UDC 621.317.18.082.742 : 621.3.088.22 : 537.636

論文

57-A79

外部磁界の影響による内部磁石形計器の指示誤差

正員 根岸 照雄 (工学院大)

正員 徳納 秀明 (工学院大)

正員 古明地 静雄 (工学院大)

1. ま え が き

内部磁石形計器の基本的な構造は、ある一つの直径方向に磁極軸をもつ円柱磁石とその外周を同心回転する可動コイルとから成り立っている。この方式の計器は、磁氣的・経済的に種々の特長をもっているため、小形計器の分野で多く用いられている。現在では直線性、精度など特性の改善が課題となっている。著者らは、さきに直線性を改善するための新しい磁気機構を提案し、動作の近似解法について報告した⁽¹⁾⁽²⁾。また内部磁石形計器の特長の一つとして次の点を明らかにした。

駆動トルクは磁石の側面磁束以外に、従来検討されていなかった上底側および下底側〔以後、上(下)底側と略記〕の磁束によっても得られる⁽³⁾。

一般に、指示電気計器は種々の内的外的原因によって指示値に誤差を生ずる。このため、実用上 JIS では計器の種類や規格に応じて許容誤差を定めている⁽⁴⁾。内部磁石形計器においても精度の向上を図り、一般用計器として用いるためには、直線性改善の次の問題として、誤差の軽減が重要と考えられる。

本論文では、内部磁石形計器において、外部磁界の影響によって指示値に生ずる誤差を解析的・実験的に検討している。また、最大誤差の生ずる条件と誤差の軽減法について考察している。今までにこのような誤差を解析的に扱った報告は見あたらない。ここでは、外部磁界の影響による指示誤差の発生過程を明らかにし、効果的な磁気シールド法を見いだすため、供試計

器として外部磁界の影響を最も受けやすい方式、すなわち、磁気機構を磁石のみで構成した基本形の実用計器を用いている。解析においては、外部磁束と磁石磁束との合成を表わす磁束の近似式を求め、これより供試実用計器における指示誤差の式を導いている。実験においては、まず大きさ一定の外部磁界を磁極軸に対してある方向から加え、磁石磁束への影響を実測する。次に外部磁界の印加方向を二、三変え、それぞれの場合について同様な実験を行ない、磁石のみに対する外部磁界の影響を総括検討している。最後に、これらの結果をもとに供試実用計器の指示誤差を実測して近似式との比較検討を行なっている。

2. 基本構成と有効磁束密度

図1に本方式の構成概要を示す。半径 r 、高さ h の円柱磁石 M の磁極軸を $Y-Y'$ 軸に示す。可動コイル m_c の平均寸法は $2l_c \times h_c$ であり、磁石面とそれぞれ δ_i 、 δ_h の間隔を保って配置され、回転軸を磁石の中心 $Z-Z'$ 軸にもつ構造である。また、回転角 θ を図示の方向に定め、コイルの可動範囲を $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_F$ としている。すなわち、 θ_0 は目盛の零位を、 θ_F はその最大目盛値を示す。

図1 内部磁石形計器の基本構成

Fig. 1. Sketch illustrating basic configuration of core magnet type moving coil meter.

Indicating Error of Core Magnet Type Moving Coil Meter by Effect of External Magnetic Field. By Teruo Negishi, Member, Hideaki Tokunou, Member & Shizuo Komeji, Member (Department of Electrical Engineering, Kogakuin University).

根岸照雄：正員，工学院大学電気工学科
徳納秀明：正員，工学院大学電気工学科
古明地静雄：正員，工学院大学電気工学科

駆動トルクは可動コイル m_c と鎖交する磁束の直角成分から得られ、理論上 m_c のすべての位置で発生する。ここで、直角成分は、上(下)底側では磁石面と垂直な成分を、側面では法線方向成分を表わすものとする。以後、これらを有効磁束密度と呼び、実用解析法の基礎的手段として用いる。なお、有効磁束密度の分布特性、測定法などの基礎的事項や基本動作の解析法については既に報告した⁽⁵⁾。

