

## 全閉式主電動機の実機検証および軸受部評価試験

Evaluation test of bearing portions and actual verification of totally-enclosed type traction motors



佐藤 真哉\*



菅谷 誠\*\*



佐藤 春雄\*

Although a recent traction motor applies a self-ventilating system as its cooling system and has a structure in which the outside air is captured through a filter, abnormal vibration is occurring by the entry of dust into the internal portion of the motor. To solve this problem, the introduction of totally-enclosed type traction motors can be considered as an option.

In this development, we produced an totally-enclosed outside-fan type traction motor and bearing evaluation unit test apparatus, and we performed bearing unit evaluation tests and traction motor performance tests.

As a result, we confirmed that our totally-enclosed outside-fan type traction motor satisfies predetermined performance. As for the bearing evaluation unit test, we confirmed that there was no degradation tendency in grease and abnormality in the bearing.

●キーワード：主電動機、全閉式、外扇式、軸受、グリース、非分解軸受交換構造、メンテナンス、軸受部評価試験

### 1. はじめに

従来の在来線において使用されている車両用主電動機の冷却方法は、回転子に組み込まれたファンにより、外気をフィルタを介して電動機内部に取り込み、固定子の電機子コイルおよび回転子を冷却する開放自己通風式が主流となっている。この方法では外気を電動機内部まで導入することができる一方で、冷却風に含まれる塵埃をフィルタで完全に除去できないために、電動機内部に塵埃が付着・堆積する可能性がある。このため、電動機内部が汚損するだけでなく、回転子風穴に塵埃が堆積してバランスが崩れることによる回転時の異常振動や、総合車両センター入場時の気吹きによる塵埃除去などメンテナンス面が問題となっている。

それに対し全閉式主電動機は、電動機内部を外気から遮断することで塵埃の侵入を防ぐものであり、電動機内部の固定子および回転子の冷却方法によりファンを電動機外部に設けた外扇式と電動機内部に設けた内扇式に分けられる。

本報告においては、E233系やE531系などの通勤電車でも広く用いられているMT75形主電動機の諸元をベースに全閉式主電動機の仕様の概略を設定し、詳細について設計検討を行った。また、全閉式主電動機は構造上、軸受部の温度が従来の開放自己通風式に比べて10K程度高くなることで温度上昇シミュレーションにより想定されたため、グリース寿命についての検証が必要となった。このため、軸受部評価試験のための装置を全閉式主電動機本体に先行して製作し、高速度での回転試験を実施して軸受部の寿命についての検討を行った。

### 2. 開発の目標

(1) 全閉式主電動機的设计・製作と性能確認試験

非分解軸受交換構造（主電動機を解体せずに軸受のみ交換可能な構造）の全閉外扇式の誘導電動機の試作を行い、性能確認、各部の温度上昇確認を実施する。

(2) 軸受部評価試験装置の設計・製作

軸受部評価試験装置を設計・製作して、軸受の耐久試験を実施する。

(3) 軸受使用可能期間の検証

(2)項の試験結果より、全閉式主電動機が80万キロ走行相当の累積回転数まで非分解で使用可能であることを検証する。また、80万キロ走行相当の累積回転数に達した時点で中間給油を行い、160万キロ走行相当の累積回転数まで軸受非分解で使用可能であることを検証する。

### 3. 全閉式主電動機的设计検討

全閉式主電動機的设计検討を行った。主な仕様については、MT75形主電動機の諸元をベースにした。

#### 3.1 冷却方式

全閉式主電動機の固定子および回転子を冷却する方法として、ファンを電動機外部に設けた外扇式と、電動機内部に設けた内扇式がある。両者を比較すると、騒音低減効果は内扇式が大きいものの、冷却効率が悪いため、それを補うために電動機体格を大きくする必要があるとともに質量も大幅に増加するデメリット面が大きい。外扇式は騒音の点では従来

機並みではあるが、冷却効率は内扇式よりも優れている。騒音が90dB程度以下では駆動装置などの主電動機以外の騒音が主となり、騒音低減効果が表れにくいいため、冷却方式は冷却効率の優れている外扇式とした。

