

# 「J-STAR<sup>®</sup> Welding」を用いた高能率溶接技術の開発

## Development of High Efficiency CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding Process with “J-STAR<sup>®</sup> Welding”

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(副課長)  
中川 郷司 NAKAGAWA Satoshi JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(課長)  
石井 匠 ISHII Takumi JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(課長)・博士(工学)

### 要旨

J-STAR<sup>®</sup>\* Welding は、極性を従来の棒プラスに対して逆の棒マイナスとし、適量の希土類金属 (rare earth metal) を添加したワイヤを用いる CO<sub>2</sub> アーク溶接法である。この溶接法は 250 A 以上の高電流溶接においてワイヤ先端を頂点とする円錐状のアークプラズマを形成することで、ワイヤ先端から熔融池へ移行する溶滴は微細かつ連続化した微細スプレー移行を達成し、従来比 1.5 倍の深い溶込みが得られる。この特性を利用した狭開先溶接について検討し、I 形-Gap5 mm およびレ形 25°-Gap2 mm の高能率溶接施工技術を確認した。また、この狭開先溶接を適用した柱・梁継手は載荷試験において十分な変形能力を有していることを確認した。

### Abstract:

The J-STAR<sup>®</sup> Welding is performed with an electrode negative polarity using the rare earth metal added wire in CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding. With the welding current over 250 A of the J-STAR welding, a conical arc plasma is formed from the wire tip, fine droplets transfer to molten pool continuously, which is called spray transfer, and the penetration depth of bead-on welding increased by 50%. The result of examination of narrow gap welding, utilizing the spray transfer phenomenon, the J-STAR Welding established high efficiency narrow gap welding with 5 mm-gap square groove and 25° single bevel groove of 2 mm gap. It was confirmed that the joint between the column and beam which the J-STAR narrow gap welding was applied had sufficient deformation capacity under the load test.

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub> アーク溶接は 1950 年代に開発<sup>1)</sup>され、溶接電源と溶接材料の改良により、能率の優れた接合技術としてアーク溶接法の主流を占めるまでに発展してきた<sup>1~3,16~18)</sup>。ガスコストが安い反面、溶接時に多量のスパッタが発生するため、アークの安定化による溶接作業性の改善とさらなる高能率化が強く要望されている<sup>1)</sup>。

以上のような要望にこたえるべく開発した「J-STAR<sup>®</sup> (JFE Spray Transfer Arc) 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移行の実現により極低スパッタ化を可能にした<sup>4~6)</sup>。また、アークの集中と安定化効果により溶接ビード中央部に従来比 1.5 倍の深い溶込み<sup>5)</sup>が得られる。これらの効果は、厚板のアーク溶接に用いられる電流域 (250 A 以上) で顕著であり、課

題とされた 200 A 以下の低電流域でも電流波形制御の適用により規則的な短絡移行が得られた<sup>7)</sup>。その結果、「J-STAR Welding」は、広い電流範囲で極低スパッタ化を達成した。高速溶接においても溶接線方向に均一なビード形状が得られることから、高能率溶接技術への展開が期待される。これら「J-STAR Welding」の特長とそれを活用した狭開先溶接技術について紹介する。

## 2. 極低スパッタ CO<sub>2</sub> アーク溶接技術 「J-STAR Welding」

従来の CO<sub>2</sub> アーク溶接法の極性が棒プラス (DCEP) であるのに対して、J-STAR Welding は、アーク安定剤として適量の REM (rare earth metal) をワイヤに添加し、通常とは逆の棒マイナス (DCEN) を採用した溶接方法である。

### 2.1 J-STAR Welding ワイヤ 「KC-500」

表 1 に J-STAR Welding ワイヤ KC-500 の化学組成の一例を示す。KC-500 は、JIS Z 3312 における YGW11 に該当し、

2007 年 8 月 15 日受付  
\*J-STAR は JFE スチール(株)の登録商標である。

表1 溶接用ワイヤの化学組成の一例

Table 1 Example of chemical composition of steel welding wire

Type	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Others
Si-Mn-Ti-REM KC-500*	0.05	0.7	1.6	0.01	0.01	0.2	REM

