

サイジングプレスの HSM への適用とその進捗

Progress in Sizing Press for Hot Strip Mill Line

田 添 信 広 IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長
百 々 秦 IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長代理
西 井 崇 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部 主査

1985年に、初めて住友金属工業株式会社鹿島製鉄所に納入したスラブ幅サイジングプレスは、その後20年以上経過した現在、合計13基の受注を得、世界中で順調に稼働中である。従来複数スタンドの縦型および水平圧延機のみから構成されていたHSM（ホットストリップミル）ラインに、大型のスラブ幅サイジングプレス設備を導入するまでには、多くの技術課題をもち、さまざまな材料変形モデル実験、数値解析などの実施、さらにそれらの結果を使った関連新装置の設計が必要であった。本稿では、約20年を経過し、HSMで定位置を確保した同設備が出現するまでの歴史、またその導入のメリット、同設備の特長、プレス後材の変形の特徴などを再度総括し、同設備を俯瞰する。

The first slab sizing press was installed at the Kashima Works of Sumitomo Metal Industries in 1985. 13 similar presses are now operated at steel producers worldwide, which were installed during last 20 years. Before emergence of the sizing press, Hot Strip Mill (HSM) lines consisted of plural vertical and horizontal rolling mill stands. The vertical and horizontal combination had many technical problems. These require many model tests, numerical analysis, and newly designed equipments based on the results obtained from the tests and analyses. This paper describes the progress in use for HSMs and the advantage of the sizing press together with features of equipment and characteristics of slab deformation after press process.

1. 緒 言

当社は元々圧延機と同様に自由鍛造設備についても多くの納入実績をもち、1980年後半ではすでに500台近くの実績をもっていた。特にスラブ幅サイジングプレスが出現する以前には、当時の通産省工業技術院の大型プロジェクトの一環として「超自由鍛造の研究」⁽¹⁾が1977年から実施されており、水平対抗鍛造プレスの開発が数年間行われた。

この間、200tの機械油圧複合駆動の全自動プレスを設計、製作し、自社内に設置して主に丸物、角物の成形実験に使われた。しかし、板物の成形も可能であり、ナショプロ終了後はこの装置を購入し、スラブサイジングの実機の約1/4サイズの熱間鋼モデル実験を行い、基本的な材料変形、負荷データを採取することができ、実機設計に大いに役立った。

当社のスラブ幅サイジングプレスの1号機は1985年4月に住友金属工業株式会社鹿島製鉄所の熱間薄板圧延工場（ホットストリップミル）に設置⁽²⁾され、稼働を開始した。

以後、20年以上が経過した現在、ホットストリップミルラインの改造、新設を含めて加熱炉出側にサイジングプレスを設置することは世界のホットストリップミルライン

のすう勢となり、その定位置を確保したと言っても過言ではない。

本稿では、従来のホットストリップミルが複数のロール設備（圧延機）だけで薄板の大量生産を行っていたラインに、当初はその生産スピードも危ぐされたプレス設備をあえて導入に至った経緯、歴史を述べる。次に、その材料変形からは、きわめて有効な成形方式であることを三次元材料変形解析によって紹介する。また、1号機以降、約20年間で世界に13基の納入実績をもつ同設備の最新設備を紹介するとともに、今後の同技術を展望する。

なお、スラブ幅サイジングプレス1号機の開発に当たり、住友金属工業株式会社と共同で1994年度日本機械学会技術賞を受賞した。

2. サイジングプレス出現に至る歴史

ホットストリップミル（以下、HSMと呼ぶ）ラインにサイジングプレスが出現するまでの歴史を以下に述べる。

元々は、孔型底径 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ の大型エッジャー（サイジングミル）によって始まったスラブ幅サイジングが、その材料変形のメリットから $\phi 2\ 200\ \text{mm}$ の超大径孔型ロールの出現を生み、またその際の先後端クロップ（製

品として使えずスクラップとして切り捨てられる部分) 対策として、先後端予成形プレス⁽³⁾(幅圧延前にスラブの先後端部のみプレスで縮幅を行う)が有効であり、当社もモデル実験などによってその効果を確認し、鉄鋼メーカーに提案した時期があった。

しかし、 $\phi 2\ 200\ \text{mm}$ よりさらに大径の孔型エッジャーの方が、その材料との接触弧長が長い材料変形上は有利となるが、その製造限界、搬送性、ロール交換時のハンドリング性などから、実際には $\phi 2\ 200\ \text{mm}$ 位が限界であった。また、ブルーム(大形長方形の半成品)製造ラインに先に出現した予成形プレスなどの経緯を経て、強幅圧下を行う場合はできるだけ金型と材料との接触長さが長い程、材料変形に有利なことが認識され、やがて本格的な全長サイジングプレスへの時代へ突入したといえる。

