

(技術資料)

# パイプライン分野向け溶接材料

山本貴大\*<sup>1</sup>・古川尚英\*<sup>1</sup>

## Welding Consumables for Pipeline Market

Takahiro YAMAMOTO・Naohide FURUKAWA

### 要旨

パイプラインは石油や天然ガス等を長距離にわたって安全かつ経済的に輸送する手段として世界的に普及しており、今後もその敷設距離は増加すると予想されている。パイプラインの敷設工事では、現地で鋼管同士をつなぐ鋼管円周溶接が施工され、主に被覆アーク溶接棒、ソリッドワイヤ、フラックス入りワイヤ、ティグ溶加棒、ワイヤが用いられる。近年のパイプライン敷設工事に用いられる溶接材料には低温じん性や高い強度が求められる。また、敷設工事の高能率化のために鋼管円周溶接の自動化が進んでおり、自動溶接に適する溶接材料も求められている。本稿では、これらのニーズに対応した溶接材料について実機による継手性能を交えながら紹介する。

### Abstract

Pipelines have gained widespread popularity worldwide as a secure and cost-effective method for transporting oil and natural gas across long distances, and their laying distance is expected to increase in the future. Girth welding is the primary method used for laying pipelines, which involves connecting steel pipes on-site using various welding consumables such as stick electrodes, solid wires, flux-cored wires, and TIG rods and wires. Welding consumables used for recent pipeline laying work must demonstrate low-temperature toughness and high tensile strength. Furthermore, there is a growing trend toward automating girth welding to improve the efficiency of the laying process, which necessitates the development of welding consumables suited to automated welding. This paper introduces welding materials that meet these needs, including actual joint performance.

### 検索用キーワード

パイプライン、円周溶接、被覆アーク溶接棒、フラックス入りワイヤ、ソリッドワイヤ

まえがき＝パイプラインは石油や天然ガス等を長距離にわたって安全かつ経済的に輸送する手段として世界的に普及している。パイプラインには、「長距離輸送用の輸送パイプライン」や「小口径で比較的短距離の消費者に天然ガス等を供給するための供給パイプライン」がある。本稿では、主に長距離輸送用パイプラインの敷設に適用される溶接材料や溶接施工法を取り上げる。天然ガスは、他の化石燃料に比べて二酸化炭素の排出量が少ないことからクリーンエネルギーと呼ばれており、世界的な人口増加と相まって、その需要は長期的に増加の一途をたどっている。パイプラインの敷設距離も天然ガスの需要拡大とともに増加していることから、世界中で敷設工事が進んでいる。

日本は、国内で消費する天然ガスの大部分をLNGの状態海外から輸入しており、その輸入量は2022年時点で中国に次ぐ世界第二位となっている。国内では、主にLNG受入基地で気化された天然ガスを消費エリアまで輸送するためにパイプラインが用いられている。いっぽう、海外では、天然ガス産出地から消費地およびLNGタンカー基地への輸送のためにパイプラインが用いられている。国内におけるパイプラインの敷設距離は2012年時点で4,800 kmであるのに対して、欧州では150,000 km、米国では480,000 kmであり、パイプライ

ンの市場は海外が大部分を占めている。近年では中国で大規模なパイプライン敷設工事が進められており、適用される鋼管グレードも多岐にわたっている。これらに適合する溶接材料のラインナップを拡充させるだけでなく、高能率施工にも好適な溶接材料開発の要求も増加している。

本稿では、パイプライン用鋼管、国内外におけるパイプライン敷設方法、当社の鋼管溶接用溶接材料および溶接施工について紹介する。

### 1. パイプライン用鋼管

パイプライン用鋼管を規定する規格は様々あるが、API (American Petroleum Institute : 米国石油協会) Specification 5L “Specification for Line Pipe” (以下、API 5Lという) が世界では最も普及している。API 5Lに規定される各グレード鋼管の強度要求を表1に示す<sup>1)</sup>。PSL (Product Specification Levels) は製品仕様を示し、PSL1には降伏応力と引張強度の下限値のみ、PSL2には降伏応力と引張強度の下限値と上限値が規定されている。Xに続く数字は降伏強度の下限値をksi単位で表示したものであり、X70の降伏強度の下限値は70 ksi (≒ 485 MPa) ということになる。

\*<sup>1</sup> 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

表 1 API 5Lに規定されている各グレード鋼管の強度要求  
Table 1 Strength requirements for each grade steel pipe specified in API 5L

