研究論文

航空機用 Ni 基耐熱合金製リング部品の ニアネットシェイプ加工技術の開発

本田　崇*　大川原　真*　田辺　寛**　須貝　裕之***　三村　和弘***　相田　収平****
阿部　和昭*****　神田　恭*****　藤岡　智裕*****　髙橋　直之*****

Study of Near Net Manufacturing Technology for Aircraft Ring Parts of Ni-based Heat-resistant Alloy

HONDA Takashi*, OKAWARA Makoto*, TANABE Hiroshi**, SUGAI Hiroyuki***,
MIMURA Kazuhiro***, AIDA Shuhei****,
ABE Kazuaki*****, KANDA Takashi***** FUJIOKA Tomohiro*****, and TAKAHASHI Naoyuki*****

抄　録

航空機向け Ni 基合金製リング部品を対象に，熱間リングローリング成形技術の開発を行った。開発にあたり，Ni 基合金の一つである Alloy718 の高温材料特性を把握するとともに，効率的に検討可能なシミュレーション技術を開発して，割れや加工荷重といった課題の解決に取り組んだ。その結果，外径 451mm，高さ 105mm の大型リング部品の成形を実現することができた。

1. 緒　　言

航空機エンジン部品には，Alloy718 のような Ni 基の耐熱合金が使われている。これらの材料は，高温強度に優れている反面，加工荷重が高く，また加工発熱による内部欠陥が発生しやすいため塑性加工が困難である[1)]。また，素材の価格が高価であることから，材料ロスの少ない成形技術の開発が課題であった。

本研究では，航空機エンジンの LP タービンで用いられるラビリンスシールを対象に，Alloy718 の熱間リングローリング成形技術の開発に取り組んだ。目標とする製品のサイズは，外径451mm, 高さ105mmの大型リングである。実施したAlloy718の高温材料特性の把握および複雑な加工現象を把握可能なシミュレーション技術の開発について報告する。

*　下越技術支援センター
**　県央技術支援センター
***　研究開発センター
****　素材応用技術支援センター
*****　タンレイ工業株式会社

2. リングローリング概要

リングローリングの工程例を図1に示す。リングローリングは, 大きく分けて2つの工程から成り立っている。前半は丸棒の切断材から型鍛造でドーナツ形状の中間素材を作る荒地成形，後半は素材の穴に差し込んだマンドレル軸と回転する主ロールによる圧縮で径を拡張する圧延工程である。リングロール圧延は局所的に少しずつ加工を行うことから，加工荷重を抑えることができるとともに，加工精度が高いといった特徴がある[2)]。したがって，Ni基合金の加工上の課題である，大きな変形抵抗と割れの発生に対して，有効な加工法と考えられる。

3. 高温材料特性の把握

3.1 高温引張試験

精度の高いシミュレーションによる検討を行うためには，詳細な材料モデルの構築が重要となる。そこで，Alloy718 の高温材料特性を把握する目的で，引張試験を実施した。特に，熱間の温度領域においては，温度およびひずみ速度が変形抵抗に大きな影響を与える[3)]。そこで，本

