

## 技術論文

## 塑性異方性を有する高強度UOE鋼管の成形・座屈シミュレーション

## Forming and Buckling Simulation on High Strength UOE Pipe with Plastic Anisotropy

津 留 英 司\*      阿 形      淳      永 田 幸 伸      白 神      聡  
*Eiji TSURU*      *Jun AGATA*      *Yukinobu NAGATA*      *Satoshi SHIRAKAMI*  
 篠 原 康 浩  
*Yasuhiro SHINOHARA*

## 抄 録

高強度UOEラインパイプの成形ではスプリングバックが大きくなるため、新たな成形指標の導出が必要となる。さらにラインパイプは成形歪みと塗装加熱に起因した歪み時効によりL(長さ)方向とC(周)方向で加工硬化特性が異なる塑性異方性を有するが、塑性異方性が鋼管使用性能に及ぼす影響については解明されていなかった。そこで塑性ヒステリシスを精度よく再現でき、直交異方性を考慮できる二つの異なる降伏関数を使用したUOE鋼管成形と鋼管曲げの数値解析シミュレーションモデルについて述べた。成形モデルでは強度レベルに応じた操業指標、プレス能力不足を補う設備設計指標を導出した。一方、曲げモデルではL方向に加えC方向応力-歪み曲線上の降伏伸びも座屈抵抗を低下させ、その低下割合は負荷内圧に依存することが明らかになった。

## Abstract

**New guideline is required in forming high strength steel line pipes since spring-back is quite higher than that of the conventional materials. Moreover, line pipes have plastic anisotropy, which the work hardening coefficients are different between the longitudinal and the circumferential direction, caused by the forming strain and the strain aging during the heating in anti-corrosion coating. However, the effect of the plastic anisotropy on the pipe performance has not been clarified. This paper describes the numerical simulation models of the UOE pipe forming and the pipe bending with two different yield functions, which are capable of representing the plastic hysteresis and the orthogonal anisotropy respectively. The forming models introduce the operating guidelines corresponding to the material strength and the design indexes of the apparatus to aid the lack of the press capacity. The bending models reveal that yield point elongation on stress vs. strain curve in the circumferential direction in addition to the longitudinal direction degrades the buckling resistance and the decreasing rate is dependent on internal pressure.**

## 1. 緒 言

天然ガスや原油を輸送する長距離ラインパイプにはUOE鋼管が使用され、近年では輸送コスト削減のため、X80からX120に至るまでの高強度鋼の需要が高まってきた。これらの高強度鋼管は外径(D)と肉厚(t)との比、D/tが大きい、すなわち薄肉鋼管が主流であり、高強度材であることと相まって造管時のスプリングバック、成形能力不足への対処が研究課題となる。一方で敷設環境は厳しさを増し、不連続永久凍土地帯に埋設されるパイプラインでは凍土の融解、再凍結が繰り返され、鋼管は降伏強度を

遙かに超えた内圧下曲げ変形を被ることになる。このような塑性変形を考慮した設計手法を Strain-based Design (SBD) と称し、鋼管には高変形能が要求される。

以上のような市場ニーズに応えるべくラインパイプの開発には数値解析シミュレーションが重要な解析手法の一つとなる。本研究は有限要素解析 (FEA) を使用したUOE鋼管成形シミュレーションと直交異方性を有した同鋼管の変形特性解析について述べる。成形シミュレーションではスプリングバックを精度よく予測できる材料硬化則を適用すると同時に実機製造に活用できるようにプレス装置のハウジング剛性を簡易的にモデル化する方を示した。曲げ

\* 鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部 主幹研究員 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

座屈特性の解析には新しく開発した直交異方性を考慮できる材料硬化則により、座屈限界歪み予測精度を向上させると共に周 (C) 方向の機械的性質が座屈限界に及ぼす影響についても解明した。

## 2. UOE 造管プロセスと使用環境

### 2.1 UOE 造管プロセス

図1にUOE造管プロセスの代表例を示す。素材には厚板を用い、Cプレス、Uプレス、Oプレス、シーム溶接、エキスパンダーの順で冷間プレス成形される。Cプレスではあらかじめ開先加工された板端部近傍を曲率を有した上下金型で挟み込むことにより曲げ加工を施す。バーソン方式のUプレスでは板中央部をUパンチにより3点曲げ加工を行うと同時に加工途中でロッキングダイと呼ばれる補助加工金型によりU字形状に仕上げる。U成形された板材はO金型内に装入され、上下に分割された金型によりO字形状に成形される。突き合わされた板端部同士は仮付け後、内外面一層からなるサブマージアーク溶接により鋼管となる。

その後のエキスパンダーでは周方向に分割されたセグメントを放射状に拡げることにより鋼管は真円に近い形状になる。ラインパイプに使用される場合は現地、または自社工場内で耐食塗装が施され、このとき、鋼管は200～250℃に加熱される。以上のようなプロセスで製造されたUOE鋼管は現地にて周溶接され、パイプラインとして敷設される。

### 2.2 パイプラインの Strain-based Design

SBDが適用される環境のうち不連続永久凍土でのラインパイプへの代表的な荷重条件は内圧下での曲げモーメント負荷であり、内弧縁での圧縮応力による局部座屈、外弧縁での引張応力によるラプチャー(延性破壊)が典型的な破断形態となる。局部座屈は通常、ラプチャーに先行して発生するため、局部座屈の開始する歪みが圧縮歪み限界となる。したがって、まずは圧縮歪み限界が歪み要求値を上回る必要がある。一方、引張歪み限界はラプチャーが発生する歪み以下、尚かつ圧縮歪み限界以上の値をとり、周溶接部の欠陥寸法から各種の破壊力学的アプローチにより決定される。