2.1 サイジングプレス出現以前(1970年代)

それまでの製鋼、分塊プロセスに代わって連続鋳造法が1970年代中頃から我が国においても普及し始め、ホットストリップ用スラブも次第に連铸スラブの採用へと変化していった。その際、スラブのサイズを変更する場合は幅固定モールド(幅固定鋳型)の交換によって行わなければならないため、多種類のスラブ幅サイズが必要なHSM用スラブでは、モールド交換ごとに鋳造ラインの停止による生産性の低下、歩留り低下が問題となった。

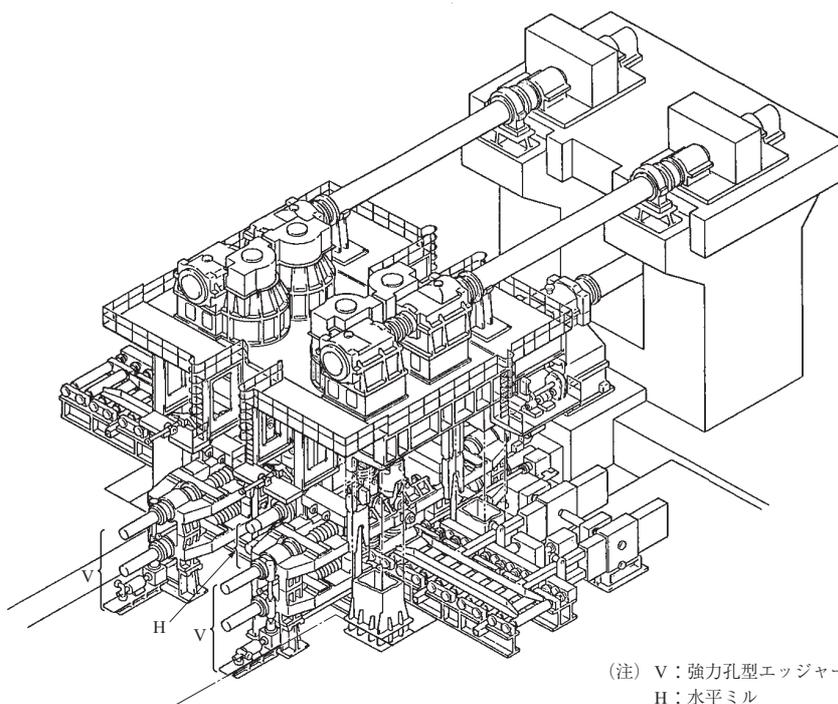
上記問題点の解決には、連铸側でのインライン幅変更技

術の開発(幅可変モールドを設置し、ラインを止めることなく幅変更を行う技術)、一方、下流のHSM側での大幅圧下技術(最初は大型縦型圧延機:サイジングミルによるスラブの強幅圧下技術)がほぼ同時期に進められた。いずれの方式にもそれぞれ問題点を抱えており、幅可変モールド⁽⁴⁾では溶鋼から徐々に凝固セルを成長させてスラブを製造する以上、連続鋳造中に一気にモールドの幅変更できない。このため、①目標幅とするまでの区間はテーパ幅状のスラブが発生すること②テーパ幅はHSMラインの縦型圧延機(エッジャー)で取らねばならないこと③サイジングミルでの強幅圧延では、スラブ先後端部に発生するフィッシュテール(魚の尾状の非定常クロップ部)による歩留りが低下すること、が問題視された。

2.2 オフラインサイジングミルの出現(1980年初頭)

技術の進歩は早く、またHSMが大量の薄板生産ラインであることから、幅サイジング技術の検討がいち早く進められた。この結果、1980年には当社は新日本製鐵株式会社大分製鐵所の連続鋳造工場内へ本格的なスラブ幅変更設備であるサイジングミル設備を設計、製作納入した。第1図にサイジングミルの外観を示す。

この設備はV(強力孔型エッジャー)、H(水平ミル)、V(強力孔型エッジャー)の3タンデムラインであり、エッジャー、水平ミルは各々5000kWのモータを



第1図 サイジングミルの外観
Fig. 1 Appearance of slab width sizing mill

備えた大型設備である。連続鋳造側は最大広幅 1 900 mm 一種類のみを生産し、HSM 用各種スラブ幅の造り込みはこのサイジングミルが受けもつ。また長尺スラブを採用することによって、生産性の向上と先後端部のクロップ率も少なくなるなどの対策を講じた本格的な大型のスラブ幅変更設備であった。

