

変速機の振動を用いた異常摩耗状態監視手法の検証

高重 達郎* 堺谷 洋* 山本 真* 横内 俊秀*

Verification of Abnormal Wear Condition Monitoring Method Using Vibration of Transmission

Tatsuro TAKASHIGE Yo SAKAIDANI

Shin YAMAMOTO Toshihide YOKOUCHI

Driving devices used for diesel cars, such as diesel engine and transmission, have a potential of raising transport disorders when they are under abnormal conditions. It is desired to early detect an indication of an abnormality to prevent the failure. Therefore, we have been conducting research and development of a condition monitoring method using vibration, targeting driving devices. We carried out a bench test to simulate an abnormal condition, in which SiC was mixed into the transmission oil to promote wear inside the transmission. As a result of the test, it is confirmed that the abnormal wear of the transmission can be detected by applying the condition monitoring method for transmission using vibration is effective.

キーワード：振動，状態監視，オクターブバンド分析，機械学習，異常検知，変速機

1. はじめに

鉄道車両の動力源として電動機やディーゼルエンジン（以下、エンジンと呼ぶ）が広く利用されている。動力源の中で、エンジンを動力とした鉄道車両（以下、気動車と呼ぶ）はエンジンの動力を車輪に伝えるために、変速機や推進軸、減速機などの動力伝達機器を搭載している。気動車は主に非電化区間を走行し、特急列車やローカル線などに幅広く利用されている。特にローカル線で使用される車両は、1両編成（1エンジン搭載）で使われていることがあり、このような車両のエンジンや動力伝達機器に故障が発生すると、遅延や走行不能となり、大きな輸送障害につながる可能性がある。そのため、これらの機器の故障の予兆を把握し、走行中の故障を未然に防ぐことが望ましい。

機械部品に異常が発生した際、振動に変化が現れるため、主に機械部品で構成されているエンジンや動力伝達機器は、機器の振動の変化を捉えることで異常を検知できる可能性がある。しかし、振動状況は運転状況や線路状態等によっても様々に変化するため、振動の大きさや特定の周波数のみを分析するだけでは、適切に異常検知を行うことが困難であると考えられる。そこで著者らは、振動のオクターブバンド分析と機械学習を組み合わせ、状態監視手法の開発を行っている¹⁾。ここで用いる機械学習の手法は、近傍法に基づいた手法である。これまで、エンジンの潤滑油に異物を混入してエンジン内部

の摩耗を促進させる単体試験を行い、本手法の有効性を確認した^{2) 3) 4)}。一方、営業車両でも振動データの取得、および分析を行っており、本手法により補機電力用の発電機に動力を伝えるCSU（動力伝達装置）で発生した異常の傾向を1か月以上前から捉えていたことを確認した⁵⁾。

本報告では、気動車の変速機について、エンジンの単体試験と同様に、変速機の潤滑油に異物を混入して変速機内部の摩耗を促進させる単体試験を行った。測定した振動データから、提案する手法を検証した結果について報告する。

2. 状態監視システムの概要

2.1 システムの構成

本手法で提案する状態監視システムの構成図を図1に示す。このシステムは、車上側に設置された状態監視装置および機器の振動を測定する振動加速度センサと、地上側に診断プログラムを実装したパソコンとで構成される。振動加速度センサで取得した振動データは、状態監視装置でオクターブバンド分析し、記録される。これらのデータを用いて、地上側の診断プログラムにより異常を判定し、機器の状態を監視する。この診断プログラムによる分析結果は、乗務員に対してリアルタイムで通知するのではなく、不具合が発生する予兆の段階で機器の点検や修繕等の処置が実施できるよう、地上の車両検修員へ情報提供することを目的としている。