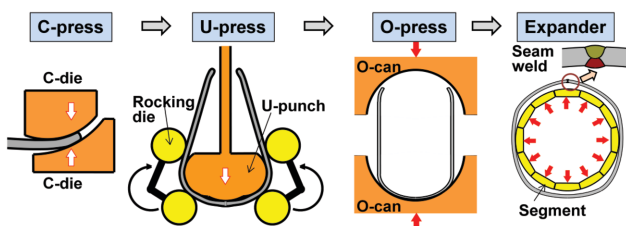


図1 UOE造管プロセスの概要  
Summary of UOE pipe forming process

以上から本研究では圧縮歪み限界に焦点を絞った内圧曲げ下の座屈挙動について解析する。

## 3. 課題解決のための数値解析シミュレーションの役割

### 3.1 高強度 UOE 鋼管の成形研究

図1に示したUOE造管プロセスに従い高強度材を成形する場合、汎用材に比較しスプリングバックが大きくなり、Uプレスで曲げ加工が不十分であると続くOプレス金型への装入が不可能になる。Oプレスでの不十分なアプセット(据え込み)は過大な板端部同士の間隙(シームギャップ)を生み、溶接仮付けに悪影響を及ぼす。さらには高強度化に伴いプレス能力不足を導く可能性も懸念される。これらの課題解決には鋼管サイズ毎、材料強度毎のスプリングバック、プレス荷重制御技術が必要となり、各プレス間での相互作用も相まって実機試験での最適化には製造設備保全の観点からも困難を極める。ここに鋼管成形の高精度な数値解析シミュレーションは有効な開発手法のひとつとなる。

### 3.2 鋼管使用性能の研究

#### 3.2.1 UOE 鋼管の塑性異方性

図2に914mmD, 19.8mmt, X80, UOE鋼管の応力-歪み(SS)曲線を示す。測定にはシーム溶接から45°離れた位置で長さ(L)方向とC方向から採取した丸棒試験片(8.9mmφ)を用いた。SS曲線はそれぞれ、鋼管成形ままと塗装時同様の240℃, 5minで加熱した鋼管で測定された。成形ままのSS曲線はL方向にラウンド形状、C方向に矩形を呈し、L方向とC方向でSS曲線の形状が異なる、いわゆる、直交異方性を示す。この直交異方性はUOE造管工程の最終プロセスであるエキスパンダーで最大主歪みとなるC方向に引張応力が負荷される故の現象である。加熱後は歪み時効によりL方向、C方向とも降伏強度(YS)、引張強度(TS)ともに上昇する。さらにはL方向SS曲線はラウンド形状を維持するが、C方向では上降伏後、2%

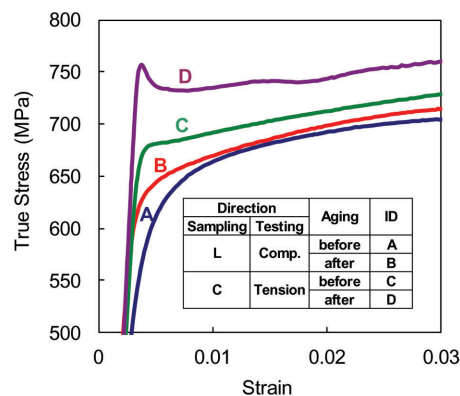


図2 UOE鋼管の応力-歪み曲線  
SS curves for UOE pipe

に及ぶ降伏伸び (YPE) が出現し、成形ままに比べ、加工硬化異方性がさらに強調されることになる。

実験的にL方向、C方向のSS曲線を独立に制御することは困難であり、曲げ下で主応力方向となるL方向とその直交方向になるC方向のSS曲線の特性が鋼管の座屈特性に及ぼす影響の定量化はこれまで行うことができなかった。

### 3.2.2 SBD に使用される鋼管の性能解析

鋼管曲げ下の座屈支配因子は材料因子と形状因子に大別される。商業生産される鋼管には強度差が許容され、現地で周溶接された左右の鋼管には規格範囲内で強度差が生じる。塑性設計にはこのような鋼管1体毎の強度差も考慮する必要がある。

形状因子としては鋼管が本来有するUOE成形に起因した形状不整に加え、周溶接の溶接残留応力による変形、溶接突き合わせ時のオフセット (目違い) などがあげられる。

これらの影響因子の定量化には実管試験により実証された数値解析シミュレーションが極めて有効である。

## 4. 鋼管成形・性能シミュレーション方法

FEAによる高精度な鋼管成形・性能シミュレーションを行うためには適切な材料構成則と鋼管形状のモデリングが必要となる。以下にその方法について述べる。

### 4.1 材料構成則

#### 4.1.1 成形解析モデル

鋼管成形のFEAモデルではスプリングバックを精度よく予測する目的からすでに実績のあるTeodosiu-Huの降伏関数<sup>9)</sup>を使用した。同モデルのパラメーター決定にあたって丸棒試験片による引張・圧縮試験を行った。

#### 4.1.2 曲げ座屈解析モデル

塗装加熱したUOE鋼管では成形ままのSS曲線と異なり、L方向SS曲線はラウンド化したまま、C方向SS曲線にYPEが発現する (図2)。熱処理によるSS曲線の変化は既存の材料構成則では考慮できず、成形から性能解析への一貫シミュレーションはできない。そこで加熱後の鋼管特性を初期材とした新たな材料構成則の構築を試みた。

異方性が考慮できる材料構成則として式 (1) ~ (3) に示すHillの二次降伏関数を基本とした。

$$f = J(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{n}_i, \bar{\epsilon}) - g_{11}(\bar{\epsilon}) = 0 \quad (1)$$

$$J(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{n}_i, \bar{\epsilon}) = \left[ \frac{1}{2} \left\{ H_F (\hat{\sigma}_{22} - \hat{\sigma}_{33})^2 + H_G (\hat{\sigma}_{33} - \hat{\sigma}_{11})^2 + H_H (\hat{\sigma}_{11} - \hat{\sigma}_{22})^2 + H_L \hat{\sigma}_{12}^2 + H_I \hat{\sigma}_{23}^2 + H_K \hat{\sigma}_{31}^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_{ij} = \mathbf{n}_i \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_j \quad (3)$$

