

三相かご形誘導電動機の電磁振動・電磁騒音分布 に関する基礎的検討 — 正弦波可変周波数駆動の場合 —

廣塚 功*, 丹羽陽介**, 坪井和男*, 川上正行***

A Basic Study on the Electromagnetic Vibration and Noise of the Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor - Drive by a Variable-Frequency Sinusoidal Wave Source -

Isao Hirotsuka*, Yousuke Niwa**, Kazuo Tsuboi*, Masayuki Kawakami***

Abstract: Recently, the demand for a three-phase squirrel-cage induction motor (IM) that generates less noise has increased considerably. Electromagnetic noise is caused by electromagnetic vibration, which is generated by the interaction between the magnetic flux density waves in the air gap. Hence, we have studied the causes and features of electromagnetic vibration and noise in order to aid the design of a lower noise IM. In this paper, the radial distributions of electromagnetic vibration and noise in IM, which is driven by a variable-frequency sinusoidal wave source, are discussed with many measured data. As a result, it is clarified that the feature of the distribution is changed by driven frequency.

Keywords : *Induction motor, Electromagnetic vibration, Electromagnetic Noise, Slot combination, Electromagnetic force*

1. はじめに

三相かご形誘導電動機（以下、IM と略記）は、その構造が簡単、堅牢、安価であるため、産業機器の動力用などとして多数用いられているが、近年の環境問題の見地から、より一層の低振動・低騒音化が強く求められている¹⁾。IM の騒音は一般に、電磁騒音、機械騒音、通風騒音に大別でき、小形 IM の場合、電磁振動に起因した電磁騒音が顕著である¹⁾。IM の電磁振動および電磁騒音に対しては古くから多数の研究が行われており、その基本的事項は明らかにされている²⁾。しかし、現在の高度に発達した技術水準に照らすとなお未解明な部分も多数残存している。

そこで、筆者らは IM の電磁振動および電磁騒音の発生原因となる電磁力波の発生の特徴、スロット数組合せの影響などについて詳細に検討を行ってきた^{3),4)}。また、IM の電磁振動および電磁騒音の半径方向分布を詳細に検討することにより、電磁力波と電磁振動と電磁騒音との関係などを実験的に明らかにしてきている⁵⁾。本論文では、無負荷時の IM の運転周波数を変更した場合、同一原因で生じる

* 工学部電気システム工学科, ** 工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻, *** 東芝産業機器製造(株)

電磁振動および電磁騒音の半径方向分布であってもその特徴が異なる場合があること、その原因として IM の機械系の共振の影響が密接に関連していることなどを実験的に検討したので、その結果を報告する。

2. 顕著な電磁力波

図 1 に、固定子巻線および固定子枠を除去した定格出力 2.2kW の IM の断面例を示す。固定子と回転子との間に約 0.3mm の狭いギャップがあり、ギャップに対して固定子スロットと回転子スロットとが対向している。従って、IM のギャップ中には、その大小はあるが必ず高調波磁束が存在し、この高調波磁束により電磁力波を生じることとなる。

図 2 に、IM の電磁騒音発生過程および電磁騒音にどのような事項が影響を及ぼすかの概念を示す。IM に電圧を印加すると、巻線による起磁力およびスロットの存在などによるパーミアンスの影響により高調波を含んだ磁束をギャップ中に生じる。この基本波成分を含めた高調波磁束の相互作用により電磁力波を生じる。電磁力波による固定子の変形および回転子の振動が電磁振動となり、これに起因して電磁騒音、さらには電磁騒音を生じることとなる。

表 1 に顕著な電磁力波の発生周波数 f_v およびモード M を示す⁽⁶⁾。同表では、IM の印加電圧を正弦波とし、固定子および回転子のスロットパーミアンスのみを考慮している。同表において、 f は電源周波数、 p' は極対数、 s は滑り、 n_s および n は固定子および回転子スロット数、 L および K は固定子および回転子スロット高調波の次数で整数、「No.」は便宜上つけた記号である。なお、 L および K の全ての組み合わせが顕著な電磁振動の発生原因とはならず、 $f_v \leq 5 \text{ kHz}$ 、 $1 \leq M \leq 3$ となる場合に特に顕著な電磁振動を生じる⁽⁶⁾。

