

潤滑油センサの液体変速機の異常診断への適用 Application of Oil Sensors to Abnormality Detection of Hydraulic Transmissions

鉄道総研（正）*鈴木 淳一 木川 定之 生駒 一樹

Junichi Suzumura, Sadayuki Kikawa, Kazuki Ikoma

Railway Technical Research Institute

1. 緒言

鉄道車両のエンジンのような駆動用機器の内部に生じる異常摩擦や焼付きを早期に検知し、営業運転中の重大な故障を未然に防止することを目的として、油の鉄粉濃度を測定できるセンサを組み込んだ可搬型の分析装置（図1）を開発した¹⁾。この装置は一般的な元素分析装置と比較して低コストであり、かつ取り扱いが簡便であることから、鉄道車両の日常点検や軽修繕を実施している検修現場に設置し、油分析による機器の異常診断を車両近傍で行うことを想定している。筆者らは、開発した装置を用いて営業車両から採取したエンジン油の鉄粉濃度を分析し、正常値のばらつきを考慮して異常判定基準値を検討した。この方法により、エンジン油に対する現時点での異常判定基準を示し、開発した装置による異常診断（以下、「開発法」と呼ぶ）を適用することで、従来の油分析で使用されている ICP 発光分光分析法による元素分析（以下、「従来法」と呼ぶ）と同等以上の確度で異常診断が可能であることを示した²⁾。

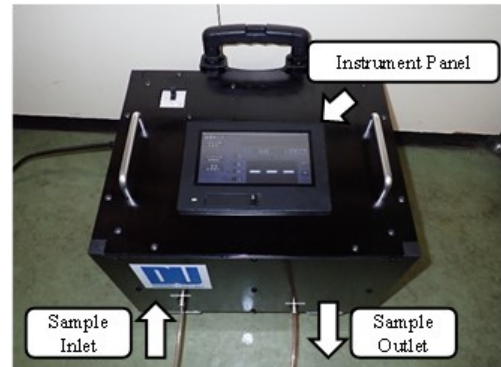


Fig. 1 Developed lubricating oil analyzer.¹⁾

ここでは、開発法について、鉄道車両用液体変速機の異常診断への適用可能性を検討した結果を報告する。液体変速機（以下、「変速機」と呼ぶ）は、トルクコンバータ、クラッチ、歯車などで構成され、変速機油によってエンジンからのトルクを変換しながら、推進軸を介して車軸に伝達する機器である。変速機油には、動力伝達と内部のしゅう動部品の潤滑の両方の役割があり、潤滑する部品も転がり軸受、クラッチ板、歯車など多種類におよぶことから、エンジン油と比較して油中の摩耗粉の粒径や構成元素の範囲が広いと推定される。そこで筆者らは、変速機についてもエンジンと同様、営業車両から採取した油の分析データから異常判定基準を決定する方法を検討した。また、軸受損傷などの異常が発生した変速機から採取した油について、開発法に加えて従来法による分析を行ったほか、レーザー式パーティクルカウンタによる摩耗粉粒径の解析を行い、異常種別ごとの摩耗粉形態の特徴を検討した。

2. 油の分析方法および分析対象の機器

異常判定基準の検討はエンジン油と同様の方法²⁾で行った。はじめに営業車両の正常な状態の変速機から採取した油 47 点について、従来法と開発法で鉄粉濃度を分析し、正常な状態で使用された変速機油の分析値（以下、「正常値」と呼ぶ）を把握した。次に、正常値の平均および標準偏差（ σ ）を考慮し、異常判定基準を検討した。さらに、異常が発生した変速機から採取した油 5 点の分析を行い、決定した判定基準により異常判定を行えるか評価した。

3. 異常判定基準の検討

図2に正常な状態の変速機から採取した油の分析結果を示す。この分析結果から、正常値の平均および標準偏差を計算すると、それぞれ 11.6 ppm、10.9 ppm である。エンジン油の場合は、正常値の標準偏差は 1.5 ppm²⁾であり、変速機油の方が正常値のばらつきが大きいことがわかる。ここで、正常値が正規分布に従うと仮定すると、平均値 $\pm 3\sigma$ の範囲内に全体の 99.7% のデータが入る。正常値について平均値 $+3\sigma$ を計算すると 44.3 ppm であることから、正常値のばらつきの上限であると推定される 45 ppm が異常判定基準として適当であると考えられる。なお、異常判定基準を 45 ppm とする場合、正常な油の 1 点が異常と判定される（図2の□で囲ったプロット）。

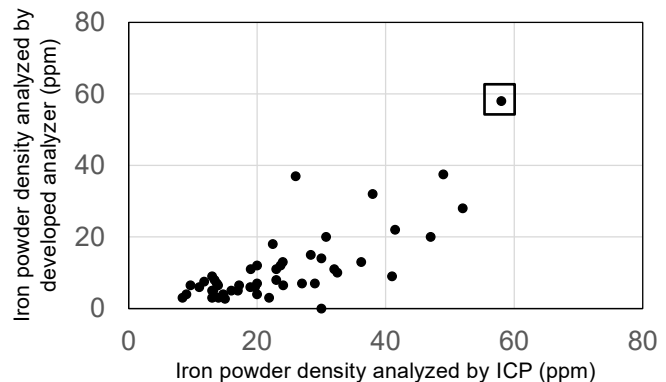


Fig.2 Results of oil analysis of normal samples.

