

表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプの製造

Mass Production of High Strength Linepipe with Low Surface Hardness for Severe Sour Services

村岡 隆二 MURAOKA Ryuji JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区） 鋼材商品技術部 溶接管室長（副部長）
藤原 高礎 FUJIWARA Takaki JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区） 鋼材商品技術部 厚板室 主任部員（課長）
松井 穰 MATSUI Yutaka JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員（副部長）
嶋村 純二 SHIMAMURA Junji JFE スチール スチール研究所 構造材料研究部 主任研究員（課長）・博士（工学）

要旨

表層硬さに起因した硫化物応力腐食割れ（Sulfide stress cracking: SSC）によるサワーラインパイプのリーク事故を起点とし、TMCP 鋼の耐 SSC 性能の向上を狙いとして、材料の造り込み（QC）対策と品質保証（QA）対策を講じた、表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプ用 UOE 鋼管の製造方法を確立し、お客様のミル承認を取得し、商業生産を完了した。QC 対策として、冷却速度制御により表層組織をグラニューラーベイナイト主体組織とすることにより鋼板全面にわたり表層の硬さを低減し、QA 対策として、鋼板表層全面の温度管理と鋼板全面の表層硬さ検査を実施した。X60 級表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプを大量生産し、製造された UOE 鋼管は、鋼板全数の表層硬さ検査実績ならびに SSC 試験の工程試験結果から、優れた耐 SSC 性能を示した。

Abstract:

Based on the accident of severe sour service pipeline due to SSC caused by surface hardness, high strength UOE pipe manufacturing method for linepipe with low surface hardness for severe sour services was established aiming at the improvement of SSC resistance property of TMCP steel, with countermeasures for both quality control (QC) and quality assurance (QA). The commercial production was completed after obtaining the Customer mill approval. As a QC countermeasure, granular bainite main structure of low hardness was introduced in the whole surface by cooling rate control, and temperature control and surface hardness inspection in the whole surface of steel plate were implemented as a QA countermeasure. This paper presents our achievements of mass production of Grade X60 UOE pipe for linepipe with low surface hardness for severe sour services. The manufactured pipes showed excellent SSC resistance property from both surface hardness inspection results of all plates and SSC tests results of the pipes.

1. はじめに

天然ガスを輸送するパイプラインにおいて、輸送効率の向上のため大径化と高強度化が進められており、製造コストならびに溶接性の観点から、パイプラインに使用されるラインパイプには、一般的に制御圧延・制御冷却プロセス（Thermo-mechanical control process: TMCP）を適用した鋼材が使用されている。硫化水素（ H_2S ）を含む天然ガス（サワーガス）を輸送する場合には、ラインパイプの要求性能として、強度、韌性に加え、水素誘起割れ（Hydrogen induced cracking: HIC）や硫化物応力腐食割れ（Sulfide stress cracking: SSC）に対する十分な耐性が要求される。そのため、高強度サワーラインパイプに用いられる厚鋼板は、HIC の起点となる介在物や偏析を極限まで低減し、さらにミクロ組織を微細なベイナイト組織とすることで強度、

韌性と耐 HIC 性能を両立させている^{1,2)}。一方、SSC 感受性は鋼材表層硬さと相関があることが報告されており^{3,4)}、サワーガス環境で使用されるラインパイプには表層硬さの上限値が規定されている⁵⁾。サワーガス輸送パイプラインでは、2013 年に表層の硬さが起因となって発生した SSC によるリーク事故が起こっており、TMCP 鋼での耐 SSC 性能を再評価する動きが出てきている^{6,8)}。オイルメジャー主体で構成された国際ガス生産者協会 IOGP（International Association of Oil & Gas Producers）により作成されたラインパイプの補足仕様 S-616⁹⁾には、表面から 0.25 mm の位置での表層硬さを低荷重で測定することが記載されている。一般的なラインパイプ規格である API 5L でも、低 pH 環境で使用されるサワーラインパイプには、お客様からの要求があれば表層硬さ検査を実施することの規格化が進められており、表層硬さ厳格仕様のサワーラインパイプの需要は拡大すると考えられる。

