

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：13302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540162

研究課題名(和文)「力と運動」教育方法の抜本的改善のための因果推論理論

研究課題名(英文)Causality-compliant theory of force and motion for its innovative instruction

研究代表者

溝口 理一郎(Mizoguchi, Riichiro)

北陸先端科学技術大学院大学・サービスサイエンス研究センター・特任教授

研究者番号：20116106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：現在、学校における力学教育は方程式偏重の方針が採用されている結果、生徒達が持つ自然な直感と遠い不自然な教育となり、子供達の物理嫌いを招く一因となっている。この状況を是正するために、生徒達の因果理解を素直に導く新しい教育カリキュラムを構築することを目的として、力と運動の因果推論のための新しい理論を構築した。そして、人間の直観と親和性のある因果推論(因果理解)に沿って一貫性のある思考で、中学、高校で学ぶべき力と運動の諸現象を理解、説明できるように指導する教育のアウトラインを開発した。更に、高校までの力と運動に関する正しい因果的説明を自動生成できる世界初の汎用シミュレータを構築した。

研究成果の概要(英文)：Current methods for teaching about "force and motion" depend on the use of equations and do not place emphasis on adequately supporting an understanding based on causality. One possible reason for this is the lack of a causality-compliant theory that gives a consistent treatment of the problem of action and reaction, the problem of apparent forces like centrifugal force, and so on. By adopting a naive view of causality (causality-based understanding) that agrees with human experience, we constructed a causal theory of force and motion. This theory can serve as the foundation for an educational approach in helping junior high and high school students understand and explain various phenomena related to forces and motion. Using this approach, we developed an outline of educational support methods and a general-purpose motion simulator with the ability to provide automated causal explanations of physical phenomena.

研究分野：オントロジー工学

キーワード：力学における因果推論 因果説明能力 汎用シミュレータ 直感との親和性 運動の法則の新解釈 新しい釣り合い概念 作用反作用の理論

1. 研究開始当初の背景

現行の「力と運動」の教育方法は方程式依存であり、因果的理解を適切に支援することに重点が置かれていない。その原因の一つに、作用と反作用の問題や遠心力に代表される見かけの力の問題などを統一的に扱う因果理論が欠如しているという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、人間の素朴な因果推論(因果理解)に沿って一貫性のある思考で、中学、高校で学ぶべき力と運動の諸現象を理解、説明できるように指導する教育の基礎となる力と運動の因果理論を構築し、生徒の誤解が格段に減少する教育支援方法とシステム、並びに因果的説明能力を持つ汎用運動シミュレータを構築するための基盤技術を開発する。

3. 研究の方法

初年度に理論を完成させ、次年度において新しい教授指針と汎用シミュレータの概念設計を行うと共に、理論の改善も行う。理論は、高校生までの力と運動に関する因果推論を扱うために必要十分な、原理・原則の集合として構成する。作用と反作用への因果の導入とそれに派生して生じる因果推論に必要な原則を典型的な例題に即して洗練する。まず、例題として静力学と動力学から基本的なものを選び、両方に共通の因果推論理論の開発を目指す。

続いて、より進んだ例題(机の上の二つのブロック、スケートをはいて壁を押す(自分が逆向きに動く)、電車内の加速度場、カーブで発生する遠心力、etc.)に沿って理論を拡張すると共に教育方針を確立する。そして、因果的説明の自動生成を可能とする汎用の運動シミュレータを実装すると共に、それらの作業を通して理論の洗練、拡張を行う。

4. 研究成果

(1) 接触力における力のつり合い

従来の理論における力のつり合いは「一つの物体にかかる合力がゼロ」と理解されている。その理由は、従来の力学の主眼は力を受けた物体の運動の軌跡を記述することにあるからである。しかし、因果推論では境界で発生する作用と反作用の関係が重要課題となる。そこで、因果推論理論における力の釣り合いを、物体間の境界における力のつり合いの典型は二つのエージェントが相互に力を及ぼし合う場合として定義し、その妥当性を論じた。

(2) 作用と反作用の一般的原理

作用と反作用に関わる因果推論をするために必要な前提と、それらを用いて記述された一般的原理を定めた。

① 前提:

