

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「革新的デジタルプレス加工技術による精
密厚鋼板成形システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成24年3月

委託者 経済産業省 関東経済産業局

委託先 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.	3
1.2 研究開発体制.	4
1.2.1 研究開発委員会.	4
1.2.2 研究開発及び管理体制.	5
1.2.3 研究者および協力者一覧.	7
1.2.4 研究実施場所.	8
1.3 成果概要.	9
1.4 当該研究開発の連絡窓口.	9
第2章 研究開発内容.	10
2.1 破壊現象モデルの定義.	10
2.2 成形シミュレーションプログラム開発.	10
2.3 プレス機械・金型変形計測方法検討.	10
2.4 汎用プレスの利用技術構築.	11
2.5 材料・成形データベース構築課題への対応.	17
2.6 実験結果対解析結果比較による精度検証.	17
2.7 成形シミュレーション利用・普及課題への対応.	19
第3章 全体総括.	20
3.1 本研究開発事業の成果.	20
3.2 今後の課題.	20
3.3 事業化について.	20

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

プレス機械による塑性加工は、板材素材から構造部品を成形する板金成形法と、ビレットから機能部品を成形する鍛造成形法（プレス加工）との2種類の異なる成形技術分野に分かれて発展してきた。特に、プレス加工は、他の機械加工と比較して生産性が高く連続加工も可能であり、さらに、この連続的な加工を自動化させやすいことから自動車部品製造等多くの部品製造に盛んに採用されて今日に至っている。しかし、近年では、日本のモノづくり環境を取り巻く世界情勢はますます厳しさを増しつつあり、従来技術の延長でモノづくりをしていたのでは、安価な労働力に支えられた周辺諸国に負けるのは必然であり、太刀打ちできない。今後とも日本がモノづくり立国を続けることができるためには、「低コスト化(Cost)」「短納期化(Delivery)」「軽量化(Quality)」に対して周辺諸国が容易に追従できない、高度な技術を駆使したモノづくりの継続・向上が必要不可欠となっている。

(1) 低コスト化

四輪自動車の世界市場は、現在約6700万台であるが、中国やインドなど新興国での需要増加によって、2025年までには約1億台に達するとみられており、自動車産業にとっては数少ない成長マーケットとして期待が大きい。しかし、新興国の現地メーカーが超低価格車を発表する等、実用性重視の低価格車競争となりつつある。こうした状況の中で日本メーカーが立ち向かう方向は、日本ブランドとして確立している便利で壊れないという機能・品質面だけではなく、コストの面でも従来以上に両立させることが必要不可欠である。

(2) 短納期化

高い寸法精度及び複雑形状を実現できる板金成形に冷間鍛造技術を活用した複合成形への適用では、塑性流動を積極的に利用した加工法となるために、型かじり発生防止のための金型表面硬化等の処理が施され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。

(3) 軽量化

最近の地球環境問題への対応を背景として自動車の燃費向上を図るために、走行中に繰り返し荷重を受ける運動部品に対しても、高い強度信頼性の確保だけではなく軽量化が要求されており、疲労強度の向上が各部品共通のニーズとなっている。

一般に疲労強度向上のためには、材料の硬さを増加させることが必要となる。しかし、硬さの増加は被削性の低下を引き起こすため、結果的に切削コストを増大させる。特に高い信頼性の確保だけではなく、大量生産で安く供給することが要求される自動車部品では、

高強度軽量化の技術開発がこの背反事象の克服にあるといっても過言ではない。この課題を克服するための技術の一つに切削コスト低減方策として、切削加工廃止を狙った成形加工寸法精度の向上が重要となっている。

1.1.2 研究目的

自動車の駆動部、シャシ等各ユニット構成部品の多くは、鋳造品及び鍛造品が使用されている。しかし、鋳造及び鍛造工程のみで最終製品を取得することは困難であり、鋳造・鍛造コストに比べてコストが大きい切削や研削による仕上げ加工が必要となる。そのため、切削工程を削減して全生産コストを下げるように、最終製品形状まで材料変形だけで加工できる工法の確立、さらに切削、焼結、接合、ダイキャスト等からの工法転換が求められている。

こうした中、プレス加工と冷間鍛造を複合した加工法（精密厚板プレス成形）が、高精度で各部位の板厚が異なる3次元形状の部品などで適用が進んでいる。主に切削、焼結、接合、ダイキャスト等からの工法転換による加工コストの大幅な削減、高精度化が実現でき、地球環境にやさしい製造法としても注目されている。しかし、精密厚板プレス加工は、より積極的に塑性流動を利用するために変形度が大きく、金型構造及び使用するプレス機械も従来のプレス加工とは異なる。また、この加工法の研究には、相当な実験スキルと成形条件変更等に大変な労力と出費が伴うことから、実験的研究成果がまだ少ない。そのため、自動車部品への適用作業過程では、従来の熟練技術者個人の経験知識（失敗経験の積み重ね）に頼った造り込みではOK品取得が難しく、膨大な時間とコストをかけた失敗と手直しの繰り返し作業が発生しているのが現状である。これからの精密厚板プレス加工技術の発展には、製造現場での「実物」との直接対峙の中で生まれる知見をもとにした製品造り込み作業からの脱却が必要である。本研究開発では、実際の成形過程時に発生している治工具変形等重要な成形不具合要因の定量的把握、及び計算機を活用した成形材料自体の成形限界予測技術の確立を目的として取り組む。

1.1.3 研究目標

本研究開発では、実際の成形実験で発生する現象（プレス機械・金型撓み等）を把握し、厚板プレス成形過程で発生する静水圧及び大きな塑性流動に対応できる理論及び取り扱い方法を検討・検証することにより、精密厚板プレス加工に対応できる成形シミュレーションを開発し、厚板プレス部品及びファインブランキング部品の製造を行っている中小企業の成形技術力の底上げに貢献する。

1.1.4 研究開発概要

(1) 研究開発の概要

本研究開発では、単純な抜き加工だけではなく、抜きとつぶし、曲げ、絞り等複合加工を連続工程で多用する精密厚板プレス加工に対応できる成形シミュレーション技術を開発する。

また、成形実験（材料板厚 10mm 程度まで）に基づき、成形限界指標、金型の弾性変形及びプレス機械の剛性等に関する基本成形データを取得し、汎用プレス機械を活用した精密厚板プレス成形適用のために活用できる精密厚板プレス成形システムを新たに構築する。

(2)実施内容

①成形不良対策課題への対応

大きな歪み勾配と応力勾配に下におけるクラックの発生条件や伝播条件、あるいはクラック挙動に対応した破壊現象のモデル化と材料試験方法を決めることにより、材料メーカーから供給される材料に関して材料試験により破壊パラメータを取得する。さらに、静水圧の影響を取り扱うことができる弾塑性 FEM に対して、大きな歪み勾配と応力勾配下におけるクラックの発生条件や伝播条件、あるいはクラック挙動をシミュレートするための破壊に関する理論及びリメッシング機能等を取り込むことにより、精密厚板プレス加成形シミュレーション解析手法を構築する。

