

転がり軸受のグリース潤滑技術

Grease Lubrication Technology of Rolling Bearings

吉崎浩二 K. YOSHIKAZI

Friction loss of rolling bearings that support rotational motion in machinery is generally smaller than that of sliding bearings. Moreover, rolling bearings lubricated with grease can contribute much more to reduction of friction loss in machines, machine size, and machine weight than those lubricated with oil due to smaller agitation resistance of lubricant and simpler sealing equipment. Development and improvement of rolling bearings and greases have been carried out to support higher performance of machinery. This paper introduces trends in greases for rolling bearings used in main industrial fields and recent examples of research and development results.

Key Words: grease, rolling bearing, boundary lubrication, elastohydrodynamic lubrication

1. はじめに

地球環境保全や温暖化防止のため、機械装置の摩擦損失の低減、高効率化、小型・軽量化や長寿命化が進められている。軸受は機械装置の回転運動を支える重要な要素部品であり、一般に転がり軸受の摩擦損失はすべり軸受の摩擦損失よりも小さい。さらに、転がり軸受の潤滑方式は、油潤滑とグリース潤滑に大別されるが、グリース潤滑の場合は油潤滑よりも潤滑剤のかくはんによる摩擦損失が小さく、また密封装置の簡素化と機械装置の小型・軽量化が可能となる。一方、機械装置のさらなる低損失化や小型・軽量化のニーズにより、転がり軸受への要求性能はますます苛酷となっている。これらのニーズに対応するため、各種用途用グリースの改良・開発が進められている。本報では、主な産業分野での転がり軸受用グリースの動向と、最近の研究開発動向を紹介する。

2. 転がり軸受用グリースの特徴

転がり軸受には、低温から高温までのさまざまな温度環境下で、ときには軸受材料が塑性変形するような高面圧で、さらには製品が寿命に至るまでの長期間、軽く、静かに、滑らかに回転運動、ときには揺動運動を支えることが求められる。このために、軸受型式の選定や内部設計の最適化などがなされるが、適切なグリースを選定することも重要である。転がり軸受の性能を発揮するた

め、転がり軸受に用いるグリースには、耐熱性、酸化安定性、低温性、耐荷重性、低トルク性、高速性、さび止め性、音響特性などが求められる。これらの性能は、潤滑の主体である油（基油）、基油を半固体状に維持するための増ちょう剤および各種性能を向上させるための添加剤の種類や組合せなどによって決まる。

耐熱性や酸化安定性、耐荷重性などは他の用途用グリース、例えばギヤ用のグリースにも必要な性能である。一方、音響特性は転がり軸受用グリースに特徴的な必要性能であり、音響特性が良好なことが求められる。転がり軸受の転動体と軌道の接触部は数 GPa と面圧が高く、かつ高速で転がり運動を行っている。この接触部にグリース中の固形分がかみ込むと、転がり軸受から振動が発生し、結果として異音が発生する。

グリース中の固形分には、グリース成分である増ちょう剤の塊と、これ以外の異物がある。図 1 に示すように¹⁾、グリース製造時にロール処理工程で増ちょう剤の塊は微細に分散されるが、ロール処理には多くの時間を要するため、グリースのコストは上昇する。異物に対しては、原料のフィルタ掛けや、クリーンルーム内で製造することにより、グリース中への異物の混入を防止し、音響特性の向上への種々の取り組みがなされている。

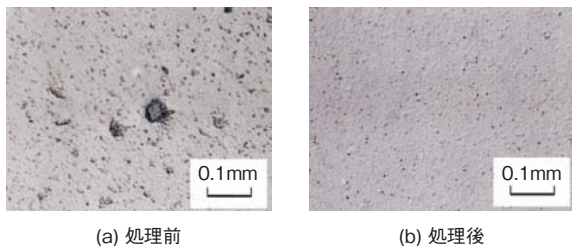


図1 ロール処理前後のグリース顕微鏡観察結果
Microscopic observation results of greases before and after roll mill treatment

3. 主な産業分野での転がり軸受用グリースの動向

3.1 自動車分野

乗用車のホイール用軸受は、小型・軽量化、メンテナンスフリー化、組付け作業の簡素化などのメリットを背景にハブユニット化が進んでいる。ハブユニットには自動車の貨車輸送時の疑似圧痕発生防止やメンテナンスフリー化への対応のため、耐熱性、摩擦面へのグリースの付着性、流入性および潤滑性にすぐれた、JIS1～2号ちよう度のウレア-鉛油系グリースが主に用いられている。

