

# 積層鉄心の磁気特性に及ぼすカシメの影響

## Influence of Interlocking on Magnetic Properties of Stacked Core

千田 邦浩 SENDA Kunihiro JFE テクノリサーチ 西日本ソリューション本部 倉敷材料評価センター 主査 (部長)・博士 (工学)  
戸田 広朗 TODA Hiroaki JFE スチール 電磁鋼板セクター部 主任部員 (副部長)・博士 (工学)  
河野 正樹 KAWANO Masaki JFE テクノリサーチ 機能材料ソリューション本部 企画部長

### 要旨

鉄心損失の予測精度向上に寄与するため、カシメ加工を施したリングコアを用い、要因をカシメダボ (突起) の形成、ダボ同士の勘合、カシメによる積層間の短絡に分けて鉄心磁気特性に対する影響を調査した。カシメにおけるダボの形成は同じ大きさの穴あけ加工よりも磁気特性を劣化させ、ダボ同士の勘合はさらに磁気特性を劣化させる。これらの影響は励磁周波数が高い条件で顕著であった。ダボ形成自体が渦電流損増加に及ぼす影響は小さいものの、複数のダボの配置によっては、渦電流の増加を招いて鉄損を増加させることを示した。さらに、ダボの個数、および渦電流を増加させるダボ対数の増加によるヒステリシス損、渦電流損の増加の挙動を明らかにし、鉄心特性予測のための基礎的な知見とした。

### Abstract:

Factors for interlocking, such as formation of dowels, jointing between dowels, and the formation of short circuits were analyzed from the viewpoint of core magnetic properties by using ring cores with interlockings. Formation of dowels had greater influence on the deterioration of the magnetic properties than making holes of the same size, and the jointing of dowels added additional deteriorations. These adverse effects were enhanced at higher magnetizing frequencies. The effect of individual interlocking on the eddy current loss was small, however, formation of eddy current paths causes extra eddy current losses. Finally, increase in hysteresis loss and eddy current loss with the number of dowels and the pairs of dowels were analyzed for the basic knowledge of core loss estimation.

## 1. はじめに

カシメはモータや発電機の鉄心を工業的に製造する際、電磁鋼板を鉄心形状に打ち抜いた後に互いを接合して一体のコア (積層鉄心) とする方法である。一般的に普及している型内カシメでは、打抜き金型にカシメを施す機構を具備しており、金型内で電磁鋼板が打ち抜かれる前に「ダボ」と呼ばれる突起を形成し、次にダボ形成部を含めて電磁鋼板を鉄心形状に金型のパンチで打ち抜き、パンチがダイの内部を下降するストロークを利用してダボ同士を勘合し、鉄心を連続的に形成する。この状況を図 1 に示す。

上記の方法によるカシメは生産性の点で優れるものの、電磁鋼板に施す加工により、その磁気特性を劣化させることが知られているが<sup>1,3)</sup>、劣化要因について詳しい知見は得られていない。そこで、本研究は、カシメによる鉄心特性の劣化防止や劣化量の予測精度向上に寄与するため、カシメによる磁気特性劣化の要因を明らかにすることを目的とした。ここでは、劣化要因をダボ形成によるひずみ、ダボ同士の勘合によるひずみ、およびダボ部での電氣的短絡の 3 つに分離してカシメによる劣化挙動を調査・解析した<sup>4,5)</sup>。

## 2. 実験方法

鉄心磁気特性に及ぼすカシメの影響を、劣化要因の解析を目的として評価した。本研究においては理想的な磁化条件下で評価するため、図 2 に示すカシメ加工を施したリング形状の試験片 (以下、リングコアまたはコアと称す) を用いて磁気特性を調査した。

リングコアの寸法は外径 55 mm、内径 35 mm、積層高さ 4.9 mm (0.35 mm×14 枚積層) とし、上面から見たときのダボの長さ 3 mm、幅 1 mm、ダボ高さ (板底面からのダボ突出高さ) 0.25 mm (板厚の 70%) の V カシメを施した。

