

Development of the Continuously Adjustable Permanent Magnet Quadrupole

Takanori Sugimoto^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Masahiro Ichikawa^{A)}, Masako Yamada^{A)},
Akihisa Wakita^{A)}, Ichiro Kazama^{A)}, Toshiaki Tauchi^{B)}

^{A)} Institute for Chemical Research Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A permanent magnet quadrupole (PMQ) with continuous strength adjustability has been fabricated. It has a fivering-singlet structure, which was originally proposed by R.L.Gluckstern. Its small overall diameter allows an outgoing beam-line to be installed pass close by the magnet. Since the permanent magnet pieces do not have any mechanical vibration source in themselves, this magnet could be suitable as a quadrupole in a final focus doublet.

In this report, such a quadrupole system is presented.

強度可変4極永久磁石の開発

1. 導入

近年における永久磁石の技術発展にはめざましいものがあり、以前では考えられなかった高強度の磁場を実現できるようになった。それに伴って、特に加速器の分野では、より高いエネルギーをもった粒子の運動を永久磁石で扱うことができるようになった。

しかしながら、そのためには実際やってくるビームのエネルギーに応じて磁場強度の微調を行わなければならない。Glucksternが提唱した5つの4極磁石のdiscを組み合わせた複合磁石^{[1][2]}を用いればこの問題は解決でき、この複合磁石は一つの強度可変な4極磁石のように振る舞う。この際、それぞれのdiscをお互いに傾けることによって磁場の強度を変化させるが、傾きによって生じるx-y couplingの効果は複合磁石が持つ鏡面対称性をもって消し去ることができる(Figure 1)。この複合磁石を実際に製作したときには製作誤差や運転誤差、配置誤差などにより、上で述べたx-y couplingの効果は完全には消し去れず、x平面とy平面でbeamのサイズや角度が大きく異なる(例えば、International Linear Collider (ILC)最終集束系)ような光学系では命取りになりかねない。

我々はILCのInteraction Point (IP)における影響を、最終集束磁石としてGluckstern型磁石を用い、かつその磁石に誤差、特に回転誤差や磁石長誤差、軸ズレがあった場合について見積もった。同時に、我々はこの型の磁石を実際に製作しており、各discについては内部の磁場分布を測定し、多重極成分の大きさを求め、軸ズレの大きさを見積もった。

現在のILCのベースラインでは最終集束用磁石には超伝導磁石が用いられることになっているが、Cryostat内を通過する液体Heによって、またそれを送り出すポンプによって、磁石に振動が伝えられる可能性がある。ILC最終集束系にはIPでのbeam同士

の交差角が14mradと非常に浅く、磁石を配置するスペースを十分に確保できないという難点もある。Gluckstern型4極磁石はILCが要求するその2つの厳しい条件を満たすことができるという点で、超伝導に変わり得る十分な利点を持ったものである。我々はまず、Accelerator Test Facility 2 (ATF2) でのbeam実験を念頭に研究を進めている。

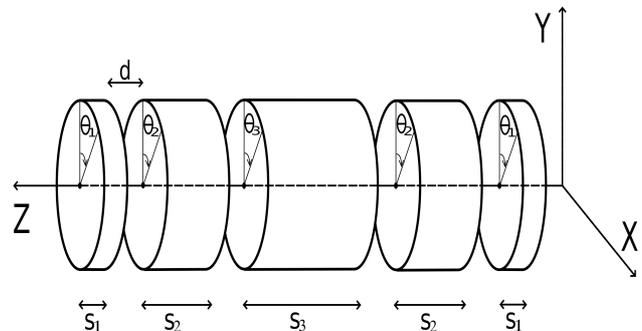


図1: Gluckstern型4極磁石

2. 誤差の推定

まず、それぞれのdiscに生じる3つの誤差、すなわち運転時における回転誤差、磁石長の製作誤差、磁石の磁場中心とbeam軸とのズレ、によって齎されるx-y couplingの影響を見積もった。この影響の推定にはfringe fieldや4重極より高次の多重極成分を無視した転送行列計算を用いた。

計算の単純化のため、まず図1の中のパラメータのうち、角度の絶対値が等しいと仮定する。

$$\theta \equiv \theta_1 = -\theta_2 = \theta_3 \quad (1)$$

次に、磁石長に集束力の可変範囲の下限を定める拘束条件

$$2s_1 - 2s_2 + s_3 = C \quad (2)$$

を与える。式(2)の中の C は集束力の下限を表す定数であり、計算を簡単にするため、これを0とおく。(この値は計算の過程に何ら特別な条件を付加しないので、実際には必要に応じてその値を変えて同じ計算を行える。)ここで4極磁石によるbeamの集束力が磁石の長さ按比例するという近似を用いた。これらの仮定は實際上、x-y couplingを打ち消すのに何ら問題とならない。式の見易さのため、以下のパラメータを導入する。

$$S \equiv 2s_1 + 2s_2 + s_3 \quad \lambda \equiv \frac{s_1}{S} \quad \mu \equiv kS \quad (3)$$