TMCP 鋼の技術革新は、圧延後の加速冷却プロセスの導

入により大きく前進し、冷却速度の高速化により厚鋼板の高強度化と高靱性化が可能となった¹⁰⁻¹²⁾。一般的に、加速冷却プロセスは鋼板を表面から水で冷却するプロセスであり、鋼板表面から 0.5 mm 以下の表層近傍での冷却速度は板厚中心よりも速くなり、TMCP 鋼では、ハードスポットと呼ばれる、局部的に表層硬さが硬くなる部分が発生する可能性がある。このハードスポットと SSC との関連性が議論されており^{6,7)}、SSC のリスクを最小限に抑えるには、ハードスポットの生成を抑え、鋼板全体に均一な表層硬さ分布を確保するための、高精度な冷却制御技術が必要となっている。

JFE スチール西日本製鉄所（福山地区）厚板工場では、冷却の均一性と冷却速度の高精度コントロールを可能とする制御冷却技術 *Super-OLAC*[®]-A を 2011 年に導入し、多種多様な高性能鋼板およびラインパイプ用鋼板に適用してきた¹¹⁾。高強度サワーラインパイプについても、*Super-OLAC*-A を適用し、鋼板表層部を軟質なグラニュラーベイナイト主体組織として、鋼板全面にわたり表層硬さを低減した、表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプを開発した¹³⁾。

また、ハードスポットに対する品質保証として、加速冷却前の鋼板表層全面の温度管理とともに、鋼板表層硬さ測定装置を導入し、鋼板表層全面における表層硬さの保証体制を確立し、お客様の事前ミル承認を取得した。

本稿では、まず、表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプの製造技術に関し、造り込み（QC）と品質保証（QA）のそれぞれの観点で確立した技術内容を示す。次に、X60 級表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプ用 UOE 鋼管を大量生産した製造実績について報告する。

2. 表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプの製造技術

2.1 造り込み（QC）対策

サワーラインパイプの材料設計では、SSC の発生を回避するため、NACE/ISO 15156-2 規格に規定されているような硬さ制限があり、炭素鋼や低合金鋼では 250 HV10 の硬さ上限が規定されている。また、一般的にラインパイプの規格である API 5L には、パイプ内外面の表面から 1.5 mm の位置で、硬さが 250 HV10 以下であることが規定されている。一方、近年のサワーラインパイプでの表層硬さに起因する SSC による事故以来、TMCP で製造するラインパイプ鋼の表層硬さを従来の 10 kgf の荷重で硬さ測定することは、圧痕サイズの観点から困難であるため、0.5 kgf の低荷重で測定することがラインパイプの補足仕様である IOGP S-616⁹⁾ に記載されている。

JFE スチールでは、サワーラインパイプの表層の硬さ低減を達成するため、冷却速度の高精度コントロールが可能な制御冷却技術 *Super-OLAC*-A を用いて、鋼板表層での冷却速度を鋼板全面で 50℃/s 以下に制御し、表層組織を軟質の

グラニュラーベイナイト主体組織とした。これにより、高強度を確保しつつ、表層の硬さを低減したサワーラインパイプ用鋼板を製造した¹³⁾。

2.2 品質保証（QA）対策

2.2.1 全面温度計による温度管理

厚板製造での加速冷却設備 *Super-OLAC*-A の、鋼板装入側の設備レイアウトを図 1 に示す。鋼板表面全体をグラニュラーベイナイト主体組織とするための QA 対策として、加速冷却設備の入側に全面温度計を設置し、Ar₃ 点以上の冷却開始を鋼板全面で保障する自動監視システムを導入した。

2.2.2 鋼板表層硬さ測定装置導入による硬さ保証

鋼材表層におけるハードスポットの有無を検査することを目的に、新しい非破壊検査技術を開発し導入した。新しい非破壊検査技術の原理を説明する。鋼の機械的特性は電磁気的特性と相関があることが一般的に知られていた¹⁴⁻¹⁵⁾。たとえば、磁場と磁束密度の関係である BH カーブの形状が硬さなどの鋼機械的特性に応じて変化する現象が報告されている¹⁶⁻¹⁷⁾。

