

軸受フレーキング損傷にフラクトグラフィー観察を用いた 電気的接触抵抗測定法の状態監視手法に関する考察

○ 狩野 将矢(院)^{*1}, 里永 憲昭^{*1}, 竹田 雄祐^{*1}, 渡邊 孝司^{*2}, 園田 智之^{*2}

^{*1} 崇城大学, ^{*2} D1 ケミカル

Consideration of a Technique of Condition Monitoring of ECR Method Using Fractography
Observation of Bearing Flaking Damage.

^{*1} Department of Mechanical Engineering, SOJO University, Faculty of Engineering, Japan

^{*2} D1 Chemical Co., Ltd., Japan

境界潤滑から流体潤滑への移行と、摩耗、摩擦を低減するために、ポリオールエステル、ジエステル系と植物油系エステル化合物などを主成分とした独自の新還元添加剤(SOD-1PN)を開発した。本論文では合成潤滑油のトライボロジー性能について、軸受寿命評価試験を行った軸受の断面を走査型電子顕微鏡(SEM)によって観察を行い、新添加剤が軸受に対して及ぼす影響を評価し、フレーキングの起点についても有限要素法 FEM 解析(SOLIDWORKS Simulation)を用いて考察した。また、電気的接触抵抗測定法(Measurement for Electrical Contact Resistance)の新たな評価手法を用いて、より明確に基準油と合成潤滑油の油膜形成状況を評価し、結果を比較した。

キーワード：状態監視、ギアオイル、エステル系添加剤、トライボロジー、フラクトグラフィー

1. まえがき

エンジンや産業機械の潤滑、耐摩耗性能などのトライボロジー性能を改善するため、独自に開発した新還元添加剤 (SOD-1PN, 以下、新添加剤と称す) について軸受寿命評価試験機を用いて究明してきた。^{[1][2][3]}

軸受の損傷形態の一つとしてフレーキングが挙げられる。フレーキングは、接触面に異物をかみ込むことで発生する表面起点型の剥離と、接触面が境界潤滑状態になり局所的なヘルツ圧力を繰り返し受けることによって疲労し、接触面に近い内部を起点に剥離する内部起点型の剥離があるとされている^[4]。これに対し、新添加剤を使用することにより、接触面で安定的に弾性流体潤滑状態を維持し、転送面と転動体の直接接触が低減され、軸受寿命が延長していると考えている。

また、今回使用したギア油(VG320)については、新添加剤を 10vol% 添加した合成油の最大運転時間(La)が理論寿命時間(Lo)に対して 36.7 倍($La/Lo=36.7$)、ギア油(VG320)単体に対して 14.5 倍を示し、新添加剤の顕著な寿命延長効果を確認している。^[3]

そこで、新たな試みとして軸受寿命評価試験を行った軸受の断面について走査型電子顕微鏡(SEM)を用いたフラクトグラフィー観察を行い、新添加剤が軸受に対して及ぼす影響を評価した。また、電気的接触抵抗法(Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下、ECR と称す) の新たな評価手法を用いて評価を行ったので報告する。

2. 新還元添加剤 (SOD-1PN)

新添加剤はスルホン酸カルシウム塩に含まれる炭酸カルシウムの構造を変更し耐摩耗性・潤滑性を高め、剪断の影響を受けにくい高粘度 PAO 成分を加えることで油膜保持力向上に重要な粘度指数を継続維持させていること。さらに焼付防止と潤滑膜再生を考慮して、極圧剤(硫黄、亜鉛) を加えたことで常温から高温まで広範囲の温度領域で再生効果を発揮できるよう設計されている。図 1 に新添加剤の仮説図を示す。機械の始動時には摺動部の油膜が欠損し境界潤滑となり、高摩擦、高摩耗が生じやすい。上述した油膜保持力向上、潤滑膜再生効果によって潤滑状態を境界潤滑から流体潤滑に移行することで、摩擦と摩耗を低減させる作用を発揮すると想定している。^[3]

