

## 誘導電動機の回転子スロット数が電磁力に与える影響

## Effect of the number of the rotor bars on the electromagnetic force in the induction motor

舘 洸史<sup>\*1</sup>, 高橋 康人<sup>\*1</sup> (正員), 藤原 耕二<sup>\*1</sup> (正員),  
石原 好之<sup>\*1</sup> (正員), 北川 亘<sup>\*2</sup> (正員), 井上 敦司<sup>\*3</sup>, 刀谷 郁也<sup>\*3</sup>

Koji TACHI, Yasuhito TAKAHASHI (Mem.), Koji FUJIWARA (Mem.),  
Yoshiyuki ISHIHARA (Mem.), Wataru KITAGAWA (Mem.),  
Atsushi INOUE, and Ikuya KATANAYA

The motor are demanded silent sound characteristics and low vibration now. The noise and the vibration on the induction motor are caused by the electromagnetic force of the radial direction acting on an iron core and a frame of the motor. Therefore this paper shows the number of the slot of the stator is constant and, changed the number of the slot of the rotor and calculated electromagnetic force to occur on a stator and a rotor, also compared these results.

**Keywords:** Induction motor, Electromagnetic vibration, Electromagnetic noise, Electromagnetic force, the number of the slot.

## 1 緒言

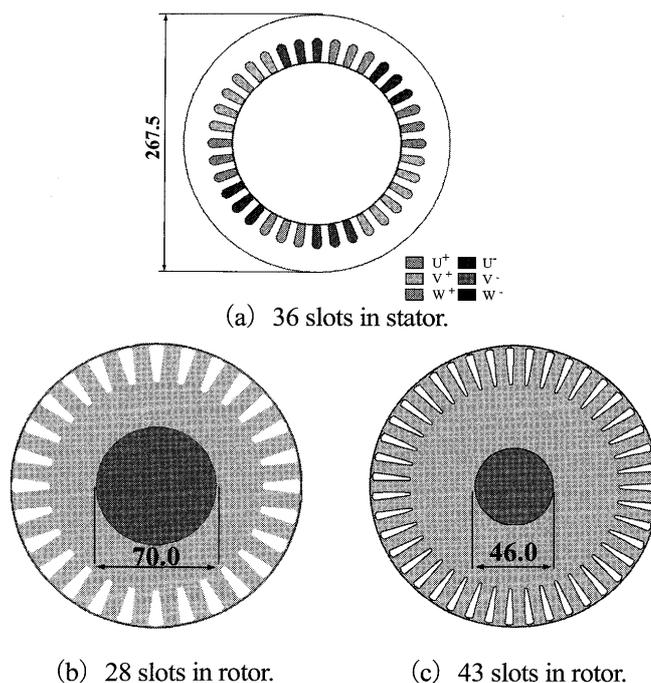
三相かご形誘導電動機は, その構造が簡単, 堅牢, 安価なため, 一般産業機器の動力源などとして古くから広範囲, 多用途に使用されてきている。近年では, 電源装置の小形化や集積化の進展により, 身近なところでも使用されるようになってきている。一方で, 環境問題の見地から, 誘導機に対する, より一層の静音性, 低振動などが要求されている。

誘導機から発生する振動や騒音は, 電磁騒音, 通風騒音, および機械騒音に分類される。一般に小型の誘導機においては, 電磁振動に起因した電磁騒音が顕著であることが知られている。電磁騒音とは, 半径方向の回転子と固定子間のギャップから発生する電磁力が回転子, 固定子および外部のフレーム等に作用し, 発生する騒音のことである[1,2]。

そこで本稿では, 実際に騒音が大きい回転子スロット数が 43 の誘導機と, 騒音が小さい回転子スロット数が 28 の誘導機の二つを, 同一の固定子で解析モデルとして用い, 回転子および固定子に発生する電磁力を算出し, それらが回転子および固定子の構造との間にもどのような関係があるのか比較検討した。

## 2 検討モデル

Fig. 1 (a) に, 固定子モデルを示し, (b) 図に回転子が 28 スロットの解析モデルを示し, (c) 図に回転子が 43 スロットの解析モデルを示す。また, Table 1 (a) に 28 スロットモデルの解析条件を示し, (b) 表に 43 スロットモデルの解析条件を示す。二つのモデルは回転子のスロット数が異なるが, 固定子は同一のものとした。



(a) 36 slots in stator.

