

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「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」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人新潟市産業振興財団

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6

第2章 本論

2-1 Ni 基合金の高温材料特性の評価	7
2-2 リングローリングシミュレーション技術の開発	9
2-3 新しいリングローリング圧延技術の開発	13
2-4 荒地成形技術の開発	16
2-5 データベースの構築	16

最終章 全体総括

3-1 研究成果	17
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	17

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景・研究目的

航空機の燃費向上のニーズは高まっており、エンジンの燃焼効率の向上のため、高温強度の大きな Ni 基合金製リング部品の採用が進んでいる。しかし、Ni 基合金には、①熱伝導率が小さく温度差が発生しやすく、②高温強度が高い一方で融点が低いため、加工できる温度領域が狭く、③素材価格が高いという特徴があることから、難加工材料である。また、現状では、特に塑性加工による形状創成の多くは海外で行われている。主な塑性加工法は自由鍛造であるため、多くの再加熱や時間を要する上、加工の精度が低く、大きな切削仕上げ代が必要である。よって、ニアネットシェイプ化は実現できておらず、素材価格も相まって低コスト化もできていない。そのことから、川下企業からは、国内生産による安定した部品供給の実現が求められている。

リングローリングの全工程を図1-1に示す。リングローリングは、型鍛造に比べ加工荷重を低く抑えつつ、加工時間が短く、また加工精度も高いといった特徴がある。ただし、Ni 基合金は変形抵抗が大きく、加工発熱による内部欠陥が発生しやすく加工温度範囲が狭いことから、Ni 基合金を対象としたリングローリング加工方法の開発は例が少なく、国内でほとんど実績がない。

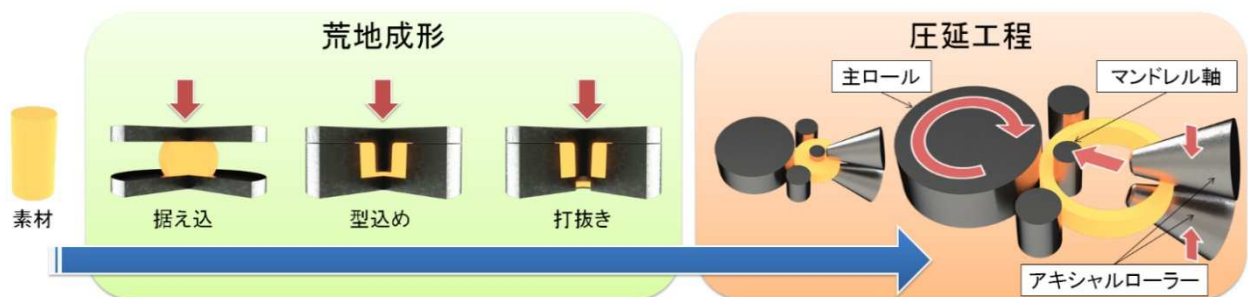


図1-1 リングローリングの全工程の成形の流れ

（２）研究目標

そこで本研究では、Ni基合金のひとつであるAlloy718製リング形状部品を対象に、高精度シミュレーション技術及び低い加工荷重で割れの発生しない熱間恒温リングローリング技術の開発に取り組んだ。それによって、本研究開発の目標であるニアネットシェイプ化の実現と、自由鍛造に比べて材料ロス1/8以下、加工時間（製品納期までの全工程時間）1/2以下、再加熱を含めた加工エネルギー1/2以下の実現により、現状の製品比でコストを1/3以下とすることを目指し、対象部品の国内調達、コストダウンを図り、航空機産業の競争力を高めることを目的とする。

