

(論文)

# HT780鋼のレーザ・アークハイブリッド溶接に関する検討

## Research on Laser-arc Hybrid Welding of HT780 Steel



菅 哲男\*1  
Tetsuo SUGA



村井康生\*1  
Yasuo MURAI



小橋泰三\*1  
Taizo KOBASHI



佐藤統宣\*2  
Munenobu SATO



原 則行\*3  
Noriyuki HARA

Nowadays, the demand for laser-arc hybrid welding of HT780 steel has been expanding in the fields of bridge construction and industrial machinery fabrication. Taking this trend into account, we have researched suitable welding parameters and consumables for the hybrid welding process that couples laser beam and MAG arc for joining HT780 steel plates. As a result, the following welding parameters have been proven to be most appropriate for better root-gap tolerance and lower spatter: MAG arc for leading (kept at a right angle)/laser for trailing (kept at a push angle); a laser-arc distance of 3-5mm; a laser beam focus position of  $\pm 0$  mm; and shielding gas of Ar-20%CO<sub>2</sub>. As to the welding wire for laser-arc hybrid welding of HT780 steel, the HT590-class MAG arc welding wire of Cr-Mo-Ti type with a small amount of titanium has been revealed to be suitable for obtaining sufficient weld metal tensile strength and toughness.

まえがき＝アーク放電に比べ数十倍のエネルギー密度をもつレーザ照射は、溶接において高速、深溶込み施工が可能である。近年、産業用レーザ機器の品質が安定し信頼性が高まるなか、従来の溶接法と組合せた新たな溶接が開拓されつつある。とりわけレーザ・アークハイブリッド溶接法は、レーザ溶接とアーク溶接を合わせることによって、レーザ溶接の高エネルギーおよびアーク溶接の施工簡易性を併せ持った溶接法として注目を浴び、その効用や特性について多数の報告がある<sup>1),2)</sup>。本溶接法におけるアーク溶接の種類には、MAG・MIG溶接、TIG溶接、プラズマ溶接などがある。

厚板へのレーザ・アークハイブリッド溶接法の適用においては、溶接材料を使用することで溶接時の狙い位置やギャップなどに対するの裕度の大きいMAG・MIG溶接との組合せへの関心が高まっている。炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金について、溶接現象の解析や溶接金属の組織の研究報告がある<sup>3)~7)</sup>。また、実用化においても、欧州における造船分野への適用<sup>8),9)</sup>を始め、日本国内でも車両<sup>10)</sup>、造船<sup>11)</sup>、橋梁<sup>12)</sup>の分野への実適用および適用検討の報告がなされている。総じて、溶接の高エネルギー化とそれに伴う溶接入熱の減少による溶接ひずみの低減がメリットとして挙げられる。

一方で近年、地球環境の観点から構造物の軽量化が求められており、高張力鋼の適用による薄板化が進み、レーザ溶接のみ、またはレーザ・アークハイブリッド溶接による1層1パス溶接が可能な板厚の部材の採用が増えてきている。さらに、橋梁、建設機械などに使用されるHT780鋼へのレーザ・アークハイブリッド溶接の需要も広がってきている。

しかしながら、HT780鋼クラスのレーザ・アークハイ

ブリッド溶接法については、TIG溶接<sup>13)</sup>およびMAG溶接<sup>14)</sup>にかかわらず、詳細に検討した報告はまだ少ない。

そこで、HT780鋼に対するレーザ溶接とMAG溶接を用いたレーザ・アークハイブリッド溶接の施工条件および溶接材料について検討したので報告する。

### 1. 実験方法

#### 1.1 試験条件

##### 1.1.1 供試材料

供試鋼板は780MPa級鋼で板厚6mmの平板を、MAG溶接用のワイヤにはHT490からHT780クラスの6種類を用いた。供試鋼板の化学成分を表1に、使用した溶接ワイヤのそれを表2に示す。

##### 1.1.2 溶接条件

図1に示すレーザ・アークハイブリッド溶接機(ロボット搭載型自動溶接システム)を用いて溶接を行った。

表1 供試鋼板の化学成分

Table 1 Chemical composition of tested steel plate

Steel	Thickness (mm)	Chemical composition (mass%)						Ceq
		C	Si	Mn	P	S	Others	
HT780	6	0.12	0.25	1.01	0.013	0.003	Ni,Cr,Mo,Ti,V	0.50

$$Ceq=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$$

表2 溶接ワイヤ

Table 2 Welding wires used

Wire No.	Strength level* (MPa)	Added material	JIS Z 3312
W1	780	Ni-Cr-Mo-Ti	G 78A 4 M N5CM3T
W2	780	Ni-Mo-Ti	G 78 A 2 U C N4M4T
W3	590	Cr-Mo-Ti	G 59J A 1 U M C1M1T
W4	590	Mo-Ti	G 59J A 1 U C 3M1T
W5	550	Ni-Mo-Ti	G 55 A 6 M N2M1T
W6	490	Ni-Mo	G 49 P 10 G N9

\*When MAG welding done.