②プレス機械・金型撓み対策課題への対応

精密厚板プレス加工では単位面積あたりの荷重が大きく、プレス機械及び金型にも高い加圧力が求められる。特に、プレス機械のフレーム、駆動軸、スライド及びボルスタなどが荷重によってたわむと、パンチとダイ高さ方向の相互位置が変化する等成形不具合を発生させる要因となる。本開発では、実際のプレス成形過程時に発生する金型及びプレス機械等での変形量、さらに、金型同士の隙間（クリアランス）及び金型に加わる成形荷重等たわみ現象に関係する物理量の計測手法を確立し、実際のプレス機械及び金型の撓みが成形に与える影響を把握可能とする。

③汎用プレスの利用技術構築課題への対応

汎用プレスを使用した精密厚板プレス加工(材料板厚 10mm 程度まで)を実現するためのプレス機械及び金型の構造面からの対策と工程変更も含めた成形方法の検討を実施する。

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摩擦抵抗等成形条件データ等を取得し、誰でも利用できる環境を構築する。

⑤成形シミュレーション利用・普及課題への対応

精密厚板プレス加成形シミュレーション及び成形加工に関する知識も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

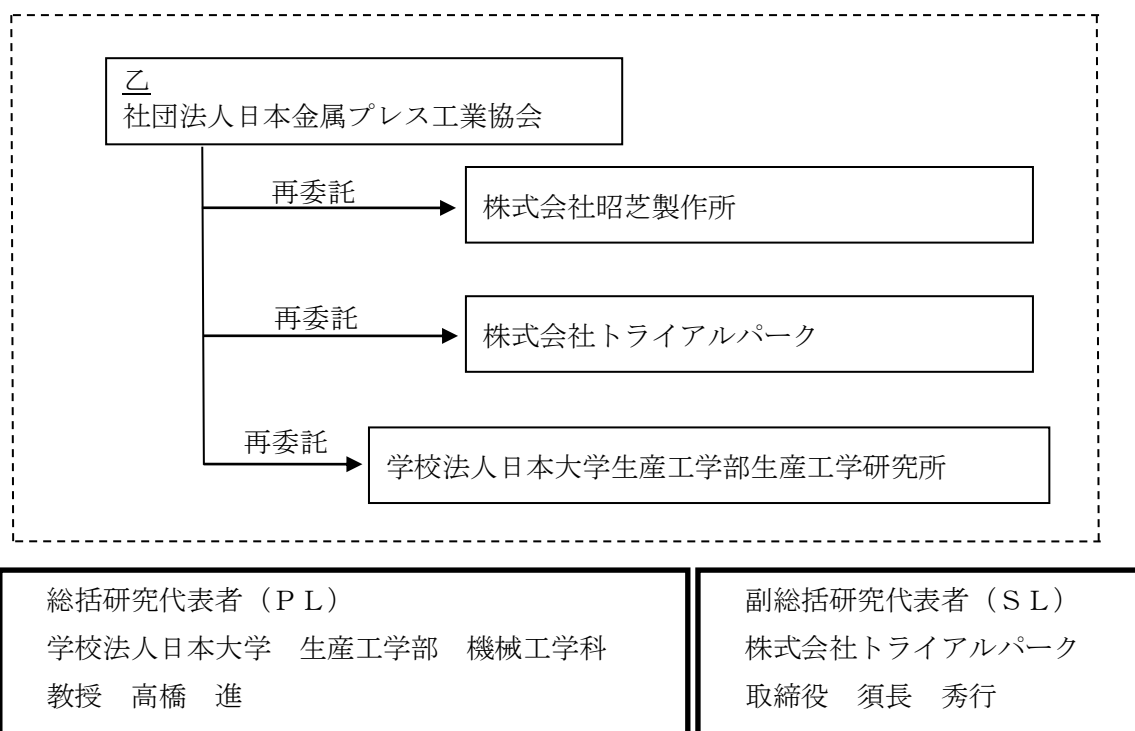
研究開発の円滑な推進のために「精密厚鋼板成形システム開発委員会」を設置し、有効に活用する。

委員名簿は次の通りである。

氏名	所属・役職	備考
高橋 進	学校法人日本大学 生産工学部 機械工学科 教授	P L
竹澤 広光	株式会社昭芝製作所 技術部 部長	委
植木 秀典	株式会社昭芝製作所 技術部 設計課 係長	委
須長 秀行	株式会社トライアルパーク 取締役	S L
白水 脩	株式会社トライアルパーク 業務部 課長	委
濱中 豊	社団法人日本金属プレス工業協会 専務理事	委
中川 朝彦	社団法人日本金属プレス工業協会 業務部 業務課長	委
高村 正人	独立行政法人理化学研究所 研究員	アドバイザー
横田 政明	株式会社タチエス 技術開発部 部長	アドバイザー