30 年弱経過した現在も、順調に稼働中である。

2.3 HSM インラインサイジングミル

その後、従来の HSM の頭に設置されている軽幅圧下のエッジャー設備である VSB（バーチカルスケールブレーカ）を、新設の強幅圧延可能なサイジングミルにする時期があった。この場合はサイジングミルによる幅調整量は 300 mm とし、孔型ロールの直径（底径）が $\phi 2\ 200\text{ mm}$ と超大径ロールが新日本製鐵株式会社広畑製鐵所に出現した。この理由は被圧延材のスラブの材料変形側から有利になる。すなわち、先後端クロップの減少、また幅圧下後のスラブ断面の幅端部の盛り上り量、つまりドッグボーン形状がなだらかになり、幅調整効率が高い（その後の厚み圧下での幅戻り量が小さい）などのメリットがあるためである。

その後、当社はこの $\phi 2\ 200\text{ mm}$ 超大径サイジングミル

を、韓国にも輸出した。

また、先後端予成形プレスは HSM では本格的な設備は実現しなかった。それはサイジングミルからやがてサイジングプレスへと移行したことで、スラブ先後端のみのプレスでも比較的大容量のプレスが必要なため設備費の面からも実現しなかったといえる。ただし、プレス容量が比較的小さくてよいブルーム材には実用化され、当社も納入実績がある。

2.4 サイジングプレスの出現（1980 年後半）

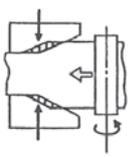
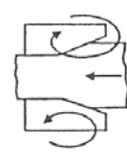
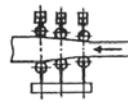
2.4.1 基本構造の検討

当社は開発ステップの第一段階としてすでに述べた熱間鋼モデル実験、またスタートしたばかりの剛塑性有限要素法解析などによって、材料変形、プレス負荷の基本特性を明らかにした。それらの結果から、すでに稼働中のサイジングミルと比較して総合的にプレス方式が有利であることは予測できた。

ただし、高生産性の我が国の HSM ラインにプレス設備を導入しようとする場合は色々問題を抱えており、さらに検討が必要であった。

当時実機として具体化するため、サイジングプレスの基本構造のあり方について検討した結果の抜粋を第 1 表⁽⁵⁾

第 1 表 サイジングプレスの基本構造の検討（抜粋）⁽⁵⁾
Table 1 Study on basic structure of sizing press (summary)⁽⁵⁾

種 別	項 目	必要機能	検討した方式	総合評価	採用した方式	総合評価	備 考
1. プレス圧下スラブ搬送方式	1. 安定稼働 2. 高生産性を確保 （現状ホットラインの生産スピードを維持できること） 3. 表面傷などの発生がないこと		1.1 スタート・ストップ型 （プレス時はスラブ停止）  ピンチロールにてスラブ搬送 （問題点） 1. 毎回プレスごとにスラブの急加減速要す 2. 高生産向きでない 3. ピンチロールとスラブ表面でスリップ傷の懸念 4. スラブ端面冷却大→スラブ高温抽出 5. 金型寿命小	×	1.2 フライングプレス （スラブを停止させずにプレス）  （長 所） 1. 高生産性を可能とする 2. スラブ送りスピードは、プレス時も搬送時も一定 3. ピンチロール不要のためシンプル構造、表面傷の心配なし 4. スラブ低温抽出可→省エネ 5. 金型寿命大	○	フライングタイプは世界で初めて
			1. シンプル構造で座屈防止効果大のこと 2. スラブ表面へのへこみ変形など発生させないこと		2.1 小径多分割ロール  （問題点） 1. 構造複雑、メンテ性難 2. スラブ表面へのロールへこみ変形大の懸念→表面傷およびスラブ搬送に難 3. 理想的な 3 点（×2）押えは無理→片当たりによるキャンバ、その発生が懸念		

に示す。

(1) プレス圧下スラブ搬送方式

従来のロール方式と比較して、プレス方式では生産スピードが問題であった。スタートストップ型プレスでは送り装置（ピンチロール）が各プレスごとに、質量が約 30 t もあるスラブを急加減速しなければならない。このため、問題点はスラブの表面にスケールが付着しているとピンチロールとスラブ表面でスリップ傷が発生、また、ピンチロールの押さえ力が過大では、押し傷の発生が考えられ、上記制約からプレスサイクルタイムが増大すると熱延の生産能力を阻害することになる。

