

永久磁石を用いた補正磁石の改良

IMPROVEMENT OF CORRECTION MAGNETS WITH PERMANENT MAGNETS

阿部賢^{A)}、岩下芳久^{A)}、照沼信浩^{B)}、不破康裕^{C)}、八子丈生^{A)}

Masashi Abe^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{C)}, Tomoki Yako^{A)}

^{A)}ICR, Kyoto Univ., ^{B)}KEK, ^{C)}JAEA

Abstract

Application of permanent magnets to the damping ring of International Linear Collider (ILC) is investigated. Replacing electromagnets with permanent magnets can reduce not only electricity for exciting the coils and maintenance cost of power supplies but also leakage accidents of cooling water. Bending magnets and correction magnets are used in damping ring, but we tried to calculate magnetic field distributions in correction magnets using permanent magnets with 3D magnetic field code CST studio. Then we improved magnet shape and calculated again, and the results of the evaluation are presented.

1. はじめに

現在、国際リニアコライダー (ILC) 計画の日本への誘致について、活発な意見交流が進められている。ILC の Technical Design Report(TDR) [1] では、ダンピングリング (DR) に用いる偏向磁石や集束磁石に電磁石を用いることになっている。DR 内に設置するそれぞれの磁石の数が多いので、電磁石のコイルの励起のための電力費や、磁石の水冷システムや電源などの保守費用が必要になる。そこで電磁石を永久磁石に置き換えることで、コイルの励起に必要な電力や電源保守費用の削減、磁石を冷却するための水冷システムにおける漏水事故の防止などが見込める。DR には複数種類の磁石があるが、本稿では補正磁石についての検討を報告する。補正磁石は偏向磁石と違い両極性の磁場を発生させる必要がある。これは半径方向に磁化した円柱磁石の x 軸周りの回転により実現でき、2次元での計算結果がすでに報告されている [2]。そこで本稿では、軌道面内の磁場分布の様子を 3D 計算により調べ、要求値に到達するように磁石の形状を変更した。

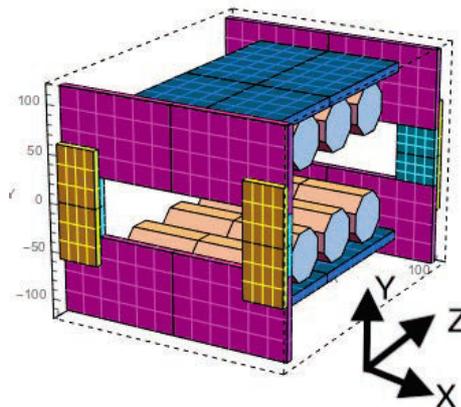


Figure 1: Former sample model.

になっており、隣合う永久磁石は互いに逆向きに回っている。また、ヨーク部分には鉄を用いる。なお、今回のシミュレーションには基本形状として図 1 のモデルを用い、その他の非磁性の部分は考慮していない。

2. 磁場計算

磁場分布の計算には CST studio suite 2019 を用いた [3]。磁石の形状は正八角形で、y 軸方向に残留磁化 0.38 T を想定している。磁石の回転角 θ ごとのビーム軌道軸上の磁場分布は図 2 上の上のようになっている。回転角の変化により両極性の磁場を作ることができるのが確認できた。 $\theta = 0^\circ$ のときの最大磁場は 0.13 T 程度になっている。またビーム水平方向の磁場分布は図 2 下の上のようになっている。このときのビーム軸上の磁場の y 成分を軸に沿って積分した値 (BL 積、 BL_y) は図 3 のようになっている。偏向磁石のビーム軸上の BL 積は 155 T·mm であり、偏向磁石の BL 積のおよそ 20% の値を取ることが確認できた [4]。BL 積から、多極成分が発生していることがわかる。今回は二種類の方法で多極成分を減らすよう

Table 1: Frame and Magnet Parameter

	$x[\text{mm}] \times y[\text{mm}] \times z[\text{mm}]$
青色部分	184×10×290
水色部分	43×61×8
ピンク部分	250×85.5×8
黄色部分	43×118×8
磁石部分	半径 26 の円に内接する正八角形 ¹ 磁石の x 軸方向の長さ 149 mm

