

Fine Alignment of Magnets in the ATF Damping Ring

M. Takano, Y. Funahashi^a, S. Araki^a, T. Matsui^b, J. Urakawa^a

Toho University

2-2-1 Miyama, Funabashi, Chiba 275, Japan

^a KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

^b E-CUBE Co., Ltd.

1077-158 Hino, Hino-shi, Tokyo 191, Japan

ABSTRACT

The construction of the ATF damping ring at KEK was nearly finished in January 1997, and several studies of the damping ring were started. Magnets in two arc sections are assembled on 36 active support tables, and aligned within $60\mu\text{m}$ using a 3D mobile tracking system. We will report on survey and alignment of the damping ring.

ATF ダンピング・リングにおける電磁石の精密設置

1. はじめに

ATF は高エネルギー加速器研究機構に建設された、電子・陽電子衝突実験用線型加速器のための試験加速器で、1.54 GeV インジェクター・ライナック、低エミッタンス・ダンピング・リング、それらをつなぐビーム・トランスポート・ライン、そしてビーム診断用イクストラクション・ラインから成る。1996年7月から始めたダンピング・リングとイクストラクション・ラインの建設を終えて、1997年2月から運転を開始している。

ダンピング・リングは高周波空洞やウイグラー電磁石などを含む直線部と偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石などを含む曲線部から成る。曲線部の半径は13.8 m、直線部の長さは25.8 mである。煩雑なバンプ・チューニングなしで目標とする低エミッタンスのビームを得るためにはこれらの電磁石を約 $60\mu\text{m}$ の位置精度で設置しなければならない。ここではATFダンピング・リング曲線部の電磁石の精密設置の方法とその結果を報告する。

2. 曲線部電磁石と架台

ダンピング・リングの曲線部は36台の位置制御架台で構成されている。それらのうちの標準的な位置制御架台には図1に示すように1台の偏向電磁石 (BEND)、一対の四極電磁石 (上流から Q1 と Q2)、一対の六極電磁石 (上流から SD と SF) が配置されている。これらの電磁石は位置制御架台の定盤上に固定された、それぞれの中間位置調整架台の上に取り付けられる。

各電磁石の上部には基準面が設けられていて鉛直中心軸上にターゲット・ホルダー設置用穴があり、設計上、それぞれに専用のターゲット・ホルダーを設置することによってターゲットの高さが定盤上面から 805 mm で揃

うようにしてある。偏向電磁石にはターゲット・ホルダー設置用穴が3箇所あり (上流から B1, B2, B3)、ビーム軌道の偏向角度に合わせて 170° の角度がついている。

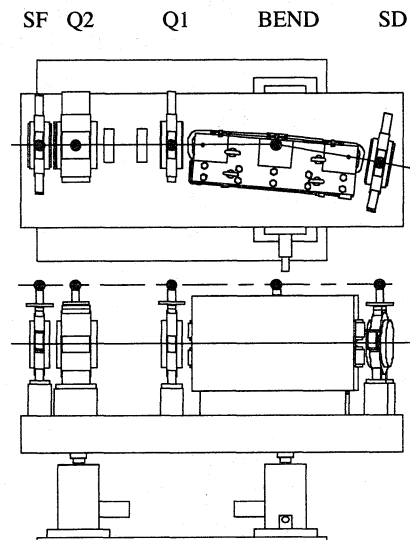


図1. 曲線部用位置制御架台と電磁石の配置。

位置制御架台は基礎底板、位置調整機構、電磁石支持用定盤から成る。定盤はそれぞれ異なる連結機構を持つ3台の位置調整機構によってビーム上流側で2点と下流側1点で基礎底板の上に支えられている。ビーム下流側の位置調整機構は定盤の支点をビーム方向 (Z方向) と動径方向 (X方向) に、ビーム上流側の位置調整機構は X方向にそれぞれ $\pm 20\text{ mm}$ だけ移動させることができる。これによってヨー (Y軸回転) を変化させることができる。また各位置調整機構は定盤の支点の高さ (Y方向) を独立

に±20 mm だけ変化させることができる。これによってロール (Z 軸回転) とピッチ (X 軸回転) を変化させることができる。これらの位置調整機構はパルス・モーターによって駆動する精密ボールねじを使用しており、位置調整は 2 μm 以下の精度で制御できる。

3. 曲線部電磁石の設置方法

バンク・チューニングなしの場合、 $\epsilon_x = 3 \mu\text{m}$, $\epsilon_y = 30 \text{ nm}$ の規格化エミッタンスを達成しようするとき曲線部電磁石の設置誤差の許容範囲は 95% CL で X 方向に対しては $\sigma_x = 90 \mu\text{m}$, Y 方向に対しては $\sigma_y = 60 \mu\text{m}$, 傾斜に対しては $\sigma_\theta = 0.2 \text{ mrad}$ であると推定されている^[1]。このような設置精度を実現する簡便な方法として三次元計測器を用いた精密設置を試みた。