API 5L pipe grade	PSL1		PSL2	
	YS (MPa)	TS (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)
X42	≥290	≥415	290~495	415~655
X46	≥320	≥435	320~525	435~655
X52	≥360	≥460	360~530	460~760
X56	≥390	≥490	390~545	490~760
X60	≥415	≥520	415~565	520~760
X65	≥450	≥535	450~600	535~760
X70	≥485	≥570	485~635	570~760
X80	-	-	555~705	625~825
X90	-	-	625~775	695~915
X100	-	-	690~840	760~990

## 2. パイプライン敷設方法

### 2.1 日本におけるパイプライン敷設方法

日本では、パイプラインの大部分は公有地である公道下に敷設される。公道下の敷設では、土地を開削した後に約12 mの鋼管を設置し、現場溶接を行う流れとなる。1日の敷設距離は鋼管1本分に当たる12 m程度であり、敷設能率が非常に低い。

近年、比較的長距離の敷設工事では非開削工法であるシールド工法が適用されている。シールド工法は、5～6 km程度のシールドトンネルを掘進した後、複数の鋼管をシールドトンネル内に配置して溶接等を実施する施工法であり、工事期間の短縮に大きく貢献している。

国内のパイプライン敷設に適用される鋼管グレードは主にX52、X60、X65であり、X70以上の高強度鋼管の適用実績は少ない。

### 2.2 海外におけるパイプライン敷設方法

海外におけるパイプライン敷設施工では、整地、溝堀、パイプ搬入・加工・溶接、検査、防食、埋め戻しの各工程を流れ作業により高速で施工するスプレッド工法が広く採用されている。スプレッド工法は施工能率面に優れ、1日で1.6～3.2 kmの敷設が可能である<sup>2)</sup>。適用される鋼管グレードもX52からX80まで幅広く、鋼管輸送コストや施工コストの観点から高強度鋼管の採用が増加している。とくに、中国では新規敷設案件に対してX80の採用が主流となりつつある。

## 3. 鋼管円周溶接用溶接材料

### 3.1 鋼管溶接部に要求される基本特性

鋼管溶接部は、母材と同等もしくはそれ以上の強度を有することが基本である。また、地震発生地帯や凍土地帯に敷設されるパイプラインでは、外部からの大規模な荷重に対して、母材部が選択的に塑性変形を受けるよう、母材の実降伏応力より高い降伏応力が溶接部に要求される。さらに、採掘される石油や天然ガスに硫化水素が含まれる場合は、腐食反応で生じる水素ガスが鋼中に侵入することにより生じる水素誘起割れ（HIC：

Hydrogen Induced Cracking）や硫化物応力腐食割れ（SSCC：Sulfide Stress Corrosion Cracking、以下SSCCという）への影響を考慮する必要もある。硫化物応力腐食割れ性は材料強度や化学組成の影響を受けるため、NACE MR0175/ISO 15156-1規格では、熱影響部を含む溶接金属に硬度の上限を規定している。溶着金属にNi ≥ 1.0 %となる溶接材料を使用する場合は、SSCC試験を実施して供用上問題がないことを示した上で使用が認められる。欧州市場では、脱硫工程前後の石油や天然ガスを輸送するパイプラインを敷設する施工会社も多く、SSCC試験や施工承認試験費用の削減、溶接材料管理を簡易化する目的でNi < 1.0 %となる溶接材料が求められる場合が多い。当社の鋼管円周溶接用溶接材料の品種別商品ラインナップを表2および表3に示す。パイプラインの現地施工では、被覆アーク溶接棒、ソリッドワイヤ、フラックス入りワイヤ、ティグ溶加棒またはワイヤが主に用いられる。

### 3.2 被覆アーク溶接棒

鋼管円周溶接で用いられる被覆アーク溶接棒の被覆剤系統の種類は、主に高セルロース系と低水素系である。また、低水素系被覆アーク溶接棒には下進用と上進用の商品がラインナップされている。

高セルロース系被覆アーク溶接棒は、他の被覆剤系統に比べてアークの吹付が極めて強く、スラグ発生量も少ない。このため、立向下進溶接性にも優れており、低水素系よりもルートパスを高効率に溶接することができる。また、溶接前の再乾燥が不要であるという特徴もある。高セルロース系被覆アーク溶接棒を用いることにより上進用低水素系の3～5倍程度の能率で溶接が可能となり、パイプライン敷設効率の向上に貢献している。いっぽう、拡散性水素が高いため耐低温割れ性に劣り、じん性が低位となる傾向がある。したがって、高セルロース系被覆アーク溶接棒はじん性の要求値が低く、低温割れ感受性が低いとされる比較的厚さが薄い鋼管に適用することが望ましい。

