

# 可搬型潤滑油分析装置による気動車エンジン および変速機の異常診断

鈴木 淳一\* 木川 定之\* 生駒 一樹\*  
高重 達郎\*\*

Abnormality Diagnosis of Diesel Engines and Hydraulic Torque Converters by using Portable Lubricating Oil Analyzer

Junichi SUZUMURA Sadayuki KIKAWA Kazuki IKOMA  
Tatsuro TAKASHIGE

The authors newly developed a portable lubricating oil analyzer equipped with the on-line iron powder concentration sensor. This paper describes experiment results for confirming applicability of the analyzer to abnormality diagnosis of diesel engines and hydraulic torque converters at a facility of maintenance and repair. First, it was confirmed that the analyzer could analyze on-site the iron powder concentration of sampled oil in a diesel engine, easily and in very short time. Secondly, an abnormality simulating test of torque converter was also conducted. In the test, foreign body was mixed in the lubricated part of the torque converter for confirming its applicability to abnormality diagnosis. From these test results, it was confirmed that the analyzer was effective for abnormality diagnosis of railway vehicle driving equipment.

キーワード：潤滑油，油分析，気動車，ディーゼルエンジン，液体変速機

## 1. はじめに

走行中の車両において、エンジンや変速機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、機器の異常により重大な事故や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し、営業線での機器の異常発生を未然に防止する手段として、摩耗により発生して潤滑油（以下、「油」と呼ぶ）に混入した鉄などの金属粉の濃度をICP（誘導結合プラズマ：Inductively Coupled Plasma）法などの発光分光分析装置を用いて分析する方法や、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）が採用されている<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であることから、分析装置の配備箇所が拠点となる工場などに限定されている。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り、異常診断の迅速化や分析頻度の増加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、技術継承や検修業務効率化の観点から、油分析による機器の異常診断をより低コストで簡便かつ迅速に行う方法の開発が求められている。

鉄道総研では、オンライン鉄粉濃度センサを用いた油分析に着目し、駆動用機器の異常診断への適用を検討している。本研究ではセンサ内部を通過する油の鉄粉濃度を測定できるオンライン鉄粉濃度センサを組み込んだ、操作が容易な油分析装置を開発した。また、現車への適用試験、ならびに機器の異常模擬試験などを行い、車両検修現場における機器の異常診断への開発した油分析装置の適用について検討した。

## 2. 油分析装置の開発

### 2.1 分析装置の原理および概要

過去の検討において、エンジンや変速機などの駆動用機器の異常検知を目的として、センサ内部を通過する油の鉄粉濃度を電氣的に計測できる市販の鉄粉濃度センサの性能を評価した。そして、駆動用機器内部からポンプで吸入した油を、センサを通過させて分析する定置試験装置を試作し、営業車両で使用された油の分析やエンジンの異常模擬試験に供した油の分析を行って、鉄粉濃度センサの異常検知への適用について検討した<sup>2) 3)</sup>。

このセンサは、油のオンライン分析（監視対象機器にセンサを組み込み、任意のタイミングで分析する方法）およびインライン分析（分析するタイミングで機器とセンサを接続して分析する方法）の両方に適用可能である。

本研究では、車両所などの区所において、鉄粉濃度セ

\* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

\*\* 車両制御技術研究部 動力システム研究室

ンサをインライン分析に適用することを目的として、上述の定置試験装置をベースに、検修現場での使用を考慮した分析装置を開発した。分析装置の外観を図1に、その構成を図2に、主な仕様を表1にそれぞれ示す。

分析装置は約400mm四方の箱型で、重量は約20kgである。検修現場で分析装置を車両の近傍まで運搬し、駆動用機器に接続して油分析を行うことが可能である。分析装置はセンサのほか、油を機器から吸引してセンサ部に循環させるポンプと、各部の制御やデータの表示および収集を行うタッチパネル式の制御部で構成されている。装置の給油口に接続した油導入チューブと排油口に接続した油排出チューブを駆動用機器の給油口や検油栓などに挿入し、ポンプで吸入した油をセンサに通過させ、排油口から機器側に戻すことで、容器に採油せずに油分析が可能である。なお、装置の開発に要した全費用は一般的なICP発光分光分析装置の1/5以下である。

