

玉軸受の低トルク性および静音性に貢献するグリース潤滑技術

Low Torque and Low Noise Technology for Ball Bearings Under Grease Lubrication

三宅一徳 K. MIYAKE 津田武志 T. TSUDA 吉崎浩二 K. YOSHIZAKI

A study was conducted to verify the effect of grease on the low torque property and low noise property which are particularly highly sought bearing performances. We focused on the viscoelasticity of grease as the dominating factor of bearing rotational torque. As a result, we clarified that the higher the viscoelasticity, the lower the torque, and that grease families with short carbon chains were superior in terms of low torque characteristic. Moreover, bearing noise increases when grease thickener becomes trapped between the raceway and rolling element causing the oil film thickness to vary, therefore low noise was better achieved if thickeners with low Young's modulus and small particle size were used as this minimizes oil film variance.

Key Words: grease, bearing torque, grease noise, young modulus, particle size

1. はじめに

近年、化石燃料の使用抑制や消費電力削減など省エネルギーに関する要求が高まっている。特に、国内年間電気消費量の55%を占めると言われている産業用モータ分野においては、エネルギー効率の向上が強く求められている。実際、工場のポンプや送風機などに使用されている三相モータを対象としたトップランナ規制が2011年に制定され、モータの高効率化が義務付けられた。そのため、これらのモータに使用される軸受によるトルク損失に関しても、要求が高まっており、グリース潤滑玉軸受には低トルク性能が強く求められる。

自動車用途ですでに多くのモータが使用されているが、電動化の促進によって自動車の静音性は今後ますます向上するものと予想される。そのため、グリース潤滑玉軸受にはさらなる静音性の向上が必要となる。

玉軸受の低トルク性に及ぼすグリースの影響についてはこれまでも検討されており、多くの研究報告や発表がある。軸受トルクに関して渡部らはリチウム石けんを用いて評価を行い、グリースの降伏応力と軸受回転トルクに相関があることを示している¹⁾。また阿久津らはグリースのチキソトロピーに着目し、せん断によるグリース粘性の低下挙動が増ちょう剤の三次元網目構造によるものと結論付けている²⁾。しかしながら、軸受回転トルクへの影響因子に関してこれを定量化した事例はほとんど

報告されていない。このため今回、軸受回転トルクに影響を及ぼす新たな因子として粘性移行応力に着目し、さらに増ちょう剤起因の損失に由来する新しい概念である、かくはん損失エネルギーを導入して、グリース組成や性状と軸受トルクならびにかくはん損失エネルギーとの相関を検討した³⁾。

軸受音響に対しては、遠藤らは弾性流体潤滑 (EHL: elasto-hydrodynamic lubrication) 増ちょう剤膜の厚さ分析結果から増ちょう剤膜の平滑性を議論し、平滑な増ちょう剤膜を形成するグリースの静音性が高いと結論付けている⁴⁾。また五十嵐らは、軸受音響に及ぼすグリース基油粘度と増ちょう剤繊維径の影響を検討し、基油粘度が大きいほど、および繊維径が小さいほど軸受音響値が低減することを示している⁵⁾。小宮は基油粘性や増ちょう度と固体成分の大きさとの関連を調査して、基油粘性が低下するほど、および増ちょう度が増大するほど増ちょう剤起因の軸受音響が大きくなることを明らかにしている⁶⁾。これらに対して、増ちょう剤の機械的な物性が軸受音響に影響していると考え、薄膜硬度計を用いて増ちょう剤パルクのヤング率を測定する手法を考案した。さらに、影響因子であるヤング率と粒子径が異なるサンプルを用いて EHL 油膜厚さ変動量を測定することで、軸受音響悪化のメカニズムを調査した。

表1 低トルク性検討用グリースの組成と性状
Compositions and properties of test grease

Sample sign		T1	T2	T3	T4	
Thickener	Composition (Diurea)	MDI-Octylamine	MDI-Decylamine	MDI-Dodecylamine	MDI-Octadecylamine	
	Carbon chain length	8	10	12	18	
	SP value, (J/m ³) ^{1/2}	21 887	21 478	21 068	20 250	
	Amount, mass%	15	15	15	18	
Base oil	Composition	PAO				
	SP value, (J/m ³) ^{1/2}	17 182				
	Kinetic viscosity, mm ² /s	40°C	30.5			
		100°C	5.82			
Density	15°C	0.827				
Grease	Penetration	60W	251	248	246	258

MDI : Methylenediphenyl 4,4'-Diisocyanate

表2 静音性検討用グリースの組成と性状
Compositions and properties of test grease

Sample sign		N1	N2	N3	N4	N5	
Thickener	Isocyanate	MDI					
	Amine	Aliphatic	Alicyclic	Aromatic	Aliphatic	Alicyclic	Aliphatic
	Amount, mass%	15					
Base oil	Composition	PAO					
	kinetic viscosity, mm ² /s	40°C	30.5				
		100°C	5.82				
Grease	Penetration	60W	256	329	356	267	302
	Average particle size of thickener, μm		2.8	2.4	1.3	0.3	13

