

工程設計に寄与するシミュレーション技術

Simulation Technology that Contributes to Process Design

中崎 盛彦*

NAKASAKI Morihiko

Synopsis: The simulation for plastic deformation has been actively conducted in the field of manufacturing of materials and car parts. The number of prototypes and verification processes can be reduced by applying the simulation to the process design.

The examples of in-house developed simulation technology for plastic deformation and their specific application were outlined. In the hot forging process, various problems regarding the process design and the die life were improved by applying the simulation. The three-roll type ring rolling simulation was developed, and the reason for good formability in cross section was clarified. In the rolling and free forging process of steel bar, the simulation for central void closure was conducted. The result concluded that the parameter that serves as the indicator of void closure used in free forging process can also be applied to rolling process. With regard to techniques for preventing the internal defects in high carbon tool steel and for closing the micro-level void, measures for further improvement have been found by linking the actual observation and the simulation. Thus, the simulation for plastic deformation process is the extremely useful tool for the optimum process design.

Keywords: plastic deformation; simulation; CAE; process design; hot forging; ring rolling; rolling; free forging; die life; void closure; synchrotron X-ray analysis; laminography.

1. はじめに

近年のコンピュータ技術の発展に伴い、数値シミュレーションは日常的に使用されるようになってきた。特に産業界では材料・部品の製造を始めとするものづくりの分野で塑性加工シミュレーションが盛んに行われている。塑性加工のシミュレーションは、前述した数値シミュレーションと物理シミュレーションの2種類に大別される。現在よく使われているのは数値シミュレーションであるが、コンピュータの発達以前には、物理シミュレーションが盛んに活用され、今なおその利用価値は高い。

塑性加工シミュレーションのベース技術として、1960年代にはそれ以前に完成していた弾性体の理論を基にした弾塑性微小変形理論の確立が始まり、70年代には剛塑性有限要素法の基礎的な理論が確立した¹⁾。80年代後半から90年代前半にかけては二次元解析で実用化が始まり、90年代後半には三次元解析が開始した。普及に伴い多くの市販コードが開発、使用されるようになった。コンピュー

タの大容量化・高速化に伴い普及が進み、今では三次元解析は当たり前の技術になりつつある。

このように、シミュレーション技術はほぼ確立されており、ほとんどの実用的プロセスにおいて問題なく利用されている。一方で計算規模の拡大に伴う計算負荷の抑制は、今でもなお大規模解析では重要な課題となっている。

シミュレーションが変形解析を中心として塑性加工の分野において広く普及した理由として、以下の点が考えられる。まず、解析結果をコンピュータグラフィックスで可視化できることにより、例えば一つの変形における途中過程の情報についても可視化をして、課題を抽出することが容易である。また、実際には実施困難な条件においてもそれを模擬した計算ができる。さらに、実験試作には準備期間と対応のコストが必要になるが、シミュレーションによってそれらを短縮・低減できる。これらの特長から、材料や部品を製造する工程設計に塑性加工シミュレーションを適用することで検証工数や試作回数を削減でき、開発期間の短縮効果が大きく得られる。従って、塑性加工シミュレ

* 研究・開発センター 部長 博士 (工学)

シミュレーションは工程設計に極めて有用なツールと言える。

本稿では、当社における塑性加工シミュレーションの導入の経緯から、その発展、具体的な適用事例について述べる。また今後の研究開発の方向性についても述べる。

2. 数値シミュレーションの導入

2.1 数値シミュレーションと物理シミュレーションの違い

現在、シミュレーションと言えばコンピュータを用いた数値シミュレーションを指すことがほとんどである。一方、シミュレーションには数値シミュレーションの他に物理シミュレーションがある。コンピュータの発達以前、物理シミュレーションは盛んに用いられた。物理シミュレーションは数値モデルではなく軟質金属、Wax、粘土などの物理モデル用材料を用い、それらを使った実験結果から変形、荷重などの測定結果をフィードバックとして得る。

一方、近年のコンピュータの発達に伴い、鍛造や圧延を中心とした塑性加工分野のシミュレーションが、設計や研究開発といった分野において適用され、製品の品質化やコスト削減に有効な手段となっている。数値シミュレーションは、CAD (Computer Aided Design) ソフトと組み合わせることで CAE (Computer Aided Engineering) 解析システムとして利用されることが多い。数値シミュレーションにはいくつかの方法があるが、最近では有限要素法解析とほぼ同義となっている。

当社では 1990 年代に数値シミュレーションの導入を開始しており、当時から実績のあった物理シミュレーションも併用しながら、実用的に役立つシミュレーションを目指した塑性加工シミュレーション体系 S.H.P.S.S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System) を提唱した²⁾。Fig. 1 にその概念図を示す。当時の数値シミュレーションはコ

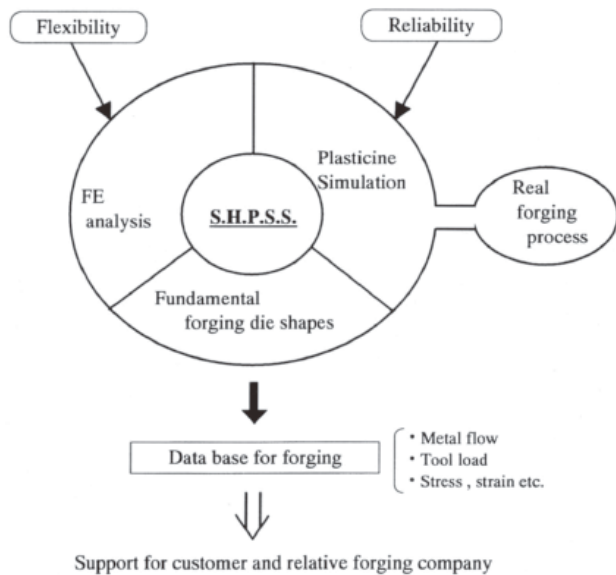


Fig. 1 Conceptual diagram of die forging CAE analysis system.

ンピュータの計算能力の限界もあり二次元モデルがほとんどであった。これは、三次元・複雑形状への適用が困難であったことが大きい。一方で、三次元形状の材料を用いる物理シミュレーションにより、数値シミュレーションでモデル化されていない対象に関する有用な結果が得られることも多くあり、物理シミュレーションによる補助を積極的に活用して解析精度の向上を図った。物理シミュレーションにはプラスティシンという材料が用いられた。プラスティシンは油粘土の一種であり、剛塑性の変形挙動を示すこと、温度や添加物により変形抵抗を変化させられることから物理シミュレーションにおいて有用な材料である。

ディファレンシャルギヤの熱間鍛造による実変形とシミュレーション、およびプラスティシン実験によるファイバーフローの比較例を Fig. 2 に示す³⁾。3 者のファイバーフローの挙動はよく一致している。このように数値シミュレーションだけでなく物理シミュレーションや実鋼変形との比較検証を行うことで、解析結果の精度を担保することができる。



Fig. 2 Comparison of metal flow in differential gear blank, plasticine experiment and FE analysis.

2.2 ギヤ素形材の熱間鍛造におけるファイバーフロー²⁾

Fig. 3 に親子鍛造と呼ばれる、1つのピレットからベアリングの内輪と外輪を同時に熱間鍛造する工程について示した。ここでは、加熱に伴うピレット表面の脱炭層がベアリング製品の転送面に入り込むことで強度低下が起これないか、シミュレーションにより確認した。CAE 解析には小坂田らが開発したソフト「RIPLS FORGE」⁴⁾を用いた。

変形挙動を、ファイバーフローにより確認した。実鋼のファイバーフローは鮮明なものが得られなかったため、比較対象をプラスティシン実験から得られるファイバーフローとした。結果を Fig. 4 に示す。プラスティシンで色分けされたファイバーフローは、シミュレーションによる

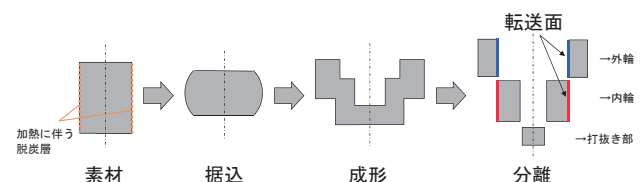


Fig. 3 Schematic diagram of forging process for bearing blank.

