

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06107

研究課題名(和文) 曲面鉄鋼構造物の在姿応力評価を可能にする表面SH波音弾性システムの開発

研究課題名(英文) Development of a surface SH-wave acoustoelasticity system which can nondestructively measure stress in curved surface of steel members

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、T形表面SH波センサを応用して、パイプや車軸などの曲面鉄鋼部材を用いた構造物において在姿状態での応力測定を検討した。R1000mmの円柱面部材に適用可能なクロスT形表面SH波センサを開発した。そして、円柱状の鉄鋼試験片に対し応力測定を行った結果、10MPa以内の精度での応力測定が可能であることを示した。また、このクロスT形表面SH波センサは、センサの曲率半径に対して85～170%の範囲で高精度な測定が行えることを確認した。一方で、互いに直交する方向に伝搬する二方向の表面SH波の伝搬音速を同時に取得することで温度補正の不要なシステムを構築し、その有用性を実験的に実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, by applying the T-type surface SH-wave sensor, we tried to measure nondestructively the stress of curved surface of steel members such as pipe, shaft, etc. A cross T-type surface SH-wave sensor for steel member with cylindrical surface of R1000 mm was developed. As the result of stress measurement, it was showed that this sensor was able to measure in a high precision within  $\pm 10\text{MPa}$  in cylindrical surface. Furthermore, it was verified that this sensor was applicable to the curved surface with radius of curvature to 170% from 80% of the sensor surface. On the other hand, a new system which can simultaneously measure each wave velocity of the orthogonal direction in the sensor was constructed, and it was demonstrated experimentally that stress measurement was able to be carried out without temperature correction in shorter time.

研究分野：超音波応用工学

キーワード：超音波 音弾性 表面SH波 応力測定 曲面鉄鋼部材

## 1. 研究開始当初の背景

近年、不同沈下や繰返し外力負荷が影響して、高経年鋼構造物が大変形したり倒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材内部に発生した残留応力が関係する事例が多いことがわかる。一方で、橋梁や鉄塔などの構造物では、鋼板材であるアングル鋼材からパイプ鋼材へと移り変わっている。このようにパイプ鋼構造物の維持管理技術の確立が益々重要視され、非解体（つまり、在姿状態）で応力評価法の構築が切望されている。

一般的に、応力測定にはひずみゲージ法が用いられるが、あくまでも相対値測定であるため、この方法では残留応力の測定はできない。つまり、残留応力が存在しない無応力状態を基準としたひずみ測定は原理的に非解体での残留応力評価は不可能である。一方で、供用開始時点からの応力変化が知りたい場合でも、建設時の初期値が既知である高経年構造物は皆無である。このようなことから、供用中の経年構造物に対して正しく応力評価が行える手法の開発が切望されている。

音弾性法は、超音波を使った応力測定法であり、安全性に優れ取扱も容易である。中でも、表面 SH 波音弾性法は、製造工程で生じる鋼材固有の初期値（組織異方性）の影響を受けず、原理的に経年構造物であっても、残留応力をその場（つまり、在姿状態）で測定することができ、C. M. Fortunko らによってなされ、電磁超音波を用いてアルミ合金の応力測定例が報告されている。しかしこの電磁超音波を用いる方法は非接触で測定が行える利点がある反面、残留磁化の影響が音速測定精度を悪化させ、未だ応力評価において実用化はなされていない。一方、圧電素子を用いた接触による表面 SH 波音弾性の場合、実測時に接触媒質の厚み変動などの影響を受け易く、結果として測定誤差が大きくなり、これまで実用的でなかった。

