

天びんの構造と原理

ザルトリウス株式会社 杉浦 宣裕

はじめに

現在、使われている質量計測機器のほとんどが機械式のものから、電子式のものに変わりました。しかし、電子式の質量計測機器の歴史はそれほど古くありません。“天びん”と言われるものは今から一万年も前から使われていたようです。

その後、電気信号を利用したはかりが開発され、現在使われている電子天びんに至るまで、様々な構造、原理が開発されてきました。

これから、その構造、原理の一部を紹介したいと思います。

1. 基本用語

1.1 質量と力

質量(物理量)とは、物体が有する物質の量(測定量)です。質量の測定単位はキログラム(kg)です。質量は物体の特性を示しますが、この特性は、物体の運動量が増えるときその物体の慣性で表されるとともに、二つの物体間の引力でも表されます。したがって、地球の重力場では個々の物体には次のような力が及ぼされます。

$$\begin{aligned} W &= m \cdot g && (1) \\ m &= \text{質量} \\ g &= \text{重力加速度(地球上では } g = 9.8 \text{ m/s}^2) \end{aligned}$$

一般にこの力 W を重さと呼んでいます。重力加速度は場所によって異なるために、重さも場所によって異なります。しかし、質量は場所に無関係に不変です。例えば、地球よりも引力が小さい月に物体を運んで測定すると、その物体の重さは地球で測定した重さと異なりますが質量は変わりません。

したがって、力(重さ)と質量をきちんと区別する必要があります。力とは変形したり、加速する(自由落下中など)物体に及ぼす影響を示しますが、質量とは物体の特性のことで、その物体の量を示します。力と質量との違いはまだ他にあります。力は、大きさと方向により定義しなければなりません。質量の定義は大きさだけで十分です。また質量と力の測定単位にも違いがあります。質量の単位はキログラム(kg)ですが、力の単位はニュートン(N)です。ここで、

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$$

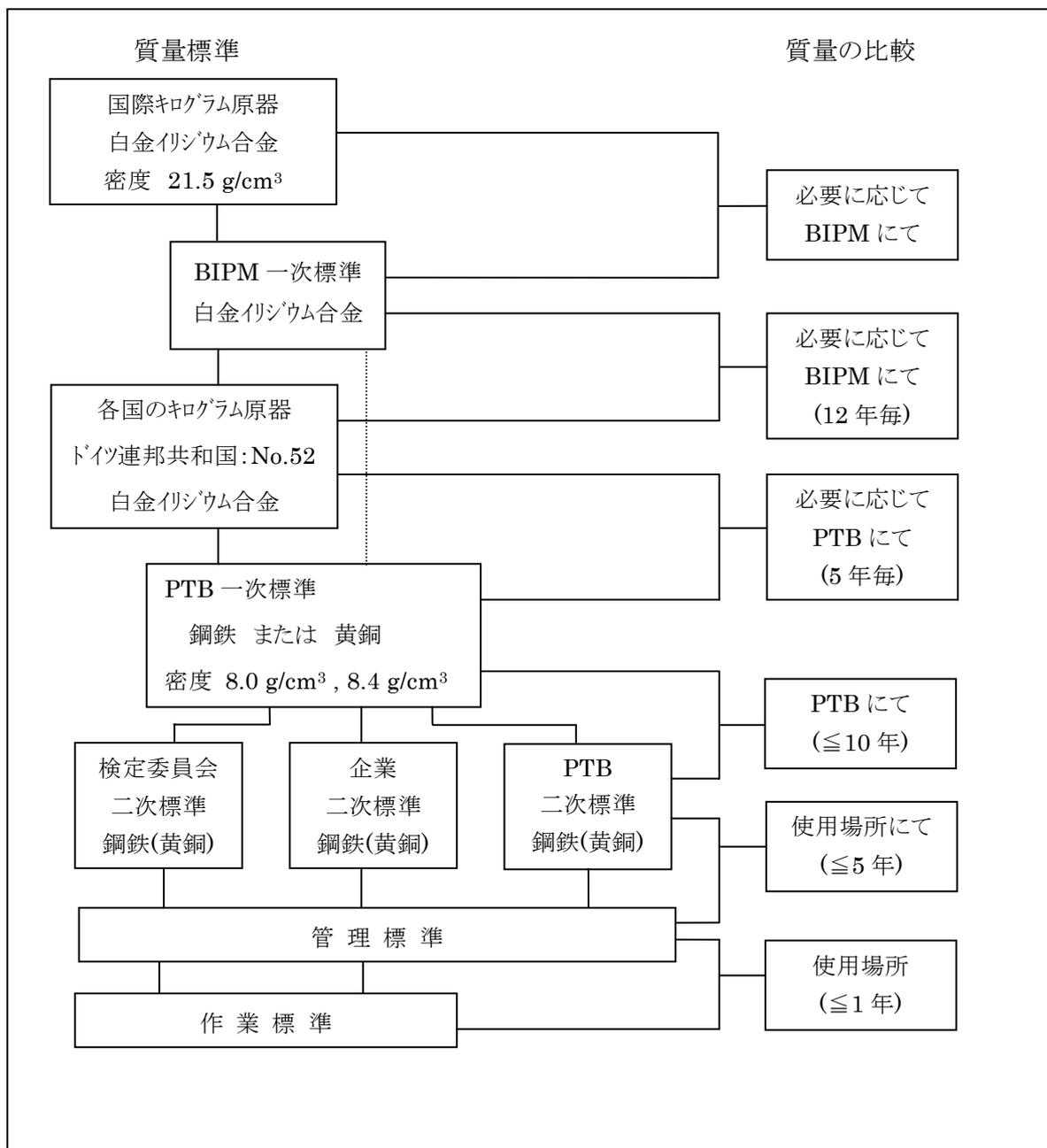
キログラムは国際単位系(SI)の基本単位で、国際キログラム原器の質量によって定義されています。国際キログラム原器は、パリ近郊のセブレにある国際度量衡局(BIPM)に保存されています。したがって、キログラムは自然定数から導き出されたものではなく、物体測度である原器によって定義されている単独の基本単位です。

