

特集 | アウタロータ型モータの音発生メカニズム*

Mechanism of Noise Generation on Outer Rotor Motor

池田 和正
Kazumasa IKEDA

瀬村 純一
Junichi SEMURA

大澤 司
Tsukasa OHZAWA

A rotor and a stator of an outer rotor motor often resonate with electromagnetic force. Resonating rotor and stator cause electromagnetic noise and the stator's noise shows its resonance frequency. However, the rotor's noise shows different frequency from its resonance frequency. To clarify the mechanism, surface vibration of the rotor was measured by cylindrical microphone array and was calculated by advanced non-stationary conformal mapping technology introduced Equivalent Source Method (ESM). As results, it was found that the rotor is resonating with rotation and the amplitude of air vibration is modulated on the surface. The modulation causes the difference of frequency.

Key words : Noise, Resonance, Visualization, Outer rotor motor

1. まえがき

カーエアコンユニットであるHVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) は、大きく分けて送風ユニットとヒータユニットから構成される。その内、送風ユニットはモータに直結したブロワファンにより風量を得る。

送風ユニットではFig. 1に示す様に、風の流れにより生じる空力音が広周波数帯域にわたって発生し、特定の周波数においてブロワモータによる磁気音が突出音として発生することがある。

今回対象とする2000 Hz付近で発生する磁気音は、ステータとロータの間に働く電磁気力により、ロータ共振が励起されることが発生要因である¹⁾⁻³⁾。しかしロータ磁気音の周波数はロータの共振周波数と異なることが確認された。本研究ではアウタロータ型モータの共振による音の発生メカニズムをインナロータ型モータの場合と比較しながら実験的に分析した結果を報告する。

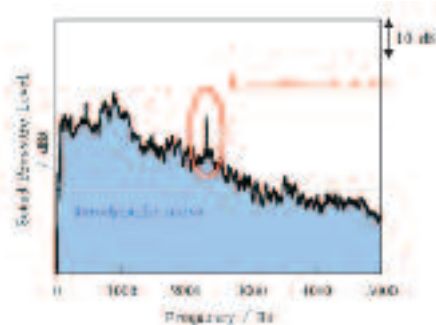


Fig. 1 Aerodynamic noise and electromagnetic noise

2. 実験設備および方法

2.1 モータサンプル

本研究では、ロータの外側にステータが配置されたインナロータ型モータにてステータを、ロータの内側にステータが配置されたアウタロータ型モータにてロータの磁気音を計測・分析し、比較した。

2.1.1 インナロータ型モータ

本研究で使用したインナロータ型モータの写真をFig. 2に示す。ハンマリング試験によりFig. 3に示す様にステータの共振特性を取得した。Fig. 3 (a)はイナータンスであり、共振周波数が1926 Hzであることが分かる。またFig. 3 (b)はステータを軸方向から見た時の共振モードであり、円環2次モードであることを確認した。



Fig. 2 Inner rotor motor
(a)Side view (b)Plan view

* (社)自動車技術会の了解を得て、「2014年春季大会学術講演会前刷集」No.101 - 14より一部加筆して転載

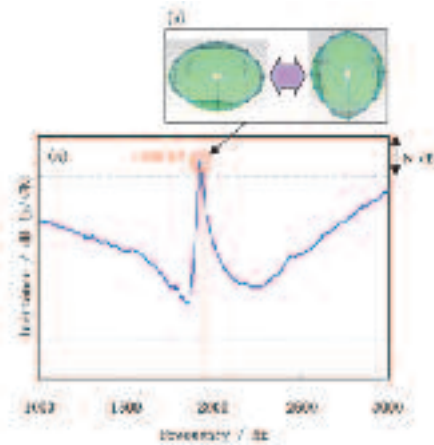


Fig. 3 Resonance characteristics of inner rotor motor
(a)Inertance (b)Resonance mode

