

フレミングの左手の法則に隠されたパラドックス

Paradox Hidden behind the Fleming's Left Hand Rule

顧 萍 木曾田 賢 治 石 塚 互
 Gu PING Kenji KISODA Wataru ISHIZUKA
 (教育学部物理学教室)

2013年10月4日受理

Abstract

There exist apparent contradiction between the fundamental laws of mechanics and electromagnetic interactions, which originates in the mismatch of level of them in school education. We point out that Lorentz force can be used as an introduction to conservation law of angular momentum, and we show an example of suitable arrangement of magnets and currents.

はじめに

モーターは磁場の中で電流が受ける力を利用して回転する。これは学校教育で取り上げられる電磁気学の基本であり、「フレミングの左手の法則」あるいは「電磁誘導」という解答を求める問題に対する生徒の正解率は高い。しかし現象に対する生徒の理解度は浅く、これは小型模型モーターに触れた経験を持たないことに一因があると考えられる。一方で電磁相互作用は相対論的効果を内包し、また場の考え方を必要とするため、基本的にニュートン力学の水準を越えている。そのために、高校までの物理教育で扱われる力学の基本法則に一見したがわかないように見える現象が実は頻出している。教師は、論理の一貫性に敏感な生徒がこれらの陥穽に落ちる危険性を認識する必要があり、本論で我々はこれらについての考察を行う。

1. 作用反作用の法則

作用反作用の法則(運動の第3法則)は、「AがBに及ぼす力と逆方向の等しい大きさの力をAはBから受ける」である。これは慣性の法則、運動の法則と併せて、ニュートン力学の基礎となる。これらの法則は基本的に大きさを持たない質点に対して成立するのであるが、大きさを持つ物体に対しても、その重心に対するものとして成立する。力 F は大きさと方向を持つベクトル量として扱われ、ベクトルは一般に平行移動に対して同一視される。この場合には偶力の作用によって一般に重心の周りの回転が生じる(図1)。それについては高校までの力学では触れられない。

したがって質点ではない対象については、回転という要素が加わるため、高校までの物理教育の範囲を越

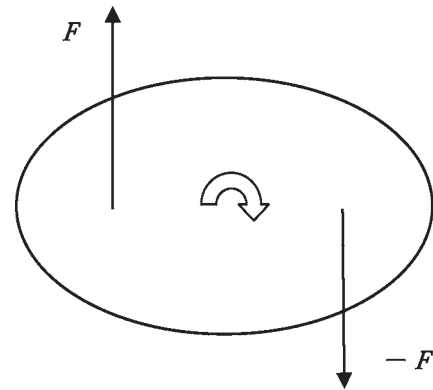


図1 大きさのある物体に作用する力

える内容が含まれることになる。しかし、これは回転を取り扱わない現行の物理教育の欠陥の一つと考えるべきである。一時期は電気・磁気分野が力学に先行していたが、基本的に現在も物理学は力学の上に組み立てられている。その力学の基盤が完全なものではない。運動学の基本はエネルギー、運動量と角運動量の3つが保存されることであり、これらの3つの重要性に差はない。

現在では、解析力学によって力学の理論体系が整えられた結果、ニュートン力学の3法則が成立することはエネルギー、運動量、角運動量が保存されることに対応し、さらに時間と空間の一様性の仮定から数学的に導かれることが知られている。

2. 磁場と電流の相互作用

「科学の甲子園」では、クリップモーターカーの動力源として製作したモーターを利用する課題が連続し

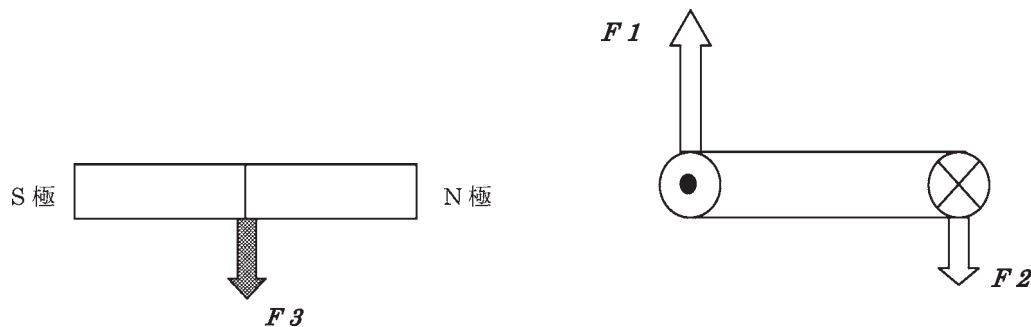


図2 磁石とコイルの間の電磁相互作用

て出題されている¹⁾。そこで科学の甲子園に参加するような一部の高校生は、磁場と電流の相互作用を体験的に深く理解している。しかし多くの生徒は教科書のイラストで得た知識としての理解に停まっている。モーターが電磁相互作用によって回転する仕組みは多くの教科書で取り上げられているが、小型模型モーターに触れる機会は驚く程に少ない。科学の甲子園に参加する物理が得意な生徒でも、触れたことのある生徒は20人中半数に充たず、分解して内部のコイルや磁石を見たことがある生徒は1人だけであった。

