

継手条件の違いによるレーザー溶接の溶接変形と残留応力の基礎評価

櫻庭 洋平, 安田 星季

Basic Evaluation of Deformation and Residual Stress of Laser Welding by the Difference in Joint Conditions

Yohei SAKURABA, Seiki YASUDA

キーワード：レーザー溶接，溶接変形，溶接継手，非接触三次元測定

1. はじめに

機械部品の生産現場では、価格競争力を維持向上させるため、溶接工程を含むすべての工程で効率化が求められており、そのひとつとしてレーザー溶接の有効活用が期待されている。

レーザー溶接は、アーク溶接など他の溶接法と比べ溶接速度が速いため、溶接作業そのものの時間を短縮することができる。また、他の溶接法より溶融部の体積が小さいため、熱ひずみが小さいことによる矯正作業の削減や、他の溶接法では難しい薄板軽量部品の製作が可能となる。

これらの特徴から、レーザー溶接の導入と活用に多くの道内企業が関心を示しているが、レーザー溶接の装置は他の溶接法と比較して高額なため、導入にあたっては現在の溶接法と溶接品質や加工時間の点で比較したうえで、優位性のある箇所を的確に把握することが重要となる。

そこで本研究では、溶接品質に係る多くの評価項目のうち、溶接前後の溶接変形と応力状態を対象に、板厚や溶接継手の違いによる大きさや発生箇所の変化を測定し、板厚や溶接継手の違いによる影響や傾向を比較した。

2. レーザ溶接の理論

2.1 レーザ溶接の溶接現象¹⁾

図1に、半自動溶接や被覆アーク溶接（以下、アーク溶接など）とレーザー溶接の溶融状態を示す。アーク溶接などは、左図のとおり溶接部に加わる熱エネルギーの密度が低く入熱の範囲も広いため、表面から徐々に深さ方向に熱が伝わり、幅広く浅い熱伝導型の溶接ビード（以下、ビード）となる。

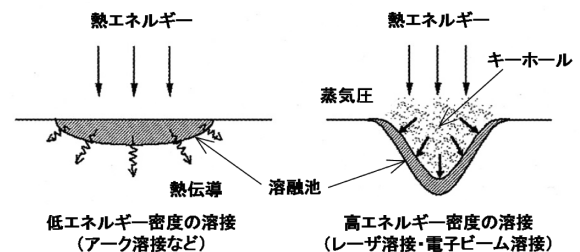


図1 溶接状態の比較

これに対し、レーザー溶接の熱エネルギー密度は $1.0\text{kW}/\text{mm}^2$ 以上で、アーク溶接などの数100~1,000倍高いため、図1右図のとおり溶接部が瞬間的に蒸発し、キーホールと呼ばれる空隙を形成する。これによりレーザーが溶融池の底部まで到達するようになり、溶融が深さ方向に進むことから、溶込み幅の小さいキーホール型（深溶込み型）のビードとなる。また、溶込み深さが同じ場合には、溶融池の体積が熱伝導型ビードよりも小さくなり、溶込みに必要な入熱量も少なくなる。

2.2 溶接変形と残留応力の発生機構²⁾

溶接変形が発生する原因について、図2に溶接変形の原因である残留応力の発生機構と、その時の応力状態を示す。

図2のとおり、溶接部Wと周辺部Bは一体構造であるため、モデル上は両端が剛体板で固定されたものと見なすことができる。材料の加熱時に長さλだけ一様膨張するが、溶接部と周辺部には温度差があるため、溶接部に圧縮応力が、周辺部に引張応力がそれぞれ生じる。圧縮応力が材料の降伏応力を超えた場合、溶接部に塑性変形（残留塑性ひずみ）が生じ、冷却された後に残留応力が生じる。力のつりあいにより、残留応力を打ち消す応力が材料全体に生じ、これにより生じた変形が溶接変形と呼ばれる。

