

揺動レーザーを用いた厚板突合せ狭開先多層溶接法の開発*

山崎 洋輔**, 阿部 洋平***, 日置 幸男****, 田中 智大***,
中谷 光良**, 北側 彰一***, 中田 一博*****

Development of Narrow Gap Multi-layer Welding Process using Oscillation Laser Beam*

by YAMAZAKI Yosuke**, ABE Yohei***, HIOKI Yukio****, TANAKA Tomohiro***,
NAKATANI Mitsuyoshi**, KITAGAWA Akikazu*** and NAKATA Kazuhiro*****

The oscillation laser beam is considered to be effective as a heat source of the narrow gap multi-layer welding, because the oscillation laser welding can control the penetration shape and prevent the lack of fusion. In this study, in order to establish a narrow gap welding process by oscillation laser beam, butt welding experiments of 50mm thickness carbon steel plate were performed. By the appropriate control of the heat input area using the in-process sensor for recognizing the groove shape, narrow gap welding of thick plate with groove which was cut by gas cutting was achieved. Properties of welded joint had been confirmed by nondestructive testing, tensile test, and side bend test. A two-dimensional numerical calculation model for welding deformation was developed. This calculation model was used for investigation of the optimal groove angle. The results of calculations were in quantitative agreement with the experimental results. Microstructure of the weld zone had multiple thermal histories. According to the hardness test results, maximum hardness of the heat affected zone of the upper layer has been lowered than that of the lower layer.

Key Words: laser welding, narrow gap multi-layer welding, oscillation laser beam, deformation simulation, gas-cutting groove, microstructure of heat affected zone

1. 緒 言

厚板の狭開先突合せ溶接法は開先断面積の大幅な縮小が図れ、入熱量の低減および能率的な施工が可能となることを特長とする施工法である。すでにガスマタルアーク、ティグアーク、サブマージアークなどを熱源とする各種狭開先アーク溶接法が実用化されており、これらは板厚 50 mm を超える大型構造物の溶接に広く適用されている¹⁾。また、近年では、レーザー発振器の大出力化、集光光学系の長焦点化などレーザー溶接に関するハードの発展という背景もあり、レーザーを熱源とした狭開先溶接法の開発も行われている²⁻⁶⁾。レーザーを狭開先溶接に用いた場合、アークを用いるよりもさらに狭開先化することができ、より少ない入熱量での施工が期待できる。

レーザー溶接を用いた狭開先溶接技術のひとつに、レーザー光を高周波数で揺動させながら積層溶接を行う揺動レーザー

狭開先溶接法がある⁴⁾。この溶接法は、内部に高周波数で揺動するミラーあるいはレンズを備えるレーザーヘッドを用いてレーザー光を高周波数で揺動させながら1層1パスで積層溶接を行う狭開先溶接法である。Fig. 1に、この狭開先溶接法の模式図を示す。熱源がアークであってもレーザーであっても、狭開先溶接の欠点のひとつとして融合不良が発生しやすいということが挙げられる。これを防止するためには開先底部の端部まで十分に溶融させるプロセスが必要である。著者らは既報にて、集光されたレーザー光を揺動させて開先底部の端部付近を周期的に直接加熱する揺動レーザー狭開先溶接法が、確実に開先底部の端部まで溶融させること

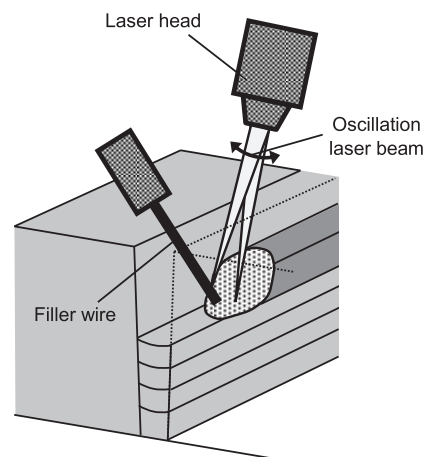


Fig. 1 Schematic illustration of narrow gap welding process

*受付日 平成26年9月8日 受理日 平成26年11月10日

**正 員 大阪大学接合科学研究所 (日立造船株式会社)
Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka
University (Hitachi Zosen Corporation)

***正 員 日立造船株式会社 Member, Hitachi Zosen
Corporation

**** 日立造船株式会社 Hitachi Zosen Corporation

*****正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and
Welding Research Institute, Osaka University

ができ融合不良防止に有効であることを示している⁷⁾。

一般に厚板の開先加工には機械加工とガスあるいはプラズマによる熱切断加工の 2 種類の加工法が用いられるが、アークもしくはレーザーによる狭開先溶接の開先の場合は、U 型開先のような融合不良の発生しにくい開先形状に精度よく加工するために、機械加工が用いられることが多い。これに対し、本研究では、施工コストが優れるガス切断による開先での厚板の狭開先突合せ溶接施工法を確立することを目的としている。ガス切断開先の場合、開先面の溶接線方向の波打ちや開先角度の誤差が機械加工開先よりも大きい場合、融合不良などの溶接欠陥を誘発しやすいと考えられる。これを防止するためには、常時開先形状をセンサにより認識し、揺動レーザーによる入熱領域をコントロールすることが必要であるが、著者らはすでに CMOS カメラによる溶接部撮影画像を用いた開先形状センシングシステムを開発しており、これを用いることでガス切断開先の狭開先溶接に対応できることを基礎的に示している⁸⁾。

本報では、ガス切断により開先加工した板厚 50 mm の厚板突合せ試験体に対して、狭開先多層溶接試験を実施した結果を報告する。狭開先溶接において効率的な施工を実現するためには、溶接前に適切な開先形状を設定することが必要である。そこで、本研究ではまず、溶接変形解析モデルを構築して初期の開先形状（開先角度）が溶接施工に及ぼす影響について検討した。その結果をもとに開先形状を決定し、溶接実験を実施した。実験における溶接長は 800 mm と長尺にし、長尺のガス切断開先溶接であっても内部欠陥が発生することなく溶接可能であることを確認した。溶接