我々は、これまで圧電センサで問題となった接触媒質の影響を排除して正確な応力測定の可能にする T 形表面 SH 波センサ（特許 4022589）を開発している。このセンサは図 1 に示すように、二つの送信子と四つの受信子から成っており、双方向に超音波を送受信させることにより原理的に接触媒質の影響をキャンセルできる。今回、これまで測定が困難であったパイプ鋼材のみならずシャフトなどの応力評価に、本技術を適用してその可能性を見出すことができれば、社会基盤の安全・安心を支える技術の確立として、研究の意義は非常に大きいと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、T 形表面 SH 波センサを応用して、表面 SH 波音弾性により、これまで困難とされてきたパイプなどの曲面鉄鋼部材を用いた構造物において在姿状態での応力評価法を確立させることを目的とした。

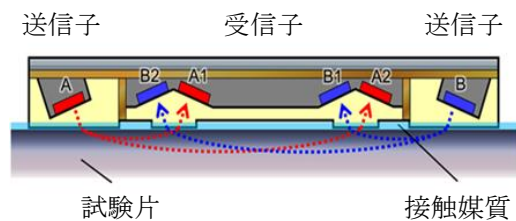


図 1 T 形表面 SH 波セン

## 3. 研究の方法

### 3.1 応力測定誤差発生要因の究明

T 形表面 SH 波センサをパイプ鋼材に応用する場合、その曲面の影響が測定精度に影響を及ぼすことが予想される。しかし、測定精度は表面性状にも影響されるため、曲面の影響と切り離して測定誤差の発生要因を明らかにする必要がある。誤差発生要因として、超音波探触子を被検体に接触させる関係上、被検体表面のうねりや表面粗度の影響を強く受ける。そこで、応力測定の高精度化に際しこれらの最適値を調査した。

### 3.2 パイプ鋼材内における表面 SH 波の伝搬挙動解析

T 形表面 SH 波センサを曲面鉄鋼部材の応力測定に応用する場合、その曲面の影響を受けることが考えられる。そこで、実験および数値解析により、表面 SH 波のパイプ鋼材内の伝搬挙動を明らかにした。まず、数値解析によりパイプ鋼材の周方向に伝搬する表面 SH 波の伝搬挙動を、パイプ鋼材の厚み、周波数、指向性および送受信子間距離を変えながら推察した。

### 3.3 T 形表面 SH センサの曲面部材への適用

T 形表面 SH 波センサを円柱面に対応できるように新たに設計を行い、様々な径に対応可能なフレキシブルセンサとして、分離形と一体形の二種類のプロトタイプセンサを作製した。そして、これらのセンサに対し、鋼板試験片を弾性範囲で曲げ変形させ、負荷応力測定に対する音弾性法の適用を検討した。

### 3.4 クロス状 T 形表面 SH センサの開発及びシステムの最適化

上で開発した曲面对応のフレキシブル T 形表面 SH 波センサは、送信子と受信子を固定する部分に柔軟なゴム板を用いて、センサが測定面の曲率に応じて変形するよう工夫したものである。しかし、このセンサは、測定曲面に合わせて曲がる構造ゆえ、センサを設置する際に接触状態が安定せず、測定精度不足が問題点として挙げられていた。今回、曲面对応 SH 波センサの問題点を解決するために、接触面を測定対象に合わせた形状のクロス T 形表面 SH 波センサを設計・開発した。このクロス T 形表面 SH 波センサの構造は、

二つの T 形表面 SH 波センサをクロスに配置したセンサとなっており、さらに、接触面を凸曲面 R1000mm の円柱面に合わせた形となっている。このセンサの特徴として、平面用の T 形表面 SH 波センサと同様、各素子の位置ずれが発生せず接触状態が安定していることが挙げられる。また、このようなクロス状センサは、パイプ鋼材の規格に応じて準備する必要があるが、これまでのように圧延方向とその直交方向の二回測定を、一回測定（つまり、センサの回転を伴わない）で応力を測定できる利点を持つ。

### 3.5 クロス状 T 形表面 SH センサを用いた応力測定システムの最適化

上で作製した R1000mm 用の曲面对応型クロス T 形表面 SH センサを用いて、精確な曲げ応力測定が可能な範囲を調べるために、曲げ応力測定において、試験片の曲率半径の変化に対しての測定精度について検証を行った。

### 3.6 クロス T 形表面 SH 波センサの実環境下測定への適用

表面 SH 波音弾性法の実環境下への適用に向けて、表面 SH 波の伝搬音速の温度補正が不要で、被検体の温度変化が測定に与える影響を低減できる測定システムの構築を行った。

## 4. 研究成果

### 4.1 応力測定誤差発生要因の究明

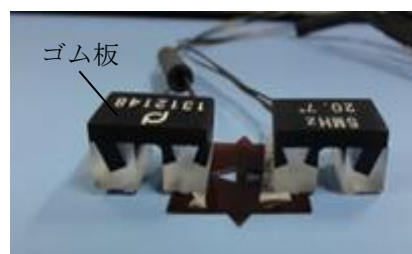
無応力状態の平面鋼板部材に T 形表面 SH 波センサを設置させ、表面性状を定量的に変化させながら応力測定を行い表面 SH 波音弾性の誤差要因を調べた。その結果、鉄鋼材料の表面性状として、算術平均粗さ Ra: 0.20 $\mu$ m 以下かつ算術平均うねり Wa: 1.0 $\mu$ m 以下であれば  $\pm 10$ MPa 以内での高精度な測定が可能であることがわかった。

### 4.2 パイプ鋼材内における表面 SH 波の伝搬挙動解析

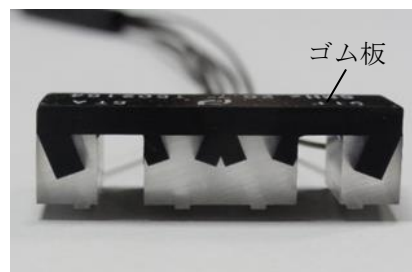
凸曲面および凹曲面における表面 SH 波の伝搬挙動を実験と数値解析により検証を行った。そして、パイプ鋼構造物で表面 SH 波を用いて応力評価を行うための測定条件や制限について検討した。その結果、凸曲面では、SH 波の短絡成分の影響により表面 SH 波の伝搬時間測定に影響を及ぼすことを確認した。また、凹曲面では、曲率半径が小さくなるにつれて減衰が大きくなる傾向がみられた。そのため、短絡成分や減衰の影響を受けないように、曲率半径に合わせた送受信子間距離を決定し音弾性測定する必要があることがわかった。

### 4.3 T 形表面 SH センサの曲面部材への適用

曲面对応のフレキシブル T 形表面 SH 波センサとして、図 2 に示すような、分離形と一



(a) 分離形



(b) 一体形

図 2 曲面对応 T 形表面 SH 波センサ

体形の二種類のプロトタイプセンサを開発した。ともに周波数は 5MHz とした。いずれのセンサもそれぞれの振動子部分はゴム板に固定されており、曲面に応じてセンサが被検体に密着できるように工夫した。これらのセンサを用いて、鋼板試験片を弾性範囲で曲げ変形させたときの負荷応力を測定した。結果として、分離形センサでは、受信子間距離が曲率によって変化してしまう問題が明らかになったが、これを補正することによりひずみゲージに対し  $\pm 10$ MPa 以内の精度で負荷応力を求めることができた。一方、一体形センサでは、曲率によって受信子間距離は一定 (10mm) であるが、センサを設置する際に、曲率が小さくなると、送信子の角度ずれが生じて十分な精度で応力測定できないことがわかった。

### 4.4 クロス状 T 形表面 SH センサの開発

図 3 に示すような R1000mm の円柱部材に適用可能な曲面对応クロス T 形表面 SH 波センサを新に開発した。周波数は 5MHz、受信子間距離は 10mm とした。そして、R1000mm

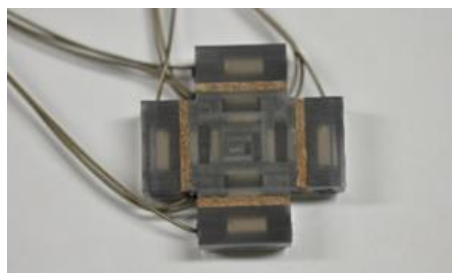


図 3 クロス T 形表面 SH 波センサ

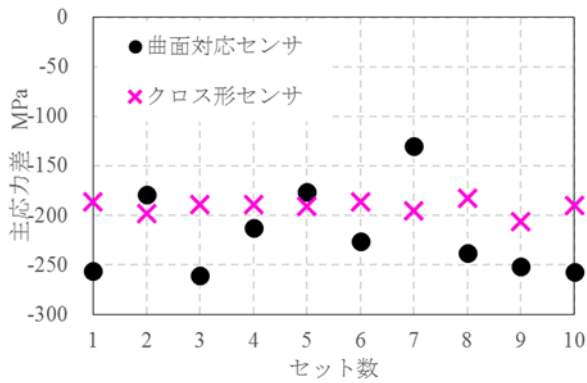


図4 凸曲面R1000mmに対する応力測定

の円柱状の鉄鋼試験片に対し、上の曲面对応一体形 T 形表面 SH 波センサと応力測定の比較を行った。その結果、曲面对応一体形 T 形表面 SH 波センサに比べ測定精度が大幅に向上でき、10MPa 以内の精度での応力測定が可能であることを確認した。次に、万能試験機を用いて円柱鋼材の長軸方向に負荷を加え応力測定を行い、その時の正確度についてひずみゲージによる応力測定と比較して検証した。その結果、ひずみゲージと同等の精度での応力測定が可能であり、クロス T 形表面 SH 波センサを用いた音弾性応力測定の有用性を確認することができた。

#### 4.5 クロス状 T 形表面 SH センサを用いた応力測定システムの最適化

R1000mm 用の曲面对応型クロス T 形表面 SH センサを用いて、曲面部材において試験片の厚みがどのように音速測定に影響するかを調べた。その結果、表面波と試験片裏面からの反射波の干渉が測定精度に影響を与えることがわかり、これらの波形を識別することで、より正確な音速測定が可能である事が実証された。

次に、平面の試験体に曲げ応力を加え、ひずみゲージの値と比較することで R1000mm 用の曲面对応型クロス T 形表面 SH センサによる応力測定の正確さを確認した。また、このセンサで高精度な測定がおこなえる曲率の範囲を検証した。その結果、R1000mm 用のセンサで 845~2706mm、つまりセンサの曲率半径に対して 85~170%の範囲であることを確認した。以上のことから、曲げ応力測定の際には測定対象より小さい曲率半径をもつセンサを用いることで正確な測定が可能である事が示唆された。

#### 4.6 クロス T 形表面 SH 波センサの実環境下測定への適用

図5に示すように、二台のシングアラウンド装置をコンピュータで制御することで互いに直交する主応力方向に伝搬する二方向の表面 SH 波の伝搬音速を同時に取得するシステムを構築した。そして、室内環境 (25°C 一定) と炎天下の実環境 (30 から 50°C に上

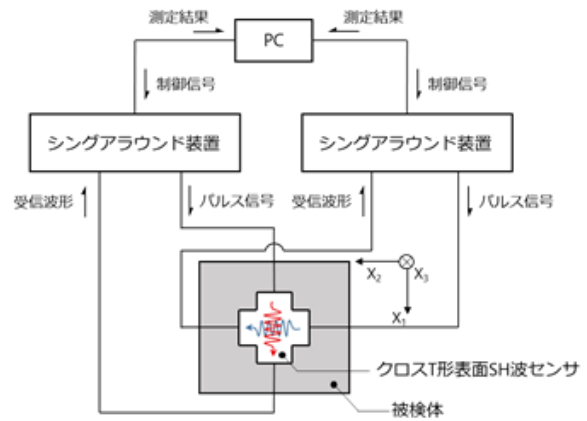


図5 主応力方向同時音速測定システム

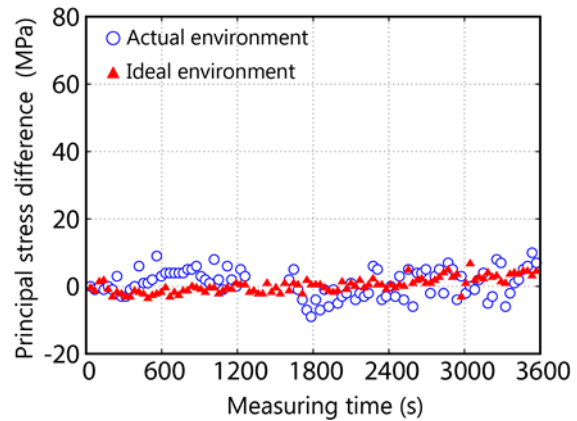


図6 提案システムの温度による影響 (理想環境 (室内環境) では、気温は 25°C 一定。実環境下では、0~3600 秒の間に 30~50°C まで気温が上昇変化している。)

昇変化) において、温度変化にともなう測定への影響を検証した。結果として、図6に示すように、実環境における測定において、従来手法では温度補正を正確におこなうことができず測定精度が悪化するが、提案手法を用いることで温度補正を行わずとも測定が安定し、許容誤差範囲内 ( $\pm 10\text{MPa}$  以内) で測定できることを実証した。

#### 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 1 件)

- ① 北野勝彦, 村田頼信: 表面 SH 波音弾性法を用いた応力測定における温度影響の低減, 電気学会論文誌 C, Vol. 138, No.9, 印刷中 (2018) 【査読あり】

[学会発表] (計 6 件)

- ① 島崎貴之, 北野勝彦, 村田頼信, 藤垣元治: 表面 SH 波音弾性法を用いた鋼板の曲げ応力測定に対する検討, 電気学会 第 22

回知能メカトロニクスワークショップ，  
一般社団法人電気学会 知覚情報技術委  
員会，甲府，2C2-3 (2017)

- ② 北野勝彦，村田頼信：表面 SH 波音弾性法  
における温度補正が不要な測定システム  
の検討，電気学会 第 22 回知能メカトロ  
ニクスワークショップ，一般社団法人電  
気学会 知覚情報技術委員会，甲府，2C2-1  
(2017)
- ③ 北野勝彦，浦部友孝，村田頼信，藤垣元  
治：クロス T 形表面 SH 波センサを用いた  
曲面鉄鋼部材の主応力差測定に関する研  
究，電気学会 第 21 回知能メカトロニク  
スワークショップ，一般社団法人電気学  
会 知覚情報技術委員会，函館，pp. 170-173  
(2016)
- ④ 北野勝彦，村田頼信：厚肉鉄鋼部材に対  
する表面 SH 波音弾性法の適用，平成 27  
年度 計測自動制御学会関西支部・システ  
ム制御情報学会 若手研究発表会，大阪，  
pp. 146-148 (2016)
- ⑤ 浦部友孝，村田頼信，藤垣元治：表面 SH  
波音弾性法による曲面鉄鋼部材の主応力  
差測定の検討，日本非破壊検査協会 平成  
27 年度秋期講演大会，札幌，pp.181-184  
(2015).
- ⑥ 浦部友孝，村田頼信，藤垣元治：曲面鉄  
鋼部材の応力測定に対する表面 SH 波音  
弾性の適用，電気学会 第 20 回知能メカ  
トロニクスワークショップ，一般社団法  
人電気学会 知覚情報技術委員会，東京，  
pp. 62-65 (2015)

## 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

### (2) 研究分担者

藤垣 元治 (FUJIGAKI, Motoharu)  
福井大学・工学 (系) 研究科・教授  
研究者番号：40273875