3.1. 三次元計測器^[2,3]

三次元計測器として Leica SMART 310 を用いた。SMART はレーザー干渉計、回転鏡とそれを回転させる 2 軸のサーボ・モーターとエンコーダー、位置検出器などで構成されている。回転鏡によって SMART はレーザー・ビームを任意の方向に送ることができ、そのレーザー・ビームは、入射角に平行な反射角でレーザー・ビームを反射する反射プリズムで SMART に送り返される。反射されて来たレーザー・ビームのずれを位置検出器によって検出して、レーザー・ビームがいつも反射プリズムに入射するように回転鏡を制御する。

こうして SMART はレーザー干渉計によって反射プリズムまでの距離を計測し、2 軸のエンコーダーによって天頂角と方位角を測定する。距離分解能は 1.26 μm, 角度分解能は 0.7 sec である。静止している反射プリズムに対する位置測定の精度は ±10 ppm である。

SMART のアプリケーション・ソフトウェアの機能として、極座標系で測定した計測値を直交座標系に座標変換することができる。また測定点のうちの任意の 3 点で直交座標系を定義し、計測値をその系に座標変換することもできる。計測中の座標を連続的にモニターに表示することができるので精密設置作業のときに便利である。

3.2. 曲線部電磁石の精密設置

ダンピング・リング内の床ケガキを行った後に、位置制御架台や電磁石を搬入し、気泡管やティルティング・レベル、SMART などを用いて位置制御架台上に電磁石を精密設置した^[4]。移動時の振動を軽減するためにエア・パレットを用いて、電磁石を精密設置し終えた位置制御架台を所定の位置に移動した。36 台の位置制御架台を床ケガキ上に配置した後、気泡管でロールとピッチを調整し、ティルティング・レベルで高さをビーム・トランスポート・ラインに合わせた。

ダンピング・リングの床ケガキはセオドライトと鋼製巻き尺を用いて行った。曲線部電磁石の精密設置にとって、概念図 (図 2) に示した床ケガキの長方形 (R1-R2-R3-R4) の測量は重要であるが、ダンピング・リングはその外側、天井、そして内側を遮蔽ブロックで囲まれているので、長方形の対角線を直接測量することができない。このため、セオドライト上部や整準盤に反射プリズム用の治具を取り付けて SMART による床ケガキの測量も行い、測量精度を上げるようにした。

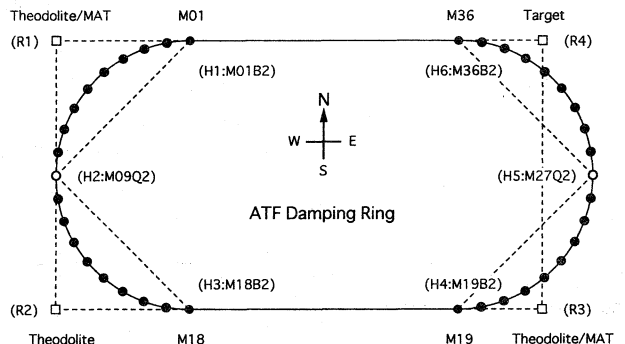


図 2. 曲線部電磁石の精密設置の概念図。

床ケガキの長方形の測量を基礎に、SMART を用いて位置制御架台 M01, M18, M19, M36 を位置調整して、ダンピング・リングの六角形のうちの四つの頂点 H1, H3, H4, H6 にそれぞれの偏向電磁石の基準点 B2 を合わせた。残りのふたつの頂点 H2 と H5 には M09 と M27 の四極電磁石 Q2 を合わせた。こうして、床ケガキを六つの電磁石の基準点に移した後は、この六角形を基準にして SMART を用いて残りの位置制御架台を位置調整した。SMART の、座標系の定義機能や測定座標の表示機能のため、曲線部電磁石の精密設置が容易にできた。

直線部のウィグラー電磁石と四極電磁石については六角形を基準にマイクロ・アラインメント・テレスコープ (Taylor-Hobson) を用いて直線上に並べ、SMART で位置調整した。

4. ダンピング・リングの測量

精密設置直後の 1997 年 1 月に SMART を用いてダンピング・リングの電磁石の基準点の位置を測定した。同様に、5 月の運転停止期間中や 7 月の保守点検日の際に、ダンピング・リングの測量を行った。また、ティルティング・レベルを用いて電磁石の基準点の高さを測定した。これらの測量の解析結果を以下に示す。

4.1. 曲線部電磁石の設置誤差

1996 年 7 月から 9 月にかけて各位置制御架台上に電磁石を設置した。電磁石の精密設置後、移動する前に架台ごとに電磁石の基準点の位置を SMART で測定し、各測

