

構造を理解できるようになったことが示されている [6][7][8]. 思考実験を通して、学生が物理構造を理解できたように、思考実験は内的モデルの修正に有効であると考えられる。

1.3 目的

Kösem & Özdemir は、参加者のプロトコルデータから思考実験が行われる目的を示している [5]. そこで、本研究では彼らの研究に基づき、2種類の異なる目的を持つ思考実験を行う状況を設定した。第一に、学生が問題解決を行う時、問題の解答を予測するために思考実験を行うことが示されている。ここから、本研究では、問題の解答を予測するために行われる思考実験を、予測の思考実験と定義する。問題の解答が与えられない時、解答を予測するために思考実験が行われる状況である。

第二に、予測した解答の正しさを実証したり、説明したりするために思考実験を行うことが示されている。これに基づき、本研究では、予測ではなく与えられた問題の解答について説明するために行われる思考実験を対象とし、説明の思考実験と定義する。予測した解答が問題の解答と異なる場合に、なぜそのような解答になるのかについて説明するために思考実験が行われる状況である。

予測の思考実験を通じた内的モデルの修正を試みた先行研究では、内的モデルは修正されなかったことが示されている [9]. そこで本研究は、説明の思考実験は内的モデルを修正させる効果をもつかどうかについても検討する。

さらに、先行研究で学生に与えられた思考実験の状況が内的モデルの修正に適していなかった可能性がある。そこで、本研究では、内的モデルを修正させると考えられる思考実験状況を考案し、予測、説明の各思考実験を通して内的モデルが修正されるかどうかを検討する。

2 題材

2.1 糸巻き問題

実験題材として糸巻き問題を用いる [1]. 図 1(a) に示された糸巻きの糸を白い矢印で示した方向へ引いたときの、糸巻きの回転方向と進行方向の解答が求められる。以降、これを基本問題と記す。多くの学生は糸巻きの軸を回転の中心とする誤った内的モデルを構築し、糸巻きは反時計回りに左方向に転がると解答してしまう。実際は、糸巻きと床との接点を支点とし、糸巻きは時計回りに右に転がる。

2.2 思考実験状況

内的モデルを修正させるためには、思考実験状況と基本問題の状況との比較を行い、共通点や相違点を利用することが有効であると考えられる。本研究では、共通点の発見が、内的モデルの修正に有効となる共通の思考実験状況、相違点の発見が内的モデルの修正に有効となる相違の思考実験状況を用意した。

まず相違の思考実験状況として、糸巻きの軸に棒が通り、机から持ち上げられている軸状況を考案した (図 1(b)). この状況では、糸を引くと糸がほどけるという結果を観察することが期待される。この観察により、学生に糸巻きの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。さらに、基本問題や他の思考実験状況と比較することで、糸巻きの軸に通る棒の有無の相違点に着目すると考えられる。この相違点から、学生は糸がほどけるという内的モデルは、糸巻きの軸に棒が通っていないならば利用できないことを理解すると考えられる。

続く思考実験状況へのブリッジとして、糸巻きの軸を通る棒と糸巻きの側面を固定した固定状況を考案した (図 1(c)). 学生が物理概念を理解する過程において、類似した特徴をもつ状況を挟み、類推を利用して細かいステップに分けることは、効果があると示されている [7]. 固定状況では、糸を引いても糸巻きが動かない結果を観察することが期待される。この観察により、糸を引くと、糸巻きにはたらく右方向の力を意識することができると考えられる。