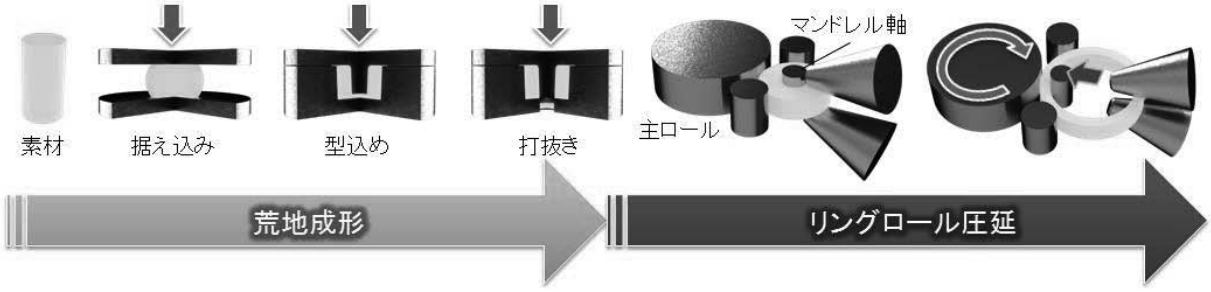


図１　リングローリング工程例

研究では 800～1200℃までの温度範囲にて，0.0006～0.139s^{-1} のひずみ速度の条件で引張試験を実施して，これらの影響を把握した。結果の例として，ひずみ速度 0.0006 s^{-1}における材料の降伏応力の変化を図 2 に示す。Alloy718 は，温度によって変形抵抗が大きく変化するとともに，1000℃以上の温度領域では変形抵抗が小さいことが確認できる。得られた結果をもとに，温度とひずみ速度の影響を考慮できる材料モデルを構築した。

3.2　高温圧縮試験と再現シミュレーション

圧縮試験は，引張試験に比べて大きなひずみを与えられる。その一方で，試験体内のひずみは一様ではなく，また試験機のクロスヘッド変位の速度を一定としても，ひずみ速度は大きく変化するといった特徴がある。そのため，圧縮試験をシミュレーションで再現するには，実際のリングロールと同様に，大変形への対応と，ひずみ速度の影響の考慮が必要となる。よって，本研究では，高温圧縮試験の再現シミュレーションの実施により，前節で構築した材料モデルの精度検証を行った。シミュレーションには ANSYS Inc.製 ANSYS-dyna 19.0 を用いた。

図 3 に試験機のクロスヘッド変位に対する荷重の比較結果を示す。この結果から，全ての設定した温度において試験中の圧縮荷重はよく一致していることがわかる。さらに圧縮試験速度