各国のキログラム原器は、国際度量衡局(BIPM)で国際キログラム原器と比較・測定されます。例えば、ドイツのキログラム原器はドイツ国立物理工学研究所(PTB)に保管されています。同研究所の一次標準

はこのキログラム原器を基準にして検査され、次にそれを基準にして検定委員会(米国基準局の地域事務局に相当)により二次標準が検査されます。この二次標準を基準として管理標準および作業標準がつけられます。このようにして物体測度は一つの階層(図 1)を構成します。

その階層でレベルが一つ下がるごとに正確さは低下しますが、使用頻度は高くなります。

一般的に標準の材料としては鋼鉄(密度 8.0 g/cm^3)が使用されています。これに対して、国際度量衡局(BIPM)に保管されているキログラム原器と各国のキログラム原器の材料は、白金イリジウム合金(密度 21.5 g/cm^3)です。密度の異なる二つの分銅を比較する場合には空気による浮力分を補正しなければなりません。現在のところ、空気による浮力による不確かさ(約 $1.5 \cdot 10^{-8}$)は、使用する質量計測機器に起因する不確かさ(約 $8 \cdot 10^{-9}$)を上回っています。



BIPM: 国際度量衡局

PTB: ドイツ国立物理工学研究所

図 1 質量標準の階層構造

次表に共通法定単位, キログラム単位の倍数および約数をまとめます.

単位	単位記号	基準単位との関係
ナノグラム	ng	1 ng = 10 ⁻¹² kg
マイクログラム	μg	1 μg = 10 ⁻⁹ kg
ミリグラム	mg	1 mg = 10 ⁻⁶ kg
グラム	g	1 g = 10 ⁻³ kg
キログラム	kg	基準単位
トン	t	1 t = 10 ³ kg

1.2 質量計測機器(質量計)

質量計測機器(weighing instruments)は質量を測定します。(訳者注:法または規則の適用を受ける場合は質量計と訳します)高性能な電子天びんとはかりは, 地球の重力が測定物に及ぼす効果によってその物体の質量を決定します. つまり, 1.1の式(1)によって重さWを測定します. しかし, 表示値は質量の単位 kg に換算されます.

