

波動伝播特性を用いた損傷検知手法に関する基礎的研究

Damage Detection Methods Based on Wave Propagation Characteristics

谷口 龍太*, 三田 彰**

Ryuta TANIGUCHI, Akira MITA

*慶應義塾大学大学院生, 理工学研究科開放環境科学専攻 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目)

** Ph. D., 慶應義塾大学助教授, 理工学研究科開放環境科学専攻 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目)

An active sensing diagnostic technique was adopted to characterize damage in aluminum beams. The technique is based on the analysis of Lamb wave signals recorded before and after damage. A series of experiments were performed using lead breaks as the simulated acoustic emission sources on the surface. The wavelet transform was applied for time-frequency analysis of the dispersive Lamb waves to estimate the wave propagation velocities. In addition, built-in PZTs working sequentially as Lamb wave emitters and receivers were used to detect damage location. The basic idea of localization is from the pulse-echo method which is often used in ultrasonic inspection. An excitation control technique was developed to separate symmetric modes and anti-symmetric modes of the Lamb wave propagation to improve accuracy of the analysis.

Key Words: PZT, Damage Detection, Health Monitoring, Wavelet Transform

1. 緒言

航空機や原子炉等の構造部材は極限環境下で使用されるにも関わらず, 使用期間中は常時監視するのが困難である。振動による疲労, 腐食, あるいは, 老朽化に伴い発生・蓄積する微小亀裂の存在に気づくことなく使用した場合, 大惨事に直結する可能性があり, より効果的な安全確保手段が必要とされている。構造材料自身に異常振動や微小亀裂の発生・蓄積に対する自己検出・診断機能を組み込むことは, その有力な手段の一つと成り得ると考えられ, 本研究では構造材料の健康状態を自己診断する機能(ヘルスマニタリング機能)を組み込む¹⁾ための基礎検討を実施した。

自己診断機能を持たせた材料を実現とする概念として, 航空機等にセンサ機能, アクチュエータ機能, 制御機能を融合させ, システムとして能動的に知覚, 判断, 応答を行わせる「スマート材料・構造」と呼ばれる概念がある。こうしたスマート材料・構造を適用することで, 老朽化した構造物を最小のコストと人的資源で維持管理する新しい仕組みへと発展させることが期待できる²⁾。特にスマート材料の一つである圧電素子(PZT)は, ひずみを加えると電圧が発生するという圧電効果, および電圧を加えると逆にひずみが発生するという逆圧電効果をもつため, 自ら励起する力を持たないシステムに対してセンサとアクチュエータの両方として機能させることができる点が極めて大きな利点となる³⁾。

多くの圧電素子に関する研究のうち, センシングとアク

チュエータ技術に関する研究は次のように分類することができる。

- ① 圧電素子自身の応答特性, ひずみ特性の改良に関する研究
- ② 損傷検知アルゴリズムに関する研究
- ③ 圧電素子を構造物自体に組み込んだスマート材料・スマート構造に関する研究
- ④ 実際の構造物への適用

また, 損傷検知を目的としたヘルスマニタリングの方法は二つの方法に大きく分類することができる。それらは損傷に働きかけてセンシングする場合と損傷が出す信号を受けてセンシングする場合である。前者は Active Diagnostics と呼ばれ, 圧電素子をアクチュエータとしてラム波や超音波などを励起し, 損傷から反射したそれをセンサ機能として圧電素子で検出することで損傷の位置, 程度などをいつでも同定できることを目標とした手法である。また, 後者はアコースティックエミッション(AE)が代表的で, 損傷から放射される信号をセンシングし, 位置評定, 損傷の大きさや強さを推定しようとする Passive Diagnostics と呼ばれるものである⁴⁾。

このような圧電素子を用いた損傷検知アルゴリズムに関する研究は, アコースティックエミッションを始め広範囲で行われている。しかしながら, スマート材料の実現を念頭においた研究は近年始まったばかりであり, 材料・エレクトロニクス・データ処理・構造設計の分野などで進められている。このように多方面からの取り組みが成功への

鍵となる。また、損傷検知アルゴリズムに関する研究のほとんどの手法は定性的なパッシブ測定であり、未だに試験片レベルでの段階にあるのが現状である。適用ニーズに合わせたアクティブで定量的な損傷検知手法の構築が望まれている。

本研究では、部材自身に診断機能を組み込ませた構造部材のスマート化、およびリアルタイムなヘルスモニタリング技術の開発を念頭においた基礎的研究と位置付け、圧電素子を用いた一次元部材におけるアクティブ損傷検知手法に関する検討を実施した。薄板材料(アルミニウム)の表面に接着した PZT を任意に加振させることによって伝播する波動に注目し、まず始めにウェーブレット変換を用いて部材内に伝播する波の伝播速度の同定・検討を行い、その結果を用いた損傷の有無による波動伝播の挙動解析、損傷の位置評定について検討する。また、ラム波の振動モードを分別する新たな手法を提案する。

2. ウェーブレット変換を用いた波動伝播速度の同定

損傷検知手法の研究において破壊に伴う信号処理パラメータは重要な手がかりとなる。例えば AE の場合、波群がいくつ生じたか、及び、その発生時間の分布により割れの程度や形態(疲労破壊、亀裂など)を解析できる可能性がある。振幅の大きさや振幅分布より破壊機構なども解明できる可能性もあり、周波数スペクトルも同じように破壊の機構分類に役立つ。また、波形の立ち上がり時間も破壊の度合いを示す場合があることで知られている。このように収録された波形データに信号処理を施し、必要とされるパラメータを解釈することは損傷検知のアルゴリズムを構築するに当たって重要なポイントである⁵⁾。

