

令和6年度

成長型中小企業等研究開発支援事業

「高機能・高精度・低コスト・短納期・環境配慮を実現した、
DXによる試作レス冷間鍛造品開発技術の確立」

研究開発成果等報告書

令和7年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 よこはまティーエルオー株式会社

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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	5
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	
2-1 生産設備に係わる課題への対応	
2-1-1 多軸制御油圧機構を追加したサーボプレスの開発	9
2-2 CAE解析技術の課題への対応	
2-2-1 CAE解析結果と測定結果との定量的な比較評価方法の確立	12
2-2-2 材料物性データの取得	14
2-2-3 CAE解析における摩擦モデル高精度化	16
2-2-4 材料物性データと摩擦モデルのCAE解析への組み込み	18
2-2-5 スパイラルギヤモデルによる検証実験	18
2-3 金型設計技術に係わる課題への対応	
2-3-1 金型製作の補正3Dデータ作成	20
2-3-2 試作金型の製作と精度検証	20
2-4 金型製作技術に係わる課題への対応	
2-4-1 5軸加工対応CAMソフトウェアの導入	22
2-4-2 5軸加工における課題の洗い出しと適正条件の検討	22
2-4-3 適正条件のとりまとめ、および金型の製作と検証	23
最終章 全体総括	

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

○研究開発の概要

近年、金属部品加工に対して、「高機能」「高精度」「低コスト」「短納期」「環境配慮」などの市場ニーズが高まっている。冷間鍛造は複雑な形状をネットシェイプで高精度かつ低コストに生産できる優れた金属加工法であるが、従来、開発期間（特に金型）の長期化やイニシャルコストの増大などの問題があった。これに対して、本研究開発では、〈生産設備の小型化〉 〈CAE 解析技術の高度化による金型試作レスの実現〉 〈CAE 解析結果を基にした金型設計技術開発〉 〈高精度かつ低コストな金型製作技術開発〉の四つを柱とした総合的なパッケージ技術開発を行い、問題の解決を図る。それによって、冷間鍛造をより幅広い産業に普及させることを目的としている。

○研究開発の背景

グローバル競争が激しい工業製品においては、性能や品質向上の追求が日々行われ、それらに使用される金属部品についても、「高機能化」「高精度化」が求められるようになった。当初は高機能、高精度なものは高コストである、というのが共通認識であったが、諸外国の急速な技術力向上もあり、現在ではそれらを「低コスト」かつ「短納期」で供給しなければ、その競争の中で勝ち残れない状況となっている。また近年ではそれに加えて、世界的な脱炭素社会に向けた取り組みとして、部品そのものや生産工程における「環境配慮」も強く求められるようになった。

「高機能化」については具体的には様々なものがある。強度や耐久性の向上、複数部品の一体化、中空構造や肉抜きによる軽量化、加工面性状の向上などである。それらを実現しつつその他の全てのニーズに応えていくためには従来工法の改良や効率化だけでは限界があり、先進的な技術開発による工法転換が必要である。

現在金属の複雑形状部品の製作に使われている加工方法には、切削、鋳造、鍛造がある。

これまでは、高精度な複雑形状部品の生産には主に切削加工が用いられてきた。しかし切削加工は金属を削り出すという工法上、加工時間が長くなると共に大量の切粉が発生して材料歩留まりが悪化するため、自動化してもコスト削減には限界があり、環境負荷も高くなってしまふ。

鋳造は形状の自由度は高いものの、成型後の冷却収縮による不規則な変形でどうしても精度が悪化する。そのため高精度部品に適用するには鋳造後に切削や研削を行う必要があり工程数が増える。やはりコスト削減には限界があり、金属を溶解するために非常に多くのエネルギーを要するので環境負荷も高い。成型時に巣と呼ばれる空洞が内部に生じることがあり、強度的な品質の不安要素もある。

最後に挙げた鍛造は「工具・金型などを用いて固体材料の一部または全体を圧縮または打撃することによって成型および鍛錬を行うこと」で、その中でも材料を再結晶温度以上まで加熱して材料を柔らかくして行うものを「熱間鍛造」、材料を積極的に加熱しないで室温または室温に近い温度で行う鍛造を「冷間鍛造」という。

熱間鍛造は加熱による表面の酸化や、鑄造同様に成型後の冷却収縮による不規則な変形があるため、高精度が要求される場合は、鍛造後に切削や研削などの後工程を必要とする。

それに対し、冷間鍛造は材料を加熱しないため不規則な変形がなく、バラツキの無い高精度なネットシェイプでの生産が可能である。短時間のプレスのみで成形が完了するため生産性が非常に高く、工程数も削減できるので圧倒的に低コストである。また、最終形状に体積を合わせた素材を成型するので材料歩留まりが非常に良い、内部にメタルフローと呼ばれる金属組織の流れが生じることにより製品強度が向上する、など数多くの優れた特徴を持つ。

金属を常温のまま成型するため、加工荷重や面圧の緻密な計算など、高度な専門技術が必要だが、近年になって金型材料や工具の性能向上、CAE 解析の普及によって適用できる製品の範囲が急速に広がっている。このように冷間鍛造は「高機能」「高精度」「低コスト」「短納期」「環境配慮」を実現できる高付加価値な金属加工方法である。ただし金型の設計製作期間と費用が必要で、中～小ロット生産品や短期間での開発を求められる製品には採用しにくく、それが普及の妨げになっているので、その問題を解決するため当該研究開発に取り組む必要がある。

○従来の冷間鍛造技術の問題点

従来の冷間鍛造技術で問題点として挙げられるものは、以下の2点である。

<1. 開発期間が長期化する>

大きな加工荷重（高い面圧）が加わることによる金型の弾性変形や、素材のスプリングバックの影響があり、試作を繰り返してその適正な補正量を導き出す必要が生じるため開発期間が長期化する。

<2. イニシャルコストが増大する>

高精度複雑形状の冷間鍛造を行うための加工設備（プレス機）には最低でも以下の4つの動力（※以後「軸」という）が必要になる。（図1参照）

①直接素材を加工する軸、②型締めのための軸、③上型から品物を離型するための軸

④下型から品物を排出するための軸

この機能を備えた鍛造用の多軸プレスは汎用性に乏しく、構造が複雑かつ大型で導入に1億円以上の設備投資を要する。

一般的な汎用プレス機で対応するために、金型内部にこれらの動力を発生させるための機構を組み込む工法もあるが、この場合は金型が複雑かつ大型化するので金型費が増大し、結果として大型のプレス機が必要となるので、やはり多額の初期投資が必要となってしまう。

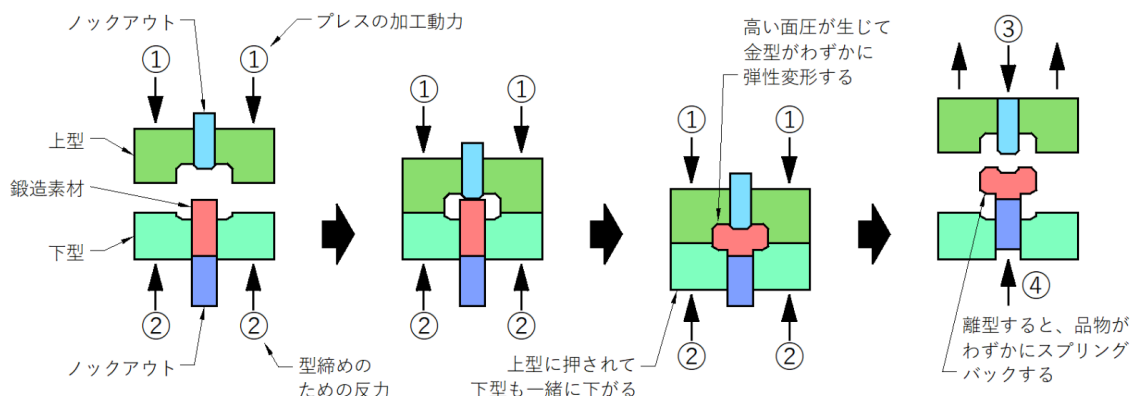


図1 冷間鍛造の模式図

これらの問題点があるため、冷間鍛造は大量生産を前提とした一部の自動車部品を中心に採用されており、中～小ロット生産の幅広い産業分野ではなかなか導入が進んでいない状況にある。

従来技術の課題と、本事業で研究開発する新技術との比較をまとめたものが表 1 である。

表 1 冷間鍛造における従来技術と新技術の比較

項目	従来の冷間鍛造技術	開発する新冷間鍛造技術
方式	<p>【生産設備】 型締め、ノックアウトなどの機構を備えた鍛造専用の大型プレス機が必要。</p>  <p>【CAE 解析技術】 CAE 解析はあくまでも参考で、数回の試作を要し、開発期間が長期化する</p> <p>【金型設計】 試作品の測定結果に基づいて、設計者が感覚的に金型設計データに補正を加える。</p> <p>【金型製作】 放電電極の製作～放電加工の工程を粗・中・仕上で3回繰り返す。その後の磨き工程は人の手作業によって行っている。</p>	<p>【生産設備】 多軸制御油圧機構を追加する改造を施した汎用サーボプレスを使用。</p>  <p>【CAE 解析技術】 CAE 解析技術を高度化し、試作レスでの製品開発を実現する。</p> <p>【金型設計】 リバースエンジニアリングソフトを使い、定量的に金型設計データに補正を加える。</p> <p>【金型製作】 5軸マシニングセンタによってワンチャックでの直彫り切削1工程で高精度を実現させ、かつ手作業による磨き工程を不要とする。金型長寿命化の効果も期待できる。</p>
従来技術の課題 新技術の課題 と解決方法	<p>【生産設備の課題】 生産設備や金型が大型化するため、インシタルコストが増大する。</p>	<p>【生産設備の小型化】 汎用のサーボプレスに組み込める油圧機構を開発し、それを使って上下のノックアウトと型締めを行う。金型も小型化し、生産設備の導入コストを半減させる。</p>

<p>従来技術の課題</p> <p>新技術の課題と解決方法</p>	<p>【CAE 解析技術の課題】 現状では、摩擦係数を任意に予測して入力するしかない。材料の物性データも一般的な数値であり、CAE 解析結果が現実と乖離してしまう。そのため、実際に試作してその誤差を修正する必要がある。</p> <p>【金型設計技術の課題】 試作品の測定結果をみながら、設計者が感覚的に補正を加えているため、1度の補正で済むことはほとんどなく、数回の試作を要する。</p> <p>【金型製作技術の課題】 工程数が多く金型の製作期間が長期化するうえ、作業者の技能によるバラツキや精度の悪化が生じる可能性がある。</p>	<p>【CAE 解析技術の高度化】 試験で得られた摩擦係数や材料の物性データを CAE 解析ソフトに入力し、CAE 解析の精度を向上させる。それによって、金型の弾性変形量、素材のスプリングバック量、加工時の材料流動、などを正確に予測し、試作レスでの開発を実現する。</p> <p>【新たな金型設計技術の開発】 高精度に導き出されたCAE 解析結果を基準として、リバースエンジニアリングソフトで正確に反転補正した金型設計データを作成する。</p> <p>【新たな金型製作技術の開発】 5軸マシニングセンタの加工パスラインおよび使用する切削工具の最適化を追求し、加工面性状の向上を図ることで手磨き工程を不要とする。</p>
-----------------------------------	---	--

他の加工方法から冷間鍛造への工法転換の検討要求があったものとして、図2に示す「スパイラルギヤ」がある。以下のような具体的なニーズがあるため、当該研究開発ではこの「スパイラルギヤ」を対象製品として研究開発をおこなうこととした。

