

小型陽子シンクロトン用偏向電磁石における磁場の一様化

Uniform Magnetic Field in the Bending Magnet for the Compact Proton Synchrotron

徳 良 晋 技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部
荒 川 雅 生 香川大学工学部信頼性情報システム工学科 助教授 博士(工学)
佐 藤 恵 一 技術開発本部総合開発センター機械システム開発部 課長 博士(工学)
宮 内 康 行 エネルギー・プラント事業本部エネルギーシステム事業部高エネルギーシステム部 課長 工学博士
中 島 正史郎 エネルギー・プラント事業本部エネルギーシステム事業部高エネルギーシステム部

陽子線がん治療は患者への負担が少ないことから、その普及が望まれている。小型のシンクロトンで、がん治療に十分なエネルギーを発生させるには、偏向電磁石中の磁場を3～5 Tにする必要があるが、そのために六極磁場成分が発生し、磁場の様性を失うことになる。間げき内の磁場は、コイル断面形状を工夫することで均一に保つことができる。コイル断面形状の検討において、新しい最適化手法を導入することで、従来に比べ少ない計算回数で偏向電磁石間げき内の磁場の均一性を向上させることが可能となった。

Radiation therapy using high-energy protons is a very effective method of cancer treatment. To attain the necessary beam energy for cancer therapy using a very compact synchrotron, the magnetic field of the normal-conductive bending magnet must be excited up to 3 - 5 T. However, increasing the field up to 4 T produces a sextupole component in the field. The sextupole component can be reduced by changing the geometry of the coil, but establishing the optimal geometry is very time-consuming. A new optimization method has been developed to establish the uniform field in the bending magnet. As a result, the optimal geometry is obtained with less calculation time.

1. 緒 言

陽子線がん治療は患者への負担が少ないことから、その普及が望まれている。しかしながら、この治療装置はシステム構成が大型になってしまうこと、導入するための費用が高額であることが課題となっており、敷地面積の縮小やコストダウンが求められている。装置の中核を占める陽子シンクロトンの大きさは、その構成要素である偏向電磁石で発生する磁場の強度が大きいほど小型となる。

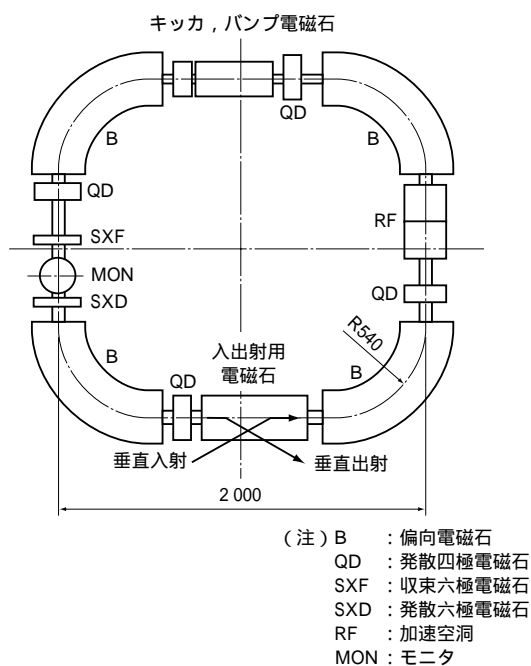
陽子線がん治療に十分なエネルギーを発生させることができ、かつ小型の陽子シンクロトンとするために、パルス大電流を用いて3～5 Tという超高磁場を発生させ、これを偏向電磁石として用いるパルスシンクロトンがある。Budker 核物理研究所(ロシア)は、最大加速エネルギーが200 MeVで、間げき内の中心磁場が5 Tとなる超小型パルス型陽子シンクロトンを提案し^{(1),(2)}、そのモデル偏向電磁石を試作したが、偏向磁場中の高調波成分が十分に抑制されていなかった^{(3),(4)}。また、遠藤(文部科学省高エネルギー加速器研究機構)らは、炭素線を利用したがん治療装置を目指し、偏向電磁石中の高調波成分が大きくならないように、最大磁場強度を3 Tにとどめることで、より実現性

