

潤滑油の劣化と色

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-04-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 本田, 知己, 岩井, 善郎 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/5129

潤滑油の劣化と色

原稿受付 2007年12月28日
 “トライボロジスト” 第53巻 第5号 (2008) 319~325

本田 知己
 岩井 善郎
 福井大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9-1)

1. はじめに

潤滑油の色は、現場の技術者が潤滑油の劣化を判断する最も簡易な情報といえる。色のように視覚的に現れる劣化形態は、潤滑油の状態を迅速に判断するのに便利である。図1は潤滑油の劣化形態とそれらに及ぼす諸因子を示す¹⁾。劣化の要因として、基油の酸化・熱分解や添加剤の変質・消耗などの化学的变化と、液相・固相の混入などの外部要因が挙げられる。いずれの場合も、潤滑油

には色の変化として現れることが多い。

本稿では、特集の趣旨である光学とトライボロジーとの関わりの中から、潤滑油の劣化と色に関する研究動向について紹介する。潤滑油の劣化診断や潤滑管理全般については、詳細に述べられている書籍^{1,2)}や解説等^{3~5)}を参考にしたい。

2. 潤滑油の汚染管理

油圧装置や潤滑装置の故障のうち、80~90%が油の汚れが原因といわれるほど、油の汚れは装

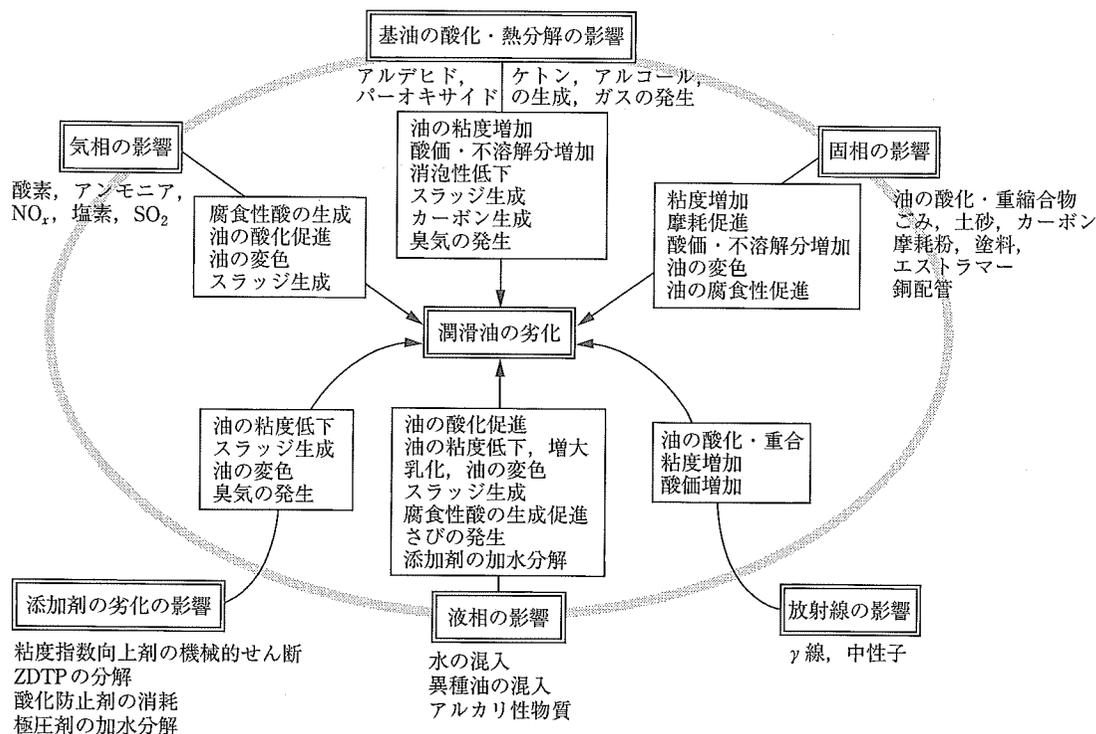


図1 工業用潤滑油の劣化に及ぼす諸因子 (出典: 文献1))