2. 試験方法

2.1 供試グリース

2.1.1 低トルク性

低トルク性の検討に用いたグリースの個々の組成と性状を表1に示す。同一の基油とイソシアネート (MDI) を使用し、アミン組成のみ変更することにより、異なる分子構造のウレアグリースを4種類 (T1, T2, T3, T4) 作製した。基油は不純物が少なく、またグリースの基油として広く使用されている合成炭化水素油 (Poly-Alpha-Olefin : PAO) を用いた。潤滑油と異なりグリースは増ちょう剤という固体成分を含むため、この固体成分がかくはん抵抗の要因となり、グリースの流動性に影響を与えると考えた。そこで、増ちょう剤由来のかくはん抵抗を定量的に評価するため、異なるアルキル鎖長の脂肪族アミンと4,4'-ジフェニルメタンジイソシアネート (Methylenediphenyl 4,4'-Diisocyanate : MDI) を基油中で反応させて合成した脂肪族ジウレアを増ちょう剤として用いた。また、かくはん抵抗に影響すると考

えられるグリースの増ちょう剤の影響を排除するため、増ちょう剤と微細化処理条件の検討により、混和増ちょう剤 (JIS K2220) を250 ± 10に統一した。

2.1.2 静音性

静音性の検討に用いたグリースの個々の組成と性状を表2に示す。そのグリースにはいずれも同一の基油とイソシアネートを使用した。基油にはPAOを用い、イソシアネートにはMDIを用いた。基油は、転がり軸受へのトルク損失低減の要求が高いことや音響特性に及ぼす増ちょう剤の影響が顕著に現れることを期待して、転がり軸受用グリース基油としては低粘度に分類されるPAO6を用いた。増ちょう剤であるウレア化合物は、イソシアネートとアミンを基油中で反応させて合成した。今回の検討では、アミン組成を変更したサンプルN1, N2, N3を作製した。サンプルN1は直鎖アルキル基、サンプルN2は単環アルキル基、サンプルN3は芳香族アルキル基を有するアミンを用いた。またサンプルN4は、サンプルN1とサンプルN2で使用した2種

のアミンを組み合わせることで作製し、サンプル N5 はサンプル N1 と同じアミンを用いて微細化処理条件を変更し、増ちょう剤の平均粒子径を大きくすることにより作製した。

2.2 試験条件

2.2.1 軸受回転トルク

図1に軸受回転トルク測定装置の概略を、表3に試験条件を示す。試験軸受は、冠型樹脂保持器を有する非接触シール付の深溝玉軸受（62022RU）にグリースを0.72g 封入したものをを用いた。回転トルクは試験軸受を組み込んだハウジングに作用する接線力をロードセルで測定し、ハウジング外径寸法の1/2を乗じて求めた。また、玉に基油を0.11g 塗布した軸受を用いて少量基油潤滑下の回転トルクの測定も行い、グリース潤滑による回転トルクと少量基油潤滑による回転トルクの差を増ちょう剤由来のかくはん抵抗起因トルクとし、その増ちょう剤由来のかくはん抵抗起因トルクを時間積分して得られる損失エネルギーをかくはん損失エネルギーと定義した。このことにより、起動トルクおよび安定時の回転トルクだけではなく、試験時間内の回転トルクの変動をすべて考慮できるものと考えた。

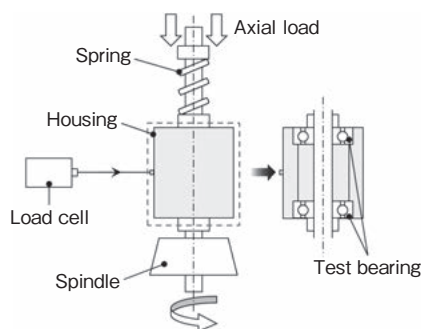


図1 トルク試験機の概要
Schematic view of torque test apparatus

表3 回転トルク試験条件
Rolling torque test conditions

Test bearing	6202
Axial load, N	44
Grease inclusion quantity, %	35
Oil inclusion quantity, g	0.11
P_{max} , GPa	0.93
Rotation speed, min^{-1}	1 800
Temperature, $^{\circ}C$	25 ± 2
Test time, s	1 800

