

解 説

小特集号 バルク成形シミュレーションの現状



S. NAKAYAMA

シミュレーションを用いた金型の最適化

中山 省二*

1. はじめに

グローバル化によるコスト競争や環境問題など我々製造業を取り巻く環境が大きく変化する中、鍛造の分野においてはさまざまな成形方法や金型構造を利用した高精度な鍛造品の開発が進められている。その中で起こる問題を効率的に解決するためのツールとしてシミュレーションへの期待は大きいと考えている。

近年では安価で高性能なハードウェアの登場やソフトウェアの進歩により多くの企業でシミュレーションが実施されており、その適用範囲も鍛造工程の検討から金型の応力、変形の確認など幅広く利用されている。

本稿では、当社でシミュレーションを活用し実施してきた鍛造金型の破損対策事例や鍛造のネットシェイプ化を目的とした金型の補正事例を中心に紹介する。

2. 金型設計におけるシミュレーションの役割

図 1 に金型製作の流れを示す。従来の鍛造品は長い開発期間、多くの開発費をかけ何度も試作を繰り返しながら量産に至ってきた。現在では鍛造工程設計や金型設計にシミュレーションを取り入れて仮想的に試作を行い、事前に鍛造不良や金型強度などの検討を行い、その対策効果の検証を行うことで実機による試作回数を削減するなど効率的な製品開発が進められている。

鍛造シミュレーションは製品形状から成形工程の検討を行うツールとして一般的に利用されており、過去の経験などでは補えきれない複雑な形状も増えていることから当社でも積極的に使用している。

その成形を行っている金型については、製品のネットシェイプ化、または複雑な形状を成形するために金型材料の強度限界まで負荷を与えることが多い。その結果、金型の短寿命が問題となることがあり、その破損対策効果について金型の応力状態をシミュレーションで確認している。最近では金型の寿命予測技術の開発も行われるなど金型強度に対してもシミュレーションは活用されている。また、ネットシェイプ鍛造を実現するためにあらかじめシミュレーションで成形時の金型の変形を予測し、その変形を見込ん

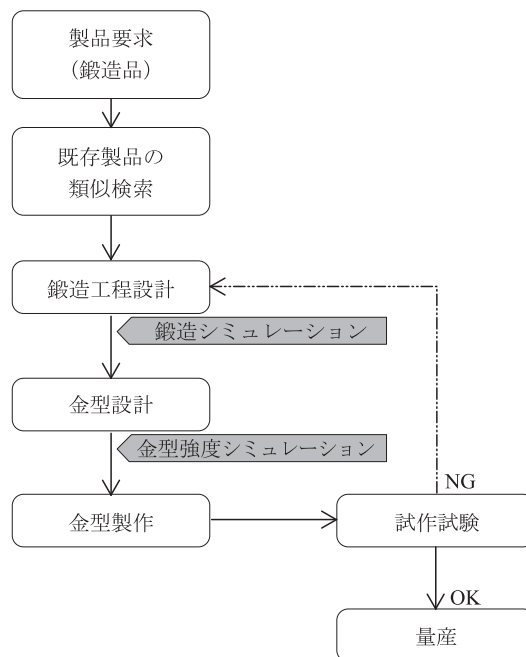


図 1 金型製作の流れ

で金型形状を補正するといったことも行うなど、金型設計においてシミュレーションは不可欠なものになってきている。

3. 金型強度対策事例

3. 1 ベベルギヤの破損対策事例

代表的な金型の破損としてギヤ形状金型の破損が挙げられるが、その中でもベベルギヤについての破損対策事例を紹介する。

図 2 に示すようにベベルギヤの金型は歯底コーナーに沿ってクラックが発生し、最終的には欠けなどに発展する。クラックが発生しても鍛造品に転写されるまで使用し続け、欠けが発生した時点で鍛造品に転写されてバリ、キズなどの欠陥となるため金型の使用を終了する。

