

# 高圧かご形三相誘導電動機 トスマイティ M21 シリーズ

Tosmighy M21 Series High-Voltage Squirrel Cage Three-Phase Induction Motors

神崎 英俊  
H. Kanzaki

小林 浩朗  
H. Kobayashi

銅坂 明彦  
A. Dousaka

1895年にわが国初の電動機を製作して以来、当社電動機は一世紀にわたって産業界のあらゆる分野で使用され続けている。この豊富な経験と最先端の研究開発力を駆使して、省エネルギー、省保全といった新時代のニーズにマッチした高圧かご形三相誘導電動機 トスマイティ M21 シリーズを開発した。

吸振性に優れた鋳物フレームの適用と防振性を考慮した構造の開発により、低振動・低騒音化を図り、環境保全性に優れた電動機である。また、最新の設計技術、シミュレーション技術および製造技術の適用により、高信頼性化、短納期化されている。

Since 1895, when Toshiba built the first motor in Japan, we have provided motors for use in all fields of industry. Utilizing our wealth of experience and expertise in research and development, we have developed the new Tosmighy M21 series of three-phase induction motors. These motors respond to the demands of the new era by helping to conserve energy and facilitating maintenance.

The new cast-iron frame has excellent vibration absorbability and a new vibration-proof construction, enabling quiet operation with minimal vibration. Moreover, through the application of new design methods, simulation methods, and production technologies, this series offers high reliability and can be delivered rapidly to customers.

## 1 まえがき

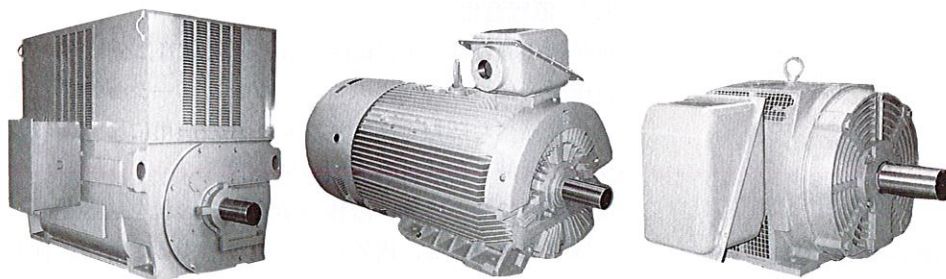
近年、電動機に要求される性能がますます高度化、多様化しており、特に低振動・低騒音化、高信頼性化、小型・軽量化、省保全化、高効率化のニーズの高まりは著しい。この要求にこたえるために、当社は電動機製造100年以上に及ぶ経験と最先端の研究開発力を駆使して、高圧かご形三相誘導電動機“トスマイティ M21 シリーズ”を開発した。

このシリーズは、低振動・低騒音化を一步進め、環境保全性に優れた使いやすい電動機である。また、最新の設計技術、シミュレーション技術および製造技術の適用により、高信頼性化、短納期化を推進し、顧客志向に徹底した開発と製品化を行った。以下にその内容を紹介する。

## 2 M21 シリーズの範囲と特長

トスマイティ M21 シリーズは、①上部に風導をもつトップハットタイプ、②密閉構造のフィンフレームタイプ、③防滴保護構造のオープンフレームタイプの3機種群から構成されており、用途に応じた保護構造(JEC(電気学会発行の規格)のIP(International Protection)構造)の選択が可能となっている。このシリーズはかご形誘導電動機の2~10極、電圧階級は2~6 kV級、出力は75~2,500 kWを対象としている。また、JECなどの国内関連規格はもとより、海外の規格にも対応可能なグローバル志向のシリーズである。

