

製品紹介

油状態診断システムの開発

吉田 尚 弘 ・ 中 村 瞭 平

1 はじめに

近年、製造業をはじめとする様々な産業分野において、設備の老朽化の進行や労働人口の減少、熟練技術者の不足といった構造的な課題が顕在化している。これに伴い、従来の経験や人的判断に依存した保全体制の維持が困難となり、設備メンテナンス業務の高度化・効率化が強く求められている。加えて、設備停止による生産ロスの最小化や品質の安定確保の観点からも、状態に応じた適切なメンテナンス、いわゆるCondition Based Maintenance（状態基準保全、以下CBM）への移行が重要となっている。

更に、近年ではSDGsやカーボンニュートラルへの対応といった社会的要請の高まりを背景に、設備の長寿命化や資源・エネルギー使用の最適化が求められている。このような観点からも、設備状態を的確に把握し、過剰な保全や突発故障を未然に防止するための最適メンテナンス技術への注目が一層高まっている。

本報では、カヤバが油圧機器向けに開発した油状態診断システム（以下、本システムとする）¹⁾について、そのシステム構成及び実機への適用事例を紹介する。

2 油圧機器のメンテナンスの現状と課題

油圧機器におけるメンテナンスでは、作動油や潤滑油（以下、油と総称する）の状態管理が極めて重要であり、油の劣化や汚損は機器性能の低下や故障の主要因となる。このため、従来は油の管理を中心とした保全が行われており、代表的には一定期間ごとに油交換や点検を実施するTime Based Maintenance（時間基準保全、以下TBM）や、採油したサンプルを分析することにより状態を把握するCBMが広く用いられている。

しかしながら、TBMによるメンテナンスでは、使用環境や負荷条件の違いによる劣化進行のばらつ

きを十分に反映することができず、過剰メンテナンスやメンテナンス不足につながる可能性がある。一方、採油分析によるCBMは、油の劣化状態を定量的に把握できる利点があるものの、サンプリング作業や分析に手間と時間を要するほか、分析結果の解釈や適切な対応判断には十分な専門知識が必要となる。このため、最適なメンテナンスタイミングの見極めや、必要なメンテナンス内容の選定には依然として熟練者の経験に依存する部分が多いのが実情である。

また、近年では油圧機器においてもIoT技術の導入が進み、運転データや各種センサ情報の収集が可能となりつつあるが、実機が使用される環境条件や負荷状況、更には使用される油種や管理状況が多様であることから、取得したデータを汎用的な診断や劣化予測に活用することは容易ではない。その結果、油の劣化診断や機器故障の予兆検知といった予知保全技術については、一部の特定用途を除き汎用的な形で普及には至っていないのが現状である。

3 カヤバの油状態診断システム

このような背景から、油の状態をリアルタイムに把握し、現場において簡便かつ継続的に診断可能な技術の確立が求められている。特に、従来の採油分析に依存した手法では対応が困難であった、運転中の状態変化の把握や迅速な異常検知を実現し、専門知識に依存しない形でメンテナンス判断を支援する仕組みの構築が重要となっている。

本システムは、これらの課題を解決することを目的として、油の状態変化をセンサにより常時監視し、定量的な指標として可視化することで、油の劣化や汚損の進行を把握するとともに、機器状態の診断及び異常の早期検知を可能とするものである。これにより、従来のTBM及び採油分析に依存した保全手法を補完し、最適なメンテナンスタイミングの判断や保全作業の効率化に寄与することを狙いとしている。

3.1 油状態診断システム概要

本システムの概要を図1に示す。本システムは、工場設備や建設機械など、多様な分野で使用される油圧機器を対象として設計されており、稼働環境などに柔軟に対応可能な汎用性を有している。本システムは、専用の油状態センサ、取得データをクラウド環境へ送信する通信機器、データの蓄積・分析を行うクラウド、及びユーザが油の状態を確認するためのWebアプリにより構成される。

