

主電動機の解体周期延伸を目指した 軸受グリース入替給脂機構の実用化

日比野 澄子* 矢口 依穂**

**New Grease Replacement System for Midterm Lubrication
for Traction Motor Bearings**

Sumiko HIBINO Io YAGUCHI

To eliminate the disassembly maintenance for traction motors of railway vehicles, it is required to extend the grease service life of bearings, which has the shortest period to be replaced or refilled among the traction motor components. Intermediate grease refilling is effective to extend the service life, however, it is difficult to obtain the best performance due to unstable effect of refilling. To solve this problem, a new device was designed which enables replacing the deteriorated grease with same amount of the less deteriorated one inside the grease pocket. In this report, the authors performed the on-track test of the experimental models of traction motors with this device and discussed the influence of grease stiffening with long term usage.

キーワード：主電動機，解体周期延伸，グリース，中間給脂，ちょう度変化，塵埃付着

1. はじめに

鉄道車両のメンテナンスは、過去には、旧国鉄運転規則に従い、車種ごとの共通の検査体系のもと実施されていたが、2002年3月の「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の施行後¹⁾、新しい技術の導入などにより耐摩耗性、耐久性を有し、定められた定期検査以上に機能が確保される車両部位については、鉄道事業者自らがその安全性を証明することで、新しい検査体系を構築することが可能となった²⁾。その結果、車両部品の解体周期においても、従来のように車両の検査周期単位での延長を目標とするのではなく、個々の部品について、より長寿命を目標とすることにより、将来の効率的な検査体系の構築につながる可能性がある。そのような中、鉄道車両の主電動機においても更なる解体周期延伸が望まれている。

そこで、主電動機に中間給脂を行う新しい方法として「入替給脂機構」を開発した³⁾。本報告では長期実用性を評価するため、約74万kmまでの現車走行試験を実施した結果について述べる。さらに、長期使用によるグリースの硬化を踏まえて改訂した入替給脂の作業指針についても述べる。

2. 背景と中間給脂方法の改善

主電動機は、軸受の潤滑グリースの交換と、回転子風穴の塵埃清掃のために定められた周期で分解されてお

り、検査周期を延伸するためには、軸受の潤滑グリースの使用壽命を延伸する必要がある。そのひとつの方策として主電動機を解体せずに外部からグリースを追加する「中間給脂」が有効である。これは、鉄道用主電動機でも実績があるが、従来の方法では、追加給脂のスペースを確保するために初期のグリース封入量を減らす必要があり、グリース不足により給脂前の潤滑状態が悪くなる懸念がある。また、追加の給脂量にばらつきが生じやすい上、軸受に直接グリースが注入されるため、給脂量が規定よりも多くなった場合には、軸受の回転に伴うかっはん熱のために軸受に不具合が起きることがわかっており、給脂量を適切に管理する必要があった。

そこで、この問題を解決するために、グリースガンの加圧により可動部に押し出し力を作用させ、使用したグリースを、事前に配置した未使用グリースに入れ替えることにより、一定量のグリースを軸受内に給脂できる方法を考案した。この給脂方法を従来の中間給脂と区別するため、「入替給脂」と呼ぶ³⁾。これにより、目標とする検査周期まで回転子風穴の塵埃清掃が不要な場合には、途中の検査での非解体化が期待できる。これまでに入替給脂の機構を組み込んだ全閉式永久磁石同期電動機について、定置回転試験および数日の現車走行試験を行い、入替給脂前後の温度上昇に問題がないこと、給脂動作に問題がないことを確認した⁴⁾。

今回実施した現車走行試験では、試験主電動機に、車両搭載状態で入替給脂を行った。給脂の効果はそのタイミングに依存し、グリースの劣化が進み過ぎた状態では給脂による潤滑状態の回復効果が見られなくなることが

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

** 東芝インフラシステムズ株式会社

特集：材料技術

わかっている。小型軸受を用いた基礎試験の結果、グリース寿命の25%のタイミングで給脂を行なった場合に最も回復効果が高かった³⁾。更に、入替給脂機構については、台上試験にて60万km走行相当で給脂を行い180万km走行相当までの潤滑寿命を確認している³⁾。本走行試験においては、試験主電動機のうち1台(M-3)には40万km走行時(実走行距離35.1万km)に、残り3台には、60万km走行時(実走行距離60.6万km)に入替給脂を実施した。