自動車用電装品やエンジン補機に用いられる転がり軸受では、実車使用中に固定輪に鋼の組織変化を伴う早期はく離が発生し問題となった。機器の小型・軽量化、高性能化のため、転がり軸受の運転条件が高速、高温、高荷重、高振動と、苛酷になったことが大きく影響を及ぼしている。

このはく離は、これまでの内部起点はく離とは全く異なり、白色組織が見られるのが特徴で、白層はく離と呼ばれる。発生メカニズムは、すべり、高面圧、衝撃荷重などによる内部応力の増大が主要因で、軌道部でのグリースの分解による水素の発生と鋼への水素の侵入がこのはく離を助長すると推定した。この推定メカニズムに基づき、白層はく離防止グリースの開発を行った。開発過程においては油膜による衝撃荷重の緩和とともに、添加剤被膜による摩擦低減および水素の発生と鋼への侵入の抑制を検討した。その結果、動粘度および圧力粘度係数が大きく、油膜形成能力に優れるアルキルジフェニルエーテル(ADE: Alkyl diphenyl ether)を基油とするウレアグリースに、有機金属系極圧添加剤を添加したグリースを開発した²⁾ 開発グリースの性状と実機での耐久試験結果をそれぞれ表1、図2に示す。本開発グリースを用いることにより、固定輪の白層はく離を防止することができ、転がり軸受の長寿命化に貢献している。

表1 オルタネータ軸受用グリースの組成・性状
Compositions and properties of grease for alternator bearing

		従来グリース	開発グリース
増ちよう剤		ジウレア	ジウレア
基油		ポリ α オレフィン/ 鉛油	アルキルジフェニルエーテル
基油動粘度 mm ² /s @ 40°C		56	97
混和ちよう度		244	238
滴点, °C		> 270	> 270
蒸発量, % 100°C × 22h		0.15	0.19
酸化安定度, kPa 99°C × 100h		15	10
低温トルク N·m, -30°C	起動	0.274	0.322
	回転	0.042	0.048

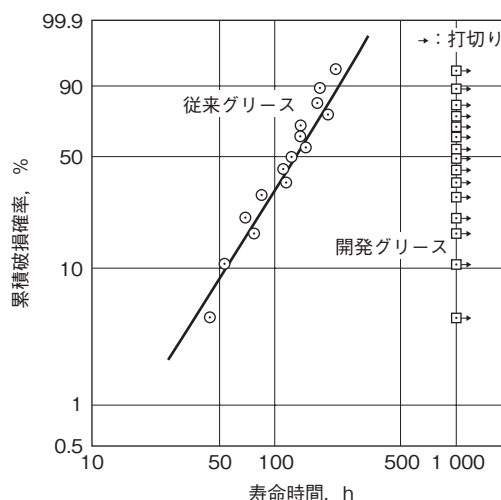


図2 オルタネータ実機耐久試験結果
Results of alternator endurance test

3.2 産業機器分野

3.2.1 風力発電

風力発電装置の構造例を図3に示す。風力発電装置は、主軸、増速機、発電機などで構成され、多くの転がり軸受が使用されている。使用される転がり軸受の潤滑は、増速機では油潤滑で、それ以外はグリースで潤滑されることが多い。

主軸用軸受は、ロータを介して作用する風による荷重を支持し、回転トルクを増速機に伝える重要な部品である。主軸用軸受のグリースには低温時の低トルク性、耐荷重性、さび止め性、長寿命が要求され、表2に示すよ

うなポリ α オレフィン（PAO：Poly- α -olefin）や鉱油を基油とするリチウム石けんグリースあるいはリチウム複合石けんグリースなどが用いられている³⁾。