ここで式中 $k[L^{-1}]$ は4重極成分の大きさを表す定数で、

$$k = \sqrt{\frac{B'}{B\rho}} \quad (4)$$

で定義される。

これによりx-y couplingを打ち消すための各磁石長の比が他のパラメータにより一意的に決まることになる。事実、 $\theta_1 \sim \theta_3$ 、 $s_1 \sim s_3$ の6つのパラメータのうち、式(1)、(2)の3つの条件により、一次独立となる変数を3つに減らすことができるので、 $\theta_1 \sim \theta_3$ 、 $s_1 \sim s_3$ は式(3)によって導入したパラメータ λ 、 μ と θ を用いて書き直すことができる。Gluckstern型4極磁石全体の転送行列はそのまま扱うには非常に複雑なので、 μ が十分小さいとして3次以上の項を無視する近似を用いた。例えば、我々が実際に製作した磁石の μ は0.090 (k が $0.41[m^{-1}]$ 、 S が $0.22[m]$)となっている。

表1にILC計画が要求するIPでのパラメータを示す。これを用いれば、IPでの最終集束磁石に誤差がある場合のIPでのbeamサイズや角度に与える影響について見積もることができる。具体的に、最終集束磁石の直前でのbeamサイズや角度を表すベクトルを X_0 、IPでの誤差なしのベクトルを X 、誤差ありのベクトルを X^* として、誤差なしの最終集束磁石の転送行列を M_Q 、誤差ありの磁石の転送行列を M_Q^* とする。また、Drift Sectionを表す転送行列を M_{DS} としておく(図2参照)。

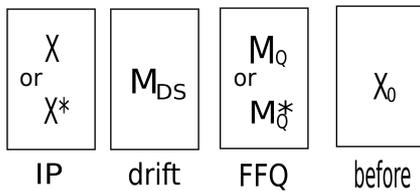


図2: ILCのIP付近の光学系

それらの関係は、

$$\begin{aligned} X &= M_{DS} M_Q X_0 \\ X^* &= M_{DS} M_Q^* X_0 \end{aligned} \quad (5)$$

であるから、

$$\Delta X = X - X^* = M_{DS} (E - M_Q^* M_Q^{-1}) M_{DS}^{-1} X \quad (6)$$

とできる。ただし、

$$M_Q^* = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad M_Q = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 \\ 0 & m_{22} \end{pmatrix} \quad (7)$$

とした。 M_Q 、 M_Q^* は 4×4 行列であり、 $m_{11} \sim m_{22}$ は 2×2 行列である。

表1: ILCのパラメータ

Parameter	Units	Value
Max Energy	GeV	250 (500)
Distance from IP to first Quad	m	3.5-(4.5)
Crossing Angle at IP	mrad	14
Beam size at IP, σ , x/y	nm	639/5.7
Beam divergence at IP, θ , x/y	μ rad	32/14

2.1 回転誤差

各discに $\delta\theta$ なる回転の誤差がある場合の誤差を、磁石の全体長が220mmに固定して見積もった。その結果、 ΔX を X の10パーセント以下に抑えるためには各discの回転誤差を表2のようにしなければならなかった。

表2: 許される回転誤差の最大値

Disc	Optimum length [mm]	Nominal $\delta\theta$ [rad]
First	17.33	$< 2.2 * 10^{-4}$
Second	55.00	$< 7.0 * 10^{-5}$
Third	75.34	$< 5.3 * 10^{-5}$
Forth	55.00	$< 7.6 * 10^{-5}$
Fifth	17.33	$< 2.5 * 10^{-4}$

2.2 磁石長誤差

同様に ΔX を X の10パーセント以下に抑えるためには各discの磁石長誤差をおおよそ100 μ m以下に抑える必要があることがわかった。

2.2 軸ズレ

各discの軸ズレはIPでのx-y couplingにほとんど影響しなが、仮想的なIPでのbeam位置に影響することがわかった。誤差によるIPでの位置のズレを1nm以下に抑えるためには軸ズレをおおよそ1 μ m以下に抑えなければならなかった。

3. 磁場測定と多重極成分の推定

我々は4つのdiscを製作し(図3参照)、個々に磁場測定を行い、その多重極成分を推定した。別に現在、磁石をより精密に組み立てるための固定具を製作しており、それが出来上がり次第5つ目のdiscの組み立てを行う予定である。

表3に磁場測定を行い推定した多重極成分の値を記した。個々のdiscについて、半径が4mm、8mm、12mmとなるような円周上の36点で動径方向の磁場強度をホール素子によって測定し、磁場が2極、4極、6極の和で表されると仮定してフィッティングを行い、平均をとって各値とした。より高次の多重極成分はここで行ったフィッティングでは無視している。