3. 合成有効磁束密度とトルク

〈3・1〉 上(下)底側 図2(a)において、一様な外部空間磁界 H_x (磁束密度 B_x) 内に磁石 M を置くと H_x は収束する。このことより、可動コイル位置における H_x の磁束密度を B_0 、収束による効果を係数 η で表わせば、 $B_0 = \eta B_x$ となる。 B_0 と Z 軸とのなす角を φ_z とすれば、上(下)底側における磁石磁束と B_0 との合成有効磁束密度 B_{IE} は近似的に次式で表わされる。ただし、負符号の場合は上底側を、正符号は下底側の特性を示す。

$$B_{IE} = k_l l^2 \sqrt{l_0^2 - l^2} \sin \theta \mp B_0 \cos \varphi_z \dots (1)$$

ここで、右辺第1項は磁石の有効磁束密度 B_l を示す。 B_l はその実測特性から実験的校正を経て、近似の度合いと計算の簡単化とを検討して定めた。 l ($0 \leq l \leq l_c$) は回転軸 Z (Z') から測ったコイル上の位置を示す。また、 k_l, l_0 は B_l の実測特性における極値の座

標 (l_m, B_{lm}) から求まる定数で次式となる⁽⁵⁾ [図4(b)参照]。

$$k_l = \sqrt{2} B_{lm} / l_m^3$$

$$l_0 = \sqrt{3/2} l_m$$

図1で巻数 n のコイルに直流電流 i を矢印方向に流すとき、上(下)底側のコイルに働く全駆動トルク τ_l は次式で表わされる。この場合、 B_0 の影響は上、下底で互いに相殺される。

$$\begin{aligned} \tau_l &= 4 k_l n i \sin \theta \int_0^{l_c} l^3 \sqrt{l_0^2 - l^2} dl \\ &= G_l B_{lm} i \sin \theta \dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 G_l は与えられた条件から求められる定数で、次式によって表わされる。

$$\begin{aligned} G_l &= \frac{4 \sqrt{2} n}{15 l_m^3} \{ \sqrt{l_0^2 - l_c^2} \\ &\quad \times (3 l_c^4 - l_0^2 l_c^2 - 2 l_0^4) + 2 l_0^5 \} \end{aligned}$$

〈3・2〉 側面 図2(b)の側面において、任意の角 θ における磁石磁束と B_0 との合成有効磁束密度 B_{hE} は、(1)式の場合と同様な条件から次式で表わされる。

$$\begin{aligned} B_{hE} &= B_{hm} \sin \theta - B_0 \sin \varphi_z \cos (\theta - \varphi_x) \\ &\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、右辺第1項は磁石の有効磁束密度 B_h の特性を示す⁽⁵⁾。(3)式より、両側面コイルの駆動トルク τ_h は次式で表わされる。この場合、 B_0 の影響は $\varphi_z = 0^\circ, 180^\circ$ において零、一方、 $\varphi_z = 90^\circ$ の場合、 $\theta - \varphi_z = 0^\circ, 180^\circ$ の条件において最大となる。

$$\begin{aligned} \tau_h &= G_h \{ B_{hm} - B_0 \sin \varphi_z \operatorname{cosec} \theta \\ &\quad \times \cos (\theta - \varphi_x) \} i \sin \theta \dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 G_h は与えられた条件から求められる定数で、次式によって表わされる。

$$G_h = 2 n l_c h c$$

4. 電流対振れ角特性と指示誤差

図1に示す実用計器において、 $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_F$ の可動範囲で全コイルに働く駆動トルクは(2)式と(4)式の和で表わされる。制御装置の制御トルク係数を τ_c とすれば、平衡時における電流 i に対する振れ角 θ の特性は次式となる。

$$\begin{aligned} i &= \frac{\tau_c (\theta - \theta_0)}{G_l B_{lm} + G_h \{ B_{hm} - B_0 \sin \varphi_z \} } * \\ &\quad * \frac{\operatorname{cosec} \theta}{\operatorname{cosec} \theta \cos (\theta - \varphi_x)} \dots (5) \end{aligned}$$

上式において、 i が一定のとき外部磁界の B_0 による振れ角 θ の変化 $d\theta$ は次式となる。

図2 磁石上の外部磁界

Fig. 2. External magnetic field impressed on magnet.