(b) 28 slots in rotor.

(c) 43 slots in rotor.

Fig. 1 Analysis models.

連絡先: 石原 好之, 〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3, 同志社大学工学研究科電気電子工学専攻,  
e-mail: yishihar@mail.doshisha.ac.jp

<sup>\*1</sup>同志社大学<sup>\*2</sup>名古屋工業大学<sup>\*3</sup>日本輸送機

### 3 騒音測定

回転子スロット数が 43 の実機を用いて、回転数を 861~1536 rpm と変化させ、騒音測定を行った。測定は、実機の横に騒音計を設置し行った。また、FFT 後のデータを測定結果とした。騒音計には RION 製 NL-31 を用い、データは小野測器製 DS-2100 で FFT 処理を行った。Fig. 2 に一例として回転数が 1444 rpm 時の騒音測定の結果を示す。この結果から、騒音には二つの支配的な周波数成分が含まれていることが分かった。これらを周波数 A, 周波数 B と呼ぶことにする。また、Table 2 と Fig. 3 に回転数を変化させ騒音測定を行った場合の、周波数 A, B の変化の様子を示す。Fig. 3 からモータの回転数と騒音の周波数 A, B の間には比例関係があり、回転数が高くなるに比例して周波数が高くなることが分かった。そして比例定数は、周波数 A では 47.23, 周波数 B では 34.68 となった。これより、固定子および回転子で発生する電磁力について、これらの周波数に近い成分について検討を行う。

Table 1 Analysis conditions.

(a) 28 slots in rotor.

Resistance	Rotor bar [ $\mu\Omega$ ]	46.87	Core length [mm]	Rotor bar	200
	End ring [ $\mu\Omega$ ]	0.13		End ring	18
Number of slots	Stator	36	Number of poles		
	Rotor	28			
Speed [rpm]		1500	Number of elements		
Slip [%]		2.53	Number of nodes		

(b) 43 slots in rotor.

Resistance	Rotor bar [ $\mu\Omega$ ]	90.29	Core length [mm]	Rotor bar	200
	End ring [ $\mu\Omega$ ]	0.66		End ring	18
Number of slots	Stator	36	Number of poles		
	Rotor	43			
Speed [rpm]		1500	Number of elements		
Slip [%]		2.53	Number of nodes		

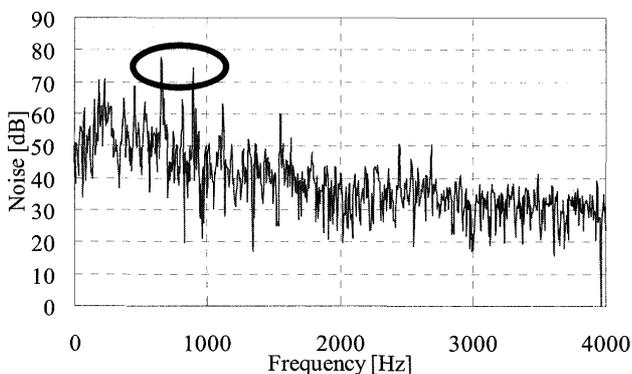


Fig. 2 Results of the noise measurement (1444 rpm) .

### 4 固有振動数算出

#### 4.1 解析方法

構造解析を行うにあたり、四角形四節点アイソパラメトリック要素を導入している。任意の節点において、x 方向の変位を  $u$ , y 方向の変位を  $v$  とすると三角形要素の場合、

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ v &= \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y \end{aligned} \quad (1)$$

と表現する。

それに対し、四角形四節点アイソパラメトリック要素では、

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy \\ v &= \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 xy \end{aligned} \quad (2)$$

として計算する。式 (2) のように第 4 項を増やすことにより、自由度を上げることができると解析精度が向上する。したがって、本研究では構造解析は四角形四節点アイソパラメトリック要素を用いて解析を行っている[3]。

Table 2 Results of the noise measurement (43 slots) .

