

原 宣一（宇宙航空研究開発機構 社友）

Proposal for Revising the Definitions of Force Unit and Mass Unit  
Norikaxu Hara (ex-JAXA)

Key Words: Mass, Force, Unit, definition, Gravity

## Abstract

The terms force and mass are most basic words used in Newton Dynamics. The units for these physical quantity are defined by the CIPM[Comit'e International des Poids et Mestres]. The force unit, [N], is with the background of the Newton's equation of motion. In spite of it's achievement it is not fitted in concept of the force which is observed in daily life. The definition of the force unit gives main part of the concept of the force. Therefore, the new definition of the force unit shall be proposed in this paper. The definition of unit of mass [kg] will be revised from prototype kilogram to another one using Avogadro's number by the end of 2018. However the specific character of mass is not used for the definition as the same way up to now. The new definition of unit of mass is proposed by using Newton's equation of motion because the inertial property is the main character of mass. After getting two new definition of the unit for mass and force, the concept of force and mass will be much clear than ever. In addition, it will be naturally recognized the fact that the gravity is not a force.

## 1) はじめに

重力が力でないことはアインシュタインが 1907 年に初めて気が付いたことであるが世間では未だに認識されていない<sup>1)</sup>。その理由は力の単位の定義に主因があると思われる。

物理量の単位は 4 年に一度パリで開催される国際度量衡総会で一つの単位系として決められ、SI 単位と称される。力の単位も SI 単位の一つとして [N]（ニュートン）が定められている。これは力の大きさの単位であるが、力の定義としてみなされる傾向がある。つまり力学の教科書<sup>2)</sup>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ことが多い。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。力士が土俵上で四つになっているとき、力は出ているのに動かない。また、建築物は大きな力に耐えているのに動かない。これらのことは力が運動に着目するより力の作用した物体のひずみに着目すべきことを暗示している。



一方、質量の SI 単位 [kg]（キログラム）は長らくキログラム原器が基準とされてきたが、後述のように新たに定義し直されることになっている。それでも実際に何かの質量を計測するときには質量の特性を使って原器と比較しなければならない。

それならば、質量の単位の定義は物理的な意味から決めておき、実測方法は技術の進歩に応じて必要な精度を満たす方法を選べば良いであろう。実際、SI 単位の中で 7 種ある基本単位の中で電流の単位 [A]（アンペア）は物理的な意味から定義されており、実測する方法とは全く無関係である。

## 2) 力の定義について

力の大きさの単位は一つの関係式を背景に関単に決めることが出来る。しかし、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。

工学で対象とする力は物体に作用する力である。物体の表面を通して加わるので外力ともいう。日常生活で目にする力はマクロな対象に作用する力である。

物体に力を加えるとその物体は運動状態を変化させるとともに物体内部に応力を生じ歪む。物体に力が作用すると次の二つの変化が生じることが力を特徴づけている。このように、力とは目に見えないだけでなく物体に作用してその物体の変化から初めてその存在が認識できる物理量である。

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。（力は常に釣り合い状態にあるとするのがダランベールの原理である。）

② その物体に応力・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。)

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の体積力である。

①と②は力を及ぼされた物体の状態変化であって、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を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ことが出来るとすると力は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。

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。物体を通して伝わる音速は物体によって異なる。

### 3) 力の単位について

力の大きさの単位は [kg-w] (キログラム重) も長らく使われてきたが、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 1 kg の質量の物体に作用したとき、その物体は 1 m/s<sup>2</sup> の加速度を生じる。

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ことは言うまでもない。

SI 単位としての N は力の単位の定義であるが、力の定義でもあると解釈されがちである。力の定義【1】は前節 2) で示した物体に力が加わったときの物体の変化①を採用したものである。このため加速度に質量を乗じた量は力であるとみなされてしまう。

### 4) 不都合なこれまでの力の単位の定義

定義【1】は長い歴史はあるものの、加速度運動をしている物体にその加速度とその物体の質量を乗じた量の力が加わっていると考えがちである。定義【1】は見かけの力も含んでいる。しかし、見かけの力は実証できない力である。これらのことも含めて、定義【1】ではいくつかの不都合な状況がある。

不都合とする理由：  
① 日常生活で普通に使う力の概念に合っていない。

冒頭にも述べたように、力と言えば力士の発生する力であったり、構造物や機械を動かしたり、これらを破壊する原因となる作用である。日常生活で力が関係するのは物体の運動よりも応力・ひずみが関係することの方が多い。

② 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。この状態は力の単位の定義

【1】に反している。定義【1】は力の実測に使えないばかりか、力の均衡状況に反している。

③ 座標系に依存する。

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。このため、時に見かけの力を考えざるを得ない。

外力でない慣性力を見かけの力とする書籍も多く、少し混乱がある。

有人ロ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ないことになる。

④ 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。

単位の定義どおりに測定できることは必ずしも必要な条件ではないが、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。

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と思われる。力の元を辿っていくと、電磁気力相互作用となるが、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。右手は矢をつがえて弦を引くので引手というのであるが、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 は次のように定義できる。

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 [m<sup>2</sup>] 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、圧力の基準に使えるような現象や装置が見当たらない。従って、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。

あるいは正確なロードセルを作って「力原器」とするかである。

## 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）

質量の単位の基準であったキログラム原器が廃止されることは2011年の第24回CGPMで既に決まっている。そして2018年中にもプランク定数を精度よく求めアボガドロ数に基づく新しい基準が定められる見込みである。

しかし、新しい定義も精度が高まることは期待されるが、これまでの白金イリジウムの合金製のキログラム原器がシリコン製の球に変わるだけのように見える。今までと同様に質量の単位の量を決めるだけであって物理的特性を基にしたものではないようである。

質量の特性で日常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/s<sup>2</sup>]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た後、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今でも、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が、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<sup>3)</sup>。

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は必ずしも明らかでない。天下り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、二通り考えられる。

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。これ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<sup>4)</sup>。

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む動機となったとアインシュタイン自身が語っている。

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/s<sup>2</sup>] 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<sup>5)</sup>。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。

## 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、より現実に近いのではないかとみるのが本稿の提案である。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 力学、東京大学応用物理学教室編、東京大学出版会、1960年
- 3) 耐高加速度鑑の実現可能性、原宣一、第58回宇宙科学技術連合講演会講演集、2014年
- 4) アインシュタインの発想、小野健一、1981年、講談社
- 5) 国土地理院 HP : [http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/gravity\\_menu03.html](http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/gravity_menu03.html)