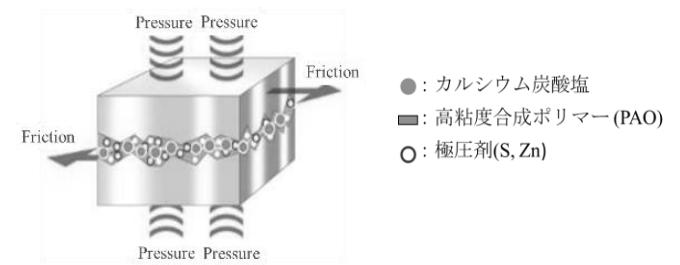


図 1 新還元添加剤 (SOD-1PN) のメカニズム仮説図

3. 軸受寿命評価試験

3.1 実験条件

軸受寿命評価試験は図2に示すスラスト玉軸受寿命評価試験機を用いて行った。試験片はスラスト玉軸受 51104(外径 35mm, 内径 20mm, 高さ 10mm, 玉径 5.56mm)を軸受の面圧を高めるために玉数を 13 個から 3 個に減じ, モータによる回転をベルトにて伝達し油浴槽に設置した軸受の外輪(上輪)を回転させ, 内輪(下輪)を固定した。軸受には圧縮バネによりスラスト荷重 4.4kN を与え, 軸回転数は 750rpm に設定した。摩擦力は回転によるトルクを計測することにより把握することができる。実験上の安全を確保するために軸受の破損による振動, または許容のトルク力を超えるような状況になった場合には安全装置が作動する。

このタイミングで試験終了としている。

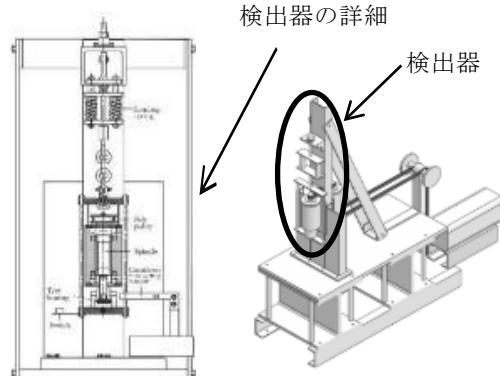


図2 スラスト玉軸受寿命評価試験機の構成

3.2 寿命試験で用いた試料油

本実験では試料油として, ギア油(VG320)と, ギア油単体に新添加剤を 10vol% 添加した合成油の 2種類を用いている。それぞれの試料油について粘度測定を行ったため、その結果を表1に示す。

表1 新添加剤をギア油(VG320)に添加した際の粘度変化

	ギア油 (VG320)	VG320+SOD-1PN
SOD-1PN 添加率 vol%	0	10
動粘度 40°C mm ² /s	324	288
動粘度 100°C mm ² /s	23.9	23.8
粘度指数	94	103
La/Lo	2.53	36.7

4. 軸受寿命評価試験を行った軸受の SEMによるフラクトグラフィー観察

4.1 観察条件

著者らのこれまでの研究から新添加剤の寿命改善のメカニズムは転送面での油膜厚さが増大し, 転動時の直接接触が減ることで, 転送面に与える疲労が低減しているためと仮説を立てている。^{[2] [3]}実際に, ギア油(VG320)に新添加剤を加えた合成油は, ギア油単体に対して 14.5 倍の稼働時間を示している。そこで, ギア油単体で寿命試験を行い, フレーキングが発生した La/Lo を基準として, ギア油に新添加剤を 10vol% 添加した合成油でも同じ時間の寿命試験を行い, それぞれ図3の箇所を観察する。

試験片は, 図4のように, ギア油(VG320)で寿命試験を行い, La/Lo=1.73 でフレーキングが発生した軸受と, ギア油に新添加剤を 10vol% 添加した合成油で寿命試験を行い, La/Lo=1.73 となるタイミングで試験機を停止して得た損傷の無い軸受の 2つを用いる。

