

シームレス鋼管プロセスの数値解析技術の開発

Development of Numerical Analysis on Seamless Tube and Pipe Process

山根 明 仁*
Akihito YAMANE下 本 豪 紀
Hidenori SHITAMOTO山 根 康 嗣
Kouji YAMANE

抄 録

シームレス鋼管の製造プロセスでは大きなせん断ひずみ加わりますが、高合金鋼は熱間加工性が劣ることが多く、高合金鋼のシームレス鋼管を製造するときにはさまざまな圧延不良や疵が問題となる。これらの発生過程を明らかにし、未然に予防し適切な製造条件を設計するには数値解析は大きな武器となるが、変形が過酷なため精度良く計算をすることが難しく、従来さまざまな技術開発がなされてきた。ピアサー、マンドレルミルを対象に、現在の数値解析技術の開発状況を述べた。ピアサーでは解析モデルと材料試験法の改善により解析精度を改善した。マンドレルミルでは材料特性を正確に反映することで高合金鋼の圧延不良を正確に予測できた。

Abstract

High alloyed seamless tube and pipe production process may have some trouble because the process cause large shear strain, and workability of high alloy is usually not good. Numerical analysis is a strong tool to clarify the process, to prevent the trouble, and to design proper production process. As the seamless tube and pipe process with large shear deformation is difficult to simulate by numerical analysis, the various development has been made. This paper shows our current development of the numerical analysis on piercing mill and mandrel mill. It improves the accuracy by state of the art analysis model and specimen test on piercing mill, and make it possible to predict the key process on mandrel mill process producing high alloyed tube and pipe by a proper model of material property.

1. 緒 言

シームレス鋼管は過酷な環境で用いられることが多く強度や耐腐食性が求められるため、一部のハイエンド品では13%Cr鋼や18-8ステンレス鋼、Ni基合金などの高合金鋼が素材として用いられるが、これらの高合金鋼は一般的に熱間変形性が劣る。さらにシームレス鋼管の製造では、後述するように加工中に大きなせん断変形を伴うため、変形能の限界を超えるひずみ加わりさまざまな圧延不良を生じさせやすい。

このような熱間変形能が劣った素材を、疵なく、所望の寸法のシームレス鋼管に仕上げるには、圧延中の変形挙動を精度良く予測する手段が必要となる。一方、シームレス鋼管の製造プロセスは、局所的に大変形を伴うものが多く数値解析でシミュレーションすることが難しい。

そこで、本論文ではマンネスマン製管法の例を中心にこれまでの予測手段の課題および数値解析技術の開発状況を

述べる。

2. 解析対象とこれまでの解析手法

2.1 シームレス鋼管の製造プロセス¹⁾

解析の対象としているシームレス鋼管の製造プロセスは、整理すると、マンネスマン製管法とプレス製管法に分類される。

マンネスマン製管法の代表的な製造プロセスを図1に示す。マンネスマン製管法とは、円柱状のビレットを穿孔するために傾斜圧延機であるピアサーを用いる製管法である。ピアサーは、ビレットを1対の傾斜ロールで回転させながらプラグに押し当てて穿孔しつつ、最終的にはロールとプラグの間で管を圧延し、所定の外径と肉厚の素管に仕上げる圧延機である。

