シームレス鋼管製造への数値解析技術の適用

Application to Manufacture of Seamless Steel Pipe with Numerical Analysis

勝村龍郎KATSUMURA TatsuroJFE スチールスチール研究所鋼管・鋳物研究部主任研究員(副部長)佐々木俊輔SASAKI ShunsukeJFE 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)・博士(工学)上岡悟史UEOKA SatoshiJFE スチールスチール研究所鋼管・鋳物研究部長

要旨

塑性加工に対する有限要素法を用いた数値解析技術の発展は目覚ましく,大変形を伴う圧延加工でも精度よく解 析でき,製鉄プロセスにも広く適用されるようになっている。シームレス鋼管の製造工程は,一般に中実丸棒を中 空化する穿孔,製品の鋼管厚さ(以下,管厚)とほぼ同等にする延伸,そして製品外径・管厚を整える定径加工か らなり,大変形で複雑な加工を受けることが知られている。従来,高精度・高品質な製品を得るためのプロセス開 発には小型実験で得た知見を利用していたが,求められる精度の向上や製品の高強度化・高合金化に伴う疵発生懸 念により実験数・開発時間の増加が課題となっていた。そこで数値解析適用による効率化,高精度化を進めてい る。本稿ではその一端を紹介する。

Abstract:

Recently, numerical analysis, especially finite element method, has made remarkable progress, and is often applied to rolling processes because it can accurately analyze even processes with large deformations. The manufacturing process for seamless steel pipe generally consists of piercing a solid round bar to make it hollow, elongating it to make the wall thickness close to the product, and sizing it to match the diameter and wall thickness with the product, and they are known to deform largely and complicatedly. In the past, knowledge obtained from small-scale experiments was used in process development to obtain high-precision, high-quality products. However, the number of experiments and the development time have increased due to the higher required precision and the occurrence of defects caused by higher strength and alloying of the product. Therefore, improvement of efficiency and accuracy has been achieved through the application of numerical analysis. This paper introduces a part of the results.

1. はじめに

シームレス鋼管の製造法は、中実部材を中空化するプロ セスである穿孔工程について塑性加工技術の視点から2種 に大別できる。一つは押出しを用いる方法であり、もう一つ は回転鍛造を用いる傾斜穿孔法である。いずれも中実材を 中空の管に製造するにあたり大きな変形が生ずる。その後、 圧延により中空素管をさらに所望の管厚とする工程でも、複 数スタンドによる連続圧延を用いるか、あるいは一つのスタ ンドで複数回圧延する方法などさまざまな形態がある。そし て最終工程では管の外径を整える定径を行う。また管の品 種によっては熱間で素管を製造した後、さらなる冷間加工を 施すこともあり、一連の工程はかなり複雑であり変形も多様 で大変形を伴うことが多い。

このようなシームレス鋼管の製造技術開発にあたっては, 従来,その加工法を模擬した実験を行うことが一般的で あった。例えば回転鍛造を用いる穿孔における変形の可視 化をプラスティシンと呼ばれる粘土を工夫して用いることで 実施する¹¹ などが行われた。しかし熱間工程の小型模擬実 験では,試験機と実験素材で寸法比を合わせることにより, 変形についてはある程度類似した結果を得ることは可能で ある一方,温度の影響については小型サンプルであるため, 分布まで合わせることは困難である。そのため対象となる現 象を限定した複数種の実験により,実機へ反映させることが 行われてきた。

一方,計算機の発達に伴い,数値解析は大規模かつ高精 度で実施できるようになってきた。鋼管圧延のように複雑か つ大変形となる現象の解析は,1990年前後から開発・報告 が行われはじめた²⁵⁾。当初は実現象の再現や変形メカニズ ムの解明に数値計算が用いられてきたが,2000年代後半以 降の計算機の高速化・大規模化により,ほぼ実現象を再現 できる状況になりつつある。そのためプロセス開発において 数値解析の役割は重要となり,適用範囲は小型試験に替わ る,あるいはその一部を担うものから,実機そのものをシ

