

ビームコリメータ部の QSC 電磁石用六軸架台の試作

PROTOTYPE OF SIX-AXIS MOUNT FOR QSC MAGNET IN BEAM COLLIMATOR AREA

白形政司[#]

Masashi Shirakata [#]

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) in Tokai village is equipped with beam collimators in order to improve the quality of the proton beam. The beam collimators must be shielded by steel or concrete because they emit a large amount of high energy γ -rays and neutrons when the halo components of the beam are physically removed. In the case of the 3-50BT collimator, the allowable beam loss was increased from 450 W to 2 kW in 2010 to increase the intensity of MR, and the increase in the radiation dose to the environment was dealt with by constructing a steel gate-shape shield covering the whole beamline. However, the maintenance of the quadrupole magnets between the collimator units has become difficult because of the gate-shape shield, which eliminates the space for workers to stand. Especially, the alignment of the quadrupole magnets will be almost impossible when the residual radiation level rises. Therefore, a simple hexagonal frame (six-axis mount) for the magnet alignment without the need for workers to crawl under the shielding structure has been developed. This paper reports on the outline, operability and stability of the prototype.

1. はじめに

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC では、取り扱う陽子ビームの品質を上げるためにビームラインおよび加速器の各所にビームコリメータを設置している。ビームコリメータはビームのハロー成分を物理的に取り除く際、大量の高エネルギー γ 線、中性子線を周囲に放射するため、鉄やコンクリートを使って適切に遮蔽を行う必要がある。MR 行きビームを整形する 3-50BT コリメータでは、MR の大強度化に向けて 2010 年に許容するビームロス量を 450 W から 2 kW まで増やし、環境への放射線量増加には Fig. 1 に示すようなコリメータ、電磁石を含むビームライン全体を覆う鉄製の門型遮蔽を建設[1]することで対応した。



Figure 1: A gate-shape shield system introduced in 2010.

遮蔽体そのものは LM ガイドレール上を動くことでビームラインを解放するが、大型の鉄橋の増築によってコリメータ部では作業者が立てる空間さえ無くなり、コリメータ本体およびコリメータ間に設置してある四極電磁石の保守作業性は大幅に低下した。特に四極電磁石のアラインメント作業は、今後残留放射線量が上昇すると

[#] masashi.shirakata@kek.jp

ほとんど不可能となる。そのため、遮蔽体の下に作業者が潜り込んだりする必要の無い、簡便な電磁石アラインメントを可能とする六軸架台を考案した。ここでは試作機の概要、操作性、安定性について報告する。

2. 六軸架台

2.1 QSC 四極電磁石

3-50BT は前後のリングとの光学整合をおこなうエリア、コリメータによるビーム整形エリア、その他の輸送エリアに大別される[2]。QSC 電磁石はビーム整形エリアに使用されている四極電磁石ファミリーであり、磁石本体の重量は約 4 トンである。磁極長 600 mm、一辺 840 mm の菱形をしており、Fig. 2 に外観を示す。現在の架台は調節ボルトを用いて位置、高さ、傾きを調節する平凡なタイプである。大ぶりのスパナを使うため作業スペースがとれる場所ではとくに問題無いが、遮蔽体の追加で作業者の配置に制限がかかる場所では作業効率をはなはだ悪い。そこで、通路側のみから簡便に電磁石アラインメントを行うことを目的とした、六軸架台を設計、試作した。



Figure 2: QSC family of quadrupole magnets.

2.2 六軸架台

六軸架台は XY リニアモーションステージの上に Z 移動機構、旋回機構、揺籃機構を載せた、階層構造となっている。XY ステージは、電磁石位置をビーム軸方向およびその垂直方向に変えるもので、THK 社の製品をそのまま利用している。Z 機構は鉛直方向の位置調整を行う。MR コリメータで実績のある三点ジャッキ構造を持ち、重量物を安定に上下させ、位置保持能力も高い。旋回機構には、THK 社のクロスローラーリングを用いている。今回の架台の目玉は、電磁石のビーム軸周りの回転 θ とビーム軸方向の傾斜 ϕ を調節する揺籃機構である。

Figure 3 に六軸架台の外観を示す。各軸の方向は定義を Table 1 に示した。右手系で表現するために Z 軸を鉛直上向きにとり、ビームの進行方向を Y 軸とした。傾き、回転については、各軸方向に右ねじの進む向きで定義してある。

