

# 鋼管を支える数値解析技術

## Numerical Analysis Techniques to Support the Reliability of Steel Tube and Pipe Products

正村 克身 MASAMURA Katsumi JFE スチール 鋼管セクター部 主任部員(部長)・工博  
園部 治 SONOBE Osamu JFE スチール スチール研究所 鋼管・鋳物研究部 主任研究員(課長)  
鈴木 信久 SUZUKI Nobuhisa JFE 技研 主席研究員(部長)・工博

### 要旨

鋼管商品の信頼性を確立するために活用されている数値解析技術の現状を紹介する。自動車用部品やラインパイプなど高い安全性を求められる機器、構造物に使用される鋼管は高い信頼性を要求されている。自動車用鋼管の2次加工時の変形挙動やパイプラインの破壊限界の定量化するために、JFE スチールでは実験による確認と数値解析技術による評価を行い両者が良い一致を示すことを確認した。

### Abstract:

Numerical analysis techniques currently utilized to establish the reliability of steel pipe products are introduced. High reliability is required for steel pipes used as mechanical and structural components, such as automobile parts and line pipes, to ensure the product safety. To quantify the rupture strength of pipelines and the deformation behavior of steel pipes for cars during the secondary forming, numerical analyses are performed along with selected experiments at JFE Steel. Calculated figures have a good correlation with experimental results.

## 1. はじめに

本特集で紹介しているように、鋼管は幅広い用途に使用されており、その要求特性も多岐にわたっている。特に、エネルギー産業に使用されるパイプラインや油井管、また自動車の部品に使用される鋼管では安全性を確保するために高い信頼性が求められている。安全性を確保していくためには、破壊現象の理論的な解析および実験による安全性の実証が重要である。しかし、さまざまな実使用条件を想定した多数の実験を実施することは困難である。これを補完する手段として数値解析技術がある。鉄鋼業において数値解析技術は製鉄、製鋼プロセスにおける熱流体解析や流動解析、圧延プロセスにおける材料の変形挙動など鉄鋼の製造にその技術を活用している<sup>1)</sup>。

JFE スチールの鋼管分野においても数値解析技術は、

- ・自動車用部品の二次加工時の変形シミュレーション
- ・地盤変動によるパイプラインの変形挙動
- ・パイプラインの高速延性破壊挙動の予測<sup>2)</sup>
- ・油井管ねじ継ぎ手のシール性評価<sup>3)</sup>

などさまざまな分野に応用されている。

数値解析技術を活用することによって、たとえば、パイ

プラインが地盤の変動によってどのような変形をするのか、どのような破壊が生じ得るのか、そのとき材料特性はどのような影響を与えるのかなどを定量的に評価することができる。

近年のコンピュータの進歩および有限要素解析（以下、FEA）の発展により、大きな構造物の複雑な変形挙動を計算で予測することが可能となった。特に、JFE スチールでは、材料メーカーとして実験的な破壊試験と数値解析技術を組み合わせることによって材料の変形や破壊挙動を定量的に評価し、安全性および信頼性の実証を主眼においた研究を実施している。本論文では、自動車用鋼管の二次加工性の評価およびラインパイプの安全性評価の例を紹介する。

## 2. 鋼管二次加工における数値解析技術

鋼管二次加工の技術分野では、たとえばチューブハイドロフォーム（以下、THF）における成形部品の形状は3次元に複雑な場合が多く、さらに曲げ加工、潰し加工といったなどの THF 以前の予成形を必要とするため、成形品の寸法形状や精度を事前に定量的に予測するには実物相当の実験が必要となる。

THF は金型費が大変高価であるため、数値解析シミュ

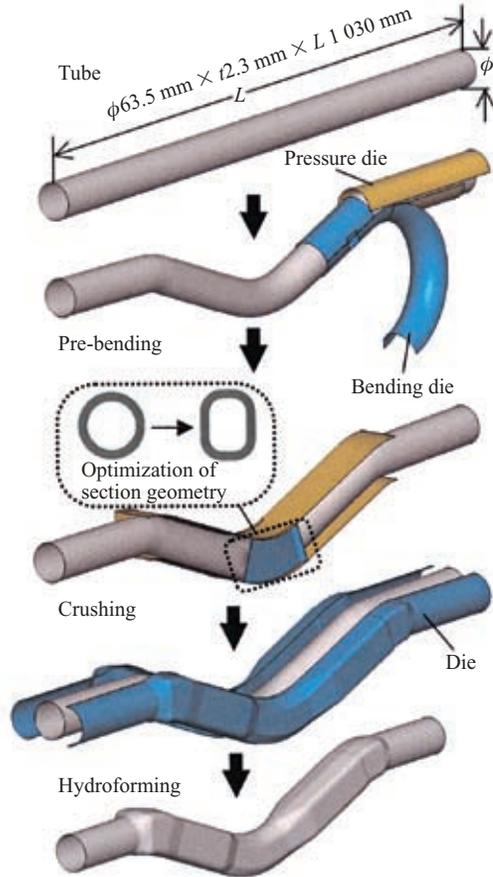


Fig. 1 Process of tube hydroforming

レーションを用いて成形可能性や金型形状について予測できれば、費用低減効果は非常に大きい。最近、FEA技術における動的陽解法 FEA の適用拡大と電子計算機の高速度・低廉化とが相まって、成形可否判断や型修正効果の検討に関する塑性加工の変形解析シミュレーションが実用段階に達している。