3. 現車走行試験

3.1 実施内容

現用主電動機をベースに入替給脂機構を組み込んだ主電動機(以下試験主電動機)4台(125001~125004R, 以下M-1~M-4)を日車走行距離の長い車両に搭載して、重要部検査周期である80万km(実走行距離約74万km)まで非解体で走行させ、途中で入替給脂作業を行った。走行試験中は、小型の温度ロガーで継続的に軸受部の温度を測定した。試験終了後には、外観検査および主電動機としての機能試験を行い、主電動機として80万km以降も継続使用が可能か確認した。更に、塵埃付着量調査、振動耐久性の評価のための部品の摩耗調査を行った。

3.2 走行中の温度上昇値の確認

走行試験中に、軸受外輪の温度上昇値を継続的に測定した結果、軸受の温度上昇値は季節変動が小さく安定しており、温度上昇値の目安である「55K」⁵⁾と比較して小さい値であった。図1に走行期間33か月のうち最後の9か月間の推移を示す。長期走行による潤滑不良や塵埃付着による冷却性能の低下の兆候はないと判断した。

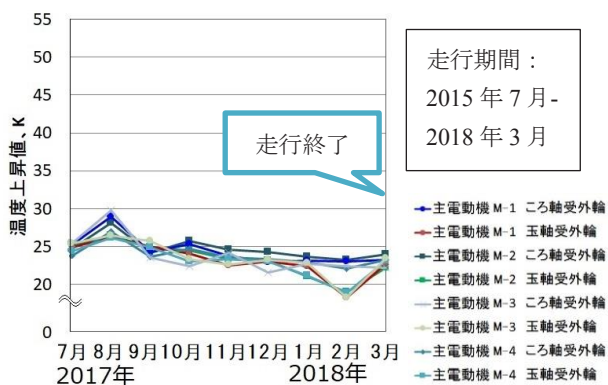


図1 月別最大温度上昇値(入気温度に対する温度上昇・走行終了直前の9か月)

3.3 走行後の主電動機の状態評価

走行試験後に車両から試験主電動機を取り外した直後、外観検査および機能試験を行った。無負荷回転状態での温度測定、絶縁抵抗試験等の電気試験を行った結果、各項目とも規定値を満たしていた。また、無負荷回転状態での振動、音に異常はなかった。

次に回転子風穴の塵埃付着状態を確認した。当該車両の主電動機では、妻部に立ち上げたダクトから入気しており、各風穴の断面積の1/3程度の付着が見られたが、台車近傍から入気している車両の主電動機で見られた付着状態と比較すると明らかに少なく、実用上許容されている付着量と判断した。

3.4 各部品の摩耗調査

試験主電動機では、グリースを封入するグリースポケットの形状、ニップルからの給脂経路の構成を変更し、更に、圧縮によるゴムの変形を抑えるために鋼板を重ねた複合パッキンを採用している。軸受は現用品を使用している。入替給脂機構として新しく導入した部品(可動板、ピストン、複合パッキン)については、現車の振動条件下での使用実績がないことから、今回の試験において使用後の状態を確認した。2台の主電動機で調査した結果、入替給脂機構の各部品および軸受について、走行中の振動による変形や損傷、位置ずれ、周囲部品とのしゅう動による摩耗は見られず、走行時の振動耐久性に問題がないことを確認した。

3.5 可動板の移動状態

走行後の分解調査の結果、4台(M-1~M-4)のいずれにおいても、端ふた内の可動板の移動が設計値よりも小さく、給脂が十分に行われていないことがわかった。そこで、可動板アームが端ふたに対して下降した量を可動板の移動高さとし、図2に示すように、可動板アームの先端部において、端ふたの基準面と可動板アーム上面の高低差を測定した。測定結果を表1に示す。移動高さは-1.02~7.77mmであり、正常な移動高さ(駆動側:7.5mm, 反駆動側:8.5mm)に対する実際の移動割合は、

