

積層鋼板を用いた多極電磁石の磁場分布シミュレーション計算 CALCULATION OF MAGNETIC DISTRIBUTION OF MULTIPOLE ELECTROMAGNETS WITH LAMINATED CORES

西森信行^{#, A)}, 深見健司^{A, B, C)}, 渡部貴宏^{A, B, C)}

Nobuyuki Nishimori^{#, A)}, Kenji Fukami^{A, B, C)}, Takahiro Watanabe^{A, B, C)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{C)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

Magnetic distribution of quadrupole electromagnets with laminated cores is calculated with ANSYS multiphysics. The quadrupole electromagnet was fabricated for a high brilliant synchrotron radiation source employing multi bend achromat lattice. The bore diameter is 34 mm and maximum magnetic gradient is 56 T/m. The measured profile of magnetic strength along z direction is well reproduced by our quadrupole magnet model which takes into account of laminated cores.

1. はじめに

X線回折限界エミッタンス高輝度放射光リングが世界で注目を集めている。国内では硬X線領域の SPring-8-II[1]に加え、軟X線向け高輝度 3GeV 級放射光源[2]などが計画されている。これら高輝度放射光リングでは、多数の偏向磁石を採用したラティスを用いることで、偏向磁石内での分散関数、水平ベータ関数を小さくし、量子励起によるエミッタンス増大を抑制する。そのため、高い磁場勾配の四極磁石が必要となり、線形ラティス補正の役割を果たす六極以上の多極磁石も同様に高い磁場勾配が要求される。

このような四極以上の多極電磁石の磁極先端は、10 μ m 程度の加工精度が求められると共に、個体差のない同一の電磁石を多数製作する必要がある。積層鋼板は大量生産時に安価であり、加工寸法について個体差が出にくいというメリットがある。同一のラティスが繰り返す放射光源で、同じ電磁石の磁場分布の個体差を小さく抑えることは極めて重要であり、我々は積層鋼板を採用している。

今回、SPring-8-II 用に設計、製作された[3]四極電磁石の一つについて ANSYS multiphysics を用いた磁場分布計算を行い、測定データとの良い一致を得た。結果について報告する。

2. 高輝度放射光リング用四極電磁石

今回対象とした四極電磁石は、ビーム軸方向の厚みが 281mm であり、3GeV 級放射光源で用いられる四極電磁石と似た形状である。0.5mm 厚みの積層鋼板を 562 枚重ね合わせ、炉で加熱する。積層鋼板表面には絶縁被膜がコーティングされており、それが溶けて接着されブロック形状となる。Table 1 に四極電磁石のパラメータを示す。

絶縁鋼板は JFE スチール株式会社製の JFE50JN600 で、厚みは 0.5mm である。表面にコーティングされた絶

[#] nishimori.nobuyuki@qst.go.jp

縁被膜の厚みは不明だが、磁石製作メーカーの実測では絶縁被膜込みの鋼板の厚みが 0.505~0.510mm であった。本研究では絶縁被膜の厚みを 0.010mm と仮定し、鋼板間の隙間は鋼板の厚みに対し 2%と仮定した。

Table 1: Quadrupole Magnet Parameters

Bore diameter	34 mm
Pole length	281 mm
Pole width	488 mm
Pole height	488 mm
Magnetic gradient	56 T/m
Coil turn	20 /pole
Maximum current	352 A

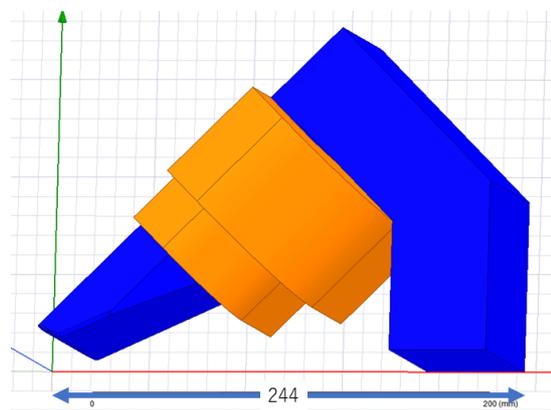


Figure 1: 1/16 cut model for a quadrupole magnet core (blue) with a coil (orange).

