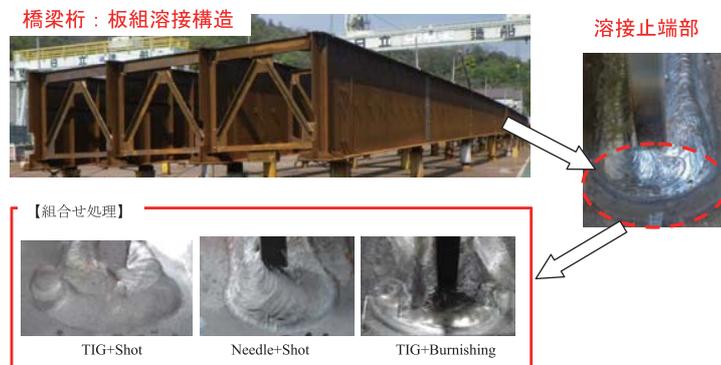


# 高張力鋼の高疲労強度溶接継手の開発

Development of High Fatigue Strength Welded Joint in High Strength Steel



馬	東	輝	Donghui Ma	①
芦	田	史	Satoshi Ashida	②
岡	田	潤	Jun Okada	①
北	村	幸	Koji Kitamura	①
深	井	康	Yasuhiro Fukai	③
森	田	寛	Hiroyuki Morita	②

## あ ら ま し

道路橋など大型の鋼構造物には溶接が多用されているが、溶接止端部に繰返し負荷が作用すると、疲労き裂が発生する場合がある。この疲労き裂発生を防止することは非常に重要である。そこで、本研究では高張力鋼（HT780材）の溶接継手の疲労強度向上を目的として、溶接止端部の応力集中および溶接残留応力に着目し、これらを低減させる各種処理方法の効果を比較した。さらに効果を増大させることを狙いとしてそれらの処理の組合せについて検討した。その結果、TIGドレッシングとバニシングの組合せ処理を適用することにより、応力集中が低減し、最大-800MPa、深さ1800 $\mu$ mの圧縮残留応力が得られることが分かった。疲労試験結果より、溶接継手の疲労強度は大幅に改善され、疲労限度は[社]日本鋼構造協会が設定する母材の一定振幅応力範囲の打ち切り限界190MPaより大きくなり、最大で約280MPaに到達した。

## Abstract

The welded joints used for large steel structures such as road bridges can occasionally develop fatigue cracks in the weld toe when load is applied repeatedly. Preventing fatigue cracks is very important. In this study, combinational treatment was applied to the weld toe of high strength steel (HT780) in order to generate large and deep compression residual stress and reduce the stress concentration. As a result of fatigue tests, the fatigue limit of all treated joints was higher than as weld, and combinational treatment joints of TIG dressing and burnishing especially improved to 280MPa more than the 190MPa design criteria of base metal set by the Japanese Society of Steel Construction. It was concluded that combinational treatment is an effective method for increasing the fatigue limit.

## 1. 緒 言

道路橋など大型の鋼構造物には溶接が多用されているが、溶接止端部に繰返し負荷が作用すると、溶接部の形状による高い応力集中や溶接による引張残留応力によって疲労き裂が発生する場合がある。このような疲労き裂が破壊事故の原因となっていることも多く<sup>1)</sup>、これらを防止することは非常に重要である。

材料（母材）の疲労強度は引張強さにおおよそ比例す

るとされているが、溶接継手の疲労強度は、溶接形状による高い応力集中および溶接止端部に生じる引張残留応力に大きく依存し、必ずしも母材の強度に比例しない<sup>2)、3)</sup>。高張力鋼は高い強度を有しているため、構造物を軽量化でき、大きな作用応力に対して耐えられるが、溶接部の疲労強度は高くないため、設計上、疲労強度が制約となっている。溶接部の疲労強度を向上させることができれば、高張力鋼をより有効に活用することが可能となる<sup>3)、4)</sup>。

一般的には、溶接継手の疲労強度を向上させる方法として、溶接止端部形状をなめらかにして応力集中を低減させる方法が考えられる。代表として、グラインダー仕上げ、TIG (Tungsten Inert Gas) ドレッシングがある<sup>3)-6)</sup>。

また、溶接止端部における引張残留応力を圧縮残留応力にする方法も効果的である。具体的な圧縮残留応力

① Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 ものづくり基盤研究センター 博士(工学)

② Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 ものづくり基盤研究センター

③ Hitz日立造船㈱ 社会インフラ事業本部 開発センター

付与方法として溶接止端部に機械的処理を施す方法がある。古くからショットピーニングやハンマーピーニングなど衝撃処理の方法が用いられ<sup>7)~9)</sup>、機械部品など多くの産業分野で実用されている。

いずれも応力集中と溶接残留応力の低減方法について、単一的な目的で使用されており、これらの両方の目的を狙った組合せ処理についての研究開発は極めて少ない。

本研究では高張力鋼HT780材を用いて、溶接継手の中でも橋梁によく用いられる代表的な溶接継手形式であるガセット、および十字溶接継手を対象として、溶接止端部の応力集中と溶接残留応力の両方に着目し、単一処理方法の効果を比較するとともにそれらの組合せ処理

表1 供試鋼材の化学成分(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.15	0.32	1.2	0.009	0.003	0.01	0.08	0.11

表2 供試鋼材の機械的性質

Density	Young's modulus	Poisson's ratio	Yield strength	Tensile strength	Elongation
P (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_M$ (MPa)	$\phi$ (%)
7800	218.8	0.3	756.5	848	24

表3 溶接条件

	MMAW of Gusset joint	MAG Welding of Cruciform joint
Current (A)	175	300
Voltage (V)	22	30
Welding speed (mm/s)	1.5~1.8	3~5
Welding material	LB-116	MG-80
Rod diameter (mm)	5.0	1.2
Shield gas	—	Ar80%-CO <sub>2</sub> 20%

MMAW : Manual Metal Arc Welding

MAG : Metal Active Gas

を検討した。組み合わせ処理を施した溶接継手の疲労試験を行い、疲労強度の改善に及ぼす溶接止端部の圧縮残留応力の影響についても検討した。それらの結果について報告する。

