

有限要素法を使用した磁場解析シミュレーション

Magnetic Field Estimation by Finite Element Method

鹿 野 俊 哉* 栗 林 裕* 永 野 信 輔*
Toshiya Shikano Hiroshi Kuribayashi Shinsuke Nagano

要 旨

近年の車載エレクトロニクスシステムの高度化に伴い、これを構成しているセンサ、アクチュエータも進化し、システムとの適合性、制御の容易さなどから磁気応用センサ、アクチュエータが数多く使用されるようになってきた。しかし従来、これらの磁気応用部品の開発には、設計段階で磁気的な性能を正確に予測できる手段が不十分で、簡易的な机上計算により仕様を絞り込み、実験で確認する手法をとらざるを得なかった。有限要素法 (FEM) を使用した磁場解析シミュレーションはこれらの課題を解決し、開発部品の性能を設計段階で精度良く予測することを可能にした。

この磁場解析シミュレーションを開発に導入しさらに、車載した時の広範囲な温度変化が磁場へ及ぼす影響を、熱応力計算と組み合わせることによって正確に予測することが可能となった。

ABSTRACT

The advanced electronics systems equipped in automobiles of late have led to the incorporation of magnetic applications in sensors and actuators. These magnetic applications help enhance system compatibility as well as operational ease.

The development process, however, had to rely on estimation with adapted formulae followed by testing to achieve targeted functions. There were no practical means to precisely predetermine the magnetic property at design level. As a solution, use of finite element method (FEM) in magnetic field estimation was explored and proved to be capable of predicting the component specification at the design stage with a high degree of accuracy.

This magnetic field estimation process was applied to component development. It was also applied to the precision forecast of the impact of temperature fluctuations on the magnetic field with the system actually equipped to the car. This application proved feasible when combined with heat stress calculations.

1. まえがき

エンジンの高出力化、低燃費の実現、さらには排気有害成分の低減など、近年の自動車に対する社会のニーズはより難しい技術課題を求めている。これらを満足させるための車載のエレクトロニクスシステムは制御技術がますます高度になりつつあり、これに伴いシステムを構成する様々なセンサやアクチュエータも進化してきている。

車輛に搭載されるセンサやアクチュエータは、

これらの高度なシステムに適合できる性能機能を有するだけでなく、厳しい使用環境に耐えうる信頼性が必要とされる。このため最近では、エンジンや車体の制御システムに信頼性の高い磁気に応用した部品が数多く使われるようになってきている。これらの部品の設計には磁気回路の構成要素である材料の選択、寸法形状の決定などが重要なポイントとなる。しかし、従来の設計手法は机上の簡易計算に頼るしかなく、設計段階で磁場の様

* 朝霞北研究所

表1 MAGNA の解析機能

解 析 機 能	計 算 手 法
・ 静電界解析	電位法(3D)
・ 静磁場解析	Reduced Scalar法(3D) A- ϕ 法(2D,AX) T- Ω 法(3D)
・ 定常 渦電流解析	A- ϕ 法(2D,AX) T- Ω 法(3D)
・ 非定常 渦電流解析	A- ϕ 法(2D,AX) T- Ω 法(3D)

注；2D：二次元 AX：三次元軸対称 3D：三次元

子を正確に可視化・定量化できる手法の開発が急がれていた。これには、有限要素法(FEM)による磁場解析シミュレーションが有効な技術であり、多くの分野で活用されるようになった。本稿では、このコンピュータシミュレーションを磁気応用部品の開発に導入し、これが部品の仕様決定のプロセスで有効に活用できることを検証し、さらには車載時の使用環境を想定した広範囲の温度変化が性能へ及ぼす影響をもシミュレーションできるシステムを開発し、実用化できたので紹介する。

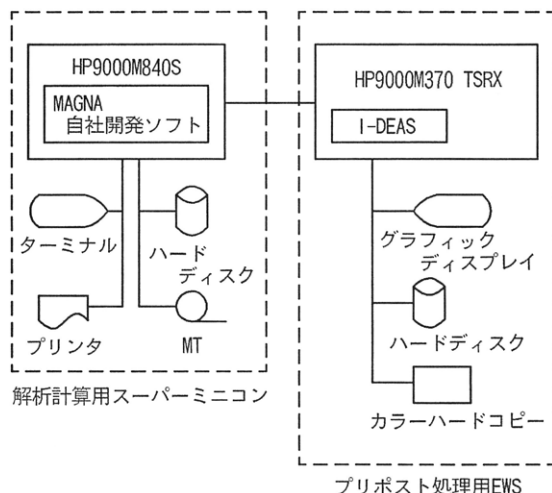


図1 システム構成

2. シミュレーションシステム

本シミュレーションを実施するためのハードウェアの構成を図1に示す。ハードウェアは、演算処理用に米国HP社製コンピュータを、プリ／ポスト処理用には同社製EWS(エンジニアリング・ワーク・ステーション)を使用し、プリ／ポストソフトウェアには米国SDRC社製のI-DEAS、磁場解析用のソフトウェアは市販のCRC社製のMAGNAを使用している。