### 3.2 極数

電動機の極数について検討した。従来機では構造の比較的簡単な4極が広く用いられている。一方、6極は巻線接続が複雑になるが、電動機体格が小さくなり、軽量化を図ることができる利点を持つ。しかし、制御方法が変わることから、採用に関しては制御方式とのマッチングを検討のうえ、体格とコストのバランスを見て選定する必要がある。本研究ではMT75形主電動機互換の電動機を設計するという方針から、4極を選定した。

### 3.3 主電動機特性

本研究ではMT75形主電動機の電動機特性をもとに設計を進めることにした。

1時間定格出力を140kW、線間電圧1100V、定格電流93A、定格周波数80Hz、定格回転速度2360r/minを合わせるようにして設計検討を行った。検討した定格を表1に示す。

表1 主電動機定格(計画値)

定格の種類	開発品			MT75(参考)		
	1時間	連続	代用定格	1時間	連続	代用定格
出力(kW)	140	128	104	140	128	104
線間電圧(V)	1100		825	1100		825
電流(A)	93	86	93	93	86	93
周波数(Hz)	80		60	80		60
すべり(%)	1.5	1.4	2.0	1.6	1.4	2.1
回転速度(r/min)	2360	2365	1770	2360	2365	1760
効 率 (%)	94.5	94.5	93.5	92.5	92.5	92.0
力 率 (%)	85.5	85.0	85.5	85.5	84.5	85.5

絶縁種別 H種

温度上昇限度 190K(固定子巻線;抵抗法)

最高使用回転速度 5818r/min

(速度140km/h、車輪径774mm、歯数比6.06)

最高試験回転速度 6980r/min

### 3.4 外形

主電動機の外形は容量、極数、冷却構造などにより大きく変わる。本研究の全閉式主電動機の設計に際しては、MT75形主電動機と互換のものを想定しているため、外形についてはMT75形主電動機と取付互換とし、E233系の台車に取付可能な寸法とすることとした。開発品の外観(駆動側)を図1、外観(反駆動側)を図2に示す。



図1 開発した全閉式主電動機外観(駆動側)



図2 開発した全閉式主電動機外観(反駆動側)

### 3.5 全閉構造

全閉式主電動機は外気を機内に取り入れない構造のため、内部に塵埃が入らず、清掃のために電動機を分解する必要がない。また、内部汚損がないために絶縁の信頼性も向上するメリットがある。

フレームの下面は外気(走行風)にさらされるため、フレーム表面からの冷却も期待して、フレーム下部には放熱フィンを設置し、熱を外部に放出するようにしている。

### 3.6 質量

全閉式主電動機は、電動機内部に外気を導入しない構造のため冷却方法を工夫する必要があり、構造が複雑となるため質量も大きくなる傾向がある。本研究における全閉式主電動機の試作品はMT75形主電動機の560kgより増加しており、計画質量を615kgと想定した。

### 3.7 騒音

全閉式主電動機の特徴の一つとして、電動機内部の騒音が外部に漏れてこないため低騒音が図れるということが挙げられる。ただし、本研究で設計するものは外扇式であり、電動機外部の外扇ファンで固定子を外側から冷やす構造であるため、外扇ファンの風切り音による騒音が発生する。設計に際しては、MT75形主電動機の91.5dB（Aスケール、5000r/min）以下の90dB（同条件）を目標として冷却構造を決定した。

### 3.8 軸受構造

軸受についてはMT75形主電動機と同じ反駆動側に玉軸受6311、駆動側にコロ軸受NU214を採用した。潤滑方式については、油潤滑との比較を行った結果、油漏れの懸念がなく、温度上昇についてもグリースが軟化するような温度上昇とはならないことが判明したため、実績のあるグリース潤滑とした。

全閉構造とすることで、総合車両センター入場時に行っていた気吹きのための分解作業は不要となる。軸受のメンテナンスについては、今回設計した全閉式主電動機では、160万キロでグリース交換、320万キロで軸受交換を想定している。これらの作業を行うためだけに電動機本体まで分解する必要はないため、軸受部分だけ取り外すことのできる「非分解軸受交換構造」を採用した。