このような現象に着目して、新たに開発、導入した検査装置は、ヨークとコイルで構成されたセンサを用いて電磁気特性を計測し、計測された電磁気特性を解析して硬さを評価することによりハードスポットの有無を検査するものである。具体的には、図 2 に示すように、低周波信号と高周波信号を重畳した信号によりセンサのドライブコイルを駆動して磁場を発生させ、電磁気特性によって変化した磁場をレシーブコイルで計測する。得られた計測信号から複数の特徴量を抽出して、事前に構築した硬さと電磁気的な特徴量の関係に基づく評価モデルを用いて硬さを評価する。電磁気特性から硬化部を評価する計測装置¹⁷⁻¹⁹⁾は数多くあるが、磁場の変化を複数の特徴量におとしこみ、それら特徴量と組織、硬さとを結びつけ評価することにより、より精緻に硬さを評価できる技術を確立した。

写真 1 に、表層硬さ検査の様子を示す。検査装置は検査員が手押しで検査するトロリー型である。トロリーの先端部に電磁気を計測するセンサを複数個収めたホルダーが配置さ

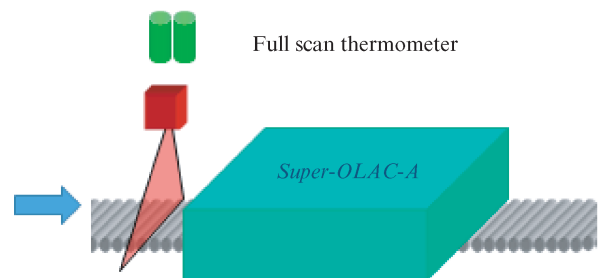


図 1 *Super-OLAC*[®]-A 入側全面温度計

Fig. 1 Arrangement of thermometer in front of *Super-OLAC*TM-A

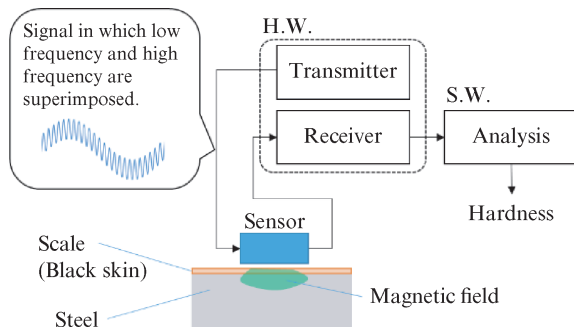


図2 開発した表層硬さ検査の原理

Fig. 2 Method of surface hardness evaluation



写真1 表層硬さ検査の様子

Photo 1 Surface hardness inspection

れている。ホルダーに収められた各センサは独立して検査面に接地し、その領域を移動できるように設計されており、スムーズに鋼材表面を移動しながら磁場の変化を計測する。レーザー焼き入れで製作した大小さまざまなサイズの硬化部を検査装置で検査した結果をPOD（Probability of detection）解析した結果、約16 mm×16 mm以上のハードスポットを検出できる性能であることが確認された。なお、POD解析とは、検査装置のもつ欠陥検出率を統計的に評価する手段である。POD解析では95%信頼水準を基準とした最小欠陥寸法が評価される。

表層硬さ検査の流れのフローチャートを図3に示す。トローリー型検査装置で鋼材の表層を検査し、ハードスポットが検出されなければ合格である。もしハードスポットが検出され

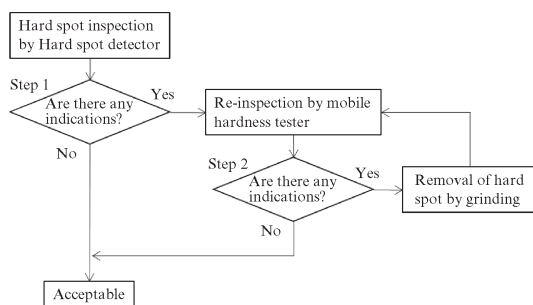


図3 表層硬さ検査のフローチャート

Fig. 3 Flow chart of surface hardness inspection

た場合は、接触式ポータブル硬さ計などを用いてハードスポット指示部位の硬さを評価する。計測値からハードスポットでなかった場合は合格とし、ハードスポットであることが確認できた場合は、グラインダーでハードスポットを研削して除去する。図3に示すフローチャートに基づき検査できるQA体制を構築した。

