

「J-STAR® Welding」の造船，建築への展開

Application of Narrow Gap Welding Process with “J-STAR® Welding” to Shipbuilding and Construction

角 博幸 SUMI Hiroyuki JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員（課長）
片岡 時彦 KATAOKA Tokihiko JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員（課長）・博士（工学）
木谷 靖 KITANI Yasushi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員（副部長）・博士（工学）

要旨

「J-STAR® Welding」は、アーク安定剤として適量の REM（Rare earth metal: 希土類金属）を添加したワイヤを用い、極性を従来とは逆の棒マイナスとした炭酸ガスアーク溶接法である。「J-STAR® Welding」では、ワイヤ先端から安定した円錐状のアークが形成され、微細かつ連続化したスプレー溶滴移行となり、低スパッタで深い溶込みが得られる。厚板の狭開先溶接においては、安定な溶接施工を実現するため開先側壁や溶接ノズルなどへのスパッタの付着・堆積を抑制することや、溶込み不良や融合不良などの溶接欠陥を防止するため開先底隅部や開先側壁を安定して溶融させることが必要となる。そこで、「J-STAR® Welding」の特長を活用した狭開先溶接について検討し、先端曲がり電極チップを用いた 1 層 2 パス溶接施工による新しい厚板の狭開先溶接技術を開発した。この溶接法を板厚 100 mm の極厚継手に適用した結果、16 層 31 パスという極めて少ない溶接工数で、十分な溶込み量を確保した健全な溶接継手を作製することができた。

Abstract:

The “J-STAR® Welding” is performed with an electrode negative polarity in CO₂ gas shielded arc welding using rare earth metal added wire. In the “J-STAR® Welding,” a conical arc plasma is formed from the wire tip and the droplets that transfer to molten pool become fine and continuous, which called “spray transfer.” As a result, reduction of spatter and deep penetration can be obtained. In the narrow gap welding of thick steel plate, it is necessary that spatter doesn't accumulate on the welding nozzle and the groove sidewall, and the bottom corner and sidewall of the groove are melted stably. Therefore, narrow gap welding utilizing the benefits of the “J-STAR® Welding” was examined, and a new narrow gap welding process by 2-pass one-layer technique using an electrode with curved tip was developed. It was confirmed that the good joint of 100 mm plate in thickness for which the developed narrow gap welding process is applied can be produced with a very few welding processes of 31 passes and 16 layers.

1. はじめに

鋼構造物の大型化・厚板化にともない、組立溶接により多くの時間が必要となり、溶接施工コストが増加することが懸念されている。溶接施工時間を短縮する方策として、溶接量の低減が可能な狭開先溶接が注目されている¹⁻⁴⁾。従来の狭開先溶接では、シールドガスに Ar-20% CO₂ のような混合ガスを用いるガスシールドアーク溶接を適用するのが一般的である。これは、シールドガスに 100% CO₂ を用いる炭酸ガスアーク溶接はスパッタの発生量が多いため、特に狭開先では開先側壁や溶接ノズルにスパッタが付着あるいは堆積して溶接施工が不安定となり、溶接欠陥が発生し易いことが懸念されるためである。

JFE スチールでは、溶接ワイヤをマイナス極とする「正極

性溶接（DCEN: Direct current electrode negative）」において、アーク安定剤として微量の REM（Rare earth metal: 希土類金属）を添加した溶接ワイヤを用いた炭酸ガスアーク溶接技術である「J-STAR® Welding」を開発している⁵⁻⁸⁾。「J-STAR® Welding」は、安定した円錐状アークの形成と微細かつ連続化したスプレー溶滴移行の実現により、スパッタ発生量の大幅な低減と深溶込みを得ることができる。これまでに、建築鉄骨の溶接接合部を対象としたレ形 25°開先や I 開先への適用化検討を実施し、(財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得している⁹⁻¹³⁾。

本報告では、さらなる適用板厚の拡大や品質向上を図るべく、先端曲がり電極チップを用いた 1 層 2 パス溶接施工プロセスによる新しい「J-STAR® Welding」の狭開先溶接技術について紹介するとともに、「J-STAR® Welding」の造船や建築分野での適用検討事例について紹介する。