の高いパルスシンクロトンを提案している⁽⁵⁾。

一方、当社では数値シミュレーションを用いて電磁石間げき内の磁場を一様にするのを試みた。その結果、コイル断面形状を工夫することで、間げき内の磁場が一様に保たれることを示した^{(6),(7)}。コイル形状の最適化を、シミュレーションを用いて試行錯誤的に行うためには、多数回にわたる解析が必要で、かつ要求形状ごとにこの作業を行う必要があった。本研究では、新しい最適化手法(実験計画法とラジアルベース関数ネットワーク応答曲面法の組合せ)を導入し、効率よく偏向電磁石内の磁場を一様にするので報告する。

2. 陽子シンクロトン

本研究で対象としている小型陽子シンクロトン^{(8),(9)}の概略図を第1図に示す。このシンクロトンは入射エネルギーが3 MeV、出射エネルギーが200 MeVであり、主に4台の偏向電磁石と4台の四極電磁石から構成されている(そのほか、入出射用電磁石および加速空洞などが含まれる)。また、偏向電磁石端部で強く発生することが予想される六極磁場成分を補正するため、2台の六極電磁石も設置されている。シンクロトンの平均直径を2.0 mとする



第 1 図 シンクロトロン概略図 (単位 : mm)
Fig. 1 Lattice layout (unit : mm)

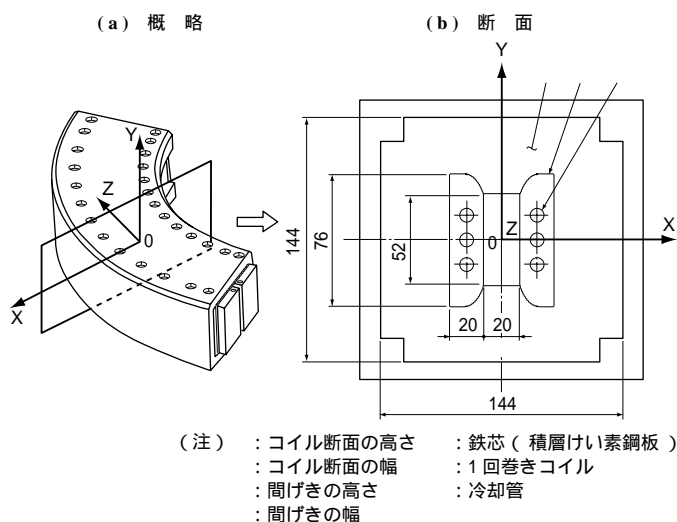
ことで、工場で組立てとチューニングを済ませてから病院に搬入が可能となる。本シンクロトロンに関するそのほかの主な仕様を以下に示す。

出射エネルギー	200 MeV
入射エネルギー	3 MeV
周 長	6.473 m
偏向半径	0.54 m
偏向磁場強度	0.42 ~ 4 T
ギャップ高さ / 幅	0.052/0.020 m
偏向角度	90 度
加速時間	3.5 ms
周期対称性	4
ベータトロン関数 垂直 / 水平	1.395/2.641 (最大)
ベータトロンチューン関数 垂直 / 水平	1.469/0.420
分散関数 垂直 / 水平	0.596/0 (最大)
クロマチシティ 垂直 / 水平	-0.049/-0.346

3. 間げき内磁場の一様化

3.1 磁場評価手法

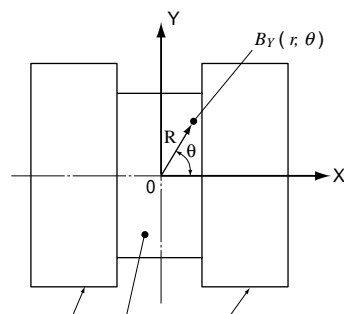
第 2 図に偏向電磁石の概略 (- (a)) とその断面 (- (b)) を示す。偏向電磁石は主に間げきを挟むコイルと積層鉄心から構成される。



第 2 図 偏向電磁石 (単位 : mm)
Fig. 2 Shape and cross section of the bending magnet (unit : mm)

本研究で問題としている磁場は、偏向電磁石の間げき内の磁場である。間げき内の空間的磁場分布の高調波成分 (特に六極磁場成分) を最小化し、一様にするのが課題となっているため、間げきを挟む 1 回巻きのコイルの断面形状を最適化する。間げき内の磁場計算には、汎用三次元電磁場解析コード「JMAG-Works」⁽¹⁰⁾を用いた。コイルに印加する電流は、1/4 正弦波 (周期 14 ms) で最大約 200 kA である。これによって、3.5 ms 時に間げきの中心磁束密度が 4 T となる。

