

# 論文 Wavelet解析による異音検査\*

## Fricative Inspection with Wavelet Analysis

安面隆史

Takafumi ANMEN

近藤禎樹

Yoshiki KONDO

室崎 隆

Takashi MUROSAKI

高羽直樹

Naoki TAKAHA

伊藤 博

Hiroshi ITO

In the mode changing operation of a car's air-conditioner, we have a fricative problem. We're inspecting all products using headphones. Our goal is to invent an automated fricative inspection system. We report on the wavelet technology with (1) Spike-noise-cut filter, (2) Superposition filter, and (3) Features extract with image processing. As a result, we can carry out a fricative inspection in a noisy factory environment.

**Key words** : Fricative inspection system, Wavelet, Features extract with image processing

### 1. まえがき

車載用エアコンにおいて、吹き出し口モード切り替え時に、ロータリー式フィルムドアより摩擦異音が発生する場合があります。組立工程ではFig. 1に示すように作業者がヘッドフォンを用いて全数聴感検査を行っている。

今回、防音室を使用しない一般の工場環境下での自動検査を目標に、時間軸情報を持つ周波数解析手法である「Wavelet解析」をベースとした異音検査システムを開発した。本論文では、「(1)スパイクノイズカット処理」, 「(2)重ね合わせ処理」, 及び「(3)画像処理技術による特徴量抽出処理」を用いた摩擦異音の検出方法について述べる。



Fig. 1 Inspection by person

### 2. 方法

#### 2.1 数値演算方法

まず、音圧信号解析の数値演算方法について触れる。よく用いられるフーリエ解析過程は、数学的に次のフーリエ変換 (Fourier Transform) で表せる。

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

ここで、 $f(t)$ は解析する信号、 $e^{-i\omega}$ は複素指数、 $t$ は時間、 $\hat{f}(\omega)$ はフーリエ係数である。

このフーリエ係数は、解析する信号に複素指数を乗じ、対象の時間全体を積分することにより得られる。この係数に対応する周波数をもつ正弦波が、どの程度解析する信号の中に含まれるかを示すものである。

次に、連続ウェーブレット変換 (Continuous Wavelet Transform: 以下CWTと略す) は、(2)式で表される。

$$C_{a,b} = \int_R s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

ここで、 $\psi(t)$ はマザーウェーブレットと呼ばれる基準関数、 $s(t)$ は解析するデータ、 $a$ は基準関数のスケール (時間軸上の伸縮: 周波数) を決定するパラメータ、 $b$ は基準関数の時間軸上のシフト (平行移動) を決定するパラメータ、 $C_{a,b}$ は基準関数と解析する信号との相関の強さを表すウェーブレット係数を表す。

連続ウェーブレット変換は、対象となる信号に基準関数のスケール、シフトを変化させたものを乗じ、時間領域で積分する。これにより、スケールとシフトの関数であるウェーブレット係数を計算できる。広範囲

\* (社)計測自動制御学会の了解を得て、“SICE Annual Conference 2004 in Sapporo PROCEEDINGS” より和訳して転載

のスケールでウェーブレット係数を計算することは、演算量が膨大になり、大量なデータを作成することになる。

そこで、2の階乗をベースにスケールとシフト（いわゆる、2進スケールと時間軸上の位置）を選択し解析する、より効率的で精度の高い、離散ウェーブレット変換(Discrete Wavelet Transform: 以下DWTと略す)が考案された。

DWTはMallat'sアルゴリズムで計算でき、異なるスケールでの変換係数 $c_k$ と $d_k$ は次の式で得られる。

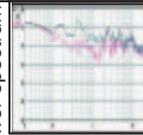
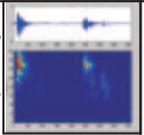
$$c_k^{j-1} = \sum_n h_{n-2k} c_n^j \tag{3a}$$

$$d_k^{j-1} = \sum_n g_{n-2k} c_n^j \tag{3b}$$

ここで $j$ は分解能、 $k$ はサンプル指標、 $c_k$ は近似(Approximation)係数、 $d_k$ は詳細(Detail)係数である。近似係数は、信号の高スケール、低周波数成分で、詳細係数は、低スケール、高周波数成分に対応する。