図1に各タイプ電動機の外観、表1にシリーズの特長を示す。



(a) トップハットタイプ：開放屋外形標準電動機

(b) フィンフレームタイプ：全閉外扇形小容量標準電動機

(c) オープンフレームタイプ：防滴保護小容量標準電動機

図1. 高圧かご形三相誘導電動機 トスマイティ M21 シリーズ 出力、枠番号、保護構造などの違いにより3機種群をそろえている。

Tosmighy M21 series high-voltage squirrel cage three-phase induction motors



表1. トスマイティ M21 シリーズの特長  
Features of Tosmity M21 series

タイプ	枠番号*	出力 範囲 (kW)	特 長
トップハット	355 450	160 2500	上部の風導を交換することによりあらゆる環境に対応できる。
フィンフレーム	250 400	75 900	省スペース型の全閉タイプ。屋外はもとより、粉じんのある環境下で使用できる。
オープンフレーム	250 355	75 800	防滴保護タイプで、省スペースにもっとも優れている。

\*枠番号とは電動機の大さを表す記号。

### 3 特 性

#### 3.1 低振動化

M21 シリーズには、鋳物フレームを全面的に適用し、鋳鉄の優れた吸振性を生かして低振動化を図っている。特に、トップハット機種については、防振性を考慮した固定子鉄心支持方法の開発およびフレーム断面構造の均一化による磁気アンバランスの低減などの新技術を導入し、外被構造への電磁振動の伝達を大幅に低減している。

また、電動機の安定した運転を実現するためには、電動機単体の固有振動特性を正確に予測することが必要であり、さらに、基礎の剛性の影響を考慮した電動機全体系の振動特性を把握することが重要である。

このシリーズの開発に先立って構築した電動機全体系の固有振動特性解析システムを用いて行った振動モード解析結果と、それから得られる据付け剛性の影響による固有振動数の変化のようすを図2、および図3に示す。

図3および基礎の剛性データから、固有振動特性を評価することにより、現地での共振を回避することができる。

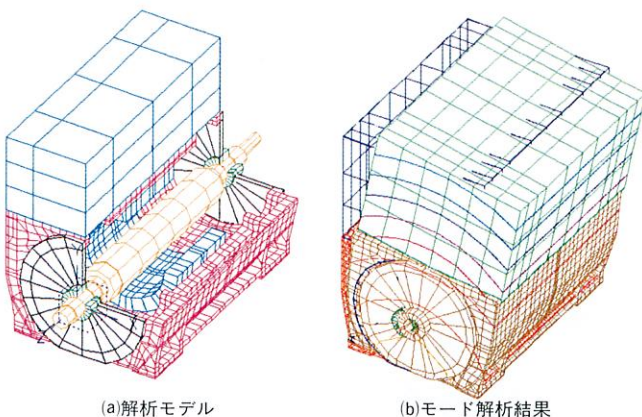


図2. トップハットタイプの解析モデルと振動モード解析結果 (a)は固有振動特性解析システムを用いて詳細に構成部品をモデル化したものである。わかりやすくするため部品ごとに色分けしている。(b)は基本となる固有振動モード図で濃いブルーと赤色の線が変形前を示す。  
Analytical model and vibration mode

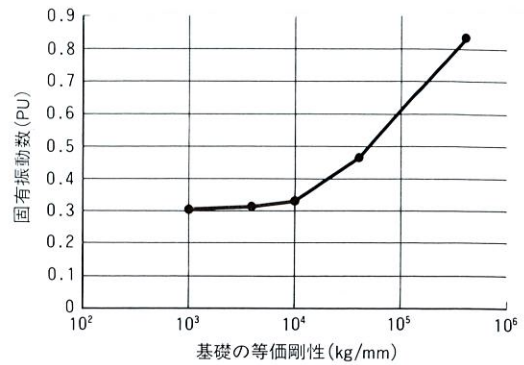


図3. 基礎の剛性と固有振動数の関係 基礎やベースの影響を等価剛性に置き換えて電動機全体の固有振動特性を解析により求めたグラフである。電動機の固有振動数が基礎の等価剛性により変化する。

