

シンクロトロン用ビーム取り出しのためのパルス四極電磁石の研究
- H型電磁石による渦電流試験 -

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]。その照射法としてスポットスキヤ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パルス四極電磁石は高速制御が必要となる。

本研究室では、パルス四極電磁石として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。この渦電流により応答特性と磁場分布に影響がでる。今回は、内部の磁場分布が一定な偏向電磁石を用いて上部中心に銅板を張ることで生じる渦電流の影響を調べた。

2. 一様磁界中に置かれた平板に流れる渦電流

無限に長い二極電磁石の上部に金属の板が貼り付けてあるモデルを考える。その二極電磁石は、磁場分布が一様で、磁場が時間的に変化した場合金属版に流れる渦電流密度 j は次式で表すことができる[3]。

$$j = -\delta x \dot{B} \dots (1)$$

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} は磁場分布の時間微分である。式(1)から分かるように渦電流は x によって大きさが変化する。例として中心より9.5mmの位置の電流密度を次のパラメータで計算してみる。板として銅を考えると $\delta = 59.6 \times 10^6$ (s/m)、 B の時間変化は正弦波的に変わると考え周波数は10 (kHz) とし、磁場のピーク値を $B_0 = 41.7 \times 10^{-4}$ (T) とする。この時 $j = 148.3 \times 10^6$ (A/mm²) を得る。

3. モデル電磁石の製作と測定

内部の磁場が一様になる二極電磁石を製作するために、poissonを用いて2次元磁場解析を行った。電磁石は左右対称、幅80mm、間隙の

長さ30mmとした。この時の電流は10(A)、巻き数10(回)の100(A)で行い、磁場の強さは41.7(G)、0.1%の一様性を得た(図1)。

このpoissonの結果に基づき試験機の製作を行ったものが図2である。ここでフェライトコアは既存の板を使用したため両端は不必要に長くなっている。電磁石の長さは70mmである。

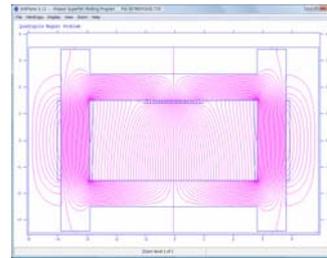


図1 偏向電磁石の磁場分布

磁場分布の一様性を確認するために、静磁場測定と動磁場測定を行った。静磁場測定ではホール素子、動磁場測定では、検出用コイルを用い



図2 試作機完成品

次に、試験機の上部に銅板を貼り付けて、測定を行った。銅板は、幅が20mm、奥行き70mm、厚さが1mmと0.5mmの2種類で行った。周波数は2kHz、4kHz、8kHzの場合で行った。なおコイル電流の値は、アンプの入力電圧の値が高いと、オシロスコープで確認した場合波形に歪がでるため、歪が出ないように調整している。周波数の高さに伴い異なる値で測定している。測定結果を図3、図4、図5に示す。周波数や板の厚さを変えることで、磁場分布が変化していることが分かる。周波数が4kHzの場合、1mm板から0.5mm板に板の厚さを変化させたことで、磁場分布は約33%減少した。板の厚さを薄くすることで磁場分布の変化が小さくなり、渦電流の影響が減少しているのが確認できる。

A study of the Pulse Q-magnet for beam extraction from synchrotron-A study of the eddy current examination with a H type magnet-

Satoshi MASUBUCHI and Tetsuya NAKANISHI

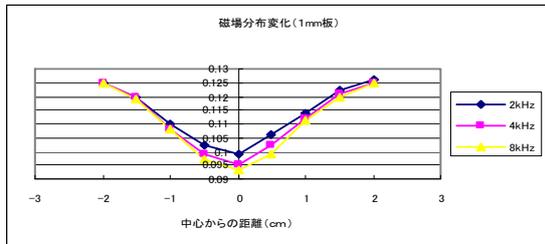


図3 周波数に対する磁場分布 (1mm厚)

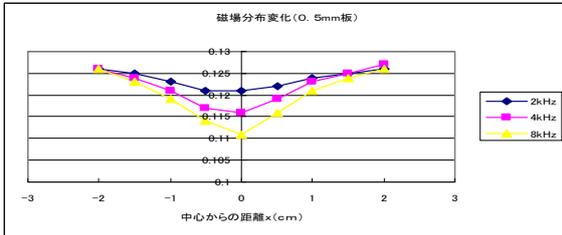


図4 周波数に対する磁場分布 (0.5mm厚)

