

3A01 構造力学における「力」の定義変更の必要性について

原 宣一 (宇宙航空研究開発機構 社友)

The Necessity of Revising the Definitions of Force Unit for Mechanical Engineering
Norikaxu Hara (ex-JAXA)

Key Words: Structural Mechanics, Pressure, Stress, Force, Unit, Definition

Abstract

The most important equation relating force in the structural mechanics may be Hooke's law. However, the current definition of force unit is related to the second law of Newton's equation of motion. Therefore the definition of the unit of this force is ignored there. It is more natural to define the force from the situation how the force acts, rather than paying attention to the second law of motion or the Hooke's law which describes the state change of the object with the force applied. Although it is necessary to revise definitions of other physical quantity also, it becomes a more natural system of units and one new knowledge comes to be revealed. The force unit, [N], shall be newly defined as the product of pressure unit [Pa] and area unit, [m²]. It would be easily recognized that the gravity is not a force.

1) はじめに

構造力学の主目的は構造物が破壊しないかの判定に資することであろう。破壊させる原因は許容される以上の力が加わるからである。一般に構造物は荷重が増大すると破壊に至る。この場合、構造物に対して力と運動の関係ではなく、力と構造物の許容応力との関係が着目すべき観点である。力学の教科書¹⁾においても力とは質量に加速度を乗じたものとされている。しかし、これは日常で経験する力の概念から離れてしまっている。東京スカイツリーなどの建築物は大きな自重に耐えて静止している。殆どの場合、力は釣り合い状態にあって動かない。従って力と運動に着目するより力の作用した物体の応力・ひずみに着目した方がより適切であった。

2) 力の単位について

力の大きさの単位として [kg-w] (キログラム重) も長く使われてきた。現在は SI 単位として [N] (ニュートン) が次のように定義されている。

定義【1】 1 N の力は質量 1 kg の物体に 1 m/s² の加速度を生じさせる。

物理に必要な各種の SI 単位には 7 種の基本単位とその他の組立単位が決められている。力の単位 [N] は組立単位の一つである。これは基本単位である質量 [kg]、長さ [m]、時間 [s] から構成されている。定義【1】はニュートンの運動の第 2 法則を基に構成されている。

3) 力の定義について

力そのものはいくつかの要素があるので、力とは何かを一言で表現することは出来ない。

力とは原子・分子の一つの集団が他の原子・分子の集団である物体に衝突するときの全体としてのマクロな作用である。工学で対象とする力は物体に作

用する力である。日常の生活で目にする力はマクロな対象に作用する力である。一般的に力は物体の表面を通して加わるので外力ともいう。

物体に力を加えるとその物体は次の二つの変化が生じることが力の特徴づけている。

二つの変化とは；

① 物体に外力を作用させるとその物体は加速度運動をする。そして、その物体の質量により慣性力が生じ、この慣性力が外力と釣り合う。(慣性力を含めて力は常に釣り合い状態にあると認識するのがダランベールの原理である。)

② その物体に慣性力が発生しているとき、応力・ひずみを生じる。(常に、ひずみを検知することにより力の存在を検知できる。) 物体に外力と釣り合う外力が同時に作用していると、慣性力は生じないが応力ひずみは発生している。

慣性力とは物体が外力を受けた時に生ずる加速度にその物体の質量を乗じた量で決まる体積力である。

力は物体を通じて伝わるが応力・ひずみの変化として伝わるのでその速さは音速である。物体を通じて伝わる音速は物体によって異なる。

4) 不都合なこれまでの力の単位の定義

定義【1】は長い歴史を経ているものの次のように不都合なことがある。

① 日常の生活で普通に使う力の概念に合っていない。

構造物には力が掛かっているが殆どの場合でそのまま静止している。

② 外力と外力の釣り合い状態を表していない。

力は常に釣り合った状態にある。物体に作用する二つの外力が均衡していると物体は動かないから加速度はゼロである。

③ 座標系に依存する。

私たちが通常認識する力は座標系に依存しないが、定義【1】では座標系に依存してしまう。有人口

ケットの推力飛行中に宇宙飛行士は加速度を感じて推力の発生を感じるが、ロケットに固定した座標系で見れば加速度はゼロで力は掛かっていることになる。

④ 力に2種類できてしまう、

定義【1】は力の単位の定義であるが力の定義でもあると見られがちである。力の定義でもあるとすると見かけの力と実際の力の2種類が出来てしまう。物体に作用しても応力・ひずみを生じない力と生じる力である。