特に、その中でも位置評定を行う際、波の到達時間の決定が重要なパラメータとなる。例えば、地震における震源の決定と同じように、多数のセンサを用いた AE 波の到達時間差の同定から AE 源の位置を決める場合、音速をいかに決定するかが直接位置評定の精度を左右する。つまり、到達時間の決定が位置評定における最大のテーマとなる。そこで本章では、ウェーブレット変換を用いた波動伝播速度の同定を実験により検討した。

2.1 収録装置のセットアップとデータ収録手順

収録装置の構成を以下に説明する。アルミニウム製の試験片(長さ 100mm×幅 20mm×厚さ 3mm)に圧電素子(直径 6.12mm×厚さ 0.25mm)を図-1 のような配置位置で接着し、オシロスコープを用いて収録するパッシブ測定(2章)と図-2 に示すようなデータ収録装置を用いて入出力間のデータ収録を行うアクティブ測定(3章)を行った。この装置の仕様を表-1 に示す⁶⁾。

本装置は試験片に設置したある一つの圧電素子をアンプを通した最大 50V の電圧で加振させ、瞬時にその他の一つの圧電素子から出力波形を収録する仕組みになっている。

つまり、この作業を収録したい入出力間の素子の対分だけ繰り返し行うことによって全てのデータを収録することができる。収録した波形の解析はすべて MATLAB を用いて実行した。作業の流れを図-4 に示す。

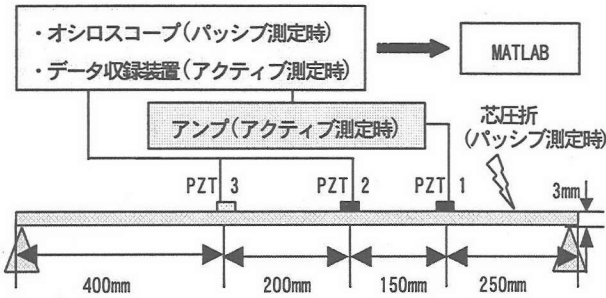


図-1 圧電素子と試験片



図-2 データ収録装置

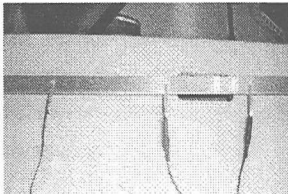


図-3 圧電素子と配線

表-1 データ収録装置の仕様

項目	仕様明細
I/O チャンネル	30 PZT チャンネル
アクチュエータ増幅器の出力	最大 34 Watts, 200 Vpp
出力の周波数帯域	最大 10 MHz
サンプリングレート	最大 60 MHz

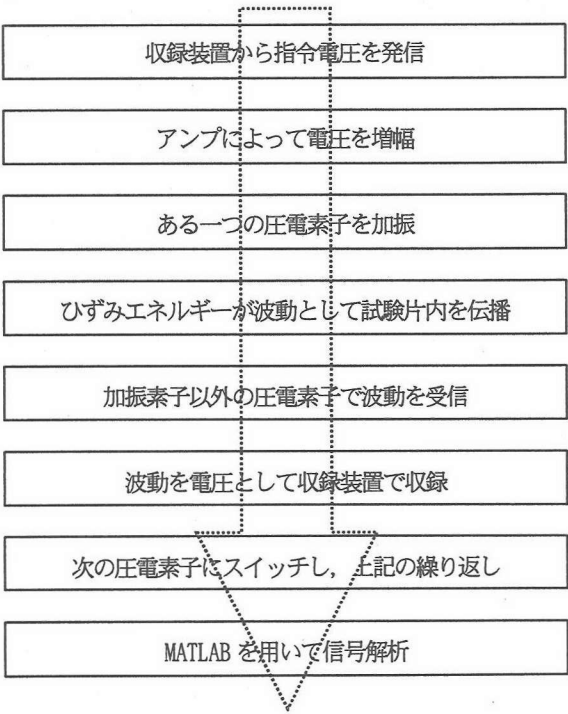


図-4 入出力データの収録手順(アクティブ測定時)

2.2 芯圧折による波動伝播速度測定

波動伝播速度の測定方法においては、アクティブな方法とパッシブな方法が知られている。一例としては、ある一つの圧電素子を加振機、その他を受信機として入出力波形のデータを収録し、それら入出力間の相互相関関数のピーク値までのデータ数(波動伝播時間)とアクチュエータからセンサまでの距離より波動伝播速度を測定するのがアクティブな方法である。また、パッシブな方法とは、シャープペンシルを用いた芯圧折によって擬似 AE 波を図-1にあるように所定の位置より伝播させ、隣接する二つの素子からの出力波形をオシロスコープにより収録し、波の到達時間差と圧電素子間の距離より測定する方法である。本実験では比較的簡単に測定することができる、後者のパッシブな測定方法を用いた実験を実施し、試験片内に伝播する波の伝播速度を同定した。

