

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

近藤 稔*

Simple Machine Diagnosis with Frequency Band of Abnormal Vibration

Minoru KONDO

Railway vehicles are equipped with many kinds of machines such as traction diesel engines and their failures sometimes lead to service disruptions and accidents. A vibration monitoring system is expected to prevent their failures by detecting their abnormalities at an early stage. In order to make an effectual action after abnormal vibration detection, it is necessary to make a root cause diagnosis. To address this issue, a simple diagnosis method is proposed in this paper. In the method, a measured vibration octave spectrum is divided into three frequency bands and abnormality detections are conducted for each spectrum to narrow down the root cause of the vibration. The effectiveness of the method is verified using vibration data acquired from the simulated abnormality tests of traction diesel engines.

キーワード：振動，車両機器，診断，状態監視，機械学習，オクターブバンド分析

1. はじめに

鉄道車両では、電車の場合には主電動機と減速機、気動車の場合にはディーゼルエンジン、変速機、減速機、推進軸といった回転機械が、駆動用機器として用いられている。これらの駆動用機器の異常を早期に検知して故障や破損を未然に防ぐことができれば、鉄道の信頼性・安全性を高めることができる。一般に機器の状態監視には振動による方法が効果的であることが知られている。そこで、著者らは振動を用いた状態監視手法の開発を行っている^{1) 2)}。

その開発では、鉄道車両の駆動用機器の複雑な振動に対応するために振動のオクターブバンド分析結果に機械学習を適用して異常振動を検出する手法を提案し、エンジンや回転軸の異常に対する有効性を異常模擬試験により確認した。

上記の手法では正常時の振動を学習してそれと大きく異なる場合に異常と判定するため、様々な機器に適用できる汎用性の高い方法となっている。しかし、この方法では異常の発生は分かるが、どのような異常が発生しているかは分からないため、異常検知後にどう対処するかという課題がある。

一方、振動のオクターブバンド分析結果には振動の周波数に関する情報が含まれているため、これを用いて発生している異常の種類をある程度特定できる可能性がある。そこで、本論文では、提案手法を応用して、どの周

波数帯で異常が発生しているかを判別して簡易診断を行う方法を新たに提案する。そして、これまでに実施した異常模擬試験結果を対象にして提案手法が有効であることを確認したので、その結果について報告する。

以下では、まず、異常振動の発生周波数により異常の原因が簡易に診断できることを紹介し、オクターブバンド分析結果を用いた異常検知法を応用して異常振動の発生周波数帯を明らかにして簡易診断を行う方法を提案する。さらに、過去に行った異常模擬試験を紹介し、それらに提案する簡易診断法を適用した結果を示す。

2. 異常振動の発生周波数による簡易診断法

振動による機器の異常検知や故障診断は古くから行われており、多くの知見が蓄積されている。そのため、ある異常に対してどのような周波数帯の振動が発生するかが明らかにされている^{3) 4) 5)}。

まず、アンバランスやミスアライメントによる異常振動は機器の回転周波数やその整数倍の比較的低い周波数の振動を引き起こす。各部のゆるみや回転軸の変形もアンバランスやミスアライメントにつながり、異常振動の原因となる。また、ゆるみの場合には、部品同士が衝突する際に発生する振動も加わり、比較的高い周波数の振動も発生する。

一方、機械の部品であるころがり軸受や歯車についても振動による診断が有効であることが知られている。ころがり軸受における発生振動の周波数に関しては、欠陥の成長に伴い周波数が変化することが知られている³⁾。

* 車両制御技術研究部 動力システム研究室

表1 機器の異常振動の周波数と対処法

分類	発生振動数	異常	対処法 (例)
低周波	100Hz 以下	・アンバランス ・ミスアライメント ・ゆるみ	外観検査 寸法測定 打音検査
中周波	100Hz ~ 1kHz	・ゆるみ ・摩耗や衝突 (軸受等)	打音検査 潤滑油検査 分解検査
高周波	1kHz 以上	・摩耗や衝突 (軸受等) ・傷や割れ (軸受等)	潤滑油検査 分解検査

まず、外輪に傷が発生すると、割れによる数 100kHz 以上の振動が発生する。次に、傷が成長すると衝突や擦過音により数 10kHz 付近の振動が発生する。さらに摩耗が進むと軸が振動しはじめて回転数依存による成分 (例えば数 100Hz 以下) の振動が現れる。そのため、異常振動の発生周波数から欠陥の成長が分かる。歯車についても、初期の割れや傷の成長に伴う振動については類似の現象が起きるものと考えられる。

