

極低温用高変形能天然ガス輸送用鋼管の開発

Development of High Strength and High Deformable Line Pipe for Ultra Low Temperature Usage

津留英司*
Eiji TSURU原卓也
Takuya HARA篠原康浩
Yasuhiro SHINOHARA重里元一
Genichi SHIGESATO猪狩玄樹
Haruki IGARI下本豪紀
Hidenori SHITAMOTO土井直己
Naoki DOI高橋伸彰
Nobuaki TAKAHASHI

抄 録

石油、石炭の化石資源に代わるクリーンなエネルギーとしての天然ガスの埋蔵場所は北極圏などの厳寒地に多く存在すること、さらに、その場所から大消費地にまでパイプラインで輸送する際、不連続凍土や地すべり、断層などの地殻変動を伴う地域を通る可能性があるために、 -40°C のような極低温にて破壊しない、かつ、変形しても破壊、座屈しない複合特性を有する鋼管が要求された。高変形能鋼管を製造するには、変形能の支配因子を定量化することが重要であり、周溶接を考慮した鋼管の曲げ変形挙動を解析可能とする高度な数値解析シミュレーション技術を開発した。これに基づき、レアメタルの適用を抑えた省合金鋼を用いて、変形能に優れた複合組織を最適化するための高精度冷却条件を確立し、極低温用高変形能天然ガス輸送用鋼管の開発に成功した。

Abstract

Long-distance gas-transmission pipelines from remote areas sometimes traverse discontinuous permafrost, and are subject to ground movement caused by repeated thaw subsidence and frost heave. In this case, a strain-based design has been applied. High grade line pipe with excellent deformability for strain-based design and excellent low temperature toughness is required. This paper describes our progress in this field with regard to metallurgical design and development based on a precise numerical simulation to analyze buckling behavior of line pipe with girth weld. Optimizing chemical composition to suppress the addition of rare earth metal and establishing TMCP conditions optimizing the volume fraction of composite microstructure were performed. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has developed high deformable line pipe for strain-based design.

1. 緒 言

天然ガスを輸送する長距離ガスパイプラインには UOE 鋼管やスパイラル鋼管などが使用される。その中でも不連続永久凍土、地震、地すべり地帯に埋設されるラインパイプの多くは UOE 鋼管であり、地盤変動に伴い、鋼管は塑性変形を被る (図1)。その典型例に不連続永久凍土地帯での地盤の融解、再凍結による曲げ・曲げ戻し変形がある。このような環境下に敷設されるラインパイプにはあらかじめ想定される歪み要求値に対して鋼管が健全性を保てる歪み許容能力、すなわち、変形能を有する必要がある、その設計手法は Strain-based Design (SBD) と呼ばれる。SBD では曲げ変形や軸圧縮・引張変形時の圧縮歪み限界 ε_c と引張歪み限界 ε_t が設計に取り入れられる。 ε_c は鋼管に局部

座屈が発生するときの歪みであり、 ε_t は ε_c 以上の歪みでのガス溶接部の許容欠陥から決定される。したがって、鋼

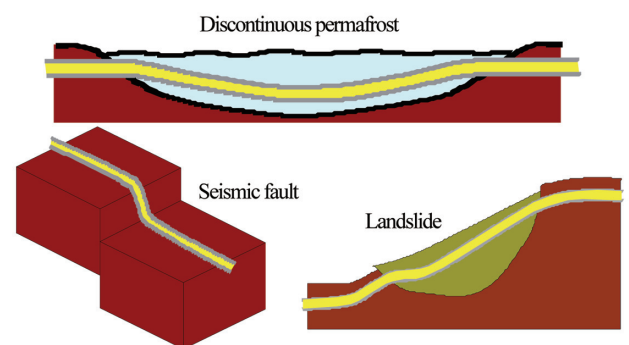


図1 地盤変動に伴う鋼管変形挙動
Pipe deformation with ground movement

管の圧縮歪み限界の向上が高変形能ラインパイプの第一の開発目標となる。

ϵ_c の支配因子は SS (応力-歪み) 曲線に代表される鋼管の機械的性質とガス溶接された鋼管の形状不整にある。機械的性質のうち加工硬化率、塑性異方性、歪み時効が ϵ_c に最も影響すると考えられ、鋼管形状としては鋼管 L (長手) 方向の形状不整 (外径・肉厚変動)、周溶接部の溶接変形、周溶接の目違いの影響が検討されてきた。影響因子を定量化するためには周溶接鋼管の曲げ変形挙動を解析するための高度な数値解析シミュレーション技術の開発が必要となる³⁾。これらの技術は新日鐵住金(株)商品の信頼性を高め、顧客に広く受け入れてもらうためのソリューション技術であると同時に鋼管自身の材料設計指針を導出するための役割も担う。

