

ラインパイプ用高性能 UOE 鋼管

High Performance UOE Linepipes

石川 信行 ISHIKAWA Nobuyuki JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(課長)・工博
遠藤 茂 ENDO Shigeru JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(副部長)・工博
近藤 丈 KONDO Joe JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部溶接管室 主任部員(課長)

要旨

天然ガス輸送用として用いられるラインパイプに対しては、高強度化と同時に高変形能や耐サワー性など、使用環境に応じたさまざまな要求が課せられている。JFE スチールでは、次世代型厚板加速冷却装置 *Super-OLAC* と誘導加熱型のオンライン熱処理プロセス HOP (heat-treatment on-line process) を駆使した、高度な材質制御技術により、多様な高性能ラインパイプ商品を開発している。本稿では、近年開発されたラインパイプ用高性能 UOE 鋼管の特性および製造技術に関して紹介する。

Abstract:

Recent construction location of natural gas pipelines is expanding toward remote regions and regions under severe environmental conditions. This requires linepipe materials to have higher strength with properties suitable for the environment, such as high deformability or sour gas resistance. JFE Steel has developed series of high strength UOE linepipes with various excellent properties by applying cutting edge processing technologies: “Super-OLAC,” on-line accelerated cooling, and “HOP,” heat-treatment on-line process by induction heating. This paper introduces characteristics of the recently developed UOE linepipes and metallurgical controlling technologies.

1. はじめに

世界的なエネルギー需要の増大と CO₂ 排出の少ないクリーン・エネルギーへの要求から、近年天然ガスの需要が大幅に拡大している。日本は天然ガスを液化天然ガス (LNG) として輸入しているが、天然ガスの産出地から消費地または LNG 基地までの輸送にはパイプラインが使われており、ガス産出地の遠隔地化にともない長距離パイプラインの開発が盛んに進められている。このような天然ガス輸送用パイプラインのトータルコスト削減のため、操業圧力の高圧化とともに使用鋼材量の低減が可能な高強度ラインパイプに対する要求がさらに高まっている。このため、近年 API X70 および X80 グレード (API: アメリカ石油協会) の高強度ラインパイプの適用が増えており、2002 年には X100 が初めて実用化された。

一方、パイプラインの建設は寒冷地や地震地帯または高深海、サワー環境など、環境の厳しい地域へ拡大している。地震地帯や不連続凍土地帯などへ敷設されるラインパイプに対しては、高強度とともに高い変形性能が要求されている。また、高強度化のニーズはサワーガス環境で使用されるサワーラインパイプにおいても同様であり、現状 NACE

サワー仕様 (NACE International: アメリカの腐食技術者協会) では X60 または X65 グレードが主に用いられているが、低 H₂S 濃度または高 pH のマイルドなサワー環境用としては X70 グレードのラインパイプが実用化されている。サワーラインパイプは高度な製鋼、 casting 技術および TMCP (thermo-mechanical control processing) 技術が必要とされる商品であり、高強度化とともに安定した材質が要求されている。また、高深海のパイプライン開発も盛んであり、管厚が厚肉化していると同時に高強度化に対する要求も同様に高まっている。以上のように、近年のラインパイプに対しては、高強度化に加え、さまざまな要求が課せられている。JFE スチールでは、高度な材質制御技術と最新鋭の鋼板製造設備を駆使することで、多様なラインパイプ商品開発を推進している。

本稿では、近年開発されたラインパイプ用高強度 UOE 鋼管の特性および製造技術に関して紹介する。

2. ラインパイプ用厚鋼板の製造技術

2.1 加速冷却技術

高強度ラインパイプ用鋼板の製造には制御圧延と加速冷却が適用されるが、特に靱性および溶接性を確保しつつ高

強度を得るため、加速冷却工程がきわめて重要な役割を果たす。厚板への加速冷却は 1980 年に世界で初めて福山厚板工場で実機化された技術であるが¹⁾、1998 年には新しい水流制御技術によって理論限界冷却速度を実現した「Super-OLAC」が開発・設備化された²⁾。加速冷却における高い冷却速度は変態強化促進による高強度化だけでなく、組織の微細化にも有効であり、合金元素の削減と同時に高靱性化も得ることができる。そして、このような最新鋭の加速冷却装置を利用した高度な TMCP 技術によって、耐サワーラインパイプや X100 ラインパイプなど、さまざまな高強度ラインパイプ用鋼板が製造されている。

