

巻きコア方式で製作されるスリットを有するモータコアの見かけのヤング率

野田 尚昭¹⁾ 高瀬 康²⁾ 高田 久貴³⁾ 張 彪⁴⁾

Analysis for Equivalent Young's Modulus of the Motor Core with Slit on the Spiral Accumulating Core System

Nao-Aki Noda Yasushi Takase Hisataka Takada Biao Zhang

The motor core is usually manufactured from magnetic steel sheet with press machine. However, usually most parts of the plate are scalped, and only about 16% of the sheet is used for the core. The spiral accumulating core system is suitable for manufacturing the core more ecologically because in this system more than 50% of the magnet steel sheet can be used. In this study, a unit cell model is assumed considering periodic character of the actual core under plane strain condition in the z direction. Using this simple model, the effects of the diameter and width of the core are discussed. Also, the effects of the numbers of the slit and embossing interlocking are analyzed. It is found that around the slits the core should be considered as zero elastic modulus because no tangential stress exists. Also, a simple evaluation method is proposed to estimate the effective elastic modulus by applying the rule of mixture to the simple model.

Key Words: (Standardized) materials, magnetic steel sheet / (Free) Motor, Numerical Calculation, Finite Element Method, Design (D3)

1. 緒 言

洗濯機用ダイレクトドライブモータやハイブリッドカーを含んだ電気自動車用モータが社会の多様なニーズに応じて、数多く生産されている。例えば、自動車のホイールに内蔵したインホイールモータは、電気自動車や燃料電池車の駆動システムとして期待されている。現在の大径モータのコア製作工法は、電磁鋼板¹⁾の一枚板を超大型プレスにより打ち抜いて成形していることで、材料歩留まりが約 10~16%と非常に悪く、製作工数及び消費電力の面においても極めて効率の悪い工法となっている。そのため、材料の無駄ならびに製作コスト増大をカバーし競争力を保持するため、現在中国での生産を余儀なくされている。

本研究はモータのコア製作工法における材料歩留まりの大幅な向上及びコア部製作の大幅な省力化を最終的な目的としており、新しい巻きコア工法の研究・開発に関するものである。具体的には、電磁鋼板を小型プレスに打ち抜き、分割コアを曲げながら図 1 に示すような自動スパイラル積層を行うため、材料歩留まりは飛躍的に向上し作業工数及び消費電力の大幅な低減が可能となる工法を考察する。巻きコア工法は古くから知られている技術^{2)~6)}であるが、既存の巻きコア工法はコア組立精度等の問題により主にφ200mm程度の自動車用交流発電機等の製造にしか利用されておらず、大径モータへの適用は難しいという現状がある。

解決すべき問題点の一つとして、焼嵌めを行う際、規則的に存在する曲げ部スリットが存在するため、これらスリ

ットの間では積層時の接着点であるかしめ部によって力が伝達される。すなわち、多数のスリットの存在によって、作製された巻きコアの剛性が変化するため、それを焼嵌めにより固定するにはコアの見かけのヤング率を正確に求める必要がある。そこで、本研究ではスリットの個数やかしめ個数がコアの見かけのヤング率に及ぼす影響を調べる。そして最終的には、かしめ部の強度評価、コア組立精度・信頼性・特性の向上を実証し、経済的な大径モータ開発に発展させることを目的とする。

2. 解析方法

2.1 曲げ部スリットの影響

図 2 に本研究で対象となる焼嵌め後のコア部を示す。コア部は、ロータと呼ばれる回転子コアと、ステータと呼ばれる固定子コアで構成されていて、それぞれ焼嵌め後に異なる応力が作用する。ステータは外側のハウジングに焼嵌

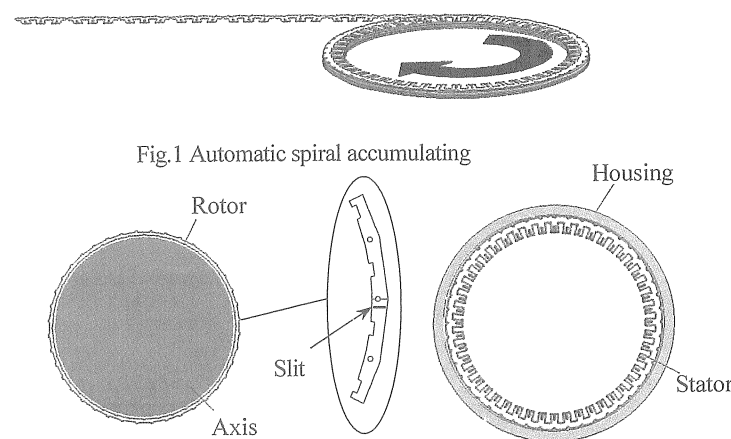


Fig.1 Automatic spiral accumulating

Fig.2 Shrink fit for rotor and stator

*2010年10月4日受理。

2010年9月30日自動車技術会秋季学術講演会において発表。

1)・2)・3)・4)九州工業大学(804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1)