## 2. 試験方法

**2.1 試験体** 供試材料は圧延鋼板HT780である。その化学成分および機械的性質を表1および表2に示す。本研究では、ガセット<sup>10)</sup>、および十字溶接継手の2種類について検討した。それぞれの試験体の形状を図1に示す。ベースプレート(t=9mm)とリッププレート(t=6mm)の接合は表3に示す条件による脚長6mmをねらったすみ肉溶接を行った。

**2.2 圧縮残留応力を付与する方法** 圧縮残留応力を付与する方法として、鋼材によるショットピーニング、ジルコニア材によるショットピーニング、ピン打撃ピーニング、およびバニッシングの4種類を採用した。それぞれの

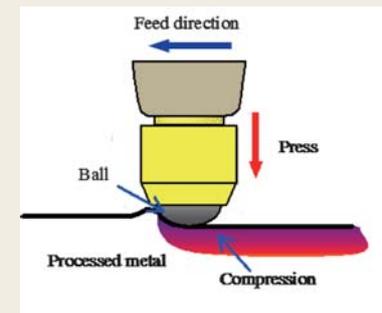
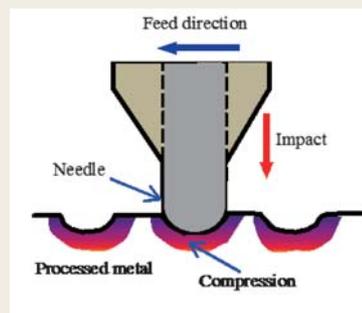
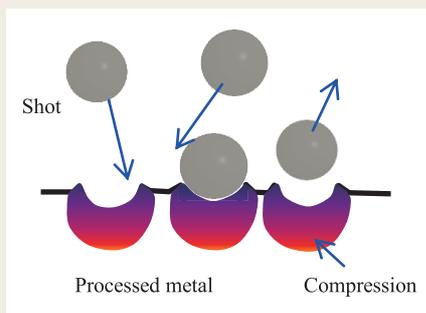
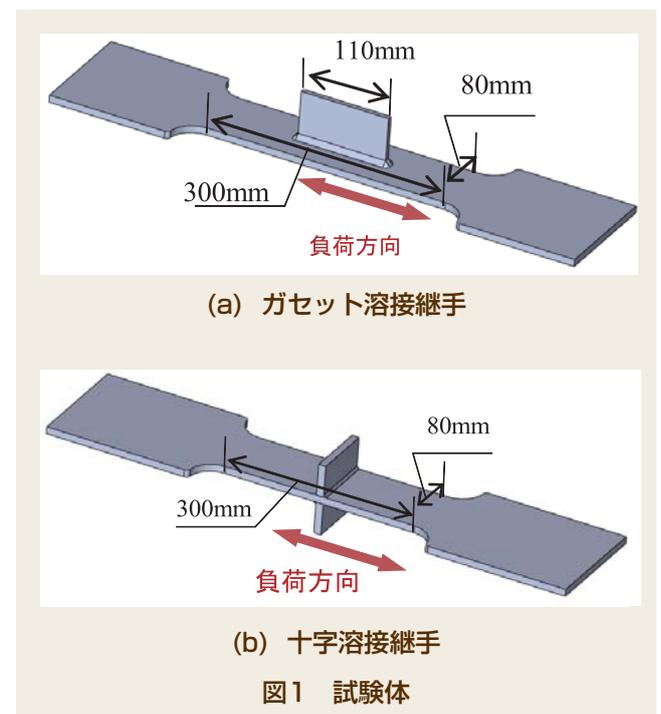


図2 各処理方法の概要

方法の詳細な施工条件を表4に示す。

(1) ショットピーニング エアー直圧式ショット機により、図2 (a) に示すようにショットを材料の表面に衝突させることで、圧縮残留応力の付与を図る方法である。本試験では高硬度鋼材ショットピーニング（以下Shotと表記）とジルコニア材ショットピーニング（以下Zirconia shotと表記）を採用した。

(2) ピン打撃ピーニング 圧縮エアーを動力源とし、図2 (b) に示すようにピン（ニードル）先端を材料の表面に連続的に打撃して、圧縮残留応力の付与を図る方法（以下Needleと表記）である。

(3) バニッシング 加工液の圧力によって、図2 (c) に示すようにボールを材料の表面に押し付けながら、連続的に移動して、圧縮残留応力の付与を図る方法（以下Burnishingと表記）である。

**2.3 組合せ処理** 本研究では、従来行われてきた圧縮残留応力付与方法を組み合わせることで、疲労強度を大幅に改善することを目的としている。溶接止端

部を対象に圧縮残留応力を付与した。組合せ処理については、以下の3種類を採用した。

- (1) Needle+Shot Needleの後にShotを実施する。
- (2) TIG+Shot 止端部をTIGドレッシングで滑らかに加工した（以下TIGと表記）後にShotを実施する。なお、TIGのシールドガスはArを使用した。
- (3) TIG+Burnishing TIGの後にBurnishingを実施する。

図3に各処理の処理領域を示す。Needleの処理範囲は溶接ビード外縁のみとした。ショットの処理領域は、ガセット溶接継手では角巻溶接部の先端20mm×40mm、十字溶接継手ではリブ溶接部に沿った20mm×80mmの範囲とした。Burnishingの処理領域は、ガセット溶接継手では角巻溶接部の先端15mm×40mm、十字溶接継手ではリブ溶接部に沿った15mm×80mmの範囲とした。

**2.4 残留応力の計測** 試験体の残留応力を把握するために、X線応力計測装置μ-X360（パルステック

表4 各処理条件

	Shot peening	Zirconia shot Peening		Needle Peening		Burnishing
Diameter of shot (mm)	0.3	1	Pressure of air (MPa)	0.5	Pressure of oil (MPa)	40
Density of shot (kg/m <sup>3</sup> )	7400	3850	Diameter of Needle (mm)	3	Diameter of ball (mm)	6
Hardness of shot (HV)	1200	650~800	Feed speed (mm/min)	300	Feed speed (mm/min)	500
Coverage (%)	300	300	Impact frequency (times/min)	60~80	Pitch (mm)	0.1
Pressure of air (MPa)	0.45	0.6	—	—	Pressing force (kN)	0.98
Angle of projection (deg)	45	45			—	—