\*1 神鋼溶接サービス(株) 技術調査部 \*2 阪神溶接機材(株) 製造部 \*3 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

レーザー源は、ファイバー（媒質Si，励起元素Yb）レーザー発振器（最大出力：4.0kW，焦点距離：250mm，焦点スポット径：0.3mm，波長：1070nm）を使用した。MAG溶接機の種類は、デジタルインバータ制御式（定格出力電流：350A）で直流パルスモードを用い、一部直流でパルスなしの条件も使用した。レーザーの焦点位置はレーザービームが照射される部材表面を基準とし、レーザー発信器のレンズ側をプラス，その反対側をマイナスとした。また，シールドガスはMAGトーチノズルから流量20L/minで供給した。板厚6mmで溶接条件はレーザー出力2.5kW，溶接速度1m/min，溶接電流280A，アーク電圧28Vである。溶接継手はI形突合せ（裏当て材なし）とし，必要に応じてスペーサを挟みギャップを1mmもしくは5mm空けた。

施工条件の検討として，溶接ワイヤW1を用いて，レーザー照射位置とMAGトーチの配置，レーザー先行かアーク先行か，レーザー／アーク間距離やMAG溶接のパルスの有無などを変えて溶接を行った。レーザーとMAG溶接の配置を図2に示す。レーザーを垂直にしてMAGトーチを25度傾けた場合（配置A）およびMAGトーチを垂直にしてレーザーを25度傾けた場合（配置B）の2種類の配置とし，それぞれの配置においてレーザー先行（WD1，WD3）またはMAG先行（WD2，WD4）で溶接を行った。本検討において採用した溶接施工条件を表3に示す。

また，溶接材料の検討にあたっては，溶接方向WD1〔レーザー先行／MAG後行（前進角）〕，デフォーカス+7mm，レーザー／アーク間距離3mmで6種類の溶接ワイヤ（W1～W6）を用いて溶接を行った（表4）。さらに，シールドガスの影響を調べるため，Ar，Ar-2%O<sub>2</sub>，Ar-20%CO<sub>2</sub>を使用して溶接ワイヤW3による溶接を行っ

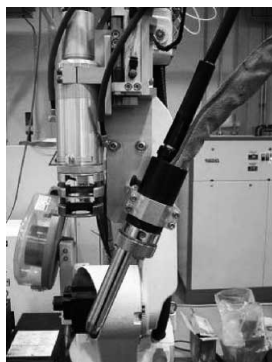


図1 レーザー・アークハイブリッド溶接機  
Fig. 1 Laser-arc hybrid welding machine

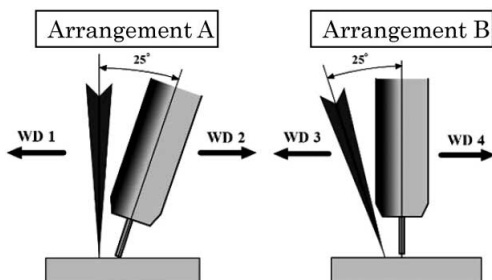


図2 レーザーとMAGトーチの配置，溶接方向  
Fig. 2 Arrangement of laser and MAG torch, and welding direction

た。溶接材料検討の場合の継手は，板厚6mmの同厚I形突合せでギャップは1mmとした。

## 1.2 調査項目

### 1.2.1 耐ギャップ性

レーザー・アークハイブリッド溶接では，溶接条件（とくに，レーザーとアークの配置）を選定する上で重要であることから耐ギャップ性の調査を行った。耐ギャップ性調査における溶接試験体は，溶接開始から45mmの間はギャップ0mm，45mm地点から徐々にギャップを大きくして200mm先の終端部で5mmとなるように加工・セットした板厚6mmのI型開先継手である（図3）。調査にあたっては，良好な溶接ビードが形成するか否かを裏波ビードだけで判断することとし（図4），表側ビードがアンダーフィルになっているか否かは無視した。最大ギャップは図4に示したGap2であり，最小ギャップは裏ビードが出始めるGap1とした。

### 1.2.2 溶接作業性

溶接作業性のなかでは，スパッタ発生量に注目する必要がある。そこで，耐ギャップ性調査と同様の条件（表3）によって板厚6mmでビードオンプレート溶接を行い，それぞれの溶接条件での発生したスパッタを捕集・計測した。溶接作業性の調査においては，ワイヤ送給量（ここでは50gとした）に対するスパッタ率（%）を比較することにした。例えば，溶接速度1m/min，ワイヤ径1.2mm，ワイヤ送給速度9.3m/min，溶接長約600mm（ワイヤ送給量50g）の溶接を行い，捕集したスパッタ量が0.1785gの場合のスパッタ率は0.36%となる。