2.1.2 アウターロータ型モータ

本研究で使用したアウターロータ型モータの写真を Fig. 4 に示す。ハンマリング試験により Fig. 5 に示す様にステータの共振特性を取得した。Fig. 5 (a) はイナータンスであり、共振周波数が 2226 Hz であることが分かる。また Fig. 5 (b) はロータを軸方向から見た時の共振モードであり、円環 2 次モードであることを確認した。

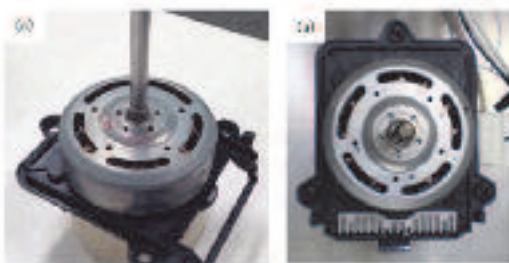


Fig. 4 Outer rotor motor
(a)Perspective view (b)Plan view

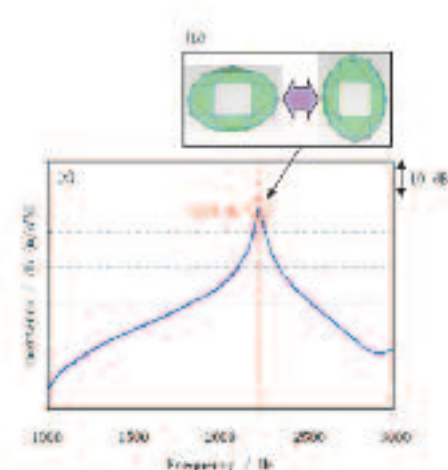


Fig. 5 Resonance characteristics of outer rotor motor
(a)Inertance (b)Resonance mode

2.2 非定常音源探査装置

対象物の振動を計測する場合、加速度センサを用いる方法では、センサと計測機器をケーブルで接続する必要があるため、ロータなどの回転部に適用することはできない。またレーザドップラ速度計 (LDV) を用いる方法では、回転する平板の表面振動を LDV により計測した例が報告されているが⁴⁾、ロータ表面が曲面であるため計測に必要な感度を得ることが出来ない。

そこで、マイクにより対象物近傍の音圧を計測し、対象物表面の振動を演算する最新の非定常音源探査技術を利用した。これは近距離場音響ホログラフィの一種であるが、対象物表面の近傍に配置された点音源を仮定するESM (Equivalent Source Method) を適用することで、計測面で測定した音圧から計測対象表面の振動挙動を演算できるように拡張されたものとなっている⁵⁾。

Fig. 6 は対象物を覆い囲う様にマイクを配置するための円筒治具である。100~6400 Hz の周波数帯での計測を可能とするため、マイク間距離、マイクと対象物との距離を調整した。インナーロータ型モータ用治具では、円周方向に 15 列、軸方向に 4 段のマイク設置箇所があり、計 60 個のマイクを設置した。一方アウターロータ型モータ用治具では、円周方向に 12 列、軸方向に 3 段、さらに平面部近傍に 12 ヶ所マイク設置箇所があり、計 48 個のマイクを設置した。

円筒治具に配置したマイクにより計測した音圧から対象物表面の振動を演算するが、演算した振動を投影するために対象物の 3 次元モデルが必要となる。本研究では Fig. 7 の様に形状を簡略化しメッシュを施したモデルを用いた。



Fig. 6 Cylindrical microphone arrays
(a)For inner rotor motor (b)For outer rotor motor

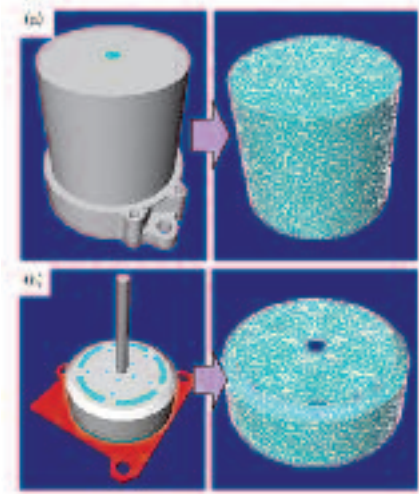


Fig. 7 Meshed models
(a)For inner rotor motor (b)For outer rotor motor

2.3 実験手順

まず計測対象であるモータ側面部付近にマイクを設置し、モータを駆動させ磁気音を測定する。磁気音が最大となる回転数とその時の騒音レベルを記録する。その後2.2で述べた非定常音源探査装置を用い、対象物表面の振動変位を計測する。マイクを配置した非定常音源探査装置をFig. 8に示す。