2.2 オンライン熱処理技術

前述のように、近年のラインパイプに対しては強度・靱性のみならず、耐サワー性能や高変形能などのさまざまな要求があり、用途に応じたきめ細やかな材質設計を行う必要がある。このような高強度ラインパイプの高付加価値化、高機能化を目的として、西日本製鉄所（福山地区）厚板工場にオンライン熱処理プロセス HOP（heat treatment on-line process）を設置・稼働した³⁾。HOP は加速冷却装置 Super-OLAC の後面のホットレベラーに近接して設置されたソレノイド式誘導加熱設備であり、HOP を Super-OLAC と組み合わせることによって今までにない新しい組織制御が可能となった。Fig. 1 に HOP を適用した鋼板製造時の温度履歴の一例を従来プロセスと合わせて示す。従来プロセスでは鋼板を制御圧延・加速冷却の後そのまま空冷するが、HOP 適用プロセスにおいては、加速冷却直後に誘導加熱による急速加熱を行う。これによって、変態を制御すると同時に炭化物の微細析出や均質組織化、または複相組織化など、通常の加速冷却のみでは実現できないさまざまな特性を得ることが可能となる。HOP を適用した代表的な鋼管商品としては、高強度耐サワーラインパイプ、高変形能ラインパイプ、コンダクターケーシング/ライザー用高強度鋼管などがあげられるが、HOP 適用によって板厚方向ならびに鋼板内の材質が均質化されるため、材質ばらつきが小さくさらに形状の良い鋼管が得られている。また、材質の熱的安定性が優れているため、耐 SR（stress relief

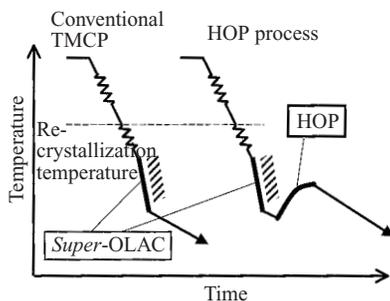


Fig. 1 Schematic temperature profile in plate production process

heat treatment) 性能または耐歪み時効性能が大幅に向上する。

3. 高強度ラインパイプ

3.1 X80 ラインパイプ

JFE スチールは、1991 年にカナダ向け X80 ラインパイプの製造を開始し、以来、5 万トンを超える X80 ラインパイプを実製造している。機械的性質の一例として、シャルピー吸収エネルギーの統計データを Fig. 2 に示す。X80 という高強度にもかかわらず、母材吸収エネルギーの平均値は 270 J であり、高い高速延性破壊停止性能を有している。また、1%の累積頻度においても母材および HAZ（溶接熱影響部）、溶接金属ともに高い吸収エネルギーを示しており、きわめて高い信頼性を有している。

3.2 X100 ラインパイプ

ラインパイプのさらなる高強度化への要求に対して、当社は 2002 年に世界で初めて CSA グレード 690（CSA：カナダ規格協会、API X100 グレード相当）という高強度のラインパイプの商用生産を行った⁴⁾。さらに、2004 年にはカナダ北部の厳寒地において冬季敷設が行われ、高い溶接施工性と母材および溶接部性能が証明されている⁵⁾。Table 1 に X100 ラインパイプの製造実績を示す。強度は規格を十分に満足するものであり、シャルピー吸収エネルギーも 200 J 以上の高い値が得られている。また、いずれのプロジェクトも凍土地盤の変動によるパイプの変形を考慮した高変形能も要求されており、X100 グレードの高強度であるにもかかわらず、管軸方向の降伏比（Y/T）は平均値で 80% 以下の低降伏比が達成されている。

X100 ラインパイプの適用は現時点ではまだ限定されているが、X100 ラインパイプの材料開発と同様にパイプラインの設計技術や利用・評価技術の開発が盛んに進められており、今後の適用拡大が期待される。