◇専用機械（歯切り盤）の製造は特殊技術を要するため特定メーカーの寡占状態にあり非常に高価で、代替の低コストな歯車加工技術として冷間鍛造を検討している。



図2 スパイラルギヤ

◇冷間鍛造へ工法転換する場合に必要となる、加工用設備、金型費、試作開発費などのインシャルコストを可能な限り削減したい。

◇動力が小型エンジンからモーターにかわり静音化が進むため、ギヤボックスも静音化を図りたい。

◇仕上がり寸法のバラツキや耐久性などの品質を現状よりも向上させたい。

○新技術を実現するために解決すべき研究課題

（三）精密加工に係る技術に関する事項

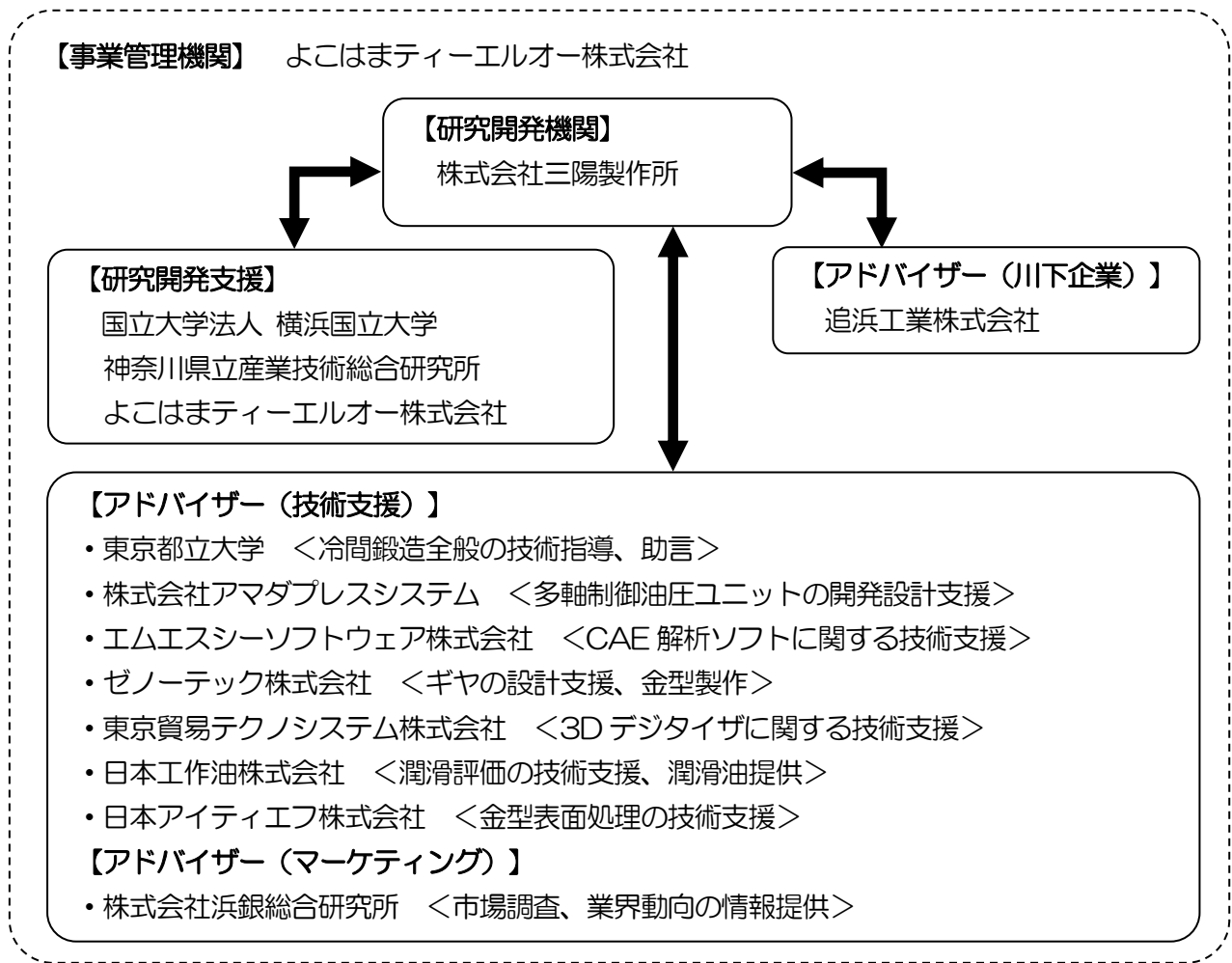
1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

（3）川下分野横断的な共通の事項

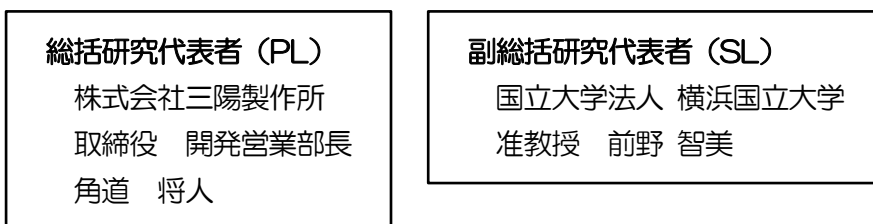
①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

力、生産性・効率化の向上、低コスト化

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）



1-2-1 研究組織・管理体制



1-2-2 研究者氏名

株式会社三陽製作所

氏名	所属・役職	備考
角道 将人	取締役 開発営業部長	PL
水村 隆	専務取締役	
柳澤 元貴	開発・設計担当 係長	
白畑 武司	開発・設計担当 係長	

澁江 俊行	開発・設計担当	
中能 慎二	金型・治工具担当 係長	
伊藤 敬	設計・生産技術担当	
東 一昭	金型・治工具担当	
佐藤 剛	工場長	
水村 直人	副工場長	
高山 涼	品質管理担当 主任	

国立大学法人 横浜国立大学

氏名	所属・役職	備考
前野 智美	大学院理工学府・工学研究院准教授	SL
戸坂 浩輔	理工学府, 機械・材料・海洋系工学専攻 ・博士課程前期	
SOLEYMANIPOOR ALIREZA	横浜国立大学大学院 理工学府 機械・材料・海洋系工学専攻 博士後期1年	
大橋 健人	理工学部, 機械・材料・海洋系工学科 材料工学 EP4年	

神奈川県立産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	備考
高橋 和仁	情報・生産技術部 主任研究員	
斉藤 光弘	情報・生産技術部 設計試作グループリーダー	

よこはまティーエルオー株式会社

氏名	所属・役職	備考
塚本 修巳	特別顧問	
岡林 光志	プロジェクト推進部門 部門長	
日置 為保	プロジェクト推進部門 コーディネーター	
梶山 繁	プロジェクト推進部門 コーディネーター	

1-2-3 協力者氏名

氏名	所属	備考
野口 健一	追浜工業株式会社 開発部	
西村 尚	東京都立大学 名誉教授	
吉田 武志	株式会社アマダプレスシステム	

川口 竜太	エムエスシーソフトウェア株式会社	
山口 和樹	エムエスシーソフトウェア株式会社	
河野 正宏	ゼノーテック株式会社	
池田 大悟	東京貿易テクノシステム株式会社	
松浦 佑弥	日本工作油株式会社	
北山 樹	日本工作油株式会社	
堀井 章伸	日本アイティエフ株式会社	
吉田 和朗	株式会社浜銀総合研究所	

1-3 成果概要

1-3-1 多軸制御油圧機構を追加したサーボプレスの開発

サーボプレスにスライド動作と連動した制御が可能な油圧ユニットを加えた 4 軸ハイブリッドプレスが完成した。装置のスペックは以下の通りで、当初の目標を上回ることができたため、加工可能な範囲を広げる効果が得られた。

- ①上部油圧シリンダ：最大加圧能力 269.4kN、ストローク 30mm
- ②型締め用油圧シリンダ：最大加圧能力 422.2kN、ストローク 100mm
- ③ロックアウト用油圧シリンダ：最大加圧能力 148.9kN、ストローク 100mm

これによって、油圧のみの多軸プレスでは実現のできない、加工時のサーボモーションの活用や、加工時間の大幅な短縮が実現可能となった。また逆に、通常のサーボプレスでは実現のできない複雑な密閉鍛造や複動加工も可能となった。

全ての油圧シリンダは、サーボプレスからのアウトプット信号に基づいて油圧ユニットのソレノイドバルブを駆動させることによって、プレス機と同期したタイミングのシーケンス制御を行う方式とした。これによって、金型への油圧ユニットの組み込みが不要となり、金型の小型化とプレス機の小型化の両立を実現した。

1-3-2 CAE 解析結果と測定結果との定量的な比較評価方法の確立

基準となる CAD データと、CAE 解析結果や 3D デジタイザでの測定結果との比較評価で、部品全体の 3D モデル形状を 0.01mm レンジで色分けがされたカラーマップとして表示させることができた。

また、従来から使用されている歯車評価基準値

[累積ピッチ誤差・単一ピッチ誤差・隣接ピッチ誤差・歯面の振れ・歯厚誤差・圧力角誤差・ねじれ角誤差] を算出できる専用のソフトウェアも完成し、従来よりも簡便かつ短時間で歯車評価を行えるシステムを構築した。

1-3-3 材料物性データの取得

金型の対象材質（粉末ハイス鋼、冷間ダイス鋼）

製品の対象材質（SCM415、C1020、SUS304）

について、温度依存性、ひずみ速度依存性を含めて材料データ（応力-ひずみ線図）を取得した。

実際に材料試験で取得した材料物性データを活用したことで、CAE 解析において目標値をクリアする精度の結果を得ることができた。

1-3-4 CAE 解析における摩擦モデル高精度化

リング圧縮試験において、加速度計による振動計測、ハイスピードカメラによる材料挙動撮影、指向性マイクロホンによる音の計測を行ったことにより、これまで目で見たり数値で捉えたりできなかった現象を数値データや画像で評価することが可能となった。

実際にリング圧縮試験で取得した摩擦モデルを活用したことで、CAE 解析において目標値をクリアする精度の結果を得ることができた。

1-3-5 材料物性データと摩擦モデルのCAE 解析への組み込み

エラーが発生せず精度の高い結果を得ることができるCAE 解析プログラムの作成に成功した。

1-3-6 スパイラルギヤモデルによる検証実験

CAE 解析結果と鍛造品との差異は歯面部分で $\pm 0.02\text{mm}$ 以下の結果が得られ、目標値 $\pm 0.04\text{mm}$ 以下を達成した。CAE 解析における摩擦モデルについては、鍛造による塑性発熱を考慮して変動する摩擦モデルを反映したことで、自由表面の変形形状の予測が向上した。

1-3-5 金型設計技術に係わる課題への対応

CAE 解析結果を用いて、金型の弾性変形とスプリングバックの両方を考慮した見込み補正形状を作成する手法、および作成した見込み補正形状が妥当なものであるか評価できる手法が構築できた。

1-3-6 金型製作技術に係わる課題への対応

加工精度で目標値をクリアできる加工プログラムの作成手法や加工手法の確立、最適な切削工具の選定および加工条件の設定を行った。その結果、高硬度材の直彫り加工による金型製作が可能となる体制を確立でき、設計 3D データと金型測定データとの差異で $\pm 0.01\text{mm}$ 以下の結果が得られ、目標値 $\pm 0.02\text{mm}$ 以下を達成した。

製作した金型で鍛造テストを実施し、手磨き工程なしでも問題なく成形可能であることを確認した。

1-3-7 分流鍛造工法の導入

分流鍛造工法を導入することで、製品としての品質を満たす歯形部の充填率（金型との接触率）80%の時に、成型荷重および金型の最大主応力で約30%の低減を図ることができた。

それによって金型の弾性変形量も大幅に縮小されて見込み補正自体不要であることが推測できたため、見込み補正なしの最終金型を製作して分流鍛造を行い、鍛造品の評価を実施。歯当りに影響する歯面部分において、設計 3D モデルと鍛造品の測定データとの差異で±0.02mm 以下という最終結果を得た。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

[事業管理機関]

よこはまティールオー株式会社

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79 番 5 号

E-mail : okabayashi-terushi-tp@ynu.ac.jp

Tel : 045-339-4441

[研究開発機関]

株式会社三陽製作所 取締役 開発営業部長 角道 将人

〒236-0044 神奈川県横浜市金沢区朝比奈町 138 番地

E-mail : m-kakudo@sanyoseisakusho.co.jp

Tel : 045-781-5873

第2章 本論

2-1 生産設備に係わる課題への対応

2-1-1 多軸制御油圧機構を追加したサーボプレスの開発

汎用サーボプレス機でも多軸制御による密閉鍛造を行えるよう、後付けが可能でプレス機のスライド動作と連動した制御が可能な油圧ユニットを開発した。



図 1-1 アマダ製サーボプレス

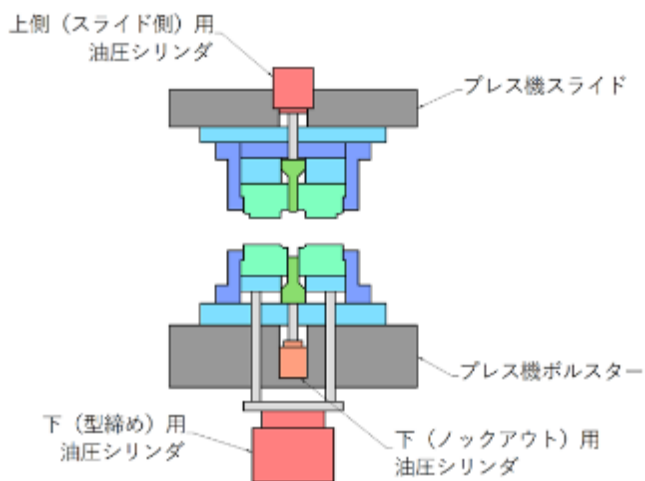


図 1-2 サーボプレスに組み込む油圧ユニットの概略図

① 油圧スペックの検討

加工に必要な最大発生力、ストロークタイム、油圧シリンダーを組み込むサーボプレス側の内部構造など、油圧装置メーカーと協議しながら総合的にスペックを検討し、油圧シリンダおよび油圧ユニットのスペックを下記一覧表の内容で決定した。