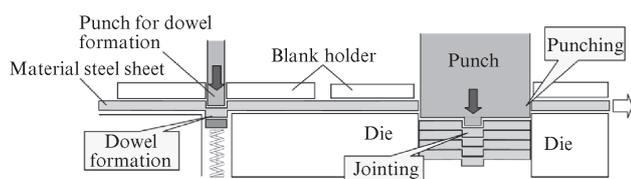


図 1 順送金型でのカシメ締結の模式図

Fig. 1 Schematic view of interlocking using progressive die

2023 年 3 月 28 日受付

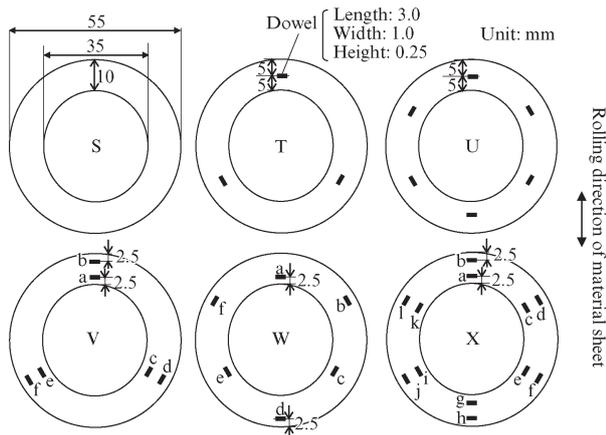


図2 カシメ付きリングコアサンプルおよびダボの位置

Fig. 2 Ring core samples and positions of interlocking dowels

素材となる電磁鋼板にはJFE スチールの無方向性電磁鋼板 35JNE250 (板厚 0.35 mm) を用いた。

試験に用いたカシメ付リングコアの作製には単工程の打抜き金型を用いた。まずこの金型でリング形状の内・外周の打抜き加工と同時にダボを形成し、未結合状態のコア素片を得た。続いて未結合状態のコア素片を一枚ずつ締結用治具に設置し、3.5 MPa の圧力で加圧してダボ同士を吻合し一体化させた。この際、最上部に置かれたコア素片のダボの部分は、締結治具に設けられたダボと同じ形状の突起によって押され、すでに結合・一体化している作製途中の積層コアに結合される。ここで作製されるリングコアの内・外周部は打抜き加工が施されているため、未焼鈍のコアではカシメによる歪だけでなく、コアの内周・外周近傍に打抜き歪が存在している。

また、ダボ形成の影響を見極めることを目的に、コア T の配置でダボと同じ寸法 (3 mm×1 mm) の穴を打抜き加工で設けたコアを準備した (コア TH)。

さらに、塑性歪を除去した後の磁気特性を評価することを目的に一部のコアに対して 750℃×3 h (Ar 中) の歪取り焼鈍を施した。本研究で用いた電磁鋼板はハイグレード材のため、上記条件の歪取り焼鈍で結晶粒の成長は起こらず、塑性歪のみが除去される。焼鈍後のカシメコアは結合状態のままであるため、締結応力が残存した状態にある。

なお、上記の方法で作製したリングコア試験片 (図 2 の S, T, U, V, W, X) について、結合前のコアを示す場合は「T1」のように 1 を、結合後のコアを示す場合は「T2」のように 2 を、歪取り焼鈍後のコアを示す場合は「T3」のように 3 を付加して表記する。

カシメおよび打抜きによるリングコアの鉄損の増分を以下の (1)~(6) の原因により区別して解析した。各劣化要因について、コア T2 またはコア TH でのコア S3 (歪取り焼鈍コア) に対する鉄損の劣化量を ( ) 中に示す記号とする。

- (1) リングコア外周の打ち抜きによる歪 ( $P$ )
- (2) ダボ形成による歪 ( $D$ )
- (3) ダボ同士の吻合による歪 ( $J$ )
- (4) 歪取り焼鈍後も残るダボ同士の吻合による歪 ( $J'$ )
- (5) ダボと同じ大きさの穴あけによる歪 ( $H$ )
- (6) カシメでの短絡による付加的な渦電流損 ( $E_U, E_V, E_W, E_X$ )

上記 (6) のカシメ部での短絡を原因とする付加的な渦電流損による鉄損の増分を以降「付加損 (Extra loss)」という。コア U, V, W, X はコア T2 に対してダボ個数が  $n$  倍 (U, V, W は  $n=2$ , X は  $n=4$ ) であるため、ダボによる影響  $D, J$  (あるいは  $J'$ ) を含めると、コア S3 に対する鉄損増分は、 $P+nD+nJ$  (または  $nJ'$ ) となる。この値よりもさらに鉄損が増加した分を付加損とし、コア U, V, W, X の付加損をそれぞれ、 $E_U, E_V, E_W, E_X$  とする。

ダボ締結による鉄損増加について、歪取り焼鈍後も残る鉄損の増分 ( $J'$ ) を  $J$  と区別したのは、ダボ締結の際に導入される歪の量と、歪取り焼鈍後に残存する歪の量が異なると考えられるためである。ダボの吻合に伴う歪としては、ダボ同士を吻合する際に導入される塑性歪と隣接する積層鋼板を結合するための応力 (締結応力) が存在するが、歪取り焼鈍後は塑性歪が開放され、締結応力は残存すると考えられる。

