

# 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

近藤 稔\* 高重 達郎\*\*

Abnormality Detection for Auxiliary Drive Shafts on Diesel Cars Using Vibration Condition Monitoring

Minoru KONDO Tatsuro TAKASHIGE

There are many kinds of rotating machines mounted on railway vehicles such as traction motors, generators, and traction gears. The failures of them sometimes lead to service disruptions and accidents. Therefore, it is important to detect their abnormalities at an early stage and prevent their failures. In general, vibration monitoring is an effective abnormality detection method for rotating machines. However, the vibration of the machines is complicated interfered by vehicle vibration and varied operation status. To address this issue, the authors have proposed an abnormality detection method using vibration octave spectra and machine learning. In order to verify the proposed method, engine tests are conducted using auxiliary drive shaft with two simulated abnormalities. The test results show that the proposed method can detect and distinguish between the simulated abnormalities.

キーワード：状態監視，異常検知，気動車，補機駆動軸，オクターブバンド分析，機械学習

## 1. はじめに

気動車では補機用の発電機やラジエータファンを駆動するための動力を，補機駆動軸を介してディーゼル機関から取り出す方式が採用されていることが多い。この補機駆動軸には様々な振動や脈動トルクが加わるため，不具合が発生する事例が少なくない。そのため，その不具合を早期に発見して事故を未然に防ぐための効果的な検査方法が望まれている。

回転機械の検査方法としては，回転時の振動を測定する方法が一般に用いられている。補機駆動軸はディーゼル機関をアイドル運転させることで回転するため，定置で回転時の振動を測定する検査を行うことができる。そこで，著者らはアイドル時の振動測定による異常検知手法について研究開発を行っている。振動の分析方法としては，一般的な振動分析計を用いた方法と，オクターブバンド分析を用いた方法<sup>1) 2)</sup>の二つの方法について検討を行っている。

本稿では，その振動による異常検知手法の検証を行うため，エンジンベンチ試験装置で行った補機駆動軸の異常模擬試験について報告する。異常模擬は，補機駆動軸取り付け部の異常と，補機駆動軸ゴムカップリングの硬化の二種類について実施した。以下では，まず，異常模擬の方法を含めた試験装置について説明し，次に，振動の測定方法や異常検知のための分析方法について説明す

\* 車両制御技術研究部 動力システム研究室

\*\* 車両制御技術研究部 動力システム研究室 (現 出向中)

る。そして最後に，振動の測定結果と提案手法による異常度の計算結果について報告する。

## 2. 異常模擬試験方法

### 2.1 試験装置の構成

試験装置の外観を図1に示す。今回の試験はエンジンベンチ試験装置に取り付けられたエンジンを用いて実施した。エンジンベンチ試験装置ではエンジンの出力軸が動力計に取り付けられており，負荷をかけた運転ができる。しかし，今回の試験ではアイドル状態のみを対象とするため，負荷をかけない。エンジンの出力軸の反対側には補機動力を取り出すための軸がある。今回の試験では補機駆動軸の回転試験を行うため，実際の気動車と同様にその部分に補機駆動軸を接続した。また，補機駆動装置を模擬した発電機に補機駆動軸の反対側を接続した。

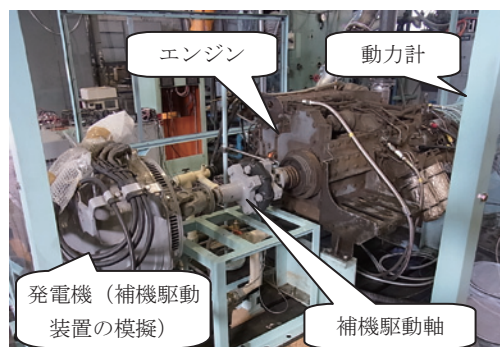


図1 試験装置外観

特集：車両技術

補機駆動軸の取り付け状況を図2に示す。補機駆動軸は、カルダンジョイント、スプライン軸、ゴムカップリングからなる。実際の車両では、補機駆動装置のシャフトにスプライン結合したフランジに、補機駆動軸のカルダンジョイントが接続されている。しかし、試験装置で用いる発電機のシャフトはテーパとキーにより結合する構造である。そのため、キー溝を加工したテーパ穴を有するフランジアダプタを試作し、このフランジアダプタを介してカルダンジョイントと発電機を接続する構造とした。

