

# JFE スチールのリアクトル特性評価技術

## Evaluation and Analysis Techniques of Reactor Characteristics in JFE Steel

平谷多津彦 HIRATANI Tatsuhiko JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (課長)  
浪川 操 NAMIKAWA Misao JFE スチール スチール研究所 数値解析研究部 主任研究員 (副部長)  
西名 慶晃 NISHINA Yoshiaki JFE スチール スチール研究所 機械研究部 主任研究員 (副部長)

### 要旨

JFE スチールにおいて、高周波リアクトルの性能向上を目的として、設計最適化シミュレーションを含むリアクトル特性評価解析技術を構築した。設計シミュレーションを用いて、所定の仕様を満たすリアクトルを、異なるコア材料とコア寸法で設計し、次いでこれらのリアクトルを作製して使用条件下で評価することにより、シミュレーションと評価結果との整合性を示した。また、音響インテンシティシステムを利用することにより、リアクトルの騒音可視化を実施した。これらのツールを活用することにより、お客様へのリアクトルソリューション提案を促進することができる。

### Abstract:

Reactor characteristic evaluation and analysis technique was constructed by JFE Steel including the design optimization simulation for the purpose of performance improvement of high frequency reactor. Based on the simulation, reactors which satisfy a given specification were designed with different core materials and core size. The validity of the simulation result was proved by physically fabricating these reactors and estimating the performance under the actual use conditions. Moreover reactor noise visualization was achieved by using a sound energy flux density system. It is possible to promote a solution suggestion of reactor to a customer by utilizing these tools.

## 1. はじめに

パワーエレクトロニクス回路において、高周波リアクトルと呼ばれるコイルは、磁気エネルギーの蓄積・放出を介して電圧変換やフィルタの役割を果たす重要部品の一つである。リアクトルの代表的な利用例として、太陽光発電用パワーコンディショナ回路、およびリアクトル電流波形を **図 1** に示す。リアクトルは、高周波のリプルが重畳した直流または交流下で使われる<sup>1)</sup>。リアクトルを小型化するため、多くの場合、コイルに強磁性体のコアが挿入されている。このようなリアクトルでは、コア材料に磁気飽和がある点と、高周波になるほどコアの渦電流による発熱が著しく増大する点に注意する必要がある。また、コイルの発熱もリアクトルの設計に大きく影響する。適切なリアクトルを得るためには、コア材料の磁気特性評価のみならず、所望の条件を反映させたうえでリアクトル特性を予測するシミュレーション技術と、実際に使用される電流波形でリアクトルを励磁して特性評価および解析を行なう技術が必要不可欠といえる。本稿では、リアクトルシミュレーションとリアクトル評価装置の概略を説明し、その活用例として、異なるコア素材で作製した同一仕様のリアクトル特性の損失比較評価、および騒音比

較評価を紹介する。

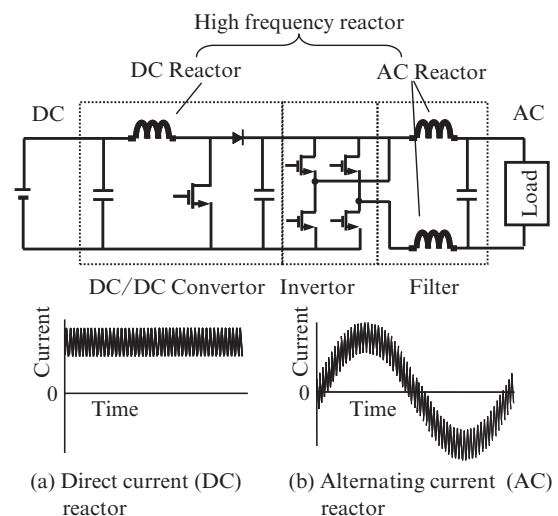


図 1 パワーエレクトロニクス回路とリアクトル電流波形の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of basic circuit and reactor current waveform

2015 年 3 月 5 日受付

## 2. リアクトルシミュレーション

### 2.1 リアクトルの磁気設計

リアクトルのインダクタンス  $L$  は、回路素子として最も重要な特性の一つであり、直流による  $L$  の変化は直流重畳特性と呼ばれている。電磁鋼板をリアクトルのコアとして用いる場合、磁気飽和による急激なインダクタンス低下を避けるため、コアにエアギャップを設けて直流重畳特性を調整する。ギャップを含むコアの磁束密度( $B$ )-磁化力( $H$ )曲線と直流重畳特性の関係を **図 2** に示す。長さ  $l_g$  のギャップを含む磁路長  $l_m + l_g$  のコアに銅線を  $N$  回巻いて電流  $I$  を流したとき、真空中の透磁率を  $\mu_0$ 、コア材料の比透磁率（微分透磁率）を  $\mu_r$ 、ギャップを含むコア全体の実効透磁率を  $\mu_{\text{eff}}$  とすると、アンペアの周回積分則と磁束の連続性より、(1) 式の関係が成り立つ。

$$\frac{B}{\mu_0 \mu_r} l_m + \frac{B}{\mu_0} l_g = \frac{B}{\mu_{\text{eff}}} (l_m + l_g) = NI \quad \dots\dots (1)$$