また、プレス時の金型とスラブ幅端面の接触時間が長くなり、スラブ幅端面の温度降下、一方、金型は金型温度上昇による熱疲労も懸念された。

以上の点から、スラブを停止させることなくプレスする走間プレスの出現が必須と考えられた。

(2) 座屈防止装置

一般に広幅スラブで、1回の幅圧下量が 300 mm を超えるとスラブが幅方向に座屈しやすくなる。特に前後に材料が接続していないスラブ先後端部の座屈が大きいことを熱間鋼モデル実験でも確認し、新たに座屈防止用の押さえロール装置が必要なことが分かった。

設備上はできるだけシンプルな構造が望ましく、熱間鋼モデル実験によって大径 $\phi 800$ mm 相当のロール

上下一対で、強幅圧下の場合も座屈防止が可能であることを確認した。

この際、押さえロールの長手方向設定位置に最適位置があることも判明した。

そのほか、詳細に検討した結果、以下に述べる世界初のフライング式水平対向高速機械プレスの出現に至った。

2.4.2 サイジングプレスの主要仕様

主な仕様を以下に示す。

形 式	フライング式水平対向機械プレス
圧下駆動方式	機械クランク上駆動式
走行駆動方式	機械クランク式、走行速度調整機構付
全幅圧下量	350 mm（最大）
幅圧下能力	2 700 t
スラブ送り量	400 mm/1 回プレス
作業回数	50 回/min
材料速度	20 m/min

第 2 図に最近設置されたサイジングプレス本体の外観を示す。

2.4.3 サイジングプレス導入のメリット

同設備を導入した住友金属工業株式会社鹿島製鉄所で得られたメリットの例を以下に示す。

(1) 連続鋳造機のモールド幅が従来の 9 種類から 5



第 2 図 サイジングプレス本体
Fig. 2 Slab width sizing press

種類に集約でき、スラブ平均幅が約 200 mm アップした。

- (2) 連続鋳造機の生産能力がアップし、それまで 24 000 t/月であった生産量が 30 000 t/月に増加した。
- (3) その結果、連続鋳造工場側の生産量ネックが解消され、HSM ラインの高い圧延能率を阻害せずに幅集約が実施された。
- (4) 連続鋳造工場の操業サイドからは幅変更回数が減少し、一定速度引抜き操業が可能となって、スラブ品質の均一化、ブレイクアウト防止に大きな効果をもたらした。
- (5) 熱間薄板工場側はホットチャージ比率の拡大によって加熱炉原単位が改善され、大きな省エネルギー効果をもたらされた。
- (6) スラブヤードの大幅な整理縮小が可能となった。

3. 現在のサイジングプレス設備

1985年に住友金属工業株式会社鹿島製鉄所の1号機が稼働開始して以来、最新のJFEスチール株式会社西日本製鉄所(旧NKK福山製鉄所)の13号機に至るまで、サイジングプレスはさまざまな改善と改良を繰り返して設備としての完成度を上げている。

ここではその実機開発後から現在に至るまでの製品開発の経緯を紹介するとともに、最新設備と近年の動向について述べる。

3.1 実機化から製品開発へ

HSMにおけるインラインでのフライング式水平対向機械プレスの開発は、2.4章で述べたさまざまな懸念事項を、実験や実証試験を繰り返すことで成功を収めた。

しかし、2700tの幅圧下作業を50回/min(1.2sで1回)で繰り返す設備を、安定稼働させることは容易なことではなかった。特にそれまでのロール成形加工機(圧延機)と比較して、短時間にオン・オフを繰り返す圧下荷重とそれによる振動や、設備保護のために吹き付けられる冷却水による蒸気や、高温のスラブからの放射熱といった悪環境との戦いの歴史があった。またほかのプレス設備に類を見ないフライング式プレス加工機の実現は、多くの摺動要素を必要とするため、その回転、スライド部分のすき間調整機構の設計や潤滑問題の解決に多大な時間が費やされている。

この結果、さまざまな試行錯誤を繰り返して、大幅

な構造変更を伴って製品開発が進められ、5号機のKURAKATAU STEEL(インドネシア)ではほぼ現在の構造が固まった。これ以降現在に至るまで基本構造の変更は行われていない。

3.2 近年のサイジングプレス設備

5号機の運転開始から現在に至るまで、基本構造の変更はないものの腐食対策、摩耗対策、消耗品の長寿命化や、メンテナンス性改善など、サイジングプレスは台数を重ねるごとに必ず進化している。