## 4. 軸受部評価試験装置の設計検討

### 4.1 全体構造

本研究で開発した全閉式主電動機の軸受の評価試験を行うに際して、軸受部評価試験装置を設計、製作して、主電動機の製作に先行して回転試験を実施した。

軸受部評価試験装置自体は電動機ではなく、外部に設けられた駆動用電動機により駆動される構造とした。

回転子の回転モーメントによる軸受への負荷を模擬するために、回転子と同じ質量のダミーウェイトを設けた回転子軸とし、両端に全閉式主電動機と同じ構造の軸受部を取り付けた。

電動機の温度上昇を模擬するために、軸受部外周にヒーターを巻いて軸受部を加熱するようにした。また、軸受のグリースを採取可能なように、軸受端フタに採取窓を設けた。

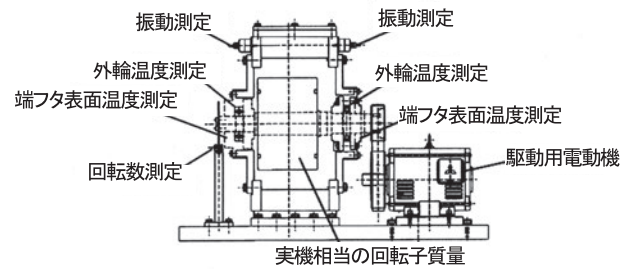


図3 軸受部評価試験装置概略図

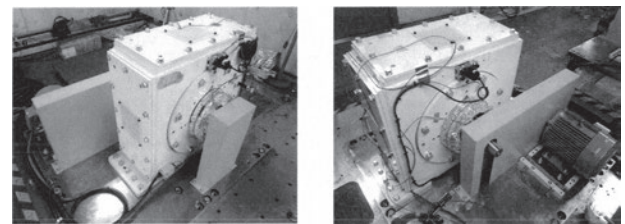


図4 軸受部評価試験装置

### 4.2 軸受部

本研究にて設計した全閉式主電動機の軸受構造と同構造の非分解軸受交換構造とした。

なお、グリースの成分調査を定期的に行うため、軸受を取り付けている端フタの一部に採取窓の穴をあけ、軸受に付着しているグリースを採取できるようにした。

### 4.3 軸受温度

軸受部評価試験装置は模擬回転子のみであり発熱する固定子の電機子コイルを持たない構造のため、電機子コイルの発熱を模擬するためのヒーターが必要となる。本研究では軸受部の外周にヒーターを巻き、回転試験中は常に100℃を保持するように制御することとした。

100℃という温度は、設計時点における軸受部の温度上昇のシミュレーション値60Kに周囲温度40℃を加算して求めた値となっている。温度測定点はコロ軸受・玉軸受ともに、軸受外輪の外周とした。

### 4.4 グリース調査方法

外部に設けた駆動用電動機にて5500r/minで連続運転し、累積回転数が10万キロに達するたびにグリース調査を行うこととした。

### 4.5 グリース種類

グリースについては、長寿命タイプのグリースとして使用を検討しているリマックスHS2のほかに、当社の在来線の主電動機用として広く採用されているユニマックスR No.2を比較対



象とした。

リマックスHS2はグリースの寿命が長い利点があるが、価格が高いのが難点である。ユニマックスR No.2でも同等のグリースの劣化傾向が確保できるのであれば、価格の面で有利なユニマックスR No.2を採用することが可能となる。このため、軸受部評価試験装置は同じものを2台製作し、2種類のグリースで回転試験を行えるようにした。

グリースの特性比較を表2に示す。

表2 グリースの特性比較

グリースメーカー		協同油脂		コスモ石油	
グリース銘柄		ユニマックス R No.2		リマックス HS No.2	
増ちょう剤		リチウムコンプレックス			
基油		鉱油		合成油	
				エーテル油+エステル油	
基油粘度	mm <sup>2</sup> /s	40℃	101	90	
		100℃	11.5	12.3	
混和ちょう度			280	275	
滴点	℃		260<	260<	
基油分比率	%		87.0	87.0	
静的離油度		100℃×192h	3.3	5.3	
		120℃×192h	4.9	6.8	
遠心離油度		100℃×192h	50.0	55.4	
蒸発量	%	99℃×22h	0.35	0.08	

