

回転条件が歯車装置軸受の特性に与える影響

高橋 研* 鈴木 大輔* 岡村 吉晃* 永友 貴史*

Effects of Rotational Conditions on Performance of Pinion Bearings of Gear Unit

Ken TAKAHASHI Daisuke SUZUKI Yoshiaki OKAMURA Takafumi NAGATOMO

Tapered roller bearings, which are mainly used in gear units for electric railcars, are lubricated by gear oil splashed by rotation of the gear. In order to prevent seizure of the bearings and to ensure the reliability of the gear units, it is required to appropriately adjust the bearing clearance. The bearing clearance sometimes changes from its initial value during the travel of the cars due to an atmospheric temperature and its initial value when assembling the gear unit. Hence, the change of the bearing clearance affects the performance of bearings. To investigate effect of the bearing rotation conditions on the characteristics of the gear units, we conducted bench rotation tests under various bearing clearances and atmospheric temperature. As a result, it is found that the bearing clearance decreases immediately after the rotation starts. The smaller the initial bearing clearance is and the lower the atmospheric temperature is, the more remarkable this tendency becomes.

キーワード：歯車装置，軸受，エンドプレイ値，雰囲気温度，台上試験

1. はじめに

国内の電車の歯車装置の回転部では、歯車箱に対して小歯車を支持する小歯車軸受や、車軸に対して歯車箱を支持する大歯車軸受として、円すいころ軸受が多く用いられており、大歯車の回転によってはねかけられるギヤ油により潤滑される。これらの軸受のうち、小歯車軸受の回転速度は大歯車軸受に比べて高いことから、内輪大つば面と大端面のすべり速度が大きく、すべり接触部の潤滑不良を発端として焼付き損傷が発生する場合がある。潤滑不良の原因としては、低温起動時のギヤ油の粘度増加による軸受部への供給不足や、軸受周辺部材の熱膨張の差によるエンドプレイ値（軸受の組合せすきま；以下、EP値とする）の減少が指摘されている¹⁾。このうち、ギヤ油の粘度増加に対しては、従来のシングルグレード油に替えて低温流動性を向上させたマルチグレード油の開発、導入などで対策が図られている²⁾。一方、EP値は通常、歯車装置を組み立てる際に一定の範囲に調整されるが、上述のように車両の走行中に歯車装置各部の温度変化により組立時とは異なる値に変化する。その変化の傾向や変化量は、雰囲気温度や初期（組立時）のEP値によって変化すると考えられるが、それらの関係や、温度変化に与える軸受のトルクや発熱などの影響は十分に明らかにされていない。

そこで、本報告では歯車装置軸受（小歯車軸受）を実機歯車装置に組み込んだ状態で台上回転試験を行い、初期EP値と雰囲気温度が、軸受の温度やトルクに与える

影響を調べた結果について述べる。また、得られた軸受やその周辺部品の温度変化から、運転中における実際のEP値の変化について検討する³⁾。

2. 試験装置および試験方法

2.1 歯車装置回転試験機

試験に用いた歯車装置回転試験機を図1に示す。本試験機は、実物の歯車装置を供試体として、その小歯車軸をモータで回転させる構造である。歯車装置は車軸に取り付けられ、その両端の支持軸受と歯車箱吊り装置によって支持される。なお、歯車箱および支持軸受部を冷却するため、それぞれの近傍に送風機を設置している。

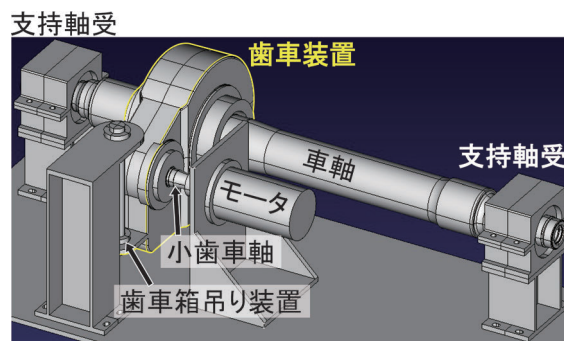


図1 歯車装置回転試験機

歯車装置の諸元を表1に、構造を図2に示す。歯車装置の減速機構は、小歯車が左ねじれ、大歯車が右ねじれのはずば歯車で構成される。小歯車軸には、小歯車を挟み左右にそれぞれ円すいころ軸受（小歯車軸受）が取

