

MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS FOR SuperKEKB/PF-AR POSITRON DAMPING RING

Kentaro Harada^{#A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Kazumi Egawa^{A)}, Mitsuo Kikuchi^{A)}, Masafumi Tawada^{A)}

^{A)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The construction of the SuperKEKB began in July, 2010. For the low energy ring (LER, 4GeV positron ring), because of the short Touscheck lifetime of the low emittance optics, the effective and frequent injection is essential to keep the high luminosity. Thus the damping ring (DR) is required to generate the low emittance positron beam. After the construction of the SuperKEKB, the 4GeV positron beam from DR will also be injected to the PF-AR. The bending magnets and the quadrupole magnets for DR were manufactured in 2010. The magnetic measurement system was also designed and manufactured in 2010. From 2011, the magnetic measurements began. In this presentation, the parameters of the magnetic measurement system and the tentative results of the magnetic field measurements of the DR magnets are shown.

SuperKEKB/PF-AR 用陽電子ダンピングリングの電磁石磁場測定

1. はじめに

KEKB リングは 2010 年 6 月 30 日に運転停止し、現在、SuperKEKB への改造作業が行われている。SuperKEKB は LER (Low Energy Ring : 陽電子 4GeV) と HER (High Energy Ring : 電子 7GeV) の衝突型加速器で、低エミッタンスのオプティクスを採用して高いルミノシティを実現する為、特に低エネルギーの LER ではビームの Touscheck 寿命が短く、高い入射効率での頻繁入射が必須となる。その為、電子ビームを標的に衝突させて生成される 2 次ビームである陽電子ビームをそのまま用いると、ビームサイズが大き過ぎて入射効率が非常に悪く、ビーム損失も大きいことが予想される。そこで、線形加速器の途中に Damping Ring (DR) を建設し、陽電子ビームのエミッタンスを小さくしてから再加速し、LER への入射が行われることになった^[1]。

また、SuperKEKB 及び DR の建設に伴い、PF-AR の入射方式も大幅に改造されることになっている。現在、PF-AR は 3GeV 電子を入射、6.5GeV まで加速してユーザー運転を行っているが、SuperKEKB の LER にあわせ、4GeV 陽電子入射、6.5GeV 加速してユーザー運転を行うことが検討されている^[2]。(直接入射路を新たに建設し、6.5GeV 電子で top-up も検討されている。)

ここでは、DR 用に製作された偏向電磁石 (Bending Magnet, BM) 及び 4 極電磁石 (Quadrupole Magnet, QM) の為の磁場測定装置の概要と測定の途中経過について述べる。

2. 磁場測定装置の概要

DR 用の BM、QM は 2010 年度にフランスシグマファイ社で製作された (表 1)。なお、DR では 6 極電磁石も用いられるが、それは現在設計制作中である。DR 用電磁石は従来の蓄積リング用電磁石に比べて磁極ギャップやボア直径が小さい為、既存の

磁場測定装置では磁場測定が困難であり、そこで、新たな磁場測定装置が製作された。

精密磁場測定は、磁場中でコイルを回転させ、コイルに発生した電圧を測定することで行われるのが一般的である^[3]。そのような回転コイルを、ハーモニックコイルという (図 1)。コイルに発生する電圧はそのコイルを貫く磁束の時間微分に等しく、

表 1 : DR 用 BM、QM のパラメータ

種類	名	有効長 L_{eff} [m]	規定磁場 (勾配) [T, T/m]	積層長 L_{lam} [m]	磁極 間隙 [mm]	製作 台数
偏向 電磁石 (BM)	B1	0.75	1.35	0.69	46	33
	B2	0.29	1.22	0.23	46	39
	B3	0.39	1.18	0.32	46	5
	B4	0.47	1.18	0.41	46	5
4極 電磁石 (QM)	QF	0.20	25.08	0.20	46	82
	QD		18.37			
	QS		25.08			

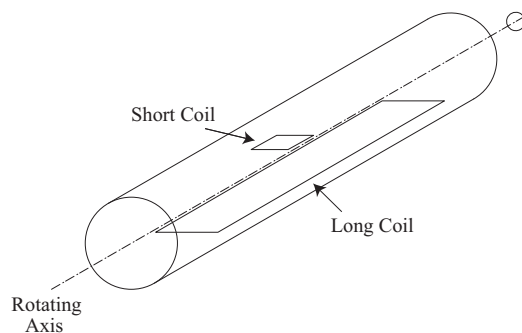


図 1 : ハーモニックコイル

$$V = -\frac{\partial}{\partial t} \varphi = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B_\theta dr$$

