

低騒音を目指す密閉タイプの鉄道車両用モータ

Low-Noise Fully Enclosed Type Traction Motors

野田 伸一

白石 茂智

永山 孝

■ NODA Shinichi

■ SHIRAISHI Shigetomo

■ NAGAYAMA Takashi

東芝は、“人と環境に優しい交通システム”への取組みとして、低騒音と省メンテナンスを実現できる密閉タイプの鉄道車両用モータを開発してきた。課題は、密閉によるモータ内部の発熱を効率良く冷却できる構造を実現することである。

ロータに直結した外扇ファンを持つ全閉外扇形モータでは、外扇ファンの騒音低減に取り組んだ。不等配ピッチ羽根を採用するとともに羽根形状の改良を行い、騒音レベルを10 dB(A)低減できた。

走行風を利用した全密閉形モータは、熱-流体解析シミュレーションにより、走行風を利用した冷却ユニットと内部構造の改良で温度低減の課題も解決した。密閉遮音効果により騒音レベルを21 dB(A)低減できた。

Toshiba has been developing fully enclosed type traction motors under a program with the concept of "traction systems harmonized with nature." A technical objective of these efforts is to realize a structure that can efficiently cool the heat generated inside the motor due to its enclosed design.

In the present work to develop low-noise fully enclosed type traction motors, the noise of the outer fan was studied. The irregular-pitch blades of the fan and blade form were improved, and acoustic noise was reduced by 10 dB(A). The cooling structure of the motor was also optimized by heat-flow simulation. As a further measure to solve the temperature issue, a cooling unit was adopted that utilizes the air flow while the motor is running. Sealing of the fully enclosed type traction motor provided a 21 dB(A) reduction in acoustic noise.

1 まえがき

東芝は、“人と環境に優しい交通システム”への取組みとして、低騒音化と省メンテナンスを実現できる鉄道車両駆動用の全密閉形モータの開発を進めてきた。

鉄道車両用モータは、小形・軽量で大出力が要求されることから十分な冷却が必要である。このため、従来からモータ内に外気を通す開放形モータが採用されているが、外気には塵埃(じんあい)が含まれており、モータの定期的な分解清掃が必要である。

そこで、モータを密閉にすれば、モータ内に塵埃が進入しないため、分解清掃が不要となる。また、モータ内に騒音を密閉遮断できるため低騒音なモータが期待できる。

この開発の課題は、密閉によるモータ内部の発熱を効率良く冷却できる構造を実現することである。

ここでは、低騒音化に取り組んだ全閉外扇形モータと全密閉形モータの2機種について述べる。

2 鉄道車両用モータの特徴と課題

従来の鉄道車両用モータは、外気をモータ内部に取り入れて冷却する開放形モータが主流である。この開放形モータは、外気で直接発熱部を冷却できるため、冷却効率がよい

という特長がある。反面、外気をモータの内部に取り入れる際に、微量ながら外気とともに塵埃が混入するため、3年に1度程度の定期的な分解清掃のメンテナンスを必要とする。更に、モータ内の回転子に通風ファンが直結する構造となっており、高速回転時の流体騒音が大きいという問題がある。

密閉タイプのモータの実現のためには、いかにモータ各部の温度上昇を限度内に収めるかが重要になる。温度上昇が飽和している状態では、発熱量と放熱量はつり合っている。その放熱量は、外気への熱伝達だけによって放熱したと仮定すれば、(1)式に示す放熱量(W)は、放熱各部の熱伝達率(h)と温度上昇値(ΔT)の積を放熱面積(A)で積分したものになる。

$$W = \int_0^A h \Delta T \, dA \quad (1)$$

温度上昇値を許容限度以下にするため、熱伝達率と放熱面積を大きくできる次の2機種の開発に取り組んだ。

- (1) ロータに直結した外扇・内扇のダブルファンの強制風により、フレームの熱伝達率を大きくする全閉外扇形モータ
- (2) 走行風を利用した冷却ユニットにて放熱面積を大きくする全密閉形モータ

