標準磁界用ソレノイドの自動寸法測定装置

正員 佐々木 仁 (電総研)
 非会員 葛西 直子 (電総研)
 正員 中村 久夫 (電総研)

1. ま え が き

基礎物理定数の一つである $\gamma_p(\text{low})$ —低磁界法による陽子の磁気回転比の精密測定—は現行電流単位の世界単位系 (SI) への変換係数を決定するために重要であり現在各国の国立研究所において研究が行われている⁽¹⁾。 $\gamma_p(\text{low})$ の測定においては標準磁界の発生に精密なソレノイドを用い、磁界をソレノイドの寸法から計算によって求める。このため、電子技術総合研究所では直径約 250 mm、有効巻線長約 750 mm の精密ソレノイドを試作した⁽²⁾。 $\gamma_p(\text{low})$ の値を 1 ppm 以下の精度で決定するためには、このソレノイドのピッチおよび直径をそれぞれ 0.1 μm の精度で測定することが必要である⁽³⁾。しかし、従来の機械的測定法では巻線の傷や付着物の影響により、1 μm 以下の精度を得ることは非常に困難であった。そこで我々は電磁誘導の原理に基づく非接触形の測定法⁽⁴⁾を採用し、独自の技術を用いて寸法測定装置の開発を行った。また、マイクロコンピュータを用いた自動測定により、従来数週間を要した測定時間を 4 時間程度に短縮することができた。以下において寸法測定の原理、開発した測定装置のハードウェアおよびソフトウェア、測定結果の例、および問題点などについて述べる。

2. 測定原理

ソレノイドのピッチおよび直径の測定には、NBS (アメリカ国立標準局) において新たに開発された電磁誘導の原理に基づく非接触形の測定法⁽⁴⁾を用いる。この測定法の最大の利点は巻線表面の位置を測定する

従来の機械的な方法と異なり、巻線を通れる電流の実効的な位置を直接検出することである。そのため巻線表面の傷や付着物の影響が排除され、安定で高感度な測定を行うことができる。この測定法の原理を以下に簡単に述べる。

装置の概念図を図 1 に示す。ソレノイド上方に設置されている電流注入器はソレノイドの被測定ターンに交流電流を流す機構であり、移動装置により任意のターンを選択することができる。検出プローブは 5 個の検出コイルとレーザ測長用のコーナキューブにより構成され、ソレノイド中心軸にそって移動する。5 個のコイルのうち直径測定には中央と両端のコイルが、ピッチ測定には他の 2 個のコイルがそれぞれ用いられる。

ピッチの測定、すなわち、ソレノイドの各ターンの位置測定は次のようにして行われる。まず、電流注入器を被測定ターンの位置まで移動し、このターンに交流電流を流す。交流電流のつくる磁界のソレノイド中心軸上での分布は図 2 (a) のようになる。次に検出プローブをソレノイド中心軸にそって移動する。ピッチ検出用のコイルは互いに逆向きに巻かれているため、検出プローブの出力電圧は図 2 (b) のように変化する。検出プローブの中心位置と被測定ターンの中心位

図 1 ソレノイド寸法測定装置概念図

Fig. 1. Schematic diagram of a dimensional measurement system of a precision solenoid.

An Automated Measuring System for the Dimensions of a Precision Solenoid. By Hitoshi Sasaki, Member, Naoko Kasai, Non-member & Hisao Nakamura, Member (Electrotechnical Laboratory)

佐々木仁: 正員, 電子技術総合研究所標準計測部
 葛西直子: 非会員, 電子技術総合研究所標準計測部
 中村久夫: 正員, 電子技術総合研究所標準計測部

図 2 ピッチ測定原理図

Fig. 2. Principle for measuring pitch.

図 3 直径測定原理図

Fig. 3. Principle for measuring diameter variations.

