

DEVELOPMENT OF CORRECTION METHOD FOR MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION DUE TO EDDY CURRENT

Takahiro Yamada ^{#A)}, Fumiaki Noda^{A)}, Hideaki Nishiuchi^{A)}, Toshiyuki Terunuma^{B)}, Takeji Sakae^{B)}

^{A)} Hitachi Ltd.

2-1, Omika-cho 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1221

^{B)} Proton Medical Research Center, University of Tsukuba

1-1-1 Tenou-cho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8575

Abstract

We are developing a method that corrects magnetic field distribution made by eddy current induced in a beam duct. In this method, copper plates are used as another source of eddy current in order to correct the magnetic field distribution uniformly. To validate efficacy of this method, magnetic field measurements was performed. Measurement result showed that the measured magnetic field distribution agreed with the calculation results within the measurement error, and that the fringing magnetic field distribution was also corrected uniformly.

シンクロトロンにおけるビームダクト渦電流起因不整磁場の補正手法開発

1. はじめに

シンクロトロンでは加速に伴う磁場の増大によって偏向電磁石部分のビームダクトに渦電流が誘起される。この渦電流はビーム通過領域に六極磁場を発生させるため、共鳴の励起、クロマチシティの増大によるビーム損失の恐れがある。その対策として、従来は、セラミックスで製作されたビームダクトの使用や、ダクトの板厚を薄くすることで渦電流発生を抑制するなどの手法がとられてきた。

今回、導電性のダクトに対して、別の渦電流源として銅板を設置することで、渦電流が作る磁場を一樣分布に補正する手法を考案した。本報告では、本手法での磁場の補正方法ならびにその磁場分布に関して纏めるとともに、磁場補正効果の実証試験に関しても併せて報告する。

2. 渦電流磁場の補正手法

偏向電磁石のビーム通過部分の断面を図 1 (a)に示す。y が負となる方向の偏向磁場が時間的に増大すると、式(1)に従い、導電性のダクトには渦電流が誘起される^[1]。

$$i(x) = \dot{B} \cdot \sigma \cdot x \quad (1)$$

ここで $i(x)$ は水平位置 x における紙面垂直方向の電流密度、 \dot{B} は磁場の時間的変化率、 σ は電気伝導率である。ダクトに誘起される渦電流がダクト内部に作る垂直方向の磁場の水平方向分布は図 1 (b)の点線に表される。以下では、磁極間に存在する導体に誘起される渦電流が作る垂直方向の磁場を渦電流磁場と記述する。図 1 (b)点線のように、ビームが感じる磁場が通過位置に依存して非線形に変化すると、クロマチシティの増大ならびに共鳴の誘起により、ビームが損失される恐れがある。今回報告する手法では、ダクトとは別の渦電流源として銅板を使用し、

ダクトに誘起される渦電流が作る磁場に、銅板に誘起される渦電流が作る磁場 (図 1 (b)破線) を重畳する。銅板は、図 1 (b)実線に示すように、ビーム通過領域の渦電流磁場が一樣分布に補正されるように配置する。

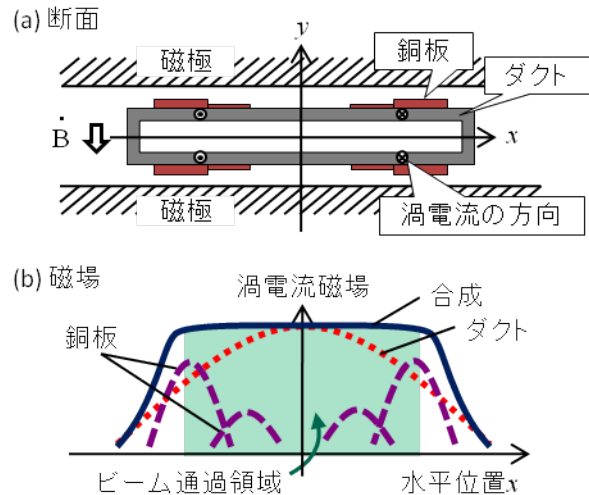


図 1 : 磁場補正の概念図

粒子線治療用シンクロトロン の偏向電磁石の典型例として図 2 (a)の体系に本手法を適用し、水平方向 $\pm 65\text{mm}$ の領域の渦電流磁場を補正した場合、銅板の配置は図 2 (b)となる。なお、磁極間隔を低減するために、ダクトは高抵抗率材料の inonel601 製としている。この体系で磁場の時間変化率を 3T/s とした場合において、POISSON を使用した二次元磁場計算によるダクト内の渦電流磁場の分布を図 3 に示す。ダクトに誘起される渦電流が作る磁場のみでは、補正領域における渦電流磁場の変化幅 ΔB が 1.7mT であるのに対し、銅板に誘起される渦電流が作る磁場 (図 3 破線) を重畳することにより 0.09mT (銅板設置前の 5.3%) に低減することが可能となる。