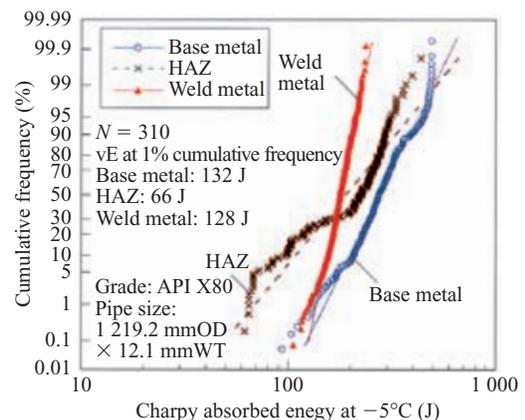


Fig. 2 Weibull distribution of Charpy absorbed energy of X80 linepipe

Table 1 Production results of X100 linepipes (all heat average)

Project	OD (mm)	WT (mm)	Tensile properties (round bar specimen)				Charpy test vE (J) at -5°C	DWTT SA% at -5°C	
			Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)			Y/T (%)
1	1 219.0	14.3	Transverse	763	838	21	91	241	100
			Longitudinal	623	801	22	78	-	-
2	914.4	13.2	Transverse	779	851	22	92	236	100
			Longitudinal	642	816	23	79	-	-

OD: Outer diameter, WT: Wall thickness, YS: Yield strength, TS: Tensile strength, EL: Elongation, Y/T: Yield ratio, vE: Charpy absorbed energy, DWTT: Drop weight tear test, SA: Share area

4. 高変形能ラインパイプ

4.1 高変形能ラインパイプの開発ニーズ

地盤の変動などによる大ひずみの発生が予想されるパイプラインの場合、高強度高靱性以外に、ラインパイプに必要となる特性として、大変形を考慮した変形吸収能が求められる。現在国内で広く用いられているラインパイプでは径厚比 D/t が 40 前後で一軸圧縮試験での限界座屈ひずみは 1% 以上の大きな変形能を示す。しかし、API X80 などの高強度ラインパイプを適用し管厚の低減を図る場合、座屈強度が低下する傾向を示すことが一般的である。したがって、高強度ラインパイプの耐座屈特性を向上させることにより、高強度ラインパイプ適用が可能となる。このような背景に鑑み、大きな座屈ひずみを有する高変形能ラインパイプを開発した。本章では、高変形能を得るための組織制御技術および開発したラインパイプの機械的性能、耐座屈特性などについて紹介する。

4.2 変形能向上のための SS カーブ制御技術

高変形能ラインパイプの開発に当たり、種々のミニモデルパイプを使った軸圧縮座屈実験を行い、パイプ素材の管軸方向の応力歪関係と座屈性能の関係を調査した。Fig. 3 に限界座屈歪とパイプの径厚比 (D/t) の関係を示す。 D/t が大きくなるほど座屈歪が低下するが、連続降伏型 (round-house type) の応力歪曲線で高 n 値のものは同じ D/t でも

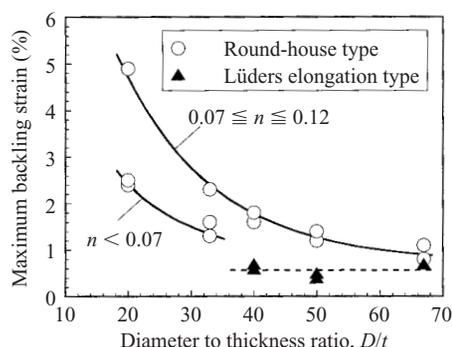


Fig. 3 Relation between maximum buckling strain and D/t of small scale pipe under uni-axial compression

高い座屈歪を示している。連続降伏型でかつ高 n 値 (低降伏比) の応力歪曲線を得るための最適マイクロ組織形態を探索するために、FEM (有限要素法) や Micromechanics の手法を用いて解析的検討を行った。Fig. 4 は単位セルモデル⁶⁾ という FEM モデルによって解析した、応力歪曲線に及ぼすベイナイト分率の影響を示す。フェライト相そのものは降伏棚を有しているが、ベイナイトを含んだ二相組織とすることで連続降伏型の応力歪曲線が得られる。また、Fig. 5 は Micromechanics による二相組織鋼の解析結果⁷⁾ であり、第二相の体積分率の増加または第二相の強度上昇によって n 値が上昇する。また、フェライト・ベイナイト組織の場合、ベイナイト相のアスペクト比が上昇する、すなわち圧延方向に伸長した組織とすることで n 値が上昇するという知見も得られている。