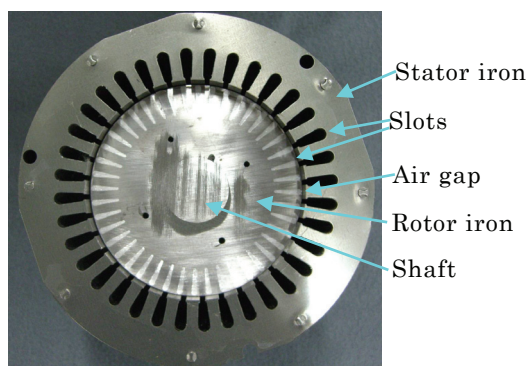


Figure 1. A cross section of IM removed stator windings and case.

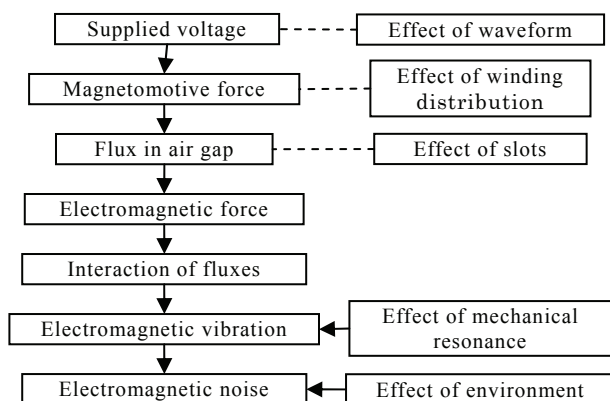


Figure 2. Causes of electromagnetic noise.

Table 1. Occurrence frequency and mode of dominant electromagnetic force.

No.	frequency : f_v	mode : M
①	$\left \frac{1-s}{p'} Kn - 2 \right f$	$ 2p' + Ln_s - Kn $
②	$\left \frac{1-s}{p'} Kn \right f$	$ Ln_s - Kn $
③	$\left \frac{1-s}{p'} Kn + 2 \right f$	$ 2p' - Ln_s + Kn $

3. 実験装置の構成と実験方法

表2に供試機の仕様を示す。固定子スロット数 n_s は36、回転子スロット数 n は37の組合せとしている。この組合せは一般に市販されている組合せではなく、電磁振動および電磁騒音の検討を行い易い組合せである⁶⁾。固有振動数は、IMを1時間暖機運転してIMの温度状態を一定にし、IM停止後にインパクトハンマを用いて測定した。

図2に電磁振動および電磁騒音の測定の様子を、図3に実験装置の構成を示す。図2に示すように、反射音および暗騒音を低減するよう工夫した実験室内で測定した。IMのみの電磁騒音および電磁振動を測定するため、IMを固有振動数の低い弾性体の上に設置し、無負荷単体とした。電源として、正弦波電圧を任意の大きさおよび周波数で発生することのできる信号発生器およびその信号を増幅する電力増幅器を用いており、印加電圧を正弦波電圧200V/60Hzの比を一定として電源周波数 $f=39\sim70$ Hzにおける電磁振動および電磁騒音を詳細に測定した。

IMの電磁振動を、固定ピックアップおよび可動ピックアップの2個を用い、FFTアナライザにより振動加速度および各振動成分の位相を測定し、電磁振動成分の半径方向分布を求めている。また、IMの電磁騒音成分の半径方向分布を、IMの軸中心からの距離0.5mに固定マイクロホンおよび可動マイクロホン2台を用いて、電磁振動と同様に求めている。なお、電磁騒音の特徴をより正確に測定するため、JIS C 4210⁷⁾で定められた測定距離(1.0m)より近い距離としている。測定位置を、IMの固定子中央上部を 0° とし、IM軸方向から見て時計方向に正の角度で表し、反時計方向に負の角度で表すこととした。

Table 2 Specification of test motor.