定値の設計値からのずれを調べた。また、架台移動後については1997年5月のSMARTによる測定に対して同じ解析を行った。表1に移動前後の電磁石の設置誤差のばらつき(RMS)とその許容範囲を示した。動径方向(X方向)と鉛直方向(Y方向)についてはほとんど変化がないがビーム方向(Z方向)の設置誤差が大きくなっている。これは厚みの薄い四極電磁石や六極電磁石が架台移動中に振動などで変位したためであると思われる。また、配線や配管などによる設置誤差への影響はほとんどなかったと言える。

	許容範囲	移動前	移動後
$\sigma_{\Delta X}$ [μm]	90	26	37
$\sigma_{\Delta Y}$ [μm]	60	21	19
$\sigma_{\Delta Z}$ [μm]		52	100

表1. 架台移動前後の電磁石の設置誤差。

4.2. ダンピング・リングの電磁石の高さ

1997年3月にはティルティング・レベルを用いて、ビーム・トランスポート・ライン(BT)とダンピング・リング直線部(SL)の四極電磁石と曲線部(ARC)の偏向電磁石の基準点の高さを測定した。その結果を図3に示す。横軸にはビームが通る順番に電磁石を並べてある。ビーム・トランスポート・ラインと北側直線部の境に段差ができています。ここには可動式ビーム・ダンプがあり、見通しが悪いために高さ合わせの精度を上げられなかったと思われる。東側曲線部の途中にも段差があるがここは見通しの良いところなので原因は不明である。また、全体的には滑らかにつながっているが、1mmを越える高低差がどのように生じたのかも今のところ不明である。

4.3. 偏向電磁石間の距離

1997年1月、5月、7月に行ったSMARTによる測定で、偏向電磁石の基準点B2間の距離の変化を調べた。B2間の距離の測定値と設計値の差 ΔL の平均値とばらつき(RMS)を表2に示した。ただし直線部の距離は除いた。また、周長に相当するものとして、直線部を含む ΔL の総和 ΔC を調べた。B2間の距離や周長がだんだん伸びてきているのがわかる。B2を結んでできる36角形の内角の平均値は5月の測定の場合、 $169.9998^\circ \pm 0.0031^\circ$ であったが、この角度には季節的な変化がなかった。従って、これまでのところダンピング・リングは次第に一樣に膨張しているように見える。これを単純に床コンクリートの熱膨張によるものとする冬から夏にかけて約5°Cの温度変化があったことに相当する。

	1月	5月	7月
ΔL [μm]	1 ± 25	63 ± 30	118 ± 37
$\sigma_{\Delta L}$ [μm]	144	173	197
ΔC [mm]	-0.32 ± 0.40	2.70 ± 0.28	5.77 ± 0.50

表2. 偏向電磁石間の距離。

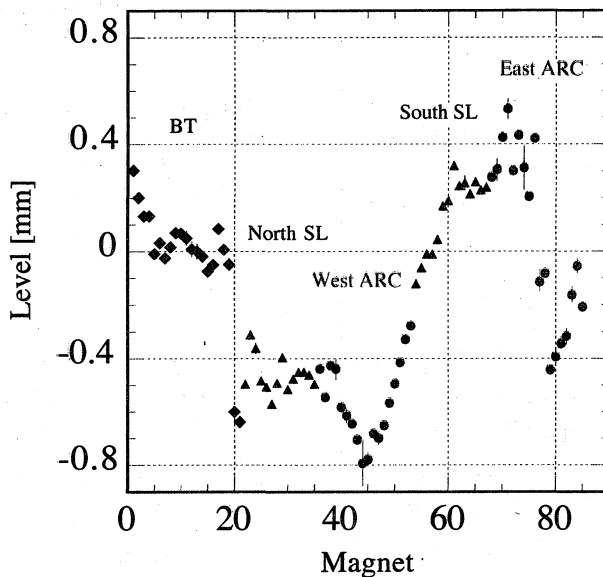


図3. ダンピング・リングの電磁石の高さ。

5. まとめ

SMARTを併用して、セオドライトと鋼製巻き尺による床ケガキを電磁石の基準点に移す方法を確立した。ダンピング・リングは内側も遮蔽ブロックで囲まれているので対角線の測定ができないが、SMARTの利用によって測定精度を上げることができた。

位置制御架台上に電磁石を精密設置した後、エア・パレットで所定の位置に移動し、配線や配管を施したが設置誤差は移動前とほとんど変わらなかった。架台ごとに見た場合、設置誤差はY方向に関しては19 μm 、X方向に関しては37 μm であるので許容範囲内である。

しかし、ダンピング・リング全体を見ると、高さについては段差や1mmを越える高低差ができています。また、周長については冬から夏にかけて6mmほどの膨張が生じています。これらの原因は調査中である。

参考文献

- [1] F. Hinode et al., KEK Internal 95-4 (1995).
- [2] Leica, SMART310 How to use (U2-248-OEN III.95).
- [3] Leica, SMART310 Hardware Guide (U2-259-OEN III.95).
- [4] M. Takano et al., Proceedings of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, NUP-A-96-10 (1996) 180.