

# プラズマ・アークハイブリッド溶接技術

## Plasma-Arc Hybrid Welding Technology

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)  
松下 宗生 MATSUSHITA Muneo 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)・Ph. D.  
池田 倫正 IKEDA Rinsei JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (部長)・博士 (工学)

### 要旨

溶接部の耐久性は、引張りの残留応力を低減するとともに溶接ビード止端部の形状を滑らかにし、応力集中を緩和することによって向上すると考えられている。溶接の生産性、コストの制約を受けることなく溶接継手の疲労強度向上を達成することができる溶接プロセスとして、プラズマ溶接とガスシールドアーク溶接 (GMAW) を複合化したプラズマ・アークハイブリッド溶接技術を開発した。特に、先行極のアーク溶接および後行極のプラズマ溶接がともにワイヤマイナス (EN) である時、アークは互いに引き合い内向きとなり、アーク間で堰止められた熔融金属は横に広がり、溶接ビードは広く高さの低い平滑なビード形状が得られる。さらに、後行極のプラズマ溶接電極をオフセットすることで熔融金属の流れを制御し、オフセット側の止端側形状をより滑らかにすることが可能である。その結果、板厚 3.2 mm の 780 N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板の重ね隅肉溶接において従来の CO<sub>2</sub> アーク溶接の約 2 倍の疲労強度が得られた。

### Abstract:

Fatigue properties of weld joint can be enhanced by mitigating the stress concentration at weld toe with smothering the profile, as well as managing the residual stress at the weld toe. In order to achieve the desirable weld toe profile without deteriorating the productivity of manufacturing processes, welding process consisting of the gas metal arc welding (GMAW) as the leading electrode and plasma welding as trailing electrode was developed. When the leading GMAW and the trailing plasma welding are both electrode negative (EN), the arcs are attracted each other and the molten metal was dammed up between those arcs, facilitating the sideward flow, which resulted in a wide and low profile of the weld bead with the obtuse edge of weld toe. Moreover, offsetting the trailing plasma welding was effective on the smothering the weld toe profile on the offset side, deliberately limiting the flow of molten metal on the offset side. The effect was verified with the lap-fillet welding of 3.2 mm thick 780 N/mm<sup>2</sup> grade steel sheet. The developed welding process exhibited the improved weld toe profile, in terms of the curvature radius and frank angle, and the fatigue strength approximately twice as much as that of conventional CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding.

## 1. はじめに

近年、高張力鋼板の適用拡大による自動車の車体軽量化が進んでおり、ボディ部材だけでなくシャーシ部材への適用に関しても検討が開始されている。シャーシ部材に要求される重要な特性の一つとして溶接継手の疲労特性が挙げられる。一般に材料の疲労強度は静的強度に比例する傾向を示すが、溶接継手を含む部材の疲労強度は溶接部からの破壊に支配されるため、母材の静的強度向上は継手の疲労強度向上に必ずしも寄与しない。溶接部から疲労破壊が発生する主な要因としては、(1) 溶接ビード止端部の応力集中、(2) 溶接部の引張残留応力が挙げられる。(1) 溶接ビード止端部の応力集中は、グラインダー処理、TIG (Tungsten

inert gas) なめ付け処理など止端部形状を平滑化する処理により緩和することができる。また、(2) 溶接部の引張残留応力は、応力除去焼鈍熱処理により低減することができ、鉄鋼の溶接ではマルテンサイト変態時の膨張により溶接部に圧縮残留応力を導入し疲労強度を向上する溶接材料が開発されている<sup>1-6)</sup>。しかし、上記の継手の疲労強度を向上する従来の方法は、煩雑な工程の増加もしくは高価な材料が必要となるため生産性、コストの制約が大きく、自動車の生産には適用が困難である。そこで、JFE スチールでは生産性、コストの制約を受けず、溶接継手の疲労強度向上を達成することができる溶接プロセスとして、プラズマ溶接と CO<sub>2</sub> アーク溶接を複合化したプラズマ・アークハイブリッド溶接技術を開発した<sup>7-9)</sup>。本報ではプラズマ・アークハイブリッド溶接における溶接ビード形成現象と止端部形状の平滑化効果、さらに、板厚 3.2 mm の 780 N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板の