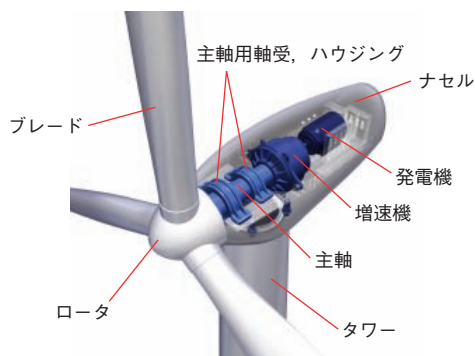


図3 風力発電装置の構造例
Typical structure of wind turbine

3.2.2 鉄鋼設備

鉄鋼設備に使用される転がり軸受は、高温、高荷重で運転されるだけでなく、水や粉じん、酸化スケール等が存在する苛酷な条件で使用されている。

圧延機ロールネック軸受は高荷重、衝撃荷重下で使用され、さらにロール部で使用される多量の冷却水やスケールが転がり軸受内に侵入するため、グリースの軟化や転がり軸受の寿命を低下させるとの問題がある。従来は、耐水性、耐荷重性の優れたリチウム石けんグリースや、高PV性能を有する特殊リチウム複合石けんグリースが使用されていたが、近年では、極圧性、さび止め性、付着性および混水時のせん断安定性に優れたカルシウムスルフォネートコンプレックスグリースの使用が拡大している⁴⁾。

連続鋳造設備のガイドロール軸受は、高温、極低速、高荷重条件下で使用されるため、油膜形成が困難で、境

界潤滑領域での運転となっている。封入グリースには、従来は耐熱性に優れたアルミニウム複合石けんが用いられていたが、近年では高粘度基油のウレア系グリースが広く用いられている⁴⁾。

3.2.3 鉄道車両

新幹線車両の車軸軸受では、1997年に営業運転を開始した500系新幹線車両に、従来の油浴潤滑にかわり、新幹線営業車両で初めてグリース潤滑が採用された。密封装置が簡素化できるため車軸軸受部の小型・軽量化が図られ、高速化対応が可能となり、メンテナンスフリー化も期待できるようになった⁵⁾。封入グリースには、検査周期の延長のため、一般の鉱油よりも酸化安定性に優れ、高粘度指数である水素化精製鉱油を基油に用いたリチウム石けんグリースが使用されている。2004年3月に営業運転を開始した九州新幹線（800系新幹線）用の車両にも、同じ型式のグリース密封形軸受が採用されている。

鉄道車両の動力源となっているトラクションモータの検査周期は誘導電動機化、ブラシレス化以降、グリース潤滑で使用される転がり軸受およびグリースの寿命に依存するようになった。新幹線では、300系新幹線車両で誘導電動機化され、転がり軸受の高速・高温化に対応するため、耐熱性の優れたリチウム複合石けんと鉱油からなるグリースが採用された。このグリースはその後の新幹線車両をはじめ、多くのトラクションモータに使用されている。更なる検査周期の延長のため、同じリチウム複合石けんを合成油を基油に用いたグリースも実用化されている。

表2 風力発電機主軸軸受用グリースの組成・性状
Compositions and properties of grease for wind turbine main bearing

	グリース A	グリース B	グリース C	グリース D	グリース E
増ちょう剤	リチウム石けん	リチウム／カルシウム石けん	リチウム複合石けん	カルシウムスルフォネートコンプレックス	リチウム複合石けん
基油	鉱油	鉱油	鉱油／PAO	鉱油／PAO	PAO
基油動粘度 mm ² /s @ 40℃	200	400	130	80	460
ちょう度グレード	1号	2号	1号	2号	1/2号

4. 最近の研究開発動向

4.1 トライボロジー特性

4.1.1 有機金属系極圧添加剤

流体潤滑条件で使用される場合は基油による油膜で十分な潤滑性を維持できるが、高温、高荷重など使用条件が厳しくなり、混合潤滑や境界潤滑条件で使用される場合は、潤滑性向上のために油性剤や極圧添加剤が添加される。極圧添加剤には硫黄系、りん系などがあるが、有機モリブデン化合物に代表される有機金属系極圧添加剤が白層はく離防止にも効果を有することを見出している。このメカニズムの検証として、有機金属系極圧添加剤の摩擦摩耗特性の評価やトライボケミカル反応により生成する表面膜の組成および構造の解析を行った。

ADE を基油とするウレアグリースに、各種有機金属系極圧添加剤を配合したグリースの摩擦摩耗特性は、摩擦低減に効果はあるが摩擦係数の変化の大きいものや、摩耗防止の効果は大きい摩擦低減効果は小さいものなど、極圧添加剤の種類によりその特徴が異なることが明らかとなった⁶⁾。さらに2種の添加剤併用による摩擦摩耗特性の改善を検討した。摩擦係数の経時変化を図4に示すが、亜鉛系添加剤との併用で摩擦摩耗低減効果が認められ、各々を単独に使用するよりも摩擦摩耗特性は改善された⁷⁾。

