

レーザ接合のインプロセスモニタリングのための 非接触ガイド波干渉法の研究

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

講師 森 直樹

(2022 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2022241-C2)

キーワード：ガイド波，薄板継手，スペクトル解析

1. 研究の目的と背景

自動車など種々の構造に対するマルチマテリアル化が推進される中、部材をつなぐ接合技術の高度化は重要な課題である。レーザ溶接は、高精度かつ高速な加工ができると同時に、自動化可能な技術として製造現場で広く使用されており、近年では、アルミニウム合金や鋼など異種材料のレーザ接合についても研究が積極的に進められている。一方、溶接部に生じたブローホール（ボイド）やき裂が強度低下を招く可能性があり、健全性を確保するためには非破壊的な検査が不可欠である。

溶接部のポストプロセスでの検査には、継手内部の評価が可能な超音波法が広く用いられてきた。超音波による代表的な溶接部の検査方法として、斜角探触子を用いた横波によるパルスエコー法や 2 探触子によるピッチキャッチ測定を行う TOFD(Time of flight diffraction)法、多数の超音波素子から構成される探触子を用いて超音波ビームをステアリングさせるフェーズドアレイ法¹⁾が挙げられる。しかし、これらの手法では、溶接後に超音波探触子を接合部近傍に接触させる必要があり、製造プロセスの非効率化を招く可能性がある。

接合後に行うポストプロセス検査に対し、接合中にその場で可否を判断するインプロセス検査は製造コスト削減と健全性向上を実現するとして注目を集めている。溶接中に健全性評価を実施する場合、接合部に超音波探触子を接触させることは困難であるため、離れた位置から構造に沿って伝わるガイド波を入射させる方法²⁾⁻⁴⁾が考えられる。エコー測定により超音波の波長程度の寸法を有する欠陥の検出には有効であるが、被接合材の密着状態や接合界面の異常を評価することは困難である。

一方、これまで研究代表者はガイド波によるシングルラップ接着継手の特性評価法の研究^{5),6)}に取り組み、接合部で生じた波の干渉現象に着目した接着剛性評価法を提案してきた。本手法の評価原理が溶接継手に対しても適用可能な可能性が考えられたが、未検討の状態であった。そこで本研究では、薄板のレーザ溶接に対するインプロセスモニタリングの実現に向けた基礎的な検討として、重ね接合部に対する特性評価法の提案と妥当性検討を目的とした。

2. 実験方法

2・1 試験片

本研究では、モデル構造として薄板の重ね接合継手を研究対象とした。インプロセスでのその場計測の前段階として、図 1 のような接合後のレーザ溶接継手を超音波計測用に準備した。本試験片は、幅 300 mm、長さ 200 mm、厚さ 2 mm のステンレス鋼(SUS304)板を基板とし、その表面に同じ材質で幅 30 mm、長さ 200 mm、厚さ 2 mm の補強板をレーザ溶接したものである。溶接ビードは補強板の長手方向に横断しており、その幅はおよそ 1.5 mm である。溶け込み深さが 4.0 mm と約 3.0 mm の試験片を作製し、それぞれの試験片を貫通溶接継手、半貫通溶接継手と呼ぶこととする。

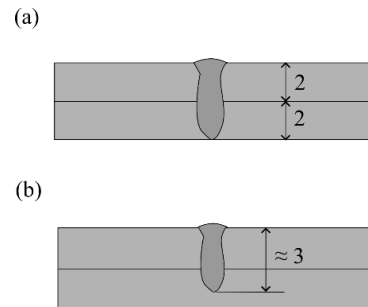


図 1 実験で用いた薄板溶接継手の模式図：(a) 貫通溶接継手，(b) 半貫通溶接継手。

溶接継手の場合、補強板上に存在するビードの影響で伝搬するガイド波が散乱し減衰してしまう可能性がある。このため、継手の表面性状に与える影響が比較的低いと考えられる接着継手も計測法の妥当性検証用に用意した。本接着試験片の概略図を図 2 に示す。基板と補強板の寸法は溶接継手と同じであるが、材質はアルミニウム合金(A5052)とした。接着剤として、二液混合型エポキシ系接着剤を使用した。ポリエステル系テープを貼ることで、接着層厚の大まかな制御を行った。補強板表面の全体を基板に接着した全面接着試験片（接着層厚 約 0.01 mm）と、溶接ビードを模して補強板中央に幅 5 mm の範囲で接着した部分接着試験片（接着層厚 約 0.08 mm）の 2 種類を準備した。