と書ける。ここで、 B_θ はコイルに垂直な磁場、積分はコイルに囲まれた面上での積分である。ここで、電磁石の磁場の角度方向成分は、多極展開して

$$B_\theta = \sum_{n=1} nr^{n-1}(A_n \cos n\theta - B_n \sin \theta)$$

と書ける。ただし、 A_n は normal 磁場の n 極成分、 B_n は skew 磁場の n 極成分である。従って、ハーモニックコイルの動径方向の内側位置を r_{in} 、外側位置を r_{ex} とすると、コイルが水平から角度 θ の場所にある時にコイルを貫く磁束は、以下の様に書ける。

$$\varphi = \sum_{n=1} L(r_{ex}^n - r_{in}^n)(A_n \cos n\theta - B_n \sin \theta)$$

ここで、 L はコイルの長さである。従って、コイルに発生する電圧は

$$V = \sum_{n=1} NLn (r_{ex}^n - r_{in}^n)(A_n \sin \theta + B_n \cos \theta) \dot{\theta}$$

となる。コイルの1回転を T 分割して電圧を積分すると、 $\Delta\theta = 2\pi/T$ として、角度 θ における電圧の出力値は

$$\begin{aligned} VS(\theta) &\equiv \int_{\theta - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta + \frac{\Delta\theta}{2}} V(\theta) d\theta \\ &= -2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} \sum_{n=1} (r_{ex}^n - r_{in}^n) \cdot (A_n \sin \theta - B_n \cos \theta) \end{aligned}$$

となる。従って、これをフーリエ展開すれば磁場の各極成分が得られ、

$$B_{skew}^{(n-1)} = \frac{n!}{2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} (r_{ex}^n - r_{in}^n)} VS_{n,\cos}$$

$$B_{norm}^{(n-1)} = -\frac{n!}{2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} (r_{ex}^n - r_{in}^n)} VS_{n,\sin}$$

となる。電磁石のビーム軸方向の中央で短いコイル(図1の short coil)を回転させれば、電磁石中心での磁場(勾配)が測定でき、電磁石を貫く長いコイル(long coil)を回転させれば、磁場の裾の漏れ磁場まで含んだ全体の積分磁場(勾配)が測定できる。積分値を中心値で割れば、実効長が計算できる。DR用に製作された、偏向電磁石用の磁場測定装置を図2に、4極電磁石用の磁場測定装置を図3に示す。

偏向電磁石用の磁場測定器は、磁場分布を測定する為に、コイルが水平方向に移動できる様になっている。磁場測定時には、2台のBMを向かい合わせに並べるが、一方は室温や水温変化の校正の為に参照用で、測定毎に交換はしない。偏向電磁石の据え付けは電磁石上部のターゲット座にターゲットを載せ、それを望遠鏡でのぞいて位置を決める。望遠鏡は図2手前に見える黄色い柱上部に固定できるようになっている。測定では2極成分のみ測定を行うが、水平方向にコイルを移動させることで、磁極間及び裾を含む広い範囲で磁場分布を測定することができ



図2：偏向電磁石用磁場測定器

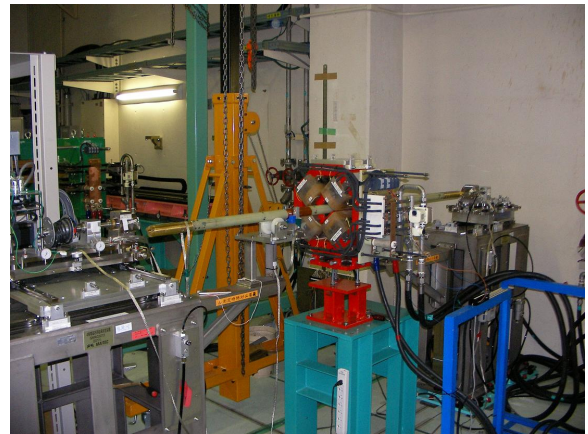


図3：4極電磁石用磁場測定器

表2：磁場測定コイルのパラメータ

	BM用	QM用 1巻	QM用 多数巻
ポピン外直径	20	40	40
短コイル 長さ	20	20	20
巻数	4	1	200
コイル外位置	9.05	14	13.5
コイル内位置	-9.05	1	1.5
長コイル 長さ	2000	1600	1600
巻数	4	1	40
コイル外位置	9.6	19	13.5
コイル内位置	-9.6	0	0