マンネスマン製管法における延伸圧延プロセスにはマンドレルミルを用いる方式、プラグミルを用いる方式などがあるが、現在主流となっているのはマンドレルミルを用い

* プロセス研究所 圧延研究開発部 主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

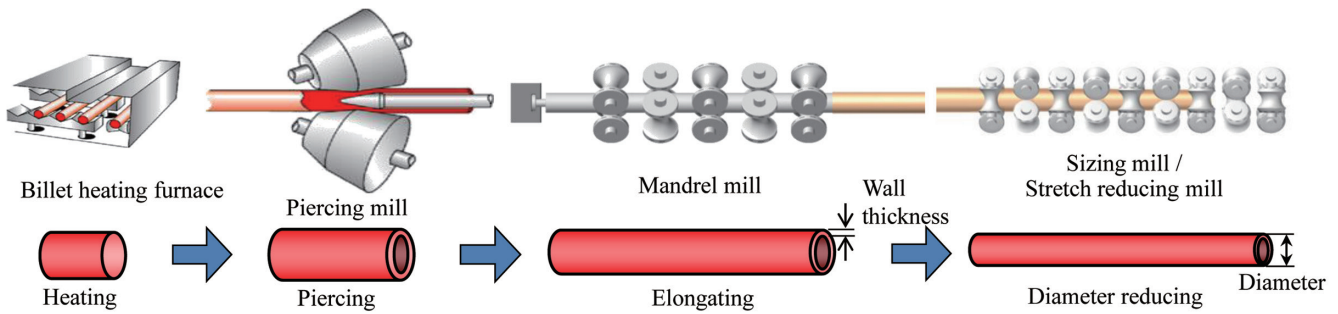


図1 マンネスマン製管法のプロセス例
Schematic of Mannesmann process

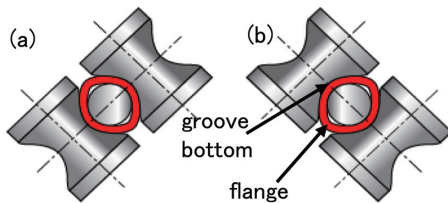


図2 マンドレルミル圧延の断面図

(a) 奇数スタンド断面図 (b) 偶数スタンド断面図
Schematic of Mandrel mill along cross-section view
(a) Odd numbered stand (b) Even numbered stand

る方式である。マンドレルミルは、穿孔された素管にマンドレルバーを挿入した後、孔型ロールとマンドレルバーで肉厚を圧下する連続圧延機である（図2）。1スタンドで2ロールを用いる2ロール式マンドレルミルでは、奇数スタンドと偶数スタンドで、断面内で90°交差する方向を交互に圧延する。

プレス製管法の代表例であるユジーンセジュールネ法は、ビレットに機械加工などによって穴をあけ、その穴にマンドレルを通して、前方押し出しによって管を延伸する製管法である。またプレス製管法には後方押し出しによるエルハルトプッシュベンチ法もある。

2.2 解析対象

シームレス鋼管は一般に強度や耐腐食性が求められる用途に用いられるため、被圧延材は高合金鋼などが多いが、一般に合金成分が多いと熱間変形抵抗は高くなり、そのような素材を圧延するには素材を高温に熱する必要がある。しかし、合金成分が多いと逆に融点は低くなる傾向にあり、加工発熱によって粒界溶解に伴う割れが生じる。加えて動的再結晶、動的回復によって変形中に加工軟化することにより一様伸びが著しく低下するため、熱間変形能は劣る傾向にある。

シームレス鋼管の製造プロセスにおける数値解析は、このような熱間変形能が劣る素材を、疵なく、所望の寸法に精度良く仕上げるにあたり、その製造条件を設計したり、生じる問題を抜本的に解決する画期的なプロセスを開発するためのツールとして用いられている。また、新製品とな

る鋼種が製管できるか否かを判定し、試作で新たに生じた疵や形状不良の原因を明らかにし、これらの課題を解決するプロセスを設計および検証するツールとしても用いられる。そのためには、形状、寸法や、加工発熱、素材に累積するひずみの分布等を、精度よく予測することが求められる。

2.3 解析における課題

ピアサーでは特にプラグの先端における素材の変形が大きく、プラグ先端中央部の素材は圧延が進むにしたがってプラグ表面に沿って極めて大きなせん断変形を受ける。またユジーンセジュールネ法についてもコンテナから押し出す出口で素材が大変形を受ける。有限要素法解析（FEA）では、このような局所的に大きなせん断変形をシミュレーションすると、この部分の要素がつぶれて応力、ひずみの釣り合い式を計算する際に用いる行列のヤコビアンが微小値もしくは負となるため、計算が収束しないもしくは計算できないという問題が生じる。従来の数値解析モデルではこの問題を解決できなかった。

また高合金鋼において熱間変形能が劣る要因とそれが製管に与える影響を定量的に評価するには、この現象を表現するための数式モデルと、このモデルのパラメータを導出するための材料試験が必要になるが、このような複雑な大変形プロセスに適用できる実用的なモデル、パラメータがなかった。

そこで、例えばピアサーの諸課題の解決や製管条件の設計は、モデルミル実験によることが多かった。しかし、モデルミル実験では応力、ひずみの分布の推定が難しいため、変形エネルギーから局所的な加工発熱による粒界溶解に伴う割れを予測したり、工具の焼き付きや素材の疵が生じる過程を定量的に追跡することが難しい。このため、実験データから疵の発生限界を回帰式で与えるなど、結果的に現象の過程を評価するにはいたらず疵の有無を評価するだけであった。また、実験自体が難しい条件、実験できてもばらつき因子が多く比較評価が難しい条件には対応できなかった。

