計測自動制御学会東北支部　第162回研究集会(1996.7.19)
資料番号　162-7

ウェーブレット変換の超音波伝搬時間計測への応用

An application of wavelet transform to measurement of ultrasonic propagation time

○照井　球一朗　　今野　和彦　　井上　浩
○Kyuichiro Terui, Kazuhiko Imano, Hiroshi Inoue

秋田大学　鉱山学部　電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering,
Mining College, AKITA University

キーワード：パルス反射法(Pulse Echo Technique), 多重解像度解析(Multiresolution analysis)
ウェーブレット変換(Wavelet Transform), 位相平面(Phase Plane)

連絡先：〒010　秋田市手形学園町1-1　秋田大学 鉱山学部 電気電子工学科　井上研究室
今野　和彦, Tel.：(0188)89-2490,　Fax.:(0188)35-4651,　E-Mail:ohyou@ipc.akita-u.ac.jp

1．はじめに

超音波を用いた物性測定には，パルス反射法が広く用いられている．一般的には，パルスの伝搬時間を時間軸上で測定するが，系の雑音が振幅に影響する場合には，測定精度が低下する．本報では，信号波形の多重解像度解析による特徴抽出に着目し，雑音の影響を受けにくい測定方法を実現するため，信号の時間－周波数解析を導入することを提案する．解析方法としてはウェーブレット変換を用い，実験例として，ガウス性雑音を含んだ超音波探傷モデル中における超音波伝搬時間測定を行ったので，その結果について述べる．

2．ウェーブレット変換[1,2,3,4,5)]

2．1 離散ウェーブレット変換

時系列信号 $x(t)$に対するウェーブレット変換 $\Psi(a,b)$は，アナライジングウェーブレットと言われる基底関数 $\Psi_0(t)$ を用いて次のように定義される．

$$\Psi(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty}\Psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right)\cdot x(t)\,\mathrm{d}t \quad (1)$$

ここで，aはスケールパラメータと呼ばれ，bは時刻のパラメータである．(1)式より信号 $x(t)$について，$\Psi_0(t)$の振幅値を$1/\sqrt{a}$倍，時刻 t を $1/a$ 倍してから b だけずらした関数を用い，たたみ込み積分を行った結果がウェーブレット変換であることがわかる．

実際に変換を行う場合には，計測データがディジタル値で取り込まれるため，離散ウェ

ーブレット変換を行うことが必要になる．数列 $\{p_k\}$ に対して，次式で与える関係（ツースケール関係）を満たす関数 $\phi(t)$ をスケーリング関数という．

$$\phi(t)=\sum_{k\in\mathbf{Z}}p_k\,\phi(2t-k) \tag{2}$$

スケーリング関数 $\phi(t)$ と数列 $\{q_k\}$ を用いて，ウェーブレット関数を次のように定義できる．

$$\Psi(t)=\sum_{k\in\mathbf{Z}}q_k\,\phi(2t-k) \tag{3}$$

これらツースケール関係を満たす数列 $\{p_k\}$，$\{q_k\}$ は，ツースケール数列といわれる．一般に，パラメータ a，b は２つの整数 j，k によって（a，b）→（2^{j}，$2^{j}k$）と置いて離散化される．このとき離散ウェーブレット変換 $d_k^{(j)}$ は(1)式より

$$d_k^{(j)}=2^{j}\int_{-\infty}^{\infty}\Psi(2^{j}t-k)\cdot x(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

となり，逆変換は

$$x(t)\sim\sum_{j}\sum_{k}d_k^{(j)}\cdot\Psi(2^{j}t-k) \tag{5}$$

のようになる．

２．２．多重解像度解析

(2)式のツースケール関数において，t をレベル j を用いて $2^{j}t$ と置き換えれば

$$\phi(2^{j}t)=\sum_{k\in\mathbf{Z}}p_k\,\phi(2^{j+1}t-k) \tag{6}$$

と書ける．レベル j のスケーリング関数 $\{\phi(2^{j+1}t-k)\}_{t\in\mathbf{Z}}$ の張る空間をＶ $_j$ とすると，(6)式は $\phi(2^{j}t)\in$ Ｖ $_{j+1}$ であることを示す．したがって，スケーリング関数 ϕ に対応して関数空間の階層構造

$$\cdots\subset \mathrm{V}_{j-1}\subset \mathrm{V}_{j}\subset \mathrm{V}_{j+1}\subset\cdots \tag{7}$$

