

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820004

研究課題名(和文)超音波法を用いた裏面粗さ評価手法の確立

研究課題名(英文)Back-Surface Roughness Evaluation Method using Ultrasonic Technique

研究代表者

黒川 悠(Kurokawa, Yu)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：40513461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超音波法で材料裏面の粗さを評価する手法を提案した。はじめに非周期的な裏面について、種々の非周期的な粗面を仮定して順解析で反射波の強度を計算し、裏面反射波の強度から裏面の二乗平均平方根粗さを算定する粗さ評価式を導出した。提案した粗さ評価式について数値シミュレーションと実験で粗さ評価精度を調査した結果、入射角 0° で縦波を送信し、裏面で反射した縦波の強度から粗さを評価すれば精度が最も高くなることを示した。次に周期的な裏面について、 0° と 60° の入射角で超音波を送受信し、受信波形を周波数解析して得た正規化したピーク周波数の強度から裏面の高さを求める評価式を提案し、実験で有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, back surface roughness evaluation method using ultrasonic techniques were suggested. For the non-periodic random rough back surface, the root-mean-square roughness evaluation equation was established by forward analysis using Kirchhoff approximation. The effectiveness of this roughness evaluation equation was investigated by both numerical simulation and experiment. The evaluation errors were investigated by changing incident angle. As a result, the error was smallest at the incident angle was set at 0-degree. For the periodic rough surface, it was found that the amplitude of the first peak frequency at 60-degree incident angle normalized by same frequency at 0-degree incident angle is increased monotonically if the surface height increases. The height evaluation equation was suggested using this relationship. The effectiveness of this height evaluation equation was investigated by experiment. The height of back-surface profile could be measured within 7% error.

研究分野：材料力学，非破壊検査

キーワード：非破壊検査 超音波法 粗さ評価

1. 研究開始当初の背景

材料表面の粗さは劣化の度合いやトライボロジー特性、光学的特性と深く関わる重要なパラメータである。表面粗さの測定は触針法やレーザー顕微鏡等で詳細な表面形状を測定し、それを基に粗さパラメータを算出する手法を用いるのが一般的であるが、これらの手法で測定できるのは試料表面の粗さのみで、表面の反対側、すなわち裏面の粗さを直接測定することはできない。試料の裏面粗さを測定できれば、例えば共用中の配管内面や構造部材裏面で腐食やエロージョン、スケールの付着によって劣化が生じている場合に、劣化の度合いを測定できると考えた。

試料表面の粗さを計測する手法のひとつとして、超音波を用いる手法が提案されている。水や空気等の媒質を介して試料表面に超音波を入射すると、表面の二乗平均平方根粗さが大きくなるのに伴って、反射された超音波の強度が単調減少するという性質がある。この性質を利用して、粗さの無い平滑面と粗面それぞれで反射・散乱した超音波の強度を測定すれば、強度の比から表面の二乗平均平方根粗さを評価できる。本手法は表面の詳細な形状を測定することはできないが、超音波ビームが入射された領域全体の平均的な粗さを瞬時に測定できるという特徴がある。

そこで、本手法を拡張し、試料表面から超音波を裏面に入射して、裏面で反射・散乱した超音波を測定すれば、裏面粗さを非破壊的に評価できるのではないかという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、図1に示すように、試料表面から超音波を入射し、裏面で反射・散乱した超音波の信号を基に裏面粗さを評価する手法を確立することを目的とした。裏面形状は劣化の種類によって非周期的になる場合と周期的になる場合があると考えられるため、それぞれの場合について裏面粗さを評価する手法を確立することを目的とした。

