

挿入光源構造改革に向けた吸引力相殺機構の開発

CANCELLATION SYSTEM OF MAGNETIC ATTRACTIVE FORCE FOR INSERTION DEVICE

金城良太^{#, A)}, 清家隆光^{B)}, 鏡畑暁裕^{B)}, 山本樹^{C)}, 田中隆次^{A)}

Ryota Kinjo^{#, A)}, Takamitsu Seike^{B)}, Akihiro Kagamihata^{B)}, Shigeru Yamamoto^{C)}, Takashi Tanaka^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} JASRI

^{C)} KEK-PF

Abstract

Undulators usually require rigid mechanical components and frames to control the magnet gap precisely against the large attractive force in between. If the attractive force is canceled out near the point of load, the requirement for the undulator structure is relaxed, and the cost and lead time of construction and installation are saved largely. For that purpose, we have proposed to add periodically-magnetized monolithic magnets beside the main magnets, which are expected to generate a repulsive force having the same gap-dependency as the attractive force in a cost-effective way. To proof the principle, we performed experiments; the periodically-magnetized monolithic magnets were created and the successful generation of the sinusoidal fields was confirmed; the repulsive force generated by the magnets showed the same gap-dependence with the attractive force generated by the main magnets which forms Halbach-array. In addition to these results, a development plan for the compact and lightweight undulator based on the force cancellation system is introduced.

1. はじめに

従来のアンジュレータは、磁石列が生み出す数トンに及ぶ磁場吸引力のために剛性の高い機械部品や架台を使用せざるを得ず、重い・大きい・価格が高い・製造や設置にかかる期間が長いなどの諸問題を抱えてきた。

一方で、これらの問題の元凶である吸引力をその作用点である磁石列近傍において相殺することにより、重く大きい架台が必要なくなり、アンジュレータが従来に比べて大幅に軽量・コンパクト化することで、製造及び収納部への設置の費用と期間が抑えられる。

さらに、装置の光源特性の点でも様々な恩恵が得られる。例えば、X線自由電子レーザーSACLAにおいて (1)アンジュレータの超狭ギャップ運転が可能となりパルスエネルギーの低下を伴わずに発振波長が長波長側に拡大する、(2) 超狭ギャップ運転を前提とした短周期アンジュレータビームラインの設置により、発振波長が短波長側にも拡大するなどが挙げられる。

吸引力の相殺方法としては、SPring-8 で開発された真空封止リボルバーアンジュレータで用いられている、磁石列の両側面に同じ周期構造を持った反発磁石列を取り付ける方法^[1]や、仏 SOLEIL の真空封止ウィグラーで用いられている、異なる長さのパネ係数を持った反発パネを取り付ける方法^[2]がある。前者は主磁石列と同じ磁石を用いた場合、磁石列や磁石ホルダーが増えることで、製造/組立の手間とコストが増大する、後者は既存の磁場計測手法が使

えない・吸引力と同じギャップ依存性を持つ事が困難である等の問題がある。

そこで我々は、これらの問題なく発生点の近傍で吸引力を相殺し、軽量・コンパクトかつ低コストな次世代アンジュレータを実現することを目的として R&Dを行っている。このための吸引力相殺機構の候補として、次節で述べるような多極着磁ブロックを用いた吸引力相殺機構について検討を行っている。

2. 多極着磁ブロックを用いた吸引力相殺機構

吸引力相殺機構が満たすべき仕様は、主磁石列の吸引力と等価な反発力を、同等のギャップ依存性を持って発生させることである。アンジュレータの磁石列では極性の異なる磁石が隣接しているため、磁場は、ひいては力 F はいわゆる逆二乗則ではなく距離に対し指数関数的な依存性を見せる。

$$F \propto \left[\sum_n \alpha_n \exp\left(-n\pi \frac{g}{\lambda_u}\right) \right]^2$$