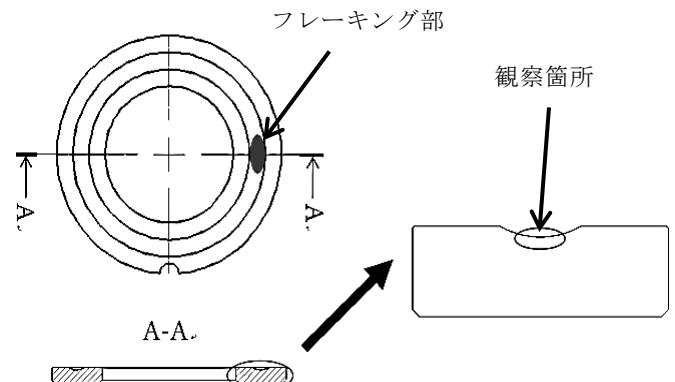


図3 軸受の観察箇所

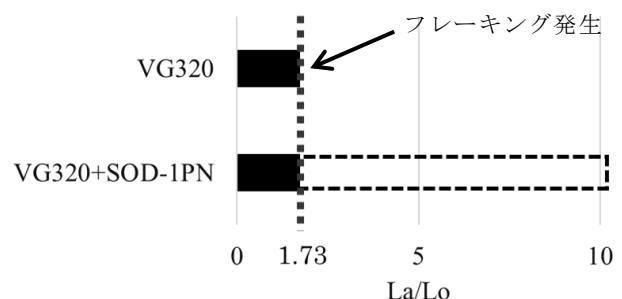


図4 軸受採取を行ったタイミング

4.2 観察結果

ギア油(VG320)単体で寿命試験を行いフレーキングが発生した軸受の転送面付近を50倍で観測した写真を図5に示す。軸受転送面がフレーキングにより損傷していることが確認できる。

次に、図5のA部を500倍に拡大した写真を図7に示す。フレーキングにより本来の転送面からの深さを計測できず、観測位置が把握できない。そこで、損傷していない転送面を利用して図5に損傷前の転送面を白い線で描いたものを図6に示す。図6を用いてB部のフレーキング深さを計測したところ、90μmだった。

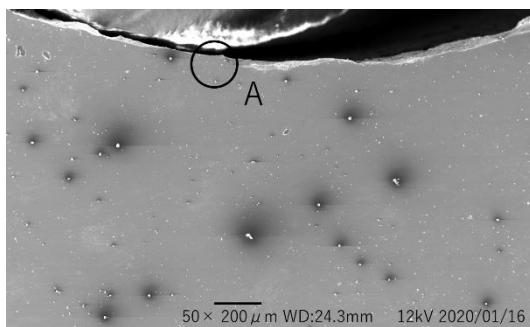


図5 ギア油(VG320)を使用した軸受のフレーキング
発生前の転送面 観測倍率 50倍

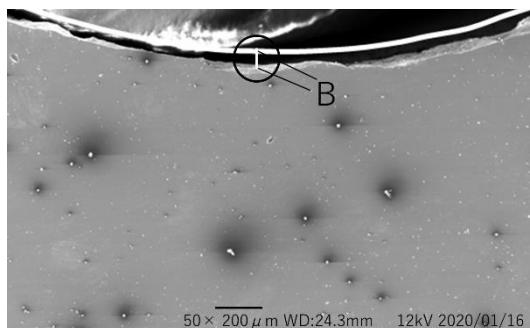


図6 ギア油(VG320)を使用した軸受
観測倍率 50倍

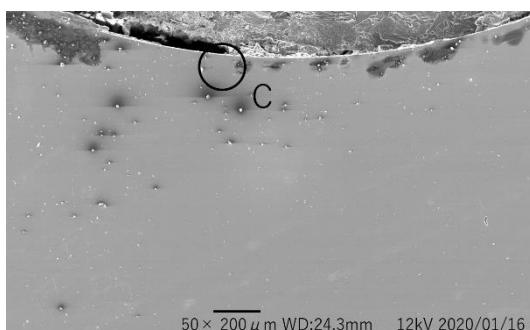


図8 ギア油(VG320+SOD-1PN)を使用した軸受
観測倍率 50倍

ギア油(VG320)に新添加剤を10vol%添加した合成油で寿命試験を行いフレーキングが発生しなかった軸受の転送面付近を50倍で観測した写真を図8に示す。こちらは、フレーキングが無いため軸受転送面に異常は認められなかった。

