

円周溶接模擬技術と溶接熱影響部特性評価技術

Development of Field Girth Welding Simulation and Test Procedure Development to Evaluate Pipe Properties at HAZ in Girth Welded Portion

濱田昌彦*
Masahiko HAMADA長山展公
Hiroyuki NAGAYAMA黒田直樹
Naoki KURODA綿谷雄輝
Yuuki WATATANI下本豪紀
Hidenori SHITAMOTO松廣克之
Yoshiyuki MATSUHIRO

抄 録

パイプラインの安全性確保の観点から、現場円周溶接部の特性に関するユーザーの関心が高まっている。このような背景の元、現場円周溶接の模擬技術と鋼管母材に形成される溶接熱影響部の特性評価技術の開発およびデータ蓄積を実施している。X80UOE 鋼管を用いた結果を例に、現場円周溶接模擬技術の開発状況を、X65 シームレス鋼管を用いた結果を例に、溶接熱影響部特性評価技術の開発状況について報告した。

Abstract

It is important controlling properties in welded portion generated by field girth welding. Thus Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation is conducting two developments about the girth welding. The first one is simulation technique of the field girth welding, it is called "field girth welding simulation". The second one is a test procedure development to evaluate properties of weld heat affected zone generated in pipe body, it is called "weldability test". A field girth welding simulation on X80 UOE pipe and a weldability test on X65 seamless pipe are reported in this paper.

1. 緒 言

油井管のように機械的にねじ締結される一部の例外を除いて、ほとんどの鋼管は円周溶接により冶金的に締結されて構造物として利用される。溶接部では溶接材料の適用により母材と異なる成分を有する溶接金属が存在する。また鋼管本体においても溶接時の熱履歴により組織や特性が母材と異なる溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) が存在する。このため、鋼管メーカーには鋼管母材だけでなく溶接金属、HAZ を含めた溶接部特性に関する知見の蓄積が求められる。特に、天然ガスや石油輸送に利用されるパイプラインの敷設においては円周溶接施工の能率確保、円周溶接部の特性確保がプロジェクトの成否を左右する。このため、ラインパイプに対する円周溶接性評価の要求は極めて高い。

溶接部特性のデータの採取にあたっては、円周溶接を実施し溶接継手を作製する必要がある。ここで、鋼管メーカーに求められる溶接継手は大きく分けて2種類ある。一つ目

は、実際の敷設での溶接に出来るだけ近い条件で作製したものである。このような要望は、コントラクターと呼ばれる敷設業者から求められることが多い。パイプラインの溶接は米国で発祥し、1945年頃にスプレッド工法と高能率な高セルロース系溶接棒による手動溶接の組み合わせが陸上パイプラインの溶接方法として確立された。

その後、省力化の観点からの機械化と高能率化の観点からの狭開先化が進み、現在主流となっているのは、ガスマタルアーク溶接と5°以下の開先角度の組み合わせによる高能率溶接である^{2,3)}。溶接材料としては0.9~1.2mmの細径のソリッドワイヤが用いられ、主に下進溶接が適用される。溶接入熱としては0.3~1.5kJ/mm程度の小さい入熱が適用される^{2,3)}。下進溶接を適用することによって溶接速度を高めて1層あたりの溶接時間を短くすることで施工能率を高める思想が小入熱を生む原因である。同様に、待ち時間を減らす為に層間温度は比較的高い温度が適用される。

二つ目は、HAZのみを抽出して性能評価を求める要望である。この場合には、実際の溶接とは異なり片側が垂直

* 和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部 溶接継手技術室長 和歌山県和歌山市湊 1850 番地 〒 640-8555

のレ開先を作製した上で、溶接線を直線状に保つ特殊な溶接が要求される。また、現実の敷設で適用する可能性がある最大と最小の溶接入熱量での施工が要求される。このような要求は、鋼管の最終ユーザーである石油、ガス会社から求められることが多い。