なかでも最新の中国鋼鉄(台湾)の12号機と、JFEスチール株式会社西日本製鉄所の13号機は、2005年の立ち上げ稼働開始以来、トラブルがほぼない状態で、現在も順調に運転を続けている。これはひとえに納入先ユーザー各位からのメンテナンス情報や、保守状況聴取による、細部にわたる改善と対策が功を奏したものと感謝している。

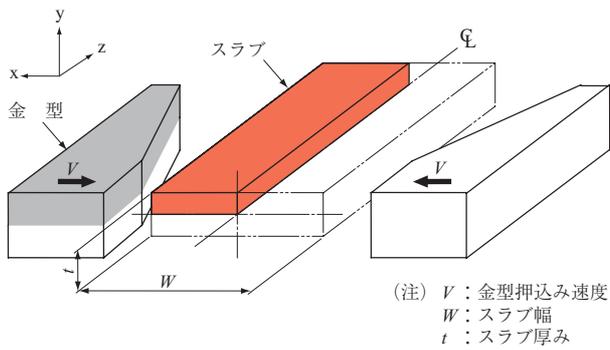
また近年では、稼働年数10年を超える機種が出現してきており、メンテナンスの状況も統計的に整理されるようになってきた。すなわち設備診断センサによる、振動、温度の経年変化の監視や、過去の状況から消耗部品の定期交換サイクルを整理して、以前の「壊れてから交換する」から「壊れる前に定期交換する」へと移り変わってきている。さらにこの交換の方法も、サイジングプレスの主要パーツをある程度の組立品で保有し、この組立品単位でメンテナンスすることでラインストップ時間を最小限に抑える方法が主流になってきている。

4. 開発技術の進歩

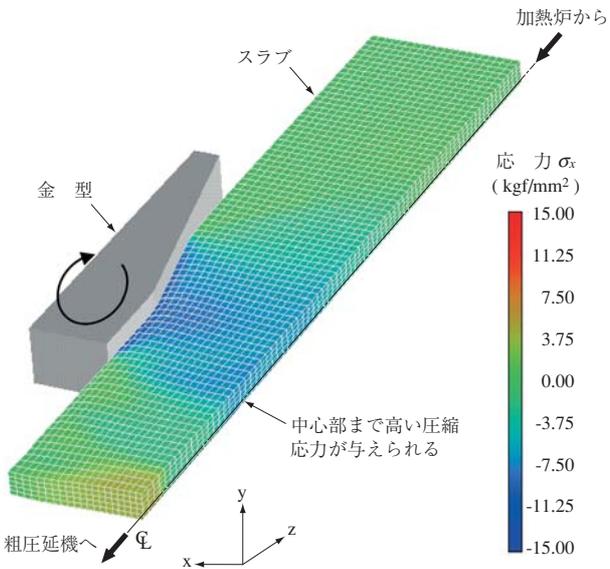
4.1 幅サイジングプレスの解析

サイジングプレスの開発当時は、材料変形特性や負荷特性などのプレスの基本特性を、鉛材や熱間鋼を用いた実験を主体に決定していた。現在では、三次元CADや三次元CAEを活用したシミュレーション技術の発展によって、シミュレーションによって変形特性や負荷特性を予測することは一般的に行われるようになっており、特に塑性加工機械の製品開発に欠くことのできない技術となっている。ここでは汎用塑性加工解析ソフトを用いて行った幅サイジングプレスの特性を解析した結果の一例を示す。

第3図に幅サイジングプレスの解析モデルを示す。解析モデルは上下左右対称の1/4モデルとし、金型には実機と同じ軌跡と速度を与え、フライング式の加工を再現した。第4図に幅サイジングプレスの三次元解析例を示す。幅1200mm、板厚250mm、0.05%C低炭素鋼を圧下幅



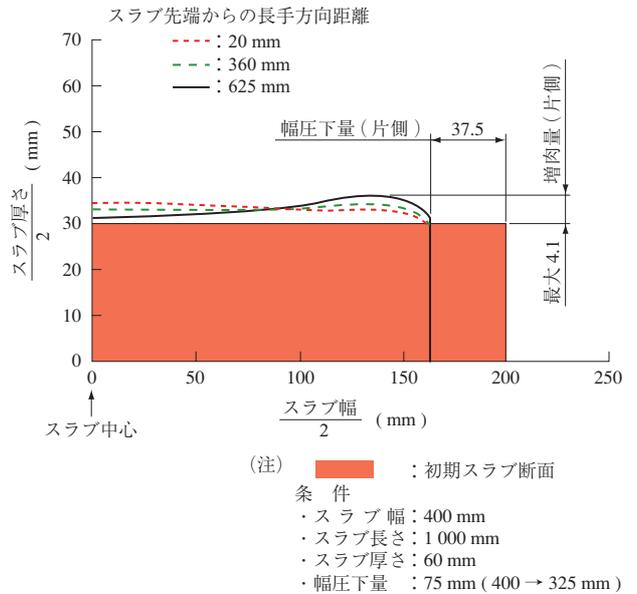
第3図 幅サイジングプレスの解析モデル
Fig. 3 Analysis model of slab width sizing press



