

磁場の精密測定(1)

竹 本 将

1 緒 言

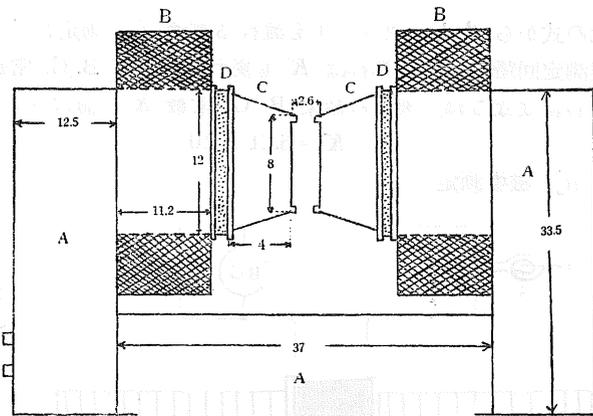
筆者は最近核磁気及び強磁性共鳴吸収の研究に使用するための電磁石を製作した。勿論周到な設計と十分な費用の下に作られたのでわなく、手軽に入る材料を用い、之に出来るだけ必要な加工を施した程度の飽くまで現実的なものである。然し後に述べる通り最初予想したよりも優秀な性能を有することが分つたので茲に報告する次第である。磁場の測定に関しては従来余り精密な方法が無かつたのであるが、1946年 F. Bloch 並びに E. M. Purcell (共に1952年度ノーベル物理学賞受賞者) 等に依て始められた核スピン反転による液体や固体のラジオ電波吸収、所謂原子核磁気共鳴吸収の方法に依つて非常に精密に測定することが可能になつた。これは全く新しい劃期的な発見である。この結果原子核の諸性質のみならず物性論の諸分野に於て驚くべき程重要な成果が挙げられて来た。

筆者は水やパラフィンによる陽子共鳴吸収を利用して上記電磁石の磁場を測定し従来の方法によるものと比較した。

2 製作した電磁石

電磁石の外観及び寸法(単位, cm)は第1図に示す如くである。

A は励磁用コイルで 20amp. 程度の電流に於ても使用出来るように直径 3mm の二重綿巻銅線を各 700 回巻いた。電池は 2 volt, 150 AH ものを 20 個使用している。B の断面積は 12cm × 12cm, 材料は市販の軟鉄角材である。C は磁極, 材料は B と同じで直径 12cm, 之をしぼつて磁極の端面で直径 8.4 cm となつている。最初の設計では磁極間隙 3cm, 磁場を一様にするために Rose の設計に従つて巾 2mm, 深さ 2mm の突起部をつけた所, 磁束が周辺に集まり過ぎて中央部が予想外に弱かつたので, 之を磁極間隙 2.6cm, 突起部の巾 2mm, 深さ 0.5mm に改めた。この原因はしぼりが可成り急であることによるものと考えられる。D は磁場変調用コイルである。

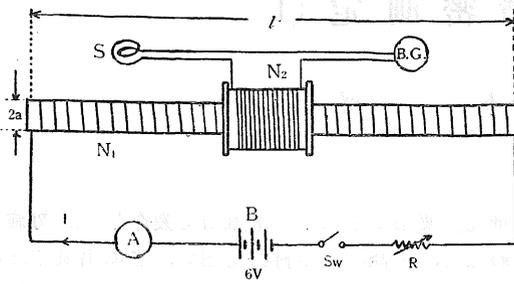


第1図 電 磁 石

3 弾動検流計による磁場測定

次に磁場の測定法として従来一般的に用いられて来た Induction method の中我々が実際製作し、実験した Ballistic galvanometer (B. G.) と Search coil による方法について述べる。B. G. は Hartmann & Braun 製のものを使用した。

[i] 弾動常数 K の決定



第2図 パリステック常数 K の測定

は次の様である。

- N_1 : 一次コイルの総巻数=700
- N_2 : 二次コイルの総巻数=1520
- S : 一次コイルの断面積
- l : 一次コイルの全点=90.5cm,
- a : 一次コイルの半径=1.32cm,

一次コイルの I なる電流の変化に対して二次コイルに発生する電気量 Q (Coulomb) は

$$Q = \frac{4\pi N_1 N_2 S I}{10^9 R l \sqrt{1 + 4 \frac{a^2}{l^2}}} \approx \frac{4\pi N_1 N_2 S I}{10^9 R l} \left(1 - \frac{2a^2}{l^2}\right)$$