置が一致して出力電圧が零になったときの検出プローブの位置をレーザ測長機を用いて測定する。同様の操作を繰り返してソレノイドの各ターンの位置を次々と記録していくことにより、ピッチが得られる。

直径の測定はピッチ測定と同時にされる。ピッチ測定により検出プローブの中心位置と被測定ターンの中心位置とが一致した状態で、もし被測定ターンの直径がわずかに変化したとすると、交流磁界の変化に伴ない直径検出コイルの出力もわずかに変化する。各ターンにおける直径検出コイルの出力電圧を記録し、全ターン平均の出力電圧との差を調べることで、各ターンの直径の平均直径からのずれを測定することができる。被測定ターンの半径 a の変化による交流磁界の振幅変化 dB/da は、図 3 (a) に示すように位置によって符号が反転する。従って、図 3 (b) のように直径検出コイル C_1 , C_2 , C_3 を配置し、 C_1 , C_3 に対し C_2 を逆向きに接続すれば、被測定ターンの直径を最も感度よく検出することができ、同時に出力電圧の固定分

を相殺することもできる。直径検出コイルの感度はソレノイド端部に巻かれた 2 組の基準ターンを用いて校正する。

この測定法においては、平均直径に対する差は高感度で測定できるが、直径の絶対値を求めることはできない。しかし、直径の絶対値の測定誤差はソレノイド中心磁界への寄与が比較的小さいため、基準ターンの直径を差動マイクロメータを用いてゲージブロックと比較する従来の方法で測定することが可能である。更には多電流法⁽⁵⁾を用いることにより、ソレノイド中心磁界が中心直径に全く依存しないようなコイル系を設計することも可能である。

ピッチおよび直径の測定は実際には 10 ターンを 1 組にして行われる。すなわち、10 ターンに対する実効的なピッチおよび直径が測定されるわけである。これにより検出感度が向上し、測定時間も大幅に短縮される。

3. 精密ソレノイド

測定対象となる精密ソレノイドは東工大、東京測範(株)、東光(株)の協力により試作されたもので、我が国においては他に例を見ない大形かつ高精度の標準磁界発生用ソレノイドである⁽²⁾。このソレノイドは外径 256 mm、厚さ 25 mm、全長 800 mm の石英ボビンに、直径 0.8 mm の金メッキ銅線を 1 mm ピッチで約 750 ターン巻きつけたものである。石英ボビンのねじ山の研削にはダイヤモンド砥石を用い、温度制御された研削液を石英ボビン全長にわたってかけることにより、有効直径およびピッチのばらつきが共に $4\mu\text{m}$ 以下のねじ山が得られた。ソレノイド巻線には純度 99.99% 以上の純銅線を使用し、ダイヤモンドダイスを用いて 1 mm から 5 段階に分けて線引きを行い、最終線径 $0.799\text{ mm} \pm 1\mu\text{m}$ 、真円度 $2\mu\text{m}$ を得た。この線に膜厚 $0.5\mu\text{m}$ の金メッキを施し、一定のテンションで石英ボビンに巻きつけてソレノイドを形成した。石英ボビンのねじ山の精度と銅線の線径一様性および真円度から、巻線形成後のソレノイド直径のばらつきは、たかだか $\pm 4\mu\text{m}$ 程度であると推定された。しかし、実際には $10\mu\text{m}$ を超える直径不整が測定において観測されている。この不整はソレノイド巻線の熱サイクルによる塑性変形によって生じた可能性が強い。これについては第 5 節で更に詳しく述べる。

4. 測定装置

前節で述べた測定原理に基づき、実際に製作した寸法測定装置の構成を図 4 に示す。測定回路のうち自

図 4 ソレノイド寸法自動測定システム

Fig. 4. Diagram of an automated dimensional measurement system of a precision solenoid.

作の回路には○印を記した。装置は電流注入器駆動機構、検出プローブ移動機構、交流電流発生回路、検出コイル出力電圧測定回路、レーザー測長機、温度測定回路、そして自動計測回路の7ブロックにより構成されている。

装置の一部は精密ソレノイドとともに高度の非磁性環境内⁽⁶⁾⁽⁷⁾に設置されるため、磁化率の十分に小さな材質以外は使用することができない。更に寸法測定においては交流磁界を用いるため、たとえ非磁性の金属でも渦電流が問題となるような大きさのものは使用できない。そのため非磁性環境に置かれる装置の大部分はガラス系およびプラスチック系の材料で構成されている。

〈4・1〉 電流注入器移動機構 電流注入器本体も、上記の制約により主にテフロンとベークライトを用いて構成されている。注入器の移動には1本の送りねじと2本のガイド（いずれも材質はベークライト）が用

いられ、パルスモータのオープンループ制御により位置決めを行っている。電流注入器はソレノイド巻線を傷つけぬように、次のターンに移る時には接点を巻線から離して移動する。この接点の出し入れは空気圧を利用して行い、電磁弁によって制御している。パルスモータの駆動回路と電磁弁駆動回路はインターロックが行われ、操作ミスによって巻線が傷つくことのないように配慮されている。

