

実信号マザーウェーブレットによる異常信号抽出に関する研究

章 忠・真田 明

Zhong ZHANG and Akira SANADA

キーワード ウェーブレット変換/異常診断/振動/信号解析

KEY WORDS Wavelet Transform/Diagnosis/Vibration/Signal Analysis

要 旨

本研究では、異常信号から実信号マザーウェーブレット RMW を構成し、それを用いたウェーブレット変換により信号の中の異常成分を抽出する手法、ウェーブレット瞬時相関法を提案した。実例として本手法をノッキング信号の抽出に応用し、その有効性を確認した。

1. まえがき

異常診断において、非定常な異常信号の抽出と評価は重要な課題である。異常信号には通常多数の特徴成分が含まれており、その強さは様々であり、なおかつ発生時期は不規則である。そのため、異常信号の抽出と評価の技術上の実現は非常に困難である。従来、異常信号の抽出と評価にデジタルフィルタ法¹⁾やパターンマッチング法²⁾などのデータ処理手法がよく使用されてきた。デジタルフィルタ法において、多数の特徴成分を同時に抽出するためには多くのバンドパスフィルタを並列に並べる必要がある。パターンマッチング法は、異常信号の強さの評価が難しいなど、実際の問題への適用には課題が多い。

一方、時間と周波数の同時解析を可能にするウェーブレット変換 (Wavelet Transform, WT) は、さまざまな分野での信号処理に応用され、注目されている。また、WT は一種の相似変換であると考えられる³⁾。WT の核、マザーウェーブレット (Mother Wavelet, MW) $\psi(t)$ から定義される関数組 $\psi_{a,b}(t)$ をスケールとして信号 $f(t)$ を計り、 $f(t)$ と $\psi_{a,b}(t)$ の相似性を WT の係数 $w(a,b)$ で数値化するものである。

本研究では、この特徴を生かし、異常信号から実信号マザーウェーブレット (Real Mother Wavelet, RMW) を構成し、それを用いた WT により信号中の異常成分との相関をウェーブレット係数で抽出して評価を行う。この手法をウェーブレット瞬時相関 (Wavelet Instantaneous Correlation, WIC) 法と呼ぶことにする。

2. ウェーブレット変換とマザーウェーブレット
有限なエネルギーを持つ時系列信号 $f(t)$ の WT は

$$w(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

と定義される⁴⁾。ここで、 $a(a>0)$ はスケール、 $1/a$ は周波数に対応し、 b は時刻のパラメータである。 $\psi(t)$ が実関数であるとき、複素共役 $\bar{\psi}_{a,b}(t)$ と $\psi_{a,b}(t)$ の区別は必要でない。関数 $\psi(t)$ は MW と呼ばれ、信号の再構成 (逆変換) を可能にするため、次のアドミッシブル条件 (admissibility condition) を満たさなければならない。

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2)$$

ただし、 $\hat{\psi}(\omega)$ は $\psi(t)$ のフーリエ変換であり、 ω は角周波数で $\omega=2\pi f$ (f は周波数) である。また、 $\psi(t)$ が遠方で充分速く零になる関数であれば、式 (2) は次式のようにかなり緩やかな条件に簡単化できる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

この意味で、MW の選択範囲は広く、その構成も簡単である。

ウェーブレット逆変換は

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{1}{a^2} da db \quad (4)$$

で与えられる。

MW は通常実型と複素型に分類されている。著者らの研究⁵⁾によれば、実型 MW を用いた WT は時間・周波数の平面上において、 $|w(a,b)|$ の値が振動するため縞状のパターンが得られる。また、 $|w(a,b)|$ の振動の様相は MW の対称性により異なる。これは実型 MW の位相の影響であると考えられている。これに対して、複素型 MW を用いた WT は、 $|w(a,b)|$ の値が滑らかに変化するため連続的なパターンが得られる。

