

## 「超音波伝搬における異常回折現象の解明と非破壊計測への応用」

神戸大学大学院システム情報学研究科

中本 裕之

## 1 研究の背景と目的

光学分野においては、周期構造をもつ界面での反射・透過に伴い、周波数スペクトルに急峻な変化が生じる **Wood's Anomaly** (以下、異常回折現象) が古くから知られている。近年、MHz 帯の超音波においても、金属媒体の反射面に周期的欠陥が存在する場合に、光学的異常回折と類似したスペクトル変化が観測されることが報告されている。この異常回折現象は、短パルス超音波の反射過程において、主反射波 (以後、メイン波とする) に加えて微小な後続波 (以後、テール波とする) が生じることによって起因するとされている。しかし、テール波の発生機構は、未だ十分に解明されていない。

本研究では、メイン波に後続するテール波の生成機構を実験とシミュレーションの両面から明らかにするとともに、プラント配管の肉厚非破壊評価に広く用いられるパルスエコー法において、周期的欠陥推定へのテール波の応用可能性を検証することを目的とする。

## 2 研究方法・研究内容

## 2. 1 実験装置および試験体

パルスエコー法では、図 1 に示すように、超音波プローブから媒体に対して超音波を入射し、対面で反射した反射波を受信する。本研究では、入射面に平滑面、対面の反射面に周期的欠陥として繰り返しの平行きずを加工した試験体を用いる。

実験装置の構成を図 2 に示す。ラップトップコンピュータによって制御されたパルサーレシーバ (JPR-600C, ジャパンプローブ (株)) と広帯域の超音波プローブ (B5C5N, ジャパンプローブ (株)) によって、試験体に超音波を入射する。試験体内を伝搬、反射した超音波を、同じプローブが電圧信号に変換し、その電圧信号はオシロスコープに表示されるとともに、サンプリングされデータとして保存される。試験体に入射する超音波には、周波数が 5 MHz (実測された中心周波数は 4.7 MHz、半値全幅は 3.6 MHz) の 1 周期正弦波バースト波を用いた。

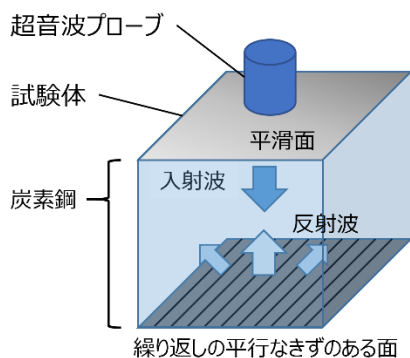


図 1 パルスエコー法

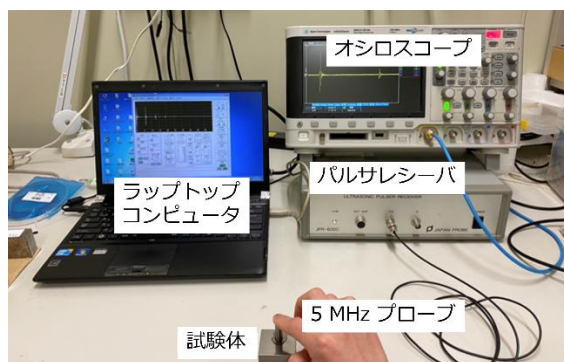


図 2 実験装置の構成

実験には、図 3 に示すような、40×40 mm の面をもつ厚さ 20 mm の炭素鋼ブロックの片面に周期的なきずを加工した試験体を用いた。周期的なきずの形状は、図 3 に示す矩形に加えて、U 字形、くさび形、三角形の 4 種類として、それぞれピッチを 1.25、1.50、1.75 と 2.00 mm の 4 通り、深さを 0.10、0.15 と 0.20 mm、くさび形以

外はきずの幅を 0.25 mm で固定、くさび形はピッチと等しいきずの幅とした。なお、きずのない試験体も用意した。また、本稿では割愛するが、パルスエコー法に加えて 2 つのプローブの一方で入射、他方で反射波信号計測を行うピッチキャッチ法も実施した。

