup>†</sup>, 松室 美紀<sup>†</sup>, 三輪 和久<sup>†</sup>  
 Yuiko Tonbe, Miki Matsumuro, Kazuhisa Miwa

<sup>†</sup>名古屋大学  
 Nagoya University  
 tonbe@cog.human.nagoya-u.ac.jp

### Abstract

In this study, we investigated which situations were effective to construct a new internal model via thought experiments. We considered two new situations different from the previous studies based on the thinking processes for constructing the new internal model. In the first situation, students construct a new internal model and apply it to the original problem situation directly. The second situation has the students realize their implicit internal model. We assume that by finding differences between such situations and the original one, they are supposed to reject their incorrect internal model and construct new one. Results of our experiments showed that these situations had only little effect to construct the new model, indicating that the construction of a new internal model was very hard because of the strong incorrect internal model constructed initially.

**Keywords** — thought experiments, internal model, physics problem solving

### 1. はじめに

現在の教育は知識偏重型であり、主体的に考える力の低下が懸念されている。本研究では、自主的に考えるための方略として思考実験を取り上げる。思考実験とは、心的に実験を実施し、観察された結果に基づき結論を導きだすことである[1]。新しい知識や情報を得ることなく、自身の持つ知識に基づいて問題の解決が行われる。思考実験は4つのステップからなる[2]。まずステップ1では頭の中で問題の状況をイメージする。続いてステップ2でイメージした状況の操作や変更を行う。ステップ3で状況に則した背景知識を利用する。ステップ4ではこれまでのステップから結果を心的に観察し、結論を導く。

本研究の目的は、思考実験を通して、学生に物理問題解決における内的モデルを修正させることである。物理問題解決においては、初期に生成した直感に頼った間違った内的モデルを、正しい内的モデルに修正することが重要であるとされている[3]。

本研究では、糸巻き問題を実験題材として扱う。図1に示された糸巻きの糸を白い矢印で示した方向へ引

つ張ったときの糸巻きの回転方向と進行方向の回答が求められる。多くの学生は回転の中心を糸巻きの軸とする誤った内的モデルを形成し、反時計回りに左方向に転がると回答してしまう。Anzai & Yokoyama [4]は、四角い糸巻きを提示することにより、糸巻きと床との接点を支点の軸とする正しい内的モデルが形成され、時計回りに右に転がるという解に到達しやすくなることを示している。

先行研究では、学生が思考実験を通して内的モデルを修正できない3つの要因が示されている[5]。第一の要因として、学生はステップ2で初期の問題状況を変更して考えることができないことが挙げられている。そのため、内的モデルを修正する手がかりとなる状況をつくることができない。第二の要因は、ステップ3で、初期の誤った内的モデルを使用することである。そのため、状況に則した知識や経験を使用することができない。第三の要因は、初期の誤った内的モデルに固執してしまい、新しく構築された内的モデルを問題状況に適用できないことである。そのため、思考実験を通して新しい内的モデルを構築できたとしても、それを元の問題状況に当てはめることができない。

このうち第一要因に関しては、教示を行えば様々な状況を作り出す操作を行えることが示されている。しかし、第二要因に関しては、先行研究では支援は行っていない。第三要因に関しては、支援をしたにも関わらず、参加者が正答にたどり着くことはなかった。以上から、第二、第三要因により内的モデルを修正することはできなかったことが示された。

そこで、本研究では第二、第三の妨害要因に着目をし、その緩和を試みる。

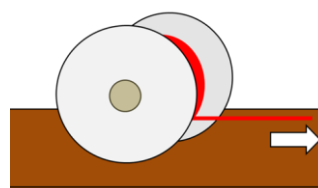


図1 糸巻き問題

## 2. 2種類の思考実験状況

本研究では、思考実験を通して内的モデルを修正できるか否かは、ステップ 1, ステップ 2 でどのような状況を構築すればよいかが重要になると考える。そこで、内的モデルの修正へと異なるプロセスをたどると考えられる 2 種類の状況を考え、その効果を検討した。

### 2.1 共通点の利用

第一に、思考実験によって新しい内的モデルを構築し、異なる問題状況にそのまま当てはめることができる状況である。思考実験の状況と問題状況の共通点に着目することにより、思考実験で観察した結果を問題にそのまま適用することができる。

