

ディコンボリューション処理による超音波探傷試験の時間分解能向上の試み

奥山 裕一¹・三木 千壽²

¹学生員 東京工業大学大学院修士課程 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

探触子で受信される欠陥からのエコーを定式化しそれを解くことにより、時間分解能を向上することができる。このときディコンボリューション処理の過程に最大エントロピー法を導入し、雑音の影響を受けにくかつ高い時間分解能を持つ方法を示した。また実験によって得た人工ノッチからの散乱波に対して処理を行い、ノッチ幅を正確に推定することができた。

Key Words: ultrasonic inspection, deconvolution, maximum entropy method, resolution

1. はじめに

疲労亀裂の先端やノッチの角などに超音波が入射すると、亀裂先端や切欠きの角を中心とした円筒波、いわゆる端部エコーが発生することが実験やFEMを用いた解析によって確認されている。端部エコー法²⁾は、図-1に示すように内部欠陥の上端部と下端部から発生するエコーを捉えることにより深さ方向の寸法を推定するものである。鋼材表面で斜角探触子を移動させ上部部および下部部からのエコーの最大値を示す位置を記録し、探触子の水平移動距離と端部エコーの伝播時間差から欠陥の深さ方向の寸法を推定できる。

しかしブローホールから発生した疲労亀裂などの場合、疲労亀裂とブローホールが形成するコーナーからのコーナーエコーと、疲労亀裂先端からの端部エコーが時間的に重なってしまう。このとき反射エコーからそれぞれの端部およびコーナーのエコーを分離することはできなくなり、寸法の推定は不可能となる。従って反射エコーの時間方向の分解能の向上が不可欠となってくる。

時間方向の分解能は一般的に使用する超音波のパルス幅によって決まる。従って時間方向の分解能を向上させるためには、使用するパルスの幅を狭くしインパルス状の波に近づければよいことになる。超音波顕微鏡は周波数が数GHzの超音波を用いることにより時間方向分解能を向上させている⁴⁾。しかし、高周波成分を含む超音波は減衰が大きくなるという問題がある。また振動子にダンパをつけて振動を強制的に抑制してパルス幅を短くすることも考えられるが、これはエコー受信の際に感度の減少をひき起こす。

近年、信号処理^{4), 5), 6), 7)}や波動理論^{3), 8), 9)}

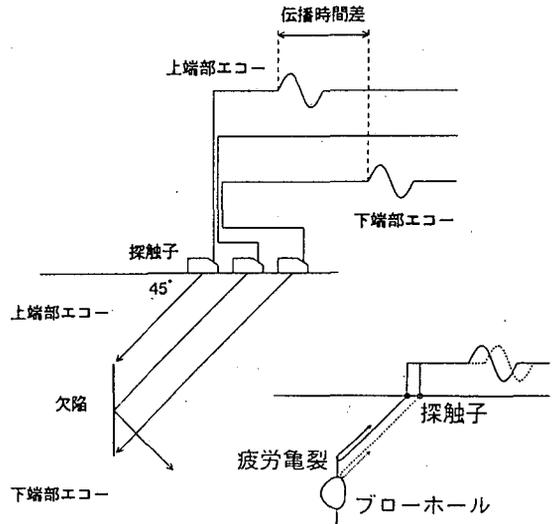


図-1 端部エコー法

を用いるにより分解能を向上させる試みがなされている。本研究では参照波を用いたディコンボリューション法に着目し、超音波エコーの時間方向の分解能向上を行った。その際、ディコンボリューション処理の過程に最大エントロピー法を導入し、高い分解能と雑音に強い性質を両立させることを試みた。