時には溶接変形量の計測を行い、溶接実験と解析結果の溶接変形量を比較することで、解析モデルの妥当性を評価した。溶接後、溶接部の継手性能試験を実施し、溶接部の健全性について評価した。また、溶接部のマイクロ組織観察および硬さ試験により、溶接部組織の特徴について考察した。

2. 実験方法および解析方法

2.1 実験方法

2.1.1 レーザ溶接装置

本開発では、揺動レーザー狭開先溶接を行うために、1 軸スキャナ内蔵レーザーヘッドを用いた。Fig. 2 に、レーザーヘッドの外観および構成図を示す。ヘッド内部のスキャナミラーを駆動モータにより角度制御することで、レーザー光をサイン波状に揺動させることができる。揺動幅と揺動周波数は任意に設定することができ、外部からのアナログ制御が可能である。コリメーションレンズの焦点距離は 125 mm、集光レンズの焦点距離は 300 mm とした。このレーザーヘッドは、外部からのアナログ信号により位置制御が可能なマニピュレータ（位置決め装置）に把持されており、このマニピュレータが稼働することで移動溶接を行った。

本実験で使用したレーザー発振器は、最大出力 10 kW の連続発振型ファイバーレーザー発振器（波長 1070 nm）である。発振器内で発生したレーザー光は、コア径 0.3 mm の伝送ファイバでレーザーヘッドに伝送されている。

2.1.2 試験体形状および溶接条件

狭開先溶接試験体形状を Fig. 3 に示す。板厚 50 mm の突

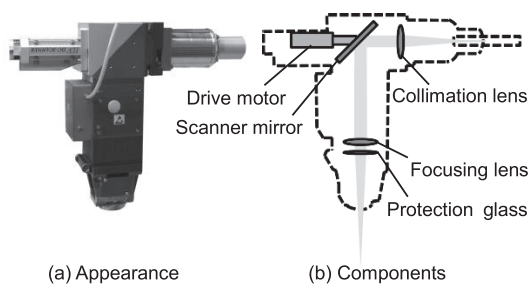


Fig. 2 Single-axis scanning laser head

Table 1 Chemical compositions of steel plate used

[mass%]				
C	Si	Mn	P	S
0.16	0.34	1.36	0.013	0.004

Table 2 Chemical compositions of solid wire used

[mass%]						
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti+Zr
0.04	0.81	1.48	0.010	0.007	0.24	0.20

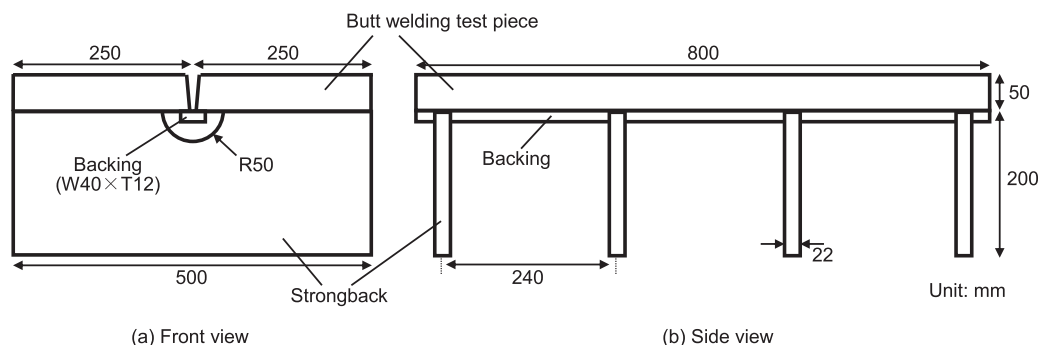


Fig. 3 Dimension of welding test piece

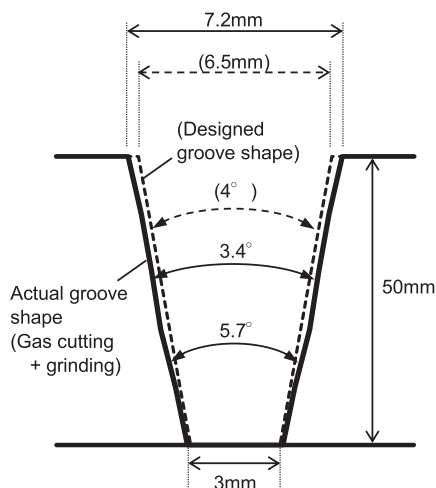


Fig. 4 Schematic illustration of profile of groove

Table 3 Multi-layer welding conditions

Laser power [kW]	6.0
Welding speed [mm/s]	5.0
Defocusing distance [mm]	+10
Wire feeding rate [mm/s]	50
CO ₂ shielding gas [l/s]	0.83
Laser beam oscillation frequency [Hz]	20
Laser beam oscillation width [mm]	Gap width - 0.5 (Automatic control)

合せ溶接試験とし、溶接長を 800 mm とした。溶接時の変形を拘束するため、板厚 22 mm、高さ 200 mm のストロングバックを 4 枚、炭酸ガス半自動すみ肉溶接にて取付けた。供試材（突合せ試験体）は JIS G3106 SM490A を用い、フィラワイヤは φ1.2 mm の軟鋼・490 MPa 級鋼用ソリッドワイヤ JIS Z3312 YGW11 を用いた。それぞれの化学成分を Table 1, Table 2 に示す。なお、ストロングバックには JIS G3101 SS400 を用いた。

開先形状の模式図を Fig. 4 に示す。破線が設計上の開先形状を示している。開先底幅はフィラワイヤ送給チップが挿入可能な幅である必要性から 3 mm とし、裏当金を用いた片面 V 開先施工とした。開先角度は 4° としたが、この値は次節で述べる溶接変形解析結果をもとに決定した。開先面はガス切断とし、開先面の酸化スケールをグラインダ研削にて除去して使用した。Fig. 4 の実線は、実際の試験体において、溶接始端付近で実測した開先形状を示している。ただし、大型試験体の開先形状を精密に計測することは困難であるので、ここでは開先の幅を複数の位置で計測し、開先は左右対称の台形であると仮定して図示した。これを見ると、設定値に対して切断精度あるいは組立精度に起因する誤差が生じており、開先上端では設定値より約 10% 広く、開先角度は位置によってバラツキがあることが分かる。