このMAGNAは積分方程式をともなった有限要素法を用いた汎用電磁界解析プログラムで、その各機能は表1に示す通りであり、解析の流れを図2aに示す。

また、磁気特性に対する車載時の環境温度の影響を考慮するために、磁場解析プログラムに有限要素法を用いた熱応力解析プログラムを組み合わせたシミュレーションシステムを開発した。この手法は図2bに示すように、熱応力による磁歪素子の透磁率変化を磁場解析に取り入れるものである。

3. 磁場解析シミュレーション

磁場解析シミュレーションは、部品の性能を支配するマグネットの着磁条件、マグネットによって形成される磁界の強さを設計段階で予測することを可能にした。その具体例を以下に示す。

～1. マグネットの着磁条件は、マグネットの着磁後の磁化特性、つまり磁化の強さと分布を決定し、その部品の性能を支配する。この磁化特性は着磁時の磁路の構成、材料など多くの要素により決定されることから、机上での十分な特性予測ができなかった。このマグネットの着磁をMAGNAによりシミュレートし、その磁化特性を調べた。

～2. マグネットとそれを組み込んだ磁気回路のエアギャップ部の磁界の強さは、そのエアギャップの大きさによって変化する。したがって、エアギャップ精度のパラッキによる磁界の強さの変化を、シミュレーションにより可視化、定量化することで、磁気を応用したセンサの性能、機能を調べた。

