

# 大出力ファイバレーザ溶接システムの開発と生産応用

## Development of a 10kW Fiber Laser Welding System and Its Applications



北 側 彰 一	Akikazu Kitagawa	①
山 崎 洋 輔	Yosuke Yamazaki	②
塚 本 計	Kei Tsukamoto	④
田 中 智 大	Tomohiro Tanaka	③
仲 村 幸 男	Yukio Nakamura	⑤
松 田 安 弘	Yasuhiro Matsuda	⑤

### あ ら ま し

当社が蓄積してきた生産技術をベースにリアルタイムで溶接位置を認識する機能やアーク溶接を併用する機能を有する10kWのファイバレーザ溶接システムを関係会社のH&Fと共同開発した。この溶接システムでは15mm程度までの厚板溶接が可能となり、炭素鋼製の化学機械部材等への適用が可能となった。化学機械部材は15mmのフランジに12mmのウェブ材を直角に取り付けた4m程度のシンプルなT形状の部材であるが、アーク溶接では変形が大きく矯正作業に多大な時間を要していた。自動レーザ溶接の採用により、変形がなく矯正不要な部材を安定的に生産できる見通しが得られたので、2009年10月より連続生産を開始した。

### Abstract

We have developed a 10kW fiber laser welding system which has a real-time seam tracking function and an integrated arc welding function with H&F. The deep laser welding capability of around 15 mm expands its application for use with carbon steel parts in chemical plant equipment. The test parts were simple T-joint shapes around 4 m long. We welded 12 mm T web material to a 15 mm T flange at a right angle. Previously, this type of fabrication required thousands of hours of correction work because of the large deformations caused by arc welding. The laser welding tests gave clear proof of high quality, high performance T joint fabrication, and thus we started continuous production in October 2009.

## 1. 緒 言

当社では10年以上にわたり薄板の原子力関連機器へレーザ溶接を適用<sup>1,3)</sup>してきたが、近年原子力関連機器等の受注が増加し対象製品の板厚も増加してきた。一方、この10年間にレーザ発振器はランプ励起YAGレーザ、半導体励起YAGレーザ、さらにはファイバレーザやディスクレーザへと発振器の形式に革新的な変化をもたらされた。この結果、レーザ出力、ビームの集光性、ビームの安定性、発振効率（レーザ出力を投入電力で除した値）、コンパクト化、メンテナンス

性が大幅に改善され、安心して工場での実生産へ適用できるものとなってきた。また、生産技術の面においても、レーザ溶接で発生しやすかった気孔などの溶接欠陥を防止する技術が確立され、学協会の研究会においても「安心して使えるレーザ溶接」<sup>4,5)</sup>などの講演がなされるようになった。

実際、自動車ボディの生産では薄鋼板を突合せレーザで溶接するテーラードブランク溶接法が世界的な生産技術として定着している。また、欧州の先進的な造船所では造船部材をレーザとアークを併用する溶接法が採用され、レーザ溶接は特殊な溶接法から一般的な溶接法になりつつある。

当社においても15mm程度の溶接が可能となれば、上述の原子力関連機器のみでなく化学機械の部材など精度とともに量産が必要とされるものがあり、レーザ溶接が実用的な技術となった。

① Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部 博士(工学) 大阪大学接合科学研究所 招聘教授  
 ② Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部、大阪大学接合科学研究所 特任助教  
 ③ Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部  
 ④ Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 プロセス機器ビジネスユニット  
 ⑤ Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 産業機械ビジネスユニット

このため、当社が蓄積してきた生産技術をベースにテーラードブランク溶接システムで多数の販売実績を持つH&Fと共同して、リアルタイムで溶接部を認識する機能やアーク溶接を併用する機能を有する10kWのファイバレーザ溶接システムを開発した。

開発した溶接システムはステンレス鋼製機器のほか、炭素鋼製の化学機械部材の量産に適用している。これらは非常に厳しい寸法精度が要求されひずみ取り作業に多大な時間を要したが、レーザ溶接の採用によりひずみがほとんどない部材を短時間に安定して製造でき、大幅な生産性向上を達成している。