* 車両制御技術研究部 動力システム研究室

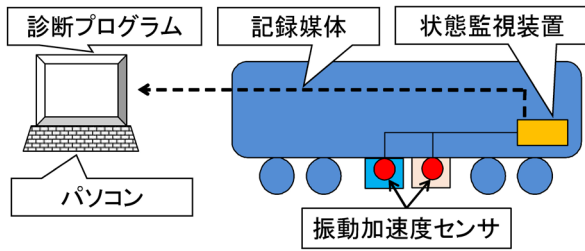


図1 状態監視システムの構成図

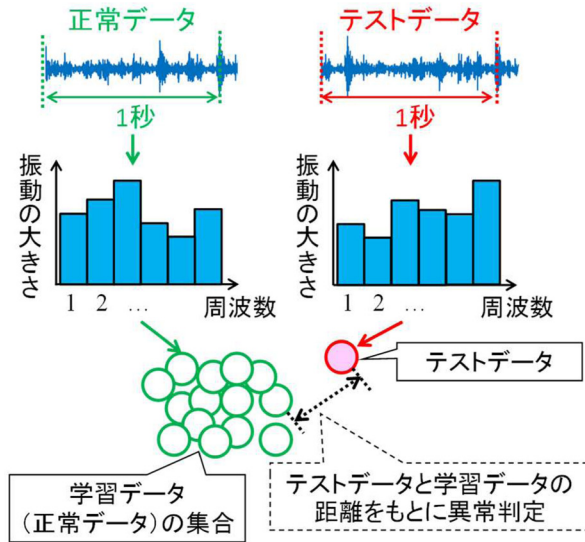


図2 異常検知の考え方

2.2 異常検知手法の概要

本異常検知手法は、機器が正常な状態での振動データを学習データとして記憶させ、評価対象の振動データ（テストデータ）が正常な範囲に含まれるかどうかを近傍法に基づいた手法により判別する。図2に示すように、最初に取得した振動データを1秒毎に分割し、それぞれに対してオクターブバンド分析を行う。次に、オクターブバンド分析結果に対して主成分分析を行い、その結果を多次元空間上の1点の座標に対応させて、テストデータと学習データ（正常データ）の距離をもとに異常判定を行う¹⁾。異常判定には、テストデータに最も距離の近い学習データとの距離から算出した異常度という指標を用いる。振動データの異常度が負の値の場合は正常と判定する。一方、振動データの異常度が正の値の場合は異常と判定し、異常データと認識される。本報告ではさらに異常度を用いて算出した異常発生率で異常判定の評価を行う。異常発生率とは、各試番の振動データに対し、異常データ数を、各試番の全振動データ数で除した値であり、異常発生率が高いほどその試番中での異常データが占める割合が高いことを表す。

2.3 周波数帯毎の異常検知手法

本異常検知手法は、正常な振動データのみを学習して異常検知を行うため、比較する異常な状態の振動データが事前に無くても異常検知ができる汎用性の高い手法であるが、異常判定された後にどのような処置を行うべきかを判断できないという問題点がある。一般的に、鉄道車両の場合は、回転体のアンバランスや締結部のゆるみ等に起因する振動は100Hz以下の周波数帯に、歯車や軸受等の傷や異常摩耗に起因する振動は1kHz以上の周波数帯に発生すると考えられる。また、上記のゆるみや傷の状況により、100Hz～1kHzの周波数帯にも異常振動が発生する。

筆者らはこれまでに、100Hz以下を「低周波数帯」、100Hz～1kHzを「中周波数帯」、1kHz以上を「高周波数帯」として振動データを3つに分割し、それぞれの周波数帯で異常判定を行うことで、異常の簡易診断が可能な手法を提案し、その有効性を検証した⁶⁾。本異常検知手法においてもその考え方を適用し、それぞれの周波数帯で異常発生率を算出して、異常判定を行う。

3. 試験方法

3.1 試験ベンチ構成

変速機異常模擬試験を実施した単体試験ベンチの構成を図3に示す。実際の営業車両ではエンジンと変速機を直結して動力を伝達しているが、単体試験ベンチではエンジンと変速機の間にはシャフトを介して動力を伝達している。試験で使用した変速機は鉄道用として使用されている変速1段・直結4段の変速機である。



図3 試験ベンチの構成

3.2 測定項目

試験中は変速機の振動3点と変速機を支える架台の振動1点の計4点を1軸の加速度センサ（リオン製：PV-41）でそれぞれ測定した。各加速度センサの取り付け位置を図4に示す。また振動以外の測定項目として、変速機の入出力回転数、変速機の各油圧、水ダイナモ（負荷吸収装置）のトルクなどを測定した。