先行研究で用いられた四角い糸巻き(図 2(a);以下、四角問題とする)が、この状況に当てはまる。思考実験においては、糸巻きに右の力がはたらき、引きずられる結果を観察する。学生は元の糸巻き問題との、糸巻きが平面上に置いてあるという共通点から、この結果をそのまま利用し、円形の糸巻きも右方向に移動する可以考虑することができる。しかし、先行研究から示された通り、平面上に置かれているという共通点が強く働きすぎ、誤った内的モデルが利用された上、回転方向については適用できる結果が観察できない。そこで、誤った内的モデルが用いられにくく、回転方向に関しても新しい情報を与える状況として、傾斜上に糸巻きが置かれた状況を考案した(図 2(c);以下、傾斜問題とする)。傾斜問題では、経験から坂の上を回転しながら移動する結果を観察しやすい。そこから進行方向と回転方向が同一であるという新しい内的モデルを構築し、糸巻きが机に置いてあるという共通点から、その内的モデルを元の平面上の糸巻きに適用することができると考えられる。

### 2.2 相違点の利用

第二に、思考実験によって誤った内的モデルを意識させ、問題状況との相違点に気づかせる状況である。学生は思考実験の状況と問題状況の相違点に気づくことによって、意識された誤った内的モデルとは異なる内的モデルを構築しなければならないことに気づくと考えられる。そのような状況として、糸巻きの軸に棒が通り、机から持ち上げられている状況を考案した(図 2(b);以下、軸問題とする)。軸問題では、糸を引くと糸がほどけるという結果を観察することにより、学生自身が糸を引くと糸がほどけるという内的モデルを持

っていることを意識させる。平面上に置かれた糸巻きの状況と思考実験の状況を比較することで、軸の有無の相違点に気づき、平面上に置かれた糸巻きでは糸がほどけるとい内的モデルが利用できないことに気づき、内的モデルを新しく構築しようと考えられる。これらの状況の思考実験を通した、内的モデルの修正への有効性を確認するため、実験を行った。なお、以降で糸巻き問題を言及する際は、元の平面上に円形の糸巻きが置かれた状況の糸巻き問題を指す。

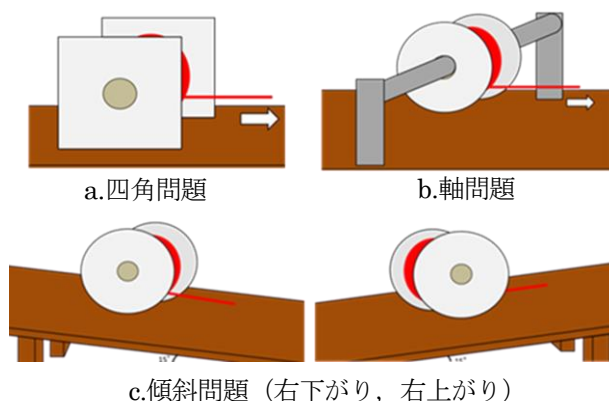


図 2 四角問題と新しく考案された問題

- 糸を引くと右に引きずられる結果を観察
- 糸を引くと糸がほどける結果を観察
- 傾斜上を回転しながら移動する結果を観察

## 3. 実験 1

新しく考案した 2 つの状況に、先行研究で利用されていた四角い糸巻きを用いた状況を加え、3 つの状況で内的モデル修正の効果を検討した。

### 3.1 方法

#### 3.1.1 実験参加者

文系の女子大学生 110 名が実験に参加した。四角問題を利用する四角条件に 35 名、傾斜問題を利用する傾斜条件に 38 名、軸問題を利用する軸条件に 37 名が振り分けられた。

#### 3.1.2 手続き

実験は集団で同時に実施された。はじめに図 1 の状況を示し、糸巻きの移動方向と回転方向を 5 分で回答させた。これをプレテストとする。条件別の各問題において糸巻きの糸を右に引いた場合の進行方向と回転方向を 5 分で回答させた(条件別問題)。ただし、軸条件に関しては、回転方向のみを回答させた。また、傾斜問

