

## 論文

# 回転子流入磁束の円周方向分布を考慮した パラメトリックモータの固定子のRNAモデル

田島克文\*・松田裕士\*\*・谷口敏幸\*

## A RNA Model for Stator of a Parametric Motor Considering the Magnetic Flux Distribution Flow into the Rotor

Katsubumi Tajima\*, Hironori Matsuda\*\*, and Toshiyuki Taniguchi\*

### Abstract

In the past work, we created a RNA (Reluctance Network Analysis) model of a stator of a parametric induction motor. But this model was not enough to analyze the motor with rotor, because the model neglected the distribution of magnetic fluxes flowing into the rotor in the direction of circumference of the rotor. In this paper, we present a new RNA model of the stator of the motor considering the flux distribution. The calculated results show a similar tendency of the experimental ones but the accuracy of the calculation is decreased compared with the one based on the former model. So, we investigate the cause for the error.

### 1. はじめに

パラメトリック誘導電動機は固定子磁心の磁気飽和に基づくパラメトリック発振現象を利用して回転磁界を得る。このため、固定子スロットが不要となり、原理的に固定子一回転子間の磁界リップルがなく、低騒音かつ構造も簡単となるなどの特長を有し、その実用化が期待されている<sup>(1)</sup>。

しかしその一方で、固定子磁心を局所的に磁気飽和させて使用するため、その磁束分布は複雑となり、通常の磁気素子の解析に用いられる有限要素法などの磁界解析法の適用は困難となる。このため、本電動機の最適設計法は未だ確立されておらず、実用上の問題点となっていた<sup>(2), (3)</sup>。

これに対し先に筆者らは、直交磁路形パラメトリック誘導電動機<sup>(1)</sup>の固定子磁心が直交磁心と呼ばれる非線形磁気素子と同様な磁心構成を有することに着目し、直交磁心の解析に実績のあるRNA法<sup>(4)</sup>をパラメトリックモータの解析に適用するものとした。先ずは回転子を除いた固定子だけの解析に適用したところ、良好な結果を得ることができた<sup>(5), (6)</sup>。

磁気回路網解析法のひとつであるRNA法は、ソ  
2002年7月26日受理

\*秋田大学工学資源学部電気電子工学科。Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University.

\*\*日本特殊陶業株式会社。NGK Spark Plug, Co., Ltd. (電気電子工学科・2001。Department of Electrical and Electronic Engineering)。

ルバー部分にSPICE等の市販の回路シミュレーションプログラムを使用できるため、計算は簡便、高速かつ比較的高精度であるほか、固定子磁心の磁気回路と外部電気回路を回路的に結合することで回路—磁界連成解析を簡単に行えるなど、他の解析法にない優れた特長を有する。

しかし、文献(5)、(6)の解析ではモデル作成の過程で回転子流入磁束の円周方向の分布を無視せざるを得ず、回転子駆動時の解析に適用する場合、回転子の運動を正確には表現できない可能性がある。

以上より本論文では、回転子流入磁束の円周方向磁束分布を考慮した固定子のRNAモデルについて検討し、その妥当性について検証を行った。

### 2. パラメトリックモータの原理と基本構成

直交磁路形パラメトリックモータの基本構成をFig. 1に示す。本電動機の固定子は、環状磁心Bを介して同一形状のカットコア2台 $A_1$ 、 $A_2$ を空間的に90度転移接続して構成されている。Dは回転子であり、通常かご形回転子を使用する。 $N_1$ 、 $N_2$ はそれぞれ励磁側巻線、共振側巻線を示し、Cはパラメトリック発振のための同調用コンデンサである。同図(b)は励磁側および共振側磁束 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ の流れを示すものであり、環状磁心Bが励磁側および共振側磁気回路の共通磁路となっていることが了解される。

本電動機では $A_1$ 、 $A_2$ の断面積に比較し、Bの円周

方向断面積が小となる構成であるため、巻線  $N_1$  に印加される交流電圧  $e_1$  により、励磁側と共振側の共通磁路である  $B$  が周期的に磁気飽和し、これに伴い巻線  $N_2$  のインダクタンスも周期的に変化する。したがって、同調用コンデンサを適当な値にすれば共振側回路でパラメトリック発振が生じ、 $e_1$  と同周波数で位相差がほぼ 90 度の交流電圧  $e_2$  が巻線  $N_2$  に誘起される。これにより、共通磁路一回転子間に回転磁界が形成され、回転子が駆動されることになる<sup>(1)</sup>。

