

## 技術論文

## オイルコンタミ濃度センサによる建機パワートレインの状態監視

## Condition Monitoring of Construction Machinery Power Train Using Oil Contamination Concentration Sensor

糟谷 遼二

Ryoji Kasuya

大型の鉱山機械を中心として、メンテナンスコスト低減を目的としたオーバーホール間隔の延長が図られており、減速機を含むパワートレインコンポーネントが長期間使用される傾向がある。コンポーネントの長期使用に伴って、メンテナンスの重要性と破損リスクが増すことが考えられる。日常のメンテナンス状況の監視することによる破損防止と、異常が発生した際に早期検知することで被害の拡大と休車時間の抑制に寄与する技術としてオイルコンタミ濃度センサの開発と、センサを用いたモニタリングシステムの開発を進めてきた。開発したモニタリングシステムにより、遠隔地で稼働している車両で発生した異常の検知が可能になった。

Extension of overhaul intervals is being eyed primarily for large-sized mining machinery to reduce maintenance cost. With this increasing trend, power train components including reduction gears are likely to be operated for longer duration. As they are operated longer, components are likely put at greater risk of breakage, making maintenance more important than ever. Programs have been pursued to develop an oil contamination concentration sensor and a related monitoring system using the sensor to help prevent breakage through monitoring of routine maintenance and enable early detection of abnormalities to contain damage and reduce downtime. The new monitoring system enables abnormalities that may occur on vehicles operating at remote sites to be detected.

Key Words: 状態監視, 減速機, 潤滑油, センシング

## 1. はじめに

建設機械のパワートレインの構成要素（コンポーネント）（図1）は内部に摺動部を多く伴う。摺動部では稼働とともに摩耗・部材の疲労が進行し、使用し続けるといつかは破損に至る。大型の鉱山機械では、適切なメンテナンスを行うことで破損に至るまでの寿命を可能な限り延長したうえで、定期的にオーバーホールを行うことで50,000時間を超えるような長期間にわたる稼働に対応してきた。



図1 建設機械のコンポーネント

近年ではメンテナンスコストと保守による休車時間を低減するという観点から、オーバーホール間隔が延長され、コンポーネントがより長時間使われるようになる傾向がある。使用時間の長期化により、これまで以上にメンテナンスが重要になるとともに、万が一異常が発生した際の被害の拡大防止の重要性も高まる。また、オーバーホール間隔の延長はあくまで時間基準での保全の範囲内での改善であるが、メンテナンスコスト最適化の観点から状態監視保全への移行が進んでいくことも考えられる。これらに伴って、コンポーネントの状態やメンテナンス状況をモニタリングすることの重要性が高まってきている。一方で建設機械は、保全を担当するメカニックからみて、機械が遠隔地で稼働している場合が多く、頻繁に機械の状態を直接確認することが難しい。

上記のような状況への対応として、パワートレインコンポーネントの状態・メンテナンス状況を遠隔監視する技術の開発に取り組んでいる。本稿では、特にトランスミッション、アクスルなどの動力伝達を担うコンポーネントの状態監視に向けた取り組みとして、潤滑油中の汚染物質（以下コンタミ）濃度を計測するオイルコンタミ濃度センサの開発と、センサを用いた状態監視システムの構築について紹介する。

## 2. 減速機の異常検知

建設機械では、動力伝達を担うコンポーネントの多くで歯車減速機を用いている。減速機内部で使用される歯車やベアリングのように機械の稼働とともに転がり疲れと摩耗が発生する部品では、稼働初期の比較的摩耗速度の高い初期摩耗から、摩耗率が低く安定する正常摩耗を経たのちに異常摩耗が発生し、破損に至る(図2)。適切なメンテナンスにより正常摩耗の期間を可能な限り延長するとともに、破損に至る前に生じる異常の兆候を早期にとらえられれば、大破や機械の稼働停止を発生させることなくオーバーホール間隔を延長することができると考えられる。減速機の異常検知に対しては、振動、AE、温度などの種々の異常検知手法が提案されている<sup>[1]</sup>が、そのなかで摩耗粉を中心とした潤滑油中のコンタミ濃度の変化に着目して異常検知技術の開発に取り組んだ。油中コンタミ濃度による異常検知では、歯車やベアリングの異常摩耗の検知だけでなく、それらの寿命に影響を与える潤滑油の管理状態についても監視できるという利点があると考えている。

