

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超高強度鋼板対応型複合プレス成形加工プロセスの構築」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 一般社団法人日本金属プレス工業協会

## 目次

第1章 研究開発の概要	2
1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1.1.1 背景	2
1.1.2 研究目的	3
1.1.3 研究目標	3
1.1.4 研究開発概要	4
1.2 研究開発体制	6
1.2.1 研究開発委員会	6
1.2.2 研究開発及び管理体制	7
1.2.3 研究者および協力者一覧	9
1.2.4 研究実施場所	10
1.3 成果概要	11
1.4 当該研究開発の連絡窓口	11
第2章 研究開発内容	12
2.1 冷間成形による成形不良対策課題への対応	12
2.2 熱間成形による成形不良対策課題への対応	20
2.3 最適プロセス評価構築課題への対応	24
2.4 材料・成形データベース構築課題への対応	25
2.5 新たな成形技術の普及課題への対応	26
第3章 全体総括	27
3.1 本研究開発事業の成果	27
3.2 今後の課題	27
3.3 事業化について	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

#### 1.1.1 背景

高強度鋼板を成形して製品にする技術はまだ十分に確立されていないのが現状である。

特に、引張強度が1 GPa以上の超高強度鋼板を採用した成形品は非常に限定されている。

これは、従来からの冷間プレス成形加工が、金型成形形状修正と試し打ちの繰り返しによるトライアンドエラーに依存した成形不具合対処法を基盤としていることから、成形加工技術が材料の高強度化に対応できていないことに大きな要因があると考えられる。

昨今、材料の高強度化に対応した新しいプレス成形技術として、板材を加熱することで変形抵抗が減少して成形荷重及びスプリングバックが減少し成形性が増加する熱間プレス成形加工が注目され始めている。しかし、現状、中小企業が生産を担っている小物部品では熱間プレス工法が採用された実績が未だ無い等、今後の実用化開発とさまざまな部品及び企業での適用拡大が期待されている。

また、従来の冷間プレス成形加工においても、スプリングバックの見込み形状設計等の取り組みがなされてきた。一方、生産現場では、サーボプレス機械が、新しいプレス機械として生産現場で本格的に導入され始めてから10年弱となるが、ユーザー側（生産現場）がサーボの特徴を把握して、特性を生かした成形技術を開発しているとは言い難い状況にある。サーボプレスの特性を十分に活用することで、高強度鋼板のプレス成形加工が可能となる等、実績としての効果が期待されている。

#### (1) 軽量化

近年、環境保護意識の世界的な広がりや原油高等により、燃費の良い車へのニーズが一層高まっている。燃費の向上には「車両の軽量化」が有効である。車両重量に占める車体の重量は約35%であり、その大部分を占めるプレス部品の軽量化が、車両重量の低減に対して非常に効果が大いなのは明らかである。鋼板の高強度化は、強度を維持したまま板厚を小さくすることが可能であり、車体軽量化と衝突安全性という相反する難題を解決する方策として非常に重要である。

車体骨格に積極的に採用された590MPa級高強度鋼板から、更なる高強度化（980MPa級以上）を行う場合の軽量化効果について、FEM解析による曲げ圧壊評価を行なった事例がある。590MPa級から980MPa級への高強度化することで、同等の平均崩壊荷重であれば板厚ワンゲージダウン（例えばt1.2 mm→t1.0 mm）が可能である。また、軸圧壊では板厚の影響が大いいため、軸圧壊部材への超高強度鋼板採用が効果的であるといえる。

#### (2) 短納期化

高張力鋼板の適用に際しては、成形性及び寸法精度不良の予測、対策が難しいばかりでなく、金型表面硬化等の処理が必要となることによって金型修正が難しくなり、プレス成形不良発生に伴う金型再設計・製作作業の繰り返しが量産準備期間でのクリティカルパス

となる。そのため、量産準備期間短縮の観点からも従来の板金加工以上に成形性事前検討の精度向上による金型設計製作期間短縮が必要不可欠である。

### 1.1.2 研究目的

一般社団法人日本金属プレス工業協会では、これまでにプレス成形加工技術の研究機関、プレス加工メーカー、成形シミュレーション開発会社等と、プレス成形加工技術の研究開発を実施してきた。先に実施した「高張力鋼板によるプレス加工法構築支援システムの開発」では、「高張力鋼板の材料モデルの研究」により、高張力鋼板（490～790MPa）の材料データを数多く取得し、その基礎的特性を見極めることに成功した。この基礎データに基づいて、成形シミュレーションによる「スプリングバック予測」の精度向上を図ることもできつつある。

しかしながら、生産現場においては、より強度の高い鋼板（980～1470MPa）の活用が急務となっている。本研究開発では、これまでに構築した高張力鋼板によるプレス加工技術を基盤としながらも、実用的な超高強度鋼板のプレス加工技術を構築する。

また、先の研究開発事業では、「成形形状修正の実験」、「形状不良対策課題への対応」において、実試作によるスプリングバック量見込み予測等の高張力鋼板のプレス加工に係る基礎的な技術開発を行った。本研究開発では、これらの成果を元に、プレス機械の精密な制御等による加工技術を開発し、研究開発力が十分ではない多くの小規模プレスメーカーにおいても、高張力、超高強度鋼板のプレス加工を可能にする各加工技術を複合した成形加工プロセスの構築を目指す。

### 1.1.3 研究目標

超高強度鋼板は、一般的に引張強度、降伏強度が高くスプリングバック量が大きくなる特徴がある。また、材料変形限界が狭く亀裂が発生しやすくなるといった性質がある。特に、引張強度が600MPaを超えるとスプリングバック量の予測や亀裂の発生予測が極端に困難になる。R値は1以下になり伸びは20%以下に減少する難加工材となる。これらの問題の対策として、製品形状の単純化、曲げ成形可能な形状設定等があるが、基本的には型・機械を工夫して新たな成形法を確立するしかない。これまでの研究開発では、スプリングバック量を見込んだ形状設計技術を構築した。本開発では、従来のプレス機械（クランクプレス）では不可能であった下死点でスライドを停留させて加工力を加えることができる等サーボプレス機械の特性を利用して、スプリングバックを抑える成形技術を構築する。

これまでに研究した高張力鋼板以上に、超高強度鋼板の冷間プレス成形では、形状不良、高い成形荷重等のハードルがますます高くなる。そのため、従来は工程の増加や生産性が劣ることにより適用が難しくミッション部品等のみで実施されていた、熱処理の活用がトータルプロセスとして視野に入ってきている。具体的には、スプリングバックと延性の問題を解

決するために、塑性加工と熱処理を組み合わせた熱間プレス成形である。各々の要素技術はすでに完成度の高いものである。

しかし、冷間プレス成形に対抗できるコストパフォーマンス等優位性を確立するには、薄鋼板に最適化された製造プロセスにする必要がある。

本開発では、超高強度鋼板に関する熱間プレス成形技術を構築し、冷間プレス成形との棲み分けを明らかにする。

超高強度鋼板では、スプリングバックを完全に抑制することは困難であり、金型製作段階で更なる対策が必要となる。具体的には、スプリングバック量を予測し、見込み形状として金型へ反映する方法が一般的である。事前予測方法の一つに、成形シミュレーションがあり、その役割は非常に高くなっている。これまでの研究において取得した高張力鋼板の材料データを元に、スプリングバック量予測技術の精度向上を図ってきている。本開発では、超高強度鋼板に関する成形シミュレーション予測精度を検証するとともに、従来のシミュレーションでは対応できていないサーボプレス機械による工具制御、熱間プレス成形における熱影響をモデル化し、サーボプレス、熱間プレスによる成形予測を可能にする成形シミュレーション機能を開発する。

#### 1.1.4 研究開発概要

##### (1)研究開発の概要

本研究開発では、スプリングバック量を見込んだ現状の設計技術を基に、下死点でスライドを停留させて加工力を加えることができるサーボプレス機械の特性を利用して、スプリングバックを抑える成形技術を、成形シミュレーションを活用し構築する。

また、高張力鋼板以上に形状不良を生じやすく、高い成形荷重を必要とする超高強度鋼板の成形性を向上させるため、成形シミュレーションを活用して熱間プレス成形技術を開発する。

