

# 大強度陽子加速器用磁場測定装置の開発

岩井正明

高エネルギー加速器研究機構 技術部

## 概要

この磁場測定装置は、大強度陽子シンクロトロンに設置される四極電磁石の磁場測定を行うための装置である。電磁石の磁場測定は、量産される電磁石の性能確認や製造段階における品質の評価などを行うためにおこなう。本磁場測定装置には、静磁場の中でサーチコイルを一定速度で回転させる方法を採用した。回転コイル部の構造は、アルミナ繊維強化プラスチック製の円筒内部に磁場測定を行うためのロングコイル、バックリングコイル、ショートコイルが組みこまれている。回転コイル部は、両端をアルミナセラミック製の静圧空気軸受けによって支持されている。

## 1 磁場測定の目的と方法

磁場測定の目的は、加速器に組みこまれる多数の電磁石の磁気特性が加速器の要求を満たしているか調べることである。本装置は、四極電磁石の磁場測定を目的として設計されている。四極電磁石は、電磁石の中心に向かう力を受ければ収束、外側に向かう力を受ければ発散する。加速器は、収束用四極電磁石と発散用四極電磁石が交互に並べられている。

ハーモニックコイル法は、サーチコイルを静磁場の中において一定速度で回転させ、コイルの回転により発生する電圧波形を解析することにより磁場を知ることができる。この方法は、誘導電圧の積分器とハーモニックコイルの回転角をロータリーエンコーダで検出する構造であり、誘導電圧を周波数分析すれば磁場成分に分解されたスペクトルが得られる。本装置は、ハーモニックコイルの片側に回転駆動源のステッピングモーター、反対側に回転角を検出するロータリーエンコーダを接続している。ハーモニックコイル法は、大量生産される四極電磁石や六極電磁石などの磁場測定に向いており、多極磁場成分などの測定に利用される。多極磁場成分は、コイルの長さが電磁石の長さより長ければ、軸方向の磁場積分値として得られる。

## 2 ハーモニックコイルと支持構造体

ハーモニックコイル（回転コイル）は、ロングコイル、ショートコイル、バックリングコイルによって構成される。ロングコイルとショートコイルを用いれば、電磁石中で反転させたときに誘導される電圧を高精度の積分器で測定することにより、コイルのループを通過する全磁束を求めることができる。バックリングコイルは、基本磁場成分を打ち消すために組みこむ。ハーモニックコイルには滑らかで正確な回転が要求される。

回転コイル部の構造は、コイル部とそれを支持する構造体、コイル部を収納する回転円筒によって構成される。回転円筒は、回転系全体の自重による静的変位や回転時の動的変位を小さくするため高剛性が要求される。回転円筒やコイルの支持構造体は、材質として非磁性および非導電性が要求され、変位や応力の問題を考えると高弾性率および高強度の複合繊維が有望な選択肢となってくる。ロングコイルは、ガラス繊維強化プラスチックの支持構造体に線径 0.2mm の無酸素銅線を 1 ターン（コイル長 2100mm）巻く。バックリングコイルは、ロングコイルの内側に同じ線材を 2 ターン（コイル長 2100mm）巻く。ショートコイルは、回転

中心に対してロングコイルとは反対の位置に2ターン（コイル長200mmが1本、コイル長650mmが2本）巻く。全てのコイルは、同一平面内にあり、真直性や円筒断面での位置が正確であることが要求される。

コイルの支持構造体は、コイルの真直性や位置を正確に決めるのに重要であり、非磁性や非導電性以外に加工容易性、高剛性、回転時の振れの問題から系全体として質量バランスが良いことが要求される。コイル支持構造体は、剛性の大きさを回転円筒に負担させ、コイルの真直性、位置、質量バランスの問題を重点的に設計した。質量バランスは、回転中心を基点として系全体のモーメントがゼロであることが理想である。現実には、コイルの固定、加工誤差、組立誤差などの問題があり理想どおりにはいかない。構造的な理由により、ダイナミックバランス法による質量バランスの計測や修正ができない。その結果、質量バランスは、低速回転であることから組込み部品を計測し、計算により質量中心を求め、組込み治具により計測を行いながら計算値の場所に固定した。

