

## 技術論文

## シームレスラインパイプX90-X100の開発とその利用技術開発

## Development of High Strength Seamless Pipes of X90-X100 Grade for Linepipe and Riser Application

荒井 勇 次\*  
Yuji ARAI長 山 展 公  
Hiroyuki NAGAYAMA中 村 潤  
Jun NAKAMURA濱 田 昌 彦  
Masahiko HAMADA近 藤 邦 夫  
Kunio KONDO平 田 弘 征  
Hiroyuki HIRATA久 宗 信 之  
Nobuyuki HISAMUNE村 瀬 恒 夫  
Tsunao MURASE

## 抄 録

近年、深海油田、ガス田の開発が活発になり、海底フローラインやライザー管用途としてのシームレスパイプにおいて、高強度材の要求が高まりつつある。また、ライザー管においては母材および溶接部における波浪や潮流振動に耐える疲労特性を有していなければならない。従来 X80 までであった強度グレードを超える X90~X100 シームレスパイプの開発を進め、母管の試作および円周溶接試験を行い、その機械的性質を評価した。X90 シームレスパイプについてはライザー管としての疲労特性を評価し、さらに Engineering Critical Assessment により溶接継手が実用に耐える性能を有していることを確認した。

## Abstract

With the increasing strong demand for the development of oil and gas fields in ultra-deepwater, offshore applications with higher strength are required. In addition, fatigue properties of parent pipe and welding joints are required for riser systems as cyclic stress is applied marine phenomena. Ultra-high strength seamless pipes of X90 and X100 grades have been developed for deepwater or ultra-deepwater applications. In order to assess the applicability of X90 parent pipe and welded joints for riser applications, high cycle fatigue testing and fatigue crack growth rate testing was conducted. This work was performed with Engineering Critical Assessment (ECA) for riser applications by using the material and fatigue properties of X90 parent pipe and welded joints.

## 1. 緒 言

近年の深海油田の開発の活発化を背景に、高強度厚肉のシームレスラインパイプ材の受注量が増加してきている。深海油田及びガス田では、海底の油井坑口やガス井坑口から、洋上のプラットフォームまでフローラインやライザー管を用いて、原油やガスを輸送する必要がある。このフローラインやライザー管には、高圧の内部流体圧がかかる。したがって、さらなる高強度化は、大水深への適用、敷設コストの低減、および操業圧力の増加による生産効率の向上などのニーズに対応する一つの解である。

従来のシームレスラインパイプの規格、たとえば API 5L (アメリカ石油協会規格) では、シームレスラインパイプの強度は X80 (下限降伏強度 555MPa) までであり、さらなる高強度材は、実用例がほとんど無かった。一般に、高強度化に伴い、母材および円周溶接部の靱性の低下が懸念される。したがって、母材の高強度、高靱性および良好な

円周溶接性を同時に達成するために、新しい材質の開発が必要である。また、Top Tension Riser (TTR) は、抗口と洋上のプラットフォームを直結し、生産流体が通る Tubing を保護する役割を担うため、その用途としての鋼管は、波浪や潮流振動に耐える疲労特性を有していなければならない。

本報告では、従来に無い X90 および X100 級の強度と、溶接可能なシームレス鋼管の開発に際し、材料設計、実機試作材の性能評価結果、ならびに母材と円周溶接部の疲労試験と Engineering Critical Assessment (ECA) を行い、その信頼性を評価した結果をまとめる。

## 2. 材料開発

従来の高強度材である X70 級シームレスラインパイプは、0.1mass% (以下、%と表記する) 前後の C 鋼で、1~1.75% Mn と Cr, Mo, Ni, Cu 等の合金元素を少量含み、炭素当量で Ceq 式なら 0.42 以下、Pcm 式なら 0.23 以下に調整され、

\* 鉄鋼研究所 鋼管研究部 主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒 660-0891

且つマイクロアロイ (Ti, Nb, V) が活用されていて、製造方法としては造管後に焼入れ焼戻し (QT) が適用される。しかしながら、この成分範囲では目標とする X90 を超える母材強度と靱性の両立が難しい。そこで、鋼成分が及ぼす強度と靱性への影響を調査するため、実験室溶解にて種々の鋼種 (合金組成を 0.04~0.07% C, 1.4~2.9% Mn, 0~0.7% Cu, 0~0.9% Ni, 0~0.7% Cr, 0~0.8% Mo の範囲で変化) を準備し、新日鐵住金(株)ラインパイプの製造方法の一つであるインライン焼入れ焼戻しを模擬した研究所設備での熱間板圧延 (20mm 厚) と実験を行い、炭素当量と、マイクロアロイの一つである V 添加の組み合わせでの、強度と靱性を比較した。

