永久磁石式 MRI 用磁気回路における磁界均一度の向上

Improvement of the Field Homogeneity with a Permanent Magnet Assembly for MRI

桜井秀也・青木雅昭・宮本毅信

住友特殊金属(株)商品開発部, 大阪府三島郡島本町江川 2-15-17 (〒618)

H. Sakurai, M. Aoki and T. Miyamoto

Sumitomo Special Metals Co., Ltd., Yamazaki Works, 2-15-17, Egawa, Shimamoto-cho, Mishima-gun, Osaka 618

In the last few years, MRI (Magnetic Resonance Imaging) has become one of the most excellent and important radiological and diagnostic methods. For this application, a strong and uniform magnetic field is required in the area where the patient is examined. This requirement for a high order of homogeneity is increasing with the rapid progress of tomographic technology. On the other hand, the cost reduction for the magnet is also strongly required. As reported in the last paper, we developed and mass-produced a permanent type magnet using high energy Nd-Fe-B material. This paper presents a newly developed 15 plane measuring method instead of a 7 plane method to evaluate the homogeneous field precisely. By using this analytical method and linear programming method, a new-shaped pole piece has been developed. In consequence, homogeneity was improved twice as much and the magnet weight was reduced 10% as compared with the formerly developed pole piece.

Key words: magnetic resonance imaging, permanent magnet assembly for MRI

1. はじめに

磁気共鳴現象を利用して人体の撮像を行う MRI (Magnetic Resonance Imaging) は、X 線 CT にはない特徴やメリットをもっていることから新しい大型医療機器として急速に普及しつつある。この MRI 用の磁界発生装置に対しては、人体を挿入して撮像するに十分な広い空間内に ppm オーダーの高い均一度が要求される。筆者らは前報で報告したとおり、高性能 Nd-Fe-B 磁石を用いて新しいタイプの永久磁石方式 MRI 用磁気回路を開発した¹⁾。本方式は従来の電磁石タイプにない特徴が発揮できることから、超電導タイプと並んで、現在 MRI 用の磁界発生装置として量産が行われている^{2), 3)}。最近の MRI の診断技術の進歩により、要求される磁界均一度はますます高くなってきている。一方磁界発生装置の経済性を高める要求も厳しくなっている現状であ

る。このような要求に対応するため、本報告ではギャップ空間の磁界分布を精度良く把握するための測定およびその解析方法を改善した。またその手法を用いてさらに経済性の優れたポールピース形状を開発したので併せて報告する。

2. 磁気回路

前報で詳述したが、筆者らが開発した永久磁石方式 MRI 用の磁気回路構成を Fig. 1 に示す。ギャップを挟んで特殊形状の永久磁石を対向させ、上下に鉄のヨークを配置し、ヨーク間を 4 本の鉄柱で結合することで磁路を構成している。ポールピース形状はギャップに面して外周のリング状突起（第一シムと呼ぶ）とポールピース内部のディスク状突起（第二シムと呼ぶ）があり、これらによってギャップ中央部の空間に均一な磁界が得られるように工夫されている^{1), 2)}。

3. 測定および解析手法

3.1 7 プレーン測定

MRI に対しては、一般に均一空間を球の体積で定義

Fig. 1 Configuration of a permanent type magnet assembly for MRI (four columns type).

Fig. 2 7 planes plotting method (a) and 15 planes plotting method (b) to evaluate the field homogeneity.