Degradation of Lubricating Oils and Its Color

By Tomomi HONDA and Yoshiro IWAI, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Fukui (9-1, Bunkyo 3-chōme, Fukui-shi, Fukui 910-8507, E-mail: honda@mech.fukui-u.ac.jp)

Key Words: degradation, colorimetric analysis, membrane patch, oil contamination, diagnosis

置に多大な被害を与える⁶⁾。油の汚染診断・管理についてはさまざまな研究がなされ、多くの出版物がある⁷⁻¹²⁾。油中の汚染物によるさまざまな問題を未然に防ぐためには、油が汚れてから対処するのではなく、油の汚染度を常時清浄な状態に維持する汚染管理が重要となる。油の汚染度分析にはフェログラフィ法、SOAP 法 (Spectrometric Oil Analysis Program)、計数法、重量法等がある。一般的に使われている汚染度分析法には、NAS 1638¹³⁾、ISO 4406¹⁴⁾、SAE AS 4059¹⁵⁾ や JIS B 9930¹⁶⁾ に規定される粒子数計測法と、ASTM D 4898¹⁷⁾ や JIS B 9931¹⁸⁾ に規定される重量法がある。数 μm 以上の粒子をカウントする粒子数計測法では、汚染物の種類や性質が不明であるだけでなく、バルブの固着など摩擦係数の増加を引き起こす数 μm 未満の酸化変質物^{19,20)} に対応できない。また、メンブランフィルタによるろ過後の汚染物の総重量を調べる重量法では、汚染物を特定することはできないが、ろ過後のメンブランフィルタ上の汚染物の色が、現場での簡易的な汚染管理に役立っている。さらに、汚染物の種類や性質と色との関係を見出せば、メンブランフィルタの色から汚染物を特定することが可能になると考えられる。

3. 潤滑油の色

3.1 石油製品の色相に関する基準

石油製品の色相について、判断色として JIS K 2580²¹⁾ にてセーボルト色と ASTM 色の二つの試験法が規定されている。流動パラフィンやパラフィンワックス等にはセーボルト色を、各種潤滑油やヒーティングオイル、マイクロワックス等には ASTM 色を用いる。セーボルト色では色を +30 (明るい) ~ -16 (暗い) の 47 段階で表示す

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0

図 2 ASTM 色カラーサンプル

る。ASTM 色では図 2 に示されるように、色を 0.5 (淡い) ~ 8.0 (濃い) の間を 16 段階に分けて表示する。測定には ASTM 色試験器を用い、試料の色と一致した ASTM 色標準ガラスの番号を ASTM 色として表す。

3.2 石油製品の色相変化

潤滑油自体の色を変化させる要因として、基油の組成変化および添加剤の変質がある。添加剤が入った潤滑油の場合、色の変化は潤滑油の劣化に対して敏感であり、全酸価が上昇する前に現れる。BHAN ら²²⁾ は軽油の色相変化の原因物質について検討し、酸性成分の色相変化が著しいことを見出している。着色成分として、窒素化合物と酸素化合物が確認されている。

進藤ら²³⁾ は、多環芳香族炭化水素およびオレフィン系炭化水素のトルエン溶液に日光を照射し、その色相変化を追跡している。潤滑油基油の場合と同様に、色相は日射量の増大に伴い黄色から赤茶色へと変化し、スラッジ生成量も増加することが確認されている。多環芳香族炭化水素の着色成分は、ヒドロキシ基、カルボニル基、カルボキシル基などの含酸素官能基を有した多環芳香族炭化水素が 2-3 分子程度縮合した混合物からなることが推定された。