図1は、降伏強度と Pcm の関係を示しており、強度は、C 量を増加させ、および、または V を添加することで Pcm が低めでも X90 以上を確保できる。V を添加しない場合は Pcm を高めにする事で目標の強度を得ることが可能である。一方、図2に示すように、低温靱性の指標の一つである Charpy V notch (CVN) エネルギー遷移温度は、Pcm を

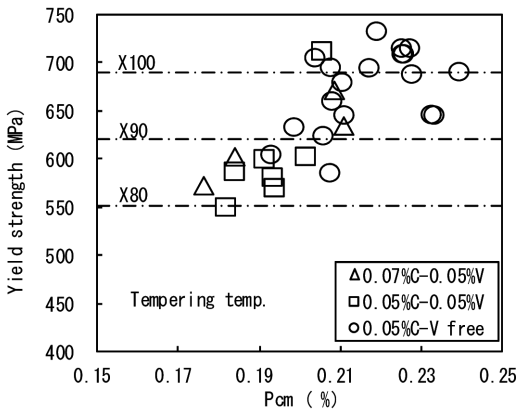


図1 炭素当量 (Pcm) と焼入れ焼戻し鋼板の降伏強度の関係  
Effect of Pcm on yield strength of simulated inline QT steel plate (tensile test of L-direction)

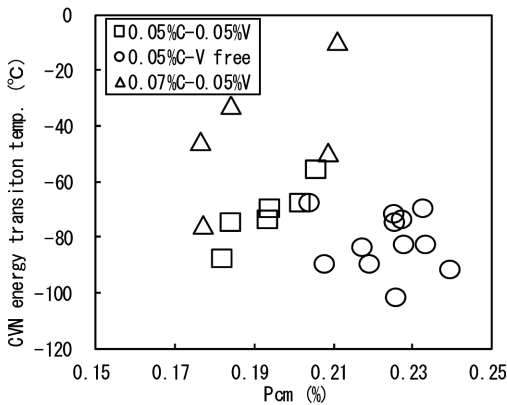


図2 炭素当量 (Pcm) と焼入れ焼戻し鋼板の CVN エネルギー遷移温度の関係  
Effect of C content, V addition and Pcm on energy transition temperature of simulated inline QT steel plate (CVN test of T-direction)

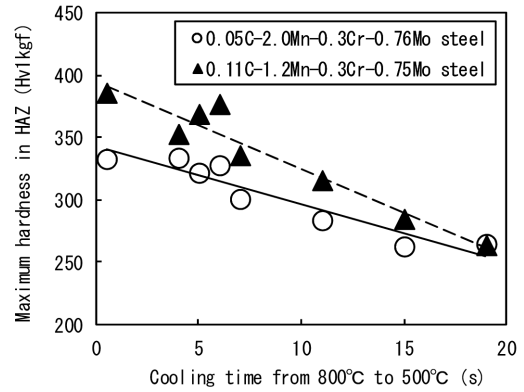


図3 低C-高Mn鋼と高C-低Mn鋼の最高硬さ試験結果 (JIS Z 3115)

Relationship between cooling time from 800°C to 500°C and maximum hardness in HAZ bead on plate test

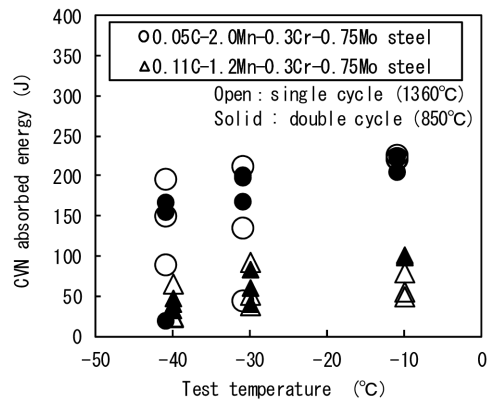


図4 低C-高Mn鋼と高C-低Mn鋼の再現 HAZ 熱サイクル試験結果 (CVN)