$l_g \ll l_m$  の場合、 $\mu_{\text{eff}}$  は (2) 式のように表すことができる。

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_0 \mu_r}{1 + \mu_r (l_g / l_m)} \quad \dots\dots (2)$$

一方、インダクタンス  $L$  は、交鎖磁束数を電流で除した値であるから、 $N$ 、 $\mu_{\text{eff}}$  および、コア断面積  $S$  を用いて表すと、

$$L = \frac{N^2 S}{l_m} \mu_{\text{eff}} \quad \dots\dots (3)$$

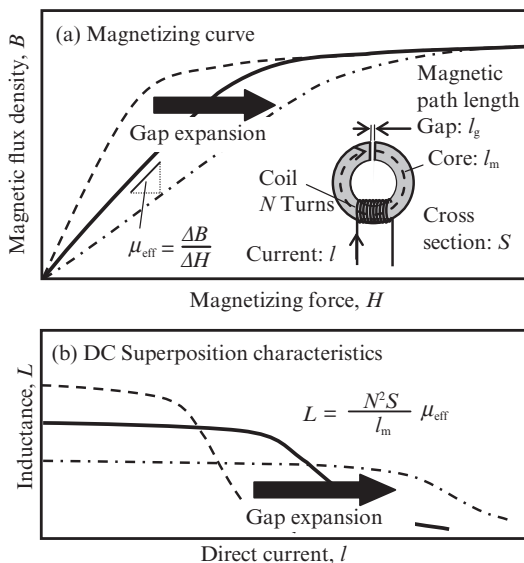


図 2 ギャップ長と直流重畳特性の関係

Fig. 2 Relationship between the direct current (DC) superimposition characteristics and the gap length

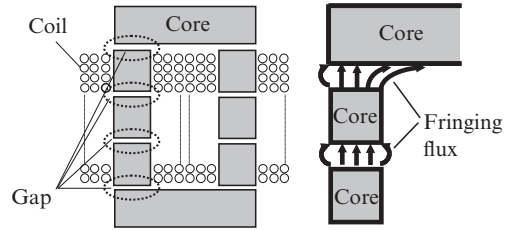


図 3 ギャップ部のフリンジング磁束

Fig. 3 Fringing flux in the gap part of reactor core

(2), (3) 式から、 $L$  を磁気回路の形で表現した (4) 式が得られる。

$$L = N^2 \left( \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{l_g}{\mu_0 S} \right)^{-1} \quad \dots\dots (4)$$

(4) 式右辺カッコ内第 1 項はコアの磁気抵抗、第 2 項はエアギャップの磁気抵抗を表す。複数のギャップを有するコアでは、各ギャップの磁気抵抗の和をとって  $L$  を計算すればよい。(2), (4) 式から明らかなように、ギャップ長  $l_g$  を大きくするほどコアの実効透磁率  $\mu_{\text{eff}}$  が抑制され、大電流域まで磁気飽和を避けることができる、すなわち直流重畳特性が向上する。その反面、使用電流域でのインダクタンス  $L$  は低くなる。

実際に計測される  $L$  の値は、(4) 式の計算値より大きく、その差はギャップ長とともに増す傾向を示す。これは **図 3** に示すように、コア材に比べて透磁率の低いエアギャップ部で磁束のふくれ（フリンジング）が生じ、この部分の磁気回路の断面積が広がって磁気抵抗が小さくなるためと考えられる。フリンジングはギャップ形態によっても異なる。精度よくインダクタンスを計算するには、ギャップ形態ごとに、磁束のフリンジングを考慮した実効断面積を用いて磁気抵抗を補正する必要がある。そこで、ギャップ形態  $i$  の実効断面積  $S_{gi}$  をギャップ長  $l_{gi}$  の関数とし、インダクタンスの測定データにフィッティングして実験的に近似式を求めるものとする。この場合のインダクタンス計算式を以下に示す。

$$L = N^2 \left( \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r S} + \sum_i \frac{l_{gi}}{\mu_0 S_{gi}} \right)^{-1} \quad \dots\dots (5)$$