2014 年 1 月 10 日受付

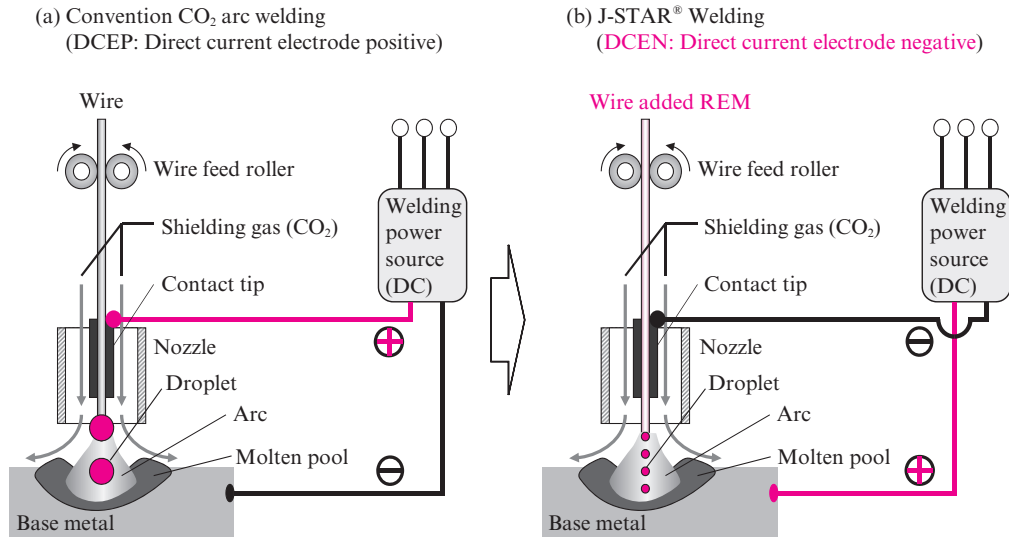


図1 従来の炭酸ガスアーク溶接と「J-STAR® Welding」の相違

Fig. 1 Comparison between conventional CO₂ arc welding and “J-STAR® Welding”

表1 「J-STAR® Welding」用溶接ワイヤの化学成分
Table 1 Chemical composition of welding wire

Type	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Others
KC-550 (JIS Z 3312, YGW18)	0.05	0.7	1.9	0.01	0.01	0.2	Mo, B, REM*

* Rare earth metal

表2 溶接金属の化学組成と機械的特性の一例

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of deposited metal

Chemical composition (mass%)					Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Absorbed energy at -5°C (J)
0.06	0.5	1.4	0.01	0.01	571	621	30	146

2. 「J-STAR® Welding」の特長

図1に示すように、従来の炭酸ガスアーク溶接が溶接ワイヤをプラス極とする「逆極性溶接」であるのに対して、「J-STAR® Welding」はREMを微量添加した溶接ワイヤを用いるとともに、従来とは逆の溶接ワイヤをマイナス極とする炭酸ガスアーク溶接法である。その特長として、

- (1) 溶接スパッタの発生が著しく少ない。
 - (2) 溶接アークが集中しやすいため深い溶込みが得られる。
 - (3) 溶接表面の酸化物（スラグ）の剥離性が良好である。
- などがあげられる。このように、「J-STAR® Welding」は狭開先溶接に適した特長を有している。

表1に「J-STAR® Welding」ワイヤ「KC-550」の化学組成の一例を示す。「KC-550」は、JIS Z 3312におけるYGW18に該当し、微量のREMを添加したワイヤである。表2に

「KC-550」を用いた炭酸ガスアーク溶接の全溶着金属試験結果を示す。550 N/mm²級鋼用溶接ワイヤとして十分な強度、靱性を有している。また、溶接ワイヤ中に微量のREMを含有させることで、強度レベルに関係なく「J-STAR® Welding」としての溶接諸特性が得られることを確認しており、590 N/mm²級鋼用などの高強度鋼用溶接ワイヤへの展開も容易である。

3. 極厚材の狭開先溶接技術

3.1 先端曲がり電極チップを用いた1層2パス溶接施工

JFE スチールでは、「J-STAR® Welding」を適用した厚板の高エネルギー溶接技術として、レ形25°開先などの狭開先溶接技術の開発を行ってきた。厚板の狭開先溶接（特にI開先）においては、溶込み不良や融合不良などの溶接欠陥を防止