題に関しては右下がりのみを用い、糸を引く方向は、傾斜と平行に右とした。最後に、プレテストと同様に糸巻き問題を回答させた。これをポストテストとする。各問題において、回答の理由を記述させた。

### 3.2 結果と考察

図3に条件ごとに、各問題で各選択を行った参加者の割合を示す。正答に至った参加者が、全体で5名しかいなかったため、条件ごとに分析と考察を行う。

四角条件では、ポストテストで正答に至った参加者は存在しなかった(図3(a))。プレテストとポストテストにおいて、回答の偏り方に有意な差は存在しなかった(Fisher's exact test  $ps \approx 1.000$ )。グラフに示されるように、条件別問題では、16名(45.71%)の参加者が期待された回答である「回転しない、右方向」を選択した。しかし、それらの参加者も含め、プレ、ポストテストともに左回り、左方向を選択した参加者に偏りが生じた。先行研究で正答者がでなかったことを合わせて考えると、四角い糸巻きは内的モデルの修正に有効ではないことが示される。

傾斜条件では、ポストテストで正答に至った参加者は3名存在した(図3(b))。プレテストとポストテストにおいて、回答の偏り方に有意な差は存在しなかった(Fisher's exact test  $ps = .758$ )。傾斜問題では、12名(31.58%)の参加者が期待された回答である「右回り、右方向」を選択した。しかし、そのうち正答に至った参加者は2名(16.66%)であった。正答できた参加者は、ポストテストの回答理由に「糸を引く方向に糸巻きが移動する」と記述していた。ここから、正答に至った参加者は、傾斜問題で観察した結果を糸巻き問題に適用することにより、正答に至ったと考えられる。

軸条件では、ポストテストで正答に至った参加者は2名存在した(図3(c), (d))。プレテストとポストテストにおいて、回答の偏り方に有意な差は存在しなかった(Fisher's exact test  $ps = .657$ )。軸問題では、32名(86.49%)の参加者が期待された回答である「左回り」を選択した。正答できた参加者は、ポストテストの回答理由に「平面では動きを制御する軸がないため、糸を引くと右方向に移動できる」と記述していた。ここから、軸問題と糸巻き問題を比較し、軸の有無を糸巻きの動きに関連付けられた参加者が、新しい内的モデルを構築できたと考えられる。

実験1の結果より、四角条件では正答者が存在しなかったことから、四角い糸巻きは内的モデルの修正に

有効ではないと考えられる。その一方、傾斜条件と軸条件では、先行研究[5]の結果とは異なり、正答へ到達した参加者が存在した。正答者の回答から、傾斜条件では傾斜問題と糸巻き問題の共通点、軸条件では軸問題と糸巻き問題の相違点に着目をすれば正答に至ると考えられる。

## 4. 実験2a

実験1の結果から、傾斜条件と軸条件で内的モデルの修正が行われた。そこで、実験2では傾斜問題と軸問題の両方を思考させ、それぞれの糸巻き問題との共通点、相違点に気づかせることにより、内的モデルが修正されるかどうかを検討した。また、先行研究を合わせ、数百人の参加者ではじめに誤った内的モデルが構築されることが確認されたため、本実験ではプレテストを省略した。

### 4.1 方法

#### 4.1.1 実験参加者

大学1年生12名が実験に参加した。

#### 4.1.2 手続き

本実験は、事前問題2問とポストテストからなる。事前問題の傾斜問題では、右上りの傾斜に糸巻きを置いた時と、右下がりの傾斜に糸巻きを置いた時の両方において、回転方向と進行方向を4分で解答させた。実験1の結果では、傾斜問題で実験者の期待する回答を行った参加者は3割程度であった。これは糸を引くことにより誤った内的モデルが想起されてしまったためであると考え、問題に糸を引くことは含めなかった。その後、平面上に置かれた円形の糸巻きとの共通点を4分で記述させた。ただし、平面上の糸巻きの状況に関しては、糸を引くことは教示しなかった。さらに、軸にささった糸巻きで糸を右に引いた時の回転方向を4分で解答させた。その後、平面上に置かれた円形の糸巻きとの相違点を4分で記述させた。傾斜上に置かれた糸巻きと軸にささった糸巻きの思考させる順はカウンターバランスがとられた。ポストテストでは、それぞれの状況場面と平面に置かれた糸巻きをより関連付けて思考をさせるために、共通点、相違点を参考にしよう教示を行い、平面上に置かれた円形の糸巻きにおいて糸を引いた時の回転方向と進行方向を8分で解答させた。

