

## 技術資料

## Technical Data

# 有限要素法電磁界解析による圧粉磁心リアクトルの特性予測

藤田雄一郎\*, 筒井和久\*

## Calculation of Compressed Core Inductor Properties by FEM Analysis of Electromagnetic Fields

Yuichiro Fujita and Kazuhisa Tsutsui

### Synopsis

Inductance DC bias characteristics and loss of inductors with Fe-Si compressed core were measured in a step-down converter circuit. These properties were also calculated electromagnetically by finite element method, and they were compared to the experimental results. Two small ring cores with different resistivity showed almost same iron loss, but the lower resistivity core inductor showed larger loss than the higher one. Calculated inter-particle eddy current loss could explain the above behavior.

## 1. 緒 言

圧粉磁心は表面に電氣的絶縁処理を施した軟磁性金属粉末をプレス成型などにより成形した磁心である。軟磁性材料が Fe-Si-Al 系や Fe-Si 系などの金属材料であることにより、フェライトコアよりも飽和磁束密度が高いため磁心の小型化が可能なこと、その高い電気抵抗率により高周波動作での損失が小さいことから、従来からスイッチング電源や DC-DC コンバータのチョークコイル用磁心として用いられてきた。最近では、ハイブリッド自動車の昇圧回路や太陽光発電用のパワーコンディショナなどに使われるリアクトルのような、より大きな電力を扱う大型の磁心にも圧粉磁心の適用が進められている。

これらの用途では、磁心により形成される磁気回路中にギャップを設けることにより直流重畳特性の調整が行われている。ギャップ近傍では磁束の漏れがコイル損失

に及ぼす影響も考えられる。また、磁心のサイズが大きくなることにより、リアクトル磁心の渦電流損失が小型の磁気特性評価用試験片よりも大きくなることも考えられる<sup>1)</sup>。

そこで今回、磁心の特性がリアクトルの特性に及ぼす影響を理解するために、カットコア形状の圧粉磁心を適用したリアクトルを実際に試作し、リアクトル特性の評価と電磁界解析によるリアクトル特性予測との比較を行った。

## 2. 実験方法

### 2. 1 圧粉磁心の作製

今回、圧粉磁心の特性がリアクトルの特性に及ぼす影響を確認するために、粉末の種類と成形条件の異なる2種類の圧粉磁心を作製した。作製に用いた粉末は Fe-3 mass%Si 粉末であり、その特性を Table 1 に示す。

2011年6月9日受付

\*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

Table 1. Characteristics of Fe- 3mass%Si alloy powder.

Core	Particle size distribution [mass%]			Apparent density (Mg/m <sup>3</sup> )
	75~150 μm	45~75 μm	~45 μm	
Core A	47.6	27.6	24.8	4.61
Core B	45.4	33.5	21.1	3.35

Table 2. Density of compressed cores.

Core	Compacting pressure [MPa]	Density[Mg/m <sup>3</sup> ]	
		ring core	CS50 core
Core A	784	6.79	6.80
Core B	1274	7.09	7.08

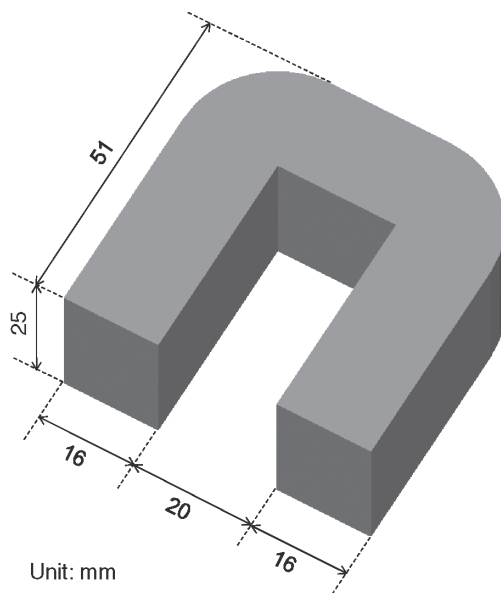


Fig.1. Shape of core for test inductor.