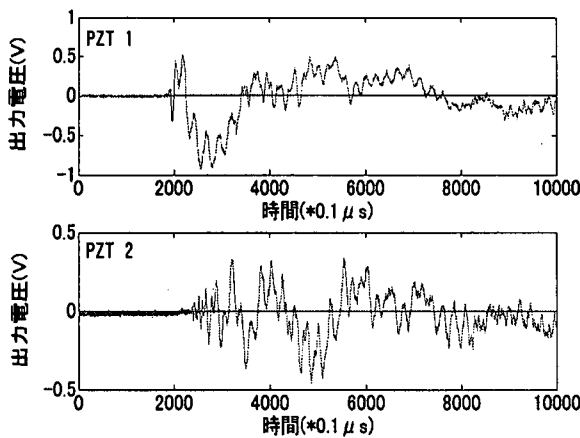


図-5 収録データ(パッシブ測定の例)

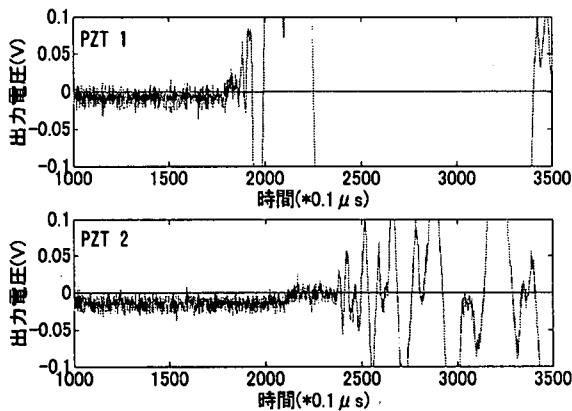


図-6 収録データ(パッシブ測定の例)

実際に収録された出力波形の例を図-5に示す。板波のように分散的な波は周波数によって波動伝播速度が異なるため、芯圧折による出力波形からの正確な測定は困難である。実際に波の立ち上がり附近を拡大したものを図-6に示す。収録の際に発生する電気ノイズの影響により、立ち上がり附近において実際の波の到達時間の判断が困難

な様子が確認できる。これら出力波形に直接しきい値を用いて波動伝播速度を算出した場合、波の分散特性による伝播速度の周波数依存性を考慮していないため誤差が大きくなると考えられる。出力波形から特定の周波数のみを抽出する波動伝播速度の同定手法を適用する必要性が指摘され、本実験では時間-周波数解析を試みた。

2.3 ウェーブレット変換 (Wavelet Transform)

ウェーブレット変換は、時間、周波数分解能が一定であるフーリエ変換に対して信号の周波数成分に応じて時間分解能を変えることができるため、最適な時間-周波数分解能により信号を解析することが可能となる。本節では、波の到達時間を求める際に適用したウェーブレット変換について概説する。

(1) 連続ウェーブレット変換 (CWT)

関数 $\psi(x)$ に対し、式(1)のようにおく。

$$C_\psi := \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}(\xi)|^2 / |\xi| d\xi \quad (1)$$

このとき、関数 $\psi(x)$ と $\hat{\psi}(\xi)$ ($\psi(t)$ のフーリエ変換) は窓関数であって、かつ $\psi(x)$ が、

$$C_\psi < \infty \quad (2)$$

を満たすとき、アナライジングウェーブレット(解析のためのウェーブレット)と呼び、式(2)をアドミッシブルの条件と呼ぶ⁷⁾。

関数 ψ がアナライジングウェーブレットのとき、関数 $f(x) \in L^2(R)$ と $a, b \in R, a > 0$ に対し、次の積分、

$$(W_\psi f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

をウェーブレット係数と呼び、 $f(x)$ から $(W_\psi f)(b, a)$ への対応をウェーブレット変換という。ここで、 $a \neq 0, b$ はともに実数であり、それぞれスケール変換とシフト変換を表すパラメータである。本研究ではアナライジングウェーブレットとして、不確定性原理における時間-周波数分解において有効的な関数として知られるガボール関数を適用した⁸⁾。

(2) 離散ウェーブレット変換 (DWT)

連続ウェーブレット変換は、時間空間と周波数空間に局在した基底による関数の展開を行い、扱えるすべての可能なスケールでウェーブレット係数を計算するのでかなり大きな計算量となる。そこで、スケールや位置についてある組合せだけを選択して計算する手法が離散ウェーブレット変換である。マザーウェーブレット関数のスケール a および平行移動量(シフト) b を離散化すると、一般に a, b の離散化は次のようになる⁹⁾。

$$a = 2^{-j}, \quad b = k2^{-j} \quad (4)$$

ここで、 j, k はスケール、シフトを表し、 $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

と離散化する場合、ウェーブレットの関数の横幅を半分、さらにその半分、あるいは倍、さらにその倍といったように伸縮することに相当する(図-7, ここでFはナイキスト周波数)。

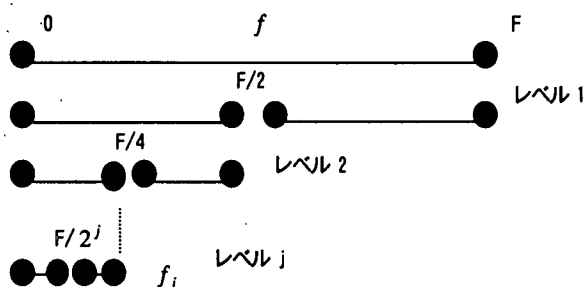


図-7 離散ウェーブレット変換による周波数分解

連続ウェーブレット変換で用いたマザーウェーブレット関数は、式(4)より次のように定義でき、

$$\psi_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2^{-j}}} \psi\left(\frac{t-k2^{-j}}{2^{-j}}\right) \quad (5)$$

式(5)を用いたウェーブレット変換が離散ウェーブレット変換である。一般的には $\psi_{j,k}$ はスケール変換を2のべき乗(二進(dyadic))に取り、次のように表される。

