

転がり軸受の低騒音化に貢献するグリース潤滑技術

Grease Lubrication Technology for Reducing Noise in Rolling Bearings

三宅一徳 K. MIYAKE 古橋資丈 M. FURUHASHI 吉崎浩二 K. YOSHIKAZI

We have investigated the effect of grease properties and composition on the acoustic performance of bearings, from two aspects that differ from conventional practices. The first of these aspects is the effect of the mechanical properties of thickeners, with a focus on the damping characteristic of thickeners. The second investigated aspect is the effect of the aggregate state of the thickeners on the nanoscale. The results of this investigation showed that the acoustic value of a bearing can be lowered by using a thickener with a small Young's modulus and excellent damping performance, or by increasing the expansion of the thickener using base oil for which the HSP value is low or for which the fractal index is small.

Key Words: grease, grease noise, Young's modulus, nanoscale structure, SAXS

1. 背景

化石燃料の使用抑制や燃費向上のため、自動車の電動化や電子制御化が今後ますます進行すると予想される。エンジンに代わる燃料電池と電動機のシステムをはじめ、それらに付随するシステムもエンジンという動力を失うため電動化されると予想される。車室内においてもすでにワイパやエアコン送風機、パワーウィンドウやパワーシートなど、すでにモータが使用されている。エンジンを用いている今日においてもアイドルストップ機能を装着した車両が増加しており、車室内の静粛性は今後ますます向上すると予想される。このため、各種モータに使用される転がり軸受の音響性能は重要な特性になるものと予想する。

転がり軸受の音響特性に及ぼすグリース組成や性状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。例えば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、また繊維径が小さいほど軸受音響は低減することを示している¹⁾。小林はグリース特有の流動挙動であるビンガム流動に着目し、グリースのダンピング効果がニュートン流体よりも小さいことが異常振動の原因であることを示している²⁾。小宮は基油粘性

や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、またちょう度が增大するほど増ちょう剤起因のノイズが大きくなることを明らかにしている³⁾。また遠藤らはEHL (Elasto-Hydrodynamic Lubrication) 増ちょう剤膜の厚さプロファイル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づけている⁴⁾。また三上は、長期に音響特性を維持する音響寿命の観点から検討を行い、音響寿命向上には増ちょう剤増量が有効であり、これはグリースの軟化を遅くすることで転がり面からのグリース排斥を抑制する効果に起因することを明らかにしている⁵⁾。

以上に示すようにこれまでに多くの検討が行われているが、軸受音響に及ぼす増ちょう剤の機械的物性の影響を検討した事例や、グリース中の分子レベルでの増ちょう剤の凝集状態や結晶構造の影響を検討した事例はほとんど報告されていない。近年の測定技術や分析技術の進化により、これまでは測定や観察ができなかった増ちょう剤の機械的物性の測定や分子レベルでの凝集状態や結晶構造の推測が可能となっている。本研究ではナノメートルスケールでの増ちょう剤の機械的物性や構造状態と軸受音響との相関を調査して、軸受音響を低減する方策を提言する。

2. 試験方法

2.1 供試グリース

2.1.1 増ちょう剤機械的物性の音響値への影響

検討に用いた供試グリースの組成および性状を表1に示す。同一の基油およびイソシアネートを使用し、アミン組成のみを変更して、異なる分子構造としたウレアグリース3種類を作製した。基油には高機能グリースの基油としてよく用いられている合成炭化水素油 (Poly-Alpha-Olefin : PAO) を用いた。その基油動粘度は昨今の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、イソシアネートには4,4'-ジフェニルメタンジイソシアネート (Methylenediphenyl 4,4'-Diisocyanate : MDI) を用い、アミンには単環アルキル基、直鎖アルキル基、芳香族アルキル基を有する3種類のアミンを用いた。軸受音響値に及ぼす増ちょう剤2次凝集粒子の影響を排除するために、ロール処理による増ちょう剤の微細分散化処理を施した。

