

高速四極電磁石とRFKOを用いたシンクロトロン用ビーム取り出しのための
Panofsky型四極電磁石の研究

日大生産工(院) ○ 増淵 聖
日大生産工 中西哲也

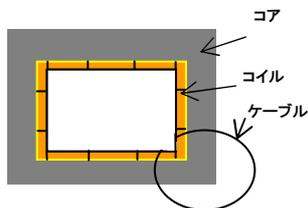
1. はじめに

重粒子がん治療では、X線など従来の放射線治療に比べて、がん患部に線量を集中することができる。そのため、がん患部の周りの正常な細胞への影響が少なく、人体への負担が少なく済む [1]。最も効果的な照射法としてスポットスキニング照射法があり、それに適したシンクロトロンからのビーム取り出し法としてQAR法が提案されている [2]。この取り出し法で用いる高速四極電磁石は高速制御が必要となる。

本研究室では、高速四極電磁石としてPanofsky型を研究している。この電磁石は磁場の時間変化によりコイルに渦電流が生じる。この渦電流により磁場分布と応答特性に影響がでる。今回、Panofsky型四極電磁石を試作し、静磁場分布、動磁場分布を測定したので、渦電流を考慮した磁場分布の計算結果とともに記述する。

2. Panofsky型電磁石

図1にPanofsky型四極電磁石を示す [3]。Panofsky型は、ビーム軸に沿って板状のコイルをコア一面に設置する。このコイルを電磁石端部でケーブル等を用いて接続し、上下面と両側面に流れる電流の向きを逆にする



磁場を発生させることができる。構造は、従来型が曲線で構成されているのに対し

図1 Panofsky型四極電磁石図 Panofsky型は直線で構成され、図1から分かる通りフェラ

イトのブロックの組み合わせで容易に製作することが出来る。また、口径内の広い範囲で均一な四極磁場が得られる。

3. Panofsky型四極電磁石の磁界設計と試作

QAR法で必要とされるPanofsky型四極電磁石の仕様を表1に示す。ここで有効磁界領域の大きさは、重粒子線用シンクロトロンへの適用を考慮して決めた。磁場勾配の強さは、セパトリクスが20%収縮されるために必要な値である。要求仕様を満たす磁場計算を二次元磁場解析ソフトPoissonを用いて行った。図2は、計算結果で磁束の分布を示す。コアの内径は横14cm、縦4.2cmであり、長さは20cm、コイル厚は0.1cmとした。同図には、有効磁界領域も示している。中心軸上(y=0)の磁場分布の磁場勾配は図3に示す。要求仕様である一様性±5%の範囲を同図に示しているが、満足できていることが分かる。垂直方向の有効磁界領域であるy=1.1cmにおいても満足できた。

次にPanofsky型四極電磁石のコイル分割数を検討した。効率良くビーム取り出しを行なうために、コイル電流の立ち上がりは10μsで95%を目標にする。これを満たすためには、等価的直列抵抗R=4[Ω]とした時インダクタンスは13.2[μH]以下である必要がある。Poissonによる磁気エネルギーからインダクタンスを計算した結果、12分割を採用することにした。

Panofsky型四極電磁石の試作は、市販のフェライトコアを用いたことにより、コアの内径は13.4cm、縦5.75cm、長さ12.9cmとなった。また、フェライトの厚みは1cmである。Poissonで計算した中心軸上(y=0)の磁場分布の磁場勾配は図4に示す。コイル幅は上下コイ

Panofsky magnet for the beam extraction from the synchrotron
using a fast Q-magnet and RFKO.

Satoshi MASUBUCHI and Tetsuya NAKANISHI

ルが1.15cm、左右コイルが0.35cmである。試作したPanofsky電磁石を図5に示す。コイルはカプトンテープでそれぞれ絶縁し、コアに両面テープで貼り付けた。コイルの厚さは0.02cmと0.06cmの2セットを作成し、それぞれの測定時にコアに貼り替えて実験した。

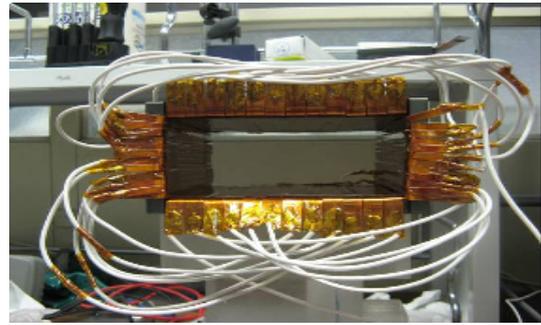


図5 試作したPanofsky型四極電磁石図

表1 要求仕様

有効磁界領域	水平方向±6.5[cm]以上
	垂直方向±1.1[cm]以上
立ち上がり時間	10[μ s]以内
磁場勾配g	26[G/cm]以上
磁場勾配の一様性	±5[%]以内