2.2.2 粘性移行応力

グリースの粘性移行応力の測定には、粘弾性測定装置を用いた。図2に測定部の概略図を示す。平行な2面間にグリースを挟み、表4に示す条件で測定を行った。徐々に増大する正弦波のひずみをひずみ制御で印加したときの貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' を測定した。ひずみ量は0.01 ~ 1,000%, 周波数は1Hzで振動させた。この時、貯蔵弾性率 G' はグリース内部に蓄えられた応力を保持する弾性成分であり、また、損失弾性率 G'' は与えたエネルギーが熱となり散逸する粘性成分である。印加したひずみが小さいときは $G''/G' < 1$ で弾性体に近い応力応答となり、ひずみが徐々に増大するに従って G'' が増大する。 G''/G' が徐々に増加し、 $G''/G' = 1$ となり損失弾性率 G'' が貯蔵弾性率 G' と等しくなるときの応力は降伏応力と呼ばれている。しかし、厳密には降伏応力は物体に力を加えていったときに弾性限界を超えて物体のひずみが急激に増加し、元に戻らなくなる時の応力の大きさであるため、グリースの流動性を表現するには適していない。そのため、複素弾性率 $G^* = G''/G' = 1$ となる時の応力を降伏応力ではなくグリースの粘性移行応力と定義し、グリースの流動性として試験した。このグリースの粘性移行応力が大きいほど軸受が回転した際、グリースが流動し始める力が大きくなり、軸受内部において軌道から一度排除されたグリースが再度軌道に流入しにくく、チャンネルング性に優れていることを示している。

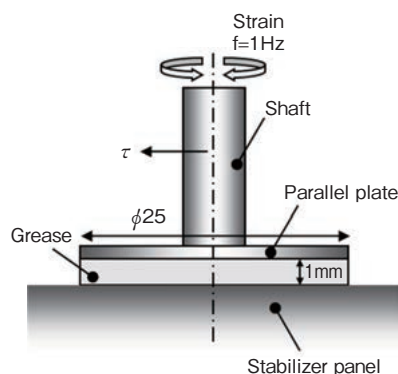


図2 粘性移行応力の測定概略図
Schematic view of transition stress of viscoelasticity measurement apparatus

表4 レオロジー特性測定条件
Rheological property test conditions

Plate	φ25 Parallel plate
Clearance, mm	1
Frequency, Hz	1
Strain	$7 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^0$
Temperature, °C	25 ± 2

2.2.3 増ちょう剤相対表面積

増ちょう剤粒子の相対表面積は、増ちょう剤粒度分布の測定結果から算出した。増ちょう剤粒度分布の測定には、レーザ回折式粒度分布測定装置を用いた。表5に測定条件を示す。増ちょう剤粒度分布の測定は、低トルク検討用グリース 1g を少量トルエンで希釈したあと、装置内を循環するトルエンに投入し、レーザを5万回照射してその散乱パターンを測定した。図3に示すように、大きな粒子の場合、レーザ光に対して小さい角度で光が散乱し、小さい粒子の場合は大きな角度で光が散乱する。ここで増ちょう剤粒子は球体とみなしており、光散乱のMie理論により、増ちょう剤粒子と同等の散乱パターンを作り出す球体の直径が粒子の有効径として算出され、この有効径を粒子径として粒度分布を得た。ここで得られた粒度分布測定結果より、粒径 d の増ちょう剤粒子の表面積を式(1)により算出した。ここで、 A は増ちょう剤粒子の表面積 [μm^2]、 d は粒径 [μm]、 V_a は全粒子の総体積 [μm^3]、 R は粒径 d の粒子が占める体積率 [%] を示す。

$$A = \frac{4\pi (d/2)^2 \times V_a \times R}{4\pi (d/2)^3 / 3} \quad (1)$$

すべての粒径 d について得られた表面積の総和より、単位体積当たりの増ちょう剤表面積を求め、さらに増ちょう剤量 TC [%] を乗算することで、式(2)によって定義したグリース中の増ちょう剤の相対表面積 S を算出した。

表5 粒度分布測定条件
Particle size test conditions

Test method	Laser diffractometry
Measurement range, μm	0.01 ~ 3 500
Carrier fluid	Toluene
Number of measurement	50 000
Agitation speed, min^{-1}	3 000
Scattering intensity, %	15 ± 5

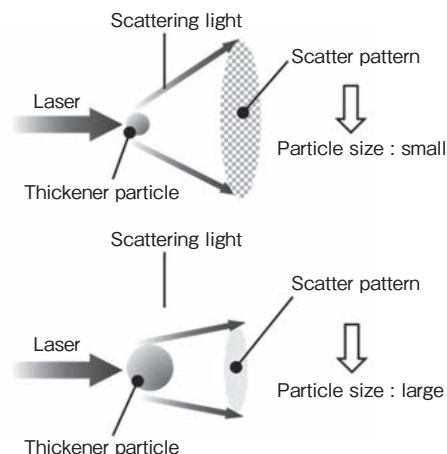


図3 粒度分布測定概略図
Schematic image of particle size measurement

$$S = \sum_d A(d) \times TC \quad (2)$$

なお、増ちょう剤粒子を球体とみなした理由は、微分干渉顕微鏡観察結果において、グリース中の増ちょう剤が球体に近い凝集粒子の形態で多く存在していることを確認したためである。

2.2.4 軸受音響値

軸受音響は軸受振動加速度により試験した。軸受振動加速度(軸受音響値)の測定方法を表6に示す。静音性検討用グリースを軸受(62022RU)に0.72g封入し非接触ゴムシールを装着して密封する。次に、軸受を測定装置のスピンデルに装着しアキシャル荷重を20N負荷し、内輪を $1\,800\text{min}^{-1}$ で回転させたときの、回転初期に最大となる軸受外輪のラジアル方向への振動加速度を圧電式加速度センサで測定した。