## 5. 全閉式主電動機形式試験

全閉式主電動機の完成後、以下の形式試験、調査試験を実施し、性能評価を行った。試験項目を表3に示す。

なお、工場内における設備の関係から、商用電源周波数(60Hz)で試験を行う場合を考慮し、定格のほか代用定格を設定している。

表3 主電動機試験項目

試番	項目	形式試験	調査試験
1	構造試験	○	—
2	一次巻線抵抗測定	○	—
3	無負荷試験	○	—
4	拘束試験	○	—
5	特性の算出	○	—
6	負荷試験	—	○
7	効率の算出	—	○
8	1時間温度上昇試験	○	○(注)
9	連続温度上昇試験	—	○(注)
10	高速試験	○	—
11	絶縁抵抗試験	○	—
12	絶縁耐力試験	○	—
13	質量測定	○	—
14	騒音測定	—	○
15	風量・静圧測定	—	○
16	回転検出器出力試験	○	—
17	軸電圧測定	—	○

注)調査試験における1時間及び連続温度上昇試験は、インバータ電源で実施する。

### 5.1 構造試験

主電動機各部の構造及び寸法が図面通りであり、異常のないことを確認した。また、MT75形主電動機が搭載されているE233系の台車に取付可能な寸法で製作できており、取付互換性があることを確認した。

### 5.2 特性の算出

- ①1次巻線抵抗
- ②無負荷試験時の電流及び入力
- ③拘束試験時の電圧、電流及び入力

を求め、代用定格周波数における主電動機の回路定数を算出し、代用定格周波数、代用定格電圧における特性を算出した。

### 5.3 効率の算出

負荷試験を実施し、代用定格における効率を算出した結果、実測値は計画値の93.5%に対し93.0%となった。

### 5.4 1時間温度上昇試験

代用定格で、1時間運転後の温度上昇を測定した。また、調査試験として、インバータ電源を用いて1時間定格で運転した場合の温度上昇値を測定した。温度上昇限度は表4のとおりとした。

表4 温度上昇限度値

部位	1次巻線	軸受外輪
温度上昇限度	190K	80K
測定方法	抵抗法	温度計法

測定の結果、固定子コイル温度(抵抗法)、軸受外輪温度ともに限度値以下であり、また各部の温度上昇値も問題ない値となっており、良好な結果が得られた。

### 5.5 連続温度上昇試験

インバータ電源を用いて、連続定格で運転した場合の飽和温度上昇値を測定した。

固定子コイル温度(抵抗法)、軸受外輪温度ともに限度値以下であり、また各部の温度上昇値も問題ない値となっており、良好な結果が得られた。

### 5.6 質量測定

主電動機完成状態の質量を測定した結果、616.5kgとなり、計画質量615kgの±3%以内であることを確認した。

### 5.7 騒音測定

反響音や暗騒音の影響を受けにくい環境のもとで、主電動機を無負荷運転し、主電動機中心から1.5mの5点における騒音レベルをAスケールで測定した。測定の結果、5000r/minにおける5点の平均値で90dBとなり、目標値を満たすことができた。

## 6. 軸受部評価試験

### 6.1 10万キロ毎のグリース調査

10～160万キロ走行相当の回転数で10万キロに達するごとにグリースを採取し、鉄分、銅分の含有量を調査した。なお、玉軸受は保持器も鉄製で銅が使われていないため、分析を省略した。

※グリース管理値 鉄分0.5%以下、銅分0.3%以下

#### (1) コロ軸受

リマックスHS2、ユニマックスR No.2ともに、160万km走行後もグリースの鉄分値に差は無く、管理値及びMT68形の過去の実績に比較しても十分に低い値を推移していた。(図5)

銅分値は、ユニマックスR No.2においては、130万キロ走行時点より銅分値が増加し、160万キロ走行後の分析結果において管理値以下ではあるが、銅分値0.19%となった。リマックスHS2に関しては、160万キロ走行後も、銅分値は0.01%以下を保っていた。(図6)