次に、図8のC部を500倍に拡大した写真を図9に示す。軸受転送面の下(内部)に小さな亀裂が確認できた。この亀裂は、転送面から最も浅い箇所で34μm、最も深い箇所で67μmに位置していた。ギア油(VG320)単体で寿命試験を行った軸受のフレーキングの深さが90μmだったことから、図9の亀裂が進展途中のフレーキング起点となる内部亀裂だと考えられる。

これらの結果から、軸受寿命評価試験によって発生するフレーキングは、内部起点型^[4]だと考えられる。

また、ギア油(VG320)に新添加剤を10vol%添加した合成油は、ギア油(VG320)単体でフレーキングが発生した時点でも、フレーキングを発生させずに図9の内部亀裂に留めていることが確認できた。

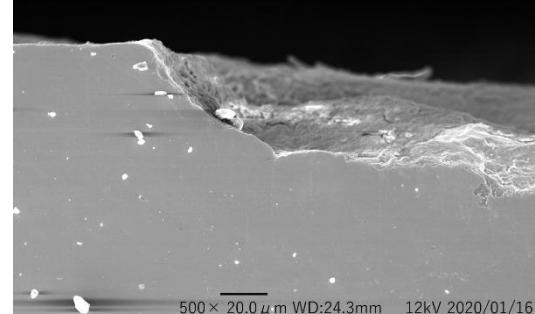


図7 ギア油(VG320)を使用した軸受
観測倍率 500倍

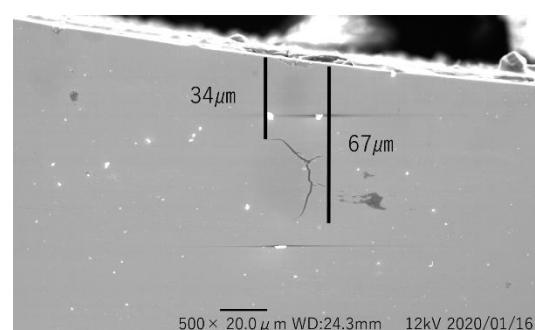


図9 ギア油(VG320+SOD-1PN)を使用した軸受
観測倍率 500倍

5. 軸受応力解析

フラクトグラフィー観察では、軸受寿命試験機で発生したフレーキングは内部起点型だと考えられた。

そこで、教育版 Solidworks に含まれる FEM 解析機能(SolidWorks Simulation)を用いて軸受が荷重を受けた際に応力が集中する位置を調べた。また、本来の軸受形状では解析が行えなかつたため、モデル条件の簡略化を行った。半径 100mm、厚さ 20mm の円盤に半径 2.75mm の半球を押しあてる解析モデルにて解析している。その模式図を図 10、解析モデルを図 11 に示す。

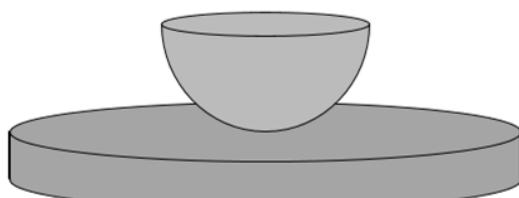


図 10 解析モデルの模式図

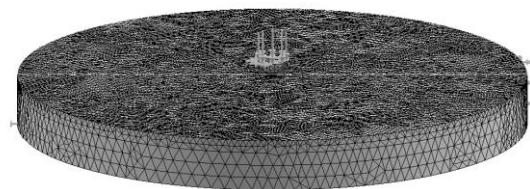


図 11 解析モデル図

解析条件について述べる。負荷する荷重は軸受寿命試験機の転動体 1 つあたりに加わる最大荷重と同等の 1696.2N、材料の縦弾性係数は円盤と半球のどちらも 210GPa とし、最小要素サイズは 2.142mm、総要素数は 184526 である。

次に境界条件について述べる。まず、円盤の側面と底面を固定する。次に半球の平面部を荷重方向のみに移動するように、半球の平面部が円盤に対して平行な 2 方向を固定した。

解析結果の断面図を図 12 に示す。応力の大きさとしては円盤の表面よりも、接触面から 383μm の深さを中心に広がっていることが推定される。実際の試験片に発生したフレーキングや亀裂の位置よりも深いが、この内部の応力による疲労が内部起点型のフレーキングを発生させるものだと推察された。