## 2. レーザ溶接

### 2.1 レーザ溶接の特長

レーザ溶接は、レーザビームを小さなスポットに集光することで、アーク溶接に比べ非常に大きなパワー密度が得られることから以下のような特長を持っている。

- ・幅が狭く深い溶込みが得られる。
- ・高速溶接が可能である。
- ・溶接入熱を大幅に低減でき、ワークの溶接変形を最小化できる。
- ・貫通溶接能力が高く、1パスで溶加材を加えることなく継手を形成できる。

また、ファイバレーザの波長は $1.07\mu\text{m}$ の近赤外光線であるため、大気を構成する酸素や窒素と相互作用がほとんどなく、アーク溶接や $\text{CO}_2$ レーザ溶接に比べ、溶接金属中へこれらのガスを混入する割合は少ない。さらに、レーザ溶接はレーザ出力や溶接速度などの溶接条件を数値的に制御する自動溶接であることから、

- ・安定した品質の製品を製造できる。
- ・細かな溶接条件の制御が可能である。
- ・特殊な技能を必要としない。

特長を有している。

### 2.2 レーザ溶接システム

レーザ溶接システムはレーザビームを生成するレーザ発振器、レーザビームを導光する光ファイバおよび導光されたレーザビームを集光する加工ヘッド等からなるレーザ光学系ならびに集光されたレーザビームを溶接部へ正確に照射するためのロボットやワークを保持するポジショナーなどの機械システムからなっている。

表1に開発したシステムの概略仕様を示す。レーザ発振器は15mm程度までの鋼板を1パスで溶接することを目標に10kWで集光性のよいファイバレーザを選定した。加工機は長さ5m程度の製品を溶接するのに十分な走行装置に6軸の多関節ロボットを搭載し、様々な形状の部材に適用できるようにした。(図1)

溶接部のギャップや目違いなどの寸法公差や溶接変形などが生じるため、溶接位置をリアルタイムで認識しロボットへリアルタイムに溶接位置情報を指示するシームトラッキングセンサを装備した。さらに、設計要求などから溶接金属を付加する必要があることか

ら、MIGアークの併用やコールドワイヤの添加が可能なシステムとした。

表1 レーザ溶接システムの仕様

装置	仕様
レーザ発振器	10kWファイバレーザ (波長 $1.07\mu\text{m}$ )
加工機	走行装置+6軸ロボット
トラッキング	リアルタイムシームトラッキング
アーク併用	デジタル溶接機
ワイヤ送給	コールドワイヤ