3. 表層硬さ厳格仕様サワラインパイプの製造実績

3.1 鋼板表層硬さ検査実績

X60級表層硬さ厳格仕様サワラインパイプを5万トン以上大量生産した。鋼板の表層硬さ検査実績を表1に示す。鋼板表層硬さ測定装置によるハードスポット検知率はわずか0.4%であり、接触式ポータブル硬さ計での表層硬さ試験において、閾値を超えとなるハードスポットは確認されなかった。

3.2 UOE 鋼管性能実績

鋼管の表層硬さを評価するため、流体と接する鋼管内面側での表層硬さ試験を実施した。内面側表層硬さ試験は、鋼管円周方向に3時、6時、9時の位置で、内面側表面下0.25 mmで実施した。鋼管の内面側の表層硬さ試験結果を図4に示す。内面側の表層硬さは235 HV0.5以下であり、要求仕様Max. 240 HV0.5を十分満足した。

また、NACE TM0316 規格²⁰⁾に準拠した4点曲げSSC試

表1 鋼板表層硬さ検査実績

Table 1 Record of hard spot inspection on steel plate surface

Step	Inspection content	Result
1	Detect rate of hard spot by hard spot inspection equipment	0.4%
2	Reject rate of hard spot by mobile hardness tester	0%

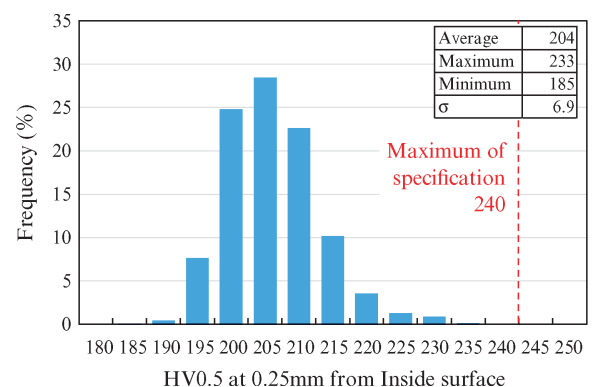


図4 鋼管の内面側表層硬さ試験実績

Fig. 4 Test record of hardness test on inside surface of steel pipe

表 2 4点曲げ SSC 試験条件

Table 2 Condition of four point bend type SSC test

Test solution (NACE TM0177 ²¹⁾)	pH (Ini./Fin.)	Partial pressure (bar)		Duration (hr)
		H ₂ S	CO ₂	
Solution A	2.6-2.8/4.0	1	-	720

表 3 鋼管内面 4点曲げ SSC 試験結果

Table 3 Record of four point bend type SSC test on inside surface of steel pipe

Test position	Number of tested specimens	Test result
Pipe body	312	No SSC
Pipe weld	156	No SSC
Total	468	No SSC

験を工程試験で実施し、大量試験で鋼管の耐 SSC 性能を評価した。母材 3 時、6 時、溶接部の位置で内面表層から試験片を採取し、表 2 に示す条件で SSC 試験を実施した。鋼管の SSC 試験結果を表 3 に示す。合計 468 本の大量試験で SSC の発生は認められず、製造した鋼管は優れた耐 SSC 性能を有することを確認した。

4. おわりに

TMCP 鋼の耐 SSC 性能達成のため、材料の造り込み (QC) 対策ならびに品質保証 (QA) 対策を講じた、表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプ用 UOE 鋼管の製造方法を確立し、お客様による事前ミル承認取得を経て、商業生産を行い、無事完了した。

- (1) 材料の QC 対策として、*Super-OLAC[®]-A* の高精度冷却性能を生かし、表層組織を軟質のグラニューベイナイト主体組織とし、鋼板全面にわたり表層の硬さを低減した。
- (2) 表層低硬さの QA 対策として、加速冷却設備の入側に全面温度計を設置し、鋼板表層全面での温度管理を行うとともに、鋼板表層硬さ測定装置を導入し、鋼板全面の表層硬さ検査を実施し、鋼板表層硬さ保証体制を確立した。
- (3) X60 級表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプを大量生産し、鋼板全数の表層硬さ検査実績でハードスポットの発生が認められず、大量の SSC 試験でも SSC の発生が認められなかったことから、製造された UOE 鋼管は優れた耐 SSC 性能を示すことを確認した。