### 1.2.3 溶接金属性能

まず，溶接可否の判断のため，溶接試験体（板厚6mm×幅200mm×溶接長240mm）に対し，放射線透過試験（JIS Z3104）を実施し，その後に性能評価を行った。溶

表3 溶接施工調査の条件  
Table 3 Condition of welding procedures investigation

No.	Arrange-ment	Welding direction	Focus (mm)	Laser/arc distance (mm)	Shielding gas	MAG pulse		
1	A	WD1	0	3	Ar-20 %CO <sub>2</sub>	With		
2		WD2						
3		WD3						
4		WD4						
5	A	WD1			1		Ar-2 %O <sub>2</sub>	
6								Ar
7								
8					5			
9							7	
10					+7			3

表4 溶接材料調査の条件  
Table 4 Condition of welding consumables investigation

No.	Arrange-ment	Welding direction	Focus (mm)	Laser/arc distance (mm)	Wire No.	Shielding gas
11	A	WD1	+7	3	W1	Ar-20 %CO <sub>2</sub>
12					W2	
13					W3	
14					W4	
15					W5	
16					W6	
17	B	WD4	0		Ar	
18					Ar-2 %O <sub>2</sub>	
19					Ar-20 %CO <sub>2</sub>	

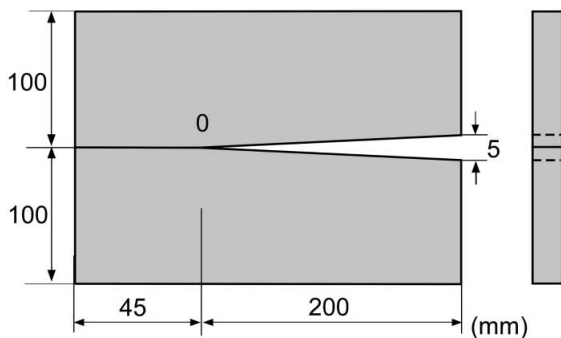


図3 耐ギャップ性調査用試験体  
Fig. 3 Test plate for anti-gap welding

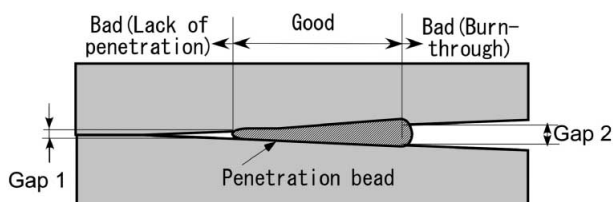


図4 耐ギャップ性の判断基準  
Fig. 4 Judgment standard for anti-gap welding test

接金属の引張強さは、溶接金属中央部に対して行ったビッカース硬さ試験 (JIS Z2244) 結果から換算した (換算表: SAE J 417)。また、シャルピー衝撃試験用試験片は溶接金属中央部から採取し、板厚 6 mm に対し 5 mm サブサイズ試験片で行った (JIS Z2242)。なお、目標性能は、引張強さが 780MPa 以上、シャルピー衝撃試験が  $-20^{\circ}\text{C}$  で 5 mm サブサイズの場合で 24J 以上、7.5mm サブサイズの場合には 35J 以上、10mm サイズの場合には 47J 以上としている。

## 2. 結果および考察

### 2.1 溶接施工条件

#### 2.1.1 耐ギャップ性

耐ギャップ性の試験結果として、適正な裏波ビードを形成することができるルートギャップの範囲を図 5 に示す。図 5 (a) は、図 2 で示した 4 とおり (WD1~WD4) の配置および溶接方向における耐ギャップ性を比べたものである。この結果をみると、WD4 [MAG トーチ先行 (垂直)/レーザ後行 (前進角)] の条件においてギャップ 0~3 mm まで溶接が可能であり、最も良好な耐ギャップ性を示している。なお、本試験結果と同様に申ら<sup>15)</sup>の報告でも、MAG 先行の方がレーザ先行よりも耐ギャップ性が良いとの結果が得られている。