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (6)$$

また、式(3)に対する離散ウェーブレット変換の式は次のように表すことができる¹⁰⁾。

$$W(j,k) = \int_0^\infty f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (7)$$

ここで、 $f(t)$ は解析対象とする信号である。

2.4 ウェーブレット変換適用後の波動伝播速度

波動伝播速度の解析分解能を向上させるため、本実験では連続ウェーブレット変換による時間周波数分解を適用した。適用関数はガボール関数である。そして、適用後の分布から各周波数成分における出力波形のみを抽出し、式(8)より波動伝播速度を算出した。

$$\text{伝播速度[m/s]} = \frac{\text{PZT間の距離[m]}}{\text{波の到達時間差[s]}} \quad (8)$$

図-8と図-9に連続ウェーブレット変換適用後の50kHzと100kHzの出力波形を示す。これらより連続ウェーブレット変換の適用によって周波数成分が分別されている様子を確認することができる。また、適用前の雑音が除去するフィルタの役割も果たしている。つまり、これら各周波数成分における波の到達時間差をノイズレベルより若干上に設定したしきい値で判別し、式(8)より波動伝

播速度を各周波数別に算出したものは、適用前の出力波形から算出したそれに比べ誤差は小さくなると考えられる。実際に算出した各周波数における波動伝播速度を図-10に示す。この際、算出した波動伝播速度が信頼性のあるものか確かめるため、試験片の物性値と幅長より厚さ3mmのアルミニウムにおけるA0モード(非対称モード)の波動伝播速度の理論値¹¹⁾を算出し、比較対象とした。図-10より連続ウェーブレット変換適用後の測定値は各周波数成分において理論値とよく一致していることが確認できる。すべての周波数成分において誤差 $\pm 85\text{m/s}$ 内に収束しており、波動伝播速度の同定において連続ウェーブレット変換の有用性を本実験を通して確認することができた。

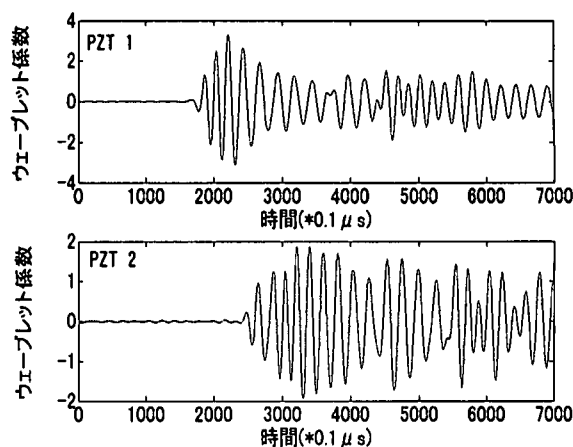


図-8 ウェーブレット変換適用後(50kHz)

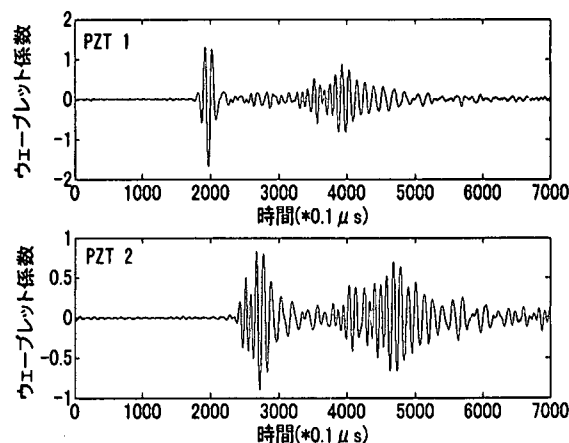


図-9 ウェーブレット変換適用後(100kHz)

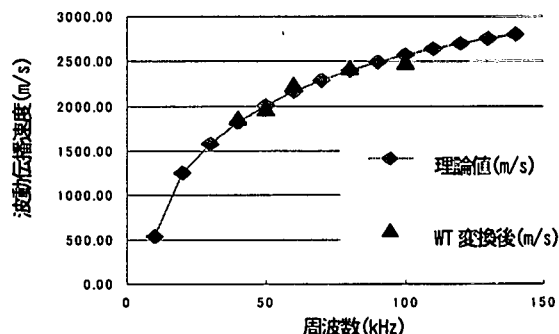


図-10 波動伝播速度(測定値と理論曲線)

今後の課題としては、So モードのようにノイズとの区別が困難な振動モードに対して、どのような到達時間の判断方法を適用するかが挙げられる。つまり、ノイズの影響を除去して到達時間を正確に判断する測定方法、解析方法などの研究が必要である。

3. アクティブ損傷検知

前章で述べたように損傷検知手法の研究において、破壊に伴う信号処理パラメータは重要な手がかりとなる。収録された波形データに信号処理を施し、必要とされるパラメータを解読することは損傷検知アルゴリズムを構築するに当たって重要なポイントである⁵⁾。損傷検知にとって重要なパラメータを表-2に示す。本章では、損傷の有無による波形の違いを比較し、一次元部材特有の損傷検知手法の検討を実施した。

表-2 波形パラメータとその情報

パラメータ	情報
波形	事象の構造
周波数スペクトル	事象の性質
振幅	事象のエネルギー
振幅分布	損傷の型
波群の時間分布	損傷の型
変換子への時間差	位置評定