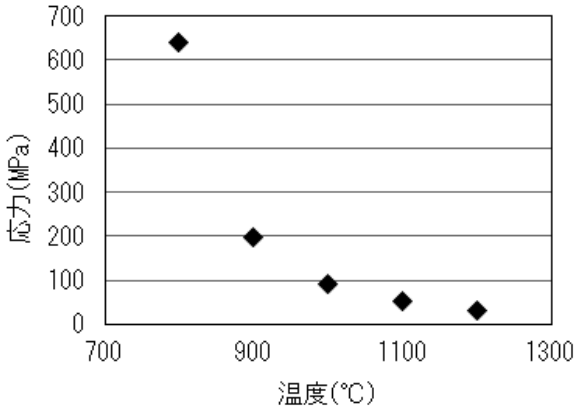


図２　Alloy718 降伏応力

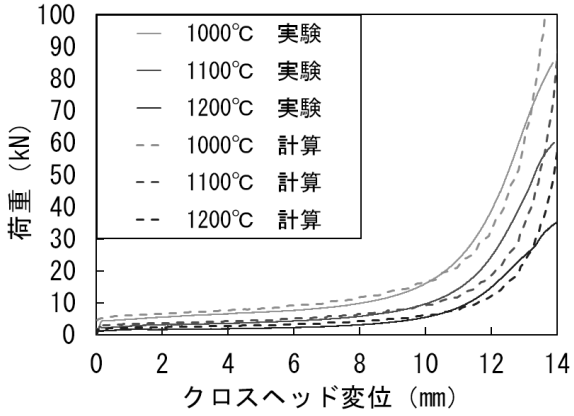


図３　クロスヘッド変位-荷重の比較（低速）

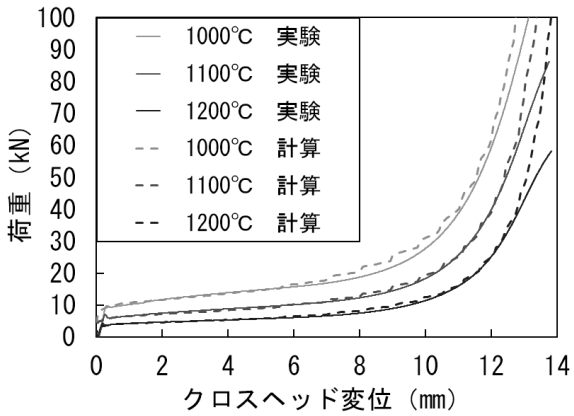


図４　クロスヘッド変位-荷重の比較（高速）

を 50 倍にした試験の比較結果を図 4 に示す。

試験速度を速くしても，全ての設定温度にて圧縮荷重はよく一致している。以上の検討により，作成した材料モデルは幅広い温度，ひずみ速度の範囲にて良好に Alloy718 の変形抵抗を再現できることが確認できた。

4. 荒地成形

4.1 荒地成形概要

図 1 で示したとおり，丸棒の切断材は，据え込み，型込め，打抜きの工程を経てドーナツ形状へと成形される。変形抵抗が大きく，加工発熱も大きい素材を成形する場合，型込め工程を分割することで，加工荷重と温度上昇の抑制対策が行われる。

従来の成形案により成形した外径 261mm 用の Alloy718 荒地成形サンプルを図 5 に示す。成形にあたり，2 工程での型込めを実施したが，加工発熱が大きく割れが発生した。このことから，Alloy718 の大型リングの荒地成形には，工程分割以外の対策の検討が必要であることがわかる。

4.2 シミュレーション技術の開発

4.2.1 計算モデル

荒地成形の課題である割れの解決には，成形中の温度変化の把握と昇温の抑制対策が必要である。そこで本研究では，成形する素材だけでなく，素材と接触する治工具をソリッド要素としてモデル化し，成形と同時に治工具との熱の授受や物体内の熱伝導を考慮した熱-構造連成解析を実施した。

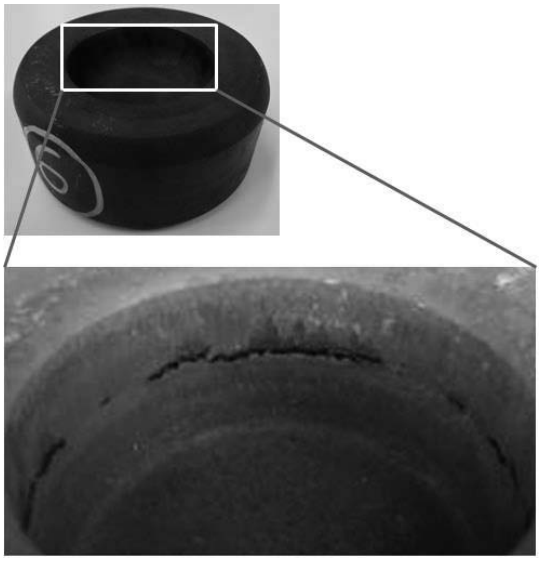


図 5 従来の成形案による外径 261mm 用荒地素材

荒地成形の例として，据え込み工程シミュレーションモデルを図 6 に示す。荒地成形では，素材・治工具ともに軸対称であることから，任意断面を 2 次元モデルとして計算した。

素材の変形抵抗については 3 章で構築した材料モデルを用いた。熱的特性については，温度依存性について詳細に測定されている Pottlacher, et.al の結果を参考とした [4]。比熱 C(J/(kg・K)), 熱伝導率 λ (W/(m・K))を式(1)，(2)にそれぞれ示す。

$$C(T) = \begin{cases} 652 & (T < 1528K) \\ 778 & (1528 < TK) \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} 1.1224 + 0.0165T & (T < 1528K) \\ 4.8985 + 0.0136T & (1528K < T) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、Tは絶対温度