ここで、 g は上下の磁石列間のギャップ、 λ_u は磁場の周期、 n は磁場の高調波の次数、 α_n は周期や磁石のサイズ、残留磁束密度に依存する係数である。特に吸引力が大きい狭ギャップ領域においては、磁場の基本波以外の成分の相対的な割合が大きくなり、複雑な関数となる。

さらに吸引力相殺機構に望まれる仕様として、可

[#] r-kinjo@spring8.or.jp

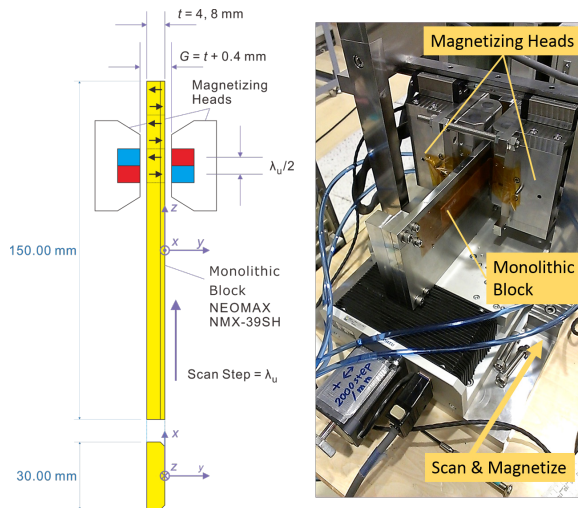


Figure 1: Magnetization system for multipole monolithic magnet.

能な限り低コストかつ組み込みが簡易になるよう、少数の部品点数で実現できることが挙げられる。

そこで我々は、多極着磁ブロックによるアンジュレータ磁場生成手法^{3,4)}に着目し、これを反発磁石列として用いた吸引力相殺機構についての検討を行っている。この方式により、主磁石列の吸引力と同等のギャップ依存性を持った反発力の生成が、安価かつ簡易に行えることが期待できる。

3. 予備試験

3.1 概要

多極着磁ブロックによって主磁石列と同じギャップ依存性を持った反発力の生成が可能であるか確認するため、および後述のプロトタイプ反発磁石列設計のためのデータ取得のため、予備試験を行った。

3.2 多極着磁ブロックの磁場分布の測定

多極着磁ブロックの着磁は、図 1 に示す着磁送り装置で行った。実験の諸元を表 1 に示す。幅 30 mm、長さ 150 mm、厚さ 4 mm と 8 mm の無着磁・TiN コーティング済みの磁石ブロックを、周期 15 mm 用の着磁ヘッドで両側から挟みこみ、15 kA のパルス電流によって 1 周期分の着磁を行った。15 mm ずつブロックを送りながら着磁を繰り返すことで、多極着

Table 1: Magnetization Experiment Setup

Period	15 mm
Periodic Number	10
Block Size	L150 mm, W30 mm, 4mmt / 8 mmt
Block Material	NEOMAX NMX-39SH ($B_r = 1.2 - 1.28$ T)
Pulse Current	15 kA, 0.3 ms (FWHM)
Pulse Field (Gap Center)	2.49 T (4 mm), 1.13 T (8 mm)