##### (2)実施内容

###### ①冷間成形による成形不良対策課題への対応

###### ①-1 冷間プレス用金型構造の検討

成形シミュレーションにより超高強度鋼板のプレス成形時に発生するワレ・シワ・スプリングバック等の成形不良を事前に把握して、成形可能な成形形状を定義する。さらに、成形解析により算出された成形力をもとに金型の静的構造解析及び強度解析を行うことにより、金型の撓み現象を把握して、有害な撓みや変形が発生しない高剛性かつ高強度な金型構造を検討する。

###### ①-2 サーボプレス機械を使用した成形実験による成形性検証

###### ・スライド速度可変機能の活用

サーボプレス機械が有するスライド速度可変機能を活用し、拘束摺動時の摩擦特性の変化や拘束変形時の材料特性の変化を活用した成形性向上によるワレ・シワ低減の効果を確認す

る。

・下死点停留機能の活用

超高強度鋼板の成形では、下死点停留機能等によるコイニング効果によりスプリングバックが抑制できることが知られている。この機能を活用し、コイニング回数、コイニング圧とコイニング時間等の加工条件の影響を調査して、スプリングバック量を抑制し高い寸法精度が得られる効果を把握するとともに最適な加工条件を特定する。

②熱間成形による成形不良対策課題への対応

②-1 熱間プレス成形条件の検討

より難成形な部品に対しては、熱間プレス成形を適用する。材料を炉で加熱後、熱間でプレス成形しながら材料を冷却して熱処理（焼き入れ強化）を行なうために必要となる材料の加熱温度及び加熱時間、冷却温度及び冷却速度等を検討し、材料の焼き入れ効果（強度の向上）を確認したうえで、実際の設備による加熱制御及び作業工程を確認する。

②-2 熱間プレス用金型構造の検討

鋼板の冷却は金型への伝熱に依存していることから、焼き入れによる材料強化が可能な金型の構造、及び冷却の仕組みを検討する。また、プレス機械下死点時の鋼板と金型間の不十分な接触により伝熱が阻害されて冷却速度が低下する現象が回避できる金型構造、及び連続生産等による金型温度の上昇を防止するために、冷却効果が十分確保できる金型構造を検討する。

②-3 熱間プレス成形実験による成形性検証

実際に熱間プレス成形実験を行なうことにより、成形加工過程での成形品品質を悪化させる要因を明かにし、プレス機械等設備及び金型構造面からの対策と工程内容変更も含めて成形方法を検討する。

また、酸化スケールの除去や成形品のピアス加工可否など、付随する問題点の確認を実施する。

③最適プロセス評価構築課題への対応

③-1 成形シミュレーション手法の構築

薄板プレス加工に適用されている弾塑性 FEM を採用して、超高強度鋼板の材料モデル、解析に用いる要素種、金型との接触条件等による影響を研究することにより、超高強度鋼板のプレス加工におけるワレ・シワ及びスプリングバックの高精度な予測が可能な解析手法を構築する。また、サーボプレス機械のスライド速度可変機能、下死点停留機能を解析モデルとして取り込み、サーボプレス成形過程における成形シミュレーション解析手法を構築する。更に高温時の材料特性等熱の影響を考慮した解法を研究開発し、熱間プレス成形過程における成形シミュレーション解析手法を構築する。

③-2 成形実験結果対解析結果比較検証

実際の成形実験（冷間及び熱間）により取得される成形品及び成形過程時の温度や成形荷重情報等をもとに、成形シミュレーション解析結果の比較を行なうことにより、解析精度を

把握して最適な解析手法を構築する。

③-3 実成形品による最適プロセス検討

実際の部品に超高強度鋼板を採用するに際して、成形シミュレーション及び実験データをもとに、最適な成形プロセス及び成形可能な成形形状の定義、さらに成形条件を設定して成形実験を行なうことにより、プロセス評価手法を検証する。

④材料・成形データベース構築課題への対応

各企業が独自に準備することが難しく共有利用が可能な材料特性データ、成形評価のための基本データ及び成形シミュレーション実行に必要な成形条件データ等が、ネットワークを介して誰でも利用できる環境を目指した仕組みを構築する。

⑤新たな成形技術の普及課題への対応

超高強度鋼板の成形加工に関する最新技術が、実際の適用事例や適用段階での留意点及び課題等役に立つ技術情報も含めて取得できる技術教育の場をプレス加工製造業者に定期的に提供していく枠組みを構築する。

1.2 研究開発体制

1.2.1 研究開発委員会

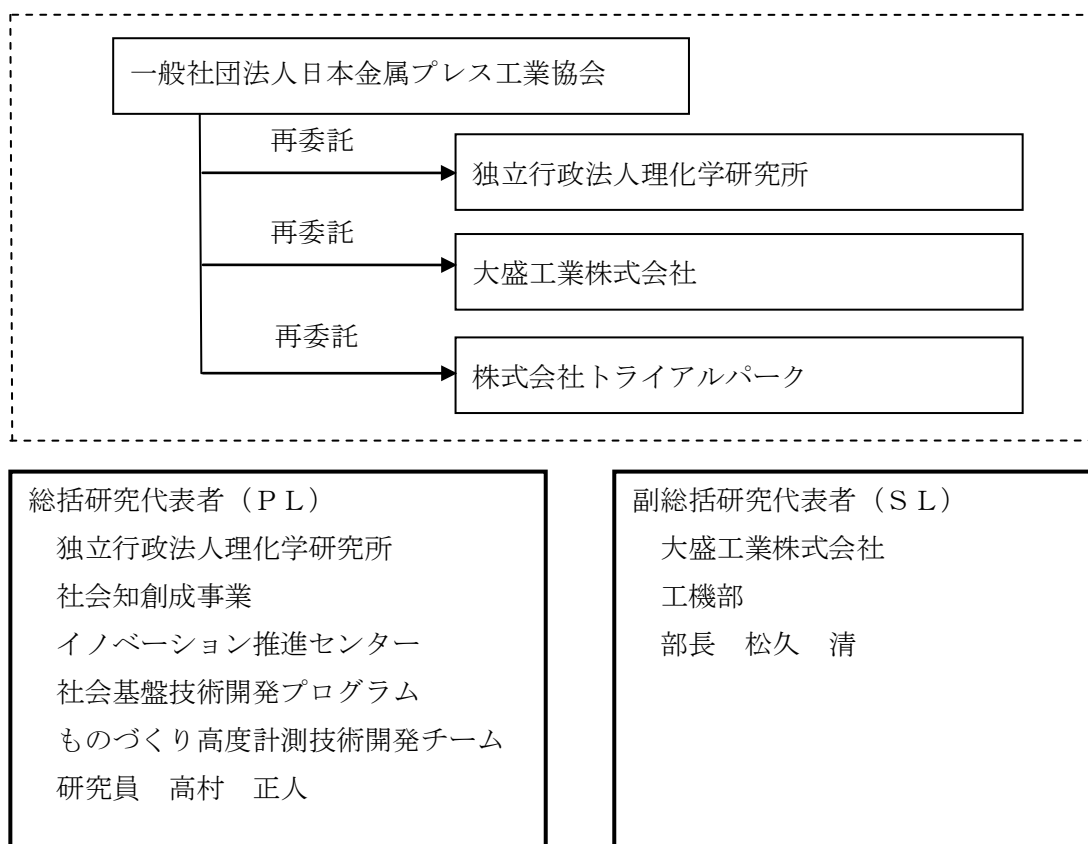
研究開発の円滑な推進のために「複合プレス成形加工プロセス開発委員会」を設置し、有効に活用する。

委員名簿は次の通りである。

氏名	所属・役職	備考
高村 正人	独立行政法人理化学研究所 社会知創成事業 イノベーション推進センター 社会基盤技術開発プログラム も のづくり高度計測技術開発チーム 研究員	P L
松久 清	大盛工業株式会社 工機部部長	S L <input type="checkbox"/> 委
須長 秀行	株式会社トライアルパーク 取締役	<input type="checkbox"/> 委
西村 滋	株式会社トライアルパーク 業務部 主任	<input type="checkbox"/> 委
南澤 正孝	一般社団法人日本金属プレス工業協会 専務理事	<input type="checkbox"/> 委
中川 朝彦	一般社団法人日本金属プレス工業協会 業務部 技術主査	<input type="checkbox"/> 委

