

学術論文

永久磁石式MRIにおける永久磁石形状の最適化

Shape Optimization of Permanent Magnet for MRI Systems

石原 好之 (同志社大学)
原田 和郎 (同志社大学)

奥村 恭代 (同志社大学)
戸高 敏之 (同志社大学)

Yoshiyuki ISHIHARA, Member of JSAEM, Doshisha University
Yasuyo OKUMURA, Doshisha University
Kazurou HARADA, Doshisha University
Toshiyuki TODAKA, Member of JSAEM, Doshisha University

Recently, the manufacturing of any shaped permanent magnet has been possible by newly developed technique. This paper describes a newly analytical method of designing for optimum shape of the permanent magnet for the MRI systems. In consequence of this analytical method, we found that the new permanent magnet for the MRI which is not used pole pieces can reduce 17% of its weight comparing with existing magnet for MRI.

Key Words : magnetic resonance imaging, shape optimization, permanent magnet

1 まえがき

永久磁石式MRIには他方式と比較してランニングコストが安く信頼性が高いなどの特徴があり、量産化されているが、永久磁石を所望の形状に整形することが困難であったために、磁石表面に取り付けられた鉄製の磁極片の形状を工夫することによって、ギャップ中央部に均一磁界を得ていた。このため、寸法が大きくなり設置面積を広く必要とする等の欠点を有している。

本報告では、新しい技術によって任意形状の永久磁石の製造が可能になったのを受けて、磁極片を用いずに均一な磁界が得られるような、永久磁石形状について解析手法及び最適形状の検討を行なったので報告する。

2 MRIの解析

図1に現在用いられている永久磁石式MRI磁気回路を示す[3]。図に示すように上部永久磁石と下部永久磁石は4本の支柱を磁路として結合されているが、本研究では永久磁石が円盤状であることに着目して、永久磁石を円筒の磁路の両端に置く形状に置換し、軸対称三次元有限要素法を適用した。永久磁石のギャップ長は一定とし、側面部分の全断面積を全鉄柱の断面積と等しくした。モデルの対称性を考慮してその1/4に

ついて解析を行なう。図2は解析モデルで、図2(a)は新しいタイプのもの、(b)が比較対象とした従来の磁極付きタイプである。

4本の鉄柱の一本あたりの直径は0.458[m]であり、全体積は0.66[m³]であった。o-a-b-c間に固定境界、o-c間に自然境界条件を与えた。また、ギャップの中心oから半径0.2[m]の1/4円周上に評価点を設定し、評価点上の磁束密度及び、中心点oと評価点との磁束密度の変動率に対して評価を行なった。

磁極つきモデルを参考に、図3に示したような形状を初期形状とした。また、d-e間に21個、e-f間に7個の設計変数(移動節点)を取り磁石の形状および体積を決定した。

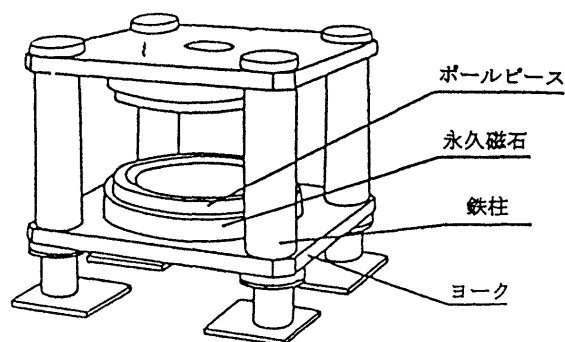
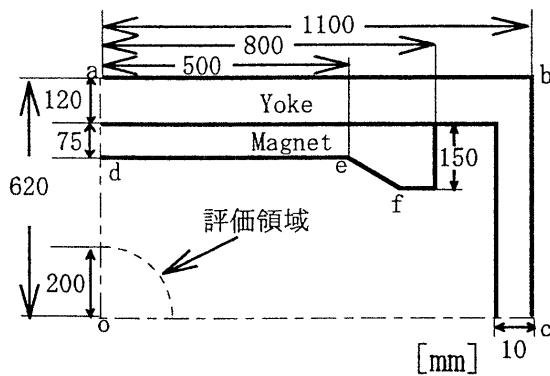
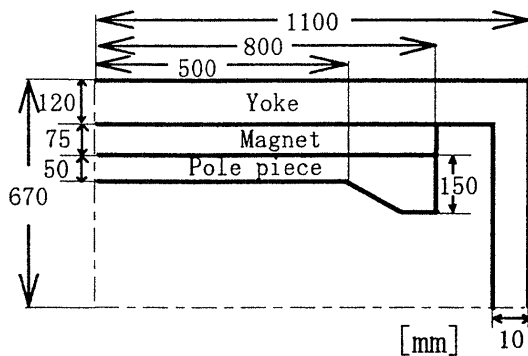


