ウェーブレットを用いた時変信号の相関分析と
船内騒音解析への適用*石 光 俊 介^{*1}, 北 川 孟^{*2}
堀 畑 聡^{*3}, 萩 野 仙 之^{*4}Correlation Analysis of Time-Varying Signal Using Wavelets and Its
Application to the Ship Interior Noise AnalysesShunsuke ISHIMITSU^{*5}, Hajime KITAGAWA,
Satoshi HORIHATA and Noriyuki HAGINO^{*5} Department of Electronic-Mechanical Engineering, Oshima National College of Maritime Technology,
1091-1 Komatsu, Oshima, Yamaguchi, 742-2193 Japan

Generally, a wavelet transform with the analyzing wavelet described by a function, has been applied to time-frequency analyses of experimental data. In this study, measured signal is adopted to analyzing wavelet instead. Applying the proposed system, the correlation between acoustic and vibration signals from a wall and a floor in a mess hall, which is adjacent to an engine room of the training ship, is analyzed. As the traditional calculation of correlation repeats averaging procedure, the original signal must be stationary. To apply the method to time-varying signals, a new concept of instantaneous correlation factor, ICF, is introduced. As a conclusion, it is proved that a dominant feature of the correlation can be estimated by the ICF. The time-varying correlation could be analyzed and the starting point of main engine deceleration can be detected accurately.

Key Words: Wavelet Transform, Analyzing Wavelet, Correlation, Time-Frequency Analysis, Ship Interior Noise

1. は じ め に

音響信号の特徴抽出には、フーリエ変換による周波数解析が広く使われている。しかし、この解析では対象となる信号が周期性かつ定常性を有することが前提となる。一般の物理信号を正確に表現するためには、周波数特性の他に時間特性も解析する必要がある。これは時間周波数 ($t-f$) 表現と呼ばれている。

代表的な解析法に Spectrogram, WD(Wigner 分布, *Wigner Distribution*)⁽¹⁾, WT (Wavelet 変換)⁽²⁾ がある。この中で WT の $t-f$ 分解能の特徴は、周波数が低い領域で周波数分解能が高く、周波数の高い領域で時間分解能が高い、という多重構造になっていることである。この方法は時間的にも周波数的にもその分布が局在した AW(*Analyzing Wavelet*) と呼ばれる

基底関数の Affine 変換 (相似変形と平行移動) により解析を行うもので、様々な分野で応用されている⁽³⁾。

本研究では、WT 解析法を基本とした時間と周波数を変数とする瞬時相関関数 (*Instantaneous Correlation Function*), $ICF(t, f)$ または 時間とスケールを変数とする瞬時相関係数, $ICF(t, a)$, を定義し、これを用いて非定常信号の相関分析を行う方法を検討した。

従来からコヒーレント法としては、解析相関分析 (相関解析)⁽⁴⁾ 等があるが、これらの方法では多数のサンプルの平均演算が必要で、信号の定常性が前提となる。このような制約を取り除く目的においても ICF を適用した瞬時相関の概念を導入し、システムの初期動作に見られる過渡状態等の非定常信号の相関分析が可能になる解析法を提案した。また、筆者らは以前にも WD を利用した空間相関関数を利用した瞬時コヒーレンス解析の結果を発表した⁽⁵⁾。しかし、この方法では各信号ごとに WD を計算する必要性があり、解析が煩雑であった。この欠点を除くために実信号を AW

* 原稿受付 2002年9月30日。

^{*1} 正員, 大島商船高等専門学校電子機械工学科(〒742-2193 山口県大島郡大島町小松 1091-1)。^{*2} 正員, 豊橋技術科学大学名誉教授(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。^{*3} 正員, 豊橋技術科学大学工学部。^{*4} ソニーイーエムシーエス(株)(〒431-0496 湖西市境宿 554)。

E-mail: ishimitu@oshima-k.ac.jp

として用いた ICF は直接信号の類似性を評価する点においても有効である。

まず、ICF の有効性をシミュレーション信号によって検証したのち、大島商船高専の練習船「大島丸」内の船員休憩室ともなる食堂における船内騒音に及ぼす床振動と壁振動の影響を調査する。次に取り出したい特徴量に関連した振動信号等を実信号 AW に選択した ICF により、機関減速開始点等の特徴点抽出にも有効であることを明らかにする。