Comparison of simulated HAZ toughness between 0.05%C-2.0%Mn steel and 0.11%C-1.2%Mn steel

増加させることで低温化することが分かった。また、合金元素の中でも、Mn と Mo の増加が遷移温度の低温化に寄与することも判明した。これは Mn や Mo が他の元素に比べて、焼入れ時の変態点を低下させ、組織を均質微細化する効果が高いためと考えられる。結果として、Pcm を 0.25 以下の範囲で、目標とする高強度化と高靱性化の同時達成が可能である目途を得た。また、同一 Pcm であっても、低C-高Mnの含有バランスとすることで溶接熱影響部 (HAZ) の過剰な硬化が抑えられ (図3)、また HAZ 靱性も改善する (図4) ことも、テーパ型最高硬さ試験 (JIS Z 3115) および再現熱サイクル試験にて確認した。

### 3. 実機試作鋼管の性能

前述した、合金設計に従い、表1に示す化学組成の鋼にて、和歌山製鉄所の中径シームレス製管工場にて試作を行った。熱処理は、高能率型のインライン焼入れ焼戻しを実施して、一部は製管後放冷した後再加熱での焼入れ焼戻しを実施した。焼入れ後鋼管の肉厚中央部での透過電子顕微鏡 (TEM) 像の代表例を写真1に示す。均質なベイナイ

表1 鋼管の主要化学成分

Chemical compositions of the actual production of high strength seamless pipe

(mass%)						
C	Si	Mn	Cr	Mo	Others	Pcm
0.04 - 0.06	0.30	2.1	0.3	0.7	Ti, Ca, Al etc.	0.22 0.24

表3 X100 シームレスの円周溶接部の CTOD 試験結果  
CTOD test results in welded portion of X100 seamless pipe

	Weld metal	FL	FL+1mm	Visible HAZ
CTOD values (mm)	0.16 0.14 0.21	0.33 0.47 0.50	0.57 0.60 0.68	0.86 0.81 0.83

表2 試作した鋼管のサイズおよび機械的性質の一例  
Example of mechanical properties of trial production of seamless pipes

Grade and size of pipes			Tensile properties					CVN properties
Grade	OD (mm)	WT (mm)	Direction*1	YS (MPa)	TS (MPa)	YS/TS (%)	Elongation (%)	vE-20°C (J)
X90	323.9	20	L	664	730	91	42	-
			T	664	727	91	25	258
X100	323.9	20	L	719	822	87	40	-
			T	737	832	89	21	185
X100	323.9	25	L	750	812	92	45	-
			T	735	798	92	23	269

\*1 L: Longitudinal direction, T: Transverse direction

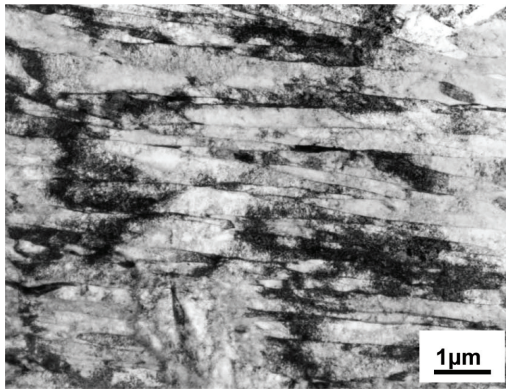


写真1 開発鋼の 20mm 厚鋼管（焼入れまま）の肉厚中央部の薄膜 TEM 像  
TEM image of mid-wall of quenched pipe

ト主体の組織である。焼戻し条件を調整することで、X90 と X100 のそれぞれの強度グレードに作り分け、性能を評価した。母材の機械的性質を表2に示す。いずれも、優れた低温靱性を有している。

一部の鋼管を用いて、円周溶接試験を実施した。X90 については、ライザー用の溶接条件を模擬した試験を行い、その詳細は別章で述べる。X100 については、フローライン用を模擬した典型的な条件（U型開先、予熱無し、Gas Metal Arc Welding (GMAW)、入熱 0.5~0.9kJ/mm）で実施した。