次にその詳細を述べる。

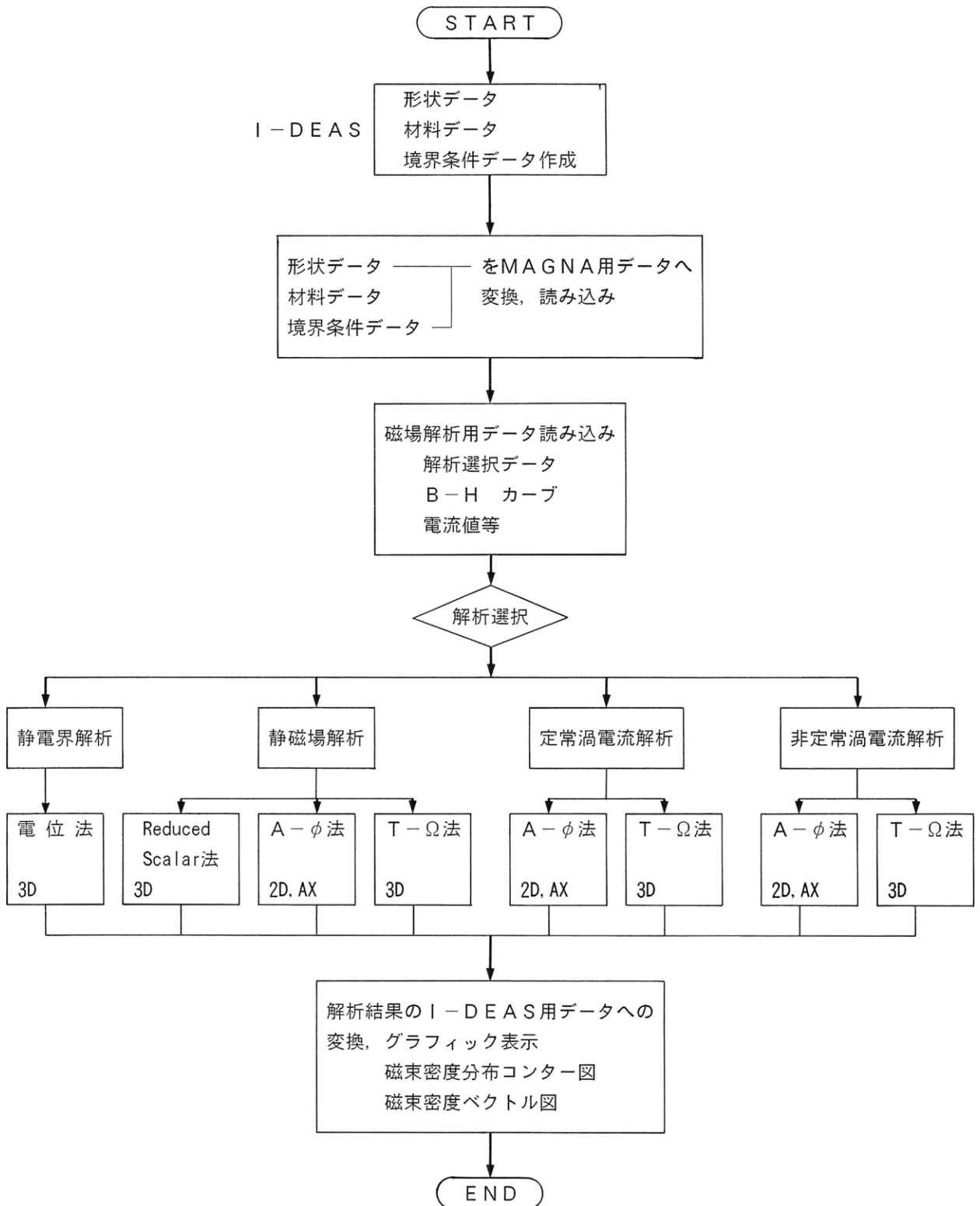


図 2a MAGNA の解析フロー

3-1. マグネット着磁シミュレーション

図3は回転角を検出するセンサに用いられるリングタイプのマグネットが、着磁のためヨークにセットされた状態を示す。このマグネットは回転角を検出するためN極とS極が円周上に交互に着磁されている。この着磁後の磁化特性に各極で大きなバラツキがあると、センサの出力特性が影響を受け、正確な回転角検知ができなくなる。その原因の一つは実験結果から着磁ヨークとマグネット間のエアギャップのバラツキと推測され、これを検証したシミュレーション結果を以下に示す。

図4は上記リングタイプマグネットの着磁時のシミュレーションを行うための軸対称FEMモデルを示している。このモデルを用い、着磁コイル

に一定電流を流した際のマグネット表面の磁化特性をエアギャップをパラメータとしてシミュレーションを行い、この時のマグネット表面での磁化の強さの変化を調べた。

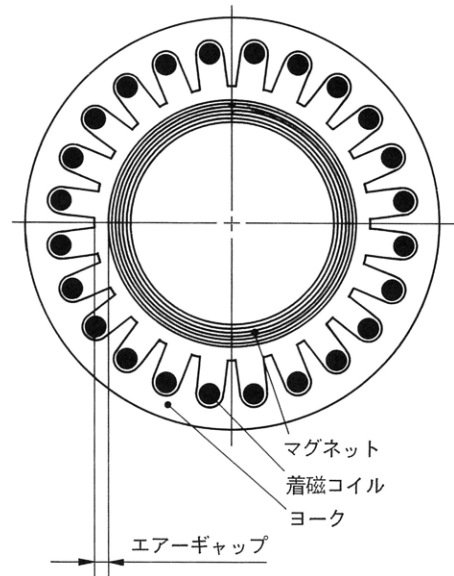


図3 着磁時の磁気回路構成

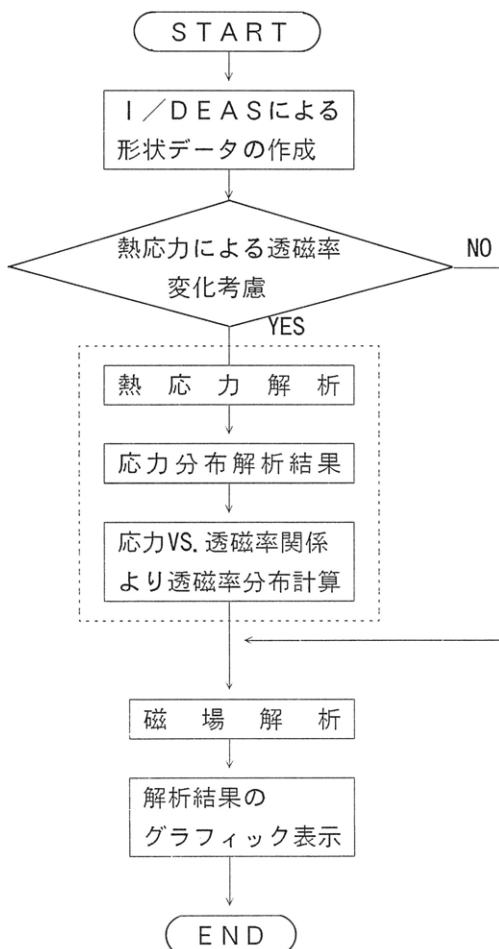


図2b 熱応力および磁場の解析フロー

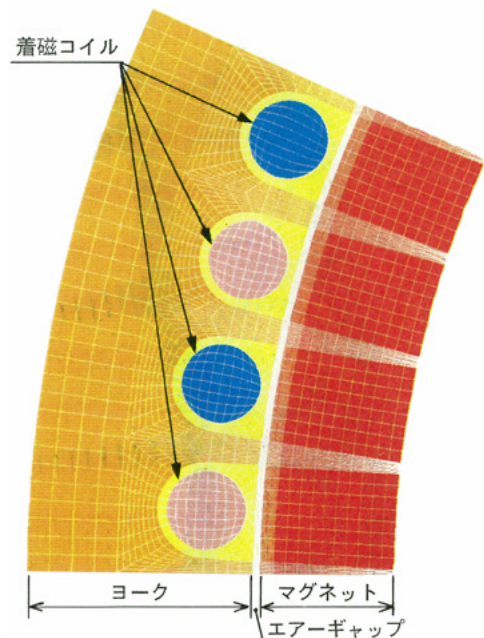


図4 シミュレーションモデル

図5～図7はシミュレーション結果である。図5は、着磁ヨークとマグネットのエアーギャップのうち一箇所だけを他のエアーギャップ基準の $10\text{ }\mu\text{m}$ に対し $100\text{ }\mu\text{m}$ と変えた場合の、着磁時の磁束密度の分布と方向を軸対称ベクトル図で表したものである。