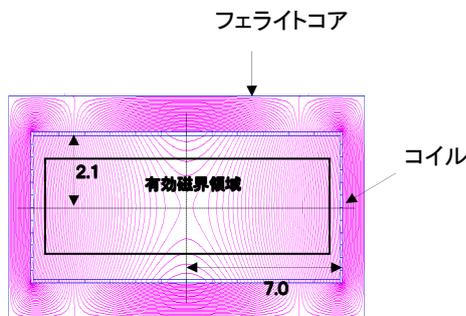


図2 Poissonによる計算と有効磁界領域

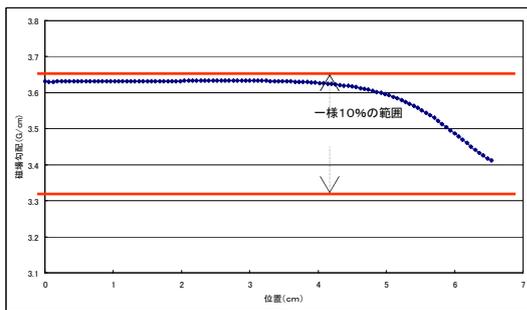


図3 電磁石の磁場勾配

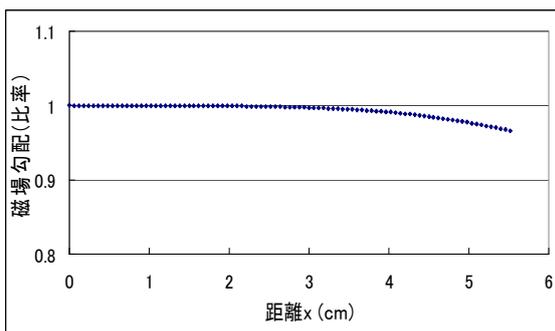


図4 試作した電磁石の磁場勾配

4. 磁場測定結果

4.1 静磁場測定

磁場測定はホール素子を用いて行った。y = 0[cm]の位置において、0.5cm間隔で測定した。コイル電流はI = 14[A]で行った。プロットした値は3回の測定値の平均である。y = 0のx軸上の磁場勾配を図6に示す。磁場勾配の値は相対的に表している、実際の値は5.5(G/cm)程度である。測定値の磁場勾配の分布と計算で求めた磁場勾配の分布(図4)は似たものとなっている。しかし、端部付近での磁場勾配の減少が、計算値よりもわずかに大きい。このことは、フェライトコアからのコイルのわずかな剥がれが原因であると考えられる。

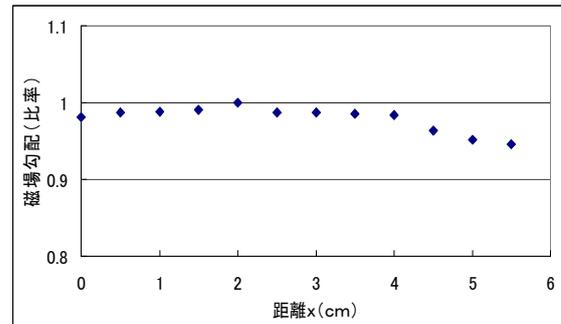


図6 静磁場分布

4.2 動磁場測定

図7は、コイル厚が0.06cmで周波数は2.5kHzと5kHzの時の磁場分布の測定結果を示す。測定は、幅0.6cm、長さ2cm、厚さ0.5cm、巻き数50ターンの検出コイルを用いて行った。ピーク電流は9.1A、y=0の位置において、0.5cm間隔で測定した。磁場分布は、検出コイルに誘起する電圧の実効値をプロットしているため、左右対称な図となっており、周波数に応じてその変化も約2倍となっていることが分かる。

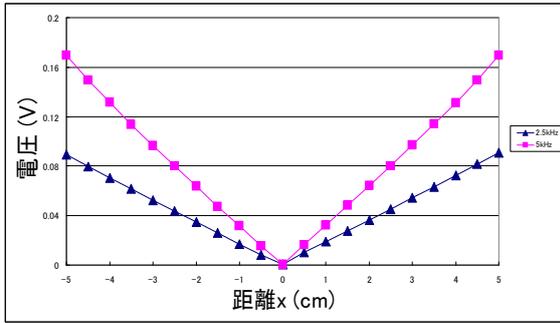


図7 動磁場分布

図8(a)はその測定値を基に計算した磁場勾配を示している、同図には周波数が10kHzの結果も示している。図8 (a) は $y=0$, ビーム軸方向の中心 ($z=0$) で周波数毎の磁場勾配を示し、図8(b)は、 $z=0$, 周波数10kHzで y の位置を変化させた時の磁場勾配を示す。なお、磁場勾配は、他の周波数と比較しやすいように磁場勾配の数値を $x=0$ の値で規格化している。図8から磁場勾配は、側面に近づくほど磁場勾配が強くなっていることが分かる。また、周波数が高くなるほどその傾向が強くなることが分かり、これは、渦電流による影響だと考えられる。

