電磁形回転数センサにおける高出力化の検討

Obtaining High Output in an Electromagnetic Tachometer

脇若弘之・辻 弘伸*・楡井雅巳**・篠原義徳***・水谷久哉***
信州大学工学部電気電子工学科,長野市若里 500(電380)
*信州大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻,長野市若里 500(電380)
**長野工業高等専門学校電子情報工学科,長野市徳間 716(電381)
***(株)小野測器,横浜市緑区白山 1-16-1(電226)

H. Wakiwaka, H. Tsuji,* M. Nirei,** Y. Shinohara,*** and H. Mizutani***

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380
*Graduate School, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380
**Dept. of Electronics and Computer Science, Nagano National College of Technology, 716 Tokuma, Nagano 381
***Ono Sokki Co., Ltd., 1-16-1 Hakusan, Midori-ku, Yokohama 226

Electromagnetic tachometers (EMTs) are used with products from many different industries. Evaluation of their performance requires magnetic field analysis. We simulated the electromotive force (emf) dependence on the yoke in circular cone shape and the thickness of the cylindrical permanent magnet, using the simpler emf calculation method with the finite element method. As a result, the value of emf/(coil turns) in this simulation was 380%of that for the current yoke shape. Next, we compared the emf of an Al-Ni-Co magnet with that of a Sm-Co magnet. For the current magnet thickness (12 mm), the emf values of the magnets were close. For smaller magnet thicknesses, (3-9 mm), however the emf of the Sm-Co magnet was higher than that of the Al-Ni-Co magnet. Therefore, EMTs can be made smaller and with higher emf than current models.

Key words: electromagnetic tachometer, electromotive force, finite elment method, yoke shape, permanent magnet thickness

1. まえがき

電磁形回転数センサ(Electromagnetic Tachometer,以下 EMTと略記)は、構造が簡単であり、高信頼性のために、産 業界で多く用いられている.また、耐環境性に優れているため に、自動車用センサとしても用いられている^{1)~3)}.しかし、そ の設計は経験的に行われており、最適化の検討はあまり行われ ていなかった.そこで、我々は、EMT における設計の最適化 を目的とした有限要素法(Finite Element Method,以下 FEM と略記)による磁界解析を行っている.電磁界解析手法 としては3次元、ハイブリッド FEM⁴⁾が優れているが、計算 時間などの理由から、静解析を行い、簡易的に EMT の起電力 を算出した.また、シミュレーションによりヨーク形状、永久 磁石材質、永久磁石高さを変えて、高出力化の検討を行った.

本論文では,以下の内容について述べる.

- (1) EMT のリコイル透磁率を考慮した簡易的な起電力算出 法
- (2) EMT のヨーク形状が起電力に与える影響

(3) Al-Ni-Co 磁石と Sm-Co 磁石を用いた場合の起電力の 比較

2. FEM を用いた起電力の算出方法

2.1 EMT の構成と動作原理

Fig.1に, EMT の構成と寸法を示した. EMT は, 円筒状 であり, ヨーク, ケース, 永久磁石, 検出コイルで構成されて いる.また, EMT は, 検出用歯車と一定のギャップを保つよ うに取り付けられている.検出用歯車が回転すると, EMT と 検出用歯車のギャップの磁気抵抗が変化し,検出コイルとの鎖 交磁束が変化する.これにより,電磁誘導の法則から検出コイ ルに検出用歯車の回転数に比例した起電力が得られる.起電力 e は, 次式で与えられる.

$$e = -N \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \quad [\mathrm{V}] \tag{1}$$

ここに, N: 検出コイルの巻数,

Φ: 検出コイルの鎖交磁束 [Wb],

v

検出用歯車の回転速度 vは、次式で表すことができる.

$$= 2\pi r_{\rm w} \frac{n}{60} \quad [{\rm m/s}]$$
$$= N_{\rm w} p \frac{n}{60} \quad [{\rm m/s}]$$

ここに, *n* : 検出用歯車の回転数 [rpm],

*r*w: 検出用歯車の半径[m],

Nw: 検出用歯車の歯数,

p :検出用歯車の歯のピッチ[m]

したがって,式(1)は,式(2)を用いて,式(3)のように表す ことができる.

$$e = -NN_{\rm w}p \, \frac{r_{\rm w}}{60} \, \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}x} \quad [\mathrm{V}] \tag{3}$$

ここに, x: 変位[m]

したがって,起電力は検出用歯車の歯数,回転数に依存する.

