

平成 26 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「エッチングに替わる薄板難加工材の微細・高精度プレス加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 27 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人 群馬県産業支援機構

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	・・・	2
1-3	成果概要	・・・	6
1-4	当該研究開発の連絡窓口	・・・	7

第2章 端面課題への対応

2-1	金型のクリアランスの最適化		
2-1-1	文献等による せん断加工に影響する加工パラメータの絞り込み	・・・	8
2-1-2	シミュレーションによる加工パラメータの影響度調査	・・・	9
2-1-3	成形シミュレーション検証による金型設計	・・・	17
2-2	金型のバラツキの最適化		
2-2-1	金型組付けのバラツキによるせん断加工への影響調査	・・・	17
2-2-2	シミュレーションによる左右非対称クリアランスの影響度調査	・・・	22
2-2-3	成形シミュレーション検証による金型設計	・・・	24
2-2-4	微細部品観察装置による解析(シミュレーション)結果との対比	・・・	24
2-3	加工油の選定		
2-3-1	文献等による 高精度せん断加工実現のための加工油の検討	・・・	27

第3章 金型およびプレス技術の構築

3-1	面打ち形状の最適化	・・・	29
3-1-1	シミュレーションによる面押しパンチ、ダイス仕様の影響調査		
3-2	微小スクラップ処理の最適化	・・・	32
3-2-1	微小スクラップの製品影響の最小化および順送金型での成形トライ		

第4章 全体総括

4-1	全体総括	・・・	33
-----	------	-----	----

第1章 研究開発概要

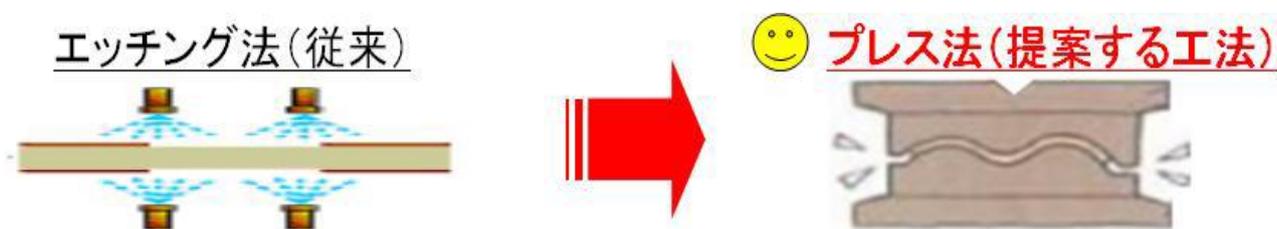
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究開発の背景

燃料電池のなかでも、スマートグリッド化から一般家庭用に特に注目されているのは、「小型」、「高出力」、「白金触媒が不要」、「現在のインフラ（都市ガス）もそのまま使える」などの優れた特徴を持つ特殊金属からなる固体酸化物形燃料電池（以下、SOFC）である。SOFCは、ひとつのセルでは電圧が小さいため、実際の発電システムでは、単セルを接続することで出力を上昇させる必要がある。この電氣的接続を行う部材がインターコネクタである。インターコネクタによる電氣的接続機能が十分に果たされなければ、燃料電池システムの電圧低下を招き、最悪の場合は発電ができなくなる恐れもある。従ってインターコネクタは、SOFCの信頼性や長期耐久性を確立するための鍵を握る重要な部材として各社の注力度は非常に高い。

2) 研究目的及び目標

特殊金属からなる固体酸化物形燃料電池（SOFC）のインターコネクタや、各種センサの検知部の微細なスリット加工は、従来エッチングにより行われてきたが、生産性やコストの問題からプレスへの転換が期待されている。しかし、プレスのみでは、バリや破断面が残り、後工程で余分なコストのかかる化学処理等が必要である。本研究開発において、プレス後の化学処理等を必要としない微細・高精度プレス加工技術を確立する。



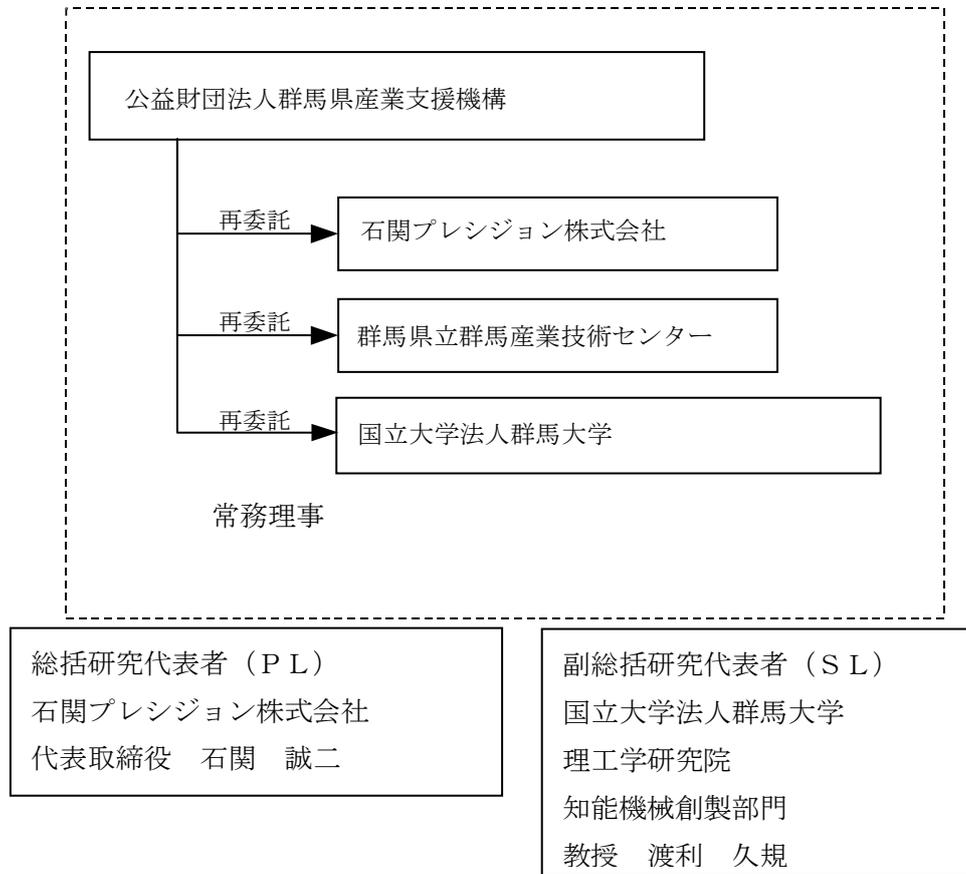
研究の目標として、下記を実現させることとする。

- ① 現状 12~15 μm のバリを 10 μm 以下に減少
- ② 現状 40~50%のせん断面を 80%以上に向上
- ③ 現状 500回で行っている微細スクラップのパキューム処理を 2000回まで延長

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

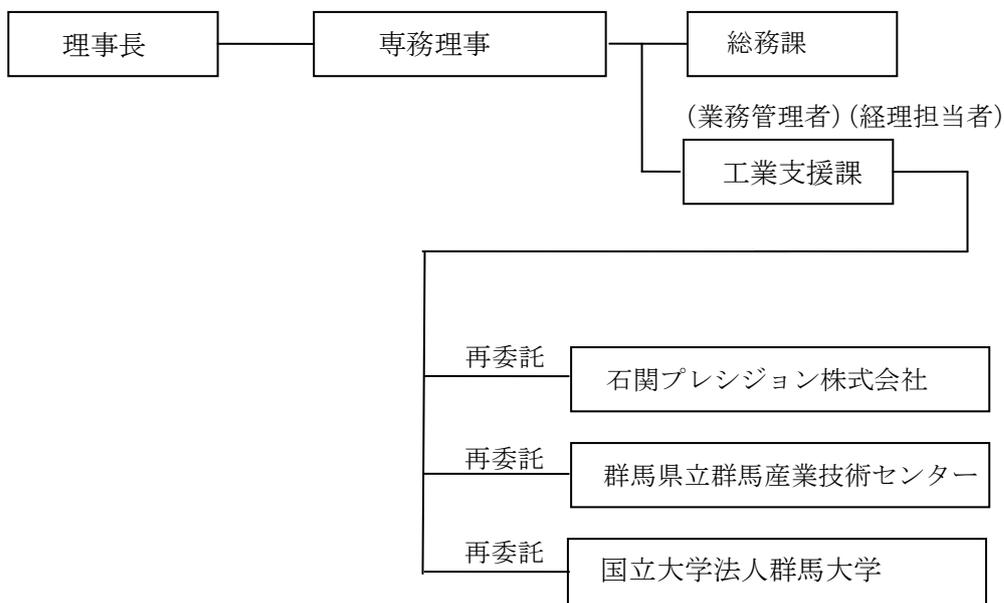
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

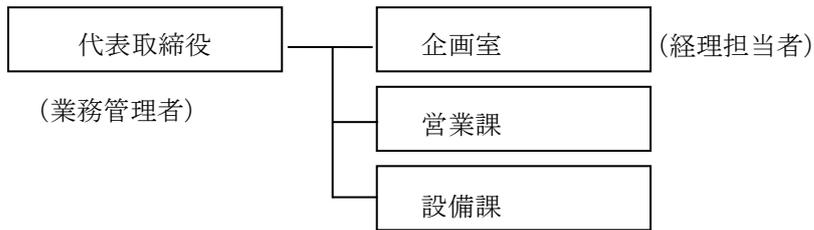
① 事業管理機関

[公益財団法人群馬県産業支援機構]

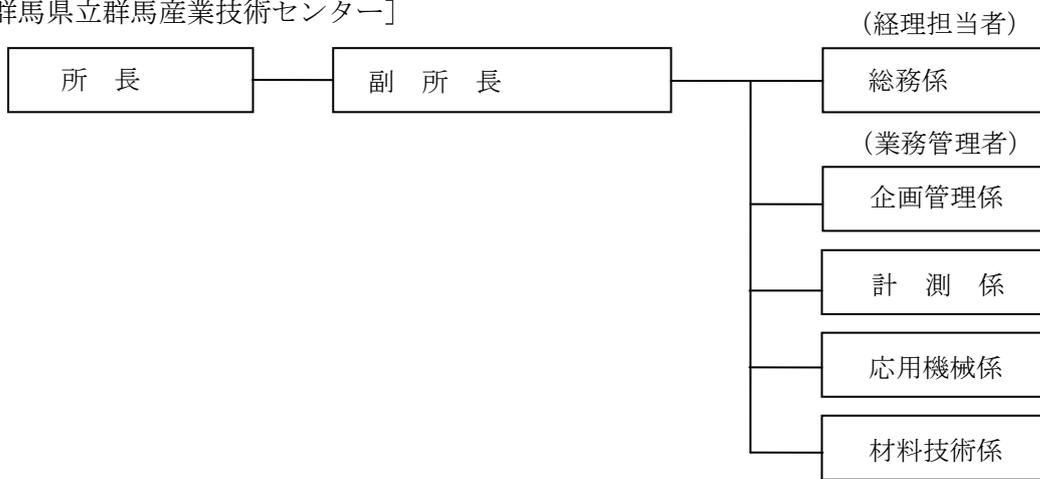


②再委託先

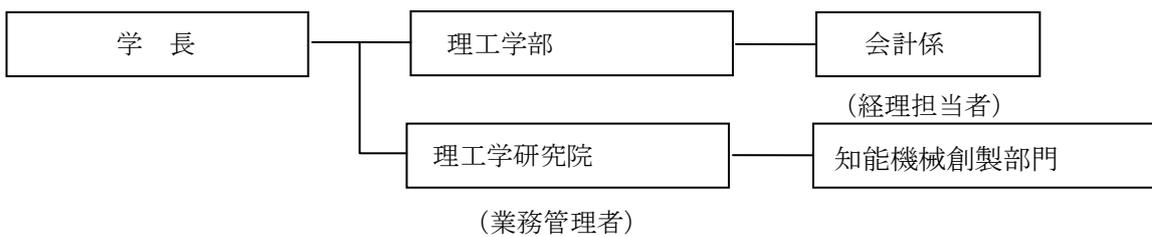
[石関プレシジョン株式会社]



[群馬県立群馬産業技術センター]



[国立大学法人群馬大学]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人群馬県産業支援機構

(管理員)

氏名	所属・役職	実施内容
田口 恭二	工業支援課 課長	プロジェクト全体管理

【再委託先】

(研究員)

石関プレシジョン株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
石関 誠二	代表取締役	①及び②
石関 成彦	企画室 室長	①及び②
黒木 貴司	設備課 課長	①及び②
大西 学	営業課 課長	①及び②

群馬県立群馬産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
横山 靖	計測係 独立研究員	①及び②
矢澤 歩	応用機械係 独立研究員	①及び②
徳田 敬二	材料技術係 独立研究員	①及び②

国立大学法人群馬大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
渡利 久規	大学院理工学府 知能機械創製部門 教授	①及び②

※ 実施内容の番号については、表1に示す。

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人群馬県産業支援機構

(経理担当者) 工業支援課 副主幹 富山 勝敏

(業務管理者) 工業支援課 課長 田口 恭二

(再委託先)