\*JIS Z 3312YGW11

表2 溶接金属の化学組成と機械的性質の一例

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of deposited metal

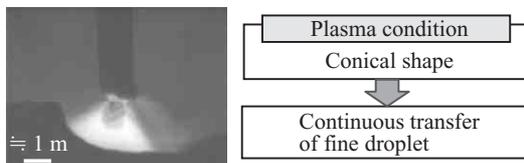
Chemical composition (mass%)					Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	0.2% proof stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Absorbed energy at 0°C (J)
0.06	0.40	0.96	0.01	0.01	470	560	32	160

微量のREMを添加したワイヤである。

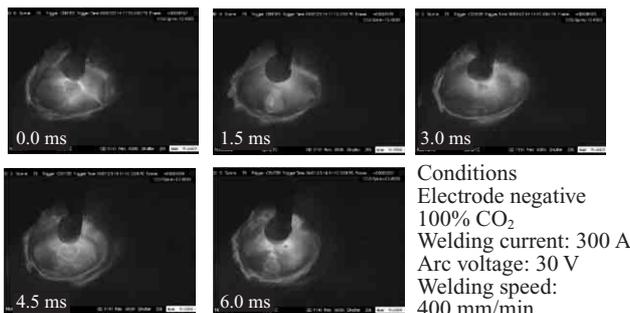
表2にKC-500を用いたCO<sub>2</sub>アーク溶接の全溶着金属試験結果を示す。490 N/mm<sup>2</sup>級鋼用溶接ワイヤとして十分な強度、靱性を有している。また、溶接ワイヤ中に微量のREMを含有させることで、強度レベルに関係なくJ-STAR Weldingとしての溶接諸特性が得られることを確認しており、540 N/mm<sup>2</sup>級および590 N/mm<sup>2</sup>級鋼用溶接ワイヤへの展開も容易である。

## 2.2 アーク現象

高電流CO<sub>2</sub>アーク溶接で観察されるアーク現象の特徴は、ワイヤ先端に懸垂した溶滴下部へのアーク集中とそれによって生じる溶滴の不規則な揺動にあり、スパッタの発生はこの溶滴の不規則な揺動によって引き起こされる。具



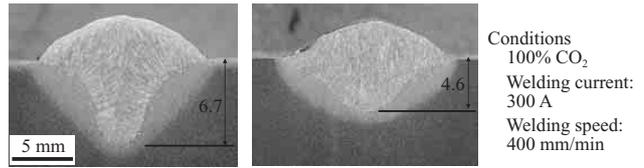
(a) Side video camera



(b) Upper video camera

写真1 J-STAR Weldingの溶滴移行現象

Photo 1 Images of droplet transfer with J-STAR Welding



(a) J-STAR Welding (b) Conventional welding

写真2 ビードオンプレート溶接の断面マクロ組織

Photo 2 Macrostructure of bead-on-plate welding

体的には、溶滴と溶融池の短絡後の再アークにおける溶融金属の飛散、あるいはアーク力による溶滴そのものの飛散などによって生じると考えられ、スパッタの発生は溶滴の粗大化によってさらに助長される<sup>8)</sup>。

写真1にJ-STAR Welding (KC-500, 棒マイナス)のアーク現象を示す。側方および斜め上方から高速度ビデオを用いて撮影した。従来のCO<sub>2</sub>アーク溶接の溶滴移行間隔は平均で37 ms、しかもその間隔は29~48 msと大きく変動する<sup>5)</sup>。しかし、J-STAR Weldingの溶滴移行間隔は、約4.5 msと非常に短く、しかも連続した溶滴移行になっており、いわゆる「スプレー移行」が観察された。また、斜め上方からの高速度ビデオ観察により、溶融池がアーク直下で深く掘り下げられる現象が確認された。

## 2.3 J-STAR Weldingの溶接特性

J-STAR Weldingは、ワイヤ先端を頂点とする安定した円錐状アークを形成し、最も理想的な溶滴移行と考えられる微細スプレー移行をCO<sub>2</sub>アーク溶接において初めて実現した。以下に、J-STAR Weldingの特長を列挙する。

- (1) スパッタ発生量は従来の1/10に低減する。
- (2) 溶接ビード近傍のスパッタ付着がない。
- (3) ヒューム発生量は従来の1/2に低減する。
- (4) 溶込み深さは従来の1.5倍に増加する(写真2)。
- (5) アーク音がソフト、音圧は従来の1/2に低減する。

これらJ-STAR Welding特性によって、溶接ラインの作業環境改善と高能率溶接への展開が期待される。

## 3. 厚板の溶接

図1に溶接電流とスパッタ発生量の関係を示す。J-STAR Welding (KC-500, 棒マイナス)では、従来溶接 (KC-50, 棒プラス)と比較して大幅なスパッタ低減が達成されており、その効果は溶接電流250~400 Aの広い範囲で著しい。

