福井大学リポジトリ
UNIVERSITY OF FUKUI REPOSITORY

潤滑油のメンテナンス・トライボロジー

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2020-07-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 本田, 知己 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/10963

Copyright 2020 Shinjusha Co., Ltd. All rights reserved.

潤滑油のメンテナンス・トライボロジー

本田知己
Tomomi HONDA
福井大学 学術研究院 工学系部門 工学領域 機械工学講座 教授

1. はじめに

ある新聞で目にした「ものまもりの科学」という言葉に非常に共感を覚えた。物質・材料研究機構（NIMS）の堤 祐介氏が書かれた記事の中で用いられていた言葉である。その意味は、「材料がなぜ劣化するのかを調べ、その進行を抑える。問題ない程度にまで劣化を遅くする」ということである。劣化という言葉はどちらかというと悪いイメージの言葉であるが、新しい製品を使い始めた瞬間から少しずつ機能は低下し、やがて使えなくなるときがやってくる。その劣化を限りなく遅くする、もしくはその過程を監視し、その寿命を予測することは、安全かつ高度で効率的な機械装置の運転を実現するために必要不可欠な科学技術である。ここで取り上げる様々な劣化診断法は、まさに「ものまもりの科学」のための技術であり、多くの機械技術者に使いこなしてほしい技術である。

「劣化」と同様、「メンテナンス（保全）」という言葉もどちらかというと後ろ向きのイメージがする言葉として捉えられている。メンテナンス技術にも新しい製品開発のような華やかさはないが、機械設備の維持管理は持続可能な社会の構築に不可欠な技術の一つであることに異論を挟む余地はない。機械やプラントのメンテナンス方式の主流は、一定期間ごとに実施する従来の時間基準保全から、稼働している機械装置の状態を監視し、それに基づいてメンテナンスを行う状態基準保全へと移行している。時間基準保全は、設備が経時的に劣化するというバスタブ曲線に沿った故障率を描くという考え方に基づく保全方式であるが、実際にはランダムに発生する故障の方が圧倒的に多く、時間基準保全では効果が出ないと報告されている[1]。さらに、いじり壊しやオーバーメンテナンスによるコスト増大も指摘されており、保全費削減のためにも時間基準保全から状態監視保全への移行は必然である。

多くの動的要素からなる機械において、摩耗や焼付きに起因する機械要素のトライボロジー的な機能劣化にどう対処するかは重要な課題であり、メンテナンスと極めて密接な関係がある。そのため、軸受や歯車などのトライボ要素に用いられる潤滑油の性状変化や混入物の有無を調べて機械の状態を監視することが、今日のメンテナンス・トライボロジーの中核技術となっている。こうした動きに呼応する形で、日本機械学会と日本トライボロジー学会は、機械の状態監視診断を行う技術者の認証制度として、2009年10月からISO18436-4に準拠した「機械状態監視診断技術者（トライボロジー）」の資格認証を共同で実施している。カテゴリーⅠ、Ⅱ、Ⅲがあり、受験資格として、それぞれ最小経験期間12、24、36ヵ月、最小訓練時間24、48、80時間が規定されている。2009年から2019年までに、カテゴリーⅠでは1108名、カテゴリーⅡでは217名、カテゴリーⅢでは11名が認証されている。

2. 潤滑油の劣化

「ものまもり」のためには、「潤滑油がなぜ劣化するのかを調べ、その進行を抑える」ことと、「劣化の予兆をいち早く正確に捉える」ことが必要となる。図に潤滑油の劣化に及ぼす諸因子[2]を示す。潤滑油は様々な因子により劣化するが、一般的に劣化の形態は二つに大別できる。