4.2.2 プレスモーション

本研究では，クランクプレスを用いて荒地成形を行っている。クランクプレスでは，スライドの位置によって加工速度が変化する。熱間の荒地成形では，熱の移動や変形抵抗は加工速度の影響を受けるため，実測したクランクモーションを再現して計算を行った。据え込み工程開始前と終了時の温度分布の変化を図 7 に示す。

成形開始時に素材の温度は，ほぼ均一であったが，成形中に治工具への熱接触や周囲環境へ

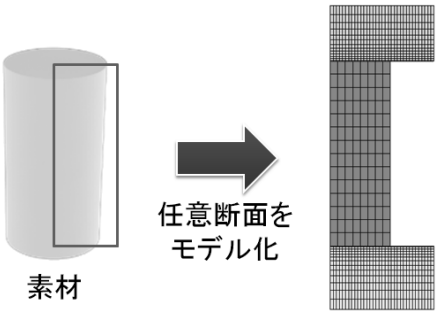
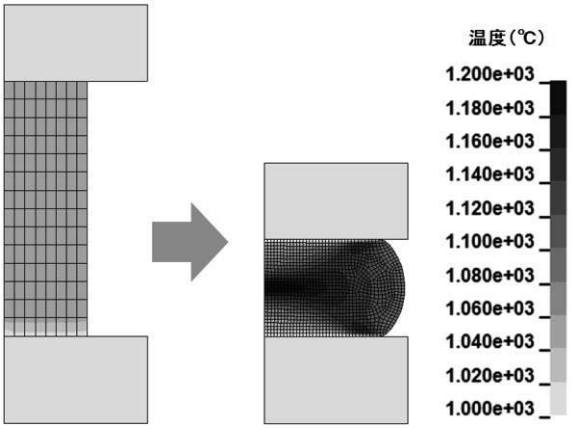


図 6 据え込み工程シミュレーションモデル

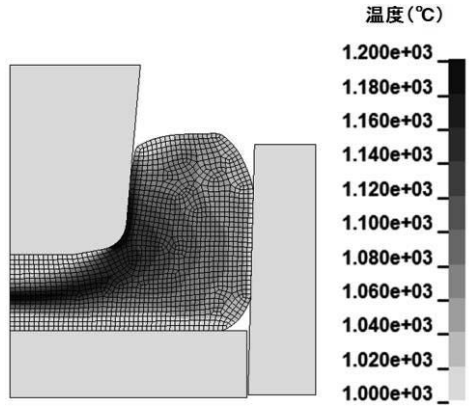


(a) 成形前　　(b) 成形後

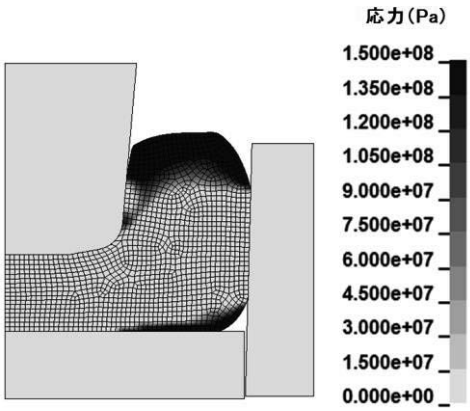
図 7　据え込み工程における温度分布の変化

の散逸, また加工発熱による温度変化が起こり, 温度差が生じている。この結果を引き継いで型込め成形したときの計算結果を図 8 に示す。

成形中のパンチ肩部の素材には，加工発熱による大きな昇温と変形による大きな引張応力が同時に生じている。これは実成形における割れ



(a) 温度分布



(b) ストローク方向の応力分布

図 8　型込め成形計算結果

発生位置とよく一致していることから，計算結果は実際の状況を精度よく再現していると考えられる。本研究では，このシミュレーション技術を活用して，加工発熱の抑制案を検討し，成形試験用の治工具を作製した。

