



## 解説

受賞技術-21

# 耐座屈性能に優れたパイプライン用鋼管の開発

Development of High Strength Linepipe with Excellent Buckling Resistance

JFEスチール(株)スチール研究所  
所長  
(現 JFEテクノリサーチ(株))

津山青史  
Seishi Tsuyama

JFEスチール(株)スチール研究所  
研究企画部 部長  
(現 JFEスチール(株)技術企画部)

遠藤 茂  
Shigeru Endo

JFEスチール(株)スチール研究所  
界面科学研究部  
部長

石川信行  
Nobuyuki Ishikawa

JFEスチール(株)厚板セクター部  
主任部員(部長)

近藤 丈  
Joe Kondo

JFEスチール(株)  
西日本製鉄所(福山)  
鋼材商品技術部 主任部員

村岡隆二  
Ryuji Muraoka

## 1 はじめに

地震凍土地帯に敷設されるパイプラインでは、地盤変動による座屈や破壊が懸念されており、鋼管の耐座屈性能の向上がパイプラインの安全性確保のための課題となる。従来のパイプライン設計では、座屈防止のために管厚を厚くする方法が採用されてきた。この場合、より強度の高い鋼管に置き換えて鋼管薄肉化によるパイプラインのコスト削減は困難であった。本研究開発では、最新の厚板加工熱処理技術を駆使した複相組織制御により、従来の鋼管に比べ優れた耐座屈性能が得られる鋼管を開発し、地震・凍土地帯に敷設されるパイプライン用鋼管として実用化された。本稿ではその開発の概要について紹介する。

## 2 開発思想

本研究での開発要素とそれらの関係性を図1に示す。鋼管は一つの構造物であり、その座屈現象は材料の機械的特性、特に、応力ひずみ関係によって支配されている。また、材料の機械的特性はそのマイクロ組織に依存しており、鋼材の化学組成や圧延、熱処理などのプロセス条件による組織制御が行われる。効率的な開発を行うためには、これらの技術要素の連続性を理解した上で、①鋼管の耐座屈性能と鋼材の引張特性の関係、②鋼材の引張特性とマイクロ組織の関係、③マイクロ組織と鋼板製造条件の各ステージでの関係解明を進めることが重要である。これらの中で、材料のマイクロ組織からその機械的特性を解明する研究は、従来は実験を中心に行われてきたが、本研究ではFEM解析等で組織構造とその変形挙動を予

測する技術を新しく開発し、マイクロ組織の最適化を行った。

## 3 研究開発の内容と特徴

### (1) 鋼管の耐座屈性能と引張特性の関係解明

はじめに、応力ひずみ曲線と管径管厚比 ( $D/t$ ) の異なる各種鋼管を用いて、軸圧縮座屈実験を行った。図2に限界座屈ひずみと  $n$  値との関係、および応力ひずみ曲線の模式図を示す<sup>1)</sup>。一般的に管径 ( $D$ ) が小さく管厚 ( $t$ ) が厚い方が座屈しにくく、 $D/t$  の小さな鋼管の限界座屈ひずみが高いが、同じ  $D/t$  でも  $n$  値が

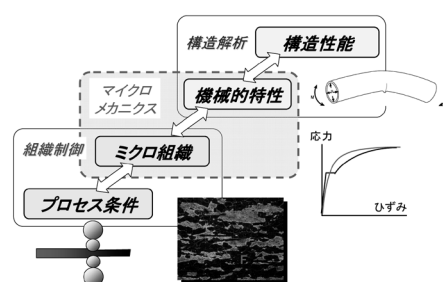


図1 研究開発要素とそれらの関係

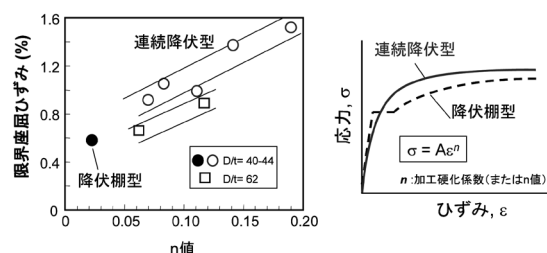


図2 限界座屈ひずみと  $n$  値の関係

高いほど限界座屈ひずみが高い。また、降伏棚を有する応力-ひずみ曲線の場合は限界座屈ひずみが低い。よって、座屈を防止するためには連続降伏型で $n$ 値の高い鋼材が有効である。