- (i) 実在する力とそれを原因として起こる運動を対象として、それを支配する因果構造を推論するための理論を構築する。

- (ii) ある基準系から別の基準系の運動がどう見えるかという運動の「見え」の問題は、力の实在論に基づく因果とは無関係であるので対象外とする。
- (iii) 「見かけの力」は見えとしての運動の説明のために導入されたものであり、そこには因果は存在していないので議論しない。
- (iv) 力はそれを受けた対象物にとってはいつも実在する力である。従って、力の因果推論のための理論はあるものが受けた力の理解から始まる。
- (v) 物体が力でつぶれることはないと仮定する(つぶれない範囲の強さの力だけを議論する)。

② 原理(公理)

- 1) 加速度と減速度は共に $F=m\alpha$ の法則に基づく。
- 2) 作用と反作用は常に大きさが等しく向きが反対である。
- 3) 作用と反作用は、値は常に等しいが、値の増加は作用にのみ起因して起こる(因果性1)。この因果性は接触面(点)で働いている相互作用としての力の間の局所的な因果である。
- 4) 剛体は与えられた力を瞬時に伝達する(透過伝達性)。
- 5) 物体がある強さの反作用を返すのは一つにはそれに見合う作用が与えられたからであるが、もう一つ忘れてはいけないことは、その強さの力を返すことができる根拠が必要であることである。その根拠には二つある。動かないこと、加速度 α で動くことである(因果性2)。この因果性は、作用反作用の力の強さの値の決定関係に関わる非局所的な因果性である。
- 6) 物体が押されても動かない時は、次の二つの場合しかない。動かないと仮定しているものから反作用を返してもらっているからか、静止摩擦力が作用(押された力)より大きい場合である。
- 7) 絶対に動かないものとして、地球や地面などを仮定していることを明示的に因果に取り込む。
- 8) ものがつぶれないことを仮定しているので、壁や床も動かないものと認定することができる。
- 9) 力は足し合わせることができる(加算性)¹。
- 10) 一般の加速度系は重力加速度との等価性を前提にして、加速度 α で動く物体の上では、加速度 $-\alpha$ が働く「場」が存在すると考える。

(3) 理論の正当性の確認

因果推論理論の10の原理の必要十分性を理論的に示すことは原理的に不可能に近い。 $F=m\alpha$ の法則ですら正しさを証明する手立て

¹ この原理は上の前提が満たされる限り用いられるのでその適用範囲には限界はない。

はなく、全て経験的に正しさを示すことがなされてきたに過ぎない。したがって、本理論も過去に習って、高校教育に現れる、一つの物体を押す問題からコリオリ力までの典型的な全ての例題を対象にして一貫した因果推論ができることを例示することによって、その必要十分性を示すこととする。

押されたものが押し返す方法は二つある²。

(a) 動かない方法

(b) 加速度 α を生成して $m\alpha$ で返す方法

以下では各々について述べる。用いられた原理を対応する文末に示している³。

(a) 動かないケース

地球(絶対に動かないと仮定している物)と閾値付きで動かないケースをしっかりと区別しつつ、同じ因果理解で説明できなければならない。閾値付きで動かないケースは、絶対動かない物から反作用 F を返してもらっているから動かないことが正しい因果構造である。

a.1 絶対に動かないと仮定している物(原理 6)

地球、従って地面は決して動かないと仮定する。もちろん、理論的には巨大な力を作用させれば地球も動くが、現実には生成可能な力では動かすことは至難である。従って、高校以下の教育で用いる例題の範囲では動かないと仮定してよい。それ故、どのように大きな作用に対しても反作用を返すことができる(原理 7)。

a.2 物体と床(地面)の間に摩擦がある場合(原理 6)

物体は置かれているものとの境界面に摩擦がある場合、押される力がある閾値までは動かないがそれを超えると動く。質量を M 、物体と床(地面)との静止摩擦係数を μ 、重力加速度を g とするとき、静止摩擦力は μmg であるが、作用 F が μmg 以下の時はその物体は動かないので、押手に対して $-F$ の反作用を返すことができ、実際に返す(原理 5)。このとき、物体と床の間では、 F とその反作用 $-F$ が釣り合っている(原理 2)。すなわち F の作用点と床との2箇所で F と $-F$ の釣り合いが生じており、作用点での $-F$ は床の $-F$ が根拠となっている。そして床からの $-F$ は床が動かないことが前提となっている(原理 8)。 F が μmg を上回る場合には動くことになるが、動く場合に返すことができる反作用は(b)に述べる。