### 2.2 音解析方法の比較

Fig. 2にフーリエ変換とWavlet変換の解析結果の比較を示す。この比較から、Wavlet解析の方がわかりやすく、使いやすいと判断し、大まかな推定をDWT解析で高速に行い、詳細解析はCWT解析を行うこととした。

	FFT	CWT	DWT
Image	 Power spectrum Frequency	 Frequency Time	 Frequency Time
Visualization	— Continuous-frequency without time-axis	Good Continuous-frequency with time-axis	(Good) Discrete-frequency with time-axis
Calculation	Fast 30ms*	Slow 2s*	Fast 60ms*

\* 44.1kHz x 70ms (2,600 points) data comparing

Fig. 2 Comparison of the sound analysis method

## 3. 結果と考察

### 3.1 実験装置

Fig. 3に実験装置の構成を示す。

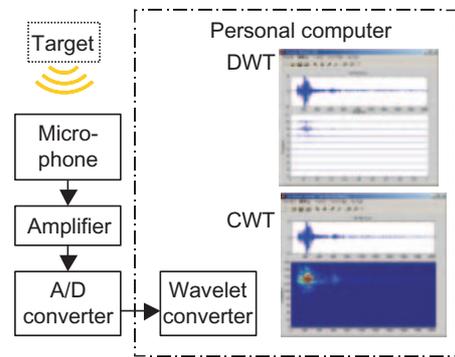


Fig. 3 Experimental setup

今回の実験では、演算ツールとしてスタンフォード大学のWaveLabを活用した。

### 3.2 DWT結果と考察

#### 3.2.1 DWT結果

Fig. 4に良品, 不良品のDWT結果を示す。上が良品の解析例, 下が不良品の解析例で、横軸は時間、縦方向は周波数帯域である。

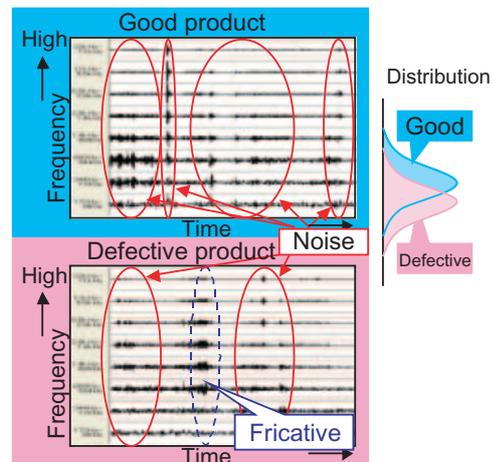


Fig. 4 DWT results

検出対象の摩擦異音と同じ周波数帯域に、工場ノイズが存在しており、音圧も摩擦異音よりも大きいものが存在する。そのため、このままでは良否判別は不可能である。

そこで、工場ノイズを除去し、摩擦異音のみを検出するための方法を考案することとした。

#### 3.2.2 考察

工場ノイズには、ベルトコンベア音、ブザー音、話し声、ねじ供給時の衝突音、電動ドライバ、エアブロー音、工場内放送などがある。