補正磁石の各部分の寸法は表 1 のとおりであり、単位は mm である。検討する補正磁石には、フェライト磁石を用いており、その形状は製作の都合で正八角形とする。磁石はモーターにより回転する機構

¹ 実際には対向面間隔が 25.4 mm のフェライト磁石を 2 枚貼り合わせたものから切り出す。

モデルの形状を修正したが、十分に小さくすることができなかった [5]。TDR によると、磁石 1 個あたりの許容できる多極成分は sextupole/dipole = 2.6×10^{-6} と見積もることができる (以下 sextupole/dipole を SD 比と呼ぶことにする)。SD 比が小さいほど、粒子は通る位置によらず一定の力を受けることができる。図 1 の形状では SD 比が絶対値で 5×10^{-5} となっており、一桁程度大きい。

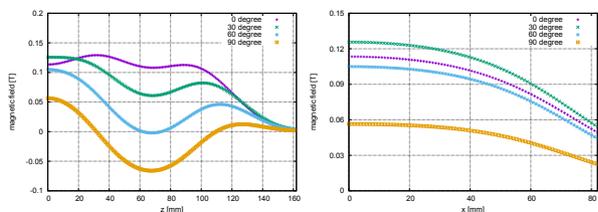


Figure 2: Field distribution on median plane. Top: z axis. Bottom: x axis.

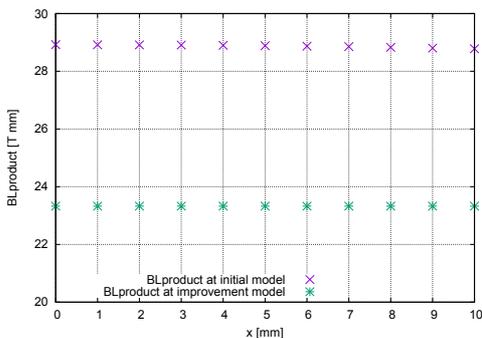


Figure 3: BLproduct before and after improvement.

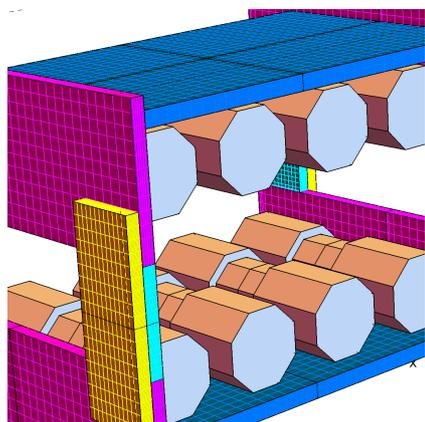


Figure 4: Improved sample model.

そこで、図 4 のように棒磁石の中央部分を周りの径よりも小さくすることでモデルの形状の修正を行った。修正する際には、元の形状のときに発生する磁場の大きさの変化が大きくなり、また BL 積も偏向磁石の BL 積の 10% 以上になるように磁石の径や内側の長さなどを決めた。磁石形状の変更部分は、中央部分の長さ L_{in} とその径 r_{in} の二種類である。

