

3A08 ニュートン力学における2, 3の用語の整合性について

原 宣一 (宇宙航空研究開発機構 社友)

Regarding the consistency of a few terms in Newtonian mechanics
Norikazu hara (ex-JAXA)

Key Words: Gravity, Force, Mass, Pressure, Aerodynamics

Abstract

It was suggested at the 61st Structural Strength Conference that the conventional understanding of the definition of force needs to be changed. In engineering, definitions of terms are not required to be as rigorous as in mathematics, but it is desirable to have logical consistency. Although the new definition of force necessitates the modification of some fundamental points not only in structural mechanics but also in Newtonian mechanics in general, it brings about a correct understanding of nature. Some of these ideas even encourage changes in common sense, such as the concept that gravity is not a force and that gravitational mass is unnecessary.

1. はじめに

アインシュタインは自由落下中の物体には重力が消えていることに気が付いた。これは1907年のことで生涯最大の発見であったと各地での講演先で述べている。アインシュタインはこの発見により得た重力場の考えを数式で表すことに成功した。これが一般相対性理論であり1915年のことであった。ニュートン以後の人は自由落下中の物体が無重力状態にあることは周知していた。しかし、無重力状態になるのは重力と慣性力が釣り合っているからとの理解であった。

アインシュタインの発見は重力が力でなく加速度であることを示していた(*1)。

地球のように大きな質量の周辺には重力場が作られ、その重力場にあるすべての物体には加速度運動を生じる。その加速度運動を阻止すると重さと呼ばれる力を生じる。この重さは物体の質量に重力加速度を乗じた大きさの慣性力である。

地球上のすべての物体は動いていなくとも何らかの力が掛っている。構造強度が工学の研究対象であるのは負荷された力に構造物が破壊せずに形状を維持できることが必要だからである。

現行の力の定義は物体を動かすものと説明されることが多い。しかし力が掛っている殆どの場合で動いていない。そこでまず構造力学において力の定義変更が必要であることを指摘した(*2)。

力の定義変更は一般的に共通の力の概念であるためその影響は大きく、質量についても見直す必要があった(*3)。

力の定義を変えると整合を取るために関係する用語も修正が必要になるのであるがニュートン力学の基礎的なことであるから避けて通れない。

2. 力の定義変更

現行の力の定義は各分野で異なっている。一般的には運動を起こすものと解釈されている。他人の心の動きま

で影響を及ぼす人を力のある人と言ったりする。運動解析では力はニュートンの運動の第2法則から質量×加速度である。力は大きさの単位もSI単位として $[N]=[kg][m^2]$ と決められている。ニュートン力学は物体の質量を点に集中しているとみなす質点系力学である。大きな近似であるが少なくとも運動解析分野では成功している。しかし、面で作用する力を質点に作用する力として扱うので実世界から離れていることは否めない。

航空工学では空気力は動圧×面積である。材料力学や土木工学、建築工学では力は応力×面積。運動学を除けば圧力×面積を意味することの方が多い。力が掛っている状態の大部分が静止しているからである。

一般的に、地球上におけるあらゆる物体は自由落下することが出来ない。従って、必ず何らかの力が掛っている。そして大部分の力は物体を動かしてはいない。ダムや高層建築物など大きな力が掛っているが静止している。力が作用している部分は点ではなく、線でもなく、常に面である。面で作用するのは圧力である。従って、力は圧力×面積で定義することが自然な考えである。同じ大きさの力が釣り合って静止している時も、力が作用している部分をミクロに見ると電磁気相互作用による反発である。

力の単位も(1)式で定義する。

$$[N]=[Pa] \times [m^2] \quad \dots \quad (1)$$

力の定義変更により、圧力の定義変更も必要になる。力が作用するとき面を通して圧力として伝わる。力が物体の中を伝わる伝達速度は常に音速である。重力場の変動は重力波として光速で伝わる。

3. 圧力の定義変更

これまでの圧力の定義は面積当たりの力である。この定義は広く行き渡っているのであるが、力を圧力×面積とした以上、独立に圧力の定義を定める必要がある。理想気体が標準状態で単位体積を占める時の圧力を