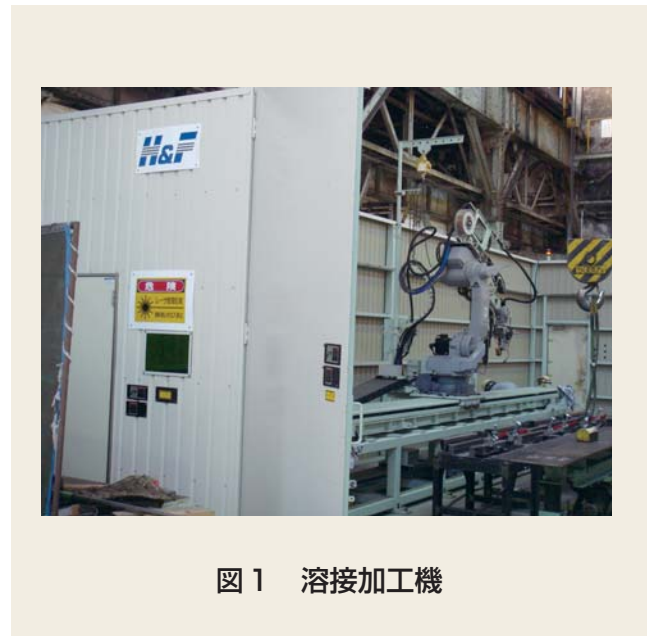
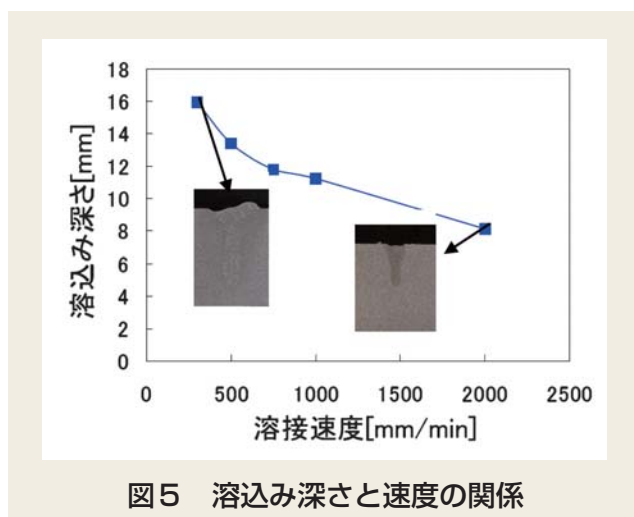
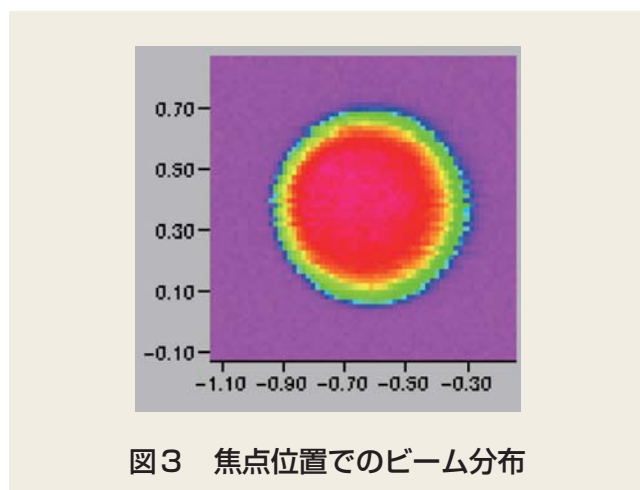
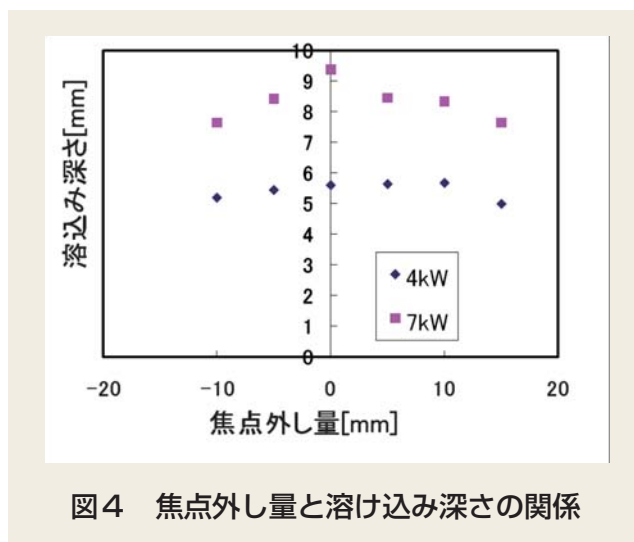
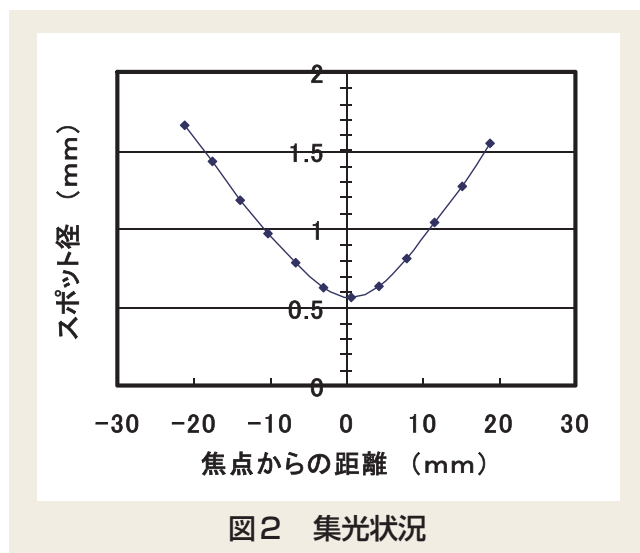