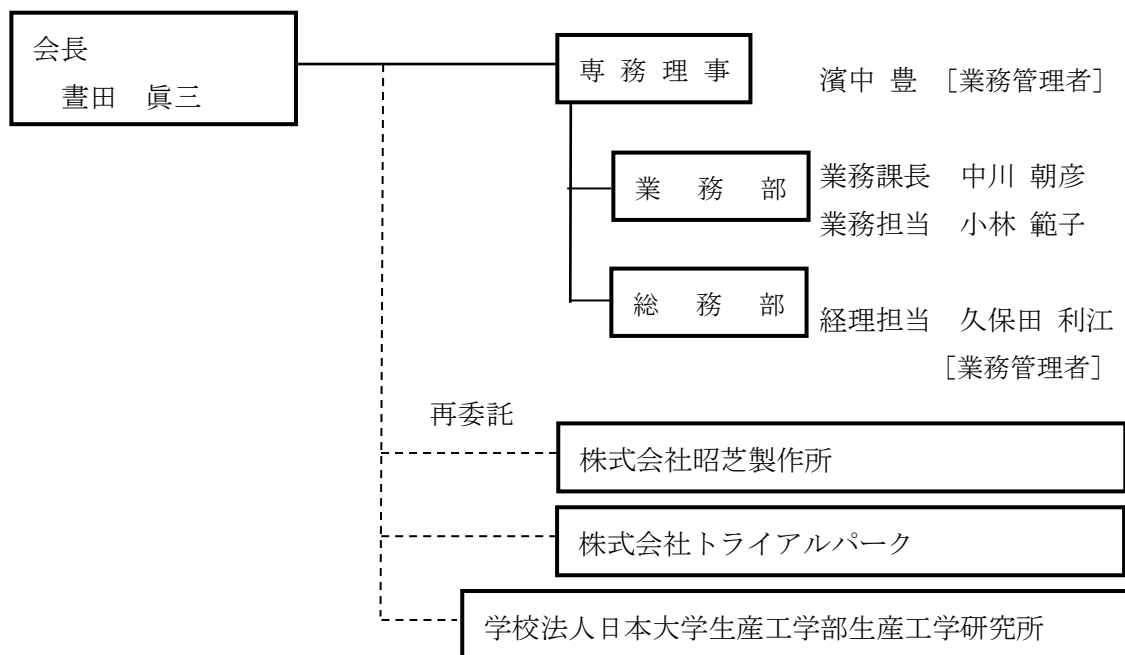
1.2.2. 研究開発及び管理体制

(1) 研究開発体制



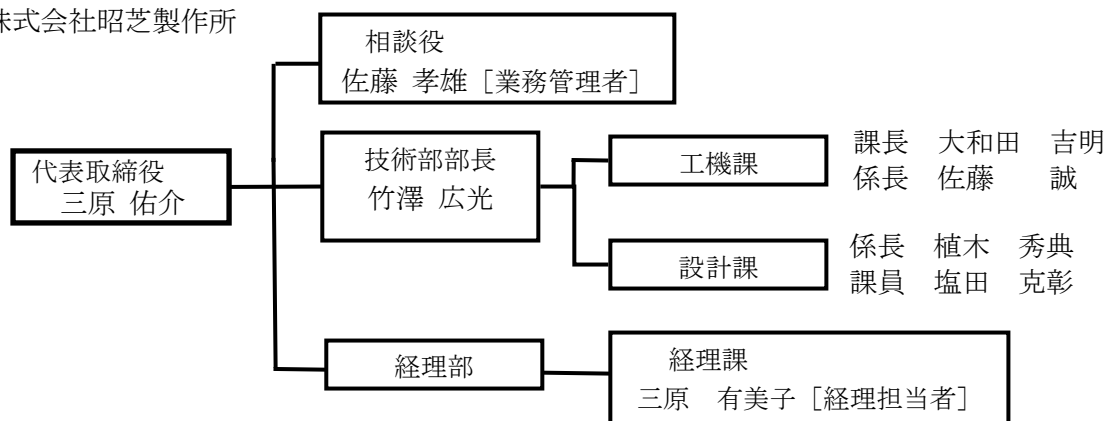
(2) 管理体制

①事業管理機関 [社団法人日本金属プレス工業協会]

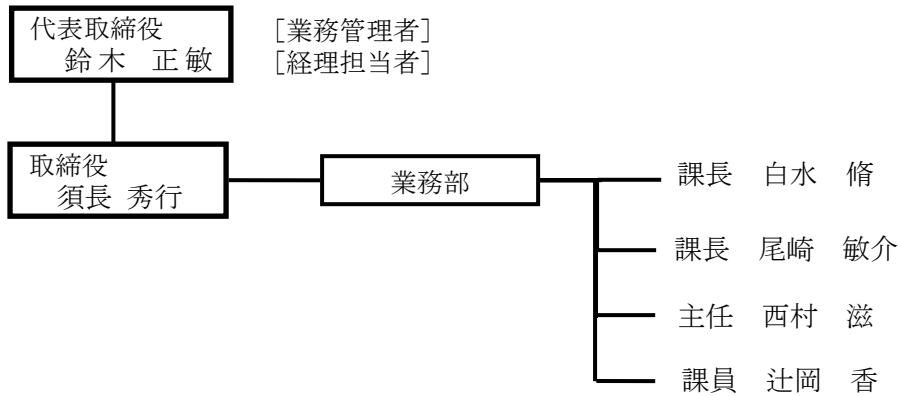


②再委託先

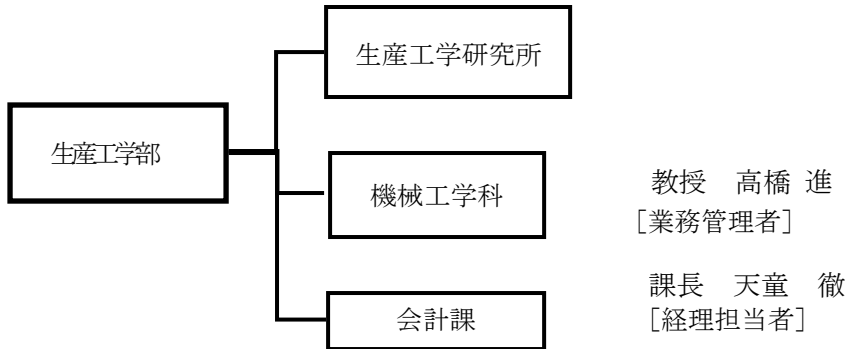
株式会社昭芝製作所



株式会社トライアルパーク



学校法人日本大学生産工学部生産工学研究所



1.2.3 研究者および協力者一覧

【事業管理機関】 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)
濱中 豊	専務理事	⑧
中川 朝彦	業務部 業務課長	⑧
小林 範子	業務部 業務担当	⑧

②研究員

氏名 株式会社	トライアル所属の役職	実施内容 (番号)
中川 朝彦 (再)	業務部 業務課長	⑤⑦
小林 範子 (再)	業務部 業務担当	⑦

【再委託先】※研究員のみ

株式会社昭芝製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
竹澤 広光	技術部 部長	③ ④ ⑥
大和田 吉明	技術部 工機課課長	③ ④ ⑥
植木 秀典	技術部 設計課係長	③ ④ ⑥
佐藤 誠	技術部 工機課係長	③ ④ ⑥
塩田 克彰	技術部 設計課課員	③ ④ ⑥

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	①②⑤⑥⑦
白水 脩	業務部 課長	②⑥⑦
尾崎 敏介	業務部 課長	①②⑦
西村 滋	業務部 主任	②⑦
辻岡 香	業務部 課員	②⑦

学校法人日本大学生産工学部生産工学研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高橋 進	生産工学部 機械工学科 教授	① ② ③ ⑤ ⑥ ⑦

【アドバイザー】

氏名	所属・役職
横田 政明	株式会社タチエス 技術開発部 部長
高村 正人	独立行政法人理化学研究所 研究員

1.2.4 研究実施場所

①事業管理機関

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

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。)

株式会社昭芝製作所 本社（最寄り駅：西武池袋線江古田駅）

〒176-0004 東京都練馬区小竹町1-63-6 ロジェ・ヌワール2階

株式会社昭芝製作所 下館工場（最寄り駅：JR水戸線玉戸駅）

〒308-0847 茨城県筑西市玉戸2971

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

学校法人日本大学 生産工学部（最寄り駅：津田沼駅）

〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1

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）〈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

実部品を摸した歯車形状を有する3鋼種（SPHC、SAPH440、SCM415）の仮想実部品（板厚6mm）に対して汎用プレス機械を使用したプレス加工実験（抜き実験）を行った結果、歯車形状部位ではせん断面の保有率90%以上を確保でき、だれ占有率に関しては15%未満となった。また、歯車形状を除く形状変化が緩やかな外周部では、せん断面の保有率95%以上及びだれ占有率10%未満を達成することができた。また、プレス加工時に発生するプレス機械及び金型変形量に関しては、新たな定量的な測定手法が構築できたことにより、汎用プレス機械が加工精度に与える影響を最小限に抑えることができた。

鋼板せん断時の破断面及びせん断面形成に関するシミュレーション技術の構築では、Cockcroft と Latham による延性破壊条件式を用いて破壊の発生を予測し、破壊要素を消滅させることで破壊の進展を表現可能な弾塑性FEMプログラムを開発した。シミュレーションの適用では、ダイ-パンチ間クリアランス等成形条件の違いに対して、実験と同様のダレの発生が確認できる等定性的にせん断加工過程を予測することができた。