²⁰²⁴年3月28日受付



Fig. 1 Schematic diagram of seamless pipe manufacturing process

ミュレートし開発に役立てることが可能なレベルにまで進歩 しつつある。

そこで本稿では、回転鍛造を用いる大量生産方法である マンネスマン穿孔-マンドレルミル/プラグミル圧延-レ デューサ/サイザー工程について、個々の課題とそれに対す る数値解析の適用事例を紹介する。

2. マンネスマン穿孔工程と数値解析

2.1 マンネスマン穿孔

図1に当社のシームレス管製造ラインの熱間工程を示す。 同図上下段に分けた2種の製造工程において、もっとも加 工を受けるのは穿孔工程である。このマンネスマン穿孔は、 図示された樽型や円錐型のロール間に丸断面形状の素材を 挿入することにより、材料中心に回転鍛造効果あるいはマン ネスマン効果⁶⁾と呼ばれる延性破壊を生じせしめる現象を用 いることで中空化する原理を用いている。この時のロール形 状やその軸が圧延材の進行方向と傾けられて配置されるこ とにより生ずる角度によって加工、すなわちひずみの分布や 量が異なる。この中空化プロセスで、過度な破壊は製品内 面の疵となり好ましくないことから、主に課題となるのは材 料中心の破壊予測やひずみの可視化である。

穿孔による回転鍛造効果は,丸棒材に対し相対する2面 から外力を加えることで材料の中心部が広がろうとすること



図2 穿孔 FEA モデル概略図 Fig. 2 Schematic diagram of piercing FEA model

により生ずる引張応力が、ロール回転に伴い連続的かつ繰 り返し付与されることで起こるせん断的な破壊現象")であ る。穿孔はパスライン中心に配した砲弾型の内面工具であ るプラグにより中実素材を中空化させるが、材料中心に過度 な回転鍛造効果が生ずると製品内面の疵となるため、抑制 できる条件の把握が必要となる。その条件は被加工材や加 工温度、圧下率などが大きく影響することが経験的に知ら れており、この破壊現象を調査するために、小型試験で傾 向を把握する方法も多用されてきた⁸⁾。一方で,小型サンプ ルにより得た定量値を工程生産、すなわち操業条件へ直接 反映させることは困難であった。なぜなら小型試験では定性 的に鋼材間の良否の比較はできても、マンネスマン穿孔とい う複雑かつ大きな変形を伴う現象に対する圧延条件の細か な変更に対するひずみや応力,破壊現象との定量的な対比 が明確にはできなかったためである。特に小型試験は実機 と寸法の比率を合わせる必要があるが、実機では数種類の 素材寸法を用いることが一般的で、これを小型試験に適用 すると比率が合わず、さらには素材中心に存在しやすい欠 陥の比率が実機換算ではまったく整合しないという問題も あった。

2.2 FEM 解析による穿孔の定量把握

穿孔中の変形などを可視化し定量把握するためには数値





解析が必須である。穿孔を想定した数値解析は,2010年前 後から汎用解析ソフトを用いた報告がいくつか行われはじめ ている⁹¹²⁾が,穿孔そのものを取り扱った例は限られ,穿孔 条件変更による対比はほとんど認められず,またマンネスマ ン効果による軸芯割れを起因とした疵の解析,予測に関す る実用的な報告はまれである。そこで本稿では陰解法による 剛塑性有限要素解析¹³⁾を行った報告に基づき,工具形状の 拡張などの改良を加え,相当塑性ひずみや延性破壊を可視 化することとした。

ラボ穿孔を模擬した解析モデルを図2に示す。同図のモ デルは、図示した被圧延材、プラグ、円盤状のガイドシュー および一般的な樽型ロール(図示せず)を有する2ロール による穿孔形式とした。また図3には穿孔解析結果の一例 として相当塑性ひずみ分布を示す。この解析に用いた小型 穿孔条件、すなわち直径58 mmの素材を砲弾型のプラグ工 具径 ϕ 49 で穿孔した場合、最大の相当塑性ひずみが10 程度 であることが認められる。 ϕ 58 mm素材が7 mm厚の管に なった場合を仮定し、管厚の圧下からひずみを求めると、素 材半径を元管厚としたなら1.4 程度になる。あるいは素材面 積と管の断面積比で計算すると、0.7 程度となる。一方で粘 土を用いた穿孔変形の可視化¹⁾によれば、断面内は大きなせ ん断を受けていることが認められる。これらより穿孔では非 常に複雑な変形過程、特にせん断変形を受けて鋼管となる 過程で大きなひずみが付与されていることが理解できる。