ファイバーフローとよく一致した。よって、シミュレーションの結果は実現象を良く再現していると思われる。

この数値解析結果を用いて、ピレット表面 1mm の部分の変形状態を追跡した結果を Fig. 5 に示す。その結果、外輪の一部に脱炭層が入り込むものの、その部分は大きく引き伸ばされるため、脱炭層の影響は軽微と結論付けられた。

このように、数値シミュレーションの活用によりファイバーフローや変形の予測を迅速かつ容易に行うことができ、利便性は高まった。ただし、この時点では熱間加工を中心とした鍛造シミュレーションへの適用にとどまっていた。原因は当時の PC の計算速度がまだそれほど速くなかったこと、三次元解析が困難であったことが大きい。

3. 三次元解析の素形材シミュレーションへの適用拡大

3.1 ハブベアリング熱間鍛造の三次元シミュレーション

2000 年頃を境に市販の鍛造シミュレーションソフトの充実が進み、ハードウェアの能力向上と相まって三次元解析への適用が現実的になってきた。



Fig. 4 Metal flow of forging process in gear blank.

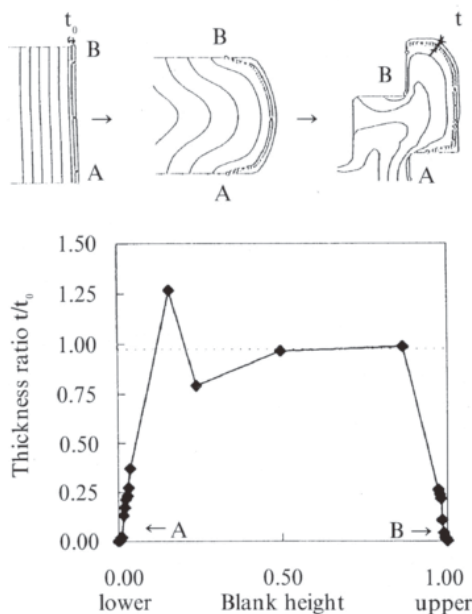


Fig. 5 Change in the decarburized layer thickness by forging.

同時期に、ハブベアリングの世代進化⁵⁾が起こり、軸対称形状であるハブⅠからハブⅡ、Ⅲといった複雑形状の製品の割合が増加した。それに伴い、これらの非対称形状のフランジを有する複雑形状を熱間鍛造にてニアネットシェイプに製造することが求められた。

そこで、ハブベアリング外輪の鍛造工程の三次元解析に取り組んだ⁶⁾。Fig. 6 にハブ外輪の鍛造形状例を示す。こうした非対称形状のフランジを成形するには従来はバリ出し鍛造が有効であったが、ここでは歩留まり向上を考慮して密閉鍛造にて仕上げる工法を検討した。複雑形状の変形に対し、単なる変形解析だけではなく、加工発熱や金型の抜熱を考慮した精密な三次元鍛造 - 温度連成シミュレーションが有効と考え、その確立に取り組んだ。

Fig. 7 にハブ外輪熱間鍛造時におけるフランジ下面とダイ接触部の温度に関し、三次元鍛造 - 温度連成シミュレーションと、赤外線サーモグラフィによる温度の測定結果の比較を示す。両者はよく一致している。

Fig. 8 に予成形形状を変更した場合のフランジ部の充足挙動について検討した結果を示す。製品工程におけるフランジ部の径方向の広がりや抑制するにあたり、予成形の上金型形状を平坦形状、上に開放した形状、広がりや抑え

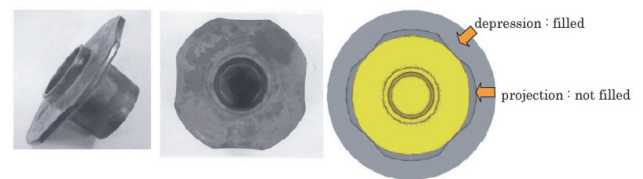


Fig. 6 Forged products for HUB bearing.

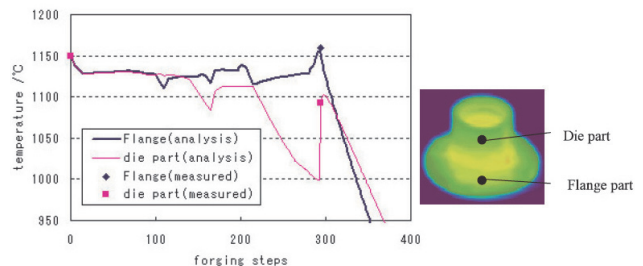


Fig. 7 Transition of temperature in forging process.

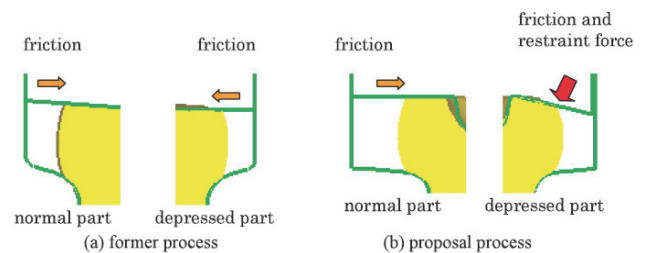


Fig. 8 Comparison between the former process and the proposal process in filling behavior of flange part.

て拘束する形状、の3種類の断面形状を設定した。平坦な上金型で圧下した場合に比べ、フランジ広がり解放した金型形状では充填挙動に差は付けられないが、フランジ広がりを抑制する金型形状にすることでフランジの広がり形状に差を付けられることが分かった。こうした設計により従来は軸対称形状であった予成形を非対称形状（二次元では解析できない形状）にする場合に対して三次元的に鍛造工程を設計することが可能となった。

こうした取り組みの結果、当社内でハブⅡ、Ⅲの熱間鍛造工程を確立することができた。今なおハブ素形材の熱間鍛造工程の設計には三次元 CAE 解析が有効に活用されている。また、中国の素形材製造拠点へのハブ専用プレスラインの導入にもつなげることができた⁷⁾。

3.2 ハブ熱間鍛造時の金型寿命向上⁸⁾

次に、ハブ内輪製造工程の金型寿命向上に取り組んだ事例につき紹介する⁹⁾。対象はパンチのエロージョン疵である。エロージョンとは、通常ダイス隅 R 部などに閉じこめられた空気や潤滑剤が瞬間的に噴出してダイスを損耗させる現象である⁹⁾。Fig. 9 に実際の疵の例を示す。ハブ内輪の4工程成形のうち、2工程目の予成形を平パンチにて加工する際、数百ショットと非常に短寿命で疵が発生したものである。

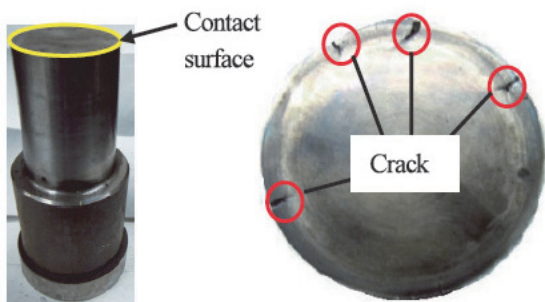


Fig. 9 Appearance of flat punch (Left) and surface cracks on punch (Right).

Fig. 10 に同工程を模擬した CAE 解析結果を示す。ストローク率 80% での変形において S_1 と S_2 の2つの微小空間の残存が見られ、これが疵発生箇所に近い箇所に存在することがわかった。このことから成形過程で潤滑剤が気化して工具付近を損傷することによるエロージョン疵と推定し、 S_2 近傍のパンチ外周部に空気抜き穴を設けたものの、大きくは改善されなかった。

そこで、原因は潤滑材の気化にあるとみたらうえて疵発生に対してより有害性の高い箇所を探った。高面圧が加わるとみられるパンチ中央部付近に注目し、素材とパンチの接触開始から鍛造終了までのパンチ中央部の面圧上昇量を加工時間で除した値を面圧上昇速度と定義し、この指標とパンチの寿命との関係性を調べた。同指標と平パンチを使用

する類似型番数種類の寿命との関係を整理した結果を Fig. 11 に示す。結果、パンチ中央部の面圧上昇速度が大きいほど金型が短寿命であることがわかった。

この解析結果をもとにパンチの中央部に空気抜き穴を設けた結果、エロージョン疵が防止され、寿命を飛躍的に向上させることができた。

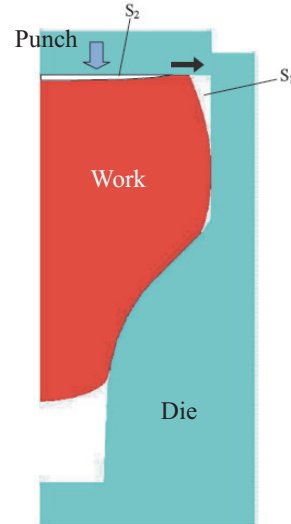


Fig. 10 Schematic diagrams of the lubricant trapped gaps, S1 and S2, in 2nd deformation process (Stroke ratio=80%).