Rated output	1.5kW
Number of pole; $2p'$	4
Rated voltage	200V
Rated frequency	60Hz
Number of stator slot; n_s	36
Number of rotor slot; n	37
Skew of rotor slot	No skew
Main natural frequencies	506, 1043, 1344, 1684, 1956, 2653, 3313, 3806Hz

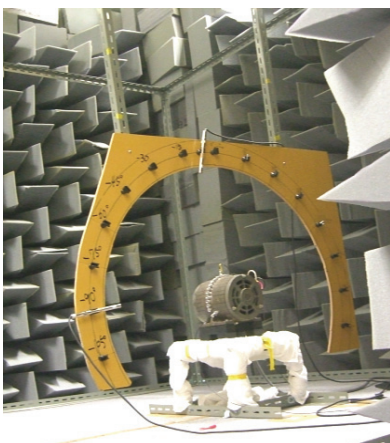


Fig.2. Motor noise laboratory.

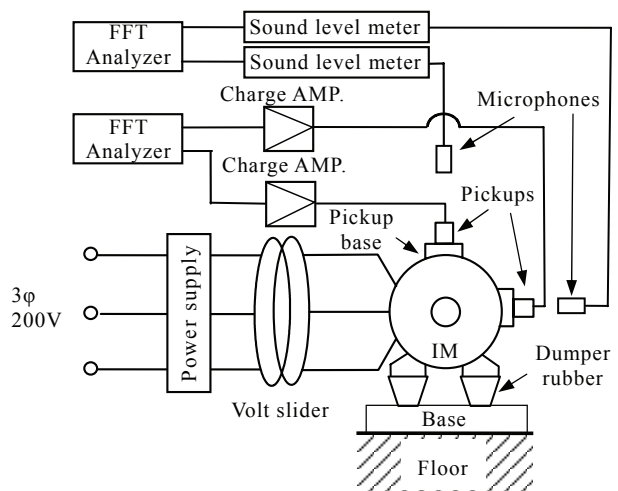


Fig.3. Arrangement of experimental apparatus.

4. 実験結果とその検討

図 4 に、実験結果の一例として、 $f = 60\text{Hz}$ における電磁振動および電磁騒音の周波数解析結果を示す。同図より明らかなように、電磁振動の測定結果において、 $1109 (=18.5f)\text{ Hz}$ 、 $2219 (=37f)\text{ Hz}$ 、 $3328 (=55.5f)\text{ Hz}$ に特に顕著な電磁振動成分を生じている。表 1 より、 $1109 (=18.5f)\text{ Hz}$ 成分は $M = 1$ 、 $2219 (=37f)\text{ Hz}$ 成分は $M = 2$ および $3328 (=55.5f)\text{ Hz}$ 成分は $M = 3$ といった、いずれも表 1 の②に分類した M の小さな電磁力波であると考えられる。なお、無負荷時であっても IM の滑り s は 0 ではないため、例えば、 2219Hz に生じている成分を $37f$ 成分と称している。これら顕著な電磁振動成分と同一周波数に顕著な電磁騒音成分も生じており、同一周波数に生じる電磁振動成分の振動加速度 f_a と電磁騒音成分の音圧レベル L_p との大小関係は類似している。これらのことから、電磁振動に起因して電磁騒音を生じており、大小関係も含めこれらの間には密接な関連があることを実験的に確認できた。