TAKATSUKA ら²⁴⁾ は、軽油の深度脱硫による着色機構を検討した結果、着色が 2 環以上のチオフェン類の脱硫に伴う多環芳香族の生成によることを示している。

3.3 潤滑油自体の色による劣化診断の限界

潤滑油の色と劣化との相関性に関するデータは少ないが、その一つに ASTM 色と波長 496 nm の光の透過率との関係があり、ASTM 色の増加とともに透過率も単調に減少することが示されている²⁵⁾。しかし、実機から採取した種々の潤滑油について調べた結果を整理すると図 3 のようになることから、ASTM 色と波長 496 nm の光の透過率との間に明確な相関があるとは言い難い。また、ASTM 色による管理基準の目安が示されているものの、劣化状態は特定できない。

潤滑油を透過する光から色情報を抽出し、それと劣化との相関性を調べる方法が紹介されている。特許第 3266637 号²⁶⁾ では、潤滑油中を透過して

きた可視光の三刺激値 XYZ から独自の演算式による潤滑油評点を求め、劣化度合いを判断する方法が示されている。XYZ 表色系は RGB 値の加法混色の原理に基づいて色を数値化する方法である。特開平 6-34541²⁷⁾ では、潤滑油中を透過してきた可視光の RGB 値の変化から劣化度合いをモニタする方法が示されている。これらは、目視で判別している色の違いを定量化する試みといえるが、広く一般化されていない。

図 4 は基油 10 ml に一定量の酸化生成物が混入した潤滑油とそれをろ過して得られるメンブランフィルタの外観を示す。潤滑油の色には酸化生成物の量による明瞭な違いが見られず、目視ではほぼ無色に見える。しかし、メンブランフィルタでろ過することにより、酸化生成物の微かな量の

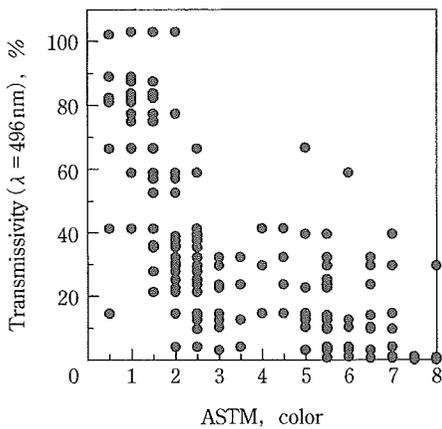


図 3 実機使用油の ASTM 色と透過率の関係 (λ=496 nm)

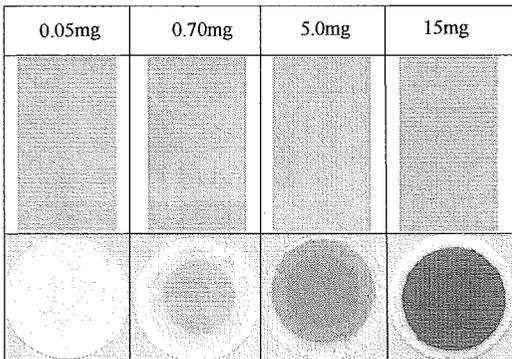


図 4 基油 10 ml に一定量の酸化生成物を混入させた油とそのメンブランパッチ

違いが色の変化として明確に捉えられている。

これらの例からもわかるように、潤滑油自体の色だけでその劣化状態を知ることは困難である。一方、メンブランフィルタ上の汚染物の色情報を利用することで、数 μm 未満の酸化生成物も対象とした劣化診断の可能性が見出されるものと考えられる。

4. メンブランフィルタ上の汚染物の色相解析

4.1 測定方法^{28,29)}

試料油のろ過では、孔径 0.8 μm、フィルタ直径 25 mm のセルロース・アセテートの白色のメンブランフィルタが用いられ、10 ml の試料油が真空引きされる。ろ過により汚染物を捕捉したメンブランフィルタは、一般にメンブランパッチと呼ばれる。