重力加速度“g”は場所によって異なるため, 電子天びんやはかりの感度は, 測定場所が変わるたびに調整し直さなければなりません. 例えば, 赤道での重力加速度は両極の場合と比較して0.5%程度小さくなっています. 例えば, ドイツ国内では重力加速度の違いは $\Delta g/g \leq 8 \cdot 10^{-4}$ で, 海拔の影響は約 $3 \cdot 10^{-7}/m$ です. もし質量計測機器を以前の位置よりも3.3 m 高い位置(ビルの一階上に相当)に設置すれば, これによって測定器の感度は $1 \cdot 10^{-6} = 1$ ppm 変化します(荷重が200 g の場合, 重量表示値のずれは0.2 mg). さらに, 高分解能の質量計測機器の場合は測定場所が変わるたびに水準器によってレベルングし直さなければなりません. もし測定方向が重力方向(つまり重力加速度方向)と異なれば, 正確な測定結果が得られないからです.

次に, 研究室用天びんを読取限度に従って分類する用語を示します.

読取限度	用語	通常の最大ひょう量
0.1 μg	ウルトラ・マイクロ天びん	5 g 未満
1 μg	マイクロ天びん	1~25 g
10 μg	セミ・マイクロ天びん	30~200 g
0.1 mg	マクロ天びんまたは分析用天びん	50~500 g
1 mg 以上	上皿天びんまたははかり	100 g 以上

天びんまたははかりは, 質量に関するその他の値(密度, 重さが等しい物体の個数計数, 表面張力, その他の力など)を測定することもできます.(力を測定する場合, その力の方向が質量計測機器による測定方向と同じ(つまり垂直)であることを確認してください.)

2. 秤量皿の固定方法

2.1 懸垂式の秤量皿

質量計測機器の表示値は, 物体を秤量皿に置く位置に左右されてはなりません. つまり, 偏置誤差ができる限りゼロに近くなければなりません. これを達成するためには様々な方法で秤量皿を固定します.

物体が秤量皿に偏置されている場合, 秤量皿を移動させて重心が天びん秤量皿の懸垂点の下になるようにします(図2).

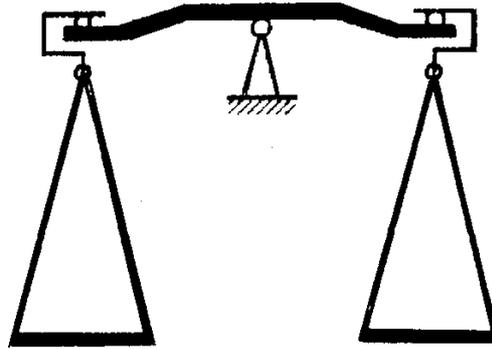


図 2 懸垂式の秤量皿

2.2 平行ガイド構造

物体を秤量皿上の中心から離れた位置に置くとトルクが発生するので、懸垂ガイドに抗力が生じます。しかし双方のガイドが平行であれば、そこに発生する力によって測定結果をゆがめられることはありません。(図 3).

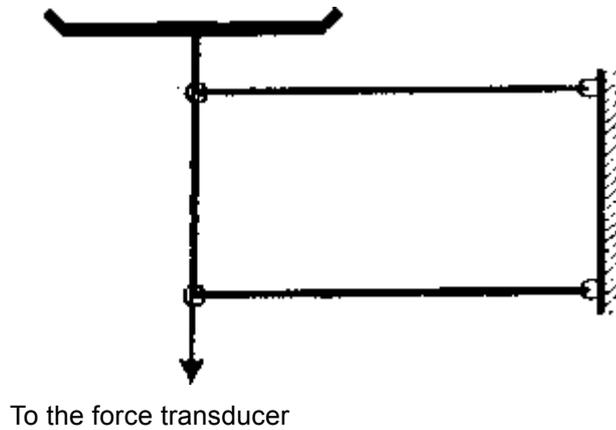


図 3 平行ガイド構造

2.3 てこ(槓桿)を使用した台ばかり

物体を秤量皿の左側に置くと左てこに力が加わり、右側に置くと右てこに力が加わります。双方のてこの伝達比が等しければ、変換部に伝達される力も等しくなります。このことは中間の各点でも言えますが、それらの位置においては、力は左右のてこによって部分的に伝達されます。したがって、表示値は秤量皿の上に置かれた物体の位置とは無関係となります(図 4).