2.1.2 増ちょう剤結晶の高次構造の影響

次に軸受音響値に及ぼす増ちょう剤高次構造や基油の極性の影響を検討するために、化学組成の異なる基油を

用いてグリースを試作し評価を行った。PAOの化学組成は炭素と水素からなり分子内における電子の偏りはなく無極性である。一方エステル結合やエーテル結合を有する基油では、分子内に不対電子を持つ酸素原子を有することや不飽和結合を有するため電子の偏りが生じ極性である。無極性であるPAOを基油とする供試グリースの組成および性状を表2-1に、極性であるアルキルジフェニルエーテル (Alkyldiphenylether : ADE) およびポリオールエステル油 (Polyolester : POE) を基油とする供試グリースの組成および性状を表2-2に示す。アミンの種類については単一アミンに加えて2種類のアミンを組み合わせたグリースも試作し評価を行った。この時のアミンのモル比率は1:1とした。増ちょう剤量は表1と同様に15mass%に統一し、軸受音響値に及ぼす増ちょう剤2次凝集粒子の影響を排除するために、ロール処理による増ちょう剤の微細分散化処理を施した。

2.2 試験条件

2.2.1 軸受音響特性

軸受音響は軸受振動加速度により評価した。軸受振動加速度 (以下軸受音響値) の測定方法を表3に示す。供試グリースを軸受 (62022RU) に0.69g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ダルに装着しアキシャル荷重を20N負荷する。内輪を1800min⁻¹で回転させた時の、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1 供試グリース①の組成および性状
Compositions and properties of test grease ①

		脂環式	脂肪族	芳香族
増ちょう剤	イソシアネート	MDI		
	アミン	脂環式アミン シクロヘキシルアミン	脂肪族アミン オクチルアミン	芳香族アミン p-トルイジン
基油		PAO6		
増ちょう剤量, mass%		15		
基油動粘度, mm ² /s (40℃)		30		
混和ちょう度 (25℃)		329	256	356
平均粒子径, μm		2.41	2.81	1.34

MDI : Methylenediphenyl 4,4'-Diisocyanate

PAO : Poly-Alpha-Olefin

表 2-1 供試グリース②の組成および性状（無極性基油）
Compositions and properties of test grease ② (Non-polar base oil)

記号		A	B	C	D	E	F	G	H	
増ちょう剤	イソシアネート	MDI								
	アミン	ODA	○	-	-	-	○	-	○	-
		OTA	-	○	-	-	-	-	○	○
		CHA	-	-	○	-	○	○	-	-
		pTD	-	-	-	○	-	○	-	○
基油	PAO6									
増ちょう剤量, mass%		15								
基油動粘度, mm ² /s (40℃)		30								
混和ちょう度 (25℃)		329	283	256	356	167	237	199	285	

ODA : Octadecylamine OTA : Octylamine CHA : Cyclohexylamine pTD : p-Toluidine
MDI : Methylenediphenyl 4,4'-Diisocyanate PAO : Poly-Alpha-Olefine

表 2-2 供試グリース②の組成および性状（極性基油）
Compositions and properties of test grease ② (Polar base oil)

記号		I	J	K	L	M	N	O	
増ちょう剤	イソシアネート	MDI							
	アミン	ODA	○	-	○	○	-	○	○
		OTA	-	-	-	-	-	-	○
		CHA	-	-	○	-	-	○	-
		pTD	-	○	-	-	○	-	-
基油	ADE			POE					
増ちょう剤量, mass%		15			15				
基油動粘度, mm ² /s (40℃)		32.3			30				
混和ちょう度 (25℃)		337	315	169	377	328	203	272	

ODA : Octadecylamine OTA : Octylamine CHA : Cyclohexylamine pTD : p-Toluidine
MDI : Methylenediphenyl 4,4'-Diisocyanate
ADE : Alkyldiphenylether POE : Polyolester

表 3 軸受振動加速度測定条件
Test condition of vibrational acceleration of bearings

項目	条件
軸受型番	62022RU (非接触ゴムシール)
内径×外径×幅, mm	15 × 35 × 11
グリース封入量, g	0.69
アキシャル荷重, N	20
回転速度, min ⁻¹	1 800
測定時間, s	5

2.2.2 増ちょう剤ヤング率測定試料調整方法

増ちょう剤のヤング率測定に用いる試料は、表 4-1 および表 4-2 に示す二つの方法で調製した。それぞれの調製方法の模式図を図 1 に示す。調整条件 A では、グリースを溶媒に分散後吸引ろ過および溶剤洗浄により単離した増ちょう剤をアルミ製容器に入れ表 4-1 に示す条件にて押し固めた。調整条件 B では、条件 A と同じ方法で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投入し、その後加熱圧縮することにより樹脂埋めした試料を成形した。条件 A では処理時の温度の影響は受けないが圧縮することによる影響が、条件 B では比較的圧縮する圧力は低いため圧力の影響は受けないが温度の影響を受けると考える。