図1 溶接加工機

### 2.3 ビーム集光特性

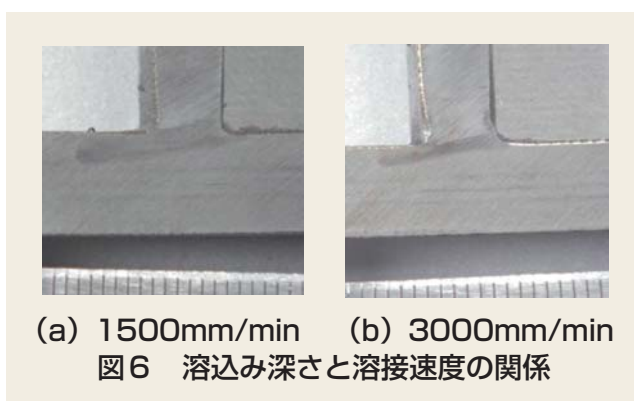
コア径0.3mmのプロセスファイバ（レーザ発振器から集光ヘッドへレーザビームを導光する光ファイバ）で導光されたレーザビームを結像比2倍の集光ヘッド（内蔵するレンズの焦点距離の比が2倍）を用いて集光した場合の収束ビーム径（スポット径）の変化を図2に示す。スポット径は焦点位置で0.6mmであり、焦点位置前後の数mmの範囲でほとんど変化しない。この領域を越えるとビーム径は拡大し、焦点位置から20mm程度ずれた位置でのスポット径は1.5mmとなる。したがって、この位置でのパワー密度は焦点位置と比べ約1/7となる。図3に焦点位置でのパワー密度計測結果を示す。ビームはスポット径0.6mmの範囲でほぼ均一に分布している。もし、レーザパワーを10kWとすると焦点位置でのパワー密度は $3.5 \times 10^8 \text{W/mm}^2$ に達し、レーザ特有の深いフィンガータ型の溶込み形成が得られる限界パワー密度（ $2.0 \times 10^7 \text{W/mm}^2$ ）の17倍に達する非常に高いパワー密度が得られる。



2.4 溶接能力 溶接速度を1m/min一定とし、レーザー出力と焦点外し位置が溶込みに与える影響を図4に示す。焦点外し量が0の位置（焦点位置がワーク表面）で溶込深さが最大となっている。また、7kWと4kWでは溶込み深さが大きく異なり、厚板を溶接するには大きなレーザー出力が必要である。また、前述のように、焦点位置が多少変化しても限界パワー密度を超える十分なパワー密度を確保できるため、溶込み深さに大幅な変化は見られない。

炭素鋼を10kWで溶接した場合の溶込み深さを図5に示す。溶込み深さは、溶接速度2m/minで7mmであるが、溶接速度を30cm/minと遅くし単位溶接長さあたりの入熱を増加させることで16mmの溶込み深さが得られている。

図6に6mm t ウェブと9mm t フランジを10kWで片側すみ肉溶接した場合の溶込み形状を示す。(a)に示す1500mm/minの速度で溶接した場合は、溶込み深さ13mm、(b)で示す3000mm/minで溶接した場合の溶込み深さは9mmが得られている。片側貫通溶接の場合は、ビームがウェブ貫通した後、フランジ表層部を溶融する形態となるためか、ビードオンプレートよりも深い溶込みが得られる。



### 3. 製品への適用

3.1 レーザ溶接の適用対象 当社では従来から、ステンレス鋼製の原子力関係部品へレーザー溶接を適用してきたが、化学機械で用いられる炭素鋼製部材への適用が課題となった。この部材は、複雑な構造をした化学機械内部に組み込まれる製品の一部である。この製品製造工程には多くの溶接が必要とされるが、T字すみ肉部材が骨格を形成するものである。

**3.2 被溶接部材加工** 精度の優れたレーザー溶接製品を製作するには被溶接部材の精度および性状確保が必要なため、レーザー切断による部材加工の可能性を検討した。図7に8mm炭素鋼のレーザー切断端面のマクロ組織と板厚中央でのミクロ組織を示す。レーザー切断面はほぼ直線で酸化物等が残存していない。また熱影響部幅は0.25mm程度でありレーザー溶接により再溶融される範囲にあり、部材加工へレーザー切断が適用できると判断された。



(a)マクロ組織 (b)ミクロ組織  
図7 レーザ切断面の組織

### 3.3 T字すみ肉部材の寸法形状と要求精度

図8に対象部材の寸法形状を示す。フランジ厚さ15mm、ウェブ厚さ10mmおよび12mmの2種類を対象とした。部材長さは最大4mである。溶接部はフランジの中央から偏芯し、部材の中立軸から大きくずれている。このため、K開先を用いたアーク溶接での製作では、フランジの横曲りによるウェブの平面度(3mm以下)が損なわれ、フランジの縦曲りにより伸直度(2mm以下)も確保できなかった。レーザー溶接ではウェブとフランジを直角に突合せ両面から溶接することで、この精度に挑戦した。