表 1-1 油圧シリンダおよび油圧ユニットのスペック

用途	油圧ユニット	最大圧力 (MPa)	最大発生力 (kN)	回転数 (rpm)	係数	吐出量 (L/min)	所要動力 (kW)	適正タンク容量 (L)	シリンダ内径 (mm)	ストローク (mm)	シリンダ容量 (L)	ストロークタイム (s 計算値)
上 (スライド側)	理研	70	269.4	1500	0.97	2.5	3.7	15	70	30	0.12	2.8
下 (ロックアウト)	不二越	21	148.9	1500	0.95	28.5	11.7	160	95	100	0.71	1.5
下 (型締め)	不二越	21	422.2	1500	0.95	49.9	11 2圧2流量制御	160	160	100	2.01	2.4

② 油圧シリンダーの設計

決定したスペックをもとに油圧シリンダの設計を行い、製作した。特に上 (スライド側) 用油圧シリンダについては、プレス機側の取付スペースが狭く、小型で高出力を得る必要があるため、最大圧力 70MPa という超高压対応の特殊仕様とした。

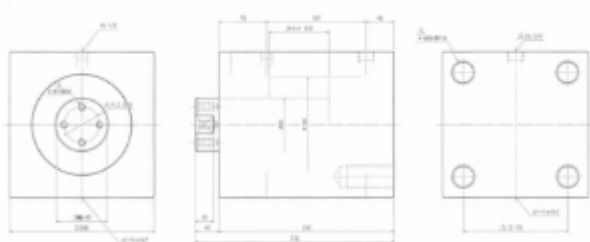


図 1-3 下 (型締め) 用油圧シリンダ図面

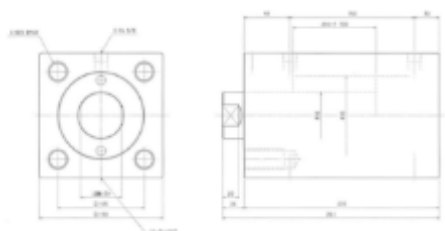


図 1-4 下 (ロックアウト) 用油圧シリンダ図面

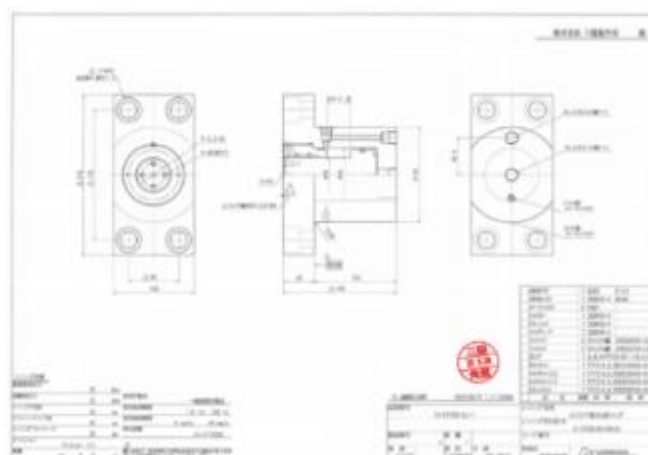


図 1-5 上 (スライド側) 用油圧シリンダ図面

③ プレス機への組み込み構造設計

株式会社アマダプレスシステムの技術者と綿密な打ち合わせを繰り返し、油圧機構をサーボプレスに組み込むための構造設計を行なった。

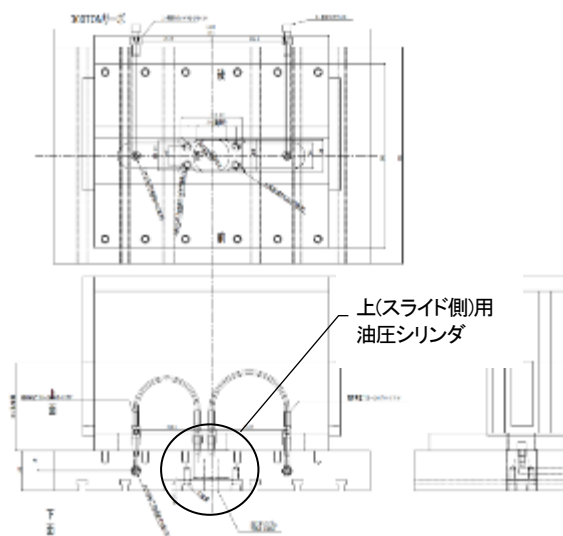


図 1-6 上(スライド側)の構造設計

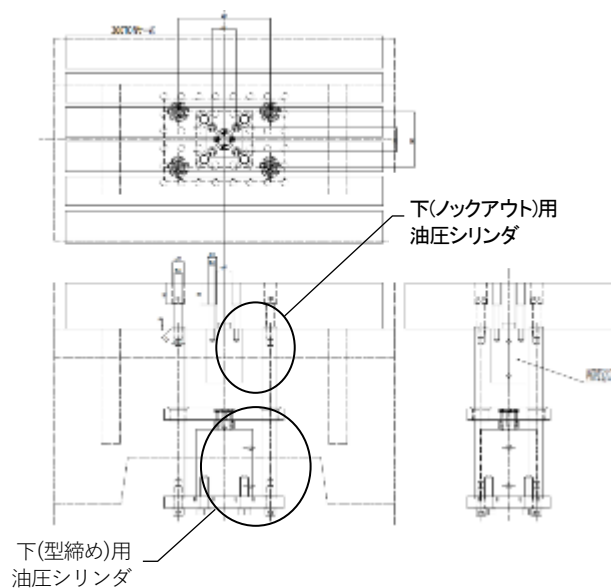


図 1-7 下(ボルスタ側)の構造設計

④ 油圧シリンダの組み込み施工

サーボプレス機には、上部のスライドと下部のボルスタに専用油圧シリンダを組み込むための改造を施したうえで、4軸の多軸制御機能を備えた密閉鍛造が可能なサーボプレス（4軸ハイブリッドサーボプレス）として完成させた。

サーボプレスに油圧シリンダを組み込む施工においては、現場での不具合発覚が許されないため、事前にプレスメーカーの技術者との打合せを十分に行って準備を進めた。実際の組み込み施工はプレスメーカーの工場で行ったが、三陽製作所から6名の人員が立ち合い、プレスメーカー担当者と協力して作業を進めたことで、大きな問題もなく完了させることができた。

油圧ユニットのプレス機との同期制御については、事前にプレス機の出力行の検証を行い、ノイズやタイムラグの問題が発生しないサーボプレスのポジションスイッチを活用する方式を採用した。

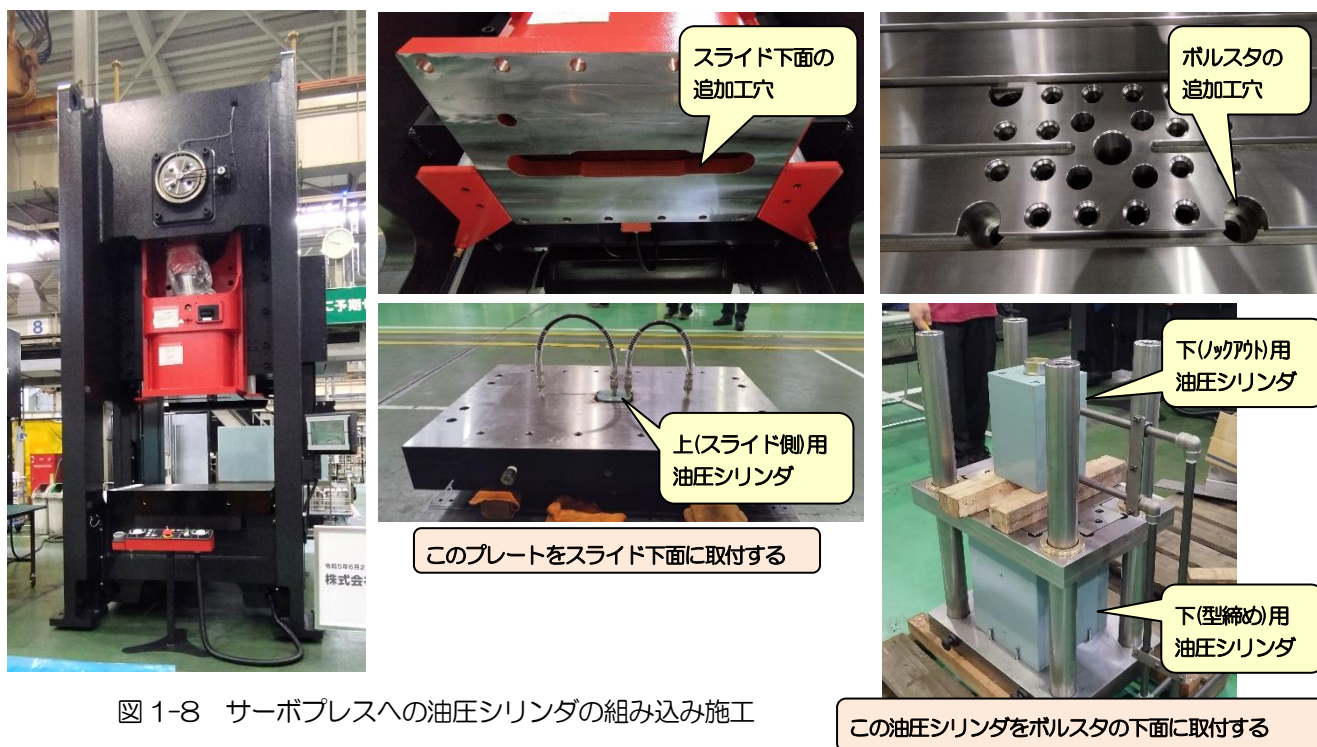


図 1-8 サーボプレスへの油圧シリンダの組み込み施工

2-2 CAE 解析技術の課題への対応

2-2-1 CAE 解析結果と測定結果との定量的な比較評価方法の確立

① 現状把握

既存の接触式歯車測定機では、歯車の諸元に対して現物の測定結果を評価することしかできない。その他、歯当たり試験機で実際に歯車を回して評価する方法もあるが、これには鍛造の後工程まで全て仕上げないと試験が行えないうえに定性的な評価しか行えない。

よって、3D デジタイザを活用して、3D-CAD データ、CAE 解析結果、現物測定結果のそれぞれを定量的に比較評価できる測定システムが必要である。



図 2-1 歯当たり試験の様子
(歯車に光明丹を塗布し、歯当たり試験機を用いてベベルギヤとピニオンギヤを噛み合わせた状態で一定時間回転させる)

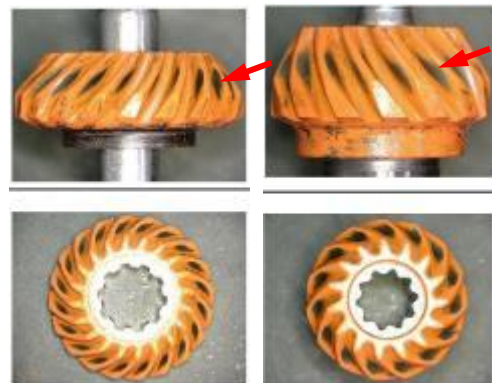


図 2-2 歯当たり試験後の歯車
(この光明丹が落ちたところ＝歯当たり部の周辺が測定評価対象となる)

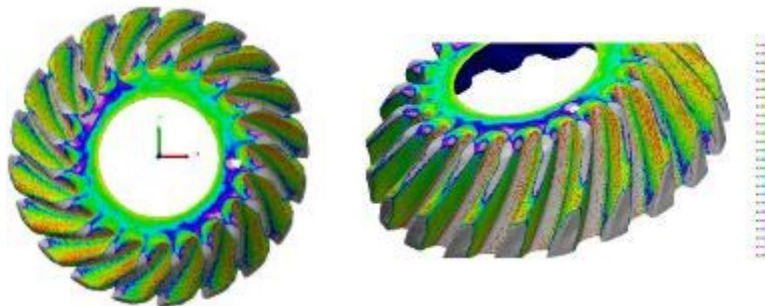


図 2-3 3D-CAD データを基準に、現状の試作品を 3D デジタイザで測定したデータとの形状の差異をカラーマップ表示したもの。

黄緑の部分が±0

カラーバーの最大：赤い部分が+0.03mm

カラーバーの最小：紫の部分が-0.03mm

でグラデーションになっており、それを超える部分はグレー色で表示されている

② 作成した 3D デジタイザを用いた歯車評価システム

1. 図面に基づいてギヤ自体の設計 3D データを作成
2. 鍛造金型（成型部分）の設計 3D データを作成
3. CAE 解析ソフト「Simufact Forming」を用いて解析の実施（金型および鍛造品）
4. 試作金型で製作した試作品を 3D デジタイザ「COMET-8M」で測定し、3D モデル化
5. CAE 解析結果を 3D データとしてエクスポート
6. 3D 寸法解析ソフト「PolyWorks Inspector」に④と⑤のモデルをインポート