事業名：経常研究

課題名：ファイバーレーザー溶接における溶接部の変形・残留応力に関する研究

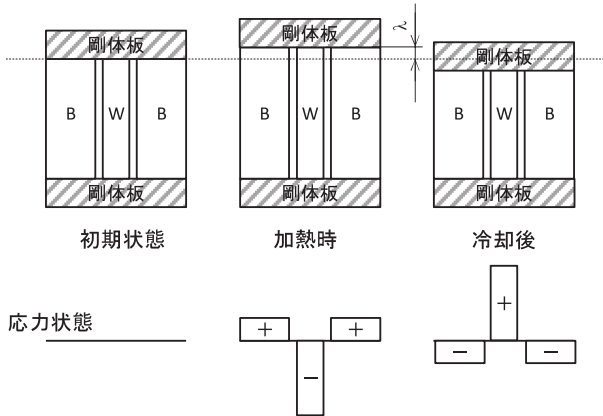


図2 溶接時の残留応力発生機構と応力状態

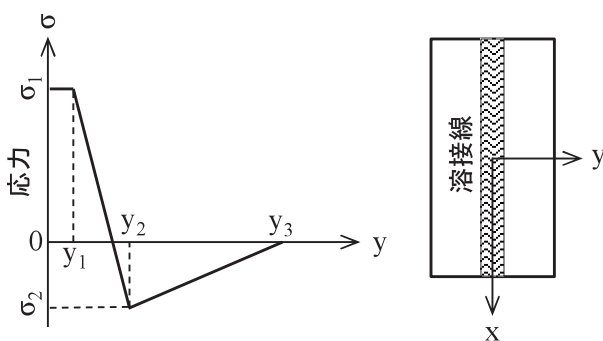


図3 突合せ溶接の溶接線距離と残留応力分布の関係

図3のとおり、溶接線の中心から距離 y_1 までの領域は残留塑性ひずみが生じている部分であるため、残留応力 σ_1 は材料の降伏応力 σ_y 以上となる。

距離 y_1 を過ぎると、力のつり合いにより距離 y_1 までの引張応力を打ち消す力が働いてくる。距離 y_2 で圧縮応力が最大となり、引張応力を打ち消した位置が距離 y_3 となる。

最大圧縮応力 σ_2 の大きさは、材料によって異なるが降伏応力の25~30%程度であるため、距離 y_1 より離れた領域の変形は弾性変形となる。また、距離 y_n (mm) ($n=1, 2, 3$) の大きさは次式(1)で与えられ、長さ1mmあたりの入熱量 Q (J/mm) に比例し、板厚 h (mm) に反比例する。オーステナイト系ステンレス鋼の場合、 y_n (mm) はそれぞれ $y_1=0.24Q/h$, $y_2=0.53Q/h$, $y_3=3.6Q/h$, となる。

$$y_n = m_n \alpha \frac{Q}{\varepsilon_y c \rho h} \quad \dots (1)$$

m_n : 材料ごとの係数, c : 比熱, ρ : 密度
 h : 板厚, ε_y : 降伏ひずみ, α : 線膨張係数

2.3 レーザ溶接の特徴と影響

レーザー溶接の長所は、薄板溶接などの形状面と、溶接時間やひずみ矯正時間などの生産面とで大別される。

薄板溶接が可能となる理由は、以下のとおりである。

- アーク溶接などの熱伝導型溶接では、溶接部の広範囲で温

度が急激に上昇し、入熱部が溶け落ちて溶接できなくなる。

- これに対しレーザー溶接の場合、薄板の場合でも熔融部分の面積が狭いため、溶け落ちにくくなる。

レーザー溶接では、薄板溶接に用いられるTIG溶接でも困難な板厚0.5mm以下の鉄鋼材料や、熱伝導率が大きく一般にろう付け接合される銅合金などを溶接できるため、これにより製品の軽量化や微細化など付加価値が向上する。

次に、溶接時間が短縮される理由は、レーザー溶接では深さ方向の溶融が瞬間的に起こり、アーク溶接などと比べ必要な深さに短時間で到達できるためである。

レーザー溶接の溶接速度は、板厚や熱源の出力などにもよるが、アーク溶接などで通常2.5~10mm/s (0.15~0.6m/min) 程度に対して、25~1000mm/s (1.5~60m/min) 以上が可能であり、これにより溶接時間が大幅に短縮される。

また、ひずみ矯正時間が短縮される理由は、アーク溶接などと比べ入熱量が少ないことから、溶接部の収縮も小さくなるためである。溶接部の収縮量 S は、式(2)のとおり入熱量 Q に比例するため、入熱量の少ないレーザー溶接では収縮量は小さくなり、それに伴い製品全体の溶接変形も小さくなる。これにより、ひずみ矯正作業の短縮や省略が可能となる³⁾。

$$S = \alpha \frac{Q}{c \rho h} \quad \dots (2)$$

ひずみの矯正に必要な時間や人員は、製品形状や要求精度で異なるため一概には比較できないが、事例としてレーザー溶接の採用により化学機械用フランジの製作で2割程度を占める矯正時間が半分以下に短縮された⁴⁾などが報告されている。