石関プレシジョン株式会社

(経理担当者) 企画室 室長 石関 成彦

(業務管理者) 代表取締役 石関 誠二

群馬県立群馬産業技術センター

(経理担当者) 総務係 浅田 岳治

(業務管理者) 企画管理係 小谷 雄二

国立大学法人群馬大学

(経理担当者) 工学部事務部 会計係 係長 宮路 昌浩

(業務管理者) 大学院理工学府 府長 篠塚 和夫

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
石関 誠二	石関プレシジョン株式会社 代表取締役	P L
石関 成彦	石関プレシジョン株式会社 企画室 室長	
横山 靖	群馬県立群馬産業技術センター 計測係 独立研究員	
渡利 久規	国立大学法人群馬大学 大学院理工学府 知能機械創製 部門 教授	S L
田口 恭二	公益財団法人群馬県産業支援機構 工業支援課 課長	
清水 紀幸	株式会社シミズプレス 代表取締役	アドバイザー

1-3 成果概要

化学処理を不要とする微細・高精度プレス加工技術の確立

表1 3年間の研究開発の実施内容

解決すべき研究課題		実施年度	目的	目標	研究成果	
① 端面課題への対応	①-1 金型クリアランスの最適化	H24年度	バリや破断面を抑える最適条件を構築する	バリや破断面を抑える加工パラメータの選定	文献等による、せん断加工に影響する加工パラメータの調査および選定した シミュレーションによる加工パラメータの影響を調査した	
		H25年度	成形シミュレーションの検証と金型設計	パンチ、ダイスの諸条件の影響調査を行い金型設計を行う	パンチ、ダイスの諸条件の影響調査を行い金型設計を行った	
	①-2 金型バラツキの最適化	H24年度	金型組み付け技術を構築し、せん断面のバラツキの最適化を図る	パンチ、ガイドピンなどの穴の垂直度および位置精度の位置決め条件測定装置による計測・データ化	位置決め条件測定装置の導入可否の事前確認として、三次元測定機による金型予備測定を実施した 位置決め条件測定装置による金型測定を実施した	
		H25年度	金型高精度測定による組み付け技術の構築	上下金型の位置変化の高精度測定の実現および金型組み付け技術の構築	パンチ、ガイドピンなどの穴の垂直度、位置精度を数値化した。その結果を基にした金型組み付け技術を構築した	
		H26年度	スリット両側のせん断面率の均等化	せん断加工に関するパラメータを決定付ける要因を検証し、バリの減少とせん断面率の向上を図る	成形シミュレーションによる最適加工条件(板押さえ力や左右非対称クリアランスの影響確認)を推定した 成形トライ用の順送金型を製作し、現物とシミュレーション結果との整合性を検証した	
	①-3 加工油の選定	H24年度	プレス加工油の最適条件の構築	加工油の選定	文献等による高精度せん断加工実現のための加工油の検討を実施した	
	② 金型およびプレス技術の構築	②-1 面打ち形状の最適化	H25年度	バリの素材の中への押し込みの最適化	面押し用パンチ・ダイスの形状組み合わせ及び面押し量の成形への影響の数値化	面打ち加工シミュレーションによる面押し用パンチ・ダイスの形状組み合わせ及び面押し量の影響調査を行った
		②-2 微小スクラップ処理の最適化	H26年度	微小スクラップの製品への悪影響の最小化	微小スクラップの影響を最小化する金型を設計し、微細スクラップ除去のためのバキューム処理をする頻度の低減を図る	製作した順送金型にて成形トライしたワーク等を微細部品観察装置を使用して、微小スクラップの発生状況を観察し改善効果の確認した

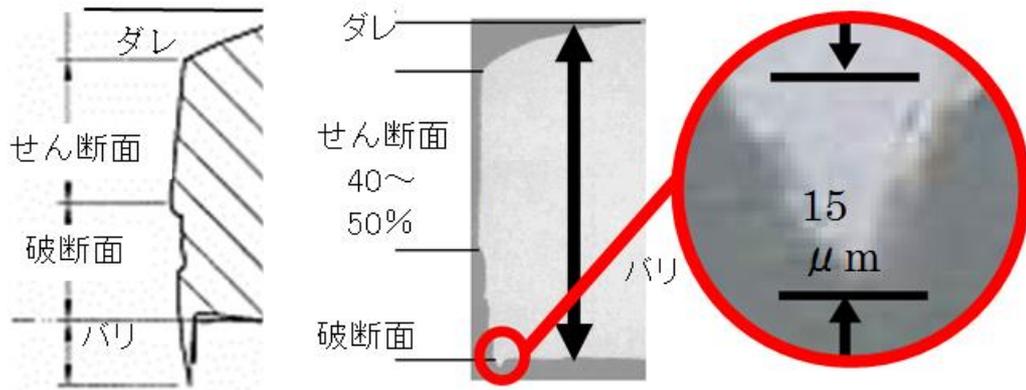


図1 解決すべき研究課題(現状のせん断面、バリ高さの状態)

図1のようにプレス打ち抜き加工を行うとその端面は、だれ、せん断面、破断面、バリに分かれる。インターコネクタは、長時間の使用に対応するため劣化の起点となるバリや破断面を抑える必要がある。

3年間の研究開発の課題として、クリアランスの最適化，せん断面のばらつきの最適化，加工油の最適化および生産性(品質)向上のための微小スクラップ処理の最適化を実施してきた。

成果として、下記に掲げた目標を全て100%達成することができた。(実施概要は、表1参照)

- ・現状 12~15 μm のバリを 10 μm 以下に減少
- ・現状 40~50%のせん断面を 80%以上に向上
- ・現状 500回で行っている微細スクラップのバキューム処理を 2000回まで延長

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関

〒371-0854 群馬県前橋市大渡町 1-10-7 県公社総合ビル2階

公益財団法人群馬県産業支援機構

工業支援課 課長 田口 恭二

TEL 027-255-6501

FAX 027-255-6161

E-mail k-taguchi@g-inf.or.jp

中核研究機関

〒370-3107 群馬県高崎市箕郷町矢原 2177-1

石関プレジジョン株式会社

営業課 課長 大西 学

TEL 027-371-5758

FAX 027-371-5986

E-mail m-ohnishi@i-precision.co.jp

第2章 端面課題への対応

2-1 金型のクリアランスの最適化

2-1-1 文献等による、せん断加工に影響する加工パラメータの絞り込み

せん断加工に関する種々の文献にて加工パラメーターを調査した。

図2-1は、ICリードフレームの微細せん断加工におけるリード幅と板押さえ力の関係を表している。板押さえ力が小さい場合にはリードがパンチに引き込まれ易く曲がりの原因となっていることがわかる。すなわち、リード幅が狭くなるほど大きな板押さえ力を必要とすることになる。神馬氏等は、リードの精度に及ぼす影響因子として以下のような影響因子をあげている。

- | | |
|--------------|---------------|
| ① プレスの動的精度 | ⑧ 切れ刃の摩耗 |
| ② ダイセットの動的精度 | ⑨ リード幅・長さの比 |
| ③ 打ち抜き速度 | ⑩ リードの湾曲形状 |
| ④ 板押さえ力 | ⑪ 打ち抜き順序 |
| ⑤ 潤滑油 | ⑫ 被加工材料 |
| ⑥ パンチの細長比 | ⑬ スリットの残留応力 |
| ⑦ クリアランス不同 | ⑭ 調質圧延による残留応力 |

図2-2は、先抜きクリアランスと後抜きクリアランスの差（クリアランスの不均等）がリードの曲がりに及ぼす影響を表している。クリアランスが不均等の場合には、クリアランスの小さい方から大きいほうに曲がりが発生しやすいことを示している。

図2-3は、L字型の打ち抜きの場合に、抜き順の影響で曲がりが発生していることを示すデータである。これは、主にせん断加工時の側方力によるものであり、角丸みが小さいほど、またリードが細いほど大きく曲がることが報告されている。

表 7.9 リード曲がりを抑える板押さえ効果⁴⁵⁾

板押さえ力 [kgf/cm ²]	リード幅 [mm]		
	0.2	0.3	0.4
25	×	×	×
50	×	○	○
100	○	○	○

図 2-1 せん断加工に関わる文献例 1

(神馬敬, 関根文太郎, 関谷健助, 勝端真一, 森本亘: 塑性と加工, 28-315 (1987), 355-362)

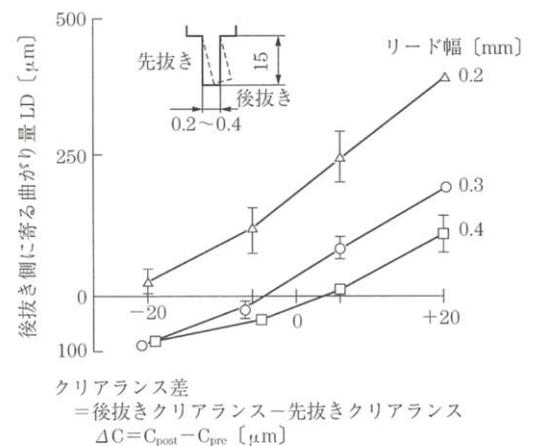


図 7.40 リード曲がりに及ぼす抜き順とクリアランスの影響⁴⁵⁾ (0.25 mm 厚 42% Ni 合金, 板押さえ圧力 1 kgf/mm)

図 2-2 せん断加工に関わる文献例 2

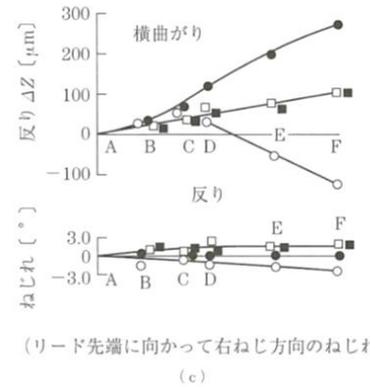
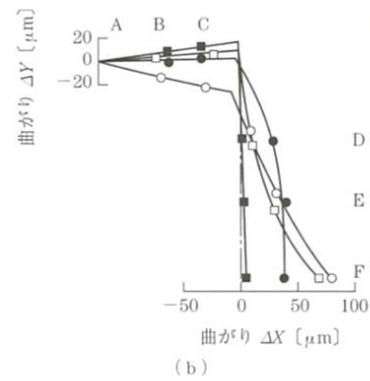
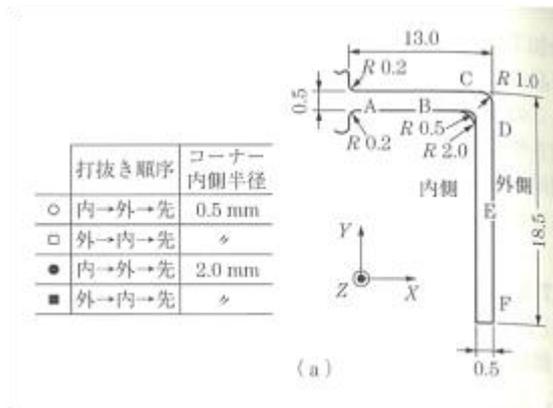


図 7.41 L 字形リード抜き変形に及ぼす抜き順とコーナー丸みの影響⁴⁶⁾ (0.25 mm 厚 42% Ni 合金)

図 2-3 せん断加工に関わる文献例 3

(神馬敬, 関根文太郎, 関谷健助, 勝端真一, 森本亘: 塑性と加工, 28-315 (1987), 355-362)

本研究の精密せん断加工は、0.5mm 以下の薄板の精密せん断である。神馬等が指摘したリードの精度に及ぼす 14 項目の影響因子の中から、主に薄板の精密せん断加工に影響を与える加工パラメーターとして

- ・板押さえ力
- ・クリアランス
- ・パンチ形状

の 3 点に絞ってプレス成形シミュレーションを行うことに決定した。

2-1-2 シミュレーションによる加工パラメータの影響度調査

① プレス成形シミュレーションによる各パラメータの影響調査

材料強度試験の結果を用いてプレス成形シミュレーションにて決定した「板押さえ力」「クリアランス」「パンチ形状」の各パラメータについて、その影響の調査を行った。

解析は、剛塑性有限要素法を用いて変形解析を行った。解析モデルの概要を図 2-4 に示す。

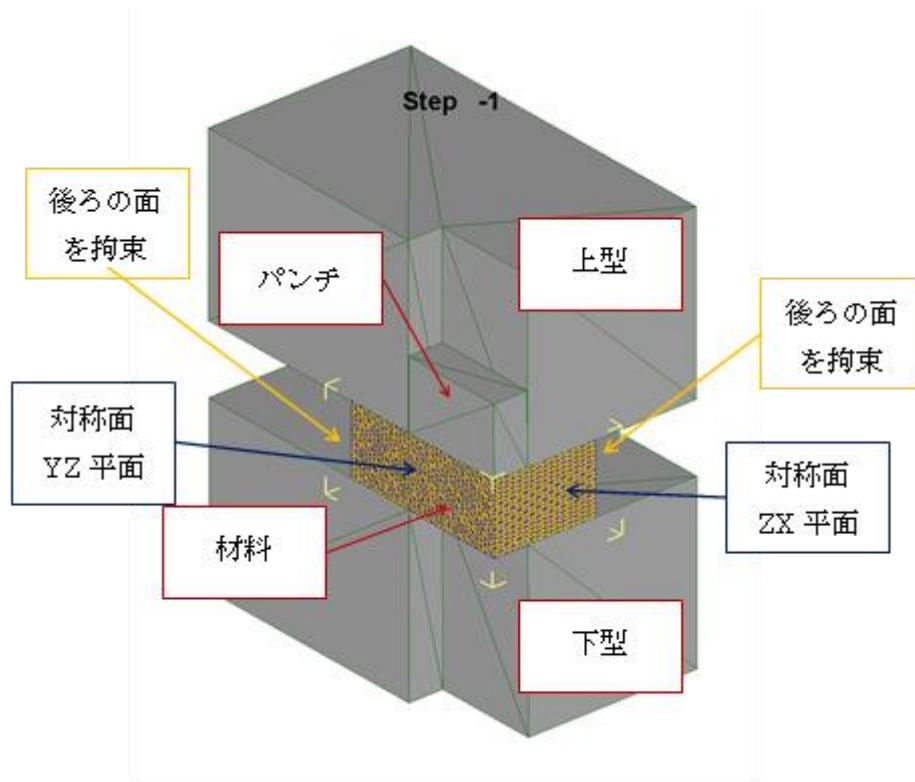


図 2-4 せん断加工解析モデルの概要

解析モデルは、図 2-4 に示すように、上下の金型、パンチとなる工具および被加工材料の 4 つの部分から構成されている。解析モデルは対称性を考慮して 1/4 モデルを使用した。図 2-4 における手前の 2 面が対称面を表している。打ち抜き後の製品の実寸法を仮に幅 0.4mm、長さ 1.2mm、板厚 0.4mm (1/4 モデルの場合、幅 0.2mm、長さ 0.6mm、板厚 0.4mm となる) とした。解析では、節点や要素の座標の定義やトレランスの関係上、問題が発生する可能性が高いため、本解析では実寸法を 100 倍したモデルを作成し、このモデルに対してシミュレーションを実行している。打ち抜きが行われる部分の金型とパンチのクリアランスは 0.003mm から 0.03mm の範囲で変更してクリアランスの影響について調査した。

