

東北放射光蓄積リングのための電磁石設計

DESIGN OF ELECTRO-MAGNETS FOR PROJECT OF THE SYNCHROTRON LIGHT IN TOHOKU, JAPAN

西森信行^{#A)}, SLiT-J デザインチーム

Nobuyuki Nishimori ^{#A)}, SLiT-J design team

^{A)} Tohoku University, 1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-0826

Abstract

Synchrotron Light in Tohoku, Japan (SLiT-J) is proposed as a high-brilliant compact 3GeV light source project. Double Double-Bend Achromat (DDBA) lattice is employed to lead low natural emittance of 0.92 nm by reducing beta and dispersion functions at bends. The SLiT-J consists of 16 DDBA lattices with circumference of ~354m and provide 16 dispersion free 5.4 m long-straight sections and 1.5 m short-straight sections with finite dispersion. The lattice with length of ~22.1 m consists of 4 combined function bending magnets and 10 quadrupole and 10 sextupole magnets. Design of the SLiT-J magnets with a 3D magnetic field computation code Radia is presented.

1. はじめに

東北放射光施設 (SLiT-J; Synchrotron Light in Tohoku, Japan) は軽元素を中心とした物質・材料研究に適する軟X線光源として 3GeV 高輝度放射光源の実現を目指すものである[1,2,3]。SLiT-J 蓄積リングは、Double Double-Bend Achromat (DDBA) ラティスにより、偏向部での分散とベータ関数を低減して低エミッタンス化を目指す先端的な設計を採用した。16個のDDBAラティスで構成される蓄積リングは周長約 354m であり、5.4m の長直線部 16 本、1.5m の短直線部 16 本、水平自然エミッタンス 0.92nm である。約 22.1m 長のラティスに機能複合型偏向電磁石 4 個、四極電磁石 10 個、六極電磁石 10 個と多数の電磁石が配置される。偏向磁石のギャップ長は 28mm、四極磁石のポア径は 34mm、六極磁石は 40mm であり、コンパクトな電磁石設計が求められる。これらの電磁石群について磁場計算コード RADIA[4]を用いて、有効磁場範囲、多極成分、漏洩磁場の影響などを求め詳細設計を行っている。検討状況について報告する。

2. 機能複合型偏向電磁石

偏向電磁石に四極磁石のデフォーカシング機能を持たせた機能複合型偏向電磁石を採用することで、エミッタンスを低減できる[5,6]。機能複合型偏向電磁石は、KEK-ATF のダンピングリング[7]、MAX-IV[8]など、低エミッタンスリングに採用されている他、ELETTRA[9]、CLS[10]、UVSOR III[11]等でも実績がある。しかしながら、磁場のアラインメント精度には充分注意する必要がある。通常の偏向磁石と異なり、四極成分を持つため、設置誤差がビームにキックをもたらす。長さ L[m]、磁場勾配 k [T/m] の四極磁石が垂直に δy [m] ずれた場合、キック角は次式で与えられる[12]。

SLiT-J 機能複合型偏向電磁石の典型値、 $k=-6.7\text{T/m}$ 、 $L=1.4\text{m}$ 、3GeV ビームに対する $B\rho=10\text{Tm}$ 、設置誤差

$$\psi = -\frac{kL}{B\rho} \delta y$$

$\delta y=0.1\text{mm}$ を代入すると、 $\psi\sim 0.1\text{mrad}$ のキックとなる。SLiT-J の四極電磁石の典型値 $k=33\text{T/m}$ 、 $L=0.3\text{m}$ 、 $\delta y=0.05\text{mm}$ から得られる $\psi\sim 0.05\text{mrad}$ のキックと比べて、2 倍大きくなる。そこで機能複合型偏向磁石の設置誤差はできるだけ小さく抑えたい。本稿では詳しく延べないが、上記の設置誤差を仮定して COD 計算を行ったところ、垂直方向の COD 最大値が $\pm 4\text{mm}$ 程度になる場合もあることがわかった。SLiT-J のような低エミッタンスリングでは磁極間隔が狭く真空ダクトサイズが小さいため、最初の 1 周を回すことが困難になる。機能複合型偏向磁石の精密な製作とアラインメント、それに伴うビーム制御は SLiT-J の技術的課題の一つである。