(b) 動くケース

b.1 $m\alpha$ で力を返す。(原理 5)

のれんのように押すとほとんどの場合動いてしまうケースも含めて、空中にあるか、置いてある場所との接触面で摩擦抵抗がないと仮定する場合には、力 F の大きさにかかわらず、押せ

ば物体は動き、そのとき得る加速度を α とし、質量を m とすると、 $F=m\alpha$ が成り立つ(原理 1)。言い換えるとその物体は $-m\alpha$ の大きさの反作用を返す(原理 5)。ここで大切なことは、作用と反作用が釣り合うことと加速度 α で動くことを切り離さないことである。動いた物体が反作用を返すことができたのは加速度 α で動いたからなのである。このことは重力と通常の加速度が等価であり、重い物はそれに加速度を与えるには大きな力が要することが等価であることから導かれる。反作用が返ってくるのは動いたことが根拠なのであり、因果を厳密に追うとすれば、 $F \rightarrow \alpha \rightarrow -F$ となる。すなわち、3つの事象は事実上同時に起こっているが、そこには $F \rightarrow \alpha \rightarrow -F$ の因果の連鎖がある(原理 5)。

b.2 押した人が $m\alpha$ で動く

スケートをはいて壁を押した場合を考える。地面との摩擦力がきわめて小さいため大きな F では壁を押すことができない。しかし、それは自分が動かないことを前提としたものであり、動いてもいいのであれば、 $m\alpha$ までの力を根拠にして強く押すことができる(原理 5)。すなわち、力 F で壁を押して、その反作用 $-F$ を得て、その結果人が壁から遠のく方向に加速度 α を得る。そのとき壁を押した力(壁からの反作用)と加速度 α は体重を m とすると $F=m\alpha$ の関係がある。これが因果を考慮した説明である。一見、この場合、普通に立っている人が壁を押した場合と因果的には異なった現象が起こっているように思われるかもしれないが、実は両者は全く同様である。ここでは壁からの反作用の問題は共通であり、理解も容易であるので議論は不要であろう。問題は作用 F が発揮可能かどうかである。人が立って壁を押す場合でも、いくら大きな F を出せるかどうかは、床との摩擦係数に依存する不確定要素があるため事前にはわからない。ある力で押してみても初めてその力で押すことが可能であることを知る(原理 5)。そのとき床と足の間では、摩擦係数を μ とするとき、 μmg 以下の大きさの F での作用と反作用の釣り合いが生じており(原理 2)、そこで F の力を得ていることが F の力を出せることの根拠になっている(原理 6)。そして、スケートの場合は、その摩擦力に対応するのが $m\alpha$ である(原理 5)。力 F で押すことができたのは、立っている時は床と足の間でそれに見合う摩擦力を発揮できたからであり、スケートの時は $m\alpha$ で動けたからである。ただし、スケートの場合には α をいくらでも大きくとれるので理論上は壁が壊れないまで非常に強い力でおすことが可能である点が、立って押す場合と異なるように思われるが、実は壁を押す場合も、滑るかどうかを忘れて体が後方に飛んでいてもよいとすればスケートと同様になる。