SBD では、プロジェクト毎に決定される要求歪み内で、溶接部からの破壊および管体からの座屈をさせない設計としなければならない。円周溶接部からの破壊を防止するための重要な設計は、円周溶接金属と鋼管長手方向の強度のオーバーマッチングである。通常、鋼管は防食を目的とした加熱塗装を実施するので、歪み時効による鋼管強度の上昇を抑える必要がある。鋼管強度の下限値は、必要グレードの最小強度であり、上限値は、現地溶接金属強度の最小値未満の値となり、狭レンジの強度を満足するような鋼管の製造法を検討しなければならない。一方、曲げ変形時に鋼管の座屈性能を向上させるには、鋼管の高一様伸び化かつ降伏比化が基本となる³⁾。

次に低温靱性について述べる。鋼管では、き裂発生抵抗性とき裂伝播抵抗性の2つが要求される。まず、脆性破壊が発生しないような特性を得るには、極低温にて、高い衝撃値 (例えばシャルピー吸収エネルギー) が要求されるため、低炭素化などの合金元素の最適化が重要となる。もう1つ、腐食や人為的に万一破壊が発生しても、き裂を停止させる特性が要求される。 -40°C のような極低温にて、脆性破壊でなく、延性破壊させることが大前提となる。これを達成するには、マイクロ組織の微細化が重要な解決策となる。

新日鐵住金では、4つ (低温靱性、変形能、厚肉、高強度) の複合特性を確保するために、これまで Mo や Ni などの希少高価元素を多く添加していたが、従来以上の複合特性を有し、かつ省合金化した天然ガス輸送用鋼管を開発した内容を紹介する。

2. ラインパイプの変形能支配因子と設計指針

2.1 周溶接鋼管の FEA モデルと変形能予測精度

2.1.1 形状不整モデル

曲げ座屈解析には鋼管 L 方向に変動する形状不整を FEA モデルに与える必要がある。図2に 914mm 径 (D) × 19.6mm 厚 (t)、X80 の UOE 鋼管を周溶接したときの L

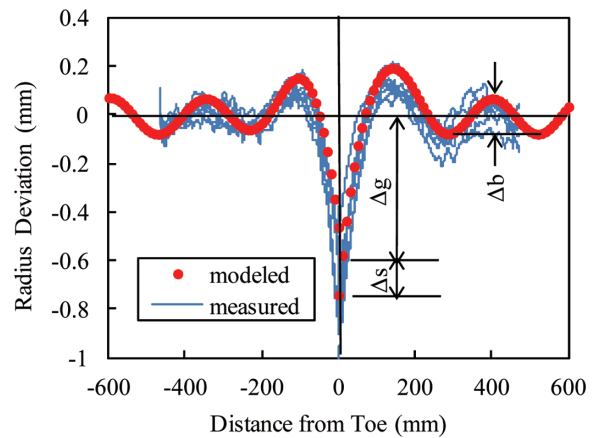


図2 周溶接された UOE 鋼管の半径変動
Radius change in girth-welded UOE pipe

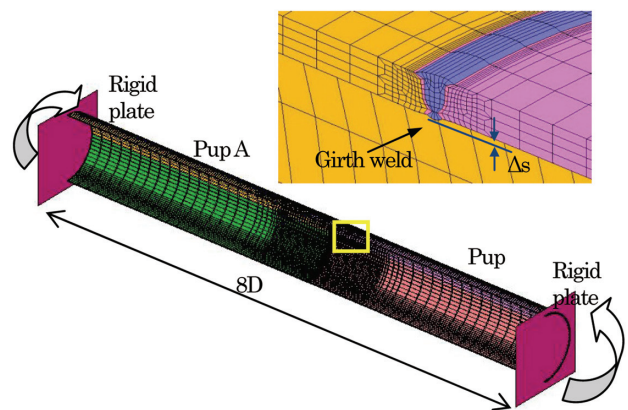


図3 周溶接鋼管の曲げモデル
Bending model for girth-welded pipe

方向半径変動を実測値とモデル形状で示す。ここで半径変動は第1項を正弦波で近似した UOE 鋼管自身が有する変動 Δb 、第2項は Timoshenko の弾性論に基づき管端にモーメントを荷重したときの変形で周溶接による変動 Δg 、第3項は周溶接での目違い Δs からなる⁴⁾。鋼管自身は一定周期で変動する形状不整を有し、周溶接近傍は溶接残留応力により縮径している。図3にはこのような形状不整を反映させた周溶接鋼管の FEA モデルを示す。鋼管には操業圧に相当する内圧を荷重した後、鋼管端面に曲げモーメントを荷重し、鋼管の曲げ座屈強度を数値解析的に評価する。管体、及び溶接部は三次元ソリッド要素でモデル化した。