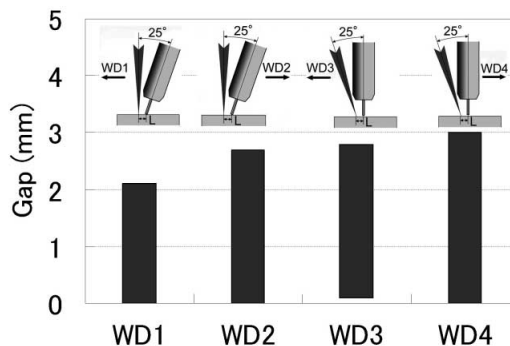
図 5 (b) は、レーザ先行の配列においてレーザ/アーク間距離を変化させた場合の、耐ギャップ性を比較したものである。この結果をみると、最大ギャップはレーザ/アーク間距離が 5 mm の場合が最も悪く、3 mm、1 mm と短くなるにつれて耐ギャップ性が良くなっている。また、レーザ/アーク間距離 7 mm ではギャップ 0 mm 地点での溶込みが不足して裏波ビードが形成されていない。これは、MAG によって形成される溶融プールの断面形状とレーザ照射点との関連による溶込み深さに起因していると考えられる。すなわち、距離 1 mm の場合はアー

ク直下のプール凹部にレーザが照射され、溶込み深さが最も深くなる。レーザ/アーク間距離 3 mm に離れるとレーザの照射される位置が高くなり溶込みが浅くなる。さらに 5 mm、7 mm と離れると、レーザで形成した溶融池の凝固が進んだ状態でアークが発生するため溶込みがさらに浅くなるものと推察される。

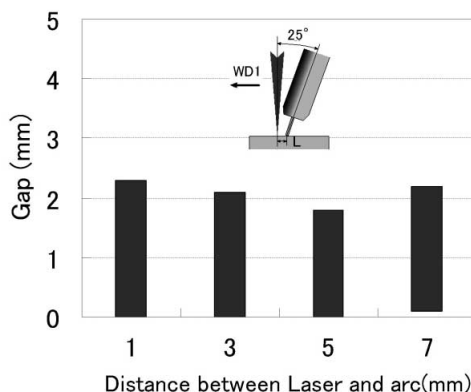
これらのことから、本実験に適用した継手に対する耐ギャップ性は溶込み深さと関係しており、溶込み深さが深くなる条件ほど耐ギャップ性が優れているという傾向が認められる。

#### 2.1.2 溶接作業性の調査

溶接作業性の特性としてスパッタ発生量を測定した結果を図 6 に示す。図 6 (a) は、MAG 溶接におけるアーク電流のパルス波形制御の有無、および WD1~WD4 の溶接方向において発生するスパッタ量を比較したものである。この図をみると、溶接方向 WD1 のパルスなしが最もスパッタ率が大きく、溶接方向 WD1 のパルスありの条件は比較的スパッタ率が小さい。このことから、アーク電流のパルス波形制御の影響は大きく、スパッタ低減に有効であるといえる。またこの結果は、レーザ・アークハイブリッド溶接をアークのパルス制御ありで行うと溶融プールが安定するとの G.Campana<sup>16)</sup>らの報告と同様である。レーザと MAG トーチの配置については、WD2 [MAG トーチ先行 (後退角)/レーザ後行] が最もスパッタ量が少ない結果となっている。しかし、パルスなしと比べると、いずれの方法も 5 分の 1 以下のスパッタ量であり、大差ないスパッタ量であるといえる。