本システムでは、油状態センサから取得した各種データをリアルタイムに収集・蓄積し、クラウド上で可視化および分析処理を行うことで、油の劣化や汚損の進行状況を連続的に把握することができる。更に、蓄積データを基にした診断ロジックにより、従来は把握が難しかった劣化傾向の変化や異常の兆候を早期に検出できる点に特徴がある。これにより、各種油圧機器の運転状態と油の劣化状況との関係性を把握し、設備状態の定量的な評価が可能となる。

また、本システムを活用することで、油の劣化に顕著な傾向が確認された場合には、従来よりも早い段階で適切なメンテナンスを実施することができ、突発的な故障の未然防止に寄与する。一方で、油の状態が健全に維持されている場合には、従来の時間基準によるメンテナンスタイミングにとらわれることなく、メンテナンス周期の延伸が可能となる。これにより、設備の信頼性を確保しつつ、不要な交換作業や点検工数の削減を実現できる。

更に、メンテナンス周期の最適化は、油の使用量及び廃油量の削減にもつながり、廃棄物低減及び資源有効活用の観点から環境負荷低減に寄与する。このように、本システムは、設備保全の高度化と効率化を実現するとともに、経済性及び環境性の両面において付加価値を提供するものである。

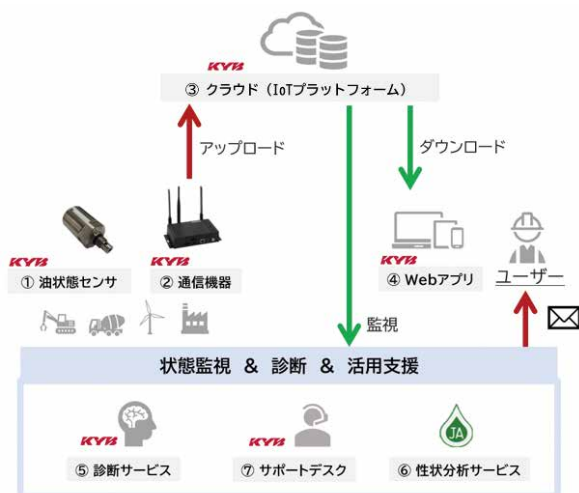


図1 油状態診断システム概要図

3.2 油状態センサ

油圧機器におけるトラブルの要因については、その約6割が油の劣化に起因するとの報告もあり、油の状態変化を把握することは機器の健全性を維持するうえで極めて重要であるとされている²⁾。特に、油の酸化劣化や熱劣化に伴う性状変化、あるいは水分や固体粒子の混入といったコンタミネーションは、潤滑性能の低下や部品の摩耗促進を引き起こし、最終的には機器故障に直結する要因となる。このため、油の劣化及び汚損の進行状況を適切に把握することは、油圧機器の状態監視及び予防保全において非常に重要な役割を担っている。

また、油圧機器の劣化過程と各種診断手法の関係については、図2に示すようなモデルで整理されることが知られている。これによれば、機器の劣化初期においては摩耗や化学的劣化に起因する微小な変化が先行して発生し、その後、振動や温度といった物理的な異常として顕在化する。この中で油分析は、摩耗粉の増加や油性状の変化を捉えることにより、振動や温度の変化として現れる以前の比較的早期の段階で異常兆候を検知可能な手法であるとされており、高い早期検知性を有する診断技術として位置づけられる³⁾。

しかしながら、従来の油分析は採油及びオフライン分析を前提としているため、診断結果の取得までに時間を要し、連続的な状態把握や即時的な異常検知には課題があった。このような背景から、油圧機器の状態診断の高度化を目的として、油の状態変化をリアルタイムかつ高精度に検出可能な油状態センサの開発を行った。本センサにより、従来の油分析の利点である早期検知性を維持しつつ、連続監視による診断の高度化と迅速化を実現することを狙いとしている。