2.4 これまでの解析手法

そこでこのような局所的に大きなせん断変形を伴うプロセスの数値解析における課題を解決すべく、国内外のいくつかの研究機関で研究開発が進められてきた。ピアサーの数値解析では、2005年頃までの研究で、2次元FEAによるビレット中心部のマンネスマン破壊の定性的評価と、ビレットがプラグ先端を通過し素管となった後の素管の変形を別に取り扱うモデルの組み合わせ²⁴⁾や、あらかじめ穴を開けたビレットを穿孔するモデル⁹⁾が提案された。しかし、応力ひずみ分布を正しく計算するには、ビレットが穿孔され素管となりロールとプラグの間で圧延されるまでを連続して解析することによってビレット中心部の素材の変形を追跡する必要があるが、これらのモデルではこの穿孔の過程を正しく評価できず、プラグ表面のせん断ひずみを正確に扱えなかった。

一方、自動メッシングのための数学的手法が発展し、2000年代初頭にアダプティブリメッシングを利用した解析手法が実用レベルとなったことから、筆者らは本機能を用いた解析手法を開発し、これを2006年頃からピアサー、ユジーンセジュールネ法の課題解決、プロセス設計に適用できるようになった。ピアサーでは、本解析により工具面圧分布がわかるようになり、例えば工具摩耗や焼き付きを推測し、防止策を設計できるようになった。またユジーンセジュールネ法では押し出し部の非定常解析ができるようになり、管先端部を含めたシミュレーションによりさまざまな現象の把握と、製造に伴う課題への対策の考案ができるようになった。

これらの解析技術は、今年度大河内記念生産賞を受賞した高合金鋼の長尺大量製管の実現など、新日鐵住金(株)のシームレス鋼管に関するさまざまな技術開発に貢献している。

3. 新日鐵住金の数値解析技術の現状

3.1 ピアサー

先に述べた通り、ビレットが穿孔され素管となりロールとプラグの間で圧延されるまでを連続して、素材の各部位の変形をシミュレーションできる解析モデルを開発したが、さまざまな鋼種の製管可否判断および製管条件の設計に際して、これまでのモデルでは精度が不十分な場合があり、さらなる解析精度の向上に取り組んでいる。

これまでの解析モデルでは、アダプティブリメッシングの適用条件の制約から、要素は4面体としていた。しかし最近になって、ある条件下ではアダプティブリメッシングが6面体でも適用できるようになり、解析モデルを改良したところ、解析精度を向上できることを確認した。具体的には、6面体要素により、要素の並びが各節点の移動方向に並行して整列させられるに加えて、応力の解析精度が向上したのに伴い、ロール摩擦力をより正しく計算できるよ

うになり、安定して計算できるようになった(図3)。また、要素分割も含めて並列計算に対応することで計算時間が短縮化され、より大規模な問題の解析、より精緻な解析も実用的に扱えるようになった。従来に比べて、同等の計算時間で図4のように大きく精度を改善した。

また、高合金鋼の製管での粒界溶融に伴う割れの予測における、加工発熱の見積もり精度を改善することを目的に、先に述べた変形予測精度の改善に加えて、熱間圧縮試験により高合金鋼の加工発熱計算モデルを検証した。まず、図5のように定ひずみ速度で、たる型変形なく均一な応力分布を維持して圧縮試験することにより、高合金鋼の加工発熱を精度良く測定できるようにした。ここで得られた正しい材料特性を与えて加工発熱量を解析したところ、素材温度の実測値と解析計算値が一致することを確認した(図