The position of laser and arc  
(a) Position from laser and arc



(b) Distance from laser to arc

図5 耐ギャップ性の試験結果  
Fig. 5 Results of anti-gap welding test

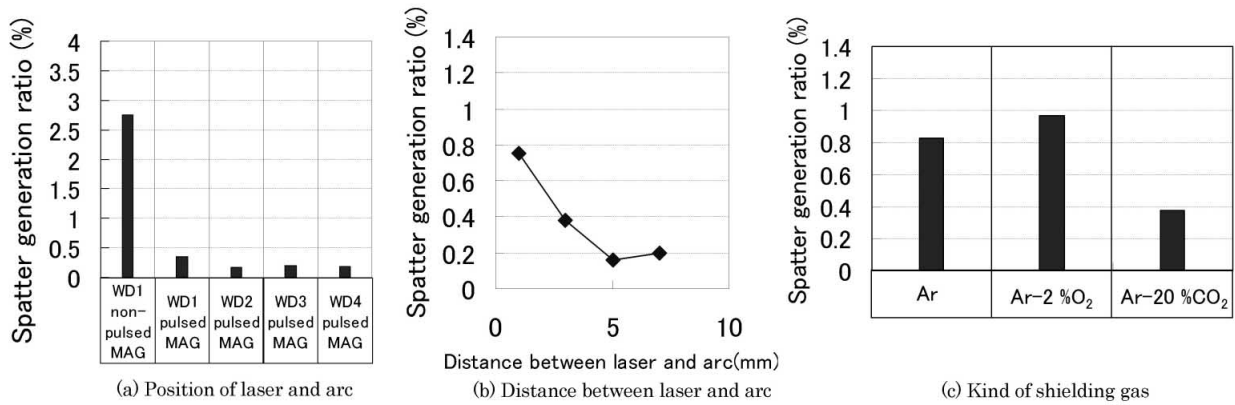


図 6 スパッタ発生量の測定結果  
Fig. 6 Results of measuring amount of spatter

図 6 (b) に、レーザ/アーク間距離を変化させた際のスパッタ量を示す。このグラフより、レーザ/アーク間距離が長くなるにつれてスパッタ量が減少する傾向があることがわかる。これは、レーザの溶融プールの高さ変化に起因するアーク長の変動が、レーザ/アーク間距離が長くなることによって少なくなるためと考えられる。

図 6 (c) に、シールドガスの種類を変えた場合のスパッタ量を示す。このグラフから、Ar-20%CO<sub>2</sub>を用いた場合が最もスパッタ量が少ない結果になっている。Ar および Ar-2%O<sub>2</sub> ではともに、アークがフレア状に広がるため溶滴移行が不安定となり、スパッタが多くなったものと考えられる。

以上の耐ギャップ性と溶接作業性（スパッタ発生量）の結果から、本実験でのレーザ・アークハイブリッドの溶接条件としては、「WD4：MAG トーチ先行（垂直）/レーザ後行（前進角）、レーザ/アーク間距離：3 mm、シールドガス：Ar-20%CO<sub>2</sub>の組合せが最も良い」といえる。

## 2.2 溶接材料の検討

### 2.2.1 溶接ワイヤの検討

ワイヤW1～W6による溶接での溶接金属マクロ組織を図 7 に示す。いずれのワイヤも表裏のビード形状は良好である（WES 2031を満足）。なお、放射線透過試験（JIS Z3104）の結果はいずれもきずは 1 類と分類され、MAG 溶接の場合とほぼ同様であった。

溶接金属のピッカース硬さ試験結果、硬さから換算した引張強さの値、およびシャルピー衝撃試験結果を表 5 に示す。Ar-20%CO<sub>2</sub>シールドガスによる 6 種類のワイヤの試験結果を比較すると、いずれも 780MPa（ワイヤ W1 および W2 の引張強度レベル）以上の引張強さが得られている。MAG 溶接とレーザ・アークハイブリッド溶接の引張強さを比較するため、横軸を MAG 溶接の溶接金属の引張強さを、縦軸をレーザ・アークハイブリッド溶接の溶接金属の引張強さとして整理した（図 8）。いずれの溶接ワイヤも、基準として引いた Y（縦軸）= X（横軸）の線より上側にあり、レーザ・アークハイブリッド溶接の引張強さの方が高くなっていることがわかる。レーザ・アークハイブリッド溶接では HT490 用ワイヤ（W6：Ni-Mo 系）でも目標を満足する強度が得られているが、裕度を考慮しても HT590 クラス（W3：Cr-Mo-Ti 系、W4：

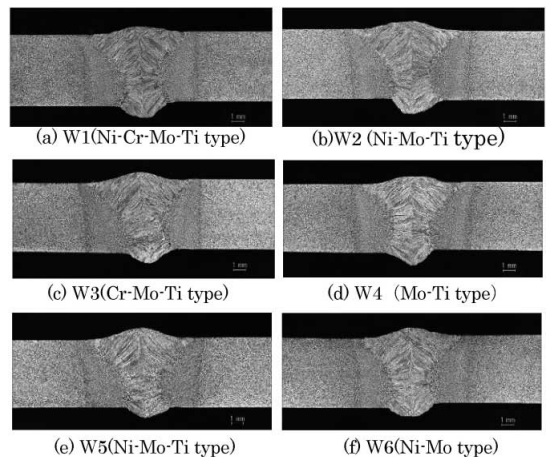


図 7 溶接金属のマクロ組織（板厚：6 mm、シールドガス：Ar-20%CO<sub>2</sub>）  
Fig. 7 Macrostructures of weld metal (Thickness: 6mm, Shielding gas: Ar-20%CO<sub>2</sub>)

表 5 各ワイヤにおける溶接金属の機械的性質

Table 5 Mechanical properties of weld metal for each wire

Wire No.	Welding wires		Shielding gas	Hardness (HV)	Tensile strength* (MPa)	Absorbed energy $\sqrt{E_{20}}$ (J)
	Strength level (MPa)	Added material				
W1	780	Ni-Cr-Mo-Ti	Ar-20%CO <sub>2</sub>	312	987	36
W2	780	Ni-Mo-Ti		321	1016	35
W3	590	Cr-Mo-Ti		271	854	48
W4	590	Mo-Ti		308	974	18
W5	550	Ni-Mo-Ti		311	984	33
W6	490	Ni-Mo		261	822	51