各加速度センサを図5に示す状態監視装置へ接続し、状態監視装置の中で信号処理を行う。状態監視装置の信

号処理の仕様を表1に示す。振動測定は12.5kHzのサンプリング周波数で実施し、1秒毎に実効値の算出とオクターブバンド分析を行った上で状態監視装置に挿入したUSBメモリにその結果を記録した。本試験では、次節で詳述する各試験番の運転時間中は常にサンプリングを行った。

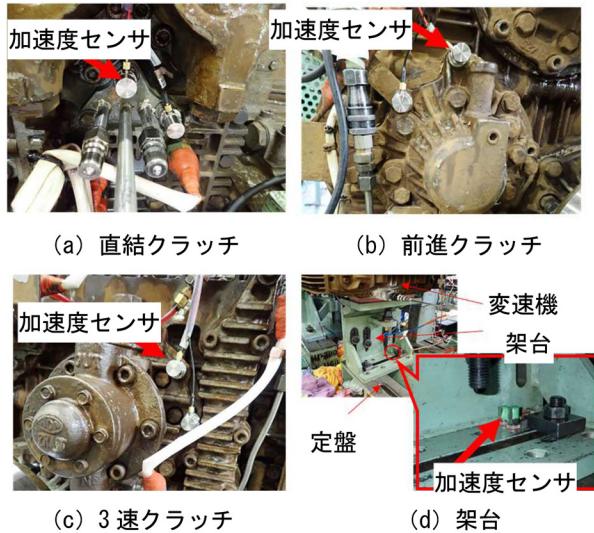


図4 加速度センサ取り付け位置

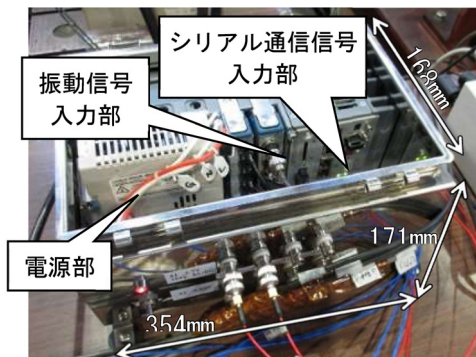


図5 状態監視装置

表1 状態監視装置の信号処理の仕様

項目		仕様
オクターブバンド分析	バンド幅	1/12
	周波数範囲	10~5000Hz
サンプリング周波数		12.5kHz
データ記録周期		1s
出力ファイル形式		CSV

3.3 試験条件

本異常模擬試験では、変速機油中に異物（炭化ケイ素（SiC）、5 μ m以下）を混入した状態で変速機を駆動し、変速機油を循環させて変速機内部の異常摩耗を促進し

た。各試験番のSiC濃度、負荷条件、累積運転時間を表2に示す。試験時の運転条件は、入力回転数をエンジンの最高出力時の回転数である2100rpmとし、変速機内なるべく多くのギアが噛み合うようにするため、速度段を前進の直結3段とした。

また、SiCが変速機内部を循環しやすくなるように、トルクコンバータ側のオイルフィルタを取り外し、ソレノイド側のオイルフィルタはSiC混入によるソレノイド動作不良を防ぐために取付けたままとした（図6、図7）。

さらに、本試験では鉄を素材とする変速機内部の歯車や軸受に異物を噛みこみ、摺動することで部品が摩耗して、変速機油中の鉄分濃度が上昇すると想定されるため、変速機油中の鉄粉濃度を併せて測定した。

本試験では、まず、SiCを投入しない状態（SiC濃度0%）で変速機振動の学習データを取得した。その後、SiC濃度0.005%から異常模擬試験を開始し、SiC濃度を徐々に増加させた。

表2 各試験番の運転条件

試験番 No.	SiC濃度 [%]	変速機入力側 回転数[rpm]	負荷 [Nm]	累積運転 時間[min]
0	0	2100	1000	145
1	0.005			246
2	0.005			345
3	0.01			444
4	0.01			542
5	0.015			639
6	0.025			836
7	0.03			934
8	0.03			1091
9	0.05			1124
10	0.08	1239		

