

平成29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

「ステンレス製小物精密部品の低コスト量産を実現する

高度に温度管理された温間鍛造加工プロセスの実用化開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人鳥取県産業振興機構

< 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	6
1-3	成果概要	10
1-4	当該研究開発の連絡窓口	13
第2章	本論	
2-1	加工製品に最適な鍛造温度と加工工程の決定	
2-1-1	鍛造温度の決定	14
2-1-2	加工工程の決定	17
2-2	温間鍛造工程における温度管理	
2-2-1	金型、加工製品の温度管理	17
2-2-2	加工製品搬送中の温度管理	19
2-3	製品精度維持と高効率生産を実現する製造プロセスの構築	
2-3-1	製品精度の維持	20
2-3-2	高効率生産工程の構築	24
2-4	プロジェクトの運営管理	25
最終章	全体総括	
	まとめ	26
	研究開発後課題・事業展開	27

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) 開発の背景

コンピュータ制御により自動走行が可能となる次世代自動車に搭載される電子基板関連、再生医療などで注目される細胞・臓器の長期保管に必要なインキュベーション等の冷蔵機器などの分野で使用される小物精密部品は、耐食性や一定の硬度、強度と高い寸法精度が要求される。重大な故障の誘発原因となる材料の磁性については特に細心の注意が払われている。

クロム (Cr) 18%、ニッケル (Ni) 8%を含み「18-8 ステンレス」として知られる SUS304 は入手しやすく、価格が安いと、耐食性と強度が必要な所に使用されている。ただし、鍛造加工の様な冷間で強加工を施すと本来の組織である軟らかいオーステナイト組織が硬いマルテンサイト組織に変態し、硬度が上がってしまう。これを加工誘起マルテンサイト変態といい、SUS304 の様な準安定オーステナイト鋼に現れる現象である。硬化したものは加工後、溶体化処理として 1050℃に加熱するとオーステナイト組織に戻る為、軟化し、再度加工が可能となる。これを繰り返すと加工できるが、費用と期間がかかってしまう。従来の鍛造加工ではこの方法が一般的であった。しかも、強度が高いため、金型への負担が高くなり、精密な成形が出来難い。そのため初めから切削加工を選択するケースが多い。準安定オーステナイトステンレス鋼の特長としては加工硬化によって、硬度、強度を上げてバネ材として使用しているが加工誘起マルテンサイトになっているため当然耐食性は落ちている。磁性を取る方法として、溶体化処理があるが、磁性は取れるものの軟化してしまい硬度を上げ強くしたいという目的は達成できない。

一方、二相ステンレス鋼の SUS329J1 は耐食性が良い素材であるが硬度、強度が非常に高いため冷間による絞り加工では形状精度が悪く、また鍛造加工では金型の強度不足のため加工できない。このため切削加工による仕上げを必要としていた。

以上、これら材料は難加工材であるため、切削や研削などの加工が主流であった。しかし、加工に時間を要し、生産性が悪く、コストが高い等の問題を抱えていた。このため、難加工材の生産性（速度）を改善するための新たな加工方法が求められている。

2) 開発の動向

従来の温間加工の研究は絞り加工に利用するものと絞り加工後、成形状態が悪い箇所があるため加熱をして成形するものであり、加工度も本研究の様な素材の加工限界近くまで上げるものではなく、軽度な加工に留まっている。そのため金型への負担は少ない。近年では SUH 耐熱鋼を対象としたレーザー照射による局所加熱を組み合わせる順送温間複合加工を行う取り組み等が行われている。この方法では設定温度の加熱温度に達するまでに時間を要する等、生産性（速度）の面での課題が報告されている。

株式会社寺方工作所では本研究の基礎となる取り組みとして、SUS304 を対象とする厚板材の温間プレス加工技術について検討した（鳥取県素形材産業高度化支援補助事業、事業期間：平成 25～26 年度）。

その結果、被加工材が 200～400℃の温度域で、最高加工度 90%の鍛造加工に成功した。また、強加工にも関わらず被加工材は磁性を帯びず、加工後の製品形状も良好であった。金属の内部を加熱する装置を内蔵しているダイセットを使い、温間鍛造をするものである。熱がプレス機に伝わらない様に断熱材で断熱しているが、一般的な断熱材ではステンレスを加工すると断熱材が破損してしまい加工できなかった。断熱の方法を事前研究にて改良することによってステンレスが加工できるようになった。ただし、断熱材の強度を上げると断熱の効果は下がるため、単ショットでの加工はできるようになったが、連続生産するためには、断熱構造の工夫、例えばプレス機の金型下面付近の冷却等の新たな工夫が必要などの問題点も判明した。

3) 開発の高度化目標及び技術的目標値

- ・新たな機能の実現

SUS304 に代表される準安定オーステナイト系ステンレス鋼は溶体化処理によってオーステナイト組織となり、非磁性であり、耐食性が良い材料として広く使用されている。ただしオーステナイト組織は軟らかく、硬さと強さが必要な個所には使用されていない。この用途で使用するには準安定オーステナイト系ステンレス鋼特有の冷間加工で加工すると、加工誘起マルテンサイトに変態して硬いマルテンサイトとなる。この加工硬化を利用する方法が一般的である。バネ等に使用されているステンレス鋼もあるが、強度が高く加工が難しい。加工誘起マルテンサイトによって硬化された組織は磁化してしまうため磁化を嫌う用途には溶体化処理を行うことで非磁性となるが軟化してしまう。硬度だけでは表面に硬質クロームメッキをする、CrN、TiN、TiCN 等のコーティングをする、窒化をする等の方法があるが内部は軟らかいという問題がある。強度を上げるためには磁性を犠牲とする。非磁性で高硬度、高強度で製品が出来ないことが課題となっている。鍛造加工をしても上記の課題が解決できる加工法の実現と製品が求められている。本研究により高度に温度管理された温間鍛造加工プロセスを開発するものである。

- ・生産性・効率化の向上、低コスト化

二相ステンレス鋼の SUS329J1 は耐食性が良く過酷な条件下で使用されている。しかし、硬度と強度が非常に高く冷間での絞り加工では、高硬度と伸びが少ないため角部が割れるなど要求通りの製品にならない。これとともに鍛造では強度が高いので金型が破損してしまう。熱間加工では加工できるが精度が悪く使用できない。唯一加工できる方法は切削加工であるが生産性が悪いのとコストが高いという課題がある。対象としている製品は多量に必要としているため、組立品としての価格に見合った当製品価格としなければならないため安価で多量に生産できる加工法が求められている。切削加工では1時間 60 個程度だったものを温間鍛造プロセスにトランスファー装置を組み込み自動化とすることで 1 時間に 600 個と約 10 倍とし、納期短縮にも繋げることとする研究である。

- ・当該技術が持つ物理的な諸特性の向上

SUS304 の場合は 200℃～400℃の間で加工すると磁性が無く高硬度、高強度になるという事が事前の研究でわかっており、また精度良く出来るという事も確認できた。ただし単発での加工であった。製品を作るためには再度加熱炉に入れて加工する等の方向で製作していた。加工温度が変化すると熱膨張率の関係で冷却した時の寸法が変化する。そのため加工温度は一定にする必要がある。従来の温間加工は製品の持っている熱容量で加工するため、小物製品は出来ない。また、温度コントロールが出来なくて精度が悪い。そのため安価で多量に作る方法としてトランスファープレスにて製作する方法を取り、非磁性の製品を精度よく製作できる方法として高度に加工する温度と搬送中の温度管理をする加工プロセスを開発する。さらにカップ状の場合の内部は殆ど切りくずとなるため材料歩留りは 30%となるが、温間鍛造の場合は 70%と大幅に改善できる。

表 1-1-1 開発課題と目標値

開発課題	サブテーマ	目標値	担当	取り組み項目
[1] 加工製品に最適な鍛造温度と加工工程の決定	[1-1] 鍛造温度の決定	各加工工程の鍛造温度の決定	■寺方工作所 ○鳥取県産業技術センター	■実機での温間プレステスト ○金属加工組織の定性・定量評価
	[1-2] 加工工程の決定	製品形状の完成	■寺方工作所 ○鳥取県産業技術センター	■製品形状の鍛造 ○被加工品の機械的特性、磁気的特性の測定
[2] 温間鍛造工程における温度管理	[2-1] 金型、加工製品の温度管理	設定温度±30℃	■寺方工作所 ○鳥取県産業技術センター	■加熱炉、金型加熱装置の温度管理 ○製品、金型の温度分布シミュレーション
	[2-2] 加工製品搬送中の温度管理	目標値より 30℃以内の温度低下に留める	寺方工作所	放熱させない仕組みの開発 搬送工程中の製品温度測定と制御
[3] 製品精度維持と高効率生産を実現する製造プロセスの構築	[3-1] 製品精度の維持	上面角 R0.1 以下	■寺方工作所 ○鳥取県産業技術センター	■製品図面どおりの成形 ○量産試作品の機械的・磁気特性評価、金型表面の観察評価
		平面度 0.03 以下 (0.02 以下)		
		円筒形上の肉厚 1.1mm の成形		
	[3-2] 高効率生産工程の構築	1 分間に 10 個以上の連続生産	寺方工作所	1 分間に 10 個以上の連続生産