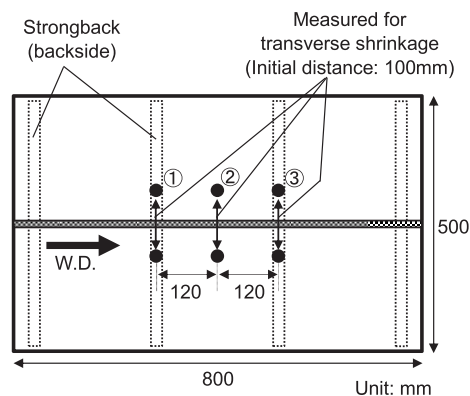


Fig. 5 Measurement points of transverse shrinkage

Table 3 に、本実験で使用した主な溶接条件を示す。フィラワイヤは溶接部前方から、開先底面に対して 45 度の角度で送給した。シールドガスは CO₂ を使用し、開先外部の溶融池上方に配したシールドガスボックスを通じて供給した。Fig. 1 に示したように 1 層 1 パス溶接とし、CMOS カメラによる溶接部撮影画像を用いた開先形状センシングシステムによりインプロセスで認識した開先幅情報をもとに、レーザー光揺動幅を自動制御した⁹⁾。

実験では、溶接による試験体表裏面での横収縮量を計測した。表面横収縮量は、Fig. 5 に示した①から③の位置の試験体表面に初期距離 100 mm として標点を設定し、1 パスごとにノギスにて標点間距離の計測を行い、その変化量から求めた。①と③はストロングバック取付け位置の真上、②は 2 枚のストロングバック取付け位置の間である。裏面横収縮量は、②の位置の試験体裏面で初期距離 100 mm として標点を設定し、溶接開始前と全パス積層後の標点間距離の変化量から求めた。

2.1.3 溶接部評価試験

溶接後の試験体に対し、放射線透過試験および超音波探傷試験を実施した。その後、継手引張試験および側曲げ試験をそれぞれ JIS Z 3121, JIS Z 3122 に則り実施した。また、溶接部横断面のマクロ試験を実施した。さらに、マクロ試験と同じ断面に対して、ミクロ組織観察および溶接熱影響部のビッカース硬さ試験（試験荷重 9.8 N）を行った。

2.2 解析方法

汎用の熱弾塑性解析有限要素法ソフトを用い、Fig. 3 に示した試験体の溶接変形解析を行った。試験体は溶接線方向に十分に長く、試験体中央付近での溶接現象は定常状態に近いと考えられる。そこで、一般化平面ひずみモデルによる 2 次元解析を行うこととした。構築したモデルを Fig. 6 に示す。1 層 1 パス溶接であるので、溶接線中央を対称面とした 1/2 モデルとした。解析モデルにおける開先形状は、開先底幅を 3 mm とし、開先角度を 2° から 8° とした。なお、Fig. 6 は開先角度 4° の例である。