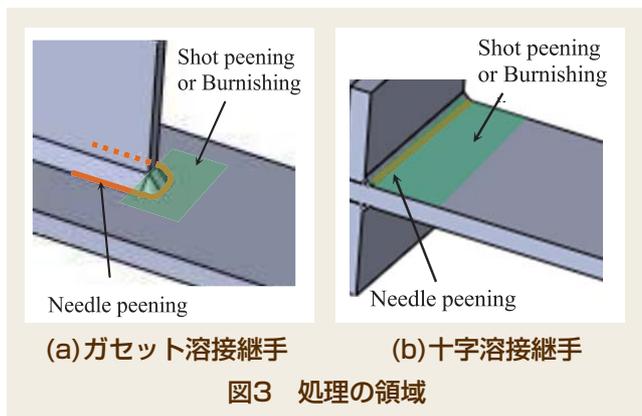
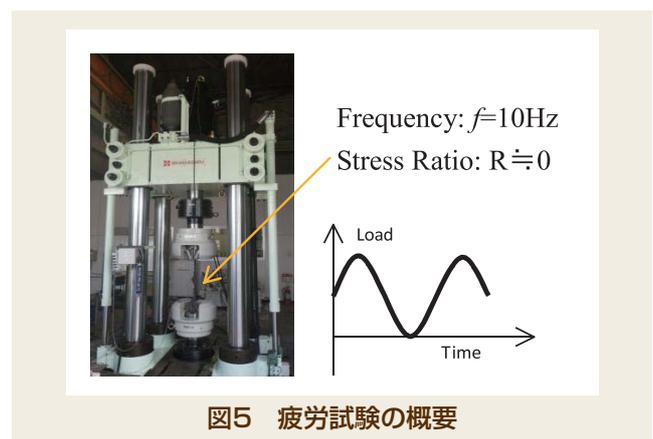
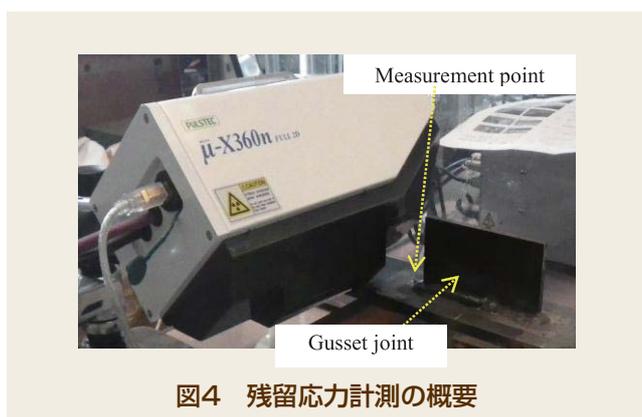


表5 残留応力の計測条件

Measurement method	Cosα method
Characteristic X-ray	Cr-Kα
Diffraction plane	211
Diffraction angle (deg)	156.4
Tube voltage (kV)	20
Tube current (mA)	1
X-ray incident angle ψ <sub>0</sub> (deg)	45
Diameter of irradiated area (mm)	2



工業製)を用い、**図4**に示すように負荷方向の残留応力測定を行った。残留応力の計測方向が負荷方向である。その計測の条件を表5に示す。

**2.5 疲労試験** **図5**に示すように1MN油圧サーボ式疲労試験機(島津製作所製)を用いて、処理を施した試験体、溶接ままの試験体(以下As weldと表記)および母材(圧延鋼板)単体試験体を用いて疲労試験を行った。荷重条件は応力比 $R=0$ (下限応力0.7MPa)、繰り返し周波数 $f=10\text{Hz}$ の一定振幅の正弦波である。

### 3. 残留応力の計測結果

**3.1 表面の残留応力分布の比較** 溶接ビード止端部処理による残留応力変化を評価するため、**図6**に示すように溶接ビード止端から2mmのC点での表面残留応力の測定を行った。各試験体で測定した残留応力の平均値も同図に示している。両溶接継手に対して各処理によって止端部の残留応力は圧縮となっていることがわかる。

また、各処理によって止端部近傍の残留応力分布を把握するために、**図7(a)**に示すようにガセット溶接止端部近傍の位置C点を中心として、幅方向(Y方向)と長手方向(X方向)の残留応力の測定を行った。

**図7(b),(c)**に示すようにNeedleの場合では、処理領域は止端部に沿って曲線状であるため、C点は約-150MPaの圧縮残留応力であるが、C点以外ではAs weldに近い引張残留応力となっている。

Needle以外の場合では、**図7(c)**に示すように長手方向の止端部C点の残留応力はAs weldとTIGでは最大200MPa以上の引張であるが、各組合せでは約-200MPa以上の圧縮残留応力となっており、特にTIG+Burnishingでは、表面の圧縮残留応力は降伏応力

より大きい約-800MPaとなった。溶接止端部前方の表面の残留応力は、Needleを除くと、処理領域内ではほぼ一定の圧縮となり、処理領域を外れるとほぼ0MPaもしくは引張となった。

十字溶接継手の止端部近傍については、**図8(b)**に示すように幅方向の残留応力分布では、As weldが中央0mmから端37mmまで圧縮残留応力になっている。組合せ処理ではAs weldより大きい圧縮残留応力になっており、TIG+Burnishingでは中央部で降伏応力より大きい約-800MPaとなった。