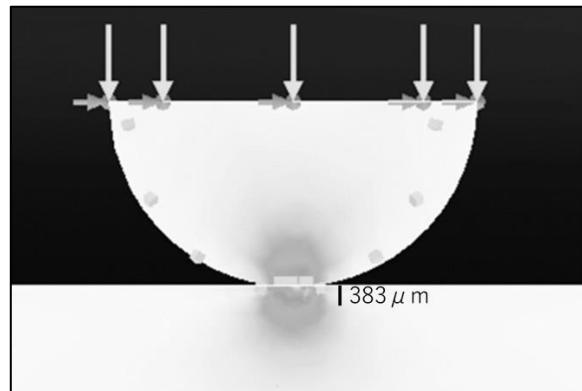


図 12 FEM 解析結果

6. 電気的接触抵抗法による油膜状態の確認

6.1 電気的接触抵抗法について

軸受接触面での油膜形成状況を電気的接触抵抗法(Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下, ECR と称す)によって観測する。^[3]

図 13 に回路図、図 14 に ECR の取付位置を示す。

この回路が示す電圧値で油膜形成状況を確認する。転送面と転動体間で油膜が形成されているときは、油膜により絶縁され電圧値は一定の値を示す。油膜が形成されていないときはスラスト玉軸受の抵抗が減少することで電圧が減少する。

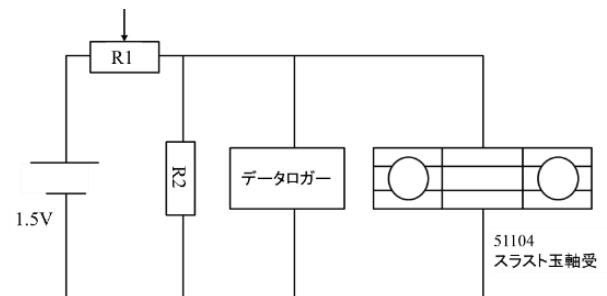


図 13 電気的接触回路の回路図 (ECR)

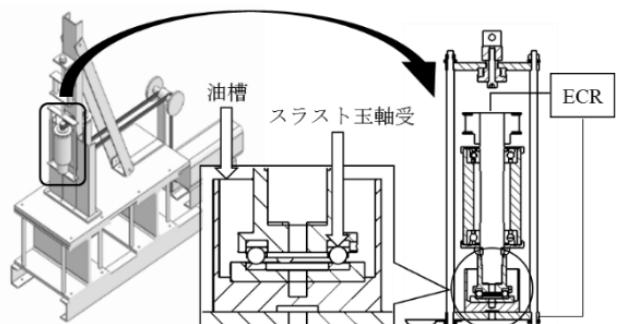


図 14 ECR の取り付け位置

6.2 ECRによる軸受寿命評価試験の状態監視

ギア油 (VG320)とギア油 (VG320)に新添加剤を 10 vol% 添加し、スラスト玉軸受寿命評価試験を行うとともに ECR を用いて油膜形成状態監視を行った。

測定時間中に示した電圧の最大値に対する割合を分離度としてグラフ化したものを図 15, 図 16 に示す。また、図 15, 図 16 の分離度が 100%を示すとき油膜が形成されているとして、表 3 に各区間にに対して油膜が形成されていた時間が占める割合(油膜が形成されていた時間/測定時間)を示す。表 2 と図 15, 図 16 の変化率を用いて各区間の油膜形成状況の評価を行う。

図 15 はギア油 (VG320) 単体で試験回転数を 750rpm に設定し、34.8 時間($La/Lo=2.3$)稼動し、フレーキングを生じ停止するまでのグラフである。