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 濱中 豊

第2章 研究開発内容

2.1 破壊現象モデルの定義

Cockcroft と Latham による延性破壊条件式のパラメータを同定するために、単軸引張試験の FEM 解析を実施し、実際の試験結果と比較した。単軸引張試験の最大荷重点以降の局部伸び領域における応力値は、延性破壊パラメータ (式(1)における C 値) に大きく影響するものの、単軸引張試験ではこの領域の真応力を計測することはできない。本研究では、局部伸び領域での応力値を変化させて多点プロットにより応力 - ひずみ曲線を定義し、それを用いた FEM 解析結果を実験結果と比較することにより、最終的な応力 - ひずみ曲線を決定した。(図 2.1.1 参照)

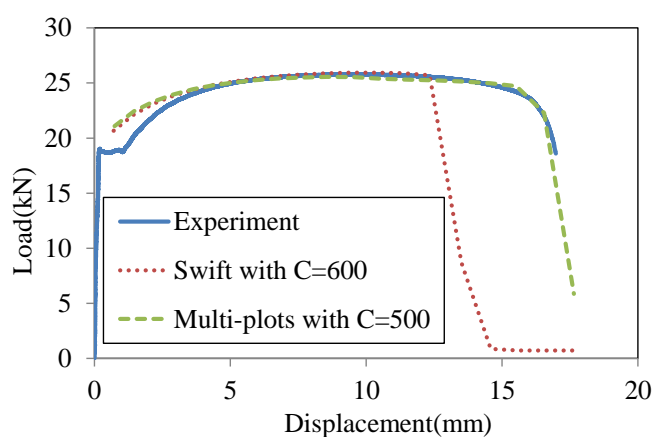


図 2.1.1 単軸引張試験結果及び単軸引張シミュレーション結果

2.2 成形シミュレーションプログラム開発

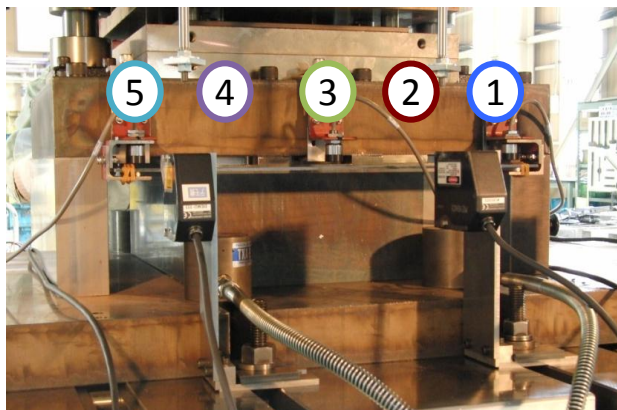
せん断加工は破壊の進展に伴う現象であることから、破壊発生時に生じる急激な剛性変化に伴う極度の非線形性を取り扱うこととなり、急激な不釣り合い力発生の問題に対処できることが求められる。本研究では、”r-ミニマム法”及び不釣り合い力消去アルゴリズムを備えている成形シミュレーションソフト ”TP-STRUCT”を採用した。さらに、Cockcroft と Latham による延性破壊条件式 (下記式(1)参照) を用いて破壊の発生を予測し、せん断による大ひずみに対応するためのアダプティブリメッシュ機能及び破壊要素を消滅させることで破壊の進展を表現させる機能等を開発することにより、鋼板せん断時の破断面及びせん断面の形成を評価可能なシミュレーションを実現させた。

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_{\max} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

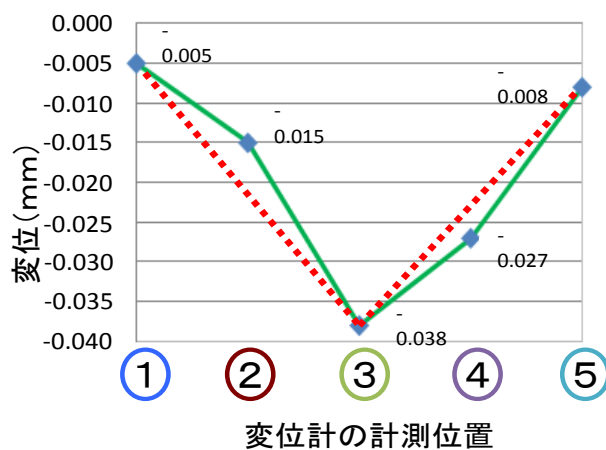
2.3 プレス機械・金型変形計測方法検討

プレス加工時に発生するプレス機械及び金型変形量を任意の位置で定量的に測定する技術 (図 2.3.1 参照) を新たに開発したことにより、成形の見える化が促進された。その結果、

成形メカニズム解明のためのデータ取得および汎用プレス機械が加工精度に与える影響を最小限に抑えることができた。加えて、金型変形解析の開発時の検証データ取得のための技術を構築出来た。



(a) 金型変形装置と測定ポイント



(b) 金型変形形状

図 2.3.1 金型片計量測定結果

2.4 汎用プレスの利用技術構築

汎用プレスを用いた精密厚鋼板プレス加工を実現するため金型の構造面からの対策と成形方法の検討を実施する。

2.4.1. 抜き加工における汎用プレス利用技術構築

厚鋼板のプレス部品においては、大きなせん断面保有と小さなだれ占有となる精密抜き加工の実現は重要である。そのため本研究では、基礎実験である単純せん断実験によりダイ刃

先形状とクリアランスの適正化後、実際の実部品を想定した抜き実験を行う。さらに歯車部のせん断面とだれを改善するためシェービング加工の条件適正化を行う。本研究の目標値は、せん断面の保有は試験片(被加工材)板厚の90%t以上確保であり、だれの占有は試験片(被加工材)板厚の10%t以内である。

2.4.1.1. 抜き加工の基礎実験と実験結果

基礎実験は、ダイ形状とクリアランス(CL)の違いによる切断面の仕上がり状況の違いを把握する。金型は直線で切断できるシャープ型として製作した。試験片は2鋼種(SAPH44、SCM415、板厚は全て6mm)を設定し、実験条件を表2.4.1及び図2.4.1に示す。実験用プレス機械は、アミノ製500Knサーボプレス(FP050C)を使用し、各実験サンプルにおいてせん断面の保有とだれの占有の測定を行う。また、本実験の結果において、最適であった実験条件を実際の部品を想定した仮想実部品の抜き実験における実験条件とする。

表 2.4.1 実験条件

実験条件	CL	刃先形状	
		ダイ	パンチ
①	10%t	90°	90°
②	5%t		
③	1%t		
④	0.33%t		
⑤	10%t	C面 (5%t)	90°
⑥	5%t		
⑦	1%t		
⑧	0.33%t		

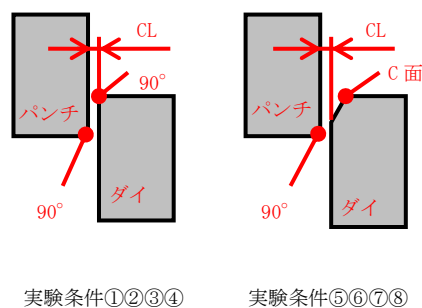


図 2.4.1 刃先形状

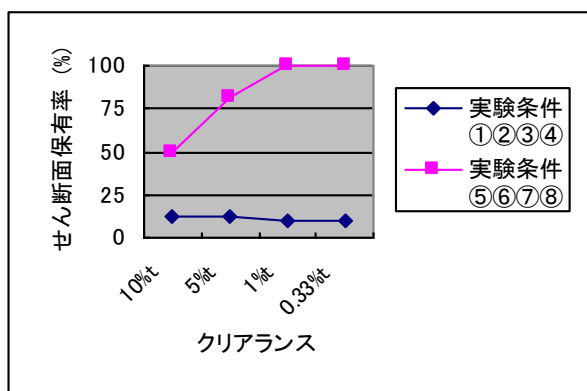


図 2.4.2 せん断面保有率(鋼種 SAPH440)

