スピニングローター真空計の測定値のバラツキの検討

平 田 正 紘*

(受理1993年11月2日, 掲載決定1994年1月8日)

Analysis of Dispersion of Measured Values of a Spinning Rotor Gauge

Masahiro HIRATA

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

(Received November 2, 1993, Accepted January 8, 1994)

Spinning rotor gauges are widely used as transfer and reference gauges for gauge calibration in high and medium vacuum. The dispersion of a spinning rotor gauge is the dominant cause of the uncertainty in pressure measurement at less than 10^{-2} Pa. The minimum value of the standard deviation of the dispersion of 2.6×10^{-8} Pa is calculated based on sampling interval of 30s and clock pulse frequency of 10 MHz. The rotational signal of a rotor was analyzed by a FFT analyzer. It was clarified that the disorder in the period of rotational signal due to external vibration increases the dispersion. The difference between the standard deviation values obtained from calculations and experiments was also investigated.

1. はじめに

スピニングローター真空計 (SRG) は, 真空中で自由回転させたローターの回転数が気体の摩擦効果で減衰する割合から圧力を測る¹⁻³⁾. 理論的に計算した感度が実測値と良く一致し, かつ, 経時変化が少ないなどの優れた特性を有するため, 中・高真空における真空標準のトランスファー真空計⁴⁻⁶⁾, 並びに, 実用真空計や残留ガス分析計を校正する際の基準真空計^{7,8)}に使われる. SRG を低い圧力まで使うためには, 低圧側の測定限界と限界に近い圧力の測定精度を決めるオフセットの変化と測定値のバラツキを小さくする必要がある⁹⁾.

オフセット変化は, 室温が一定であれば起動後約3時間以降は単調になるので予測できる¹⁰⁾. バラツキはデータを平均することで軽減できる. 例えば, 正規分布する10個のデータの平均値の不確かさは標準偏差の ~ 0.8 倍になる. データの数を多くすると平均化の効果は上がるが, 測定時間が長くなってオフセットの不確かさが増す. 1%の精度で測定可能な圧力の下限は標準偏差の ~ 100 倍

である. バラツキ自身を小さくすることがSRGの重要な課題である.

バラツキの大きさは, 振動などの影響で変わる^{11,12)}. 今までに測定したバラツキの標準偏差の最小値は 3×10^{-7} Pa である. この報告は, ローター回転数の減衰率の測定時間間隔とクロックパルスの周波数からバラツキの理論的な最小値を求める. 更に, ローター回転信号の波形分析, 電源交換と振動の影響の測定から, 実際のバラツキが理論的な最小値よりも大きくなる原因を調べる.

2. バラツキの理論的限界と実測値との比較

2.1 測定時間間隔に減衰率を1回ずつ測る場合

SRGの圧力測定の精度はローター回転数の減衰率測定の精度に依存する. Fig. 1に示すように, 測定時間間隔 t_0 に減衰率を1回ずつ測る場合, 周期測定の間隔を t_1 , t_2 とすると, 減衰率 $(-\dot{\omega}/\omega)$ は,

$$(-\dot{\omega}/\omega) = (t_2 - t_1)/t_1 t_2 \quad (1)$$

t_0 における回転数の変化は非常に小さいので, $t_1 \simeq t_2 \simeq t_0/2$ である. クロックパルスの間隔を dt とすると, 減衰率の最小分解能 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{MIN}}$ は,

* 電子技術総合研究所, つくば市梅園 1-1-4

Fig. 1 Relationship among rotational signal, clock pulse and sampling interval in the decay rate measurement of rotational signal of rotor.

