ヌード型 B-A 真空計の感度係数の取り付け管径 依存性に関するシミュレーション

杉沼 茂実*・平田 正紘*

(受理1998年4月3日, 掲載決定1998年6月6日)

Simulation Concerning about Dependence of Sensitivity Coefficient
of a Nude-type Bayard-Alpert Gauge on the Diameter of an Envelope

Shigemi SUGINUMA and Masahiro HIRATA

(Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568 Japan)

(Received April 3, 1998, Accepted June 6, 1998)

Sensitivity coefficient of a nude-type Bayard-Alpert gauge depends on the diameter of an envelope. In our measurement on four gauges, sensitivity coefficients of three gauges in small envelopes (inner diameter of 35, 38 mm) were higher by 20~40% than those in large envelopes (54, 70 mm) for nitrogen in high vacuum 10^{-4} Pa. One gauge showed small dependence of the coefficient on the diameter. In order to discuss these experimental results, an electric potential distribution and an electron trajectory inside the envelope were calculated using a super-computer. And a sensitivity coefficient was estimated using the potential distribution and the electron trajectory. The estimation showed that the coefficient of a gauge with a wide gap (3 mm) between a grid and a filament has the same dependence on the diameter as those of three gauges and the coefficient of a gauge with a narrow gap (1 mm) has small dependence on the diameter. Large envelope gives small dependence of the coefficient on the gap.

1. はじめに

信頼性の高い測定を行うには、真空計の感度係数と使用条件との関係が明らかな必要がある。ヌード型 B-A 真空計は、高真空の測定に使われる代表的な真空計であるが、感度係数に取り付け管径依存性がある¹⁻³⁾。例えば、Fig. 1 に、筆者らが管径を変えて測定した4個のヌード型 B-A 真空計の高真空 1×10^{-4} Pa における感度係数を示す³⁾。真空計#1, #2 と#3 の感度係数は、細い管 (35, 38 mm) に入れた場合は太い管 (54, 70 mm) の場合より20~40%も高い。一方、真空計#5 の感度係数は管径によらないでほぼ一定であった。

前報³⁾では、管径による管内の電位分布の違いが感度

係数にどのように影響を及ぼすかを定性的に考察し、真空計#1, #2, #3 の感度係数の管径依存性を説明した。即ち、太い管に取り付けた真空計のグリッドの外側の電位勾配は管壁との間隔が広いので小さい。フィラメントの電位は近傍の空間電位より低い45 Vに固定されているので、フィラメントの廻りの電位勾配は急になる。従って、電子はフィラメントから直接グリッド方向に放射されるだけでなく、一度管壁の方向に放射される割合が多くなる。この結果、多くの電子がグリッドを回り込んでグリッド内に入るようになるので、グリッド内での飛行距離が短くなって、感度係数の低下をもたらす。今回は、この検討の妥当性を定量的に検証するために、また、どのような場合に真空計#5 のような特性が得られるのかを検討するため、大型計算機によるシミュレーションを行った。シミュレーションは①電位分布の計算、

* 電子技術総合研究所 (〒305 茨城県つくば市梅園 1-1-4)

Fig. 1 Relationship between the sensitivity coefficient and the diameter of the envelope at 1×10^{-4} Pa of nitrogen.

②電位分布に従って飛行する電子の軌道計算, ③感度係数の見積り, ④実験結果との比較という順番で行った。なお, シミュレーションは, 電位分布に重要な影響を及ぼすグリッド-フィラメント間距離もパラメータとした^{4,5)}。

2. シミュレーション

2.1 電位分布の計算

Fig. 2 に, シミュレーションを行う領域のモデルを示す。管内及び管周辺の70 mm 四方の断面を考え, この領域を0.05 mm の間隔のメッシュで細かく分割する。B-A 真空計の形状は複雑である。グリッドは4本の支柱を線径125 μm のワイヤーで螺旋状に巻いた直径23 mm で全長45 mm のかご型で, その外側3, 4 mm の位置の1本の支柱の両側に線径150 μm のタングステン線を螺旋状に巻いた全長35 mm のフィラメントがある。イオンコレクターは線径125 μm 又は50 μm で全長35 mm の直線状のタングステン線でグリッドの中心に位置する。シミュレーションでは, これを単純化し, 長さ方向には無限大で, グリッドは直径23 mm で幅0.1 mm の円筒, フィラメントは150 μm 径の1本の円柱, イオンコレクターは125 μm 径の円柱と仮定した。管径は前報の実験条件と同じ35, 38, 54, 70 mm の4通り, グリッド-フィラメント間距離は1, 2, 3, 4 mm の4通りで, 計16通りの条件について計算した。