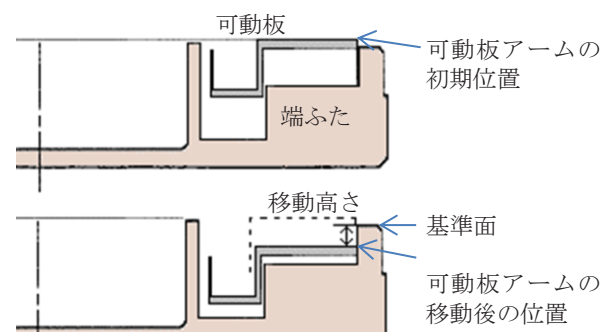


図2 移動高さの測定位置

表1 走行試験後の端ふた可動板の移動高さ（実測値）と移動割合、軸受グリース中の鉄分

主電動機	端ふた左右	駆動側 設計値 7.5mm			反駆動側 設計値 8.5mm		
		左	右	平均	左	右	平均
M-1	移動高さ (mm)	1.24	5.26	3.25	0.3	7.77	4.04
	移動割合 (%)	17	70	43	4	91	48
	鉄分 (wt%)	0.3			0.1		
M-2	移動高さ (mm)	0.06	0.36	0.21	3.42	0.83	2.13
	移動割合 (%)	1	5	3	40	10	25
	鉄分 (wt%)	0.8			0.1		
M-3	移動高さ (mm)	3.57	0.05	1.81	4.67	-0.95	1.86
	移動割合 (%)	48	1	24	55	-11	22
	鉄分 (wt%)	0.4			0.1		
M-4	移動高さ (mm)	2.52	1.89	2.21	5.23	-1.02	2.11
	移動割合 (%)	34	25	30	62	-12	25
	鉄分 (wt%)	0.6			0.1		

－12～91%であった。左右のアームともほとんど移動していないものがある一方で、片方のアームのみ移動し傾いているものもあった。もっとも傾きが大きいのはM-1の反駆動側であった。

3.6 軸受グリースの鉄分増加

入替給脂機構では、可動板の移動高さに比例して軸受へ給脂され、潤滑状態が回復する。潤滑状態の確認のため、軸受グリースの分析を行った結果、一部で鉄分が増加し、M-2とM-4の駆動側で鉄分の管理基準値0.5wt%⁶⁾を超えていた（表1）。移動量と鉄分には相関が見られることから、鉄分増加の原因は、入替給脂の動作が正常に完了せずに74万kmまで走行したためと考えられる。一方で、移動量の左右平均が正常に完了した場合の半分にとどまったM-1でも、その鉄分は管理基準値以下であったことから、給脂が本来のタイミングに本来の量で行われていれば、グリースの鉄分は増加しなかったと考えられる。反駆動側は、入替給脂前のグリース封入量が駆動側よりも多いため、移動量が少ない場合も鉄分の増加は見られなかった。試験主電動機の鉄分以外の分析項