\*Corresponding value from HV

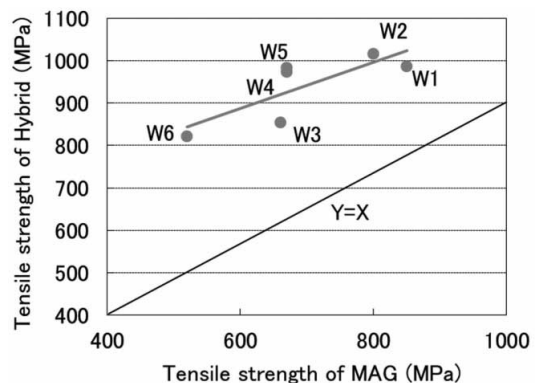


図 8 マグとレーザ・アークハイブリッドの引張強さ比較  
Fig. 8 Comparison of tensile strength between MAG and laser-arc hybrid

Mo-Ti 系) で十分な引張強さとなっている。一方、HT780 用ワイヤ（W1：Ni-Cr-Mo-Ti 系、W2：Ni-Mo-Ti 系）では

引張強さが1,000MPaを超える。レーザ・アークハイブリッド溶接ではこれらのワイヤの引張強さはHT950レベルであり、どのワイヤにおいても強度レベルがMAGの場合よりも約200MPa以上高くなっている。

これは、レーザ・アークハイブリッド溶接の冷却速度がMAG溶接に比べ大きいことや、母材の希釈率がMAG溶接の30%程度に対しレーザ・アークハイブリッド溶接は60%程度と大きな差異があることなどが原因として考えられる。加えて、MAG溶接金属が多パス溶接から成ることに対してレーザ・アークハイブリッド溶接金属が1パスで形成されること、換言すると多重熱サイクルと単熱サイクルの差が引張強さのレベルを変化させていることが要因の一つに挙げられる。これらの要因究明は今後の課題である。

じん性面〔HT780鋼スペック： $\sqrt{E}_{-20} \geq 24\text{J}$ （5 mm サブサイズ）〕では、W6（Ni-Mo系）とW3（Cr-Mo-Ti系）が約50Jで比較的良好であり、つぎにW1（Ni-Cr-Mo-Ti系）、W2（Ni-Mo-Ti系）、W5（Ni-Mo-Ti系）が約35Jと目標値を満たしているなか、最も低いW4（Mo-Ti系）は約20Jと要求値以下であることがわかる。この結果と上述の引張強さの結果を考慮すると、本実験で使用したレーザ・アークハイブリッド用溶接ワイヤのなかでは、W3もしくはW6が有力であり、両ワイヤとも引張強さよりじん性の方がスペックに対し裕度がある。このため、本実験結果を受けた結論としては引張強さが高いW3（Cr-Mo-Ti系）を最適であるとした。

ワイヤW1～W6における溶接金属の光学顕微鏡組織を図9に示す。いずれの組織もベイナイト主体の組織であり、大きな差は認められない。つぎに固溶Ti（試料を塩酸で溶解してTiを分析して得られる酸可溶性Tiを固溶Tiと定義している）と吸収エネルギーの関係を図10に示

す。このグラフから、固溶Tiの増加はじん性を低下させることがわかる。さらにこのことから、溶接ワイヤで、W4、W5、W2、W1、W3、W6の順でじん性が向上することが説明できる。W1、W2、W5、W6については溶接金属中にNiを含有しているため、Niによるマトリックスの強じん化も考慮する必要があるだろう。なお、レーザ溶接などで課題となるシャルピー衝撃試験におけるFPD（Fracture Pass Deviation）、すなわち破断経路が湾曲して溶接金属から逸脱する現象は本実験では認められなかった。FPDは、溶接金属部の幅が狭い場合や母材部と溶接金属部の硬さの差が大きい場合に起こることとされ<sup>17)</sup>、本試験で用いた板のビッカース硬さは約300HVもあり、溶接金属部との硬さの差がFPDが起こるほど大きくないためと考えられる。

## 2.2.2 シールドガスの検討

2.2.1項での実験結果から最適ワイヤとして選定したW3を用い、最適配置WD4〔MAGトーチ先行（垂直）／レーザ後行（前進角）〕、レーザ／アーク間距離 3 mm、レーザ焦点距離±0 mmでシールドガスをAr、Ar-2%O<sub>2</sub>、Ar-20%CO<sub>2</sub>と変えて溶接を実施し、引張強さ（硬さから換算）とじん性を調べた。