2014 年 1 月 14 日受付

重ね隅肉溶接継手に本技術を適用した場合の溶接ビード止端部形状および継手疲労強度について報告する。

## 2. プラズマ・アークハイブリッド溶接技術

図1にプラズマ・アークハイブリッド溶接の構成を示す。プラズマ・アークハイブリッド溶接法は、先行極に溶極式のCO<sub>2</sub>アーク溶接を、後行極に非溶極式プラズマ溶接を配置した溶接法であり、CO<sub>2</sub>アーク溶接により形成された溶融状態の溶接金属（溶融プール）とその周囲をプラズマにより再加熱することで、溶接ビードの形状を制御する溶接法である。プラズマ溶接はタングステン電極の耐久性の観点から極性ワイヤマイナス（Electrode negative：EN）に限定される。一方、極性ワイヤマイナス（EN）のCO<sub>2</sub>アーク溶接には安定したアークとスパッタの低減が可能な「J-STAR<sup>®</sup> Welding」<sup>10-12</sup>を用いる。

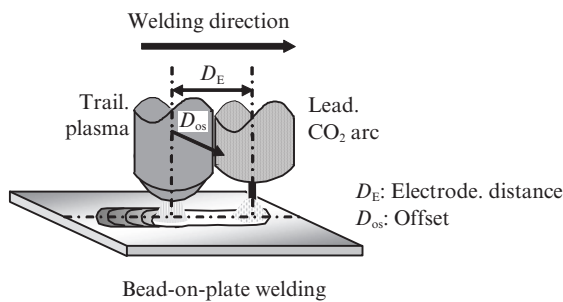


図1 プラズマ・アークハイブリッド溶接法の模式図  
Fig. 1 Illustration of setup for plasma-arc hybrid welding

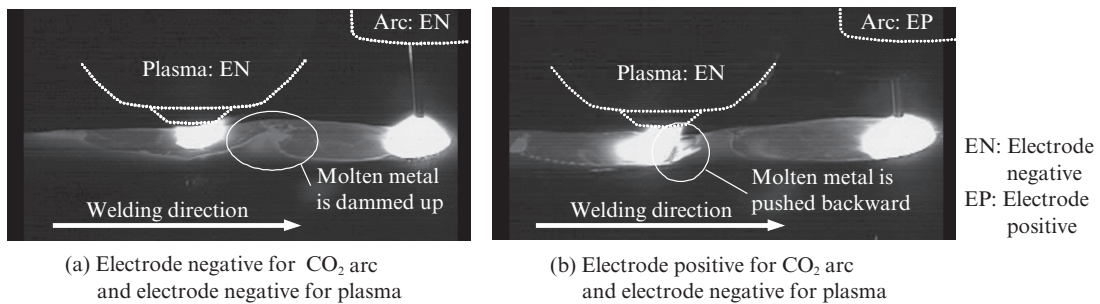
### 2.1 溶接アーク現象

アークの複合化は電磁力によって互いのアークに干渉が生じる。写真1はプラズマ・アークハイブリッド溶接を行なった時のCO<sub>2</sub>アークとプラズマの溶接アークの相互作用と溶融池の挙動を高速ビデオを用い観察した結果である。溶接条件を表1に示す。板厚9mmの熱間圧延鋼板へのビードオンプレート溶接とした。

CO<sub>2</sub>アーク溶接およびプラズマ溶接がともに極性ワイヤマイナスの場合は、写真1(a)から分かるようにCO<sub>2</sub>とプラズマのアークが引き合い、後行プラズマ溶接のアークは前方（先行）のCO<sub>2</sub>アーク溶接に向かって傾斜した。これより、CO<sub>2</sub>・プラズマ間にはプラズマのアークにより堰き止められた溶融金属の湯溜りが確認された。一方、先行極のCO<sub>2</sub>アーク溶接がワイヤプラス（Electrode positive：EP）、後行極プラズマ溶接がワイヤマイナス（EN）の場合は、写真1(b)から分かるようにCO<sub>2</sub>とプラズマのアークが互いに反発し合い、プラズマのアークは後方へ傾斜し、CO<sub>2</sub>・プラズマ間の溶融金属は、さらに後方へと押し流される様子が確認された。

### 2.2 溶接ビード形状制御

写真2にビードオンプレート溶接部の断面マクロ組織を示す。CO<sub>2</sub>アーク溶接が極性ワイヤマイナスの場合は、写真2(a)から分かるように幅が広く高さが抑えられた平滑なビード形状が得られた。一方、先行CO<sub>2</sub>アーク溶接がワイヤプラスでは、写真2(b)から分かるように幅が細く顕著な凸形のビード形状となった。図2にプラズマ・アーク