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

り付けられている。また、車軸には、大歯車を挟み左右にそれぞれ円すいころ軸受（大歯車軸受）が取り付けられている。これらの軸受の内輪は小歯車軸および車軸に、外輪は軸受ふたを介して歯車箱に取り付けられる。歯車箱の内部（下部）にはギヤ油が貯められる。なお、図2中に矢印で示した回転方向を正転、その逆の回転方向を逆転と呼ぶ。

表1 歯車装置の諸元

| | |
|--------|--|
| 歯車箱材質 | アルミニウム合金鋳物 |
| 軸受ふた材質 | 機械構造用炭素鋼 |
| 小歯車軸材質 | 機械構造用合金鋼 |
| 小歯車軸受 | 円すいころ軸受 (外径：150mm, 内径：70mm, 組立幅 38mm) |

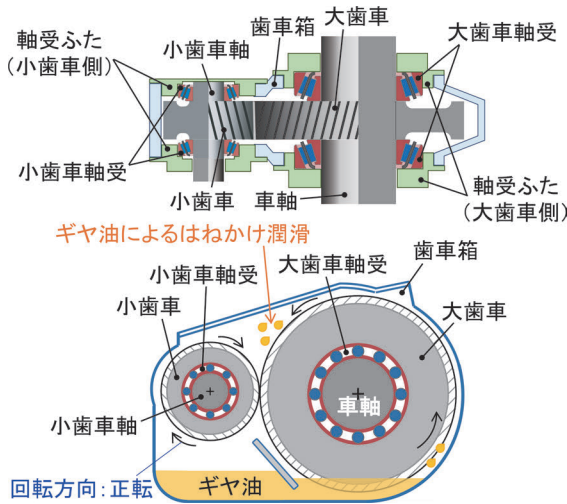


図2 歯車装置の構造

2.2 測定項目および方法

歯車装置回転試験機の運転中には、各部の温度および小歯車軸の回転速度とトルクを測定する。それぞれの測定箇所を図3に示す。なお、小歯車軸軸端部の温度は小型の温度データロガーにより測定する（図4）。

2.3 試験軸受および初期EP値の変更方法

ここでは、表1に示した小歯車軸受（以下、軸受とする）を検討対象とする。この軸受2個が小歯車を挟んで

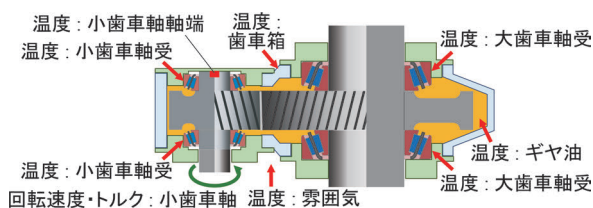


図3 測定項目および測定箇所

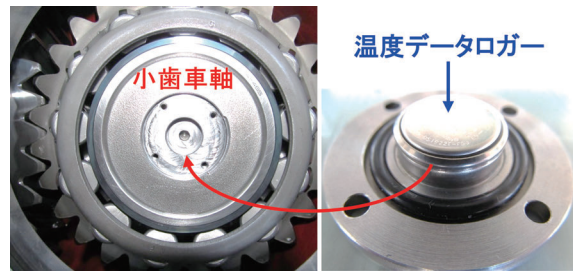


図4 小歯車軸温度の測定方法

左右にそれぞれ1個ずつ取り付けられている。軸受の内輪と小歯車軸，外輪と軸受ふたのはめ合いはいずれもしまりばめである。軸受の初期EP値は、図5に示すように歯車箱と軸受ふたの締結面に種々の厚さのシムを挟むことにより変更する。ここでは、組立後に歯車箱を固定した状態で小歯車軸を軸方向に押し引きし、その移動量を初期EP値とする。

