

ILC ダンピングリングにおける永久磁石を用いた補正磁石の設計 DESIGN OF CORRECTION MAGNET WITH PERMANENT MAGNET FOR DAMPING RING

阿部賢^{*A)}、岩下芳久^{A)}、片山領^{A)}、頓宮拓^{A)}、竹内佑甫^{A)}、八子丈生^{A)}、照沼信浩^{B)}、不破康裕^{C)}
Masashi Abe^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Ryo Katayama^{A)}, Hiromu Tongu^{A)},
Yusuke Takeuchi^{A)}, Tomoki Yako^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{C)}
^{A)}ICR, Kyoto Univ., ^{B)}KEK, ^{C)}KURNS, Kyoto Univ.

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. In addition to the bending magnets, many correction magnets are also used in the damping ring. Unlike a bending magnet, it is necessary to generate a bipolar magnetic field in a correction magnet. This can be realized by rotation of magnet rods. We tried to calculate, magnetic field distributions in a correction magnets using permanent magnets with 3D magnetic field code RADIA, and the results of the evaluations are presented.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) 計画の TDR (Technical Design Report [1]) では、ダンピングリング内の偏向磁石や集束磁石に電磁石を用いることが想定されている。そのため励起のための電力費やその水冷システム、電源などの保守費用が必要になる。これを改善しうる方法として電磁石を永久磁石に替えることが考えられる。永久磁石を使うことで、コイルを励起するための電力や電源保守費用の削減、装置を冷却するための冷却システムにおける漏水による事故の防止などが見込める。ダンピングリングには偏向磁石と補正磁石があるが、本稿では補正磁石について検討を報告する。TDR では補正磁石はダンピングリング内に 304 個用いられる予定である。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、軌道面内の磁場分布の様子を調べるため、3D 計算を行った。

3D 計算は RADIA 4.31 を用いて行なった [3]。検討する補正磁石には、比較的安価なフェライト磁石 (図 1 のオレンジ部分) を 8 本用いており、製作の都合から、円柱ではなく正八角形とする。隣り合う棒状永久磁石が互いに逆向きに回るようにする。図中の磁石以外の部分は鉄であり、非磁性の部品は描かれていない。また対称性を用いて全体の 1/8 の部分で計算を行った。各部分の寸法は表 1 に記載されている。なお単位は mm である。

鉄部分のメッシュサイズは図 1 のモデルを基準とし (メッシュ要素数 1152 個)、このサイズをさらに 2 分割から 5 分割にしたものを計算に用いた。図 2 は各メッシュサイズごとのビーム軸 (z 軸) 上の磁場の y 成分を $z = -\infty$ から $+\infty$ まで積分した値 (BL 積) を表している。横軸はメッシュの要素数の逆数を取っており、メッシュ数増加による BL 積の絶対値の収束性があまりよくないため、まだメッシュ分割

に改善の余地がありそうだが、今回は傾向を見るのが主眼であるため、あまり凝らずに計算を進めた。なお、BL 積の x 座標依存性はメッシュ数に大きく依存しなかった。5 分割にしたものは計算時間におよそ 6 時間ほど要したため、今回はメッシュを元のものを 4 分割したモデルで計算をすすめることにした。

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 | $r=26$ の円に内接する正八角形 ¹ 磁石の長さ 298 mm |

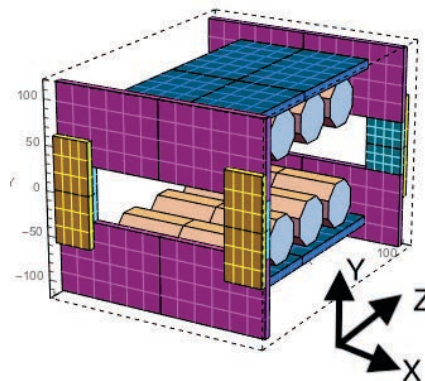


Figure 1: Initial sample model.

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。

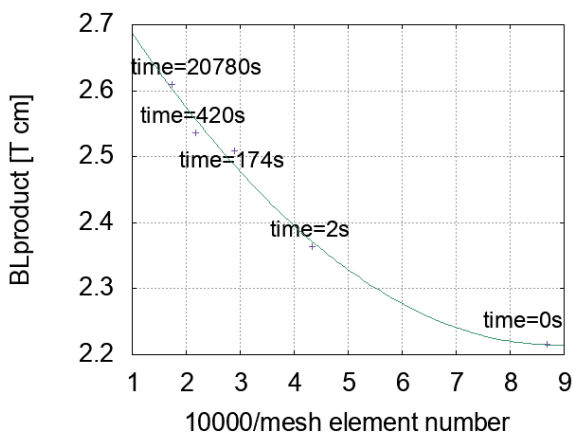


Figure 2: Mesh number dependency of BL product.

