

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560220

研究課題名（和文） 超音波変調検出による異常診断技術の開発

研究課題名（英文） Non-destructive evaluation by detecting an ultrasonic frequency modulation

研究代表者

井上 卓見（INOUE TAKUMI）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40274485

研究成果の概要（和文）：申請者は、物体内部を通過する超音波の瞬間的な振動数が変化し、その変化の度合いが内部状態の違いにより異なる現象を見出した。この現象は、これまでの方法に比較してより詳細な物体内部の組成変化を捉える可能性がある。申請者はこの現象を便宜的に超音波変調と呼んでおり、これを用いることで、通常の方法では難しい異常の検出や、内部状態の推定方法の確立を目的とした。実際にいくつかの例を通じてそれらの実現可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：Ultrasonic frequency modulation is a new knowledge which have been found by an applicant, Prof. Inoue. This phenomenon shows frequency modulation of ultrasonic as it passes inner boundaries in object. The aim of this study is to detect minute cracks and delaminations in object through the ultrasonic frequency modulation. An earlier detection of such cracks and delaminations is expected.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |
| 2009年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| 2010年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,900,000 | 1,170,000 | 5,070,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：モニタリング，機械力学・制御，超音波，診断，信号処理

1. 研究開始当初の背景

(1) 超音波検査の課題

超音波検査は、物体内部の検査・診断になくなくてはならない技術である。通常の超音波検査で用いる超音波は、図1に示すようなパルス状の粗密波であり、例えば振幅が正のときに密の状態とすれば、そのときの物体内部には圧縮力が作用し、逆に振幅が負のときには粗の状態となり物体内部には引っ張り力が

作用する。超音波は、物体内部の亀裂、空隙のように音響インピーダンスが異なる場所

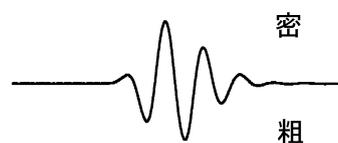


図1 超音波波形の例

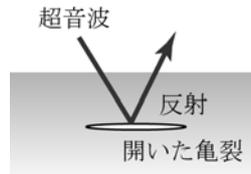


図2 超音波が反射する亀裂（開いた亀裂）

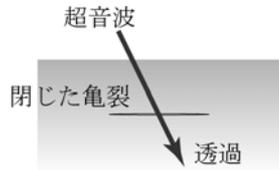


図3 超音波が透過する亀裂（閉じた亀裂）

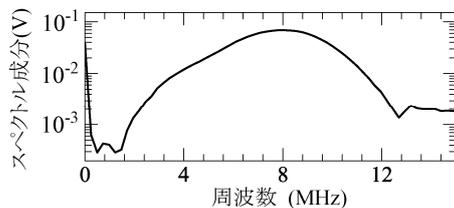


図4 図1の超音波波形の周波数スペクトル

で反射するため、その場所で反射した超音波を検出することで物体内部の異常検出が可能となる。図2は入射した超音波が内部の空隙で反射する模式図である。この方法はパルス反射法と呼ばれ、一般的な超音波検査は基本的にこの技術に相当する。ただし、これらは超音波が欠陥部等で反射することが前提である。欠陥部である亀裂の中には、応力状態により閉じたもの（closed crack、閉じた亀裂などと呼ばれる）があり、これらの欠陥は図3に示すように超音波が透過することが知られている。また、自動車のボディ生産に多用されるスポット溶接部で、表面だけ軽く付いた状態の剥離部（kissing bond などと呼ばれる）も同様に超音波が透過し、これらの欠陥部の検出が超音波検査の一つの課題となっている。

非破壊検査として重要であるものの超音波が透過してしまう別の例として、接着状態の強度評価がある。接着剤の完全な剥離は図2に示す通常のパルス反射法により対応できるが、接着界面にそのような剥離がない場合の純粋な接着強さの評価は難しい。接着剤内部を通過する超音波は接着界面で反射するが、それらの反射エコーに対して、振幅の変化から接着強さを評価する方法、群速度の変化から評価する方法、あるいは周波数成分の変化を利用する方法などが試みられている。これらの方法は測定対象によってはよい結果を与えるが、薄く、小さい測定対象は減衰の程度や音速の違いを見極めることが難しく、精度の高い評価は期待できない。また、