3 全閉外扇形モータ

図1に全閉外扇形モータの断面構造を示す。

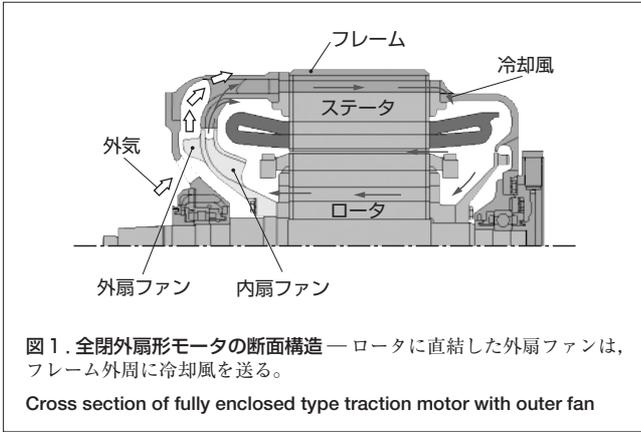


図1. 全閉外扇形モータの断面構造 — ロータに直結した外扇ファンは、フレーム外周に冷却風を送る。
Cross section of fully enclosed type traction motor with outer fan

ロータに直結した外扇ファンが騒音を発生させる。この騒音は、大別すると次の2種類がある。

- (1) 羽根の回転で周期的(回転数×羽根枚数)に生じる圧力が変動し、卓越した周波数成分となる回転風切り音
- (2) 羽根周辺の空気の乱れで、広い周波数にわたる成分となる渦音

回転風切り音は卓越したピーク音となり、ピュアトーン(Pure Tone)という、うるさい音である。そこで、羽根間隔を不等配ピッチにすることでピュアトーンを低減できると考えた。

3.1 不等配ピッチ羽根での騒音低減の原理

単純な不等配ピッチでは、回転バランスと通風性能が悪化する。そこで、羽根の取付け角度と回転バランス量の関係を定式化し、アンバランス量をもっとも少ない条件を見いだした⁽¹⁾。

図2に等配ピッチ羽根と不等配ピッチ羽根を配置した場合の任意の観測点での音圧 $P(t)$ を示す。つまり、等配ピッチ羽根のときは、等しい時間間隔で $P(t)$ が生じるのに対して、不等配ピッチ羽根のときは、その間隔に応じて $P(t)$ の最大値の周期が変動する。

そのため、元の回転風切り音の単一スペクトルが様々な周波数に分散され、騒音の卓越成分は低減できる。

この原理を定式化するため、等配ピッチ羽根の単一スペクトルの振幅を1とし、基本波成分だけを考える。任意の観測点を羽根が通過するときの空気の圧力、すなわち $P(t)$ は式(2)で表すことができる。

不等配ピッチ羽根の各周波数の振幅は、図2に示すように、卓越ピーク音の J_0 倍となり、その両側に ω_m ごとに振幅 J_1, J_2, \dots のスペクトルが分散されて生じることになる。スペクトルの大きさは β の値によって決まる。なお、 $P(t)$ を二つの周波数 ω_{m1}, ω_{m2} で変調すると、式(3)で表すことができる。

