

## SPring-8 蓄積リングの電磁石と架台の温度および位置の変動と軌道変動

### TEMPERATURE AND POSITION VARIATION OF THE SPRING-8 STORAGE RING MAGNETS AND GIRDERS AND ITS EFFECT TO ELECTRON ORBIT

妻木孝治<sup>#</sup>

Koji Tsumaki

JASRI/SPring-8

#### Abstract

Orbit stability of less than 1  $\mu\text{m}$  is needed for low emittance storage ring for synchrotron radiation source. One of the sources of orbit change is temperature change and the resultant magnet position change. We measured the temperature change of magnets and girders for two double bend achromat cells of the SPring-8 storage ring after turning on the power supplies of the magnets. In a cell, temperature change of the upper and lower stream is smaller than that of the central magnet of the cell. In a girder, the temperature change of the central magnet is higher than the magnets of both ends of girder and its difference reaches to 0.5  $^{\circ}\text{C}$ . We also measured the position change of the magnets on the three girders for a cell. The relative position change of the center magnets on the girders was measured by the Peek Carbon Wire that was connected to the magnets of both ends of girder. After turning on the power supplies, the central magnets on the three girders moved to the outer and upper direction with the temperature rise of magnets. The maximum changes were 30  $\mu\text{m}$  for horizontal and 38  $\mu\text{m}$  for vertical direction. We calculated the closed orbit distortion assuming the position changes for the whole cells in the storage ring are the same as the measured cell. Calculated maximum orbit distortions for horizontal and vertical directions are 2.6 mm and 0.46 mm, respectively.

#### 1. はじめに

最近の放射光リングでは、精密な実験を行うためサブミクロンの軌道安定性が要求されている。SPring-8 蓄積リングでも軌道の安定性を確保するために、軌道変動の原因を特定し、その原因を取り除き、それでも残ったものをステアリング電磁石で補正するという方針で軌道安定化をはかってきた[1]。

軌道変動の原因の一つとして温度変化による 4 極電磁石の中心の変化がある。SPring-8 でも初期のころ、運転開始とともに軌道が徐々に変動していくことが観測された。その理由として通電により電磁石や架台が温められ磁石中心の位置が変化し、軌道が変化するものと推定された[2]。そのため運転の一週間ほど前から通電し、電磁石と架台を熱平衡状態に持って行ってから運転するようにしていた。最近では通電経費の節約の観点からクイックスタートの試験を行い[3]運転の 2 日まえから通電するようにしている。

軌道変動の原因は温度変化による電磁石や架台の位置の変化とされているが、以前調査した時は 1 個の架台上の電磁石と架台の温度を測定しただけであり、位置の変化はレーザーと CCD カメラによる測定であり精度的にも必ずしも十分とは言えなかった。今回、温度と磁石の位置の変化と軌道の変化の関係をより明確にするため、温度測定は 2 セル分 6 架台上の電磁石と架台の温度を熱電対で測定し、位置の変化もレーザーより正確なワイヤーによる計測システムを 1 セル 3 架台に設置し、その結果をデータベース上に記録するようにした。

これらの測定結果をもとに温度とともに電磁石や架台がどのように変動し、それが軌道に及ぼす影響について検討したのでその結果について述べる。

#### 2. 温度と位置の測定

##### 2.1 温度測定

SPring-8 蓄積リングは 4 4 個の Double Bend Achromat ラティスからなるセル (DBA セル) と 4 個の長直線セルからなり、各セルは C1 から C4 8 までの番号が付けられている。DBA セルは 10 台の 4 極 (Q) 電磁石と 7 台の 6 極電磁石と 2 台の偏向電磁石からなり、偏向電磁石以外は、A 架台 B 架台 C 架台と名付けられた 3 台の架台上に据え付けられている。軌道の位置に影響を及ぼすのは 4 極電磁石の位置の変化と偏向電磁石の変形が考えられるが、今回は 4 極電磁石の変化を詳しく調べることにし、温度測定は C9 と C15 の A 架台上の Q1、Q2、Q3 電磁石、B 架台上の Q4、Q5、Q6、Q7 電磁石、C 架台上の Q8、Q9、Q10 電磁石と対応する架台上の各点について行った。図 1 に示す A 架台を例に測定箇所を示す。測定は一個の 4 極電磁石あたり、電磁石の上部と下部、架台の上面と下面の 4 箇所を行った。従って全体の測定点数はセルあたり 40 点、2 セルで合計 80 点になる。センサーは直径 0.32mm の K 熱電対で、先端をアルミテープで電磁石や架台に密着固定させ、その上をウレタンで覆い外気の影響を低減させた。