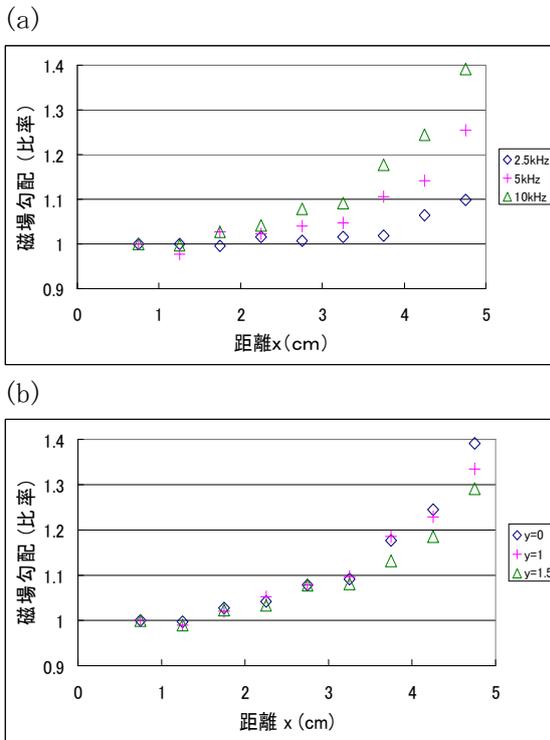


図8 (a) 周波数毎の磁場勾配 (b) y 軸の位置毎の磁場勾配

図9は、コイル厚が0.02cmの結果である。図9(a)は $y=0, z=0$ で周波数毎の磁場勾配を示し、図9(b)は、 $z=0$, 周波数10kHzで y の位置を変化させた時の磁場勾配を示す。コイル

厚0.06cmより変化の割合は小さくなっていて、厚みが薄くなることにより、渦電流が減少したことが考えられる。0.02cm板の場合、5kHzまでは表1の磁場勾配の一意性の要求仕様を満たす値となっているが、10kHzになると要求仕様の範囲を超えているのが分かる。

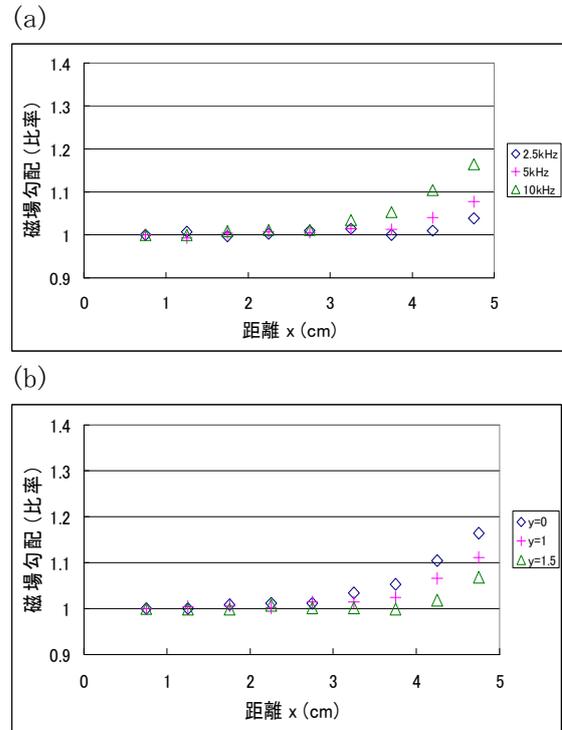


図9 (a) 周波数毎の磁場勾配 (b) y 軸の位置毎の磁場勾配

5. シミュレーションと考察

側面に近い位置で、渦電流の影響が大きくなることについて検討する。 $y=0$ の時の静磁場分布(図6)と比較すると、 $x=4$ cmまでの静磁場分布はほぼ平坦であり、従って、磁場勾配が側面付近で変化が大きくなる原因は渦電流によるものであると考えることが出来る。そこで、上下面のそれぞれのコイル板の渦電流分布を考える。ここで、両サイドのコイル板の渦電流による影響は、板幅が小さく、且つ、磁束の通過方向が板の厚さ方向ではなく幅方向なので、小さいとして無視する。コイル板を通過する磁場が同様であれば、渦電流分布は式(1)で示されるように中心をゼロとして、その両側で電流の向きは異なる。[4]

$$j = -\delta x \dot{B} \quad [\text{A/m}^2] \cdots (1)$$

ここで、 δ は、板の導電率、 x は中心を0とした時の距離、 \dot{B} は磁束密度の時間微分である。これに対して、Panofsky型では、磁極面中心から端部に向かって外側ほど磁場は強くなる