7. 二つのデータを重ねてベストフィットさせ、差異を定量的にカラーマップ表示

<⑦の方法について>

基準となる3D-CADデータ上で、歯面（歯当たり周辺部）に測定点を設け、その点を中心とした $\phi 0.2$ 以内の測定結果（点データ）において、測定点との乖離値の平均を出力する。右図の黄色い点が測定点。

全ての歯面（歯表・歯裏）が対象1歯につき凸歯面15点、凹歯面15点

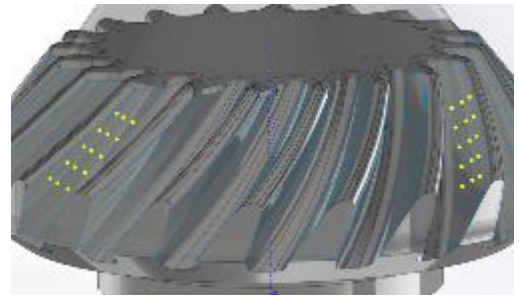


図2-4 歯車に設定した測定点

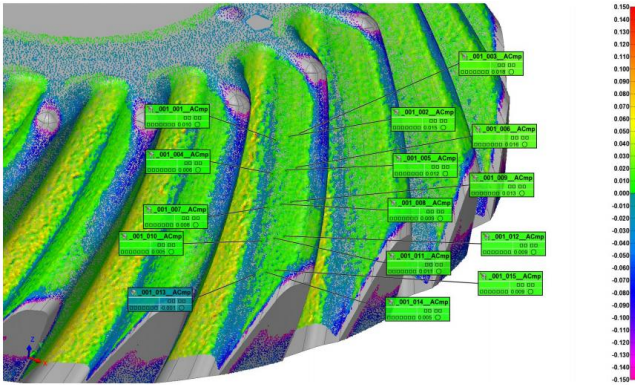


図2-5 取得した各測定点の乖離値（凹歯面）

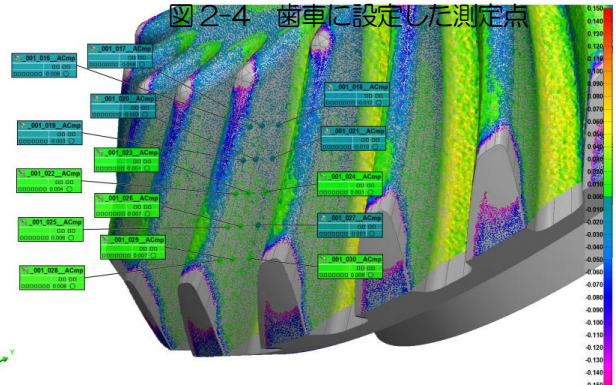


図2-6 取得した各測定点の乖離値（凸歯面）

左下図は既存の接触式歯車測定機の測定結果である。JISで規定された歯車評価基準値が出力されている。今回開発した歯車評価システムでも、取得した乖離値平均をもとにこれらの評価基準値を算出されるものとした。

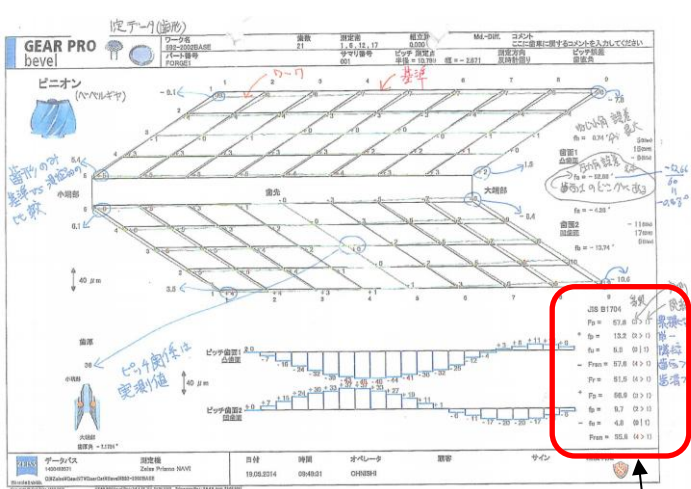


図2-7 既存の接触式歯車測定機の測定結果表示

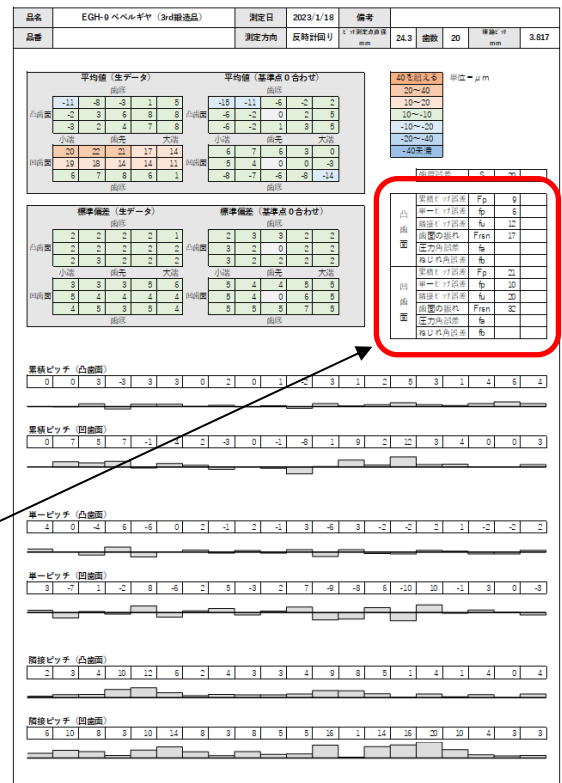


図2-8 新システムの測定結果表示

<歯車評価基準値>

- ・累積ピッチ誤差
- ・単一ピッチ誤差
- ・隣接ピッチ誤差
- ・歯面の振れ
- ・歯厚誤差
- ・圧力角誤差
- ・ねじれ角誤差

2-2-2 材料物性データの取得

① 事業計画

実鍛造加工に基づいた加工温度領域、速度温度領域を考慮した材料試験の実験計画を立て材料試験を実施し、試験より材料物性値を取得し、材料物性データ（温度依存性および速度依存性を考慮した応力-ひずみ曲線データ、塑性物性値を含めた機械的性質、応力構成式など）を作成する。

これらデータをCAE解析（弾塑性解析ソフトSimufact formingによる解析）用にカスタマイズ（スムージング化）し、製造に使用する実材料として解析との適合性とマテリアルデータとしての用意性を図り、CAE解析用のマテリアルデータ（データベース化も含む）として研究開発する。

① CAE 解析を用いた温度条件の検証

材料試験を行う際の温度条件を決定するため、CAE 解析によってギヤ鍛造時の温度検証を行った。

<熱影響に関する設定>

- 素材、型ともに、
初期温度・・・20℃
- 周囲に対する熱伝達係数 [W/(m²K)] ……50
- 型から素材への熱伝達・・・なし
- 周囲に対する放射率・・・自動

<摩擦に関する設定>

- 面圧 低・・・クーロン摩擦 $\mu=0.1$
- 面圧 高・・・せん断摩擦 $m=0.15$

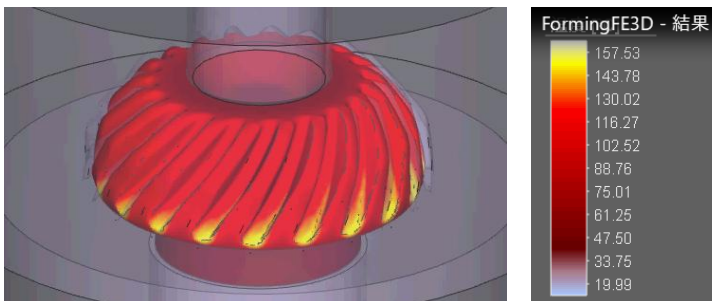


図 2-9 鍛造時表面の温度分布

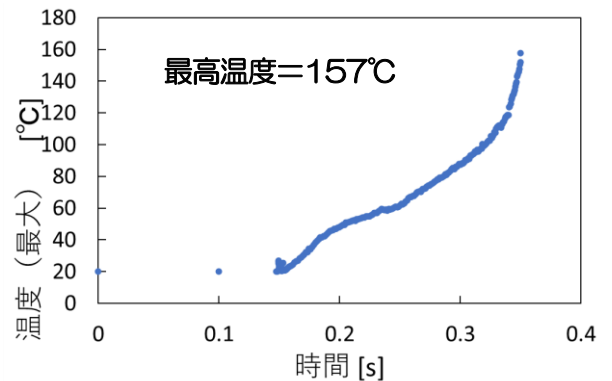


図 2-10 表面の温度変化

上記の検証結果では、最高温度は 157℃であった。この結果から、CAE 解析や各種試験の温度条件は、常温（≒21℃）、100℃、150℃ で行うこととした。

② 材料試験結果

<材料条件>

ギヤ（製品）材料である SCM415（球状化焼鈍-HRB73）を主対象として、C1020、SUS304、金型材として HAP5R（粉末ハイス鋼-熱処理-HRC60）、DC53（冷間ダイス鋼-熱処理-HRC60）

<試験条件>

- 圧縮試験
- 試験温度3水準…常温（≒21℃）、100℃、150℃
- 試験速度3水準…0.2 mm/s、7 mm/s、20 mm/s
- 繰返し数（n数）3～5回

<試験装置>

- サーメックマスターZⅢ型（富士電波工業（株））
- 負荷形式…油圧方式
- 負荷荷重…最大 100kN
- 試験速度… 10^{-3} ～500mm/s

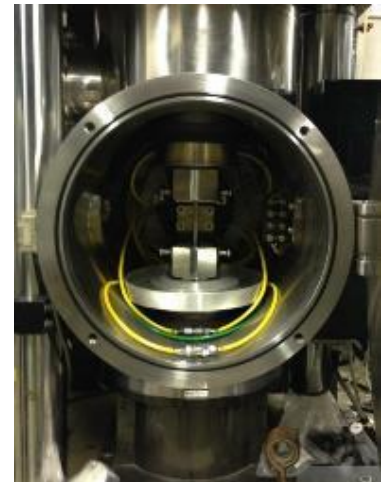


図 2-11 使用した試験装置

③ 取得した材料データ

CAE 解析ソフト「Simufact Forming」に導入できる形での材料データを取得するために、ソフトウェアメーカーの技術者との協議を重ねながら方式を検討のうえ実施した。

実鍛造加工に基づいた加工温度領域、速度温度領域を考慮した材料試験の実験計画を立て材料試験を実施し、試験より材料物性値を取得し、材料物性データ（温度依存性および速度依存性を考慮した応力-ひずみ曲線データ、塑性物性値を含めた機械的性質、応力構成式など）を作成した。その結果を図 2-12 に示す。

これらデータを CAE 解析（弾塑性解析ソフト Simufact forming による解析）用にカスタマイズ（スムージング化）し、製造に使用した実材料として解析との適合性とマテリアルデータとしての用意性を図り、CAE 解析用のマテリアルデータ（データベース化も含む）として研究開発し、ここで取得したデータをスパイラルギヤモデルの CAE 解析に活用した。