図 2 に測定系を示す。熱電対は加速器が設置されている収納部からセルダクトと呼んでいる床のダクトを通して保守通路まで導かれマルチメータ (KEITHLEY 2701) に入力する。マルチメータの出

<sup>#</sup>tsumaki@spring8.or.jp

力は Ethernet を介してデータベースに保存される。

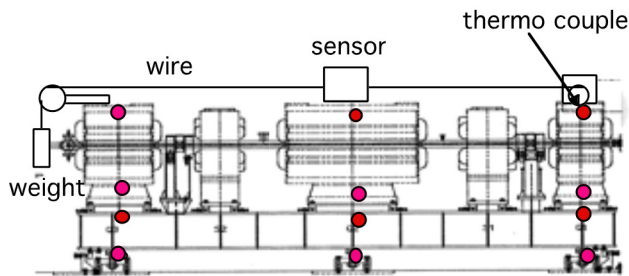


Figure 1: Measurement position of temperature by thermo couple (red circle) and the apparatus of magnet position measurement by carbon wire system.

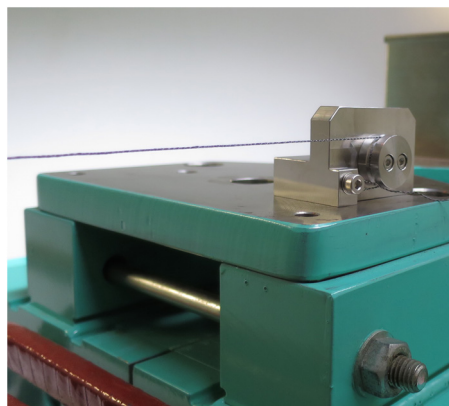


Figure 3: Carbon wire fixing device.

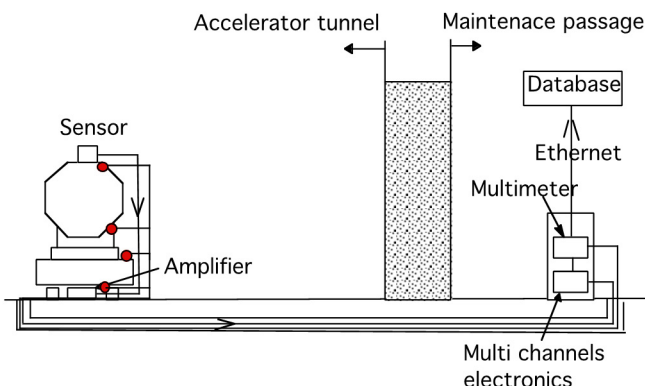


Figure 2: Measurement system of temperature and magnet position.

## 2.2 位置の測定

Spring-8 では架台上の電磁石を架台の両端の電磁石を基準にして一直線上に精度よくアラインメントし、架台間はレーザートラッカーで得られる精度にアラインメントした。軌道のずれへの影響は架台上の電磁石の一直線からのずれの方が大きいため、図 1 に示すカーボンワイヤーとセンサーのシステムを C15 にセットし、温度変化に伴う電磁石の変動を測定した。架台上の上流端の電磁石上に図 3 に示す FOGALE nanotech 製の直径 0.4 mm のカーボンワイヤー(PEEK Carbon Wire : CWMR-04)を固定し、中央の測定したい電磁石に図 4 に示す静電容量式の位置センサーをセットし、中央の穴にワイヤーを通し、架台の下流端の電磁石に図 5 に示す 2.5 kg のおもりをベアリングの入った滑車を通して吊り下げた。

測定は温度の時と同様に A、B、C の各架台上のセンサーからの信号を架台の下に置いた増幅器で増幅し計測器に導いたのち、マルチメータ、Ethernet を経由してデータベースに信号を取り込んだ。