さて、マンネスマン効果は中実材を中空にするための工具 であるプラグの圧延入側で生ずる。またこの破壊予測には、 延性破壊に対する材料の閾値が必要となる。そこで異なる 外径の円柱ビレットとプラグを置かない、純粋なマンネスマ ン効果の解析を行うことにより、小型試験で破壊の生じた値 から閾値を決定、これをもって各穿孔条件における延性破 壊を予測する手法を開発した¹⁴⁾。この結果を図4に示す。こ の相関図の横軸は素材径に対する圧延後の外径の圧下率で あり、縦軸は延性破壊式として用いた Cockcroft-Latham の





Fig. 4 Relationship between rolling reduction and C-L parameter

式¹⁵⁾ から得た値(以下 C-L 値)である。同図中◆は素材丸 棒を横軸で示した外径圧下率で圧延した場合に得られる解 析の C-L 値を示す。また●は小型実験で割れが生じた場合 のプロットである。これらから,ある条件でこの材料を用い た場合には,C-L 値でおおよそ 1×10⁷の値を超えるとマン ネスマン効果による破壊が生ずる可能性があることを示唆し ている。圧延条件を変更した場合の解析により得られる C-L 値を図 4 の C-L 値,すなわち破壊限界を下回るように設定 すれば図 4 に示すようなマンネスマン効果による疵を抑制で きることが認められた。

3. マンドレルミル圧延における数値解析

3.1 マンドレルミル圧延

中空化した鋼管の厚さを減ずる延伸加工において、主な ミル形式は2種あり、その一つがマンドレルミルである。こ れは一般に6~8スタンドからなり、ロールに円弧上の孔型 を設けることで鋼管内面側に挿入したバーとともに圧延し, 鋼管の厚さを減ずる圧延機である。隣り合うスタンドは2 ロールミルの場合, 圧延長軸方向に対して中心から90度逆 に傾けられ、前スタンドで主に圧延された箇所は次スタンド では圧延されない。そのため断面内は不均一な変形を示し, 特に圧延されない箇所は被圧延部の伸びに伴い未加工であ りながら引張を受けることになり欠陥を発生する可能性があ ることが知られている¹⁶⁾。また孔型圧延であるため、過度な 幅拡がりは狭いロール間隔への噛み出しとなることもあり, 他方,幅拡がりが小さすぎると被圧延材が内面に挿入され ているバーと完全に接触し, 管とするために必要な圧延後の バーの抜き取りが困難となることから、圧延中の変形や応力 の推定が重要になる。

3.2 工具にかかる負荷の FEM モデルによる推定

このように孔型圧延における課題もひずみ,応力の定量 把握であり,従来の実験的手法に代わり近年では数値解析 による検討が一般的となっている。

古くはスラブ法を微細メッシュとして解析を行った例もあ る²⁾が、現在では汎用解析コードが用いられることが多い。 寸法精度向上のための圧延条件検討に加え、圧延長軸方向 に直交する断面における不均一変形に起因した欠陥や圧延 の不具合に関する検討もなされている¹⁷⁻¹⁹⁾。このように被圧 延材の変形予測は適用事例が増えているが、ロールによる 負荷を受けるのは常に被圧延材と接している内面工具の バーである。バーに関してはその表面品質が製品内面に転 写され影響をおよぼしたり、圧延後の抜き取りが困難になる など、圧延そのものに大きく影響する。そこで圧延中のバー の変形について数値解析を適用し検討した²⁰⁾。

解析には汎用解析ソルバー ABAQUS を用いた。また実験 に用いた材料は 0.9% Sb を含有させた硬質鉛である。解析



図 5 単スタンド形式のマンドレルミル圧延解析モデル²⁰⁾ Fig. 5 FEA model of single stand mandrel rolling





に用いた硬質鉛の流動応力は事前に室温で圧縮試験を行う ことにより求めた。解析モデルの外観を図5に示す。バー に負荷される応力の測定にはひずみゲージを用い,ゲージ が圧延されない孔型ロールフランジ部で実施し精度を確認 した。