めするため、円周方向には常に圧縮応力が作用する。よってスリットが及ぼす影響は殆どない。それに対し、ロータは内側の軸に焼嵌めするため、円周方向に引張応力が作用しスリットの影響を大きく受けることが考えられる。したがって、本研究では焼嵌め代を決定する際に必要な、ロータコアの見かけのヤング率を推定するために解析を行う。

2.2 三層周期モデルの境界条件

図3に実物コア形状モデルの一例を示す。実物形状コアモデルは、一層ごとにスリットの位置がずれる構造になっており、4層目と同じ位置にくるようになっている。この例では、それぞれの層において54°の周期性を有するので、ここでは、解析時間短縮のため54°のユニットセルモデルとして解析を行う。図4に境界条件を示す。ここで、例えば $\theta=90^\circ$ と $\theta=36^\circ$ での θ 一定面の境界条件は厳密には周期境界条件となる。また、一層目の上面と三層目の下面でのz方向の境界条件も同様に周期境界条件となる。 θ 方向の境界条件については、両端固定した場合と周期境界条件を与えた場合の解析を行い、両者の結果がほとんど一致することを確認している¹⁾。よって、本解析では、計算時間の節約のため θ 方向変位、z方向変位を固定し、半径方向に一定変位 ΔR を与えて解析を行う。モデルの全体図及びかしめ部付近のFEMメッシュの例を図5に示す。本研究で扱う解析モデルは六面体一次要素であり、要素分割は、要素数44312、接点数57116である。図5に示すように各層はかしめによって接合されており、特にスリットの近傍ではかしめによって力が伝達される。

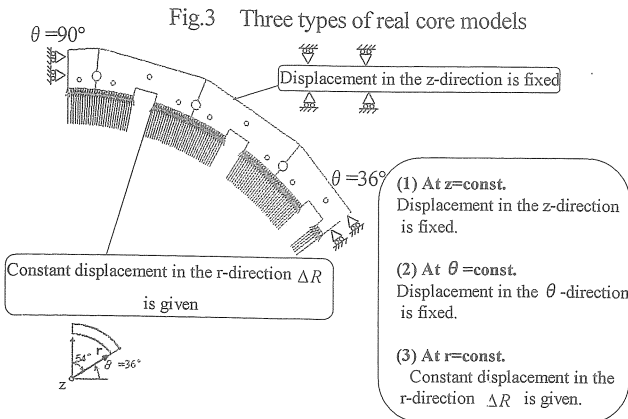
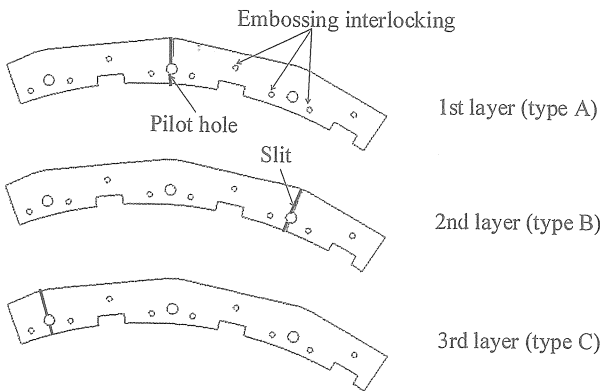


Fig.4 Boundary conditions

2.3 コアの見かけのヤング率E*の定義

見かけのヤング率E*は全体モデルの θ 方向の応力とひずみを比較した値である。正確には図6に示すように、 $\sigma_{\theta ave}$ はモデル各層(図6(a))の内側端面応力の平均値 $\sigma_{\theta ave} = (\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta 3})/3$ (図6(b)参照)である。 σ_{rave} はコアの内面にかかる平均応力である。 σ_{zave} は積層面にかかる軸方向応力の平均値(図6(b))である。 ϵ_θ は θ 方向のひずみであり、式(1)を用いて求める。 R はコア内側の半径であり、 ΔR は半径方向の一定変位である。積層方向の固定による影響を除去するために、式(2)を用いて見かけのヤング率E*を求める。焼嵌めに用いるため、 σ_{rave} 、 $\sigma_{\theta ave}$ 、 ϵ_θ はコア内側の値を使用する。

$$\epsilon_\theta = \frac{2\pi(R + \Delta R) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{\Delta R}{R} \quad (1)$$

$$E^* = \frac{\sigma_{\theta ave} - \nu(\sigma_{zave} + \sigma_{rave})}{\epsilon_\theta} \quad (2)$$

