

## 磁性鉄粉を考慮した圧粉磁心の渦電流損失解析に関する検討

## Eddy Current Loss Analysis for Soft Magnetic Composite Considering Magnetic Particles

増井 出, 中村 健二, 一ノ倉 理

東北大学 大学院工学研究科 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 980-8579

Izuru Masui, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura

Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6-05 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Soft magnetic composite (SMC) is an artificial aggregate of magnetic particles that are electrically isolated by resin coating on the particles. This isolation enables it to suppress eddy current flowing inter-particles, and thereby its iron loss at high frequency is very low compared with that of conventional silicon steel. This paper presents an analysis model of the SMC including the magnetic particles in order to accurately predict the SMC performance. Experimental results show that the calculation accuracy of the iron loss of the SMC is improved by considering the magnetic particles with its isolated coating. Moreover, the proposed model clarifies that the inter-particle eddy current loss becomes dominant when the particle size is gradually decreased; that is, the effect of reducing iron loss by finer particle size is basically limited.

**Key words:** soft magnetic composite (SMC), magnetic particle, inner-particle eddy current, inter-particle eddy current

## 1. はじめに

近年, 大気汚染や地球温暖化などの環境問題が国際的に注目されている。これらの原因の一つである二酸化炭素の排出量の多くを占める運輸部門では, ハイブリッド車 (HV) や電気自動車 (EV) の普及が急務となっている。また, HV や EV のパワートレインに搭載されるモータやトランス, リアクトルなどは高効率化に加え, 高周波化による小型軽量化のため, 交流磁気特性に優れた軟磁性材料の利用が必須である。

圧粉磁心 (SMC: soft magnetic composite) は磁性鉄粉に絶縁被膜を施し, 圧縮成型した磁性体である。模式図を Fig. 1 に示す。磁束変動に伴い圧粉磁心内に誘導される電流は, 磁性鉄粉の粒子内に流れる粒子内渦電流と, 隣接する粒子間を渡って流れる粒子間渦電流の二種類に大別されるが<sup>1)</sup>, 粒子同士が被膜でほぼ絶縁されているため, 通常, 粒子間渦電流は極めて小さく, そのため, 高周波鉄損を低く抑えることができる。

圧粉磁心の高性能化には, 飽和磁束密度を高めながら, 鉄損を低減することが必須であることから, 磁性鉄粉の粒子径を小さく, かつ絶縁被膜の厚さを極力薄くするとともに, 高い圧力で成型することで, 鉄粉の占積率を上げることが必要不可欠である。しかしながら, 極端に絶縁被膜を薄くすると, 被膜不良によって磁性鉄粉同士が直接接触する, あるいは絶縁被膜に導電性の不純物が入り込むことによって, 粒子間渦電流に起因する損失が増大する。したがって, このような影響を定量的に評価できる解析手法の確立が必須である。このような解析手法に関しては多くの研究報告がある。例えば, 森田らは数 MHz 帯において結晶粒界面層キャパシタンスによる粒界インピーダンスを考慮したモデルを用いて, 変位電流を含めた渦電流損失を算定する手法を提案している<sup>2)</sup>。ただし, 本稿で想定している HV や EV のパワートレインに使用される, トランスやリアクトルの動作周波数は数 kHz 程度であるため, 変位電流まで考慮する必要はない。一方, C. Appino らは鉄粉同士の接触が粒子間渦電流の原因と考え, 粒子の接触部の抵抗値を正規分布に従って, 実験的に求めることで数 kHz 帯における粒子内

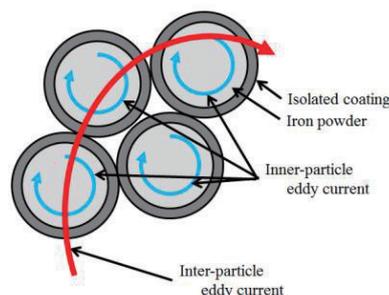


Fig. 1 Schematic diagram of SMC.