目および現用主電動機（約61万km走行）の全分析項目で、すべて管理基準値を満たしていた。

4. 入替給脂機構の信頼性向上

調査の結果、給脂機構の移動が不十分であったことから、その原因推定を行うとともに対策について検討した。

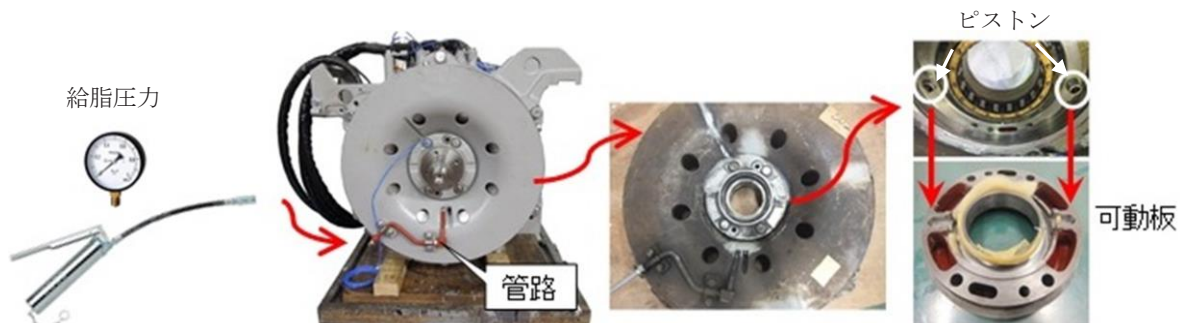
4.1 原因推定

設計時に行った複数回の動作試験および短期の現車試験（初回試験⁴⁾では、同じ作業指針（2g注入し、3MPaまで上がることを確認して作業終了）により入替給脂が正常に行われていた。入替給脂機構の動作のしくみは、「作業者が主電動機のグリースニップルに接続したグリースガン进行操作し、その作動圧力により内部のピストンを動かす」機構と、「ピストンが可動板のアーム部を押すことにより、可動板の下のグリース（以下未使用グリース）が軸受へ押し出される」機構に分けられる（図3）。初回試験との条件の比較により作業方法は同等であったこと、試験主電動機の分解時に、機構の前半にあたる「グリースガンがピストンを動かす機構」については稼動に問題がないことが確認されたことから、今回の可動板の移動不足は、可動板のアームがピストンに押されたにもかかわらず、未使用グリースが軸受内へ押し出されなかった結果であると推定した。更に、機構の動作に関わる条件のうち、初回試験と顕著に異なるのは給脂時期であることから、本走行試験においてグリースが押し出されなかった原因は、未使用グリースが経年変化により硬化し、押し出すための必要押し出し力が増加したことにあると推定した。

4.2 グリースの硬化状態

本機構の動作に必要な押し出し力とは、「未使用グリース」を可動板内径側のすき間から軸受へ押し出すのに必要な押し出し力であり、「未使用グリース」の硬さが影響すると考えられる。

グリースの硬さはちょう度で表され、値が大きいほど



グリースガンの給脂圧力が管路内のグリースを伝わり、ピストンが可動板を動かす力を発生させる

図3 可動板を動かすしくみ

特集：材料技術

柔らかいことを示す⁷⁾。試験で使用しているグリースの新品時のちょう度は260～280程度(ちょう度番号2)であるのに対し、現車試験後の分解時の調査では、230程度であり、やや硬化していた。主電動機軸受のグリースのちょう度は、管理基準値により150～350の範囲であれば使用できることから⁶⁾、それと比較するとこの硬さの変化はわずかであり、軸受内に入れば十分に潤滑できる状態である。しかしながら、このわずかなちょう度変化により必要な押し力が増加したと考え、ちょう度変化が押し力へ与える影響について検討した。

今回の試験では、入替給脂を行ったタイミングの違い(M-3:35.1万km走行時点、残り3台:60.6万km時点)によってピストン移動高さ(表1)に差異は見られなかったことから、最初の1台に給脂した35万km時点で既にちょう度変化があったと推察した。本機構を用いて180万kmまでの潤滑寿命延伸を可能とするためには60万km走行時点までに入替給脂を行うが、グリースの経年変化がより進行した約74万km走行後のちょう度の値(上記の230程度)に対して、必要な押し力を確認することとした。なお、経年によるグリースのちょう度変化の傾向は、グリースの種類により異なるため、グリース種類を変更する場合は別途検討が必要である。

4.3 必要押し力の検討

検証にあたっては、試験主電動機のうち2台(M-1, M-2)を可動板の動作に必要な押し力やグリースガンの給脂圧力の測定に使用し、残り2台(M-3, M-4)は、新たに設定する入替給脂作業方法の検証用として、分解せずに残すことにした。

試験主電動機(M-1, M-2)を現車試験後に解体し、端ふた内の経年変化したグリース(未使用グリース)をそのまま保存した状態で、可動板の動作に必要な押し力の測定を行った。駆動側・反駆動側の端ふた単体に対し、可動板の2つのアーム(ピストンの加重位置)の中央に静荷重が加わる構成(図4)とし、可動板をグリースポケット底部に達するまで移動させるために必要な押し力を測定した。次に、M-2に対し、グリースを新品に詰め替えて同様の測定を行った。その結果を表2に示す。

経年変化グリースでは、可動板が移動するまでにピストン1つにつき約130～190Nの押し力が必要であった。一方で、新グリースでは、63～93Nの押し力で移動した。以上より現車で長期使用により、グリースが硬化し、設計時よりも可動板を動かすための必要押し力が大きくなったことが判明した。測定の結果、現車でグリースの経年変化を考慮すると、ピストン1つにつき200N程度の押し力を発生させる必要があると考えられる。