Table 1 に、検出用歯車の仕様を示した.

(2)

2.2 起電力の算出方法

2.2.1 磁界解析モデル Fig. 2 に, EMT の磁界解析モデル を示した.実際の検出用歯車は全体に歯が刻まれているが, Fig. 2(a) では, EMT の出力に影響のある EMT の近くの歯の みモデル化した. Fig. 2(b) の軸対称円柱座標系においては, 検出用歯車の位置に、磁性体 (SS400) を配置したモデルとし た. EMT の解析は、円柱状の EMT と 2 次元的に扱うことの できる検出用歯車のために、軸対称と2次元の混合問題であ ると考えられる、そこで、2次元直交座標系と軸対称円柱座標 系を併用して起電力を算出した. Fig. 2(a) のモデルにおいて, ヨークに対する検出用歯車の歯の位置を変化させたモデルにお いてそれぞれ静解析を行う.次に、Fig. 2(a) で検出用歯車の 位置に磁性体を配置したモデルで解析を行い、検出用歯車のそ れぞれの歯の位置でのヨーク内の磁束密度が等しくなるよう に、ヨークと磁性体のギャップを決める.決められたそれぞれ のギャップで, Fig. 2(b) のモデルで静解析を行い, 円柱状の EMT を評価することにした⁵⁾. 起電力は、ギャップ変化によ る磁束の変化から、式(1)により算出した.



Fig. 1 Schematic diagram of an EMT system (unit: mm).

Table 1 Specification of toothed wheel

Item	Value	
Material	SS400	
Diameter	84 [mm]	
Number of teeth	82	
Module	1	



Fig. 2 Magnetic field analysis model of an EMT (unit: mm). (a): rectangular region, (b): axisymmetric region.

2.2.2 リコイル透磁率の考慮方法 EMT は, Al-Ni-Co 磁 石を用いている. したがって, 起電力を算出する場合, リコイ ル透磁率を考慮する必要がある.

Fig. 3 に, リコイル透磁率の考慮方法を示した. ギャップ の磁気抵抗は, EMT と検出用歯車の溝が対向した場合に最大 となる. この場合において, Al-Ni-Co 磁石の減磁曲線を用い て解析を行う. 解析結果から磁石部分の磁束密度を平均して動 作点とする. この動作点からリコイル線を引く. このリコイル 線は,線形な B-H 特性を用いて考慮する. リコイル透磁率は 3.6 とした. この方法を用いる場合, 保磁力 H'a は, 検出用歯 車とのギャップにより異なる.

Fig. 4 に,起電力−ギャップ特性を示した.軸対称円柱座標 系を用い,リコイル透磁率を考慮した結果,計算値は実測値と 一致した傾向を示し,ギャップ 0.5~1.5 [mm] において,誤差 15% で一致した.

3. ヨーク形状が起電力に与える影響

Fig. 5 に、シミュレーションに用いたヨーク形状を示した. 現行の形状ではヨーク上部で磁気飽和しており、ヨークの動作 点の微分透磁率が小さくなるため、磁束密度変化分が抑制され る.そこで、ヨーク上部の磁気飽和を緩和させるために、Fig. 5(b)示す円錐のヨーク形状を検討することにした.このシ ミュレーションにおいては、ヨーク上部の直径 d,をパラメー タとし、ケースの内径、ヨーク先端の直径、検出コイルの外 径、永久磁石の形状は、一定とした.さらに、検出コイルに用 いる線(線径 0.03 [mm]、ポリウレタン被覆線)は変えないも のとする.したがって、検出コイルの外径を一定にした場合、 ヨークを円錐形にすることにより巻数は減少する.