本報告では、X80UOE 鋼管を対象に実施したガスマタルアーク溶接と狭開先を組み合わせた現地円周溶接模擬試験結果および X65 シームレス鋼管を対象に実施したレ開先溶接での円周溶接 HAZ 特性評価結果を紹介する。

2. X80UOE鋼管を用いた現地円周溶接模擬と溶接部評価

2.1 供試材および円周溶接方法

溶接に用いたのは外径 610mm, 肉厚 15.6mm の X80 UOE 鋼管である。鋼管母材の化学成分を表 1 に示す。低 C の Mn-Cu-Ni-Cr-Mo-Nb-V-Ti 添加鋼であり、Pcm は 0.18mass% であった。

溶接方法は現地円周溶接の模擬を目的に、狭開先の機械化ガスマタルアーク溶接を適用した。図 1 に開先形状を示す。本溶接においては内面からの初層溶接を模擬するために内面側 1 段、外面 2 段の開先形状を採用した。図 1 に示したように主開先角度は 5° である。図 1 には積層方法を合わせて示した。現地円周溶接で最も一般的な 1 層 1 パス溶接を採用した。

円周溶接条件を表 2 に示す。初層溶接は内面から半自動のガスマタルアーク溶接で実施した。初層溶接の間は鋼管は外面よりクランプで保持し、管回転で溶接を実施した。2 層目以降は全て外面から管固定で下進溶接を行った。溶接プロセスはパルスガスマタルアーク溶接である。表 2 に溶接条件を示す。第 2 層溶接 (Hot pass) には十分な溶け込みが得られるよう 100% 炭酸ガスをシールドガスとして

表 1 X80 鋼管母材の化学成分
Chemical compositions of base metal of X80 UOE pipe

(mass%)				
C	Si	Mn	P	S
0.06	0.14	1.72	0.006	0.0012
Others			Ceq (IIW)	Pcm
Cu, Ni, Cr, Mo, Nb, V, Ti			0.43	0.18

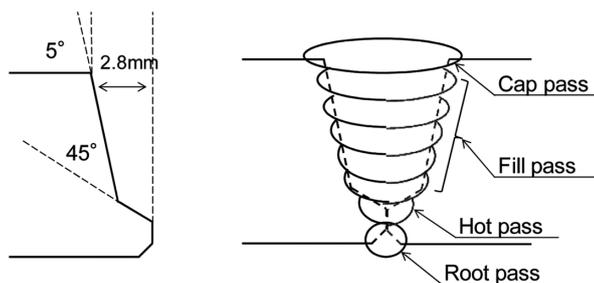


図 1 開先形状と積層方法
Bevel preparation and pass sequence

表 2 溶接条件
Welding procedures

Pass	Root (inside)	Hot	Fill - cap
Process	Semi-auto	GMAW	PGMAW
Position	1G	5G	5G
Equipment	DAIHEN DM-350	RMS	RMS
Welding wire	Nippon-Sumitomo YM-SCV (1.0 mm) (Eq. AWS 5.18 ER70S-G)		
Shielding gas	75%Ar-25%CO ₂	100%CO ₂	70%Ar-30%CO ₂
Heat input (kJ/mm)	-	0.3	0.4 ~ 0.7
Note	Preheating was not applied. Inter pass temp < 100 °C		

表 3 溶接金属の化学成分
Chemical compositions of girth weld metal

(mass%)				
C	Si	Mn	P	S
0.069	0.71	1.48	0.009	0.005
Cu	Ni	Cr	Mo	V
0.31	0.04	0.04	0.02	0.01
Ti	Nb	B	Sol-Al	Insol-Al
0.002	0.008	0.0006	0.008	< 0.001
O	N	Pcm		Ceq (IIW)
0.03	0.0033	0.19		0.35