図 5 に、電源周波数 f に対する 5kHz までの振動加速度の全実効値 F_{va} を示す。同図より明らかなように、

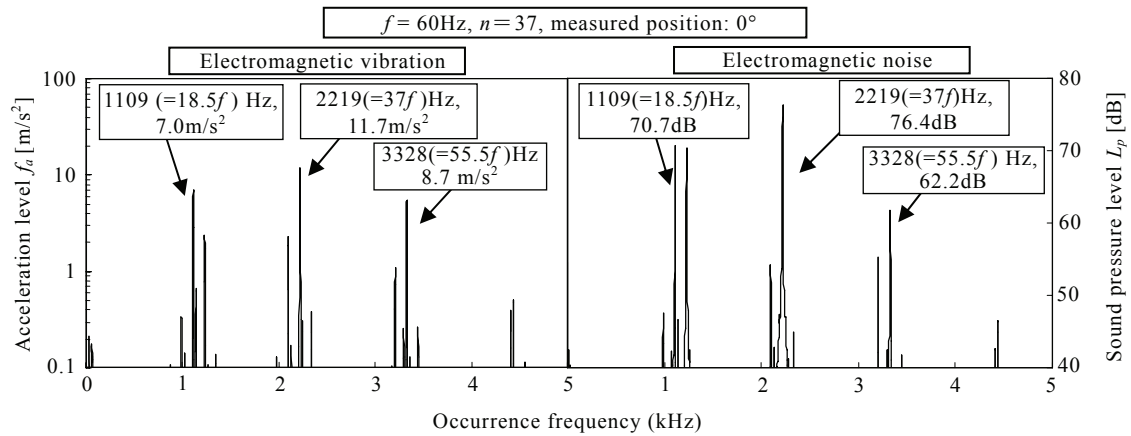


Figure 4. An example of measured data.

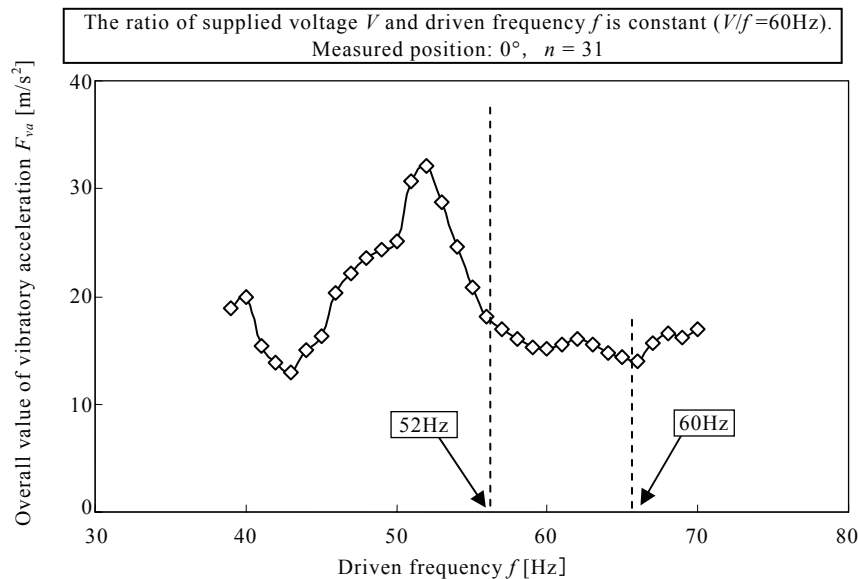


Figure 5 . Overall value of vibratory acceleration F_{va} for driven frequency.