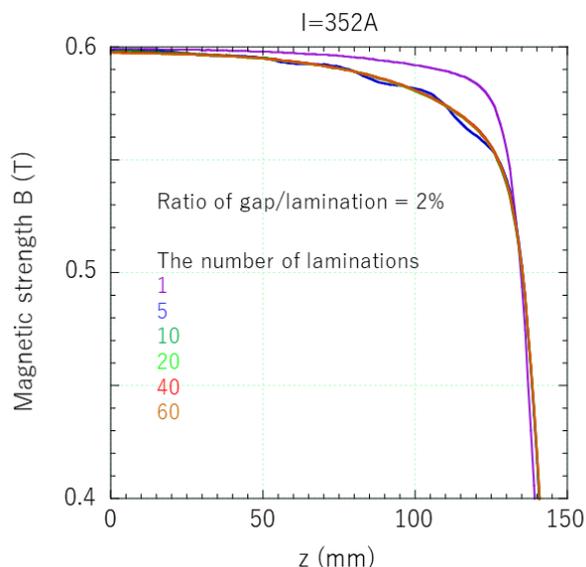


Figure 2: Z profiles of magnetic strength of a quadrupole magnet at $x=10\text{mm}$ and $y=0\text{mm}$ for various numbers of laminations. The ratio of gap over lamination is assumed to be 2 %.

3. ANSYS multiphysics による磁場計算

東北大学金属材料研究所計算材料科学センターの ANSYS multiphysics を用いて計算を行った。磁極とコイル形状は図 1 に示す 1/16 カットモデルで模擬した。境界面での磁場の向きは理想的とし、境界条件に応じて面に対し垂直、あるいは平行とした。積層鋼板の厚みは 0.5mm のため 281 枚の鋼板を 2% の隙間で積層し、

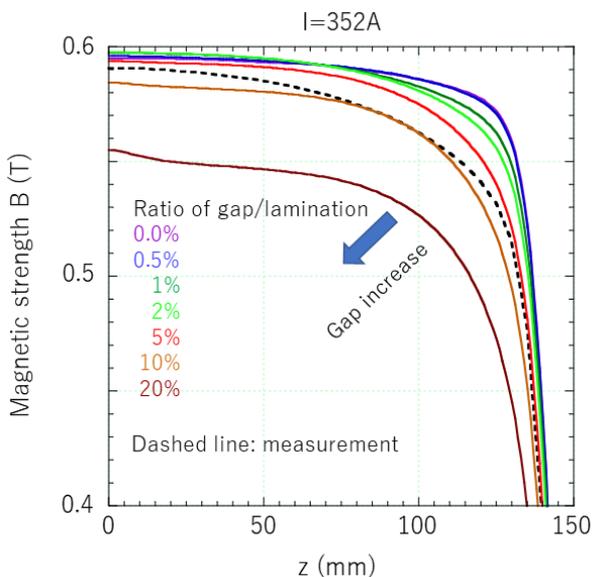


Figure 3: Z profiles of magnetic strength of a quadrupole magnet at $x=10\text{mm}$ and $y=0\text{mm}$ for various ratios of gap over lamination.

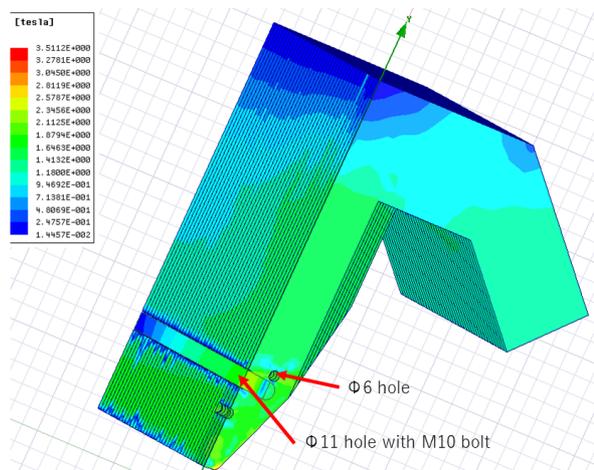


Figure 4: 1/16 cut model of a quadrupole magnet yoke. There are three M6 holes with 15 mm depth on the edge of the yoke. A $\phi 11$ hole where a M10 bolt is inserted is located at the center of the yoke.