作製した圧粉磁心は、磁気特性評価用のリング試験片 ( $\phi 28 \times \phi 20 \times 4 t$ ) と、リアクトル作製用の馬蹄形磁心 (CS50 カットコア相当形状 [Fig.1]) である。バインダーとして 0.5 mass% のシリコン樹脂を付与した Fe-Si 粉末を、ステアリン酸亜鉛を塗布した金型内に充填し、所定の成形面圧にて成形した。その後、成形体に Ar 雰囲気中で  $750 \text{ }^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$  の熱処理を施し評価用の圧粉磁心とした。磁心の成形条件と密度を Table 2 に示す。

## 2. 2 圧粉磁心特性の評価

作製したリング試験片を用いて、圧粉磁心の磁気特性評価を行った。直流磁気特性の測定は、BH トレーサー (電子磁気工業製: BH-5501) を用いて、最大印加磁界 16 kA/m までの測定を行った。鉄損の測定は、交流 BH アナライザー (岩通計測製: SY-8232) を用いて、励磁磁束密度振幅を 0.1 ~ 0.5 T、周波数を 3 ~ 50 kHz の間で変化させて測定した。電気抵抗率は、圧粉磁心より切り出したサンプルを用い直流 4 端子法により測定した。

## 2. 3 リアクトルの作製

$\phi 1.8$  の被覆単線で 35 ターンの巻線を施したボビンを 2 個用意し、ボビンの中でギャップ材としての絶縁フィルムを介して作製した CS50 形状の圧粉磁心 2 個を突き合わせ、磁心をバンドで締結し、2つのコイルを直列に接続した。作製したリアクトルの外観を Fig.2 に示す。

## 2. 4 リアクトル特性の特性評価

作製したリアクトルの特性評価は、Fig.3 に示すような、降圧回路に組み入れて評価した。入力電圧は 300 V、スイッチング周波数は 10 kHz、デューティー比は 50 % とし、電子負荷を流れる電流を 0 から 20 A まで制御して評価した。リアクトルを流れる電流  $I$  と、リアクトル両端の電位差  $V$  をパワーアナライザ (横河工具電機製: PZ4000) に入力し損失の測定を行った。インダクタン

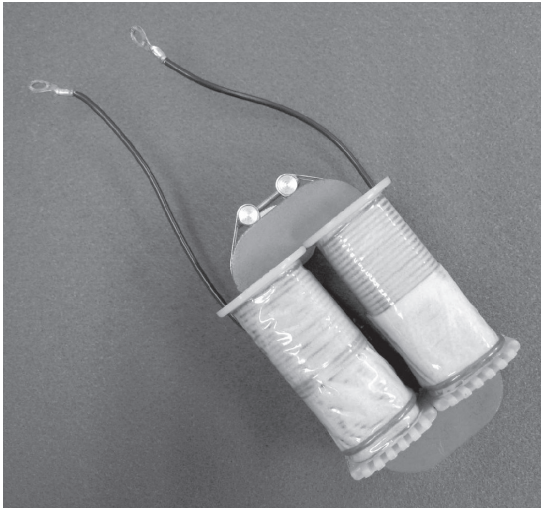


Fig.2. Appearance of Inductor.

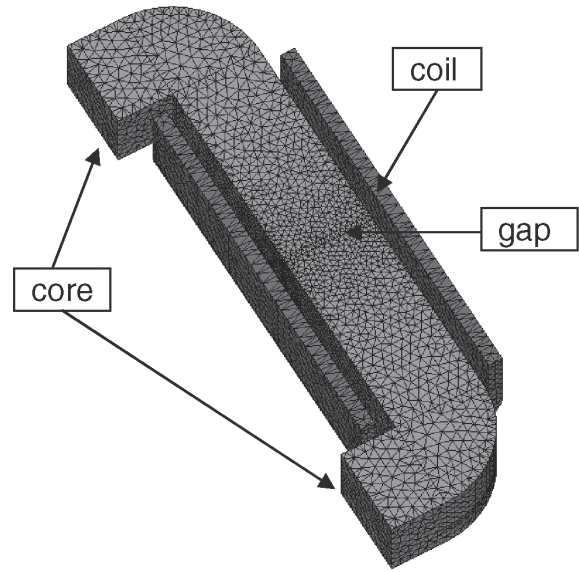


Fig.4. Quarter model for calculation.