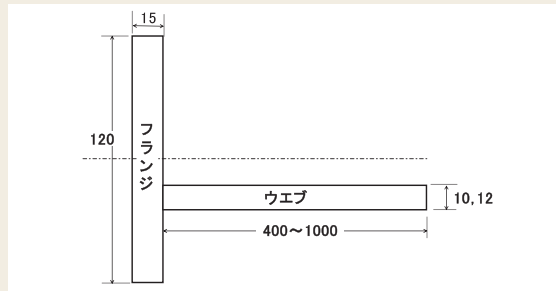
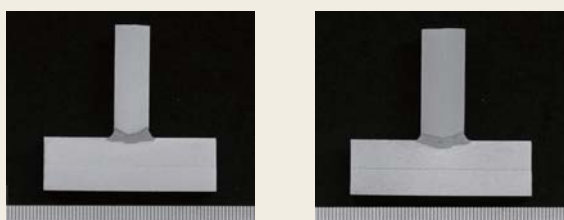


図8 対象部材の断面形状

**3.4 溶接部の断面像** 図9に溶接部の断面マクロ像を示す。(a)はウェブ厚さ10mmの部材、(b)はウェブ厚さ12mmの部材であり、両側からのビードが十分に会合し、欠陥のない完全溶込み溶接が実現できている。



部材(a) 10t-15t 部材(b) 12t-15t  
図9 溶接部の断面マクロ像

**3.5 溶接部の硬さ** 炭素鋼の溶接では、レーザー溶接の入熱が少ないことから溶接部の硬度が著しく上昇する場合がある。ロイズ船級協会は1982年に造船部材へCO<sub>2</sub>レーザー溶接を適用するためのガイドライン<sup>6)</sup>を示し、この中でフィラーワイヤを用いない溶接部の最高硬さを380Hv<sub>5</sub>以下と要求している。今回の部材に硬さに対する要求はないが、確認のため船級協会の規定に従い硬さ測定を行った。硬さ分布測定位置(図10)と入熱の少ない部材(a)での測定結果を表2に示す。最高硬さは、ビード先端の会合部で299 Hv<sub>5</sub>を示したが、380Hv<sub>5</sub>よりはるかに低い硬度を実現できている。

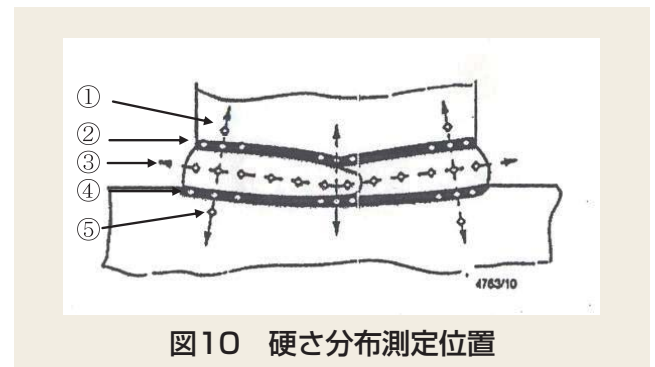


図10 硬さ分布測定位置

表2 ビッカース硬さ分布(Hv<sub>5</sub>)

部位	左		中央			右			
	1	2	3	4	5	6	7		
①		155					155		
②	210	203	206	204	212	199	203	210	221
③	260	262	257	299	286	271	229	271	274
④	229	234	232	221	224	241	227	246	260
⑤		148						155	

**3.6 継手強度** すみ肉溶接では継手強度が確認できないため、フランジとウェブを突合せ、すみ肉溶接と同条件で突合せ継手を作製した。この継手の継手引張試験、表曲げ試験および裏曲げ試験を行った。継手引張試験結果を表3に示す。いずれも母材部での延性破壊となった。また、いずれの表曲げ試験、裏曲げ試験ともキズは見当たらず合格した。

表3 引張り試験結果

部材	引張強さ (MPa)	破断位置
10t-15t	503.9	母材
10t-15t	498.6	母材
12t-15t	499.3	母材
12t-15t	497.1	母材