低水素系被覆アーク溶接棒は、拡散性水素量が低く、耐低温割れ性に優れている。中でも、下進用低水素系被

表2 鋼管円周溶接用溶接材料 (SMAW)  
Table 2 Welding consumables for steel pipes (SMAW)

API 5L pipe grade	Welding pass	Covered electrodes		
		High cellulose type	Low hydrogen type	
			Vertical upward	Vertical downward
X56-X60	Root	FAMILIARC™KOB-6010 FAMILIARC™KOB-7010S	FAMILIARC™LB-52U TRUSTARC™LB-52NSU	FAMILIARC™LB-78VS FAMILIARC™LB-88VS
	Hot	FAMILIARC™KOB-7010S FAMILIARC™KOB-8010S	FAMILIARC™LB-52 FAMILIARC™LB-52-18 TRUSTARC™LB-52NS	
	Filler & cap			
X65	Root	FAMILIARC™KOB-7010S FAMILIARC™KOB-8010S	FAMILIARC™LB-52U	FAMILIARC™LB-88VS
	Hot		FAMILIARC™LB-57 FAMILIARC™LB-8018 TRUSTARC™LB-62 TRUSTARC™LB-62D TRUSTARC™LB-62L	
	Filler & cap	FAMILIARC™KOB-8010S		
X70	Root	FAMILIARC™KOB-7010S FAMILIARC™KOB-8010S	FAMILIARC™LB-55U TRUSTARC™LB-62U	FAMILIARC™LB-88VS
	Hot		TRUSTARC™LB-62 TRUSTARC™LB-62D TRUSTARC™LB-62L	
	Filler & cap	FAMILIARC™KOB-8010S		
X80	Root		TRUSTARC™LB-62U	TRUSTARC™LB-98VS TRUSTARC™LB-108VS
	Hot		TRUSTARC™LB-65D TRUSTARC™LB-67L TRUSTARC™LB-70L TRUSTARC™LB-106	
	Filler & cap	-		

表3 鋼管円周溶接用溶接材料 (FCAW, GMAW, GTAW)  
Table 3 Welding consumables for steel pipes (FCAW, GMAW, GTAW)

API 5L pipe grade	Welding pass	Flux cored wire		Solid wire	TIG wire or rod	
		Ni < 1 %	Ni ≥ 1 %	Ni < 1 %		
X56-X60	Root	-	-	FAMILIARC™MG-S58P FAMILIARC™MG-PA50	TRUSTARC™TG-S62	TRUSTARC™TG-S60A
	Hot	FAMILIARC™DW-A55E FAMILIARC™DW-A55ESR TRUSTARC™DW-A55LSR TRUSTARC™DW-A81Ni1	TRUSTARC™DW-A55L TRUSTARC™DW-PA55L		-	-
	Filler & cap					
X65	Root	-	-	FAMILIARC™MG-S58P FAMILIARC™MG-PA50	TRUSTARC™TG-S62	TRUSTARC™TG-S60A
	Hot	FAMILIARC™DW-A55E FAMILIARC™DW-A55ESR TRUSTARC™DW-A55LSR TRUSTARC™DW-A81Ni1 TRUSTARC™DW-A65Ni1	TRUSTARC™DW-A55L TRUSTARC™DW-PA55L TRUSTARC™DW-A65L TRUSTARC™DW-PA65L		-	-
	Filler & cap					
X70	Root	-	-	FAMILIARC™MG-S58P FAMILIARC™MG-PA50	TRUSTARC™TG-S62	TRUSTARC™TG-S60A
	Hot	TRUSTARC™DW-A81Ni1 TRUSTARC™DW-A65Ni1 TRUSTARC™DW-A70L	TRUSTARC™DW-A55L TRUSTARC™DW-PA55L TRUSTARC™DW-A65L TRUSTARC™DW-PA65L		-	-
	Filler & cap					
X80	Root	-	-	TRUSTARC™MG-PA55Ni1	TRUSTARC™TG-S80AM	
	Hot	TRUSTARC™DW-A65Ni1 TRUSTARC™DW-A70L	TRUSTARC™DW-A65L TRUSTARC™DW-PA65L TRUSTARC™DW-PA70L		-	-
	Filler & cap					