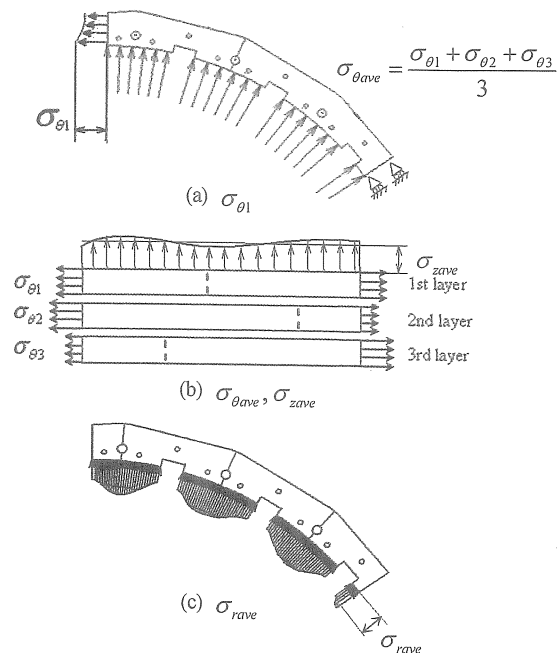
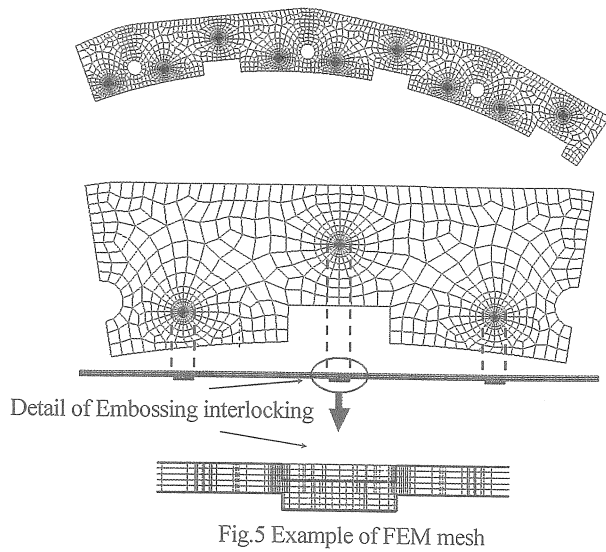


Fig.6 Definition of $\sigma_{\theta ave}$, σ_{zave} , σ_{rave}

3. 実際コア形状の解析

3.1 ヤング率に及ぼすスリット間のかしめ個数の影響

ここでは、周期モデルのかしめ個数を変化させたときのヤング率の変化を調べる。54° 周期モデルでのスリット間のかしめ個数 n_s を 3, 2, 1 個と変化させたときの、見かけのヤング率を図 7 の解析モデルを用いて解析した。解析の結果は表 1 に示す。かしめ個数を 3 個から 2 個に減らした際は 1.6% と変化しなかったが、2 個から 1 個に減少させると 22.6% の低下がみられた。実際のコア形状においてスリット間のかしめ個数 $n_s=1, 2$ 程度の範囲では見かけのヤング率に与える影響は小さい。

4. 単純化コア形状の解析

実際のコア形状は図 3 のように複雑であり、図 8(a) のようにらせん状に積層されることが多い。このモデル形状を用い

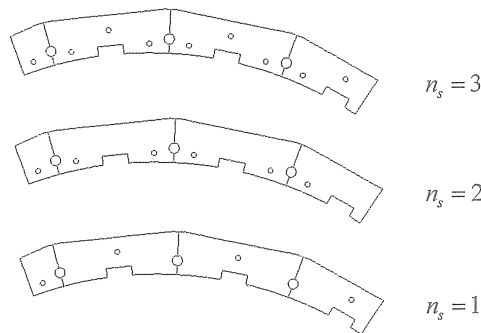
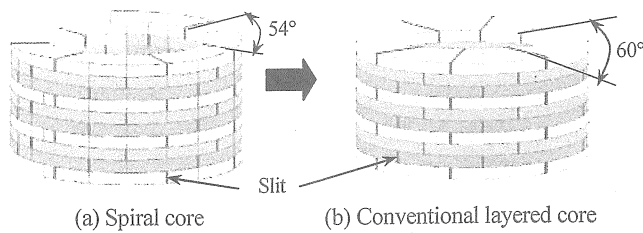


Fig.7 Three kinds of models analyzed



(a) Spiral core (b) Conventional layered core
Fig.8 Diagrammatic illustration of rotor core

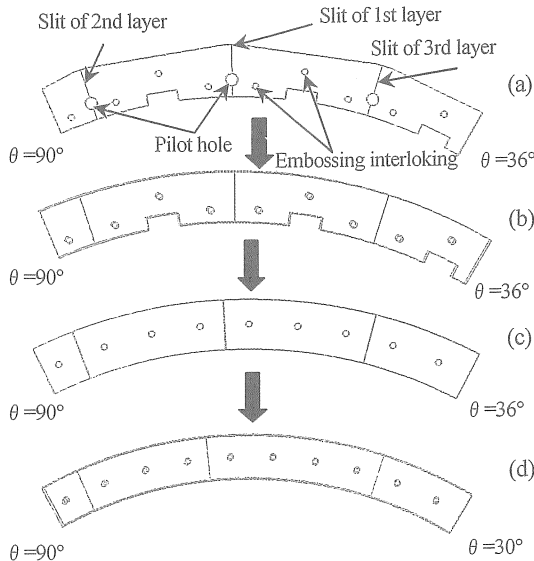


Fig.9 Real core A and simple core D

て幾何学的条件を変化させる際、一周あたりのスリット数も同時に変化する。そこで、図 8(b) のように各層ごとに分かれたモデルによって近似し幾何学的条件を変化させてこの影響を調べる。なお、今回考察したモデルは 1 層の厚さが 0.5mm と極く薄いのが図 8 ではわかりやすくするため軸方向に拡大して描写している。