表6 軸受音響値測定条件
Bearing noise test conditions

Items	Conditions
Bearing	62022RU
I.D × O.D × W, mm	15 × 35 × 11, mm
Grease quantity, g	0.63
Axial load, N	20
Rotation speed, min^{-1}	1 800
Measurement time, s	1

2.2.5 増ちょう剤ヤング率

1) 測定試料調整方法

増ちょう剤のヤング率測定に用いる試料は、表7に示す条件で図4に示す方法により作製した。グリースから増ちょう剤を単離した後、金型の底に増ちょう剤を付着させてその上からフェノール樹脂を注入し、その後加熱圧縮することにより樹脂埋めした試験片を成型した。この調整条件であれば、増ちょう剤に与える温度の影響も小さく、圧力も低いいため、試料作製による影響を小さくできると考えた。

表7 試料作製条件
Sample preparation method

Item	Condition
Resin	Phenolic
Heating temperature, °C	130
Pressure, MPa	1.5
Compress time, s	900

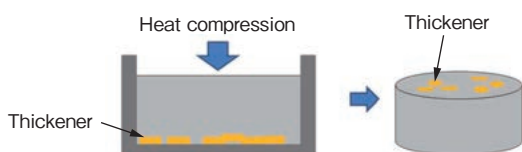


図4 試料作製方法概略図
Schematic image of sample preparation method

2) 増ちょう剤ヤング率

増ちょう剤のヤング率の測定条件を表8に示す。測定装置には薄膜硬度計を用い、押し込み荷重を荷重した後、除荷したときの除荷曲線の傾きよりヤング率を求めた。押し込み荷重は、予備測定により押し込み深さが測定する増ちょう剤の厚さの1/10以下となるように決定した。

表8 ヤング率測定条件
Measurement conditions of Young's modulus

Item	Condition
Number of measuring location	4
Load, μN	500
Load time, s	5
Wait time, s	3

2.2.6 油膜厚さ

本試験では、ガラスディスクと鋼球で構成される点接触状態のグリース EHL 油膜厚さを、光干渉法を用いて測定した。図5に油膜厚さ測定機の概要を、表9に油膜厚さ測定条件を示す。測定には、クロムを蒸着したガラスディスクおよび直径 38.1mm の軸受用鋼球を使用し、ガラスディスクに鋼球を押し付け、純転がり条件におけるグリース油膜の厚さを干渉縞の次数から計測した。測定にあたり、油膜厚さが薄くなる 5mm/s の低速条件での試験を行い、接触界面への増ちょう剤の侵入を観察した。また、軸受の回転速度を考慮し 100mm/s の高速条件にて試験を行い、この条件での干渉縞の観察結果から油膜厚さを測定した。

表9 油膜厚さ測定条件
Measurement conditions of oil film thickness

Item	Condition
Load, N	90
Grease coating thickness, mm	1
Temperature, °C	25
Rotation speed, mm/s	5 100
Measurement time, min	1

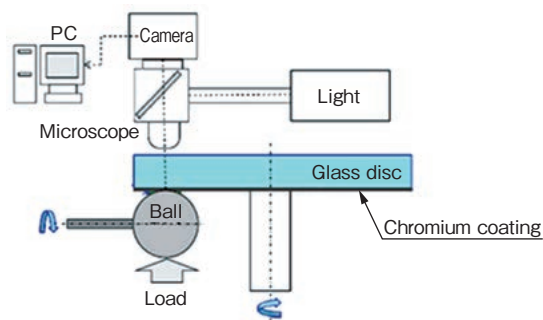


図5 油膜厚さ測定試験機の概要
Schematic image of oil film thickness measuring tester

3. 結果および考察

3.1 軸受回転トルクとかくはん損失エネルギー

低トルク性検討用グリースおよび基油を軸受に封入し、回転トルクを測定したときの経時変化を図6に示す。グリース潤滑による回転トルクは、少量基油潤滑による回転トルクに比べ高いことを確認した。また、低トルク性検討用グリース間で回転トルクに差が認められることから、増ちょう剤ウレアの末端アルキル鎖長が回転トルクに影響を及ぼすことが明らかになった。回転トルクの

