

製品動作音の新検査法の開発

笠原 太郎
Taro Kasahara
高部 晃好
Akiyoshi Takabe

坂本 湧暉
Yuki Sakamoto
伊藤 秀浩
Hidehiro Ito

宗戸 俊樹
Toshiki Muneto

概要

自動車部品の動作音検査において、官能検査の定量化と自動化が求められている。筆者らは異音を7種類に分類し、複数の手法を併用することで異音検査精度を高めている。本稿では、特に従来手法では検出が難しい“動作音の周波数が変化する異音”の新しい検出手法を開発したので、ここに報告する。

1. はじめに

近年、自動車の電動化により車室内の静粛性が向上したことで、自動車部品の動作音に対する要求が高まっている。自動車部品の生産工程では、品質を保证するために厳しい検査が行われており、動作音検査では熟練した検査員の聴感による官能検査が広く行われている。このような官能検査は工数、検査員への負担、技術伝承の問題から定量的評価と自動化が求められている。本論文ではまず自動車部品の動作音検査で発生する異音の性質を整理し、新たに開発した“動作音の周波数が変化する異音”を検出する手法について報告する。

2. 自動車部品で発生する異音

自動車部品の動作音検査で発生する異音は7種類に分類できる(図1)。異音の大分類として“音そのものが異常”な場合と“音の変化が異常”な場合がある。“音そのものが異常”な異音は正常な作動音に対し、意図しない異音が重畳した状態であり、異音が非定常的か定常的か、その継続時間や周期によって更に分類できる。“音の変化が異常”な異音は動力源(モータ等)の異常な挙動に起因するものであり、短時間毎に見ると正常だが、音の変化パターンが異常なことが特徴である。“音の変化が異常”な異音は振幅が変化するか、周波数が変化するかによって更に分類できる。

図2は周波数が変化する異音(図1中の⑦)の例である。周波数の変化は、製品内のモータの回転速度変化によるものであり、部品の不具合や製品組付け不備の可能性もある。図2(a)は正常品、(b)は異常品の時系列信号と振幅スペクトログラムである。正常品の周波数は回

転変動によって周期的に変動しているものの、概ね一定である。一方、異常品では4sと8s付近で動作音の周波数が変化している。このような周波数が変化する異音は、他の種類の異音と比べて検出が難しく、検出技術は確立されていなかった。

3. 動作音の周波数が変化する異音の検出方法

本稿では図2(b)のような周波数の変化を検出するための方策として、振幅スペクトログラムから周波数変化の軌跡を求め、回転変動によるものと考えられる周期的な周波数変化を除いたのち、局所的な周波数の変化量を評価することとする。



図1 自動車部品の異音分類

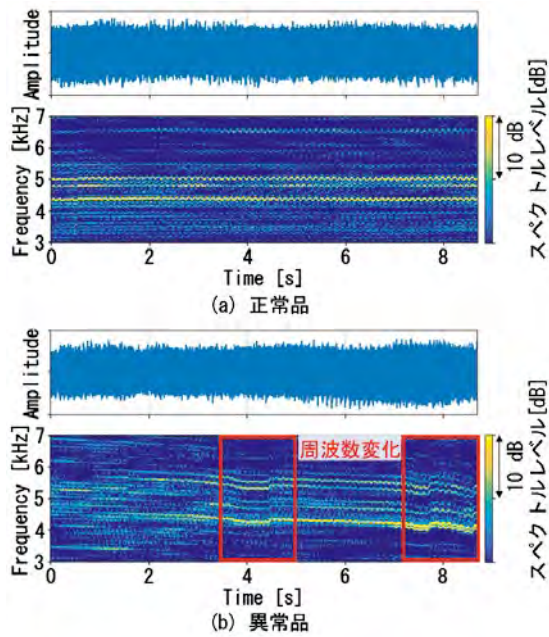


図2 振幅スペクトログラム(A特性重み付け)

3.1 従来手法

はじめに、動作音の周波数変化を検出する従来手法として、周波数スペクトルの重心(周波数変化の軌跡に相当)を監視する手法¹⁾について述べる。これは式1によって、各時間フレーム n の動作音のスペクトル重心 g_n を算出し、 g_n の変化量を閾値判定して動作音の変化を検出する手法である。

$$g_n = \frac{\sum_{i=1}^I f_i S_{i,n}}{\sum_{i=1}^I S_{i,n}} \quad (1)$$

ここで、 I と i は周波数のインデックス(0 Hz は除く)、 f_i は i 番目の周波数(周波数分解能 $\Delta f \times i$)である。 $S_{i,n}$ は周波数 f_i 、時間フレーム n における振幅スペクトログラムの強度を表す。