磁束のフリンジングを考慮した (5) 式と、コア材料の磁性データ ( $\mu_r$ - $I$  または  $\mu_r$ - $B$  特性) を用いることにより、リアクトルの直流重畳特性を精度よく計算できる<sup>2)</sup>。

### 2.2 リアクトル設計支援

リアクトル設計では、発熱の原因となる銅損とコアロスの見積りも重要である。これらの損失の計算についてさまざまな方法が検討されているが<sup>3)</sup>、簡易的には、リアクトルの

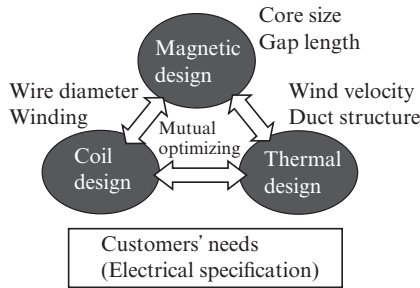


図4 リアクトル設計の要点

Fig. 4 Important point with a reactor design

定格電流  $I_m$ , リップル振幅  $\Delta I_{p-p}$ , 直流重畳特性, コア材料の鉄損特性から損失を概算できる。リアクトル設計に際しては, コアの発熱が許容温度を超えないように, コア材料, 寸法, ギャップ長を選定する。コイルも発熱を考慮して, 線径, 巻数を調節する。(5) 式に示したように, コア断面積, コイル巻数はリアクトルのインダクタンスにも大きく影響する。また同じ巻数であっても, コイル形状や巻き方により銅損は異なる。使用環境での冷却条件も, 重要な因子といえる。

このように, リアクトルの設計において, 磁気設計, コイル設計, 熱設計が密接に関係しているため, 与えられた条件の中で, 所望の電氣的スペックが得られるように, 相互に最適化を図っていくことが, リアクトル設計の要点といえる(図4)。

シミュレーションのメリットとして, 数百アンペアの大電流域で使われるリアクトルや, さまざまな制御方式の電源に対応した励磁条件での特性予測など, 評価装置の制約に縛られず柔軟に対応できる点が挙げられる。また, 電磁鋼板の使用経験の少ないお客様に対し, リアクトル製作前に最も適した使い方を, シミュレーションで迅速に提案することができる。

### 3. リアクトル評価装置とその活用例

#### 3.1 リアクトル評価装置

JFE スチールでは, リアクトル試料を接続し, 商用交流の実効値, リップルの周波数と振幅をそれぞれ調整して所定の電流波形で励磁可能な電源を導入し, さまざまな条件でリアクトルの評価試験を行なっている。リアクトル評価装置の基本構成を図5に示す。一般的な評価では, リアクトルの定格電流相当の交流に, キャリア周波数に相当するリップルを重畳させ, 波形モニタを確認しながらリップル振幅を調整し, 所定の電流波形となった時のリアクトル損失を電力計で計測する。評価用リアクトルに2次巻線を施すことによりコアロスを計測し, リアクトル損失との差から, 銅損を求めることも可能である。

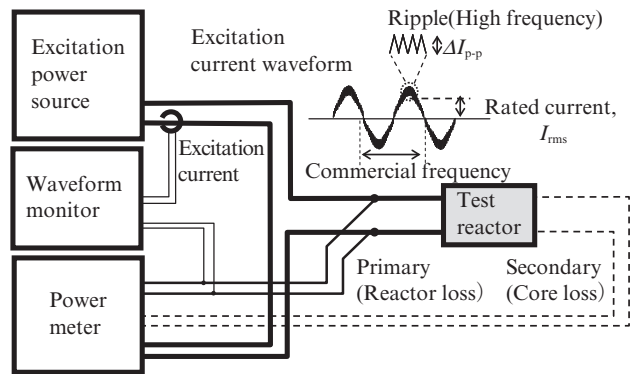


図5 リアクトル評価装置

Fig. 5 Reactor evaluation equipment

#### 3.2 交流リアクトルの損失比較

リアクトル評価の一例として, 図6の仕様を満たす交流リアクトルの評価例を紹介する。ここでは  $70 \times 20 \times 30 \text{ mm}$  のブロックコア4つと丸銅線のコイルを用いて作製するものとし, コア材料として, [A] Fe-Si系の圧粉磁心と, [B] 高Si電磁鋼板 Super Core<sup>®</sup> 10JNHF600の積層コアをそれぞれ用いる場合について, 両者のリアクトルがほぼ同じ直流重畳特性となるように, コイル巻数, ギャップ長のシミュレーションを行なった。また[B]と同じコア材料での小型化も試みた。コアを小型化してインダクタンス条件を確保するには, [B]より銅線径を細くして巻数を増やす必要があり, その結果銅損は増加する。ここでは, 銅損を[A]に揃えた形で[B]の小型版[C]を設計した。その結果を表1に示す。