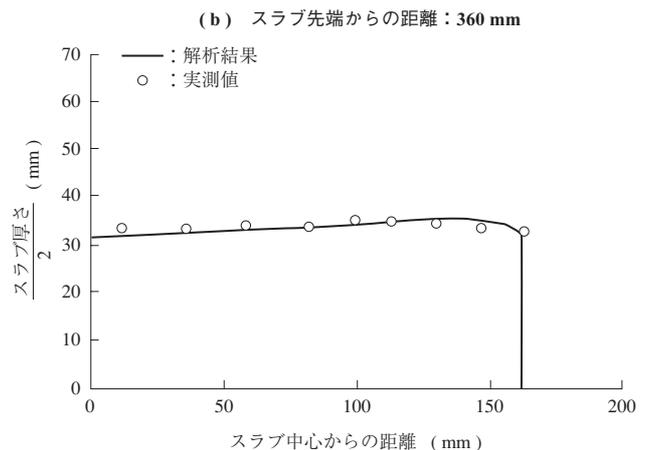
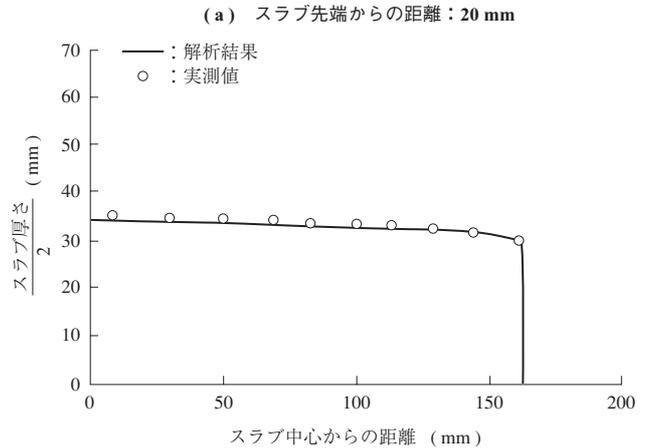
第4図 幅サイジングプレスの三次元解析例
Fig. 4 3D analysis of slab width sizing press

350 mm でプレスしたときの定常変形状態の変形形状と幅方向応力の分布である。スラブ温度は 1 375 K, 変形抵抗は $\bar{\sigma} = 90.5(\bar{\epsilon} + 0.001)^{0.21}\bar{\epsilon}^{0.13}$ MPa, 1 回のプレス当たりのスラブ送り量は 400 mm, スラブと金型の摩擦係数は 0.3 とした。第 4 図から幅中心部まで高い圧縮応力を付与できることが分かる。

また、第 5 図に幅サイジングプレスの断面変形特性を示す。実機 1/4 サイズの熱間鋼（幅 400 mm, 板厚 60 mm, 0.15%C 低炭素鋼）を圧下幅 75 mm（実機 350 mm 圧下に相当）でプレスしたときの厚さ-幅断面の変形形状解析結果である。スラブ先端の非定常域ではシングルバルジであるが、加工が進んだ定常域ではダブルバルジのいわゆるドッグボーン形状となることが分かる。同条件で実験した熱間鋼モデル結果との比較を第 6 図に示す。



第5図 幅サイジングプレスの断面変形特性
Fig. 5 Sectional deformation characteristics of slab width sizing press



(注) 条件
・スラブ幅: 400 mm
・スラブ長さ: 1 000 mm
・スラブ厚さ: 60 mm
・幅圧下量: 75 mm

第6図 幅サイジングプレスの解析と実験の比較
Fig. 6 Comparison between analyses and experiments of slab width sizing press

