

## 潤滑油センサを用いた気動車用エンジンの異常検知 Condition Monitoring of Diesel Engines Using Oil Sensors

鉄道総研（正）\*鈴木 淳一 木川 定之

Junichi Suzumura, Sadayuki Kikawa

Railway Technical Research Institute

### 1. はじめに

走行中の鉄道車両において、エンジンのような駆動用機器に使われている、軸受などのしゅう動部品に異常摩耗や焼付きなどの損傷が発生すると、機器の異常により輸送障害につながる可能性がある。これらの損傷の兆候を検知する手段として、潤滑油（以下、「油」と呼ぶ）に混入した鉄などの摩耗金属粉の濃度を、ICP 発光分光分析装置などで分析する方法や、磁力により捕集した鉄系摩耗粉の形状や量を解析する方法（フェログラフィ）が行われている<sup>1)</sup>。しかし、現在使用されている分析装置は大型で高価なため、分析装置を配備できる箇所が拠点となる工場に限定されている。そのため、車両所などの区所で採取した油を拠点工場まで輸送する必要がある、迅速な異常診断を行うことや測定頻度を増やすことが難しいという課題がある。また、現在の方法は分析装置の操作やデータ解析にある程度の習熟が必要であり、より低コストで簡便かつ迅速に機器の異常診断を行う方法の開発が求められていた。

このような課題に対し、著者らはエンジンなどの油分析による異常診断に適用可能な、取り扱いが容易で十分な精度を有する可搬型の分析装置（図 1）を開発した。この分析装置には、油の鉄粉濃度を測定できるセンサと、油を機器から吸引しセンサに導入したのちに排出するポンプが組み込まれている。可搬型分析装置では、給油口や検油栓などにチューブを挿入して、ポンプで吸入した油をセンサに導入した後、その油を給油口などから機器に戻すことで、容器に採油せずに油を分析できる<sup>2)</sup>。開発した装置の現車への適用試験、および異常を模擬した機器を使用した台上試験を実施し、車両近傍での油分析による機器の状態診断の可能性を見出した<sup>2)</sup>。

一方、開発した分析装置を、実際の車両検修現場における機器の状態診断に適用するためには、異常を判定するための基準（以下、「異常判定基準」と呼ぶ）を検討する必要がある。そこで著者らは、営業車両から採取した油の鉄粉濃度を、開発した装置を用いて分析し、正常値のばらつきを考慮して異常判定基準を決定する方法について検討するとともに、決定した基準値を用いた機器の状態診断の妥当性について検証した。

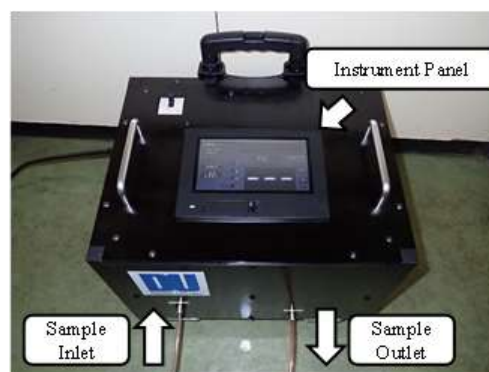


Fig. 1 Developed lubricating oil analyzer.<sup>2)</sup>

### 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に際し、はじめに営業車両から採取した油について、従来の油分析で使用されている ICP 発光分光分析法（以下、「従来法」と呼ぶ）と、開発した鉄粉濃度センサを用いた油分析装置（以下、「開発法」と呼ぶ）により鉄粉濃度を分析し、正常な状態で使用された機器の油の性状（以下、「正常値」と呼ぶ）を把握した。なお、上記の 2 通りの方法は測定原理が異なるため、同じ油を両方法で測定した場合、両者の分析値は必ずしも一致しない。従来法は、酸による溶解などの試料の前処理を行わない場合、軸受などの異常摩耗や焼付きの初期の段階で多く発生する、粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の摩耗粉に対しては検出感度が低下すると言われている。また、試料の量が数 mL 程度と少ないため、サンプリングによる分析値のばらつきが生じやすい。一方、開発法は粒径 3  $\mu\text{m}$  以上の摩耗粉に対する検出感度が高く、一定量の油をセンサ内部に通過させながら平均的な鉄粉濃度が得られるため、分析値のばらつきが生じにくいと考えられる。

ここでは、地方幹線を主に走行する気動車のエンジンから油を採取し、従来法と開発法で分析した鉄粉濃度を比較するとともに、正常値の平均値および標準偏差 $\sigma$ （分析値のばらつき）を求めた。また、不具合が発生したエンジンから採取した数点の油についても同様の分析を行い（以下、分析結果を「異常値」と呼ぶ）、正常値と比較した。

### 3. 油の測定結果

図 2 に気動車エンジン油の分析結果を示す。図 2 において、赤枠（ $\square$ ）で囲ったプロットは不具合が発生したエンジンから採取した 1 点の油（以下、「試料 A」とする）である。試料 A では、従来法による分析値は正常値の平均値（11.3 ppm）と同程度であるのに対し、開発法ではそれよりも顕著に高い値となっている。試料 A では、エンジン内部の潤滑不良等により粒径の大きい鉄粉が多く含まれていると推定される。また、正常な状態で使用されたエンジンから採取した油の中に、開発法による分析値が顕著に大きい試料が 1 点確認された（図 2 の青枠（ $\square$ ）で囲った油：以下、「試料 B」とする）。