表6に示すように、いずれの条件においても引張強さ780MPa以上、吸収エネルギー $\sqrt{E}_{-20} \geq 24\text{J}$ （5 mm サブサイズ）と目標値以上であった。シールドガスがAr-20%CO<sub>2</sub>の場合に比べると、ArおよびAr-2%O<sub>2</sub>の場合の引張強さは高く、じん性は逆にやや低下している。ArやAr-2%CO<sub>2</sub>は、ガス中の酸素量が低いため溶接金属のSiやMnが酸化しにくく、スラグ量が減少し合金成分の歩留りが上がる。また、焼入れ性の高いマルテンサイト組織の生成もあって硬さが高くなり引張強さは上がるが、逆にじん性は低下するものと考えられる。なお、参考のため

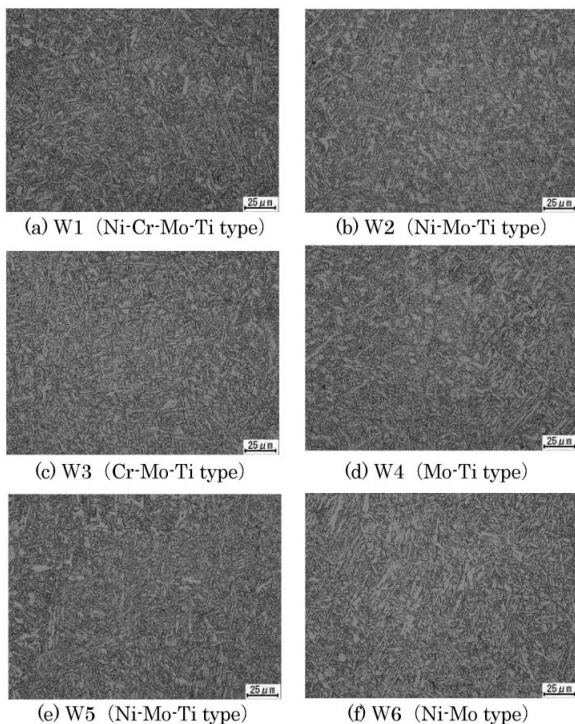


図9 溶接金属のミクロ組織（シールドガス：Ar-20%CO<sub>2</sub>）  
Fig. 9 Microstructures of weld metal (Shielding gas: Ar-20%CO<sub>2</sub>)

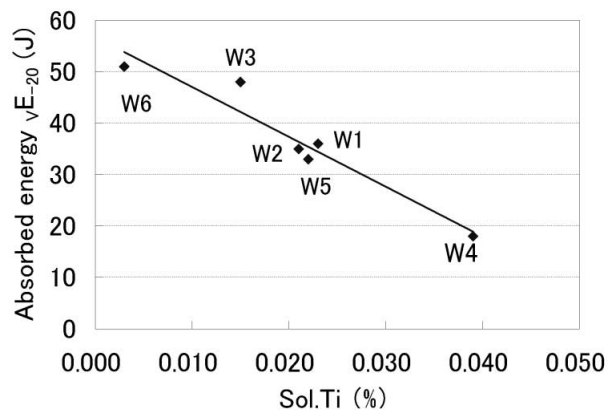


図10 固溶チタンと吸収エネルギーの関係  
Fig.10 Relationship between sol. Ti and absorbed energy

表6 各シールドガスにおける溶接金属の機械的性質 {ワイヤ：W3、配置：B(WD4)}  
Table 6 Mechanical properties of weld metal for each shielding gas {Wire: W3, Arrangement: B(WD4)}

Wire No.	Welding wire		Shielding gas	Hardness (HV)	Tensile strength* (MPa)	Absorbed energy $\sqrt{E}_{-20}$ (J)
	Strength level (MPa)	Added material				
W3	590	Cr-Mo-Ti	Ar-20%CO <sub>2</sub>	282	890	38
			Ar-2%O <sub>2</sub>	338	1071	28
			Ar	336	1065	29

\*Corresponding value from HV

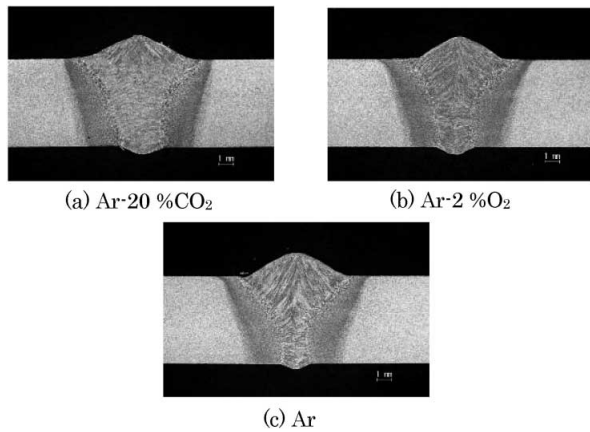


図11 各シールドガスにおける溶接金属のマクロ組織 (板厚: 6mm, ワイヤ: W3, 配置: B(WD4))  
 Fig.11 Macrostructures of weld metal for each shielding gas (Thickness: 6mm, Wire: W3, Arrangement: B(WD4))