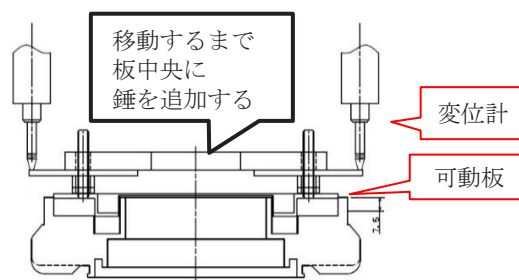


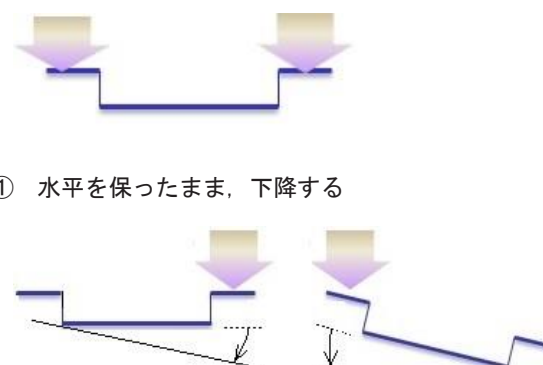
図4 可動板の移動に必要な押し力の測定方法(駆動側の例)

表2 可動板の移動に必要な押し力の測定結果(1ピストンあたり)

条件	使用部品	駆動側	反駆動側
経年変化あり	M-1	178N	129N
	M-2	190N	190N
経年変化なし(新品グリース)	M-2	93N	63N

4.4 可動板が傾いた場合の影響

次に、検証用とした主電動機M-3について約200N/ピストンの押し力をかけて可動板の動作試験を行った結果、可動板が大きく傾き最後まで移動しない現象が見られた。そこで、プッシュプルゲージにより移動が遅れた方のアームを押して最後まで移動させる(傾いた状態から水平に戻す)のに必要な押し力を測定した結果、約400N/ピストンとなり、水平の場合の2倍程度の押し力が必要であることがわかった。そこで、新グリースを用いて①可動板が水平のまま2本のピストンで押す場合に対して、②水平の状態から片方のピストンが先行して傾く場合と、③可動板が傾いた状態から水平にする場合(図5)の必要押し力を測定して比較した結果を表3に示す。



① 水平を保ったまま、下降する

②片方のピストンが先行し③傾いた状態から水平に

図5 可動板が傾くときの動作パターン

表3 可動板の傾きによる必要押出し力の比較（新グリース）（1ピストンあたり）

条件	駆動側	反駆動側
①水平のまま下降	117～137N	98～127N
②水平から片方先行し傾く	215N	215N
③傾いた状態から水平へ	245N	225N

駆動側、反駆動側のいずれにおいても、①水平に押された場合よりも、③傾いた状態から水平にする場合の方が、一つのピストンにかかる押出し力が2倍程度に大きくなった。以上の試験から、可動板を動かすために必要な押出し力を簡単にまとめると表4のようになる。

表4 可動板を動かすために必要な押出し力

	グリース条件	傾きの有無	必要押出し力
(i)	新グリース	可動板の傾きなし	100N程度
(ii)	新グリース	可動板の傾きあり	200N程度
(iii)	硬化グリース	可動板の傾きなし	
(iv)	硬化グリース	可動板の傾きあり	400N程度

4.5 必要な給脂圧力の検討

次に、ここまでの試験結果を踏まえて、現車でのグリースの経年変化を考慮し、ピストン1つにつき200～400N程度の押出し力を発生させるのに必要なグリースガンの給脂圧力を明らかにするため、作業者がグリースガン进行操作する際の給脂圧力とピストンに発生する力との関係について検討した。従来の作業指針における圧力3MPaでは不十分であることがわかっているため、3～5MPaの範囲で検討した。グリースガン操作による給脂圧力とピストンに発生する力を表5と図6にまとめる。発生した力は、ピストン直径（12mm）から計算した値よりもやや小さかった。