表1の設計で評価用リアクトルを作製し, その直流重畳特性を測定した結果を図7に示す。各サンプルとも初期インダクタンス, 定格インダクタンスとも, 仕様を満たすことが確認できる。次に, リアクトル評価装置を用いて, 定格電流に周波数 16 kHz, 振幅 3.5 Aのリップルを重畳した電流波形で損失比較を行なった。これらのリアクトルには, それぞれ励磁コイルと同じ巻数の2次コイルを巻き, リアクトル損失と同時にコアロスも測定した。銅損はリアクトル損失からコアロスを引いた値として求めた。測定結果を図8に示す。

同一コア寸法の[A]と[B]でリアクトル損失を比較すると,

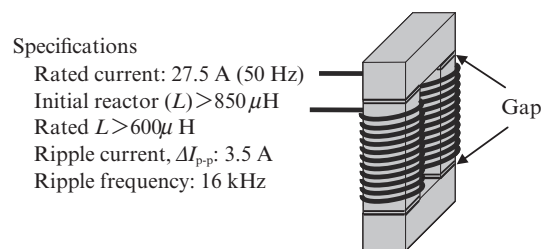


図6 評価用リアクトルの仕様

Fig. 6 Specifications of the test reactor

表 1 評価用リアクトル

Table 1 Simulation results of the test reactors

Sample	[A]	[B]	[C]
Core material	Powder Core 6.5% Si-Fe	Super Core <sup>®</sup> 10JNHF600	Super Core <sup>®</sup> 10JNHF600
Core size (mm)	70×20×30	70×20×30	60×15×31
Gap length (mm)	0	0.7×4	0.8×4
Wire diameter (mm)	2.3φ×2	2.9φ×2	2.1φ×2
Turn number	78	58	66
Design induction, <i>B</i> (T)	0.684	1.050	1.136
Direct current resistance (DCR) (mΩ)	24.8	12.5	25.5

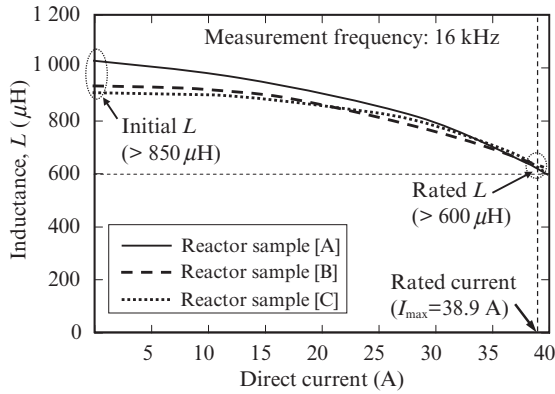


図 7 評価用リアクトルの直流重畳特性

Fig. 7 Direct current (DC) superposition characteristics

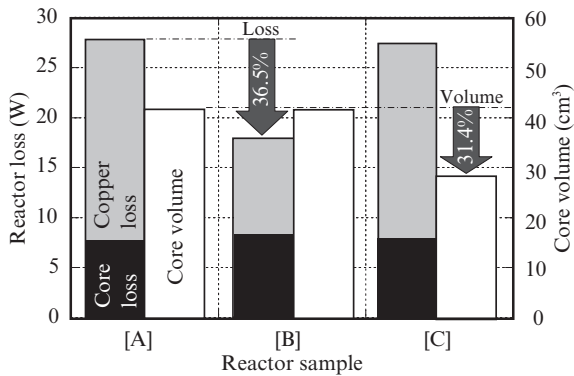


図 8 リアクトル損失とコア寸法の比較

Fig. 8 Comparison of reactor losses and core volume

[B]の方が[A]より約37%低損失であった。損失をコアロスと銅損に分離すると、[B]の銅損が[A]と比較して小さいことがわかる。これは、[B]のコア材の実効透磁率が[A]の圧粉磁心より高く、インダクタンス条件を満たすに必要な銅線巻数を減らせたためである。次に、[A]と[C]を比較すると、[C]の設計では銅損を同程度に保ちつつ、[A]よりコア寸法

を約30%小型化可能であることがわかる。これらの結果は、表1の設計を行なう際に想定していた傾向とよく一致しており、シミュレーションと評価結果との整合性を示すものといえる。