図3 外部磁界の影響の測定装置

Fig. 3. Schematic diagram of equipment measuring the effect of external magnetic field.

$$\begin{aligned}
 d\theta &= \frac{\partial \theta}{\partial B_0} dB_0 \\
 &= \frac{d}{B_0 \{ \cot \theta + \tan(\theta - \varphi_x) \}} * \\
 &\quad * \frac{B_0}{\tau_c \{ (\theta - \theta_0) \cot \theta - 1 \} + i G_h \sin \varphi_x \cos(\theta - \varphi_x)} \dots \dots (6)
 \end{aligned}$$

上式より、振れ角 θ における誤差率は次式で表わされる。

$$d\theta/\theta \dots \dots \dots (7)$$

また、指針長を L と $id\theta$ による目盛上の指針のずれを指示誤差 ε_L とすれば、この値は次式となる。

$$\varepsilon_L = L d\theta \dots \dots \dots (8)$$

5. 実験装置と実験方法

〈5.1〉 装置 図3に外部磁界の発生装置の概要を示す。平均半径 R 、巻数 m のヘルムホルツコイルを用いる。これに直流電流 I_0 を流せば、中心軸 $Z-Z'$ 上の p 点において軸方向へ $H_x = 0.716 m I_0 / R$ の一様磁界が得られる⁽⁶⁾。

〈5.2〉 測定条件 $R=30.5\text{cm}$ 、 $m=103$ のヘルムホルツコイルに $I_0=10\text{A}$ を流して $H_x=2,400\text{A/m}$ ($B_x=30.4 \times 10^{-4}\text{T}$) の外部磁界を供給する。この値は JIS 規格の6倍に相当するが、磁石磁束に対する影響を精度良く測定するために定めた値である。磁石としては、保磁力の大きいものが望ましいが、ここでは入手が容易であった直径 $2r=14\text{mm}$ 、高さ $h=8\text{mm}$ のアルニコ5を用いた。ギャップ $\delta_i=0.8\text{mm}$ 、 $\delta_h=0.65\text{mm}$ に設定したとき、図4(b)に示す有効磁束密度の実測特性から、 $l_m=6.44\text{mm}$ 、 $B_{lm}=930 \times 10^{-4}\text{T}$ を、また図6の特性から $B_{hm}=915 \times 10^{-4}\text{T}$ を得た。可動コイルの平均寸法を $2l_c=15.3\text{mm}$ 、 $h_c=9.6\text{mm}$

とし、巻数 $n=63$ 、 $\theta_0=45^\circ$ 、 $\theta_F=135^\circ$ とする。制御トルク係数は、実測の結果 $\tau_c=1.38 \times 10^{-6}\text{N}\cdot\text{m/rad}$ となった。

〈5.3〉 方法 実験においては、まず図1(b)のホール素子 H_i 、 H_h (0.3mm 角, InAs) の移動により、磁石 M の有効磁束密度特性 $B_{i-\theta}$ 、 B_{i-l} 、 $B_{h-\theta}$ を実測する⁽⁵⁾。次に、図3の p 点に磁石 M を固定する。この点を中心として XYZ 軸に対しヘルムホルツコイルの中心軸を任意な方向に設定し、電流 I_0 を流せば図2の φ_x 、 φ_y および B_0 が定まる。これより磁石 M についての合成有効磁束密度 B_{iE} 、 B_{hE} の特性が実測できる。また、図1に示す実用計器を磁石の場合と同様な条件で設定すれば、指示値の誤差率 $d\theta/\theta$ および目盛上の指示誤差 ε_L の実測が可能となる。 ε_L の測定には 0.05mm/div 、倍率25の拡大鏡を用いた。

以上を要約すると、まず磁石 M のみの場合について外部磁界の印加方向による影響を検討総括する。次に、これらの結果をもとに、実用計器の指示誤差特性を最大誤差の生ずる場合を中心に検討する。