測定に先立ちセンサーの出力と位置の関係を校正した。校正は図 6 (a) に示すようにステージ上にセンサーを置きワイヤーをセンサーの中を通し、ステージを上下させることで行った。結果を図 6 (b) に示す。

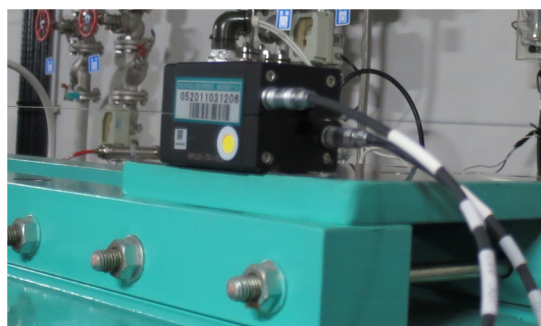


Figure 4: Capacitive position sensor set on a magnet.

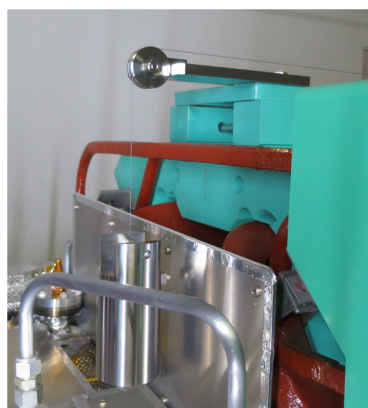
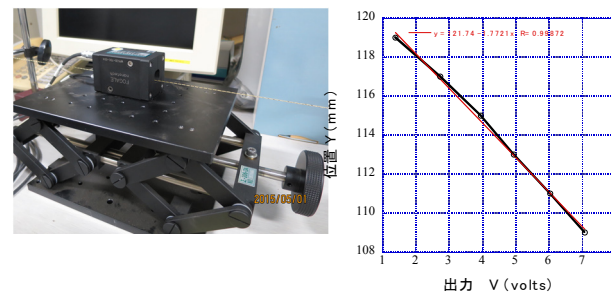


Figure 5: A pulley and 2.5 kg weight to keep the constant tension of the carbon wire.



(a) Wire and sensor on a stage (b) Calibration result

Figure 6: Calibration of carbon wire system.

### 3. 測定結果と検討

#### 3.1 温度

電磁石への通電前後の温度変化の様子を図7 (C9) と図8 (C15) に示す。電磁石と架台は通電とともに約6時間の時定数で温度が上昇して行く。C9のA架台では、電磁石、架台とも一番上流側のQ1、girder\_1の温度変化は少なく、下流に行くほど温度上昇は大きい。B架台では中央のQ5、Q6、girder\_5、girder\_6の温度上昇が両端より大きい。C架台ではA架台とは逆に最上流の電磁石Q8と架台girder\_8の温度変化が最も大きく下流に行くに変化が小さくなり、最下流のQ10、girder\_10はほとんど変化しない。C15についてもほとんど同様の傾向が見られる。またC架台では最下流の架台girder\_10の温度がわずかではあるが下降している。これらの電磁石と架台の温度の上昇分を図9に示す。C9、C15とも全体的にセルの中央の温度が一番高く、両端に行くに従って低くなる傾向が見られる。

SPRING-8 蓄積リングでは、架台上の両端の電磁石を基準にして、その他の架台上の電磁石を一直線上にアラインメントしている。そこで架台の両端部の電磁石と架台の温度の平均と架台中央部の電磁石と架台の温度の平均の差をとりプロットした (図10)。A架台C架台の温度差の変化は小さく、C9ではほとんど無視できる。C15ではA架台で0.2℃程度、C架台で0.1℃程度である。これに対しB架台ではC9、C15とも0.5℃程度の差が見られた。