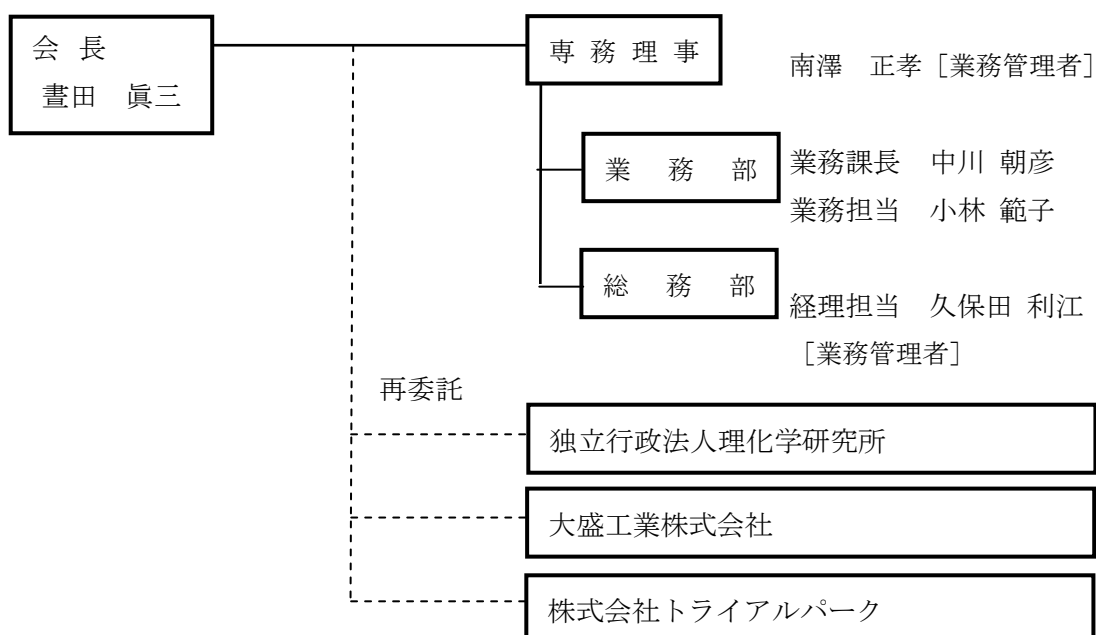
## 1.2.2. 研究開発及び管理体制

### (1) 研究開発体制



### (2) 管理体制

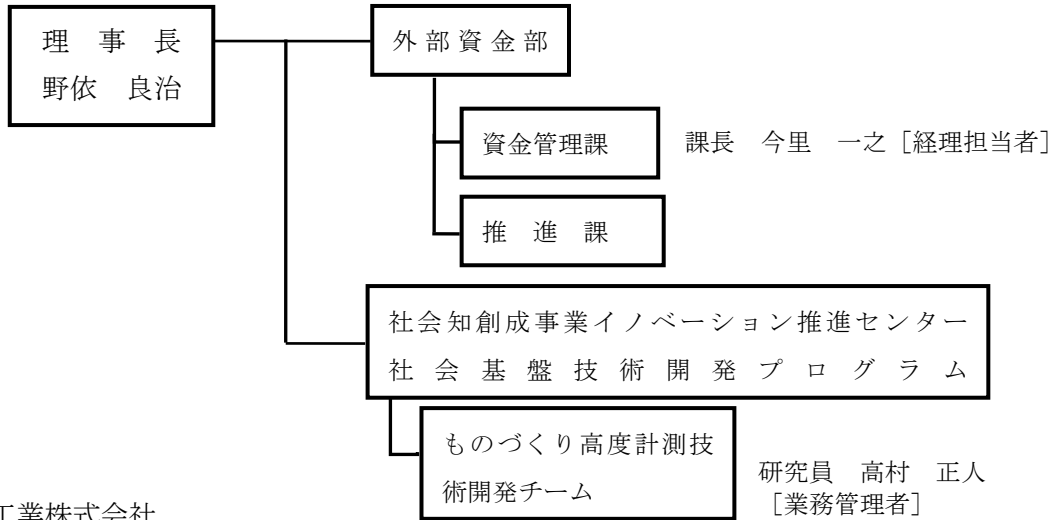
#### ① 事業管理機関 [一般社団法人日本金属プレス工業協会]



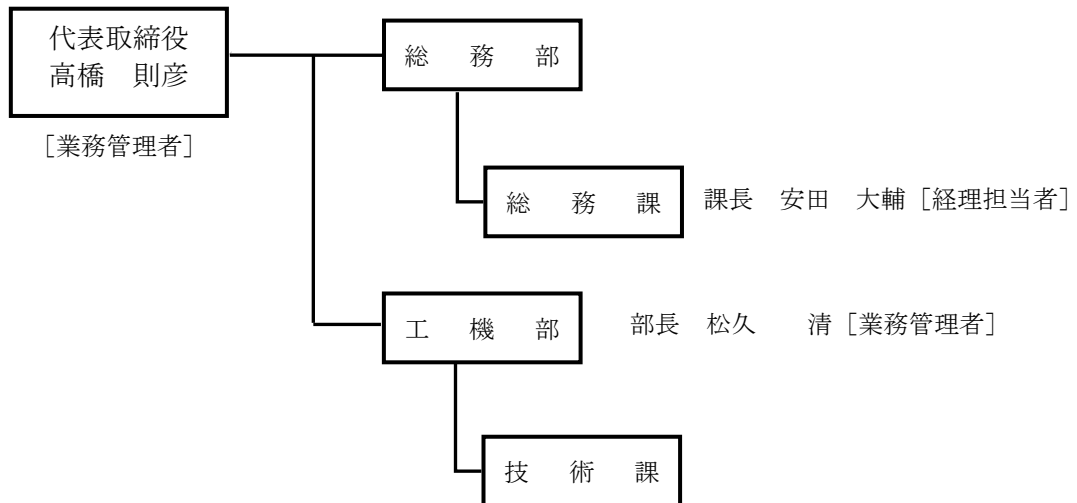


② 再委託先

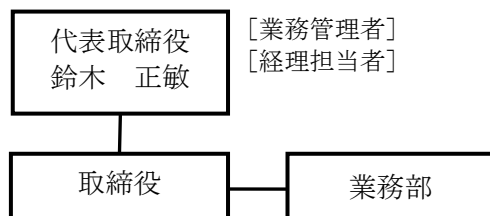
独立行政法人理化学研究所



大盛工業株式会社



株式会社トライアルパーク



### 1.2.3 研究者および協力者一覧

【事業管理機関】 一般社団法人日本金属プレス工業協会

#### ①管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
南澤 正孝	専務理事	⑤
小林 範子	業務部 業務課長	⑤
中川 朝彦	業務部 技術主査	⑤

#### ②研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
中川 朝彦（再）	業務部 技術主査	④

【再委託先】 ※研究員のみ

独立行政法人理化学研究所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
高村 正人	社会知創成事業イノベーション推進センター社会基盤技術開発プログラムものづくり高度計測技術開発チーム研究員	①②④

大盛工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
松久 清	工機部 部長	①②③
小清水 弘光	工機部 部長（担当部長）	①②③
佐藤 秀之	工機部 次長	①②③
吉田 中道	工機部技術課 課長	①②③

株式会社トライアルパーク

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
須長 秀行	取締役	①②③
白水 脩	業務部 課長	①②③
西村 滋	業務部 主任	①③
見原 俊介	業務部 担当	②③
村井 香	業務部 担当	①③
西川 真悠子	業務部 担当	①③

#### 1.2.4 研究実施場所

##### ① 事業管理機関

一般社団法人日本金属プレス工業協会（最寄り駅：東京メトロ日比谷線 神谷町駅）  
〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館 212 号室

##### ② 研究実施場所（主たる研究実施場所については、下線表記。）

独立行政法人理化学研究所（最寄り駅：東武東上線、東京メトロ有楽町線 和光市駅）  
〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