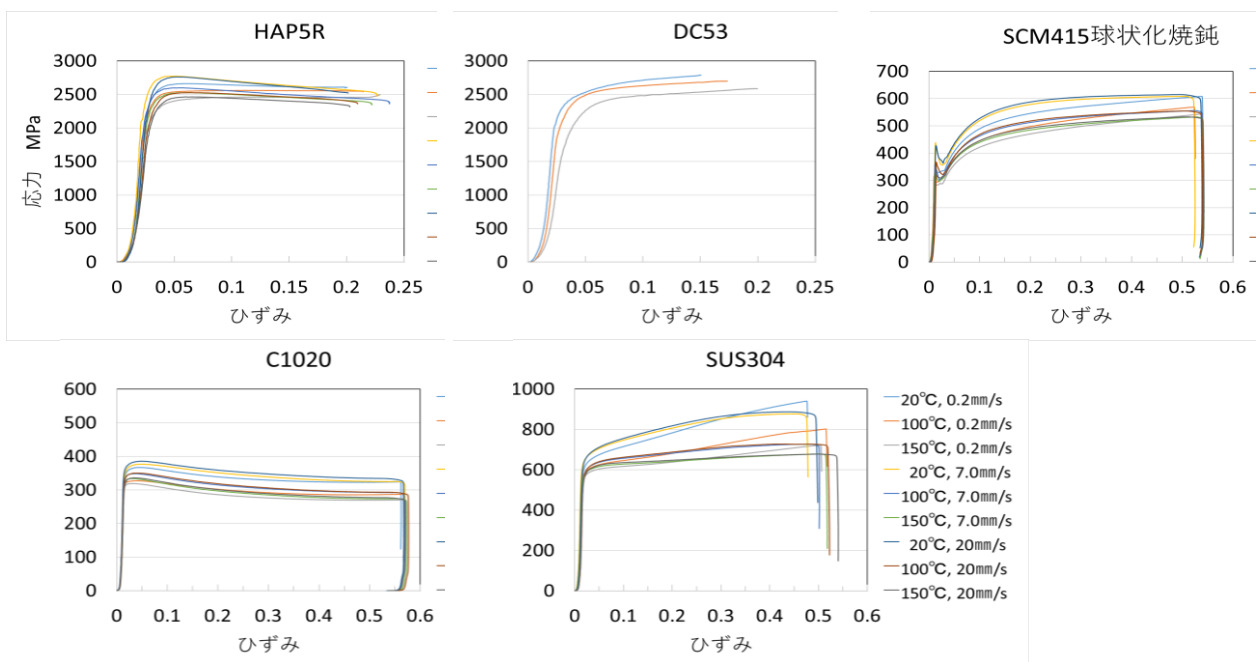


図 2-12 取得した各材料の応力-ひずみ線図

2-2-3 CAE 解析における摩擦モデル高精度化

リング圧縮試験において、摩擦係数に及ぼす温度、素材表面拡大率、面圧などの影響を体系的に調査し、CAE 解析に導入できる形での摩擦モデルを構築した。

① リング圧縮試験の概要

図 2-13 のように、リング状の試験片を圧縮し、その内径と外径の変化量をもとに摩擦係数を導出する。

摩擦係数によって、同じ圧下率でもリングの内径（赤矢印部の寸法）が変化する
 摩擦係数：大 ⇒ 内径：小さくなる
 摩擦係数：小 ⇒ 内径：大きくなる

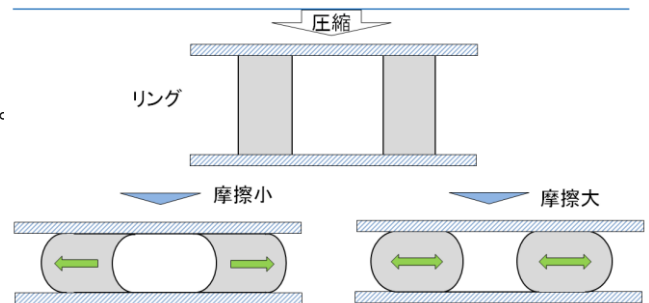


図 2-13 リング圧縮試験の原理

② 外形を常時測定する温間リング圧縮試験方法

図 2-14 に変位センサーを用いた温間リング圧縮試験の概要を、図 2-15 にその外観を示している。上下の圧盤はヒータープレートの上に設置されている。出力 1600W のヒータープレート（200×200×30 mm）を使用し、圧盤押え上面に設置した K 型熱電対により温度を制御した。圧縮にはサーボプレス（SDE-8018、アマダ）を用い、プレス速度は 7 mm/s の等速モーションとした。圧盤は焼入れした SKD61 製で、直径 50 mm、厚さ 20 mm である。表面は平面研磨後にバフ仕上げを施しており、粗さは Ra 0.24 μm である。リング試験片には球状化焼鈍した SCM425 を用いた。外径：内径：高さの比率を 6：3：2 とし、それぞれ 24 mm、12 mm、8 mm とした。上下の表面には平面研削を施した。潤滑剤には、動粘度 130 mm²/s（40° C）の塩素添加鍛造用潤滑剤を用い、10 μl をマイクロピペットで計量し、試験直前に上下の圧盤全面に塗布した。

試験片の加熱には電気炉を使用し、熱電対を取り付けたアルミニウム板の上に載せて加熱した。試験片と圧盤は同じ温度に加熱され、加熱温度 T は、後述の歯車鍛造シミュレーションにより塑性発熱による昇温を評価し、T=50、100、150 ° C とした。

リングの圧縮率は渦電流ストロークセンサを用いて求め、r=50~55%とした。リングの外径は、リング両サイドに設置した板の移動量を金型外のエッジセンサで測定することで求めた。また、リングは圧縮後にわずかに楕円形となるため、試験後に最大直径と最小直径を測定して平均直径を算出し、エッジセンサによる値を補正した。

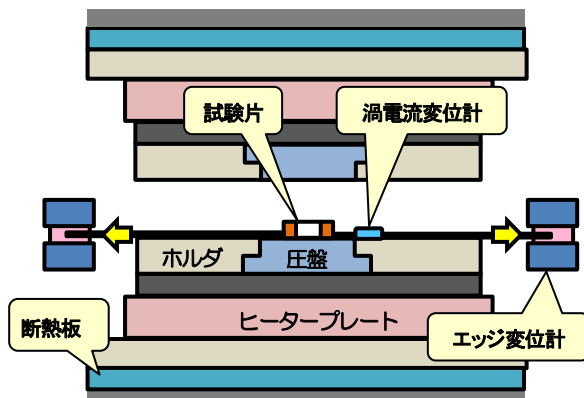


図 2-14 温間リング圧縮試験の概要

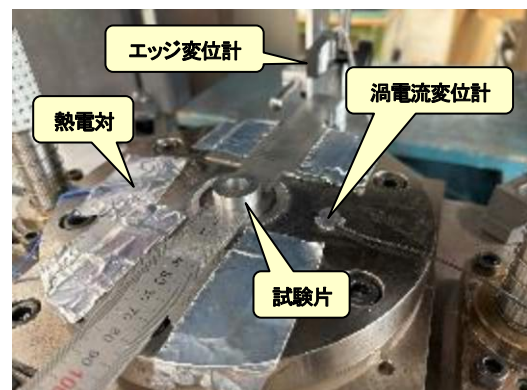


図 2-15 温間リング圧縮試験の外観

③ 温間リング圧縮試験結果

図 2-16 には、各温度における温間リング圧縮試験の結果として得られた外径拡大率と圧縮率の関係を示しており、FEM で作成したノモグラフも併記している。FEM 解析では軸対称変形を仮定し、温度との連成解析は考慮していない。実験は同一条件で 4 回繰り返し実施し、その結果として全体的に低摩擦傾向が見られた。T=50° C ではばらつきがやや大きく、r=40%以降で高摩擦側へと移行する傾向が確認された。一方、T=100° C および 150° C の結果はばらつきが小さく、圧縮率の増加に伴う摩擦係数の変化も比較的小さかった。

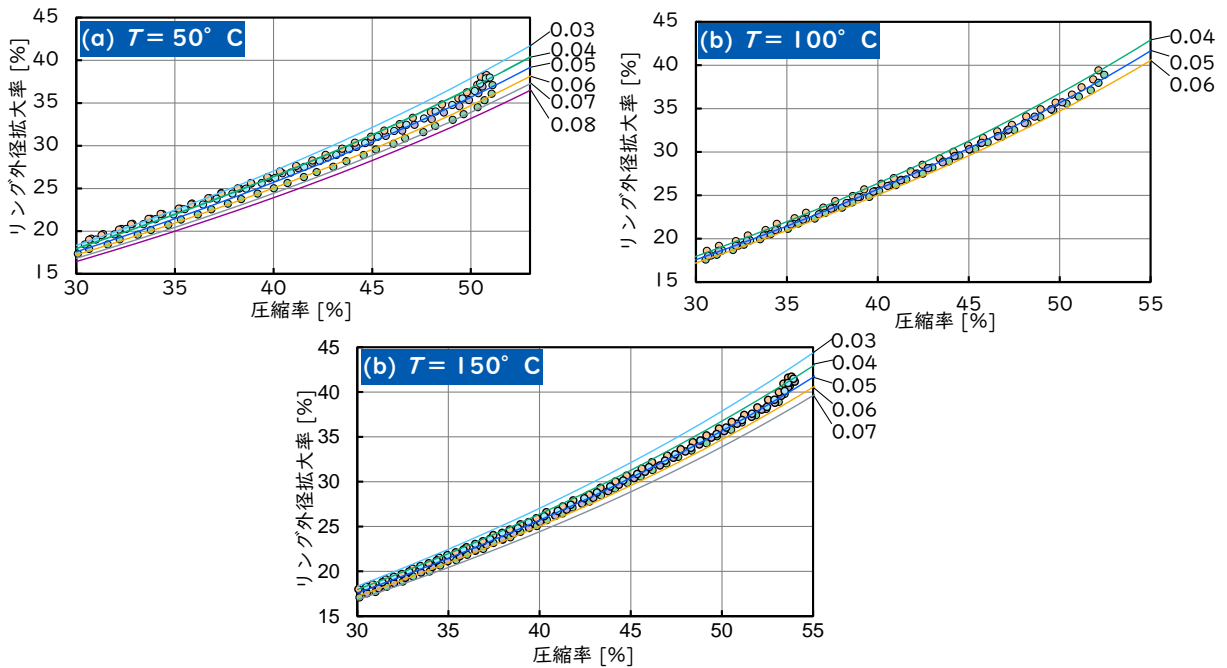


図 2-16 各温度における温間リング圧縮試験の結果から得られた外径の拡大率と圧縮率の関係

図 2-17 に、各温度条件における摩擦係数のリング圧縮率に対する変化を示す。すべてのプレス速度において、温度 T = 100° C では摩擦係数が最も低く、かつ変動が小さいことが観察された。また、圧縮率の増加に伴って摩擦係数が徐々に増加する傾向が見られた。

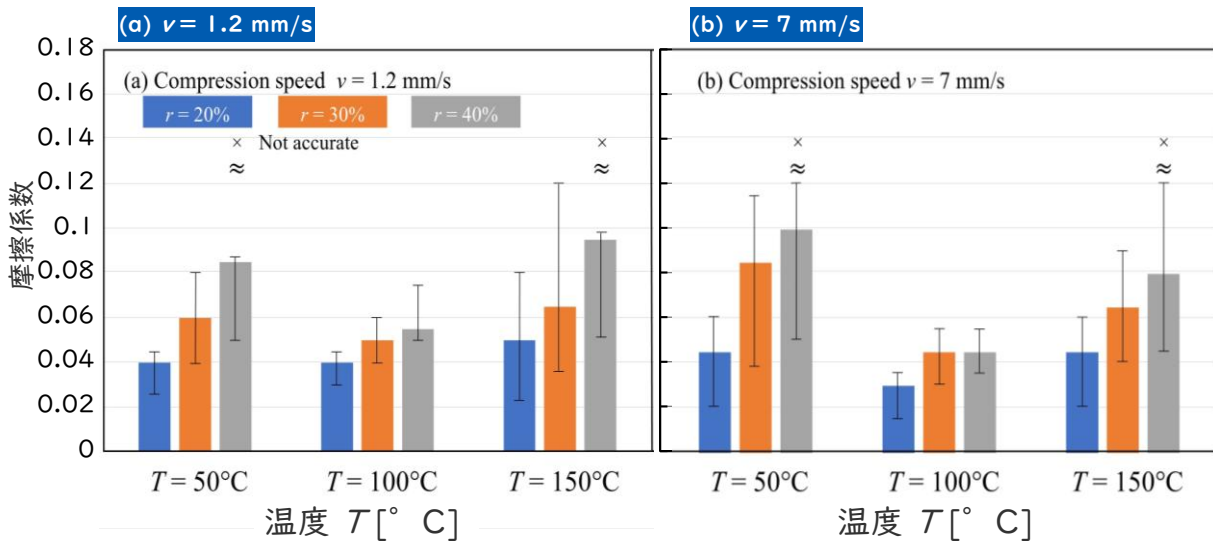


図 2-17 各温度における摩擦係数のリング圧縮率に対する変化

2-2-4 材料物性データと摩擦モデルのCAE解析への組み込み

材料試験で取得した結果に基づき、ギヤの材料データ（SCM415）は、温度：21℃、ひずみ速度：1.43 S-1、ヤング率：204.73GPa、ポアソン比：0.3、降伏応力：218.73MPaとし、金型の材料データ（HAP5R）は、弾性体として扱い、ヤング率：212.25GPa、ポアソン比：0.3、熱膨張係数：1.1e-5 K-1とした。

摩擦条件はリング圧縮試験の結果から、クーロン摩擦のテーブルとして、0.08（温度 50℃）、0.12（温度 100℃）、0.13（温度 150℃）とした。

解析時にエラーが発生しないことが最重要事項であるため、アドバイザーであるソフトウェアメーカーの技術者による支援を受けながら、取得したデータのCAE解析ソフトへの組み込みを進めた。

2-2-5 スパイラルギヤモデルによる検証実験

① 理想的な歯形設計の決定

歯形設計→マスターギヤ製作→かみ合い試験による歯当たりの検証を3回繰り返して理想的な歯形設計を決定。マスターギヤの加工精度（設計値との差異）は3D デジタイザを用いて検証し、歯面形状において0.02mm以下であることを確認した。図2-18～21



図2-18 マスターギヤ加工の様子



図2-19 かみ合い試験を行ったマスターギヤ

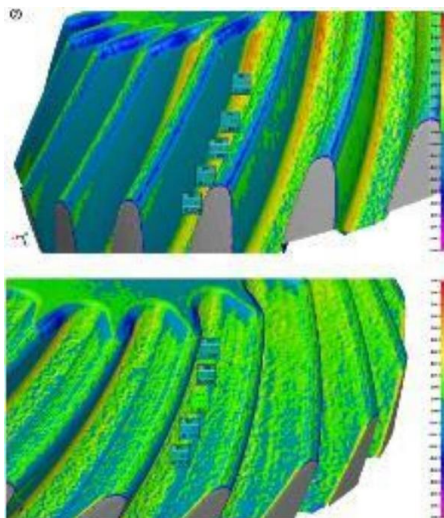


図2-20 マスターギヤ（ベベル）の測定結果

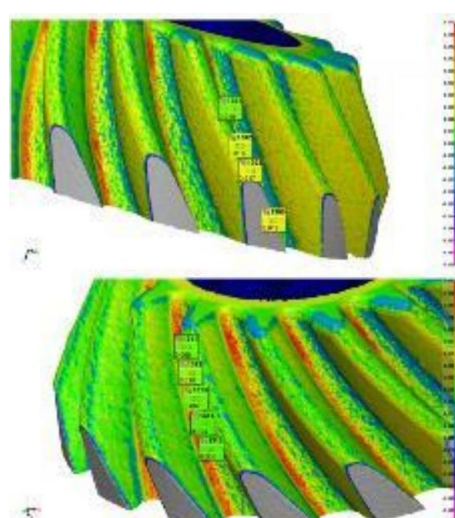


図2-21 マスターギヤ（ピニオン）の測定結果

② 歯車かみ合い試験機的设计製作

高精度かつ迅速に歯車かみ合い試験を実施するため、三陽製作所にて新たに歯車かみ合い試験機を新規に設計製作し、軸の振れ0.005以下の試験機精度であることを確認した。図2-22

このかみ合い試験機を用いたギヤの評価方式について、光明丹塗布による歯当たりの目視確認だけでなく、加速度センサによる振動測定、指向性マイクによる騒音測定、ハイスピードカメラによる歯当たり伸展状況の観察、が可能なシステムを構築した。

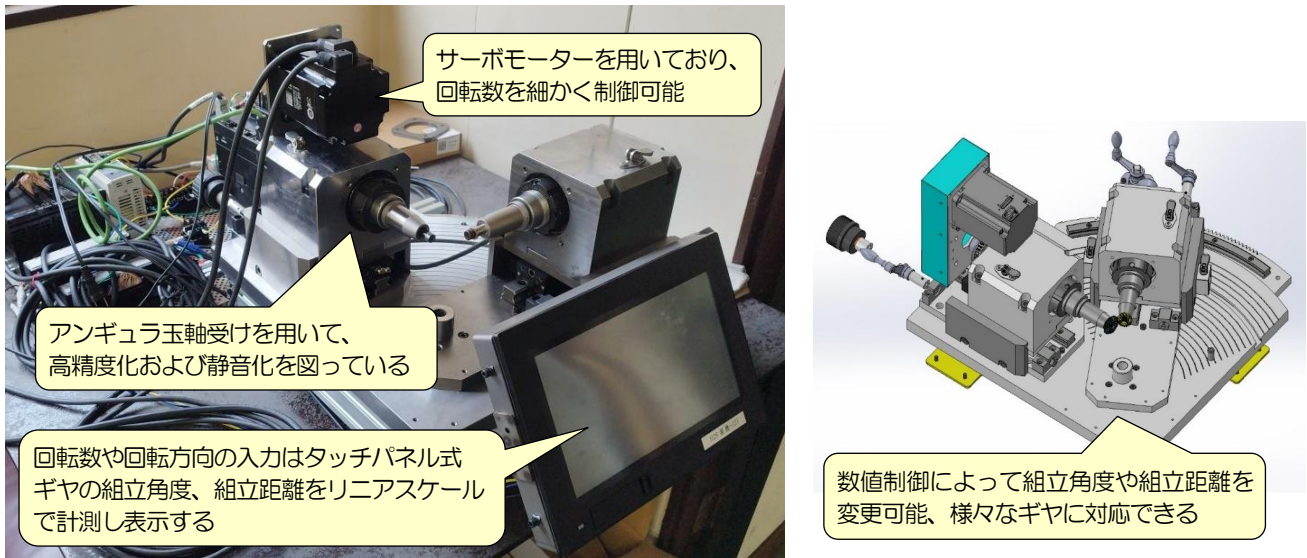


図2-22 新たに設計製作した歯車かみ合い試験

③ CAE解析→鍛造試作結果との比較検証

まずは補正を加えない設計通りの形状でCAE解析を実施、同じく設計通りの形状で製作した試作金型を用いて実際に鍛造した品物との比較検証を実施した結果、CAE解析結果と鍛造品との差異は歯面部分で±0.04mm以下と目標を達成する精度を得られた。しかし、ベベルギヤでは時計回りに徐変している傾向がみられ、ピニオンギヤでは徐変と共に全体的にマイナス傾向がみられたため、対策を実施し更なる精度向上を図った。図2-23

※この精度悪化の原因は金型であったため、詳細については、項目【2-3-2】に記載する。

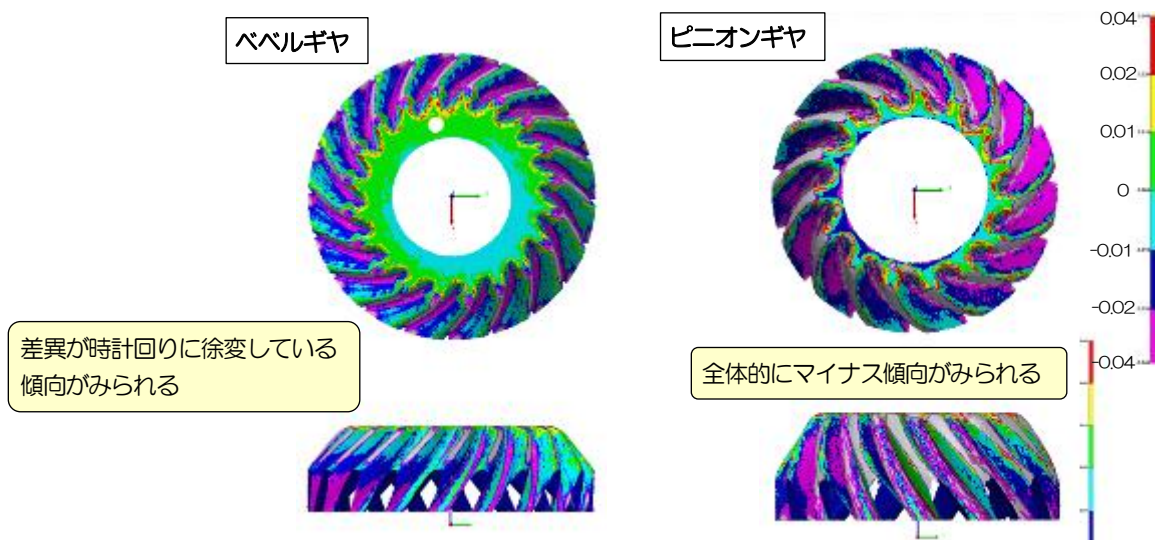


図2-23 CAE解析結果と鍛造品の比較

2-3 金型設計技術に係わる課題への対応

2-3-1 金型製作の補正 3D データ作成

リバースエンジニアリングソフト「spScan」を用いて、CAE 解析結果をもとに、金型変形やスプリングバック量を反転補正した金型の補正 3D データを作成した。手順は以下の通りである。

1. CAE 解析結果とギヤの設計 3D データを重ね合わせる。
2. 設計 3D データの面を基準に、CAE 解析結果を反転させた「見込み補正形状」作成。
3. 見込み補正形状を CAD に取り込み、CAD 上で金型製作の補正 3D データとして整える。

ベベルギヤ、ピニオンギヤともに見込み反転補正形状を作成した。図 3-1 そしてこの「見込み補正形状の金型 3D データ」を使ってギヤ鍛造解析を実施し、解析結果と元の補正なし CAD を比較して、歯当りに影響する歯面部分において目標とする反転補正精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 以下であることを確認した。図 3-2

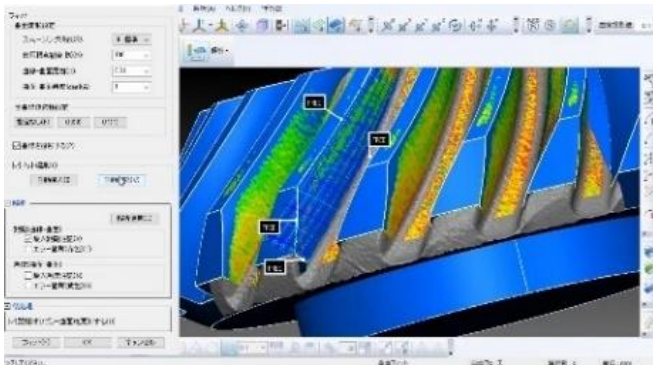


図 3-1 見込み補正形状の作成

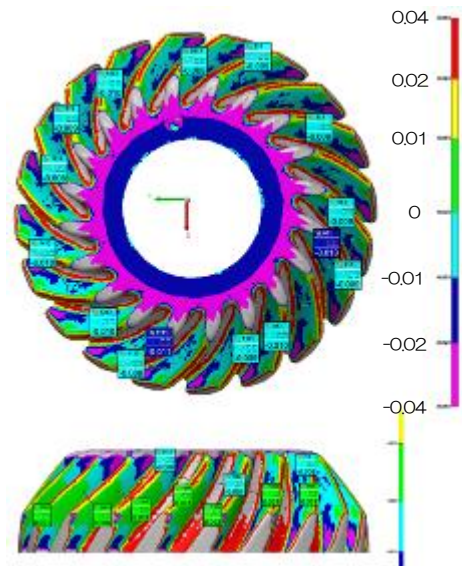


図 3-2 解析結果の評価

2-3-2 試作金型の製作と精度検証

① 5軸マシニングセンタによる金型製作と精度検証

まずは補正を加えていない設計通りの形状で試作金型を製作し、図 3-3 特殊シリコン材を用いて製作した金型の転写形状を取り、図 3-4 それを 3D デジタイザで測定して加工精度の検証を行った結果、項目【2-2-5 ③】と同様の傾向がみられた。

そこで金型の加工プログラムを含めて検証したところ、切削工具の摩耗が原因であることが判明。

よって、現状の時計回りの仕上げ工程の後に工具を交換して反時計回りの最終仕上げ工程を追加。その工程で見込み補正ありの金型製作を行ったところ、歯面部分で ± 0.01 以下となり、目標値 ± 0.02 を上回る加工精度の向上が確認できた。図 3-5



図 3-3 金型テスト加工の様子

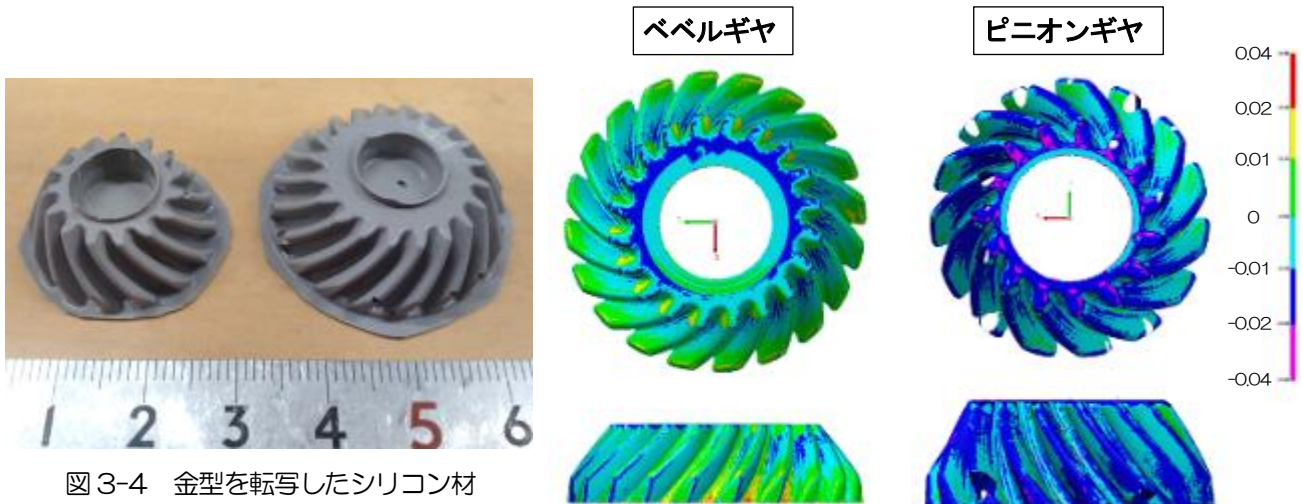


図 3-4 金型を転写したシリコン材

図 3-5 最終仕上げ工程を追加した金型の測定データ

② 見込み補正に関わる歯面精度の定量的評価システム構築

今回見込み補正形状は歯すじ方向に加えているため、その補正量が適正か、また金型の加工精度に問題がないかを定量的に評価するため、ギヤの歯面上（歯表・歯裏両面）に規定の測定点を5点設け、その測定点での差異を数値として取得するとともに歯面形状をグラフ化することで、数値的にも視覚的にも評価を行えるシステムを構築した。図 3-6 具体的な手順は以下の通りである。

1. 3D デジタイザ「COMET-8M」で測定
2. 基準となる設計 3D データの歯面上に、測定点を定義（歯表・歯裏で各5点）
3. 3D 寸法解析ソフト「PolyWorksInspector」で、設計 3D データの測定点と測定結果の差異を数値として出力
4. 数値を「EXCEL」に読み込んで歯すじ形状をグラフ化

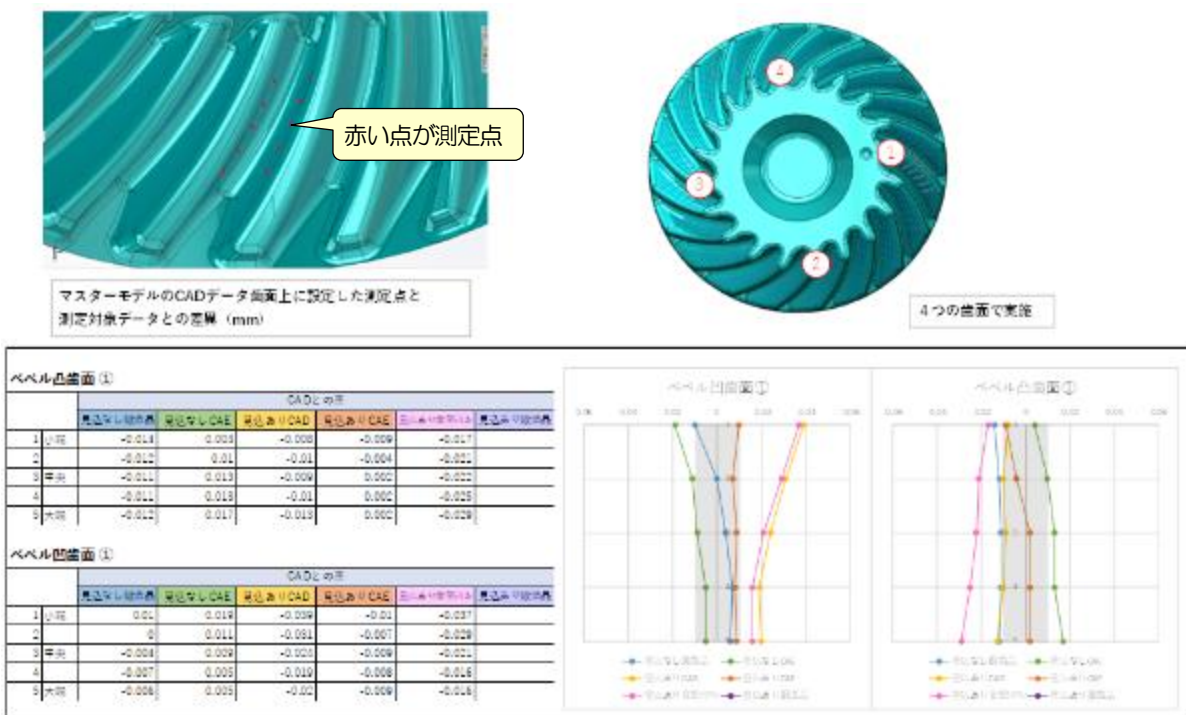


図 3-6 歯すじ形状の定量的評価システム

2-4 金型製作技術に係わる課題への対応

2-4-1 5軸加工対応CAMソフトウェアの導入

① 歯車設計

全ての元となる歯車の設計を行なうためのソフトウェアを導入した。図 4-1 このソフトウェアはスパイラルベベルギヤに対応し、かつ歯形修正・歯すじ修正・歯当たり検証・歯面評価・歯形データの3D出力までの機能を有する。

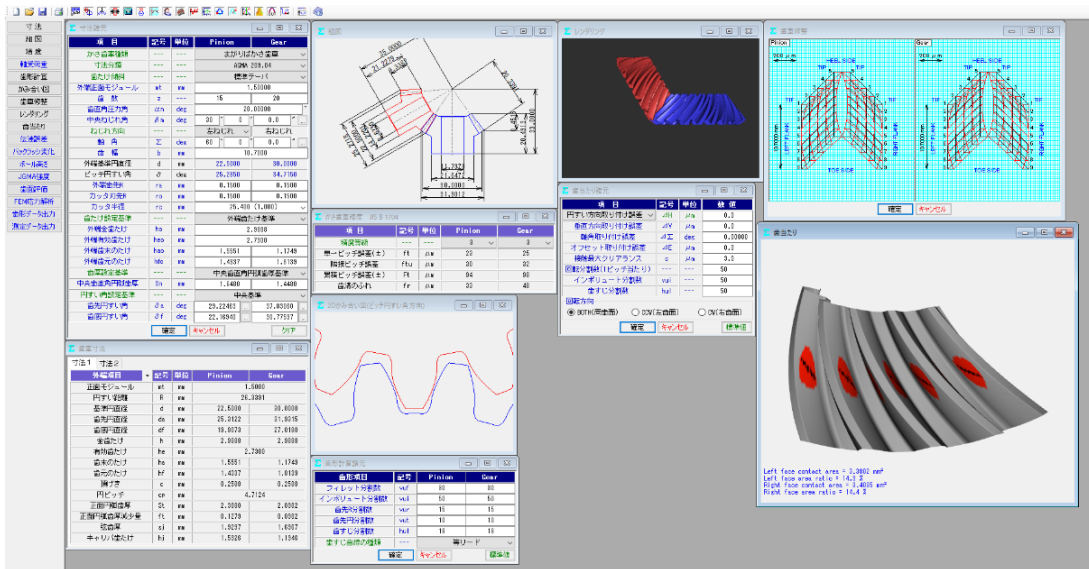


図 4-1 歯車設計支援ソフトウェアの出力画面

② 5軸加工対応CAMソフトウェアの選定

今回導入する5軸マシニングセンタは金型製作に用いることを目的としているため、加工時間よりも精度と面性状が重要である。それを念頭に導入コストも含めて検討を進め、世界No.1のシェアを持ち、金型の5軸加工はもちろん幅広い加工に対応する「Mastercam」を導入した。

2-4-2 5軸加工における課題の洗い出しと適正条件の検討

5軸マシニングセンタによる直彫り加工によって手磨き工程を廃止できる面性状を実現するため、CAMで作成する加工パスラインや切削条件の最適化、および使用する切削工具の最適化の研究を実施した。

① 最適な工具の選定と加工条件の設定、加工パスラインの最適化

項目【2-3-2】で実施した金型のテスト加工に際して、工具メーカー「MOLDINO」の協力を得て、最適な工具を選定し、加工条件を設定した。

それを元にCAMで作成する加工パスラインや切削条件の微調整を加えながらマスターギヤの試作を3回実施。図 4-2 それによって目標とする面性状の加工条件の叩き台を導き出したうえで実際の金型加工を2回繰り返し、各種条件の最適化を図った。図 4-3

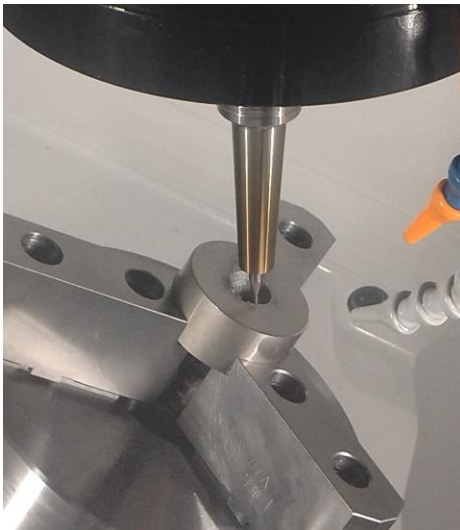


図 4-2 金型テスト加工の様子



図 4-3 金型テスト加工品の表面性状

2-4-3 適正条件のとりまとめ、および金型の製作と検証

① 見込み補正有り金型での鍛造

CAE 解析結果に基づいて見込み補正を加えた 3D 設計データで金型を製作し、鍛造実験を実施した。鍛造品の測定評価を行いながら最終的なプレス条件の最適化を進めたところ、金型の強度、およびプレス機の油圧能力による制限事項があり、ギヤ品質に求められるだけの十分な充填率を得るには、通常の密閉鍛造では不可能であることが判明した。

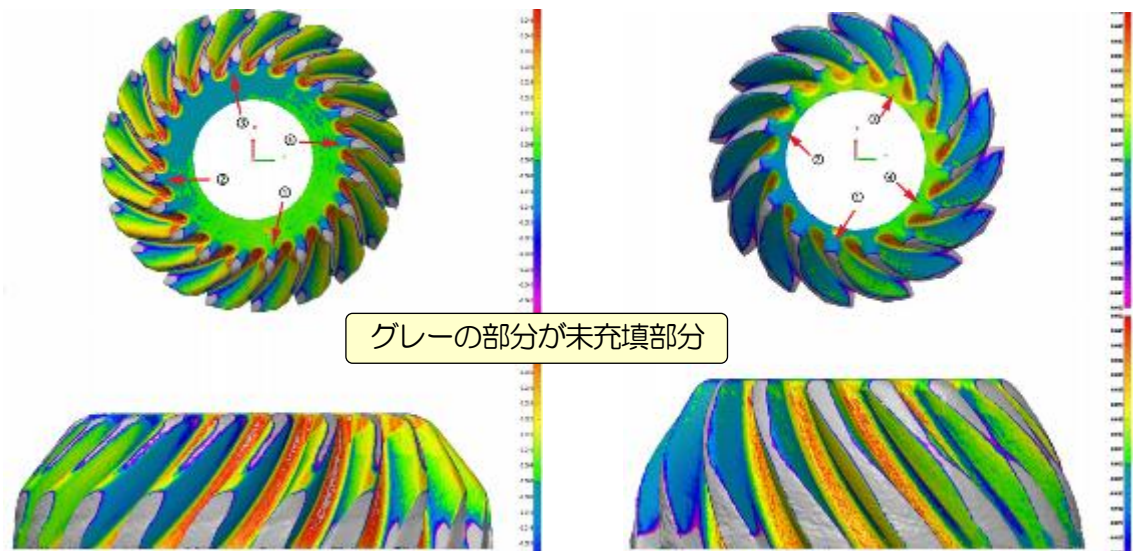


図 4-4 ベベルギヤの測定結果

図 4-5 ピニオンギヤの測定結果

② 分流鍛造工法の採用

冷間鍛造において、材料を複数の方向へ流すことで、加工力を抑えながらも材料の充填率を向上させることができる「分流鍛造工法」がある。これを行うには、プレス加工の途中で金型内部に材料を逃がすための空間を作る必要があるが、本事業で製作した多軸制御油圧機構を追加したサーボプレスであればそれが実現可能である。

分流鍛造工法を導入することによって、加工荷重の低減、充填率の向上、そして金型弾性変形量の低減も図ることが可能となる。

今回採用した分流鍛造工法の工程を図 4-6 に示す。①がプレス加工力、②がダイクッションによる型締め力、③が上側のロックアウトシリンダによる圧力である。

加工開始初期段階から、③には加工力に対抗する圧力を加えておき、ほぼ歯形が成形された下死点手前 0.5mm のところで油圧を抜く。油圧が抜けると上側ロックアウトシリンダが逃げた空間に材料が流れ込み、分流状態での成形となるので、完全な閉塞状態を回避して材料の充填を完了できる。油圧を抜くタイミングは、CAE 解析で加工荷重と充填のバランスを検討して導いた値である。

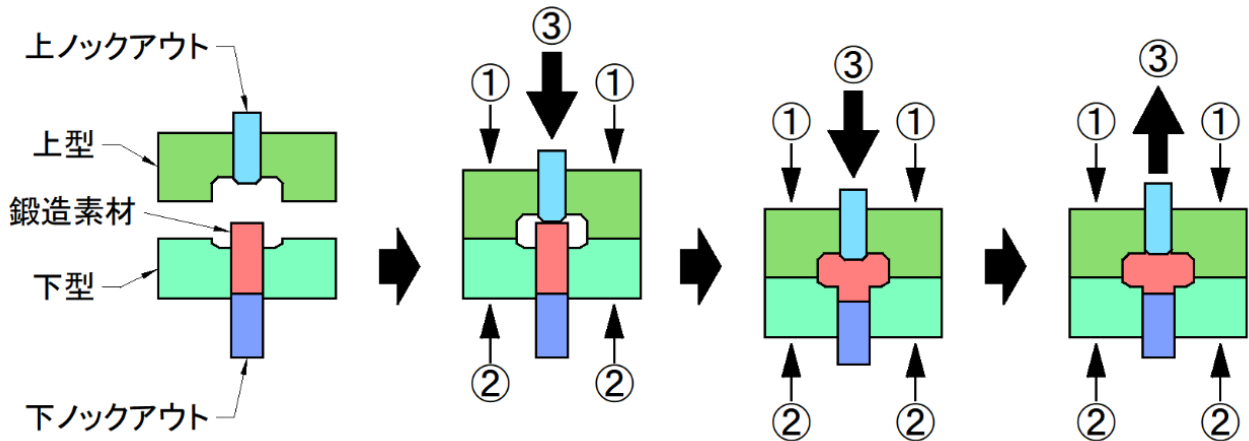


図 4-6 分流鍛造工法の工程

分流を行わない鍛造工程と分流を行った鍛造工程で、それぞれ CAE 解析を行って加工荷重を比較したものを図 4-7 に示す。横軸が加工ストローク、縦軸が荷重である。分流鍛造を用いることで、品質上必要な充填率 80% 時において、加工荷重が約 30% の低減されることで、金型の弾性変形量も目標とする鍛造品の精度 $\pm 0.04\text{mm}$ 以下となり、金型の最大主応力は約 3000MPa から約 1500MPa へと半減されるという解析結果となった。

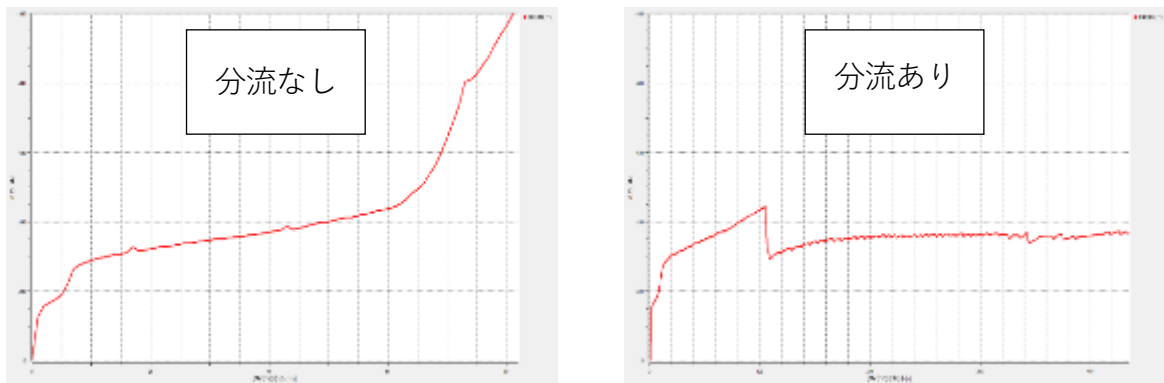


図 4-7 分流鍛造の有無による加工荷重波形の比較

③ 分流鍛造工法で製作したギヤの評価

前項に記載の通り、CAE 解析の結果、金型の金型の弾性変形量が減少するために見込み補正が不要となることが判明したため、見込み補正なしの金型（製品設計 3D モデルの通り）を製作し、鍛造実験を行ったものの測定結果を図 4-8、図 4-9 に示す。

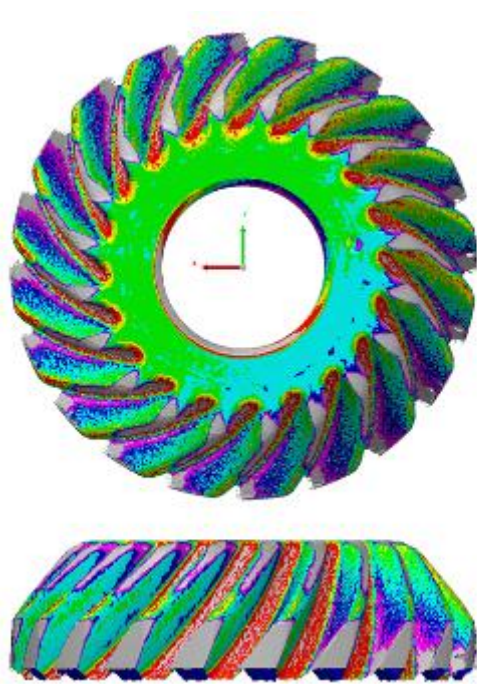


図 4-8 ベベルギヤの測定結果

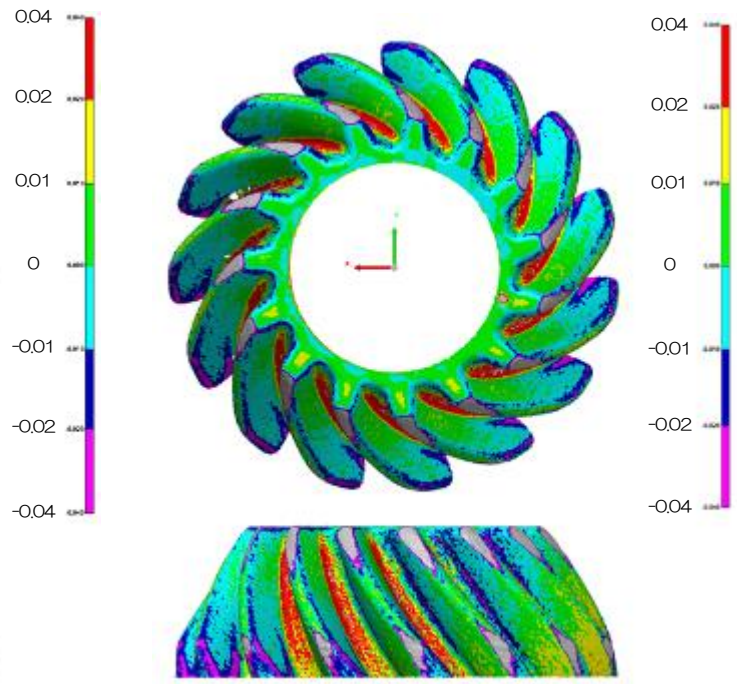


図 4-9 ピニオンギヤの測定結果

ベベルギヤ、ピニオンギヤ共に、歯当りに影響する歯面部分において、スパイラルギヤの製品設計 3D モデルと、実際にその金型で鍛造試作した品物の 3D 測定データとの差異で $\pm 0.02\text{mm}$ となり、精度の目標値 $\pm 0.04\text{mm}$ 以下という結果を得ることができた。

最終章 全体総括

「アドバイザーによる講評」

• 追浜工業株式会社 【野口 健一】

研究成果として、想定以上の成果が出たと思います。

今後はコスト、品質管理などの条件でも優位性を示して、量産化出来ることを期待します。

• 東京都立大学 【名誉教授 西村 尚】

目標を全て達成したことは素晴らしい。計画性、実行力ともに Go-Tech で最高評価ではないか。今回開発したサーボプレスは世界初であり、波及効果として板の成形にも使える。今後の課題としては、生産性（コスト）、型寿命（コスト）、歩留まり（コスト）がある。

• 株式会社アマダプレスシステム 【吉田 武志】

ボンデフリーとサーボプレス開発で協力させてもらった。高い技術力を評価する。鍛造と切削の比較評価は素晴らしいと思う。

• エムエスシーソフトウェア株式会社 【川口 竜太/山口 和樹】

プロジェクトの成功と精密な結果の達成に敬意を表します。

弊社は計測技術と CAE 技術を通じて、今後も皆様をサポートし続けます。

・ゼノーテック株式会社 【河野 正宏】

金型メーカーとしても興味深い内容であった。機会があれば今後も参加したいと考えている。得られた知見やデータを利用させてもらいたい。

・東京貿易テクノシステム株式会社 【池田 大悟】

三陽製作所の技術力の高さだけでなく発想力においても実力が発揮されたプロジェクトだった。ギヤ形状の高精度での計測・比較という形で参加できたことをうれしく思う。

・日本工作油株式会社 【松浦 佑弥／北山 樹】

ボンデ処理から油利用への転換は一步前進したと考えている。

・日本アイティエフ株式会社 【堀井 章伸】

今回の研究テーマは今までの冷間鍛造技術の概念を覆す、日本の製造業の未来を変えるかもしれないものだと考えており、3年間に渡る研究開発の結果、いよいよ事業化が見えてきていると感じている。実際に事業化になると、金型の耐久性向上が課題となるかと思うので、弊社は金型への表面処理という分野で今後も事業化に向けて貢献していきたいと考えている。

・株式会社浜銀総合研究所 【吉田 和朗】

冷間鍛造品の市場規模は着実に拡大しており、2024年（暦年）の生産金額は、前年比約9%増加の493億円と過去最高水準となっている。本研究開発による技術の積み重ねを活かし、幅広い分野・用途での実用化を目指していただきたい。

グローバル競争にさらされている日本の製造業において、安い労働力を基盤とした海外からの低コスト品の流入により従来工法での競争力維持はもはや限界を迎えており、工法転換によるコストダウンの模索がなされている。

「MADE IN JAPAN」ブランドの品質を維持しつつ、国際社会での価格競争に勝ち抜くためには、大胆な発想で製法技術を革新的に進化させ、工程数の削減や性能の向上などの研究開発を推し進める必要がある。

そのような背景を受け、本プロジェクトは、「高機能・高精度・低コスト・短納期・環境配慮を実現した、DXによる試作レス冷間鍛造品開発技術を確立すること」をテーマとしてスタートし、以下の結果を得ることができた。

① スパイラルギヤモデルによる検証実験

最終的に、CAE解析結果と実際に製作した鍛造品との差異は歯面部分で±0.02mm以下の結果が得られ、目標値±0.04mm以下を達成した。CAE解析における摩擦モデルについては、鍛造による塑性発熱を考慮して変動する摩擦モデルを反映したことで、自由表面の変形形状の予測が向上した。

② 試作金型の製作と精度検証

株式会社三陽製作所において、自社内で5軸マシニングセンタを用いた高硬度材の直彫り加工による金型製作が可能となる体制を確立でき、設計3Dデータと金型測定データとの差異で±0.01mm以下の結

果が得られ、目標値±0.02mm 以下を達成した。

③ 5軸加工における課題の洗い出しと適正条件の検討

直彫り加工による金型製作において、最適な工具および加工条件を設定し、加工パスライン最適化の研究を行った。製作した金型で鍛造テストを実施した結果、金型の手磨き工程なしでも問題なく成形可能であることを確認した。

④ 適正条件のとりまとめ、および金型の製作と検証

分流鍛造工法を導入することで、製品としての品質を満たす歯形部の充填率（金型との接触率）80%の時に、成型荷重で約30%、金型の最大主応力で約50%の低減を図ることができた。その効果として金型の弾性変形量も大幅に縮小されて見込み補正自体不要であることが推測できたため、見込み補正なしの最終金型を製作して分流鍛造を行い、鍛造品の評価を実施。設計 3D モデルと鍛造品の測定データとの差異で±0.02mm 以下という最終結果を得た。

本プロジェクトでは、アドバイザーを含めた参画機関全体での委員会を3年間通して毎年2～3回実施、研究開発機関（株）三陽製作所、横浜国立大学、神奈川県立産業技術総合研究所、よこはまティーエールオー(株)においては、毎月1回の定例会議および個別ミーティングや共同実験を行って、綿密な連携を図りながら研究開発を推進した。

CAE シミュレーションにおいて、(株)三陽製作所・横浜国立大学・神奈川県立産業技術総合研究所の3者で共通の塑性加工シミュレーションソフトを導入することで、相互の連携を深めるとともに相乗的な解析技術の向上が図ることができた。

またアマダプレスシステム(株)と共同で開発した4軸ハイブリッドサーボプレスによる新工法は、日本塑性加工学会の「技術開発賞」および日本鍛圧機械工業会の「MF 技術大賞」を受賞。

これらは産学連携による研究開発への支援事業である Go-Tech 事業の大きな成果であった。

事業化に向けた課題としては、①工程内全数検査による品質保証体制の構築、②自動化による製造コストの低減、③金型寿命の向上にある。①②については、今後も研究機関で連携しながら、2年以内に全数検査装置の開発やロボット導入による工程の自動化を遂行する計画である。③については、工具メーカーと共同で超硬金型の直彫り加工の研究に着手しているので、同様に今後も継続して推進していく。