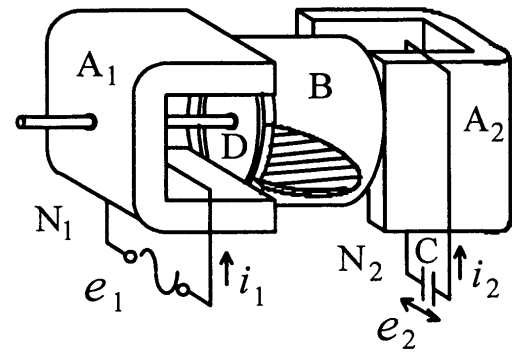
本電動機はこのように単相駆動ではあるが、パラメトリック発振により生じる共振側電圧と電源電圧により回転子が駆動するため、動作原理上、二相誘導電動機として動作する<sup>(1)</sup>。

本電動機の固定子磁心は、その形状より三次元的な磁束分布を有し、また磁心が磁気飽和領域で動作するため、その動作解析は容易でない。このため、先に筆者らは固定子磁心と磁心形状が似た磁気デバイスである直交磁心の解析に実績のある RNA 法を固定子磁心の解析に適用するものとした<sup>(5),(6)</sup>。

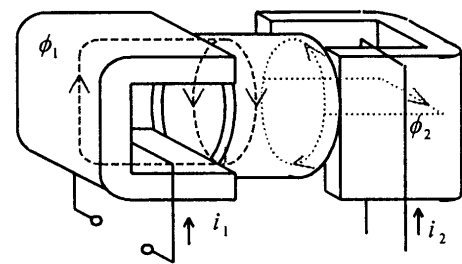
### 3. RNA 法における解析モデルの導出

ここでは、直交磁路形パラメトリックモータの固定子磁心の RNA モデル導出過程について述べる。Fig. 2 に固定子磁心の寸法を示す。まず、Fig. 3 のように固定子磁心を磁心外空間も含め、いくつかの直方体要素に分割する。磁心外空間を含むのは本電動機の動作が磁気飽和に伴う漏れ磁束を無視できないことによる。また、計算の高速化のため、分割時には分割要素数が最小となるように配慮する。各分割要素は Fig. 4 に示すような三次元的な磁束の流れに対応する単位磁気回路で表し、各磁路は隣接する分割要素の磁路と結合されて、解析対象全体の磁気回路網モデル (RNA モデル) が構築される<sup>(5),(6)</sup>。

ここで、単位磁気回路における磁気抵抗  $R$  及びインダクタンス  $R'$  は磁心材質の磁気飽和特性と鉄損を表現するものであり、その特性は磁心材質の磁気特性と分割要素の寸法より与えられる。すなわち、磁心材質の非線形磁気特性を磁気飽和および磁気ヒステリシスを考慮して式(1)で近似する<sup>(4)</sup>。右辺第 1, 2 項と各分割要素の寸法より得られる磁路長  $l$ 、断面積  $S$  から非線形磁気抵抗  $R$  の特性は式(2)で与えられ<sup>(4)</sup>、同様に磁気インダクタンス  $R'$  の特性は右辺第 3, 4 項と磁路長、断面積から式(3)で与えられる<sup>(4)</sup>。



(a) Basic structure



(b) Fluxes flow

Fig. 1 Schematics of the orthogonal-core type parametric induction motor.

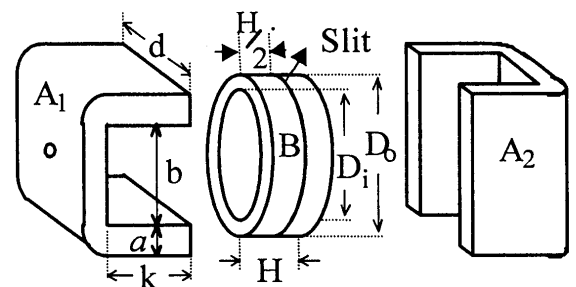


Fig. 2 Dimensions of the stator core.

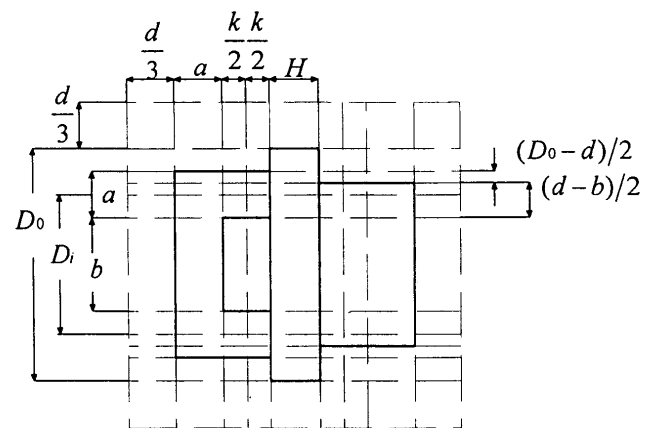


Fig. 3 Division of the stator core.