これらの知見を利用すると、鉄道車両の駆動用機器を対象とした場合には、表1のように異常振動の周波数帯で分類することで、異常振動が発生した際に行うべき検査を定めることができる。

まず、回転体のアンバランスに起因する振動の周波数は機器の回転周波数からその範囲が分かる。電車用主電動機は最高回転速度が概ね 6000/min 以下に設計されるため、回転周波数は 100Hz 以下となる。気動車のディーゼルエンジンは概ね 2100/min 以下で使用されるため回転周波数は 35Hz 以下となる。気動車ではディーゼルエンジンの動力をユニバーサルジョイントとカルダンシャフトを介して伝達するが、ミスアライメントがあると回転周波数の 2 倍の周波数 (70Hz 以下) の振動が生じる。これらのことから、鉄道車両では 100Hz 以下を低周波として扱い、この領域での異常振動についてはアンバランスやミスアライメントを原因として疑うことができる。そのため、これらの異常振動が発生した場合には、外観検査や寸法測定を行い、取付不良、異物の付着、部品の変形等の有無を調査するのが良い。

次に、軸受や歯車の異常では、前述の通り数 10kHz までの振動が発生するが、軸受異常の事例³⁾では 1.7kHz 付近に発生振動数のピークが生じている。また、軸受診断の事例⁴⁾で 4kHz 以上の周波数で不良に伴う振動が観測されており、歯車診断の例ではピッチングによる振動の増加が 4 ~ 5kHz 付近に見られる。このため、軸受や歯車の異常をとらえる上では、数 kHz の振動までを対象とするのが良く、1kHz を高周波振動の下限として設定するのが良いと考えられる。

歯車や軸受に異常が生じた場合には異常摩耗が進行していくため、潤滑油やグリースを分析して摩耗粉の量や

成分を分析することにより損傷の状況を推定することができる。そのため、高周波域で異常振動が検知された場合には、潤滑油やグリースの検査や分解検査により異常摩耗の発生を確認するのが良い。

最後に、高周波と低周波の間の領域が中周波となる。中周波領域の振動は前述の通り傷が成長した際に発生する。そのため、対処法としては高周波の場合と同様に潤滑剤の検査を行うのが良い。また、ゆるみによりガタが生じた場合にも回転周波数の 1/2 倍、1/3 倍の分数調和成分や 2 倍、3 倍の高調波成分が観測される⁵⁾ため、低周波や中周波の異常振動が観測されると考えられる。そのため、中周波の異常振動が観測された場合にはゆるみについても検査を行う必要がある。

以上のように、異常振動が起きている周波数帯を把握することで、異常の発生原因を絞り込み、適切な対処ができるようになると考えられる。

3. 周波数帯毎の異常振動の検出法

3.1 振動のオクターブバンド分析と機械学習を用いた異常検知法

これまで開発してきた振動のオクターブバンド分析と機械学習を用いた異常検知法^{1) 2)}では、正常時の振動データ (オクターブバンド分析結果) を学習データとして与え、機械学習の 1 クラス分類の手法を用いて診断対象となる振動データ (テストデータ) が正常な振動に該当するかどうかを判別する分類器を作成する。1 クラス分類の手法にはいくつかの方法があるが、本稿では近傍法に基づく方法を用いている。

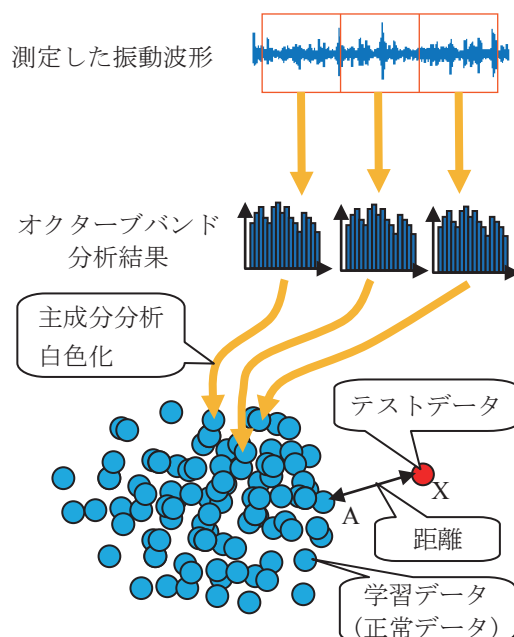


図1 異常検知の考え方

具体的には、図1に示すように振動の測定結果を1秒毎のデータに分割し、それぞれについてオクターブバンド分析を行う。次に、その分析結果に対して、前処理として主成分分析と白色化の処理を行う。