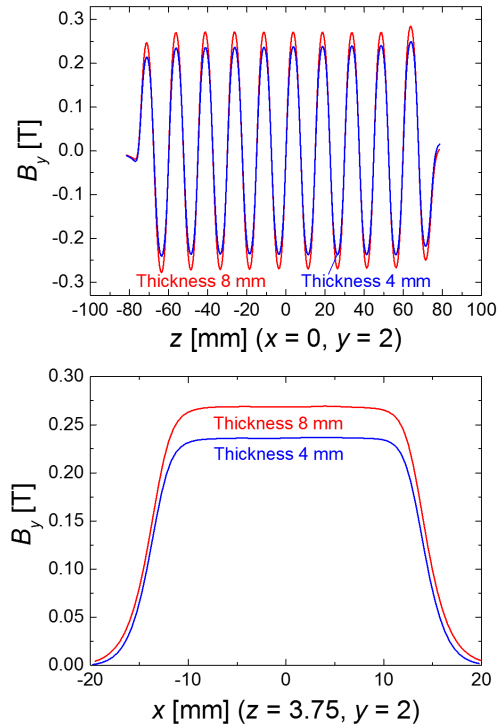


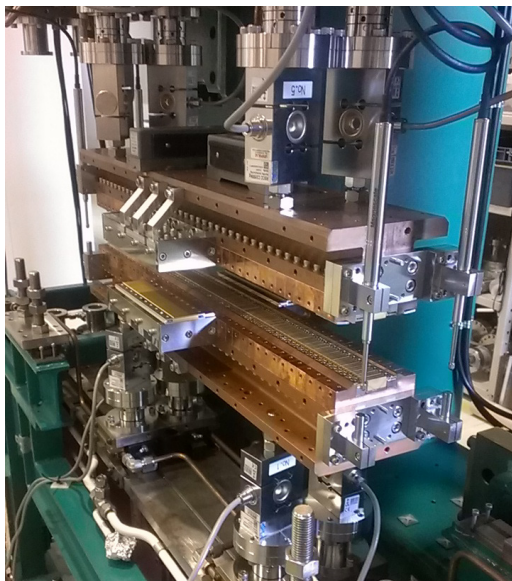
Figure 2: Field distribution of multipole magnet.

磁ブロックを作成した。着磁磁場は、着磁ヘッド間のギャップ G が 4 mm、8 mm のとき空芯のピックアップコイルで測定した結果、ギャップの中心でそれぞれ 2.49 T と 1.13 T であった。

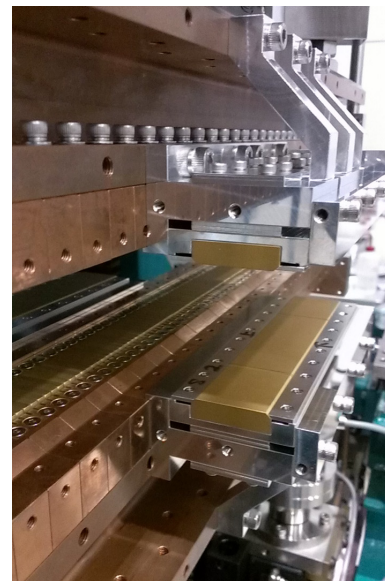
多極着磁ブロックの B_y の分布を測定した結果を示す。座標系は図 1 の通りである。図 2 上段は $x = 0$ mm、 $y = 2$ mm の位置での B_y の z 方向分布、図 2 下段は $z = 3.75$ mm (ピーク位置)、 $y = 2$ mm の位置での B_y の x 方向分布である。 z 方向のピークの標準偏差は 0.2% 以下であった。 z 方向、 x 方向分布ともに良好な結果が得られている。図は B_y の y 方向分布であり、アンジュレータに取り付けた場合のギャップに対する依存性に相当する。厚さ 8 mm の磁石の方が厚さ 4 mm の磁石よりも高い磁場を発生しているが、厚さ、つまり体積が異なる事から理論的に予測される値ほどは大きくない。これは、ギャップが 8 mm の時のパルス磁場が中心で 1.13 T と B_r のカタログ値より低いことで説明できる。逆に考えると、着磁ヘッドの冷却機構を増強してパルス電流を増やせば厚さ 8 mm でもカタログ値の B_r を達成可能であるということである。今回は、厚さ 4 mm のブロックを二枚重ねたものについても反発力を調べた。

3.3 吸引/反発力計測試験

吸引・反発力の測定は、図 4 に示すようなセットアップで行った。周期 15 mm、全長 600 mm、磁石の $B_r = 1.36$ T の Halbach 型磁石列が銅ホルダーに取り付けられ、銅のビームに並べられている。上下それぞれのビームを 4 本ずつの引張/圧縮両対応ロードセルを用いて架台に取り付け、吸引/反発力を測定した。上下の磁石列間の実際のギャップは、吸引力



(a) Gap-force measurement system



(b) Repulsive magnets beside main magnets

Figure 3: Gap-force measurement system. The force between the upper and lower magnets is measured by 8 strain-gauge-type load cells which supports the magnets. The real gap between them is measured by 4 linear gauges.