4) 開発の概要

ステンレス製の小物精密部品

加熱－搬送－加工に至る一連の工程に高度な温度管理を施したトランスファー連続温間鍛造加工プロセスを構築し、従来の加工技術では不可能であった、ステンレス等難加工材の小物精密部品の低コスト量産プロセスを確立する。

表 1-1-2 研究開発の目標

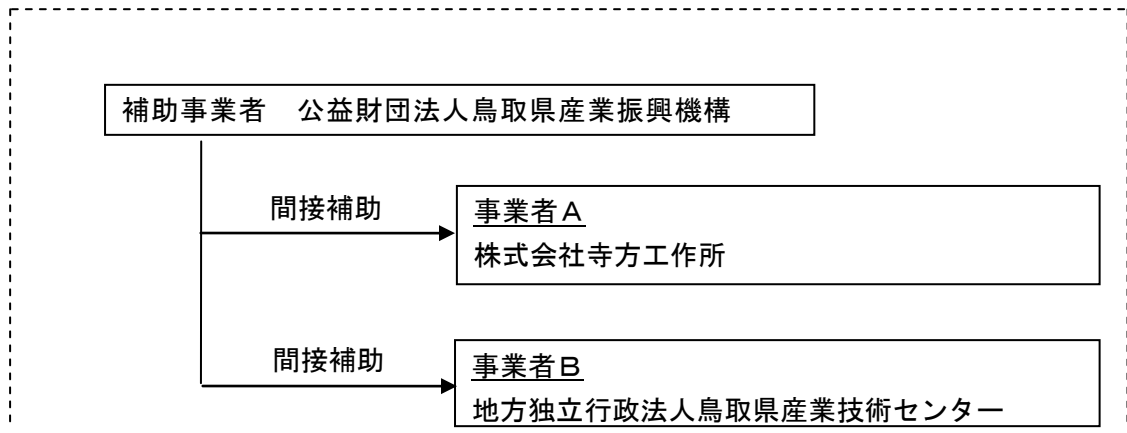
項目	目標値	各年度目標
[1-1]鍛造温度の決定	・ 素材加熱温度と金型加熱温度を決定	平成 27 年度 素材、金型共に最適な加熱温度を決定する。
		平成 28 年度 被加工材の形状によって温度低下の速度が異なるため、小さく薄いものはより高い温度に加熱する必要があるその温度を決定する。 テフロンを混合した加工油を使用すると焼付き等が抑制されることがわかり、テフロンの配合率を検討する。 これらを踏まえ、鍛造した製品について、金属加工組織、結晶相を調査し、要請される製品品質をもたせる鍛造温度を決定する。
[1-2]加工工程の決定	・ 製品形状の完成	平成 27 年度 温度、形状、周辺条件を何パターンか試すことにより必要条件をみだす工程を決定する。
		平成 28 年度 初年度の鍛造実験結果をもとに温間鍛造金型を製作し、連続加工による試作を実施。 試作品の磁気特性・機械的強度特性を調査・評価する。 製品品質をもとに、形状を鍛造するための工程を決定する。
[2-1]金型、加工製品の温度管理	・ 設定温度±30℃	平成 28 年度 目標値とする温度域に設定するために必要な条件を温度分布シミュレーションおよび実測実験を実施。 素材加熱炉、金型加熱装置といった狙い温度にて加工するために必要な設備を設計し、製作する。

<p>[2-2]加工製品搬送中の温度管理</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 目標値より 30℃ 以内の温度低下にとどめるシステムの設計 	<p>平成 29 年度</p> <p>[1-1][1-2]の実験により決定した温度にて搬送、加工、再加熱などを行い、温度測定を行う。実際の 3 工程加工による温度上昇+搬送中の温度低下を管理し、量産を見込んだ温間鍛造加工プロセスを構築する。</p>
<p>[3-1]製品精度の維持</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金型材料の選定 ・ 金型コーティングの決定 ・ 加工油の決定 	<p>平成 28 年度</p> <p>製品精度を維持するための金型材質の選定、金型へのコーティング処理、加工油の検討を実施。これにもとづき、製品を試作し電解研磨エッチング装置による組織観察、磁気特性評価装置による透磁率の測定、結晶相同定や硬さ試験による機械的特性の評価を行い、製品の品質を評価する。これにより、切削加工では硬度不足、粉末成形では強度不足といったその他の加工方法では実現できない特性を補うことができる優位性を示す。</p> <p>平成 29 年度</p> <p>これまでの取組で製作した 3 つの連続鍛造金型および温度管理システムをもちいた試作品の製造を実施する。製品に要求される精度、機械的特性、磁気的特性、および組織を調べ品質の評価を行う。金型の評価としては、前年度の実験により決定した表面処理や加工油を使用した鍛造後の金型表面の観察を行い、金型寿命を維持する管理方法を検討する。</p>
<p>[3-2]高効率生産工程の構築</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 搬送装置の設計・構築 	<p>平成 28 年度</p> <p>素材の温度低下を最小限にし、かつ温度を維持するシステムを設計・構築する。コスト低減を目指した連続生産のための搬送方法・チャッキング方法・断熱方法などを研究する。</p> <p>平成 29 年度</p> <p>28 年度に構築した搬送装置を用いて温間搬送の実証実験を行う。具体的には被加工材の置き方及び位置決め、高温雰囲気による機械類への影響などを解決するための検証を行う。生産に関しては目標となっている 1 分間に 10 個以上の連続生産を実現する。</p>

1 - 2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 履行体制図

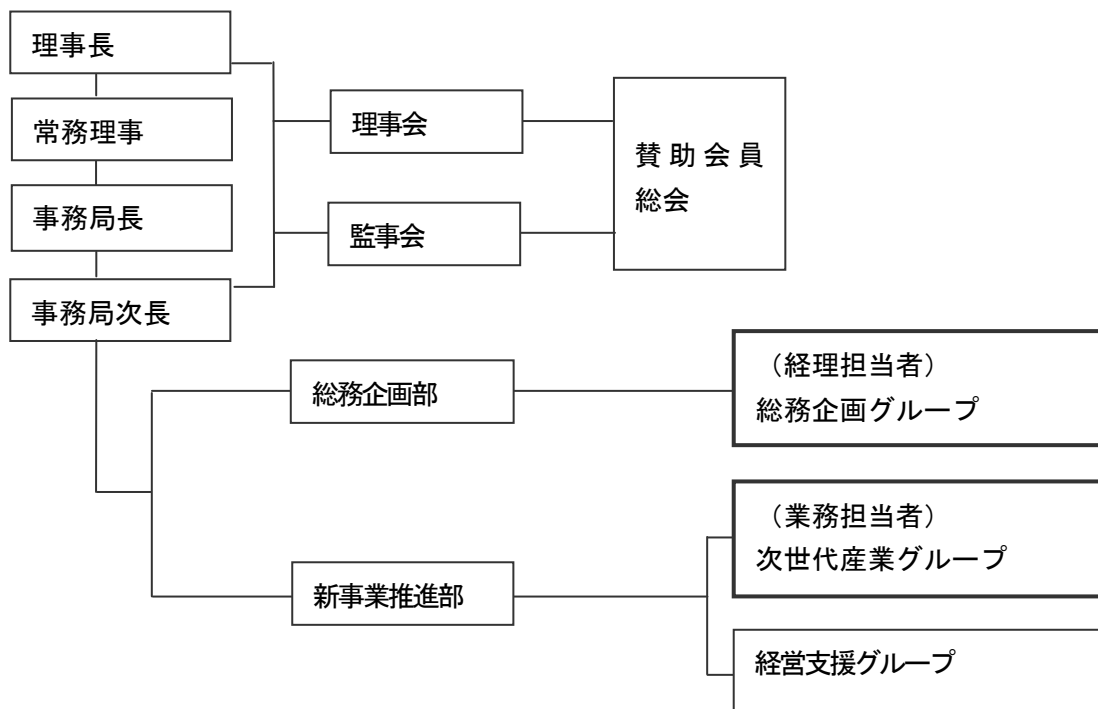


総括研究代表者（P L） 氏 名： 寺方 泰夫 組織名： 株式会社寺方工作所 役 職： 代表取締役	副総括研究代表者（S L） 氏 名： 松田 知子 組織名： （地独）鳥取県産業技術センター 役 職： 機械素材研究所無機材料科主任研究員
--	---