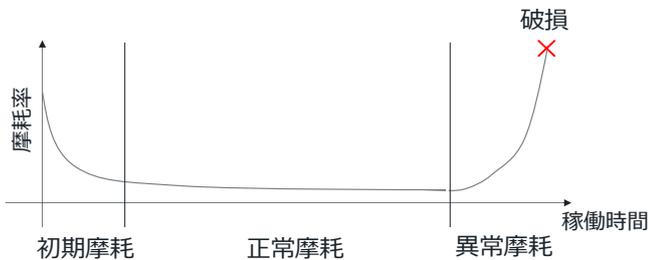


図2 摩耗曲線

## 3. オイルコンタミ濃度センサ

### 3.1 オイル分析による潤滑油状態監視

これまで潤滑油の状態監視には、機械から採取した油を分析し、摩耗粉、異物の混入量や劣化度合いを評価するオイル分析サービスが利用されてきた。11,000時間稼働した時点で破損が発生した減速機のオイル分析結果(図3)では、不具合発生前に油中铁粉濃度の急上昇が見られている。この事例のような異常の早期検知以外に、異常が発生した際に異常箇所や原因の特定においても実績を上げている。

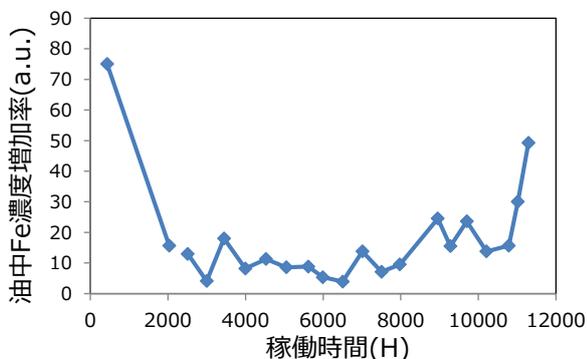


図3 減速機潤滑油中の鉄濃度増加率推移

今回対象としている減速機の潤滑油で発生する異常について、これまでのオイル分析サービスの実績から鉄と砂の濃度異常が多いことが分かっている(図4:例としてアクスルオイルの異常)。潤滑油の監視から発見できる異常のなかでは、内部部品の異常摩耗やシール不良による土砂の混入が大半を占めていることになる。土砂と鉄以外では、水分の混入や、クラッチのフェーシングの異常摩耗による油中の銅濃度の上昇などが見られている。

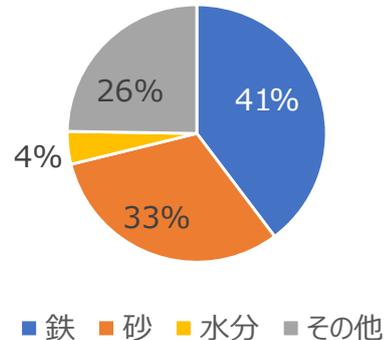


図4 アクスルオイル分析結果の異常内容割合

### 3.2 車載型オイル中コンタミ濃度センサの開発

実績を上げている一方で、オイル分析による状態監視には採油、分析できる頻度が限られる、採油から分析結果が出るまでに時間がかかる、採油方法が不適切だと油の状態を正確に判定できない、という課題があった。コンタミ濃度をオンラインで計測できるセンサを車載することでこれらの課題を解決できると考え、オイルコンタミ濃度センサの開発を進めた。