一つは潤滑油自体の化学的変化によるものである。炭化水素の酸化はフリーラジカル連鎖反応（自動酸化反応）により進行する。この特徴は、一度反応が始まると停止反応がなければ、非酸化物とO_2の存在する限り連鎖反応が繰り返されることである。潤滑油の酸化反応機構については、桜井による書籍[3]や小西・上田による書籍[4]で詳細に述べられている。炭化水素の自動酸化反応は二つの段階に分けられ、第1段階はフリーラジカル連鎖反応によるハイドロパーオキサイド（酸価の初期段階で生じる過酸化物）の生成、第2段階はハイドロパーオキサイドの分解である。さらに、重縮合を繰り返すこ

【著者問合先】
〒910-8507 福井県福井市文京3-9-1
Tel.0776-27-8925 Fax.0776-27-8748
E-mail honda@u-fukui.ac.jp

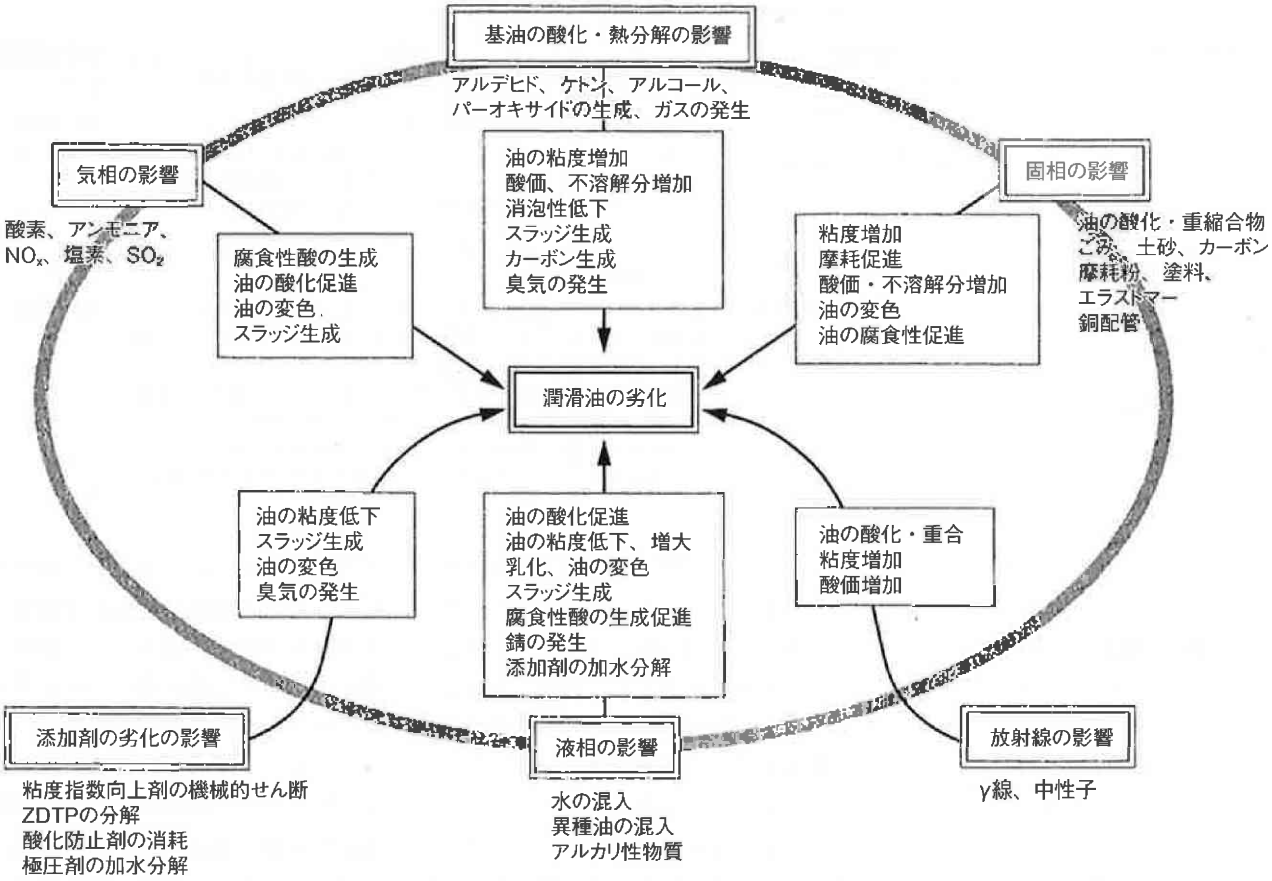

図　潤滑油の劣化に及ぼす諸因子[2)]