(a) Electrode negative for CO<sub>2</sub> arc and electrode negative for plasma

(b) Electrode positive for CO<sub>2</sub> arc and electrode negative for plasma

写真1 プラズマ・アークハイブリッドビードオンプレート溶接のアーク現象と溶融金属の流れ

Photo 1 Arc phenomena and molten metal flow of plasma-arc hybrid welding with bead-on-plate (Plasma offset, D<sub>os</sub>: 0 mm)

表1 ビードオンプレート溶接条件  
Table 1 Welding conditions for bead-on-plate welding

Leading: CO <sub>2</sub> Arc welding				Trailing: Plasma welding					Elec. dist., D <sub>E</sub> (mm)	Weld. speed (mm/min)
Shield. gas	Polar.	Current (A)	Voltage (V)	Offset, D <sub>os</sub> (mm)	Shield. gas	Polar.	Current (A)	Voltage (V)		
Ar-20% CO <sub>2</sub>	EN* or EP**	320	30	0, 3	100% Ar	EN	150	22	25	600

\*EN: Electrode negative \*\*EP: Electrode positive

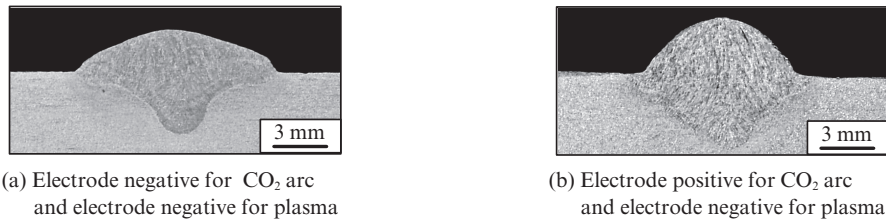


写真2 プラズマ・アークハイブリッドビードオンプレート溶接部の断面マクロ組織

Photo 2 Macrostructures in transverse section of welds for plasma-arc hybrid welding with bead-on-plate (Plasma offset,  $D_{os}$ : 0 mm)

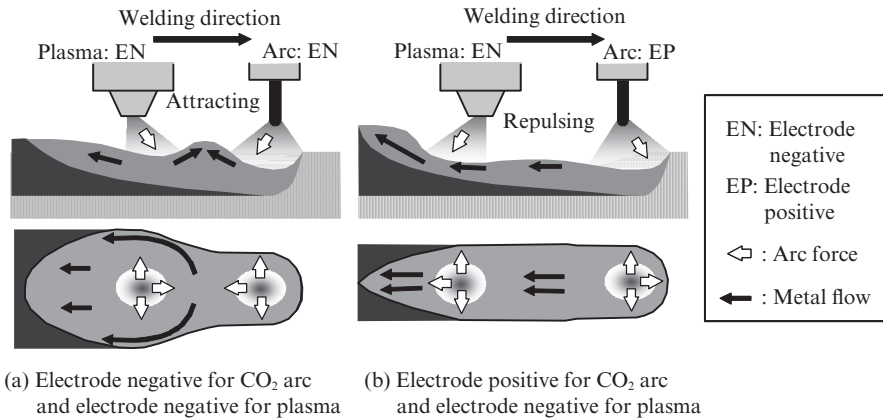
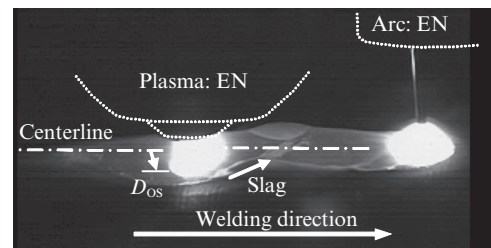


図2 プラズマ・アークハイブリッド溶接のアーク現象と溶融金属の流れの模式図

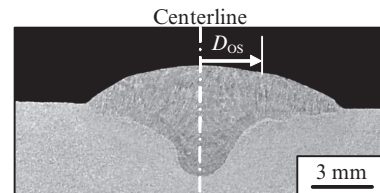
Fig. 2 Interaction of arc phenomena and molten metal flow of plasma-arc hybrid welding (Plasma offset,  $D_{os}$ : 0 mm)