グリース分析結果(鉄分値・銅分値・ちよう度の推移)より、ユニマックスR No.2は130万キロ走行時点より銅分値上昇、ちよう度低下の傾向があり、潤滑が厳しくなってきたと推定する。

#### (2) 玉軸受

リマックスHS2、ユニマックスR No.2ともに、160万キロ走行相当後も鉄分値は管理値以下であり、良好な潤滑状態であったと判断する。(図7)

ユニマックスR No.2の鉄分値は、100万キロ走行までは、MT68形の過去の実績に比較しても十分に低い値を推移している。中間給油後の90万キロ走行時点以降微増したものの、160万キロ走行後には管理値以下となった。リマックスHS2は、軽微な初期磨耗の影響で、初期の10万キロ走行時点に0.2%が測定された。その後、80万キロ時の中間給油により軸受内グリースの入れ替わりが確認され、その後は安定した状態で推移し、160万キロ走行後には管理値以下の0.16%となった。

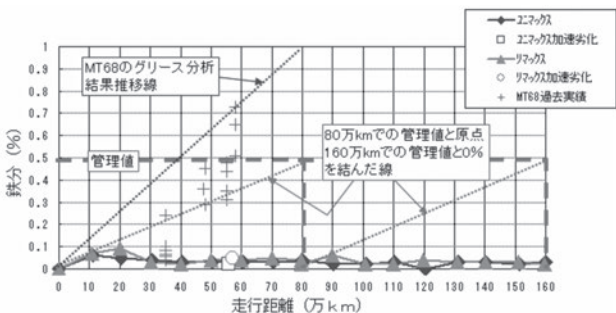


図5 コロ軸受 グリース中の鉄分含有量の推移

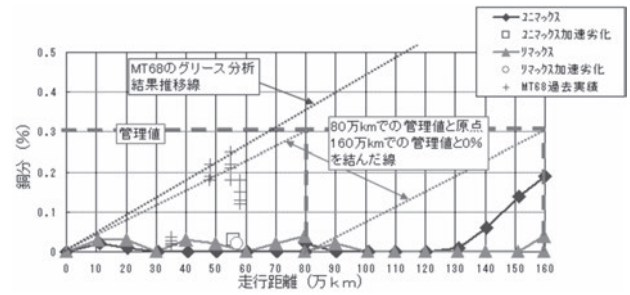


図6 コロ軸受 グリース中の銅分含有量の推移

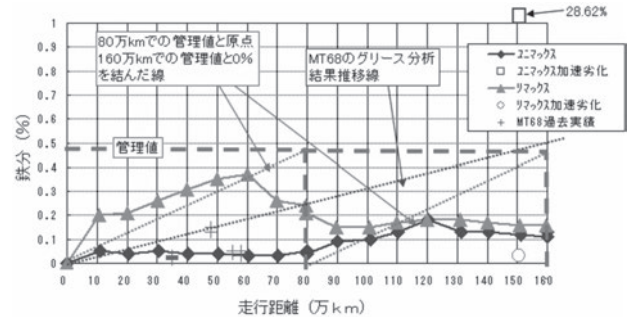


図7 玉軸受 グリース中の鉄分含有量の推移

### 6.2 160万キロ走行時のグリース・軸受詳細調査

160万キロ走行相当の累積回転数に達した時点で、グリース及び軸受の詳細調査を行った。グリース採取箇所を図8に示す。

#### (1) グリース調査方法

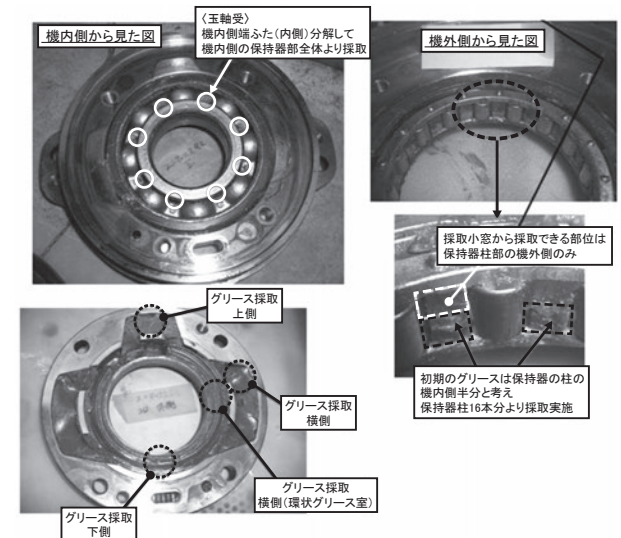


図8 グリース調査方法

#### (2) グリース調査結果

端フタグリース室上側、横側のグリースは静的離油効果によりグリース中の油分が染み出し、環状グリース室下側部分より軸受内に油が供給されていることを油分離率、離油度の値を比較することで確認した。

