

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

振動の音色で 機器の異常を検知する

鉄道車両では動力源としてモーターやエンジンなどの機器が用いられています。これらの機器の異常は普段と異なる音をきっかけに発見されることが多いです。この音の変化、すなわち異音を生み出すのは普段と異なる振動なので、正常時の振動の音色を覚えておき、測定した振動をそれと比較することで異常の検知が期待できます。そこで、振動の音色をオクターブバンド分析で表現し、異常を検知する方法に機械学習を用いた振動監視システムを開発しています。ここでは開発中の振動監視システムと、異常模擬試験の結果について紹介します。



近藤 稔
Minoru Kondo
車両制御技術研究部
動力システム研究室
主任研究員
[専門分野] 主電動機、
車両機器の状態監視

異音による異常の発見

鉄道車両が走るためには動力源が必要です。電車ではモーターが、ディーゼル車ではエンジンが動力源になっており、歯車などを介して車輪を駆動します。これらの動力機械に加え、空調などのサービス機器、それに電気を供給する電源装置など、車両にはさまざまな機器が搭載されています。

これらの機器が故障すると、車両が走れなくなることもあります。もし、機器が故障する前にその兆候を知ることができれば、早めにメンテナンスを行って、運行中の故障を未然に防ぐことができるかもしれません。そこで、鉄道総研では故障の兆候として表れる機器の異常を早期に検知するためのシ

ステム(図1)を開発しています。

では、機器の異常を早期に検知するためにはどのようにしたらよいでしょうか。

私たちが普段、家電製品などを使っているときに、いつもと違う音がしたら機械が故障しているかもしれないと考えられると思います。つまり、普段の音を知っていれば、音色の違いから異常に気がつくことができるわけです。車両機器の場合にも、乗務員などにより異音という形で機器の異常が発見されることが多くあります。つまり、音の監視が機器の異常検知に有効であると考えられます。