ここで $\sigma$ はコーシー応力、 $\mathbf{n}_i$ は直交座標 $\hat{x}_i$ に沿った法線方向単位ベクトル、 $\bar{\epsilon}$ は相当塑性歪み、 $J$ は相当応力、 $g_{11}$ は $\hat{x}_1$ に沿った単軸引張試験での加工硬化関数である。鋼管への適用に際しては $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 、 $\hat{x}_3$ はそれぞれL方向、C方向、肉厚(t)方向とした。 $H_F - H_K$ は異方性を取り込むための直交係数で異方性加工硬化を表現するために直交係数を相当塑性歪みの関数と定義した。簡単化のため、 $H_I$ と $H_K$ は6とし、 $\hat{x}_1$ と $\hat{x}_3$ の応力-歪み挙動は同等と仮定した。 $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 、 $\hat{x}_3$ と $\hat{x}_1$ から45°傾いた方向の単軸引張による加工硬化関数、 $g_{11}$ 、 $g_{22}$ 、 $g_{33}$ 、 $g_{45}$ を使用することで式 (4)、式 (5) に示すようにすべての直交係数を決定する。

$$H_F = \frac{1}{\Sigma_{22}^2}, \quad H_G = -\frac{1}{\Sigma_{22}^2} + 2, \quad H_H = \frac{1}{\Sigma_{22}^2} - 2, \\ H_L = \frac{8}{\Sigma_{45}^2} - 2, \quad H_I = 6, \quad H_K = 6, \quad (4)$$

$$\Sigma_{22} = \frac{g_{22}(\bar{\epsilon})}{g_{11}(\bar{\epsilon})}, \quad \Sigma_{45} = \frac{g_{45}(\bar{\epsilon})}{g_{11}(\bar{\epsilon})} \quad (5)$$

$H_F - H_K$ は直交係数で異方性を表すパラメーターとなる。通常、直交係数は降伏強度の異方性、あるいはr値 (ランクフォード値) の異方性として定数として扱われる。しかしながら時効後のC方向SS曲線にYPEが現れる歪み領域ではL、C方向で加工硬化係数が著しく異なり、降伏局面は相似的には拡大しない。直交係数を歪み関数化することにより、降伏局面は形状を変化させながら拡大して行くことになる。本研究でこの異方性降伏関数をHill's yield function modified (m-Hill) と称することとする。

### 4.2 材料構成則の実証モデル

鋼管のFEAモデルにはFEA汎用コードであるMARCを使用した。前述したTeodosiu-Hu、及びm-Hillの降伏関数はMARCのユーザーサブルーチンの一つであるhypela2に組み込み、相当応力、相当塑性歪みを計算し、降伏局面の拡大、移動を求めた。実証には一つの8節点ソリッド要素を使用した。

### 4.3 UOE 鋼管成形のFEAモデル

図3にUOE実機製造設備と相似形状 (縮尺1/7) をした

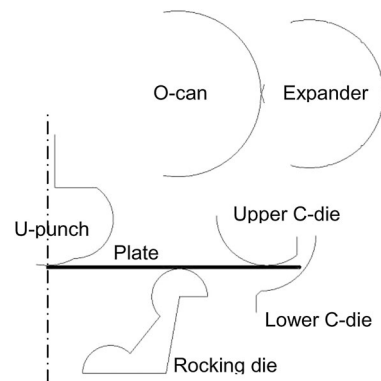


図3 UOE鋼管成形のFEAモデル  
FEA model for UOE pipe forming

ミニプレス試験機のFEAモデルを示す。モデルは素板とCプレス装置(上下C金型), Uプレス装置(Uパンチ, ロッキングダイ), Oプレス装置(上下O金型), 及びエキスパンダー装置(拡管セグメント)からなる。シーム溶接部は内面と外面を順次, アクティブ要素とすることでモデル化し, 1300℃からの冷却を仮定した非定常熱-応力連成解析を行った。素板には平面歪み要素を用い, Teodosiu-Huの降伏関数を使用した大変形弾塑性解析を行った。金型には剛体要素を用い, 金型による素板の成形は接触問題として取り扱った。

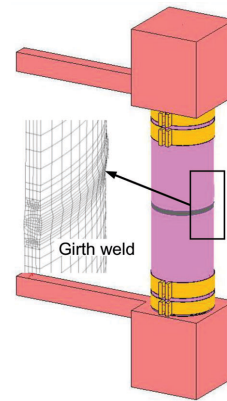


図5 ガース溶接鋼管の曲げFEAモデル  
FEA model for bending of girth-welded pipes

Cプレスは荷重制御であり, Uプレス, Oプレス, エキスパンダーは変位制御により最終金型位置が決定される。Uプレスの基本駆動力はパンチ荷重であり, ロッキングダイはパンチ荷重の鉛直方向の推力を受けて回転する。このとき, パンチに板が巻き付くことでU形状に成形される。ロッキングダイには付設のサイドシリンダーによる回転力も加わり, パンチ成形を補助できる。

実機製造設備では一連の装置のハウジング剛性からプレス中に金型が“逃げる”現象が観察される。FEAでは金型を剛体でモデル化しているため, 逃げの現象は現れない。そこで実機設備でのロッキングダイ回転中心の変動を実測した。

図4にUパンチメインシリンダーの圧力とロッキングダイ回転中心の水平方向の変位を示す。ロッキングダイはシリンダー圧力, すなわち, パンチ荷重に比例して外方向に逃げる。したがって, 成形モデル上では図4の傾きをばね定数としたスプリングをロッキングダイ中心に配置することによりダイの逃げをシミュレーションすることとした。