4.1 実際のコア形状と単純化コア形状の違い

実物形状モデルでは、スリット間のかしめ個数や周期性等の条件を変更した際にかしめの位置、モデル形状が解析結果に影響を及ぼすと考えられる。そのため、図 9(a), (b), (c), (d) のようにコア形状を簡略化する。このモデルを用いてスリット間のかしめ個数、スリットの周期性のヤング率への影響を調べる。なお、解析における境界条件、解析法については実物コア形状と同じである。単純化コアと実物コアでは、外形、パイロットホールやノッチの有無等、形状が大きく異なるため徐々に形状を簡略化しそれぞれの見かけのヤング率への影響を調べる。解析結果は表 2 に示す。表 2 より、モデル A の実物コアの見かけのヤング率は、モデル C の単純化コアの見かけヤング率より、16% 低下していることがわかる。

4.2 単純二層モデルについて

まず、図 8 で最も単純な第一層と第二層のみからなる単純二層モデルを考察する。今回解析するモデルにおいて第一層と第二層とのスリット間に設けるかしめの個数を n_s 、一周あたりに設けるスリット数を N_s と定義する。図 10 のように一層目と二層目の間には位相差を与えて、積層したモデルを作成する。

4.3 二層モデルと多層モデルの違いについて

実際のコアは何層にも積層されているが、解析時間の短縮のために図 11(a) のように周期性を考慮したユニットセルを取り出して解析する。そして、積層数を徐々に増やしていくことにより積層数の影響を調べる。具体的には二層周期モデルにおいて 2, 3, 4 層と層数を変化させて解析する。そのモデルを図 11(b), (c), (d) に、解析結果を表 3 に示す。表 3 に示すように層数の増加に伴って若干のヤング率の低下が見られたものの急激な変化は見られなかった。

Table 1 Effect of total number of embossing interlocking n_s on E^*

Number of Embossing interlocking n_s	Effective Young's modulus E^* [GPa]
$n_s=3$	120
$n_s=2$	118
$n_s=1$	92.9

Table 2 Effective Young's modulus E^* to three layers core

Model	Effective Young's modulus [GPa]
Real core A	120
Simple core B	136
Simple core C	143
Simple core D	156

4.4 二層モデルにおけるスリット間かしめ個数の影響

スリット間に配置するかしめ個数の影響を調べるために図10のようなモデルを作成し解析する。今回二層モデルを使用し、一層目と二層目のスリットの間に設けるかしめの個数を

Table 3 Effect of number of layers on E^*

Number of Layers (type of layers)	Effective Young's modulus E^* [GPa]
2 (AB)	139
3 (ABA)	136
4 (ABAB)	135

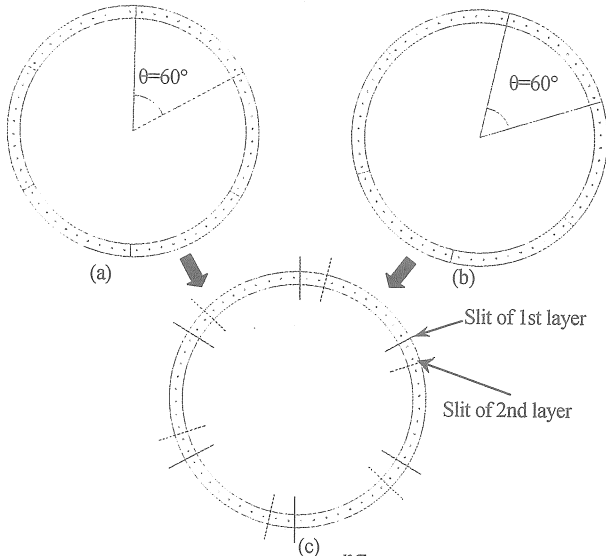


Fig.10(a) First layer with slits at $\theta = \frac{n\pi}{3}$ ($n=0,1,2,3,4,5$)
 (b) Second layer with slits at $\theta = \frac{(5n+1)\pi}{15}$ ($n=0,1,2,3,4,5$)
 (c) Two layers are fixed at embossing interlocking