図１－２に本研究開発で目標とする製品例を示す。

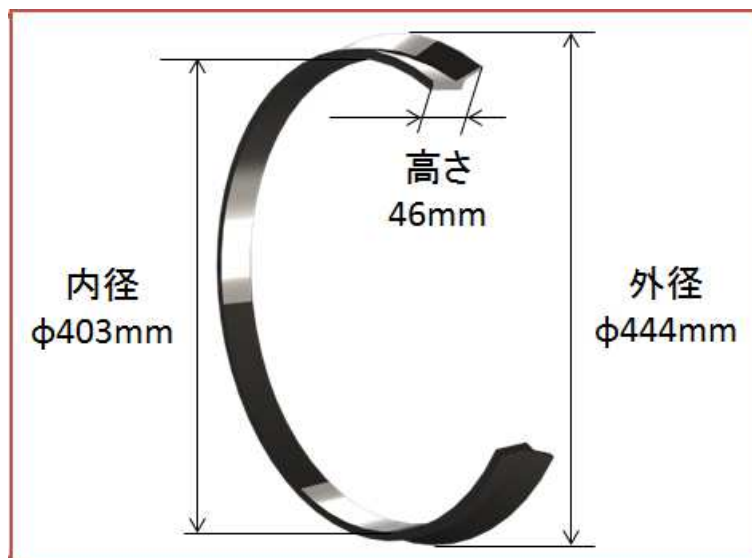
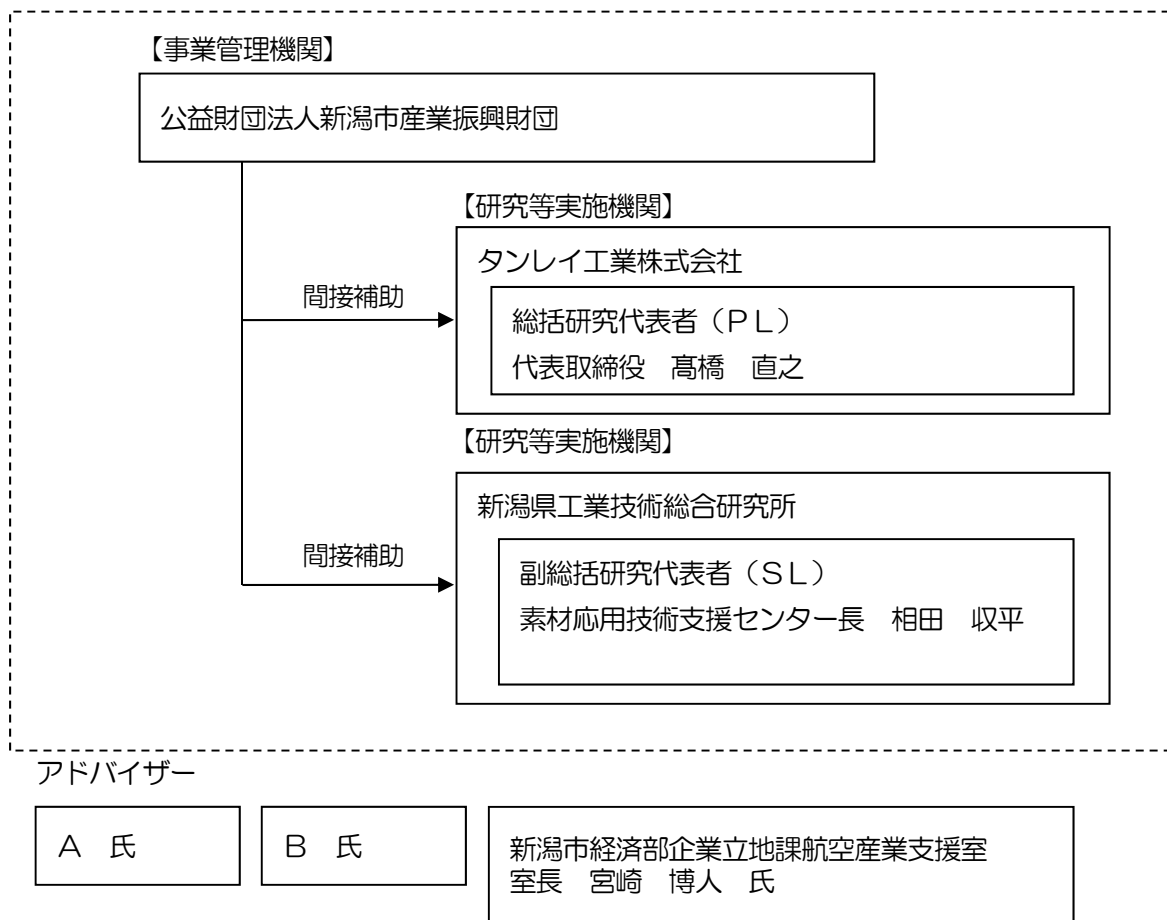


図１－２ 航空機エンジンに用いられるNi基合金製リングの例

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制



(2) 管理員・研究員

【事業管理機関】

公益財団法人新潟市産業振興財団

	氏名	所属・役職
管理員	荒井 正幸	ビジネス支援センター チーフ
管理員	佐藤 淳司	ビジネス支援センター スタッフ
管理員	近藤 貴俊	ビジネス支援センター スタッフ

【研究等実施機関】

タンレイ工業株式会社

	氏名	所属・役職	備考
研究員	高橋 直之	代表取締役	管理員を兼ねる
研究員	藤岡 智裕	品質保証部 品質保証課 課長	管理員を兼ねる
研究員	神田 恭	品質保証部 品質保証課 係長	管理員を兼ねる
研究員	阿部 和昭	製造部 製造技術係 係長	管理員を兼ねる
研究員	田中 正文	製造部 製造技術係	
研究員	佐藤 一也	生産管理部 生産管理課 設備開発係	
研究員	武者 和彦	製造部 鍛造課 鍛造係 係長	
研究員	赤澤 弘幸	製造部 鍛造課 鍛造係 リーダー	
研究員	渡辺 勇也	製造部 鍛造課 鍛造係 リーダー	

新潟県工業技術総合研究所

	氏名	所属・役職	備考
研究員	相田 収平	素材応用技術支援センター センター長	管理員を兼ねる
管理員	阿部 淑人	研究開発センター センター長	
研究員	三村 和弘	研究開発センター 専門研究員	
研究員	須貝 裕之	研究開発センター 専門研究員	
研究員	本田 崇	下越技術支援センター 主任研究員	
研究員	大川原 真	下越技術支援センター 主任研究員	
研究員	田辺 寛	県央技術支援センター 専門研究員	

(3) その他

開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
高橋 直之	タンレイ工業株式会社 代表取締役	PL
相田 収平	新潟県工業技術総合研究所 素材応用技術支援センター長	SL
小林 正幸	公益財団法人新潟市産業振興財団 理事	
A	—	アドバイザー
B	—	アドバイザー
宮崎 博人	新潟市経済部企業立地課航空産業支援室 室長	アドバイザー

