

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

機械学習を用いてモーター軸受の異常を検知する

電車のモーターは電車を動かすための重要な機器であり、モーターが故障すると最悪の場合、電車が動かなくなってしまう。モーターの部品の中で故障することが多いのは「軸受」とよばれる部品で、軸受の異常を早期に検知し、故障を未然に防ぐことができれば電車の安全性、信頼性をさらに高めることができます。ここではモーターのような機器の異常検知のために私たちが開発したオクターブバンド分析と機械学習を組み合わせた異常検知手法を紹介し、その手法の性能を確かめるために行った異常模擬試験の結果について紹介します。



堺谷 洋
Yo Sakaidani
車両制御技術研究部
動力システム研究室
研究員
【専門分野】主電動機



近藤 稔
Minoru Kondo
車両制御技術研究部
動力システム研究室
室長
【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空調が効かなくなったり、走行ができなくなったりする可能性があるため、機器の異常を早期に検知し、故障を未然に防ぐことは重要です。私たちは鉄道車両に搭載された機器の異常を検知するために、振動を用いた機器の状態監視システムを開発しています。

普段家電製品などを使っていて、いつもと違う音がすれば故障を疑うかと思えます。これは普段の音との比較で、家電製品の異常を異音として検知しているといえます。この異常検知のされ方を、私たちは鉄道車両の機器にも応用しました。鉄道車両の機器の通常発する振動を覚えておき、いつもと違う振動を異常として検知する、というアイデアです。人間は音で検知しましたが、機器の異常検知では振動を使用しました。これは、鉄道車両の場合、機器の発する音は周囲のさまざまな音に紛れてしまう可能性が高いためです。そのため音を発生させる原因である振動を使用しています。

私たちが開発した異常検知手法で

は、オクターブバンド分析と機械学習の「分類」とよばれる手法を使用しています¹⁾。オクターブバンド分析は音波などの波形を分析する方法の一つで、騒音や振動を評価するときに用いられます。機械学習の「分類」とは、機械が自動的に物事を分類できるようになる手法です。以下ではこの「分類」について詳しく紹介します。

分類

機械学習の「分類」の技術を使うと、人間が機械に教えなくも大量のデータを機械に与えれば、機械は自らそれらのデータを学習しデータを分類できるようになります。たとえばメールソフトの中には、メールの差出人やその内容から自動的にスパムメールを検知し振り分けてくれる機能を持つものがありますが、これはメールソフトがメールをスパムかそれ以外に「分類」しているといえます。

この「分類」の技術を応用すれば、鉄道車両に搭載した機器の正常なときと異常なときの振動データを事前に学習することで、機器の状態を診断することができそうです。しかし、一般的

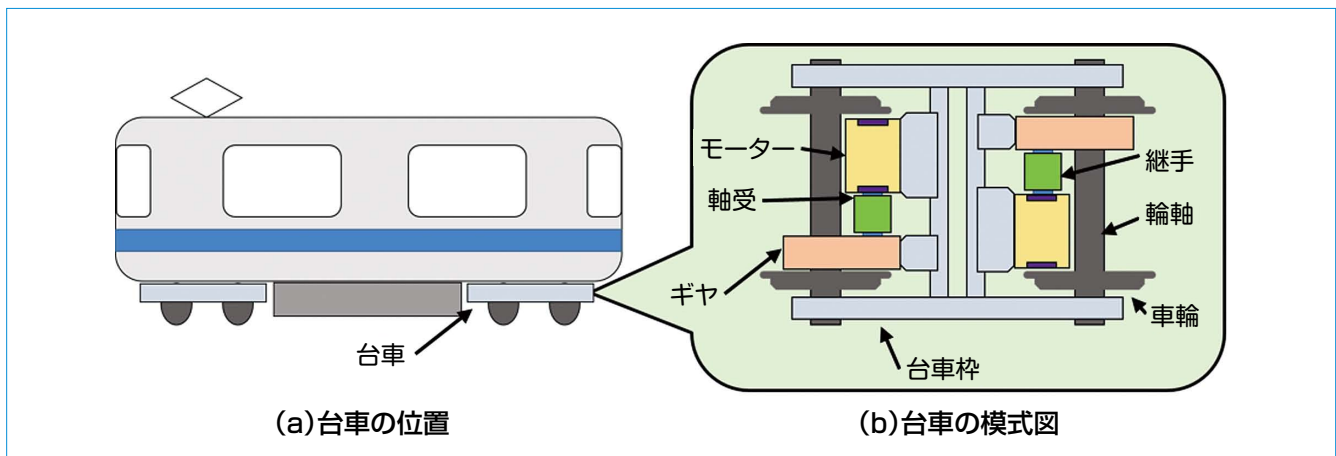


図1 電車の模式図

に精度よくこの「分類」を行うためには、大量のデータが必要です。機器の状態を正しく「分類」するためには、「正常時」と「異常時」それぞれのデータを大量に集める必要があります。当然、異常な状態の鉄道車両を走行させるわけにはいかず、異常データを大量に取得するのは困難です。そこで私たちの開発したシステムでは、異常データを使用せずに、正常データだけで機器の状態を判断するために「1クラス分類」とよばれる手法を使用しています。