J-STAR Welding (KC-500, 棒マイナス) ビードオンプレート溶接における断面マクロ組織を写真2(a)に、外観を写真3に示す。ビード近傍へのスパッタ付着がなく、ビード中央には従来比約1.5倍の深い溶込みが認められる。REMを添加していない従来ワイヤを用いた棒マイナスのCO<sub>2</sub>アーク溶接は、棒プラスに対して溶込み深さは約1/2に減少し、ワイヤの溶融速度は約1.5倍に増加する。J-STAR Welding

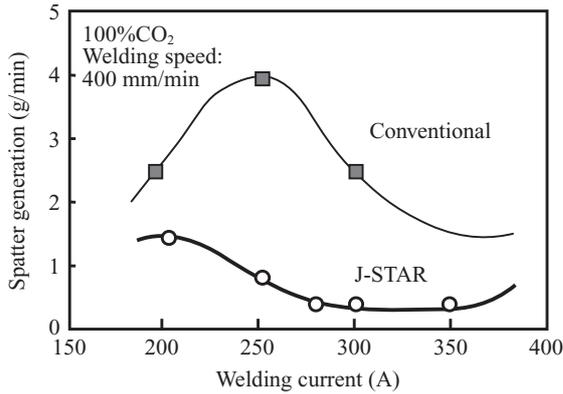
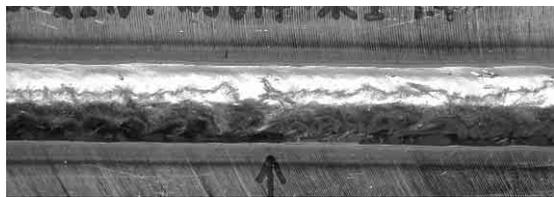


図1 溶接電流とスパッタ発生量の関係

Fig. 1 Relationship between welding current and spatter generation



10 mm

Conditions  
 Electrode negative, 100% CO<sub>2</sub>  
 Welding current: 300 A  
 Arc voltage: 30 V  
 Welding speed: 400 mm/min

写真3 J-STAR ビードオンプレート溶接部の外観

Photo 3 Weld bead appearance of bead-on-plate welding with J-STAR

は、ワイヤに適量のREMを添加することで安定かつ集中した円錐状アークの形成により棒マイナスの溶接でありながら従来の棒プラスのCO<sub>2</sub>アーク溶接に対して約1.5倍の深い溶込みが得られる<sup>5)</sup>。また、ワイヤの熔融速度は、従来の棒プラスの溶接と同等である。

### 3.1 J-STARを用いた高能率狭開先溶接技術

狭開先溶接は、開先断面積の低減と溶接施工時間の短縮が可能であるが、初層溶接における開先底部での安定したアーク発生および積層溶接における開先面へのスパッタ付着防止が重要となる<sup>19)</sup>。この課題を解決する方法として、

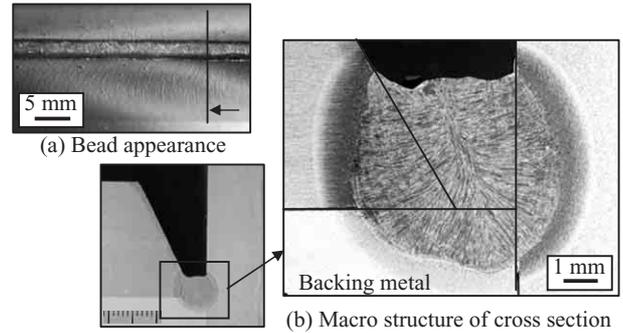


写真4 T継手1パス溶接後の外観と断面マクロ組織

Photo 4 Bead appearance and macro structure of T joint specimen after 1 pass welding (Single bevel groove, Groove angle 25°, Gap 2 mm)

電流波形制御あるいはシールドガス組成制御が有効との報告<sup>9)</sup>がなされている。J-STAR Weldingはスパッタの発生が少なくアークの集中と安定性に優れることから、これら制御機構を用いることなく狭開先の溶接が可能である。