ANSYS で計算するのが理想的である。しかしながら、これは PC の能力を越えており現実的でない。PC で計算でき、かつ現実に即した結果となる積層数を決定するため、磁場 z 分布の積層数依存性をまずは計算した。本報告では、ビーム軸を z 軸、ビーム軌道の水平方向を x 軸、垂直方向を y 軸としている。四極磁石であるため、水平中心座標では磁場 0 となる。磁場 z 分布は水平位置 $x=10\text{mm}$ 、垂直位置 $y=0\text{mm}$ における磁場強度で計算した。図 2 に結果を示す。積層数 1 と 5 では大きく結果が異なるが、10 以上の積層数であれば同様の結果が得られた。本研究では積層数 40 で計算することにした。積層数 1 の場合は、隙間が 0% に等しい。これが、5 以上の結果と大きく異なる理由である。

図 3 は磁場 z 分布の隙間比依存性を調べたものである。積層間の隙間は絶縁被膜材であるが、計算では空気で模擬した。黒点線が実験データである。水平位置 $x=10\text{mm}$ 、垂直位置 $y=0\text{mm}$ でホールプローブを用いて磁場強度を測定した。紫、青、緑の順に隙間比が 0.0, 0.5, 2% と増加している。隙間比は鋼板に対する絶縁被膜の厚みを表す。隙間がないときは、磁石の端部における計算値と実験値の差異が大きい。隙間を増やすとともに、実験値に近づくが、増やしすぎると磁極中心での不一致が大きくなる。ここでは、既述の通り、隙間比 2% を仮定した。

図 4 は磁場計算時に考慮した電磁石ヨークの加工穴を示す。ヨークの端部には M6 で深さ 15mm のタップ穴が 3 箇所空いている。磁石を半割してクレーンで吊った時の磁極変形防止用の金具を固定するための穴である。各鋼板には直径 11mm の穴が開いており、積層後に M10 ボルトを通し、両端からナットで締めて固定する。接着材で積層を固定してヨークを形成するが、それを補強するためのものである。

積層の隙間を増やすと特に端部で磁束密度が減少す

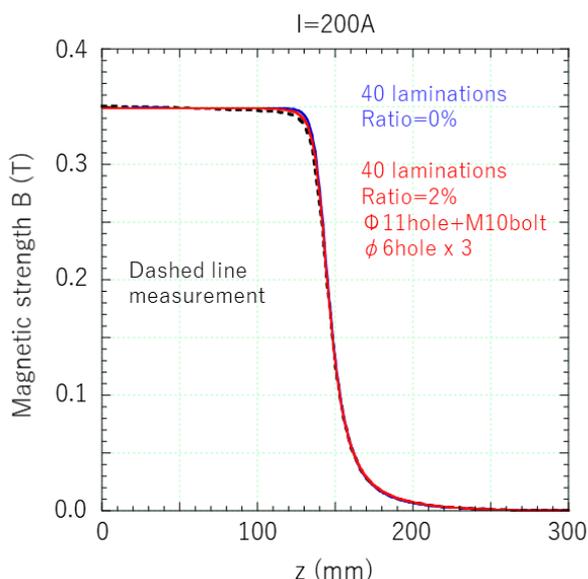


Figure 5: Z profiles of magnetic strength of a quadrupole magnet measured at $x=10\text{mm}$ and $y=0\text{mm}$ for $I=200\text{A}$. The black dashed curve is measurement, blue curve is a calculation with ratio of gap over lamination = 0%, red curve is calculation with ratio of gap over lamination = 2%.