ハイブリッド溶接における先行  $\text{CO}_2$  アーク溶接と後行プラズマ溶接の極性の組み合わせが、溶接アークの相互作用、溶融池における溶融金属の挙動、そして溶接ビード形状に及ぼす影響について模式的に示す。先行  $\text{CO}_2$  アークおよび後行プラズマがともに EN の場合は、 $\text{CO}_2$  アークとプラズマのアークが引き合い、双方のアーク力は  $\text{CO}_2$  アーク-プラズマ間の内側に作用するため、 $\text{CO}_2$  アーク-プラズマ間で溶融金属がぶつかり合い湯溜りを形成する。結果として、横方向への溶融金属の流動が生じビード形状は広く平滑となる。一方、先行  $\text{CO}_2$  が EP、後行プラズマが EN では、 $\text{CO}_2$  アークとプラズマのアークが反発し、双方のアーク力は  $\text{CO}_2$  アーク-プラズマ間の外側に作用するため、 $\text{CO}_2$  アーク-プラズマ間の溶融金属はプラズマのアーク力によりさらに後方へと押し退けられ、後方への流動を助長する。よって、凝固により形成された溶接ビードのさらに上方へ溶融金属を押し上げるため、ビード形状は細く凸になる。

さらに、後行プラズマ溶接電極のオフセットによる溶接止端部の形状制御を検討した。写真3 (a) はプラズマ電極を溶接線と直角方向に 3 mm オフセットした時のアークと溶融池の挙動を観察した結果である。先行  $\text{CO}_2$  アークがワイヤマイナス (EN) では、オフセット 0 mm の場合と同様に、プラズマのアークが前方へ傾斜し、 $\text{CO}_2$  アーク-プラズマ間にプラズマのアークにより堰き止められた溶融金属の湯溜り



(a) Arc phenomena and molten metal flow



(b) Macrostructures in transverse section

写真3 オフセット 3 mm におけるプラズマ・アークハイブリッド溶接

Photo 3 Result of plasma-arc hybrid welding with offset,  $D_{os}$ : 3 mm (Bead-on-plate, Electrode negative for  $\text{CO}_2$  arc and electrode negative for plasma)

を形成し、さらに、オフセットしたプラズマが、溶融止端部の溶融領域を広げる様子が確認された。また、写真3 (b)は、プラズマ・オフセット 3 mm の断面マクロ組織である。プラ

ズマ・オフセット側のビード幅がより広く平滑となることが確認された。以上のように、プラズマ・アークハイブリッド溶接において、先行 CO<sub>2</sub> アークおよび後行プラズマがともに EN では、プラズマ・オフセットなしの場合と同様に CO<sub>2</sub> アークとプラズマのアークが引き合い、双方のアーク力は CO<sub>2</sub> アーク-プラズマ間の内側に作用するため、CO<sub>2</sub> アーク-プラズマ間で溶融金属がぶつかり合い湯溜りを形成する。さらに、プラズマ溶接電極のオフセットにより、プラズマのアーク熱でオフセット側のビード幅がさらに広くなり、かつアーク力の作用で溶融金属はオフセットの反対側へ流動しオフセット側の流動は大きく制限され広く平滑とすることができる。以上のように、後行プラズマ溶接電極のオフセットにより溶接ビード形状を制御することができる。

### 3. 自動車シャシー部材への適用検討

高張力鋼板の適用拡大による自動車の車体軽量化はボディ部材だけでなくシャシー部材への適用も進んでいる。このシャシー部材への適用を想定して重ね隅肉溶接の止端部形状制御と疲労強度について検討した。

#### 3.1 重ね隅肉溶接ビード止端形状の制御

表 2 に重ね隅肉溶接の溶接条件を示す。先行極 CO<sub>2</sub> アー

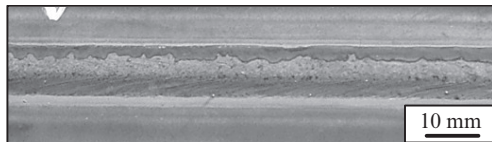


写真4 プラズマ・アークハイブリッド溶接の外観

Photo 4 Bead appearance of plasma-arc hybrid weld (Offset, D<sub>OS</sub>: 4 mm)

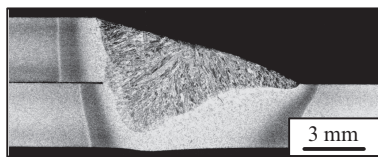


写真5 プラズマ・アークハイブリッド溶接の溶接線垂直方向の断面マクロ組織

Photo 5 Macrostructures in transverse section of welds for plasma-arc hybrid welding (Offset, D<sub>OS</sub>: 4 mm)