現状では、自動車会社、部品会社においては不可欠な技術として普及し、素材会社においても、FEAによって材料特性改善が成形に及ぼす効果、材料と成形技術に起因する成形不良の検討に極めて有効な手段として活用している。

FEA が有用となる鋼管二次加工の典型的事例としては、上記の曲げ・潰しの予成形工程を含む THF 多工程解析が挙げられる。FEA を行った解析例を Fig. 1 に示す。部材形状は自動車のサブフレーム部品を想定したモデル形状であり、THF の実験はアイダエンジニアリング(株)と共同で実施された。鋼管を最終製品形状に類似した形状に曲げ加工、プレス潰し加工など予成形をした後金型に装入し、軸押し力と内圧という二種類の加工力を負荷して所定の金型形状に張出成形する工程である<sup>4,5)</sup>。このため、曲げおよび潰し加工におけるひずみ変化の解析結果を THF の解析に引き継いで、THF における減肉による破断危険部位やわれ・しわなどの成形不良の発生個所について検討することが重要な課題となる。

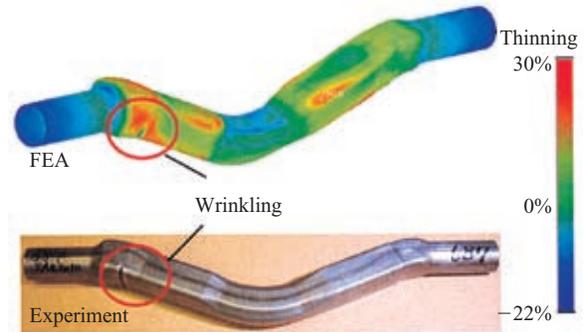


Fig. 2 Comparison of results between an FEA and an experiment (Case 1)

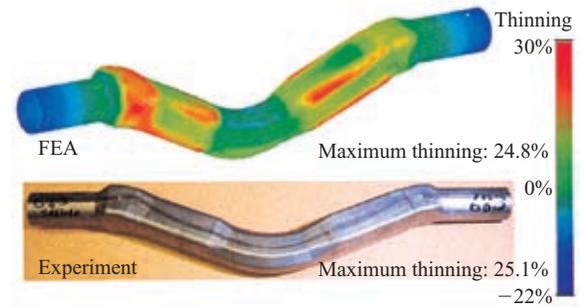


Fig. 3 Comparison of results between an FEA and an experiment (Case 2)

Fig. 2 および 3 に FEA および FEA と同一加工条件で内圧と軸押しの負荷条件（ローディングパス）を変化させた実験結果を示す。Case 1 はしわが発生した例であるが、FEA と実験でしわ形状は非常によく一致している。また、Case 2 の場合はしわの発生なく成形が完了した例であるが、最大肉厚減少率は FEA と実験でほぼ一致している。Case 1 と Case 2 において、しわ発生の有無を生じた原因は、内圧と軸押しの負荷条件にあり、Case 1 の軸押しを開始する成形圧力が、Case 2 の場合より約 1 MPa 低い点にある。

FEA プログラムは市販されているが、FEA により良好な解析精度を得るためには、材料特性、金型条件、加工条件を FEA の境界条件として高度に反映させることが重要である。

### 3. ラインパイプの安全性評価における数値解析技術

近年、天然ガスの生産地から消費地までの輸送距離が増加する傾向にあり、ラインパイプの高強度化と輸送圧力の高圧化が図られるようになってきている。このような長距離天然ガスパイプラインは、地震地域、寒冷地域、氷海域などに敷設されることが多い。このため、高強度ラインパイプは、HIPER のように優れた変形特性あるいは余裕のある曲げ局部座屈歪を保有することが要求されるようになってきている。