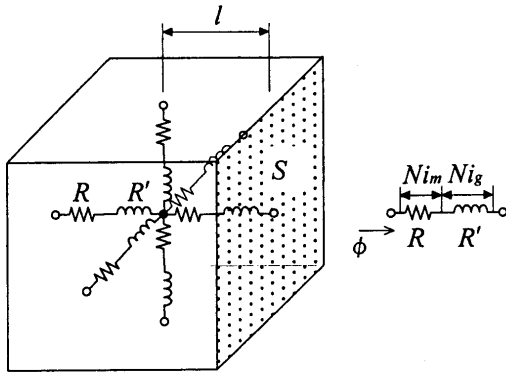


Fig. 4 Basic magnetic circuit.

$$H = \alpha_1 B + \alpha_2 B^m + \beta_1 \frac{dB}{dt} + \beta_n \left( \frac{dB}{dt} \right)^n \quad (1)$$

( $m, n$  : 3 以上の奇数)

$$Ni_m = l \cdot \left\{ \alpha_1 \frac{\phi}{S} + \alpha_m \left( \frac{\phi}{S} \right)^m \right\} \quad (2)$$

$$Ni_g = l \cdot \left\{ \beta_1 \frac{1}{S} \frac{d\phi}{dt} + \beta_n \left( \frac{1}{S} \frac{d\phi}{dt} \right)^n \right\} \quad (3)$$

磁心外空間の分割要素は線形の磁気抵抗を用い、その値は真空の透磁率  $\mu_0$  を用いて

$$R = l / (\mu_0 S) \quad (4)$$

により決定している。

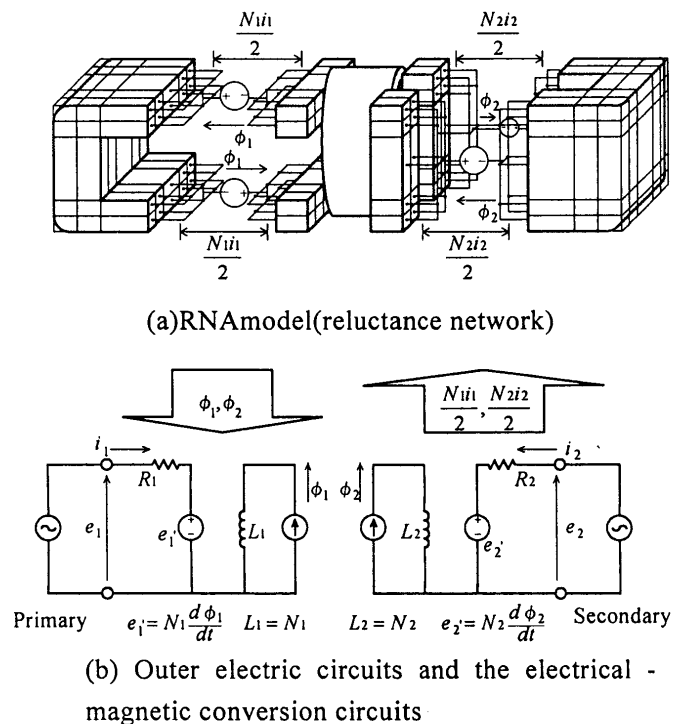
以上より得られる RNA モデルを用いれば、外部電気回路を含めたパラメトリックモータの固定子の解析が可能となる。実際の解析に用いた回路を Fig. 5 に示す。同図(a)は固定子の RNA モデル、同図(b)は励磁および共振側外部電気回路と電気-磁気結合回路を示す。巻線電流による起磁力は同図(a)に示すように空間的な分布は無視し、カットコアの脚部を 2 分した中央に配置するものとする。同図(b)の電気回路は励磁および共振側巻線の励磁回路であり、 $R_1$ 、 $R_2$  は巻線抵抗を示す。この回路において励磁および共振側巻線電流  $i_1$ 、 $i_2$  を計算すれば磁気回路中の起磁力が得られる。これより励磁および共振側磁束  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  を求めて図(b)中に与えれば、インダクタンス  $L_1$  ( $=N_1$ )、 $L_2$  ( $=N_2$ ) の両端の電圧として磁心励磁電圧  $e_1'$ 、 $e_2'$  が求められる。これを外部電気回路に与え、電気回路と磁気回路を同時に解析すれば、外部電気回路と磁心の磁界-回路連成解析が可能である。市販の回路シミュレーションプログラムを用いれば、