2.1.2 材料モデル

形状モデルに加え、鋼管の材料特性を精度よくモデル化することは感受性解析を行う上で重要である。UOE 鋼管は造管歪みと多くの場合、出荷後に行われる耐食塗装時の加熱により SS 曲線の形状が変化すると同時に塑性異方性が強調されるようになる。図4は 914D × 19.6t、X80 の UOE 鋼管を塗装加熱 ($235^{\circ}\text{C} \times 5 \text{ min}$) 前後 (as, aged) で測定した引張 SS 曲線である。鋼管は成形まま (as) でも L (長手)

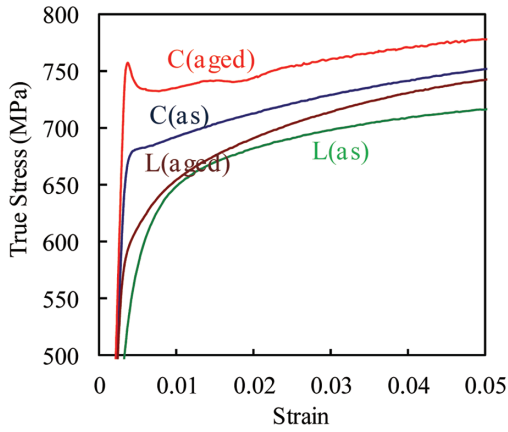


図4 UOE 鋼管の塑性異方性
Plastic anisotropy in UOE pipe

方向，C（周）方向で強度が異なる塑性異方性を呈するが，加熱後（aged）は異方性がさらに強調され，SS 曲線の形状も L 方向はラウンド型のまま，C 方向は降伏伸びを発現し，大きく異なるようになる。L，C 方向で加工硬化係数が異なる材料の降伏関数は汎用的にはなく，新たに開発することにより強度異方性が鋼管の座屈特性に及ぼす影響について解析できるようになった。

2.1.3 変形予測精度

図5に鋼管変形能を実証するための実管試験結果と前出の数値解析モデルによる変形シミュレーション結果を示す。実管試験は914D×19.6t，X80のUOE鋼管に対して塗装加熱，周溶接を考慮した3本の試験体を準備し，カナダC-FER Technologyで行った。管体降伏内圧の72%まで水圧を負荷した状態で曲げを負荷し，曲げモーメントが最大値に達した時点での曲げ歪み，

$$\epsilon_{bend} = \frac{\theta}{2\Delta L/D}$$

を圧縮歪み限界 ϵ_c と定義した。ここで θ は曲げ角度， ΔL はゲージ長さ， D は鋼管外径を意味する。周溶接鋼管ではガス溶接近傍から局部座屈が発生し，発生箇所は実験鋼管と同等の形状不整，塑性異方性を持つFEAモデルとよく一致する。

図6には各鋼管の実管試験で得られた ϵ_c とFEAシミュレーションのうち，塑性異方性降伏関数を使用した結果（ANISO）とVon Misesの降伏関数で等方性を仮定した結果（ISO）を示す。これより塑性異方性を考慮するとすべての条件に対して精度よい予測結果を与えるが，等方性材料を仮定すると予測結果は ϵ_c を過大評価することが明らかになった。さらには実験結果では加熱による ϵ_c の変化は顕著でなかったが，周溶接継手があると約20%の ϵ_c の低下が観察された。

以上のように形状不整をモデル化し，塑性異方性を考慮した降伏関数を用いることにより，周溶接鋼管の変形能を高精度に予測できることが実証でき，本技術による変形能

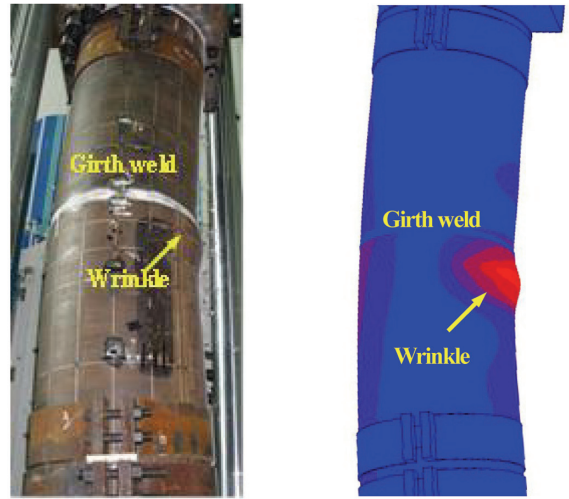


図5 周溶接鋼管の曲げ下座屈挙動と塑性歪み分布
Buckling behavior of girth-welded pipe under bending and plastic strain distribution