図 2 に示した各コアのコア S3 に対する鉄損増分を、コア T2 での鉄損増分  $P, D, J$  と、コア U, V, W, X での付加損  $E_U, E_V, E_W, E_X$  を用いて表 1 に示す。ここでは、鉄損要因間の相互作用等はないものと仮定し、付加損以外はダボの数に比例して増加するとして鉄損増分を求めた。

リングコアは 100 ターンの 1 次コイルにより交番磁化し、100 ターンの 2 次コイルで磁束を検出することにより磁気特性を評価した。鉄損測定は、周波数 50 Hz, 400 Hz, および 1 kHz で行い電力計法により鉄損を算出した。鉄損の構成要素のうち、ヒステリシス損が周波数に比例し、渦電流損が周波数の 2 乗に比例するとして、400 Hz と 50 Hz での鉄損から、周波数 400 Hz で励磁した場合の渦電流損、ヒステリシス損を 2 周波分離法により算出した。

また、ダボ近傍の塑性歪の蓄積を硬度上昇により評価した。ここでは、微小ビッカース硬度計を用いて荷重 50 g での硬度の分布を測定し、加工による歪のない部分に対する硬度の増加率を用いて歪蓄積量の分布を調査した。

### 3. 実験結果および考察

ダボ近傍での硬度増加率の分布 (板厚中心位置) を図 3 に示す。硬度測定用のサンプルには結合前のコア T1 を用いた。この結果から、ダボ形成で強い加工を受けた部分で硬度が上昇していることが分かる。このような硬度の上昇は塑

表1 評価したリングコアサンプル(鉄損増分の推定値)  
Table 1 Tested ring cores (estimated increase of core loss)

Core conditions	Symbols	Dowel configurations					
		S	T	U	V	W	X
	Dowels	No dowel	1×3	1×6	2×3	1×6 (Staggered)	2×6
With holes	—	—	TH [P+H]	—	—	—	—
Before jointing	S1 [P]	—	T1 [P+D]	—	—	—	—
After jointing	—	—	T2 [P+D+J]	U2 [P+2D+2J+E <sub>U</sub> ]	V2 [P+2D+2J+E <sub>V</sub> ]	W2 [P+2D+2J+E <sub>W</sub> ]	X2 [P+4D+4J+E <sub>X</sub> ]
After annealing	S3 [-]	—	T3 [J]	U3 [2J+E <sub>U</sub> ]	V3 [2J+E <sub>V</sub> ]	W3 [2J+E <sub>W</sub> ]	X3 [4J+E <sub>X</sub> ]

[ ] indicates estimated increase of core loss in each core. The following values  $P, D, J, H$  are the amount of deterioration by each factor defined in core T with respect to core S3.  $E_U, E_V, E_W, E_X$  represent extra loss due to increased eddy current loss in core U, V, W, X, respectively.  $P$ : punching strain,  $D$ : strains introduced by dowel formation,  $J$ : strains introduced by jointing (before annealing),  $J'$ : strains introduced by jointing (after annealing),  $H$ : formation of holes.

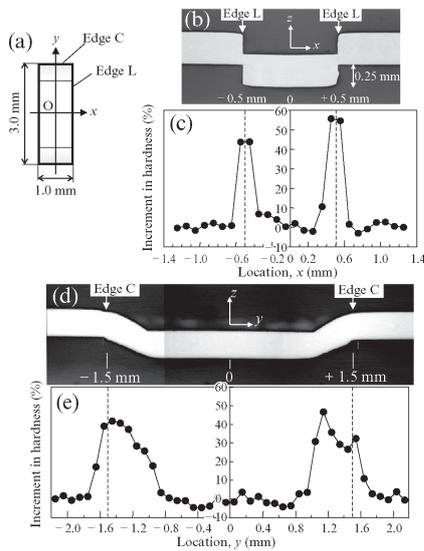


図3 ダボの断面図およびダボ内部と周辺の硬度増加率の分布  
Fig. 3 Cross sectional view of dowel and hardness distribution inside and around dowel

性歪の蓄積による。図3でエッジL近傍の硬度上昇領域の幅(片側)は0.15 mm程度であり、従来から知られている打抜き歪による硬度上昇領域の幅、板厚の約1/2に相当する<sup>6)</sup>。

ダボなし(S1)、穴付き(TH)、ダボ形成後締結前(T1)、ダボ締結後(T2)のコアについて、50 Hzの交番磁束条件で測定した磁界強度の最大値と磁束密度の最大値の関係を図4に示し、50 Hzの交番磁束条件での鉄損の比較結果を図5に示す。