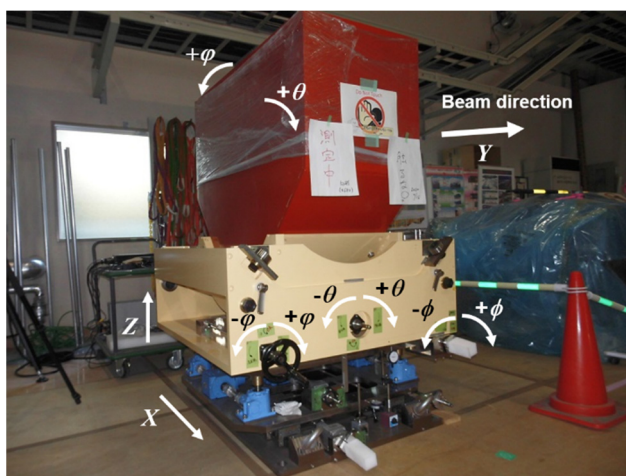


Figure 3: Overview of the six-axis mount.

Table 1: Definition of Axis Directions

X	Back to front.
Y	Identical to the beam axis.
Z	Vertically upward.
ϕ	Right-hand thread orientation to the x-axis. (Upstream down.)
θ	Right-hand thread orientation to the x-axis. (Front side down.)
ϕ	Right-hand thread orientation to the x-axis. (Upstream to the front.)

六軸架台の操作系は、すべて架台正面に持ってきてある。操作者は鉄橋越しに各軸を専用ダイヤルを使用して回すことで、電磁石の位置と傾きを調節する。動作確認には API 社製レーザートラッカー Radian によるリアルタイム測位を用いた。架台本体に用意してある基準座にピンネストを差し込み、その位置座標をモニターする。結果、本架台はレーザートラッカーの表示上で、 $20 \mu\text{m}$ 以下の精度での位置合わせが可能であると判明した。また、

すべての軸で、動作時のがたや観測位置の飛びなどは確認されなかった。これは、四極電磁石アラインメントに要求される位置精度 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 、回転・傾斜精度 $\pm 0.2 \text{ mrad}$ 以下で、自在に電磁石の設置状態を調節できるということである。

3. 安定度測定

3.1 測定方法

六軸架台において安定度の問題となり得るのは、新しく導入した $\theta\phi$ 揺籃機構である。電磁石の予備は無いので、鉛ブロックを積み込んだダミー容器で荷重 (4 t) をかける。レーザートラッカーは架台全体の動きを見るが、XY ステージおよび Z 機構の動きについてはダイヤルゲージを用いて別途監視する。電磁石とともに動く揺籃機構には、レーザートラッカー観測用にピンネストを挿せる基準座を四カ所用意してある。一台のレーザートラッカーで観測できる三カ所を観測点 A, B, C とし、長時間測定の前では観測点 A, B, C すべての変位を確認した。長時間測定時には、10分毎に観測点 A の座標を記録した。また精度を保つため、観測期間中レーザートラッカーの電源は常時 ON とした。

3.2 中央に近い状態での安定度

揺籃機構には負荷の荷重により、常に中央へ戻ろうとする力がはたらく。まず復元力が無い状態での安定度をみるため、 θ , ϕ を中央に寄せた状態での観測を行った。結果を Fig. 4 に示す。観測期間は 7/17(金)14:21 から週末を挟んで 7/20(月)02:16 までである。観測点 A の座標を 10 分毎に記録し、360 点をとった。縦軸は $20 \mu\text{m}$ ステップであり、XYZ いずれの方向にも変位は小さい。

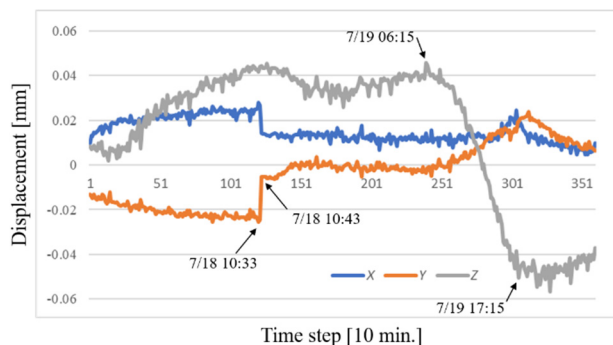


Figure 4: Stability of the cradle mechanism with low load.