4. 異常判定の妥当性検証

正常値のばらつきから検討した変速機油に対する異常判定基準(45 ppm)の妥当性を検証するために、異常が発生した変速機から採取した5点の油について、開発法によって鉄粉濃度を分析し異常判定基準と照合した。なお、対象とした変速機に発生した異常の種別は、内部の

Table1 Results of abnormality detection.

Sample	Type of abnormality	Iron powder density	Abnormality criteria		
			45 ppm	35 ppm	25 ppm
1	Damaged bearings	51 ppm	OK	OK	OK
2	Damaged bearings	52 ppm	OK	OK	OK
3	Damaged bearings	32 ppm	NG	NG	OK
4	Abnormal wear of clutch plates	32 ppm	NG	NG	OK
5	Abnormal wear of housing	14 ppm	NG	NG	NG

軸受損傷が3点、クラッチプレートの異常摩耗が1点、アルミニウム合金製ハウジングの損傷が1点である。開発法による異常判定の結果を表1に示す。異常が発生した変速機から採取した油の鉄粉濃度は14~52 ppmであり、いずれも正常値の平均値(11.6 ppm)よりも大きい。一方、異常判定基準を45 ppmに設定した場合、5点中3点が異常判定基準を下回り、正常と判定される。すなわち、この場合は異常の半分以上を見逃してしまうことになる。

以上の結果を踏まえ、平均値+2σおよび平均値+σの値を基準に異常判定基準の再検討を行った。なお、正規分布では、平均値±2σ、平均値±σの範囲内に全体の95%、68%のデータが入る。正常値に対して平均値+2σおよび平均値+σの値を計算すると、それぞれ33.4 ppmおよび22.5 ppmとなることから、この値に対応する異常判定基準として35 ppm、25 ppmをそれぞれ設定した。35 ppmを異常判定基準とした場合、5点中3点が異常の見逃しとなるのに対し、25 ppmを異常判定基準とした場合、異常の見逃しは5点中1点となり、異常判定の確度が高くなることがわかる。

5. 異常データの解析

異常が発生した変速機から採取した5点の油について、従来法による元素分析(鉄、銅およびアルミニウム)、およびレーザー式パーティクルカウンタによる摩耗粉粒径の解析を行った結果を表2に示す。

Table2 Results of oil particle analysis.

Sample	Concentration analyzed by ICP			Number of particles (>15μm particles/100ml)
	Fe	Cu	Al	
1	41 ppm	35 ppm	10 ppm	1123279
2	23 ppm	4 ppm	2 ppm	408678
3	58 ppm	43 ppm	17 ppm	931677
4	78 ppm	7 ppm	3 ppm	525194
5	35 ppm	6 ppm	118 ppm	773375
Average of normal samples	24 ppm	21 ppm	3 ppm	88958

異常種別と開発法による異常判定との相関を考慮した場合、軸受損傷が発生した変速機(試料1~3)に対しては、異常判定基準を25 ppmに設定することで全ての試料の異常判定が可能であり、また異常判定

基準を45 ppmとした場合でも3点中2点を異常と判定できることから、異常判定の確度が比較的高いと考えられる。これらの変速機油について摩耗粉解析を行うと、試料1および3については鉄と銅のICP分析値および15 μm以上の粒子数が正常値平均より著しく大きな値である。変速機で使用されている転がり軸受の主な構成成分は鉄(黄銅製の保持器が使用されている一部の軸受では鉄と銅)であるため、軸受に損傷が発生した場合、開発法によって高感度で検出できる粒径の大きな鉄系摩耗粒子が多く発生すると推定される。試料2では15 μm以上の粒子数は正常値平均より著しく大きな値であるが、鉄のICP分析値は正常値平均と同程度である。このことから、試料2では正常な変速機油と比較して大粒径摩耗粒子の比率が大きく、開発法による分析では鉄粉濃度が大きくなったと考えられる。

一方、アルミニウム合金製ハウジングの損傷が発生した変速機(試料5)に対しては、開発法による鉄粉濃度が正常値平均に近い値のため、開発法による異常検知は難しいと考えられる。この試料については、鉄とアルミニウムのICP分析値および15 μm以上の粒子数が正常値平均より著しく大きな値であることから、大粒径摩耗粒子はアルミニウムの比率が鉄よりも著しく大きいと推定される。

6. 結言

鉄道車両の変速機について、営業車両から採取した油の分析データから、開発法により異常を判定する基準を検討した。その結果、今回解析した試料においては、平均値+σの値を異常判定基準とすることで、軸受損傷やクラッチプレートの異常摩耗などの異常を検知できることがわかった。一方、アルミニウム合金製ハウジングの損傷など、大粒径の鉄系摩耗粒子の発生を伴わない異常の検知は難しい。また、エンジン油の場合と比較して正常値のばらつきが大きいことから、正常であるが異常と判定される試料の割合も大きくなる。ただし、そのような試料は今回の場合47点中4点であり、開発法を検修現場での異常診断に適用することで、変速機についてもエンジンと同様に迅速な異常診断と油分析業務の効率化を図ることができると考えられる。

文献

- 1) 木川・鈴村・生駒・高重・藤井・西本：潤滑油微量鉄粉濃度計測装置を用いた鉄道車両用機器の状態監視の検討、第28回交通・物流部門大会(TRANSLOG2019)予稿集。
- 2) 鈴村・木川：, トライボロジー会議2023春 東京 予稿集。