続いて、共通の思考実験状況として、ひび状況を考案した (図 1(d)). 固定された糸巻きの糸を右に引き続けた結果、支柱にひびが入り、あと少し糸を引

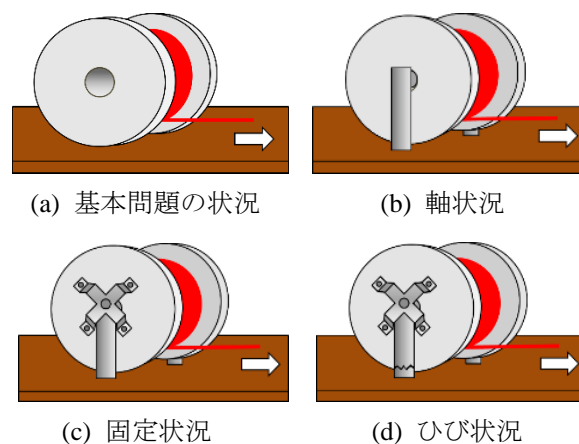


図 1：基本問題と各思考実験の状況

いたら支柱が折れてしまうという状況である。ひび状況では、参加者は、糸を引くと糸巻きを固定していた支柱が折れて、糸巻きが右方向に右回転して移動する結果を観察することが期待される。学生は基本問題の糸巻きと思考実験状況を比較することで、糸巻きを支える点が軸ではなく、糸巻き下部であるという共通点に着目すると考えられる。この共通点から、学生はひび状況の思考実験の結果を、基本問題に適用することができると考えられる。

以上の、糸がほどけるのは軸に棒が通っている時、糸を引いた方向へ力がはたらく、糸を引いた方向へ回転をしながら動くのは下部が支えられている時という手がかりから、新しい内的モデルが構築されると考えられる。

3 使用システム

本研究では、松室・三輪・白石 [10] により開発された、思考実験を PC 上で外化させるシステム Thought Experiment-externalizer (以下、TE-ext) を改良し用いた。糸巻き問題の解決のために行われた思考実験をシステムの操作系列として取得することが可能である。

TE-ext は糸巻き問題における思考実験の各ステップを外化する。ステップ 1 と対応し、図 2 に示したように、想像すべき状況が外化される。画面上部に思考実験状況、下部に基本問題の状況が提示される。ステップ 2 では糸を引く操作を加える。TE-ext では、マウスを利用し、実際に糸巻きの糸を引く感触を想像することができる。背景情報や知識が利用されるステップ 3 では、ステップ 2 において糸を引いた経験や感覚が利用される。ステップ 4 の結果の観察では、画面右下にあるアニメーションボタン部分によりアニメーションの回転方向と移動方向を指定し、

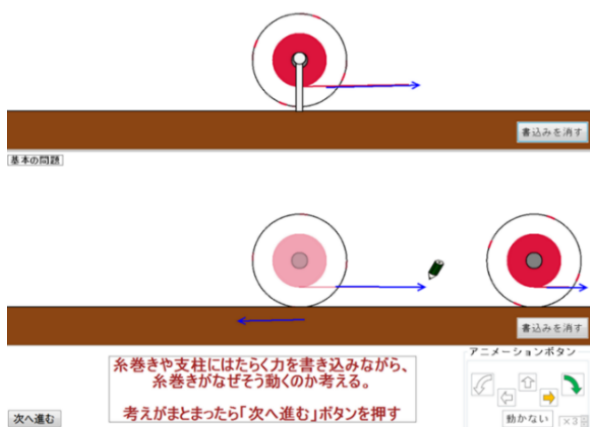


図 2 : TE-ext の操作画面。軸問題と基本問題の状況を比較した場面。

学習者が自ら糸を引いて、糸巻きの動きを観察することができる。予測した通りに糸巻きを動かすことが可能なため、全ての糸巻きの動きは完全に物理法則に従うわけではない。ステップ 5 では、なぜステップ 4 で糸巻きが観察した動きをするのかを考えるため、図 2 に示したように糸巻きにはたらいた力を矢印で書き込むことができる。

4 実験

思考実験を行う目的を操作するため、解答の提示のタイミングを操作した。思考時間に解答を予測するために思考実験を行う参加者を解答提示なし条件とした。また、思考時間前に問題の解答が与えられ、解答について説明するために思考実験を行う参加者を解答提示なし条件とした。