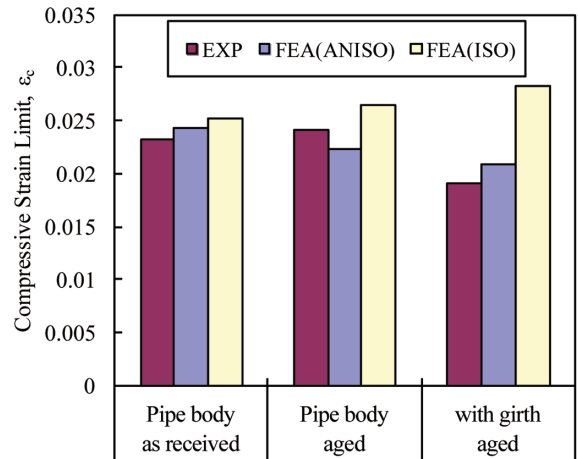


図6 圧縮歪み限界の実験値と予測値の比較
Comparison in compressive strain limit between experiment and calculation

影響因子の解析が可能となる。

2.2 変形能に影響を及ぼす機械的性質

2.2.1 L 方向の機械的性質

SBDに使用される鋼管には曲げ負荷時の主応力方向であるL方向の機械的性質が規定される。そこで ϵ_c と最も相関の高い機械的性質をFEAモデルにより評価することとした。図7は1220D×32.5t，X60の鋼管に管体降伏内圧の40%を負荷したときの ϵ_c を示す。商業生産されたUOE鋼管のうち12本のSS曲線を抽出し，Y/T（Yield to tensile ratio）， $\sigma_{1\%}/\sigma_{5\%}$ ， $\sigma_{1\%}/\sigma_{2\%}$ との相関を示している。SBDの海外プロジェクトではY/T， $\sigma_{1\%}/\sigma_{2\%}$ などが使われてきたが，本研究の使用条件下では $\sigma_{1\%}/\sigma_{5\%}$ が最も高い相関を示すことがわかった。この理由として座屈が開始するときの局部歪みが5%に達することが考えられる。したがって，高変形能ラインパイプの開発指針として $\sigma_{1\%}/\sigma_{5\%}$ の高い材料をめざし，材

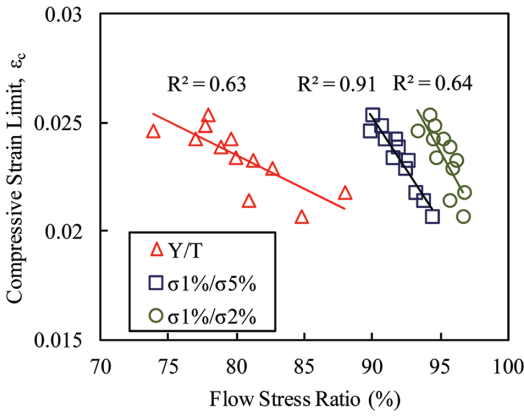


図7 圧縮限界歪みと機械的因子の相関
Correlation between compressive strain limit and mechanical factor

料開発を推進することとなる。

2.2.2 C 方向の機械的性質

塗装加熱により L 方向 SS 曲線上で発現する降伏伸びは曲げ変形能を劣化させることが指摘されており、材料開発においては加工硬化係数を高めると同時に SS 曲線のラウンド化を目指してきた。しかし、C 方向 SS 曲線に生じる降伏伸びの ϵ_c への影響については明らかではなかった。図8には各温度での加熱履歴を受けた SS 曲線を使用し、FEAにより得られる ϵ_c を等方硬化モデルと異方硬化モデルで72%降伏内圧下で比較した。同時に図には各温度でのC方向降伏伸び (C-YPE) も示す。なお、L方向SS曲線はすべてラウンド形状を呈している。図より異方硬化モデルでは加熱温度の上昇に伴い ϵ_c は低下し、200℃以上では一定となる。等方硬化モデルでは温度に伴う ϵ_c の低下は観察されない。等方硬化モデルでは ϵ_c は温度に依存しないこと、及び異方硬化モデルによる計算結果は実管試験の結果によく一致することから判断して ϵ_c の減少は加熱温度とともに上昇する C-YPE の影響と判断できる。

以上のようにL方向のみならずC方向の応力-歪み挙動も鋼管の座屈特性に影響を与えることが明らかとなった。

2.2.3 鋼管強度差の影響

商業生産を念頭においた場合、規格範囲内で鋼管には強度ばらつきを生じ、敷設されたパイプラインでは周溶接を境に鋼管強度が変化する場合がある。周溶接近傍では溶接による形状不整に加え、強度変化も生じるため局部座屈も発生しやすい。

図9は周溶接鋼管同士の降伏強度差 ΔYS と ϵ_c の関係を示す。内圧を降伏内圧の72%まで変化させ、軸歪みを拘束した条件で解析した。いずれの条件においても ΔYS が大きくなるほど ϵ_c は減少し、減少量は高内圧で初期 ϵ_c が大きいほど顕著になった。この結果はSBDに代表される塑性設計には材料特性のみならず、鋼管の強度ばらつきも考慮し