XY については 7/18 10:33 と 10:43 の間に Z 軸周りに回転したかの様な動きが見られるが、その日は土曜日であり現場に人が立ち入った可能性は少なく、原因は不明である。記録[3]によると、7/18 10:36:57.9 に茨城県沖を震源とする M3.5 の地震が起きているが、最大震度 1 であり原因とするには規模があまりにも小さい。また、同規模の地震が 13:30:22.4 にも起きているが、その時は何も見えていない。そもそも、この変位量は測定精度とほぼコンパラであり、有意では無いかもしれない。なお、この一回目の長期観測前後でダイヤルゲージのふれは X 方向が $4.085 \rightarrow 4.090 \text{ mm}$ 、Z 方向が $3.920 \rightarrow 3.950$

mm であり、架台下部では X 方向にはほとんど動いていない。

XY 方向に比して、Z 軸方向には有意と思われる変位が見られる。特に 7/19(土)06:15 から 17:15 にかけて 0.1 mm 近く動いており、有意な差といえる。Figure 5 に測定を行っていた C2 搬入棟内の気温と気圧の記録を示す。測定を開始した 7/17~19 早朝までは気候が涼しく、7/19 の日中から気温が上がっていることがわかる。トラックには温度、気圧補正機能があり、架台本体が温度による影響を受けたと思われる。なお、気圧に対する相関は認められない。

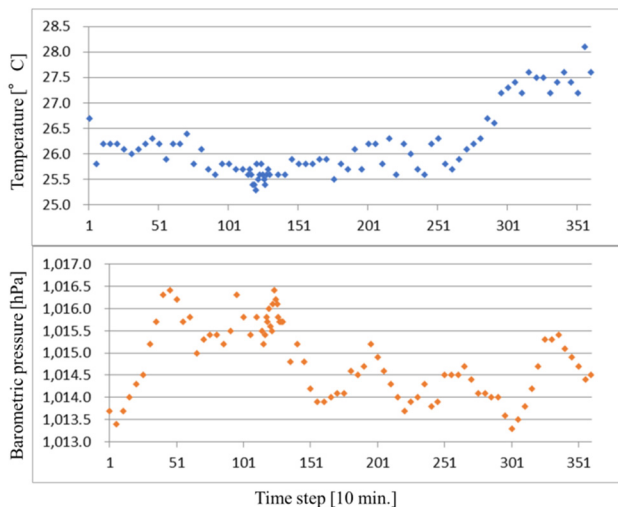


Figure 5: Room temperature and barometric pressure trend in C2 carry-in building.

3.3 復元力がある状態での安定度(1)

次に復元力が働いている状態での安定度をみた。通常は架台そのものも水平を出して設置されるため、架台と電磁石の間で傾きに大きな差が出ることは無い。ここではあえて負荷に傾きを与え、揺籃機構に復元力が働いている状態を作り出した。 θ はプラス方向にハンドルを 40 回転、 ϕ はマイナス方向に 40 回転し、それぞれ+6.6 mrad、-6.2 mrad の傾きとした。測定は 7/21(火)12:36~7/27(月)10:18 まで、850 点を収集した。結果を Fig. 6 に

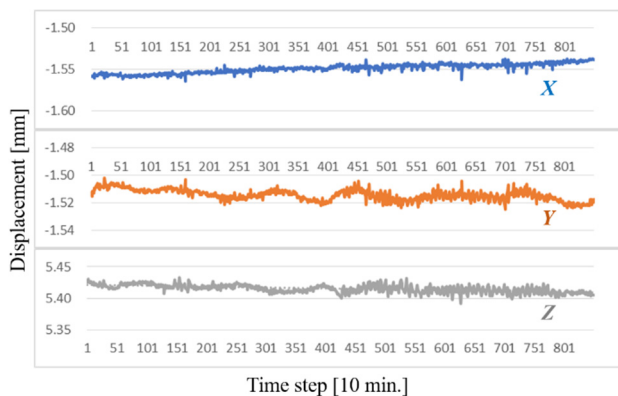


Figure 6: Stability of the cradle mechanism with the restoring force.

示す。

X 軸方向に一方方向への変位が見られるが、その大きさは 20 μm であり、測定誤差範囲内である。現時点で、一方方向に変位しているとは言えない。YZ 方向についても、変位量は同程度。ただし、Xに比べて振動が見える。今回の測定以降、C2 搬入棟内の気温はほぼ 27°C で安定しており、Z 座標の有意な変位は見られなくなった。

3.4 復元力がある状態での安定度(2)

揺籃機構に復元力が働いている場合でも、安定度に関しては無いことがわかった。じつは揺籃機構には Fig. 7 に示すようなストッパーが θ , ϕ に対し各四箇所、合計八箇所ついているが、本架台を現場で使用する際は、これらのストッパーは原則として使用しない。正面側からの操作のみで電磁石アラインメントを完了するという、目標にそぐわないからである。そこで、すべてのストッパーを解放した状態で、二度目の安定度測定を行った。また、傾斜をこれまでの二倍にし、揺籃機構に働く復元力も大きくした。結果を Fig. 8 に示す。



Figure 7: Stopper handles for cradle mechanism.