適用した。初層にはアルゴン-25%炭酸ガス、第 3 層以降にはアルゴン-30%炭酸ガスをシールドガスとして適用した。混合ガスを用いた理由は、溶接金属中の酸素量増加を抑制し溶接金属の靱性を確保することにある。溶接には AWS A5.18 ER70S-G 相当の直径 1.0mm のソリッドワイヤを用いた。X80 鋼管に Gr70 相当の溶接ワイヤを適用したのは小入熱溶接条件での強度増加を見込んだ上で、イーブンマッチ溶接を行うためである。表 3 に溶接金属の化学分析結果を示す。Pcm は 0.19mass% でありほぼ母材と同等の結果を得た。また、酸素量は 0.03% に抑制されていた。

2.2 溶接部断面マクロ形状と溶接部硬さ分布

図 2 に作製した溶接継手の断面マクロと共に硬さ測定位置を示す。溶接幅が狭く溶接金属断面積が小さい典型的な現地円周溶接での断面マクロ形状が再現できている。

溶接金属中央の肉厚方向および鋼管表面と並行に内外表面から 1mm の位置および肉厚中央の 3 か所で硬さを測定した。溶接金属中央では図 3 に示すように、多層溶接による複数回加熱の影響により周期的に硬さが変化した。最高硬さは HV274, 最低硬さは HV219, 平均値は HV244 であった。図 4 に示すように 3 か所の測定位置において、母材の硬さに大きな変化はなく平均で HV251 であった。溶接金属と母材の硬さがほぼ等しく目標通りイーブンマッチの継手が得られていることを確認した。HAZ において硬さの上昇は、ほとんど認められず、わずかに軟化していることを