図3は図2の振幅スペクトログラム(グレースケール表示)とスペクトル重心(赤線)である。異常品のスペクトル重心に着目すると、異常品のスペクトル重心は4s付近で時間変化しているが、8s付近の周波数変化の特徴は確認できない。これは、スペクトル重心が各周波数成分の大きさに作用されることが原因であり、モータ音に含まれる様々な次数成分の時間的増減により、検出したい周波数の変化が埋もれていると考えられる。

以上の結果から、スペクトル重心は一部の周波数変化を捉えることができない。よって、この製品に関しては従来手法を用いて異音を検出することは難しく、次数成分の時間的増減に影響を受けない新しい検出手法が必要である。

3.2 提案手法

本稿では、周波数変化の軌跡を求めるためのロパス

トな手法を提案する(以下、提案手法)。検査対象の製品の動作音はモータ音が支配的であり、モータの回転速度変化によって音色が変化する。モータ音は回転速度によって決まる基本周波数と、基本周波数の整数倍の周波数(次数成分)からなる調波構造をもつ。提案手法では、調波構造を持つ音の解析に有効なケプストラム解析²⁾と、ロバストな周波数トラッキング手法である時間-周波数リッジ解析³⁾を用いる。提案手法の解析手順は以下の通りである。

はじめに、短時間フーリエ変換で動作音の振幅スペクトログラムを求める。次に、振幅スペクトログラムの時間フレーム毎にケプストラム解析を行う。ケプストラム解析は次式で定義される。

$$C_n = \text{IFFT}(\log_e S_n) \quad (2)$$

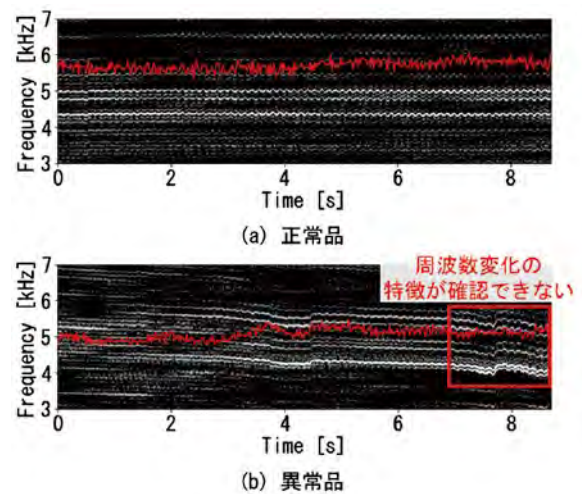


図3 スペクトル重心(図中、赤線)

ここで、 n はスペクトログラムの時間フレームのインデックスであり、 S_n は時間フレーム n における振幅スペクトルであり、IFFTは逆フーリエ変換(Inverse Fast Fourier Transform)を表す。本稿では、ケプストラムを時間フレーム n 順に並べたものをケプストログラムと呼ぶ。図4は図2をケプストラム解析したケプストログラムである。横軸は時間、縦軸はケフレンシーである。ケプストラムはパワースペクトルを周波数分析したものと解釈できることから、縦軸のケフレンシーはパワースペクトル上の周波数ピークの周期と対応している。正常品のケプストログラム図4(a)はケプストラムのピークは周期的に変動しながら一定の範囲にとどまっている。一方、異常品のケプストログラム図4(b)では、約4sと8s付近に動作音の周波数変化と対応した局所的な変化が確認できる。また、時間経過とともにケプストラムのピーク周波数が上昇している。これはモータが減速しているためと考えられる。以降、時間経過によるケプストラムの大局的な変化をドリフトと呼び、異常に関する周波数変化とは区別する。