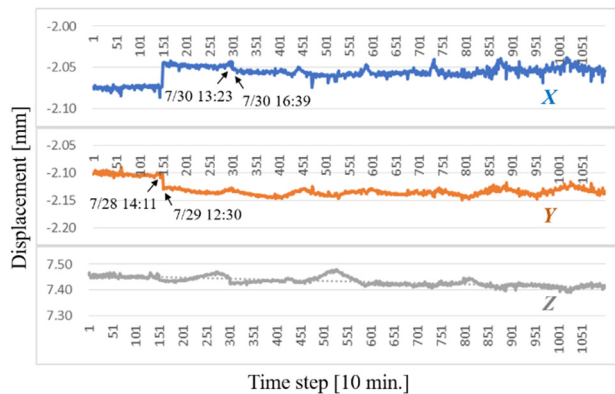


Figure 8: Stability of the cradle mechanism with the restoring force, and without stoppers.

測定は 7/27(月)13:19~8/5(火)06:00 まで。今回は、150, 150, 800 点の三回の測定をまとめた。150 と 151 の

間で値が飛んでいるが、7/18 の時とは逆方向に本体が振れた可能性がある。この間に 22 時間のブランクがあるが、この時は 7/29 05:33:23.4 に茨城県沖を震源とする M4.5 の地震が起きており、最大震度 3 だったので何らかの影響があった可能性があるが、いづれにしても 30 μm 未満の話であるので問題とはならない。300 と 301 の間も 3 時間強空いているが、そこでは何も起きた様子が無くシームレスにつながっている。周期的に見える動きは日較差である。X 座標で上に凸になっているところは 16~17 時頃に対応しているが、何が見えているのかはよくわからない。結論としては、揺籃機構のストッパー群を使用しなくとも、アライメントされた状態は維持されると思われる。

3.5 ダイアルゲージによる X, Z の安定度確認

レーザートラッカーによる一連の安定度測定期間中、X, Z 軸方向の動きをダイアルゲージで個別にモニターした。セットアップを Fig. 9 に示す。もともと三軸をモニターするつもりであったが、ダイアルゲージが一台故障していたため、電磁石アライメント的に重要度の低い Y 軸方向(ビーム軸方向)をモニタリングから外した。結果を Table 2 にまとめた。Z 軸については、ダイアルゲージの指示値とレーザートラッカーの Z 座標値は向きが逆になるので注意されたい。ダイアルゲージの値が大きい時、負荷は下にさがっている。レーザートラッカーによる連続観測の前後で X の変位は 20 μm 未満となっており、ほとんど動いていない。Z では 40 μm 程度あり、レーザートラッカーで観測された変位の半分くらいである。ただ、いづれにしても問題となる大きさではない。



Figure 9: Independent stability monitoring for X and Z direction.

3.6 その他所見

その他の所見を、以下にまとめる。

- 観測点となる基準座同士の間隔は、数値に端数がある。現場で扱う人間には、わかりにくい。
- θ の操作において、Y は不変であるべき。Z の変位量に対する Y の変化は 0.47% であった。
- φ の操作において、X は不変であるべき。Z の変位量に対する X の変化は 0.30% であった。
- 直角度は、十分に出ていると考える。

Table 2: Stability on Axis X and Z

	X [mm]	Z [mm]
Setup	4.050	3.960
Before measurement test.	4.050	3.920
Before 1 st meas.	4.085	3.920
After 1 st meas.	4.090	3.950
Before 2 nd meas.	4.085	3.910
After 2 nd meas. (6 days)	4.088	3.909
Before 3 rd meas. (no stoppers)	4.080	3.964
1 st break	4.080	3.967
2 nd break	4.067	3.973
After 3 rd meas.	4.050	3.930

試作した六軸架台は求められる調節精度を満足し、各調節機構の安定度も十分で、概ねうまく出来ていると言える。しかしながら、完成形とするまでに、まだいくつか確認すべき事項が残っている。まず、基準座の位置を最適化するべきである。また、本測定を行う前に、軸継手のひとつでピン抜けが発見された。これは架台の輸送中に想定していないスラスト荷重がかかったためと思われる、若干設計の見直しが必要である。さらに、本架台を現場に設置する際ビーム軸方向の寸法が一杯いっぱいと思われるので、揺籃機構のサイズ縮小を検討中である。