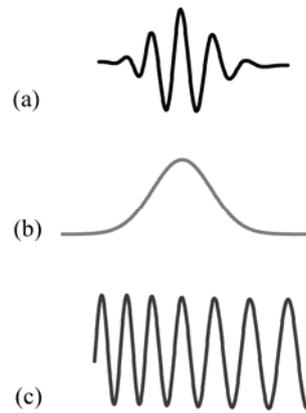


図5 超音波波形のモデル化：超音波波形(a)を振幅(b)と正弦波(c)の重ね合わせで表現

周波数解析を用いる方法では、超音波パルスの周波数スペクトルが図4のように広帯域に広がるため、周波数成分の変化が明確でなく、統計的な取り扱いを行わざるを得ないのが現状である。

2. 研究の目的

このように、超音波が異常部や対象とする部分で明確に反射せず、透過する場合の内部状態の診断は一つの課題となっている。このような場合の超音波診断は、上述のように、

- ①振幅の変化
- ②音速の変化
- ③周波数成分の変化

から異常の有無を推定する方法にほぼ限定されている。しかしながら、測定する物理量の高精度化には限界があり、従来とは異なるコンセプトによる超音波診断の高精度化が期待される。透過超音波に対する診断方法の高精度化は、工業分野だけでなく、医療やその他の分野への応用に対しても大きく貢献すると思われる。

3. 研究の方法

(1) 瞬時振動数

ここで提案する新たな超音波診断法も、上記③の周波数成分の変化に着目するものである。ただし、上述のように、図1に示すような通常の超音波波形の周波数スペクトルは図4のように広帯域になり、このままでは周波数のわずかな変化を捉えることができない。そこで、違ったアプローチで超音波の周波数に着目し、より詳細な周波数変化を検出できる方法を考える。

超音波波形を時間 t とともに変動する波 $u(t)$ で定義する。例えば、超音波波形 $u(t)$ が図5(a)に示すような形とすれば、 $u(t)$ を図5(b)に示す振幅 $A(t)$ と図5(c)に示す正弦波 $\sin \phi(t)$ の重ね合わせで以下のように表現する。

$$u(t) = A(t) \sin \phi(t) \quad (1)$$

ここに、 $\phi(t)$ は超音波波形の位相を表す。位相 $\phi(t)$ は一定の時間割合で変化するとは限らず、例えば第5図(c)の正弦波 $\sin \phi(t)$ の位相は、速い変化から徐々にゆっくりとした変化になっている。この位相の変化率に着目し、次式で定義する位相 $\phi(t)$ の時間変化率を瞬時振動数 $f(t)$ とする。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2)$$

分母の 2π は、 $f(t)$ の単位がヘルツ (Hz) であることを意味する。瞬時振動数 $f(t)$ は時間 t の関数であり、超音波振動数の時間的な変化を表すことができる。瞬時振動数 $f(t)$ を求めることで、図4に示す周波数スペクトルと比較して格段に詳細な周波数成分の変化を捉えることができる。瞬時振動数の具体的な求め方はいくつか考えられるが、ここではヒルベルト変換を基本とする方法を用いる。

(2) ヒルベルト変換

$u(t)$ を連続な実関数とすると、 $u(t)$ のヒルベルト変換 $h(t)$ は次式で定義される。

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(s)}{t-s} ds \quad (3)$$

$h(t)$ は $u(t)$ の振動数成分の位相を 90° シフトさせた信号になる。実際に測定する超音波波形 $u(t)$ は離散データであり、その場合のヒルベルト変換は式(3)ではなく、 $u(t)$ のフーリエ変換 $\hat{u}(\omega)$ に対し、

$$\begin{aligned} \hat{z}(\omega) &= 0 & (\omega < 0) \\ \hat{z}(\omega) &= \hat{u}(\omega) & (\omega = 0) \\ \hat{z}(\omega) &= 2i\hat{u}(\omega) & (\omega > 0) \end{aligned} \quad (4)$$