(4) 高度な例での検討

紙面の都合で省略するが、非慣性系での運動として、回転運動における慣性力、遠心力、向心力、コリオリ力に関する例題においても、

² ここで「押し返す」とは押された力と同じ大きさの力を反対方向に働かせることを意味する。意図とは無関係である。

³ 原理9は随所で使われているので明示されていない。

理論がうまく働くことを検証した。

(5) 新しい教育の方法論

従来の力学の導入教育では、「運動」と「力」のうち、「運動」を説明することに注力しており、第二法則中心の力学であったといえる。第二法則においても力が現れるが、これは運動において要請される力であり、人が感じる力に関するものではなかった。第三法則である作用反作用の法則が人の感じる力を直接的に取り扱うものとなるが、この第三法則が運動を説明する力を見つけるためのヒューリスティックスとして用いられており、人の感じる力を説明するために正しく使われていなかったといえる。学習者にとっての力学現象の一方である感じる力を正しく説明することができないことは、学習者に力学を学ぶことの意義を疑わせることになり、また、誤概念の発生を容易にし、その修正を困難にしているといえる。本稿で説明したように、因果推論理論は、第三法則と、第二法則を力のつり合いとして解釈するダランベールの原理を基礎として、学習者が経験的に知っている力である「感じることのできる力」を実在の力として因果的に説明する術を与えるものとなる。これが因果推論理論の教育上の意義であり、これまでの力学教育を大きく改善する可能性を持っている。

従来の第三法則の教え方の具体的な問題点としては、(1)反作用が何を根拠にして発生するか、および(2)同じ力が反対方向に働くにも関わらず物体が動く場合があること、が適切に説明されていないことがあげられる。また、(3)人が感じる慣性力がしばしば現実の力として扱われていないことも大きな問題である。因果推論理論を用いれば、これらを全て適切に説明することができる。たとえば、円運動を説明する際に「回転する回転台上での一端を中心に固定されたバネの他端につながれたボールの円運動」を用いる。学校教育では、向心力が常に存在する力であることには触れられても、遠心力には触れられないか、触れられる場合においても、観測者の存在する系によって現れたり現れなかったりする「見かけの力」とされている。しかしながら、この例に因果推論理論を用いれば以下のような効果的な説明をすることができる。

バネが伸びていることは観測系に独立した事実である。バネが伸びるためには先ず引っ張られることが不可欠であり、その引っ張り力の反作用としてその伸びに対する弾性力(向心力)が生じているはずである(原理 2,3,5)。言い換えれば遠心力が作用であり、向心力は反作用として現れている。これは、観測者の存在する系とは無関係な事実であるといえる。これに対して因果推論理論では、円運動「場」に存在する物体としてボールが遠心力を受け、バネが伸び、その伸びに対しての弾性力として向心力が生じている(原理 2,3,5)、と実在する力を実在のものとして観測系に関係なく正しく説明することができる。

これらのことを踏まえると、因果推論理論に基づいて提案される教育の方法論とは、(I)人が感じる力を取り上げ、(II)その力がどのように因果的に伝播した結果、作用反作用として釣り合ったのかを説明する因果推論の方法を教える、ことが基本方針となる。大まかな段階としては、まず、(A)静止において作用に対して反作用が釣り合うことの理屈、つまり因果的な推論の方法を教える(原理 2,3,6,7,8,9)。この段階において作用を起点として対象に対して働いている力について順を追って考え、最終的に作用と反作用を釣り合わせることで網羅的に力を考えることができる能力を身につけさせる。次に、(B)加速度運動する物体における力のつり合いを説明するために、運動方程式をダランベールの原理に基づいて導入する(原理 1,5)。これは慣性系における慣性力の取り扱いを意味している。この慣性力は、多くの場合物体の運動に直接関与する力ではないため従来の力学教育ではほとんど取り扱われていない。しかしながら、物体を加速するように押す時に感じる力は明らかに実在のものであり、それを実在のものとして説明することは不可欠である。最後に(C)加速度系に存在する物体に対して働く慣性力を扱う。これが非慣性系における慣性力であり、加速度系が物体に対して与える作用として物体の運動に直接関与するため従来の力学教育においても扱われているが、運動を説明するという観点からすると観測者の存在する系によって現れたり現れなかったりするため、「見かけの力」としてしばしば実在性が否定されており、力学教育における大きな問題点となっていた。加速度系に存在する物体に働く慣性力は、検知することができる実在の力であり、それを実在のものとして説明することは不可欠といえる。この加速度系の一部として前述のような円運動「場」とそこに存在する遠心力、向心力まで扱うことにより、高校の範囲の力学における実在の力、つまり学習者が感じることができ、また、知りたいと思うであろう力を網羅的に取り扱うことができる。

