

ウェーブレット変換を用いた音質評価システムに関する研究

橋場 参生, 大村 功, 高橋 裕之

Study on Sound Quality Evaluation System using Wavelet Transform

Mitsuo HASHIBA, Isao OHMURA, Hiroyuki TAKAHASHI

キーワード：ウェーブレット変換, 音質評価, FPGA

1. はじめに

製品の選別や品質評価を行う際に、音質の評価が必要とされる場面があるが、その多くは自動化されておらず、依然として熟練者の耳と勘に頼っている。そこで本研究では、熟練者が動作音を手掛かりとして電子部品の良否選別を行っている道内企業の事例を対象として、熟練者の技能を代行する音質評価システムの実用化に向けた実験と検討を行った。

評価の対象となる電子部品は、ダイナミック型スピーカと同様の原理で動作する小型の直動式ボイスコイルモータで、当該企業が開発する福祉機器のアクチュエータとして使用されている。このボイスコイルモータの動作音から熟練者と同様の良否判定を可能にするため、本研究では、近年、機械・設備等の異常検出に有効な信号分析手法として着目されているウェーブレット変換¹⁻³⁾を利用することによって、動作音の分析と良否を判定するための特徴抽出を試みた。

以下、本報では、まず、音響信号の分析に利用するウェーブレット変換の概略について、また、評価対象となる直動式ボイスコイルモータの構造と動作について説明し、続いて、ボイスコイルモータの動作音をウェーブレット変換を用いて分析した実験結果について述べる。さらに、音質評価システムの実用化に向けて開発を進めているFPGAを利用した信号処理ボードについて報告する。

2. ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は、連続ウェーブレット変換と呼ばれる方法と、離散ウェーブレット変換と呼ばれる方法に大別され、前者は主に時系列データの特徴を分析する用途に、後者は主にデータの圧縮・符号化や、ノイズ除去等の用途に用いられている。本研究では、時系列データである音響信号を対象として分析を行い、部品の良否判定に有効な特徴抽出を試みることから、ここでは、連続ウェーブレット変換の概要について説明する。

信号分析の代表的手法として広く活用されているフーリエ変換は、信号を周波数の異なる複数の正弦波に分解する手法で、分析の際の時間分解能と周波数分解能は常に一定となる。これに対して、連続ウェーブレット変換は、図1に示すようにマザーウェーブレットと呼ばれる基本波形の縮尺（スケール）を拡大・縮小することによって複数のウェーブレットを作成し、各々のウェーブレットを時間軸方向に移動（シフト）させながら、信号との相関を調べていく手法で、高周波領域では時間分解能を高くした分析が、また、低周波領域では周波数分解能を高くした分析を行えるという特徴がある。これは人間の聴覚処理と類似しており、その特徴から、機械や設備の異常等によって生じる突発的な信号の変動や、非定常的な変動の検出等に有効であることが報告されている。

次に、連続ウェーブレット変換の演算方法について説明する。分析対象となる信号を時間の関数 $f(t)$ で表すと、その連続ウェーブレット変換は、次式で定義される。

$$W(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (1)$$

ここで、 $\psi(t)$ はマザーウェーブレットとなる基準関数、 $\overline{\psi(t)}$ は $\psi(t)$ の複素共役、 a は基準関数のスケール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を決定す

事業名：一般試験研究

課題名：ウェーブレット変換を利用した音質評価システムの開発

るパラメータである。

式(1)によって計算された変換結果は、図1の下部に示すように、周波数に相当するスケールを縦軸に、時間を横軸にとった平面上に、階調表示等を用いて可視化することができる。なお、マザーウェーブレットとなる基準関数には様々な種類が存在するため、分析対象となる信号が同一であっても、使用するマザーウェーブレットによって分析結果には違いが生じる。マザーウェーブレットの例として、MATLAB Wavelet Toolbox¹⁾に実装されている中から、4種類のマザーウェーブレットを図2に示す。