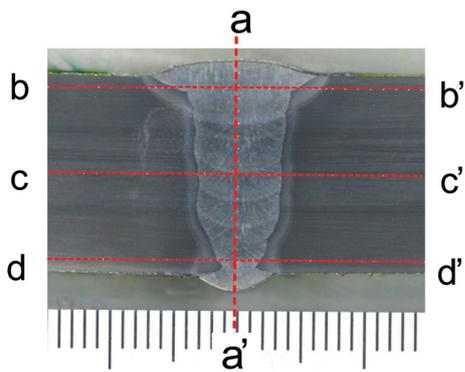


図2 断面マクロと硬さ測定位置

Macro structure and measurement lines of hardness distribution

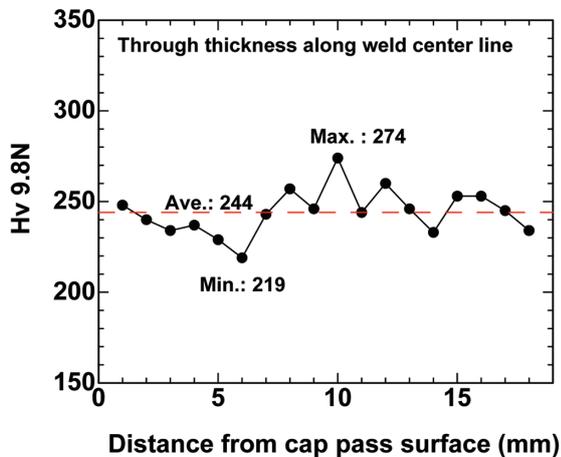


図3 溶接金属中央での肉厚方向硬さ分布

Hardness distributions through thickness along weld center line

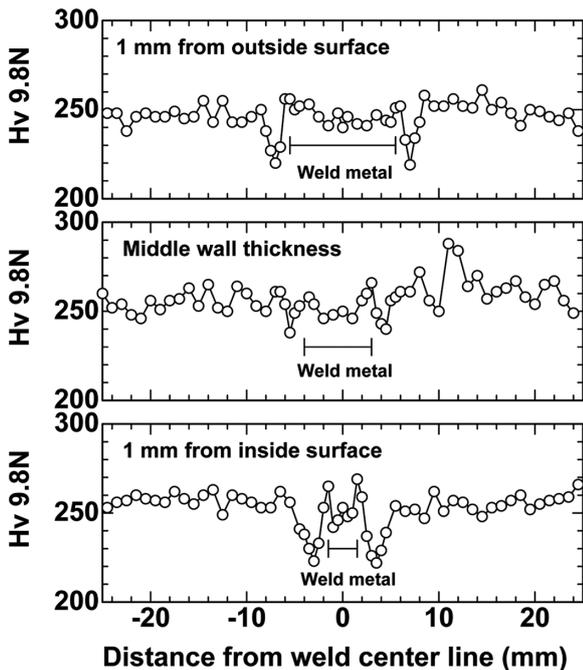


図4 溶接部硬さ分布

Cross weld hardness distributions

確認した。HAZでの最低硬さはHV219であり、これは母材硬さ平均値の87%である。

2.3 溶接部引張り特性

図3に示したように円周溶接金属では多層熱サイクルの影響を受けた周期的な硬さ変化が生じている。即ち、溶接金属内では局所的な強度変化が生じていることが明かである。そこで、図5に示すような丸棒および板状引張り試験片を採取して差を確認した。丸棒試験片は直径3mmとし、肉厚方向3か所から採取した。板状試験片は全肉厚に近い特性が測定できるように幅15mmで採取した。

試験結果を図6、7および表4に示す。図6に示すように丸棒試験片では、肉厚中央および内面2mmから採取した

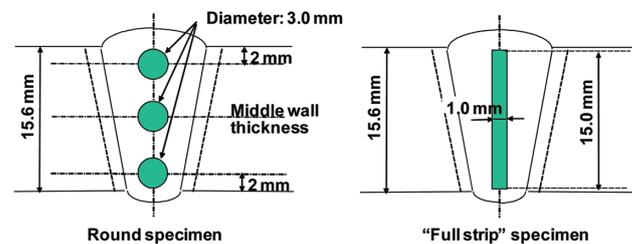


図5 引張り試験片採取位置

Schematic illustration showing location of tensile specimen

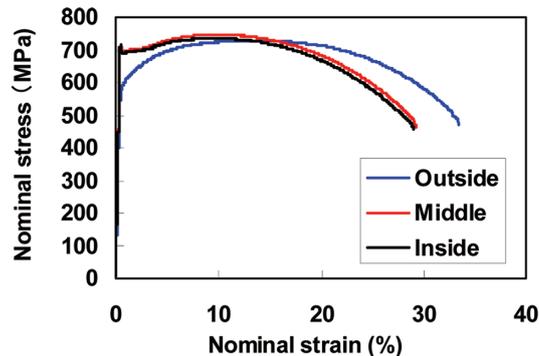


図6 溶接金属の丸棒引張り試験結果

Stress-strain curves of girth weld metal by using round bar specimen

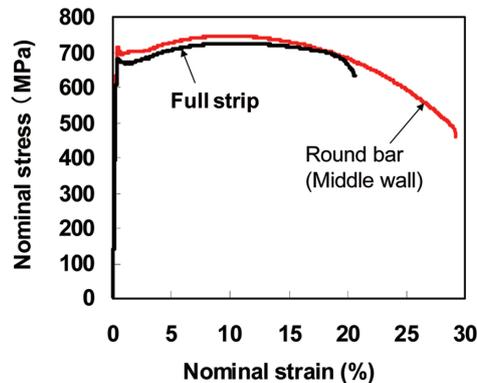


図7 丸棒および板状試験での応力歪み曲線の比較

Comparison of stress-strain curves of girth weld metal by using round bar and full strip specimen

表4 円周溶接金属の引張り試験結果
Results of tensile test on girth weld metal

Specimen type	Location	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Round bar	Outside	574	728
	Middle	708	745
	Inside	693	734
Strip	Full thickness	674	725
Base metal data		541 - 576	717 - 741