表 4-1 ヤング率測定用試料調整条件 (A 法)

Conditions of preparation of samples for measurement of Young's modulus (Method A)

項目	条件
印加荷重, N	19.6
圧縮時間, s	60
圧縮回数, 回	2

表 4-2 ヤング率測定用試料調整条件 (B 法)

Conditions of preparation of samples for measurement of Young's modulus (Method B)

項目	条件
樹脂組成	フェノール樹脂
加熱温度, °C	130
圧縮圧力, MPa	1.5
圧縮時間, s	900

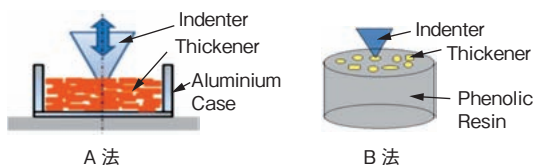


図 1 ヤング率測定試料 調整方法

Preparation method of samples for measurement of Young's modulus

2.2.3 ヤング率測定条件

増ちょう剤のヤング率の測定条件を表5に示す。測定装置にはナノインデンタを用い表5に示す押し込み荷重を印加した後除荷した時の除荷曲線の傾きによりヤング率を求めた。押し込み荷重は押し込み深さが測定する増ちょう剤の厚さの1/10以下となるように予備測定を行った後、決定した。

表 5 ヤング率測定条件

Measurement conditions for Young's modulus of thickeners

項目	条件
測定点数	4~6
押し込み荷重, μN	500
負荷時間, s	5
除荷時間, s	3

2.2.4 増ちょう剤凝集状態

増ちょう剤の凝集状態は対象とするスケールにより二つの方法で観察した。まずマイクロメートルスケールの凝集状態は、スライドガラスとカバーガラスにより薄膜化したグリースを偏光顕微鏡を用いて500倍で像観察し、得られた観察像に対して二値値処理を行うことにより1μm以上の凝集粒子数を得た。一方、ナノメートルスケールの凝集状態は小角X線散乱 (Small angle X-ray scattering : SAXS) を用いて測定した。SAXSは図2に示すようにカプトンチューブに封入したグリースに1.5keVのX線を照射し、カメラ長4.5mで測定した。SAXSスペクトルは式(1)に示す Unified model にてフィッティングして慣性半径およびフラクタル指数を求めた⁶⁾。

$$I(q) = G \exp(-q^2 R_g^2 / 3) + B \left\{ \frac{[\text{erf}(\frac{qR_g}{\sqrt{6}})]^3}{q} \right\}^P \quad (1)$$

q : scattering vector, R_g : Radius of gyration, P : Fractal index, G, B : coefficient

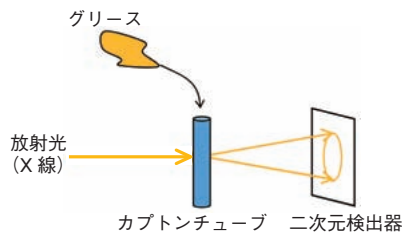


図 2 SAXS 測定方法
Measurement method of SAXS

3. 結果

3.1 軸受音響値

表 6-1 に機械的物性への影響を評価した供試グリース①の、表 6-2 に増ちょう剤高次構造や基油の極性の影響を評価した供試グリース②の軸受音響値測定結果を示す。なお、表 6-1 では回転直後の音響値とともに、安定した軸受音響値も合わせて示した。さらに、レーザー回折式粒度分布計により測定した増ちょう剤の平均粒径も併記した。

供試グリース①において回転初期と安定時の軸受音響値を比較すると、安定時の軸受音響値は転動体と軌道間の機械的せん断の影響により増ちょう剤が微細化され初期の軸受音響値よりも低減した。また今回の供試グリー

スは増ちょう剤量を 15% に統一したためグリース間の混和ちよう度が異なるが、回転初期におけるころと軌道間のグリース付着状態は混和ちよう度の影響を大きく受けないと考えて、今回の評価においては回転初期軸受音響値を比較することとした。このため、供試グリース②では回転初期の軸受音響値のみ記載した。

