

力の素朴因果理論に基づく作用反作用に関する 因果的理解支援システムの試作

Support System for Causality-based Understanding of Action and Reaction Based on Causality-compliant Theory of Force and Motion

中岡 尚之^{*1}, 山田 敦士^{*1}, 篠原 智哉^{*1}, 山元 翔^{*1}, 林 雄介^{*1}, 平嶋 宗^{*1}, 堀口 知也^{*2}, 溝口 理一郎^{*3}
Takayuki NAKAOKA^{*1}, Atsushi YAMADA^{*1}, Tomoya SHINOHARA^{*1}, Sho YAMAMOTO^{*1}
Yusuke HAYASHI^{*1}, Tsukasa HIRASHIMA^{*1}, Tomoya HORIGUCHI^{*2}, Riichiro MIZOGUCHI^{*3}

^{*1} 広島大学工学部, ^{*2} 神戸大学海事科学部

^{*1} Faculty of Engineering, Hiroshima University, ^{*2} Faculty of Maritime Sciences, Kobe University

^{*3} 北陸先端科学技術大学院大学

^{*3} Japan Advanced Institute of Science and Technology

Email: nakaoka@lel.hiroshima-u.ac.jp

あらまし: 作用に対して反作用が存在することは運動の第三法則として力学の公理となっており, 力学学習における必須の学習項目である。しかしながら, 学校教育の中では作用に対して反作用が必ず存在することは教えるものの, その反作用を構成する力の吟味は行わない。このため反作用に対する学習者の理解が浅いままになってしまふ危惧があり, 実際に反作用に関する誤概念は力学における誤りにおいて大きな部分を占めるとされている。この問題を解決するためには, 反作用を構成する力の吟味を可能にすることが必要となる。本研究では, 作用と反作用の関係を因果関係として説明するための枠組みである「力の素朴因果理論」に基づいて, 作用に対する反作用を因果的に説明する活動を学習者に行わせることで, 作用と反作用に関する因果的理解を支援するシステムを設計・開発したので報告する。

キーワード: 作用反作用の法則, 素朴因果推論, 因果的理解支援システム, 力の作図

1. はじめに

力学の教育では反作用は, 「作用 F に対して, 同一直線上にあり, 向きが反対で, 大きさが等しい力 $-F$ 」といったように, 作用に対して直ちに成立するものとして説明されるのが一般的であり⁽¹⁾, その因果は考えることは間違っているとさえいわれている⁽²⁾。このため, 反作用に対する学習者の理解はしばしば暗記レベルに留まることになり, 反作用に関係する多くの誤概念の原因になっていると推定できる。

「作用反作用の法則」は, 作用に対して常に反作用が存在することを公理として示したものであるが, このことは作用に対して反作用を因果的に考えること自体を禁ずるものではない。また, 事象を因果的に考えることは, 人が事象を科学的に理解するための基本的な方法であるといえる。力学の作用反作用を因果的に考える方法が提供されていないことは, 力学を学ぶ上での大きな問題であるといえる。

本研究では, 力と運動に関する因果的な説明を提供する枠組みである「力の素朴因果理論」に基づいて, 作用反作用を因果的に説明・理解することを支援するシステムを開発したので報告する。

2. 作用反作用の因果的理解と説明法

2.1 作用反作用の因果的理解

作用 F が存在した場合, 同時に反作用 $-F$ が返ってきて釣り合うことは疑う必要がない公理である。しかしながら, その反作用がどのような力で構成されているかは, 自明ではない。作用が様々な力として存在しうると同様に, 反作用も様々な力から構

成されるものとして解釈することが可能となる。反作用に対してこの解釈を行うためには, 作用に対して反作用がどのような経緯のもと返ってきたのかを知る必要がある。これが, 作用反作用の因果的理解となる。つまりこの因果的理解は, 反作用に対する WHY: なぜ存在するのか, ではなく, HOW: どのように存在しているのかに関するものとなっている。

2.2 反作用の根拠とは..

ある物体を押した場合, その押した作用に対して, 反作用が返ってくる。この時, 反作用を構成する力の根拠は様々である。たとえば, ブロックを水平方向に押す場合の作用反作用に限定して考えると,

(1) その物体が接する床との摩擦力によって動かなかった場合には, その反作用は摩擦力を根拠として返ってきていることになる。また, (2) その物体の反対側から誰かが同じ大きさで押している場合には, その押す力が反作用の根拠となる。さらに,

(3) その物体が, 動かない壁に接していれば, その壁から返ってくる力が反作用の根拠となる。また,

(4) その物体が加速しているのであれば, その加速に伴う慣性力が根拠となる。このように反作用の根拠は様々であり, この根拠を明らかにするのが, 作用反作用に関する因果的な推論である。

2.3 素朴因果理論に則した反作用の説明例

2.2 で述べたような反作用の根拠に基づいて, 作用反作用の因果的な説明の例を図 1 を用いて示す。図 1 では, 壁に接している物体に力 F が加えられ, 反作用としての④の力を返されている。この反作用④の根拠を因果的に説明する。まず, 物体に力 F

