

容積、 V をその中に入れられた被測定物体の体積とすれば次の関係が成り立つ。

$$(P_0 - \Delta P_1)(V_1 + \Delta V)^{\gamma} = P_0 V_1^{\gamma} \quad (2)$$

これから

$$\frac{\Delta P_1}{P_0} = \gamma \frac{\Delta V}{V_1} \quad (3)$$

が得られる。同様に

$$\frac{\Delta P_2}{P_0} = \gamma \frac{\Delta V}{V_2} \quad (4)$$

がえられ、次式が導かれる。

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_0 - V}{V_1} \quad (5)$$

$$V = V_0 - V_1 \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \quad (6)$$

ここで、測定槽の容積 V_0 と基準槽の容積 V_1 は一定の値であるから、被測定物体の体積 V は圧力 ΔP_1 と ΔP_2 の比からもとめられる事がわかる。

この微小な圧力の変化はスピーカの駆動周波数と同じ周波数 f の音であり、それぞれマイクロホン M_1 と M_2 によって検出され、それらの出力の電気信号 e_1 と e_2 はデジタル信号に変換されてコンピュータに取りこまれる。式 (6) の微小圧力変化に対応する量として出力信号の振幅 E_1 、 E_2 の比 R を用い次のような計算方法で測定体積を求める。

$$V = V_0 \left(1 - \frac{R}{R_0} \right) \quad (7)$$

ここで、

V : 被測定物体の体積

V_0 : 測定槽の空の容積

$R = E_1 / E_2$: マイクロホンの出力の振幅比で、振幅は信号 e_1 、 e_2 のフーリエ変換から求める。

R_0 : 測定槽が空の時の R の値

を表わす。これらの関係から測定体積 V は次の式により求められる。

$$V = V_s \frac{R_0 - R}{R_0 - R_s} \quad (8)$$

ここで、

V_s : 校正に用いた基準物体の体積

R_s : 測定槽に基準物体を入れたときの R の値を表す。

図 2 は式 (7) の関係を示すが、このグラフからわかる様に測定槽が空の時の R_0 点と、基準物体を入れた時の R_s 点から体積 V を求める式で、変数 R に関して 1 次式になっている。体積計のキャリブレーションは測定原点 R_0 と、この式の勾配 $V_s / (R_0 - R_s)$ を決めるものである。

V_0 は測定槽を変えない限り一定であるが、振幅比 R はマイクロホンの感度や増幅器のゲインなどに左右され、これらはドリフトがあるので測定中に R_s の値を確かめる必要がある。

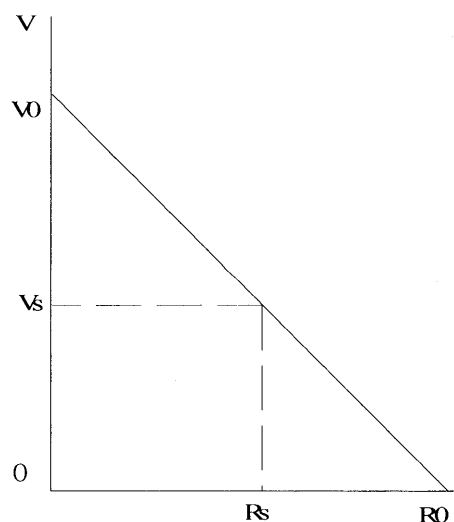


図 2 測定式のグラフ

3 測定方法、測定結果

今回測定したのは、約 90[cm³]、130[cm³]、220[cm³]の体積の分銅で、基準物体として、体積約 400[cm³]のアルミニウム製の円柱を用いた。

この基準物体と、測定分銅を交互に測定槽に入れ、勾配のチェックをしながら測定を 10 回繰り返した測定値の平均と平均値の標準偏差を列記する。

分銅 3-3-2

平均値 130.60[cm³]

平均値の標準偏差 0.066[cm³]

分銅 3-3-1

平均値 218.61[cm³]

平均値の標準偏差 0.079[cm³]

分銅 3-2-1

平均値 83.97[cm³]

平均値の標準偏差 0.044[cm³]

分銅 3-2-3

平均値 87.59[cm³]

平均値の標準偏差 0.082[cm³]

4 測定法及び測定値に対する検討

4.1 基準物体の体積

この方式の体積測定法は原理から分かるように、ある基準の体積を持つ基準物体との体積比較法によっている。したがって基準物体の体積値は重要である。ここで用いたアルミニウムの円柱状の物体（直径、高さとも約 80[mm]）の体積を、ノギスを用いた寸法測定から求めた。直径、高さをそれぞれ 5 箇所測定してその平均値から体積を算出した。ノギスの副尺の目幅は 1/19[mm]なので、ノギス目盛の標準不確かさは $0.05/\sqrt{3}$ とすることが出来る。これから求められた円筒の体積はノギス目盛りの不確かさ、および繰り返し測定の不確かさを考慮して直径、高さの平均値から求めた体積は

$$400.27[\text{cm}^3]$$

直径、高さの合成標準不確かさから求めた体積の拡張不確かさ ($k=2$) は

$$0.75[\text{cm}^3]$$

と求められる。

4.2 測定対象の形状

測定対象と体積の基準とする物体の形と大きさは同程度である事が望ましい。これは測定対象の表面積の大きさが測定の精度に影響する事が報告されている²⁾。今回は同じ形状、大きさの標準物体を使用した訳ではないが、測定対象と標準物体の大きさの違いはそれほど大きくないので、この影響は無視できる程度と考える。