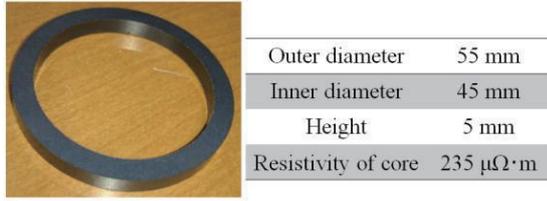
および粒子間の渦電流損失を算定する手法を提案している<sup>3)</sup>。しかしながら, この手法は被膜を接触抵抗に置き換えて検討しているため, 圧粉磁心の性能を決める重要な指標の一つである, 鉄粉の占積率については評価することができない。

そこで本稿では, 圧粉磁心の絶縁被膜の厚さや抵抗率の変化が渦電流損失に与える影響を把握することは重要であると考え, 磁性鉄粉のサイズや絶縁被膜の厚さ, 抵抗率などを考慮可能な電磁界解析について検討を行ったので報告する。

## 2. 磁性鉄粉まで考慮した SMC の解析

本章では, 提案する解析モデルの妥当性を検証するため, 圧粉磁心 (ヘガネス社製 Somaloy 700 3P<sup>4)</sup> 5) で作製したリングコア試料の渦電流損失を測定し, 解析モデルと比較を行う。Fig. 2 に, リングコア試料の諸元を示す。外径は 55 mm, 内径は 45 mm, 厚みは 5 mm である。また, 四端子法を用いて直接測定したコアの抵抗率は 235  $\mu\Omega \cdot \text{m}$  であった。

Fig. 3 に実験システムの構成を示す。Fig. 4 に示すように, リングコア試料に励磁コイルとサーチコイルを重ねて巻き, 励磁コイルに流れる電流  $i$  と励磁電圧  $v_e$ , およびサーチコイルの電圧  $v_s$  をオシロスコープを用いて測定した。ここで, 励磁コイルおよびサーチコイルの巻数をそれぞれ



Ring core

Fig. 2 Specifications of a ring core made of SMC.

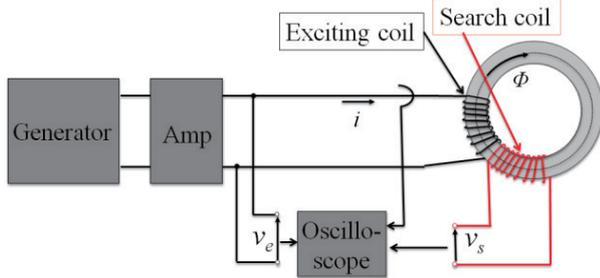


Fig. 3 Configuration of experimental system.



Fig. 4 Exciting coil and search coil.

れ  $N_e, N_s$  とし、鎖交磁束を  $\Phi$ 、コア断面積を  $S$ 、磁路長を  $l$  とすると、磁界の強さ  $H$  と磁束密度  $B$  はそれぞれ次のように求まる。

$$\oint_c Hdl = N_e i \quad (1)$$

$$H = \frac{N_e}{l} i \quad (\text{A/m}) \quad (2)$$

$$v_s = N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{1}{N_s S} \int v_s dt \quad (\text{T}) \quad (4)$$

したがって、リングコアで発生する鉄損  $W_i$  は次式のように求まる。

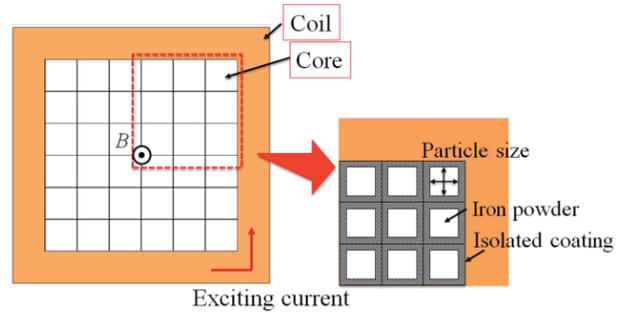
$$\begin{aligned} W_i &= Sl \int HdB \\ &= \frac{N_e}{N_s} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T v_s i dt \quad (\text{W}) \quad (5) \end{aligned}$$

有限要素法 (FEM) を用いて圧粉磁心内部の磁性鉄粉に流れる渦電流を解析するためには、非常に微細な磁性鉄粉を一つ一つ要素分割する必要がある。本稿では、Fig. 2 に示したリングコア試料の平均粒子径から、Fig. 5 に示すように、磁性鉄粉の大きさを 1 辺 140  $\mu\text{m}$  の立方体と仮定し、

これを縦 6 個、横 6 個に等間隔に並べた解析モデルを作成した。絶縁被膜の厚さは 0.7  $\mu\text{m}$  とした。

本モデルを用いて解析するにあたり、絶縁被膜の抵抗率を決める必要があるが、試料から直接測定することはできない。そこで、四端子法を用いて測定したリングコア試料の抵抗率 235  $\mu\Omega\cdot\text{m}$  から、次のように被膜の抵抗率を概算した。