X100 の円周溶接部の CVN 試験データおよびき裂先端開口変位 (CTOD) 試験データを図5および表3に示す。これらの試験は肉厚中央部の L 方向から溶接部について試験片を採取し、ノッチ位置を Weld Metal (WM), Fusion Line (FL), FL+1~5mm, および Visible HAZ (V.HAZ) と種々変えて実施した。その結果、-30°Cにおいても CVN 吸収エネルギー 100J 以上を確保しており、且つ 0°C の CTOD 値

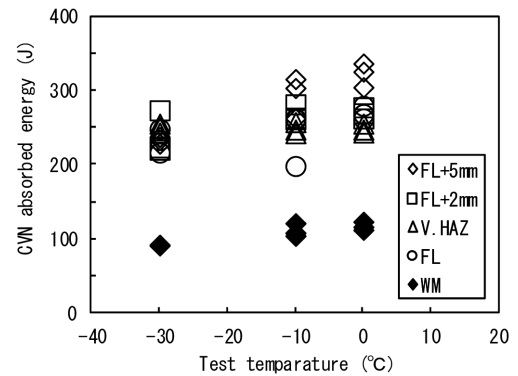


図5 X100 シームレスの円周溶接部の CVN 試験結果  
CVN test results in welded portion of X100 seamless pipe

は 0.3mm を超えている。以上の結果は、ノルウェー船級協会規格 DNV-OS-F101 の Grade 555 (API-X80QO 相当) での下限値よりも高い性能であることを示しており、ラインパイプとしての円周溶接部の靱性が優れていることを確認した。

#### 4. X90鋼管のTTR用途としての円周溶接部性能と破壊安全性評価

##### 4.1 TTR 用円周溶接方法

本試験に供した鋼管は、和歌山製鉄所で製造した X90 グレードのラインパイプである。鋼管の外径、肉厚はそれぞれ 323.9mm, 20.0mm である。

円周溶接施工は、大手ライザー製造メーカーである RTI Energy Systems 社（在米）にて実施した。実際の TTR 製造を模擬するために溶接条件、溶接装置およびその周辺機器は RTI 社でのライザー製造時において使用されるものを適用した。本試験で作製した円周溶接継手は、ライザー製造時の主要プロセスである Submerged Arc Welding (SAW)

表4 X90SAW 円周溶接方法  
Welding procedures of X90 SAW joints

Pre-heat temp.	Interpass temp.	GTAW for root and hot passes			SAW for fill and cap passes			
		Consumable		Ave. heat input	Consumables			Ave. heat input
		Wire	Wire dia.		Wire	Wire dia.	Flux	
121°C	Max. 260°C	AWS A5.28 ER100S-G	1.0 mm	1.06 kJ/mm	Metal cored	2.4 mm	Fluoride basic flux system	1.22 kJ/mm

表5 X90 溶接継手の全溶接金属部引張試験結果  
All weld metal tensile test results of X90 welded joints

YS (MPa)	TS (MPa)	YS/TS (%)	El (%)
645	786	82	26.8

表6 X90 溶接継手の CVN 試験結果  
CVN test results of X90 welded joints

Notch	CVN absorbed energy, min./ave. (J)			
	Weld metal	FL	FL+2mm	FL+5mm
-20°C	100/103	105/114	204/233	218/235

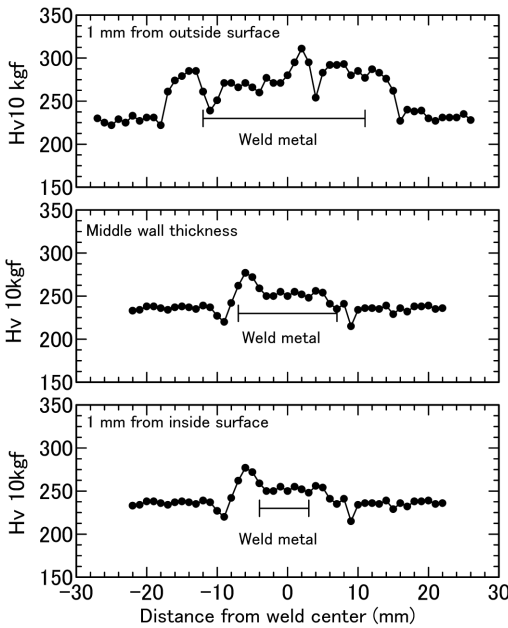


図6 X90 溶接継手の硬さ分布  
Hardness distributions of X90 welded joints

表7 X90 溶接継手の CTOD 試験結果  
CTOD test results of X90 welded joints

Notch	CTOD value (specimen thickness: B=16.0mm, depth: W=2B) (mm)			
	Weld metal	FL	FL+2mm	FL+5mm
0°C	0.279	0.588	0.929	1.064
	0.238	0.563	1.006	0.966
	0.289	0.248	0.827	1.025