色の測定には、メンブランパッチに光を照射して、その散乱光を RGB に感度をもつ光電受光器で受光する方法が用いられている³⁰⁾。スキャナの仕様は、解像度 300 dpi×600 dpi、入力 30 bits/pixel、RGB 各色 1024 階調 (約 10 億色)、出力 24 bits/pixel、RGB 各色 256 階調 (約 1 677 万色) である。得られた色は画像編集ソフトにより、RGB 各色 256 階調で表される。RGB 値はそれぞれにある幅をもつため、RGB 各色の抽出にはヒストグラムによる中間値が採用されている。

4.2 実機使用油のメンブランパッチの色^{28,29)}

実際に稼働している種々の機械から無作為に収集した 732 サンプルの油 (表 1) のメンブランパッチの一例を図 5 に示す。黒色、灰色、茶色、黄

表 1 実機使用油の種類とサンプル数 (出典：文献 28)

Oil	Number of samples
Hydraulic oils	405
Lubricating oils	45
Cutting oils	45
Washing oils	8
Test oils	75
Other	154
Total	732

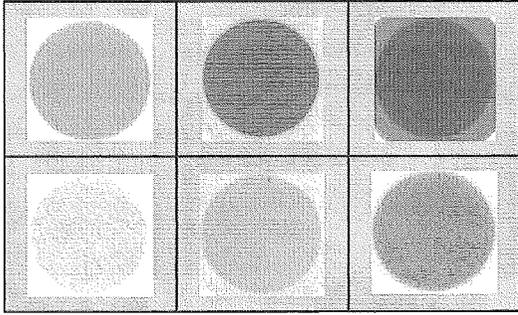


図5 実機使用油のメンブランパッチの一例

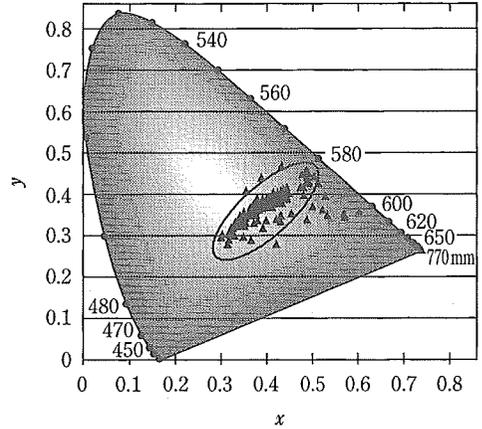


図6 XYZ表色系の色度図〔出典：文献29〕

色等、さまざまな色を示している。図6は色彩工学の分野でよく用いられるXYZ表色系の色度図²¹⁾上にメンブランパッチの色をプロットしたものである。分布は非常に狭い範囲に集中し、色を分析することは困難である。そこで、図7のように、R、G、Bを頂点とする三次元上に各色256階調で表示すると、メンブランパッチの色は黒、灰、白を結ぶ対角線上と、その対角線から赤と黄の方向に分布し、黒、白、赤、黄を結ぶ三角すいの中に含まれている。また、単にRGBの数値だけでなく、新たにR-G、G-B、R-Bの中の最大差（最大色差と呼ぶ）に注目して色の傾向を整理することが提案されている。たとえば、あるメンブランパッチのRGB値がR：120、G：42、

B：10の場合、最大色差はR-Bの110となる。これにより、目視では難しかった色の類別を容易に行うことができるようになり、最大色差は茶系色で大きく、黒系色もしくは白系色で小さくなることを示されている。

メンブランパッチの着色要因を解明するために、メンブランパッチをトルエンで洗浄後、そのトルエン溶液を再度ろ過して得られるメンブランパッチの色が調べられている。トルエンに溶解したものは酸化生成物であり³²⁾再ろ過によりフィルタに捕捉されないが、不溶解なものはフィルタで再