2) 管理体制

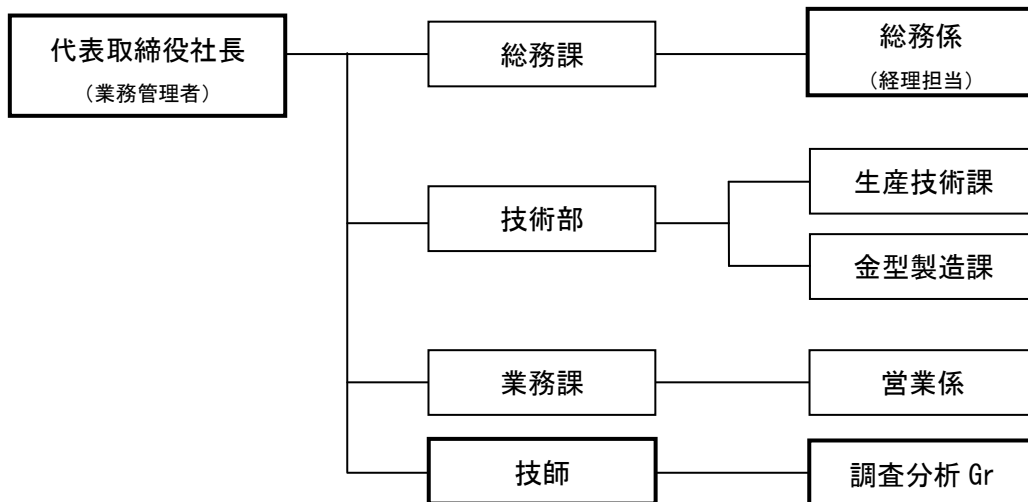
①事業管理者

[公益財団法人鳥取県産業振興機構]

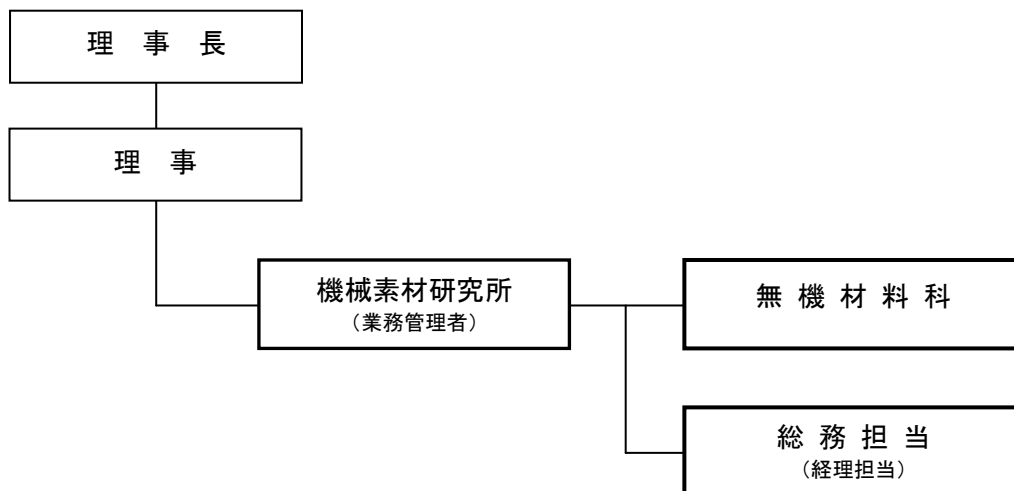


② (再委託先)

株式会社寺方工作所



地方独立行政法人鳥取県産業技術センター



(2) 管理員、研究員及び補助員

【事業管理者】 公益財団法人鳥取県産業振興機構

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
山崎 均	新事業推進部長	事業管理業務
長井 和広	新事業推進部次世代産業Gグループ長	事業管理業務
井上 佳美	総務企画部総務企画G副グループ長	事業管理業務
小坪 一之	新事業推進部次世代産業Gコーディネーター	事業管理業務

【間接補助事業者】

②研究員

株式会社寺方工作所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
寺方 泰夫	代表取締役	1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2
田中 伸治	営業課 チーフ	1-2, 3-1
山田 博昭	技術部金型製造課 チーフ	1-2, 3-1
野田 峰行	技術部金型製造課 リーダー	1-2, 3-1
大西 正明	技術部金型製造課 チーム長	1-2, 3-1
倉繁 良文	技術部金型製造課 課員	1-2, 3-1
種部 和彦	技術部金型製造課 課員	1-2, 3-1
森本 友和	技術部金型製造課 課員	1-2, 3-1
入江 映三千	技術部金型製造課 課員	1-2, 3-1
山田 良一	技師	1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2
岩田 成弘	調査分析Gr 課員	1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

地方独立行政法人鳥取県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
松田 知子	機械素材研究所 無機材料科 主任研究員	1-1, 1-2, 2-1, 3-1
玉井 博康	機械素材研究所 無機材料科 副所長	1-1, 1-2, 2-1, 3-1
塚根 亮	機械素材研究所 無機材料科 研究員	1-1, 1-2, 2-1, 3-1
今岡 睦明	機械素材研究所 無機材料科 科長	1-1, 1-2, 2-1, 3-1
田中 俊行	機械素材研究所 無機材料科 研究員	1-1, 1-2, 2-1, 3-1

※実施内容番号は実施計画番号による

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人鳥取県産業振興機構

(経理担当者) 総務企画部総務企画G副グループ長 井上 佳美

(業務管理者) 新事業推進部次世代産業グループ 小坪 一之

(間接補助事業者)

株式会社寺方工作所

(経理担当者) 総務課 総務課セクションチーフ 石見 幸子

(業務管理者) 代表取締役社長 寺方 泰夫

地方独立行政法人鳥取県産業技術センター

(経理担当者) 機械素材研究所総務担当主事 西村 裕子

(業務管理者) 機械素材研究所長 草野 浩幸

(4) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職	備考
井野 達也	株式会社生方製作所 取締役 CSセンター長	アドバイザー
水谷 克人	株式会社NEXAS 副社長	アドバイザー
大東 弘幸	美和ロック株式会社 製品開発部部长	アドバイザー

1-3 成果概要

平成 27 年度の目標進捗状況は表 1-3-1 に示す結果となった。

表 1-3-1 H27 年度 目標進捗状況

テーマ名	サブテーマ名	目標 (数値、内容)	実施結果
[1] 加工製品に最適な鍛造温度と加工工程の決定	[1-1] 鍛造温度の決定	各加工工程の鍛造温度の決定	搬送中の被加工材の温度低下を考慮し、また金型設定温度も加工後の被加工材の温度低下を考慮し最適温度を決定できた。X 線回折装置を用いた結晶相分率の定量および金属加工組織観察を行い設定温度の妥当性を裏付けした。
	[1-2] 加工工程の決定	製品形状の完成	予備実験金型 一型を用いて製品形状の鍛造を行った。所定の温度で鍛造し、圧下率の異なる試験片の硬さ試験を実施し、機械的強度を評価した。また、同様のサンプルの透磁率を測定し、磁気特性を評価した。
[2] 温間鍛造工程における温度管理	[2-1] 金型、加工製品の温度管理	設定温度 $\pm 30^{\circ}\text{C}$	素材加熱装置、金型加熱装置、保温機構の構想設計を完了した。温間鍛造工程における素材および金型の温度変化をシミュレーションを用いて予測した。

平成 28 年度の目標進捗状況は表 3 に示す結果となった。

表 1-3-2 H28 年度 目標進捗状況

テーマ名	サブテーマ名	目標 (数値、内容)	実施結果
[1] 加工製品に最適な鍛造温度と加工工程の決定	[1-1] 鍛造温度の決定	各加工工程の鍛造温度の決定	初年度の実験結果を踏まえ、被加工材の形状による温度低下を抑えるため、素材・形状に適切な鍛造温度を決定した。
	[1-2] 加工工程の決定	製品形状の完成	昨年度の試作金型にもとづき、スクレーパーおよびハウジングともに 3 工程分の連続鍛造金型による工程を決定し、金型を製作した。 この金型で加工した製品の磁気特性・機械的強度特性を評価した。
[2] 温間鍛造工程における温度管理	[2-1] 金型、加工製品の温度管理	設定温度 $\pm 30^{\circ}\text{C}$	シミュレーションで得られた結果をもとに、薄板の場合、搬送も含めた加工工程において、再加熱を行う必要が示されたため、実際の工程に再加熱装置を設置した。 また、素材加熱装置、金型加熱装置、保温機構についての構想設計にもとづき、これらを製作・設置し、システムを構築した。
	[2-2] 加工製品搬送中の温度管理	目標値より 30°C 以内の温度低下にとどめる。	今年度、薄板素材の搬送・加工工程を仮想した実験において、素材の温度低下についてデータを取得した。これと、初年度の実験結果にもとづき、狙った最適な加工温度を維持するためのシステムを構築した。
[3] 製品精度維持と高効率生産を実現する製造プロセスの構築	[3-1] 製品精度の維持	金型の材質選定 金型コーティングの決定 加工油の決定	金型材質については、超硬材では鍛造時に破損するため、粉末ハイス鋼 (ASP60) とした。 金型へのコーティングには、TiCN を採用した。 加工油には、テフロン粒子を混合することで、鍛造時の焼付き抑制および良好な表面粗さを得ることができた。
	[3-2] 高効率生産工程の構築	搬送装置の設計および構築	高効率生産工程の構築をめざし、連続生産のための搬送方法・チャッキング方法・断熱方法を検討し、搬送システムを設計・構築した。