図 3 に対策前後の金型構造を示す。対策前では歯形ダイはコーナー R の小さい一体型となっていたが、対策後はコーナー R を拡大して製品上面を成形する部分を分割した構造とした。図 4 にシミュレーションで得られた破損部の R と最大主応力 $\sigma_{\max}$ の関係を示す。コーナー R が大きく

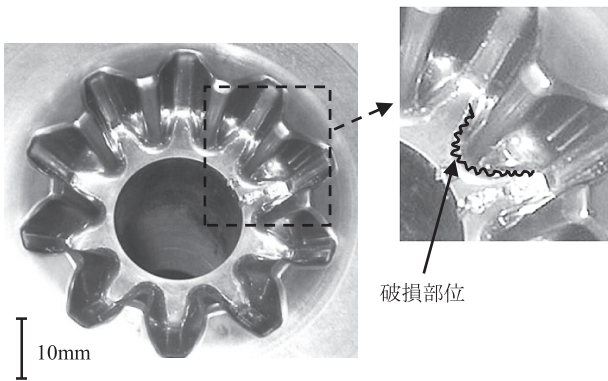


図2 ベベルギヤ破損箇所

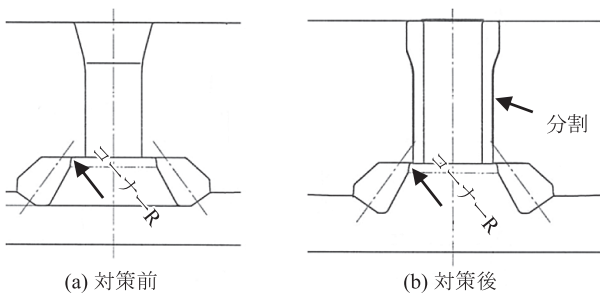


図3 ベベルギヤ金型構造

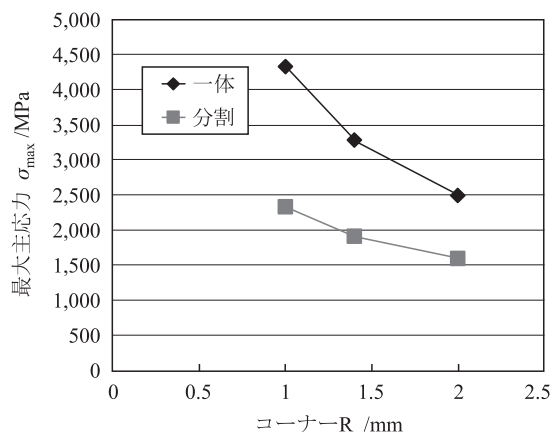


図4 ベベルギヤ金型のコーナー R と最大主応力の関係

なると応力は約 40% 軽減されて、金型を分割するとさらに応力が約 35% 軽減しているのが分かる。

コーナー R の拡大、金型の分割で応力集中を緩和することで金型に働く引張の応力を軽減しているが、製品によってはコーナー R を拡大できない場合もあり、状況に応じて R 拡大、型分割の対策を使い分けている。

3.2 クロスジョイントの破損対策事例¹⁾

クロスジョイントは金型を閉塞し側方押出しで成形されている。そのためクロスジョイントの金型は製品の上下中央で分割されている。

対策前はコスト低減からダイインサート径を小さく設定して軸部を貫通溝（図 5(a)）として加工していたため、側方押出しが始まると軸部入口が広げられてクラックが発生し、破損に至っていた。