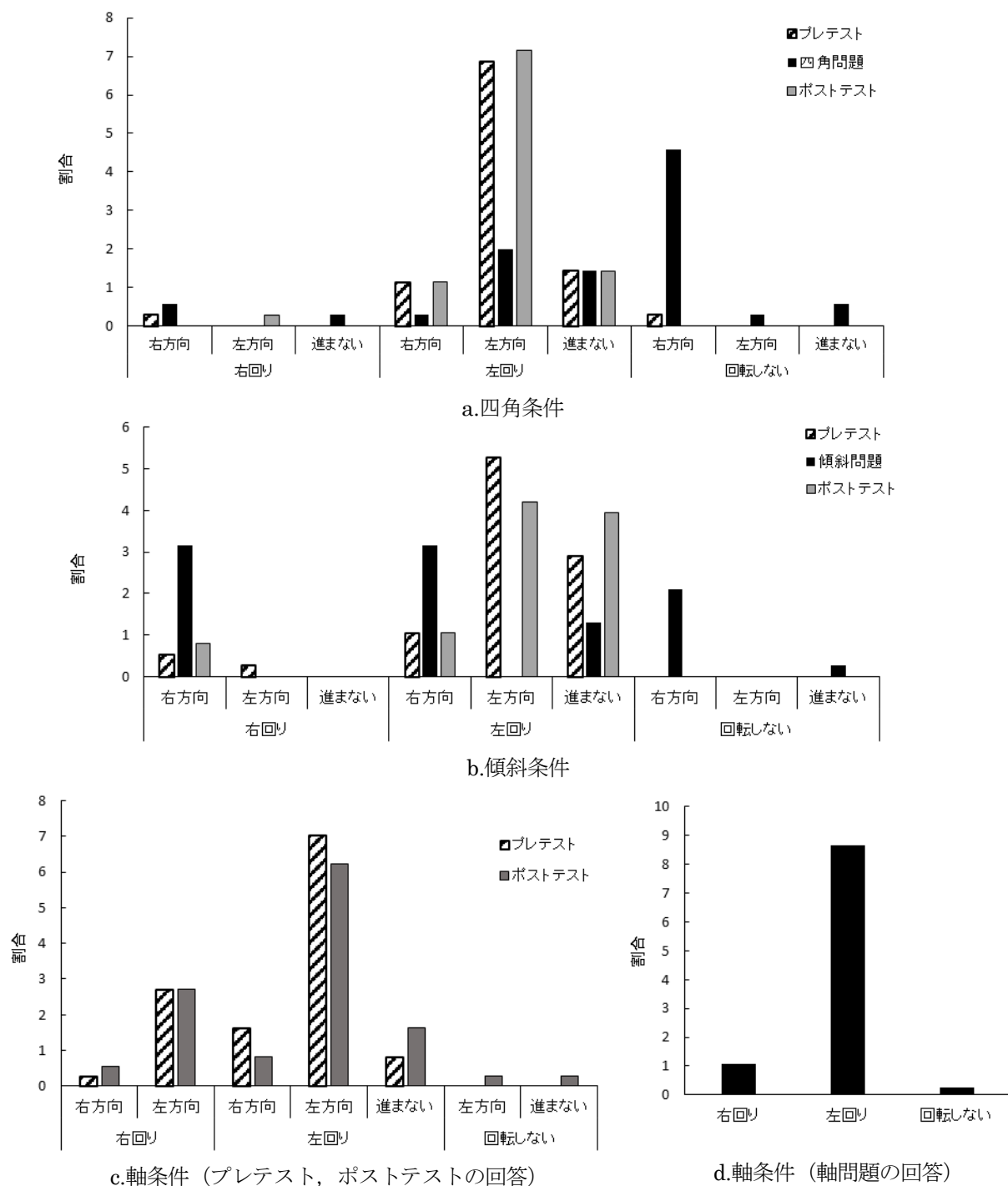


図3 各選択の回答をした参加者の割合

- a. 四角条件でプレテスト, 四角問題, ポストテストの糸巻きの進行方向, 回転方向の各選択を回答した参加者の割合
- b. 傾斜条件でプレテスト, 傾斜問題, ポストテストの糸巻きの進行方向, 回転方向の各選択を回答した参加者の割合
- c. 軸条件でプレテスト, ポストテストで糸巻きの進行方向, 回転方向の各選択を回答した参加者の割合
- d. 軸条件で軸問題の糸巻きの回転方向の各選択を回答した参加者の割合