使用した物性値を Fig. 7, Fig. 8 に示す。突合せ試験材は

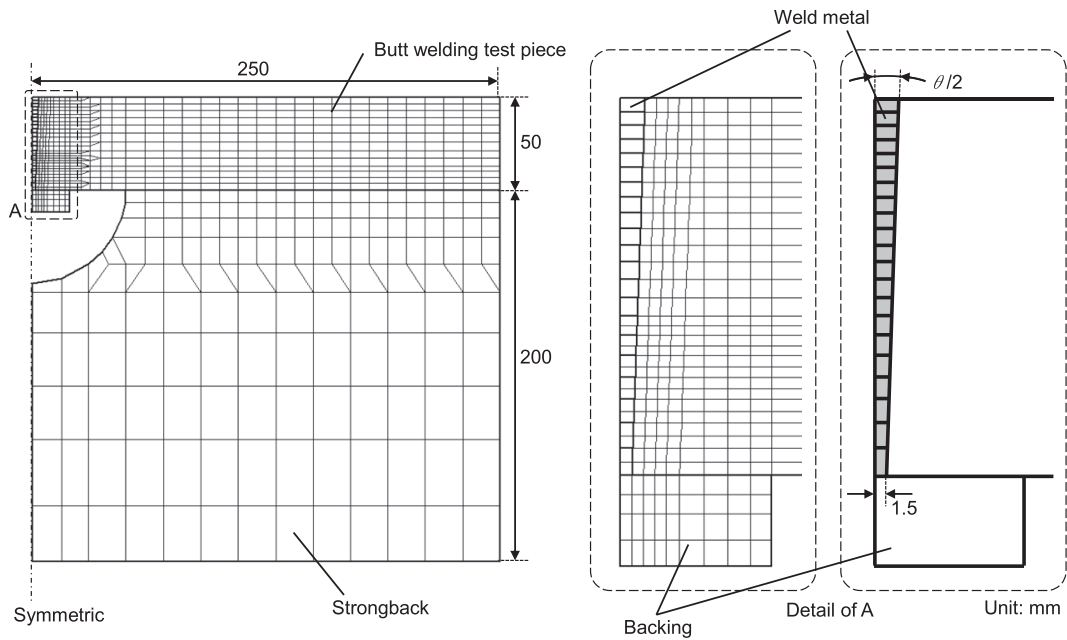


Fig. 6 Two-dimensional model for numerical analysis

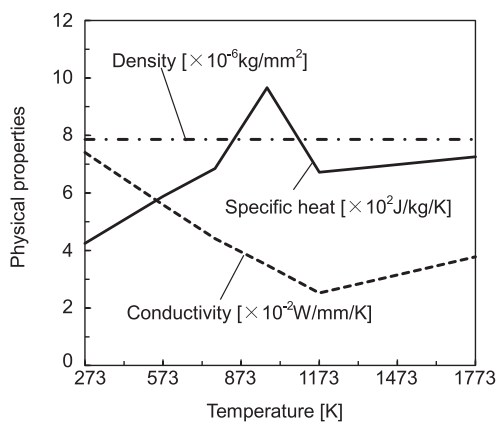


Fig. 7 Physical properties

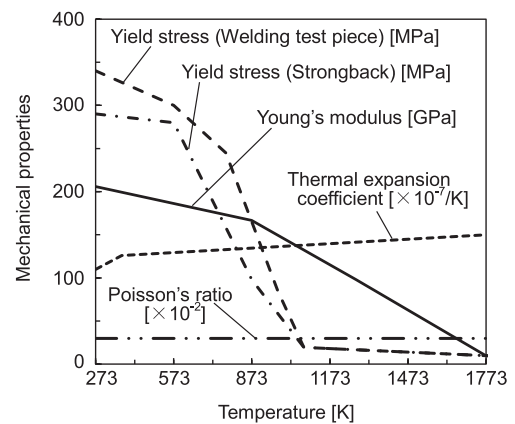


Fig. 8 Mechanical properties

SM490A, ストロンクバックはSS400であるので、それぞれ降伏応力は異なる値を用い、その他の物性値は同一とした。

ストロンクバックは、溶接線方向に見ると、長さ 800 mm の突合せ試験体に対して板厚 22 mm のものが 4 枚、断続的に取付けられている。しかし、一般化平面ひずみモデルでは溶接線方向に形状が変化しないモデルとなるため、溶接線全線に渡ってストロンクバックが存在することになる。そこで、本モデルにおけるストロンクバックの取り扱いを以下のようにした。まず、実際のストロンクバックと同等の溶接変形拘束能を持たせるために、突合せ試験体とストロンクバックの溶接線方向（解析モデル奥行き方向）の長さの比を考慮し、ストロンクバック部分のヤング率を 0.11 倍 (22 mm × 4 / 800 mm) とした。また、実際には突合せ試験体とストロンクバックの接合部を通じた熱伝導が存在するが、解析モデルではそれを無視し、ストロンクバックへの熱伝導はないものとした。突合せ試験体の周囲は 20℃ の

空気であるとし、自然対流を想定した熱伝達（熱伝達率 $5 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2/\text{K}$ ）⁹⁾と、表面からの熱放射（放射率 0.8）¹⁰⁾を考慮した。

解析モデルにおける溶接条件は、実験での溶接条件 (Table 3) と同一とした。フィラワイヤの溶着効率は 100% とし、溶接前の開先断面積およびフィラワイヤ送給速度と溶接速度から求められる 1 パスあたりの溶着断面積をもとに解析モデルでのパス数および各パスの断面形状を決定した。1 パスあたりの溶着断面積は一定のため、開先角度が大きいほどパス数が多い条件となっている。文献^{11), 12)}をもとに熱効率を 0.9 とし、各パスの溶着金属部分に入熱を与えるモデルとした。

3. 解析モデルによる開先角度検討

狭開先溶接において、開先形状の最適化は重要な課題で

ある。施工効率を向上させるためには、初期開先角度をできるだけ小さくすることが理想である。一方で、レーザー光は使用する光学系に依存した一定の広がり角を持つため、開先角度が小さすぎる場合には開先上端とレーザー光の干渉が発生し、施工不良を誘発する原因となる。溶接中は溶接変形に伴って開先角度が小さくなっていくため、これを見込んだ上で初期開先角度の設定をしないと、積層途中でレーザー光と開先上端の干渉が発生することになる。そこで、構築した解析モデルを用いて、積層溶接時の開先角度の変動を予測し、最適な初期開先角度の設定について検討した。

Fig. 9は、揺動レーザー光が開先壁に最も近づいた時の開先およびレーザー光の模式図である。このとき、開先上端とレーザー光が干渉しないことが必要であり、それにより開先角度が制限される。Fig. 9をもとに、溶接時の開先角度の限界値とレーザー光広がり角および開先深さの関係を求めると、式(1)となる。

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left(\tan \frac{\phi}{2} - \frac{D_f \tan \frac{\phi}{2}}{d} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 θ ：限界開先角度、 ϕ ：レーザー広がり角、 D_f ：焦点外し量、 d ：開先深さ

レーザー光の焦点外し量がゼロでない場合、開先深さによって限界開先角度が変動し、開先が浅くなるほど限界開先角度は小さくなる。狭開先溶接では積層が進むに伴い開先は浅くなっていくため、1パスごとに限界開先角度が小さくなっていく。板厚 50 mm の場合での限界開先角度と積層高さの関係を Fig. 10 に示す。ここでは、Table 3 の溶接条件をもとに、焦点外し量を +10 mm としている。また、レーザー光の広がり角は本実験に使用した光学系における実測値である 3.6° とした。焦点外し量が +10 mm であるため、開先残り深さ 10 mm 以下すなわち積層高さ 40 mm 以上になった場合は限界開先角度が 0°（垂直）となる。この実線より下の領域が、開先上端とレーザー光の干渉が発生する施工不可の領域である。狭開先溶接を行うためには、積層高さと同開先角度の関係は常にこの実線よりも上の領域になければならない。

積層が進むに伴い、1パスごとに開先角度がどう変動していくかを解析モデルから求めた結果を Fig. 11 に示す。初期開先角度は 2° から 8° としている。初期開先角度によらず、いずれの場合も積層高さが 20 mm 程度になるまでは開先角度がほとんど減少していない。これは、この領域では横収縮は発生しても角変形はほとんど発生せず、開先が平行に閉じるように変形しているためである。積層高さが 20 mm を超えた領域では、すでに積層済みの板厚下部の溶接部が拘束となり、板厚下部よりも板厚上部のほうが大きく横収縮が発生するために、積層が進むにつれて開先角度が減少していく結果を示している。開先角度が大きいほどパス数が多い、すなわち全体の入熱量が多い条件となっているが、