1-3 成果概要

(1) Ni 基合金の高温材料特性の評価

高温における引張試験及び圧縮試験を実施した。引張試験により高温領域における Alloy718 の材料強度及びひずみ速度依存性を把握した。また、圧縮試験により高温領域における Alloy718 の大変形領域の材料強度を把握した。

(2) リングローリングシミュレーション技術の開発

リングローリングの全工程において、成形中の熱伝導等を考慮したシミュレーション技術（熱-構造連成解析）を開発するとともに、高精度な 6 面体でのリメッシュ手法及び 3 次元の追跡が可能なメタルフローの評価技術を確立した。これにより、成形試験結果を高精度に再現することが可能となった。

(3) 新しいリングローリング圧延技術の開発

航空機用部品の均一な予熱に求められる AMS2750(高温測定)クラス 5 の規格を満たす均熱炉を開発した。また、高温強度が高い治工具材質を検討するとともに、成形時の温度変化を抑制する恒温成形技術を開発した。これにより、外径 451mm までの Alloy718 製リングを 1 回の予熱で圧延成形することが可能となった。その結果、目標例の製品サイズに対して、ニアネットシェイプ化を実現するとともに、自由鍛造に比べて材料ロスを 1/8 以下、加工時間を 1/2 以下、加工エネルギーを 1/2 以下にすることを達成し、現状の製品比でコストを 1/3 以下とするという目標も達成した。

(4) 荒地成形技術の開発

シミュレーションを活用して、Alloy718 の最適な予熱温度や最適な治工具形状を検討して割れのない良好な荒地成形が可能となった。

(5) データベースの構築

Alloy718 の加工荷重・伸び・圧延速度・温度の測定を実施して、様々な製品寸法におけるデータを蓄積することで、外径 451 mm までの加工条件の設定を把握した。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

【法認定企業】

タンレイ工業株式会社 製造部 製造技術係 係長 阿部 和昭

Tel:025-387-1050 Fax: 025-387-1053 E-mail: ka-abe@tanray.co.jp

【事業管理機関】

公益財団法人新潟市産業振興財団 ビジネス支援センター スタッフ 佐藤 淳司

Tel: 025-226-0550 Fax: 025-226-0555 E-mail: info@niigata-ipc.or.jp

第2章 本論

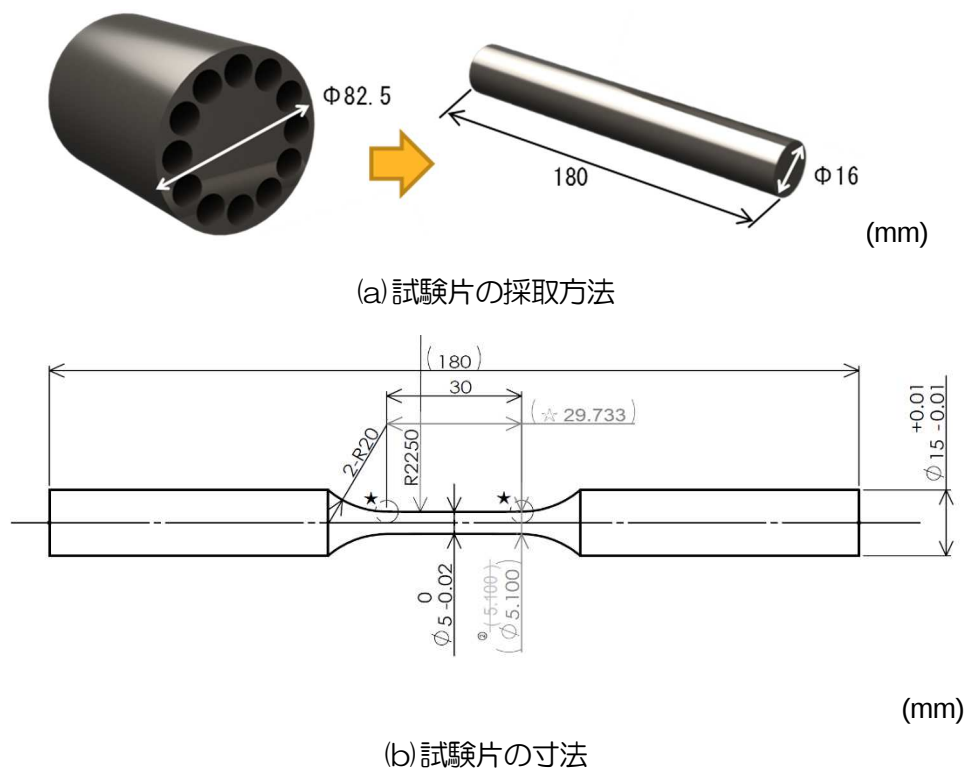
2-1 Ni 基合金の高温材料特性の評価

(1) 高温材料強度の評価（温度の影響及びひずみ速度の影響の評価）

Ni 基合金のリングローリングにおける成形条件及びシミュレーション条件を詳細に検討するためには、素材の材料特性の把握が重要となる。そこで、本研究開発で使用する Alloy718 について高温引張試験を行い、熱間加工温度における温度とひずみ速度の影響を把握した。

① 試験条件

試験片形状を図2-1に示す。なお、素材の中央部は荒地成形において打抜かれることを考慮し、中央部を除いた領域から試験片を採取した。温度については700℃から1200℃まで100℃間隔の6条件、ひずみ速度については、0.0006、0.028、0.139/secの3条件で実施した。