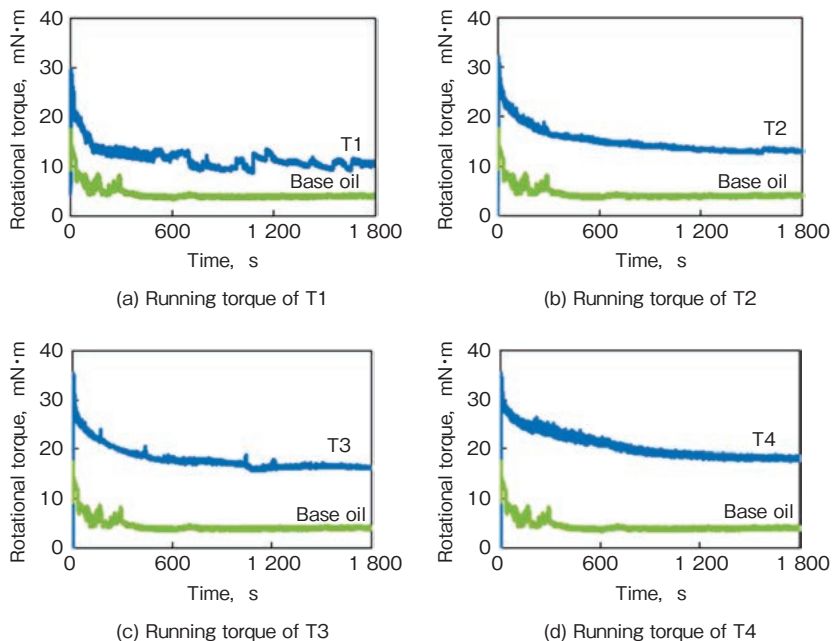


図6 低トルク性検討用グリースの回転トルク
Rolling torque of sample grease

初期安定性など試験時間内全体の回転トルクの変動も試験するため、図7に示すようにかくはん抵抗起因トルクを時間積分し、増ちょう剤由来のかくはん抵抗によって軸受回転中に損失したエネルギーを算出した。図中で彩色された部分の面積がかくはん損失エネルギーを示しており、このかくはん損失エネルギーが小さいほど、一度軌道から排除されたグリースが軌道へ再流入しにくいチャンネルタイプであることを示す。また、回転トルクの絶対値が初期から低い状態を維持しているグリースは、回転トルクの安定性に優れていることも示している。低トルク性検討用グリースのかくはん損失エネルギーを図8に示す。回転トルクと同様にT4が最も高く、T1が最も低いかくはん損失エネルギーを示した。これらのことから、増ちょう剤の末端アルキル鎖長はかくはん抵抗に影響し、アルキル鎖長が長くなるとともにかくはん損失エネルギーが増加し、回転トルクが増加することが明らかとなった。これは増ちょう剤の末端構造のアルキル鎖長によりグリース全体の流動性が変化したためと考える。

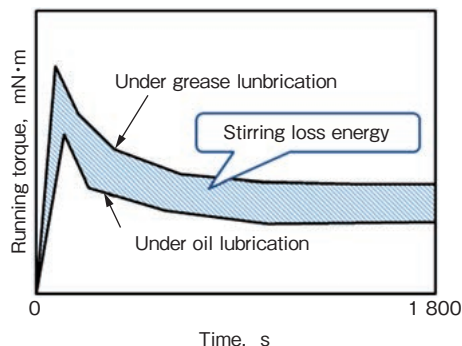


図7 かくはん抵抗の模式図
Schematic of stirring resistance

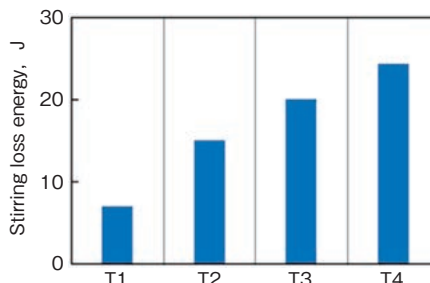


図8 低トルク性検討用グリースのかくはん損失エネルギー
Stirring loss energy of sample grease

3.2 かくはん損失エネルギーと粘性移行応力

低トルク性検討用グリースの粘性移行応力測定結果を図9に示す。増ちょう剤ウレアの末端アルキル鎖長が短い（短鎖長）ほど粘性移行応力が大きくなる傾向が認められ、このため流動性に差が生じることが明らかになった。得られた粘性移行応力と増ちょう剤由来のかくはん損失エネルギーの関係を図10に示すが、低トルク性検討用グリースにおいては粘性移行応力が高いほどかくはん損失エネルギーが低くなる傾向が認められた。図11に、軸受内部のグリースの付着状況の観察結果を示す。末端アルキル鎖長が長い（長鎖長）T4では玉の表面に多くのグリースが付着しているのに対し、短鎖長のT1では玉の表面のグリースの付着量はT4と比較すると少なく、シールへの付着量が多い。粘性移行応力の大きいT1では玉の運動がグリースに障害されず、安定なチャンネリング状態を保持し、かくはん抵抗が抑制されたため、回転トルクが低下したと考えられる。これらの結果から、軸受内部でのグリースの流動については、初期にグリースは回転による遠心力、および玉や保持器の運動に伴って移動し、最終的にシールの内側などかくはん抵抗に寄与しない箇所に付着する。その後、粘性移行応力の高いグリースの場合、付着部から移動せず玉や軌道付近に残った微量なグリース、およびシールや保持器に付着したグリースから分離した基油のみが軌道面に供給される。一方、粘性移行応力の低いグリースは多量のグリースが残存するため、かくはん抵抗が大きい状態となる。このことより、増ちょう剤ウレアの末端アルキル鎖長が短く、粘性移行応力の大きいグリースを設計することに