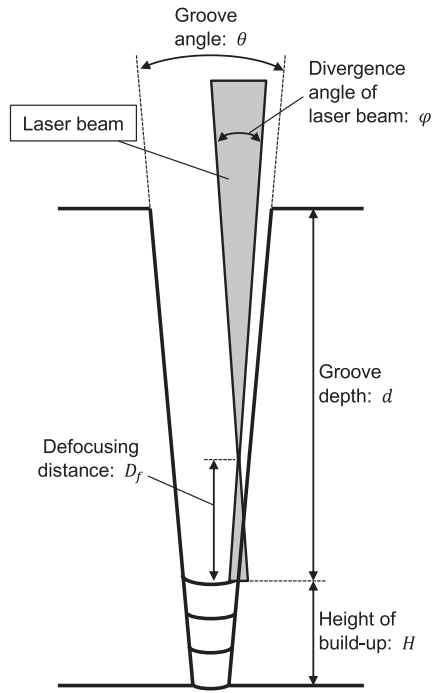


Fig. 9 Schematic showing positional relationship between groove wall and laser beam

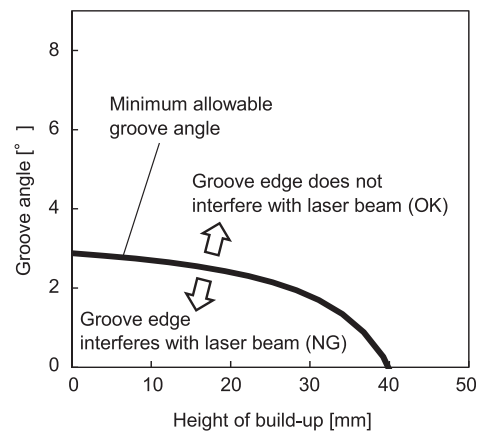


Fig. 10 Allowable groove angle

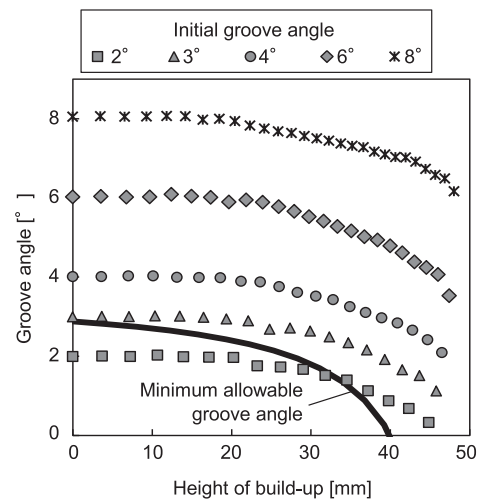


Fig. 11 Calculated results of groove angle

開先角度の減少量はその影響をあまり受けず、同程度となることがわかった。

Fig. 11 にて限界開先角度と解析結果とを比較すると、初期開先角度が 2° の場合は初期段階で開先角度が小さすぎて施工不可となるが、初期開先角度 3° 以上の場合は溶接変形により開先収縮が発生しても限界開先角度を下回ることがなく、施工が可能であることがわかる。しかし、実際に溶接実験を行うに当たっては、ガス切断精度を考慮して若干の裕度を持たせた開先角度 4° が適正であると判断し、この角度を実験条件とした。

4. 実験結果および解析モデル評価

4.1 溶接部断面および内部欠陥検査

揺動レーザを用いた狭開先溶接法による多層溶接継手の横断面のマクロ試験結果を Fig. 12 に示す。本実験の開先の場合、初期の開先断面積と1パスあたりの溶着断面積からパス数を計算すると21パスとなるが、実際の溶接では開先収縮の影響もあり17パスでの施工となった。溶接部断面を見ると、初パスから最終パスまで融合不良などの内部欠陥は発生していない。レーザ光を揺動させることで確実に開先底部の端部まで溶融させ融合不良を防止するという本施工法の目的が達成されている。また、Fig. 12 では下層付近、上層付近の高倍率での断面マクロ像を併せて示している。積層高さは下層で4mm程度、上層で3mm程度であり、ファイライヤの送給が適切に行われたことがわかる。マクロ試験結果からは凝固割れやポロシティは確認されなかった。なお、この図では一部にピッカース硬さ試験の圧痕が黒点状に見られるが、この結果については後述する。溶接後に放射線透過試験および超音波探傷試験を実施したが、溶接

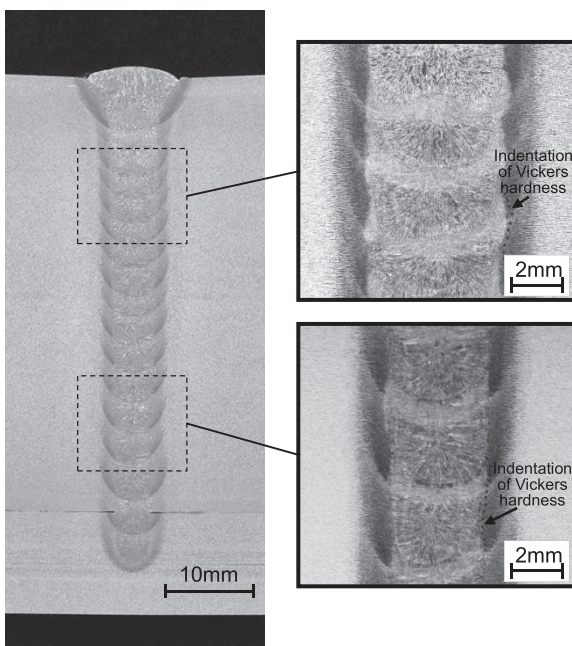


Fig. 12 Cross section of narrow gap multi-layer welding bead

部始端および終端の一部を除いて、溶接部のほぼ全線に渡って内部欠陥は確認されなかった。実験はガス切断開先に実施したため、開先切断誤差や試験体組立精度に起因する開先形状の変動があると考えられるが、800mmという長尺の溶接であってもレーザ光揺動幅の自動制御により溶接欠陥を防止することができた。