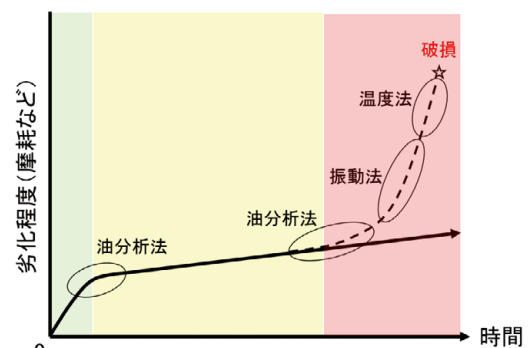


図2 油圧機器の劣化と診断法

3.2.1 油状態センサ検出パラメータ

一般に、油の性状分析は専門の分析機関にて実施され、酸化劣化の進行を示す全酸価（TAN）や、汚損状態を把握するための汚染度、金属摩耗粉の元素分析、水分量といった複数の指標が用いられている⁴⁾。これらの分析項目はそれぞれ油の劣化や汚染の側面を評価するものであり、油の健全性を総合的に判断する上で重要な役割を担っている。

一方で、これらの性状分析結果と油の電気的特性との関係性について検討した結果、従来の分析項目と比誘電率および導電率との間には相関関係が存在することが確認されている（図3）。例えば、酸化劣化に伴う極性物質の生成は比誘電率の変化として現れ、また水分やイオン性物質、摩耗粉の増加は導電率の上昇として反映される。このように、油中の化学的・物理的变化は電気的特性の変化として表出するため、比誘電率及び導電率を用いることで、複数の劣化要因や汚損状態を統合的に捉えることが可能となる。

以上の知見に基づき、本開発では油状態センサの検出パラメータとして、比誘電率及び導電率を採用した。これにより、従来の油性状分析により得られる情報を簡便かつ連続的に把握することが可能となり、リアルタイムでの状態監視及び早期異常検知の実現が可能となる。

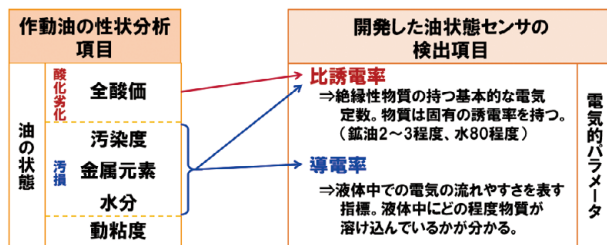


図3 一般的な性状分析項目と油状態センサ検出値との関係

3.2.2 油状態センサ検出原理

油状態センサにおける比誘電率および導電率の検出原理模式図を図4に示す。本センサでは、測定対象である油中に配置した電極に所定の電圧を印加し、その際に得られる電流応答を基に電気的特性を評価する構成としている。電極間に形成される電界と油の電気特性の相互作用により、電流応答には油の誘電特性及び導電特性が反映される。

具体的には、印加信号に対する応答から電極間の静電容量及び抵抗値をそれぞれ検出し、これらのパラメータを基に測定対象油の比誘電率及び導電率を算出する。静電容量は油の誘電特性に依存し、比誘

電率の指標として扱われる一方、抵抗値は油中の電荷移動のしやすさに対応し、導電率の算出に用いられる。

このように、本センサでは単一の電極系により誘電特性と導電特性の両方を同時に取得可能であり、油の状態変化を反映する2つの電気的パラメータを一体的に計測・出力する構成としている。これにより、油の劣化及び汚損の進行をリアルタイムに把握することが可能となる。