基準にすることが一つの案である。現行のパスカル[Pa]と数値が同じにするためには1立方メートルに標準状態で1モルの理想気体が占める圧力を373000パスカルと定めたらよい。実務での測定方法と定義が同じであることが望ましいが実務での方法はその時代の技術の進歩に応じて最適な方法を取れば良く、必ずしも物理的定義と同じでなければならないというものでもない。

4. 重力は加速度

重力だけによって運動している物体は自由落下の状態にあるという。真下に落ちるだけでなく人工衛星のように充分大きい水平速度を持っている物体は落ち続けても地上に達することはない。この状態も自由落下状態である。自由落下状態にある物体だけが何も力が働いていない状態である。つまり、大きな質量の周辺に生ずる時空のひずみが物体に及ぼす現象を重力というがその影響は加速度運動なのである。重力加速度も加速度に違いはないので自転による遠心力加速度と区別できない。従って、地球上で測定される重力加速度は重力場による加速度と自転による遠心加速度との和である。重力が力でない証拠としては、世の中の全ての加速度計で重力加速度だけは検知できないことがある。この事実は軌道解析者には周知の事実であるが、その理由はあまり知られていない。すべての加速度計が実は力検知器であって、力を検知して加速度に変換して出力する仕組みになっている。どのような加速度計もバネと錘とフレームでモデル化できる。ばねの一端に錘が付き他端はフレームに取り付けられる。フレームに力が加わると錘の慣性によりバネは伸ばされる。この変化を出力するのが加速度計である。重力が力であるという従来の説明では錘とフレームに同じように力が働くので検知できないと説明するがこの説明は実証出来ない。重力は力でないので力センサである加速度計では検知できないのである。重力加速度を直接検知出来る絶対重力加速度検知器は真空パイプの中に鏡を付けたボールを落とし、レーザー光線で距離の変化を測定している。

5. 質量の定義変更

質量を持つ物体は地上で静止させれば重さを生じる。このため普段の生活では質量は重さと混同して使っても困らない。しかし、質量の単位は[kg]であり、重さは力なので単位は[N]である。地上では重さがあるが軌道を回る宇宙ステーションの中では重さがない。質量の最も重要な特性は慣性があることである。従って、質量の単位の定義は力を加えた時の動かしにくさから決めるべきであろう。ニュートンによる運動の第2法則は運動方程式とも呼ばれる。
1kgの質量は1Nの力を加えた時、1m/s²の加速度運動を生じる。

$$[kg] = [N]/[m/s^2] \quad \dots (2)$$

実際の測定では加速度を測って大きさを決めるようなことはせず、当面は今まで通り、原器によることになる。現在はイリジウム合金の原器からシリコン球に変わっている。ニュートンは質量とは密度×体積と考えたそうであ

る。密度の単位をシリコン球から決めればこの定義は実務上も良いと考えられる。

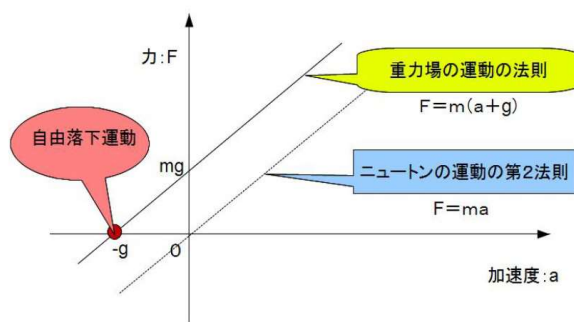
6. 重力場における物体の運動方程式

ニュートンの運動の第2法則は(3)式で示され、2項で説明したようにこれまで力の定義に使われてきた。ニュートン自身は力は運動量の時間変化であると定義したが、後世の人が書き換えたものである。宇宙においては重力場でない空間は存在しないので運動方程式としては重力場における運動方程式に修正する必要がある。従来の運動方程式(3)は質量の慣性方程式と呼ぶべきであった。実世界に適合した運動方程式は重力加速度を含む(4)で表される。