No.	Speed [rpm]	Frequency[Hz]		Frequency / Speed[r/s]	
		A	B	A	B
1	861	680	550	47.39	34.85
2	947	745	600	47.20	34.65
3	1039	815	660	47.06	34.80
4	1138	895	715	47.19	34.62
5	1239	975	775	47.22	34.60
6	1344	1060	835	47.32	34.70
7	1444	1135	885	47.16	34.57
8	1536	1210		47.27	

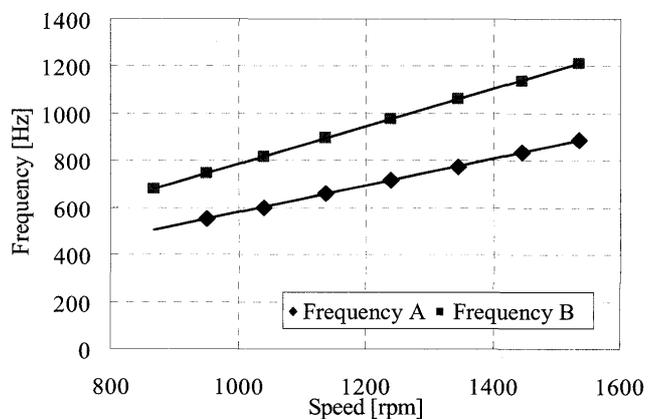


Fig. 3 Noise frequency (43 slots) .

## 4.2 解析結果

Table 3 に固有振動数解析における解析条件を示す。磁界解析に比べて、要素数が 1620、節点数が 1728 と少ないが、四角形四節点アイソパラメトリック要素を用いているため、解析精度は確保されているとして解析を行った。

Table 4 に解析結果を示す。また、Fig. 4 (a) ~ (c) に固定子の固有モードを示す。

Table 4 の結果、および Fig. 4 (a) ~ (c) より、1009.2 Hz で二次モード、2681.4 Hz で三次モード、4766.2 Hz で四次モードが現れることが分かった。

騒音の測定結果と比較すると、三次と四次モードの固有振動数は騒音の周波数よりも高いため、これらは関係があるとは考えにくい。一方、二次モードの固有振動数 (1009.2 Hz) は Fig. 3 の周波数 A の変化の範囲内であることが分かる。しかし、騒音測定において 1000 Hz あたりでの騒音の大きさに変化は見られなかったこと、固有振動数以外の周波数でも同レベルの騒音が発生していることから、供試誘導機では共振が原因で騒音が発生しているとは考えにくい。

## 5 電磁力の算出

### 5.1 固定子に働く電磁力の算出方法

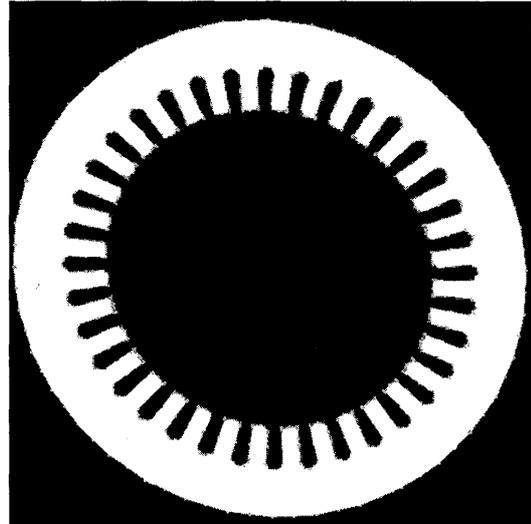
Fig. 5 に節点法より求めた、機械角が 1801 deg の瞬時の半径方向の電磁力の様子を示す[4]。ここで、節点法より求めた各節点での電磁力の方向を中心から外向きの力を正とした。

Table 3 Analysis conditions for natural frequencies.