見かけの力については、外力でない慣性力を見かけの力とする書籍も多く、注意が必要である。

⑤ 力が関係する多くの工学の分野で使われていない、

構造力学、材料力学、建築工学、等、SI単位の[N]が使われているが、力の意味として定義【1】は無視されている。工学の分野で力を測定するときに使われる器具はロードセルやバネばかりである。これらは応力とひずみの関係式であるフックの法則に基づいている。

単位の定義どうりに測定できることは必ずしも必要ないが、加速度を測定して力の大きさを決めることは殆ど行われていない。

5) 新しい力の単位の定義 (案)

力を測定する方法は、ロードセルやバネばかりなど殆どがひずみを測定する方法を利用している。従って、フックの法則を背景に、基準となる秤を作ってこれを力原器と定めることも一案である。

3) 力の定義で述べた①と②は力を及ぼされた物体の状態変化である。力は物体に圧力として作用する。点や線で作用するのではなく面を通して作用するものであり、圧縮力として作用する。これが力である。

引き張り力は物体の内部で発生する状態であり、外力は直接に引き張り力として作用させることは出来ない。

近似的に力を点で作用させるならば力をベクトルで表すことが出来る。力と運動の関係を表現する目的ではこれで済む。これが質点系力学である。

しかし、物体に力が作用したときの物体の変化を力の単位の定義に利用するよりも、力の作用する仕方を基にする方が理に適っている。力の元をミクロの状態まで辿っていくと、そこにあるのは電磁気力相互作用である。しかし、工学の範囲ではマクロの状況観察の方が適切である。

弓を引く場合やハンマー投げなど力いっぱい引っ張っているように見えるが、接触部分を見ると常に圧縮力を加えていることに気が付く。和弓の場合、左手は弓を押すので押手というものの、右手は矢をつがえて弦を引くので引手という。しかし、実際には弦を親指の付け根で押している。エキスパンダーを思い浮かべると弓も両手で押していることに違いがないことが分かる。

ロケットのエンジンが推力を出しているときは燃焼室から高圧の燃焼ガスが排気されている。エンジ

ンが発生する推力はガス圧を燃焼室壁面にわたって積分した値になっている。

従って、力の大きさの単位1 Nは次のように定義し直すことが適切である。

定義【2】1 [N] の力は1 [Pa] (パスカル) の圧力が物体の表面で面積1 [m²] に作用したときに釣り合う力である。

力の大きさを定義【2】で単位を決めても、ニュートンの運動方程式もフックの法則も常に成立する。軌道解析における力も、構造力学における力も同じ単位の定義となる。

ただし、圧力の単位は再定義が必要になる。ヘリウムなどの気体が標準状態で単位体積に閉じ込められた時に示す圧力と定義することになる。

ただし、圧力の基準に使えそうな現象や装置が見当たらないから、力の実測に関しては当分はこれまでどりの方法を踏襲することになる。

6) 質量について

あらゆる物質、物体が共通に持つ唯一の特性は質量である。質量とは何かの問いに対し、昔は重さと答えてもほとんど支障はなかった。人類の活動分野が地上に限られることなく、宇宙にまで広がった現在では質量と重さは明確に区別する必要がある。

質量の特性として重さだけでなく次の6項目が認められる。

- ① 慣性があること。
- ② 重力場で運動(自由落下)を生じる。
- ③ 自由落下を阻止すると慣性力が生じる。
- ④ 大きな質量は周囲に重力場を形成する。
- ⑤ 化学反応の前後で質量は保存される。
- ⑥ エネルギーと等価である。

慣性とは力が加わった時の運動変化に抗する性質である。ニュートンの運動の第2法則は見方を変えれば慣性の法則である。この法則により質量と慣性の定量的な関係が定まる。

自由落下運動とは重力場において何も力を加えないときの運動である。水平方向の速度があれば真下に落下しないが自由落下運動であることに変わりない。国際宇宙ステーションも人工衛星も、自然の月も、すべて地球(の重心)に対して自由落下運動を続けている。

水平方向速度を持たず真下に落ちる自由落下運動を阻止したときに現れる慣性力が重さである。重さ(又は重量)と重力は明確に区別しなければならない二つの概念である。重さは力であるから単位はNである。一方、重力場で物体が自由落下するときの運動は加速度運動であるから、重力は加速度で表現することが良い。

小さな質量が重力場を形成することが実証されているのは今のところキャベンディッシュの実験まであり、それは質量150kg程度の鉛球である。重力はあまりにも小さすぎるのでこれより小さな質量ではその質量による重力場を検知できない。

原子核反応では反応の前後で質量に変動があるが化学反応では検知できるほどの変化はない。このため近年まで質量保存則は自然界の基本的な法則であると考えられていた。

質量がエネルギーと等価であることはアインシュタインによる特殊相対性理論の帰結であり、太陽のエネルギー源を説明している。

7) 質量の単位の新しい定義 (案)