電源にインバータ等を用いた複雑な解析も簡単に行うことができる<sup>(5),(6)</sup>。

いま、Fig. 5(b)のように励磁および共振側巻線を同相同周波数の正弦波電圧で交流励磁すれば、励磁側磁束振幅  $\phi_1$  をパラメータとした、共振側磁化特性（起磁力の最大値  $N_2 i_{2max}$  と共振側磁束振幅  $\phi_2$  との関係）を算定できる。この磁化特性は固定子の特性を代表するものであり、パラメトリックモータの特性を大略決定するものである<sup>(2),(3)</sup>。

解析に用いたモータの固定子の仕様を Table 1、磁心材質の磁気特性のパラメータを Table 2、Table 3 に示す。使用した磁心材質は方向性ケイ素鋼板であるため、圧延方向と圧延と直角方向では異なる特性を与えている。Fig. 6 に解析で用いた圧延方向の  $B-H$  特性および鉄損特性を実験値と比較して示す。各パラメータの値は実験値を近似して与えたものである<sup>(5),(6)</sup>。

Fig. 7 に磁化特性の計算結果を実験値と比較して示す。図において実線が実験値を、破線が計算値を示す。これより、励磁側磁束の増大により共振側巻線インダクタンスが低下しており、固定子磁心が一種の可変インダクタンスとして動作することが了解される。また、計算値は実験値と差異はあるものの良好な算定精度が得られていることがわかる<sup>(5),(6)</sup>。



(a)RNAmodel(reluctance network)

(b) Outer electric circuits and the electrical - magnetic conversion circuits

Fig. 5 Circuit for the analysis.

Table 1 Dimensions of the motor.

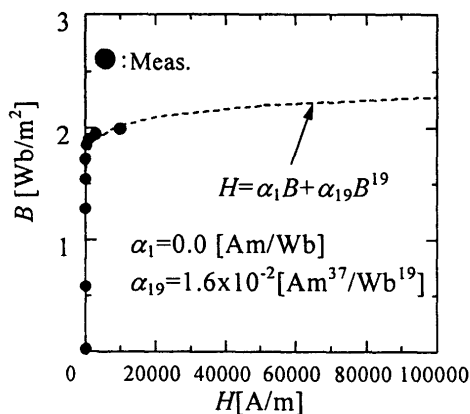
Core	Dimensions[mm]	$a=24.8, b=40.4, k=25.6, d=85.0$
A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>	Material	Grain oriented silicon steel strip with thickness of 0.18mm
Core	Dimensions[mm]	$D_o=100.4, D_i=70.0, H=28.8$
B	Material	Grain oriented silicon steel strip with thickness of 0.18mm
Windings [turns]		$N_1=200, N_2=200$
Winding resistances [Ω]		Primary:0.676, Secondary:0.676

Table 2 Parameter  $\alpha_1, \alpha_m$ .

Rolling direction	$\alpha_1$ [Am/Wb]	0
	$\alpha_{19}$ [Am <sup>37</sup> /Wb <sup>19</sup> ]	$1.6 \times 10^{-2}$
Perpendicular direction	$\alpha_1$ [Am/Wb]	$2.99 \times 10^2$
	$\alpha_{11}$ [Am <sup>37</sup> /Wb <sup>19</sup> ]	$3.75 \times 10$

Table 3 Parameter  $\beta_1, \beta_n$ .

Rolling direction	$\beta_1$ [Ams/Wb]	$3.0 \times 10^{-2}$
	$\beta_7$ [Am <sup>13</sup> s <sup>7</sup> /Wb <sup>7</sup> ]	$8.34 \times 10^{-19}$
Perpendicular direction	$\beta_1$ [Ams/Wb]	$2.8 \times 10^{-1}$
	$\beta_7$ [Am <sup>13</sup> s <sup>7</sup> /Wb <sup>7</sup> ]	$1.0 \times 10^{-21}$



(a) B-H characteristics

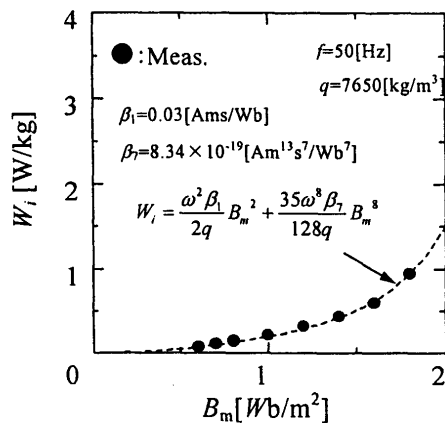
(b)  $W_i$ - $B_m$  characteristics

Fig.6 Magnetic properties of the core material (Rolling direction).

