

次世代ニーズに対応する高品質高性能鋼管

High Performance Steel Pipes Securing and Exploiting the Future Demands

三浦 寛 鉄鋼事業部 鋼管セクター部 部長
山本 定弘 総合材料技術研究所 鋼材研究部 部長 工博

Hiroshi Miura
Sadahiro Yamamoto

当社の福山製鉄所ならびに京浜製鉄所の溶接管工場において製造される各種高性能鋼管は、インフラストラクチャー整備、高性能自動車用途などの多様な用途に広く用いられてきた。さらなる次代のニーズに応えるべく、各種高性能ラインパイプ、建築土木用鋼管、ハイドロフォーミングプロセス適合鋼管などを開発した。本稿では、適用の拡大が期待される開発鋼管の特徴とその製造方法などについて紹介する。

Wide variety of high performance steel pipes for infrastructure and automobile usages have been manufactured in UOE and ERW mills of Fukuyama and Keihin works for many years. High performance linepipes such as high strength corrosion resistance, high deformability structural pipes and ERW pipes suitable for hydro-forming process have been developed for needs expected to come in near future. Characteristics of these steel pipes and some features of manufacturing process are introduced in this article.

1. はじめに

当社は福山製鉄所ならびに京浜製鉄所に溶接管工場を有し、UOE 鋼管、スパイラル鋼管、電縫鋼管、鍛接鋼管を製造している。両溶接管工場では、ラインパイプ、建築土木などインフラストラクチャー、自動車構造部材など各種用途に用いられる高性能溶接鋼管を製造している。

本稿では、使用環境あるいは設計・操業条件の多様化から、従来より求められてきた高強度に加えて、高靱性、厚肉、高耐食性など様々な要求に応えるべく開発され、今後の更なる需要に拡大が期待される高性能 UOE ラインパイプとその特性について紹介する。また、設計の多様化や高付加価値化のニーズに対応して開発した建築土木用途に用いられる各種鋼管について紹介する。さらに最近注目されているハイドロフォーミング技術を用いた自動車部材への電縫鋼管適用ニーズに対応して、当社で開発した高加工性電縫鋼管についても紹介する。

2. 高性能ラインパイプ

2.1 パイプライン敷設・使用環境ならびにパイプライン設計・操業条件の多様化

ラインパイプにおいては、寒冷域あるいは深海域を含む海底におけるガス・油田開発が進み、敷設・使用環境ならびに輸送される石油・天然ガスの性状は多様化している。

サハリン州コルサコフを起点として北海道の苫小牧を經由し、日本に向けた天然ガスパイプラインの敷設も検討されている¹⁾。また、水深 2000m の黒海を横断する長さ 300km のパイプラインも現在敷設が行われている²⁾。

パイプライン敷設・操業のコスト削減も叫ばれ、コスト

削減の方法として操業圧力の増加あるいは高強度ラインパイプの使用による使用鋼材量の低減が試みられている。種々のグレードのラインパイプを用いた場合のコスト比較の結果、X65 からの高グレード化により、X80 では 5%程度、X100 を用いると 8%程度のトータルコストの低減が可能であるとの試算結果が報告されている³⁾。

さらに、コスト削減のため、使用材料を含めた適正なパイプライン設計が注目され、より実環境に近い条件での評価方法が提案され始めている。たとえば EFC (European Federation of Corrosion) Document No.16 の「硫化水素環境で用いられる炭素鋼に対する要求ガイドライン」では SSC 試験での試験溶液に関して、従来広く用いられてきた NACE TM0175-96 の溶液 A ないし B に加えて、井戸の環境を模擬した環境での試験溶液が提案されている⁴⁾。