第 3 図に示すように、間げき内にその中心を原点とする直交座標系 X-Y と極座標系 R- θ を設定する。磁場評価の対象は、間げき内の原点を中心とする半径 10 mm の円 (以下、評価円と呼ぶ) 内の Y 方向磁束密度成分 (陽子の軌道に直交する成分、以下 B_Y と呼ぶ) とする。間げき内の磁場は次の (1) 式のように多極磁場成分の重ね合わせで表現できる。



(注) : コイル断面
: 間げき
: コイル断面
第 3 図 間げき内における座標系
Fig. 3 Coordinate system in the aperture

$$B_y = B_0 \cdot \sum_{n=0}^m \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n \cdot \sin(n \cdot \theta)) \quad \dots\dots\dots (1)$$

B_y : 間げき内磁束密度の Y 方向成分

r, θ : 間げき内の地点の極座標値

B_0 : 間げき内の中心磁束密度

r_0 : 評価円の半径, 本研究では 10 mm

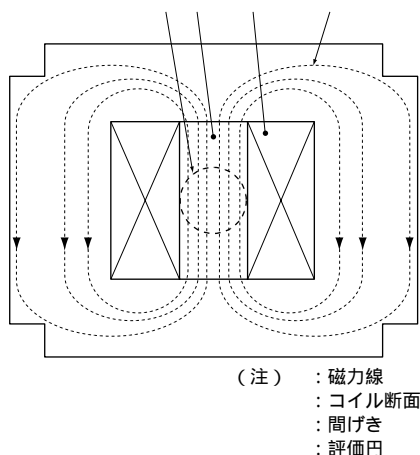
A_n : $2(n+1)$ 極ノルマル磁場成分の係数

B_n : $2(n+1)$ 極スキュー磁場成分の係数

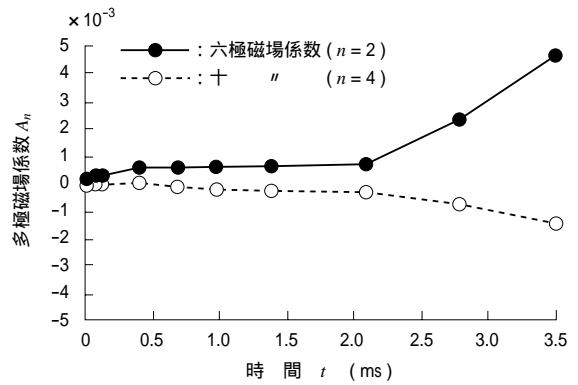
磁場の評価は, 評価円内の磁場を (1) 式を使って級数展開して多極磁場成分に分解し, 各多極磁場成分の係数を算出することで行う。なお磁場解析では, 間げき内の磁束密度の分布は X 軸対称であるため係数 B_n は常に 0 となる。そこで, 本研究では $2(n+1)$ 極磁場係数とは係数 A_n を意味するものとする (例えば, 六極磁場係数は A_2 となる)。磁場の評価において間げき内の磁場が完全に一樣であるということは, 電流を印加している時間 (3.5 ms) にわたって二極磁場係数 A_0 以外のすべての多極磁場係数の値が 0 であることを意味する。

3.2 最適化前のコイル断面形状における磁場評価

第 4 図のような矩形コイル断面形状の場合の磁場評価を行った。コイルに 3.5 ms, 1/4 正弦波電流を印加した場合の非定常磁場解析を行い, 各時間における評価円内の (r, θ, B_y) を得た。3.1 節の (1) 式と評価円内の B_y 分布から, 時間 t における 16 次までの多極磁場係数を決定した。このうち, 六極および十極磁場係数の時間変化を第 5 図に示す。最適化前のコイル断面形状では, 2 ms 以降, 特に六極磁場係数が時間とともに増大し, 満たすべき磁場の一様性が失



第 4 図 偏向電磁石内の磁束線の概念図
Fig. 4 Schematic diagram of magnetic flux lines in the bending magnet