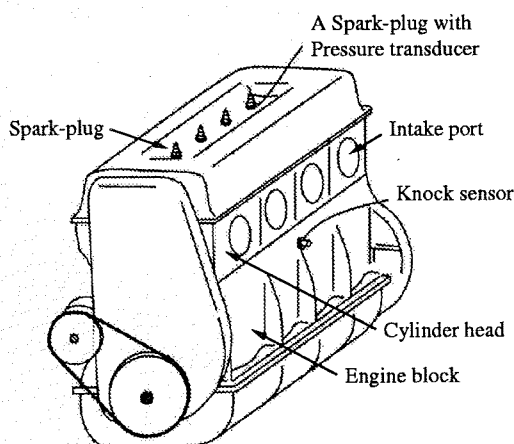


図1 実験用エンジンの概略図

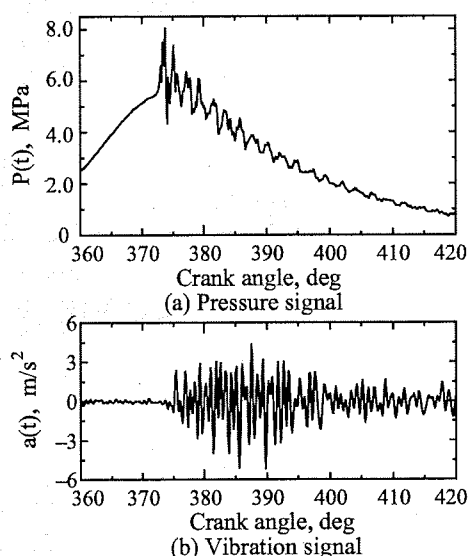


図2 シリンダ内の圧力信号とエンジンプロック振動信号の例

また、式(3)に示すように、平均値がゼロ、遠方で充分速く零になるような特性を持つ関数であればすべてMWとして用いることができる。よって、実信号に遠方で充分速く零になるような窓関数を掛け平均値を取り除くことにより、実型RMWを構成することができる。ここで、注意すべきことは、窓関数の選択である。窓関数は、通常、窓幅が広いほど時間分解能が低く周波数分解能は高くなり、逆に窓幅が狭いほど時間分解能が高く周波数分解能は低くなる特徴を持っている。本研究において、時間・周波数分解能および関数の滑らかさを総合的に考え、Hanning窓を選んだ。また、複素型RMW構成は実型RMWのヒルベルト変換を用いた。

3. ノッキング信号のウェーブレット解析

火花点火機関において、圧縮比を高めることは熱効率を向上する有効な手段である。ところが、圧縮比を高くするとノッキングが発生しやすくなる。ノッ

キングはシリンダ内壁やピストンなどに損傷を生じるため、圧縮比の増大を制限しエンジンの熱効率向上を制限する。ノッキングの検出について従来多くの研究がなされてきた^{1,2)}。本研究ではエンジンプロック振動からノッキングによる特徴成分を取り出してRMWを構成し、WICによりノッキングの発生時刻およびノッキング強さを抽出することを試みる。

ノッキングの実験は台上試験で行った。実験用機関及びセンサの取り付け位置の概略図を図1に示す。試験用エンジンは直列4気筒、吸気管内ガソリン噴射式である。燃焼室はペントルーフ型で、シリンダ内径は78mm、行程は78.4mm、圧縮比は9.0である。エンジンの第4気筒内の圧力を点火プラグに内装された圧力センサ(KISTLER 6117A)で測定した。また、エンジンプロックの振動をノックセンサで測定した。ノックセンサの仕組みは通常の加速度センサと同じであるが、17kHz以上の周波数領域において感度が高いことが特徴である。ノックセンサの取り付け位置は、エンジンプロックの側面、第2、3気筒の間であった。実験1は、全負荷のもとで機関回転速度をそれぞれ3000、5000、6000rpmに維持し、正常燃焼したときのエンジンプロックの振動と筒内の圧力波を測定した。実験2は点火時期の調整により強い、または弱いノックを発生させ、同様の測定を行った。エンジンの負荷および機関回転速度は試験1と同一とした。

機関回転速度3000rpmにおけるシリンダ内の圧力信号とノックセンサによるエンジンプロック振動の例を図2に示す。ただし、図中の360°は圧縮上死点に対応している。図示のように、ノッキングが発生したとき、圧力波形の振動が生じ、それに対応してエンジンプロックの振動が生じている。図3に示すのはエンジンプロック振動のWTである。ただし、図の(a)は強いノッキング、(b)は弱いノッキング、(c)は正常燃焼の場合である。図中の0時刻は圧縮上死点後10度の時刻に対応している。そこで、信号の振幅の影響を抑え、周波数特徴を明確するために、標準偏差が $\sigma=1$ となるように信号の振幅を正規化した。ウェーブレット変換の時間・周波数の平面について、横軸は時間、縦軸は周波数を表し、 $|w(a,b)|$ の大きさは濃淡レベルで表す。また、解析は4オクターブであり、各オクターブを48分割した。また、MWはRI-Splineウェーブレットを採用した。

