大気イオン測定用振動容量型電位計の簡易な較正法*

増田純夫 関川俊男**

東京理科大学 理学部

Abstract. This letter describes a simple technique to calibrate the vibrating reed electrometers (VREs) which are used to measure atmospheric ions. The VREs convert input minute currents to measurable voltages using the standard resistances or capacitances inserted into their feedback loops. However, it has been difficult to determine these standard values simply.

In this technique, measuring a constant minute current with and without an external reference capacitance, one can calculate the standard resistance and capacitance easily. The calibration equipment used in this technique is constructed of some resistors (one of them is $10^{12}\Omega$), a battery and a reference capacitor. One must know the accurate value of only the reference capacitor.

In an example of a series of calibrated values, while the resistance shows relatively large ($\pm 6\%$) seasonal fluctuation, the capacitance shows smaller ($\pm 2\%$) and irregular fluctuation.

1. はじめに

大気イオン計測に於いて測定される電流は、通常、 10^{-12}A 以下の微小電流である。是を測定する為、振動容量型電位計 (VRE) が広く用いられている。VRE はその帰還ループの抵抗 R_f 、或は容量 C_f を基準値として、入力電流を低インピーダンスの電圧に変換している為、測定電流の絶対値を知るには、 R_f 、 C_f の値を知る事が必要である。

R_f の値はメーカーによる校正値を用い、 C_f の値は R_f との時定数から求めるのが普通であるが、 R_f は $10^{12}\Omega$ という高抵抗で、その値を維持するには細心の注意を必要とする。後述の様に、 R_f の値が季節的にかなり変動している例もあり、必要な測定精度によっては頻繁に較正を実施しなければならない場合もある。

較正法として、(1) R_f を取外し、高抵抗測定器を用いてその抵抗値を測定する方法 (タケダ理研, 1975)、(2) 標準微小電流源を用いる方法 (Suzuki et al., 1979) 等があるが、是等の方法には、その為の高価な装置を用意する必要がある上、その装置の確度の経時変化等の問題も残されている。特に (1) については、操作が繁雑である。

ここに報告する方法は、(1) 基準値として、一般的な値のコンデンサを用いているので、確度の経時変化がほとんどない、(2) 較正装置は単純な構造で、小型・安価に構成できる、等の特徴を有している。

* A SIMPLE TECHNIQUE TO CALIBRATE VIBRATING REED ELECTROMETERS USED TO MEASURE ATMOSPHERIC IONS

** Sumio Masuda and Toshio Sekikawa

Faculty of Science, Science University of Tokyo, Tokyo 162

2. 振動容量型電位計による微小電流の測定

微小電流計としてのVREは、Fig. 1に示す様に、負帰還増幅器による反転増幅器として動作する。即ち、増幅器の開ループゲインが十分大きければ、スイッチSがONとなっている時、入力電流 I_i と出力電圧 V_o との関係は、

$$I_i = -\left(\frac{V_o}{R_f} + C_f \frac{dV_o}{dt}\right)$$

で表わされる。 t は経過時間である。是を積分して、

$$V_o = k \cdot \exp(-t/R_f \cdot C_f) - R_f \cdot I_i$$

となる。ただし、 k は定数である。

十分な時間が経過すると($t \gg R_f \cdot C_f$)、

$$V_o = -R_f \cdot I_i \quad (1)$$

となり、 V_o は I_i と比例関係になる。

$R_f \cdot C_f \gg t$ の時、 $\exp(-t/R_f \cdot C_f) \approx 1 - t/R_f \cdot C_f$ の近似を用いて、

$$I_i = -C_f \cdot dV_o/dt$$

即ち、時間間隔 Δt に於ける出力電圧の変化を ΔV_o とすると、平均電流 $\bar{I}_i$ は、

$$\bar{I}_i = -C_f \cdot \Delta V_o / \Delta t \quad (2)$$

(1)式を用いる方法は電位降下法と呼ばれ、入力電流を直読できるのが特徴である。この場合、比例定数となる R_f の値を知る事が必要である。また、SをOFFとした時、帰還ループの絶縁が十分に保たれていれば(2)式が成立つ。(2)式を用いる方法を電荷蓄積法と称し、積分時間 Δt を長くすればそれだけ少い電流を測定できる為、特に微小な電流域で使われる。この時、 Δt と共に C_f が判っていれば ΔV_o から I_i を求める事ができる。

3. VREの較正法

R_f 及び C_f の値を較正する為に、以下に述べる3つの方法で入力電流 I_i を測定する。

(1) 帰還ループに並列に、既知の容量 C_o を接続し、電荷蓄積法により I_i を測定する(Fig. 2a)。この時、時間間隔 Δt_1 に於ける出力電圧の変化を ΔV_{o1} とすると、

$$I_i = -(C_f + C_o) \Delta V_{o1} / \Delta t_1 \quad (3)$$

(2) C_o を取外して、電荷蓄積法により I_i を測定する(Fig. 2b)。時間間隔 Δt_2 に於ける出力電圧の変化を ΔV_{o2} とすれば、

$$I_i = -C_f \cdot \Delta V_{o2} / \Delta t_2 \quad (4)$$

(3) R_f を挿入して、電位降下法により I_i を測定する(Fig. 2c)。出力電圧を V_{o3} とすると、

$$I_i = -V_{o3} / R_f \quad (5)$$

(3)、(4)及び(5)式より、

$$R_f = \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta V_{o1}} - \frac{\Delta t_2}{\Delta V_{o2}} \right) \frac{V_{o3}}{C_o} \quad (6)$$

$$C_f = \frac{V_{o3}}{R_f} \cdot \frac{\Delta t_2}{\Delta V_{o2}} \quad (7)$$

が得られ、 R_f 、 C_f の値を求める事ができる。

(6)、(7)式に明らかな様に、電流 I_i は操作中一定でありさえすればよく、その絶対値を

Fig.1. Circuit diagram of the VRE current measuring method.