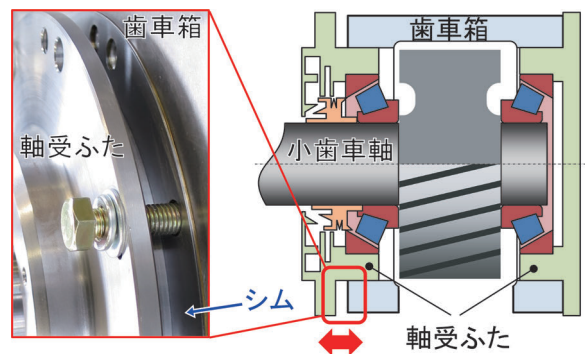


図5 初期EP値の変更方法

2.4 試験方法

試験条件を表2に、小歯車軸の回転パターンを図6に示す。最高回転速度（小歯車軸）となる 6000min^{-1} は車両の速度で約 320km/h に相当する。この試験条件の下で、初期EP値と雰囲気温度を様々に変えて試験した。それらを図7に示す。なお、歯車箱と小歯車軸の材質が異なるため、EP値は歯車装置の温度によって変化

表2 試験条件

| | | |
|--------|--|------|
| 回転方向 | 正転 | |
| 回転パターン | 図6参照 | |
| 潤滑油 | ギヤ油 粘度指数：105 動粘度：9.9mm ² /s (100°C), 78.7mm ² /s (40°C) | |
| 油量 | 2.95L | |
| 冷却 | 10m/sで風冷 | |
| 初期EP値 | 0.06~0.31mm | 図7参照 |
| 雰囲気温度 | 6.6~29.1°C | |