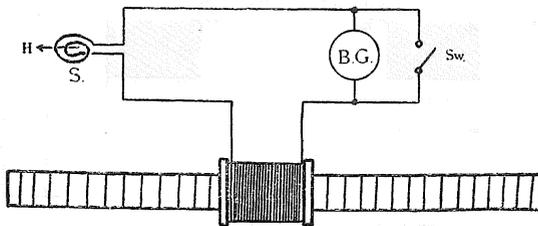
但し, R : 二次回路の全抵抗=26.4 Ω 。Kick の目盛を θ とすれば $Q = K\theta$ であるから

$$K = \frac{4\pi N_1 N_2 S I}{10^9 R l \theta} \left(1 - \frac{2a^2}{l^2}\right)$$

此の式から θ と一次コイルを流れる電流 I を測定して K を決定することが出来る。この際測定回路の抵抗が異れば K も変わるから, B. G. 常数の測定は実際の磁場測定の状態で行わねばならぬ。実測の結果 B. G. 常数 K の値は次の様になった。

$$K = 6.21 \times 10^{-6}$$

[ii] 磁場測定



第3図 磁場の測定

時回路に流れる電気量を ΔQ とすると

$$\Delta Q = nA \Delta B / R$$

但し, 単位は Q : Coulomb, R : ohm, B : gauss である。

又 $\Delta Q = K\theta$ であるから磁場の強さ H は

$$H = \frac{RK}{nA} \theta \times 10^8 \quad (\text{Oersteds})$$

となり θ を測定して磁場を決定することが出来る。

標準ソレノイド(第2図)の一次側の電流を増減し二次側に発生する電気量を検流計を通して放電し, その Ballistic Kick θ より常数 K を定める。一次コイルは絶縁の良い細長い円筒上に巻き, その中央に同軸にして短い二次コイルを密に巻いてあるから二次コイル中の磁場は一樣である。実際実験に使用した標準ソレノイドの各要素の数値

Search coil は切口面積が正確に分つている絶縁棒に細い絶縁導線を数回から百回位巻いたものである。Search coil を B. G. に series につなぎ, その巻数を n , effective area を A , coil 面を直角に貫く磁束密度を B , 回路の全抵抗を R とする。磁束密度が ΔB だけ変化した

effective area とは、実際に磁束を取囲む面積を意味する。それ故に一層巻きのコイルの effective area は(ボビンの半径)+(導線の半径)+(導線の絶縁層の厚さ)だけの半径の円の面積に等しい。勿論コイルを貫く磁束密度は一定としての話である。

数層のコイルの effective area は之を標準ソレノイド中におきコイルとソレノイドとの間の相互インダクタンスを測定することに依つて実験的に精密に測定することが出来る。

電磁石の磁極間隙の磁場 H を測定する場合には Search coil の面を磁場に垂直に置き、間隙の位置から磁場が無視出来る程小さい所まで急に引出すか(この時 $\Delta B=H$)、或は間隙の磁場内で 180° 回転して(この時 $\Delta B=2H$) B. G. の振れの目盛を読む。筆者は前者を採用した。Search coil の移動は B. G. の固有振動の周期(普通20秒以上)に比べて小さい時間内に行わねばならない。この際余り早く動かし過ぎて B. G. 中の永久磁石の磁化に変化を与えないように注意しなければならない。そのためには移動の早さを次第に早くして一定の指度が得られるまで何回もやつて見る必要がある。

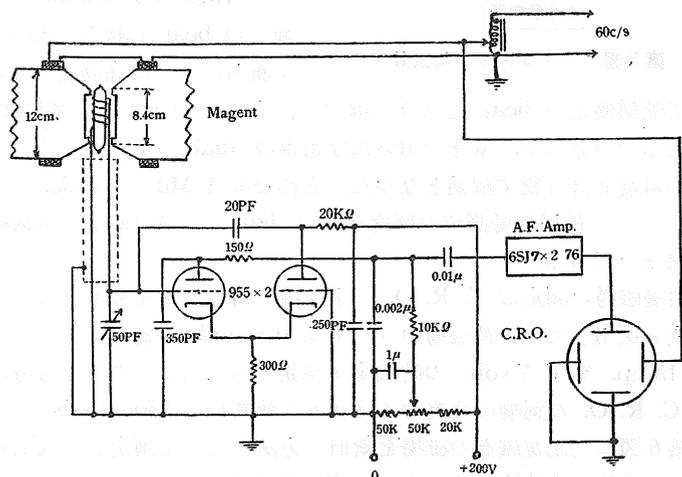
この方法の精度は主として標準コイルの相互インダクタンス(精密なものでは $\frac{1}{10000}$ の精度を有す)及び Search coil の effective area の精度に左右される。多くの場合磁場が一定であるのは小範囲に過ぎないから、この様な磁場の測定に於ては Search coil の effective area を正確に決めることは一寸困難である。然し筆者の製作した電磁石では可成り広い範囲(直径 3 cm 位)で磁場が大体均一であることが陽子共鳴吸収曲線の中の変化から分つた。測定回路の抵抗は cd 標準電池と P. O. Box を用いた Wheatstone bridge 法に依つて決めたからこの誤差は他のものに比べて無視してよい。

