

論文

# 汎用有限要素法プログラムによるワイス形電磁石の 二次元解析モデルの構築

牧野晃浩\*

Construction of two-dimensional simulation model of a weiss type electromagnet  
with a general finite element method program

Akihiro MAKINO

**Abstract** The two-dimensional simulation model of a weiss type electromagnet was constructed with a general finite element method program, and the generated magnetic field between the magnetic poles was analyzed when the gap length was 30mm and 10mm. At the gap length of 30mm, the calculated results for linear conditions agreed with the experimental results qualitatively and quantitatively. However, at 10mm, the calculated results for non-linear conditions did not agree with the experimental results quantitatively due to magnetic saturation. In order to remove the influence of the magnetic saturation, it was considered how the magnetic flux was related to the cross section of the magnetic path in the two-dimensional field. As a result of modifying the magnetization curve of the material that was assigned to parts of the yoke, good agreement between the calculated and experimental results is obtained.

**Keywords** Weiss type electromagnet, Two-dimensional model, Finite element method, Non-linear condition, Magnetic saturation, Magnetization curve, Permeability

## 1. はじめに

近年、急速なコンピュータの発達と数値解析手法の進歩により、ハードとソフトの両面でコンピュータシミュレーション技術の発展は目覚ましく、大規模なシステムのシミュレーションを除けば、パーソナルコンピュータでのシミュレーションが可能となってきた。

また、最近の社会構造の変化により、製品開発に対して、省コスト、省資源、省エネルギー、かつ、高品質、安全性、信頼性、環境への配慮等の要求がますます高まっている。これらの要求に応え、開発・設計の迅速化を図るためには、既製品の情報を開発・設計に生かし、試作時間と材料の無駄を省くことが有効であると考えられ、現在、シミュレーションによる設計の効率化、最適化が注目されている。シミュレーションの利点として、試作コストの軽減、実験計測の困難な製品の性能評価、可視化による物理現象の解明、デザイン変更の最小化等が挙げられる。

従来、電磁石等の磁性体を組み込んだ装置を設計したり使用する場合、仮定磁路法をベースとした磁気回路計算が利用されてきたが、漏洩磁束、残留磁化、非線形性等の磁気特有の性質により、厳密解を得るのが困難な

め、実質的には、経験に基づく方法が実用されていた。本研究では、汎用有限要素法(FEM)プログラムを用い、事例として、磁気飽和の影響が問題となるワイス形電磁石の設計におけるシミュレーションの有効性について検討した。また、計算は、モデリング、計算時間、コスト等の点で実用的かつ経済的な二次元場で行った。

## 2. ワイス形電磁石

一般に、電磁石は、用途に応じて、磁気吸引力を利用するものと磁界を利用するものに大別することができる。前者としては、電磁接触器、電磁弁、つり上げ電磁石等があり、後者として、磁気計測器、イオン加速器、医用機器等の磁界印加部として利用されている。今回、解析の対象としたワイス形電磁石は、磁極間空隙部の磁界を利用するもので、主に、永久磁石材料の磁化特性測定用磁化装置、漏洩磁束探傷器、各種磁界印加装置として使用することが多い。したがって、ワイス形電磁石の性能を把握するうえで、発生磁界、磁化電流、空隙長の関係や磁極間の磁界分布等を予め考慮した設計が必要となる。