供試グリース①では、増ちょう剤のアミン組成により軸受音響値は異なり、脂肪族ジウレアの軸受音響値が最も小さく次いで脂環式、芳香族ジウレアの順で軸受音響値は大きくなった。従来の研究では増ちょう剤粒子径と軸受音響値に相関があり増ちょう剤粒子径が大きいほど軸受音響値が大きくなるとの報告がある¹⁾が、今回の評価においては軸受音響値と増ちょう剤粒子径に相関は認められなかった。

供試グリース②では、無極性油 PAO での脂環式、脂肪族および芳香族単独アミンの軸受音響値は供試グリース①での結果とほぼ一致しており再現性を確認した。無

極性油 PAO での組合せアミンの軸受音響値は、CHA に ODA もしくは pTD を併用した場合は、いずれの組合せにおいても CHA 単独よりも軸受音響値は低減した。一方、単独アミン OTA に ODA もしくは pTD を併用した場合は、OTA と ODA の併用においては OTA 単独の、OTA と pTD の併用においては pTD 単独の軸受音響値に近い値であり、明確な傾向は認められなかった。

基油の極性を変化させたことによる軸受音響値への影響は基油組成やアミン組成およびアミンの組合せにより異なり、明確な傾向は認められなかった。

3.2 ヤング率

ヤング率の測定結果を表7および図3に示す。予備測定の結果、A 法での測定では測定結果に大きなばらつきが認められたことより、6 回測定したヤング率の最大値と最小値を除外した 4 個の測定結果の平均値を比較した。B 法では 4 回測定した結果の平均値を比較した。

増ちょう剤組成間で比較すると、いずれの測定方法においても脂肪族のヤング率が最も小さく、次いで脂環式、芳香族の順序で増ちょう剤のヤング率は大きくなった。測定方法間の比較では、A 法での測定値は B 法よりも大きくまたばらつきが大きい結果となった。これはヤング率測定用試料の調製条件に起因するものであり、A 法では測定用試料を圧縮成型しているためにその残留応

表 6-1 軸受音響値測定結果 (供試グリース①)
Measurement results of acoustic characteristics of bearings (Test grease ①)

	脂環式	脂肪族	芳香族
初期軸受音響値, G	0.157	0.029	0.243
安定時軸受音響値, G	0.036	0.017	0.121
平均粒子径, μm	2.41	2.81	1.34

表 6-2 軸受音響値測定結果 (供試グリース②)
Measurement results of acoustic characteristics of bearings (Test grease ②)

記号		A	B	C	D	E	F	G	H	
増ちょう剤	イソシアネート	MDI								
	アミン*	ODA	○	—	—	—	○	—	○	—
		OTA	—	○	—	—	—	—	○	○
		CHA	—	—	○	—	○	○	—	—
	pTD	—	—	—	○	—	○	—	○	
基油		PAO6								
軸受音響値, G		0.028	0.084	0.154	0.238	0.025	0.098	0.022	0.168	
記号		I	J	K	L	M	N	O		
増ちょう剤	イソシアネート	MDI								
	アミン	ODA	○	—	○	○	—	○	○	
		OTA	—	—	—	—	—	—	○	
		CHA	—	—	○	—	—	○	—	
	pTD	—	○	—	—	○	—	—		
基油		ADE			POE					
軸受音響値, G		0.111	0.168	0.074	0.080	0.080	0.126	0.039		

* : ODA, OTA : 脂肪族アミン CHA : 脂環式アミン pTD : 芳香族アミン

力が影響しているものと判断した。条件 B においても試料を加熱圧縮して成形しており厳密には測定値に影響するが、印加した圧縮応力は得られたヤング率の 0.06 ~ 0.21% と小さく無視できると判断した。

表7 ヤング率測定結果

Measurement results of Young's modulus of thickeners

	測定回数	A 法	B 法
脂環式	1	4 737	1 568
	2	4 683	1 678
	3	4 193	1 526
	4	3 366	1 663
	5	3 369	—
	6	6 463	—
	平均	4 246	1 609
脂肪族	1	1 980	685
	2	1 835	729
	3	1 960	734
	4	1 887	685
	5	1 739	—
	6	1 973	—
	平均	7 655	708
芳香族	1	4 799	3 382
	2	4 842	2 621
	3	8 252	2 592
	4	5 056	2 273
	5	5 865	—
	6	6 641	—
	平均	5 601	2 717