4.3　成形試験

荒地の成形試験には住友重機械工業（株）製 6,300tf クランクプレスを用いた。荒地成形の様子を図 9 に示す。

外径 451mm, 高さ 105mm の大型リング部品の成形にあたり，荒地の素材には，直径 150mm, 高さ 230mm, 重さ 33.5kg の丸棒切断材を用いた。シミュレーションにて検討した案による荒地素材を図 10 に示す。

成形試験の結果，内径部に欠陥のない良好な荒地が成形でき，検討案の割れの抑制効果が確認できた。また，この方案を他のサイズの荒地成形へ適用することで，外径 191～451mm の製品に対応する荒地成形が可能となった。

図 9　荒地成形の様子

図 10　検討案による外径 451㎜ 用荒地素材

5.　圧延成形

5.1　圧延成形概要

リングロール圧延機のイメージ図を図 11 に示す。装置は図 1 で示したマンドレル軸と主ロール以外にも，ガイドロール，アキシャルロールといった多くの治工具によって成形が行われる。また，目標とする製品径や圧延中の径の変化に応じてガイドロールの接触位置が変更できるよう，多くのリンク機構が組み込まれており，非常に複雑な装置である。

従来の成形条件における圧延サンプルを図 12 に示す。このように，内部で過加熱が生じるとモミ割れと呼ばれる欠陥が発生する。その一方で，成形中に素材の温度が低下すると変形抵抗が大きくなり，加工できなくなるといった課題がある。

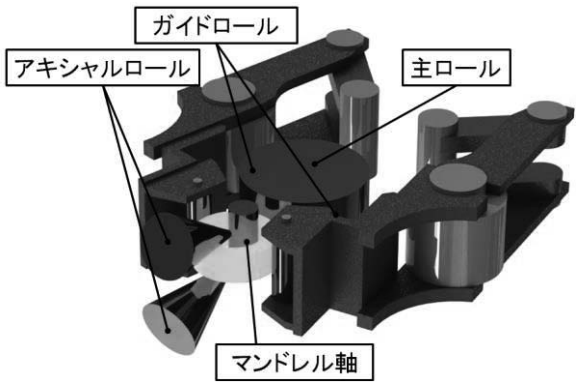


図 11　リングロール圧延機イメージ

図 12　従来の成形条件における圧延サンプル

5.2　シミュレーション技術の開発

5.2.1　計算モデルの構築

圧延での課題解決には，成形中の素材の変形挙動を把握するとともに，温度変化の把握が必要である。ただし，前述のとおり，製品形状はシンプルな矩形の断面のリングながら，複雑な装置による逐次成形であり，現象の把握は困難である。

そこで本研究では，実際の圧延機の動きを再現できるようモデル化しつつ,荒地成形と同様,素材と接触する治工具すべてをソリッド要素とした熱-構造連成解析を実施し，成形中の変形とともに温度変化についても計算を行った。図 13 に圧延の計算モデルを示す。

5.2.2　リメッシュ技術の開発

有限要素法による計算では，変形に伴う要素のゆがみが問題となる。リングロール圧延のような大変形に対して継続して計算を行うには，要素のゆがみを解消するリメッシュが必要である。ただし，一般的なソフトウェアに実装されているのは 4 面体によるリメッシュであり，計算精度が 6 面体の要素に比べ低く，また要素内の応力やひずみの分布はマッピングされない。そのため，リメッシュにより計算精度が低くなるといった課題がある。そこで，本研究では，応力やひずみの分布を高精度に再現可能な 6 面体要素を用いたリメッシュ技術の開発を行った。