上述のような検討をもとに、制御圧延および Super-

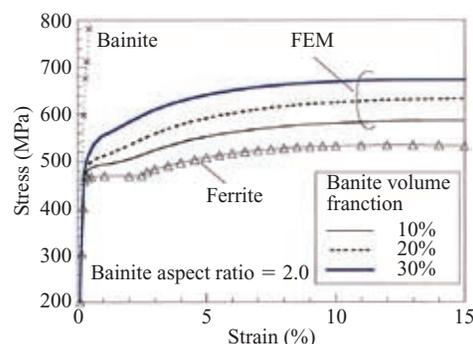


Fig. 4 Effect of bainite volume fraction on stress-strain curves of ferrite-bainite steel by FEM analysis

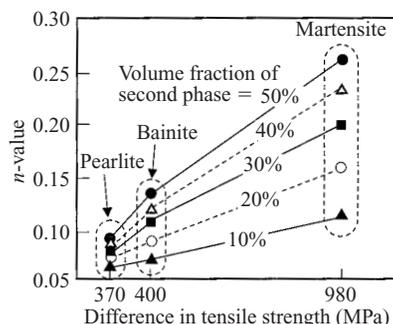


Fig. 5 Effect of difference in tensile strength of each constituent phase on n -value of dual phase steel

OLAC 条件を最適化することでマイクロ組織をフェライト-ベイナイトとし、連続降伏型で高 n 値の応力歪曲線を得ることができる。このような基本思想のもとに「JFE-HIPER」⁸⁾ が開発され、強度、靱性または変形能などの要求性能に応じてフェライト-ベイナイト組織形態の最適化がなされている。

また、Fig.5にも示すように、第二相としてより硬質なマルテンサイト相を用いることも有効であるが、通常の加速冷却による厚板製造プロセスでは十分な分率のマルテンサイト組織を含む複相組織を得ることはできない。そこで、Fig.1に示した HOP プロセスを適用することで、組織をベイナイトと MA (島状マルテンサイト) の複相組織とした新しい JFE-HIPER も開発されている⁹⁾。

4.3 高変形能ラインパイプ「JFE-HIPER」の特性と製造実績

前節で紹介した Super-OLAC による複相組織制御と応力歪曲線の最適化によって耐座屈性能に優れた高変形能ラインパイプ「JFE-HIPER」が開発され、X52 から X100 グレー

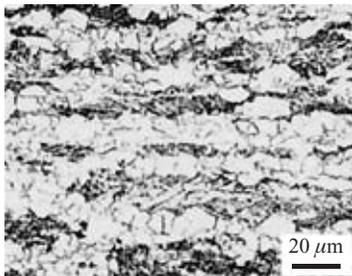


Photo 1 Microstructure of X65 grade JFE-HIPER

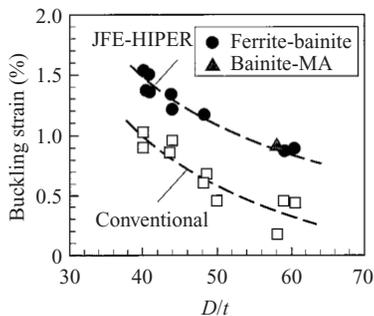


Fig.6 Relation between maximum buckling strain and D/t of full scale pipes under uni-axial compression

ドまで商品化されている。代表的なグレードの機械的特性を Table 2 に示す。いずれの鋼管も管軸方向の応力歪曲線は連続降伏型であり、高い n 値と低降伏比が得られている。Photo 1 は X65 グレードの JFE-HIPER のマイクロ組織の例である。フェライト-ベイナイトの二相組織とし、ベイナイト体積率またはその形態を最適化することで優れた変形性能が得られる。開発した高変形能ラインパイプの耐座屈性能は実管の軸圧縮実験によって確認されている。Fig. 6 に軸圧縮実験での限界座屈歪と D/t の関係を示す。JFE-HIPER は従来のラインパイプに比べ 1.5 倍以上の高い耐座屈性能を有している。