このモデルを用い,小型実験における断面形状と解析を 比較した。これを図6に示す。同図のプロットおよび線は管 横断面の内外表面を示す。これより汎用解析ソルバーで構 成されたモデルと実験で得られた寸法は非常によく一致して いることが認められる。

この時のあるスタンドでの圧延中にバーにかかっている圧 延方向応力を図7のコンターに、またこの圧延中における バー表面からの直径深さ方向における圧延方向応力の推移 をまとめた結果を図8に示す。

図7から,圧延により工具と材料が接触を開始した Inlet side と図示した個所以降では,工具であるバーもロール孔 型と触れないフランジ部で圧延長軸方向に大きな引張応力



図7 単スタンドマンドレルミル圧延における工具表面の応力²⁰⁾

Fig. 7 Surface stress on mandrel bar in mandrel rolling FEA



Fig. 8 Rolling direction stress on surface of mandrel bar

場が形成されることが認められる。これはあたかも被圧延材 と同様に圧延されるかのような変形,応力が負荷されている ことを示している。また図8より圧延中には,フランジ部で は常に高い圧延方向応力がバー内部にまでおよぶこと,他 方,ロール径が最も小さくなる孔型底部では圧延入側およ び出側においてほぼ同程度の応力分布となり,表面で引張, 中心側で圧縮となることがわかった。これらより特にフラン ジ部ではバー表面にき裂が生じやすく,折損などの可能性 があることが示唆される結果となった。このように解析を適 切に用いることで,操業や各種圧延条件における課題を事 前に把握することができる。

4. サイザー圧延における数値解析

4.1 サイザー圧延

延伸圧延により製品と同等程度の厚みまで作り込まれた 鋼管は,所望の外形寸法を得るために数スタンド~20スタ ンド以上の定径圧延が施される。この定径圧延機は延伸圧 延後の素管から製品に至るまでの外径圧下率や圧延方向張 カ付与によりストレッチレデューサとサイザーの2種に大別 される。本章で取り扱うサイザーは4~8スタンドからなり, 所望の外径を,低外径圧下率かつほぼ張力がかからない圧 延で得る。これらは,20スタンド程度を用い高い張力を付 与できるストレッチレデューサとは大きく異なる。

サイザーは従来から2ロール方式であったが,近年はマ ンドレルミルとのタンデム化を背景に,ストレッチレデュー サと同様の3ロール方式も導入されてきた。2ロール方式の 場合は,隣り合うスタンドは圧延長軸方向に対して直交する ように配置され,被圧延材の外径を互い違いに小さくしてい く圧延が行われる。この時,最終スタンドでは所定の外径と なるよう,ロール孔型の最大間隔をその外径と同じく設定す る。

ところで鋼管の外径は多様であり、その多くの外径に対応 するには、最終スタンドのロールを所定寸法と同じ数だけ保 有する必要がある。しかし全サイズ分のロールを保有するこ と、およびサイズ変更の都度ロールを組み替えることは効率 の良い手段とは言いがたい。そこで鋼管寸法に対するロー ル孔型寸法を完全に同一とせずに、間隔調整で対応させる ことが一般的に行われる。言い換えると最終スタンドのロー ル孔型形状は製品のそれと一致していることが望ましいが、 実用上、より大きい孔型を用いロール間隔を狭めることで外 径調整をすることがある。

4.2 サイザー FEM モデルによる寸法精度向上

ロール間隔調整は管のみならず圧延のほとんどの工程で 一般に行われるが,サイザーでは孔型を変えない場合,孔 型の最大間隔となるロール径が最も小さくなる孔型底部(以 下,図中ではBottomおよびその位置での鋼管外径を Bottom diameterと表記)の間隔のみで管の外径を整えよう とすることになるため,最終スタンドのロールフランジ側の 外径が所望製品と合致しなくなる可能性がある。このことは ある1点の外径のみに着目した圧延条件設定では所望の高 精度な圧延ができないことを示しており,鋼管寸法と一致し ない孔型を用いても良い精度の鋼管を得るためには,ほか の指標を参照する必要がある。これは冷間で加工される電 縫鋼管のサイジングでも同様で,真円孔型を圧延条件につ いて解析した事例がある²¹⁾。

