Installation and alignment of quadrupole magnets for the PF straight section upgrade

Shinya Nagahashi¹, Yukinori Kobayashi, Kentaro Harada, Tsukasa Miyajima KEK-PF 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have installed new forty-six quadrupole magnets into the ring for the PF straight section upgrade. In order to make precise alignment of the magnets, the laser tracker (SMART) and the levelling scope (N3) are employed. Before the upgrade, the coordinates of all magnets were measured during last summer shutdown, and the results are used for the alignment of new quadrupole magnets. For the doublet magnets on the common girder, they are precisely aligned on the girder before the installation into the ring tunnel. In the ring tunnel, the girder is adjusted to locate the magnets to the designed position. After alignment of the magnets, the precise measurements are conducted.

PF直線部用四極電磁石の据付とアライメント

1. はじめに

PF(Photon Factory)リングは2.5GeVの電子蓄積リン グであり、1982年に運転を開始して以来、20年以上 にわたってユーザー運転に供されてきた。PFリング では2005年3月より9月まで運転を中断し、直線部増 強の為の改造作業が行われている。

直線部増強においては、1980年代に製作された直 線部の四極電磁石が全て(46台)更新され、ボア径を 小さくして、磁場勾配が高く、磁石長の短いものに 変更された。さらに、四極電磁石の設置場所も、直 線部両端の偏向電磁石にできる限り寄せることによ り、既存の直線部を最大4m延長し、また、新たに4 箇所の短い直線部(1.4m)を作り出すことが可能と なった。

今回の直線部改造の為に、まず2004年夏のシャッ トダウン中にリング全周の一括測量が行われ、その 結果を基準として電磁石据え付けの為の設計座標を 算出した。実際の据え付けの際には、垂直方向には 水準儀(N3)を、水平方向にはレーザートラッカー (SMART)を用いた。本論文においては、まず測量結 果と解析方法、設計座標の算出について述べた後、 実際の据え付け方法について述べる。

2. リングー括測量結果及び設計座標

2004年夏のシャットダウン中に、直線部増強作業の試行を兼ねてリングー括測量を行った。ここでは その方法と結果について述べる。

2.1 従来の測量方法と新しい方法

PFリングにはモニュメント(トンネル床面に固定 された、ビームの高さ(1.2m)の柱)が29箇所存在す る。これまでの改造では、垂直方向(高さ方向)の 測量及び電磁石据付に対してはWILD社製の水準儀 (N3)が用いられ、水平方向(主にリング内外方向) に対しては、レーザーで長さを校正したインバール 線を用いてモニュメント位置を補正した上で、モ ニュメント間に釣り糸をぴんと張り、その糸まで延 びる腕を電磁石側面に取り付け、腕に付けられた印 と糸の位置を拡大鏡で見て比較するという方法が取 られていた。

今回の改造においては、SMARTを用いた水平測 量がPF-ARやKEKB[1],[2]で既に実績を上げているこ とを踏まえた上で、さらにインバール線を用いた旧 来のシステムの再立ち上げの困難さもあり、最終的 に水平方向の測量と据え付けにはSMARTを用いる こととなった。なお、垂直方向には従来通りN3を 使用しており、電磁石の傾きについても従来通り精 密水準器を使用した。

測量は、電磁石本体の測量座(位置と加工の精度 が整った直径4cmの穴)にターゲットを載せる台座 を固定し、そこにターゲットを載せて行う。ター ゲットは球の端を切り落とした様な形(載せ方に依 らず中心が出る)で、N3の場合は同心円が印刷さ れたガラスがはめ込まれており、SMARTの場合は レーザーを反射する鏡(Cat's eye)が埋め込まれてい る。測量座は、改造前の古い電磁石では上部に1カ 所、側面に1カ所存在し、今回導入する電磁石では 上部に2カ所、側面に1カ所存在する。

N3を用いると、ある点から見渡せる範囲の電磁 石の相対的な高さが測定できる。なお、測定は各電 磁石につき上部の1カ所のみ行った。一方、 SMARTでは、SMART本体を原点として、見渡せる 範囲のターゲット座の3次元座標(x,y,z)が測定でき る。ここで、SMARTで垂直位置を測定することも できるのだが、10m離れたターゲットで0.1mmの精 度を出す為には、SMART本体の傾きを0.01mrad以 内に調整しなければならず、時間的制約からそれは

¹ E-mail: shinya.nagahashi@kek.jp



図1 水平方向の座標変換例

行わず、N3を用いることとした。

2.2 結果の解析方法

水平方向を例に取り、測量結果の解析方法を述べる。リング全周を15区分(各区分の座標原点が SMART位置)に分け、測量を行った。隣り合う各区 分で数カ所、同一のターゲットを測定し、それを重 ねることでリング1周の座標を導出した。例えば区 分Aと区分Bの重複点のデータについては、最初は 図1-(a)の様であるが、重心位置を平行移動で重ねた 上で、点を直線近似した傾き同士が重なる様に座標 を回転させると、結局図1-(b)の様になる。区分の全 測定点のデータについて見てみると、最初は図1-(c) の様であるが、繋いだ後は図1-(d)の様になる。ただ し、この方法でリング1周を繋いだとしても誤差が 積み重なる為に、区分Aは1周繋いだ区分Aとは重 ならない(Aから繋ぎ始めた場合)。その補正の為、 各区分同士を重ねる変換(平行移動と回転)に補正