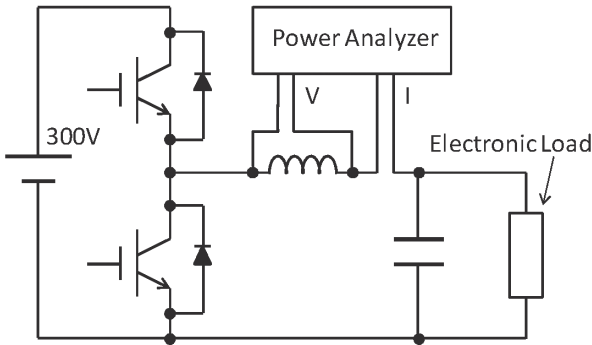


Fig.3. Step-down converter circuit for measurement.

ス  $L[H]$  の測定は、パワーアナライザの調波分析により得られた  $f=10\text{ kHz}$  成分のリアクタンス  $X[\Omega]$  の値から、式(1)により求めた。

$$L = \frac{X}{2\pi f} \dots\dots\dots (1)$$

## 2. 5 リアクトル特性の電磁界解析

リアクトルの重畳特性、損失の電磁界解析による推定を行った。解析には、有限要素法による電磁界解析ソフトウェア（株式会社 JSOL 製：JMAG-Studio ver9.0）を用い、Fig.4 に示すような 4 分の 1 モデルで解析を行った。コイルについては、導体をそのままモデル化するのではなく、コイル領域に均一な電流密度で電流が流れるモデルとしている。

重畳特性は、リング試験片の直流磁化特性を用いた

静磁界解析により、コイル電流値に対するコイルの鎖交磁束を求めておき、次に、所定の電流を中心に  $\Delta I = 8 [A]$  の電流振幅を与えた際のコイルの鎖交磁束振幅  $\Delta \Phi [Wb]$  を求め、所定の電流におけるインダクタンス  $L [H]$  を式(2)により求めた。

$$L = \frac{\Delta \Phi}{\Delta I} \dots\dots\dots (2)$$

今回、損失については重畳電流 0A 時の解析のみ行った。重畳特性の解析と同じモデルを用い、Fig.3 の回路の動作を過渡応答解析で再現した。リアクトルの損失を鉄損と銅損に分けて考えると、鉄損はさらにヒステリシス損失と粒子内の渦電流損失と粒子間の渦電流損失に分けて考えることができる<sup>1)~3)</sup>。これらのうち粒間渦電流損失は磁心の電気抵抗率を設定し、磁心に発生する渦電流によるジュール損失を直接解析することにより求めた。

ヒステリシス損失と渦電流損失はコアの磁束密度分布の解析結果と鉄損式（磁束密度、周波数とヒステリシス損失、渦電流損失の関係式）により求めた。用いた鉄損式は、リング試験片の鉄損測定結果から導出している。本来、圧粉磁心の電気抵抗率が十分に高く粒子間の渦電流損失が無視できる程度であれば、リング試験片の鉄損測定結果にはヒステリシス損失と粒内渦電流損失の和になっていると考えられる。しかし、今回試作した圧粉磁心の電気抵抗率が残念ながら不十分であった。そこで、まず電気抵抗率の値を用いてリング試験片の鉄損測定に