ク溶接にはワイヤマイナス (EN)、鋼板には板厚 3.2 mm の 780 N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板を用いた。得られた溶接ビードは、レーザ変位計を用いて止端部の形状を測定し、フランク角 (Frank angle,  $\theta$ (rad)) と曲率半径 (Curvature radius,  $\rho$ (mm)) を求めた。さらに (1) 式<sup>13)</sup>を用いて応力集中係数 (Stress concentration factor,  $K_t$ ) を求めた。

$$K_t = 1 + \frac{1 - \exp\left\{-0.9\sqrt{\frac{T}{h}}(\pi - \theta)\right\}}{1 - \exp\left\{-0.9\sqrt{\frac{T}{h}}\left(\frac{\pi}{2}\right)\right\}} \cdot \left[ \tanh\left\{\left(\frac{T}{t} - 1\right)^{\frac{1}{4}}\right\} \cdot \left[ \frac{0.13 + 0.65\left(1 - \frac{\rho}{t}\right)^4}{\left(\frac{\rho}{t}\right)^{\frac{1}{3}}}\right] \right] \quad (1)$$

ここで  $T$  は重ね部の板厚 (mm)、 $t$  は下板の板厚 (mm)、 $h$  は溶接ビードの高さ (mm) である。

写真 4, 5 は、プラズマ溶接電極オフセット 4 mm とした場合の重ね隅肉溶接継手のビード外観と断面マクロ組織である。

溶接線方向に安定なビード形状が得られ、かつプラズマをオフセットした重ね隅肉継手の下板側では平滑なビード止端部形状が得られた。

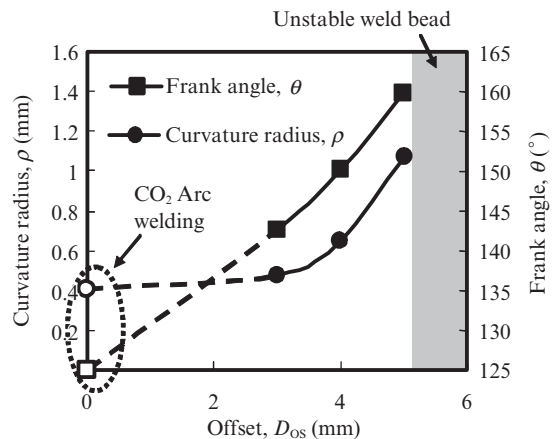
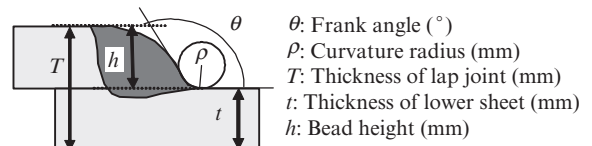


図3 オフセットと止端形状パラメータの関係

Fig. 3 Relationship between weld toe shape parameters and offset

表 2 重ね隅肉溶接条件

Table 2 Welding conditions for lap-fillet welding

Leading: CO <sub>2</sub> Arc welding					Trailing: Plasma welding					Elec. dist., D <sub>E</sub> (mm)	Weld. speed (mm/min)	
Trans. angle., $\theta_A$ (°)	Shield. gas	Polar.	Current (A)	Voltage (V)	Trans. angle., $\theta_B$ (°)	Offset, D <sub>OS</sub> (mm)	Shield. gas	Polar.	Current (A)			Voltage (V)
30	100% CO <sub>2</sub>	EN*	300-325	26-27	8	3-5	100% Ar	EN*	200-220	24-26	25	1 200

\*EN: Electrode negative



図3はプラズマ・オフセット量と止端部形状パラメータの関係を示す。一般的なCO<sub>2</sub>アーク溶接のフランク角および曲率半径 ( $\theta=125^\circ$ ,  $\rho=0.41\text{ mm}$ )<sup>7-9)</sup> に対してプラズマ・アークハイブリッド溶接のフランク角および曲率半径を大きく増加させることが可能である。さらに、止端部のフランク角および曲率半径はプラズマ・オフセットとともに増加する傾向を示した。

### 3.2 重ね隅肉溶接継手の疲労特性

表3の溶接条件によりプラズマ・アークハイブリッド溶接 (plasma-arc hybrid weld : HYB), MAG (Ar-20% CO<sub>2</sub>) 溶接 (Metal active gas welding : MAG), CO<sub>2</sub>アーク溶接 (CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding : CO2) の溶接継手を作製した。写真6に得られた溶接継手の断面マクロ組織を示す。表4は各溶接継手止端部の曲率半径  $\rho$ , フランク角  $\theta$  および (1) 式より求めた応力集中係数  $K_t$  を示す。曲率半径およびフラ