3. 実験方法

3.1 試験片の諸元および固定方法

表1に、試験片の諸元と比較条件を示す。

表1 試験片の諸元および比較条件

材 料	SUS304
寸 法	50mm × 50mm
板厚(mm)	0.3, 0.5, 1.0(※)
溶接継手	突合せ, かど, T

※ T継手の下板は全て板厚2.0mm

表1のとおり、実験材料にはステンレス鋼SUS304の50mm×50mm板を使用した。試験片の板厚は0.3mm, 0.5mm, 1.0mmの3種類で、突合せ継手とかど継手では同じ板厚の試験片同士を溶接し、T継手では板厚2.0mmの下板の端面に試験片を溶接した。試験片は、シャーリング装置で所定の大きさに切断した後、溶接部の密着性を高めるため、溶接線となる一辺のみ湿式高速切断機で切削した。

溶接継手の種類は、図4に示す突合せ継手、かど継手、T

継手の3種類とした。なお、溶接変形を比較する際の基準として、溶接線の溶接方向を $+x$ とする直交座標系を設けた。

溶接実験では、各継手とも2枚の試験片を図5のクランプ治具で固定し、溶接線の始端から2mm, 13mm, 25mm, 37mm, 48mmの合計5箇所、表4, 5にて後述する仮付条件でスポット溶接した後、溶接線の始端から終端まで連続溶接を行った。各継手の試験片とクランプ押さえとの位置関係を図6に示す。クランプ治具による試験片の締付力は、突合せ継手用が4.7kN、かど継手・T継手用が1.8kNとした。

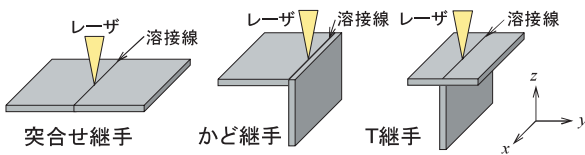


図4 溶接継手の種類

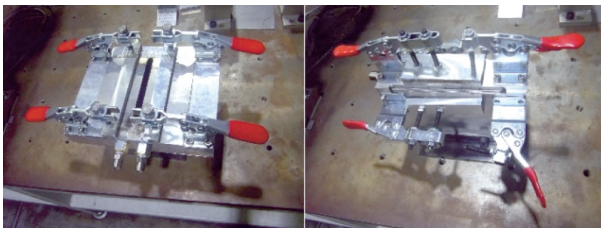


図5 クランプ治具
(左：突合せ継手用 右：かど・T継手用)

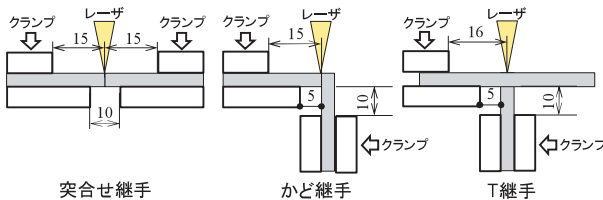


図6 試験片のクランプ押さえ位置

3.2 溶接変形の測定

溶接変形の測定には非接触三次元測定装置COMET5を使用し、仮付した段階（溶接前）と連続溶接後（溶接後）の変形の大きさや変形箇所を測定した。

測定では、溶接前後の三次元CADデータを重ね合わせて、溶接前の形状から法線方向への変位量を数値化した。なお、溶接前後の位置合わせの基準点を得るために、図7のように片方の試験片の溶接線から40mm離れた場所に、 $\phi 8$ mmの丸穴を2箇所設けた。

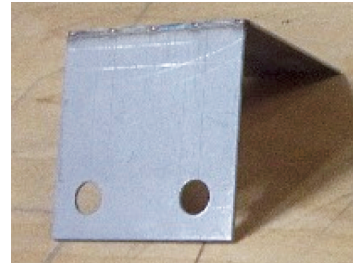


図7 位置合わせ穴の例（かど継手）

3.3 溶接部付近の応力測定

溶接部付近の応力測定は、試験片の図8に示す溶接線から5mm, 7.5mm, 10mmの箇所に各2枚ひずみゲージを貼り、クランプ治具で固定した時をひずみ0として、溶接後クランプ治具から外したときのひずみから応力をもとめた。

ひずみの測定方向は溶接線の直角方向とした。使用したひずみゲージの諸元を表2に示す。

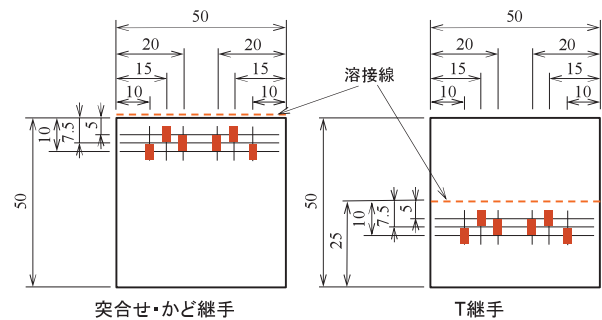


図8 ひずみ測定箇所

表2 ひずみゲージ諸元

ゲージ長(mm)	2
ゲージ抵抗(Ω)	120.4 \pm 0.4
ゲージファクタ(-)	2.14 \pm 1.0%

なお、ひずみゲージによる応力測定では、試験片の一部を破壊したときに解放される応力を測定する破壊法が一般的である。しかし、本研究で使用したステンレス鋼SUS304は加工硬化性が高く、また、試験片の板厚も薄いため、破壊時の切削抵抗による塑性変形を防ぐのが極めて困難なことから、前述の方法を採用した。