る。コイルは図1とは異なり、短コイル、長コイルとも、動径方向にはポピンの端から端まで張られている。(フリップコイルという。)このようなコイルを使うと、フーリエ変換せずとも電圧信号の和で2極成分を求めることもできる。なお、偶数次の磁場(中心軸対称の磁場)はハーモニックコイルと同様にフーリエ変換で求められる一方、奇数次磁場の効果は理想的には中心軸を挟んで左右で打ち消されるので、電圧ゼロとなり、求めることができない。今回は測定、解析方法を4極と統一する為、エンコーダを用いて正確に角度を刻んだ電圧波形を測定し、それを離散フーリエ変換して磁場を求めた。一方、4極電磁石の磁場測定では、電磁石を設置した後、コイルを通し、ベアリング一式を移動させてコイルを固定する。コイルは電磁石中央に精度よく固定され、測定ではフーリエ変換によって多極成分まで測

定を行う。電磁石の据え付けは、中心に十字に金属線を張った求心治具をボアに挿入し、それを望遠鏡で観測して行った。電磁石上のターゲット座とボア中心の関係は、今後、別途測定されることになっている。また、4極電磁石用のハーモニックコイルは2種類製作された。一方は磁束が貫く断面積を正確に決められる1巻コイル、一方は信号電圧を高め、正確に高次までの磁場が解析可能な多数巻コイルである。それぞれの磁場測定器のコイルのパラメータを表2に示す。

3. BM 磁場測定途中経過

現在までに B1、B3、B4 全数の水平磁場分布、励磁曲線の測定が完了している。測定に特に問題はなく、順調に進んでいる。図4に各電磁石全数の平均励磁曲線、図5に設計電流における平均磁場水平分布を示す。B1は33台、B3とB4は5台ずつの平均であり、設計電流値はB1が815A、B3、B4が700Aである。短コイルで測定した中心磁場(central field)を”ct”、長コイルで測定した積分磁場をコア長で割った実効磁場(effective field)を”ef”で示す。B3とB4はコア長が短い為、裾の効果が大きい。どれも設計時の磁場計算と比較して特に問題ない結果である。図6に全台数の磁場の統計的な標準偏差(standard deviation)を”sdev”として、平均からのずれの最大値を”dmax”として示す。設計仕様の個体差は3乗以内であり、測定誤差を考慮すれば、それは

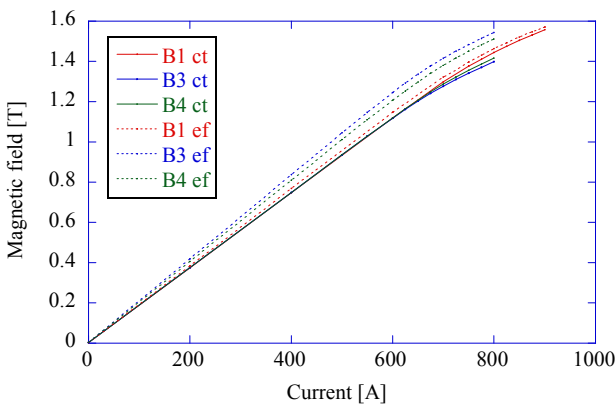


図4：励磁曲線（平均）

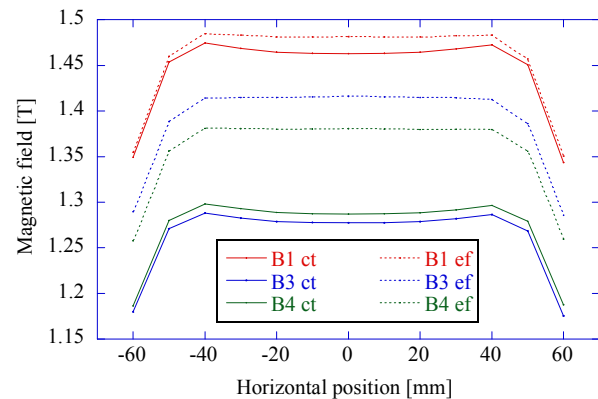


図5：磁場水平分布（平均）

満たされている。なお、励磁曲線は各電流値で10回測定、水平分布は各位置で5回測定の平均を行っている。各測定毎の10回、5回のばらつきは4乗~5乗台である。図7に磁場の傾きのばらつきを示す。測定前のアライメント時にターゲット座の清掃研磨を行っているが、1台に3カ所あるターゲット座の傾きのばらつき(数十 mrad 程度)を考慮に入れると(据付は3カ所の平均とした)、このばらつきは妥当である。