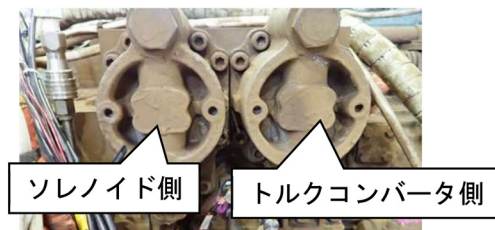


図6 変速機オイルフィルタ取り付け位置



図7 変速機オイルフィルタ

4. 試験結果

本章では、始めに状態監視装置に記録されたオクターブバンド分析結果について示す。続いて、著者らが提案する異常検知手法を用いた分析結果について示す。

4.1 オクターブバンド分析結果

4か所の加速度センサのうち、ここでは直結クラッチ部におけるオクターブバンド分析結果を図8(a)～(d)に示す。各グラフはSiC投入時の結果(オレンジ)をSiC未投入である試番0の結果(青)と比較している。紫色で表された部分は両グラフが重なっていることを示す。また、横軸はオクターブバンド分析の中心周波数を対数表示しており、縦軸は振動加速度実効値をデシベル表示で表している。なお、デシベル表示の基準加速度は 1.0m/s^2 としている。これらのグラフは各中心周波数における振動加速度実効値の最小値と最大値を表す。

図8(a)の結果を見るとSiC濃度0.005%の条件ではオクターブバンド分析結果からはSiC未投入との明らかな差異は見られない。図8(b)の結果を見ると、概ね10Hz～1kHzまでは振動加速度実効値の取りうる範囲に明確な差異は見られない。しかし、1kHz以上の高周波数帯ではSiC投入後に振動加速度実効値が明確に高くなっている周波数帯が存在している。つまり、ここではSiC投入によって変速機内部で摩耗部分が生じ、それによって1kHz以上の高周波数帯で振動が変化したと考えられる。さらに、図8(c)、図8(d)の結果を見ると、SiC濃度の増加に従って、振動加速度実効値が全体的に増加していることが分かる。つまり、それまでの試番で発生した1kHz以上の振動加速度実効値の変化に加え、1kHz未満の振動加速度実効値の増加も顕著になっている。これはSiC投入初期に発生した変速機内部の摩耗が進展し、変速機内にかたつきなどが発生したためと考えられる。