これらの摩擦摩耗特性は、トライボケミカル反応によって形成される表面膜によるものである。したがって表面膜の化学構造や膜厚を明らかにすることは重要であり、オージェ電子分光分析 (AES: Auger Electron Spectroscopy) などの表面分析機器により、表面膜の解析を行なった。

一例として、ジチオカルバミン酸アンチモン (SbDTC: Antimony dithiocarbamate) と亜鉛系添加剤を併用した時の、摩擦摩耗試験後の摩擦面の AES 分析結果の例を図5に示す。表面膜の構造は、最表面にアンチモンの酸化物と硫化物の層が形成され、その下部に亜鉛の硫化物の層が形成されていると考えられ、アンチモンの酸化物と硫化物が摩擦低減に、亜鉛の硫化物が摩耗防止に効果を示すことが示唆された⁷⁾。

さらに、転がり接触の場合とすべり接触の場合に形成される表面膜の比較を行った⁸⁾。転がり接触で形成された表面膜の分析結果の例を図6に示す。転がり接触により形成された表面膜の組成はアンチモンと亜鉛の酸化物が主体であり、すべり接触において形成される硫化物が

主体の表面膜と異なった。これは摩擦条件の違いや酸素との接触の有無によるものと考えられる。

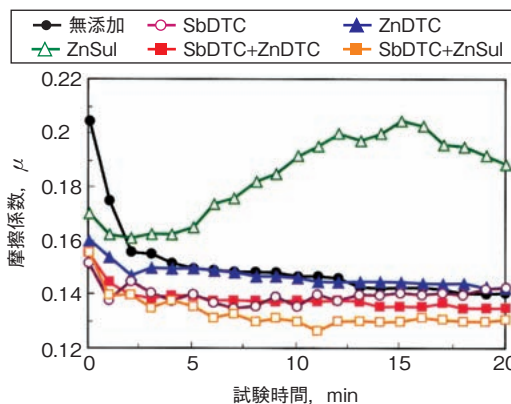


図4 SbDTC / 亜鉛系添加剤併用時の摩擦係数
Friction coefficient of greases combination SbDTC with Zn additives

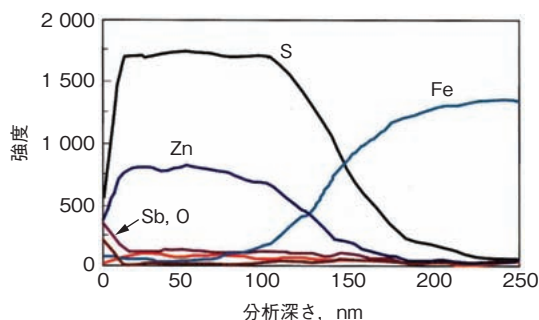


図5 すべり摩擦面の AES 分析結果 (SbDTC + ZnSul)
AES analysis results of sliding friction surface (SbDTC + ZnSul)

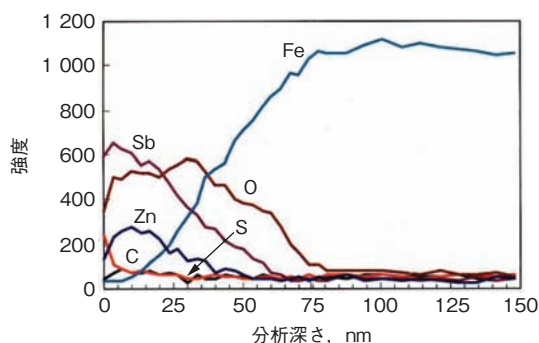


図6 転がり摩擦面の AES 分析結果 (SbDTC + ZnSul)
AES analysis results of rolling friction surface (SbDTC + ZnSul)

4.1.2 ビスマス系極圧添加剤

地球環境保全や人体への安全性向上への取り組みは重要であり、極圧添加剤の分野では、鉛化合物や塩素化合物から代替添加剤への転換を完了している。しかし、今後新たに人体や環境への影響を指摘・規制されることに対して、より安全性の高い添加剤の研究開発は重要である。