### 3 回転円筒

回転円筒は、内部にコイルおよびコイル支持構造体を収納するとともに、静圧空気軸受けの回転軸の役目も担っている。回転円筒に要求される項目は、非磁性および非導電性であること以外に、比剛性が高い、比強度が高い、加工性の良さや加工精度が高い（寸法、円筒度、表面あらさ）、材料および加工費用が安いなどがある。これらの「要求をすべて満たす」となったときに問題が発生した。例えば、炭素繊維強化プラスチックを採用すれば、非導電性と加工性の要求を満たさない。ガラス繊維強化プラスチックは、比剛性及び比強度が要求を満たさない。問題を解決するため、要求項目に重要度を付け、その内容にしたがって、材料の特性、静的変位、動の変位、質量バランスの問題、加工性と加工精度、製作費用などを調べた。その結果、「費用を安価に！」が犠牲となり、アルミナ繊維強化プラスチックの採用となった。検討した材料は繊維強化プラスチックであり、各材料の繊維の母材に対する充填率、繊維を円筒に巻く角度、線径などを変えて調べた。設計にあたっては、最初、1ヘルツ以下の低速回転であるため動的な問題を考えなかった。静的な問題がある程度進んだ段階で動の変位と質量バランスの問題を調べた。細長い円筒であるため、高剛性の材料を使用しているにもかかわらず共振周波数（固有振動数）が目的の回転数の近くになった。動の変位は、静止した状態から緩やかに増加し、共振周波数が近くなると急激に上昇する。共振周波数では無限大になり、以降は急激に下降した後に質量バランスの悪い位置に落ち着く。今回は、電磁石の磁極寸法の関係から、円筒の外径を固定し、内径寸法を変えることで、複合繊維の使用量（高弾性率繊維は高価である）と変位、共振周波数の問題を最適化することに努めた。その結果、共振周波数が目的の回転数から離れた位置に移動した。

### 4 セラミック静圧空気軸受

本装置は、軸受としてセラミック静圧空気軸受を採用している。静圧空気軸受は、回転コイル部の滑らかで正確な回転と大量生産された電磁石への組みこみの容易さから選択された。セラミックは、電磁石の近くで使用するためとアルミニウム合金などの柔らかい材料は避けたいとの要求で選択された。通常の静圧空気軸受と違うのは、電磁石への組みこみを容易にするため、軸の外径と軸受けの内径から決定される圧縮空気層の隙間が大きいことである。隙間が大きいことにより、軸を支持する空気層の考え方が少し変わってくる。回転軸を支持する圧縮空気は、軸の下部では軸の質量を受け持ち、軸の上部では軸の浮き上がりを柔らかく抑える感じである。したがって、圧縮空気の噴き出し口を下部と上部に分け、供給側の能力の関係から、下部の圧力を高く、上部の圧力を低く設定している。この方法によると、軸受としての剛性を低下させ、非接触であるため回転は滑らかであるが、回転軸の中心が少しふらつく。ふらつきの原因となるのは、空気圧変

動以外に回転円筒外周の真円度の影響と質量バランスの悪さである。今回は、それらを事前に取り上げて設計を進めたので目的を満足させたと考えている。

## 5 精密調整架台

磁場測定装置の外観と電磁石に組みこんだ状態を「図 1」に示す。精密調整架台は、電磁石を中心として左右に各 1 台設置される。この架台は、磁場測定装置を電磁石の磁極中心に正確にあわせるために使用される。位置調整は、大量生産された電磁石の数だけ行われる。したがって、簡単に位置あわせができる必要がある。位置あわせの方法は、セラミック静圧空気軸受けの中に望遠鏡を組みこみ、反対側のセラミック静圧空気軸受けに十字の入ったターゲットを組みこむ。望遠鏡の中心が十字の中心と合えば両方の軸が合ったことになる。実際は、十字のターゲット側の傾斜が検出できないため、望遠鏡とターゲットを入れ替えて 2 回実施される。精密調整架台は、位置あわせなどのため、電磁石の中心軸に対して直交する水平面と垂直面内に約 10mm の直線移動と軸受け中心を中心として水平面内に約 2 度の回転ができる。また、回転円筒の自重による変形に合わせるため、軸受け中心を中心として、垂直面内に約 0.1mrad の回転ができる構造になっている。各移動量は、ダイヤルゲージにて読み取りができるようになっている。