図4に示すとおり、磁界強度300 A/m以下ではダボ付(締結前)コアT1の磁束密度は穴あきコアTHよりも低い。また、図5に示すとおり最大磁束密度1.0 T、周波数50 Hz

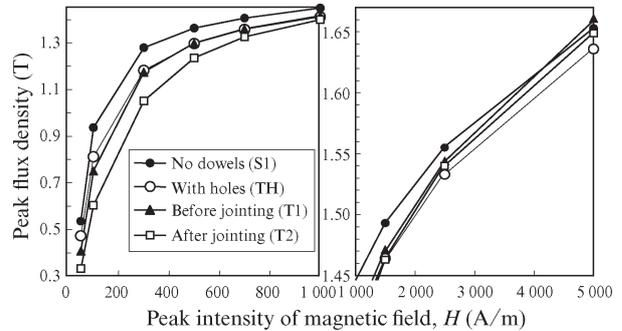


図4 異なるダボ条件のコアの最大磁束密度の変化  
Fig. 4 Variation of peak flux densities in cores with different dowel conditions

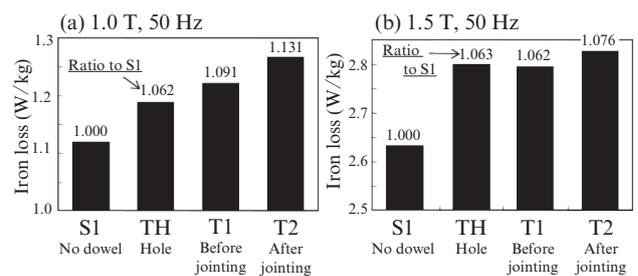


図5 カシメコアの鉄損の比較  
Fig. 5 Comparison of iron losses of cores with interlocking

の交番磁束条件でのコアT1の鉄損はコアTHよりも高い。これらの結果から、ダボの形成は同じ寸法の穴を打抜き加工によって開けるよりも低磁束密度域での磁気特性を劣化させる作用が強いといえる。これに対して、1.5 Tの交番磁束条件ではコアT1の鉄損はコアTHとほぼ同等である。また、図4に示すとおり、 $H=300\sim 1000$  A/mでの磁束密度はコアT1とコアTHでほぼ同等である。さらに $H=5000$  A/mになると、コアTHは最も低い磁束密度となっている。コア

THの磁気特性が高磁束密度域で低下する理由は、穴部分には磁性体が存在しないため、磁化された際に穴の内側に磁極が生成して磁性体部分の磁化を低下させるためである。

結合後のコア T2 は磁界強度 1500 A/m 以下において、比較したコアの中で最も低い磁束密度となり、最大磁束密度 1.0 T および 1.5 T の条件において最も高い鉄損値を示した。

図 3 のエッジ L において、コア T1, T2 に対するダボ形成とコア TH に対する穴あけでは、同様の剪断加工が施されているため、ダボおよび穴部周辺での塑性歪の分布はほぼ同等と考えられ、さらに、コア TH は穴部分の内部に磁性体がないため、磁化特性の点でコア T1 よりも不利なはずである。それにもかかわらず低磁束密度域での磁気特性はコア TH よりもコア T1 の方が劣っていた。これは、コア T1 ではダボの形成に伴って生じた塑性変形部が周辺の部分を拘束することにより弾性歪領域が広範囲に広がった影響と推定される。コア T2 ではダボの締結による歪が追加されるため、磁気特性はさらに劣化する。

コア T2 と同じコアを用いて、締結前、締結後、および一度締結した状態のコアを分離してから測定した磁束密度および鉄損の変化量について増加側を正として図 6 に示す。ここでの励磁条件は、交番磁化条件（周波数 50 Hz）とし、変化量算定の基準はコア S1（打抜き加工後の単純リングコア）とした。

図 6 のとおり、締結を外し分離したコアの磁気特性は締結後コアよりも良好な水準となったことから、コア片同士を結合する締結歪の影響でコアの磁気特性が劣化しており、締結をはずすことで締結歪の解放により磁気特性が改善したものと考えられる。ただし、図 6 に示されるように、締結を外したコアの特性は締結前のコアに比べて劣化していることから、ダボの勘合ではコア片同士の結合のための締結応力だけでなく、塑性歪も導入されて鉄損劣化を起こしていると考えられる。