Table 1: Main Parameters of SLiT-J Combined Function Bending Magnets

Item	unit	B magnet	B1 magnet
Strength	T	0.8	0.8
Gradient	T/m	-6.7	-7.0
Bending curvature	m	12.5	12.5
Bending angle	degree	6.525	4.725
Central gap	mm	28	28

[#] n_nishim@tagen.tohoku.ac.jp

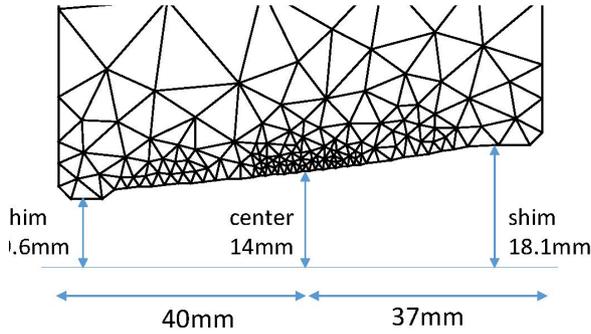


Figure 1: Mesh diagram for Radia simulation of SLiT-J combined function bending magnet.

磁石の設計は CDR[1]をベースに行っている。2種類の機能複合型偏向電磁石の主要パラメータを Table 1 に示す。中心ギャップは $2h(0)=28\text{mm}$ である。偏向磁極面は次式で与えられる[13]。

$$h(x) = \frac{h(0)}{1 + x/X_0}$$

ここで、 $X_0=B_0/B'$ で B_0 は偏向磁場、 B' は磁場勾配。Table 1 で B 磁石に対しては $X_0=119.4\text{mm}$ 、B1 磁石に対しては $X_0=114.3\text{mm}$ である。式を元に磁極面を作成し 2次元磁場計算コード Poisson[14]を用いて計算を行った。有効磁場範囲が $\pm 12\text{mm}$ 以上となること、多極成分が小さくなるように Fig.1 のシムの高さや幅を調整した。

次に、Radia[4]を用いた 3次元磁場計算に用いる磁石の 2次元磁極形状を得るため、ソフトウェア Triangle[15]を用いた。Fig.1 に示すように、Poisson で得られた磁極面を Triangle で三角メッシュに分割した。得られた 2次元磁極形状を Radia に入力し、3次元に引き延ばして、磁場計算を行う。最初は、セクター偏向磁石形状ではなく、直線形状で計算した。目的は、二極と四極成分の有効磁場長の違いを確認

するため、磁極長はセクター偏向磁石と同様とした。3次元計算で得られる二極と四極の有効磁場長の違いは、2次元形状での磁場勾配を変えることで補償し、磁場、磁場勾配の積分値が設計値となるよう調整した。最後に、図 2 右に示すようなセクター型として Radia で 3次元磁場計算を行った。

図 2 左に機能複合型偏向電磁石のセクター形状に対する有効磁場範囲(GFR; Good Field Region)を示す。 $\Delta B/B_0$ は磁石中心の 2次元磁場分布から得た GFR である。2次元磁場分布の多極展開から得た二極磁場 b_1 と磁場勾配 b_2 を用い、水平位置 x の理想磁場を

$$\frac{\Delta B}{B_0} = \frac{B(x) - b_2x - b_1}{B(x)}$$

b_2x+b_1 とした。Radia で求めた値 $B(x)$ との差 ΔB を $B(x)$ で割った値を、青線でプロットした。

$\int \Delta B / \int B_0$ は積分磁場分布を多極展開して得た磁場 b_1 と磁場勾配 b_2 を用いて水平位置 x の理想磁場を

$$\frac{\int \Delta B}{\int B_0} = \frac{\int [B(x) - b_2x - b_1] ds}{\int B(x) ds}$$

b_2x+b_1 とし、Radia で求めた値 $B(x)$ との差 ΔB から次式として定義し、赤線でプロットした。

$-12 < x < 12\text{mm}$ の範囲において、積分磁場は $\int \Delta B / \int B_0 \leq 10^{-4}$ となっている。本計算では積分磁場の GFR が広がるようにシムを調整している。磁極外(フリンジ)で失われるシムの効果を補償するため、磁極内部でシムの効果を強くしている。そのため、2次元磁場分布については、 x の大きい所で磁場が強くなっている。