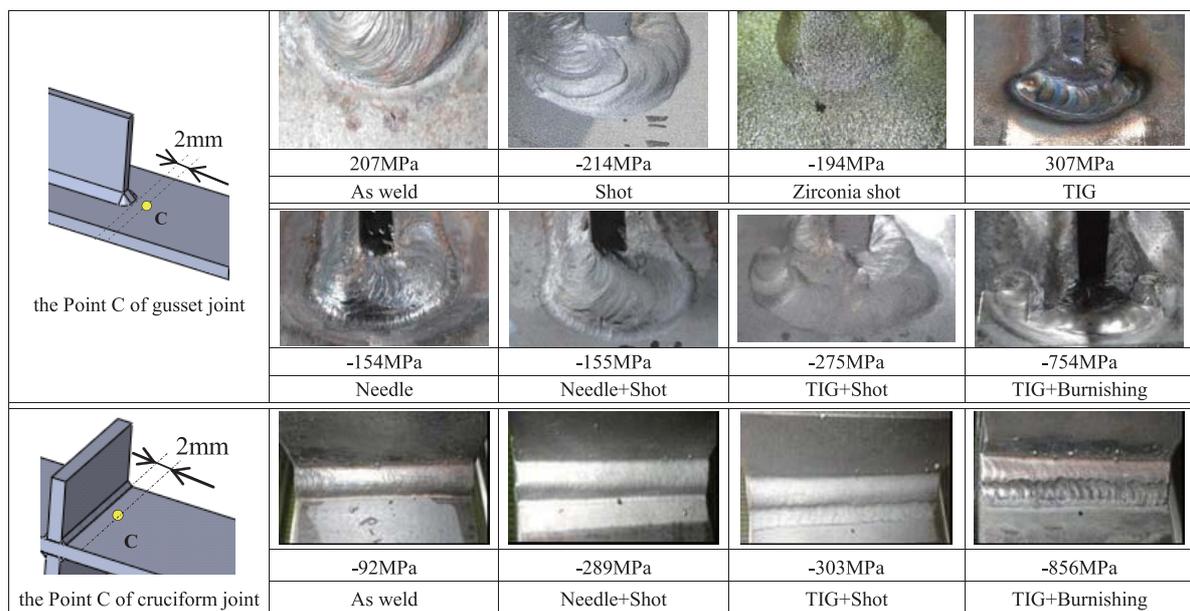
長手方向に沿った表面残留応力は**図8(c)**に示すように、処理領域内ではほぼ一定の圧縮となった。

**3.2 深さ方向の残留応力分布の比較** 処理表面下の深さ方向の残留応力分布を計測した。**図7(a)**に示すC点において電解研磨により数回のステップに分けて約10mm角の領域の材料を除去し、ステップ毎に残留応力を測定した。

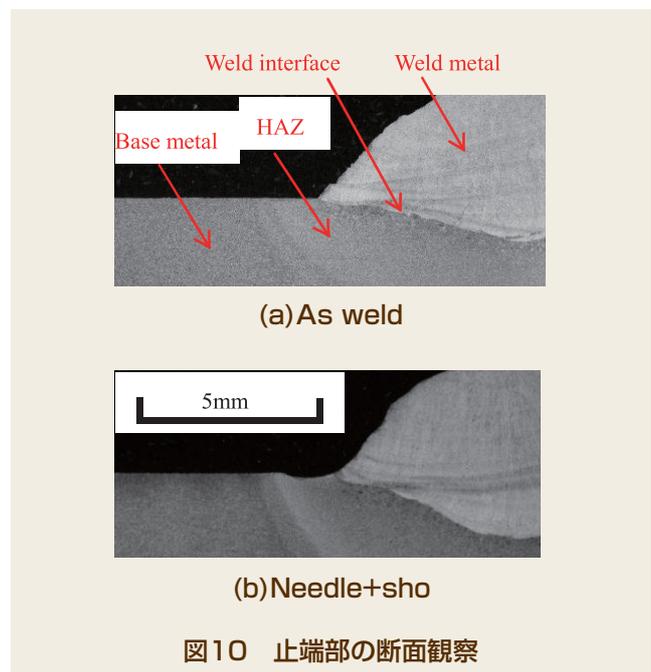