試料 A および試料 b に含まれる鉄粉の粒径を詳細に解析するために、レーザー式パーティクルカウンタを使用し、油に含まれる摩耗粉粒径の解析を行った。一般に、機械部品における異常摩耗の初期段階では粒径 10～50  $\mu\text{m}$  以上の摩耗粒子が増加すると言われている<sup>3)</sup>。ここでは粒径 15  $\mu\text{m}$  以上の粒子数を指標として油に含まれる摩耗粉粒径の解析を行った。

表 1 に粒子数分析結果を示す。比較対象として試料 A、b 以外の代表的な正常油 3 点（正常油 1：従来法による分析値が最大の油、正常油 2：開発法による分析値が最大の油、正常油 3：パーティクルカウンタで分析した粒径 15 $\mu\text{m}$  以上の粒子数が最大の油）についても粒子数分析を行った。試料 A は粒径 15 $\mu\text{m}$  以上の粒子数が全試料の中で最大であり、他の油よりもエンジン内部の潤滑状態が悪化していると推定される。試料 b は開発法による分析値が全試料の中で最大であるが、粒径 15 $\mu\text{m}$  以上の粒子数は他の正常油と同等以下である。開発法による分析値が大きい原因の一つとして、採油時に粒径が大きい塵埃等が混入した可能性が考えられる。

以上の検討により、気動車エンジン油については開発法により鉄分濃度を分析し、正常なエンジンから採取した油の平均的な分析値と比較して顕著に分析値が大きい油を、異常発生可能性がある油として判定できると考えられる。ただし、異常の有無を最終的に確定させるためには、これらの油についてパーティクルカウンタやフェログラフィ等による詳細な摩耗粉粒径の解析を行う必要がある。また、異常判定基準を実際の車両検修現場に適用する際には、現場において正常データをさらに蓄積したうえで、定期的に基準値の検証を行い、必要に応じて見直しを行うことが望ましい。

#### 4. 異常判定基準の検討

開発した分析装置を用いて機器の状態診断を行う際の異常判定基準を検討した。開発法により分析したエンジン油の正常値は、分析値が大きく外れた試料 b を除いて、平均値は 4.6 ppm、標準偏差は 1.5 ppm である。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 9.1 ppm となり、約 10 ppm が正常値のばらつきの上限であると考えられる。エンジン油の異常値が 30 ppm（試料 A）であることを考慮すると、エンジン油に対する異常判定基準値を 10 ppm から 30 ppm の間に設定することが考えられる。しきい値を低く（10 ppm に近い値）設定した場合は、正常であっても異常判定となる油が多くなり、しきい値を高く（30 ppm に近い値）設定した場合は、異常を見逃す可能性がある。正常値のばらつきの上限と異常値からの余裕しを考慮し、現時点では気動車エンジン油の異常判定しきい値を、両者の中間値である 20 ppm とすることが考えられる。

以上のように気動車エンジン油に対する異常判定しきい値を 20 ppm とした場合、図 2 に示した営業車両から採取したエンジン油全 49 点のうち、2 点（全体の約 4 %）が異常判定となった。そのうち 1 点が、実際に不具合が発生したエンジンから採取した油（試料 A）である。試料 A については、従来法による分析値は正常値の範囲内であり、異常判定ができないのに対し、開発法では正しく異常判定を行える。また、1 点の正常値（試料 b）が異常判定となるが、3 章で述べた通り、パーティクルカウンタによる詳細な摩耗粉分析を行えば、正常判定となる。このことから、開発法では従来法と同等以上の確度で異常診断が可能である。

#### 5. おわりに

エンジンなどの油分析による異常診断に適用することを目的として開発した、取扱方法が容易で十分な精度を有する分析装置について、営業車両から採取した油の分析データを収集し、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、開発法では従来法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。今後、開発した油分析装置を検修現場での油分析による機器の異常診断に適用することにより、迅速な異常診断と油分析業務の効率化が期待できる。

#### 文献

- 1) 鈴木・細谷・中村・曾根：油中摩耗粉分析によるディーゼルエンジンの故障診断, Japan Railway Engineering, Vol.132, No.3(1995).
- 2) 木川・鈴木・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.
- 3) 増子・太田：フェログラフィについて, 日石レビュー, Vol.27, No.5, pp.46-52(1985).

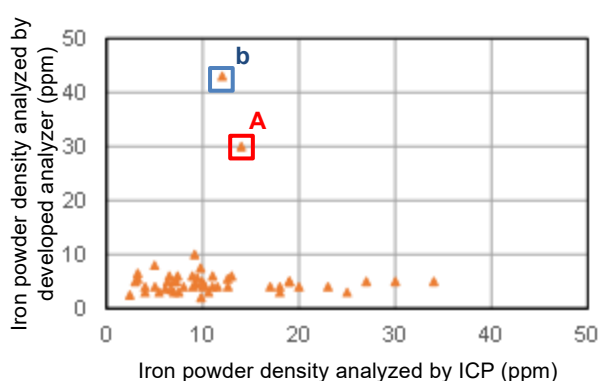


Fig.2 Results of engine oil analysis.

Table1 Results of oil particle analysis.

Sample	Iron powder density (ppm)		Number of particles larger than 15 $\mu\text{m}$ in diameter (particles/100mL)
	ICP	Developed analyzer	
A	14	30	12584
b	12	43	5756
Normal oil, 1	34	5	2458
Normal oil, 2	9	10	2683
Normal oil, 3	5	8	7321