Fig.5 Bending of a buried pipeline due to shear deformation



Fig.4 Shell wrinkling due to bending

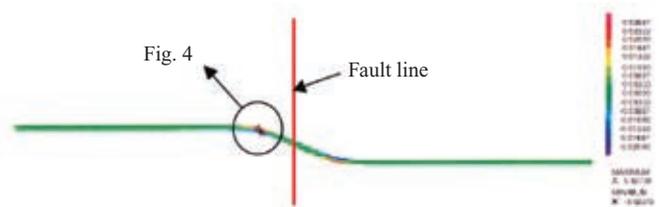
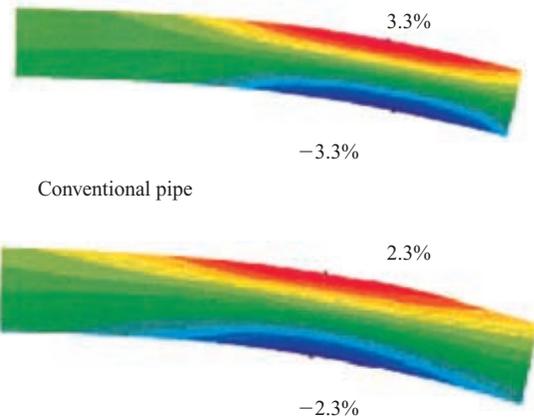


Fig.6 Deformation of a buried pipeline (Fig.2)



HIPER

Fig.7 Comparison of strain distribution of buried pipeline

現行の設計基準あるいは設計指針に記述されているラインパイプの局部座屈歪推定式は実験式であり、 $D/t$  ( $D$ :管径、 $t$ :管厚)の関数で表されている。材料特性や内圧の影響は考慮されていないのが一般的である。また、実験式は従来強度のラインパイプと従来の輸送圧力の範囲で提案されているため、上述の高強度ラインパイプおよび高圧パイプラインには適用できないのが実情である。

高強度ラインパイプの局部座屈歪は、実管による座屈実験によって求める必要があるが、大口径ラインパイプの座屈実験には多大な費用がかかる。このため、必要最小限の実管座屈実験を行ない、材料特性(加工硬化特性)や幾何学的初期不整(管径や管厚のばらつき)や内圧を考慮した有限要素解析(FEA)によって、局部座屈歪を精度良く推定することが一般的である。さらにFEAは、実管実験では制約されるパラメータを任意の変数とすることも可能であるため、多くの情報を得ることができる。

曲げモーメントによって発生した座屈波形を、実管実験とFEAを比較してFig.4に示す。FEAの結果は、実測された応力歪曲線と幾何学的初期不整と内圧を考慮しているため、圧縮座屈歪と座屈波形が精度よく推定されている。

局部座屈歪については、 $D/t$ の他に加工硬化特性が重要な影響因子であるが、実管実験で加工硬化特性の影響を定量的に求めることは困難である。このような場合、FEAが最適な手法となる。

Fig.5に示す横ずれ断層(一面せん断変形)の模型実験を例に、加工硬化特性がパイプラインの安全性に及ぼす影響を定量的に示す。Fig.5の左図がせん断変形した土槽で、右図が変形した埋設パイプライン(模型)を掘削した状態である。Fig.6は、埋設パイプライン(模型)全体の变形に関するFEAの結果である。パイプラインの曲げ変形は、断層面からやや離れたところに集中している。Fig.7は、曲げ変形が集中した部分について、断層変位が3mの場合における軸歪分布を表している。Fig.4の上図は、通常ラインパイプの応力歪曲線を仮定した結果で、下図はHIPERの応力歪曲線を仮定した結果である。

断層変位が3mの場合の計算結果をFig.7に示す。通常パイプの最大圧縮歪は3.3%で、HIPERは2.3%である。HIPERの最大圧縮歪は通常パイプの約60%であり、歪分布も通常パイプよりも広い範囲に分布している。また、HIPERの局部座屈歪は通常パイプの1.5倍程度である。したがって、地震地域や寒冷地などで発生する地盤変位に対して、HIPERは通常パイプの2倍以上の安全性を有しているものと推定することができる。

実管実験結果とFEA結果の比較、模型実験結果とFEA結果の比較については、紙面の都合で省略した。しかし、適切な入力データを採用したFEAにより、ラインパイプの変形性能や埋設パイプラインの変形は、十分な精度で推定することが可能である。

#### 4. おわりに

数値解析技術は実験だけでは確認できない条件における材料の挙動を評価する上で大変に有効である。JFE スチールでは、材料の供給ばかりではなくこのような材料を使う

上で必要な技術についても研究し、お客様が材料を使う上で必要な情報を提供していく。

#### 参考文献

- 1) 数値解析・形鋼特集号. 川崎製鉄技報. vol. 33, no. 3, 2001.
- 2) Makino, H.; Inoue, T.; Endo, S.; Kubo, T.; Matsumoto, T. Int. J. of Offshore and Polar Eng. vol. 14, no. 1, 2004-03.
- 3) 本特集号. 製品・技術紹介.
- 4) 淵沢定克. 175/176 西山記念講座, 2001, p. 55-77.
- 5) 阿部英夫, 園部治. プレス技術. vol. 39, no. 7, 2001, p. 24-27.



正村 克身



園部 治



鈴木 信久