4. QM 磁場測定途中経過

QM については、テスト測定を行いつつ、磁場測定器のノイズ減少に取り組んでおり、現在までに1巻コイルで22台の測定を行い、多数巻コイルで6台の試験測定を行っている。まだ試験測定及び磁極端のエンドシムの検討中である為、ここではある程度時系列に沿って現状を報告する。

磁場測定装置の調整開始時、2極成分の誤差が特に大きかった。原因は回転コイルと端子台を結ぶケーブル(コイルを抜き差しする為に長く取ってある部分、図8)がコイルの回転とともに架台とこすれて何度か跳ねることと、電磁石コアが電氣的に浮

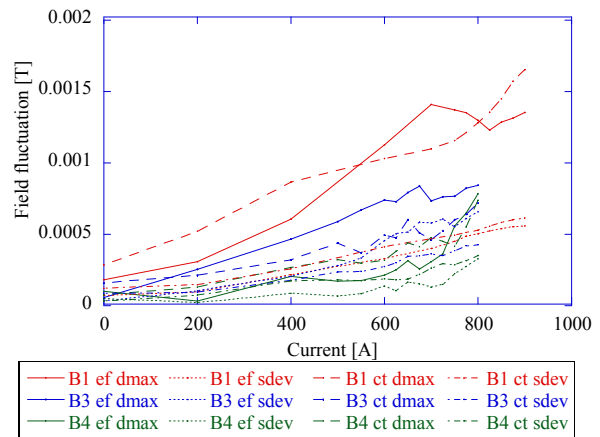


図6：電磁石個体差。測定結果の標準偏差とずれの最大値(絶対値)。

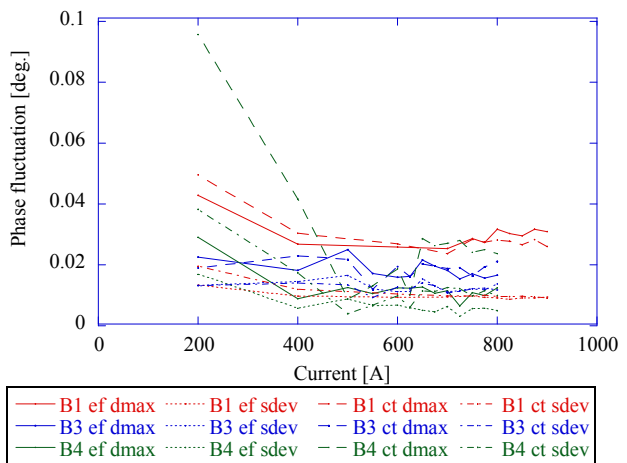


図7：電磁石傾きの個体差。磁場の2極磁場の位相のずれ最大値と標準偏差。

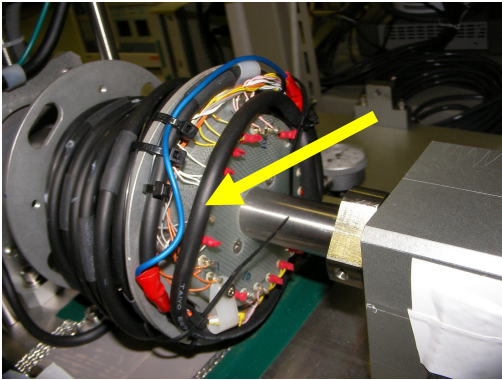


図 8：誤差 2 極成分の原因となったケーブル。（ケーブルタイで固定済みの様子。）

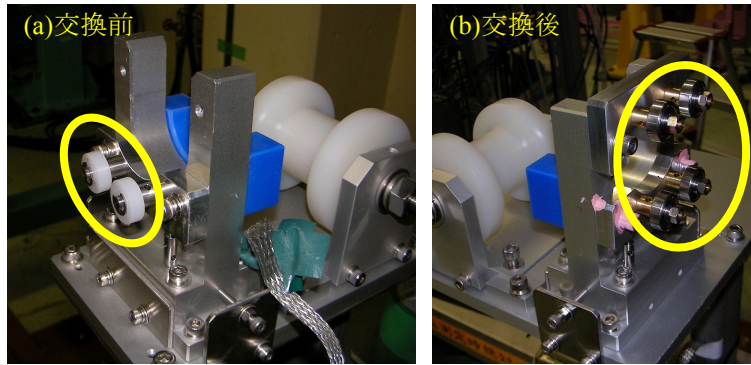


図 10：微少なスパイク状の誤差の原因となったベアリング。左側が交換前、右側が交換後（コイル挿入時、上側は外す）。

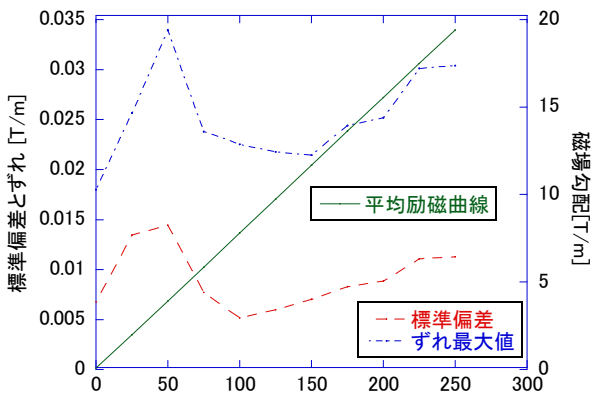


図 9：1 巻コイルによる励磁曲線の測定結果と、22 台のばらつき（ベアリング交換前の試験測定のみ）。

いていて、初期化で微妙に帯電することであった。どちらの誤差も測定毎におよそ再現し、励磁電流に依存しない誤差 2 極成分を発生させた。ケーブルを測定の度にきちんと固定する様にし、電磁石本体に接地線を取り付けることで、この誤差は抑制された。

1 巻コイルで測定した 22 台分の平均励磁曲線とデータのばらつきを図 9 に示す。高次成分は積分器の分解能以下である上に、誤差に埋もれてしまい、この段階ではうまく測定できていない。