2. 時間分解能の向上

(1) ディコンボリューション処理

端部およびコーナーからのエコーの波形が入射した

波の波形を保っていると仮定すると、複数の反射源からのエコーは次のような式で表せる。

$$p_{rec}(t) = \sum a_i \cdot p_{ref}(t - \tau_i) \quad (1)$$

ここで、 $p_{ref}(t)$ は参照波、 $p_{rec}(t)$ は探触子で観測される受信波であり、 a_i は時間距離 τ_i の反射源のエコーレベルである。 $p_{ref}(t)$ と $p_{rec}(t)$ の時間軸に関するフーリエ変換を $P_{ref}(f)$ と $P_{rec}(f)$ とするとそれらの関係は次のようになる。

$$P_{ref}(f) = \int p_{ref}(t) \cdot \exp(-j \omega t) dt \quad (2)$$

$$P_{rec}(f) = \sum a_i \cdot P_{ref}(f) \cdot \exp(-j \omega \tau_i) \quad (3)$$

$$\omega = 2 \pi f$$

式(3)を式(2)で除すと、

$$T(f) = P_{rec}(f) / P_{ref}(f)$$

$$= \sum a_i \cdot \exp(-j \omega \tau_i)$$

$$= \sum a_i \cdot \cos(\omega \tau_i) - j \sum a_i \cdot \sin(\omega \tau_i) \quad (4)$$

この実部に対して逆フーリエ変換を行うと、

$$\tau(t) = \sum a_i \cdot \delta(t - \tau_i) / 2 \quad (5)$$

となり、 τ_i のところにのみインパルスが現れ、反射源までの距離を知ることができる。以上の操作をディコンボリューション処理と呼ぶ。フーリエ変換はFFTのアルゴリズムを用いる¹²⁾。

いま例として、図-2に示すような時間サンプリング点で20点離れているノッチ端点A,Bを考える。鋼材表面の点Cから45度の斜角入射で図-2aに示す波を入射し、ノッチの各端点A,Bからの端部エコーを同じ点Cで受信したとする。入射する波は5MHz・広帯域探触子から発生する超音波の波形データを使用した。時間サンプリング間隔は0.005 μ secである。B点から発生する端部エコーはA点から発生する端部エコーに対し位相が逆転する。このことを考え、それぞれの点からのエコーが入射波の波形を維持したまま振幅と位相が変化して到達すると仮定する。A,Bからの反射波の波形を図-2b,cに示す。このとき点Cで受信されるエコーは図-2dのような重ね合わせ波形となるが、この波形から各端点からのエコーを判別することはできない。

そこで、図-2aの入射波を参照波 p_{ref} とし、図-2dの受信波を p_{rec} としてディコンボリューション処理を行うことにより、図-2eのような結果が得られる。横軸は参照波に対する反射波の時間遅れを示し、縦軸は参照波に対する反射波の振幅の比を示している。また、符号は参照波に対する反射波の位相の反転を示しており、負の場合、位相は反転している。図-2eは参照波と反射波との間の時間遅れと、反射波の位相および振幅を正確に表現している。つまり、ディコンボリューション処理によって幅を持ったパルスインパルスに近づけ、時間方向の分解能を向上させることができる。

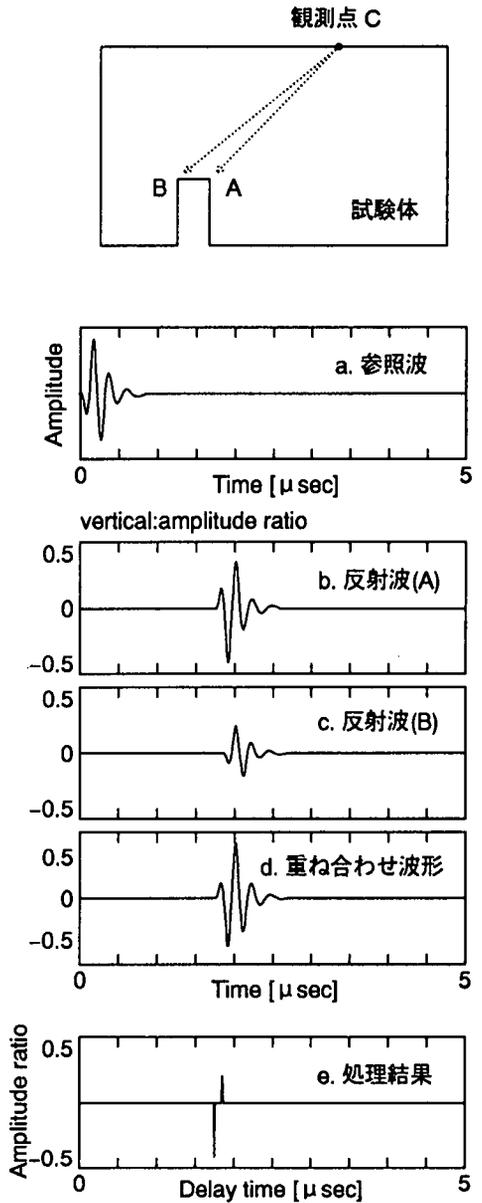


図-2 仮想的な重ね合わせの場合

この処理においての理論的な分解能は、波形の変形や雑音の影響を無視すれば、波長や波数に依存せずサンプリング周波数により決定される。つまり最小の分解能はサンプリングの時間間隔である。