#### 4.4 周溶接鋼管の曲げFEAモデル

図5には周溶接鋼管の実管曲げ試験のFEAモデルを示す。2つの鋼管は中央には周溶接部を配置し, 鋼管, 及び溶接継手部の形状不整にはレーザー変位計で測定したL方向形状不整を反映した。材料モデルには図2に示したL方

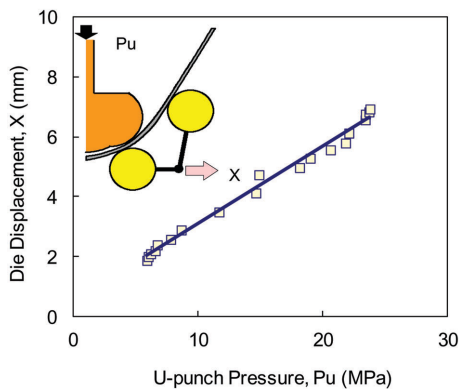


図4 Uプレス圧力とロッキングダイ変位の関係  
Relationship between U punch pressure and rocking die displacement

表1 鋼管曲げの実験, 及び数値解析条件  
Experimental and numerical conditions for pipe bending

Case	Experimental condition				Numerical model	
	Pipe No.	Girth weld	Heating temp.(°C)	Internal pressure	Type of SS curve	Yield function
A	1	None	None	72% SMYS	As formed	ISO ANISO
B	2	None	240		Aged	
C	3	With	240		Aged	

向, C方向のSS曲線を初期値としたm-Hillの降伏関数を使用した。

表1に曲げ解析の計算条件を実験条件と対比して示す。3本の試験鋼管に対し, Misesの降伏関数を用いた等方硬化(ISO)とm-Hillの降伏関数を用いた異方硬化(ANISO)をそれぞれ仮定し, 硬化則が座屈特性に及ぼす影響を評価した。荷重条件としては実管試験同様, 72%の規格管体降伏内圧(SMYS)負荷後, 管体のエンドプレートの腕に曲げ荷重を負荷した。

### 5. 実験方法

#### 5.1 材料硬化則の実証試験

Teodosiu-Huとm-Hillの降伏関数を使用したFEAモデルを実証するために丸棒試験片(5mmφ)と十字型試験片(260mm×260mm×1.8mm)を用いた圧縮・引張繰返し試験<sup>2)</sup>と二軸負荷試験を実施した<sup>3)</sup>。丸棒試験片はX80, X100, X120の板材から採取し, ±2%, ±4%, ±6%の圧縮引張を繰返した。十字型試験片はX80の板材から採取し, X軸に2%の引張予歪みを付加した後, X軸, Y軸の応力比が1:2, 1:1, 2:1となる二軸応力を負荷した。

#### 5.2 UOE造管のミニプレス実験

UOE成形シミュレーションモデルの適合性を実機製造設備で判断するには設備装置のアライメント, 摩耗, ハウジング剛性, 素材の強度分布などを考慮しなければならず, これらをFEAモデル中に確実に反映させることは困難である。そこで実機設備と1/7相似形状をなす金型を

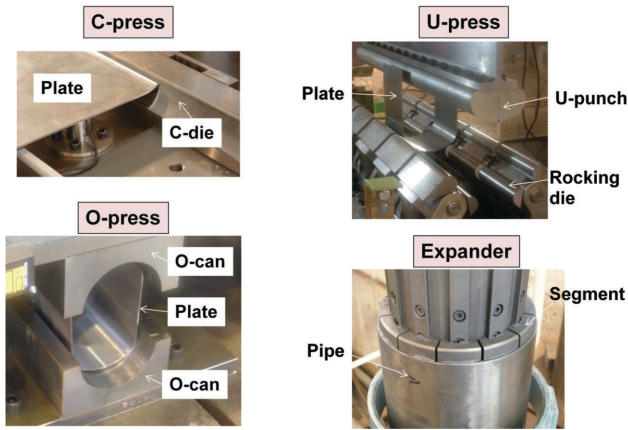


図6 ミニプレス実験装置  
Testing apparatus for mini-press

使用したプレス実験(以下、ミニプレス)で数値解析モデル適合性を判定することとした。

図6にC, U, Oプレスとエキスパンダーのミニプレス装置を示す。実験は1219mm OD, 19mm tの1/7スケールで行い、金型は3900 kNの汎用プレス装置に組み込んだ。素板にはX80, X100, X120の実機材より切り出した高強度ラインパイプ素材を用いた。

### 5.3 実管曲げ試験

曲げ内圧下での座屈特性を評価するための実管試験はC-FER technology (カナダ)のユニバーサル試験機<sup>4)</sup>で行った。試験は表1に示す条件で行い、鋼管の形状特性として鋼管本体と周溶接された鋼管の形状不整を調査した。材料特性としてL方向SS曲線はいずれもラウンド型であるが、C方向SS曲線にYPEを含まない成形ままの材料とYPEを有する加熱後の材料を選択した。曲げ歪みは中立軸上に1D毎に設置した回転計から得られる曲げ角度をもとに式(6)で求めた。

$$\epsilon_{bend} = \frac{\theta}{2\Delta L / D} = -\epsilon_{neutral} - \epsilon_0 \quad (6)$$

ここで $\epsilon_{bend}$ は曲げ歪み、 $\epsilon_{neutral}$ は中立軸での歪み、 $\epsilon_0$ は内圧負荷時の歪み、 $\theta$ は曲げ角度(rad)、 $\Delta L$ はゲージ長さ(mm)、 $D$ は外径(mm)をそれぞれ示す。本実験では $\Delta L = 1D$ とした。局部座屈が発生する圧縮歪み限界、 $\epsilon_{Limit}$ は曲げモーメントが最大値に達したときの $\epsilon_{bend}$ で定義した。

