

潤滑油画像解析に基づくクラスタリングによる汚染形態図の構築

Construction of contamination mode diagram by clustering based on the lubricating oil image analysis(LIA)

福井大・工（正）*本田 知己 （正）今 智彦

出光興産（株）（正）関口 浩紀 （正）清水 保典 （正）青木 慎治

Tomomi Honda*, Kon Tomohiko*, Hiroki Sekiguchi**, Yasunori Shimisu**, Shinji Aoki**

*University of Fukui, **Idemitsu Kosan Co.,Ltd

1. 緒言

機械やプラント安定稼働のために状態監視による異常の早期検知の重要性が増しており、機械要素の状態監視の手法として、潤滑油の分析が早期検知に有効といわれている。一方で、総合的なシステムの自動化や自動オンライン異常診断を目的とした AI や IoT への投資割合が、医療や自動車など様々な分野で増加しているように、メンテナンス分野においても AI を活用した異常診断技術の需要が高い。しかし、潤滑油の汚染形態を定量的に分類する方法や潤滑油データをもとに自動かつオンラインで異常診断するための方法は確立されていない。そこで本研究では、潤滑油自体の「色」に着目した新たな潤滑油劣化診断技術である潤滑油画像解析法 LIA (Lubricating oil Image Analysis)^{1,2)}を用いたメンテナンストライボロジーに基づく科学技術を構築することを目的とし、クラスタリングにより LIA で取得可能な RGB 値と二値化パラメータを用いて分類し、潤滑油汚染形態図の構築を試行した。

2. 試料油および解析方法

2.1 試料油

JIS K 2514-1 内燃機関用酸化安定度試験 (ISOT : Indiana Stirring Oxidation Test) に準拠して作製された模擬酸化油 29 サンプル、摩耗粉と見立てた粒子を混入させて作製した模擬汚損油 16 サンプル、実機で使用された 24 サンプル、化学合成油 PAO の新油に精製水を混入させた水混入油 6 サンプルの計 75 サンプルを解析に用いた。

2.2 色相および粒子解析方法

潤滑油画像解析法 LIA は、潤滑油を透過した光をデジタルカメラによって撮影した潤滑油画像の RGB 値から可視領域に吸光を有する化合物の定量分析を行う手法であるが、今回潤滑油の撮影には一般的な CMOS カメラを使用し、ISO 感度を 100、シャッター速度を 1/10000 とした。取得した RAW 画像は「Adobe Lightroom」を用いてホワイトバランスを 5,650 で一定として編集し、色空間は sRGB として TIFF ファイル形式で RAW 現像した。また「WinROOF」を用いて試料油部分の RGB 値を取得した。試料油中の固形汚染物を定量的に評価するために画像解析・計測ソフトウェア「WinROOF」を用いて、独自に考案したしきい値設定アルゴリズムを適用することで二値化を行い、二値化パラメータ（二値化面積率および粒径分布）を算出した。

3. 分析方法

3.1 混合分布正規モデル (GMM)

データ解析による異常検知技術には様々な手法が存在するが、本研究ではデータの集合を似たデータ同士にグループ化して分類し、正常時のクラスタリングの状態と異なるクラスタや正常クラスタから外れるデータを異常とする手法であるクラスタリングを用いた。その中でも今回はデータ全体の分布を複数の正規分布モデルの重み付け線形和で表現する教師なし学習法である混合正規分布モデル (GMM : Gaussian Mixture Model) を用いた。

3.2 シルエット分析

クラスタリング結果に解析者の主観が影響することを避けるために、クラスタリング結果の評価手法の一つであるシルエット分析 (Silhouette analysis) を用いてクラスタ数 n を決定した。ここでは、クラスタリング性能の評価に用いるシルエット係数の平均値が $n=7$ のとき、 $n=4\sim 16$ で解析した中で一番高い値を示したため $n=7$ とした。

3.3 標準化

学習データを構成する一つ一つのデータ（特徴量）は単位の取り方によって数値の大小が異なるため、その重みも異なる。よってデータがもつ重みを均等にして機械学習への影響を取り除き、各データを平均 0、分散 1 に操作した。

3.4 主成分分析

主成分分析 (PCA : Principal Component Analysis) の主な目的は、次元の縮約によりデータの圧縮および可視化を行うことであり、学習データの分散が最大になる方向への線形変換を求める手法である。PCA で次元が削減されたデータは累積寄与率を確認することで、元データから損失された情報量を把握することができる。

4. 分析結果および考察

4.1 主成分分析結果

PCA の過程で算出される固有ベクトルおよび第二主成分までの累積寄与率を Table 1 に示す。第二主成分までの累積

寄与率が 0.849 と高い割合を示したため、4 変数からなるデータ集合を第二主成分まで次元を削減しても元データの情報を十分に有していることが確かめられた。

Table 1 Eigenvectors output by PCA

Principal component	Exposure: 0		Number of particles				Binarized area ratio	Cumulative contribution rate
	G	B	14-21	21-38	38-70	>70		
1	-0.0683	-0.150	0.434	0.434	0.430	0.439	0.468	0.632
2	-0.701	-0.651	0.148	-0.130	-0.182	-0.089	-0.076	0.849