(2) フーリエ逆変換時の周波数帯域制限について

実際の超音波探傷で得られる波形は雑音を含んでいると考えられ、そのままではディコンボリューション処理によってあまりよい結果は得られない。

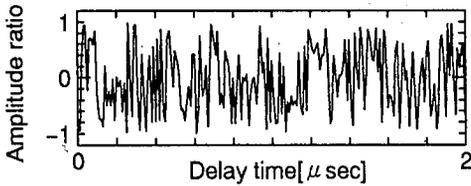


図-3 雑音混入の影響

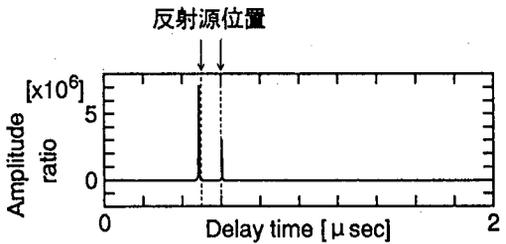


図-5 MEMを導入した場合の処理結果

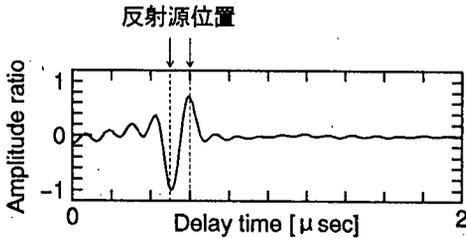


図-4 帯域制限をした場合の処理結果

式(1)を雑音 $n(t)$ を含んだ形でかきなおすと次のようになる。

$$p_{\text{rec}}(t) = \sum a_i \cdot p_{\text{ref}}(t - \tau_i) + n(t) \quad (6)$$

また式(4)も $n(t)$ のフーリエ変換を $N(f)$ とすると次のようになる。

$$T(f) = \sum a_i \cdot \exp(-j \omega \tau_i) + N(f)/P_{\text{ref}}(f) \quad (7)$$

式(7)を逆フーリエ変換する際、 $n(t)$ が白色雑音であるとするとそのフーリエ変換 $N(f)$ は全ての周波数に対して一定の値を持つ。入射波の周波数成分 $P_{\text{ref}}(f)$ の値が大きいときは誤差成分である右辺第 2 項の影響は小さく無視してもよいと思われるが、 $P_{\text{ref}}(f)$ の値が小さいとき右辺第 2 項は大きな値となり、よい結果が得られない原因となる。図-2d の波形に最大値の 1% の白色雑音を加え合わせた波形に対してディコンボリューション処理を行なった結果を図-3 に示す。図から明らかなように、雑音の混入によって計算結果から反射源の時間位置を知ることは不可能となる。そこで、 $P_{\text{ref}}(f)$ の大きな周波数成分の範囲だけを用いて逆フーリエ変換を行うことが考えられる。これを帯域制限と呼び、本研究では参照波のスペクトルの最大値の 10% 以下の周波数成分を除いて処理を行った。

帯域制限を行い逆フーリエ変換した場合、反射源までの時間距離をインパルスとして知ることはできなくなる。このため時間分解能は理論上のサンプリング周波数とはならない。また Gibbs の現象¹⁰⁾ として知られる

ようなサイドローブ(副極)が発生し、処理結果は複数のピークの立つまざらわしいものとなる。このサイドローブは振幅の小さい有効なピークを隠してしまうことなど、反射源の時間位置を知る上で妨げとなることがある。

図-2d で用いた重ね合わせ波形に最大値の 1% の白色雑音を加えあわせ、帯域制限を行って処理した結果を図-4 に示す。ここでは反射源の位置にピークが立っているが、その他にもいくつかのピークが存在し、どれが有効なピークであるかを決定できなくなる。また反射源の位置をインパルスとして得られなくなるため、分解能の低下が予想される。