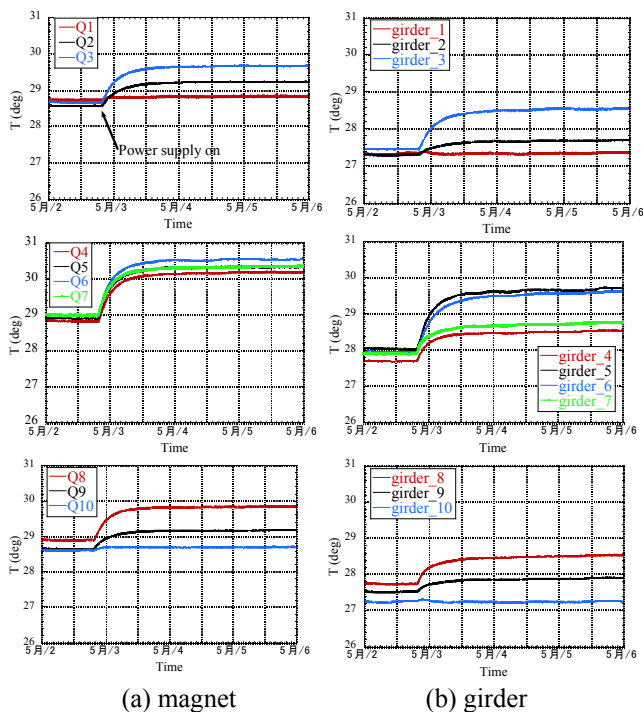


Figure 7: Temperature variation of (a) magnet and (b) girder of Cell 9. Magnets were turned on at 19:30.

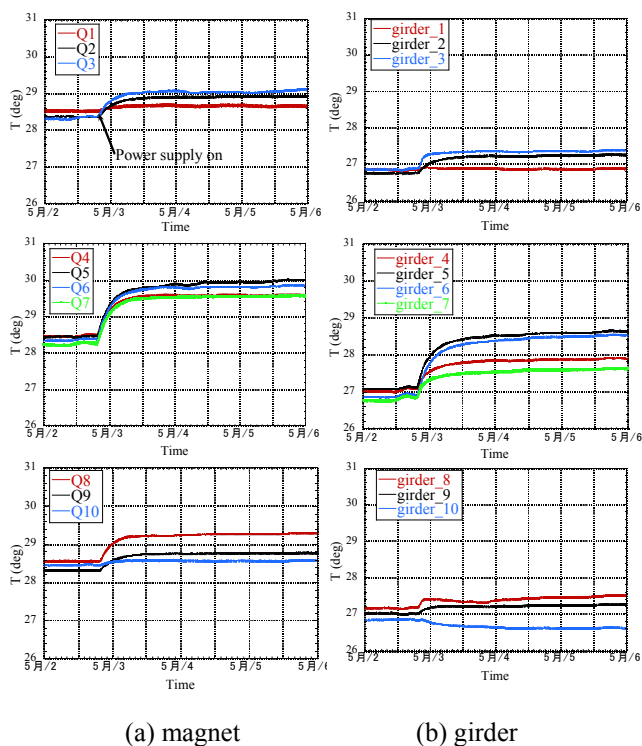


Figure 8: Temperature variation of (a) magnet and (b) girder of Cell 15. Magnets were turned on at 19:30.

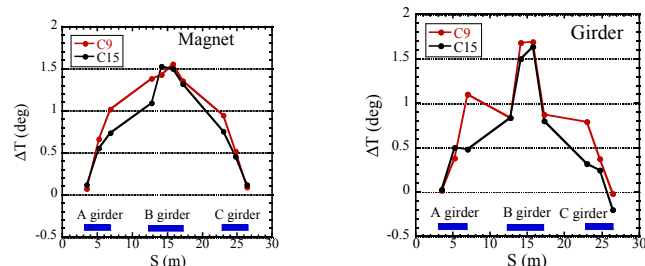


Figure 9: Temperature difference distribution of magnets and girders before and after turning on the power supplies.

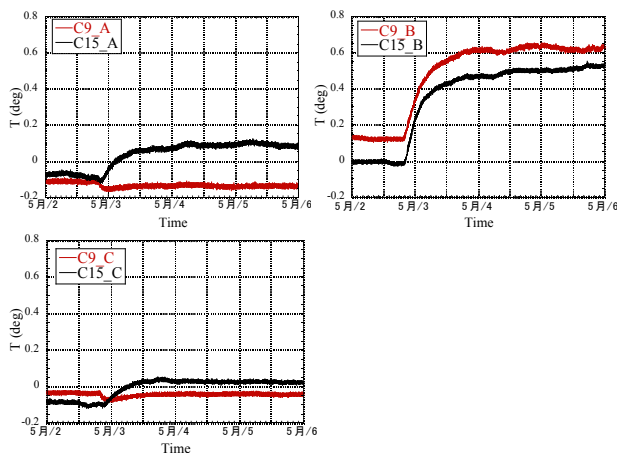


Figure 10: Temperature difference between the both ends of girder and the center of girder for three girders. Red lines and black lines show the temperature for C9 and for C15, respectively.