3.4 レーザ溶接条件

レーザ溶接の溶接条件は、表3の溶接速度などを共通条件とし、突合せ継手とかど継手のレーザ出力を表4、T継手のレーザ出力を表5のとおりとした。なお、レーザ出力の良否は、突合せ継手とかど継手では途切れない連続した裏波ビードが得られる最小出力とし、T継手では上板と下板の溶接部にすき間が生じない最小出力とした。

表3 レーザ溶接実験条件（全試験片共通）

溶接速度 (m/min)	レーザー 焦点径 (mm)	シールド ガス	ガス流量(L/min)	
			表側	裏側
1.5	0.3	N ₂	10	10

表4 レーザ照射条件（突合せ継手・かど継手）

板厚 (mm)	溶接条件		仮付条件		
	レーザー 出力(W)	発振 形態	レーザー 出力(W)	照射時間 (ms)	仮付 箇所数
0.3	240		150	150	
0.5	380	CW	280	200	5点
1.0	550		400	400	

表5 レーザ照射条件（T継手）

板厚 (mm)	溶接条件		仮付条件		
	レーザー 出力(W)	発振 形態	レーザー 出力(W)	照射時間 (ms)	仮付 箇所数
0.3	450		400	100	
0.5	500	CW	400	200	5箇所
1.0	550		400	400	

表6 最大変位の大きさと発生箇所

溶接継手	板厚 (mm)	最大変位		発生箇所
		変位量(mm)	方向	
突合せ	0.3	1.1	+z	溶接線終端
	0.5	0.65	+z	溶接線終端
	1.0	0.23	+z	溶接線始端
かど	0.3	0.70	+y	溶接線始端
	0.5	0.27	+y	溶接線始端
	1.0	0.12	+y	溶接線始端
T	0.3	0.35	+z	固定端側
		0.51	+z	自由端側
	0.5	0.20	+z	固定端側
		0.22	+z	自由端側
	1.0	0.020	+z	固定端側
		0.46	+z	自由端側

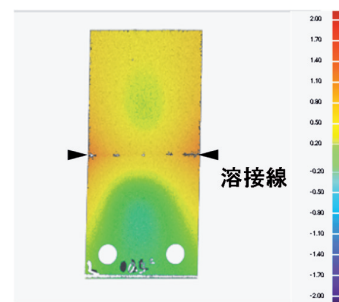


図9 突合せ継手の変位分布

4. 結果と考察

4.1 溶接変形の傾向

溶接前後の主な変形箇所や大きさについて、表6に主要な変位が生じた箇所と変位量の比較を、図9～11に各継手の変位量の分布画像をそれぞれ示す。なお、溶接後の変位の向きについて、突合せ継手とT継手では+z方向を、かど継手では+zと+y方向をそれぞれ正の向きとした。

4.1.1 突合せ継手

突合せ継手の場合、図9のとおり溶接線の始端と終端付近に顕著な変位が確認され、板厚0.3mmの試験片では溶接前後で最大約+1.1mmの変位が生じた。この変位は板厚1.0mmでは約+0.2mmとなり、板厚とともに減少する傾向を示した。

溶接線の始末端付近に大きな変位が生じた理由について、図3のとおり溶接線上では引張応力が働くが、力のつりあいにより溶接線の始末端部では圧縮応力に転じる。この圧縮応力により始末端部に座屈変形が生じ、z方向の変位になった可能性が考えられる。

また、板厚とともに変位が減少する原因については、実験で使用した試験片の材質がすべて同じであるため、式(2)の物性値 α 、 c 、 ρ はすべて等しくなり、 S の大小は入熱量と板厚 Q/h (W/mm)で比較することができる。表4より、板厚ご