ビスマスはヒ素などと同じ15族に属するが、その化合物は医薬品や化粧品などに用いられ、重元素の中では比較的毒性が低い。また、ビスマスは鉛フリーはんだ合金の材料にも使用されている。さらに、有機ビスマス化合物は鉛系極圧添加剤の代替添加剤として期待できるとの研究報告⁹⁾があり、ビスマス化合物の極圧添加剤としての特性を研究した。その結果、ジチオカルバミン酸ビスマス (BiDTC : Bismuth dithiocarbamate) が図7に示すように、摩擦摩耗特性などに優れることを見出した¹⁰⁾。

さらに、ADEを基油とするBiDTC添加グリースの、すべり摩擦条件でのトライボロジー特性評価と、すべり摩擦条件と転がり摩擦条件で形成される表面膜の解析を行った¹¹⁾。図8に示すように、BiDTC添加グリースはすべり摩擦条件では、SbDTC添加グリースと同等の摩擦摩耗特性を示し、図9に示すように、その表面膜はビスマスと硫黄よりなる膜であることが明らかとなった。図10に示す転がり摩擦で形成される表面膜は、ビスマス、酸素、硫黄から形成されており、すべり摩擦と転がり摩擦で形成される表面膜の組成が異なることを明らかとした。これはSbDTCと同様に、摩擦条件の違いや酸素との接触の有無によるものと考えられる。

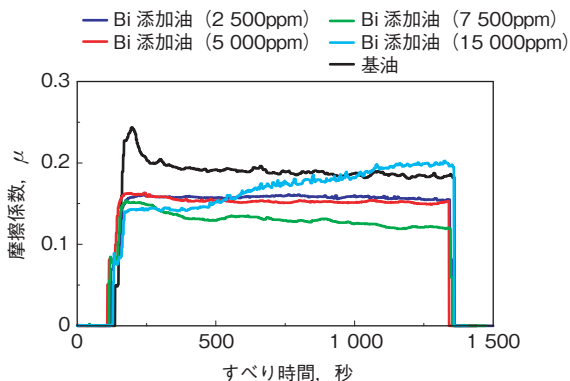


図7 BiDTC添加ADE油の摩擦特性
Friction characteristics of ADE oil containing BiDTC

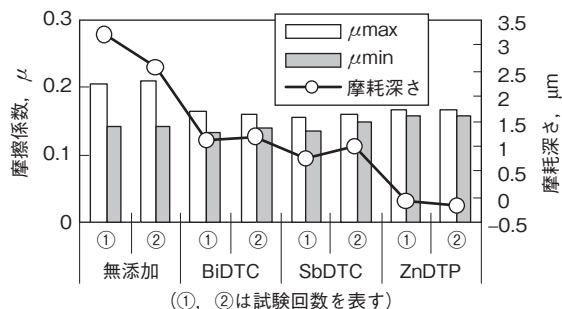


図8 BiDTC添加グリースの摩擦摩耗特性
Friction and wear characteristics of BiDTC-added grease

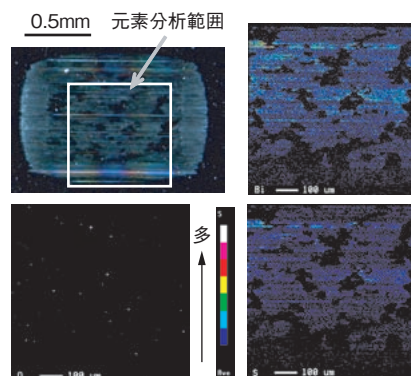


図9 すべり摩擦試験後の摩擦面の分析結果
Analysis results of friction surface after sliding friction test

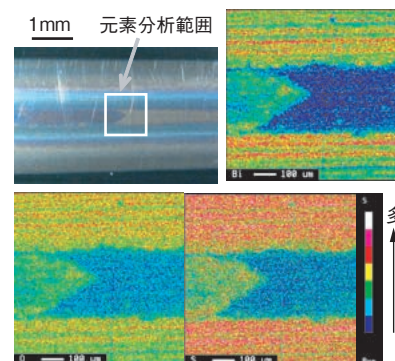


図10 転がり摩擦試験後の摩擦面の分析結果
Analysis results of friction surface after rolling friction test