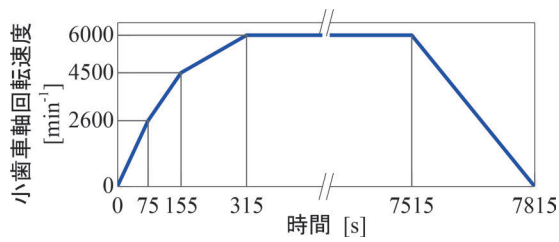


図6 小歯車軸の回転パターン

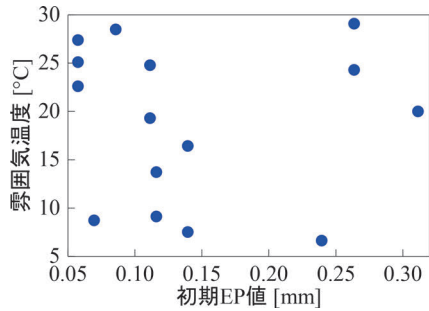


図7 初期EP値と雰囲気温度

する。したがって、ここでは初期EP値として、組立時の測定値を一律に20℃での値に換算した値（20℃換算値）で示す。

3. 初期EP値と雰囲気温度の軸受性能への影響

3.1 歯車装置の温度分布

1章で述べたように、小歯車軸受の回転速度は大歯車軸受に比べて高いことから、歯車装置の主要な発熱源は

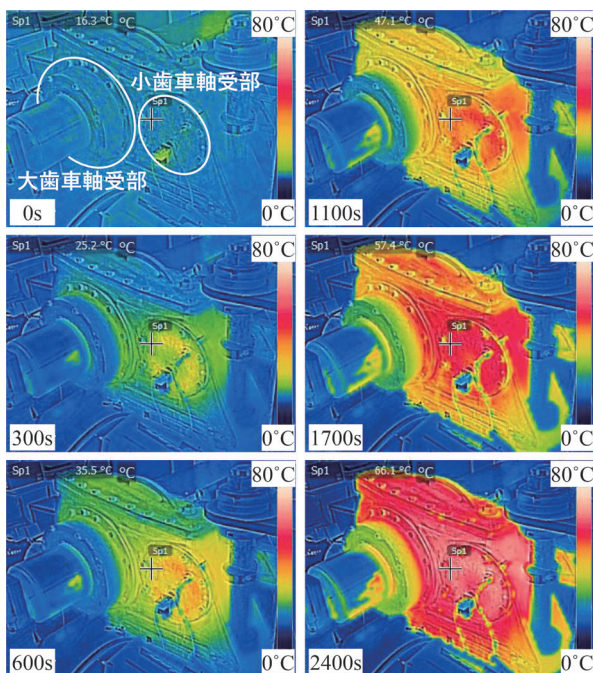
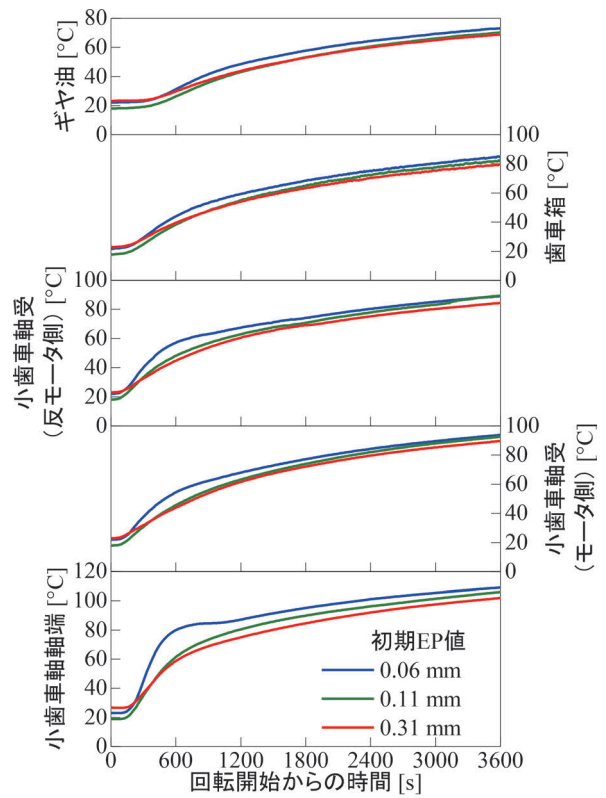


図8 歯車装置表面の温度分布

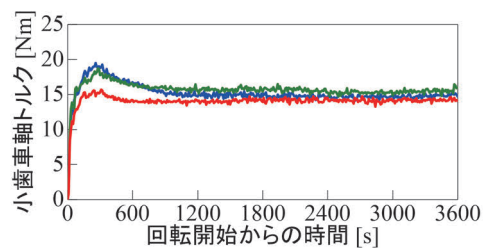
小歯車軸受であると推測される。このことを確認するため、赤外線サーモグラフィカメラによる歯車装置の温度分布の測定を行った。回転開始時の初期EP値を0.12mm、雰囲気温度を13.7℃とした場合における0, 300, 600, 1100, 1700, 2400s後の温度画像を図8に示す。画像は反モータ側から見た歯車箱表面温度分布を示すもので、軸受の温度を直接示すものではないが、回転開始から300s以降の画像からは小歯車軸受部近傍の表面温度が最も高くなっていることがわかる。これより、歯車装置の主要な発熱源が小歯車軸受であることが確認できる。

3.2 初期EP値の影響

雰囲気温度が約20℃で初期EP値が0.06, 0.11, 0.31mmにおける、回転開始から3600sまでの歯車装置各部の温度変化と小歯車軸トルクを示したグラフを図9