大盛工業株式会社（最寄り駅：小田急江ノ島線 六会日大前駅）

〒252-0813 神奈川県藤沢市亀井野 3093

大盛工業白河工場株式会社（最寄り駅：JR 東北本線 白河駅）<設置機械借用等>

〒961-0304 福島県白河市東工業団地字北 1 番

株式会社トライアルパーク 本社（最寄り駅：四ツ谷駅）

〒160-0003 東京都新宿区本塩町 4-4

株式会社トライアルパーク 和光事務所（最寄り駅：東武東上線（東京メトロ有楽町線）  
和光市駅）

〒351-0104 埼玉県和光市南 2-3-13 108 号室

一般社団法人日本金属プレス工業協会 <再掲>

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館 212 号室

### 1.3 成果概要

冷間プレスによる高張力鋼板成形技術については、実操業で 370MPa 級鋼板が適用されている絞り成形部品に対し、サーボプレスのスライドモーション最適化機能を活用することにより 780MPa 鋼板の適用を可能とする成形技術が確立できた。また、曲げ成形部品に対しては、スプリングバック量半減を達成できた。

熱間プレスによる成形技術については、サーボプレスのスライドモーション最適化機能を活用することにより、1GPa 級の硬度と極めてスプリングバックの少ない成形技術が獲得でき、中小企業における試作等への適用が可能であることが確認できた。ただし、潤滑油等の工夫による酸化スケール低減技術については、十分な成果が得られなかった。

成形シミュレーション技術については、弱連成による熱間プレスシミュレーション技術が確立できた。また、サーボプレスのスライドモーション変更の効果が再現できるよう、Norton のクリープ則を導入した粘弾塑性解析手法を定式レベルから開発し、単軸引張試験から得られる応力緩和特性から材料パラメータを同定する技術と合わせ、実験(高張力鋼板絞り成形)との比較検証において、良好な一致が得られる解析技術として確立できた。

### 1.4 当該研究開発の連絡窓口

住所：東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館 212 号

所属役職・連絡担当者名：専務理事南澤 正孝

## 第2章 研究開発内容

### 2.1 冷間成形による成形不良対策課題への対応

超高強度鋼板は、一般的に引張強度、降伏強度が高くスプリングバック量が大きくなる特徴がある。また、材料変形限界が低く亀裂が発生しやすい性質も併せ持つ。引張強度レベルが590MPaを超える鋼材では、スプリングバック量や亀裂発生の予測が極端に困難となり、これらの問題に対してこれまでは、製品形状の単純化や曲げ成形可能な形状設定等の対策が採られてきた。

また、これまでの研究開発において、シミュレーションによる高強度鋼板（高張力鋼板ともいう440MPa～780MPa）のスプリングバック量の予測技術の構築を行ってきており、スプリングバック量を見込んだ形状設計技術の向上を図ってきている。

しかし、これまでに研究対象とした高強度鋼板以上に、超高強度鋼板（980～1470MPa）の冷間プレス成形では、形状不良、高い成形荷重等のハードルがますます高くなる。そこで本研究開発では、生産現場への導入が進んできているサーボプレス機械による成形技術の高度化により、実用的な超高強度鋼板のプレス加工技術を構築する。

#### 2.1.1. 冷間プレス用金型構造の検討

##### 2.1.1.1. 絞り成形実験用金型

図2.1.1に示したサスペンションアーム取り付け部補強部品の第1工程(1stドロー)及び第2工程(2ndドロー)における絞り限界の向上について検討した。

現行の製品は370MPa級鋼板で製作されているが、昨今の自動車軽量化ニーズにより、更なる軽量化、高強度化が求められている。しかし、現行においても、スプリングバック量を見込んだ複雑な形状設計と、寸法補正のための第2工程(2ndドロー)が必要となっており、370MPa級鋼板においても難易度の高い成形工程となっているため、このままでは440MPa以上への適用は難しい。

まずは、絞り性の検討に欠かせない、クッションピンによる絞り成形を可能な形を採用し、図2.1.2に示す金型を作成した。



図 2.1.1 サスペンションアーム取り付け部補強部品

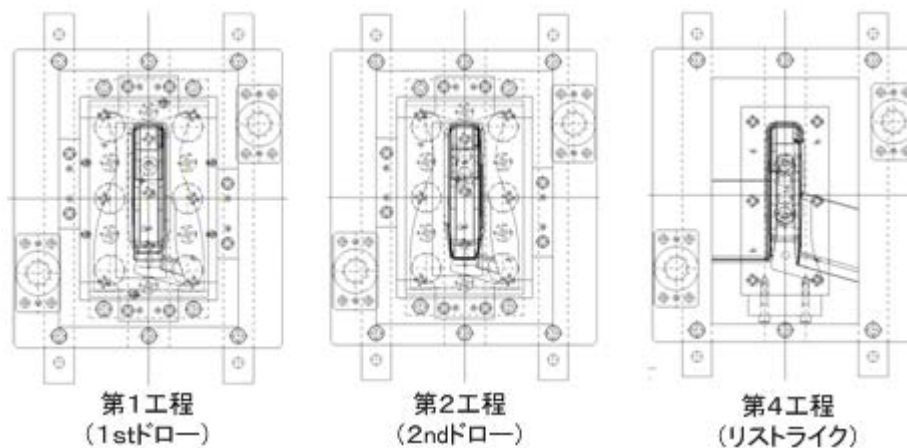


図 2.1.2 絞り成形実験のための成形工程

#### 2.1.1.2. 曲げ成形実験用金型

一方、スプリングバック低減のための曲げ成形品として、図 2.1.3 に示す部品形状、及び図 2.1.4 に示す金型（BND 型）を設定し、サーボプレスのスライドモーション制御がスプリングバックに及ぼす影響の調査に使用した。



図 2.1.3 曲げ成形実験のための成形品形状

図 2.1.4 曲げ成形実験のための金型構造

## 2.1.2. サーボプレス機械を使用した成形実験による成形性検証

### 2.1.2.1. 絞り成形実験

#### ① 1st ドロー形状変更の効果検証

成形限界の向上を狙いとして、1st ドローの形状変更を行った。変更前後の形状の違いを、図 2.1.5 に示す。

今回の形状変更は、780Y による成形実現を目的とし、所謂「オーバードロー」という手法により、ネッキング・破断の緩和を狙ったものである。本手法を採用するに至った技術的背景を、下記に示す。

##### ■ オーバードローの必要性及び有効性

・本製品の破断形態が、パンチ肩で生じる所謂  $\alpha$  破断であることがこれまでの技術的検討からわかっており、パンチ肩での荷重集中を緩和する形状変更（すなわちパンチ肩 R 拡大）が必要である。

・2nd ドローにて、旧 1st ドローとほぼ同等の形状に絞ることになるため、その際の周長変化が生じない（すなわちオーバードロー）形状である必要がある。

・1st ドロー形状変更の有効性については、事前の FEM シミュレーションにより検証済み（後述）である。

##### ■ 形状変更によるデメリットについて

・本製品の成形工程には、元来 1st 及び 2nd ドローが設定されており（2nd ドローは、壁反り対策が主目的）、本件オーバードローの追加を行っても、工程数増加にはならない。

・2nd ドローでの成形量が大きくなるため、荷重増大としわ発生が懸念される。この点については、FEM シミュレーションによる事前確認を実施した。

以上の背景から、第 1 工程をオーバードローの考えで形状変更することにより、効果が大きく且つデメリットの小さい成形性向上が見込まれるとの検討結果に基づく形状変更であると言える。

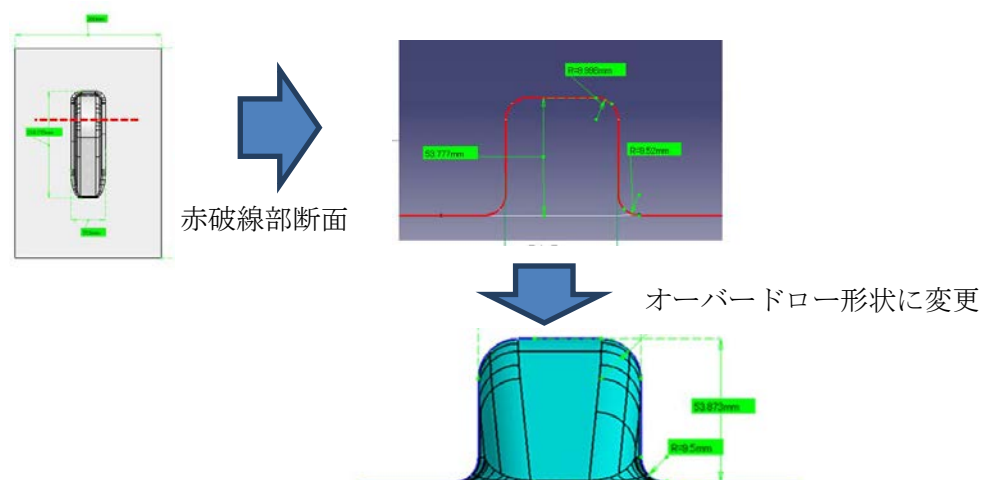


図 2.1.5 1st ドローの形状変更

以上の検討結果から、図 2.1.5 に示すように、パンチ肩 R を拡大し、ブランクホルダープロファイルを幅方向（短手方向）に拡大した。

② スライドモーション制御の効果/メカニズム検証

応力緩和（クリープ）の概念を導入した FEM シミュレーション（第 2 章第 3 節参照）により、スライドモーションの変更が成形性に及ぼす影響の事前検討（後述）が可能となり、成形性向上のメカニズムについての仮説が構築できた。これらのシミュレーション技術とメカニズム仮説の検証を行うために、絞り成形実験を行った。