〈4・2〉 検出プローブ移動機構 検出プローブ移動機構は寸法測定装置全体の中で最も重要な部分であり、測定精度に直接的な影響を与える⁽⁸⁾⁽⁹⁾。具体的には超低速度（ $0.1\mu\text{m/s}$ ）での滑らかな移動と、検出プローブ軸が 0.02° 以上傾かないような高精度の送りを、非磁性かつ非金属の材質を用いて実現しなければならない。

移動機構の断面図を図5に示す。プローブ移動台および移動ガイドには摩擦係数の小さなフェノール樹脂

図 5 検出プローブ移動装置
Fig. 5. Pick-up probe driving unit.

図 6 検出コイル出力電圧測定回路
Fig. 6. (a) Pitch detection circuit.
(b) Diameter detection circuit.

(商品名スターライト)を用いた。また、移動ガイドは FRP パイプに固定して剛性を高めている。移動台と移動ガイドの接触部分にはテフロンスペーサを挿入した。テフロンは、移動速度が減少すると摩擦係数も小さくなるという特質を有するため、低速移動での支持材としてしばしば用いられている。また、駆動ベルトには市販の硬質ゴム系のタイミングベルトを用いた。このベルトの弾力性とテフロンの摩擦特性により $0.1 \mu\text{m/s}$ のなめらかな超低速移動が得られた。

移動速度はパルスモータの周波数制御により行い、 $0.1 \mu\text{m/s}$ から 1mm/s の範囲で変速することができる。パルスモータと駆動ベルトの間には超低速送りのために 5 段の減速ギヤが挿入されている。移動ガイドの両端にはリミッタが設けられて、操作ミスなどによってプローブ移動台が可動範囲を超えた場合には自動的に駆動電源が切断される。なお、FRP パイプの内部はレーザ測長の精度を上げるために減圧が可能な構造になっている。また、標準磁界発生時にはパルスモータおよび検出プローブは装置から取りはずされ、標準磁界に対して影響を生じない位置まで遠ざけられる。

〈4・3〉 交流電流発生回路 交流電流発生回路は周波数シンセサイザ、同期 CR 発振器、低周波増幅器、およびローパスフィルタにより構成される(図 4

参照)。被測定ターンに流す交流電流は通常 33Hz 、 250mA を用いる。検出コイルの周波数特性による出力電圧変化を避けるため、発振周波数は周波数シンセサイザを用いて安定化している。また、検出コイルは 7kHz 付近に共振点を持っているため、注入電流の高次歪によって検出コイルに共振が生じやすい。その場合プリアンプの入力が飽和し検出感度が低下してしまう。そのため低歪率の同期発振器を用いて正弦波を発生させ、低周波増幅の後に更にローパスフィルタを通すことにより純度の高い正弦波を得ている。

〈4・4〉 検出コイル出力電圧測定回路 検出コイル出力電圧測定回路は、図 4 において検出プローブ、検出プローブアダプタ、そしてロックインアンプにより構成される。測定回路の詳細を図 6 に示す。ピッチ検出コイルおよび直径検出コイルは直径 100mm 、全長 280mm のベークライト製ボビンに 0.2mm の銅線を多層に巻いて作成した。ピッチ検出コイルは約 $3,000$ ターンの 2 個のコイルを逆向きに接続して構成し、また、直径検出コイルは中央の約 $3,000$ ターンのコイルに対して両側の約 $5,000$ ターンの 2 個のコイルを逆向きに接続して構成した。検出コイル-ロックインアンプ間の約 20m のケーブルの影響を避けるため、検出コイル出力はプリアンプを用いて 20dB 増

幅され、インピーダンス変換を行った後にロックインアンプに送られる。アース点は両回路共にプリアンプの入力側に入れた2個の5 M Ω の抵抗の中点に設定し、コモンモードノイズの影響を避けるため入出力ともに平衡型とした。

このプリアンプは、また検出コイルのごく近傍に置かれるため、使用する電子部品の磁性が重要な問題となる。通常の電子部品はリード線にニッケルメッキが施されるなど、磁気的性質には配慮がなされていない。このような部品を検出コイルに近づけた場合、検出コイル出力に数 μm から数十 μm の直径変化に相当する誤差電圧が生じることが実験により確かめられた。このためプリアンプの部品にはすべて磁性検査を行い磁化率が小さなものを選択して使用した。この結果、検出コイルに対するプリアンプの影響は測定感度以下に抑えられた。