図6は、図5の結果から着磁ヨークを取り去り、着磁のための外部磁場を0に戻した時のマグネットの磁化の強度を軸対称コンター(等高線)図で表している。

図7は、着磁ヨークとマグネット間のエアーギャップのうち一箇所だけ他のエアーギャップ基準の $10\text{ }\mu\text{m}$ に対し $0\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ と変化させた時の、マグネット表面での磁束密度の計算値と実験値を対比してして示したものである。シミュレーション結果と実験値とはよく一致しており、エアーギャップのバラツキがマグネット各極の磁化の強さへ及ぼす影響の、シミュレーションができることを検証した。

以上の結果により、センサに要求される精度から、使用する着磁ヨーク各極のエアーギャップ精度のバラツキ量の許容範囲を、シミュレーションにて定量的に予測することが可能となった。



図6 マグネット部磁化率
(r 方向成分) コンター図

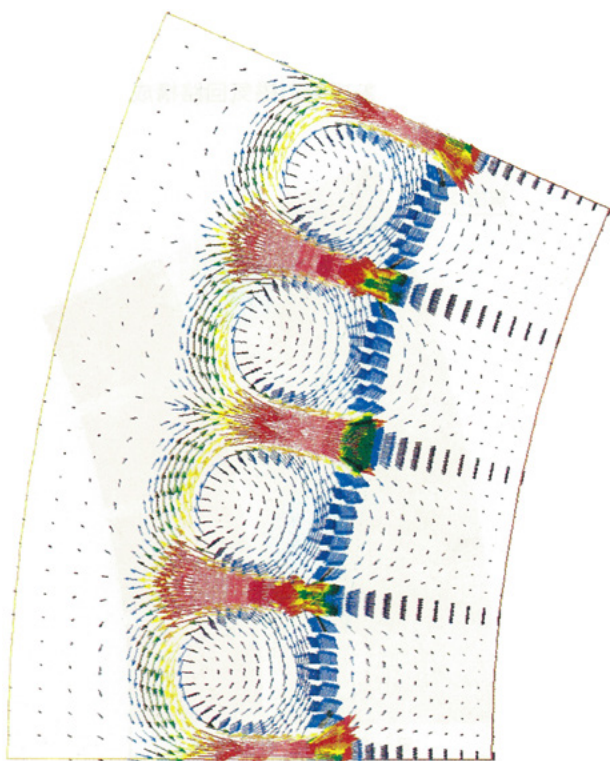


図5 磁束密度ベクトル図

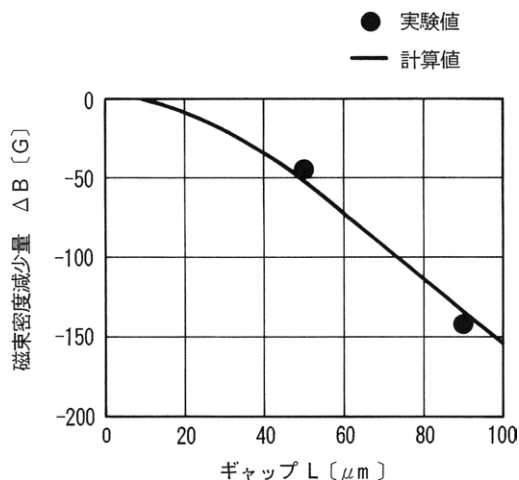


図7 ギャップとマグネット上側定位置
での磁束密度減少量 ΔB

3-2. マグネットが作る磁場の

シミュレーション解析

磁気応用センサは、一般にマグネットがスライドする構造（図8）と、回転する構造（図9）がよくとられており（以下、スライドタイプ、回転タイプと略す）、共にマグネット、エアギャップ、ヨークにより磁路を構成し、ヨークに取付けられた検出部で、磁束の変化を電気信号に変換して出力する方式を用いている。

図10、図11は、上記のマグネットを用いたセンサの磁気特性をシミュレーションするために使用した3次元FEMモデルである。計算はマグネット表面から発生する磁束密度をセンサ検出部で求め、さらにエアギャップを変化させた場合にこ

の値がどう変化するかを調べた。

図12、図13は、スライドタイプはスライド量に対する検出部での磁束密度を、回転タイプは回転角に対する検出部での磁束密度を、各々シミュレーションで計算値を求め、実験値と対比して示したものである。図のようにシミュレーション結果と実験値はほぼ一致し、シミュレーションの信頼性が高いことを示している。