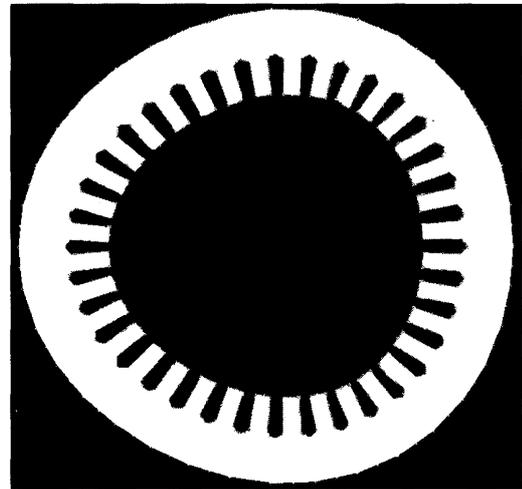
Material	50A1300
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7850
Young's modules [Gpa]	210
Poisson's ratio	0.3
Core length [mm]	200
Number of elements	1620
Number of nodes	1728

Table 4 Result for natural frequency analysis.

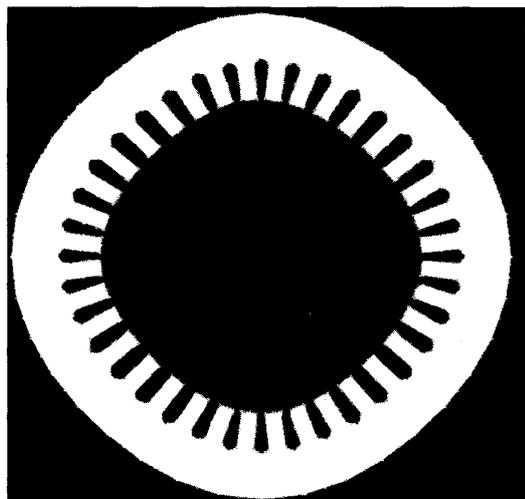
Mode	Natural frequencies [Hz]
n = 2	1009.2
n = 3	2681.4
n = 4	4766.2



(a) n = 2 (1009.2 Hz) .



(b) n = 3 (2681.4 Hz) .



(c) n = 4 (4766.2 Hz) .

Fig. 4 Natural-frequency vibration mode.

また, Fig. 6 (a) に磁束分布図を, (b) 図に磁束線図を示す。この結果より, 大きな電磁力が発生する箇所は, 空気との境界の磁束が集中している箇所であるということが分かる。ただし, 各節点から求められる電磁力は, 実際に物質中のその点で発生している力ではないため, 電磁力の分布には物理的な意味合いはない。そのため, Fig. 7 に示すように, ティース部鉄心と空気層の境界の節点を用いて, 固定子の一箇所のティースに働く半径方向の電磁力を算出した。尚, (b) 図は (a) 図の拡大図である。

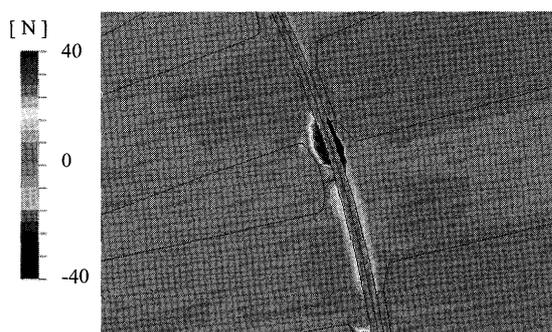
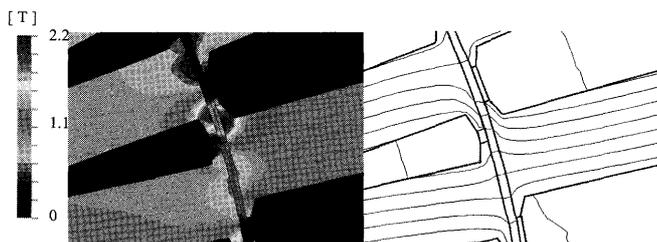
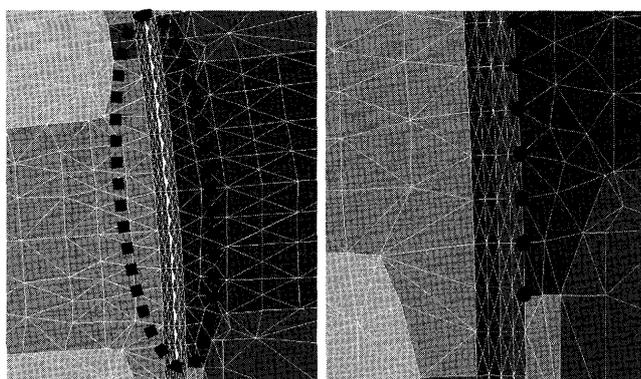