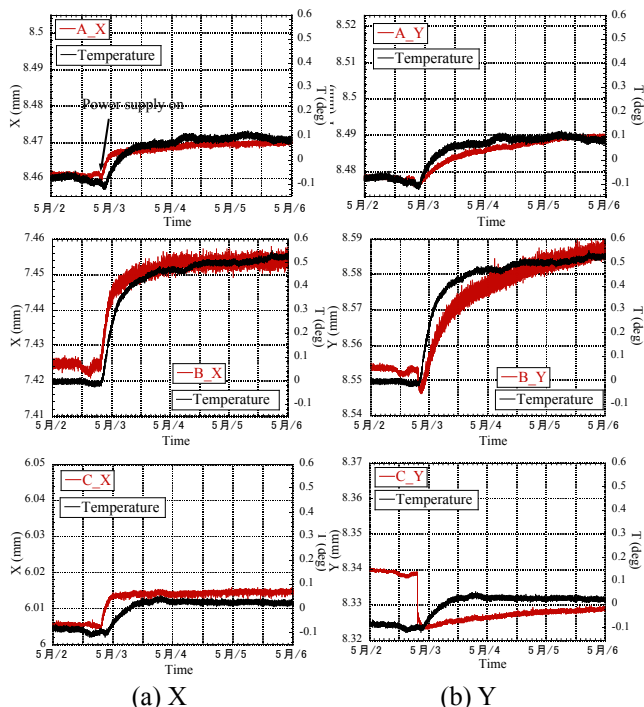


### 3.2 温度変化と位置の変化

図 11 に C15 の A 架台、B 架台、C 架台の両端の電磁石に対する中央の電磁石の相対的な変化を、温度変化と共に示す。ただし座標は加速器の座標と同じように水平方向が X (蓄積リングの外側が正) で、垂直方向が Y である。また温度変化は中央の電磁石部と両端の電磁石部の温度差をとったものである。水平方向は各架台とも中央の電磁石 Q2、Q6、Q9 が通電と共に X が正の方向 (外側) に増加して行く。A 架台、C 架台は  $10\ \mu\text{m}$  程度の変化であるのに対し、B 架台は  $30\ \mu\text{m}$  程度である。Y 方向は通電直後は中央の電磁石が下がる。特に C 架台の変化は大きい。中央の電磁石が下がる理由は、中央の電磁石は両端の電磁石に比べ電磁力による引力が大きいためである。さらに C 架台上の Q9 電磁石は放射光を取り出すため水平方向に広がった形状をしているため、強度的に弱く変化量が大きい。通電直後に下がった後は時間とともに上昇し、A 架台で  $14\ \mu\text{m}$ 、B 架台で  $38\ \mu\text{m}$ 、C 架台で  $5\ \mu\text{m}$  となる。

温度変化との関係は全体的に見れば相関が見られるが、個別に見れば異なっている部分もある。X 方向では、A 架台 B 架台は温度変化と同じ立ち上がりをしているが、C 架台では温度変化より早く位置が変化している。Y 方向は温度変化に比べ位置の変化がより緩やかに変化している。特に C 架台でこの傾向が顕著である。

Y 方向について両端と中央の温度差による膨張の差が位置の変化の原因と仮定すると、A 架台、B 架台、C 架台の温度差による膨張差ではそれぞれ  $4\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$  であり、温度差による熱膨張だけでは説明できない。



(a) X (b) Y  
Figure 11: Relative position and temperature variation after turning on power supplies for Q2, Q6 and Q8 magnets.