異なるダボ配置のカシメコアの磁気特性について、図 7 に歪取り焼鈍前のコアの励磁周波数 50 Hz ( $B_m=1.0$  T, 1.5 T) での鉄損の比較を示し、図 8 に歪取り焼鈍前後のコアの励磁周波数 400 Hz での鉄損とその内訳（ヒステリシス損と渦電流損）を示す。図 7、図 8 では図中にダボのないコア (S1 または S3) に対する鉄損の比を示した。これらの結果によれば、コア内部のダボの数の増加に従い鉄損が増加しており、カシメが磁気特性を劣化させていることが明らかである。図 7 のコア S1 に対する鉄損の比は  $B_m=1.0$  T の方が 1.5 T よりも大きい。これは図 4、図 5 でも示したように、カシメによる磁気特性の劣化が低磁束密度領域で顕著であることに対応する。図 7 (a) と図 8 (a) で基準コア (S1) に対する鉄損の比を比べると、コア T2, U2 は励磁周波数が 50 Hz の場合と 400 Hz の場合とでほぼ同等であるのに対し、コア V2, W2, X2 では 400 Hz での鉄損の比が 50 Hz での鉄損の比より著しく増大している。コア V2, W2, X2 に共通

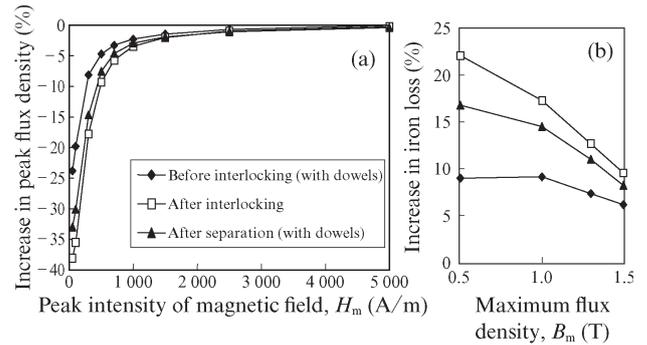


図 6 締結前、締結後、締結をはずした後の磁束密度、鉄損変化量の比較（コア S1 に対する比較）

Fig. 6 Comparison of increase in flux density and iron loss between core before jointing, after jointing, and after separation

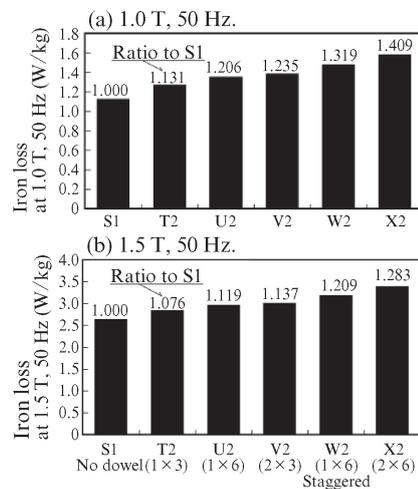


図 7 異なるダボ配列のコア（歪取り焼鈍前）の鉄損の比較

Fig. 7 Iron losses of cores with different interlocking configuration before annealing

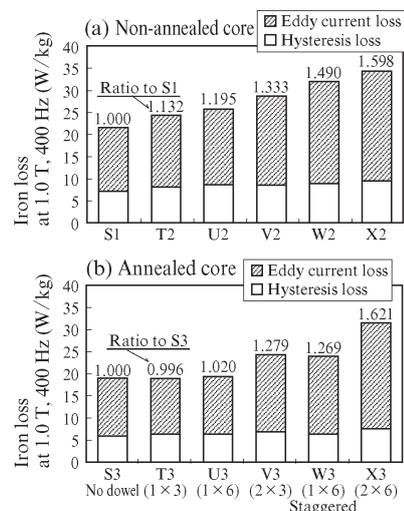


図 8 異なるダボ配列のコアの 1.0 T, 400 Hz での鉄損成分の比較

Fig. 8 Comparison of iron loss component at 1.0 T, 400 Hz in different interlocking configuration

する特徴は、ダボが磁路の中心になくリングコアの幅の中で内側または外側に位置している点である。したがって、コア V2, W2, X2 で認められた鉄損（渦電流損）の増加は、積層方向に隣接した積層鋼板同士がカシメ位置で短絡することにより電気的閉回路が形成され、これと鎖交する交番磁束により誘起された渦電流（付加損）によると推定される。

#### 4. コア損失の解析

ここからは、カシメによる磁気特性劣化因子を分離して評価する試みについて述べる。

リングコアの作製過程における鉄損劣化の因子としては2章で述べた(1)~(6)の要因が考えられる。カシメ付きリングコアの製造に関連する劣化因子間に交互作用がないと仮定すると、それぞれのコアでの鉄損増加量（歪を含有しないコア S3 に対する）は表1の [ ] 中の式で表せる。また、個々のカシメによる磁気特性の劣化は一次近似的には加算的に取り扱えるとしてよい<sup>4)</sup>。