2. ICF(瞬時相関関数, Instantaneous Correlation Function)

2.1 WT WT は信号: $f(t)$ と AW: $\psi_{a,b}(t)$ との次式の内積計算により得られる。

$$WT_f(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}^*\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (1)$$

ここで、 a はスケールパラメータ、 b はシフトパラメータで、それぞれ $\psi_{a,b}(t)$ の相似変形と平行移動を行う変数である。 $\psi_{a,b}^*(t)$ は $\psi_{a,b}(t)$ の複素共役である。WT は、本来、時間-スケール ($t-s$) 平面で表すが、時間的、周波数的に局在している AW を使う事で、近似的に $t-f$ 分布とみなす事ができる。AW としては時間及び周波数分解能の不確定性が最小となる式 (2) の Gabor 関数を用いることが多い。

$$\psi_{a,b}(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{\omega_p}{\gamma}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\omega_p}{\gamma})^2 t^2 + j\omega_p t} \quad (2)$$

この AW は、中心周波数: ω_p と周波数領域での局在の幅を決めるパラメータ γ によって特徴づけられる。通常はこのような関数表現された AW が適用されている。

2.2 実信号を AW とした WT 本研究では、実信号を AW とする新しい解析法を提案する。ここでは、AW とした実信号の相似変形演算により (1) 式のスケールパラメータ: a に対応させ、相似変形したそれぞれの信号を時間軸上で平行移動することにより、シフトパラメータ: b に対応させる。すなわち、AW として用いる実信号 $s(t, a, b)$ で表わすと相似変換と平行移動の Affine 変換解析は (3) 式によって表される。 $s(t, a, b)$ を実信号 AW と定義し^{(6),(7)}、これと信号 $f(t)$ との内積を取ることで、解析結果 $C_f(b, a)$ を得ることができる。

$$C_f(b, a) = k_a \int_{-\infty}^{\infty} s(t, a, b) f(t) dt \quad (3)$$

ここで、 k_a は (1) 式の $1/\sqrt{a}$ と同様、解析長の正規化定数である。

$s(t, a, b)$ に時間的、周波数的に局在化特性を与えるために、 Δt 時間で切り出した信号に窓関数処理を施す。本研究では、窓関数としてブラックマン窓を用いた。この場合、 $s(t, a, b)$ の基本周波数 f_0 は窓長 Δt から (4) 式によって求まる。

$$f_0 = \frac{1}{L_0 \Delta t} \quad (4)$$

L_0 は窓内のデータ数である。 $s(t, a, b)$ は、この基本周波数 f_0 の比によって、圧縮伸張される。

この変形は数学的操作によって実現できないので、次式を利用して数値計算を行う。

$$s(t, a) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n\Delta t) \frac{\sin((\pi/\Delta t)(t - n\Delta t))}{(\pi/\Delta t)(t - n\Delta t)} \quad (5)$$

Δt の取り方を変えることにより、 $s(n\Delta t)$ は圧縮伸張され、任意の基本周波数の AW, $s(t, a)$, を得ることができる。なお、 b の項はシフトパラメータであるので、圧縮伸張により AW を求める際には考慮しない。また、 2^a での変形においては単純な補間 (interpolation) と間引き (decimation) により得られる。

Fig. 1 Transformation of harmonic AW from time-domain to frequency-domain

さらにこの方法では、調波構造の周波数成分をもつ $s(t, a)$ による解析も可能である。すなわち 2.1 で述べた通常の解析では、例えば Gabor 関数⁽²⁾を用いた場合は単一の周波数成分 (ω_p) を抽出するウェーブレットが用いられるが、本手法では AW も図 1 に示すような構造を持っている場合、基本周波数とその調波成分をもつ観測信号解析に適用することができる。したがって、調波構造をもつ信号を解析する場合、基本周波数とその調波成分による特徴量も同時に検出されるので、調波構造を持つ特徴量の変化が効果的に得られることが期待される。