2. 磁場計算

磁石は正八角形で y 軸方向に残留磁化 0.35 T を想定している。図 3 は回転角 θ ごとの $y = 0$ での磁場の分布である。角度を変えることで磁場分布が変わることが確認できた。

次に z 軸上の BL 積の x 座標依存性を求めた。図 3 で、 $x = 0$ 付近の値が大きく、六極成分が発生していることがわかる。そこで磁場分布が平坦になるようにモデルの形状を修正する。今回

- A. ヨークに隙間を開ける (図 4)
- B. 磁石を中央で分割する

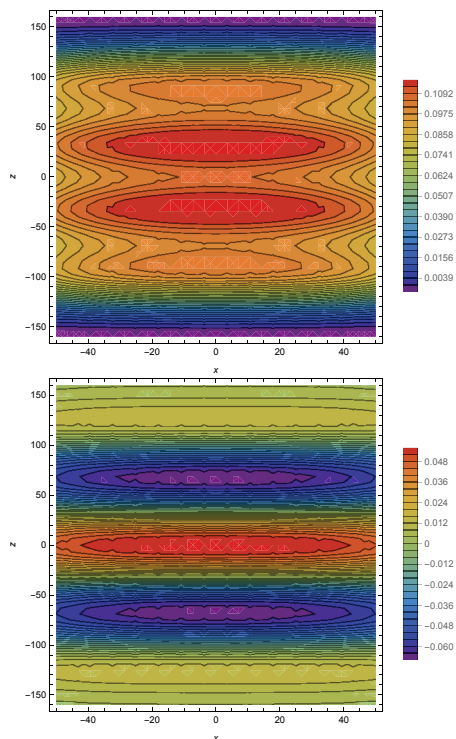


Figure 3: Field distribution on median plane. Top: $\theta = 0^\circ$. Bottom: $\theta = 90^\circ$.

の 2 種類の方法を試した (図 5)。図 5 の凡例の値は実際の隙間の大きさの値の半になっている。また縦軸は $(By(x) - By(0))/By(0)$ を表している。

A. では図 4 のヨークの隙間を変化させて磁場分布と BL 積を求めた。結果は隙間の大きさを変えると磁場の大きさが変わり、 $(By(x) - By(0))/By(0)$ の値は $x = 50$ 付近でわずかに変化が見られた (図 5 上)。各係数ごとに見ると、隙間の大きさに応じて変化が見える (図 6)。B. では磁石を長手方向に 2 分割して

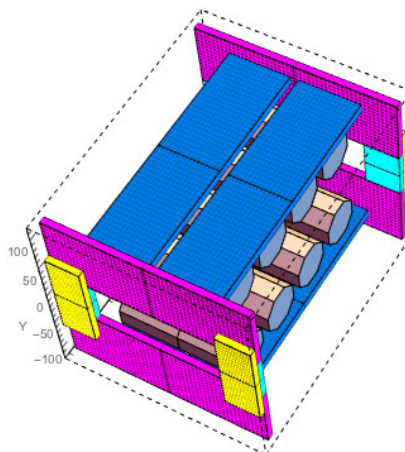


Figure 4: Yoke gap model.

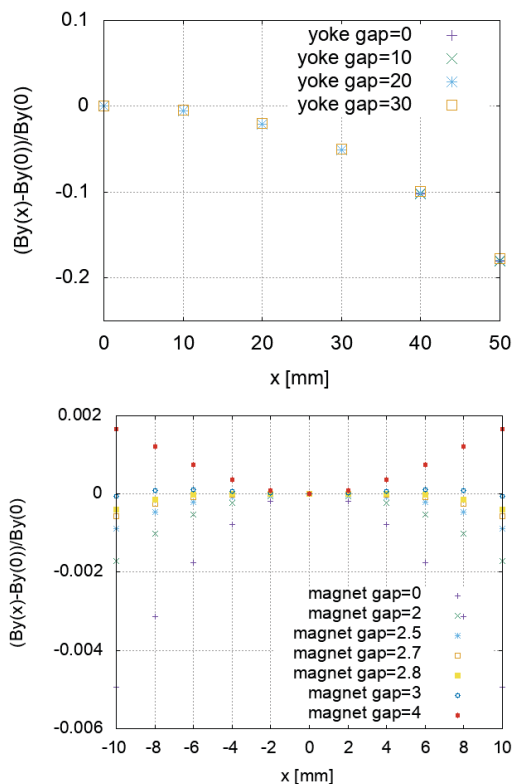


Figure 5: BL products as function of x coordinate: Top: method A, Yoke gap model. Bottom: method B, Magnet gap model.

隙間を開けた。分割する前に比べて分割した後の磁場は平坦になっていたが、2.8 mm より隙間が大きいときは $x = 0$ で磁場が最大となっておらず少しくぼんでいた。それぞれのデータを5次関数でフィットし、偶数項の係数を図6、7に表す。A. の場合は、4次の係数(十極成分)にピークがあり、およそ $x = 20$ のときに係数をもっとも小さくなる。これより今回の場合はヨークの隙間を 20 mm にすることでBL積の十極成分が最小化できる。B. の場合は係数の変化がほぼ線形になっており、 $x = 2.73$ のときに2次の係数(六極成分)の符号が変化している。これより磁石の隙間を 2.73 mm にすることでBL積の六極成分は最小化できる。

次にBL積の多極成分の回転角依存性について調べた。図8は回転角 θ ごとの5次までの多項式フィットの偶数次の係数の変化を表したものである。偶数次の係数はそれぞれサインカーブとなっている。奇数次の係数に関しては偶数次の係数に比べて $1/10000$ 以上小さくなっていたため、計算が対称性を正しく反映していると判断された。次に磁石の隙間を 2.73 mm にしたときとヨークの隙間を 20 mm にしたときの回転角ごとの多極成分を求めた(図9)。

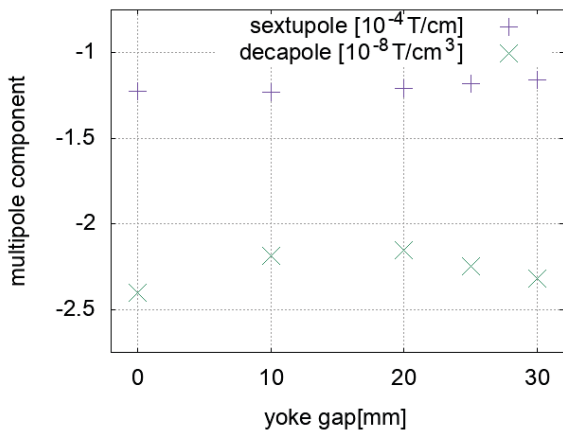


Figure 6: Gap dependency of multipoles in case A.

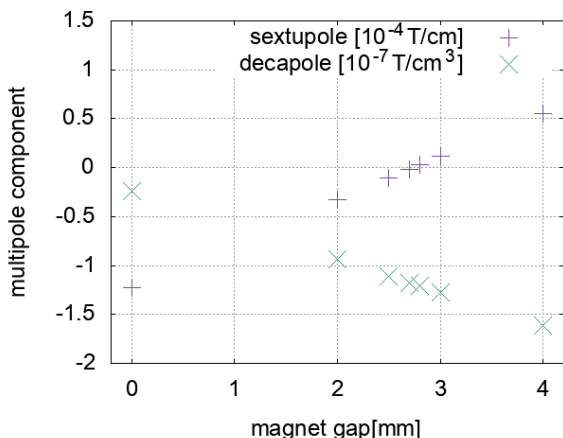


Figure 7: Gap dependency of multipoles in case B.

このとき前者は六極成分が、後者は十極成分が小さくなった。しかし多極成分について、 $\theta = 0^\circ$ でのみの最適化では、それ以外では大きくなることがわかった。多極成分の削減については、さらなる磁石の形状の工夫や、磁極ポールを導入等、まだ検討すべき余地があることがわかった。

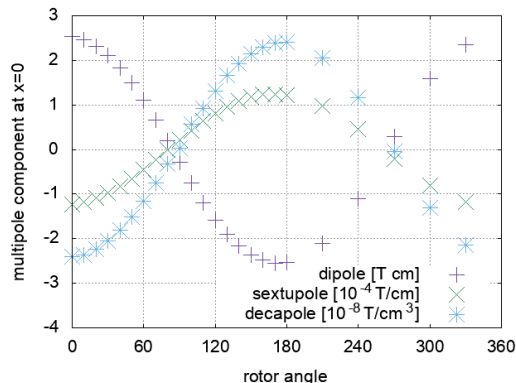


Figure 8: θ dependency of multipole components.

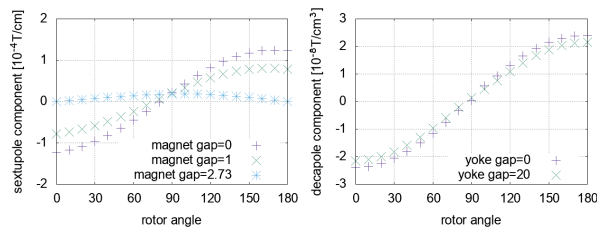


Figure 9: Comparison of multipole component.

3. まとめ

RADIA を用いた3次元計算によるシミュレーションにより多極成分の確認ができ、形状を変更することによって、BL積の多極成分の偶数次の係数の変化が確認できた。今後はさらなる調整要素の導入をして最適な形状を決定するだけでなく、試作機を作製し磁場測定を行い、結果について比較していく予定である。

参考文献

- [1] ILC 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] RADIA; <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>