おける磁心に発生する粒間渦電流によるジュール損失を損失測定を模した電磁界解析により求め、鉄損測定値から除した。次に、残りの鉄損値の周波数依存性から2周波法によりヒステリシス損失  $Ph$  と粒内渦電流損失  $Pe$  を分離し、それぞれの損失の磁束密度振幅依存性から回帰分析により式(3)の形の鉄損式とした。

$$P_c = Ph + Pe = Kh \cdot B_m^\alpha \cdot f + Ke \cdot B_m^\beta \cdot f^2 \quad (3)$$

ここで、

$P_c$ : 鉄損 [ $W/m^3$ ]

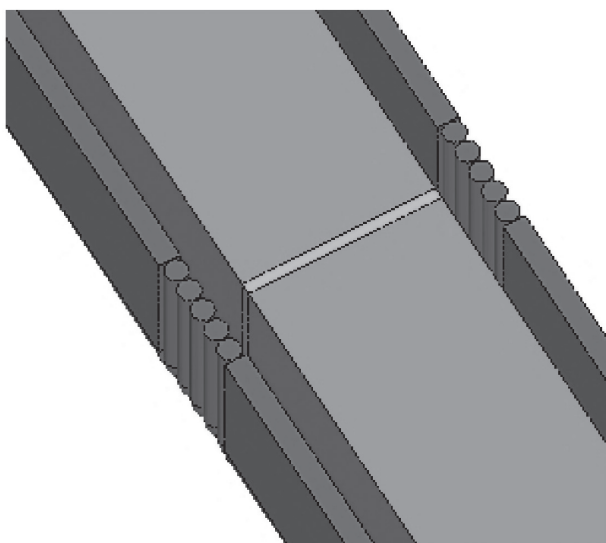


Fig.5. Calculation model for copper loss.

$Ph$ : ヒステリシス損失 [ $W/m^3$ ]

$Pe$ : 渦電流損失 [ $W/m^3$ ]

$Kh$ : ヒステリシス損失係数

$Ke$ : 渦電流損失係数

$B_m$ : 磁束密度振幅 [ $T$ ]

$f$ : 周波数 [ $Hz$ ]

である。

銅損については、重畳電流 0A としているので直流成分は 0 であるが、交流成分の損失は発生する。銅損の交流成分の解析にあたっては、表皮効果、近接効果、ギャップでの漏れ磁束の影響などによる渦電流分布を考慮するために、コイル導体を 1 本ずつモデル化し十分細かいメッシュに分割する必要がある。しかし、全コイル導体をそのようにモデル化をして解析することはメッシュ数が膨大になり困難であった。そこで Fig.5 のようにコイルの一部を実モデル化し電流密度分布を考慮した解析を行うことで、その部分についてのコイルの交流損失を解析し、モデル化するコイルの部位を変えながら解析することで、コイル全体の交流損失を推定した。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 磁心特性の評価結果

リング試験片の初磁化特性の測定結果を Fig.6 に示す。成形圧が高く、密度の高い磁心 B の方が磁化曲線の立ち上がり急、すなわち初透磁率が大きい。

鉄損測定結果の例として Fig.7 に磁束密度振幅  $B_m =$

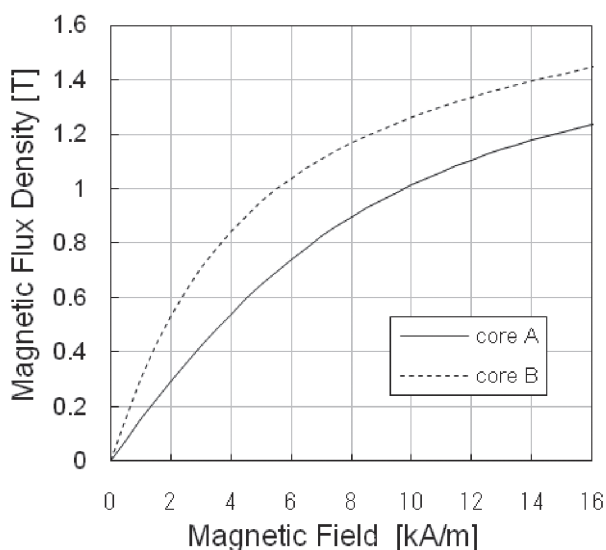


Fig.6. Initial magnetization curves of cores.