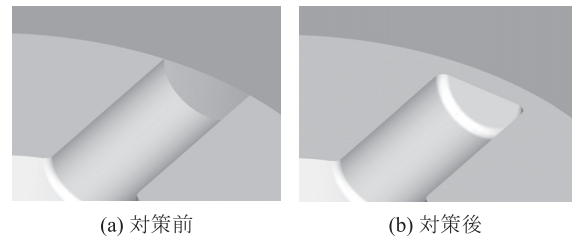


図5 ダイインサート分割位置

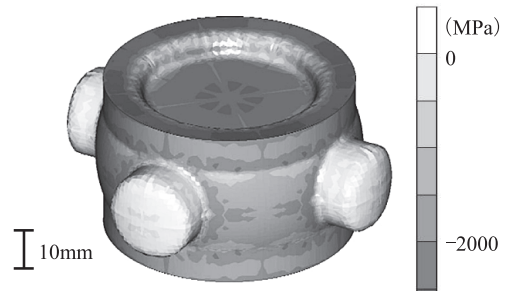


図6 面圧分布（最大荷重時）

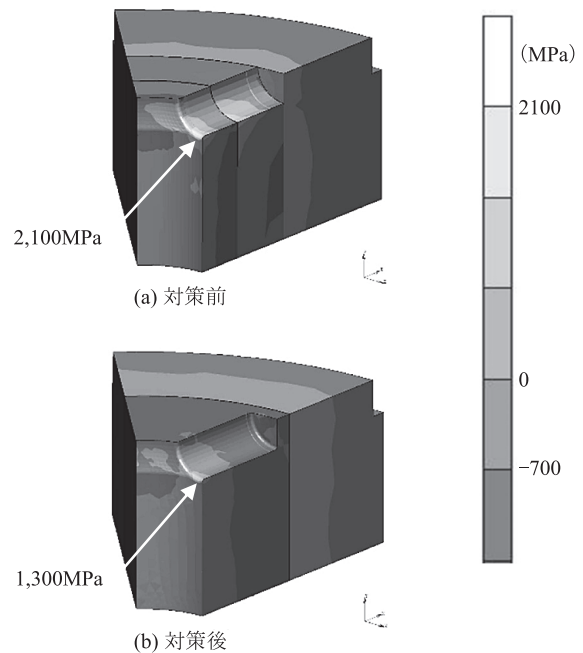


図7 対策前後の金型応力解析結果

図 6 に鍛造シミュレーションから得られた面圧分布、図 7 に金型シミュレーション結果を示す。対策後は貫通溝から止まり溝（図 5(b)）に変更することで、ダイインサートの剛性が高くなり軸部入口の広がりや抑えられて軸部入口に発生していた引張応力が 40% 弱軽減され、金型寿命が約 5 倍となった。

3.3 バリ出し成形の破損対策事例

バリ出し成形の金型は上型の下面、下型の上面に製品形状が加工されており、座面と側壁のコーナーから破損するが多い。このコーナーに発生する割れは単純に焼きバメなどで強く締め付けても改善しにくい破損形態となっている。この場合、一般的にコーナー R を大きくするなどの

対策が施されるが、それだけでは十分な応力軽減効果が得られない場合がある。この事例は金型の変形に注目し、部分的に変形していた金型を全体的に変形させることで応力軽減できないか検討したものである。

破損した金型構造と対策構造を図 8 に示す。破損した金型構造は下型の下面全面を支える構造となっているのに対し、対策構造は中央付近のみを支えてダイインサート外周付近の下面は支えていない状態となっている。破損した金型構造では成形面に成形面圧が負荷されると座面のみが押し下げられるような変形（特に中心側の変形量大きい）をしており、側壁とのコーナー部が押し広げられて応力集中してしまう。一方、対策構造ではダイインサート下面外周部を支えていないので座面と一緒に側壁も軸方向に変形することでコーナー部の押し広げが緩和されてコーナー部の応力集中が軽減されている（図 9）。