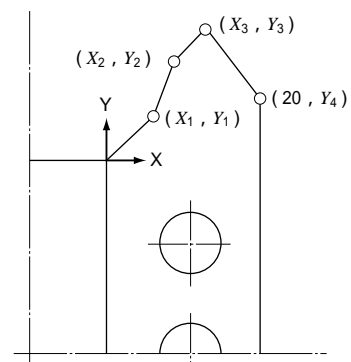
第 5 図 多極磁場係数の時間変化
Fig. 5 Time evolution of multipole coefficients

われていることが示されている。

間げき内の磁場分布は, コイル断面形状に依存することから, これを最適化することで, 陽子を加速する間の六極磁場係数の抑制が可能である。六極磁場係数は, 設計や組立誤差などを考慮に入れると 1×10^{-3} 以下に抑制することが必要となる。

3.3 最適化手法

最適化するパラメータは第 6 図に示すようにコイル断面における各点の座標値 ($X_1 \sim X_3, Y_1 \sim Y_4$) とした。目的関数は六極磁場係数の時間に関する積分値 (以下, S_{k3} と呼ぶ) とし, 制約条件は印加電流とした。印加電流の最大値が 210 kA 以下において S_{k3} を最小にするパラメータ値を決定する。最適化手法は, 「実験計画法を使って二次多項式近似の応答曲面からパラメータの最適値を得る方法」(以下, 手法 1 と呼ぶ) と, 「ラジアルベース関数ネットワーク⁽¹¹⁾を使って自由曲面の応答曲面を求めパラメータの最適値を得る方法」(以下, 手法 2 と呼ぶ) を併用した。ここで, ラジアルベース関数ネットワークとはニューラルネットワークの一種である。基底関数とし



第 6 図 コイル断面形状において最適化するパラメータ (1/2 断面)
Fig. 6 Parameters optimized in the cross section of the coil (1/2 cross section)

てガウス関数 (第 7 図 - (a)) を用い , 次の (2) 式で表現されるようにその重ね合わせによって自由な曲面を形成する (第 7 図 - (b)) .

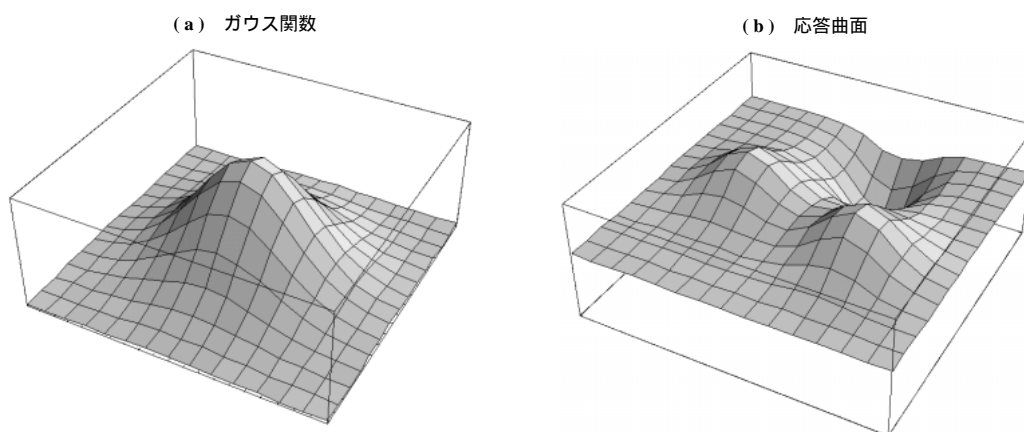
$$h(x, c, r) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \exp \left(\sum_j \frac{(x_j - c_j)^2}{r_j^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