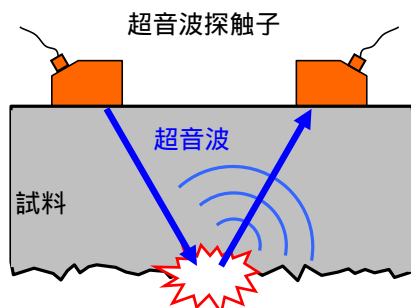


図1 提案手法の概要

固体内で超音波が反射する場合、縦波から横波へ、あるいは横波から縦波へ振動エネルギーの一部が変化する、モード変換と呼ばれる現象が生じる。粗面におけるモード変換については、粗面の形状や粗さがモード変換に

及ぼす影響は十分に調査されていない。また、光学の分野では一般に単一波長の連続波を用いるため、粗面における反射・散乱は比較的簡単に議論できるが、提案手法において試料内部に連続波様の超音波を入射すると試料内の至る所で反射・散乱した超音波が種々の経路を通過して重なって受信探触子に到達し、受信波形が非常に複雑になる。そこで提案手法では、一般の超音波探傷手法と同様にパルス状の入射波を用いるが、パルス波は中心となる周波数以外の周波数成分を多く含むため、連続波を仮定した場合と結果が異なる可能性がある。本研究では上記2点の課題を考慮しながら、評価に使用する超音波の種類(縦波、横波)、波長、裏面に対する超音波の入射角、及び裏面粗さが反射波の強度に与える影響を評価し、裏面反射波・散乱波から粗さを求める手法を検討した。

3. 研究の方法

本研究では、非周期的な裏面と周期的な裏面それぞれについて、反射・散乱した超音波の信号を基に裏面粗さを評価する手法を検討した。

3.1 非周期的な粗裏面について

はじめに、非周期的な粗面を対象に、Kirchhoff 近似を用いて、裏面形状が既知である場合に超音波の反射・散乱挙動を順解析的に計算するプログラムを構築し、種々の粗裏面について裏面形状と反射・散乱波の関係を調査し、反射波の強度や周波数から裏面粗さを算出する評価式を求めた。次に、2次元の差分法による数値シミュレーションを用いて評価式の妥当性を検証し、粗さの測定精度を評価した。最後に、非周期的な粗面を導入した試験片を製作して実験を行って、粗さの測定精度を評価した。

3.2 周期的な粗裏面について

次に、周期的な粗面を対象に2次元の差分法による数値シミュレーションを用いて裏面形状と反射・散乱波の関係を調査し、粗さの評価方法を提案した。次に実験を行って測定精度を評価した。

4. 研究成果

4.1 非周期的な粗裏面について

はじめに、非周期的な粗裏面に対して Kirchhoff 近似を用いて裏面反射波の強度を計算し、裏面粗さ、評価に用いる超音波の種類、超音波の入射角、及び裏面形状の相関長と裏面反射波の強度の関係を調査した。裏面の高さプロファイルは Gauss 分布に従うと仮定して、2次元の正規乱数を2次元の Gauss 関数で平滑化することで種々の非周期的な3次元の裏面を生成した。なお、実際に測定に使用するのはパルス波であるが、本計算では連続波を仮定して強度を計算した。種々の入射角について粗さと反射波の強度を調査した結果、固体裏面で超音波が反射する場合には、モード変換の影響で、粗さが大きくなっ

た際に反射波の強度が単調減少しない条件が存在するが、入射角を適切に設定すれば、図2に示すように粗さが大きくなった際に反射波の強度が単調減少することが明らかになった。この単調減少する条件について上記のプログラムを用いて種々の粗さの粗面について反射波の強度を計算し、裏面の粗さと反射波の強度の関係を調査した結果、横軸を二乗平均平方根粗さの二乗、縦軸を強度比の対数としてグラフを描けば直線関係になることが明らかになった。すなわち、測定する入射角の条件について予めデータを直線フィッティングして係数を求めておけば、次式を用いて強度比から裏面の二乗平均平方根粗さを求めることができる。

$$Sq = \lambda_p \sqrt{\frac{1}{C} \ln \left(\frac{A}{A_0} \right)} \quad (1)$$

ここで、 C はフィッティングで求めた傾き、 A は粗裏面で反射した超音波の強度、 A_0 は平滑な裏面で反射した超音波の強度、 λ_p は超音波の波長である。なお、裏面プロファイルの相関長が長くなると、同じ裏面粗さでも反射波の強度が大きく変動するようになるため、測定誤差が大きくなることが明らかになった。