主成分分析はデータが広く分布している方向の成分を主な成分として抽出する方法であり、白色化は各データの各主成分について、全学習データの平均値を引いて標準偏差で割る処理である。

異常検知を行う際には、前処理後の各データを多次元空間上の一点の座標に対応させ、テストデータ(点X)と各学習データとのこの空間上での距離を計算し、最も距離の近い学習データ(点A)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する。

このようにすると算出した距離が基準距離を超えた場合に異常度が正の値になるため、異常度の正負で異常判定ができる。基準距離は、学習データ自身に対して評価を行った際にその99%が正常判定されるように定めている。

ただし、この方法では点Aが正常データに紛れ込んだ異常なデータであった場合に大きな影響を受けてしまうため、k番目に近い学習データまでについても同様の計算をして、平均した値を異常度とする。このkを近傍データ数と呼ぶ。

なお、これらの処理を行うプログラムの作成にあたってはオープンソースの機械学習ライブラリである scikit-learn⁶⁾ を使用している。

3.2 周波数帯毎の異常振動検出法

従来の異常検知手法では学習データの全周波数帯を異

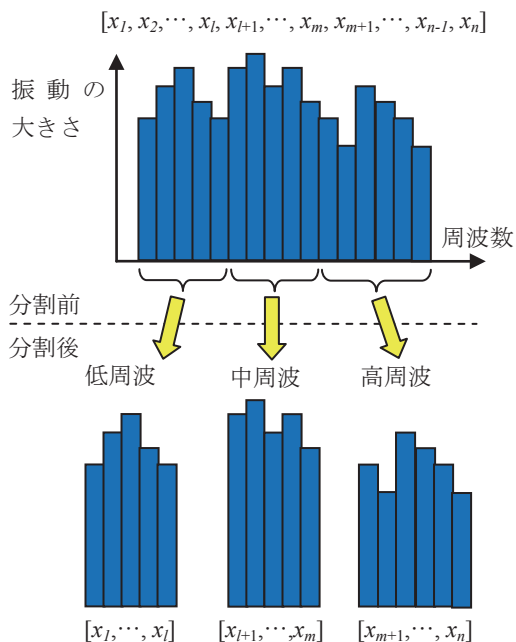


図2 オクターブバンド分析結果の分割

常判定の分類器の学習に使用していたため、異常振動が発生している周波数帯が不明であった。

そこで、オクターブバンド分析結果を周波数帯毎に分割し、各周波数帯のデータの集合について、それぞれ異常検知を行うことで、異常振動が発生している周波数帯が特定され、表1に従って簡易診断を行うことができると考えられる。

周波数帯毎に異常振動検出を行う場合には、学習データを図2のように「低周波データ」「中周波データ」「高周波データ」の3つに分けて周波数帯毎に分類器を作成する。周波数帯の境界は前述の通り100Hzと1kHzであるが、後述する異常模擬試験では1/12オクターブバンド分析を使用しており、各周波数帯の範囲を中心周波数で表わすと、低周波データは96Hz以下、中周波データは102Hzから970Hz、高周波データは1030Hz以上となる。診断時にはテストデータを学習データと同じように分割し、図3に示すように周波数帯毎に異常度計算を行うことで異常振動が発生している周波数帯が明らかになる。