質量の特性で日常の生活にも身近で最も顕著な特性は慣性であろう。この慣性で質量の単位を定義すると 1 kg は次のように規定できる。

定義【3】 質量 1 [kg] (キログラム) の物体は 1 [N] の力を作用させると 1 [m/s²] の加速度を生じる慣性がある。ここで加速度は力に比例し質量に逆比例する。

この定義はニュートンの運動の第 2 法則を慣性の法則と解釈し直しただけであり物理は同じである。

8) 重力について

重力はニュートンが万有引力を発表して後、万有引力に地球の自転による遠心力を加味した力であると考えられてきた。そして、自由落下中の物体が無重力状態になることはニュートンも気が付いていた。現在も、地球の重力が慣性力と釣り合うからであると説明されていることが多い。しかし、無重力状態は力の釣り合い状態ではない。

重力は如何に強くとも潮汐力が無視できる物体の大きさである限り、自由落下中にその物体が壊れることはない。このことと中性浮力による模擬的な無重力状態との考察から、人間が大きな加速度に耐える方法があることも分る²⁾。

ニュートンがエドモンド・ハレーからのケプラーの 3 法則がなぜあるかの問いに万有引力の法則でケプラーの 3 法則を導けることを示した。ニュートンが万有引力の法則をどのように発見したかについて二通り考えられる。天下行に距離の逆二乗則から万有引力の方程式を作ったのか、ケプラーの三法則から、万有引力の式を作ったのかである。

ニュートンが万有引力の式を導いたのが前者であったとする。重力質量と慣性質量が異なるとしてもその相違は 1 と異なる無次元係数がつくだけである。この相違は重力定数 G に含まれていると考えれば良いから慣性質量と異なる重力質量を想定する必要はなかった。後者であるならば式を誘導する途中で加速度の項を (力/質量) で置き換えている。この質量は慣性質量でしかない。重力質量という概念は最初から必要なかったのである。

重力質量という概念が不要の概念であることを指摘しているのは小野健一だけである³⁾。

実証できる重力 (Gravity) はその場に置かれた質量をもつ物体が加速度運動をしていることだけであって力としてではない。加速度に質量を乗じた量は力の次元ではあるが見かけの力にすぎない。

アインシュタインは自由落下を考察し、1907 年に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。これは重力が力でないことに気が付いたことであり、その後の一般相対性理論に取り組み動機となったとアインシュタイン自身が各地で語っている。

質量と重さ (又は重量) は単位が [kg] と [N] と異なることにより明確に区別されるようになった。次に明確に区別すべきは重さ (又は重量) と重力である。重力の大きさは加速度で示すべきであるから単位は [m/s²] である。

国土地理院のホームページでは各地で計測した重力値から任意の地点の重力値推定計算サービスがある。この計算結果は加速度 [mGal] で表示している⁴⁾。しかし、このホームページでも「重力」は「引力」と「遠心力」を合わせた力であるとの説明を残したままである。重力が力であるなら N で表示すべきであるが、正すべきは「重力」は力であるとの説明の方である⁵⁾。

9) 終わりに

力の単位は同じ [N] で示すにしても定義の仕方は一つではない。現行の単位の定義【1】が不適切であることを示し、これに変わるべき新たな定義【2】を提案した。次にニュートンの運動の第 2 法則は慣性の法則と考えて質量の定義に使うべきとして質量の単位の定義【3】を提案した。

この二つの新たな定義により、重力 (Gravity) が力でないことの認識も自然に得られよう。アインシュタインによれば重力は時空のひずみであって、その変化、すなわち重力波は光速で伝わる。

自然に存在する四つの力という表現も紛らわしい。これは四つの相互作用という表現が良い。すべての力の源泉は四つの相互作用の内、電磁気力相互作用である。

ニュートンは質量を基本的な物理量と考えず、質量は密度に体積を乗じた量と考えた。これは間違いではなく全体の単位系を考えて一般的に現在も採用されていないだけである。力は圧力に面積を乗じたものとしても全体の単位系として矛盾はなく、より現実に近いとみるのが本稿の提案である。

参考文献

- 1) 力学、東京大学応用物理学教室編、東京大学出版会、1960 年
- 2) 耐高加速度鎧の実現性、原宣一、第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集、2014 年
- 3) アインシュタインの発想、小野健一、1981 年、講談社
- 4) 国土地理院 HP : http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/gravity_menu03.html
- 5) 重力は力でなく加速度である、原宣一、第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集、2013 年