さらに、材料の「板押しえ力」がせん断加工に与える影響について調査するため、板押しえ部分の長さを拘束する距離を変更した。すなわち、板押しえ部分の対称面 YZ 平面からの X 方向の距離を 0.6mm、1.0mm と変更した場合、材料の拘束条件は被加工材の端部の節点を拘束することで再現している。本解析において使用した材料は、四面体の剛塑性ソリッド要素であり、要素サイズは一辺が約 0.025mm~0.035mm (モデル寸法) である。

通常の大変形有限要素解析では、材料の破断に関する条件式は考慮されていない。そのため、せん断加工解析を行うためには、材料の破断条件を用意する必要がある。そこで、せん断加工解析における破断条件として、一般化した Cockcroft-Latham の式を使用し、式 (1) のダメージ値がある一定値を超えた要素が破断を起こすものと仮定した。式 (1) の限界ダメージ値の値 D は、同じ材料の引張試験の剛塑性有限要素解析を実行し、実際に引張試験が破断を起こした時点での式 (1) の値を限界ダメージ値 D として採用した。ここで、本解析における限界ダメージの値 D は 3 とした。

$$D = \int \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad \text{式 (1)}$$

すなわち、せん断加工シミュレーションでは、限界ダメージ値 $D (= 3)$ を超えた要素を消去し、残った有限要素に対して剛塑性解析を継続した。解析における金型-材料間の摩擦係数は 0.05 とし、上下金型間のクリアランス C は $C=0.003\text{mm}(C/t=0.0075)$ とした。

①-1 板押さえ力が与える影響

板押さえ力が与える影響について調査するため、押え部分の拘束する距離を変更した。対称面 YZ 平面からの X 方向への拘束範囲を 0.6mm より正側 (拘束大), 1.0mm より正側 (拘束小) と変更し、両者のせん断加工時の相当応力の違いを検証した。

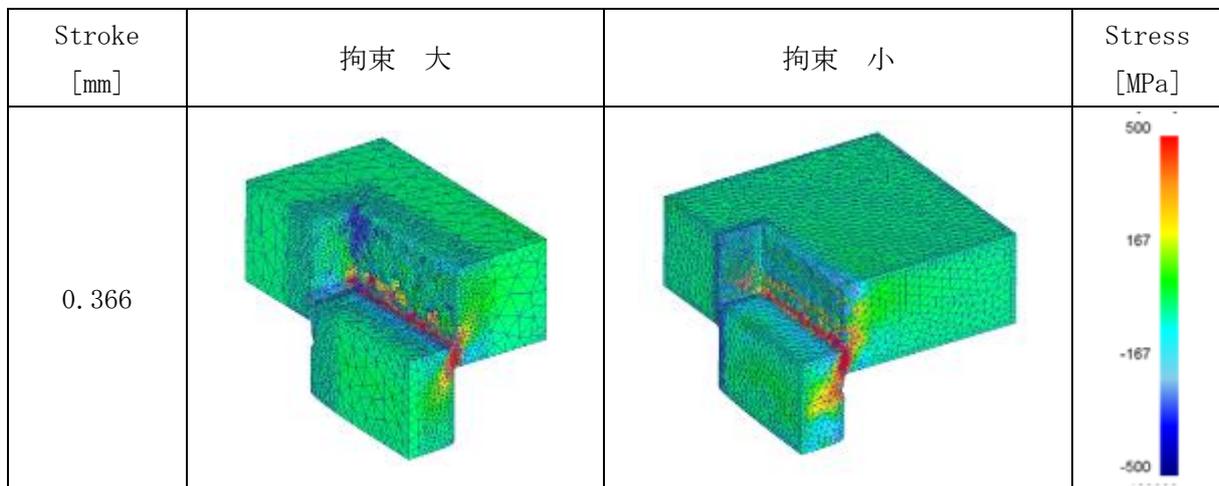


図 2-5 板押さえ力の違いが相当応力におよぼす影響

図 2-5 では板厚 0.400mm に対して、鉛直上方よりパンチが 0.366mm 移動した際の相当応力の分布を示している。拘束される領域が大きな条件では、局所的な応力によるせん断が行われるのに対し、拘束される領域が小さな条件では応力の発生する範囲が広い。すなわち、材料を拘束していない領域では板材のせん断部分の材料不足を補うために、幅広い領域に材料の変形を起こす必要がある。このため、拘束していない領域はせん断部分の材料に引きずられる形で引張を受ける。その結果、図 2-5 の右側のせん断部分における相当応力の最大値は約 500MP 以上であったものと予想される。

相当応力の分布は図 2-5 のような違いが表れているが、だれの発生等には両者の拘束による大きな相違は認められなかった。

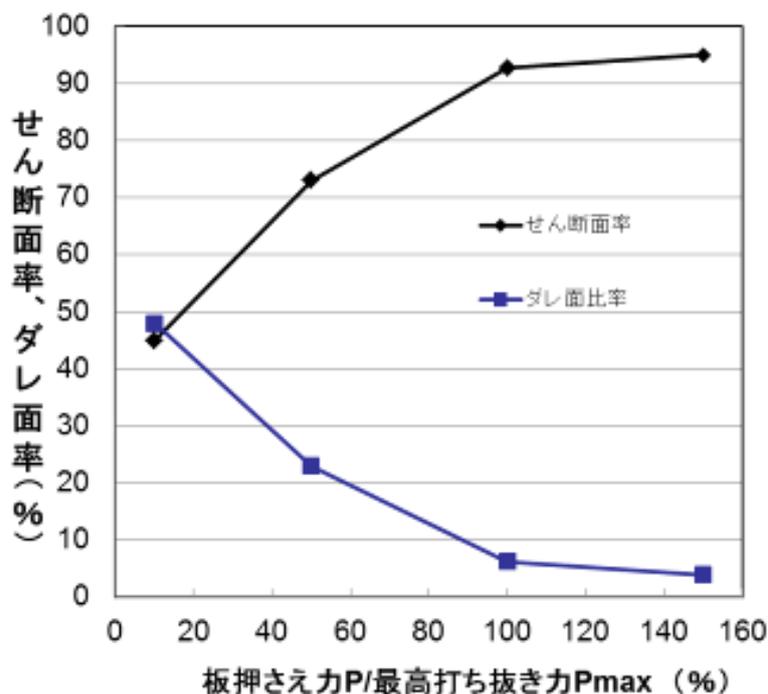


図 2-6 板押さえ力 P/最高打ち抜き力 Pmax とせん断面率、だれ面率の関係

図 2-6 に示すように、板押さえ力 P/最高打ち抜き力 Pmax を 4 種類 (10, 50, 100, 150%) に変化させ、せん断面率、だれ面率の比較を行った。

この結果より、90%以上のせん断面を得るためには、板抑えは最高打ち抜き力とほぼ同等の板抑え力が必要であることが判明した。通常のせん断加工においては板押さえ力 P/最高打ち抜き力 Pmax の値は、それほど必要ではないが本実験のような薄板の高精度せん断加工においては押さえ力が不十分な場合には、被加工材と下型の上に板浮きが発生する可能性がある。このような板浮き（もしくは押さえ力の不十分による板ずれ）が発生した場合には、プレス切断方向と刃先との間にせん断面の倒れ角が発生し、せん断面の比率が低下すると考察した。

また、このようにプレス切断方向と刃先との間にせん断面の倒れ角が発生した場合には、刃先に負担がかかることも予想され刃物損傷の原因にもなることが考えられる。図 2-6 に示すように板押さえ力 P/最高打ち抜き力 Pmax の値は 100%以上、すなわち打ち抜き力と同等以上の抑えが必要であることが判明した。

①-2 クリアランスがせん断加工に与える影響

図 2-4 の解析モデルに対して、打ち抜きが行われる部分の金型とパンチのクリアランスを 0.003mm (C/t=0.75%)、0.015mm (C/t=3.75%)、0.03mm (C/t=7.5%) の 3 種類に変更させ、クリアランスがせん断加工におけるせん断面のだれやバリの大きさや与える影響についての考察を行った。一例として、図 2-7 に最小クリアランス (C/t=0.75%) および最大クリアランス (C/t=7.5%) の場合のせん断加工完了の直前におけるせん断面の形状の比較を示す。図 2-7 からクリアランスが大きい条件ではだれの発生が大きいことが確認できる。この結果を受けて、せん断面およびだれ高さについて数値的に評価することを考えた。

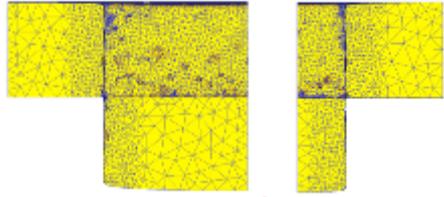
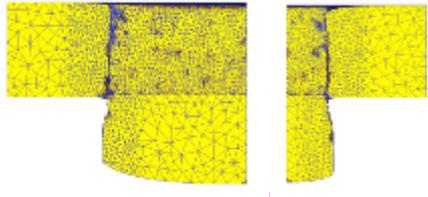
クリアランス C/t	0.75% (C=0.003mm)	7.5% (C=0.03mm)
せん断面形状		

図 2-7 クリアランスがせん断面の形状におよぼす影響

そこで実験におけるせん断面が、式 (1) で示したダメージの値で 2.5 以下であることから、ダメージの値が 2.5 以下をせん断面、それ以上を破断面としてせん断面の比率を求めた。

その結果、クリアランス 0.75% (C=0.003mm) では、ほぼ全面でせん断が行われていることとなり、実験結果と一致した。一方クリアランスが 7.5% (C=0.03mm) の条件では、板厚の約半分がだれとせん断面となっておりダメージの値が 2.5 以上の領域は破断面として評価できることを確認した。図 2-8 にせん断面におけるダメージ値の分布の様子を示す。

以上のように、解析で得られたせん断面の値からダメージを用いて、各種条件におけるせん断面の比率およびだれ面の比率の調査を行うこととした。

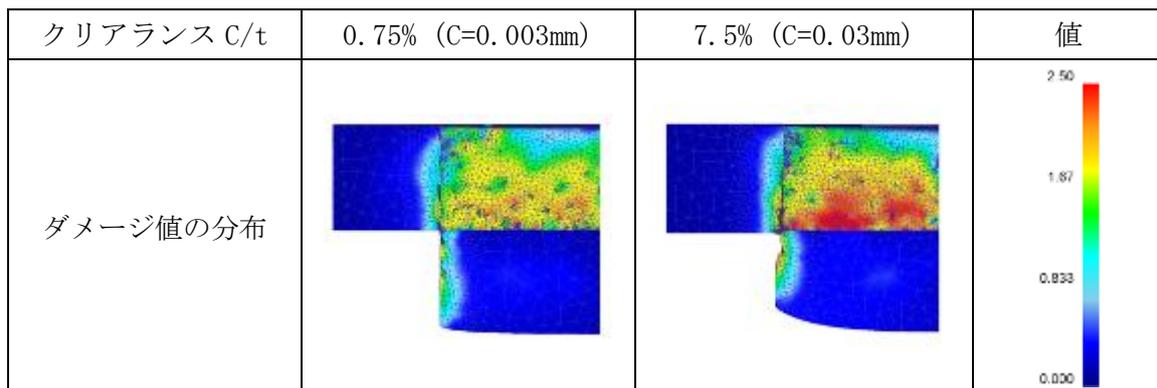


図 2-8 せん断面におけるダメージ値の分布

同様に、クリアランス 3.75% (C=0.015mm) の条件でもせん断面の比率を評価し、金型とパンチのクリアランスを 0.003mm (C/t=0.75%)、0.015mm (C/t=3.75%)、0.03mm (C/t=7.5%) の 3 種類に変更した場合の、せん断面の高さ、だれの高さを纏めたものを表 2-1 に示す。図 2-9 には、3 種類のクリアランスとせん断面の高さおよびだれ高さとの関係を表している。

