

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

Development and Evaluation of the System for Problem Solving using Thought Experiments

松室美紀^{1*} 三輪和久¹ 白石愛輝²
Miki Matsumuro¹ Kazuhisa Miwa¹ Yoshiki Shiraishi²

¹ 名古屋大学 大学院情報科学研究科

¹ Graduate School of Information Science, Nagoya University

² 名古屋大学情報文化学部

² School of Informatics and Sciences, Nagoya University

Abstract: This study aimed to develop a Thought Experiment Externalizer (TE-ext). TE-ext enables students to visualize a problem situation. Users of TE-ext can implement changes in the situation and see the result as an animation. Additionally, they can make reference to physical laws if they need. We expected that the students would have realized the benefits of thought experiment by solving the problem successfully using TE-ext. However, no one was able to reach the correct answer in our experiment. The students had a problem with carrying out an operation that made the situation different from the initial one.

1 はじめに

ここ数十年、科学教育における思考実験への関心が高まっている [1, 2]。思考実験は、学生が自身の持つ知識を状況に当てはめ考えるという、自身の知識を活用する力を育成すると考えられる。そこで、本研究では、思考実験の実施を支援するシステムである、Thought Experiment Externalizer (TE-ext) を開発し、その評価を行った。

1.1 思考実験

思考実験とは心的に実施される実験を指す。有名な例として、ガリレオ・ガリレイは思考実験により、アリストテレスの重いものは早く落ちるという理論を棄却した。はじめに、彼は重いボールと軽いボールを持って高い塔の上にいる状況を想像した。そして、それら2つのボールを紐でつなぎ、塔の上から落とすと考えた。もしアリストテレスの理論に従うとすれば、重いボールは、落下速度が遅い軽いボールに引っ張られ、単体で落下する時よりも落下速度は遅くなるはずである。しかし、同時に、繋がれた2つのボール全体の重さは、重いボール単体より重くなるため、重いボール単体よりも早く落ちるといふ、矛盾する結果も予測さ

れる。このような矛盾した結果を導く理論は妥当ではないため、ガリレオはアリストテレスの理論を棄却することができた。

上記の例のように、思考実験は科学史において重要な役割を果たしてきたとされている [3, 4, 5, 6]。例えば、ニュートンの万有引力やアインシュタインの相対性理論も、思考実験により導かれたとされている。いくつかの研究はこのような歴史的な思考実験の記録に基づき、その過程を明らかにしようとしている。

近年の研究は、思考実験は上記のような著名な科学者によってのみ行われるものではないことを示している [7, 8, 9]。例えば、Trickett and Trafton は、科学者がデータの分析において、日常的に思考実験を用いていることを示している [9]。また、Stephens and Clement は、授業中の思考実験の実施をジェスチャーに基づき抽出している [8]。

思考実験の正確な定義はまだ存在しないが、Brown や Reiner は、手続き的な定義を行っている [4, 10]。Köseme and Özdemir はそれらの定義に基づき、思考実験の流れを4つのステップにまとめている [11]。先述のガリレオの思考実験の例と対応させながら、以下で各ステップを示す。

Step 1: 状況の視覚化

重いボールと軽いボールを持って高い塔の上にいる状況を想像

Step 2: 操作の実施

*連絡先：名古屋大学 大学院情報科学研究科
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
E-mail: muro@cog.human.nagoya-u.ac.jp

- 2つのボールを紐でつなぎ、塔の上から落とす
- Step 3: 背景知識, 情報の利用
アリストテレスの理論に従う
- Step 4: 結果の観察
矛盾する2つの結果の観察