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{MIN}} = 4dt/t_0^2 \quad (2)$$

ところが、Fig. 1 に示すように、回転信号とクロックパルスは周期のタイミングが一致しないので、時間的なズレで測定値のバラツキは大きくなる。ズレを dt_a , dt_b , dt_c とすると、バラツキ $(-\dot{\omega}/\omega)_F$ は

$$(-\dot{\omega}/\omega)_F = 4(dt_a - 2dt_b + dt_c)/t_0^2 \quad (3)$$

$0 \leq dt_a \leq dt$, $0 \leq dt_b \leq dt$, $0 \leq dt_c \leq dt$ であるため、バラツキの幅 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{PP}}$ は、

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{PP}} = 16dt/t_0^2 \quad (4)$$

となり、時間的なズレが無い場合の最小分解能の4倍になる。標準偏差 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}}$ は、 dt_a , dt_b , dt_c に乱数を当てはめて計算すると、

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}} \approx 2.8dt/t_0^2 \quad (5)$$

dt は 10^{-7} s, 最長の t_0 は 30 s であるから、標準偏差 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}}$ の最小値は 3.1×10^{-10} /s となる。

圧力 P と減衰率 $(-\dot{\omega}/\omega)$ は、次の関係がある。

$$P = R\rho/10\rho \cdot \sqrt{2\pi R_0 T/M} \cdot (-\dot{\omega}/\omega) \quad (6)$$

ここで、 σ は運動エネルギーの授受係数、 R はローターの直径、 ρ はローターの密度、 M は気体の分子量、 R_0 は気体定数、 T は気体温度である。 $\delta=1$, $R=4.5 \times 10^{-3}$ m, $\rho=7.8 \times 10^3$ kg/m³, $T=300$ K, $M=2.8 \times 10^{-2}$ kg/mol (N_2) の時、

$$P = 2.6 \times 10^3 (-\dot{\omega}/\omega) \quad (7)$$

標準偏差 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}}$ の最小値 3.1×10^{-10} /s を代入すると、圧力換算値 P_{STD} は 8.1×10^{-7} Pa となる。

2.2 複数回の測定によるバラツキの軽減

Fig. 2 に示すように、SRG は測定時間間隔 t_0 毎に減衰率を複数回測って平均し、バラツキを小さくする^{13,14)}。

標準偏差 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}}$ は、(5)式から、

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}} = 2.8dt/t^2 \cdot 1/\sqrt{N} \quad (8)$$

ここで、 t は 1 回の測定に要する時間、 N は t_0 における測定回数である。回転周波数を f_0 とすると、 N の最大値は $f_0(t_0 - t)$ であるから、

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}} \approx 2.8dt/t^2 \cdot 1/\sqrt{f_0(t_0 - t)} \quad (9)$$

Fig. 2 Schematic of mean value measurement of decay rate in rotational signal by the averaging mode.

Fig. 3 Dependence of standard deviation on sampling interval. A: experimental data obtained from offset measurement, B: calculated from clock pulse rate and sampling interval without averaging, C: theoretical lower limit obtained by averaging.

$t=0.8t_0$ の時、 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}}$ は最小になる。

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}} = 9.8dt/t_0^{2.5} \cdot 1/f_0^{0.5} \quad (10)$$

標準偏差 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}}$ は t_0 の -2.5 乗に比例する。回転周波数 f_0 が最小の 405 Hz, 測定時間間隔 t_0 が最長の 30 s の時、 $(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}}$ は 9.8×10^{-12} /s, 圧力換算値 P_{STD} は (7) 式から 2.6×10^{-8} Pa となる。この値がバラツキの標準偏差の最小値である。従って、1% の精度で測定可能な SRG の理論的な低圧限界は $\sim 3 \times 10^{-6}$ Pa である。

2.3 理論的境界と実測値との比較

Fig. 3 に、クロックパルスの周波数 10 MHz と測定時間間隔 t_0 から算出したバラツキの標準偏差と t_0 との関係、及び、オフセットの実測値から求めたバラツキの標準偏差と t_0 との関係⁹⁾を示す。実測値の標準偏差は 10 個のデータから求めた値である。減衰率を t_0 に 1 回だけ測る場合の計算値は t_0^{-2} に、 t_0 に複数回測る場合の計算値は $t_0^{-2.5}$ に比例する。実測値のバラツキは $t_0^{-2.5}$ に比例

Fig. 4 Effect of monotonous change in pressure (1×10^{-7} Pa/s) on standard deviation. A: theoretical lower limit, B: standard deviation caused by change in pressure, C: overall ($C=A+B$).