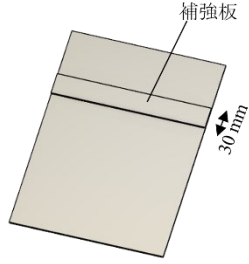


図2 予備実験で用いた薄板接着継手

2・2 測定系と測定方法

実験で用いた測定系の概略図を図3に示す。パルサ・レシーバ（JPR-108，ジャパンプローブ社製）で周波数 0.34 MHz，サイクル数 5 の正弦波電圧信号を発生させ，公称周波数 0.4 MHz の空気結合探触子（0.2K14×20N，ジャパンプローブ社製）に印加した。これにより，超音波を空气中に発生させた。

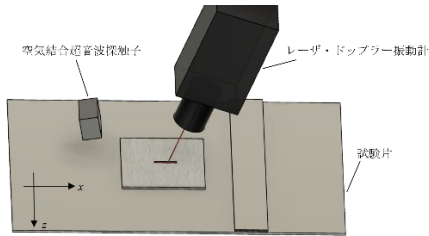


図3 超音波測定系の概略図

重ね接合部から約 50 mm 離れた位置で基板表面に超音波を照射し，基板中に曲げ波型のラム波 0 次反対称(A0)モードを発生させた。この際，試験片の幅方向に x 軸，板厚方向に y 軸，長さ方向に z 軸をとり，入射波は x 軸方向に伝搬するように探触子の向きを調整した。1 次反対称(A1)モードのカットオフ周波数よりも低い周波数域を使用しているため，基板中を伝搬するガイド波モードはラム波 A0 モード，0 次対称(S0)モード，SH 波 0 次対称(SH0)モードの 3 種類である。本測定では A0 モードを支配的に励起するため，基板表面に対する超音波の入射角度 θ_i をスネルの法則

$$\theta_i = \sin^{-1} \frac{c_0}{c_A} \quad (1)$$

を基に決定した。ただし， c_0 は空気中の音速， c_A は A0 モードの位相速度である。

ガイド波の受信には，レーザードップラー振動計 (LV-1710，小野測器) を用いた。ステッピングモータで電氣的に制御可能な 3 軸ステージで本振動計を走査することにより，基板表面での多点測定が可能となる。本測定では，四辺が x 軸と z 軸にそれぞれ平行な長方形領域 M を基板表面に設定した。長方形領域 M の x 軸方向および z 軸方向長さは

それぞれ 20 mm，5 mm であり，レーザードップラー振動計の走査間隔 Δx ， Δz は測定対象の A0 モードの波長を参考に $\Delta x = \Delta z = 0.5$ mm と設定した。なお，振動計の受光感度を向上させるため，測定箇所には再帰反射テープを貼り付けた。

レーザードップラー振動計で得られた受信信号に対しパルサ・レシーバで増幅処理を施し，100 回の同期加算平均処理の後デジタル信号として PC に保存した。PC 内ではバンドパスフィルタを適用した。以上の測定と装置の制御を LabVIEW により行った。

今回の測定では，測定された入射波と反射波成分に対してそれぞれ高速フーリエ変換(FFT)を適用し，算出された振幅スペクトル $I(f)$ と $A(f)$ を用いて反射スペクトル

$$R(f) = \frac{A(f)}{I(f)} \quad (2)$$

を周波数の関数として算出した。なお，FFT を行う際には，適当な滑らかな窓関数を時間波形に適用することで必要な波形を抽出した。信号処理には MATLAB を使用した。用いた空気結合探触子の帯域を考慮して，スペクトル解析の周波数範囲は 0.32–0.36 MHz とした。

3. 数値解析

3・1 接合継手のモデル化

測定したガイド波のスペクトルから接合部の特性評価を行うためには，評価対象に対応する理論モデルを設定する必要がある。本研究では平面ひずみ状態を仮定し，図4のように板厚 d の半無限等方弾性平板（基板）に板厚 d ，幅 L の等方弾性平板（補強板）が接合されたモデルを考える。レーザー溶接継手を想定し，重ね接合部中央において幅 w の範囲で基板と補強板が接合されているとする。重ね部の左端を $x = 0$ とし，重ね部の左端から接合部の左端までの距離を w_L とし，接合面 $w_L < x < w_L + w$ では垂直剛性を K_N ，接線剛性を K_T とするばね界面⁷⁾

$$\sigma = K_N[v], \quad \tau = K_T[u] \quad (3)$$

により基板と補強板が接続されているとモデル化した。ここで， σ と τ はそれぞれ界面の垂直・接線方向応力であり， $[v]$ と $[u]$ はそれぞれ基板/補強板間の x 方向と z 方向の変位不連続を表す。なお，今回は接合面が補強板の中央に位置していると想定し， $w_L = L/2 - w/2$ とした。