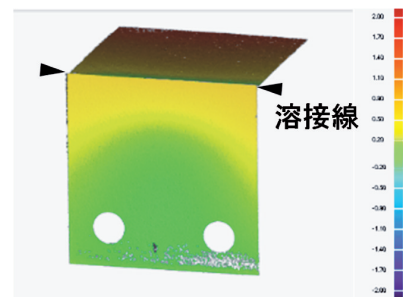


図10 かど継手の変位分布

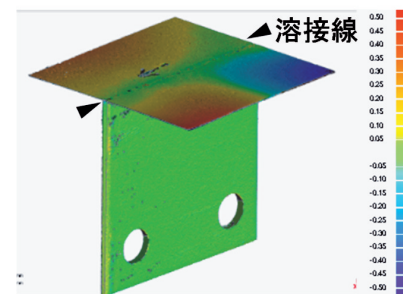


図11 T継手の変位分布

との Q/h は $Q/h_{0.3}=933$ 、 $Q/h_{0.5}=760$ 、 $Q/h_{1.0}=550$ となり、板厚が厚いものほど S の値が小さくなるため、それに伴い変位が減少したと考えられる。

4.1.2 かど継手

かど継手の場合、図10のように y 方向については溶接線の始末端付近に顕著な変位が確認され、板厚0.3mmの試験片では最大約+0.7mmとなり、板厚1.0mmでは約+0.1mmまで減少した。しかし、 z 方向の溶接線付近では y 方向と異なり板厚によらずほぼ±0 mmとなった。

板厚と変位の関係については、突合せ継手の場合と同様な原因が考えられる。一方、溶接線をはさんだ両側で変形の傾向が異なる理由については、以下のことが考えられる。

- 溶接線の仮付により、後述のT継手の場合と同様に z 方向の変形が抑制された。
- 溶接線とクランプ押さえとの距離が図6のとおり異なるため、溶接線の片側のみに変形が集中した。

4.1.3 T継手

T継手の場合は、他の継手と異なり溶接線付近の変位が±0.1mm前後と小さく、試験片の端部に顕著な変形が生じた。板厚との関係については、クランプ治具で固定した側は板厚0.3mmで約+0.4mm、板厚1.0mmではほぼ±0 mmとなり、板厚とともに減少した。一方、クランプで固定していない側の端部では明確な板厚との関係は確認できなかった。

板厚と変位の関係については、他の継手と同様の理由と考えられる。また、T継手の溶接線付近の変形が他の継手より小さい原因には、以下のことが考えられる。

- T継手のみ2.0mm板との溶接になるため、溶接線付近の剛性が高く変形が小さくなった。
- T継手の下板の剛性に加え、仮付溶接の効果でさらに変形が抑えられた。

以上より、一般に溶接変形が少ないと言われるレーザ溶接においても、薄板では一定の変形が生じることを確認した。薄板の溶接変形を最小限に抑える場合には、溶接線ぎりぎりの位置でクランプ押さえを配置する方法や、本実験のT継手のように重ね溶接の下板に剛性の高い部材を配置する方法など、設備面や製品設計からの対策が重要となる。

4.2 溶接部付近の応力状態の傾向

溶接線付近の表面応力について、溶接線からの距離と表面応力の平均値との関係を比較した。図12～14に各継手の比較結果を示す。なお、同一条件での測定回数は、2～6回とした。

図12～14のとおり、一般的傾向として、各継手とも溶接線から近いほど表面の圧縮応力が大きく、溶接線から離れるに従って応力が0に近づくことを確認した。また、距離5 mmの圧縮応力は板厚が厚いものほど大きくなることを確認した。

溶接継手の違いについて、距離5 mmから10mmにかけての応力の変化は、突合せ継手やかど継手では120MPa前後に対しT継手では80MPa程度となり、他の継手の2/3程度と