するので、SRGは t_0 に減衰率を複数回測っている。但し、実測値と計算値との間に約30倍の開きがある。今までに得た最小の実測値、 t_0 が30 sの時に 3×10^{-7} Paでも、計算値との間に約10倍の開きがある。

3. 測定値のバラツキが大きくなる要因の検討

3.1 測定対象の圧力が変化する場合

測定対象の圧力（あるいは、オフセット）が変化すると、測定値のバラツキは大きくなる。 1×10^{-8} Pa/sの割合で圧力が単調に変化する時、バラツキと測定時間間隔 t_0 との関係はFig. 4に示すようになる。圧力の変化量は時間に比例するので、 t_0 が長くなるとクロックパルス周波数から算出されるバラツキよりも圧力変化量が大きくなる。

圧力が振幅 1×10^{-5} Pa、周期30 sで周期的に変動する時、バラツキの標準偏差と t_0 との関係はFig. 5に示すようになる。 t_0 が圧力変化の周期に比べて短い場合、圧力変化量は t_0 に比例して大きくなる。 t_0 が周期よりも長くなると圧力変化は平均化されるので、バラツキは小さくなるが $t_0^{-2.5}$ には比例しない。

従って、圧力が単調に、あるいは、周期的に変化する時もバラツキと t_0 の関係は実測の関係と異なる。実測値のバラツキの増加は圧力変化が主原因でない。

3.2 測定系に原因がある場合

Fig. 6に、SRGのローター回転数の減衰率測定回路を示す。ピックアップコイルで検出された回転信号は前置器で増幅された後、バンドパスフィルタを兼ねた主増幅器で増幅される。回転信号は矩形波に変換された後、周期測定、減衰率の算出、圧力値に換算・表示される。測定値のバラツキが大きくなる原因は、ローター回

Fig. 5 Effect of sinusoidal change in pressure (amplitude: 1×10^{-5} Pa, freq.: 0.03 Hz) on standard deviation. A: theoretical lower limit, B: standard deviation caused by change in pressure, C: overall ($C=A+B$).

Fig. 6 Block diagram of the electric circuit of spinning rotor gauge for decay rate measurement of rotational frequency.

転信号の変化と電源の誤差が考えられる。前者は、ローターが不均一磁場で回転するため、あるいは、振動や浮上機構の誤差によって、ローターの回転速度が実際に変化する場合と回転信号に回転位置変動の信号が重畳して時間分解能が劣化する場合がある。後者は、クロックパルスの変動、回転信号への雑音の重畳とコンパレータの誤差による時間分解能の劣化が考えられる。

実質の時間分解能を dT とすると、バラツキの標準偏差は、(10)式から次のようになる。

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}} = 9.8dT/t_0^{2.5} \cdot f_0^{0.5} \quad (11)$$

Fig. 7に、 dT とバラツキの標準偏差との関係を示す。今までに得た最小の標準偏差 $\sim 3 \times 10^{-7}$ Paは、実質の時間分解能が $0.1 \mu\text{s}$ から $1.1 \mu\text{s}$ に劣化すると生じる。この劣化は400 Hzの回転周波数が 0.18 Hz (0.1%)の幅で変動するのと同じである。

回転信号に外部振動による回転位置の変動の信号や雑音为重畳しても、あるいは、コンパレータに誤差があっ

Fig. 7 Relation between uncertainty in clock pulse rate and standard deviation.