が定まる．これは，スケーリング関数によって生成される多重解像度解析と言われる．

特に，直交ウェーブレットには必ず多重解像度解析が対応している．今，離散ウェーブレット逆変換(5)式の右辺の２重和について，

$$y_j(t)=\sum_{k}d_k^{(j)}\,\Psi(2^{j}t-k) \tag{8}$$

と書き，また

$$x_j(t)=y_{j-1}(t)+y_{j-2}(t)+\cdots \tag{9}$$

と書く．(9)式より，信号 $x(t)$ がそれよりも低レベルのウェーブレット成分 $y(t)$ の和で構成されていることがわかり，同式はさらに $x_j(t)$ についての再帰的な形に書き直すことができる．

$$x_j(t)=y_{j-1}(t)+x_{j-1}(t) \tag{10}$$

(10)式は，レベル j の関数 x_j（解像度は 2^{j}）を解像度が半分の 2^{j-1} の関数の和に分解できることを示す．すなわち，分解を次々と繰り返すことにより元の信号のレベルは１つずつ下がり，解像度が半分の信号成分を得ることができる．これが信号の展開時における多重解像度解析である．

図１に示す方法で，実際に時系列信号 $x(t)$ を分解し，多重解像度解析を行うことができる．信号 $x(t)$ は帯域フィルタＨ（ローパス），Ｇ（ハイパス）に通された後ダウンサンプリングされて，２つの帯域成分に分解（サブバンド分解）され，同時に時間分解能が半分にされている．また，得られた低周波数成分を再びフィルタＨ・Ｇに通して分解を行うと，ダウンサンプリングにより信号の時間分解能はさらに半分になるものの，周波数分解能は倍になる．これを繰り返すことで，離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を実行でき，その結果元の信号 $x(t)$ の帯域別のいくつかの信号成分が得られ，信号の特徴づ

けが可能になる．例えば，信号 $x(t)$が一定の周波数 f で振動しているのならば，f を含んだ帯域の信号成分に係数（ウェーブレット変換値）が集中する．また，高周波数成分に顕著に現れる信号の異常性を検出したり，帯域の違いにより波形から雑音を除去したりすることも可能である．

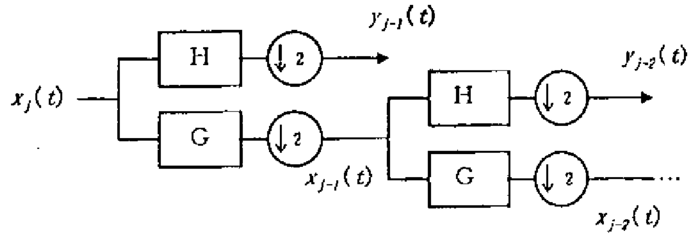


図１ウェーブレット変換による多重解像度解析

２．３．位相平面

図１の手順に従ってサブバンド分解とダウンサンプリングにより j 回分解された信号波形は，低周波数成分ほど時間分解能が悪く（$\propto 2^j$），周波数分解能が良い（$\propto 2^{-j}$）．これを横軸を時間，縦軸を周波数として平面上に表したのが図２であり，これは位相平面と呼ばれ，時間－周波数解析の手段として用いられる．ただし信号の係数は，セルと言われる平面上のマス目の濃淡で表わされる．

ウェーブレット変換による位相平面は，フーリエ変換によるそれと異なって，時間的に局在する高周波数成分に関して時間分解能が高く，周波数的に局在する低周波数成分に関して周波数分解能が高いという特徴がある．このため，平面を最適に分割し，成分の係数を非常に効率的に分布させることができる．

３．計測実験

パルス反射法により，超音波探傷モデル中の超音波伝搬時間計測を行う実験システムを図３に示す．モデルは水と試料との多層構造となっている．試料はＦ２ガラスで，その外形は直径 d=28mm，高さ h=25mm の円柱である．