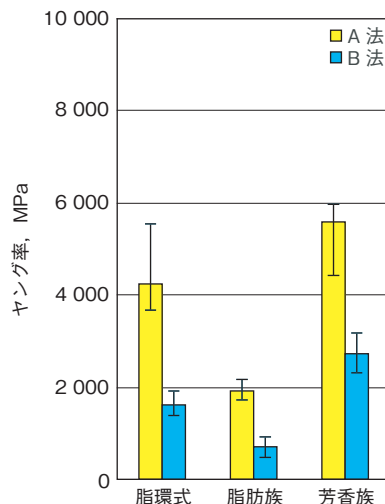


図3 ヤング率測定結果

Measurement results of Young's modulus of thickeners

3.3 凝集状態

3.3.1 マイクロメートルスケール

偏光顕微鏡による測定画像を二値化処理して得られた 1μm 以上の大きさの凝集粒子数を表8に示す。

無極性の PAO を基油としたグリースでは、脂肪族のグリースとその他のグリースで違いが認められ、脂肪族のグリースで凝集粒子数は少ない結果であった。アミンを併用することによりそれぞれ単独よりも凝集粒子数は低減した。

表8 増ちょう剤凝集粒子数測定結果

Measurement results of aggregate density of thickeners

記号		A	B	C	D	E	F	G	H	
増ちょう剤	イソシアネート	MDI								
	アミン	ODA	○	—	—	—	○	—	○	—
		OTA	—	○	—	—	—	—	○	○
		CHA	—	—	○	—	○	○	—	—
		pTD	—	—	—	○	—	○	—	○
基油		PAO6								
1 視野当たりの 1μm 以上の凝集粒子数, 個		532	502	1 089	940	260	840	121	682	
記号		I	J	K	L	M	N	O		
増ちょう剤	イソシアネート	MDI								
	アミン	ODA	○	—	○	○	—	○	○	
		OTA	—	—	—	—	—	—	○	
		CHA	—	—	○	—	—	○	—	
		pTD	—	○	—	—	○	—	—	
基油		ADE				POE				
1 視野当たりの 1μm 以上の凝集粒子数, 個		138	576	288	139	292	243	119		

極性の ADE および POE を基油としたグリースでは、単独アミンとアミン併用で傾向が異なった。単独アミンの場合は、極性油を基油に用いることにより凝集粒子数は大幅に低減した。一方、アミン併用の場合は 100 ~ 300 であり、基油極性の影響は認められなかった。

3.3.2 ナノメートルスケール

ナノメートルスケールでの凝集状態は SAXS による慣性半径とフラクタル指数にて評価した。測定結果を図 4 に示す。SAXS で得られる情報を式(1)に示した Unified model にてフィッティングして慣性半径 (R_g) およびフラクタル指数(P)を求めた。慣性半径は増ちょう剤の大きさを表しており、増ちょう剤繊維の繊維径のフラクタル指数は粒子の密度に依存する特性値であり、また増ちょう剤凝集粒子では粒子中への基油の膨潤状態を表す指標である。今回の測定により得られた R_g および P を表 9 に示す。

無極性の PAO を基油とするグリースにおいて、単独アミンの場合は脂環式アミンを用いた場合の慣性半径が小さく増ちょう剤繊維径は小さいことやフラクタル指数へのアミン組成の影響は小さく基油の膨潤状態は同じであることが分かった。混合アミンの場合は単独アミンよりも慣性半径およびフラクタル指数ともに小さくなる傾

向を示した。この結果は混合アミンを用いることにより増ちょう剤繊維径を小さくすることや繊維中に基油を膨潤させることが可能であることを示している。

極性の ADE および POE を基油とするグリースでは、基油の組成やアミンの組合せにより慣性半径やフラクタル指数は異なるが、これら指標へのグリース組成の影響は今回の評価では明確にできなかった。