### 6. FEAによる塑性変形挙動の予測

図7にTeodosiu-Huの降伏関数を使用してFEAで計算された塑性ヒステリシスと丸棒試験片による圧縮引張試験結果をX100について示す。±6%の歪み内において再降伏、再々降伏を精度よく近似できている。

図8にm-Hillの降伏関数を使用してFEAで計算された二軸応力下での応力-歪み挙動をX80の十字試験片による二軸負荷試験結果と共に示す。また、同図には代表的な

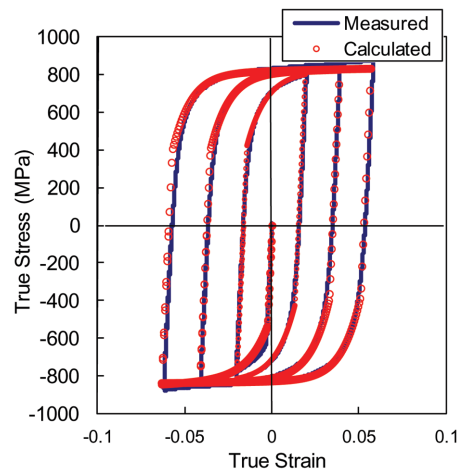


図7 塑性ヒステリシスの実験値と解析値の比較  
Comparison of plastic hysteresis between experiment and FEA

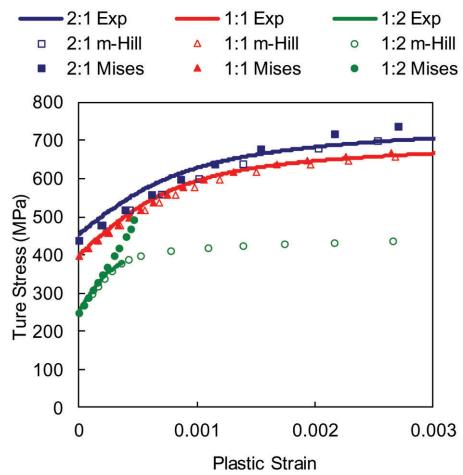


図8 二軸応力負荷下での応力-歪み曲線  
SS curves under biaxial loading

等方材の降伏関数であるMisesの降伏関数で計算した結果も示す。ここでX軸の塑性歪みはSS曲線上で比例限を外れてからの歪み量として定義した。X軸とY軸との応力比、 $\sigma_x : \sigma_y$ が1:1である等二軸応力負荷下では両降伏関数による計算結果と実測値はよく一致している。しかし、 $\sigma_x : \sigma_y$ が1:2, すなわち、予歪み付加方向に対して最大主応力方向が直交する方向に傾く場合、実験値の降伏開始点は $\sigma_x : \sigma_y = 1:1$ ,  $\sigma_x : \sigma_y = 2:1$ に比較して大きく低下する。Misesによる予測値はこの降伏開始点を過大に評価するが、m-Hillでは実験値とよく一致している。

以上の小型試験の結果より実管シミュレーションに用いる降伏関数の適合性が証明された。

### 7. UOE成形シミュレーション結果

高強度材の鋼管成形での主な課題はプレス後のスプリングバックが過大になることと、プレス能力の不足である。本研究ではこの2つの課題に対して数値解析値と実験値を比較対照し、高強度材造管技術の指針を示す。

### 7.1 鋼管成形時のスプリングバックと操業指針

#### 7.1.1 Uプレス時の板開口量

図9に1/7 FEAモデルとミニプレス実機試験の結果をUパンチストロークとU幅の関係で示す。ここでU幅とはUプレス後の最大開き量を意味する。U幅はストロークの増加と逆比例し、減少する。また、図は高強度になるほど深いストロークが必要なことを示唆している。FEAによる予測値は実験値とよく一致することから歪みが単調増加するUプレスにおいて本モデルによりスプリングバックを精度よく予測できることが実証できた。これによりX120のような超高強度材においてもFEAによりO金型へ挿入するための最適ストロークが算出できる。

図10には1219mmD, 19mmt, X120の実機造管でのU幅と基準点からのUパンチ変位との関係を示す。図にはFEA結果としてロッキングダイを固定した場合と実測ばね定数に従い移動させる場合を示す。これより、ロッキングダイをミニプレス同様に固定するとU幅の縮小を過大に評価し、実効性を伴わない。これに対し、スプリングモデルによる移動を考慮するとFEA値は実測値によく一致するようになる。

以上のように実機製造設備においてO金型へ挿入できるU幅をFEAにより決定する手法を確立できた。

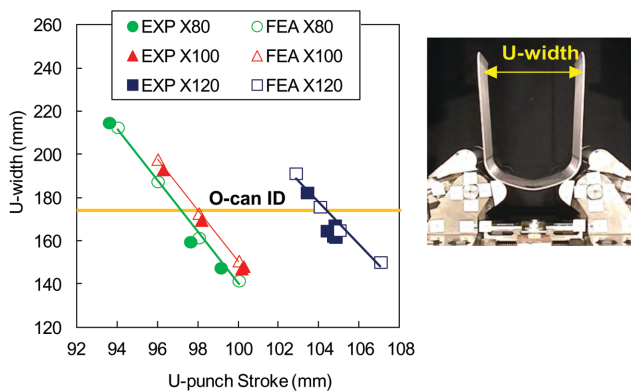


図9 UパンチストロークとU幅の関係 Relationships between U punch stroke and U width

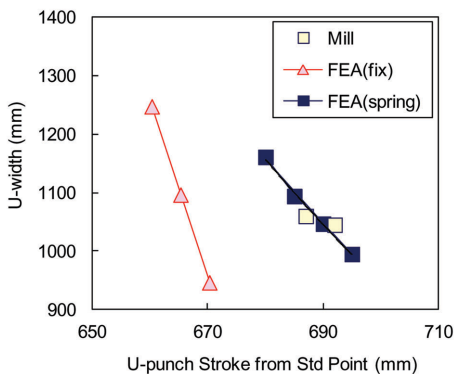


図10 実機造管におけるUパンチストロークとU幅の関係 Relationships between U punch stroke and U width for full scale mill