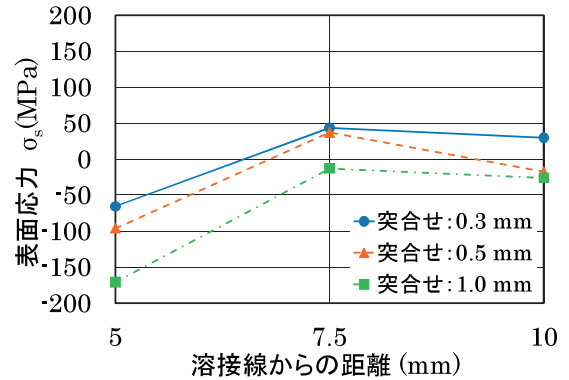


図12 突合せ継手の表面応力分布

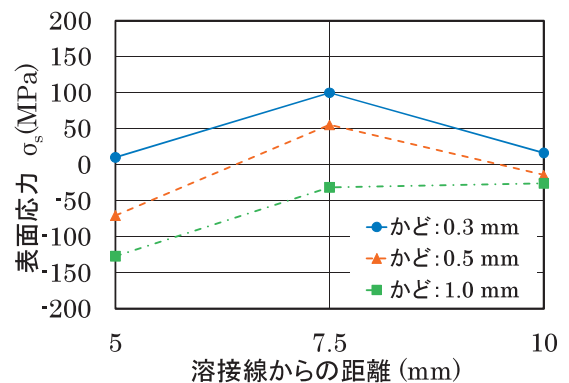


図13 かど継手の表面応力分布

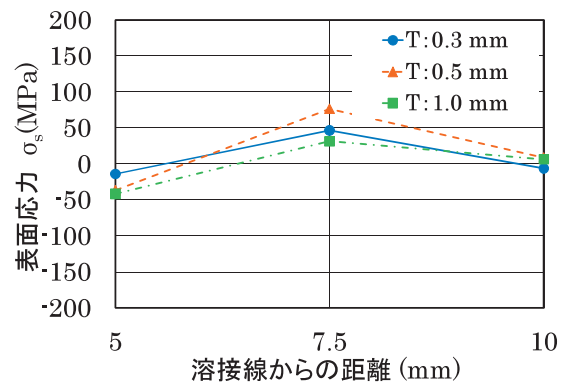


図14 T継手の表面応力分布

なることを確認した。

これらの原因について、図12～14の測定結果を図3の応力分布の理論モデルに当てはめ比較した。図15～17に突合せ継手とかど継手の、図18～20にT継手の、板厚ごとの理論値と実測値との比較を示す。なお、照射したレーザ光の一部は反射により失われるため、レーザの出力すべてが入熱にはならない。文献⁹⁾より、ステンレス鋼のレーザ吸収率や光学系部品による損失を、レーザ出力の約40%と仮定した。また、理論モデルの σ_1 と σ_2 は、オーステナイト系ステンレス鋼の場合 $\sigma_1 = \sigma_y$ 、 $\sigma_2 = -0.3\sigma_y$ となり、SUS304の σ_y は255MPaとなる。

図15～17のとおり、突合せ継手とかど継手の距離 5 mm における応力は、理論値は板厚1.0mmでは y_2 - y_3 間の圧縮応力域、板厚0.3mmと0.5mmでは y_1 - y_2 間の引張から圧縮に転じる領域となる。応力の理論値は、 $\sigma_{0.3-5mm} = +140\text{MPa}$, $\sigma_{0.5-5mm} = +50\text{MPa}$, $\sigma_{1.0-5mm} = -80\text{MPa}$ となり、板厚とともに圧縮応力が増加する。一方実測値は、引張応力となる場合や理論値以上の圧縮応力となる場合があるものの、板厚とともに圧縮応力が増加する点については、理論値との整合性が確認された。実測値と理論値の誤差については、前項で確

認された試験片の曲げや座屈による可能性が考えられる。

一方、距離7.5mmと10mmについては、理論値では圧縮応力を示す領域であるが、実測値ではほぼ応力0から引張応力を示しており、理論値とは合致しなかった。この原因については、図3の応力分布モデルが試験片を拘束しない条件のものであり、これに対し実測では図6のとおり溶接線の両側のクランプ拘束が影響した可能性が考えられる。

これに対しT継手の実測値は、図18～20のとおり応力の大きさや引張・圧縮の傾向ともに、理論値と合致しなかった。

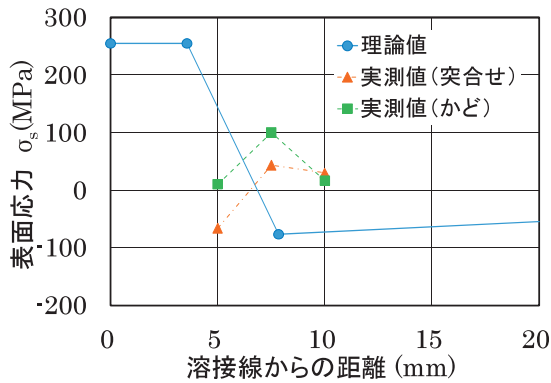


図15 応力分布モデルと実測値の比較 (突合せ・かど継手 板厚0.3mm)

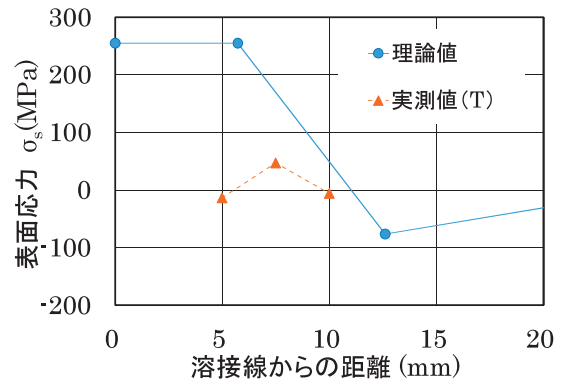


図18 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.3mm)

