研 究

誘導電動機のすべりと接線研削抵抗*

— 計測システム —

東 江 真 一** 山 口 力*** 海 野 邦 昭**

Slip of Induction Motor and Tangential
Grinding Force
—System of Instrumentation—

Shinichi TOOE, Tsutomu YAMAGUCHI
and Kuniaki UMINO

According as the development of the automatic grinding is taken place, so it becomes a serious problem how grinding state is recognized. And it is described that grinding force is closely related to grinding conditions and the deterioration of the cutting edges, therefore the in-process measurement of the grinding force is important. In this report, the method of measuring the slip in the induction motor to obtain the grinding power is considered, and

the new system to measure the tangential grinding force is developed with which the problem of the small power and the high speed on the grinding and the problem of the fluctuation on the voltage of the motor is solved. This system can be applied to the small grinding force in the fine grinding, because the minimum resolving power is about 0.202 N. {20.6gf} and the error of the tangential grinding force for the fluctuates of the voltage and the frequency of the electric source on the induction motor is automatically corrected.

Key words: tangential grinding force, adaptive control, in-process detection, induction motor, rotary encoder.

1. 緒 言

研削作業に数値制御技術ならびに適応制御技術が適用されるにつれ、以前にも増して、研削状態をいかに正しく把握するかということが問題になりつつある。とりわけ研削抵抗は、研削条件、目立て条件および切れ刃の劣化過程などと密接なかわりを持つとともに、研削焼けやびびりの発生といった問題にも関係するので¹⁾²⁾、インプロセスで精度良く研削抵抗を測定することが研削作業を自動化するうえで重要な決め手となっている。ところで研削抵抗をインプロセスで測定する方法には、心押軸センタ等のひずみを利用する方法、静圧軸受の圧力差を利用する方法、並びに電力変化や砥石主軸の回転周期の変化から研削動力を求める方法などがあるが^{1)3)~5)}、これらの方法は研削盤の剛性を損ねたり、砥石主軸系の改造を要したり、軽負荷に対応できなかったり、電源周波数や電圧などの電源事情の変化に基づく影響を受けたりといった問題があり、感度と精度の面で一長一短があるというのが現状である。

さて最近になって、電源周波数の変動を考慮した上で誘導電動機のすべりを測定し、そのすべりから旋削作業

における切削抵抗主分力を求める手法が開発されている⁶⁾。しかしながら研削にこの手法を適用するためには、切削と比較して高速で、しかも微小切込みであり、特に精研削ではより軽負荷になるという研削作業特有の問題、また旋盤では4極電動機が使われているのに対し、研削盤では多くの場合、2極電動機が使われているという問題、更に電動機にかかる電圧の変動による影響といった問題などがあり、それらに関連した多くの問題を解決し、研削作業に適応しうる新しい測定システムを開発する必要がある。そこで本文においては、電動機のすべり特性を利用しつつ、しかも高速・軽負荷という研削作業特有の性質に対応した新しい接線研削抵抗の測定システムを開発したので、以下そのシステムの詳細について述べる。

2. 測 定 原 理

2.1 誘導電動機のすべりと研削動力

誘導電動機が完全に無負荷状態にあるとすれば、電動機は極数と電源周波数によって定まる同期速度で回転するが、負荷が作用するとそれに応じて回転数が減少し、すべりが生じる。その関係をトルクとすべりとで表現すると図1のようになる⁷⁾。図における太線は定格出力までの範囲の関係であり、この範囲内であれば、トルク T とすべり s との関係は近似的に次式のように表される。

$$T = ks \quad (1)$$

* 原稿受付 昭和57年6月18日。昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和56年11月5日)にて発表。

** 正 会 員 職業訓練大学校(相模原市相原1960)

*** 正 会 員 香川職業訓練短期大学校(丸亀市郡家町3202)

Fig.1 Torque-slip characteristic curve on induction motor

ただし, k : 比例定数.