しかし、小さな異音は騒音にまぎれて気づかない可能性も高いです。そこ

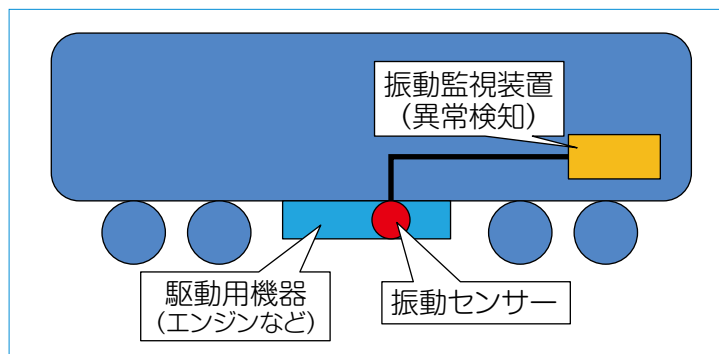


図1 振動監視システムのイメージ

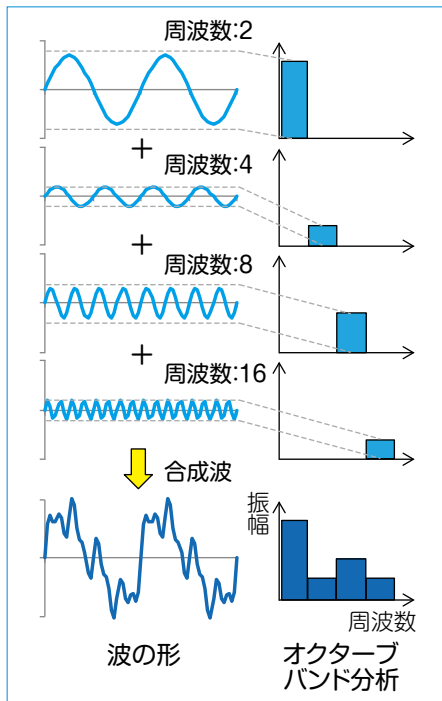


図2 周波数解析のイメージ

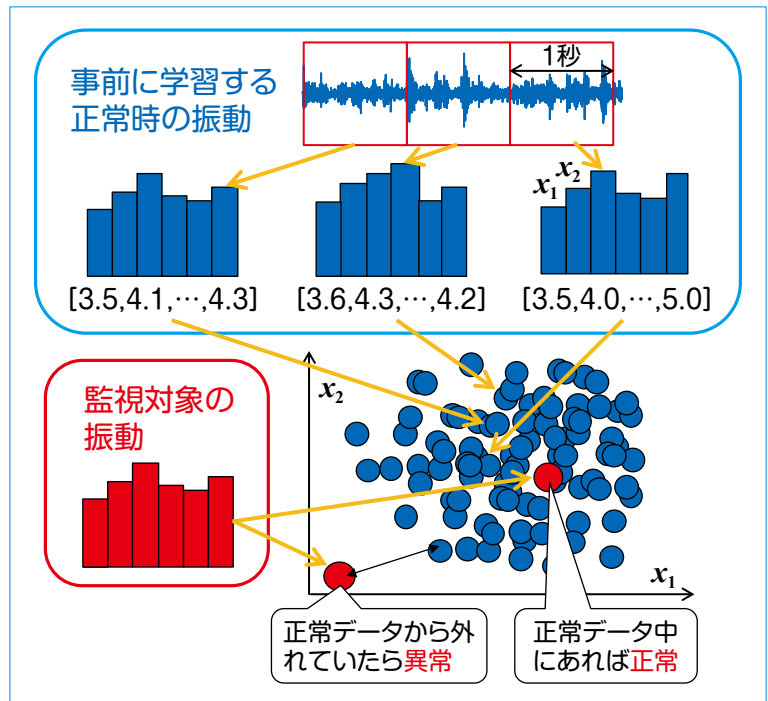


図3 振動のオクターブバンド分析と最近傍法による異常検知

で、より確実に異常検知ができるように音の原因となる機器の振動を直接センサーで測定して監視する振動監視システムを開発しています。

振動監視システムでは、人間が普段の音と比べることにより異音を検知するように、コンピュータが普段の振動を覚えておき、それと比較することで異常振動を検知するようにしました。以下ではまず、その仕組みについて説明します。

振動のオクターブバンド分析

人間が音を覚えるように、コンピュータに機器の振動を覚えさせるためには、振動の測定結果から振動の特徴を表すデータを抽出する必要があります。振動監視システムではその方法としてオクターブバンド分析を用いています。

振動の特徴はその大きさ（振幅）と時間当たりの回数（周波数）で表されます。大きな音は大きな振幅、高い音は高い周波数の空気の振動です。また、さまざまな楽器の音は、音の大きさや

高さが同じでも、異なる音色の音を出します。この音色の違いは振動の波の形に由来します。

波の形はさまざまな周波数の正弦波を合成して作成できることが知られています（図2）。ある波を分解してその波を構成する各周波数成分の正弦波の大きさなどを調べることを周波数解析（参照）と呼びます。周波数解析をすることで、音色の基となる波の形の特徴を端的に表すデータを得ることができます。オクターブバンド分析はその周波数解析の一つです。

オクターブとはたとえばドの音から一つ高いドまでの隔たりを指し、1オクターブで周波数は2倍になります。振動監視システムで用いている1/12

オクターブバンド分析では、1オクターブを12分割した周波数帯に分け、各周波数帯の振動を抽出して、その大きさを算出することによって、振動の音色に関するデータを得ることができます。

普段の振動と比較して異常検知¹⁾

次に、普段の振動をオクターブバンド分析したデータをコンピュータに記憶させ、それと比較して違いが大きければ異常と判定する方法（図3）について考えます。

振動監視システムでは、測定された振動データを1秒ごとに区切り、それぞれについてオクターブバンド分析を行います。その結果は周波数帯ごとの振動の大きさを表す、100個程度の数

周波数解析

周波数解析の方法としてはフーリエ変換がよく知られており、それを高速で実行するアルゴリズムである高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）は広く用いられています。