図3(a),(b)に示したように、ノックセンサによる振動から約20kHzを中心としたパターンが強く検出された。これは本実験に使われたノックセンサが17kHz以上の成分に対して大きな感度を持つためである。正常燃焼の場合、図3の(c)の振動からは約20kHzを中心としたパターンは検出されなかった。従って、振動信号の約20kHzを中心としたパターンはノッキングの特徴成分として扱うことができる。

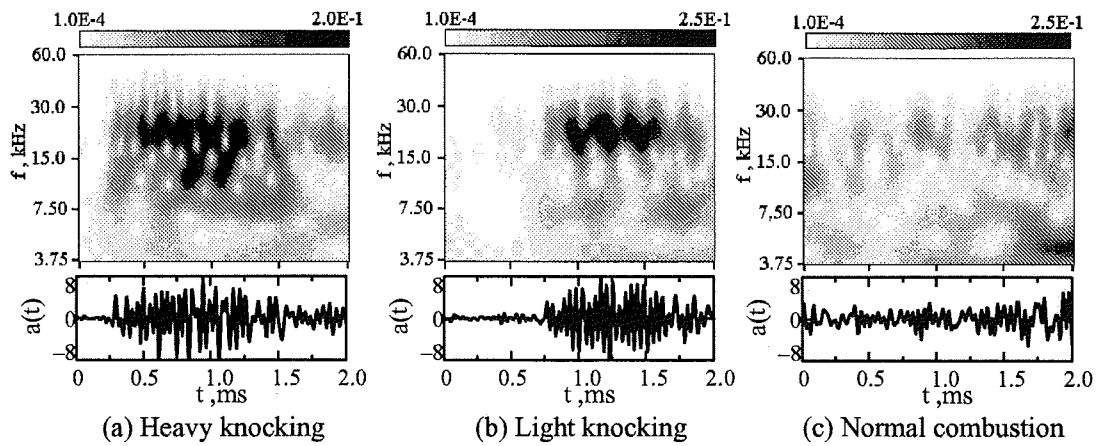


図3 エンジンブロック振動信号のウェーブレット変換

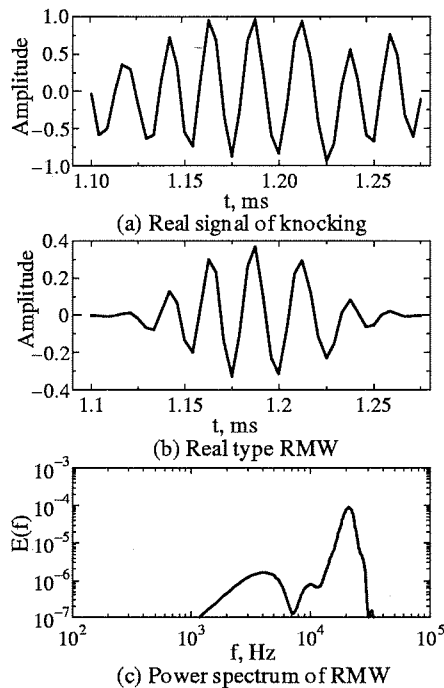


図4 実型 RMW とパワースペクトル

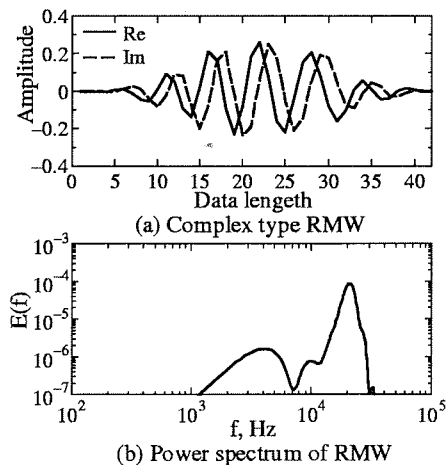


図5 複素型 RMW とパワースペクトル

4. ノッキング信号から RMW の構成

図4(a)に示すのは図3(b)の振動信号を1.1ms付近からサンプリングタイム0.175msで43点切り出したノッキングによる信号の特徴的な部分である。そ

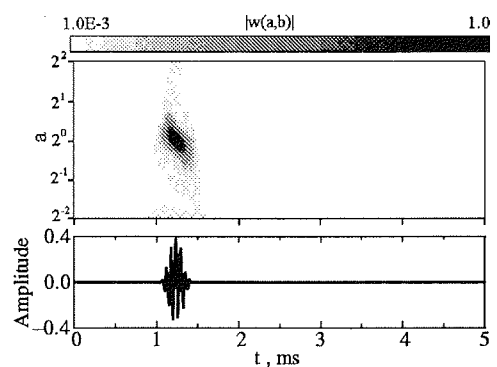


図6 複素型 RMW によるウェーブレット変換

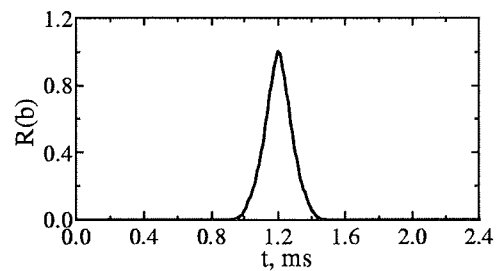