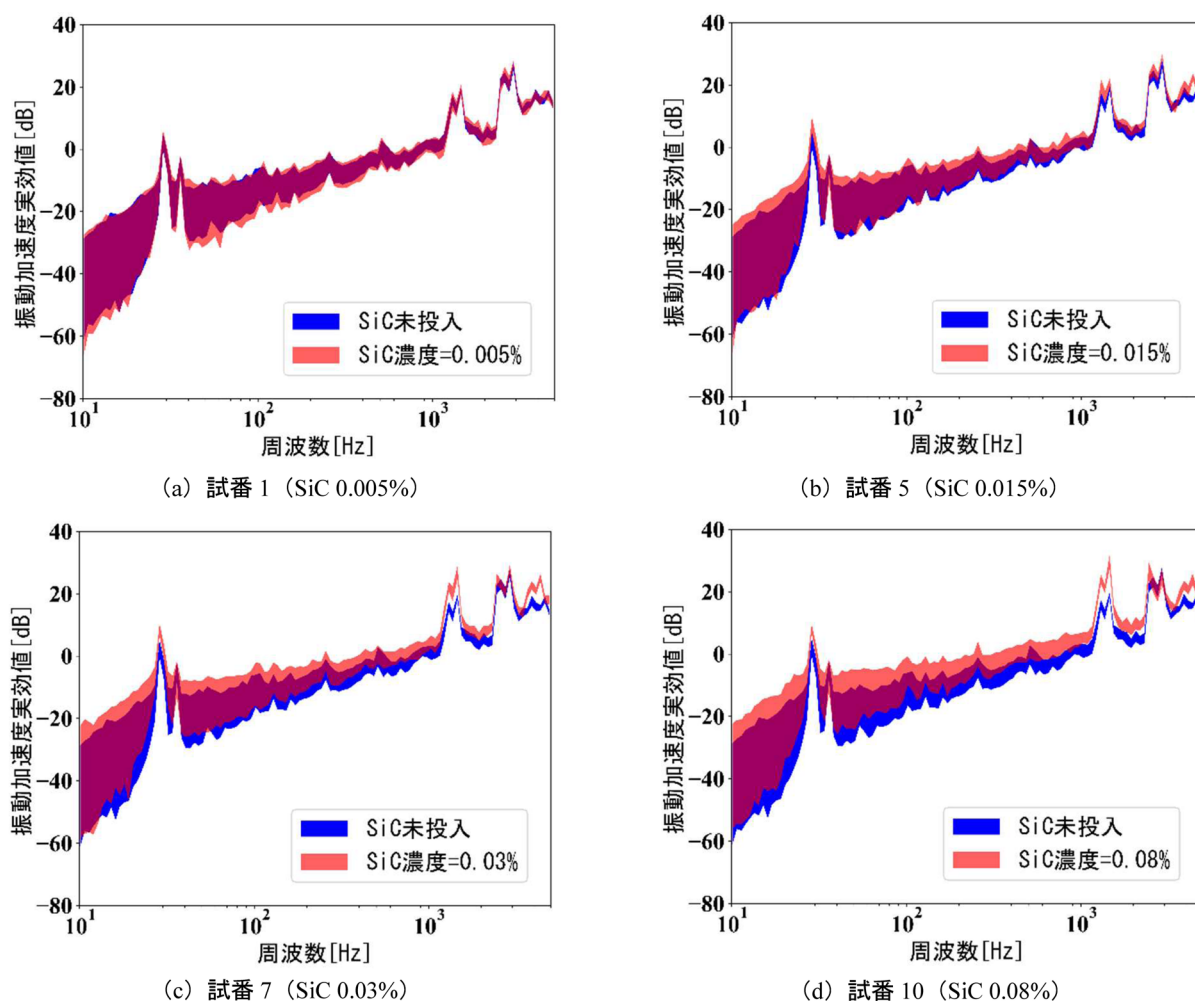


図8 オクターブバンド分析結果(直結クラッチ)

4.2 異常検知手法の分析結果

続いて、我々が提案する異常検知手法を用いて分析した結果について示す。得られた振動データを用いて、異常度計算を行った。2章で述べたように、周波数帯によってSiC投入による影響が異なるため、得られた振動データを低周波数帯、中周波数帯、高周波数帯の3つの周波数帯に分けて異常度計算を行った。先ほどのオクターブバンド分析と同じく、図4に示した直結クラッチの振動データについて、各試番の異常発生率を算出した結果を図9に示す。

図9の異常発生率に着目すると、高周波数帯においてはSiC濃度0.005%（試番1と試番2）の時点で異常発生率が70%を超えている。さらに、SiC濃度が0.01%以上の全ての試験条件で高周波数帯の異常発生率が100%になる。高周波数帯の異常として変速機内部の歯車や軸受の傷もしくは異常摩耗による振動の変化が起こりうることから、SiC投入によって変速機内部の摩耗が発生したと考えられる。

また、中周波数帯に着目すると、SiC濃度が0.01%の試番3以降ではSiC濃度と異常発生率が概ね単調増加しており、SiC濃度が0.03%（試番8）以降は異常発生率が100%になっている。さらに、低周波数帯についてもSiC濃度が0.015%以上になると、SiC濃度0.08%（試番10）を除いてSiC濃度と異常発生率が概ね正の相関関係にあり、異常発生率はSiC濃度0.05%で最大の90%程度に達している。