図 2 の計算で、4極積分磁場を 2極積分磁場で割った値は $8.3792[1/\text{m}]$ であった。Table 1 の設計値では $8.375[1/\text{m}]$ であり、0.05%の精度で一致している。どの精度まで追い込む必要があるかは、optics 計算をする必要があり今後の課題である。

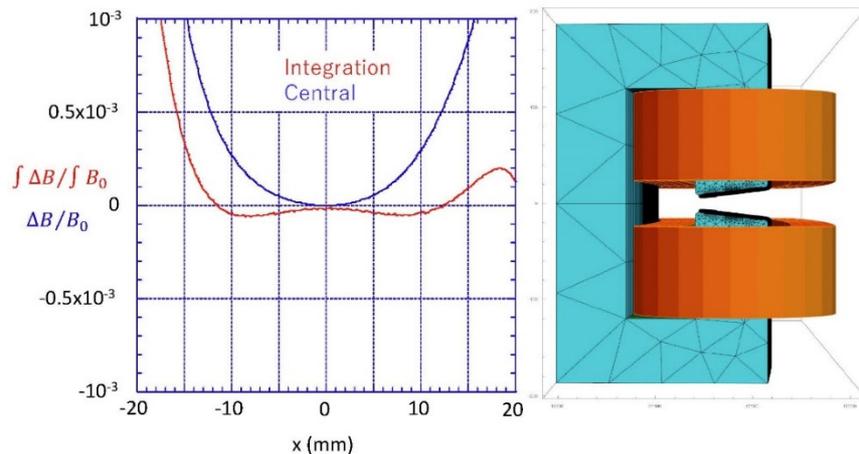


Figure 2: Good field region of SLiT-J combined function bending magnet (left). 3D model of SLiT-J combined function bending magnet used for Radia computation.

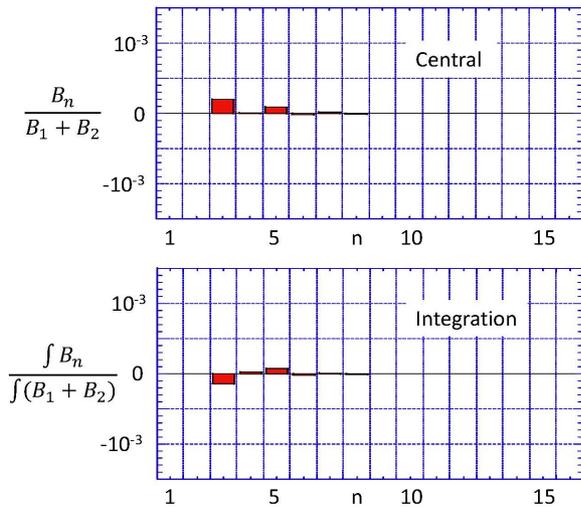


Figure 3: Ratio of multipole fields to combined function bending magnet fields at $x = 0.01$ m.

図 3 に $x=0.01\text{m}$ 位置での多極磁場成分を示す。多極 n 成分 b_n が x 位置に作る磁場は $B_n = \frac{b_n x^{n-1}}{(n-1)!}$ となる。 B_n と B_1+B_2 の比は次式で表され、図 3 上に示す。

$$\frac{B_n}{B_1 + B_2} = \frac{b_n x^{n-1}}{(n-1)! (b_1 + b_2 x)}$$

積分磁場の比は次式で表され、図 3 下に示す。

$$\frac{\int B_n}{\int (B_1 + B_2)} = \frac{\int b_n x^{n-1}}{(n-1)! \int (b_1 + b_2 x)}$$

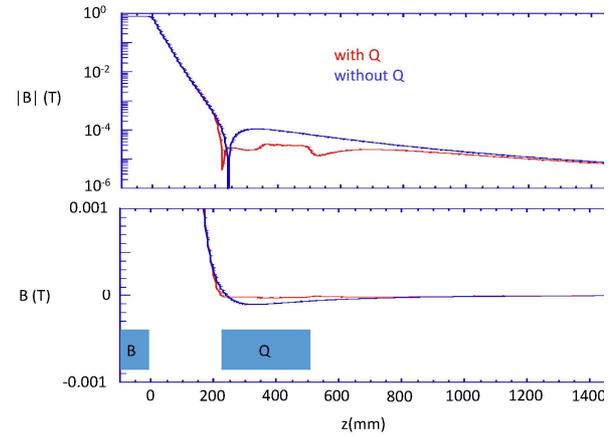


Figure 4: End field profiles of combined function bending magnet with (blue curve) and without (red curve) quadrupole. The distance between bending and quadrupole magnets is 216 mm.