覆アーク溶接棒は、上進溶接の欠点である施工能率向上を主眼に開発された溶接材料である。ただし、高セルロース系に比べてアークの吹き付けが弱いため、ルートパス溶接で十分な溶込みを得るためには高度な溶接技量が必要となる。この欠点を補うために、ルートパスおよびホットパス溶接には高セルロース系を適用し、フィラーからキャップパスには下進用低水素系を適用する混用施工法が実用化されている。<sup>3), 4)</sup>

上進用低水素系被覆アーク溶接棒には、ルートパス溶接に適用される裏波用被覆アーク溶接棒とホットパスからキャップパスまで適用される一般的な全姿勢用被覆アーク溶接棒がある。裏波溶接とは、溶接面の表面だけでなく裏面にもビードを形成する施工法である。上進溶接の特徴として、下進溶接より施工能率は低いものの深い溶込みが得やすいことが挙げられる。近年のパイプライン敷設工事では、継手金属の健全性が重要視されることから、とくに低水素系被覆アーク溶接棒を適用する場合の溶接方向は、下進よりも上進の方が多い。

ここで、当社の裏波溶接用低水素系溶接棒である TRUSTARC™ LB-52NSU と全姿勢用低水素系溶接棒である TRUSTARC™ LB-52NS の組み合わせによる継手

溶接施工例を紹介する。これらの溶接材料は低温高じん性のニーズに対応しており、-60℃において優れたじん性と低い拡散性水素量を示す。開先形状と TRUSTARC™ LB-52NSU (ルートパスのみ)、TRUSTARC™ LB-52NS を用いた積層要領を図1に示す。ルートパス溶接には TRUSTARC™ LB-52NSU φ3.2 mm, ホットパスからキャップパスまでは TRUSTARC™ LB-52NS φ3.2 mm を用いた。溶接条件を表4、継手金属の断面マクロ写真を図2、溶接継手の化学成分を表5、機械的性質を表6に示す。断面マクロ写真から良好な裏ビードが形成されていることが確認できる。また、衝撃試験の破面遷移温度 (FATT) も十分に低い温度を示しており、-60℃において良好なじん性を示す特長がある。

### 3.3 ソリッドワイヤ

ソリッドワイヤを用いた現地溶接では、自動溶接機を用いた下進溶接が主流になっている。以前の自動溶接機を用いたGMAW法では開先角度40°以上の開先形状が一般的であったが、昨今の自動溶接機の機能や開先加工精度の発展により、開先角度5~10°の狭開先溶接が一般的になっている。また、近年では自動溶接機に2本のトーチを搭載したデュアルトーチ法などの高溶着施工法



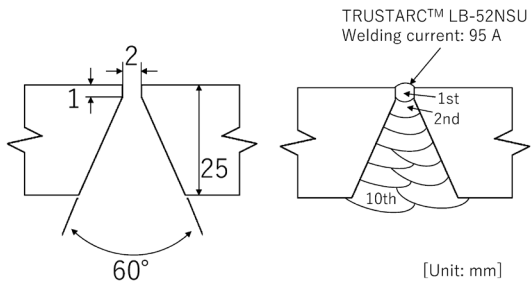


図1 開先形状とTRUSTARC™ LB-52NSU（ルートパスのみ）、TRUSTARC™ LB-52NSを用いた積層要領  
 Fig.1 Groove shape and pass sequence of butt joint welding with TRUSTARC™ LB-52NSU (root pass only) and TRUSTARC™ LB-52NS

表4 被覆アーク溶接による継手の溶接条件  
 Table 4 Welding conditions of SMAW butt joint

Welding wire	[Root] TRUSTARC™LB-52NSU φ3.2 mm [Hot~Cap] TRUSTARC™LB-52NS φ3.2 mm
Welding position	Vertical upward
Polarity	DCEP
Welding parameters	95 A (TRUSTARC™LB-52NSU) 110 A (TRUSTARC™LB-52NS)
Pre-heating/inter pass temperature	115~130°C

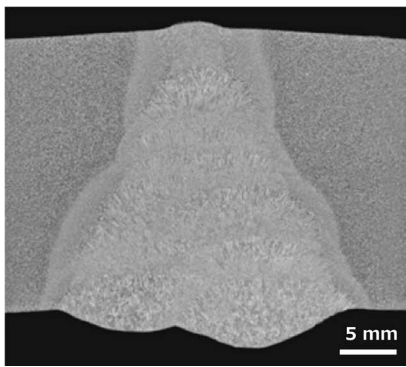


図2 被覆アーク溶接による継手金属の断面マクロ写真  
 Fig.2 Cross-sectional macro photograph of SMAW butt joint weld metal