#### 7.1.2 Oプレス後のシームギャップ

図11にO金型の変位とシームギャップの関係を示す。ここで金型変位はOプレス成形の指標であるアプセット率(周長の平均圧縮塑性歪み量)がゼロとなる位置からの相対変位で示す。金型変位とシームギャップの間には弱い相関しかなく、板強度による影響が大きいことがわかる。

特にX120ではシームギャップの拡大が顕著になる。過大なシームギャップはシーム溶接時の仮付け不良を招くため、縮小させる必要がある。X120ではアプセット率のみの単独効果では十分にシームギャップは縮小できないため、U幅との相乗効果を求めなければならない。一方で過大なアプセットはX80ではエッジバックリングと呼ばれる致命的な損傷を誘発した。したがって、板材強度毎に最適なアプセット率を求める必要がある。実験値とFEA値はいずれの材料でもよく一致しており、Oプレスのような曲げ、曲げ戻しを受けるプレス環境下においても本モデルは最適アプセット量、プレス間の複合効果を求める有力ツールであるといえる。

#### 7.1.3 エキスパンダーでの真円度矯正効果

図12にエキスパンダーでの1219mmD, 19mmt, X120の1/7モデルでの拡管前後での真円度を示す。真円度 $\beta$ は

$$\beta (\%) = (D_{\max} - D_{\min}) / D_{ave} \times 100 \quad (7)$$

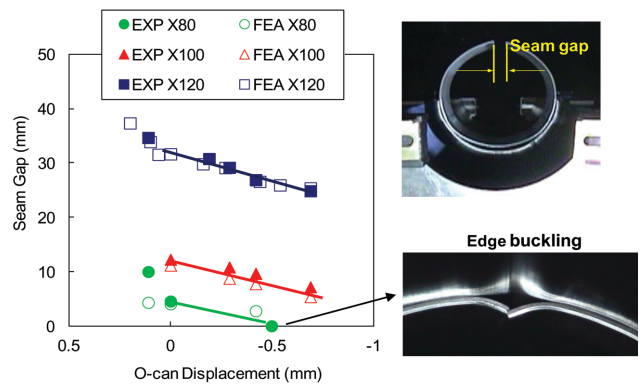


図11 O金型の変位とシームギャップの関係 Relationships between O can displacement and seam gap

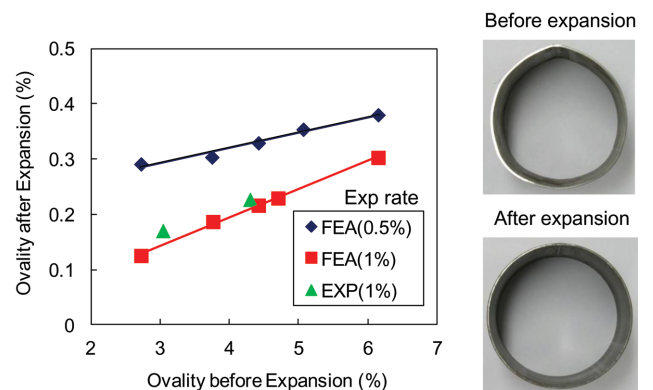


図12 拡管前後での真円度 Ovality before and after expansion

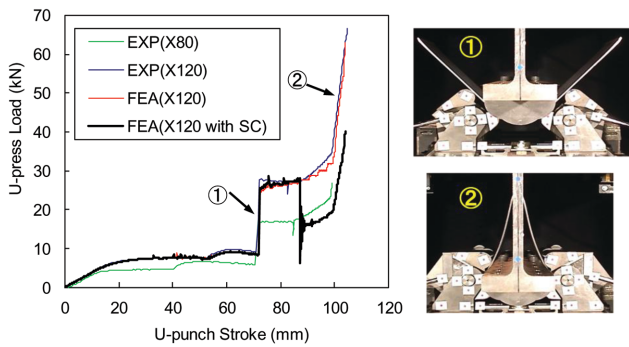


図13 Uプレス中の荷重挙動  
Loading behavior during U press

で表され、Dは外径を示す。鋼管の真円度は敷設現場で行われる周溶接部の目違いを軽減するために必要となり、小さいほど好適である。拡管はUOE造管プロセスの最終工程であり、拡管率が大きいほど製品真円度が向上することが理解できる。一方では拡管前の真円度とも正の相関があり、拡管工程のみならず、C-U-O プレスを通しての最適ツーリングが有効であることを結果は示唆している。

## 7.2 成形荷重予測と設備設計への適用

図13にミニプレス実験でのX80とX120のUパンチ荷重挙動とFEAによるX120の荷重挙動をサイドシリンダーの有無で示す。X120のパンチ荷重は①と②の2回の急激な増加で特徴付けられる。①の増加はロッキングダイが回転し始める過程で生じ、②の増加は板端部がパンチバーに接触する過程で生じることがわかる。X80では荷重挙動はX120と同様の履歴を呈するが、その絶対値は材料強度低下に伴い半減する。X120の実機造管ではUプレスの能力不足に陥る懸念がある。

この対策を考案する過程で数値解析シミュレーションを活用した。X120の実験値とFEA予測値を比較すると荷重絶対値、及び挙動とも両者はよく一致する。サイドシリンダー機能を付与したFEAではロッキングダイの回転が任意の値に達したときに回転周方向荷重を発生させている。この時点でメインシリンダーの荷重は半減し、最終荷重も大幅に低下できることを結果は示している。実機設備ではメインシリンダー圧力と周方向荷重を負荷するサイドシリンダー圧力は連動しているため、現行能力のまま、高強度材の成形が可能になる。