図8 継手引張り試験破断部外観
Fracture appearance after the cross weld tensile tests

結果はほぼ同様の応力歪み曲線を示した。いずれも降伏伸びを有する Luder's elongation type であり、降伏強さは 708 および 693MPa であった。外面 2mm から採取した試験片では、降伏伸びが観測されず round house type のカーブを示した。また、降伏強さは 574MPa であり他の採取位置に比べて低い値を示した。最終層溶接金属は後続溶接が無く再熱されないため、凝固焼き入れままの組織となっていることが S-S カーブが異なる原因と考えられる。一方で、図7に示すように板状試験での結果は、降伏伸びを有する Luder's elongation type であり、降伏強さは 674MPa となった。すなわち、肉厚中央から丸棒試験片を採取すれば、ほぼ全厚の試験結果と同等の結果が得られることが確認できた。

表4に纏めたように、本試験で得られた溶接継手は引張り強さで母材とイーブンマッチであるのに対して、降伏強さでは約 20% のオーバーマッチである。溶接継手における母材と溶接金属の強度マッチングの定義に、引張り強さを用いるか降伏強さを用いるかについては議論がある。近年では FEA を用いた比較検討⁴⁾等によりいずれの定義が妥当かが研究されつつある。

板状の継手引張り試験の破断後外観を図8に示す。溶接部から離れた母材で破断しており、溶接継手として破断モードに問題ないことを確認した。

2.4 シャルピーおよび CTOD 特性

溶接金属中央と溶接金属（以下 Fusion Line : FL と省略

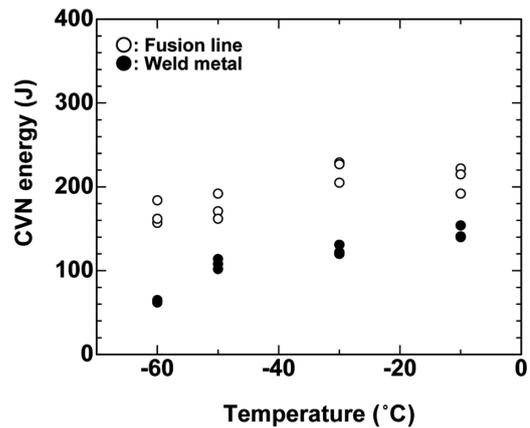


図9 溶接部シャルピー試験結果
Charpy impact test results at welded portion

表5 CTOD 試験結果
CTOD test results

Notch location	Temp. (°C)	CTOD value (mm)
Weld center line	-10	0.32, 0.35, 0.33
Fusion line	-10	0.40, 0.61, 0.34

する) : HAZ = 50 : 50 の2か所のノッチ位置でシャルピー試験を行った。シャルピー試験結果を図9に示す。FL 位置では -60°C においても 100J 以上の高いエネルギー値が得られた。また延性 - 脆性の遷移温度は -53°C であった。溶接金属中央ノッチではエネルギー値は全般に FL に比べて小さい。この理由は、溶接金属の酸素量が 0.03 mass% と母材に比べて一桁高いことにある。鋼中酸素は酸化物を形成し、この酸化物が延性破壊の起点となるために 100% 延性破壊でのエネルギー値が低くなる。一方で、溶接金属中央ノッチでの延性 - 脆性の遷移温度が -60°C 以下であることを確認しており、溶接金属が十分な靱性を有することは明かである。

CTOD 試験は -10°C の試験温度で実施した。ノッチ位置はシャルピー試験と同じく溶接金属中央と FL とした。試験結果を表5に示す。溶接金属中央ノッチでの CTOD 値は 0.32, 0.35 および 0.33mm, FL ノッチでの CTOD 値は 0.40, 0.61 および 0.34mm であった。全ての試験片が延性 100% で破壊しており、溶接部での優れた亀裂発生抵抗特性を確認した。