2.3 ICF(瞬時相関関数, Instantaneous Correlation Function) の定義 本研究では $s(t, a)$ を

基底関数として利用する WT を、ICF(瞬時相関関数、Instantaneous Correlation Function) : $ICF(t, a)$ として (6) 式のように定義する。

$$ICF(t, a) = k_a \int_{-L_a/2}^{L_a/2} s(\tau, a) f(t + \tau) d\tau \quad (6)$$

L_a は圧縮伸張により決定される窓長である。 $ICF(t, a)$ の値は L_a に依存して変化するので、この値を自己相関関数を用いて、 k_a によって正規化する。 τ によりシフトしながら計算を行うことは、(1) 式中のシフトパラメータ b による操作と同等である。

(6) 式において $a = 0$ の場合は相関関数を与える。 $a \neq 0$ の場合、 $a < 0$ は圧縮、 $a > 0$ は伸長となる。観測信号の一部を $s(t, a)$ とした場合、 $a \neq 0$ の部分によって AW と観測信号との自己相似性の解析が行える。また、2つの信号間の解析では、1つの信号から切り出した $s(t, a)$ と他の異なる信号との相似性が分かる。

3. シミュレーション信号の ICF 解析

先ず ICF 解析を用いて、図 2 に示す Chirp 信号を解析した。基準 AW、すなわち実信号ウェーブレット: $s(t, a)$ は、観測時間中央部から観測時間の 1/2 の長さで切り出した。(6) 式による解析結果を図 3、4 に示す。これらは表示を変えただけで、図 3 は等高線表示、図 4 はその鳥瞰図である。いずれも横軸は時間 t 、縦軸はスケール a である (この場合も時間-スケール ($t-a$) 平面上の分布は時間-周波数 ($t-f$) 平面上の分布と見なせる。後者の分布と対応させるために、各図では縦軸 a の値の符号を逆にして表示)。図中に窓長の 2^a で計算した値: $ICF(t, a)$ を、この平面上に表わしている。 $a = 0$ (圧縮伸長率=1、すなわち自己相関値を与える) の場合、時間中央値: 80ms での ICF 値: $ICF(80ms, 0)$ は最大値となる。各図はこの値で正規化して表している。時間軸上で中央値から離れると、ICF 値の分布は圧縮側 ($a < 0$ 、すなわち高周波側) に移動する。図 4 でより明瞭に分かるように、分布値は $ICF(80ms, 0)$ の点に集中し、この点以外の自己相似性は極めて小さいといえる。以上より、ICF 解析から基準 AW と時変信号 (非定常信号) との自己相似性分析を含めた相関解析が可能であることが分かる。

次に、 $s(t, a)$ が観測信号の調波構成成分をもつ場合のシミュレーション解析を示す。図 5 は $(100 \times 2^{-3})\text{Hz}$ 、 $(100 \times 2^{-1})\text{Hz}$ 、 $(100 \times 2^1)\text{Hz}$ 、 $(100 \times 2^3)\text{Hz}$ の 4 つの調波構成をもつ合成正弦波シミュレーション信号を、100Hz の基準 AW により解析した結果である。(6) 式から得られた ICF 値は、

$ICF(t, -3), ICF(t, -1), ICF(t, 1), ICF(t, 3)$ に集中しており、明瞭に調波構造が抽出されている。

これら 2 つのシミュレーション解析例から、基底値に $s(t, a)$ を用いた WT により、自己相似性を次々と解析していくことにより従来の関数形で表された基底関数を用いた WT と同等の解析結果が得られることが明らかになった。調波構造を持つ AW により解析するのであれば調波構造を持つ信号の特徴をより効率よく抽出することが可能となり、わずかな変動を含む初期異常を含めた特徴抽出に有効であることを示唆している。

Fig. 2 An original chirp signal

Fig. 3 Distribution of $ICF(t, a)$ of a chirp signal : gray-scale representation

Fig. 4 Distribution of $ICF(t, a)$ of a chirp signal : a bird's eye view representation