が開発・実用化されている<sup>5), 6)</sup>。

FAMILIARC™ MG-PA50は中国パイプライン市場向けに開発されたソリッドワイヤであり、X70までの鋼管に適用される。FAMILIARC™ MG-PA50と自動溶接機の組み合わせによる円周溶接施工の一例を紹介する。溶接条件を表7、開先形状と各溶接姿勢における溶接継手金属の断面マクロ写真を図3、ビード外観を図4、溶接継手の化学成分を表8、機械的性質を表9に示す。各溶接姿勢において安定したビード形状が得られている。溶接継手の機械的性質は、X70の公称耐力に対して十分な降伏応力と-40°Cにおいて優れたじん性を示している。

### 3.4 フラックス入りワイヤ

円周溶接用フラックス入りワイヤには主にチタニア系フラックス入りワイヤが用いられており、自動溶接機による上進溶接で施工される。チタニア系フラックス入りワイヤでは、溶接時に発生するスラグが全姿勢溶接における溶融池の垂れを防止してビード形状を整え、溶融金属と開先のなじみを良好なものとする。開先形状は40~60°のV形が一般的であり、施工能率はソリッドワイ

表5 被覆アーク溶接による継手金属の化学成分  
 Table 5 Chemical compositions of SMAW butt joint weld metal

Location*	Chemical compositions (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	B
Face	0.07	0.31	1.40	0.008	0.003	0.50	0.013	0.0022
Reverse	0.06	0.30	1.36	0.009	0.003	0.43	0.014	0.0023

\* Analysis location; Face: 7 mm from face surface, Reverse: 7 mm from back surface

表6 被覆アーク溶接による継手金属の機械的性質  
 Table 6 Mechanical properties of SMAW butt joint weld metal

Tensile properties <sup>#1</sup>				V notch toughness <sup>#2</sup>				
0.2 %OS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	RA (%)	Location	Absorbed energy (J) (Brittle fracture (%))			FATT (°C)
					-80°C	-60°C	-40°C	
506	577	25	81	Face	47(56)	169(26)	162(22)	-75
					73(64)	145(30)	172(16)	
				71(55)	167(26)	160(26)		
				Avg. 64(58)	Avg. 160(27)	Avg. 165(21)		
506	577	25	81	Reverse	17(79)	93(53)	167(26)	-58
					108(56)	92(56)	114(40)	
				49(73)	82(50)	169(26)		
				Avg. 58(69)	Avg. 89(53)	Avg. 150(31)		

\*#1 Specimen location; 1/2t

\*#2 10×10 mm, 2 mm V notch, Notch location; Center of weld metal

Specimen location; Face: 7 mm from face surface, Reverse: 7 mm from back surface

表7 ソリッドワイヤによる継手の溶接条件  
 Table 7 Welding conditions of GMAW butt joint

Steel pipe	API 5L X70 1,016 mm dia. × 21 mm wall thickness
Power source	DPS-500P(XIONGGU ELECTRICAL)
Welding equipment	Dual torch welding system A-610 (XIONGGU ELECTRICAL)
Welding wire	[Root] Solid wire φ0.9 mm [Hot~Cap] FAMILIARC™ MG-PA50 φ1.0 mm
Polarity	DCEP
Welding parameters*	Welding current: 110-230 A Arc voltage: 22-24 V Welding speed: 47-70 cm/min
Welding position	5G (downhill welding)
Shielding gas	80 %Ar-20 %CO <sub>2</sub> , 25 L/min
Pass sequences	8 passes/7 layers[Hot~Cap]
Pre-heating/inter pass temperature	70~110°C

\* Welding parameters are well controlled and programmed at each position

ヤによる狭開先下進溶接よりも低いですが、深い溶込みが得られるため融合不良発生リスクが小さい。また、ソリッドワイヤの自動溶接で適用が難しい6G姿勢での溶接にも適しており、勾配のある土地にパイプラインを敷設する際にはフラックス入りワイヤは好適である。欧州や中国では、ソリッドワイヤを用いた下進溶接施工が主流であるが、耐欠陥性に優れているフラックス入りワイヤを用いた上進溶接施工の比率が増加している。

フラックス入りワイヤを用いた自動溶接施工では、低スパッタ発生量に加えて、溶接中はスラグが自然に剥離することなく、溶接後にハンマー等を用いて容易に除去できる溶接作業性が望ましいとされる。