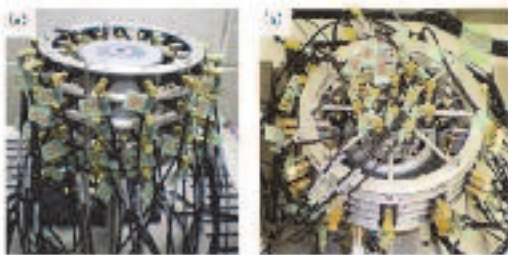


Fig. 8 Microphone-placed arrays
(a)For inner rotor motor (b)For outer rotor motor

3. 実験結果

3.1 インナロータ型モータの非定常音源探査結果

インナロータ型モータを稼働させ、ステータ側面部における磁気音を測定したところ、回転数1650 rpmの時に磁気音が最大となった。その際の周波数-騒音レベル特性をFig. 9に示す。ステータの共振周波数1926 Hz付近で騒音が最大となっている。

続いて回転数1650 rpm, 周波数1926 Hzにおいて、非定常音源探査装置を用いてステータ表面の振動変位を演算した。ステータ表面の任意の点の振動周期をTとして、T/4毎に時系列に並べた結果をFig. 10に示す。

ここで黄色の様に暖色系で示される領域は振動変位が正であり、ステータの径外方向への変位を表している。対して青色の様に寒色系で示される領域は振動変位が負であり、ステータの径内方向への変位を表している。ステータの周方向に暖色領域と寒色領域が交互に2つつ存在し、暖色領域と寒色領域が周期的に入れ替わっていることから、ステータはハンマリング試験で確認した円環2次の定在波で共振していることを確認できた。

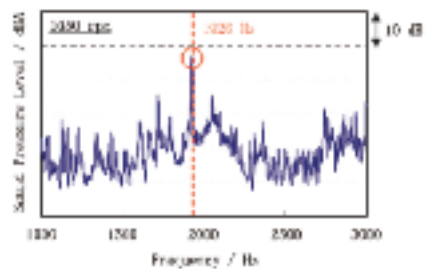


Fig. 9 Sound pressure level of inner rotor motor at 1650 rpm

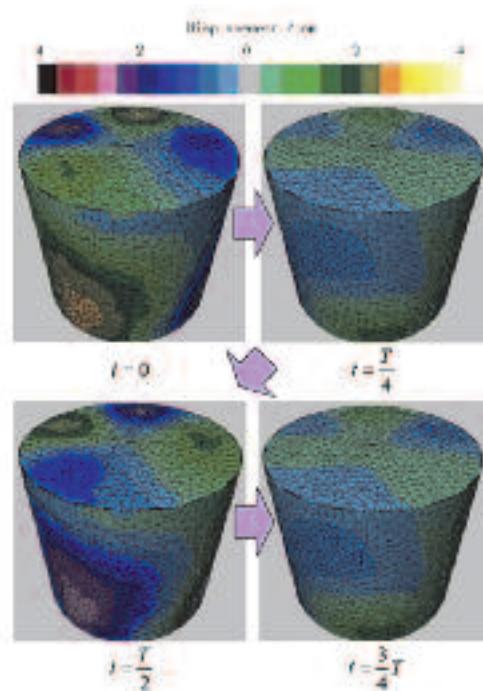


Fig. 10 Vibration displacements on surface of the stator at 1926 Hz

3.2 アウタロータ型モータの非定常音源探査結果

3.2.1 全周波数成分

アウタロータ型モータを稼働させ、ロータ側面部における磁気音を測定したところ、回転数2783 rpmの時に磁気音が最大となった。その際の周波数-騒音レベル特性をFig. 11に示す。ロータの共振周波数2226 Hzを挟む様にして2つの騒音ピークが発生している。