- h : 出力値
- w_i : 重み関数
- x_j : 入力変数
- c_j : 基底関数の中心位置
- r_j : 基底関数の半径

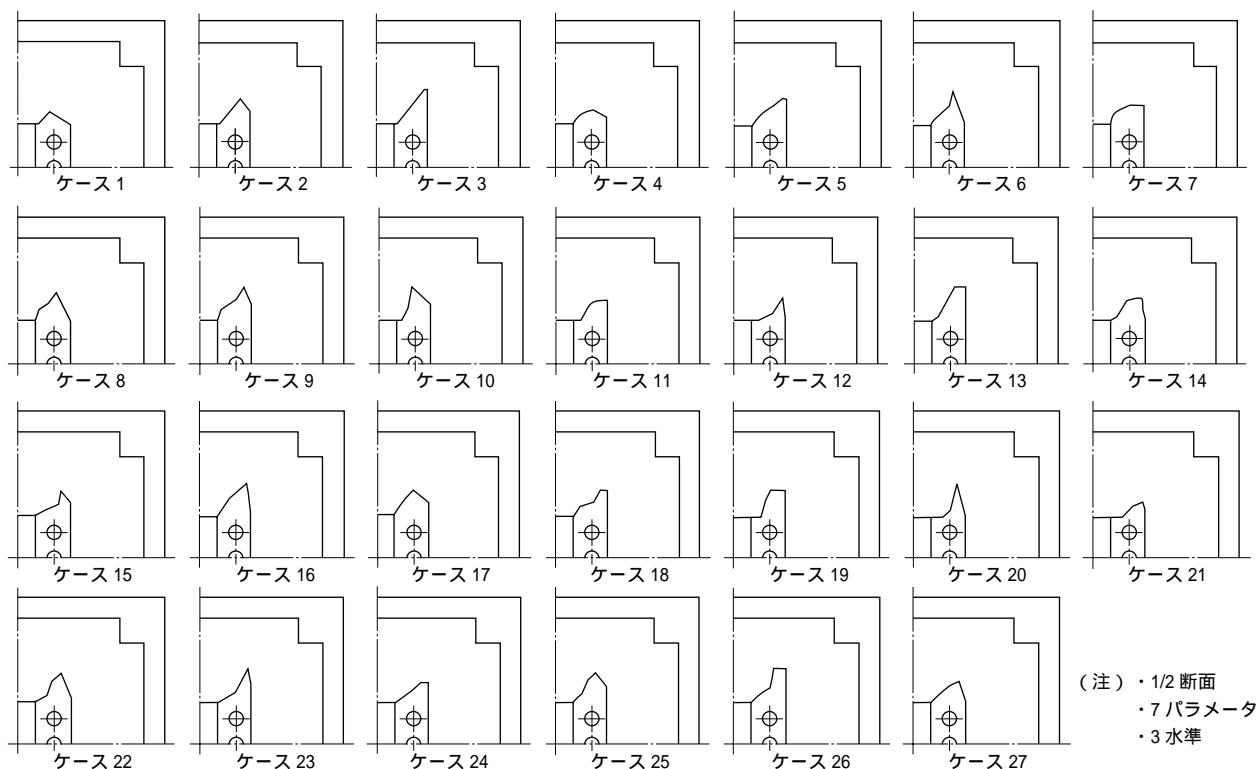
手法 1 で大まかな断面形状を決定し , パラメータを絞り込んだ後 , 手法 2 でより最適なパラメータ値を求めた . なお , 手法 1 による最適化には汎用の最適化ツール「Design director plus」⁽¹²⁾を使用した .

3.4 コイル断面形状の最適化

応答曲面を作成する学習データ用のコイル断面形状を , 実験計画法に従って七つのパラメータ , 各 3 水準で合計 27 ケース決定した . 第 8 図に決定したコイル断面形状 (1/2 断面) を示す . 3.2 節と同様の要領で各コイル断面形状についての S_{k3} を算出し , パラメータと S_{k3} の関係を二次多