## 4.2 結果と考察

ポストテストの回答結果を図4に示す。2名がポストテストで正答に至った。正答者が少なかったため、統計分析は実施せず、参加者の回答の特徴を述べる。

傾斜問題では、参加者全員が期待通り、右上がりの問題では「左回り、左方向」、右下がりの問題では「右回り、右方向」と回答した。この結果から、参加者は、傾斜問題では進行方向、回転方向が同一となることを理解したと考えられる。また、参加者全員が共通点の記述において、この理解を平面上の糸巻きに適用するために重要な床と糸巻きが床に接しているという点が記述されていた。

軸問題では、1名を除く参加者は期待通り「左回り」と回答した。この結果から、参加者は軸問題で糸がほどける状況を理解したと考えられる。また、参加者全員が相違点の記述において、糸巻きの軸の有無に着目した点を記述していた。

それぞれの事前問題で、実験者の期待した回答が行われていた。しかし、ポストテストでは、正答に至った参加者は2名のみであった。ポストテストの回答理由から、これまで四角い糸巻きや傾斜上の糸巻きの糸を引くことにより得られていた糸を引いた方向に力がはたらくという点を理解していなかったと考えられる。そのため、軸問題と平面上の糸巻きの相違点を、糸巻きが動くかどうかということのみ適用し、糸がほどけるという誤った内的モデルを棄却できなかったと考えられる。

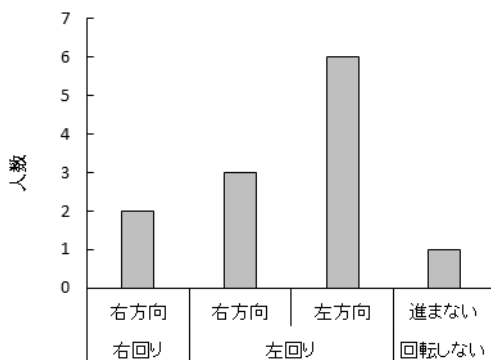


図4 ポストテストの回答

糸巻きの回転方向、進行方向の各選択を回答した参加者の人数

## 5. 実験2b

実験2aの結果から、糸巻きの糸を引いたときに引い

た方向に力がはたらくという新しい内的モデルを構築させる状況が必要であると考え、図5の問題を追加した。追加した問題では、糸巻きから糸が全てほどけ、軸から直接糸を伸ばした糸巻きの進行方向と回転方向を解答させた。これを残り糸なし問題と呼ぶ。残り糸なし問題では、糸を白い矢印で示した方向へ引っ張ったときの進行方向の回答として「右方向」が期待される。回転方向に関しては、「回転しない」か「右回り」という回答が得られると考えられる。机に糸巻きが置かれているという共通点を通して、糸を引いた方向に糸巻きが移動するという理解を平面上の糸巻きに適用することを想定した状況である。そのため、進行方向と回転方向の回答と合わせて共通点の記述を行わせた。

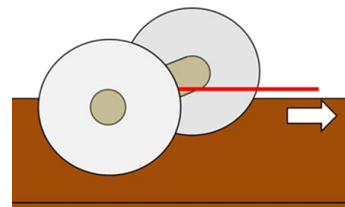


図5 残り糸なし問題

## 5.1 方法

### 5.1.1 実験参加者

大学生1年生、2年生19名が実験に参加した。

### 5.1.2 手続き

実験2aの事前問題に、残り糸なし問題の回答と共通点の記述を追加し、実験を実施した。手続きは以下の点を除き実験2aと同様である。各条件別問題の回答時間、共通点と相違点の記述時間をそれぞれ3分ずつに短縮した。また、ポストテストの回答時間を4分とした。