[#] takahiro.yamada.dp@hitachi.com

なお、従来の対策方法である薄肉ダクト（厚さ0.5mm、SUS316L製）の場合、補正領域における渦電流磁場の変化幅は0.27mTである。

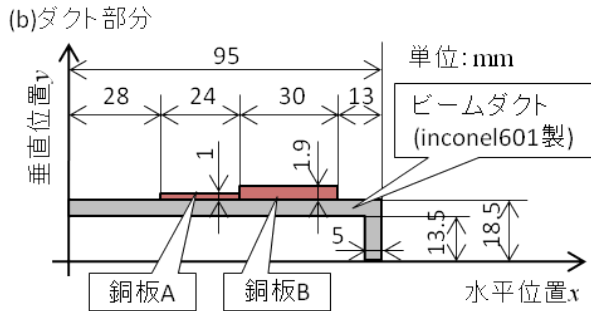
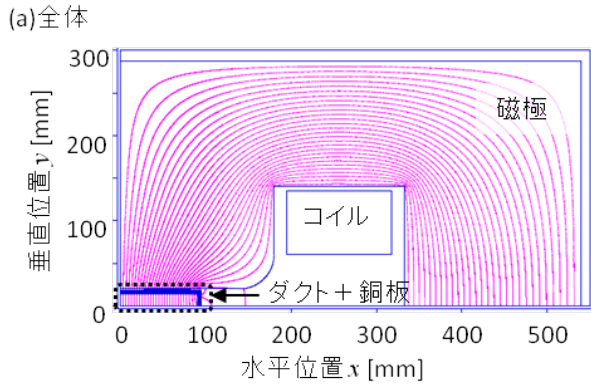


図2：計算体系

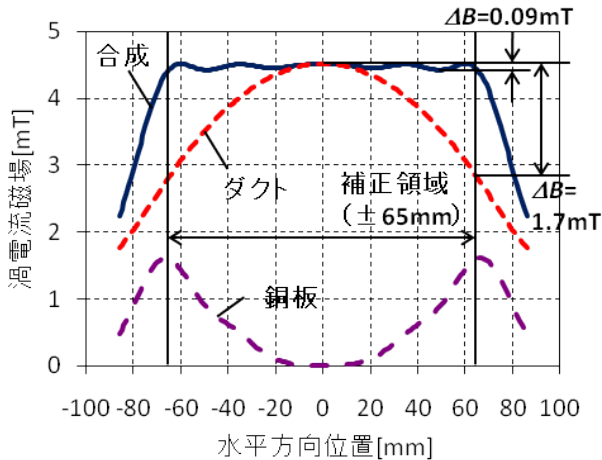


図3：渦電流磁場の水平方向分布

3. 磁場補正効果の実証試験

前章の検討は無限長の体系を仮定した二次元磁場解析を基に実施した。有限長の偏向電磁石磁極の場合においても、銅板により渦電流磁場を一様分布に補正可能であることを確認するために、縮小体系での動磁場測定試験を実施した。

3.1 試験体系

本試験は筑波大学陽子線医学利用研究センターの基礎研究照射室に設置されたビーム走査電磁石を用いて実施した。図4に試験装置の概要を示す。本試

験では、固定治具を用いてダクトならびに銅板を磁極間に設置した。ビーム走査電磁石の励磁量を変化させ、ダクトの内部に設置した測定コイルに誘起されるコイル端電圧をデジタルオシロスコープにて測定した。測定したコイル端電圧から、①磁極間にダクトのみを設置した状態での磁場、②磁極間にダクトと銅板を設置した状態での磁場、③磁極間に何も設置しない状態での磁場を計算し、それぞれの差、①-③、②-③をとることで、それぞれダクトのみの渦電流磁場、ダクト+銅板の渦電流磁場を得た。測定コイルは移動ステージに固定された支持棒上に設置され、移動ステージを移動させることにより、x方向の分布を測定できる。また、支持棒への測定コイル設置位置を変える事により、s方向に測定位置を変化させることが可能である(図5)。なお、s,x,y方向ともに、磁極の中心をゼロ点に取る。