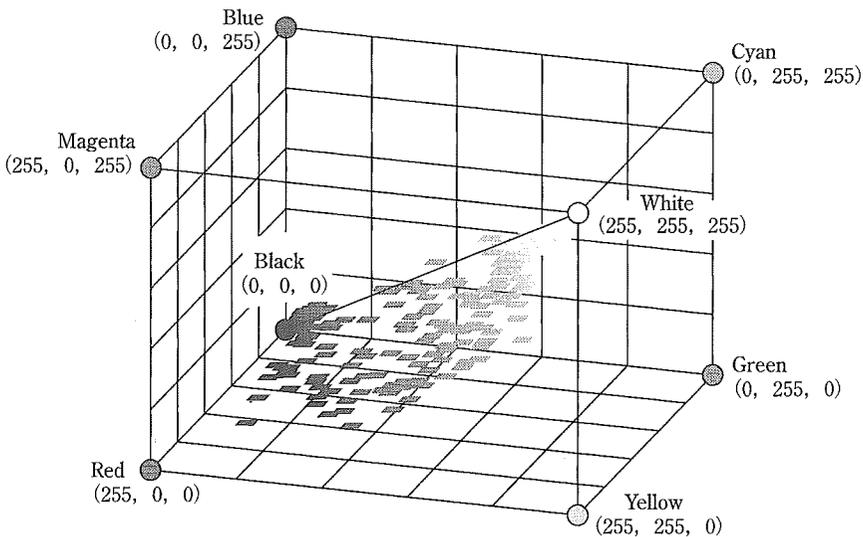


図7 メンブランパッチの三次元色分布

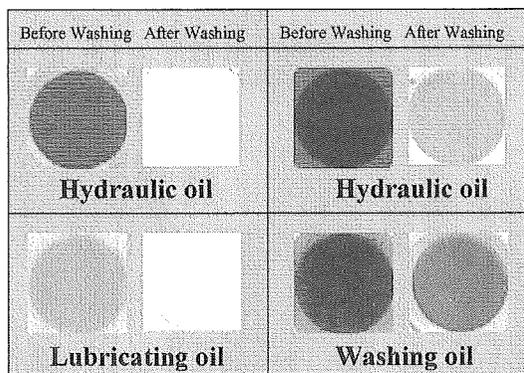


図8 トルエンで洗浄前と洗浄後のメンブランパッチの画像の一例

捕捉される。つまり、トルエン洗浄前後の色の違いは、汚染物中の酸化生成物の有無を示している。図8はトルエンでの洗浄前と洗浄後のメンブランパッチの画像の一例を示す。茶系色のメンブランパッチをトルエンで洗浄すると白色になり、黒系色のそれは灰色になる。このことから、メンブランパッチの着色要因は汚染物の種類と関係があり、トルエンに溶解する酸化生成物の場合は茶系色を示し、トルエンに溶解しない固形物の場合は灰色を示すと結論づけている。

4.3 メンブランパッチの色と潤滑油の劣化要因³³⁾

酸化のみによる劣化油をろ過したメンブランパッチの色が調べられている。酸化劣化油は内燃機関用潤滑油酸化安定度試験 (ISOT, Indiana Stirring Oxidation Test), および潤滑油熱安定度試験 (DTST, Deterioration of Thermal Stability Test) の2種類の試験法で作製され、加熱時間3時間ごとに性状測定が行われている。ISOTによる無添加基油では、メンブランパッチの着色は薄く、黄系色を示した。一方、DTSTによる酸化防止剤が添加された潤滑油では、濃い茶系色を示した。この研究において、メンブランパッチの色を表す値として、 $\Delta E_{RGB} (= (R^2 + G^2 + B^2)^{0.5})$ が新たなパラメータとして定義され、劣化状態との関係が調べられている。図9は加熱時間に対する最大色差と ΔE_{RGB} の変化を示す。ISOT劣化油の ΔE_{RGB} は大きい値を示し、直線的に減少した。最大色差は12時間以降に顕著な増加が確認でき