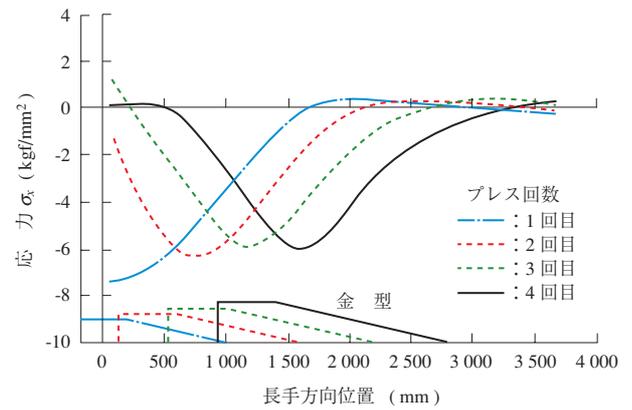
以上の結果から、シミュレーション結果と実験結果が良い一致を見、非定常域のシングルバルジ、定常域のダブルバルジ変形が計算シミュレーションでも良く再現できることが分かる。

4.2 幅サイジングプレスの連続プレス解析

サイジングプレスでは所定の送り量だけスラブを送りながら連続的に幅プレスを行う。ここでは、当社において開発した剛塑性 FEM ソフトを用いて、ソフト開発時に実施したスラブ先端から定常プレス状態となる（通常、3～4 回目のプレス）までの連続プレス解析結果を示す。

第 7 図に幅サイジングプレスの連続プレス解析結果を示す。スラブ先端から 4 回目までのプレス時の幅方向応力分布である。スラブ先端の非定常域から 3～4 回目のプレスで定常域となる様子が分かる。第 8 図に連続プレス時のスラブ幅中心における幅方向応力の推移を示す。

スラブ幅中心における幅方向応力をスラブ長手方向に見た結果である。スラブ幅中心に高い圧縮応力が効率的に付与されていく様子が分かる。これは、当社が推奨しているスラブ送り量 400 mm が内質改善の観点からも効率的で

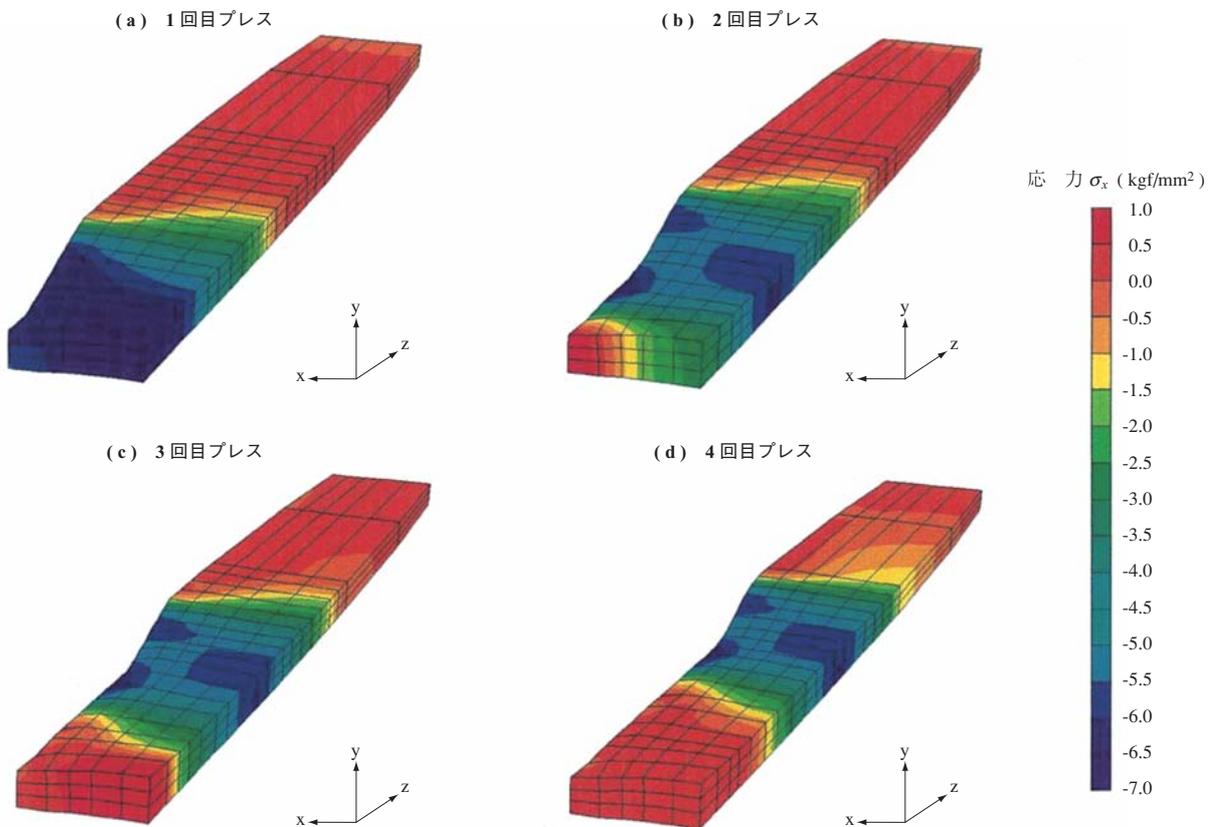


(注) σ_x : スラブ中心

第 8 図 連続プレス時のスラブ幅中心における幅方向応力の推移
Fig. 8 Stress distribution to width direction in continuous slab sizing press