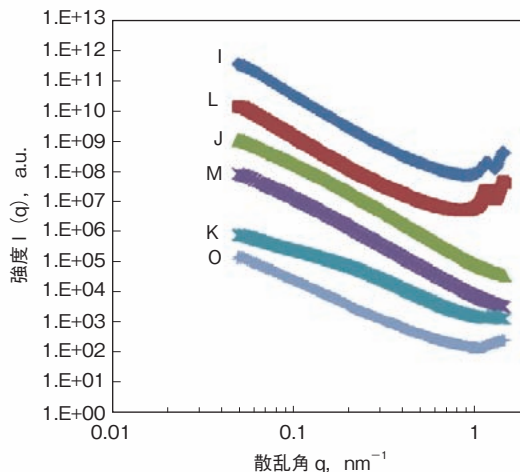


図 4 SAXS 測定結果
Measurement results of SAXS

表 9 SAXS による凝集状態調査結果
Investigation results of aggregate state via SAXS

記号		A	B	C	D	E	F	G	H	
増ちょう剤	イソシアネート	MDI								
	アミン	ODA	○	—	—	—	○	—	○	—
		OTA	—	○	—	—	—	—	○	○
		CHA	—	—	○	—	○	○	—	—
		pTD	—	—	—	○	—	○	—	○
基油		PAO6								
慣性半径 R_g , nm		53	52	35	46	26	37	44	44	
フラクタル指数 P		3.8	3.5	3.5	3.5	2.7	3.1	2.3	3.1	
記号		I	J	K	L	M	N	O		
増ちょう剤	イソシアネート	MDI								
	アミン	ODA	○	—	○	○	—	○	○	
		OTA	—	—	—	—	—	—	○	
		CHA	—	—	○	—	—	○	—	
		pTD	—	○	—	—	○	—	—	
基油		ADE				POE				
慣性半径 R_g , nm		39	34	26	38	37	(32)*	35		
フラクタル指数 P		3.3	3.5	2.5	3.1	3.4	(2.5)*	2.6		

* : SAXS スペクトルに周期構造が見られたため値は参考とし解析対象外とした

4. 考察

4.1 軸受音響値に及ぼす増ちょう剤の機械的特性の影響

軸受音響値に及ぼす増ちょう剤の機械的特性をヤング率の点から考察した。供試グリース①について軸受音響値に及ぼすこれらの特性の影響を図5に示す。平均粒子径の大きさが1.3～2.8 μm と同程度の平均粒子径となっている三つの供試グリース①を用いてヤング率の影響を評価した。

軸受音響値とヤング率との相関は、ヤング率が小さいほど軸受音響値は小さくなっている。これは転動体と軌道の接触面に増ちょう剤粒子が侵入した時の油膜厚さの変動を増ちょう剤の変形により緩和することにより、軸受音響値の増加を抑制できたと推察する。

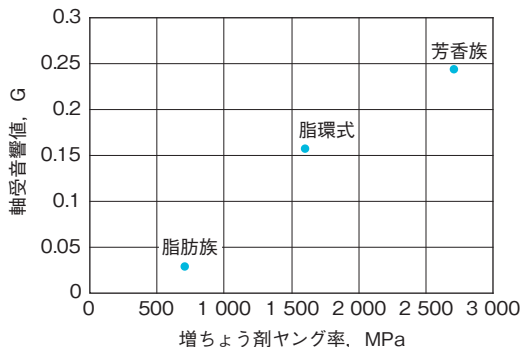


図5 軸受音響値に及ぼす増ちょう剤機械的物性の影響
Effects of mechanical properties of thickeners on acoustic characteristics of bearings

4.2 軸受音響値に及ぼす増ちょう剤凝集粒子数の影響

転がり軸受の転動体と軌道接触面への増ちょう剤粒子の侵入には、増ちょう剤粒子径に加えて増ちょう剤の粒子数も影響すると考える。軸受の音響値に影響を与えているのは1次粒子ではなく凝集した粒子と考え、1 μm 以上の凝集粒子の数を調査し、軸受音響値に及ぼす増ちょう剤凝集粒子数の影響を考察した。

図6に軸受音響値に及ぼす増ちょう剤凝集粒子数の影響を示す。無極性のPAOを基油に用いた場合、凝集粒子数が多いほど音響値が大きくなる傾向が認められ、凝集粒子のかみこみ頻度も音響値に影響を与えていることが分かった。図6中に印を付与したデータが供試グリース①に対応しており、供試グリースDの音響値が大きい。これは1 μm 以上の増ちょう剤凝集粒子数が多く、かつ平均粒子径が小さいためかみこみ頻度が高いことと、ヤング率が大いため増ちょう剤の変形による油膜

変動の減衰効果が小さいことに起因すると推定する。これらの因子の影響度や寄与率については今回の検討では明らかにできなかった。

基油にADEやPOEの極性油を用いた場合においても凝集粒子数が多いほど軸受音響値が大きくなる傾向が認められ、またPAOを基油にした場合よりも軸受音響値に及ぼす増ちょう剤凝集量子数の影響は大きくなる傾向を示した。