た設計の重要性を示唆し、鋼管メーカーには狭強度範囲での造り込み技術が求められる。

2.3 変形能に影響を及ぼす形状不整の定量化

図10には762D × 15.8t, X80の鋼管に対して72%の降

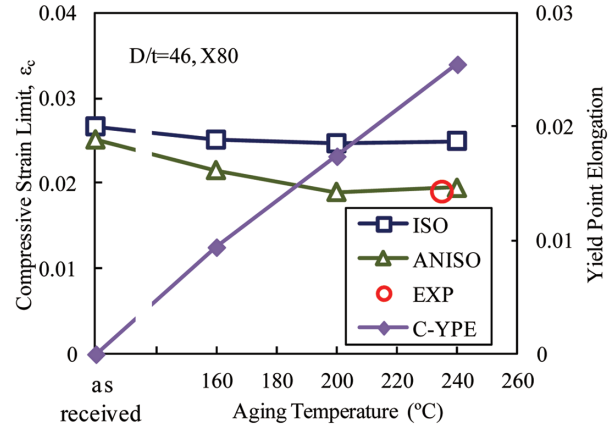


図8 圧縮歪み限界に及ぼすC方向降伏伸びの影響
Effect of C-YPE on compressive strain limit

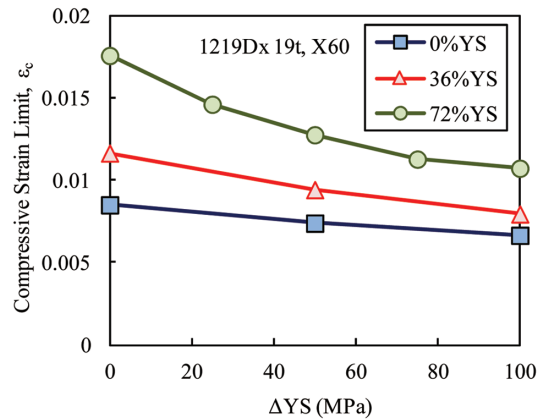


図9 圧縮歪み限界に及ぼす鋼管強度差の影響
Effect of strength mismatch on compressive strain limit

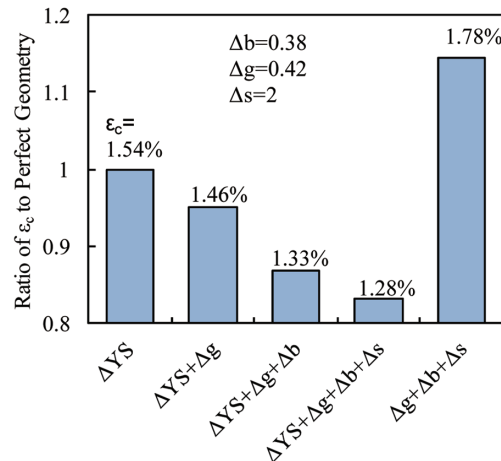


図10 形状不整と強度差が圧縮歪み限界に及ぼす影響
Combined effect of geometric imperfection and strength mismatch on compressive strain limit

伏内圧を負荷したときの形状不整毎の ϵ_c への影響を定量化している。ここで基本となる ΔYS の条件では周溶接以外の形状不整はなく、鋼管同士の強度差 ΔYS を50MPaとしている。形状不整の相乗効果（溶接縮径： Δg 、母管不整： Δb 、溶接目違い： Δs ）による ϵ_c の低下率は最大17%である。これに対し $\Delta YS = 50$ MPaでの低下率は28%と計算され、形状不整による劣化割合よりも鋼管間の強度ばらつきによる影響の方が大きいことが予見された。

以上のように実管試験と鋼管変形挙動の数値解析シミュレーションにより、周溶接されたUOEラインパイプの性能下限値が導出でき、SBDにおけるより安全で信頼性の高いパイプラインの敷設に貢献できる。

3. 高変形能ラインパイプの開発

上述したように、変形能に優れた鋼管を製造するには、以下の点を考慮した材料開発が必要である。

- 1) 鋼管L方向の加工硬化能を高める。
- 2) 鋼管C方向の降伏伸びを抑える
- 3) 鋼管間の強度のばらつきを抑える。すなわち、狭強度範囲で製造する。

以上の点を考慮した高変形能ラインパイプの開発を行った。

3.1 開発鋼の設計思想

まず、本開発鋼の設計思想について述べる。高変形能を確保するために、加工硬化能に優れたフェライト（軟質組織）とベイナイト（硬質組織）の複合組織を適用した。次に、極寒地域での適用を考慮して、 -40°C のような最も厳しい低温靱性を保証することを目的として、平均粒径 $5\mu\text{m}$ 以下（ASTM法）の微細複合組織を基本とした。新日鐵住金の高変形能鋼管には、従来にない3つの大きな特徴がある。

1つは、これまでラインパイプにて必須元素であったMoをフリーにし、鋼管の加熱塗装後の変形能を改善させた。一般に、防食のために鋼管を 200°C 以上に加熱塗装する際、歪み時効の影響を受ける。フリーな炭素量が多く存在するほど歪み時効が生じやすく、降伏比が上がり、一様伸びが低下するため、変形能が低下する。Moフリーにすると、鉄炭化物（セメントライト）が多く形成し、フリーな炭素量が著しく低下した結果、変形能が改善されることを初めて見出した。