3.1 損傷有無の検知

損傷検知手法の検討を行うため、PZT 2 と PZT 3 の中間地点(図-11)を中心として試験片と同部材であるアルミプレート(長さ 40mm×幅 20mm×厚さ 2mm)を試験片の両面に対して対称になるようにクリップで固定した場合(図-12)、直径 6 mm の穴を開けた場合(図-13)の2通りで損傷を仮定し、PZT 1 を加振させた時の入出力波形を収録した。損傷の前方に位置する圧電素子と後方に位置する圧電素子からの波形を比較解析することで、損傷の有無を検知することが目的である。比較パラメータとして本実験では、収録波形の振幅、パワースペクトル密度の変化、入出力間の伝達関数の変化を解析した。

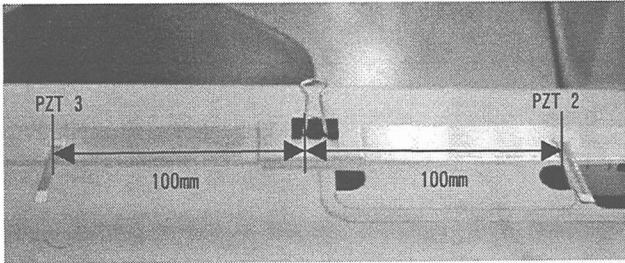


図-11 固定部材の固定位置

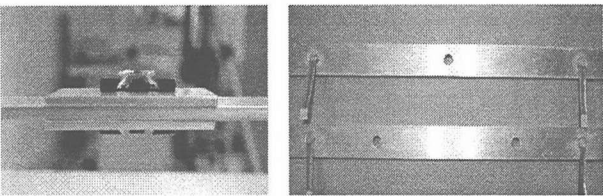


図-12 アルミプレート 図-13 直径6mmの穴

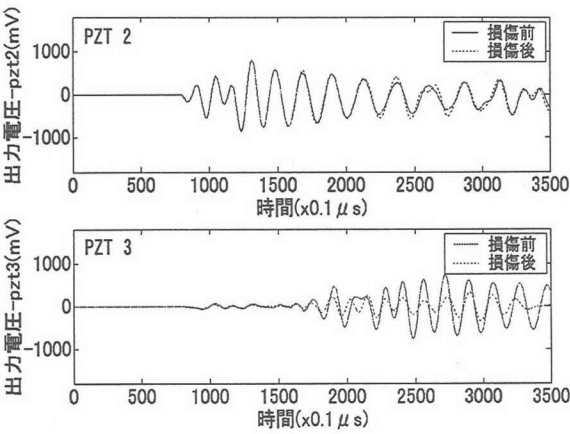


図-14 損傷の有無によるPZT間の振幅の変化

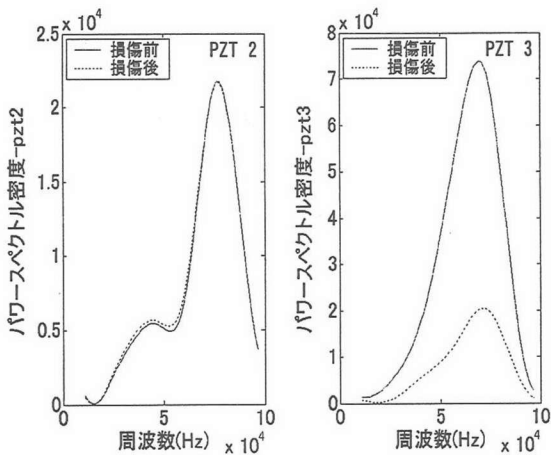


図-15 損傷の有無によるPZT間のPSDの変化

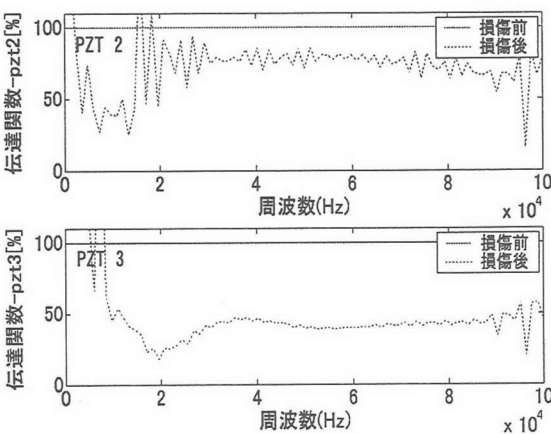


図-16 損傷の有無によるPZT間の伝達関数の変化

図-14～16より、損傷の後方に位置する圧電素子に

において、振幅、パワースペクトル密度、伝達関数に著しい変化が生じ、損傷の前方に位置する圧電素子においては、変化が著しくないか生じていない様子が確認できる。また、PZT 2 を加振させ残り二つの圧電素子を受信機とした場合、および PZT 3 を加振させ残り二つの圧電素子を受信機とした場合においても、同様な結果を得ることができた。このままでは損傷の定量的な診断に用いることは困難であるが、このように各圧電素子において加振機、受信機の切り替えを実施し、各圧電素子の出力波形を比較解析することで、損傷の有無は容易に判断することができる。また、ヘルスマonitoringの自動化として、ニューラルネットなどによるパターン認識手法を本手法に適用することで、リアルタイムに損傷の有無を判断することが可能になると考えられる。今後の課題としては、定量的な診断を行うための解析手法の構築、診断のリアルタイム化が挙げられる。