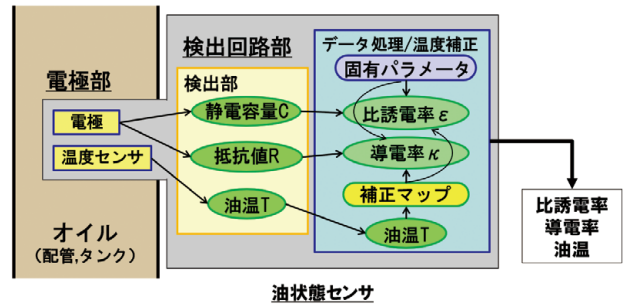


図4 油状態センサの検出原理 模式図

3.2.3 油状態センサ仕様

油状態センサの外観を写真1、主な仕様を表1に示す。本センサは、油圧機器への組み込み及び後付け搭載の双方を想定し、検出部を含めた外形寸法をφ42×89mmとすることで小型化を図っている。これにより、限られた設置スペースにおいても適用可能な構造としている。

また、電源電圧はDC 9～32Vの広範囲に対応しており、産業機械や建設機械に一般的に用いられる電源システムでの安定動作を可能としている。更に、センサ出力方式にはCAN（Controller Area Network）通信を採用しており、高い耐ノイズ性を有するとともに、車載・建設機械分野における既存ネットワークとの親和性を考慮した仕様となっている。

これらの仕様により、本センサは多様な油圧機器への適用を容易にし、現場環境における信頼性の高いデータ取得及びシステム連携を実現する構成としている。



写真1 油状態センサ外観

表 1 油状態センサ仕様

項目 Items	開発センサ仕様 Specifications of the Sensor Under Development
測定可能項目 Measurable parameters	比誘電率, 導電率, 油温 Relative permittivity, Conductivity, Oil temperature
大きさ Sensor dimensions	Φ42×89mm (コネクタ部除く) (excluding the connector part)
電源電圧 Power source voltage	9V to 32V DC
消費電流 Operating current	Max. 80mA, average 12mA (DC12V)
出力インターフェイス Output interface	CAN
使用可能雰囲気温度 Permissible ambient temperature range	-40℃ to +85℃
使用可能油温範囲 Permissible oil temperature range	-20℃ to +100℃
耐圧性 Pressure resistance	1.0MPa以下 1.0MPa or less
防水・防塵性 Water and dust resistance/IP rating	IP67
耐振性 Vibration resistance	10G (JIS D 1601)
耐衝撃性 Shock resistance	50G (IEC 60068-2-27)
取付けねじサイズ Mounting part thread size	G3/8 (推奨締付トルク34N・m) (Recommended tightening torque: 34N・m)

3.2.4 検出例

開発した油状態センサを用いて実際の作動油を測定した結果について述べる。油状態センサの検出値である比誘電率と、分析機関における性状分析項目である全酸価との関係を図5に、また導電率と水分量との関係を図6にそれぞれ示す。

図5に示すように、比誘電率と全酸価の間には一定の相関関係が確認されており、酸化劣化の進行に伴う極性物質の増加が、比誘電率の変化として捉えられていることが分かる。一方、図6に示す導電率と水分量の関係においても、水分の増加に伴い導電率が上昇する傾向が認められ、導電率が油中の水分状態を反映する有効な指標であることが示されている。

これらの結果から、本センサにより取得された比誘電率及び導電率の変化を評価することで、従来の性状分析により把握される油の劣化及び汚損の進行を定量的に捉えることが可能であるといえる。すなわち、油状態センサの検出値を用いることで、油の状態変化を連続的に監視し、劣化傾向や異常の兆候を早期に検知できた。