TRUSTARC™ DW-PA70Lは、上記スラグ特性に着目して開発したX80鋼用フラックス入りワイヤである。TRUSTARC™ DW-PA70Lを用いた6G姿勢での円周溶接施工の一例を紹介する。溶接条件を表10、開先形状と各溶接姿勢における溶接継手金属のマクロ写真を図5、ビード外観を図6、溶接継手金属の化学成分を表11、機械的性質を表12に示す。X80はじん性の担保

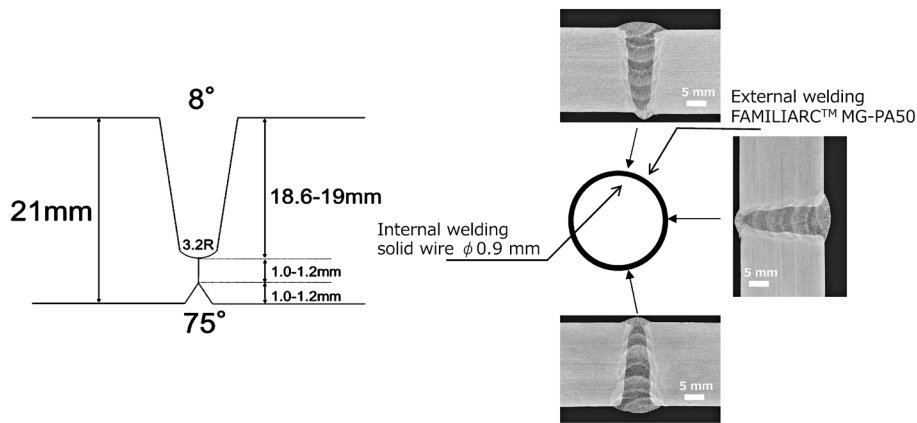


図3 ソリッドワイヤによる継手の開先形状と各溶接姿勢における溶接継手金属のマクロ写真  
Fig.3 Groove shape and cross-sectional macro photographs at each welding position of GMAW weld joint

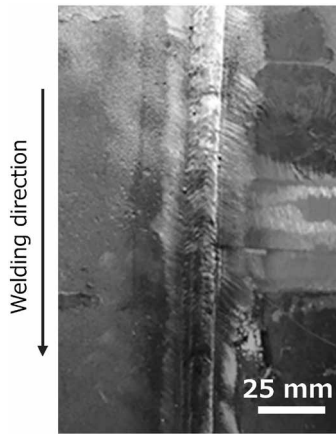


図4 ソリッドワイヤによる継手のビード外観  
Fig.4 Bead appearance of GMAW butt weld joint

表8 ソリッドワイヤによる継手金属の化学成分  
Table 8 Chemical compositions of GMAW butt joint weld metal

Location*	Chemical compositions (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Ti
Face	0.10	0.73	1.44	0.009	0.009	0.22	0.01	0.002
Reverse	0.09	0.68	1.47	0.008	0.008	0.19	0.02	0.003

\* Analysis location; Face: 7 mm from face surface, Reverse: 7 mm from back surface

表9 ソリッドワイヤによる継手金属の機械的性質  
Table 9 Mechanical properties of GMAW butt joint weld metal

Tensile properties* <sup>1</sup>				V notch toughness* <sup>2</sup>			Hardness [HV] <sup>3</sup>	CTOD* <sup>4</sup> (mm)		
0.2%OS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	RA (%)	Location	Absorbed energy (J) (Brittle fracture (%))					
					-60°C	-40°C	-20°C			
668	735	31	70	Face	55(60)	94(38)	116(30)	Max.257	0.61	
					66(60)	104(30)	132(23)			
					60(60)	74(38)	130(8)			
				Avg. 60(60)			Avg. 91(35)			Avg. 126(20)
				Reverse	78(38)	105(25)	135(11)			
					60(53)	103(30)	142(8)			
77(38)	103(30)	122(15)								
Avg. 72(43)			Avg. 105(28)	Avg. 133(11)						

\*<sup>1</sup> Size of tensile specimen; Dia. = 4.0 mm, G.L. = 16.0 mm, Specimen location; 1/2t