Fig. 5 Distribution of $ICF(t, a)$ of a simulation signal with harmonics

4. 実測信号の ICF 解析

本解析手法を、「大島丸」の定常（すなわち定速）走行時と減速時の振動・騒音解析に適用した。

Fig. 6 Main-deck of a training ship, 'Oshima maru', and arrangement of sensors

Fig. 7 Lower-deck of 'Oshima maru', and arrangement of sensors

4.1 大島丸騒音の性質 大島丸はディーゼル機関 (1300ps, 370r.p.m.) を主機関とする 226 トンの練習船である。図 6 に同船の上甲板断面図を、図 7 に下甲板断面図を示す。主機関は下甲板に設置され、上甲板の食堂の壁は吹き抜け部に隣接しているため、本船

では種々の構造上の振動・騒音対策が施されているものの、船員の休憩室も兼ねる食堂は低い周波数をもつ不快な騒音に悩まされている。加えて食堂直下に発電機が設置されており、食堂ではこれらの騒音の影響も受ける。

まず食堂内騒音の性質を調べる目的で、図 6 の●の位置にマイクロフォンを設置して騒音を測定した。測定データを Gabor 関数を AW とする WT で解析した結果を図 8 に示す。これは、主機関が 1.2 秒近傍で急減速したときのものである。騒音信号は低周波成分が主体で、400Hz 以下の成分は高周波成分より 10dB 以上高い。この騒音成分を除去するための適応制御を検討中である⁽⁸⁾が、これを実現するには騒音源の特定が必要となる。従来はこのような場合、フーリエ変換によるコヒーレンス解析を適用することが多い。しかし前述のように、この手法による解析は信号の周波数成分が時不変であることが前提となり、主機関の急加・減速時等の信号分析には適用できない。なお図 8 の解析においては、主機関が急減速した 1.2 秒近傍の非定常挙動は検出されていない。

Fig. 8 WT analysis, with Gabor function as AW, of the noise from mess hall

4.2 ICF による騒音解析 従来の手法では急加減速等の非定常挙動が検出が不可能なので、ICF 解析法の適用を試みた。ここでは、食堂内の壁と床の振動と室内騒音との相関性を評価した。また主機関の急減速の開始動作が騒音にどのように影響するか、等についての解析も行った。

図 6, 7 において、加速度ピックアップとマイクロフォンの設置位置をそれぞれ▲印と●印で示す。各センサから得られる信号はサンプリング周波数 6kHz で採取され、解析の周波数帯域は 2.5kHz とした。

4.2.1 ICF による定常騒音の解析 この解析では、加速度ピックアップからの振動データを $s(t, a)$ として ICF を計算した。窓関数は、前述の通りブラック

マン窓を用いた。 $s(t, a)$ の波形を図 9 に示す。この実測ウェーブレットの周波数特性は、図 10 に示されるように調波構造をもっている。

これらの $s(t, a)$ によって定常走行時の室内音響信号を解析した結果が、図 11 と図 12 である（横軸と縦軸は、図 4 と同様）。双方とも AW との相似性の時間組成が明らかになっていることが観測できる。床振動との相関を調べた図 11 では、 $ICF(t, 1)$ の値が大きい。これは、2 倍に伸長した AW: $s(t, 1)$ と音響信号との相関が大きいことを意味する。図 12 では、壁振動信号から得た実測ウェーブレット: $s(t, 0)$, $s(t, 2)$ と音響信号との相関（すなわち $ICF(t, 0)$ と $ICF(t, 2)$ の値）が大きい。さらに図 12 では、離散的に $ICF(t, -3)$ の値が大きくなり、両信号は周期的に特定の高周波成分とも相関があることも予測される。この値の広がりが高調波を持つ壁振動 WT の圧縮により騒音の高次の高調波成分をも検出していることを示している。図 1 における AW の圧縮時に AW の高調波が高次成分解析をする場合に相当する。

なお、両解析結果ともに $a < 0$ では ICF 値が小さく、いずれの場合も高次成分への自己相似性は少なく、振動は調波構造を持つ大きな高周波騒音を発生させていないことが解析できる。また、図 11 の ICF 値そのものが大きいところから、床からの振動の方が壁からのそれより騒音に大きく寄与していると考えられる。それは特に $ICF(t, 0)$ の卓越値より判断され、その値は (6) 式より従来の相互相関関数と等しくなるためである。その他の高次および低次の成分は前述のように直接的な相関ではなく、解析対象が調波構造を持つ場合にその成分の変動や特徴を抽出するのに有効である。したがって、定常状態の解析より非定常状態での特徴抽出により有用であると考えられる。