より、チャンネリング性を向上させることが可能であることを意味しており、この結果は、玉が運動する際にグリースのかくはん抵抗が小さくなることと一致しているものと考えられる。

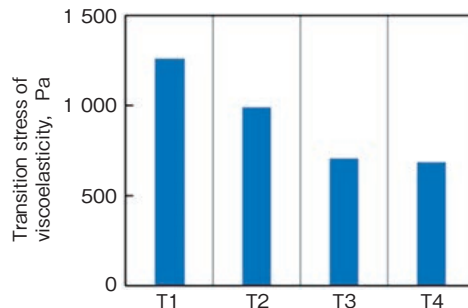


図9 粘性移行応力の測定結果
Measurement result of viscous transition stress

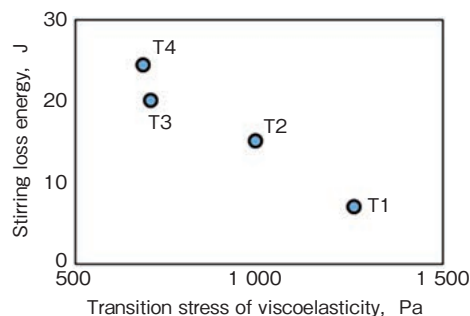


図10 粘性移行応力と増ちょう剤由来のかくはん損失エネルギーの関係
Correlation between transition stress of viscoelasticity and stirring loss energy

Sample	T1		T4	
	Side of tabs	Back side	Side of tabs	Back side
Observation of the balls and retainer				
Grease amount	0.559g		0.570g	
Observation of the seals				
Grease amount	0.079g		0.045g	

図11 試験軸受の観察結果
Observation result of test bearing

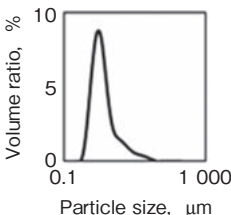
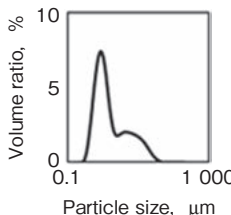
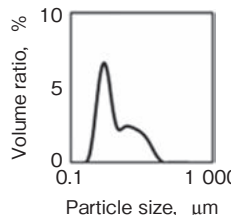
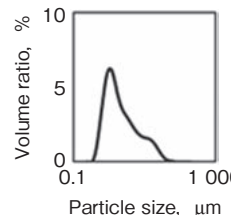
Sample	T1	T2	T3	T4
Particle size distribution				
Average grain size, μm	2.23	3.682	3.93	4.624
Relative surface area	8 953	8 154	7 632	7 472

図12 粒度分布および増ちょう剤の相対表面積
Particle size distribution and relative surface area of thickener

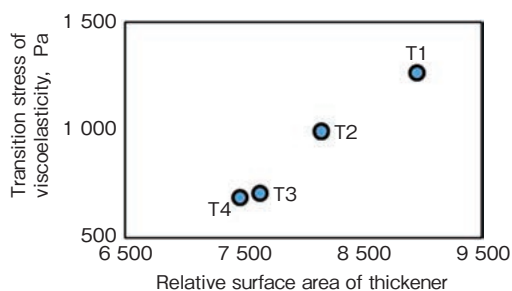


図13 増ちょう剤相対表面積と粘性移行応力の相関
Correlation between relative surface area of thickener and viscoelasticity

表10 軸受音響値測定結果
Measurement result of bearing noise

Sample sign	N1	N2	N3	N4	N5
Amine	Aliphatic	Alicyclic	Aromatic	Aliphatic Alicyclic	Aliphatic
Average particle size of thickener, μm	2.8	2.4	1.3	0.3	13
Bearing noise value, G	0.029	0.157	0.243	0.021	0.186

表11 ヤング率測定結果
Measurement result of Young's modulus

Sample sign	N1	N2	N3	N4	N5	
Young's modulus, MPa	n = 1	685	1 568	3 382	783	706
	n = 2	729	1 678	2 621	821	627
	n = 3	734	1 526	2 592	689	687
	n = 4	685	1 663	2 273	755	592
	Average	708	1 609	2 717	762	653

3.3 粘性移行応力の影響因子

回転トルクの低減には粘性移行応力の影響が大きいことが明らかになったため、粘性移行応力の影響因子について検討した。グリースの流動性を示す粘性移行応力の影響因子として、グリース中の増ちょう剤と基油の間の相互作用に着目した。これらの相互作用を示す物性値はいくつかあると考えるが、特に、増ちょう剤と基油間の界面面積を表す増ちょう剤粒子の相対表面積の影響が大きいと考えた。図12に各グリースの粒度分布および算出された増ちょう剤の相対表面積を示す。短鎖長のT1では粒子径の小さい増ちょう剤が多く形成され表面積が大きいのにに対し、長鎖長のT4は粒子径の大きい増ちょう剤が多く形成され、相対表面積が小さいことが明らかになった。ここで得られた増ちょう剤相対表面積と粘性移行応力の相関を検討した結果を図13に示すが、増ちょう剤の相対表面積が大きいほど粘性移行応力も大きくなる傾向が明らかになった。増ちょう剤の相対表面積が大きく、粒子径が小さい増ちょう剤の場合存在する粒子数が増加するため、増ちょう剤粒子間の距離が短くなり、増ちょう剤粒子間の相互作用が大きくなる。さらに、油中に小さい粒子が分散することで擬似的にスラリーの状