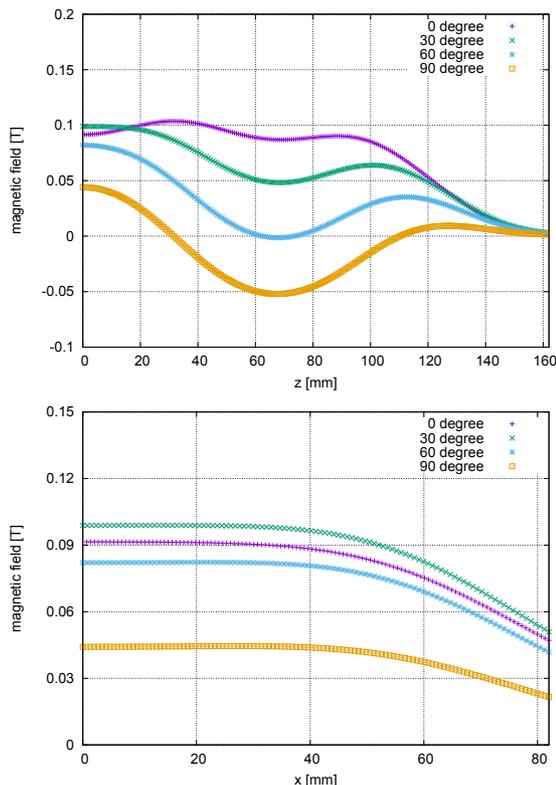


Figure 5: Field distribution on median plane at improved model. Top: z axis. Bottom: x axis.

まず回転角を $\theta = 0^\circ$ にした状態でビーム水平方向の磁場分布が元の形状に比べて平坦になるようにパラメータを決定した (図 5)。このとき、 $L_{in} = 80.0$ mm、 $r_{in} = 22.40$ mm であった。図 6 は、ビーム軸水平方向の磁場についての磁場分布 (相対値) である。形状の最適化後、磁場の平坦性が良くなったことが確認できる。また、元の形状でのビーム軸上の BL 積は 28.9 T·mm であるのに対して、最適化後は 23.3 T·mm であった。20% 程度減少しているが、可変幅はまだ偏向磁石の BL 積の 10% 以上あるので許容範囲である。図 7 は SD 比の比較である。赤色の線は sextupole/dipole = 2.6×10^{-6} を表しており、 $\theta = 0^\circ$ では赤線の内側に入っており、多極許容値を満たしている。回転角が大きくなるにつれて SD 比が大きくなっていくが、元の形状のときの SD 比と比べると小さくなっており、装置としての性能は向上している。

次に $\theta = 45^\circ$ にした状態で同様のことを行った。すると $L_{in} = 80.0$ mm、 $r_{in} = 22.85$ mm とパラメータを決定できた。BL 積は 23.9 T·mm であった。このとき SD 比は、 $\theta = 20^\circ \sim 60^\circ$ で赤線内側に入っており、 $\theta = 0^\circ$ のときに比べて広い範囲で多極許容値を満たしている。また、図 8 は六極成分の BL 積の絶対値を表したものである。対称性から 90° 付近では 0 になるはずであるが、それぞれ有限の値を持っているので、ビームの軌道に影響を与えると考えられる。

これらの結果から、 $L_{in} = 80.0$ mm、 $r_{in} = 22.85$ mm

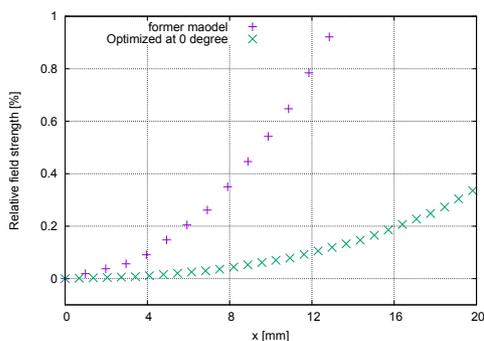


Figure 6: Magnetic field distribution before and after improvement.

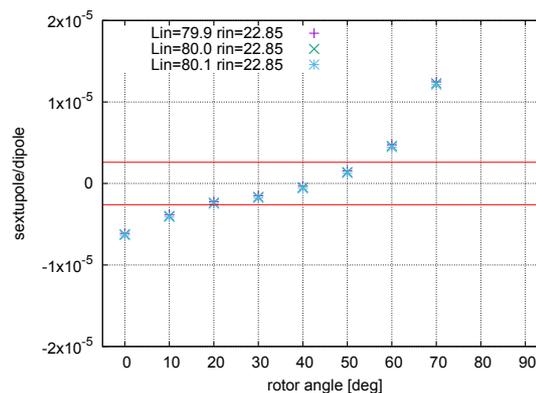


Figure 9: Comparison of SD ratio by L_{in} value.