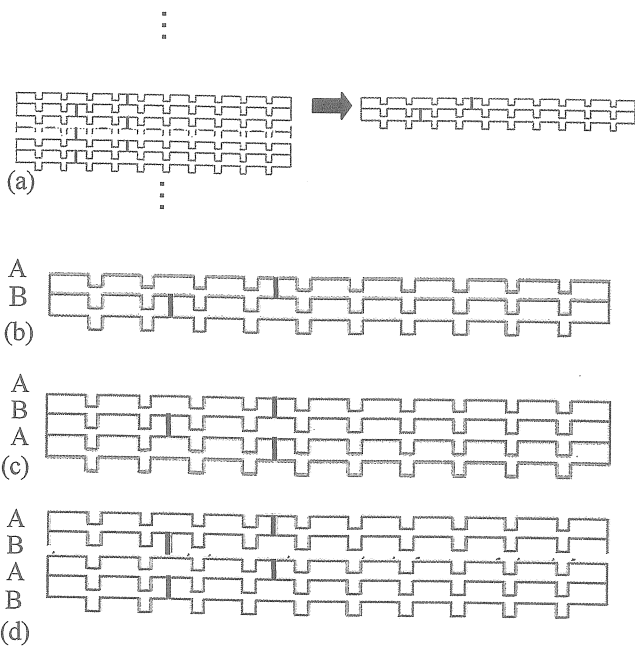


Fig.11 Effect of number of layers on E^*

(a) Modeling of core accumulated, (b) Two layers model,
 (c) Three layers model, (d) Four layers model

n_s とする。また、一周に設置するスリット数を N_s と定義する。 $n_s=1\sim 5$, $N_s=6$ とした際のモデルを作成し解析する。図12に $n_s=2, 4$ のモデルを示す。解析結果、かしめ個数 n_s の影響を表4, 図13に示す。二層モデルではスリット間のかしめ個数を4個から3個に減らした際は0.7%と変化しなかったが、3個から2個に減少させると4.0%の低下がみられた。前章に述べたように、実際のコア形状においても $n_s=2$ 以上でヤング率はほとんど同じとなった。二層モデルでは n_s の影響がやや大となる傾向が認められる。

4.5 スリット個数の違いについて

二層モデルを用いて一周辺りのスリット数のヤング率に与える影響を調べる。今回スリット間かしめ個数を $n_s=2$ と固定し、一周あたりのスリット数 $N_s=1, 2, 3, 6, 12$ としたモデルを作成し解析する。コア直径 D , 厚さ t の変化による影響もあわせて検証する。図14に解析モデルの一例を、図15, 表5に解析結果を示す。図15に示すように、スリットの個数の増加とともに、見かけのヤング率も低下する。

5. 見かけのヤング率の複合則による検討

5.1 複合則を用いた見かけのヤング率の算出

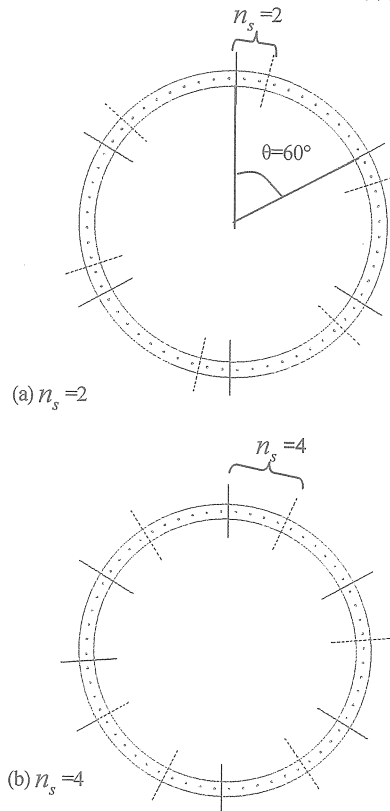


Fig.12 Effect of n_s on E^* (a) $n_s=2$ (b) $n_s=4$

Table 4 Effect of n_s on E^*

Number of embossing interlocking n_s	Effective Young's modulus E^* [GPa]
$n_s=1$	122.5
$n_s=2$	138.3
$n_s=3$	144.0
$n_s=4$	145.0
$n_s=5$	144.0

図16にスパイラルコアを2層周期モデルでモデル化した例を示す。第1層に対して第2層はかしめ2個分の位相差を有する。図16の例では各層に6つのスリットを有する。図16(d)および図17に周期性を考慮して取り出した中心角60°のユニットセルモデルを示す。図17は2層構造とかしめスリット位置が明確となるように厚さ方向に示した図である。ここで図17(b)に示すスリット近傍の剛性が低下する部分(図17の(a)の破線部: block2)は、スリットがあるため実質的には1層と同じ剛性とみなすことができる($E_2=E_0/2$)。このように考えて図17(c)にスリット周辺を1層と近似したモデルを示す。表6に3次元FEM解析によって得られたみかけのヤング率(FEM)を示す。また表6には複合則(Rule of mixture)から求