## 2. 2 シミュレーション方法

超音波の伝搬と反射の様子を確認するため、有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time-Domain method, FDTD) によりシミュレーションを行った。FDTD 法では、計算領域をメッシュに分割し、各メッシュ格子点における応力と粒子速度を時間ステップ毎に交互に計算する。図 3 に示した試験体を、きずの方向と直交する断面を 2 次元等方性弾性体としてモデル化した。物理的なパラメータとして、試験体の材料である炭素鋼のパラメータを設定した。境界条件には、固体 - 空気界面に対応した自由境界条件を適用した。

入射波は、図 4 に示すように、きずのない面の中央 5 mm 幅の領域に  $x$  方向垂直応力として与えた。波形は 4.7 MHz の正弦波に波数 2.5 のハン窓を適用し、実験で得られる信号と同様の縦波パルスを設定した。シミュレーションにおける反射波の信号は、入射波と同じ領域の  $x$  軸方向垂直応力の平均値とした。図 4 は、シミュレーションによって得られた超音波伝搬の様子を示しており、 $x$  軸方向垂直応力がカラーチャートによって示されている。

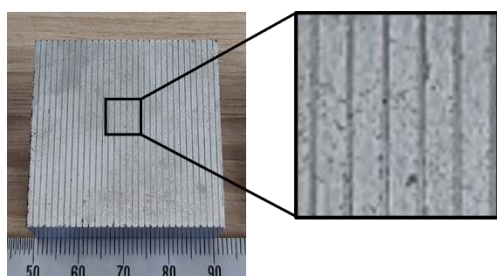


図 3 典型的な試験体

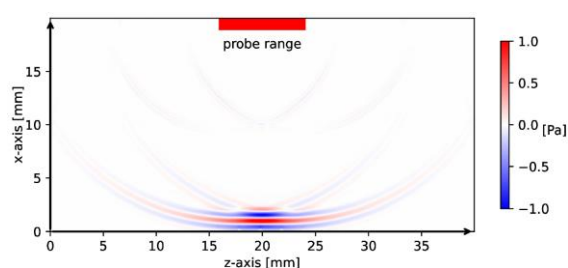


図 4 シミュレーションの様子

## 2. 3 解析方法

実験とシミュレーションで取得した反射波信号に対して、 $2.05 \times 10^{-6}$  s の幅の矩形窓関数を適用し、メイン波とテール波の信号を抽出した。そのメイン波とテール波を含む信号を高速フーリエ変換によって周波数スペクトルに変換した。反射面がきずのある場合、きずのない試験体と比較すると、部分的にスペクトルが低下する。そこで、きずの有無によってスペクトルの比をとって正規化し、受信信号の比較に用いた。

本研究では、まず実験結果とシミュレーション結果の周波数スペクトルにおいて、急激に降下する周波数が実験とシミュレーションの結果の間で一致することを確認した。その確認の上で、シミュレーションにより周期的粗面で反射する超音波の様子を確認した。

## 2. 4 きずパラメータの推定

反射波信号から算出した周波数スペクトルからきずパラメータの推定を試行した。推定には Deep Neural Network (DNN) を用いた。DNN は、入力層が 49 ユニット、ReLU 活性化関数とバッチ正則化を備えた 2 層の中間層が 128 と 64 ユニット、

出力層は矩形のきずのピッチと深さを出力する 2 ユニットからなる。入力層には、スペクトルの周波数帯を 48 等分した周波数区間のスペクトル値を対応させる。

DNN の学習データとして、製作した矩形の試験体のきずのパラメータの範囲を網羅するようピッチと深さを走査したパラメータで 225 通りの反射波をシミュレーションにより生成した。生成した反射波をデータセットとして、80%を学習データ、20%を検証データとしてランダムに分割した。これらのデータセットを用いてモデルのハイパーパラメータ調整を行い、検証データにおいて最小の誤差を示すハイパーパラメータを選択した。モデルの性能評価を行うためのテストデータには、保有する 27 個の試験体で測定された実験スペクトルを使用した。テストデータによる評価においてはモデルの初期重みをランダムに変えて学習とテストを 10 回行った。各試行において、予測値と真値の間の二乗平均平方根誤差 (RMSE) の平均を求めた。

### 3 研究成果

#### 3. 1 実験とシミュレーション結果の比較

シミュレーションの妥当性を確認するために、実験とシミュレーションのそれぞれから得られた信号波形を比較する。まず、実験とシミュレーションの平滑面と周期的な矩形のきずのある面で反射した超音波の波形を図 5 に示す。ただし、きずの条件はピッチが 2.00 mm、深さが 0.2 mm、きずの幅が 0.25 mm である。きずのある面からの反射波には反射パルス波の後ろに小さな振幅の波が続いていることが確認でき、この波がテール波である。テール波は、図 5(a)の実験結果と図 5(b)のシミュレーション結果ともに確認できる。これらの信号の周波数スペクトルを図 6 に示す。きずのある面からの反射波のスペクトルでは、5 MHz と 3.7 MHz に顕著にスペクトルの極端な低下、すなわち音響版の異常回折現象を確認できた。これらは、実験とシミュレーションともに共通する結果であった。さらに、本稿では割愛するが、きずの条件の異なる 16 種類の矩形きずをもつ試験体を用いて反射信号の解析を実施し、スペクトルが低下する周波数とその程度がシミュレーションと実験との間で差が小さいことを検証し、シミュレーションにおいて超音波の伝搬が計算できたことを確認した。

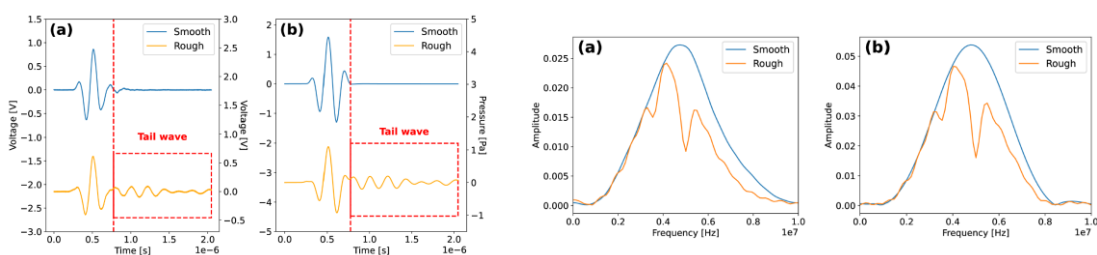


図 5 反射波信号の一例, (a)実験と (b)シミュレーション  
図 6 周波数スペクトルの一例, (a)実験と (b)シミュレーション

#### 3. 2 きずのある面での反射時の超音波の可視化

図 5 で示したピッチが 2.00 mm、深さが 0.2 mm、きずの幅が 0.25 mm の試験体をモデルとして、周期的なきずのある面での超音波反射をシミュレーションによって可視化した。時刻 3.6  $\mu$ s から 4.43  $\mu$ s までの反射の様子を図 7(a) から (h) に示す。赤い点線はプローブの中心を示しており、きずの中間点と一致させた。各グラフの左側のきずの右面の座標を z 軸の 0 とし、x 軸は各グラフの下部の反射面を 0 とし

上方向がきずの深さ方向である。同じ時刻の  $x$  と  $z$  軸方向の応力 T1 と T3 のグラフが対になり、それが(a)から(h)まで時間的な進行を示す。

図 7(b)、(c)、(d)、および(e)の T3 のグラフの下部に四角で囲った小さな応力が観察された。これらは、それぞれ 1 つ前の T1 のグラフで示された入力波の波動成分によって励起されたものである。図 7(f)から(h)では、図 7(e)で励起された正の T3 成分がきずから隣のきずへ表面波として伝搬していることが確認できる。特に、図 7(g)および(h)では、表面波からバルク波への再変換が示されている。

表面波はきずのある面上の平面ときず間の不連続点で励起され、表面に沿って伝搬する。シミュレーションにより、複数の表面波が相互作用し、定在波のように表面上の異なる位置で振幅が変化することが示された。図 7(g)より、表面波同士が互いに強め合い振幅が大きくなった際に、T3 成分から T1 成分へのモード変換、すなわち表面波からバルク波への再変換が生じることがわかる。図 7(h)では、表面波がきずの側面に到達し、側面からきずの底面へ伝搬する際に、バルク波が放射されていることが観察される。この表面波からバルク波への再変換は、表面波が周期粗面に沿って伝搬し、表面波が減衰するまで継続的に発生する。