表 2-1 クリアランスとせん断面の高さおよびだれ高さ

クリアランス [%]	せん断面 [mm]	せん断面率 [%]	だれ [mm]	だれ面の比率 [%]
0.75	0.371	92.8	0.025	6.3
3.75	0.298	74.5	0.027	6.7
7.50	0.228	56.9	0.032	8.0

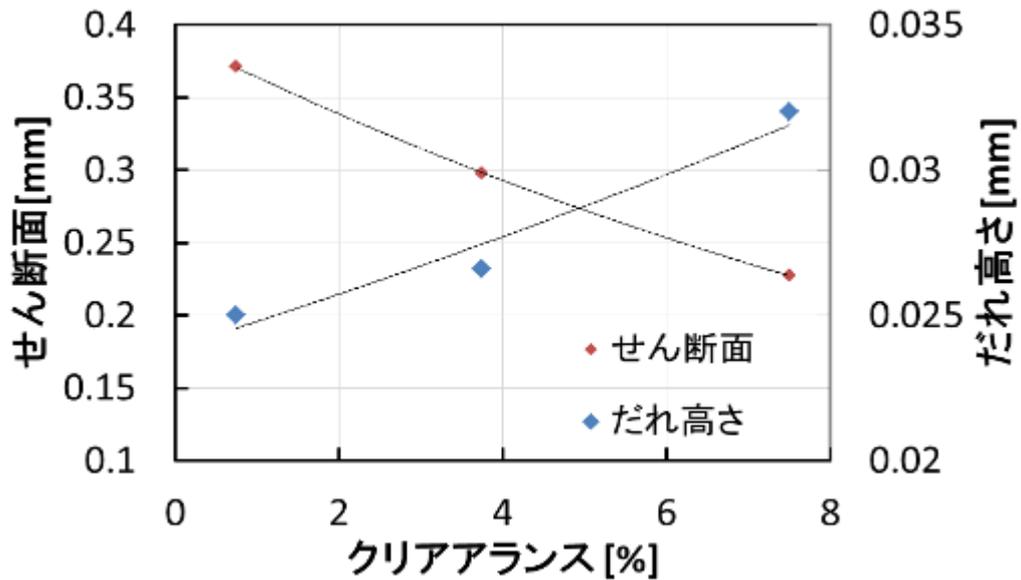


図 2-9 クリアランスとせん断面，だれ高さとの関係

表 2-1、図 2-9 の結果より、クリアランスが 0.75 で最小の時に、せん断面の比率は 92%以上、だれ面の比率は 6.3%以下になることが確認できた。

図 2-10 では、せん断加工終了直前における材料および金型に負荷される圧力分布を示している。クリアランスが大きい場合には、材料や金型に負荷される圧力も高くなって幅広く分布しているが、クリアランスが小さい条件では材料に負荷される圧力は集中的であり、また金型への負荷が小さくなっていることがわかる。すなわち、以上の結果よりクリアランスを小さくすることが高精度せん断加工を実現するために最も重要な条件であると考えられる。

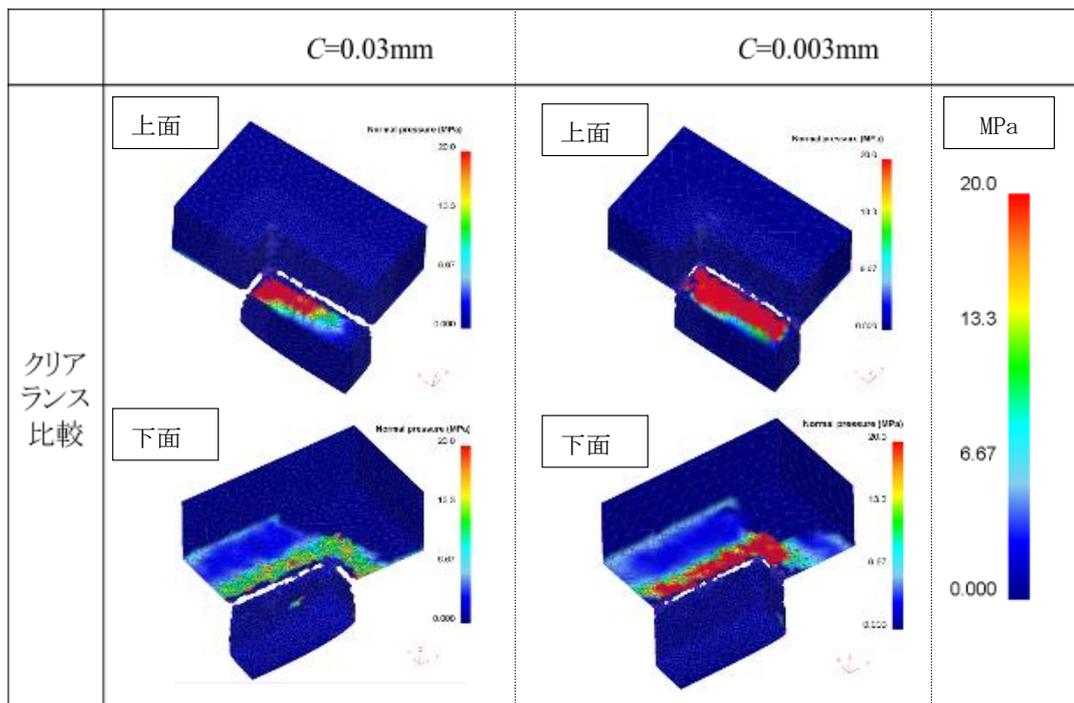


図 2-10 クリアランスと材料の圧力および金型の圧力の関係

①-3 パンチ先端の R による影響

成形シミュレーションソフトウェアを用いて、図 2-11 に示すようにパンチの先端 R の半径を 0.03mm ($R/t=0.75\%$), 0.06mm ($R/t=1.5\%$), 0.12mm ($R/t=3.0\%$) と 3 種類変化させて比較を行った。この解析におけるクリアランスは 0.003mm ($C/t=0.75\%$) および 0.03mm ($C/t=7.5\%$) の 2 種類に対して解析を行っている。

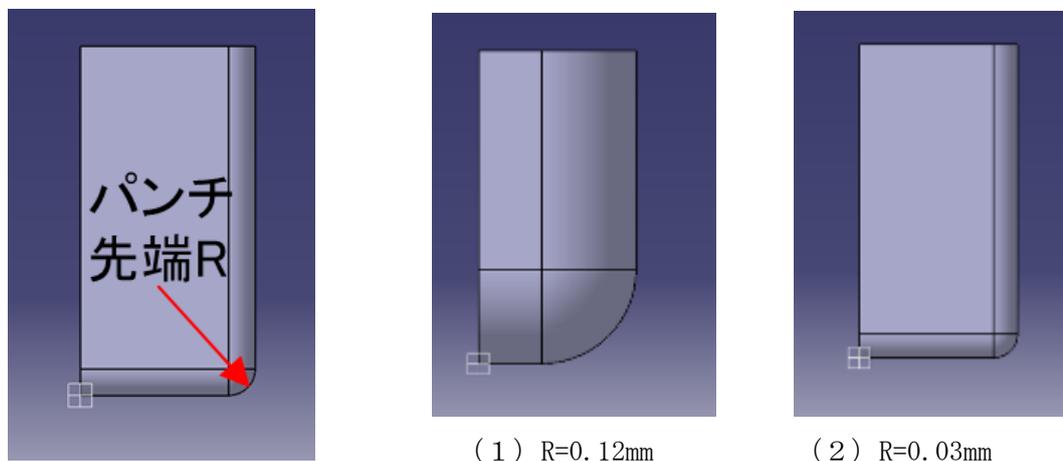


図 2-11 パンチ先端 R 形状の影響

解析モデルは、図 2-12 に示すように上下の金型およびパンチ、材料の 4 つのパートにより構成した。解析モデルは 1/4 モデルを使用した。実寸法では要素やトレランスの問題が発生する可能性があるため、本解析では実寸法を 100 倍したモデルを作成しシミュレーションを実行した。また材料の要素数は約 50000 とした。材料は剛塑性体とし、引張試験より得られた応力-ひずみ線図を用いて解析を実行している。打ち抜きが行われる部分の金型とパンチのクリアランスを 2 種類に変更し、また、パンチ先端の角部に丸みを付け、半径の違う 3 種類のパンチの影響について解析結果に基づいて考察した。パンチの移動速度は 0.1mm/s, 上下の金型は固定、摩擦係数は 0.15 とした。

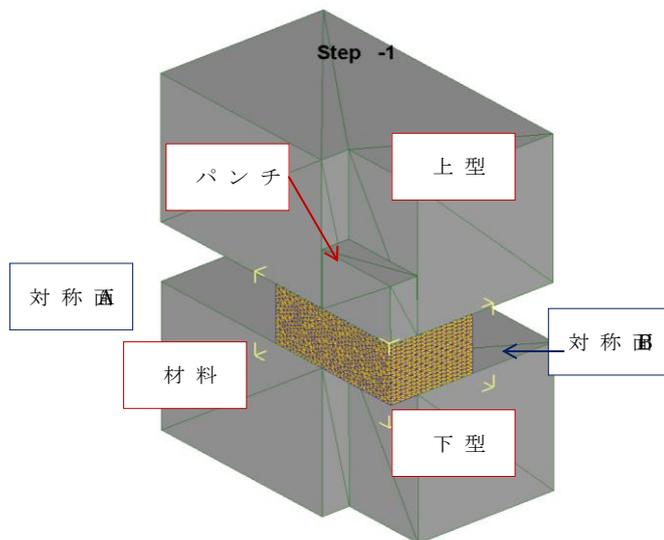


図 2-12 パンチ先端 R の解析用せん断加工モデル (一例)

解析結果を表 2-2 に示す。表 2-2 よりパンチ先端半径 R がせん断加工におけるせん断面の比率、だれの比率に与える影響は少ないことがわかった。例えば、クリアランス 0.003mm (C/t=0.75%) の場合は、その影響は図 2-13 に示すような結果になる。図 2-13 からパンチ先端半径 R のせん断面の比率に与える影響は少なく、だれの比率に与える影響が若干認められる程度であることがわかる。

実際の工具の作成においては、工具先端パンチ半径 R は小さいほうが望ましいが、工具先端パンチ半径 R が小さすぎると刃先の破損をもたらす可能性もある。また、実際の加工の際は、パンチ先端半径 R の限界を考慮して実際のパンチ先端半径 R の値は 0.10~0.12 程度で問題ないと判断した。

表 2-4 パンチ形状の影響調査

クリアランス [mm]	先端 R [mm]	せん断面 [mm]	せん断面率 [%]	だれ [mm]	だれ面率 [%]
0.003	0.03	0.354	88.4	0.0165	4.1
0.003	0.06	0.356	89.0	0.0275	6.9
0.003	0.12	0.357	89.3	0.0425	10.6
0.03	0.03	0.308	75.2	0.0430	10.7
0.03	0.06	0.320	80.1	0.0434	10.8
0.03	0.12	0.352	88.0	0.0479	12.0

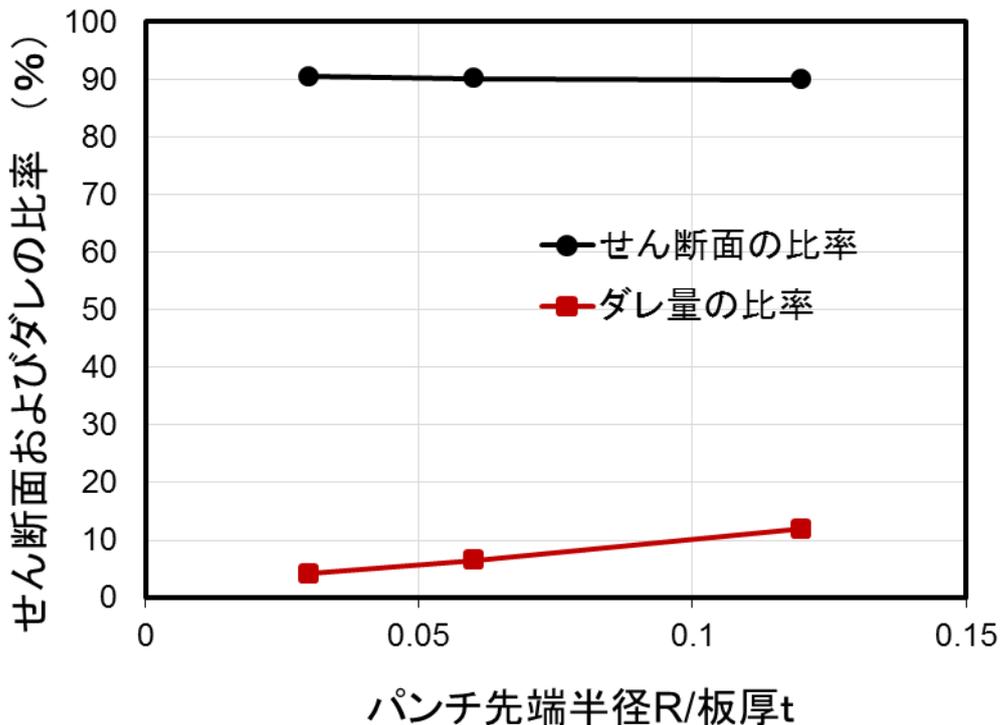


図 2-13 パンチ形状の影響調査(0.003mm (C/t=0.75%) の場合)