JFE-HIPER は国内のガスパイプライン用として X65 グレードが 3 000 t 以上製造されており、海外の地震地帯に敷設されるガスパイプライン向けとして X52 および X60 グレードをあわせて 44 000 t が製造された。今後、凍土・地震地帯の開発が進むことが予想されており、高変形能ラインパイプへの需要がさらに高まることが予想される。また、海底パイプラインなど大変形が予想されるさまざまなパイプラインへの適用拡大が期待される。

4.4 HOP を適用した JFE-HIPER と今後の展開

上述のようなフェライト-ベイナイト組織の JFE-HIPER の他に、HOP を適用することでベイナイト-MA (島状マルテンサイト) 組織を得ることが可能である。これは、加速冷却後の加熱処理によって未変態オーステナイトへの炭素濃縮を促進することで、微細で粒状の MA が得られることによる。HOP を適用した X80 グレードの JFE-HIPER のマイクロ組織を Photo 2 に示す。体積分率で 8% 程度の MA があり、マトリクスはベイナイト組織 (またはベイニティックフェライト組織) となっている。Table 3 は HOP 適用の X80 グレードの HIPER の機械的特性である。フェライト-ベイナイト型の HIPER と同様に軸方向の引張特性では 80% 以下の降伏比が得られている。ベイナイト-MA 型の HIPER についても実管圧縮実験を行った結果を Fig. 6 にあわせて示している。フェライト-ベイナイト型の HIPER と同様に高い耐座屈性能が得られている。

HOP を適用した HIPER の特徴の一つとして耐歪時効性能が上げられる。これは HOP による加熱時に、炭化物の微細析出などによって固溶炭素量が減少し、さらに焼もど

Table 2 Mechanical properties of JFE-HIPER

API grade	Dimention			Longitudinal tensile properties*				Impact properties	
	OD (mm)	WT (mm)	D/t	YS (MPa)	TS (MPa)	Y/T (%)	n	vE_{-10} (J)	$vTrs$ (°C)
X65	762.0	19.1	40	463	590	78	0.16	271	-98
X80	610.0	12.7	48	553	752	74	0.21	264	-105
X100	914.4	15.0	61	651	886	73	0.18	210	-143

* Round bar specimen
 OD: Outer diameter, WT: Wall thickness, D/t : OD/WT, YS: Yield strength, TS: Tensile strength, Y/T : Yield ratio,
 n : n -value, vE_{-10} : Charpy absorbed energy at $-10^{\circ}C$, $vTrs$: Brittle to ductile transition temperature

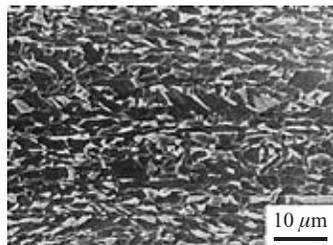


Photo 2 Microstructure of X80 grade JFE-HIPER produced by applying HOP

Table 3 Mechanical properties of JFE HIPER produced by applying HOP

API grade	Dimension			Longitudinal tensile properties*			
	OD (mm)	WT (mm)	D/t	YS (MPa)	TS (MPa)	Y/T (%)	n
X80	762	15.6	49	532	702	76	0.12
	1 016	17.5	58	581	734	79	0.14

* Full thickness strip specimen
 OD: Outer diameter, WT: Wall thickness, D/t: OD/WT, YS: Yield strength, TS: Tensile strength, Y/T: Yield ratio, n: n-value

しによって転移が回復し可動転位密度が低減することなどによる。ラインパイプは敷設前に防食のため塗装処理されるが、近年、塗装時の加熱によって歪時効を生じYS（降伏強さ）やY/Tが変化することが指摘されている¹⁰。しかし、HOPを適用した組織制御技術によって歪時効の原因となる固溶炭素および可動転位密度を低減することが可能であり、約240°Cの温度に加熱、コーティングされた後でも、Table 3に示したX80グレードのHIPERは80%以下の低降伏比が維持されている。海外のパイプラインでは高温でコーティングが施される場合が多いため、耐歪時効性能を有した高変形ラインパイプとして今後の実用化が期待される。