4.2 レオロジー特性

極圧添加剤は、主に境界潤滑から混合潤滑領域下で効果を発揮する。境界潤滑から混合潤滑領域へ、混合潤滑から流体潤滑領域への潤滑状態の改善と併用すれば、転がり軸受の摩擦摩耗の低減や、長寿命化などの性能向上により貢献できる。グリース潤滑の場合、潤滑状態は温度、荷重や回転速度などの使用条件以外に、グリースそのものの流動特性 (レオロジー特性) の影響を大きく受ける。このため、グリースのレオロジー特性の把握は重要である。

さらに、グリースのかくはん抵抗に起因する摩擦損失の低減や、グリースの使用量削減の観点より、封入グリースの少量化のニーズが高まっている。少量化した時の懸念としては、潤滑を必要とする接触部へのグリースの供給が不十分になることであり、このような貧潤滑状態でのレオロジー特性の把握や、レオロジー特性の適正化により、有効に潤滑に寄与するグリースの量を増加させることが、転がり軸受の性能向上には必要である。

従来、グリースの流動性は混和ちょう度で論じられることが多かったため、まずは貧潤滑下でのレオロジー特性と混和ちょう度の相関を検討した¹²⁾。図11に示すように、貧潤滑でのすべり接触下での耐焼付き性は、ちょう度の影響を受け、ちょう度が高いグリースの焼付きに至る時間が長いこと、摩擦面へのグリース流入性は、接触部入口のグリース溜り部のせん断粘度および降伏応力と相関が認められることなどを明らかにした。さらに、それらのレオロジー特性に及ぼす増ちょう剤の種類の影響や、基油動粘度の影響について検討し、同等のちょう度でも増ちょう剤の種類によりグリース流入性は異なることなどを明らかにした^{13, 14)}。

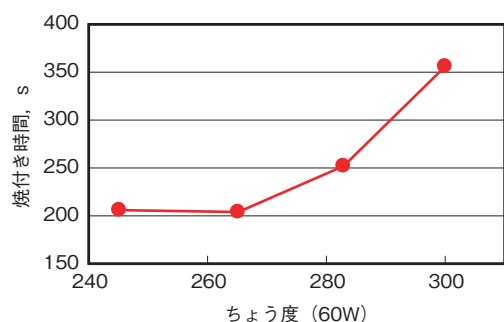


図11 ちょう度と焼付きに至る時間の関係
Relationship between penetration and seizure time

4.3 弾性流体潤滑膜の形成性

グリースの弾性流体潤滑 (EHL: Elastohydrodynamic lubrication) 膜の理論的解析ならびに計測は、基油の EHL 膜形成性と比較して実施されている。これまで、増ちょう剤の種類、量、繊維構造や基油の種類、グリースちょう度の影響などについて検討されている¹⁵⁾。

図12に、光干渉法によるグリース膜形成性を評価した結果¹⁶⁾を示す。この測定では、測定前にグリースを塗布した後は追加の給脂を行っていない。一般のグリースでは、グリース A のように早期にグリース膜が破断するが、増ちょう剤の種類や量、混和ちょう度などを調

整することにより、グリース B のように、長期にわたりグリース膜の形成を維持することが可能となる。

次に、ウレア系グリースの低速領域でのグリース膜形成性の研究報告事例を2例紹介する。

極低速領域までのグリース膜厚の計測の結果、低速領域におけるグリース膜厚は、基油の膜厚よりも桁違いに厚い膜が形成されることが明らかとなっている¹⁷⁾。低速領域でも EHL 膜に典型的な馬蹄形の干渉縞が観察されており、膜厚の増加の原因は、流体潤滑効果によるものと推定している。一方、別の研究報告では、低速領域におけるグリース膜厚の増加が確認されるが、閉じ込め油膜の観察結果¹⁸⁾やディスク転走面の FT-IR 分析結果¹⁹⁾より、グリース膜が厚くなる原因を、回転中に増ちょう剤が転走面に付着、堆積することであると推定している。

以上2例はウレア系グリースが低速領域での油膜形成に優れることを示しているが、それぞれのメカニズムは異なり、前者は流体潤滑効果、後者は境界膜形成効果によるものと推定している。これは評価条件の違いなどによるものと考えられる。また、これらの評価は光干渉法で行われたものであるが、今後実際の転がり軸受での検証も必要である。