② 試験結果と評価

試験により得られた引張強さを図 2-2 に示す。試験温度が高くなるにつれて引張強さが小さくなること、また、ひずみ速度が大きくなるにつれて引張強さが大きくなることが確認できた。

これらの試験の結果を基に温度とひずみ速度の変化に対応する Alloy718 の材料特性データを作成した。ただし引張試験では、大変形の試験を実施することは不可能であったため、ひずみが大きい領域への対応は（2）の圧縮試験で行った。

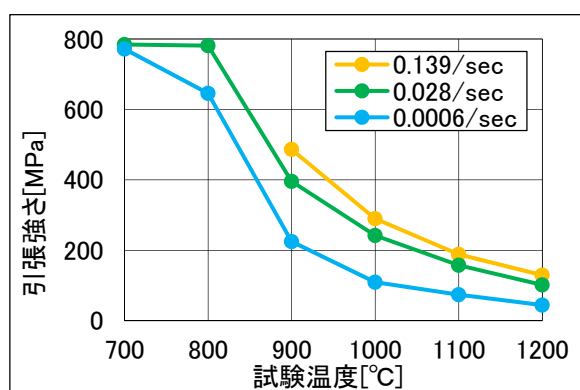


図 2-2 引張強さ

（2）高温材料強度の評価（大変形領域の評価）

破断までの変形量が少ない引張試験と比べて、圧縮試験は素材に大きなひずみを与えることができる。また、試験片の高さが縮むにつれて、一定の試験速度下でもひずみ速度が大きくなることから、ひずみ速度の変化についても評価することができる。よって、（1）に続き、計算に用いる材料モデルの精度を高めるため、高温圧縮試験を実施した。ただし、素材の変形は不均一であり、試験結果だけでは材料強度を算出することができないことから、本研究では圧縮試験をシミュレーションで再現することで、材料モデルの評価を行った。

① 試験条件

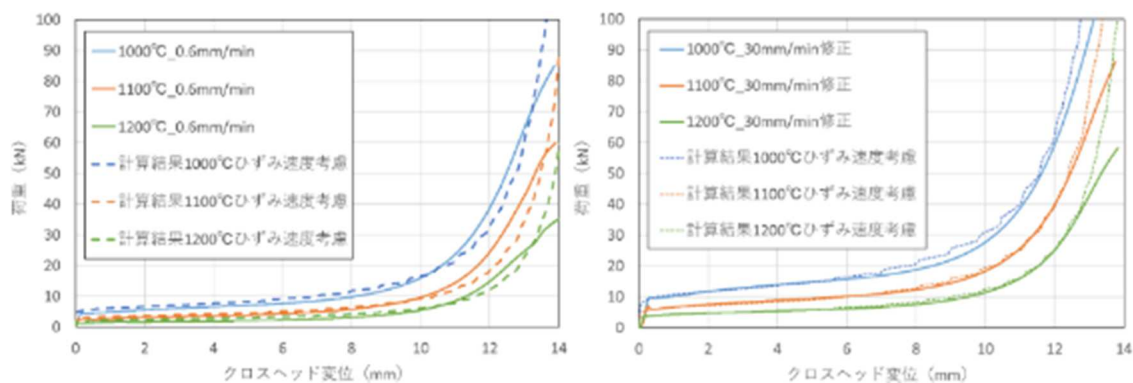
圧縮試験片の形状を図 2-3 に示す。温度については 1000、1100、1200°C の 3 条件、試験速度については 0.6、30mm/min の 2 条件で実施した。



図 2-3 圧縮試験片形状

② 試験結果とシミュレーションによる試験の再現

図2-4 (a) にひずみ速度が小さい場合、(b) にひずみ速度が大きな場合における試験結果とシミュレーションによる荷重の比較をそれぞれ示す。



(a) 試験速度 0.6mm/min

(b) 試験速度 30mm/min

図2-4 修正した材料モデルを用いた試験荷重の比較

どちらのひずみ速度の条件でも、全変形に渡って良好に試験荷重を再現できていることから、これらの材料特性をシミュレーションに適用することで精度の高いリングローリングの計算が可能になった。

2-2 リングローリングシミュレーション技術の開発

(1) シミュレーション技術の構築

本研究開発における解析環境を表2-1に示す。シミュレーションには、動的陽解法ソルバーを有するANSYS LS-DYNAを用いた。リングローリングは『丸棒から圧延のリング素材を作る荒地成形工程』と、『回転する主軸と押し付けるマンドレル軸による圧延で径を拡大する圧延工程』に分かれているが、シミュレーション技術についても2工程に分けて構築した。

表2-1 解析環境

機器およびソフトウェア名	機能
SOLIDWORKS2010	CAD
ANSYS LS-DYNA 17.2	計算 solver

① 荒地成形シミュレーション技術の開発

荒地成形は、据え込み、後方押し出し（型込め）、打ち抜きの3工程からなり、後工程で行う圧延の素材を作製する工程である。荒地成形のいずれの工程も、素材の変形、金型形状ともに軸対称であるため、代表断面により素材全体の状態をあらわすことができる。よって、高精度な再現が可能な荒地成形シミュレーション技術確立にあたって、高速な処理を実現するため、代表断面による2次元軸対称モデルでの計算を検討した（図2-5）。