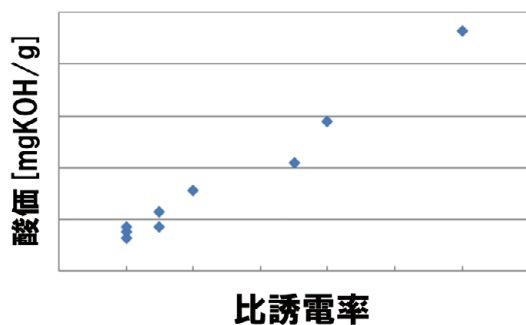


図 5 比誘電率と全酸価の関係

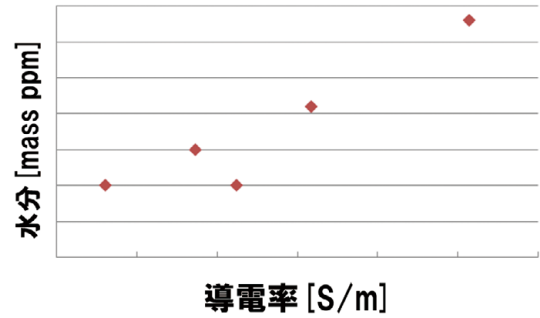


図 6 導電率と水分量の関係

また、摺動摩耗が発生した際の影響を評価するため、摺動摩耗を伴う状態のサンプル油を用いて、油状態センサの検出値である導電率の変化を測定した結果を図7に示す。

図7に示すように、新油と比較して摺動摩耗が発生した油（サンプル①～③）では、導電率が顕著に上昇する傾向が確認された。これは、摺動摩耗に伴って発生する金属摩耗粉や微細粒子、更にはこれらに付随するイオン性成分の増加が、油の電気伝導性に影響を与えた結果であると考えられる。

これらの結果から、本センサの検出パラメータである導電率を用いることで、油の汚損状態のみならず、機器内部で発生する摺動摩耗に起因する状態変化を捉えることが可能であるといえる。すなわち、導電率の変化を監視することにより、摩耗の進行に伴う異常の兆候を早期に検知できる可能性が示された。

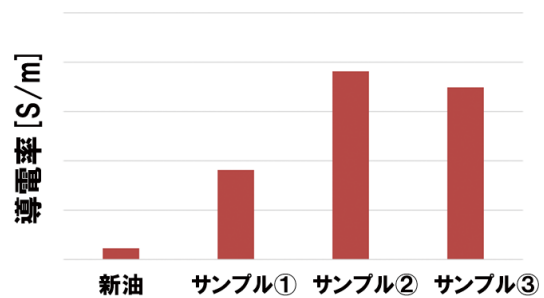


図 7 新油と摺動摩耗発生油の比較

3.3 データ収集、分析、可視化

油圧機器に設置された油状態センサにより取得されるデータを有効に活用するためには、これらの情報を継続的に収集・蓄積するとともに、多角的な分析および可視化を行う仕組みが必要となる。特に、油の状態変化を長期間にわたり把握し、劣化傾向や異常の兆候を的確に評価するためには、時系列データとしての管理および解析が重要である。

このため、本システムでは、油状態センサから取得したデータをクラウド上のIoTプラットフォーム

に集約し、データの蓄積および分析を行う構成としている。クラウド環境を活用することで、複数機器にまたがるデータの一元管理や遠隔地からの状態監視を可能とし、設備保全の効率化および高度化を実現する。

本節では、油状態センサのデータをクラウドへ送信する通信機器、データの蓄積・分析を担うクラウド上のIoTプラットフォーム、およびユーザが油の状態を確認するためのWebアプリについて、それぞれの構成及び役割を示す。

3.3.1 通信機器

通信機器は、センサから取得したデータを収集し、通信ネットワークを介してクラウドへ送信するゲートウェイ機能を担う機器である。油状態センサから出力されるCAN信号を受信し、必要なデータの抽出および変換処理を行った上で、通信回線を通じてクラウド上のIoTプラットフォームへ送信する構成としている。

本端末を介してセンサデータをクラウドに集約することで、現場における配線制約を低減するとともに、遠隔地からの状態監視やデータ分析を可能とし、本システム全体の実用性及び拡張性を高めている。

3.3.2 IoTプラットフォーム

IoTプラットフォームでは、油状態センサから収集されたデータをクラウド上に蓄積し、時系列データとして管理するとともに、これらの情報を基に油の状態及び油圧機器の状態監視を行う。蓄積されたデータは、油の劣化傾向や異常兆候の把握に加え、過去データとの比較やトレンド解析に活用される。