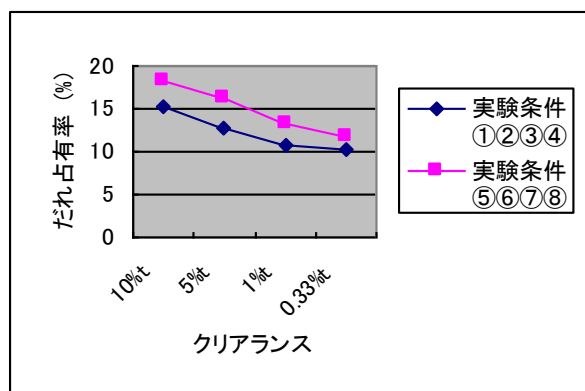


図 2.4.3 だれ占有率(鋼種 SAPH440)

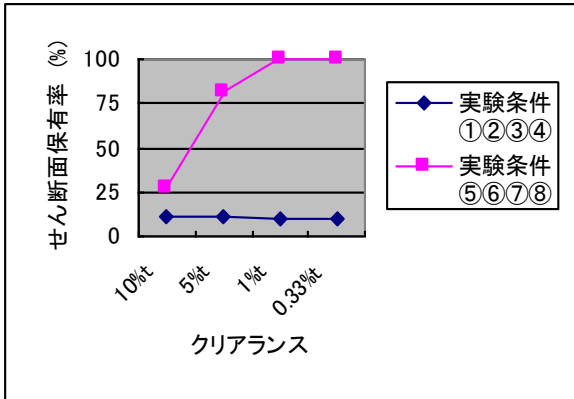


図 2.4.4 せん断面保有率(鋼種 SCM415)

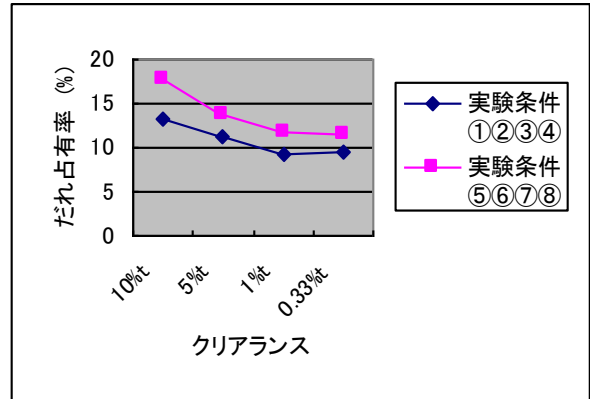


図 2.4.5 だれ占有率(鋼種 SCM415)

実験結果を図 2.4.2 から図 2.4.5 に示す。実験結果よりせん断面の保有及びだれの占有は、金型のクリアランス及びダイ(金型構造によりパンチの場合もある)の刃先形状が大きく起因していることがわかる。このことより、仮想実部品の抜き実験における実験条件は、せん断面の保有が大きく、だれの占有が比較的小さかった実験条件⑧とした。

2.4.1.2. 仮想実部品における抜き実験と実験結果

仮想実部品における抜きの実験では、図 2.4.6 に示すような実部品を想定し、仮想実部品として設定し、試験片鋼種は基礎実験と同鋼種とした。実験条件は、基礎実験の結果より適正であった実験条件⑧とし、金型は抜き(ブランク)型として製作した。基礎実験同様、実験サンプルにおいてせん断面の保有とだれの占有の測定を行う。実験用プレス機械は、アイダエンジニアリング製 4,000kN プレス (UL-4000) を使用した(図 2.4.7 参照)。