計算方法は以下の通りである。B-A 真空計は, 電源によりグリッドに180 V, フィラメントに45 V の電位が与えられる。従って, グリッドの位置に相当するメッ

Fig. 2 Simulation model of a gauge (a) a whole view (b) a partial view.

シュを180 V, フィラメントを45 V, イオンコレクター, 管壁及びその外部をアース電位に固定する。グリッドの内側の電位分布はイオンコレクターがグリッドの中心にあるとして(1)式から解析的に求めた。

$$V = 180 \cdot \frac{\ln(r/R_C)}{\ln(R_G/R_C)} \quad (1)$$

ここで, V はメッシュ点の電位, r はメッシュ点とイオンコレクターの中心との距離, R_G はグリッドの半径, R_C はイオンコレクターの半径である。

グリッドの外側の電位分布はフィラメントがあって非対称となるため解析的に計算できないので, 以下に示す繰り返し計算により求めた。Fig. 2 の xy 面に直交する方向を z 方向とすると直交座標系でのラプラスの方程式は

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

となる。 z 方向には変化しないとして, 差分方程式に置き換えると, 空間のメッシュ点 (M, N) の電位は

$$V_{M,N} = (V_{M+1,N} + V_{M-1,N} + V_{M,N+1} + V_{M,N-1}) / 4 \quad (3)$$

で表わされ, 隣り合った4つのメッシュ点の電位の平均

Fig. 3 Potential voltage distribution along the a-a' plane in Fig. 2 on a certain convergent condition as a parameter.

である。電位の固定されていないメッシュ点の電位は、電位の固定されているメッシュ点を境界条件として Fig. 2 に示す x 方向に沿って比例計算し、初期値とする。初期値から始めて、(3)式に従う電位計算を何周か繰り返すと、全てのメッシュ点の電位はそれぞれある一定の値に収束する。収束条件を1周前の電位の計算値との値の差の割合と考える。Fig. 3 に、フィラメントのある方向に対して直角方向 (Fig. 2 の a-a' 面) の電位分布を収束条件を変えて計算した結果を示す。収束条件を厳しくしていくと、グリッドの外側の電位分布は解析的な式

$$V = 180 \cdot \frac{\ln(R_w/r)}{\ln(R_w/R_g)} \quad (4)$$

に収束する。収束条件が0.0005%以下の時、計算結果と(4)式との一致は良い。従って、以下の計算は、収束条件0.0005%を満たした時点で繰り返し計算を終了した。直径38 mmの管では、繰り返し計算回数は5000回程度で、計算時間は約2時間であった。同じく、直径70 mmの管では、25000回程度で、約20時間であった。

Fig. 4 に、計算で得た管内の全体の電位分布と、フィラメントの周囲12 mm 四方だけを拡大した電位分布を立体的に示す。グリッド-フィラメント間距離は3 mm である。180 Vのグリッドとアース電位の管壁の間にフィラメントがあるので、フィラメントの周囲に電位の窪みができる。細い管 (内径38 mm) と太い管 (内径70 mm) のフィラメントの周囲4 mm 四方の等電位線図を Fig. 5 に示す。太い管 (内径70 mm) では、細い管 (内径38 mm) に比べて管壁方向への電位勾配も急になっており、前報³⁾の定性的な議論の結果を裏付けている。

2.2 電子軌道の計算

上述の電位分布を使って熱電子の軌道を計算した。先

Fig. 4 Potential voltage distribution represented in three dimensions (a) a whole view (b) a part of 12 mm square around a filament.

Fig. 5 Potential voltage distribution of a part of 4 mm square around a filament when the diameter of the envelope is (a) 38 mm (b) 70 mm.