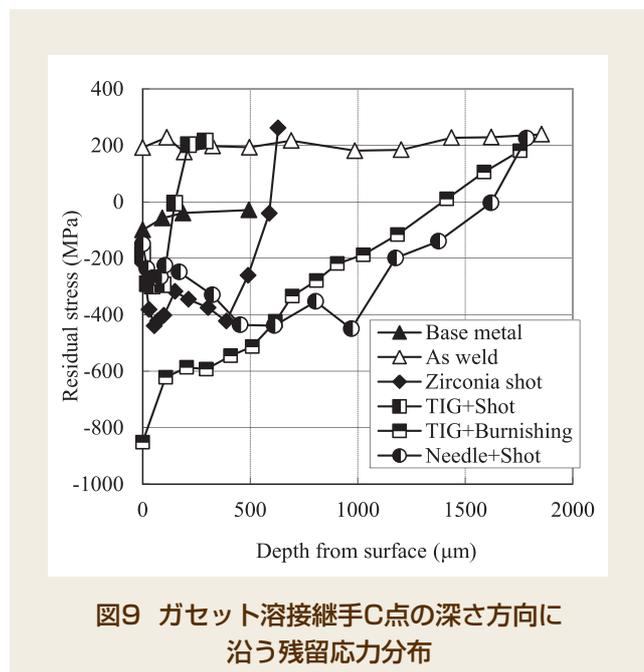
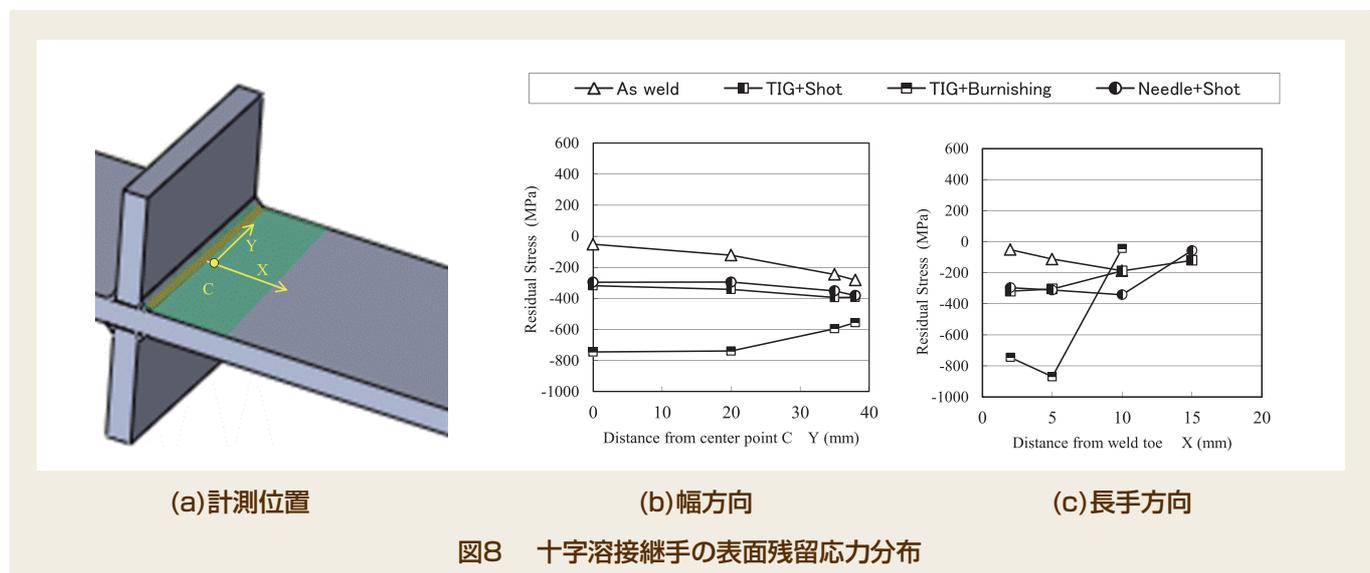
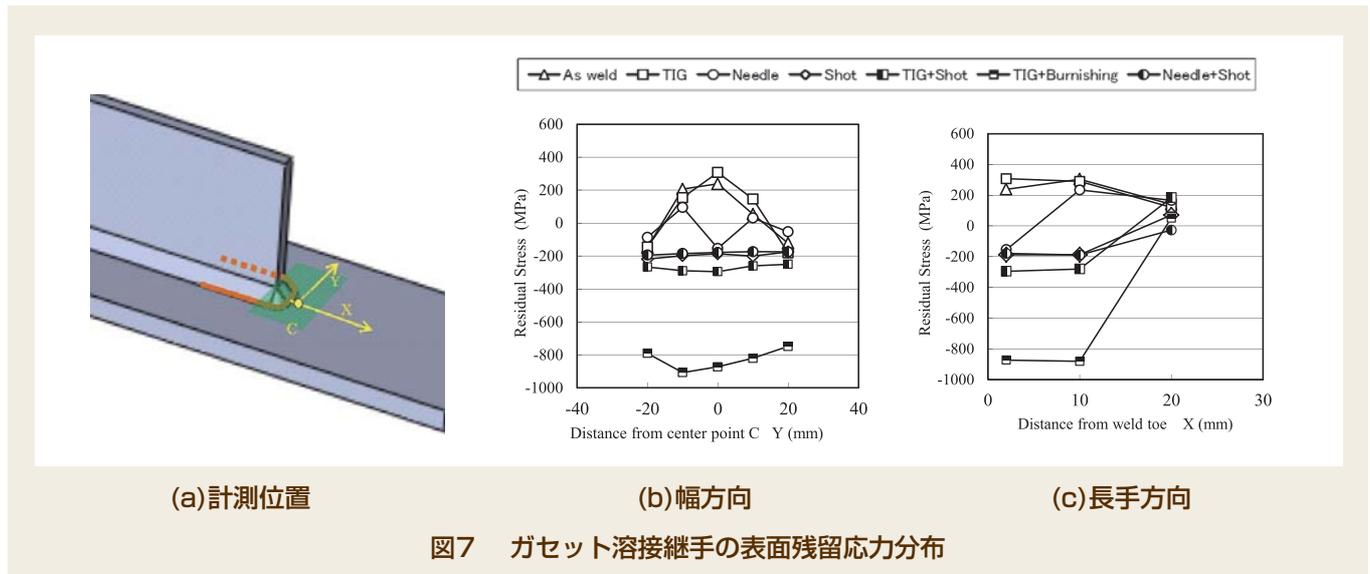
残留応力と表面からの深さの関係を**図9**に示す。表面の残留応力は母材では-100MPa、As weldでは引張200MPa、処理を施したものでは圧縮-150MPa~-800MPa程度であった。