今までの解析結果を纏めると、図 2-13 に示したようにパンチ先端半径 R のせん断面の比率に与える影響は少なく、だれの比率に与える影響が若干認められる程度であることがわかる。すなわちパンチ先端形状の影響よりも、せん断加工を決定する要因は、ほぼクリアランスで決まると言っても良いことがわかった。

2-1-3 成形シミュレーション検証による金型設計

せん断加工に関するパラメータを決定づける要因を成形シミュレーションにより検討した結果、以下のようなことが判明した。

- (1) せん断加工におよぼす影響としてはクリアランスの影響が最も支配的になる。せん断面率を90%以上を得るためには、 C/t が1.00% 以下であることが望ましい。
- (2) せん断面率90%以上を得るためには、板押さえ力/最大打ち抜き力の比 $P/P_{max}=100$ (%) の拘束条件が必要である。
- (3) C/t が1.00% 以下の条件では、パンチの先端形状はせん断面率にはあまり影響しない。パンチ先端Rの値が大きくなるとダレ面の比率が若干増加する。

以上の結果を踏まえた上で、パンチとダイスのクリアランス設定条件、板押さえ力、パンチ先端半径の各条件を設計することとした。

2-2 金型のバラツキの最適化

2-2-1 金型組付けのバラツキによるせん断加工への影響調査

① 上下金型の位置変化の高精度測定の実現及び金型組み付け技術の構築

今回導入した位置決め条件測定装置を用いてパンチ、ガイドピンなどの穴の垂直度、位置精度を数値する。その結果を基にした金型組み付け技術を構築する。
位置決め条件測定装置を図2-14に示す。



図2-14 位置決め条件測定装置

高精度プレスせん断加工を行う金型は、下型として図 2-15 に示すようなダイスとそのまわりにプレス位置を規制するガイドピンがあり、上型にはダイスのスリット部に合わせてパンチがあり、ガイドピンに合わせてガイドブッシュがありダイセットとして組まれている。パンチおよびダイスは入れ子構造になっており位置の微調整が可能となっている。



図 2-15 精密せん断用金型 (ダイス)

これまで、パンチとダイスの精密位置決めについては、経験からおおよその位置合わせを行った後、組付けを行い、試作加工によるせん断面のバリやだれ等を観察し、経験に基づいて微調整を繰り返す作業を行っていた。

本研究開発では、上型および下型の高精度測定を行うことによって、金型組み付けの段取り作業の低減を図る。

例えば、図 2-16 に示した金型ではダイスの幅がおよそ 0.4mm であることから、位置決め条件測定装置により先端φ0.2mm 球のスタイラス (接触子) を用い、図 2-17 に示すように形状を測定することが可能となった。

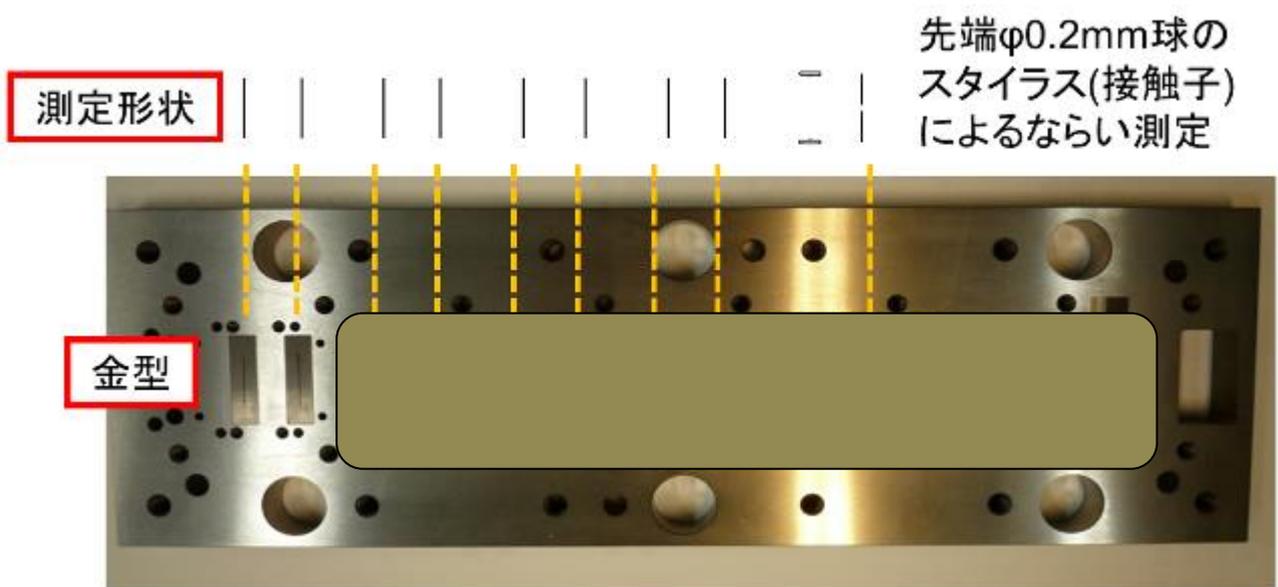


図 2-16 位置決め条件測定装置による測定例

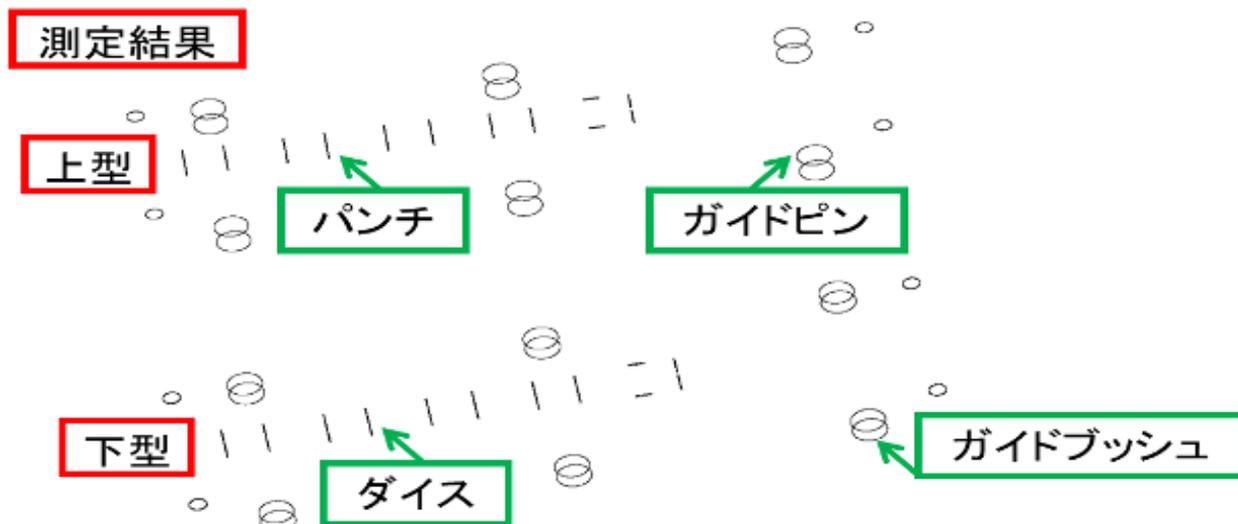


図 2-17 金型の測定結果（一例）

パンチ、ダイスおよびガイドピン、ガイドブッシュを測定した鳥瞰図を図 2-17 に示す。測定可能なことがわかったため、パンチとダイスの位置ずれやガイドピンの倒れ、ガイドピンとガイドブッシュのクリアランスなどについての検討も行った。

② ガイドピンとガイドブッシュのクリアランスおよびガイドブッシュの倒れについて

上型と下型の位置関係は、ガイドピンとガイドブッシュの、はめあいによって決められていることから、金型の位置決め精度はガイドピンとガイドブッシュのクリアランスに影響されるものと考えられる。そのためガイドピンとガイドブッシュのクリアランスの測定とガイドブッシュの倒れについて調査を行った。

ガイドピンとガイドブッシュのクリアランスの測定結果を図 2-18 に示す。図 2-18 より、ガイドピンとガイドブッシュのクリアランスは、ガイドピンがガイドブッシュのちょうど中心にくる理想状態では、およそ $4\mu\text{m}$ のクリアランスがあることが判明した。

パンチとダイスの位置合わせを数 μm のオーダーで位置合わせを行っていることから、このガイドピンとガイドブッシュのクリアランスは、位置合わせの精度に対して大きいことがわかった。

そのため、測定とガイドブッシュの倒れについての調査を行った。ガイドピンの倒れの一例を図 2-19 に示す。

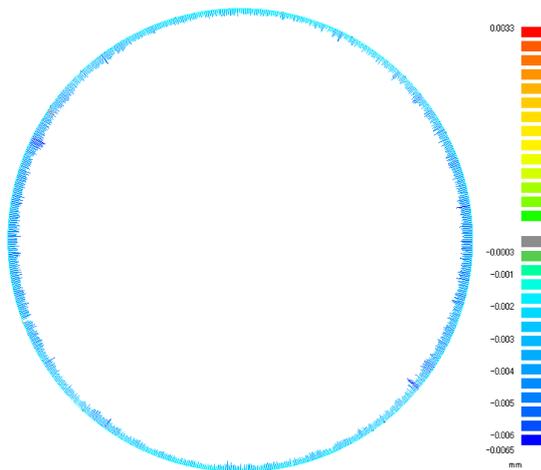


図 2-18 ガイドピンとガイドブッシュのクリアランス

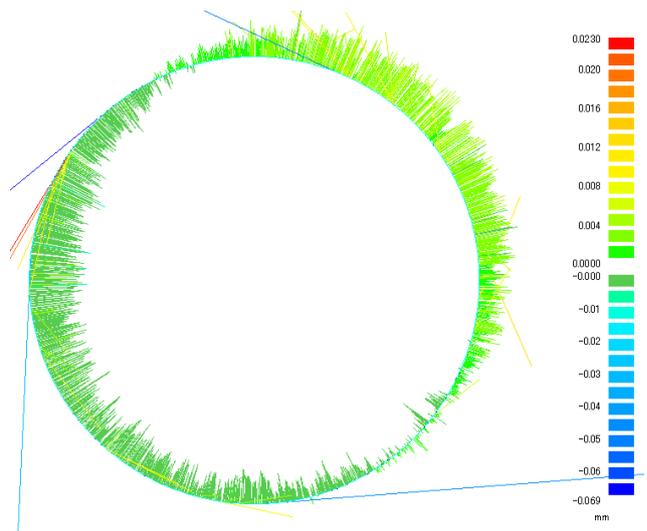


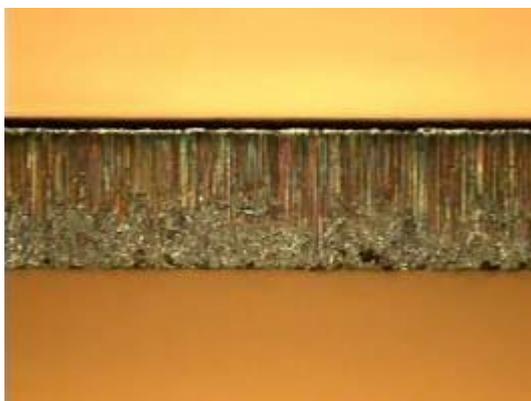
図 2-19 ガイドブッシュの倒れ（一例）

図 2-19 はガイドブッシュが上方と下方で約 $2\mu\text{m}$ ほど斜めに倒れていることを示している。ガイドブッシュおよびガイドピンは 6 組ずつあり、それぞれが別の方向に少しずつ傾いていることがわかった。

ガイドピンとガイドブッシュの組み合わせ単体を見ると金型の位置合わせのオーダーに対してクリアランスが大きすぎるように感じるが、6 組のガイドピンとガイドブッシュの組み合わせにより上型と下型の位置合わせが一義的に決まるようになっているものと考えられる。

そのことは金型の再度の調整をせずに、ばらしと組付けを行った場合に試作加工によるせん断面の様子に変化がないといった経験からも裏付けられる。

調整前のせん断加工面と調整後のせん断加工面を図 2-20 に示す。ずれたパンチとダイスの調整により、ほぼ一致した状態になった。なお、図 2-20 は既存のプレス機を用いて実験を行った結果である。位置決め条件測定装置による測定と金型位置決め効率化により、既存プレスを用いてもせん断面の効率的な改善ができることがわかった。



(調整前)



(調整後)

図 2-20 せん断加工面

③ 高精度プレス機による実験について

更なるせん断面の高精度化のために高精度プレス機を導入した。導入した高精度プレス機を図 2-21 に示す。付帯として順送のための送り機も導入している。



図 2-21 導入した高精度プレス成形機

位置決め条件測定装置で測定し位置決めを行った金型を用いて、図 2-21 に示す高精度プレス機にて高精度せん断加工実験を行った。せん断加工実験の様子を図 2-22 に、実験で得られたせん断面を図 2-23 に示す。