の操作を行い、 $\hat{z}(\omega)$ を逆フーリエ変換して求めた $z(t) = u(t) + ih(t)$ (i は虚数単位)の虚部として得る。時間の関数として表される振幅 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ は、

$$\begin{aligned} A(t) &= \sqrt{u(t)^2 + h(t)^2} \\ \phi(t) &= \tan^{-1}[h(t)/u(t)] \end{aligned} \quad (5)$$

から求められ、瞬時振動数 $f(t)$ は式(2)の微分を数値的に実行して得る。

例として、図6(a)に図1と同じ超音波パルスを示す。これは、公称周波数8MHzの周波数特性を持った探触子から投射されたパルスを測定したもので、求めた瞬時振動数を図6(b)に示す。図6の横軸は(a)、(b)ともに共通で時間 t を表し、(a)の超音波パルスが現れている部分での瞬時振動数を(b)に示す。超音波パルスの瞬時振動数は公称周波数8MHzとほぼ同じであり、およそ一定の値を示していることが確認できる。瞬時振動数は、通過する物体内部の状況によって全体的あるいは局所的に変化することが簡単な実験を通

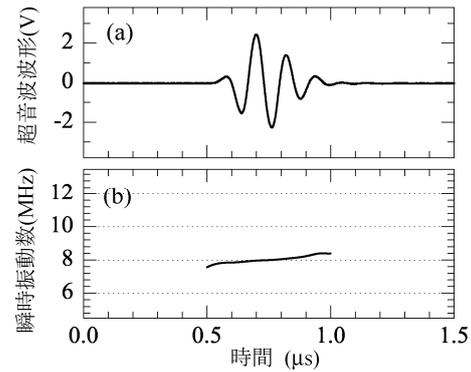


図6 図1の超音波波形(a)とその瞬時振動数(b)

じてわかってきた。すなわち、瞬時振動数を用いて物体内部の状況の評価できる可能性がある。以下、二つの例から、その有効性、実用的な問題への応用可能性を示す。

4. 研究成果

(1) 超音波が透過する異常(閉じた亀裂)の検出

図3に示したような閉じた亀裂を模擬的に作成し、超音波パルスを透過させる実験を行った。概略を図7に示す。閉じた亀裂は中央で引き裂いた対象物を再び合わせて加圧することで模擬した。対象材として扱いやすい(圧着させやすい)ゴム板材を用いた。この供試体の一方から超音波パルス波を投射し、通過してきた超音波を反対側で受信した。同じ厚さで引き裂いていない無垢のゴム板を通過した超音波パルスも同様に測定し、上記の模擬的な閉じた亀裂を通過した超音波パルスと比較する。これらの超音波パルスの瞬時振動数を求め、波形とともに図8および図9に示す。図8(a)および(b)は、それぞれ無垢のゴム板を通過した超音波パルス波形およびその瞬時振動数であり、図9(a)および(b)は、それぞれ模擬的な閉じた亀裂を通過した超音波パルス波形およびその瞬時振動数である。超音波パルス波形は、図9(a)の振幅が図8(a)と比較して若干小さいものの形状はほとんど同一である。一方、瞬時振動数は、図8(b)は6MHz以下でほぼ一定、図9(b)は5.7MHz程度の値であり、閉じた亀裂を通過した超音波パルスの瞬時振動数に約300kHz程度の低下が見られる。すなわち、

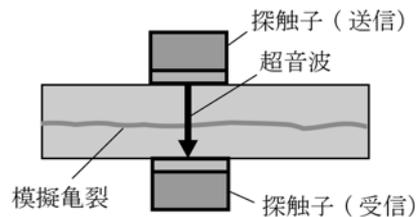


図7 模擬的な閉じた亀裂を通過する超音波パルス波の実験

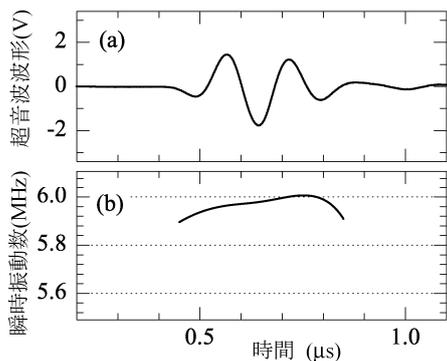


図8 模擬亀裂がないときの超音波波形(a)とその瞬時振動数(b)