Relationship between base stiffness and motor natural frequency

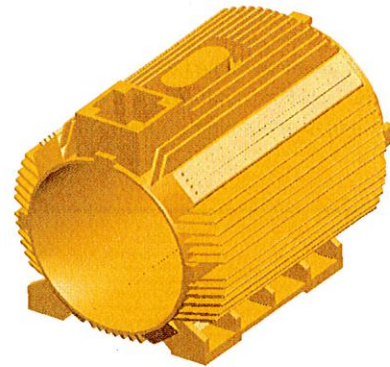


図4. フィンフレーム三次元モデル 三次元CADデータを用いて、剛性・振動解析を実施し、製品の信頼性を高めている。図は、3D-CADモデルを示す。

3D model of fin frame

図4は、フィンフレームのCADデータを用いた構造解析モデルである。これを用いて三次元構造解析を実施し、フレーム脚部構造の最適化により高剛性化を図った低振動化フレームを開発し、シリーズ設計に反映している。

また、ロータダイナミクスの観点からも十分な検討を行い<sup>(1)</sup>、振動的に安定な軸系の設計をシリーズ設計に反映して低振動化を図っている。

#### 3.2 低騒音化

電動機の騒音は、主に電磁騒音と通風騒音に分けられる。電磁騒音については、スロットコンビネーションの最適化と先に述べた防振・高剛性フレームの適用により、音源パワーの低減と伝達低減を図っている。

通風騒音については、流体力学的に翼形状を最適化し、また翼枚数を減らし、内外径比を適切化することで、従来に比べ風量を約13%増大させて、かつ3~4 dB(A)の騒音低減を図った。この新型ファンは、トップハットタイプとフィンフレームタイプの全閉外扇形電動機に適用している。



オープンフレームタイプには、当社独自の低圧鋳造ロータのラジアル通風ダクト成形技術を適用し、ラジアルダクト配置の実験的検証に基づいた改良により、約5dB(A)の騒音低減を図っている。

### 3.3 冷却特性

トップハットタイプは機内温度の平均化を目的として、低損失軸流ファンによる両側通風方式を高速機に採用した。通風回路網解析により機内風量分布のパラメータサーベイを行い、冷却風量分布の最適化を図った。この解析結果に基づいて各部の熱伝達率を求め、数値解析手法を用いて温度分布の平均化を確認し、シリーズ設計に反映している。

図5は、トレーサ法による全閉外扇形の熱交換器内の冷媒分布可視化試験結果の一例であり、熱伝達特性を向上させる冷却パイプ寸法、ピッチなどの設計条件の導出を行った。これにより滞流分布の排除、流れの安定化、流量分布の適正化など解析だけでは得られない効果を得た。

また、外扇に先に述べた低ヘッド型高風量低騒音ターボファンを適用することにより冷却風量の増加を図った。フィンフレームタイプではフレーム内気循環路形状の改善により固定子鉄心とフレームとの接触面積の拡大を図り、冷却性能を向上させている。一方、フレームの内気循環路の面積を拡大し、新しく開発した両回転可能な高ヘッド型端板付き内扇を適用して内気の循環を活性化し、電動機全体温度の平均化を図っている。

### 3.4 高信頼性化

回転電気機械である電動機は、電気現象と機械現象の複合した挙動を伴う。したがって、信頼性を確保するためには両方の現象をリンクさせた評価が必要となる。図6は、固定子コイルエンド部のCAE(Computer Aided Engineering)解析モデルの自動生成結果を示したものである。これにビオサバルの法則を適用した三次元の電磁力解析(図7)を行い、得られた電磁力分布を用いて振動および変形・応力

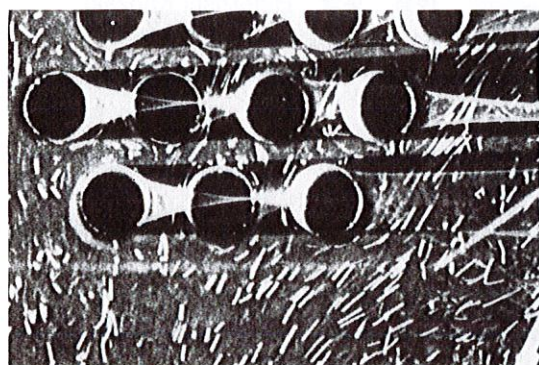


図5. 熱交換器内の冷媒流れ ポリスチレンをトレーサとして水を用いて流体力学的に等価な条件をつくり電動機内部の冷媒流れを可視化して、通風冷却を最適化した。図は、その流れを見た写真でパイプ間を流れる冷媒の状態が把握できる。