更に、これらの解析結果に基づき、対象となる油圧機器に対して必要なメンテナンス内容や適切な実施タイミングの推定を行う機能を備えている。これにより、従来の経験や定期点検に依存した保全から、データに基づく合理的なメンテナンス判断の支援を可能としている。

また、異常兆候の検出や設定した閾値の逸脱が確認された場合には、ユーザに対してメール等の手段を用いた通知を行い、迅速な対応を促す仕組みとしている。このように、IoTプラットフォームはデータの収集・蓄積にとどまらず、分析・診断及び情報提供までを一体的に担い、本システムにおける中核的な役割を果たしている。

3.3.3 Webアプリ

本システムを利用するユーザは、クラウド上のIoTプラットフォームに収集・蓄積された油状態センサデータを基に、油の状態や油圧機器の状態を専用のWebアプリを通じて確認することができる。本Webアプリでは、時系列で取得されたデータの可

視化に加え、解析結果に基づく油の劣化状態や機器状態の診断結果を直感的に把握可能なインタフェースを提供している。

具体的には、比誘電率や導電率などのセンサデータの推移をグラフ表示することで、油の劣化傾向や異常兆候を容易に把握できるほか、IoTプラットフォームにより推定された状態指標やアラート情報を併せて表示することで、ユーザによる迅速かつ適切な判断を支援する。

更に、複数機器の状態を一元的に監視可能な機能を備えており、遠隔地からでも設備の稼働状況や油状態を確認できる。これにより、現場巡回の負担軽減および保全業務の効率化を実現する。

Webアプリでの表示例を図8に示す。

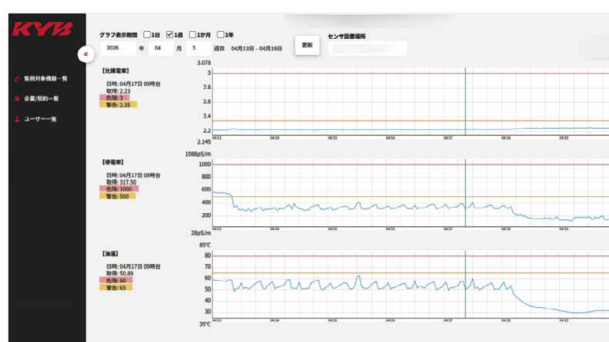


図8 Webアプリ画面 センサデータ表示例

3.4 提供サービス内容

本システムでは、油状態センサにより取得されるデータを活用し、ユーザのメンテナンス最適化に寄与する下記「油状態診断サービス」の提供も行っている。

3.4.1 定期診断レポート

定期的なデータ解析に基づき、カヤバの専門技術者が油圧機器の状態を継続的に監視・分析し、油の状態や劣化傾向を整理した月次の定期診断レポートを作成し、ユーザへ提供する。

3.4.2 トrend診断レポート

油状態センサの検出値を常に監視し、変化傾向などを検知するトレンド分析結果に基づき、カヤバの専門技術者が油圧機器の状態を継続的に監視・分析し、異常の兆候や対処の必要性が認められた場合には、臨時のトレンド診断レポートを発行し、メール等にてユーザへ通知する仕組みとしている。

3.4.3 総合診断レポート

より詳細な状態評価が必要な場合には、採油による性状分析を実施し、その分析結果とクラウド上に蓄積されたトレンドデータを組み合わせた総合診断レポートを作成する。本レポートでは、油の劣化状

態や汚損状況の評価に加え、油圧機器の状態推定及び推奨されるメンテナンス内容を記載し、ユーザの保全判断を支援する。

4 油状態診断システムによる油圧機器の状態診断事例

本システムの有効性を検証するため、当社工場内に設置された油圧試験機及び当社製品である特装車両など、実際の運用環境に本システムを適用し、実証評価を実施している。各対象機器に油状態センサ及び通信端末を設置し、稼働中の油状態データの継続的な収集を行うとともに、クラウド上での可視化及び分析を通じて、油の劣化挙動や機器状態の把握を行っている。