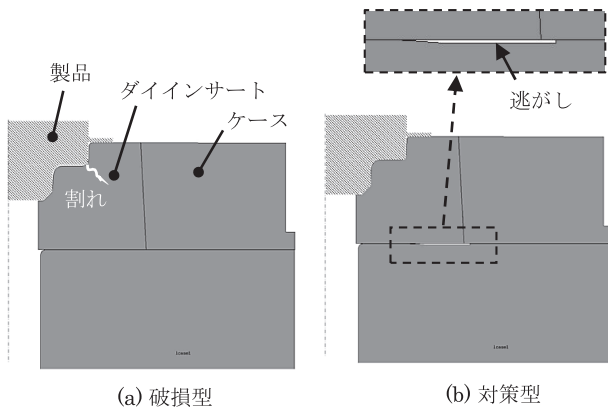


図 8 対策前後の金型構造

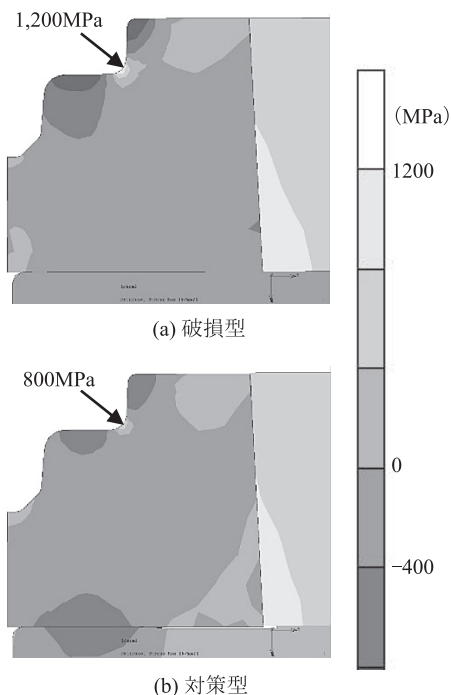


図 9 コーナー部の応力状態

4. 金型補正事例

4.1 ベベルギヤ歯形補正²⁾

これまでは実際に試作を行い、鍛造品の精度から補正値を決定し金型に反映していた。最近ではシミュレーションで金型の弾性変形を予測し金型の補正を行っている。最初に鍛造シミュレーションを実施して金型への面圧分布（図 10）を求めて金型の弾性シミュレーションで境界条件として金型に負荷しているが、その負荷（面圧）が高い部分は金型の変形も大きい。そのため歯面を均一にオフセットするのではなく、面圧に応じた形状補正を行う必要がある。この鍛造シミュレーションから得られる面圧の高さによって金型の弾性変形量（図 11）が変化するため鍛造シミュレーション結果を高精度に求めることが重要になってくる。

