

機関番号：56301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760066

研究課題名（和文） 高温設備における材料損傷の定量計測および常時監視システムの構築

研究課題名（英文） Construction of health monitoring system be able to measure damage in high temperature equipment

研究代表者

明松 圭昭（AKEMATSU YOSHIAKI）

新居浜工業高等専門学校・機械工学科・助教

研究者番号：20396766

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は高温設備における材料損傷の定量計測を行い、さらに常時監視（ヘルスマモニタリング）を1本の光ファイバで行うことである。光ファイバ振動センサおよび放電撃力を用いることにより、高温設備を停止することなく検査可能な診断技術の確立を目指した。その結果、作製したシステムにおける常時監視（ヘルスマモニタリング）の可能性を見いだせた。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we measure the damage in high temperature equipment by using optical fiber sensor in order to construct the health monitoring system. As the results, it was found that this system was possible to detect the damage in high temperature and to estimate the propagation characteristic of elastic wave.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：非破壊検査

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：非破壊検査、打音検査、光ファイバ振動センサ、アコースティックエミッション

## 1. 研究開始当初の背景

国際競争の激しい昨今では、新規プラントを国内に設置せず、老朽化した既存の設備を稼働させ続ける傾向が強い。そのため従来の検査だけでは不十分になっており、化学設備等で事故が増加している。このように検査は人々の暮らしの安心・安全を支える基盤技術であるため、技術・技能の進化は非常に重要である。このような背景の中、設備の健全性を保証する非破壊検査技術の開発が強く求められている。現在設備の診断は超音波計測

および常時監視（ヘルスマモニタリング）により行われている（図1）。しかし超音波計測は点測定であるため孔食などの特定部位の損傷（減肉）を測定することが困難な状況である。そのような問題に対応すべく、検査部を面測定する超音波連続測定検査装置が開発されているが、高温環境では適応できない。一方、設備にセンサを取り付けて損傷、欠陥の進展を自動的に検出しようとするヘルスマモニタリング技術に用いられている圧電素子センサも高温環境では使用できない。

本研究で使用する光ファイバ振動センサは 2001 年、東京大学 影山和郎教授らにより開発されたセンサである。本センサは 600 度程度の高温環境下で使用可能、数 Hz から数 MHz の広帯域、多点測定（任意点）が 1 本の光ファイバで可能、センサの信号受信感度の設計可能、耐食性に優れる等、既存のセンサを凌駕する特性を有することから様々な設備の常時監視（ヘルスマonitoring）への適応が図られている。これらの応用研究とは別に著者らはこの光ファイバ振動センサを用い放電加工現象の解明に関する基礎研究を行っている。現在までの研究により、コンデンサ放電に伴い発生する放電撃力は理想的な点音源になる可能性が見出せつつある。そこでコンデンサ放電音を入力基準音源とし、光ファイバ振動センサにより計測すれば従来の受動的な計測だけでなく、能動的な計測手法（放電撃力を用いた新しい打音検査）として提案ができるのではないかと考えた。

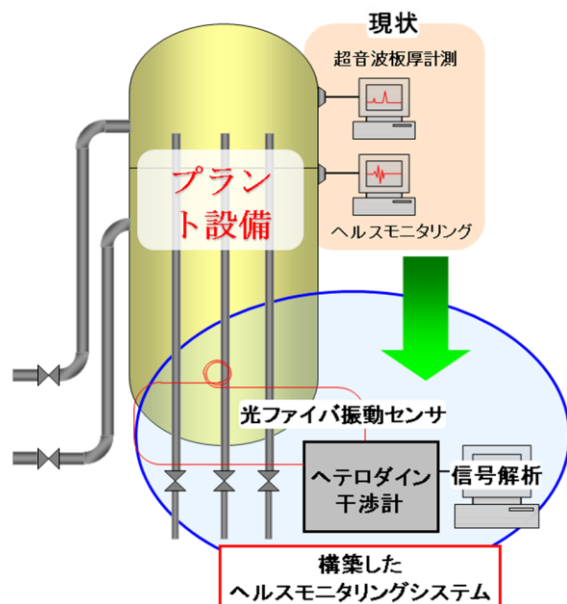


図 1 構築したシステム概略

## 2. 研究の目的

本研究の目的は光ファイバ振動センサを用いた高温構造物の板厚、欠陥形状（特定部位）の定量計測を行い、同時に常時監視（ヘルスマonitoring）を 1 本の光ファイバで行うことである。設備の検査基準は消防法により 3.2mm 以下になれば補修が必要と定められているので、数 100 度の高温環境下で数 100  $\mu\text{m}$  単位の板厚変化が計測可能か調査した。数 100 度の高温環境下でスリット深さ数 100  $\mu\text{m}$ 、スリット幅数 100  $\mu\text{m}$ 、長さ数 100  $\mu\text{m}$  程度が計測可能か調査する。また高温環