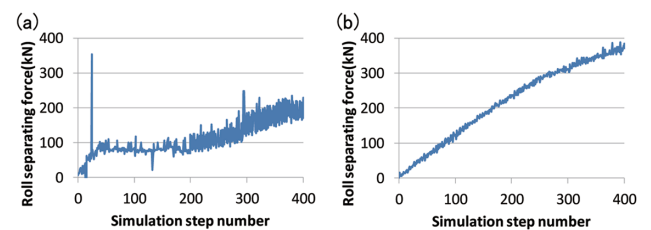


図3 ピアサーロール噛み込み時のロール反力計算結果
(a) 2006モデル (b) 2012モデル

Separating force computation comparison on roll biting of piercing

(a) 2006 model (b) 2012 model

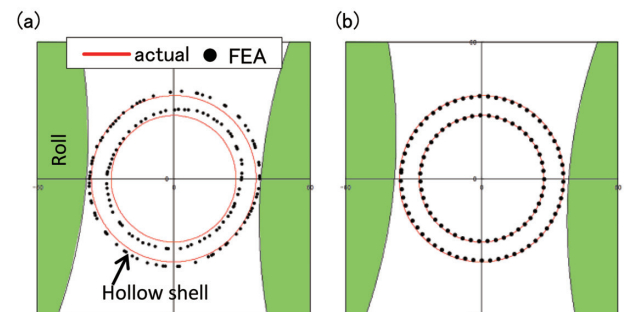


図4 穿孔の変形予測精度比較

(a) 2006モデル (b) 2012モデル

Deformation shape accuracy comparison of piercing

(a) 2006 model (b) 2012 model

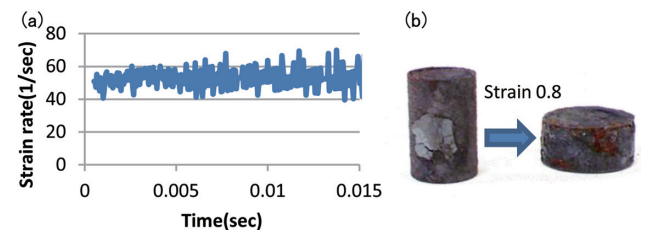


図5 熱間圧縮試験での圧縮速度と圧縮後形状

(a) 圧縮速度 (b) 圧縮後形状

Compressive velocity and compressed specimen shape of hot compression test

(a) Compressive velocity (b) Compressed specimen shape

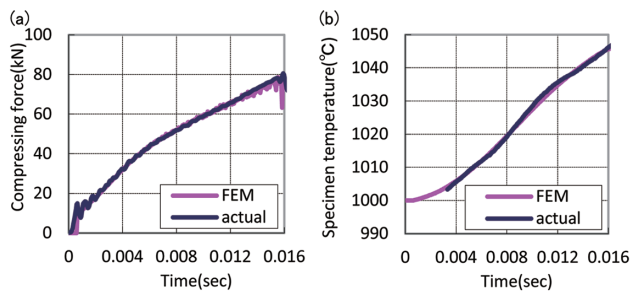


図6 加工発熱量の予測精度検証

(a) 圧縮荷重 (b) 試験片中心温度

Verification of processing heat computation

(a) Compressing force (b) Specimen temperature

6)。この結果、材料試験結果に基づいて数値解析により粒界溶解限界を直接解くことができるようになり、モデルミル実験等によらずとも、高合金鋼の製管可否を定量的に予測可能と期待できる。

3.2 マンドレルミル

3.2.1 マンドレルミルでの圧延技術上の課題

マンドレルミルの圧延では、単スタンドでは管の肉厚圧下量を全周で一様にするのができない。ロール孔型の溝底直下で最も圧下量が大きく、フランジ部に向かって圧下量が小さくなり、フランジ方向ではバーと接触せず、肉厚が圧下されない。溝底部はロールとマンドレルバーに拘束され、これらの工具間の圧下で延伸されるのに対して、フランジ部は、直接圧下を受けず溝底部が延伸されるのに引きずられる形で、軸引張力により材料周長が減じられ、材料肉厚が減じられる。この変形が過度になると、フランジ部でネッキングが生じ、材料に穴があく欠陥が生じる場合もある(図7)。薄肉材になるほどこの現象は顕著であり、ステンレス鋼等の熱間加工性が悪い材料では薄肉材の圧延がますます困難となっている。

加えて合金成分が多くなると、圧延中に素管の周長が減少して幅狭まり(アンダーフィル)が生じ、圧延後に管に挿入されたマンドレルバーに素材が焼き嵌め状に張り付いて、素管からマンドレルバーを引き抜けなくなるバー引き抜き不良が生じやすくなることが知られている(図8)。この現象が生じる原因は、上で述べたフランジ部に作用する軸引張力が過大となり、圧延中に素管の周長が絞られて管の幅が狭まるためと考えられている。この現象は、炭素鋼よりも、合金鋼、あるいはステンレス鋼でさらに発生しやすい。