最終的には試作を行い精度確認することになるが、シミュレーションを活用することで開発期間と金型コストの削減に貢献している。

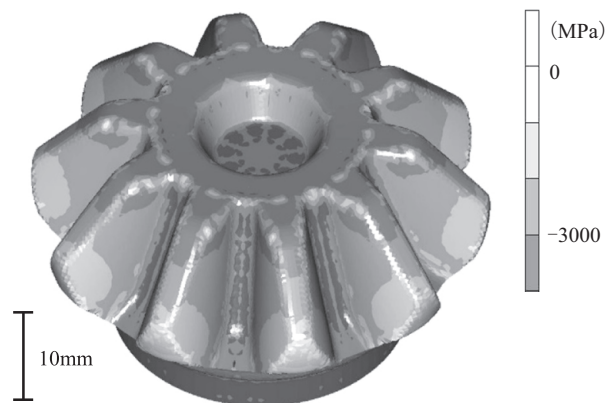


図 10 面圧分布（最大荷重時）

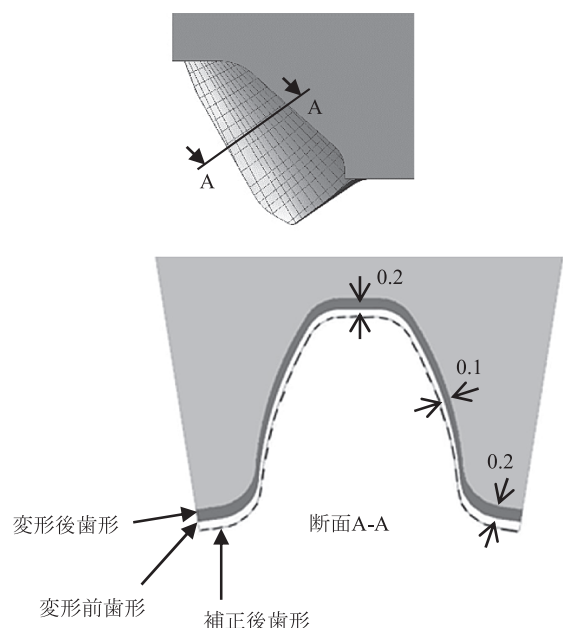


図 11 ベベルギヤの歯形変形量

4. 2 一体クラッチギヤ歯形補正²⁾

トランスミッション用の一体クラッチギヤはドッグ部とギヤ部を一体で成形したもので、ギヤ部の歯形形状は逆テーパ形状となっている(図12)。この逆テーパ形状を成形する際、図13に示すように逆テーパ成形金型を用いて製品歯形大径側から中心に向かって成形を行っている。この時、歯形チャンファ部は金型で拘束されていないため変形の予測が困難である。

図14に鍛造シミュレーションの結果を示す。この逆テーパ成形において歯形チャンファ先端部が軸方向に0.1mm変形してしまうことが分かる。このようにシミュレーションを行うことによって変形量を予測し、コイニング形状(素材形状)に反映することで成形後の形状が製品形状と一致するよう補正を行っている。

4. 3 縦型閉塞クロスジョイント軸真円度補正³⁾

一般的なクロスジョイントは上下に分割された金型を閉塞して成形している。しかし、この方法では分割面にバリが発生し(図15(a))、軸部の金型の変形が上下と左右で不

均一となり真円度が悪くなってしまう。この工法で精度を向上させるには経験的に成形時の金型変形を予測するか鍛造品精度からフィードバックして金型を補正するしかなかった。

軸部のバリを防止し(図15(b))真円度を向上させる方法として図16に示す4分割ダイスを用いる方法がある。この成形方法は4分割したダイスによって金型を閉塞し、上下パンチで成形を行っている。軸部に材料が押し出されると内圧により金型穴部は水平方向に扁平した形状に変形するが、この金型構造ではあらかじめ4方向から閉塞することで隣り合う金型の分割面同士が押し合い、金型穴部を垂直方向に扁平した形状に弾性変形させることができる(図17)。

図18にシミュレーション結果を示す。閉塞時には垂直方向に扁平し、成形時には水平方向に扁平している。垂直方向の扁平度合いは4方向からの閉塞力によってコントロールしており、閉塞力が小さいと閉塞時の垂直方向の扁平度合いが不足し成形軸は水平方向に扁平してしまう。閉塞