4.2 溶接変形の解析結果と実験結果の比較

Fig. 13 に、溶接変形による試験体表面および裏面での横収縮量の解析結果および実験結果を示す。白色の点が解析結果、黒色の点が実験結果である。表面横収縮量の実験結果については、Fig. 5 の位置①から③の3点の計測値の平均値を1パスごとに示しており、裏面横収縮量の実験結果は全パス終了後の1点のみを示している。グラフの横軸は各パス溶接後の積層高さとしている。表面横収縮量について解析結果と実験結果を比較すると、定量的に見ると解析結果のほうが実験結果よりも少し小さいが、いずれも積層高さが30mmに達するまでの範囲ではほぼ一定の割合で増加し、積層高さ30mm以上となったところで収縮の割合が低下してあまり収縮しなくなっており、両者は定性的によく一致している。裏面横収縮量の解析結果を見ると、表面横収縮量よりも積層高さが低い段階で収縮量が飽和する傾向を示している。積層溶接の場合、積層が進むにつれて積層済みの溶接部が裏面付近の変形に対する拘束となるため、表面横収縮よりも裏面横収縮のほうが早く収縮量が一定となるものと考えられる。積層終了後の裏面横収縮量は、実験結果とおおそ一致している。なお、表面横収縮量の実験結果に関して、Fig. 5 の位置①から③の計測値には、裏面のストロングバック取付け位置に関わらずほとんど差がなかった。従って、今回の実験条件では、試験体中央付近では溶接が定常状態となっており、一定の溶接変形が生じていると考えることができる。このことは、2次元解析モデルを本実験の溶接変形予測に適用できることを示唆している。

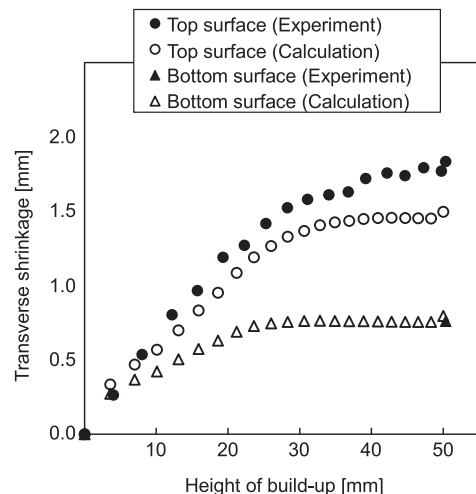


Fig. 13 Experimental and calculated results of transverse shrinkage

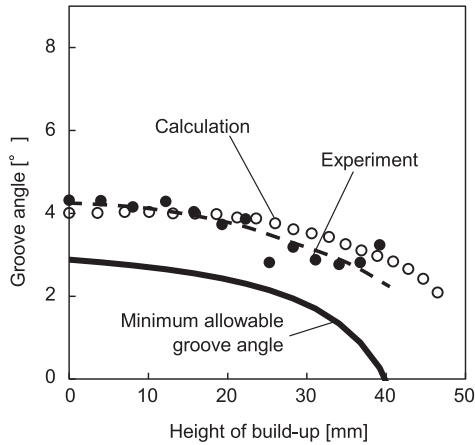


Fig. 14 Comparison between experimental and calculated results of groove angle variation

Fig. 14 に、積層溶接が進むことに対する開先角度の変動の解析結果および実験結果を示す。また、本実験での限界開先角度を併せて示す。実験値については、溶接中の開先は左右対称の台形であると仮定し、各パス終了後の開先上端幅、開先底幅（積層済みビード表面幅）、開先深さの値から算出した。なお、開先上端幅と開先深さの値はノギスにて測定した。開先底幅の計測はノギスでは困難であるため、開先形状センシングに用いる CMOS カメラによる溶接部撮影画像から画像処理により求めた⁹⁾。この方法の場合、開先深さが浅い条件では計測精度が劣化するため、積層高さ 40 mm までの値を記載している。また、開先深さや開先上端幅・底幅は溶接線全線で一定でないこと、および計測に誤差があることに起因して、積層高さ 40 mm までの領域でも開先角度の算出値には誤差が含まれているため、各計測点を連続的に見ると単調な減少とはなっていないが、実際の開先角度は破線で示した近似曲線のように積層の進行に伴い単調に減少しているものと考えられる。この結果を見ると、実験値の傾向は解析による予測値とおおよそ一致している。実験値は実線で示した限界開先角度を下回ってはおらず、適切な施工が行われたことが確認できる。

Fig. 13 および Fig. 14 を見ると、解析により求めた溶接変形量は実験結果とおおよそ定量的に一致している。これらの結果から、構築した解析モデルが狭開先レーザー溶接の溶接変形を予測するうえで十分な妥当性を有していると言える。

4.3 継手性能試験結果

実験にて作製した溶接部に対して、継手引張試験、側曲げ試験によりその継手性能を確認した。Table 4 に継手引張試験の結果を示す。継手引張試験は溶接線の 2 箇所から試験片を採取し、使用した試験装置の引張能力の制約のため板厚方向に 2 分割して計 4 試験片で実施した。溶接継手は十分な引張強さを有しており、いずれの引張試験片においても母材破断を示した。Fig. 15 に側曲げ試験片の外観を示す。

Table 4 Results of tensile test

No.	Tensile strength [MPa]	Fracture
T1(Upper)	576	Base metal
T1(Lower)	565	Base metal
T2(Upper)	572	Base metal
T2(Lower)	564	Base metal

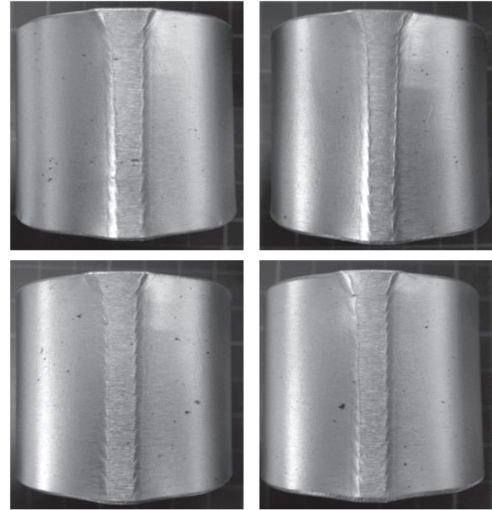


Fig. 15 Results of side bend test

す。側曲げ試験は全厚での試験片を溶接線の 4 箇所から採取し、いずれの試験片でも割れは認められず、外観も良好であった。これらの結果は、例えば JIS B 8265 「圧力容器の構造—一般事項」などの規格を満足しており、本施工法にて溶接した継手が健全であることが示された。