表3 重ね隅肉溶接疲労試験片の溶接条件

Table 3 Welding conditions of lap-fillet weld fatigue test specimens

Weld sample	Leading: CO <sub>2</sub> Arc welding					Trailing: Plasma welding			Electrode distance, $D_E$ (mm)	Weld. speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)		
	Welding wire	Shield. gas	Polar.	Current (A)	Voltage (V)	Offset, $D_{OS}$ (mm)	Current (A)	Voltage (V)			Arc	Plasma	Total
HYB	YGW11	CO <sub>2</sub>	EN*	250	27	4	180	23	25	850	0.48	0.29	0.77
MAG	YGW15	Ar-20% CO <sub>2</sub>	EP**	320	28	—	—	—	—	1 200	0.45	—	0.45
CO2	YGW11	CO <sub>2</sub>	EP**	220	20	—	—	—	—	600	0.44	—	0.44

HYB: Plasma-arc hybrid welding    MAG: MAG Welding    CO2: CO<sub>2</sub> Arc welding  
 \*EN: Electrode negative    \*\*EP: Electrode positive

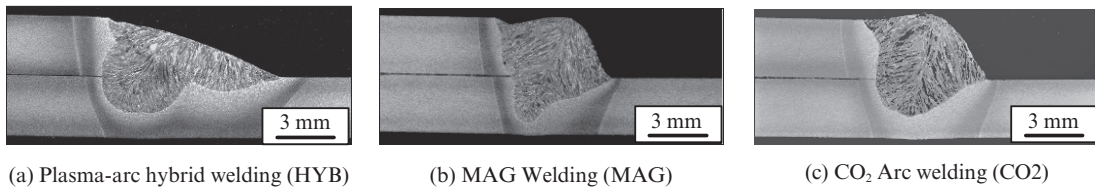


写真6 重ね隅肉溶接疲労試験片の溶接線垂直方向の断面マクロ組織

Photo 6 Macrostructures in transverse section of welds for lap-fillet weld fatigue test specimens

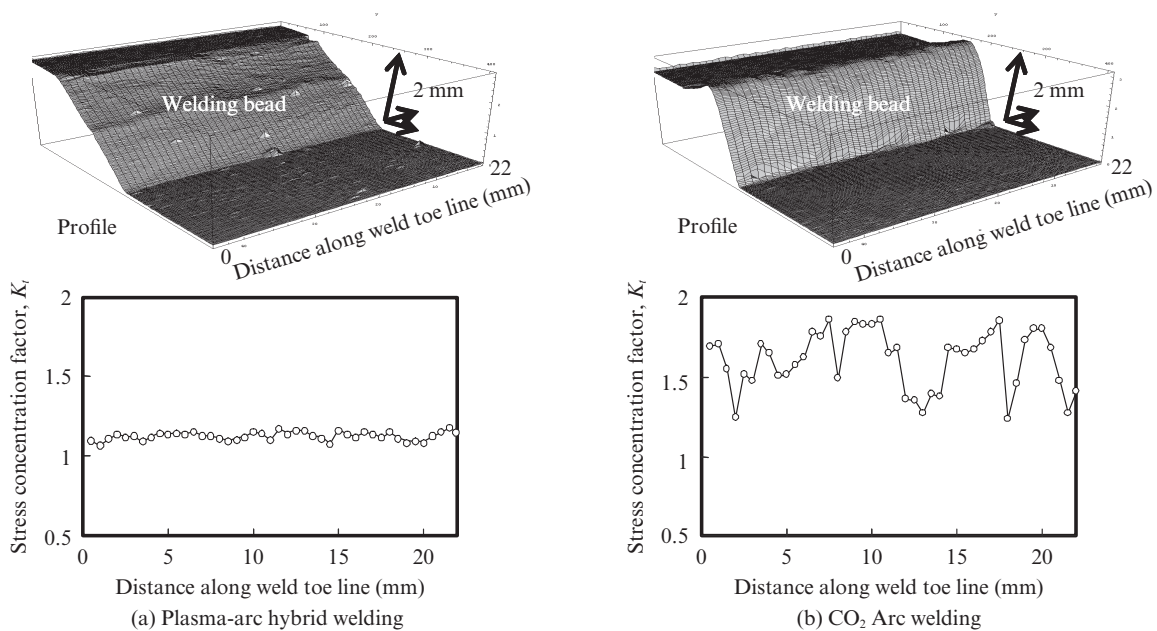


図4 疲労試験片の応力集中係数  $K_t$  の分布

Fig. 4 Profile of stress concentration factor,  $K_t$ , along the weld toe line of fatigue test specimen