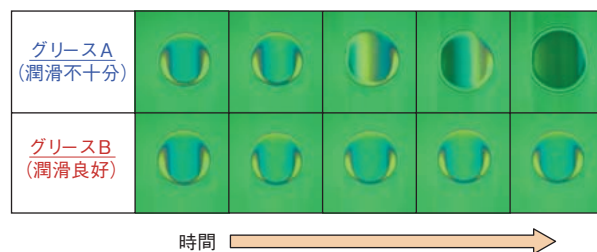


図12 グリース膜観察結果
Observation results of grease film

5. おわりに

今後ますます機械装置の小型・軽量化、高速化などが進展し、転がり軸受の使用環境が厳しくなる一方、転がり軸受の低トルク化や長寿命化の要求はより一層厳しくなるものと予想される。さらには環境負荷低減への取り組みも重要な課題である。これらの動向に対応するためには、転がり軸受の進化が必要である。転がり軸受の“要素”であるグリースも同様に進化が必要である。このため、添加剤技術とレオロジー・油膜形成性解析の2本の柱によってグリースの高性能化・高機能化を達成し、その結果により、転がり軸受の進化に貢献したいと考える。

参考文献

1) ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会編著：図解入門よくわかる最新ベアリングの基本と仕組み，秀和システム(2011)112.

2) 小宮：転がり軸受の潤滑技術，設計工学，35，6(2000)194.

3) K. Yoshizaki, K. Matsuo, K. Yamakawa, H. Matsuyama, T. Saito: Lubricating performance of wind turbine main bearing greases, International Tribology Conference Hiroshima 2011 Extended Abstract, B2-11(2011).

4) 長野：鉄鋼設備に使用されるグリースの最近の動向，潤滑経済，551(2011)37.

5) 大山：新幹線の高速化とトライボロジー，KOYO Engineering Journal, no. 154(1998)29.

6) 中田・小宮：潤滑グリースの摩擦特性に及ぼす添加剤の影響，トライボロジー会議予稿集，大阪 1997-11 (1997) 255.

7) 加藤・中田・小宮：グリースの添加剤による表面膜生成と摩擦特性，トライボロジー会議予稿集，東京 1998-5 (1998)408.

8) 小宮・中田・吉崎：有機金属系極圧添加剤を添加したグリースの転がり接触における表面膜形成，トライボロジー会議予稿集，仙台 2002-10(2002)7.

9) D. K. Tuli, R. Sarin, A. K. Gupta, A. H. Kumar, M. M. Rai, A. K. Bhatnagar : Synthetic Metallic Dialkyldithiocarbamates as Antiwear and Extreme-Pressure Additives for Lubricating Oils: Role of Metal on their Effectiveness, Lubrication Engineering, 51, 4(1995)298.

10) 鈴木・小宮・岡村・俣野：潤滑添加剤としての有機ピスマス化合物のトライボロジー特性，石油学会盛岡大会講演要旨(2005)341.

11) 吉崎・白井：有機金属系極圧剤添加グリースのトライボロジー特性，トライボロジー会議予稿集，東京 2009-5 (2009)95.

12) 中田・木村・松山：グリースの摩擦特性およびレオロジー特性に及ぼすちよう度の影響，トライボロジー会議予稿集，東京 2010-5(2010)277.

13) 中田・木村・松山：グリースの摩擦面介入性に及ぼすレオロジー特性の影響，トライボロジー会議予稿集，福井 2010-9(2010)287.

14) 中田・木村・松山・齊藤：グリースの摩擦面流入性およびレオロジー特性に及ぼす基油粘度の影響，トライボロジー会議予稿集，東京 2011-5(2011)375.

15) 日本トライボロジー学会グリース研究会編：潤滑グリースの基礎と応用，養賢堂(2007).

16) ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会編著：図

解入門よくわかる最新ベアリングの基本と仕組み，秀和システム(2011)101.

17) 遠藤・董・木村：低速域におけるグリースの EHL 膜厚の測定，トライボロジー会議予稿集，東京 2008-5(2008)181.

18) 池田・光岡・岩松・小宮：グリース膜形成性におよぼす増ちよう剤の影響(第1報)，トライボロジー会議予稿集，東京 2011-5(2011)377.

19) 小宮・池田・光岡・岩松：グリース膜形成性におよぼす増ちよう剤の影響(第2報)，トライボロジー会議予稿集，東京 2011-5(2011)379.

筆者



吉崎浩二*

K. YOSHIZAKI

* 研究開発本部 材料技術研究部