4.1 方法

4.1.1 参加者

文系の大学 1 年生 43 名が実験に参加した。参加者は、解答提示なし条件に 22 名、解答提示あり条件 21 名が割り当てられた。

4.1.2 手続き

4.1.2.1 解答提示なし条件

予測テスト (プレ、ポスト) と思考時間と説明テストからなる。まずプレ予測テストでは、基本問題の回転方向と進行方向を 15 分で回答させた。

続いて、TE-ext の使い方を練習した後、TE-ext を使用した 30 分間の思考を行った。この時、基本問題における糸巻きの動きを、システムにより与えられた 3 つの思考実験状況の糸巻きの動きと比較をしながら考えるよう教示を行った。思考時間では、各思考実験状況が画面上部に順番に提示される。参加者は各状況にて、TE-ext を用いて思考実験の各ステップを行った。各状況の思考実験後、各思考実験状況の糸巻きの回転方向と移動方向の回答を配布された解答用紙に記述するよう求められた。

その後、ポスト予測テストでは、システムで糸巻き問題と比較した 3 つの状況の糸巻きの動きを利用して考えるよう教示が行われ、プレ予測テストと同様の内容を 15 分で回答させた。続いて、実験者が参加者の前で平面に置かれた糸巻きの糸を引いて、糸巻き問題の解答を示した。

解答提示後、説明テストとして、なぜ糸巻きは解答のような動きをするのかを、13 分間で記述させた。また、基本問題の解答に対する納得度を、「全く納得できなかった」を 0、「とても納得できた」を 100 としてスライダーで評定する。また参加者が説明テ

トで記述した説明に対する自信度を、「全く自信がない」を0、「とても自信がある」を100としてスライダーで評定する。また基本問題の解答についての説明を記述させる際、システムで基本問題と比較した3つの状況を参考にして説明を考えるよう教示を行った。

4.1.2.2 解答提示なし条件

予測テストと思考時間と説明テスト（プレ、ポスト）からなる。まず、予測テストとして基本問題を15分で回答させた。続いて、実験者が参加者の前で平面に置かれた糸巻きの糸を引いて、糸巻き問題の解答を示した。プレ説明テストとして、なぜ糸巻きは解答のような動きをするのかを13分で記述させた。この時、解答提示なし条件と同様に、納得度と自信度をスライダーで評定させた。

続いて、解答提示なし条件と同様に、TE-extを使用した30分間の思考を行った。解答提示なし条件と異なり、システムにより与えられた3つの思考実験状況の動きと比較しながら、基本問題の糸巻きはなぜ解答のような動きをするのかについての説明を考えるように教示を行った。

その後、解答の実演を含め、プレ説明テストと同様の手続きで、ポスト説明テストを実施した。

4.1.3 説明テストの採点基準

説明テストにおける説明内容は、以下の基準に基づき採点された。学生が初期にもつ誤った内的モデルは、糸を引いた時に糸が巻かれた糸巻きの軸を回転の中心とし糸がほどけるものであった。糸がほどけると考えられた記述がみられた説明に0点を与えた。「糸が引っ張られる力の反作用として、左向きの力がある」、「糸巻きは左回りの動きをしようとする」のような記述が0点とされた。

学生が正しい内的モデルを生成するには、まず、床に置かれた物体を引っ張ったときに、物体は引っ張られた方向に移動することを理解しなければならない。よって、右方向の力がはたらいたため糸巻きが右方向に移動するという記述がみられた説明に1点を与えた。「糸を引いた方向に力が加えられ右に移動する」のような記述が1点とされた。

さらに、糸を引く右向きの力は、糸巻きの軸に巻かれた糸のみでなく、糸巻き全体にはたらくことを理解しなければならない。糸巻きの軸など糸巻き全体に右向きの力がはたらいているという記述がみられた説明に2点を与えた。「糸巻き全体に右方向の力がはたらく」、「糸巻きの上に右向きの力がはたらく」のような記述が2点とされた。