## 8. UOE鋼管曲げシミュレーション結果

本章ではUOE鋼管が有する直交異方性が座屈特性に及ぼす影響について数値解析シミュレーションにより明らかにする。

### 8.1 曲げ座屈限界の予測精度

図14にPipe No.2の曲げモーメント-歪み曲線を示す。

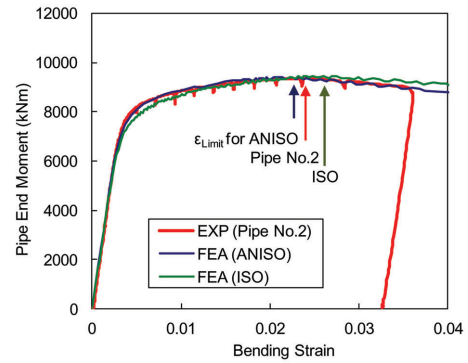


図14 曲げモーメント-曲げ歪み曲線  
Bending moment vs. strain curves

ここで歪みは式(6)による曲げ歪みで算出した。また、図にはm-Hill (ANISOで標記)とMises (ISOで標記)の降伏関数により計算された曲げモーメント挙動も示す。曲げモーメントが最大値に達した以降は局部座屈が急速に進行するため、モーメント最大値での曲げ歪みを圧縮歪み限界、 $\epsilon_{Limit}$ と定義する。実験値とFEA予測値で $\epsilon_{Limit}$ を比較するとISOでは $\epsilon_{Limit}$ を過大に評価していることがわかる。一方、ANISOでは実験値をより精度よく予測できている。降伏開始点を比較するとISOによるモーメント挙動は実験値、及びANISOよりラウンド化している。これらはC方向SS曲線の降伏伸びと高降伏強度が曲げ変形能を劣化させ、一方で降伏点を押し上げていることを意味する。

図15にはPipe No.3の局部座屈進行後の変形図を実験とANISOを使用したシミュレーションの比較で示す。局部座屈の発生箇所は実験とFEAで一致し、図14で示したモーメント挙動と併せてm-Hillにより直交異方性を有するUOE鋼管の座屈特性を高精度に予測できることが明らかになった。

図16には3本の実管試験に対してANISO、ISOによるFEAの $\epsilon_{Limit}$ を比較する。造管ままのPipe 1ではISOでも予測誤差は比較的小さくなっている。しかし、Pipe 2では予測誤差は前述の理由で大きくなり、Pipe 3ではさらに拡大する。Pipe 3では硬化則の影響に加え、局部座屈発生位

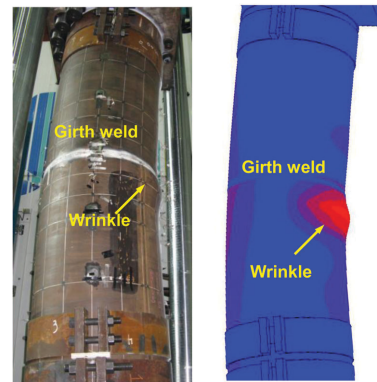


図15 曲げ試験時の局部変形  
Local buckling during bending test

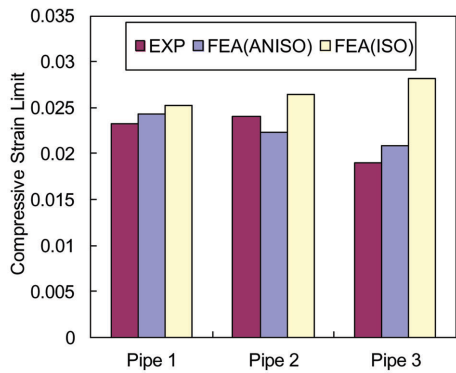


図16 実験値とFEAの圧縮歪み限界の比較  
Comparison of  $\epsilon_{Limit}$  between experiment and FEA

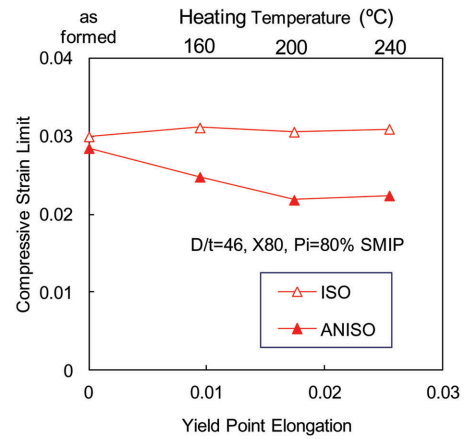


図18 圧縮歪み限界に及ぼす降伏伸びの影響  
Effect of YPE on  $\epsilon_{Limit}$

置が図14の上部の鋼管から発生したことに一因があると考えられる。

### 8.2 直交異方性が鋼管の座屈特性に及ぼす影響

図17には $\epsilon_{Limit}$ への内圧の影響をANISOとISOで解析した結果を示す。いずれの解析結果もこれまでの研究が示唆してきたように内圧負荷に伴い、上昇する。40%SMYS以下の低圧領域では両者に有意差はないものの、SBDに適用されるような高設計係数(72%SMYS以上)では従来のような等方硬化則の使用では $\epsilon_{Limit}$ を過大に評価してしまう危険性のあることが明らかとなった。

一方でC方向SS曲線がラウンド化していれば高内圧下でもC方向SS曲線が $\epsilon_{Limit}$ を低下させることはない。そこで図18にD/t=46, X80材の80%SMYS下でのC方向YPEと $\epsilon_{Limit}$ の関係を示す。X軸の第2軸にはYPEに対応する加熱温度も示す。これより加熱温度160℃以上でYPEが発現し始めることに伴い、 $\epsilon_{Limit}$ は低下するが、YPEが約2%となる200℃以上では低下割合はほぼ一定となる。