全溶接金属部引張試験片は、6.4mm 径の丸棒試験片を肉厚中央部より採取した。このときの標点距離は 25.4mm である。試験結果を表5に示す。溶接金属の YS (0.2%耐力) および TS (引張強さ) は、それぞれ 645MPa および 786MPa であり、YS は API 5L における X90 の下限降伏強さである 625MPa を満足した。

円周溶接横断方向のビッカース硬さ分布を図6に示す。溶接金属および HAZ における最高硬さはいずれも溶接継手表層 1mm 位置において認められ、それぞれ 311HV10kgf, 287HV10kgf であった。前述の通り、低 C-高 Mn の含有バランスとすることで、HAZ で顕著に硬化しないことが確認できる。

CVN 試験結果および CTOD 試験結果を表6, 表7にそれぞれ示す。これらの試験は円周溶接横断方向に試験片を採取し、ノッチ位置を溶接金属, HAZ (FL, FL+2mm, FL+5mm) と種々変化させて実施した。試験温度は CVN 試験, CTOD 試験でそれぞれ -20°C, 0°C である。その結果, CVN においてはいずれのノッチ位置においても吸収エネルギーの最小値は 100J 以上を示し, HAZ における CTOD 値の最小値は FL ノッチの 0.248mm であった。本 CTOD 最小値は、後述する ECA で使用した。

を適用し、鋼管端部に開先加工を施し鋼管同士の突き合わせ多層溶接を実施した。

SAW 継手の円周溶接方法の詳細を表4に示す。初層溶接および第2層溶接は、Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) プロセスを適用し、残層を SAW にて施工した。SAW に適用した溶接ワイヤおよびフラックスは、米市場より調達した高強度メタルコアードワイヤおよび高塩基度フラックスである。すべての溶接パスは鋼管回転下向き (1G) 溶接とし、鋼管外面より施工した。

#### 4.2 X90SAW 円周溶接部評価結果

円周溶接部特性を評価するために、全溶接金属部引張試験, ビッカース硬さ試験, CVN 試験, CTOD 試験を実施した。なお実際のライザー製造時は、疲労特性を考慮し溶接部内外面の余盛を除去しているため、本評価においても同様に内外面余盛を除去し、上述の各種試験を実施した。

#### 4.3 X90 鋼管および溶接継手の疲労特性

TTR を含むライザー管用途としては、波浪や潮流振動に耐える疲労特性を有していなければならない。一般に、TTR 用途の場合、応力比 R は 0.5~0.7 とされており、この応力比条件下における各種疲労特性を確認する必要



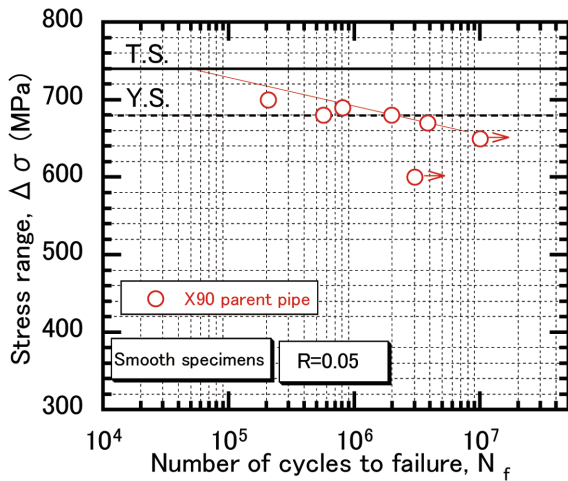


図7 X90 鋼管母材における応力振幅と疲労寿命の関係の一例 (R=0.05)  
Relationship between stress range and fatigue life in X90 parent pipe at R=0.05