これらの現象の予測には圧延後の管形状を精度良く計算することが重要となる。FEAでの予測には、熱間材料の変形能については、応力ひずみ曲線や一様伸びに影響する動的回復、動的再結晶を取り扱う必要があることに加えて、パス間の材料特性の変化も重要であり、静的回復、静的再結晶も考慮した変形解析手法を確立した。以下、その開発

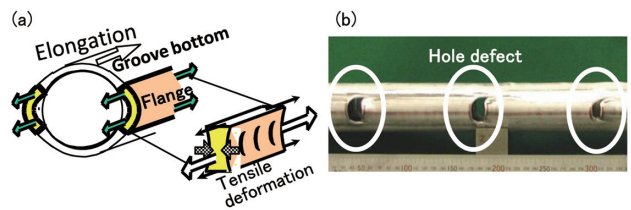


図7 フランジ部のネッキングによる穴あき欠陥

(a) フランジ部の変形 (b) 穴あき欠陥

Hole defect by necking on flange

(a) Deformation on flange (b) Hole defect

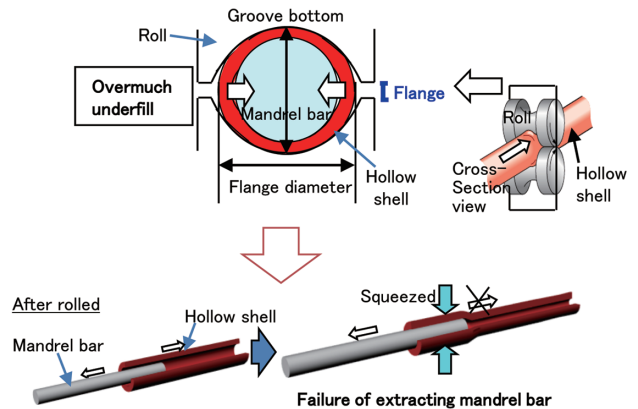


図8 マンドレルミルのバー引き抜き不良

Failure of extracting mandrel bar

内容を述べる。

3.2.2 FEAによるアンダーフィル予測⁶⁾

合金成分が多くなるとアンダーフィルが大きくなる現象について、まずメカニズムの解明に取り組んだ。加工硬化の影響を評価したところ、材料の応力ひずみ曲線が違っているとアンダーフィルの度合いも変わるが、例えば、実際の中炭素鋼と18-8ステンレス鋼の応力ひずみ曲線における加工硬化の違いではアンダーフィルの差はわずかで、現実の現象とは合致しなかった。

そこで図8に示すようなアンダーフィルを生じさせる変形挙動を考察した結果、ひずみの回復に差があるとアンダーフィルの挙動も大きく変わることがわかった。多パス連続圧延においては、溝底部で大きく圧下された部位は次のパスのフランジ部に当たる。このフランジ部は直前のスタンドで加工硬化の影響を受けているため、フランジ部の変形抵抗は溝底部に比べて高くなる。静的回復、静的再結晶によりひずみが回復すると、この加工硬化が時間とともに緩和されるが、このひずみの回復の違いにより、溝底部とフランジ部の変形抵抗の差が異なり、これが変形挙動に大きな影響を与える。特に高合金鋼では、合金成分が多いためひずみの回復が阻害され、かつ粒界溶解に伴う割れを防止するために低温で圧延され、さらにひずみの回復が遅れる(図9)。この特性に基づいたFEAの結果、高合金鋼の低温製管時には、フランジ部に高い引張応力がかかる

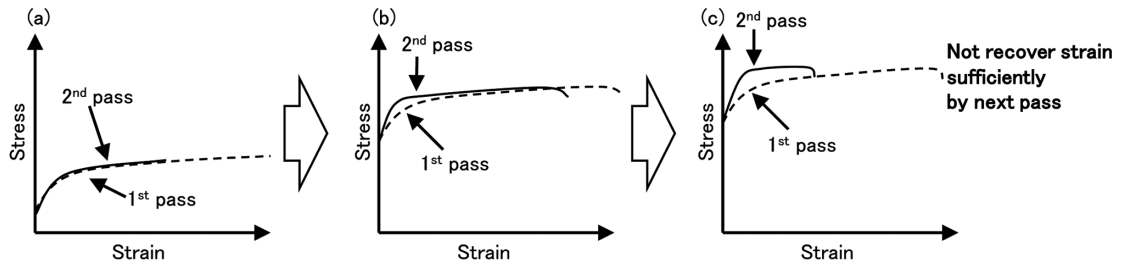


図9 高合金鋼の低温製管における応力ひずみ曲線の違い
 (a) 普通鋼 1100°C (b) 高合金鋼 1100°C (c) 高合金鋼 1000°C
 Stress strain curve differences among steel grade and rolling temperature
 (a) Carbon steel 1100°C (b) High alloyed steel 1100°C (c) High alloyed steel 1000°C