\*<sup>2</sup> 10 × 10 mm, 2 mm V notch, Notch location; Center of weld metal

Specimen location; Face: 7 mm from face surface, Reverse: 7 mm from back surface

\*<sup>3</sup> Measurement at weld metal

\*<sup>4</sup> According to WES 1108

表10 フラックス入りワイヤによる継手の溶接条件  
Table 10 Welding conditions of FCAW butt weld joint

Steel pipe	API 5L X80 1,219 mm dia. × 21 mm wall thickness
Power source	DPS-500P(XIONGGU ELECTRICAL)
Welding equipment	Automatic welding system A-305 (XIONGGU ELECTRICAL)
Welding wire	[Root] Solid wire φ 0.9 mm [Hot~Cap] TRUSTARC™ DW-PA70L φ 1.2 mm
Current type, Polarity	DCEP
Welding parameters*	Welding current: 180-190 A Arc voltage: 22-23.5 V Welding speed: 15-24c m/min
Welding position	6G (uphill welding with 25° slope)
Shielding gas	80 %Ar-20 %CO <sub>2</sub> , 25 L/min
Pass sequences	8 passes/6 layers[Hot~Cap]
Pre-heating/inter pass temperature	55~105°C

\* Welding parameters are well controlled and programmed at each position

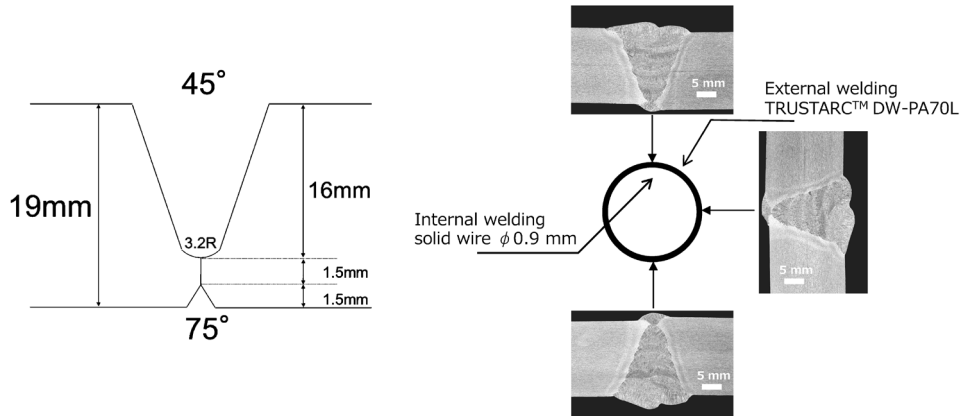


図5 フラックス入りワイヤによる継手の開先形状と各溶接姿勢における溶接継手金属のマクロ写真  
Fig.5 Groove shape and cross-sectional macro photographs at each welding position of FCAW butt weld joint

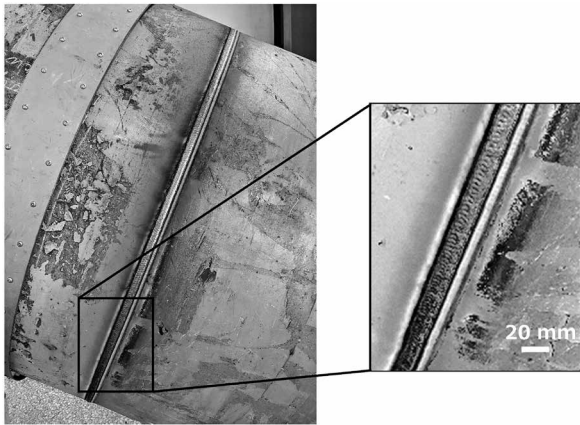


図6 フラックス入りワイヤによる継手のビード外観  
Fig.6 Bead appearance of FCAW butt joint

表11 フラックス入りワイヤによる継手金属の化学成分  
Table 11 Chemical compositions of FCAW butt joint weld metal

Location <sup>※</sup>	Chemical compositions (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Ti
Face	0.05	0.26	1.32	0.008	0.006	2.29	0.41	0.041
Reverse	0.06	0.26	1.36	0.008	0.006	1.94	0.36	0.043

※ Analysis location; Face: 7 mm from face surface, Reverse: 7 mm from back surface

が難しい鋼管グレードであるが、 $-60^{\circ}\text{C}$ においても優れたじん性を示す。ビード外観はビードのそろいが一定かつ良好な波目となる。

### 3.5 溶接材料品種別の特徴比較

各種被覆アーク溶接棒の特徴比較を表13に示す。高セルロス系被覆アーク溶接棒は溶接能率に優れ、低温じん性の要求が低い場合や低温割れリスクが低い鋼管に適用される。

上進用低水素系被覆アーク溶接棒は、低温じん性、耐低温割れ性、耐溶接欠陥性に優れる。施工能率よりも継手金属の健全性を重要視したい場合に適用される。

下進用低水素系被覆アーク溶接棒は、高セルロス系と同程度の溶着速度を確保しつつ高セルロス系の欠点である低温じん性と耐低温割れ性を高めた溶接材料である。

被覆アーク溶接棒は、自動化が困難であり、フラックス入りワイヤやソリッドワイヤに比べて能率面で劣るものの、シールドガスが不要であること、溶接装置が簡易的であること、風の影響を受けにくいなどの利点があり、現在も多くの施工現場で採用されている。