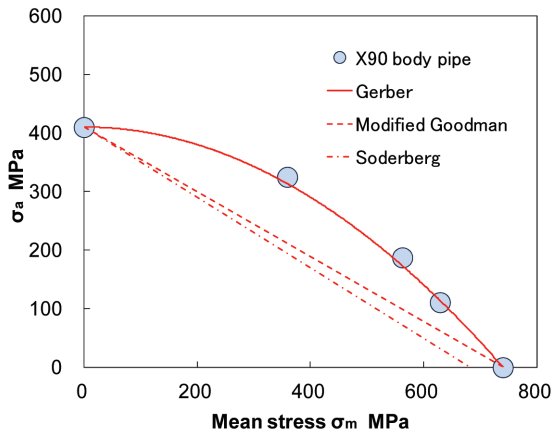


図8 X90 鋼管母材における疲労限度線図  
Endurance limit diagram of X90 parent pipe

がある。

X90 鋼管母材について、応力比 R を -1~0.7 の範囲で変化させ、高サイクル疲労試験を実施した。図7に、応力比 R が 0.05 における大気中の X90 鋼管母材の応力範囲（最大応力 - 最小応力）と疲労寿命の関係の一例を示す。このとき用いた試験片は 8.0mm 径の平滑試験片である。応力比 R が 0.05 においては、疲労限は 650MPa であり、このときの応力振幅  $\sigma_a$  は 325MPa、平均応力  $\sigma_m$  は 359MPa である。同様に、種々の応力比における疲労限を測定し、疲労限における応力振幅  $\sigma_a$  とそのときの平均応力  $\sigma_m$  の関係を図8に示す。ここで疲労寿命に及ぼす平均応力の影響について種々提案されているモデル<sup>3,5)</sup>を併記した。X90 鋼管母材の種々の応力比における疲労限は、最も厳しい疲労限度線図である Gerber 線図と同等以上であることから、優れた疲労特性を有していると言える。

図9に、応力比 R が 0.7 における大気中の X90 溶接継手および鋼管母材の最大応力と疲労寿命の関係を示す。本条

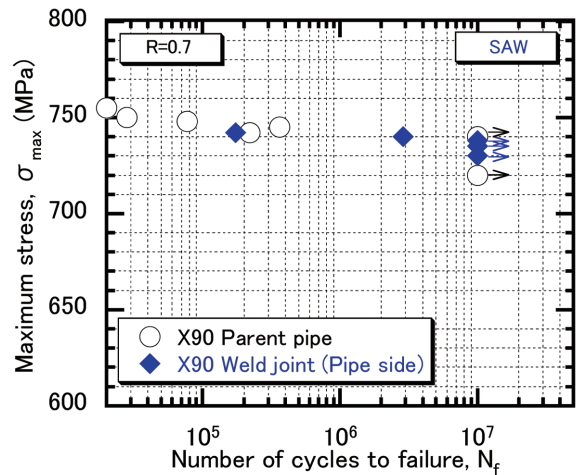


図9 X90 溶接継手の最大応力と疲労寿命の関係  
Relationship between maximum stress and fatigue life of X90 welded joints

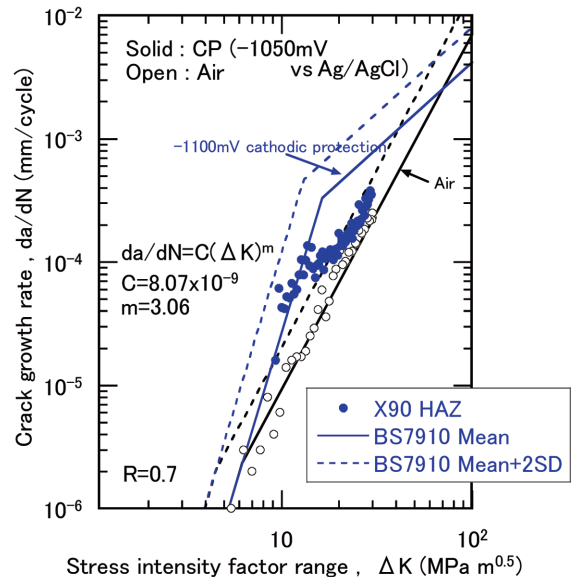


図10 X90 溶接継手の HAZ (FL) における疲労き裂進展速度  
Fatigue crack growth rate of HAZ(FL) in X90 welded joints