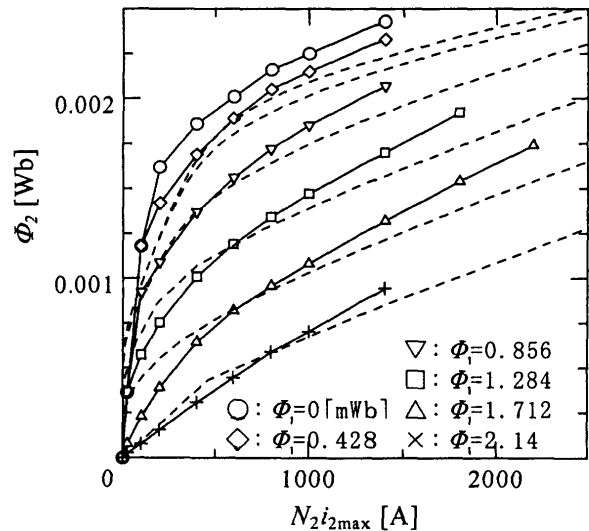


Fig. 7 Calculated results of the Flux-MMF relationships

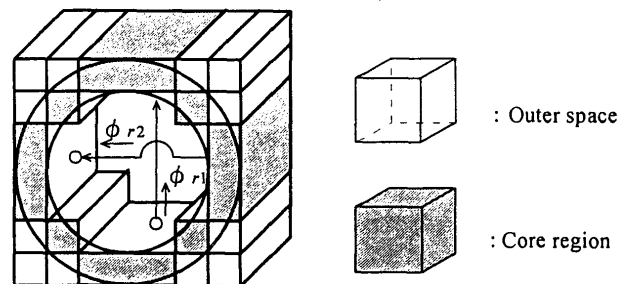


Fig. 8 RNA model for the ring core.

しかしながら、このモデリング過程では解析対象を直方体の集合として表現したため、本来はリング状である環状磁心もまた、他の分割要素との接合を考慮し、Fig. 8 に示す直方体の集合体に近似して解析モデルを導出していた。このモデルでは、環状磁心から回転子へ流入する磁束を、図中の $\phi_1$ 、 $\phi_2$ のように直交する2方向から集中して流入するものとして表現せざるを得ない<sup>(5),(6)</sup>。しかし、実際には環状磁心から回転子へ流入する磁束は2方向のみではなく、環状磁心全体から円周方向に分布して流入する。パラメトリックモータは励磁、共振側磁束の共通磁路である環状磁心に発生する回転磁界により回転子が駆動される。よって回転子を含めた解析を考えた場合、このモデルでは、回転子の運動を正確に表現できない可能性がある。

次章において回転子流入磁束の円周方向分布の表現が可能となるような環状磁心のRNAモデルについて検討を行う。

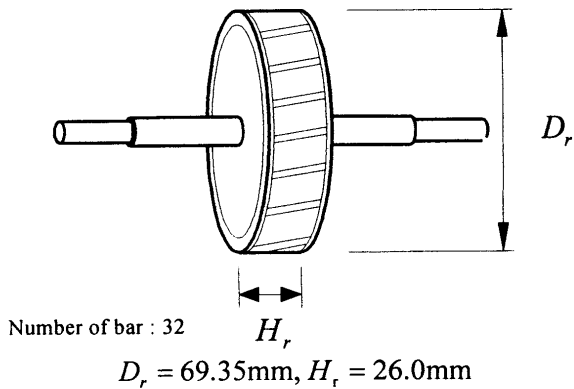


Fig.9 Structure of the squirrel cage rotor.

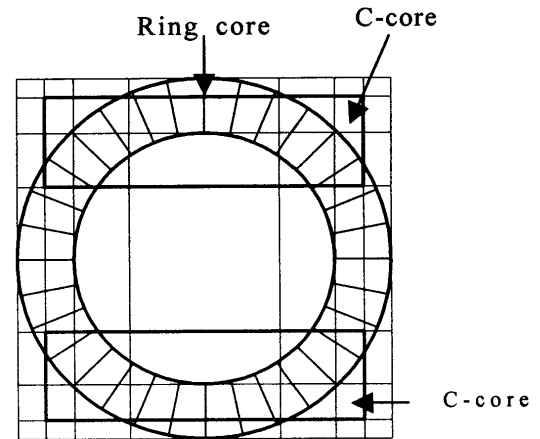


Fig. 12 Junctions of the C-core and the ring core.