Refrigerant flow in heat exchanger

解析(図8)を実施する。さらに実験により得られた固定子コイルおよび絶縁材料の強度データと合わせて支持構造を検討し、シリーズの信頼性を向上している。

一方、ロータに関しては、低圧鋳造アルミロータの適用拡大を行い、インバータ駆動などの多様なニーズに応じた特性を得るための設計自由度の拡大やロータバーとエンドリングの一体化による強度向上を図っている。図9はエンドリングおよびロータバー部の低圧鋳造アルミの実体試験片を用いたクリープ特性試験結果であり、弾塑性応力解析の結果(図10)と合わせて非線形現象の評価を行っている。また、その実体試験片の組織評価、高温引張試験、疲労試験と合わせて信頼性を確保している。

### 3.5 省保全化

このシリーズの軸受は、高速大容量機を除きグリース潤滑の転がり軸受を採用している。メンテナンスの省力化のニーズにこたえるため、新シリーズではグリースの油分を効率よく軸受部に導く最適な軸受箱構造を採用し、潤滑寿命の延長を図っている。



図6. 固定子コイルエンド解析モデル 固定子コイルエンド部の三次元CAE解析モデルを自動生成した結果である。黄色がコイルでブルーが鉄心である。Stator coil end calculation model

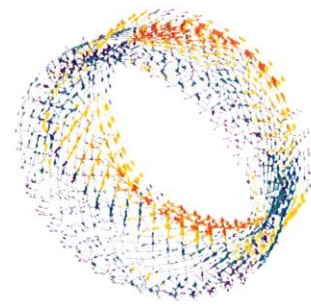


図7. 電磁力分布解析結果 図6のモデルにビオサバルの法則を適用し、電磁力解析を行うことにより、コイルエンド部に作用する力の分布状態が把握できる。図は矢印により電磁力の方向と大きさを表しており、実線部がコイルである。Electromagnetic force distribution

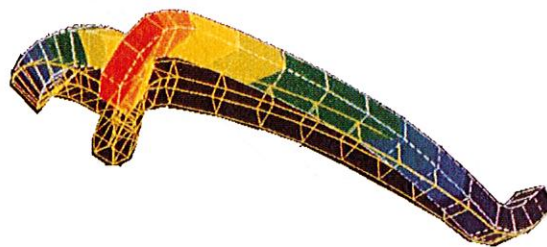


図8. コイルエンド部変形解析 図7の電磁力分布から求めた1コイル分の変形解析結果であり、材料の強度データと合わせてコイルの信頼性評価を行っている。黄色い実線は変形前を示し、それぞれの色は変形の大きさの分布を示す。

Displacement analysis of coil end



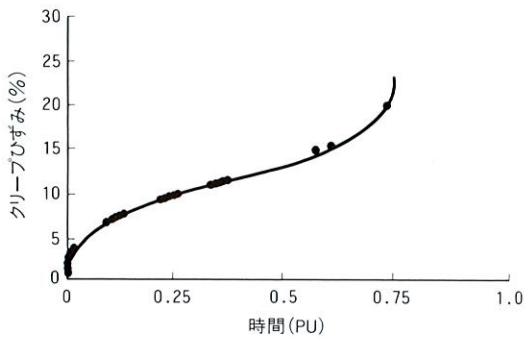


図9. クリープ特性試験結果 実際の低圧鋳造アルミのクリープ特性試験を実施し応力、温度、時間をパラメータとした強度評価を行い、製品の信頼性を高めている。図は、温度一定で一定荷重を与えたときのクリープ特性曲線である。