TIG+Shotの圧縮残留応力層の深さは約 $200\mu\text{m}$ で、Needle+ShotおよびTIG+Burnishingの場合は約 $1800\mu\text{m}$ であった。圧縮残留応力層が深くなるほどき裂の伝播が抑制される領域が広く<sup>9)</sup>、疲労寿命を延ばす効果は大きいと考えられる。

ただし、TIG+Burnishingでは圧縮残留応力の最大値(約-800MPa)が表面に生じていることに対して、ほかのピーニング処理では、ある程度深い位置で生じている。表面近傍において圧縮残留応力が大きいと、き裂進展の開始を抑制する効果があると考えられるため、疲労限度を向上させる効果は、TIG+Burnishingが最も期待できる。



**図6** 止端部外観および点Cの残留応力



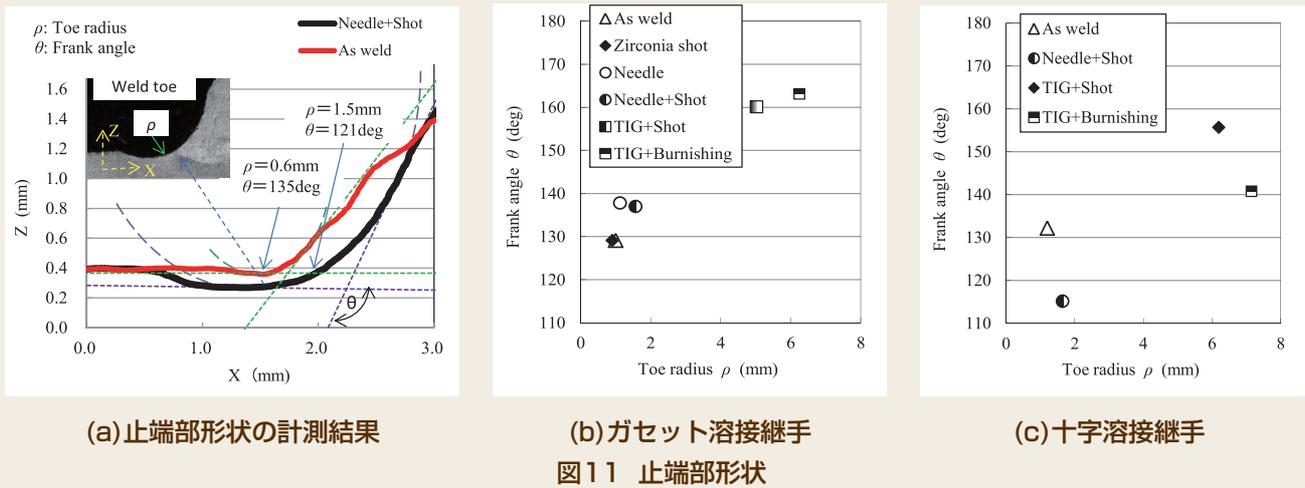


図11 止端部形状

#### 4. 溶接止端部の観察と応力集中

As weldとNeedle+Shotを行った2種類の試験体において、止端部の断面を観察した。その一例を図10に示す。Needle+Shotの止端部がAs weldより凹んでおり、その凹みが溶接金属(Weld metal)、ボンド部(Weld interface)およびHAZ(Heat-Affected Zone)の範囲に渡っていることがわかる。

溶接止端部の応力集中は溶接継手の疲労強度に影響する。その応力集中を決める支配的なパラメータとしては止端半径 $\rho$ およびフランク角 $\theta$ が取り上げられる。一般的に止端半径 $\rho$ が大きいほど、また、フランク角 $\theta$ が大きいほど応力集中が小さく、疲労強度が向上する<sup>11)</sup>。ここでは、レーザ変位計を用いて、図11(a)のように止端部の形状を計測した。得られた形状データから止端半径 $\rho$ とフランク角 $\theta$ を求めた。

Needle+Shotの止端半径 $\rho$ は約1.5mmで、As weldの0.6mmと比べて大きくなっており、応力集中の緩和が期待される。この止端半径 $\rho$ はニードル(ピン)の先端の形状(曲率半径1.5mm)が転写されたことによると思われる。さらに、TIG+Burnishing処理後には図11(b)、(c)に示すように止端半径 $\rho$ が5mm以上、フランク角 $\theta$ が140度以上になり、ほかの処理より応力集中が改善されている。

溶接止端部の応力集中係数Ktを評価するため、有限要素法(コードABAQUS)により三次元弾性応力解析を行った。材料物性は表2の値を使用した。Ktは公称応力を基準とし、次の式で定義した。

$$Kt = \sigma_{\max} / \sigma_0 \quad (1)$$

ここで $\sigma_{\max}$ は引張方向応力の最大値、 $\sigma_0$ は公称応力である。

図11(a)に示す形状測定結果に基づいて、試験体の対称性を考慮し、図12(a)、図13(a)に示すように1/4モデル(最小要素サイズ0.01mm)を作成した。

図12(b)と(c)、図13(b)と(c)に引張公称応力200MPa時の止端部の応力分布を示す。ガセット溶接継手について、As weld試験体のKtが3.0であるのに対し、

Needle+Shot試験体では2.6となり、13%低減していることが分かる。また、十字溶接継手について、As weld試験体のKtが2.5であるのに対し、Needle+Shot試験体では2.3となり、8%低減している。TIG処理はより大きい止端半径 $\rho$ 、フランク角 $\theta$ が得られるため、応力集中はさらに低減すると考えられる。