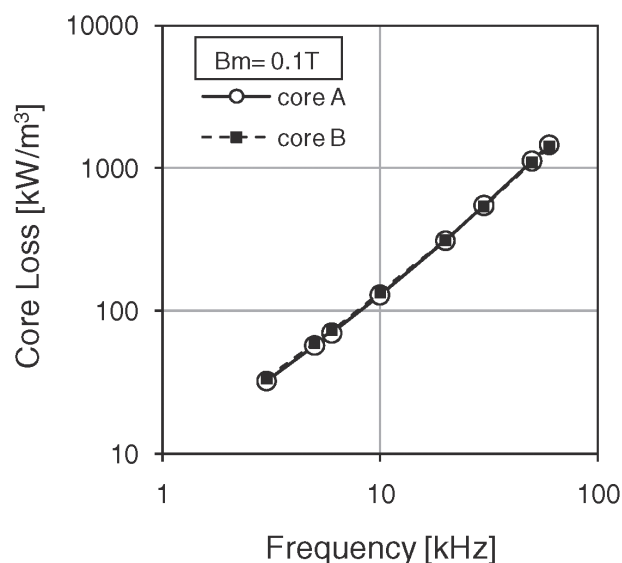


Fig.7. Loss-frequency characteristics.

0.1 Tの時の周波数による鉄損の変化を示すが、どちらの磁心もほぼ同等の損失特性であることが分かる。

Table 3 にそれぞれの磁心の体積抵抗率を示すが、磁心 B の方が体積抵抗率が低い。

### 3. 2 リアクトル特性評価結果

Fig.8 にリアクトルの重畳特性を示す。同じ 0.96 mm のギャップのもので比較すると、磁心 A は磁心 B と比べて低いインダクタンスになる。これは、リング試験片の直流磁化特性で密度の低い磁心 A の初透磁率が密度の高い磁心 B より低いことと一致する。一方、重畳電流の増加に伴いインダクタンスは緩やかに低下するが、インダクタンスの低下の割合は磁心 A の方が小さい。

また、磁心 A のギャップを 0.30 mm と小さくすることで重畳電流 0A 時の初期インダクタンスを磁心 B (ギャップ 0.96 mm) と同等にすることができ、今回の試作では両者の重畳特性に大きな差異は認められなかった。

Fig.9 にリアクトル損失の測定結果を示す。重畳電流の増加に伴い銅損が増加するため、損失は増加している。また、磁心 B の損失は、磁心 A と比較して 30 W

程度も大きな値となっている。

### 3. 3 リアクトル特性の電磁界解析結果

Fig.10 にインダクタンス重畳特性の測定値と解析結果の比較を示す。インダクタンスの低下の割合はおおむねの傾向はあっているが、絶対値には差異がみられる。差異の原因としては、交流動作している現象を直流初磁化特性を用いた静磁界の解析で行っていることや、マイナーループを考慮していないことなどが考えられるが、今後の課題である。ギャップの異なる磁心 A の事例の比較から明らかなように、ギャップが 0.30 mm から 0.96 mm と大きくなり磁気回路に占めるギャップの割合が大きくなるにつれて、測定値と解析値の差は小さくなる傾向にある。

Fig.11 に重畳電流 0A 時の損失の測定値と解析結果の比較を示す。解析値と実測値の間に 1 割程度の差異があるが、磁心 B の損失が磁心 A よりも大きくなる現象は解析結果にも表れている。解析による損失の内訳をみると、磁心 A と磁心 B との大きな違いとして、磁心 B の粒子間渦電流損失が磁心 A と比べて 20 W も大きいことがあげられる。

Table 3. Resitivity of Cores.