(a) 温度



(b) トルク

図9 初期EP値が各部の温度とトルクに与える影響

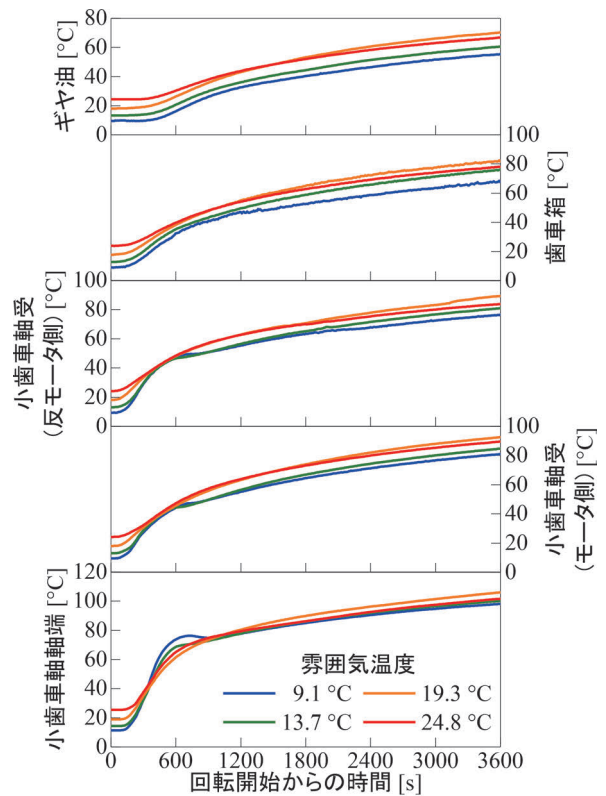
に示す。いずれの条件でも、各部の温度のうち最も高温となったのは小歯車軸の軸端部であり、初期 EP 値が小さいほど、回転開始から約 600s までの温度上昇が急激になる。特に、初期 EP 値が 0.06mm の場合には、回転開始後の 600s で 80℃程度に達し、一旦温度上昇が止まった後に再び緩やかに上昇する。これは、初期 EP 値が小さいほど軸受の負荷圏（軸受の一周のうち、ころに荷重が作用する範囲）が広く、荷重が作用するころの数が多くなり、軸受内部の摩擦抵抗や転がり粘性抵抗が増加するためと考えられる。軸受外輪の温度は、前述の軸端部の温度ほど顕著ではないものの、モータ側、反モータ側の軸受ともに、初期 EP 値が小さいほど、回転開始直後の温度上昇が急激になる。歯車箱表面の温度やギヤ油の温度では、上述の傾向がさらに弱くなっている。これらの傾向の強弱は、本試験での主要な発熱源が小歯車軸受であり、なかでも内輪の温度上昇が最も大きいことを示している。小歯車軸トルクは回転開始直後に最大となった後に低下し、約 1000s 以降はほぼ一定となる。この小歯車軸トルクの最大値は、初期 EP 値が小さいほど大きくなる。小歯車軸トルクには小歯車軸受以外に起因するトルク（例えば、大歯車軸受のトルクやギヤ油のかくはん抵抗など）も含まれるが、これらのトルクを発生する条件は各試験で共通なため、上述のトルクの違いに対しては初期 EP 値の大小が最も影響していると考えられる。

3.3 雰囲気温度の影響

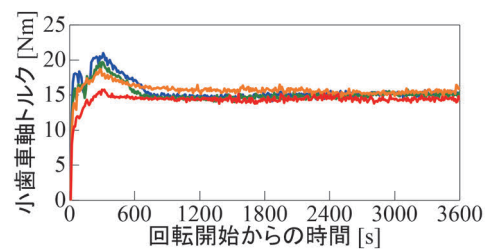
初期 EP 値が約 0.11mm で雰囲気温度が 9.1, 13.7, 19.3, 24.8℃における、温度変化と小歯車軸トルクを示したグラフを図 10 に示す。いずれの条件でも、各部の温度のうち最も高温となったのは小歯車軸の軸端部であり、雰囲気温度が低いほど、回転開始から約 600s までの温度上昇が急激になる。特に、雰囲気温度が 9.1℃ の場合には、回転開始後の 600s で 80℃程度に達し、一旦温度上昇が止まった後に再び緩やかに上昇する。これは、雰囲気温度が低いほどギヤ油の粘度が高く、軸受内部での転がり粘性抵抗やかくはん抵抗が増加するためと考えられる。軸受外輪、歯車箱表面、ギヤ油の温度の変化の傾向は、3.2 節で述べたそれらの傾向と同様である。小歯車軸トルクは回転開始直後が最大でその後は低下し、約 1000s 以降はほぼ一定となる。この小歯車軸トルクの最大値は、雰囲気温度が低いほど大きくなる。これは、雰囲気温度が低いほどギヤ油の粘度が高く、軸受内部での転がり粘性抵抗やギヤ油のかくはん抵抗が増加するためと考えられる。