次にケプストログラムに対して時間-周波数リッジ解析を実施する。時間-周波数リッジ解析とは時間-周波数行列から、各時間フレームにおける最大ピーク周波数の軌跡をロバストに推定する手法である。提案手法ではケプストログラムに時間-周波数リッジ解析を適用する。スペクトログラムを使用した場合と比較し、ケプストログラムを用いることで、よりロバストな周波数変化のトラッキングが可能になる。図5は図4のケプストログラムを時間-周波数リッジ解析した結果である。ケプストルの周波数変化の軌跡を求められていることがわかる。

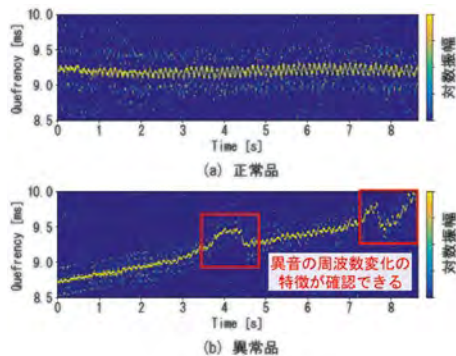


図4 正常品と異常品のケプストログラム

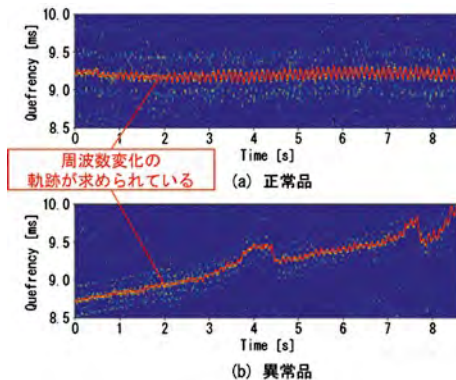


図5 時間-周波数リッジ解析結果(図中の赤線)

3.3 前処理と異常度の算出方法

本稿では、従来手法と提案手法のそれぞれに対して、同一の前処理および異常度算出を実施する(図6)。

前処理(図6(a))では、A特性周波数重みづけ、音圧正規化(音圧を実効値で除算)、短時間フーリエ変換(STFT)を順に実施する。異常度算出(図6(b))では、周期的な周波数変化を除外するための平滑化、ドリフト補正を順に実施した後、特徴量を時間フレームで分割し、各フレームにおける変化量(最大値と最小値の差)を算出し、全フレームの最大値を異常度とする。これは、式3と式4で表される。

$$\Delta x_n = \max(x_n) - \min(x_n) \quad (3)$$

$$\text{score}_{\text{ng}} = \max(\Delta x_0, \dots, \Delta x_{N-1}) \quad (4)$$

ここで、 $x_n = (x_{nH}, \dots, x_{nH+L-1})$ であり、ドリフト補正後の特徴量(従来手法ではスペクトル重心、提案手法ではケプストルの周波数変化の軌跡)をフレーム分割したベクトルを表す。 n はフレームのインデックス、 L と H はフレームの長さとしフト量を表す。なお、本稿で用いた解析パラメータは表1の通りである。

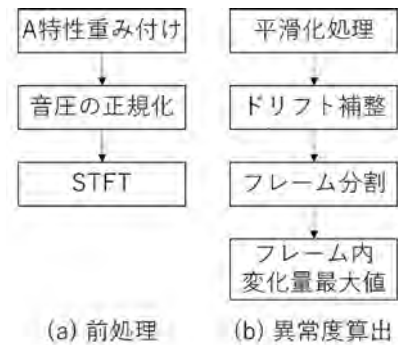


図6 前処理と異常度算出の処理フロー

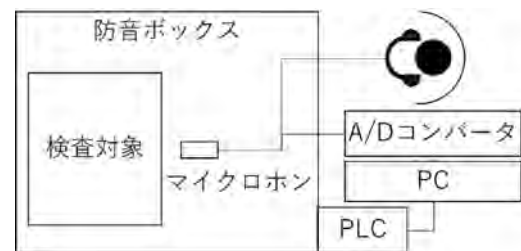


図7 動作音検査システムの構成図

表1 解析条件

サンプリング周波数		51.2 kHz
STFT	窓関数	Hann
	窓長	40 ms
	シフト長	20 ms
フレーム分割	時間フレーム長	360 ms
	シフト長	360 ms

