

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

「高アスペクト比ステンレス薄肉缶、
トランスファ高速・高効率温間絞り工法の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 一般財団法人 大阪科学技術センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
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)	2
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論 研究内容及び成果	5
【1-1】 第一絞りの深さを最大限に深くする温度分布（温度勾配）の、シミュレーションによる導出	5
【1-2】 加熱コイルと材料間の距離調整により温度勾配をコントロール可能にする高周波誘導加熱条件の確立	7
【2-1】 材料からの吸熱時間を確保する局所冷却パンチ機構の開発	7
【3-1】 自動送りコイル材で安定した材料加熱を実現する高周波誘導加熱のコントロール方法の確立	8
【3-2】 温度分布と絞り加工位置の差を極小にする材料送り精度の実現	8
【3-3】 コイル材の振れに対する高周波誘導加熱コイルと材料間距離の安定化構造の設計製作	8
【4-1】 ワークからの放熱量を補う発熱量を得る各絞り工程及び全体工程の設計	9
【4-2】 フランジ部放熱抑制の為にパンチ冷却緩和を可能にするノックアウトによるワーク底 R 部冷却方法の開発	10
【5-1】 超微粒超硬と同等硬度を持つサーメット材金型の開発	11
【6-1】 低摩擦係数素材であるサーメットの耐焼き付き性の検証	11
【6-2】 耐焼き付き性向上サーメット表面処理方法の開発	12
【7-1】 場所により異なる強度を持つ被加工材に対する絞り加工成形シミュレーション手法の確立	12
【8-1】 連続生産でのワーク温度バラツキの把握及び管理方法、条件の確立	14

【9-1】 試作缶評価を行う電池加速試験条件の設計及び確立	14
【9-2】 開発された缶の評価	14
【10-1】 加工エネルギー量、加工ストローク長さ、工程数、これらを市販プレス機で実現可能にする工程レイアウトの確立	14
第3章 全体総括	15
3-1 複数年の研究開発成果	15
3-2 研究開発後の課題	15
3-3 事業化展開	15

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

1-1-1 研究開発の背景・目的

需要の拡大が確実にになっている車載システムがある。当該システムの電源電池に①-40℃~85℃で作動 ②10年保証 ③軽量化・小型化、これら3つのニーズがあるが、これら全てを満たす電池は現在無い。これに対しマクセル株式会社が新電池の開発を計画している。その新電池の缶には①高強度 ②薄肉 ③角型高アスペクト比 ④高生産性、が求められ、本研究開発はこれに応える缶を開発するものである。

当該電池缶に対する「高強度」のニーズに応える、プレス深絞り量産加工が可能な高強度材としてはオーステナイト系ステンレスが最も有力である。しかし、同材は変形抵抗が高い為、加工に非常に大きな荷重が必要となることから、高アスペクト比の深絞り加工では破断するリスクが非常に高い。

同材の深絞り加工での破断対策技術としては「温間絞り工法」が知られている。金型を加熱して、その熱で加工する製品の側面及びフランジに相当する部分の材料を100℃付近に加熱させて加工する工法であるが、同工法の生産速度は5spm程度が一般的で、生産性が非常に低い。材料の加熱に時間が掛る為である。

近年、熱間プレス（材料を1000℃付近に加熱）で採用され始めている通電加熱は、金型加熱方式に比べて材料の加熱に要する時間が大幅に短縮されるが、深絞り加工には適さない。材料全体が加熱されるので、絞り加工でパンチ荷重を負担する箇所の材料の強度が低下してしまい、破断リスクが高くなる為である。

本開発はこの高アスペクト比のオーステナイト系ステンレスの深絞り加工で課題となる高破断リスクと低生産性を同時に解決する技術の実現を目的とするものである。

この研究は「中小企業ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針」に示された高度化目標の以下の項目に相当する。