各周波数帯に対して異常度計算を行う際には前節で述べた異常検知法を用いる。実際に異常度計算を行う際に

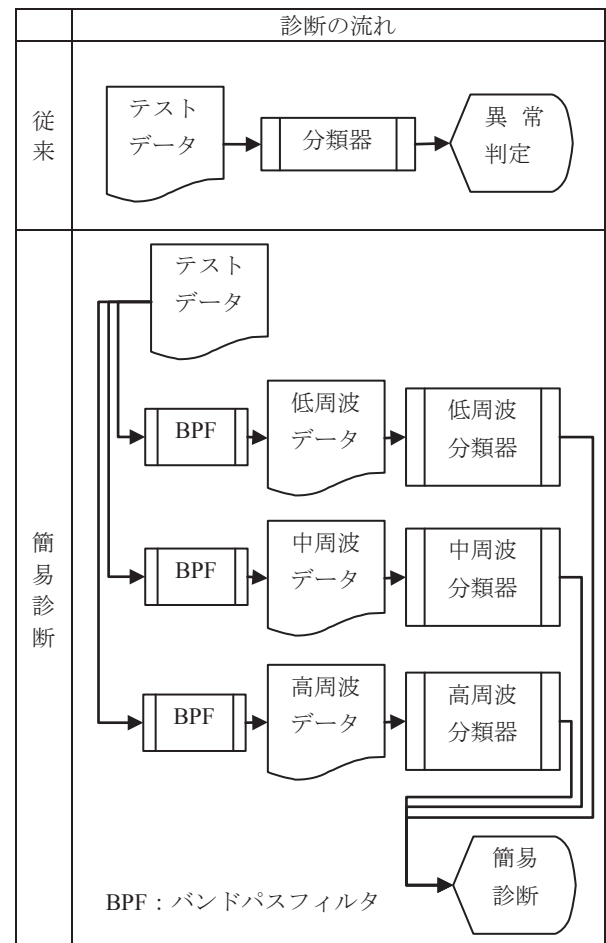


図3 簡易診断の流れ

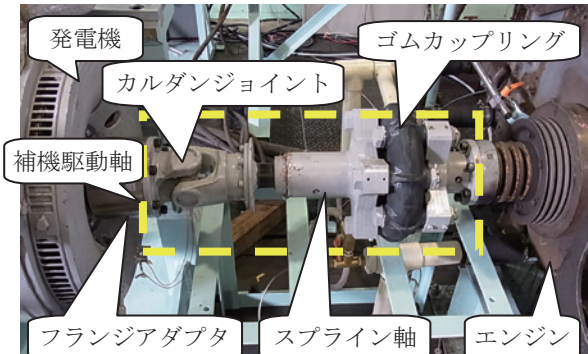
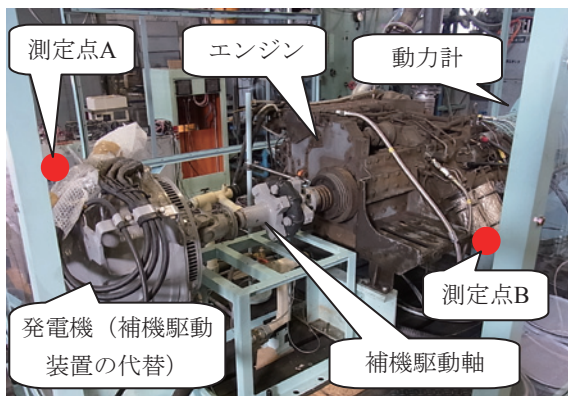
特集：車両技術

はパラメータの値を定める必要があり、次節で述べる検証においては過去の検討結果^{1) 2)}を参考にして主成分の数を6、近傍データ数を4として異常度計算を行った。

4. ディーゼルエンジンの異常模擬試験結果を用いた簡易診断法の検証

4.1 ディーゼルエンジンの異常模擬試験

今回提案する簡易診断法の検証を行うため、過去に実施した異常模擬試験において測定された振動データに対して提案手法を適用し、検証を行う。



(上：試験装置外観，下：補機駆動軸取付状況)

図4 エンジンベンチ試験装置

表2 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)
正常品	A73	29.4kNm/rad
劣化模擬品	A65	21.9kNm/rad

表3 試験条件

順序	略称	条件
1	正常1	正常状態
2	隙間あり	取り付け部異常
3	正常2	正常状態
4	ゴム劣化	ゴムカップリング硬化

異常模擬試験は補機駆動軸の異常模擬試験とエンジン潤滑油への異物混入による異常摩耗試験の二つがあり、いずれも図4に示すエンジンベンチにおいて同種のエンジンにより行われた。エンジンの運転はいずれもアイドルリング運転のみで行った。