態になり、グリースの流動を妨げる効果が発生するものと考えられる。

3.4 軸受音響値への影響因子

表10にアミン種および微細化処理条件を変更した静音性検用グリースの軸受音響値測定結果を示す。なお、回転1秒後の軸受音響値とともに、レーザ回折式粒度分布径により測定した増ちょう剤の平均粒子径も併記した。サンプルN1, N2, N3で比較すると増ちょう剤のアミン種によって軸受音響値は大きく異なり、脂肪族ジウレアの音響値が最も小さく、次いで脂環式、芳香族の順で軸受音響値は大きくなった。また脂肪族と脂環式を組み合わせたサンプルN4では、サンプルN1, N2と比較して軸受音響値が低くなることが確認できた。一方、

サンプル N1 と同じ脂肪族アミンを用い、平均粒子径を大きくしたサンプル N5 は、サンプル N1 と比べて軸受音響値が大幅に増加することを確認した。

ヤング率の測定結果を表11に示す。増ちょう剤種が異なるサンプル N1, N2, N3 間で比較すると、脂肪族アミンを用いたサンプル N1 が最もヤング率が低く、次いで脂環式アミンを用いたサンプル N2、芳香族アミンを用いたサンプル N3 の順となった。またサンプル N4、サンプル N5 のヤング率は、サンプル N1 に近い値となった。本測定を行った樹脂埋め試験片は 1.5MPa の圧縮応力をかけて作製しているが、今回得られた増ちょう剤ヤング率の絶対値に対して非常に小さく、影響はないと判断した。

今回得られた結果より軸受音響値に及ぼすグリースの影響因子について考察した。静音性検討用グリースのうち、増ちょう剤のアミン種が異なるが平均粒子径が 1.3 ~ 2.8 μ m と同程度を示したサンプル N1, N2, N3 を用いて、軸受音響値に及ぼす増ちょう剤ヤング率の影響を表わした結果を図14に示す。軸受音響値と増ちょう剤ヤング率の間には高い相関関係があり、ヤング率が低いほど軸受音響値は小さくなっている。転動体と軌道の接触面にはグリースの基油だけではなく増ちょう剤も侵入しており、増ちょう剤がかみこんだ際の転動体の上下振動量が小さいほど油膜変動を抑制でき、軸受音響値を小さくできると考えられる。増ちょう剤ヤング率が低い場合、かみこんだ際の増ちょう剤の変形量が大きくなるため、転動体の上下振動量を抑制でき、軸受音響値を低減できたと推察する。

一方、増ちょう剤の平均粒子径が異なるサンプル N4、サンプル N5 において、増ちょう剤ヤング率と軸

受音響値との関係を調査すると、図14のような相関関係は得られない。従来の研究より、増ちょう剤の粒子径と軸受音響値には相関があり、粒子径が小さいほど音響値が低減するという報告があるため⁴⁾、今回の調査結果と同じ傾向であることを確認した。これは軸受音響値に影響する因子として、増ちょう剤ヤング率と平均粒子径の両方が影響しているためである。

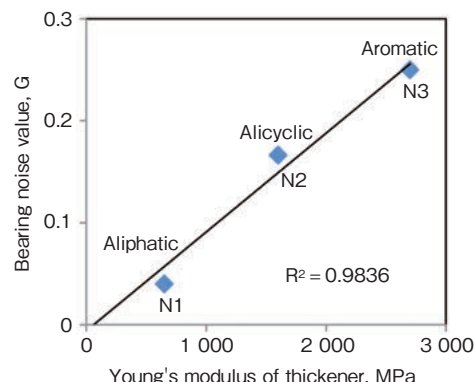


図14 軸受音響値に及ぼす増ちょう剤ヤング率の影響
Effect of Young's modulus of thickener on bearing noise

3.5 軸受音響値に及ぼす油膜変動量の影響

速度条件 5mm/s と 100mm/s における干涉縞の観察結果および 100mm/s での干涉縞の次数から求めた油膜厚さ測定結果を図15に示す。油膜厚さが薄くなる 5mm/s の低速条件において、増ちょう剤粒子の侵入に伴う油膜の変動を明瞭に確認することができた。100mm/s の高速条件においても、増ちょう剤起因と考えられる油膜の変動が認められた。今回ヤング率、平均粒子径が大きく異なるサンプルについて観察を行ったが、いずれのサンプルについても接触面に増ちょう剤粒