3. レ開先による円周溶接HAZ特性評価

3.1 レ開先溶接を実施する目的

円周溶接に限らず、溶接を実施するにあたっては開先を加工し、溶接ワイヤなどの溶接材料を溶融充填するのが一般的である。この為、例えば通常の溶接継手を用いて溶融線近傍に形成される粗粒 HAZ (Coarse Grain HAZ : CGHAZ) のシャルピー特性や CTOD 特性を評価しようとした場合には、2.4に示したようにノッチ上に占める溶接

金属とHAZが50:50になるようなノッチ加工をして試験を実施することになる。この場合、ノッチ上には評価対象であるCGHAZだけでなく細粒化HAZ（FineGrainHAZ：FGHAZ）や溶接金属が含まれることになり、必ずしもCGHAZの特性を評価していないと考えられる場合がある。

多層溶接継手において、最も靱性が低下するのはCGHAZおよびCGHAZが後続の溶接熱サイクルによりAc3点とAc1点の中間温度に再加熱された2相域再加熱CGHAZ（InterCriticalReheatedCGHAZ：ICCGHAZ）であるとされている。そこで、特にHAZのCTOD特性を正確に評価する方法として、レ開先を用いて溶接継手を作製しノッチ位置に占めるCGHAZおよびICCGHAZの割合を高める方法がAPI-RP2Zで推奨されている。本検討ではRP2Zを参考にし、下記の目標を満足した継手につきHAZ特性の評価を実施した。

- ①溶融線の凹凸が1.0mm以下
 - ②ノッチ位置と溶融線の平均距離が0.5mm以下
 - ③ノッチに占めるHAZの割合が80%以上
 - ④溶融線に隣接するCGHAZおよびICCGHAZの割合が25%以上
- （上記はすべて、肉厚又は試験片厚の中央60%で定義）

3.2 供試材および円周溶接方法

溶接に用いたのは外径219.1mm、肉厚33.45mmのX65シームレス鋼管である。表6に溶接条件を示す。溶接入熱量を0.5および1.6kJ/mmの小入熱、大入熱の2水準とした。いずれの条件の溶接も管回転で溶接を行った。小入熱溶接にはパルスガスマタルアーク溶接を適用し、予熱、層間温度は50℃以下に管理した。大入熱溶接にはサブマージアーク溶接を適用し、予熱、層間温度は125～150℃の範囲に管理した。緒言で述べたようにパイプラインの円周溶接には0.3～1.5kJ/mmの低入熱条件が多用されている。本研究で選択した条件により、現場円周溶接に適用される条件範囲のほとんどをカバー可能であると考えられる。また、開先は図10に示すような片側垂直で片側が2段の角度を有する変形のレ型開先を適用した。

3.3 溶接部断面マクロ形状

作製した溶接継ぎ手の断面マクロ観察例を図11に示す。また溶融線の凹凸（HAZ Straightness）および溶融線に隣接するCGHAZおよびICCGHAZの比率の測定結果を表7

表6 溶接条件
Welding procedures

	Low heat input	High heat input
Process	Pulsed GMAW	SAW
Position	Pipe rotated	Pipe rotated
Aimed heat input	0.5 kJ/mm	1.6 kJ/mm
Preheat/interpass temp.	max. 50°C	125 ~ 150°C

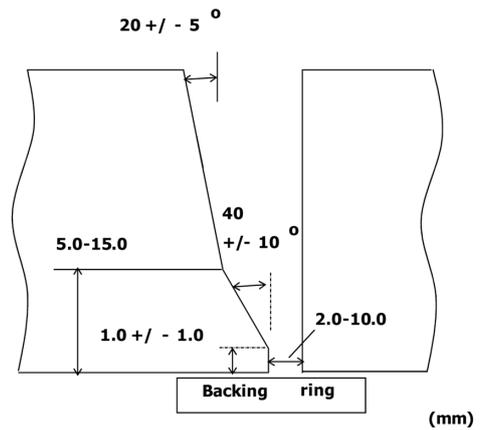
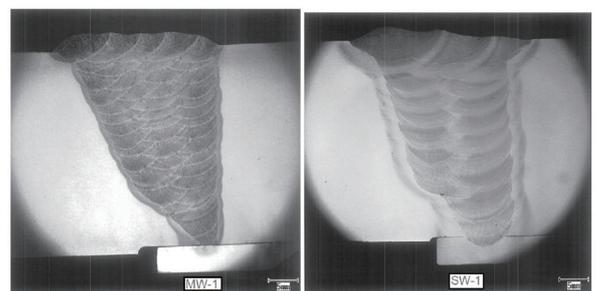