図14はタイプによりエアギャップによる変化割合が異なることを示しており、このシミュレーションモデルにおいては回転タイプの方が検出部での磁束密度のエアギャップに対する変動幅が小さいことがわかる。

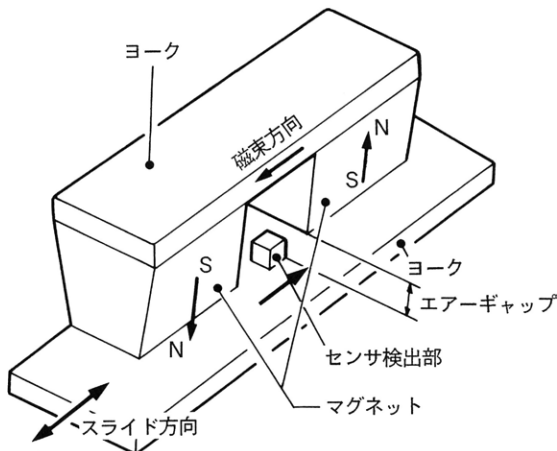


図8 センサ構造（スライドタイプ）

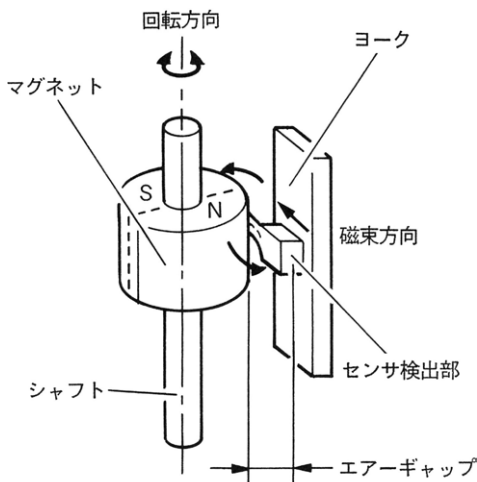


図9 センサ構造（回転タイプ）

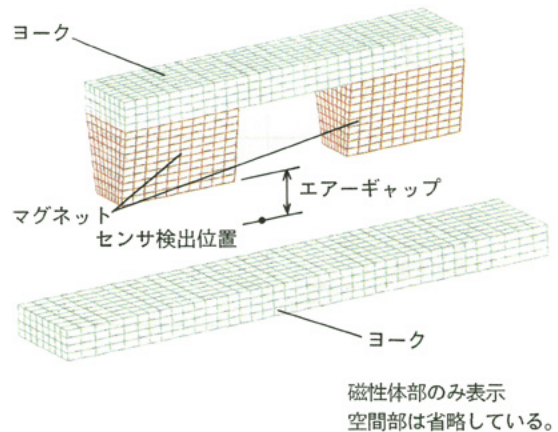


図10 シミュレーションモデル（スライドタイプ）

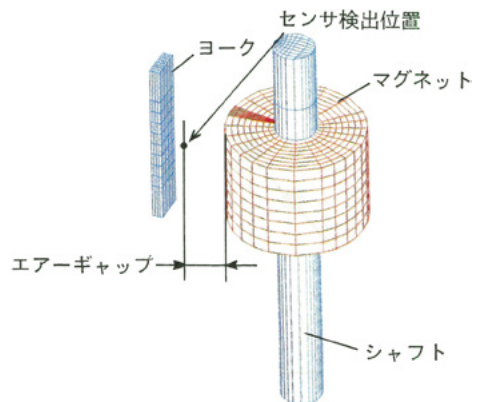


図11 シミュレーションモデル（回転タイプ）

上記での理由を図15で説明すると、マグネット形状(特にZ方向の厚さ)により磁束密度の3次元空間での広がり方に差が生じ、エアギャップ方向(X方向)に対する磁束密度の変化の割合が異なることによると考えられる。磁束密度は磁束をその面積で割ったものであり、図に示すようにエアギャップ方向に対する面積の変化の割合がマグネット形状により異なることが、視覚的にとらえられる。

上記の結果より、センサ Assy でのエアギャップのバラツキ管理とマグネット形状との因果関係が明確になった。

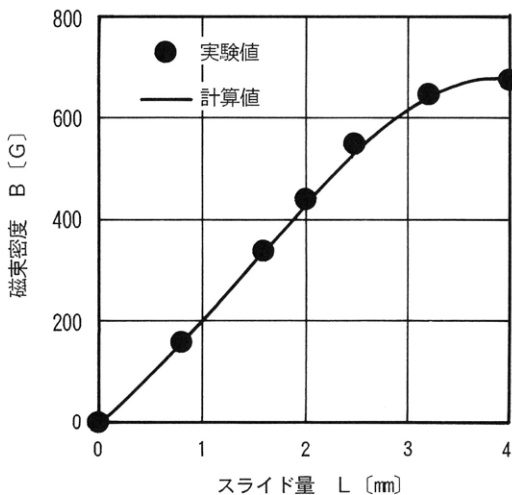
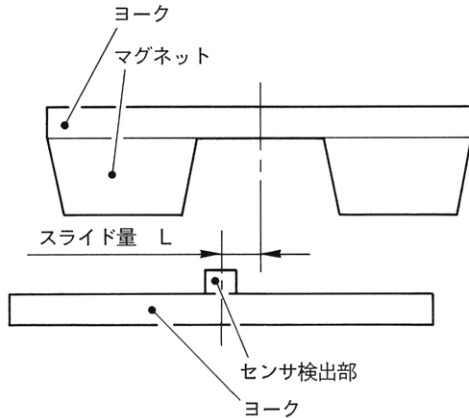