3.2 損傷位置の検知

前節では、損傷の存在範囲を判定することを実験により試みた。しかしながら、損傷の位置を特定するのは困難であった。そこで本節では、損傷の位置を特定するための手法として、超音波探傷試験でよく用いられる反射波を用いた位置評定を試みた。

アクチュエータ(PZT 1)から伝播される波は試験片の長手方向に1次元方向のみに伝播するとし、図-17のような伝播経路の仮定を立てた。

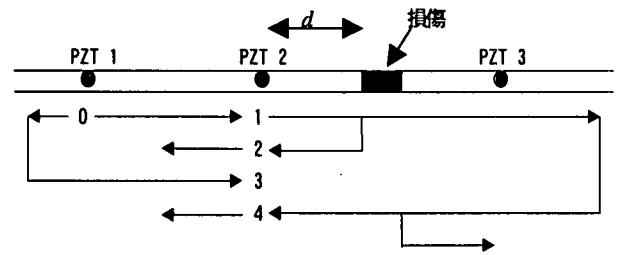


図-17 損傷時における波動伝播経路

試験片の寸法を考慮すれば、PZT 1 から伝播した波(直達波)はPZT 2 で受信され、次に同センサで受信される波は損傷からの反射波と考えられる。つまり、PZT 2 で受信される波の始め二つの到達時間差を求めることで、式(9)よりPZT 2 から損傷までの距離を求めることが可能となる。

$$d = \frac{c(t_2 - t_1)}{2} \tag{9}$$

実際に収録されたPZT 2の出力波形を図-18に示す。これら収録した波形より反射波を確認することは分散的な波の重ね合わせがあるため困難である。そこで離散ウェーブレット変換によるウェーブレット展開を適用した。この際、ウェーブレット関数には時間分解能がその他の基底よりも優れているため位置評定に適していると考えられるドベシ関数(dB8)を適用した^{10) 12)}。離散ウェーブレ

ット変換を適用した理由としては、連続ウェーブレット変換に比べ、反射波の実在する周波数領域を判断するのが容易であること、更に、解析に費やす時間を大幅に削減できる点である。適用後、周波数領域60~120kHz(レベル6)の間で反射波らしき波の変化を確認することができ、実際に損傷前後の収録波形の差を求めたところ一つの波は打ち消され、二つ目の波(反射波)を確認することができた(図-19)。それらより直達波と反射波の到達時間差、また、反射波のパワースペクトル密度のピーク周波数におけるA0モードの波動伝播速度 c を波動伝播速度実験の結果より式(9)に代入したところ、87mmという結果を得た。実際にPZT 2から損傷までの距離は80mmであることを考慮すると妥当な結果であると考えられる。

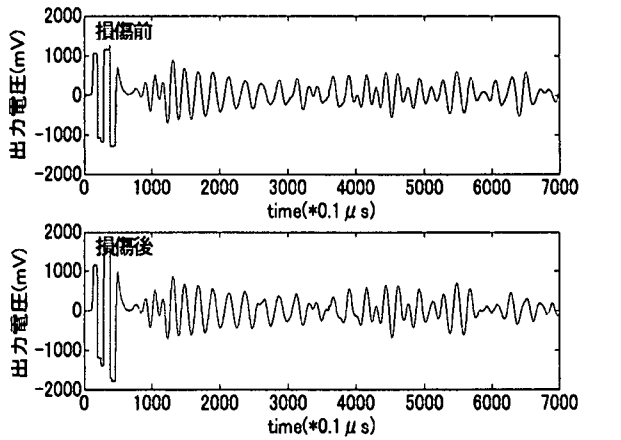


図-18 損傷の有無による出力波形の違い
(上段: 損傷前, 下段: 損傷後)

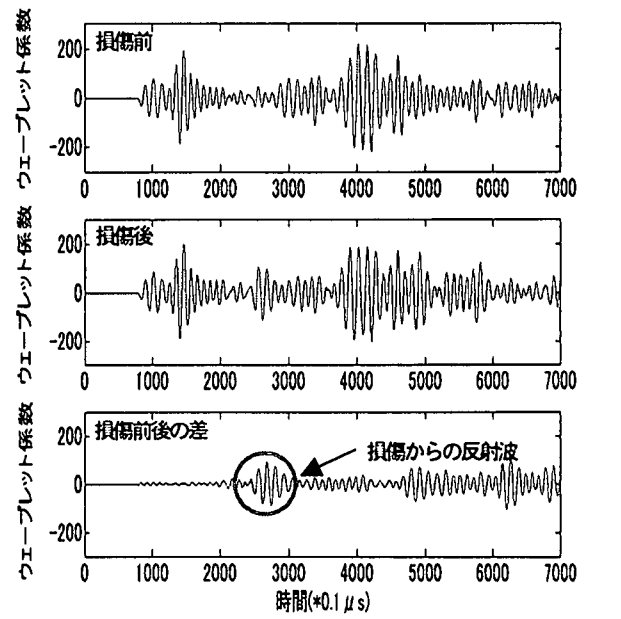


図-19 ウェーブレット変換適用後の波形の違い
(上段: 損傷前, 中段: 損傷後, 下段: 損傷前後の差)