Fig. 4のDWT音解析結果から工場ノイズは以下のことが言える。

- (1) ねじ供給時の衝突音は、200ms以下の信号
- (2) その他は再現性のない信号

そこで、衝突音をカットする(1)スパイクノイズカット処理と、再現性のないものをカットする(2)重ね合わせ処理を行うフィルタを考案し、適用した。

(1) スパイクノイズカット処理

Fig. 5に、スパイクノイズカット処理フィルタの考え方を示す。

これは、連続した時間(200ms)の間一定レベルを超えている信号のみを抽出し、それより短い時間に減衰してしまう信号(スパイクノイズ)を除去するものである。

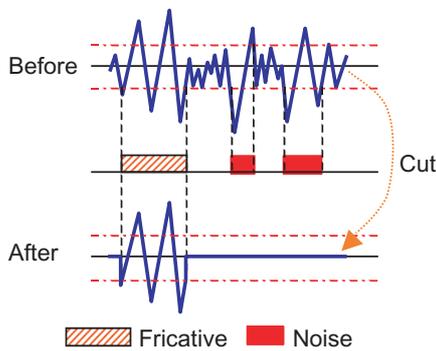


Fig. 5 Spike-noise-cut filter

スパイクノイズカット処理結果の例をFig. 6に示す。破線部のスパイクノイズが除去されることが分かる。

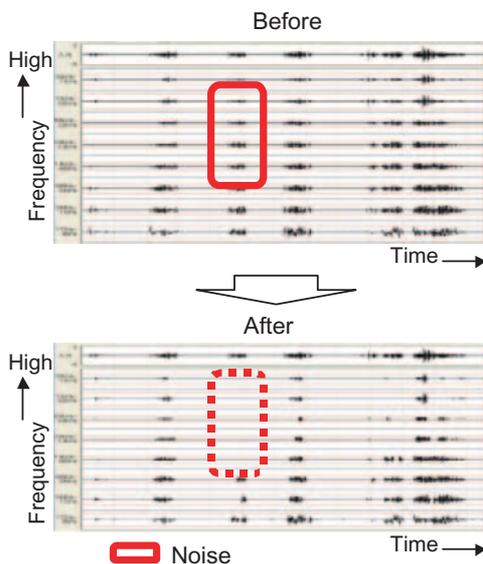


Fig. 6 Spike-noise-cut filter result

(2) 重ね合わせ処理を行うフィルタ

さらに、スパイクノイズ以外のノイズ(電動ドライバ、工場内放送、エアブロー音等)を除去するために、重ね合わせ処理フィルタを使用した。

Fig. 7に、重ね合わせ処理の考え方を示す。これは、1回目と2回目の計測信号の論理積を取り、ノイズを除去するものである。

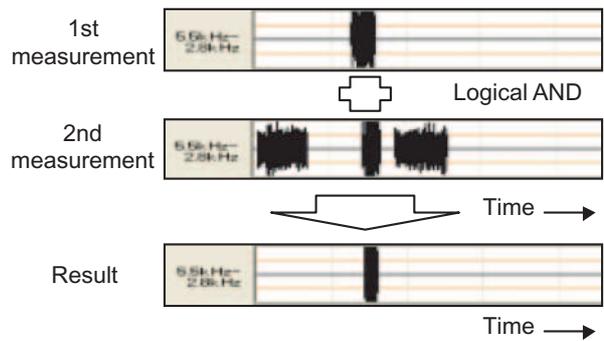


Fig. 7 Superposition filter

重ね合わせ処理結果の例をFig. 8に示す。

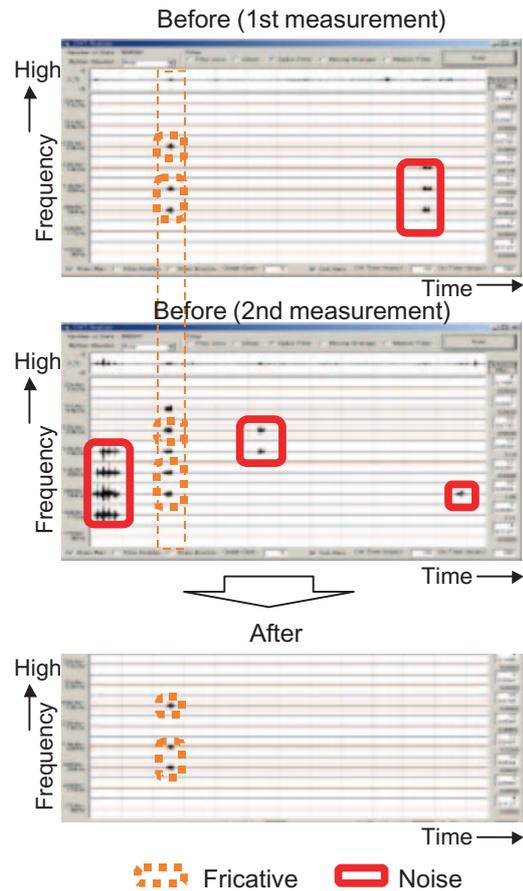


Fig. 8 Superposition filter result

Fig. 8のDWT解析結果において、破線枠で示す部分が摩擦異音に相当し、実線枠で示す部分がノイズである。1回目と2回目でノイズの表われるタイミングが異なるのに対して、摩擦異音は同じタイミングで発生することが分かる。重ね合わせ処理後の結果では、同じタイミングで発生している破線枠の部分のみを抽出している。しかし、まだ良品を不良品と判定する過剰判定が存在する。