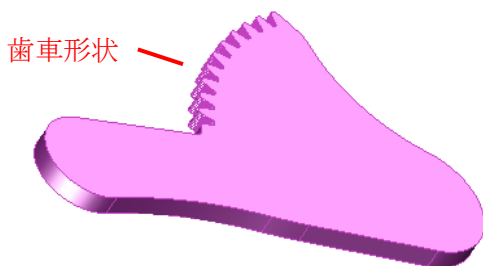


図 2.4.6 仮想実部品形状

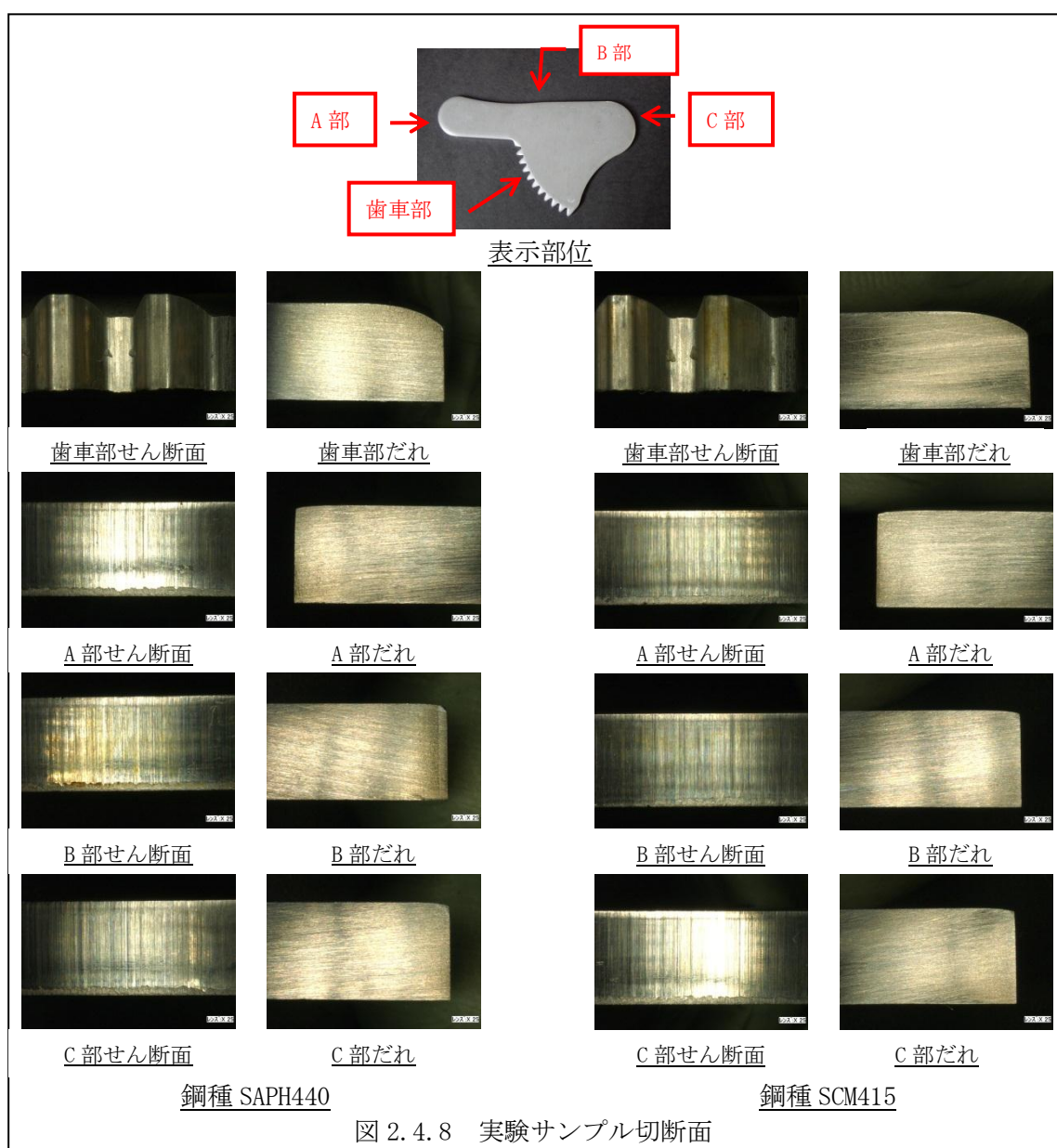


図 2.4.7 実験用プレス機械

実験結果を表 2.4.2 に各実験サンプルを図 2.4.8 に示す。

表 2.4.2 実験結果

試験片 鋼種	歯車部				外周部位(歯車部除く)			
	せん断保有率(%)		だれ占有率(%)		せん断保有率(%)		だれ占有率(%)	
	実験 結果	目標値 比較	実験 結果	目標値 比較	実験 結果	目標値 比較	実験 結果	目標値 比較
SAPH440	100(破断有)	△	24.6	×	91.0	○	4.6	○
SCM415	100(破断有)	△	25.3	×	91.0	○	4.0	○



実験結果より、歯車部を除く部位においては、せん断面保有率 90%以上、だれ占有率は 10%未満であり、目標値を満足した。しかし、歯車部においては、せん断面の一部に破断した部位を確認することができ、だれ占有率が目標値に達することはできなかった。歯車部の切断面を改善するには、金型精度、表面処理、潤滑油などの要因も考えられるが、本研究では別な加工方法も考慮すべきと判断し、事項に述べるシェービング加工の実験を行った。

2.4.1.3. シェービング加工による歯車部抜き実験と実験結果

仮想実部品の実験結果より、歯車部の切断面を改善するためシェービング加工の条件適正化実験を行う。実験モデル形状は、仮想実部品形状を基に簡素化したものである(図 2.4.9 参照)。試験片は 3 鋼種(SPHC、SAPH440、SCM415、板厚は全て 6mm)を設定し、実験条件は多段シェービング加工を想定した実験条件とした。これを表 2.4.3 及び図 2.4.10 に示す。実験用金型は、抜き型として作製し、実験用プレス機械は、アイダエンジニアリング製 4,000kN プレス(UL-4000)を使用した(図 2.4.7 参照)。各実験サンプルにおいて歯車部のせん断面の保有とだれの占有の測定を行った。

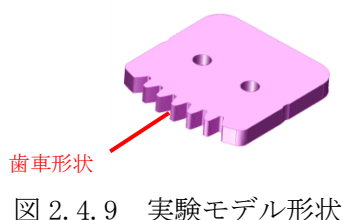


表 2.4.3 実験条件

実験条件	CL	刃先形状		取り代
		パンチ	ダイ	
①	0.33%t	90°	C(5%t)面	—
②			C(3.3%t)面	5%t
③			C(2.5%t)面	2.5%t
④			90° (C面なし)	0.83%t

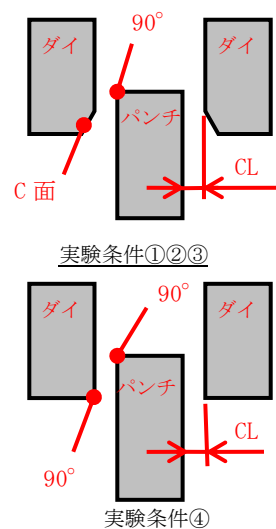


図 2.4.10 刃先形状

実験結果を図 2.4.11 及び図 2.4.12 に示す。各実験サンプルは、仮想実部品の抜き実験と同鋼種(SAPH440、SCM415)を示す。実験結果より、歯車部のせん断面に仮想実部品の抜き実験で発生した破断した部位はなかった。本実験は、多段シェービング加工を想定した実験条件であり、せん断面の保有率は、実験条件④においては 95%以上となり、目標値を満足した。だれの占有率においては、目標値を達成することはできなかったが、実験条件①で発生しただれを以後の実験条件②、③、④と実験を行っていくことで占有割合を小さくすることができ、シェービング加工がだれの占有に改善効果があることを確認できた。

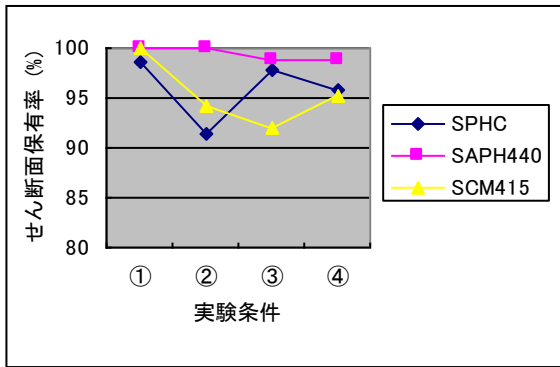


図 2.4.11 歯車部せん断面保有率

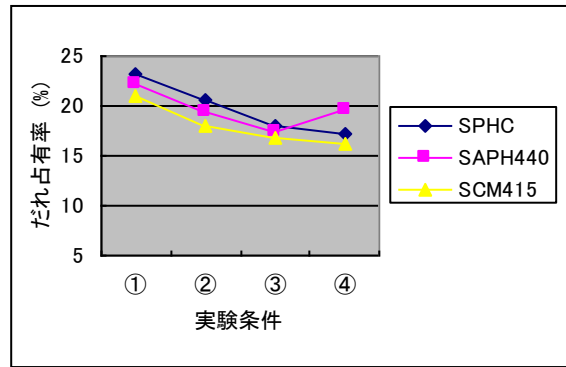


図 2.4.12 歯車部だれ占有率

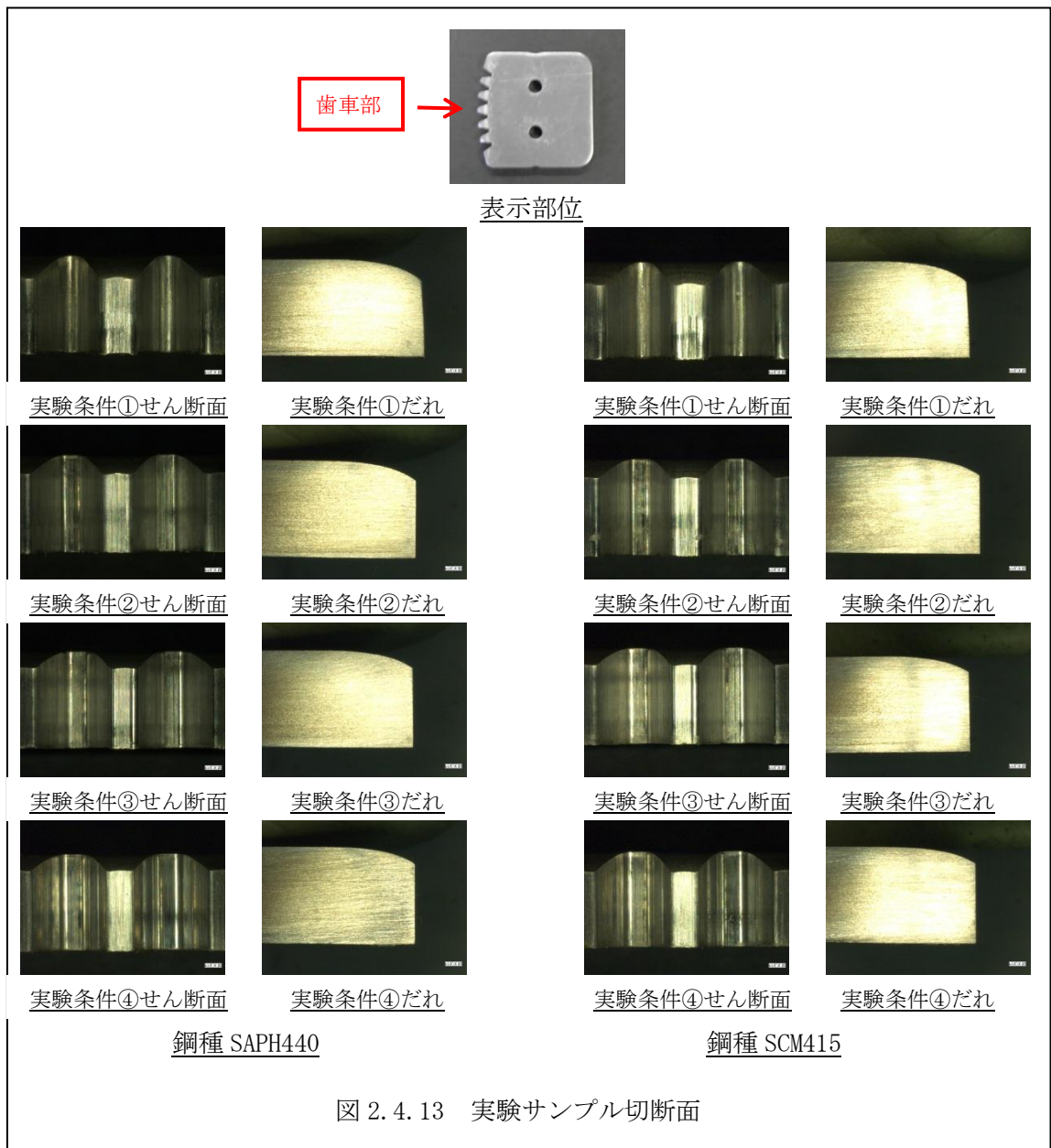


図 2.4.13 実験サンプル切断面

2.5 材料・成形データベース構築課題への対応

せん断加工過程等破壊の進展を伴う解析を実行する上で必要不可欠となる延性破壊条件式のパラメータに関する同定手法（手順）を材料の種類に関係なく明確化したことにより、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、汎用プレスを利用した精密厚鋼板プレス加工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。

2.6 実験結果対解析結果比較による精度検証

3次元解析精度を検証するために行った基礎実験用工具概略図を図 2.6.1 に示す。1mm の奥行きを持たせた3次元メッシュを用いて解析を実施した。ガススプリングの最大荷重は、上型 18kN、下型 30kN である。試験片は、図 2.6.2 に示す厚さ 6mm の SCM415 を用いた。ダイ - パンチ間のクリアランスは (a) 0.6mm と (b) 0.06mm の2水準とした。

図 2.6.3 にせん断実験の結果を示す。ダレの発生が (a), (b) 双方の条件で確認でき、その量は (a) において (b) より大きいことが確認できる。

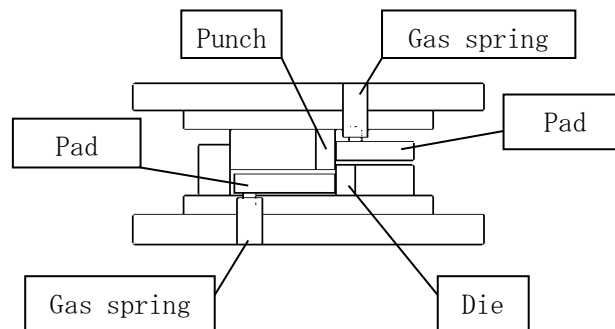


図 2.6.1 基礎実験用工具概略図

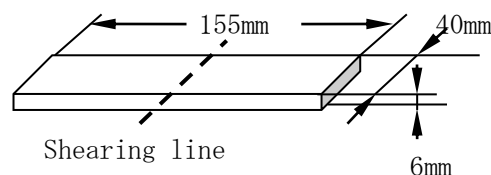


図 2.6.2 基礎実験用材料サイズ

3次元解析の可能性を検証するために、図2.6.3の条件と1mmの奥行きを持たせた3次元メッシュを用いて、多点プロットによる応力-ひずみ曲線近似をもとにせん断解析を行った結果を図2.6.4に示す。なお、(a)はダイ-パンチ間クリアランス0.6mm、(b)は0.06mmの条件に対する結果である。

実験とダレの発生が解析結果にて定性的に再現されている。ダレ量及びせん断面率を実験結果、Swift近似を用いた解析結果、及び多点プロット近似を用いた解析結果について比較した結果を図2.6.5及び図2.6.6に示す。

ダレ量については、定性的傾向が実験と解析で一致し、かつ、定量的には多点プロット近似による解析結果がより実験結果に近いことがわかる。一方、せん断面率については実験と解析の間でかい離があり、今後の精度向上が必要であることがわかった。

本研究により、延性破壊を考慮したせん断過程のように破壊による急激な剛性変化に伴う高度な非線形現象を3次元弾塑性FEMで解析するに当たり、静的陽解法によるTP-STRUCTの頑健性が有効であることが示された。

また、局部伸び領域の応力-ひずみ曲線を正確に推定することにより、延性破壊パラメータを精度よく同定することができ、結果としてせん断過程のFEM解析によるダレ量の予測が実験値に近くなることが確認できた。

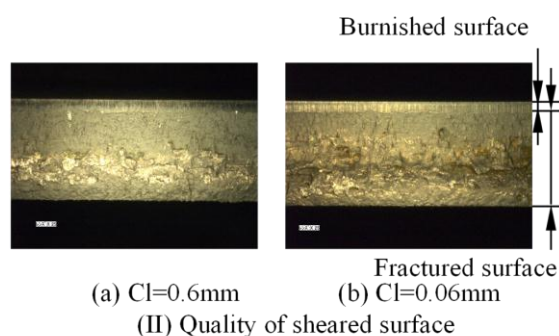
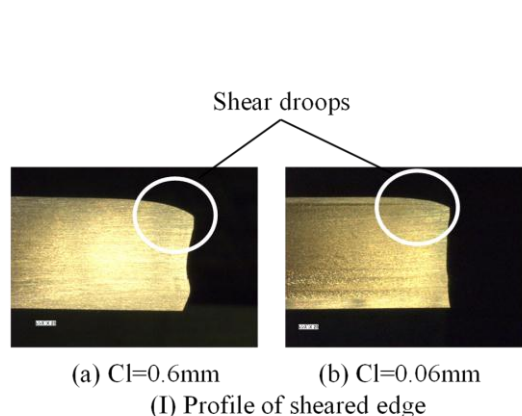