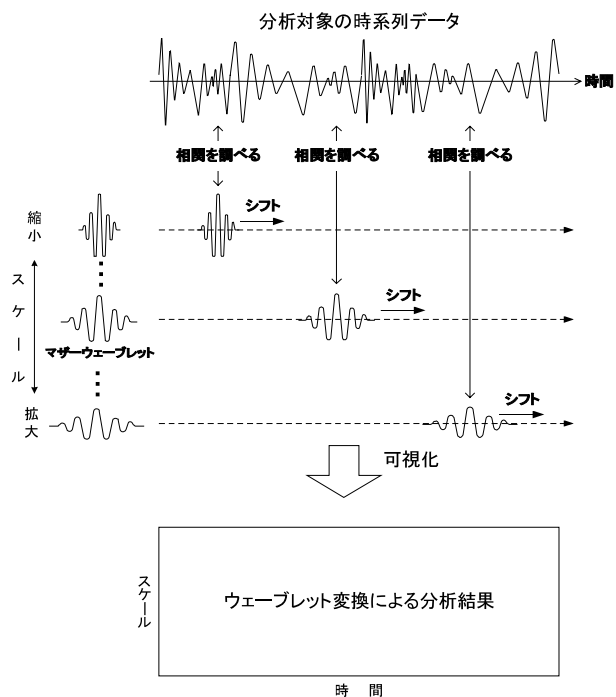


図1 連続ウェーブレット変換の概略

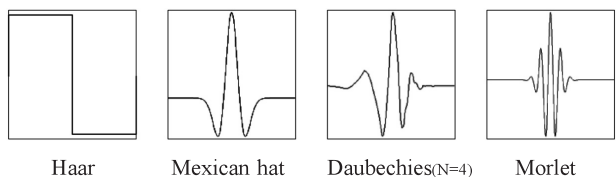


図2 マザーウェーブレットの例

3. 評価対象

本研究では、電子部品の動作音を手掛かりとして良否選別が行われている道内企業の事例を対象として、熟練者の技能を代行する音質評価システムの実用化に向けた実験と検討を行った。評価の対象とした電子部品は、携帯型の福祉機器に組み込まれ、振動発生用のアクチュエータとして使用されている直動式ボイスコイルモータである。以下に、その構造と動作を説明する。

3.1 構造

評価の対象となる直動式ボイスコイルモータの外観を図3に、内部構造を図4に示す。直径26mm（ヨーク部分）の円筒形の胴体の上部に、直径4mmの直動ピンが取り付けられており、このピンが上下に直線運動を行う。ピンを含めた高さは26mm、重量は50gである。ピンの直線運動を実現するための基本構造はダイナミック型スピーカと同様であり、円筒形のヨークと円柱形のマグネットとの磁極空隙に、ボビンに巻いたコイルが配置されている。このボビンには、ゴム膜で支持された直動ピンが取り付けられており、直動ピンを介してゴム膜からボビンが懸垂された構造になっている。



図3 直動式ボイスコイルモータの外観

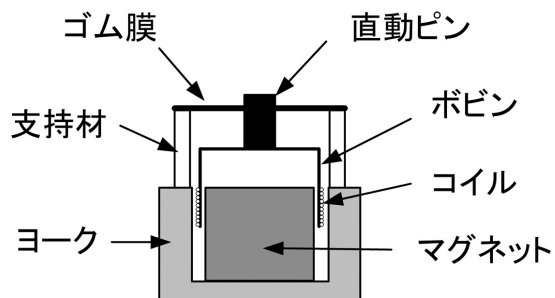


図4 直動式ボイスコイルモータの内部構造

3.2 動作

上記の構造を有するボイスコイルモータのコイルに電流を流すと、フレミングの左手の法則に従って上方向への力が発生し、ボビンと共に直動ピンが押し上げられる。また、電流を止めると、ゴム膜の弾性力によって直動ピンが引き戻され、ボビンも元の位置へと戻る。製品に組み込まれて使用される際には、標準設定80Hzの周期で電流をオン・オフする制御が行われ、直動ピンが上下運動を繰り返す。当該企業の熟練者は、その動作音を聞くことによってボイスコイルモータの異常を感知し、不良品を選別している。