中心磁場と積分磁場どちらについても、多極成分は 10^{-4} 程度以下となった。

偏向磁石磁場の磁極外への漏洩を図 4 に示す。偏向磁石のみの場合、磁場が地磁気レベル ($5 \times 10^{-5} \text{T}$) まで下がるのは、磁極から 220mm 程度の場合である。SLiT-J では、四極、六極電磁石が近くにあるため、フリンジ磁場が鉄に吸われてしまう。SLiT-J の現設計では偏向磁石に最も近い四極電磁石との距離は 216mm である。吸われる磁場の強さは地磁気の倍程度であり、近接する磁石に与える偏向磁石の漏洩磁場の影響はほぼない。

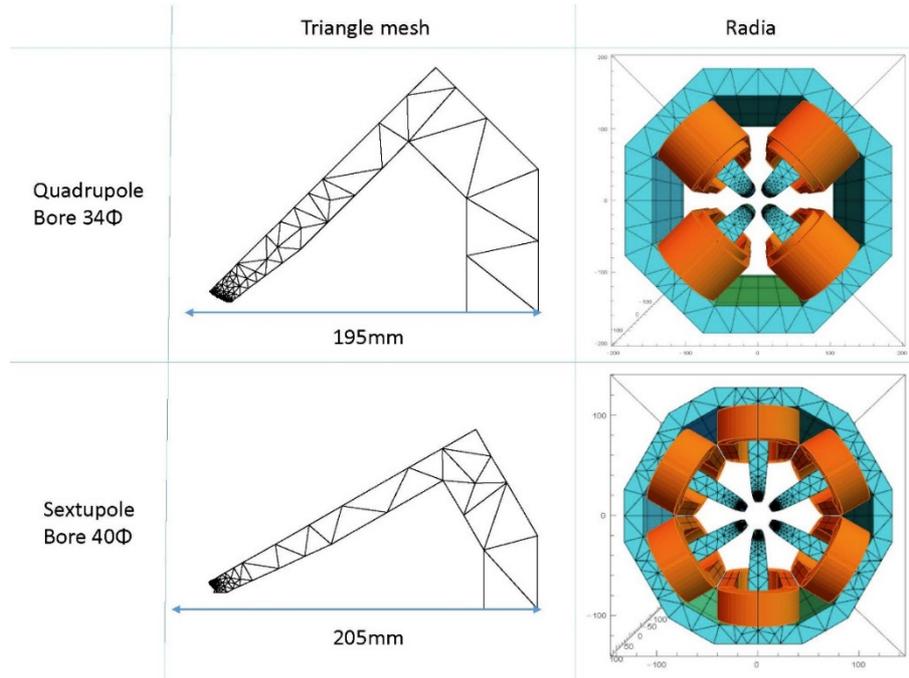


Figure 5: Mesh diagrams used for Radia computations of SLiT-J quadrupole (top middle) and sextupole (bottom middle) magnets. Quadrupole (top right) and sextupole (bottom right) magnet 3D models for Radia computations.

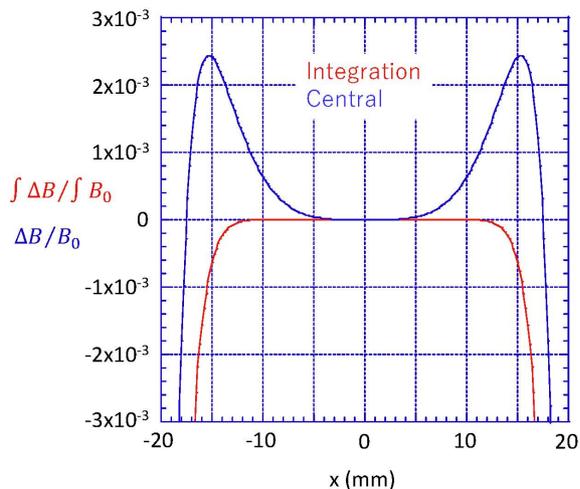


Figure 6: Good field region of SLiT-J quadrupole magnet.