Fig.6に、磁束線図を示した、ヨークから漏れ、ケースに







Fig. 4 Characteristics of emf-gap length (number of rotations: 100 [rpm]).

日本応用磁気学会誌 Vol. 21, No. 4-2, 1997



Fig. 5 Yoke shape model (unit: mm). (a): current model, (b): improved model.



Fig. 6 Distribution of the magnetic flux (interval of magnetic flux line: 4 [mWb]).



Fig. 7 Flux density distribution in yoke (*g*=0.5 [mm], Al-Ni-Co magnet).

流れ込む磁束がみられる.したがって、ヨーク上部の直径を増加させすぎると漏れ磁束が増加し、ヨーク内の磁束密度が減少する.

Fig.7に、ヨーク内の磁束密度分布を示した.現状モデル においては、ヨーク上部で磁束密度は、最大1.8[T]となり、 飽和していると考えられる.ヨーク上部の直径を増加させる と、ヨーク上部の断面積が増加するために磁束密度は減少し、 ヨーク先端で磁束が集中するために磁束密度は増加した.ヨー クが歯、溝と対向したときの磁束密度の差は、ヨーク先端部で 大きい.したがって、ヨーク先端の巻数を多くすることによ り、起電力は増加することが考えられる.

Fig. 8 に, ヨーク上部の直径の違いによる起電力特性(Al-Ni-Co磁石)を示した. ヨーク上部の直径 4 [mm] において, ヨークを円錐形にすることにより, 起電力は 1.9 倍となった. ヨーク上部の直径の増加に伴い起電力が減少するのは, コイル 巻数の減少によるものである. コイル巻数が大きいほど, EMT の起電力は増加する. しかし, コイル巻数の増加に伴 い,出力インピーダンスも増加し,外部からの電磁ノイズの影 響を受けやすくなる. したがって,起電力/コイル巻数が大き いほど,高出力かつ電磁ノイズの影響を受けにくくなると考え られる. 起電力/コイル巻数は,ヨーク上部の直径に対して 最大値をとる傾向となる. ヨーク上部の直径 6 [mm] におい て,コイル巻数は 2066 回となり,起電力/コイル巻数は現状 モデルの 3.8 倍となった.

4. 永久磁石の違いによる起電力の比較

Fig. 1 に示した EMT は, Al-Ni-Co 磁石を用いている. しかし, 現在は, 希土類磁石が多く用いられている. そこで, Al-Ni-Co 磁石と Sm-Co 磁石の場合において, シミュレーションを行った.

Table 2 に、シミュレーションに用いた永久磁石の仕様を示した.



Fig. 8 Dependence of the emf on the variation in the diameter of the yoke top (g=0.5 [mm], Al-Ni-Co magnet, the number of rotations: 100 [rpm]).

 Table 2
 Specification of permanent magnet with simulation

· Item	Al-Ni-Co	Sm-Co
Coercive force H_c [kA/m]	49	650
Rediual flux density B_r [T]	1.3	0.9
Recoil permeability μ_r	3.6	1.0



Fig. 9 Dependence of the emf on the variation in the diameter of the yoke top (g=0.5 [mm], Sm-Co magnet, the number of rotations: 100 [rpm]).



Fig. 10 Dependence of the emf on the variation in the thickness of the permanent magnet (g=0.5 [mm], the number of rotations: 100 [ppm], diameter of yoke top: 6 [mm]).



Fig. 11 Characteristics of the flux density in a permanent magnet with a yoke (g=0.5 [mm]), diameter of yoke top: 6 [mm]).

Fig. 9 に, = -2上部の直径の違いによる起電力特性(Sm-Co磁石)を示した. 起電力/コイル巻数は、=-2上部の直径 7 [mm]において最大値となった. Fig. 8 に示した Al-Ni-Co磁石の場合と同様の傾向を示し、それぞれの=-2上部の直径において、Al-Ni-Co磁石の場合に比べて、 $3 \sim 8\%$ 減少した. これは、5 - 2xが磁性体であるために、= -2xで通らずに直接ケースに流れ込む磁束が多く、Sm-Co磁石より Al-Ni-Co磁石の動作点が大きいためであると考えられる.