2.2 高強度・高靱性鋼管の製造技術

高強度ラインパイプを用いるためには、安全性の観点から優れた低温靱性、溶接施工能率の観点からは優れた現地溶接性が重要である。しかし、これらの特性は鋼の高強度化とは相反するものである。この矛盾を解決するための手段として、高強度ラインパイプの製造には制御圧延と加速冷却が適用されている。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、制御圧延後オンラインで鋼板を冷却するものである⁵⁾。加速冷却の適用により、より低成分な鋼を用いた高強度高靱性鋼板の製造が可能となる。さらに、高冷却速度と優れた温度制御性、鋼板上下面の対称冷却と面内均一冷却を特徴とする新しい加速冷却装置「Super-OLAC」を開発し、1998 年に設置稼動を開始している。2001 年までのわずか 3 年間で累計生産量 150 万トン突破という、かつてないハイペースでの快挙

を成し遂げている。

耐サワーラインパイプは、S、Pの低減、Caによる硫化物の形態制御、連続鋳造技術ならびに制御圧延・加速冷却の組み合わせにより、1980年代末までにX65グレードまでが開発、実用化されている。耐サワー性能のさらなる改善を目的として、脱酸前の鋼中酸素量の低減による清浄性向上を目指したプロセスを確立している⁶⁾。また、耐サワー鋼や高強度ラインパイプのような炭素含有量が低く、高清浄性を必要とする鋼の製造用に、低Si溶銑を溶銑予備処理炉に適用するスラグレス製鋼法（ゼロスラグプロセス）も確立し、コストの低減と鋼の高純化を図っている⁷⁾。

さらに、多様化、厳格化している品質への要求に応えるため、UOE鋼管溶接部自動超音波探傷装置も1999年に更新している。この装置は最大20チャンネルまで同時に探傷可能、高精度シーム追従センサを有するなどの特徴がある。

また、厳格化する寸法精度ニーズに対応し成形技術開発を進め、C成形形状の最適化を進めている。より厚肉管で理想的なC成形形状を達成するためにCプレス機の更新が予定されており、製造可能範囲の拡大が見込まれている。

2.3 次世代高性能ラインパイプ

次に、前述したパイプライン敷設環境の多様化およびコスト低減などの流れに対応して開発し、今後の需要拡大が大いに期待される次世代高性能ラインパイプについて紹介する。

2.3.1 高強度ラインパイプ

当社では1991年にカナダ向けX80ラインパイプを国内の他社に先駆けて製造し、以来約5万トンのX80ラインパイプを実製造している。機械的性能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.1に示す。図からわかるようにX80という高強度にもかかわらず吸収エネルギーの平均は250J前後（-5）となっている。この値はISOに規格化されているX80ラインパイプの高速延性破壊伝播停止に必要なエネルギー値を十分に満足している値である。

さらに高強度となるX100ラインパイプの開発も進めている。X100といった高強度材の適用に向けた共同研究プロジェクトが欧米では盛んに行われており、これらの共同研究へのサンプル管の提供を通してX100ラインパイプの評価方法や要求性能の確立に向けた取り組みも進めている。

Fig.2には、X100ラインパイプの強度評価方法の検討として2種類の引張試験と実管内圧試験とを比較した結果を示す。X100ラインパイプのような高強度材では、試験片矯正時のバウシinger効果が大きく、従来広く用いられてきた矯正API試験片を用いた試験結果は実管内圧試験結果に比べ著しく低い値を示す。

すでに十分な機械的性質と現地溶接性とを有するX80ラインパイプの供給可能な体制は整っており、至近のX80

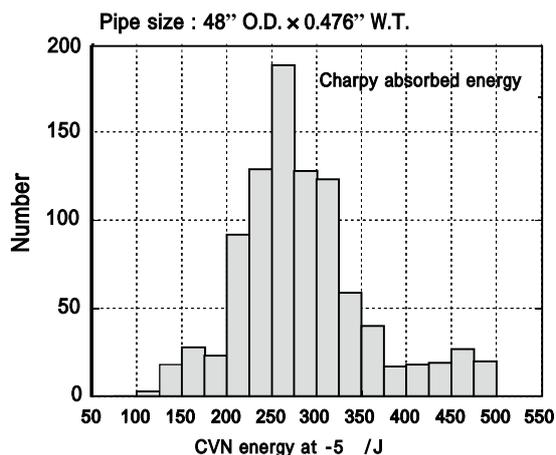


Fig.1 Charpy absorbed energy statistical data of X80 linepipe mass-produced in NKK