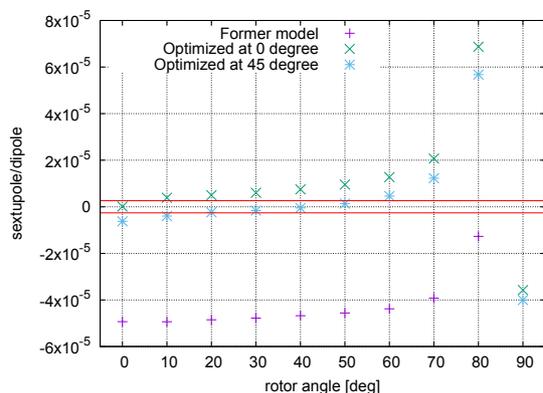


Figure 7: Rotor angle dependence of integrated sextupole component ratio.

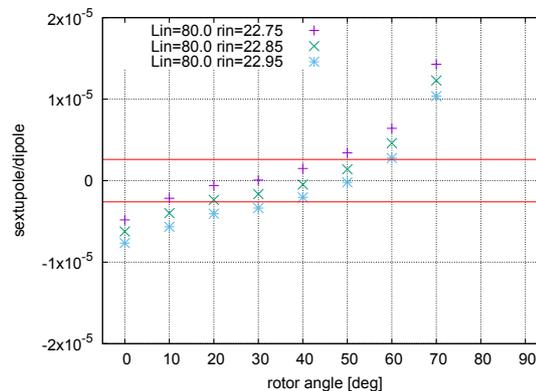


Figure 10: Comparison of SD ratio by r_{in} value.

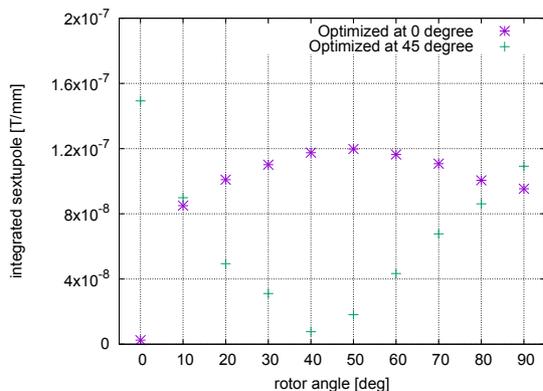


Figure 8: Rotor angle dependence of integrated sextupole component.

にすると多極成分が小さくなり磁石の性能が向上する。しかし、実際に磁石を製作する際に精度よく磁石を切り出すことは困難である。図 9、10 は L_{in} と r_{in} のずれがどの程度多極成分に影響するかを示しており、 L_{in} と r_{in} にそれぞれ ± 0.1 mm の変化を加えたときの SD 比である。 L_{in} の増減に対しては SD 比に変化はほとんど見られない。 r_{in} の増減に関しては、値に変化はあるものの大きな変化があるわけではなく、増減の影響は許容できると考えられる。

3. まとめ

CST studio を用いた 3 次元計算によるシミュレーションにより、永久磁石部分の構造の変更による BL 積の平坦性の向上を確認することができた。また形状を最適化し $L_{in} = 80.0 \pm 0.1$ mm、 $r_{in} = 22.85 \pm 0.1$ mm であれば目標の性能を十分発揮できると見積ることができた。この構造をもとに試作機を製作し、実際に発生する磁場分布の測定を行い、シミュレーションの結果と比較していく予定である。

参考文献

- [1] LC Technical Design Report; <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] Y. Iwashita, N. Terunuma, "Design Study of PM Dipole for ILC Damping Ring", IPAC2018, Vancouver, BC, Canada.
- [3] CST studio suite; https://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php
- [4] T. Yako *et al.*, "Design study of main dipole magnet using permanent magnet for ILC damping ring", PASJ2018 proceedings.
- [5] M. Abe *et al.*, "Design of correction magnet with permanent magnet for damping ring", PASJ2018 proceedings.