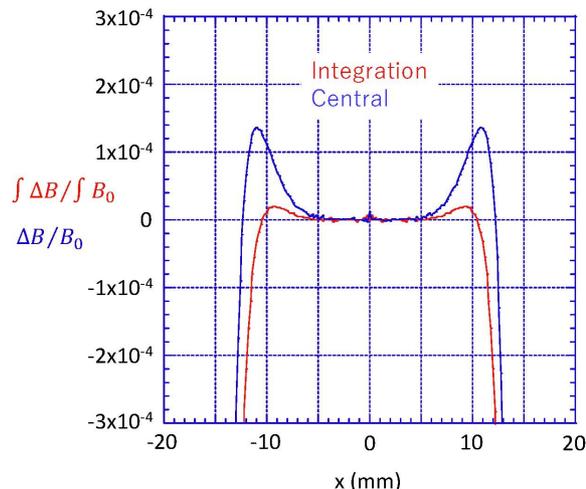


Figure 8: Good field region of SLiT-J sextupole magnet.

3. 四極電磁石

四極磁石の典型値は 33.7T/m、有効長 0.3m である。ボア径 $2R=34\text{mm}$ で設計し、磁極面は $xy = R^2/2$ である。偏向磁石と同様に、計算コード `poisson` を用いて GFR が広がるようにシムを調整した。それをモデルに、コード `triangle` を用いて図 5 の中上に示す三角メッシュを作成した。1/8 カットモデルにしたのは、メッシュの非対称性に起因する多極磁場を避けるためである。図 5 の右上に Radia 計算時の 3 次元磁石モデルを示す。SLiT-J では四極磁石は各セルに 5 ペア、計 10 個使用する。5 種類とも異なる形状であるが、ここでは 1 種類の計算例のみを示す。

図 6 は四極電磁石の GFR を示したものである。偏向磁石と同様に、 $\Delta B = B(x) - b_2x$ を計算した。積分磁場は $-12 < x < 12\text{mm}$ の範囲において、 $\int \Delta B/$

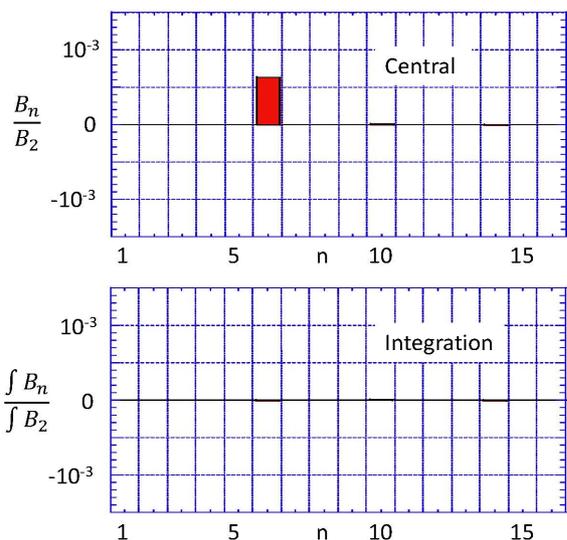


Figure 7: Ratio of multipole fields to quadrupole magnet fields at $x = 0.01\text{m}$.

$\int B_0 \leq 10^{-4}$ となっている。中心磁場の GFR は $x = \pm 12\text{mm}$ で $\Delta B/B_0 = 10^{-3}$ になるなど、中心から遠ざかるほどずれが大きくなる。磁極外のフリンジで失われるシムの効果を補償するためである。

図 7 は多極成分の計算結果である。中心磁場については 12 極成分が比較的強く、20 極、28 極も若干見えている。積分多極成分は全て 10^{-4} 以下である。

4. 六極電磁石

六極電磁石の典型値は 1050T/m^2 、有効長 0.2m である。磁極面は $3x^2y - y^3 = R^3$ として、様々なボア径についてコード `poisson` で計算し、GFR が 10mm を越えるボア径である $2R=40\text{mm}$ を選択した。次に、コード `triangle` を用いて図 5 の中下に示す三角メッシュを作成した。1/12 カットモデルにしたのは、