によりギャップ開閉用モータの設定値とは異なる値をとるため、4本のリニアゲージで実測した。

多極着磁ブロックは、上下それぞれの主磁石列の両側にステンレス製の治具を用いて取り付けられた。多極着磁ブロックのギャップは、主磁石列のギャップと同一になるように調整した。多極着磁ブロックは (1) なし、(2) 厚さ 4 mm、(3) 8 mm および (4) 4 mm 二枚重ねの条件で計測した。

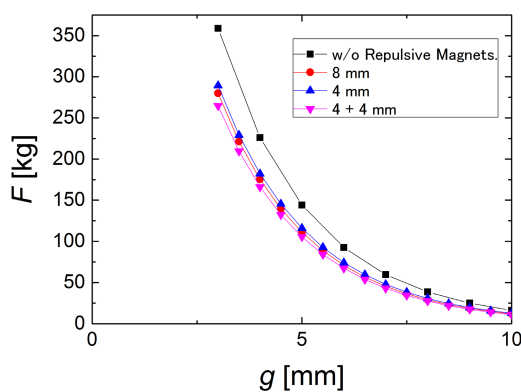
3.5 吸引/反発力の計測結果と考察

ギャップと吸引力の関係を図 5 (a) に示す。黒■、赤●、青▲、ピンク▼は、それぞれ上記計測条件 1—4 の実測値に対応する。

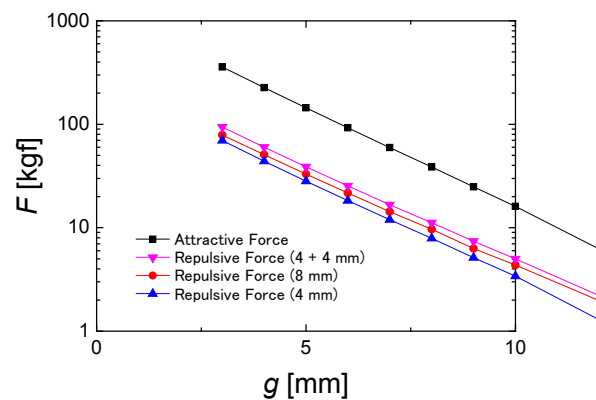
図 4 (a) より、反発磁石を取り付けたことで明らか

に全てのギャップにおいて吸引力が下がっていることが見て取れる。

多極着磁ブロックは主磁石列の両側についており主磁石列の約 2 倍の幅があるにも関わらず、主磁石列の吸引力に比べて多極着磁ブロックの反発力は小さいように見える。このことは、主磁石列に用いられている磁石の B_r が都合により 1.36 T と多極着磁ブロックの約 1.2 T と比べて高いこと、多極着磁ブロックの高さ (厚さ) が 4 mm の場合には主磁石列の高さ 8 mm と比べて小さいこと、多極着磁ブロックが周期に対して片側に磁石が 2 個の配列 (主磁石列は 4 個の Halbach 配列) であること、さらに磁化が台形分布していること、によりほぼ定量的に説明できる。このうち、 B_r については、実際には電子ビームから



(a) Measured force



(b) Gap dependence of attractive / repulsive forces

Figure 4. Measured forces in preliminary experiment. The force is measured (1) without multipole monolithic magnets (black square line), (2) with 4 mm (red circle line), (3) with 8 mm (blue upper triangle line), (4) with 4+4 mm (pink lower triangle line).