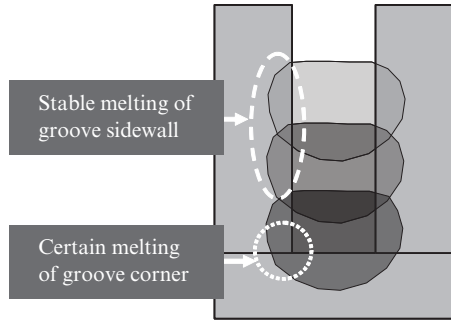
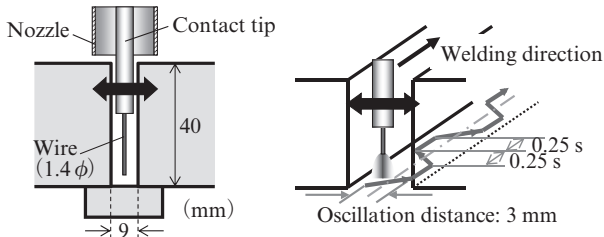
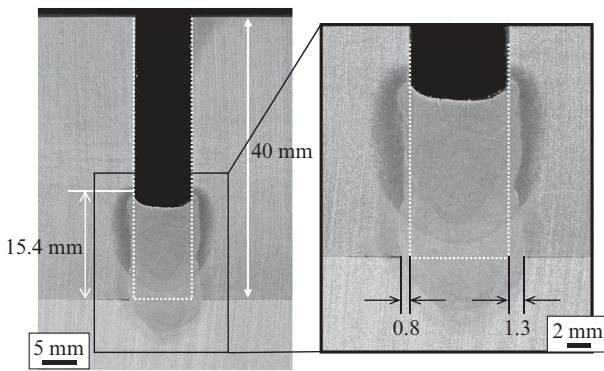


図2 狭開先溶接継手における課題
Fig. 2 Issues required in narrow gap welding



(a) Schematic illustration of conventional narrow gap welding



(b) Macrostructure of cross section

写真1 従来法（1層1パス溶接）による狭開先溶接継手の断面マクロ組織

Photo 1 Macrostructure of welded joint by conventional narrow gap welding process

するため、図2に示すように、開先底隅部を確実に溶融させるとともに、開先側壁を安定して溶融させる必要がある。しかし、溶接アークの指向性が強い「J-STAR® Welding」を用いても、写真1に示すようにI開先の1層1パス溶接施工（オシレートあり）では開先側壁の溶融量は1 mm程度であり、実用化に向けての課題であった。

開先側壁の溶融を拡大させるためには、図3に示すように、アークが開先底隅部や開先側壁に直接当たるようにする必要がありと考え、先端を僅かに曲げた電極チップを狭開先内に挿入した溶接施工の検討を行なった。予備検討の結果、「J-STAR® Welding」の強いアーク指向性の効果が上手く作用して、開先底隅部や開先側壁の溶融量を容易に拡大でき

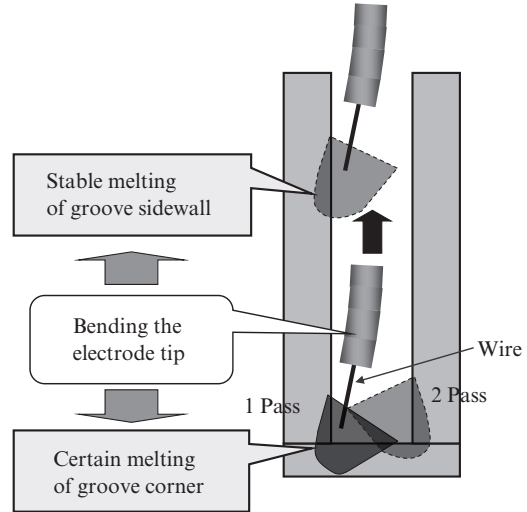


図3 先端曲がり電極チップを用いた1層2パス溶接法
Fig. 3 Schematic illustration of developed narrow gap welding process

ることが判明した。その後、電極チップの先端曲げ角度の適正化などの検討を経て、先端曲がり電極チップを用いた1層2パス溶接施工による「J-STAR® Welding」を適用した狭開先（I開先）溶接技術を開発した¹⁴⁾。

3.2 溶接条件

表1に示すREMを微量添加した溶接ワイヤ「KC-550」(JIS Z 3312のYGW18に該当)を用い、表3に示す開先形状および溶接条件で先端曲がり電極チップを用いた1層2パス溶接による狭開先溶接を実施した。板厚40 mmの狭開先溶接はギャップ10 mmのI開先継手とし、板厚100 mmの狭