ので、渦電流がゼロとなる位置はコイル板中心より端部側にずれる。このため端部側の渦電流密度は高くなる。一方、電源から供給される電流の向きは、端部側の渦電流の向きと同じである。そのため、それぞれのコイル板の電流密度は端部側ほど強くなる。結果として、磁場勾配は端部側ほど強くなる。と考える。

また、それぞれのコイル板にはその位置での磁場強度に応じて渦電流は独立に流れるので、渦電流による磁場分布は周期的に変化する。図8には、その周期的変化が見られ、 y が大きいほどその影響が強く見られ、 $y = 0$ に近づくほどその影響は小さくなっている。これは、渦電流による磁場が平均化されているためと考える。コイル幅は1.15 cmであり、その長さで周期的に変化している。但し、検出コイルの幅は0.6 cmと大きいので、分解能が下がり変化は小さく測定されていると思われる。 y が0 cmに近づくほど端部で磁場勾配が強くなる原因は分からないが、以下に述べる近似計算でもこのような結果が得られている。

それぞれのコイルに流れる渦電流を近似して、Poissonを用いて磁場分布を計算する。まず上部と下部のコイルを2:1に分割し、渦電流の偏りを考慮した。これは、渦電流がゼロとなる位置がコイル板中心よりも0.18 cmずれることを意味する。分割したそれぞれのコイルに流れる渦電流は一樣とし、同じ値で向きは逆とする。即ち、広い方のコイルの渦電流密度は狭い方の半分である。また、それぞれのコイル板の渦電流値は、コイル板中心での磁場強度に比例するとした。それぞれの渦電流値を元のコイル電流値に加えて計算した結果を図10に示す。渦電流の絶対値は、図8(b)に示す $y = 0$ の分布の変化率にほぼ等しくなるように設定した。詳細な分布は再現できていないが、 $y = 0$ に近づくほど渦電流の影響が大きくなるなど、定性的には実験結果と同様の傾向が見られる。

このように、渦電流の影響を考慮すると、有効磁界領域は狭まるため、電磁石のビームアパーチャを広くする必要がある。特に水平方向の長さを広げる必要があるであろう。

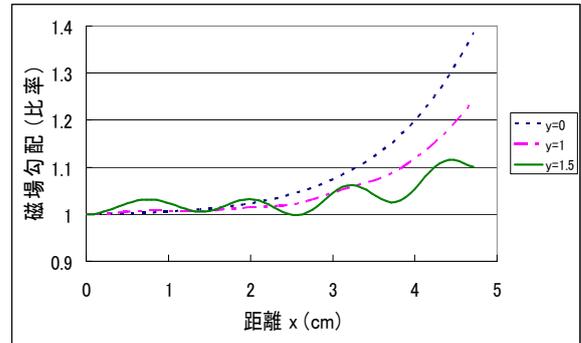


図10 シミュレーション結果

6. まとめ

Panofsky型電磁石をQAR法に適用するため、磁場設計を行い、試作機を製作した。製作した電磁石の磁場測定をDC電流と交流で行い、コイルに流れる渦電流の磁場分布への影響を測定した。渦電流の影響は大きく、0.02 cm厚のコイルでも10 kHzでは磁場勾配の一樣性に対する仕様を満足できないことが分かった。渦電流の影響は、磁場勾配を端部で大きくする方向に働き、この分布は、渦電流を近似してPoissonで計算した磁場分布と定性的には一致した。今後は、渦電流を考慮した設計が必要で、ビームアパーチャを水平方向に広げる必要があるだろう。

「参考文献」

- [1] 辻井博彦、遠藤真広、「切らずに治すがん 重粒子線治療がよくわかる本」コメントズ, 2006.
- [2] 中西哲也、他 粒子線がん治療用シンクロトロンからの新ビーム取り出し法の研究 日本大学生産工学部第39回学術講演会, 2006, pp51-52.
- [3] L. N. Hand and W. K. H. Panofsky, THE REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 30. NUMBER 10 OCTOBER, 1959, pp927-930.
- [4] S. Y. Lee, Nuclear Instruments and Method in Physics Research A300(1991) 151-158 North-Holland.