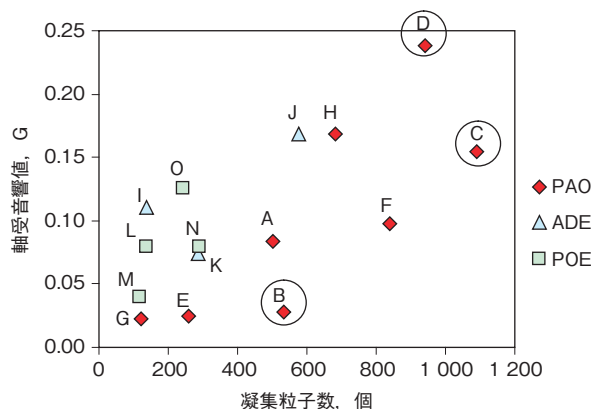


図6 軸受音響値に及ぼす増ちょう剤凝集粒子数の影響
Effects of aggregate density of thickeners on acoustic characteristics of bearings

増ちょう剤の凝集状態を支配する因子として増ちょう剤と基油との親和性が影響すると考え、溶解度パラメータの点から考察した。溶解度パラメータにはハンセン溶解度パラメータ (Hansen solubility parameter : HSP) を用い、HSP値の推算は化学構造を基に株式会社豊田中央研究所内製アルゴリズム (原子団寄与法) または市販ソフトウェア (HSPiP v4.1.03) により計算した。その結果を図7に示す。HSP距離は増ちょう剤と基油の相対的な距離を表しており、HSP距離が小さいほど増ちょう剤と基油の距離が近い、すなわち増ちょう剤と基油の親和性は高く、増ちょう剤の凝集は抑制されることを表している。図7に示すように基油組成毎にHSP値と凝集粒子数に相関が認められ、この結果はHSP値の推算により凝集粒子数の推定が可能であり、さらには軸受音響値の予測も可能であることを示唆している。ここでHSP値と軸受音響値との相関を図8に示すが、PAOおよびADEを基油とするグリースではHSP値と軸受音響値に相関が認められHSP値から軸受音響値の予測は可能であるが、POEを基油とするグリースでは相関が認められなかった。これらの結果により、軸受音響値には凝集粒子数やHSP値以外に影響する因子が存在すると予測した。

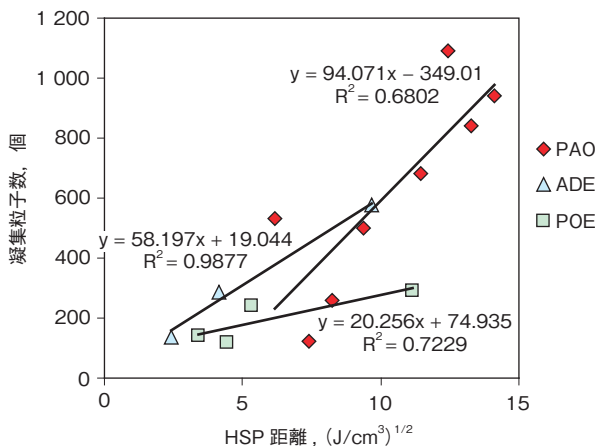


図7 凝集粒子数に及ぼす増ちよう剤と基油の親和性の影響

Effect of compatibility between thickener and base oil on aggregate density of thickeners

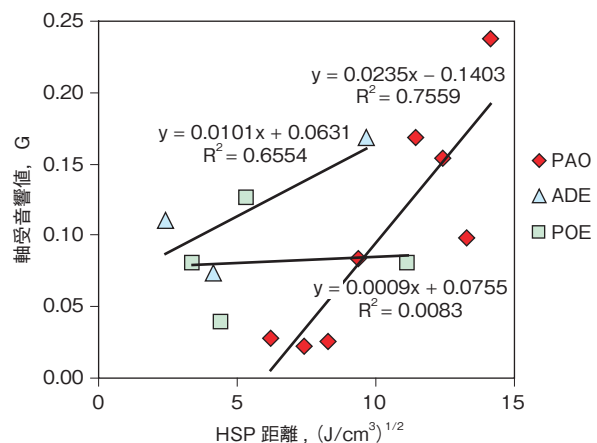


図8 軸受音響値に及ぼす HSP 値の影響

Effect of HSP value on acoustic characteristics of bearings

4.3 軸受音響値に及ぼす増ちよう剤ナノメートルスケール構造の影響

近年放射光を用いた分析技術の向上により、これまで分析不可能であった増ちよう剤の分子結晶レベルでの構造解析が可能となっている。増ちよう剤の分子結晶レベルの構造も軸受音響値に影響を与えていると考えられるため、軸受音響値へ及ぼす増ちよう剤ナノメートルスケール構造の影響を検討した。分子結晶レベルの増ちよう剤構造の指標として SAXS による慣性半径とフラクタル指数を用い、軸受音響値との相関を検討した。その結果を図9に示す。