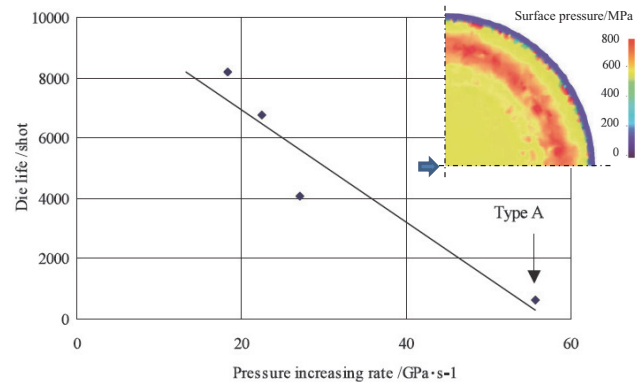


Fig. 11 Relationship between the pressure increasing rate and the die life.

3.3 リングローリングのCAE解析技術の確立

リングローリングはベアリングレースを始めとする中空リング状の各種素形材を製造する、有力な工程である。中空素材を拡径する工程であり、中実材を熱間鍛造で成形する工程に比べて鋼材歩留まりが良好であることがメリットである。一方で、過去には製造時の疵発生が経験されており、また素形材のニアネットシェイプ化に伴い断面プロフィール成形品の製造要望がある一方で、一般的なリングローリング工法では断面形状の成形が難しいといった課題があった。

そうした点を踏まえて、リングローリングの CAE 解析技術を確立することは工程改善に大いに寄与すると考えら

れる。ただし、リングローリングは1回転あたりの圧下率が小さいことから、リング内の加工される領域は狭い。したがって、CAE解析のためにリング全周を微細に要素分割する必要がある一方、変形に関与する要素はそのうちのごく一部に過ぎない。それに対して、通常の変形解析手法を適用した場合、単純形状の変形でも約7日を要するなど¹⁰⁾、計算時間が膨大になることが課題となっていた。

そこで、リングローリングの変形解析にALE法を適用したソルバーをベンダーに開発委託し、リングローリングの変形挙動適用への活用を図った^{11,12)}。ALE法とは「Arbitrary Lagrangian-Eulerian method」であり、Fig. 12に示すように、領域を分割するEuler要素と物体を要素分割するLagrange要素の2種類を適宜切り替え、計算する要素を変形体近傍に限定することで、計算時間を短縮する手法である¹⁾。

まず、同手法を冷間リングローリング(CRF)に適用した¹²⁾。その結果、圧延時の成形ロール回転を実測値とすると、シミュレーションによるリングの回転ならびにマンドレルの回転が実測値と同じ挙動を示すことを確認した。また、リングの拡張挙動は、Fig. 13に示すように葉山の理論式¹³⁾通りの挙動となることを確認した。

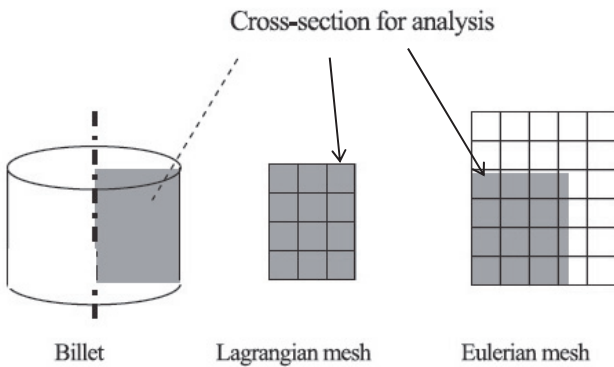


Fig. 12 Example of Lagrangian mesh (Middle) and Eulerian mesh (Right).

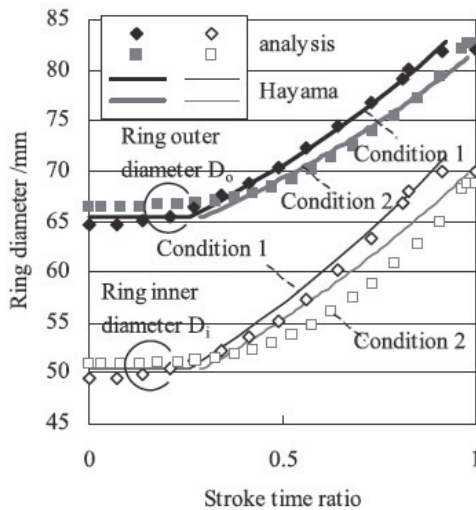


Fig. 13 Variation of the ring diameter during cold ring rolling.

以上より、CRFの変形挙動をCAE解析により短時間で計算することができるようになった。

続いて熱間リングローリングへの適用事例について示す。当社の保有する熱間リングローリング機の機構をFig. 14に示す。主ロール2枚が傾斜角 θ をもって並ぶ3ロール型リングローリング機であり、この機構により断面プロフィールを有するリング製品を製造することが可能とされる¹⁴⁾。ただし、その加工メカニズムは明確ではなかった。

まず、3ロール型リングローリング機による材料変形をALE法にて再現できるか確認した。圧延時の半径方向に旋盤目を入れて加工状態をモニタリングできるようにした材料を圧延し、その変形結果をCAE解析と比較した。Fig. 15にその結果を示す。リング内周部2ヶ所の材料が先進する実機の挙動を再現できており、本手法による解析は3ロール型でも適用可能と考えられた。

また、Fig. 16に示す貫通穴を開けたリングを活用して肉厚方向での材料の変形挙動を調査した。結果をFig. 17に示す。3ロール型ではz軸方向中央付近では他の箇所より U_r (半径方向への変位)の値が大きいことからみて、内

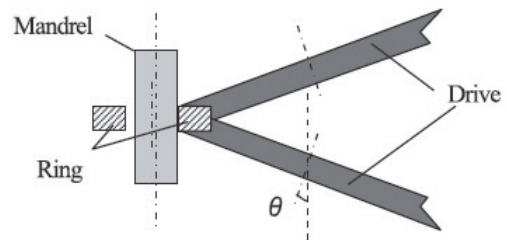


Fig. 14 Schematic diagram of 3-roll-type ring rolling mill.

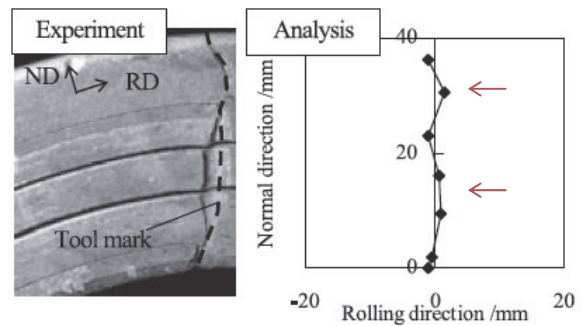


Fig. 15 Forward slip behavior by the three-roll-type ring rolling. Arrows in the analysis result show the behavior of forward slip.

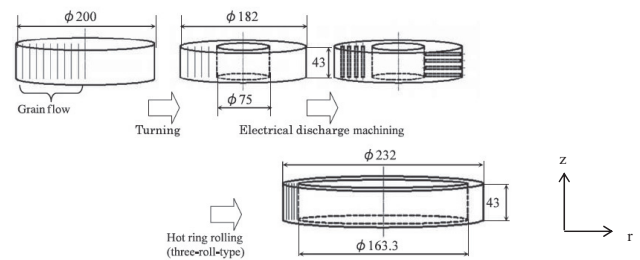


Fig. 16 Preparation of initial ring and the rolled product after three-roll-type ring rolling.