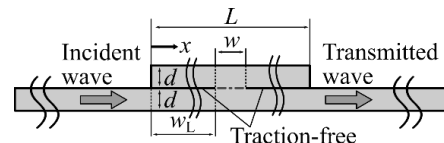


図4 薄板重ね継手の理論モデル

上のモデルにおいて，単一周波数 f のラム波 A0 モード

を重ね部に入射する場合について周波数領域解析を行った。ラム波の伝搬挙動はナビエの式に従うとし、補強板の左端から 50 mm 離れた位置で基板両面に面外方向の表面力を与え、A0 モードのみを励起した。透過波を求める場合には補強板右側の領域で板表面の面外方向変位を計算した。一方、補強板の左側の領域では入射波と反射波が重畳しているため、反射スペクトルを求めるためには入射波の影響を分離する必要がある。本解析では、板表面で取得した変位分布に空間 (x) 方向の FFT を適用することで、入射波と反射波の振幅を別々に求め、それらの比を取ることで式(2)に相当する反射スペクトルを計算した。本解析を周波数 0.2–0.4 MHz の範囲で実施した。

3・2 解析手法

前節の解析モデルに対して汎用のソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いた有限要素解析を実施した。基板の端部における反射を抑制するため、基板の両端に吸収領域を設定した。要素分割には、1 辺の長さが $d/8$ の 2 次ラグランジュ正方形要素を使用した。

4. 研究結果と考察

4・1 数値解析結果⁸⁾

ここでは、板厚 $d = 2$ mm のアルミニウム合金板を想定し、補強板の幅を $L = 30$ mm、接合幅を $w = 5$ mm とした場合の数値解析結果を示す。補強板右側 $x > L$ の基板において板両面の面外方向変位を取得することにより、透過した A0 モードの変位振幅を算出した。得られた結果と、基板単体に対して計算された A0 モード変位振幅の比を取ることで、継手に対する A0 モード透過係数 $|T|$ を算出した。

接合部の剛性 $K_T d/\mu$ を変化させた場合に得られる A0 モード透過係数 $|T|$ の周波数依存性を図 5 に示す。なお、剛性比は $K_N/K_T = 2.5$ に固定している。この図から、透過係数 $|T|$ は周波数に依存し、複数の極値を示すことがわかる。また、この周波数依存性は接合部の剛性に影響を受ける。例えば $K_T d/\mu = 80$ の場合、周波数 0.243 MHz に特徴的な極小が現れ、この極小周波数は接合部剛性の低下に伴って減少傾向を示すことがわかる。この原因として、接合部を伝搬するガイド波の波長が低下した点が考えられる。

接合部の剛性が $K_T d/\mu = 80$ の場合について、周波数 0.243 MHz における接合部近傍での波動場の様子を図 6 に示す。ただし、周波数領域で表した面外変位 $v = V \exp(i2\pi ft)$ の実部 $\text{Re}(V)$ を代表して描画している。ここで、 i は虚数単位、 t は時刻である。接合部左側の領域 $x < w_L$ では基板だけでなく補強板も振動している一方、接合部より右側の領域 $x > w_L$ では変位が見られないことがわかる。この周波数では補強板内で多重反射した成分が基板に漏洩し、干渉が生じることでこのような特徴的な波動場が現れたと考えられる。この現象は接合部を伝わるガイド波の伝搬特性に影響を受けると推測され、図 5 で示した透過係数の特徴的な極値挙動が接合部の剛性に依存するという結果に対応

していると考えられる。

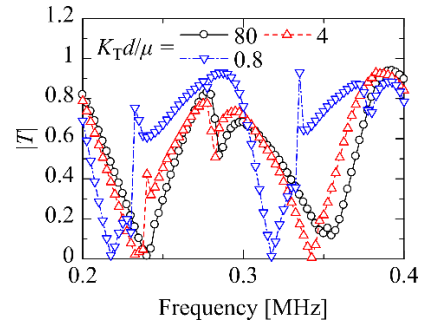


図 5 A0 モード透過係数の周波数依存性に関する数値解析結果

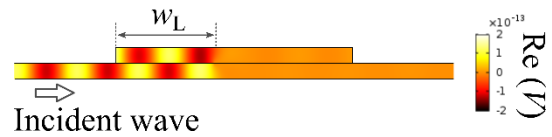


図 6 周波数 0.243 MHz における面外変位場 $\text{Re}(V)$ の様子 ($K_T d/\mu = 80$)