Fig. 5 Electromagnetic force distribution.



(a) Flux density distribution. (b) Flux distribution.

Fig. 6 Flux density distribution and flux distribution.



(a) A teeth figure. (b) An enlarged figure of (a).

Fig. 7 Calculation point of electromagnetic force.

## 5.2 回転子に働く電磁力の算出方法

回転子の場合固定子の様に, 一つのティースに働く電磁力を算出するだけでなく, シャフトにどのような力が加わるかを考慮する必要がある。そこで固定子の場合と異なり, 回転子の全ての節点より求めた半径方向の電磁力を合計することにより, 回転子全体に働く電磁力とした。電磁力の計算は, 半径方向の電磁力  $f_r$  を  $x$  成分の電磁力  $f_x$  と  $y$  成分の電磁力  $f_y$  に分解し, 各節点力を合計することによって, 回転子に働く  $x$  方向の電磁力  $F_x$  と  $y$  方向の電磁力  $F_y$  とした。

## 5.3 固定子に働く電磁力の解析結果

Fig. 8 (a) に, 回転数 1500 rpm の場合の, 28 スロットモデル固定子の一箇所のティースに加わる電磁力の時間的変化を示す。また, (b) 図は 1444 rpm の場合の 43 スロットモデルの固定子の一箇所のティースに加わる電磁力である。ここで, 定格回転数は 1500 rpm であるが, 43 スロットモデルについては, 騒音測定の結果と比較するために, この回転数について解析を行った。Fig. 9 (a) に Fig. 8 (a) の調波解析の結果を, (b) 図に Fig. 8 (b) の調波解析結果を示す。尚, 回転磁界の一回転を, すなわち電源周波数の 1/2 を基本波として調波解析を行った。

Fig. 8 図の結果より, 電磁力のグラフの振動の間隔は, 28 スロットの場合は 12.857 deg, 43 スロットの場合は 8.372 deg であり, これらはロータバーの間隔と同値であることから, 固定子のティースに加わる電磁力はロータバーの数に起因している。

Fig. 9 (a) に示すように 28 スロットの電磁力には, 4 次, 23 次, 27 次, 31 次の成分が顕著であり, また, (b) 図に示すように, 43 スロットの電磁力には, 4 次, 37 次, 41 次, 45 次の成分が顕著であった。4 次は極数により発生した成分であり, Fig. 9 (a) の 27 次と, (b) 図の 41 次は, ロータバー数とすべりにより発生した成分であると考えられる。また, その他の成分は (28 スロットの場合は 23 次と 31 次, 43 スロットの場合は 37 次と 45 次), 27 次と 41 次の  $\pm 4$  次の成分のため, 極数が 4 のために発生した成分と考えられる。

また, Fig. 9 (b) より, 45 次の周波数は 1083 Hz であり, これは騒音測定の結果の騒音周波数 (1135 Hz) と非常に近いことが分かる。しかし, 騒音測定で得られた低い方の周波数成分が表れていない。そのため, 次に回転子において考察を行う。