4.2 GMM によるクラスタリング結果

GMM によるクラスタリング結果を Fig. 1 に示す。クラスタ 1 には水混入油以外のすべての油において酸化・汚損状況が初期段階であるサンプルがプロットされた。クラスタ 2 には粒径分布の値が大きいかつ B 値が非常に小さく、酸化と汚損がともに進行した油がプロットされた。クラスタ 3 にはクラスタ 1 と比較して B 値が大幅に減少するなど、より酸化が進行した油がプロットされた。クラスタ 4 にはクラスタ 1 と比較して粒径分布の値が大幅に増加するなど、より汚損が進行した油がプロットされた。クラスタ 5 には水混入油がまとめてプロットされた。クラスタ 6 にはクラスタ 2 と比較して粒径ごとの粒子数、二値化面積率の値がさらに増加した油がプロットされた。クラスタ 7 には粒子数の値が比較的大きいかつ、クラスタ 3 と比較して B 値の値は低いままに G 値も減少した油がプロットされた。

4.3 潤滑油汚染形態図の構築

PCA、クラスタリングおよび各クラスタに属するサンプルデータから考案した分類別に汚染形態を定めた汚染形態図を Fig. 2 に示す。以下に各分類の汚染状況を示す。

- I. 新油および酸化・汚損の進行が比較的少ない良好な状態の潤滑油であり、交換の必要はない。
- II. I に比べて酸化が進行しており、B 値が減少した潤滑油であり、B 値が 0 に近い値を示す油もみられる。汚損においては特に 14-21 μm の粒子数が増加した潤滑油であるが、汚損度は低い。
- III. II に比べて酸化が進行しており、G 値が減少し、B 値が 0 に近い値を示す。汚損度は II と同等である。
- IV. 酸化の進行は比較的少ない状態の潤滑油であり、I と比べて汚損が進行しており、粒径毎の粒子数、二値化面積率が増加している潤滑油である。
- V. IV と比べてさらに汚損が進行しており、酸化状況においても G 値が減少し、B 値が 0 を示すように、IV と比べて酸化が進行している潤滑油である。
- VI. V と同等の酸化度であり、汚損は進行しているが、粒径毎の粒子数、二値化面積率の値がともに V と比べて小さく、V ほど過度に汚損は進行していない潤滑油である。

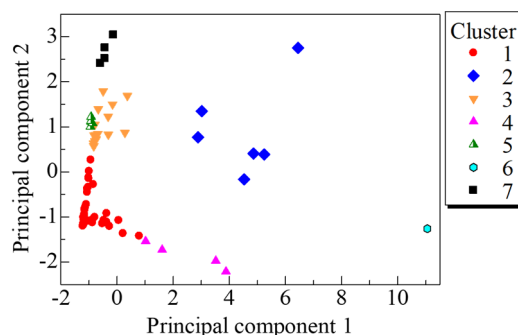


Fig. 1 Classification results using GMM

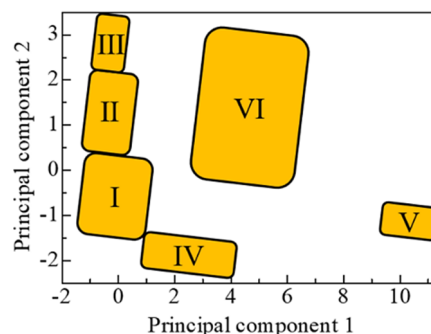


Fig. 2 Lubricant contamination mode diagram

4.4 考察

PCA の過程で算出される固有ベクトルから縦軸と横軸の関係をみると、第一主成分（横軸）の固有ベクトルは二値化パラメータのみ正となり、G、B 値は負となった。第二主成分（縦軸）の固有ベクトルは 14-21 μm のみ正となり、G、B 値を含む他のパラメータは負となった。よって、酸化の進行に伴い第二主成分が大きくなると判断できる。また固有ベクトルの絶対値に着目すると、G 値は第一主成分（横軸）が -0.068、第二主成分（縦軸）が -0.701 であり、第二主成分（縦軸）方向に約 10 倍寄与することがわかる。

5. 結言

LIA によって測定された RGB 値と二値化パラメータをもとにクラスタリング分析を行い、加えて PCA および各クラスタに属するサンプルデータより、分類別に汚染形態を定めた汚染形態図を考案した。

文献

- 1) 中村・本田・今・奥山・関口・小別所：潤滑油画像解析法による色を用いた潤滑油酸化診断技術，トライボロジスト, 68, 6 (2023) 398-410.
- 2) 中村・本田・今・奥山・関口・小別所：潤滑油画像解析法によるオンサイト潤滑油中固形粒子計測技術，トライボロジスト, 69, 2 (2024) 119-133.