

## 広範囲構造物検査に適応する音源および計測システムの設計・製作

明松圭昭

筑波技術大学 産業技術学部 産業情報学科

キーワード：放電音，光ファイバ振動センサ，弾性波シミュレーション

### 1. 緒言

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設計寿命を超えても稼働させ続ける傾向が強い。このためプラントの事故は増加傾向にある。現在，プラントの劣化診断は残存板厚で管理されている。一般に板厚計測は探触子を測定物に接触させ，超音波を測定物に送信，測定物の裏面に反射して戻ってくる超音波を探触子で受信し，その伝播時間から測定物の厚さを算出する。しかしこの手法では探触子が接触している点での板厚のみしか計測できない。さらにプラントは保温材に覆われていたり，配管がはり巡らされていたりなどの理由により多点検査は容易ではない。近年，構造物に沿って屈曲・伸縮運動しながら伝播する特殊な音波（超音波）を用い板厚の減少を領域で検知する検査法の適応が試みられている。この手法を用いれば伝播する超音波の速度が周波数と板厚によって変化するため板厚の変化を計測できる。ただし計測される波形は情報量が多くなるため解析が困難である。そこで本研究では広範囲構造物検査に適応する音源として放電音を計測システムとして光ファイバ振動センサに着目し，理論解析と実験解析結果を比較することで板厚計測の可能性を調査した。

### 2. 実験方法

研究では理論解析（シミュレーション）と実験を組み合わせることで構造物の板厚計測の可能性調査を行った。理論解析では局部的に板厚が変化した場合に材料を伝播する波（音）の波動方程式を解くために有限要素法（MSC. Marc）によるシミュレーションを用いた。実際の計測は光ファイバ振動センサを用い得られた結果を理論解析結果と比較した。

#### 2.1 理論解析

理論解析には MSC. Marc を用いた。加工物が一樣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 パーセントである  $1 \times 10^{-8}$ s を用い解析を行った。図 1 に解析モデルを示す。

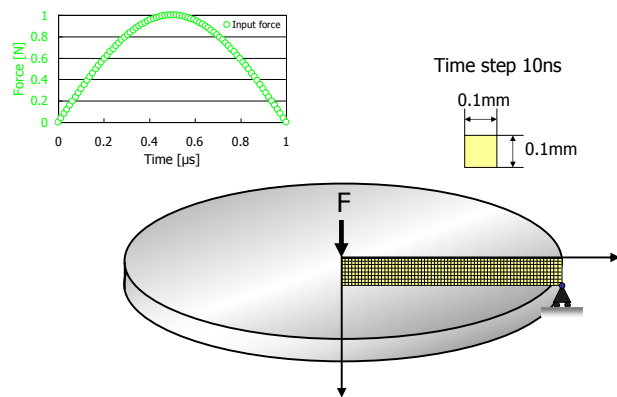


図 1 解析モデル

半径 200mm から 10000mm のモデルを作成した。また擬似欠陥として長さ数 10mm，深さ数 mm を作成し最上層に導入した。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。要素の大きさを 0.1mm×0.1mm 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 と仮定すると一波長を 30 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。

## 2.2 光ファイバ計測

図2に光ヘテロダイン方式を用いた光ファイバ振動センサの計測原理図を示す。光源から射出した光波 ( $f_0$ : 周波数) はハーフミラーで信号光と参照光に分割される。弾性波がセンサ部を通過する際、信号光はドップラー効果により周波数が変化 ( $f_D$ : ドップラーシフトした周波数) する。参照光は音響光学素子 (AOM) により周波数変調 ( $f_M$ : 変調周波数) させる。受光器は信号光と参照光の周波数成分の差を取り出す。取り出した周波数成分の差を電気信号に変換することにより光ファイバ振動センサが変位する速度を計測する<sup>2)</sup>。