以上の仮定のもとに、コア T2 で定義される鉄損劣化量  $P, D, J$ 、およびコア T3 で定義される  $J'$ 、およびコア U, V, W, X で定義される  $E_U, E_V, E_W, E_X$  を用いて、それぞれのコアにおける鉄損増加量を算出できる。例えばコア V2 を例にとると、打抜き歪による鉄損劣化量はコア T2 と同じなので  $P$  となり、コア V2 のダボの数はコア T2 の2倍(6個)あるので、ダボ形成による鉄損劣化量は  $2D$ 、ダボの締結による劣化量は  $2J$  である。さらに付加損による劣化量を  $E_V$  とすると、コア V2 の鉄損劣化量は、 $P+2D+2J+E_V$  となる。また、コア V2 に歪取り焼鈍を施したコア V3 では、打抜き歪やダボ形成により歪は除去されているので、焼鈍後コア T3 での締結による鉄損劣化量を  $J'$  とすると、V3 での劣化量は  $2J' + E_V$  となる。ここでは積層コア間の短絡状態は歪取り焼鈍前後で変化しないと考えられるので、コア V2 とコア V3 の付加損を同じ  $E_V$  とした。

表1の [ ] に示した式に基づき、 $P, D, J$  および  $E_U, E_V, E_W, E_X$  について定量化した。例えば、 $J$  はコア T2 の鉄損増分 ( $P+D+J$ ) からコア T1 の鉄損増分 ( $P+D$ ) を差し引くことにより求めた。このようにして求めた各因子による鉄損増分の比率を次の式(1)により、歪を含まない単純リングコア S3 の鉄損に対する比率  $r_{int}$  とした。

$$r_{int} = \frac{\Delta W}{W(S3)} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (1)$$

$\Delta W$  : カシメに起因の各因子による鉄損の増加量 [W/kg]  
 $W(S3)$  : コア S3 の鉄損 [W/kg]

式(1)で  $\Delta W$  は、鉄損増加量  $P, D, J$  (コア T2 で規定) および付加損  $E_U \sim E_X$  (それぞれコア U~X で規定) に

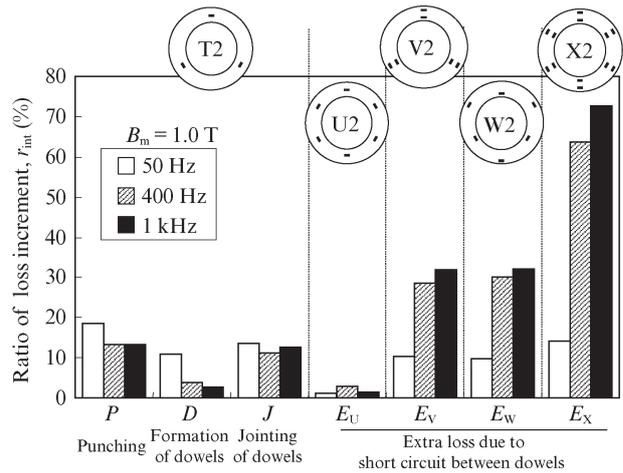


図9 打抜き加工およびカシメに関連した各要因による鉄損増分の比率

Fig. 9 Ratio of iron loss increment due to each factor related to punching and interlocking

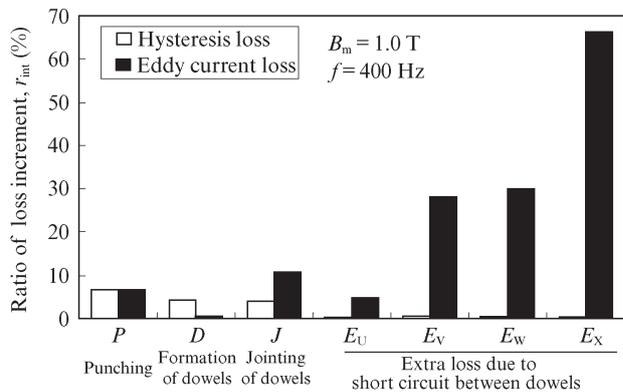


図10 打抜き加工およびカシメに関連した各因子によるヒステリシス損、渦電流損の増分の比率 (対コア S3)

Fig. 10 Ratio of increment in hysteresis loss and eddy current loss due to factors related to punching and interlocking