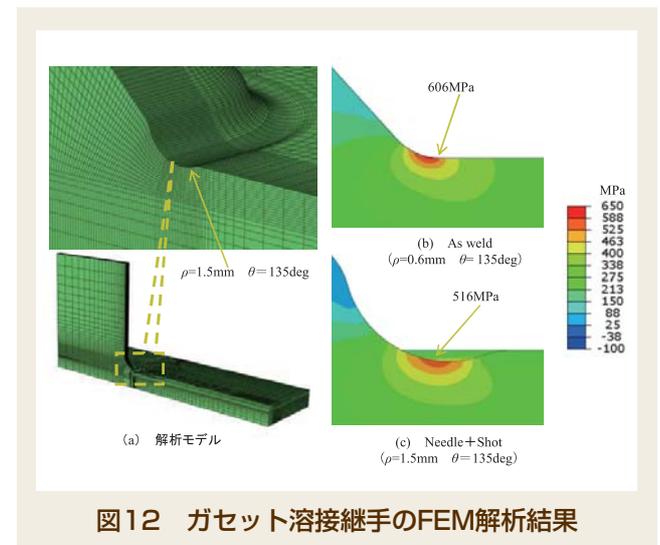


図12 ガセット溶接継手のFEM解析結果

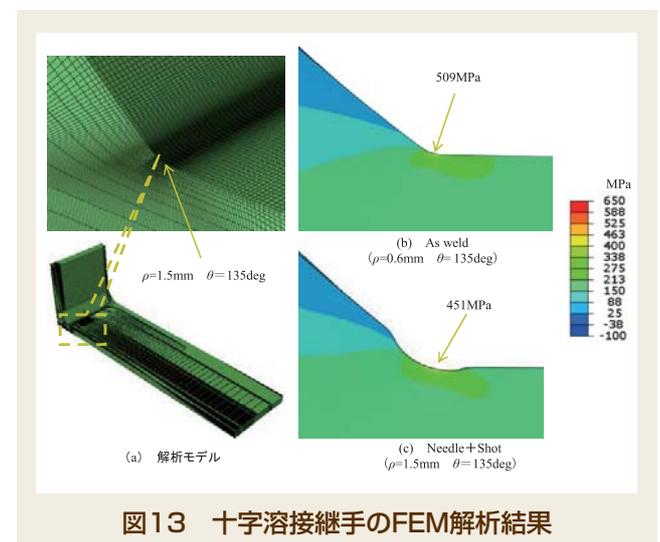


図13 十字溶接継手のFEM解析結果

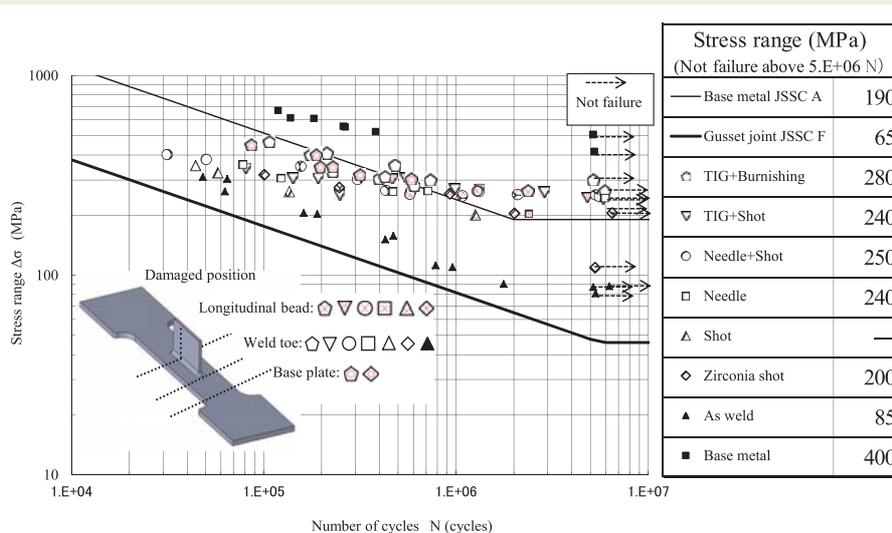


図14 ガセット溶接継手の疲労試験結果

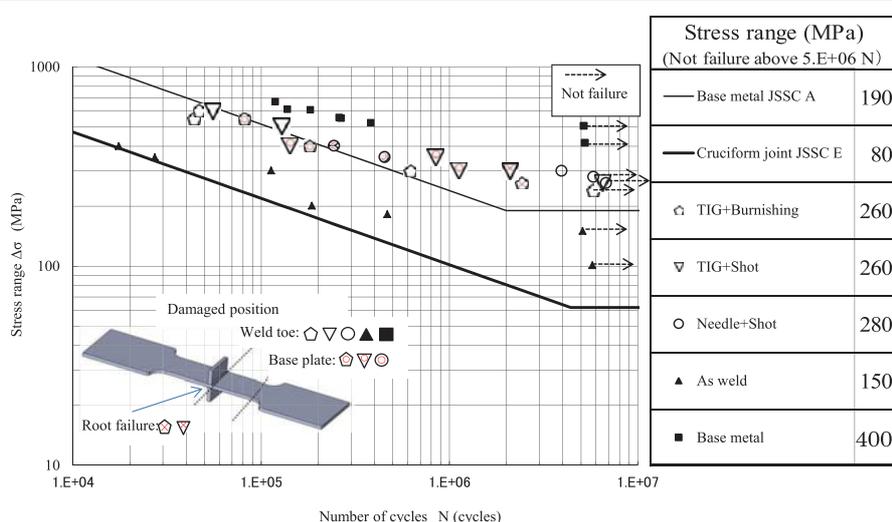


図15 十字溶接継手の疲労試験結果

## 5. 疲労試験結果

**5.1 各処理による疲労強度の改善** ガセット溶接継手試験体の疲労試験結果を図14に示す。縦軸は公称応力範囲 $\Delta\sigma$ 、横軸は疲労寿命(破断繰返し数)Nを意味する。

Zirconia shot、Needle、Shotおよび組合せ処理を施すことで疲労強度がAs weldより改善されたことがわかる。前述した残留応力は、As weldで高い引張状態であり、一方、処理を施したものは、処理面に圧縮残留応力が存在しており、これがき裂の進展を妨げる働きをしたため、疲労寿命の大幅な改善効果が得られたといえる。組合せ処理を施したものは単一処理を施したものより疲労強度が改善されている。また、疲労寿命の改善率は公称応力範囲が低いほど大きくなる傾向が見られる。

疲労限度について、500万サイクル以上の繰返し数で

応力範囲の打ち切り限界をもとに定義した。母材単体の疲労限度は、約400MPaに対して、As weldが約85MPaであった。単一処理の場合ではZirconia shotで約200MPa(JSSC A等級程度)、Needleで約240MPa、組合せ処理ではNeedle+Shotで約250MPa、TIG+Shotで約240MPa、TIG+Burnishingで約280MPaに到達した。TIG+Burnishingを施した結果では、単一処理(Zirconia shot、Needle)のみを施したものに比べ、疲労限度は明らかに向上したといえる。

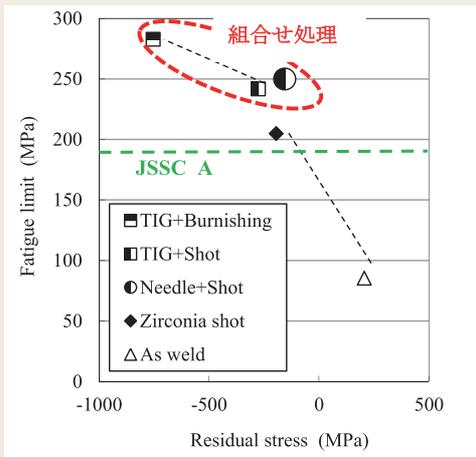
ガセット溶接継手試験体の破断箇所を図14中に模式的に示したが、As weldの試験体がすべて溶接止端から破断したのに対し、組合せ処理した試験体は縦ビード部(マークの内側に×)、ベースプレート(マークの内側に○)から破断するものも多く見られた。これは溶接止端部の疲労限度が著しく改善されたことを意味する。

組合せ処理を施したものは、大きな圧縮残留応力が付与され、また応力集中が低減されたことによって、平均

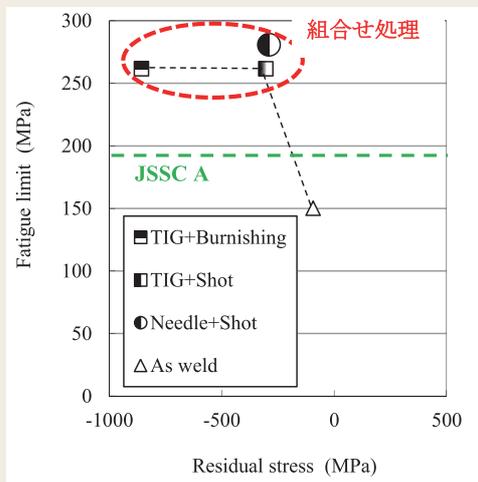
応力と応力振幅が低下するために、疲労寿命が大幅に改善されたと考えられる。

図15に十字溶接継手試験体の疲労試験結果を示す。As weldの疲労限度が約150MPaであったのに対し、組合せ処理ではNeedle+Shotで約280MPa、TIG+Shotで約260MPa、TIG+Burnishingで約260MPaとなった。ガセットと同様に、十字溶接継手においても、組合せ処理を施すことで、疲労強度が明らかに向上した。