Results of creep characteristics test

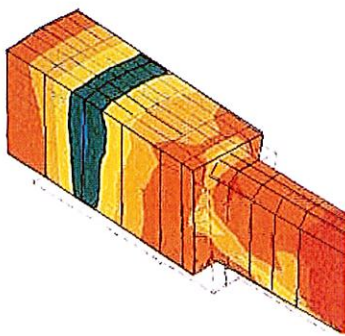


図10. エンドリングとロータバーの弾塑性解析結果(相当応力コンター図) 温度分布および遠心力を考慮した低圧鋳造ロータバーのエンド部における弾塑性応力解析結果である。黒い破線は変形前を示しており、その他の色は相当応力分布を示している。  
Elastic-plastic analysis of rotor bar end

さらに、酸化安定性を向上させる<sup>(2)</sup>ことにより長寿命化が図れた新グリースを開発した。図11は、新グリースを用いた軸受寿命試験結果を示したもので、従来の耐熱性長寿命グリースに比較して、さらに長寿命化を図っている。

以上から、新シリーズのグリースの補給インターバルを2倍以上(当社従来シリーズ比)に延長し、電動機のメンテナンスの省力化を図っている。

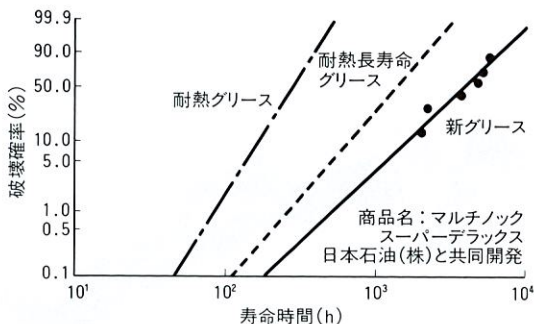


図11. 潤滑寿命試験結果 開発したグリースと従来からのグリースのワイブルプロットを示したもので、グリース単独で従来の2倍寿命を確保している。

Results of lubrication life test

#### 4 短納期化

このシリーズの対象となる電動機は、多品種少量生産機種でありながら、最近の動向として短納期の要求が非常に強くなっている。これに対応するために、人工知能(AI: Artificial Intelligence)を応用した新設計システムを開発し、ルーチン設計に適用している。

信頼性の高い実績データを活用した事例ベース推論(Case-Based Reasoning)<sup>(3)</sup>を基本とするシステムであり、徹底した標準化により各種仕様に対する設計内容を自動展開し、設計効率の向上を図っている。その結果、複雑な設計ルールが必要となるモディファイ設計の自動化が実現でき、製造リードタイムの短縮に寄与している。

また、鋳物造形工程における減圧造型の新設備化と、巻線絶縁工程への新自動化設備の導入により品質向上させ、品質のばらつきをなくすとともに、短納期化を達成した。

#### 5 あとがき

継続的に実施してきた種々の要素技術開発の成果を折り込み、新しい時代のニーズに適応した環境保全性、メンテナンスの省力化に優れた電動機トスマイティ M21シリーズの開発を行った。今後も、ここで述べたような要素技術の開発に注力し、材料技術、パワーエレクトロニクス技術との融合により、さらに高度化した社会ニーズに適合する製品を提供していけるよう努力していく。

#### 文献

- (1) 神寄英俊, 他: 機械学会論文集, 60, 578, C, pp.6-12 (1994)
- (2) C. Araki, et al: A study on the thermal degradation of lubricating greases 61st, Annual Meeting of NLGI, Oct. 23-26, (1994)
- (3) 服部雅一, 他: 人工知能学会誌, 9, 1, pp.82-90 (1994)



神寄 英俊 Hidetoshi Kanzaki

三重工場 中形回転機部主査。  
中形高圧三相誘導電動機の開発・設計に従事。日本機械学会、日本トライボロジー学会会員。  
Mie Works



小林 浩朗 Hiroaki Kobayashi

三重工場 中形回転機部主査。  
中形高圧三相誘導電動機の開発・設計に従事。電気学会会員。  
Mie Works



銅坂 明彦 Akihiko Dousaka

三重工場 中形回転機部。  
中形高圧三相誘導電動機の開発・設計に従事。日本機械学会会員。  
Mie Works