境下で欠陥、き裂進展の位置標定を行い常時監視の可能性を評価した。

## 3. 研究の方法

設備の板厚、欠陥形状の計測に用いられているセンサは主に圧電素子（強誘電体の一種で、振動や圧力などの力が加わると電圧が発生し、また逆に電圧が加えられると伸縮する素子）である。圧電素子は 300 度付近にキュリー点（分極する温度：力や電圧に反応しなくなる温度）を有するため、高温環境下では使用できない。一方、常時監視（ヘルスマonitoring）では欠陥の活性度に依存し発生するアコースティックエミッション（材料の亀裂の発生や進展などの破壊に伴って発生する弾性波）を検知するため板厚および欠陥形状は計測できない。

本研究では高温設備の常時監視（ヘルスマonitoring）に加え、特定部位の板厚および欠陥形状を定量計測できるシステムを製作するために広帯域で再現性の良いコンデンサ放電音を用いた。研究で用いた計測システム概略図を図 2 に示す。

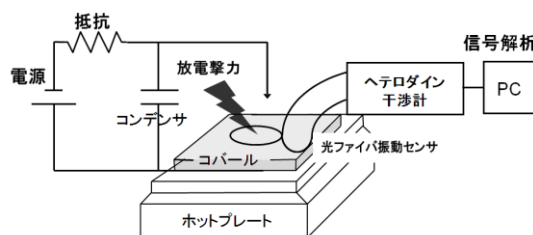


図 2 計測システム概略

セラミクス製の高温プレートにより試験片は室温（20℃）から数 100℃まで変化させた。直径 20mm の光ファイバセンサは試験片中心にエポキシ系耐熱ボンドを用い固着した。音源には放電音を用いセンサ中心で発生させることにより数値解析結果と比較可能にした。光ファイバセンサ信号はサンプリングレート 10MHz で取込み解析した。

有限要素法を用いた数値解析に関しては、市販の有限要素法解析ソフト MSC 社 MARC を用いて解析した。加工物が様な組成で応力とひずみが線形の関係であると仮定し、有限要素法解析を行った。以前の研究により今回の実験条件では 1MHz 程度までの周波数領域の弾性波が発生することがわかっている。よって数 Hz から 1MHz 程度までの周波数領域で系の動的応答を求める必要があるためニューマークベータ法を用いた。さらに本手法は積分区間で加速度を一定と仮定することにより解析される解は無条件安定である。ただし解析される時間ステップは位相誤差を小さくするために最大周波数の 10 パーセント以下が推奨されている。よって最大

周波数 1MHz の 1.25 パーセントである  $1.25 \times 10^{-8}$ s を用い解析を行った。図 3 に解析モデルを示す。

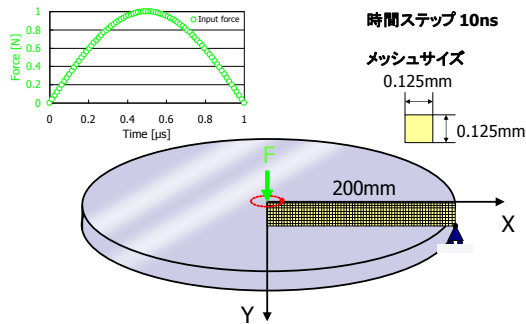


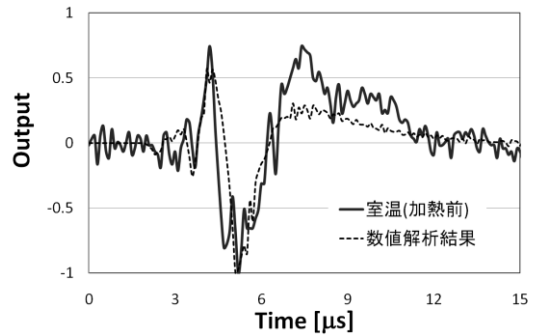
図 3 解析モデル

半径 200mm のモデルを作成した。計測される弾性波は反射波が入らない位置では板の形状には影響されないものと考えられるため、モデルを軸対称の円盤とした。半径方向を等間隔に 1600 分割、厚さ方向を等間隔に分割して要素の大きさを  $0.125\text{mm} \times 0.125\text{mm}$  とした。要素の大きさはシミュレーションの誤差に大きな影響を与えるが、本研究で対象とする最大周波数を 1MHz、横波の速度を 3000m/s と仮定すると一波长を 24 分割しているため誤差は少ないと考えられる。境界条件は、円盤端部を上下方向で拘束した。入力する機械荷重を正弦波 1/2 周期、最大値 1N の点荷重とした。