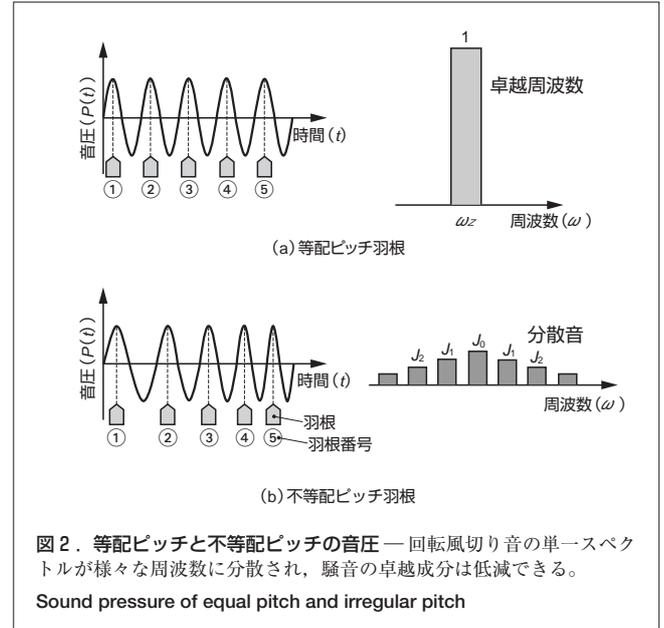


図2. 等配ピッチと不等配ピッチの音圧 — 回転風切り音の単一スペクトルが様々な周波数に分散され、騒音の卓越成分は低減できる。
Sound pressure of equal pitch and irregular pitch

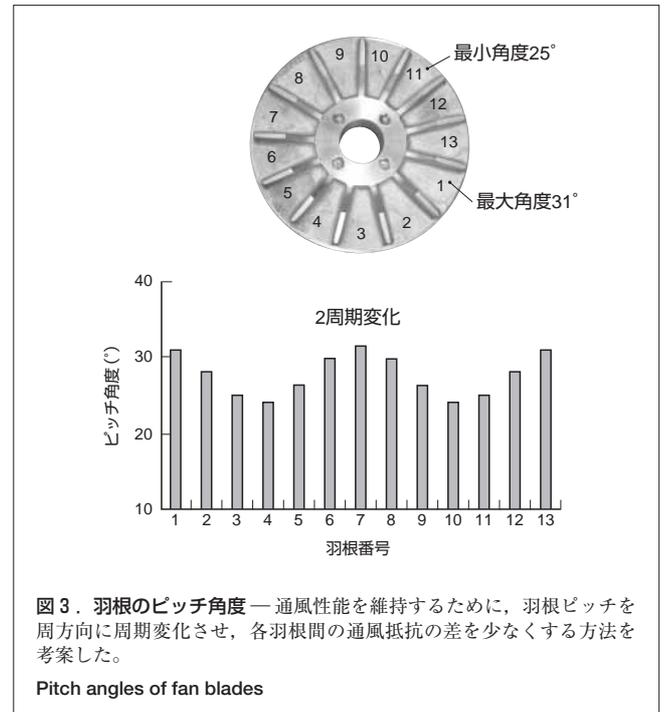


図3. 羽根のピッチ角度 — 通風性能を維持するために、羽根ピッチを周方向に周期変化させ、各羽根間の通風抵抗の差を少なくする方法を考案した。
Pitch angles of fan blades

$$P(t) = \sin(\omega_t \cdot t) \quad (2)$$

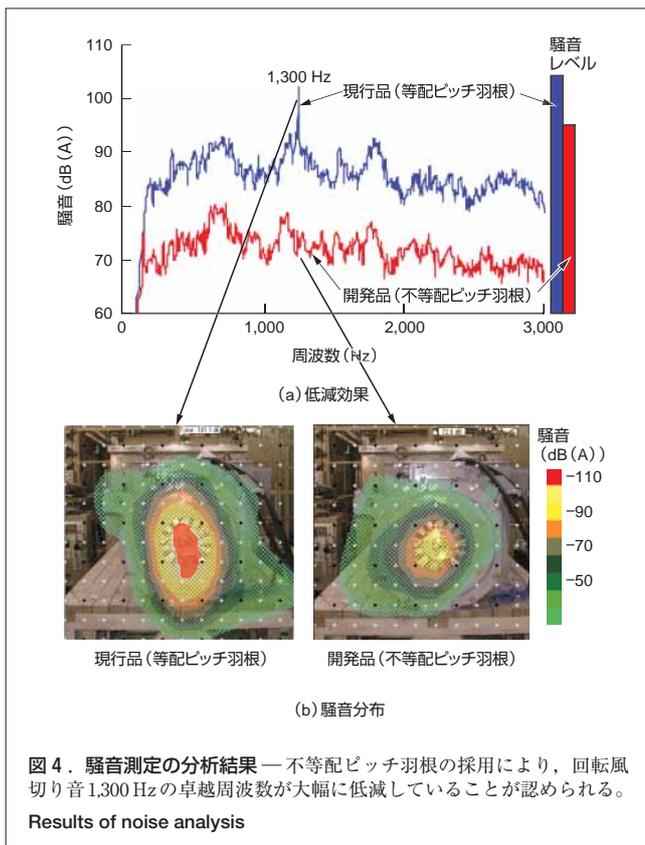
$$P(t) = J_0(\beta) \sin \omega_z t + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta) [\sin \{(\omega_z + n\omega_m) t\} + (-1)^n \sin \{(\omega_z - n\omega_m) t\}] \quad (3)$$