有限要素法では，節点でのみ変形・応力・ひずみなどの物理量が計算される。そのため，要素内部の物理量については，節点の物理量をも

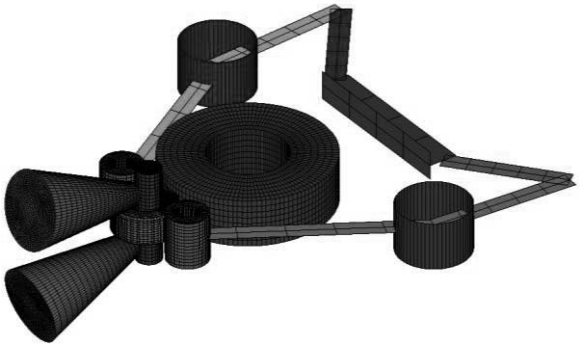


図 13　圧延の計算モデル

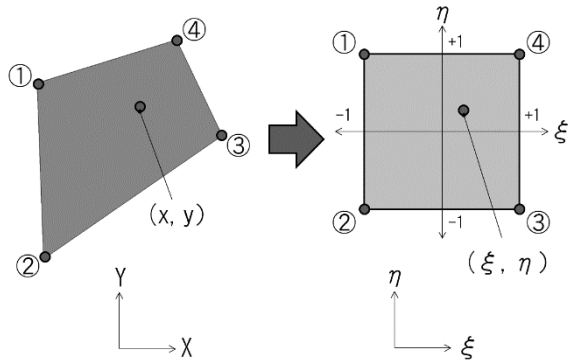
とに形状関数と呼ばれる関数で内挿される。形状関数は，要素の形状に依らずに，ξ-η座標系へ正規化された要素座標系にて同一の形で与えられる。図14に要素の正規化のイメージと形状関数を示す[5]。本研究では，6面体でリメッシュした新しい節点の物理量のマッピングにおいて，有限要素法の処理と同様に，形状関数による内挿で求めた。具体的な手順は下記のとおりである。

①新規の節点を内包するリメッシュ前の要素（旧要素）を検索する。

②内包する旧要素の正規座標系において，新規節点のξ-η座標を求める。

③正規座標系での新規節点の位置と形状関数から，旧要素での各節点の物理量をもとに，新規の節点の物理量を計算する。

開発したリメッシュ技術による，要素形状の修正と物理量のマッピングについて，任意断面の位置（白枠部）を例として図15に示す。リメッシュ前の断面では，圧延で大きな変形が生じるコーナー部に大きくゆがんだ要素がみられるが，リメッシュにより良好な要素形状へと修正されている。また，温度・塑性ひずみの分布はリメッシュ前後でほぼ一致しており，良好にマッピングされていることが確認できる。



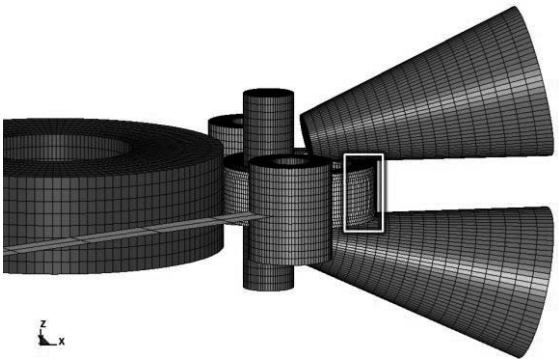
$$u = u_{①}N_1+u_{②}N_2+u_{③}N_3+u_{④}N_4$$

$$N_1 = (\xi-1)(\eta+1)/4$$
$$N_2 = (\xi-1)(\eta-1)/4$$
$$N_3 = (\xi+1)(\eta-1)/4$$
$$N_4 = (\xi+1)(\eta+1)/4$$