1クラス分類

先ほどのメールの例だと、届いたメールを普通のメール、重要なメール、スパムメールに分類していましたが、これらの分類先を「クラス」とよびます。「分類」において、精度よく分類できるようになるためには、それぞれのクラスの十分な量のデータが必要となります。この「分類」に対して「1クラス分類」とよばれる手法で必要なのは一つのクラスのデータだけです。つまり「1クラス分類」を使用すると、正常なデータのみで、機器を正常かそれ以外(異常)かに分類できます。ちな

みに、「1クラス分類」と区別するために前述の「分類」は、「多クラス分類」とよばれることもあります。

私たちはオクターブバンド分析と「1クラス分類」を組み合わせて、機器の正常時の振動データだけを使って機器の状態を判定する異常検知システムを開発しています。開発したシステムの性能を確認するため、異常検知システムを気動車の営業車に搭載し、その性能を確認しました。その期間中に、実際に機器が故障するトラブルが発生しましたが、異常検知システムはその予兆を約50日前からとらえることができ、その有効性を確認できています²⁾。

オクターブバンド分析と機械学習を用いた異常検知手法は、気動車に対してだけでなく、電車でも使うことができます。さらにこの異常検知は、正常時との比較で異常検知を行うため、振動以外のデータでも異常検知できる可能性があります。以下ではこの異常検知手法を電車駆動用モーター軸受に適用した結果を紹介します。

モーター軸受の異常検知

電車のモーターは、車体の下にある

台車という部品に取り付けられています。モーターは電車を動かすための力を発生させる機器であり、その力は継手、ギヤを通して最終的に車輪まで伝わります(図1)。モーターを滑らかに回転できるようにしているのが軸受という部品です。ある調査ではモーター故障のおよそ半分は軸受に由来するとされており³⁾、モーター軸受の異常を早期に検知することは重要です。

軸受に異常が発生すると普段と違う振動が発生するため、気動車と同様の方法で軸受の異常を検知することができそうです。しかし、気動車のエンジンなどと違って、モーターは、激しい振動や衝撃にさらされる台車枠(図1)に取り付けられています。そのためセンサーやそのケーブルを台車枠に新たに設置すると、走行中に外れるなどの新たなトラブルの原因となりかねません。

そこでモーター軸受異常検知のために、振動以外にも三つの値に注目しました(図2)。これら三つの値は、台車枠にセンサーを設置せずに測定することができます。

まず、振動以外に異常を検知できそうなものとして注目したのが、モー



図2 軸受の異常を検知する値の候補

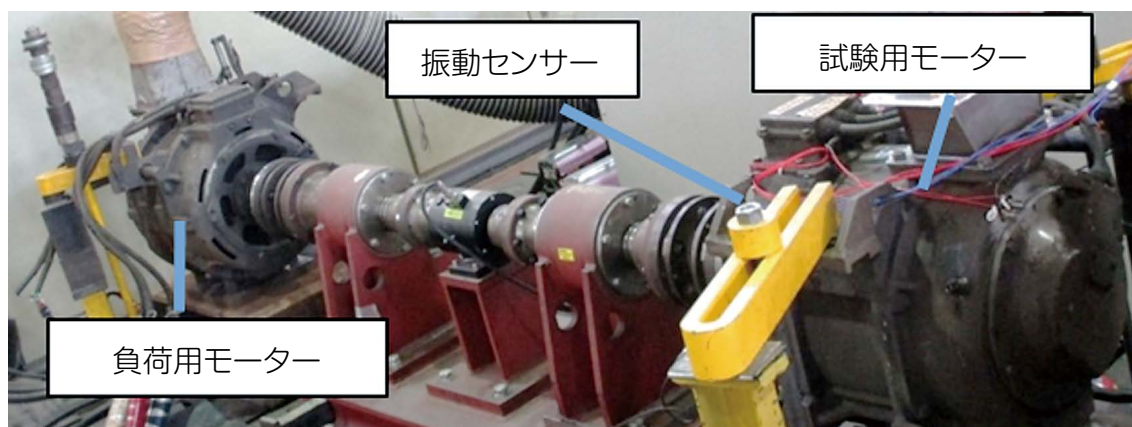


図3 異常模擬試験の様子

ターの速度センサーの値とトルクを決める値です。軸受に異常が発生するとモーターが滑らかに回転できなくなります。この回転の乱れを、速度センサーの値やモーターのトルクの乱れより異常として検知できるのではないかと考えました。

また、モーターからわずかに漏れる電流（漏洩電流）にも注目しました。漏洩電流とは電路以外を流れる微弱な電流で、過去に軸受を漏洩電流が流れることで起こる損傷（電食）が問題となっていたことがありました。現在は対策され、電食は大きな問題になっていません。もし、軸受の異常によりわずかに流れる漏洩電流が変化するのであれば、その変化を捉えることで軸受の異常を検知できる可能性があります。実際に異常模擬試験を行い、これら

の値を用いて異常検知可能かどうかを確認しました。今回の試験では速度センサーの値とトルクを決める値からは、異常を検知することはできませんでした。そこで、以下では異常模擬試験の概要と、振動と漏洩電流による軸受診断結果を紹介します。