ず、電子軌道の計算に用いるメッシュ点の電界 ($-dV/dx$, $-dV/dy$) は、Fig. 2 のメッシュ点の図で、両隣りのメッシュ点の電位差と両隣りのメッシュ点間の距離 $2D$ から求まる。

Fig. 6 Positions of mesh points and trajectory points around a filament.

$$\left(\frac{dV}{dx}\right)_{M,N} = \frac{V_{M,N+1} - V_{M,N-1}}{2D} \quad (5)$$

$$\left(\frac{dV}{dy}\right)_{M,N} = \frac{V_{M+1,N} - V_{M-1,N}}{2D} \quad (6)$$

但し、導体内の電界は 0 (V/m) なので、電位の固定されているメッシュ点の電界は 0 (V/m) とした。

熱電子はフィラメントから等方的に放射されると考える。放射角はフィラメントから管壁方向を 0° 、グリッド方向を 180° とする。シミュレーションを行う領域のモデルがフィラメントとイオンコレクターを結ぶ直線に対して線対称なので、計算は放射角 0° から 180° の範囲で行った。電子軌道の軌道点は電位を求めたメッシュ点とは別に任意の位置をとれる。以下、軌道点の計算方法を述べる。ここで、電子が動くことによる空間電位の乱れとイオン空間電荷効果は考慮していない。

Fig. 6 に、フィラメント周辺のメッシュ点と軌道点の位置関係を示す。電子軌道の第 1 点 $P_1(x_1, y_1)$ はフィラメントの表面の位置とした。フィラメントの中心と P_1 とを結ぶ直線方向を電子の放射角 θ とし、この直線の延長上に電位を指定して第 2 点の位置 $P_2(x_2, y_2)$ を求める。 P_2 の電位をどのように指定すれば、第 3 点以降終点までの軌道点間隔が十分細かくできるかは、第 3 点以降の軌道点を繰り返し計算し、最終的な P_2 の電位を決定するのが適当である。以下、 $P_2(x_2, y_2)$ 及び第 3 点以降の位置の求め方と最終的な P_2 の電位の決定方法の詳細を述べる。

P_2 の電位の初期値は、フィラメントの周りの 9 個のメッシュ点 a~i の電位の最小値とした。フィラメントの周りのメッシュ点 a~i の電位は、管径とグリッド-フィラメント間距離によって異なるので、 P_2 の電位の初期値は管径やグリッド-フィラメント間距離の条件によ

って異なる。放射角 θ 方向の P_2 の位置を求めるために必要となる、交点 j (放射角 θ 方向の直線と Fig. 6 に示すメッシュ点 a~i を結ぶ線との交点) の電位を最近接の 2 個のメッシュ点 (Fig. 6 の例では点 b, c) の電位から (7) 式により比例計算する。

$$V_j = V_b + \frac{V_c - V_b}{y_c - y_b} (y_j - y_b) \quad (7)$$

P_2 の位置は、点 P_1 と点 j の位置と電位及び P_2 の電位から (8) (9) 式により比例計算する。

$$x_2 = x_1 + \frac{x_j - x_1}{V_j - V_1} (V_2 - V_1) \quad (8)$$

$$y_2 = y_1 + \frac{y_j - y_1}{V_j - V_1} (V_2 - V_1) \quad (9)$$

以下、 $P_3, P_4, \dots$ は次のように決定した。まず、電子の速度 v を P_2 の電位 V_2 とフィラメント電位 V_f と電子の熱速度 V_0 (~ 0.2 eV) から