通電後 C15 の B 架台近傍の室温が  $0.3\ ^\circ\text{C}$  上昇した。もしワイヤーが熱により伸び縮みし、それを滑車が吸収しない場合垂直方向の誤差となる。PEEK Carbon Wire の線膨張係数は  $-1\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$  でワイヤーの長さが約  $5\ \text{m}$  であるため熱によりワイヤーは約  $1.5\ \mu\text{m}$  縮む。そこでワイヤーの端を図 12 に示すステージに固定し、ステージを  $2\ \mu\text{m}$  ステップでビーム軸方向に  $\pm 10\ \mu\text{m}$  動かした。結果を図 13 に示す。ステージを動かした時間は 14 時 10 分から 14 時 31 分の間である。図よりこの間で有意な変化は見られない。従って温度によるワイヤーの伸縮の影響は無視できる。

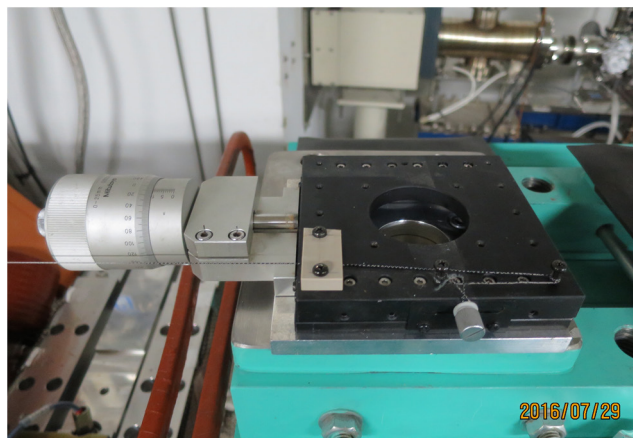


Figure 12: Carbon wire fixing device to move the fixing point along the beam direction.

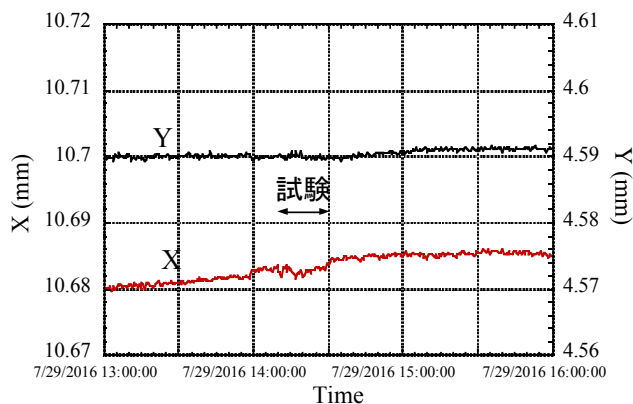


Figure 13: Position of Q6 magnet. Fixing point was moved  $\pm 10\ \mu\text{m}$ . Experiment was done from 14:10 to 14:31.

### 4. 閉軌道のずれ

通電直後と通電 3 日後の各架台の中央の電磁石の位置ずれに伴う閉軌道のずれを計算した。即ち A 架台上の Q2、B 架台上の Q5、Q6、C 架台上の Q8 に表 1 に示す誤差があり、この誤差がすべてのセルの同じ電磁石にもあるものとして閉軌道を計算した。B 架台上の Q5 電磁石にも Q6 電磁石と同じ誤差を与えたのは、B 架台上の電磁石が対称になって

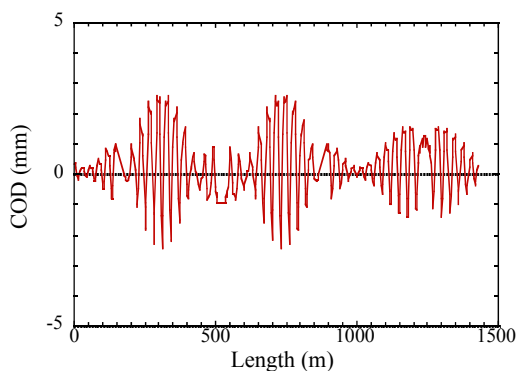
いるためである。また長直線部の両端の8個の架台は通常の架台と異なり約8mの長さがあり積載されている電磁石の数も他と異なるため変化量が予想できず、誤差はゼロとした。結果を図14に示す。x方向は最大2.6mm、y方向は0.46mm軌道がずれる。B架台の相対温度変化0.5℃に対する変化率は、x方向が5.2mm/℃、y方向が0.9mm/℃である。