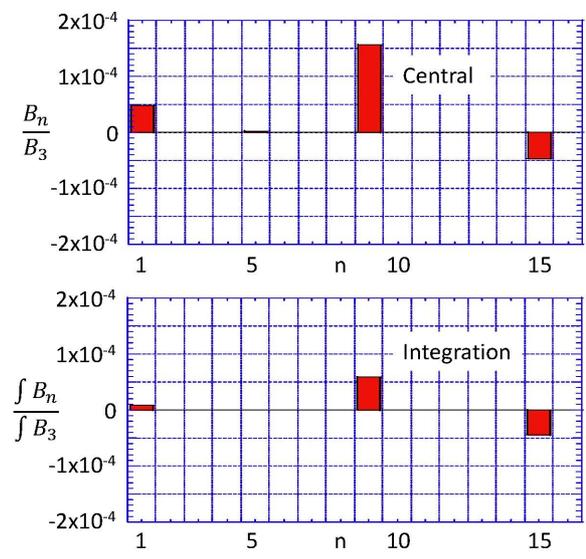


Figure 9: Ratio of multipole fields to sextupole magnet fields at $x = 0.01\text{m}$.

メッシュ非対称性に起因する多極磁場を防止するためである。図5の右下に Radia 計算時の3次元モデルを示す。SLiT-Jでは六極磁石は各セルに5ペア、計10個使用する。4ペアは同じ形状であるため、異なる形状は2種類である。ここでは1種類の計算例のみを示す。

図8は六極電磁石のGFRを示したものである。偏向磁石の時と同様に、 $\Delta B = B(x) - \frac{b_3 x^2}{2} - b_1$ を計算した。積分磁場は $-12 < x < 12\text{mm}$ の範囲において、 $\int \Delta B / \int B_0 \leq 10^{-4}$ となっている。

図9は $x=0.01\text{ m}$ での多極成分の計算結果である。2極、18極、30極成分が若干見えているが、積分多極成分は全て 10^{-4} 以下である。

5. まとめ

3次元磁場計算コード Radia を用いて SLiT-J 用の電磁石を設計した。磁場強度の線形近似からのずれが 10^{-4} 以下と定義した積分有効磁場領域は機能複合型偏向電磁石、四極電磁石については $\pm 12\text{mm}$ 、六極電磁石については $\pm 11\text{mm}$ が得られた。GFRを決める 10^{-4} という値は、今後COD補正計算を進め、必要十分条件となる値を詰めていく予定である。積分多極成分についても、 10^{-4} 以下を得ている。SLiT-Jのような電磁石が密に詰まったシステムにおいて、漏洩磁場を完全に地磁気レベルに落とすのは難しい。コイル形状の工夫などにより、漏洩磁場を減らすこと、近接する電磁石に吸われる磁場の影響を見積もることが必要である。

今後は、コイルの実装、水の配管、アラインメント用治具の実装、六極電磁石についてはステアリングコイル、skew四極コイルの追加など、更に詳細を詰めていく予定である。

参考文献

- [1] SLiT-J デザインチーム、「東北放射光施設計画“SLiT-J”3GeV高輝度光源加速器システム提案書V2.0」, 2016年3月.
- [2] Hiroyuki Hama, “Status of SLiT-J Project”, presented in Low Emittance Rings Workshop 2016, SOLEIL, France, Oct. 26-28, 2016.
- [3] 濱広幸, SLiT-J デザインチーム、「東北放射光(SLiT-J)計画の進捗状況」、第14回日本加速器学会年会、WEP012、北海道大学、2017年8月.
- [4] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>
- [5] H. Wiedemann, “Particle Accelerator Physics I”, Springer, Berlin (1998).
- [6] 大見和史、「低エミッタンスリングのラティス」、OHO’91 (1991).
- [7] K. Egawa *et al.*, “R&D Status of the Magnet System for the ATF Damping Ring”, Proc. of Linac 1994, 80 (1994).
- [8] Dieter Einfeld / Martin Johansson, “Magnets for MAX IV”, presented in 3rd Low Emittance Workshop, Oxford, United Kingdom, July 8-10, 2013.
- [9] G. Petrucci *et al.*, “The Magnets of the ELETTRA Storage Ring”, Proc. of EPAC 1990, 1119 (1990).
- [10] L. Dallin *et al.*, “Gradient Dipole Magnets for the Canadian

Light Source”, Proc. of EPAC02, 2340 (2002).

[11] M. Adachi *et al.*, J. Phys. Conf. **425** (2013) 042013.

[12] 福間均、「閉軌道の補正」、OHO’88 (1988).

[13] 遠藤有馨、「加速器における電磁石の基礎」、OHO’97 (1997).

[14] http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml

[15] <https://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>