件下における X90 溶接継手の疲労限は、鋼管母材のそれと同等であることがわかる。したがって、本溶接継手は母材と同等の優れた疲労特性を有していると言える。

図10に、大気中および5℃電気防食 (CP) 下の人工海水中における X90 溶接継手の疲労き裂進展試験結果を示す。ここで人工海水溶液は ASTM D1141<sup>6)</sup>に従って作製している。いずれの環境下においても試験片は Compact Tension (CT) 試験片を用い、初期き裂は HAZ (FL) とし、応力比 R は 0.7 で実施した。大気中および電気防食下の人工海水中における疲労き裂進展速度 (da/dN) はそれぞれ、BS 7910<sup>7)</sup>で提案されている大気中および人工海水中の設計線図+2SD (標準偏差) よりも遅いことがわかる。これは、X90HAZ が優れた疲労き裂進展特性を有することを示し

ている。一方、X90 鋼管母材についても HAZ と同様の試験を実施し、BS 7910 の設計線図よりも進展速度は遅く優れた疲労き裂進展特性を有していることを確認している<sup>8)</sup>。ここで、図 10 で得られた大気中の疲労き裂進展データからパリズ則の指数、定数を算出し、後述する ECA に使用した。

#### 4.4 X90 溶接継手の ECA (Engineering Critical Assessment)

ECA とは、既知の欠陥を有する金属構造物（特に溶接構造物）の健全性を評価する手法である。ECA では、初期欠陥寸法、材料特性、荷重条件が既知の場合に、FAD (Failure Assessment Diagram) 法を用いて、静的荷重下あるいは動的荷重下における溶接構造物の破壊安全性を評価できる。本 ECA は、前述した円周溶接部特性を用いて X90 溶接継手がライザー管用途として実用に耐えうる性能を有しているか（ここでは、許容される初期欠陥寸法が十分大きい）判定するために実施した。

本 ECA では、TWI 社が開発した汎用ソフトウェアである Crackwise<sup>®</sup>4 を使用した。評価対象は HAZ (FL) とし、前述の円周溶接部評価で得られた結果を材料特性として定義した。初期き裂の形状は図 11 に示すように、鋼管内表面き裂および内表面全周にき裂が存在する場合を定義した。内表面き裂の場合は、種々のアスペクト比  $2c/a$  ( $c$ : き裂長さ、 $a$ : き裂高さ) のき裂を仮定し、内表面全周にき裂が存在する場合と併せ静的あるいは動的荷重下における許容欠陥寸法を評価した。静的および動的荷重下での評価は、それぞれライザー管が受ける敷設時および操業時の負荷応力を考慮して行った。

図 12 に、静的荷重条件下における許容欠陥寸法を示す。初期欠陥が図中に示した許容欠陥寸法よりも小さければ、ライザー管の溶接継手は破断しないことを意味する。本結果は、仮に高さ 6mm の初期き裂があった場合でも、き裂の長さに関わらず X90 溶接継手は敷設時に破断しないことを示している。ここで高さ 6mm の初期欠陥は、言い換えれば肉厚の 30% 深さの欠陥を意味し、溶接部の超音波検査時に十分検出可能な寸法である。

動的荷重条件下においては、上述の HAZ のき裂進展試験結果を考慮し、種々の初期欠陥寸法における X90 溶接継手の破断に至るまでの寿命を評価した。図 13 に、動的

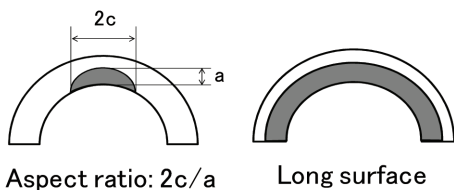


図 11 初期欠陥形状の概略図  
Schematic illustration of flaw configuration

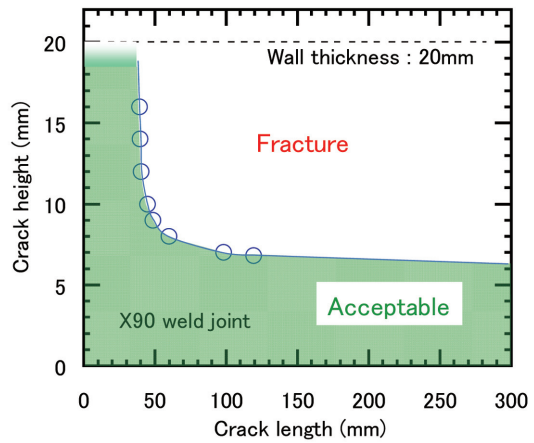


図 12 静的荷重条件下における X90 溶接継手の許容欠陥寸法  
Allowable critical flaw sizes for the X90 welded joints under static loading conditions