## (2) 計算科学を用いた組織の最適化

### —複相組織鋼の引張特性制御—

次に、鋼材のマイクロ組織と鋼材の引張特性の関係について解析的な検討を行った。高い加工硬化特性を有する組織として、制御圧延と加速冷却で製造可能なフェライト-ベイナイト2相組織鋼を取り上げ、マイクロ組織をモデル化してその変形挙動を解析する。軟質相中に硬質相が分散している3次元構造は、その連続性と対称性から図3のような単位セルとしてモデル化することで、2次元軸対称要素で解析が可能となる<sup>2,3)</sup>。本モデルにより異なる組織分率のフェライト-ベイナイト鋼の応力-ひずみ曲線および加工硬化特性を解析した結果を図4に示す<sup>3)</sup>。FEM解析は実験結果とよく一致しており、本解析モデルを用いることで複相鋼の加工硬化特性を予測することが可能といえる。また、 $n$ 値はフェライトまたはベイナイト単相では低く、ベイナイト分率が40%で極大になっている。

一方、鋼材の製造プロセスによって硬質第2相としてベイナイト相以外にも様々な組織を選択できる。そこで、第2相をパーライトやマルテンサイトとした場合についても解析した。図5に $n$ 値に及ぼす軟質相と硬質相の強度差および硬質相の分率の影響をいわゆるマイクロメカニクス的手法で解析した結果を示す<sup>4)</sup>。いずれの硬質相でも、その分率の増加によって $n$ 値が増加しているが、軟質相との強度差が大きいほど $n$ 値への影響が大きくなる。よって、第2相をマルテンサイトとすること

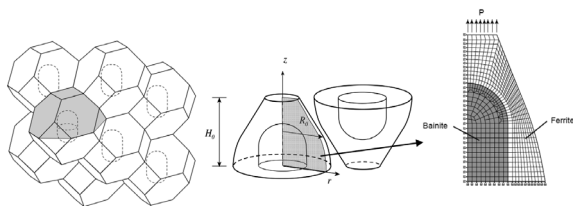


図3 応力-ひずみ曲線解析のための計算モデル

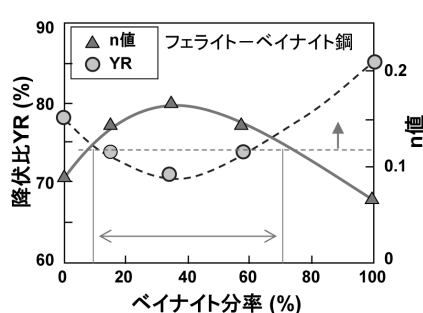
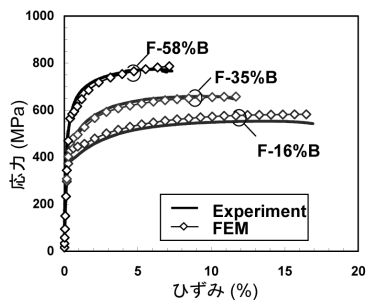