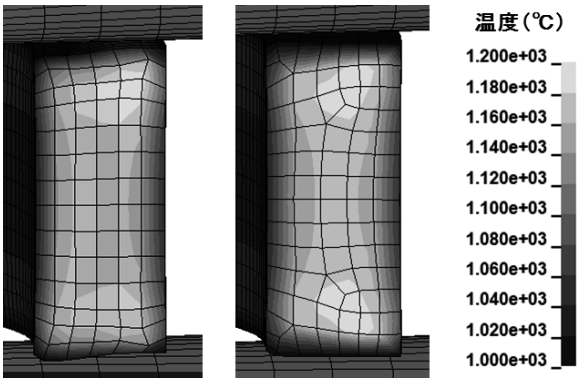
uは変位，応力，ひずみなどの物理量

図14　要素の正規化のイメージと形状関数

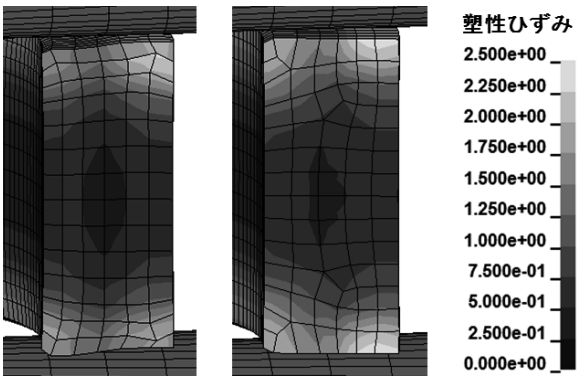
開発したリメッシュ手法により，リメッシュ前の状態を引き継ぎつつ，良好な要素形状にて計算を継続できたことから，この開発技術を用いて，圧延工程全体のシミュレーションの精度の確認を行った。実際の圧延試験から得られた圧延荷重とシミュレーションから得られた圧延荷重の比較を図16に示す。



(a) 素材全体



(b) リメッシュ前後の温度分布



(c) リメッシュ直前の塑性ひずみ分布

図15　要素形状の修正と物理量のマッピング

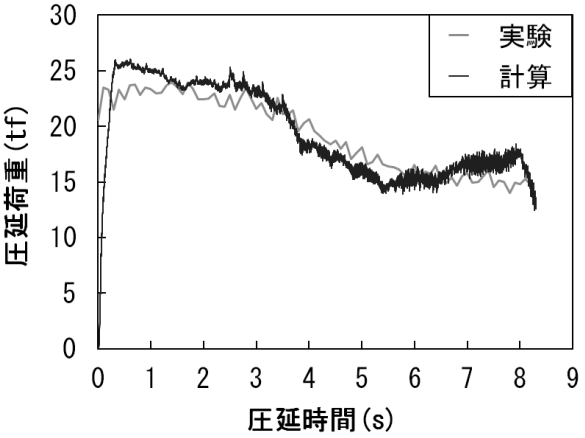


図 16 実成形と計算の圧延荷重の比較

計算結果は，実験結果の最大荷重値および圧延荷重の推移ともに良く一致しており，構築した計算モデルと開発したリメッシュ手法によって，高い精度で実成形を再現できることが確認できた。よって，このシミュレーション技術を活用して，予熱温度・圧延速度などの成形条件の検討を行い，成形試験を実施した。

5.3 成形試験

圧延試験の様子を図 17 に，成形中の素材外表面温度,圧延荷重および径の変化を図 18 に示す。

径の拡大が始まる約 6 秒からの素材温度の変化は少なく，装置の過負荷となる変形抵抗の増加を避け，圧延荷重を均一に制御することができた。その結果，良好な圧延が可能となり，外径値は滑らかに拡大していることが確認できる。

図 19 に成形品の外観を示す。成形品は真円度で 1mm 以内と良好な形状である。また，成形品を旋削加工後，浸透探傷検査にて表面を，超音波探傷検査により内部を確認したところ，いずれも欠陥はなく良好な品質であることを確認できた（図 20）。