#### (1) 計測方式

油中のコンタミ濃度など潤滑油の性状をセンシングする方法としては、インダクタンスバランス式、誘電率を用いた方法などいくつかの方法が提案されており、測定方式によって計測可能な内容や取付方法の制約が異なる(表1)。取付方法の制約の例として、パーティクルカウンタは一定の流れのある配管中でしか計測ができない。建設機械の減速機で使用するにあたっては、減速機の潤滑油で多く問題となる鉄系の摩耗粉を計測でき、油浴潤滑の減速機にも容易に取付けられることが求められることから、透過光を用いた測定方法を採用した。

表1 潤滑油のセンシング方法

計測方法	計測対象						取付性
	異物(固体)		清浄度	水分	劣化		
	鉄系	非鉄			酸化	添加剤	
誘電率/ 導電率	×	×	×	○	○	○	良好
インダクタンス バランス式	○	×	×	×	×	×	配管のみ可
マグネット スイッチ	△	×	×	×	×	×	良好
透過光	○	○	×	△	×	×	良好
パーティクル カウンタ	×	×	○	×	×	×	配管のみ可

○	良好
△	計測可
×	計測不可

今回開発したセンサでは、計測部はLEDとフォトダイオード（受光素子）から構成されており、油中を通過した光の透過光強度を受光素子で計測している（図5）。油中にコンタミが存在すると光が散乱され、受光素子に届く光の強度が低下することから、コンタミ量が多いほど受光強度が低下する。光学式の計測装置でも、レーザー回折式の粒度分布測定装置や高性能な濁度計では、散乱された角度毎に光の強度計測を行うことで異物の粒度分布の計測などを可能にしている。一方で建設機械の状態監視用のセンサとしてはコストとサイズの制約から、現実的には透過光のみの計測にならざるを得ない。異物が光を散乱する際の重量当たりの散乱断面積は異物の種類やサイズによって異なるため、透過光のみから油中のコンタミ濃度を推定する場合には、異物の種類や粒度をある程度仮定することになる。

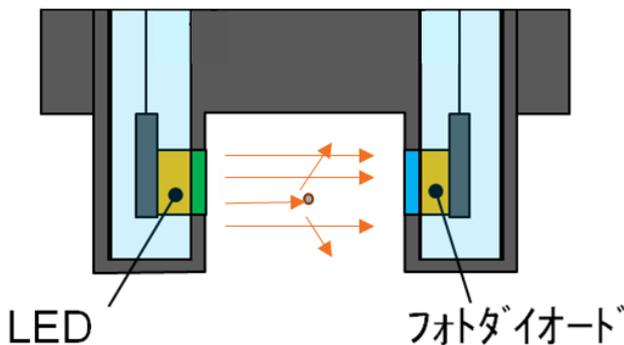


図5 オイルコンタミ濃度センサ計測部

開発したセンサの測定精度について、建設機械の減速機で使用した油を用いた検証を行った。油中の元素濃度分析で広く用いられているICP発光分光分析装置の分析結果と比較し、よく一致した（図6）。計測原理上は、異物の粒径などにより濃度と透過光強度の関係は変化するはずであるが、摩耗で発生する鉄系のコンタミの粒径分布が一定となっている結果と考えられる。