(3) 最大エントロピー法の導入

2(2)で示したように逆フーリエ変換による方法は雑音に敏感に反応する。また雑音の影響を低減させるための帯域制限は分解能の低下につながる恐れがある。

式(5)における逆フーリエ変換は、時間距離 τ のとき関数 $\cos(\tau)$ のスペクトルを計算することに相当している。そこで本研究では、この作業を最大エントロピー法(Maximum Entropy Method: 以下 MEM)におきかえてディコンボリューション処理を行う。

MEM¹¹⁾は、短いデータからも安定したスペクトルを計算できるという特徴を持っている¹¹⁾。この特徴は帯域制限によって減少したデータに対して非常に有効であると考えられる。

MEM はスペクトルと自己相関の関係を基礎にスペクトルを推定する手法であり、自己相関を求めるラグタイムを設定する必要がある。離散データにおけるラグタイムは時間サンプリング間隔 t の倍数となるが、このラグタイム $m \cdot dt$ を求める数 m を予測誤差フィルタの次数と呼ぶ。この予測誤差フィルタの次数決定に関する合理的な基準はない。通常は MEM の計算の際に求められる最終予測誤差(Final Prediction Error: FPE)を計算し、FPE が極小値を示す次数で MEM の計算を打ち切る方法が取られている¹¹⁾。しかし鋭いピークを持つランダム変動を解析した場合、FPE は明確な極小値を示さず、これをもって次数決定の指標とすることはできない。

3. MEM 導入におけるパラメータの影響

(1) 予測誤差フィルタの次数の影響

ここでは予測誤差フィルタの次数を変え、MEM を導入したディコンボリューション処理の結果の変動をピークの位置と値の面から観察する。

図-6 に予測誤差フィルタの次数と計算される反射源位置の関係を示す。用いた波形は図-2 と同じ時間サンプリング間隔で 20 ポイント離れた反射源 A,B から得られる重畳波形である。フィルタ次数が小さいときは二つの反射源を計算することができず、その位置もかなり変動している。フィルタ次数が 12 以上になるとピークが二つ現れ反射源の数を正しく計算することができるようになる。またこのとき、二つのピークの位置はそれぞれ反射源の位置をかなり正確に表しており、フィルタ次数の増加に関してこの傾向は変わらない。計算に用いたデータ数は 36 であるので適当とされるフィルタ次数は 12 ~ 18 となるが、この範囲内では反射源の位置を正しく計算できていることがわかる。

逆フーリエ変換を用いてディコンボリューション処理を行った場合、ピークの値は参照波と反射波の振幅の比を表す。これはフーリエ変換が線形な性質を持つためである。しかし MEM は線形な演算ではないので、計算されるピークの値が参照波と反射波の振幅の比になるとは必ずしもいえない。

図-7 に予測誤差フィルタの次数とピークの値の関係を示す。計算に使用した波形は図-2 で得られる波形であるので、反射源 A,B からの反射波の振幅は参照波の振幅の 1/2, 1/4 である。従って計算結果は二つのピークの値の比が 1:2 であることが望ましい。最適次数とされる $m=12\sim 18$ の区間では二つのピークの値はほぼ 1:2 となっており、この次数の指標は適当な結果を与えているといえる。