4.3 測定対象の材料の音響インピーダンスの影響

音響式の体積計は固いものだけではなく、例えばこんにやくのような柔らかいものでも、中まで実質が詰まっていれば測定が可能である事が分かっている²⁾。しかし、果物のように表面の音響インピーダンスが異なる物体に対しては測定の誤差が生じる事がわかっている²⁾。今回は測定の対象が金属であるのでこの影響はないと考えて良いが、前回報告した木製の枡の容積測定ではこの影響が現れていた事を報告した¹⁾。

4.4 測定槽の大きさその他

この測定方法は、測定槽の中の音圧の大きさが、測定槽の中の物体との隙間の容積（余積）に反比例するという関係に基づいて体積測定を行っており、測定誤差は余積に比例する。今回の測定の場合に測定槽の容積は約 1500[cm³]で、測定対象の体積に関して適当な大きさかどうかは系統的に調べる必要があり、将来の問題として残されている。

また、温度、湿度、気圧など測定環境の影響も考えられるが、それらは小さいと考えて無視した。

4.5 分銅の体積測定の不確かさ

古分銅の体積測定の不確かさは次のように考えられる。(8) 式から標準物体の体積の不確かさと、測定過程の不確かさの二つによって総合的な不確かさが決められる。

$$u^2(V) = \left(\frac{R_0 - R}{R_0 - R_s} \right)^2 u^2(V_s) + u^2(r) \quad (9)$$

ここで、

$u(V)$: 合成標準不確かさ

$u(V_s)$: 標準物体の体積の標準不確かさ。感度係数は (8) 式から上式で与えられ、振幅比は体積比に比例する。

$u(r)$: 測定過程の不確かさ。繰り返し測定の平均値の標準偏差から求める。

を表す。この関係から分銅の体積の平均値と拡張

張不確かさは次のように求められる。

3-3-2

体積 130.60 [cm³]

拡張不確かさ(k=2) 0.96 [cm³]

3-3-1

体積 218.61 [cm³]

拡張不確かさ(k=2) 0.88 [cm³]

3-2-1

体積 83.97 [cm³]

拡張不確かさ(k=2) 0.98 [cm³]

3-2-3

体積 87.59 [cm³]

拡張不確かさ(k=2) 0.98 [cm³]

4.6 補足実験

以上に述べたような測定に影響を与える因子が考えられるが、今回はそれらの影響の全てについては定量的に調べることが出来なかったので、測定の不確かさを確かめるひとつの方法として体積約 200 [cm³] のアルミニウムの円柱の体積をこの方法によって測定を試みた。

前に述べた基準物体としての円柱の体積測定と同じく、ノギスによる寸法測定から求めた体積は、繰り返し測定の不確かさ、ノギスの目盛の不確かさを考慮して次に示される。

体積 199.84 [cm³]

拡張不確かさ 0.45 [cm³]

この円筒の体積を音響式体積計で求めた結果、および繰り返し測定の不確かさは次のとおりである。

平均 199.73 [cm³]

平均値の標準偏差 0.062 [cm³]

これに基準の円筒の体積の標準不確かさ 0.38 [cm³] を考えるとこの体積値の拡張不確かさは (k=2)

0.90 [cm³]

となる。

この測定結果の比較から、音響式体積計で求めた円柱の体積値とノギスに依る寸法測定から計算した体積値は妥当な値で一致している。

5 まとめ

古分銅の体積を音響式の体積計で測定を行った。測定原理、測定装置測定方法について述べ、測定結果について検討を行った。不確かさの細かい検討は将来の問題として残されているが、基準とした物体の体積の決定をノギスによる寸法測定によらざるを得なかったが、基準物体の体積の不確かさが測定体積の不確かさに与える影響は大きいので、水中秤量法による測定を行うことが出来ればさらに不確かさを小さくすることが出来るであろう。

この分銅は、東京大学の馬場章氏から高田誠二氏に質量測定の依頼があった際に、高田氏の判断として体積測定が提案され、測定を小宮が担当したので、その経緯と結果を略述したものである。

参考文献

- 1) 小宮勤一：音響式体積計による桁の体積測定、計量史をさぐる会 2004 講演予稿集、(2004)、9～13 頁
- 2) 石井泰：音響式体積計、計測と制御、36-4 (1997)、288～291 頁

付記

現在使用されている分銅に関して、空気の浮力補正を目的とした体積測定に、ここで説明した音響式体積計が用いられることがある。測定の詳細、および体積測定の不確かさの詳細に就いては次の文献が参考になる。

- 1) T Kobata, M Ueki, A Ooiwa, and Y Ishii ; Measurement of the volume of weights using an acoustic volumeter and the reliability of such measurement, Metrologia, 41(2004), pp. 75～83
- 2) M. Ueki, T. Kobata, S. Mizushima, Y. Nezu, A. Ooiwa and Y. Ishii ; Application of an Acoustic Volumeter to Standard Weight, IMEKO-World Congress,