位置評定の誤差の要因としては、伝播速度の測定値が関

連していることが式(9)より認識できる。また、本実験では分散性のある A_0 モードを用いて損傷検知を行ったが、実際には非分散的な縦波、横波、 S_0 モードなども存在し、それらの振幅は A_0 モードと比較するとかなり小さいものではあるが、波の到達時間差を求める際に、多少の影響を及ぼしている可能性が考えられる。このような誤差を改善する方法としては、波動伝播速度の測定において、波の到達時間差を正確に判断する手法の改善、および、収録したデータ内から非分散性信号のみ、または分散性信号のみを取り出す信号処理や測定方法、入力波形(加振電圧のパルス)そのものを改善し、発生する波の振動モードを変化させることなどが考えられる。到達時間の精度は解析対象とする周波数をより高周波にし、立ち上がり時間を明確にさせることで向上できると考えられ、相対的に小さい対象物になるほど高い精度が要求される。また、比較方法に関してはリアルタイムな診断に向けて、PSD や伝達関数の変化をどのように比較するか、つまり、どのようなパターン認識を適用させるかを検討していく必要がある。最終的な目標として伝達関数や PSD の減少の程度、またはグリーン関数などのパラメータから損傷の大きさ・程度などを推定するアルゴリズムを検討し、二次元部材での損傷検知アルゴリズムを構築することが望まれる。

3.3 加振モード制御を適用した検知

前節で示した位置評定の誤差の改善として、収録データを非分散性信号と分散性信号に分別する測定手法について検討した。提案する手法は板波の振動モード、 S_0 モードと A_0 モードの伝播波形の違いを利用して、それら振動モードを分離しようとするものである。板波の振動モードは図-20に示すように、 S_0 モード(対称モード)は上下対称、 A_0 モード(非対称モード)は上下が同じ方向に振動する形をしている⁹⁾。よって、図-21に示すように試験片の裏表に対称に圧電素子を取り付け各々を加振させ、PZT 3で受信すると、 S_0 モードは対称的な波なので同じ方向、逆に A_0 モードは非対称的なので振動は逆向きに受信されと考えられる。収録信号の和や差を算出することで、このような振動モードの振動特性を利用した振動モード分別が可能か実験により検討した。

実際に PZT 1 と PZT 4 をそれぞれ加振させ、出力された PZT 3 の応答を図-22に示す。図の上段より PZT 1 加振時、PZT 4 加振時、PZT 1 と PZT 4 加振時の和、PZT 1 と PZT 4 加振時の差の順である。まず始めに、PZT 1 加振時と PZT 4 加振時の収録波形を比較すると波の振幅方向に対する振動が逆向きに伝播している様子が確認でき、非対称的な波の特性を明確に判断することができる。 A_0 モードは非対称的な信号であるので、それらの和を求めることで非対称的な信号は打ち消され、対称的な信号である S_0 モードのみが強調されるはずである。実際に和を求めたところ、図-22より A_0 モードは打ち消され、 S_0 モードが明確に出現している様子を確認することができる。また、 A_0

モードが打ち消されたことによって、従来振動モードの重ね合わせにより確認することが困難であった S_0 モードの反射波を確認することもできる。次に出力応答の差を求めると、 A_0 モードのみが強調され、 S_0 モードは打ち消されている。つまり、本測定手法を適用することによって、和によって S_0 モード、差によって A_0 モードに分別することが可能となる。

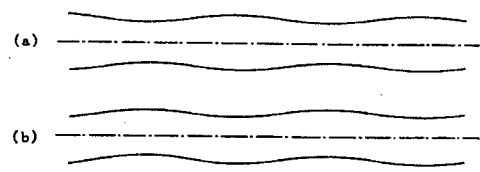


図-20 (a)対称モード (b)非対称モード

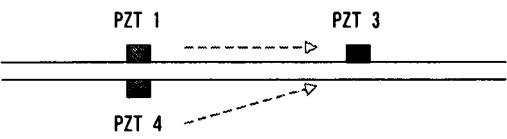


図-21 複数対称加振測定手法における測定方法

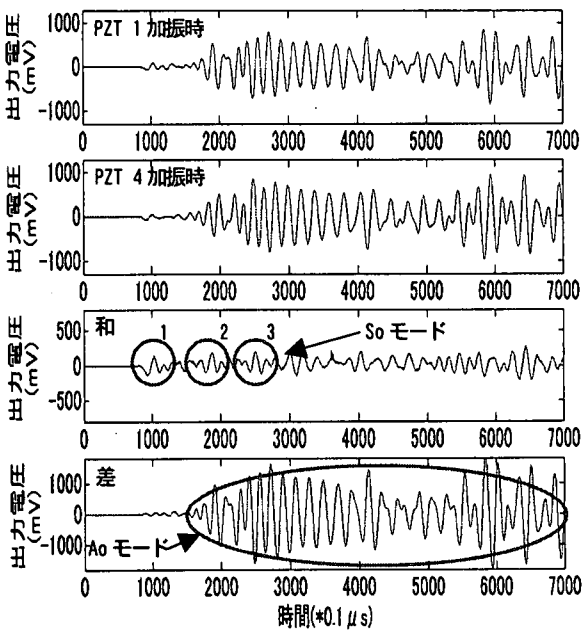


図-22 複数対称加振測定における PZT3 の応答
(上段: PZT 1 加振時、二段目: PZT 4 加振時、三段目: PZT 1 と PZT 4 加振時の和、下段: PZT 1 と PZT 4 加振時の差)

次に、応答の和を求める際に出現した反射波が実際に試験片両端からの反射波であるかどうかを確認するため、応答の和の波形に連続ウェーブレット変換を適用し、 S_0 モードの伝播速度の測定値と理論値を比較した。この際、伝播速度を求めるに当たって、波の伝播経路は図-23のようになると仮定した。