③ 解析による事前検討

■ スライドモーション制御の効果

応力緩和（クリープ）の概念を導入した FEM シミュレーション（第 2 章第 3 節参照）により、成形速度を変更した際の成形性の違い（板厚分布の変化）について、事前検討を行った。

図 2.1.6 に実験で用いたスライドモーションカーブを示す。SPM=6 程度に相当するクランクモーション (a)、及び相似形のまま 5 倍の速度にしたもの(b)の、計 2 条件を用いて成形を行った。

一方、FEM 解析においては、後述するアルゴリズム及び表 2.1.1（詳細は第 2 章第 3 節参照）のパラメータを採用し、(a)と(b)の各スライドモーションに相当する条件で解析を実施した。

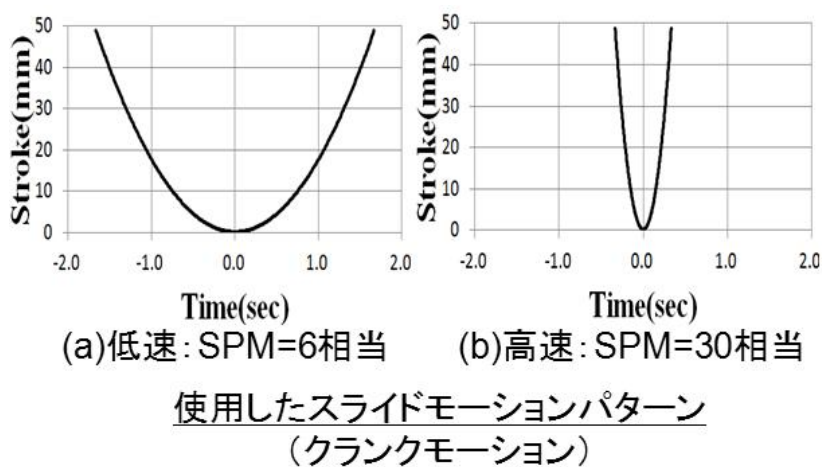


図 2.1.6 解析に使用したスライドモーション

表 2.1.1 解析に用いたパラメータ

Norton		Swift*		
$A$	$m$	$C$ [MPa]	$n$	$\epsilon_0$
$1.0 \times 10^{-226}$	80	1350	0.4	$8.3075 \times 10^{-4}$

\*Approximated by  $\sigma = C(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^n)^{1/n}$



解析結果を、図 2.1.7 に示す。この結果から、ひずみ速度の上昇に伴う  $n$  値の上昇（応力が緩和しにくくなる）から、成形速度上昇による成形性改善を説明することができる。

■ 解析結果(板厚分布)

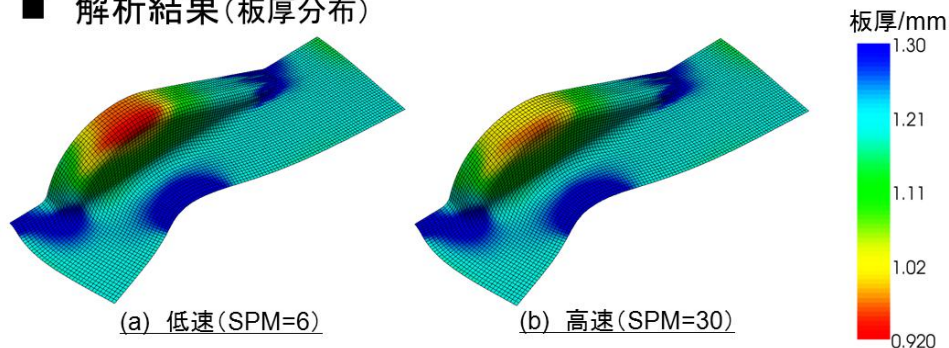


図 2.1.7 異なるスライドモーシオンに対する解析結果

④ 実験結果

■ 1st ドロー形状変更による効果の検証

1st ドロー形状変更有無の比較を、図 2.1.8 に示す。

鋼種	旧金型 1stドロー	改良型 1stドロー	改良型 2ndドロー
590Y1. 2mm			
780Y1. 2mm			
980Y1. 2mm	—		

図 2.1.8 絞り成形結果 (1st ドロー形状変更有無の比較)

図 2.1.8 に示すように、改良型 1st ドローにより、顕著なフレ改善が確認できた。また、改良型 1st ドローにより成形した中間品を 2nd ドロー工程で成形した場合、しわ等顕著な不具合は確認できなかった（壁反り等寸法精度の評価は今回の取組の対象外としているため、計測していない）。これにより、目標としてきた 780Y 材の適用が成功したことになる（上記結

果は、成形速度等の条件を変更しない限り、安定して得られた)。

■ スライドモーション制御の効果

780Y 材に対して、スライドモーション制御 (クランクモーションの速度変更) を行った際の結果を、表 2.1.2 に示す。

表 2.1.2 実験結果 (780Y 材に対してスライドモーション変更)

成形速度	10% (3spm)	20% (6spm)	56% (16spm)	90% (27spm)
780Y1. 2mm 改良金型	△ ネック	△ ネック	○ 成形	○ 成形

シミュレーションによる事前検討のとおり、成形速度が遅いときに板厚減少が大きくなりネックに至ることが確認できた。

⑤ 考察

■ 1st ドロー形状変更による効果の検証

破断発生メカニズム ( $\alpha$  破断) を事前に分析し、それに基づいた対策を施した結果、高ハイテン材 (780Y 材) による成形に成功することができた。

■ スライドモーション制御の効果

シミュレーションによる事前検討の結果のとおり、高速成形条件になるほど DP 材で顕著な n 値のひずみ速度依存性の効果により、 $\alpha$  破断が回避しやすくなるという傾向が確認できた。本部品のような破断形態を示す成形に対しては、破断発生時点のスライドモーションを速くすることによって、n 値のひずみ速度依存性を積極的に活用することが、良好な成形品を得るための指針となることがわかった。