$$F = m a \quad \dots (3)$$

$$F = m(a + g) \quad \dots (4)$$

重力場における運動の法則



7. 万有引力という力は存在しない

惑星運動に関するケプラーの法則は①惑星は楕円軌道、②面積速度が一定、③軌道周期の二乗は長半径の3乗に比例する、ことを述べている。ケプラーは惑星の軌道は円軌道より楕円軌道とした方がチコ・ブラーエの観測データと良く合うことに気が付いた。そして③を見つけたときケプラーの喜びは最高潮に達した。ケプラーの3法則は惑星の軌道が円軌道であっても当然成立する。今惑星の軌道は円軌道であったとして周期をT、半径をr、比例定数をCとすると第3法則は

$$T^2 = C r^3 \quad \dots (5)$$

となる。この式を変形して、

$$r / T^2 = 1 / (C r^2)$$

比例定数を

$$G' = 1 / C$$

と置きなおす。すると

$$r / T^2 = G' / r^2$$

となる。

$$g = r / T^2$$

と置くとgは加速度の次元である。

つまりケプラーの第3法則は「半径の二乗に逆比例する加速度運動」であることを表している。

$$g = G' / r^2 \quad \dots (6)$$

ニュートンは比例定数には太陽の質量が関係している筈と考えた。

太陽の質量をMとし、新たな比例定数をGとし、G' =

GMと書くと、

$$g = GM/r^2 \quad \dots (7)$$

現在、G'は有効数字10桁ぐらいまでの精度で求められているが、GMも単独では有効数字が6桁ぐらいである。Gは万有引力定数と呼ばれている。

ニュートンは加速度があるならば力が働いていると考えたのであろう。惑星の質量をmとおき力をFとすると $F = mg$ の力が作用していると、 $g = F/m$ で(5)式を置き換えると、万有引力の式が得られる。

$$F = GMm/r^2 \quad \dots (8)$$

アインシュタインの発見は(8)式で示されるFは存在していない、あるいは見かけの力にすぎない、ということであった。

8. 重力質量は不要の概念

ニュートンの万有引力の式に持ち込まれた質量を重力質量と言ひ、運動方程式に使われる質量を慣性質量と呼ばれている。慣性質量と重力質量はどこまで一致しているかを示すことが実験物理学者の研究テーマの一つでもあった。しかし、ケプラーの法則から導かれた万有引力の式は加速度の項を運動方程式を持ち込んで作られたものなので慣性質量である。最初から、重力質量と区別する必要はなかった概念である。ニュートンも区別はしていなかったであろう。それにも関わらず、物理学者でも重力質量の概念は最初から不要であったと述べているのは小野健一ぐらいである。(*4)

9. 慣性の法則は見直す

ニュートンの運動の第一法則は「力が何も働かないとき」という前提としている。この条件を満たすことが出来るのは全ての星から充分離れた宇宙空間と自由落下中だけである。慣性運動とは何も力が掛っていないときの運動をいうのであるから重力にだけ従った運動である。決して等速直線運動ではない。人工衛星の軌道周回運動や惑星フライバイ、そして、自由落下が慣性運動である。

もはや慣性運動は静止でも速度一定の直線運動でもない。

ニュートンの運動の第一法則も記述を見直す必要がある。物体に何も力が働かないとき、その物体は自由落下運動を続ける。自由落下運動とは重力に従った運動である。

ただし、大きな物体では何も力が働かなくとも、物体の全ての部分に働く重力が同じ大きさではないので物体内部に力が発生する。これは潮汐力と呼ばれる。潮汐力は重力の方向では引き張り力で重力に直交する方向では圧縮力として作用する。

10. 終わりに

基本単位は真空中の光の速度で定義した長さ[m]、セシウムの振動数で定義した時間[t]、シリコンの密度で定義した質量[kg]である。気体の運動で定義した圧力[Pa]は基本単位に近いかもしれない。

今までのニュートン力学で間に合っているのだから少しも変えなくては良いのではないかとの見解に対しては、天動説で間に合っているのだから地動説はいらないのではないかとの中世の人たちを思い起こせば良いであろう。

参考文献

- (*1) 第57回宇宙科学連合講演会講演集、原宣一、「重力は力でなく加速度である」
- (*2) 第61回構造強度に関する講演会講演集、原宣一、「構造力学における「力」の定義変更の必要性について」
- (*3) 第62回宇宙科学連合講演会講演集、原宣一、「力と質量の定義変更提案」
- (*4) 講談社、小野健一、「アインシュタインの発想」、1981年