Fig.1 永久磁石式MRI



(a) 新タイプ



(b) 従来タイプ

Fig.2 解析モデル

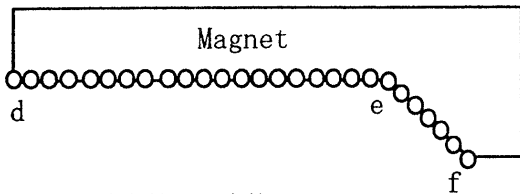


Fig.3 設計変数の設定位置

永久磁石を含む領域を解析する場合、永久磁石の磁気特性は磁化 M を用いて表現されるが、その近似式は $B-H$ 曲線を用いて次式の様に磁束密度 B の関数として表される [1].

$$M = B - \mu_0 H = B - \mu_0 f(B) \quad (1)$$

使用した永久磁石は Nd-Fe-B 磁石で残留磁束密度 B_r は 1.4[T], 保持力 H_c は 1040[kA/m], 最大エネルギー積は 47[MGOe] である。これより、磁化 M は、

$$M = 1.303 + 0.0692 B \quad (2)$$

と近似される。また、初期形状において永久磁石の片側の体積は $0.206[\text{m}^3]$ であった。

3 最適化の計算手順

所望の均一磁界を得て、かつ永久磁石の体積を最少にするため、次式のように、中心と評価点における磁束密度を制約条件とし、永久磁石の体積 V を目的関数としてこれを最少化する問題を検討した [2].

$$\text{minimize } Z = V(\alpha^i) \quad (3)$$

$$\text{subject to } C_{obj} - C = 0 \quad (4)$$

上式において、 C および C_{obj} は、それぞれ評価点の磁束密度および、磁束密度の目標値である。永久磁石形状を変更する際の節点の移動量 α^i を設計変数として、この問題をラグランジュ未定乗数法により解くと、次式が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha^i} \delta \alpha^i = C_{obj} - C \quad (5)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \alpha^i} \delta \alpha^i = -f_1 \quad (6)$$

ここで、

$$i = 1, \dots, m \quad l = 1, \dots, m-1$$

(6) 式の f_1 は次式で与えられる。

$$f_1 = e_{ij} \frac{\partial V}{\partial \alpha^i} \cdot \frac{\partial C}{\partial \alpha^j} \quad (7)$$

ここで、 e_{ij} はエディントンのイプシロンである。偏微分の項は感度解析により求めた。体積の感度マトリクス $\partial V / \partial \alpha^i$ は α^i を微小変化させた時の永久磁石の体積の変化を、磁束密度の感度マトリクスは微小変化させた時の評価領域上の磁束密度の変化を計算することによって求められる。