図11にMoフリー鋼とMo添加鋼を1%の予歪みを付加した後、 240°C の時効前後での降伏応力の上昇量を示す^{6,7)}。Moフリー鋼の時効後の降伏応力の上昇量が大幅に抑制されていた。図12にMoフリー鋼とMo添加鋼の時効前のTEM（Transmission Electron Microscopy）像を示す^{6,8)}。Moフリー鋼のセメントライトはMo添加鋼よりも多く生成していた。焼入れ性の指標である $\beta^9)$ がほぼ

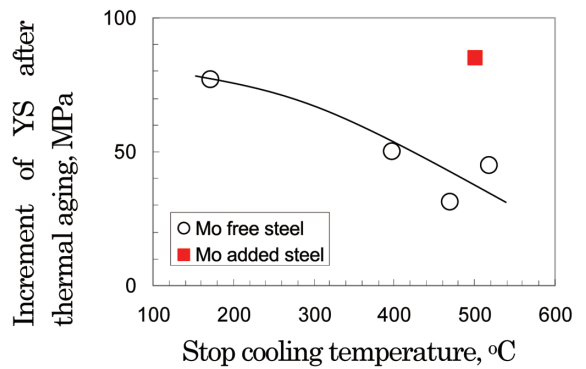


図11 Moフリー鋼とMo添加鋼のひずみ時効後の降伏応力上昇量（1%予歪み+ 240°C 加熱）^{6,7)}
Increment of YS after thermal aging for Mo free and Mo added steels (240°C thermal aging after 1% pre-strain)

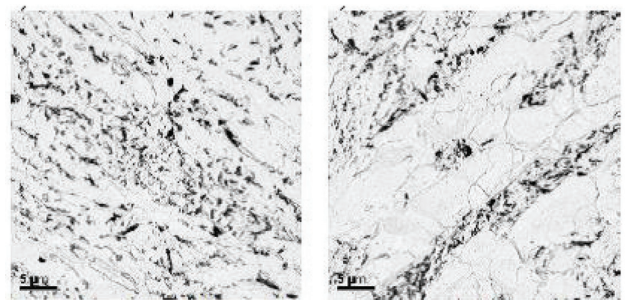


図12 MoフリーとMo添加鋼のTEM像（左図：Moフリー鋼、右図：Mo添加鋼）^{6,8)}
TEM images of replica for Mo free and Mo added steels (left photo: Mo free steel, right photo: Mo added steel)

同じであり、 γ/α 変態開始温度も同じであった。Mo添加鋼は変態停留が生じるため¹⁰⁾、室温まで冷却後、未変態 γ やマルテンサイトが生成することが知られている。本実験でも、Mo添加鋼は未変態 γ やマルテンサイトが生成していたのに対して、Moフリー鋼では、未変態 γ やマルテンサイトは多く生成せず、セメントライトが多く生成したと考えられる。

もう1つの特徴は、独自の加速冷却装置（CLC- μ ：Continuous on-Line Control- μ ）を適用し、Moフリーの強度不足を補うとともに、高精度、均一冷却を実現させ、強度の狭レンジ化を可能とした。すなわち、フェライトとベイナイトのそれぞれの組織分率を最適化させ、大量生産時に同じ組織分率を常に確保できるような緩冷却（mild accelerated cooling：MAC）プロセスを確立した。図13に緩冷却プロセスの概念図を示す^{6,7)}。これは独自の冷却技術である。その結果、強度の狭レンジ化（引張り強度50MPa以内）が達成できた。

最後に、極低温にて高靱性を確保するために、厚板圧延条件の各工程の最適化と加速冷却の高精度化、均一冷却を行い、平均粒径 $3\mu\text{m}$ 以下（ASTM法）という超微細組織を得ることに成功した。図14に代表的なマイクロ組織を示す（SEM：Scanning Electron Image）^{6,11)}。