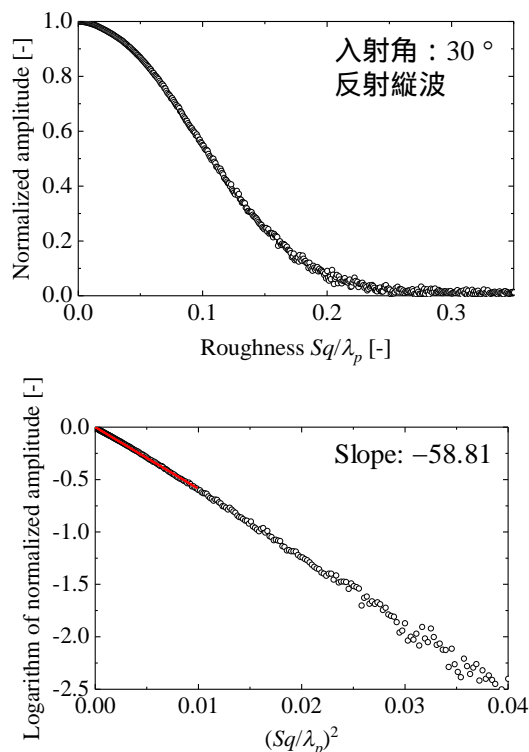


図2 裏面粗さと反射波の強度の関係の一例

次に、2次元の数値シミュレーションを行って提案した評価式の妥当性を検討した。図3にシミュレーションに用いたモデルを示す。

Kirchhoff 近似では単一周波数の連続波を仮定したが、シミュレーションでは実際に測定を行う場合と同様にパルス波を入射した。なお、実際は試料表面に配置した超音波探触子から超音波を試料に入射するが、本シミュレーションでは簡単のため、試料内部に超音波振動子を配置して検討を行った。裏面形状、入射角、及び評価に使用する波を変えて裏面粗さの測定精度を調査した。

図4に入射角15°で縦波を入射し、反射した縦波と、モード変換で生じた横波を受信して、それぞれの受信波形について peak-to-peak を強度として粗さを評価した結果を例として示す。提案手法で裏面粗さを評価できていることがわかる。連続波を仮定した Kirchhoff 理論を基にした評価式を用いても裏面粗さを評価できることが明らかになった。また、反射縦波を用いるよりもモード変換で生じた反射横波を評価に用いるほうが測定誤差が小さくなることが明らかになった。同じ周波数では、縦波と比較して横波の波長が短いため、図2に示した傾きが急になる。これは粗さの変化に対して強度の変化が大きくなることを示しており、そのため測定の感度が高くなるためだと考えられる。なお、入射角が大きくなると、粗さの測定誤差が大きくなることが明らかになった。入射角が大きくなると超音波ビームが直接照射されない影となる領域が多くなり、また、裏面で反射した波が再度裏面で反射する多重反射が生じるようになるが、Kirchhoff 理論を用いて反射波の強度を計算する際にはこれらの現象を考慮していないため、入射角が大きくなると誤差が大きくなったと考えられる。