上式を用いて、以下の2種の計算を行うことが出来る。

(1). 中心点及び評価点上に所望の強さの磁界を得て、かつ、磁石の体積を最少にする永久磁石の最適形状。

この場合、中心点と評価点上の磁束密度の平均値の目標値を制約条件とした。

(2). 評価領域上に所望の均一度の磁界を得て、かつ磁石の体積を最少にする永久磁石の最適形状。

この場合、評価点上の磁束密度の、中心の磁束密度からの変動率の目標値を制約条件とした。

図4に解析のフローチャートを示す。

4 解析結果および検討

図5に解析に用いた分割図を示す。要素数は 4400, 節点数は 2295 である。

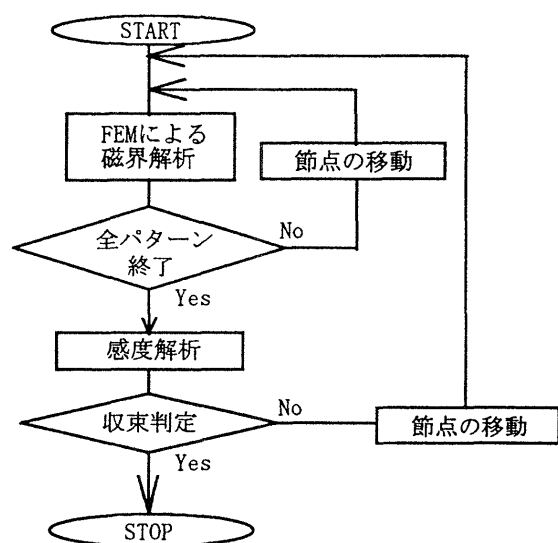


Fig.4 フローチャート

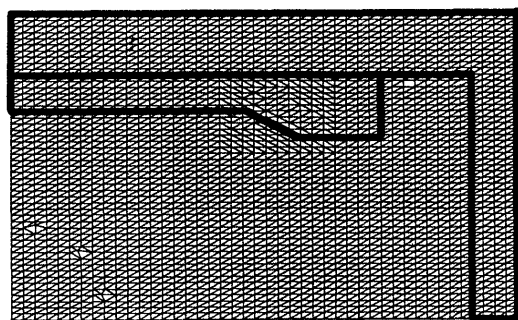
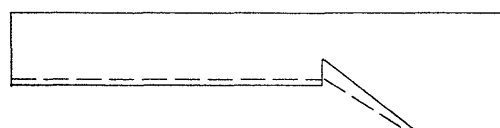
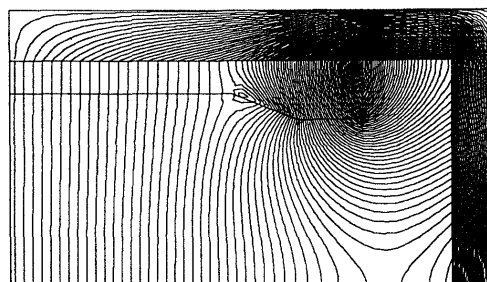


Fig.5 初期分割図

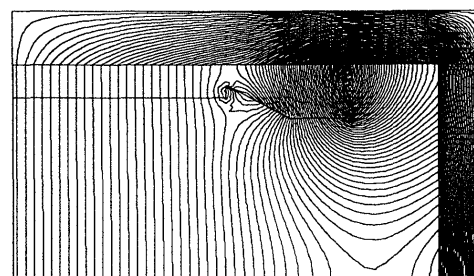
4.1 所望の磁界強度を与える永久磁石の最適形状

図6に永久磁石の最終形状を示す。点線は初期形状である。図7、図8に初期形状および最終形状の等ポテンシャル線図と等磁束密度線図を示す。

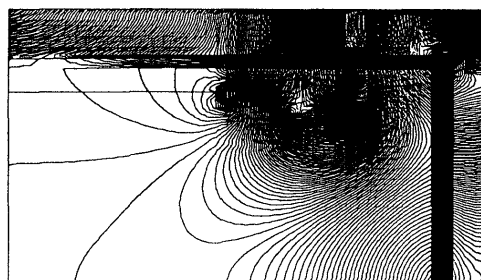
図9は、評価点における磁束密度を比較したものである。横軸の角度は図2 (a) の $o-c$ を $0[\text{deg}]$, $o-d$ を $90[\text{deg}]$ とした時の各評価点の位置を表わしている。今回の計算では、評価点での磁束密度の目標値を $0.2[\text{T}]$, 収束判定値 $0.2 \pm 5 \times 10^{-4}[\text{T}]$ とした。これより、最終形状の磁石において評価点の磁束密度が $0.2[\text{T}]$ に近づくとともに、評価点間の磁束密度の差が小さくなり、初期形状よりも均一度の面においても目標値が達成されていることが分かる。最終形状の永久磁石の体積は $0.194[\text{m}^3]$, 中心点の磁束密度は $0.19993[\text{T}]$ であった。