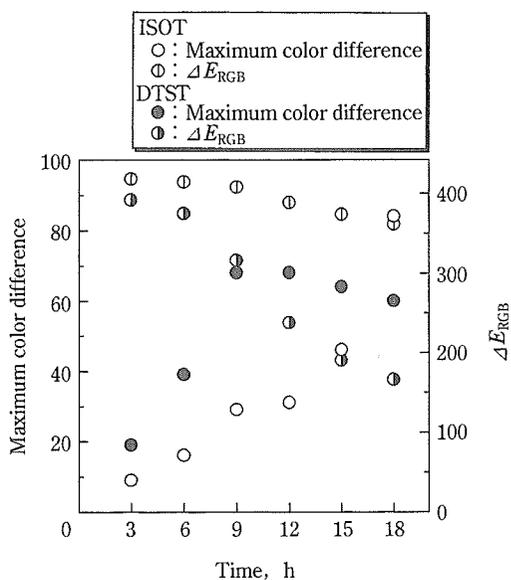


図9 最大色差と ΔE_{RGB} の時間変化〔出典：文献33)〕

る。DTST劣化油の ΔE_{RGB} は、加熱時間が6時間以降にそれ以前に比べて著しく減少した。最大色差は9時間経過時に最大値をとり、その後減少した。

潤滑油の酸化度合いとメンブランパッチの色との関係を知るために、カルボン酸に対応する 1720 cm^{-1} 付近の吸収と、C-O結合に対応する $1300\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ の吸収が、赤外分光分析により調べられている。図10(a)はカルボン酸のピーク強度およびC-O結合の面積強度と ΔE_{RGB} との関係を示し、図10(b)はカルボン酸のピーク強度および 1250 cm^{-1} から 1000 cm^{-1} の間の最大値と最小値の差(P-P値)と ΔE_{RGB} との関係を示す。どちらにおいても、吸収強度と ΔE_{RGB} にはよい相関が見られ、メンブランパッチの色が潤滑油の酸化度合いを表すことが示されている。

図11は ΔE_{RGB} と最大色差の関係を示す。図中○印は実機使用油を、▽、◇印は溶剤抽出法により取り出された酸化生成物を含む潤滑油を示す。ISOT劣化油の色と溶剤抽出により取り出した酸化生成物の色を総合すると、酸化劣化油から得られるメンブランパッチは茶系色でかつ最大色差が大きく、その最大色差は ΔE_{RGB} に対して放物線を描いて分布している。また、DTST劣化油の

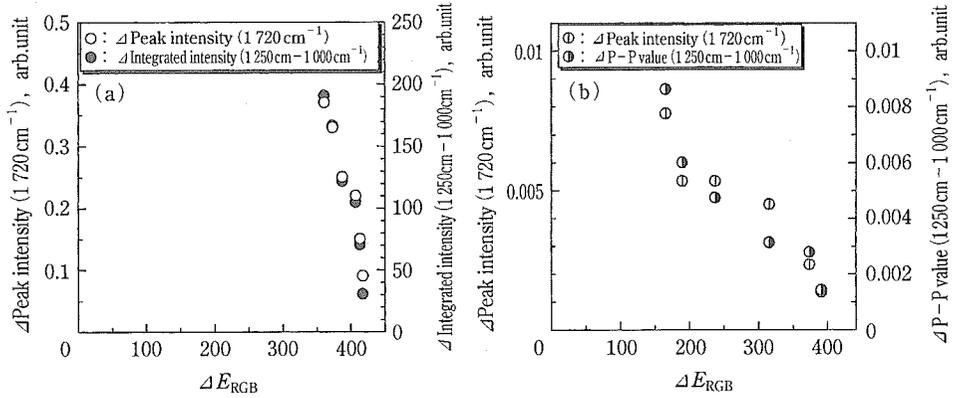


図 10 ΔE_{RGB} と赤外分光分析の関係 [(a)ISOT, (b)DTST] (出典: 文献 33)