**3.7 部材の製造** レーザ溶接のオペレータはウェブとフランジを加工室に搬入し、それらをジグにクランプ後、シームトラッキングセンサを稼働させればよい。シームトラッキングセンサはワークの始端部および終端部を検出し、溶接中は図11に示すように

ウェブ面とフランジ面をリアルタイムに検出する。もし、ワークが変形してもフランジ面とウェブ面の交点を算出し、所定の狙い位置情報をロボットに与えるようになっている。

図12に完成した部材の外観と溶接開始部分のビード外観を示す。始端部も含め非常に美しく安定した溶接が実現できている。

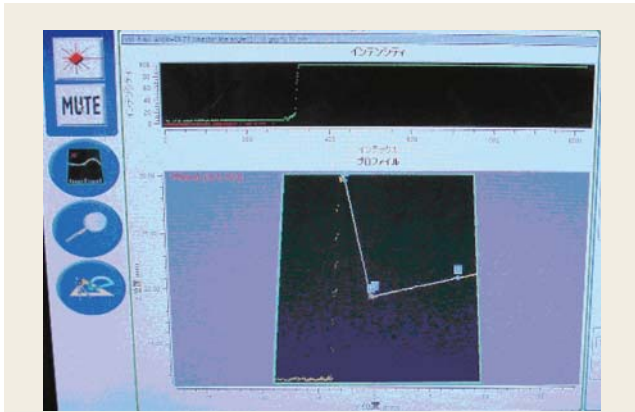


図11 シームトラッキングによる開先認識



図12 製作された部材

**3.8 製作部材の精度** 溶接されたT継手部材の変形はほとんど見られず、目視ではほとんど変形を確認できない。このため、図13に示す●点の位置をシームトラッキングセンサにより計測した。

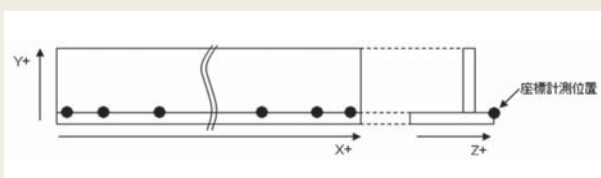


図13 変形計測位置

図14にフランジの横曲り変形量を示す。部材 (a) では0.3mm、部材 (b) では0.4mmの微小な変形でありウェブに要求される平面度を満足した。図15にフランジの縦曲り変形量を示す。(a) 材の最大たわみは1.3mm、(b) 材の最大たわみは1.5mmとなり、溶接入熱の影響が多少見られたが、ともにフランジに要求される伸直度を満足し、従来必要とされたひずみ取り作業 (図16) が不要となった。

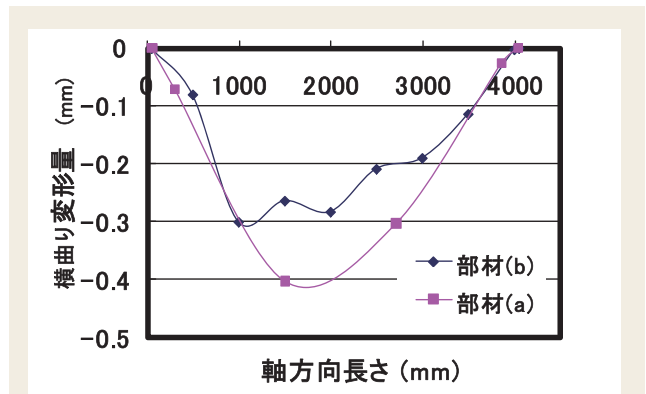


図14 フランジの横曲り変形量

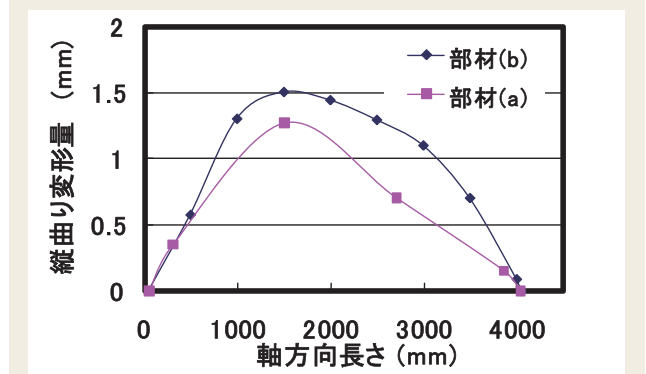


図15 フランジの縦曲り変形量



図16 ひずみ取り状況(従来)