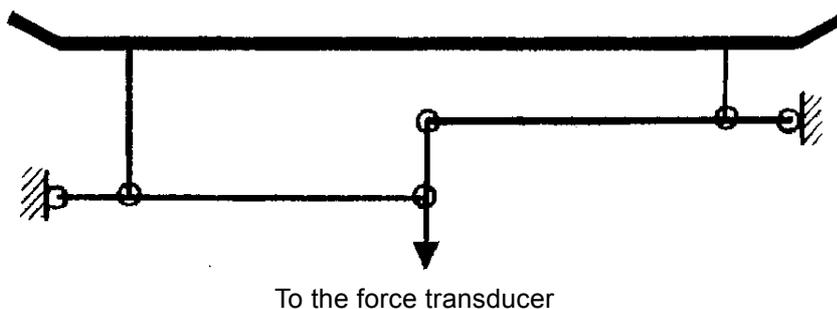


図 4 てこを使用した台ばかり

2.4 複数のロードセルを使用した台ばかり

秤量皿は3, 4個ないしそれ以上のロードセルで支えられるので, その出力信号が電子的に加算されます。すべてのロードセルの感度が等しければ, はかりの表示値は個々のロードセル間の力の分布とは無関係となります(図5)。



図5 複数ロードセル台ばかり

3. ひずみゲージ天びんおよびはかり

一般的に, ひずみゲージ天びんおよびはかりは, あまり高い分解能が要求されない場合に使用されます。これらの質量計測機器は, 最大 100,000 桁(質量計測ステップ)の分解能を有します。

例えば, これらの質量計測機器によって, 最大能力 10,000 g で 0.1 g の読みやすさが実現されます。

ひずみゲージ(図6)は, 金属薄膜によってエッチングを施された千鳥形の条導体です。ひずみゲージは, 導体が機械応力の影響により受けるときの電気抵抗の変化を測定します。(抵抗の変化は, 長さ, 断面積および固有抵抗の変化によって生じます)。通常, 4個のひずみゲージは二組ずつ向かい合わせにしてばね(曲げ部品)に接着されます。例えば, 二重曲げビームの上部と下部にそれぞれ二個ずつのひずみゲージを接着します。二つのガイド4, 5によって, 秤量皿が平行ガイド構造となります(図7左)。ひずみゲージ6~9を接着したガイドの端の薄い部分は曲げ接合部となります。二重曲りビーム全体は単一部材から作られます。

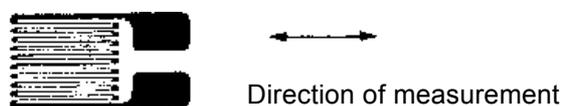
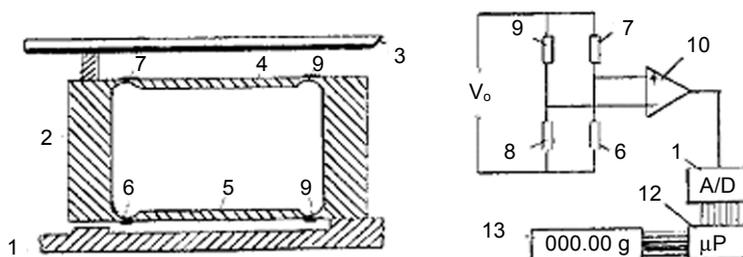


図6 各ひずみゲージ(拡大図)



- | | |
|--------------|-----------------------|
| 1. ベースプレート | 10. 増幅器 |
| 2. ロードセル | 11. アナログ/デジタル変換器 |
| 3. ひょう量皿 | 12. 信号処理装置(マイクロプロセッサ) |
| 4. 5. ガイド | 13. デジタル表示部 |
| 6. ~ 9. ひずみ計 | Vo 電源 |

図7 ひずみゲージおよび一体型平行ガイド

左:機械的構造 右:電気配線図

上記で説明したひずみゲージの抵抗の微小変化は、ホイートストンブリッジ(図 7 右)で測定されます。天びんまたははかりの秤量皿に何も荷重を載せない状態では、4つのひずみゲージの抵抗はいずれも同じであり、増幅器 10 の入力電圧は 0 です。荷重を載せた状態では、ひずみゲージ 6 および 9 にひずみが生じます(これによって抵抗が増加)が、ひずみゲージ 7 および 8 は圧力を受けます(これによって抵抗が減少)。したがって、ホイートストンブリッジでは数 mV の荷重依存電圧が生じます。この電圧は増幅され、デジタル化されて質量計測結果として表示されます。