異常模擬試験

異常模擬試験の様子を図3に示します。2台のモーターを接続し、一方を試験用モーター、もう一方を負荷用モーターとしました。試験用モーターの軸受を正常品、異常模擬品に交換した場合のそれぞれの振動と漏洩電流を測定しました。負荷用モーターは、加速時や上り坂などのモーターがたくさん力を出さなければいけない状況を再現するために使用しました。モーター

の振動はセンサーをモーターに設置して測定し、漏洩電流はモーターに電力を供給するためのケーブルから測定しました（図2）。

試験では図4に示す2種類の軸受を使用しました。正常品（図4(a)）は新品の軸受を使用し、内輪とよばれる部品の表面の一部を平らに削ったものを異常模擬品としました（図4(b)）。これははく離（参照）などの局所的な

はく離

軸受の転がり接触面の一部がうろこ状に剥がれてしまう現象です。軸受が寿命に達したときにこのはく離が生じますが、それ以外にも、想定よりも大きな力がかかったり、軸受がうまく取り付けられていなかったり、異物が混入していたりすると、想定するよりも早く、はく離が生じることがあります。



図4 試験で使った軸受

欠陥を模擬したものです。

正常な軸受と異常な軸受のそれぞれで試験を行い、異常検知性能を確かめるためのデータを取得しました。高速での走行を模擬したデータで軸受の異常度を算出した結果を図5に示します。異常度が負だと正常、正だと異常であることを意味します。振動により診断した場合、正常品の異常度はほぼ負の値、異常模擬品の異常度は正の値となっており、軸受を正しく診断できていることがわかりました。また漏洩電流により診断した場合にも、軸受の異常を検知できていることがわかりました。

これらの試験結果から、モーターの振動または漏洩電流を測定することで、軸受の異常を検知できる可能性があることがわかりました。ただし、今回の試験はモーターだけで行った試験であり、実際の車両での条件とは異なります。たとえば、振動はモーターに由来するもの以外に、走行にともない発生する振動もあるため、実際の車両でも異常検知できるかどうか確かめる必要があります。ただし、走行にともなう振動は、今回の異常検知で使用した振動とは異なる種類のものであるため、実車両でも振動で異常検知できる可能性は高いと考えています。

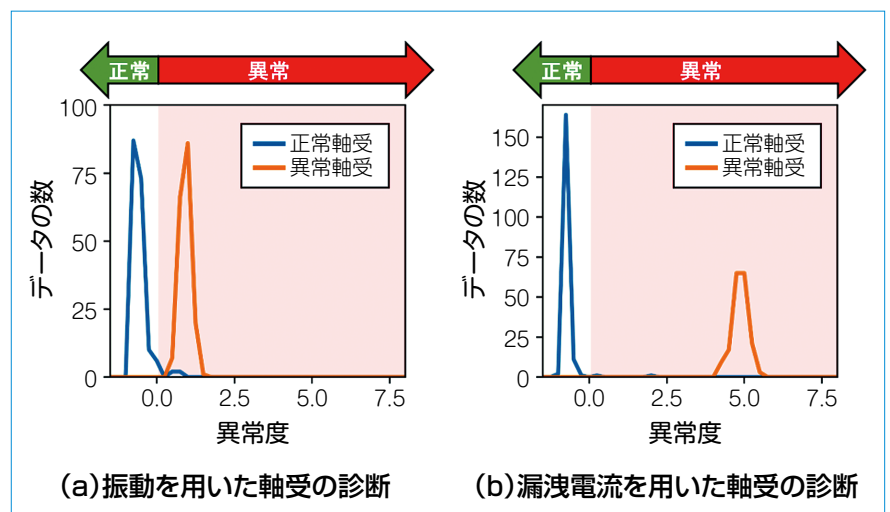


図5 軸受の異常度算出結果(高速での走行を模擬)

おわりに

ここではオクターブバンド分析と機械学習を用いた異常検知手法について紹介しました。提案した手法は正常時のデータのみで機器の異常を検知することが可能です。この手法をモーター軸受に適用して異常模擬試験を行い、異常検知可能であることを定置試験で確認しました。

今後は実際の車両での異常検知性能の確認や、機器の劣化状態の評価といったことに取り組んでいきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 近藤稔：振動の音色で機器の異常を検知する, RRR, Vol.74, No.10, pp.16-19, 2017
- 2) 西谷幸祐, 近藤稔：振動による駆動機器用状態監視システムの営業列車への適用, JREA, Vol.61, No.5, pp.11-14, 2018
- 3) A.H.Bonnet, C.Yung : Increased Efficiency Versus Increased Reliability, IEEE Industry Applications Magazine, Vol.14, Issue 1, pp.29-36, 2008
- 4) 近藤稔, 堺谷洋：振動のオクターブバンド分析を用いた駆動用電動機軸受の異常検知, Dynamics and Design Conference 2018
- 5) 堺谷洋, 近藤稔, 高橋研：主電動機軸受の漏洩電流を用いた異常検知手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.29-34, 2019