径から外径に向かう材料流動を促進する作用が働いていることが明らかになった¹⁵⁾。

続いて2ロール型、3ロール型のリングローリングに関し、テーパ型リング加工時の材料外周・内周の周速との一致度を確認した。Fig. 18にロール出側の断面形状を示す。主ロールとマンドレルで構成されるロールバイト出側の形状は、鍛造加工の場合に類似した閉孔型となっている。一般的な2ロール型ではリング肉厚中央で型割りすることが多く、その場合は開放型的であると言える。2ロール、3ロール型でのロールと材料の相対速度差の計算結果をFig. 19に示す。2ロール型(図中のCondition 3)において相対速度差の幅が大きい一方、3ロール型(図中のCondition 1, 2)においては相対速度差の幅は小さく、したがってロールバイトにおいて材料とロール間のすべりが生じにくいことが見出せる。すなわち、これらの3ロール型の材料流動の特徴がプロフィールを有するリングの製造に有利に働くことがわかった^{16,17)}。

以上の通り、リングローリングの解析時間の短縮が可

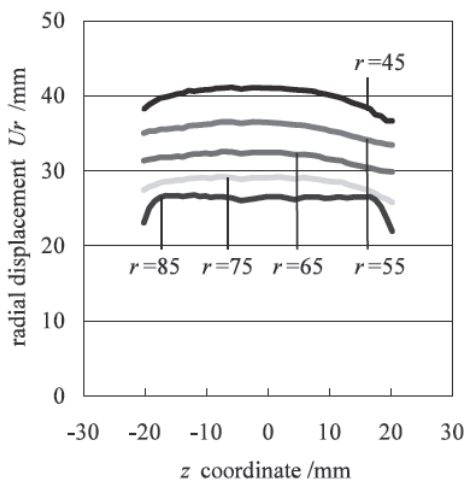


Fig. 17 Radial displacement of z-coordinate of the ring by three-roll-type ring rolling.

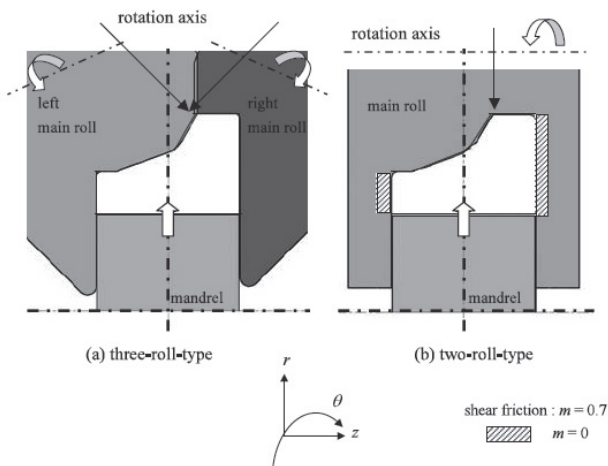


Fig. 18 Schematic diagram of 2-roll-type and 3-roll-type tapered ring rolling mill.

能なCAE解析ソルバーを開発・活用して、2ロール型ならびに3ロール型リングローリングの変形解析に適用し、それぞれのロール方式での実機の変形挙動を再現できた。特に当社が保有する3ロール型はロールバイト出側が閉孔型になること、ロール周速とリング周速とを一致させやすい機構であることにより、断面プロフィールを有するリング製品の製造に有利であることが明らかになった。

3.4 コネクティングロッド金型の寿命向上の検討

CAE解析を活用して、ユーザーにおける金型寿命向上の取り組みも行っている¹⁸⁾。コネクティングロッドの熱間鍛造についてその工程をFig. 20に示す。半密閉鍛造で行われており、一部の材料がフラッシュ(ばり)として製品の外側に付随している。熱間鍛造金型に見られる割れの状態をFig. 21に示す。全3工程で行われる鍛造のうち、

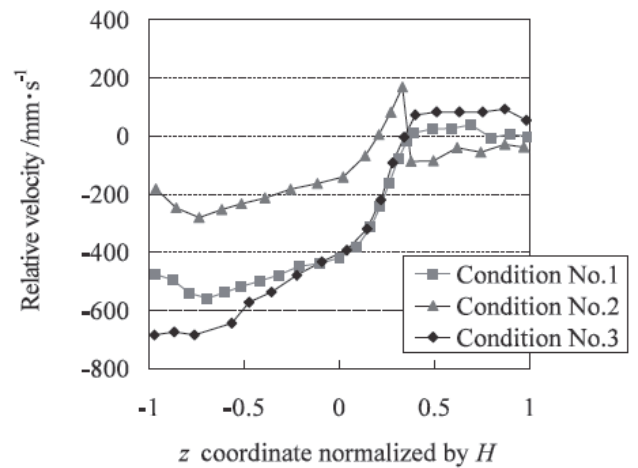


Fig. 19 Relative velocity between main rolls and the ring.

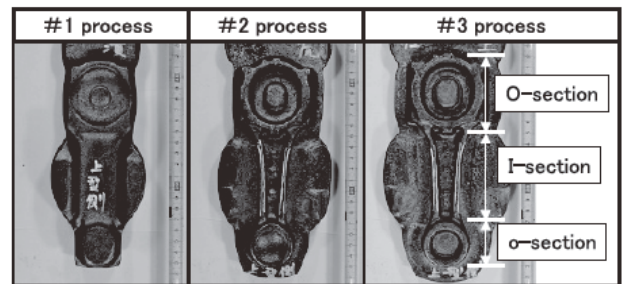


Fig. 20 Intermediary and final shapes of hot-forged connecting rod.

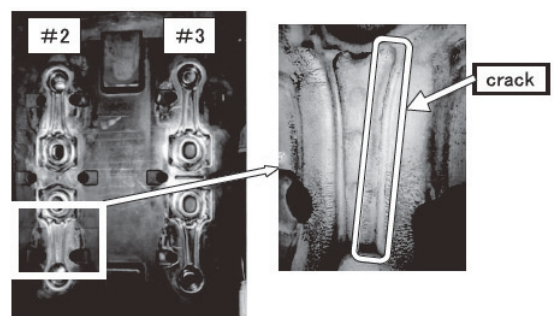


Fig. 21 Example of the crack in hot-forging die.

2 工程目の金型の大端部と小端部をつなぐロッド部分の金型に割れの発生が見られている。

この金型に対し、まず成形解析を行い、その面圧を金型に転写する方法にて金型の応力解析を行った。その結果を Fig. 22 に示す。下死点近傍のストロークで割れ発生部に 835MPa と比較的高い最大主応力の発生が予測された。

次に、品質工学手法（タグチメソッド）の援用による金型寿命向上に取り組んだ。フラッシュの厚み、金型の R 形状など 5 種類の設計項目を制御因子とし、上記最大主応力の低減により金型寿命が向上するとの考えのもと、実験計画法を用いて必要十分な条件数に低減して行った CAE 解析結果に基づき最適設計形状を決定した。

各制御因子における各水準の SN 比、感度（いずれもタグチメソッドにおける指標）を Fig.23 に示す。両因子に関し、ここでは感度が小さいほど最大主応力を小さく、SN 比が大きいほど最大主応力の温度によるばらつきを小さくすることが可能である。最適制御因子を採用した結果、最大主応力は 520MPa に抑制された。これに材料の最適化を組み合わせ適用した結果、金型寿命を指数表記で従来の 0.87 から 1.46 にまで向上させることができた。

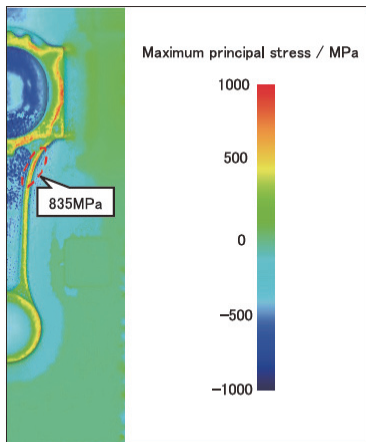


Fig. 22 Distribution of maximum principal stress on die in 2nd forging process.