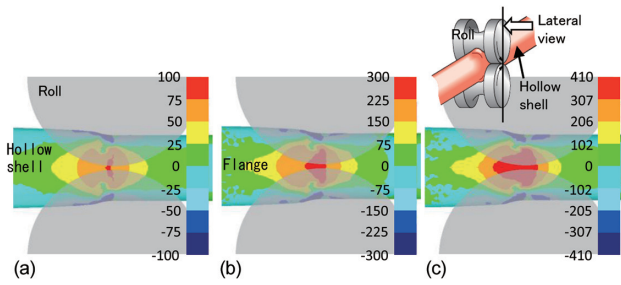


図10 高合金鋼の低温製管における圧延方向応力
 (a) 普通鋼 1100°C (b) 高合金鋼 1100°C (c) 高合金鋼 1000°C
 Rolling direction stress comparison among steel grade and rolling temperature
 (a) Carbon steel 1100°C (b) High alloyed steel 1100°C (c) High alloyed steel 1000°C

ことがわかった (図10)。

ひずみの回復が遅れると、なぜフランジ部に高応力がかかり、アンダーフィルに至るかの理由を述べる。まず、第2スタンド以降の圧延時には、溝底部は変形抵抗が低いが、直前の溝底部で圧延されているフランジ部は加工硬化により変形抵抗が高くなる。炭素鋼では、直前の溝底部で圧延された部位も、ひずみが回復することにより、次のスタン

ドで圧延するときには柔らかくなっている。つまり硬くなるのは圧延直後の溝底部のみである。一方、高合金鋼で特に低温製管時には、ひずみの回復が小さいため直前の溝底部で圧延されているフランジ部は硬いままであり、加えてさらに、次のスタンドの溝底部でより大きな圧下が加わりより硬化する。しかし鋼種や温度が違って、溝底部の圧下量が同じで溝底部の圧延方向の伸び量が同じなら、フランジ部の伸び量も溝底部の伸び量と等しくなるため、フランジ部が硬化している場合には、より高い引張応力がかかる。

一般に、変形中に軸方向に高い引張応力がかかると、フランジ部の外径が絞られて減じられる。表1にひずみの回復の特性を考慮して第2スタンド以降の普通鋼と高合金鋼およびその低温製管時の周方向ひずみを解析した結果の比較例を示す。炭素鋼では、溝底部において圧延後の硬い部分が伸ばされる際に、圧延部直下のフランジ部においてわずかに周長が減少するのに対して、高合金鋼では、溝底部において圧延後の硬い部分が伸ばされる際に、図10のように加工硬化が残っているフランジ部も強く引っ張られることにより、より広い領域においてより強い力で引っ張られ、圧延が進むにつれて特に圧延部直下のフランジ部でよ

表1 普通鋼の製管と高合金鋼の低温製管の変形挙動予測結果の比較 (第2スタンド)
 Comparison of deformation at 2nd stand among steel grades and rolling temperature

	Carbon steel 1100°C	High alloyed steel 1100°C	High alloyed steel 1000°C
<p>Circumferential strain rate</p>	<p>Rolling direction Roll</p> <p>Hollow shell</p> <p>Flange</p> <p>Circumferential bulging area is wider</p>	<p>Flange</p>	<p>Circumferential contracting area is smaller and its quantity is larger.</p>
<p>Rolled hollow shell shape along cross-section view at 2nd stand</p>	<p>Hollow shell</p> <p>Mandrel bar</p>		

表2 FEAの予測精度
Accuracy verification of FEA

	1 st stand	2 nd stand	3 rd stand	4 th stand
FEA				
actual				

り大きく周長が減少する。

このように高合金鋼の低温製管では、広い範囲で円周方向に大きな収縮変形が生じることがわかった。つまりひずみ回復の遅れによる溝底部とフランジ部の変形抵抗の違いにより、高合金鋼では普通鋼よりもアンダーフィルが大きくなるということが判明した。