以上のことから、テール波が、メイン波の反射時の表面波への変換と再変換を介した遅れを伴うバルク波によるものであることが明らかとなった。

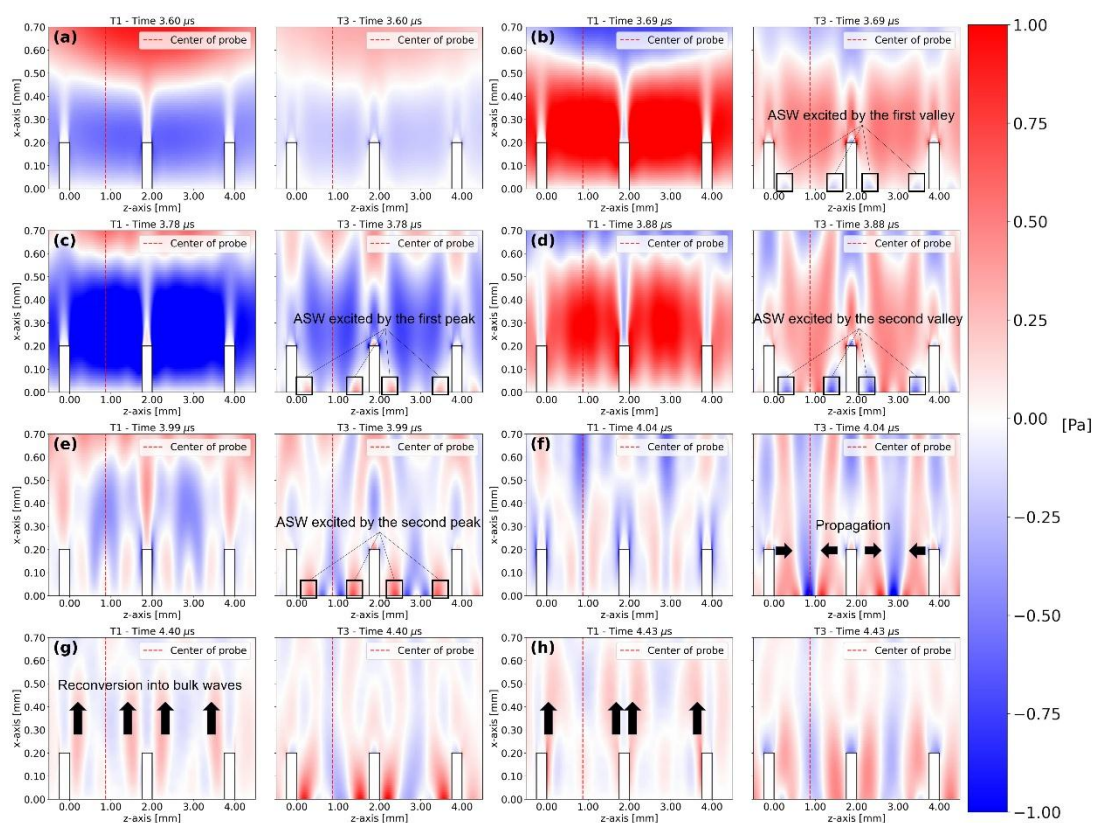


図 7 きずのある面における超音波反射のシミュレーションの様子

### 3. 3 異なる形状のきずのある面で反射した反射波信号

U字形、くさび形、三角形のきずのある面で反射した反射波信号のスペクトルを図 8 に示す。いずれのきず形状もピッチが 1.50 mm、深さが 0.15 mm である。反射波信号は、実験とシミュレーションの両方において、図 5 で示した矩形のきずと同様にテール波が確認された。反射波信号から算出された図 8 のスペクトルでは、きずの

形状毎に異なる周波数スペクトルを示している。矩形のきず以外の周期的なきずにおいても固有のスペクトルが確認され、スペクトルがきずの形状を反映することを確認できた。

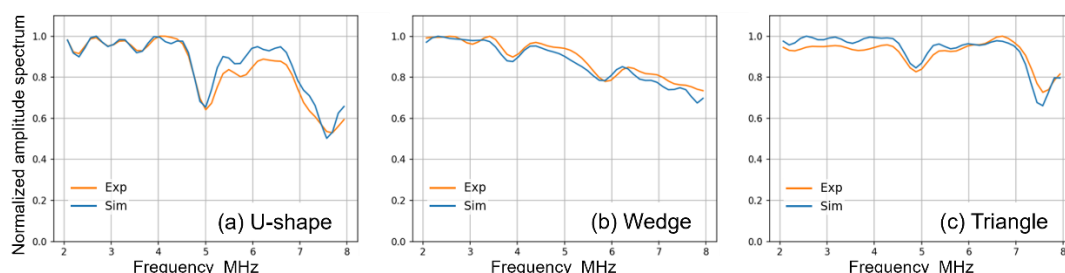


図8 U字形、くさび形、三角形のきずの面で反射した超音波のスペクトル

### 3. 4 きずパラメータの推定結果

図9にDNNによる典型的な推定結果の散布図を示す。横軸は試験体の実際の値、縦軸は予測値を表す。赤線は完全な一致を示す。両グラフとも正の相関を示すとともに、予測値は実際の値に比例して増加しており、DNNがスペクトルから周期的なきずのパラメータを予測できていることがわかる。ピッチの10回の学習と予測結果について、1.25-2.00 mmの範囲において平均RMSEは $18.7 \times 10^2$  mm(誤差率9.0-15.2%)であり、深さについては、0.02-0.28 mmの範囲において平均RMSEは $2.64 \times 10^2$  mm(誤差率10.7-150%)であった。なお、深さの誤差率が最大150%となるのは、真値が0.02 mmと小さい試験体において誤差率が大きく算出されたためである。誤差率が小さい場合が10%程度であり、これは十分な精度ではないが、比較的小規模なDNNであってもピッチと深さの推定の可能性が示唆された。シミュレーションの精度向上とデータの蓄積、DNNの構造の最適化により、推定の高精度化が期待できる。

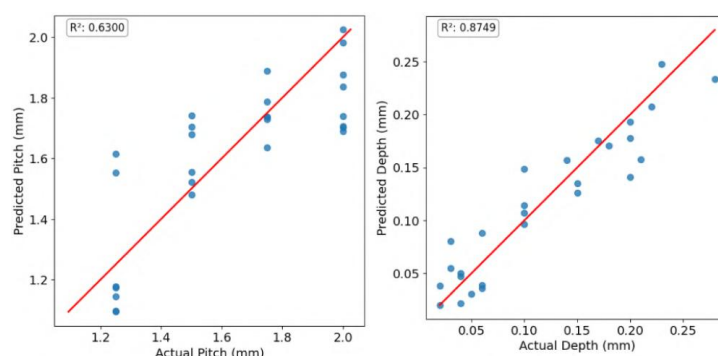


図9 きずパラメータの推定結果

## 4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究は、異常回折現象を利用した繰り返しのきずのパラメータを推定の可能性を明らかにした。プラントなどの高温高压の流体が流れる配管の健全性の検査において、超音波センサは配管の厚さ計測に多用されている。この計測では超音波を配管の外壁から入射し、内壁で反射した反射波を受信して、往復に要した時間から配管厚さを算出する。したがって、現状は反射波信号のピークしか利用されていない。ピークの時刻以外の信号に含まれる情報を用い、厚さ計測と同時に反射面のきずのパラメータも推定できれば、超音波を用いた計測技術を大きく拡張可能である。厚

さ計測用の低コストの超音波センサを利用する点も長所であり、既設の検査装置を大きく変更することなく既存の検査業界への貢献が期待できる。さらには、フェーズドアレイセンサの高精度化など他の超音波計測技術への異常回折現象利用の波及効果も望める。日本には高経年化したプラントに代表される構造物が多く存在するため、非破壊計測技術の高度化は喫緊の課題である。本研究の成果はその高度化に貢献できる。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なるご援助を賜りました公益財団法人ひょうご科学技術協会に、厚く御礼申し上げます。実験とシミュレーションにご尽力いただいた神戸大学大学院生の藤井滉太郎氏、学部生の市川詠祥氏に深く感謝いたします。