さて、エミッタンスの大きい陽電子ビームを損失なく捕獲する為には、広いダイナミックアパーチャが必要であり、そのためには高次磁場、特に 12 極成分を補正する必要がある。ところが、12 極成分の電圧信号は 4 極成分のおよそ 1/1000 以下であり、正確な測定は容易ではない。特に 1 巻コイルでは、コイルからの電圧信号を正確に読み取る為に使う電圧積分器の最小分解能 (10^{-8} Vsec) に満たない信号となってしまう。そこで、磁場の絶対値の精度を若干許容（1 巻コイルの測定結果と比較校正）することにし、多数巻コイルを製作することにした。

製作した多数巻コイルで測定を行ったところ、信号電圧は向上したものの、やはり誤差が大きく、正確な測定ができていないことが分かった。信号波形

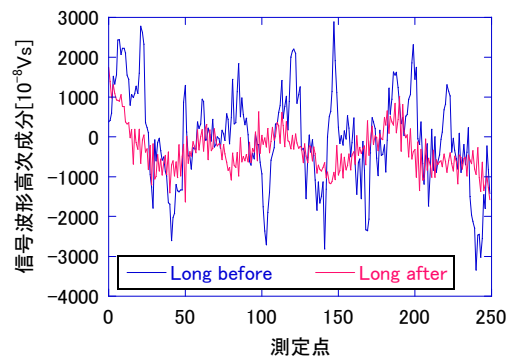


図 11：ベアリング改善前後の信号波形の比較。グラフは 350A 時の多数巻長コイルの信号波形から 2 極、4 極成分を引いた残りで、単位は積分器の分解能である 10^{-8} [Vsec]。（この単位のまま各極成分に対応するおよその振幅目安（改善後）は、2 極成分 5000、4 極成分 100000、6 極、8 極成分 500、10 極 300、12 極 100 程度である。）

から 2 極と 4 極を引いた後の多極成分波形に残るスパイク状のノイズがその原因であろうと推定し、その対策を行った。コイルは両端をエアベアリングで固定し、さらにたわみ防止の為に電磁石両脇の 2 点を樹脂製のベアリングで支えているが、この樹脂製のベアリング（図 10 (a)）のがたつきがノイズの原因である。コイル回転角（たわみによる力の差）に対するベアリングのがたつきもおよそ再現する為、測定毎に似た様な場所にスパイクが立つ。ベアリングをのがたつきのないものに交換し、上からもコイルを押さえる構造にした結果（図 10 (b)）、ノイズは大幅に減少した（図 11）。