フラックス入りワイヤとソリッドワイヤの特徴比較を表14に示す。フラックス入りワイヤは上進溶接で使用されるのが一般的であり、下進溶接で使用されるソリッドワイヤに比べて耐溶接欠陥性に優れる。また、溶接中に発生するスラグが熔融池の垂れを抑制することから6G姿勢においても健全な溶接金属が得られやすい。いっぽう、ソリッドワイヤは、狭開先を下進で高速溶接することが可能であり、能率面に優れる。

表12 フラックス入りワイヤによる溶接継手金属の機械的性質  
Table 12 Mechanical properties of FCAW butt joint weld metal

Tensile properties <sup>※1</sup>				V Notch toughness <sup>※2</sup>			Hardness [HV] <sup>※3</sup>	CTOD <sup>※4</sup> (mm)	
0.2%QS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	RA (%)	Absorbed energy (J) (Brittle fracture (%))					
				Location	-60°C	-40°C	-20°C	-10°C	
695	744	23	66	Face	56(38) 69(38) 71(30) Avg. 65(35)	79(20) 90(19) 86(19) Avg. 85(19)	104(1) 101(1) 110(1) Avg. 105(1)	Max.278	0.31
				Reverse	53(38) 57(31) 58(31) Avg. 56(33)	74(25) 67(25) 78(31) Avg. 73(27)	91(19) 94(19) 95(19) Avg. 93(19)		

※1 Size of tensile specimen; Dia. = 6.0 mm, G.L. = 24.0 mm, Specimen location; 1/2t  
 ※2 10 × 10 mm, 2 mm V notch, Notch location; Center of weld metal  
 Specimen location; Face: 7 mm from face surface, Reverse: 7 mm from back surface  
 ※3 Measurement at weld metal  
 ※4 According to WES 1108

表13 各種被覆アーク溶接棒の特徴比較  
Table 13 Features comparison by types of SMAW

Types of covered electrodes	Usability on root pass	Resistance against weld defect	Resistance against low temperature clacking	Welding efficiency	Low temperature toughness
High cellulose type	○	○	○	◎	△
Low hydrogen type	Vertical upward	◎	◎	△	◎
	Vertical downward	△	○	◎	○

※ ◎: Excellent, ○: Fair, △: Inferior

表14 フラックス入りワイヤとソリッドワイヤの特徴比較  
Table 14 Features comparison by types of GMAW (flux cored wire and solid wire)

Types of welding materials	Automation	Weldability in 6G position	Resistance against weld defect	Resistance against low temperature clacking	Welding efficiency	Low temperature toughness
Flux cored wire	OK	◎	◎	◎	○	◎
Solid wire	OK	○	○	◎	◎	◎

※ ◎: Excellent, ○: Fair, △: Inferior

むすび=パイプラインに適用される鋼管グレードは、天然ガスなどを高圧で輸送することを目的に高強度化が進められ、溶接金属部にも高強度、高じん性が要求されるようになった。また、敷設工事費削減のために溶接施工高能率化のニーズがあり、自動溶接機の適用が普及してきた。本稿では、これらの変化に対応する溶接材料について実機による継手性能も交えながら紹介した。今後はカーボンニュートラル実現に向け天然ガスパイプラインに加えて、水素燃料の輸送インフラとしての水素パイプラインやCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) としてのCO<sub>2</sub>輸送用パイプラインの需要が高まると予想される。これら輸送用パイプラインの溶接金属部に要求される性能にいち早く対応するとともに、高能率、高品質、技能レスへの取組みを継続していきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) API specification 5L. Specification for Line Pipe. American Petroleum Institute, 2018, 46th edition.
- 2) 芥米地正敏. 石油/天然ガス レビュー. 2004, 1月号, p.70-84.
- 3) D. V. Dorling et al. Welding Journal. 1992, Vol.71, No.5, p.55-61.
- 4) 笠井 登. 配管技術. 2002, 7月号, p.42-49.
- 5) 杉浦一樹ほか. JFE技報. 2014, No.34, p.104-108.
- 6) 村山雅智. 溶接学会誌. 2005, Vol.74, No.7, p.464-468.