図2.6.3 基礎実験結果

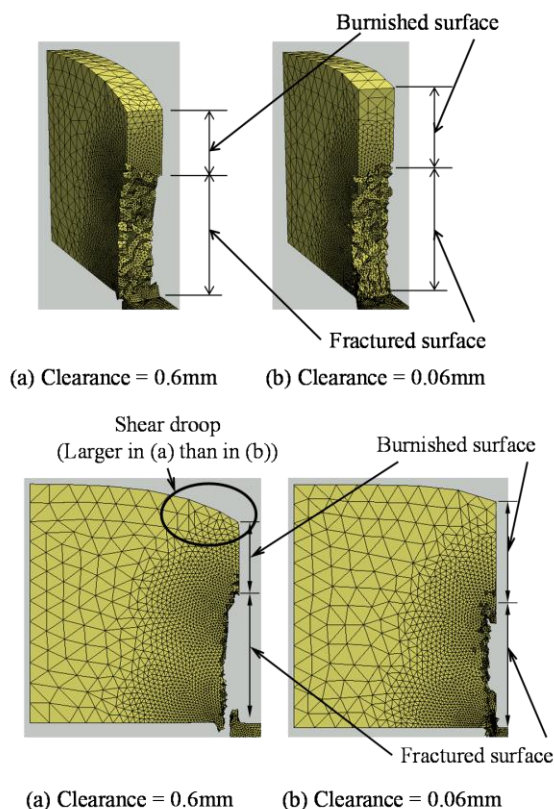


図2.6.4 基礎実験解析結果

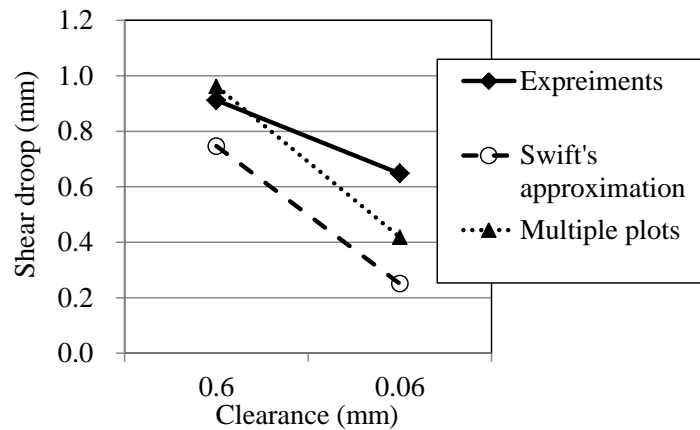


図 2.6.5 だれ占有率とクリアランスの関係

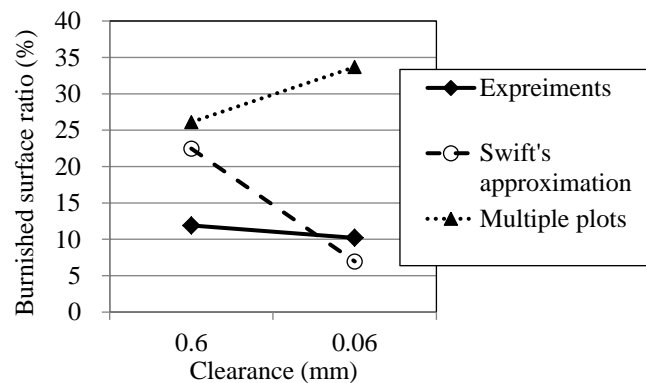


図 2.6.6 せん断面占有率とクリアランスの関係

2.7 成形シミュレーション利用・普及課題への対応

塑性加工学会主催の定例講演会にて題名「延性破壊条件を考慮した 3 次元弾塑性有限要素法による厚板せん断過程のシミュレーション」として発表を行ない、国際会議「ICTP2011」でも題名「Shearing Simulation with Ductile Fracture Propagation Using Three-Dimensional Elastoplastic Static-Explicit Finite Element Method」として研究成果に関する外部発表を行なった。

プレス加工製造業者が手元の PC で使用できるように Windows 上にて開発し、プレス用語にて操作もできるように精密厚板プレス成形シミュレーションを構築した。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なっていくと同時に、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

本研究で設定した仮想実部品の歯車形状を除く外周部のように形状変化が緩やかである形状においては、せん断面の保有率及びだれの占有率ともに目標値を満足することができた。歯車形状のような突起を有す複雑形状においてもせん断面の保有率の目標値を満足することができた。

汎用プレスを利用した精密厚鋼板プレス加工において、せん断面の保有とだれの占有に寄与する要因が得られ、プレス機械・金型変形量の定量的な計測方法を確立できたことから金型の構造面からみた適正な金型形状及びその金型で行う加工の適正な加工条件を設定できる技術を構築することができた。また、実際の部品において要求されるこれらせん断面の保有とだれの占有に対し、本研究の成果で対応できる適用範囲を得ることもできた。

せん断加工シミュレーション技術構築では、破壊発生時に生じる急激な剛性変化に伴ない発生する急激な不釣り合い力の問題に対処できる”r-ミニマム法”及び不釣り合い力消去アルゴリズムを備えた”TP-STRUCT”に対して、Cockcroft と Latham による延性破壊条件式を用いた破壊発生判定、リメッシュ機能及び破壊要素を消滅させる機能を導入することにより、せん断の進展を表現することができた。さらに、単純せん断加工での解析対実験の比較により、だれ発生等が定性的に実際のせん断加工過程を予測できることを確認できた。

3.2 今後の課題

歯車形状のような突起形状を有す複雑形状においては、だれの占有率の目標値を満足することはできなかった。これを満足させるためには、試験片(被加工材)の塑性流動を考慮し、大きなせん断面保有、且つ、小さなだれ占有、これらを両立させる成形技術(工法)の確立が今後の自社内で継続して研究していく上での課題である。

せん断加工シミュレーションでは、定量的にだれ占有率が予測できることは確認できたが、せん断面占有率に関しては定性的な一致にとどまっている。せん断進展時の要素形状及びサイズが解析精度に対して大きな影響を与えていることより、せん断加工過程でのリメッシュ機能の高度化が必要不可欠である。

3.3 事業化について

本開発研究では、自動車用シート部品を仮定して歯車形状を有する部品にて実際に汎用プレス機械を使用して成形実験を行ってきた。本研究成果は、想定した自動車用シート部品にのみ適用されるのものではなく、エンジン系部品、シートベルト系部品など更なる適用拡大が考えられる。また、自動車部品だけでなく、工法転換を担う新たな技術として、他の産業分野においても、形状精度を必要とする機械部品にも適用可能と考える。また、せん断加工シミュレーションは、せん断加工に最適な材料選定への活用等さまざまな応用展開が考えられることから、日本金属プレス工業協会及び学会等を通じて活用を提案していく。