FEAの予測精度例を表2に示す。予測結果と実績の形状はよく合っており、アンダーフィルの度合いを示すフランジ外径も両者でほぼ一致している。

以上のように、多パス連続圧延における各パスでのひずみの回復の遅れがアンダーフィルに及ぼす影響の支配要因であることを見出し、材料特性から、鋼種、圧延条件に応じて管周長を正確に見積もり、圧延不良現象を予測できる技術を確立した。

3.2.3 高合金鋼高品質延伸圧延技術の成果

本FEA技術に基づく製造条件設計によるアンダーフィル防止効果を図11に示す。開発条件ではアンダーフィルがないため、圧延後のフランジ径が溝底よりも十分に大きく確保できている。この効果により、バー引き抜き力は図12のように十分低減できており、バー引き抜き不良を未然に防止できている。

このように、材質特性に基づくFEAを援用した考察で、品質不良、圧延トラブルの要因を事前に予測して対策した高合金鋼高品質延伸圧延技術により、長尺の高合金鋼のシームレス鋼管を短納期で量産することに寄与した。

3.3 材料特性の把握

例えば3.1および図5で述べたような、正確な材料特性の測定技術を用いて、圧縮、引張試験結果から応力ひずみ曲線を逆算し、加えて3.2.2で述べた静的回復、静的再結晶の挙動を把握することにより、さまざまな鋼種の材料特性データベースを構築している。現在では、このデータベースはシームレス鋼管の製造プロセスでのFEAの基盤となっ

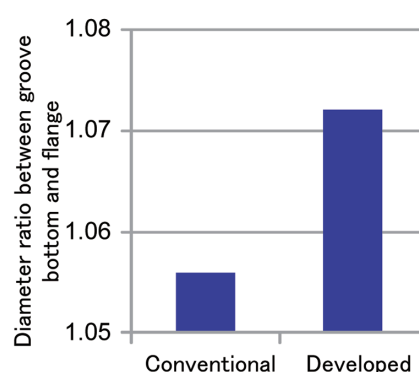


図11 新開発孔型によるアンダーフィル防止効果
Achievement of underfill prevention

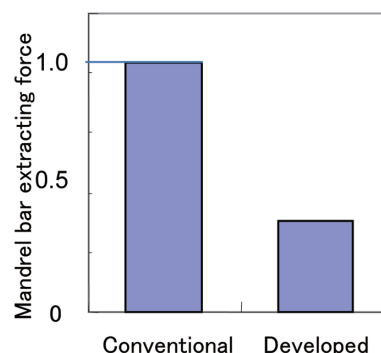


図12 新開発孔型によるバー引き抜き力の低減効果
Achievement of mandrel bar extracting force reduction

ている。

4. 結 言

本論文では、主にマンネスマン製管法のピアサーおよびマンドレルミルを対象に、これまでの数値解析技術における課題と技術開発の経緯を紹介し、現在の新日鐵住金の状況を概説した。ピアサーではより精緻な解析ができるようになり、かつ粒界溶解に伴う割れを予測するために、材料試験法の開発も組み合わせることで加工発熱も精度良く予測できるようになったことを示した。またマンドレルミルでは、

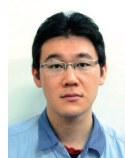
材料特性を正確に反映した解析をすることにより、管のアンダーフィルを同じく精度良く予測できるようになり、高合金鋼における安定圧延の実現に大きく貢献したことを示した。

参考文献

- 1) 林千博：鋼管の製造法，初版，東京，日本鉄鋼協会，2000，420p
- 2) 吉村英徳 ほか：日本機械学会論文集A編. 64-622, 1515 (1998)
- 3) Ceretti, E. et al：Tube and Pipe Technology. 15 (3), 55 (2002)
- 4) Ceretti, E. et al：Tube and Pipe Technology. 17 (2), 155 (2004)
- 5) 小森和武 ほか：日本機械学会第 16 回計算力学講演会講演論文集，神戸，2003，日本機械学会
- 6) 岡本辰憲 ほか：材料とプロセス. 25 (1), 373 (2012)



山根明仁 Akihito YAMANE
プロセス研究所 圧延研究開発部
主幹研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



山根康嗣 Kouji YAMANE
プロセス研究所 圧延研究開発部



下本豪紀 Hidenori SHITAMOTO
プロセス研究所 圧延研究開発部
主幹研究員