ても、時間分解能の劣化はグラウンド電位が変動するのと同じように考えることができる。Fig. 8 に示すように、回転信号の振幅を V_0 、雑音の振幅、あるいはコンパレータの不確かさの幅を V とすると、 $V_0 \gg V$ の時、実質時間分解能 dT は次のようになる。

$$dT = (V/V_0) / \pi f_0 \quad (12)$$

dT がランダムに変化すると、(11)式から、

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}} = 9.8(V/V_0) / (\pi \cdot t_0^{2.5} \cdot f_0^{1.5}) \quad (13)$$

$f_0 = 405 \text{ Hz}$, $t_0 = 30 \text{ s}$ の時、

$$(-\dot{\omega}/\omega)_{\text{STD}} = 7.9 \times 10^{-8} (V/V_0) \quad (14)$$

圧力に換算すると、

$$P_{\text{STD}} = 2.1 \times 10^{-4} (V/V_0) \quad (15)$$

Fig. 9 に、回転信号に対する雑音の大きさ (V/V_0) とバラツキの標準偏差との関係を示す。クロックパルスと同じ $0.1 \mu\text{s}$ の分解能で減衰率を測るためには、雑音は回転信号の $\sim 1/8000$ (-78 dB) 以下にする必要がある。 $\sim 1/700$ (-57 dB) の雑音が回転信号に重畳すると、バラツキの標準偏差が今までに得た最小値の $\sim 3 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ になってもおかしくない。

4. 回転信号の波形分析

Fig. 10 に、主増幅器の出力波形を示す。振幅 $10 V_{\text{PP}}$ の正弦波の回転信号は詳細に観察すると振幅に $\sim 2\%$ 、回転周期に $\sim 2 \mu\text{s}$ の変動があった。この時のオフセット測定値の標準偏差は $\sim 9 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ である。

Fig. 11 に、高速フーリエ変換器 (FFT) を用いて分析した回転信号のスペクトルを示す。窓関数は、サイド・スロープが少なく回転信号に比べて微弱な信号が分析可能なミニマム窓関数を用いた。410 Hz はローターの回転周波数、820 Hz と 1230 Hz は回転周波数の 2 倍と 3 倍の高調波である。残りのスペクトルの内、50 Hz の倍数の信号 (150, 250, 350, ...) は AC 雑音、回転数が 415 Hz に近い時に見られる 406 Hz の信号はターボ分子

Fig. 8 Uncertainty of time interval measurements caused by noise.

Fig. 9 Relation between noise and standard deviation.

ポンプの振動である。13 Hz と 130 Hz の信号は補助ポンプの回転数 24 Hz にも一致しないので、原因を特定できていない。主増幅器出力のスペクトルが前置増幅器出力に比べて $\sim 300 \text{ Hz}$ 以下と $\sim 1 \text{ kHz}$ 以上で大きく減衰するのはフィルターの効果による。前置増幅器の出力に 40 kHz の信号が観察されたが、ローター位置制御の信号と考える。

スタンバイ状態 (ローターを浮上させただけ) のスペクトルは回転周波数とその高調波の信号が無いだけで、動作状態のスペクトルとほとんど同じである。つまり、ローターが回転することで新たな振動は発生しない。

Fig. 10 に見られる $2 \mu\text{s}$ の回転周期の変化は、0.3 Hz の幅の回転周波数の変化に相当する。回転周波数自身の变化と雑音の影響とが考えられるが、回転周波数そのものの变化の有無は分解能 2.5 Hz の FFT 分析器では分析できなかった。

主増幅器出力の高調波は基本周波数の 1.4% (-37

Fig. 10 Rotational signal of a rotor measured at monitor output.

dB) である。高調波はヘッドのコイルを傾けると増加するので、不均一磁場との干渉による回転周期に同期した回転速度、あるいは、回転位置の変化によると考える。増幅器の歪みによるものであれば、回転信号の大きさに依存して大きくなるはずであるが、高調波の大きさは必ずしも回転信号の大きさに依存していない。実際値 $\sim 9 \times 10^{-7}$ Pa の ~ 3 倍の 3×10^{-6} Pa の標準偏差が高調波の大きさから(15)式により予測されるが、高調波が小さくても、極端な場合、2 倍の高調波がほとんどない電源とローターの組み合わせもあったが、バラツキは必ずし