まず、Fig. 6 に示すように、解析モデルの粒子には一方方向の電流が流れると仮定し、粒子を磁性鉄粉と絶縁被膜の部分に分け、Fig. 7 に示すような電氣的等価回路を作成する。この回路の抵抗のうち、磁性鉄粉の抵抗  $R_{\text{iron}}$  については粒子寸法と鉄の抵抗率から簡単に求めることができる。



Particle size	140 $\mu\text{m}$
Thickness of isolated coating	0.7 $\mu\text{m}$
Resistivity of iron powder	98.0 $\text{n}\Omega\cdot\text{m}$
Resistivity of insulating film	23.2 $\text{m}\Omega\cdot\text{m}$
Space factor	98%

Fig. 5 Analysis model of SMC including the magnetic particles.

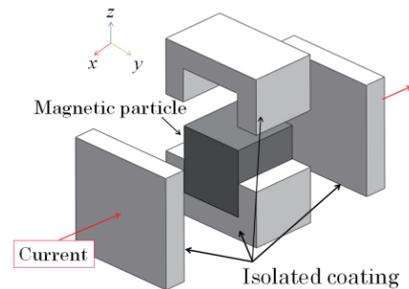


Fig. 6 One particle model.

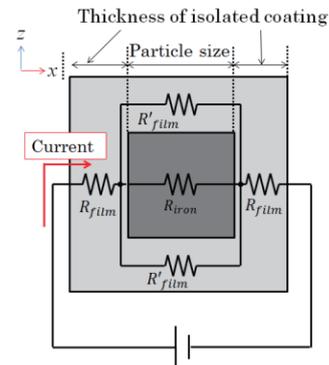


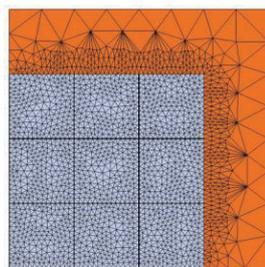
Fig. 7 Electric circuit model of one particle of SMC.

一方、被膜部の抵抗である  $R_{film}$  と  $R'_{film}$  については、抵抗率が未知であるため、単純に求めることはできないが、この一粒子分の電気回路をリングコア試料と同寸法になるまで直並列接続した回路網の合成抵抗が、四端子法で実測した抵抗値である  $235 \mu\Omega \cdot m$  と等しいとみなすことで、被膜部の抵抗、すなわち絶縁被膜の抵抗率を求めることができる。このようにして絶縁被膜の抵抗率を求めた結果、その値は  $23.2 m\Omega \cdot m$  となった。

Fig. 8 に 2 次元 FEM モデルを示す。電磁界分布の対称性から 1/4 モデルを用いて渦電流損失の解析を行った。この図を見ると、 $\mu m$  サイズの粒子一つ一つに対して十分に細かいメッシュが作成できていることがわかる。

Fig. 9 は、上記の FEM モデルを用いて算定した粒子内の渦電流密度分布である。なお、励磁周波数は HV のポートレインの鉄心として数 kHz で使用することを考慮し、1000 Hz とした。同図(a)は、被膜の抵抗率を先に求めた値である  $23.2 m\Omega \cdot m$  とした結果である。一方、同図(b)は被膜の抵抗率を粒子同士が完全に絶縁されているとみなせるほど大きな値にした結果である。これらの図を見ると、磁性鉄粉内に流れる渦電流が主であることがわかり、両者にあまり大きな差は認められない。一方、Fig. 10 に示すように、被膜の渦電流密度分布に着目すると明らかのように、同図(a)の方が電流密度が高くなっており、絶縁被膜を渡って流れる電流が生じていることが了解される。これにより、被膜部での損失が増加することが推察される。

Fig. 11 に、リングコア試料の単位体積当たりの渦電流損失の計算値と実測値を示す。同図(a)は励磁周波数 1000Hz、同図(b)は励磁周波数 3000Hz における渦電流損失である。



Elements	15,888
Nodes	10,888

Fig. 8 2-D FEM model of SMC.