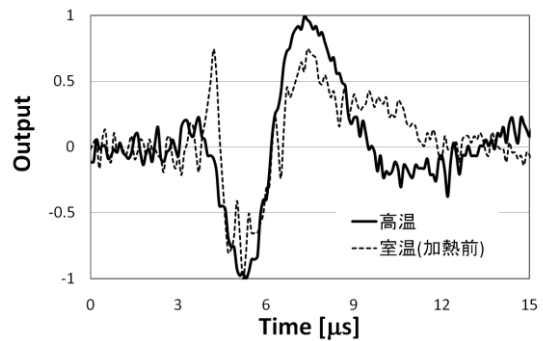
#### 4. 研究成果

光ファイバ振動センサで計測される信号と有限要素法を用いた数値解析結果を比較することで高温環境下におけるヘルスマニタリングの可能性を調査した。図 4 に温度変化に伴う計測信号の変化を示し、センサの耐熱性を評価した。室温における計測信号および数値解析信号の相関係数は 0.8 程度であった。過去に報告した瞬間接着剤を用いた比較結果と同等の相関係数を示していることより、エポキシ系耐熱ボンドも原波形解析の可能性が見出せた。数 100°C まで加熱した高温および室温で計測される光ファイバセンサ信号を比較した結果より高温下における信号の相関係数は 0.76 となり高い相関関係が得られた。これにより高温下でも光ファイバセンサは使用可能であり、さらに原波形解析の可能性が見出せた。ただし室温での計測信号は  $4 \mu\text{s}$  付近で出力比 0.7 程度の挙動があるのに対し、高温では 0.2 程度しか計測されなかった。高温状態では高周波数成分の検知能力低下を考慮する必要があることがわかった。室温および室温から約 200°C まで加熱した後、室温まで冷却したときに計測される光ファイバセンサ信号より加熱前後で計測さ

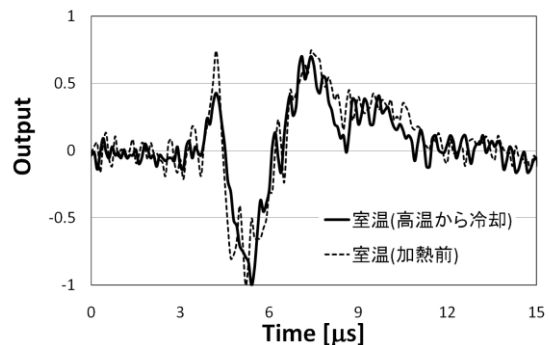
れる信号の相関係数は 0.9 程度であった。また高周波数成分の検出感度も回復していることが分かる。よって室温から約 200°C までの温度範囲であれば繰り返し使用できる可能性が見出せた。本結果の一部は、2010 年 1 月 28 日 - 29 日に開催された国内会議 (第 17 回超音波による非破壊評価シンポジウム) にて講演発表を行った。これらの成果により、平成 21 年度の目標である『数 100 度の高温環境下で計測可能なシステムの製作』はほぼ達成できた。



実験および数値解析信号 (室温)



計測信号 (高温および室温)



計測信号 (室温, 加熱前後)

図 4 センサの耐熱性

またスリット欠陥を有する試験片を作製し、スリット深さ、スリット幅およびスリット長さが数  $100 \mu\text{m}$  単位で計測可能かを調査した。擬似欠陥試験片を用いた計測結果を図 5 に示す。

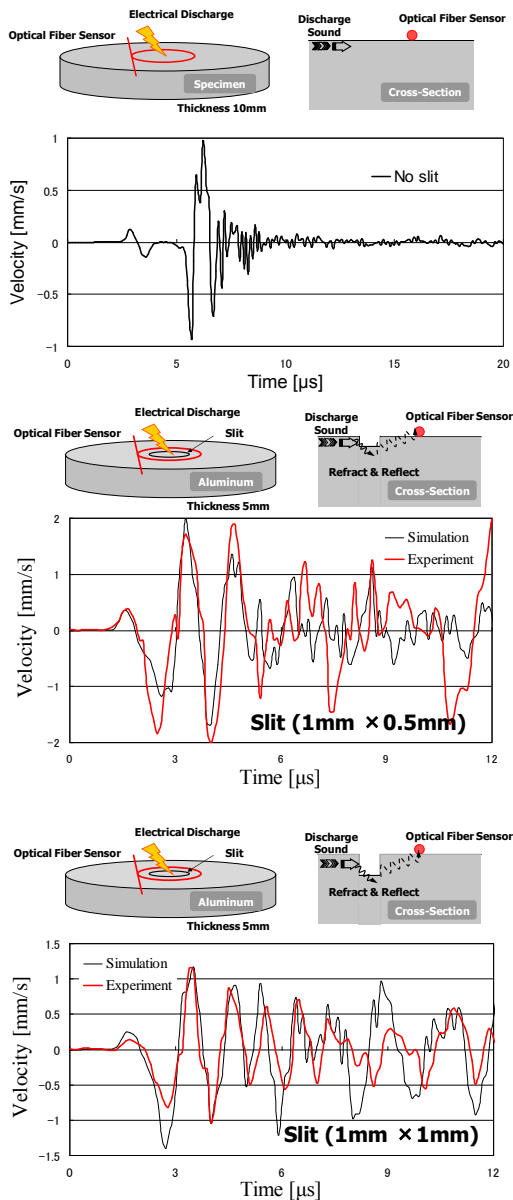


図5 擬似欠陥試験片計測

その結果、 $500\mu\text{m}$ の板厚変化が計測可能であることが分かった。また数 $100\mu\text{m}$ 単位で変化させた欠陥形状の異なる試験片で計測される弾性波と有限要素法を用いた数値解析結果に相関関係が認められた。よって板厚の定量計測および欠陥形状推定が可能であることが明らかになった。本結果の一部は、2008年12月9日-12日に開催された国際会議 (The 19th International Acoustic Emission Symposium) にて講演発表を行った。これらの成果により、平成20年度の目標である『常温環境下で板厚、欠陥形状を定量計測する』ことはほぼ達成できた。

最終年度には光ファイバ振動センサおよび放電撃力を用いることにより、高温設備を停止することなく検査可能な診断技術の確立を目指した。具体的には1本の光ファイバ

(1チャンネル)で多方向の音源特定可能なセンサ設計を行いセンサの評価を行った。そのさい各センサで計測された弾性波には全センサ信号が混在した状態で計測されるため、信号分離を行う必要があると考えセンサの形状、巻数を設計することにより周波数感度特性を変化させた。その結果、音源がセンサ外の場合の解析には振幅、立ち上がり時間、持続時間等から位置標定(時間差計測)の可能性が見出せた。本結果の一部は、中国四国学生会 第41回学生員卒業研究発表講演会にて講演発表を行った。これらの成果により、『作製したシステムにおける常時監視(ヘルスマモニタリング)の可能性を確認する』はほぼ達成できた。

### 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0件)

〔学会発表〕(計5件)

- ① 明松圭昭, 平尾篤利, コンデンサ放電に伴い発生する気泡の挙動におよぼす粘度の影響、2011年度精密工学会春季大会学術講演会、平成23年3月14日-16日(震災に伴い中止)、CD-ROMおよびJ-STAGE
- ② 大西達也, 明松圭昭, 光ファイバAEセンサの形状特性、中国四国学生会 第41回学生員卒業研究発表講演会、平成23年3月4日、岡山
- ③ 武内秀明, 明松圭昭, 影山和郎, 村山英晶, 町島祐一、高温下で発生する放電音の伝播、第17回超音波による非破壊評価シンポジウム、平成22年1月28日、29日、東京
- ④ 明松圭昭, 影山和郎, 毛利尚武, 村山英晶、極間媒体の違いによる放電圧力の挙動、精密工学会 2009年精密工学会春季講演、2009年3月11日、東京
- ⑤ Yoshiaki AKEMATSU, Kazuro KAGEYAMA, Naotake MOHRI and Hideaki MURAYAMA、MEASUREMENT OF PLATE THICKNESS BY USING OPTICAL FIBER SENSOR、The 19th International Acoustic Emission Symposium、2008年12月9日、京都

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

明松 圭昭 (AKEMATSU YOSHIAKI)

新居浜工業高等専門学校・機械工学科・助教  
研究者番号: 20396766

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者