図12 センサ出力特性 (スライドタイプ)

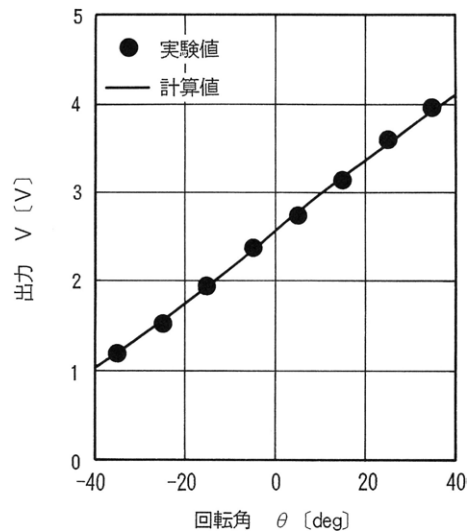
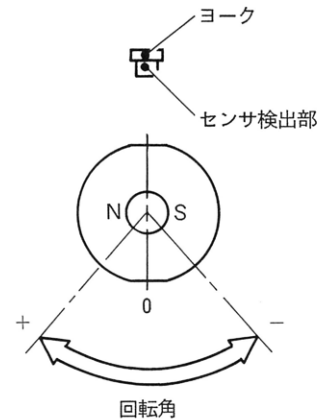


図13 センサ出力特性 (回転タイプ)

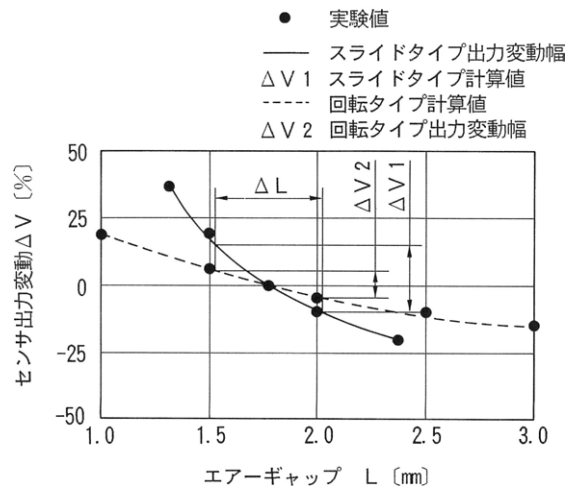


図14 エアギャップ特性比較

4. 熱による影響を考慮した 磁場解析シミュレーションの応用

車載に搭載されるセンサ、アクチュエータは厳しい使用環境に耐えうる信頼性が必要とされる。車載部品の使用環境条件は、温度、振動、水、ほこりなど多様であり、特に温度はその変化範囲が広いことから磁気応用センサの出力性能に影響し、その要因は次の2つに分けられる。