また、表3に示した押出し力は、いずれも3.0MPaで発生する力（276～302N）以下であり、新グリースであれば、仮に可動板が傾いても動くと考えられる。可動板が傾く理由としては、グリースの硬化により押し出す際の抵抗が大きくなった場合、水平に下降しながらグリースを全周で押し出すよりも、傾く方が抵抗が小さくなるためと考えられる。したがって、硬化グリースでは、新しいグリースよりも傾きやすくなると考えられる。

4.6 管路内に空気が混入した場合の検討

ピストンに発生する力は、グリースニップルからピストンまでの管路内の状態に影響される。現車試験開始時（組立時）には管路に新しいグリースを満たしているが、分解調査時には、グリースガンからの加圧に対してピストン部へのグリースの吐出に遅れが見られた。これは、グリースの経年変化による圧送抵抗の増加、あるいは管

表5 給脂圧力に対して発生する力（新グリース）（1ピストンあたり）

	給脂圧力 (MPa)	発生する力 (実測平均, N)	発生する力 (計算, N)
駆動側	5.0	454.9	565
	4.0	350.9	452
	3.0	276.1	339
反駆動側	5.0	504.4	565
	4.0	407.1	452
	3.0	301.7	339

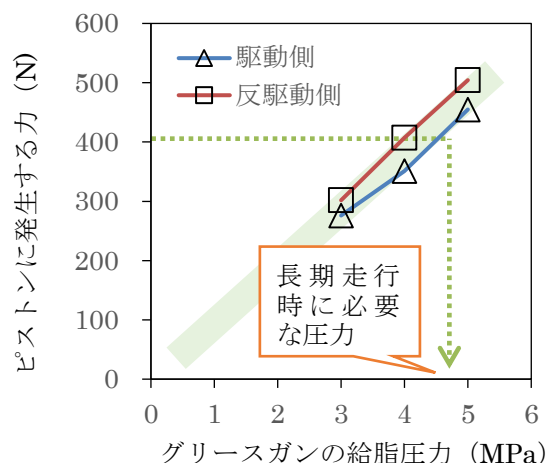


図6 給脂圧力とピストンに発生する力の関係

路内のグリースの減量が原因とみられる。グリースの減量の原因としては、現車走行中に受ける振動や自然な油分の浸出によるグリース体積の減少が考えられる。

グリース減量の影響について検討するため、管路に空気を入れることによりグリースの減量を模擬したところ、グリースガン操作開始後1～3回は、圧力が上がってすぐ下がり、ピストンに力が発生しない空打ちの状態が発生することがわかった。

また、グリースガンの操作に対する力の発生タイミングを確認した結果、圧力が上がってからピストンに力が作用するまでに「遅れ」があった。図7に、同じ圧力を3回ずつ繰り返しかけた場合に発生する力を示す。1回目と比較して、2回目、3回目で力が段階的に増加しており、このことから、グリースガンからピストンに向かって、段階的に圧力が伝わるまでに相応の時間が必要であることが示唆された。

上記の試験結果より、現車走行後の入替給脂作業をグリースガンの「操作回数」で設定した場合、ピストンの移動を確実に完結させるのが難しいと考えられる。そこで、新しい作業指針では、作業開始時に「空打ち」の作業を設定し、更に、圧力が高まってからピストンへ力が作用するまでの遅れを考慮して、「圧力の保持時間」を設定することとした。