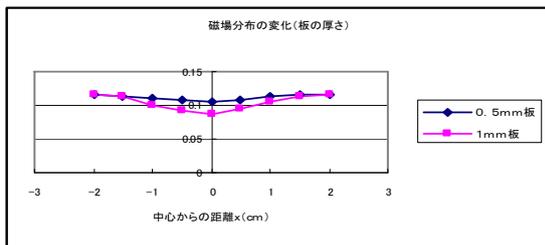


図5 板の厚さに対する磁場分布の変化 (f=4kHz)

4. 渦電流による磁場分布のシミュレーション

銅板に流れる渦電流を計算するために銅板を20分割し(図1)、式(1)で求まる電流密度から渦電流を計算した。導出した各区間の渦電流の値をpoissonにいれて計算した結果を図6に示す。本来渦電流の影響による磁場分布の変化は、元の磁場を打ち消す程度と考えられるが、図6では、それ以上の異常な値となってしまうている。

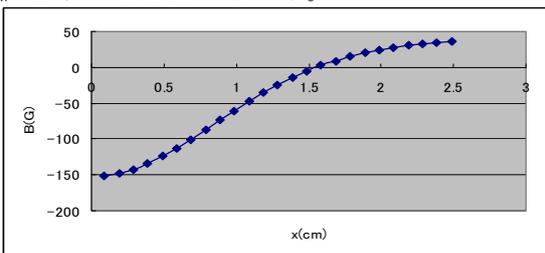


図6 計算で求めた渦電流による磁場分布

そこで、渦電流の大きさを減少させるためにインダクタンス分を入れて再度考えた。計算で使用するモデルは、幅1mmの棒状のコイルを考える。銅板の幅は20mmなので、10個のコイルとして考えることができる。銅板は抵抗とインダクタンスの直列回路と等価である。従って、誘起電圧をVとすると各コイルに流れる電流は次式で表すことができる。

$$I = \frac{V}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \dots (2)$$

$$V = AB_0 \omega \cos \omega t \dots (3)$$

ここで、Aはコイルの面積である。インダクタンスLは次式を使って近似的に求める。

$$L = \frac{Wm \cdot l}{I^2} \dots (4)$$

Wmは、poissonで解析した単位長あたりの磁気エネルギー、lはコイル長である。一方、抵抗rは、

$$r = \rho \frac{l_2}{s} \dots (5)$$

で与えられ、 l_2 はコイルの周長である。ここで、すべてのコイルに流れる電流の位相は等しいはずである。そのために、それぞれのコイルの間には、

$$\frac{L_1}{R_1} = \frac{L_n}{R_n} \dots (6)$$

が成り立つ必要がある。 R_n は式(5)を用いてそれぞれのコイルで計算する。Lに関しては、最外周の L_1 を求め、他の L_n に関しては式(6)を満足するように求める。この方法で求めた電流値を使って磁場分布を求めたものが図7のL2である。なお、縦軸の値は分布を比較するために磁場強度の比とした。同図に測定値も一緒に示しているが、測定値に対して依然として大きい。

そこで、実際のLはもれ磁場を考慮するともっと大きいはずなので、測定値の電流値に合うLを求める。その結果、Lの値を約3倍にすることで測定値と近い磁場となった。結果を図7にL1で示すが、分布もよく一致していることが分かる。

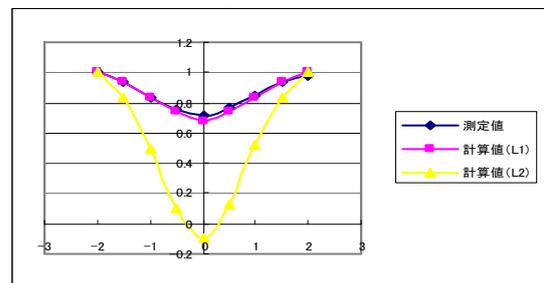


図7 測定値と計算値の比較

5. まとめ

渦電流の値が周波数の大きさや銅板の厚さにより変化し、磁場分布にどのような影響を与えるか確認できた。また、渦電流の計算方法を検討し、それによる磁場分布を測定値と近い値にすることができた。しかし、測定値と合わせるためには、計算値のインダクタンスの値を3倍近く大きくしなければならなかったため、その原因についてさらに検討を要する。

「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」コモンズ
 [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
 [3] Nuclear Instruments and Method in Physics Research A300(1991) 151-158 North-Holland