続いて回転数2783 rpmにおいて、非定常音源探査装置を用いてロータ表面の振動変位の全周波数成分を計測した。ロータ表面の任意の点の振動周期をTとして、T/4毎に時系列に並べた結果をFig. 12に示す。ハンマリング試験で確認した円環2次の定在波が、図中黒色の矢印で示す様にロータと同じ回転方向の反時計回りに移動する進行波であることが確認された。

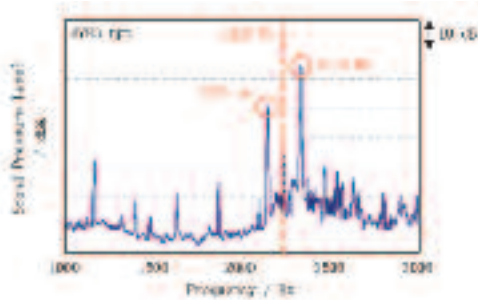


Fig. 11 Sound pressure level of outer rotor motor at 2783 rpm

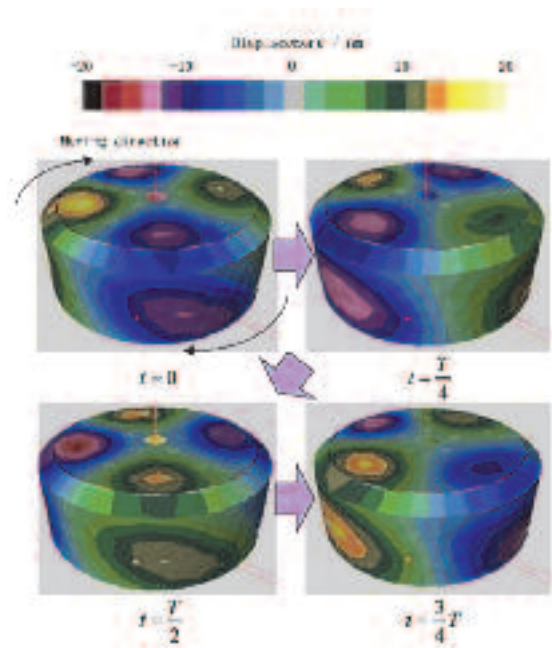


Fig. 13 Vibration displacements on surface of the rotor at 2133 Hz

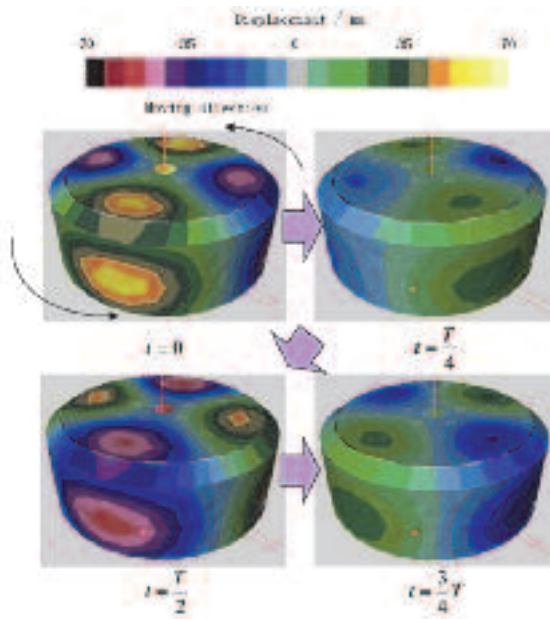


Fig. 12 Vibration displacements on surface of the rotor in all frequency range

3.2.2 2133 Hzの騒音ピーク

2133 Hz、2319 Hzの2つの騒音ピークの内、分析する周波数を1つに限定し、それぞれの騒音ピークにおけるロータ表面の振動変位を算出した。Fig. 13は2つの騒音ピークのうち、周波数が低い方である2133 Hzにおける振動変位である。図中黒色の矢印で示す様に、回転方向とは逆に移動する円環2次の後退波で振動していることが確認された。