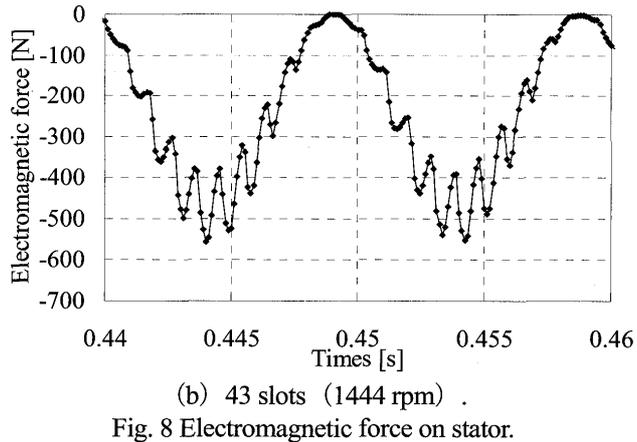
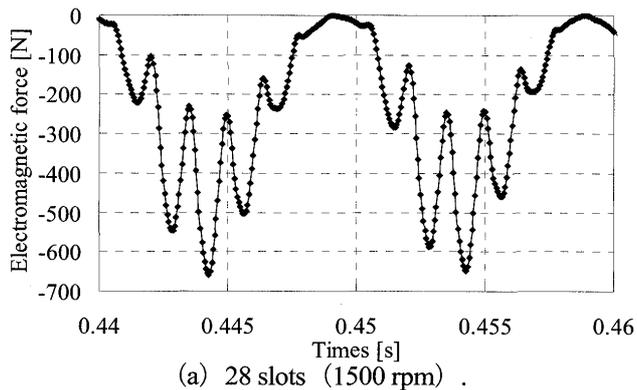


Fig. 8 Electromagnetic force on stator.

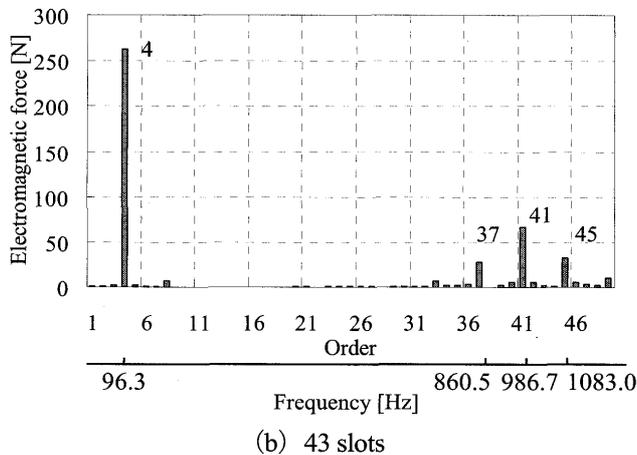
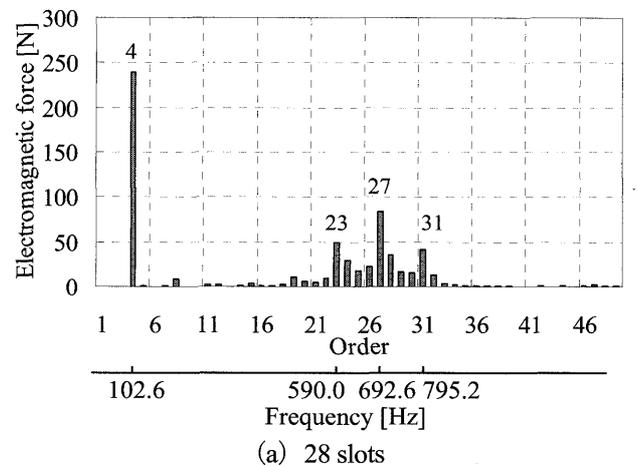


Fig. 9 Frequency analysis.