写真4にJ-STAR Weldingを用いたレ形25°-Gap2 mm狭開先の初層溶接部の外観とマクロ組織を示す。溶接電流は350 A、溶接速度は80 cm/minとした。従来の棒プラスのCO<sub>2</sub>アーク溶接およびMAG溶接では、アーク変動による溶込みの不足およびビードの不均一を生じやすい。これに対してJ-STAR Weldingは、スパッタ付着がなく、均一な溶接ビード形状と深さ2 mmの安定した溶込みが確認された。

写真5に板厚25 mmの突合せ溶接継手のマクロ組織を示す。開先形状は(a)無開先(I形)-Gap5 mm、(b)レ形25°-Gap2 mm、(c)レ形35°-Gap7 mm(日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事 標準仕様)とした。いずれの継手もJ-STAR Weldingの特長である低スパッタ性とアーク集中による深い溶込みによって欠陥のない良好なマクロ組織が得られた。

図2に突合せ溶接可能な開先角度とギャップ(ルート間隔)の関係を示す。J-STAR Weldingは、従来法に対してより狭い角度および狭いGapの溶接が可能である<sup>10~11)</sup>。

表3にパス間温度250℃でのJ-STAR狭開先溶接における溶接金属の機械的性質を示す。溶接金属の0℃シャルピー吸収エネルギー(ノッチ位置:溶接金属中央, 1/2t)は無開先

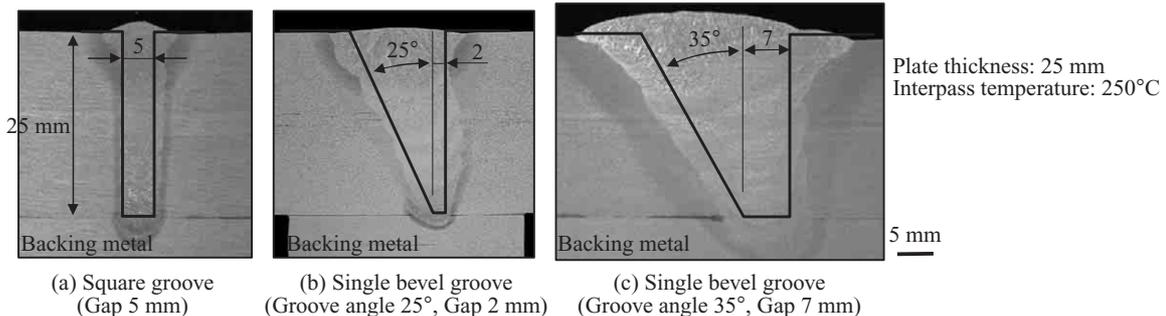


写真5 突合せ溶接部の断面マクロ組織

Photo 5 Macrostructure of butt joints

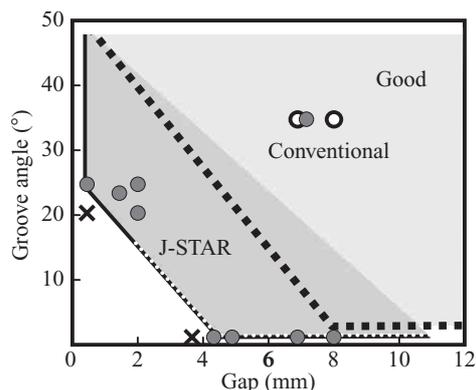


図2 健全な溶接が可能な開先角度とギャップの範囲  
Fig.2 Gap and groove angle map for good welded joint

表3 J-STAR 狭開先溶接金属の機械的特性

Table 3 Mechanical properties of welded metal with J-STAR narrow gap welding

Groove type	Heat Input (kJ/cm)	Mechanical properties			
		0.2% proof stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Absorbed energy at 0°C (J)
Square groove (Gap 5 mm)	6-10	612	654	29	138
Single bevel groove (25°-Gap 2 mm)	6-30	412	517	34	143

Butt joint  
Plate thickness: 25 mm  
Interpass temperature: 250°C

(I形)-Gap5 mm, レ形 25°-Gap2 mm とともに 100 J 以上, 引張り強さは a 無開先 654 N/mm<sup>2</sup>, レ形 25° 開先 517 N/mm<sup>2</sup> を得た<sup>12)</sup>。490 MPa 級鋼の継手として十分な強度と靱性である。狭開先の多層溶接継手は高冷速となることから溶接金属の継手強度と靱性の確保が容易であり, パス間温度の緩和が期待できる。