表 4 重ね隅肉溶接疲労試験片の応力集中係数  $K_t$

Table 4 Stress concentration factor,  $K_t$  of lap-fillet weld fatigue test specimens

Weld sample	Curvature Radius, $\rho$ (mm)	Flank Angle, $\theta$ ( $^\circ$ )	$K_t$
HYB	0.97	161	1.17
MAG	0.46	143	1.5
CO2	0.41	125	1.72

HYB: Plasma-arc hybrid welding      MAG: MAG Welding  
 CO2: CO<sub>2</sub> Arc welding

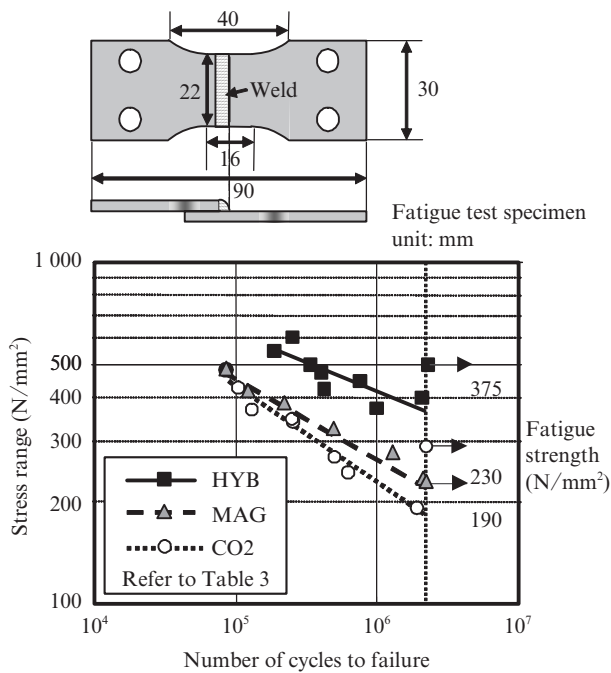


図 5 溶接継手疲労試験の結果

Fig. 5 Results of fatigue test for weld joints

ンク角は、CO<sub>2</sub> アーク溶接 (CO2)、MAG 溶接 (MAG)、プラズマ・アークハイブリッド溶接 (HYB) の順で増加し、応力集中係数  $K_t$  は CO2 の 1.72、MAG の 1.50 に対して HYB では 1.17 にまで減少した。図 4 に疲労試験片の溶接ビード止端部の形状測定結果と溶接線方向の応力集中係数  $K_t$  の分布を示す。プラズマ・アークハイブリッド溶接継手の応力集中係数は、CO<sub>2</sub> アーク溶接継手と比較して、低くかつばらつきが小さい。

図 5 に溶接継手疲労試験の試験片形状と疲労試験結果を示す。疲労試験は、シェンク式平面曲げ疲労試験機を用いて完全片振りで実施し、繰返し数 200 万回を疲労強度とした。

プラズマ・アークハイブリッド溶接 (HYB) の疲労強度は、CO<sub>2</sub> アーク溶接 (CO2) の 190 N/mm<sup>2</sup> に対して約 2 倍の 375 N/mm<sup>2</sup> が得られた。図 6 は応力集中係数  $K_t$  と疲労強度の関係を示す。CO<sub>2</sub> アーク溶接 (CO2)、MAG 溶接 (MAG)、プラズマ・アークハイブリッド溶接 (HYB) の順で応力集

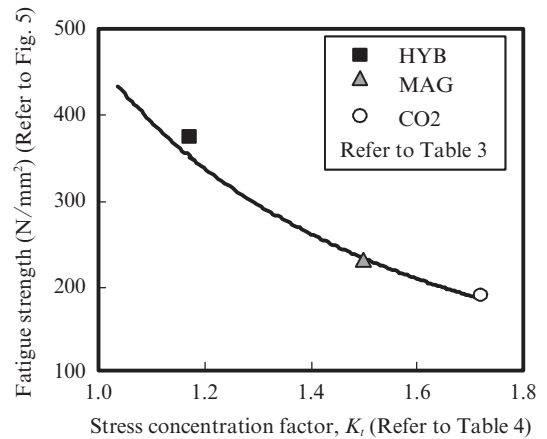


図 6 応力集中係数  $K_t$  と疲労強度の関係

Fig. 6 Relationship between stress concentration factor,  $K_t$  and fatigue strength