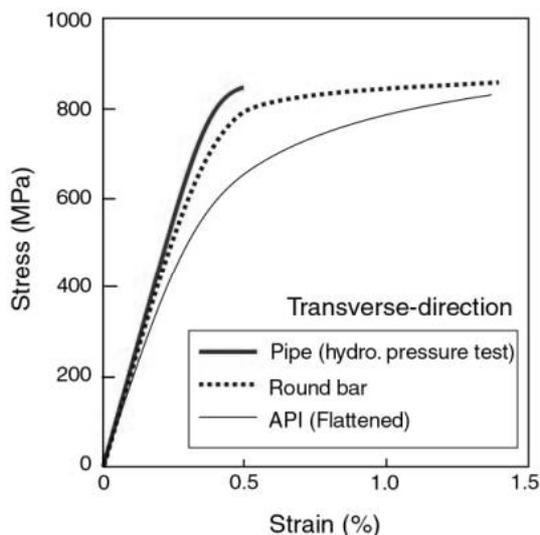
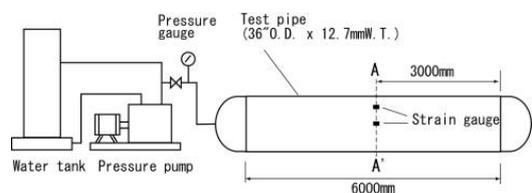


Fig.2 Comparison of stress strain relationships measured by small scale and full scale testing

Schluchten-Werne (Rhgas)プロジェクトならびに NGTL (TCPL)プロジェクトでは、敷設距離がそれぞれ、260kmおよび250kmと長大なパイプラインになっている。一方、X80ラインパイプに対応するバンド管などのフィッティングの開発は、ラインパイプに比べるとやや遅れている感があるが、当社においてはX80までの高周波曲がり管の開発をほぼ完了している⁸⁾。さらに、X100ラインパイプにおいては、バンド管、円周溶接材料ならびに適正溶接プロセスの開発が今後の課題である。これら周辺技術の開発と、上述の延性破壊挙動の検討がX80さらにX100ラインパイプの適用拡大をもたらすと考えられる。

2.3.2 厚肉ラインパイプ

深海パイプラインでは、外圧や敷設時の座屈防止のために、管厚のきわめて厚い鋼管が求められている。水深 2000m の黒海を横断する長さ 300km のパイプラインにおいては、管厚外径比 (t/D) が 5% 以上と大きく、かつパイプのグレードも X65 と高強度材を用いている。厚肉の鋼管の製造では、高強度高靱性 (DWTT 特性) を得るための制御圧延 - 加速冷却条件の適正化が必要となる。このような厚肉のラインパイプにおいても高冷却速度を有する「Super-OLAC」の適用は効果的で、Fig.3 に示すように従来材に比べて優れた DWTT 特性が得られている。

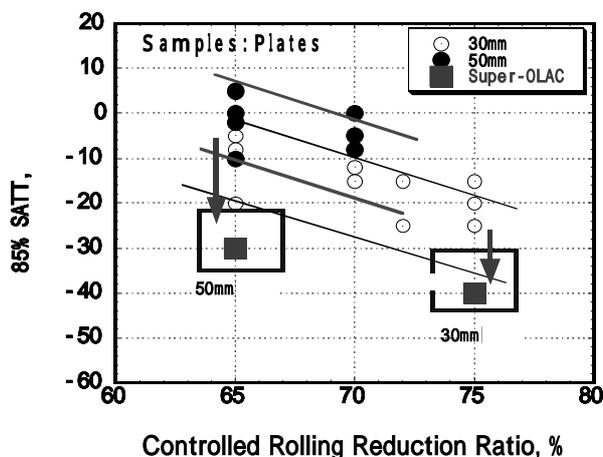


Fig.3 Toughness (DWTT) improvements achieved by applying “Super-OLAC”

また、このプロジェクトでは、パイプライン敷設時の座屈の伝播を防ぐため、管厚 52.7mm のバックルアレスターを採用した。当社では、厚肉のラインパイプに加えてこのバックルアレスターも開発し製造した。Fig.4 に、厚肉鋼管の機械的性質の一例として管周方向での引張強さの統計データを示す。管厚 52.7mm といった厚肉材においても十分な強度が得られている。さらに引張強さの最大と最小の差は約 50MPa と非常に小さい値となっている。

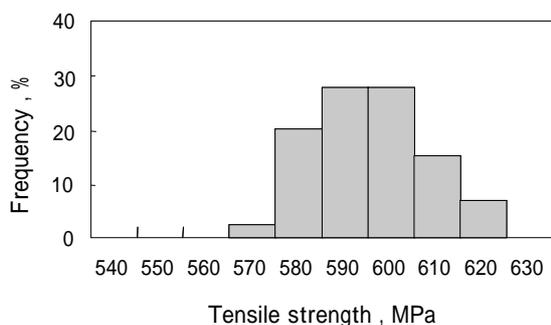


Fig.4 Tensile strength statistical data of heavy wall linepipe mass-produced in NKK

2.3.3 適正性能ラインパイプ

(Fit for purpose ラインパイプ)

前に述べたようにパイプラインシステム費用低減を目的として、適正鋼材かつ低価格鋼材への要求が高まると考えられる。すなわち、厳しい条件での評価試験を採用することにより、高価格の過剰品質鋼材を選定するよりも、実環境を反映した適正な試験条件で適正な材料を選定する傾向は増加すると考えられる。このような背景から H₂S 濃度が低いあるいは pH が高いライトサワー環境に適したラインパイプや Weldable 13%Cr などの適用が拡大することも予想される。

前述のように EFC では過剰品質鋼材の採用によるコストアップを防ぐことを一つの目的として、実環境に近い条件での SSC 試験を提案している。硫化水素濃度や pH レベルごとに適用可能な鋼材の組成や硬さを明確にし、適正鋼材選定のための検討も行われている。このような研究結果の一例を Fig.5 に示す。図に示すように、H₂S 濃度の低い領域では割れ発生限界硬さが上昇し、80% CO₂-20%H₂S の条件下においては限界硬さは 280Hv 前後となる。また、pH の上昇による限界硬さの上昇も報告されている。このような結果に基づいて、限界硬さに対する要求性能が緩和されれば、当然ラインパイプ製造コストへの反映が期待できる。

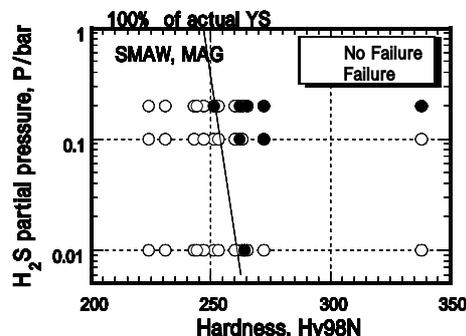


Fig.5 Effect of H₂S content on the SSC

2.3.4 耐震性・高変形吸収ラインパイプ NK-HIPER

今後、高強度高靱性以外に日本国内での高強度ラインパイプに必要となる特性として、大規模地震を考慮した耐震性・変形吸収能が挙げられる。国内のパイプラインでは、高圧ガス配管の耐震設計基準に基づいて設計がなされている⁹⁾。1995年に発生した兵庫県南部地震の被害を教訓としてパイプラインの耐震設計法の見直しが進められている。新しい耐震設計では兵庫県南部地震レベルの大規模な地震に対応できる設計レベルの高い塑性設計法が導入され、今後は従来にも増して鋼管の変形吸収能力の向上が必要となる。ガス導管耐震設計指針では鋼管の塑性座屈ひずみの設計式を定義している。この座屈ひずみは管厚に比例し、管径に反比例する。パイプラインが高強度化した場合、管厚

を低減すると Fig.6(通常材)に示すように管径管厚比が増加し、限界座屈ひずみを低下させる結果となる。当社では、高強度ラインパイプの座屈ひずみ改善についての検討を行ってきた。そして、一軸圧縮時の限界座屈ひずみを通常のパイプの1.5以上を有する耐震ラインパイプ「NK-HIPER」を開発した。「NK-HIPER」は鋼材の加工硬化能を向上させることにより、高座屈性を達成している。「NK-HIPER」の耐座屈性能を通常材のそれと比較した結果を Fig.6 に示す。日本国内を通過するサハリンパイプラインなどを考えた場合、このようなパイプラインの耐震性・変形吸収能を考慮した高強度ラインパイプ材料設計が必要となる。現在、国内向けの実製造を開始するとともに、高変形能を要求されるパイプラインへの適用を図っている。

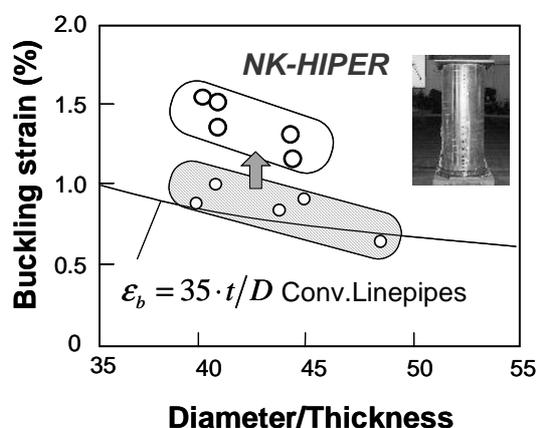


Fig.6 Buckling strain versus diameter to thickness ratio in standard gas pipelines and “NK-HIPER”

3. 建築土木用鋼管

円形鋼管柱の優れた力学特性や、建築分野ではその優れた意匠性から、大径の溶接鋼管の建築土木分野への適用が進んだ。当社ではこれら分野への溶接鋼管の用途拡大を1990年代初めから推進し、現在、建築分野では、「NTコラム」、土木分野では、「つばさ杭」、「リップ付鋼管」、「NKKイーグル」、「NKピラー」などの商品を開発、商品化している。

「NTコラム」は UOE 鋼管やプレスバンド鋼管にリング状の外ダイヤフラムを嵌め、自動溶接によって一体化したものである。従来タイプの柱材に比べて安価であること、コンクリート充填鋼管構造 (CFT) へも容易に適用できるなどの特徴を有している。福山溶接管工場では 1997 年に「NTコラム」のダイヤフラム取り付けなどを行う建材加工工場を立ち上げている。1991 年から「NTコラム」の開発を始め、その後もサイズ拡大 (厚肉対応) と素材の高張力化高性能化を図ってきた。現在では、低降伏比 (85%以下) と高靱性を有する STKN590 グレードの製造も可能となっている。オーダー生産を行った STKN490N/mm² 級「NTコラム」の製造実績を Fig.7 に示す。0.02 t/D 0.13

の領域で UOE、冷間プレスバンド+SR もしくは温間プレスバンドで製造した「NTコラム」の結果である。引張特性は YR 80%を満足した上で十分な強度を確保している。また、靱性についても 0 でのシャルピー吸収エネルギーが母材、溶接部とも 27J を大きく上回ったレベルの値を示している。以上のように、実機製造においても安定して低降伏比、高靱性を有する建築構造用高性能鋼管「NTコラム」の製造技術を確立し、数多くの建築物・土木構造物用に量産、出荷した。

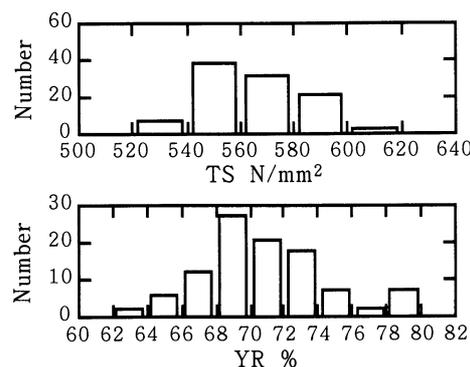


Fig.7 Strength statistical data of “NT-Column” mass-produced in NKK

4. ハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管

4.1 ハイドロフォーミング技術と自動車部材への適用

ハイドロフォーミングは金型に装入された鋼管の中に水を満たし、水圧によって複雑な形状を一体成形する成形技術で、1990年代後半より国内外でこの技術を用いた自動車部材への電縫鋼管の適用が徐々に拡大している¹⁰⁾。特に国内では、鋼管適用による軽量・高剛性化効果を最大限に享受するために、より高強度の素材、より高い加工度を志向する傾向が強く、これに適用可能な加工性の高い電縫鋼管が求められている。

ここでは、このような要求に応えるために当社が開発した 290~590MPa 級ハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管について紹介する。

4.2 ハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管

一般に、ハイドロフォーミングにより鋼管から成形される部材は、連続したプレス成形により鋼板から成形される部材に比べ、造管、曲げや金型による圧下による予成形、液圧工程など複雑なひずみ履歴を経て部材に成形される。このため、曲げ、液圧などの成形工程に必要な変形能を確保するには、造管前の素材鋼板の加工性を最大化すると同時に、こうしたひずみ履歴による加工性の低下を最小限に抑える鋼管特有の材質設計を行うことが重要である。

Fig.8 は、時効指数 A.I < 10MPa とした鋼板を素材とする電縫鋼管の、引張強度 TS と降伏比 YR、一様伸び U-El、全伸び El、n 値の関係を示したものである。素材の A.I を

<10MPaとした電縫鋼管は、A.I 20MPaの比較材に比べてYRが低く、U-EI, EI, n値が高く、より良好な加工性を示す。これはA.I < 10MPa（所謂、非時効）とすることでひずみ履歴を受けた際の加工性低下（主に固溶Nにより助長）が抑制されたことによるものと考えられる。当社ではこのように成分と熱延条件を制御し、素材鋼板のA.Iを<10MPaとすることを、ハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管の基本材質設計としている。なお、素材熱延鋼板の段階では引張特性に対するA.Iレベルの影響は認められない。

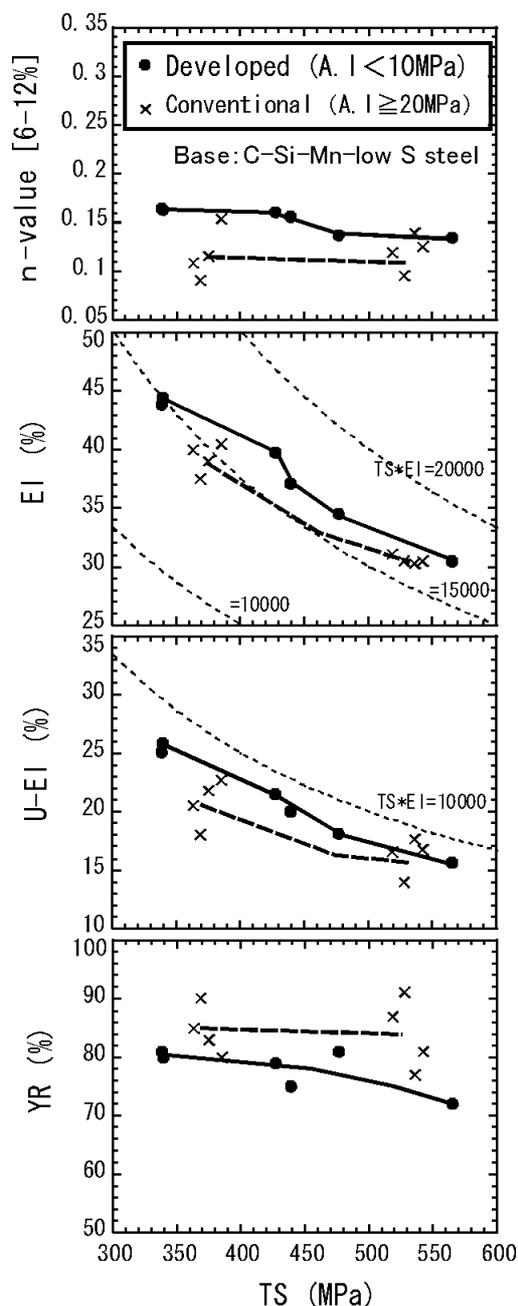


Fig.8 Relationship between tensile strength and tensile properties of developed and conventional tubes (t/D=2 ~ 4%; JIS No.12A)

Fig.9は鋼管を周長増加率20%の矩形型内部で液圧成形した際のTSと最大張出し率の関係を示したものである。素材鋼板のA.Iを10MPa未満とし、ひずみ履歴による加工性の低下を抑制したハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管は強度によらずいずれも破断なく周長増加率20%の矩形断面が得られている。一方、A.I 20MPaの比較材ではいずれも成形途中で破断が生じている。

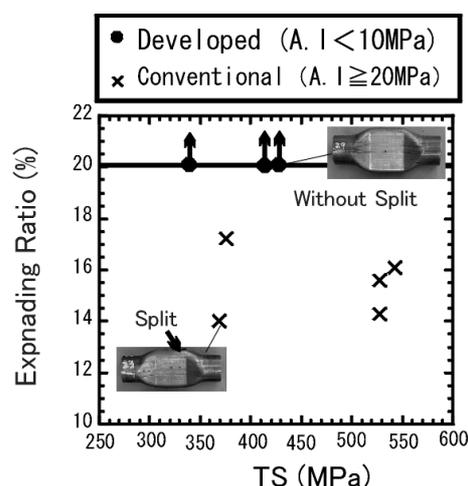


Fig.9 Relationship between tensile strength and hydroformability in rectangular die cavity (Maximum expanding ratio = 20%)

Fig.10はハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管に負荷される公称応力の軸方向応力と周方向応力の比 m^{11} を変えて自由バルジさせた際のひずみ経路と破断限界を示したものである。軸力を上げ (m を下げる) ことで限界周長張出し率は上昇し、 $m = -0.5$ の条件で周長増加率60%を超える高い破断限界が得られている。

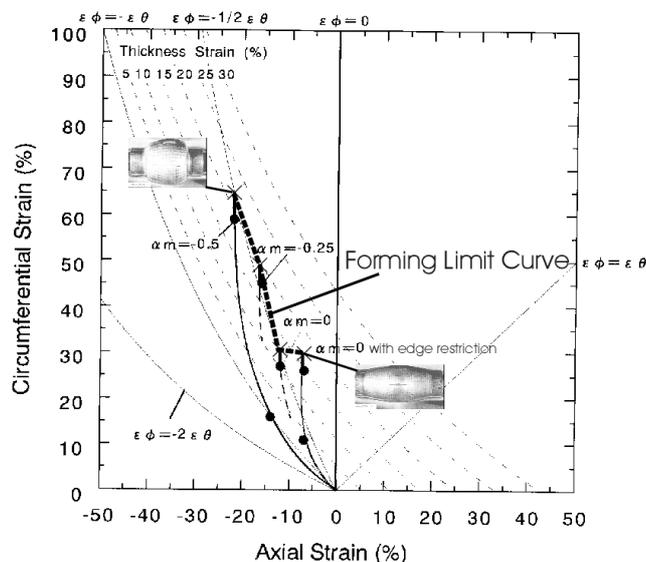


Fig.10 Forming limit curve of the developed tube (TS=340MPa) in free-bulge

以上のように、非時効を基本とした当社のハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管は、液圧成形性に優れ、同時に曲げなど他の二次加工においても優れた加工性を示す。