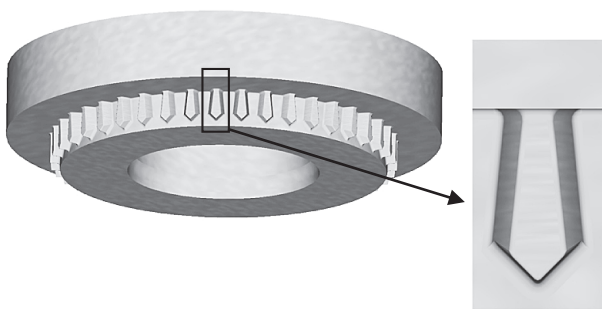


図12 逆テーパ形状

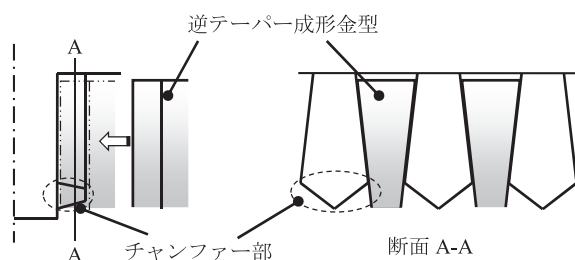


図13 逆テーパ成形イメージ

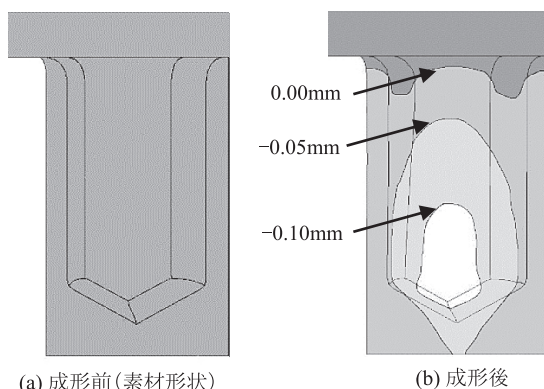
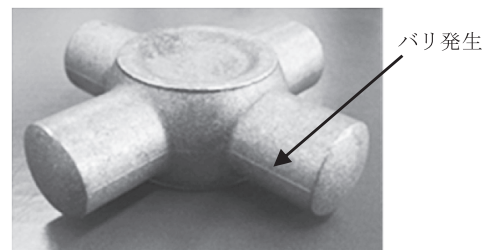
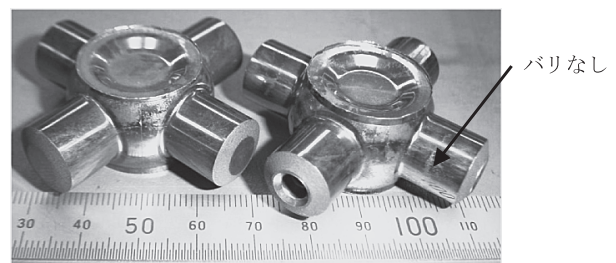