また電動機に発生する動力 W とトルク T との関係は, 研削負荷時の電動機の回転数を R_g , 同期速度を R_0 とし, 更に式 (1) を使うと

$$W = 2\pi R_g T = 2\pi k R_0 (1-s) s \doteq 2\pi k R_0 s \quad (2)$$

となる. ただし定格出力までのすべりは小さいので, s の 2 乗の項を無視する. ここで電動機に発生する動力を機械空運転動力 W_m (砥石を回転させるだけに必要な動力) と研削動力 W_g とに分け, そして機械空運転時の電動機の回転数を R_m とすれば, 式 (2) は

$$\begin{aligned} W &= W_m + W_g \\ &= 2\pi k (R_0 - R_m) + 2\pi k (R_m - R_g) \end{aligned} \quad (3)$$

となる. ただし, $s = (R_0 - R_g) / R_0$.

そこで式 (3) の機械空運転動力の項を消去すれば, 研削動力は

$$W_g = 2\pi k (R_m - R_g) = 2\pi k \Delta R \quad (4)$$

となる. ただし, $\Delta R = R_m - R_g$. したがって電動機の負荷・すべり特性を示す k が既知であれば, 回転数の減少から研削動力を求めることができる.

2.2 電動機の回転数の検出と接線研削抵抗

ここで, 電動機的主軸にロータリエンコーダを直結し, このエンコーダからの一定時間 (ゲート時間) 当たりのパルス数 (以下, 出力パルス数と呼ぶ) によって回転数の変化を検出することにする. そしてエンコーダの 1 回転当たりのパルス数 (以下, 発生パルス数と呼ぶ) を q , ゲート時間を t とすれば, 式 (4) は

$$W_g = \frac{2\pi k}{qt} \Delta P = c_1 \Delta P \quad (5)$$

となる. ただし, $\Delta P = P_m - P_g = qt \Delta R$ (以下, ΔP を減少パルス数と呼ぶ), P_m : 機械空運転時の出力パルス数, P_g : 研削時の出力パルス数, $c_1 = 2\pi k / qt$.

さて, 研削動力は接線研削抵抗と研削速度との積によって与えられるので, 砥石周速度 V を砥石回転数 N , 砥石直径 D , 電動機と砥石との回転比 $\varepsilon (= N/R)$ およ

Table 1 Three phase induction motor

Poles	Voltage V	Rated output W	Rated speed s^{-1}	Synchronous speed s^{-1}	k (Calculated value) Ws
2	200	2 200	47.7	50.0	150
4	200	2 200	23.8	25.0	300
6	200	2 200	15.9	16.7	467

び P_g によって表現すれば, 次式のようになる.

$$V = \pi D N = \frac{\pi \varepsilon D P_g}{qt} \quad (6)$$

また加工物速度は, 通常, 砥石周速度の 1/100 程度なので, 加工物速度を無視すれば, 接線研削抵抗 F_t は式 (5) および式 (6) より

$$F_t = \frac{W_g}{V} = \frac{qtc_1 \Delta P}{\pi \varepsilon D P_g} = c_2 \frac{\Delta P}{D P_g} \quad (7)$$

となる. ただし, $c_2 = qtc_1 / \pi \varepsilon = 2k / \varepsilon$ となるため, c_2 は発生パルス数 q およびゲート時間 t に依存しない定数となる.

なお加工物速度を考慮した場合には, 接線研削抵抗は

$$F_t = \frac{W_g}{V+v} = \frac{c_1}{\pi \varepsilon D P_g / qt + dn} \quad (8)$$

として表現できる. ただし, v : 加工物速度, d : 加工物直径, n : 加工物回転数.

3. 実験方法

3.1 電動機の極数と発生パルス数

発生パルス数を大きくすると感度は向上するが, 研削抵抗以外の要因による回転むらも検出し, 精度の面で問題となる. したがって感度と精度の両者を向上させるためには, 適当な発生パルス数を選択するとともに, 回転むらの少ない電動機を選ぶことが必要になる. そこで電動機を表 1 に示す 2 極, 4 極および 6 極の 3 種類とし, それぞれの電動機における機械空運転時の出力パルス数のばらつきと発生パルス数との関係について検討した. この場合, パルスをカウントするためのゲート時間を 1 s, 出力パルス数のサンプリング数を 200 個およびサンプリング間隔を 2 s とし, また 4 000 pulse/rev のエンコーダの出力を分周することにより発生パルス数を変化させた. ただし電動機の極数が違うと回転数も異なるため, プーリの直径を変えることによって砥石主軸回転数が同じになるようにした. また, パルスカウンタは電源周波数の変動による回転むらを相殺するため, 電源ゲート方式とした⁶⁾.