## 3. 磁極間の磁束密度の測定

今回、シミュレーションの有効性を検証するために、実測に用いたワイス形電磁石の概要および仕様を図1、

\*計測応用技術グループ

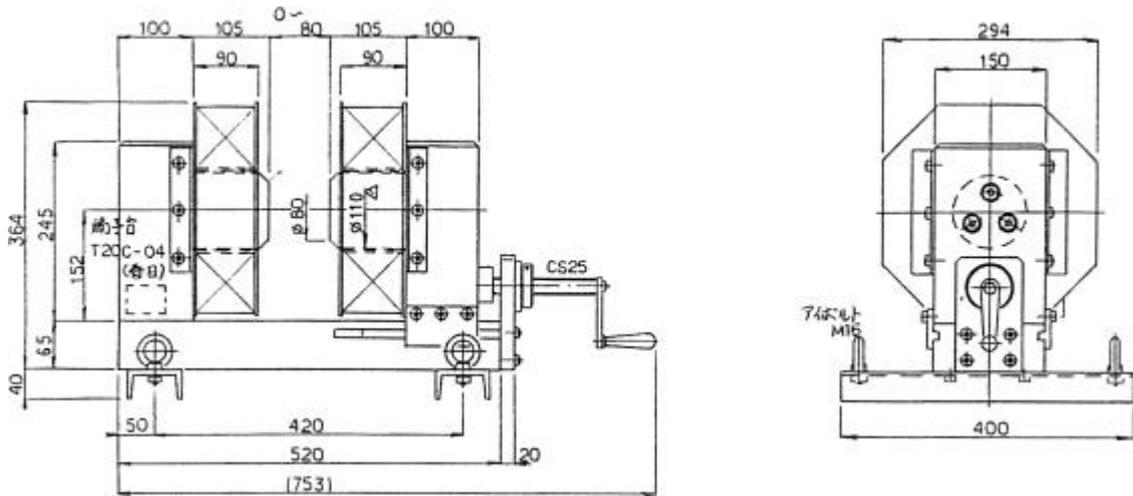


図1 実測用ワイス形電磁石

表1に示す。まず、コアおよびヨークの磁気飽和の影響が小さい条件として、空隙長が30mmの場合の空隙中心部の磁束密度をガウスメータで測定した。次に、磁気飽和の影響を検討するため、空隙長が10mmの場合について、同様に磁束密度の測定を行った。なお、磁化電流は、2~10Aの範囲内で2A毎に変化させた。

表1 ワイス形電磁石の仕様

使用電源定格	DC75V, Max10A
磁極寸法	径: 80mm, Gap:0~80mm
巻線	PVF 23mm, 1000turn×2
重量	約190kg

件で解析を行った。なお、磁化電流が10Aの場合の要素数は1000、節点数は2545であった。

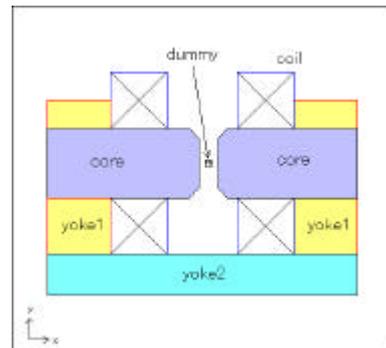


図2 解析モデル

#### 4. シミュレーション

##### 4.1 線形解析(空隙長30mmの場合)

図2に解析モデルを示す。モデルの作成は図1に基づいて行い、解析領域をxy平面の二次元とし、フルサイズモデルとした。なお、磁極間のメッシュの精度を上げるため、空気層をモデル化したダミーオブジェクト(図中、dummy)を作成した。また、各部の材質は、コイルが導電率 $5.8 \times 10^7$ [S/m]の銅とし、コア(core)およびヨーク(yoke1,yoke2)は、比透磁率4000の電磁軟鉄とした。なお、これらの特性は代表値とし、各材料の導電率測定および磁気特性測定等は行っていない。

図3に、モデル全体の要素分割の例を示す。要素分割の制御は、特に行っておらず、自動メッシュ機能を用いた。要素数は858、節点数は2057であった。なお、ここで用いたFEMプログラムは、Maxwell EM 2D Field Simulator Version 7.0.04である。

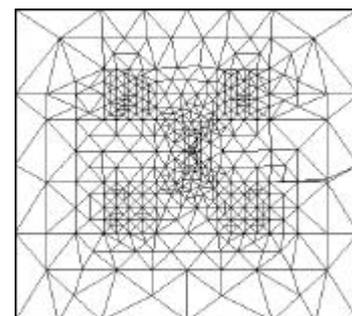


図3 メッシュ分割例

##### 4.2 非線形解析(空隙長10mmの場合)

空隙長を10mmとしてモデルを作成し、コアおよびヨークの材質を図4に示す特性の電磁軟鉄とした非線形条

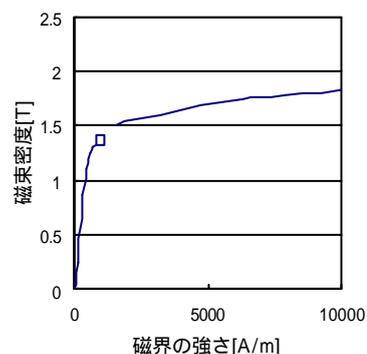


図4 電磁軟鉄の磁気特性

5. 結果および考察

5.1 線形解析(空隙長30mmの場合)

図5は、空隙長30mmの場合の実測と解析の結果を比較したものである。図より、磁化電流と磁束密度は比例関係にあり、実測値と計算値がほぼ一致することがわかる。また、一般に、工業用電磁軟鉄の透磁率は、炭素量や熱処理条件等により異なるため、コアおよびヨークの比透磁率が2000と6000の場合についても解析したところ、計算結果はほとんど変わらなかった。これらのことから、磁気飽和が生じない場合には、電磁軟鉄の比透磁率に代表値を設定することによって、二次元モデルで線形解析の適用が可能であることがわかる。