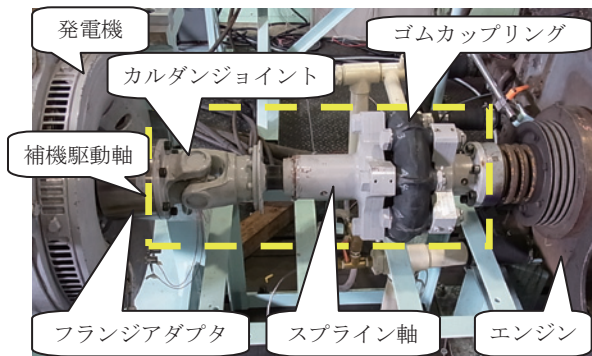


図2 補機駆動軸の取り付け状況

2.2 異常模擬方法（取り付け部隙間）

補機駆動軸に関する故障の事例として、補機駆動装置入力フランジ部の結合部における摩耗に起因して、補機駆動軸が入力フランジ部から脱落した事例がある。この結合部はスプライン結合であり、摩耗が発生すると回転方向に隙間が生じて異常振動を発生すると考えられる。そこで、今回の試験装置においてこの状況を模擬するため、フランジアダプタと発電機シャフトを結合するキーを、正常品よりも幅が小さいものに交換することで回転方向に隙間を設け、異常振動を発生させることとした。正常なキーの幅は15mmであるのに対し、異常模擬に使用したキーは14mmであり、周方向に1mmの隙間が生じる。図3は異常を模擬した取り付け部の状況であり、周方向に1mm程度の隙間ができています。

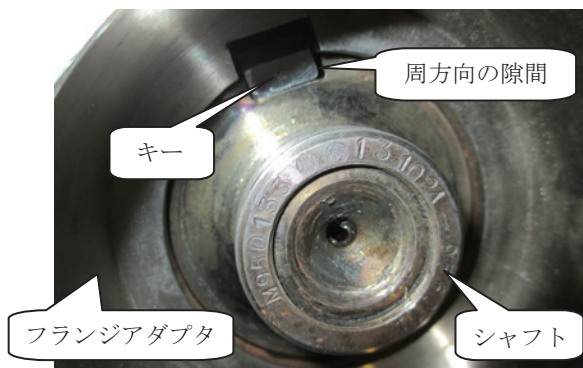


図3 取り付け部の状況

2.3 異常模擬方法（ゴムカップリング硬化）

補機駆動軸は、前述の通り、ゴムカップリング、スプライン軸、カルダンジョイントを接続した構成になっている。補機駆動軸ではゴムカップリングを用いることで、エンジンのトルク脈動が直接補機に加わらないようにしている。その一方で、ゴムカップリングがばね要素となることから、ゴムカップリングの特性がねじり振動の特性に影響すると考えられる。一般に、ゴムは経年劣化により硬化することが知られている。そこで、経年劣化を模擬するために、正常品よりも硬度を高めたゴムカップリング（表1）を準備し、ゴムカップリングを交換することで劣化を模擬した。

表1 ゴムカップリングの特性

種類	ゴム硬度 (表面)	ねじりバネ定数 (計算値)
劣化模擬品	A73	29.4 kNm/rad
正常品	A65	21.9 kNm/rad

3. 異常検知方法

3.1 振動分析計による測定と解析

振動測定による回転機械の検査は従来から広く行われており、そのための計測器も市販されている。そこで、補機駆動軸についても従来の手法が適用できるかを検証するため、今回は、そのような計測器の一つである携帯型の振動分析計（図4、リオン：VA12 振動分析計）を用いて振動測定を行う。