相当する。図9に周波数毎(50 Hz, 400 Hz, 1 kHz)の鉄損増分の比率  $r_{int}$  を各要因ごとに示す。また、図10は400 Hzでのヒステリシス損と渦電流損に対して式(1)を適用し、コア S3 の鉄損に対する比率として示した結果である。

図9において、コア T2 のカシメによる鉄損の増分は  $D$  と  $J$  の和に相当する。 $D+J$  はいずれの周波数においても打抜き歪による鉄損増分  $P$  よりも大きいことから、本研究で作製したリングコアでは鉄損の劣化に関して、カシメの方が打抜き歪よりも大きな影響を及ぼしているといえる。

図9に示すとおり、ダボ形成による鉄損の増分比率 ( $D$ ) は周波数が増加するに従い低下した。一方、打抜き歪による鉄損の増分比率 ( $P$ ) と締結による鉄損の増分比率 ( $J$ ) には周波数とのはっきりした関係は見られない。一般的に、鉄損増加の主要因がヒステリシス損の場合、励磁周波数が高くなると鉄損の増加率は低下する。したがってダボ形成に

よる鉄損増分 ( $D$ ) は主にヒステリシス損によると考えられる。一方、打抜き歪 ( $P$ ) やダボの締結による歪 ( $J$ ) では励磁周波数が高くなっても鉄損の増加率は大きく低下していない。したがって、これらの因子の場合はヒステリシス損だけでなく渦電流損の影響も比較的大きいといえる。

ダボの締結による歪 ( $J$ ) の場合、カシメ部での短絡が渦電流増加の原因として考えられるが、図 8 (b) に示すように、歪取り焼鈍後のコア T3 およびコア U3 の渦電流損の増加量は小さいことから、これらのコアのような磁路方向に一直列に並んだカシメ配列の場合、カシメ部での短絡は渦電流損に大きな影響を及ぼさないといえる。また、図 9 に示すように  $E_U$  はごく小さく、磁路の中央に 6 個のカシメを有するコア U2 もコア T2 と同様に渦電流損の増加はほとんど認められない。一方、コア V, W, X では付加損の顕著な増加が生じていた。図 10 に示すヒステリシス損、渦電流損の分離の結果から、コア V, W, X での付加損の増加は渦電流損の増加によることが分かる。コア V, W, X で渦電流損が顕著に増加した理由として、2つのカシメ部を結ぶ線と鎖交する磁束成分がある場合 (図 2 における、コア V の a-b, c-d, e-f 間、コア X の a-b, c-d, e-f, g-h, i-j, k-l 間)、カシメ部では積層鋼板間で短絡が生じているので、カシメ部を含む短絡閉回路中に電流が誘起される結果、鉄損が増加すると考えられる。千鳥状のダボ配置となっているコア W の場合にもコア V と同等の付加損が生じている。コア W では、図 2 のダボの組 a-b, b-c, c-d, d-e, e-f, f-a が磁束方向と鎖交していることから、この経路に渦電流損が誘起されると考えられる。

本研究で得られた結果を、カシメによる鉄心損失劣化の予測に適用することを試みた。

カシメがヒステリシス損に及ぼす影響を調査した。図 11 にリングコア片面  $100 \text{ mm}^2$  あたりのダボ個数 (以降、「ダボ密度」という) とヒステリシス損の関係を示す。歪取り焼鈍前のコア、歪取り焼鈍後のコアそれぞれのヒステリシス損はダボ密度の増加に従って増加する関係となっており、ダボの配置にはあまり関係していない。したがって、本研究と同じ仕様 (形式、寸法、深さ) のカシメの場合は図 11 の関係から回転機鉄心のヒステリシス損を予測できる。

次に、カシメが渦電流損に及ぼす影響について解析した。図 12 にダボのないコア S1, S3 と付加損を生じないコア (T2, T3, U2, U3) に関して渦電流損に及ぼすダボ密度の影響を示す。歪取り焼鈍後のコア (S3, T3, U3) ではダボ密度が増加しても渦電流損の増加は認められない。一方、歪取り焼鈍前のコアではダボ密度に応じて渦電流損が増加している。このような歪取り焼鈍前のコアでの渦電流損の増加は、先に述べたコア内部の弾塑性歪に起因する局所磁束波形の歪によるものと推定される。対象とする回転機鉄心で付加損の発生がない場合、図 12 の関係を用いて渦電流損の増分を予測できる。