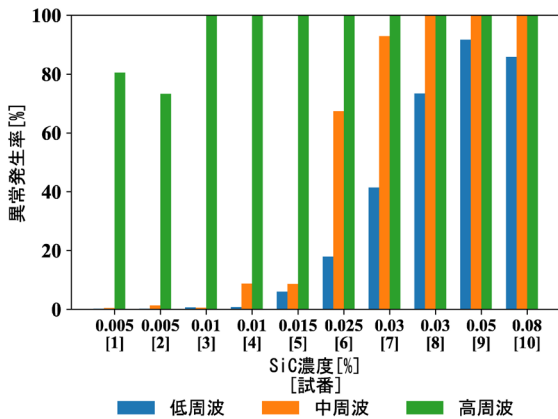


図9 異常発生率（直結クラッチ）

一方、各試番について変速機油中のSiC濃度と鉄粉濃度の推移を示した図10を見ると、SiC濃度の増加に伴って変速機内部の部品が摩耗し、鉄粉濃度が増加したものと考えられる。低周波数帯、中周波数帯では摩耗が進展した結果、回転体のがたつきや傷などが発生して異常検知されうることから、SiC濃度の上昇に伴う鉄粉濃度の増加と対応するように変速機内部の摩耗が進展していたと考えられる。

本試験終了後に分解調査を行い、変速機内部の状態を確認した。変速機内部のコンバータの潤滑油はSiC混入を示す白色沈殿が見られたことから、SiCが変速機内部を循環していたことが確認できる（図11）。また、変速機内部のコンバータスラスト玉軸受の内輪側にスラスト方向に等間隔の傷が見られたが（図12）、軸受の動作に異常は見られなかった。その他の部品についても摩耗や動作不良などは確認されなかった。以上より振動による状態監視手法では変速機内部の部品損傷が初期の状態であっても振動の変化から状態を把握することが可能であると考えられる。

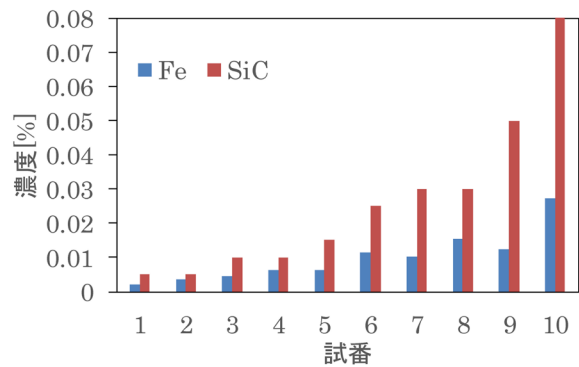


図10 変速機油中の濃度



図11 コンバータ内部の潤滑油

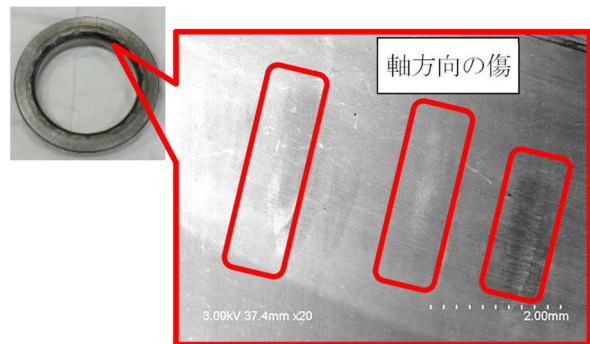


図12 コンバータスラスト玉軸受

さらに、直結クラッチ以外の加速度センサから算出した異常発生率を図13～図15に示す。異常発生率に差はあるものの、どの加速度センサでも図9と同様に高周波数帯で高い異常発生率が確認された。この結果より、変速機の加速度センサの取り付け位置によらず変速機内部の異常診断が可能である。さらに変速機の架台に取り付けた加速度センサから変速機内部の異常判定が可能であり、機器同士の接続方法によっては一つの加速度センサで複数の機器の状態監視ができる可能性を示した。