ここで β は図2に示す変調の大きさを表す振幅、 J_0, J_1, J_2, \dots はベッセル関数である。つまり、回転風切り音のスペクトル振幅は $J_0(\beta)$ となり、そのスペクトルの両隣に ω_m ごとに $J_1(\beta), J_2(\beta), \dots$ の分散したスペクトルが生じることになる。

次に通風性能を維持するために、図3に示すように最大ピッチ角度と最小ピッチ角度の範囲で、羽根ピッチを周方向に周期変化させ、各羽根間の通風抵抗の差を少なくする方法を考案した⁽¹⁾。更に、不等配ピッチでも回転バランスが崩れないことを考慮している。つまり、ある羽根が一方向に所定角度ずれるときには、別の羽根が他方向に所定の角度ずれるように設定する。各羽根は相互に補うようにずらして配置するため、羽根全体の回転バランスが崩れることはない。

3.2 全閉外扇形モータの騒音低減効果

図4に不等配ピッチ羽根の採用による実験結果を示す。上図が周波数分析結果を示し、下図に音響インテンシティー法による騒音分布を示す。開発品は、回転風切り音1,300 Hzの卓越周波数が大幅に低減していることが認められる。また、広い周波数にわたり全体に騒音が低減しているのは、羽根形状、通風路の整流と羽根外径の縮小などによる改善効果であり、これにより騒音レベルを10 dB (A) 低減することができた。これは、音響インテンシティーの騒音分布にも明確に差が認められる。



4 全密閉形モータ

全密閉形モータは外部のファンを持たず、密閉された機内に内部ファンを設けている。そのためモータ内に騒音を密閉

遮断でき、低騒音なモータが期待できる。ここでは、走行風を利用した冷却ユニットの冷却特性を向上させ、全密閉形モータを低騒音化した内容を述べる。

4.1 全密閉形モータの冷却原理

図5に示すように、モータ内部のステータ及びロータにて発熱した熱を内部ファン①により冷却ユニット②へ送り込む。そのときに列車が走行する際に受ける向かい風(外気)③を利用して、冷却ユニットの放熱フィンで熱交換させる。冷却ユニットで冷却された空気④を再び機内に送り込む。更に、ロータダクト及びステータとロータ間のエアギャップを通じて内部ファン①に戻る。