### 3.3 交流リアクトルの騒音評価

リアクトルの騒音は、コアの磁歪振動、ギャップの磁氣的吸引力による振動、コイルの振動、それらの共振など、さまざまな原因が考えられる。通常、マイクによる音圧測定が行なわれているが、騒音発生源の特定は難しい。

最近、音の流れのエネルギーを測定することにより、機械装置などからの発聲音の分布や、騒音発生源の位置を特定できる音響インテンシティ法のシステムが開発され、実用化されている<sup>4)</sup>。本システムは、音圧測定用マイクと粒子速度検知センサーがセットされたプローブをビデオカメラの前で対象物の特定面をスキャンし、後でプローブの軌跡と計測データを一致させることにより、それぞれの分布を可視化するものである。また、音圧と粒子速度を掛け合わせることで、エネルギー密度分布も可視化できる。

ここでは、アモルファスのカットコアと、高Si電磁鋼板 Super Core<sup>®</sup>10JNEX900の積層コアをそれぞれ用いた同一仕様(定格インダクタンス1.5mH)の2つのリアクトルについて、定格電流13.6A、リップル周波数10kHz、リップル振幅1.9Aの条件で励磁した時の騒音評価例を図9に示す。

両者を比較すると、10JNEX900のリアクトルの方がアモルファスのものより全体的に低騒音であることがわかる。10JNEX900は磁歪定数がほぼゼロに近い6.5%Si鋼板であり、低磁歪材料をコアに用いることがリアクトルの騒音低減に有効であることを、この結果は示している。一方、アモルファスのリアクトルは、全体的に音圧が高く、特にカットコアのギャップに相当する部分で音圧レベルが高くなっている。全体の騒音は磁歪振動によるもの、ギャップ付近の騒音は、磁氣的吸引力によるものと推定される。このように騒音を可視化することにより、騒音発生源の特定が容易となり、原因究明、低騒音化対策が迅速に進むものと期待される。

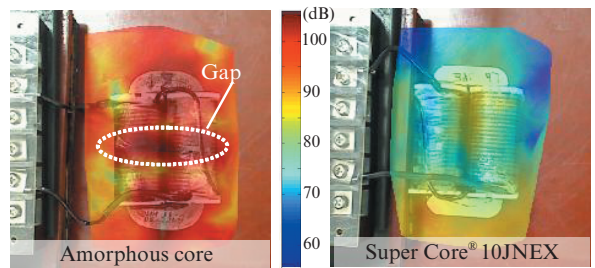


図 9 同一電流波形で励磁された2つのリアクトルの騒音可視化比較

Fig. 9 Noise visualization of two reactor samples excited by same current waveform



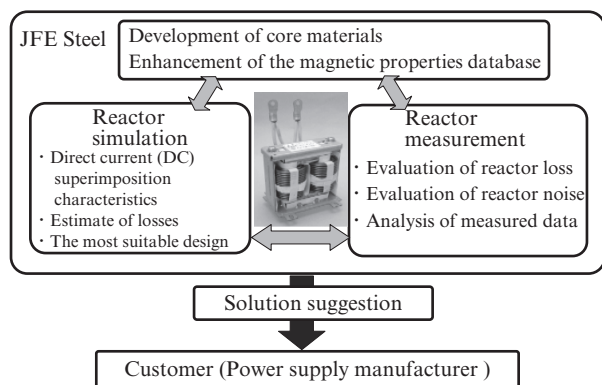


図 10 リアクトル評価によるソリューション提案

Fig. 10 Solution suggestion by reactor evaluation

材料の開発を行なうとともに、リアクトルシミュレーションによる設計支援、リアクトル評価装置による実測・解析技術を連携させることにより、お客様に対し、迅速かつ確かなソリューション提案を行なっていく予定である (図 10)。

参考文献

- 1) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘, JFE 技報. 2005, no. 8, p. 11-16.
- 2) JFE スチール. 浪川操. 特許第 3709828 号.
- 3) Mühlenthaler, J. et al. Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics. ECCE Asia 2011. p. 945-952.
- 4) de Bree, H. E. Acoustics Australia. 2003, vol. 31, no. 3, p. 91-94.

4. おわりに

高周波リアクトルの性能向上には、軟磁性材料に関する知識と詳細な特性データが必要であるばかりでなく、コイルを含む電気回路の知識や熱、騒音・振動に関する知識も要求される。JFE スチールは、リアクトルのコアとなる軟磁性



平谷 多津彦



浪川 操



西名 慶晃