Fig.6 磁石最終形状
(点線は初期形状)

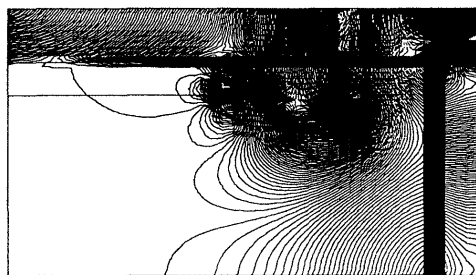
(a) 初期形状



(b) 最終形状

Fig.7 等ポテンシャル線図
[0.002Wb/m 間隔]

(a) 初期形状



(b) 最終形状

Fig.8 等磁束密度線図
[0.005T 間隔]

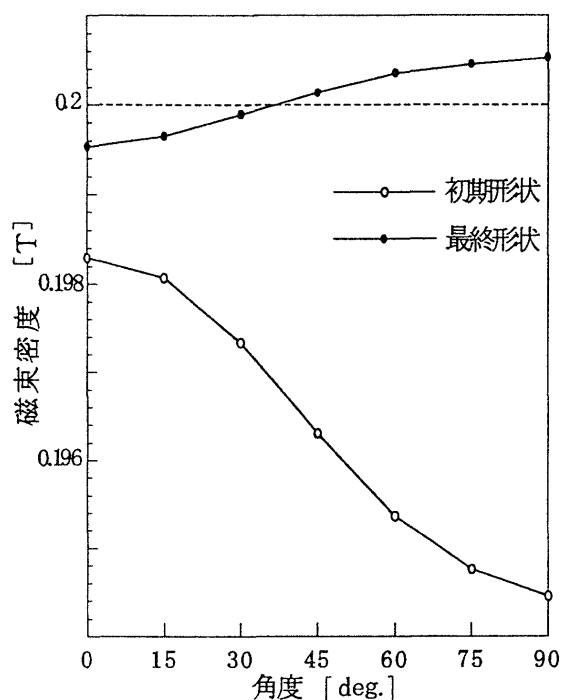


Fig.9 評価点上の磁束密度

また、図 2 (b) のモデルにおいて、最終形状と同程度の均一度で同じ強さの磁界を与える永久磁石の体積は $0.231[\text{m}^3]$ であり、(a) のモデルの方が磁石の使用量が少なくて済むことが分かる。

4.2 所望の磁界均一度を与える永久磁石の最適形状

図 10 に最終形状を実線で、初期形状を点線で示す。図 11, 12 に最終形状の等ポテンシャル線図と等磁束密度線図を示す。図 13 は評価点における中心の磁束密度からの変動率を比較したものである。

今回の計算では、変動率の目標値を 0 [%]、収束判定値を $\pm 0.05[\%]$ としたが、図より最終形状の磁石においてこれが達成され、より均一度の高い磁界が得られていることがわかる。この場合の初期形状は 4.1 の場合と同じである。ここでは、変動率にのみ着目したので、評価領域における平均磁束密度は $0.1949[\text{T}]$ で $0.2[\text{T}]$ より小さくなっている。最終形状の永久磁石の体積は $0.191[\text{m}^3]$ 、中心点の磁束密度は $0.1959[\text{T}]$ となった。