知る必要はない。従って、電流源は乾電池に高抵抗を接続した程度の簡単なもので十分である。

4. 較正装置と操作

上記の様な較正を行う場合、電流源と基準コンデンサが必要である。この為に使用している較正装置の回路図及びVREとの接続をFig. 3に示す。乾電池の電圧を適当に分圧した後、 $10^{12}\Omega$ の抵抗を入れて電流源とし、更に、基準コンデンサ C_o を内蔵している。

較正装置の構造をFig. 4に示す。下方に出ているのがVREへの電極、BNC Receptacleが C_o 端子である。単純な構造なので小型に構成でき、また、外部電源を必要としない。高抵抗やコンデンサの表面絶縁の低下を防ぐ為、ケースは密閉構造として、水分の侵入を防いでいる。

C_o として、公称 100pF のポリスチロールコンデンサを使用している。較正装置に収めた状態での、その容量の実測値は 100.58pF である。

較正時の出力電圧の例をFig. 5に示す。 V_{o2} は 3V レンジで測定しているが、 V_{o1} は帰還容量が約10倍となり、その分だけ上昇率が小さくなる為、 300mV レンジで測定している。この例から、 $R_f = 1.007 \times 10^{12}\Omega$ 、 $C_f = 9.20\text{pF}$ という較正值が求められる。

実際の操作に於いては、数回の測定を繰返し、その平均値から較正值を求めている。各測定値のバラツキは、通常、1%以下である。

Fig.2. Calibration procedure.

Fig.3. Circuit diagram of the calibration equipment and its connection with the VRE.

Fig.4. Illustration of the calibration equipment.

5. 較正值の安定性について

筆者等は1975年から、月1回の定期観測の前後に、この方法によってVREを較正し、観測値を補正して来た。較正值の経時変化の一例をFig.6に示す。

この例ではCfの変動は小さく($\pm 3\sigma$ を変動範囲とすると $\pm 2\%$ 。ただし σ は標準偏差)、その傾向に特定のパターンが見られないのに対し、Rfは比較的大きく変動している($\pm 6\%$)上、夏低く冬高いという明確な季節変化を示している。

Rfの較正值を支配しているのはCo、Cf及びRfの値であり、その他の要素(開ループゲイン等)はそれらの影響がCo、Cf、Rfに比べた違いに小さい事、また、それらの環境条件に対する安定性から、無視する事ができる。

Co、Cf、Rfの変動の原因として環境条件の変動が考えられるが、その内、直接的に影響する可能性のあるものは温度及び湿度であろう。実際、これらの季節変化はRf較正值の変動とよく対応している。

ここで、Co、Cfとして使われているポリスチロールコンデンサの容量値及び、Rfとして使われている高抵抗器の抵抗値の温度係数は、いずれも高々200ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 程度であり、例えば30 $^{\circ}\text{C}$ の温度変化に対して0.6%以下となって、問題にならない。

従って、湿度による帰還ループの絶縁低下が最も疑わしい事になる。所で、高湿の夏季でもVo₁、Vo₂の直線性が良好である事から、Co、Cfの絶縁低下がない事は明らかである。(例えば、

Fig.2aで、帰還ループに並列にリーク抵抗R_lが加わったとすると、 ΔV_{O1} が直線的に変化する事より、 $(Co+Cf)R_l \gg \Delta t_1$ 従って、 $R_l \gg 10^2/10^{-10} \approx R_f$ となり、R_lは無視できる。)

以上の事から、Rfの較正值の変動は、湿度による高抵抗器の抵抗値変化(恐らく表面絶縁の変化による)に起因するものと推定でき、較正法の問題ではないと考えている。

Fig.5. An example of the VRE output voltage during the calibration procedure.

Fig.6. An example of the variation of the calibrated values.

6. 結語

本稿で紹介した較正法では、一般的な値のコンデンサを基準としている事から、その較正装置は単純な構造でメンテナンスをほとんど必要とせず、併も、高精度の較正が可能である。また、手軽に扱える為、VRE の故障等の診断にも便利である。

例示した較正結果ではCfの値がほぼ一定であったのに対し、Rfの値は規則的な季節変化を示し、その変動範囲も $\pm 6\%$ と、かなり大きいものであった。他の一例も同様の傾向を示している。ただし、この変動は飽く迄特定のVRE の例であり、一般論として断定するものではない。

特に高精度を要求される観測や、複数のVRE による測定値を比較する様な場合には、その都度この様な方法でVRE を較正するか、電荷蓄積法を用いる事が必要であろう。

謝辞 本較正法のヒントを与えて下さった、電総研の中谷茂博士に厚く感謝の意を表します。また、較正データの大部分は東理大・関川研究室の卒業研究生の手になるものであり、併せて感謝致します。

参 考 文 献

タケダ理研, TR-84M 取扱説明書, 1975.

Suzuki, K., T. Mitsukuchi and N. Watanabe, Production of Multi-Electrodes Ion Spectrometer III, Proc. Soc. Atmos. Elect., Japan, 22, 60-63, 1979.

(Received April 6, 1982;
revised September 7, 1982;
accepted September 25, 1982)