表3：各discにおける多重極成分の大きさ

Disc (length)	Dipole (STD DV) [G]	Quadrupole (STD DV) [G/cm]	Shift (Error) [μm]
First (20mm)	13.4 (7.45)	1740 (113)	76.8 (47.9)
Third (70mm)	5.87 (1.31)	2960 (27.7)	19.8 (4.62)
Forth (55mm)	99.0 (19.4)	2690 (97.3)	369 (85.4)
Fifth (20mm)	15.1 (2.70)	1670 (91.2)	90.1 (21.1)

製作するdiscの厚みがボア径に比べ小さい場合には磁力線が十分に内部に集中せず、無限長を仮定して行う2次元磁場計算と比べて磁場強度が弱くなる傾向がある^{[3][4]}。



図3：製作した厚み20mmのdisc

表3中において、磁石長が短いほど4極成分の値が小さいのはそのためであると考えられる。具体的に、無限長を仮定したときの内部の磁場強度を B_{max} とすると、有限長 s の磁石内部の磁場強度 $B(s)$ は B_{max} を用いて、

$$B(s) = \{F(z - s/2) - F(z + s/2)\} B_{max} \quad (8)$$

と書ける。ただし、 $F(z)$ は $z=0$ から $z=-\infty$ の領域に磁石があるとしたときの z 軸方向の磁場の最大値に対する比の分布、 $B(s)/B_{max}$ を表し、

$$F(z) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{z}{8} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \left\{ \frac{v_1^2 v_2^2 (v_1^2 + v_1 v_2 + v_2^2 + 4 + 8/v_1 v_2)}{v_1 + v_2} \right\} \right] \quad (9)$$

と書ける。ここで、 v_i は

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{1 + (z/r_i)^2}} \quad (10)$$

であり、 r_1 は磁石の内径、 r_2 は外径を表す。

磁石長を20mm、55mm、70mmとしたときの $B(z)/B_{max}$ は図4のような分布を示す。この効果により、磁石の長さの違いによる4極成分の大きさの違いをおおよそ説明できることがわかる。

この測定によって、4番目のdiscの軸ズレが他に比べ大きいことがわかった。これは組み立てによる誤

差の所為であると思われ、事実4番目のdiscに関してはその組み立て時の配置ズレが肉眼で確認できた。

Red:l=20, Green:l=55, Blue:l=70

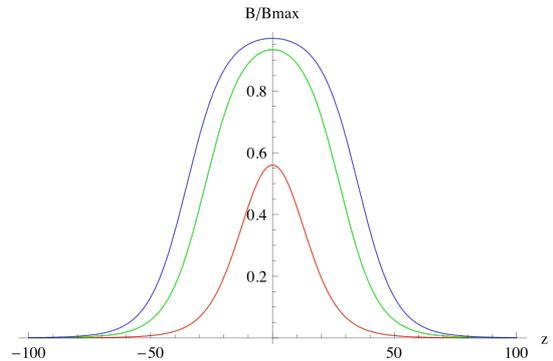


図4：有限長磁石内部の磁場分布

4. 結論と展望

まず、我々はGluckstern型強度可変4極磁石について転送行列を用いて、現実には生じ得る誤差の推定を行った。その際、磁場にfringe fieldや6極以上の多極成分を無視する近似を用いた。結果、各discに許容される誤差として、回転誤差については数十μrad以下、磁石長誤差については100μm以下、軸ズレについては1μm以下に抑える必要があることがわかった。

次に、我々は実際に磁石を設計し、4つdiscについては組み立てて、内部の磁場測定を行い、その多極成分の大きさを見積もった。結果として、まず磁石の長さが短いもので磁場強度がかなり小さくなっていることがわかった。これは解析的に十分説明でき、長さに対してボア径が大きいため起こる磁束密度の減少のためとわかった。次に4番目のdiscで軸ズレが非常に大きくなっていることがわかった。これは主に組み立て時の配置誤差による影響と思われる、現在組み立て時に使用する固定具を新たに考案し、調整を進めている。

3次元磁場計算によるbeam tracking simulationを用いた誤差の推定を行う予定である。また、磁場測定に関してはホール素子による測定が必要とする精度を十分に保証できない可能性があることが指摘されているので、rotation coilあるいはcoilを固定して、磁石を回転することによる磁場測定の機構の製作を進めている。

参考文献

- [1] R.L.Gluckstern et al, "Variable Strength Focussing with Permanent Magnet Quadrupole", Nucl. Instrum. Meth., **187**, 119, (1981)
- [2] R.L.Gluckstern et al, "Adjustable Strength REC Quadrupole", IEEE Trans. on Nucl. Sci., **30**, 3226, (1983)
- [3] K. R. Crandall et al, "TRACE 3-D Documentation, Third Edition", Los Alamos National Laboratory, (1997)
- [4] K. Halbach, "Physical and Optical Properties of REC Magnets", Nucl. Instrum. Meth., **187**, 109-117, (1981)