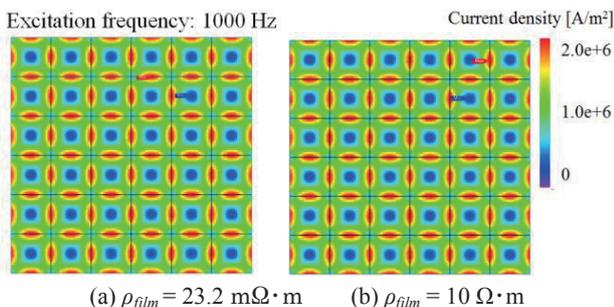


Fig. 9 Eddy current density distribution of magnetic particles.

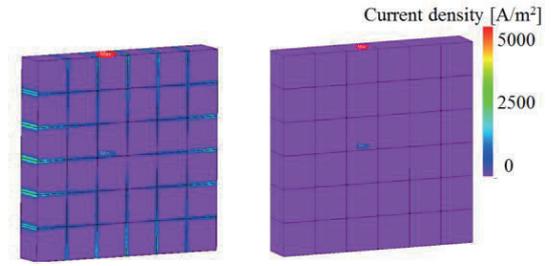


Fig. 10 Eddy current density distribution in the isolated coating.

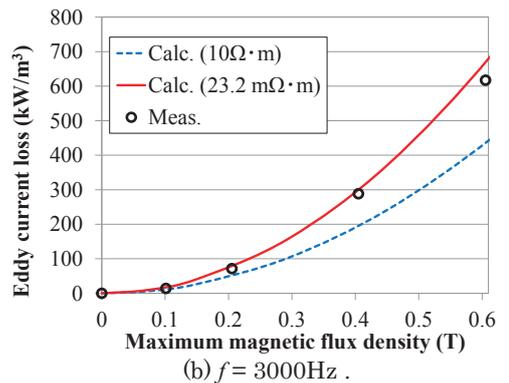
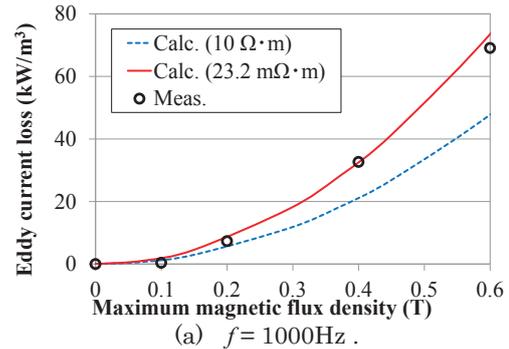


Fig.11 Eddy current loss of a ring core.

ここで、リングコア試料の渦電流損を算定するためには、コアと同形状、同寸法の解析モデルを作成する必要があるが、計算機容量の観点からそのような極めて大規模な解析モデルを作成することは不可能である。そこで計算においては、渦電流損失を粒子内渦電流損失と粒子間渦電流損失に分離して、次のように求めた。

まず、粒子内渦電流損失は粒子径および被膜厚さのみで決まることから、Fig. 8 の解析モデルを用いて、被膜の抵抗率が充分大きい時の渦電流損失を求めれば、それがすなわち粒子内渦電流損失に相当する。

一方、粒子間渦電流損失については、これがコア断面積に比例することに注目する。すなわち、抵抗率を  $23.2 m\Omega \cdot m$  とした時の渦電流損失から上述の粒子内渦電流損失を引くことで、粒子間渦電流損失を分離することができるので、これにリングコア試料と解析モデルの断面積の比を掛けることで、リングコア試料の粒子間渦電流損失を算出した。

Fig. 11 中の破線が粒子内渦電流損失の計算値であり、実線が粒子内渦電流損失と粒子間渦電流損失の和である。こ

**Table 1** Specifications of each analysis model

	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E
Particle size [ $\mu\text{m}$ ]	140	120	80	60	40
Thickness of isolated coating [ $\mu\text{m}$ ]	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2
Resistivity of isolated coating	23.2 $\text{m}\Omega\cdot\text{m}$				
Space factor	98 %				

の図を見ると、粒子レベルでモデルを作成し、かつ絶縁被膜の抵抗率にも適切な値を与えることで、精度の高い損失算定が可能であることが了解される。

### 3. 磁性鉄粉の粒径を変化させた際の損失特性

一般に、圧粉磁心の損失低減のためには、粒子径を可能な限り小さくすることが有効であると言われている。そこで本章では、構築したモデルを用いて、磁性鉄粉の粒子径を小さくした場合の特性について検討を行った。Table 1 に比較検討に用いた解析モデルの諸元を示す。粒子径を 140  $\mu\text{m}$  から 40  $\mu\text{m}$  まで変化させた 5 つのモデルを作成した。また、被膜の抵抗率は前章と同様に 23.2  $\text{m}\Omega\cdot\text{m}$  とし、被膜の厚さは鉄粉の占積率を一定にするため、粒子径に応じて変えた。