4.4 溶接部組織のマイクロ観察

レーザー溶接は、アーク溶接と比較して溶接後の冷却速度が大きいためと考えられるため、溶接熱影響部 (HAZ) の組織の粗大化や硬化が懸念される。さらに、本施工法は多パス溶接であるため溶接部は多重の熱履歴を受け、マイクロ組織が一層複雑になっていると考えられる。そこで、多パス溶接部の溶融境界近傍のマイクロ組織観察および溶接熱影響部のビッカース硬さ試験 (試験荷重 9.8 N) を行った。

Fig. 16 に、下層パス (4 パス目から 5 パス目) の溶融境界近傍のマイクロ組織写真と、溶接熱影響部の硬さ分布を示す。また、図中の (a) から (d) の位置の高倍率でのマイクロ組織写真を併せて示す。なお、写真上の黒色の点はビッカース硬さ試験の圧痕である。これを見ると、溶接金属では、一度だけ熱影響を受けた領域と二重に熱影響を受けた領域 (再熱部) とが存在し、再熱部は結晶粒が微細化されていることが分かる。これは、一般的なアーク溶接による多パス溶接と同じ傾向である。熱影響部についても同様に一度だけ熱影響を受けた領域と二重に熱影響を受けた領域とが存在している。次層のパスとの境界付近の (a) の位置では粗粒

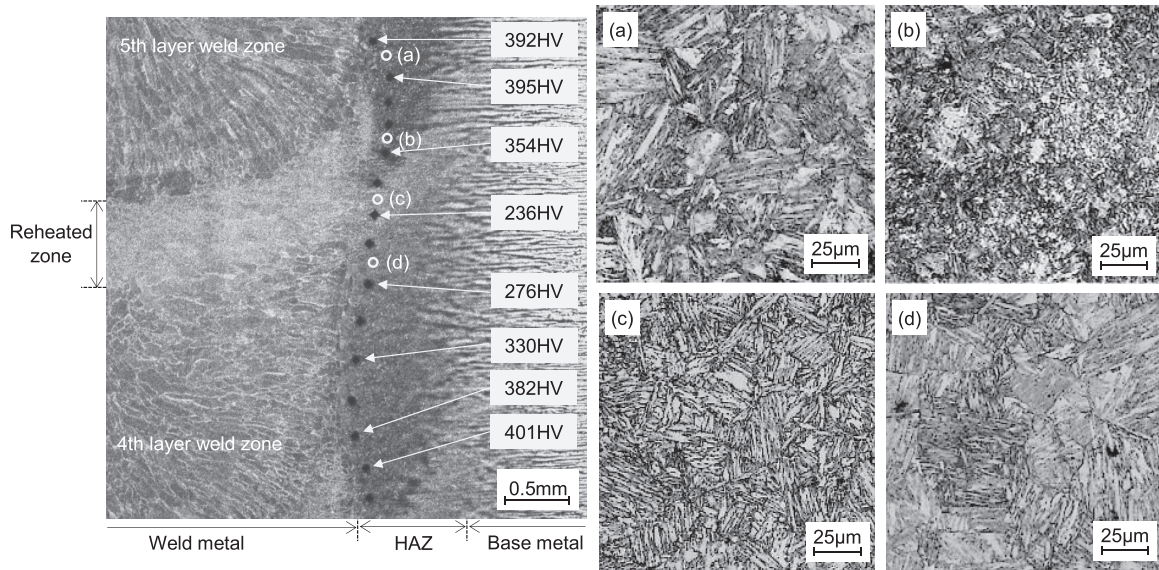


Fig. 16 Microstructure and hardness distribution of lower layer weld zone

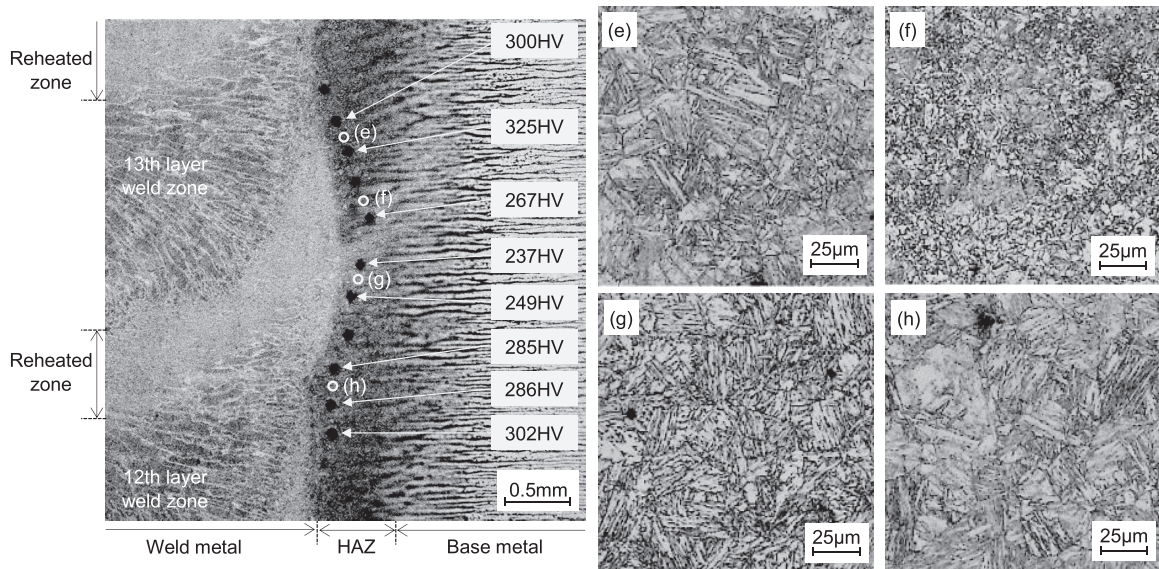


Fig. 17 Microstructure and hardness distribution of upper layer weld zone

HAZ となっており、そこから下方に向かうにしたがって (b) の細粒 HAZ, (c) の 2 相域加熱 HAZ, (d) の粗粒焼戻し HAZ と遷移している。これも一般的なアーク溶接による多パス溶接の熱影響部と同じ傾向である。これらの領域の硬さ分布を見ると、粗粒 HAZ が最も硬化しており、390~400 HV 程度であった。細粒 HAZ, 2 相域加熱 HAZ, 粗粒焼戻し HAZ は粗粒 HAZ と比較すると硬さが低下しているという傾向が見られた。