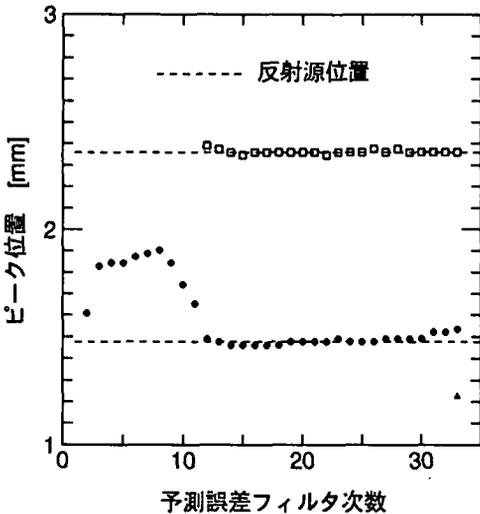


図-6 フィルタ次数とピーク位置の関係

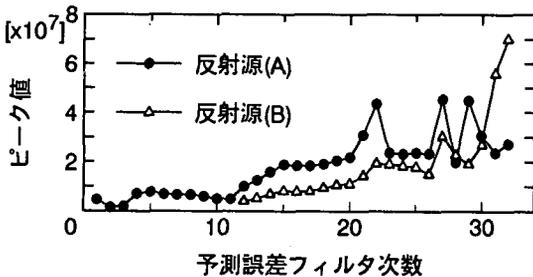


図-7 フィルタ次数とピーク値の関係

MEM を導入したディコンボリューション処理は反射源の時間距離をスペクトルのピーク位置として知る方法であり、まさにこの性質にあてはまる。このような場合、解析するデータ数を N とすると予測誤差フィルタの次数は $2\sim 3\cdot\sqrt{N}$ と取るとよいとされている¹¹⁾。

図-2d で用いた重ね合わせ波形に対し、MEM を導入したディコンボリューション処理を施した結果を図-5 に示す。データ数が 36 なので予測誤差フィルタの次数は 15 とした。逆フーリエ変換による結果である図-4 にくらべ、サイドローブの発生も見られず反射源の位置のみ鋭く立ち上がる結果が得られており、時間方向の分解能向上が明らかに観察できる。

この場合、関数 $\cos(\tau)$ のスペクトルを求めるという作業を行うため、計算結果はすべて正の値しかとらなくなる。従って負のピークが反射波の位相の反転を示すという情報は失われてしまうことになる。

(2) 雑音レベルの影響

ここではシミュレーションとして、時間サンプリング点にして 20 ポイント離れた二つの反射源を考え、この反射源からの重ね合わせ波形の分離を行う。雑音レベルの影響を見るために、この波形に対し最大振幅の 1, 2.5, 5, 7.5, 10% の白色雑音を加え合わせた波形を用いてディコンボリューション処理を行った。

図-8 (1), (2), (3), (4), (5) に結果を示す。実線は MEM を導入したディコンボリューション処理による計算結果であり、点線は逆フーリエ変換を用いたディコンボリューション処理の計算結果である。MEM 予測誤差フィルタの次数は 15 とした。逆フーリエ変換を用いた場合、反射源の位置を表すピークは曖昧なものになり、この図から二つの反射源を認めることは困難であることがわかる。これから、MEM を導入した方法は雑音レベルの増加に対しても高い時間分解能を保持していることがわかる。

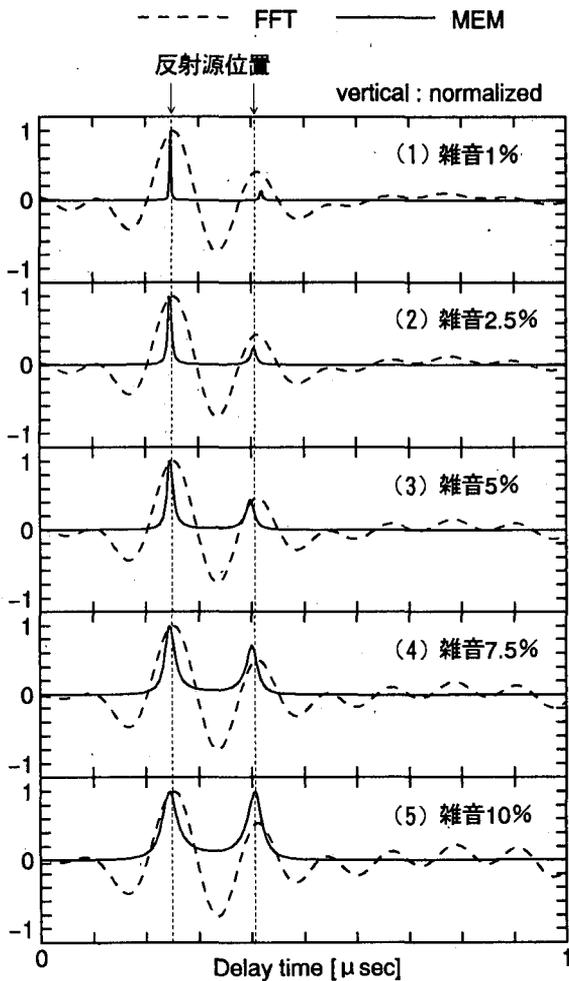


図-8 雑音レベルの影響

(3) 重畳波形の分離限界

以上のシミュレーションの結果、ディコンボリューション処理に帯域制限とMEMを導入することにより、雑音がある場合でも反射源の時間距離と間隔を精度よく計算できることがわかった。ここでは時間的に近接した反射源を考え、ディコンボリューション処理による時間方向の分離限界について調べる。