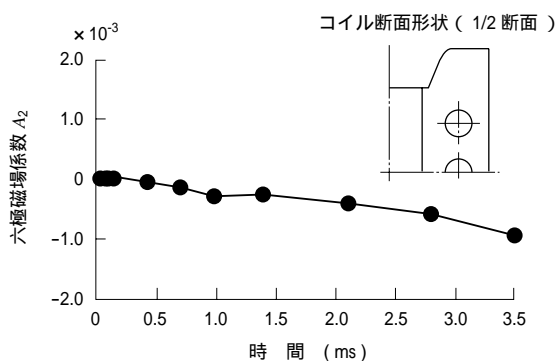


第 7 図 ガウス関数と応答曲面
Fig. 7 Gauss function and response curve surface



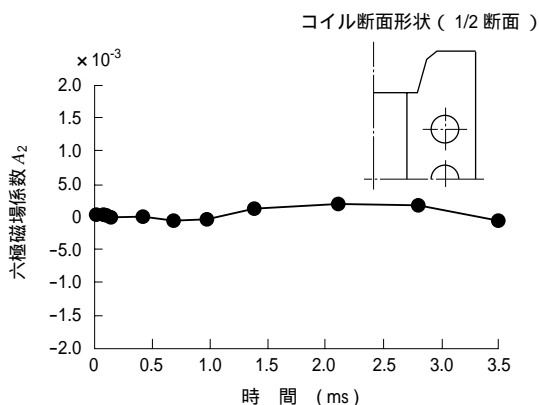
第 8 図 実験計画法に従って決定したコイル断面形状 (1/2 断面)
Fig. 8 Cross-sectional geometry of coils decided by the experimental method (1/2 cross section)

項式で近似する．逐次二次計画法によって S_{k3} を最小化するパラメータ値を求めた後（手法1），各パラメータの影響度を評価する感度解析を実施した．得られたコイル断面形状，および六極磁場係数の時間変化を第9図に示す．第5図に示した矩形断面形状の場合に比べると六極磁場係数は抑制されているものの，目標としている 1×10^{-3} 以下とはなっていない．感度解析の結果，パラメータ X_1, Y_1 （第6図参照）が最も S_{k3} に影響を与えることが示されたため，より最適な解を得るため，パラメータをその二つに絞り4水準で手法2を試みた．手法1と同様，実験計画法によって16ケースのコイル断面形状を決定し，パラメータと S_{k3} の関係をラジアルベシス関数ネットワークで近似し，遺伝的アルゴリズムで S_{k3} を最小化するパラメータ値を求めた．得られたコイル断面形状，および六極磁場係数の時間変化を第10図に示す．六極磁場係数の絶対値は最大でも 1.8×10^{-4} 以下となり目標を十分に満たすことが示された．



第9図 手法1で得られたコイル断面形状を採用した場合における六極磁場係数の時間変化

Fig. 9 Time evolution of sextupole coefficient using the cross-sectional geometry of the coil obtained by method 1



第10図 ラジアルベシス関数ネットワークを使ってコイル断面形状を最適化した場合における六極磁場係数の時間変化

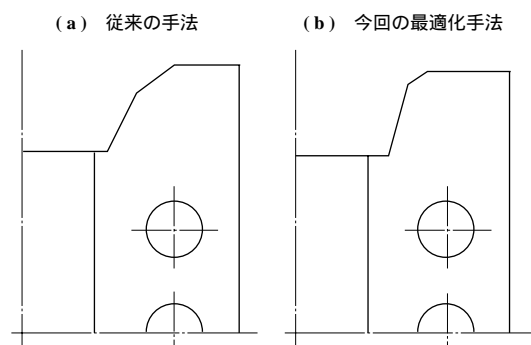
Fig. 10 Time evolution of sextupole coefficient using the cross-sectional geometry of the coil optimized by the radial basis function network

これまでの研究では，試行錯誤を繰り返した結果，最終的に目標としている磁場の一様性を達成するために100ケース以上解析を行った．しかしながら本研究では，二つの手法を合わせて43ケースで目標としている磁場の一様性を達成した．これは作業期間としては，約3か月から2週間への短縮となる．また，コイル断面形状に関するパラメータを最適化手法を用いて決定することで，最適化手法適用前のコイル断面形状の場合に比べ S_{k3} の値が23%減少した．

第11図に，従来の試行錯誤によって得られたコイル断面形状（-（a））と，本研究で得られたコイル断面形状（-（b））を示す．矩形形状でなく，第11図-（b）のようなコイル断面形状にすると，六極磁場成分が抑制される理由としては，断面形状を変えた部分を流れる表皮電流による効果が挙げられる．第12図に0.42 ms時（-（a））と3.5 ms時（-（b））のコイル断面内の電流密度分布を濃淡表示した．時間の経過とともに，間げきを挟むように薄く分布していた電流がコイル内部および曲面形状の部分（第12図-（b）の領域A）に広がる．この曲面形状をした部分は，評価円に対して約60度の角度に位置し，六極磁場成分を抑制する補正コイルの役割を果たしていると考えられる．