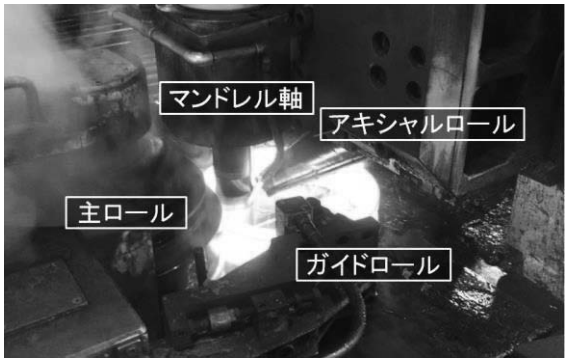


図 17 圧延試験の様子

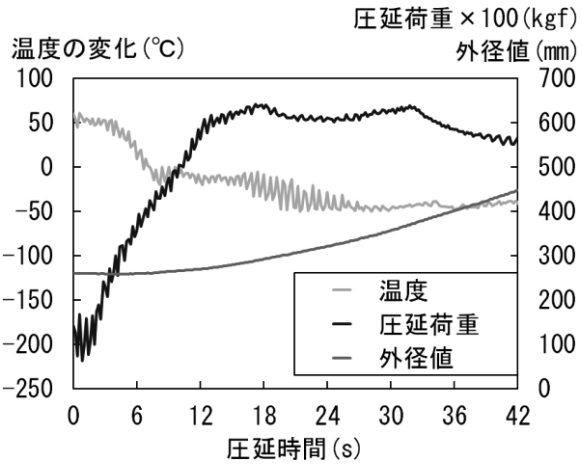


図 18 成形中の素材外表面温度，圧延荷重，径の変化

図 19 成形品外観

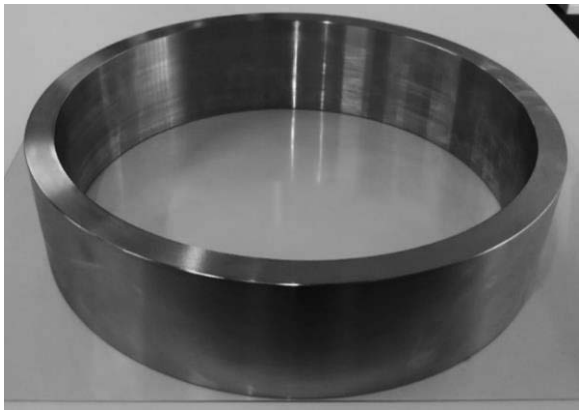


図 20 旋削加工品の外観

図 21　本研究の成果品

本研究の取り組みにより，最終的に外径 192～451mm までのリングローリングが可能となった。本研究の成果品を図 21 に示す。

なお，本研究は経済産業省より，戦略的基盤技術高度化支援事業にて採択され，平成 28 年度から 30 年度に実施したものである。

6. 結　　言

（1）高温引張試験と圧縮試験により, Alloy718 の高温材料特性を把握して，高精度な材料モデルを構築した。

（2）リングローリング成形における，荒地成形および圧延工程のシミュレーション技術を開発した。

（3） Alloy718の成形の課題である割れと加工荷重の抑制に取り組み，リングローリングにて外径451mm，高さ105mmの大型リング部品を形状精度よく，良好な品質で成形できた。

参考文献

1）青木 宙也，上野 友典，大野 丈博，“718 合金の溶体化処理による金属組織制御”，日立金属技報， Vol. 32，2016，p26

2）中溝利尚，“特精鍛での熱間縦型リングローリングの紹介”, Sanyo Technical Report，Vol.11 No.1，2004，pp.70-71.

3）日本塑性加工学会編，“わかりやすい鍛造加工”，日刊工業新聞社，2005，pp.14-17.

4）池庄司敏孝，京極秀樹，米原牧子，荒木正浩，中村和也，“SLM造形過程におけるレーザ照射部近傍の粉体層溶融凝固を考慮した過渡伝熱数値解析”，近畿大学次世代基盤技術研究所報告， Vol.7，2016，pp.89-94.

5）三好俊郎，“有限要素法改訂版”，培風館，1998，pp.179-181.