図4 応力-ひずみ曲線および加工硬化特性の解析結果

で、少ない分率で効果的に $n$ 値を高めることができると言える。

## (3) オンライン熱処理による革新的複相組織創製技術

次に、素材となる鋼板製造において最適な複相組織を得るための条件を検討する。鋼板製造プロセスを図6に示す<sup>5)</sup>。フェライト-ベイナイト組織鋼は制御圧延後に $Ar_3$ 温度以下から加速冷却を行うことで得ることが可能であり、フェライト-ベイナイト型の高変形鋼管は国内ガス導管をはじめ多くの製造実績がある<sup>6)</sup>。しかし、海外では防食用の外表面コーティングが $200\sim 250^{\circ}C$ 程度の高温で施されるため、歪み時効によって変形性能が劣化する問題があった。この課題を解決するために、鋼板製造時の加速冷却後にオンライン熱処理「HOP<sup>®</sup> (Heat-treatment On-line Process)」を適用する技術を開発し、複相組織化と歪み時効の低減が可能となった。

図7に加速冷却とオンライン熱処理を利用した組織制御の模式図を示す<sup>7)</sup>。制御圧延の後の加速冷却を行う際にベイナイト変態途中で加速冷却を停止し直ちに加熱処理を行うと、未変態オーステナイトへの炭素の濃化が生じ、加熱後の空冷過程でMA (島状マルテンサイト) が生成するため、ベイナイト中にMAが分散した複相組織が得られる。また、加熱過程でNb, Mo等の炭化物の析出も生じるため、固溶C量が大幅に低減され歪み時効を抑制することが可能となった<sup>7,8)</sup>。このような軟質なベイナイト相に硬質なMAが分散した複相組織は従来のプロセスでは得られない組織である。

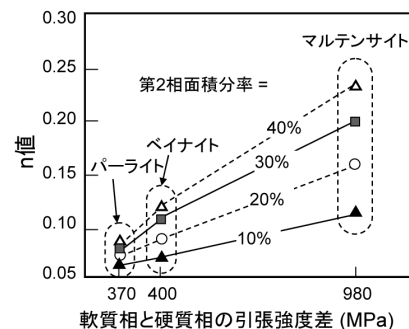


図5  $n$ 値に及ぼす第2相の影響

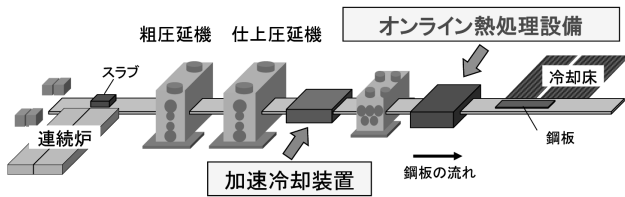


図6 厚鋼板製造ライン (JFE スチール西日本製鉄所 (福山地区))

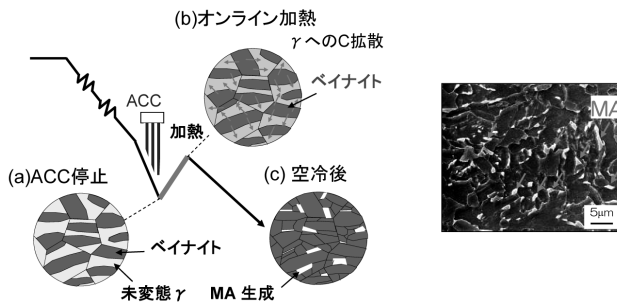


図7 オンライン熱処理による複相組織形成プロセス

#### (4) ベイナイト-MA組織鋼の機械的特性と実用化

ベイナイト-MA組織鋼およびフェライト-ベイナイト組織鋼のコーティング加熱による強度特性の変化を図8に示す<sup>7)</sup>。ベイナイト-MA組織鋼ではコーティング加熱によって降伏強度YSがわずかに上昇するがその変化は小さく、図9に示すように、応力ひずみ曲線の形状も大きく変化せず、コーティング後も高n値である。一方、フェライト-ベイナイト組織鋼では、コーティング加熱によりYSが大幅に上昇し、n値も低下している。MAは溶接熱影響部などでは脆性破壊起点となり靱性を劣化させることが知られているが、オンライン熱処理によって得られるMAは微細な粒状であり、母材靱性には悪影響を及ぼさないことが示されている<sup>7)</sup>。また、MAが異なる方位関係を有する複数のベイナイト相に囲まれているため、ベイナイト/MA界面でのき裂伝播が抑制される事も知られている<sup>9)</sup>。