これらの実証評価により、本システムが実機環境において油の状態変化を適切に捉え、状態監視及び診断が有効であるかを確認している。本章では、これらの検証結果の一例について紹介する。

4.1 工場設備

当社生産設備である油圧試験機に本システムを適用し、連続的にデータ収集を行った結果の一例を紹介する。油状態センサの検出値である比誘電率および導電率、ならびに油温の時系列変化を図9に示す。

図9に示すように、運転の経過とともに比誘電率が徐々に上昇する傾向が確認され、その後、導電率が急激に上昇する挙動が観測された。この導電率の急上昇後に、当該油圧試験機において油圧ポンプの故障が発生しており、センサの検出値により機器の異常発生に先行する状態変化を捉えていることが分かる。

これらの結果から、比誘電率及び導電率の変化を継続的に監視することで、油の劣化進行や汚損状態の変化に加え、機器内部の異常兆候を早期に把握できる可能性が示された。すなわち、本センサの検出値は、油圧機器の故障予兆検知に有効な指標であるといえる。

また、油交換やフィルタ交換といった日常的なメンテナンス作業に伴う油状態の変化についても、本センサにより高感度に検出可能であることが確認された。これにより、従来の時間基準による管理に加え、実際の油状態に応じたメンテナンス判断が可能となり、メンテナンス周期の最適化による工数削減や廃油量の低減といった効果も期待できる。

以上より、本システムにおける油状態センサの検出値を活用することで、機器の故障予兆の把握に加え、オイル交換やフィルタ交換などの各種メンテナンスを適切なタイミングで実施するための有効な指標として機能することが確認された。

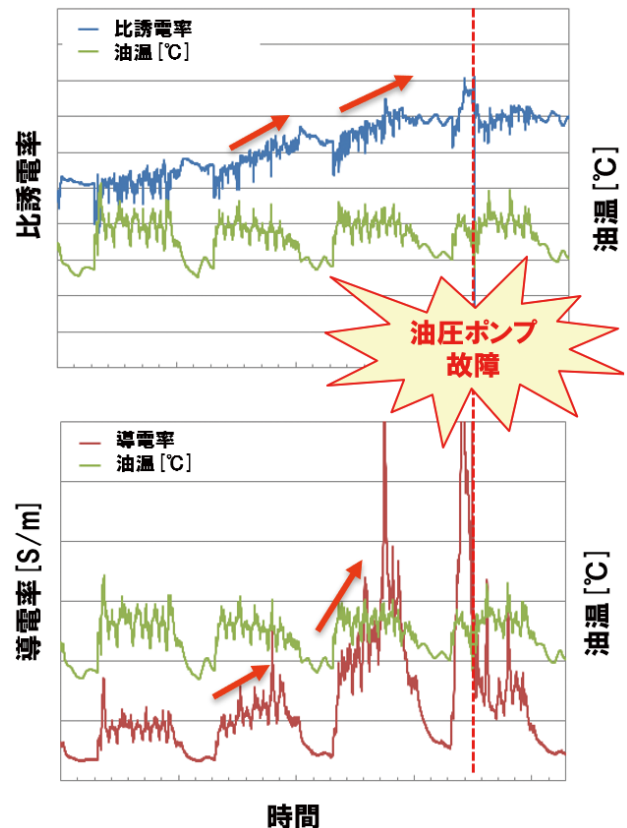


図9 油状態センサの検出例
(工場設備 油圧作動油)

4.2 特装車両

次に、当社製品であるコンクリートミキサ車のドラム駆動用油圧システムに適用される減速機を対象とし、油状態センサを取り付けてデータ収集を行った事例について紹介する。油状態センサの検出値である比誘電率及び導電率、並びに油温の時系列変化を図10に示す。