Sample sign		N1	N2	N3	N4	N5
Speed	5mm/s					
	100mm/s					
Oil film thickness, nm	Max.	690	790	800	630	850
	Min.	550	550	550	520	600
	Variation range	140	240	250	110	250

図15 油膜厚さ測定結果
Measurement result of oil film thickness

子が侵入しており、増ちょう剤が接触面にかみこまないように制御することは不可能であると判断した。

油膜厚さは、ガラスディスクと鋼球が接触している中央部の油膜厚さから求めた。また増ちょう剤侵入による油膜厚さのばらつきを考慮して5視野の観察を行い、最大油膜厚さから最小油膜厚さを引いた値を油膜厚さ変動幅とした。今回の測定結果より、脂肪族アミンと脂環式アミンを併用したサンプル N4 の油膜厚さ変動幅が最も小さく、次いで脂肪族アミン単独のサンプル N1 という結果であった。また脂環式アミン、芳香族アミンを単独使用したサンプル N2, N3 および増ちょう剤粒子径が大きいサンプル N5 は油膜厚さ変動幅が大きいことを確認した。

軸受音響値に及ぼす影響因子として増ちょう剤のヤング率や平均粒子径が影響する理由は、増ちょう剤が転動体と軌道の間に入り込みこむことで油膜変動が起こり、油膜の変動が軸受の振動を引き起こすためであると考えられる。そこで光干渉法での観察結果から計測した油膜厚さ変動幅と軸受音響値との関係を調査した。その結果を図15に示す。

グリースの増ちょう剤によって引き起こされる油膜厚さの変動幅と軸受音響値の間には高い相関関係があることが認められた。ヤング率が低く平均粒子径も小さいサンプル N4 では、増ちょう剤が噛み込んだ際の油膜変動の減衰効果が大きいいため軸受音響値を低減できたものと推定する。

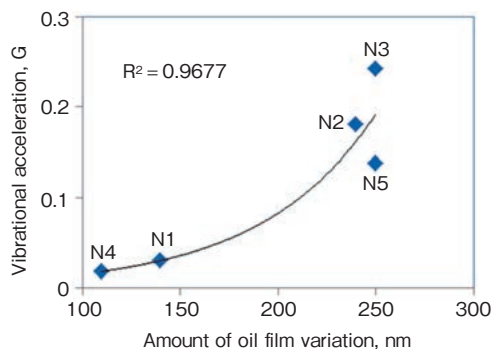


図16 油膜厚さ変動幅と軸受音響値との関係
Relationship between amount of oil film thickness and bearing noise

4. おわりに

転がり軸受のトルクに及ぼすグリース組成と性状の影響についての定量化の取り組みを行った。グリース性状としては降伏応力に代わる新しい指標として粘性移行応力を、軸受トルクに関しては増ちょう剤起因トルクの時

間積分値であるかくはん抵抗エネルギーの概念を導入した。脂肪族ジウレアグリースについて末端アルキル鎖長とかくはん損失エネルギーおよび粘性移行応力との相関を検討した結果、短鎖長ほどかくはん損失エネルギーが低く、粘性移行応力が大きいことが明らかとなった。短鎖長脂肪族ジウレアグリースほど粒径が小さく粒子数が多いことより、増ちょう剤同士の間隔の増大が粘性移行応力の増大に寄与していると推定した。

軸受音響値低減に関しては、増ちょう剤の弾性率や油膜変動の点から検討を行った。その結果、弾性率が小さい脂肪族アミンからなるジウレア増ちょう剤、あるいは粒径が小さく油膜変動が小さい脂環式アミンと脂肪族アミンの組合せからなる増ちょう剤の軸受音響値は低く、良好な結果を示した。

参考文献

- 1) 渡部絵里, 戸田雄次郎: グリースによる低トルク化技術とモータ用軸受への応用, トライボロジー会議予稿集, 2013 春・東京(2013)F28.
- 2) 阿久津智宗, 益子正文, 鈴木章仁: せん断による粘性低下から考察する潤滑グリースの網目構造変化, トライボロジスト, Vol. 52, No. 6(2007)445-452.
- 3) 新田真理子, 津田武志, 新井大和, 坂本清美, 酒井一泉: 転がり軸受のトルクにおけるジウレアグリースの粘性移行応力と増ちょう剤分子構造の影響, トライボロジスト, Vol. 61, No. 10(2016)699-708.
- 4) K. MATSUBARA, D. DONG, T. ENDO: Low Noise Greases for Bearings, NLGI SPOKESMAN, Vol. 72, No. 6(2008)25.
- 5) 五十嵐昭男, 神谷紀男: 玉軸受の振動及び音におよぼす潤滑剤の影響, 潤滑, Vol. 17, No. 3(1972)154.
- 6) H. KOMIYA: Effect of Contamination in Lubricant on Noise of Ball Bearing, NLGI SPOKESMAN, Vol. 56, No. 5(1992)173.

筆者



三宅一徳*
K. MIYAKE



津田武志*
T. TSUDA



吉崎浩二*
K. YOSHIKAZI

* 研究開発本部 材料研究部