3.4 小歯車軸の軸端温度およびトルク

3.2 節、3.3 節で述べたように、試験条件の違いが最も明瞭に影響したのは、小歯車軸軸端部の温度であった。特に、



(a) 温度



(b) トルク

図 10 雰囲気温度が各部の温度とトルクに与える影響

回転開始から約 600s までの温度上昇の傾向は試験条件により大きく変化することがわかった。そこで、図 7 に示した各条件での試験の結果より、小歯車軸軸端部の温度上昇率（10s あたりの温度上昇値）の最大値を初期 EP 値と雰囲気温度に対して整理した等値線図を図 11 に示す。グラフ中の白色の領域は、回転試験を実施していないため、データが得られていない領域である。小歯車軸軸端部の温度上昇率は、初期 EP 値が小さいほど、また、雰囲気温度が低いほど大きくなる傾向が認められる。特に、初期 EP 値が 0.14mm より小さくなると、初期 EP 値の減少とともに小歯車軸軸端部の温度上昇率は急激に増加する。

試験条件の違いは小歯車軸のトルクにも影響することがわかった。そこで、小歯車軸のトルクの最大値を初期 EP 値と雰囲気温度に対して整理した等値線図を図 12 に示す。小歯車軸のトルクの最大値は、初期 EP 値が小さいほど、また、雰囲気温度が低いほど大きくなる傾向が認められる。

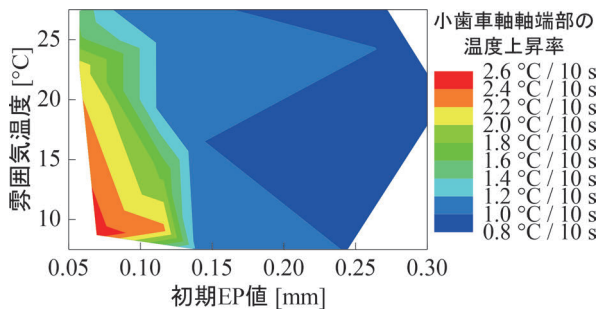


図 11 小歯車軸軸端部の温度上昇率

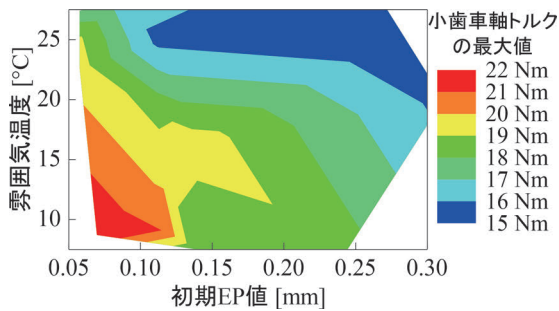


図 12 小歯車軸トルクの最大値

4. 温度変化による EP 値の変化の検討

3章で述べたように、歯車装置各部の温度は歯車装置の起動直後に大きく変化する。そのため、この温度変化にともなう各部品の熱膨張により軸受の EP 値が変化する。EP 値が 0mm 以下になると軸受の焼付きに至る可能性がある⁴⁾。そこで、歯車装置各部の温度変化から EP 値の変化を推定した。

4.1 EP 値の算出方法

図 2 に示した歯車装置の軸受の周辺の構造について形状を簡略化して (図 13)、各部材の軸方向の熱膨張のみを考慮した式 (1) により回転中の EP 値 Δ_a を算出した。

$$\Delta_a = \Delta_{a20} + (t_c - 20)\alpha_c L_c - (t_h - 20)\alpha_h(L_c - L_b) - (t_s - 20)\alpha_s L_b \quad (1)$$

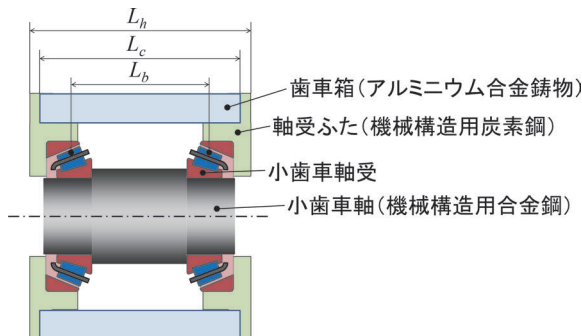


図 13 小歯車軸受周辺の構造

ここで、 Δ_{a20} は小歯車軸受の初期 EP 値 (20°C 換算値)、 t_c 、 t_h 、 t_s はそれぞれ、歯車箱、軸受ふた、小歯車軸の温度、 α_c 、 α_h 、 α_s はそれぞれ、歯車箱、軸受ふた、小歯車軸の熱膨張率、 L_c は歯車箱の軸受ふた締結面間の距離、 L_b は軸受中心間の距離である。これらの値を表 3 に示す。軸受ふたの温度は直接測定していないため、近傍の軸受外輪の温度 (2 個の軸受の平均値) を用い、小歯車軸の温度は軸端部の温度を用いる。