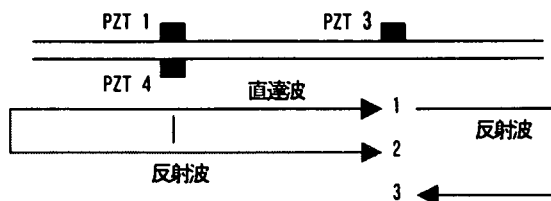


図-23 直達波と反射波の伝播経路

反射波の到達信号の伝播速度を加振素子から受信素子までの距離と波が到達するまで必要とした時間より算出すると二つ目は 5227.6 m/s 、三つ目は 5390.8 m/s となり、 S_0 モードの理論値は 5440.44 m/s であることから、一つ目の信号は S_0 モードの直達波であり、二つ目と三つ目はその反射波と判断される。

本手法のメリットは、前述の位置評定において明記したように、分散的な信号以外に従来ノイズと区別が困難であった S_0 モードを新たな損傷検知のパラメータとして適用することを可能とする点である。本手法を適用することによって、振動モードの干渉によって生じていた誤差を除去することが可能となり、伝播速度測定 of 誤差の改善や位置評定精度の向上などに繋がることが期待できる。

4. まとめ

本研究では、部材自身に診断機能を組み込ませた構造部材のスマート化、およびリアルタイムなヘルスマニタリング技術の開発を念頭においた基礎的研究と位置付け、圧電素子を用いた一次元部材におけるアクティブ損傷検知手法に関する検討を実施した。対象材料における損傷の有無による力学的変化を検知することで、例えば航空機などにおける構造の健全性と破壊の原因となる大ひずみ発生部分の発見に繋がる可能性が期待できる。

以下に本研究で得られた結論を示す。

- ・ 時間-周波数分解を行うウェーブレット変換を収録データに適用させることで、解析分解能を向上させることができる。
- ・ 損傷によって伝播波の振幅、パワースペクトル密度、伝達関数に変化が生じる。これらの変化を捉えることによって損傷の有無を判断することが可能である。
- ・ ウェーブレット変換を収録データに適用させることで損傷による反射波を比較的簡単に観測することができる。
- ・ 損傷からの反射波を用いることで位置評定が可能である。また、適用した仮定(試験片内の波動は試験片の長手方向に一次元的に伝播する)は妥当であると考えられる。
- ・ 提案した複数対称加振測定手法により、対称かつ非分散信号(S_0 モード)と、非対称かつ分散信号(A_0 モード)を分別することができる。この方法を発展させ

ば振動モードを任意に選択することが可能である。

以上、本研究の有用性を述べたが次のような課題がある。

- ・ アクティブな診断において、複数の圧電素子を用いた測定データを瞬時に解析し、位置評定を行うことのできる、リアルタイムな損傷検知手法への改善。
- ・ 損傷による波動の変化を比較するにあたって、それらの変化をどのように比較するか、つまり、どのようなパターン認識手法を適用させるか。
- ・ 圧電素子の接着具合によって応答特性に約 3 倍近い変化を与えてしまうことがある。今後、損傷のエネルギー的解釈の信頼性を向上するには、各素子の感度を一定に保つような均一システムの検討が必要である。
- ・ 損傷度合い・大きさ等を推定するアルゴリズムの検討。
- ・ 二次元部材へ適用できる、リアルタイムな損傷検知手法の構築。

参考文献

- 1) 江草茂則：圧電性塗料の開発とその応用～スマート材料/構造体への1つのアプローチ, Boundary, 1996.
- 2) 江川幸一：材料と構造の新しい展開-知的材料・構造について, 鉄と鋼, Vol.80, No.5, pp.N222-N227, 1994.
- 3) 阿部雅人, 宮下剛, Park, G. and Inman, D.J. : 圧電インピーダンス計測によるヘルスマニタリング, 第16回宇宙構造・材料シンポジウム論文集, pp.53-56, 2000.
- 4) Lin, M. and Chang, F. K. : Composite Structures with Built-in Diagnostics, Material Today, Vol.2, Issue 2, 1999.
- 5) 岸輝雄：材料の評価システム, 東京大学出版, 1995.
- 6) Lin, M. : Smart Layer and Smart Suitcase for Structural Health Monitoring Applications, Acellent Technologies, Inc, 2001.
- 7) 芦野隆一, 山本鎮男：ウェーブレット解析, 共立出版, 1997.
- 8) Jeong, H. and Jang, Y. : Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates, Composite Structures, Vol.49, pp.443-450, 2000.
- 9) Lemistre, M. and Balageas, D. : Structural Health Monitoring System Based On Diffracted Lamb Wave Analysis by Multiresolution Processing, Smart Mater. Struct, No.10, pp.504-511, 2001.
- 10) Sone, A. , Yamamoto, S. , Arima, K. , Masuda, A. and Nakaoka, A. : Health Monitoring System of Machines and Structures by Wavelet Transform, 日本機械学会論文集(C編), Vol.61, No.586, pp.2340-2346, 1995.
- 11) Giurgiutiu, V. , Bao, J. and Zhao, W. : Active Sensor Wave Propagation Health Monitoring of Beam and Plate Structure, Smart Structures and Materials, pp.234-244, 2001.
- 12) Sasaki, F. and Maeda, T. : Study of Fundamental Characteristics of the Wavelet Transform for Data Analysis, Journal of Struct. Constr. AIJ, No.453, pp.197-206, 1993.

(2002年4月19日 受付)