図3に溶接パス間温度 250°C 以下の管理における溶接電流と鋼板温度履歴を示す。継手は, 板厚 25 mm, 溶接長さ 300 mm の突合せとし, 開先形状は (a) I 形-Gap5 mm, (b) レ形 25°-Gap2 mm, (c) レ形 35°-Gap7 mm とした。開先断面積は (a)125 mm<sup>2</sup>, (b)196 mm<sup>2</sup>, (c)394 mm<sup>2</sup> となり, この時のアークタイムは (a)198 s, (b)341 s, (c)536 s と開先断面積にほぼ比例した。溶接施工時間はパス間温度 250°C の管理によりそれぞれ (a)447 s, (b)778 s, (c)1954 s とアークタイム以上の差が生じ, (c) レ形 35°-Gap7 mm (日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事 標準仕様) に対する溶接施工時間比率は (a) I 形-Gap5 mm の施工で 1/4, (b) レ形 25°-Gap2 mm で 2/5 にまで減少した。以上のことから, パス間温度の管理を必要とする多層溶接において, J-STAR 狭開先溶接は冷却待ち時間の短縮によりさらなる高能率化が期待できる。

### 3.2 J-STAR 狭開先溶接の開先標準

表4に J-STAR 狭開先溶接の標準開先を示す。推奨の開先形状は無開先 (I 形)-Gap5 mm, レ形 25°-Gap2 mm である。なお, KC-500 を用いた J-STAR 狭開先溶接法は, 建築鉄骨分野への適用拡大を考慮して財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明を 2007 年 5 月に取得した。

### 3.3 柱 - 梁接合部の載荷試験

角形鋼管柱と H 形鋼梁の仕口部を対象に繰返し載荷実験を行い, J-STAR 狭開先溶接による梁フランジ継手の性能を評価した。図4に載荷装置および試験体形状を示す。梁は溶接組立 H 形鋼 (SN490B), 柱は冷間成形角形鋼管 (BCR295), 通しダイアフラムは板厚 28 mm (SN490C) とすることで梁以外は塑性化しない断面寸法とした。継手部はノンスラップとし算出される梁端接合部係数は 1.29 であり, ひずみ硬化を考慮する場合の接合部係数を満足している。梁フランジとダイアフラムの溶接部に J-STAR 狭開先溶接 (a) 無開先-Gap 5 mm, (b) レ形 25° 開先-Gap