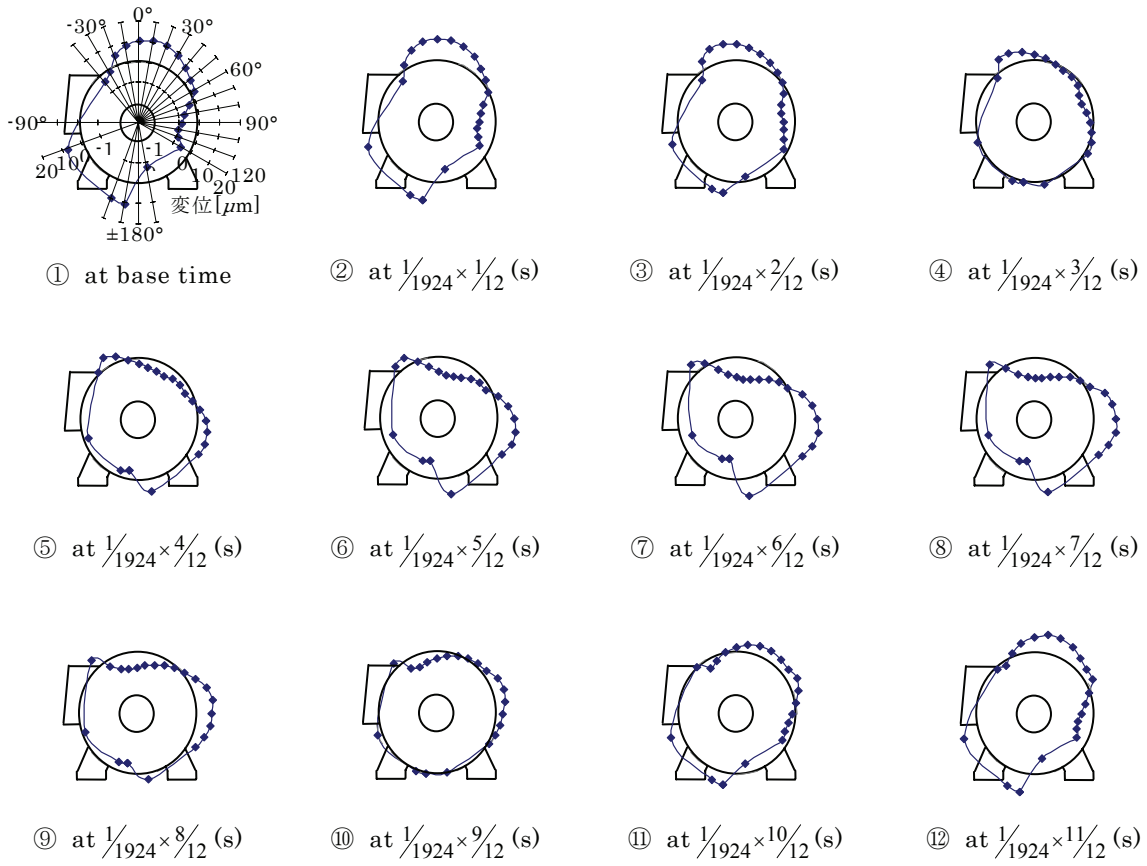


Figure 7. Radial distribution of 1924 (= 37f) Hz electromagnetic vibration at $f=52\text{Hz}$ ($n=37$).