B. G. と Search coil を用いて実測した磁場の測定値と核磁気共鳴吸収による値との比較は第 6 図に示した如く、磁場の小さい所ではよく一致し、2000 oersteds より大きくなると数十 oersteds のずれが見られる。

4 陽子共鳴吸収による磁場の測定

これには Purcell の磁気共鳴吸収によるものと Bloch の磁気誘導法によるものがあるが筆者は前者を用いて磁場の精密測定を行つた。

電子全体の角運動量が 0 である様な原子を均一磁場中に置くと原子のエネルギーは $2\mu H$ (μ は陽子の磁気能率)だけ変化し、この転移に対して $h\nu_L=2\mu H$ を満足する周波数の電波が対応する。この ν_L は所謂 Larmor frequency である。従つて静磁場を変へて行くと Larmor frequency もそれにつれて変化し、之と H に直角に加えられた高周波磁場の周波数が一致



第 4 図 高周波分光器

した所では試料を入れた共振回路の Q が減少し、共振の強さに変化が起り磁気共鳴吸収が現われる。従つて此の変化を C. R. O. 上に現はす様にすればよい。この時水平軸に磁場変調用の交流を入れておくと水平軸は磁場を表わすことになり、此の変調磁場内に磁気共鳴点があれば C. R. O. 上に吸収曲線が現われる。Larmor frequency は核に対するもので 1~100Mc となるので大体通信用の短波の領域に在るから電波に関する技術を最高度に利用すれば良い訳である。

測定回路は第 4 図に示す如き Cathode-Coupled 方式を採用した。これに依ると 100 Mc まで楽に発振させることが出来る。

本回路は動作の安定な負抵抗回路であつて、試料の部分で吸収を受けると等価的に回路の正抵抗が増加し、発振強度が著しく減少し、第一球のプレート電流が激減する。20 pF の結合用コンデンサーに依つて Feed back の量を加減し感度の調節をなす。

前式より陽子の Gyromagnetic ratio γ は

$$\gamma = \frac{\mu}{I\hbar} = \frac{2\pi\nu_L}{H} \quad \left(I = \frac{1}{2} \right).$$

となる。これは精密に測定されていて次の値をとる。

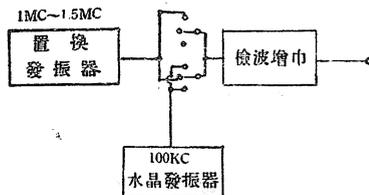
$$\gamma = (2.6751 \pm 0.00009) \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1} \cdot \text{oersted}^{-1}.$$

この値を上式に代入すると

$$H(\text{oersteds}) = (234.86 \pm 0.005)f(\text{Mc})$$

となり、有名な磁場と周波数との関係を与える。これに依つて共鳴の起る周波数を精密に知ることによつて磁場 H を極めて正確に知ることが出来る。試料は蒸留水に少量の硝酸鉄を混じたものを内径 7 mm, 外径 1 cm, 長さ 5 cm のガラス管に封じたものを三個使用した。

高周波分光器の周波数校正に対して筆者は次の如き方法を採用した。



第 5 図 ヘテロダイン周波計

先づ通信用全波受信機で 4Mc 或は 8Mc の標準電波 (10^{-8} の桁まで校正されている)を受け、之と第 5 図のヘテロダイン周波計の 1Mc の高調波との beat を取り 100 kc の水晶発振器を校正する。校正されたこの 1Mc 及び 100 kc と全波受信機の局部発振周波数との beat を取る。次にヘテロダイン周波計の出力を断ち、代りに高周波分光器の出力を入れ dial を廻して受信機との beat を次々に取つて行く。この様にして周波数を精度 5×10^{-5} まで確定出来るのであるが、筆者の用いた分光器の dial が 1 目盛の $\frac{1}{10}$ しか正確に読めないので折角の高精度を自ら殺す結果となつた。それでも 1 Mc の order で有効数字 3 桁までは信用してよい。結局磁場測定の精度はこの dial の目盛の精度及び試料内の磁場の均一度に依つて決まつて来る。