5.4 回転子に働く電磁力の解析結果

Fig. 10 に、43 スロットモデルでの回転子に加わる電磁力  $F_x$  のグラフを示す。尚、回転数は 1444 rpm である。さらに、Fig. 11 に Fig. 10 の結果を調波解析した結果を示す。ここでは回転子の一回転を一周期として調波解析を行った。また、Fig.14 に、28 スロットモデルでの回転子に加わる電磁力  $F_x$  のグラフを示す。尚、回転数は 1500 rpm である。Fig. 10 の結果より、スロット数が 43 の場合は、回転子に電磁力が加わっており、それが時間的に変化している様子が分かる。これは、スロット数が奇数のため、回転子が非対称構造であることが原因で対角に対応するティースが存在せず、力が打ち消しあわないためであると考えられる。

Fig. 11 の調波解析の結果より、36 次、48 次の成分が算出された。36 次と 48 次の周波数は 866.4 Hz と 1155.2 Hz である。これらはどちらも騒音の測定結果で表れた周波数 (835 Hz および 1135 Hz) に非常に近いことが分かる。そこで、Fig. 12 に騒音測定を行った各回転数において、同条件の下解析を行い、電磁力の成分を算出した結果を測定結果と合わせて示す。また、Fig. 13 に解析結果と測定結果との誤差を示す。Fig. 13 の結果から、解析結果と測定結果は誤差 1~4 % に収まっており、非常に近いことが分かる。これより、これらの周波数成分が騒音を引き起こしている可能性があると考えられる。

一方、Fig. 14 の結果より、回転子のスロット数が 28 の場合には、回転子に全く電磁力が加わっていないことが分かる。これは、スロット数が偶数のため、回転子が対称構造となり、対角同士で対応するティースに加わる電磁力が等しく、打ち消しあうためであると考えられる。このために、回転子に加わる電磁力に変動はない。

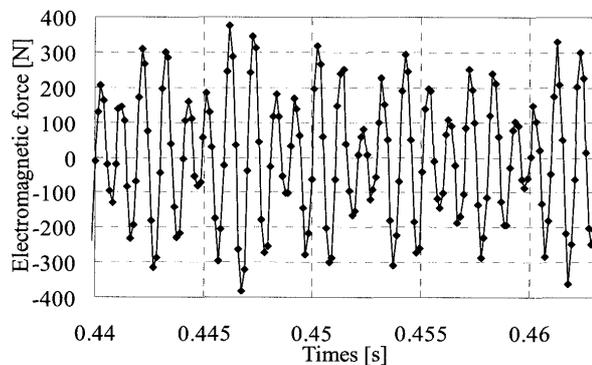


Fig. 10 Electromagnetic force on rotor (43 slots) .

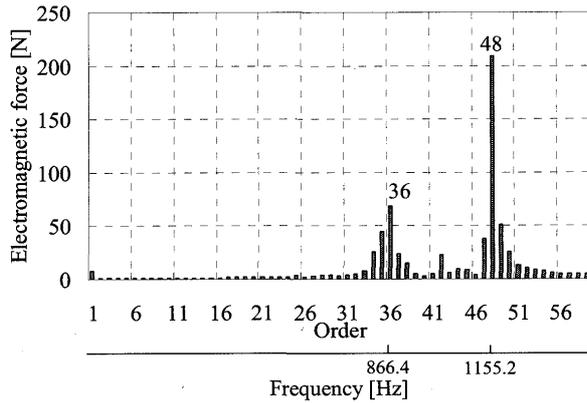


Fig. 11 Frequency analysis (43 slots) .

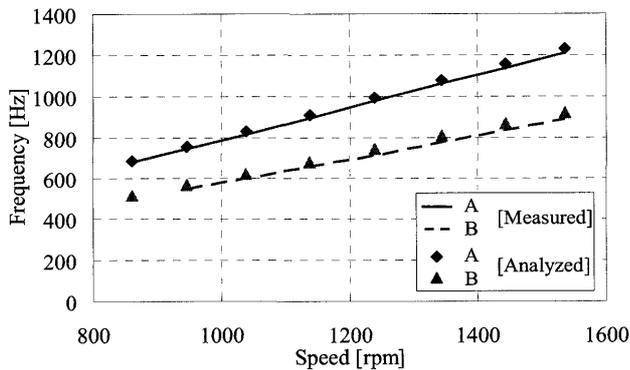


Fig. 12 Comparison between measured and analyzed.