一方、オクターブバンド分析は主に騒音の評価で用いられています。その理由は、オクターブバンド分析の方が人間の聴覚に近いからです。

本振動監視システムでは異音という人間の感覚による方法に着想を得たためオクターブバンド分析を用いています。

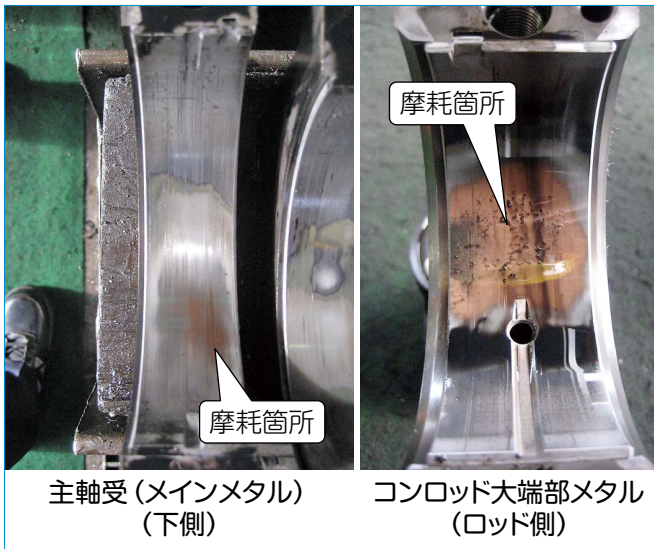


図4 試験後のエンジン内部

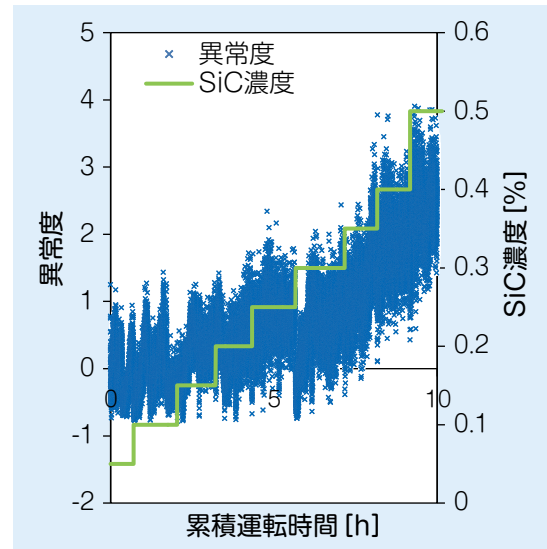


図5 試験時の異常度の変化

値のセットになります。2個の数値のセットは平面上の一点の座標を、3個の数値のセットは空間中の一点の座標を表していると考えることができ、100個の数値のセットは100次元空間中の一点の座標に対応させることができます。

データ同士が似ている場合には、そのデータに対応する点同士は空間中で近い場所に位置します。つまり、データ同士が似ているかどうかはデータに対応する点同士の距離が近いかどうかで判断することができます。

正常時に大体同じような振動が発生しているのであれば、正常時の振動データ(正常データ)を空間中にプロットした場合、それらの点はある領域に密集して分布します。

そこで、ある振動が異常かどうかを

判定するためには、その振動データ(テストデータ)をプロットしたときに、その点が正常データの領域内にあるかどうかで判断できます。

たとえば、テストデータと各正常データとの距離を計算し、最も近い正常データとの距離がある基準距離よりも大きければ異常と判定する方法が考えられます。この方法は機械学習(☞参照)の分野で最近傍法と呼ばれる方法を応用したものです。

振動監視システムでは基本的にこの方法を用いて異常判定を行っています。具体的にはテストデータと最近傍の正常データとの距離を基準距離で割った値から1を引いたものを異常度として定義し、その値が正であれば異常と判定します。基準距離は正常データの99%が正常と判定されるように定めます。

なお、実際の振動監視システムでは、最近傍のデータだけでなく2番目、3番目に近いデータも用いる工夫や、オクターブバンド分析結果をそのまま用いずに前処理として主成分分析(☞参照)を行うなどの工夫をして異常検知の性能向上を図っていますが、基本的な考え方は上述のとおりです。

エンジン異物混入試験²⁾

振動監視システムの有効性を検証するため、ディーゼル車の機器を対象に異常模擬試験を行いました。以下ではその結果について紹介します。

まず、エンジンの潤滑油に異物としてセラミック(SiC)の粉を混入し、人為的に異常摩耗を発生させる試験を行いました。この試験では定置でエンジンをアイドリングさせてエンジンの振動データを測定しました。どの程度の異物で異常摩耗が発生するか不明であったため、セラミックの粉を徐々に追加していく方法で試験を行いました。

試験後にエンジンを分解したところ、図4に示すように内部で異常摩耗が発生していましたが、ディーゼル車で通常監視されている潤滑油温度、潤滑油圧力、冷却水温度には異常が表れませんでした。その一方で、振動監視シス

☞ 機械学習

多くのデータからコンピューターがパターンや規則を学習して分類や予測を行う技術は機械学習と呼ばれ、近年その応用が広がっています。その代表的なものとして、最近傍法、サポートベクターマシン、ニューラルネットワークなどがあります。

☞ 主成分分析

多次元のデータが多数あるときに、主成分分析ではそのデータが多次元空間上で広く分布している方向の成分を主な成分と考えて抽出していきます。主成分分析により不要な成分を削除したり、その計算過程で白色化を行ったりすることで、機械学習を適用したときの性能を向上できる場合があるため、前処理として使用されます。