- ～1. 材料の磁気特性が温度に依存すること。
- ～2. 構成材料の熱膨張差で発生する応力(熱応力)により、磁気特性が変化すること。

前者は材料の温度特性であり、その材料固有の物性値であることから予め補正をすることでその影響を低減することができる。

後者は個々の構成材料の熱膨張差による応力に起因することから、その構造や形状にも依存する。特に、磁歪特性を有する素子を応用したセンサではその影響が大きい。

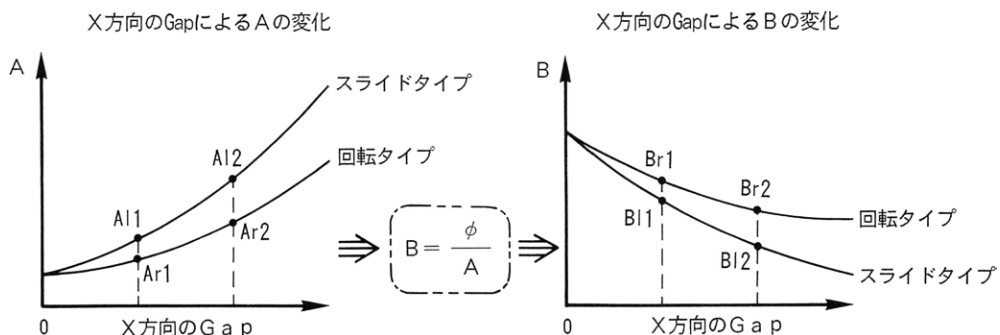
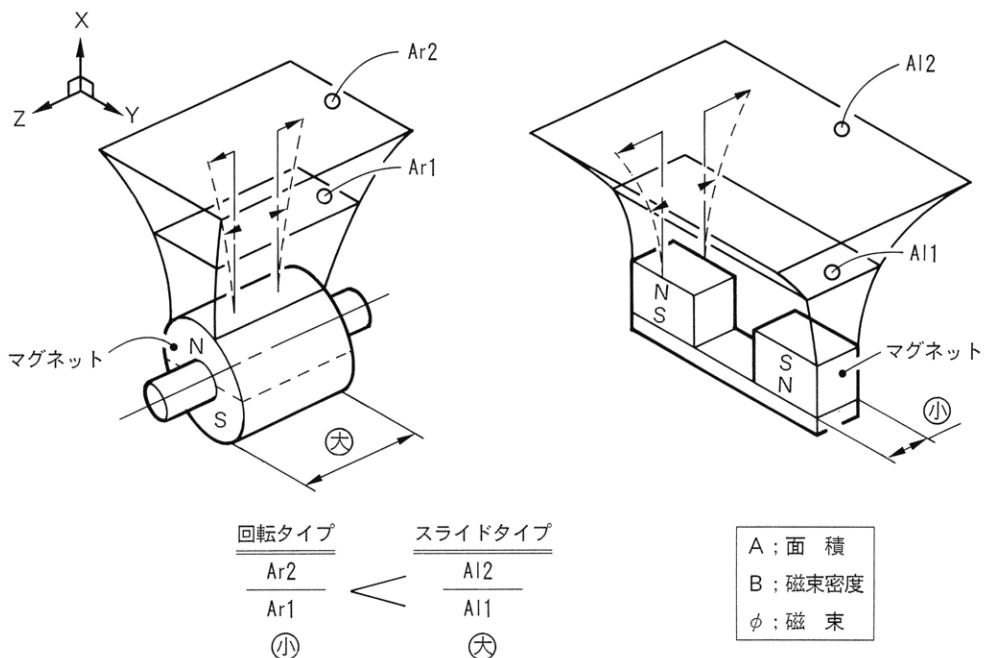


図 15 磁束密度分布比較 (スライドタイプと回転タイプ)

これらの影響を反映するため磁場解析と熱応力解析を組み合わせた結果、広範囲の温度変化における磁気特性への影響を設計段階で予測することが可能となったので、次にその例を紹介する。

4-1. 熱膨張差により生じる応力

磁気特性に及ぼす影響の解析

図16は、シミュレーションに用いた、荷重を検出するセンサの構造でコイル、ヨーク、エアギャップ、検出部により磁路を構成している。このセンサは、検出部（磁歪素子）の透磁率が応力によって変化し、これを電気信号に変換して出力する方式である。したがって、検出部が環境温度変化により膨張、収縮する際、発生する応力によって出力特性が変化する。

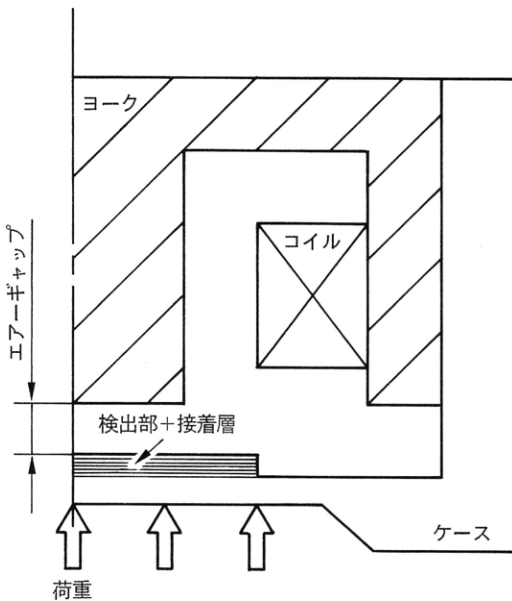


図16 センサ構造

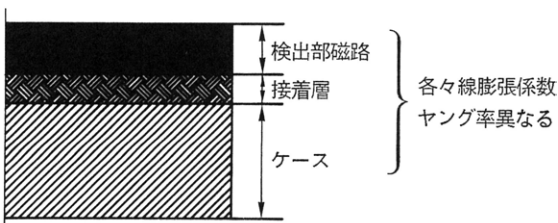
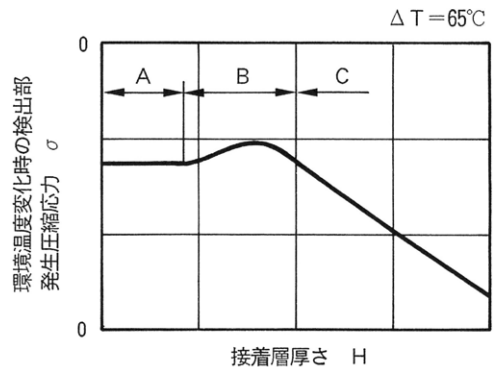