図7 ウェーブレット瞬時相関 $R(b)$

して、それに Hanning 窓を掛け、平均値を除いて構成された実型 RMW, $\psi_R(t)$ を図4(b)に示し、そのパワースペクトルを図4(c)に示す。図4(c)に示すように、RMW には周波数領域において、約20kHzを中心とする大きなピークと低周波の小さなピークがあり、複数の特徴成分を持っている。

さらに、次の手順に従って複素型 RMW を構成する。1) 実型 RMW, $\psi_R(t)$ をフーリエ変換し、周波数スペクトル $\hat{\psi}_R(f)$ を得る。2) 負の周波数領域において、 $\hat{\psi}_R(f)$ を0にし、正の周波数領域において $\hat{\psi}_R(f)$ を $\sqrt{2}\hat{\psi}_R(f)$ にして逆フーリエ変換を行う。手順2)において、通常 $\psi_R(t)$ のヒルベルト変換を求めるには、正の周波数領域において $\hat{\psi}_R(f)$ に2を掛ける⁶⁾が、そこで複素型 RMW と実型 RMW が同様なパワースペクトル ($||\psi||=1$) を持つために、 $\hat{\psi}_R(f)$ に $\sqrt{2}$ を掛けた。図5(a)に示すのは、図4(b)に示した実型 RMW を用いて構成した複素型 RMW, $\psi(t)$