し、その均一度の評価方法として7プレーン法が用いられてきた¹⁾。これは Fig. 2(a) のように、球空間をZ軸方向に垂直な七つの面に分割し、各プレーンを30°ピッチで12点ずつ、合計84点の磁界強度を測定する。これらの測定値を球関数で表すと、ラプラスの方程式の一般解として

$$u(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \times (A_n^m \cos m\phi + B_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (1)$$

$$P_n^m(x) = (1-x^2)^{m/2} \frac{d^m P_n(x)}{dx^m}$$

ここで A_n^m , B_n^m は任意定数で、 $P_n(x)$ はルジャンドルの多項式である。上式から $m=0$ とおくことで軸(Z)方向の係数 $Z^n = A_n^0$ が導かれる。MRI用の磁界均一度に対しては、この $Z^1 \sim Z^6$ および84点の測定値から

$$Pk/Pk = (\text{最大値} - \text{最小値}) / \text{原点の値}$$

で表される最大のズレ量で定義する方法が多く採用されている。この方法の妥当性をチェックするため、代表的な製品を抽出し、7プレーン測定を行い $Z^1 \sim Z^6$ を求めた。これらを(1)式に代入して逆にギャップの磁界を計算してみた。その結果を Fig. 3(a) に示す。一方 Fig. 3(b) はギャップ空間を2 cm ピッチのメッシュに分割し、実測したマップを示す。同図はギャップの磁界分布を磁界の等高線で結んだ等磁束密度線図で表したもので、 $H \cdot L$ はギャップ中心から見た磁界勾配の高低を示している。ここでは対称性を考慮して空間の1/4をプロットしている。図(a)の計算結果ではギャップ中の磁界の高低(山・谷)が3か所存在しているのに対して、(b)の実測結果は6個の山谷が存在しており計算とかなり異なった分布のパターンとなっている。このことから $Z^1 \sim Z^6$

の六つのパラメータでは実測結果を説明するには不十分であることが分かる。

3.2 15プレーン測定方法の導入

上の結果から磁界の測定点をさらに増し、Fig. 2(b) に示すように15プレーンとする方法を導入した。すなわち7プレーンの各面と面の間に破線で表される測定面を一つずつ増やすとともに、軸方向の上下頂点を加え、合計158点の測定結果を7プレーンの場合と同様に(1)式に代入すると、軸方向に関して $Z^1 \sim Z^{14}$ 項のルジャンドル係数が得られる。Table 1 は Fig. 3 の測定および解析に使用した磁石について、7プレーンと15プレーンの二つの方法による測定結果から得られた解析結果を比較したものである。7プレーン解析ではZ各項も小さく押えられており、また Pk/Pk 値も32 ppmと良好な結果となっている。しかし同じ磁石を15プレーンで解析した結果はZの各項、特に偶数項が異なった符号および値になっており、 Pk/Pk 値も78 ppmと2倍以上になっていることが分かる。Table 1 に示した $Z^1 \sim Z^{14}$ の値を用いて空間の磁界分布を推定した計算結果を Fig. 4 に示した。Fig. 3(b) の実測値と比べて分布は良く一致している。このことから、15プレーン測定法を用いることで磁界分布を精度良く求めることが可能であり、その解析結果は空間の磁界分布を正確に反映しているといえる。したがって均一度を向上するという目的に対しては15プレーン解析における $Z^1 \sim Z^{14}$ の各不均一項が小さいようなポールピース形状を開発することが必要かつ十分と言える。

4. ポールピース形状の最適化

15プレーン解析における $Z^1 \sim Z^{14}$ の値を小さくする

Fig. 3 Equi-magnetic flux density lines: (a) is a calculated result by 7 planes method and (b) is a measured result.

Table 1 Comparison of measured and analyzed results between 7 planes and 15 planes

7 planes data	15 planes data
[Pk/Pk = 32 ppm]	[Pk/Pk = 78 ppm]
Z1 = -1.3 ppm	Z1 = -0.8 ppm
Z2 = 1.9	Z2 = -19.0
Z3 = 0	Z3 = -1.7
Z4 = -12.7	Z4 = 8.6
Z5 = 2.4	Z5 = 3.0
Z6 = 4.7	Z6 = 11.2
	Z7 = 6.2
	Z8 = 21.1
	Z9 = 0.3
	Z10 = 42.5
	Z11 = 4.9
	Z12 = -96.6
	Z13 = 5.5
	Z14 = -47.1