上述のような方針に基づいて個々の事例に対して具体的な指導方法を実現し、まずは力学既習者を対象とした理解の深化や誤概念の解消への効果を事例的に検証してゆくことが、本因果推論理論をベースとした教育方法に関する研究アプローチとなる。このような検証を重ねてゆくことで本理論の優位性を示し、それに基づく指導法の体系化を進めることになる。

(6) 汎用運動シミュレータの開発

高校力学の学習用シミュレータが備えているべき要件としては、(1)様々な状況下において生起する現象を再現できること、及び(2)それらの現象がなぜ・どのように生じたかを、直観的かつ一貫した原理に基づいて因果的に説明できること、が挙げられることになる。

既存のシミュレータの殆どは、方程式に基づく数値計算によって要件(1)の機能を提供し、所与の状況に応じて方程式を自動生成できる

汎用性を備えている。しかし、これらは方程式に基づいて現象を再現するだけであり、またその自動生成には高度に専門的かつ非直観的な技法(解析力学など)が用いられているため、現象に対する因果的説明を与えることはできない。高校力学の知識に基づいて所与の状況に対する方程式を立式する機能を持つものも存在するが、それらは「公式」及びそれを状況に合わせて適用するためのいわゆる「解法のテクニック」に依っている。すなわち一貫した説明原理を持たず問題毎に個別的であり、かつやはり方程式に基づいているため、因果的説明を与えるものではない。つまり、上記の要件(2)を十分に実現した汎用運動シミュレータは未だ存在しない。

上記の二要件を兼備した運動シミュレータを実現することの難しさは、(a)直観に従う原理に基づく推論はしばしば科学的概念とのつながりを持たず、状況が複雑になるとそのみでは十分な定式化モデルを導出できないこと、(b)定式化モデルを導出する汎用的・科学的技法は通常非直観的であることにある。我々の提案する因果推論のための理論は、これらの問題を次のように解決する。すなわち、作用が伝播して反作用が返るまでの過程を一貫して扱える理論によって、複雑な相互作用が生じる状況に対しても直観に従う因果推論のみで十分な定式化モデルを導出することができる。従来直観的な説明が難しかった慣性力も実在の力として作用反作用の理論に組み込まれ(原理 5)、因果的に説明することができる。例えば、摩擦のない床の上に隣接して置かれた二つの物体(左:ブロック1, 右:ブロック2)があり、ブロック1に右向きの外力 F を加えてブロック2を押し動かしている例を考える。通常の直観に従うと、ブロック1が外力によって押されたとき(摩擦がないので)それがブロック2を押すことは容易に推論できるが、動くかどうかはブロック2に依存するため、推論は直ちに行き詰まる。これは通常の直観推論が局所的な因果性のみに基づくためであり、従来の定性シミュレーション技法ではこのような場合、何らかの仮定(「動く/動かない」)を置いて因果伝播を続け、その成否を後から矛盾の有無によって判断する。このため、因果的説明が背理法のような形の不自然なものとなる。これに対し、本理論では非局所的な因果性(原理 5)に立脚した推論により自然かつ形式的知識とも整合する説明を生成することができる。このように、本理論によって、従来は不可能であった「直観的かつ一貫した原理に基づいて現象を因果的に説明する機能を持つ汎用運動シミュレータ」の実現が可能となる。

試作したシミュレータの説明生成方式の概要を以下に示しておく。

(1)一つの物体に働く外力や場の力を因果の起点とする。(複数の力が働く場合はそれらの合力とする(原理 9)。また、押される場合と引かれる場合は同形であるため、以下、押される場合のみ記述する)

(2)その物体が絶対に動かないものである場合、押された力と同じ大きさで向きが反対の力を反作用として返す(原理 2,3,5,6,7,8)。

(3)その物体が動く可能性のあるものであり、かつ十分な静止摩擦力があれば、押された力と同じ大きさで向きが反対の力を反作用として返す(原理 2,3,5,6)。そうでなければ、次の二つの場合に分かれる。

(4-1)その物体が押された方向に他の物体と隣接していなければ、その方向に動いて押された力と同じ大きさで向きが反対の力 $-ma - fr$ を反作用として返す(原理 1,2,3,5)。ここで、 m と a は物体の質量と加速度、 fr は動摩擦力である。