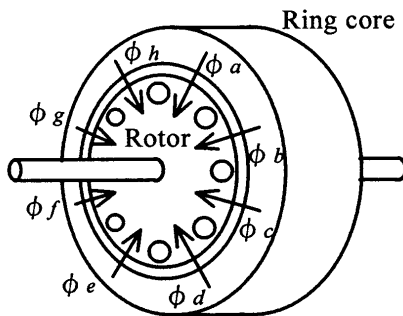
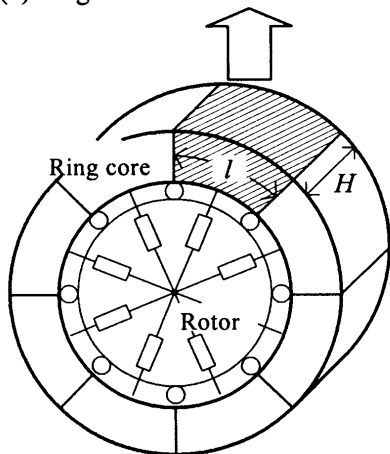
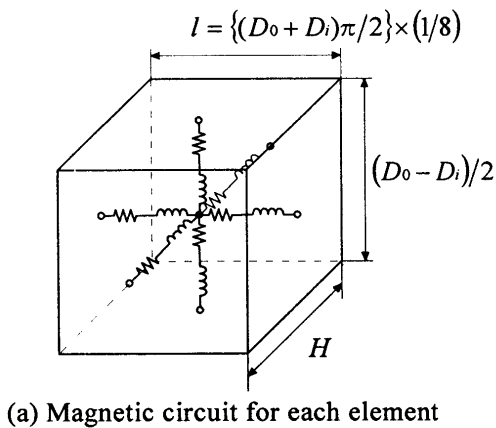


Fig.10 Fluxes flowing into the rotor from the ring core.



(b) Division of the ring core suitable for the analytical model of the rotor

Fig.11 Division of the ring core.

#### 4. 円周方向磁束分布を考慮した環状磁心の解析モデル

Fig. 9 に本モータに用いられたかご形回転子を示す。回転子の RNA モデルとしては、固定子から回転子に流入する磁束とそれにより回転子の導体棒に誘導される電流とのローレンツ力を計算できることが要求される。

これより、回転子に流入する磁束は Fig. 10 に示すように、隣り合う導体棒に挟まれた領域毎に分割して考えればよい。すなわち、回転子導体の数が 8 本の場合は、8 方向から磁束が流入すると考えて回転子および環状磁心の解析モデルを構築すれば回転子に発生するトルクを計算するには十分である<sup>(7)~(9)</sup>。

この考えに基づけば、固定子から回転子に流入する磁束の磁路は Fig. 11 に示すように、回転子導体棒と同数となり、環状磁心もこれと同数に分割できる。図中の長方形は、回転子の RNA モデルを構成する磁気抵抗等を表している。分割した要素は同図(a)に示すように他の部分の分割要素と同様、3 方向の磁路を持つ単位磁気回路として表す。このとき、分割要素の円周方向長さ  $l$  は環状磁心の内円周と外円周の平均を取り、それを回転子導体の数で割った値を用いる。

以上のように環状磁心を分割してモデル化を行えば、回転子の磁気回路モデルとの接続が可能となる。しかし、本モデルは、従来のモデルのようにカットコアとの接続を考慮した変形を行っていないため、カットコアとの接続法を考える必要がある。

このときのカットコアと環状磁心との接続部を表した図を Fig. 12 に示す。図に示すように、環状磁心、カットコア双方の分割要素は、互いに複数の分

割要素と接しているため、以下の方法で接続するものとした<sup>(10),(11)</sup>。

Fig. 13(a)は Fig. 12 の右上 1/4 の領域を表した図である。図において、 $B$  で示した環状磁心の分割要素を例にとり説明する。 $B$  は Fig. 13(a)右図に示す、カットコアの分割要素①、②、③と接している。そこで、Fig. 13(b)に示すように単位磁気回路の接続方向の磁路を、接しているカットコアの分割要素の数と同数、この場合では3つに分割する。このとき、分割した磁路の磁気抵抗に与える断面積はカットコアの各分割要素と実際に接している面積を与える。

また、カットコアも同様に、接している環状磁心の分割要素と同数に接続方向の磁路を分割する。Fig. 13(a)右図のカットコアの分割要素を例にとり説明すると、②は Fig. 14 に示すように  $A$ 、 $B$ 、 $C'$  3つの環状磁心分割要素と接しているのので、接続方向の磁路を3つに分割することとなる。このとき、②の単位磁気回路は Fig. 14 下図に示すものとなる。