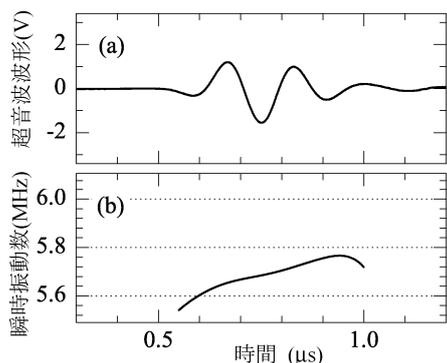


図9 模擬亀裂を通過した超音波波形(a)とその瞬時振動数(b)

瞬時振動数の違い（低下）から、閉じた亀裂のような内部の異常を検出できることがわかる。図8(a)および図9(a)の超音波波形に対し、通常の周波数解析を行って周波数スペクトルを求めてもほとんど変化を見出せなかった。したがって、瞬時振動数を利用する方法は、閉じた亀裂のように超音波が透過してしまう内部異常の検出に有効であることがわかる。

(2) 内部状態の診断(接着度強度評価)

次に、内部状態の診断として、接着剤の接着度強度評価を行った。実験対象として、図10に示すように、2枚のアクリル板をエポキシ系接着剤で接着した供試体を作成した。その際、以下に示す3つの異なる条件で接着を行った。使用した接着剤は、所定の接着強度を得るには塗布後10分以内の接着が必要であり、接着剤塗布から接着までの時間が長いほど接着度は低下する。

【条件1】接着剤塗布、20分後接着(接着度低)

【条件2】接着剤塗布、10分後接着(接着度中)

【条件3】接着剤塗布、すぐに接着(接着度高)

上記3種類の供試体について、割裂による接着強度の評価を行うことで、実際に条件1、2、3の順で接着度が弱いことが確認した。

この実験では、図10に示すように供試体

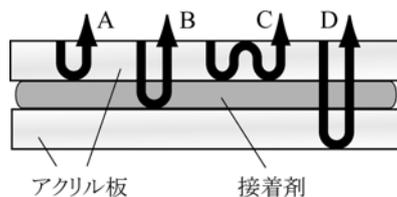


図10 接着度強度評価の実験と反射超音波パルスの経路

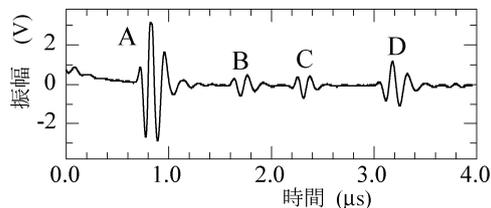


図11 反射超音波パルス波形

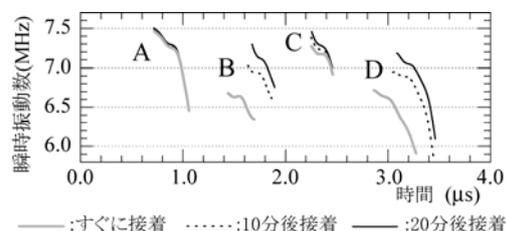


図12 各接着条件における反射超音波パルスの瞬時振動数

の一方から超音波を投射し、供試体内部で反射してきた超音波を測定した。超音波の投射、受信は一つの超音波探触子で実行される。条件1の供試体に対する実験で測定した超音波波形(反射パルス)を図11に示す。音速と板厚の関係および接着層の厚さを考慮すると、図11の反射パルスA~Dは、それぞれ図10に示す経路A~Dを通過してきたと推測される。条件2および3の反射パルスの表示は省略するが、測定データからは、それぞれの条件の音速や、反射パルスA~Dの振幅に大きな違いを確認することはできなかった。また、反射パルスA~Dに対し区分的に周波数解析を行い、それぞれの周波数スペクトルを求めても、周波数帯域が図4のように広帯域であることに加え、区分的にフーリエ変換を適用することにより周波数分解能が大きく低下するため、各条件による周波数成分の違いを明確に見出すことはできなかった。すなわち、音速の変化、振幅の変化および周波数成分の変化から接着条件1~3を区別できないことがわかる。