5.2 疲労限度と残留応力の関係 残留応力と疲労限度との関係を図16に示す。ガセット溶接継手について、Zirconia shotの試験体はAs weldと同様の



(a)ガセット溶接継手



(b)十字溶接継手

図16 残留応力と疲労限度の関係

止端部形状 ( $\rho$ ,  $\theta$ ) であるが、止端部の残留応力が引張の200MPaから圧縮の-200MPaになることで、疲労限度が約85MPaから約200MPaまで増加した。同様にTIG+ShotとTIG+Burnishingを比較すると、圧縮残留応力が大きいほど、疲労限度が上昇していることがわかる。十字溶接継手については、TIG+Shot、TIG+Burnishing及びNeedle+Shotの試験体はAs weldより明らかに疲労限度が圧縮残留応力の増加を伴って上昇した。

500万サイクル以上の繰り返し荷重荷重で未破断であった試験体について、試験前後で計測した止端部表面の残留応力を表6に示す。500万サイクル繰り返し荷重を負荷しても、残留応力がほぼ変化してないことがわかる。

## 6. 結言

本研究ではHT780材の溶接継手の疲労強度向上を目的として、溶接止端部の応力集中を低減し、あるいは溶接止端部に圧縮残留応力を付与する各種処理方法の効果を比較し、さらに効果を増大させることを狙いとしてそれらの組合せ処理の効果を比較した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 各処理の表面および板厚方向の残留応力を計測したところ、TIG+Burnishingを適用することによって最大-800MPa、深さ1800 $\mu$ mの圧縮残留応力が得られた。表面の圧縮残留応力が大きいほどき裂進展の開始を遅らせ、また、圧縮残留応力層が深くなるほどき裂の伝播が抑制される領域が広がるので、本検討で実施した組合せ処理の中では、TIG+Burnishingが最も疲労寿命を延ばす効果は大きいと考えられる。

(2) 組合せ処理後の溶接止端の応力集中係数を評価したところ、応力集中係数はAs weldより低下することを確認した。すなわち、Needle+Shot処理の場合、ガセット溶接継手が3.0から2.6に、十字継手合が2.5から2.3に低下した。

(3) 組合せ処理によってガセット溶接継手および十字溶接継手の疲労強度は大幅に改善され、疲労限度は[社]日本鋼構造協会が設定する母材の一定振幅応力範囲の打ち切り限界190MPaより大きくなり、両者とも最大で約280MPaに到達した。

表6 疲労試験前後の残留応力の比較

Gusset joint	Specimen	AS weld	Zirconia shot	Needle+shot	TIG+ burnishing
	Initial residual stress	176	-194	-153	-632
	Residual stress after fatigue	172	-196	-155	-542
Cruciform joint	Specimen	AS weld	TIG+Shot	Needle+shot	TIG+ burnishing
	Initial residual stress	-93	-308	-328	-884
	Residual stress after fatigue	-106	-303	-312	-888

## 参考文献

- 1) JSSC: 都市橋梁の持続的デザイン, JSSC Report, **2010**, 92, 8-11.
- 2) JSSC: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, **1993**, 5-24.
- 3) C.Miki, K.Anami, H.Tani and I.Sugimoto: Fatigue Strength Improvement Methods by Treating the Weld Toe, Quar.JJWS, **1999**, 17(1), 111-119.
- 4) K.Anami, C.Miki, H.Yamamoto and Y.Higuchi: Fatigue Strength of Welded Joint Made of High Strength Steel and Fatigue Strength Improvement, Journal of JSCE, **2001**, 675 (55) , 251-260.
- 5) S.Ohta, K.Asai and S.Ohya: Improvement of the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints by TIG Arc Remelting of Weld Toe Region, Quar. JJWS, **1990**, 8 (2), 254-261.
- 6) S.Hirayama, T.Mori, T.Inomata: Influence of Grinding Method on Fatigue Strength of Web-Gusset Welded Joints, JSSC steel construction engineering, **2005**, 12 (45), 111-121.
- 7) JSSP: 金属疲労とショットピーニング, 現代工学社, **2004**, 13-32.
- 8) T.Mori, H.Shimanuki, M.Tanaka and R.Usami: Effect of UIT on Fatigue Strength of Web-Gusset Welded Joints Considering Service Condition of Steel Structures, Journal of JSCE A1, **2011**, 67 (2) , 421-429.
- 9) M.Tai, C.Miki and K.Suzuki : Fatigue Strength Improvement at Weld Toe of Out-of-Plane Gusset by Hammer Peening Treatment, Journal of JSCE A1, **2011**, 67 (2), 396-409.
- 10) D.Ma, S.Ashida, J.Okada, Y.Fukai, H.Morita: Development of High Strength Welded Joints against Fatigue Loading, 溶接構造シンポジウム, **2014**, 155-162.
- 11) K.Ikeda, S.Denoh, T.Godai and T.Ogawa: Improvement of Fatigue Strength of Fillet Welded Joint in High Strength Steel, J. JWS, **1975**, 44 (2), 128-135.

## 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 技術開発本部  
 技術研究所 ものづくり基盤研究センター  
 馬 東輝  
 Tel : 06-6551-9692 Fax : 06-6551-9086  
 e-mail : ma\_d@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
 Technology Development Headquarters  
 Technical Research Institute  
 Innovative manufacturing & Technology  
 Research Section  
 Donghui Ma  
 Tel : +81-6-6551-9692 Fax : +81-6-6551-9086  
 e-mail : ma\_d@hitachizosen.co.jp



馬 東 輝



芦 田 史 史



岡 田 潤



北 村 幸 嗣



深 井 康 宏



森 田 寛 之