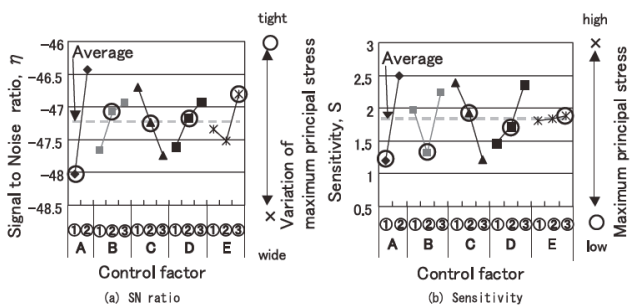


Fig. 23 Relationship between SN ratio, sensitivity and control factor in 2nd forging process.

4. 棒鋼圧延工程への適用拡大

4.1 棒鋼圧延工程の形状予測ならびに棒鋼内部の空隙閉塞予測

当社で取り扱う棒鋼、鋼管といった製品は長さ方向で断面形状が同一であり、比較的単純な形状を有するが、それらの塑性加工には三次元変形過程を伴う。棒鋼製造において、解析によって変形形状を予測できることは、製品の高精度化や製品欠陥の防止に有用である。棒鋼の主要な品質課題は表面疵と内部欠陥防止の 2 点に集約され、数値シミュレーションにてこれらの欠陥を予測することができれば、工程改善やコストダウンに貢献することができる。

前章でも述べた通り、2000 年頃から鍛造の三次元変形への CAE 適用が開始されたが、これは棒鋼の製造工程に対しても同様である。本章では圧延や自由鍛造といった社内製造工程の改善のために CAE 解析を適用した事例について述べる。

2000 年当時の当社の棒鋼圧延の粗列パスは、丸ビレットをダイヤ-スクエアカリバーで圧延後に、オーバル-ラウンドカリバーで圧延するようになっていた。これは、角ビレットからスタートする工程では一般的ではあるが、一部の難加工材では角部に疵を発生させることがあった。そこで、全パスをオーバル-ラウンド工程に変更することに取り組んだ¹⁹⁾。

圧延変形の様子を CAE 解析並びにプラスティシン実験により検証した。プラスティシン実験のために圧延実験機を導入し、使用した。圧延解析には、柳本らの開発した三次元剛塑性定常圧延解析コード「CORMILL」²⁰⁾を棒鋼圧延用に機能特化し、GUI (Graphical User Interface) を強化したバージョン²¹⁾を用いた。

Fig. 24 にオーバル-ラウンド工程に関し、実鋼のかみ止め圧延実験結果ならびに CAE 解析結果を示す。実鋼の形状と数値シミュレーションの形状とはよく一致しており、圧延解析に対して CAE の実用適用が可能であることが示された。

また、棒鋼の中心空隙の閉塞挙動についても検討した。棒鋼あるいはその中間製品であるビレットの製造時において、連続 casting 及び鋼塊凝固時の収縮に起因する中心空隙が残留することがある（ビレットに関する取組みは後述）。それを模擬するために、プラスティシン製のビレットの中心に貫通孔を設け、ダイヤ-スクエアとオーバル-ラウンドパスでの貫通孔の閉塞挙動を観察した。Fig. 25 にプラスティシン実験結果を示す。パス毎に、また圧延方式の違いにより中心孔の閉塞挙動には違いが見られる。このような挙動は、数値解析を用いた空隙閉塞パラメータによって説明することができる。鍛造工程での必要性から開発された空隙閉塞パラメータ G_m は下記の式 (1) にて表される²²⁾：

$$G_m = \int^{\epsilon} \left(-\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d\epsilon \dots (1)$$

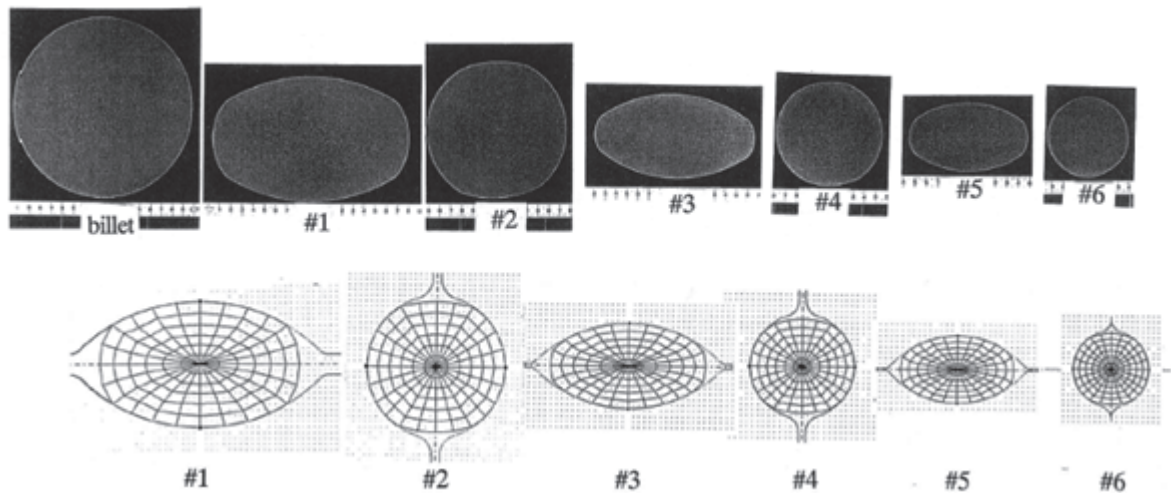


Fig. 24 Comparison of cross-sectional shapes between the rolled steel and the CAE result during rough rolling pass.

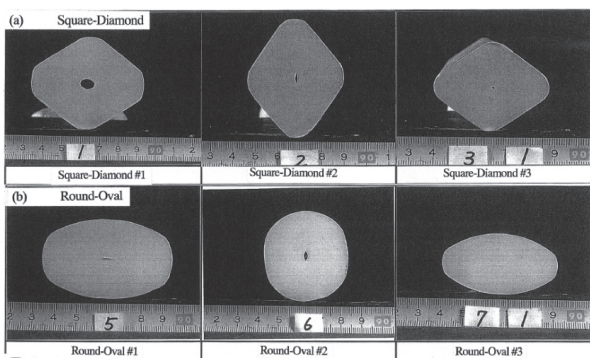


Fig. 25 Plasticine test of roughing passes. (Top: Square-Diamond, Bottom: Round-Oval)

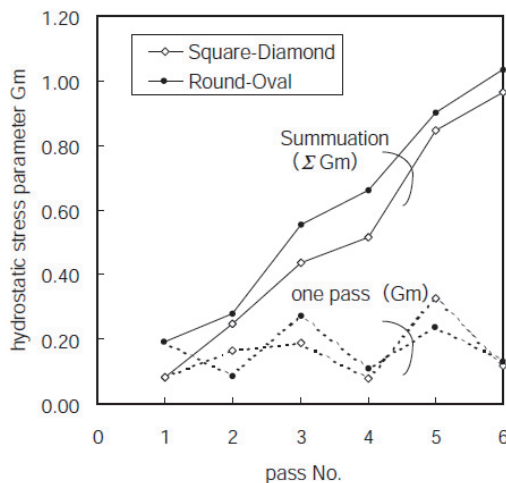


Fig. 26 Transition of Gm the hydrostatic stress parameter during rolling.