図10 レ型開先の形状例
Example of half K bevel



(a) 0.5 kJ/mm GMAW joint
HAZ straightness: 0.76 mm
CGHAZ+ICCGHAZ: 64.9 %
(b) 1.6 kJ/mm SAW joint
HAZ straightness: 0.98 mm
CGHAZ+ICCGHAZ: 52.5 %

図11 マクロ組織と組織評価結果
Macrographic examination results

表7 溶融線の直線性とマイクロ組織評価結果
HAZ straightness and CGHAZ+ICCGHAZ ratio

WPS	Joint ID	Specimen ID	HAZ straightness (mm)	CGHAZ+ICCGHAZ (%)
PGMAW 0.5 kJ/mm	M-2	MW-1	0.76	64.9%
		MW-2	0.88	66.9%
	M-3	MW-3	0.68	58.9%
		MW-4	0.73	62.8%
SAW 1.6 kJ/mm	S-2	SW-1	0.98	52.5%
		SW-2	0.85	57.3%
	S-3	SW-3	0.95	67.1%
		SW-4	0.56	63.8%

に示す。小入熱のガスマタルアーク溶接継手、大入熱のサブマージアーク溶接継手ともに目標の形状、組織率を満足することを確認した。

次に、ノッチと溶融線の平均距離とノッチ上に占めるHAZの割合の関係について調査した。結果を図12に示す。CGHAZおよびICCGHAZのCTOD特性を正確に評価する観点からはノッチは溶融線に可能な限り接近していることが望ましい。一方で、溶融線に接近し過ぎるとノッチ上に占める溶接金属の割合が増加し、HAZのCTOD特性を調

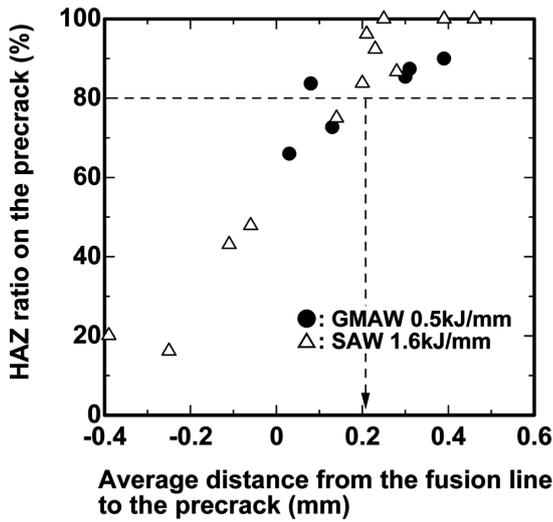


図 12 予亀裂と溶融線との平均距離と予亀裂に占める HAZ の割合の関係

Effect of the average distance from the fusion line and precrack on the HAZ ratio on the precrack

査するという目的を満たさなくなる。図 12 より明らかなように、ノッチと溶融線の平均距離が 0.2mm より小さくなると、ノッチに占める HAZ の割合が目標である 80% を満足できない場合が発生した。このことから、目標を満足するには、ノッチと溶融線の平均距離を 0.2~0.5mm の極めて狭い範囲に制御することが必要であることが分かる。