そして、糸巻きと床が接する部分に着目をする必要がある。左向きの摩擦力と糸巻き全体にはたらく右方向の力についての記述がみられた説明に3点を与えた。「右方向に力を加えると左向きの摩擦力がかかり、摩擦力により糸巻きに右回りの回転が生じる」のような記述が3点とされた。

4.2 結果

4.2.1 予測テストの回答

解答提示なし条件、解答提示あり条件の予測テストにおける各回答の選択人数を表1に示す。全ての予測テストにおいて、選択された回答に有意な偏りが存在した (Fisher's exact test $ps < .001$)。また、全ての予測テストで「左回り、左方向」が、期待値より有意に多く選択されていた ($ps < .01$)。解答提示あり条件で、「右回り、右方向」を選択した参加者1名は、初期で正しい内的モデルを生成していたことが確認できたため、以降の分析から除外した。

4.2.2 説明テスト

ひび問題は正しい内的モデルの構築において、最も重要な手がかりであると考えられるため、ひび問題で正答しなかった参加者1名を分析から除外した。

説明内容の採点は2人の評定者により行われ、評定者の採点が異なった場合、合議の上点数が決められた。評定者間信頼性は、解答提示なし条件で $\alpha = .934$ 、解答提示あり条件で $\alpha = .957$ であった。説明内容の結果を図3(a)に示す。解答提示あり条件のプレ、ポストの説明内容の点数を比較したところ、ポスト説明内容の方が有意に高かった ($t(18) = 2.306, p < .05$)。9名(47.4%)の参加者がプレ説明テストからポスト説明テストにおいて点数が上昇した。

両条件における基本問題の解答に対する納得度の

表1：予測テストで各選択肢の選択人数

		左回り			右回り			回転しない		
		左方向	右方向	進まない	左方向	右方向	進まない	左方向	右方向	進まない
提示なし	プレ	13	2	7	0	0	0	0	0	0
	ポスト	14	3	5	0	0	0	0	0	0
提示あり		16	3	1	0	1	0	0	0	0

平均を図 3(b) に示す。解答提示あり条件のプレ、ポスト説明テストの納得度を比較したところ、ポスト説明テストの方が有意に高かった ($t(18)=3.250, p<.01$)。また、解答提示あり条件の説明テストの納得度と、解答提示なし条件のプレ説明テストの納得度を比較したところ、有意な差はみられなかった ($t(40)=0.067, p=0.473$)。一方、解答提示あり条件の説明テストの納得度と、解答提示なし条件のポスト説明テストの納得度を比較したところ、ポスト説明テストの方が有意に高かった ($t(40)=2.983, p<.01$)。

両条件における解答の説明に対する自信度の平均を図 3(c) に示す。解答提示あり条件のプレ、ポスト説明テストの自信度を比較したところ、ポスト説明テストの方が有意に高かった ($t(18)=2.939, p<.01$)。また、解答提示あり条件の説明テストの自信度と、解答提示なし条件のプレ説明テストの自信度を比較したところ、有意な差はみられなかった ($t(40)=0.090, p=0.464$)。一方、解答提示あり条件の説明テストの自信度と、解答提示なし条件のポスト説明テストの自信度を比較したところ、ポスト説明テストの方が有意に高かった ($t(40)=2.794, p<.01$)。

4.2.4 思考問題

軸問題で、解答提示なし条件の 1 名を除いた参加者が実験者の期待する「左回り、進まない」を選択した。両条件で選択された回答に有意な偏りがあり (Fisher's exact test $ps<.005$)、両条件で「左回り、進まない」が期待値より有意に多く選ばれていた ($ps<.01$)。

固定問題で、解答提示あり条件の 2 名を除いた参加者が実験者の期待する「回転しない、進まない」を選択した。両条件で選択された回答に有意な偏りがあり (Fisher's exact test $ps<.005$)、両条件で「回転し