6. 実験結果と考察

〈6.1〉 磁石のみの場合

(1) $\varphi_x=0^\circ(180^\circ)$ の特性

(i) 上(下)底側 図4(a)は上底側の $l_m=6.44\text{mm}$ における有効磁束密度 B_{li} と合成有効磁束密度 B_{iE} の回転角 θ に対する特性を示す。また、(b)図は磁極軸上 ($\theta=90^\circ$) におけるコイル位置 l に対する特性である。 $\varphi_x=0^\circ$ の場合、 B_0 の影響は θ の全領域においてはほぼ一様となり、 N 極側では減少、 S 極側では増加の特性となる。一方、 $\varphi_x=180^\circ$ では $\varphi_x=0^\circ$ の場合と対称で逆の増減特性を示す。図4(a)に B_0 の増減実測値を絶対値 $|B_{0i}|=42 \times 10^{-4}\text{T}$ で示す。この値は供給源における値 B_x の約1.4倍となっているが、その理由は〈3.1〉節で述べた磁束の収束効果によるものである。

一方、下底側における B_0 の特性は、上底側の特性と対称となり逆の増減特性を示す。

(ii) 側面 図5は磁極軸断面における磁石磁束 B と B_0 との関係を定性的に示す。外部磁界 H_x を $\varphi_x=0^\circ$ の方向から加えても、収束の効果により B_0 は側面と平行とはならず水平成分 B_{0h} が現われる。このため、磁石の側面有効磁束密度 B_h は上底寄りの N 極側で減少、 S 極側で増加の特性となる。また、下底寄りでは上述の場合と逆の増減特性を示す。 $h/2$ 位置より 3.2mm 上底寄りおよび下底寄りの側面にお

図4 (a) $B_l, B_{lE}-\theta$ 特性, (b) $B_l, B_{lE}-l$ 特性
Fig. 4. Effective flux density distribution on the top of magnet.

図5 磁石磁束と外部磁界との関係
Fig. 5. Relationship between magnet flux and external magnetic field.

る B_0 の増減実測値は $|B_{0h}| = 13 \times 10^{-4}\text{T}$ となる。また, $\varphi_z = 180^\circ$ の場合は $\varphi_z = 0^\circ$ の特性と逆の増減特性となる。

以上, (1)項の場合を要約すると, 外部磁界の影響はコイル全周においては互いに相殺され有効束密度は変化しない。このことは, (6)式において $dB_0 = 0$ が表わす。従って, 後述するように供試実用計器では理

図6 磁石の側面における $B_h, B_{hE}-\theta$ 特性
Fig. 6. Characteristics of B_h, B_{hE} versus θ on the side of magnet.

図7 収束効果による外部磁界の増加特性
Fig. 7. Increasing property of external magnetic flux by the effect of convergence.

論上指示値に誤差は生じないことを示している。

(2) $\varphi_z = 90^\circ$, $\varphi_z = 90^\circ (270^\circ)$ の特性 磁石側面の高さ $h/2$ における有効束密度 B_{hE} の θ に対する特性を図6に示す。 B_0 の影響は θ の全領域において $\varphi_z = 90^\circ$ のとき減少, $\varphi_z = 270^\circ$ で増加の特性となる。特に, B_0 が磁石磁束と平行となる $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ において影響は最大となり, その増減の実測値は, $|B_{0h}| = 50 \times 10^{-4}\text{T}$ となった。この値は供給源における B_z の約 1.6 倍を示すが, 前項で述べた収束効果によるものである。図7は側面 $h/2$ において, 収束効果の φ_z に対する実測例を示す。この特性は(3)式の右辺第2項とはほぼ一致し, η は約 1.6 となる。

一方, 上(下)底側における合成有効束密度 B_{lE} の θ に対する特性を図8に示す。 $l_m = 6.44\text{mm}$ において実測最大値は $|B_{0l}| = 17 \times 10^{-4}\text{T}$ となり, 側面の場

図 8 磁石の上底における B_l, B_{lE} - θ 特性
Fig. 8. Characteristics of B_l, B_{lE} versus θ on the top of magnet.

図 10 磁石の上底における B_l, B_{lE} - θ 特性
Fig. 10. Characteristics of B_l, B_{lE} versus θ on the top of magnet.

図 9 磁石の側面における B_h, B_{hE} - θ 特性
Fig. 9. Characteristics of B_h, B_{hE} versus θ on the side of magnet.

図 11 磁石の側面における B_h, B_{hE} - θ 特性
Fig. 11. Characteristics of B_h, B_{hE} versus θ on the side of magnet.