4・2 実験結果

前節の数値計算では、解析を簡単とするため接合部を透過した A0 モードに注目した結果を示した。しかし、実際の特性評価では接合部両側へのアクセスが確保できるとは限らない。このため、本実験では接合部からの反射波が示す周波数依存性に着目した。

まず、全面接着継手と部分接着継手に対する反射スペクトルの測定結果を図 7(a), (b) にそれぞれ示す⁹⁾。得られた反射スペクトルは、それぞれ異なる周波数で極小を取った。この極小周波数に着目し、さまざまな接合部剛性 K_T に対する有限要素解析結果との比較を行った。図 7(a), (b) では、それぞれ 2 通りの K_T に対する反射スペクトルの解析結果を示している。なお、低周波数域における A0 モード反射スペクトルの極小周波数に垂直剛性 K_N が及ぼす影響は小さいことを示した先行研究を基に、ここでは剛性比を $K_N/K_T = 2.5$ に固定している。これらの結果から、全面接着継手では $K_T = 109$ GPa/mm、部分接着継手では $K_T = 6.78$ GPa/mm のときにそれぞれスペクトルの極小周波数が良好に一致することがわかった。全面接着継手の接着層厚は、部分接着継手の約 1/8 であり、接線剛性の大小関係と定性的に対応していることがわかる。

しかしながら、極小周波数近傍における反射スペクトルの挙動に着目すると、数値解析結果よりも実験結果の方が緩やかに変化する傾向にあり、この差異は部分接着継手の方が顕著であった。この原因として、数値解析では単一周波数の調和波を入射した場合の周波数領域解析を実施しているのに対し、実験では有限長さの時間波形を測定しスペクトル解析を行っているという違いが挙げられる。数値計算では定常状態を解析していることになるため、接合部

からの多重反射波を全て考慮することができる一方、実験で取得できる時間波形は有限である。今後、数値計算でも時間領域の解析を実施することによって、実験データと数値計算結果の間の差異が小さくなると予想される。

次に、貫通溶接継手と半貫通溶接継手に対する反射スペクトルの測定結果をそれぞれ図 8(a), (b)に示す。いずれの結果においても反射スペクトルの周波数依存性が見られ、極小はそれぞれ 2 個確認された。しかし、本検討では実験データを良好に再現できる数値解析結果を得ることができなかった。この要因として、接着継手の結果に対する考察で述べた周波数領域解析の影響に加え、実験データからスペクトルを算出する際の解析方法にも課題が残されていると考えている。現在のデータ解析では、基板上のある位置で得られた時間波形から窓関数を乗じることで入射波と反射波を分離し、FFT を適用している。しかし、使用している空気結合超音波探触子の周波数帯域が狭い影響で、波形の時間長さが増大する傾向にある。このため、入射波と接合部からの反射波を適切に分離できていない可能性がある。この問題に対する解決策として、時間方向だけでなく空間方向へも FFT を適用し、周波数-波数スペクトルから反射スペクトルを算出する信号処理が想定される。本処理によって波数の成分に応じて振幅を抽出することが可能となり、数値解析で仮定しているモデルにより近い状態で測定を行うことができるようになると考えている。

5. 結言

レーザ接合のインプロセスモニタリングの実現に向けて、本研究課題では非接触ガイド波干渉法の提案と基礎的な検討を行った。空気結合超音波探触子とレーザドップラー振動計を用いた超音波測定系を構築し、接着または溶接した薄板重ね継手に対して実験的検討を実施した。また、継手に対応する有限要素解析モデルを作成し、継手におけるガイド波の反射・透過特性について数値計算を行った。数値計算結果から、接合部からの透過スペクトルは多重反射成分の干渉により極値が発生し、その挙動は接合部の剛性に依存することが明らかとなった。接着継手に対する実験では試験片によって異なる反射スペクトルが測定され、それらの結果に基づき接合部の剛性を变化させた解析を行ったところ、推定された接合部剛性の大小関係は接着層厚のものと定性的に一致する結果となった。一方、溶接継手に対する測定では反射スペクトルの取得は可能であったものの、適当な接合部剛性を見出すことができなかった。今後の課題として、実験における反射スペクトルの算出方法の改善と、それによる数値計算結果の後処理方法の修正が挙げられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、ご支援いただきました公益財団法人天田財団に厚く御礼申し上げます。