(4-2)その物体(物体 1 とする)が押された方向に他の物体(物体 2 とする)と隣接していれば、物体 2 を押す(原理 4)。物体 2 について(2)~(4-1)の処理を再帰的に行い、動くかどうかを決定する。このとき、因果性 2 および加算性により「押された力 $= ma + fr +$ 物体 2 からの反作用」(動く場合)または「押された力 $= fr' +$ 物体 2 からの反作用」(動かない場合、 fr' は静止摩擦力)であり、いずれも右辺が物体 1 が押された力に返す反作用である(原理 1,2,3,5,9)。

* エージェントがある方向に力を発揮しようとしている場合は、その力をエージェントに働く外力(因果の起点)として上記の処理を行う。動かない場合は意図した力をすべて発揮できており(原理 2,3,5,6)、動く場合は意図した力から自身が動くことによる慣性力 ma を差し引いた力を発揮できたことになる(原理 1,2,3,5,9)。また、エージェントが力を発揮した根拠を説明するため、意図した力と同じ大きさで向きが反対の力をエージェントの足下の床、および必要であれば背後の物体に外力として加えたときの因果伝播をも上記に従って導出する。床および背後の物体(必要でありかつ存在すれば)から返された反作用(動く場合はそれに自身の慣性力を加えた力)が、意図した力を発揮できた根拠となる(原理 1~3,5~9)。

このような因果伝播の過程を辿ることにより、自然な直観に従う原理(原理 1~10)のみを用いて、任意の系についての一貫した因果的説明を生成することができる。例えば、上記の処理に二軸の力の合成・分解を導入すれば円運動などへも容易に拡張でき、向心力・遠心力の発生の仕組みを因果的に説明することも可能となる。

(7) むすび

本報告では接触力を中心として、人の直観と親和性の高い力の因果推論理論を構築した。その理論上の意義を述べるとすると、以下の3つに要約される。

① ニュートンの第 3 法則に因果を導入したこと。これにより、作用と反作用は先験的な釣り合いではなく、適切な反作用が返されることには根拠があることを明確にし、**反作用が実在する力**として実質的な役割を持つことを明らかにした。

②また、作用と反作用の釣り合いに関して、恒等性と値の決定問題とを分離して、それぞれに関する因果性があることを明示した。

③ 力の実在論を展開して、力と運動の因果推論のための理論には座標変換を介した運動の「見え」の議論が不要であることを示すと共に、遠心力や慣性力などの「見かけの力」といわれる力を、直観と整合性のある実在する力として扱える因果推論理論を構築した。

これらにより、中学・高校程度の運動と力に関わる諸現象を、ニュートンの三法則との整合性を保ちながら、人が直観的に感じることでできる力に基づく因果的推論によって一貫して理解・説明することが可能となる

因果的理解に立脚することにより、力学教育支援方法の抜本的改善する新しい教育プログラムの枠組みを示すと共に、**世界初**の因果的説明能力を持つ汎用運動シミュレータを開発した。

得られた成果は、天動説が唱えられている時代に地動説を唱えたことに匹敵する革新的な成果であり、現在の物理教育学会の知的レベルでは受け入れ可能なレベルを超えている。その結果、2 編の投稿論文はいずれも事実上まともな査読プロセスをされずに不採録となった。次に人工知能学会に投稿したがそこでも2度不採録となったが、編集委員会の度量のおかげで我々のクレームが認められて、現在再査読中の段階である。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計1件)

[1] 堀口知也, 平嶋宗, 溝口理一郎: 人間の素朴な因果理解に準拠した汎用運動シミュレータ, 第29回人工知能学会全国大会, 平成27年5月30日, はこだて未来大学(北海道, 函館)2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

溝口 理一郎 (MIZOGUCHI RIICHIRO)
北陸先端科学技術大学院大学・サービスサイエンス研究センター・特任教授
研究者番号:20116106

(2)研究分担者

平嶋 宗 (HIRASHIMA TSUKASA)
広島大学大学院・工学研究科・教授
研究者番号:10238355

堀口 知也 (HORIGUCHI TOMOYA)
神戸大学大学院・海事科学研究科・教授
研究者番号:00294257