図17 熱応力解析モデル

温度変化によって生じる各部の応力は図17に示すように、検出部、接着層、ケース部各々の線膨張率、ヤング率の差によって生じ、その値は各部の寸法により支配される。特に接着層は膜厚が重要ポイントであり、この影響を予め把握し、設計仕様を決定する必要がある。

温度が変化した場合の接着層厚さに対する検出部応力の計算結果を図18に示す。このグラフから



- A : ケースと検出部間熱膨張差の影響領域
- B : 中間領域
- C : 接着層と検出部間熱膨張差の影響領域

図18 接着層厚さと熱応力

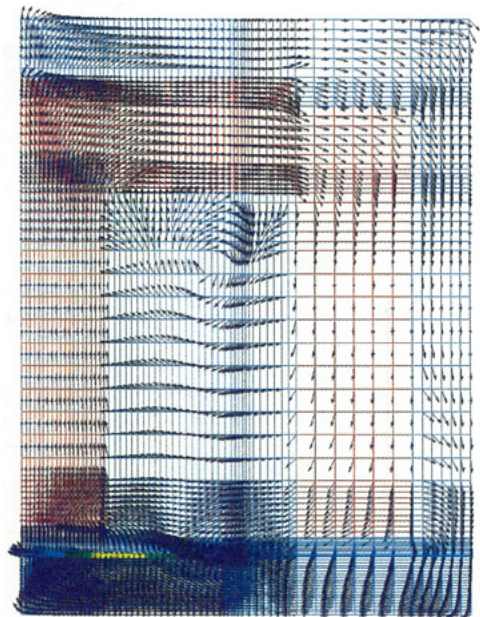


図19 磁束密度ベクトル図

接着層が薄いときにはそこに発生する熱応力の影響は小さく、検出部とケース間に発生する応力のみを考慮すればよいことがわかる。したがって、接着層の膜厚は図18のA部内に管理すればその影響は極めて小さくできる。

図19は、温度差による熱応力シミュレーションを行い検出部の透磁率変化を求め、この値を磁場シミュレーションに組み込み計算したものである。結果は、磁束密度の分布と方向を軸対称ベクトル図で示したものである。

図20は、この磁場シミュレーションモデルにより、ケースと検出部との線膨張係数の差が異なる2種類の場合について、温度を変化させたときの出力変動を計算し実験値と対比して示したもので

ある。図のように計算値と実験値とはよく一致しており、このシミュレーション手法によって線膨張係数の差がセンサ出力に及ぼす影響を定量的に把握できることがわかった。

以上の結果により、センサの検出部、接着部、ケース相互の線膨張係数差がセンサ出力変動に影響するメカニズムを解明でき、またその影響を定量的に予測できることがわかった。このシミュレーションシステムを使用することにより、センサの使用温度条件とセンサに要求される出力精度から、各部の仕様を設計段階で設定できるようになり、各種磁気応用センサの開発期間を大幅に短縮することができた。

5. ま と め

磁気応用部品の開発に、新たに確立したシミュレーションシステムを用いることにより下記のことが可能となり、設計段階で精度の高い磁気特性の予測ができた。

- ～1. マグネットの着磁後の磁化特性に影響を及ぼす構成因子の寄与度を、磁束密度の可視化、定量化により明確にできた。
- ～2. エアーギャップ変化による磁束密度の特性を3次元シミュレートすることによってその原因と傾向を、明確にすることができた。
- ～3. 熱応力解析を磁場解析と組み合わせることにより、車載温度環境下における応力分布状態及び、これに伴う透磁率変化によるセンサ出力への影響を高い精度で予測することができ、そのメカニズムが明確となった。

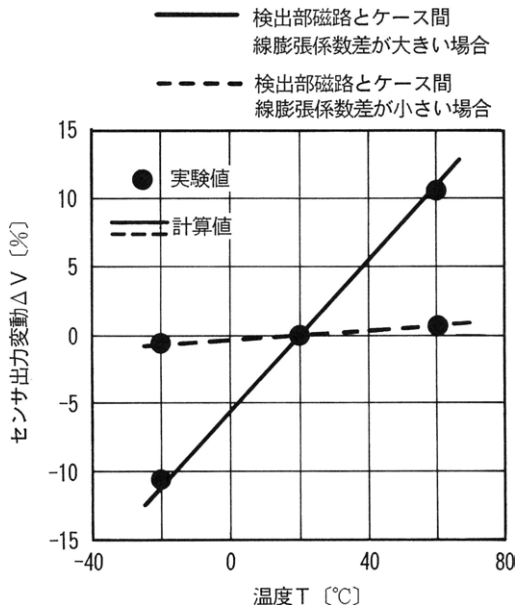


図20 センサ出力変動の温度特性

■著 者■



鹿野 俊 哉



栗 林 裕



永 野 信 輔