上記の他、外力を加えた際の変位確認が必要である。ビームラインに置いた電磁石には自然または人為的に力加わることがあり、一時的に変位、変形があっても基準座位置で最終的にアライメント精度内に収まっていなければならない。Table 3 および Fig. 10 に今回の安定度測定期間中における、J-PARC に影響しそうな地震情報をもとめた。丸の大きさは最大震度に、色は震源の深さに対応している。リストの上から最初の三つは一回目(中央に近い状態)の測定中である。四番目は測定の合間、五番目は復元力がある状態(1)、六~九番目は復元力がある状態(2)の測定中であるが、レーザートラッカーによる連続測定で観測にかかっているかも知れないのは一、六番目(いづれも震源地:茨城県沖)のみである。

4. まとめ

門型遮蔽の増築によりアライメント困難な状況になっている QSC 四極電磁石ファミリーのために、通路側のみからの簡便な操作でアライメントを実施できる六軸架台を設計、試作した。位置および回転・傾斜調節能力は十分要求性能を満たし、正面からの簡便な操作のみで 4 t の電磁石をアライメントできる。そして、いったん電磁石の姿勢を設定すると、長時間にわたって安定してその状態を保持する。周囲温度が $\pm 1^\circ\text{C}$ で安定していれば、変位量は一週間で 40 μm 程度である。これは、アライメント精度として十分である。実電磁石の架台入れ替えにはまだ若干改善すべき点があるが、MR 大強度化に必要な新架台の設計は概ね完成したと考える。

Table 3: Earthquake List During this Measurement Period

Date	Epicenter	Magn- itude	Maximum seismic intensity
2020/07/18 10:36:57.9	Off the coast of Ibaraki	M3.5	1
2020/07/18 13:30:22.4	Off the coast of Ibaraki	M3.5	1
2020/07/19 21:01:29.1	Off the coast of Ibaraki	M4.3	2
2020/07/20 19:32:46.4	Southern Ibaraki	M3.8	2
2020/07/22 13:07:37.1	Southern Ibaraki	M3.1	1
2020/07/29 05:33:23.4	Off the coast of Ibaraki	M4.5	3
2020/07/31 23:05:38.0	Off the coast of Fukushima	M3.2	1
2020/08/01 17:03:28.3	Nakadouri	M2.7	1
2020/08/04 23:03:06.5	Off the coast of Fukushima	M3.7	2

- Kyoto, Japan, May 23-28, 2010, pp. 4246-4248;
<http://accelconf.web.cern.ch/IPAC10/papers/thpec081.pdf>
 [2] Accelerator Group, JAERI/KEK Joint Project Team, “Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC”, JAEI-Tech 2003-044, KEK Report 2002-13, pp. 193-199;
<http://cds.cern.ch/record/747209/files/34072617.pdf>
 [3] Japan Meteorological Agency, Various data and materials, Seismic intensity database search;
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>

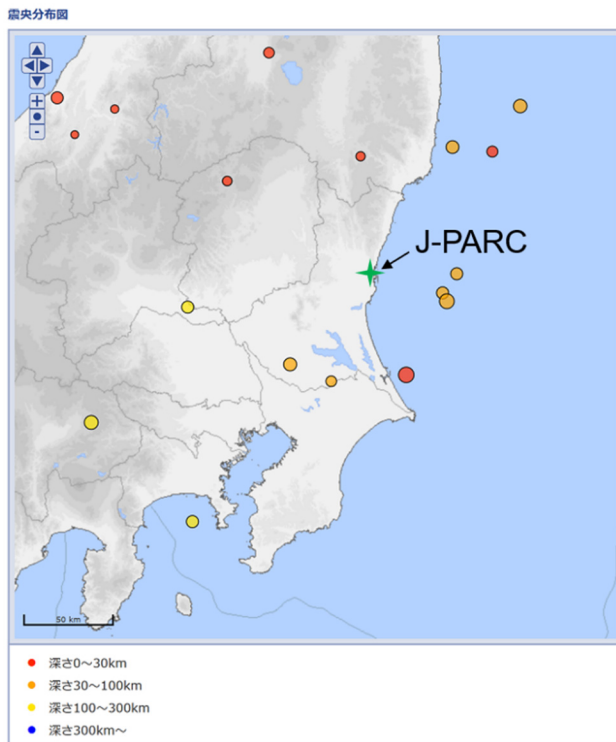


Figure 10: Epicenter distribution during this measurement period. (from 2020/07/17 14:00 to 2020/08/05 07:00) Maximum seismic intensity one and above only.

参考文献

- [1] M. J. Shirakata *et al.*, “UPGRADE OF RADIATION SHIELD FOR BT COLLIMATORS”, Proc. of IPAC2010,