$$v = (2(q/m)(V_2 - V_f + V_0))^{1/2} \quad (10)$$

q : 電子の電荷 m : 電子の質量

により求め、この速度で P_1 から P_2 へ微小距離 ΔL 移動するのに要する微小時間 Δt (数 10^3 ピコ秒オーダー) を計算する。

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{v} \quad (11)$$

第 3 点以降は、電子がこの微小時間 Δt 秒間に電界 ($-dV/dx, -dV/dy$) からの力だけを受け、以下の差分式

$$x_{k+1} = 2x_k - x_{k-1} + (q/m)(\Delta t)^2(-dV/dx) \quad (12)$$

$$y_{k+1} = 2y_k - y_{k-1} + (q/m)(\Delta t)^2(-dV/dy) \quad (13)$$

に従って、順次、軌道点が変わっていくと考える。具体的に、 $P_k(x_k, y_k)$ から $P_{k+1}(x_{k+1}, y_{k+1})$ への電子の移動は、Fig. 7 に示すように、 $P_{k-1}(x_{k-1}, y_{k-1})$ から $P_k(x_k, y_k)$ への方向のベクトルと電界からの力が働く方向のベクトルの和で表わされる方向に起こる。

第 2 点 P_2 の電位を初期値のままとする、軌道点を順次計算していく過程で、軌道点間隔がメッシュ点間隔に比べて長くなり、飛ばされるメッシュ点の電界は計算に考慮されなくなることが生じる。これを避けるため、第 2 点 P_2 の電位を初期値から始め 0.1 V (管径 35 mm, グリッド-フィラメント間距離 4 mm の場合は 0.001 V) ずつ低く設定して、(8) 式以降の電子軌道計算を繰り返した。すべての軌道点間隔がメッシュ点間隔未満になった時点で計算を終了した。最終的に、第 2 点 P_2 の電位は最小値で 45.009 V (管径 35 mm, グリッド-フィラメント間距離 4 mm の場合)、最大値で 48.07 V (管径 70 mm, グリッド-フィラメント間距離 1 mm の場合) となった。第 2 点 P_2 の電位を全て 45.009 V に統一するの

Fig. 7 Relationship among positions of trajectory points.

は、管径が太い時に計算される軌道点数が多くなり、計算機のメモリを多く必要とするので避けた。

窒素の全電離断面積⁶⁾から、フィラメントとグリッド間の電位差135 Vで加速された電子が1 cm 走って生成するイオンの個数は、大まかに見積ると 1.33×10^2 Paで10個である。電子が135 eVのエネルギーのままグリッド内を2 cm 飛行すると、真空計の感度係数は 0.15 Pa^{-1} となる。実験に使用した真空計の公称の感度係数は 0.15 又は 0.19 Pa^{-1} であるため、電子はグリッド内を平均2回程度飛行していると考ええる。シミュレーションでは、電子がグリッド内を2回飛行した後にグリッドに流れ込むとし、この時点で軌道計算を終了した。即ち、実際のグリッドの透過率は有限の値があるものの、シミュレーションでは、電子がグリッドを通る回数で3回目までは透過率100%とし、4回目で透過率0%と仮定した。また、電子が管内を運動し、再びフィラメントに入射した場合はその時点で計算を終了した。

放射角を 5° おきに設定して電子軌道を描かせると、細い管の方のグリッド内の飛行距離がほとんどの角度で長い。例として、管径が38 mmと70 mmの場合にフィラメントから 42.5° , 132.5° の放射角で放射された熱電子の電子軌道を Fig. 8 に示す。フィラメント-グリッド間距離は3 mm である。管径70 mm の場合は管径38 mm の場合に比べて、フィラメントの周囲の電位の窪みが管壁方向にも急な分グリッドを回り込んでグリッド内に斜め入射する電子が増え、グリッド内での電子軌道が短くなる傾向がある。

管径70 mm の方が例外的に長くなるのは、電子がグリッドの回りを周回した後にたまたまフィラメントの付近の比較的強い電界で軌道が急に曲げられてグリッド内に入射する時である。例として、放射角 67.5° 、管径70 mm の時の電子軌道を Fig. 9 に示す。

Fig. 8 The trajectory of an electron emitted from a filament at the emission angle of 42.5° and 132.5° in the case of the envelope diameter (a) 38 mm (b) 70 mm.

Fig. 9 The trajectory of an electron emitted from a filament at the emission angle of 67.5° in the case of the envelope diameter 70 mm.