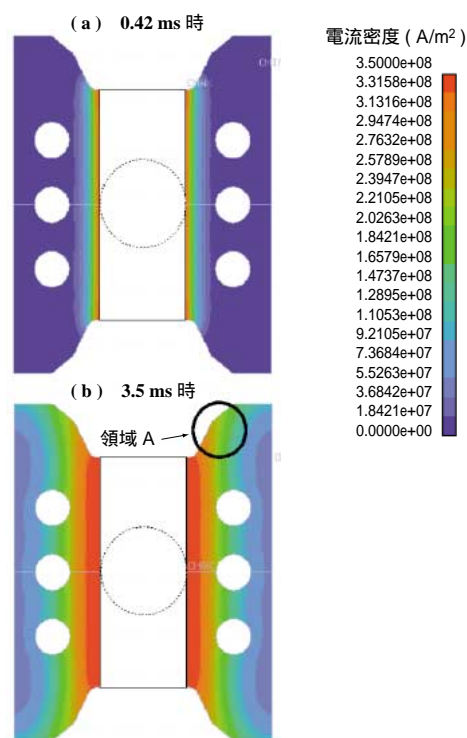
4. 結 言

小型陽子シンクロトロン用偏向電磁石における磁場の一様化に最適化手法を導入した．コイル断面形状の決定において，「実験計画法を使って二次多項式近似の応答曲面からパラメータの最適値を得る方法」と，「ラジアルベシス関数ネットワークを使って自由曲面の応答曲面を求めパラメータの最適値を得る方法」を併用することで，従来に比べ少ない計算回数で偏向電磁石間げき内の磁場の一様性を



第11図 コイル断面形状の比較

Fig. 11 Comparison of the cross-sectional geometry of coils obtained by the previous method and by the present optimization method



第 12 図 コイル断面内の電流密度分布
Fig. 12 Distribution of current density in the cross-sectional geometry of coils at 0.42 ms and at 3.5 ms

向上させることが可能となった。

謝 辞

本研究の実施に当たっては、文部科学省高エネルギー加速器研究機構の遠藤有聲教授、京都大学化学研究所の野田章教授および東京工業大学原子炉工学研究所の嶋田隆一教授の方々に、加速器設計および磁石設計・試験で多くのご指導をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。また、社内では、技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部の上松和夫次長および原 正一氏に研究の支援を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- (1) I. Averbukh et al. : Project of Small-Dimensional 200 MeV Proton Synchrotron EPAC'88 Rome (1988) pp.413 - 416
- (2) Budker Institute of Nuclear Physics SD RAS :

Prototype of the Proton Synchrotron with 5-Tesla Dipole Magnets BINP annual report (1998) pp.207 - 209

- (3) L. Picardi et al. : Preliminary Design of a Technologically Advanced and Compact Synchrotron for Proton therapy ENEA (1994)
- (4) L. Picardi et al. : Preliminary Design of a Synchrotron Technologically Advanced and Compact (STAC) for Protontherapy Hadrontherapy in Oncology (1994) pp.367 - 376
- (5) K. Endo et al. : Table-top Proton Synchrotron Ring for Medical Applications EPAC2000 Vienna (2000) pp.2 515 - 2 517
- (6) S. Tokura et al. : Very High-Field Short-Pulse Dipole Magnet for Compact Proton Synchrotron PAC2001 Chicago (2001)
- (7) S. Tokura et al. : Design of the Very High-Field Short-Pulse Dipole Magnet The 13th Symposium on Accelerator Science and Technology (2001) pp.271 - 273
- (8) Y. Miyauchi et al. : Conceptual Study of Pulse High Field Compact Proton Synchrotron for Medical Use The 13th Symposium on Accelerator Science and Technology (2001) pp.449 - 451
- (9) Y. Miyauchi et al. : Preliminary Study of the Feasibility of Pulse High Field Compact Synchrotron for Medical Use Kyoto Univ. activity report Vol.6 (2001) pp.24 - 29
- (10) The Japan Research Institute, Limited : JMAG-Works User's Manual Version 6.0 (2000)
- (11) 荒川雅生, 中山弘隆, 石川 浩 : ラディアルベークス関数と領域適応型遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計 (制約条件のない場合における検討) 機論 67-655C 日本機械学会 2001 年 1 月 pp.789 - 796
- (12) NHK Spring Co., Ltd. : Design director plus (1999)