合の特性と類似の分布特性を示す。(6)式ではこの場合の B_{0l} の影響を考慮していないため、後述する供試実用計器の指示特性において実測値と計算値との誤差原因の一つとなる。

(3) $\varphi_x = 90^\circ, \varphi_x = 0^\circ (180^\circ)$ の特性 磁石側面の $h/2$ における B_h と B_{hE} の θ に対する特性を図 9 に示す。 B_0 の影響は、 $\varphi_x = 0^\circ$ のとき θ に関する第 1, 第 3 象限で減少, 第 2, 第 4 象限で増加の特性となる。また、 $\varphi_x = 180^\circ$ では上述の場合と逆対称の増減特性となる。特に、増減の値は $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ において零、 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ で最大となる。最大実測値は収束効果により $|B_{0h}| = 50 \times 10^{-4} \text{ T}$ となる。

一方、上(下)底側における合成有効磁束密度 B_{lE} の θ に対する特性を図 10 に示す。側面の場合の特性と類似の分布特性となる。

以上、(2)項、(3)項の条件の場合を要約する。実用計器の見地から、 $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ の振れ角範囲におい

て B_0 の影響が最大となる点は(2)項の場合に生ずる。なお、ここでの最大値は(3)式からも明らかにように、 B_0 の他のどのような印加条件の場合の値よりも大きい。比較のため、総合的な特性の一例として、 $\varphi_x = \varphi_x = 45^\circ (\varphi_x = 135^\circ, \varphi_x = 225^\circ)$ の場合、側面の N 極側 $h/2$ における実測値を図 11 に示す。

以上、磁石のみの場合における外部磁界の影響を総括すると、 B_0 を磁極軸方向から加える場合が最も重要となる。

〈6・2〉 実用計器の場合 図 1 に示す実用計器において、指針長 $L = 64.5 \text{ mm}$ 、最大目盛値 90° のトートバンド方式を用い、振れ角 $\theta - 45^\circ = \Theta$ とおく。

磁石の上(下)底面と垂直な方向から外部磁界を加える場合、前節(1)項で述べたように理論的には指示誤差 ε_L は零となるが、実測の結果、全振れ角範囲において極めてわずかな誤差が認められた。 $\theta = 30^\circ$ で最大 $\varepsilon_L = 0.04 \text{ mm}$ となったが無視できる値である。こ

図 12 実用計器の指示誤差特性 $\varepsilon_L-\theta$ の計算値と実測値との比較

Fig. 12. Comparison between calculated and measured values for $\varepsilon_L-\theta$ of practical meter.

表 1 電流と指示誤差に対する計算値と実測値との比較

Table 1. Comparison between calculated and measured values for current and indicating error.

$\varphi_x = \varphi_z = 90^\circ$ ($B_{0h} = 50 \times 10^{-4} \text{ T}$)				
θ (度)	i (mA)		ε_L (mm)	
	実測値	計算値	実測値	計算値
0	0	0	0	0
20	0.450	0.414	-1.24	-0.97
40	0.789	0.753	-2.12	-1.72
50	0.981	0.941	-2.23	-1.88
55	1.097	1.047	-2.24	-1.91
60	1.223	1.164	-2.21	-1.89
70	1.536	1.448	-2.18	-1.81
90	2.560	2.386	-1.82	-1.42

の原因は、主に組立て時に生じた構造上の微細な非対称性によるものと考えられる。結論として、磁石のみの場合の検討結果とほぼ一致している。

次に、外部磁界の影響が磁石に対して最も大きい前節(2)項の場合の指示誤差 ε_L を検討する。振れ角 θ に対する ε_L の計算結果と実測結果を図 12 に示す。 $\varphi_x = 90^\circ$ において負誤差、 270° で正誤差となる。負誤差の場合の数値特性例を表 1 に示す。

図 13 実用計器の $\theta = 55^\circ$ における指示誤差特性 $\varepsilon_L-\varphi_x$

Fig. 13. Characteristics of ε_L versus φ_x at $\theta = 55^\circ$ of practical meter.

図 14 指示誤差の実測例

Fig. 14. Examples of measured values for indicating error.