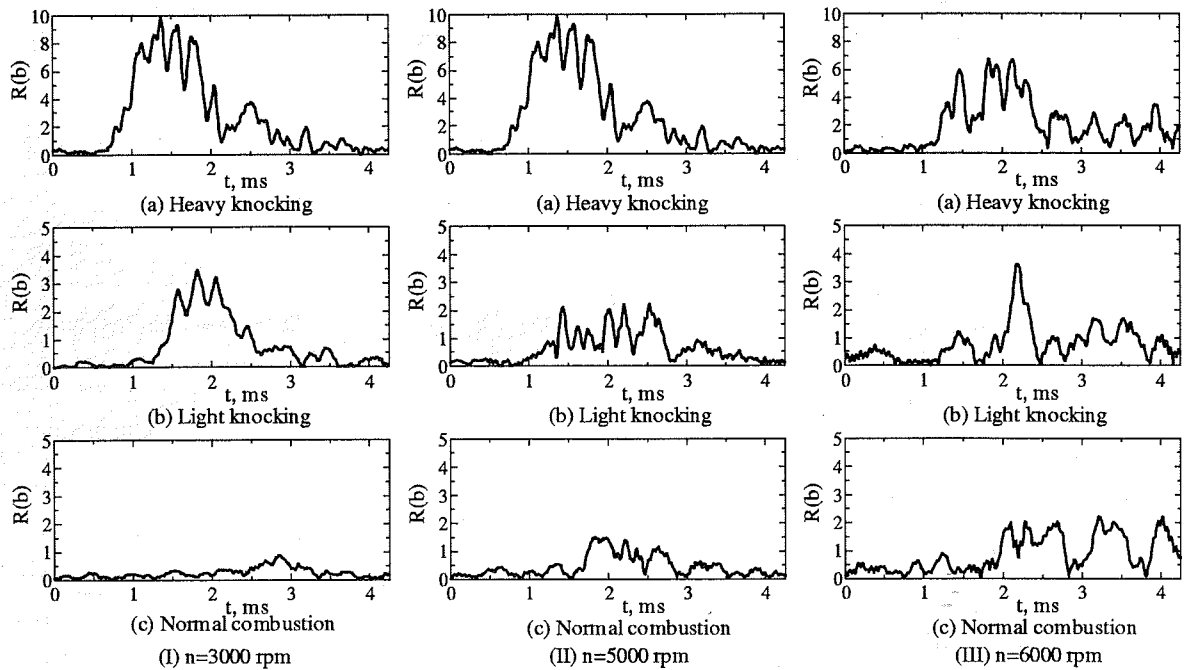


図8 瞬時相関値 $R(b)$ の実例

の例であり、(b) はそのパワースペクトルである。図4(c) と図5(b) を比べて分かるように、実型 RMW と複素型 RMW とは同様なパワースペクトルを持っている。

図6 は複素型 RMW を用いたウェーブレット変換であり、解析された信号は図4(b) に示した信号である。図中の横軸は時間、縦軸は周波数を表し、 $|w(a, b)|$ の大きさは濃淡レベルで表す。また、解析は4オクターブであり、表示のため、各オクターブを32分割した。図示のように、スケール $a=1$ (RMW の中心周波数)、時刻 1.2ms を中心としたパターンが得られた。また、図6 からスケール $a=1$ における $|w(a, b)|$ を取り出して $R(b)$ とし、それを時間 t に対してプロットすると、図7 が得られる。図示のように、1.2ms 付近において $R(b)$ が大きくなり、その値は 1.0 となる。これは 1.2ms 付近における振動信号の成分は複素型 RMW と全く同じであるためである。よって、振動におけるノッキングによる周波数の特徴の RMW との相似程度、または振動の強さは $R(b)$ の大きさにより抽出することができる。そこで、 $R(b)$ をウェーブレット瞬時相関値と定義する。

5. WIC によるノッキング信号の抽出

機関回転速度が 3000, 5000, 6000rpm におけるブロック振動から求めた $R(b)$ を図8 に示す。ただし、図8 の (I) は 3000rpm の場合、(II) は 5000rpm、(III) は 6000rpm の場合である。また、図中の (a) は強いノッキング、(b) は弱いノッキングの場合であり、(c) は正常燃焼の場合である。図示のように、同じ機関回転速度において $R(b)$ の大きさはノッキング強さに応じて変化している。また、正常燃焼の場合における $R(b)$ の値は機関回転速度の増加に応じて増加している。これは回転速度が増加すると、他の原因に

よるブロック振動が増加されるためである。回転速度 5000, 6000rpm の場合において、 $R(b)$ の値により弱いノッキングと正常燃焼を区別することができた。すなわち、本手法は従来困難であった高回転でのノッキングの抽出に成功したものだと思われる。

6. まとめ

以上の検討により得られた主な結果は次の通りである。

1. 実信号マザーウェーブレット RMW は複素型と実型の2種類がある。実型は信号の特徴を有する部分を取りだし、それに窓関数を掛け平均値を除いて構成することができる。複素型は実型の Hilbert 変換により求められる。
2. RMW から得られたウェーブレット瞬時相関値 $R(b)$ の時間軸上での大きさにより、解析信号の中に RMW と同じ成分を有する信号の発生時刻および強さを同時に抽出することができる。また、実例により本有効性を確認した。

参考文献

- 1) 山崎：異常検出と予測，工業調査会 (1988)。
- 2) 章，川畑：日本機械学会論文集 (C 編)，67-657(2001)，pp.1289-1296。
- 3) 新：計測技術，97-3(1997)，pp.52-57。
- 4) 榊原：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)。
- 5) 章，川畑：計算機統計学，10-2(1997)，pp.93-101。
- 6) 関岡：実験・研究のためのプログラミング技法，理工学社 (1996)，p.205。