## 5.2 結果と考察

ポストテストの回答結果を図6に示す。1名の参加者がポストテストで正答に至った。正答者が少なかったため、統計的な分析は実施せず、参加者の回答の特徴を述べる。

傾斜問題、軸問題では、実験2aと同様に、ほぼすべての参加者が実験者の期待に沿った回答と共通点、相違点を記述した。傾斜問題で1名、軸問題で1名が期待と異なる回答が行われていた。軸から直接糸を伸ばしきった糸巻きの問題では、参加者全員が「右方向」を選択しており、そのうち半数の8名が「右回り、右方

向」を回答した。このことから、糸を引くことで右向きの力がはたらくことを理解し、ステップ3で新しい内的モデルが構築できたと考えられる。以上の結果は、3つの問題で参加者が実験者の期待する内的モデルや理解を獲得していたことを示すが、ポストテストでは正答に至らなかった。ポストテストで17名が糸巻きは「左回り」すると解答しており、誤った内的モデルは維持されたままであると考えられる。参加者は事前問題を通して、新しい内的モデルや理解、共通点を理解することができた。しかし、それらのモデルや理解は糸がほどけるという強固な誤った内的モデルにより妨害され、平面上の糸巻き問題での適用、または、新しい内的モデルの構築に利用されなかったと考えられる。3つの事前問題をすべて考慮に入れることは、負荷が高く困難であった可能性も存在する。

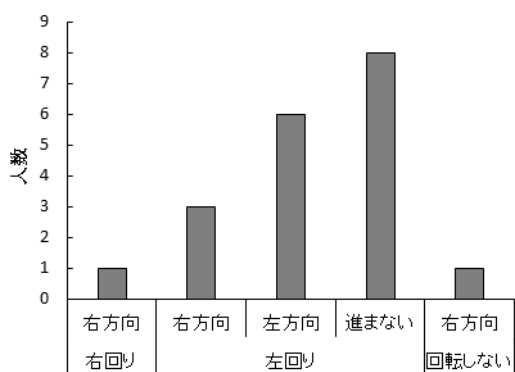


図6 ポストテストの回答

糸巻きの回転方向、進行方向の各選択を回答した参加者の人数

## 6. 結論

本実験では、内的モデルの修正に有効な状況を検討した。様々な設定をしたが、そのいずれも糸巻き問題の正しい内的モデルへ修正するには効果が薄かった。様々な状況で新しい内的モデルの構築や誤った内的モデルの意識化ができ、各状況と問題状況の共通点、相違点に気づくことは可能であった。しかし、糸がほどけるという誤った内的モデルが強固にはたらき、修正を妨げたと考えられる。以上の結果は、思考実験を通じた内的モデルの修正は、誤った内的モデルに妨害され、非常に困難であることを示す。思考実験を行う目的として、Prediction (予測), Proof (証拠), Explanation (説明) が挙げられている[2]。思考実験を通して、回答を考えることは Prediction (予測), Proof (証拠) にあたる。

本研究の結果から、誤った内的モデルを持っている場合、思考実験を通してそのような目的を達成することは困難であることが示された。そこで、今後は思考実験を行う目的の内、説明のために行われる思考実験に焦点を当て、内的モデル修正の検討を行う。

## 参考文献

- [1] Reiner, M., (2006) "The context of thought experiments in physics learning" *Interchange*, Vol. 37, pp.97-113
- [2] Kösem, Ş. D., & Özdemir, Ö. F., (2014) "The nature and role of thought experiments in solving conceptual physics problem" *Science & Education*, Vol.23, pp.865-895
- [3] Vosniadou, S., & Brewer, W. F., (1987) "Theories of knowledge restructuring in development" *Review of Educational Research*, Vol.57, pp. 51-67.
- [4] Anzai, Y., & Yokoyama, T., (1984) "Internal models in physics problem solving" *Cognition and Instruction*, Vol.1, pp.397-450
- [5] Matsumuro, M., & Miwa, K., (in press) "Three barriers to effective thought experiments, as revealed by a system that externalizes students' thinking" *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society, Philadelphia, PA: Cognitive Science Society*