中係数  $K_t$  は減少し、それに伴い疲労強度は向上した。以上より、プラズマ・アークハイブリッド溶接において、プラズマ溶接電極のオフセットにより溶接ビード止端形状制御が可能であり、適正化によりビード止端部への応力集中低減による継手疲労強度の向上が可能であることが明らかとなった。

#### 4. おわりに

プラズマ・アークハイブリッド溶接技術を開発した。先行極アークと後行極プラズマをともに極性ワイヤマイナス (EN) とし、さらに、プラズマ溶接電極をオフセットすることで溶融金属の挙動を適正に制御することができ、広く平滑なビード形状を得ることが可能である。これにより、プラズマ・アークハイブリッド溶接は、板厚 3.2 mm の 780 N/mm<sup>2</sup> 級熱間圧延鋼板の重ね隅肉溶接継手の疲労試験において、CO<sub>2</sub> アーク溶接の約 2 倍の疲労強度を得た。複合化により装置が大型となり、溶接方向などの施工上の制約が生じるが施工能率を落とすことなく溶接継手特性の大幅な向上が可能であり、自動車シャシー部材の組立て溶接などでの活用が期待される。

#### 参考文献

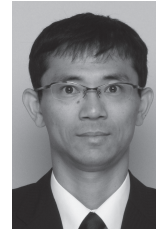
- 1) 太田昭彦, 渡辺修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏. 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上. 溶接学会論文集. 2000, vol. 18, no. 1, p. 141-145.
- 2) 太田昭彦; 前田芳夫; NGUYEN, T. N.; 鈴木直之. 低変態温度溶接材料を用いた箱型断面溶接部材の疲労強度向上. 溶接学会論文集. 2000, vol. 18, no. 4, p. 628-633.
- 3) 太田昭彦, 渡辺修, 松岡一祥, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏. 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上—溶接後熱処理による 3 倍加一. 溶接学会論文集. 2001, vol. 19, no. 2, p. 373-376.
- 4) 毛利雅志, 阪野賢治, 荒川幸次, 久保高宏, 森影康. 低変態温度溶接材による荷重非伝達型十字継手の疲労強度改善. 溶接学会論文集. 2002, vol. 20, no. 2, p. 282-286.
- 5) 太田昭彦, 鈴木直之, 前田芳夫. 重ね溶接継手の疲労強度向上—低変

- 態温度溶接材料により圧縮残留応力を導入して実現一。自動車技術会論文集。2002, vol. 33, no. 3, p. 91-96.
- 6) 鈴木直之, 太田昭彦, 前田夫. 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の補修による疲労強度向上. 溶接学会論文集. 2002, vol. 20, no. 2, p. 62-67.
- 7) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. プラズマ・アークハイブリッド溶接技術の開発(第1報)ー溶接ビードの形成現象と止端部形状制御一. 溶接学会全国大会講演概要集. 2007, vol. 80, p. 12-13.
- 8) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. プラズマ・アークハイブリッド溶接技術の開発(第2報)ーハイテン重ね隅肉溶接継手の止端部形状制御による疲労強度の向上一. 溶接学会全国大会講演概要集. 2007, vol. 80, p. 14-15.
- 9) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫正, 遠藤茂. プラズマ・アークハイブリッド溶接技術の開発. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 1, p. 77-85.
- 10) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則. 炭酸ガスアーク現象に及ぼすワイヤへのREM添加の影響. 溶接学会論文集. 2008, vol. 26, no. 1, p. 37-41.

- 11) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一. 極低スパッタ CO<sub>2</sub> アーク溶接技術「J-STAR Welding」の開発. JFE 技報. 2007, no. 16, p. 50-53.
- 12) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則. スプレー移行を可能にした CO<sub>2</sub> アーク溶接技術「J-STAR Welding」の開発. まてりあ. 2008, vol. 47, no. 2, p. 99-101.
- 13) 西田正孝. 応力集中. 1st ed., 1967, p. 47,638.



片岡 時彦



松下 宗生



池田 倫正