理科教員を志望している教員養成課程の学生も同様か、または更に理解度が低い²⁾。電磁誘導によって、あるいはローレンツ力によってという解答では不十分である。図のように、コイルの各部分に流れる電流に作用するローレンツ力の大きさと方向が異なるためにコイルに偶力が作用して回転する。この正解を正しく理解していた学生は殆どいない。このように、たとえば200字で説明することを求められた場合に、誤理解が顕在化する。これは確かな理解力が求められているにもかかわらず、理科に固有の課題ではなく他教科でも同様と考えられるが、理科では実験による効果的な学習が可能である。教材として模型モーターを活用する方法を提案する。

ここで、ローレンツ力が本質的に保存力ではないことに因る錯誤が現れる。図2で右側は電流が流れているコイルの断面を示している。力 $F1$ と力 $F2$ の反作用はどこに現れるのかを考えてみる($F1$ の大きさが

$F2$ よりも大きいことに注意)。磁石に作用する力は $F3$ 以外にない。しかしこれらは同一線上にないので、ナイーブな意味での作用反作用の法則が成立していないように見える³⁾。力学と電磁気学が互いに矛盾しているように見えるが、勿論、力の合成の結果は0に等しく、磁石とコイルの系全体の重心は動くことはない。

3. 角運動量の保存

高校までで扱う電磁気の範囲でも電場と磁場は現れる。作用反作用の法則は、角運動量の保存として理解することができる。電磁場の理論では、場が、電場と磁場のベクトル積で与えられる角運動量を担う。場を含めれば角運動量は保存される⁴⁾⁵⁾のであるが、場の考え方は近接力で現象を記述するために導入される。しかし古典物理学の範囲では、遠隔力によっても同等に適切に記述されなければならない。

その場合は図3のように、コイルと磁石のそれぞれにも紙面に向かって右回りのトルクが生じて、それによって紙面に向かう角運動量が生まれる。同時にコイルと磁石には $F3$ と $F4$ による左回りのトルクが生じ、磁石とコイルの系の全角運動量は保存されることが理解される($F4$ は磁石の両極に作用する力の反作用)。

図3は、角運動量の保存法則を理解する鍵となる。磁石とコイルのそれぞれが紙面に向かって右回りに「自転」することに因る角運動量と、磁石とコイルの2つがそれらの重心の周りを左回りに「公転」するこ

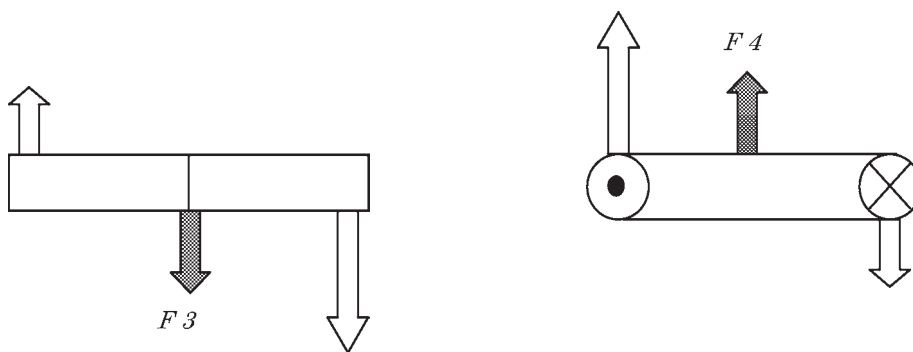


図3 コイルと磁石が担う角運動量

とに因る角運動量(角運動ベクトル)の和が一定になる。そこで、これを惑星系の模型と見做せば、衛星の自転速度の増加・減少によって、遠隔力としての重力の相互作用を通じて公転速度が減少・増加することを容易に理解することができる。高校までの学校教育で角運動量は扱われないが、我々がここで提示したものは角運動量を介して力学と電磁気学の2つの分野を繋げられる有効な方法である。力学に電磁気の相互作用も矛盾なく組み込まれていることを理解することによって、生徒の、首尾一貫した一つの体系である物理学に対する興味・関心を高めることができると期待される。

4. まとめ

本論で我々は電磁気現象における力学分野の作用反作用の法則の妥当性について考察した。フレミングの左手の法則を鍵として電磁気と力学の両方の分野の理解を深めることができることを示し、階層性を持つ学問分野における学習方法に関する提案を行った。

物理学の本質は自然界の網羅的な記述を目指すのではなく、論理体系の一貫性にある。高校までの学習内容においては力学分野と電磁気分野の間でレベルのギャップが確かに存在する。物理に関心が高い生徒ほどこの部分で戸惑い、教える教師の側でも陥りがちな盲点となる。そこで逆にローレンツ力に関連させながら、角運動量とその保存則の導入を図るのが、一つの効果的な学習方法である。

《参考文献》

- 1) 独立行政法人科学技術支援機構、<http://rikai.jst.go.jp/koushien/index.html>
- 2) 日本理科教育学会近畿支部大会、滋賀大学附属中学校(2013.11.26)
- 3) 小野健一、作用反作用について、物理教育(1974)、Vol.22(3)P.141
- 4) 砂川重信、電磁気学、岩波書店(1987)、P.156
- 5) R.P.ファインマン、物理法則はいかにして発見されたか、岩波書店(2001)、P.116