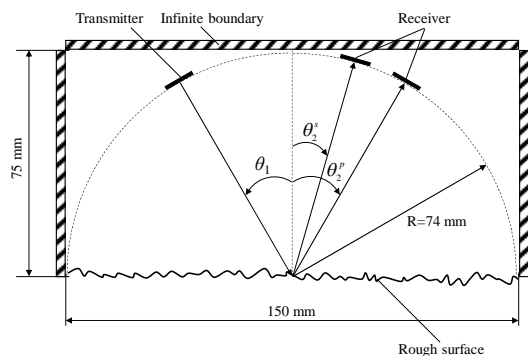


図3 非周期的粗面を対象とした数値シミュレーションモデル

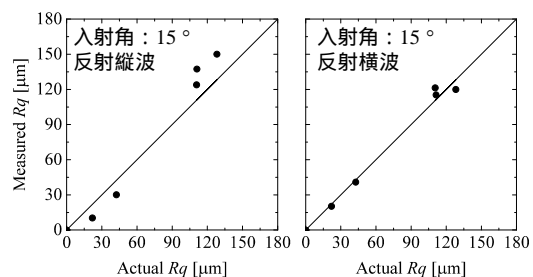


図4 数値シミュレーションで得た受信波形の強度を基に裏面粗さを評価した結果の例

最後に実験を行って提案手法の妥当性を評価した。裏面にディスクグラインダーで3次元の非周期的な粗さを付与した A5052 製の試験片を用いて実験を行い、提案手法の有効性を評価した。図5に入射角を変えて粗さを評価した結果を示す。P0 は入射角 0° で縦波を入射し、反射した縦波を用いて粗さを評価した結果を、S15 は入射角 15° で縦波を入射し、モード変換によって生じた横波を用いて粗さを評価した結果を示す。図中の×印は粗面からの反射波の強度が平滑面からの反射波の強度を上回り、式(1)で粗さを評価できなかったことを示す。図から、縦波反射波を用いて粗さを評価する場合、入射角が小さいほうが測定精度が高くなる。また、数値シミュレーションではモード変換によって生じた横波を用いて粗さを評価すれば測定精度が高くなるという結果が得られたが、横波垂直探触子は専用の接触媒質を塗布して使用する必要があり、接触状態が少しでも変化すると受信される波の強度が大きく変化するという特性があるため、実験の際の測定誤差が非常に大きくなった。そのため、実際に測定する際には裏面で反射した縦波を用いて粗さを評価するほうが測定精度が高くなる。図5

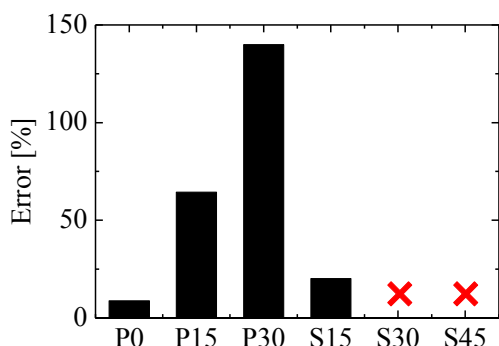


図5 入射角と粗さ評価結果の関係

4.2 周期的な粗面について

次に、粗面が周期的な形状の場合について検討を行った。図6に示すモデルを用いて2次元の数値シミュレーションを行い、裏面粗さと反射・散乱波の強度を調査した。裏面で散乱された超音波をパルスエコー法で受信した波形を周波数解析した結果を図7に示す。図から、裏面の周期 d が変化すると、受信波形に含まれる周波数成分のピーク値が変化するため、この周波数成分のピーク値から周期 d を算出できることが明らかになった。また、周期 d の測定精度は入射角が大きいほど高いことが明らかになった。次に、同じく2次元シミュレーションを用いて、裏面高さを求める手法について検討した。本研究では直角二等辺三角形が連続する周期的な粗裏面を想定した。はじめに、裏面に対して斜めに超音波を入射し、散乱して探触子に戻ってきた波を受信し、周波数解析して最も低いピーク周波数の強度 A を求める。次に、入射角を 0° に設定し、裏面で反射して探触子に戻ってきた波を受信し、周波数解析して、斜めに入射した際の最も低いピーク周波数における強度 A_0 を求め、この値で A を除して正規化する。種々の入射角についてこの正規化した強度（以下、正規化第一ピーク強度と呼ぶ）を求めた結果、図8に示すように、入射角を 60° に設定すれば、裏面高さ h が大きくなると第一ピーク強度は $h/d < 0.6$ の範囲で単調増加することが明らかになった。 d は斜め入射で得られた受信信号の周波数解析結果のピーク周波数の値から算出できるため、正規化第一ピーク強度を測定すれば、図8の関係から裏面の高さ h を算出することができる。