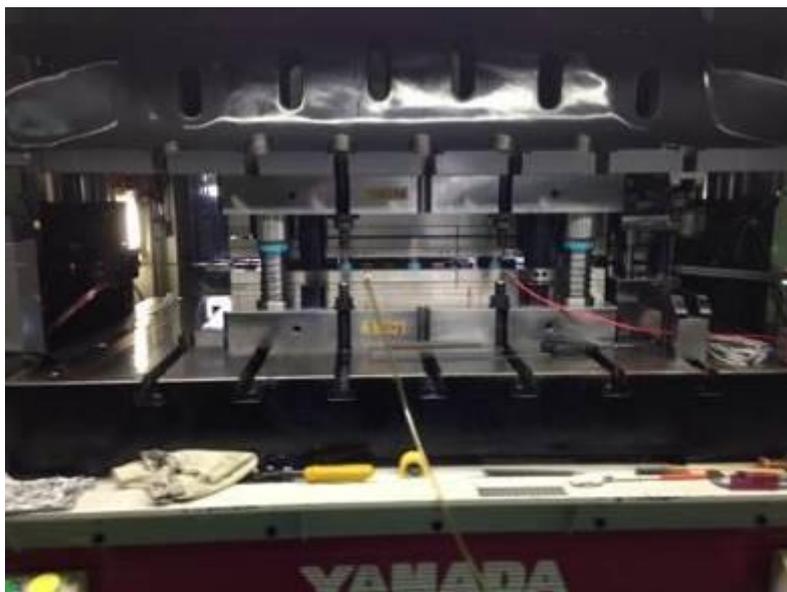


図 2-22 高精度プレス成形機によるせん断加工実験



図 2-23 高精度プレス成形機を利用したせん断加工面

位置決め条件測定装置を利用した組み付け金型および高精度プレス機使用により図 2-23 に示めすような、ほぼ破断面のない高精度せん断加工を実現できた。

2-2-2 シミュレーションによる左右非対称クリアランスの影響調査

図 2-24 に示すように、クリアランス 3% ($C=0.012\text{mm}$) の設定において、左右のクリアランスが等しい状態から、片側に 0.004mm だけずれが生じて左右のクリアランスが 0.008mm , 0.016mm となった時のせん断加工シミュレーションを行った。非対称なクリアランスがせん断加工におよぼす影響を調査した結果、ダレ高さには大きな差異が認められなかった。しかし、だれによって引き込まれる材料面積はクリアランスが狭い方が小さい、バリ高さはクリアランスが狭い方が小さいことを確認した。

だれ高さ 0.0260mm(6.5%) せん断面 0.3680mm(92.0%) バリ高さ 0.0220mm(5.5%)	だれ高さ 0.0285mm(7.1%) せん断面 0.3520mm(88.0%) バリ高さ 0.0312mm(7.8%)	だれ高さ 0.0240mm(6.0%) せん断面 0.3760mm(94.0%) バリ高さ 0.0120mm(3.0%)
対象せん断加工時(正面)	$C=0.016\text{mm}$ 側(4%側)	$C=0.008\text{mm}$ 側(2%側)

図 2-24 クリアランスとだれ高さ、せん断面、バリ高さとの関係

図 2-25 に示すように、クリアランス 3 % ($C=0.012\text{mm}$) の設定において、左右のクリアランスが等しい状態から、片側に 0.004mm だけずれが生じて左右のクリアランスが 0.008mm , 0.016mm となった時のせん断加工シミュレーションにおけるダメージ値を比較した。左右のクリアランスの違いは 1 % ではそれほど大きな差異が認められなかったが、クリアランスの狭い側でダメージ値の高い部分が若干広がった。

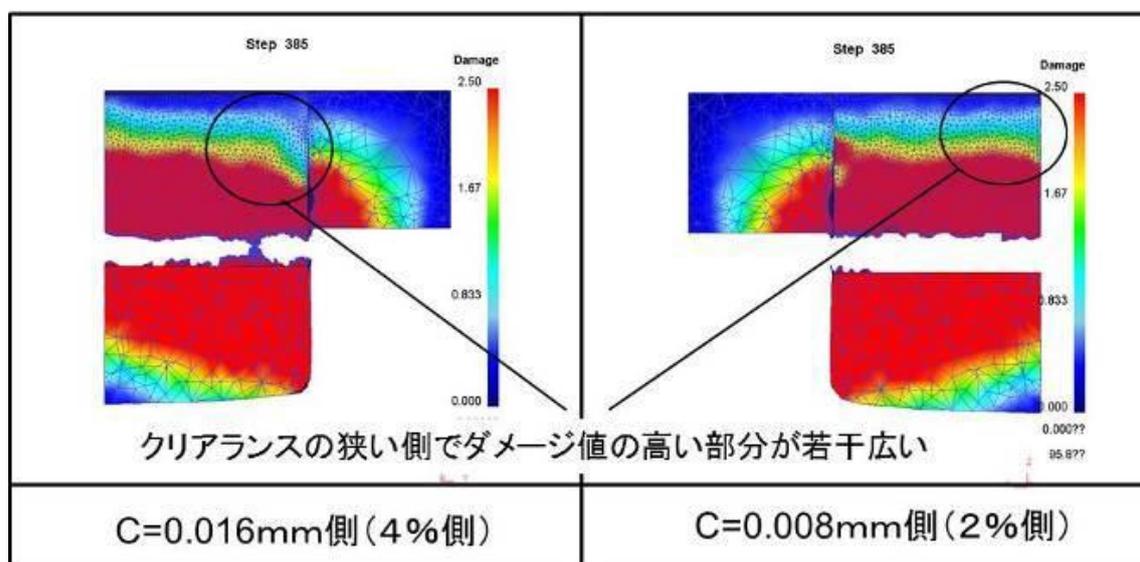


図 2-25 クリアランスとダメージ値との関係

図2-26に示すように、クリアランス 3 % ($C=0.012\text{mm}$) の設定において、左右のクリアランスが等しい状態から、片側に 0.004mm だけずれが生じて左右のクリアランスが 0.008mm , 0.016mm となった時のせん断加工シミュレーションにおける相当ひずみ値を比較した。クリアランスの狭い側は、高いひずみ値のところ広い範囲に分布していることが明らかになった。

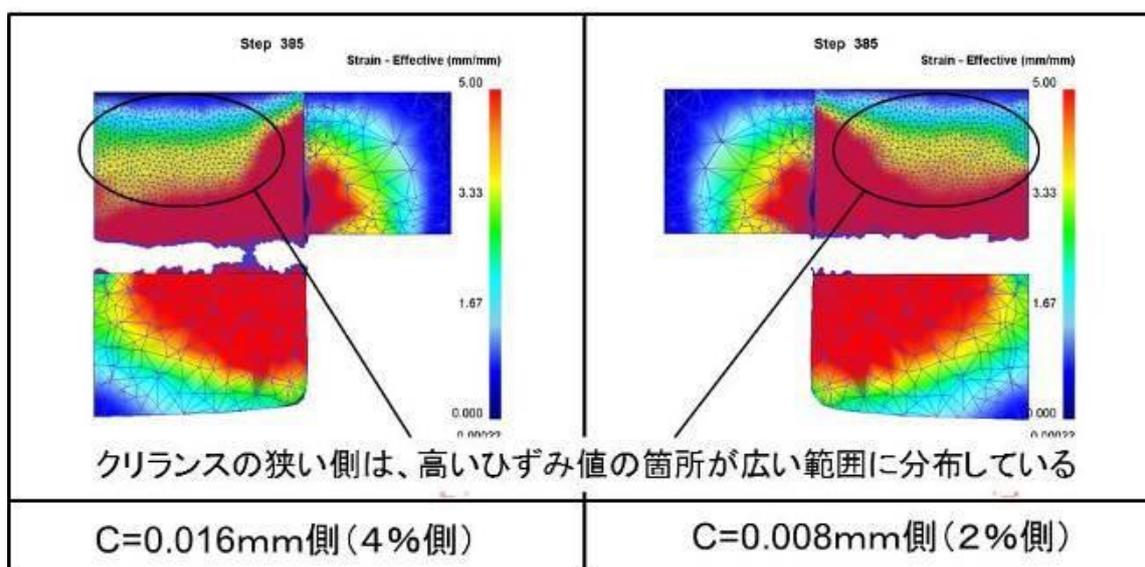


図 2-26 クリアランスと相当ひずみとの関係

2-2-3 成形シミュレーション検証による金型設計

前述の結果をもとに、形成トライ用金型を設計・製作した。製作した金型の概略図を図2-27に示す。

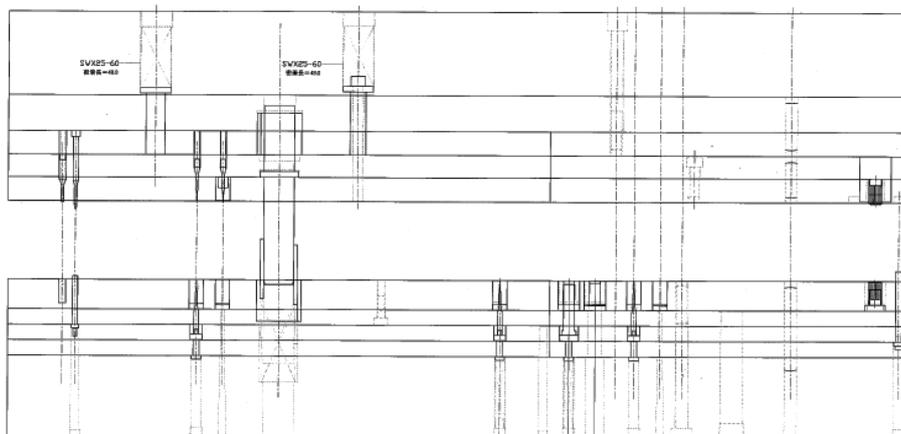


図 2-27 順送金型の図面(概略)

成形したワーク等を観察・計測するために導入した微細部品観察装置を図 2-28 に示す。

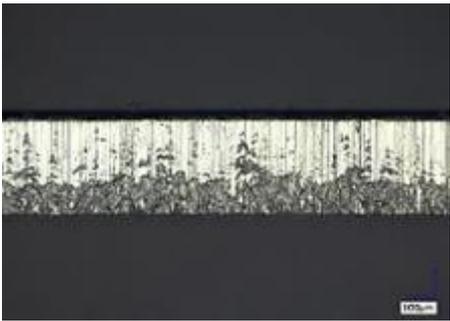
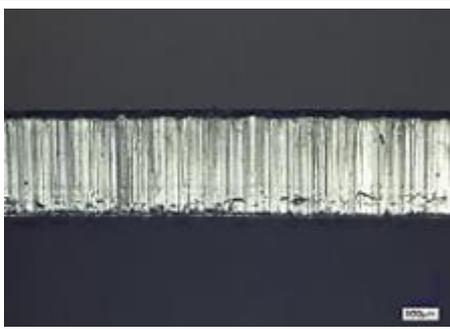


図 2-28 微細部品観察装置

2-2-4 微細部品観察装置による解析（成形シミュレーション）結果との対比

P/Pmax の値を 50%, 85%, 100%（その時の各々のクリアランスは 3%, 2%, 1%）と変化させた時に成形したワークの実際に計測したせん断面積率とシミュレーションによる解析値との整合性を確認した結果を表 2-3 に示す。また、クリアランス最適化前後のせん断面積率の結果を図 2-29 に示す。

表 2-3 せん断面積の実測値とシミュレーション値の対比

<p>P / Pmax=50%</p> <p>クリアランス 3%</p>	<p>せん断面積率</p> <p>実験 64.6%</p> <p>解析 73.0%</p>	
<p>P / Pmax=85%</p> <p>クリアランス 2%</p>	<p>せん断面積率</p> <p>実験 87.8%</p> <p>解析 90.0%</p>	
<p>P / Pmax=100%</p> <p>クリアランス 1%</p>	<p>せん断面積率</p> <p>実験 97.4%</p> <p>解析 94.0%</p>	

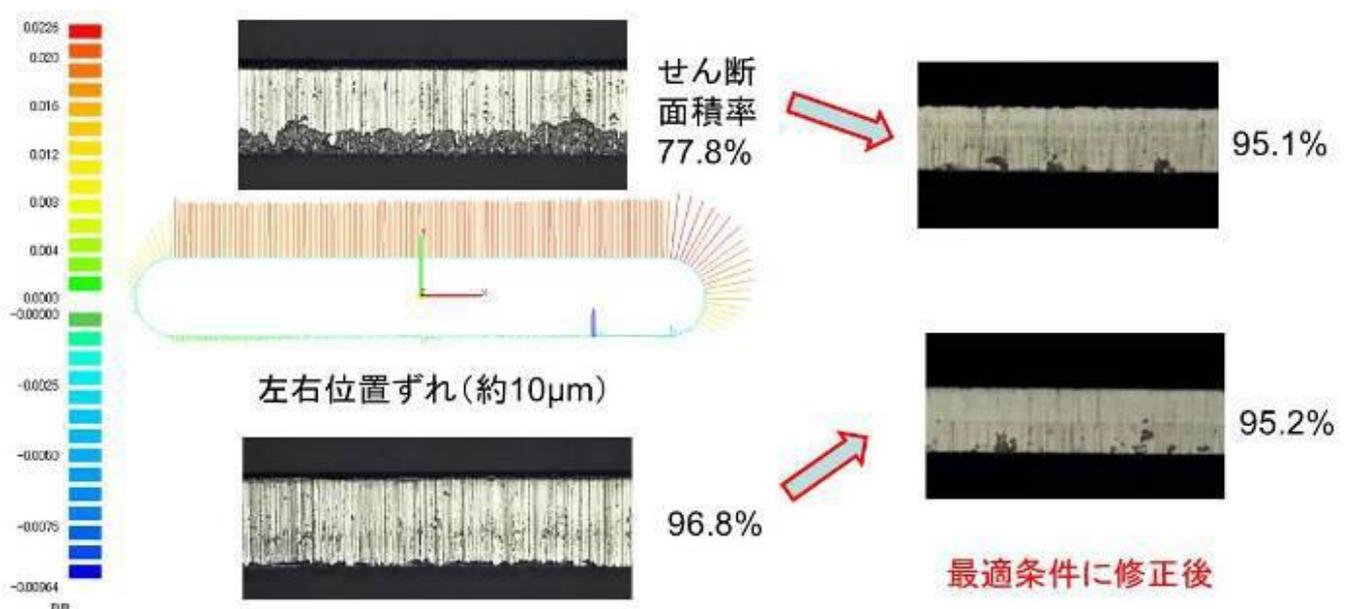


図 2-29 左右位置ずれ補正後のせん断面積の変化

微細部品観察装置を用いて、P/Pmaxおよびクリアランスを最適化した時のバリ発生状況を図2-30 図2-31に示す。写真を見てわかるように、バリの発生はほぼ無い状態(10 μ m以下)にできることが確認できた。