も小さくなかった。従って、高調波はバラツキの主原因でない。周期に完全に同期した高調波は回転周期に影響しない。

高周波を除いた最大の雑音 (550 Hz) は回転信号の 0.1% (-60 dB) である。この値から予測されるバラツキの標準偏差 2×10^{-7} Pa は実測値の $\sim 1/5$ である。前置増幅器出力に観察された 40 kHz のスペクトルは、フィルターの効果により主増幅器の出力に無いので問題とならない。

5. 電源とローターの組合わせの影響

同じ真空槽に 3 台の SRG を取付けて同時に動作させた時、バラツキの標準偏差に 2 $\sim$ 3 倍の差があった⁹⁾。同様に、電源 EU とセンサーヘッド SH のコイルの組合わせを変えて同じローターを動作させた時も、標準偏差に 2 $\sim$ 3 倍の差があった。振動の大きさは同じと考えられる。Fig. 12 に示すように、組合わせによって雑音と高調波の大きさに差はあるが、雑音と高調波が大きい組合わせのバラツキが必ずしも大きくない。

従って、振動、雑音と高調波は必ずしもバラツキの主原因でない。振動の影響が電源の組合わせで異なるか、電源によるクロックパルスの不安定性とコンパレーターの誤差が大きいと考える。

Fig. 11 Spectra of rotational signals of a rotor measured at outputs of pre-amplifier and main amplifier during operation and standby.

Fig. 12 Change in spectra of rotational signals with the same rotor by using electric unit EU and sensor head coil SH.

6. 振動の影響

SRG センサーに外部から正弦波の振動を加えると、Fig. 13 に示すように加えた振動の周波数と同じ周波数 (300 Hz) の信号が回転信号に重畳するが、これ以外に新しい信号の発生と既存スペクトルの変化はないことが回転信号のスペクトル分析からわかった。振動周波数の信号が回転信号に重畳するのは、振動によってローターとヘッドのコイルとの相対位置が変化するためである。回転数と同じ周波数の振動を加えても、新しい信号の発生と既存スペクトルの変化はないので、ローターの回転自身は振動によって乱されないと判断できる。

SRG は、回転周波数の振動とインパルス性の振動に敏感である¹²⁾。Fig. 14 に、回転信号に対する振動信号の割合とバラツキの標準偏差との関係を示す。回転周波数とその高調波の振動は、バックグラウンドと同じレベルでも問題になるのがこの図から分かる。前報⁹⁾の Fig. 3 において、ローターが再加速される～7 時間前にバラツキが突然大きくなったのは、再加速が起こる回転数 405 Hz と回転数の時間変化率から逆算し、ローターとターボ分子ポンプの回転数とが丁度その時に一致したためである。ドライバーで軽く叩くなど、センサーに衝撃を加えると圧力指示値が変化する。この理由は、回転信号が瞬間的に大きく変動して、回転数を余分にカウントする

Fig. 13 Effect of 300 Hz external vibration on spectra of rotational signals.

ためと考える。

Fig. 15 に、回転数と同じ周波数の振動をセンサーに加えた時のバラツキの標準偏差と測定時間間隔 t_0 との

Fig. 14 Relation between external vibration level and standard deviation. BG: background level. f : freq. of external vibration, f_0 : rotational freq. of rotor.

関係を示す。標準偏差は、 t_0 が2sより短いときには振加を加えない時と同じであるが、2~15sではほぼ一定、15sより長くなると急激に小さくなる。原因は次のように説明できる。

回転数と外部振動周波数は完全には一致できないので、回転周期は回転数と振動周波数との差の周波数でゆっくり変動する。前述の圧力が周期的に変動した時と同じ様に、測定時間間隔 t_0 がゆっくりした周期よりも短い場合、回転周波数の変化量は t_0 に比例する。測定を繰返すとバラツキは t_0 に比例して大きくなるが、同じ t_0 内に減衰率を何回測っても測定値を平均する効果はない。周期と t_0 がほぼ等しい時には、バラツキはほぼ一定になる。 t_0 が周期よりも長いと、平均化の効果でバラツキは小さくなる。