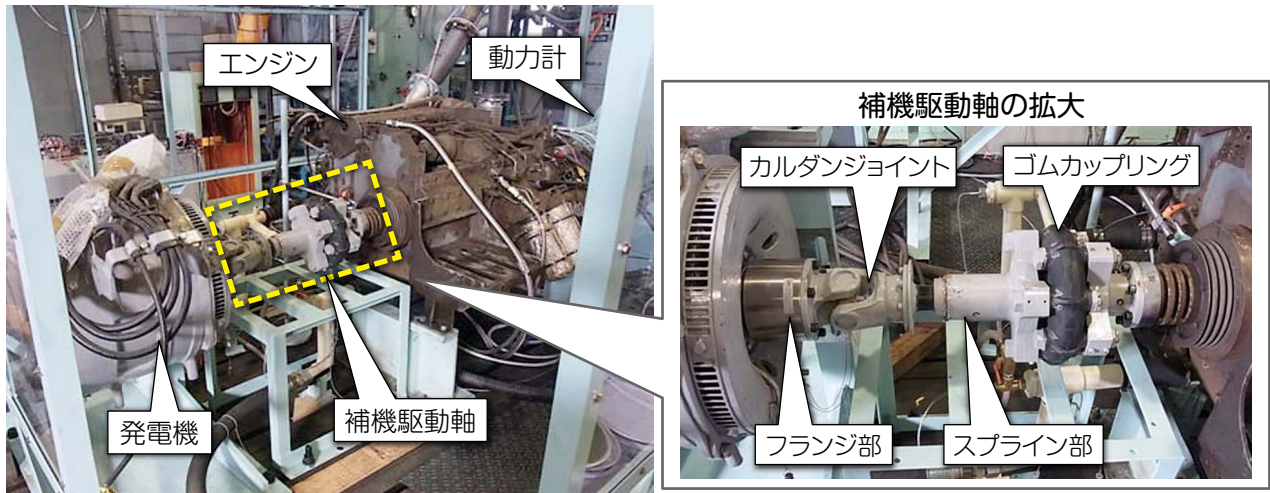


図6 補機駆動軸の異常模擬試験

テムで算出される異常度は、図5に示すように時間の経過とともに増大することが確認され、その有効性が確認できました。

補機駆動軸異常模擬試験③

次に、車内電源のための発電機などをエンジンで駆動するための補機駆動軸で異常が発生した場合の模擬試験を行いました(図6)。

この試験では補機駆動軸を発電機に取り付けるフランジ部で異常摩耗が発生した場合を模擬した隙間を設けた場合(「隙間あり」と、ゴムカップリングの劣化による硬化を模擬した場合(「ゴム硬化」)の2種類の異常模擬を行いました。

また、異常検知のための正常データ測定とは別に、比較のための正常データ測定を行いました。試験は異物混入の場合と同じ定置の試験装置でエンジンをアイドリングさせ、発電機の振動データを測定しました。

その結果、図7に示すとおり2種類の異常模擬とも大部分のデータが異常と判定され、その一方で正常データの大部分が正常と判定される結果となり、本振動監視システムの有効性が確認できました。

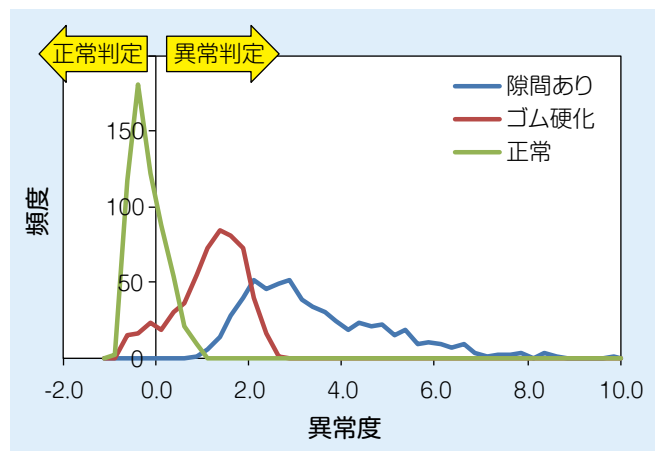


図7 異常度のヒストグラム

おわりに

ここでは正常時の振動の音色を学習して、それと比較することで異常検知を行う振動監視システムを紹介しました。

複数の異常模擬について、同じ方法で異常検知ができていることから、本システムがさまざまな機器に適用できる汎用性が高い方法であることがわかります。この特長は、普段の振動を覚えてそれと比較するという方法に由来します。

その一方で、正常データとして学習した振動以外は異常と判定してしまうため、車両間の個体差や経年による振動の変化を異常と判定しないためには、十分な量の正常データを学習させる必要があります。大量のデータを学習する方

法の工夫などにも必要になります。

今後は、実用的な振動監視システムの実現を目指してさらなる研究開発を行っていきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 近藤稔, 真鍋慎一, 高重達郎, 菅野普: 振動のオクターブバンド分析を用いた車両用ディーゼル機関の異常検知手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.9, pp.17-22, 2015
- 2) 近藤稔, 高重達郎, 真鍋慎一, 菅野普: 振動による状態監視法を用いたディーゼル機関異物混入時の異常振動検知, 鉄道総研報告, Vol.30, No.4, pp.47-52, 2016
- 3) 近藤稔, 高重達郎: 振動による状態監視手法を用いた気動車補機駆動軸の異常検知, 鉄道総研報告, Vol.31, No.6, pp.23-28, 2017