油分離率を確認すると、ユニマックスR No.2よりもリマックス

HS2の方が離油度の値が小さいことを確認した。これは、リマックスHS2の方が160万キロ走行後もグリース中に油分が残っており、まだ余力がある状態であるということを示す。

グリース劣化傾向について総合的に検討すると、160万キロ走行後のグリース分析結果（鉄分値・銅分値）より、リマックスHS2およびユニマックスR No.2ともに管理基準以下であり、顕著な軸受摩耗はないと判断できる。しかし、ちょう度、油分離率、離油度の値を考慮すると、ユニマックスR No.2は、グリースが硬化傾向にあり、リマックスHS2の方が160万キロ走行後も余力を残していることがわかった。

以上より、160万キロ走行に対してはリマックスHS2のほうが優位であると判断する。

### (3) 軸受調査結果

コロ軸受、玉軸受ともに、ラジアル隙間及び内外径寸法測定を実施した。軸受の寸法測定箇所を図9に示す。

その結果、外観上変形は見られず、寸法測定結果も新製の値と差もないことから、継続使用可能であると判断する。

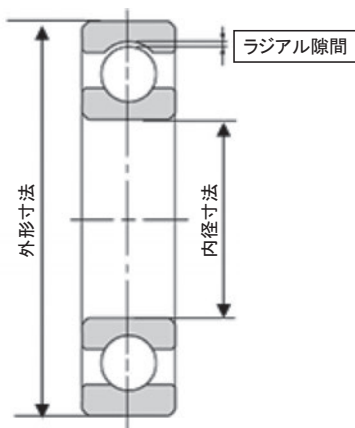


図9 軸受ラジアル隙間測定要領

## 7. 評価

MT75形主電動機互換の全閉式主電動機を設計するという主旨に対しては、外形、電気的性能ともに所定の仕様を満たすことができた。

非分解軸受交換構造に関しては、気吹きのための分解が不要となった時点で残る軸受のメンテナンスを軽減するために必要な技術であり、本研究の試作機で導入した。構造は軸受箱の構造が若干複雑になるが、メンテナンスは電動機本体を分解するのに比べて大きく改善されるものと思われる。

軸受部評価試験については、160万キロ走行相当の累積回転数まで実施し、10万キロごとのグリース調査及び160万キロ走行後のグリースと軸受の詳細調査において異常は見られ

ず、160万キロ走行まで非分解で使用可能であることがわかった。リマックスHS2とユニマックスR No.2の2種類のグリースの潤滑性能の違いについては、いずれも160万キロまで使用可能であることが判明した。ただし、ちょう度、油分離率、離油度の値を考慮するとリマックスHS2が余裕を有しており、優位であることがわかった。

## 8. まとめ

MT75形主電動機の外形と電気的特性をベースに、全閉外扇式主電動機を設計・製作し、形式試験を行って計画通りの性能が得られることを確認した。また、軸受部評価試験装置を製作して軸受への荷重と温度条件を設定し、非分解軸受交換構造の全閉外扇式主電動機の軸受回転試験を160万キロ走行相当の累積回転数まで実施した。

グリースと軸受の調査結果より、軸受は80万キロで中間給油を行って160万キロまで主電動機非分解で継続使用の妥当性を確認した。なお、軸受部評価試験装置において長寿命タイプのリマックスHS2と従来のユニマックスR No.2の2種類のグリースの比較を行ったところ、160万キロ走行後のグリース詳細調査において、ちょう度、油分離率、離油度の値において、リマックスHS2がユニマックスR No.2より優れていることがわかった。