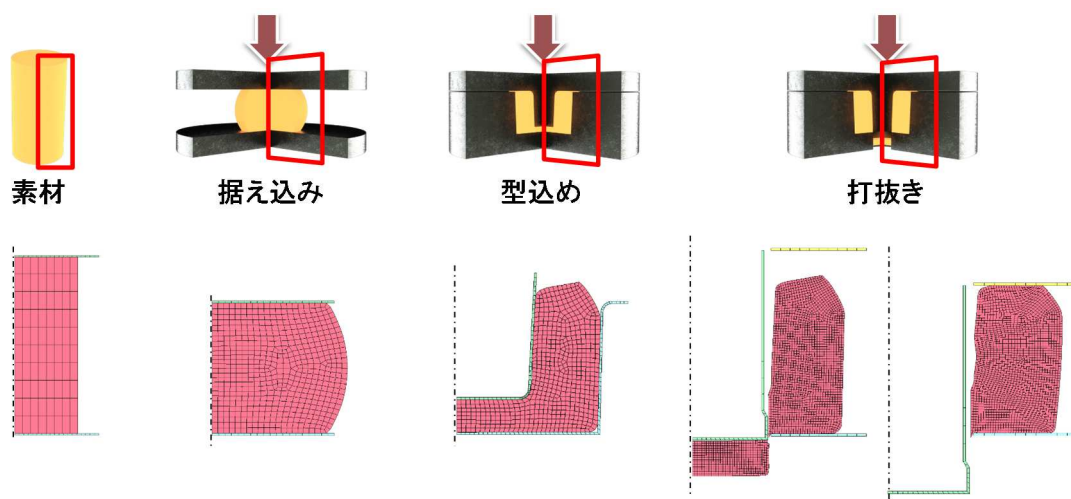


図2-5 2次元モデルによる荒地成形シミュレーション

次に、より高精度な計算モデルとするため、素材の変形と温度変化について同時に計算を行う熱-構造連成解析を検討した。温度の変化を計算する伝熱計算には、治工具と素材間の熱接触、物体内部での熱伝導、変形に伴う加工発熱、また周囲環境への熱伝達と輻射の考慮が必要となる。そこで本研究では、治工具への熱接触と治工具内での熱伝導を考慮するため、治工具の接触面をあらわす表面のみでなく体積を持つソリッドモデルとした。計算結果の一例を図2-6に示す。

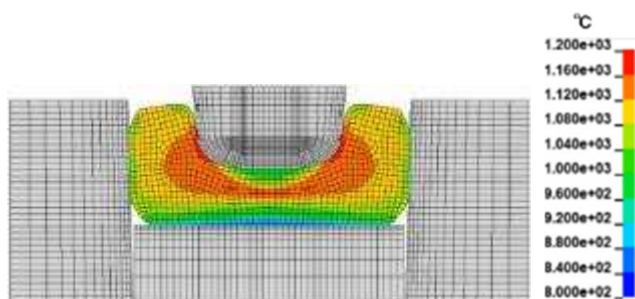


図2-6 ソリッドモデルによる計算（表示は温度分布）

② リングローリング圧延シミュレーション技術の開発

圧延工程では主軸、マンドレル軸、ガイドローラー、上下アキシャル軸など、それぞれの治工具が素材と局所的に接触して逐次成形が行われる。よって、圧延工程は、荒地成形のような２次元軸対称モデルではなく、３次元モデルによる計算が必須となる。また、治工具のモデル化については、素材と接触する周辺の部品形状の再現だけではなく、それらを動作させるリンク機構の力点の位置、荷重・変位などの制御方法や供回りなどの回転自由度などを再現する必要がある。構築した計算モデルを図２－７に示す。