Fig. 26 に空隙閉塞パラメータ G_m の合計値 ΣG_m の推移を示す。オーバル-ラウンドでの ΣG_m 値はダイヤ-スクエアに比べて高く、プラスチック実験の結果と併せて、オーバル-ラウンド工程の方が閉塞に対し有利であると推定された。

4.2 分塊圧延工程の空隙閉塞予測^{23,24)}

次に、分塊圧延工程への数値シミュレーション適用に取り組んだ。ここでは、分塊圧延におけるビレットの中心空隙の閉塞に着目した取組みを行った。その対策には、鑄造方法の検討はもちろん、圧延及び鍛造といった塑性加工工程を通じた改善も不可欠である。

前節同様に貫通孔を設けたプラスチック母材を用いて、実工程を模擬した圧延実験を行った。圧延パスは通常パス A と、1パスあたりの圧下量を変更したパス B, C の3パターンについて行った。その結果を Fig. 27 に示す。比較的強圧下を行うパス A に対し、複数パスに分割して弱圧下を行うパス B, C では材料外形は同じであっても中心に大きな孔(空隙)が残存していることが分かる。これらの圧延パスについて 4.1. 節で示した鍛造工程の空隙閉塞パラメータの式(1)を用いて計算した結果を Fig. 28 に示す。空隙閉塞パラメータの合計値 ΣG_m と残存空隙の有無には関連性が強く認められるが、その序列や残存空隙の大きさと ΣG_m の値の対応にはやや整合性がない。そこでさらなる検証を行った結果、軽圧下の場合の空隙閉塞パラメータの計算においては、実挙動との対応に基づいた式の補正が必要と分かり、補正された以下の式(2)による計算を改めて行った。

$$G_m^+ = \int^\epsilon \left(-\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d\epsilon + 0.024 \dots (2)$$

式(2)による ΣG_m^+ の計算結果を Fig. 29 に示す。残存空隙の実態とパラメータ値とはよく対応していると考えられる。本式は元の式に対して補正係数を加算した構造であり、圧延工程だけではなく鍛造工程に対してもパラメータの閾値が変わるだけで同様に適用可能と考えられ、圧延・鍛造に共通して適用可能な評価式になっている。

本式を用いて、Fig. 30 に示すような圧延・鍛造工程で

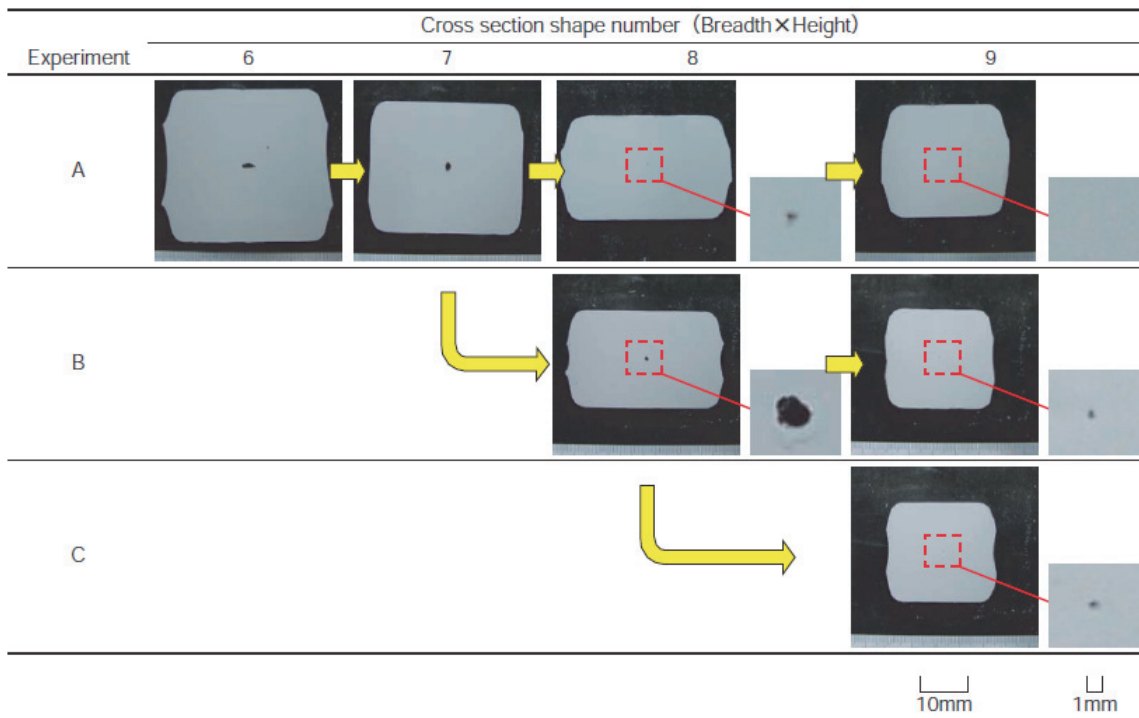


Fig. 27 Variation of cross sectional shape of plasticine bars during rolling experiment.

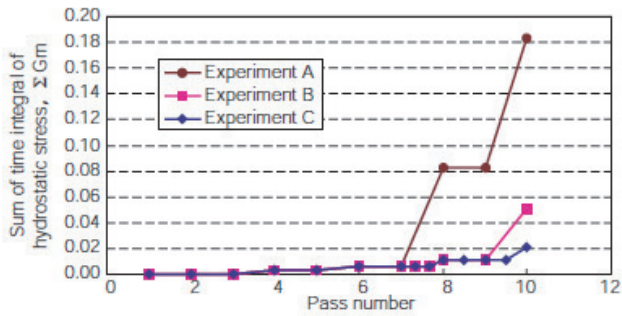


Fig. 28 Relationship between pass schedule and ΣGm .

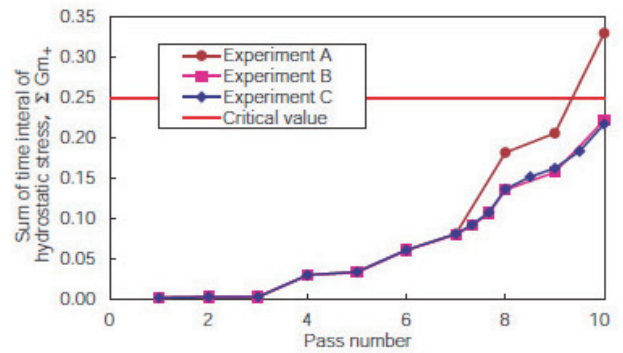


Fig. 29 Transition of $\Sigma Gm+$ for each pass.

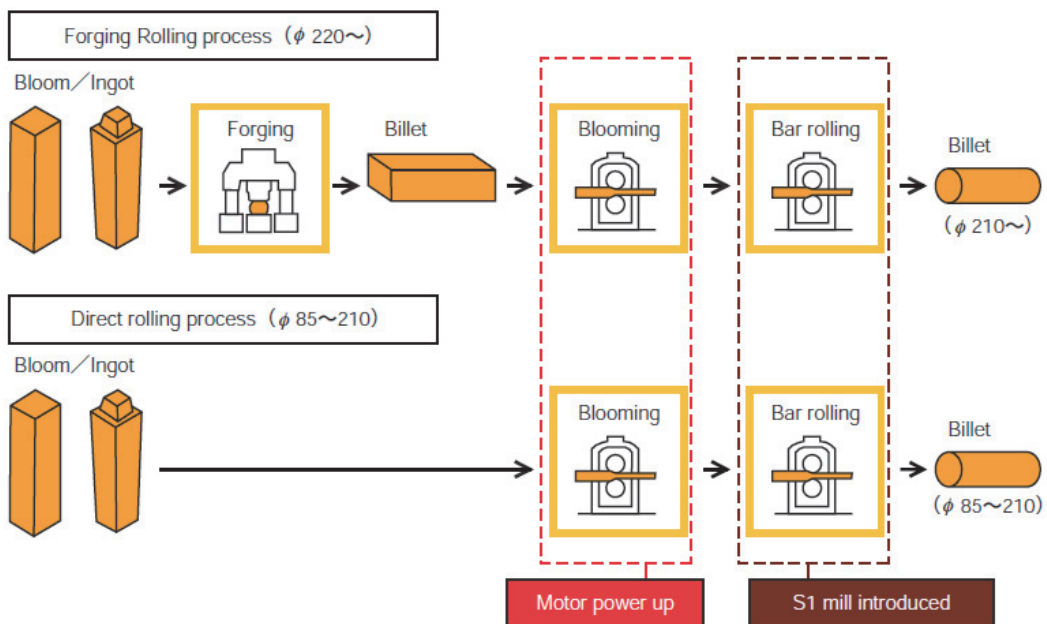


Fig. 30 Manufacturing routes for steel bar. One includes free-forging process.