**3.9 製作部材の非破壊検査** 製作した部材溶接部の健全性を立体的に確認するため、フェイズドアレイ超音波探傷器により (b) 部材の検査を実施した。プローブは周波数10MHz、素子数128のものを用い、フランジ下面からウェブ面に向かって垂直探傷を行った。探傷感度は深さ15mmの位置にあるφ3mm横穴を80%に調整し、+6dbとした。画像処理された断面像を図17に示す。図中の赤線 (15.0) の上側がフランジ、下側がウェブである。縦軸の38.5mmがウェブ板厚の中心である。15mmの赤線位置がフランジとウェブの界面である、溶接断面にはキズが検出されず良好な製品が製造できていることが確認できた。

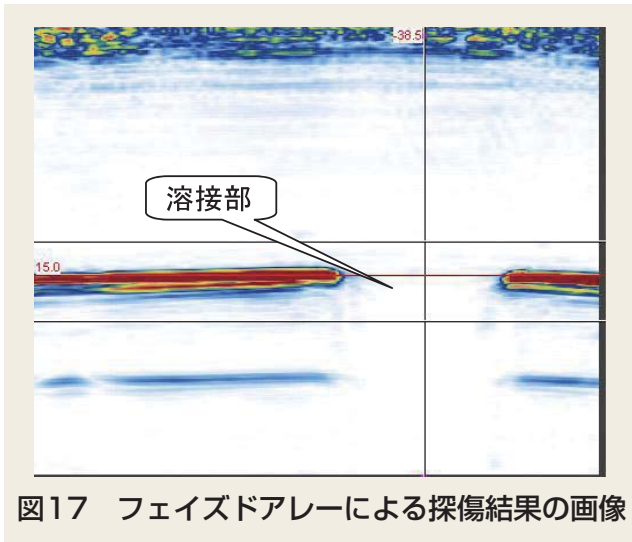


図17 フェイズドアレーによる探傷結果の画像

**3.10 T継ぎ手部材の生産** 上述のように良好なレーザー溶接特性が得られたことから、2009年10月より連続的な生産を開始している。

#### 4. まとめ

- (1) レーザ溶接により変形がほとんどなく美しいT継手部材を安定して製作できた。このため、従来必要とされた矯正作業が不要となり、精度の高い製品の生産が可能となった。
- (2) 10kWの大出力レーザー溶接システムを開発し、ウェブ板厚10mmおよび12mmの炭素鋼T継手部材への生産応用を2009年10月より開始した。
- (3) 12mmまでの炭素鋼部材へのレーザー溶接例をご紹介したが、厚板ステンレス鋼等へも適用が可能である。さらなる研究開発を推進し、高精度・高品質のレーザー溶接製品を顧客の皆様へ提供したいと考えている。

#### 参考文献

- (1) 北側彰一ほか：ステンレス鋼薄板複層容器のレーザー溶接，溶接学会全国大会講演概要，2000，67，104-105.
- (2) 北側彰一ほか：レーザー溶接による304ステンレス鋼製容器の製造に関する研究，溶接学会論文集，2002，20（2），301-308.
- (3) 北側彰一：レーザー溶接変形を制御する，溶接技術，2005，53（7），64-70.
- (4) 宮崎康信：鉄鋼材料のレーザー溶接性に及ぼすガスの影響，レーザー加工学会講演論文集，2007，（2），147-160.
- (5) 片山聖二：ステンレス鋼のレーザー溶接性に及ぼすガス成分の影響，レーザー加工学会講演論文集，2007，（2），161-170.
- (6) Marine Division Lloyd's Register of Shipping :Guideline for Approval CO2-Laser Welding, March 1997.

#### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部  
技術研究所 機械・インフラ技術グループ  
北側彰一  
Tel : 06-6551-9239 Fax : 06-6551-9841  
e-mail : kitagawa\_a@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Business & Product Development  
Headquarters  
Technical Research Institute  
Machinery & Infrastructure Technology  
Group  
Akikazu Kitagawa  
Tel:+81-6-6551-9239 Fax:+81-6-6551-9841  
e-mail : kitagawa\_a@hitachizosen.co.jp



北側彰一



山崎洋輔



塚本計



田中智大



仲村幸男



松田安弘