Fig. 12 に、磁性鉄粉の粒子径を変化させた時の粒子内および粒子間の渦電流損失特性の変化を示す。最大磁束密度は 1 T である。粒子内の渦電流損失は粒径の二乗に比例して減少しており、小粒径化に伴う渦電流損失の低減が確認できる。しかしながら、粒子間の渦電流損失は占積率一定かつ被膜の抵抗率一定という条件下では粒子径を小さくしてもほとんど変化しないことがわかる。そのため、磁性鉄粉の粒子径を小径化しても、ある程度まで小さくすると、粒子間の渦電流損失が支配的になり、小径化による損失低減効果が薄れていくことが了解される。したがって、圧粉磁心の損失低減には小径化だけでは不十分であり、同時に絶縁被膜の品質向上による高抵抗率化が欠かせないことがわかる。

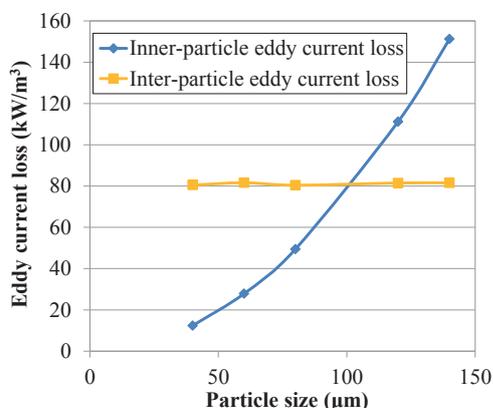


Fig. 12 Particle size versus inner- and inter-particle eddy current losses.

### 4. まとめ

以上、本稿では磁性鉄粉のサイズや絶縁被膜の厚さ、抵抗率などを勘案した圧粉磁心の設計指針の確立を目的として、圧粉磁心内の磁性鉄粉まで考慮した電磁界解析について検討を行った。

まず始めに、提案したモデルの妥当性を検証するため、SMC で作製したリングコア試料の損失を測定し、計算値と比較を行った。その結果、粒子レベルでモデルを作成し、かつ絶縁被膜の抵抗率を適切に設定して粒子間渦電流を考慮することで、精度の高い損失算定が可能であることを明らかにした。

次いで、構築したモデルを用いて、圧粉磁心の鉄粉粒子径と損失の関係について検討を行った。一般に、圧粉磁心の損失低減のためには、粒子径を可能な限り小さくすることが有効であると言われているが、本稿での検討によって、小粒径化により粒子内の渦電流損失は低減される一方で、粒子間の渦電流損失は変化しないことが明らかになった。したがって、ある程度まで粒子径を小さくしていくと粒子間渦電流損失が支配的になり、小粒径化による損失低減効果は薄れる。そのため、圧粉磁心の損失低減には小粒径化だけでなく、同時に絶縁被膜の品質向上による高抵抗率化が必要であることを明らかにした。

### References

- 1) Yuichiro Fujita, Kazuhisa tsutsui: Calculation of Compressed Core Inductor Properties by FEM Analysis of Electromagnetic Fields, *Denki Seiko*, **82**, (No. 1), p. 73-79 (2011)
- 2) T.Morita et al: Analysis of the Eddy Current Loss of Mn-Zn Ferrite Taking Account of the Microstructure, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, **25**, (No. 4-2), p. 939-942, (2001)
- 3) C. Appino et al: Computation of Eddy Current Losses in Soft Magnetic Composites, *IEEE Trans. on Magnetics*, **48**, (No.11), 2012.
- 4) Hogan's Somaloy 700 3P quick guide  
[http://www.hoganas.com/globalassets/uploaded-files/smc/somaloy-quick-guide\\_july\\_2015\\_1122hog.pdf](http://www.hoganas.com/globalassets/uploaded-files/smc/somaloy-quick-guide_july_2015_1122hog.pdf)  
(As of October 06, 2016)
- 5) Hogan's Somaloy 700 3P Product portfolio  
[http://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepoint-documents/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/Somaloyproductportfolio\\_Aug\\_2016\\_1698HOG.pdf](http://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepoint-documents/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/Somaloyproductportfolio_Aug_2016_1698HOG.pdf) (As of October 06, 2016)

2016年10月11日受理, 2016年11月29日再受理, 2016年12月22日採録