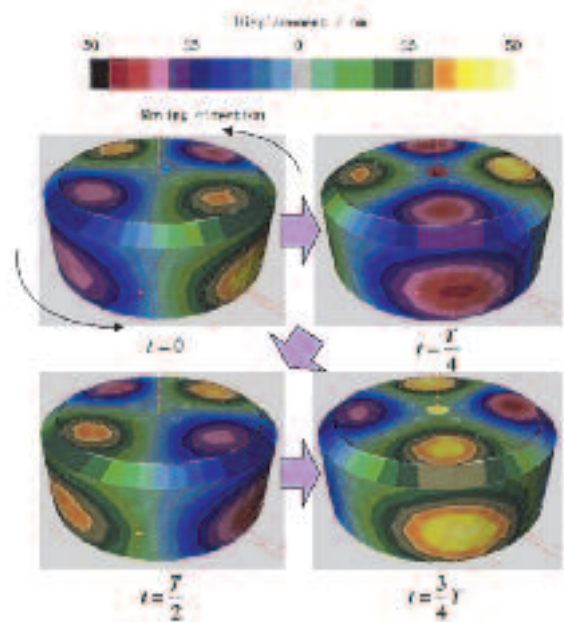


Fig. 14 Vibration displacements on surface of the rotor at 2319 Hz

3.2.3 2319 Hzの騒音ピーク

2つの騒音ピークのうち、大きい方である2319 Hzにおける振動変位をFig. 14に示す。図中黒色の矢印で示す様に、回転方向に移動する円環2次の進行波で振動していることが確認された。

4. 考察

4.1 ステータの振動

円環2次のモードを持つ円筒体の表面における振動変位を考える。モードがFig. 15で示す様な共振周波数 f_c [Hz]で振動する定在波である時、振動変位は以下で表される。

$$U(\theta, t) = U_0 e^{j2\theta} \frac{e^{j2\pi f_c t} + e^{-j2\pi f_c t}}{2} \quad (1)$$

ここで、 U_0 は最大変位[m]、 θ は空間位相[rad]を表す。式(1)はインナロータ型モータのステータの共振周波数 $f_c = 1926$ Hzで振動する定在波を示すFig. 10の結果と一致する。式(1)の構成から、振動変位はFig. 16に示す様に進行波と後退波の重ね合わせと考えることができ、共に共振周波数 f_c で変動する。

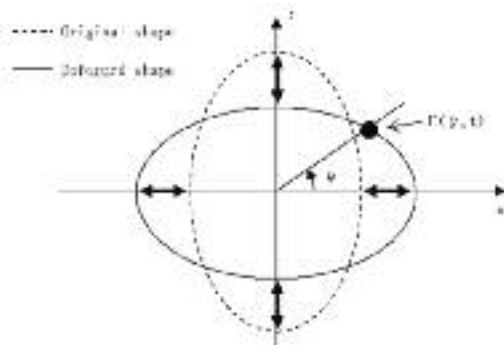


Fig. 15 Vibration displacements on the surface of cylindrical body

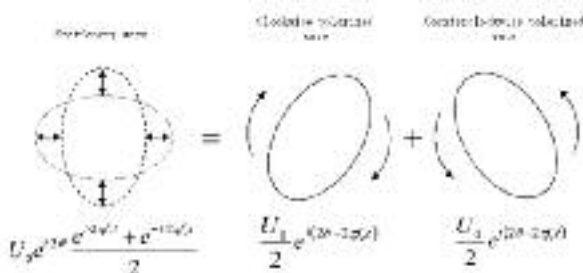


Fig. 16 Division of stationary wave into two polarized waves

4.2 ロータの振動

式(1)で表されるモードが回転数 a_0 [rps]で移動する時、固定座標における振動変位は以下で表される。

$$U(\theta, t) = U_0 e^{j2(\theta - 2\pi a_0 t)} \frac{e^{j2\pi f_c t} + e^{-j2\pi f_c t}}{2} \\ = U_0 e^{j2\theta} \frac{e^{j2\pi(f_c - 2a_0)t} + e^{-j2\pi(f_c + 2a_0)t}}{2} \quad (2)$$