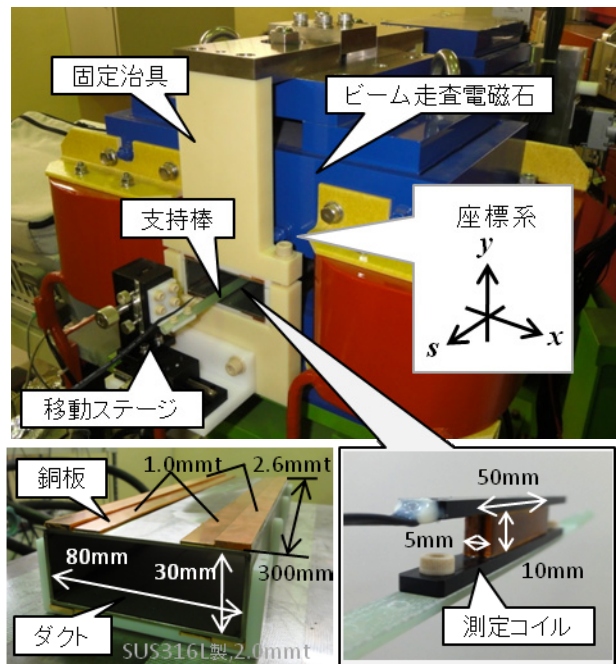


図4：測定装置の概要

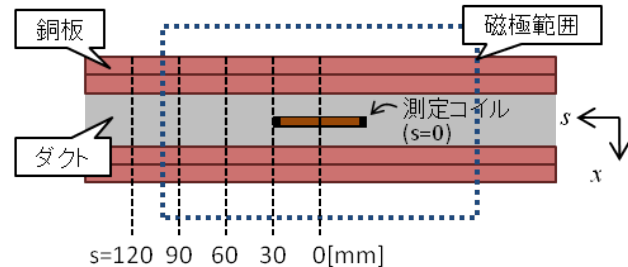


図5：s方向の磁場測定位置

3.2 試験結果

磁極のビーム進行方向中心位置 (s=0) における、渦電流磁場の水平方向分布を図6に示す。銅板を設置することにより、渦電流磁場が一様分布に補正されている。測定結果と計算は、測定誤差 0.05mT(2

σ)の範囲で一致する結果を得た。この測定誤差は測定コイルの電圧信号にのるノイズによる誤差である。一方、測定コイルの傾きによる系統誤差は全幅で $\pm 0.0035\text{mT}$ 程度であると考えられるため、本試験の測定誤差は測定コイルのノイズが主原因である。

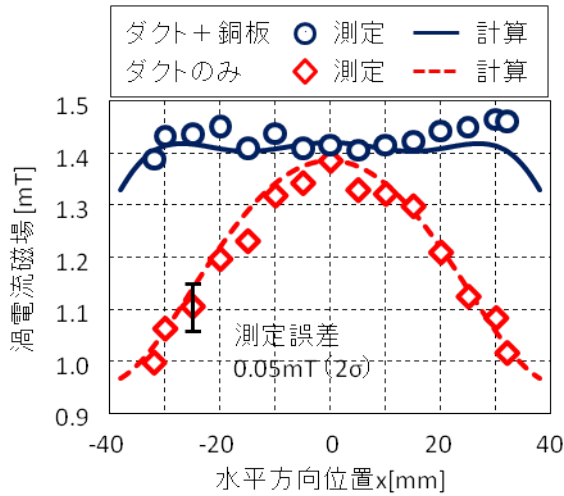


図6：ダクト中心(s=0)での渦電流磁場の水平方向分布

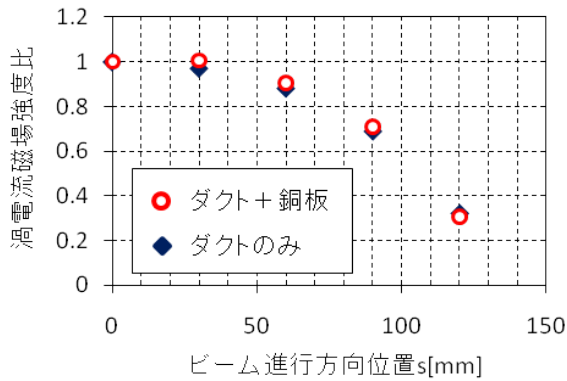


図7：ビーム進行方向各点での渦電流磁場の水平方向分布 (ダクトのみ)