そこで汎用解析ソルバーの ABAQUS により 2 ロール形式 の複数スタンドからなるサイザー圧延解析モデルを構築し, 製品外径精度におよぼす圧延パラメータを調査した²²⁾。構築 したモデルを図9に示す。同図中には理想的な条件,すな わち製品外径と孔型ボトム部の間隔が等しい真円となる場 合の模式図も示した。

本来の鋼管寸法と一致しない孔型を用いたサイザー圧延 を行った場合に外径精度が低下する現象は,ロール間隔の みを制御するため,不整な孔型に管の外形が充満しロール フランジ側へ管が大きく変形することで,最大外径と最小外





径の差を平均径で除した値で示される真円度の低下が生じ るためであることが認められた。

そこで所望の外径と真円度を両立させるために FEA モデ ルを用い種々の検討を行った。その結果,最終スタンドで 外径を得る前のスタンドで所望の外径から算出できる外周 長とすることで,最終スタンドでは外径のみを整えれば,鋼 管寸法と一致しないロール孔型でも,最終スタンドのロール 間隔調整のみで所望寸法を得られることが認められた。こ れを従来の外径制御と比較し図 10 に示す。

この最終スタンドの孔型への鋼管の充満を比較した結果 を図11に、従来の外径のみを調整する手法と外周長を制御



図10 最終スタンドと最終前スタンドの孔型形状比較

Fig. 10 Difference of pipe shape between fullness and overfilled state at final and penultimate stand



図 11 サイザー圧延最終スタンドのロール面圧比較 Fig. 11 Contour diagram of surface pressure at final stand



図 12 新外径制御による解析を用いた精度比較

Fig. 12 Comparison of dimensional accuracy between conventional and new rolling control

する新手法で得た管の寸法精度比較を図12に示す。図11 のコンターはロール表面の面圧を示しており、従来法では ロールに被圧延材の管が全周で接触しているが、外周長を 制御する新手法では外径を整えるためにごく一部しか接触し ていないことが認められる。その結果、新手法ではロール間 隔の最大値となる箇所の外径およびロールフランジ部の外 径のいずれもがほぼ同じ値となり、真円度が大幅に改善する ことがわかった。

5. おわりに

本稿では,近年急速に発達した有限要素解析を使用した 鋼管圧延への適用事例を紹介した。鋼管はいずれの工程に おいても3次元的な変形が生じており,特に穿孔ではマクロ 的な変形からは想像のつかないひずみが生じている。また最 近では解析で直接的に破壊現象を取り扱えるようにもなりつ つある。このため素材のバラツキをある程度除外すれば,近 い将来,実操業・実圧延の前に高速な解析端末を用いるこ とで,その場で条件を最適化し,寸法精度が高く欠陥のな い製品を得られるデジタルツインの実現が図られるであろ う。そのためにも今回紹介したような解析ツールをどのよう に使っていくか,その考え方と構築方法を積み上げていくこ とが高度な技術開発につながるはずであり,今後も実現象 の再現性向上と操業最適化を合わせて継続していきたい。

参考文献

- 加藤健三,平澤猛志.模型せん孔機による管材変形の研究.塑性と加工. 1964, vol. 5, no. 42, p. 485-491.
- 2) 平川智之,藤田文夫,鎌田正誠,岡戸克,三原豊,沼野正睦.マンド

レル圧延における塑性変形解析. 塑性と加工. 1983, vol. 24, no. 273, p. 1063-1069.