上記のステップに示される通り、思考実験は状況を心的に可視化し、特定の動きの結果を観察する過程を含む。これは、力学的推論の方略とされる、メンタルシミュレーションの一種である [12]。思考実験の重要な特徴として、ステップ2の操作があげられる。ここで、適切な操作を行うことにより、操作前の状況では適用することができなかった知識を適用することが可能となる [13]。Köse and Özdemir はステップ2で行われる操作は、推論者の持つ知識や経験に影響されることを示している [11]。最終的に、心的に観察された思考実験の結果に基づき、結論が引き出される。ガリレオの場合であれば、矛盾した2つの結果が観察されたことから、アリストテレスの理論が棄却された。

1.2 科学教育と思考実験

思考実験の実施を促進する取り組みはほとんどなされていない。Monaghan and Clement は、課題中にコンピュータシミュレーションを用いることにより、ポストテストにおいて、メンタルシミュレーションの利用が促進されることを示した [14]。しかし、彼らの研究は少人数のケーススタディである。さらに、その手法はチューターによる対面指導が必要であり、大人数の授業には不適である。そこで、本研究では、思考実験の過程をPCモニタ上に外在化することにより、学生に思考実験を用い、問題の解決を行わせるシステムである TE-ext を開発した。

2 TE-ext

2.1 糸巻き問題

TE-ext では Anzai and Yokoyama による、糸巻き問題を題材として利用した [15]。糸巻き問題とは、図1に示されるように、机の上に置かれた糸巻きから出た糸を引くと、糸巻きはどのように動くか、または、動かないかを回答する問題である。図1の場合、「糸巻きは時計回りに右に転がる」が正答となる。これは、糸巻きと机の接点が回転の中心となり、糸を引くことにより右向きの力が働くためである。

糸巻き問題の利用には2つの利点が存在する。第一に、Anzai and Yokoyama により、学生の持つ内的モデルが十分に検討されている点である [15]。学生は糸

下の図のように机の上に置かれた糸巻きから右に向かい糸が伸びています。糸を矢印の方向へ引いた時、糸巻きはどうなるでしょうか？

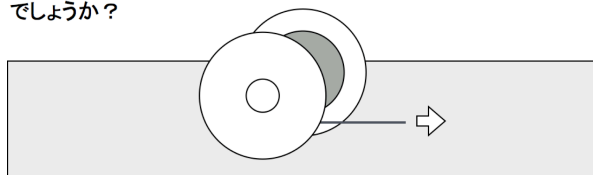


図 1: 糸巻き問題。

巻き問題について初めて考える際、糸巻きの中心にある軸が支点となり回転すると考えてしまう。そのため、多くの学生が糸を引いた際に、反時計回りに左に転がると回答する。

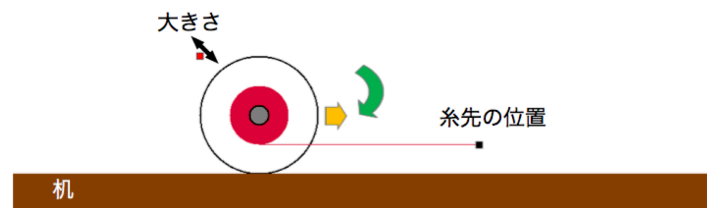
第二の利点は、正しい回答を導く内的モデルを構築するための手がかりが明らかとされている点である。Anzai and Yokoyama は、糸巻きの代わりに、糸の出ている四角い物体を置くことにより正答率が上昇することを示した [15]。これは、学生が四角い物体が回転せずに引きずられることを想像し、机と物体の接点が支点となり、右方向へ力が働くことに気づくためである。

以上の点から、糸巻き問題の解決に至るためには、思考実験のステップ2の操作において、糸巻きの形を変更して考えることが重要であることが示される。糸巻きの形を四角にして、思考実験を行うことにより、学生は机との接点を支点とする正しい内的モデルを構築できると考えられる。そのモデルを、元の円形の糸巻きに適用することにより、正しい回答が導かれるだろう。

2.2 システムの機能

図2に TE-ext の一部を示す。TE-ext には、思考実験の4つのステップそれぞれを支援する機能が搭載されている。ステップ1の状況の視覚化において、学生は糸巻き問題の状況を心的に構築する必要がある。TE-ext はステップ1の支援として、図2(a)のように、PCモニタ上に、机の上に置かれた糸巻きを真横から観察した状況を投影する。この状況が TE-ext の初期状態に当たる。この支援により、学生は心的に状況を構築することが不要となり、思考実験を始めるための負荷が軽減される。

思考実験のステップ2は状況の操作である。糸巻き問題においては、ステップ1で構築した糸巻きの状況に操作を加え、糸を引くことがステップ2に当たる。TE-ext では、学生がいくつかの糸巻きの属性を変更することが可能である。変更可能な属性は、糸巻きの大きさと形、糸先の位置、残り糸の量、糸の太さである。糸巻きの大きさと糸先の位置は、それぞれ、赤と黒の四角をドラッグすることにより変更される。他の属性



(a) TE-ext における糸巻き .



(b) オプションパネルとアニメーションボタン .

図 2: TE-ext のスクリーンショット例 . 図 2(a) は机の上に置かれた糸巻きを示す . 図 2(b) はオプションパネルとアニメーションボタンを示す . 時計回りと右向きアニメーションボタンが選択された状態である . 各図は TE-ext の重要な部分を抜き出したものであり , スクリーンの他の部分は糸巻きの動きを表現するために使用される .

は , オプションパネルの選択肢を変更することにより , 変更される (図 2(b)) . 変更可能な属性がモニタ上に提示されているため , 学生が様々な属性を変更し , その際の糸巻きの動きを考えることが期待される . その中で , 糸巻き問題解決の手掛かりとされる , 四角い糸巻きについて思考し , 心的モデルの修正が起きる事により , 学生は正しい解答へと至るだろう .

続いて , 操作した状況に合わせて , 知識が適用される . 物理の知識が不足している学生のために , このステップ 3 の支援として , 基本的な物理法則の一覧を参照可能とした . 法則はタブを切り替える事により参照可能である . 法則一覧は , 思考実験の結果を導くために , 補助的に利用されると考えられる .

最後に , 操作の結果を心的に観察する . TE-ext には , 結果を実際に視覚的に観察できるよう , アニメーション機能が実装された . 学生は , アニメーションボタンを使用し , 自身の指定した方向 (上下左右 , 移動なし) へ , 指定した回転方向 (時計回り , 反時計回り , 回転なし) を伴い , 糸巻きを動かすことが可能である (図 2(b)) . その際 , 学生の指定した動きが実際の物理法則に反していたとしても , 可能な限り違和感のない動きが再現される . これは , 思考実験においてはどのような結果も観察可能であるという点に基づいている . アニメーションは科学的推論において重要であるとされている [16] . この機能により , 学生が自身の想像の違和感に気づき , 心的モデルの変更が促進されることが期待される .

さらに , 思考実験の結果から結論を導く際の支援としてアニメーションの履歴を提示した . 法則一覧と同

様に , タブを切り替えることにより , 直近 4 回のアニメーションにおいて選択された , 糸巻きの各属性とアニメーションの方向が画像で提示される .

TE-ext を用いて , 糸巻き問題を解決することにより , 学生が , 状況进行操作し , 利用できなかった知識を適用すること , つまり , 思考実験の有効性を実感することが期待される . それにより , 思考実験を問題解決の方略として身につけ , 学生が自身の知識を用いて考える力が向上すると考えられる .

3 評価実験

TE-ext を用い , 問題を解決することにより , 期待された能力が得られるかを検討するため , 評価実験を行った . 合わせて , システムの使いやすさの評価も行った . すべての学生が科学的思考力を必要とするという点から , 日頃から科学に慣れ親しんでいない , 文系学生を対象とした .

3.1 評価実験 1

3.1.1 方法

参加者 名古屋大学の文系学部生 18 名が評価実験 1 に参加した ($M = 18.889$; $SD = 0.583$) .

手続き 学生は初めに , 図 1 に示した糸巻き問題を与えられ , 糸巻きが動く方向と , 回転方向をそれぞれ , [

表 1: 評価実験 1, 2 におけるプレ, ポストテストの各選択肢の選択人数 .

実験	テスト	時計回り			反時計回り			回転しない		
		右方向	左方向	動かない	右方向	左方向	動かない	右方向	左方向	動かない
実験 1	プレ	0	1	0	0	11	0	0	6	0
	ポスト	0	1	0	0	12	0	1	4	0
実験 2	プレ	0	1	0	0	11	0	0	6	0
	ポスト	0	0	0	0	12	0	0	6	0

右・左・動かない」, 「時計回り・反時計回り・回転しない」から選択した. これをプレテストとする.

TE-ext の使用方法の説明を行ったのち, 学生は TE-ext とメモ用紙を自由に使用し, 10 分から 20 分の間, 糸巻き問題の解決を行った. その後, 学生はポストテストとして, プレテストと同様の内容に回答した.

糸巻き問題の回答の解説を行った後, 評価質問紙に回答させた. 質問紙には, 問題解決におけるシステムの有効性, システムの使いやすさ, 問題解決への熱中度, 問題解決力の獲得に関する質問が, 各 2 項目ずつ含まれた.

3.1.2 結果と考察

プレ, ポストテストにおける学生の選択を表 1 に示す. プレ, ポストテストともに学生の選択の偏りが有意であった (Fisher's exact test $ps < .005$). どちらのテストにおいても, 反時計回りに回転しながら, 左へ転がると回答した学生が期待値より有意に多かった ($ps < .005$). この結果は, 学生が初めに作った誤った心的モデルから, 正しいモデルへと移行できなかったことを示す.

その原因を探るため, 学生が問題解決中に糸巻き, 法則, 履歴のそれぞれを表示した時間の割合を算出した. 図 3 に割合を示す. 分散分析の結果, 表示割合には有意な差があった ($F(2, 34) = 33.820, p < .001$). 下位検定の結果, 糸巻きと法則の表示割合が履歴よりも有意に大きかった ($ps < .001$). 糸巻きと法則の表示割合に有意な差異はなかった ($p = .178$). 法則一覧は思考実験の補助として, 短時間参照されることが期待されていた. しかし, 実験の結果は, 法則一覧が, 思考実験の実施を妨害してしまったことを示す. そのため, 法則一覧を TE-ext から除外し, さらに評価実験を行った.

3.2 評価実験 2

3.2.1 方法

法則一覧を除外した TE-ext を用い, 評価実験を行った. 参加者は名古屋大学の文系学部生 18 名 ($M =$

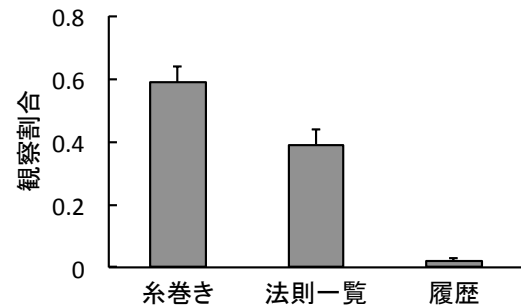


図 3: 各タブの観察割合 .

18.778; $SD = 0.548$), 手続きは評価実験 1 と同様であった.

3.2.2 結果と考察

プレ, ポストテストにおける学生の選択を表 1 に示す. プレ, ポストテストともに学生の選択の偏りが有意であった (Fisher's exact test $ps < .005$). どちらのテストにおいても, 反時計回りに回転しながら, 左へ転がると回答した学生が期待値より有意に多かった ($ps < .005$). この結果は, 評価実験 1 と同様に, 学生が正しいモデルへと移行できなかったことを示す.

続いて, 問題解決中に行われた参加者の思考実験の特徴を検討した. 先述の通り, 糸巻き問題の解決には糸巻きの形を変更することが重要となる. そのため, アニメーションを実行する時に, 学生が選択していた糸巻きの形を分析した. 評価実験 1 の結果も含め, 各図形の割合を図 4 に示す. 2 (実験) \times 6 (図形) の混合要因分散分析を実施した. その結果, 実験要因と図形要因の交互作用は有意ではなかった ($F(5, 170) = 0.677, p = .642$). 図形要因の主効果が有意であった ($F(5, 170) = 51.521, p < .001$). 円形は他の全ての図形より有意に多く選択された ($ps \leq .001$). また, 十二角形は円形以外の図形より有意に多く選択された ($ps < .010$). さらに, 四角形は十角形よりは有意に多く選択された ($p = .040$).

これらの結果は, 学生が問題の初期状態である円形

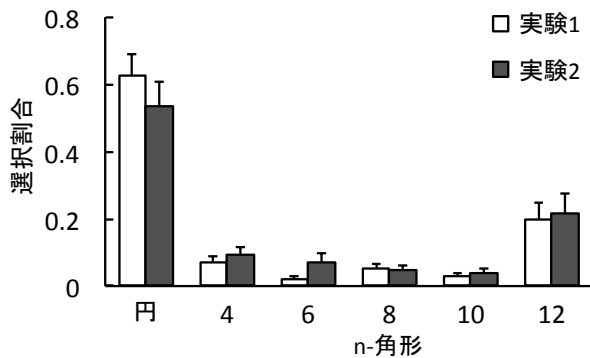


図 4: アニメーション実行時の各図形の選択割合。

の糸巻きに操作を加え、形を変更して考えることができなかつたことを示す。十二角形が他の図形より多く選択されたのは、糸巻きの回転運動を、円形より明確に観察するためであると考えられる。その結果、手がかりとなる四角形の糸巻きをほぼ観察できず、正しい心的モデルの構築に至らなかつた可能性が高い。この結果より、学生にとっては、操作可能な属性を提示する支援だけでは、状況に操作を加えて、新しい知識を引き出すためには不十分であったことが示唆される。

3.3 システム評価

両実験で実施した、問題解決におけるシステムの有効性、システムの使いやすさ、問題解決への熱中度、問題解決力の獲得に関する質問の平均得点を図 5 に示す。最低得点は 1 点，最高得点は 5 点である。システムの使いやすさについては 4 点付近の高い評価を得ていたことが示される。これはマウスを用いたドラッグ等の、直感的に分かりやすい操作を実装したためであると考えられる。しかし、他の質問に関しての得点は 2 点から 3 点の間であり評価は低かつた。これは、学生に解説の後に質問紙に回答させたためである。TE-ext を利用しても、正答にたどり着かなかつたことが評価に影響したと考えられる。

4 総合考察

本研究では、思考実験の実施を支援するためのシステムである TE-ext を開発した。評価実験の結果、学生に思考実験を通して、誤つた心的モデルを正しいモデルへと移行させるためには、本研究における TE-ext の支援では不十分であることが示された。

第一に、特定の心的モデルを持つ学生に、支援として物理法則を与えることは、思考実験の実施そのもの

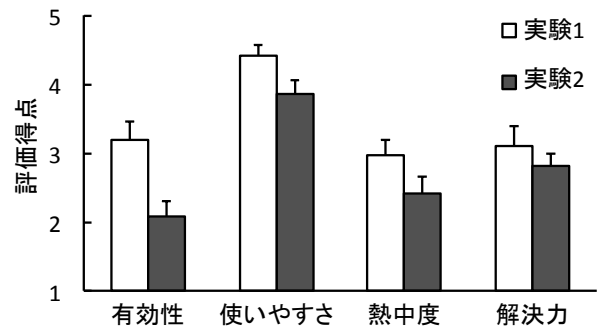


図 5: 各項目の評価得点の平均。

を阻害することが示された。そのため、ステップ 3 の知識の適用においては、異なる支援が必要である。例えば、自身の持つ知識や経験に基づき、糸巻きの周辺に力の作用を書き込むことができる支援は、知識を状況に適用し、さらに、状況に基づき自身の知識を引き出すことにつながると考えられる。

第二に、操作可能な属性を提示するだけでは、学生は問題の初期状態から状態を大きく変更させるような操作を行わないことが示された。心的モデルをすでに保持している場合、人間はそのモデルに反するような状況が生じる可能性のある実験を実施しようとしなかつたことが示されている [17]。評価実験においても、学生は、現在の心的モデルに固執していたため、状況を大きく変更するような操作を行わなかつたと考えられる。そのため、使用していない操作を提案するような、様々な操作を促進する支援が必要である。

最後に、TE-ext の活用場面として、グループワークが挙げられる。TE-ext を利用することにより、本来、他者から観察することができない思考実験を外化し、学生間で共有することが可能となる。このように、TE-ext は、学生やその思考をつなぐハブとしての役割を果たす可能性がある [18]。

参考文献

- [1] Matthews, M. R.: Science teaching, 20th anniversary revised and expanded edition, New York, NY: Routledge (2014)
- [2] Nersessian, N. J.: In the theoretician's laboratory: Thought experimenting as mental modeling, *In Proceedings of the biennial meeting of the philosophy of science association*, Philosophy of Science Association, pp. 291–301 (1992)

- [3] Brown, J. R.: The laboratory of the mind: Thought experiments in the natural sciences, New York, NY: Routledge (1991)
- [4] Brown, J. R.: The promise and perils of thought experiments, *Interchange*, Vol. 37, pp. 63–75 (2006)
- [5] Khun, T. S.: The structure of scientific revolution, Chicago, IL: University of Chicago Press (1962)
- [6] Nersessian, N. J.: The cognitive basis of model-based reasoning in science, In P. Carruthers, S. Stich, & M. Siegal (Eds.), *The cognitive basis of science*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 133–153 (2002)
- [7] Lattery, M. J.: Thought experiments in physics education: A simple and practical example, *Science & Education*, Vol. 10, pp. 485–492 (2001)
- [8] Stephens, A. L., Clement, J. J.: Documenting the use of expert scientific reasoning processes by high school physics students, *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, Vol. 6, 020122 (2010)
- [9] Trickett, S. B., Trafton, J. G.: “What if...”: The use of conceptual simulations in scientific reasoning, *Cognitive Science*, Vol. 31, pp. 843–875 (2007)
- [10] Reiner, M.: The context of thought experiments in physics learning, *Interchange*, Vol. 37, pp. 97–113 (2006)
- [11] Kösem, Ş. D., Özdemir, Ö. F.: The nature and role of thought experiments in solving conceptual physics problems, *Science & Education*, Vol. 23, pp. 865–895 (2014)
- [12] Hegarty, M.: Mechanical reasoning by mental simulation, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 8, pp. 280–285 (2004)
- [13] Clement, J. J.: The role of imagistic simulation in scientific thought experiments, *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, pp. 686–710 (2009)
- [14] Monaghan, J. M., Clement, J. J.: Use of a computer simulation to develop mental simulations for understanding relative motion concepts, *International Journal of Science Education*, Vol. 21, pp. 921–944 (1999)
- [15] Anzai, Y., Yokoyama, T.: Internal models in physics problem solving, *Cognition and Instruction*, Vol. 1, pp. 397–450 (1984)
- [16] Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., Whelan, S. M., Hecht, H.: Influence of animation on dynamical judgments, *Journal of experimental Psychology: Human Perception and performance*, Vol. 18, pp. 669–690 (1992)
- [17] Wason, P. C.: On the failure to eliminate hypotheses in a conceptual task, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 12, pp. 129–140 (1960)
- [18] Nersessian, N. J.: How do engineering scientists think? Model-based simulation in biomedical engineering research laboratories, *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, pp. 730–757 (2009)