とによりカルボン酸、エステルを主体とする高分子量の油に溶けない酸化生成物に変化していく。このような酸化生成物が油中に蓄積すると、粘度、不溶解分などの性状に変化が現れるとともに、バルブロックやオイルクーラーの熱伝導の低下などを引き起こす[5)]。

もう一つは異物の混入による潤滑油の汚損である。潤滑油の汚損の原因は、固相によるもの、液相によるもの、気相によるものに分けられる。固相によるものには、固形粒子や前述の潤滑油の酸化・重縮合物などがある。固形粒子の発生源は、加工および組立て時の残留固形物やなじみ運転時の初期摩耗粉、通常運転時の定常摩耗粉や環境から侵入した塵埃や砂塵などであり、摩耗促進の原因とされている。液相によるものには、水の混入や異油種の混入などがあり、特に水は潤滑油の乳化(懸濁)や、発錆、低温ではろ過器を詰まらせる原因となる。水は空気中の水分の結露や油温の低下に伴う溶解水分から遊離水分への変化により発生する。気相によるものには空気の侵入があり、油槽内の油面の低下や戻り配管位置の不適による戻り油の空気巻き込み、油温上昇や圧力低下にともなう溶解空気から遊離空気への変化により発生する。空気の混入はキャビテーションの発生やオイル劣化の促進、油膜切れ、油圧剛性の低下を引き起こす。

3. 潤滑油の状態監視

前章で述べた劣化要因から、潤滑油の状態監視のためには、酸化挙動や水分・異種油の混入などを調べるための化学的分析と、固形粒子を調べるための物理的測定が欠かせないことは自明である。また、メンテナンスコスト低減の観点から、潤滑油の状態監視方法について二段階・二通りに考えることができる。一般的には定期的な現場型の潤滑油分析を行い、それらに異常がみられたら分析室型の潤滑油分析を行う二段階の方法をとる。現場型の潤滑油分析は、粒子計数、クラックル試験などであり、分析室型の潤滑油分析は粘度測定(40℃)、酸価測定、フーリエ変換赤外分光分析(FT-IR：Fourier Transform Infrared Spectroscopy)、元素分析(金属摩耗粉)、鉄分濃度測定などである。最も利用されている分析装置はFT-IRや高速液体クロマトグラフィー(HPLC：High Performance Liquid Chromatography)であり、酸化防止剤の残存量、酸の生成度合い、水分量、基油の分子量分布の変化などを評価できる。元素分析は、摺動面に損傷が起こった場合に特有の成分と形を持った摩耗粉が生成されることに基づく分析法で、金属元素分析から判断する誘導結合プラズマ発光分析(ICP-AES：Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry)や摩耗粉の量と形から判断する分析フェログラフィーなどがある。また、分析の方法にはオンラインとオフラインの二通りがある。オンラインの方法では、粒子計数や潤滑油の色相判別、鉄粉濃度測定などが一般的である。分析室型の潤滑油分析の多くはオフライ