表 3 EP 値の算出に用いたパラメータ

| | | | |
|------------|------------------------------------|-------|-------|
| α_c | $2.2 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ | L_c | 178mm |
| α_h | $1.2 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ | L_b | 128mm |
| α_s | $1.2 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ | | |

4.2 EP 値の算出結果

図 9、図 10 に示した試験結果について、式 (1) により算出した EP 値 Δ_a を図 14、図 15 にそれぞれ示す。回転開始から約 600s 以降は歯車装置各部の温度上昇にともなう主に歯車箱と小歯車軸との熱膨張率の差により EP 値が大きくなる。一方、回転開始から約 600s 間については、回転とともに EP 値が小さくなり、この傾向は初期 EP 値が小さいほど (図 14)、また、雰囲気温度が低いほど (図 15) 顕著である。これは、回転開始後の初期には、軸受の回転にともなう小歯車軸の温度 t_s の上昇が歯車箱の温度 t_c の上昇より速いため、小歯車軸の熱膨張が歯車箱の熱膨張より大きくなったことによる。3章に記したように、初期 EP 値が最も小さい場合と雰囲気

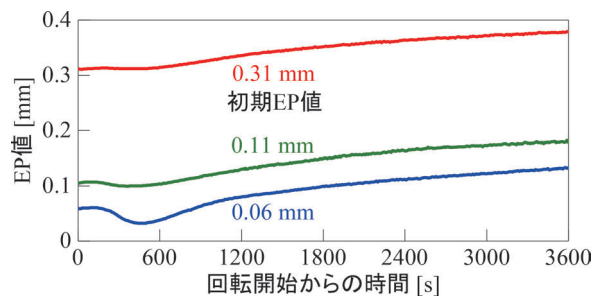


図 14 初期 EP 値が回転中の EP 値に与える影響

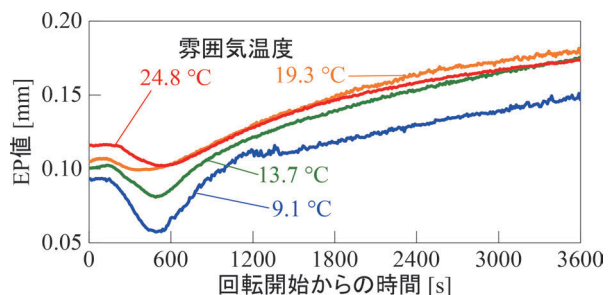


図 15 雰囲気温度が回転中の EP 値に与える影響

気温度が最も低い場合に、小歯車軸軸端部の温度が急激に上昇し、温度上昇がほぼ止まった後に再び緩やかな上昇を示したのは、回転開始直後のEP値の減少により、軸受の発熱が増加した後に、EP値が増加に転じて発熱が抑制されたためと考えられる。

図14、図15に示したように、回転中のEP値は様々に変化するが、なかでも、EP値が最小となる時に軸受の温度が急激に上昇し、軸受の焼付きに至ることが懸念される。そこで、図7に示した各試験条件の結果より、式(1)により求めたEP値 Δ_e の最小値 Δ_{eMIN} を、初期EP値と雰囲気温度に対して整理した等値線図を図16に示す。また、初期EP値から Δ_{eMIN} を差し引いた値、すなわちEP値の減少量(最大値)を図17に示す。

同じ雰囲気温度で比較すると、初期EP値が小さいほど Δ_{eMIN} が小さい。また、同じ初期EP値で比較すると、雰囲気温度が低い方が、 Δ_{eMIN} が小さくなる傾向が認められる。それにともない、EP値の減少量も、初期EP値が小さいほど、また、雰囲気温度が低いほど大きくなる傾向が認められ、試験を実施した範囲では、初期EP値が0.10mm以下かつ雰囲気温度が10℃以下の条件でEP値の減少量が0.05mm以上と比較的大きくなっている。