3.2 動力の測定

式 (5) における定数 c_1 を決定するため, 図 2 および図 3 に示すように, 円筒研削盤 (Toyoda-Gendron RS 115

Fig. 2 Block diagram for measurements of tangential grinding force

Fig. 3 Experimental device for measurement of tangential grinding force

型静圧軸受)の砥石主軸にアルミニウム材を取り付けるとともに、バイトと工具動力計(共和電業, 4.9 kN)を研削盤のテーブルに固定し、アルミニウム材を切削した。そしてその切込み量を変化させ、工具動力計から得られる切削動力(切削抵抗主分力と切削速度との積)と減少パルス数 ΔP との関係を検討した。ただし、切削速度を計算する場合に必要な被削材の直径を切削点の中央とし、砥石主軸回転数を発生パルス数と回転比 ϵ から求めた。

3.3 電圧の変動

電動機にかかる電圧は工場内における電気機器の稼働状態によって左右されるが、電源事情によってはかなりの電圧変動が予想される。ここで仮に電源周波数が同じで、電圧のみが変化したとすれば、電動機の同期速度は変化しなくても、式(1)の比例定数 k が変動することになる。そのため電圧変動を考慮に入れて、式(5)や式(7)の定数 c_1, c_2 および P_m を定めることが必要になる。そこで三相誘導電圧調整器(山菱電気, 5 kVA)によって電動機にかかる電圧を140 Vから20 V間隔で240 Vまで変化させ、その場合に生じる機械空運転時と電動機空運転時(Vベルトを外して、電動機のみを回転させた場合)の出力パルス数の変動を調べた。それらの結果から、

Fig. 4 Relationships between number of pulse in rotary encoder q and minimum tangential grinding force F_{tmin}

c_2 と P_m に及ぼす電圧変動の影響を吟味した。

4. 実験結果と考察

4.1 測定可能な最小接線研削抵抗

極数の異なる電動機の感度を検討するため、最初にそれぞれの電動機のラベルに表示してある仕様によって、定数 k を求めることにする。すなわち、式(4)の R_m に同期速度、 R_g に定格速度(定格出力時の回転数)を代入すると、 k は表1に示した値となる。

また最小読取值 F_{tmin} は接線研削抵抗を減少パルス数で割ることによって得られるので、式(5)より

$$F_{tmin} = \frac{F_t}{\Delta P} = \frac{2\pi k}{qV} \quad (9)$$

となる。そこで式(9)の概略値を知るため、 k に表1の値、 t に1 s、および V に30 m/sを代入し、そして発生パルス数、電動機の極数および1パルス当たりの接線研削抵抗の関係で示すと図4のようになる。図より感度だけを問題にすれば、電動機の極数が少なく、かつ発生パルス数が大きい方が有利であるといえる。それは2極電動機の場合、極数が少ない分だけ回転数が高くなり、同じ研削抵抗であってもそれだけ減少パルス数が大きくなるように作用するからである。

4.2 測定精度

ところで本測定法は、機械空運転時と研削負荷時との出力パルス数の差によって接線研削抵抗を求めようとするのであるから、負荷以外の要因による出力パルス数の変動は不都合となる。そこで機械空運転時のそれぞれの電動機の出力パルス数の変動を調べると図5のようになる。図の縦軸は出力パルス数のばらつきで、標準偏差 σ で表しており、またパルスゲート回路では+1パルスないし-1パルスの変動は不可避であるから、 $\sigma \leq 0.5$ pulse/sになるときがこの条件を満たすことになる。図より、出力パルス数のみの安定性を問題にするならば、

Fig. 5 Relationships between number of pulse in rotary encoder q and amount of scatter in pulse counter σ
2.2 kW induction motor, $t=1$ s

Fig. 6 Relationships between number of pulse in rotary encoder q and range of deviation on tangential grinding force

発生パルス数の大きさには限界があり、また電動機を6極にした方が有利であるといえる。

しかしここで問題にするのは出力パルス数のばらつきでなく、むしろ減少パルス数を接線研削抵抗に校正したときの変動であるので、そのばらつきを力の単位で置き換えることが必要になる。そこで出力パルス数のばらつき幅(95.4%)を図4で示した感度で掛けると図6のようになる。図より、研削抵抗に直した精度で考えれば、発生パルス数が小さいと不利であり、逆に発生パルス数がある一定値以上あれば、その精度は発生パルス数と電動機の極数にあまり依存しないといえる。