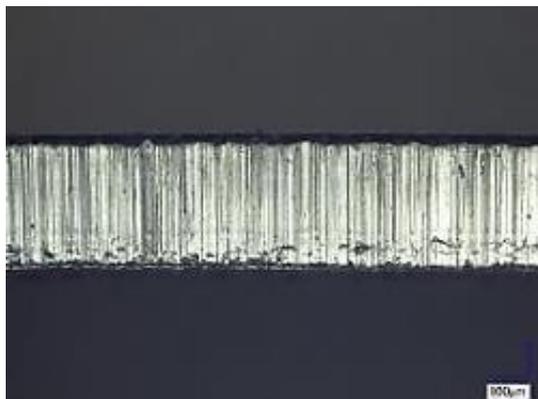


図 2-30 成形条件最適化時のバリ発生状態

	条件最適化前	条件最適化後
観察倍率 X200		
観察倍率 X1000		
観察倍率 X1000 3D画像	<p style="text-align: center;">バリ高さ 18.1μm</p>	<p style="text-align: center;">バリ高さ 4.6μm</p>

図 2-31 成形条件最適化時のバリ発生状態

2-3 加工油の選定

2-3-1 文献等による、高精度せん断加工実現のための加工油の検討

バリや破断面を抑える高精度せん断加工実現のため、どのような加工油を適用すればよいかについて文献等により調査・検討した。まず、アルミ系の精密薄板に関してバリや破断面を含む形状欠陥等を抑える加工油について記載した文献を調査した。図 2-32 は一般的なプレス加工用の潤滑剤の特徴についてまとめたものである。潤滑剤の選定にあたっては、加工の条件や成形性、材質、および表面の状態、工具の種類に応じて選定する必要がある。アルミ系の薄板のせん断加工に関しては、環境へ配慮して水溶性の潤滑剤の使用例が多いが、添加剤を加えるために固体潤滑剤を水溶性の潤滑剤に添加した報告例もあった。

表 22.12 プレス潤滑剤の種類と特徴⁽⁶⁶⁾

	潤滑剤	主成分	特徴		
油状潤滑剤	軽質鉱油	鉱油/炭化水素	潤滑性はあまりよくないが安価、洗浄性良好		
	鉱油/油脂	天然油脂、合成エステル	金属表面に吸着し、粘塑性体として働き、皮膜強度を上げる		
	鉱油/石油酸化物	パラフィン、 α -オレフィンの酸化物	いろいろな粘度のものあり、潤滑性良好、防錆性良好、アルカリ洗浄性良好		
	鉱油/極圧添加剤	塩素化パラフィン、塩素化油脂、硫化油脂、硫化鉱油、有機りん化合物	高粘度、塩素を含むポリマー形成、極圧状態で S, P, Cl と鉄の化合物を形成、絞り性良好、加工後のさびに注意		
水溶性潤滑剤	せっけん溶液	ステアリン、オレイン酸 Na 塩	濃度により付着量を変えられる。水洗可		
	ソリュブル油	鉱油、油脂、脂肪酸、活性剤	潤滑性あまりよくない。循環使用可、安価、極圧添加剤を含むものあり		
	エマルジョン	鉱油、動植物油、乳化剤	ソリュブルよりは油分付着量大、潤滑性良好も腐敗しやすい		
	ペースト	粉体なし 粉体含有	脂肪酸せっけん+油脂 同上+黒鉛、タルク、二硫化モリブデン、ZnO	かなり粘度高く、35~60%の脂肪酸含有、水で希釈、除去性悪い 10~50%の固体潤滑剤を含み、耐かじり、耐焼付き性良好。除去性悪い	
乾燥膜潤滑剤	乾燥せっけん皮膜 (水溶性乾燥皮膜)	アルカリせっけん+ほう砂など	極圧状態で鉄せっけんを形成。成形性、脱脂性良好、安価、ただし乾燥工程が必要		
	乾燥ワックス皮膜 (不水溶性乾燥膜)	天然ワックス、合成ワックス	薄膜でも高圧に耐える。潤滑性良好、溶剤脱脂が必要		
	有機ポリマー	合成樹脂皮膜	ポリエチレン、ポリプロピレン、PTFE など	離型性良好、ワークおよび工具保護性良好、除去性悪い、高価	
		溶剤型	厚膜	PVB, PVA, PVC など+溶剤	32 μ m 以上の厚膜、離型性良好
			薄膜	メタクリレート共重合体+溶剤	2.5~7.5 μ m、離型性良好
	化成処理皮膜	りん酸亜鉛+せっけん	成形性抜群、高価、環境負荷性大		

図 2-32 加工用の潤滑剤の種類と特徴

(平井亀雄：塑性と加工，20-227 (1979) 1130-1134)

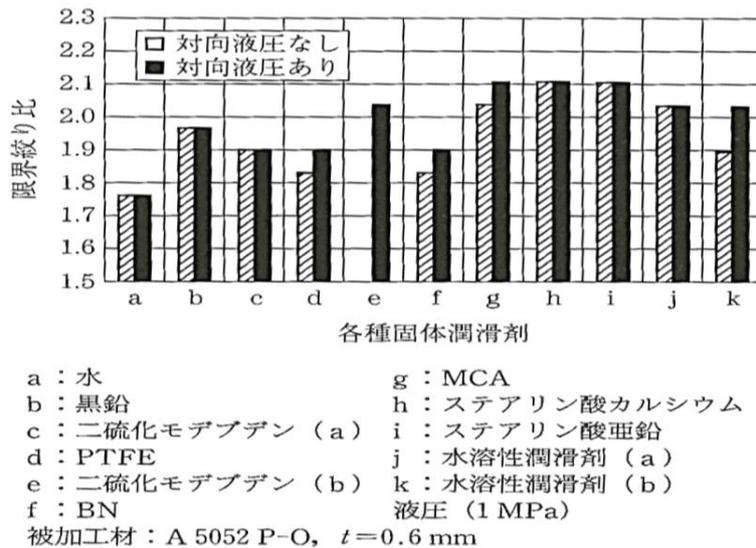


図 22.71 水に固体潤滑剤を混ぜた潤滑剤による絞り加工¹⁷³⁾

図 2-33 水に固体潤滑剤を混合した場合の加工性

(片岡征二, 中田高志, 加藤光吉: 材料試験技術, 43-4 (1998) 265-270)

図 2-33 は、各種固体潤滑剤が絞り成形の限界絞り比に及ぼす影響を調査した報告例を示している。図 2-33 より、水にメラミンシアヌレート (MCA)、金属石鹸 (ステアリン酸カルシウムおよびステアリン酸亜鉛) を添加したものは一般の水溶性のものより加工性が向上している。精密せん断においても、同じような傾向を持つことが考えられ、水溶性の潤滑剤に固体潤滑剤を添加したものは効果があるものと予測される。添加剤については、工具の焼き付きや型材の消耗の防止という観点からは金属表面に吸着して吸着膜を作り、境界摩擦を低下させる目的のためには添加すれば効果は上がると思われるが、量産におけるコストの面からは可能であれば添加しないほうがメリットがある。

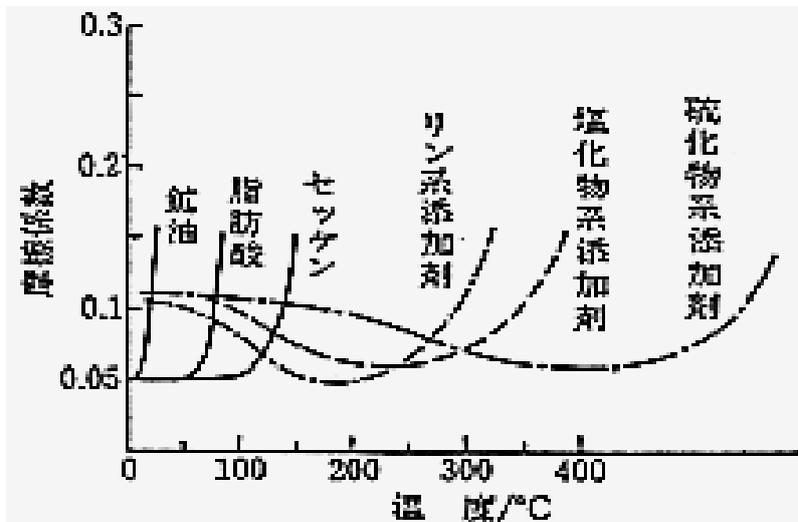


図 2-34 添加剤の温度と摩擦係数

(神居 詮, 寺門良二: 塑性と加工, 17-182 (1976), 202-207)

一方、添加剤の効果に関して塩素系や硫黄系の極圧剤の効果を示した文献の一例が図 2-34 である。特に添加剤の温度と摩擦係数の関係を示している。

本研究開発では、加工油は凝着を防ぐことが最も重要な要素であることを考慮し、凝着を最も効率良く防ぐことが可能な高粘度な塩素系もしくは硫黄系の添加剤が含まれた加工油が有効であると考えられる。但し、硫黄系の添加剤が含まれた加工油は、塩素系の添加剤が含まれた加工油に比べて環境に対する負荷が高いため、処理にコストがかかることも考慮する必要がある。

以上の文献の資料および事業化へ向けての生産性への考慮から、加工油は凝着を最も効率良く防ぐことが可能な高粘度な塩素系の添加剤が含まれた加工油を利用することにした。

第 3 章 金型およびプレス技術の構築

3-1 面打ち形状の最適化

3-1-1 面打ち加工シミュレーションによる面押しパンチ、ダイス仕様の影響調査

バリの素材の中への押し込みの最適化として、面打ち加工シミュレーションによる面押しパンチ・ダイスの形状の組み合わせ、面押し量の影響調査を行った。

① ダイスの形状の影響調査

バリが出た状態の被加工材のバリを丸みのついたダイスに押し込むシミュレーションを実行した。解析モデルを図 3-1 に示す。得られたダイス R の影響を図 3-2 に示す。