この振動分析計では、圧電式の振動加速度センサを測定対象に取り付けて振動測定を行う。振動分析計にはいくつかのモードがある。振動計モードでは測定された振動はその場で処理され、振動変位、振動速度、振動加速度のRMS値とピーク値、および振動加速度の波高率（クレストファクタ）が表示される。また、FFTモードでは測定された振動変位、振動速度、振動加速度の周波数分



図4 携帯型振動分析計

析（フーリエ変換）を行い、その結果をファイルに記録することが可能である。

そこで、今回の測定では通常の振動計モードでの測定を行い、さらにFFTモードで振動変位、振動速度、振動加速度のFFT解析を行い、その結果を記録する。

振動分析計の設定は表2の通りとした。レンジは必要に応じて調整しながら測定を行う。

表2 振動分析計の設定値

設定項目	設定値	
ハイパスフィルタ	3Hz	
ローパスフィルタ	5kHz	
FFT	演算種類	リニア平均 (平均回数：10回)
	測定データ種類	変位、速度、加速度
	周波数スパン	200Hz
	分析ライン数	3200
	窓関数	ハニング窓

### 3.2 状態監視装置による測定と解析

定置での振動測定による検査では、前述の通り携帯型振動分析計を使用することを前提とする。一方、車両に状態監視装置を搭載し、振動を常時監視する異常検知方法も開発中<sup>1) 2)</sup>であり、補機駆動装置に振動加速度センサを取り付ければ、開発中の状態監視システムにより補機駆動軸の異常検知ができる可能性がある。また、その状態監視システムで用いている手法を定置での振動測定に適用することも可能である。

そこで、今回の異常模擬試験では、状態監視装置による振動測定も同時に行い、開発中の状態監視システムにより補機駆動軸の異常検知が可能であるかについて検証する。

状態監視装置は振動を測定してオクターブバンド分析した結果を、回転速度等のデータとともに記録する装置である。本装置では、測定した振動加速度をオクターブバンド分析した結果と測定した電圧を平均値処理した結果を内部記憶装置及びUSB接続された外部記憶装置に記録する。本装置は電源が入ると振動加速度と電圧の測定と信号処理を自動で開始する。そして、指定した測定値が設定したしきい値を超えている間、結果を出力ファイルに書き込む。出力ファイルはパソコンでの処理が容易なように、コマ区切りで繋げたテキストデータの形式(CSV)を用いることとし、各時刻につき各測定項目を並べたものを1行出力することとする。

状態監視装置の主なソフトウェア仕様を表3に示す。

状態監視装置で得られたオクターブバンド分析結果は診断プログラムで処理されて、異常度が評価される。診

表3 状態監視装置ソフトウェア仕様

項目		仕様
オクターブバンド分析	対象チャンネル	振動加速度測定 1ch ~ 4ch
	バンド幅	1/12
	計算周期	1s
	分析周波数範囲	10Hz ~ 5kHz
データ記録周期		1s
出力ファイル形式		CSVファイル

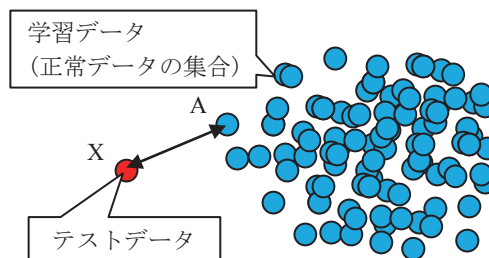


図5 診断プログラムでの異常度計算

断プログラムでは、図5のようにオクターブバンド分析結果のデータを多次元空間上の点の座標に対応させて異常度を計算する。

具体的には振動のオクターブバンド分析した結果に主成分分析等の前処理を施したものが異常検知に用いる振動を表わすデータとなり、多次元空間上の点の座標となる。そして、機械学習の近傍法の考え方に従い、評価対象とするテストデータXと最も近い学習データAを探し、X～A間の距離が学習データ間の距離に比べて大きい場合に異常度が大きくなるように異常度を定義して計算する。この異常度計算の詳細等については文献2に記載の通りである。