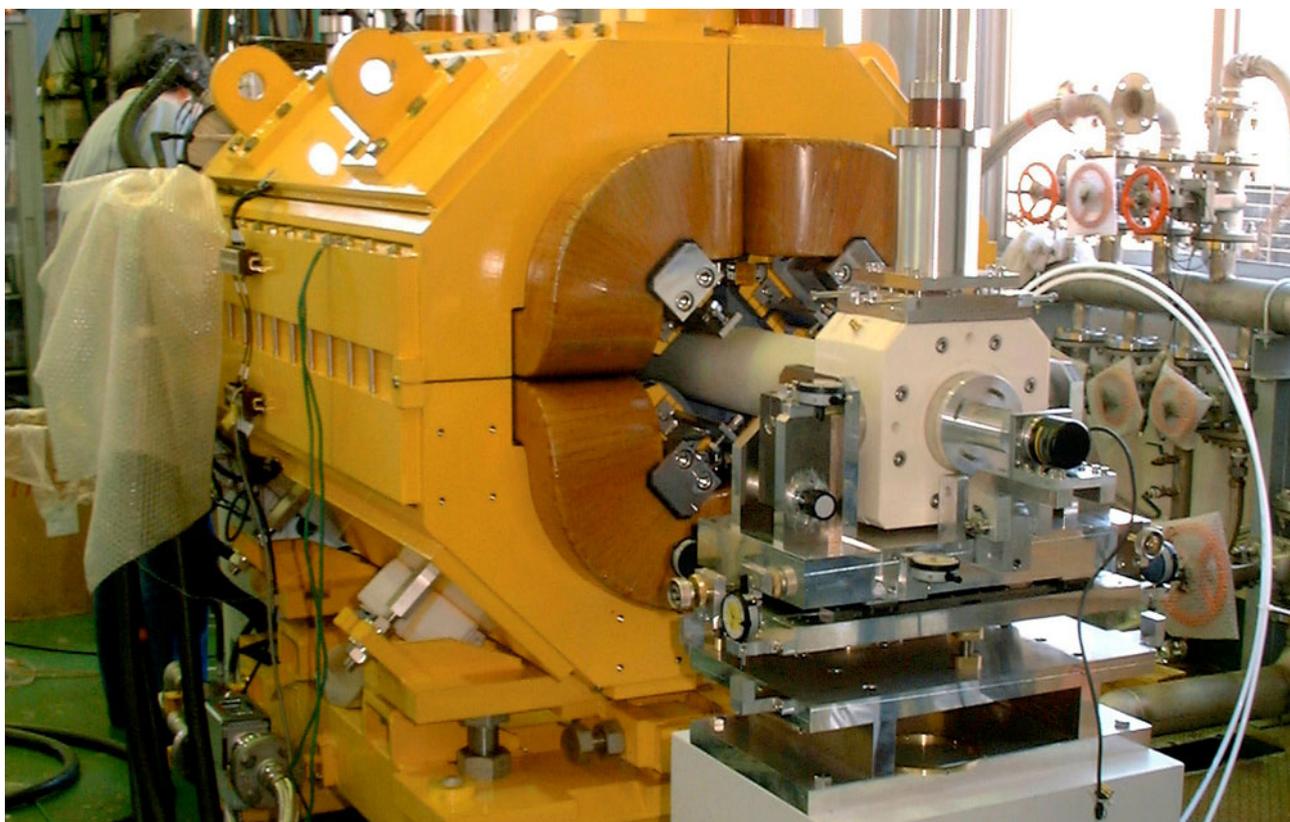


図 1. 磁場測定装置

## 6 まとめ

最初、磁場測定装置の構造が簡単であるため、回転部の静的変位とコイル部の組立に注意すれば良いと考えていた。検討が進むに連れ、材料の選択、変位対策、加工容易性と加工精度、製作費用の低減が簡単でないことがわかってきた。精密調整架台は、要求内容を満足するため、100 枚をはるかに超える図面枚数となってしまった。

## 参考文献

- [1] R.ガッシュ, et al 著,三輪修三訳,“回転体の力学”, 森北出版(株)
- [2] 小堀与一,“实用振動計算法”, 工学図書(株)
- [3] 高分子学会編集,“高強度・高弾性率繊維”, 共立出版(株)
- [4] 高分子学会編集,“炭素繊維と複合材料”, 共立出版(株)
- [5] 内田盛也,“先端複合材料”, (株)工業調査会
- [6] 国立天文台編,“2003年版理科年表”, 丸善(株)
- [7] “OHO'97 高エネルギー加速器セミナー”, (財)高エネルギー加速器科学研究奨励会
- [8] “OHO'99 高エネルギー加速器セミナー”, (財)高エネルギー加速器科学研究奨励会