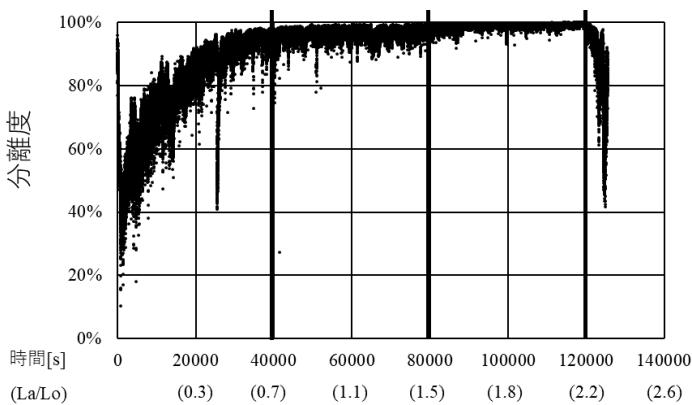


図 15 ギア油(VG320)の ECR 分離度

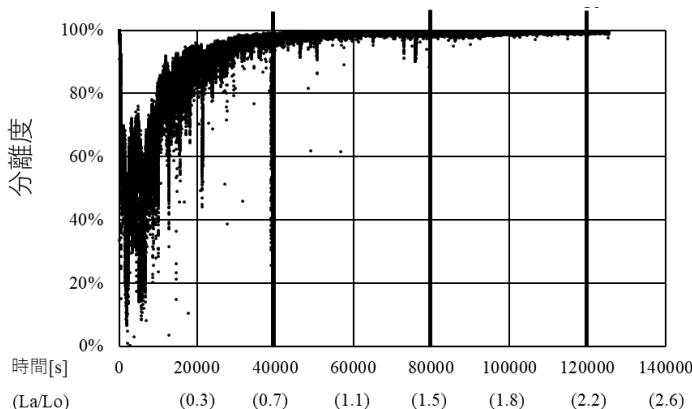


図 16 ギア油(VG320+10vol% SOD-1PN)の ECR 分離度

表 2 時間経過ごとの油膜形成割合

時間[s]	油膜が形成されていた割合	
	VG320	VG320+SOD-1PN
0~40000	0.00%	0.24%
40000~80000	1.19%	57.22%
80000~120000	68.42%	82.79%
120000~	4.50%	99.18%

図 15 の 0~40000s では、分離度が大きく変動している。また、表 3 の油膜が形成されていた割合は 0.00% であり、この区間では油膜は形成されていなかった。

これは、表面粗さが油膜厚さと比べて大きいことから軸受転送面と転動体が直接接触を頻繁に繰り返している為だと思われる。

図 15 の 40000~80000s では分離度の変動が小さくなっている。また、表 3 の油膜が形成されていた割合は 1.19% であり、この区間では短い時間とはいえ、油膜が形成されていたことが分かる。これは、稼働開始から A₁間で軸受接触面の摩耗を生じたことで、表面粗さが油膜厚さより小さくなり初め、転送面と転動体の直接接触が低減されつつあると考えられる。

図 15 の 80000~120000s では分離度が安定している。また、表 3 の油膜が形成されていた割合は大きく増加し 68.42% であり、この区間は油膜が形成されていた時間が増加していることが分かる。これは、油膜厚さが表面粗さを上回り、油膜が安定して形成されているためだと考えられる。

図 15 の 120000s 以降は、フレーキングが生じたことで、分離度が急激に変動している。また、表 3 の油膜が形成されていた割合は大きく減少し 4.50% だった。最終的に、許容のトルク力を超えた時点で安全装置が作動し、軸受寿命評価試験を終了した。

図 15 はギア油 (VG320)に新添加剤を 10 vol% 添加した合成油で試験回転数を 750rpm に設定し、軸受が損傷せずに 412.8 時間($La/Lo=27.26$)稼動したものである。図 15 の稼働時間に合わせて、稼働開始から 34.8 時間の測定値をグラフ化している。

図 16 の 0~40000s を図 15 の 0~40000s と比較すると同様な分離度の変動を示している。また、表 2 の油膜が形成されていた割合は 0.24% であり、油膜は形成されていたが、その期間は極めて短い。

図 16 の 40000~80000s では、分離度が安定し始めている。この区間は油膜が形成されていた時間が増加している。表 3 の油膜が形成されていた割合は大きく増加し 57.22% だった。

図 16 の 80000~12000s では、分離度が高い水準で安定している。また、表 3 の油膜が形成されていた時間は更に増加し 82.79% であり、油膜が形成されていた時間が大半を占めるようになっていた。