温度変化はゆっくりであり、温度変動に起因する軌道変動は時間的にはステアリングで対応できる。しかしステアリングの数は有限であるためすべて補正しきれぬわけではないため、元の温度変動を小さくすることは重要である。

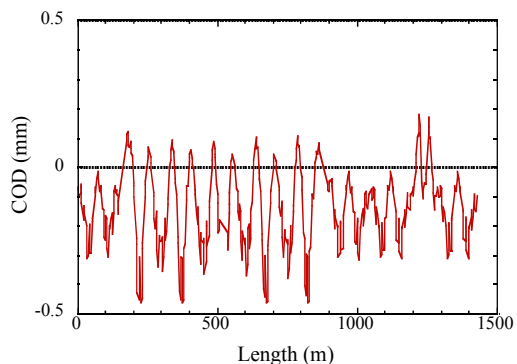
現在は3個の架台の変動からすべての架台が同じ動きをするものとして閉軌道のずれを計算したが、通電後の架台の動きとともに軌道の実際の動きを観測して温度変動や架台の変動と軌道のずれの関係をさらに明らかにするのが重要と思われる。

Table 1: Magnet Position Deviation

Magnet	dx / dy (μm)
Q2 (A girder)	10 / 14
Q5, Q6 (B girder)	30 / 38
Q8 (C girder)	9 / 5



(a) Horizontal COD X



(b) Vertical COD Y

Figure 14: Calculated closed orbit distortion assuming all girders have the same magnet position changes as C15 magnets.

## 5. まとめ

2セル6架台分の4極電磁石20台と対応する4極電磁石部の架台の温度を熱電対で測定し、データベース上に記録するようにした。通電後の温度上昇を観測したところ、電磁石と架台の温度は通電とともに約6時間の時定数で上昇し、2個のセルの温度上昇のパターンは類似していた。また一つのセル内および架台内で温度上昇に分布があることがわかった。セルの最上流にあるA架台では下流に行くに従って温度上昇が大きく、反対に最下流にあるC架台では下流に行くに従って温度上昇が小さかった。中央にあるB架台は一番温度上昇が大きく、最大1.6℃近くに達した。またB架台の中では両端の電磁石に比べて中央の電磁石の温度上昇がより大きく、その差は0.5℃ちかくであった。

1セル分3架台について両端の電磁石を基準にして、中央の電磁石の相対位置をワイヤーで測定し、データベースに取り込むようにした。各架台上の中央の電磁石は、各電磁石とも通電により温度が上昇すると水平方向はXが増す方向（リングの外側に向かう方向）に動き、垂直方向は高さが増す方向に動いた。移動量はB架台上の電磁石が一番大きく水平、垂直方向にそれぞれ30μm、38μmであった。A架台、C架台上の電磁石はこれより小さく、A架台で水平、垂直がそれぞれ10μmと14μm、C架台で9μmと5μmであった。

位置の変化は温度の変化と相関があった。水平方向の位置の変動の時定数はA架台、B架台ではほぼ同じであったがC架台では温度変動の時定数の方が大きかった。垂直方向に関しては温度変動の方が位置の変動よりより緩やかであった。

通電後の電磁石の位置ずれに伴う軌道のずれを計算した。位置ずれの測定結果は1セル分しかないが、残りの43セルも同じずれが発生すると仮定して計算を行った。その結果、軌道は水平方向が最大2.6mm、垂直方向が最大0.46mmずれることがわかった。

今後は実際の軌道が温度変化とともにどのように変動するか観測することが重要であると思われる。

## 参考文献

- [1] [http://www.spring8.or.jp/ja/about\\_us/whats\\_sp8/facilities/accelerators/upgrading/project/orbit\\_stability/#2.\\_Approach\\_to\\_orbit\\_stabilization](http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/facilities/accelerators/upgrading/project/orbit_stability/#2._Approach_to_orbit_stabilization)
- [2] K. Tsumaki *et al.*, "Effect of Temperature Variation on the Beam Stability of the SPring-8 Storage Ring", SPring-8 Annual Report, 1998, p. 129.
- [3] 高雄勝, "クイック・スタート試験の結果報告", SPring-8 ACC-MEMO, 2009-07.