ただし、図5に示した出力パルス数の変動が少ない $\sigma \leq 0.5$ pulse/s を満足し、かつ図6で示した精度と図4の感度とを考慮に入れると、この場合は多少2極電動機が有利であり、そして発生パルス数を200~300 pulse/rev程度にするのが良いといえる。そこで本システムでは、供試電動機のうちで2極電動機を採用することにし、

Fig. 7 Relationship between idling time on induction motor and number of pulse on pulse counter P_m

Fig. 8 Relationship between number of reduced pulse on pulse counter ΔP and cutting power W_t

またこの範囲内で出力パルス数が最も安定している(データ処理の行いやすい)200 pulse/revの発生パルス数を選択することにする。

さて機械空運転時の出力パルス数はできるだけ一定であることが望ましいので、2極電動機の経時変化を調べた。その結果を図7に示す。図より、出力パルス数が安定するまでに30 min以上の慣し運転を必要とすることがわかる。

4.3 切削実験

円筒研削盤を使って、Al材を切削したときの減少パルス数と切削動力との関係を2極電動機について調べた。その結果を図8に示す。この場合、発生パルス数を200 pulse/revおよびゲート時間を1sにしてあり、またそのときの電圧は約212 Vであった。そして図における関係を最小二乗法で求めると、式(5)は次のようになる。

$$W_g = 6.06 \Delta P \quad (\text{W}) \quad (10)$$

また、式(10)より、式(7)は次のようになる。

$$F_t = 7.14 \times 10^5 \frac{\Delta P}{DP_g} \quad (\text{N}) \quad (11)$$

ただし、砥石直径 D の単位は mm, $\epsilon=0.540$, 式 (10) より 1 パルス当たりの研削動力は 6.06 W/pulse となり, 研削速度が 30 m/s であるとすれば, 1 パルス当たりの接線研削抵抗は 0.202 N/pulse [20.6 gf/pulse] となる. また表 1 に示した k の値を使うと, 4.71 W/pulse となるので, 電動機の仕様による計算値と比べ, 実験による感度は 28.7% 低かったことになる.

式 (11) は接線研削抵抗を求めるための校正式であるが, 式 (11) より明らかなように, 負荷が増大して減少パルス数が大きくなると, P_g は逆に減少することになる. したがって負荷が増大するに従い, 減少パルス 1 パルス当たりの接線研削抵抗は増大して, 感度は幾分低くなることになる.

4.4 電圧の変動による影響

前述のように, 電動機にかかる電圧が変化すると, 機械空運転時と研削負荷時の回転数も変化することになるが, その場合でもその電圧における c_1 や c_2 の値がわかれば, 本測定法によって接線研削抵抗を測定することができる. ただし研削中に電圧が変化すると, 接線研削抵抗の原点を意味する P_m も変化することになるが, その場合には研削力が作用しているため, その電圧における P_m を測定することができない. したがって, 変化した電圧から P_m を予測することが必要になる. そこで, c_2 と P_m の電圧による変化率をそれぞれ α および β として, c_2 と P_m を表すと次のようになる.

$$c_2 = c_{20} \{1 + \alpha(E - E_0)\} \quad (12)$$

$$P_m = P_{m0} \{1 + \beta(E - E_0)\} \quad (13)$$

ただし, E : 電圧, E_0 : 基準電圧, c_{20} : E_0 のときの c_2 の値, P_{m0} : E_0 のときの P_m の値.

そこで α と β を実験的に吟味するために電圧を変化させ, その場合の P_m と電動機空運転時の出力パルス数 P_a の変動について調べた. その結果を図 9 に示す. 図より, 空気抵抗などがわずかにあるため, P_a は電圧変動に伴って多少変化するが, 180 V と 220 V の間でその差は 1 pulse/s であり, ほぼ電動機の同期回転数に対応した値といえる. それに比べ, 機械空運転時の電動機には電動機空運転時よりも大きな負荷が作用しているため, P_m は電圧変動の影響を受けやすく, この場合, 電圧によってすべりが変化することがわかる. ここで α を求めるため, 式 (7) の ΔP に $P_a - P_m$, P_g に P_m を代入し, 仮に 200 V のときの c_2 の値を基準にして, それぞれの電圧における c_2 の比を取ると図 10 のようになる. ただし, DF_t の値を一定として考える. そして, 実際に生じる電圧変動幅を 220 V から 180 V 程度までと考え, 図のこの 2 点を通る直線の傾き α を求めると $8.97 \times 10^{-8} \text{ V}^{-1}$ となる. すなわち, 電圧が 1 V 低下すると測定感度は

Fig. 9 Relationships between voltage on induction motor E and number of pulse in idling P_m , P_a .