表1　現場型の潤滑油分析法の概略と関連規格

試験の名称(単位)	関連規格		概要	必要な試料量
ASTM色(16段階)	JIS K 2580	ASTM D1500	ASTM色標準ガラスと潤滑油の色を比較し、劣化度を診断。	50mL
密度(g/cm^3)	JIS K 2249	ISO 1183, ASTM D792	浮ひょうまたは振動式密度計で測定。	20～500mL
汚染度：粒子計数法	JIS B 9930, 9932, 9934, 9935	ISO 4407, 11171, 11500, 11943	顕微鏡やパーティクルカウンターを使用して、汚染微粒子の数と粒径を測定。ISO4406清浄度コードを用いて表示。	200mL
汚染度：質量法(mg/100mL)	JIS B 9931	ISO 4405	メンブランフィルターで油をろ過する前とろ過した後のフィルターの重量差。	100mL
パッチテスト		ASTM D7843	メンブランフィルターで油をろ過した後のフィルターの色。	25～60mL
鉄粉濃度		ASTM D8120	磁気プラグなどにより、油中に含まれる磁性粒子を捕捉し、その量から摩耗状態を監視。	
クラックル(水分量)			試料油2、3滴を160℃前後に加熱したプレート上に滴下し、水泡の発生挙動(はじける音)から定性的に水分量を推定。	2、3滴
ブロッタースポット			試料油1、2滴を吸取紙に滴下し、油分が吸収された後のシミから炭素粒子やスラッジの発生、グリコールやすすによる汚染を推定。	1、2滴

ンの方法である。現場型、分析室型の両分析法について、関連する規格と併せてその概要を**表1**、**表2**に示す。オンラインとオフラインの両手法において広く用いられている粒子計数(パーティクルカウント)に関する解説は、本誌359号7巻(2017)[6]において詳しく解説されているので参照されたい。

表1、表2では規格化されている診断方法について説明してきたが、その他にも開発が進められている。例えば、粒子計数のためのオンラインパーティクルカウンターに関して、これまで区別することができなかった潤滑油中の固形物と気泡を自動判別できる微粒子計数装置と、これを用いる微粒子計数方法[7]が開発され、実用化に至っている。著者らは、ろ過後のフィルター(メンブランパッチ)に光を照射して、汚染物からの反射光およびフィルターを透過した透過光を光の三原色(RGB)に分解し、それらを256階調のデジタル値に変換して差分演算を行い、目視では識別できない微妙な色の違いを判別する手法を確立している[8]。ここで新たに考案された色パラメーターと潤滑油性状値との関係から、色と汚染度および汚染要因との関係について詳細に調べられており、潤滑油の状態監視や余寿命評価に役立つ方法として注目されている。メンブランパッチの色を測定するための装置も開発されて商品化に至っている[9]。最近では、建設機械分野において、エンジンオイルや作動油の状況を監視し、異常値を検知した場合に迅速かつ自動で知らせるソリューションパッケージが2017年に実用化された[10]。このシステムは誘電率や動粘度、密度、温度から油の劣化や異種油の混合、汚染物の混入が推定できる。開発段階の診断方法として、未使用の潤滑油を基準とすることなく、対象とする潤滑油のインピーダンスまたはコンダクタンスの温度に対する変化率を測定することで、潤滑油の劣化度を評価できる評価方法[11]や、潤滑油の温度履歴をもとに計算された潤滑油温度負荷積算値に基づいて潤滑油寿命を計算する方法[12]などが特許として公開されている。また、著者らは自動車の実走行環境下における燃費とエンジン油の電気的パラメーターの変化とともに、エンジン油の化学変化との関係について調べた結果、リアクタンスの変化傾向からエンジン油の劣化度合いと交換時期を予測できることを示した[13]。