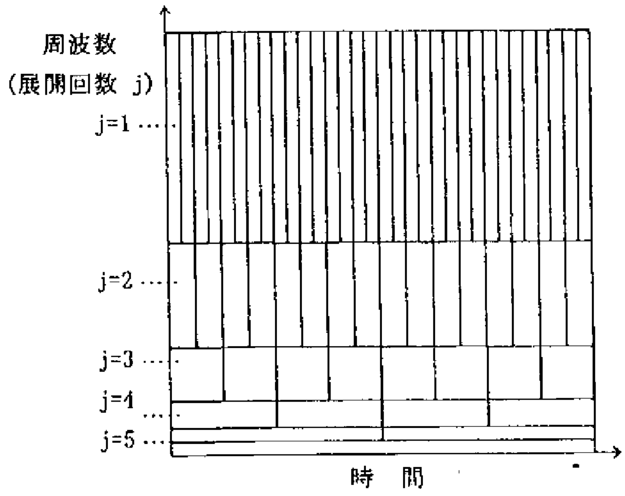


図２ウェーブレット変換による位相平面の分割

発振器（HEWLETT PACKARD 製　8111A）により 10 ＭＨｚのバースト波形電圧でトランスデューサ（日本電波工業製　10Z10N）を駆動して，振動面から水中に向けて超音波パルスを放射する．試料の上面と底面からの反射波は同じトランスデューサで受波され，これらはディジタルオシロスコープ（横河電気製 DL1200）上で観測される．さらに信号波形をＧＰＩＢを介してパソコン（EPSON 製　PC-286LS）上に取り込み，ウェーブレット変換により信号波形を位相平面へ展開，時間軸上でパルスの立ち上がり時間を読み取って伝搬時間を測定する．なお，解析には Daubechies の４タップウェーブレットを用いた[5]．

実験では，ファンクションジェネレータ（HEWLETT PACKARD 製　33120A）からガウス性雑音を発生し，これを低域フィルタ（安藤電気製　LF-27 型）により帯域制限してから信号波形に加え，ＳＮ比を 6dB～-4dB の間で変化させて各 10 回の測定を行った．ここで，ＳＮ比を次式で定義する．