これに対し、条件1~3それぞれの反射パルスA~Dの瞬時振動数を図12に示す。条件1(20分後接着)は黒線、条件2(10分後接着)は点線、条件3(すぐに接着)は灰色の線で表している。アクリル部分のみを通過した反射パルスA、Cの瞬時振動数は条件1~3

でほとんど差がないが、接着剤部分を通過した反射パルス B、D の瞬時振動数は条件 1~3 で大きく異なり、接着剤塗布から時間をおかずに接着するほど、すなわち、接着強度が高いほど瞬時振動数が低下していることがわかる。したがって、接着剤部分を通過した反射パルスの瞬時振動数の変化から、接着強さが評価できることがわかる。通常の周波数スペクトルではこのような明確な違いを見出すことができないため、瞬時振動数に着目する方法は有効である。

以上、閉じた亀裂の検出や接着強度の評価は、従来の方法では困難であるのに対し、提案した超音波の瞬時振動数を用いる方法は有効であることがわかった。今後は様々な産業上の非破壊検査に対し、本手法の発展、展開を行っていくことが課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Takahiro Nakano, Takumi Inoue, Estimation of Inner Condition by the Frequency Modulation in Ultrasonic Wave, APVC2009, 13th Asia Pacific Vibration Conference, 査読有, 2009, p.138.
- ② Takahiro Nakano, Takumi Inoue, Takushi Sugiyama and Syunpei Yamanaka, Detection of Inner Abnormality by the Frequency Modulation of Ultrasonic Wave, Proc. of the 23rd International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 査読有, 2010, pp.281-287,.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 中野貴裕、井上卓見、超音波周波数の変調検出による物体内部の状態推定、日本機械学会 長崎講演会、査読無、2009、pp. 135-136.
- ② 杉山拓史、井上卓見、中野貴裕、山中駿平、超音波周波数変調の検出による診断技術の開発、日本機械学会九州支部第 63 期総会・講演会、査読無、2010、pp. 63-34.
- ③ 杉山拓史、井上卓見、中野貴裕、山中駿平、超音波周波数変調の検出による物体内部状態の診断、日本機械学会 D&D Conference 2010、査読無、2010、pp. 61-61.
- ④ 中野貴裕、井上卓見、杉山拓史、山中駿平、超音波の振動数変化に着目した接着状態の推定、日本機械学会 徳島講演会、査読無、2010、pp. 71-72.
- ⑤ 中野貴裕、井上卓見、超音波の瞬時振動数に着目した物体内部の状態推定、第 60

回理論応用力学講演会、2011、OS12-14.

- ⑥ 櫛川紘典、井上卓見、中野貴裕、松原光希、超音波の振動数変化に着目した寒天内部状態の推定、査読無、2011、pp. 219-220.

[図書] (計 1 件)

- ① 井上卓見、超音波の瞬時振動数に着目した新しい診断、検査技術、Vol. 15、No. 11、2010、pp. 1-7.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：非破壊検査方法及び装置
発明者：井上卓見
権利者：国立大学法人九州大学
種類：特許
番号：特願 2009-179510
出願年月日：2009 年 7 月 31 日
国内外の別：国内

名称：非破壊検査方法及び装置
発明者：井上卓見
権利者：国立大学法人九州大学
種類：特許
番号：PCT/JP2010/062905 号
出願年月日：2010 年 7 月 31 日
国内外の別：国外 (PCT 出願)

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

<http://dynamic.mech.kyushu-u.ac.jp/ken.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 卓見 (INOUE TAKUMI)
九州大学大学院・工学研究院・教授
研究者番号： 4 0 2 7 4 4 8 5

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし