

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. リング一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一括測量を行った。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

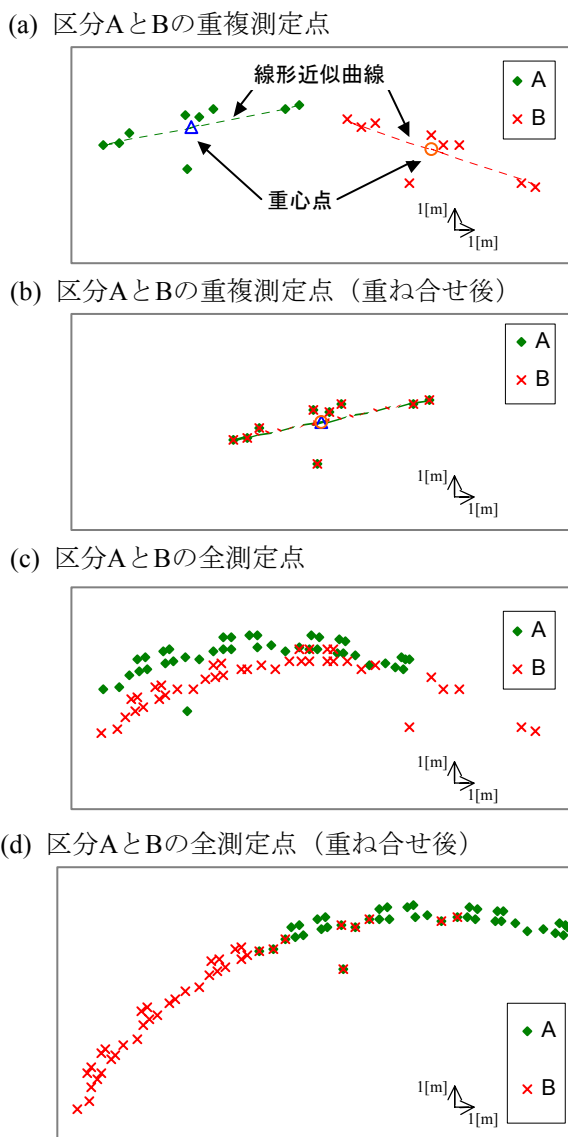


図1 水平方向の座標変換例

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

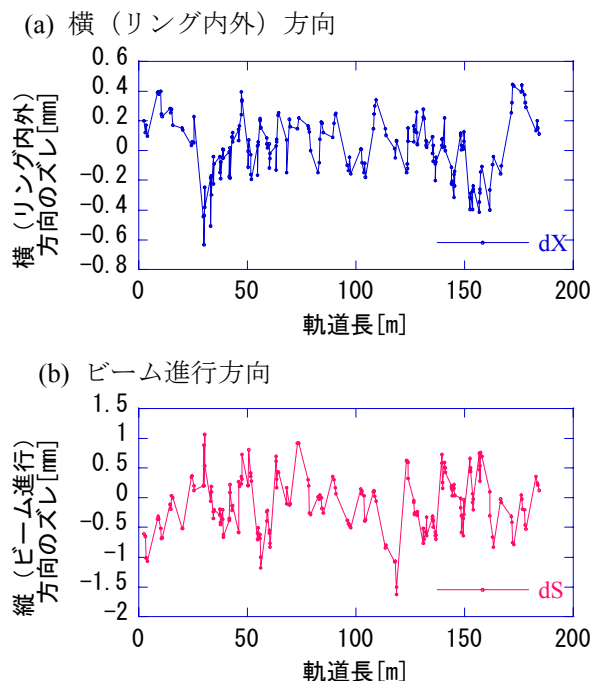


図2 水平測量結果

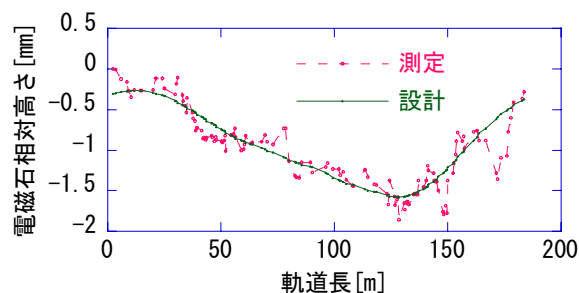


図3 垂直方向測量結果と設計座標

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周繋いだ区分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)を取ることにした。設計座標

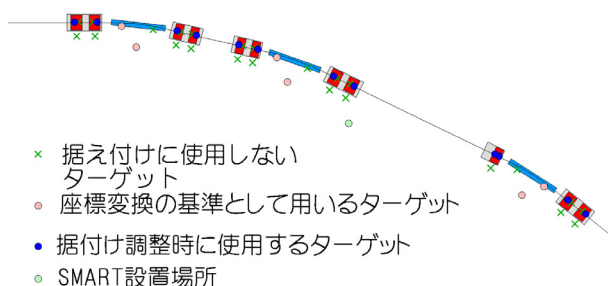


図4 据付けに使用したターゲット例

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褃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、まだアライメント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年夏にリング一括測量を行い、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

- [1] 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