特許出願

発明名称「非磁性高強度ステンレス鋼加工品およびその製造方法」にて特許出願を行った。

平成 29 年度の目標進捗状況は表 1-3-1 に示す結果となった。

表 1-3-3 H29 年度 目標進捗状況

テーマ名	サブテーマ名	目標 (数値、内容)	実施結果
[2] 温間鍛造工程における温度管理	[2-2] 加工製品搬送中の温度管理	設定温度±30℃	2年間の研究において構築された加工温度を維持するためのシステムを実際に運用した。実際に稼働させて工程毎の温度低下の実測を行った。素材加熱炉からプレス内の搬送部に素材を移動させた後、加工ステージ上で一定の温度となり、プレス加工の1工程目、2工程目、および3工程目の温度低下のデータを取得し検証を行った。その結果、温度低下は目標値である30℃以下を達成した。
[3] 製品精度維持と高効率生産を実現する鍛造プロセスの構築	[3-1] 製品精度の維持	上面角 R0.1 以下 平面度 0.03 以下 円筒形上の肉厚 1.1mm の成形	製品に要求されている精度の検証を行った。目標値の数値に対して 100%の達成率となった。形状および精度の点においては、客先の要求に満足いただけるものが完成した。金型については、前年度までの実験により決定した材質、表面処理、および加工油の条件で、簡易的に金型寿命のテストを行った。その結果、合計 6000 ショットの加工が可能であった。金型の形状を観察したところ、初めの形状から 6000 ショット加工後も変化が無く、寿命向上にも効果があったと判断できた。
	[3-2] 高効率生産工程の構築	1 分間に 10 個以上の連続生産	実際に構築された搬送システムを稼働させ、搬送試験を行った。その結果をもとに、プレス内引き込み、プレス内工程搬送、プレス加工の見直し及び改良を行った。その結果、プレス内引き込みに 2.5 秒、プレス内工程搬送に 3 秒、プレス加工に 0.5 秒となり 1 個辺りの生産時間としては 6 秒となった。生産能力が目標値の 1 分間に 10 個 (60 秒÷6 秒=10 個) としていたが、実測データより 10 個 (60 秒÷6 秒=10 個) となり目標値を達成した。

特許出願

発明名称「非磁性高強度ステンレス鋼加工品及びその製造方法並びにその製造装置」にて国際特許出願を行った。

国際特許出願番号 PCT/JP2018/002653

国際特許出願日 2018 年 1 月 29 日

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関

法人名：公益財団法人鳥取県産業振興機構 代表者役職・氏名：代表理事理事長 中山 孝一 住所：〒689-1112 鳥取県鳥取市若葉台南7丁目5番1号
連絡担当者名：コーディネーター 小坪 一之（新事業推進部） Tel:0857-52-6704 Fax:0857-52-6673 E-mail:kkotsubo@toriton.or.jp

実施機関（法認定機関）

法人名：株式会社寺方工作所 代表者役職・氏名：代表取締役 寺方 泰夫 住所：〒689-2103 鳥取県東伯郡北栄町田井175
連絡担当者名：調査分析グループ 岩田 成弘 Tel:0858-36-4311 Fax:0858-36-4268 E-mail:chousabunseki@terakata.co.jp

第2章 本論

2-1 加工製品に最適な鍛造温度と加工工程の決定

ステンレス製の小物精密製品加工に最適な鍛造温度と加工工程を確立するために、以下の項目に取り組んだ。

2-1-1 鍛造温度の決定

オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) 及び二相系ステンレス鋼 (SUS329J1) のそれぞれについて、加工する製品の大きさ・形状に関する最適な温間加工条件を調査した。被加工材の金属組織、機械的特性、磁気特性を評価し、加工誘起マルテンサイトの定性・定量評価を行った。加工度と各物性の結果から加工工程における鍛造温度を決定した。

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 丸棒材の鍛造実験と物性評価

鍛造するときの素材を初期厚さからつぶした量の割合を圧下率という。図 2-1-1-1 に、厚さ 10 mm から 7 mm につぶした時の素材の模式図を示す。この時の圧下率は 30%となる。

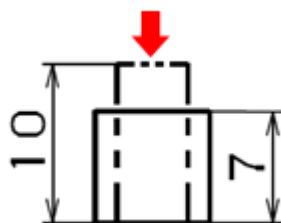


図 2-1-1-1 圧下率説明図

本実験では、冷間 (素材常温、金型常温) および温間 (素材 450°C、金型 250°C) で SUS304 丸棒材の鍛造を行った。図 2-1-1-2、3 にそれぞれ冷間および温間で鍛造した SUS304 試験片を示す。



図 2-1-1-2 冷間鍛造サンプル (圧下率は左から 5、10、15、20、25、30%)



図 2-1-1-3 温間鍛造サンプル (圧下率は左から 15、20、25、30、40、50、60%)

(1) 硬さの評価

鳥取県産業技術センター機械素材研究所所有のマイクロビッカース硬さ試験機（ミットヨ HM-220D）を用いて、冷間および温間鍛造した SUS304 試験片の硬さを評価した。鍛造実験には、SUS304 引抜材を使用した。

図 2-1-1-4 に、冷間および温間鍛造した SUS304 試験片の表面および内部の圧下率に対するビッカース硬さの変化を示す。比較のため、鍛造前の SUS304 引抜材（■）とその固溶化処理材（■）の硬さを示す。

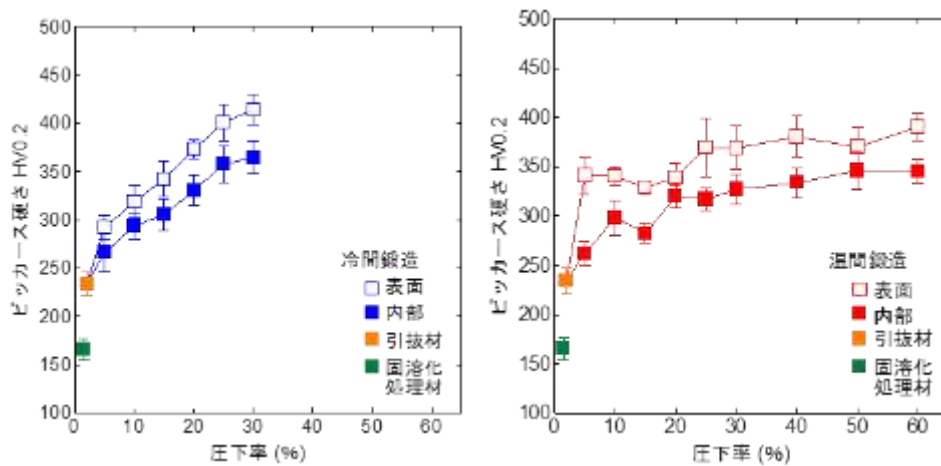


図 2-1-1-4 SUS304 試験片の表面と内部のビッカース硬さ

冷間鍛造試験片の表面・内部のビッカース硬さは、圧下率の増加とともに大きくなる。温間鍛造では、試験片内部の硬さは、圧下率の増加とともに 260 ~ 345 まで増加している。一方、試験片表面の硬さは、約 350~400 となり、安定した硬さが得られている。

冷間と温間を比較すると、温間鍛造では圧下率 5% と 60% の時、表面硬度に差がない。また、圧下率 5% の試験片の表面と内部で、ビッカース硬さに約 70 の差がある。これらは、わずかな圧下率でも内部の硬さは低く、表面の硬さは高いものができることを示している。今後、表面硬度のみを必要とする製品を鍛造するにあたって、本実験で示された結果は、新たな表面硬化法として大いに期待することができる。

(2) X線回折測定による加工誘起マルテンサイト量の定量

X線回折装置を用いて冷間および温間鍛造した SUS304 の加工誘起マルテンサイト相の相分率 ($V\alpha'$) を定量的に評価した。

測定には、鳥取県産業技術センター機械素材研究所所有の X線回折装置（リガク UltimaIV）を使用した。表 2-1-1-1 に測定条件を示す。

表 2-1-1-1 X線回折測定条件

管球	Cu-K α
検出器	半導体 1 次元検出器
走査速度	10 ° /min
走査角 (2 θ)	70 ~ 95°

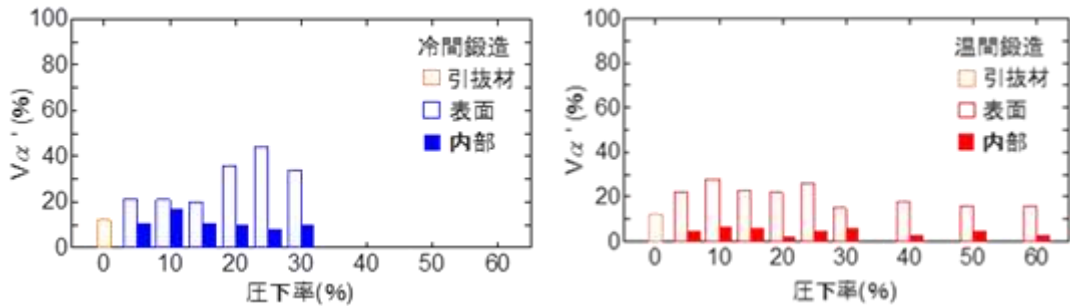


図 2-1-1-5 X線回折測定による試験片の表面と内部の加工誘起マルテンサイト相の相分率

図 2-1-1-5 に、冷間および鍛造した SUS304 試験片の表面および内部の加工誘起マルテンサイト相の相分率 ($V\alpha'$ (%)) を示す。

冷間鍛造材表面の $V\alpha'$ は、圧下率とともに増加している。温間鍛造材の $V\alpha'$ は圧下率によらずほぼ一定である。表面の $V\alpha'$ は 20%前後、内部の $V\alpha'$ は 10%弱であり、表面に加工誘起マルテンサイト相が多く発生している。出現した加工誘起マルテンサイト量と内部硬さに関係があることがわかる。本結果から、温間鍛造材の表面および内部の硬さの違いは、加工誘起マルテンサイト相の出現率の違いによるものであることがわかった。

(3) 磁気特性の評価

平成 27 年度本事業の補助金を受けて導入した磁気特性評価装置を用いて、冷間および温間鍛造した SUS304 試験片の透磁率を定量的に評価した。

オーステナイト系ステンレス鋼は非磁性材料であり、透磁率は $\mu \leq 1.005$ である¹⁾。

図 2-1-1-6 に、冷間および温間鍛造した SUS304 試験片について透磁率の測定結果を示す。鍛造前の引拔材および固溶化処理材の透磁率は、ともに $\mu = 1.005$ である。

冷間鍛造した SUS304 試験片では、圧下率の増加とともに、表面および内部の透磁率は、 $\mu = 1.008 \sim 1.35$ まで上昇した。一方、温間鍛造した SUS304 試験片では、圧下率の増加によらず、その透磁率は $\mu = 1.004 \sim 1.007$ の範囲で一定である。

図 2-1-1-4 では、温間鍛造材の表面に 20%前後、内部に 10%弱の加工誘起マルテンサイト相が出現していることが示されていた。試験片の一部が加工誘起マルテンサイト相に変態しても、その割合が 10 ~ 20%程度の場合には、磁石に反応するような透磁率を呈さないことがわかった。

本結果から、温間鍛造では、SUS304 に磁性を発現させることなく、高い圧下率での加工が可能であることが示される。

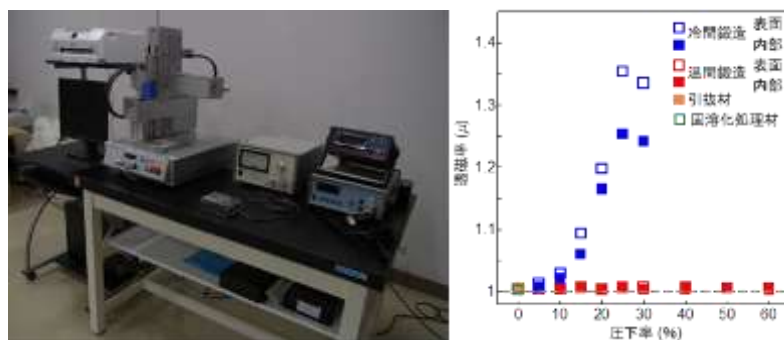


図 2-1-1-6 SUS304 試験片の圧下率 (%) に対する透磁率の変化

2-1-2 加工工程の決定

スクレーパーの工程設計

試作により工程を決定した。図 2-1-2-1 に工程図を示す。

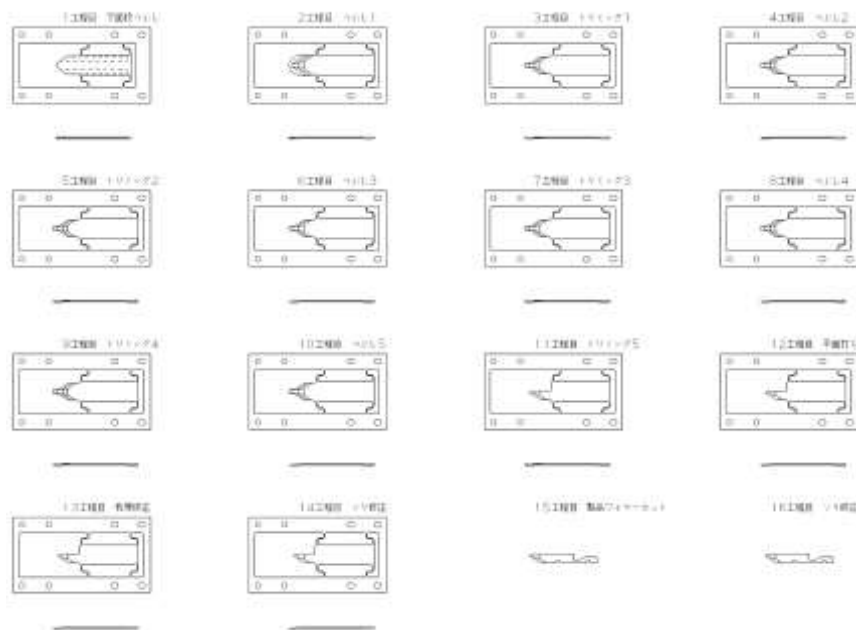


図 2-1-2-1 スクレーパー成型工程図

ハウジングの工程設計

素材から 3 工程でハウジングの成型を完成させることができた。川下企業より形状の変更依頼があり図 2-1-2-2 に示すような形状及び工程にて鍛造加工した。

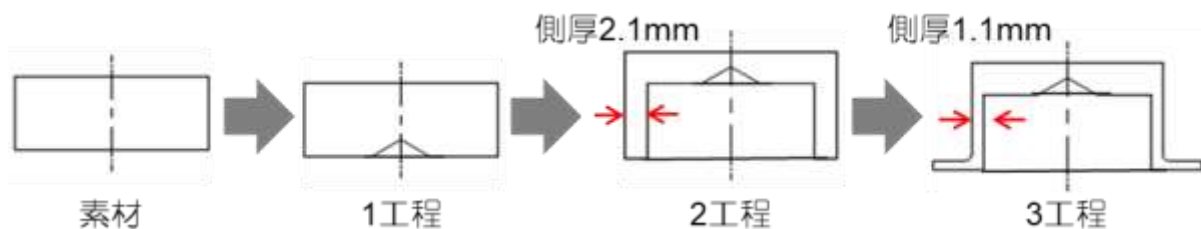


図 2-1-2-2 ハウジング成型工程図

2-2 温間鍛造工程における温度管理

素材加熱温度と金型加熱温度の決定をしたが、加工中、搬送中の温度低下の懸念があり、温度低下をどの程度まで許せるか、また途中で再加熱をする必要があるかを加工する製品に合わせて条件を決定した。

2-2-1 温間鍛造工程における温度管理

搬送時と加工時の実測不能な素材及び被加工材の温度を予測するため、事前シミュレーションを行い、素材加熱システム電気炉、金型加熱装置及び保温装置の構築を行った。

1) 加工工程における素材の温度変化シミュレーション

これまでに決定した鍛造温度、加工工程の条件をもとに、スクレーパー成型工程における素材の初期加熱から温間鍛造最終工程の間における素材の温度変化をシミュレーションを用いて予測した。

図 2-2-1-1 に、トランスファープレスとロボットアームによる素材搬送模式図を示す。

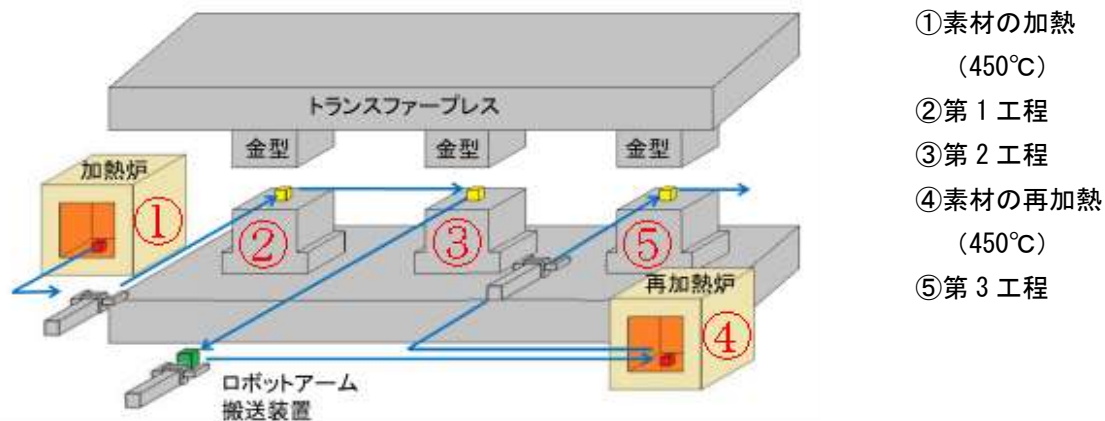


図 2-2-1-1 トランスファープレスとロボットアームによる素材搬送時の模式図

2) 素材加熱システム 電気炉 の構築

素材を設定温度まで加熱し量産に対応できる電気炉 (図 2-2-1-1①) を構築するため、炉内の温度管理方法について検討した。表 2-2-1-1 に、この電気炉の主な仕様を示す。

表 2-2-1-1 電気炉の主な仕様

使用温度範囲	400~500℃
最高温度	600℃
搬送サイクル	5 秒
素材の炉内滞在時間	380 個×5 秒 = 1,900 秒

当初作製した電気炉では、炉内温度分布にムラがあったため、次の 2 点の課題解決に取り組んだ。1 点目の改善として、中央部から出入り口側 (温度が逃げやすい側) にかけて、上部から熱源 (棒状のヒータ) を 40 本入れ込んだ。2 点目については、温度制御用熱電対を 4 本に増加させた。これら 4 本の熱電対は、炉内で温度上昇しにくい場所に設置した。

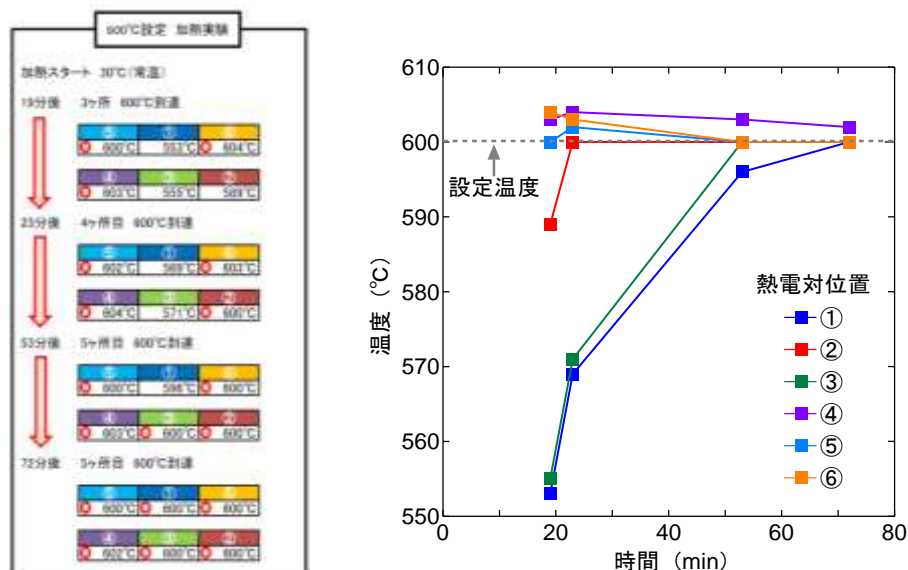


図 2-2-1-2 改善後の炉内温度測定結果

炉内温度の測定実験を実施した。加熱開始から温度上昇の様子を示したグラフを図 2-2-1-2 に示す。加熱開始から 19 分後に 3 か所の熱電対 (④、⑤、⑥) 23 分後に②の熱電対、53 分後に③の熱電対、72 分後に①の熱電対が設定温度の 600℃に到達した。この炉内に素材 (SUS304) を投入し、排出時の素材温度を測定したところ 560℃であった。設定温度に近い値まで素材を加熱することが可能となった。

2-2-2 加工製品搬送中の温度管理

ステンレス製の小物精密製品が製品になるまでの工程毎の温度変化を確認し、目標値の温度低下 30℃以下を達成するために、以下の項目に取り組んだ。

1) プレス内搬送時の製品温度測定

トランスファーによる搬送とともに内部温度を管理できる設備とした。設備外観を図 2-2-2-1 に示す。

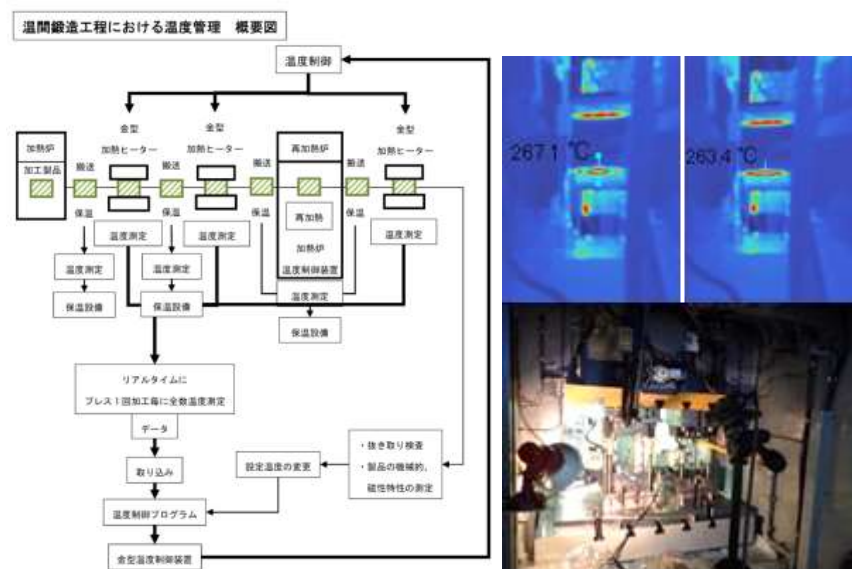


図 2-2-2-1 温度管理の外観写真と温度データ

プレス内搬送中に工程毎の温度低下 (実際の製品温度) を確認した。対象製品はハウジングであり、工程は、第 1 工程の打込み、第 2 工程の押出し、第 3 工程のフランジ成形で構成される。加工される被加工材の様子を図 2-2-2-2 に示す。

第 1 工程の金型上に置かれた直後の温度は、設定温度より -6℃、第 1 工程で加工された直後には +1℃であり、第 2 工程の金型上に置かれた直後は -5℃まで下がった。第 2 工程金型で加工された直後の素材温度は -32℃であり、その後第 3 工程金型上に置かれた直後は同じく ±0℃であった。最後に、第 3 工程金型で加工された直後の温度は、+12℃まで上昇していた。このように、素材が加熱炉から排出され、第 3 工程金型で加工されるまでに温度低下は最大で 32℃あることが分かった。



図 2-2-2-2 加工されるハウジングの様子

2-3 製品の精度維持と高効率生産を実現する製造プロセスの構築

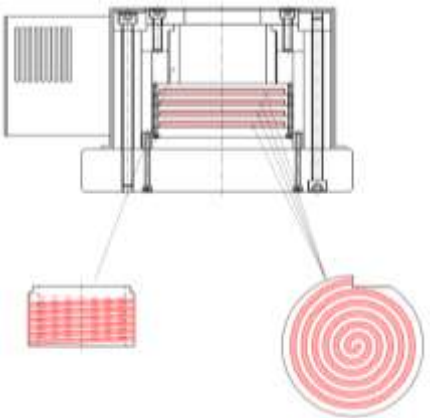
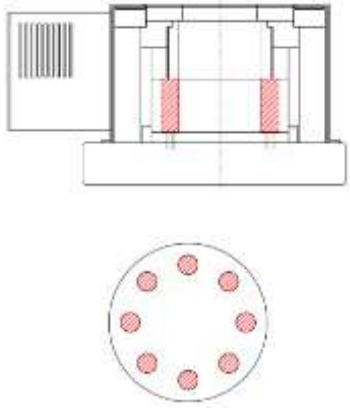
2-3-1 製品精度の維持

1) 金型に関する開発

金型加熱方式の変更

複雑な立体形状に対応するため金型加熱方式を新たに設計し直した。新たに設計した金型の加熱方式と従来の方式を比較したものを表 2-3-1-1 に示す。

表 2-3-1-1 金型加熱方式の新旧比較

従来設計	新規設計
	
<p>単純なつぶし加工のみ対応できる 中心付近までヒーターが設置される構造であり、成形後の取り出し不可</p>	<p>φ 50 mm のカートリッジヒーターを内蔵する構造 →中心部分が空き、ノックアウト構造の導入が可能</p>

2) 周辺条件の開発

(1) 加工油の決定

表 2-3-1-2 に、加工油の検討結果を示す。表面粗さはそれぞれ改善案①が Ra2.10、改善案③が Ra0.19 となった。設定した加工条件で、目標値を達成する表面粗さとなり、改善案③を採用した。

表 2-3-1-2 加工油の選定結果

加工油の種類	加工油の内容	検討結果	使用の可否
高温間(800°C)用	固形潤滑剤の黒鉛	精度が悪い 製品に付着する	否
冷間(常温)用	ステンレス絞り加工用油	加工油が燃えて煤発生	否
温間(600°C)用	マグネシウム合金板の温間成形用加工油:(A)	金型焼付き	否
改善案①	(A)に PTFE(テフロン)の粉末を混合:(B)	1 時間経過後分離	否
改善案②	(B)に市販のルブロイドを混合	金型に付着→被加工材の取り出し不可で連続加工不可 ルブロイドが高価	否
改善案③	(B)に新規検討加工油を混合	24 時間経過後分離せず 金型に付着しない 連続加工可能 油が安価	可

(2) 金型材質の決定

表 2-3-1-3 に、金型材質の検討結果を示す。

表 2-3-1-3 超硬合金 KD20 を使用した金型の温間鍛造後の状況

金型材料	マトリックス系 ハイス YXR33	超硬合金 KD20	超硬合金 QS35	粉末ハイス VANADIS60
特長	熱間、温間鍛造用	微粒タングステン カーバイド材 高強度・高硬度 耐摩耗性・チップン グ性優良 HRA90	非磁性、高耐熱性・ 高耐食性	高耐摩耗性 高圧縮強度 HRC68
温間鍛造後の状況	金型にへこみ発生	数発で破損 図 27(a, b)	数発で破損	— 図 27(c, d)
結果	ステンレス鋼の温間鍛造加工に不向き			採用

(3) 金型への表面処理

表 2-3-1-4 に、金型への表面コーティング膜の候補一覧を示す。株式会社寺方工作所では、これまでに TiCN をもっとも多用している。表 2-3-1-4 に示す候補膜を検討した結果、TiCN 膜をコーティングした金型で試験鍛造した結果、焼き付き、溶着、および剥がれが発生しなかった（図 2-3-1-3）。金型への表面コーティングは、TiCN 膜に決定した。

表 2-3-1-4 金型への表面コーティング膜の検討結果（清水電設カタログ抜粋）

	TiN	TiCN	TiAlN	CrN
ビッカース硬さ HV	2300	2800	3000	1500
耐熱温度(°C)	550	400	800	650
摩擦係数	0.45	0.40	0.55	0.50

(4) 給油装置

生産性改善のため、加工油を霧状にして金型表面に均一に吹き付ける自動塗布装置について検討した。粉末が混合されていても、必要な量の加工油を噴霧できるように装置改良を検討した。外部給油方式を自動塗布装置に組み込んだ。

この外部給油方式を組み込んだ自動塗布装置では、粉末濃度の上限値が 10% であるため、本研究で用いる混合油の粉末濃度はそれを採用した。本自動塗布装置を用い、再度塗布試験を行った。その結果、温間鍛造加工する際に、必要な塗布量を適切なタイミング（製品搬送後の信号をキャッチしたとき）で自動塗布することが可能となった。また、この方法で金型部品に混合油を塗布して加工した製品を評価した結果、成形性など製品精度も良く、金型状態も焼き付きもなく良好であった。よって塗布した混合油の効果が現れていることがわかった。

2) 試作製品の精度維持

量産に向けた試作品の製作

平成 27 年度の温間つぶし実験ならびに、平成 28 年度の工程削減実験をもとに、本年度は量産に向けた試作品の製作を行った。試作品としては、スクレーパー、ハウジング、それぞれの物性を評価した。当初の計画ではなかったが川下産業からの試作依頼と温間の問題解決のために次の 2 点も追加してキャスタードライブ、およびバルブプレート、それぞれの物性についても評価した。

(1) スクレーパー

図 2-3-1-1 に、試作品として完成したスクレーパーの外観を示す。スクレーパーの素材はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。表 2-3-1-5 に、スクレーパーの硬さ、磁性、および平面度を示す。



図 2-3-1-1 スクレーパーの外観

表 2-3-1-5 スクレーパーのビッカース硬さ、透磁率、および平面度

項目	目標値	実測値		達成度
		板厚(mm)	硬さ(HV0.05)	
1.硬度 (ビッカース硬さ)	HV300以上	0.11	490	100%
		0.32	410	
		0.78	320	
2.磁性	透磁率		100%	
	1.01以下	1.004		
3.平面度	0.02以下	0.018	100%	

上記のように、温間鍛造加工によりスクレーパーの製品形状が完成した。目標値を達成し完成したスクレーパー試作品を川下企業様に納品し、電子部品挿入機実機へ装着および動作テストしていただいた。テスト結果は良好であり、次機種への採用が決定した。客先からの要請で、スクレーパーの再設計が行われ、3種類のサイズ違い(3機種分)の見積依頼があった。現在、量産金型の設計に取り掛かり、平成30年8月ごろに初期品を納品する予定である。

(2)ハウジング

冷蔵庫のセンサー部品として用いられるハウジングについても試作を行い、完成した。図 2-3-1-2 に試作したハウジングの外観写真を示す。ハウジングの素材には、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 ならびに二相系ステンレス鋼 SUS329J1 を用いた。



図 2-3-1-2 ハウジングの外観

図 2-3-1-3 にハウジングの鍛造工程の模式図を示し、表 2-3-1-6 に得られたハウジングの形状評価を示す。

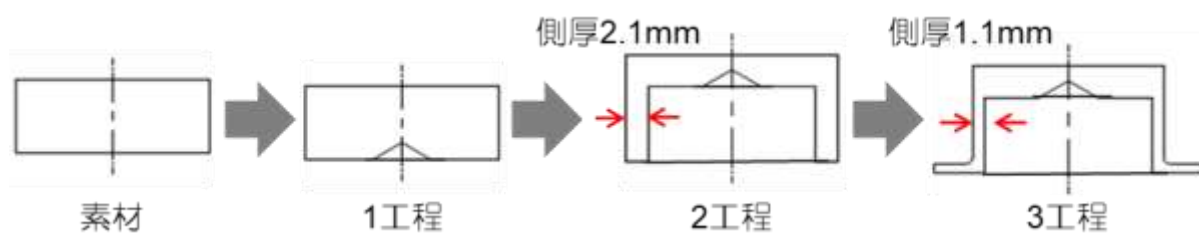


図 2-3-1-3 ハウジングの温間鍛造工程

表 2-3-1-6 ハウジングの形状評価結果

	目標値	実測値	達成度
厚み	3.00mm±0.05	3.02mm	100%
角R	R0.10以下	R0.02	100%
割れ	無し	無し	100%
側厚	1.1mm±0.1	1.15mm	100%

2-3-2 高効率生産工程の構築

本研究開発で構築した本装置は、トランスファーユニットでプレス機内での搬送を行い、被加工材の温度低下を抑制する構造である。

構築した連続温間鍛造システムの外観写真を図 2-3-2-1 に示す。

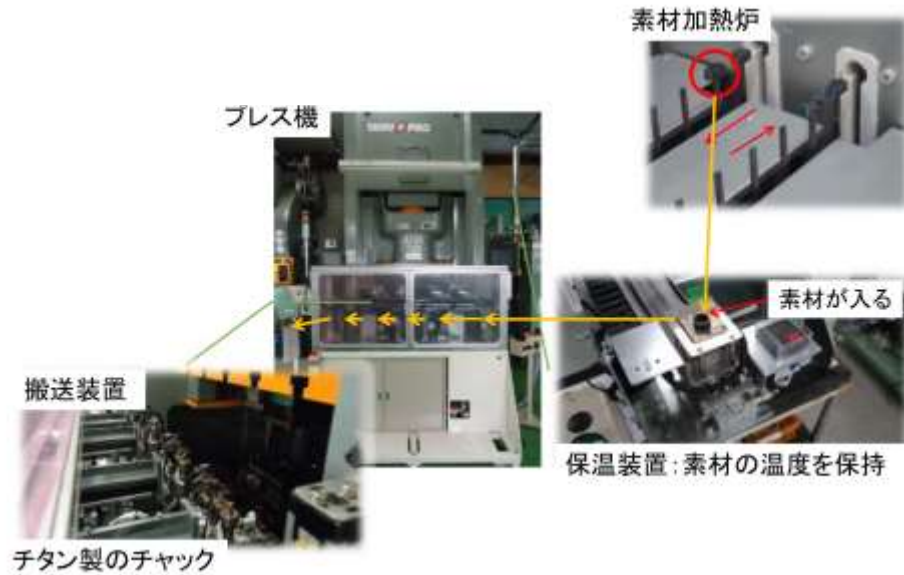


図 2-3-2-1 連続温間鍛造システムの外観写真

ハウジングの加工を例として、構築した温間連続生産工程にて搬送テストを行った。その結果、トランスファー装置により (a) プレス内への搬送時間が約 2.5 秒、(b) プレス内の工程間搬送時間が約 3 秒、(c) 加工時間が約 0.5 秒であるため、製品 1 個あたりの搬送・加工時間は約 6 秒である。生産能力の目標値は、1 分間に 10 個以上としていたが、実際の生産能力は 10 個となり目標値を達成した。

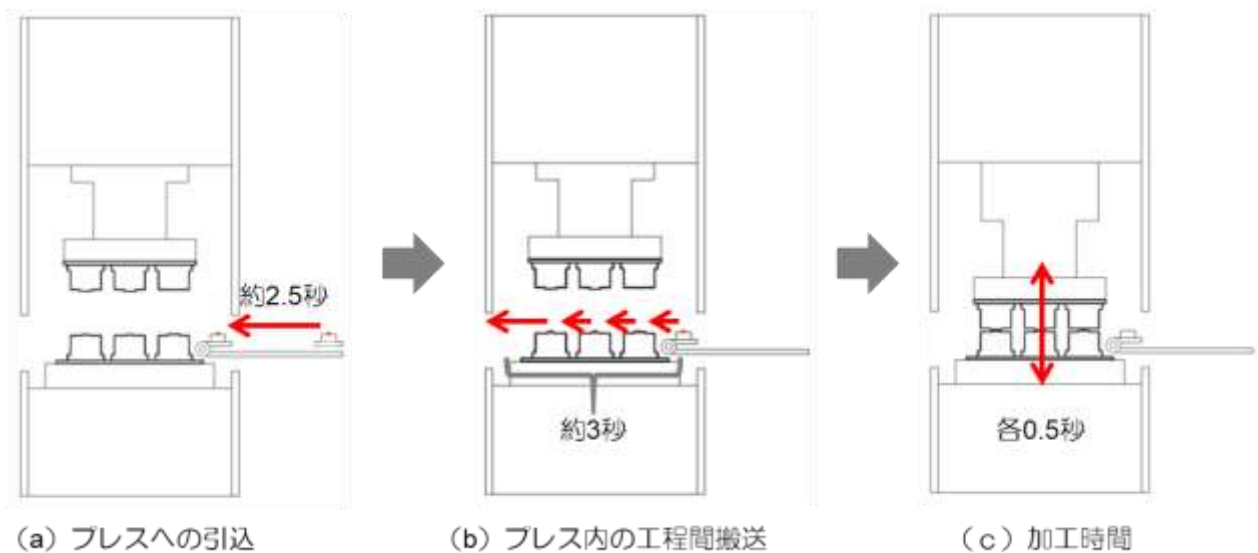


図 2-3-2-2 搬送・加工の流れ

2-4 プロジェクトの運営管理

(担当：公益財団法人鳥取県産業振興機構)

本研究開発の円滑な運営と推進を図るために、全体会議（プロジェクト推進会議）を定期的に行い、各研究機関相互の連絡体制を密にするとともに、各研究開発実施項目の課題抽出、検討、研究推進を行った。プロジェクト推進会議開催は次の通りであった。

H27年度

第1回推進会議

開催日時 平成27年10月8日（木） 午後1時30分～4時30分

場 所 倉吉シティホテル 会議室（レモンバーム）

(〒689-0023 鳥取県倉吉市山根 543-7)

出席者 21名

第2回推進会議

開催日時 平成28年1月27日（水） 午後1時30分～4時30分

場 所 倉吉シティホテル 会議室（レモンバーム）

(〒689-0023 鳥取県倉吉市山根 543-7)

出席者 14名

H28年度

第1回推進会議

開催日時 平成28年8月4日（木） 午後1時30分～4時30分

場 所 倉吉シティホテル 会議室（レモンバーム）

(〒689-0023 鳥取県倉吉市山根 543-7)

出席者 13名

第2回推進会議

開催日時 平成29年1月26日（木） 午後1時30分～4時00分

場 所 倉吉シティホテル 会議室（マーガレット）

(〒689-0023 鳥取県倉吉市山根 543-7)

出席者 13名

H29年度

第1回推進会議

開催日時 平成28年8月22日（火） 午後2時00分～午後4時30分

場 所 倉吉シティホテル 会議室（マーガレット）

(〒689-0023 鳥取県倉吉市山根 543-7)

出席者 16名

第2回推進会議

開催日時 平成30年2月21日（水） 午後2時00分～午後4時30分

場 所 倉吉シティホテル 会議室（マーガレット）

(〒689-0023 鳥取県倉吉市山根 543-7)

出席者 11名

最終章 全体総括

まとめ

[1]加工製品に最適な鍛造温度と加工工程の決定

[1-1]鍛造温度決定

オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）は、500～800℃に長時間加熱すると Cr が析出して耐食性が悪くなる。したがって、素材温度は 500℃以下とする必要がある。素材は、形状・板厚によって冷却速度が異なることを考慮して実験した結果をもとに素材の温度を決定した。

被加工材に加工誘起マルテンサイト相を発生させないために、金型の温度は 200℃以上とする必要があることを考慮し、実験した結果をもとに金型の加熱温度を決定できた。

[1-2] 加工工程の決定

加工工程を決めるうえで、金型の寿命は重要な要素の一つである。今年度の取り組みにおいて温間鍛造用金型材を用いた実験では、強度不足のため型が変形し、精密加工が不可能であった。そこで、冷間鍛造用金型の粉末ハイス鋼を用いることとした。

試作金型に基づき、3 工程分の連続鍛造金型による工程を決定し、金型を製作した。この金型で加工した製品の磁気特性、機械的強度特性を評価した。

[2]温間鍛造工程における温度管理

[2-1]金型、加工製品の温度管理

素材加熱システム（電気炉）、金型加熱装置、および素材保温装置の設計を完了した。素材加熱システムにおいて昇温実験を行った結果、設定の温度を示した。金型加熱装置についても、加熱温度誤差は ±2℃であり、テーマ[1-1]で決定した鍛造時の金型温度で加工することが可能であった。

また、素材加熱装置、金型加熱装置、保温機構についての構想設計にもとづき、これらを製作・設置し、システムを構築した。

[2-2]加工製品搬送中の温度管理

薄板素材の搬送・加工工程を仮想した実験において、素材の温度低下についてデータを取得した。これと初年度の実験結果にもとづき、狙った最適な加工温度を維持するためのシステムを構築した。

2年間の研究において構築された加工温度を維持するためのシステムを実際に運用した。実際に稼働させて工程毎の温度低下の実測を行った。素材加熱炉からプレス内の搬送部に素材を移動させた後、加工ステージ上で一定の温度となり、プレス加工の1工程目、2工程目、および3工程目の温度低下のデータを取得し検証を行った。その結果、温度低下は目標値である30℃以下を達成した。

[3-1]製品精度の維持

金型材質は超硬では破損するため ASP60 とした。またコーティングには TiCN を採用した。加工油には固形潤滑として加工油にテフロン粒子を混合し高精度な製品成型に効果を得ることができた。

素材を加熱するための加熱炉の検証を行ったところ、炉内温度分布に 40℃前後の差があったため製品の寸法精度が安定しなかった。初期の設計では、加熱炉内の熱源が外壁側だけに設置されていたため、搬送中の内部（炉の中心付近）の温度が外壁部分に比べて低いことがわかった。炉内構造の設計について見直しを行い、熱源を外壁だけでなく炉の上部にも設け、また、温度制御の熱電対を 1ヶ所から 4ヶ所に増設した。その結果、炉内の温度は実測値で温度差 2℃以内となり、製品精度の維持につながった。

次に、製品に要求されている精度の検証を行った。目標値の数値に対して 100%の達成率となった。形状および精度の点においては、客先の要求に満足いただけるものが完成した。金型については、前年度までの実験により決定した材質、表面処理、および加工油の条件で、簡易的に金型寿命のテストを行った。その結果、合計 6000 ショットの加工が可能であった。金型の形状を観察したところ、初めの形状から 6000 ショット加工後も変化が無く、寿命向上にも効果があったと判断できた。

[3-2]高効率生産工程の構築

高効率生産工程の構築をめざし、連続生産のための搬送方法・チャッキング方法・断熱方法を考慮し、搬送システムを設計し、構築した。

実際に構築された搬送システムを稼働させ、搬送試験を行った。その結果、プレス内引き込みに 2.5 秒、プレス内工程搬送に 3 秒、プレス加工に 0.5 秒となり 1 個辺りの生産時間としては 6 秒となった。生産能力が目標値の 1 分間に 10 個 (60 秒÷6 秒=10 個) としていたが、実測データより 10 個 (60 秒÷6 秒=10 個) となり目標値を達成した。

研究開発後の課題・事業化展開

ステンレス、主に SUS304 材を対象に研究開発を行ってきた。結果として、素材及び金型の加工温度、金型加熱装置の構造、製品精度の維持方法、量産するためのシステム構築などの技術を確認したことで、川下企業の必要としている製品を完成させることができた。対象のケース A としてきたスクレーパーに関しては、研究期間内に試作品を納入させていただき、実機組込みテストを行い問題なく機能を発揮できることを確認済みである。この結果より川下企業側の図面修正があり、サイズ違いにて 3 機種の受注に繋がった。進行状況としては現在量産仕様の再設計を行っており、金型製作後 8 月末に量産試作品を納入予定である。この研究にて開発した温間加工法はさまざまな条件を振ることによって、対象としていたステンレス材以外にも、鉄系、アルミ系材料などにも有効なことが分かった。そのため、材質の幅を拡げることで更なる受注拡大へと繋げる。温間加工技術を使用して製造する製品を含めた売上として 2017 年度を基準として 2018 年 0.4 億、2019 年 1.3 億、2020 年 3 億、2021 年 7 億、2022 年 9 億の増化を見込む。