入射波が時間軸上で近接した二つの反射源から反射してくるとし、それぞれ時間サンプリング点で30,20,15,10,8,6,4ポイントずらして重ね合わせた。雑音がなく全ての周波数成分を用いるとすれば、分離限界は時間サンプリング間隔 dt であるが、帯域制限により分離限界距離は悪化していると考えられる。

図-9, 10にFFT, MEMによる計算において二つのピークを認めることができる範囲でのピーク位置を示す。

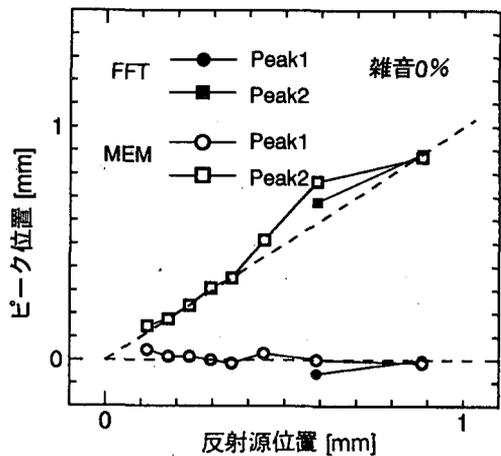


図-9 反射源の分離限界 (雑音 0%)

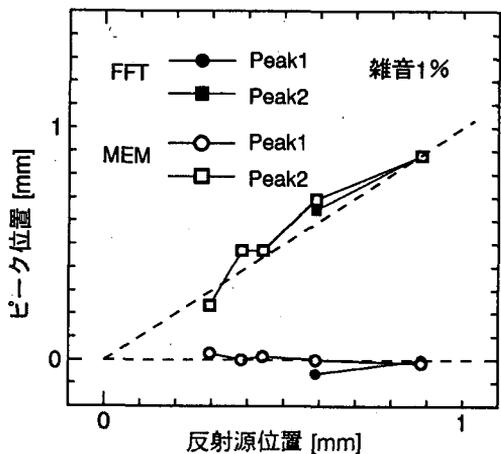


図-10 反射源の分離限界 (雑音 1%)

横軸は設定した反射源間の距離であり、縦軸は計算されたピーク間の距離差を表す。これから、MEMによる計算では雑音 0%のとき 0.1mm程度まで二つの反射源を識別でき、計算される距離差はかなり正確であるといえる。また雑音 1%のときでもFFTによる計算法の分離限界を超えて 0.3mm程度まで二つの反射源を分離することができる。最終的には正しい反射源位置と若干のずれが生じているが、非常に近接した二つの反射源に対してもかなり正確な時間位置の計算が可能であるといえ、MEMの導入により分離限界の性能も向上していることがわかる。