2.1.2.2. 曲げ成形実験

① 成形速度による影響

成形速度がスプリングバック量に及ぼす影響を、図 2.1.9 に示す。

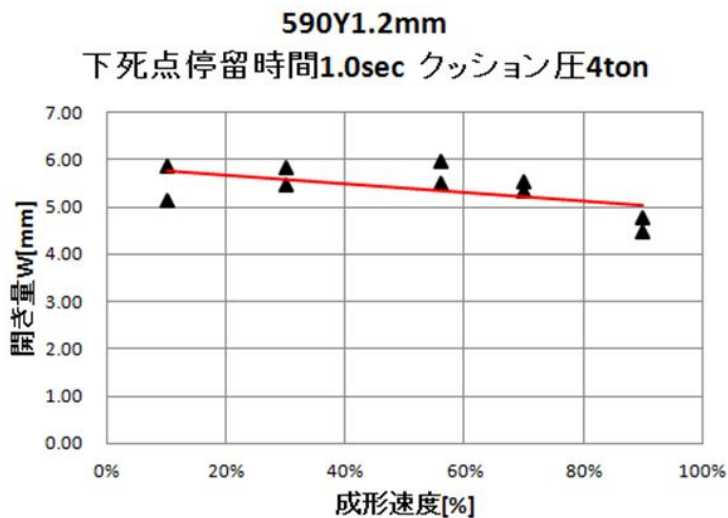


図 2.1.9 成形速度がスプリングバック量に及ぼす影響

成形速度の上昇とともに、スプリングバックが低減する傾向があることがわかる。

② 下死点停留時間による影響

下死点停留時間がスプリングバック量に及ぼす影響を、図 2.1.10 に示す。

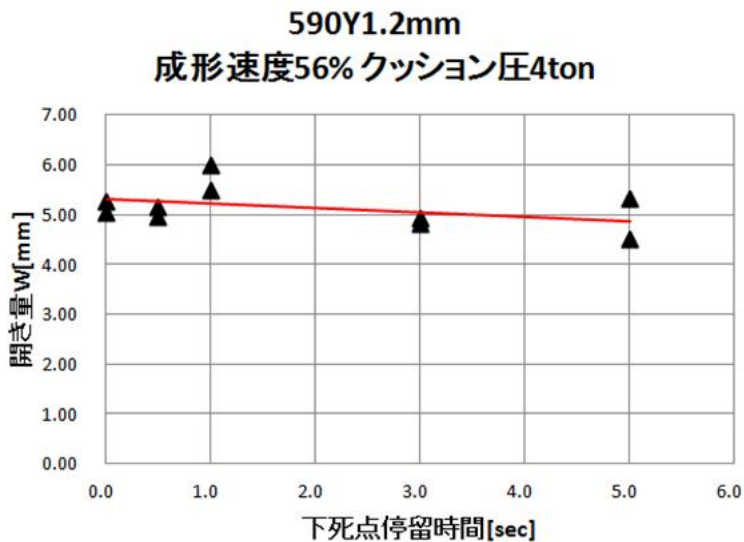


図 2.1.10 下死点停留時間がスプリングバック量に及ぼす影響

③ 最適条件による曲げ成形結果

各鋼種に対して、成形速度及び下死点停留時間が最適となる条件で成形し、標準条件による成形品に対して、どの程度スプリングバック量が減少するかを検証した。その結果を、図 2.1.11 に示す。

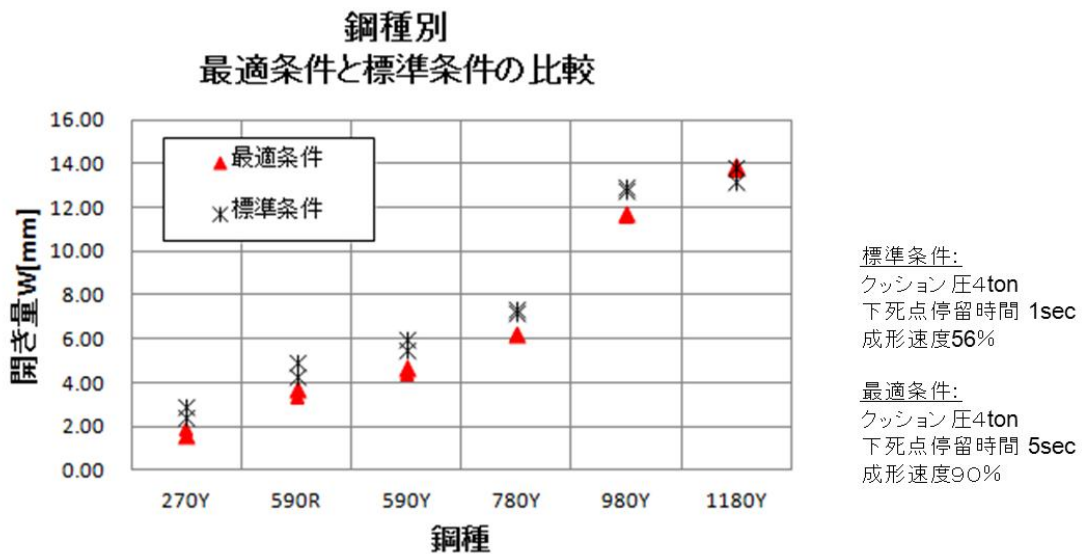


図 2.1.11 標準条件と最適条件の比較

図 2.1.11 で示されるように、鋼種によりばらつきはあるものの、おおむね 10%~20%のスプリングバック低減効果が確認できた。この効果と、コイニング成形による約 40%のスプリングバック低減効果（図 2.14 参照）を合わせると、本課題の目標であったスプリングバック量半減が達成できたことになる。

#### ④ 考察

##### ■ 成形速度による影響

n 値のひずみ速度依存性が支配的に働くとしたら、成形速度の遅い方が塑性流動応力が小さくなり、スプリングバックが低減できると考える方が自然である。しかし、実験結果は（第 5 回、第 6 回ともに）逆の傾向となった。したがって、この現象は n 値のひずみ速度依存性からは説明できず、応力緩和（流動応力が大きい方が緩和幅が大きい）現象から説明づけする方が妥当である。

##### ■ 下死点停留時間の影響

下死点停留時間が長い方がスプリングバック量が小さくなる傾向は、第 5 回実験、第 6 回実験ともに顕著に安定して得られている。前項目の成形速度の影響の出方と考え併せ、本曲げ成形においては、応力緩和現象が支配的に効いている（下死点停留中に流動応力が大きく低下する）と考えることができる。

すなわち、サーボプレスのスライドモーション制御による積極的なスプリングバック制御を考えた場合、材料の応力緩和特性に基づいた加工法を考えることが、より寸法精度の高い部品を得ることにつながるということがわかった。

## 2.2 熱間成形による成形不良対策課題への対応

熱間プレス成形工法には、①冷間成形では得られないレベルの高強度が得られる、②残留応力が小さく寸法精度が得やすい、③大きな成形力が不要といったいくつかの利点があり、かつ上記①に関しては、1.5GPa 級以上の強度が得られるプレス工法は、現在のところ熱間プレス成形しか存在しない。その一方で熱間プレス成形工法では、通常の冷間プレス工法に比べて、(a)生産性が低い、(b)酸化スケールが発生する、(c)成形後の塑性加工が難しい、(d)成形後のアセンブリ工程におけるスポット抵抗溶接が難しい、(e)加工時の加熱によるエネルギー消費が大きい等のデメリットも存在する。

本研究では、上記①～③に示すメリットを最大化し、かつ(a)～(e)のようなデメリットを最小化できる成形条件、金型条件を明らかにして、中小企業における加工技術の一つの選択肢とすることを狙いとしている。本章では、本研究で使用した金型形状や計測した材料特性値について述べる。

### 2.2.1. 熱間プレス成形条件及び金型構造の検討

熱間プレスの適用対象は、高温時の延性の増大を活かしながらも加工硬化特性が期待される「絞り」等の要素が限定的であるべきと考えられる。この点を考慮し、「絞り」の要素を含みながら「曲げ」が主体となり、かつブランクサイズの調整により2次元的なハット曲げ成形実験による、より基礎的検討が可能であることから、国際会議 Numisheet'96（1996年、米国デトロイト）でベンチマーク課題として設定された「S-Rail」形状を採用した。

金型構造の概観を、図 2.2.1 に示す。

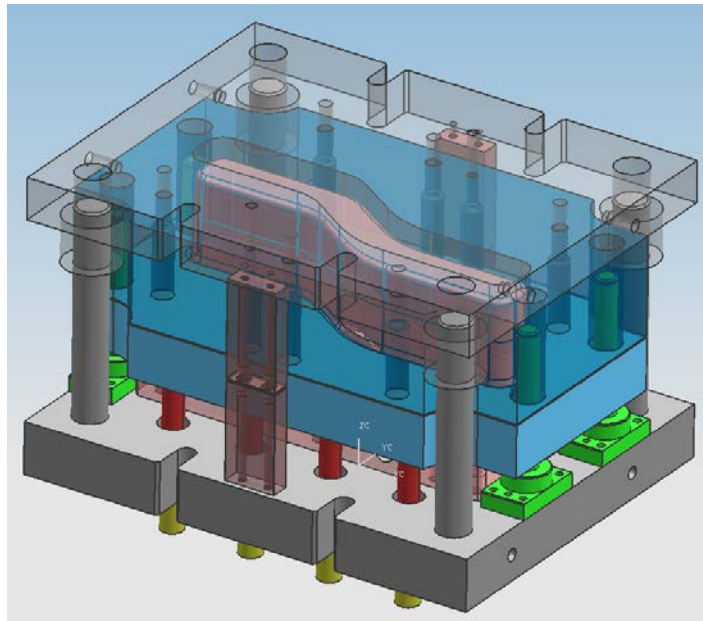


図 2.2.1 熱間プレス実験用 S-rail 成形金型外観図

## 2.2.2. 熱間プレス成形実験による成形性検証

### 2.2.2.1. 熱間成形操作の流れ

熱間成形実験の手順について検討し、下記の通り設定した。

- ①材料を炉内に設置
- ②加熱（オーステナイト単層組織を得るために、5分または10分加熱する）
- ③炉内温度測定（放射温度計）
- ④材料取出し
- ⑤材料をプレス機に設置（このタイミングでも放射温度計で材料温度測定）
- ⑥成形（成形後に再度放射温度計で温度測定）
- ⑦材料取出し
- ⑧型の清掃