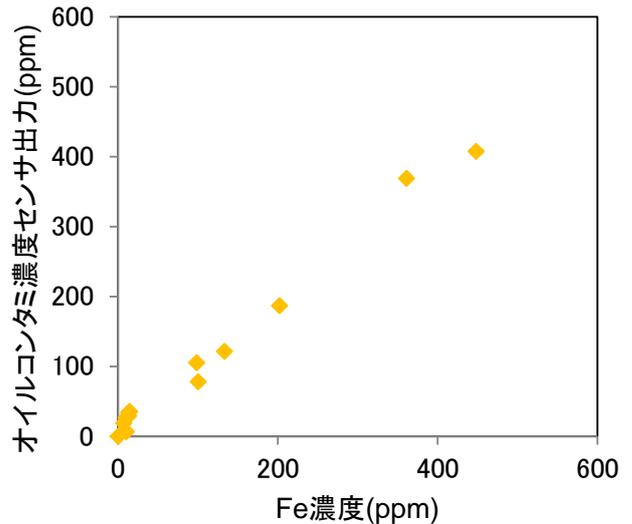


図6 コイルコンタミ濃度センサの測定性能

(2) 駆動方式、形状

建設機械の減速機は土砂などの衝突が起こるような箇所に配置されている場合や、減速機自体が回転体である場合など、センサを取り付ける位置への配線が困難であることが多い。これらの箇所にも適用可能なセンサにするため、ゼーバック効果（図7）を利用した熱電発電により電源を自給し、計測データを無線送信させることでセンサへの配線を不要とした。電源の自給化・データ送信の無線化にあたっては、センサを共同開発したKELKのKELGEN SD<sup>[2]</sup>でも使われた技術を応用している。センサの形状はボルト型（図8）としており、ねじ径などが合えば既存のポートにセンサを取り付けるだけで計測を開始できるようにした。

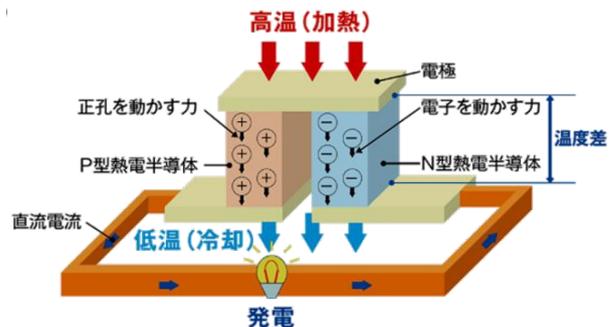


図7 ゼーバック効果



図8 オイルコンタミ濃度センサ外観

#### 4. オイルコンタミ濃度センサによる状態監視

オイルコンタミ濃度センサを用いた建設機械の状態監視について、監視事例や運用システムを紹介する。

##### 4.1 オイルコンタミ濃度センサの搭載

オイルコンタミ濃度センサによる状態監視システムの機体側のハードウェア構成を、ダンプトラックを例として紹介する。ダンプトラックの場合、計測対象はトランスミッションとアクスルの潤滑油となるため、センサをそれぞれの減速機に搭載する。センサ無線で発信されるデータを収集するため、車体フレームに受信器を取付け、受信したデータを、キャブ内のコントローラに送る。センサの搭載にあたって、今回開発したセンサは光学式で、油中の気泡が計測結果に影響してしまうため、安定した計測を行うためには気泡が発生しない箇所へ搭載する、気泡が消えた後のデータを抽出して使用するなどの対応が必要となる。

##### 4.2 モニタリングシステム

車載コントローラに蓄積したセンサデータは車体の稼働データとともに衛星通信などで定期的にクラウドサーバーに送信され、サーバー上でデータ処理とレポートの作成を行う(図9)。計測しているコンタミ濃度の推移に異常が見られた場合、ディーラーの担当メカニックに異常内容と現地対応が必要となる項目を通知し、適切なメンテナンスや予防措置を講じることで機械の大破やダウンタイムの発生を抑制する。