Fig. 10 Relationship between voltage on induction motor and ratio of c_2 to c_{20}
Standard voltage; 200 V

0.897% 高くなることになる.

次に P_m の変化率 β を求めるため, 式 (13) の E_0 に 220 V , E に 180 V , P_m と P_{m0} にそれぞれの電圧に対応する実験値を代入すると, この 2 点間の β は $5.94 \times 10^{-5} \text{ V}^{-1}$ となる. この場合, 発生パルス数が 200 pulse/rev であるので, P_m の変動は約 0.59 pulse/V となる. ただし P_{m0} の大きさ, すなわち機械空運転時の電動機にかかる負荷の大きさによって β の値は異なるが, その変化は少ないものとして近似的にこの β の値を採用することにする. またゲート時間内の衝撃的な電圧の変動には, この手法を適用することができない.

5. 計測システム

電動機にロータリエンコーダを取り付け, その出力パルスを電源ゲート方式のカウンタでカウントすれば, 接線研削抵抗の測定が可能となる. そして研削抵抗へ変換する場合の校正式は式 (7) および式 (8) になるが, 機械空運転時の出力パルス数 P_m は, 図 7 に示したように一定時間経過後も空運転時間によってわずかに変わるので, 研削する直前の値であることが望ましく, また研削時の出力パルス数 P_g をカウントしている最中に, 電動機に

Fig. 11 Outline of flow chart

Fig. 12 Block diagram for measurement of tangential grinding force

かかる電圧が変動したとすれば、式(12)および式(13)によって c_2 などの定数や P_m をその都度修正することが必要になる。これらの点を考慮して、接線研削抵抗計測システムの概略フローチャートとブロックダイアグラムを示すと図11および図12のようになる。このシステムは、マイクロコンピュータ TK 80 によって式(7)を計算させ、その計算結果である抵抗値をデジタル量で表示させるとともに、記録も同時に実行させようとするものである。

本システムでは最初に式(12)および式(13)の c_{20} , P_{m0} , α , β および E_0 を実験によって求め、それらの値と砥石直径 D とを TK 80 に入力しておくことが必要になる。ただし、定性的傾向だけで良ければ、 c_{20} を電動機の仕様によって定めることができ、また電圧変動による影響を無視できれば、式(12)と式(13)を省略してもよい。

次にプログラムがスタートすると、研削前か研削中かの判断が行われる。研削前であれば、その時の出力パル

Fig. 13 Example of tangential grinding force in this method of measurement and waves of acceleration on center of tail stock

Depth setting of plunge grinding; $4 \mu\text{m}/\text{rev}$ of work-piece, WA 60 J 6 V, S 45 C, HrC 45

ス数は P_m として入力され、続いて電圧値から式(13)に基づいて基準電圧における P_{m0} に修正される。それはパルスがカウントされるごとに行われるので、結果として研削を開始する直前の P_{m0} だけが TK 80 に格納されることになる。研削を開始すると今度は、出力パルス数は P_g として認識されるが、研削中かどうかの判断を確実にすることは困難であるので、砥石主軸台が 25 mm 前進しているかどうか、すなわち砥石主軸台に取り付けたリミットスイッチが押されているかどうかでその判断が行われている。そして P_g が入力されると、再度、電動機にかかる電圧が確認され、 c_{20} および P_{m0} はその電圧における値にそれぞれ修正され、接線研削抵抗を求めるための計算が実行される。計算結果は TK 80 の LED ディスプレイに表示されるとともに、インタフェースに転送されてプリンタとペン書きオシログラフとに記録される。なお本システムでは、パルスカウンタのゲート時間を 1 s にしているが、カウントは 2 s 間隔で行われるので、計算結果は 2 s ごとに表示され直すことになる。また定数 c_2 は発生パルス数に依存しないので、パルス分周器によって適当な発生パルス数を選択することができる。

