

蛍光法を用いた揺動運転時のオイルシールにおけるグリース潤滑膜のその場観察
In Situ Observation of Grease Lubricant Films on Radial Seals under oscillating operation by
Fluorescence Induced Microscopy

NOK（正）*堀内 貴生 NOK（正）酒井 陽平 NOK（正）細沼 慎正
NKL（非）佐藤 駿介 NOK（正）青柳 彩子

Takao Horiuchi*, Yohei Sakai*, Hosonuma Norimasa*, Sato Syunsuke**, Ayako Aoyagi*
*NOK CORPRATION, **NOK KLÜBER CO.,LTD.

1. 緒言

近年、電動化の進展に伴い、産業用ロボットの需要が急速に増加している。多くのロボット関節部では減速機が用いられ、潤滑にはグリースが使用される。グリース漏れ防止のためオイルシールが広く採用されており、油膜を介在させることで摩耗を防ぎ、密封性を確保している。油潤滑下でのオイルシールの機構は多くの研究により理解が進んでいる¹⁾が、グリース潤滑かつ揺動運転条件下における密封機構には未解明な点が多い。揺動運転では周期的な逆転が生じ、潤滑膜の形成・保持や増ちょう剤の挙動が密封性能に影響を与える可能性がある。

これにより、密封不良や摩耗の進行といった課題が生じる恐れがあり、密封機構の解明が求められている。グリースは主に基油、増ちょう剤から構成され、増ちょう剤は基油の保持と摩擦低減に寄与する。潤滑状態を詳細に把握するには、基油と増ちょう剤を個別に観察する必要がある。過去にはLIF(レーザー誘起蛍光法)により油潤滑下の潤滑膜観察が行われた²⁾が、グリース潤滑下での観察は未だ報告されていない。顕微赤外分光法や蛍光法は膜厚と増ちょう剤の個別観察が可能であり、グリース潤滑膜のその場観察に有効とされる^{3,4)}。また、増ちょう剤粒子がしゅう動面に存在し、シール性能に影響を及ぼすことが示唆されている⁵⁾。しかし、膜厚と増ちょう剤を同時かつ個別に観察した研究はない。本研究では、グリース潤滑下かつ揺動運転条件におけるオイルシールのしゅう動面に着目し、蛍光顕微鏡を用いて潤滑膜の膜厚分布および増ちょう剤分布をその場観察することを試みた。

2. 試験方法

2.1 試験装置

試験に用いた装置の概略図を Fig. 1 に示す。観察には中空のガラス製シャフトを用い、シャフト内側からシールのしゅう動面を直接観察可能とした。光源には水銀キセノンランプを使用し、光源から蛍光剤が励起する波長の光を取り出すために励起フィルターを用い、蛍光のみを観察できるように蛍光フィルターを用いた。

2.2 試験サンプル・潤滑剤

試験サンプルにはフッ素ゴムのオイルシールを用い、潤滑剤にはLi石けんグリースを用いた。潤滑剤の詳細を Table 1 に示す。蛍光剤は基油の観察に Perylene を、増ちょう剤の観察に Rhodamine B を用いた。Li石けんグリースに Perylene を 200ppm, Rhodamine B を 100 ppm 分散させ、オイルには Perylene のみを 200ppm 分散させた。

2.3 運転条件

ポンピング中の挙動を観察するため、意図的に大気側に潤滑剤を漏れさせた後に Table 2 に示す運転条件で試験を実施した。事前に実施したシール試験において、対象潤滑剤では (B)の運転条件でのみ漏れが発生している。

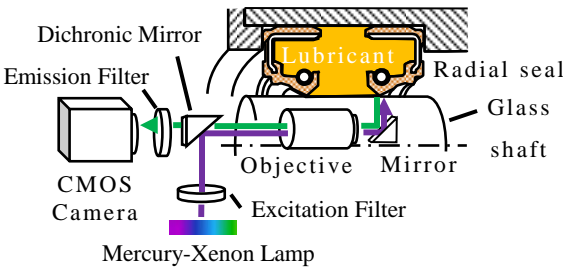
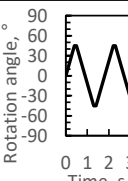
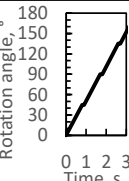


Fig. 1 Schematic of Fluorescence observation

Table 1 Lubricant

	Grease	Oil
Base oil	PAO	PAO
Base oil viscosity, cSt@40°C	30	30
Thickener	12-Hydroxystearic acid lithium salt	-
Thickener shape	fiber	-
Penetration	285	-

Table 2 Test operation

	(A)	(B)	(C)
Shaft eccentricity	T.I.R. 0.03mm		
Velocity	Max 42mm/s		
Operation	One-way rotary	Oscillation	One-way rotary stop
Operation Program	-		
Test result	Seal	Leak	Seal

3. 結果と考察

蛍光観察により取得された強度データをもとに、しゅう動面付近の膜厚を算出した。これにより、大気側の流量、しゅう動面の膜厚、ならびにリップの位置を定量的に評価した。油槽側の膜厚が軸に挿入後のリップ角度と同様の勾配で増加していることから、膜厚 $15\mu\text{m}$ の領域を追跡することでリップ位置を推定した。測定領域の詳細は Fig. 2 に示す。リップの動きは軸の偏心により、図中の方向に周期的に移動することが確認された。