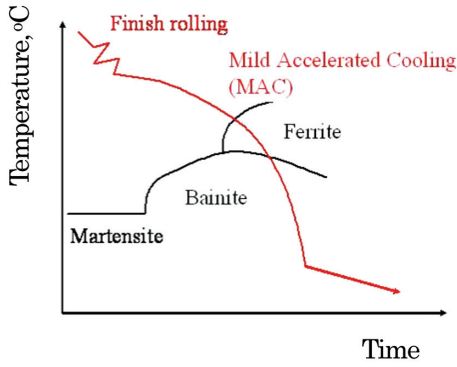


図 13 CLC- μ での冷却中の温度時間曲線^{6,7)}
Cooling curve during accelerated cooling

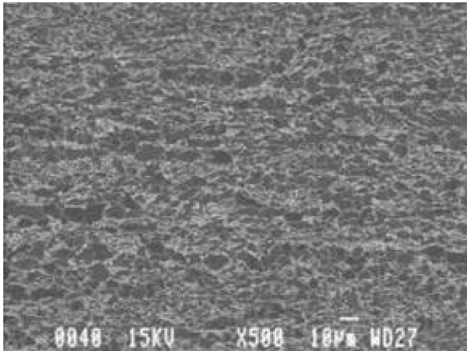


図 14 鋼管のSEM像^{6,11)}
SEM image showing microstructure of high deformable pipe

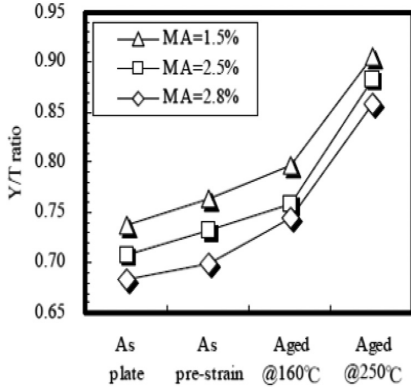


図 15 鋼管の降伏比に及ぼすM-Aの影響¹²⁾
Effect of M-A content on yield to tensile ratio

MoフリーにしてNiを最小限に添加した系にて、高精度冷却条件にて製造した高変形能ラインパイプ用鋼管は、APIグレードX60からX100までの鋼管製造を可能とした。

なお、X100についてはフェライト（軟質組織）とベイナイト（硬質組織）に加えて、M-A（Martensite-Austenite Constituent）を制御した複合組織とした鋼管の開発も行っている（図15）¹²⁾。ただし、M-Aの積極的な採用は溶接熱影響部の靱性に影響を与えるので、M-A分率の制御が重要となる。

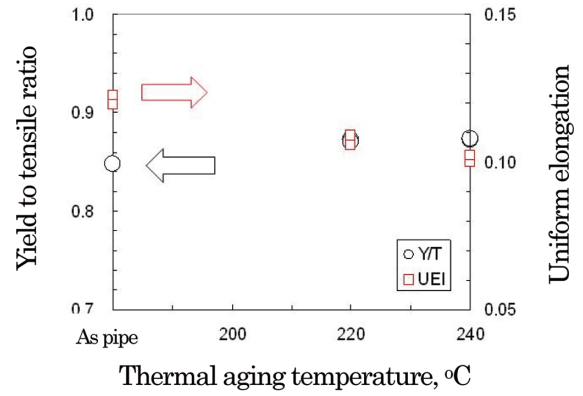


図 16 APIグレードX60鋼管のひずみ時効特性^{6,11)}
Mechanical properties before and after thermal aging of API grade X60 high deformable line pipe

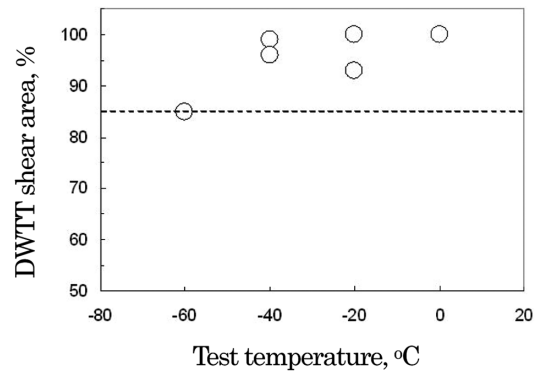


図 17 APIグレードX60鋼管のDWTT延性脆性遷移温度^{6,11)}
DWTT properties of API grade X60 high deformable line pipe

3.2 開発鋼の特性

ロシア向けに製造したAPIグレードX60鋼管の歪み時効前後の機械的性質について述べる。図16に240°Cでの歪み時効前後での降伏比と一様伸びを示す^{6,11)}。降伏比は歪み時効前後とも88%以下で、かつ、一様伸びは10%以上を達成した。低温靱性については、厚板圧延の適正化によって、平均粒径3 μ m以下という超微細組織を創製して、-40°Cでの極低温での靱性を確保した。図17にAPIグレードX60鋼管でのDWTT（Drop Weight Tear Test）の延性脆性遷移曲線を示す^{6,11)}。本鋼管の32mm厚の厚肉鋼管のDWTT延性破面率を確保することは、極めて困難であるが、本鋼管は微細組織を有しているため、-60°Cの極低温でも85%の延性破面率を満足することができた。

3.3 実用化状況

APIグレードX60からX100までの省合金化型天然ガス輸送用鋼管を開発した。このうち、API X60グレードについては、2009年ロシア向けに1.7万トン製造した（図18）^{6,11)}。また、APIグレードX100については、カナダに5km敷設した^{6,13)}。直近、ミャンマー向けAPIグレードX70ラインパイプ0.5万トンを受注し、製造を完了した¹⁴⁾。



図 18 API グレード X60 鋼管の敷設状況⁶⁾
Field construction line of API grade X60 high deformable line pipe

4. 結 言

塑性変形を許容できる天然ガス輸送用鋼管の開発には汎用鋼管にさらに変形能という機能を付加した材料開発と鋼管性能に対する信頼性を実証するソリューション技術が不可欠である。新日鐵住金では、これらの技術を融合させた高変形能 UOE ラインパイプの商業生産に成功した。その根幹となった研究成果を以下に示す。

- 1) 周溶接した UOE 鋼管の形状不整、塑性異方性を考慮した数値解析モデルを構築した。同モデルによる曲げ座屈特性の解析では実管試験から得られる座屈限界とのよい一致を見た。
- 2) 開発モデルによる感受性解析から座屈抵抗を支配する材料因子、形状因子が定量化でき、圧縮歪み限界の下限値の導出が可能になった。
- 3) 変形能支配因子の定量化に基づき、レアメタルの適用を抑えた省合金鋼を用いて、変形能に優れた複合組織を最適化するための高精度冷却条件を確立し、極低温用高変形能天然ガス輸送用鋼管の開発に成功した。

参考文献

- 1) Barbas, S., Weir, M.: Strain-based Design Methodology for Seismic and Arctic. Proc. of the Seventeenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Lisbon, 2007, p. 3037-3080
- 2) Shitamoto, H. et al.: Effect of Full Scale Pipe Bending Test Method on Deformability Results of SAW Pipes. Proc. of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Rhodes, Greece, 2012, p. 557-563
- 3) Tsuru, E., Shinohara, Y., Asahi, H.: Evaluation Precept for Strain Capacity of High Strength UOE Line Pipes Used in Strain-based Design Applications. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 18 (3), 176 (2008)
- 4) Tsuru, E. et al.: Analytical Methods for Girth-welded UOE Line Pipes with Plastic Anisotropy and Geometric Imperfections to Predict the Deformation Limitation. Proc. of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Maui, Hawaii, 2011, p. 637-645
- 5) Tsuru, E., Yoshida, K., Shirakami, S., Kuwabara, T.: Numerical Simulation of Buckling Resistance for UOE Line Pipes with Orthogonal Anisotropic Hardening Behavior. Proc. of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Vancouver, 2008, p. 104-110
- 6) 原卓也, 篠原康浩, 重里元一, 津留英司: まてりあ. 52 (2), 77 (2013)
- 7) Shinohara, Y., Tsuru, E., Asahi, H., Hara, T., Doi, N., Ayukawa, N., Murata, M.: Development of a High Strength Steel Line Pipe for Strain-based Design Applications. Proc. of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Lisbon, 2007, p. 2949-2954
- 8) Shigesato, G., Shinohara, Y., Hara, T., Sugiyama, M., Asahi, H.: Thermal aging during coating of X80 High Strength Steel for Line Pipe. Proc. of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Lisbon, 2007, p. 2983-2987
- 9) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼. 74, 910 (1988)
- 10) 高橋健二, 宮本五郎, 古原忠: 材料とプロセス. 20 (6), 37 (2008)
- 11) Hara, T., Shinohara, Y., Hattori, Y., Muraki, T., Doi, N.: Development and Mass Production of X60 High Deformable Line Pipe Suitable for Strain-based Design. Proc. of the Seventeenth (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Hawaii, 2011, p. 575-580
- 12) Igari, H., Nakamura, H., Okaguchi, S.: Metallurgical Design and Microstructure for High Deformability of X100 Linepipe Steel. Proc. of the Seventeenth (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Hawaii, 2011, p. 570-574
- 13) Hara, T., Shinohara, Y., Asahi, H., Terada, Y., Doi, N.: Metallurgical Design and Development of High Deformable X100 Line Pipe Steels Suitable for Strain-Based Design. Proc. of International Pipeline Conference. IPC2008-64234, ASME, Calgary, 2008
- 14) Shinohara, Y., Hara, T., Iwasaki, Y., Muraki, T., Doi, N.: Mass Production of X70 Highly Deformable Line Pipe for Strain-based Design. Proc. of the Eighteenth (2013) International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Anchorage, 2013, p. 520-524



津留英司 Eiji TSURU
鉄鋼研究所 鋼管研究部
主幹研究員 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



原 卓也 Takuya HARA
君津技術研究部長 博士(工学)



篠原康浩 Yasuhiro SHINOHARA
君津技術研究部 主幹研究員



重里元一 Genichi SHIGESATO
先端技術研究所 解析科学研究部
上席主幹研究員 博士(工学)



猪狩玄樹 Haruki IGARI
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部



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



土井直己 Naoki DOI
君津製鉄所 品質管理部 主幹



高橋伸彰 Nobuaki TAKAHASHI
鹿島製鉄所 鋼管部 主幹