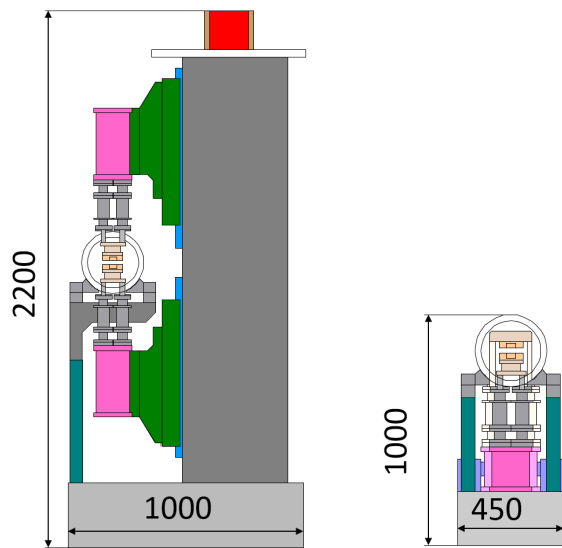


Figure 5: Conceptual drawing of conventional (left) and lightweight compact & cost-effective (right) undulators.

離れた場所に付ける多極着磁ブロックの B_r を主磁石列の B_r と同等以上のグレードに選定する予定であり、高さについても 8 mm あるいは 4 mm 二枚重ねにすれば等しくなる。一方で、周期に対して磁石が 4 個の Halbach 配列を多極着磁で行う手法や、磁化の分布を台形ではなく階段関数に近づける方法はまだ確立されていない。それを補うために、多極着磁ブロックの B_r や幅を主磁石列より大きめにとるか、ギャップを主磁石列のギャップよりわずかに小さくすることが考えられる。

各ギャップで測定した吸引力と反発力のみを取り出し、 F を対数表示したものを図 4 (b) に示す。吸引力と反発力が同じ傾きの直線になっていることがわかる。つまり、ギャップの依存性が一致している。

ギャップの依存性が一致したことにより、多極着磁ブロックの B_r 、幅、高さを適切に選ぶことで絶対値を調整し吸引力を全てのギャップ領域においてほぼゼロにまで相殺可能であることがわかる。

4. 軽量・コンパクト挿入光源の計画

今回報告した吸引力相殺機構の開発と平行して、吸引力が実効的にゼロであることを見越した超軽量コンパクト架台に基づく次世代型アンジュレータのプロトタイプ機的设计が進められている。その概念図を図 6 に示す。

プロトタイプにおいては、ギャップを 1 mm 程度まで閉めて薄型プローブによる磁場分布計測を行い、吸引力による変形が原因となる狭ギャップ時の磁場位相エラーの増大が抑制されることを確認する予定である。そのため、1 mm という狭ギャップでの磁場測定を行う点から、多極着磁ブロックのギャップを主磁石列のギャップと揃える。さらに、既存の主磁石列を用いる点から、多極着磁ブロックを主磁石列ホルダー上に取り付ける方式をとる。

多極着磁ブロックの設計においては、現状で多極

着磁ブロックのモデルを用いた反発力計算が実験結果を精度よく再現できないことから、実験結果も用いた設計を行っている。つまり吸引/反発力の製作後の微調整も必要で、上の段落で述べた機械的な制約も勘案し、位相による反発力調整機構の検討を行っている。

5. まとめ

挿入光源の大規模な構造改革に向けた SPring-8 / SACLA における取り組みを紹介した。安価かつ簡易に、そして磁場計測を阻害することがない、吸引力と同じギャップ依存性を持つ反発力を発生可能な吸引力相殺機構の候補として、多極着磁ブロックを用いた吸引力相殺機構について検討を行った。予備実験を行って多極着磁ブロックの磁気的特性を調べた。多極着磁ブロックによって、Halbach 型磁石列の吸引力と同じギャップ依存性を持った反発力の発生ができることを確認した。また、吸引力ゼロを前提とした軽量・コンパクトアンジュレータプロトタイプ計画について述べた。

参考文献

- [1] T. Bizen, et al., Proc. 8th Internat. Conf. Synchrotron Radiation Instrumentation, San Francisco, USA (2003).
- [2] O. Marcouille, et al., Proc. Internat. Particle Accelerator Conf., Kyoto, Japan (2010).
- [3] S. Yamamoto, J. Phys.: Conf. Ser., 425, 032014 (2013).
- [4] 山本樹、第 10 回加速器学会年会、SAOT11、(2013).