

思考実験を通じた問題解決の妨害要因

Barriers in construction of internal model via thought experiments

松室 美紀[†], 三輪 和久[†]

Miki Matsumuro, Kazuhisa Miwa

[†] 名古屋大学

Graduate School of Information Science, Nagoya University

muro@cog.human.nagoya-u.ac.jp

Abstract

This study aimed to observe and break the barriers to physics problem solving via thought experiment using Thought Experiment Externalizer (TE-ext). TE-ext enables students to visualize a problem situation. We can observe the thought experiments of the participants through the TE-ext. Our experiment identified three barriers to conducting an effective thought experiment. First, participants tended not to change the situation from the original one; second, incorrect or inappropriate knowledge was applied to the situation; third, the participants did not apply the results of their TE to other situations. These factors prevented participants from rejecting their initial incorrect model and finding a new one through TEs.

Keywords — Thought experiment; scientific reasoning; physics problem solving

1. はじめに

近年の科学教育において、思考実験への注目が高まっている [1, 2]. 本研究では、思考実験を外化するシステムを用い、物理問題の解決において、思考実験を通じた内的モデルの修正を阻害する要因を検討する。

思考実験とは、心的に実施される実験を指し、4つのステップからなる [3, 4, 5]. まず、思考実験を実施する状況を心的に想像する (ステップ 1). 続いて、その状況を変更したり、何らかの操作を実施する (ステップ 2). 背景情報や知識を利用し (ステップ 3), 実験の結果を心的に観察する (ステップ 4). 状況の操作を通して、それまで使用できていなかった知識や感覚的なスキーマを利用することができる [6, 7]. アインシュタインやガリレオらが思考実験を通じ科学的発見に至ったとされるように [3, 8, 9], 思考実験は誤った内的モデルの修正に有効であると考えられる。

2. Thought Experiment-externalizer

本研究では、思考実験の各ステップを外化するシステムである Thought Experiment externalizer (TE-ext) を用い、学生の思考実験を取得する。

題材として図 1 に示した糸巻き問題を用いる。多くの学生が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に転がると回答してしまう。実際は机と糸巻きの接点が回転の中心となり、糸巻きは時計回りに右に転がる。四角い糸巻きが右に引きずられることを想像することにより、正しい内的モデルへの修正が行われやすいことが示されている [10].

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、糸巻きはどのように転がるのでしょうか？

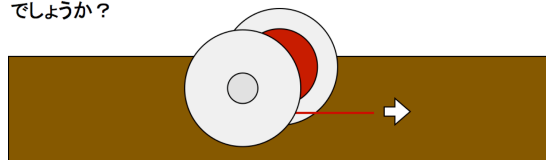


図 1 糸巻き問題

図 2 に TE-ext を示す。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システムである。糸巻き問題の思考実験は、状況の視覚化にあたる問題状況のイメージから始まる。TE-ext はこのイメージを図 2(a) に示した通り実際に PC モニタ上に外化する。続いて、ステップ 2 の操作の実施にあたる糸巻きの属性の操作が行われる。純粋な思考実験の場合、この操作は頭の中で行われるが、TE-ext を使用すると、図 2(b) に示した操作パネルにより、実際に糸巻きの属性を変更することが可能である。糸巻きの残り糸の量、形、大きさ、糸の太さ、向きが変更可能である。ステップ 3 では、操作に基づき思考実験に必要な知識が想起される。外化が困難であるため、現在の TE-ext はこのステップの外化は行わない。最後に、想起され

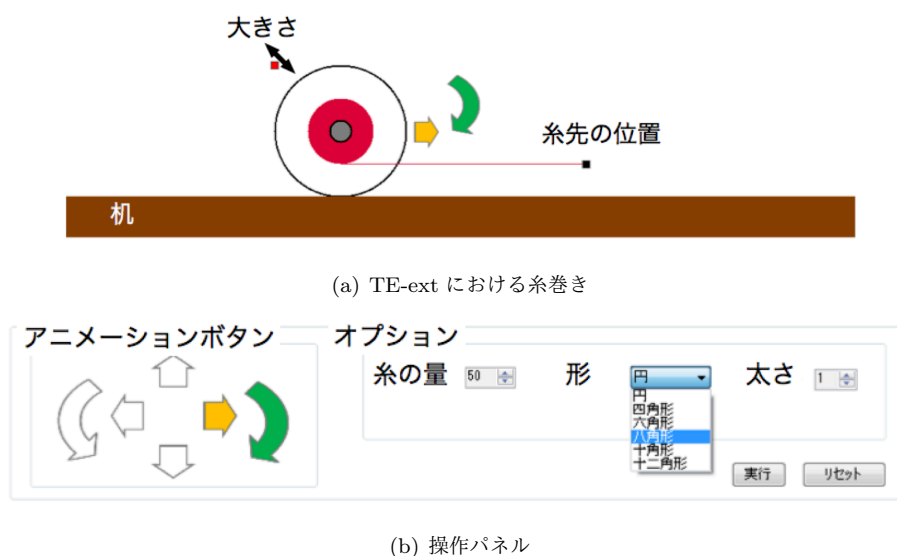


図2 TE-ext の画面例。(a)糸巻き部分と(b)操作パネルを拡大して示す。(a)には机の上に置かれた糸巻きを横から観察した状態が示されている。(b)の操作パネルで糸巻きの残り糸の量, 形, 糸の太さが操作される。糸巻きの大きさと糸先の位置の操作は, (a)に示される赤と黒の四角をドラッグすることにより行われる。また, アニメーションの回転方向, 移動方向は, アニメーションボタンにより指定される。

た知識に基づき, 糸巻きの動きが心的に観察される。TE-ext では, 実際にアニメーションを設定し, 糸巻きを動かして観察することができる。TE-ext を用いることにより, 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。

3. 目的

思考実験を通した糸巻き問題の内的モデルの修正には3つの妨害要因が想定される。第一に, 内的モデルの修正のためには, 思考実験のステップ2で様々な操作を行い, 手がかりとなる状況(四角い糸巻)を作る必要がある。しかし, 問題の初期状況と異なる状況を考えにくいため多様な操作が行えないという阻害要因1が存在する[11]。続いて, 手がかりとなる状況での思考実験では, ステップ3で状況に即した知識や経験を使用する必要がある。しかし, すでに持っている誤った内的モデルを使用してしまうという阻害要因2が存在する[12, 13]。さらに, ステップ4で手がかりとなる結果を観察し, 新しい内的モデルを構築したならば, それを問題状況に当てはめる必要がある。そこには, 最初の内的モデルに固執してしまい, 異なる状況で構築した内的モデルを問題状況に当てはめることができないという阻害要因3が存在する[14]。本研究ではこれらの阻害要因の存在の確認と緩和を試みる。

4. 実験

4.1 方法

4.1.1 参加者

文系の学部生19名が実験に参加した。

4.1.2 手続き

実験は3つのフェーズからなる。始めに, 参加者は紙面上で糸巻き問題に回答した。これをフェーズ0とする。続いて, 実験者よりTE-extの使用方法が教示され, その後, 参加者は糸巻き問題の回答を5分間, TE-extを用い自由に思考した。その後, 参加者はプレテストと同様に糸巻き問題に回答した。これをフェーズ1とした。フェーズ1の思考時間における操作の多様性から, 妨害要因1の有無を判断した。

フェーズ2の始めには, 想定される妨害要因1を緩和するための教示が行われた。具体的には, 参加者に様々な糸巻きの属性の変更を示し, それらの属性を変化させて回答を考えるよう教示した。その後, 参加者はTE-extを用いて, 5分間の思考を行った。思考時間の後, 参加者は再び糸巻き問題の回答を行った。

最後にフェーズ3が行われた。フェーズ3では, 参加者はまず, 四角い糸巻き問題に回答した。四角い物体は, Anzai & yokoyama (1985) において, 内的モデ

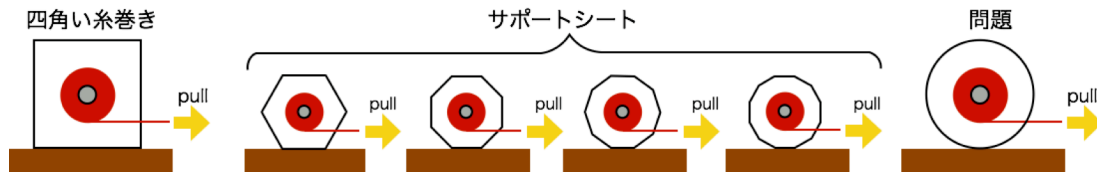


図3 四角い糸巻き問題とサポートシート，円形の糸巻き問題の関連

ルの修正の手がかりとされている [10] . もし、妨害要因 2 が存在しているならば、参加者は自身の持つ内的モデルに従い、期待される「右方向、回転しない」の組み合わせ以外の選択を行うだろう。その後、参加者は TE-ext を用いて 5 分間の思考を行った。

フェーズ 3 の思考時間では、四角い糸巻き問題で新しい内的モデルを構築できた参加者が、円形の糸巻き問題にその内的モデルを適用できるように、図 3 に示したサポートシートが与えられた。サポートシートでは、参加者は六、八、十、十二角形のそれぞれについて、円形の糸巻き問題と同様に糸を引いた場合の動きを回答することが求められた。サポートシートにおいて、四角形を徐々に円形に近づけ、連続的に内的モデルを当てはめていくことにより、図 3 に示した通り、妨害要因 3 が緩和され、参加者が四角形で構築した新しい内的モデルを円形の糸巻きに適用することが期待される。最後に、もう一度、円形の糸巻き問題への回答が求められた。

4.2 結果

各フェーズにおける紙面上での円形の糸巻き問題への回答を図 4 に示す。正答に至った参加者は存在せず、内的モデルの修正が起こらなかったことが示される。全フェーズで回答に有意な偏りが存在し (Fisher's exact test $ps < .05$)、反時計回りと左移動の組み合わせが期待値より有意に多く選ばれていた ($ps < .002$)。

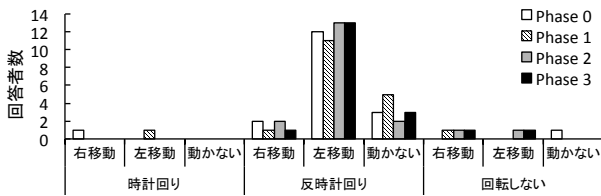


図 4 円形の糸巻き問題の回答

続いて、図 5 に各フェーズの思考時間におけるアニメーション時の糸巻きの形の割合を示す。3 (フェーズ) × 6 (形) の分散分析の結果、交互作用が有意に達

した ($F(10, 180) = 13.84, p < .001$)。フェーズ 1 では、形の単純主効果が有意であり ($F(5, 90) = 26.412, p < .001$)、他の多角形よりも円形の糸巻きで有意に多くのアニメーションが行われていた ($ps < .05$)。この結果より、妨害要因 1 の存在が確認された。この偏りはフェーズ 2 において解消され ($F(5, 90) = 1.376, p = .241$)、教示により妨害要因 1 が緩和されたことが示される。

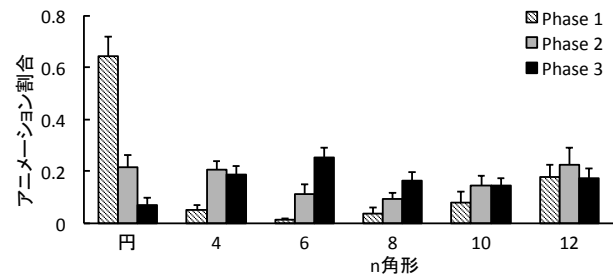


図 5 アニメーション実行時に選択された糸巻きの形

フェーズ 3 における四角い糸巻き問題とサポートシートにおける各多角形の移動、回転方向の回答を図 6 に示す。四角の糸巻きにおいて、回答に有意な偏りがあり (Fisher's exact test $p = .024$)、右に引きずられるという回答が有意に多かった ($p = .002$)。半数以上の参加者が初期の内的モデルに影響されず、正しい内的モデルの手がかりとなる結果を観察したことが示される。一方で他の半数の参加者は誤った内的モデルに基づき、他の回答を選択していた。これらの参加者に関しては妨害要因 2 が働いていたと考えられる。

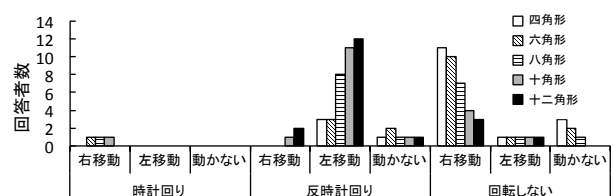


図 6 四角い糸巻きとサポートシートの糸巻きの回答

四角い糸巻き問題で妨害要因 2 が観察されなかった参加者も、最終的な円形の糸巻き問題で正答に至ることはなかった (図 4)。図 6 より、多角形の角が多くな

るにつれて、左回りの選択が増加している。これは、彼らが、四角い糸巻きで構築できたであろう新しい内的モデルを、問題状況に適用することに失敗したことを示す。サポートシートを与えたにもかかわらず、妨害要因3が緩和されることはなかった。

5. 考察

以上の結果から、想定した3つの妨害要因の存在が確認された。第一に、妨害要因1に関して、参加者は基本的に問題状況を用いたアニメーションの観察を好むことが示された。しかし、この傾向は教示により緩和される。よって、初期状況への固着は思考実験の妨害要因となるが、教示により比較的簡単に緩和されるため、内的モデル修正における大きな困難ではないと考えられる。

第二に、妨害要因2については、新しい内的モデルの構築の手がかりとなる状況として設定した四角い糸巻き問題において、約半数の参加者が最初の内的モデルに基づき、実験者の想定と異なる回答をしていたことから、その存在が示された。本実験では、この点に関して特に支援を与えていない。そのため、今後の課題として、妨害要因2を緩和できるようTE-extを改良する必要がある。TE-extの改良については、後に論ずる。また、四角い糸巻き問題以外の手がかりとなる状況の利用も有効であると考えられる。

最後に、妨害要因3に関しては、四角い糸巻き問題で糸巻きに働く右向きの方に気付いた参加者であっても、正答に到達しなかったことから、新しい内的モデルの元の問題への適用は容易ではないことが示された。参加者は多角形の角を増やすに従い、初期の内的モデルの利用に戻っていく傾向があった。また、最終的な回答の理由において、角が少ない糸巻きの動きを例外として説明していた(e.g., 辺が長いと摩擦力が大きいから右に動くが、円ならば左へ転がる)。この結果は、思考実験の状況と円形の糸巻き問題の共通点ではなく相違点に着目してしまい、思考実験の結果を利用して内的モデルを修正することができなかったことを示している。

6. 今後の課題

本実験の結果、現在のTE-extは正しい内的モデルへの修正を支援するシステムとして利用するためには、不十分であることが示された。現在のTE-extの問題点として、ステップ3の支援が存在しないことが挙げられる。思考実験にどのような知識が用いられているかに関しては、統一した見解は存在しない。しか