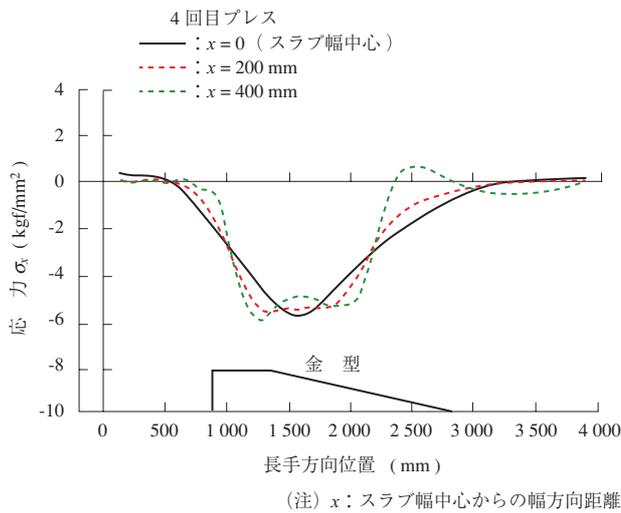
あることを示している。

また、第 9 図に幅サイジングプレスの定常状態（4 回目プレス）における幅方向応力分布を示す。スラブ幅中心および幅中心から 200, 400 mm の位置でスラブ長手方向に見た幅方向応力 (σ_x) である。スラブ幅端部と同レベルの圧縮応力が幅中心まで達していることが分かる。



(注) 幅方向の応力分布を示す。

第 7 図 幅サイジングプレスの連続プレス解析結果
Fig. 7 Analytical results of continuous slab width sizing press



第9図 幅サイジングプレスの定常状態における幅方向応力分布
 Fig. 9 Stress distribution to width direction in slab sizing press under the normal condition

5. 結 言

サイジングプレス1号機が稼働してから20年以上が経過して、それまでロールによる圧延成形のみであった世界の大量生産用HSMラインに、サイジングプレスの導入の考えが定着化した。

それ以前に幅圧下用の大型の縦型圧延機としては孔型底径が最大で $\phi 2200$ mmの超大径サイジングミルが出現した。

その被成形材の材料変形からは、さらなる大径化が有利と予想された。しかし、主にそのロール製造能力、搬送限界などからそれ以上の大径ロールエッジャーは現在の所出現するに至っておらず、次の世代のサイジングプレスに置き換わった感が強い。

また当社は大量生産に向き、また成形時のスラブ端面の

温度低下防止から、スラブを停止させることなく連続プレスが可能なフライング式水平対向高速機械プレスを出現させた。現在、13基の同設備が国内外で稼働中である。また、その応用技術として厚み圧下プレスの検討を行い、その有効性を確認している。

世界的には今後もHSMの新設、改造案件が続くものと予想される。今までに蓄積された技術と経験を生かし、他設備とともにサイジングプレスの拡販に尽力する所存である。

参 考 文 献

- (1) 小幡俊彦：自由鍛造の現状と将来 塑性と加工 21巻-235号 1980年8月 pp. 684 - 689
- (2) 植村昌信, 菰田 隆, 波床尚規, 田添信広, 井出賢一, 小林 弘：スラブ幅サイジングプレスの開発-第3報 実機設備の概要および稼働状況- 石川島播磨技報 第30巻第6号 1990年11月 pp. 479 - 483
- (3) 田添信広：熱延粗ラインにおける強幅圧延でのフィッシュテール防止対策 石川島播磨技報 第20巻5号 1980年9月 pp. 339 - 345
- (4) 小久保一郎, 井端治広：幅制御・幅集約技術の総合評価 塑性と加工 25巻-277号 1984年2月 pp. 100 - 108
- (5) 田添信広, 井出賢一, 太宰啓至, 小池正昭, 望月智俊：スラブ幅サイジングプレスの開発-第2報 先後端予成形, サイジングミルとの特性比較, 実機基本構造の検討- 石川島播磨技報 第30巻第3号 1990年5月 pp. 193 - 198