

20世紀当初にプランクが提唱した量子論、アインシュタインが提唱した光速不変の原理と、質量とエネルギーの等価原理。最初は単なる仮説でしたが、その後様々な実験や観測によって、これらの仮説が揺るぎない事実であることが明らかになります。それらの事実をもう一度まとめると、

- ・電磁波のエネルギーは最小エネルギーの整数倍しか取り得ず、その最小値は $h\nu$ で与えられる。ここに ν (ニュー) は電磁波の周波数、 h はプランク定数。
- ・質量とエネルギーの関係は光の速さを c とするとき $E = mc^2$ で与えられる。

共にエネルギーを与える式なので、ある質量 m について $mc^2 = h\nu$ つまり $m = h\nu/c^2$ と、プランク定数と光速（及び振動数）で質量を示すことができます（光速は定義値 $c = 299\,792\,458$ m/s で厳密に決まっている）。このことから

「キログラムはプランク定数を正確に定めることで定義できる」

と言うことができます。これが予定されている質量の定義です（表現は他にも検討されています）。プランク定数も光の速さも、物理法則を司る根本的かつ不変な値（不変物理定数）です。人間の恣意性が入る余地のない、決して変わらない理想的な計量標準の定義ではあります。現在のところ、プランク定数は $h = 6.626\,070\,040 \times 10^{-34}$ J·s（単位はまた m^2 kg/sとも分解できる）と得られています。2018年の再定義の際は、プランク定数が定義値（不確かさゼロ）となり、代わりにキログラム原器が不確かさを引き受けて、定義の座を降りることになります。

とは言え定義は定義として、現実にその量を取り出す（現示: Realization）、安定した技術が無いと画に描いた餅です。そのために考案された装置の一例が図1に示「ワット・バランス」です。ここで言う「バランス」とは「てんびん」の事です。

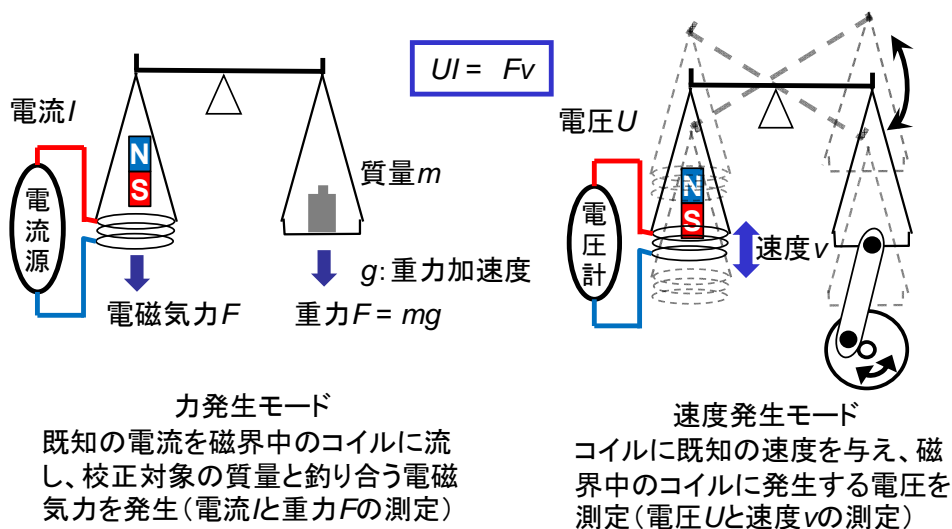


図1. ワット・バランス

てんびんの一方に既知の質量 m 、もう一方にはコイル状に巻かれた長さ L の電線が取り付けられています。そのコイルには永久磁石からの一定の磁束 B が貫いています。左図のようにコイルに電流を流すと、高校の物理で習うフレミングの左手の法則どおり力が働きます。質量に働く力、 $F=mg$ と釣り合うように電流 I を調整すると次の関係が得られます。

$$mg = IBL \quad (1)$$

これだけなら単なる電磁式の電子てんびんと同じです。この装置の巧みなところはここからです。右図のように錘 m を取り去り、その代わりにてんびんを上下に振る装置をつけます（図ではクランクを模していますが、実際はもっと複雑な機構を用います）。また電流源の代わりに電圧計を接続します。てんびんが速度 v で動いた時、発生する誘導起電力 U は

$$U = vBL \quad (2)$$

と与えられます。(1)、(2)式から質量 m は

$$m = IU / (gv) \quad (3)$$

で与えられます。 IU も mgv も、単位は仕事率・ワットなのがワット・バランスと呼ばれる所以です。磁束を高精度で測定するのは大変難しいのですが、こうして B と L が消去出来るので、測定精度を向上させることが出来るのです。

そして力学的な量である重力加速度 g は、最新機器ではプランク定数の決定に必要な 9 桁程度の精度が得られています。幾何学的な量である速度 v は、レーザ干渉計などでこちらも必要な精度で測ることが出来ます。

一方電氣的な量である電圧 U と電流 I はどうでしょうか。ここで詳細は省きますが、電圧はジョセフソン効果により正確に測定出来、その値は h/e に比例します (e は電気素量)。電流 I は、図 1 の電圧計の内部抵抗を R 、その両端に生じる電圧を U' とするとオームの法則から明らかに $I = U'/R$ で、抵抗に反比例します。そしてこれも詳細は省きますが、抵抗は量子ホール効果により正確に測定出来、その値は h/e^2 に比例します。これを (3) 式右辺に表れる IU に適用すると、 $IU = U'U/R \propto (h/e)(h/e)/(h/e^2) = h$ 、つまり $m \propto h/(gv)$ 、質量はプランク定数に比例 (トレーサブル) となるのです。

ワット・バランスは言わば質量とプランク定数の変換器 (コンバーター) です。一度既知の質量でプランク定数を決定すれば、次からは電氣量 (電圧・抵抗) と重力加速度および運動速度で質量を決定出来る優れたものなのです。

ところで現在ワット・バランスは世界 8 ヶ国ほどで取り組まれています。測定結果を報告できているのは米・カナダだけです。それだけ難しいのです。先ほど「その量を取り出す安定した技術が無いと画に描いた餅」と言いました。これではまさに画に描いた餅ではないでしょうか…。実は定義改定の狙いと恩恵は、もっと別の所にあるのです。本項続く (多分)