2.3 感度係数の計算と管径依存性

グリッド内で生成したイオンの内イオンコレクターに収集されたイオンが感度係数に寄与する。窒素の全電離断面積 σ は電子エネルギー E の関数なので、感度係数値 S は、

$$S \propto \int \alpha \sigma(E) dL \quad (14)$$

と表わされる。ここで、 α はイオン収集効率で、以下の計算では1と仮定した。シミュレーションでは、グリッド

Fig. 10 Relationship between the sensitivity coefficient and the diameter of the envelope as a result of simulation.

ド内の微小飛行距離 δL を (x_{k+1}, y_{k+1}) と (x_k, y_k) との2点間の距離とすれば,

$$S \propto \sum \alpha \sigma(E) \delta L \quad (15)$$

と表わされる。

Fig. 10に、 $\sum \alpha \sigma(E) \delta L$ の計算結果を示す。グリッド-フィラメント間の距離が4 mmでは、太い管 (54, 70 mm) に比べ、細い管 (35, 38 mm) では感度係数は40%程度高い。この比率は、グリッド-フィラメント間距離が3 mm, 2 mmと狭くなるにつれて、小さくなる。又、太い管 (54, 70 mm) での感度係数は、グリッド-フィラメント間の距離が1 mmから4 mmの範囲で変化してもそれほど差はない。細い管 (35, 38 mm) では、グリッド-フィラメント間距離が1 mm変化すると、感度係数は10~20%変化する。イオンコレクター径を50 μm とした時は125 μm にした時と比べて、どの管径についても約2%高いだけで、管径依存性の傾向は同じであった。イオンコレクター径が細い真空計の感度係数の実測値が低いのは、イオン収集効率 α がイオンコレクター径が細い程小さくなるためと考えられる。

真空計#1, #2と#3は、細い管 (35, 38 mm) での感度係数が太い管 (54, 70 mm) での感度係数より高いという点に関して、実験結果とシミュレーション結果はよく一致している。真空計#5のような管径依存性を示すの

は、グリッド-フィラメント間距離が1 mmの時であることがシミュレーションによってわかった。しかし、真空計#5は、真空計#1, #2, #3に比べてグリッド-フィラメント間距離が極端に短いということはないので、熱変形等の何らかの影響で動作中にグリッド-フィラメント間距離が狭まった可能性がある。グリッド-フィラメント間距離の短い管球の感度係数は管径依存性が小さいが、グリッド-フィラメント間距離の変化による感度係数の変化は大きいので、真空計#5はグリッド-フィラメント間距離の小さな変化により感度係数が大きく変化するという不安定性を抱えていることになる。従って、ヌード型 B-A 真空計は、グリッド-フィラメント間距離の変化で感度係数が影響を受けにくい太い管で使用した方が、圧力測定の信頼性が高まることがシミュレーションの結果から説明できた。

3. ま と め

ヌード型 B-A 真空計の感度係数は太い管に比べて細い管に取り付けた方が高くなる傾向にある。管内の電子軌道をシミュレーションにより求めると、太い管内ではグリッドを回り込んで斜め入射する電子が多く、電子はグリッド近傍の短い軌道をとる。電子軌道から感度係数を見積もると、感度係数は太い管に比べて細い管の方が高くなり、実験結果とシミュレーション結果は一致する。シミュレーションから、グリッド-フィラメント間距離が狭い程、感度係数の管径依存性は少なくなることがわった。しかし、細い管内では、フィラメントの変形などによる感度係数の変化は大きい。従って、ヌード型 B-A 真空計は、フィラメントの変形にも、又、グリッド-フィラメント間距離が違っても感度係数の変化の少ない太い管で測る方が信頼性の高い測定ができる。

〔文 献〕

- 1) 酒井 正, 織田善次郎: 真空, 7 (1964) 376.
- 2) A. R. Filippelli: J. Vac. Sci. Technol. A14 (1996) 2953.
- 3) 杉沼茂実, 平田正紘: 真空, 40 (1997) 796.
- 4) 平田正紘, 小野雅敏, 村上 寛, 国分清秀, 丸野尚彦: 第25回真空に関する連合講演会予稿集 (1984).
- 5) P. A. Redhead: J. Vac. Sci. Technol. 6 (1969) 848.
- 6) J. T. Tate and P. T. Smith: Phys. Rev. 39 (1932) 270.