4. 実験

ここでは実験により方形先端の人工ノッチ両端からの端部エコーを取得し、MEMを導入したディコンボリューション処理を用いて畳重波形の分離を試みる。

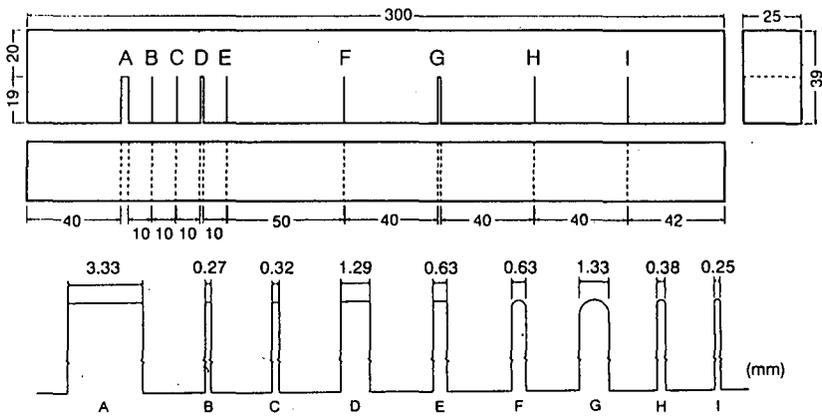


図-11 試験体

本研究の実験は水浸法で行った。試験体は図-11に示す人工ノッチを含む鋼材である。実験は最小幅である0.27mmとそのほぼ倍の幅である0.63mmのノッチに対して行なった。図-12に実験システムを示す。人工ノッチ端部に45度で超音波を入射するため、水浸用探触子は18.9度の角度で支持した。このため水-鋼材の境界面でのモード変換によって鋼試験体中に伝播する波は45°の横波になる。鋼材中の伝播速度は、減衰等の影響を無視し一定とした。

試験体中のノッチ端部で散乱した端部エコーは、再び水中を伝播した後、探触子で受信される。受信信号は探傷器で増幅されてオシロスコープに送られ、そこでA/D変換され波形が表示される。さらにデジタル波形データはパーソナルコンピュータに送られ記録される。

超音波探触子は公称周波数5MHz・水浸無焦点の広帯域探触子を用いた。図-13に参照波として用いた底面エコーの波形を示す。

図-14a, 15aに実験を行った幅0.63mm, 0.27mmのノッチ両端から得られた端部エコーの波形を波形を示す。これらの波形ではノッチ両端からの端部エコーは重なりあい、波形から各端部エコーを分離することはできない。図-14b, 15bにMEMを導入したディコンボリューション処理による結果を示す。それぞれ反射源の時間位置にのみ立ち上がる結果が得られている。また反射源間の時間距離も精度よく計算できており、MEMを導入したディコンボリューション処理の有効性を実験においても確認することができた。

5. まとめ

(1)欠陥からの反射波を定式化しディコンボリューション処理を用いて解くことにより、欠陥までの時間距離を計算できる。このとき、雑音の影響を低減するために帯域制限を行うと、時間分解能が低下する。そこでディコンボリューション処理の過程に最大エントロピー法を導入し、帯域制限により減少したデータからも正確に反射源の位置を知ることができることを示した。

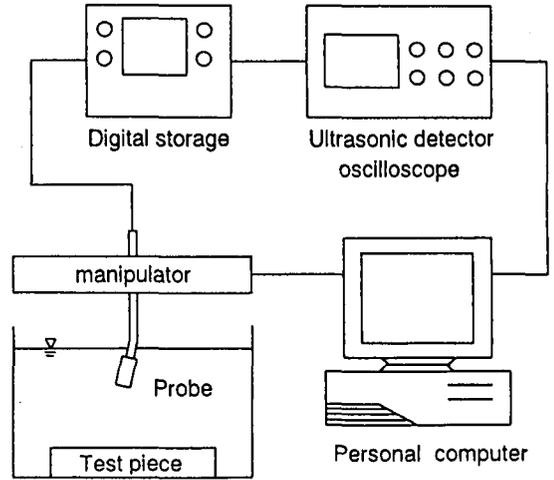


図-12 実験システム

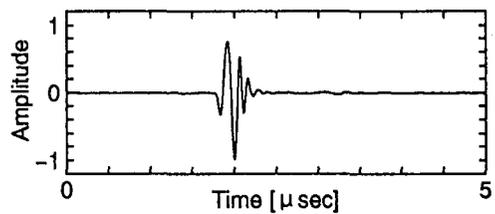


図-13 参照波波形

(2)最大エントロピー法を導入したディコンボリューション処理において、雑音レベル、予測誤差フィルタの次数の影響をシミュレーションによって検討した。その結果、雑音レベルが増加したときにも反射源の位置をインパルスに近い形で知ることができることがわかった。

(3)実験によって人工ノッチの2点の端部から発生する端部エコーを捉えディコンボリューション処理を施すことにより、その距離と入射角度からノッチの幅を正確に推定することができた。