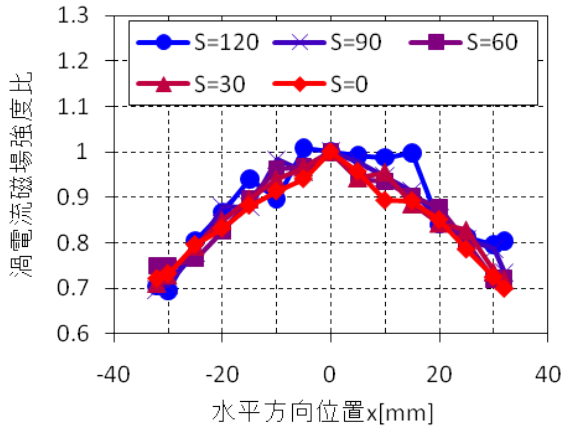


図8：ビーム進行方向各点での渦電流磁場の水平方向分布 (ダクトのみ)

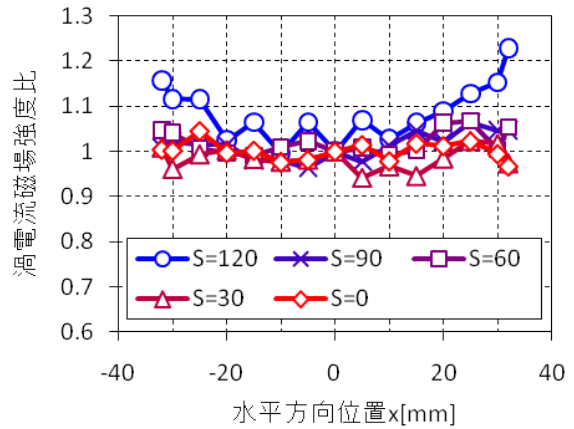


図9：ビーム進行方向各点での渦電流磁場の水平方向分布 (ダクト+銅板)

s 方向に測定位置をずらし、渦電流磁場分布を測定した結果を図7-9に示す。図7の縦軸は、 $s=0$ での渦電流磁場で規格化した、s 方向各測定位置の水平方向中心($x=0$)における渦電流磁場の強度比である。銅板の有無によらず、渦電流磁場は磁極端部に向かって低下する。図8、図9はビーム進行方向各点での渦電流磁場の水平方向分布であり、縦軸は、磁場分布を比較するために s 方向各測定位置での $x=0$ における渦電流磁場で規格化した渦電流磁場の強度である。図8に示すように、ダクトのみの場合、渦電流磁場の分布形状は磁極端部においても非線形である。一方、銅板を設置することにより、磁極端部においても渦電流磁場は一様分布に補正されている(図9)。なお、 $s=120[\text{mm}]$ での渦電流磁場分布は外側ほど磁場が強くなる形状となっているが、 $s=120[\text{mm}]$ では渦電流磁場の絶対値が小さくなり、測定誤差が磁場強度比で $0.12(2\sigma)$ と相対的に大きくなることから、このような磁場分布の傾向の有無は、本試験からは判断できない。しかし、仮に磁極の外側にこのような磁場分布が発生したとしても、磁場の絶対値が小さく、かつビーム進行方向の範囲が狭いことからビームへの影響は無視できる。

4. 結論

シンクロトロン偏向電磁石部分の真空ダクトに銅板を設置することで、ビーム通過領域に渦電流が作る磁場を一様分布に補正する手法を考案した。縮小体系での動磁場測定試験により、本手法の磁場補正効果を実証するとともに、本手法により磁極端部においても渦電流磁場が一様分布に補正されることを確認した。

参考文献

[1] A. Nilsson, et al., "Calculations of eddy-current effects in a ramped dipole field", Proceedings of 1st European Particle Accelerator Conference (EPAC 88), Rome, Italy, 7-11 Jun 1988