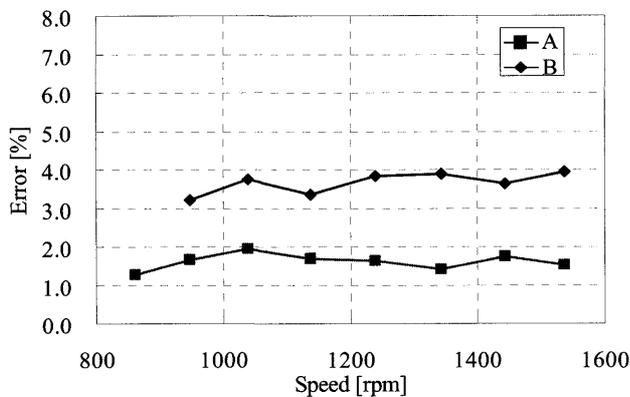


Fig. 13 Error between measured and analyzed.

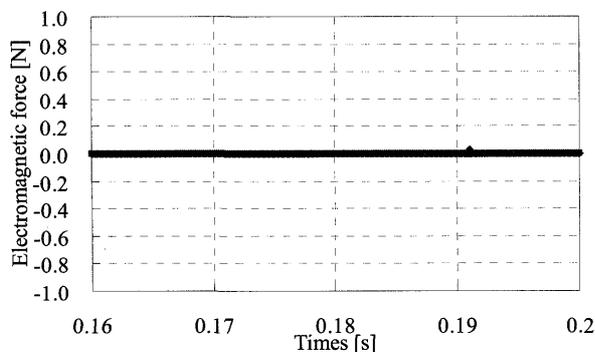


Fig. 14 Electromagnetic force on rotor (28 slots) .

## 6 結言

本稿では、実際に騒音が発生するモデルと発生しないモデルについて、固定子と回転子鉄心に働く電磁力をそれぞれ算出し、比較・検討を行った。得られた知見は以下に示す通りである。

- (1) 騒音測定の結果と固有振動数算出より、供試誘導機の騒音の原因は、固有振動数による共振のみが原因であるとは考えにくい。
- (2) 固定子と回転子に加わる電磁力を算出した結果より、騒音に非常に近い周波数成分が検出された。特に、回転子に加わる電磁力の周波数は騒音の周波数に非常に近いため、43 スロットのような奇数スロットという構造が騒音の原因になっていると考えられる。
- (3) 回転子のスロット数が偶数の場合、回転子が対称構造となるため、対角の位置に対応するティースが存在し、ティースに加わる電磁力が釣り合うことで、回転子に加わる電磁力に時間的な変動はない。

今後は、43 スロットモデルにおいて、何故 36 次と 46 次といった電磁力の成分が検出されたかについて検討を行う。

(2010 年 10 月 15 日受付, 2011 年 2 月 25 日再受付)

## 参考文献

- [1] 誘導機電磁騒音解析技術調査専門委員会, 電気学会技術報告 第 1048 号, 誘導電動機の電磁振動と騒音の解析技術, pp.4, 2006.
- [2] 廣塚, 丹羽, 坪井, 川上, 三相かご形誘導電動機の電磁振動・電磁騒音分布に関する基礎検討— 正弦波可変周波数駆動の場合 —, 総合工学, 第 22 巻, pp.7-13, 2010.
- [3] W. Kitagawa, K. Fujiwara, Y. Ishihara, Structure Deformation Analysis caused by Magnetic steel sheet using Combination of Electromagnetic and Structure Analysis., *Proc. of ICEM 2010*, Rome, CD-ROM, Proceedings, RF-009512, 2010.
- [4] 高橋則雄, 三次元有限要素法 磁界解析技術の基礎, オーム社, 2006.