以上の特性から、 $\theta = 55^\circ$ において ε_L は最大となり、 $B_{0h} = 50 \times 10^{-4} \text{ T}$ では、実測値 $\varepsilon_L = \pm 2.24 \text{ mm}$ 、 $|\Delta\theta/55^\circ| = 3.62\%$ となる。ここで、最大誤差を生ずる振れ角の実測値 55° は(6)式からの計算結果と一致している。また、 ε_L の計算値と実測値とは比較的良好一致を示すが、両特性間の誤差の主な原因は、電流 i の計算値と実測値とのわずかな違い、側面特性の理論式に上(下)底側の B_{0i} が含まれていないこと、制御トルク係数 τ_c の実測誤差などが考えられる。

図 13 は $\varphi_x = 90^\circ$ 、 $\theta = 55^\circ$ において、外部磁界の印加方向 φ_x に対する ε_L の実測結果を示す。これより ε_L は φ_x の正弦関数となり、磁石のみの場合の特性(図 7)と相似になる。また、図 13 において外部磁界

の大きさをパラメータとした場合、それぞれの外部磁界に対する ε_L 特性はパラメータとした値にほぼ比例して変化している。これより、JIS 規格において生ずる最大誤差は換算の結果約 0.36% となる。

図 14 に外部磁界の印加条件を異にする ε_L - θ の実測例を示す。いずれの場合においても、指示誤差 ε_L の最大値は図 12 の場合の最大誤差よりも小さい。更に、 ε_L - θ 特性が極値または零点をもつ場合は、それぞれの θ 座標の実測値は計算値と良い一致を示している。

以上を要約すると次の事柄が明らかとなる。指示誤差は外部磁界の磁石側面における法線方向成分のみによって生じ、上(下)底面と垂直な方向成分による誤差は互いに相殺される。これより、精度向上の見地から側面についてのみ磁気シールドを行えばよい。

7. む す び

内部磁石形計器において、精度向上の観点から外部磁界の影響によって指示値に生ずる誤差を解析的・実験的に検討した。供試計器として、磁気機構を磁石のみで構成した基本方式の実用計器を用いた。解析においては、外部磁界と磁石磁束との合成を表わす近似式を求め、これより実用計器の指示誤差の式を導いた。実験においては、大きさ一定の外部磁界を磁極軸に対してある方向から加え、磁石磁束への影響を実測した。次に、印加方向を変えて同様な実験を行ない磁石磁束の変化を検討総括した。最後に、以上の結果をもとに最大誤差が生ずる場合を中心として実用計器の指示誤差を実測し、近似式との比較検討を行なった。こ

こに、得られた主な特長を要約すると次のようになる。

外部磁界を任意の方向から加えた場合、計器磁石の上(下)底面と垂直な方向成分による誤差は相殺され、指針の指示値に対する影響は無視できる。

一方、側面成分が磁極軸と平行で法線方向から加わるとき、その影響は最も大きく N 極から S 極への向きで負誤差、逆向きで正誤差となる。側面成分として、 $50 \times 10^{-4} \text{T}$ を測定範囲 90° 、指針長 64.5 mm の実用計器に加えたとき、振れ角 55° において誤差率は最大となり、実測値で $\pm 3.62\%$ を得た。これより磁気シールドは側面のみについて行なえばよい。

なお、課題として収束効果を表わす係数が上(下)底側と側面とで相違している点が挙げられる。その主な理由は、磁石コイル間の間隔きが上(下)底側と側面とで異なっていたためと考えられる。このことは実験的に確かめられているが、今後の検討課題としたい。

終りに、日ごろ指導をいただく本学電子工学科 西野治教授に深謝いたします。

(昭和 56 年 11 月 25 日受付, 同 57 年 7 月 26 日再受付)

文 献

- (1) 根岸: 「内部磁石形計器の直線性を改善するための磁気機構」, 電学論 A, **100**, 57 (昭 55-2)
- (2) 根岸・徳納・古明地: 「平等目盛をもつ内部磁石形計器の方式」, 昭 52 電子通信学会大会 No. 2033
- (3) K. Schüller & K. Brinkmann: Dauermagnete (Werkstoffe und Anwendungen), p. 364 (1970) Springer
- (4) 日本規格協会: 指示電気計器 JIS C-1102-1981 (昭 56-3)
- (5) 根岸・徳納・古明地: 「内部磁石形計器の基礎的動作の一計算法」, 計測自動制御学会論文集, **16**, 137 (昭 55-2)
- (6) 近角: 磁気(実験物理学講座 17), p. 39 (昭 52)