しゅう動面の膜厚、増ちよう剤量の時間変化を Fig. 3 に示す。膜厚および増ちよう剤量の絶対値には大きな差異は認められなかったが、運転条件ごとに膜厚の変動周期が異なる傾向が見られた。これらの時間変動に着目し、大気側流量、膜厚、リップ位置の時系列データに対して高速フーリエ変換 (FFT) 解析を実施し、各条件における最大振幅周波数を抽出した。解析の結果、リップ部の動作周波数において、シール条件と漏れ条件の間に明確な境界が存在することが判明した (Fig. 4)。漏れの発生している揺動運転 (B) では、オイル、グリース共に逆転を含まない運転 (A), (C) よりもリップの動作周波数が高い。このことから、リップの動的挙動がシール性能に影響を与えている可能性があり、特に揺動条件下ではリップの応答性がシール性の維持に重要な要素となることが示唆される。

4. 結言

本研究では、産業用ロボットのオイルシールにおける潤滑・密封機構の解明を目的として、グリースおよびオイル潤滑条件下でのシール性能試験と蛍光法によるしゅう動面観察を実施した。基油粘度 30cSt の条件下では、しゅう動面膜厚に大きな差異は認められなかったものの、大気側流量、膜厚、リップの動作周波数には運転条件に応じた違いが見られた。特に、リップの動作周波数はシール状態と強い相関を示し、FFT 解析によりシール性能の良否を判別可能であることが示唆された。これにより、リップ挙動の周波数解析がオイルシールの設計および診断における有効な指標となる可能性が示された。

文献

- 1) E.T.Jagger Rotary shaft seals: the sealing mechanism of synthetic rubber seals running at atmospheric pressure, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 171,1 (1957) 597.
- 2) 佐藤・杉山・山本: オイルシールしゅう動面の油膜形成と摩擦特性に関する研究, トライボロジスト, 48, 6, 494~502 (2003).
- 3) 星・滝渡・七尾・八代・森: 顕微赤外分光法によるグリース EHL 膜のその場観察, トライボロジスト, 60, 2 (2015) 153.
- 4) D. Kostal, M. Okal, J. Fryza, I. Krupka&M. Hartl, Novel in-situ observation of the grease constituents in elastohydrodynamic contacts by fluorescence microscopy, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, 17, 8 (2022).
- 5) M. Sommer, W. Haas, A new approach on grease tribology in sealing technology: Influence of the thickener particles, Tribology International, 103, 574-583(2016).

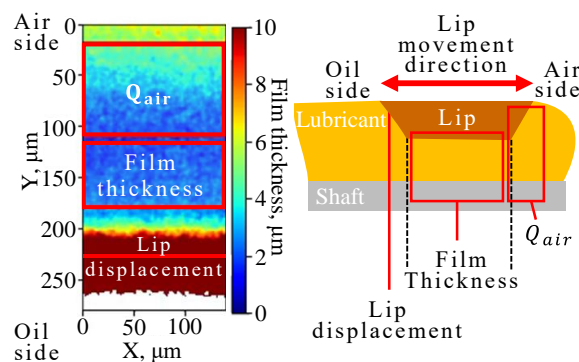


Fig. 2 Measured area

Operation	(A)	(B)	(C)
Grease	—	—	—
Oil	---	---	---

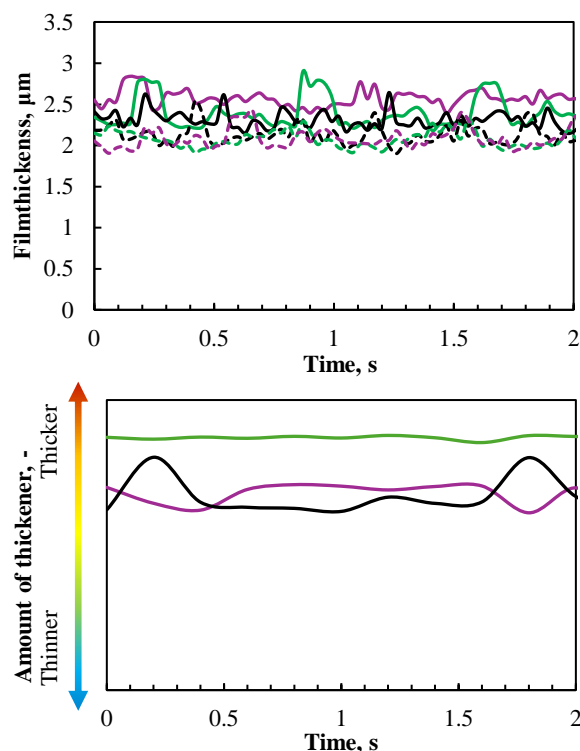


Fig. 3 Film thickness and amount of thickener on sliding surface

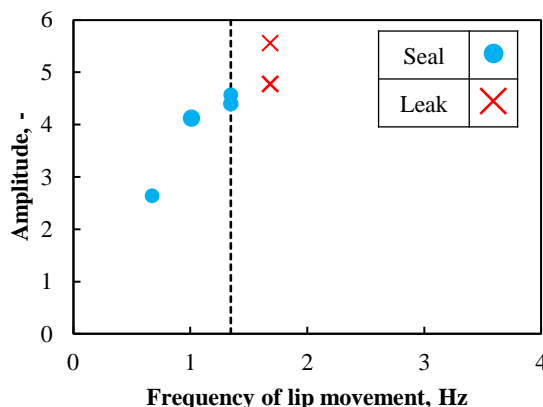


Fig. 4 Lip Movement – FFT Result