上記プロセスを、図 2.2.2 に示す。



図 2.2.2 熱間プレス成形作業の流れ

### 2.2.2.2. 900℃保持時間の影響

900℃保持時間がビッカース硬度に及ぼす影響を、図 2.2.3 に示す。

ビッカース値の最大値、平均値ともに 900℃保持時間増加に従って、硬度が低下する傾向となった。一般的には、5分～10分保持する必要があるとされているが、本ケースでは5分程度が最適であったことがわかる。

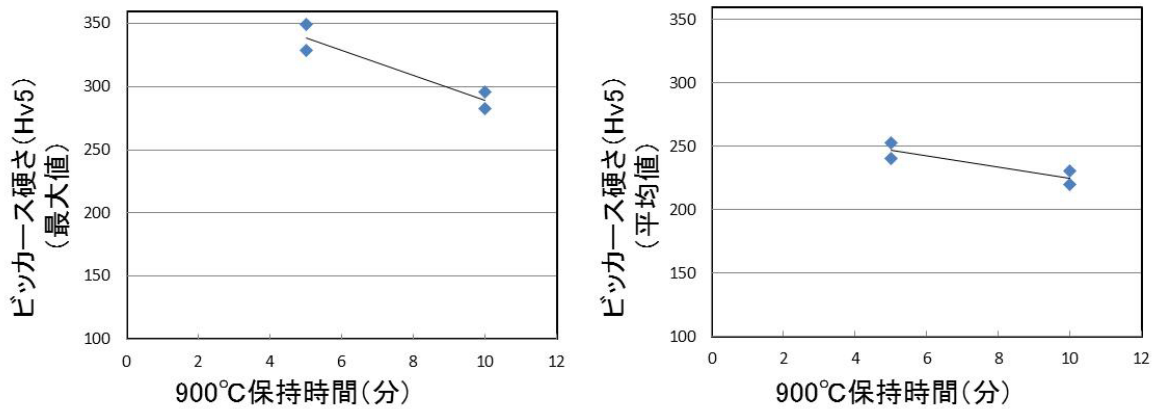


図 2.2.3 900°C保持時間が成形品硬さに及ぼす影響（下死点保持時間は10秒一定）

#### 2.2.2.3. 下死点保持時間の影響

下死点保持時間がビッカース硬度に及ぼす影響を、図 2.2.4 に示す。

最大値、平均値ともに下死点保持時間増加に従って硬度が増したことがわかる。このことから、十分な強度を得るためには、ある程度の下死点保持時間が必要であることがわかる。

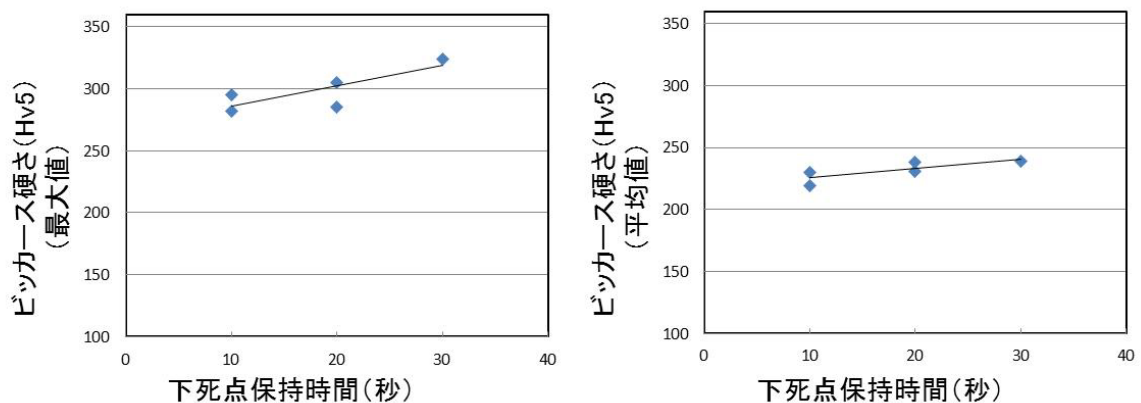


図 2.2.4 下死点保持時間が成形品硬さに及ぼす影響（900°C保持時間は10分一定）

#### 2.2.2.4. 成形速度の影響

成形速度がビッカース硬度に及ぼす影響を、図 2.2.5 に示す。また、成形品概観を図 2.2.6 に示す。

最大値、平均値ともに成形速度の増加とともに硬度が増加している。このことから、冷却が進まないうちに素早く成形を行うことが、高い強度を得るためには重要であることがわかる。また、このメカニズムと連動して、成形速度が速い方が寸法精度が良いこともわかった。

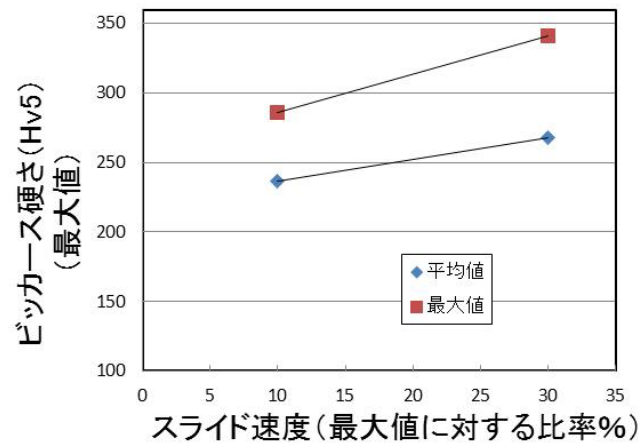


図 2.2.5 成形速度が成形品硬さに及ぼす影響  
(900℃保持時間は 10 分一定、下死点保持時間は 10 秒一定)

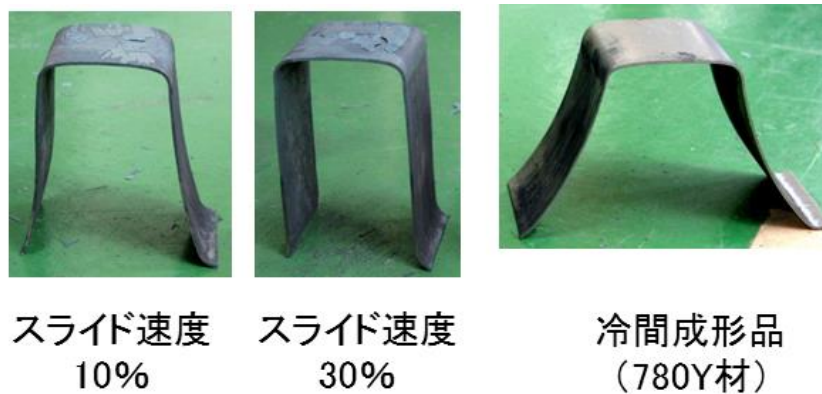


図 2.2.6 成形品概観 (スプリングバックに対する影響)

#### 2.2.2.5. 熱間プレス成形技術のまとめ

これまで述べてきた熱間プレス実験結果、及び考察結果から、下記の結論を得ることができた。

- 1GPa 級相当の硬度を持った成形品を、良好な寸法精度で得ることができた。
- 高温時の材料特性を計測し、最適な絞り条件を見出すことができた。
- 十分な硬度を得るためには、下死点保持時間を長くとる (10 秒以上) ことが必要であることがわかった。
- 成形速度を速くすることにより、硬度、寸法精度ともに向上することがわかった。
- 上記下死点保持時間と成形速度の条件を満たし、かつ生産性を維持するためには、サ