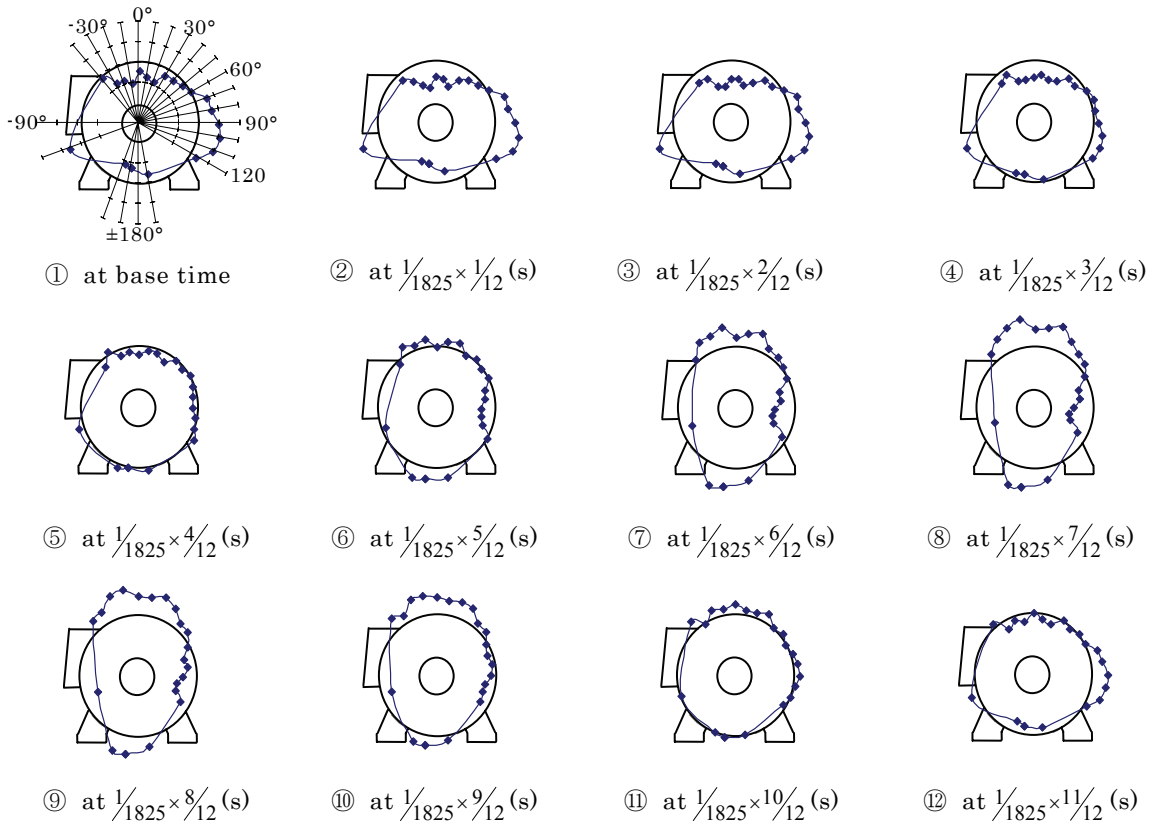


Fig. 8. Radial distribution of a natural frequency at 1825Hz.

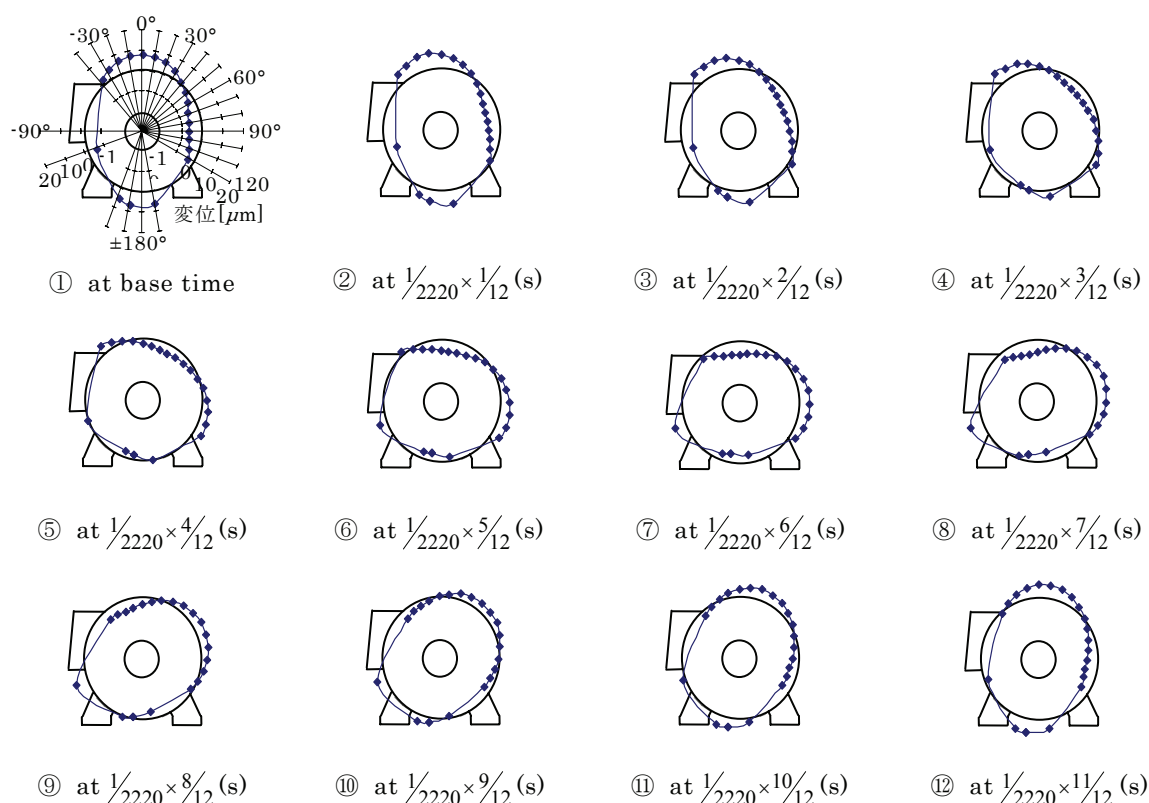


Fig. 6. Radial distribution of 2220 (= 37f) Hz electromagnetic vibration at $f = 60\text{ Hz}$ ($n = 37$).