6. 測定例

本システムによる接線研削抵抗の測定例を図13および図14に示す。図13は、S 45 C で硬度 HrC 45 の加工物を WA 60 J 6 V の目直してある砥石でプランジ研削した例であり、参考として心押台センタに取り付けた加速度ピックアップでの加速度波形ならびに砥石の回転周期を表す信号を合わせて載せてある。図13における

Fig. 14 Example of tangential grinding force in this method of measurement

Feed rate in traverse grinding: 6.2 mm/s, WA 46 K, S 45 C, H_{RC} 50, ϕ 0.04 taper/140

研削抵抗の変動は切れ刃の劣化過程を表し、次のような過程を経ていると推察される。すなわち研削時間が3 minを経過するまでは、切れ刃の摩耗とともに研削抵抗が増加する。そして研削抵抗が砥石の臨界圧力に達すると、砥粒の一部は脱落するが、新しい切れ刃も発生するため、研削抵抗が下がり始める。研削抵抗が下がったことにより、再び砥粒の脱落する確率が小さくなる。砥粒が脱落する際、結合度の低い部分が特に損耗するため、4 minを経過するあたりから砥石の回転周期に同期したうねりを含むびびりが起き始め、また切れ刃の劣化も進むために研削抵抗は再度上昇するようになる。8 min後に最大の研削抵抗に達するとびびりも激しくなり、その後再び砥粒が脱落するため、研削抵抗が低下する。以後、高いびびり音に伴う砥粒の脱落と切れ刃の劣化との確率が同じように進行するため、研削抵抗はほぼ一定値になる。

図 14 は、長さ 140 mm で ϕ 0.04 mm のテーパを持つ加工物を 1 行程のみトラバース研削した例であり、砥石切込み量が大きくなるに従い、研削抵抗が増加しているのがわかる。またそれに伴って、研削盤や加工物の弾性変形も増加していることなどが考えられ、研削抵抗の増加する割合が減少していることが認められる。

このように、切れ刃の劣化過程や加工物の寸法生成過程における研削抵抗の変動にも十分に追従しているの、1 s 間（ゲート時間）当たりの平均値ということには

なるが、本システムは接線研削抵抗の測定法として利用できるといえる。

7. 結 言

- (1) 誘導電動機の負荷・すべり特性を利用した接線研削抵抗測定システムを開発した。本システムにおいては、電動機にかかる電圧と電源周波数の変動に基づく測定誤差が自動的に修正される。
- (2) 本システムにおいて、発生パルス数が 200 pulse/rev のとき、1 パルス当たりの接線研削抵抗は 2.2 kW 2 極電動機で 0.202 N/pulse {20.6 gf/pulse} である。この場合、電動機にかかる電圧が変化したとすると、1 V の低下につき、その値は 0.897% 小さくなる。
- (3) 電動機の回転むらに起因する出力パルス数のばらつきを研削抵抗に換算すると、発生パルス数がある大きさ以上あれば、その値は発生パルス数と電動機の極数にあまり依存しない。
- (4) クリープフィード研削などのように、接触弧が長くなる場合にも、本システムが適用できる。
- (5) 誘導電動機の回転をより安定させることができれば、感度と精度を一層向上させることができる。

終わりに、本研究を進めるに当たり、御助言をいただいた職業訓練大学校の篠崎襄教授ならびに廣田平一助教授に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 牧野秀一：研削抵抗，精密機械，30，1（1964）72。
- 2) 例えば、海野邦昭，篠崎 襄：砥石作動面劣化過程の研削抵抗解析による考察，精密機械，42，4（1976）299。
- 3) 砥粒加工研究会：砥粒加工技術便覧，日刊工業新聞社（1965）958。
- 4) 児玉 隼，西村秀夫，狩野公男，新高昇二郎：適応制御技術の円筒研削盤への応用，トヨタ技報，12，2（1971）8。
- 5) 和井田 徹，須藤徹也，玉高利一高：研削動力測定法，機械技術研究所所報，35，4（1981）187。
- 6) 廣田平一，篠崎 襄：電動機負荷特性を利用した切削抵抗主分力の測定，精密機械，35，4（1981）187。
- 7) 福島弘毅，虫明康人：電気工学概論，朝倉書店（1969）107。