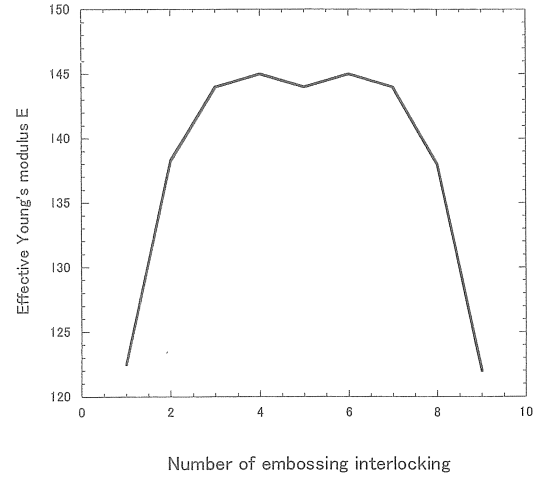


Fig.13 Effect of young's modulus of two layers' core

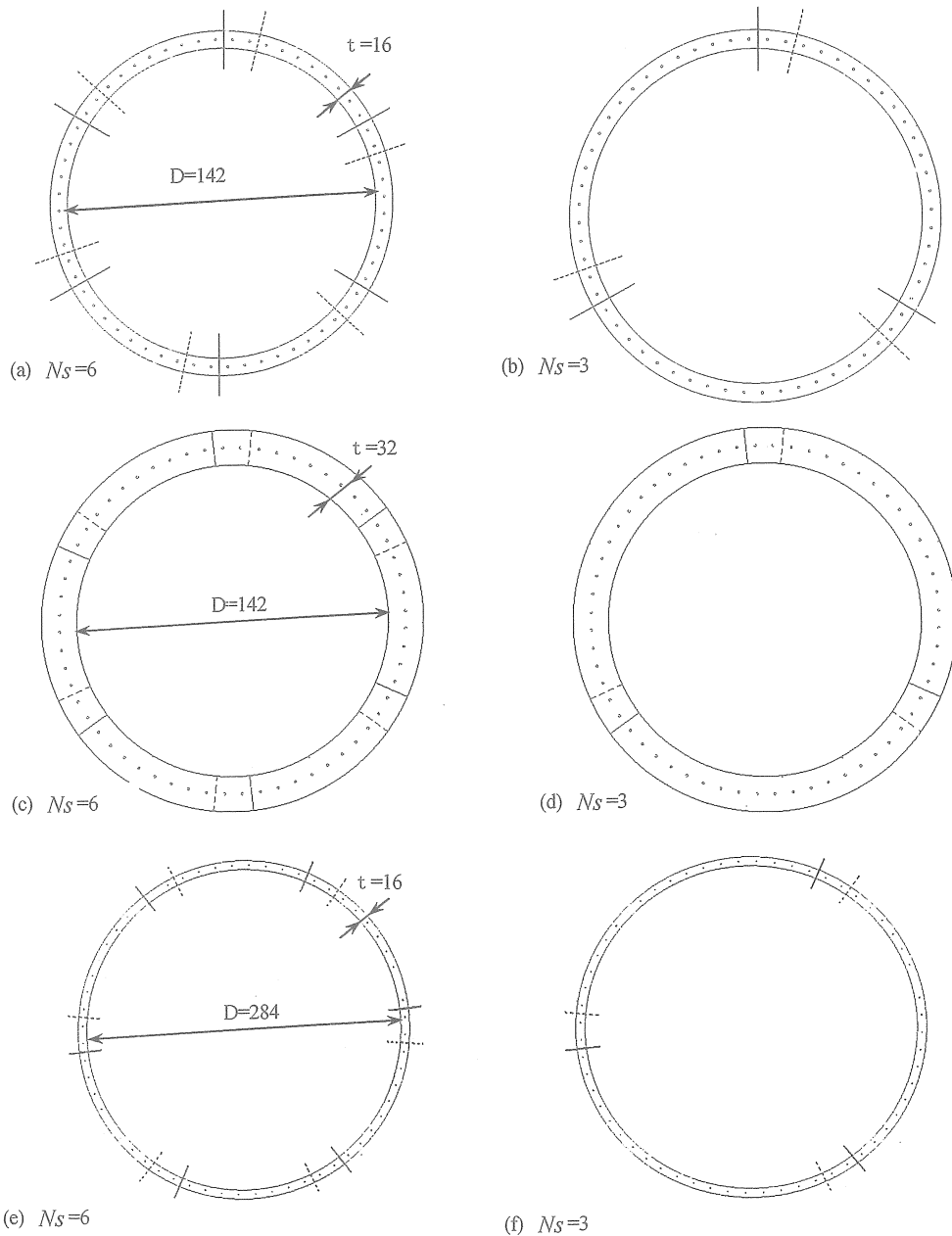


Fig.14 Effect of number of slits N_s in each layer on E^*

(a) $N_s=6$, (b) $N_s=3$, (c) $N_s=6$, (d) $N_s=3$, (e) $N_s=6$, (f) $N_s=3$

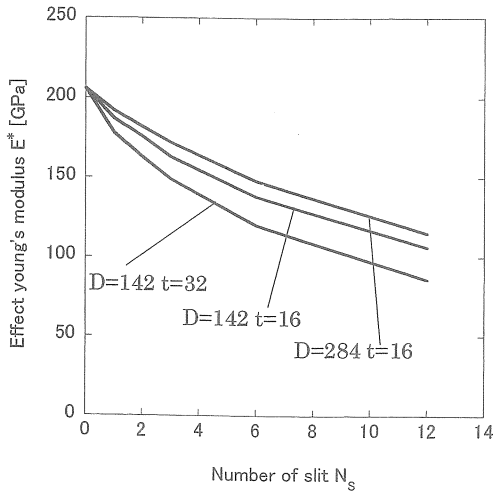


Fig.15 Effect of number of slit N_s on E^*

Table 5 Effect of number of slit N_s on E^*

(N_s : Effect of number of slit of one layer)