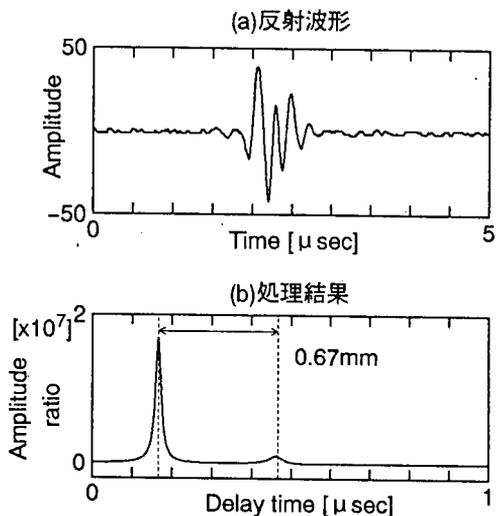


図-14 ノッチ幅 0.63mm の処理結果

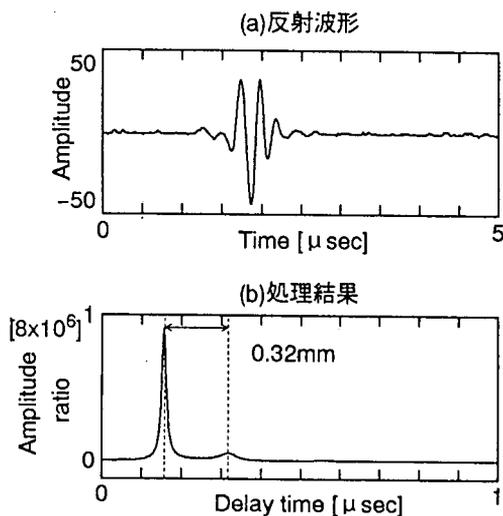


図-15 ノッチ幅 0.27mm の処理結果

参考文献

- 1) 相川康浩：端部エコー法マニュアル，端部エコーハンドブック，日本非破壊検査協会 210.202 小委員会，pp.47-60, 1989.
- 2) 仙田富男，三芳滋：溶接部の非破壊試験・検査，現代溶接技術大系，産報出版，1980.
- 3) 北原道弘，広瀬壮一，建印華，横井幹仁：超音波による界面クラック長の一推定法，土木学会第48 会年次学術講演会，pp.1324-1325, 1993-9.
- 4) Wickramasinghe, H.K., Bray, R.C., Jipson, V., Quate, C.F., and Salcedo, J.R.: Photoacoustics on a microscopic scale, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 33 (11) pp.923-925, 1 Dec. 1978.
- 5) 松原紀夫，山本常昭，小河慎二：MEMIによる重畳波形分離，電気情報通信学会，pp.7-12, October, 1992.
- 6) 篠原源太：パルス圧縮信号の応用，超音波TECHNO. pp.15-22, March, 1993.
- 7) 河口亮一，高木幹雄：分割スペクトル処理とディコンボリューションを用いた探傷波形の分解能向上，非破壊検査，第39巻，第9号，pp.769-777, February, 1991.
- 8) 北原道弘，五月女晃久，中川克也，武捨貴昭，猿渡克己：散乱波動場における位相情報の定量化と実験，土木学における非破壊評価シンポジウム講演論文集，pp.73-80, October, 1991.
- 9) 北原道弘，野村正義，小木哲朗，J.D. Achenbach：部材裏面のクラックの一検出法，構造工学論文集，Vol.37 A, pp.465-477, March 1991.
- 10) Nagai, K.: "A new synthetic-aperture focusing method for ultrasonic B-scan imaging by the Fourier transform", *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics* Vol. SU-32, 4 pp.531-534, July 1985.
- 11) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，October, 1986.
- 12) 大崎順彦，地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，May, 1998.

(1996. 8. 5 受付)

A STUDY ON IMPROVEMENT OF TIME-RESOLUTION OF ULTRASONIC INSPECTION BY DECONVOLUTION METHOD

Yuichi OKUYAMA and Chitoshi MIKI

Time-resolution of ultrasonic inspection test can be improved by numerical deconvolution analysis of scattered ultrasonic echo from a defect. We used maximum entropy method in a process of deconvolution analysis and show a method that prevent noise effect and have high time-resolution. An experiment was done and an artificial notch width was calculated accurately by applying the method to an experimental scattered ultrasonic echo.