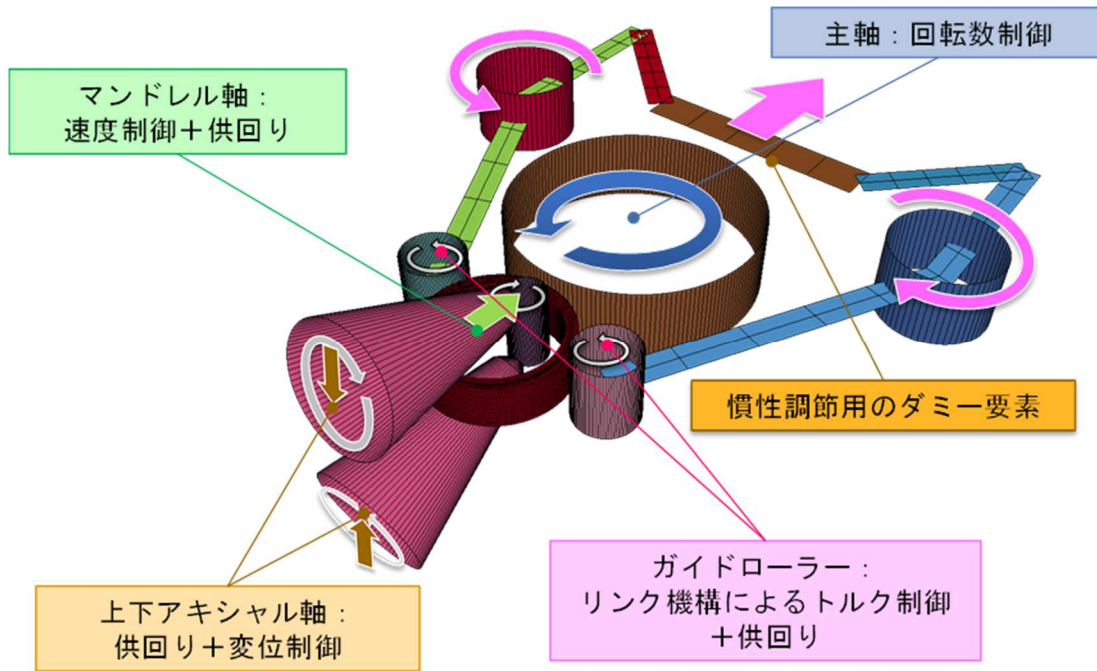


図２－７ 構築したリングローリング圧延の計算モデル

また、荒地成形と同様に、温度の変化を計算する伝熱計算を行うため、治工具形状についてもシェルモデルではなく、実際と同じく体積を持つソリッドモデルとした。計算結果の一例を図２－８に示す。

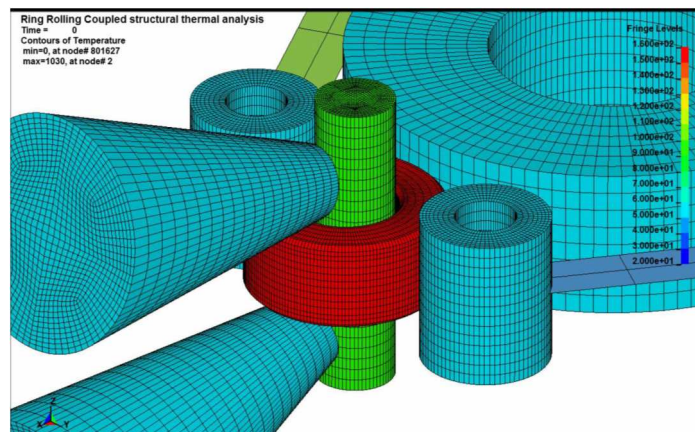


図２－８ 体積を持つソリッドモデル

(2) シミュレーションによる評価技術の開発

大変形の計算では、計算モデルを構成する要素のゆがみが大きくなり、計算精度の悪化や計算が継続できなくなるといった問題が生じる。要素のゆがみに対応する手法としては、計算の途中に要素を再構成するリメッシュと呼ばれる手法が一般的である。ただし、市販のソフトウェアで実装されているリメッシュ機能では、再構成される要素が計算精度の低い4面体であるうえ、形状の再現性も低く、計算精度に課題がある。さらに、リメッシュ後の応力・ひずみ分布は、要素の平均値からのマッピングであるため、状態の再現性にも課題がある。そこで本研究では、形状、応力、ひずみ速度および温度を高精度に再現できる6面体リメッシュ技術の開発を行った。

成形品は軸対称形状であるため、任意の素材断面からモデル全体の形状、応力、ひずみ速度および温度などの状態を把握できる。そこで本研究では、ある断面を代表断面として、この断面の情報から新たな全体の要素の作成および状態のマッピングを行った。リメッシュの前後における、断面の温度およびひずみ分布の比較を図2-9に示す。図2-9のリメッシュ比較から、開発したリメッシュ技術により、成形中の素材の状態を良好に引き継いでいることが確認できる。

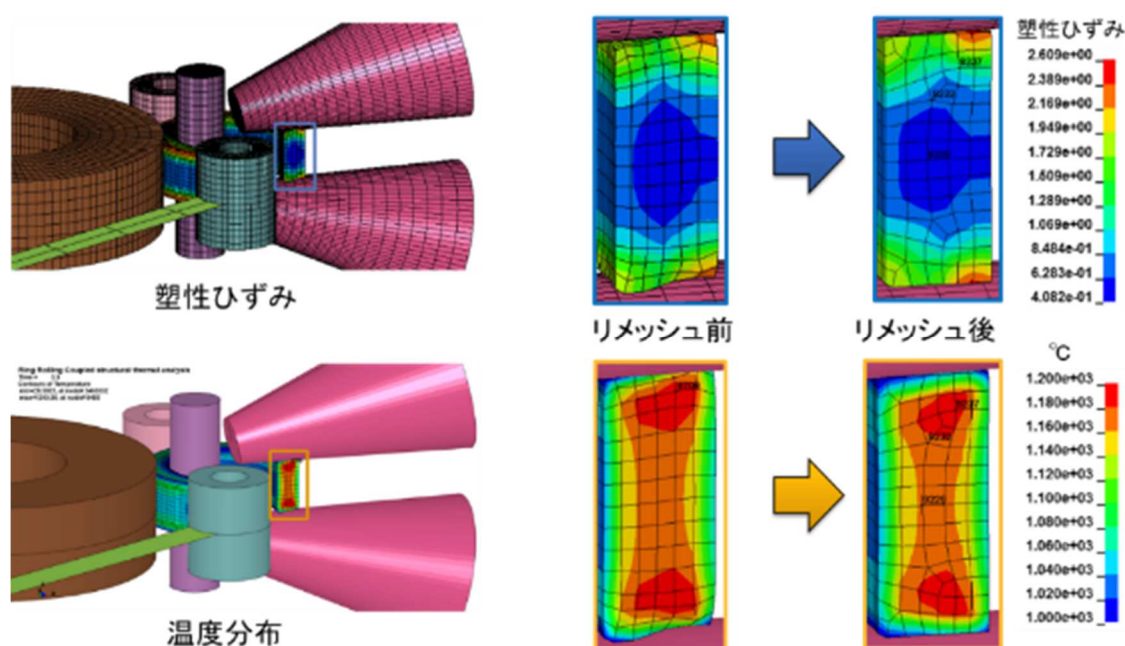


図2-9 断面の形状および状態の比較

構築した材料モデルおよび開発したリメッシュ技術を用いて、Alloy718の実成形における治工具の動きを設定した計算を行い、実成形と圧延荷重が一致していることから、成形条件の検討にあたり十分な計算精度であることを確認できた。

2-3 新しいリングローリング圧延技術の開発

(1) 均熱・恒温成形技術の開発

①均熱技術の開発

Alloy718 は、変形抵抗が大きく高温で加工せざるを得ない反面、加工発熱により内部欠陥が発生しやすく、加工温度範囲が狭い。そのため、熱間加工を行うためには、均一な予熱が必要であるが、炉内温度分布をどの程度の均一性にするべきかについては、現在、鍛造加熱炉に公共規格はない。よって本研究では、航空機用部品の予熱に求められる AMS2750(高温測定)クラス 5 の規格値 $\pm 14^{\circ}\text{C}$ 以内を参考に、それよりも厳しい $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内を目標として加熱炉の開発を行った。

開発した加熱炉を図2-10に示す。本研究開発では、中型ラインの加熱炉 2 基、大型ラインの加熱炉 1 基を開発するとともに、炉内の均一な温度分布の確保と、素材の予熱温度の検証に取り組んだ。これらの炉内の角 8 か所と中央の計 9 か所において温度測定を実施して、目標内の均一な加熱が可能であることを確認した。



(a) 中型ライン用加熱炉 2基



(b) 大型ライン用加熱炉

図2-10 AMS2750(高温測定)クラス5の規格を満たす加熱炉

②統合モニタリングシステムの開発

リングローリング圧延工程において、加工中の素材には加工発熱による温度上昇や治工具との接触による熱伝達及び周囲環境への放熱による温度の低下が起こる。そのため、素材には温度の変化及び温度分布が発生する。Alloy718 の加工に適する温度範囲は狭いため、加工時の温度の変化や素材の温度分布を把握することが、本研究開発を進める上で非常に重要となる。

そこで、リングローリング圧延中の素材の表面温度を熱画像解析装置で測定し、それを圧延荷重や素材の外径伸びと同期してモニタリングするシステムを開発した。このシステムにより、同期して測定した荷重計、変位計、熱画像解析装置の結果の分析が可能となった。

③恒温成形技術の開発

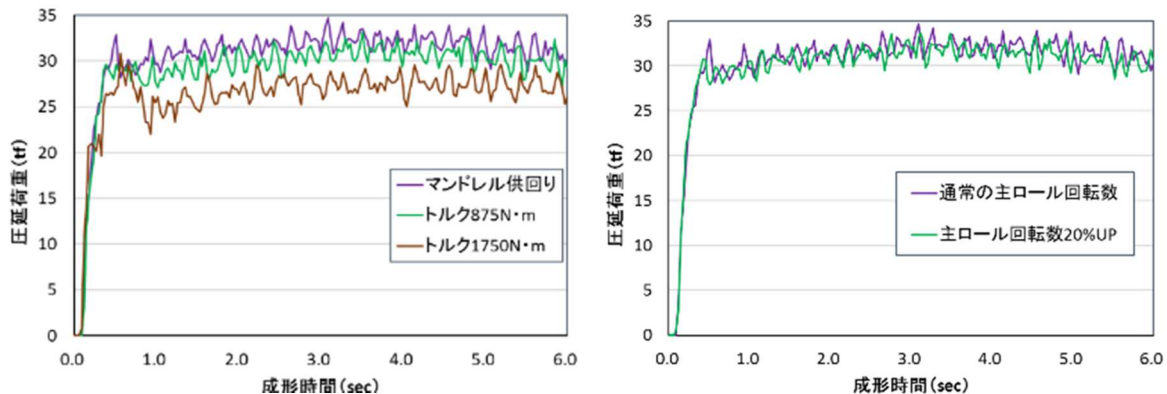
リングローリング圧延中の素材は、治工具との接触や加工発熱によって温度の変化が起こる。素材の温度の変化を抑制するため、治工具材質及びその冷却条件、圧延速度、主ロール周速並びに予熱条件など最適な成形条件について、シミュレーションを活用しながら検討した。

(2) 異周速成形技術の開発

圧延荷重の抑制を目的に、板圧延にて荷重低減効果が確認されている異周速圧延成形をリングローリング圧延へ適用することについて検討した。

リングローリング圧延にて、マンドレル軸と主ロール間に速度差を与える場合、現状供回りとしているマンドレルにトルクを与える機構を追加する必要がある。与えたトルクに対してどれだけの抑制効果が得られるか、シミュレーションを用いて効果の検証を行った。一方で、圧延荷重低減の別案として、主ロールの回転数変更の効果について解析を行った。検討の結果を図2-11に示す。

主ロールの回転数を上げることで表面の温度がわずかに高くなり、温度上昇に伴って圧延荷重の低減効果を確認できた。そこで、実成形においても主ロール回転数を従来の圧延条件より20%増加したところ、約10%の荷重低減効果があることを確認した。



(a) マンドレルにトルクを与えたときの圧延荷重の比較 (b) 主ロールの回転数を変更したときの荷重履歴の比較

図2-11 異周速圧延と主ロール回転数アップの2案の検討

（３）閉式端面拘束成形技術の開発

主ロールとマンドレル軸による圧延の際に、素材内部に発生する引張荷重の低減を目的として、主ロールを異形化した治工具形状について検討した。図２－１２に異形化した治工具の検討図を示す。

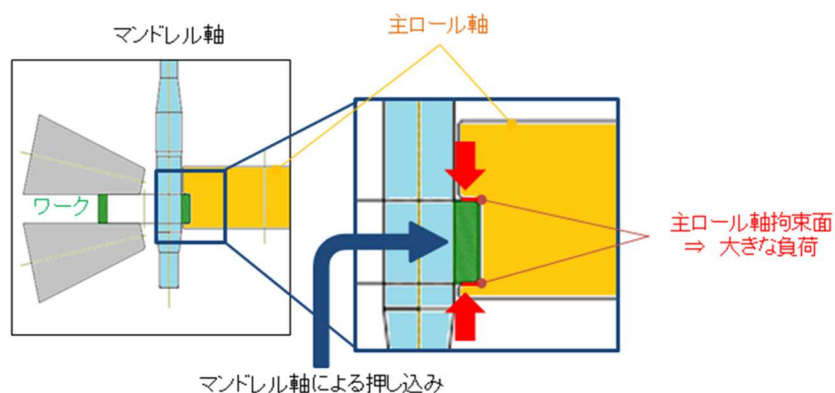


図２－１２ 検討した治工具図

その一方で、大きな成形荷重が発生することもわかり、リングローリング圧延の場合には主ロールの拘束面に大きな負荷が生じることが懸念された。そこで、本研究開発では、適切な温度管理や主ロールの回転数などの適切な加工条件の検討を中心に進め、端面を拘束しなくても外径 451mm の成形において割れなどの欠陥が生じない良好な圧延を可能とした。ただし、今後より大型の製品を検討する際には、さらなる割れ対策が必要な場合が考えられることから、成形時の負荷を考慮しながら端面拘束技術を適用できる治工具形状を検討していく予定である。

（４）成形品の評価

上記（１）～（３）により、温度の変動及び荷重を抑制することで、外径 451mm までの Alloy718 製リングを予熱１回で圧延成形することができた。

成形品を全面旋削加工し、超音波検査により内部を、浸透探傷検査により表面の検査を行った（図２－１３）。その結果、いずれも欠陥はなく良好な状態であった。



(a) 成形品



(b) 旋削品



(c) 浸透探傷検査品

図２－１３ 外径 451mmの成形品

2-4 荒地成形技術の開発

リングローリング圧延工程にてニアネットシェイプ成形を実現するには、その工程に最適な形状となる素材を荒地成形の段階から供給することが重要である。良好な荒地を安定して供給できるようにするため、治工具形状及び予熱条件について、タンレイ工業株式会社のこれまでのノウハウやシミュレーションを活用しながら検討した。

検討の結果、良好な荒地を供給するための評価手法をシミュレーションにより確立し、それを実現する最適な加工条件を設定することができた。成形した荒地に対して浸透探傷検査を行い、割れのない良好な状態であることを確認した（図2-14）。



図2-14 外径 451mm向けの良好な荒地

2-5 データベースの構築

2-3（1）で開発した熱画像解析を伴った統合モニタリングシステムにより、荒地成形工程、リングローリング圧延工程での温度変化、加工条件の把握が可能となった。各工程で測定した各データを蓄積し、データベースを構築した。

荒地成形において、据込み、型込め、打抜き各工程の加工温度を熱画像解析装置により測定することで、適切な素材温度、治工具温度を把握した。リングローリング圧延において、加工荷重・伸び・圧延速度・温度を測定し、様々な製品寸法におけるデータを蓄積することで、外径 451mm までの加工条件の設定を把握した。

最終章 全体総括

3-1 研究成果

本研究開発では、Ni 基合金製リング形状部品を対象に、高精度シミュレーション技術及び低い加工荷重で割れの発生しない熱間恒温リングローリング技術を開発した。主な取組みとして、①Ni 基合金の高温材料特性の評価、②リングローリングシミュレーション技術の開発、③新しいリングローリング圧延技術の開発、④荒地成形技術の開発、⑤データベースの構築を行った。

目標としていた外径 451mm の Alloy718 製リングの成形に成功した。それ以外にも様々なサイズの成形に成功した。(図3-1)



図3-1 本研究開発の成果

また、ニアネットシェイプ化はもちろんのこと、自由鍛造に比べて材料ロス 1/8 以下、加工時間（製品納期までの全工程時間）1/2 以下、再加熱を含めた加工エネルギー 1/2 以下の実現により、現状の製品比でコストを 1/3 以下とする目標も達成した。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

今後は、大手重工等へのサンプル出荷を行うほか、事業化へ向けて市場調査、客先ニーズやコストを勘案しながら、より大径サイズの成形及び断面形状の異形化と、フローフォーミング成形との複合化への取り組みを進めていく。