

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560396

研究課題名(和文) 表面SH波を用いた残留応力分布測定による高経年構造物の健全性評価

研究課題名(英文) Soundness evaluation for aged structures by a residual stress distribution measurement using grazing SH-wave

研究代表者

村田 頼信(MURATA YORINOBU)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：50283958

研究成果の概要(和文)： 組織異方性などの初期値が未知であっても、T形表面SH波センサを用いることによって、その場の残留応力を高精度で評価することが可能である。本研究では、このセンサを用いた表面SH波音弾性法を高経年鉄鋼構造物の健全性評価に適用した。T形表面SH波センサを用いて表面直下の表面異方性を正しく評価することで、残留応力の板厚方向分布も測定できる可能性を示した。さらに、表面異方性を計測することにより無応力時の音速を推定し、その結果、主応力差のみならず主応力中の計測も行えることを実証した。

研究成果の概要(英文)： A grazing SH-wave acoustoelastic method using T-type grazing SH-wave sensor is possible to measure residual stress with high accuracy at inspection site even if initial values, such as material anisotropy, were unknown. In this study, the grazing SH-wave acoustoelasticity using this sensor has been applied to the soundness evaluation for aged steel structures. A possibility that the distribution along board thickness of residual stress could also be evaluated by measuring the surface anisotropy just under the surface using T-type grazing SH-wave sensor was shown. Furthermore, it was demonstrated that not only principal stress difference but also principal stress sum was able to be measured by using the value of the acoustic velocity of non-stress which was estimated by measuring surface anisotropy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：超音波応用工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：超音波、音弾性、表面SH波、残留応力、非破壊評価

1. 研究開始当初の背景

近年、繰り返し外力負荷や熱的負荷に長年さらされた高経年構造物が大変形したり破壊したりする事故が報告されている。これらの要因を調べると、材質の経年劣化や構造部材内部に発生した残留応力が関係するケースが多いことがわかる。このような高経年構造物は今後ますます増加する一方であるが、今までのように安易に新しく作り替えることは経済的にも困難である。つまり、これからは保守検査に力を入れて補修しながら寿命一杯まで有効に活用することが求められている。近年、原子炉を対象にした維持基準が日本機械学会で策定され、高経年原子炉では、「検査」、「評価」、「補修・取替え」の三本柱で健全性を保証することを義務づけている。この規格を有効に生かすためには、き裂などの検出だけでなく、き裂寸法を評価するサイジング技術が求められる。さらに、き裂の発生した構造部材に内在する残留応力を正しく評価して初めて維持基準に適合した健全性評価が完結する。しかしながら、残留応力を非破壊評価できる実用的な技術はまだ確立されていない。

一般的に、応力測定にはひずみゲージが用いられるが、初期応力が不明な場合は残留応力の測定はできない。初期応力が既知である高経年構造物は皆無であり、このような構造物に対して正しく残留応力を評価することができる方法が切望されている。応力測定の一つにX線応力測定法があるが、測定が極表面(10⁻⁶m程度)に限られるだけでなく安全性に欠ける。一方、超音波を使って応力を測定する音弾性法は取扱が容易である。中でも表面SH波音弾性法は、複屈折音弾性法とは異なり、組織異方性の影響を受けず原理的に残留応力をその場で測定できる。しかしこの表面SH波音弾性法では実測時に被検体の表面粗さや接触媒質の厚み変動などの影響を受け易く、その厚み変動に伴う測定誤差が大きくなり実用的でなかった。これらの影響を排除して正確な測定の可能性を高めたのが、研究代表者らが考案したT形表面SH波センサ(特許公開中：特開2004-037436)である。このセンサは図1に示すように左右の双方向から表面SH波を送信する方式を採用している。それぞれの伝搬方向に対し一定の距離離

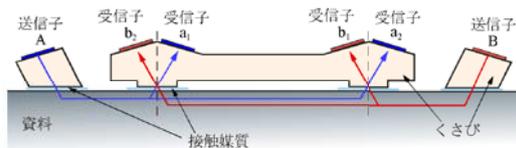


図1 T形表面SHセンサの概略構造
(赤・青の矢印は超音波の伝搬経路を示す)

れた二組の受信子で得られるそれぞれの伝搬時間差の平均値をとることで、接触媒質厚さなどに起因する誤差要因をほとんど排除できる。実際にこのT形表面SH波センサの受信子間距離を5mmとしたときでも、表面SH波の伝搬時間を誤差0.1ns以下で測定可能であること実証している。一方で、圧延鋼板には表面異方性(圧延方向に伝搬する表面SH波の音速と、圧延方向に対し45°傾いた方向に伝搬する音速との相対音速差で定義)が存在することがわかっている。この表面異方性の値を利用することによって、表面SH波の伝搬深さや主応力の評価など独創的な研究成果が得られる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、材料自身もつ応力の初期値が未知である場合でも正しく構造物の残留応力を計測できる方法を、T形表面SH波センサを用いた音弾性により確立し、高経年材料の健全性評価に応用することにある。本研究期間内では、T形表面SH波センサの高性能化を検討すると共に、T形表面SH波センサを用いて表面直下の真の表面異方性を正しく評価することで、残留応力の板厚方向分布を行うこと、さらには、表面異方性を計測することにより無応力時の音速を推定し、主応力差のみならず主応力中の計測も行うことを目標とした。

3. 研究の方法

本研究期間内において、主に以下に示す課題について積極的に取り組んだ。

- ・ 応力測定誤差の発生要因究明とその改善
- ・ T形表面SH波センサの高性能化および計測システムの自動化
- ・ 各種圧延鋼板の表面異方性及び表面異方性の板厚方向分布の測定データ採取
- ・ 面直下の表面異方性の推定法の検討
- ・ 表面SH波音弾性による平面応力評価法の確立

ここでは、二つの課題に絞って、以下に説明する。

(1) 表面直下の表面異方性の推定法の検討

表面SH波の伝搬経路は二つの受信子の間の距離、送信子と受信子の間の距離、および送信波の周波数などのパラメータに依存することが予想されている。T形表面SH波センサで測定される表面SH波の伝搬深さは、図2に示す斜線領域の平均深さに相当する。したがって、測定した表面異方性の値からこの伝搬深さを求めるには、試験片の表面直下の表面異方性を正しく推定する必要がある。今回、表面直下の表面異方性を推定する方法として次のような手法を考案した。例えば、周波数5MHzで受信子間距離が異なる二つの探触

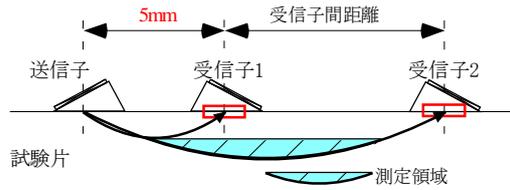


図2 表面SH波の伝搬深さ

子 (5mm と 8mm の探触子) で測定した表面異方性を直線で結び、それを送受信子間距離分まで外挿する。この場合、5mm の送受信子間距離を考慮して、-5mm の位置まで直線を延長し、この位置での値を表面直下の表面異方性の推定値とする。これは、受信子間距離 0mm の表面異方性 (つまり、表面直下の表面異方性) を推定するためには、この送受信子間距離分を考慮する必要があるためである。また一方で、ホイヘンス・フレネルの原理を用いて表面 SH 波の伝搬挙動を数値解析することで表面直下の表面異方性を求め、実験値との比較を行った。

(2) 表面 SH 波音弾性による平面応力評価法の確立

一般に、表面 SH 波音弾性法で測定できるのは主応力差のみである。もし、主応力差のみならず主応力和の値も計測できると、鋼板材の平面応力状態を評価することが可能となる。そこで、まず表面 SH 波音弾性による平面応力評価法について、数学的な解析により主応力和を計測する方法の検討を行った。これによると、主応力 σ_1 と σ_2 の和は次式で求まることがわかった。

$$\frac{V(0^\circ)+V(90^\circ)}{2} = V_0 + \frac{\alpha + \beta}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

ここで、 $V(\theta)$ は θ 方向に伝搬する表面 SH 波の伝搬速度 (測定値) であり、また α 、 β は材料固有の値であり既知の値である。すなわち、表面 SH 波を用いて主応力和を求めるためには無負荷時の表面 SH 波の伝搬速度 V_0 の値が必要であることを導きだした。そこで、次に T 形表面 SH 波センサで計測した表面異方性の大きさと無負荷時の表面 SH 波の伝搬速度の相関を調べた。これは、表面異方性が、負荷応力の影響を受けず一定であるとともに、材料の音速に影響を与える集合組織を反映していることに起因している。そして、この相関を利用して表面異方性の測定値から無負荷時の表面 SH 波の伝搬速度を推定を試み、実験により、この提案手法の有用性の実証を試みた。

4. 研究成果

(1) 表面直下の表面異方性の推定法の検討

推定した表面直下の表面異方性の値 (図 3

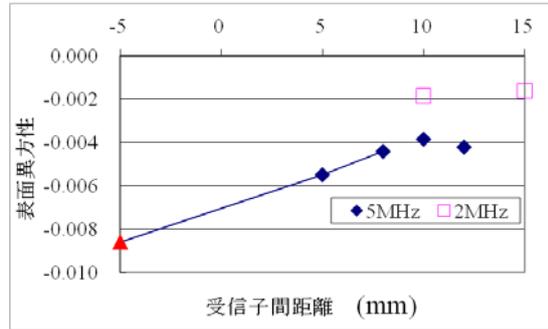


図3 表面直下の表面異方性の推定

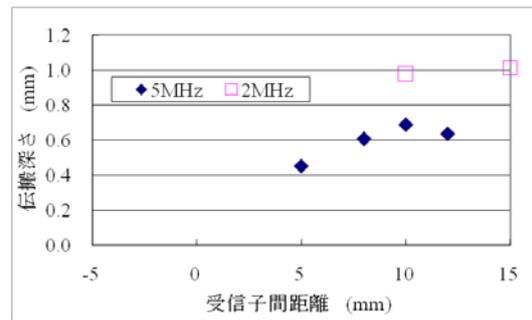


図4 表面SH波の伝搬深さ

参照) を使って、算出した表面 SH 波の伝搬深さを図 4 に示す。結果として、周波数 5MHz では、受信子間距離 10mm で最大伝搬深さは 0.8mm となり、周波数 2MHz では受信子間距離 15mm で最大伝搬深さ 1.1mm となった。受信子間距離 10mm に着目すると、伝搬深さは 5MHz では波長 (0.64mm) の 1.2 倍になり、2MHz では波長 (1.6mm) の 0.8 倍であった。波長が長くなると、表面 SH 波の伝搬深さは深くなるが、波長の変化に比例はしていないことがわかった。図 4 より、表面 SH 波の伝搬深さは受信子間距離と周波数により変化することが明らかになった。次に、表面 SH 波の伝搬深さを数値解析した結果と実験結果の比較を図 5 に示す。受信子間距離 10mm に着目すると、周波数 5MHz の場合、実験での伝搬深さが約 0.8mm、数値解析による伝搬深さは約 0.7mm となり、ほぼ同程度の伝搬深さとなっ

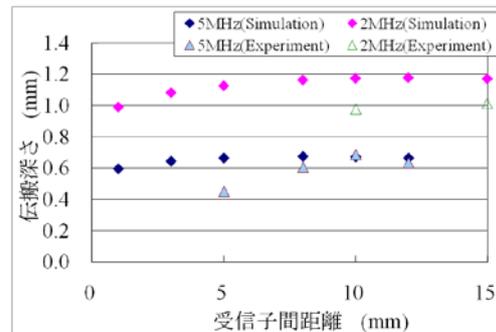
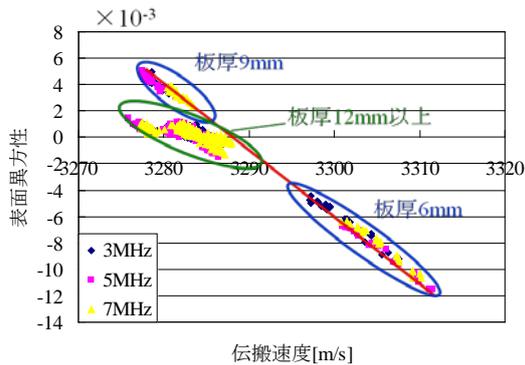


図5 伝搬深さの比較

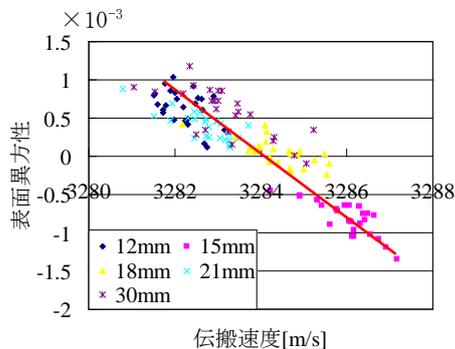
た。また、周波数 2MHz の場合では、実験伝搬深さが約 1.1mm、数値解析による伝搬深さが約 1.2mm となった。この結果から、実験と数値解析による伝搬深さはほぼ一致することが言え、実験における表面直下の表面異方性の推定値がほぼ正しいということが証明された。以上のことから、この推定法により、表面直下の真の残留応力を評価できることになり、ゆえに残留応力の板厚方向の変化率を正しく評価できる可能性が示された。

(2) 表面 SH 波音弾性による平面応力評価法の確立

厚さの異なる 9 つの試験片 (厚み: 6~30mm, サイズ: 200×200mm) を用意し、周波数 3, 5, 7MHz の T 形表面 SH 波センサを使って伝搬深さを考慮しながら、表面異方性と伝搬速度 (つまり、無負荷時の伝搬速度) を測定した。この結果を図 6 に示す。図 6(b) は板厚 12mm 以上に対し 7MHz の探触子のみで測定した結果である。このことから、無負荷時の伝搬速度と表面異方性との間に明確な相関があることを見出した。また、板厚が厚い材料に対しては伝搬させる表面 SH 波の周波数を高くすることで、より強い相関を示すことがわかった。



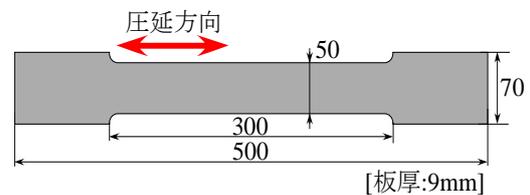
(a) 伝搬速度と表面異方性の相関



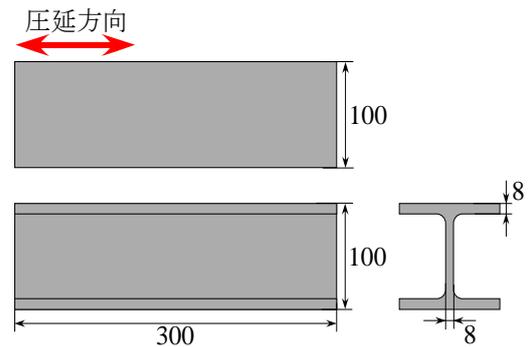
(b) 板厚 12mm 以上の伝搬速度と表面異方性の相関 (周波数: 7MHz)

図 5 鋼板における伝搬速度と表面異方性の相関

次に、SS400 から成る板厚 6mm および 9mm の鋼板 (200×200mm), それに図 7 に示す引張り試験片と H 形鋼 (フランジ部) について、上で求めた相関を利用して、無負荷時の伝搬速度の推定を試みた。その結果を表 1 に示す。測定箇所はそれぞれランダムに選んだ。表 1 の結果から、約 0.01~0.4m/s の精度で伝搬速度の推定が行えることが確認された。なお、H 形鋼については、表面処理 (研磨) が十分に行うことができず誤差が生じたものと考察している。以上のことから、提案手法を用いることによって、表面 SH 波音弾性においても主応力中の計測が可能であり、平面応力状態でも正確な応力評価が行えることを実験的に実証した。



(a) 引張り試験



(b) H 形鋼 (フランジ部)

図 7 試験片

表 1 無応力時の伝搬速度の推定結果

測定対象物	表面異方性 ×10 ⁻³	伝搬速度[m/s]		推定誤差 [m/s]
		実測値	推定値	
板厚6mmのSS400鋼板	-9.20	3307.13	3307.19	-0.06
	-7.43	3303.58	3303.46	0.11
	-6.67	3301.88	3301.87	0.01
板厚9mmのSS400鋼板	6.17	3275.05	3274.91	0.15
	5.89	3275.46	3275.51	-0.04
	6.51	3274.18	3274.19	-0.01
引張試験片	-0.06	3288.30	3287.99	0.31
H形鋼(フランジ)	-1.61	3290.88	3291.25	-0.37