鉄粉濃度センサは、鉄等の磁性を有する粒子が2個のコイルを通過する際にインダクタンスが変化することを利用して磁性粒子濃度を測定する。通過型のセンサによる分析結果はセンサ内部の流量の影響を受けやすいことから、ピストンにより一定量の油をセンサに送り込める構造に改良している。ポンプ駆動部の摩耗粉が分析結果に影響しないように、内部が樹脂製のポンプを使用している。分析装置内部の油経路の分岐部や曲折部をできる限り減らすことで、分析時間を短縮するとともに、装置内部に摩耗粉が滞留することを防止している。また、定置試験装置として使用することを考慮して、装置内部の油経路を短くすることで、100mL程度の油量でも分析できるようにしている。

測定操作はすべて装置上面のタッチパネルで行い、1回のみ測定のほか、一定間隔で連続して測定するように設定することも可能である。測定を開始すると数回(ソフトウェア上で設定可能)の測定操作を自動で行い、その平均値をppm(0.0001%)単位でパネルに表示する。また、測定のための内部洗浄、油の置換についても専用のモードを設けており、タッチパネルから行える。1回の測定に要する時間は、油の粘度により異なるが、駆動用機器で一般に使用されている銘柄の油であれば、概ね60秒以内である。測定結果はパネルに表示されるほか、装置に内蔵されているSDカードに自動的に記録される。

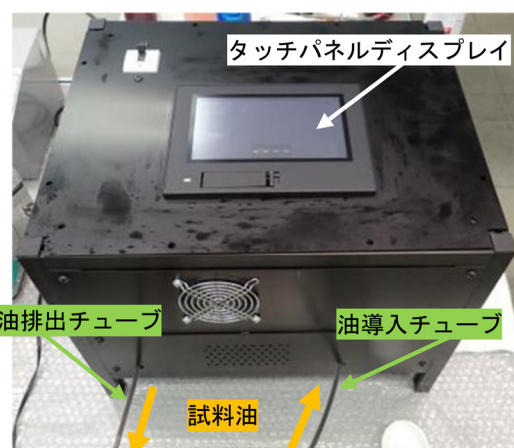


図1 開発した油分析装置の外観

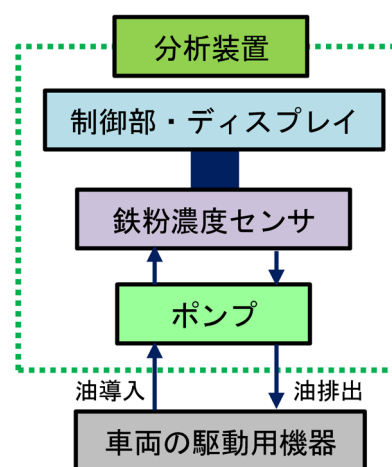


図2 油分析装置の構成

## 2.2 車両への適用試験

開発した分析装置について、現車の駆動用機器への適用可能性を確認するために、鉄道総研所有の試験車両(キハ30系)などを使用し、エンジン油および変速機油のインライン油分析試験を実施した。インライン油分析の具体的な手順は以下のとおりである。

### ①油経路の洗浄

分析対象油と同じ銘柄の未使用油を使用して分析装置内部の油経路を洗浄する。なお、同じ銘柄の油を連続して測定する場合で、直前に測定した油の性状に異常がなければこのステップは省略可能である。

### ②分析装置の設置

分析装置を駆動用機器の近傍に設置し、油導入チューブ

表1 油分析装置の主な仕様

サイズ	幅: 420mm, 奥行: 380mm	分析時間	約 60 秒/回
	高さ: 400mm	分解能	1ppm
重量	約 20kg	測定精度	±5ppm
電源	AC100V	測定範囲	0~500ppm

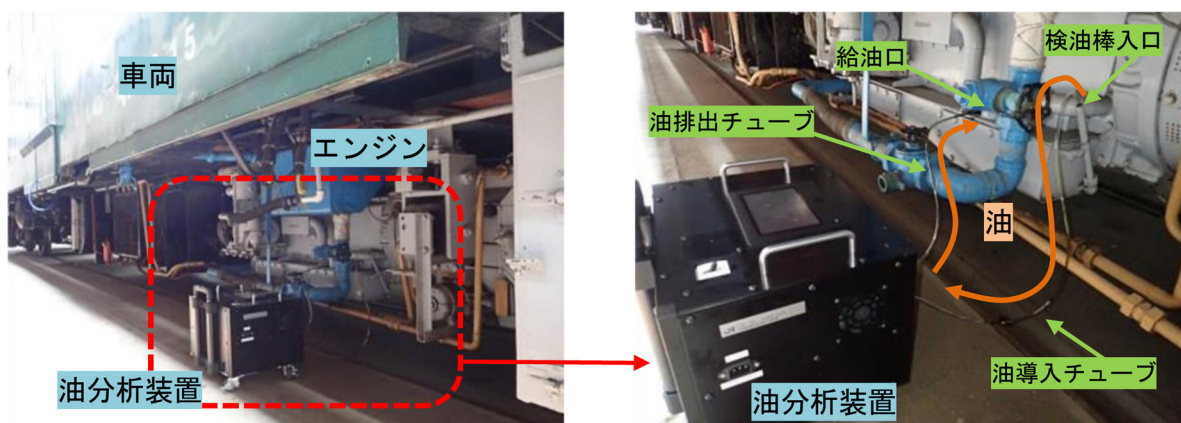


図3 エンジン油のインライン分析試験（キハ30系試験車両の例）

ブと油排出チューブを機器の給油口などに挿入する。

### ③油経路の置換

分析前に分析対象油を分析装置内部に循環させ、油経路を置換する。油経路は未使用油で洗浄されているため、分析装置から排出される油は機器に戻ることができる。

### ④分析対象油の分析

キハ30系車両のエンジン油のインライン油分析試験の状況を図3に示す。供試エンジンをアイドリングで数分間回転させ、停止直後に油導入チューブを検油棒の入口、油排出チューブを給油口にそれぞれ挿入し、オイルパン底部の油について、鉄分濃度を分析できることを確認した。

変速機の場合は、油導入チューブおよび油排出チューブを給油口に挿入することで分析が可能である。しかし、一部の型式の変速機では、給油口からオイルパンまでの経路がエンジンと比較して複雑であり、軸やギヤなどがチューブに干渉することから、ホース先端がオイルパンに到達せず、正常に採油できないか、採油できたとしても毎回オイルパン内の同じ位置から採油することが難しいため、採油位置により分析結果のばらつきが生じることが懸念された。そこで、測定之都度、安定して同じ位置から採油できるように、変速機の排油栓に油導入チューブを接続して採油できる構造とした（図4）。

インライン油分析に必要な時間は、機器1台当たり20～30分程度であり、従来の区所で採取した油を分析拠点の工場に輸送して分析を行う方法と比較して、油分析に要する時間を大幅に短縮できる。