(三) 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

ウ. 薄肉材の加工技術の確立・高度化

エ. 難加工材・新材料加工

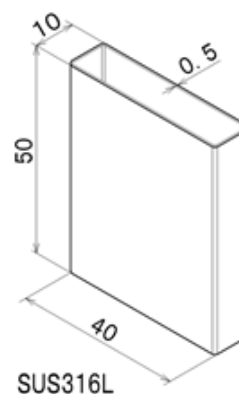
1-1-2 研究目標

下記仕様の缶を、40spm 以上の回転数で生産することを目標とする。

〔缶仕様〕

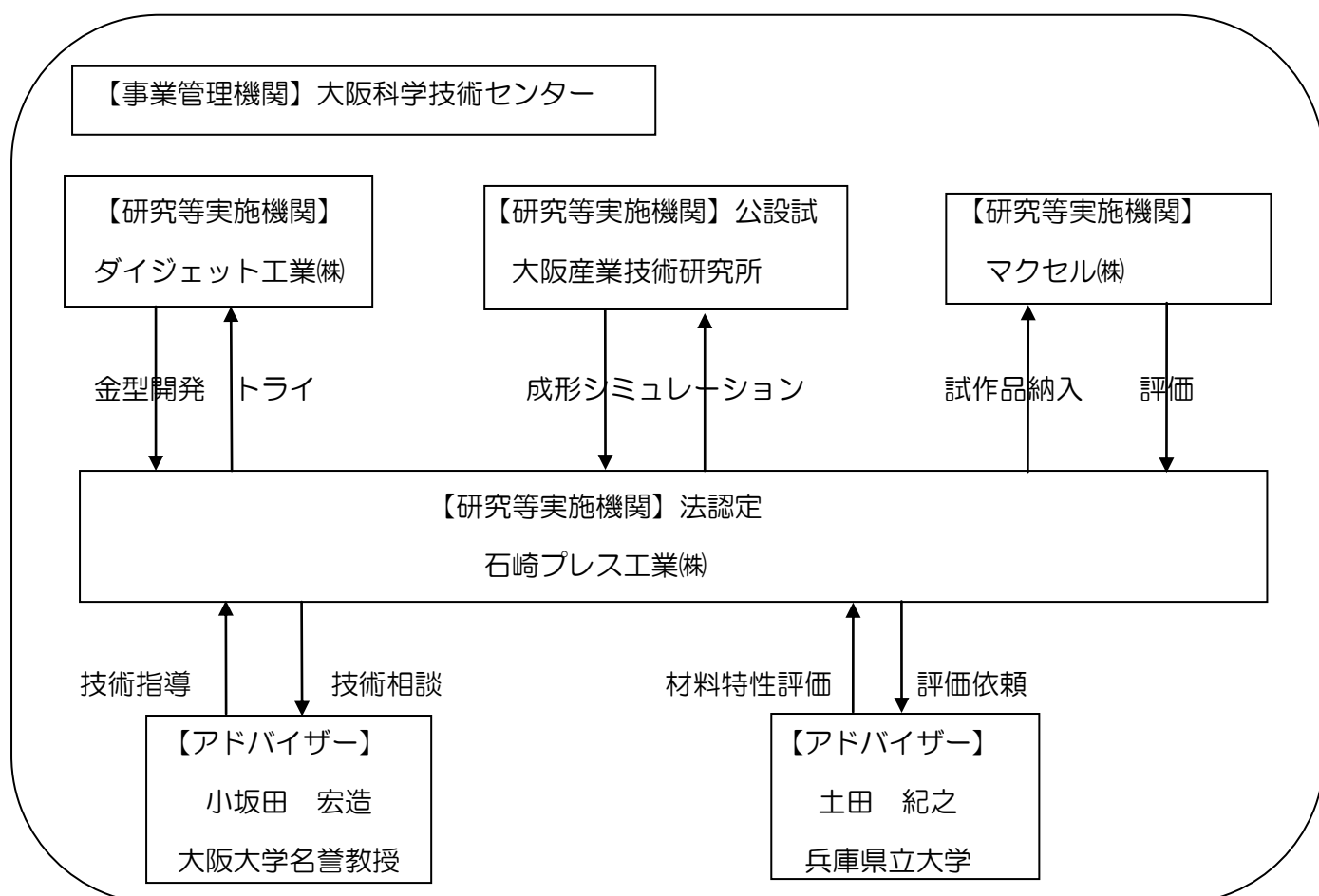
- ・材質 オーステナイト系ステンレス SUS316L
- ・缶側壁厚 0.5mm 狙い
- ・アスペクト比 1（縦）:4（横）:5（高さ）

（実寸：10mm×40mm×50mm）



1-2 研究体制

1-2-1 研究組織・管理体制



①【事業管理機関】 一般財団法人 大阪科学技術センター
加賀城 俊正、森山 昌己、川口 満、鳥山 博司、長田 圭子

②【研究等実施機関】

－1. 石崎プレス工業株式会社

石崎 泰造 (PL)、浦上 正和、森本 貢、相川 孝史、宮崎 浩司

－2. ダイジェット工業株式会社

森 章司、永田 卓生、谷口 正樹

－3. マクセル株式会社

木村 孝史、斉藤 勲

－4. 地方独立行政法人 大阪産業技術研究所

四宮 徳章 (SL)、白川 信彦

③【アドバイザー】

土田 紀之、小坂田 宏造

1-3 成果概要

- 研究目標（1-1-2）で示した、通常の冷間絞り加工では破断リスクが高い仕様の缶を、破断することなく、成形することが出来た。
- 従来の温間絞り工法の課題である低生産性を解決する方法として考案した、高周波誘導加熱を利用した温間絞り工法の自動連続生産による多段絞り加工を実現した。
- 研究目標（1-1-2）で示した仕様の缶を、要求規格公差を満足させるところまでは実現できず、試作缶の顧客による評価は実施できなかった。
- 本開発工法による全工程を通じた連続生産は、開発製品の寸法変更等による金型再設計、再製作などの開発スケジュールの遅れが生じた為、実現に至らなかった。

1-3-1 本補助事業の成果に係る知的財産権

- 平成 29 年 3 月 27 日、特願 2017-061398 で、本開発に関する技術を石崎プレス工業㈱と大阪産業技術研究所が共同特許出願。
- 平成 29 年 9 月 22 日、特願 2017-182418 で、本開発に関する技術を大阪産業技術研究所と石崎プレス工業㈱が共同特許出願。
- 平成 29 年 12 月 28 日、国内出願 2017-061398 の内容を国際(PCT)出願。

(※) 本開発技術の関連特許（石崎プレス工業㈱、大阪産業技術研究所の共同特許）：

平成 28 年 9 月 2 日取得、特許番号第 5994055 号、発明の名称「金属部品の製造方法および金属部品の製造装置」

1-4 当該研究開発の連絡窓口

石崎プレス工業株式会社

専務取締役 石崎 泰造

TEL：072-782-6715 FAX: 072-782-9804

E-mail：Taizo.I@ispress.co.jp

地方独立行政法人大阪産業技術研究所 和泉センター

加工成形研究部 主任研究員 四宮 徳章

TEL: 0725-51-2564 FAX: 0725-51-2599

E-mail: shinomiya@tri-osaka.jp

第2章 本論 研究内容及び成果

【1. 高周波誘導加熱によるブランクの最適温度分布（温度勾配）形成技術の開発】

【1-1】第一絞りの深さを最大限に深くする温度分布（温度勾配）の、シミュレーションによる導出

絞り加工では、ブランクからの第一絞り加工を最大限に深く絞るのが、より深い絞り加工の実現や工程短縮に有利になる。その為には温間絞り工法である当該開発工法では、ブランクを最も効果的な温度分布の状態にすることが重要になる。この温度分布のシミュレーションによる導出を研究した。

シミュレーションは次の通り行った。

一般に、ステンレス材の深絞り加工では、ブランクの加熱範囲として、パンチ頭頂部からパンチ肩に接する部分を除く周辺部を加熱することで成形性を向上できることがわかっている。しかし、本事業で開発するアスペクト比のステンレス缶は、深絞り加工に加えてしごき加工が加わること、またブランクが円形ではなく楕円形状になることから、従来の加熱範囲の考え方では成形性の向上が見込めないことが検討により明らかになった。そこで、半径方向の温度分布だけでなく、円周方向に生成した温度分布についても減肉抑制効果を検証することにした。図1に設定した温度分布（1/4モデル）を示す。

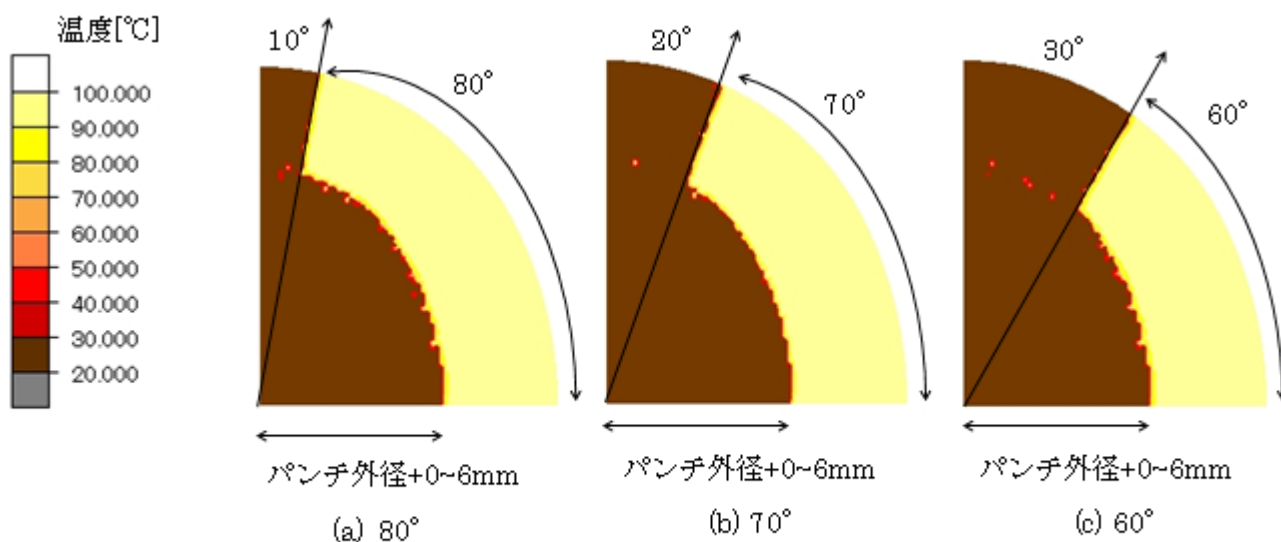


図1 円周方向に生成した温度分布

なお、解析条件は以下の通りとする。

使用ソフトウェア： Simufact, forming13.0.0

三次元ソリッドモデル（1/4 対称）

ブランク：SUS316、 $t=0.5\text{mm}$

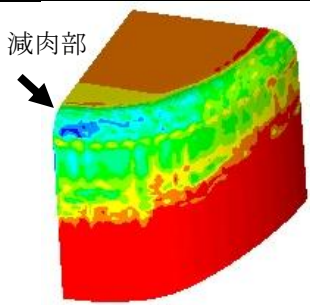
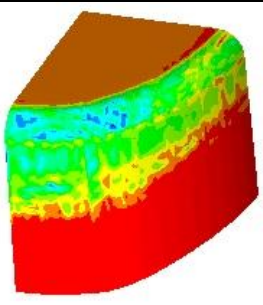
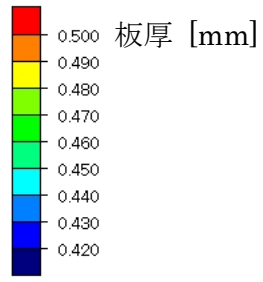
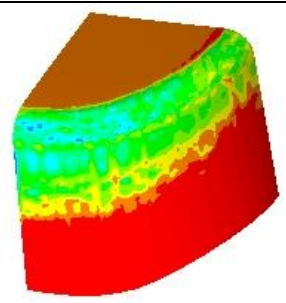
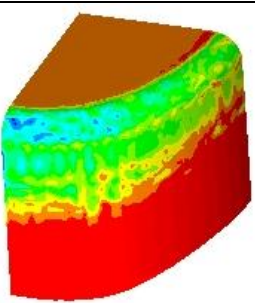
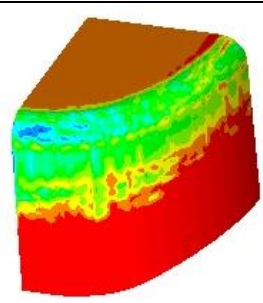
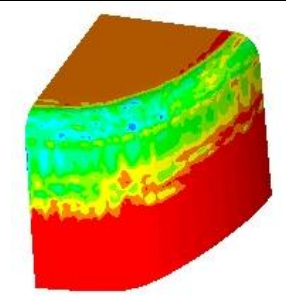
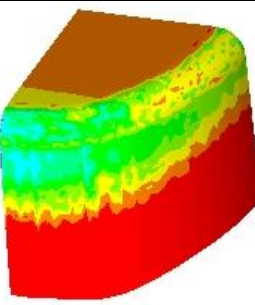
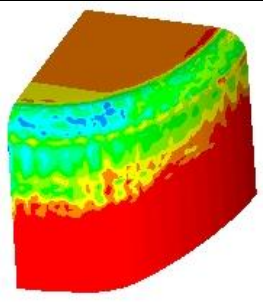
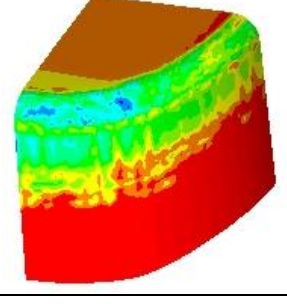
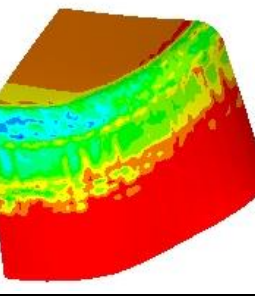
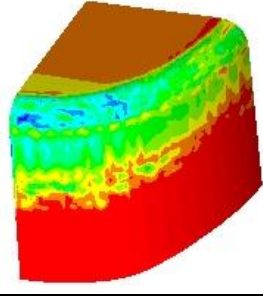
メッシュサイズ：面内方向 0.6mm、板厚方向 3 層

パンチ速度：50mm/s

しわ押さえ力：5kN

摩擦係数：クーロン摩擦 0.1

表1 板厚に及ぼすブランク加熱範囲の影響

	ブランク一様に 20°C	パンチ外径から 3mm	
周方向に分布なし			
	パンチ外径から 0mm	パンチ外径から 3mm	パンチ外径から 6mm
80°			
70°			
60°			

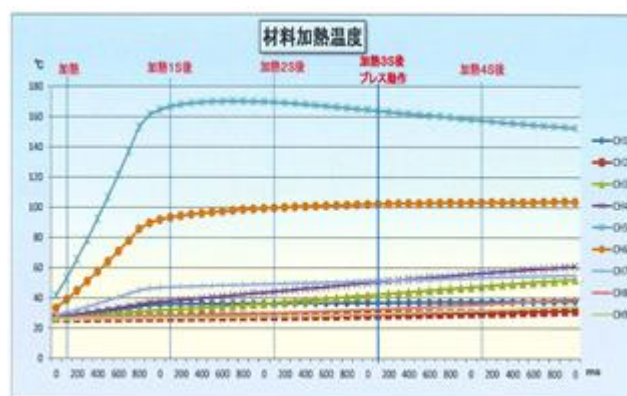
表より、パンチ外径から 0mm の範囲で 80°、70°、および、パンチ外径から 3mm の範囲で 70° の条件が、パンチ肩付近の板厚減少を抑制できていることがわかる。

以上のとおり、第一絞りにおいて板厚減少に効果的なブランク加熱範囲を見出した。

【1-2】加熱コイルと材料間の距離調整により温度勾配をコントロール可能にする高周波誘導加熱条件の確立

第一絞り深さを最大限に深くするブランクの温度分布を実現するには、缶の側面にあたる部分の材料は加熱して強度を低下させる一方で、絞り込む際にパンチの荷重が集中するパンチの R 部付近の材料は常温に近い温度を保持して強度の低下を抑える必要がある。絞り込む際の変形量が多くなる外側の材料ほど高い温度で加熱して、内に向かって行くに従い加熱温度を下げ、パンチ R 部にあたる箇所では加熱されないようにする必要がある。これに対し、15mm 幅で最大 50℃の温度勾配を付ける目標で開発に取り組んだ。

結果として、目標を大きく上回る 100℃程度の温度勾配を付けることが出来た（下のグラフ O1 と O3）。



これは、各測定位置に熱電対を貼り付け、データロガーに接続して時間経過による温度変化を測定することによって確認した。

【2. 局所冷却機構の開発】

【2-1】材料からの吸熱時間を確保する局所冷却パンチ機構の開発

材料から必要となる吸熱を可能にするには、1ショットの時間内で吸熱に必要な時間、冷却パンチが材料と接していなければならない。局所冷却パンチの下死点は材料上面になる為、通常のパンチと同じスライドに固定する取り付けであると、パンチが材料に接してから離れるまでの時間は0.1秒も無く、吸熱が成り立たないのが課題であった。

駆動源にバネを使用する構造の機構の開発により、これを実現した。

【3. 自動送りコイル材で安定して高速局所加熱する技術の開発】

【3-1】自動送りコイル材で安定した材料加熱を実現する高周波誘導加熱のコントロール方法の確立

自動送りされてくる材料は、同じ加熱時間で同じ温度分布を作る必要があるが、室温の変化、コイル材温度のコイル内でのバラツキ、またショット数の進行に伴う材料への加熱の蓄積による温度上昇等によって、生産の進行に伴って材料温度が変化することが想定される。連続生産の中で高周波誘導加熱による材料温度の予想される変化に対して安定した温度分布が得られるようにする為、加熱温度を高い精度でモニターし、一定以上の温度変化があれば作業員への通知、管理限界を超えた場合はプレス機を停止する機構の開発に取り組んだ。

結果として、目標とした 90℃以上 150℃以下の温度コントロール方法を確立することが出来た。測定温度に対して 90℃と 150℃の管理限界値を設定、この設定値を超える温度測定結果が出た場合、それを異常として検出するソフトを設計。実機によるテストを行い、設定温度を超える温度になった場合、プレス機が停止することを確認した。

【3-2】温度分布と絞り加工位置の差を極小にする材料送り精度の実現

高周波誘導加熱で形成された温度分布が第一絞り工程で可能な限り同じ位置で維持される為には、加熱工程から第一絞り工程までの材料送り精度に高い精度が必要になる。高い送り精度を実現するには、ブランキング加工前で且つ加工油塗布前の材料を送り出す方式が適用させられるのが望ましい。それを可能にする為、材料に常に一定のテンションが掛けられる機構を開発。目標とした 0.5mm 以内の送り精度を実現することが出来た。

【3-3】コイル材の振れに対する高周波誘導加熱コイルと材料間距離の安定化構造の設計製作

高周波誘導加熱による加熱温度の安定には、材料の加熱対象部と高周波誘導コイルの距離が一定に保たれていることが重要となる。自動送りコイル材は、通常の構造では、ブランキング加工や送り装置による搬送の影響を受けて上下動することが避けられない。

これに対し加熱工程に取り付ける材料の押さえ装置を開発。加熱コイルと材料間の距

離変動を±1mm以内に抑えることが実現できた。

【4. 低熱伝導金型（ダイ）による深絞り量産加工の実現】

【4-1】ワークからの放熱量を補う発熱量を得る各絞り工程及び全体工程の設計

金型に熱伝導率の低いサーメットを使用することにより、材料の変形（ひずみ）によって発生する加工熱が金型を通して放熱される量を減らし、ワークに熱を溜める。それには各工程においてワークからの放熱を抑える事、そしてその放熱量を補う熱量を各絞り工程で生じさせなければならない。それには熱源となる材料の変形量（ひずみ）が必要となる。各絞り工程のひずみ値を成形シミュレーションによって求める研究を行った。

板材をソリッド要素としてモデリングし、熱と成形の連成解析を行った。そこで得られた成形中の板材の温度分布とひずみ分布からひずみと温度の関係を把握し相関式を作成した。

後述の【7-1】のシミュレーション手法を用いて、加熱有り・無しの場合について、各工程の最小板厚を迅速に求めることができた。シミュレーションに用いた応力-ひずみ線図を図2に示す。

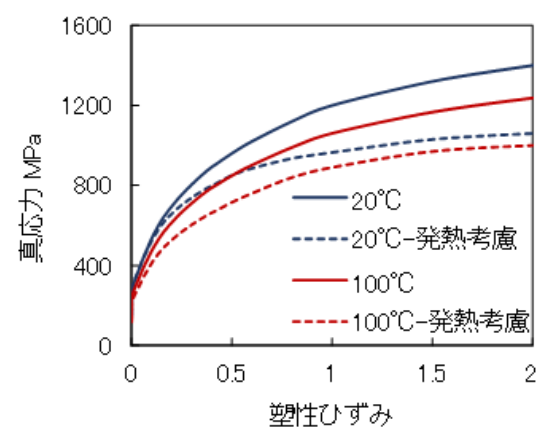


図2 シミュレーションを用いた応力-ひずみ線図

また、発熱を考慮した場合のシミュレーション結果（加熱なし 20℃、加熱有り 100℃/加熱範囲：パンチ外径から+3mm、70℃）を図3に示す。

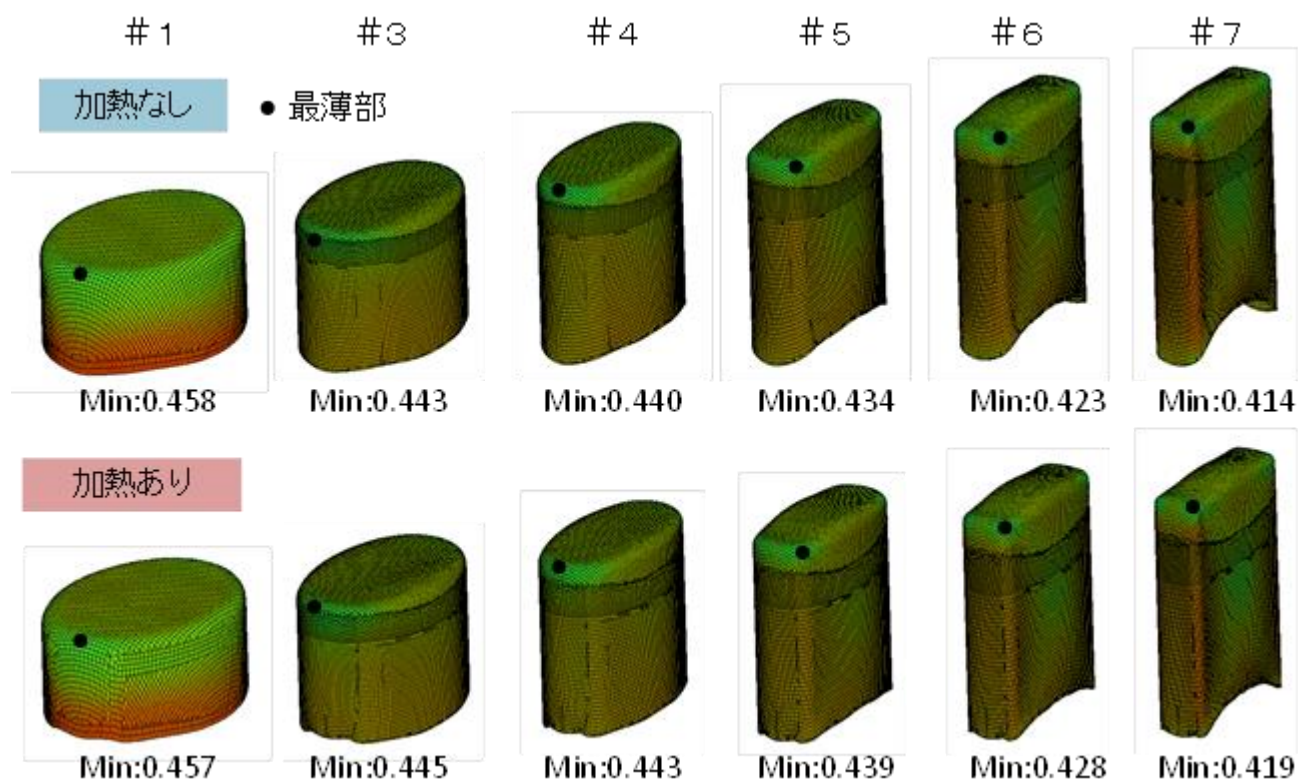


図3 成形シミュレーションの結果

図より、多工程であっても各工程での板厚を計算できていることがわかる。また、加熱することによって最薄部の板厚を厚くした。

【4-2】フランジ部放熱抑制の為にパンチ冷却緩和を可能にする、ノックアウトによるワーク底 R 部冷却方法の開発

各絞り工程では破断防止の為にワーク底 R 部付近の冷却が必要。従来の温間絞りの技術ではこれをパンチ冷却で行うが、冷却を強くするとワークの側面からフランジ部にかけての加工熱のパンチへの放熱量が増え、成形性向上に加熱が求められるこれらの箇所温度保持に不利になる。これに対し加工中ワーク底にのみ接している金型であるノックアウトを冷却することで、パンチの冷却温度を緩くし、側面からフランジ部にかけてのパンチへの放熱を抑制する方法を研究した。

これに対し内部に螺旋状の穴を加工したノックアウトを作製、この穴を通した空冷に

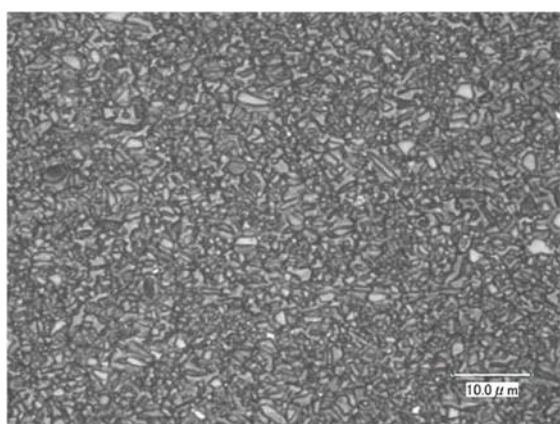
成功した。

【5. 低熱伝導金型（ダイ）による深絞り量産加工の実現】

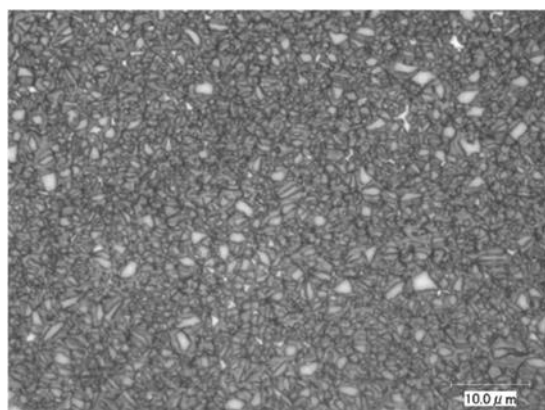
【5-1】超微粒超硬と同等硬度を持つサーメット材金型の開発

サーメットは、従来切削チップ等の大きさにしか加工できなかったが、近年、より大きな加工が可能になり、プレス絞り金型（ダイ）としての使用事例も試作では報告されている。しかし、このサーメットを素材とした深絞り金型（ダイ）で試作を行ったところ、通常使用している高硬度仕様である超微粒超硬金型に比べて磨耗の進行が著しい結果となった。サーメットの硬度は HRA90.0 であって、これを超微粒超硬と同等の HRA92.0 に引き上げる開発が必要となった。

サーメット材料の原料粉末の混合条件、および電気炉による焼結条件の種々の組み合わせでの実験を重ね、大幅な改善を図り、従来法では得られなかった硬度 HRA92.0、良好な合金組織、金型材料として求められる各機械的性質を有した新材料を完成した。



従来品組織



開発品組織

【6. 温間加工によって起き易くなる材料の金型（ダイ）への焼き付き防止】

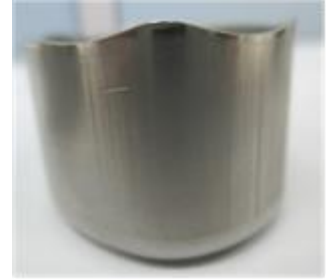
【6-1】低摩擦係数素材であるサーメットの耐焼き付き性の検証

絞り加工では、材料が金型（ダイ）に凝着する「焼き付き」という現象がある。これは材料とダイのお互いの金属どうしの化学結合で、温度が高くなる程、起き易くなる。オーステナイト系ステンレスは熱伝導率が低いことから加工熱が溜まり易く、よって常温加工でも焼き付きが起き易い。温間絞りである当該開発技術ではその傾向が大きく増

加することが確実であり、この焼き付きに対する効果的な防止策の実施が必須である。これに対して、深絞り用金型として一般的な超硬の半分程度の摩擦係数であるサーメットの、耐焼き付き性を検証した。

検証結果、サーメットダイで加工したワークには、右写真の通り、金型の焼き付き跡である縦筋が入り、耐焼き付き性効果としては不十分であることが判明した。

この結果から、焼き付き抑制にはコーティングが必要であることが確認された。



【6-2】耐焼き付き性向上サーメット表面処理方法の開発

当該開発品は厳しい深絞りであることから、コーティングは密着性の高い CVD コーティングが必要となる。サーメットに対する CVD コーティングの実施例は無く、これを開発した。

超合金等で開発が進められている潤滑剤保持効果の高い表面処理方法のサーメットへの適用の妥当性を確認、サーメット材金型への CVD コーティング処理技術を開発し、温間加工における耐焼き付き性向上の効果を確認した。

CVD コーティングを実施したサーメットダイを使用して加工を実施、コーティング無しのダイの使用時に発生していた焼き付きが抑えられていることを確認した（右写真）。



【7. 局所加熱絞り加工成形シミュレーション手法の確立】

【7-1】場所により異なる強度を持つ被加工材に対する絞り加工成形シミュレーション手法の確立

加工するブランク及び第二絞り以降のワークは、加熱と冷却により場所によって異なる強度になる。工程設計するにあたり実施する成形シミュレーションにおいて入力する被加工材の強度は、従来は当然ながら一つの値であるが、当該開発技術では一つの材料に対し場所によって異なる強度の設定が必要となる。これに対し、近年開発された、材料の異なるブランクを溶接したテーラードブランクの成形シミュレーションの手法を参考として、このような条件の強度入力とそれを基にしたシミュレーションが可能となる

シミュレーション手法の確立を研究した。

温度を考慮したシミュレーションを行う場合、熱と構造の連成解析を行う必要がある。連成解析は、成形に伴う発熱や金型への熱移動を考慮できるので正確である一方、解析に多大な時間を要する、構造と熱は基本単位形が異なるため設定が煩雑、といったデメリットがある。そこで、温度上昇によるワークの軟化を温度依存性関数として定義するのではなく、温度の異なる部分を強度の異なる材料として定義することで簡略化した。図4に手順をしめす。

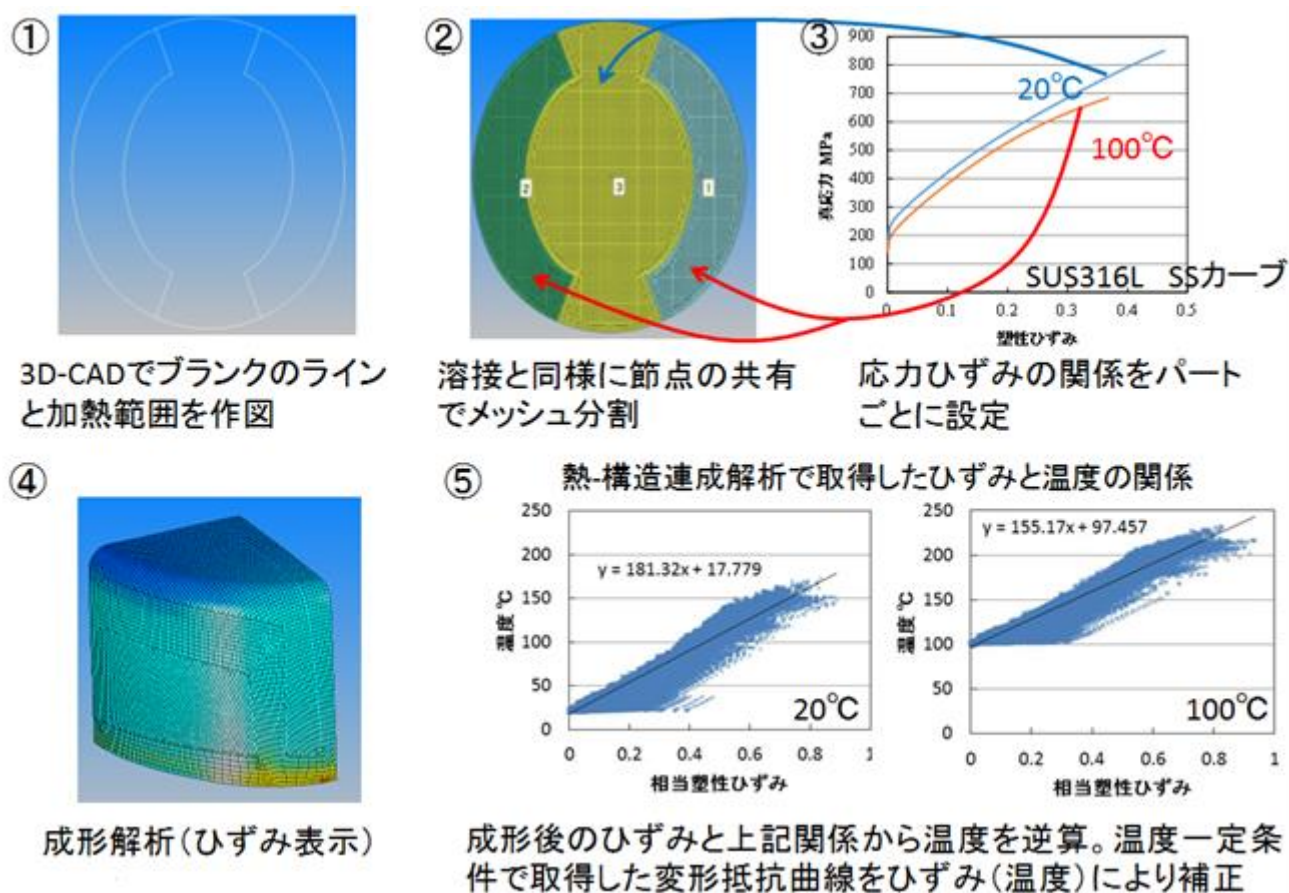


図4 高速温間絞りのシミュレーション手法

解析のモデル化については、テーラードブランクの成形解析を基本とした。つまり、強度の異なる材料が接合されているという前提で、ワークの温度分布を考慮した(手順①②③)。しかしそれだけでは、加工発熱に伴う材料の軟化を考慮できない。そこで、ひずみ値から発熱量(成形後の温度)を想定し、後工程での成形開始時のワーク温度を見積もることで、次工程でのワークの強度を補正することにした(手順⑤)。

上記の手法を採用することで、陰解法ソリッド要素での熱構造連成解析を、陽解法

シェル要素あるいはソリッド要素での構造解析にすることができ、解析時間を大幅に短縮することができた。

【8. 当該開発工法での安定連続生産の実現】

【8-1】 連続生産でのワーク温度バラツキの把握及び管理方法、条件の確立

高周波誘導による自動送り材の加熱、低熱伝導金型を用いた加工発熱利用によるワーク加熱、これらの加熱方法を用いた工程で安定した連続生産を実現するには、それぞれの加熱法での材料（ワーク）の温度バラツキを把握し、そのバラツキを管理可能な範囲に抑える為、バラツキに影響する因子を特定して、その管理方法と管理条件を確立する必要がある。

試作生産を通じた確認を計画したが、開発製品の寸法変更による金型再設計、再製作等による開発スケジュールの遅れが生じ、全工程を通じた連続生産を実現するに至らなかった。事業期間終了後、引き続き連続生産を目指した開発を行う。

【9. 試作缶の評価】

【9-1】 試作缶評価を行う電池加速試験条件の設計及び確立

電池を組み込む機器が使用される要求寿命において、曝される温度、湿度分布から電池への熱影響、水分侵入を考慮して試験条件を設計。特に高温領域がネックのため、高温域における電池評価を実施。平行して顧客要求の整理と放電、充電条件の提案による主体的な評価方法を確立し、10年保証に合致した加速試験条件を設計、評価項目を作成して、顧客に提出した。

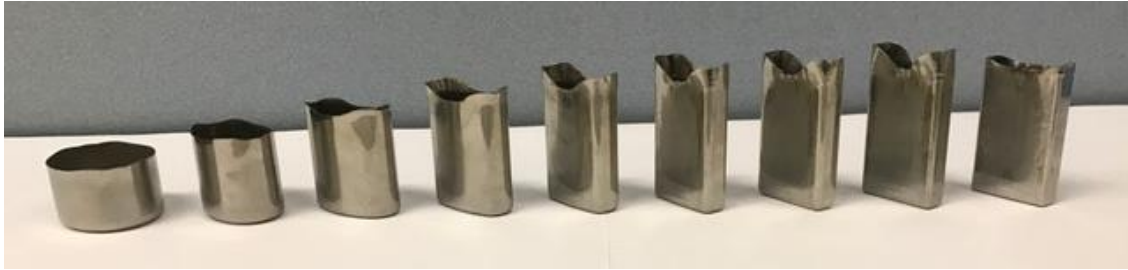
【9-2】 開発された缶の評価

試作缶の作製スケジュールが遅れ、試作缶が提出できず、評価は未実施。事業期間終了後、引き続き試作缶の作製に取り組み、サンプル提出、評価を目指す。

【10. 開発した要素技術を用いた角深絞り加工の実現】

【10-1】 加工エネルギー量、加工ストローク長さ、工程数、これらを市販プレス機で実現可能にする工程レイアウトの確立

開発したシミュレーション及び各要素技術を用いた試作生産を通じて工程レイアウトの確立を進めた。結果、使用した市販のプレス機で、計画した工程数で、最大の課題であった破断を発生させることなく成形することが出来た（下写真）。



第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

- 5spm 前後の低生産性が課題であった従来の温間絞り工法に対し、加熱方法を主とした開発によって 60spm まで対応可能な高生産性の温間絞り工法を実現することが出来た。
- この温間絞り工法の生産性向上の研究開発の中で、角絞りの成形性向上に資する従来に無いブランクの加熱温度分布を成形シミュレーションから見出した。
- 量産の深絞り金型材としては実績が乏しかったサーメットを、超微粒超硬と同等の HRA92.0 の硬度を達成し、同時に CVD コーティング処理を実現したことにより、量産使用の目途を立てた。

3-2 研究開発後の課題

製品仕様の変更等による研究開発スケジュールの遅れにより、開発した高生産性の温間絞り工法による全工程を通じた自動連続生産の実現には至らなかった。事業期間終了後、引き続きこの開発を進める。

3-3 事業化展開

本開発品の顧客であるマクセル㈱で 2018 年に試作缶の評価を実施、2020 年からの量産化への準備を進める。石崎プレス工業㈱では、2018 年に試作缶納入を実現し、その後 2020 年からの量産化に向けた量産試作を通じた課題抽出とその解決を通じて量産条件の確立を進める。