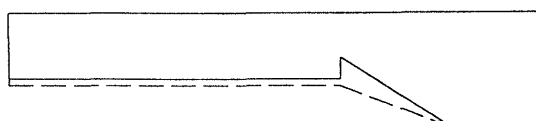
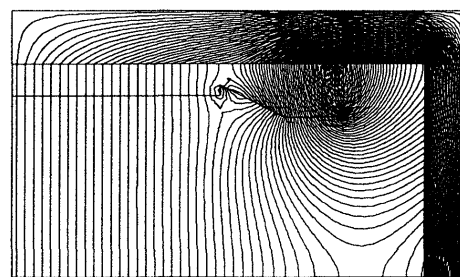
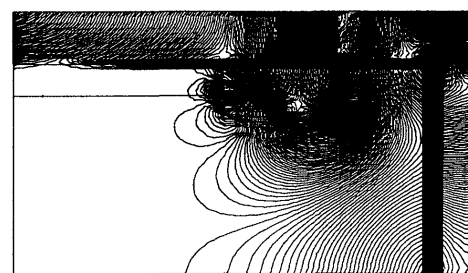
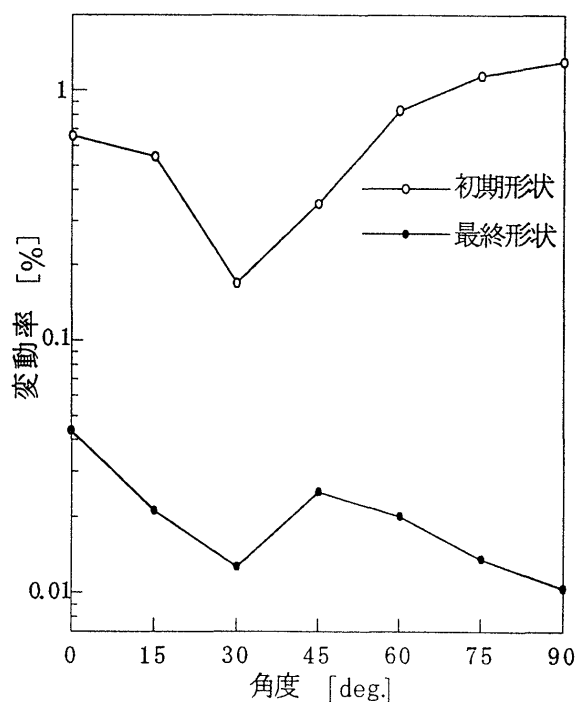
Fig.10 磁石最終形状
(点線は初期形状)Fig.11 等ポテンシャル線図
[0.002Wb/m 間隔]Fig.12 等磁束密度線図
[0.005T 間隔]

Fig.13 中心からの変動率

今回は磁界の強度と均一度の目標値を別々に達成した。双方の条件を同時に満足させるためには、あらかじめ 4.1 の計算を行い、その結果得られた最終形状を初期形状として 4.2 の計算を行えば良い。

5 むすび

本論文では、ラグランジュ未定乗数法および、感度解析を用いた永久磁石の形状最適化手法を提案した。この手法を用いてMR I 用永久磁石の解析を行い、その結果、所望の均一磁界を得て、かつ体積が最小となるよう形状最適化手法を提案した。この手法を用いてMR I 用永久磁石の解析を行い、その結果、所望の均一磁界を得て、かつ体積が最小となるような永久磁石の形状を求めるのに本手法が有用であることを示した。

実際のMR I では ppm オーダーの磁界均一度が要求される。これは分割を十分小さくして計算することによって実現される。

最後に、本研究にあたり御指導、御協力頂きました舞鶴工業高等専門学校の金森満助教授、並びに（株）インターメタリック佐川真人氏に感謝いたします。

(1995 年 6 月 22 日受付)

参考文献

- [1] 中田, 高橋:「電気工学の有限要素法」森北出版(平元)
- [2] 金森:「磁気ダンパに関する基礎的研究」同志社大学学位論文(平4)
- [3] 宮本, 桜井, 他:「Nd-Fe-B 磁石の MRI への応用」日本応用磁気学会誌, Vol.13, No.4, 567-572, (平元)