## 3. 気動車用変速機の異常模擬試験

駆動用機器に異常が発生した場合の油の性状を把握し、インライン分析試験結果を用いた異常診断の基礎となるデータの取得を目的として、台上試験において気動

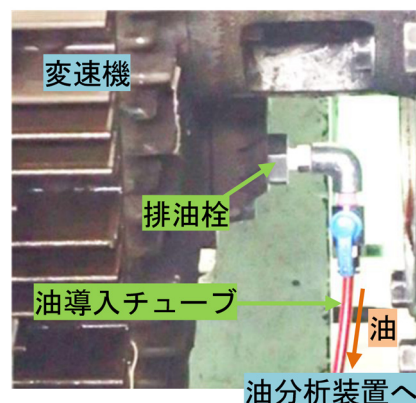


図4 変速機排油栓からの採油

車用変速機を回転させ、変速機油中への異物混入により内部の異常摩耗を発生させる試験（以下、「異常模擬試験」と呼ぶ）を実施した。なお、2.1節で述べたとおり、過去に実物の気動車用エンジンをを用いた異常模擬試験を実施し、開発した油分析装置に組み込まれている鉄粉濃度センサについてはエンジンの異常検知、状態監視に適用できる可能性を示した<sup>2) 3)</sup>。一方、鉄道車両用液体変速機については、変速機メーカー等も含めて、実機を使用した異常模擬試験がこれまでに行われていないため、異物混入による変速機内部の異常摩耗が発生した際の変速機の機能や油の性状に関する知見は非常に少ない。そこで、営業車両で使用されている実物の液体変速機を使用した異常模擬試験を実施し、開発した装置をインライン分析に適用することによる異常検知の可能性について検討した。

### 3.1 試験方法および試験条件

異常模擬試験には図5に示す台上試験装置を使用した。供試変速機として、DW21型液体変速機を使用し、駆動用エンジン（カミンズ製、型式N-14E-R、最高出力331kW）で供試変速機の入力軸を回転させる。また、供

試変速機の出力軸には水ブレーキ負荷装置（フチノ製作所製、型式 DFWR-3.0S、最高吸出力 367kW）を接続することにより、負荷を加えた。異常模擬の方法は、過去に実施したエンジンの異常模擬試験と同様に、変速機油中に異物として粒径が約  $3\mu\text{m}$  の炭化ケイ素（SiC）微粒子を混入した状態で回転試験を行い、軸受やギヤ、クラッチプレートなどのしゅう動部品の摩耗を促進させることとした。

試験条件を表 2 に示す。はじめに SiC を混入しない条件（SiC 濃度 0ppm、試番 1-1 ～ 2-2）で合計 151 分間の試験を実施し、正常時のデータを収集した。その後、油中に SiC を段階的に混入して、油中の SiC 濃度を 50ppm ～ 1000ppm に設定したうえで回転試験を行った。SiC を混入した試験では、原則として 1 試番あたり約 100 分の連続回転試験を、変速機入力回転数  $2100\text{min}^{-1}$ 、負荷  $1000\text{Nm}$  の条件で実施した（試番 2-3 ～ 4-3）。しかしながら、試番 4-3 終了時に直結クラッチ油圧の低下が見られたため、その後の試番（試番 5-1 ～ 6-2）では、SiC 混入量と負荷条件および運転時間は、直結クラッチ油圧を確認しながら適宜設定した。各試番終了時に回転を停止し、油中の SiC 濃度を調整したのちに次の試番を実施した。試験終了までに直結不良や焼付きなどの運転不能状態には至らなかった。

開発した分析装置を変速機近傍に置き、図 4 に示すように油導入チューブを変速機の排油栓に設置し、油排出チューブを変速機の給油口に挿入した。油中の鉄分濃度は、回転試験を継続しながら約 5 分毎に測定した。

すべての試番を実施した後に、供試変速機の解体調査を行い、変速機内部の軸受、ギヤ、クラッチプレート、オイルポンプおよびソレノイドなどのしゅう動部品を中心に、外観観察および一部の部品については顕微鏡による観察を行い、摩耗状態を調査した。

### 3.2 変速機油の鉄分分析結果

変速機の異常模擬試験における油分析結果を図 6 に示す。SiC の混入により油中の鉄分濃度が増加する傾向が見られた。また、各試番の開始直後（停止状態から回転試験を開始した直後）が最も鉄分濃度が高く、最大約