4. 潤滑油の状態とトライボロジー

機械摺動面に常に存在し、摺動面の状態を反映している潤滑油の状態がトライボロジー特性を左右すると考えることに異論はない。その一方で、潤滑油の劣化状態を定量化し、それに基づいて摺動面の摩擦特性や余寿命を予測できるまでには至っていない。これを可能にするためにも、潤滑油の劣化状態を定量化すること、潤滑油の劣化状態と摩擦摩耗特性の関係を明らかにすることが必要である。それらが達成されて初めて、潤滑油状態監視に基づく機械摺動面の余寿命予測とトライボ設計が可能となる。著者らは実機で使用された潤滑油の分析結果をもとに4通りの模擬劣化油を作製し、ブロック・オン・リングタイプのすべり摩擦試験を行った[14]。試験は実機の潤滑状態を想定して混合潤滑とした。模擬劣化油は、酸化のみが進行した油、軟質粒子のみ混入させた油、軟質粒子と硬質粒子を混入させた油、酸化が進行した油に軟質粒子を混入させた油の4種類を用意した。摩擦摩耗試験前の4種類の油に対してオフラインパーティクルカウンターによる粒子計数を行い、ISO清浄度コードをほぼ同じ値に制御した。新油および軟質粒子を混入させた油において、不明瞭ではあるがブロック試験片に摩耗痕がみられた。酸化のみが進行した油およびそれに軟質粒子を混入させた油においては摩耗痕がみられなかった。一方、軟質・硬質粒子を混入させた油においては、他の条件ではみられなかった明瞭な摩耗痕が多数みられた。以上の結果は、粒子計数では粒子の大きさと数のみ知ることができ、それらの種類を知ることができないため、粒子計数とトライボロジー特性を一義的に関係づけることができないという一例である。

5. おわりに

本稿では、まず機械の保全と潤滑油の劣化要因に触れた後、潤滑油の状態監視

表2　分析室型の潤滑油分析法の概略と関連規格

試験の名称(単位)	関連規格		概要	必要な試料量
動粘度(mm²/s)	JIS K 2283	ASTM D445	重力下での油の流れにくさの尺度で、絶対粘度を試料密度で割った値。32mm²/s@40℃のように、試験温度を併記。	15～30mL
粘度指数	JIS K 2283	ISO 2909 ASTM D2270	潤滑油の動粘度の温度依存性を表す物性値。	
水分(vol%、mass%、ppm)	JIS K 2275	ASTM D6304 ASTM D1744	サンプル油量に対するサンプル油中の水分量の比率。 (クラックル試験、カールフィッシャー試験)	0.1～50g
全酸価(mgKOH/g)	JIS K 2501	ASTM D974 ASTM D664	試料油1g中の全酸性成分を中和するのに必要な水酸化カリウムの量。	0.1～20g
全塩基価(mgKOH/g)	JIS K 2501	ASTM D4739	試料油1g中の全塩基性成分を中和するのに必要な塩酸と等量の水酸化カリウムの量。	0.1～20g
赤外分光分析(IR)(cm⁻¹)	JIS K 0117	(ASTM E2412)	物質が吸収する赤外線の波長と強度から化合物を定性・定量。	1～10mL
潤滑油酸化防止剤 減少率分析法(RULER)		ASTM D6971	潤滑油中の酸化防止剤残存濃度変化により酸化防止剤の残存寿命を評価(ボルタンメトリー法)。	0.4mL
高速液体クロマトグラフィー (HPLC)	JIS K 0124		液体の移動相をカラム(固定相)に通過させ、分析種を固定相および移動相との相互作用の差を利用して高性能に分離して検出。	
油中金属元素分析 (ICP-AES)(mass%)	JPI-5S-38 JPI-5S-44	ASTM D5185 ASTM D7260	分析対象元素を気化励起し、得られる発光スペクトル線の波長と強度から元素を定性・定量。	5～10g
蛍光X線分析(mass%)	JIS K 0119	ASTM E1621	試料にX線を照射して発生する蛍光X線のエネルギーと強度から元素を定性・定量。	10mL
分析フェログラフィー		ASTM D7690	油中摩耗粉を磁力でスライド上に大きさの順に配列させ、粒子の形状、量、色より潤滑状態を診断。	20mL
定量フェログラフィー		ASTM D8120	油中摩耗粉を磁力で沈着管上に配列させ、大きい粒子と小さな粒子の粒子の量の割合から、摩耗の規模を推定。	20mL
内燃機関用潤滑油酸化安定度試験 (ISOT)	JIS K 2514-1		試料に触媒とワニス棒を浸し、規定温度で規定時間酸化させた後、酸化油の動粘度と酸価とを測定して試験前と比較。	250mL
タービン油酸化安定度試験 (TOST)(mgKOH/g)(min)	JIS K 2514-2	ISO 4263 ASTM D943 ASTM D7873	触媒と水の存在下で試料に酸素を吹き込み、95℃で酸化させ、規定時間後の酸価、またはあらかじめ定めた酸価に達するまでの試験時間で評価(タービン油、油圧作動油)。	300mL
回転圧力容器式酸化安定度試験 (RPVOT)(min)	JIS K 2514-3	ASTM D2272	銅のコイル状触媒と蒸留水含む加圧酸素容器内の試料油の150℃での酸化安定性。所定の圧力降下をするまでの時間で評価(タービン油、油圧作動油、空気圧縮機油対象)。	50～150mL
引火点(℃)	JIS K 2265	ASTM D92	規定の昇温速度で油を加熱し、油面上の混合気に小さな炎を近づけたときに引火する最低温度。	80mL
流動点(℃)	JIS K 2269	ASTM D97	規定の冷却速度で冷却したとき、流動性を失う最低温度。	60mL
泡立ち(mL)	JIS K 2518	ISO 6247	試料に空気を吹き込んで、吹き込み終了直後と10分後の泡の量を測定。	200mL