このようにして、モータ内部で空気を循環させ、冷却ユニットで熱交換させ、モータ全体を冷却させるのが、このモータの冷却原理である。

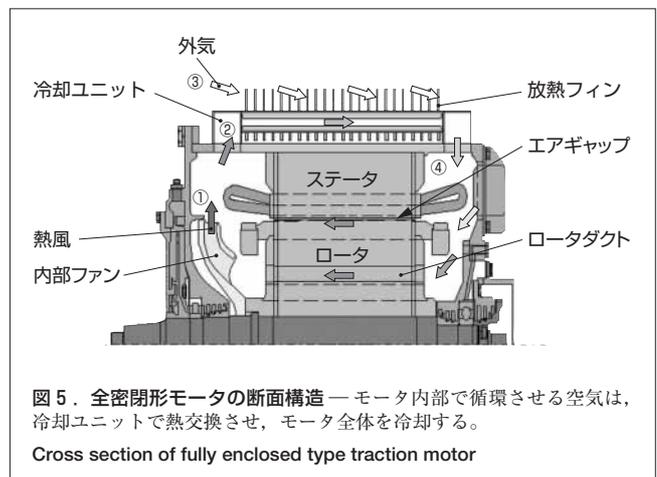
4.2 冷却性能向上による温度低減

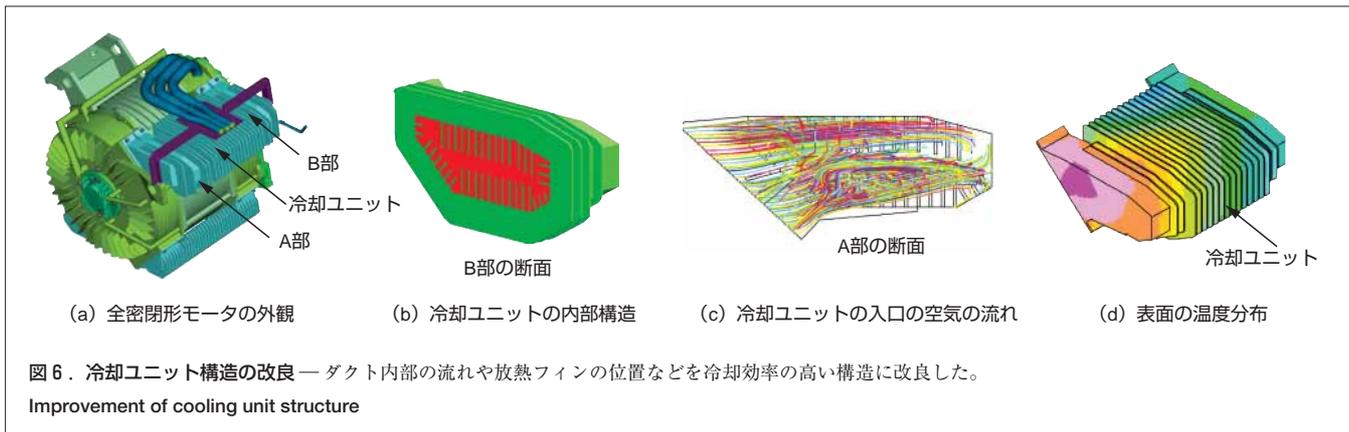
全密閉形モータの冷却性能を向上させるため、以下の構造を採用した。

- (1) ダクト方式の新冷却ユニット 列車走行時の向かい風を利用した、放熱に有利なダクト方式による新冷却ユニットを考案した。図6 (b)にダクト方式の内部構造を示す。
- (2) フレームレス構造 ステータの熱源を熱伝導で直接外部に放熱させるフレームレス構造を採用した。
- (3) ブラケットの放熱フィン 軸受部の冷却性能を向上させるブラケットの内外表面に放熱フィンを設置した。