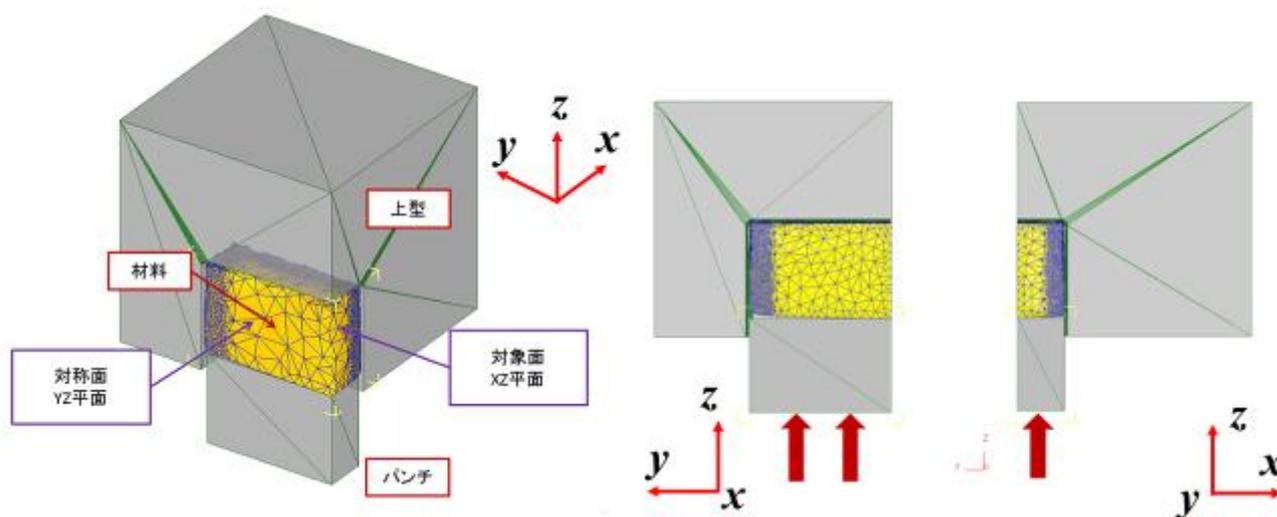


図 3-1 解析モデル

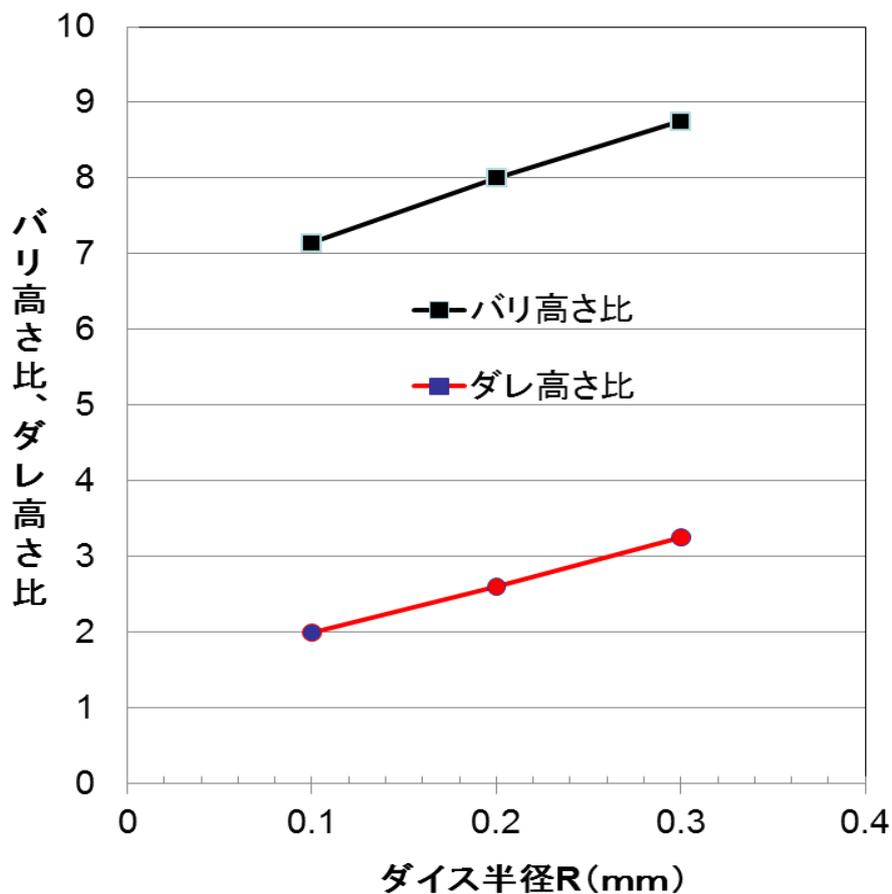


図 3-2 ダイス R の影響

ダイス R の開始位置と R の大きさを解析して、バリ高さ比を 8%以下にする適切な面押し量を決定した。

② 面押し量とダイス形状の組み合わせによる影響調査

ダイスの傾斜部のダイス半径 R を 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm と変えて、バリの部分の押し込みについての解析を実行し、バリ部分の形状を調査した。解析モデルを図 3-3 に示す。

ダイス半径 R と板厚の比 R/t を半ダイス R 半径比とし、押し込みの開始位置を $5R/6$, $4R/6$, $3R/6$ と変化させて解析を行った。

また、押し込み量を、接触開始位置より 0.10mm, 0.15mm, 0.20mm とダイスに深く押し込んだ時のバリ、だれの変化量についても調査した。

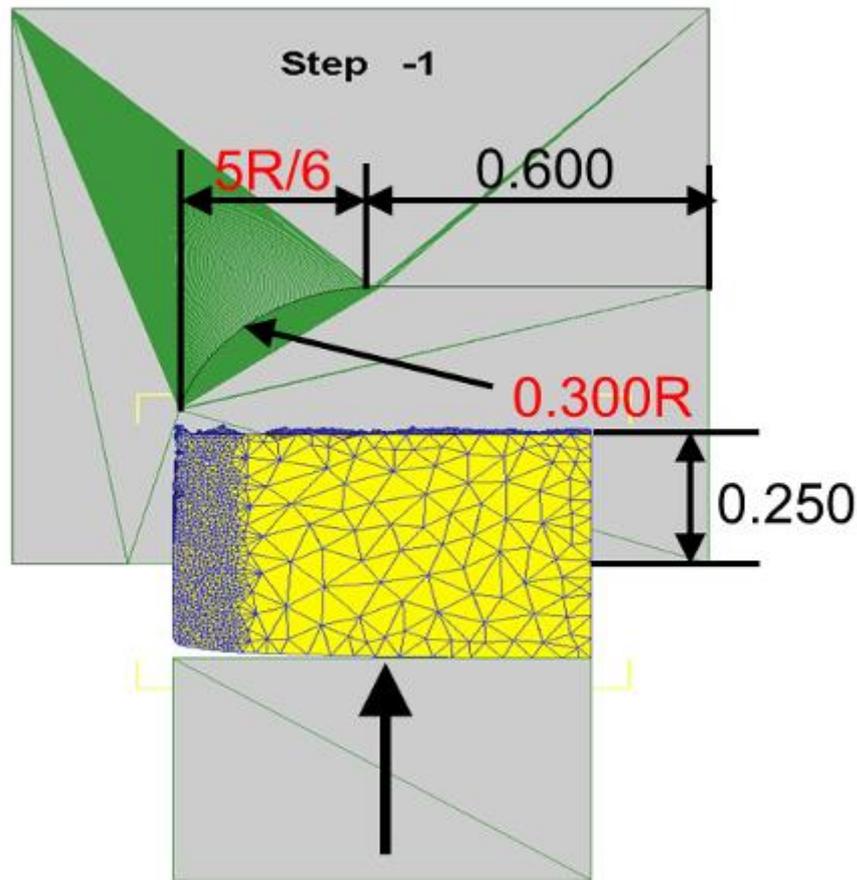


図 3-3 解析モデル

表 3 面押し量とダイス形状の組み合わせによる影響

ダイスの半径 [mm]	ダイスへの押し込み量 [mm]	バリ高さ [mm]	バリ高さ比 [%]	ダレ高さ [mm]	ダレ高さ比 [%]
0.3	0.10	0.025	6.25	0.018	4.5
0.3	0.15	0.031	7.75	0.014	3.5
0.3	0.20	0.035	8.75	0.012	3.3
0.2	0.10	0.021	5.25	0.016	4.0
0.2	0.15	0.029	7.15	0.012	3.0
0.2	0.20	0.032	8.00	0.010	2.6
0.1	0.10	0.013	5.50	0.014	3.5
0.1	0.15	0.022	6.55	0.010	2.5
0.1	0.20	0.026	7.15	0.008	2.0

面押し量(ダイスへの押し込み量)とダイス形状 R の組み合わせの影響を表 3 に示す。
 ダイス R の開始位置と R の大きさを解析した結果、バリ高さを 8%以下にするためには、ダイス半径 R は 0.175mm、ダイス R の開始位置は 0.125mm(押し込み量)とすることとした。

3-2 微小スクラップ処理の最適化

3-2-1 微小スクラップの製品影響の最小化および順送金型での成形トライ

クリアランスの最適化にて微小スクラップの軽減(せん断面積率の向上による)を図った。成形トライ用に設計・製作した金型および実験装置を用いて評価を行った。観察には、微細部品観察装置を用いた。

微細部品観察装置にて、金型に付着している微小スクラップの数とクリアランスの関係について調査した結果を図3-4に示す。

同様に、成形したワークに付着している微小スクラップについて調査した結果を図3-5に示す。

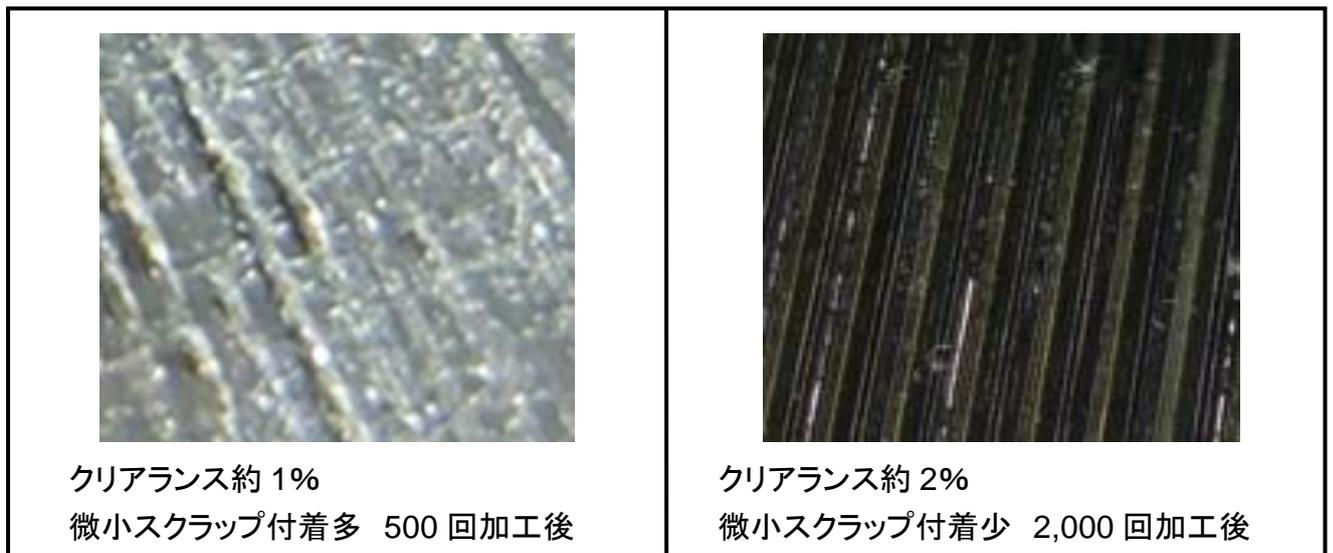


図 3-4 金型に付着している微小スクラップ観察結果

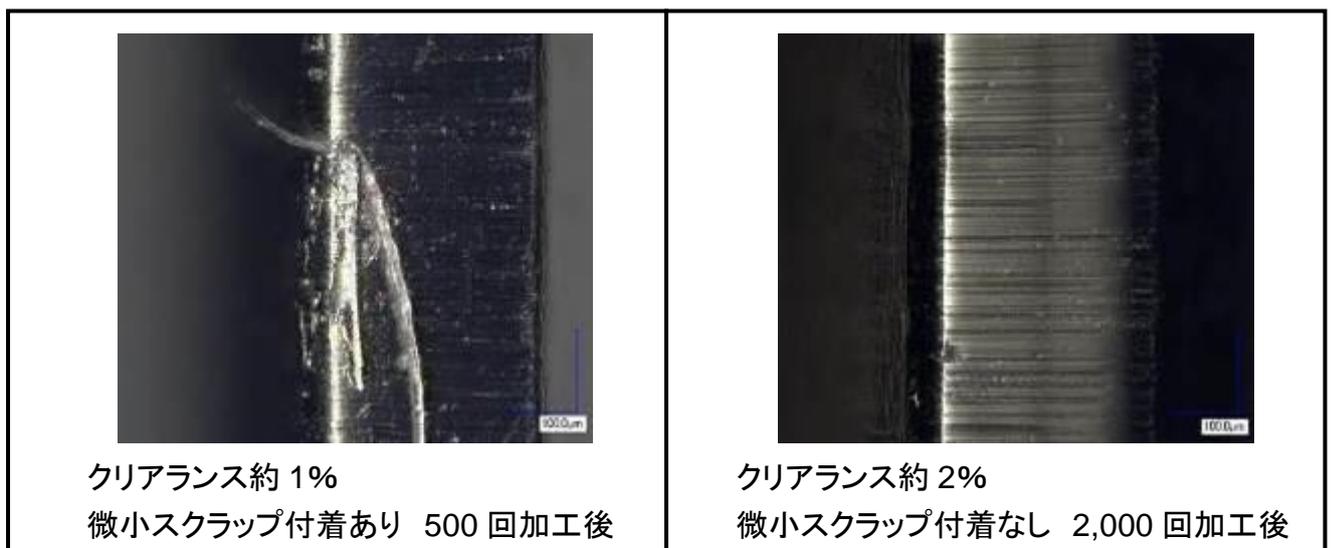


図 3-5 成形ワークに付着している微小スクラップ観察結果

クリアランスを約 1%から約 2%にすることにより微小スクラップの金型内への付着と成形したワークへの付着が低減できることを確認した。

図3-5に面打ち処理後のワークの形状を示す。面打ち処理により下部約30%が処理されるため、その部分の破断面の影響は極小となる。

それにより、微小スクラップ生成を抑えるためのクリアランスの増加による破断面増加の影響をなくすことが可能になることがわかった。



図 3-5 面打ち処理後のワーク断面

第4章 全体総括

以上の研究成果より、薄板難加工材の微細・高精度プレス加工技術の確立の可能性を見い出せた。SOFC 燃料電池業界は、現状の家庭用だけではなく産業用(プレスリリースより)にも需要の拡大が見込まれる。本研究の結論から得た部材加工技術を最大限有効活用し、量産性も考慮しながら、SOFC 燃料電池のみならず、他の用途への技術展開を図りながら早期の事業化を目指していく。

研究開発の下記の目標については、全て 100%達成することが出来た。

- ① 現状 12~15 μm のバリを 10 μm 以下に減少
- ② 現状 40~50%のせん断面を 80%以上に向上
- ③ 現状 500 回で行っている微細スクラップのバキューム処理を 2000 回まで延長