補機駆動軸の試験では取付部の異常摩耗を模擬した「隙間あり」と、ゴムカップリングのゴムの経年劣化による硬化を模擬した「ゴム劣化」の二種類の異常模擬を行った。

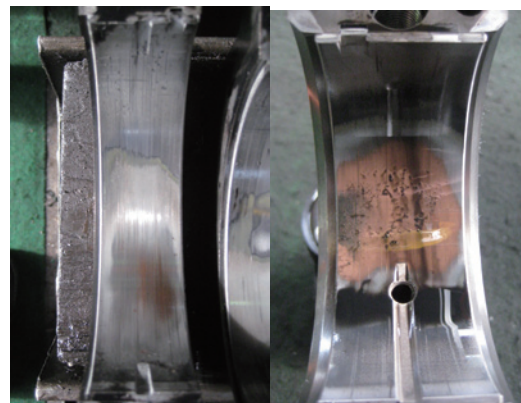
「隙間あり」の試験では、補機駆動軸と発電機の結合部においてフランジ部のキーの幅を1mm狭くして周方向に隙間を設けることにより、結合部が異常摩耗して周方向に隙間が生じる状況を模擬した。

「ゴム劣化」の試験では、ゴムカップリングの経年劣化を模擬するために、ゴムカップリングを硬度の高いゴムで製作された劣化模擬品(表2)に交換して試験を行った。

これらの補機駆動軸の異常模擬試験については、表3に示す順序で実施した。正常状態については「正常1」と「正常2」を実施し、「正常1」を学習データ用、「正常2」をテストデータ用として実施した。試験は各条件につき約30分ずつ実施した。

表4 SiC濃度の設定

SiC濃度 [%]	運転時間 [分]	累積運転時間 [分]
0.05	40	40
0.1	80	120
0.15	70	190
0.2	70	260
0.25	80	340
0.3	90	430
0.35	60	490
0.4	60	550
0.5	60	610



左：主軸受（メインメタル）（下側）

右：コンロッド大端部メタル（ロッド側）

図5 エンジン内部の損傷状況の例

また、異常摩耗試験ではエンジンの潤滑油にセラミック粉末 (SiC) を表 4 に示す通り段階的に混入して異常摩耗を発生させた。試験中にはエンジンの冷却水温、潤滑油温度、潤滑油圧力等に異常は見られなかったが、試験終了後にエンジンを分解して内部を調査した結果、図 5 に示すようにエンジンの主軸受などの摺動部分が大きく摩耗しており、実際に異常摩耗が発生していたことを確認している。

以下の検証で用いる振動データは、補機駆動軸の異常模擬試験については発電機 (図 4 測定点 A) で測定したもので、異常摩耗試験についてはエンジンマウント部 (図 4 測定点 B) で測定したものである。

4.2 周波数帯毎の異常度計算結果

前章で説明した周波数帯毎の異常振動検出法を上述の異常模擬試験時の振動データに適用した結果を図 6、図 7 に示す。異常度は 1 秒毎の振動データに対して算出さ

れるが、結果を分かり易く表示するために、各条件について全振動データを対象として異常度の平均値を算出して図に示している。

まず、図 6 の「隙間あり」について見ると、低周波・中周波で異常が出ている。「隙間あり」は隙間を設けているのでゆるみと類似の状況が発生していると考えられる。また、フランジ部にゆるみがあるとアンバランスが発生している可能性が高い。さらに、異常模擬試験後にフランジ部を分解したところ、摩耗粉の発生が確認されている。よって、「隙間あり」では、ゆるみ・アンバランス・摩耗が同時に発生していると考えられ、図 6 の結果から表 1 に従い診断を行うことで、実際の状況と一致する診断結果が得られる。

次に、「ゴム劣化」については中周波で小さな異常がみられる。ゴム劣化は経年劣化の状態であって故障ではないため、大きな異常度とならないのは適切な診断結果と考えられる。表 1 には「ゴム劣化」の項目が無いが、振動特性が変化するという意味ではゆるみに似た性状を示す。そのため、もし表 1 に「ゴム劣化」を加えるのであれば、この試験結果も考慮して「ゆるみ」の列に併記するのが良いと考えられる。

図 7 のエンジン異物混入試験について見ると、はじめの「SiC0.05%」では高周波のみで異常が検知されており、表 1 に従って判断すると「異常摩耗」の診断となり、適切な診断結果であると言える。その後、摩耗が進む SiC 濃度 0.1 ~ 0.2% では中周波のみ異常となり、その後、中周波および高周波で異常が検知され、SiC 濃度 0.5% では全ての周波数帯で異常が検知されている。末期になって低周波でも異常が検知されるように変化していく様子は 2 章での説明と一致しており、概ね想定通りに診断できていることが分かる。