る理由を考察する。図 4 に示すように、一般に磁極の外側ほど磁束密度 B が強くなり、飽和しやすくなる。また、隙間の割合を増やすと積層鋼板を通る磁場の強さ H が

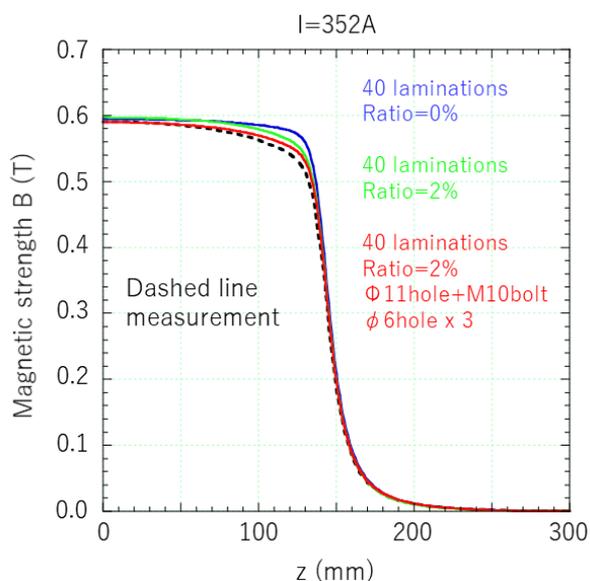


Figure 6: Z profiles of magnetic strength of a quadrupole magnet measured at $x=10\text{mm}$ and $y=0\text{mm}$ for $I=352\text{A}$. The black dashed curve is measurement, blue curve is a calculation with ratio of gap over lamination = 0%, green curve is calculation with ratio of gap over lamination = 2%, and red curve is calculation with ratio = 2% and $\phi 11$ hole and $\phi 6$ holes.

増す。磁極端部で B-H 曲線が直線的となる磁場の弱い条件下では、隙間による影響は小さい。しかしながら、磁極端部で B-H 曲線が寝てくる磁場の強い条件下では、隙間の影響が顕著となる。

図 5 は電流 200A 時の磁場 z 分布を表す。黒点線が実験データで、青線が隙間比 0%、積層数 40 の計算値である。赤線が隙間比 2%、磁極固定用のボルト穴 11 ϕ に M10 ボルトを通し、M6 のタップ穴を考慮した計算値である。M10 ボルトの材質は SS400 である。200A では計算値は実験データをよく再現する。また、隙間比 0%と 2%の場合で、計算結果の違いがほとんど見られない。磁場強度が低いときは積層の効果はほとんどないと言える。

図 6 は電流 352A 時の磁場 z 分布である。黒点線が実験データ、青が隙間比 0%の計算、緑が隙間比 2%の計算、赤が隙間比 2%に加え、 $\phi 11$ 穴に M10 ボルトを通した効果と、M6 深さ 15mm の穴の効果を加えたものである。隙間比 0%(青線)では、特に端部において実験データを再現できなくなる。隙間比 2%(緑線)では端部において実験データを再現する方向に寄る。磁場強度が上がると積層間の隙間の影響が大きくなることを示している。さらに、直径 11mm の積層鋼板固定用のボルト穴の効果も大きく、赤線は端部だけでなく、磁極中心の絶対値をかなりよく再現する。直径 11mm の穴があると、磁場の通り道が遮られ、M10 のボルトを通したとしても、ボルトと穴のわずかな隙間を磁場が通りにくいことを表している。

4. まとめ

積層鋼板で製作した四極電磁石の一つについて ANSYS multiphysics を用いてモデル化し、磁場計算を行った。磁束密度の z 分布の測定値について、コイル電流 200A と 352A の場合で比較を行った。どちらの電流においても、積層鋼板間の隙間 2%を仮定した計算はよく一致した。隙間 0%の計算は、磁場強度が強くなると、実験データを再現しない。飽和しやすい磁極端部の磁束密度に、積層間の隙間が大きな影響を与えることがわかった。今後は、その他の形状の電磁石についても計算を行い、実験データと比較し、積層効果についてより一層理解を深める予定である。本研究は 3GeV 級放射光源の多極電磁石の開発にも有用である。

謝辞

本研究は東北大学金属材料研究所における共同研究(17S0210)により実施されたものである。金属材料研究所のスーパーコンピュータを利用した。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, "SPRING-8 Upgrade Project", Proc. of IPAC2016, 2016, pp. 2867-2870.
- [2] 内海渉, "次世代放射光施設の推進に関する状況について(1)—文部科学大臣発表及び量子ビーム利用推進小委員会報告書について—, 放射光 31, 2018, p. 168.
- [3] T. Watanabe *et al.*, "Updates on Hardware Developments for SPRING-8-II", Proc. of IPAC2018, 2018, pp. 4209-4212.