Fig. 9 Fundamental wavelets, $s(t, 0)$'s, of measured signals from the wall and the floor

Fig. 10 Frequency distributions of the $s(t, 0)$'s

Fig. 11 Distribution of $ICF(t, a)$ obtained from WT analysis, with the measured vibration signal of the floor as AW

Fig. 12 Distribution of $ICF(t, a)$ obtained from WT analysis, with the measured vibration signal of the wall as AW

4.2.2 ICF による過渡的騒音の解析 過渡状態の騒音の性質を調べるために、入港時に主機関を 350r.p.m. から 280r.p.m. に急減速したときの相関解析を行った（それぞれのデータ採取位置は前出と同様）。先ず定常走行時 (350r.p.m.) の振動信号から作成した

$s(t, a)$ を用いて音響信号を解析した結果を図 13~16 に示す (図 14 と図 16 は鳥瞰図). これらの図において, $t = 1.2$ 秒以降は急減速状態の信号である.

図 13、図 14 に示す床振動信号との相関解析結果では $ICF(t, 0)$ の値は周期的に 0.5 以上の値となっている. 解析結果から, 定常状態と同様に床からの寄与度が高いと考えられる. また, 図 8 の解析結果では, 急減速時点前後での変化は全く検出されていなかった. この場合も急減速の影響は明瞭ではない. ただし, $ICF(t, 0)$ と $ICF(t, 4)$ の各値が急減速の箇所のみ, 値が小さくなっていることが確認できる. また, 壁振動との解析結果から得られた値より高い ICF 値となっていることから, 主機関以外の振動である床直下にある発電機が室内音響に寄与していることが予想される.

一方, 図 15, 16 の $ICF(t, 0)$ の値が小さいことから分かるように, 食堂内騒音に及ぼす壁振動の影響は少ないと考えられる. ただし, $ICF(t, 4)$ との強い相似性を示しており, このような基本周波数を $1/4$ とした調波構造に対しての相似性が示唆される. また, 急減速時の $ICF(t, a)$ の分布は $s(t, a)$ の自己相似性をもつ Chirp 信号のような周波数変調の形態はとらない. しかし, これらの図において 1.2 秒以後は $ICF(t, -2)$ の値が小さくなっている. この成分が主機関の振動成分との相関性があり, 急減速点が検出されていると判断される.

Fig. 13 Distribution of $ICF(t, a)$ obtained from WT analysis, with the measured vibration signal of the floor as AW, at rapid deceleration : gray-scale representation

以上のように, 床と壁の振動信号を $s(t, a)$ とした場合, 急減速時の特徴は信号そのものとの相関ではなく, 元の信号を相似変形した信号との相関によって検出された. その主たる原因は, これらの振動信号は主機関の回転振動だけでなく, 海水と船との衝撃振動や食堂直下にある発電機の振動等も含んでいるからであ

Fig. 14 Distribution of $ICF(t, a)$ obtained from WT analysis, with the measured vibration signal of the floor as AW, at rapid deceleration : a bird's eye view representation

Fig. 15 Distribution of $ICF(t, a)$ obtained from WT analysis, with the measured vibration signal of the wall as AW, at rapid deceleration : gray-scale representation

Fig. 16 Distribution of $ICF(t, a)$ obtained from WT analysis, with the measured vibration signal of the wall as AW, at rapid deceleration : a bird's eye view representation

る。それらの信号を相似変形成分によって、検出したものと考えられる。

したがって、急減速時の特徴のみを抽出するときには、主機関の主軸受振動を $s(t, a)$ として用いる方がより直接的と考えられる。このような判断に基づき、主軸受振動を $s(t, a)$ として解析した結果が図 17 である。この図から、減速開始時間 (1.2 秒) で $ICF(t, 4)$, すなわち基本 AW, $s(t, 4)$, の調波成分が現れていることが分かる。これは急減速によりプロペラにかかる負荷によって発生する軸受振動成分と騒音との相関を抽出しているものと考えられる。それ以後は ICF 値が急速に減少していることは、軸受の運動停止による振動成分消失と時間的に対応している。