SRGが回転数とその高調波以外の振動に鈍感な理由は、周波数の差が大きいためにバラツキが平均化されるためである。但し、回転信号が小さいと雑音の影響を受けやすいので、注意を要する。

Fig. 16は、回転数との差が0.1 Hzと10 Hz、振幅が回転信号の1/300の雑音が重畳した時、Fig. 2に示した測定方法に基づいて算出した標準偏差と t_0 との関係を示す。実験結果との一致は良い。周波数の差が10 Hzの時は影響が小さいが、差が0.1 Hzの時は振動がバラツキに大きく影響する。従って、振動はローターの回転を直接乱すよりは、回転信号に雑音として重畳し信号を乱すことが分かった。

7. おわりに

SRGのバラツキの理論的な限界を、測定時間間隔とクロックパルスの周波数から求めた。最小値は時間間隔が最長の30sの時に 2.6×10^{-8} Paである。1%の精度で

Fig. 15 Effect of external vibration on standard deviation. A: without vibration, B: with vibration ($f=f_0$).

Fig. 15 Effect of external vibration on standard deviation. A: experimental data without vibration, B: calculated data with vibration ($f-f_0=0.1$ Hz), C: ($f-f_0=10$ Hz).

圧力を測定できるSRGの理論的な低圧限界は $\sim 3 \times 10^{-6}$ Paである。ところが、バラツキの理論値と実測値 $3 \sim 10 \times 10^{-7}$ Paとの間に10~40倍の差がある。

SRGは回転数と同じ周波数とインパルス性の振動に敏感であるが、回転数と異なる周波数の振動に鈍感である。センサーに振動を加えると、振動と同じ周波数のスペクトルが回転信号のスペクトルに重畳するが、振動周波数以外のスペクトルは発生しない。振動の影響は振動周波数のスペクトルと回転スペクトルとの干渉により説明できた。SRGのバラツキは電源の組合わせで異なる。バラツキは回転信号を正弦波から矩形波に波形整形するときのコンパレータの誤差、あるいは、クロックパルスの変動が主原因と考える。回転数とその高調波を除いた振動と雑音は、平均化の効果によりバラツキの主原因になっていない。しかし、回転信号が小さい場合は注意を要する。

高い信頼性が要求される圧力測定には、予め SRG の精度限界を調べて使うのが重要である。回転信号のスペクトル分析とパラツキの測定時間間隔依存性の測定は、SRG の動作状態を調べるのに有効である。

〔文 献〕

- 1) J. W. Beams, D. M. Spitzer, Jr. and J. P. Wade, Jr.: J. Appl. Phys. **33-2** (1962) 151.
- 2) J. K. Fremerey: J. Vac. Sci. Technol., **9-1** (1972) 108.
- 3) G. Messer: Proc. 8th Intern. Vac. Congr. & 4th Intern. Conf. Solid Surface (Cannes 1980) 191.
- 4) G. Messer, P. Rohl, G. Grosse and W. Jitchin: J. Vac. Sci. Technol. **A5-4** (1987) 2440.
- 5) 平田, 小野, G. Rumianno, M. Bergoglio and A. Calcatelli: 真空 **34-9** (1991) 713.
- 6) G. Reich: J. Vac. Sci. Technol., **20-4** (1982) 1148.
- 7) S. Dittmann, B. E. Lindenau and C. R. Tilford: J. Vac. Sci. Technol., **A7-6** (1989) 3356.
- 8) G. Messer, et al: Metrologia **26** (1989) 183.
- 9) 平田: 真空 **36-1** (1993) 26.
- 10) 磯貝, 平田, 小野, 国分: 真空 **30-10** (1987) 799.
- 11) 平田, 磯貝, 国分, 小野: 真空 **28-12** (1985) 898.
- 12) M. Hirata, K. Isogai and M. Ono: J. Vac. Sci. Technol., **A4-3** (1986) 1724.
- 13) J. K. Fremerey: J. Vac. Sci. Technol., **A3** (1983) 1715.
- 14) 上田, 広畑, 日野, 山科: 真空 **26-4** (1993) 414.