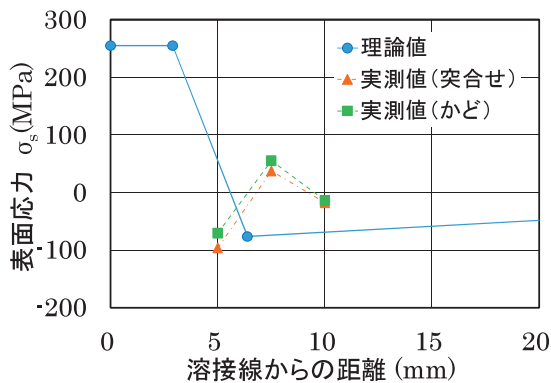


図16 応力分布モデルと実測値の比較 (突合せ・かど継手 板厚0.5mm)

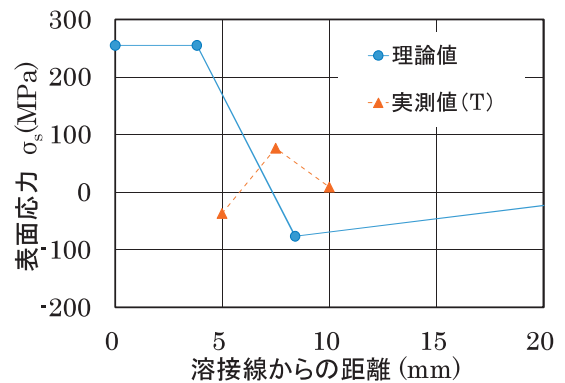


図19 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.5mm)

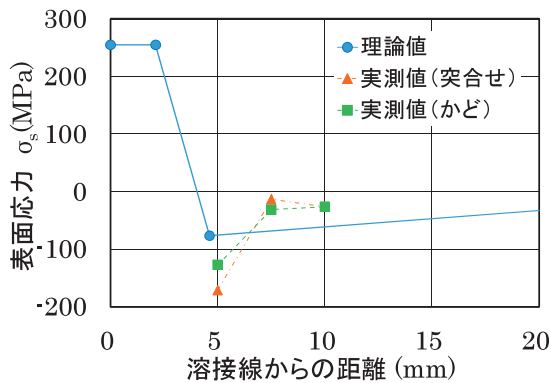


図17 応力分布モデルと実測値の比較 (突合せ・かど継手 板厚1.0mm)

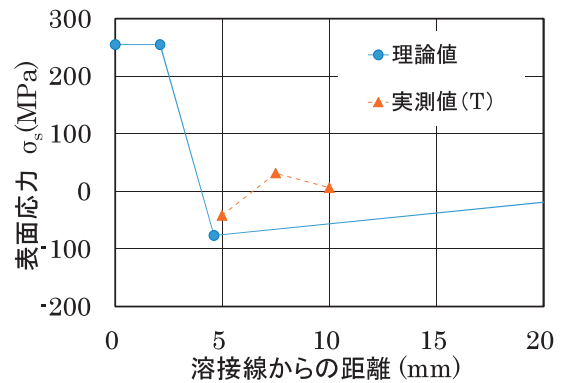


図20 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚1.0mm)

この原因について、突合せ継手やかど継手の入熱では入熱がすべて溶接で消費されるのに対し、T継手では下板の溶融にも入熱が必要なため、測定対象の上板に加わる入熱が照射したレーザーの出力より大幅に少ない可能性が考えられる。

この仮定について、上板と下板で入熱量を熱伝導率で分解することを検討した。なお、上板と下板の入熱量については、厳密には材料表面の熱伝達や放射による熱損失をすべて網羅する必要があるが、今回は熱伝導成分のみの検討とした。

熱移動量の分解について、上板と下板の材質が同じであるため、上板と下板が十分密着している場合は断面積(=板厚)の合計から上板の断面積で按分できるものと考えられる、図21~23に、図18~20の理論値の式に表7の按分率を代入し、修正した後の理論値と実測値の比較を示す。