表 2 変速機異常模擬試験の試験条件

試番	SiC 濃度 (ppm)	試験時間 (min)	試番	SiC 濃度 (ppm)	試験時間 (min)
1-1	0	26	4-1	200	100
1-2	0	13	4-2	250	105
1-3	0	34	4-3	300	104
2-1	0	37	5-1	300	56
2-2	0	41	5-2	300	103
2-3	50	102	5-3	500	46
2-4	50	102	5-4	500	11
3-1	100	99	6-1	800	66
3-2	100	104	6-2	1000	73
3-3	150	104			

400ppm まで上昇した後、鉄分濃度が減少する傾向が見られた。この理由として、変速機の底部に沈殿していた摩耗粉が、回転に伴う油のかくはん、循環により分散し、一部がオイルフィルタに捕集されたことが考えられる。

そこで、各試番における試験終了直前の値を油が均一になった状態での分析値とみなし、分析結果を整理した。その結果を図 7 に示す。なお、試験時間が短く、十分に油がかくはん、循環されていない可能性がある試番 5-1、5-3、5-4、6-1、6-2 は整理対象から除外した。また、SiC 混入前の試番 1-1 ～ 2-2 は 1 つの試番として整理した。図 7 から、試験終了直前の値で整理した場合は、SiC を混入すると鉄分濃度は 45ppm 以上に増加するが、SiC の量を増やした場合でも鉄分濃度は急激に上昇せずに最大で 65ppm 程度であることがわかる。SiC 混入量の増加と比較して鉄分濃度の増加が緩やかである理由として、変速機の潤滑油回路の構造上、コンバータ部に油が滞留し、沈殿した SiC が吐出されにくいいため、変速機内を循環する油に含まれる SiC の濃度が、実際に混入した SiC の量から計算される SiC 濃度よりも小さいことが考えられる。

### 3.3 供試変速機内部の摩耗状態

試験後に供試変速機の解体調査を行い、摩耗状態を調査した。また、比較対象として、油中に SiC を混入した



図 5 変速機異常模擬試験の状況

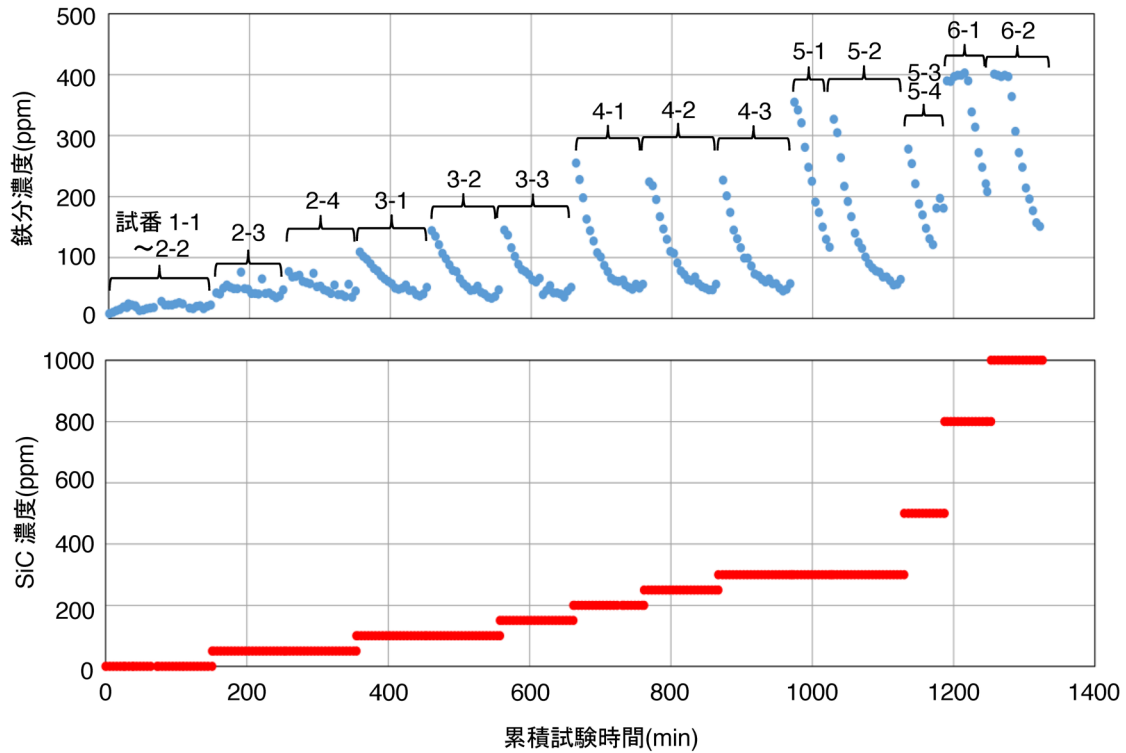


図6 変速機異常模擬試験における油の鉄分分析結果（全データ）

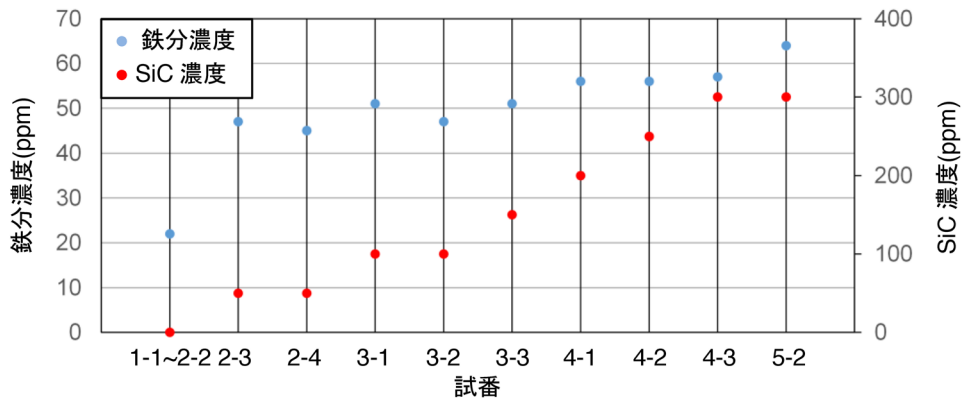


図7 変速機異常模擬試験における油の鉄分分析結果（試験終了直前）

台上試験を実施していない別の変速機の解体調査も実施した。

摩耗状態調査の結果を図8に示す。供試変速機のコンバータスラスト玉軸受の内輪および転動体（玉）の表面に面荒れが認められた。一方、ギヤ、クラッチプレートおよびオイルポンプなど、その他のしゅう動部品には外観上の異常は認められず、SiCを混入していない比較対象との差は見られなかった。また、3.1節で述べたとおり、試験中に直結クラッチ油圧が徐々に低下したが、クラッチ切換弁回路、ソレノイドおよび油回路に異常は見られなかった。

SiCの混入によりコンバータスラスト玉軸受の摩耗が

促進したことが、油中の鉄分濃度が上昇した一因となった可能性がある。しかし、コンバータスラスト玉軸受の外観から判断すると、その摩耗は顕著ではなく、この鉄分濃度の上昇がコンバータスラスト玉軸受の摩耗のみで引き起こされたとは考えにくい。その他のしゅう動部品に外観上の異常は見られなかったが、SiCの混入により変速機内部のしゅう動部品が全体的に少しずつ摩耗したものと推定される。これより、変速機内部に顕著な異常摩耗が発生していない状態であっても、開発した油分析装置によるインライン油分析により、変速機の機能低下の兆候を検知することができると考えられる。