N_s	Effective Young's modulus E^* [GPa]		
	D=142[mm] t=16[mm]	D=142[mm] t=32[mm]	D=284 [mm] t=16[mm]
12	106	85.6	115
6	138	120	148
3	163	149	172
2	176	163	182
1	187	178	192

Table 6 Effect of number of slit N_s on E^*

(N_s : Effect of number of slit of one layer)

N_s	Effective Young's modulus E^* [GPa]					
	D=142[mm] t=32 [mm]		D=142[mm] t=16 [mm]		D=284[mm] t=16 [mm]	
	FEM	ROM	FEM	ROM	FEM	ROM
12	85.6	90.4	106	113	115	128
6	120	126	138	146	148	158
3	149	157	163	171	172	179
2	163	170	176	181	182	187
1	178	186	187	193	192	196

Table 7 Effective Young's modulus E^* of block2 in Fig.17

($E^*_{ROM} = 103GPa$)

N_s	Effective Young's modulus E^* [GPa]		
	D=142[mm] t=16[mm]	D=142[mm] t=32[mm]	D=284 [mm] t=16[mm]
12	95.8	97.0	92.1
6	95.1	96.1	94.0
3	93.6	92.7	93.8
2	94.3	91.3	93.8
1	84.2	85.6	93.7

めた結果(ROM)も比較のため示す。解析(FEM)と複合則(ROM)の値を比較した結果、複合則による見かけのヤング率の近似は解析した範囲で誤差 11%以内の精度がある。

表7はblock2の見かけのヤング率をFEMで解析した結果である。表7に示すように複合則による近似は $E_2 \approx E_0/2=103$ GPaであるが、FEM解析では最大誤差が18%生じる場合があることがわかった。

5.2 実際のモータコアの見かけのヤング率の推定

ここでは、実際のコアと同じ3層周期モデルを考察した。モデルのユニットセルを軸方向、ならびに厚さ方向から見た図をそれぞれ図18、図19に示す。図19に示すFEM解析の結果より、簡略化したモデルの解析値 $E_{B,ROM}=143$ GPaに対し実際のモデルの剛性は $E_{A,FEM}=120$ GPaと約16%低下している。

見かけのヤング率を簡便に評価するため図18のようにサン

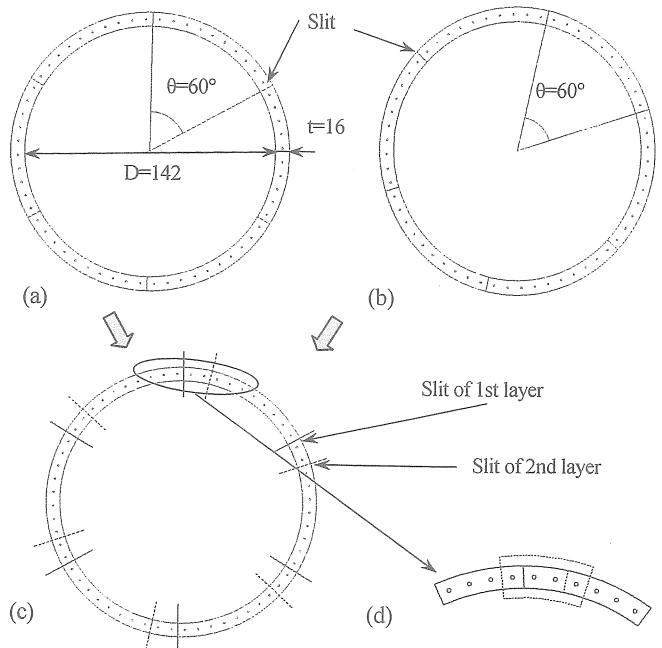


Fig.16 Two layer's model of spiral core

- (a) First layer with slits at $\theta = \frac{n\pi}{3}$. $n=0,1,2,3,4,5$
- (b) Second layer with slits at $\theta = \frac{(5n+1)\pi}{15}$. $n=0,1,2,3,4,5$
- (c) Two layers are fixed at embossing interlockings
- (d) Unit cell

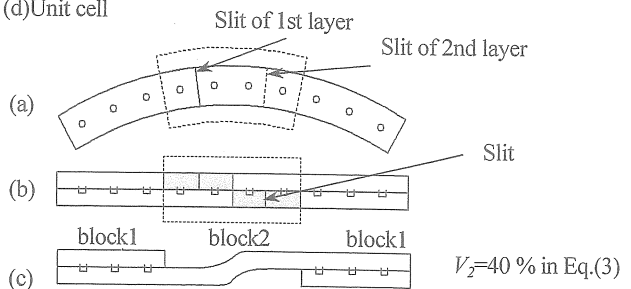


Fig.17 Unit cell of two layer's model

- (a) Two layers model, (b) Positions of slits,
- (c) Approximation method

ブナンの原理によりスリットから板幅長さの2倍分だけ力を分担していないものとし、2層と3層の直列モデルとして近似する。すなわち、2層と近似した部分のヤング率を、電磁鋼板の $E_0=206\text{GPa}$ の $2/3$ として複合則を用いて計算すると $E_{BRCM}=152\text{GPa}$ となる。図19の結果より、実際の形状ではそれより16%低下させると $E_{ARCM}=152\text{GPa}\times 0.84=127\text{GPa}$ となる。有限要素法で求めた $E_{AFEM}=120\text{GPa}$ の結果と誤差6%程度で一致する。

$$E^* = \frac{E_2 E_0}{E_0 V_2 + (1 - V_2) E_2} \quad (3)$$

E^* : 全体のヤング率, E_0 : block1 のヤング率

E_2 : block2 のヤング率, V_2 : block2 の体積含有率

6. 結 言

現在の大型モータのコア製作工法は、電磁鋼板の一枚板を超大型プレスにより打ち抜いて製作している。そのため、材料歩留まりは極めて低く16%である。それに比べてスパイラル積層方式では材料歩留まりが50%以上と改善されている。本研究では、新工法により製作されたコアをロータに固定する際に必要となる見かけのヤング率を有限要素法解析によって考察することを目的として行った。結論をまとめると以下ようになる。

(1) 見かけのヤング率を簡便に評価するためサンプナンの原理によりスリットから板幅長さの2倍分だけ力を分担していないものとし、2層と3層の直列モデルとして近似する複合則の簡便近似法を提案した。その結果、有限要素法で求めた $E_{AFEM}=120\text{GPa}$ の結果と誤差6%程度で一致することを示した(図18, 19)。

(2) 二層モデルを用いて一周辺りのスリット数のヤング率に与える影響を調べた結果、一周あたりのスリット数が増えるとヤング率は低下することを明らかにした。なお、低下の割合はコア直径とコア厚さによって異なる(表5)。

(3) 実際コア形状モデルと単純コア形状モデルでスリット間のかしめ個数を変化させて解析した結果、かしめ個数 $n_s=3$ 以上では、見かけのヤング率に影響を与えないことを示した(表1, 4)。

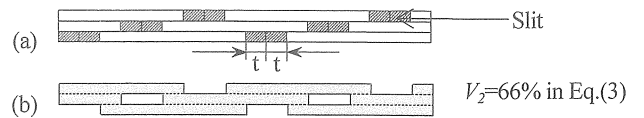


Fig.18 (a) Positions of slits in simple core B, (b) Approximation method

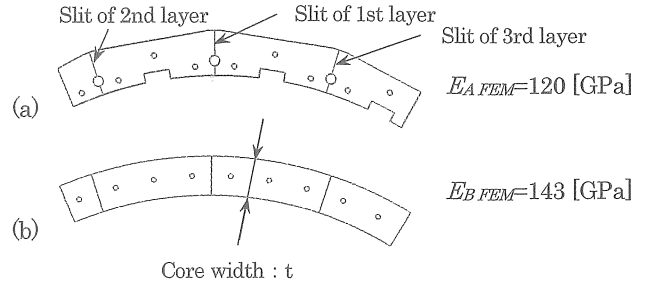


Fig.19 Difference between real core A and simple core B
(a) Real core model A, (b) Simple core model B

参 考 文 献

- (1) 開道 力: 方向性電磁鋼板を用いた螺旋コア, 電気学会論文誌, Vol.116-D, No. 3, p.265-270 (1996)
- (2) Abb research ltd.: Method of forming motor, Japan patent, 2004-505595
- (3) Kumai, S., and Yaskawa electric corp.: Winding accumulating core of motor, Japan patent, s51-40506
- (4) Kikuchi, Y., Fukuda, Y., Maeyama, K., and Fujitsu general ltd.: "Motor", Japan patent, 2005-160170
- (5) Sakanishi, S., Asai, T., Koyama, M., and Kuroda precision ind. ltd., Mitsuba electric mfg. co. ltd.: Method and device for manufacturing winding stator core, Japan patent, h2-106151
- (6) Mizutani, K., and Toshiba corp.: Manufacture of annular core, Japan patent, h1-264548
- (7) Noda, N., Nisitani, H., Takase, Y., Wada, T.: Effective Young's Modulus of a Composite Including Two Groups of Periodically Arranged Inclusions, Materials Science Research International, Vol. 8, No.1, p.14-19 (2002)