	Core A	Core B
Resitivity [ $\Omega\text{m}$ ]	$5.24 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-3}$

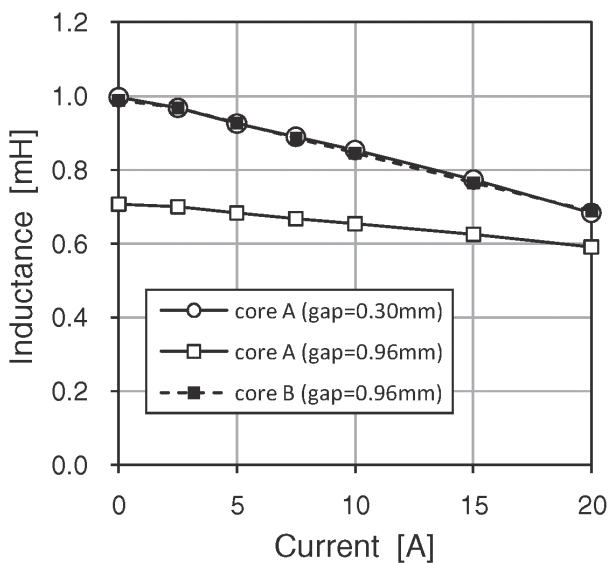


Fig.8. Inductance DC bias characteristics.

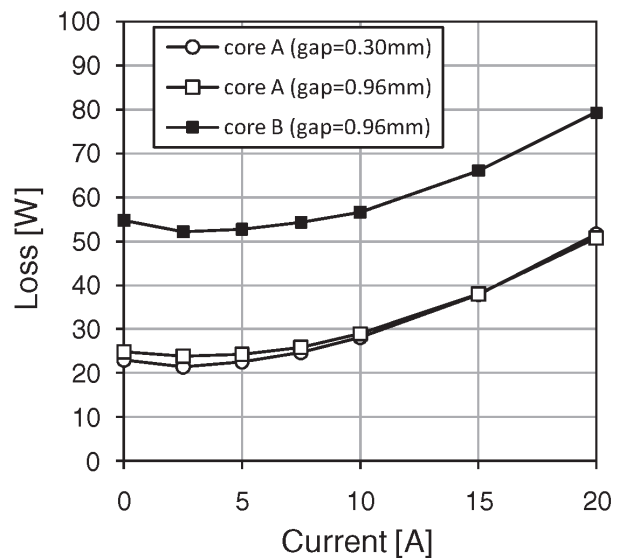


Fig.9. Loss DC bias characteristics.