図14 軸方向変形量



(a) 上下分割型クロスジョイント



(b) 縦型閉塞クロスジョイント

図15 鍛造クロスジョイント

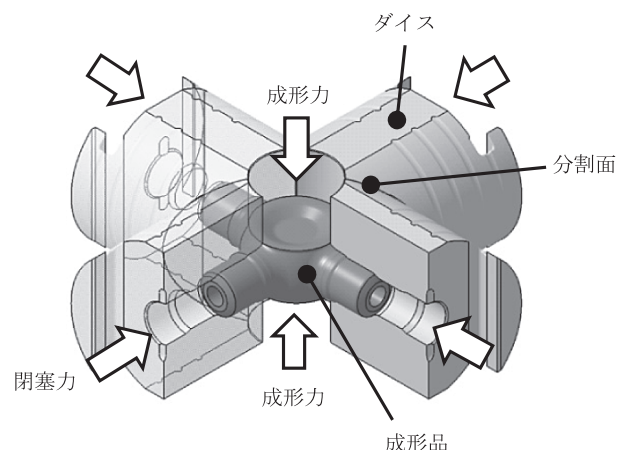


図16 4分割ダイス

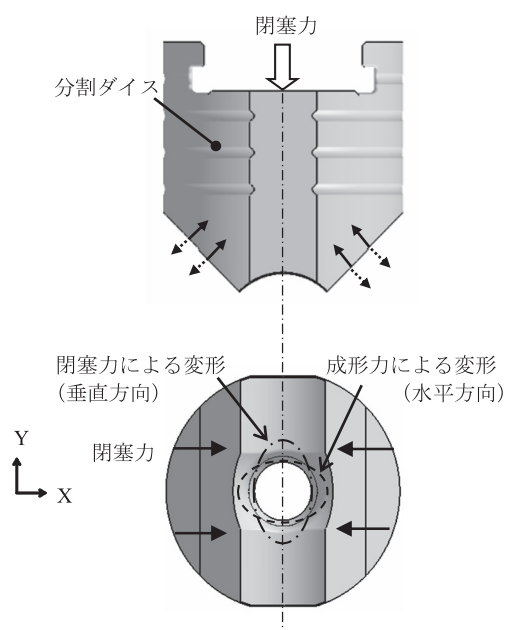


図 17 金型の変形状態

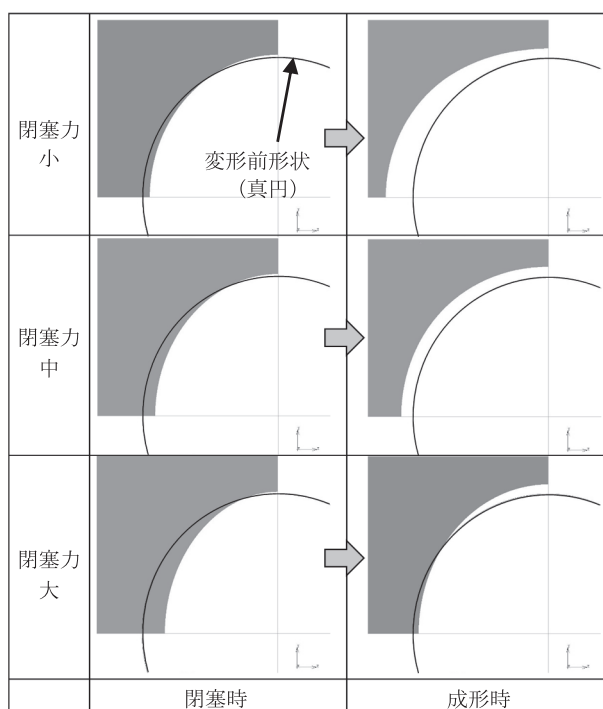


図 18 金型の変形

力を大きくし過ぎると閉塞時の垂直方向の扁平度合いが大きく、成形軸は垂直方向に扁平したままになってしまう。この閉塞力をコントロールすることで軸部の真円度を向上させることが可能となった。さらに成形時の水平方向の扁平度合いが大きいと金型穴部の応力も高くなってしまうため、金型強度的にも閉塞力の制御は重要である (図 19)。

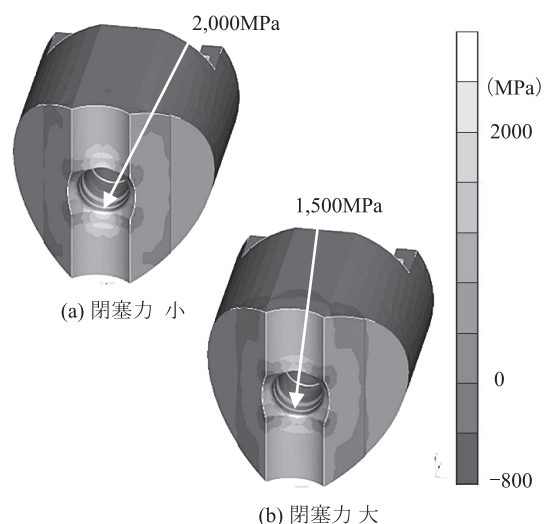


図 19 応力解析結果

5. おわりに

当社で実施しているシミュレーションを活用した金型の最適化を図るための破損対策事例、および金型補正事例について紹介した。開発期間短縮、コスト低減のためにシミュレーションは鍛造工程設計だけでなく金型設計においても必要不可欠となってきている。しかし、1 案件に対し数回のシミュレーションを実施するなど最適な解を得るまでに時間がかかるものもあり、少ないシミュレーションで金型の最適化を図るにはシミュレーションの精度向上や適切な結果評価方法の確立など課題は残っている。

当社では数多くの設計に対し妥当性を評価できるよう設計者自身がシミュレーションを実施する環境を整えている。しかし、シミュレーション経験の浅い設計者が精度の高い結果を得て正しく評価するにはこれらの課題の解決は重要項目となっている。実機での試作結果をフィードバックすることで入力パラメータ、結果の評価方法の最適化を図り、なおかつ金型設計の方向性を検討するために過去の類似品のシミュレーション結果を容易に参照できる仕組みを構築するなど、課題解決に向けての活動を進めている。

今後も課題を解決しながら試作回数削減による開発期間の短縮、コスト低減に貢献できるよう努めていきたい。

参 考 文 献

- 1) 濱家信一：第 38 回鍛造実務講座テキスト，(2011)，27-33.
- 2) 濱家信一：第 35 回鍛造実務講座テキスト，(2008)，13-16.
- 3) 石原義弘：型技術，26-5 (2011)，34-37.