表3 開先形状および溶接条件

Table 3 Groove geometries and welding conditions

Groove configuration	Welding conditions	
		Current (A)
Voltage (V)		35.3
Welding speed (mm/min)		600
Heat input (kJ/mm)		1.3
Layer number		7
Pass number		13
Current (A)		324-371
	Voltage (V)	34.9-38.4
	Welding speed (mm/min)	200-600
	Heat input (kJ/mm)	1.2-2.5
	Layer number	16
	Pass number	31

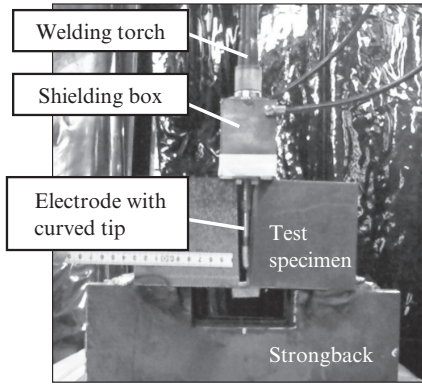


写真2 板厚 100 mm 継手の溶接施工

Photo 2 Welding technique in butt joint of 100 mm thickness

開先溶接はギャップ 10 mm の V 開先継手（開先角度 5°）とした。供試鋼板には、いずれの板厚も 490 MPa 級鋼板を使用した。なお、板厚 100 mm の狭開先溶接では、写真 2 に示すように大気のをき込みを防止するため、母材表面にシールドボックスを取り付けて溶接を行なった。

3.3 狭開先溶接継手の性能評価

今回開発した先端曲がり電極チップを用いた 1 層 2 パス溶接方法で作製した板厚 40 mm の狭開先継手の断面マクロ組織を写真 3 に示す。溶接途中である 3 層溶接終了時点の写真で分かるように、開先側壁にスパッタの付着は認められず、「J-STAR® Welding」の特長である低スパッタの効果が確認できる。また、開先底隅部や開先側壁の溶込みについては、溶融量で 2 mm 以上が確保できており、前述した 1 層 1 パス溶接継手（写真 1）に比べて大幅に拡大している。これは、先端曲がり電極チップを用いることでアークを開先

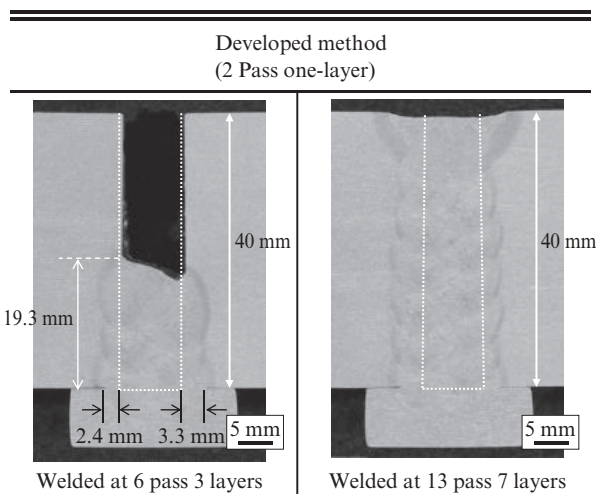


写真3 開発法（1層2パス溶接）による板厚 40 mm 継手の断面マクロ組織

Photo 3 Macrostructure of welded joint of 40 mm thickness by developed narrow gap welding process

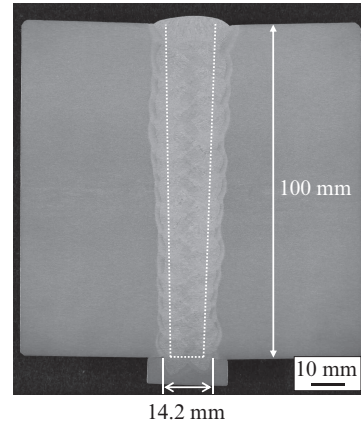


写真4 開発法（1層2パス溶接）による板厚 100 mm 継手の断面マクロ組織

Photo 4 Macrostructure of welded joint of 100 mm thickness by developed narrow gap welding process