共鳴磁場の測定は C. R. O. の水平軸の両端で吸収曲線が消える周波数に対する磁場の平均値を採用した。変調磁場のコイルは $0.5\text{mm}\phi$ の絹巻エナメル銅線を各 100 回宛巻き、電流 1 amp, 電圧 7 volt の時測定が容易であつた。この時の磁場の振巾は吸収曲線の極大点が C. R. O. の両端に位置する目盛から計算して 25oersteds であつた。

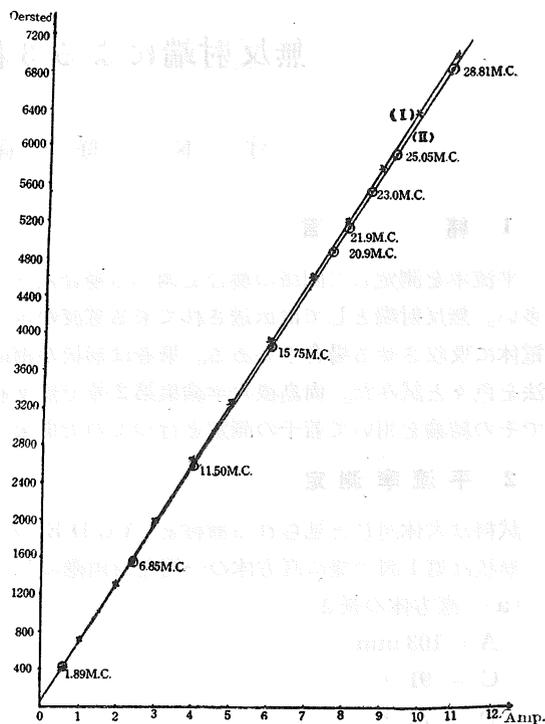
共鳴磁場の測定は C. R. O. の水平軸の両端で吸収曲線が消える周波数に対する磁場の平均値を採用した。変調磁場のコイルは $0.5\text{mm}\phi$ の絹巻エナメル銅線を各 100 回宛巻き、電流 1 amp, 電圧 7 volt の時測定が容易であつた。この時の磁場の振巾は吸収曲線の極大点が C. R. O. の両端に位置する目盛から計算して 25oersteds であつた。

第 6 図に上記電磁石の磁場を新旧二方法によつて測定した較正曲線を示して置いた。曲線 (I) が弾動検流計法によるもの、(II) は陽子共鳴吸収による曲線である。図から分る通り、2000oersteds までは殆ど一致し、それより大きな磁場に対しては少しづつづれている (5

amp. の所で 50 oersteds)。二曲線は略同じ間隔で平行にずれるものと予想していたのであるが図の様な結果が得られた。又最初 6000 oersteds 附近で飽和するのではないかと予想したが両曲線共殆んど直線である。これは磁極の断面積が比較的大きいこと、その端面の傾斜が適当であつた結果と考えられる。

5 結 言

市販の入手し易い材料を使つて電磁石を試作し、その磁場を精密測定するために陰極結合式高周波分光器を作つてその性能の一部を調べた。磁場の均一性を得るための磁極の材料、形状、平坦性、等未だ問題は今後に残されている。核磁気共鳴吸収法は可成り広い範囲に亘つて磁場が均一であることを要するから、普通の磁場の測定には必ずしも適当とは云えないが、此の方法に依つて磁束計を校正



第6図 磁場校正曲線

して置けば非常に正確な測定が可能となる。10000 oersteds 前後で使う電磁石の本格的な設計並びに其の性能に関しては東大熊谷寛夫教授の論文(文献2)を是非参照されたい。最後に此の実験を熱心に手伝つて頂いた物理専攻学生、杉谷悟、佐藤敏雄、篠田茂の三君並びに周波数校正に協力して頂いた国警松江通信部の足立雄一氏に衷心感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 日本物理学会：物理学論文選集 29。(1951)。
- (2) 熊谷、庄野：東大理工研報告, 6, 2, (1952)。
- (3) 小島, 小川, 島塚：光の科学, 1, 2, (1951)
- (4) Bates: Modern Magnetism (Cambridge, 1951)。
- (5) 四手井, 矢野, 東村：日本物理学会誌, 5, 5, (1950)。
- (6) 伊藤：現代自然科学講座 (11)。

(1953, 1月10日受理)。