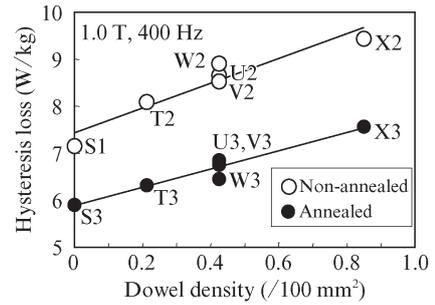


図 11 ヒステリシス損に及ぼすダボ密度の影響  
Fig. 11 Effect of dowel density on hysteresis loss

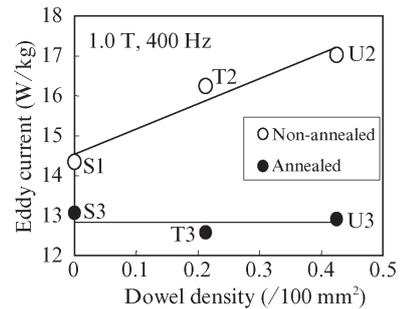


図 12 渦電流損に及ぼすダボ密度の影響  
Fig. 12 Effect of dowel density on eddy current loss

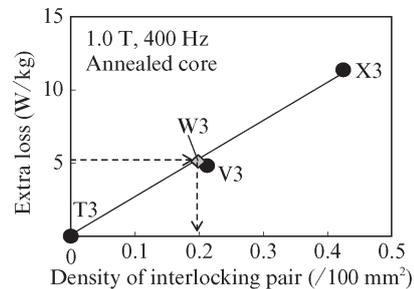


図 13 付加損に及ぼすカシメ対密度の影響  
Fig. 13 Effect of density of interlocking pair on extra loss

続いて歪取り焼鈍後のコアの結果を用いて付加損を解析した。鎖交磁束を有する最近接の 2つのカシメを以降「カシメ対」という。カシメ対の個数密度 (コア面積  $100 \text{ mm}^2$  当たり) と付加損の関係を図 13 に示す。ここに示すように、付加損はカシメ対の密度の増加に従い線形に増加している。また、千鳥配置としたコア W3 の付加損を図 13 の関係に適用し、相当するカシメ対の密度を求めるとコア V2 と同等の  $0.2 \text{ 個}/100 \text{ mm}^2$  (コア全体で 3 個に相当) となる。

カシメ部での短絡に起因する付加損は、カシメ対の距離や配置にも依存するため、任意のカシメ配置の場合に図 13 の結果を回転機鉄心の損失解析に直接適用することは適当ではない。カシメ対による鎖交磁束成分が存在するとき、図 11 および図 12 の関係から予測されるヒステリシス損、渦電流損を上回る鉄損増分が認められたときはカシメ起因の短

絡閉回路を流れる渦電流を原因とした付加損の影響を疑う必要がある。

## 5. おわりに

本研究では、鉄心磁気特性に及ぼすカシメの影響について、磁気特性に劣化を引き起こす因子を分離して評価した。この結果、カシメはダボの形成およびダボの勘合により、場合によっては打ち抜き加工を上回る影響を鉄心に及ぼしていることが明らかになった。さらに、カシメ部での短絡による渦電流回路が形成される場合は、渦電流損の顕著な増加を招くことを示した。また、カシメによる劣化因子の実験的な分離方法を示し、鉄心特性との関係を明らかにすることで、カシメが鉄心磁気特性に及ぼす影響の概略を予測できるようにした。これらの結果を、今後、カシメ加工の弾塑性

解析やモータコアの電磁界解析の基礎データとすることで、鉄心特性の予測技術向上に貢献できると考える。

### 参考文献

- 1) 藤村浩志, 屋鋪裕義, 児嶋 浩, 中山大成. 無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす打ち抜き・かしめによる応力の影響. 電気学会マグネティックス研究会資料. 2003, MAG-03-190.
- 2) Nakayama, T.; Kojima, H. Interlocking performance on non-oriented electrical steels. *J. Mater. Eng. Perform.* 2007, vol. 16, no. 1, p. 7-11.
- 3) Kurosaki, Y.; Mogi, H.; Fujii, H.; Kubota, T.; Shiozaki, M. Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheet. *J. Magn. Magn. Matter.* 2008, vol. 320, p. 2474-2480.
- 4) 千田邦浩, 河野正樹, 石田昌義. かしめによる鉄心磁気特性劣化の要因解析. 電気学会マグネティックス研究会資料. 2005, MAG-05-42.
- 5) Senda, K.; Toda, H.; Kawano, M. Influence of interlocking on core magnetic properties. *IEEE J. Ind. Appl.* 2015, vol. 4, no. 4, p. 496-502.
- 6) 千田邦浩, 石田昌義, 中須洋一, 八木正昭. 剪断加工による無方向性電磁鋼板の鉄損および磁区構造の変化. 電気学会論文誌 A. 2005, vol. 125-A, no. 3, p. 241-246.