に、溶接部のマクロ組織観察結果を図11に示す。シールドガスがArリッチなほど板厚中央部のビードが狭くなる傾向が認められる。また、裏ビードもArリッチなほど幅が狭くなっており、裏波が出にくくなっている。これらの結果から、本実験ではレーザー・アークハイブリッド溶接用シールドガスとしては、Ar-20%CO<sub>2</sub>が良好であるといえる。

以上の溶接ワイヤとシールドガスの検討によると、レーザー・アークハイブリッド溶接としては、「MAG溶接におけるHT590クラスでTi量が少ないワイヤ(W3: Cr-Mo-Ti系)とAr-20%CO<sub>2</sub>シールドガスの組合せが最適である」といえる。

むすび=本稿では、HT780鋼のレーザー・アークハイブリッド溶接の施工条件と溶接材料について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 耐ギャップ性は、レーザーとアークの配置がMAG先行(垂直)／レーザー後行(前進角)で、レーザー／アーク間距離は小さい(3mm以下)場合が最も良い。溶込み深さが深くなる条件ほど耐ギャップ性が優れる傾向があるといえる。
- (2) スパッタ発生量の低減には、MAG溶接のアーク電流のパルス化が最も有効である。加えて、レーザー／アーク間距離をある程度(3mm以上)離し、シールドガスをAr-20%CO<sub>2</sub>にした場合に最も少

なくなる。

- (3) HT780鋼に対する溶接ワイヤとしては、MAG溶接のHT590クラスでチタン含有量が少ないワイヤ(Cr-Mo-Ti系)が適している。MAG溶接に比べて、レーザー・アークハイブリッド溶接の冷却速度が大きいことにより、HT590クラスのワイヤで引張強度が十分確保され、脆化の要因である固溶Tiが少ないためにじん性が良くなるからである。またシールドガスは、Ar-20%CO<sub>2</sub>がじん性確保に適している。

今後、建設機械や橋梁などで適用されている高張力鋼に本技術を適用し、ものづくりに貢献していきたい。また、HT950鋼や軟鋼などへの対応へも展開していく。

本検討の実施にあたり、共同で試験を取組んでいただきました株式会社ダイヘン 溶接メカトロカンパニー 溶接機事業部 第二技術部の上山部長、恵良グループ長、および上田殿に深く感謝の意を表します。

(本論文は「溶接学会論文集, 2011, 第29巻, 第4号, p.248-257」の抜粋である)

#### 参考文献

- 1) S. Datta et al. Indian Welding Journal. 2010, Vol.43, No.1, p.47-51.
- 2) F. Vollertse et al. 溶接学会誌. 2011, Vol.80, No.2, p.94-101.
- 3) 小野守章ほか. 溶接学会論文集. 2003, Vol.21, No.4, p.515-521.
- 4) J. Defalco. Welding Journal. 2007, Vol.86, No.10, p.47-51.
- 5) 石出 孝ほか. 溶接学会誌. 2001, Vol.70, No.4, p.394-399.
- 6) 杵名宗春ほか. レーザ加工学会誌. 2003, Vol.10, No.2, p.127-132.
- 7) 牧野吉延ほか. レーザ加工学会誌. 2003, Vol.10, No.2, p.139-143.
- 8) A. Wieschemann et al. Welding in the World. 2001, Vol.45, No.7/8, p.10-15.
- 9) M. Decker et al. Baender Bleche Rohre. 2004, Vol.45, No.11/12, p.38-41.
- 10) 富田直良ほか. レーザ加工学会論文集. 2005, Vol.63, p.100-103.
- 11) 坪田秀峰ほか. レーザ加工学会論文集. 2010, Vol.73, p.25-29.
- 12) 山岡弘人ほか. レーザ加工学会論文集. 2010, Vol.73, p.19-23.
- 13) 村上浩二ほか. 日本金属学会誌. 2006, Vol.70 No.2, p.134-137.
- 14) L. E. Stridh. Australian Welding Journal. 2011, Vol.56, No.1, p.10-13.
- 15) 申 政孝ほか. 溶接学会論文集. 2011, Vol.29, Vol.3, p.181-186.
- 16) G. Campana et al. Journal of Materials Processing Technology. 2007, Vol.191, p.111-113.
- 17) 荒田吉明ほか. 溶接学会誌. 1975, Vol.44, No.12, p.1011-1017.