〈4.5〉 レーザ測長機 ピッチ測定において、検出プローブの位置測定にはレーザ測長システム (HP: 5501 A) を用いたこのレーザ測長機は2周波変調方式によって最大 300 mm/s の速度範囲で 0.16 μm の分解能を有し、また、波長は 0.1 ppm の確度を持っている。ただし、HP 社のコーナキューブおよび干渉計は鉄系合金のケースに収められているため、本装置には使用することができない。そのため HP 社と同一方式の非磁性干渉計およびコーナキューブを試作して使用した。

〈4.6〉 温度測定回路 ピッチおよび直径測定と並行してレーザ光路の気温、ソレノイド温度、そして検出プローブ温度の測定が行われる。ソレノイドに使用した石英ボビンおよび検出コイルのベークライトボビンの線膨張率はそれぞれ 0.5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 、80 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 程度であり、またレーザ光路の気温はレーザ波長に約 1 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ の変化を与える。このため、レーザ光路の気温およびソレノイド温度はデジタル温度計を用いて 0.1 $^{\circ}\text{C}$ の確度で測定され、また、検出プローブ温度は白金抵抗ブリッジ回路により 0.01 $^{\circ}\text{C}$ の感度で測定される。

〈4.7〉 自動計測回路 本装置はマイクロコンピュータ (NEC: PC 8001 システム) を用いて自動化されている。PC 8001 システムは PC 8001 本体の他に PC 8011 拡張インターフェイスやデュアルミニフロッピーディスク、モニタ CRT、およびプリンタにより構成されている。図 4 で示されるように、PC 8001 システムには駆動機構インターフェイス、デジタル交流電圧計、デジタルナノボルトメータ、リレーコントローラ、および測長システムインターフェイスが

接続されている。

駆動機構インターフェイスは PC 8011 拡張インターフェイスの平行 I/O ポートに接続され、電流注入器駆動系および検出プローブ駆動系とのインターフェイスおよびグランドアイソレーションを行っている。デジタル交流電圧計およびデジタルナノボルトメータはいずれも GP-IB バスにより PC 8011 に接続されている。また、リレーコントローラは各測定機器の入力切替に用いられ、PC 8011 の RS 232 C ポートに接続されている。デジタルナノボルトメータの入力はプログラムによって 1. ロックインアンプ出力、2. 検出プローブ温度測定用抵抗ブリッジ出力、3. デジタル温度計出力のいずれかを選択するようになっている。測長システムインターフェイスはレーザ測長システムと PC 8001 のインターフェイスを行うもので、測長システムの制御信号およびデータ信号を2組の PIA ($\mu\text{PC 8255 A}$) を用いて PC 8001 の I/O

図 7 測定プログラムフローチャート

Fig. 7. Measuring program.

バスに接続している。これらのインターフェイスを通して収集されたデータは、いったんフロッピーディスクに蓄えられた後、NTT（日本電信電話（株））の専用回線を通して約 25 km 離れた RIPS（工業技術院情報計算センター）に送られ、詳しい解析が行われる。

〈4・8〉 測定プログラム 測定プログラムのフローチャートを図 7 に示す。システムの初期化においては測定データ用メモリ領域の確保、機械語サブルーチンの割り付け、各 I/O チャンネルおよび接続機器の初期化、そして注入器および検出プローブのスタート位置への移動が行われる。次にディスクより測定順序を読み出し、その内容に従って測定を開始する。まず、注入器と検出プローブはあらかじめ指定された位置に早送りしておく。次にピッチ出力が零になる位置の近傍 ($\pm 2 \mu\text{m}$) において検出プローブを $0.1 \mu\text{m/s}$ の速度で微小送りする。レーザ測長機の位置出力とピッチ検出コイル出力電圧は同時測定され、21 組のデータから直線近似の最小 2 乗法によって検出プローブの零点位置が算出される。