の空隙閉塞について評価した。ピレット製品の空隙閉塞を目的として、従来は寸法によっては閉塞効果の高い鍛造を行った後に圧延する工程を適用していたが、コストの観点からは鍛造を省略した圧延工程のみによる製造が望まれる。

そこで、当社の圧延機リプレースに伴う圧延ロール径アップを契機に、ピレット製品径に及ぼす空隙閉塞効果を上記式(2)により計算した。結果をFig. 31に示す。プラスチック実験結果にさらに安全係数を考慮し、 $\Sigma G_m^+ \geq 0.30$ の場合に空隙が閉塞可能と判断され、その下限値($\Sigma G_m^+ = 0.30$)との対比に基づき、圧延のみで製造できる製品径として従来の圧延機における $\phi 210$ に対し $\phi 240$ まで製造が可能と判断された。本計算結果を元に、新圧延工程での合理化を実現できた。

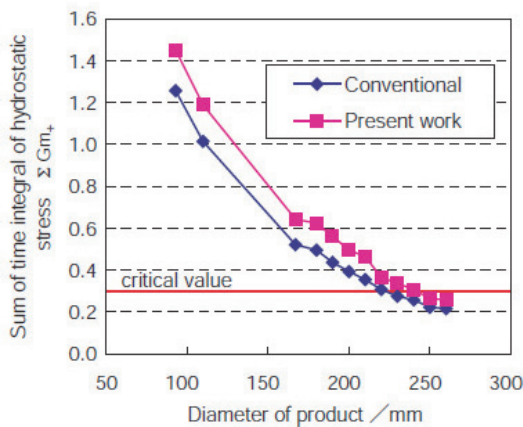


Fig. 31 Estimated ΣG_m^+ for various size of product by conventional and present mill.

4.3 工具鋼自由鍛造品の内部欠陥防止²⁵⁾

高炭素系難加工鋼材である工具鋼の課題として、鋼塊凝固時の熱収縮に起因する「未圧着」と、鋼塊偏析部に液相が生じた状態で熱間加工することにより発生する「オーバーヒート」の2種類の欠陥の抑制がある。両者は原因の異なる現象であるが、見かけ上は類似する場合がある。冷間工具鋼SKD11などの難加工材では加工に適した温度帯が狭く、金相学的なミクロ調査だけでは欠陥の発生原因特定が困難な場合がある。Fig. 32に内部欠陥の観察例を

示す。(a)は未圧着、(b)はオーバーヒートと推定されるが、(c)は両者の特徴を兼ね備えている。このような場合の欠陥発生原因の特定に対し、加工条件をもとに温度、ならびに空隙閉塞挙動を予測可能なCAE解析は有用である。

CAE解析にて工具鋼の自由鍛造品の加工パスを再現し、内部温度推定ならびに4.2節で紹介した式(2)を用いた空隙閉塞挙動の評価を行った。後者の解析結果をFig. 33に示す。鋼塊状態から500角までの加工工程における空隙圧着パラメータの合計値 ΣG_m^+ は前述した下限値の0.30を超えており、未圧着ではないと推定された。一方、鍛伸工程における自由鍛造品の温度分布をFig. 34に示す。通常圧下における推定温度は実験によって求めた危険温度より 10°C 高いことから、当該工程の欠陥は加工発熱によるオーバーヒートで発生したと推定された。また、同CAE解析により、温度上昇を抑制するためには、圧下量を同等としたままで金敷の送り量を少なくする方法が有効と推定された。

このように、CAE解析にて自由鍛造のパススケジュールに伴う内部欠陥の発生原因を特定することができた。本手法は現在に至るまで自由鍛造工程の有効な解析手法として使われている。

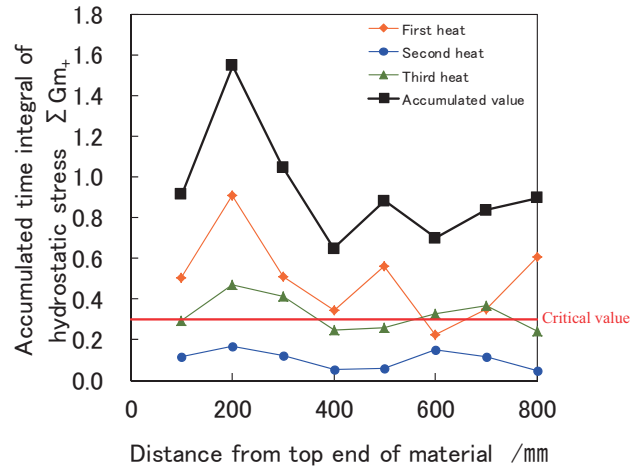


Fig. 33 Transition of accumulated time integral of hydrostatic stress, ΣG_m^+ .

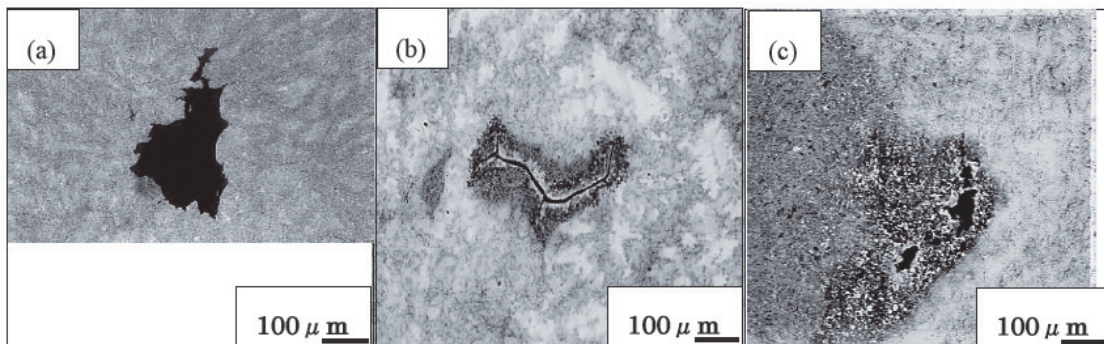


Fig. 32 Micrographs of center defects; (a) Remained porosity after free forging, (b) Crack caused by overheating, (c) Porosity observed in micro-segregation area.

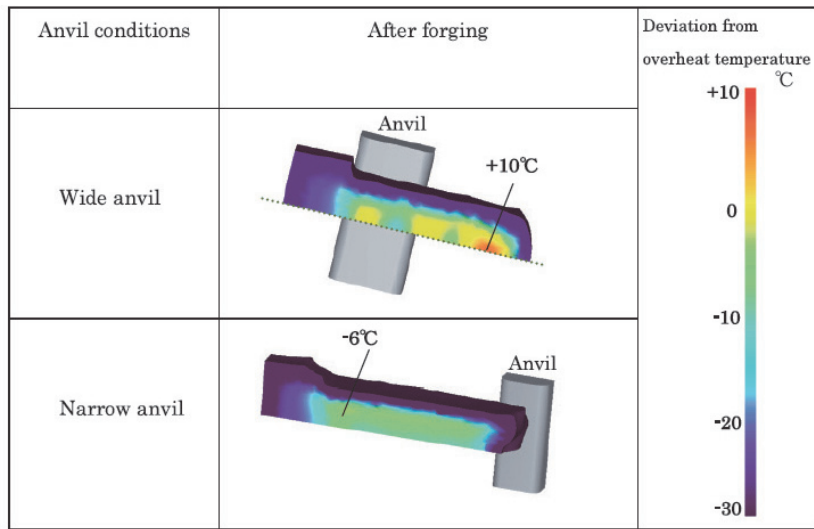


Fig. 34 Effect of narrow anvil on the temperature distribution of product after free-forging (1/4 model).