Fig. 10 に,永久磁石高さの違いによる起電力特性を示した.永久磁石高さの減少に伴い,起電力は減少した.永久磁石高さ9[mm]以下において,Sm-Co磁石を用いた方が,起電力は大きくなった.永久磁石高さ12[mm]の場合に対して,3[mm]では,Al-Ni-Co磁石の場合,52.3%,Sm-Co磁石の場合,20.8%減少した.したがって,永久磁石高さを9[mm]以下にする場合,Sm-Co磁石を用いることにより,EMTの小型化,高出力が可能である.

Fig. 11 に,永久磁石内の磁束密度特性を示した.永久磁石 の高さに対して,Fig.9の傾向と一致した.したがって,永 久磁石内の磁束密度の減少に伴い,ヨーク内の磁束密度も減少 する.そのため,磁束の変化分が減少し,起電力も減少した. 永久磁石の高さの減少に伴い,Sm-Co磁石の場合に比べて Al-Ni-Co磁石の磁束密度の減少が大きいのは,永久磁石の減 磁曲線の違いによるものであると考えられる.また,高さが増 加するに伴い,磁束密度が飽和傾向を示すのはケース内で磁気 飽和し,磁気抵抗が大きくなるためであると考えられる.

5. あとがき

本論文により明らかになったことを以下に示す.

(1) 電磁形回転数センサの有限要素法を用いた,簡易的な 起電力算出法について述べた. Al-Ni-Co磁石のリコイル透磁 率を考慮して算出された起電力は,実測値に対して,誤差 15% で一致した.

(2) 電磁形回転数センサのヨーク形状が起電力に与える影響を、シミュレーションを行い検討した. ヨーク形状を円錐形 にすると、ヨーク先端での磁束密度が増加した. また、ヨーク 先端での磁束密度変化が大きいことから、ヨーク先端のコイル 巻数を増加させることにより、起電力が増加すると考えられ る. ヨーク上部の直径6[mm]のとき、起電力/コイル巻数は、 現状の形状に対して、3.8 倍となった.

(3) Al-Ni-Co 磁石と Sm-Co 磁石を用いたときの起電力の 比較を行った.現状の永久磁石高さ 12 [mm] では, Al-Ni-Co 磁石を用いた方が起電力は,大きいことが分かった.しかし, 永久磁石高さ 9 [mm] 以下では, Sm-Co 磁石を用いた場合の 方が起電力は大きく,永久磁石高さ 3 [mm] の場合, Al-Ni-Co 磁石を用いた場合の起電力に比べ, 61% 増加した.した がって, Sm-Co 磁石を用いると,電磁形回転数センサの小型 化,かつ高出力化が可能である.

文 献

- 戸塚裕治、山中伸浩: アンチロックブレーキにおけるセンシン グ、センサ技術、10(10), 25-30 (1991).
- 野々村 裕: 自動車分野の磁気センサ,電気関係学会東海支部 連合大会講演論文集, No. S4-5, S-45, 46 (1993).
- H. Saito, M. Kume, and K. Hayashi: Analysis of Vibration Noise on Variable Reluctance Type of Rotation Sensor, Technical Digest of the 12th Sensor Symposium, pp. 71-74 (1994).
- 4) 中田高義,河瀬順洋,船越浩昌,伊藤昭吉:円筒座標系と直交 座標系が混在する磁気回路の近似三次元有限要素解析,電気学 会論文誌 B, 106, 271-278 (1986).
- 5) 脇若弘之, 辻 弘伸, 楡井雅巳, 篠原義徳, 大久保康一, 水谷 久哉: 電磁形回転数センサの磁界解析手法の検討, 電気学会リ ニアドライブ研究会資料, LD-96-42, 1-10 (1996).

1996年10月14日受理, 1997年1月16日採録