$$S / N = 20\log\frac{V}{\sigma} \tag{11}$$

V：第２の反射波の実効値［Ｖ］
σ：雑音の実効値［Ｖ］

さらに，反射波形間に干渉が生じない場合（バースト波の周期は 40 cycle）と，反射波

形間に干渉が生じる場合（同 160 cycle）の二通りについて実験を行い，ＳＮ比と測定値のばらつきについて検討した．

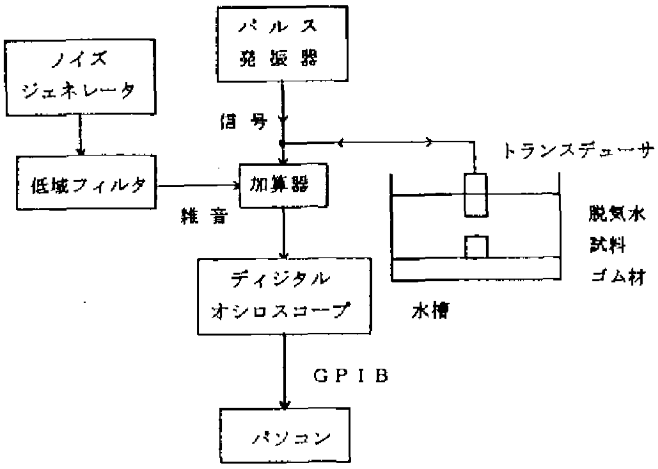


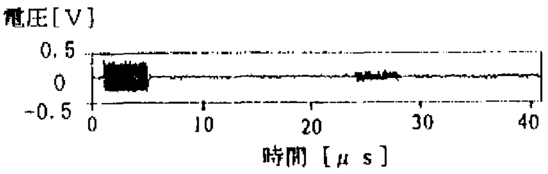
図３　実験システム

４．実験結果および考察

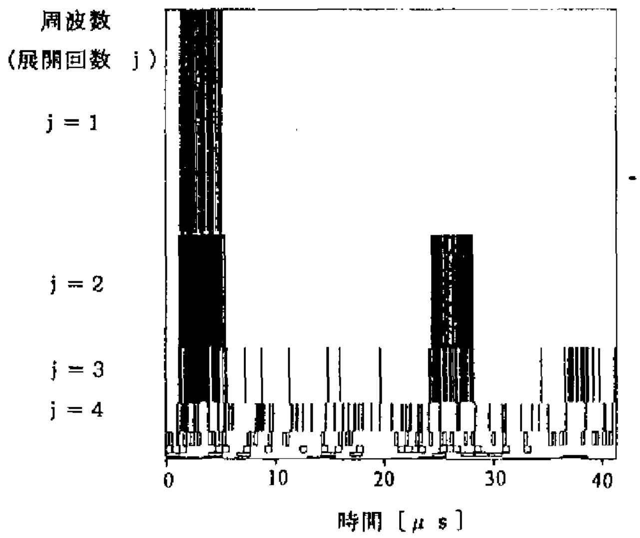
図４に解析を行った結果の例を示す．波形間には干渉がなく（バースト波の周期は 40 cycle），またＳ／Ｎ＝-1.7dB である．図４(a)はこの条件で得られる超音波信号波形で，(b)は信号波形をウェーブレット変換により位相平面へと展開した様子を示す（ただし，表示は最大の係数の 8%でレベルカットしてある）．位相平面(b)上ではトランスデューサの駆動周波数 10 ＭＨｚが分解のレベル（周波数軸） j=2〜3 に現れ，これらは雑音に比べて明瞭であるため，信号波形(a)では読みとりにくいパルスの立ち上がり位置の検出が容易となっている．すなわち，雑音の影響を強く受けずに超音波伝搬時間を測定できる．

図５は第１・第２反射波形間に干渉が生ずる場合（バースト波の周期は 160 cycle）である．また，Ｓ／Ｎ＝-1.7dB で(a)が信号波形，(b)が位相平面への展開（レベルカットは 18%）である．位相平面上では，図４(b)と同様に雑音の影響に左右されずに測定を行うことが可能である．