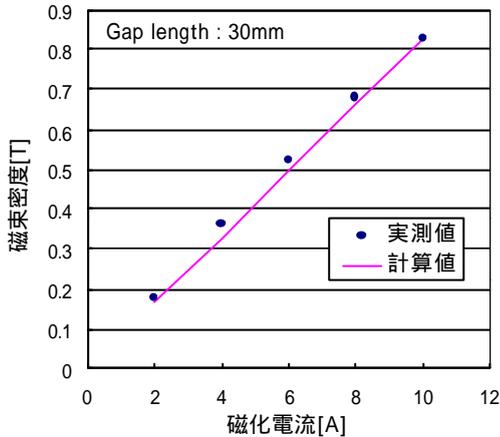


図5 実測と線形解析の比較

5.2 非線形解析(空隙長10mmの場合)

図6は、空隙長が10mmの場合の実測と解析の結果を比較したものである。図より、実測および解析ともに、定性的には、磁化電流と磁束密度の関係が非線形な振る舞いを示すことがわかる。しかし、定量的には、磁化電流が2Aの場合、コアおよびヨークが磁気飽和を起こさない線形領域にあると考えられるために、実測値と計算値はほぼ一致するが、4A以上では、計算値が実測値より小さくなる。これは、二次元モデルではz方向(厚さ方向)を考慮していないため、コアよりも磁路の幅の小さい下部ヨーク(yoke2)に磁束が集中し、下部ヨークの方がコアよりも先に飽和することにより、実測値よりも小さくなったと考えられる。

以上のことから、発生磁界や磁極部の解析に注目する場合、コアが飽和するようなモデルを構築する必要がある。そこで、ヨークが飽和しないことを条件として、ヨークの透磁率を一定( $\mu=4000$ )と設定した場合の解析を行ったところ、結果は図7のようになった。図より、磁化電流が2~6Aでは、実測値と計算値はほぼ一致し、精度が向上した。しかしながら、磁化電流が6A以上の場合には、実測値は計算値よりも小さくなった。これは、

ヨークの磁気飽和に起因するものと考えられ、磁気飽和の影響を考慮した設計を行うことによって、電磁石の性能が向上する可能性を示唆しているともいえる。したがって、解析条件に寸法、形状等の情報を考慮することで、より精度の高い実用的な設計を行うことができると考えられ、次項で、その解析手法について考察する。

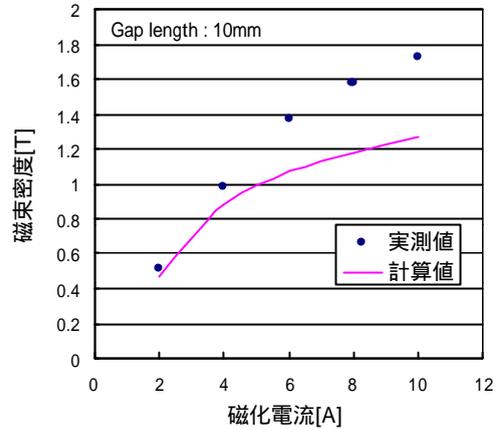


図6 実測と非線形解析の比較[1]

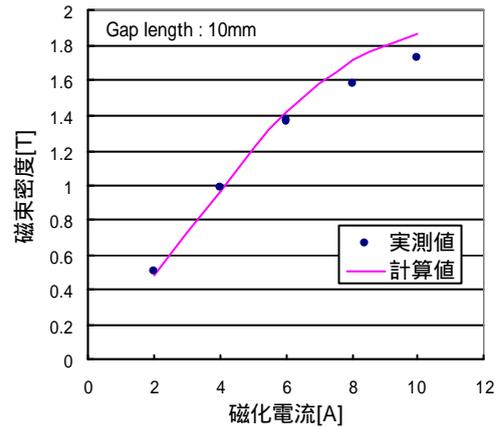


図7 実測と非線形解析の比較[2]

5.3 磁路の断面を考慮した解析

一般に、磁気飽和は、磁束が通過する磁路の断面積に依存するため、磁束量が同じであれば、断面積が小さいほど磁気飽和を起こしやすい。

二次元解析モデルでは、z方向(厚さ方向)に無限の広がりをもつため、断面のz方向の寸法(厚さ)や形状は考慮されていない。したがって、各磁路の断面積の情報を何らかの方法で解析条件に設定することを考えてみる。

いま、実際の断面積を計算し、解析モデルの各磁路の幅の大きさから、各部の厚さ相当の大きさを計算してみると、ヨークの厚さは、コアのそれよりも約1.7倍大きいことが確認された。これは、ヨークでは、コアよりも磁束が1.7倍増加することを意味し、起磁力一定より、ヨークの磁気抵抗がコアよりも1.7倍小さいことに相当する。

磁気抵抗は、透磁率と反比例の関係にあるので、ヨークに当初設定した電磁軟鉄よりも透磁率が1.7倍大きい材料を設定してみる。つまり、ヨークを図8の磁気特性をもつ材料に修正して解析を行ったところ、図9に示すような結果となり、実測値とほぼ一致した。したがって、二次元解析モデルでは、磁路の断面の情報を、磁路の材料の透磁率に反映し、磁化曲線を修正することで、定量的な評価を行うことができると考えられる。

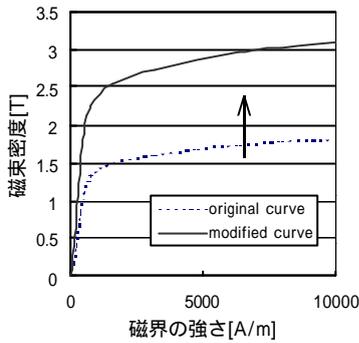


図8 修正した磁気特性

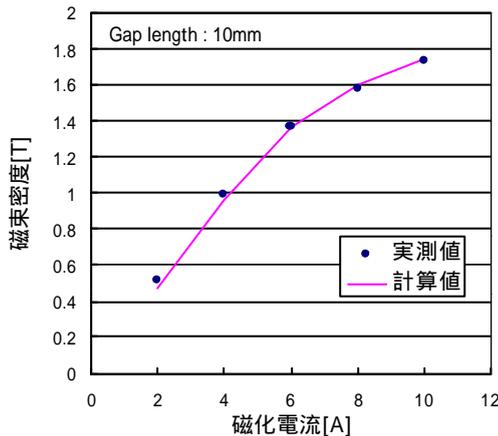


図9 実測と非線形解析の比較(3)

#### 6. 磁極先端部の設計事例

電磁石の設計では、用途に応じて、磁極先端部の形状や材質を変えることで、磁界分布や最大発生磁界を調整する場合がある。そこで、図10に、解析事例として、空隙長10mm、30mmにおいて、磁極先端径が50mm、80mm、110mmの場合の磁極間の磁界分布を示す。なお、磁極部の材質は、電磁軟鉄とし、磁化電流は10Aとした。図より、空隙長10mmと30mmの比較から、空隙が大きくなると、磁極間の平等磁界領域および磁気勾配は小さくなる傾向にあると考えられる。また、空隙長が10mmの場合、先端径が小さいほど最大発生磁界が大きくなるが、空隙長が30mmの場合には、最大発生磁界はほとんど変化がなく、磁極先端部の形状効果は小さい。

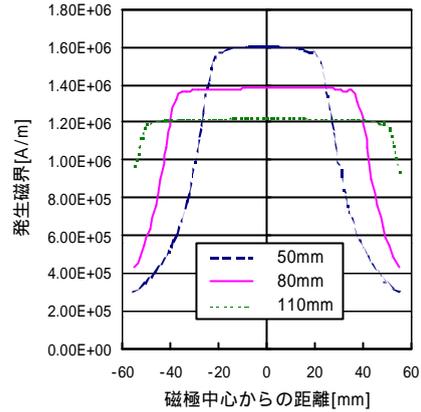


図10a 空隙長10mmのとき

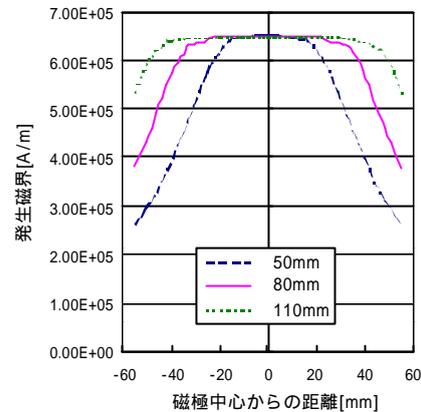


図10b 空隙長30mmのとき

図10 磁極間中心部の磁界分布(磁化電流:10A)

#### 7. まとめ

汎用FEMプログラムを用いてワイス形電磁石の二次元モデルを構築し、磁極間の磁束密度の解析を行った。磁気飽和の影響がない場合には、線形条件で解析が可能であった。しかし、磁気飽和が生じる場合、非線形条件で解析したが、定量的な評価が困難であった。そこで、解析手法として、磁路の断面の情報を、磁路の材料の透磁率に反映し、磁化曲線を修正することを提案したところ、計算値は実測値と一致した。また、この手法を用いて、磁極先端径を変えた場合の磁極間の発生磁界について解析したところ、空隙長が大きくなるほど、磁極先端の形状効果は小さくなることを示した。

最後に、二次元解析は、複雑な形状やz成分の大きい磁気回路を扱う場合には、誤差が大きくなるが、仮想モデルの構築や近似方法により、有効な設計ツールとなりえる。今後は、さらに、二次元解析モデルの適用について、さまざまな事例で検証し、併せて、軸対称三次元場、三次元場について検討していく所存である。

(原稿受付 平成12年7月28日)