ない、進まない」が期待値より有意に多く選ばれていた ($ps<.01$)。

ひび問題で、解答提示なし条件では 3 名 (13.6%) が、解答提示あり条件では 20 名 (95.6%) が期待された解答である「右回り、右方向」を選択した。解答提示なし条件では回答の選択に有意な偏りはなかった (Fisher's exact test $p=.066$)。解答提示あり条件で、選択された回答に有意な偏りが存在し (Fisher's exact test $p<.005$)、「右回り、右方向」が多く選択されていた ($p<.01$)。

4.2.5 書き込み操作

思考実験を通して、参加者の内的モデルにおいてはたらく力が変化したかを検討するため、TE-ext の書き込みの分析を行った。ひび問題で選択された回答に、条件による違いが見られたため、ひび状況のみを検討対象とする。ひび状況で、糸巻きにはたらく右向きの力について考えることは、正しい内的モデルを生成する手がかりとなる。そこで、机に対して平行な右向きの矢印が書き込まれていたかどうかを調べた。ただし、糸を引く力を表すと考えられる矢印の書き込みは除いた。

はじめに思考実験状況を示す画面 (図 2 の上部) において、両条件、ひび状況で一度でも右向きに力を書き込んだ人を書き込みありとし、一度でも右向きの力を書き込んでいない人を書き込みなしとし、その比率を図 4(a) に示す。右向きの力を書込んだ人の割合が、解答提示なし条件より、解答提示あり条件で多かった ($\chi^2(1)=5.300, p<.05$)。

また、同様の分類を、ひび状況が上部に提示されている時の基本問題画面 (図 2 の下部) でも行った。書き込みありとなしの比率を図 4(b) に示す。右向きの力を書込んだ人が、解答提示なし条件より、解答提

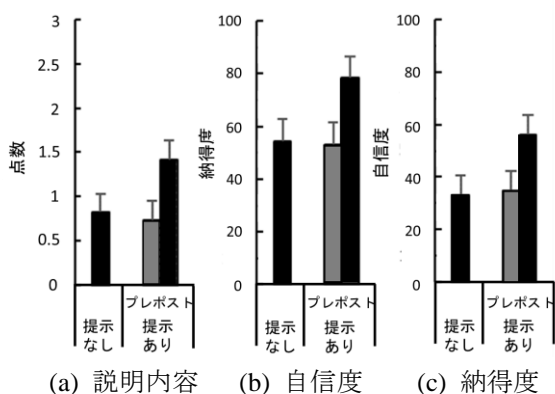


図 3：説明テスト。(a) は説明内容の平均点数。(b) は糸巻き問題の解答に対する納得度の平均。(c) は解答の説明に対する自信度の平均。

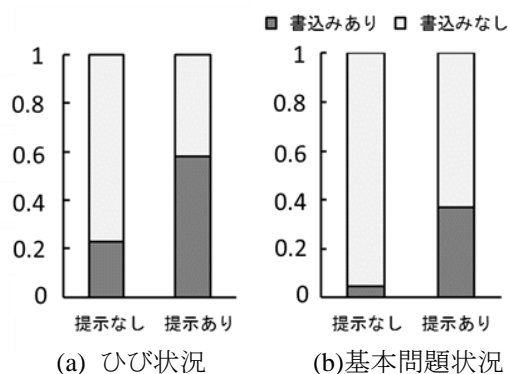


図 4：右向きの力を書込んだ参加者割合。(a) は、ひび状況画面における書き込み。(b) はひび状況と比較をした基本問題画面における書き込み。

示あり条件の方が多かった ($\chi^2(1)=6.711, p<.01$).