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 3 件)

- ① 村田頼信, 戸田裕己, 岩崎重一: 表面 SH 波音弾性による圧延鋼板部材の残留応力測定, 超音波 TECHNO, 査読無, vol. 22 (6), pp. 25-30 (2010)
- ② 三鼓 晃, 村田頼信, 芥川真一: 鋼構造物における非破壊応力測定方法に関する開発研究, 電力土木, 査読無, No. 349, pp. 75-79 (2010)
- ③ 戸田裕己, 村田頼信, 小玉尊守: 音弾性によるロングレール軸応力測定 - 改良型装置による新敷設レールの軸応力の経月変化測定 -, 非破壊検査, 査読有, 57 巻, 9 号, pp. 441-447 (2008)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 池下正実, 戸田裕己, 村田頼信: 表面 SH 波音弾性による圧延鋼板部材の残留応力測定 - 実環境下測定に関する検討 -, 日本非破壊検査協会 第 18 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, pp. 31-32, (2011. 1. 27)
- ② 平井裕士, 村田頼信, 戸田裕己: 表面 SH 波音弾性法による多結晶シリコンインゴットの残留応力測定, 日本非破壊検査協会 第 42 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 東京, pp. 141-144, (2011. 1. 21)
- ③ 村田頼信: 音弾性を用いた残留応力測定, 日本機械学会 材料力学部門 講習会 応力・ひずみ測定の基礎と応用, 東京, pp. 55-60, (2011. 1. 18)
- ④ 池下正実, 戸田裕己, 村田頼信, 米中博志: 表面 SH 波音弾性による圧延鋼板部材の残留応力測定 - 測定精度の向上に関する検討 -, 日本実験力学会講演論文集 2010 年度年次講演大会, pp. 323-324, (2010. 8. 17)
- ⑤ 平井裕士, 村田頼信, 戸田裕己: 音弾性による多結晶シリコンインゴットの残留応力評価, 日本非破壊検査協会関西支部 平成 22 年度非破壊検査に関する研究発表会, 大阪, pp. 33-36, (2010. 8. 6)
- ⑥ 平井裕士, 村田頼信: 音弾性を用いた多結晶シリコンインゴットの残留応力測定, 産学連携事業 和歌山大学・近畿大学大学院生研究成果発表会, 和歌山, (2010. 2. 2)
- ⑦ 池下正実, 村田頼信: 表面 SH 波音弾性による圧延鋼板部材の残留応力測定 - 表面粗さが及ぼす測定精度への影響 -, 産学連携事業 和歌山大学・近畿大学大学院生研究成果発表会, 和歌山, (2010. 2. 2)
- ⑧ 池下正実, 戸田裕己, 村田頼信, 米中博志: 表面 SH 波音弾性による圧延鋼板部材の残

留応力測定 - 表面粗さが及ぼす測定精度への影響 -, 日本非破壊検査協会 第 17 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, pp. 53-54, (2010. 1. 28)

- ⑨ 村田頼信: 超音波で材料内部を“見る・診る・観る”, 第 1 回全空間画像計測シンポジウム, 大阪, (2010. 1. 27)
- ⑩ 村田頼信: 音弾性を用いた残留応力測定, 日本機械学会 材料力学部門 講習会 応力・ひずみ測定の基礎と応用, 東京, pp. 47-52, (2010. 1. 26)
- ⑪ 西谷祐一, 村田頼信, 戸田裕己: 表面 SH 波音弾性による圧延鋼板材の残留応力測定 ~ 主応力和と主応力差を用いた平面応力状態における主応力測定 ~, 日本非破壊検査協会関西支部 平成 20 年度非破壊検査に関する研究発表会, 大阪, pp. 43-44, (2008. 8. 8)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 頼信 (MURATA YORINOBU)
和歌山大学・システム工学部・准教授
研究者番号: 50283958