し、多くの先行研究は、思考実験に使用される知識は、単なる物理的な法則ではなく、より潜在的な知識であるとしている[5, 6, 15]。例えば、Clement (2009)は、行為と知覚の結びつきにあたる、知覚的知識が思考実験に利用されるとしている[6]。このような、行為や知覚、感覚、感情と結びついた知識は、それが獲得された行為や状況と同様の行為、状況により利用が促進される[16]。そこで、そのような知識の使用を促進させるためのTE-extの改良を行った。

改良前のTE-extでは糸巻きの動きを選択すると、自動で糸が直線的に引かれ、選択された動きが再現された。しかし、この過程で、学習者は自身の持つ知識から運動の推定を行うよりも、アニメーションの観察に注力してしまう。そのため、新しい内的モデルが構築されにくく、さらに、各観察を個別に捉えてしまい、新しい内的モデルの適用も困難となると考えられる。そこで、我々は、TE-extの思考実験プロセスに、図7のように学習者自らが糸巻きの糸を引くステップを追加し、潜在的な知識利用の促進を試みる改良を加えた。この改良の効果については現在検討中である。

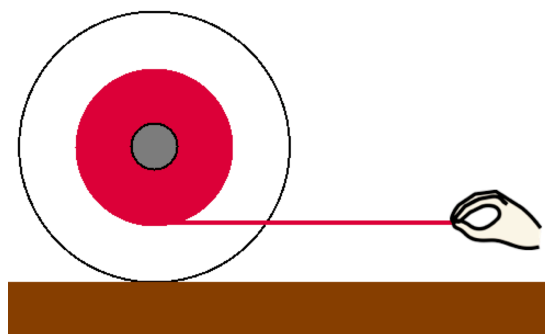


図7 改良されたTE-ext。手のアイコンを使い、学習者が糸を引くことができる。

参考文献

- [1] Matthews, M. R., (2014) "Science teaching, 20th anniversary revised and expanded edition" New York, NY: Routledge.
- [2] Nersessian, N. J., (1992) "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.
- [3] Brown, J. R. (2006) "The promise and perils of thought experiments" Interchange, Vol. 37, pp. 63-75.
- [4] Kösem, Ş. D., & Özdemir, Ö. F., (2014) "The nature and role of thought experiments in solving conceptual physics problems" Science & Education, Vol. 23, pp. 865-895.

- [5] Reiner, M., (2006) "The context of thought experiments in physics learning" *Interchange*, Vol. 37, pp. 97-113.
- [6] Clement, J. J., (2009) "The role of imagistic simulation in scientific thought experiments" *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, pp. 686-710.
- [7] Hegarty, M., (2004) "Mechanical reasoning by mental simulation" *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 8, pp. 280-285.
- [8] Brown, J. R., (1991) "The laboratory of the mind: Thought experiments in the natural sciences" New York, NY: Routledge.
- [9] Nersessian, N. J., (2002) "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.
- [10] Anzai, Y., & Yokoyama, T., (1984) "Internal models in physics problem solving" *Cognition and Instruction*, Vol. 1, pp. 397-450.
- [11] Wason, P. C., (1960) "On the failure to eliminate hypotheses in a conceptual task" *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 12, pp. 129-140.
- [12] Chinn, C. A., & Brewer, W. F., (1993) "The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction" *Review of Educational Research*, Vol. 63, pp. 1-49.
- [13] Dunbar, K., (1995) "How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories" In R. J. Sternberg & J. E. Davidson (Eds.), *The nature of insight*, Cambridge, MA: MIT Press, pp. 365-395.
- [14] Gick, M. L., & Holyoak, K. J., (1980) "Analogical problem solving" *Cognitive psychology*, Vol. 12, pp. 306-355.
- [15] Chandrasekharan, S., & Nersessian, N. J., (2015) "Building cognition: the construction of computational representations for scientific discovery" *Cognitive science*, Vol. 39, pp. 1727-1763.
- [16] Barsalou, L. W., (2008) "Grounded cognition" *Annual Review of Psychology*, Vol. 59, pp. 617-645.