増ちよう剤のナノメートルスケールでの増ちよう剤繊維径を表す慣性半径と軸受音響値との相関では、POEでは高い相関を示すが ADE では相関は認められなかった。一方、増ちよう剤の基油による膨潤状態を示すフラ

クタル指数と軸受音響値との相関では、フラクタル指数が大きいほど軸受音響値は低減する傾向を示した。すなわち、基油による増ちよう剤の膨潤が大きいものほど増ちよう剤粒子が軟らかく、軸受音響値が小さくなるものと推定する。

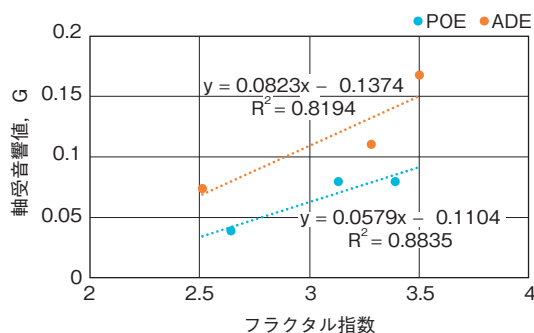
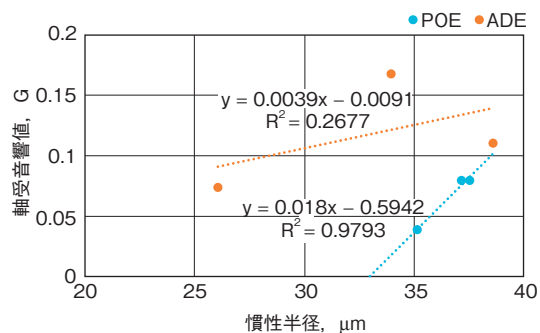


図9 軸受音響値に及ぼす増ちよう剤ナノメートルスケール構造の影響

Effect of nanoscale structure of thickeners on acoustic characteristics of bearings

5. まとめ

軸受音響値に及ぼす増ちよう剤の機械的物性並びに凝集状態の影響を検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 軸受音響値には増ちよう剤の機械的物性や凝集粒子数が影響する。凝集した増ちよう剤の接触部への流入抑制や、流入する増ちよう剤の弾性率低減が軸受音響値低減に効果的であることを示した。
- 2) 増ちよう剤の凝集状態は、マイクロメートルスケールでは HSP 距離で、ナノメートルスケールでは SAXS によるフラクタル指数が影響する。HSP 距離は基油と増ちよう剤の親和性、フラクタル指数は基油による増ちよう剤の膨潤状態を現す指標であり、これらを小さくすることで軸受音響値の低減が可能であることを示した。

謝辞

本研究における HSP 値による増ちょう剤と基油の親和性解析、および SAXS による増ちょう剤ナノ結晶構造解析に関しましては、株式会社豊田中央研究所殿に多大なる協力を頂きました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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, 17, 3(1972)154.
- 2) 小林政弘: ころがり軸受の音響に及ぼすグリースの影響, 潤滑, 19, 4(1974)56.
- 3) Hiroshi Komiya : Effect of Contamination in Lubricant on Noise of Ball Bearing, NLGI SPOKESMAN, AUGUST (1992)173.
- 4) Kenichirou Matsubara, Daming Dong & Yoshiaki Endo : Low Noise Greases for Bearings, NLGI SPOKESMAN, SEPTEMBER (2008)25.
- 5) 三上英信: トライボロジー会議予稿集, 高松(1999 - 秋) D-25.
- 6) G Beaucage: Combined Small-Angle Scattering for Characterization of Hierarchically Structured Polymer Systems over Nano-to-Micron Meter: Part II Theory, Polymer Science: Comprehensive Reference, 2 (2012) 399.

筆者



三宅一徳*
K. MIYAKE



古橋資丈*
M. FURUHASHI



吉崎浩二*
K. YOSHIKAZI

* 研究開発本部 材料研究部