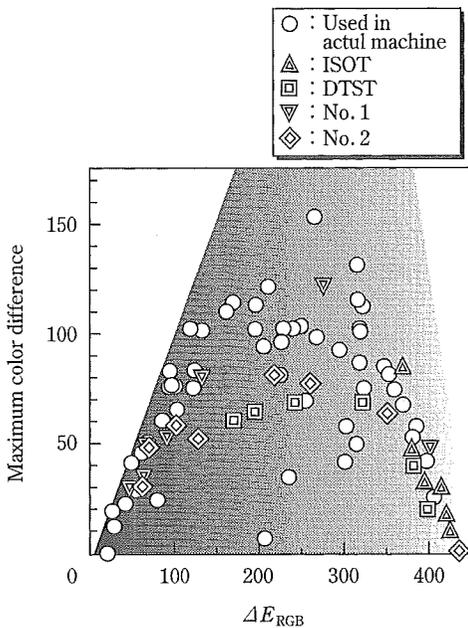


図 11 ΔE_{RGB} と最大色差の関係 (出典: 文献 33)

ように添加剤の影響が大きい場合は最大色差が小さい。一方、摩耗粉などの固形粒子の影響が大きい場合は最大色差が小さく、灰色を示している。つまり、メンブランパッチの色は主に、基油の酸化劣化、添加剤の消耗などによる不溶解性の酸化生成物、摩耗粉などの固形粒子の三つの要因に影響されるといえる。このように、図 11 のような関係図において潤滑油の劣化要因が 3 種類に大別され、メンブランパッチの ΔE_{RGB} と最大色差の値によって劣化の程度が推定されるものと考えら

れる。

5. おわりに

潤滑油の劣化に関するさまざまな情報を含んでいる「色」は、簡便・安価で早期の潤滑油劣化診断を実現できる指標として期待される。しかし、現状では、潤滑油の劣化と色に関する研究は、今後定量化と標準化が進められていく発展途上の段階にあるといえる。本稿が色による潤滑油の劣化診断を議論するうえでの一助となれば幸いである。

文 献

- 1) (社)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.
- 2) (社)日本トライボロジー学会編: メンテナンストライボロジー, 養賢堂 (2006).
- 3) 柴田正明: 潤滑油の劣化診断とトライボロジー, トライボロジスト, **39**, 7 (1994) 559.
- 4) 佐々木 徹: 潤滑油汚染の問題と潤滑管理のための清浄化技術, トライボロジスト, **39**, 7 (1994) 566.
- 5) 木村信治・岩波睦修: 使用油の分析・診断法, 月刊トライボロジー, **9** (2005) 26.
- 6) 似内昭夫: わかりやすい潤滑技術—トライボロジー入門, 日本プラントメンテナンス協会潤滑技術委員会編 (1995) 197.
- 7) 吉長重樹・岩井善郎・本田知己・鈴木 拓: 潤滑油中の摩耗粉のリアルタイム形状解析としゅう動面劣化診断への適用, 機論 (C編), **64**, 618 (1998) 282.
- 8) A. PRABHAKARAN & C.R. JAGGA: Condition Monitoring of Steam Turbine-Generator through Contamination Analysis of Used Lubricating Oil, Tribology Int., **32** (1999) 145.
- 9) 長瀬直樹・中村 彰: 近赤外分光法及び多変量解析の潤滑油管理への適用, 出光技報, **41**, 2 (1998) 54.
- 10) 横山文彦・羽石 正・益子正文: 潤滑油の酸化劣化に伴う全酸価変化と動粘度変化の相関性, トライボロジスト,