表7 T継手の板厚による熱移動量按分率

板厚(mm)		按分率: $2a/(2a+b)$
上板:a	下板:b	
0.3	2.0	0.23
0.5	2.0	0.33
1.0	2.0	0.50

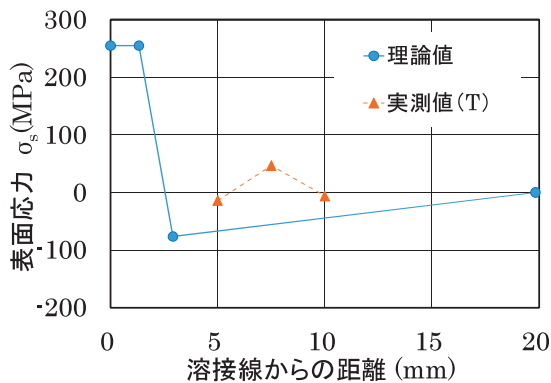


図21 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.3mm 熱量按分後)

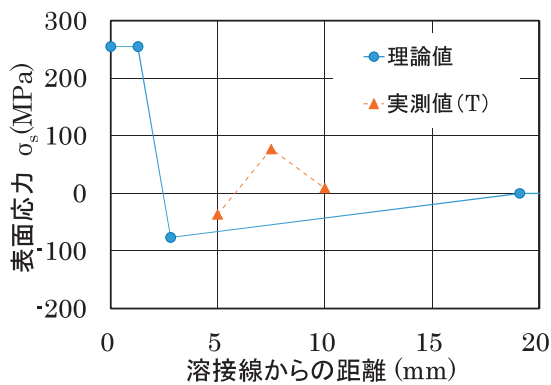


図22 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.5mm 熱量按分後)

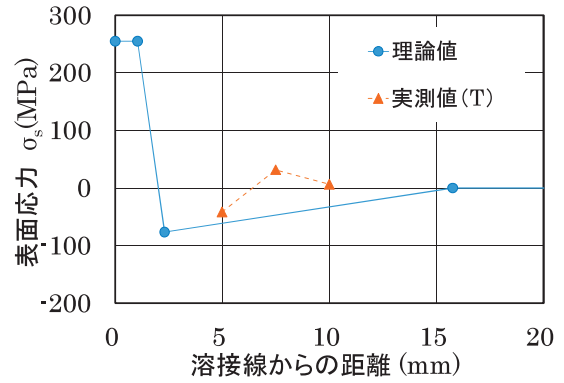


図23 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚1.0mm 熱量按分後)

図21~23のとおり、修正後の理論値はすべての板厚で y_2-y_3 間の領域となり、距離5mmと10mmについては理論値との誤差はあるものの、理論値と同様に溶接線から離れるほど応力が±0に近づく傾向が確認された。しかし、距離7.5mmについてはいずれも引張側の応力となり、理論値と大きく異なる結果となった。この原因について、試験片の端部が拘束されていることで座屈が生じた可能性や、溶接線方向の変形が影響した可能性が考えられるが、本研究の測定内容のみで原因を特定するのは困難であり、今後の課題として残った。

以上により、試験片の拘束条件などによる誤差はあるものの、図3のモデルによってレーザー溶接の応力分布や傾向をおおむね評価できることを確認した。

5. おわりに

ステンレス鋼のレーザー溶接における溶接変形の大きさや主な変形箇所の分布、溶接部付近の応力状態を測定し、板厚や溶接継手の種類による傾向を確認した。これらの知見をもとに現在の溶接法と比較し、レーザー溶接でひずみ矯正作業を省略可能な箇所の抽出や、溶接法に合わせた製品設計の改良などが可能となる。

一方、溶接変形や応力状態の数値的な検証には、曲げや座屈など三次元的な溶接変形をモデル化し、これをもとにシミュレーション等による検証作業が必要となる。

今後は、本研究で得られた測定結果をもとに溶接変形や応力状態の測定データを加え、同時に測定データの誤差の範囲や誤差の発生原因について検証作業を進め、技術情報としての信頼性向上に努めていく。そのうえで、適切なレーザー溶接使用箇所の選定、レーザー溶接に適した製品設計の改良、装置導入時の機器選定や周辺設備の改善提案など、道内企業が生産する溶接製品の品質や付加価値の向上を支援する。

謝辞

本研究で使用したファイバーレーザー加工溶接装置・非接触3次元測定システム・試料埋込装置・実体顕微鏡は(独)科学技術振興機構の地域産学官共同研究拠点整備事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 新井武二：レーザー加工の基礎工学，丸善，pp.316-354，(2007)
- 2) 溶接学会編：新版溶接・接合技術特論，産報出版，pp.238-248，(2011)
- 3) 寺崎俊夫：溶接変形と残留応力，溶接学会誌 第78巻 第2号，pp.55-62，(2009)
- 4) 北側彰一・山崎洋輔：大出力ファイバーレーザー溶接システムの開発と生産応用，第76回レーザー加工学会講演論文集，pp.81-86，(2011)
- 5) 新井武二：レーザー加工の基礎工学，丸善，pp.122，(2007)