ために、これらの値がポールピースの形状とどのような関係になっているかを調べる必要がある。そのためポールピース表面にリングシムを配置したときの Z 各項の変動を測定した。その例としてFig. 5に $Z^8 \sim Z^{14}$ の各不均一項の位置別傾向を表した。この結果から各項はリングシムの位置により各々独自の変動を示すことが分かった。例えばリングシムが中心に近い位置ではプラス方向に変化し、径が大きくなるにつれてマイナス方向に変化する。また次数が高くなるにつれて分布形状は左にシフトし、変動する大きさが小さくなる傾向がある。このようにリングシム位置により各不均一項がそれぞれの傾向をもって変動することは、適切なリングシムを複数個組み合わせることにより、各項の絶対値を小さくして均一度を改善できる可能性があることを示唆している。

そこで Z 各項のリングシム位置別の変動量を要素データとして、最適のポールピース形状を求めるための

Fig. 4 Equi-magnetic flux density lines which is calculated by 15 planes method.

リングシムの大きさ、位置および組み合わせの検討を行った。

ポールピース形状改善のフローチャートをFig. 6に示す。まず与えられたポールピース形状における15プレーンの均一度を求め、均一度が要求を満たさない場合、線形計画法(LP)のフローへ進む。要素データとしてリングシムを配置した位置別の Z 各項の変動を入力しておく。求めた均一度と要素データから Z 各偶数項の絶対値が与えられた空間の制約条件の中で最小限のリングシムの組み合わせで要求を満たす解を、LPを用いて求めた。求めた形状に従い、ポールピース形状の修正、すなわちシミングを行う。実際にはLPで求めた形状が複雑すぎたり、要素データにおける誤差分の積み重ねが生じることを考慮し、FEMや実機モデル実験を用いたシ

Fig. 5 Relationship between Z^8 , Z^{10} , Z^{12} , Z^{14} value and diameter of a ring shim.

Fig. 6 Flow chart.

ミング結果の確認を行っている。

ポールピース改善結果を Fig. 7 に示す。内面の第二シム部がより明確に凸部として表され、表面には第三シムともいべき細かい凹凸が着いている。等磁束密度線図上では第一シムと第二シム間のフリンジ A の幅が狭くなっている。さらに内側ではポールピース表面の凹凸に従い、フリンジの数が増えているとともにバランス良く配置され、均一空間が広がっているのが特徴である。その結果、従来は 7 プレーン測定で 32 ppm, 15 プレーンで 78 ppm であったものが、改善後には 15 プレーンでも 36 ppm が得られた。また従来と同等の均一度を得る

Fig. 7 The equi-magnetic flux density lines of the pole piece which has newly developed pole figure.

場合には、ポールピース径の縮小が可能であり、それによる磁石重量の軽減効果は 10% と推定された。

5. まとめ

従来用いられてきた磁界均一度の評価・解析手法として 7 プレーン法では評価精度が不十分なため、新たに 15 プレーン法を開発し十分な精度が得られた。この解析手法を用いて軸方向の各不均一項とポールピース表面のリングシム位置との関連を調べ、線形計画法を用いて最適なリングシムの組み合わせから形状決定を行い、新たな形状のポールピースを開発した。その結果 15 プレーン測定で約 2 倍の均一度向上を達成し、経済効率の面からは磁石重量で 10% の軽減化が可能となった。

文 献

- 1) 宮本毅信, 桜井秀也, 高林博文, 青木雅昭: 日本応用磁気学会誌, 13, 465 (1989).
- 2) T. Miyamoto, H. Sakurai, H. Takabayashi, M. Aoki: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-25, 567 (1989).
- 3) 宮本毅信, 桜井秀也, 矢仲重信, 黒田正夫, 佐藤 茂: 日本応用磁気学会誌, 13, 467 (1989).

1990 年 1 月 11 日受理, 1990 年 3 月 13 日採録