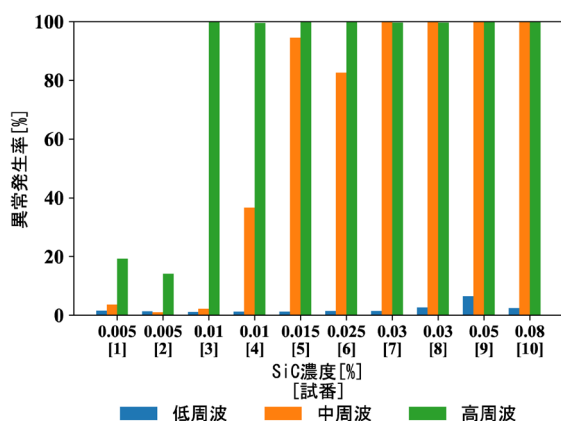


図13 異常発生率（前進クラッチ）

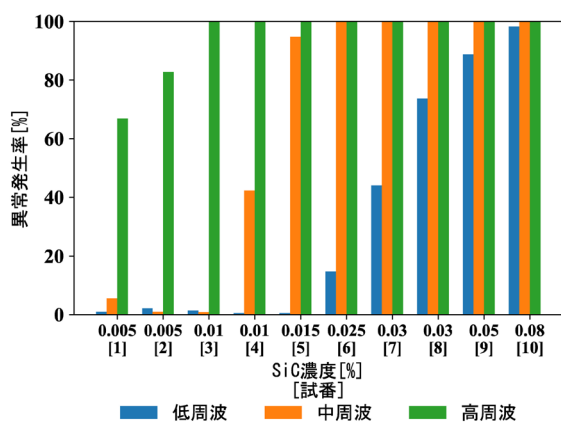


図14 異常発生率（3速クラッチ）

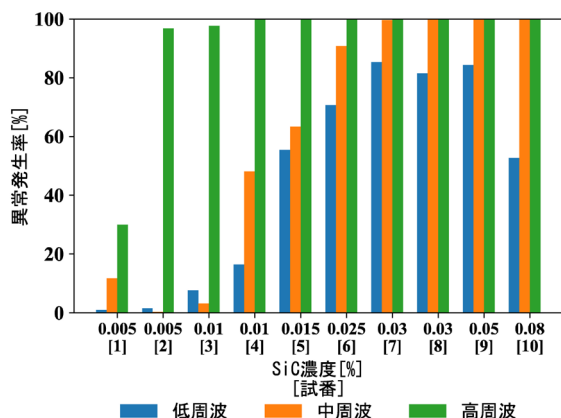


図15 異常発生率（架台）

5. まとめ

本報告では、振動のオクターブバンド分析と機械学習を組み合わせた状態監視手法を紹介し、提案手法を変速機の異常模擬試験に適用した結果について示した。

変速機油中に異物としてSiCを投入し、変速機内部の摩耗を促進させる異常模擬試験を単体試験ベンチにより行い、以下の知見を得た。

- (1) 本状態監視手法により、SiC投入時は濃度に関わらず1kHz以上の高周波数帯において異常が検知された。
- (2) 試験終了後に変速機を解体したところ、変速機内部のコンバータスラスト玉軸受の損傷が確認された。
- (3) 本状態監視手法を用いると、振動の測定箇所によらず、変速機内部の異常検知が可能であった。機器同士の接続状態によっては一つの加速度センサで複数の機器の状態監視ができる可能性を示した。

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エンジンの異常検知手法, 鉄道総研報告, Vol29, No.9, pp.17-25, 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手法を用いたディーゼルエンジン異物混入時の異常振動検知, 鉄道総研報告, Vol30, No.4, pp.47-52, 2016
- 3) 近藤稔, 真鍋慎一, 高重達郎, 菅野普: 振動による駆動用機器の状態監視手法, 講演番号1201, 第22回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2015), 2015
- 4) 近藤稔, 高重達郎: 振動のオクターブバンド分析と機械学習を用いた車両機器の異常検知, 講演番号GS0103-01, 日本機械学会関東支部第23期総会, 2017
- 5) 西谷幸祐, 近藤稔, 高重達郎, 片岡祐太, 野口敬太: 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, 鉄道総研報告, Vol32, No.8, pp.23-28, 2018
- 6) 近藤稔: 異常振動の発生周波数帯による車両機器状態の簡易診断, 鉄道総研報告, Vol32, No.1, pp.35-40, 2018