$f=52\text{ Hz}$ の場合に F_{va} が最も大きくなっている。これは、図 4 に示した $37f$ 振動成分が最も優勢で、この振動成分の f_a に F_{va} が著しく影響を受けたためである。

図 6 および図 7 に、 $f = 60\text{ Hz}$ および 52 Hz の場合における $37f$ 振動成分の半径方向分布を理解しやすい表現で示す。すなわち、図 6 および図 7 中の①～⑫は、ある瞬間における IM 表面の半径方向の変位を IM の形状と合わせて表示している。図 6 および図 7 より、 $37f$ 振動成分の半径方向分布は、その発生の主要原因となる電磁力波のモード $M(=2)$ と同様な変化をしている。しかし、図 6 と図 7 との比較より、 $f=60\text{ Hz}$ の場合と $f=52\text{ Hz}$ の場合とで全く同じ半径方向分布とはなっていない。すなわち、図 6 の $f=60\text{ Hz}$ の場合には半径方向の変位が 0 となる角度が時間とともに回転しているが、図 7 の $f=52\text{ Hz}$ の場合、測定位置 60° および -40° 近辺における半径方向の変位の変化が小さく、変形の節が確認できる。

この原因として、供試機の機械系の共振の影響が考えられるので、 $f=52\text{ Hz}$ の場合に $37f$ 振動成分は 1924 Hz に生じていることを勘案し、ハンマリング試験を行い、 1825 Hz における機械系の共振の様子を調べた。その結果を、図 6 および図 7 と同様の形式で図 8 に示す。図 7 と図 8 との比較より明らかなように、これらの半径方向分布において、測定位置 60° および -40° 近辺における半径方向の変位の変化が小さく、変形の節が確認でき、極めて類似した分布状況となった。このことから、電源周波数を変更した場合、同一の電磁振動成分であっても、その半径方向分布の特徴が異なる場合があること、機械系の共振周波数近辺に顕著な電磁振動成分を生じる場合、その振動成分の振動加速度は極めて大きくなるとともに、その振動成分の半径方向分布は機械系の共振の影響を著しく受けた分布となることなどを実験的に明らかにできた。なお、この電磁振動成分と同一周波数に生じる電磁騒音の半径方向分布の特徴も電磁振動成分と同様な傾向であり、電源周波数により異なることを確認している。

5. あとがき

以上のように，IM の電磁振動および電磁騒音の半径方向分布が，電源周波数が異なる場合，同一のモードであっても機械系の共振の影響を著しく受ける場合があることなどを実験的に示した。今後，さらに詳細に検討を行う予定である。

謝辞

本研究は中部大学総合工学研究所 平成 20 年度～21 年度の第 3 部門の援助を受け遂行されたものであり，ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 電気学会「誘導機電磁騒音解析技術」調査専門委員会：「誘導電動機の電磁振動と電磁騒音の解析技術」電気学会技術報告，No.1048（2006）
- 2) 例えば，S. J. Yang：“Low-noise electrical motor”，Clarendon Press, Oxford (1981)
- 3) 坪井和男・廣塚功・石橋文徳：「かご形誘導電動機の負荷時における電磁振動の発生原因と特徴」電気学会論文誌，Vol.117D，No.1，pp.73-80（1997-1）
- 4) 廣塚功・坪井和男：「かご形誘導電動機の負荷時電磁振動に及ぼすスロット数組合せと斜めスロットの影響」電気学会論文誌，Vol.119-D，No.8/9，pp.1080-1089（1999-8）
- 5) 廣塚功・坪井和男・丹羽陽介：「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的検討ー 回転子スロット数が異なる場合 ー」中部大学総合工学，Vol.21，pp.21-26（2009-3）
- 6) 廣塚功・坪井和男：「かご形誘導電動機のスロット数組合せによる電磁振動の実験的考察」電気学会論文誌，Vol.109D，No.5，pp.347-354（1989-5）