5. 高強度耐サワーラインパイプ

5.1 HOPを適用した耐サワーラインパイプ用鋼板製造技術

サワーラインパイプに要求される特性は、強度韌性、溶接性に加えて、H₂Sを含有する環境において水素誘起割れや硫化物応力腐食割れに対する高い抵抗力が必要とされる。そのために、極低硫、低燐鋼溶製技術と、Ca添加による硫化物形態制御技術や、Super-OLACの高冷却速度を活用した組織制御技術が開発され、X65グレードまで適用されてきた。このような基本的な材質制御技術に加え、Super-OLAC後面に設置された加熱設備であるHOPを適用することで、さらなる特性を付与することが可能となる。HOPを適用した材質の特徴として以下のものがあげられる。

- (1) 板厚方向に均一な硬度分布
- (2) 鋼板内部の材質バラツキの低減

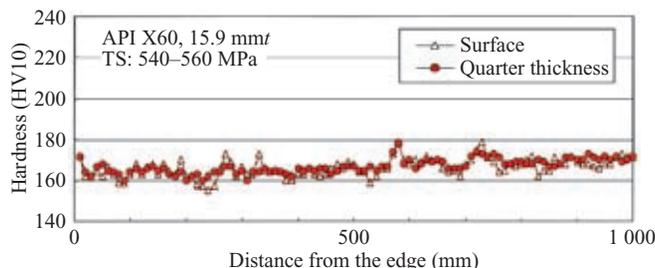
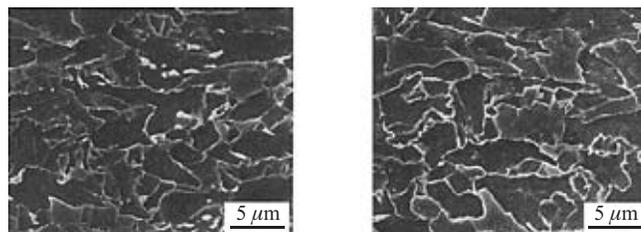


Fig. 7 Hardness distribution along the plate width of X60 sour linepipe steel produced by applying HOP



(a) Conventional steel (b) HOP
 Photo 3 Microstructure of X70 sour linepipe steel plate produced by conventional TMCP and HOP

- (3) 微細なNb主体の炭化物による析出強化
- (4) MA（島状マルテンサイト）の生成／消失制御

Fig. 7はHOPを適用して製造したX60耐サワーラインパイプ用鋼板の板幅方向の硬度分布を表層部および1/4t位置について測定した結果である。表層部の硬度は1/4t位置とほぼ等しく、さらに板幅方向に非常に均一な硬度分布を有している。これはHOPの加熱温度の均一性に起因したマイクロ組織の均質化によるものである。そのため、強度韌性などの材質バラツキが低減でき、さらにはUOE整形時の成形性が向上するため寸法精度の高いラインパイプを得ることが可能である。

また、前章で紹介したHOPを適用したHIPERにおいては、HOP加熱によってMAを生成させる技術を適用しているが、合金成分および加速冷却-HOP加熱条件を調整することで、MAの生成を抑制することも可能である。Photo 3はX70グレードの耐サワーラインパイプ用鋼板のマイクロ組織である。通常の加速冷却のみの製造方法では、高グレードの鋼になるとMAを生成しやすくなり、Photo 3(a)のようにMAが多数観察される。一方、HOPを適用した鋼板はMAの無い非常に均質なマイクロ組織となっている。これはHOP加熱時に炭化物の析出を促進することで、未変態オーステナイトへの炭素濃縮を抑制できるためである。

5.2 耐サワー X60, 65 ラインパイプの製造実績

当社では、耐サワーラインパイプへのHOP適用を2004年より実施しており、これまでに累計で40 000 t以上のX60またはX65サワーラインパイプを製造した。

Table 5 Trial production results of X70 sour linepipes by applying HOP

API grade	Pipe number	Tensile properties*1				Impact properties	DWT	HIC*2	
		YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Y/T (%)			CLR (%)	
						vE (J) at -10°C	SA% at 0°C	90°	180°
X70	1	531	613	23	87	373	100	0, 0, 0	0, 0, 0
	2	523	600	22	87	343	100	0, 0, 0	0, 0, 0

*1 ISO lecutanglar specimen, trans. direction

*2 NACE TM0284-solution A

YS: yield strength, TS: tensile strength, Y/T: Yield ratio, EL: Elongation, vE: Charpy absorbed energy,