Fig. 17 は、上層パス (12パス目から13パス目) の溶融境界近傍のミクロ組織写真および溶接熱影響部の硬さ分布である。また、図中の (e) から (h) の位置の高倍率でのミクロ組織写真を併せて示している。この領域では下層付近と比較して溶接熱影響部での最高硬さが低く、325 HV 程度であ

った。次層のパスとの境界付近の (e) は (h) とよく似た組織であり、粗粒焼戻し HAZ であると判断できる。(f) は組織が比較的細粒化しており、(g) は 2 相域加熱 HAZ であると考えることができる。上層パス付近では下層パス付近に比べて開先幅が広く、1 パスあたりの積層高さが低い。そのため次層だけでなく次々層以降の入熱の影響を強く受けており、それにより粗粒 HAZ が焼戻されて硬さが低下したものと考えられる。

狭開先溶接においては、施工効率を改善するために 1 パスあたりの溶着量を増加させ積層高さを高くすることが効果的であると考えられるが、その場合は溶接熱影響部の最高硬さが比較的高くなることに注意が必要である。一方で、レーザー溶接は入熱量や入熱領域をコントロールしやすい溶

接法であることから、1パスあたりの積層高さを低くし適正な多重熱履歴を与えることで、組織の微細化や硬さの制御ができる可能性があると言える。

5. 結 言

本報では、ガス切断により開先加工した板厚 50 mm の厚板突合せ試験体に対して、揺動レーザーを用いた狭開先溶接実験を実施し、その効果について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 狭開先レーザー溶接においては、開先形状とレーザー光の幾何学的関係を把握し干渉を防止する必要がある。溶接実験に先立ち、一般化平面ひずみモデルによる2次元解析を実施し、その結果をもとに実験条件における適正な開先形状を導出した。
- 2) 揺動レーザーによる狭開先溶接法を用いて、板厚 50 mm の長尺のガス切断開先試験体に対して内部欠陥のない突合せ溶接継手を作製した。継手性能試験の結果、溶接継手が健全であることが示された。
- 3) 一般化平面ひずみモデルによる2次元解析の結果と溶接実験での溶接変形結果を比較すると、両者は定量的におおよそ一致した。構築した解析モデルは狭開先レーザー溶接の溶接変形を予測するうえで十分な妥当性を有している。
- 4) 狭開先溶接では、溶接熱影響部は多重の熱履歴を受ける。ミクロ組織は粗粒 HAZ、細粒 HAZ、2相域加熱 HAZ、粗粒焼戻し HAZ が存在しており、粗粒 HAZ で最も硬さが高くなる。1パスあたりの積層高さが低い領域のほうが熱影響部での最高硬さが低くなる傾向が見られた。溶接条件を適正に選択することで、溶接部の組織や硬さを制御できる可能性がある。

参 考 文 献

- 1) Technical Commission on Welding Processes, The Japan Welding Society: NARROW GAP WELDING (NGW) The State-of-the-Art in Japan, Kuroki shuppan, (1984). (in Japanese)
- 2) X. Zhang, E. Ashida and S. Tarasawa: Properties of Welded Joint for Narrow Gap Laser Welding of Austenitic Stainless Steels, ICALEO 2010 Congress Proceedings, (2010), 632-637.
- 3) T. Okagaito, H. Watanabe, K. Shinozaki, M. Yamamoto, K. Kadoi, A. Nishijima and R. Phanim: Developmant of Narrow Gap Hot-wire Laser Welding Process for Heat-Resistant Steel Pipe for Boiler, Preprint of the National meeting of J.W.S, 91, (2012). (in Japanese).
- 4) T. Tsukamoto, H. Kawanaka and Y. Maeda: Laser Narrow Gap Welding of Thick Carbon Steels using High Brightness Laser with Beam Oscillation, ICALEO 2011 Congress Proceedings, (2011), 141-146.
- 5) K. Yamaguchi, Y. Murai, N. Eguchi and T. Kobashi: Application of Laser Welding Using Band Filler Metal for Narrow Gap Joint, Preprint of the National meeting of J.W.S, 90, (2011). (in Japanese)
- 6) D. Dittrich, R. Schedewy, B. Brenner and J. Standfu?: Laser-Multi-Pass-Narrow-Gap-Welding of Hot Crack Sensitive Thick Aluminum Plates, Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference 2013, Physics Procedia 41, (2013), 225-233.
- 7) Y. Yamazaki, Y. Abe, Y. Hioki, M. Nakatani, A. Kitagawa and K. Nakata: Fundamental Study of Narrow Gap Welding with Oscillation Laser Beam, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 32-2 (2014), 114-121. (in Japanese)
- 8) Y. Yamazaki, Y. Abe, Y. Hioki, M. Nakatani, A. Kitagawa and K. Nakata: Development of Gap Sensing System for Narrow Gap Laser Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 32-3 (2014), 122-129. (in Japanese)
- 9) M. Shoji: 伝熱工学, University of Tokyo Press (1995). (in Japanese)
- 10) The Japan Institute of Metals and Materials: 金属便覧改訂3版, Maruzen (1971). (in Japanese)
- 11) E. Ashida, S. Shono, M. Ushio and T. Hidaka: Measurement of Heat Efficiency in Nd:YAG-Laser Welding, Preprint of the National meeting of J.W.S, 66, (2000). (in Japanese)
- 12) Y. Kawahito, N. Matsumoto, Y. Abe and S. Katayama: Laser Absorption Characteristics in High Power Fiber Laser Welding of Stainless Steel, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27-3 (2009), 183-188. (in Japanese)