量を加える。無補正では水平位置が最大で4.4mm程 度、回転角が0.13mradずれていたが、まず回転の補 正(15個の変換全てに対し、0.009mrad多く回す) を行うと、1周繋いだAと元のAで角度の差はなく なり、重心位置のずれも同時に0.5mmまで小さくな る。次にこのずれを15分割して平行移動量の補正を 行い、1周繋げた区分Aと元の区分Aとが完全に重 なるようにした。最終的に重複測定点は平均を取る ことにして、リング1周の測定座標を求めた。

2.3 測定結果と設計座標

新たに据付ける直線部の電磁石だけでなく、今回 は既存の弧部の電磁石の位置修正も行うこととした。 据付けの際に基準とする座標データは、2004年の測 量結果をそのまま用いることとした。

水平測量の結果を図2に示す。横方向(リング内 外方向)では、最大で0.6mm、平均で0.16mmほどの ずれがあることが分かった。新しい電磁石を据付け る場合と既存の電磁石の位置を修正する際に用いる 設計軌道としては、完全に理想の軌道(偏向電磁石 で作られるポリゴン)を取ることとした。設計座標



図4 据付けに使用したターゲット例

を実際の座標に重ね合わせる際、弧部の電磁石の測 定結果と設計座標との差が最小になるように全体の 傾きと重心を調整した。

一方、垂直位置(図3)については、全体として 入射点付近が最も低くなるように傾いていることが 分かった。修正量を最小にした上で、垂直分散関数 や電子ビームのXYカップリングを防ぐ為に、全て の電磁石が、ある傾いた平面上に乗る様に設計座標 を決め、据付けと修正を行うこととした。

3. 電磁石据付の方法

4.1 概要

新規導入する四極電磁石は46台、架台の数は26台 存在する。据え付け手順としては、まず四極電磁石 の納入保管場所であるPF電源棟において、架台上で 電磁石の位置を精度0.1mmで精密に調整し、その後 光源トンネル内に架台と電磁石を一体で丁寧に搬入 した。トンネル内では、架台の調整機構を用いた架 台全体としての位置調整しか行わないこととし、架 台全体として精度0.5mmで仮据付けを行い、その後 真空ダクトが設置されてから精度0.1mmの精密据え 付けを行った。据え付けに際しては偏向電磁石とモ ニュメントは一切調整しないものとし、それらを基 準として用いた。

4.2 架台上での電磁石精密据付け

同一の架台に2台の四極電磁石が載っているもの に対して、架台上で相対的な位置調整を行った。精 密経緯儀(セオドライト、トランシット)と水準儀 を用い、垂直位置調整は四極電磁石と架台の間にシ ム(金属薄板)を挟み込むことで行った。

4.3 罫書き・ベースプレートの設置

電磁石据付け後の架台調整量を最小減とするため、 罫書き及びベースプレート(架台の足を固定する分 厚い金属板)の設置は精度約1mmを目標に行った。

(架台の調整機構は15mmの余裕がある。) リング内の床面には、旧四極電磁石架台のための ベースプレートが埋設されているため、新ベースプ レートは床面から3cmの高さに設置した。プレート 自体はケミカルアンカーで固定し、床面との隙間は モルタルで埋めた。ベースプレート設置については、 以前の罫書きと比較して特に大きく辻褄の合わない 箇所はなかった。

4.4 仮据付け

新電磁石は、旧電磁石の搬出後、PF電源棟より架 台毎リングトンネル内に搬入した。その後、電磁石 を半割りして真空ダクトを設置する為の仮据付けを 行った。できるだけ速く真空ダクトを設置する必要 があった為、前述のように仮据付けは精度0.5mmで 行い、ダクト設置後、再度時間をかけて精密据付け を行うこととした。

仮据付けでは、水平方向はモニュメント2カ所の 測定結果を基準として用いて、設計座標をSMART を原点とした座標系に重ね合わせ、目標となる電磁 石の座標を取り出した。垂直方向については、リン グ内側の壁面に取り付けられているターゲット座を 基準にして相対的な高さの差が小さくなるように据 付けを行った。架台上の調整は済んでいる為、据え 付けに際しては図4に示す様に各架台上の電磁石両 端のターゲット座2点だけを用いた。調整はSMART 及びN3の値を見ながら架台に取り付けられている 位置調整ボルトで行った。

4.5 精密据付け

精密据え付けと仮据付けで調整方法は同じである が、座標を算出する際の基準測定点の数と、調整に 費やす時間が異なる。また、高さ方向については両 脇の偏向電磁石を基準とし、水平方向については図 4に示すように偏向電磁石側面とモニュメントの合 計6点を測定し、座標系を重ね合わせた。

傾きもについても精密水準器を用いて調整した。 現在、まだアライメン後の精密測量を行っている ところであり、終了次第解析を行う予定である。

5. まとめ

2004年夏にリングー括測量を行い、その結果を用いて2005年の直線部増強作業において精密据付けを行った。据え付け精度は、水平、垂直方向ともに0.1mmを目標としており、現在リング全周の精密測量を行っている最中である。

参考文献

- R. Sugahara, et al., "Installation and Alignment of KEKB Magnets", Proc. of IWAA99, ESRF, 1999
- [2] K. Egawa, et al., "Magnet system for the KEKB main ring", NIM A, Vol.499, 2003, pp24-44