5 考察

本研究の第一の目的は、思考実験状況を行う 2 つの状況で、内的モデルが修正されるかどうかを調べることであった。予測の思考実験を通して内的モデルは修正されなかったが、説明の思考実験を通して内的モデルが修正されたことが示された。

予測の思考実験を行った解答提示なし条件では、プレ、ポスト予測テストで多くの参加者が「左回り、左方向」を選択していた。参加者は思考実験で与えられたひび問題で、「左回り、左方向」を選択していた。この結果は、ひび状況で糸がほどけるという誤った内的モデルが利用されていたことが示唆される。誤った内的モデルが非常に強固であり、参加者がその修正の必要性に気づけなかったため、内的モデルの修正が行われなかったと考えられる。

説明の思考実験を行った解答提示なし条件では、説明内容の向上や解答に対する納得度、説明に対する自信度の向上が見られた。思考実験状況において、内的モデルを修正させる手がかりをつかむことができたと予想する。特にひび問題では、実験者の期待に沿った回答が選択され、さらに、右方向の力の書き込みも多くなされていた。糸巻きにはたらく右向きの力が理解され、基本問題にも適用されていたことが、基本問題の画面で右方向の力の書き込みが多くなされていたことから示唆される。各思考実験から獲得された手がかりを、基本問題の状況との比較により、正しく適用できたため、内的モデルの修正に至ったと考えられる。

本研究の第二の目的は、考案した 2 種類の思考実験状況が内的モデルの修正に効果があるかどうかを検討することであった。説明の思考実験において、「糸巻きを固定する軸がない」、「軸があれば、そこを中心として回転する」のような説明の記述が見られた。軸状況と基本問題の比較において、軸による固定の有無に関する相違の発見から、糸巻きの動きが異なることを理解していたと考えられる。

そして、先述の右方向の力の書き込みからわかるように、ひび状況との共通点から、固定部分がないと力が加えられた方向に糸巻きが動くという手がかりを問題状況に適用できたと考えられる。

以上の結果は、思考実験では相違点、共通点の発見が内的モデルの修正に重要であることを示す。生徒が共通点を利用した **bridging analogy** により物理構造を理解したように [7]、共通点を利用し、思考実験から得られた手がかりをそのまま適用可能な内的モデルを修正させる有効なソースであったと考えられる。また、先行研究では、問題状況の予測と思考実

験状況で観察された結果が異なったため、予測と結果が異なった原因を状況の相違点から導きだし、内的モデルが修正されている [8]。一方で、本実験では、糸がほどけるという誤った内的モデルに基づく予測と軸状況で観察される結果が同じであったため、状況の相違点から新しい内的モデルを構築するに至らなかったと考えられる。今後さらに正しい内的モデルを構築できる思考実験状況を検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 研究費 [15H02927] の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Anzai, Y., and Yokoyama, T.: Internal models in physics problem solving, *Cognition and Instruction*, Vol. 1, pp. 397-450 (1984)
- [2] Vosniadou, S., and Brewer, W. F.: Theories of knowledge restructuring in development, *Review of Educational Research*, Vol. 57, pp. 51-67 (1987)
- [3] Gadgil, S., Nokes-Malach, T.J., and Chi M.T.H.: Effectiveness of holistic mental model confrontation in driving conceptual change, *Learning & Instruction*, Vol. 22, pp. 47-61 (2012)
- [4] Reiner, M.: The context of thought experiments in physics learning, *Interchange*, Vol. 37, pp. 97-113, (2006)
- [5] Kösem, Ş. D., and Özdemir, Ö. F.: The nature and role of thought experiments in solving conceptual physics problem, *Science & Education*, Vol. 23, pp. 865-895 (2014)
- [6] Brown, D. E.: Refocusing core intuitions: A concretizing role for analogy in conceptual change, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 30, No. 10, pp. 1273-1290 (1993)
- [7] Clement, J.: Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 30, No. 10, pp. 1241-1257 (1993)
- [8] Clement, J.: The Role of Imagistic Simulation in Scientific Thought Experiments, *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 686-710 (2009)
- [9] Matsumuro, M., and Miwa, K.: Three barriers to effective thought experiments, as revealed by a system that externalizes students' thinking, *In Proceedings of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 176-181), Austin: Cognitive Science Society (2016)
- [10] 松室美紀・三輪和久・白石愛輝: 思考実験による問題解決を目指したシステムの開発と評価, 人工知能学会第 76 回先進的学習科学と工学研究会資料, SIG-ALST-B503, pp. 30-35 (2016)