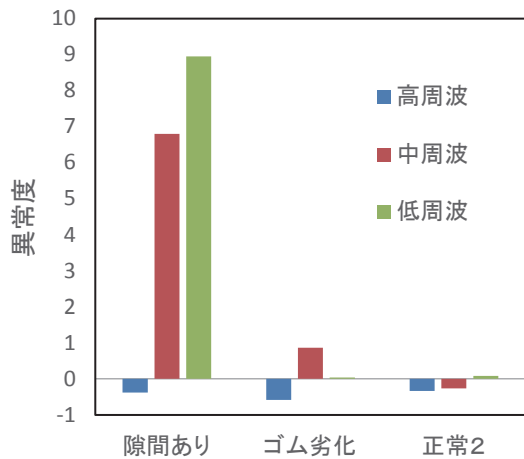


図 6 補機駆動軸試験時の異常度算出結果

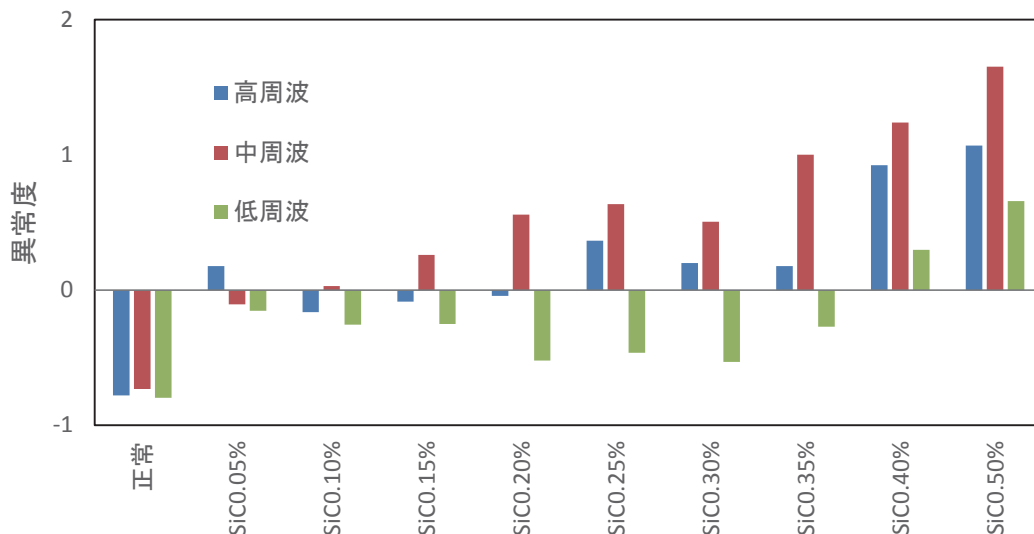


図 7 異物混入試験の異常度算出結果

特集：車両技術

以上のことから、上記の異常模擬試験においては、今回提案した簡易診断法が概ね想定通り機能していることが確認できた。

5. まとめ

鉄道車両の駆動用機器の異常振動を早期に検知するためのオクターブバンド分析を用いた異常検知法を応用して、異常の種類をある程度絞り込むことができる簡易診断法を提案した。

機器が故障した際に発生する異常振動は、その故障内容に応じて発生周波数が異なる事が知られている。提案手法ではこれに着目し、周波数帯別に異常検知を実施して異常振動の発生周波数帯を明らかにすることで、発生した故障内容を推定する。

過去に行った異常模擬試験の結果に対して簡易診断法を適用したところ、異常模擬の内容と異常振動の発生周波数帯の関係は従来知見と一致しており、概ね想定通りに診断を実施できることを確認した。

今後も、様々な異常のデータが得られた際には、本簡易診断法を適用して妥当性の検証を行うとともに、必要に応じて改良を行ってより効果的な診断法の確立を目指していきたい。

文献

- 1) 近藤稔, 真鍋慎一, 高重達郎, 菅野晋: 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, 菅野晋: 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検知, 鉄道総研報告, Vol.30, No.4, pp.47-52, 2016
- 3) 牧修市: 振動法による設備診断の実際, 日本プラントメンテナンス協会, 1983
- 4) 小林健二, 鈴木英男, 金井浩, 大橋正尚: 音・振動による診断工学, コロナ社, 2000
- 5) 豊田利夫: 回転機械診断の進め方, 日本プラントメンテナンス協会, 1991
- 6) Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. and Duchesnay, E., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, Vol.12, pp. 2825-2830, 2011.