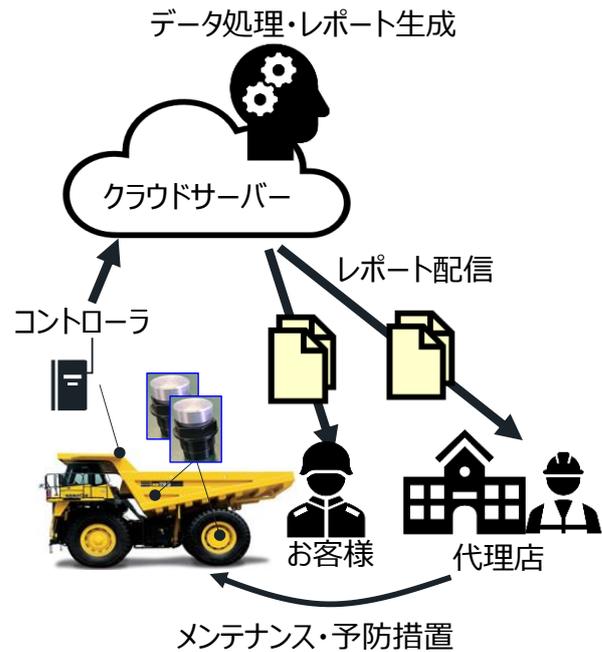


図9 モニタリングシステム

また、通常時はレポート画面から油中のコンタミ濃度の推移や、コンタミ濃度推移から判定したオイル交換実績、最新のオイル使用時間などを表示することでメンテナンス状況を確認できるようになっている。状況の見える化によるメンテナンスの漏れ防止と、突発故障時の早期対応の両面で機械トラブルの防止に寄与できると考えている。

##### 4.3 オイルコンタミ濃度監視事例

油中コンタミ濃度センサによる状態監視で異常を検知した事例を紹介する。減速機の破損の早期検知だけでなく、メンテナンス工程の不良や外部からの異物混入の検知でも成果が上がっており、不具合発生の防止にも寄与することが分かっている。

###### (1) フラッシング工程不具合

潤滑油の清浄度改善のために定期的にオフラインフィルタによるフラッシング作業を行っている車両で、通常フラッシング後に低下するセンサ出力が上昇している事例が見られた。調査の結果フラッシング工程に問題があったことが判明し、早期の対応が可能となった。減速機の不具合だけでなく、オイル交換やフラッシングを含めた潤滑油のメンテナンス状況の監視にも油中コンタミ濃度センサによるモニタリングが有効である。

## (2) 水分混入

走行減速機の潤滑油に水分が混入した際に、油中コンタミ濃度センサに出力異常が見られ、早期に対処することができた。基礎試験で計測できることを確認していたのは摩耗粉として発生する鉄系のコンタミ濃度のみであったが、潤滑油に水分が混入すると乳化して透明度が低下する（図10）ため、一定以上の水分混入の検知も可能となる。潤滑油に水分が混入した状態で減速機を使用し続けると内部の部品に錆が発生して破損の原因となるため、早期検知による破損防止が重要となる。



図10 水分が混入し乳化した油

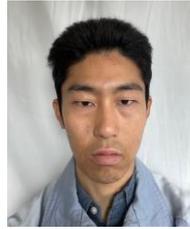
## 5. おわりに

メンテナンスコストの低減に向けたオーバーホール期間の延長に伴うメンテナンス状態の見える化、異常の早期検知ニーズの高まりに対応した技術として、油中コンタミ濃度センサを用いた減速機の状態監視技術への取り組み状況を紹介した。機械の状態監視に関しては、将来的に建設機械の自動化、無人化が進んだ際に、従来はオペレータが気付いていた異音などの異常が見つからなくなってしまうという課題への対応のためにも必要な技術と考えている。油中コンタミ濃度の監視だけで対応できる課題ではないが、機械の運用コストの最適化に加え、機械の自動化・無人化にも貢献できれば幸いである。

### 参考文献

- 【1】 若林利明，間野大樹，“軸受け異常診断の現状と動向”，トライボロジスト，第59巻 第6号（2014），p.323-329
- 【2】 村瀬隆浩，後藤大輔，柴田勲，村田知紀，“熱電EH振動センサデバイス KSGD-SV”，KOMATSU TECHNICAL REPORT，2020年

### 筆者紹介



Ryoji Kasuya

糟谷 遼二 2014年，コマツ入社。

生産本部 生産技術開発センタ所属

### 【筆者からひと言】

今回紹介したオイルコンタミ濃度センサをはじめとする状態監視技術を通じて、車両のメンテナンスコストの低減と保守の省人化に貢献していきたい。