本対象においては、減速機に使用されるギヤオイルがユーザにより定期的に交換されており、図10においてその交換タイミングに対応して比誘電率および導電率が変化する挙動が確認された。特に、油交換時には劣化した油が新油へ更新されることにより、センサ検出値が低下または初期状態へと回復する傾向が認められ、本センサが油の更新状態を明確に捉えられることが示された。

これらの結果から、本センサは油の劣化や機器異常の検知に加え、ユーザによるオイル交換といったメンテナンス作業の実施状況を把握する手段としても有効であるといえる。すなわち、本システムを活用することで、油の状態監視のみならず、実際の保全履歴の可視化及び適切なメンテナンス実施の確認が可能となり、設備管理の高度化に寄与するものと考えられる。

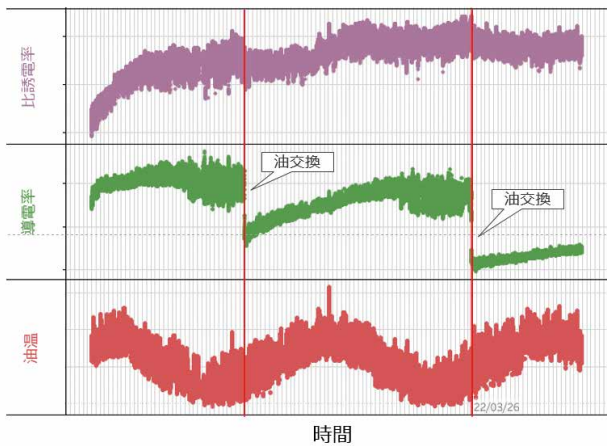


図10 油状態センサの検出例
(コンクリートミキサ車 ギヤオイル)

5 おわりに

近年、製造業をはじめとする各産業分野においては、設備の老朽化や労働人口の減少、熟練技術者の不足といった課題に加え、デジタルトランスフォーメーション（DX）の進展やカーボンニュートラル実現に向けた取り組みの加速など、設備保全を取り巻く環境が大きく変化している。こうした背景のもと、IoTを活用した設備の状態監視及びデータに基づくメンテナンスの高度化は、今後ますます重要性を増していくものと考えられる。

このような状況に対し、当社が販売を開始した油

圧機器向け油状態診断システムは、油の状態をリアルタイムに把握し、機器の状態監視及び異常兆候の検知を可能とすることで、従来の保全手法の高度化に寄与するものである。今後設置数が増えることでデータの収集・蓄積も更に進むことから、蓄積されたデータの分析を進め、様々な使用環境における有効性の検証と診断精度の向上に取り組んでいく。これにより、持続可能な社会の実現に向けた設備保全の高度化に貢献していく所存である。

本開発の遂行にあたり、多大なご協力を賜りました関係各位に深く感謝申し上げます。また、本システムの実証評価に際し、貴重なご意見及びデータ提供にご協力いただいたお客様、関係部門の方々にも厚く御礼申し上げます。更に、本開発の推進にあたりご指導ご助言をいただいた皆様に心より感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 油状態診断システム製品ホームページ
<https://www.kyb.co.jp/products/iot.html>
- 2) 風間俊治：作動油の劣化とその対策について，フルードパワーシステム学会誌，Vol. 47, No 4, p 7-11 (2016)
- 3) ISO18436-4準拠 機械設備の状態監視と診断カテゴリー I
- 4) ジャパン・アナリスト(株)ホームページ
<https://www.japan-analysts.com/>



著 者



吉田 尚弘

2011年入社。ハイドロリックコンポーネンツ事業本部油機事業部技術統轄部システム技術部。主に油状態診断システムの開発に従事。



中村 瞭平

2016年入社。ハイドロリックコンポーネンツ事業本部油機事業部技術統轄部システム技術部。主に油状態診断システムの開発に従事。