### 3.3 CWT結果と考察

#### 3.3.1 CWT結果

そこで、詳細な解析ができるCWT解析により過剰判定した摩擦音を解析することとした。

(2)式により求めたウェーブレット係数  $C_{a,b}$  を2次元プロットしたものをFig. 9に示す。

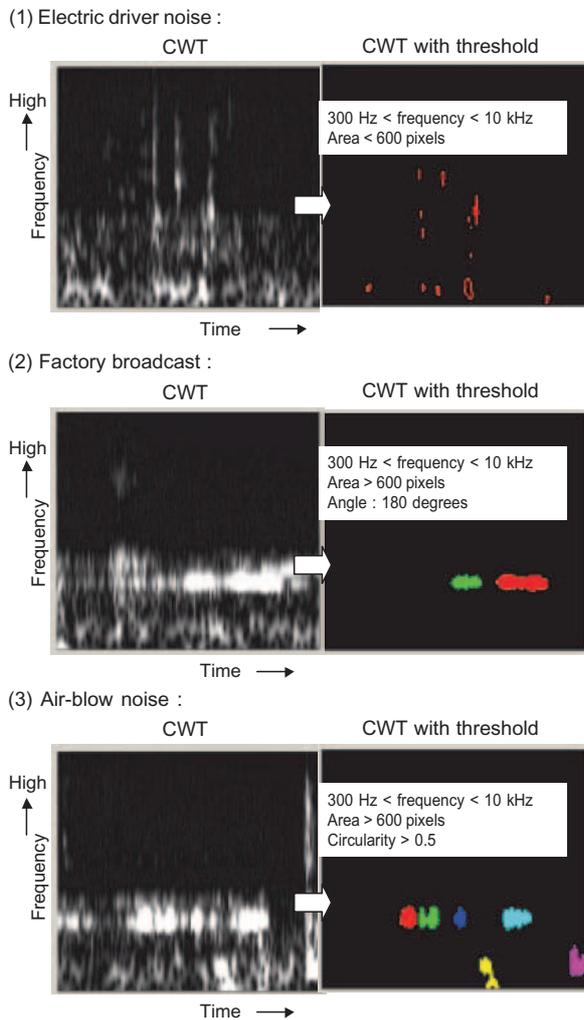


Fig. 9 CWT analysis result

ここで、縦軸は周波数、横軸は時間で、周波数成分の強い部分を明るく（白く）表現している。右側の画像は、左側のCWT解析結果を元に、設定した閾値から画像処理を用いて2値化した画像であり、個々の音の特徴を示している。

今回、以下の特徴量を抽出した。

- ・周波数帯域
- ・面積
- ・角度
- ・真円度

#### 3.3.2 考察

Fig. 9から以下のことが分かる。

- (1) 電動ドライバのノイズは個々の面積が600ピクセルより小さい特徴がある。
- (2) 工場内放送は面積が600ピクセルより大きく、角度が水平な特徴がある。
- (3) エアブロー音は面積が600ピクセルより大きく、真円度が0.5より大きい特徴がある。

以上の特徴を検出する画像処理フローをFig. 10に示す。

今回採用した、摩擦異音検出の条件式を次に示す。

$$300 \text{ Hz} < \text{frequency} < 10 \text{ kHz} \quad (4)$$

$$\text{Area} > 600 \text{ pixels} \quad (5)$$

$$|180 - \text{Angle}| > 30^\circ \quad (6)$$

$$\text{Circularity} < 0.5 \quad (7)$$

これら(4)～(7)式の条件を満たさないものはノイズとみなし、条件を満たすものを摩擦異音とみなす。

これを元に、良品の作動音と不良品の作動音に対して、テストした結果を以下に示す。

まず、良品について見てみる。良品では工場内ノイズを摩擦異音と区別する必要がある。3.3.1項で述べた三つの過剰判定したデータで検証した。

#### (1) 電動ドライバ音

Fig. 11は、ノイズとして電動ドライバ音がある場合である。電動ドライバのノイズは、個々の面積が小さいという特徴がある。従って、(4)式、(5)式からカットできる。