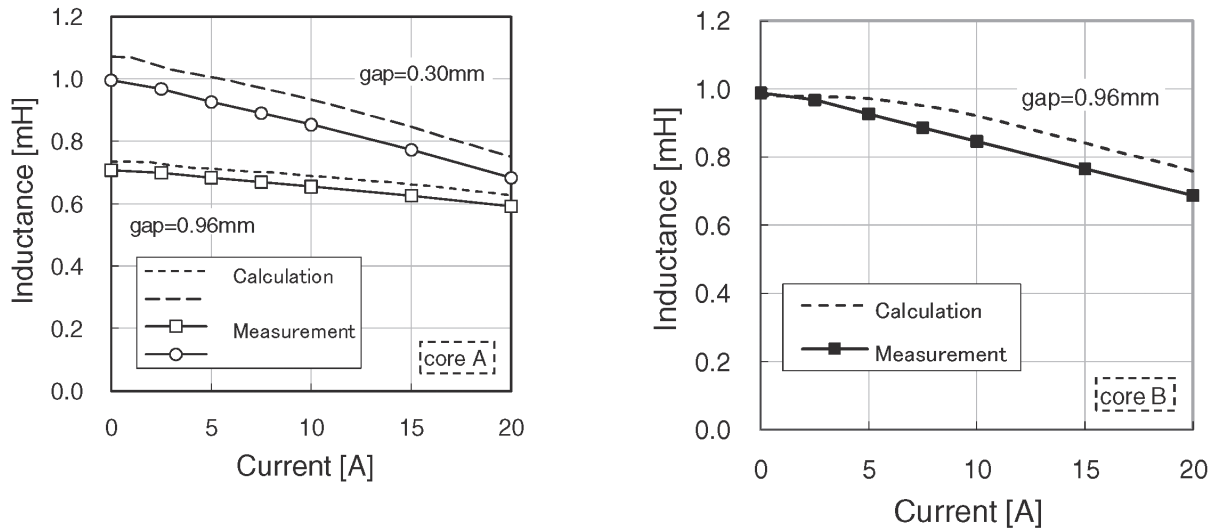


Fig.10. Inductance DC bias characteristics.

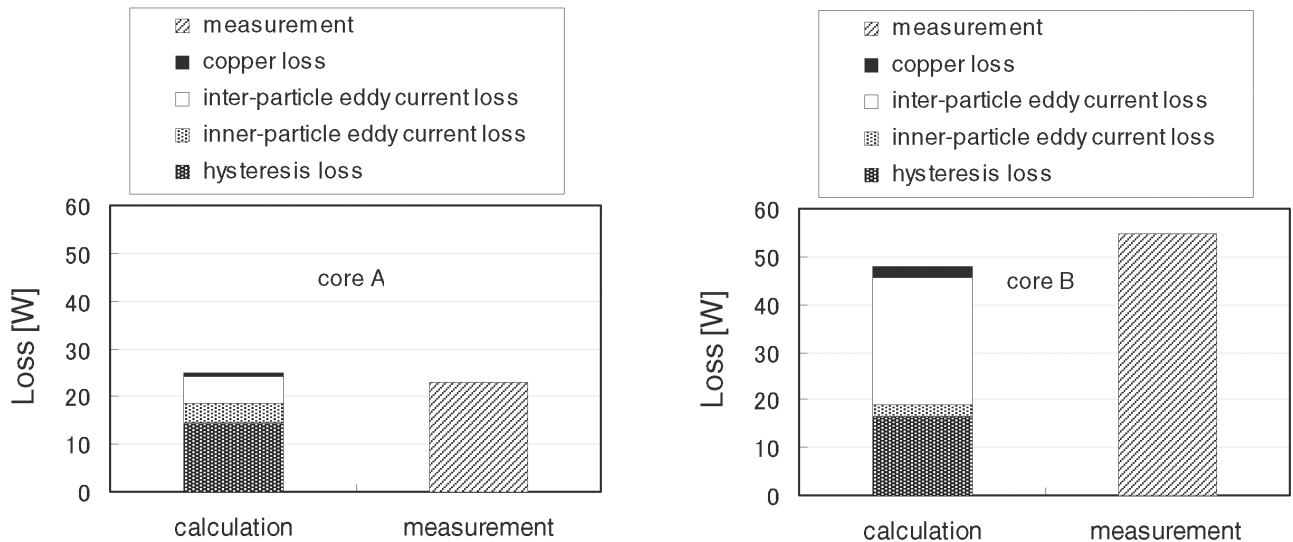


Fig.11. Comparison between calculation and measurement of loss.

Fig.12に磁心の電気抵抗率のみを変更して磁心の粒間渦電流損失を解析した結果、およびリング試験片の粒間渦電流損失の解析結果を示す。同じ電気抵抗率でも寸法の大きなCS50形状の磁心の方がリング試験片よりも損失が大きいこと、同じ形状の磁心の損失は磁心の電気抵抗率の逆数に比例することが分かる。したがって、この粒間渦電流損失の差はコアの電気抵抗率の差に由来するものである。この損失を減らすという視点では、今回試作に用いた磁心の電気抵抗率は磁心Aでも不十分であり、仮に1W以下に抑えようとするならば、少なく