以上のように、環状磁心、カットコアとも、接合面を含む分割要素の接続方向磁路を分割し、分割した磁路同士の接続を行えば接続が可能となる。

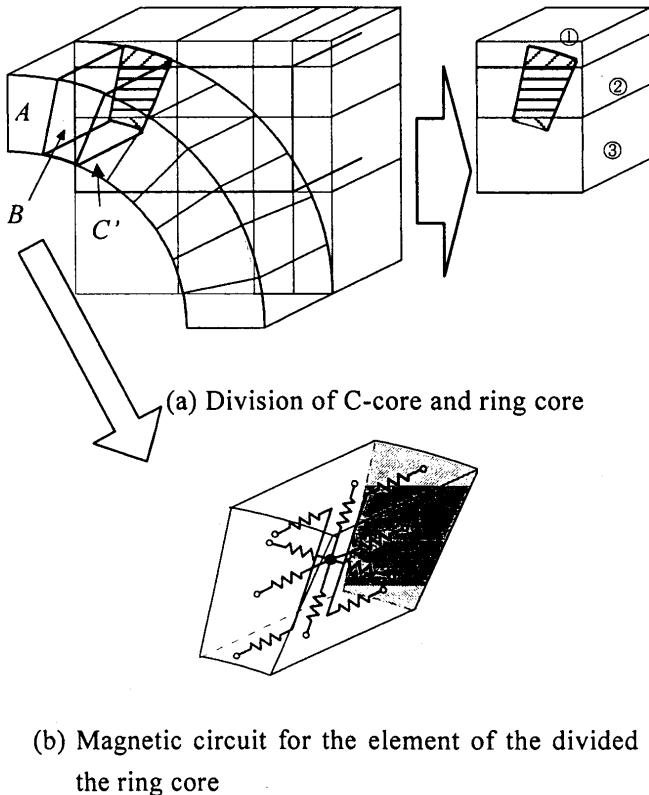


Fig. 13 Magnetic circuit for the element of divided Ring core considering the junction of the C-core and the ring core.

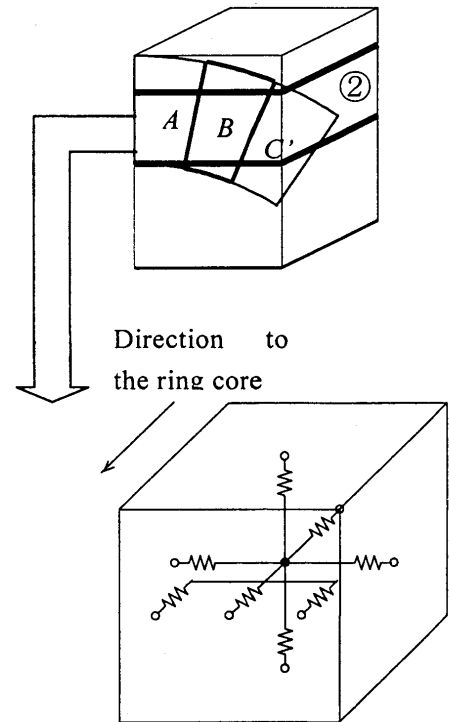


Fig. 14 Magnetic circuit for the element of divided C-core considering the junction of the C-core and the ring core.

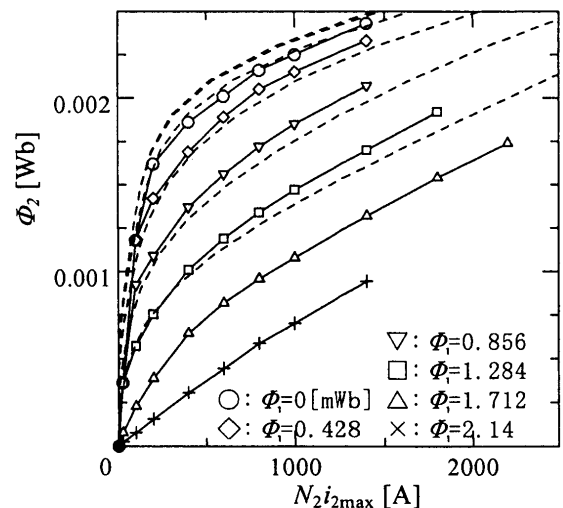


Fig. 15 Calculated results based on the new RNA model.