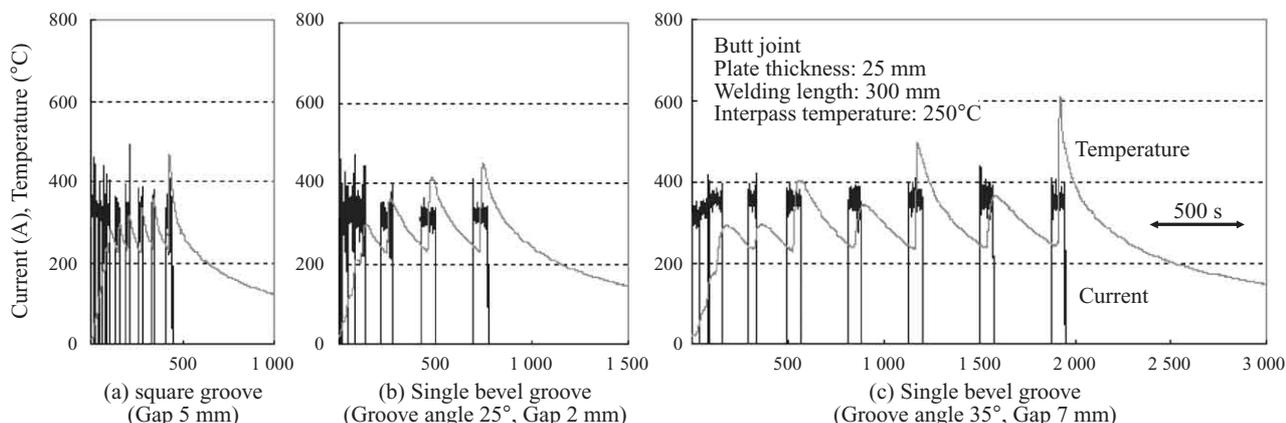


図3 溶接電流と試験体の温度履歴

Fig.3 Change in welding current and temperature of specimen



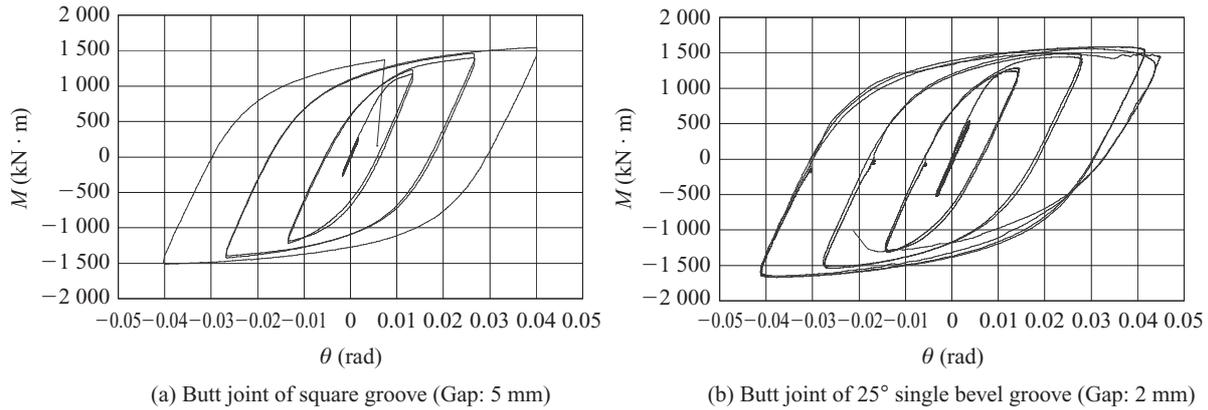


図6 荷重試験における梁端相対変形角と梁端フェースモーメントの関係

Fig.6 Relation between relative rotation of beam end connection and moment of beam end

ダイアとコラム溶接部に試験体(b)と同じレ形25°-Gap2mmの狭開先溶接を施し、柱-柱接合部の荷重試験を実施しており、この荷重試験においても変形能力としては十分であることを確認している<sup>14)</sup>。

#### 4. おわりに

「J-STAR Welding」は、微細スプレー移行の実現により極低スパッタ化が可能であり、CO<sub>2</sub>アーク溶接では避けられなかった溶接後の付着スパッタ除去作業や手直しが削減できる。また、J-STAR狭開先溶接は、開先断面積の低減にともなうアークタームの短縮と多層溶接における冷却待ち時間の短縮による溶接施工の高能率化が期待できる。さらに、微細溶滴の連続的な移行は、アーク電流値を安定化させることから溶接金属の品質、溶接ビード形状の安定化にも効果があると考えられ、今後、厚板の高能率組立溶接での活用が期待される。

#### 参考文献

- 1) 三田常夫. 溶接学会誌. 1990, 第50集, no.8, p.564-568.
- 2) 阿草一男, 山内信幸. 溶接学会誌. 1981, 第50集, no.11, p.1059-1065.
- 3) 阿草一男, 山内信幸. 溶接学会誌. 1981, 第50集, no.11, p.1066-1074.
- 4) 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. 2002, 第75集, p.250-251.
- 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. 2002, 第75集, p.252-253.
- 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.
- 8) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一. 溶接学会論文集. 2007, vol.25, no.3, p.410-415.
- 9) 中村照美, 平岡和雄. 溶接学会論文集. 2001, vol.19, no.1, p.44-53.
- 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, 第78集, p.136-137.
- 11) 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, 第79集, p.110-111.
- 12) 石井匠, 中川郷司, 片岡時彦, 池田倫正. 溶接学会講演概要集. 2007, 第80集, p.92-93.
- 13) 鋼構造接合部の力学的性状に関する研究の現状. 日本建築学会. 1993-10, p.126-134.
- 14) 石井匠, 中川郷司, 片岡時彦, 池田倫正. 溶接学会講演概要集. 2007, 第80集, p.94-95.
- 15) 鈴木春義. 炭酸ガスおよびノンガスアーク溶接. 1970, 産報.
- 16) 安藤弘平, 長谷川光雄. 溶接アーク現象. 1962, 産報.
- 17) 伊藤崇明, 奥石房樹, 佐藤正晴, 菅哲男, 牛尾誠夫. 溶接学会論文集. 1997, vol.15, no.3, p.432-437.
- 18) 荒井敏夫, 六条正治, 山田忠昭, 菅哲男. 溶接学会論文集. 1983, vol.1, no.2, p.177-182.
- 19) 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.50-56.



片岡 時彦



中川 郷司



石井 匠