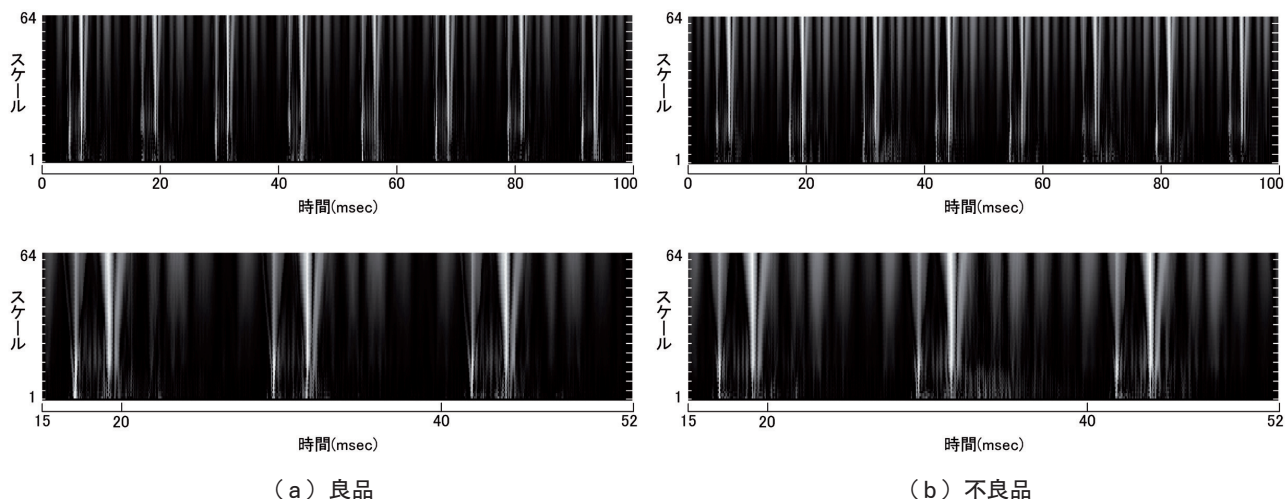


図5 Haarによるモータ動作音のウェーブレット変換結果

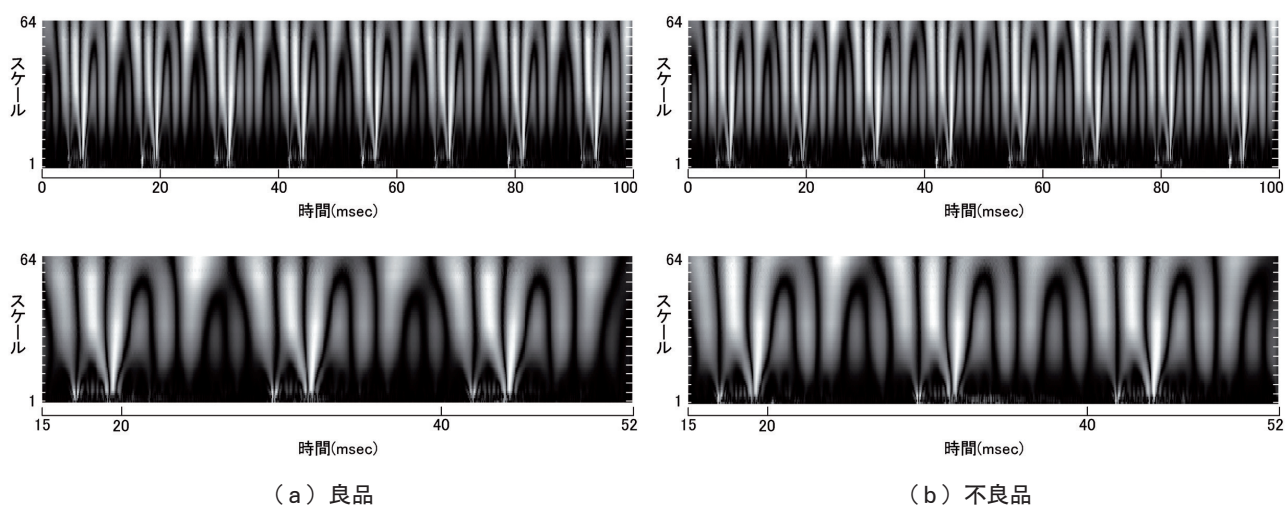


図6 Mexican hatによるモータ動作音のウェーブレット変換結果

4. 実験

4.1 実験方法

当該企業の熟練者が良・不良を判断した直動式ボイスコイルモータを入手し、製品使用時の標準設定である周期80Hzで駆動した際の動作音をマイクロホンで収録した。そして、良品と不良品の各々の動作音について、MATLAB Wavelet Toolbox⁴⁾に実装されている4種類のマザーウェーブレットを用いて、ウェーブレット変換による分析を行った。分析に用いたマザーウェーブレットは、図2に示したHaar, Mexican hat, Daubechies (N=4), Morletである。

4.2 実験結果

Haar, Mexican hat, Daubechies (N=4), Morletの4種類のマザーウェーブレットを使用して動作音を分析した結果を図5～8に順に示す。各図において、(a)は良品と判断されたボイスコイルモータの分析結果を、(b)は不良品と判

断されたボイスコイルモータの分析結果を示しており、式(1)による計算結果が大きい程、階調が白くなるように描画されている。また、(a)・(b)両図の上段には100msec長の動作音に対する分析結果を示し、下段には、その15～52msecの区間を拡大した結果を示した。本実験では80Hzの周期でボイスコイルモータを駆動していることから、(a)・(b)両図の上段には約8周期分の動作音が、下段には約3周期分の動作音が含まれていることになる。

図5～8を比較してわかるように、マザーウェーブレットが異なると、階調表示された分析結果も異なってくるが、何れの結果においても、80Hzの周期に同期して類似の描画パターンが繰り返されている。この描画パターンを、良品の場合と不良品の場合について比較すると、マザーウェーブレットとしてHaar及びMexican hatを用いた結果(図5, 6)では、明確な相違点が視認し難かったが、Daubechies (N=4)やMorletを用いて分析を行った結果(図7, 8)では、(b)図に印をつけたように、良品には見られない白い

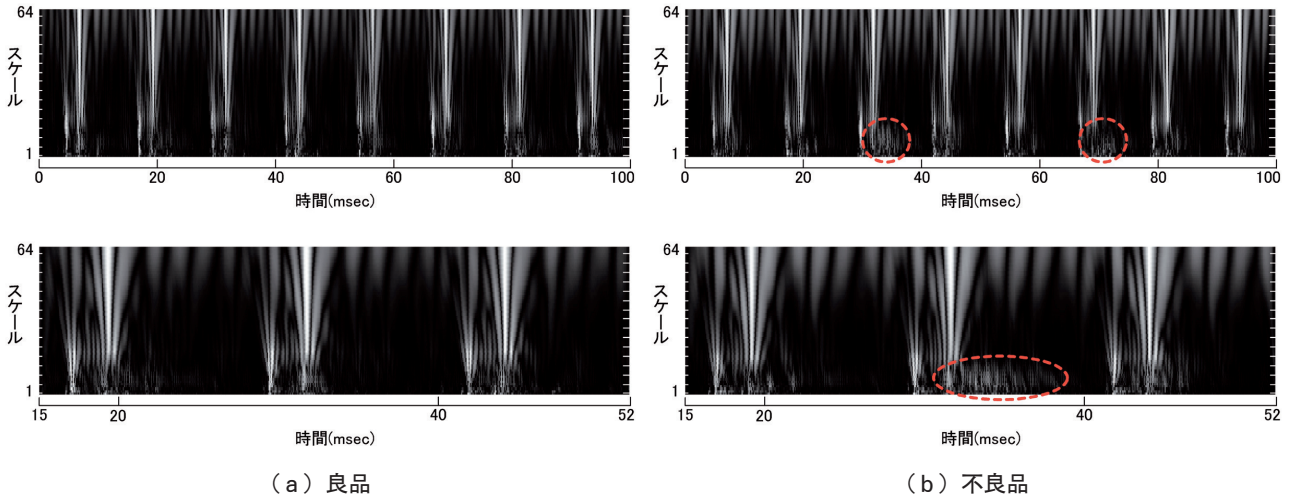


図7 Daubechies (N=4) によるモータ動作音のウェーブレット変換結果

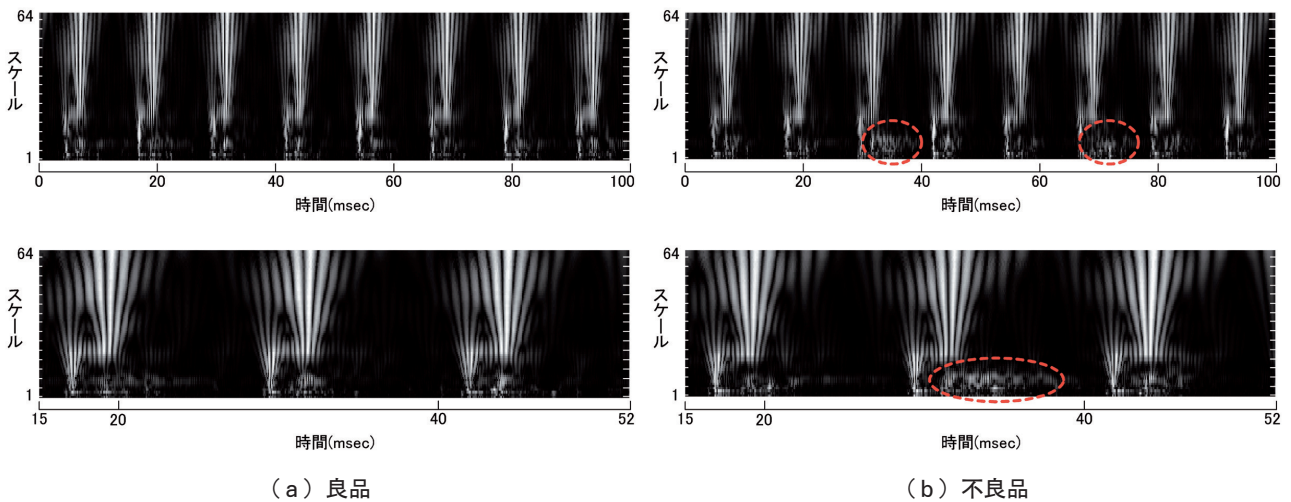


図8 Morletによるモータ動作音のウェーブレット変換結果

縦縞が不定期に強く表れる現象を捉えることができた。この事から、不良品とされるボイスコイルモータの動作音には、図2に示したDaubechies (N=4) やMorletの形状に似た波形が含まれており、そのような波形が存在する箇所が、異常な動作音として熟練者に聴取されていると推察された。

以上より、現段階では、まだ限られたサンプル品による実験結果ではあるが、適当なマザーウェーブレットを選択してボイスコイルモータの動作音を分析し、図7や図8で視認されたウェーブレット変換結果の相違点をパターン識別することによって、熟練者と同様の良否選別を行える見通しが得られた。

5. FPGAを利用した信号処理ボードの開発

図1に示したように、連続ウェーブレット変換は、マザーウェーブレットを拡大縮小した複数のウェーブレットについて、時間軸方向へのシフトを行いながら、式(1)の演算を繰り返し実行する必要があるため、分析に非常に多くの計算量を伴う

という欠点がある。そのため、前章で方針が得られた手順に従って連続ウェーブレット変換を実行しようとする、一般的なパーソナルコンピュータやマイクロコンピュータの利用では、リアルタイムで動作する音質評価システムを実現することが困難となる。

そこで現在、ウェーブレット変換に伴う反復演算処理等の高速化を図るために、FPGA (Field Programmable Gate Array) を搭載した信号処理ボードの開発を進めている。開発中のボードの外観を図9に、構成を図10に示す。本ボードは、マイクロホン等から入力された信号をA/D変換した後、FPGA内部において、ウェーブレット変換に伴う反復演算やパターン識別演算をハードウェア処理する構成になっている。また、入力された動作音のモニタリングや、信号処理によって異音部を強調した音の出力等も行えるように、信号出力用のD/A変換デバイスも搭載している。現在の開発状況は、ボードの設計及び試作を終え、前章で得られた処理手順のFPGAへの実装を進めている段階である。

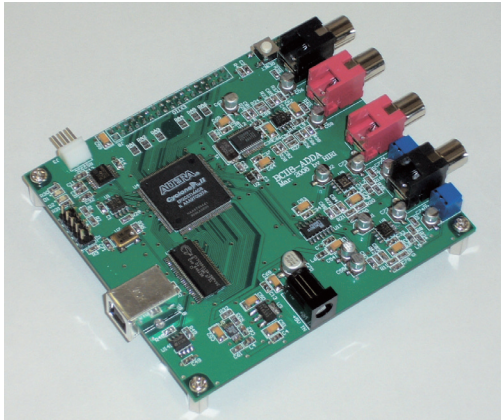


図9 FPGAを搭載した信号処理ボード

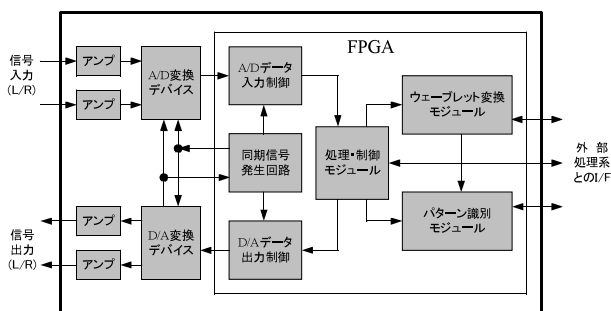


図10 信号処理ボードのブロック図

6. おわりに

熟練者の聴覚に頼って行われている作業の自動化を目的として、ウェーブレット変換を利用した音質評価システムの実現に向けた研究を行った。道内企業における直動式ボイスコイルモータの選別作業を対象として、熟練者が聞き分けている動作音の分析をウェーブレット変換により行った結果、適当なマザーウェーブレットを選択することによって、良品と不良品の音質の差異を検出できる見通しを得た。また、熟練者の技能を代行するシステムの実用化に向けて、ウェーブレット変換等の高速処理を可能にするFPGAを搭載した信号処理ボードの設計・製作を行った。

今後は、実験で得られた良否判定の処理手順をFPGAに実装し、当該企業の製品開発工程に導入可能なシステムの実用化を目指すと共に、音質評価が必要とされている他の相談案件への適用も進める予定である。

また、実験結果でも示されたように、ウェーブレット変換を用いて信号の分析を行う場合には、使用するマザーウェーブレットの種類によって、分析結果に違いが生じる。今回は4種類のマザーウェーブレットによる分析結果を比較検討することによって、直動式ボイスコイルモータの良否判定に有効なマザーウェーブレットを選定したが、より汎用的なシステムを構築するためには、分析対象に応じて適切なマザーウェー

レットを自動的に選定する手法についても、今後研究を行う必要がある。

謝辞

実験の実施にあたり、(株)電制の須貝保徳研究開発室長、山口悦範研究員に御協力を頂きました。この場を借りて深く感謝致します。本研究で使用した音声・音響分析システムは、日本自転車振興会の補助により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 電気学会編：ウェーブレット解析の産業応用，朝倉書店，(2005)
- 2) 新誠一・中野和司監訳：図説 ウェーブレット変換ハンドブック，朝倉書店，(2005)
- 3) 榊原進：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電機大学出版局，(1995)
- 4) Mathworks社：<http://www.mathworks.com>