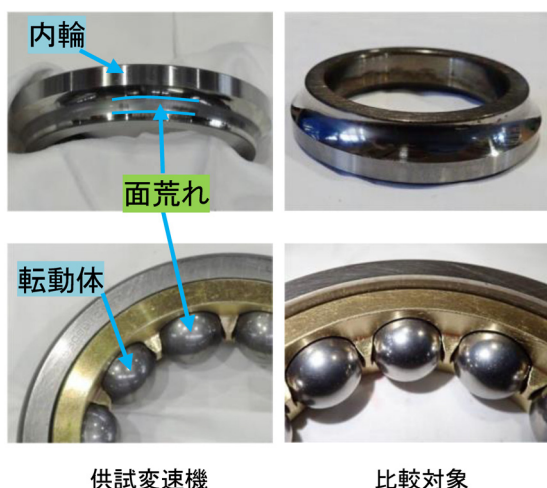


図8 コンバータスラスト玉軸受の摩耗状態

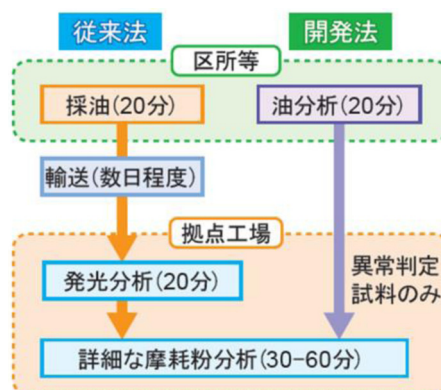


図9 従来法と開発法の比較

#### 4. 潤滑油分析による駆動用機器の異常診断への適用

以上述べたように、開発した油分析装置（開発法）を用いることで、従来の発光分光分析法（従来法）と比較して、より低コストかつ短時間で変速機などの機器の異常を検知できる可能性があることがわかった。本章では、開発法の車両検修現場への適用方法ならびに期待される効果について述べる。

車両検修現場への適用方法として、開発した油分析装置を車両所等の区所に配備し、交番検査時等に開発法による異常診断を行うことが考えられる。従来法と開発法の油分析による異常診断フローを図9に示す。従来法では機器から採取したすべての油を、分析を行うことができる拠点となる工場に輸送する必要があるのに対し、開発法では区所等で採油に必要な時間と同等の時間でインライン油分析による異常診断をその場で行うことができる。また、ここでは気動車と機関車のエンジンおよび変速機を異常診断の対象機器としたが、機器の給油口などを利用して油を分析装置内に導入することができれば、エンジンや変速機以外の歯車箱、減速機、定速回転装置（CSU）および空気圧縮機などの異常診断にも開発法の適用が可能である。

実際の車両検修現場において、開発法を機器の異常診断に適用する際には、対象の機器に対して適切な異常判定基準を検討する必要がある。異常判定基準を決定する方法としては、以下が考えられる。

- ① 検修現場において、正常な状態で使用された機器から採取した油を油分析装置で分析することにより、正常時の油の性状に関するデータを蓄積する。
- ② これらのデータから正常値の範囲を把握し、これから外れた値を異常と判定する。

#### 5. まとめ

オンライン鉄粉濃度センサを組み込んだ、操作が容易な油分析装置を開発した。また、現車への適用試験、ならびに機器の異常模擬試験などを行い、開発した油分析装置の、車両検修現場での機器の異常診断への適用可能性を示した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 開発した油分析装置を用いることにより、車両近傍において、約20分で油の鉄分濃度を分析できる。
- (2) 開発した油分析装置によるインライン油分析を、変速機などの機器の異常検知に利用できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究において、油分析装置は鉄道総研と株式会社IHI原動機が共同で開発した。株式会社IHI原動機の藤井幹氏、西本功氏をはじめ関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

#### 文献

- 1) 鈴木政治, 細谷哲也, 中村和夫, 曾根康友: 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) 真鍋慎一, 鈴木淳一, 木川定之, 岩堀展夫, 柳和朗, 小澤泉: 潤滑油センサを用いた車両床下機器の状態監視手法, 第21回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL) 講演論文集, S2-6-3, 2014
- 3) 鈴木淳一, 木川定之: オンライン潤滑油センサを用いた車両用機器の異常検知, 第23回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL) 講演論文集, S2-8-4, 2016