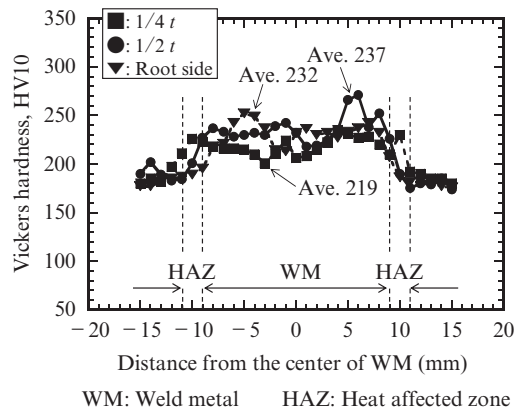


図4 板厚 100 mm 狭開先継手の硬さ分布

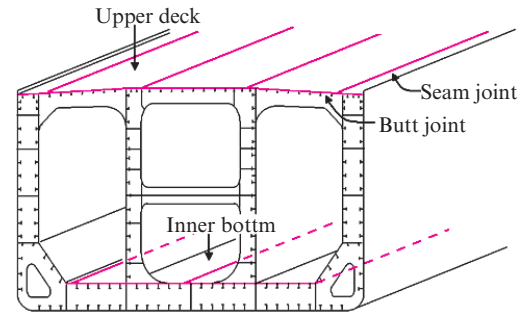
Fig. 4 Hardness distributions of welded joint of 100 mm thickness by developed narrow gap welding process

底隅部に指向させることができ、「J-STAR® Welding」のアーク直下における溶込み能力が高いという特長がより効果的に作用したためと考えられる。

先端曲がり電極チップを用いた「J-STAR® Welding」による 1 層 2 パス溶接施工が厚板の狭開先溶接に適用可能であることが判明したことから、板厚 100 mm の突合せ継手への適用を試みた。その断面継手マクロを写真 4 に示す。開先底隅部や開先側壁の溶込みも十分に確保できており、16 層 31 パスという極めて少ない溶接工数で作製することができた。図 4 の溶接継手硬さ試験結果から分かるように、溶接金属の硬さは測定位置によらず HV230 程度であり、積層による変動は小さいことが確認される。

4. 「J-STAR® Welding」の造船、建築分野への展開

図 5 にタンカーにおけるスプレー溶滴移行型炭酸ガスアー



Welding part	Base metal		Single V groove	
	Grade	Thickness (mm)	Angle (°)	Gap (mm)
Upper deck	AH36	20	40	2-6
Inner bottom	AH36	20	40	0-4

図5 「J-STAR® Welding」の適用部位と開先条件

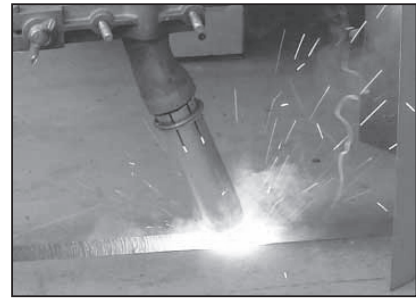
Fig. 5 Application part and groove conditions of “J-STAR® Welding”

ク溶接法「J-STAR® Welding」の適用継手を示す^{15,16}。板厚20 mmの490 MPa級鋼AH36の長尺継手となるインナーボトムとアッパーデッキのシームおよびバット溶接であり、裏面にセラミックスのバック材を用いる片面溶接である。開先角度は、従来の50°Vから40°Vに狭開先化した。写真5に従来法とKC-550を用いた開発法によるインナーボトム溶接中のスパッタの飛散状況を示す。「J-STAR® Welding」は、実際の建造工程においてもスパッタの粒子が小さく、発生も極めて少なかった。従来、インナーボトムの溶接施工では、スパッタがノズルへ付着、堆積するためチップ周りでのスパークやガスシールド不良が生じ、これを防ぐため定期的な停止による装置のメンテナンスと溶接継ぎ部分の補修溶接が必要となる。補修溶接はガウジング後に表あるいは裏面から溶接するため、ビード表面の機械切削が必要となる。本開発法では15 mの連続溶接が可能となり、溶接停止回数は従来法の半分以下に低減した。開先角度を50°から40°へ狭くしたことや、スパッタの減少とアークの安定性が向上したことで従来よりも高電流域での溶接が可能となり溶接速度の高速化やパス数が減少したことにより、施工時間はおよそ3分の2に短縮した。「J-STAR® Welding」の適用箇所を超音波検査したが、欠陥は認められなかった。また、従来ソリッドワイヤに比べヒュームの発生も非常に少なかった。

写真6に「J-STAR® Welding」(KC-550, DCEN(直流棒マイナス))を用いた溶接ビード外観と断面マクロ組織を示す。従来法では、溶接ビード表面へのスラグ密着性が強く、溶接後にチッパーなどのエアーツールを用いてもビード表面の半分程度にスラグが残存、溶接スラグは塗装欠陥となるため、塗装工程の前処理として別途除去作業を実施して