- 46, 9 (2001) 733.
- 11) W. BACKE & D. WINNER: Investigation of the Contamination Sensitivity of Hydraulic Pumps, Paper No. C 248, 84, Contamination Control in Hydraulic Systems, IMechE 1984, London (1984) 129.
 - 12) E. C. FITCH: Fluid Contamination Control, F. E. S. Inc. (1988).
 - 13) 全米航空宇宙工業会 NAS 1638 (1964)
 - 14) 国際標準化機構 ISO 4406 (1998)
 - 15) 米国自動車技術者協会 SAE AS 4059 (1990)
 - 16) 日本工業規格 JIS B 9930 (2000)
 - 17) 米国材料試験協会 ASTM D 4898 (1995)
 - 18) 日本工業規格 JIS B 9931 (2000)
 - 19) 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.
 - 20) H. WATANABE & C. KOBAYASHI: Degradation of Turbine Oils-Japanese Turbine Lubrication Practices and Problems, Lubrication Engineering, **34**, 8 (1978) 421.
 - 21) 日本工業規格 JIS K 2580 (2003)
 - 22) O. K. BHAN, D. W. BRINKMAN, J. B. GREEN & B. CARLEY: Storage Stability of Marine Diesel Fuels, Fuel, **66** (1987) 1200.
 - 23) 進藤隆世志・堀部英司・北林茂明・小沢泉太郎: トルエン中での日光照射による縮合多環芳香族炭化水素の色相変化, 日本化学会誌, **4** (2001) 207.
 - 24) T. TAKATSUKA, Y. WADA, H. SUZUKI, S. KOMATSU & Y. MORIMURA: Deep Desulfurization of Diesel Fuel and Its Color Degradation, Sekiyu Gakkai, **35**, 2 (1992) 179.
 - 25) (社)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) 614.
 - 26) 國廣隆紀: 潤滑油劣化度判定方法およびその装置, 特許第 3266637 号 (2002).
 - 27) 岡田美津雄・宮野直人: 潤滑油劣化モニター装置, 特開平 6-34541 (1994).
 - 28) 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.
 - 29) 山口智彦・本田知己・岩井善郎・上田正紘・佐々木徹: 潤滑油汚染物質の色判別法, 福井大学工学部研究報告, **51**, 1 (2003) 81.
 - 30) 田幸敏治・辻内順平・南 茂夫編: 光測定ハンドブック, 朝倉書店 (1990) 483.
 - 31) 川上元朗: 色のおはなし, 日本規格協会 (1999) 124.
 - 32) A. SASAKI, et al.: Criticism on Oil Cleanliness Standard and Suggestion of a New Method, The Fifth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'97 (1997) 243.
 - 33) T. HONDA, Y. ITO, K. KODO, Y. IWAI & A. SASAKI: Color Characterization of Membrane Patches, STLE Annual Meeting & Exhibition 2007 CD Proceedings (2007).

■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■ 著者プロフィール ■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■

本田 知己 1993年東北大学大学院工学研究科博士
 後期課程機械工学専攻修了, 博士(工学).
 現在, 福井大学大学院工学研究科機械工学
 専攻・准教授. 主として, 光学的手法による
 潤滑油の劣化診断, AFMを用いたナノ
 摩擦試験, しゅう動面のなじみ過程, 摩擦
 制御, 硬質材料の摩耗機構などの研究に従
 事, 他に日本機械学会, 精密工学会, 日本
 設計工学会などに所属.



岩井 善郎 1977年京都大学大学院工学研究科博士
 課程機械工学専攻単位修得退学, 1980年
 工学博士(京都大学), 現在, 福井大学大
 学院工学研究科機械工学専攻・教授. 主と
 して, しゅう動面の異常診断, 硬質皮膜の
 耐摩耗性評価, 各種材料の摩耗・エロージ
 ヨン, 表面微細加工などの研究に従事. 他
 に日本機械学会, 精密工学会, 日本材料学
 会, レーザ加工学会などに所属.