ク周波数の強度 A を求める。次に、入射角を 0° に設定し、裏面で反射して探触子に戻ってきた波を受信し、周波数解析して、斜めに入射した際の最も低いピーク周波数における強度 A_0 を求め、この値で A を除して正規化する。種々の入射角についてこの正規化した強度（以下、正規化第一ピーク強度と呼ぶ）を求めた結果、図8に示すように、入射角を 60° に設定すれば、裏面高さ h が大きくなると第一ピーク強度は $h/d < 0.6$ の範囲で単調増加することが明らかになった。 d は斜め入射で得られた受信信号の周波数解析結果のピーク周波数の値から算出できるため、正規化第一ピーク強度を測定すれば、図8の関係から裏面の高さ h を算出することができる。

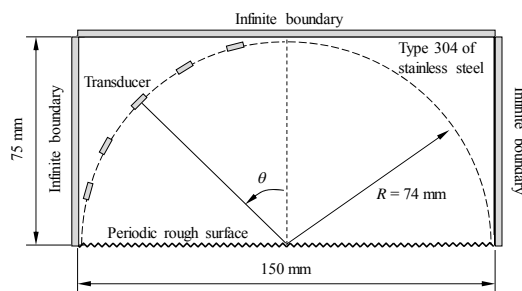


図6 周期的粗面を対象とした数値シミュレーションモデル

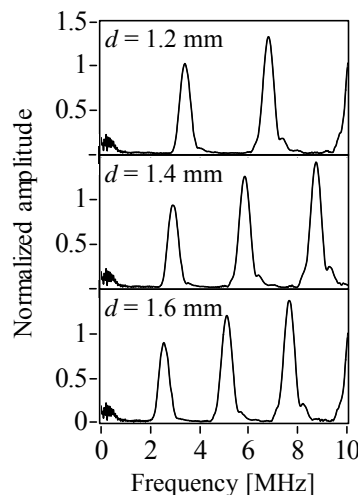


図7 受信波形の周波数解析結果の一例

種々の材料を想定して h/d と正規化第一ピーク強度の関係进行调查した結果を図9に示す。材料が変化すると正規化第一ピーク強度は変化するが、 h/d が大きくなると第一ピーク強度が単調増加する傾向に変化は無い。この結果について、材料のポアソン比 ν を用いてフィッティングした結果、式(2)と式(3)を得た。材料のポアソン比は材料の縦波速度と横波速度の関数で、これらの速度は超音波法で容易に測定できるため、材料の縦波速度、横波速度及び正規化第一ピーク強度を測定すれば、材料裏面の高さを求めることができる。種々の周期的な粗さを持つ試験片を製作

し、実験を行って提案手法の有効性を調査した。試験片の概観を図 10 に示す。A の試験片は S45C, B の試験片は A5052 でそれぞれ複数個製作し, 0~1 mm までの高さの直角二等辺三角形の周期的な粗さを機械加工によって付与した。提案手法で裏面高さを評価した結果, 7%以内の誤差で裏面高さを測定できた。