とももう一桁程度の高い抵抗が必要であったといえる。今回の事例のように、リング試験片の鉄損評価では同等の磁心材料でも、磁心サイズが大きくなると粒子間の渦電流損失が無視できなくなるため損失に差が出る可能性がある。したがって、鉄損の低減のためには、磁心の電気抵抗率が十分に高いことが必要である。

次に、銅損について Fig.13にコイル片側の1ターンずつの損失の解析値を示す。ギャップ付近に相当するコイル中央で損失が大きくなる傾向が見られる。これは、磁心からの漏れ磁束の影響によるものと考えられ、

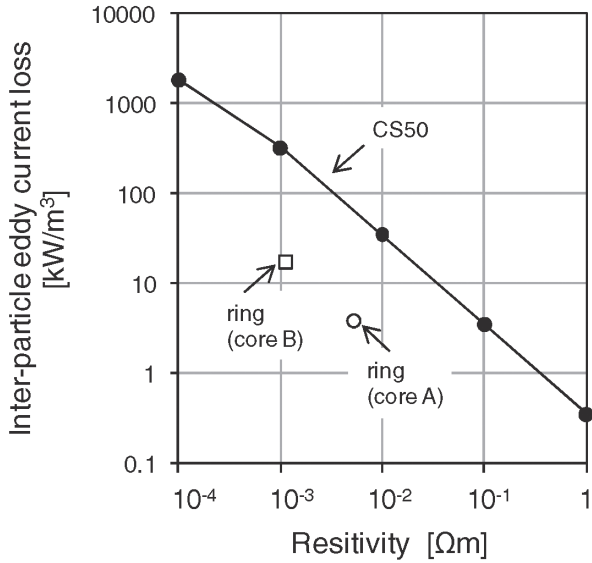


Fig.12. Relationship between inter-particle eddy current loss and resitivity.

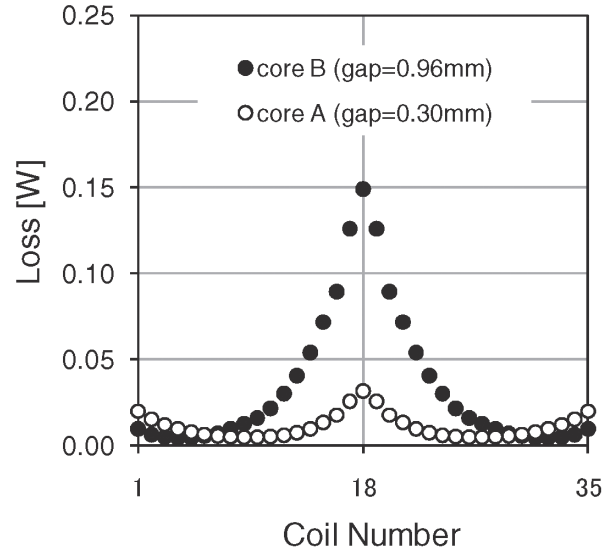


Fig.13. Distribution of copper loss.

ギャップの大きい磁心 B の方がやや大きな値になっている。ただし、Fig.11 からわかるように、今回の事例では鉄損の値と比べると小さな値であり、損失全体に占める交流銅損の割合はそれほど大きくない。

#### 4. まとめ

Fe-Si 粉末を用いた圧粉磁心によるリアクトルを試作評価し、電磁界解析による特性予測との比較を行った。その結果、大型の磁心では磁心の電気抵抗率を十分に確保することが必要なことが明らかになり、試作リアクトルでは全体損失に占める銅損の交流成分の割合は小さい

ことが予想された。解析によるリアクトルの重畳特性、損失の予測精度には改善の余地があり、今後の予測精度向上により磁心材料特性の改善に役立てていきたい。

(文 献)

- 1) 武本聡, 藪見崇生, 齊藤貴伸: 電気製鋼, 76(2005), 165.
- 2) 齊藤貴伸, 矢萩慎一郎: 電気製鋼, 69(1998), 181.
- 3) T. Saito, S. Takemoto and T. Iriyama: IEEE on Trans. on Magn., MAG-41(2005), 3301.