この円周方向の磁束分布を考慮した固定子の新 RNA モデルによる磁化特性の計算例を Fig. 15 に示す。同図より、従来のモデルによる計算値 (Fig. 7) と比較して、磁気飽和の程度が小さく、かつ励磁磁束による共振側磁化特性の変化も小さく計算されていることがわかる。全体として算定精度は従来のモデルよりも低下した。

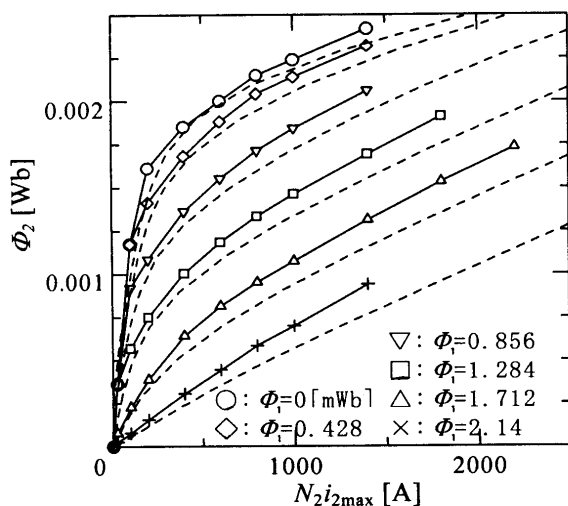


Fig. 16 Calculated results based on the new RNA model in the case the reluctances in the direction of the circumference of the ring core are changed twice as much.

計算値と実験値の差異の原因として、新しいモデルでは励磁側磁束と共振側磁束の相互作用が十分に反映されていないことが考えられる。すなわち、励磁側と共振側の共通磁路である環状磁心円周方向の磁気回路において誤差が生じている可能性がある。

このことを検証するため、新モデルにおいて、励磁側と共振側の共通磁路となる環状磁心円周方向の磁気抵抗を2倍にした場合の磁化特性計算値への影響をみる<sup>(11)</sup>。Fig. 16より、磁気抵抗を増加させたことにより算定精度が向上することがわかる。このことは環状磁心の円周方向の磁束が増大すればモデルの解析精度が高くなることを示しており、新モデルにおいてカットコアから環状磁心に流入する磁路についてさらに検討を加えるべきであることがわかる。

## 5. おわりに

以上、円周方向磁束分布を考慮した、直交磁路形パラメトリックモータの固定子のRNAモデルに関して述べた。

本論文では、これまでの固定子のRNAモデルが回転子流入磁束の円周方向の分布を無視したものであったので、これを考慮したモデルとして、新たに環状磁心をより詳細に分割したモデルの構築を試みた。しかしながら、本論文で提案したRNAモデルを用いた磁化特性の算定結果は、従来のRNAモデルより算定精度が低下するものとなった。この差異について検討を行い、本論文で提案したRNAモデルは、カットコアから環状磁心への磁路についてな

おも検討の余地があることを明らかにした。

今後はRNAモデルの算定精度の向上および、回転子を含めた解析を検討する予定である。

## 参考文献

- (1) 村上孝一 (1989) : パラメトリックモータ, オーム社.
- (2) 井出一正, 一ノ倉理, 村上孝一 (1987) : 電学マグネティックス, 信学非線形問題共催研究会資料, MAG-87-99, NPL- 87-19.
- (3) 井出一正, 一ノ倉理, 菊地新喜, 村上孝一 (1987) : 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-87-139.
- (4) 田島克文, 加賀昭夫, 一ノ倉理 (1996) : Reluctance Network と電気回路の結合による直交磁心形電力変換器の動作解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-54.
- (5) 佐藤孝平, 田島克文, 穴澤義久, 小向敏彦, 一ノ倉理 (1998) : 三次元非線形磁気回路モデルに基づくパラメトリック誘導電動機の解析法, 電気学会回転機研究会資料, RM-98-136.
- (6) 田島克文, 一ノ倉理 (2000) : 回転子駆動時のパラメトリック誘導電動機の一解析法, 日本応用磁気学会誌, Vol. 24, 146-9 頁.
- (7) 田島克文, 松田裕土, 谷口敏幸, 一ノ倉理 (2000) : RNA法によるパラメトリック誘導電動機の動作解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-266.
- (8) 田島克文, 松田裕土, 谷口敏幸, 一ノ倉理, 坂本禎智 (2001) : RNA法を適用したパラメトリックモータの動作解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-68.
- (9) 田島克文, 松田裕土, 谷口敏幸, 一ノ倉理, 坂本禎智 (2001) : RNA法を適用したパラメトリックモータの動作解析—その2—, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-78.
- (10) 松田裕土, 田島克文, 谷口敏幸, 一ノ倉理, 坂本禎智, (2001) : 回転子流入磁束分布を考慮したパラメトリックモータの解析モデル, 電気学会回転機研究会資料, RM-01-136.
- (11) 松田裕土, (2001) : RNA法に基づくパラメトリックモータの動作解析に関する研究, 秋田大学修士論文.