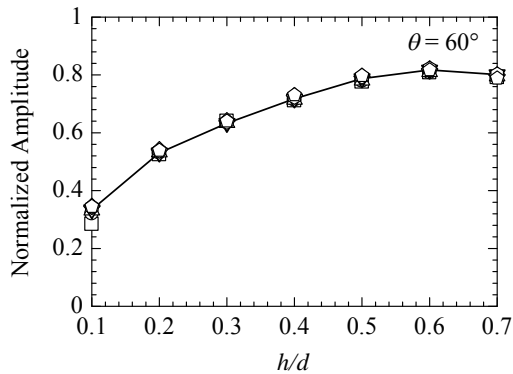


図 8 入射角 60°と入射角 0°での受信波形を周波数解析して得た正規化第一ピーク強度

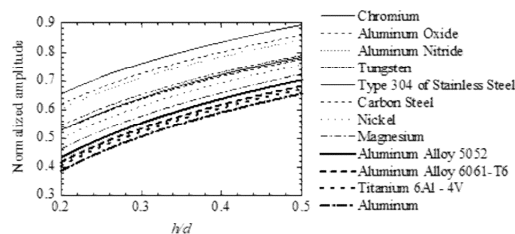


図 9 種々の材料についての裏面プロファイル高さ h と裏面プロファイル周期 d の比と正規化第一ピーク強度の関係

$$h = \frac{2\pi}{\sqrt{3k_1}} \exp\left(\frac{A_1 + 1.7582\nu - 0.4926}{1.0693}\right)^{\frac{1}{0.4322}} \quad (2)$$

$$A_1 = 1.0643 \left(\frac{h}{d}\right)^{0.4322} - 1.7582\nu + 0.4926 \quad (3)$$

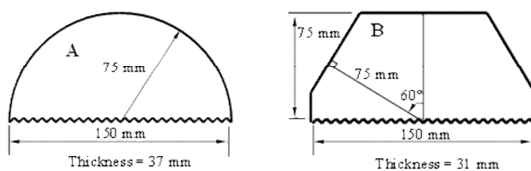


図 10 周期的粗面の高さ測定に使用した試験片の概観

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 2 件)

Chanh Nghia NGUYEN, Yu KUROKAWA, Hirotsugu INOUE, Evaluation of the

height of internal periodic triangular surfaces by ultrasonic backscatter, Mechanical Engineering Journal, 査読有り, Vol.5, 2018, 1-19
 Chanh Nghia NGUYEN, Masaki SUGINO, Yu KUROKAWA, Hirotsugu INOUE, Ultrasonic evaluation of the pitch of periodically rough surfaces from back side, Mechanical Engineering Journal, 査読有り, Vol.4, 2017, 1-17

[学会発表](計 8 件)

Yu KUROKAWA, Naoki KUWAMURA, Hirotsugu INOUE, Back-surface roughness evaluation using longitudinal ultrasonic pulse, Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures 2017, 2017

桑村尚樹, 黒川悠, 井上裕嗣, 超音波を用いた材料裏面の粗さ評価に及ぼす入射角と周波数の影響, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 2017
 桑村尚樹, 黒川悠, 井上裕嗣, 超音波による非周期的裏面の 3 次元粗さ評価に関する基礎的検討, 第 24 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2017

Yu KUROKAWA, Naoki KUWAMURA, Hirotsugu INOUE, Roughness Evaluation of Non-Periodic Back Surface using Ultrasonic, 2016 M&M International Symposium for Young Researchers, 2016
 Chanh Nghia NGUYEN, Masaki SUGINO, Yu KUROKAWA, Hirotsugu INOUE, Evaluation of Back Surface Roughness using Ultrasonic Scattering, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, 2015

Yu KUROKAWA, Masaki SUGINO, Hirotsugu INOUE, 2-Dimensional Back-Surface Roughness Evaluation by Ultrasonic Method, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, 2015

杉野将規, 黒川悠, 井上裕嗣, 超音波を用いた裏面粗さ評価におけるモード変換の影響, 第 22 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2015

Yu KUROKAWA, Hirotsugu INOUE, Masaki SUGINO, Fundamental Study on Ultrasonic Evaluation of Back Surface Roughness, The Fifth US-Japan NDT Symposium, 2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒川 悠 (KUROKAWA, Yu)

東京工業大学・工学院機械系・助教

研究者番号: 40513461