を加えると、①のように指と物体の境界面にその力が伝えられる。物体に伝わった力①は、壁と接している境界面の力②として伝えられる。この時、不動物体である壁に力が伝わったため、力②に対する反作用③が壁から物体へと返され、この境界面で力②と③の釣合いが成立する（この時、不動物体はなぜ反作用を返すことはできるかは問わないので、これは直接的な反作用ということができる）。返された力③は元の境界面へと伝わり、ここで④の力として力①との釣合いが成立する。

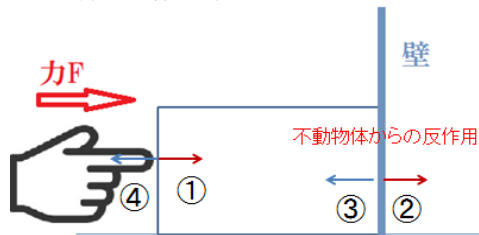


図1 不動物体から反作用が返ってくる例

3. 因果的理解支援システム

3.1 支援システムの必要性

前章で述べた因果的な説明を学習者に修得させるためには、説明法の教授だけでは不十分であり、学習者自身に説明の活動を行わせる必要がある。しかしながら、作図やその順序付け・対応づけが重要となる活動であり、紙の上での活動では不十分であることが予想される。そこで本研究では、学習者が因果的な説明を再構成でき、またその再構成した説明に対する即時的な正誤判定・フィードバックを行うことのできる因果的理解支援システムを試作した。

3.2 システムの概要

システムの演習画面を図2に示す。システムでは画面中央に作用反作用を考えるべき状況が提示され、操作指示文にしたがって学習者は力や加速度の作図を行う。矢印の追加・削除は右上のボタンで切り替え可能である。また、反作用の根拠の説明については、反作用の作図後に左下のリストから選択可能である。力の説明は段階的に行い、1つの力の作図を終えた後、診断ボタンを押すことで、次の力の説明へ移動する。システムでの演習問題は、2.2で述べた基本的な反作用の4つの根拠に準ずる問題4問と、これらの根拠が複数混在する応用問題1問の計5問から構成されている。

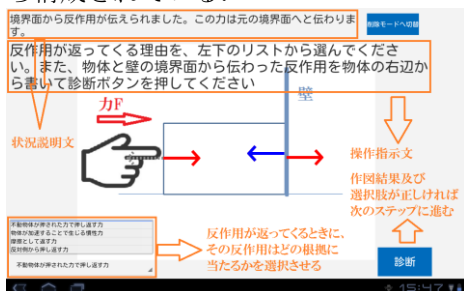


図2 システムの演習画面

3.3 システムを用いた演習手順

システムを用いた演習は力や加速度の因果的な作

図と、作用が反作用に反転する際の根拠の選択で行われる。どの問題についても、最初は物体に働く力が物体の境界面に伝わるというステップから始まる。作図が正解なら次の力の作図へと進む。この際、最終的に返ってくるのが予想される反作用が、灰色の破線の矢印で示され、作用からこの反作用に因果関係を与えることが学習者の課題となる。作用はある地点で根拠を持った反作用と釣り合う。この際の反作用の根拠を、あらかじめ用意された反作用の根拠リスト（図2左下のリスト）から選択する。作図結果と根拠が正解ならば、今度はこの反作用を伝えていき、最終的に1ステップ目で示された灰色の矢印が説明されれば、その問題は終了となり、反作用を因果的に説明できたことになる。

なお、加速度を持つ場合は、加速度に対して慣性力としての反作用が生じることになるため、「加速度」を物体の中心に記入し、この加速度に対する「慣性力」をこれも物体の中心に記入することで、加速度に対応する慣性力、を記入できるようにしている。

3.4 演習の実験的实施

作用反作用の因果的な理解を促すためには、まず因果的な説明の手順を、必要となる基本概念とともに与える必要がある。ここで学習者が受けた説明を再構成させることで、理解の定着を図るのが本支援システムの役割である。本研究においては、(1)作用反作用についてどのように理解しているかの事前調査、(2)作用反作用について因果的推論法の説明、(3)演習システムを用いた因果的説明の再構成、(4)作用反作用の理解についての事後調査、(5)因果的推論の受け入れ度合いの調査、の手順で本演習を工学系大学生8名に実験的に実施した。結果として、事前においては5名の被験者が暗記レベルの回答しかできず、残りの3名の説明は、「加速するから」などの一部根拠を含んだ因果的な要素が現れていたが、完全な因果を構成するものにはなっていなかった。事後においては、全被験者がシステムを用いて行った作用反作用の因果的説明を再現することができた。また、因果的説明自体についても、納得度の高いものであり、作用反作用に対する理解に貢献するものであるとの回答が得られた。

4. まとめ

本稿では、作用反作用の因果的説明を可能にする枠組みと、その枠組み沿った理解を促進するための因果的説明の組み立てを支援するシステムについて述べた。また、因果的説明の実験的な教授・演習も行い、有望な結果を得ている。因果理論に基づく力学理解の意義を実証してゆくのが今後の課題である。

参考文献

- (1) 啓林館 物理基礎 pp.48,49
- (2) 鈴木亨:誤概念を支える因果スキーマ,物理教育 56(1), 10-15(2008).