ーボプレスによるフレキシブルなスライドモーション制御が有効であることがわかった。

- 本取組で用いた簡便な設備により十分な品質の熱間成形品が得られることがわかったため、中小企業による少量試作実現の可能性が示唆された。

### 2.3 最適プロセス評価構築課題への対応

本研究では、冷間及び熱間成形に対して、成形性評価のために不可欠となる、材料の粘弾塑性特性を考慮するための解析技術を開発し、弾塑性有限要素法ソフトウェア「TP-STRUCT」に導入した。以下、その定式について述べる。

サーボプレスの特長として、フレキシブルなスライドモーション制御が可能な点が挙げられる。スライドモーション最適制御による成形限界向上のメカニズムを、材料の応力-ひずみ関係のひずみ速度依存性と関連付けて検討することが有効と考えられるが、材料の応力緩和特性から説明できるとする検討例もある。特に、ステップモーションや下死点停留の効果が問題となる場合には、従来の  $m$  乗則によるひずみ速度依存性でその効果を表現することは困難であり、応力緩和現象を陽に扱い、且つそのモデルを用いてひずみ速度依存の加工硬化特性も同時に考慮できるようなモデルが必要となってくる。

本研究では、材料の応力緩和特性を考慮した成形シミュレーションにより、材料の粘弾塑性特性のモデル化について検討するとともに、スライド速度の影響について分析した。下記に、その概要を示す。

以下に示す Norton のクリープ則を用いる。

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A\bar{\sigma}^n \quad (2.3.1)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}^{cr}$  は相当クリープひずみ速度、 $\bar{\sigma}$  は Mises 相当応力とする。

弾塑性解析プログラムに、以下の計算ルーチンを追加する。

各時間増分ステップ終了時に、クリープひずみ速度（増分）とそれによって発生するクリープ応力を見積もり、これを次の時間増分ステップにて不釣り合い力とみなし、前進 Euler 法で陽的に釣り合いを取る。以下にその手順を示す。

- 1) 時刻  $t$  の偏差応力値から、Norton のモデルから構築される以下のクリープ構成則により、クリープひずみ速度（増分）を算出する。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \sigma'_{ij} A \bar{\sigma}^{n-1} \quad (2.3.2)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{cr} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} \Delta t \quad (2.3.3)$$

( $\sigma'_{ij}$  は偏差応力)

- 2) 求めたクリープひずみ速度（増分）を用いて、下記の関係式により時刻  $t$ 、 $t+\Delta t$  間

のひずみ増分を修正する。

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^p + \Delta \varepsilon_{ij}^{cr}$$

( $\Delta \varepsilon_{ij}^e$  は弾性ひずみ増分、 $\Delta \varepsilon_{ij}^p$  は塑性ひずみ増分。以上が追加するルーチン)

具体的には、

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^{e,trial} + \Delta \varepsilon_{ij}^{p,trial} = \Delta \varepsilon_{ij}^{e,t+\Delta t} + \Delta \varepsilon_{ij}^{p,t+\Delta t} + \Delta \varepsilon_{ij}^{cr} \quad (2.3.4)$$

ここで、

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{p,t+\Delta t} = \Delta \varepsilon_{ij}^{p,trial} \quad (2.3.5)$$

を仮定すると、

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{e,t+\Delta t} = \Delta \varepsilon_{ij}^{e,trial} - \Delta \varepsilon_{ij}^{cr} \quad (2.3.6)$$

により、弾性ひずみの増分が求まる。

3) 上記弾性ひずみ緩和から、応力緩和を求める。

弾性ひずみ及び弾性ひずみ増分の各成分は陽には求まらないので、次式により弾性ひずみ減少による応力緩和分を算出する。

$$\Delta \sigma_{ij}^{cr} = D_{ijkl}^e \Delta \varepsilon_{kl}^{cr} \quad (2.3.7)$$

(2.3.2)、(2.3.3)、(2.3.7) 式より、

$$\Delta \sigma_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} D_{ijkl}^e \sigma_{kl}' A \bar{\sigma}^{n-1} \Delta t \quad (2.3.8)$$

この応力増分を用いて、次式に従い応力値を修正する。

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t} = \sigma_{ij}^{trial} - \Delta \sigma_{ij}^{cr} \quad (2.3.9)$$

以下、既存の計算手続きに従えば、時刻  $t+\Delta t$  におけるクリープが考慮された応力値が求まり、それに基づいた不釣り合い消去アルゴリズムが働き、自動的にクリープによる物理量変化が生じる。

## 2.4 材料・成形データベース構築課題への対応

高張力鋼板の成形プロセスを評価する上で必要不可欠となる材料特性（粘弾塑性特性等）のパラメータに関する同定手法（手順）を確立したことにより、成形シミュレーション用データベース造りに向けた基盤構築を達成できた。また、サーボプレスを利用した絞り及び曲げ実験、さらに熱間プレス実験にて取得された成形データを整理することにより、他の部品形状等への応用展開時の設計基本データとして活用できる貴重なデータベースとして構築で

きた。今後、これらの材料・成形データ及び技術情報をもとにセミナー等で配布する資料を作成し、日本金属プレス工業協会主催の「金属プレス加工技術研究会」等技術セミナーを通じて Face to Face を主体に展開していく。

## 2.5 新たな成形技術の普及課題への対応

塑性加工学会主催の定例講演会（第 63 回塑性加工連合講演会）にて題名「高張力鋼板の絞り成形におけるスライドモーション制御の効果についての検討」として発表を行い、研究成果に関する外部発表を行った。

シミュレーション技術については、クリープ則を用いて材料のひずみ速度依存性をモデル化し、サーボプレスのスライドモーションの影響を考慮できる新たな手法を構築した。今後は、実際に各プレス加工製造業者に提供できるようにソフトウェア開発を継続して行っていくと同時に、蓄積された材料・成形データ及び技術情報の提供も含めて、日本金属プレス工業協会主催の「金属プレス加工技術研究会」等を通じてシミュレーション体験の場を提供していく。

## 第3章 全体総括

### 3.1 本研究開発事業の成果

本研究では、高張力鋼板の成形技術という切り口で、冷間、熱間といった複数の加工法、及びその評価技術といった様々な側面から取り組んできた。その結果、各要素技術だけでなく、それらを最適に組み合わせることにより、統合システムとしての「プレス部品高強度化技術」確立に向けての重要な成果が得られたものと考えられることができる。

個々の技術的成果、及びそれらの相関関係は下記のとおりである。

冷間プレス技術として、サーボプレスの活用手法が確立できた。そのメカニズム解明に際しては、実験だけでは可視化することができない応力分布、ひずみの発達過程等をシミュレーション技術の活用により詳細に分析することで、クリープ則の適用という新たな視点での評価技術を構築することができた。

熱間プレス成形技術として、成形速度等の影響を調査するために、サーボプレスのスライドモーション可変機能を活用することができた。その結果、熱間プレスとサーボプレスの組み合わせによるさらに高度な成形技術が獲得できる可能性が示唆された。

成形シミュレーション技術として、熱間プレス過程の解析技術及びサーボプレスのスライドモーションを考慮するための解析技術を開発し、それらを材料試験結果及び豊富な実験結果と比較検証することによって、実現象に忠実な解析モデルとして高度化することができた。

### 3.2 今後の課題

冷間プレス成形技術については、本研究で得られた知見をより多くの実部品に適用し、プレス部品高強度化、軽量化に寄与していくとともに、サーボプレスのスライドモーション活用技術をより普遍化、汎用化することが重要である。

熱間プレス成形技術については、ようやく中小企業における試作レベルの実務適用の可能性が見いだせた段階である。今後はより安定して良品が得られるよう、搬送技術や酸化スケール除去技術を追求していくことが課題である。

成形シミュレーションについては、今回取り上げた高張力鋼板だけでなく、より広範な材料に適用できる粘弾塑性モデルの構築を目指すとともに、ユーザビリティを改善して、中小企業が活用できるシステムにする必要がある。

### 3.3 事業化について

本研究で獲得した成形技術及びシミュレーション技術は、自動車用部品だけでなく、軽量化が求められるあらゆるプレス部品への適用拡大が考えられる。また、本研究で実施した各種材料試験で得られたデータは、中小のプレス加工業者が活用することにより、業界全体のプレス成形技術全の底上げが期待できるものである。これらのことから、日本金属プレス工業協会及び学会等を通じて技術の普及を図っていく。