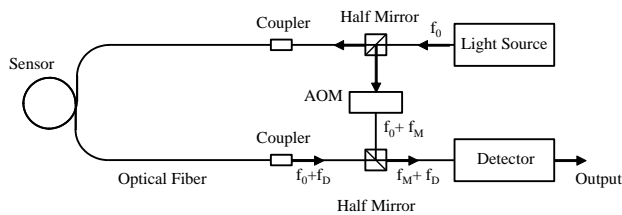


図2 計測原理

数 $\mu\text{s}$ 以下の短い放電持続時間の放電特性を得るためにコンデンサ放電回路を作製した。電源は直流電源、抵抗は  $1\text{M}\Omega$  を用いた。円形光ファイバ振動センサは加工物の中心に瞬間接着剤で固着させた。放電は光ファイバ振動センサの中心で行った。電流、電圧および光ファイバ振動センサ信号は A/D 変換を行い、パソコンに取り込み解析を行った。

## 3. 結果および考察

図3に光ファイバ振動センサにより計測される弾性波とシミュレーション結果を同時に示す。発生する弾性波の速度値にはバラツキがあるので、シミュレーションによって得られた速度を基準とし、相対表示で示した。光ファイバ振動センサにより計測される速度信号の挙動はシミュレーションにより求められる挙動とよく一致することがわかった。

図4に擬似欠陥長さが  $50\text{mm}$  とし深さを変化させた場合に得られる数値解析結果を示す。擬似欠陥の深さが増加すると、最初に現れる第一波 ( $S_0$  モード) の時間が長くなる傾向が得られた。第一波に注目すれば欠陥を計測できる可能性が見いだされた。

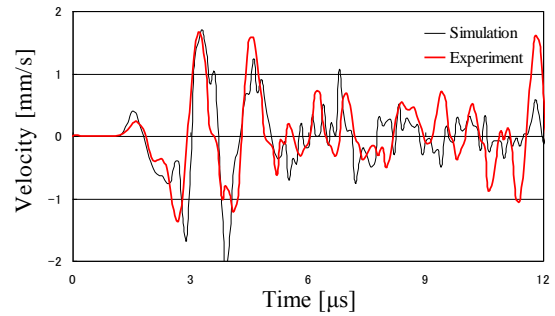


図3 実験および数値解析結果の比較

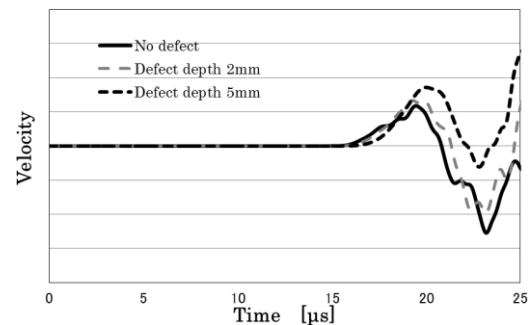


図4 数値解析結果

## 4. 結言

本研究では光ファイバ振動センサを用いた非破壊検査技術、特に損傷量検査技術を開発するために、理論解析と実験解析結果を比較することで板厚計測の可能性を調査した。その結果、入力基準音源には放電音が有効であることがわかった。また放電音を音源としシミュレーションできることが分かった。理論解析と実験結果を比較することで欠陥を計測できる可能性が見いだされた。

これらの研究成果の一部は IAES-21 (21st International Acoustic Emission Symposium, PROGRESS IN ACOUSTIC EMISSION XVI, The Japanese Society for NDI, pp.121-126, Nov. 28-30, 2012) で発表された。

### 参考文献

- [1] Yoshiaki Akematsu et al. : Effect of Plate Thickness on Acoustic Emission Wave Propagation during Single Pulse Discharge, The 18th International Acoustic Emission Symposium (IAES-18), 2006, pp. 27-32.
- [2] Kazuro Kageyama et al. : Doppler Effect in Flexible and Expandable Light-Waveguide and Development of New Fiber-Optic Vibration/Acoustic Sensor, IEEE Journal of Light wave Technology, Vol. 24, No. 4, 2006, pp. 1768-1775.