4. 動作音検査システム構成

図7は動作音検査システムの構成図である。検査は周囲からのノイズを低減するため防音ボックス内で行う。マイクロホンは検査対象の近傍に設置し、出力信号をA/Dコンバータを用いてPCに信号を取り込み、検査を実施する。検査の結果は、PCからPLCに送信され、上位システムに通知される。PCに取り込んだ信号は音源ファイルとしてデータベースに蓄積しており、データの後解析やシステムの評価に用いられる。また、マイクロホンで収録された音はリアルタイムでモニタリングでき、官能検査と検査システムによるダブルチェックが可能となっている。

5. 評価

従来手法と提案手法の異音検出性能を評価する。評価データには正常品334サンプル、動作音の周波数が変化する異常品17サンプルを用いた。正常と異常のアノテーションは熟練した検査員が音源ファイルを聴いて実施し、異常品サンプルの1つを限度見本とした。

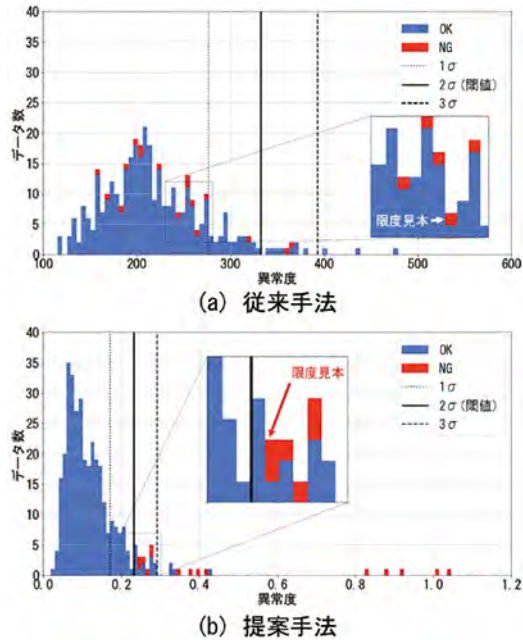


図8 異常度分布の比較

表2 検出性能を表す評価指標

	ROC-AUC	見逃し率	過検出率
従来手法	0.613	88.2%	3.6%
提案手法	0.989	0%	5.1%

検出性能の指標にはROC-AUC、異常品の見逃し率、正常品の過検出率を用いた。なお、見逃し率と過検出率を算出するために用いた閾値は、正常品サンプルの異常度の平均 μ と標準偏差 σ を用いて $\mu + 2\sigma$ に設定した。

図8は異常度のヒストグラム、表2は検出性能の評価指標の比較である。提案手法はROC-AUCが最大値1に近い0.989であることから、異常品の検出に有効であることが分かった。従来手法の見逃し率は88.2%であり、限度見本を検出できなかった。一方、提案手法は見逃し率0%で、限度見本を含む全ての異常品を検出可能なことから、異常品の流出を許容できない量産工程に耐える性能を有している。また、提案手法の過検出率は約5%であることから、検査員が官能検査を実施するワーク数を20分の1に低減できることがわかった。

以上の結果から、提案手法は周波数が変化する異音の検出に有効であると結論する。今後はROC-AUCの更なる向上と、過検出率を下げる改善が期待される。

6. おわりに

自動車部品で発生する異音の性質を整理し、“動作音の周波数が変化する異音”を検出するための新しい手法を提案した。また、実データを用いた検証により提案手法の有効性を確認した。

異音検査技術の今後の展望として、検査設備や周辺環境から到来するノイズへの対応、防音ボックスを必要としない検査の実現があげられる。

本手法の開発にあたり、立命館大学の西浦教授に貴重なアドバイスをいただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Grey, John M., John W. Gordon., Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, The Journal of the Acoustical Society of America 63.5, 1493-1500, 1978
- 2) Noll, A. Michael., Cepstrum pitch determination, The Journal of the Acoustical Society of America 41.2, 293-309, 1967
- 3) Thakur, Gaurav, et al., The synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: Robustness properties and new paleoclimate applications, Signal Processing 93.5, 1079-1094, 2013

筆者



笠原 太郎

DS部 AIセンシング1室
異音検査の技術開発に従事



坂本 湧暉

DS部 AIセンシング1室
異音検査の技術開発に従事



宗戸 俊樹

DS部 AIセンシング1室
異音検査の技術開発に従事



高部 晃好

DS部 AIセンシング1室
異音検査、因果探索の技術開発に従事



伊藤 秀浩

DS部 AIセンシング1室
異音検査、設備診断の技術開発に従事