図 7 の左側に示した構造は、最大約 50 kg の荷重範囲に適しています。それ以上の荷重を測定する場合には、図 5 のように秤量皿の下に 3 ないし 4 個のロードセルを取り付けると、出力信号が電氣的に加算されます。図 8 に最も重要なロードセルの設計を示しますが、以下にそれについて説明します。

○せん断応力ロードセル(図 8 上). $\pm 45^\circ$ の対角で取り付けられたひずみゲージによってせん断応力が測定されます。

○リングねじりロードセル(図 8 中). 各リング形ひずみゲージがリング形起わい体の上側および下側にそれぞれ取り付けられています。

○円筒形起わい体を取り付けた大荷重用(1 トンを超える)ロードセル(図 8 下).

この場合、管または金属シリンダは「ばね」の役割をします。その周辺にはひずみゲージが縦方向ないし横方向に取り付けられています。

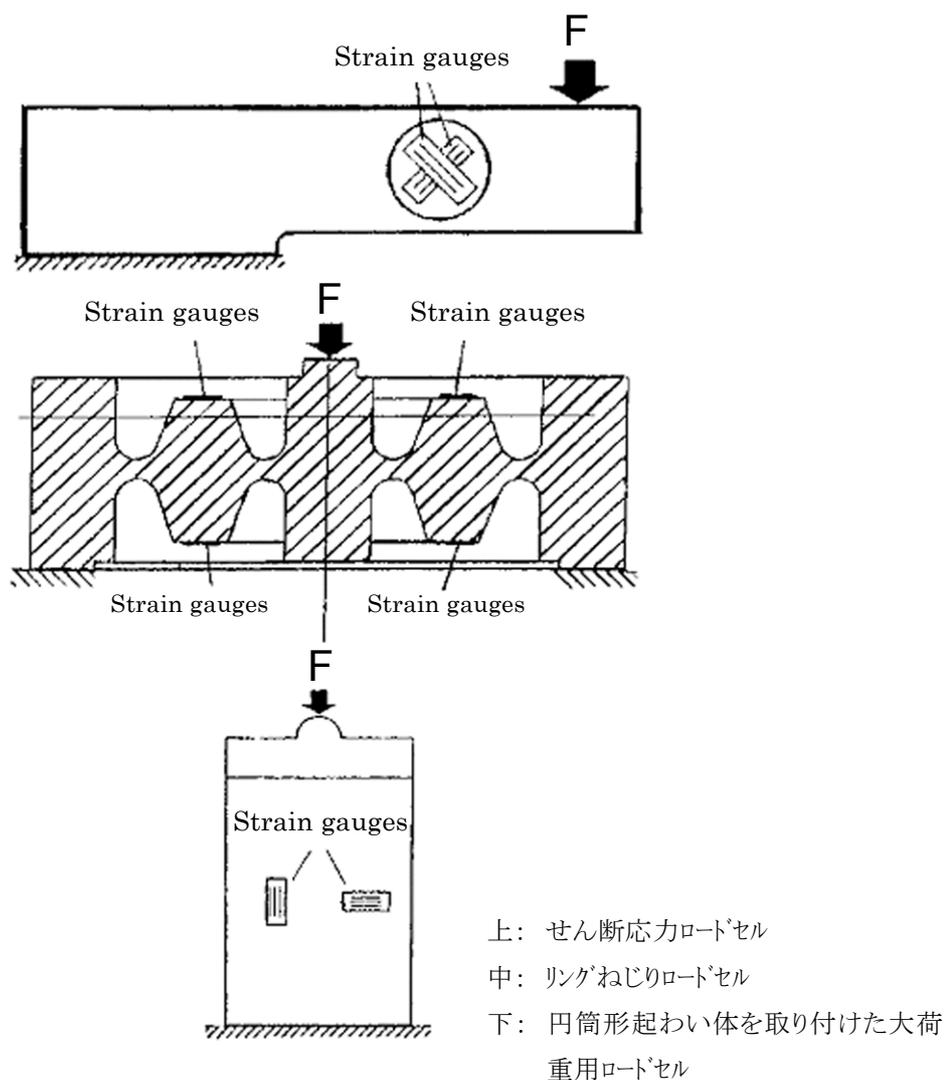
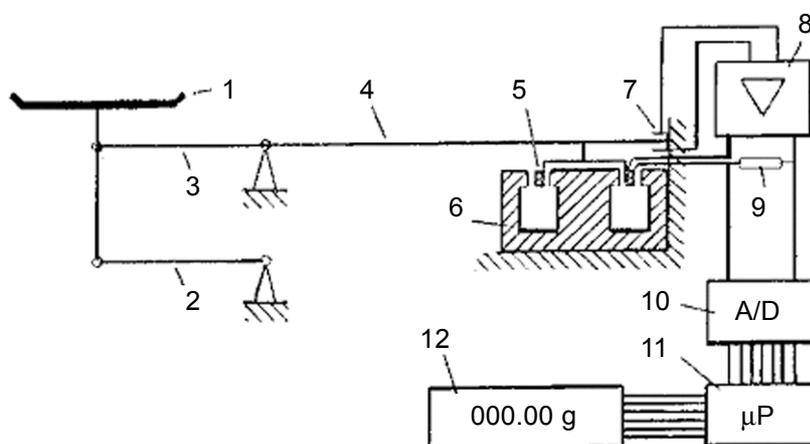


図 8 ひずみゲージを取り付けたロードセル

ひずみゲージを使用する測定方法には、主としてばね部材のクリープおよび、ばね本体とひずみゲージ管を接合する接着剤に起因する限界があります。またこの測定方法の問題点は接着剤の湿感度と低出力信号です。この測定方法の主な利点は、平行ガイド構造とばね本体が一体になっているので、ロードセルの設計がコンパクトになることです。またこの測定方法は各種最大能力に適用しやすいことも大きな利点です。

4. 電磁力補償天びんおよびはかり

電磁力補償天びんおよびはかり(図9)の場合、永久磁石6のコイル5によって抗力が生じ、これによって秤量皿1の上に置いた荷重は厳密に均衡保持されます。秤量皿の平行ガイド構造はガイド2と3によって構成されます。コイルを流れる電流は、感度位置センサ7およびサーボ増幅器8によって調整されるので、電磁的に発生した力が秤量皿の上の荷重を厳密に均衡保持します。長いてこ4と短いこ3との比によって、抗力が小さければ、秤量皿の上の大きな荷重でも必ず均衡に保持されます(このため磁石が小型になり、コイル電流も小さくなります)。精密抵抗体9にはコイル電流が流れます。この抵抗体の電圧はAD変換器10に伝達され、そこでデジタル化されて表示されます。



- | | |
|-------------|-----------------------|
| 1. ひょう量皿 | 7. ポジションセンサー(ゼロ点センサー) |
| 2. 下ガイド | 8. 自動増幅器 |
| 3. 上ガイド | 9. 抵抗器 |
| 4. てこ(3も含む) | 10. アナログ/デジタル変換器 |
| 5. コイル | 11. 信号処理装置(マイクロプロセッサ) |
| 6. 永久磁石 | 12. デジタル表示部 |

図9 電磁力補償天びんの断面図(平行ガイド構造およびてこによる力の伝達)

電磁力補償によって非常に高い分解能が達成できます(最大5千万ステップ)。さらに、てこ比、コイルサイズ、コイル電流を変えることによって電磁力補償を適用できるため、特にマイクロ天びん等のように、微小な重さの測定が広範囲にわたってできます。

5. 質量計測誤差

質量計測機器の誤差に関する用語

図 10 は、質量計測機器の実特性曲線と理想特性曲線との対比を示したものです。両者の関係がはっきり分かるように測定値の偏差は誇張されています。理想特性曲線の場合、天びんまたははかりの表示値は秤量皿の質量に正確に対応します。この特性曲線は一定量 ΔZP だけずれることがあります(破線)。この偏差は零点誤差と呼ばれています。ゼロ点設定または風袋引きキーを押すと、零点誤差 ΔZP は除去されます。従って、零点誤差は測定に時間がかかる場合だけ発生します。実特性曲線の傾きが理想特性曲線の傾きよりもずれている場合(図の点線)、これは感度誤差 ΔS と呼ばれています。感度誤差は、軽量の場合や重さの変化が微小の場合には無視できますが、重さが増えるにつれてその影響は大きくなります。この結果、感度誤差仕様は常に相対的な数値です。例えば、 $2 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 又は 20 ppm ($1 \text{ ppm} =$ 百万分の一という微量な物質の量を示す単位 $= 10^{-6}$)。不正確な校正用分銅を用いて質量計測機器を調整すると感度誤差が生じます。また偏置誤差を補正する目的で質量計測機器を不正確に調整すると感度誤差が生じます。この場合には、質量計測機器の特性曲線の傾きは、秤量皿の上の物体の位置によって異なります。さらに、この特性曲線は弓状に曲ります。ゼロ点と最大能力との間の傾きは直線性誤差もしくは単に直線性と呼ばれています。天びんまたははかりの仕様には通常、最大直線性高誤差が記載されています。

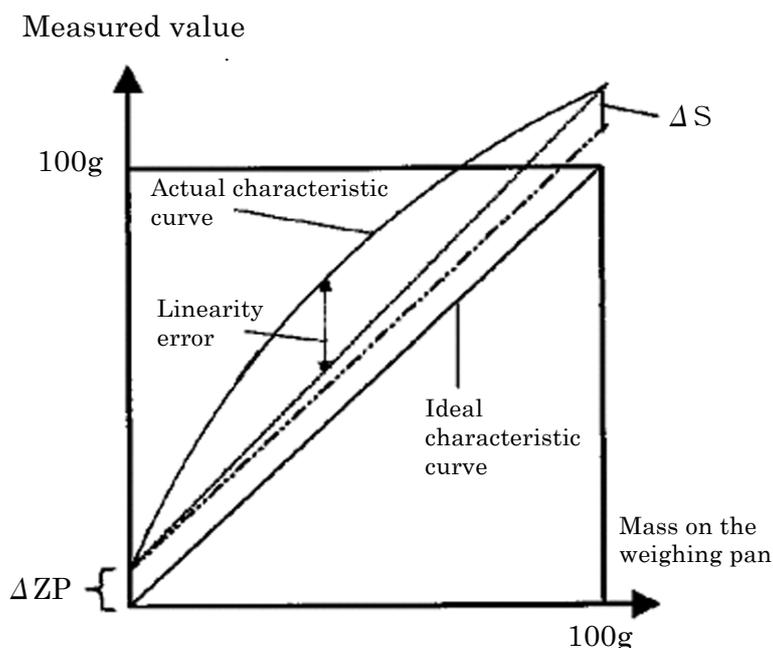


図 10 質量計測機器の特性曲線

実際の測定値が理想特性からはずれている状態がはっきり分かるように、測定値のすべての偏差は誇張されています。

理想特性曲線からのこれらの偏差の全ては温度変化によって生ずることがあります。これはゼロ点または感度の温度係数(TC)として表されます。データシートまたはパンフレットで「 $2 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ 以下の感度(TC)」と記載されている場合、例えば、天びんの感度が $18 \text{ }^\circ\text{C}$ で調整され、その後、 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ で使用されるときに感度偏差が最大 $6 \cdot 10^{-6}$ (つまり、 $0.6 \text{ mg}/100 \text{ g}$)であることを示します。ゼロ点の温度係数(TC)は、被測定物を秤量皿に載せたままでの長時間の測定の場合に影響を及ぼします。そうでない場合にはゼロ点設定または風袋引きキーを押して質量表示値をゼロにリセットできるからです。さらに特性曲線は経時変化します。この設定はゼロ点または感度の(長期)ドリフトと呼ばれています。

質量計測手順が同じ環境条件で繰り返される場合、それぞれの質量計測結果の間にわずかなずれが生じることがあります。これは質量計測機器の「繰り返し性」と呼ばれています。繰り返し性の量は標準偏差“S”を用いて次のように表せます。

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{x})^2}{n-1}}$$

X = 測定値
x̄ = 平均値
n = 回数

おわりに

二つの重さを比べるという方法の天びんも、この約半世紀ほどの間に電気信号を利用することによって、天びんの構造は飛躍的に進歩しました。

今後も電子天びんの歴史が変わるような、機構、原理が生み出されることが、期待されます。