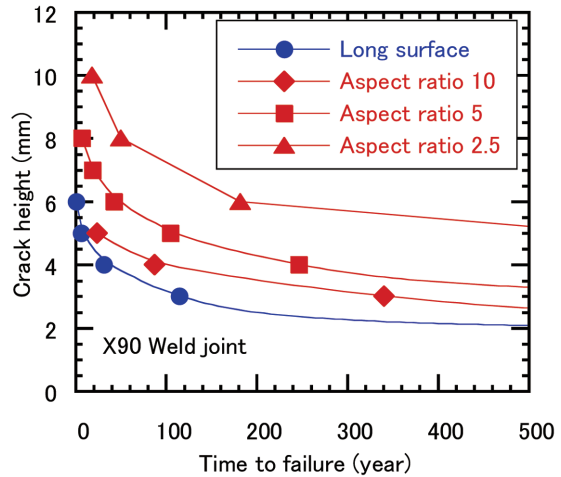


図 13 動的荷重条件下における X90 溶接継手の許容欠陥寸法と疲労寿命の関係  
Relationship between acceptable critical flaw sizes and fatigue life for the X90 welded joints under cyclic loading conditions

荷重条件下における許容欠陥寸法と溶接継手の寿命の関係を示す。初期き裂のアスペクト比が大きくなるにつれて（き裂長さがき裂深さに対して長くなるにつれて）寿命が短くなっていくことがわかる。最も厳しい鋼管全周に欠陥が存在した場合においても、初期き裂高さが 2mm 以下であれば、操業時に半永久的に破断しないことを示している。高さ 2mm の初期欠陥は、言い換えれば肉厚の 10% 深さの欠陥を意味し、溶接部の超音波検査時に十分検出可能な寸法である。

上記の ECA 評価より、X90 溶接継手はライザー管の敷設時および操業時に想定される荷重条件下において、実用に耐える優れた性能を有していると言える。

## 5. 結 言

従来に無い高強度 (X90-X100) で溶接可能なシームレ

スラインパイプを開発した。合金設計による母材強度と靱性の両立、および低 C 化による溶接部靱性の改善により、円周溶接性を含めた性能を満足させた。本開発の試作データを元に、API 規格化を推進し、2010 年度より X90Q、X100Q として正式に規格登録された。また、ライザー用途としての母材および溶接部の疲労特性、ならびに ECA による評価の結果も優れたものであり、本用途としてのニーズに応えられる状態である。

参考文献

- 1) Arai, Y. et al.: International Pipeline Conference. Calgary, 2004, ASME
- 2) Steven, W., Haynes, A.G.: J. Iron Steel Inst. 183, 349 (1956)
- 3) Goodman, J.: Mechanics Applied to Engineering. London, Longmans Green, 1899
- 4) Gerber, W. Z.: Bayer. Arch. Ing. Ver. 6, 101, (1876)
- 5) Soderberg, C. R., Sweden, V.: ASME Transactions. AER-1S, 52 (1), 1 (1980)
- 6) ASTM D1141-98: Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. 2008
- 7) British Standard BS 7910: Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. British Standard Institution, London, 2005
- 8) Nagayama, H. et al.: Offshore Technology Conference 2013. Houston



荒井勇次 Yuji ARAI  
鉄鋼研究所 鋼管研究部 主幹研究員  
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



近藤邦夫 Kunio KONDO  
鉄鋼研究所 鋼管研究部長



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



平田弘征 Hiroyuki HIRATA  
鉄鋼研究所 接合研究部  
首席主幹研究員 博士(工学)



中村 潤 Jun NAKAMURA  
鉄鋼研究所 水素・エネルギー材料研究部  
材料信頼性研究部兼務 主任研究員



久宗信之 Nobuyuki HISAMUNE  
和歌山製鉄所 カスタマー技術部  
ラインパイプ技術室長



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



村瀬恒夫 Tsuneo MURASE  
和歌山製鉄所 カスタマー技術部 主幹