技術について概説した。詳細については、表中の規格番号をもとに原文を調べていただきたい。最後に、摺動面の摩擦特性や余寿命を予測するためにも、潤滑油の劣化状態を定量化すること、潤滑油の劣化状態と摩擦摩耗特性の関係を明らかにすることが必要であることを述べた。本稿が、潤滑油のメンテナンス・トライボロジーを議論する上での一助になれば幸いである。

参考文献

1) Nowlan, F. S. and Heap, H. F.：Reliability-centered maintenance, U.S. department of commerce, December(1978)46.
2) 日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック、養賢堂(2001)820.
3) 桜井俊男：潤滑の物理化学、幸書房(1974)145.
4) 小西誠一、上田 亨：潤滑油の基礎と応用、コロナ社(1992)110.
5) 佐々木 徹：油の酸化生成物に起因する油圧バルブの固着について、トライボロジスト、40、5(1995)386-390.
6) 本田知己：パーティクルカウンタによる潤滑油清浄度管理、月刊トライボロジー、359、7(2017)45-477.
7) トライボテックス：微粒子計数装置、これを用いる微粒子計数方法及びこれを備える潤滑対象部診断システム、特許第4719587号.
8) T. Yamaguchi, S. Kawaura, T. Honda, M. Ueda, Y. Iwai, A. Sasaki：Investigation of Oil Contamination by Colorimetric Analysis, Lubrication Engineering, 58, 1(2002)12-17.
9) T. Honda, Y. Iwai, A. Sasaki：Oil State Monitoring Method and Oil State Monitoring Device, US Patent：US 8, 390, 796 B2.
10) 濱町好也、秋田秀樹：建設機械オイル監視システム"ConSite OIL"、潤滑経済、4(2018)7-11.
11) 出光興産：潤滑油劣化度の評価方法、特開2009-002887.
12) 三菱重工業：産業車両の潤滑油劣化診断方法及び装置、特開2010-65637.
13) 本田知己、Sukcharoen Krittawit、佐々木正隼、浅川恭輝：エンジン油の電気的特性によるオンライン劣化診断法に関する研究、第18回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集、202(2019)86-88.
14) 今 智彦、本田知己、中村由美子、高東智佳子：ISO清浄度コードとメンブランパッチの色に基づいた潤滑油汚染診断法、日本機械学会論文集、83、856(2017)17-00285.