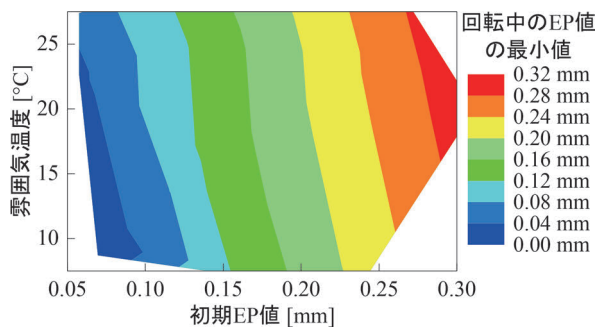


図16 回転中のEP値の最小値

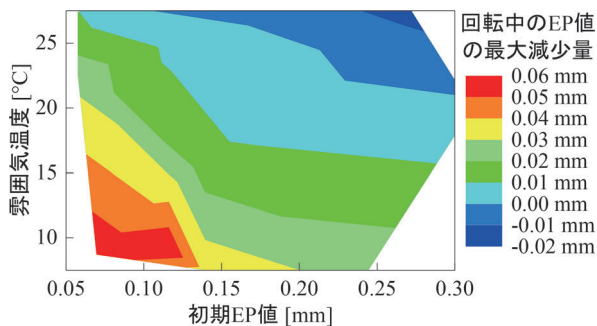


図17 回転中のEP値の最大減少量

5. まとめ

本試験により得られた知見を以下に要約する。

- (1) 歯車装置各部の温度のうち、回転試験中に最も高

温となったのは小歯車軸受の内輪に最も近い小歯車軸の軸端部であった。この小歯車軸の軸端部の温度は、初期EP値が小さいほど、また、雰囲気温度が低いほど、回転開始から約600sまでの温度上昇が急激になり、温度上昇率(10sあたりの温度上昇値)の最大値も大きくなった。この理由として、以下のことが考えられる。初期EP値が小さいほど軸受の負荷圏が広く、荷重が作用するところの数が多くなり、軸受内部の摩擦抵抗や転がり粘性抵抗が増加する。また、雰囲気温度が低いほどギヤ油の粘度が高く、軸受内部での転がり粘性抵抗やかくはん抵抗が増加する。

- (2) 小歯車軸のトルクの最大値は、初期EP値が小さいほど、また、雰囲気温度が低いほど大きくなる傾向が認められた。この理由も(1)で述べた理由と同じであると考えられる。
- (3) 歯車装置各部材の温度変化から、回転中のEP値を算出した。その結果、回転開始から約600s間については、回転とともにEP値が小さくなり、この傾向は初期EP値が小さいほど、また、雰囲気温度が低いほど顕著であることがわかった。これは、回転開始後の初期には、軸受の回転にともなう小歯車軸の温度の上昇が歯車箱の温度の上昇より早いため、小歯車軸の熱膨張が歯車箱の熱膨張より大きくなったことによると考えられる。
- (4) 歯車装置回転中のEP値の最小値は、初期EP値が小さいほど、また、雰囲気温度が低いほど小さくなる。EP値の最小値が小さいほど軸受内部での転がり粘性抵抗が増加して発熱が増加するため、小歯車軸の温度の上昇が早まることにより、さらなるEP値の減少を招く可能性があり、このようなEP値の減少と発熱の増加の循環が継続すると軸受の焼付きに至る可能性が高いといえる。

文献

- 1) 山田孝則：車両用転がり軸受の設計の変遷，設計工学，Vol.50, No.9, pp.435-441, 2015
- 2) 木川定之：鉄道車両用ギヤ油の技術動向，月刊トライボロジー，No.383, pp.15-17, 2019
- 3) Takahashi, K., Suzuki, D., Nagatomo, T., "Effects of bearing clearance and atmospheric temperature on performance of pinion bearings of railway vehicles," Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.14, No.4, p.20-00048, 2020.
- 4) 西河崇，鈴木健吾，折戸航，豊田司：鉄道車両用軸受の開発への取り組み，NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, pp.21-26, 2020