測定値のＳＮ比変化に対するばらつきを検討するため，パルスエコーオーバーラップ

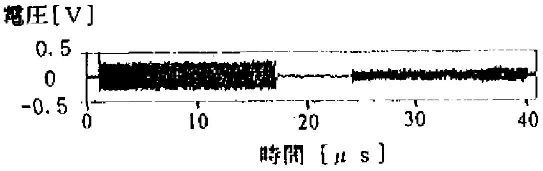


(a)　信号波形

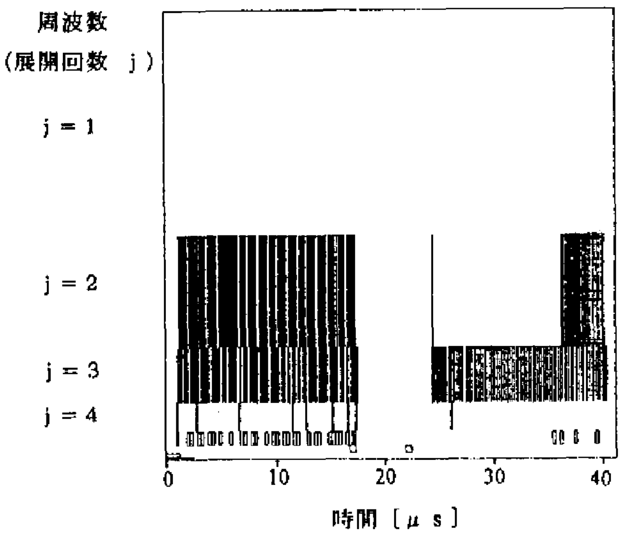


(b) ウェーブレット変換による位相平面への展開

図４　信号波形の解析結果
（波形間の干渉なし）



(a)　信号波形



(b) ウェーブレット変換による位相平面への展開

図５　信号波形の解析結果
（波形間の干渉あり）

法（以下 PEO 法）による測定値を基準とし，両者の差を取って百分率で表す[7]．また，比較のためにディジタルオシロスコープ上でも測定を行い，これについても同じく差を求める．これらから各ＳＮ比ごとに差の平均値と標準偏差を示すと図６，７のようになる．ただし波形間に干渉のない場合の結果が図６，また，干渉のある場合の結果が図７である．両図において，ＳＮ比が低下するにしたがって PEO 法との差は標準偏差・平均値ともに増大する傾向にあることがわかる．しかし，オシロスコープでの測定値に比べ，ウェーブレット変換による測定値ではその傾向が非常に小さく，最小二乗法による近似直線をあてはめてもその傾きはほぼ０であった．これは，位相平面上では雑音が帯域全体（平面全体）に分散されるのに対して，信号の周波数局在性が高く，雑音の影響をあまり受けずに測定を行うことが可能であったためと考えられる．

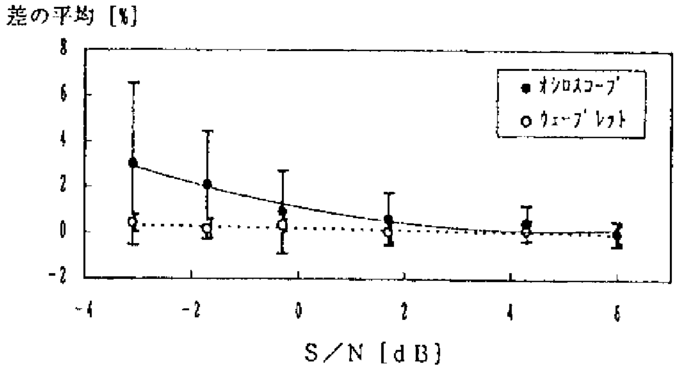


図６　ＳＮ比に対する PEO 法との差の変動（波形間の干渉なし）

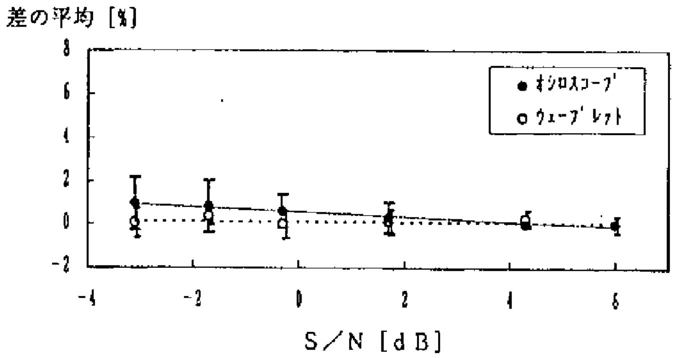


図７　ＳＮ比に対する PEO 法との差の変動（波形間の干渉あり）

５．おわりに

パルス反射法による超音波伝搬時間計測にＳＮ比が影響する場合について，ウェーブレット変換を導入して測定を行った．ウェーブレット変換による解析の特徴は，周波数と時間の両方の情報を得られることであり，帯域を考慮した時間測定が期待された．実験により，波形間に干渉のある場合とない場合について測定を行った結果，両者ともＳＮ比変化による影響を受けにくいことがわかった．オシロスコープ上で行われる通常の測定と比較すると，その特徴が顕著であり，特に低ＳＮ比の条件下ではウェーブレット変換による測定の方が信頼性が高いという結果が得られた．

参考文献

1）篠原克幸：ウェーブレット変換，O plus E, No.193, 74/82 (1995)

2）花熊克友・風戸裕彦：異常信号をどう検出するか？，エレクトロニクス，11 月，42/43 (1995)年

3）榊原進：ウェーブレットビギナーズガイド，155/178，東京電機大学出版局，(1995)

4）O.Rioul and M.Vetterli:Wavelets and Signal Processing, IEEE SP Magazine, Oct，14/35, (1991)

5）R.R.Coifman and M.V.Wickerhouser : Adapted waveform “de-noising” for medical signals and images, IEEE engineering in medicine and biology, Sep, 578/586, (1995)

6）R.R.Coifman and M.V.Wickerhauser: Wavelets and adapted waveform analysis, A K Peters, 8/44, (1993)

7）根岸勝雄・高木堅志郎：超音波技術，109/123，東京大学出版会，(1984)