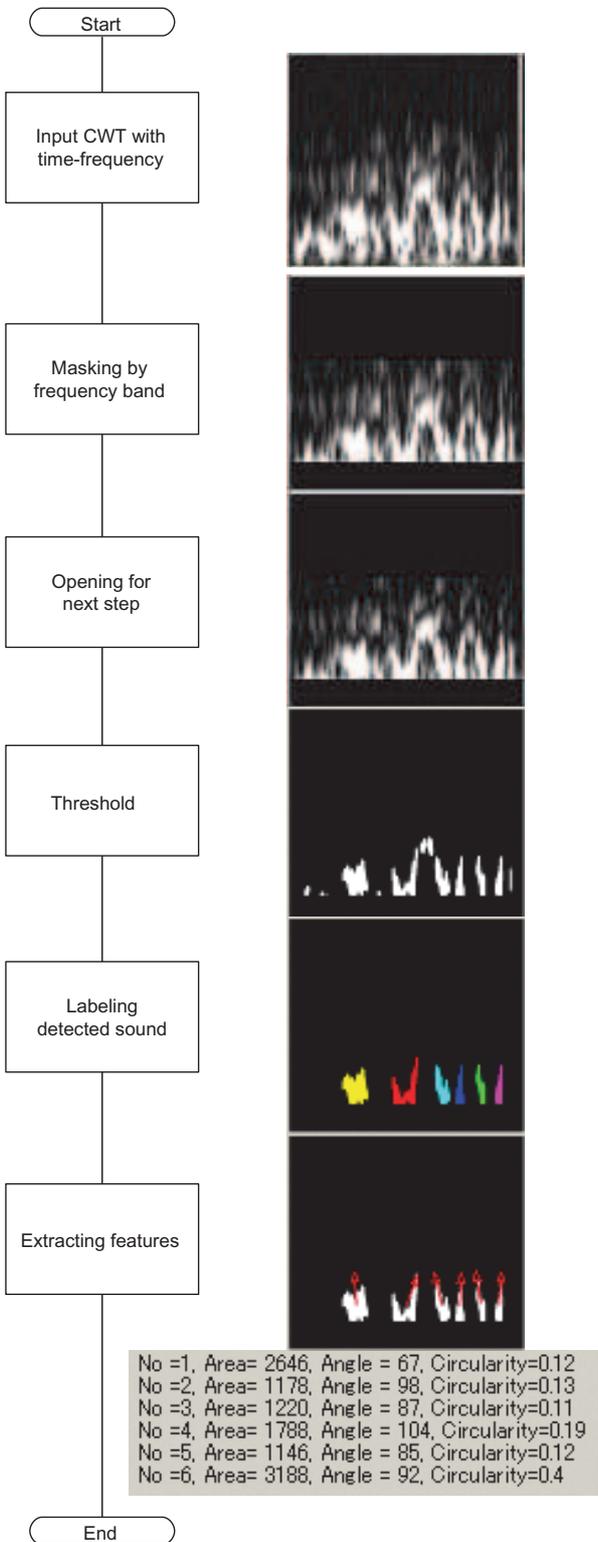


Fig. 10 Features extract

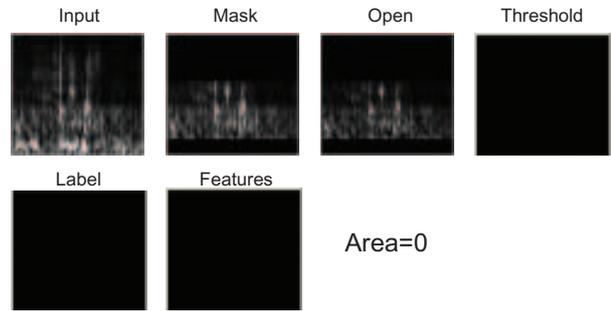


Fig. 11 Electric driver noise

(2) 工場内放送

Fig. 12は、ノイズとして工場内放送の音がある場合である。工場内放送は面積が大きく、角度が水平という特徴がある。従って、(4)式、(6)式からカットできる。

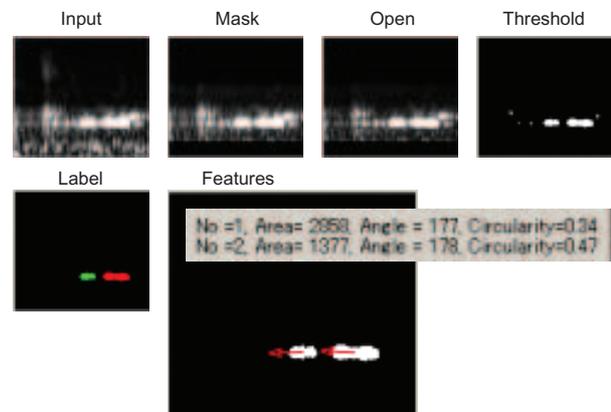


Fig. 12 Factory broadcast

(3) エアーブロー音

Fig. 13は、ノイズとしてエアーブロー音がある場合である。エアーブロー音は面積が大きく、真円度が大きいという特徴がある。従って、(4)式、(7)式からカットできる。

(4) 摩擦異音

次に、摩擦異音の発生する不良品について見てみる。Fig. 14, Fig. 15は摩擦異音を含む不良品の場合である。

どちらも、(4)式、(5)式、(6)式、(7)式から不良品と判定できる。

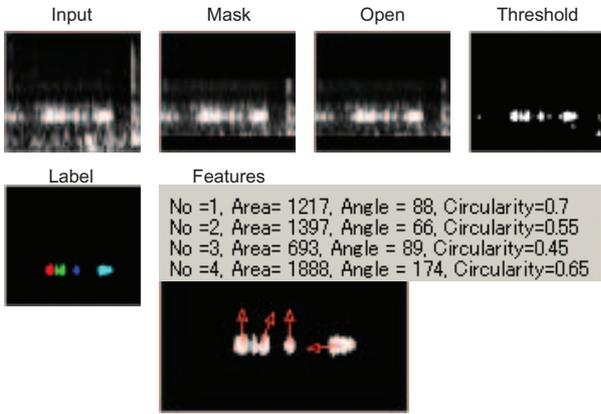


Fig. 13 Air-blow noise

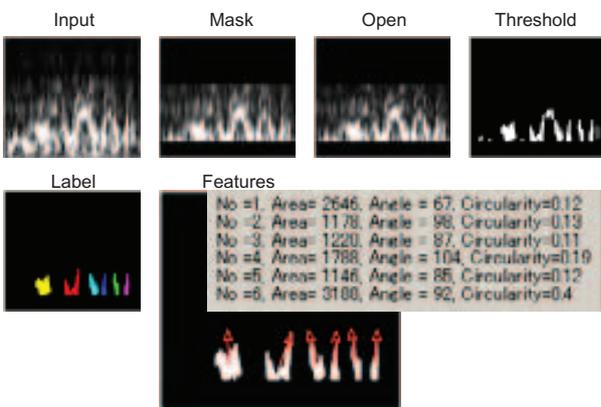


Fig. 14 Fricative sample No.1

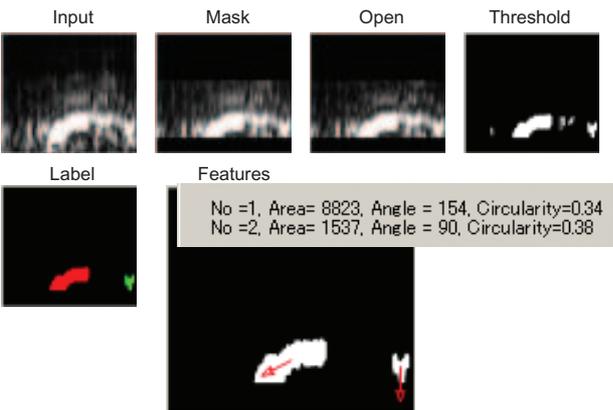


Fig. 15 Fricative sample No.2

### 3.4 摩擦異音検査システム

Fig. 16に、今回作成した摩擦異音検査フローを示す。

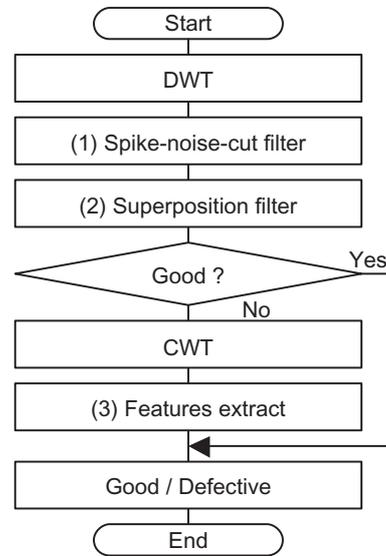


Fig. 16 Sound inspection flow

Fig. 17に、今回開発した摩擦異音検査システムを示す。

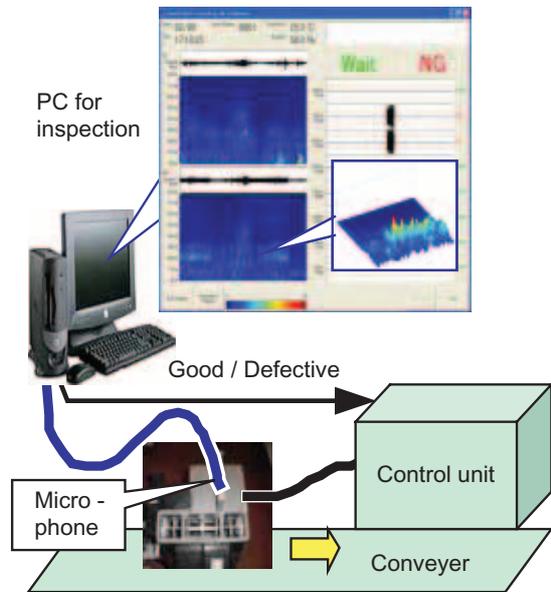


Fig. 17 Fricative inspection system

Fig. 18に結果を示す。良品と不良品を判別する閾値を決めることができた。また、Fig. 4のDWT結果と比べ大幅に判定精度が改善できた。

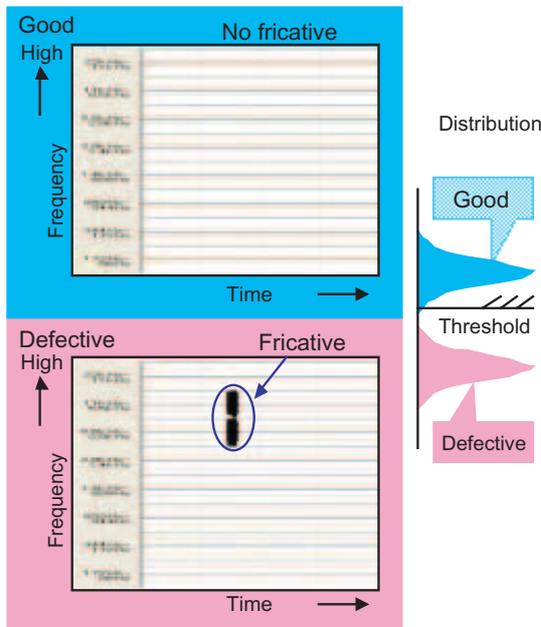


Fig. 18 Result

#### 4. 結論

Wavelet解析技術をベースとした音解析システムを開発した。

今回考案した音解析技術は、Wavelet解析技術をベースとした下記三つの手順からなる。

- (1) スパイクノイズカット処理
- (2) 重ね合わせ処理
- (3) 画像処理を用いた特徴量抽出

この摩擦異音検査システムにより、防音室を使用せず、一般の工場環境での摩擦異音検査を実現した。

#### <参考文献>

- 1) Numerical Recipes in C  
Cambridge University Press
- 2) WAVELAB 802 for Matlab5.x  
<http://www-stat.stanford.edu/~wavelab>
- 3) A Wavelet Tour of Signal Processing  
Stephane Mallat, ACADEMIC PRESS (2001)
- 4) Wavelet Methods for Time Series Analysis  
Donald B. Percival & Andrew T. Walden, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (2000)
- 5) Daubechies, I. (1992), Ten lectures on Wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics. SIAM Ed.
- 6) [www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/Wavlet/dwt.html](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/Wavlet/dwt.html)
- 7) [www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/Wavlet/cwt.html](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/Wavlet/cwt.html)
- 8) [www.documents.wolfram.com/applications/digital image/UsersGuide/8.6.html](http://www.documents.wolfram.com/applications/digital_image/UsersGuide/8.6.html)



<著者>



安面 隆史  
(あんめん たかふみ)  
工機部  
音解析による生産設備技術の開発  
に従事



室崎 隆  
(むろさき たかし)  
工機部  
生産設備技術の開発に従事



高羽 直樹  
(たかは なおき)  
工機部  
生産設備設計，開発全般に従事



伊藤 博  
(いとう ひろし)  
工機部  
社内及び関連会社の工機機能全般  
に従事



近藤 禎樹  
(こんどう よしき)  
冷暖房製造2部  
車載用エアコンの組立工程設計，  
生産技術開発に従事