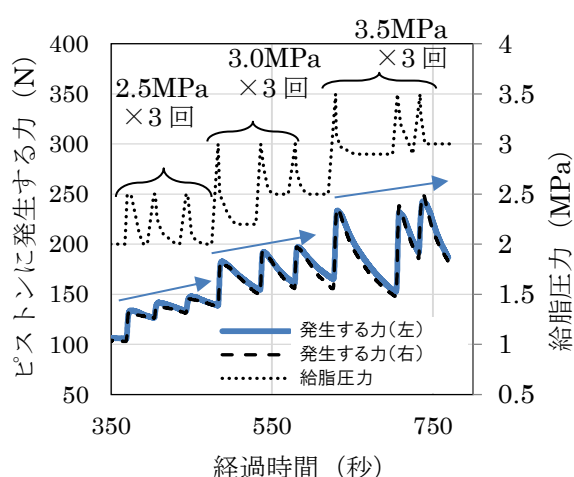


図7 給脂圧力とピストンに発生する力の関係

5. 新たな給脂作業指針の設定

5.1 新たな作業指針

以上を踏まえて、入替給脂時の作業指針を以下のように変更することとした。なお、給脂圧力は余裕を見てかつ手作業であることを考慮し 5.0MPa とした。

新しい作業指針

①圧力が高まるまでグリースを複数回注入し、圧力が下がらなくなったら 3.0MPa まで加圧する*¹ (管路内空気が圧縮されるまでは圧力が上がらないため)。

②ハンドルを戻した後、10 秒間 5.0MPa を維持するように*² 加圧する。

③ハンドルを戻した後 5 秒間 5.0MPa を維持するよう加圧し、更にハンドルを戻した後 5 秒間 5.0MPa を維持するよう加圧する。

④作業を終了する。

* 1 グリースガンのハンドルはゆっくり操作する。

* 2 ピストンが動いていない場合は、ハンドルを押さえている間圧力は変わらないが、ピストンが動きだすと圧力が下がるため、更に加圧しながら 5.0MPa を維持する必要がある。

5.2 模擬硬化グリースを用いた実機による検証

新グリースから遠心分離で油分を抜き、4.2 節で述べた現車硬化グリースと同程度のちょう度 (224) とした模擬硬化グリースを用いて、新しい作業指針による可動板の動作状態を M-2 において検証した。可動板の傾き方としては (a) 可動板が最大に傾いた場合 (左アームは移動が完了した位置、右アームは初期位置にセットして開始) と、(b) 水平な場合の 2 条件で実施した。いずれの場合も、可動板は完全に移動した。また、試験主電動

機 M-4 に対して、現車試験後の状態から分解せずに (グリース経年変化状態を保持)、5.0MPa × (10 秒間 + 5 秒間 + 5 秒間) の条件で入替給脂作業を行ったところ、反駆動側では、左が 91%、右が 94%、駆動側では、左が 83%、右が 91% の移動割合となり、正常な動作が確認された。したがって、新しい作業指針で入替作業を行えば、いずれの場合も可動板が正常に動作すると考えられる。

6. まとめ

入替給脂機構を搭載した主電動機の長期実用性を評価するため、約 74 万 km までの現車走行試験を実施した。試験期間中、軸受の温度上昇値に問題はなく、試験終了後の主電動機の機能検査の結果は良好であり、主電動機として 80 万 km 以降も継続使用が可能であることを確認した。更に、塵埃付着量調査、振動耐久性の評価のための部品の摩耗調査にも問題はなかった。一方で、長期使用によりグリースが経年変化し、入替に必要な押し力が増加することがわかったため、その対策として、経年変化した場合に必要な押し力を求め、作業圧力との関係から、入替給脂の作業指針を改訂した。更に、実機での検証を通じて、グリースが経年変化した場合にも正常に動作することを確認した。

本研究は、東芝インフラシステムズ株式会社との共同研究により実施した。

文献

- 丸山正浩：鉄道車両の保守に関する技術基準について、鉄道車両と技術 No.79, Vol.8, No.8, pp.2-5, 2002
- 一木剛：JR 東日本の新しい車両保全体系 (新保全体系) の概要, R&m, Vol.10, No.10, pp.17-20, 2002
- 日比野澄子, 中村和夫, 細谷哲也：主電動機軸受のグリース入替給脂機構, 鉄道総研報告, Vol.25, No.10, pp.17-22, 2011
- 川村淳也, 児玉佳則, 日比野澄子, 松岡孝一, 永山孝, 喜多村稔：主電動機中間給脂機構の開発, R&m, Vol.20, No.4, pp.17-20, 2012
- 電気学会：JEC-122 電気鉄道車両用主電動機, 1981 (現在は廃止されている)
- 日比野澄子, 鈴木淳一, 木川定之, 曾根康友：車両用潤滑グリースの新しい管理基準値の提案, 鉄道総研報告, Vol.31, No.8, pp.5-10, 2017
- 日本規格協会：JIS K2220, JIS ハンドブック石油, p.230, 2011