3.4 CTOD 試験結果

レ開先溶接を用いて、溶融線近傍にノッチを導入した場合の CTOD 試験結果を図 13 に示す。小入熱の 0.5kJ/mm ガスマタルアーク溶接継手では -20℃ で実施した 3 本の試験片すべてが最高荷重に達した後に完全に延性破壊し 1.0mm 以上の高い CTOD 値を示した。大入熱の 1.6kJ/mm サブマージアーク溶接継手では -20 および 0℃ のいずれの試験温度においても一部の試験片が最高荷重に到達する前に破断した。但し、破壊は延性破壊により生じており、最も低い値であっても 0.25mm 以上となっていたことからパイプラインとして十分な亀裂発生停止特性を有していると考えられた。

4. 結 言

ラインパイプを対象にした円周溶接技術に関する取り組みについて、パイプライン敷設現場での円周溶接にできる

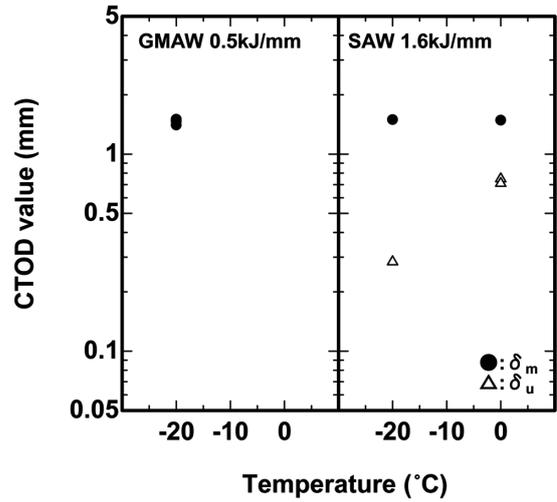


図 13 CTOD 試験結果
CTOD test results at coarse grain HAZ

だけ近い溶接を模擬しようとする技術開発と鋼管本体に溶接熱履歴により生じる HAZ の特性（特に CTOD 特性）をより正確に評価するための技術開発について紹介した。2010 年にメキシコ湾で発生した原油流出事故以降、顧客のパイプラインの安全性への意識はより高まっており、特にパイプライン溶接部の特性確保に対する関心は極めて高い。

鋼管本体の開発、製造、販売だけではなく、溶接をはじめとした鋼管利用技術に関する顧客への貢献も鋼管メーカーの責務であると考えます。顧客要望に耳を傾けつつ、鋼管利用技術評価体制の整備、知見の蓄積を継続する。

参考文献

- 1) 谷中幸司：溶接接合教室“パイプライン プロセス・敷設編”。溶接学会誌。80(3), 30-38 (2011)
- 2) Hammond, J., Blackman, S. A., Hudson, M. G.: Challenges of Girth Welding X100 Linepipe for Gas Pipeline. Pipe Dreamer's Conference, 7-8 Nov 2002, Yokohama, p. 931-955
- 3) Biery, N. E., Macia, M. L., Appleby, R. J. T., Fairchild, D. P., Hoyt, D. S., Dorling, D., Horcley, D.: Godin Lake Trial: X120 Field Welding. Proceedings of IPC2006. Sept 25-29, Calgary, IPC2006-10397
- 4) Motohashi, H., Hagiwara, N.: Analytical Study of Effect of Strength Matching on Strain Capacity. Proceedings of ISOPE 2007. July 1-6, Lisbon, 3101-3106



濱田昌彦 Masahiko HAMADA
和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部
溶接継手技術室長
和歌山県和歌山市湊1850番地 〒640-8555



長山展公 Hiroyuki NAGAYAMA
和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部
溶接継手技術室



黒田直樹 Naoki KURODA
和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部
溶接継手技術室



綿谷雄輝 Yuuki WATATANI
和歌山製鉄所 継手開発マーケティング部
溶接継手技術室



下本豪紀 Hidenori SHITAMOTO
プロセス研究所 圧延研究開発部
主幹研究員



松廣克之 Yoshiyuki MATSUHIRO
日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株)
技術・品質本部 溶接技術部 部長