4.4 ラミノグラフィーによる微小空隙閉塞のその場観察²⁶⁾

これまで述べてきたように、熱間加工における材料の空隙閉塞挙動を知ることは鋼材製造工程での欠陥防止において重要である。ここでは、さらに鋼種による影響について調査した。そのために、微小試験片を準備し、その試験片内に設けた微小空隙の閉塞挙動について、大型放射光施設 SPring-8 で放射光 X 線ラミノグラフィー法により疑似的にその場観察を行うことで把握した。

具体的には、ミクロ凝固欠陥による微小空隙（マイクロポイド）を有する試料から $\phi 8 \times 1L$ 試験片を切り出し、それに対する圧縮加工とラミノグラフィー法²⁷⁾による測定の繰り返しによりマイクロポイドの変形挙動を観察した。結果を Fig. 35 に示す。加工前のマイクロポイドの形状に応じて変形挙動には差が見られ、アスペクト比の低いポイドでは変形が小さかった。一方、アスペクト比の高いマイクロポイドは分断されやすいことがわかった。また、炭素鋼とステンレス鋼を比較すると、ステンレス鋼のマイクロポイドは閉塞しやすく、その理由は Fig. 36 の CAE 解析の結果をもとに熱間での変形抵抗の加工硬化指数 (n 値) の違いに

起因すると推定された。

以上に例示する通り、欠陥の一種である内部微小空隙に

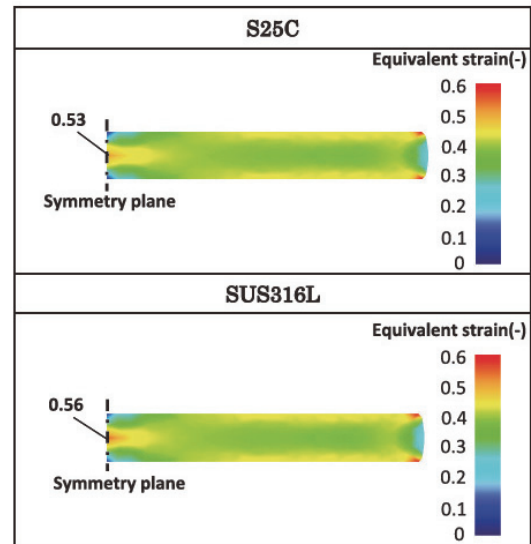


Fig. 36 CAE analysis results of equivalent strain (ϵ_{eq}) at 30% compression for S25C and SUS316L.

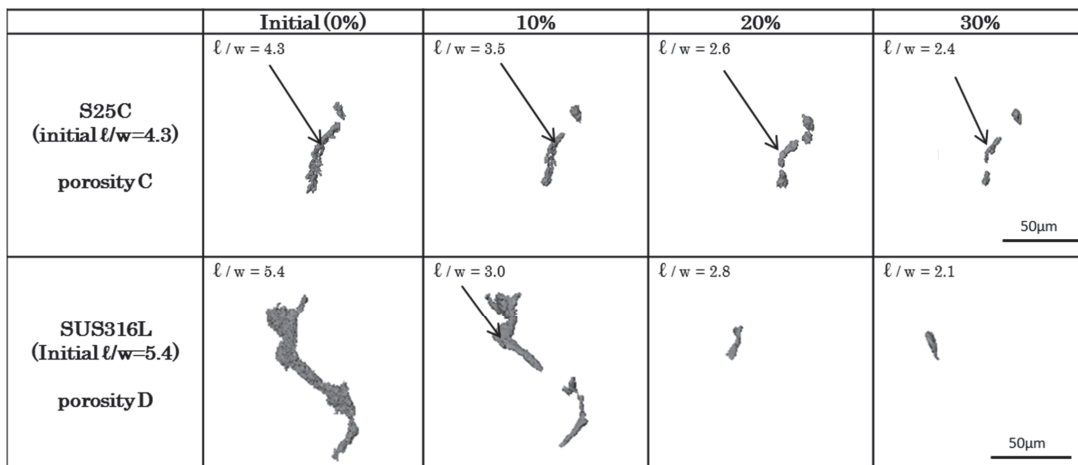


Fig. 35 Morphology change of high aspect ratio porosity (micro-void) in compression.

対し、工程設計に CAE 解析を活用することで、欠陥を防止・減少させる方策の創出が可能となった。

5. おわりに

以上、当社における塑性加工シミュレーション技術の発展や具体的活用事例を中心に概説した。以下にその要点、ならびに今後のシミュレーションを活用した研究の方向性について示す。

- (1) 熱間鍛造、リングローリングなどの工法により製造する素形材部門ではシミュレーションが工程設計、金型寿命向上など種々の課題解決に貢献した。また、当社の独自技術である 3 ロール型リングローリングについてのシミュレーションにより、その変形特性を把握することができた。
- (2) 圧延、自由鍛造の三次元解析に関して、特に棒鋼製造時の中心空隙閉塞のシミュレーションに取り組み、鍛造で使用されてきた空隙閉塞の指標となるパラメータを圧延にも拡大適用できるようにした。難加工材の内部欠陥防止技術やマイクロレベルの空隙閉塞に関し、実態観察とシミュレーションとの連携により、更なる不良低減の方策が見出されている。

既にシミュレーション技術は工程設計を始めとして、その周辺技術の改良にあたり必要不可欠の技術となっている。実変形の精密な再現や、測定困難な内部の応力・ひずみ情報の可視化ができるだけでなく、理論式に基づく各種パラメータを適用した解析により、工具寿命や空隙閉塞挙動などの予測にも威力を発揮する。これら種々の長所に加え、それに実材料の挙動確認やプラスチックなどの物理シミュレーションによる検証を組み合わせることでさらに多くの改善に有効な情報を引き出すことが可能であり、このような解析の手法は今日でも重視されている。

現在、熱処理シミュレーションなどの分野に対しても実現象の検証や予測を可能にする数値解析技術と実験技術の高度化を進めている。今後も、鋼材に関するより高度な課題に対応していけるように、さらなるシミュレーション技術の高度化・適用可能分野の拡大に努めていきたい。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：静的解法 FEM- バルク加工，(2003)，78-98，コロナ社。
- 2) 吉田忠継，尾崎勝彦，中崎盛彦，矢野正和，濱野利幸，笠原義夫：山陽特殊製鋼技報，4(1997)1,23-32。
- 3) 尾崎勝彦，吉田忠継，矢野正和，笠井貴之，濱野利幸，中崎盛彦，瀬川冬樹：山陽特殊製鋼技報，5(1998)1,32-39。
- 4) 森謙一郎，島進，小坂田宏造：日本機械学会論文集，45-396(1979),965。
- 5) 船橋英治：NTN TECHNICAL REPORT,70(2002),52-56。
- 6) 中崎盛彦，明珍洋之，中溝利尚：山陽特殊製鋼技報，12(2005)1,20-25。
- 7) 渡邊守人：山陽特殊製鋼技報，12(2005)1,76-78。
- 8) 中崎盛彦，明珍洋之，江良康司，高須一郎：山陽特殊製鋼技報，14(2007)1,36-41。
- 9) 渡部清彦：素形材，46-5，(2005)，17-21。
- 10) 中崎盛彦，高須一郎，中溝利尚，宇都宮裕：第 59 回塑性加工連合講演会論文集，(2008),239-240。
- 11) 中崎盛彦，高須一郎，宇都宮裕：塑性と加工，50-579(2009),349-353。
- 12) 中崎盛彦：山陽特殊製鋼技報，16(2009)1,25-32。
- 13) 葉山益次郎・大島勉：塑性と加工，22-240(1981)，71-79。
- 14) 中溝利尚：山陽特殊製鋼技報，11(2004)1,70-73。
- 15) 中溝利尚，中崎盛彦，高須一郎：山陽特殊製鋼技報，17(2010)1,28-34。
- 16) 中溝利尚，中崎盛彦，宇都宮裕：塑性と加工，53-616(2012),445-449。
- 17) 中溝利尚，中崎盛彦：山陽特殊製鋼技報，19(2012)1，24-31。
- 18) 井手洋文，中崎盛彦，鎌田諒大，北城弘樹，瀬川勝敏：山陽特殊製鋼技報，21(2014)1,62-67。
- 19) 中崎盛彦，西村信己：山陽特殊製鋼技報，8(2001)1，51-58。
- 20) 柳本潤，木内学，中村充，倉橋隆郎：塑性と加工，32-367(1991)，1000-1006。
- 21) 柳本潤，木内学，宮澤英之，浅川基男：鉄と鋼，86-7(2000),452。
- 22) 田中光之，小野信市，常野誠：塑性と加工，28-314(1987),287。
- 23) Morihiko Nakasaki, Ichiro Takasu, Hiroshi Utsunomiya: Journal of materials proceeding technology, 177(2006), 521-524。
- 24) 中崎盛彦，高須一郎，宇都宮裕：鉄と鋼，94-8(2008),284-289。
- 25) 金井智則，中崎盛彦，高須一郎，石橋直弥，宮本俊輔：山陽特殊製鋼技報，14(2007)1,50-57。
- 26) 渡邊啓介，井手洋文，中崎盛彦：山陽特殊製鋼技報，25(2018)1,24-30。
- 27) 星野真人，上杉健太郎，竹内晃久，鈴木芳生，八木直人：放射光，26-5(2013),257-267。