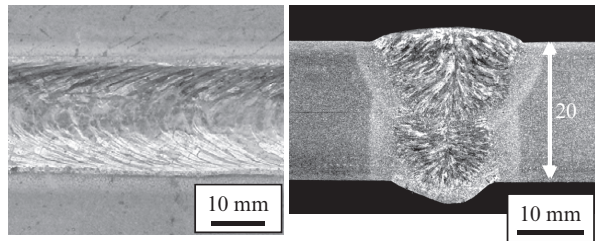
(a) Conventional welding; DCEP (Direct current electrode positive), Welding current: 280 A



(b) “J-STAR® Welding”; KC-550, DCEN (Direct current electrode negative), Welding current: 380 A

写真5 インナーボトムの溶接の状況

Photo 5 Comparison of welding phenomenon of internal bottom joint



One side welding of butt joint, Groove: V40°, Gap=0 mm, KC-550, DCEN (Direct current electrode negative), 2 Pass, 100% CO₂, Welding current: 380 A

写真6 「J-STAR® Welding」を用いたインナーボトム溶接部の外観と断面マクロ組織

Photo 6 Bead appearance and macrostructure of inner bottom

いた。これに対して、本開発法はスラグ剥離性が良好で、このスラグ除去作業を従来時間のほぼ半分に短縮した。また、ビード表面のチッパーなどの打痕傷が減ることで、塗装外観も改善した。このスラグ剥離性の向上は、溶接ビードの平滑化に加えて溶接中の酸化反応によってスラグへと移行したREMの効果であると考えられる。

一方、建築分野への「J-STAR® Welding」の適用拡大に向けては、2013年6月にJIS Z 3312のYGW18に該当する溶接ワイヤ「KC-550」についても(財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明「J-STAR溶接法による狭開先溶接接合」を追加取得した。これで適用可能な鋼材の強度クラスは

550 N/mm²級まで拡大できた。また、レ形開先形状に対する適用板厚範囲についても、従来の40 mm以下から50 mm以下までと、その適用上限板厚の拡大を図っている。このような第三者機関からの技術性能証明を充実させることにより、今後、建築分野でも「J-STAR® Welding」の適用は進むものと期待される。

5. おわりに

REM 添加ワイヤを用いた正極性炭酸ガスアーク溶接技術である「J-STAR® Welding」の低スパッタで溶込み特性に優れている特長を活用した、先端曲がり電極チップを用いた1層2パス溶接施工による新しい厚板の狭開先溶接技術を開発した。本溶接法の適用により、狭開先継手の底隅部や側壁面で安定した溶込みが確保でき、造船、建築などの各分野において、厚板溶接施工の高効率化および低コスト化が期待される。

参考文献

- 1) 妹島五彦, 五代友和, 河原稔, 野村博一. 溶接学会誌. 1981, vol. 50, no. 11, p. 1074-1080.
- 2) 堀勝義, 羽田光明. 溶接学会誌. 1999, vol. 68, no. 3, p. 41-62.
- 3) 岩田真治, 村山雅智, 小島裕二. JFE 技報. 2008, no. 21, p. 15-19.
- 4) 中村照美, 平岡和雄, 高橋誠, 佐々木智章. 溶接学会論文集. 2002, vol. 20, no. 2, p. 237-245.
- 5) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2004, no. 75, p. 250-253.
- 6) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接技術. 2005, vol. 53,

no. 3, p. 64-69.

- 7) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一. JFE 技報. 2007, no. 16, p. 50-53.
- 8) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則. 溶接学会論文集. 2008, vol. 26, no. 1, p. 37-41.
- 9) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2006, no. 78, p. 136-137.
- 10) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2006, no. 79, p. 110-111.
- 11) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接技術. 2006, vol. 54, no. 9, p. 62-67.
- 12) 片岡時彦, 中川郷司, 石井匠. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 41-46.
- 13) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則. まてりあ. 2008, vol. 47, no. 2, p. 99-101.
- 14) 角博幸, 片岡時彦, 木谷靖, 大井健次, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2013, no. 92, p. 26-27.
- 15) 草場卓哉, 木治昇, 片岡時彦, 池田倫正. 溶接学会講演概要集. 2011, no. 89, p. 356-357.
- 16) 草場卓哉, 片岡時彦, 吉川正幸, 福山英作, 橋本大輔, 大井健次, 木治昇. 日本船舶海洋工学会講演論文集. 2011, no. 12, p. 273-276.



角 博幸



片岡 時彦



木谷 靖