4.3 熱-流体シミュレーション

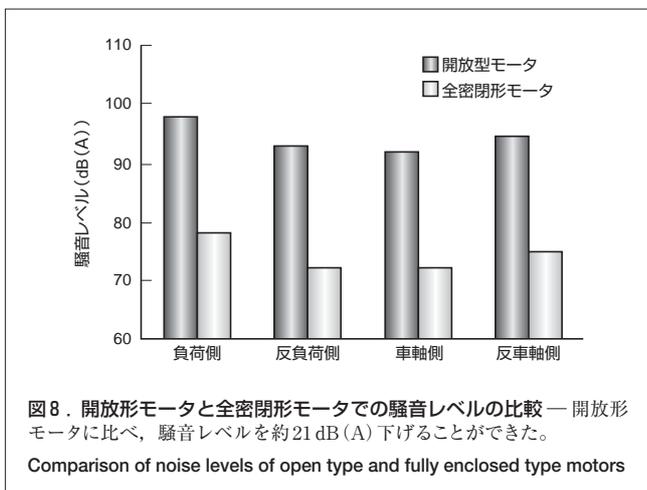
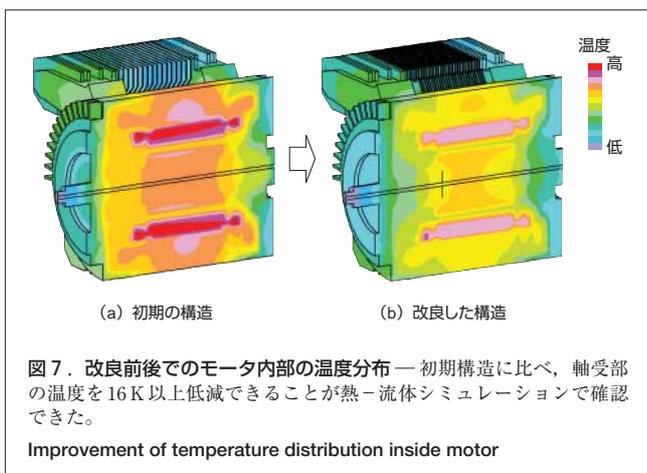
熱-流体シミュレーションを用いて冷却構造の最適化に取り組んだ。冷却ユニットのダクト内部の空気の流れを図6 (c)に示す。ダクト内部の全域に熱風が循環するようにして、放熱しやすい構造に改善した。また、図6 (d)に冷却ダクトの表面温度を示す。温度が高い部分に冷却フィンを追加し、冷却性能を向上させた。





冷却フィンの位置, 内部ファンの大きさ, 冷却ダクトの位置, ロータダクトの数など, モータ全体の冷却構造のシミュレーションを実施し, 最適化した。図7に冷却効果を最適化した温度分布の結果を示す。

その結果, 初期構造と比較して, モータ全体の温度が低減でき, 固定子で25 K, 軸受部で16 K以上低減できることが確認できた。



4.4 密閉による騒音低減の効果

図8にモータ単体を5200 rpmで回転させたときの, モータから1 m離れた位置による騒音の測定結果を示す。

全密閉形モータの騒音は, モータ周り4か所の平均値で74 dB(A)であり, 開放形モータと比較して21 dB(A)低減しており, これは密閉構造による遮音効果である。

5 あとがき

人と環境に優しい低騒音と省メンテナンスが実現できる全閉タイプのモータは, 更に多くの鉄道車両に適用を拡大していきたい。

今後, 流体による冷却性能の向上と永久磁石の採用による大容量化を行い, ユーザーニーズへ対応した魅力ある全閉タイプモータのシリーズ化を完成させる。

文 献

- 野田伸一, ほか. 送風機の低騒音設計. 日本機械学会論文集C編. 66, 649, 2000, p.2960 - 2965.
- Noda S., et al. Fan noise and Resonance Frequency in Induction Motors. VSTeach2005, p.41 - 46.



野田 伸一 NODA Shinichi, D.Eng.

電力・社会システム社 電力・社会システム技術センター 電機応用システム開発部グループ長, 工博。電機機器及び交通システム分野の研究・開発に従事。電気学会, 日本機械学会, 音響学会会員。

Power and Industrial System Research and Development Center



白石 茂智 SHIRAIISHI Shigetomo

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 交通システム部主査。鉄道車両主電動機の開発に従事。電気学会会員。

Fuchu Operation - Social Infrastructure Systems



永山 孝 NAGAYAMA Takashi

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 交通システム部主査。交通システム分野の回転電機の研究・開発, 設計に従事。日本機械学会会員。

Fuchu Operation - Social Infrastructure Systems