### 3.3 振動測定位置

振動加速度センサの取り付け位置を図6に示す。

まず、振動分析計の振動加速度センサは発電機吊り穴上部の位置(A部分)に設置し、上下方向の振動を測定した。営業車両における振動分析計を用いた測定では、補機駆動装置側面で上下方向の振動を測定するように振動加速度センサを取り付ける方法が実施しやすいため、類似の位置としてこの位置を選定した。

次に、状態監視装置の振動加速度センサについては、過去の研究開発における経験から、状態監視装置による異常検知の性能は、振動加速度センサの取り付け位置に大きく依存しないことが分かっているため、発電機の中で比較的センサを取り付け易い場所(B部分)に取り付けることとした。

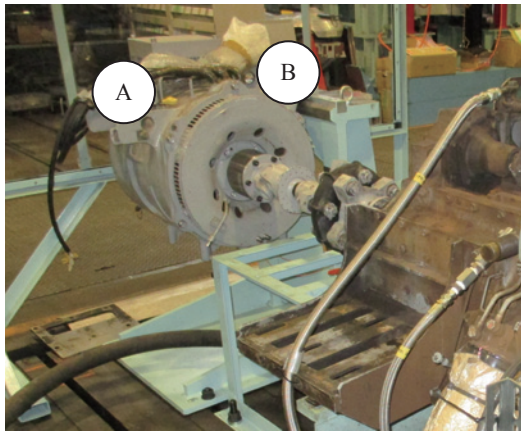


図6 振動加速度センサ取り付け位置

#### 4. 異常模擬試験結果

##### 4.1 振動分析計による結果

以下ではまず、振動分析計により測定した、振動計モードでの測定結果および解析結果について述べる。

振動計モードでは、振動加速度の実効値、ピーク値、クレストファクタ、振動速度（実効値）、振動変位（等価 p-p 値）の 5 項目について測定を行った。測定は表 4 に示す 4 回の試験について行った。運転条件はいずれもアイドリングとした。

試験条件が変更された後の運転では、部品同士がなじむまでのしばらくの間は発生する振動が安定しないため、30 分程度アイドリングした後に測定を行った。測定結果のうち振動速度と振動変位の結果を図 7 に示す。振動計モードではサンプリングを行ったタイミングにより測定値が大きく変動する可能性があるため、図 7 では 5 回のサンプリングの平均値を最大値および最小値とともに示している。

図 7 では、正常 1 と正常 2 がほぼ同じ測定値であるのに対し、隙間ありの場合には高い値が観測された。この結果から、隙間ありの場合に発生する異常振動は振動速度等の測定により検知できることが確認できる。振動速度や振動変位以外の指標についても同様の傾向であったが、加速度ピーク値、クレストファクタ、振動変位については、隙間ありの場合に最大値と最小値の差が比較的大きかった。これは、隙間ありの場合には衝撃による振動が発生しており、そのばらつきが大きいためであると

表 4 試験条件

順序	略称	条件
1	正常 1	正常状態
2	隙間あり	取り付け部隙間 (2.2 節)
3	正常 2	正常状態
4	ゴム劣化	ゴムカップリング硬化 (2.3 節)

考えられる。振動速度は、測定結果のばらつきが最も小さかったため、評価に適した指標であることが分かった。

一方、ゴム劣化の場合について見ると、正常状態より若干小さい値が観測されており、振動計モードでの測定値に対して上限値を設けてゴム劣化を検知することは困難であると考えられる。若干小さい値が観測される理由としては、ゴム硬化に起因してねじり振動が起きにくくなった可能性が考えられる。

次に FFT モードでの測定結果について述べる。FFT モードでは、振動加速度、振動速度、振動変位 3 種類の指標について FFT による周波数解析を行った。試験条件は振動計モードの場合と同様であり、表 4 の試験条件についてアイドリング開始後約 30 分に測定を行っている。なお、アイドリング時の回転速度は 700 ~ 710/min (11.7 ~ 11.8Hz) 程度である。

振動加速度の周波数解析結果を図 8 に示す。

観測されている主な周波数成分は各試験条件ともほぼ同じである。隙間ありの結果を正常状態と比較すると、

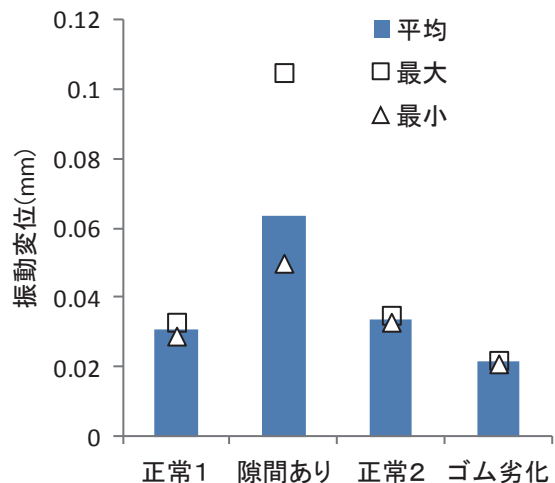
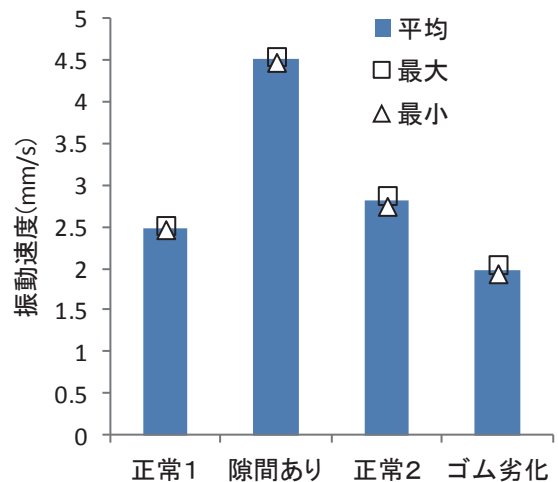


図 7 振動計モードでの測定結果  
(上：振動速度，下：振動変位)

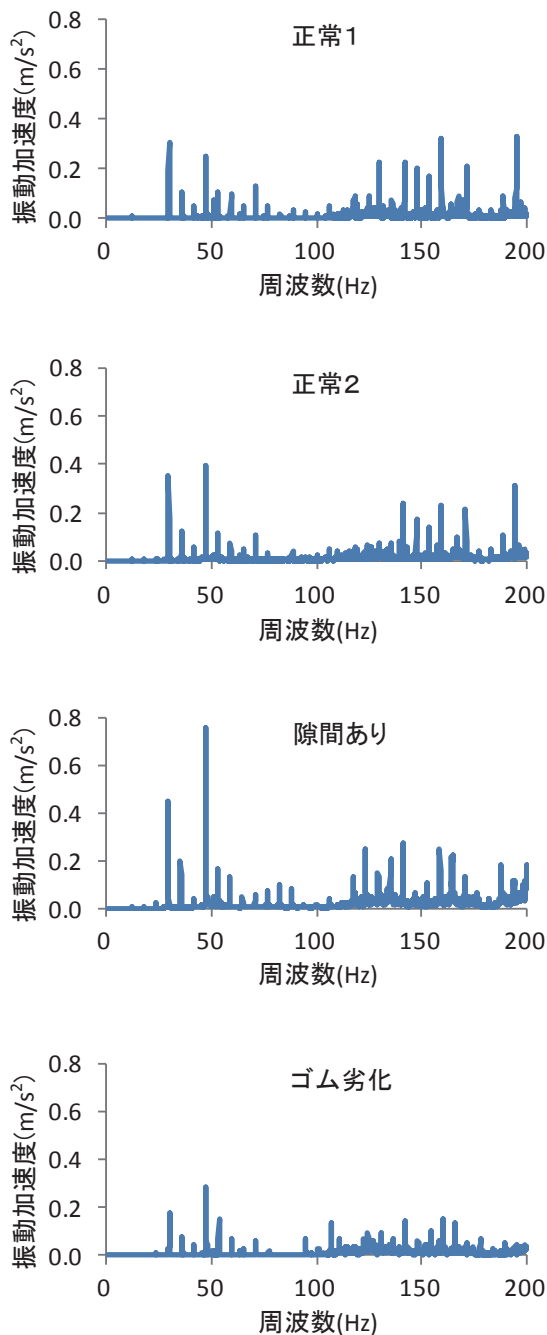


図8 FFTモードでの測定結果

29.4Hz（回転周波数の2.5次成分）と47Hzの成分（4次成分）が顕著に高い値を示している。そのため、周波数分析結果からも隙間ありの異常振動は正常状態と判別可能である。ゴム劣化の結果を正常状態と比較すると、全体としては大きな違いが認められないが、正常状態で観測されている195Hz成分がゴム劣化の条件ではほとんど観測されていない点等が違いとして認められる。このような差異が生じる理由は不明であるが、振動加速度の周波数分析結果にはゴム劣化による振動の変化が明確に表れることが分かった。この結果は、振動加速度以外の振動速度等の指標についても同様であった。

振動分析計を用いた異常検知についてまとめると、今回行った異常模擬のうち、隙間ありについては振動速度の測定により異常検知ができることが分かった。一方、ゴム劣化については振動速度による異常検知は困難であることが分かった。しかし、周波数解析結果には振動の違いが表れているため、周波数解析結果を分析して劣化を評価できる可能性があるといえる。

#### 4.2 状態監視システムによる結果

状態監視装置は診断プログラムとともに状態監視システムを構成するものであり、振動のオクターブバンド分析結果は診断プログラムで行われる異常度計算に使用される。そこで、以下では今回の測定結果に対して診断プログラムで異常度を計算した結果について述べる。

診断プログラムで異常度計算に使用するアルゴリズムはこれまでにいくつか検討してきたが、ここでは近傍法に基づく方法<sup>2)</sup>を用い、パラメータの値は、表5に示す通り、過去の検討時と同じ値とした。ただし、車両の走行データを扱う場合に必要となる定常状態の抽出<sup>1)</sup>については、定置でアイドリングのみの運転であることから、しきい値を十分に大きくすることで実質的に抽出の処理を行わないようにした。その代わりに起動直後や停止直前のデータを除外するため、対象とするエンジン回転速度の範囲を限定する処理を行っている。

異常度を算出する際には、正常状態の振動データを学習データとして与える必要がある。今回の異常度計算では、正常1の振動データ全てを学習データとして用いた。テストデータは隙間あり、正常2、ゴム劣化の振動データであるが、これらについては分解再組立後に運転を行って十分になじんだ状態を対象とすることとし、試験時の運転時間約30分のうち、最後の10分間の振動データをテストデータとして用いた。

計算した異常度のヒストグラムを図9に示す。

診断プログラムで計算される異常度は、正常と判定される場合には負の値、異常と判定される場合には正の値になる。図9では、正常2は一部が正の値であるものの、大半が負の値であり、概ね正常と判定されている。一方、隙間ありは全てのデータが異常度1以上であり、明確に異常が検知できている。また、ゴム劣化についても90%以上のデータが正の異常度であり、こちらについて

表5 診断プログラムのパラメータ

パラメータ	値
定常状態抽出のしきい値	1
エンジン回転速度の範囲	600～800/min
主成分の数	6
近傍データの数	4
近傍データ間距離のしきい値	99%

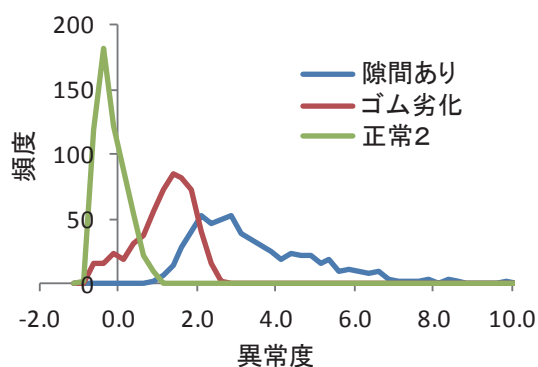


図9 異常度のヒストグラム

も概ね異常検知ができています。

なお、正常2の一部が異常と判定される原因については、正常2の場合において実際に正常1とは異なる振動パターンが観測されているためと考えられる。正常な状態での運転状態も様々な理由により変化するため、正常1のデータが全ての正常状態を網羅できていない可能性が高い。しかし、営業車両を対象とする場合には、長期間にわたり膨大な学習データを取得できるため、様々な正常状態を網羅できるようになると期待できる。

次に、異常データを学習データとして用いることで、異常の種類を診断ができることを検証する。

まず、隙間ありとゴム劣化の異常データを、それぞれ前半と後半のデータに分割し、隙間あり1、隙間あり2、ゴム劣化1、ゴム劣化2とする。その上で、例えば、異常データが隙間ありに該当するかどうかを評価するために、隙間あり1を学習データとして隙間あり2およびゴム劣化2の異常度に負号をかけた値（該当度と呼ぶ）を計算する。異常度は、元々、学習データに対する非該当度を示しているため、それに負号をかけた値は学習データに対する該当度となる。隙間あり1を学習データとして該当度を計算した結果を図10上に、ゴム劣化1を学習データとして該当度を計算した結果を図10下に示す。

図10上によると、隙間あり2の大半のデータの該当度は正の値であり、隙間ありに該当すると判別できる。一方、ゴム劣化2のデータの該当度は負の値であり、隙間ありでは無いと判別できる。同様に、図10下から、隙間あり2はゴム劣化には該当せず、ゴム劣化2はゴム劣化に該当すると判別できる。

このように、異常データを学習データとすることで、異常の種類を診断できることが確認できた。

## 5. おわりに

振動測定による補機駆動システムの検査方法の開発を進めていくため、エンジンベンチ試験装置において、補機駆動軸の異常模擬試験を実施し、提案する手法により異常が検知できるかを検証した。

その結果、振動分析計を用いた方法と、開発中の状態監視システムによる方法の両方について、異常模擬にともなう振動の変化を検知できることが確認できた。

また、状態監視システムでは過去の異常振動のデータを用いることで、異常の種類を診断できる可能性があることが確認できた。

今後は、営業車両を対象にして振動データを蓄積し、提案手法を用いた異常検知や検査の実現を目指していきたい。

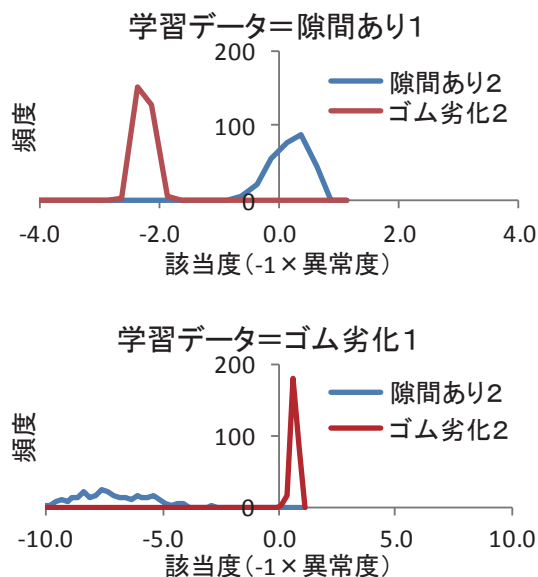


図10 非該当度のヒストグラム

## 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, 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会, GS0103-01, 2017