Fig.11に当社のハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管のシーム近傍の硬度部分布を示す。当社電縫鋼管製造ラインは電縫溶接後、溶接部をオンラインで熱処理可能な高出力ポストアニーラーを有しており、鋼管には電縫溶接時の加熱冷却に起因する高硬度部が存しない。このため、電縫溶接部に起因する成形不具合への配慮が比較材に比べて少なく済み、部材設計、工程設計上のメリットが見込める。

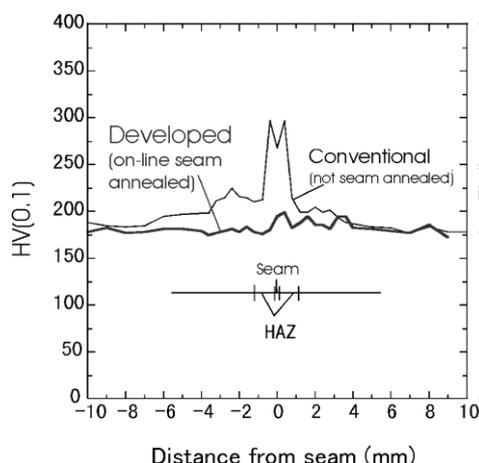


Fig.11 Hardness distribution in weld seam of the developed tube with on-line seam annealed compared with the conventional tube (TS=490MPa)

実際のハイドロフォーミングにおいては、予成形、型拘束によるひずみ分布、潤滑、型形状によるひずみ勾配、軸力など材料以外の多くの要因が成形可否を大きく左右する。特に成形の難しい高強度材においては最適な素材、加工技術、加工条件を組み合わせることが必須となる。このため、当社では本稿で紹介した材料技術に加えて、加工技術（ハイドロフォーミング技術、鋼管の二次加工技術）、数値解析技術の開発に早期より取り組み¹¹⁾、現在までに型設計を含む試作技術まで含めた自動車用鋼管のハイドロフォーミング部品の開発から量産までの一貫体制を確立している。

5. おわりに

UOE ラインパイプ分野では、高強度高靱性材料の開発に加えて、設計・操業条件および評価方法の多様化と、適正材料適正設計によるコストダウンをドライビングフォースとした材料開発が求められている。

これらの背景と次代のニーズに応えるべく開発した高強度高靱性ラインパイプ（X80-X100，厚肉，耐サワー，「NK-HIPER」）について紹介した。これら商品は次代のパイプラインに広く用いられることを確信している。また、今後も環境に見合った適正材料の開発がさらに重要となると考えられる。

ハイドロフォーミング用高加工性電縫鋼管については、現在 590MPa 級を超える高強度材のニーズにも対応した素材技術、加工技術、数値解析技術などの開発を進めている。今後、成形性に加え、衝撃特性、疲労強度など製品特性をも勘案した素材設計、部材形状・成形工程設計技術の重要性が増すものと考えられる。

参考文献

- 1) 佐野佳洋. 配管技術. No.9, p.54(1998).
- 2) Ahrabian, A. et al. Proceedings of the 21st Offshore Pipeline Technology.
- 3) Sanderson, N. et al. Oil & Gas Journal. Mar. 15. p.54(1999).
- 4) European Federation of Corrosion Document. No.16.
- 5) 束田幸四郎. 日本鋼管技報. No.89, p.121(1981).
- 6) 川波俊一ほか. CAMP-ISIJ. Vol.6, p.1152(1993).
- 7) 赤井真一ほか. CAMP-ISIJ. Vol.11, p.24(1998).
- 8) Kondo, J. et al. Proceedings of the 4th ISOPE. Conference (1994) p.164.
- 9) (社)日本ガス協会ガス導管耐震設計指針(1982).
- 10) Fuchizawa, S. Proceeding of International Semiar on Recent Status & Trend of Tube Hydroforming. p.40(1999).
- 11) Suzuki, K. et al. 日本塑性加工学会第 195 回塑性加工シンポジウム(2000). p.238.