ベイナイト-MA組織制御による鋼管は実管座屈試験等によって優れた耐座屈性能が実証され<sup>7)</sup>、API X80グレード (TS550MPa以上) の高変形鋼管が中国やカナダの地震凍土地帯の天然ガス輸送用パイプラインに適用されている<sup>10)</sup>。

## 4 まとめ

本開発では、鋼管の耐座屈性能が形状 (管径管厚比D/t) だけでなく、鋼材の加工硬化特性 (n値) の影響を大きく受けることをいち早く解明し、高n値を達成するための最適なミクロ組織形態を計算科学的手法により導出した。そして、鋼板製造プロセスでの制御圧延と加速冷却、さらにはオンライン熱処理を活用することで軟質相と硬質相からなる最適な複相組織を得る技術、およびコーティング加熱による材質変化

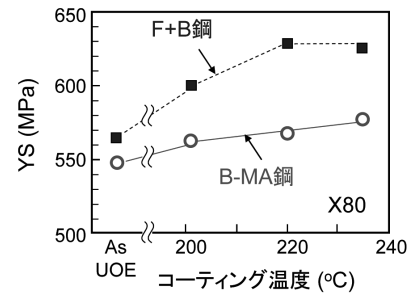


図8 コーティング加熱によるYS変化

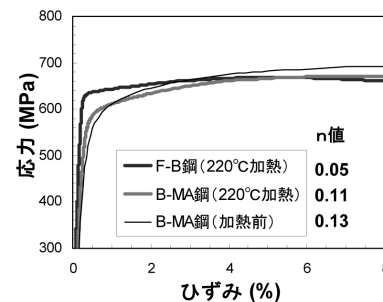


図9 コーティング加熱による応力-ひずみ曲線の変化

を抑制する技術を開発した。これらにより、高い耐座屈性能を有する高強度X80鋼管を世界で初めて開発し、カナダや中国などの地震凍土地帯に大量に適用された。

#### 参考文献

- 1) N.Ishikawa, M.Okatsu, S.Endo and J.Kondo : Proc.6th Int.Pipeline Conference, (2006), IPC2006-10240.
- 2) N.Ishikawa, D.M.Parks, S.Socrate and M.Kurihara : ISIJ Int., 40 (2000), 1170.
- 3) 石川信行, 末吉仁, 遠藤茂, 鹿内伸夫 : 鉄と鋼, 91 (2005), 809.
- 4) T.Hüper, S.Endo, N.Ishikawa and K.Osawa : ISIJ Int., 39 (1999), 288.
- 5) 藤林晃夫, 小俣一夫 : JFE技報, 5 (2004), 8.
- 6) 遠藤茂, 栗原正好, 鈴木信久, 加藤昭彦, 吉川正樹 : まてりあ, 39 (2000), 166.
- 7) T.Shinmiya, N.Ishikawa, M.Okatsu, S.Endo, N.Shikanai and J.Kondo : Proc.17th Int.Offshore and Polar Engineering Conference, (2007), 2963.
- 8) 岡津光浩, 石川信行, 鹿内伸夫 : JFE技報, 17 (2007), 20.
- 9) S.Tsuyama, H.Nakamichi, K.Yamada and S.Endo : ISIJ Int., 53 (2013), 317.
- 10) R.Muraoka, J.Kondo, L.Ji, Y.Feng, N.Ishikawa, M.Okatsu, S.Igi, N.Suzuki and K.Masamura : Proc.8th Int.Pipeline Conference, (2010), IPC2010-31556.

(2015年10月7日受付)