ところで、DR の QM では、軸方向の磁極の端に鯉の様に出っ張り (tangential shim) が作ってある。電磁石内部で磁極の裾の磁場を持ち上げておき、軸方向の磁極端での落ちを補正する為であった。ところが、珪素鋼板の積層で製作された QM コアの磁極長をそろえる為に、電磁石軸方向の磁極端に面取り (end chamfer) を行った効果が予想以上に大きく、結果、軸方向の磁極裾でも磁場が持ち上げられ、12

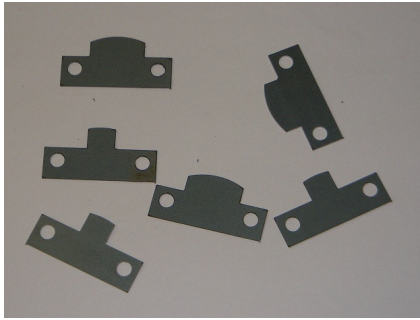


図 12 : 12 極成分補正用のエンドシム試作例

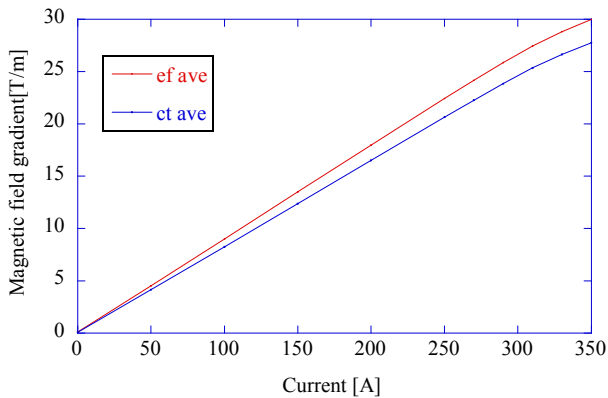


図 13 : 多数巻コイル、新ベアリング、シムなしで現在までに測定した 6 台の QM の平均励磁曲線。ef は実効磁場勾配、ct は中心磁場勾配。

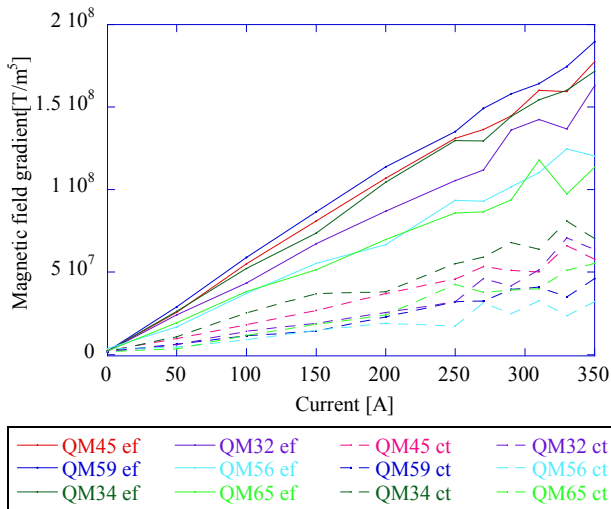


図 14 : 6 台分の 12 極成分の測定結果

極は 4 極と同位相で発生することとなった。現在、磁極中央付近の磁場を持ち上げる為のエンドシム板を検討、試験製作し (図 12)、枚数及び形状の最適化を行っている。

多数巻コイル、新ベアリング、シムなしの組み合わせで行った QM6 台分の平均励磁曲線を図 13 に示

す。6 台分の 12 極成分の測定結果を図 14 に示す。12 極成分は測定誤差が大きい為、誤差の為にばらついているのか、現実に個体差があるのか、まだ区別できていない段階である。

5. まとめ

SuperKEKB/PF-AR 入射用 DR の偏向電磁石及び 4 極電磁石の磁場測定を行っている。偏向電磁石については装置の立ち上げ等に問題はなく、順調に進んでおり、残りは B2 電磁石のみである。一方、4 極電磁石については測定誤差が大きく、装置の調整、改善を続けている。高次成分の補正が重要であるが、現在、12 極成分補正の為のエンドシムの設計検討及び試作、測定を行っている最中である。

参考文献

- [1] M.Kikuchi et al., "DESIGN OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPER-KEKB", Proc. Of IPAC2010, (2010), pp.1641-1643
- [2] H.Takaki, "PF-AR 入射路 4 GeV 化", 2012 PF シンポジウム予稿集(FL-05)
- [3] 原田他, "PF 直線部増強用の 4 極電磁石磁場測定", 第 14 回加速器科学研究発表会、つくば、2003, 1P031