ピッチ測定に引き続き直径測定が行われる。検出プローブ位置を固定し、注入電流 ON の状態で 50 点、

電流 OFF の状態で 50 点、それぞれ約 6 秒間にわたって直径コイルの出力電圧を記録し、それぞれの平均の差を求めている。直径測定終了後ただちに検出プローブ温度、ソレノイド温度、およびレーザ光路の温度を測定する。この一連の測定が各ターン位置において繰り返され、測定結果はその都度 CRT に表示される。全ターン測定の場合にはこれらの操作が約 80 回繰り返され、所要時間は約 5 時間である。測定終了後すべての測定データがディスクに記録される。測定プログラムの記述には BASIC を用いた。ただし、レーザ測長機とのインターフェイスおよびパルスモータの制御において、高速の入出力が必要な部分には機械語を用いた。

5. 測定結果

本装置を用いて測定された結果の一例を図 8 に示す。3 日間にわたって測定した 8 回のデータを重ねて表示したものである。

図 8 (a) は各ターンの直径の平均直径からの変化分を表示している。また、(b) 図では基準ピッチを 1.000012 mm とした場合の各ターンの規定位置から

図 8 測定結果例

Fig. 8. Examples of measurement result.

の変化分を表示している。8回の繰り返し測定に対する標準偏差(1σ)として、全ターンの平均でそれぞれ0.11 μm(ピッチ), 0.16 μm(直径)が得られた。

ピッチ測定データからソレノイドの平均ピッチを求めると1.000014 mmとなる。ソレノイドボビンのねじ山形成後の機械的な測定では1.000000 mmであった。従って、ソレノイドの全長はそれ以後に約14 ppm(750 mmに対して10 μm)増加したことになる。この伸びは、マンドレル(ソレノイドボビン芯出し用保持具)の締め付けトルクの解放によって起きたと推定される。ただし、この様な伸びは標準磁界の計算において誤差要因とはならない。また、各ターンの累積ピッチ誤差は平均ピッチに対して±2 μmの範囲内に収まっており、予想通りの結果が得られている。

一方、直径測定のデータにおいては10 μmを超える直径不整が見いだされた。これはねじ山の有効直径のばらつき4 μm, 巻線の様性±1 μm, 真円度2 μmだけからは説明のつかない大きな値である。この不整の原因としてはソレノイドの温度サイクルによる巻線の塑性変形が考えられる。第3節で述べたように、ソレノイド巻線には99.99%の純銅線を用いた。これは線材に含まれる磁性不純物の影響を排除するためである。しかし、使用した純銅線は弾性限界が低く、比較的弱い応力で塑性変形が引き起こされる。特に石英と銅とは線膨張率が10 ppm程度異なるため、温度サイクルによって塑性変形が引き起こされる危険性が高い。以上により温度について十分な考慮が必要である。

6. ま と め

開発されたソレノイド寸法測定装置は、予備的な測定において0.1 μm台の再現性を示した。特にテフロンスペーサを用いた独自の構成により、非磁性かつ高精度の移動機構が実現できた。一方、標準磁界発生用ソレノイドに予想を上回る直径不整が生じていることが見いだされたが、これは温度の対策により解決できると考えられ、更に寸法測定装置のより一層の改良、具体的にはレーザ光路の減圧、検出コイルのターン数の最適化、そして検出プローブの軸合わせなどによって、今後、更に測定精度の向上が期待される。

なお、本研究を進めるにあたって御指導いただいた前量子計測研究室長 中村 彬氏(現在、住友金属鉱山(株)電子材料研究所長)、また、検出プローブ移動機構を製作していただいた測機舎(株)反町、西田 両氏に深く感謝します。(昭和61年1月9日受付)

文 献

- (1) B.N. Taylor: *Metrologia*, **12**, 81 (1976)
- (2) J. Otsuka, et al.: *Bull. P.M.E.(T.I.T.)*, **49**, 39 (1982)
- (3) P.T. Olsen & R.L. Driscoll: *Atomic Masses and Fundamental Constants 4*, p. 471 (1971, Plenum Press, New York)
- (4) E.R. Williams & P.T. Olsen: *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **IM-21**, 376 (1972)
- (5) H. Nakamura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, 1883 (1979)
- (6) H. Nakamura, N. Kasai, & H. Sasaki: *Trans. I.E.E. of Japan*, **104**, 109 (1984)
- (7) 葛西・佐々木・中村・中村: 電機研集報, **47**, 40 (昭 58)
- (8) 佐々木・葛西・中村: " , **46**, 24 (昭 57)
- (9) 佐々木・葛西・中村: " , **49**, 38 (昭 60)
- (10) 佐々木・葛西・中村: 計測研究会資料 IM-85-5 (昭 60)