振動変位はFig. 17に示す様に進行波と後退波に分解でき、後退波は周波数 $f_c - 2a_0$ 、進行波は $f_c + 2a_0$ となり、異なる周波数で変動する。

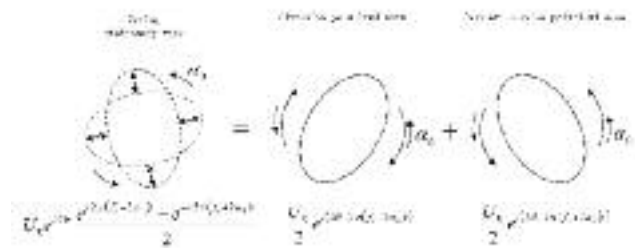


Fig. 17 Division of moving stationary wave into two polarized waves

アウトロータ型モータのロータの共振周波数 f_c は 2226 Hz、ロータの回転数 a_0 は 2783 rpm すなわち 46.38 rps であるから、後退波および進行波の周波数は以下になる。

$$f_c - 2a_0 \approx 2133 \text{ Hz}, \quad f_c + 2a_0 \approx 2319 \text{ Hz} \quad (3)$$

Fig. 11で発生した2つの騒音ピークと周波数が一致しており、またFig. 13, Fig. 14で示した振動変位の移動方向もそれぞれの周波数で一致している。これにより、ロータから発生する磁気音は共振周波数に対し、ロータ回転数の2倍の周波数だけ正負にずれた2つの周波数で発生することを導出できた。

5. むすび

アウトロータ型モータであるブロワモータにおいて、ロータが共振しながら回転することにより、共振周波数と異なる2つの周波数の磁気音が発生することを明らかにした。

また円環2次モードで共振するロータでは、発生する磁気音は共振周波数に対し、ロータ回転数の2倍の周波数だけ正負にずれた2つの周波数で発生することを理論式により導出し、ESMを導入した非常音源探索装置により現象を実験的に確認した。

本研究を遂行するにあたり、非常音源探索装置の開発にご協力頂きましたブリュエル・ケアー社の Jesper Gomes様、石井豊様に深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) Sun, Tao, et al : “Effect of pole and slot combination on noise and vibration in permanent magnet synchronous motor”, Magnetics, IEEE Transactions on 47.5, p.1038-1041 (2011)
- 2) Islam, Mohammad, Rakib Islam, and Tomy Sebastian : “Noise and vibration characteristics of permanent magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) , 2011 IEEE, p. 3399-3405 (2011)
- 3) Islam, Rakib, and Iqbal Husain : “Analytical model for predicting noise and vibration in permanent-magnet synchronous motors”, Industry Applications, IEEE Transactions on 46.6, p.2346-2354 (2010)
- 4) 宮本大資, 梶原逸朗, 細矢直基 : “非接触レーザー加振技術を用いた回転円板の実稼動時振動計測”, 日本機械学会論文集 C 編 77巻, 784号, p.4402-4412 (2011)
- 5) Jesper G, Yutaka I, Bernard G : “Non-stationary Holography on Arbitrary Source Shapes”, Proceedings of Internoise 2014



<著者>



池田 和正
(いけだ かずまさ)
研究開発2部 NV技術開発室
音振動の研究開発に従事



瀬村 純一
(せむら じゅんいち)
研究開発2部 NV技術開発室
音振動の研究開発に従事



大澤 司
(おおざわ つかさ)
技術開発センター デジタル・
エンジニアリング室
音振動のCAE技術開発に従事