YPEの $\epsilon_{Limit}$ への影響はその大きさに加え、D/t, 及び内圧に影響を受けるため、プロジェクト毎に定量化を図る必要がある。図19にはANISOとISOでの $\epsilon_{Limit}$ の計算によりC方向SS曲線の影響を考慮したときの $\epsilon_{Limit}$ の減少率を示す。これより薄肉で高設計係数を適用する鋼管ほど、減

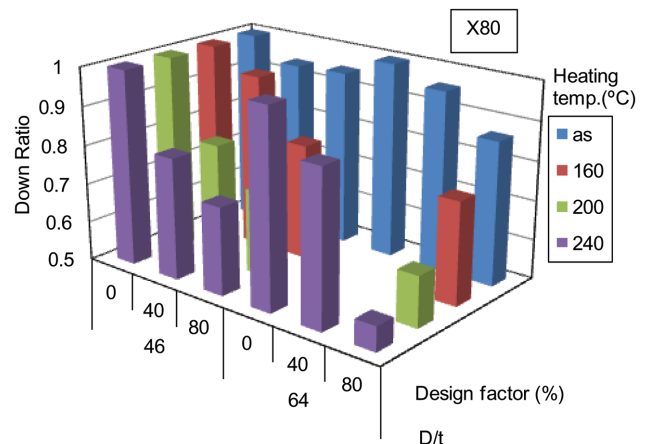


図19 塑性異方性による圧縮歪み限界の減少率  
Reduction ratio of  $\epsilon_{Limit}$  by plastic anisotropy

少代が大きくなるといえる。このような設計は長距離ガスパイプラインに相当し、不連続永久凍土地帯のようなSBDが適用される環境ではC方向SS曲線の影響を考慮することの重要度が高いと考えられる。

従来のSBDにおける $\epsilon_{Limit}$ の決定では実管試験で実証された数値解析シミュレーションを使用し、規格強度範囲を考慮しながら性能限界値を予測してきた。本研究で、加工硬化の直交異方性を定義できる降伏関数を開発することでC方向SS曲線が鋼管の曲げ座屈特性に及ぼす影響が明らかとなり、SBDの信頼性向上に貢献できる。

## 9. 結 言

高強度UOE鋼管の成形では過大なスプリングバックによる難成形性、及びプレス能力不足が課題となる。また、UOEラインパイプではその製造方法、及び耐食塗装加熱による直交異方性のモデル化が鋼管座屈特性解析への鍵となっていた。本研究成果を以下に示す。

(1) 曲げ、曲げ戻しが繰り返されるUOE造管においてTeodosiu-Huの降伏関数を汎用FEAプログラムに適用することで高精度の数値解析成形シミュレーション法が確立できた。

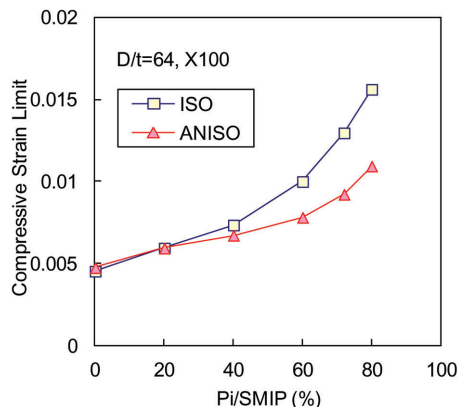


図17 圧縮歪み限界に及ぼす内圧の影響  
Effect of internal pressure on  $\epsilon_{Limit}$



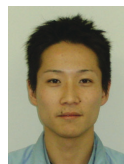
- (2) 実機製造設備に成形モデルを適用するためにプレス機のハウジング剛性をばね定数化することで実効性のある解析ツールとなり得た。
- (3) 以上の数値解析シミュレーションにより、高強度材の成形条件、及び設備改善指標の導出が可能となった。
- (4) 加熱後のUOE鋼管で観察される加工硬化異方性を取り込める降伏関数をHillの降伏関数を改良すること(m-Hill)で提案した。
- (5) m-Hillを取り込んだ鋼管曲げFEAモデルにより、C方向SS曲線上に現れる降伏伸びが曲げ座屈限界を低下させることが明らかになった。
- (6) C方向降伏伸びの座屈への影響は鋼管サイズ、内圧に依存し、これらをダイヤグラム化することでSBD信頼性向上に貢献できる。

参照文献

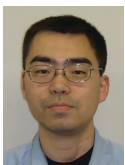
- 1) 鈴木 他:高強度鋼板における形状凍結性予測のための高精度材料モデルの開発. 塑性と加工. 46(536), 636-640(2005)
- 2) 津留 他:高強度UOE鋼管の成形性, 及び座屈特性の数値・実験解析評価. 日本鉄鋼協会第159回春期講演大会, Vol.23, p.297-300
- 3) Tsuru, E. et al.: Numerical Simulation of Buckling Resistance for UOE Line Pipes with Orthogonal Anisotropic Hardening Behavior. Proc. of 2008 Int. Offshore and Polar Engineering Conf. ISOPE, p.104-110
- 4) Tsuru, E., Agata, J.: Buckling Resistance of Line pipes with Girth Weld Evaluated by New Computational Simulation and Experimental Technology for Full-scale Pipes. Proc. of 2009 Int. Offshore and Polar Eng. Conf. ISOPE, p.204-211



津留英司 Eiji TSURU  
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部  
主幹研究員 工博  
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



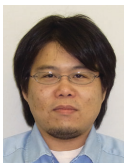
白神 聡 Satoshi SHIRAKAMI  
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター  
研究員



阿形 淳 Jun AGATA  
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部  
主任研究員



篠原康浩 Yasuhiro SHINOHARA  
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部  
主任研究員



永田幸伸 Yukinobu NAGATA  
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部  
研究員 工博