ただし、今回用いた壁や床による振動信号の調波成分も含めた相似変形により、対象となる室内音響との相関性とその時間組成は明らかになった。よって、各振動源と床および壁振動との関連性を調べることで、特徴抽出のみではなく、より物理的な解析が可能になるものと考えられる。

Fig. 17 Distribution of $ICF(t, a)$ obtained from WT analysis, with the measured vibration signal of the bearings as AW, at rapid deceleration : gray-scale representation

5. お わ り に

本研究では、非定常信号の相関解析を行う目的で、実測信号を AW とした瞬時相関関数, ICF を定義した。ICF を用いて, Chirp 信号や調波構造をもつシミュレーション信号を解析した。Chirp 信号の解析結果から、実信号の一部をウェーブレット, $s(t, a)$, とすると自己相似性を含めた相関関係が得られることを明らかにした。また調波構造をもつシミュレーション信号の構造解析も可能であることを示した。

さらに、この手法を用いて、本校の練習船の室内騒音解析を行った。船内食堂の騒音と壁及び床振動との

相関関係を、それぞれの振動信号を $s(t, a)$ として ICF 値を評価した。船が定速で走行中は、壁振動より床振動の方が室内騒音への寄与が大きいたことが分かった。壁振動信号を $s(t, a)$ とした解析結果から、 a の圧縮・伸長のいずれの場合 (すなわち低周波・高周波の両領域) でも、調波構造の特徴的挙動が検出できた。急減速時の過渡的状態の解析では、壁及び床のいずれの振動信号を $s(t, a)$ とした場合も急減速時の不連続挙動は抽出できたが、明瞭ではなかった。ただし、従来法では全く特徴抽出できなかったもので、若干の改善が認められる。また、この場合もやはり床信号との相関の方が顕著であった。さらに主機関の主軸受等のプロペラ負荷のようなより直接的な振動信号との相関解析では、過渡的状態の特徴が一層明瞭に表れた。

室内振動と機関室各部の振動との関係をより詳細に解明するならば、特徴の抽出はさらに明確になるものと考えられる。今後は、この調査を行うと共に実信号窓長や $t-s$ (すなわち $t-f$) 分布の特性評価の自動化等の検討を進めたい。

最後に、本研究の遂行にあたりご協力頂いた練習船大島丸乗務員の方々に深甚の謝意を表します。

References

- (1) 石光俊介, 北川孟, *Wigner 分布の補正と非定常信号解析への適用*, “日本機械学会論文集”, 57 巻, 535 号, C, (1991), pp.787-794
- (2) 堀畑聡, 伊藤忠宏, 川上高史, 北川孟, 石光俊介, 平滑化 *Wigner 分布* による代表的非定常信号解析の統一表現, “日本応用数理学会論文集”, Vol.4, No.2, (1994), pp.81-100
- (3) O.Rioul and M.Vetterli, *Wavelets and Signal Processing*, “IEEE SP MAGAZINE”, Vol.10, (1991), pp.14-38
- (4) R.B.Randall, 周波数解析ハンドブック, Brüel& Kjær, (1987),
- (5) 石光俊介, 杵築兼史, 北川孟, リファレンス関数を用いた *Cross-Wigner 分布*, “日本機械学会論文集”, 58 巻, 551 号, C, (1992), pp.2068-2073
- (6) S. Ishimitsu, H. Kitagawa and S. Horihata, *Correlation analysis of time-varying signals by the wavelet obtained from measurement* “Proceedings of ISMA25 International Conference on Noise and Vibration Engineering”, Vol.II, (2000), pp.945-949
- (7) S. Ishimitsu, H. Kitagawa and S. Horihata, *Active control of the room noise of ship by the correlation analysis of measured wavelet*, “Proceedings of the 29th International Congress on Noise Control Engineering”, (2000)
- (8) 石光俊介, 吉村美香, 船室内騒音のアクティブ制御システムの検討, “日本マリンエンジニアリング学会誌”, 第 37 巻 9 号, (2002), 67-74