- 山田健二,小川茂,濱渦修一,菊間敏夫. 三次元剛塑性有限要素法に よるマンドレル圧延の解析. 塑性と加工. 1995, vol. 36, no. 411, p. 384-389.
- 4) 曽谷保博,平川智之,生井賢治,畑中政之,森謙一郎.管材のレ デューサ圧延における3次元シミュレーションと厚肉鋼管製造技術. 鉄と鋼. 1993, vol. 79, no. 3, p. 192-198.
- 5) 奥井達也,山田將之,山田建夫. 3 ロールレデューサの変形解析. 塑 性と加工. 1997, vol. 38, no. 432, p. 192-198.
- 6) Frederick, S. On rolling seamless tubes from solid bars or ingots by the Mannesmann process. Journal of the Society for Arts. 1888, vol. 36, no. 1871, p. 1094.
- 7) 東野豊之,斎藤好弘,外山雅雄,加藤健三. 丸棒の平面ひずみ回転圧 縮における応力解析. 塑性と加工. 1977, vol. 18, no. 199, p. 605-612.
- 8) 加藤健三. 傾斜圧延に対する考察. 大阪冶金会会誌. 1969, no. 10, p. 46-55.
- Fanini, S.; Ghiotti, A.; Bruschi, S. Prediction of The Fracture Due To Mannesmann Effect In Tube Piercing. AIP Conf. Proc. 2007, vol. 908, p. 1407–1412.
- Pater, Z.; Kazanecki, J. Complex Numerical Analysis of the tube forming process using Diesher Mill. Archives of Metallurgy and Materials. 2013, Issue 3, p. 717–724.
- 11) Man-soo, J.; Jangho, L.; Jae-min, C.; Seung-won, J.; Ho-keun, M. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft. Proceedings of the 11th Int. Conf. Tech. Plast. 2014, p. 197-202.
- 12) Xiao-feng, D.; Yuan-hua, S.; Qiu-zu, L.; Chun-jiang, Z. New rotary piercing process for an AZ31 magnesium alloy seamless tube. Mat. Sci. and Tech. 2018, vol. 34, no. 4, p. 408–418.
- 13) Komori, K. Simulation of Mannesmann piercing process by the threedimensional rigid-plastic finite-element method. Int. J. Mech. Sci. 2005, vol. 47, p. 1838–1853.
- 14) Katsumura, T.; Ota, H. Effect of Rolling Conditions on Ductile Fracture During Piercing. Iron & steel Tech. 2020, vol. SEP, p. 136–141.
- Cockcroft, M. G.; Latham, D. J. Ductility and the workability of metals. J. Inst. Metals. 1968, vol. 96, p. 33–39.
- 16) 今江敏夫、岡弘、山本健一. マンドレルミルによる高合金鋼および薄 肉継目無鋼管の圧延方法. 塑性と加工. 1993, vol. 34, no. 390, p. 800-805.
- 17) Hui, Yu.; Feng-shan, Du.; Zhi-qiang, Xu. Influence of Pass Parameters on Retained Mandrel Rolling Process. J. Iron and Steel Res. Int. 2011, vol. 18, no. 2. p31-37.
- 18) Chang, L.; Guangbing, Z.; Xing, H. Finite Element Analysis of Hot-Rolled Seamless Pipe Rolling Process Elastic-Plastic Deformation. Int. Conf. on Electronic & Mech. Eng. and Information Tech. 2011, p. 557–560.
- 19) Dazhi, Z.; Mingsheng, G.; Qingdong, Z.; Aiguo, W.; Xinliang, Z. Simulation study on steel pipe deformation behavior in retained mandrel pipe mill. J. Phys. Conf. Ser. 2020, vol. 1633, p. 1–8.
- 20) Sasaki, S.; Tachi, R.; Matsumoto A.; Katsumura, T.; Ota, H. Influence of mandrel rolling conditions on load of mandrel bar. 24th Int. Conf. on Metallurgy and Mat. 2015.
- 伊丹美昭,阿高松男. 電鍵鋼管の2ロールサイザーの変形解析―薄肉 電鍵鋼管の管端真円度向上技術の開発III―. 塑性と加工. 1996, vol. 37, no. 431, p. 1303-1308.
- 22) Yoshimura, Y.; Sasaki, S.; Katsumura, T.; Miyake, M. Development of Dimensional Control Technology for Seamless Steel Pipe Rolling by Controlling Circumference Length in Sizing Mill. Proceedings of the 14th Int. Conf. Tech. Plast. 2023, vol. 1, p. 173–183.