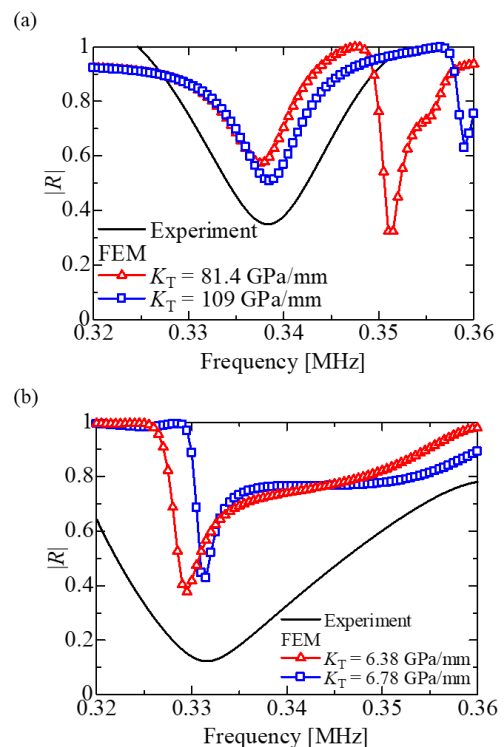


図 7 反射スペクトルの測定結果と対応する数値解析結果：(a) 全面接着継手，(b) 部分接着継手。

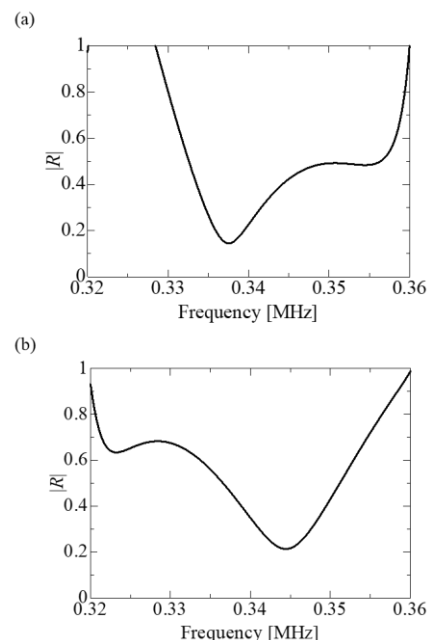


図 8 反射スペクトルの測定結果：(a) 貫通溶接継手，(b) 半貫通溶接継手。

参考文献

- 1) Ye, J., Kim, H.-J., Song, S.-J., Kang, S.-S., Kim, K., and Song, M.-H., "Model-based simulation of focused beam fields produced by a phased array ultrasonic transducer in dissimilar metal welds," NDT&E International, **44**, 290–296 (2011).

- 2) Arone, M., Cerniglia, D., and Nigrelli, V. "Defect characterization in Al welded joints by non-contact Lamb wave technique," *Journal of Materials Processing Technology*, **176**, 95–101 (2006).
- 3) Yu, X., Zuo, P., Xiao, J., and Fan, Z., "Detection of damage in welded joints using high order feature guided ultrasonic waves," *Mechanical Systems and Signal Processing*, **126**, 176–192 (2019).
- 4) Vasilev, M., MacLeod, C., Galbraith, W., Javadi, Y., Foster, E., Dobie, G., Pierce, G., and Gachaganasilev, A., "Non-contact in-process ultrasonic screening of thin fusion welded joints." *Journal of Manufacturing Processes*, **64**, 445–454 (2021).
- 5) Mori, N. and Kusaka, T., "Reflection and transmission characteristics of Lamb waves at an adhesive lap joint of plates," *Journal of the Acoustical Society of America*, **145**, 3075–3085 (2019).
- 6) Mori, N., Wakabayashi, D., and Hayashi, T., "Tangential bond stiffness evaluation of adhesive lap joints by spectral interference of the low-frequency A0 Lamb wave," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **113**, 103071 (2022).
- 7) Mori, N., Matsuda, N., and Kusaka, T., "Effect of interfacial adhesion on the ultrasonic interaction with adhesive joints: A theoretical study using spring-type interfaces," *Journal of the Acoustical Society of America*, **145**, 3541–3550 (2019).
- 8) 森 直樹, 林 高弘, 若林大智, 日下貴之, 「薄板を伝わるガイド波の干渉特性を利用した重ね接合継手の剛性評価法」, 日本機械学会 関西支部第 98 期定時総会講演会講演論文集, 30101 (2023).
- 9) 岩本直大, 森 直樹, 林 高弘, 「ガイド波のスペクトルに着目した薄板重ね接合部の特性評価」, 日本機械学会 関西学生会 2023 年度学生員卒業研究発表講演会講演概要集, 02AM2-4 (2024).