DWT: Drop weight tear test, SA: Share area, HIC: Hydrogen induced cracking, CLR: Crack length ratio

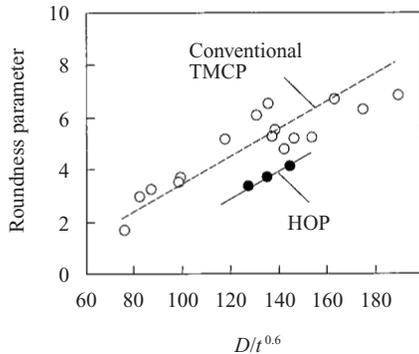


Fig. 8 Relation between roundness and $D/t^{0.6}$ for the linepipes with different manufacturing process

Fig. 8 は 1 物件ごとに得られた管端真円度のデータを統計処理した真円度パラメータ（数値が小さいほど真円度が良い）とパイプ形状の関係を示す。 $D/t^{0.6}$ が大きくなると真円度が低下するが、HOPを適用することで真円度が向上している。また、Fig. 7にも示すとおり、板厚方向の硬度分布もフラットであり、海底ラインパイプの規格である DNV OF101にも推奨されている、最高硬さ規定 ($HV \leq 220$) に対しても対応可能である。

5.3 耐サワー X70 ラインパイプの試作結果

合金成分の増加にともなって通常の TMCP で製造される高強度鋼には MA などの脆化組織が生成しやすくなる。これは HIC 試験において割れの伝播経路となりうるため、高強度の耐サワーラインパイプ開発のための課題となっている。そこで HOP を適用した均質組織化、MA 生成抑制技術によって、X70 グレードの耐サワーラインパイプ (914.4 mmOD × 19.1 mmWT) の試作を行った。Table 4, 5 に試作鋼管の化学成分および機械的特性、HIC 試験結果を示す。X70 グレードとして十分な強度を有しており、NACE solution A の HIC 試験においても CLR (crack area ratio, 割れ面積率) はいずれも 0% であった。

今後、さらなる試作検討を進め、X70 サワーラインパイプの早期の実用化を目指している。

6. おわりに

世界的なエネルギー需要増加を背景とした天然ガス輸送

Table 4 Chemical composition of trial X70 sour linepipe

(mass%)

API grade	Chemical compositions						
	C	Si	Mn	P	S	others	Pcm
X70	0.05	0.28	1.13	0.014	0.0005	Mo, Ni, Cr, Nb, Ca	0.14

$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

用ラインパイプの開発は今後も続くことが予想され、ラインパイプの高強度化と使用環境に応じた多様な特性に対する要求も継続的なトレンドといえる。さらに、長距離化するラインパイプの安全性を確保し信頼性を高めるため、使用されるラインパイプの材質の安定性には最大限の注意が払われる必要がある。これらの背景と次代のニーズにこたえるべく、高度な組織制御技術と最新鋭の鋼板製造設備を駆使し、X100 ラインパイプ、JFE-HIPER および高強度サワーラインパイプなど、さまざまな商品開発を行ってきた。これらの高強度ラインパイプは今後ますますその重要性が増すと考えられ、エネルギーの安定供給を通して世界に貢献できるものと確信している。

参考文献

- 1) 東田幸四郎ほか. 日本鋼管技報. no. 89, 1981, p. 121-132.
- 2) 小俣一夫ほか. NKK 技報. no. 179, 2002, p. 57-62.
- 3) 藤林晃夫ほか. JFE 技報. no. 5, 2004, p. 8-12.
- 4) Glover, A. et al. Proc. of OMAE 2003. OMAE2003-37429.
- 5) Glover, A. et al. Proc. of IPC 2004. IPC2004-0328.
- 6) Ishikawa, N. et al. ISIJ Int. no. 40, 2000, p. 519-527.
- 7) Huper, T. et al. ISIJ Int., no. 39, p. 288-294.
- 8) 鈴木信久ほか. NKK 技報. no. 167, 1999, p. 44-49.
- 9) Okatsu, M. et al. Proc. of OMAE 2005. OMAE2005-67149.
- 10) 藤原康浩ほか. CAMP-ISIJ. vol. 18, 2005, p. 562.



石川 信行



遠藤 茂



近藤 文