図 16 の 120000s 以降の区間では更に分離度が安定している。この区間ににおいて表 2 の油膜が出来ていた割合は 99.18% まで増加し、理想的な油膜形成状況になっている。このことから、新添加剤による安定した油膜形成を確認できた。

ギア油 (VG320) 単体とギア油 (VG320) に新添加剤を 10 vol% 添加した合成油の ECR 測定値を比較した結果、全ての区間ににおいて新添加剤を添加した合成油の分離度が 100% を示していた時間の割合が高かった。分離度が 100% より低い期間の軸受転送面と転動体間の潤滑状況は、図 17 に示すストライベック曲線で境界潤滑領域から混合潤滑領域にあると考えられる。また、分離度が 100% を示していた期間の軸受転送面と転動体間の潤滑状況は図 17 の流体潤滑領域にあると考えられる。新添加剤を添加した合成油で寿命試験を行ったときの分離度は、100% を示していた時間が多かったことから、軸受転送面と転動体間の潤滑状況は流体潤滑領域が多くを占めたことで、直接接触が少なく、転送面と転動体は疲労が少なかった。例えば、ECR とフラクトグラフィーの結果を合わせると、新添加剤によって油膜形成状況が改善したこと、内部亀裂の進展を抑え、フレーキングを発生させずに運転を可能としていたと考えることもできる。

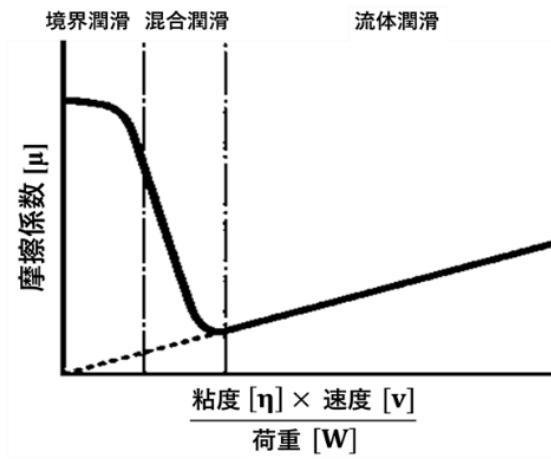


図 17 ストライベック曲線

7. 結論

新還元添加剤 (SOD-1PN)がトライボロジー性能に及ぼす影響を化学的作用と実用試験等により確認した結果、下記の結論が得られた。

- 1) 軸受寿命評価試験機によって加速試験を行った場合でも、発生するフレーキングは内部起点型によるものだったと考えられる。
- 2) ギア油 (VG320) に新添加剤を 10 vol% 添加した合成油は、ギア油 (VG320) 単体でフレーキングが発生した時点でも、内部亀裂のみに留めていたことが確認できた。
- 3) ギア油 (VG320) 単体とギア油 (VG320) に新添加剤を 10 vol% 添加した合成油の ECR 測定値を比較した結果、新添加剤を添加した合成油の極めて高い油膜維持率が確認できた。新添加剤はより長期間の油膜維持を可能にする。また、油膜を維持していた時間の割合で評価することで各区間の油膜形成状況がより明確になった。

参考文献

- [1] 清水秀真,里永憲昭,渡邊孝司,竹川秀男：潤滑油の新還元添加剤による自動車と産業機械用における合成油寿命延長の考察,日本設備管理学会誌, Vol.29, No.2, pp.37-41(2017)
- [2] 竹田雄祐,里永憲昭,河野裕典,渡邊孝司,園田智之：転がり軸受の損傷に与える潤滑油新還元添加剤 (SOD -1PN)の効果,日本設備管理学会誌 Vol.31, No.2, pp.69-74(2019)
- [3] 河野裕典,竹田雄祐,里永憲昭,渡邊孝司,園田智之：電気的接触抵抗測定法(ECR)を用いた損傷メカニズムに関する傾向監視, 18回評価診断意に関するシンポジウム [2019. 11.27-28, 大阪市] pp.122-127
- [4] 土田武広, 田村栄一：軸受鋼における介在物を起點とした転動疲労き裂発生メカニズム, 神戸製鋼技報/Vol.61 No.1 (2011)