今後、低 pH 環境で使用されるサワーラインパイプは、お客様からの要求により表層硬さ検査を実施することが規格化される見通しであり、表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプの需要拡大が予想される。

参考文献

- 1) 平忠明ほか. 耐サワーガス鋼管の開発-1-耐サワーガス鋼管の HIC 性能および SSC 性能. 日本鋼管技報. 1980, no. 87, p. 61-75.
- 2) Ishikawa, N.; Shinmiya, T.; Endo, S.; Wada, T.; Kondo, J. Recent Development in High Strength Linepipe for Sour Environment. Proc. OMAE 2003. Paper no. OMAE2003-37065.
- 3) 山根康義, 元田邦昭, 倉橋速生, 中井揚一. 硫化物環境下での低合金鋼の応力腐食割れ挙動. 川崎製鉄技報. 1985, vol. 17, no. 2, p. 178-184.
- 4) Endo, S.; Nagae, M.; Kobayashi, Y.; Ume, K. Sulfide Stress Corrosion Cracking in Welded Joints of Welded Linepipes. ISIJ Int.. 1994, vol. 34, no. 2, p. 217-223.
- 5) NACE MR0175/ISO 15156-2, Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production, NACE International/ISO (2001)
- 6) Newbury, B. D.; Fairchild, D. P.; Prescott, C. A.; Anderson, T. D.; Wasson, A. J. Qualification of TMCP Pipe for Severe Sour Service: Mitigation of Local Hard Zones in Sour Service Steels. Proc. OMAE 2019. Paper no. OMAE2019-96614.
- 7) Fairchild, D. P.; Newbury, B. D.; Anderson, T. D.; Thirumalai, N. S. Local Hard Zones in Sour Service Steels. Proc. OMAE 2019. Paper no. OMAE2019-96593.
- 8) 伊木聡. パイプライン・ペンストック. 溶接学会誌. 2019, vol. 88, no. 5, p. 75-78.
- 9) IOGP S-616, Supplementary Specification to API Specification 5L and ISO 3183 Line Pipe.
- 10) 東田幸四郎ほか. OLAC の実用化研究-1-厚鋼板へのオンライン加速冷却 (OLAC) の適用. 日本鋼管技報. 1981, no. 89, p. 1-12.
- 11) 小指軍夫. 制御圧延・制御冷却. 地人書館, 1997, 214p.
- 12) 遠藤茂, 中田直樹. JFE スチールの TMCP 技術の進歩とそれによる高性能厚板. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 1-6.
- 13) 嶋村純二, 伊木聡, 田村雄大. 表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプ. JFE 技報. 2020, no. 46, p. 64-69.
- 14) Kronmüller, H.; Fähnle, M. Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids. Cambridge University Press. 2003.
- 15) 八重樫 光. 引張変形した実用鋼における磁気特性の転位密度依存性. 鉄と鋼. 2005, vol. 91, no. 8, p. 655-661.
- 16) Bernard, M.; Reimche, W.; Bach, F-W. Non-Destructive In-Process Determination of Hardness Values by Harmonic Analysis of Hardness Values by Harmonic Analysis of Eddy Current Signals. ECNDT 9th, 2006, Poster 125.
- 17) Wolter, B.; Gabi, Y.; Conrad, C. Nondestructive Testing with 3MA — An Overview of Principles and Applications. Appl, Sci. 2019, 9, 1068.
- 18) Schneibel, G.; König, C.; Gopalan, A.; Dussaulx, J-M. Development of an Eddy Current based Inspection Technique for the Detection of Hard Spots on Heavy Plates. 19th WCNDT, 2016, th1h.
- 19) Koh, S-U.; Lee, J. Development of API-X65 Carbon Steel for Severe Sour Service and Hard Spot Detection with Advanced NDT Technology. 18th Pipeline technology conference BERLIN, 2023.
- 20) NACE TM0316-2016, Four-Point Bend Testing of Materials for Oil and Gas Applications.
- 21) NACE TM0177-2016, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments.