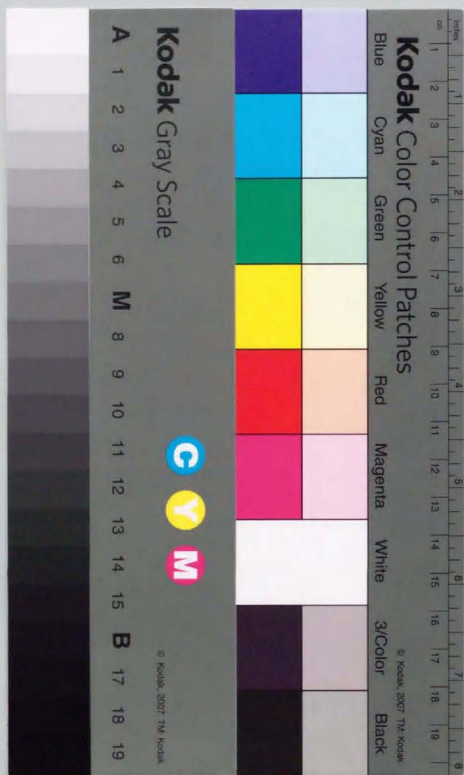


塑性加工を応用した複雑形状
マイクロ部品成形に関する研究

高橋 俊典



塑性加工を応用した
複雑形状マイクロ部品成形に関する研究

高橋 俊典

目次

1 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 セン断加工による三次元成形法	4
1.2.1 セン断加工により微細三次元成形を行うための課題	5
1.3 本論文での取り組み	8
1.3.1 パンチの曲がり	8
1.3.2 加工力とパンチ移動	9
1.3.3 材料の流動	10
1.3.4 丸線材のせん断特性	10
1.3.5 単型成形	10
1.3.6 成形プレスの提案と試作	10
1.3.7 磁気研磨法によるバリ取り	11
1.3.8 ピーニング処理による工具摩耗対策	11
2 加工中のパンチ変形	12
2.1 はじめに	12
2.2 パンチの変形とその計測	13
2.2.1 従来の方法	13
2.2.2 パンチ変形の新たな算出法の提案	14
2.3 実験装置及び実験条件	18
2.3.1 実験装置	18
2.3.2 実験条件及び方法	19
2.3.3 パンチにはったひずみゲージの出力特性	21
2.4 パンチの表面ひずみからパンチ先端の変位を算出することの妥当性の確認	23
2.4.1 実験結果	23
2.4.2 考察	25
2.5 加工条件の影響	26
2.6 本章のまとめ	29

3	加工力とパンチの移動	30
3.1	はじめに	30
3.2	加工力の計測	31
3.3	実験装置	33
3.4	実験方法	37
3.5	実験結果	39
3.5.1	均等クリアランスにおける加工力の計測	39
3.5.2	不均等クリアランスにおける加工力の計測	43
3.5.3	パンチ移動の測定	45
3.6	縦弾性係数の小さい材料による工具の支持	49
3.6.1	型構造	49
3.6.2	実験結果	50
3.7	本章のまとめ	51
4	材料流動とひずみ分布 (大変形に適用可能な Visioplasticity 法)	53
4.1	はじめに	53
4.2	変位分布の計測方法	54
4.2.1	材料に描いた標点を用いる方法	54
4.2.2	フーリエ変換を応用した方法	55
4.3	実験装置及び実験方法	56
4.3.1	実験装置	56
4.3.2	実験条件	58
4.3.3	実験方法	60
4.4	変位計測法の検定	64
4.5	実験結果	67
4.5.1	せん断中の材料の変位計測	67
4.5.2	加工条件の影響	68
4.6	本章のまとめ	89
5	塑性加工による三次元微細素子成形のための基礎実験 (丸線材のせん断特性)	90
5.1	はじめに	90
5.2	実験方法	91
5.2.1	加工形態	91
5.2.2	実験条件	95
5.3	実験結果	97
5.3.1	半割せん断	97
5.3.2	片面せん断	97
5.3.3	両面同時せん断	99

5.4	本章のまとめ	105
6	塑性加工による三次元微細素子の成形	106
6.1	はじめに	106
6.2	医用鉗子の構成と型成形による部品の製作	107
6.3	成形金型と成形の手順	109
6.3.1	わに口部品の成形	109
6.3.2	操作ワイヤの成形	114
6.4	成形結果	117
6.5	本章のまとめ	120
7	デスクトップサイズの三次元微細素子プレス装置	121
7.1	はじめに	121
7.2	成形装置の概念設計	122
7.3	試作した成形装置	123
7.3.1	成形装置の概要	123
7.3.2	工具回転機能の試験装置	126
7.3.3	加工工具の種類と構造	127
7.3.4	材料の加工位置	135
7.4	成形実験の結果	140
7.4.1	わに口部品の成形実験	140
7.4.2	製品精度	141
7.4.3	回転工具を使った成形実験	141
7.5	本章のまとめ	146
8	磁気研磨法による微細部品のバリ取り	147
8.1	はじめに	147
8.2	磁気研磨法	148
8.3	実験装置	149
8.3.1	実験装置	149
8.3.2	研磨材	149
8.4	実験方法	150
8.4.1	基礎実験	150
8.4.2	バリ取り実験	150
8.5	実験結果と考察	151
8.5.1	基礎実験	151
8.5.2	バリ取り実験	153
8.6	本章のまとめ	158

9 工具の耐久性向上	159
9.1 はじめに	159
9.2 評価方法	160
9.3 実験装置及び方法	161
9.3.1 加工力の計測実験装置及び方法	161
9.3.2 連続打抜き実験装置及び方法	163
9.4 実験結果及び検討	164
9.4.1 工具仕上げ面の表面性状	164
9.4.2 せん断線図	164
9.4.3 加工力に及ぼす工具表面性状の影響	165
9.4.4 製品性状	169
9.4.5 工具寿命	170
9.4.6 検討	171
9.5 本章のまとめ	175
10 塑性加工による微細成形技術の開発に関する総合的検討	176
10.1 基礎研究の意義	176
10.1.1 研究の内容	176
10.1.2 基礎研究の意義のまとめ	182
10.2 技術開発の位置付け	183
10.2.1 研究の内容	183
10.2.2 複雑微細成形技術としての位置付けと評価	186

目次

1.1 せん断加工では創成しにくい形状	3
1.2 せん断加工用の工具の構成例	4
1.3 せん断製品の切り口面	5
1.4 せん断加工による三次元的な形状の成形	6
1.5 パンチ片面によるせん断と両面によるせん断	8
1.6 せん断加工中に材料からパンチに作用する力	9
1.7 医療用微細鉗子	11
2.1 パンチとダイの心のずれとパンチ変形	12
2.2 パンチの曲げ変形と表面ひずみの計測	13
2.3 左右のパンチ刃角に作用する力	15
2.4 細長いパンチに作用する力	15
2.5 せん断加工装置の詳細	17
2.6 実験装置	18
2.7 材料の支持方法	21
2.8 パンチの曲げ試験に用いた検定装置	22
2.9 パンチの曲げ検定	22
2.10 パンチの食い込み量に対するパンチ表面のひずみ	23
2.11 パンチ食い込み量に対するパンチ先端の横変位	24
2.12 パンチの変形形状の履歴	24
2.13 パンチ食い込み量に対する加工力の変化	25
2.14 パンチ変形による偏心の是正	26
2.15 パンチ変形が偏心を是正する場合	26
2.16 パンチ変形による心ずれの増加	27
2.17 パンチ変形が心ずれを増加させる場合	27
3.1 材料と工具の間に働く力	31
3.2 加工力の測定装置	34
3.3 加工力の測定装置の検定	35
3.4 パンチ移動量測定装置	36

3.5	材料の支持条件	37
3.6	均等クリアランスのはさみ形における加工力	39
3.7	はさみ形における側方力に及ぼすクリアランスの影響	40
3.8	両端固定におけるダイ側の加工力	40
3.9	両端固定におけるパンチ側加工力	41
3.10	両端固定におけるダイ側側方力に及ぼすクリアランスの影響	41
3.11	両端固定におけるパンチ側側方力に及ぼすクリアランスの影響	42
3.12	両端固定で工具に作用する力	42
3.13	はさみ形で不均等クリアランスの場合の加工力の測定結果	43
3.14	はさみ形での側方力の差	44
3.15	両端固定で不均等クリアランスの場合の加工力の測定結果	45
3.16	両端固定での左右の側方力の差	46
3.17	パンチの移動量の計測結果	47
3.18	パンチが移動する場合の加工力	48
3.19	アクリル樹脂により支持された平行複刃形の金型	49
3.20	ウレタン樹脂により支持された丸形の金型	50
3.21	平行複刃形のパンチ移動量の計測結果	51
3.22	丸形のパンチ移動量の計測結果	52
4.1	金型	57
4.2	実験装置	58
4.3	圧縮試験用金型	59
4.4	板押さえの形状	60
4.5	切り口面の模式図	61
4.6	変形領域の分割画像	62
4.7	変位計測法の検定装置	64
4.8	検定に使用した材料表面の撮影画像	65
4.9	変位計測方法の検定	66
4.10	材料表面の撮影画像	67
4.11	2つの画像の相関をとった結果	69
4.12	慣用せん断での材料流動 (r が大きい場合 1)	70
4.13	慣用せん断での材料流動 (r が大きい場合 2)	71
4.14	慣用せん断でのひずみ分布 (r が大きい場合 1)	72
4.15	慣用せん断でのひずみ分布 (r が大きい場合 2)	73
4.16	慣用せん断での材料流動 (r が小さい場合 1)	75
4.17	慣用せん断での材料流動 (r が小さい場合 2)	76
4.18	慣用せん断での材料流動 (r が小さい場合 3)	77
4.19	慣用せん断でのひずみ分布 (r が小さい場合 1)	78

4.20	慣用せん断でのひずみ分布 (r が小さい場合 2)	79
4.21	慣用せん断でのひずみ分布 (r が小さい場合 3)	80
4.22	ファインブランキング法に関する検討 (材料流動 1)	81
4.23	ファインブランキング法に関する検討 (材料流動 2)	82
4.24	ファインブランキング法に関する検討 (材料流動 3)	83
4.25	ファインブランキング法に関する検討 (材料流動 4)	84
4.26	ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 1)	85
4.27	ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 2)	86
4.28	ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 3)	87
4.29	ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 4)	88
5.1	半割せん断加工の模式図	91
5.2	クリアランスの設定方法	92
5.3	半割せん断実験装置	93
5.4	片面せん断加工	93
5.5	片面せん断加工用のダイの形状	93
5.6	片面せん断加工の模式図	94
5.7	片面せん断加工用のパンチ形状	94
5.8	片面せん断の複数回加工	94
5.9	両面同時せん断加工の模式図	95
5.10	両面同時せん断加工の製品	95
5.11	両面同時せん断実験装置	96
5.12	半割せん断された製品	98
5.13	せん断途中の材料	99
5.14	半割せん断中の加工力	100
5.15	過大クリアランスの半割せん断で得られた特異形状製品例	100
5.16	クリアランスと加工力の最大値との関係	101
5.17	片面せん断された製品	102
5.18	多面せん断	103
5.19	両面同時せん断された製品	104
6.1	医療用微細鉗子 [三菱電線工業(株)資料]	106
6.2	鉗子の製作図面	108
6.3	第一工程模式図	109
6.4	第二工程模式図	110
6.5	第三工程模式図	111
6.6	第一工程金型概略図	112
6.7	第二工程金型概略図	113

6.8	第三工程金型概略図	114
6.9	歯付け工具	115
6.10	歯付け工具写真	115
6.11	操作ワイヤの成形工程	116
6.12	わに口部品の成形結果	117
6.13	わに口部品の歯	118
6.14	操作ワイヤの成形結果	118
6.15	連結板の成形結果	118
6.16	組み付けられた二つのわに口部品	119
6.17	組み立てられた製品	119
7.1	基本的な加工手法例	122
7.2	成形装置	124
7.3	システムの詳細	125
7.4	加工位置、角度指定状況	125
7.5	変位計の取り付けられたパンチ	126
7.6	回転工具による加工	126
7.7	工具回転機能の試験装置	128
7.8	工具回転機能試験装置の構成	130
7.9	回転可能な工具軸を備えた成形装置	131
7.10	直径 0.35mm 丸線丸穴打抜き工具による加工の模式図	131
7.11	丸線半割工具による加工の模式図	132
7.12	丸線歯付け工具による加工の模式図	132
7.13	丸線鍛造工具による加工の模式図	132
7.14	直径 0.3mm 丸穴打抜き工具による加工の模式図	133
7.15	直径 0.5mm 丸穴打抜き工具による加工の模式図	133
7.16	0.5mm 角の穴打抜き工具による加工の模式図	133
7.17	0.5mm × 1mm の角穴打抜き工具による加工の模式図	134
7.18	輪郭成形用工具による加工の模式図	134
7.19	パンチに作用する側方力に対する対策	135
7.20	板押さえを組み込んだパンチ	136
7.21	駆動座標系	137
7.22	加工位置の座標	137
7.23	わに口部品の成形手順	140
7.24	成形製品例	142
7.25	フィードバック制御の効果	143
7.26	板押さえの効果	143
7.27	回転可能な工具による成形手法と製品例 (1)	144

7.28	回転可能な工具による成形手法と製品例 (2)	145
8.1	対向磁極形磁気研磨法の原理	148
8.2	実験装置	149
8.3	磁気回路	150
8.4	研磨時間と研磨量との関係	151
8.5	研磨能力に及ぼすダイヤモンド粒径の影響	152
8.6	研磨能力に及ぼす加圧力の影響	152
8.7	研磨能力に及ぼす磁束密度の影響	153
8.8	スチールファイバー混入の効果	153
8.9	角材の研磨実験	154
8.10	研磨された角材の輪郭	155
8.11	切削加工されたステンレス製品のバリ取り実験結果	156
8.12	切削加工されたアルミニウム製品のバリ取り実験結果	157
8.13	プレス加工製品のバリ取り実験結果	157
9.1	実験装置	162
9.2	パンチ側面の粗さ曲線	164
9.3	パンチ側面の顕微鏡写真	165
9.4	せん断線図の例	165
9.5	せん断抵抗に及ぼす表面処理の影響	166
9.6	押込み抵抗に及ぼす研削仕上げの影響	167
9.7	引抜き抵抗に及ぼす研削仕上げの影響	168
9.8	引抜き抵抗に及ぼすピーニング仕上げの影響	169
9.9	押込み抵抗に及ぼすピーニング仕上げの影響	170
9.10	加工の安定性に及ぼす表面処理の影響	171
9.11	引抜き抵抗に及ぼす動粘度の影響	172
9.12	せん断製品の平滑面の表面粗さ	173
9.13	連続打抜き後の切れ刃の比較	173
9.14	押込み工程、引抜き工程において工具に作用する力	174
9.15	マイクロボールの概念図	174
10.1	パンチに作用する側方力の大きさ	178
10.2	パンチ先端の曲がり量	179
10.3	押し込み力とかす取り力に及ぼす相対パンチ直径の影響 [95]	182
10.4	穴の切り口面形状に及ぼす相対パンチ直径の影響 [52]	183
10.5	工具摩耗に及ぼすせん断輪郭の影響 [20]	184
10.6	基礎研究の意義	184
10.7	小穴抜きにおける問題点と対策	185

10.8 開曲線輪郭の切り欠きにおける問題点と対策	186
10.9 せん断切り口面の形状と各部の名称	187
10.10 良好な切り口面を得るための加工条件	188
10.11 わに口鉗子の様々な形状 [96]	189
10.12 圧縮によるパンチ直径の限界	191
10.13 座屈によるパンチ直径の限界	192
10.14 成形寸法の限界及び形状の多様性を示す概略数値	193

表 目 次

2.1 使用したパンチの諸元	20
2.2 使用した材料の機械的特性	20
2.3 パンチとダイのクリアランス	20
2.4 パンチ変形量に及ぼす加工条件の影響	28
3.1 使用した材料の機械的特性	38
4.1 慣用せん断を検討するために設定した実験条件	59
4.2 ファインブランキング法を検討するために設定した実験条件	60
5.1 材料特性	96
6.1 材料特性	112
7.1 用意した工具の一覧 (ダイの形状で代表)	129
7.2 各駆動系の公称精度	138
7.3 位置決め精度	138
7.4 工具回転機能試験装置の各駆動系の公称精度	139
7.5 工具回転機能試験装置の繰り返し位置決め精度	139
9.1 パンチ側面の表面仕上げ	161
9.2 使用した潤滑油の特性	161
9.3 使用した材料の機械的特性	163

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

本研究は、塑性加工による微細成形に取り組んだものである。現在、微細成形を目的とした研究は盛んに行われており、様々な加工法が検討されている。エッチング・リソグラフィによる加工はマスクパターンの転写による技術である。これは、半導体製造技術を転用して開発された、機械部品と同時に電子回路を組み込むことが可能であり、マイクロセンサの製作などに用いられている。この加工法では加工と同時に組立を行うことができる。ただし、得られる製品は薄い形状のものに限られる。LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) 技術は、X 線を用いた厚いレジストの露光とメッキプロセスを組み合わせたものである [1]。レジスト除去後の金属メッキ構造体を型として使用し、樹脂などの構造体を大量に生産することが可能である。LIGA 技術によれば厚みのある製品を成形することができる。ただし、シンクロトロン放射光を光源として使用するために、設備費は高額になる。これらリソグラフィに基づいた方法は非常に微細なものを成形することができるが、三次元的な形状の製品を成形するのは難しい。一方、切削加工などの従来技術を用いた微細加工も試みられている。従来技術であれば、三次元形状を成形することが可能である。切削加工は一般に加工力が大きく微細加工が難しいと考えられていたが、精密運動制御、計測、精密加工ツールの進歩により $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の精度での加工が可能となっている [2]。研削加工は、切削加工よりも広範な材料を加工でき、また、切削加工に比較して加工力は小さく抑えられる [3]。放電加工は、非接触加工であるため加工力はさらに小さいが、被加工材は導電性材料に限られる [4]。これら従来技術では工具経路を制御することにより製品形状を容易に変更できる。光造形法による加工法には二つの方法がある [5]。一つはマスクパターンを転写する方法であり、もう一つは細いビームを材料上で一筆書きのように描画するか、テレビ画面のように操作させながらビームをオン・オフさせて形状を描く方法である。ビームを用いた方法ならば製品形状は容易に変更できる。ただし、光造形法では材料は感光性樹脂に限られる。

各加工法は次のような観点から評価することが可能であり、上記の加工法はそれぞれ優

れた特徴を持っている。

1. 微細なものを成形できるか。
2. 三次元的な形状を成形できるか。
3. 加工できる材料は何か。
4. 製品形状を容易に変更できるか。
5. 加工速度は速いか。
6. 成形を安価に行うことができるか。

さて、本論文で検討する加工法は、従来技術の一つである塑性加工である。通常の大きさの加工では塑性加工、中でもプレス加工は多用されている。これは、製品を大量につくる場合、安価に速く生産することができるという長所をもつためである。この点に注目し、本研究ではプレス加工による微細成形に取り組むこととした。微細加工の分野ではリードフレームや時計部品などの微細部品の成形がせん断加工により行われ、この長所が生かされている。ただし、成形される製品形状は限定され、現状の製品としては上記部品のようない二次元成形が大部分を占める。固有技術的に見れば、微細絞り[6]、微細曲げ加工[7]などはあるが、いずれも特定形状部品の成形が多い。せん断加工、曲げ加工などを複合させた三次元成形も行われているが、板材を用いるため製品形状は厚さ方向に変化の少ない二次元的なものに限られる。また、型を用いた加工には製品形状を容易に変更できないという欠点がある。この欠点が克服できれば、活用分野が拡大する。

これらの点を考慮して、次のような条件で新たな微細加工法を検討した。

1. プレス加工を利用することによりその利点をいかす。
2. 三次元形状を成形できるものとする。
3. 製品形状を容易に変更できるものとする。

上記の条件を満たす加工法として、本論文で提案する加工法は鍛造加工とせん断加工を併用した微細三次元成形法である。

まずは塑性加工による三次元形状創成法について考えてみる。まず、鍛造加工であれば製品形状に合わせた型さえ製作すれば任意の形状を創成することが可能であり、もちろん三次元形状を創成することも可能である。ただし、既に指摘したように製品形状の変更が容易でなくこれだけでは本研究の目的を果たすことはできない。また、鍛造加工による成形では型の間にはみ出た余肉を切り落とすためにせん断加工を併用する必要がある。また、せん断加工を併用すれば、穴あけなどをこれにより行うことが可能である。鍛造加工、せん断加工はともに一对の工具をプレスによって加圧することにより加工を行う。加工形態

が同じであり、工具交換のみによって両者を切り替えることが可能であり、併用は容易である。

またせん断加工によっても三次元形状を創成することは可能である。製品形状が二次元的なものに限定されてしまうのは板材を素材として用い工具を板材の表面に対して垂直方向にだけ動かして加工を行うためである。素材として幅と同程度の厚さをもつものを採用し、工具を動かす向きを変えて加工を行えば、製品形状は三次元的なものになる。ただし、せん断加工では図 1.1 のような凹部や凸部の成形は容易でない。こういった形状の成形は鍛造加工であれば容易に行うことが可能であり、この場合も加工はせん断加工だけに限定するのではなく鍛造加工との併用が有効である。

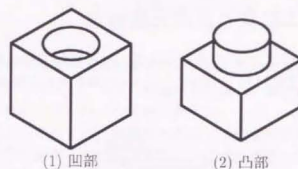


図 1.1 せん断加工では創成しにくい形状

すなわちプレス加工により三次元形状を創成するためには鍛造加工とせん断加工を併用すればよい。

次に製品形状の変更を容易にするための手法である。これに対してはせん断加工の分野において活用されているタレットパンチプレスがある。この加工装置は次の機能を持っている。

1. タレット上に配置された複数の工具から使用工具を選択できる。
2. 材料を支持する部分が材料を移動させ、材料の任意の位置を加工できる。

このような機能を備えた加工装置により、材料の様々な位置を様々な工具で逐次加工していくことにより複雑な形状を創成していく。選択する工具や加工位置を変えることにより製品形状を変更することが可能である。ただし、現在あるタレットパンチプレスは板材を加工素材として用いるもので成形可能な形状は平面的なものに限定されてしまう。三次元形状を創成するためには加工装置は次の要件を満たしていなくてはならない。

1. 幅と同程度の厚さを持った三次元形状創成に適した形状の素材を加工できること。
2. 素材を支持し加工位置に送り込む部分は素材の位置を変えられるだけでなく向きも変えられること。

3. 加工用の工具としては複数の鍛造工具とせん断工具を備えていること。

したがって製品形状変更の容易な加工装置としては上記の要件を満たすタレットパンチプレス形加工装置を設計製作すればよい、これにより本研究の目的も達成される。ただし加工装置をつくるためには予め行うべき事柄がある。まず、せん断加工により三次元形状を創成するための基礎工法を開発しなければならない。したがって形状創成に有効な加工形態、適切な加工条件、工具形状などを新たに明らかにする必要がある。厚物のせん断加工は通常とは異なった条件でのせん断加工であるから、この場合の問題点について予め検討しておかなければならない。すなわち板厚よりも微細な工具でせん断加工を行う場合の問題点についてである。具体的には微細になった工具の変形などがあげられる。

1.2 せん断加工による三次元成形法

まず、通常のせん断加工について説明する[8]。せん断加工用の工具の構成例を図1.2に示す。打抜き工具は基本的には、パンチ、ダイ、板押さえから構成される。パンチとダイ

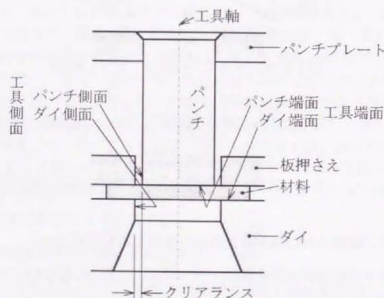


図 1.2 せん断加工用の工具の構成例

は輪郭の全周ほぼ同一の形状であるが、かみ合わせるとわずかに隙間があるように構成する。この隙間をクリアランスという。通常はダイ端面に材料をおき、板押さえによってはきみながら押さえつけ、パンチを降下させて加工する。せん断加工では素材から不要部分が一気に除去される。このため加工力は大きくなる。加工を良好に行うためには材料を強く拘束し、材料の変形を抑えなければならない。

図 1.3 に示すようにせん断切り口面は通常はだれ、平滑面、破断面、バリの四つの部分から構成される。だれ部は工具が食い込む際、圧下された自由表面の部分で、平滑面は大

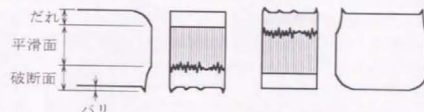


図 1.3 せん断製品の切り口面

きなせん断ひずみを受けた面で、工具側面でパニシ加工されて光沢のあるきれいな部分である。破断面は亀裂を生じ破断した部分で結晶粒面が現れ、微小凸凹がはなはだしく、傾いた面である。バリは破断の端が残った突起である。

せん断加工も切削加工も素材から不要部分を除去して製品形状を創成する。切削加工による三次元成形は不要部分を少しずつ除去することにより可能となる。せん断加工でも逐次加工を行えば三次元形状を成形できる。せん断加工により成形される微細部品の形状が二次元的なものに限られるのは素材として薄い板を用い、工具を板面に対して垂直方向にだけ動かして加工を行うためである。厚みのある素材を用い、様々な角度から工具を動かすことができれば、三次元成形は可能である。二回のせん断によって角柱を部分的に縦横に削り取る例を図 1.4 に示す。

1.2.1 せん断加工により微細三次元成形を行うための課題

上に提案した加工法を実現するために取り組むべき課題としては次のようなものと考えられる。

1. 個々のせん断加工に関する事項。

- (a) 微細なせん断加工を精密に行うための加工方法、加工条件を明らかにする。このとき次のような条件があることを考慮しなければならない。
 - i. 加工が微細である。
 - ii. パンチの厚さよりも厚い材料を加工する。
 - iii. 素材形状が板状とは限らない。

2. 逐次加工による三次元成形に関する事項。

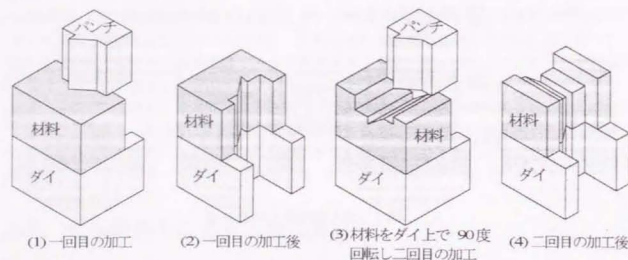


図 1.4 セン断加工による三次元的な形状の成形

(a) 逐次加工可能な加工装置を製作する。厚みのある素材の様々な位置を様々な角度から加工できなければならない。

(b) 製作した加工装置により実際に三次元成形を試みる。

3. 加工後の切り口面の処理に関する事項。

(a) 破断面の凸凹を処理し、バリを除去する。微細で複雑な形状をもった製品に適用できる方法が必要である。

4. 工具摩耗対策に関する事項。

(a) 工具寿命を維持する。微細な工具にも容易に適用できる方法が必要である。

逐次加工による三次元成形を行う前に、一回一回の加工を精密に行うために必要な条件を明らかにする必要がある。この際、微細三次元成形を行うために通常の加工とは異なる条件下で加工を行わなければならないことを考慮しなければならない。

微細加工であるため、工具や素材の寸法が小さくなる。工具寸法が小さくなると、十分な剛性を得ることができず、加工力による変形が問題となる。せん断加工では加工中の素材変形は工具により抑制されるが、材料が微細になると、変形を十分に抑えるのは難しい。

通常のせん断加工では打ち抜かれる形状は板厚に対して大きい。例えば丸穴の打抜きであれば、穴の直径は板の厚さよりも大きい。これに比較し、三次元形状を成形するためには板厚よりも小さな形状の打ち抜きが必要である。

通常のせん断加工では打ち抜かれる素材は板材である。三次元形状成形を行うためには、これに適した形状の素材を選定する必要がある。これは板状とは限らない。

次に、逐次加工により三次元成形が行えることを実際に加工を行い確認する必要がある。このためには加工装置を製作しなければならない。逐次加工を行う加工装置の形態としては二つ考えられる。一つは各加工工程用の金型を順番に並べる順送型である。微細加工であるので加工力は小さくて済み、成形装置の大きさは小さくすることができる。この点をいかして、小さなプレスをつなげたフレキシブル加工システムの提案と、検証のための基礎実験が行われ実用性が示されている[9]。この方法であれば、個々のプレスを入れ替えることにより、製品形状は比較的容易に変更することができる。もう一つはタレットパンチプレス形の成形装置である。タレットパンチプレスは多数の金型を納めたタレットと、板材の位置決め機構をもつパンチングプレスである。タレットを回転することにより金型を選択し、板材を移動させ、所定の位置に加工を行う。加工工程の変更をソフト上で行うことが可能であり、順送型よりも容易に製品形状を変更できる。ただし、どちらの方法をとるにしても、現状の加工装置は二次元成形を意図したものである。三次元成形に必要な機能を明らかにし、それを実現する必要がある。

せん断加工により生成される切り口面は滑らかな平滑面ばかりで構成されるわけではなく、本研究の目的からすれば、切断面を機能面として利用することも考えられ、平滑面が長いことが望ましい。このためには、シェービング[10]、仕上げ抜き[11]、ファインブラッキング法[12]、対向ダイスせん断法[13]などの切り口面をすべて平滑面としようとする加工法があり、歯車やカムなどの製作に用いられている。また、実際には必ずしも切断面全体を機能面として利用しなければならないわけではなく、十分長い平滑面が得られれば目的が達成される場合が多い。ただしこの場合も破断面の凸凹の処理やバリの除去は必要である。バリについては各種バリなしせん断法[14]～[17]が開発されているが、板材以外には適用が難しい。やはりバリ除去により対応することが適切と考えられるが、対象は微細で三次元形状をもつため通常の方法によるバリ取りは難しい。有効な方法を見いだす必要がある。

パンチ厚さよりも厚い材料を加工する。この場合加工力は大きくなり、工具摩耗にとっては厳しい条件である[18]～[23]。基本的な加工方法としてせん断加工を選択したのはプレス加工の持つ長所をいかしたいと考えたからである。プレス加工の利点である加工速度の速さや成形の安定性は工具寿命が補償されてはじめて成立する。特に本研究が対象としているような微細な製品を精度良く加工し続けるためには工具の摩耗は防がなければならない。何らかの工具摩耗対策が必要である。ただし、微細工具に対しても容易に適用できる方法でなければならない。

1.3 本論文での取り組み

本論文の中で取り組んでいる課題は以下のようなものである。

1.3.1 パンチの曲がり

個々のせん断加工に関する事項として、まず加工中のパンチの曲がりについて調べる。微細加工を行う場合、パンチの曲がりの影響が大きくなる理由を以下に説明する。

図 1.5 (1) のようにパンチ片面の刃によりせん断を行う場合は、パンチの厚さを十分厚くすることによりパンチの曲がりを小さくすることができる。しかし、同図 (2) のように両面の刃によりせん断を行う場合、パンチは細長くなり、曲がりやすくなる。加工形状が軸

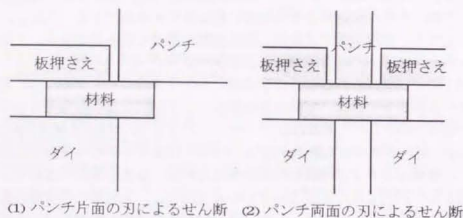


図 1.5 パンチ片面によるせん断と両面によるせん断

対称でありパンチとダイの心が完全にあっていれば力は対称に作用し問題は生じない。パンチとダイの心を合わせることでできる工法としてワイヤ放電研削 (WEDG) を打ち抜き加工に適用した方法が提案されている [24]。この方法であれば、パンチ成形時、ダイ成形時、打ち抜き加工時の主軸がすべて共通であるためパンチとダイの軸を合わせる必要がない。ただし、一般にはパンチとダイの心のわずかなズレは避けられない。このためには完全には対称とならないパンチとダイの心のわずかなズレは避けられないからである。これによりパンチには横方向に曲げようとする力が働いてしまう。この力によるパンチ変形の影響が、微細加工では無視できなくなる。例えば、せん断工具、材料が相似形で微細化した場合を考えてみる。せん断加工中にパンチに働く軸方向の力の最大値は材料の板厚にほぼ比例する。パンチを曲げようとする力は軸方向に作用する力よりも横方向に働く力である。ここでは横方向に働く力の大きさが軸方向に作用する力の大きさに比例すると考える。するとパンチを曲げようとする力は材料の板厚に比例することとなる。パンチの曲がり易さは断面二次モーメントにより決まる。パンチの形状が直方体であるとして断面二次モー

メントはパンチの厚さの三乗に比例する。したがって、工具や材料の大きさを相似形に $1/n$ に微細化した場合、パンチの曲がり量は n^2 倍になる。曲がりが大き過ぎればパンチは折れてしまう。

また三次元形状を成形するためには厚い材料を加工しなければならない。このことも考慮に入れる必要がある。この場合、パンチ厚さに対する材料の厚さの比が大きくなる。上に示した考察をそのまま延長すれば、パンチの曲がりはさらに大きくなるはずである。ただし、これまでの研究では材料の厚さがパンチの厚さよりも厚くなる条件では加工現象が変わっていくことが指摘されている。材料の厚さが薄い場合と厚い場合のパンチの曲がりを同様に扱うことができるかどうかについては慎重に検討する必要がある。このようなことも考慮して広範な加工条件におけるパンチの曲がりを調べる。

1.3.2 加工力とパンチ移動

続いてパンチに作用する力を調べる。パンチを曲げるのは材料からパンチに作用する力である。この力を明らかにすることが、パンチ変形の挙動を理解するために重要である。加工力に及ぼす加工条件の影響を詳細な測定により調べる。材料からパンチに作用する力を図 1.6 に示す。パンチには軸方向と横方向に力が作用する。パンチの曲がりとの関係を明

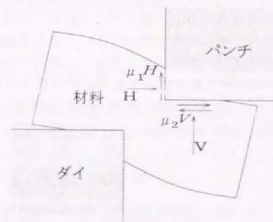


図 1.6 せん断加工中に材料からパンチに作用する力

らかにするためには横方向に作用する力を正確に把握しなければならない。

パンチが偏心を是正する方向に曲がるということは、偏心を是正する方向に力が働いていることを意味する。パンチが細長い場合でも、この力をうまく利用することができれば偏心を是正できる。その方法として加工力によりパンチを移動させるという方法が考えられる。パンチが横方向に移動可能な構造の型により加工を行う方法である。そこでパンチが横方向に移動できる型を製作し、パンチ移動に及ぼす加工条件の影響を調べる。

以上はせん断加工現象を工具の挙動から見たものである。

1.3.3 材料の流動

次にとりあげるのは加工中の材料の挙動の把握である。材料から徐々に不要部分を除去することにより三次元形状を成形する。その過程では、様々な形のせん断加工を行うこととなる。加工現象はせん断様式によって相当異なる。例えば、パンチ寸法と板厚の比、材料の拘束方式、板厚さの形状等によって加工機構が異なることが知られている。この点を材料流動の観点から検討する。現在、塑性加工中の材料流動が有限要素法を用いて盛んに解析されている[25]。せん断加工への取り組みもなされている[26]～[30]。しかし、非定常加工であるせん断加工を取り扱うのは難しい。実験的解析手法である Visioplasticity 法[31]は有効であるが、適用の煩雑さが問題である。そこで Visioplasticity 法を簡単に、速く、しかも高精度に実行するための方法を考える。そして、その方法を用いて計測実験を行い、材料流動に及ぼす加工条件の影響を調べる。

1.3.4 丸線材のせん断特性

三次元形状を成形するために厚さをもった材料を用いる。この素材の選択は重要である。素材精度の良さが確認されれば、素材を加工して新たな成形基準を作る必要はなく、素材自体を基準にできる。三次元を考えると丸線が適切な材料の候補としてあげられる。丸線は引抜き加工により製造され、その精度は極めて高い。また微細製品の成形に用いるような短い長さに限れば真直度も高い。板状に加工するのも容易である。こうした丸線のせん断については、鍛造の素材取りせん断の観点からの研究は多いが[32]～[41]、形状創成の観点からの研究はほとんどない。そこで単純な形状の加工を行い、基本的特性を調べる。また、簡単な逐次加工を試み、丸線の逐次加工についても調べる。

1.3.5 単型成形

次に実際に逐次加工による三次元成形を試みる。特定の製品例をとりあげ、実際に成形することにより加工法の有効性を確認する。まずは、専用の単型により成形を行う。一般性を持ち、実用性の検証ができる製品例として図 1.7 に示す医用鉗子を取りあげる。これは製品の軸方向断面の大きさが 0.6～1mm、長さが数 mm、最少成形部分の寸法は 50 μ m 程度である。例えば医用鉗子の中で最も複雑な形状をもつわに口部品は鍛造加工とせん断加工を併用した工法により 3 回の工程で加工する。

1.3.6 成形プレスの提案と試作

専用の型を用いれば、少ない工程で複雑な形状の製品を加工できる。ただし、製品形状を変更するためには型をつくり直さなければならず容易でない。製品形状を変更しやすい

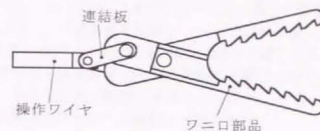


図 1.7 医療用微細鉗子

加工装置の製作が本研究の課題である。そこで、汎用工具を用いた逐次加工により三次元成形を行う加工装置を考える。加工装置の方式としては順送形とタレットパンチプレス形が考えられる。ここでは製品形状変更の容易さを重視し、タレットパンチプレス形を採用した。ただし、既存のタレットパンチプレスは板材を一方からしか加工できず、三次元成形を行うことはできない。丸線材を様々な角度から加工できる機能を付加したタレットパンチプレス形の加工装置を新たに製作する。取り扱いの便を考えると加工装置の大きさは小さい方が望ましい。微細成形では加工力が小さいため、装置全体の大きさは小さくすることができる。そこで、机の上にあるような、いわゆるデスクトップサイズの加工装置を製作する。

1.3.7 磁気研磨法によるバリ取り

バリを除去する方法を考える。対象が三次元微細製品であるため、通常の方法によるバリ取りは難しい。従来から用いられているバレル、プラスト等は微細形状製品には適用が難しい。形状をできるだけ損なわずバリのみを除去する手法が望ましい。ここでは磁気研磨を用いた方法を取りあげ、その有効性を調べる。

1.3.8 ビーニング処理による工具摩耗対策

プレス加工の生産性の高さは工具寿命が維持されて初めて成立する。せん断加工において良好な切り口面を得るためには工具面圧の高い加工条件で加工する必要があるため工具摩耗に対しては厳しい条件となる。工具摩耗に対する有効な対策が必要である。この場合微細工具に対しても簡便に適用できる方法が望ましい。そこで、工具表面のビーニング処理を取りあげ、その有効性を調べる。

第2章

加工中のパンチ変形

2.1 はじめに

本章ではせん断加工中のパンチ変形について明らかにする。これに関しては前田らにより既に調べられている [42]。そこで調べられているのは、図 2.1 のような平行複刃形における細長いパンチの変形である。それによれば、パンチはパンチとダイの心のずれを是正する方向に曲がる。この作用を以下では偏心是正作用と呼ぶこととする。偏心是正作用は

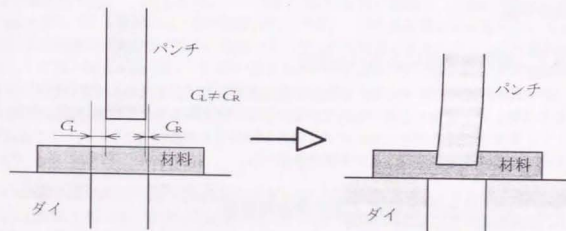


図 2.1 パンチとダイの心のずれとパンチ変形

精密な加工を行うためには有効な作用である。現在、せん断加工の精度はミクロンオーダーに達している [43]、[44]。この製品精度は金型部品の製作精度、パンチ・ダイの心合わせ精度、ダイセット精度、さらにプレスの繰り返し安定性等を考えると信じられないような高い加工精度であり、これを実現させる機構が存在すると考えられる。「偏心是正作用」はその一つの候補である。「偏心是正作用」を成形装置の設計に役立てるためにはこの作用の働

く条件を明らかにしなくてはならない。前田らにより示されたのは特定の条件に対する偏心是正作用の存在である。そこでパンチ変形に及ぼす加工条件の影響を調べることとした。様々な加工条件におけるパンチ変形量を計測し、パンチ変形と加工条件との関係を明らかにする。また、微細加工ではパンチ厚さが材料厚さに比べて薄くなる条件での加工も行われる。このような条件では加工現象が通常のせん断加工と異なってくることが指摘されている。パンチ変形がこのような条件の影響を受けるのかどうかについても明らかにする。まず、パンチ変形量の計測方法についての検討から始める。

2.2 パンチの変形とその計測

前田らの用いた計測方法では、パンチの変形量を求める際にパンチの変形形状を仮定していたため、パンチの変形量を正確に測定することができなかった。今回用いた計測方法では、変形量を正確に測定することができる。

その計測方法について説明する。

始めに従来の測定方法とその問題点を検討する。

2.2.1 従来の方法

図 2.2 に測定方法の概略を示す。実際に測定するのは、パンチの左右表面それぞれのひず

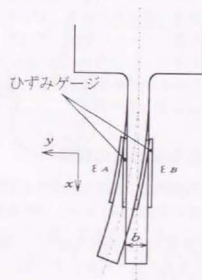


図 2.2 パンチの曲げ変形と表面ひずみの計測

みである。この測定値からパンチのある1点(ひずみゲージはり付け位置)での曲率が以下のようにして求められる。

パンチの左右の表面ひずみ $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ は圧縮ひずみ $\varepsilon_{AC}, \varepsilon_{BC}$ と曲げひずみ $\varepsilon_{AM}, \varepsilon_{BM}$ との和として次式であらわされる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_A &= \varepsilon_{AC} + \varepsilon_{AM} \\ \varepsilon_B &= \varepsilon_{BC} + \varepsilon_{BM}\end{aligned}\quad (2.1)$$

圧縮ひずみ、曲げひずみはそれぞれ左右の表面ひずみから以下のように表される。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{AC} = \varepsilon_{BC} &= \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B}{2} = \varepsilon_C \\ \varepsilon_{AM} &= -\varepsilon_{BM} = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{2}\end{aligned}\quad (2.2)$$

曲げひずみと曲率との間には次式のような関係がある。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{\varepsilon_{AM}}{b}\quad (2.3)$$

ただし、 b はパンチの厚さである。また、圧縮荷重は次式により求められる。

$$P = AE\varepsilon_C\quad (2.4)$$

ただし、ここで A はパンチの断面積、 E はパンチの縦弾性係数である。パンチの左右の表面ひずみを独立に測定することにより、パンチに作用する圧縮荷重とひずみゲージはり付け位置のパンチの曲率、すなわち曲げモーメントが求められる。ところで、パンチ全体の变形状態を決定するには、1点の曲率が求められただけでは十分ではない。1点の曲率からパンチの变形状態を決定するためには、パンチの变形形状を仮定しなければならない。このとき問題となるのが、その仮定の妥当性である。パンチと材料の接点における力の働き方は複雑であり、また食い込み量によっても変化していく。これらのことを考慮した上で、正しくパンチの变形状態を仮定することは非常に難しい。従来方法ではパンチの曲率が一様であると仮定している。この仮定があてはまらない場合、求められた値は正しくない。この問題点を改善したのが次に示す方法である。

2.2.2 パンチ変形の新たな算出法の提案

パンチの变形状態について考察する。加工中のパンチには左右の刃角に図 2.3 に示すような力が作用する。まずは従来方法と同じくパンチの变形をはりの曲げとして取り扱う。パンチの厚みを考えないことになる。この場合、図 2.3 に示した 4 つの力は図 2.4 に示す 2 つの力 P, Q と 1 つのモーメント M_0 にまとめられる。ここで P, Q は図 2.3 に示した 4 つの力により次のようにあらわされる。

$$\begin{aligned}P &= P_R + P_L \\ Q &= Q_R - Q_L\end{aligned}\quad (2.5)$$

すなわち、 P は軸荷重、 Q はパンチの左右の面に作用する側方力の差である。また、パンチにはモーメント M_0 も作用すると考える必要がある。この妥当性は、例えば、軸荷重 P

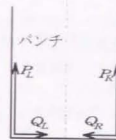


図 2.3 左右のパンチ刃角に作用する力

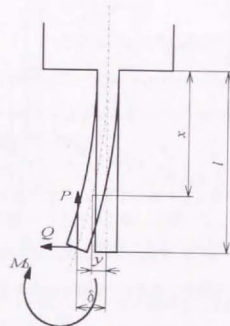


図 2.4 細長いパンチに作用する力

の荷重中心がパンチ中心と一致しない場合があることを考えても明らかである。したがって、パンチに働く曲げモーメントは M は次式で表される。

$$M = P(y - \delta) - Q(\ell - x) + M_0\quad (2.6)$$

ただし、 ℓ はパンチの長さ、 δ はパンチ先端の横変位である。パンチの变形状態は次式で決定される。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}\quad (2.7)$$

ただし、 I は断面二次モーメントである。以上からパンチの変形を決定する微分方程式が次式のように求められる。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{1}{EI} [P(y - \delta) - Q(\ell - x) + M_0] \quad (2.8)$$

この式の一般解は次のようになる。

$$y = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 \cos(\alpha x) + \frac{\beta^2}{\alpha^2} (\ell - x) + \delta - \frac{M_0}{P} \quad (2.9)$$

$$\alpha^2 = \frac{P}{EI}, \quad \beta^2 = \frac{Q}{EI}$$

ここで、 C_1, C_2 は積分定数である。

パンチの根本 ($x = 0$) での端条件を次のように仮定する。

$$y = 0, y' = 0 \quad (2.10)$$

結果として、曲がりを表す方程式は次のようになる。

$$y = C_1 \{\sin(\alpha x) - \alpha x\} + C_2 \{\cos(\alpha x) - 1\} \quad (2.11)$$

このように残される未知数は α, C_1, C_2 の3つとなる。なお、 C_1, C_2 は他の値と以下のような関係にある。

$$C_1 = \frac{\beta^2}{\alpha^3}, \quad C_2 = -\frac{\beta^2}{\alpha^2} \ell - \delta + \frac{M_0}{P}$$

上に示したのは荷重 P が圧縮荷重の場合である。次に引抜き時のように引張り荷重が作用する場合について検討する。この場合、曲げモーメント M は次式のようになる。

$$M = -P(y - \delta) - Q(\ell - x) + M_0 \quad (2.12)$$

この場合、曲がり決定する微分方程式の一般解は次式のように変わる。

$$y = C_1 \exp[\alpha x] + \exp[-\alpha x] + \frac{\beta^2}{\alpha^2} (\ell - x) + \delta + \frac{M_0}{P} \quad (2.13)$$

$$\alpha^2 = \frac{P}{EI}, \quad \beta^2 = \frac{Q}{EI}$$

圧縮の場合と同じ端条件を与えると、曲がりを表す式は次式のようになる。

$$y = C_1 \{\exp[\alpha x] - \alpha x - 1\} + C_2 \{\exp[-\alpha x] + \alpha x - 1\} \quad (2.14)$$

このように式の形は若干変わるが、残る未知数は圧縮荷重の場合と同様 α, C_1, C_2 の3つである。なお、この場合 C_1, C_2 は他の値と以下のような関係にある。

$$C_1 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} \ell + \delta + \frac{M_0}{P} - \frac{\beta^2}{\alpha^3} \right)$$

$$C_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} \ell + \delta + \frac{M_0}{P} + \frac{\beta^2}{\alpha^3} \right)$$

上の結果からパンチの変形状態を決定するために必要な測定量の数は全部で3つということになる。従来の測定法でさらに変形形状の仮定が必要だった理由は、測定量が足りないからである。測定しているのはパンチ表面の二か所のひずみである。さらに一つの量を測定すれば、仮定が不要となる。例えば、パンチの表面ひずみを後一か所測定すれば良い。実験ではパンチの表面ひずみをさらに二か所測定することとした。一か所余分に測定している。図 2.5 に示すように、左右二か所ずつ、合計で四か所の表面ひずみを測定する。こ

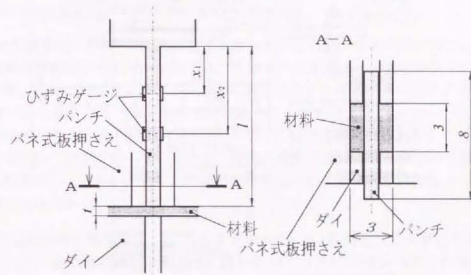


図 2.5 セン断加工装置の詳細

れらの量はパンチに作用するせん断力、二か所の曲率として整理される。例えば、 P が圧縮の場合には、次の三つの式に対応する。

$$P = EI\alpha^2 = AE\varepsilon_C$$

$$y''(x = x_1) = -\alpha^2 \{C_1 \sin(\alpha x_1) + C_2 \cos(\alpha x_1)\} \quad (2.15)$$

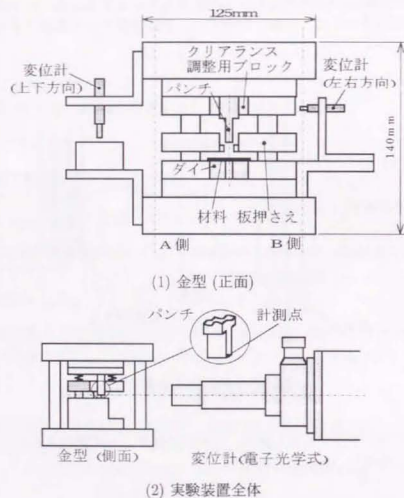
$$y''(x = x_2) = -\alpha^2 \{C_1 \sin(\alpha x_2) + C_2 \cos(\alpha x_2)\}$$

測定値から上式の3つの未知数 α, C_1, C_2 が求められ、式 (2.11) は完全に決定される。同様に、式 (2.14) も決定することができる。

2.3 実験装置及び実験条件

2.3.1 実験装置

実験装置を図 2.6 に示す。図 2.6 (1) に金型の全体図を示す。せん断はばね式板押さえで



(2) 実験装置全体

図 2.6 実験装置

材料を拘束する平行複刃形である。型はサブガイド、板押さえを備えている。図に示すように、パンチはクリアランス調整用ブロックで両側から挟み込み、拘束する。この調整ブロックの交換で左右のクリアランスを様々な設定できる。実験装置全体を図 2.6 (2) に示す。パンチの表面ひずみから算出したパンチ先端変位の値が正しいかどうかを確認するため、電子光学式変位計によりパンチ先端変位を実測する。電子光学式変位計は同図 (1) に示した金型を正面からみてパンチ先端変位を計測する。なお以降では金型を正面から見た

ときの左側を A 側、右側を B 側とする。

加工時の計測は以下に行われる。

- (1) **パンチの表面ひずみ** パンチ側面にはったひずみゲージで左右の面 2 か所ずつの表面ひずみを独立に検出する。ひずみゲージはゲージ長 0.3mm のものが 1mm おきに 5 つ配置されたもの (日本電気三栄 R51-FA-03-120-11) をはり付け、そのうちの 2 つを用いた。測定回路はパンチ表面に貼り付けたひずみゲージ 1 枚を測定ゲージとしたブリッジ回路であり、1 ゲージ法により測定した。残りの 3 枚のひずみゲージは別の位置に貼り付けた。4 つの表面ひずみは 2 節で説明したように、せん断荷重、及びパンチの曲がりの曲率の算出に用いられる。求められる曲率はひずみゲージのゲージ長 (0.3mm) にわたった平均値となる。
- (2) **パンチ先端変位** パンチ先端角部をターゲットとして電子光学式変位計で上下方向・左右方向の移動量をそれぞれ検出する。左右方向の変位はパンチの曲がりによる先端の移動量、また、測定装置が下型に対して固定されているので上下方向の変位は材料への食い込み量となる。電子光学式変位計 (ヤーマン オプトフォロー: モデル 7100C) は明暗の境界線を持つ被測定点 (ターゲット) が測定視野内にあるとき、この運動変位を非接触で計測できるものである。今回の測定では縦方向と横方向の変位を測定する 2 軸測定モードとしており、応答周波数は 50kHz、繰り返し精度は $\pm 1\mu\text{m}$ 、測定範囲は 1mm である。
- (3) **金型の左右方向の相対変位** 上下の金型が相対的に左右に変位する可能性を考慮し、図 2.6 (1) に示す渦電流形変位測定装置 (電子応用 GAP-SENSOR AEC-5706PS 分解能: $0.02\mu\text{m}$) でその変位を測定する。ただし、出力 ($10\text{mV}/\mu\text{m}$) を $12\text{bit}/10\text{V}$ の A/D 変換ボードを介して取り込むため、実際の分解能は $0.25\mu\text{m}$ である。
- (4) **金型の上下方向の相対変位** 図 2.6 (1) に示す渦電流形変位測定装置 (電子応用 GAP-SENSOR AEC-5505 分解能: $0.5\mu\text{m}$) で測定する。

2.3.2 実験条件及び方法

パンチの長さや厚さを変えて実験を行った。主に使用したパンチの諸元を表 2.1 に示す。なお、パンチの材質は SKD11 である。パンチの変形しやすさとその量は断面二次モーメントや細長比と関係する。表にはこれらの値も併せて示してある。材料は幅が 3mm、厚さが 0.3mm と 0.6mm の銅板 (C1100P-1/4H) である。これらの機械的特性を表 2.2 に示す。パンチとダイの心をずらすことにより左右で異なったクリアランスを設定する。実験を行ったクリアランスの設定値の中で代表的な値を表 2.3 に示した。片側のクリアランスが負となるまで心をずらした条件を設定している。材料の支持条件は図 2.7 に示す 2 種類である。図 (1) は板押さえを用いた加工であり、以下、両端固定と呼ぶ。せん断時の板押さえ力は約 200N である。そして、図 (2) は板押さえを用いないもので、以下、両端支持

表 2.1 使用したパンチの諸元

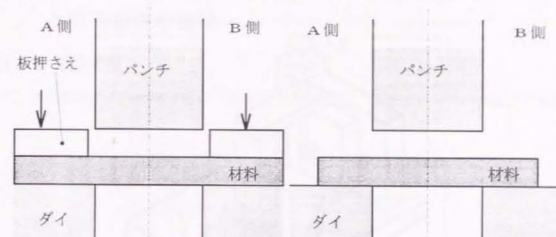
厚さ b mm	断面二次モーメント I mm ⁴	長さ l mm	細長比 λ
0.4	0.043	3 5	25.9 43.1
0.7	0.229	3 5 13	4.8 24.7 64.3

表 2.2 使用した材料の機械的特性

材料 (銅)	引張強さ MPa	全伸び %
C1100P-1/4H		
0.3mm 厚	257	41.2
0.6mm 厚	240	43.9

表 2.3 パンチとダイのクリアランス

クリアランス μm		クリアランス (板厚比) %			
		材料の厚さ			
		0.3mm		0.6mm	
A 側	B 側	A 側	B 側	A 側	B 側
0	120	0	40	0	20
60	60	20	20	10	10
120	0	40	0	20	0
-10	70	-3	23	-2	12
0	60	0	20	0	10
30	30	10	10	5	5
60	0	20	0	10	0
70	-10	23	-3	12	-2



(1) 両端固定

(2) 両端支持

図 2.7 材料の支持方法

と呼ぶ。加工速度は $50\mu\text{m/s}$ 、データはコンピュータに取り込まれ、そのサンプリング間隔は 0.1 秒である。

2.3.3 パンチにはったひずみゲージの出力特性

ひずみの計測値から曲率を求めるので、ひずみゲージの出力特性を予め調べる必要がある。図 2.8 に示す検定装置によりパンチの曲げ試験を行った。検定として行ったパンチの曲げ試験結果を図 2.9 に示す。試験はパンチの先端から 0.5mm, 1mm, 1.5mm の点にパンチ軸に垂直に荷重を加えて行った。はりに集中荷重が加わる場合として計算値は次の式から算出できる。

$$\varepsilon = \frac{bx}{EI}P = \frac{12x}{Ewb^2}P$$

ただし、 x は荷重を加えた位置からひずみゲージはり付け位置までの距離であり、 P は荷重、 w はパンチの幅である。同図は 0.5mm の位置に荷重を加えた場合で計算値とよい一致を示している。また、ひずみからは軸方向の荷重も求められる。その際に必要となる係数は荷重検定を行い求めた。

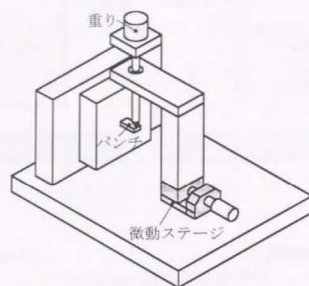


図 2.8 パンチの曲げ試験に用いた検定装置

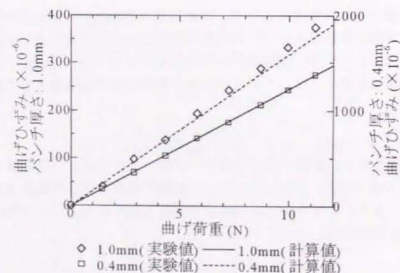


図 2.9 パンチの曲げ検定

2.4 パンチの表面ひずみからパンチ先端の変位を算出することの妥当性の確認

2.4.1 実験結果

パンチの表面ひずみの測定値の一例を図 2.10 に示す。同図はパンチの表面ひずみをパン

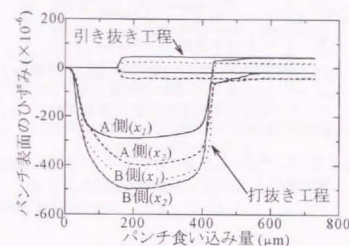


図 2.10 パンチの食い込み量に対するパンチ表面のひずみ
パンチ長さ: 13mm, 厚さ: 1mm, 材料厚さ: 0.6mm
両端固定, クリアランス: 7%(A 側), 13%(B 側)

チ食い込み量に対する変化として表している。なお、図ではパンチの引き抜き工程も示している。四か所の表面ひずみの変化は、いずれもおおむねせん断荷重の変化に対応している。 $x_1=6\text{mm}$ での値に比べ $x_2=11\text{mm}$ での値が大きな負の値を示しているが、これはパンチの幅に比べ、材料の幅が小さいため、パンチのひずみがパンチ幅方向に一様でないことによる。

図 2.11 は図 2.10 に示した値を用いて算出したパンチ先端の横変位量 (以下横変位と記す) である。図には実測した横変位をあわせて示した。加工の進行は図中の矢印で示してある。この図では変位の絶対値の大きい方が打抜く工程、小さい方がパンチを引抜く工程に対応する。符号は図 2.4 と同じで金型を正面から見て左の方向 (A 側) を正としてあるため、図 2.11 の条件では負の方向が偏心を是正する方向に対応する。

図 2.12 は求められたパンチの変形状態である。これはパンチを正面から見たときの変形状態であり、横方向は縦方向の 500 倍に拡大して表示している。0 から 8 までの番号は加工の進行を示し、図 2.13 に示したせん断行程の番号と対応する。

図 2.13 にはパンチに作用する力の垂直・水平方向成分を示す。これはパンチの変形状態

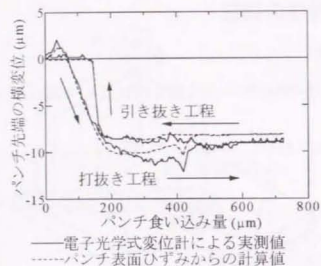


図 2.11 パンチ食い込み量に対するパンチ先端の横変位
横変位は A 側が正、実験条件は図 2.10 と同じ

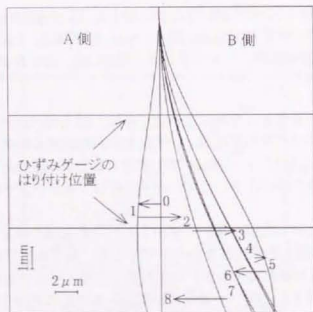


図 2.12 パンチの変形形状の履歴
実験条件は図 2.10 と同じ
図の上に記した番号は図 2.13 に示した番号に対応

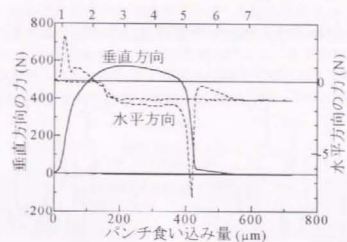


図 2.13 パンチ食い込み量に対する加工力の変化
実験条件は図 2.10 と同じ

を決定する計算の段階で同時に求められるものである。

2.4.2 考察

図 2.11 から明らかなように、ひずみから算出された横変位と実測した横変位は全パンチ食い込み量にわたりよく一致している。図 2.12 を見ると、パンチの変形状態は食い込み量によって大きく変化している。パンチの変形状態を様曲率と仮定した従来法ではパンチ変位を正しく算出できないことがわかる。特に、食い込み初期とせん断終了時には他のときと異なった曲がり方をしていることが分かる。このような変化にもかかわらず、2つの計測結果が全行程にわたって、非常によく一致を示していることから、今回使用した計測方法の有効性が確認されたといえる。

図 2.13 から力の水平方向成分が非常に小さいことがわかる。また、その力の働く方向は食い込み初期を除いて、クリアランスの小さい側から大きい側へ向かっている。これは、クリアランスが小さい方が側力は大きいという前田らの計測結果 [46] と一致している。パンチの曲がり方は、このようなわずかな水平方向の力に加え、垂直方向の力が同時に作用することによって、生じている。また、せん断完了期に大きな水平方向の力が生じているのが注目される。これは不均等クリアランスのため、一方の面の材料が先にせん断され、この方向への大きな側力が一時的に生じるためである。

2.5 加工条件の影響

次に様々な加工条件（クリアランス、材料厚さ、パンチ寸法）に対して得られたパンチ変形量の計測結果を検討する。ここでは各加工条件で得られた結果を3つの種類に分類した。1番目は図2.14のようにパンチが偏心を是正する方向に曲がったものである。その典型的な計測例を図2.15に示す。図にはパンチとダイの心ずれを逆の方向に設定した2種類の

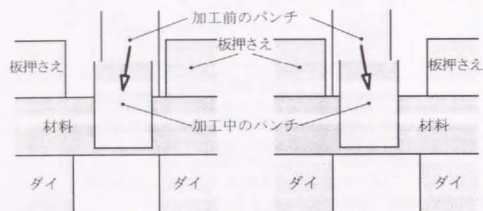


図 2.14 パンチ変形による偏心の是正

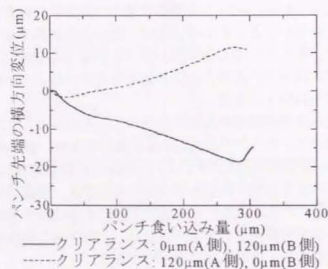


図 2.15 パンチ変形が偏心を是正する場合
パンチ長さ: 5mm, パンチ厚さ: 0.4mm, 両端固定, 材料厚さ: 0.3mm

結果を示してある。パンチはこの2種類の条件でちょうど逆の方向に移動している。その方向はパンチとダイの心ずれを是正する方向である。2番目は図2.16のようにパンチ変形が心ずれを増加させてしまうものである。1番目とは逆の傾向である。この典型的な計測

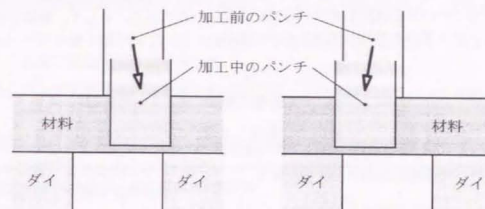


図 2.16 パンチ変形による心ずれの増加

例を図2.17に示す。図2.15とは逆の方向に動いていることが分かる。また、この場合、1

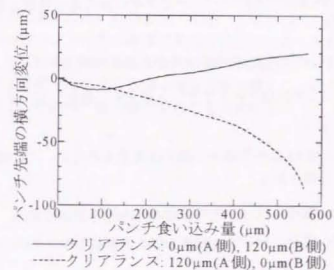


図 2.17 パンチ変形が心ずれを増加させる場合
パンチ長さ: 5mm, パンチ厚さ: 0.4mm, 両端支持, 材料厚さ: 0.6mm

番目のパンチ変形が偏心を是正する場合に比べ、移動量が大きくなっている。他に、パン

チの変形とパンチとダイとの心ずれとの間に明確な関係が見られないものがあつた。これを3番目とする。

計測結果をまとめて示したのが表2.4である。左右の平均クリアランスが等しいものを一つにまとめて示した。表の中の数値は片側のクリアランスがゼロの場合のパンチ先端の変位の最大値である。正の値となっているものが上記の1番目の分類に属するものであり、負の値となっているものが2番目の分類に属するものである。そして、数値を書き込んでいないものが3番目の分類に属するものである。

表 2.4 パンチ変形量に及ぼす加工条件の影響

片側のクリアランスを0 μ mに設定した場合のパンチ先端の移動量 (μ m)		パンチの厚さ mm		0.4		0.7	
材料の厚さ mm	平均クリアランス μ m (%)	両端固定	両端支持	両端固定	両端支持	両端固定	両端支持
0.3	60 (20)	15	—	6	4		
	30 (10)	10	—	5	—		
0.6	60 (10)	9	-41	7	5		
	30 (5)	8	-28	5	-4		

パンチ先端の横方向変位に及ぼすパンチとダイの偏心量の影響を調べた結果からいえることは次の3点である。

1. 両端固定ではパンチは偏心を是正する方向に変形する。
2. 両端支持ではパンチが厚くクリアランスが大きい場合、パンチは偏心を是正する方向に変形する。
3. 両端支持で2の条件以外の場合、偏心は是正されない。この場合の結果は条件により次の2つに分類される。
 - (a) 材料が薄い場合にはパンチの変形の方向は不明確である。
 - (b) 材料が厚い場合はパンチは初期の偏心を悪化させる方向に変形する。

2.6 本章のまとめ

平行複刃形のせん断加工をするときのパンチ変形について調べた。得られた結果は以下のとおりである。

1. パンチ変形量の測定方法について検討した。行った内容は以下のようである。
 - (a) パンチ軸上四か所 (2 対) の表面ひずみを測定することにより、パンチ変形量を正確に算出する方法を示した。
 - (b) パンチ先端変位の実測値との比較より、上記手法によりパンチ変形量が正しく求められることを示した。
2. パンチ変形に及ぼす加工条件の影響を調べた。上の手法を用いたパンチ変形の計測実験を広範な加工条件に対して行い、パンチ変形と加工条件の関係を調べた。得られた結果は以下の通りである。
 - (a) 両端固定の加工条件では、パンチは偏心を是正する方向に変形する。
 - (b) 両端支持において材料の板厚が厚い場合にはパンチは偏心を増加させる方向に大きく変形するため、特に注意が必要である。

加工条件を適切に設定すれば、パンチ変形は偏心を是正することが分かった。この結果は平行複刃形に対して得られたものであるが、一般の軸対称の加工に対しても同じことがいえる。三次元成形では板厚の厚い材料を加工する。したがって、細長いパンチを用いた加工を行う場合には板押さえの使用が必須であることがわかる。一般にせん断加工では板押さえを用いるなどして材料を強く拘束した方が加工は良好に行われる。細長いパンチでは良好な加工を助ける作用としてさらに偏心は正作用が働くことになる。細長いパンチを用いる場合、板押さえの使用が一層重要であることがわかる。

第3章

加工力とパンチの移動

3.1 はじめに

前章では、せん断加工中の細長いパンチの変形をとりあげた。それによれば、パンチ変形が加工条件の影響を受けるということが明らかになった。パンチを変形させているのは加工力であり、加工力が加工条件の影響を受けているということである。加工力に及ぼす加工条件の影響を明らかにすることが、パンチ変形の挙動を理解するために重要である。そこで本章では加工力に及ぼす加工条件の影響を調べる。このために加工力の計測を行う。加工力の測定はこれまでも行われているがパンチとダイの心のズレを考慮したものはない。ただし、細長いパンチを用いると加工力がパンチ変形の影響を受けてしまうため、計測は細長いパンチを用いて行う。前章において用いたパンチ変形の計測法によれば、加工力も同時に求められるが、これはパンチが変形した場合の加工力であり、加工条件の影響だけを反映したものではない。また、前章において適切な加工条件では偏心は正作用が働くことが明らかになった。これは高精度の加工を行う場合、有効な作用である。本章では細長いパンチでこの効果を利用する方法について考える。細長いパンチの場合、パンチの変形量は小さくパンチ変形による偏心は正効果は期待できない。そこでパンチ移動による偏心は正効果と考えた。加工中にパンチが移動できる状態にしておけば、細長いパンチを曲げようとする力が、パンチを移動させる力として作用し、パンチ移動による偏心は正効果が期待できる。この考えの妥当性を確認するため、パンチが移動可能な構造の型を製作し、パンチ移動量を計測した。この結果からパンチ移動量に及ぼす加工条件の影響を明らかにする。

3.2 加工力の計測

加工力に及ぼす加工条件の影響を調べるため、加工力の計測実験を行う。まず、加工力の計測の際に注意すべき点を考察する。前章と同様に工具と材料の間に働く力は集中荷重として表す。せん断加工中に材料から工具に働く力を図3.1に示す。図中の V_D は材料がダ

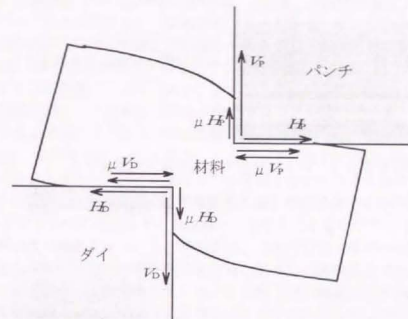


図 3.1 材料と工具の間に働く力

イ端面を垂直方向に押す力であり、 H_D は材料がダイ側面を水平方向に押す力である。さらに、材料とダイとは接触した状態で相対的に動くため図のように摩擦係数 μV_D 、 μH_D が働く。ここで μ は摩擦係数である。摩擦係数は厳密には工具部分により異なり、また加工の進行に伴っても変化すると考えられる。材料からダイにはこれらの力の合力が働くことになり、垂直方向と水平方向についてそれぞれ次式のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} P_D &= V_D + \mu H_D \\ F_D &= H_D + \mu V_D \end{aligned} \quad (3.1)$$

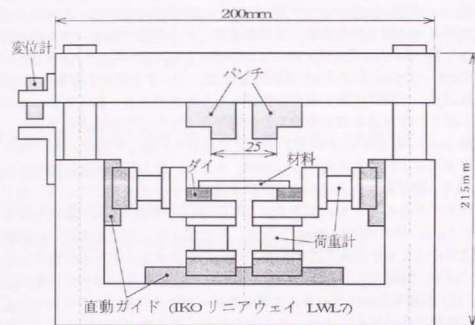
垂直方向に働く力 P_D をせん断力、水平方向に働く力 F_D を側方力と呼ぶ。側方力の構成要素のうち摩擦係数 μV_D は H_D に対して和となる場合と差となる場合がある。どちらになるかは材料がダイに対してどちらの方向に動くかにより決まる。せん断力も側方力も重要であり、加工力の測定としては両方の力を別々に測定することが必要である。また、これらの力は加工条件に大きく影響されることが従来の研究でも指摘されている [46]～[49]。そこで加工条件を広範に設定して測定を行う。特に側方力については加工条件によってはそ

の値が負、すなわち引張りとなることが益田らにより示唆されている[51]。測定装置はこのことを考慮して負の側方力も測定できる構造のものとしなければならない。また、図ではダイに作用する力を例にとり示したが、当然パンチに対しても力は働く。そして材料からダイに働く力とパンチに働く力は一般には異なる。加工力計測の観点からはこの両者どちらも測定する必要がある。さらにここではパンチとダイの心がずれていた場合のパンチの移動について考えている。この場合、左右のクリアランスは異なるため、両方の加工力を別々に計測する必要がある。以上、パンチとダイの心のズレを考慮し、次のように加工力の計測を行った。

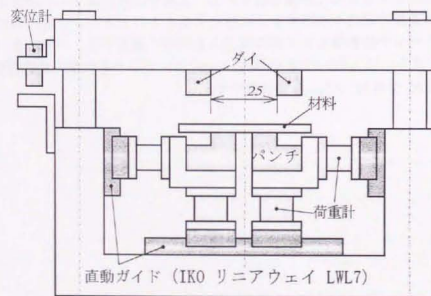
1. 垂直方向に働く力と水平方向に働く力を分離し、両方とも測定する。
2. 広範な加工条件下で測定する。
3. 負の側方力も測定できる方法で測定する。
4. ダイに作用する力とパンチに作用する力の両方を測定する。
5. 左右の刃角にかかる加工力の両方を測定する。

3.3 実験装置

図3.2は加工力の測定装置である。同図(1)はダイ側に作用する力を測定する場合を示す。ダイは直動ガイド上に自作のロードセルを介して設置されている。これにより垂直方向に働く力と水平方向に働く力を分離して測定することが可能である。ロードセルの軸方向に貼り付けた2枚のひずみゲージと軸に対して垂直方向に貼り付けたひずみゲージ2枚の計4枚のひずみゲージによりブリッジ回路を組んだ。パンチとダイを交換し図3.2(2)のように配置すればパンチ側に作用する力を計測することができる。加工中にはたらく力により直動ガイド部分が沈み込み加工や測定に影響を与えるかどうか検討してみる。最大せん断荷重は板厚1mm、幅10mmの硬質アルミニウムをせん断した場合、約1500Nとなる。最大側方力を最大せん断荷重の約20%(300N)とする。せん断荷重測定用ロードセルの下には6個、側方力測定用ロードセルの下には4個のブロックを用いている。全ブロックに均等に力が作用するとするとせん断荷重による沈み込みは約4 μ m、側方力による移動量は外方向に約1 μ m、中方向に約2 μ mとなる。したがって、加工や測定への影響は無視できる。垂直方向の力と水平方向の力の計測が互いに干渉するかどうかの検定を行った。結果を図3.3に示す。同図(1)が垂直方向に力を与えた場合の2つのロードセルに生じたひずみであり、(2)が水平方向に力を与えた場合のロードセルに生じたひずみである。どちらの図からも両者の干渉が極めて小さいことが分かる。ここでは加工中のパンチ移動を考えており、この測定も本加工力測定装置を使って行う。図3.2の実験装置では上型に設置される工具は直動ガイドを介して設置されている。工具を上型に固定した状態で加工力の測定は行う。この装置を図3.4に示すように設定することによりパンチは左右に移動可能となる。加工中のパンチ移動量とダイ側の加工力を同時に測定する。パンチ食い込み量は渦電流形変位計(電子応用 AEC-5509 分解能: 1 μ m)で、パンチ移動量は渦電流形変位計(電子応用 AEC-5505 分解能: 0.5 μ m)で計測する。

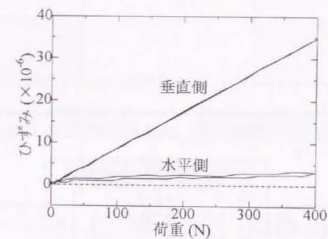


(1) ダイに作用する力を測定する場合

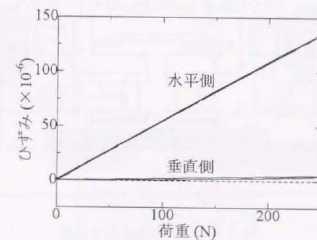


(2) パンチに作用する力を測定する場合

図 3.2 加工力の測定装置



(1) 垂直方向に力を与えた場合



(2) 水平方向に力を与えた場合

図 3.3 加工力の測定装置の検定

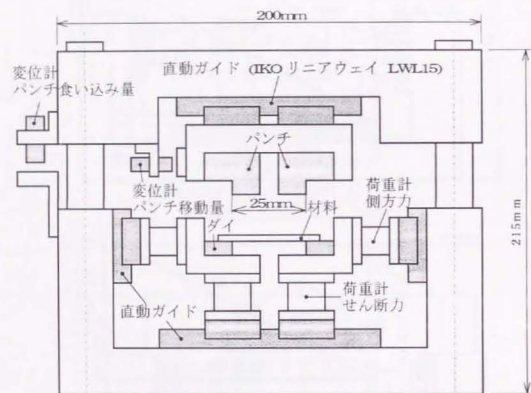


図 3.4 パンチ移動量測定装置

3.4 実験方法

材料の支持条件には図 3.5 に示す 4 種類がある。(1) では板押さえを用いない。左右か

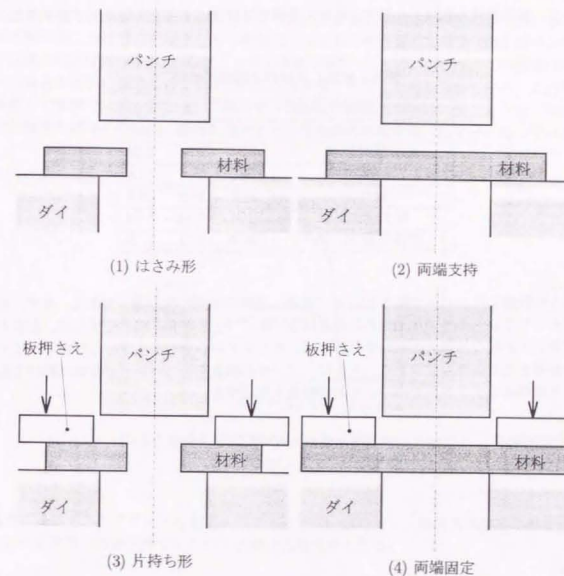


図 3.5 材料の支持条件

ら別々に挿入された二枚の材料を同時にせん断する。ダイの上側の材料は上方向にパンチの下側の材料は下方向に変形することができる。以降、この条件をはさみ形と呼ぶ。(2) では板押さえを用いない。一枚の材料の二か所を同時にせん断する。ダイの上側の材料は上方向に変形することができる。前章同様、この条件を両端支持と呼ぶ。(3) では板押さえを用いる。左右から別々に挿入された二枚の材料を同時にせん断する。パンチの下側の材料

は下方向に変形することができる。以降、この条件を片持ち形と呼ぶ。(4)では板押さえを用いる。一枚の材料の二か所を同時にせん断する。ダイの上側の材料もパンチの下側の材料も変形できない。前章同様、この条件を両端固定と呼ぶ。これら四つの条件のうち材料の動きが最も拘束されないはさみ形と最も強く拘束される両端固定についての結果を以下には記述する。加工される材料は半硬質アルミニウムであり、幅が5mm、厚さが1mmである。材料特性を表3.1に示す。なお、実験では材料はすべて圧延方向が長手方向にな

表 3.1 使用した材料の機械的特性

圧延方向に対する角度 $^{\circ}$	0	90	45
引張強さ N/mm^2	139.2	147.8	134.0
一様伸び %	5.30	2.58	2.24
全伸び %	15.0	12.6	10.6
絞り %	21.8	16.8	16.9
加工硬化係数	0.05	0.04	0.03
塑性係数 N/mm^2	160.8	173.2	151.5

るように設置した。パンチ幅は25mmである。実験の手順は次の通りである。まず、左右均等クリアランス条件で加工力の計測を行う。次にパンチとダイの心をずらし、左右のクリアランスが異なる場合の実験を行う。パンチとダイの心を大きくずらし片側のクリアランスが負となる条件も設定する。さらに、パンチの拘束を外しパンチが自由に動ける条件で、不均等クリアランスでのパンチの移動量を測定する。

3.5 実験結果

3.5.1 均等クリアランスにおける加工力の計測

(a) はさみ形

はさみ形ではパンチ刃による加工とダイ刃による加工が対称なのでパンチ側の加工力とダイ側の加工力は等しくなる。せん断加工では材料の切り落とし長さ(例えばパンチ端面下に残される材料の長さ)が異なると加工現象が異なってくる。しかし、この影響は切り落とし長さが材料の板厚に対して十分長ければ無視できることが知られている。この事実を考慮して実験ではダイ側とパンチ側の切り落とし長さともに十分に長くとった。加工力の測定結果を図3.6に示す。側方力の大きさはせん断力の大きさの約半分となっている。側

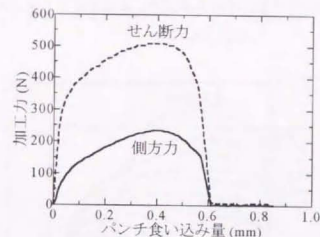


図 3.6 均等クリアランスのはさみ形における加工力
クリアランス: 10%, ダイ左側

方力に及ぼすクリアランスの影響を図3.7に示す。図に示した側方力は左右の平均値である。クリアランスを大きくしていくと側方力は大きくなる。

(b) 両端固定

ダイ側とパンチ側の加工力の測定結果を図3.8, 3.9に示す。側方力の大きさはせん断力の大きさの10%から20%であり、はさみ形と比較するとかなり小さい。側方力に及ぼすクリアランスの影響を図3.10, 3.11に示す。図に示した側方力は左右の平均値である。パンチ側とダイ側で傾向が異なる。ダイ側の側方力はクリアランスが大きくなるにつれて小さくなる。はさみ形とは逆の傾向である。パンチ側の側方力はクリアランスを変えてもあまり変わらない。材料からパンチとダイに作用する力を考察してみる。両端固定の条件で材

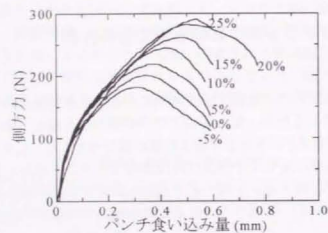


図 3.7 はさみ形における側方力に及ぼすクリアランスの影響

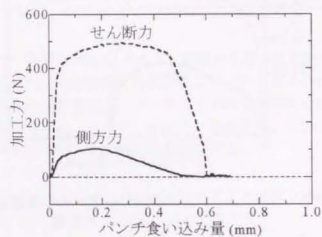


図 3.8 両端固定におけるダイ側の加工力
クリアランス: 10%, 左側

料から工具に作用する力を図 3.12 に示す。図には左側のパンチ刃角とダイ刃角にはさまれた部分の材料に作用する力を示した。T は材料内部に生じる張力である。力のつりあいより次式が成立する。

$$V_P + \mu_2 H_P = V_D + \mu_4 H_D$$

$$(\mu_0 + \mu_5)f + \mu_3 V_D + T + H_D = H_P + \mu_1 V_P$$

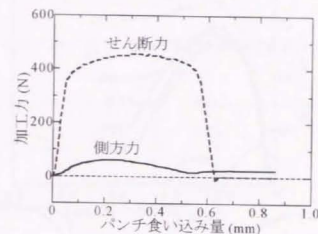


図 3.9 両端固定におけるパンチ側加工力
クリアランス: 10%, 左側

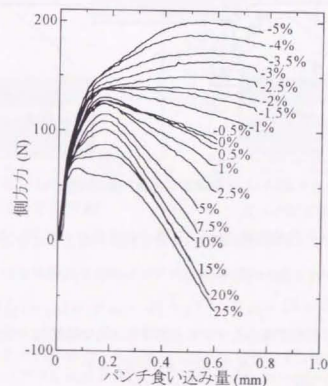


図 3.10 両端固定におけるダイ側側方力に及ぼすクリアランスの影響

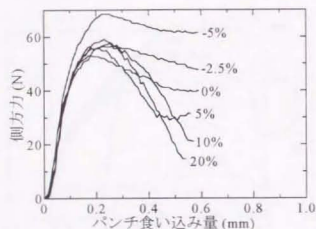


図 3.11 両端固定におけるパンチ側方力に及ぼすクリアランスの影響

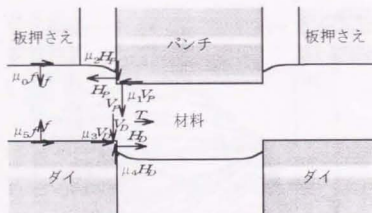


図 3.12 両端固定で工具に作用する力

パンチに作用する力とダイに作用する力はそれぞれ次式になる。

$$P_P = V_P + \mu_2 H_P, \quad F_P = H_P + \mu_1 V_P$$

$$P_D = V_D + \mu_4 H_D, \quad F_D = H_D + \mu_3 V_D + (\mu_0 + \mu_5)f$$

したがって、パンチに作用する力とダイに作用する力の間には次式が成立する。

$$P_P = P_D, \quad F_P = F_D + T$$

パンチに作用するせん断力 P_P とダイに作用するせん断力 P_D は等しくなる。一方、パンチに作用する側方力 F_P とダイに作用する側方力 F_D は異なる。これは材料内に生じる張力 T による。

3.5.2 不均等クリアランスにおける加工力の計測

(a) はさみ形

加工力の測定結果を図 3.13 に示す。左右それぞれの測定結果は同じクリアランスで測定

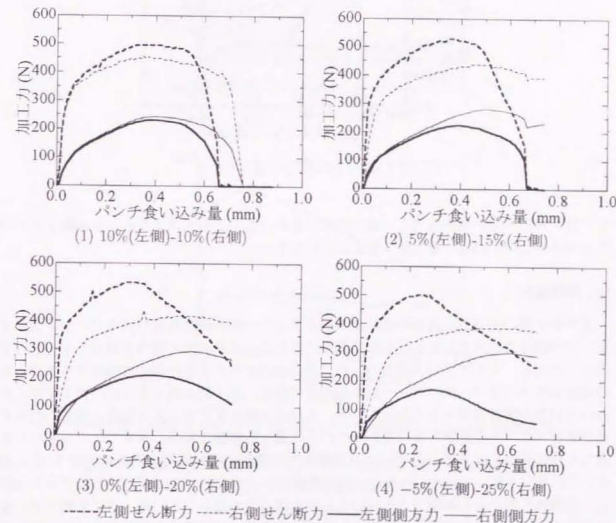


図 3.13 はさみ形で不均等クリアランスの場合の加工力の測定結果

された均等クリアランスの場合と同じである。すなわち、左右のクリアランスが異なっても、片側ずつそれぞれの条件でせん断した場合と変わらず、他方からの影響は認められない。側方力はクリアランスが大きい方が大きい。パンチに横方向に作用するのは左右から働く側方力の差である。側方力の差を図 3.14 に示す。ただし、 C_L は左側クリアランス、 C_R は右側クリアランスを表し、左側側方力から右側側方力をひいたものを側方力の差としている。パンチとダイの心がずれ、クリアランスが不均等となった場合、パンチはク

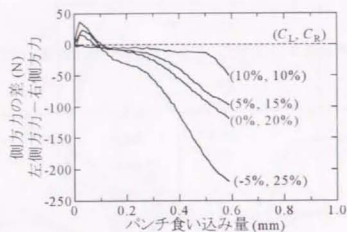


図 3.14 はさみ形での側方力の差

リアランスの小さい側から大きい側に向く力を受ける。この力によりパンチが動くとパンチとダイの心のずれは一層大きくなることになる。

(b) 両端固定

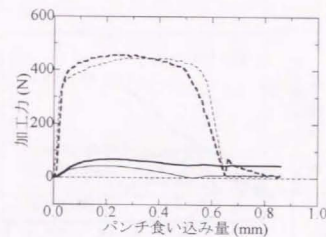
まずダイ側の側方力に注目する。左右のクリアランスが異なる場合はクリアランスの小さい方の側方力が大きくなる。これは均等クリアランスの結果と傾向を同じくするものである。ただし、クリアランスが異なったときの側方力の大きさの違いは均等クリアランスの場合に比べ小さい。次にパンチ側の側方力である。ダイ側と同じように、クリアランスの小さい方の側方力が大きくなっている。これは均等クリアランスの場合に側方力の大きさがクリアランスの影響を受けなかったとは異なる結果である。さて、ここで左右の側方力の差に注目してみると、パンチ側の側方力の差とダイ側の側方力の差が図 3.16 に示すように等しくなっている。ただし、 C_L は左側クリアランス、 C_R は右側クリアランスを表し、左側側方力から右側側方力をひいたものを側方力の差としている。パンチ側とダイ側の側方力の違いを生み出す主な原因として考えられるのは材料内の張力であった。左のパンチに作用する側方力 F_{PL} とダイに作用する側方力 F_{DL} の間、右のパンチに作用する側方力 F_{PR} とダイに作用する側方力 F_{DR} の間には次式のような関係が成立する。

$$F_{PR} = F_{DR} + T, \quad F_{PL} = F_{DL} + T$$

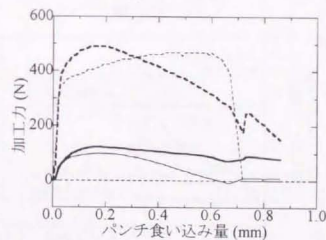
したがって、左右の側方力の差はパンチ側とダイ側で等しくなる。

$$F_{PL} - F_{PR} = F_{DL} - F_{DR}$$

パンチ側の側方力の差を計測することによりダイ側の側方力の差も求められる。また、その逆にダイ側の側方力の差を計測することにより、パンチ側の側方力の差が求められるこ



(1) パンチ側



(2) ダイ側

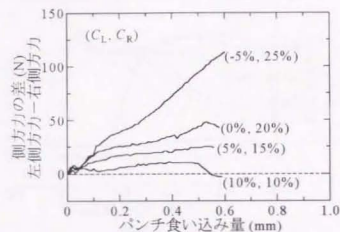
-----左側せん断力 -----右側せん断力 ——左側側方力 ——右側側方力

図 3.15 両端固定で不均等クリアランスの場合の加工力の測定結果
クリアランス: 0%(左側)-20%(右側)

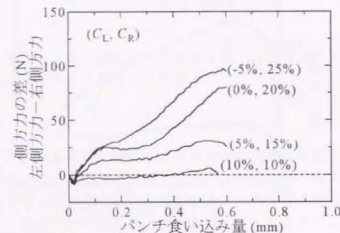
とになる。また、ダイ側の側方力差が均等クリアランスにおける計測値から予想されるものよりも小さくなっているが、減った成分はパンチ側の側方力に差を与えるために使われたと考えられる。両端固定の場合、パンチに作用する側方力の差はクリアランスの小さい側から大きい側へと向くことになる。したがって、パンチの拘束が外されるとパンチはクリアランスの不均等を是正する方向に移動すると考えられる。

3.5.3 パンチ移動の測定

次にパンチの拘束を外し、パンチの移動量を計測した。結果を図 3.17 に示す。はさみ形、



(1) パンチ側

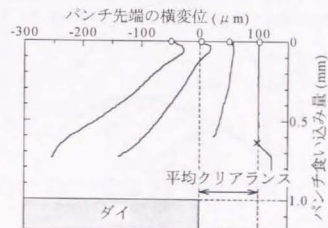


(2) ダイ側

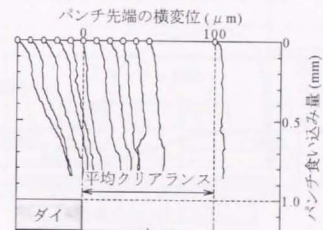
図 3.16 両端固定での左右の側方力の差

両端固定いずれの場合も、移動量計測結果は、側方力計測結果と対応している。はさみ形の場合、パンチは心ずれを大きくする方向に動いている。そして、初期状態で心ずれが大きいほど、移動量も大きくなっている。

両端固定の場合はパンチは、はさみ形とは逆に、心ずれを是正する方向に動いている。そして、初期のずれ量が大きいほど移動量は大きくなっている。このときの加工力の計測結果を図3.18に示す。左右の側方力の大きさは等しくなっている。ここで計測しているのはダイ側の側方力であるが、加工力の計測結果から明らかのように力の差はパンチ側とダイ側で等しくなるはずである。すなわち、パンチ側の左右の側方力も等しくなっていることになる。パンチは左右から作用する側方力の差により動き、結果として左右の側方力は等しくなる。



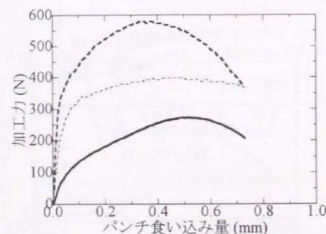
(1) はさみ形



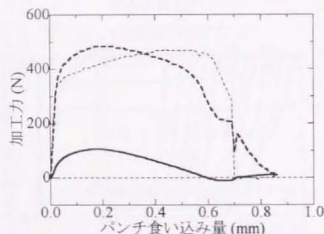
(2) 両端固定

○ パンチ先端の初期位置

図 3.17 パンチの移動量の計測結果



(1) はさみ形



(2) 両端固定

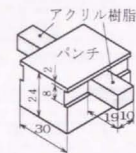
-----左側せん断力 -----右側せん断力 ——左側側方力 ——右側側方力

図 3.18 パンチが移動する場合の加工力
クリアランス: 0%(左側)-20%(右側)

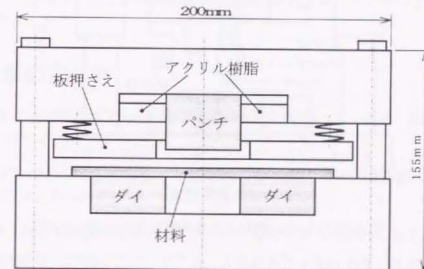
3.6 縦弾性係数の小さい材料による工具の支持

3.6.1 型構造

実際の加工を考えると前節までの計測に用いてきたようにパンチが左右に自由に移動できる状態で加工を行うことは困難である。そこで、パンチを縦弾性係数の小さい材料で支持する方法を考え、型を試作した。図 3.19 に示すように、この型ではパンチの根本に近い部分がアクリル樹脂により支持されている。アクリルのヤング率は鉄の約 60 分の 1 である。



(1) パンチ部分



(2) 金型全体

図 3.19 アクリル樹脂により支持された平行複刃形の金型

る。さらに、平行複刃だけではなく打抜き輪郭が閉輪郭となる丸形の打抜き用の型の試作も行った。型を図 3.20 に示す。この型ではパンチの根本がウレタン樹脂により拘束されている。ウレタンのヤング率は鉄の約 2000 分の 1 である。用いた実験装置ではパンチ先端

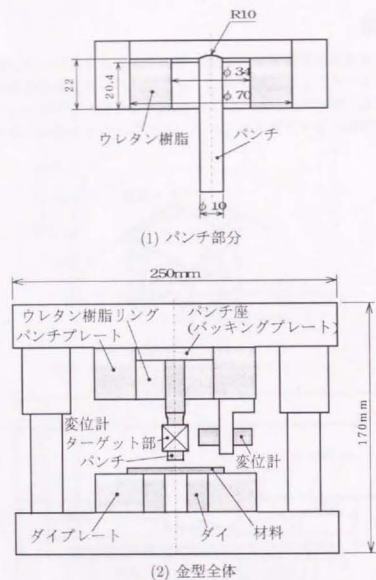


図 3.20 ウレタン樹脂により支持された丸形の金型

に横方向に 50N の力が作用するとパンチ先端が約 80 μ m 移動する。

3.6.2 実験結果

平行複刃の実験結果 (アクリル樹脂支持型) を図 3.21 に示す。図はパンチ先端の移動量を示す。

次に丸形打抜きの結果 (ウレタン樹脂支持型) を示す。板押さえを用いずに加工を行った

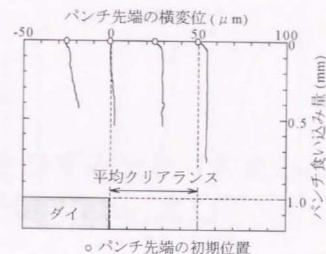


図 3.21 平行複刃形のパンチ移動量の計測結果
平均クリアランス: 5%, 両端固定

ところ、図 3.22 のようにパンチは不均等クリアランスを是正する方向に移動した。閉輪郭では材料自体の拘束がダイ上の材料の動きを抑制し板押さえを用いたのと同様の効果をもたらしたと考えられる。

3.7 本章のまとめ

せん断加工するときの加工力とパンチの移動について調べた。前章と同様、軸対象な加工をとりあつかった。

1. 広範な加工条件に対して加工力の測定を行い、加工条件の影響を調べた。結果は以下のようにまとめられる。
 - (a) はさみ形では側方はクリアランスの増大とともに大きくなる。
 - (b) 両端固定では側方はクリアランスの増大とともに小さくなる。
2. パンチが横方向に移動可能な型を用い、パンチ移動に及ぼす加工条件の影響を調べた。結果は以下のようにまとめられる。
 - (a) はさみ形では偏心を是正する方向とは逆方向にパンチは移動する。
 - (b) 両端固定では偏心を是正する方向にパンチが移動する。
 - (c) 丸形の打抜きでは板押さえを用いなくてもパンチは偏心を是正する方向に移動する。

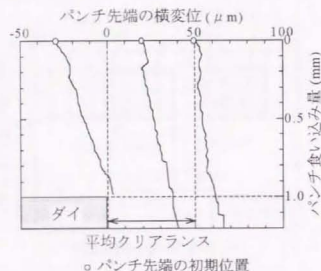


図 3.22 丸形のパンチ移動量の計測結果
平均クリアランス: 5%, 板押さえなし

この結果は平行複刃形と丸形に対して得られたものであるが、一般の軸対称の加工に對しても同じことがいえる。

前章と本章での結果をまとめると以下になる。

次の条件を満たすときパンチにはパンチとダイの偏心を是正する方向に力が働く。

1. 加工形状が軸対称である。
2. ダイ上の材料の変形を拘束されている。具体的には次のような状況である。
 - (a) 板押さえを用いている。
 - (b) 打抜き輪郭が閉輪郭である。

この力を利用できればパンチとダイの偏心を是正することができる。細長いパンチを用いればパンチの曲がりも偏心を是正する。パンチが移動できるようにしておけばパンチの移動が偏心を是正する。

第 4 章

材料流動とひずみ分布 (大変形に適用可能な Visioplasticity 法)

4.1 はじめに

三次元成形に際しては、種々異なる形状の工具を用い、様々な厚さの材料を加工する必要がある。パンチ厚さよりも厚い材料の加工も含まれる。例えば、小穴抜きでは通常のせん断加工と現象が異なることがこれまでの研究からも指摘されている [52], [53]。このような加工現象の違いは材料流動の観点から議論するのが有効である。塑性加工中の材料流動を知るための手段としては理論的解析手法である数値計算が考えられる。この分野では有限要素法による計算が盛んに行われており [25]、せん断加工の解析も試みられている [26] ~ [30]。ただし、せん断加工は変形が大きく、しかも、き裂の発生を伴うなど解析が困難であるため、完全に解析されるには至っていない。今のところ、せん断加工中の材料流動を考察するための最も有効な方法は半実験的解析方法である Visioplasticity 法 [31] である。Visioplasticity 法ではまず加工中の材料表面の変位分布を計測する。そして、その変位の計測値から他の物理量を算出する。このように Visioplasticity 法は実測値を基に行う解析方法であるので、き裂発生後の変形状態を取り扱うことができる。Visioplasticity 法によって広範な加工条件に対する結果が得られることは理論解析手法の構築にも役立つものと考えられる。ここでは次の二つの課題を検討した。

1. Visioplasticity 法を簡便に行うための方法
2. 材料流動、ひずみ分布に及ぼす加工条件の影響

まず、1. の課題について説明する。Visioplasticity 法では変位分布の計測が必要であるが、これを人が実行すると膨大な時間と労力が必要となる。解析を容易に行うためにはコンピュータにより計測を自動化する必要がある。つまり、顕微鏡下で人間の目によって行っていた作業を画像処理技術に置き換えるのである。既に、古閑等はこのような考えから、自動解析システムを実現している [54]。そのシステムでは従来通り、材料表面に描いた標点を用

いて変位計測を行っている。しかし、この方法ではせん断加工のような大変形対象を取り扱うのは難しい。そこで本研究では変位計測に他の新たな方法を用いることとした。画像処理を利用した新手法では特定形状の標点を必要としないため、大変形の変位計測を容易に行うことができる。また、計算過程に無駄がないため、高い精度の結果を短時間で得ることができる。

次に、上に説明した変位計測方法を取り入れた実験装置を用いて Visioplaticity 法を実際にせん断加工に適用する。様々な加工条件で得られた材料流動とひずみ分布の結果から加工条件の影響を考察する。

4.2 変位分布の計測方法

従来とは異なる方法で変位分布を計測することにより Visioplaticity 法の実行を容易に行う。まず、その変位計測方法について述べる。

4.2.1 材料に描いた標点を用いる方法

従来、材料に描いた標点を用いて変位は計測されてきた。この方法の問題点、さらにそれを画像処理により行う場合の問題点を格子法を例にとり説明する。格子法では材料の観察できる面にあらかじめ格子を描いておき、この格子の交点を標点としてその面の変位分布を測定する。このためには画像データから格子の交点座標を取り出す必要がある。実際の処理手順は以下になる。

1. 画像データから格子模様の成分を抽出するための準備として、邪魔になる雑音の成分を除去する。
2. 画像データから格子線の成分を抽出する。例えば直線として取り出すならば Hough 変換等をする。
3. 抽出された直線群を関連付け、格子の交点座標を算出する。

ここにあげられた処理は画像処理の中では最も時間のかかる処理であり、画像処理が最も苦手とする処理である。また、この方法には次のような問題点がある。

1. 加工が進み変形が大きくなると変位測定の標点となる目印が消えてしまい、変位測定が継続できない。これは格子法が本質的に持っている欠点である。この問題に対して、加工途中に格子線をかきなおすという解決方法が提案されている [54] がこれでは連続して計測を行うことができないうえ、計測作業が煩雑なものとなる。
2. 変位を測定するための情報として膨大な大きさの画像データを使っているのにもかかわらず、変位測定には格子線の部分の情報しか使っていない。これでは取り込んだ情報量に見合うだけの測定精度は引き出せない。

3. 何段にもわたる処理過程を経て得られる測定結果は各演算過程での誤差を含むことになり、高い測定精度を得るのが難しい。

4.2.2 フーリエ変換を応用した方法

ここでは標点を描く必要のない変位計測方法を用いる。塑性変形する材料を取り扱う場合、実際に必要なのは少しずつ加工が進んでいく過程での各段階の間の変位増分である。このことを考慮すると上に記した問題点に対する解決方法が得られる。

1. 各段階の画像とその 1 段階後の画像とを比較してその間の変位の増分を求める。標点としては初期状態にあったものではなくて各段階の材料表面が元々持っている傷などの模様を用いる。これにより、初期状態からの変形の大きさは関係なく計測できる。
2. 標点として画像データすべてを使う。すなわち 2 次元に分布した画像データを標点として使う。標点としては特定のパターンを仮定せず、材料表面の状態をそのまま使う。これにより特徴を取り出すための処理やそれに付随した処理が不要となる。データのすべてを使い、かつ、余計な処理が加わらないので高精度な処理結果が得られる。

必要となる処理作業は各段階の画像の中のある部分の画像が次の段階の画像の中のどこにあるかを探すことである。すなわち、2 枚の画像の間の位置を合わせることであり、そのための方法としてここではフーリエ変換を応用した方法 [56] を使った。この方法では 2 枚の画像の位相成分の相関をとる。そしてその値を基準として画像同士の位置を合わせる。この方法は精度が非常に高く雑音に対して強いという特徴を持つ。具体的な演算過程は以下の通りである。

ある段階の画像 $f(x, y)$ とその 1 段階後の画像 $h(x, y)$ のフーリエ変換画像をそれぞれ

$$\mathcal{F}f(x, y) = F(\xi, \eta), \quad \mathcal{F}h(x, y) = H(\xi, \eta) \quad (4.1)$$

とする。ただし、 \mathcal{F} はフーリエ変換を表す。 F, H を絶対値と位相の成分に分ける。

$$\begin{aligned} F(\xi, \eta) &= |F(\xi, \eta)| \exp[-i\phi_F(\xi, \eta)] \\ H(\xi, \eta) &= |H(\xi, \eta)| \exp[-i\phi_H(\xi, \eta)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで位相に関する項だけをフーリエ逆変換することにより、フーリエ位相画像が次式のように求められる。

$$\begin{aligned} f^{\phi}(x, y) &= \mathcal{F}^{-1} \exp[-i\phi_F(\xi, \eta)] \\ h^{\phi}(x, y) &= \mathcal{F}^{-1} \exp[-i\phi_H(\xi, \eta)] \end{aligned} \quad (4.3)$$

2 枚の画像 f, h を x, y 方向にそれぞれ x, y 移動させたときの相関 g はフーリエ位相画像によって

$$g(x, y) = \iint f^{\phi}(x', y') h^{\phi}(x' - x, y' - y) dx' dy' \quad (4.4)$$

となる。この $g(x, y)$ が最大になる点 (x, y) が2枚の画像同士を位置合わせしたときのずれ量、すなわち2枚の画像の間の移動量である。 g はフーリエ面では

$$g(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \exp[-i\{\phi_F(\xi, \eta) - \phi_H(\xi, \eta)\}] \quad (4.5)$$

と表される。このように、位相相関を使った方法では得られた画像をそのままフーリエ変換し、位相成分の差をとり、フーリエ逆変換をするという演算から移動量を求める。1枚の画像を分割した各部分画像についてこの方法を使って変位を計測することが画像内部の変位分布を計測することになる。この方法の特徴をまとめると以下のようになる。

1. 画像データ全体を使っているので高い精度の結果が得られる。
2. 実際の演算は2回フーリエ変換をするだけである。処理そのものに無駄がなく高い精度の結果が短時間で得られる。
3. 各段階の画像そのものを標点として使う。このため初期状態からの変形の大きさに関係なく演算が実行できる。

4.3 実験装置及び実験方法

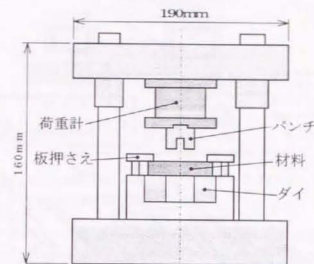
4.3.1 実験装置

せん断形式としては平行複刃形をとりあげ、各種加工条件に対する材料流動を実測する。通常のせん断加工の他に、精密せん断法についても調べる。精密せん断を行うためには板押さえや逆押さえを設けるなどの工夫がなされる。ここでは精密せん断法の中からファインブランキング法をとりあげた。ファインブランキング法は切断面全体を平滑なせん断面で構成するための工法である。材料は高い圧縮応力下では大きな延性を示し、破壊が起こりにくい。ファインブランキング法では、工具切れ刃からのき裂発生を防止するため、高い圧縮応力下で加工を行う。このために型に施される工夫は次の四点である。

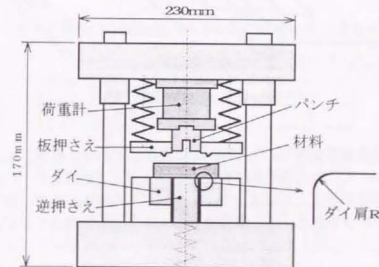
1. クリアランスをできるだけ小さくする。
2. 板押さえと逆押さえにより材料を加圧する。
3. 板押さえ面上にV字形の突起をつける。
4. ダイ側切れ刃にわずかに丸みをつける。

これらの工夫の効果について検討する。なお、ファインブランキング法と区別するため、以下では通常のせん断を慣用せん断と呼ぶ。

使用した金型を図4.1に示す。材料側面の変位分布から材料内部の変形を求めるためには、材料側面も内部と同じく平面ひずみ状態である必要がある。そこで強化ガラスによって材



(1) 慣用せん断用金型



(2) ファインブランキング法用金型

図 4.1 金型

料の側面をおさええている。これにより材料側面は幅方向には変形しない。加工中のパンチ、ダイ、材料をガラス越しにカメラで撮影し、画像データとしてコンピュータに取り込む。実験装置の全体図を図4.2に示す。材料の変形領域全体を1画面では撮影することはできない。

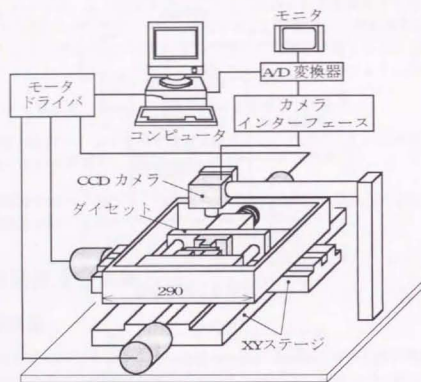


図 4.2 実験装置

このため、せん断装置全体をXYステージ上に設置してある。固定されたカメラに対してせん断装置を動かして、せん断中の材料表面を部分ごとに撮影する。これらの画像を画像処理によりつなぎ合わせることで変形領域全体の画像が得る。加工の制御、ステージの動作、画像データの取り込み、画像処理による変位の計測はコンピュータにより自動的に行う。

4.3.2 実験条件

実験材料は幅 10mm の鋼 1/2H 材である。通常の格子法と異なり、材料側面に特別な処理をせず、砥石で切断されたままの面を被計測面とした。また、これとは別に比較試料として側面に格子を描いたものも用意した。材料側面にフォトエッチング法により格子を描いたもので、その格子線の幅は 30 μ m、間隔は 70 μ m である。材料特性を得るために平面ひずみ圧縮試験を行った。用いた金型を図 4.3 に示す。変形抵抗 $\bar{\sigma}$ (N/mm²) とひずみ $\bar{\epsilon}$

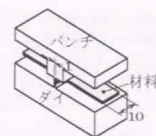


図 4.3 圧縮試験用金型

の間の関係式は次式のように表された。

$$\bar{\sigma} = 553 \times \bar{\epsilon}^{0.323}$$

材料厚さは 1mm と 2mm である。

慣用せん断に対してはパンチ幅は 1mm、2mm と 20mm の 3 種類を用意した。これらを組み合わせることにより材料板厚に対するパンチ幅の比を 3 種類設定した。これらに対してクリアランスをかえた実験を行う。実験条件の一覧を表 4.1 に示す。材料の支持条件

表 4.1 慣用せん断を検討するために設定した実験条件

材料の幅: 10mm						
材料の厚さ: 2mm, 長さ: 30mm						
パンチの厚さ mm	1		2			
r	0.5		1			
クリアランス %	5	10	20	5	10	20
材料の厚さ: 1mm, 長さ: 50mm						
パンチの厚さ: 20mm, r: 20						
クリアランス %	-20	5	10	20	30	

$$r = (\text{パンチの厚さ}) / (\text{材料の厚さ})$$

は両端固定である。

ファインブランキング法について検討するために設定した実験条件を表 4.2 に示す。用いた板押さえの形状を図 4.4 に示す。同図に示す距離 a をここでは突起位置と呼ぶこととする。突起位置についてはこれまで詳しく調べられており、それによれば、この場合 1.2mm が適正な値である [57]。

表 4.2 ファインブランキング法を検討するために設定した実験条件

材料の寸法	厚さ: 2mm, 幅: 10mm, 長さ: 30mm
板押さえ力 (N)	2500, 3800
逆押さえ力 (N)	790
クリアランス (%)	1, 10
突起	あり (突起位置: $a=1.2\text{mm}$ 又は $a=3.6\text{mm}$) 又はなし
ダイ肩 R (mm)	0.00, 0.06

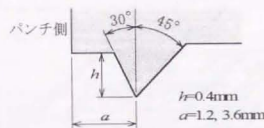


図 4.4 板押さえの形状

なお、実験はすべて無潤滑で行った。

打ち抜かれた材料切り口面の模式図を図 4.5 に示す。

4.3.3 実験方法

1枚の画像は 512×512 ピクセルで構成され、白黒の 256 階調である。変位の計測精度を約 $1\mu\text{m}$ とするため 1 ピクセルが材料表面上で約 $1.3\mu\text{m} \times 1.3\mu\text{m}$ の正方形となるレンズを用いた。1枚の画像には約 $680\mu\text{m} \times 680\mu\text{m}$ の範囲が撮影される。この大きさでは変形領域全体を撮影することができないので、変形領域全体を分割して、25 ~ 42枚の画像で撮影する。分割される様子を図 4.6 に示す。慣用せん断では 5×5 の 25枚の画像を撮影する。ファインブランキング法により加工する場合には突起を付与された板押さえの動きも計測する必要がある。このため、上側に多く画像を撮影する。撮影枚数は 6×5 の 30枚となる。さらにパンチ側面から離れた位置に板押さえ突起が付与される場合には横方向に多く画像を撮影しなければならない。撮影枚数は 6×7 の 42枚となる。隣り合う画像同士をつなぎ合わせ大きな1枚の画像としなければならない。このため隣り合う画像同士には重なり合う部分をもたせてある。この部分を用いて位置あわせを行う。位置あわせに用いた手法は変位を求める際に用いている位置あわせの手法と同じものである。パンチを板厚の

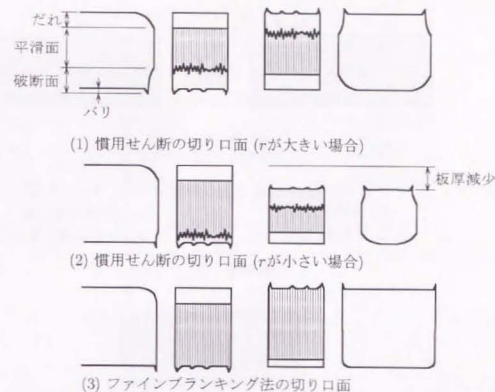
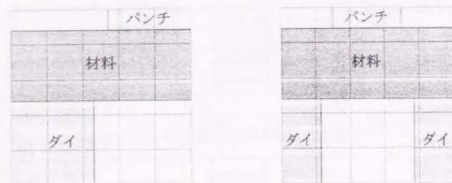


図 4.5 切り口面の模式図

2.5% ($25\mu\text{m}$) 食い込ませるごとに、必要な枚数の画像を撮影していく。撮影時の焦点と明るさは処理に影響を与えない。そこで、これらは、加工開始前に設定した状態のまま一定とし、加工中には調整しない。変位増分は 64×64 ピクセルの部分画像を使い計測する。局所的な変位を求めるためにはユニットの大きさを小さくした方がよいが、測定精度を維持するためにはある程度の大きさが必要となる。計測を行う点は約 $80\mu\text{m}$ 間隔の格子の交点である。表面全体の変位増分分布及びひずみ増分分布は、正格子状上に計測した変位増分の値を3次のBスプライン曲面上にフィッティングして求めた。具体的な算出手順を以下に述べる。

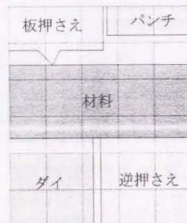
画像データからは x_i, y_j における変位の増分 $\Delta u(x_i, y_j), \Delta v(x_i, y_j)$ を算出する。ただし、ここで x_i, y_j は一定の間隔 D で $n \times m$ 点得られたとする。すなわち $x_i = iD$ ($i = 0, \dots, n$), $y_j = jD$ ($j = 0, \dots, m$) である。とびとびに得られている変位増分の値から任意の点 x, y の変位増分 $\Delta u(x, y), \Delta v(x, y)$ とひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{xx}(x, y), \Delta \varepsilon_{yy}(x, y), \Delta \varepsilon_{xy}(x, y)$ を算出する。まず、次の条件を満たす i, j を求める。

$$\begin{aligned} x_i &\leq x < x_{i+1} \\ y_j &\leq y < y_{j+1} \end{aligned} \quad (4.6)$$

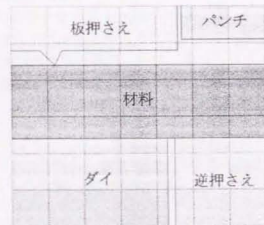


(1) 慣用せん断
(パンチが厚い場合)

(2) 慣用せん断
(パンチが薄い場合)



(3) ファインブランクング法 (突起位置: 1.2mm)



(4) ファインブランクング法 (突起位置: 3.6mm)

図 4.6 変形領域の分割画像

次に下の式より媒介変数 r, s を求める。

$$\begin{aligned} r &= \frac{x - x_i}{D} \\ s &= \frac{y - y_j}{D} \end{aligned} \quad (4.7)$$

i, j, r, s から下の式を使って変位増分 $\Delta u(x, y), \Delta v(x, y)$ を求める。

$$\begin{aligned} \Delta u(x, y) &= R \Delta U S \\ \Delta v(x, y) &= R \Delta V S \end{aligned} \quad (4.8)$$

ただし、ここで R, S, U, V は下の式によって表される行列である。

$$\begin{aligned} R &= \left(\frac{1}{6}(1-r)^3 \frac{r^3}{2} - r^2 + \frac{2}{3} \frac{1}{2} \left(-r^3 + r^2 + r + \frac{1}{3} \right) \frac{r^3}{6} \right) \\ S &= \begin{pmatrix} \frac{1}{6}(1-s)^3 \\ \frac{s^3}{2} - s^2 + \frac{2}{3} \\ \frac{1}{2} \left(-s^3 + s^2 + s + \frac{1}{3} \right) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= \begin{pmatrix} \Delta u(x_{i-1}, y_{j-1}) & \Delta u(x_i, y_{j-1}) & \Delta u(x_{i+1}, y_{j-1}) & \Delta u(x_{i+2}, y_{j-1}) \\ \Delta u(x_{i-1}, y_j) & \Delta u(x_i, y_j) & \Delta u(x_{i+1}, y_j) & \Delta u(x_{i+2}, y_j) \\ \Delta u(x_{i-1}, y_{j+1}) & \Delta u(x_i, y_{j+1}) & \Delta u(x_{i+1}, y_{j+1}) & \Delta u(x_{i+2}, y_{j+1}) \\ \Delta u(x_{i-1}, y_{j+2}) & \Delta u(x_i, y_{j+2}) & \Delta u(x_{i+1}, y_{j+2}) & \Delta u(x_{i+2}, y_{j+2}) \end{pmatrix} \\ \Delta V &= \begin{pmatrix} \Delta v(x_{i-1}, y_{j-1}) & \Delta v(x_i, y_{j-1}) & \Delta v(x_{i+1}, y_{j-1}) & \Delta v(x_{i+2}, y_{j-1}) \\ \Delta v(x_{i-1}, y_j) & \Delta v(x_i, y_j) & \Delta v(x_{i+1}, y_j) & \Delta v(x_{i+2}, y_j) \\ \Delta v(x_{i-1}, y_{j+1}) & \Delta v(x_i, y_{j+1}) & \Delta v(x_{i+1}, y_{j+1}) & \Delta v(x_{i+2}, y_{j+1}) \\ \Delta v(x_{i-1}, y_{j+2}) & \Delta v(x_i, y_{j+2}) & \Delta v(x_{i+1}, y_{j+2}) & \Delta v(x_{i+2}, y_{j+2}) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

同様に、 i, j, r, s から下の式を使ってひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{xx}(x, y), \Delta \varepsilon_{yy}(x, y), \Delta \varepsilon_{xy}(x, y)$ を求める。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{xx}(x, y) &= \frac{R \Delta U S}{D} \\ \Delta \varepsilon_{yy}(x, y) &= \frac{R \Delta V S}{D} \\ \Delta \varepsilon_{xy}(x, y) &= \frac{1}{2} \frac{R \Delta U S}{D} \frac{R \Delta V S}{D} \end{aligned} \quad (4.10)$$

ただし、ここで R' , S' は下の式によって表される行列である。

$$R' = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(1-r)^2 & \frac{r(3r-4)}{2} & \frac{(1-r)(1+3r)}{2} & \frac{r^2}{2} \end{pmatrix}$$

$$S' = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(1-s)^2 & \frac{s(3s-4)}{2} & \frac{(1-s)(1+3s)}{2} & \frac{s^2}{2} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

変位 u, v は変位増分 $\Delta u, \Delta v$ を経路に沿って足し合わせるにより、ひずみ $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$ はひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{xx}, \Delta\varepsilon_{yy}, \Delta\varepsilon_{xy}$ を経路に沿って足し合わせるにより求める。

また、パンチとダイの位置も材料変位と同じ方法で計測し、パンチ食い込み量はそのデータから求めた。

4.4 変位計測法の検定

せん断実験に先立ち、変位計測の正確さを確認するため検定を行った。検定に使用した実験装置を図4.7に示す。実験に使用される材料を動かしながら、その画像を順次取り込ん

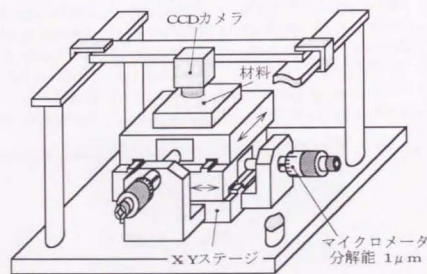


図 4.7 変位計測法の検定装置

でいく。得られた画像から4.3.3の手法により移動量を求める。画像処理により求められた移動量と実際の移動量を比較することにより、本手法の精度を確認する。部分画像の大き

さは以後の実験において用いられるものと同じ64×64ピクセルである。材料の表面はサンドペーパーにより二種類の粗さに仕上げた。画像は二種類の倍率で撮影した。材料表面の撮影画像を図4.8に示す。

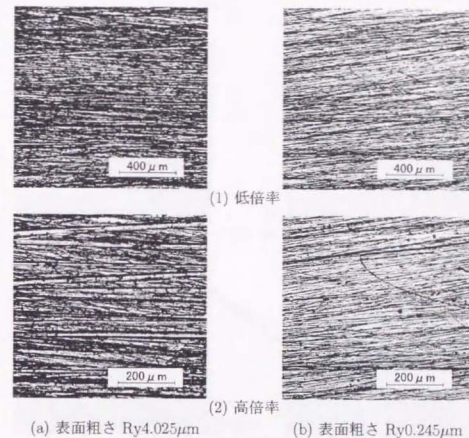


図 4.8 検定に使用した材料表面の撮影画像

材料移動は基準画像に対し、 $\pm 40\mu\text{m}$ の範囲にわたり $1\mu\text{m}$ 刻みとした。その結果を図4.9に示す。画像データから求められる変位量は画像データの1ピクセル分の幅刻みで得られる。図には、計算上予想される結果をあわせて実線で示している。図から計算値と実測値が非常によく一致していることがわかる。このことから本システムにおいて変位の計測が期待通りの精度で行われていることが確認された。

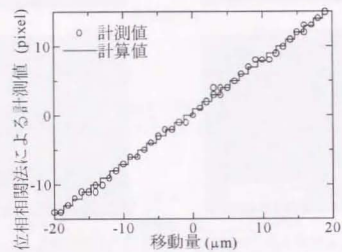


図 4.9 変位計測方法の検定

4.5 実験結果

4.5.1 セン断中の材料の変位計測

せん断加工中の材料表面の撮影画像を図 4.10 に示す。格子を描いた材料と描いていない

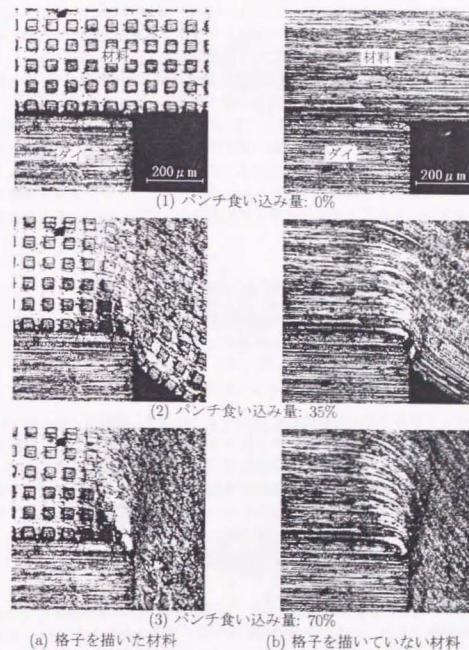


図 4.10 材料表面の撮影画像

材料の二種類を示している。どちらも 30% クリアランスのときのダイ刃角上部である。従来は同図(a)のように材料表面に格子模様などの標点を描いておく必要があった。しかし、パンチが食い込み変形が大きくなると標点は識別できなくなり、変位計測を続けることはできない。今回用いている変位計測法は特定形状の標点を利用しないため、格子模様が消失するほど変形しても変位計測を継続できる。以降の処理では標点を描いていない同図(b)の材料を用いている。例として画像の中の1部分(64×64ピクセル)に対して位相成分の相関を求めた結果を図4.11に示す。図4.11の(1)~(3)はそれぞれ図4.10の(1)~(3)の画像と、さらに食い込み量が2.5%進んだ段階の画像とを使って処理したものである。相関のピークを示している位置は(1)が $x = 0\mu\text{m}$, $y = -1\mu\text{m}$, (2)が $x = 0\mu\text{m}$, $y = -31\mu\text{m}$, (3)が $x = 0\mu\text{m}$, $y = 0\mu\text{m}$ であり、この座標が各段階から食い込み量が2.5%進む間の変位の増分に対応している。グラフ上で縦軸の値は最大値を1として表示しているが、実際に得られたピークの値はそれぞれ(1)が21.0, (2)が14.7, (3)が32.2である。同図から分かるように、いずれのデータに対しても鋭いピークが得られ、画像上の1ピクセルの大きさの精度で変位を求めることができる。このようにパンチが食い込み、変形が大きくなっても変位を連続して計測することができる。加工中に照明やカメラの焦点を調整する必要はなく、材料をセットするだけで以下に示す材料流動やひずみの分布の結果を得ることができる。

4.5.2 加工条件の影響

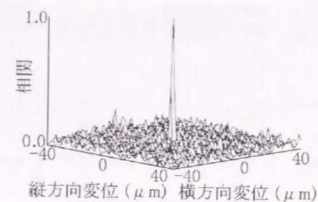
変位分布の計測結果から求めた材料流動とひずみ分布の結果を示す。材料厚さに対するパンチ厚さの比 r の大きさにより分けて記述する。

(1) 慣用せん断 (r が大きい場合)

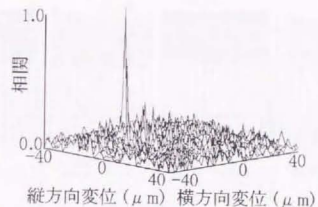
四種類のクリアランスでの材料流動を図4.12, 4.13に示す。材料内に描かれている線は加工前からの移動の軌跡を示している。クリアランスが大きくなるにつれ、材料が不足しているクリアランス部分に材料が多く流れ込んでいる。ひずみ分布を図4.14, 4.15に示す。材料内を分割して表示している線は加工前には等間隔の格子状だったので、各食い込み量での材料の変形状態を表している。色はひずみの大きさを示している。クリアランスが大きくなるにつれて変形領域が広がっていく。

(2) 慣用せん断 (r が小さい場合)

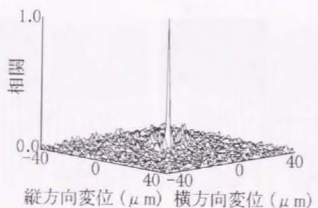
r が1と0.5の場合の二種類の結果を示す。クリアランスは三種類設定している。図4.16~4.18が材料流動である。 r が1の場合は r が大きい場合と変わらないが、パンチ厚さが板厚比で0.5のときには大きく違っている。まず、パンチ下の材料は加工前よりも薄くなる。クリアランス部分は材料が不足するため、パンチ下から材料が流れ込んでしまう。この傾向はクリアランスが大きいほど顕著になる。ダイ上の材料もクリアランス部分に流れ



(1) パンチ食い込み量: 0%

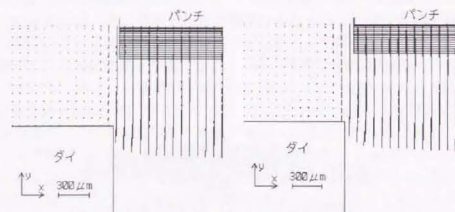


(2) パンチ食い込み量: 35%

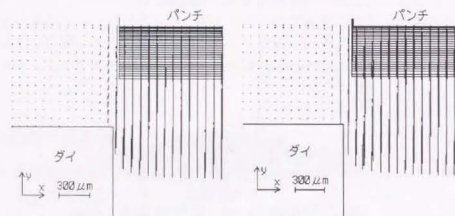


(3) パンチ食い込み量: 70%

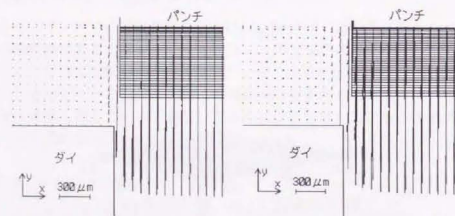
図 4.11 2つの画像の相関をとった結果



(1) パンチ食い込み量: 30%



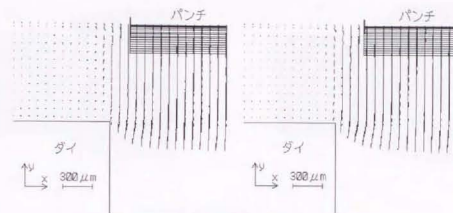
(2) パンチ食い込み量: 50%



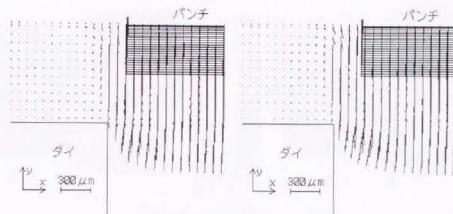
(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) クリアランス: 5% (b) クリアランス: 10%

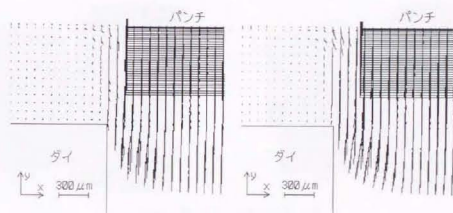
図 4.12 慣用せん断での材料流動 (r が大きい場合 1)



(1) パンチ食い込み量: 30%



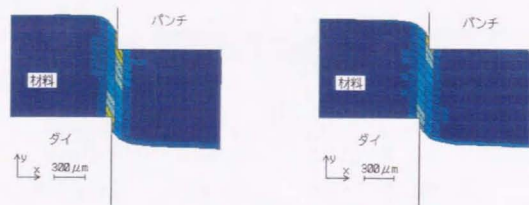
(2) パンチ食い込み量: 50%



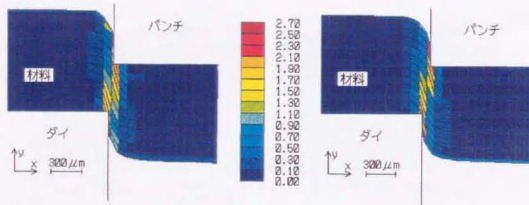
(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) クリアランス: 20% (b) クリアランス: 30%

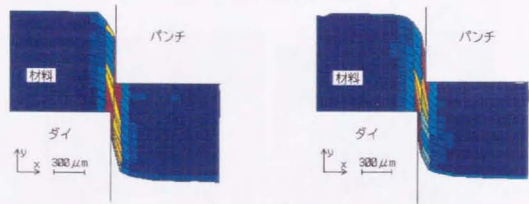
図 4.13 慣用せん断での材料流動 (r が大きい場合 2)



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%

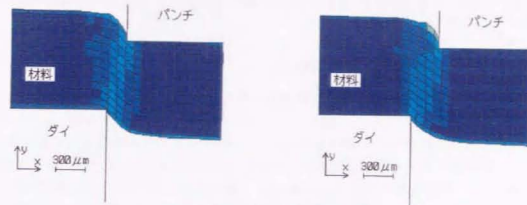


(3) パンチ食い込み量: 70%

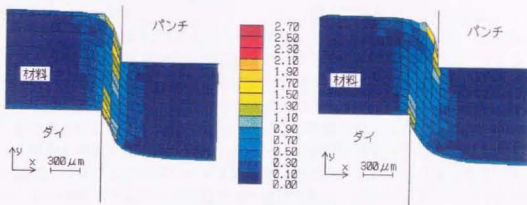
(a) クリアランス: 5%

(b) クリアランス: 10%

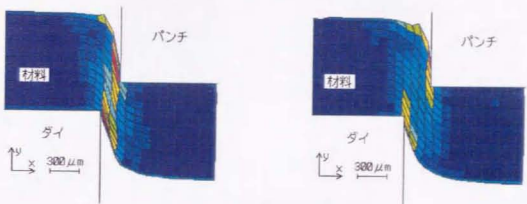
図 4.14 慣用せん断でのひずみ分布 (r が大きい場合 1)



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%



(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) クリアランス: 20%

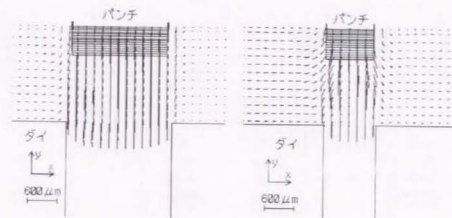
(b) クリアランス: 30%

図 4.15 慣用せん断でのひずみ分布 (r が大きい場合 2)

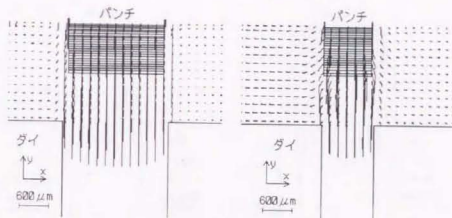
込むのが普通のような気がするが、結果を見ると外側へと流れ出している。このため、一層パンチ下の材料はクリアランス部に流れ込み、厚さが薄くなる。図 4.19～4.21 がひずみ分布である。パンチ厚さが板厚比 r で 0.5 の場合、左右のクリアランス部分の変形領域がつながってしまっているのが分かる。

(3) ファインブランキング法に関する検討

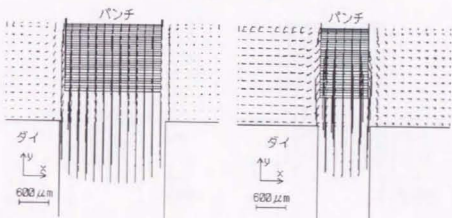
板押さえに突起をつけない場合の材料流動を図 4.22, 4.23 に示す。ダイ刃角に丸みをつけず、板押さえ力を十分に付与し、僅少クリアランスで打ち抜いたときの図 4.22(a) を基準にして、ダイ刃角に丸みをつけた場合を図 4.22(b)、板押さえ力を弱めた場合を図 4.23(a)、クリアランスを大きくした場合を図 4.23(b) に示す。板押さえに突起をつけた場合の材料流動を図 4.24, 4.25 に示す。ダイ刃角に丸みをつけ、適切な位置に突起のついた板押さえを用い、板押さえ力を十分に付与し、僅少クリアランスで打ち抜いたときの図 4.24(a) を基準にして、ダイ刃角に丸みをつけなかった場合を図 4.24(b) に、板押さえ力を弱めた場合を図 4.25(a) に板押さえの突起位置が遠い場合を図 4.25(b) に示す。突起により材料流動の様子は大きく異なっている。突起位置が適切な場合、突起が食い込むことにより上部の材料が変形領域へ押し込まれている。これにより変形領域の圧縮応力が高められる。板押さえ突起の右側の材料は突起位置を中心にして回転するような動きをしている。厚板の打ち抜きの場合にはダイ上にも突起が設けられるが、上記結果からダイ上突起が刃角付近の材料の静水圧をさらに高める効果のあることが推察できる。突起位置を遠くした場合は突起のない場合とあまり変わらない。ひずみ分布を図 4.26～4.29 に示す。突起位置が適切な場合、突起周辺部からダイ刃先に向かってひずみの大きい領域が広がっているのがわかる。突起が遠い場合、突起部周辺のひずみの大きい領域の影響が変形領域まで及ばず、突起のない場合とあまり変わらない結果となっている。



(1) パンチ食い込み量: 30%



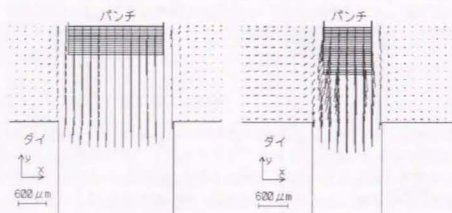
(2) パンチ食い込み量: 50%



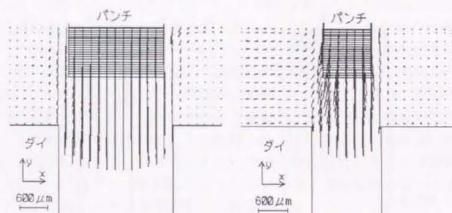
(3) パンチ食い込み量: 70%

- (a) パンチ厚さ: 2mm (板厚比 1) (b) パンチ厚さ: 1mm (板厚比 0.5)

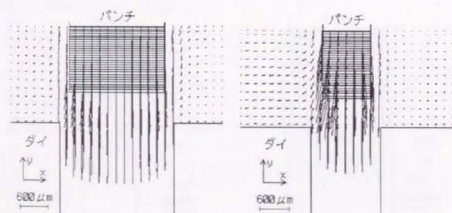
図 4.16 慣用せん断での材料流動 (r が小さい場合 1) クリアランス: 5%



(1) パンチ食い込み量: 30%



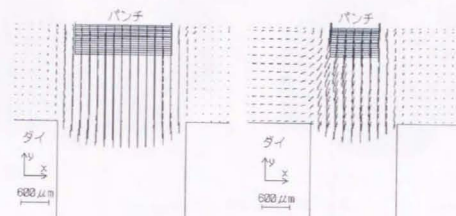
(2) パンチ食い込み量: 50%



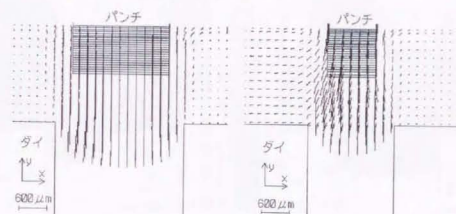
(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) パンチ厚さ: 2mm (板厚比 1) (b) パンチ厚さ: 1mm (板厚比 0.5)

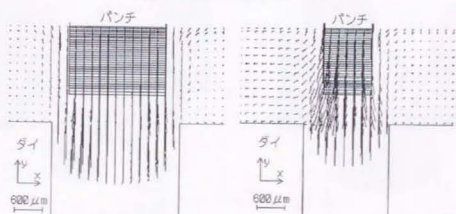
図 4.17 慣用せん断での材料流動 (r が小さい場合 2) クリアランス: 10%



(1) パンチ食い込み量: 30%



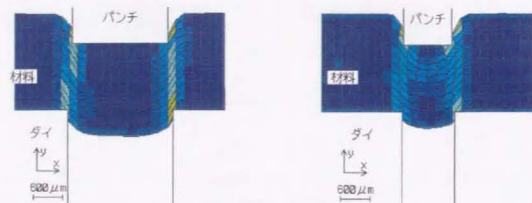
(2) パンチ食い込み量: 50%



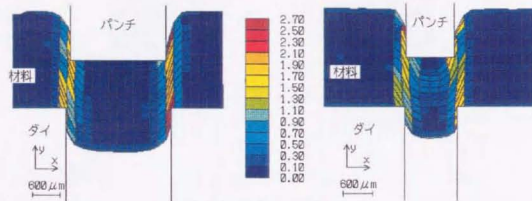
(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) パンチ厚さ: 2mm (板厚比 1) (b) パンチ厚さ: 1mm (板厚比 0.5)

図 4.18 慣用せん断での材料流動 (r が小さい場合 3) クリアランス: 20%



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%

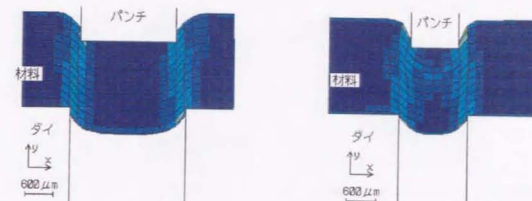


(3) パンチ食い込み量: 70%

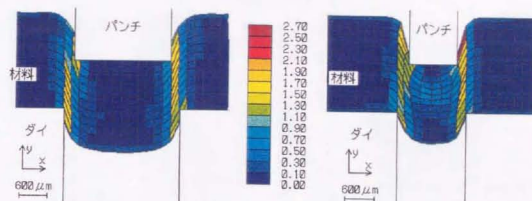
(a) パンチ厚さ: 2mm
(板厚比 1)

(b) パンチ厚さ: 1mm
(板厚比 0.5)

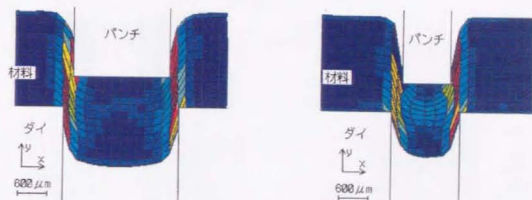
図 4.19 慣用せん断でのひずみ分布 (r が小さい場合 1)
クリアランス: 5%



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%

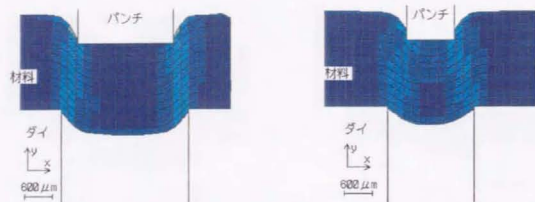


(3) パンチ食い込み量: 70%

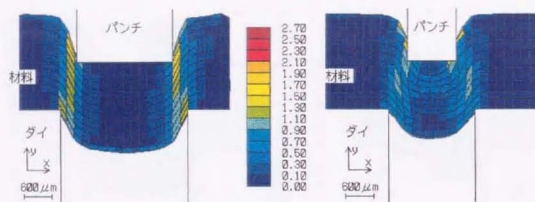
(a) パンチ厚さ: 2mm
(板厚比 1)

(b) パンチ厚さ: 1mm
(板厚比 0.5)

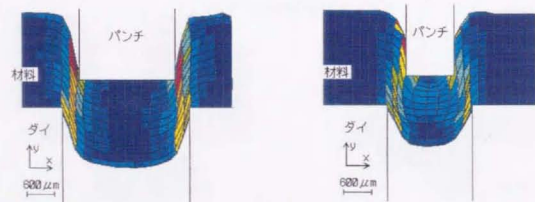
図 4.20 慣用せん断でのひずみ分布 (r が小さい場合 2)
クリアランス: 10%



(1) パンチ食い込み量: 30%



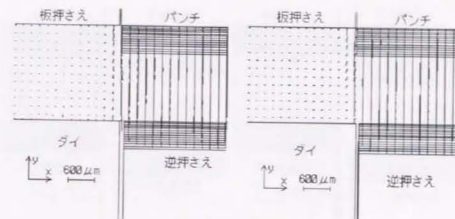
(2) パンチ食い込み量: 50%



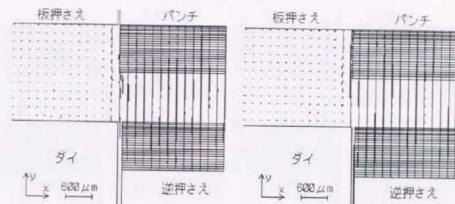
(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) パンチ厚さ: 2mm (板厚比 1) (b) パンチ厚さ: 1mm (板厚比 0.5)

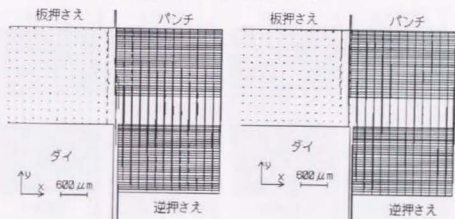
図 4.21 慣用せん断でのひずみ分布 (r が小さい場合 3) クリアランス: 20%



(1) パンチ食い込み量: 30%



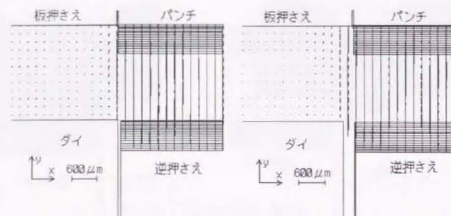
(2) パンチ食い込み量: 50%



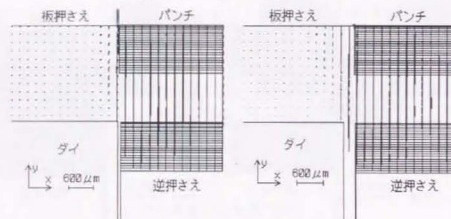
(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) ダイ刃角丸みなし (b) ダイ刃角丸みあり R0.06

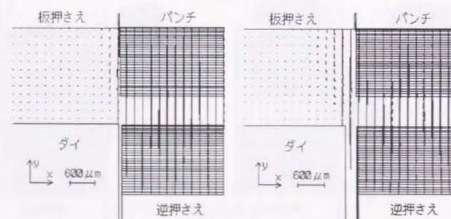
図 4.22 ファインブランク法に関する検討 (材料流動 1) クリアランス: 1%, 板押さえ力: 3800N, 板押さえ突起なし



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%



(3) パンチ食い込み量: 70%

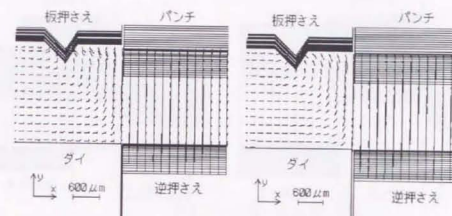
(a) クリアランス: 1%

(b) クリアランス: 10%

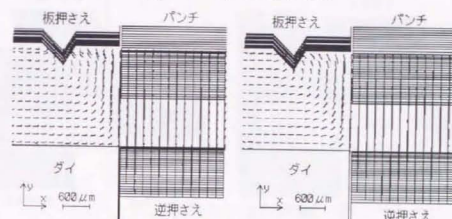
板押さえ力: 650N

板押さえ力: 3800N

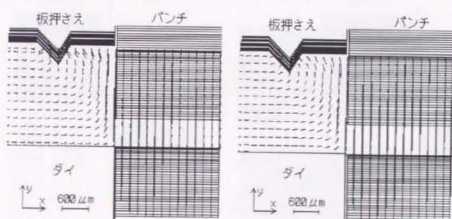
図 4.23 ファインブラッキング法に関する検討 (材料流動 2)
ダイ刃角丸みなし, 板押さえ突起なし



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%

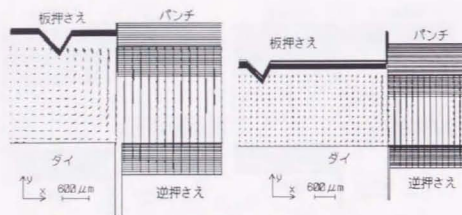


(3) パンチ食い込み量: 70%

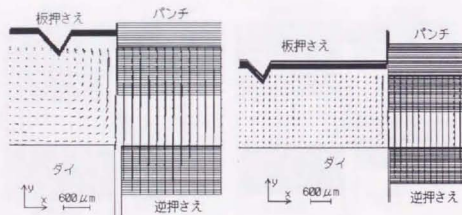
(a) ダイ刃角丸みあり (R0.06)

(b) ダイ刃角丸みなし

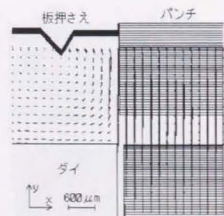
図 4.24 ファインブラッキング法に関する検討 (材料流動 3)
クリアランス: 1%, 板押さえ力: 3800N, 板押さえ突起あり (突起位置適切)



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%

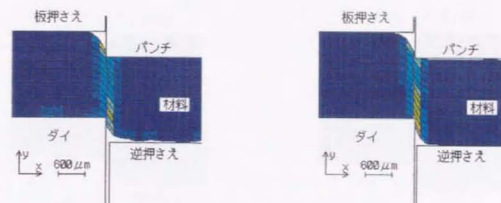


(3) パンチ食い込み量: 70%

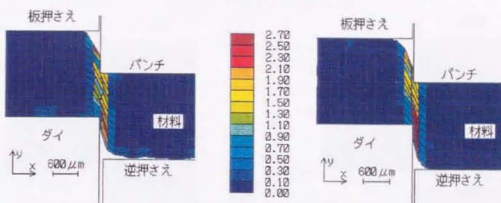
(a) 突起位置適切
板押さえ力: 2500N

(b) 突起位置違い
板押さえ力: 3800N

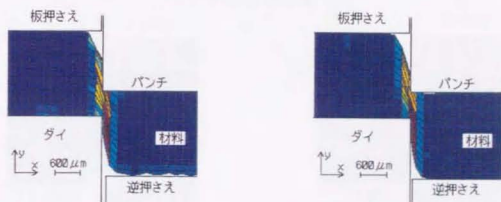
図 4.25 ファインブランキング法に関する検討 (材料流動 4)
ダイ刃角丸みあり (R0.06), クリアランス: 1%, 板押さえ突起あり



(1) パンチ食い込み量: 30%



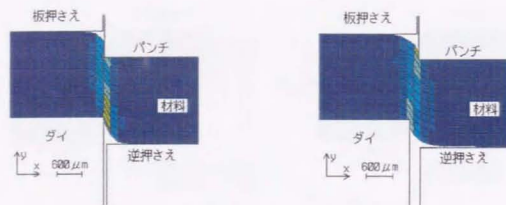
(2) パンチ食い込み量: 50%



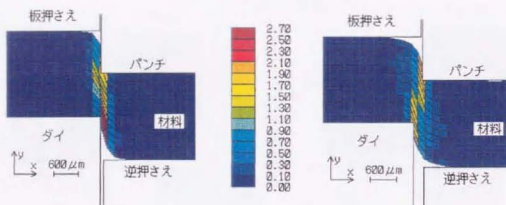
(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) ダイ刃角丸みなし
(b) ダイ刃角丸みあり R0.06

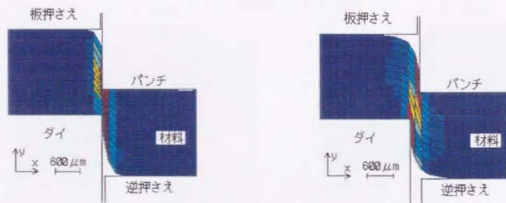
図 4.26 ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 1)
クリアランス: 1%, 板押さえ力: 3800N, 板押さえ突起なし



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%



(3) パンチ食い込み量: 70%

(a) クリアランス: 1%

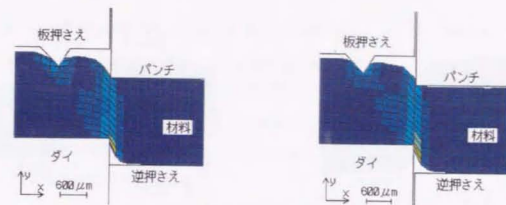
板押さえ力: 650N

(b) クリアランス: 10%

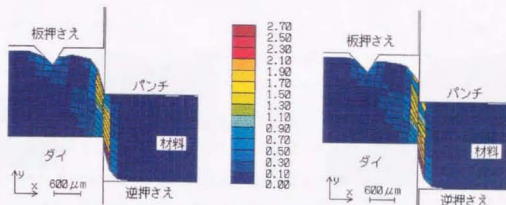
板押さえ力: 3800N

図 4.27 ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 2)

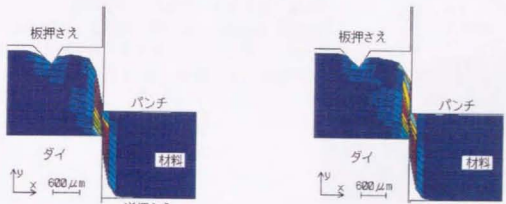
ダイ刃角丸みなし, 板押さえ突起なし



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%

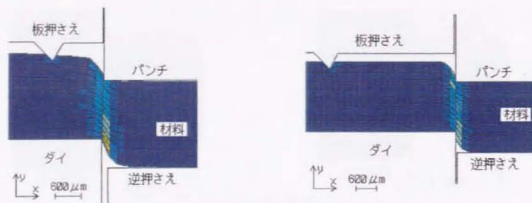


(3) パンチ食い込み量: 70%

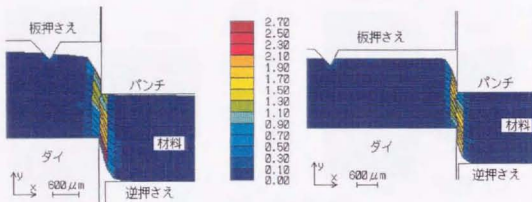
(a) ダイ刃角丸みあり (R0.06)

(b) ダイ刃角丸みなし

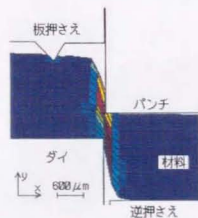
図 4.28 ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 3)
クリアランス: 1%, 板押さえ力: 3800N, 板押さえ突起あり (突起位置適切)



(1) パンチ食い込み量: 30%



(2) パンチ食い込み量: 50%



(3) パンチ食い込み量: 70%

- (a) 突起位置適切 板押さえ力: 2500N
(b) 突起位置適切 板押さえ力: 3800N

図 4.29 ファインブランキング法に関する検討 (ひずみ分布 4)
ダイ刃角丸みあり (R0.06), クリアランス: 1%, 板押さえ突起あり

4.6 本章のまとめ

せん断加工中の材料流動を Viscoplasticity 法により調べた。

1. せん断加工中の材料内部の変位分布を計測する方法として、フーリエ変換を応用した方法を示した。この手法を用いることの利点は以下のようなものである。

- (a) 材料表面に格子などの標点を描く必要がない。
- (b) 高い精度の結果を短時間で得ることができる。
- (c) 大変形の計測が可能である。

2. 上のひずみ計測手法を用い、せん断変形状態に及ぼす加工条件の影響を調べた。検討した加工条件は以下のようなものである。

- (a) クリアランスの影響。
- (b) パンチの厚さに対する材料の厚さの比の影響。
- (c) 精密せん断の一手法であるファインブランキング法の効果。

三次元成形では 2 の条件の加工を行うことになる。この場合、パンチの厚さが厚い場合に比べ、次のような点で異なることを考慮する必要がある。

- (a) パンチ下の材料の厚さは元の板厚に比べ薄くなる。
- (b) ダイ上の材料は加工後、外側に広がる。

ここで用いた方法を用いれば計測データを容易に蓄積することが可能である。充実した計測データが適切な工具設計や加工条件の選択を可能とする。

ただし三次元変形を伴うような加工に対しては計測は難しい。シミュレーション計算でできるようになることが望まれるが、計算手法の検証データとしても実測データは役立つものと思われる。

第 5 章

塑性加工による三次元微細素子成形のための基礎実験 (丸線材のせん断特性)

5.1 はじめに

前章までは板材のせん断実験によりせん断加工の基本的な性質を調べた。三次元成形に適した素材形状は板材とは限らない。三次元成形に適した素材形状を選択しなければならない。ここでは丸線材を採用することとした。それは次の理由による。

1. 丸線材は形状精度が高い。
2. 微細製品を成形する場合、加工対象部分の長さは短く、この範囲では丸線材に高い真直度が期待できる。
3. 丸線材の対称な形状を位置決め基準として用いることができ、高い加工精度と組立精度を容易に得ることができる。
4. 鍛造加工やせん断加工などにより板状に成形することも可能である。
5. 安価であり、入手も容易である。

本章では、この丸線材の基本的なせん断特性について調べた結果を記述する。丸線材のせん断に関しては軸に直角に切断する場合について詳しく調べられている [32]~[41]。しかし、その他の角度でせん断する場合についてはほとんど調べられていない。三次元形状のせん断をするためには丸線材を様々な角度でせん断しなければならない。そこで、最も基本的な加工である軸と平行な平面を創成するせん断加工について実験的に検討した。

また、三次元成形ではこの丸線材に対して逐次加工を行っていく。これについて調べた結果についても併せて示す。

5.2 実験方法

5.2.1 加工形態

直径 1mm の丸線材を加工する。基本的な加工形態として次に示す 3 種類を設定し、調べることにした。

1. 半割せん断
2. 片面せん断
3. 両面同時せん断

以下にそれぞれの詳細を記す。

半割せん断

丸線材を半分に割るせん断である。丸線材を 2 本の半円柱状製品にせん断する例が既に報告されている [58]。ここでは丸線材を図 5.1 に示すようにせん断する加工を半割せん断と呼ぶこととする。図に示したように工具の形状は材料に沿ったものであり、材料の変形

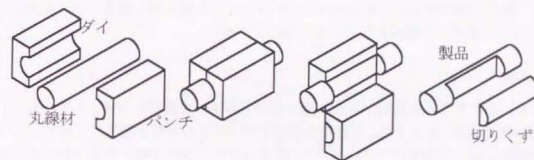


図 5.1 半割せん断加工の模式図

は工具によって拘束される。この場合にもパンチとダイの間にはクリアランスを設ける必要があるが、板材の場合とは状況が異なる。ここではクリアランスの設定方法は図 5.2 に示す 2 種類を試みた。図 (1) の設定方法では工具は材料に沿った形状を保ったままクリアランスが設けられている。この設定方法を以下、タイプ 1 と呼ぶこととする。これに対し図 (2) はクリアランス 0 としてつくった工具をずらすことによりクリアランスを設けるものである。この設定方法を以下、タイプ 2 と呼ぶこととする。これら 2 種類のクリアランス設定方法では材料拘束の強さが異なり、タイプ 1 の方がタイプ 2 よりも強く拘束される。クリアランスの大きさは 0mm、0.02mm、0.05mm、0.10mm に設定した。クリアランスの設定方法、クリアランスの大きさが加工にどのような影響を及ぼすかを調べる。

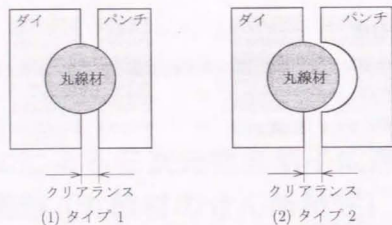


図 5.2 クリアランスの設定方法

本実験では軸方向に作用するせん断力とそれと垂直方向に作用する側方力の測定する。また電子顕微鏡により製品性状を観察する。

用いた実験装置を図 5.3 に示す。パンチの食い込み量は渦電流形変位計 (電子応用 GAP-SENSOR AEC-5505 分解能: 0.5 μ m) により測定する。荷重は自作のロードセルにより測定する。測定回路は軸方向に貼り付けたひずみゲージ 2 枚と軸と垂直方向に貼り付けたひずみゲージ 2 枚により構成したブリッジ回路である。

片面せん断

図 5.4 に示すように丸線材から切り取る部分の厚さが丸線材の半径よりも少ないものを片面せん断と呼ぶこととする。片面せん断加工用のダイの形状を図 5.5 に示す。この場合、ダイを材料に沿った形状にすると図 5.5 (1) のように、材料を横から取り出すことができない。図 5.5 (2) のように取り出し角を設ければ横から取り出すことが可能となる。図 5.5 (3) のように型を U 字形にしても材料を横から取り出すことは可能であるが、この場合切り口の下部がつぶれてしまう。この点も考慮して図 5.5 (2) の型形状を採用した。図 5.6 に片面せん断加工の模式図を示す。また、図 5.7 に示すような 2 種類の形状のパンチを用いて加工した。(1) のパンチ形状は材料に沿った形状である。(2) のパンチ形状は (1) に比べ、単純な形状であり製作が容易である。このような単純形状のパンチを用いることにより加工がどのように変わるかを実験により確認する。加工力を測定し、製品形状を調べる。切り取る幅を図に示すように切り取り幅と呼ぶこととし、0.2mm 一定とした。

図 5.8 に示すように丸線材を軸まわりに回転させて角度を変え、同一箇所にて複数回の片面せん断を行う加工も試みる。2 回加工製品と 4 回加工製品を調べた。2 回加工製品には 2 つの平坦部ができる。4 回加工製品には 4 つの平坦部が生じ断面は 4 角形になる。逐次加工の可能性を調べることが多面せん断実験の目的である。

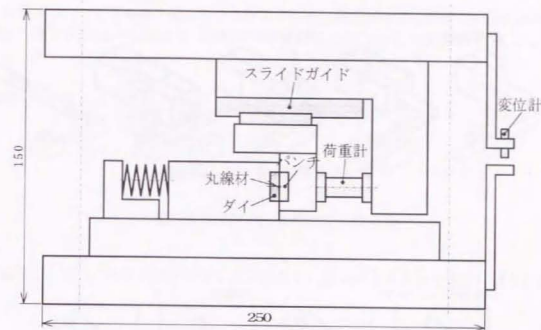


図 5.3 半割せん断実験装置

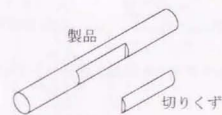


図 5.4 片面せん断加工

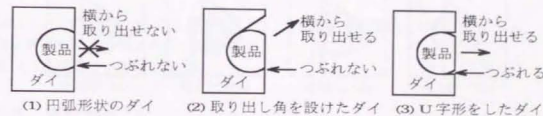


図 5.5 片面せん断加工用のダイの形状

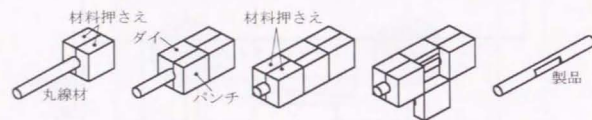


図 5.6 片面せん断加工の模式図

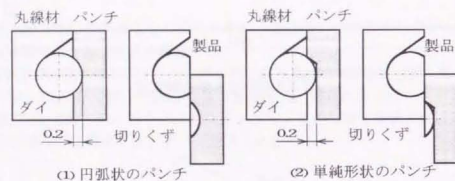


図 5.7 片面せん断加工用のパンチ形状

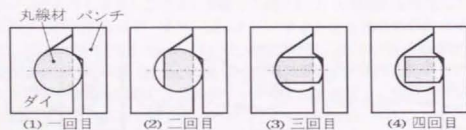


図 5.8 片面せん断の複数回加工

両面同時せん断

これは平行な2面を同時にせん断する加工である。両面同時せん断加工の模式図を図 5.9 に示す。図 5.10 のように加工中に材料がダイに押しつけられるため材料下部も平面状とな

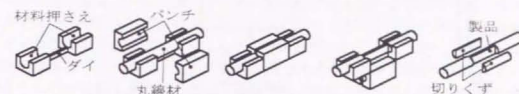


図 5.9 両面同時せん断加工の模式図

る。結果として三つの平坦部ができることになる。図に示すように中央部に残される部分

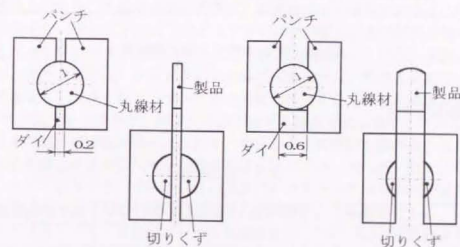


図 5.10 両面同時せん断加工の製品

の幅は 0.2mm と 0.6mm の 2 種類とした。この幅を中央部幅と呼ぶこととする。電子顕微鏡により製品形状を観察する。用いた実験装置を図 5.11 に示す。

5.2.2 実験条件

実験に使用した材料は直径 1 mm の丸線材である。その機械的特性を表 5.1 に示す。表に示した値より真応力の大きさ σ は $\sigma = C\epsilon^n$ で求められる。ただし、 C は塑性係数、 n

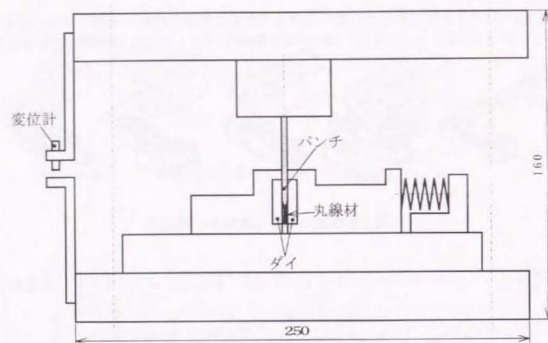


図 5.11 両面同時せん断実験装置

は加工硬化指数である。

表 5.1 材料特性

材質	JIS 記号	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	加工硬化指数	塑性係数
銅	C1100W-O	300.6	50.0	0.2	70
アルミニウム	A1100W-H12	120.0	15.0	0.1	24

潤滑油はパラフィン系基油 (動粘度: $3.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) を用いた。

5.3 実験結果

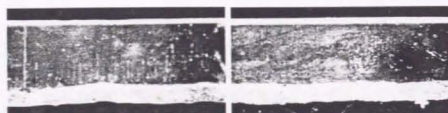
5.3.1 半割せん断

半割せん断された製品を図 5.12 に示す。また、図 5.13 は加工途中の形状である。クリアランスが小さい場合、パンチ側とダイ側の製品いずれも図のように半円形となり、切り口面は大きなせん断面を持つ良好なものとなった。クリアランスが大きくなるとパンチ側製品とダイ側製品の形状は異なってくるはずであるが、タイプ 1 に比べ、タイプ 2 では比較的似た形状となった。特に、タイプ 2 の方法でクリアランスを設定したアルミニウムでは図のようにパンチ側とダイ側の製品はほぼ対称な形状となった。加工部両端の角部分の影響がなければ、タイプ 2 では加工は対称なものとなり、パンチ側とダイ側の製品は同一形状になるはずである。剛性の低いアルミニウムでは製品断面を観察した加工部中央部に加工部両端の影響が及ばず、このような結果になったと考えられる。図 5.14 は加工力の測定結果である。側方力の大きさはせん断力の大きさの約半分である。板材せん断の場合の値である約 10~20% (板押さえあり) と比較するとかなり大きな値となっている。クリアランスが大きくなると打抜きが完了するパンチ食い込み量が大きくなる。板材の場合にもこのような傾向となるが、丸線材の場合の方がこの傾向が強く現れている。この傾向はタイプ 1 の方が大きい。タイプ 1 のようにクリアランスを設定した方が材料は強く拘束され高い静水圧を得ることができ、き裂が発生しにくい。2 種類のクリアランス設定方法による違いはこのことに対応する。クリアランスが特に大きい場合、打抜きが完了する食い込み量は線の外径よりも大きくなり、ついにはせん断できなくなる。この極端な場合の製品例が図 5.15 に示したものであり、加工力の測定結果も製品形状に対応している。この場合、素材径よりも広幅の平坦部が得られており、それなりの利用法も期待できる。

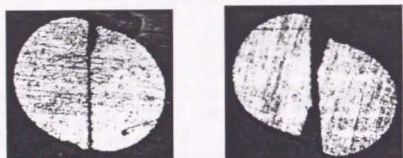
加工力の最大値とクリアランスとの関係を図 5.16 に示す。せん断力はクリアランスが大きくなるにつれて小さくなっている。この傾向はクリアランス設定方法や材料の種類によらずみられる傾向である。この傾向は板材せん断の場合と同じ傾向である。せん断力と異なり、側方力はクリアランスが変わってもあまり変化しない。この傾向はクリアランス設定方法や材料の種類によらない。この結果は板材せん断 (板押さえを用いた場合) とは異なる傾向である。

5.3.2 片面せん断

片面せん断された製品を図 5.17 に示す。同図 (1) は図 5.7 (1) に示したパンチを用いて成形された製品例であり、加工は良好に行われている。同図 (2) は図 5.7 (2) に示したパンチを用いて成形された製品である。この場合も製品の形状は良好なものであった。このようにパンチの形状を単純化しても加工を良好に行えることが確認された。2 種類のパンチによる成形結果を比較してみるとパンチ側に生じる切りくずの形状が異なっている。片面せん断を複数回行い、複数の平面を成形する多面せん断を行った例を図 5.18 に示す。同図



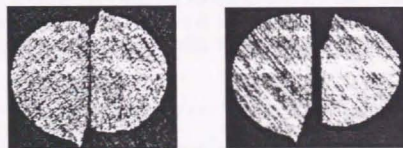
(1) 切り口面 (クリアランス: 0)



(2) 断面 (クリアランス: 0)

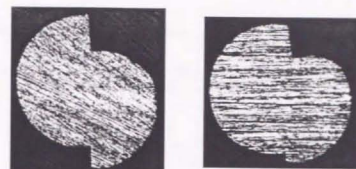


(3) 断面 (クリアランス: 50μm, タイプ 1)

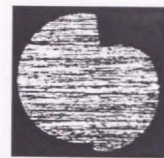


(4) 断面 (クリアランス: 50μm, タイプ 2)
(a) アルミニウム (b) 銅

図 5.12 半割せん断された製品



食い込み量: 27%



食い込み量: 24%



食い込み量: 65%
クリアランス: 0.02mm



食い込み量: 68%
クリアランス: 0.10mm

図 5.13 せん断途中の材料
銅, タイプ 1

(1) は 2 面を成形した場合であり, 良好な結果が得られている。同図 (2) は 4 面を成形したものであるが, 形状はゆがんでいる。これは 3 回目, 4 回目の加工をする際には図 5.8 に示すように材料と型の間に隙間が生じ, 加工中に材料が動いてしまうことによる。材料の動きを拘束できる形状の場合だけ, 次の加工を行うことが可能となり, それ以外の場合には製品形状に合わせた型を用意する必要があることがわかる。

5.3.3 両面同時せん断

両面同時せん断された製品を図 5.19 に示す。中央部幅や材料によらず, 三面が平面となった製品が得られている。せん断加工と鍛造加工を同時に行っている。この場合, 中央部分の製品高さが加工前よりも減少している。この傾向は中央部の厚さの狭い条件の方が大きく現れている。これは板材の場合と同じ傾向である。板材の場合にも板厚に比べ, 細い幅のパンチを用いて打抜きを行うとパンチの下に打ち抜かれる材料の幅はもとの板厚に

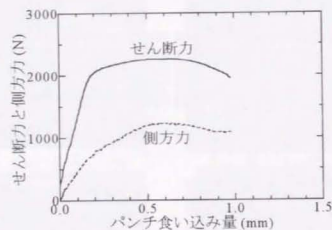
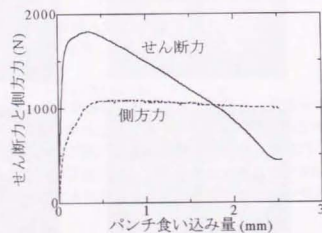


図 5.14 半割せん断中の加工力
(銅, クリアランス: 0)

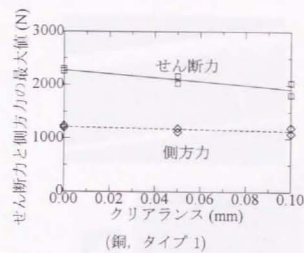


(1) 製品の断面

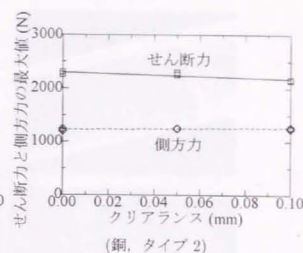


(2) 加工力

図 5.15 過大クリアランスの半割せん断で得られた特異形状製品例
(銅, クリアランス: 200 μ m)



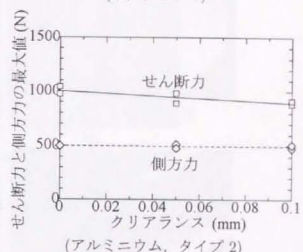
(銅, タイプ 1)



(銅, タイプ 2)



(アルミニウム, タイプ 1)



(アルミニウム, タイプ 2)

図 5.16 クリアランスと加工力の最大値との関係

比べて薄くなる。

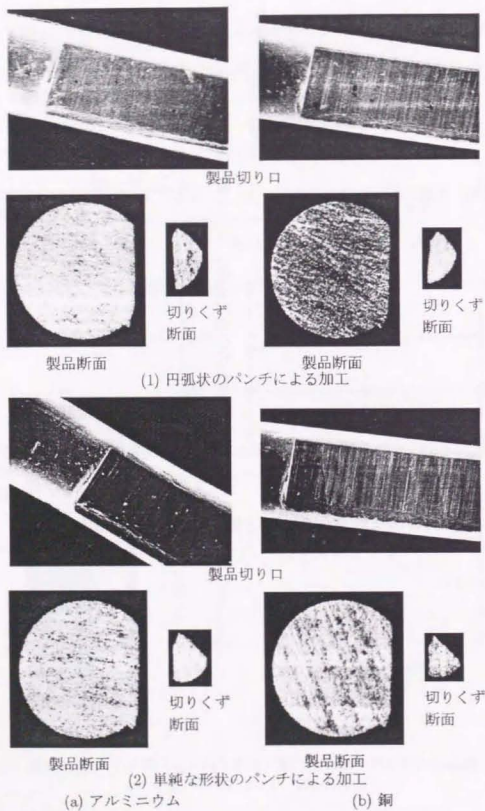


図 5.17 片面せん断された製品



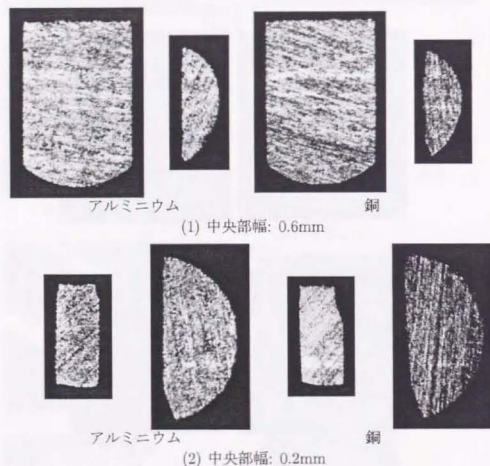


図 5.19 両面同時せん断された製品

5.4 本章のまとめ

せん断加工により三次元形状微細素子の成形するための素材として丸線材が適していると考え、丸線材のせん断特性を検討した。基本的な加工形態として半割せん断、片面せん断、両面同時せん断の3種類を設定し、せん断実験を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

1. クリアランスを小さくすることで良好な製品を得ることができることがわかった。
2. 板材のせん断に比較して側方力が大きいため、型の剛性には注意が必要であることがわかった。
3. 片面せん断では取り出し角度を設けた型が有効である。
4. 単純な形状のパンチによっても片面せん断は良好に行われる。
5. 複数回片面せん断を行うことにより多面せん断が可能である。ただし、二回目以降の加工が良好に行えるのは材料の形状が型により十分拘束できる場合に限られる。
6. 両面同時せん断により丸線材に三つの平面を同時に成形することが可能である。

材料に沿った型形状とし、クリアランスを小さくして、材料の動きを拘束することにより良好なせん断加工が可能となる。型と材料の間にすきまがある場合には型形状に材料を鍛造する要素が生じる。このことを考慮すると次のような工夫が考えられる。

1. 切りくず側については型形状を単純化し、型の製作を容易にする。
2. 鍛造の成分を積極的に活用し、一度に複雑な加工を行う。

第 6 章

塑性加工による三次元微細素子の成形

6.1 はじめに

前章ではせん断加工による三次元成形のための基礎実験として、単純な形状の丸線材せん断加工を行った。その結果、素材を十分に拘束すれば、良好な加工が可能であることが確認された。本章では複雑な形状の成形が可能であるかどうかを確認するため、単型により複雑形状の成形を試みる。鍛造加工の要素を取り入れることにより、一回の工程での複雑形状の成形を可能とする。最終製品は複数回の工程により成形する。工程が複数回になったとき、各工程間で位置を正確に合わせる必要がある。丸線材から三次元成形を行う際の位置合わせ方法についても検討する。複雑形状をもつ製品例として図 6.1 に示す医療用の微細鉗子を設定した。微細かつ複雑形状を持っており、いくつかの部品が組合わさって機

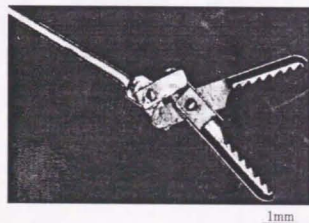


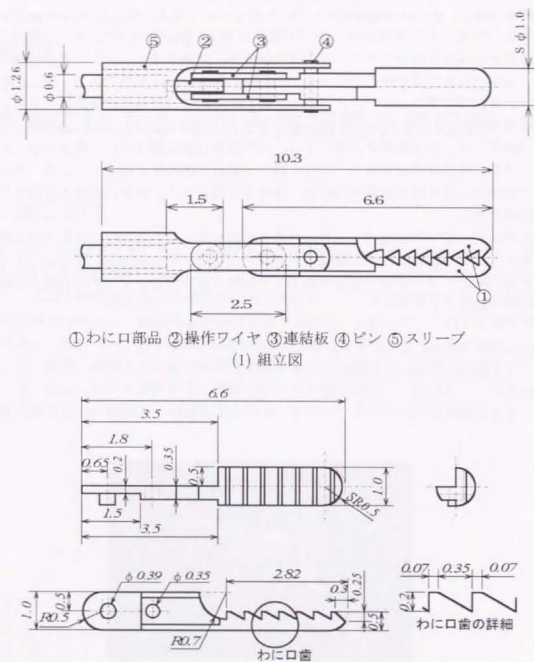
図 6.1 医療用微細鉗子 [三菱電線工業(株)資料]

能することなど検討すべき内容を含んだ成形対象と考えられるからである。

6.2 医用鉗子の構成と型成形による部品の製作

成形対象として設定した医療用微細鉗子について記述する。これは内視鏡に組み込まれ、病変患部の除去、あるいは検体採取に用いられるものである。図 6.2 に既存の鉗子の製作図面を示す。同図 (1) は組立図で、わに口部品 (2 個)、連結板 (2 枚)、ピン、操作ワイヤの 4 種 6 点から構成される。スリーブは内視鏡本体に付随するものとして製作対象から除外する。全体の大きさは外径 0.6~1mm、主要部全長は 10mm 程度である。閉じた状態を軸方向から見れば直径 1mm の円となる。同図 (2) はわに口部品の詳細図面である。現状では、切削 (旋削、フライス加工、ドリル加工など) と手仕上げによって成形されているが、相当の時間と高い加工技術を必要とする。同図相当の製品製作では、数十分以上の機械加工と、さらに手作業部分があり、経験を積んだ熟練作業者を必要としている。このような製品が型成形により製作可能となれば、製作は容易となり、成形に必要な費用や時間は大幅に削減できる。

成形可能性を鉗子の部品のうち最も複雑な形状を持っているわに口部品を例に取り考えてみると、わに口状の歯付けや輪郭の成形、穴あけなどせん断加工により成形できると考えられる。また、ダボを出す必要があるがこれは半抜きする、すなわち打抜きを途中で止めることで成形できる。



(2) わに口部品
図 6.2 鉗子の製作図面

6.3 成形金型と成形の手順

6.3.1 わに口部品の成形

わに口部品は丸線に2段の平坦部、丸穴、ダボ、歯がついている。このわに口部品を直径1mmの丸線材から以下に示す三回の工程で成形することとした。それぞれの工程の模式図を図6.3、図6.4、図6.5に示す。第一工程では図6.3の工具により2段の平坦部の

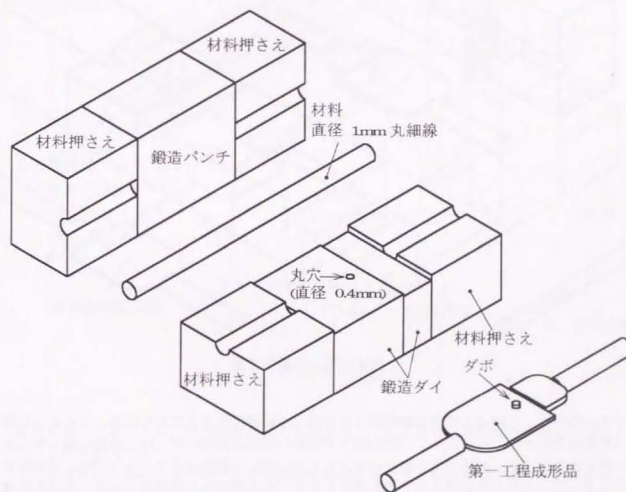


図 6.3 第一工程模式図

成形とダボ出しを同時に行う。平坦部の成形、だぼ出しともに鍛造加工により行う。加工後の平坦部の板厚は0.35mmと0.20mmである。この高さはパンチの食い込み量により調整することができる。下型には直径0.4mmの穴があけられており、圧縮時に材料が押し込まれダボが成形される。丸線材への平坦部の創成はせん断加工によっても可能である。また、せん断加工の方が加工力は小さくなる。それにもかかわらず、ここで鍛造加工を用い

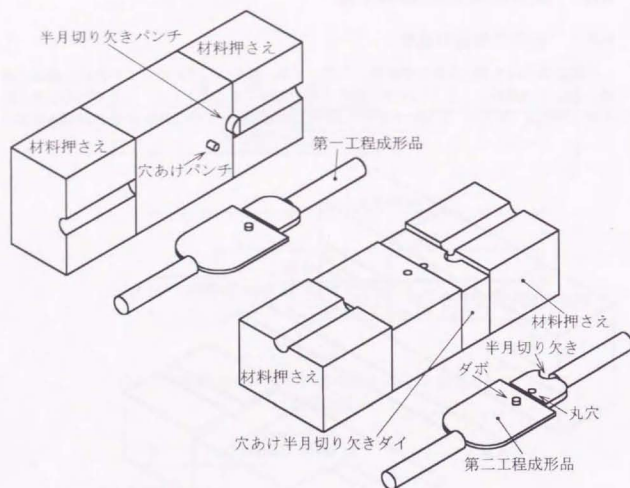


図 6.4 第二工程模式図

ているのは、このように平坦部創成とダボ出しが同時に行えるためである。このように型形状を工夫することにより、一度の加工で複数の成形を同時に行えば工程数を減らすことができる。また、鍛造では丸線材の径よりも広い幅の平坦部を得ることができ、成形対象によってはこの点を利用する手法も考えられる。せん断加工と鍛造加工は同一形式の装置により加工を行うことが可能であるので、両者を適切に使い分け、それぞれの特徴をいかすことが可能である。

ダイ側には材料が精度良くはまりこむ溝が設けられており、丸線材の軸に直角方向の材料位置決めを行うことができる。第二工程以降では、前加工の加工位置に対してさらに軸方向の位置決めが必要である。それには、この第一工程で成形されるダボを位置合わせの基準として用いる。丸線材では軸そのものを位置決め基準として用いることができる。さらに、軸に平行な方向の位置を決める基準の一つ用意（この例ではダボ）すれば位置を完全

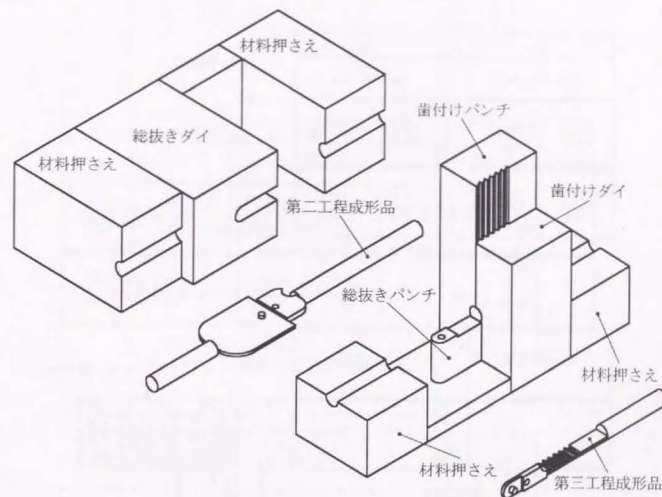


図 6.5 第三工程模式図

に合わせることができる。丸線材を素材とした場合、このように正確な位置決めを容易に行うことが可能である。

次に図 6.4 の工具により穴あけと半月部分の打抜きを行う。半月部分は鉗子がかみ合う際の干渉をさけるために設けられるものである。穴はわに口部品をピン組み付けするために必要となるもので穴の直径は 0.35mm である。

第三工程では、歯付け加工と、第一工程の鍛造によって広がった不要部分の切り落としをせん断加工で一度に行う。歯のような複雑形状の成形と輪郭打抜きが一工程で実現できる。

このようにせん断加工に一部鍛造加工を組み合わせることによりわに口部品のような複雑な形状の部品を三回の工程で加工することが可能である。使用した金型の概略を図 6.6 ~ 6.8 に示す。第三工程で用いた歯付け工具の概略を図 6.9 に、その写真を図 6.10 に示す。

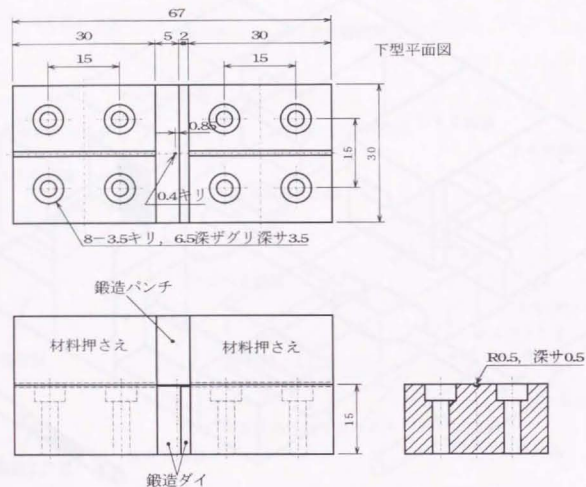


図 6.6 第一工程金型概略図

材料は直径 1 mm のアルミ丸線材を用いた。材料特性を表 6.1 に示す。

表 6.1 材料特性

材質	JIS 記号	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	加工硬化指数	塑性係数
アルミニウム	A1100W-O	95.5	35.5	0.2	15

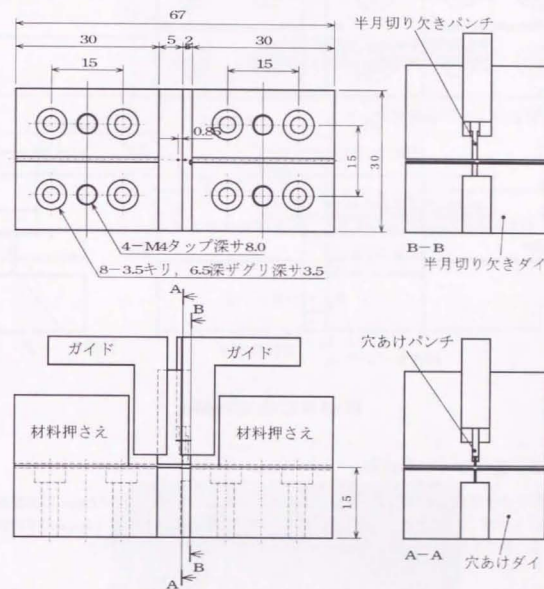


図 6.7 第二工程金型概略図

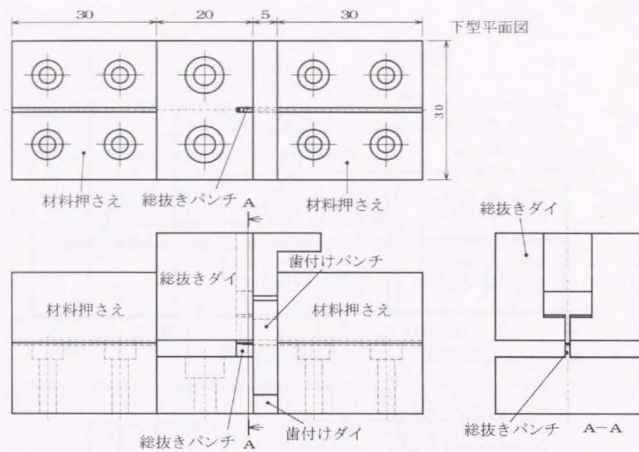


図 6.8 第三工程金型概略図

6.3.2 操作ワイヤの成形

操作ワイヤは鉗子を遠隔操作するためのものである。これは直径 0.6mm の丸線材から図 6.11 に示す二つの工程で成形した。第一工程では鍛造により厚さ 0.3mm の平坦部を成形する。第二工程では平坦部の輪郭打ち抜きとピン穴開けを同時に行う。

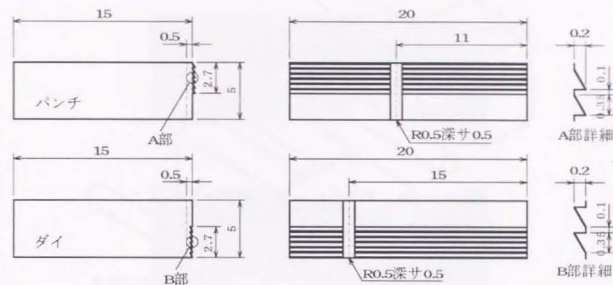


図 6.9 歯付け工具

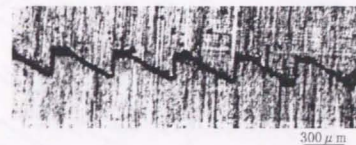


図 6.10 歯付け工具写真

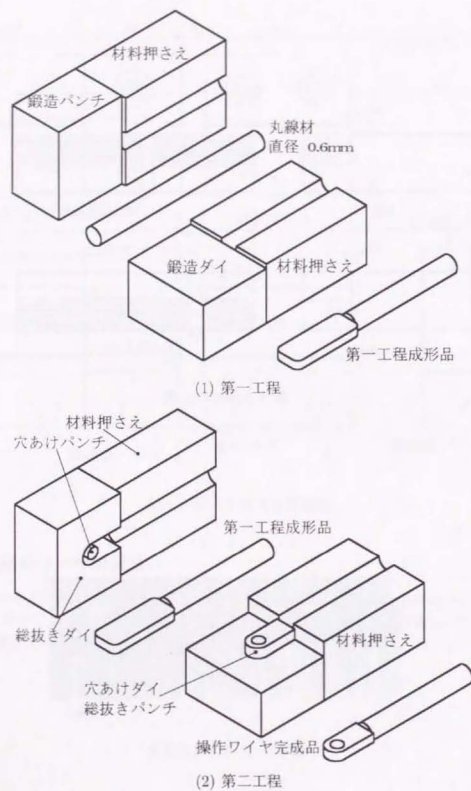
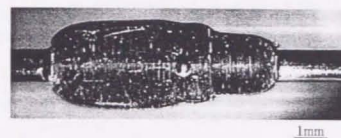


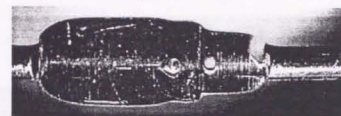
図 6.11 操作ワイヤの成形工程

6.4 成形結果

わに口部品の各工程の成形結果を図6.12に示す。図6.13に歯の部分の写真を示す、それ



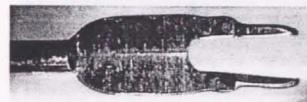
(1) 第一工程



(2) 第二工程



(3) 第三工程



(4) 第三工程抜きかす

図 6.12 わに口部品の成形結果

ぞれの工程で期待通り、良好な成形がなされ、満足すべき製品が得られた。図 6.14 に操作

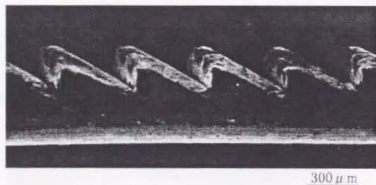


図 6.13 わに口部品の歯

ワイヤの成形結果を示す。図 6.15 に連結板の成形結果を示す。図 6.16 は二つのわに口部

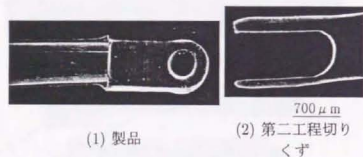


図 6.14 操作ワイヤの成形結果



図 6.15 連結板の成形結果

品を組み付けた状態を示す。図 6.17 はすべての部品を組み合せ鉗子とした状態を示す。開閉動作を含め最終製品は良好であった。このように複雑な三次元微細素子が型成形により成形できることが確認された。

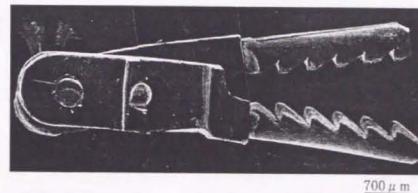


図 6.16 組み付けられた二つのわに口部品

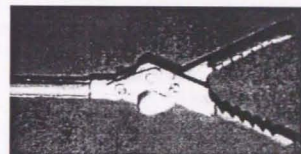


図 6.17 組み立てられた製品

6.5 本章のまとめ

型成形により微細三次元形状の成形が可能であることを確認するため成形実験を行った。成形対象としては、医用鉗子を設定した。これは微細かつ複雑形状をもつこと、いくつかの部品が組み合わさって機能を発揮することなど検討すべき内容を含んだ成形対象と考えられるからである。結果は以下のようにまとめられる。

1. 複雑な形状のわに口部品を三回の工程で成形できることを確認した。このように少ない工程でわに口部品のような複雑な形状を成形できたのは型形状の工夫による。特にせん断加工に一部鍛造加工を取り入れる方法が有効である。
2. 素材として丸線材を利用することにより各工程間の正確な位置合わせを容易に行い得ることを確認した。型に丸線材がちょうどまる溝を設けることにより軸に垂直な方向の位置を正確に合わせることができる。これは丸線材が軸まわりに対称な形状を持っているためである。第二工程以降では前加工された部分との位置合わせも考慮し、軸と平行な方向の位置をあわせる必要がある。このために第一工程で位置あわせ用の成形部分を一方所用意すればよい。本章における加工では製品形状に必要な部分位置合わせの基準として用いることが可能であった。
3. 成形された部品を用い組み上げた鉗子は機能的にも満足すべきものであった。

以上、せん断加工により微細三次元成形に必要な事項が明らかとなった。次章では本章のような加工が可能となる汎用の成形装置について検討する。

第7章

デスクトップサイズの三次元微細素子プレス装置

7.1 はじめに

前章ではプレス加工により三次元微細形状を成形できることを示した。ただし、前章のように専用の金型を用いる方法では、製品の形状を変更する場合、金型そのものをつくり直さなければならない。このように製品の形状を容易に変更できないのが型成形の欠点である。本章では製品形状を容易に変更できる加工装置について検討する。ここで提案する方式はタレットパンチプレス形の成形装置である。これは汎用工具による加工を材料上の異なる位置に順次行い、複雑形状を成形していくものである。ただし、三次元形状を成形する観点からすると既存装置は十分でなく、新たな機能を付加する必要がある。どのような機能が必要であるかを明確にし、その機能を加工装置に組み込む必要がある。ここで念頭におくべき事項は 1) 取り扱いが容易であること、2) 作業性がよいこと、3) 適当な大きさであることである。特に大きさに関しては机上にのる程度のもの、既存機械の感覚から言えばマイクロプレスといったものがよいと考えられる。以下にその加工装置の概要及びその装置による成形実験の結果について述べる。なお、成形実験では加工対象として前章と同様、医用微細鉗子のわに口部品をとりあげている。

7.2 成形装置の概念設計

製品形状を容易に変更できるプレスマシンにタレットパンチプレスがある。これは材料の加工位置をXYテーブルで指定し、さらに選択したパンチ・ダイで様々な形状の打抜きを行うものである。ただし、現状のタレットパンチプレスでは板材しか加工できないため、成形される製品形状は平面的なものに限られている。タレットパンチプレスの持っている製品形状の変更のしやすさをいかしつつ、いかにして三次元成形を行うかが本章の課題である。前章での三次元成形を参考に加工装置に必要な機能を考察してみる。

1. 三次元成形を行うためには厚みをもった素材を加工できなければならない。前章で明らかにした丸線材の利点を考えれば、ここでも同じ素材を選択するのが妥当であろう。したがって、成形装置に必要な機能の第一は丸線材を加工できることとなる。
2. 成形装置に必要な機能の第二は、工具に対する材料角度を任意に設定できることである。これは材料回転、または工具回転のいずれかによって実現できる。
3. 前章の成形実験によれば、加工速度の観点からせん断加工と鍛造加工を併用することが望ましいことがわかる。鍛造加工では下死点を指定する必要がある。例えば、材料を板状に成形する場合、下死点指定により任意厚さの成形が可能となる。同様にせん断工具による規定寸法のダゲ出し成形も可能となる。
4. タレットパンチプレス方式では、ある範囲内での製品仕様変更には最初設定した工具群で対応するが、大幅な仕様変更には工具交換を伴う。したがって、既存のタレットパンチプレスと同様、シャンク部形状を統一し、工具交換の便を図る必要がある。

以上の機能を搭載した成形装置で実現される加工例を図7.1に示す。図のようにせん断

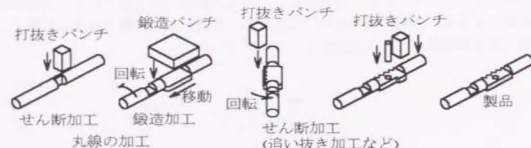


図7.1 基本的な加工手法例

加工と鍛造加工、さらに鍛造加工により板状に成形された部分の追加工等が可能である、さ

らに、半加工製品の回転機能により角度を変えた加工が可能である。また、追い抜き加工により工具には用意されていない形状の加工を行うこともできる。

机上に置ける大きさという方針で成形装置の試作を行う。

7.3 試作した成形装置

必要とされる機能を備えた成形装置を設計し、試作した。ただし、後に述べるように一部特殊な機能については専用の試験装置を製作し、その有効性を確認した。

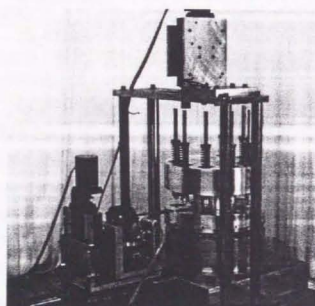
7.3.1 成形装置の概要

成形装置外観を図7.2に示す。装置は図7.3のように、工具を収納するタレット部、材料を保持し加工位置を定める移動ステージ、加圧力を与えるストライカ、及びこれらを制御するドライバとコンピュータで構成される。

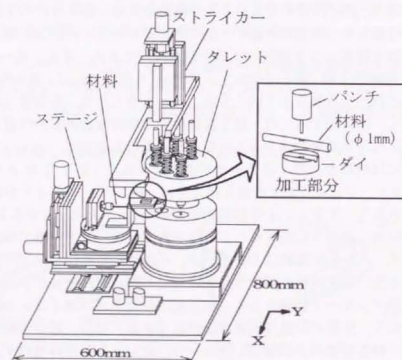
タレットには上部にパンチ、下部にダイが装着され、タレットが回転することによりパンチとダイが一緒に回転し、必要な工具軸を選定する。パンチはボールスプライン先端に標準化した継手を介し保持され、上下方向に直線運動ができる。本装置では工具を取り付けるための軸は10箇所用意してある。工具軸数や実際に取り付ける工具の数は、製品形状の複雑さや仕様変更の程度を考慮して決める必要がある。現在は前章において製作した鉗子部品の製作を想定して8種類の工具を取り付けてある。また、ビーム加工軸（例えばレーザ加工）、機械加工軸（例えば極細エンドミル）を用意すれば、部分的に複雑な加工・接合等をそれらに行わせる複合加工機とすることが可能となる。別装置との複合加工とする場合に比較して、複合加工機には、加工装置間での素材移送の際の位置合わせの必要がないこと、設置スペースが節約できることなどの利点がある[59]。

移動ステージには材料を支持するアームが取り付けられ、XYZ θ_1 ステージが備えられている。XYステージにより加工位置が指定され、 θ_1 ステージにより移動平面内で回転して角度が指定される。ステージには丸線素材保持チャックを回転させる θ_2 ステージが備えられており、材料は軸周りに回転することが可能である。加工位置、角度を指定する状況を図7.4に示す。タレット駆動はDDモータ、その他の駆動はACサーボモータ、及びステップモータを用いた。材料の移動や回転に対して働く力は十分小さいため、モータの駆動はすべてオープンループ制御としている。加圧を行うストライカーの駆動はステップモータを用いており、任意の位置に下死点を設定できる。なお、鍛造工程では加工力が大きくなり、装置各部の弾性変形により指定したパンチの食い込み量が得られず、大きな誤差を生じることが考えられる。この対策として、図7.5に示すようにパンチ部分に渦電流変位計を取り付け、パンチ変位の測定値を用いてパンチ食い込み量をフィードバック制御する方法を採用した。

すべてのモータの駆動はモータコントロールボードを介してコンピュータにより制御される。ストライカーの下死点を制御するための変位計データはADボードを介してコンピュ



(1) 外観



(2) 装置の模式図

図 7.2 成形装置

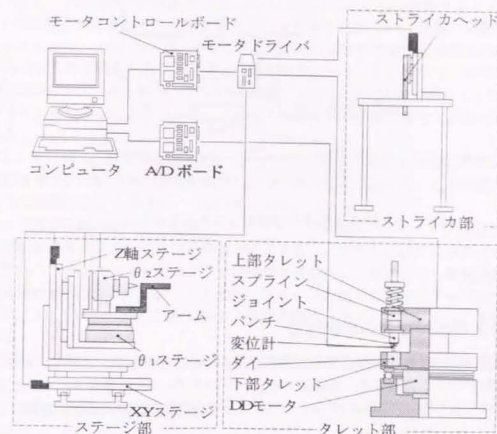


図 7.3 システムの詳細

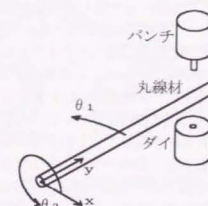


図 7.4 加工位置、角度指定状況

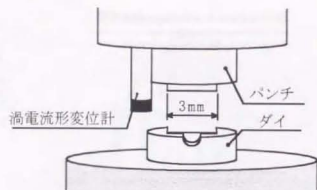


図 7.5 変位計の取り付けられたパンチ

タに取り込む。

7.3.2 工具回転機能の試験装置

上記装置では、材料と工具の間の角度を変えるために材料を回転させているが、これは工具を回転させても実現でき、実際にタレットパンチプレスでも採用されている[60]、[61]。工具を回転させた場合の加工の状況を図 7.6 に示す。以上二つの方法を比較検討してみる。

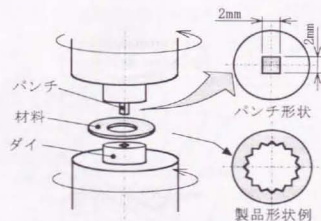


図 7.6 回転工具による加工

まず、材料を回転する方法では図 7.4 を見て分かるとおり回転角度を大きくしようとするとき方向に大きく移動しなければならない。これは精度の点からも望ましくないが、むしろ

る現実的には ϕ 方向の移動可能距離が限定され、回転可能な角度が制限されてしまう問題の方が大きい。試作装置の回転可能角度は ± 25 度である。これに比較すると工具(パンチとダイ)を回転する方法ならば回転角度が制限されることはない。反面、装置の構造が複雑になってしまう。工具の形状(対称性)によっては全く回転させる必要のない場合、また必要があってもある範囲の角度回転すれば済む場合もある。したがって、材料が回転可能な機構を組み込んだ上で、タレットの工具軸のうちいくつかを回転可能にしておけばよい。取り付ける工具の選定を行うが、特に必要性がある工具を回転可能な工具軸に設置するようにする。

ただし、既に紹介した成形装置のタレット部分には回転可能な工具軸は用意していない。工具回転機能だけは別に専用装置を製作し、その有効性を確認した。この装置は図 7.7 に示すように回転可能な工具軸を一つだけ備えたものである。

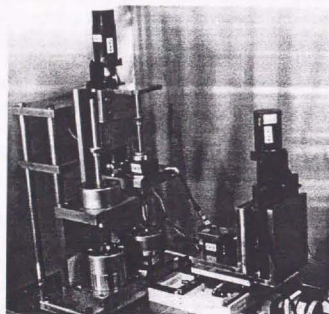
タレット部分に組み込むことを考えているため、工具軸はコンパクトな構造としてある。工具は回転機能を持たない工具軸と共通で使用することを考え、取り付け部分の形状を共通としてある。パンチはボールスプライン先端に標準化した継手を介し保持され、上下方向に直線運動ができる。パンチ、ダイともにプッシュを介して回転ステージに取り付けられており、360 度回転することができる。装置の構成は図 7.8 に示すように前記装置と同様である。

回転可能な工具軸をタレットに組み込んだ成形装置の概念図を図 7.9 に示す。

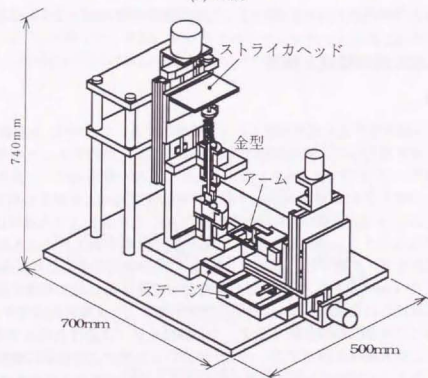
7.3.3 加工工具の種類と構造

(1) 工具種類

本システムは様々な形状を成形できることを目的とする。ここでは、丸線素材直径を 1mm 一定とし、工具を選択した。成形実験では、主に口部品を成形することを考え、これに適合する工具選択となっている。表 7.1 に用意した工具の一覧を示す。工具形状はダイの形状で代表する。図 7.10 に直径 0.35mm 丸線丸穴打抜き工具による加工の模式図を示す。ダイには半径 0.5mm の半円柱状の溝が設けられている。この溝により丸線材は固定され、正確な位置に加工を行うことが可能となる。図 7.11 に丸線半割工具による加工の模式図を示す。この場合もダイに設けられた半径 0.5mm の半円柱状の溝により丸線材を固定する。図 7.12 に丸線歯付け工具による加工の模式図を示す。この場合もダイに設けられた半径 0.5mm の半円柱状の溝により丸線材を固定する。図 7.13 に丸線鍛造工具による加工の模式図を示す。この場合もダイに設けられた半径 0.5mm の半円柱状の溝により丸線材を固定する。パンチの食い込み量により板状に成形される部分の厚さを調節することが可能である。板状に成形される部分の軸方向の長さは 3mm である。図 7.14 に直径 0.3mm 丸穴打抜き工具による加工の模式図を示す。図 7.15 に直径 0.5mm 丸穴打抜き工具による加工の模式図を示す。これら二つの工具は板状に成形された部分に丸穴をあける。図 7.16 に 0.5mm 角の穴打抜き工具による加工の模式図を示す。図 7.17 に 0.5mm \times 1mm の角穴打抜き工具による加工の模式図を示す。これら二つの工具は板状に成



(1) 外観



(2) 模式図

図 7.7 工具回転機能の試験装置

表 7.1 用意した工具の一覧 (ダイの形状で代表)

汎用工具			
丸線半割工具		丸線打抜き工具	
平坦部打抜き工具			
専用工具			
丸線歯付け工具		輪郭成形用工具	
丸線鍛造工具			

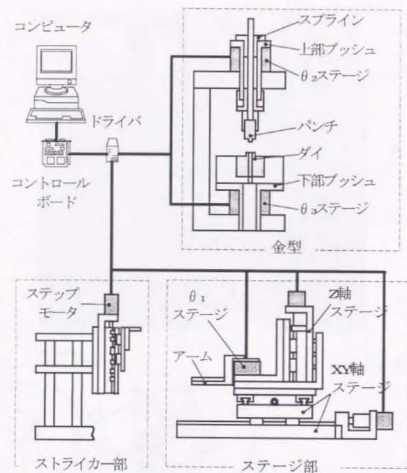


図 7.8 工具回転機能試験装置の構成

形成された部分に角穴をあける。図 7.18 に輪郭成形用工具による加工の模式図を示す。板状に成形された部分の輪郭を成形する。材料はまず平板式板材とよび固定されたパンチにより打ち抜かれる。パンチ部分の大きさは $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ である。以上見てきたように工具は丸線を描き加工するものとし、一旦板状に成形してから加工を行うもの二種類に分類できる。丸線を描く加工のために用いるダイには、材料が精度良くはまり込む溝が設けられており、材料の位置と向きを正確に決めることができる。ただし、このため工具に対する材料の移動平面内での角度は変えることはできない。したがって、回転可能な工具では板状の素材を成形することとなる。

図 7.9 回転可能な工具軸を備えた成形装置



図 7.10 直径 0.35mm 丸線丸穴打抜き工具による加工の模式図

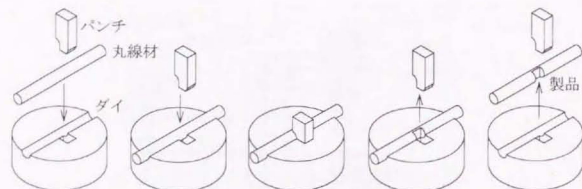


図 7.11 丸線半割工具による加工の模式図

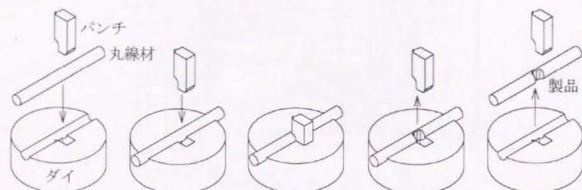


図 7.12 丸線歯付け工具による加工の模式図

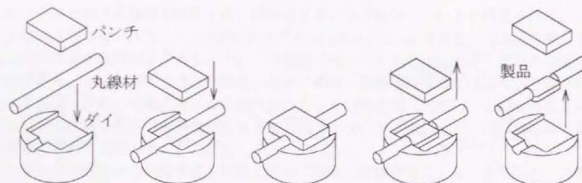


図 7.13 丸線鍛造工具による加工の模式図

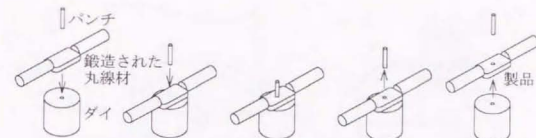


図 7.14 直径 0.3mm 丸穴打抜き工具による加工の模式図

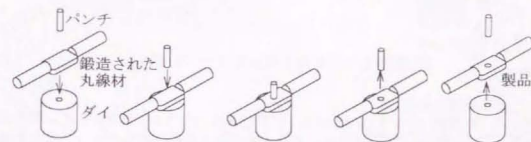


図 7.15 直径 0.5mm 丸穴打抜き工具による加工の模式図

け工具は専用工具ということになるが、例えば、歯付けピッチは、同一工具でも加工位置指定で任意に変更できる。

連続して加工を行うためには、打抜き後、パンチに食い付いた材料を取りはらわねばならない。このために打抜き工具にはストリッパが取り付けられている。また、汎用工具の多くは軸対称な形状を持っている。2, 3 章における結果から考えると、良好な加工を行うためにも板押さえを用いることは必要なことである。

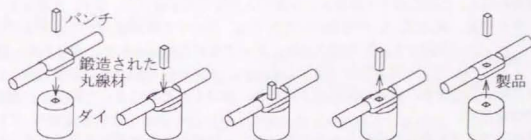


図 7.16 0.5mm 角の穴打抜き工具による加工の模式図

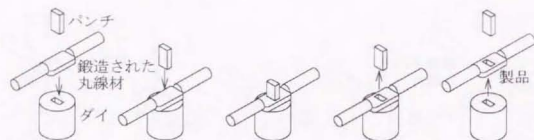


図 7.17 0.5mm × 1mm の角穴打抜き工具による加工の模式図

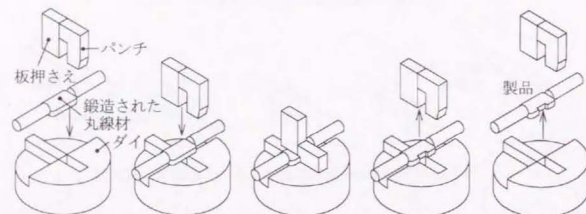


図 7.18 輪郭成形用工具による加工の模式図

(2) 工具構造

プレス加工では加工精度を保つためには材料と工具が強固に固定されなければならない。この点から、単一型成形の場合と同様、不均等な側方力が作用する場合の工具と材料の変形が問題となる。細いパンチでは、側方力が小さくても曲がりを生じ、ダイとの接触や欠損・異常摩耗を招く。これに対する対策として次のような工夫を施した。まず、丸線材をそのまま加工する場合、例えば、V 字形歯付け工具では、刃のくさび状部分から逆方向に側方力が働く。パンチに作用する不均等側方力は、ダイで受ける構造とした。すなわち、図 7.19 に示すようにパンチ切れ刃が材料に接する以前に、ダイが反対側パンチ面を拘束し、パンチ曲げ変形を防止する。材料の位置はダイの側に設けられた溝によって拘束し、側方力による変形を防ぐ。

一旦鍛造加工され板状に成形された材料に対しては異なった対策が必要である。例えば輪郭成形工具では切れ刃から逆方向に側方力が働く。パンチの変形は丸線加工用の工具と同じようにダイで不均等側方力を受ける方法で対応できる。材料はその形状が丸線とは異

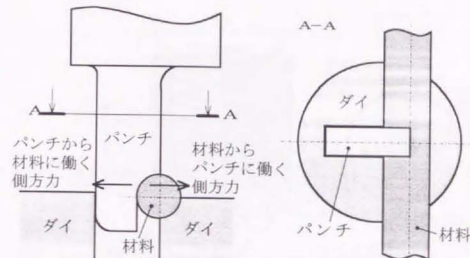


図 7.19 パンチに作用する側方力に対する対策

なるため溝による拘束はできない。丸線材はアームの溝にはまっているため、ある程度、変形は拘束されている。また、鍛造工具以外にはパンチに食い込んだ材料を取り払うためのストリッパが設けられており、これも材料変形を拘束する。しかし、片側をせん断する場合、側方力は大きく、これのみでは十分ではない。そこでパンチに組み込まれた板押さえで材料を拘束した。例として平坦部の輪郭成形用の工具を示したのが図 7.20 である。パンチ切れ刃が材料に接する前にパンチに組み込まれたバネ式板押さえが材料の動きを拘束する。バネ剛性、及びバネ上部のネジ調整により板押さえ力を調節できる。

その他の部分の変形は加工力が小さいため、問題とならない。例えば、パンチはボールスプライン先端に標準化した継手を介し保持され、上下方向に直線運動ができる。この場合、スプラインの直線運動精度と曲げ剛性が重要である。加工変位内での振れ精度は約 $3\mu\text{m}$ である。剛性は側方力に対抗するものであるが、例えば、歯付け工具では、側方力による軸先端変位は $2\mu\text{m}$ 以下となる。なお、せん断工具のクリアランスはすべて $5\sim 10\mu\text{m}$ である。

7.3.4 材料の加工位置

材料の加工位置は、材料移動ステージに座標系を定め、ステージアームの移動により指定している。このステージによる位置決め精度を検討してみる。まず、各駆動系の公称精度を表 7.2 に示す。

図 7.21 の駆動座標系を参照すれば加工位置座標は次式のようになる。

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta_1 - r \sin \phi \cos \theta_1 - y \sin \theta_1 - R \sin \theta_1 + r \sin \theta_1 - r \cos \phi \sin \theta_1 \\ y' &= x \sin \theta_1 - r \sin \phi \sin \theta_1 - y \cos \theta_1 - R \cos \theta_1 + r \cos \theta_1 - r \cos \phi \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (7.1)$$

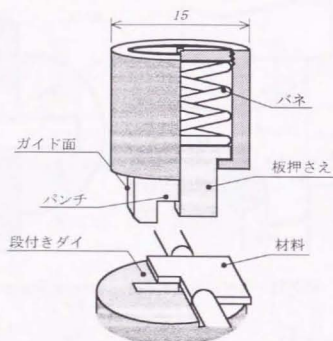


図 7.20 板押さえを組み込んだパンチ

ここで

- x : Xステージ移動量
- y : Yステージ移動量
- θ_1 : θ_1 ステージ回転角
- ϕ : タレット回転角
- R : アーム長さ(140mm)
- r : タレット回転中心から加工点までの長さ(115mm)

ここで、加工位置の座標は図 7.22 に示すように材料上での座標であり、アーム長手方向を y' 座標、これに直行する方向を x' 座標としている。材料の移動はオープンループ制御となっているため、繰り返し精度によって規定される位置決め誤差は避けられない、この量を表 7.2 の仕様から求めた結果を表 7.3 に示す。

表 7.3 には x', y' 軸上での値を示している。

同様に工具回転機能試験装置で用いている各駆動系の公称精度を表 7.4 に、求められる繰り返し位置決め精度を表 7.5 に示す。

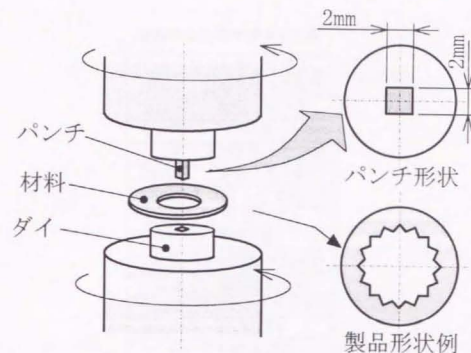


図 7.21 駆動座標系

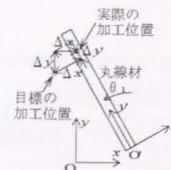


図 7.22 加工位置の座標

表 7.2 各駆動系の公称精度

DD モータ (タレット)	
位置決め絶対精度	0.008°
繰り返し精度	0.0006°
θ_1 ステージ	
位置決め絶対精度	0.03°
繰り返し精度	0.005°
バックラッシュ	0.005°
平行度	20 μ m
θ_2 ステージ	
位置決め絶対精度	0.05°
繰り返し精度	0.01°
バックラッシュ	0.01°
平行度	50 μ m
XY, Z 軸ステージ	
位置決め絶対精度	15 μ m
繰り返し精度	2 μ m
バックラッシュ	3 μ m

表 7.3 位置決め精度

	繰り返し精度 (μ m)
x' 方向	12
y' 方向	2

表 7.4 工具回転機能試験装置の各駆動系の公称精度

XY, Z 軸ステージ	
位置決め絶対精度	30 μ m
繰り返し精度	3 μ m
バックラッシュ	5 μ m
平行度	25 μ m
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ステージ	
位置決め絶対精度	0.05°
繰り返し精度	0.01°
バックラッシュ	0.01°
平行度	50 μ m

表 7.5 工具回転機能試験装置の繰り返し位置決め精度

	繰り返し精度 (μ m)
x' 方向	13
y' 方向	13

7.4 成形実験の結果

わに口部品の成形実験、及び精度確認のための基礎実験を行った。なお、成形素材は直径1mmのアルミニウム丸線である。工具回転機能試験装置では0.3mm厚のアルミ1/4H材を用い、成形実験を行った。結果を以下に示す。

7.4.1 わに口部品の成形実験

前章で作成した鋸子主要部品であるわに口部品の成形を試みた。工具の都合で若干形状は異なる。成形手順を図7.23に示す。



図 7.23 わに口部品の成形手順

1. 専用工具により歯付けを行う。一回の打抜き加工で歯を一つ成形する。これを五回繰り返すことにより五つの歯を所定の間隔で成形する。いわゆる追い抜き加工である。
2. 平坦部の成形を鍛造により行う。同一工具で圧縮量を変えて二度加工を行うことにより二段の平坦部を成形する。
3. 平坦部に直径0.3mmの穴をあける。

4. 平坦部にダボを成形する。直径0.3mmの打抜き工具により半抜き加工して一段目のダボを成形する。同じ位置に直径0.5mmの打抜き工具により半抜き加工して二段目のダボを成形する。
5. 最後に周囲の輪郭のトリミングと切り落としを行う。汎用の輪郭成形用工具と角形打抜き工具による追い抜き加工で行う。なお、前の加工の状態では成形されたダボが下方向に飛び出しており本加工を阻害するので、予め材料を軸周りに180度回転しておく。

製品例を図7.24に示す。

7.4.2 製品精度

図7.24に示す製品寸法精度誤差は、設定寸法に対し、丸穴内径15 μ m、ダボ外径16 μ m、丸穴-ダボ間寸法は20 μ m、歯ピッチは6 μ mとなり、組立精度等から見て一応満足できる数値である。しかし、さらに一層の微細化・高精度化を目指す努力が必要と考えられる。

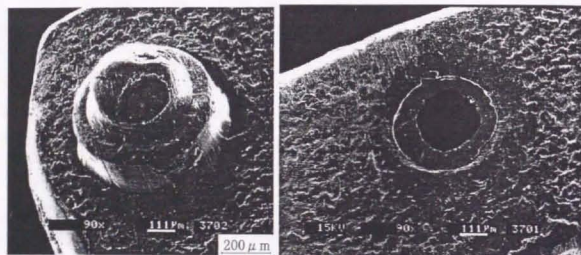
また、これとは別に繰り返し精度の検査を行った。この結果x'方向が4 μ m、y'方向が2 μ mであり、表7.3に示した値を満足していることが確認された。

鍛造加工では加工力による各部の弾性変形を考慮して、パンチ食い込み量の実測値をもとにパンチ食い込み量をフィードバック制御している。板厚の設定値に対して実際にどれだけの厚さに成形されるかをフィードバック制御した場合としない場合（オープンループ制御）とを比較して図7.25に示す。図から見て分かるようにフィードバック制御を行わない場合には、大きな誤差を生じる。誤差はH材の方が大きく、食い込み量の設定値の増加とともに増えている。これに対し、フィードバック制御を行った場合、誤差をすべての条件に対して $\pm 5\mu$ m以下に抑えられている。

図7.26に板押さえの組み込み効果を示す。板押さえを用いない場合、材料が工具から逃げるように変形するため、切り口面は傾いてしまう。またバリも相当大きい。これに対し、板押さえを用いることでこれらの欠陥が著しく改善されている。

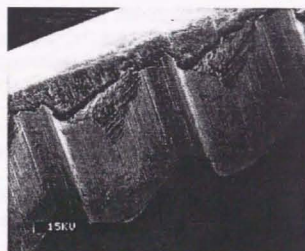
7.4.3 回転工具を使った成形実験

ここでは板材に対する成形実験の結果を示している。成形はすべて2mm角の工具で行った。それぞれの形状の成形手順と成形結果を図7.27、7.28に示す。図7.27(a)は45度回転させて同一位置を二度打ち抜くことにより星形の成形を行う。そして、15度間隔で24回打ち抜くことにより外側の円周を打ち抜く。図7.27(b)は追い抜きにより長方形の打抜きを行い、その後三種類の角度の歯を打ち抜く。図7.28は曲線の打抜きを行ったものである。



(1) ダボ

(2) 穴



(3) 歯

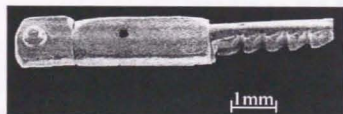


図 7.24 成形製品例

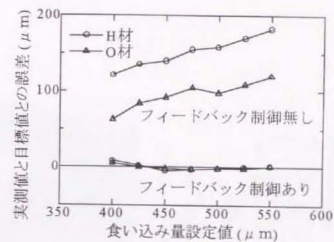
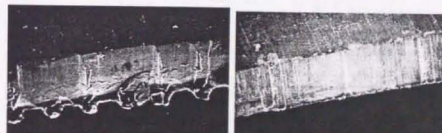


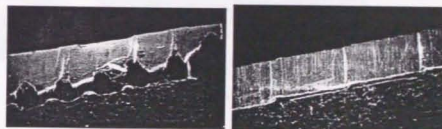
図 7.25 フィードバック制御の効果



(1) 断面



(2) だれ側から見た切り口面

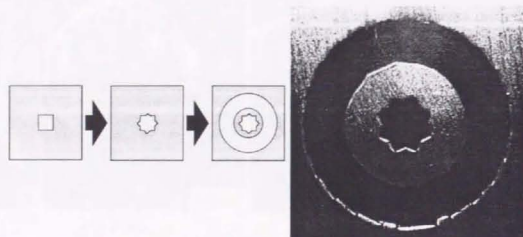


(3) バリ側から見た切り口面

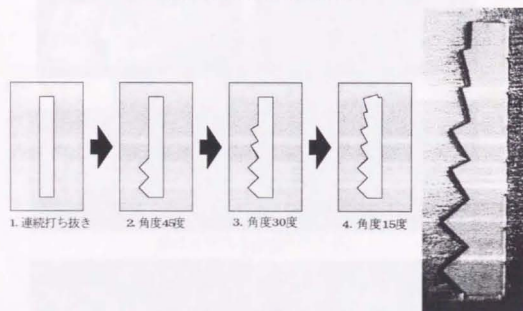
(a) 板押さえなし

(b) 板押さえあり

図 7.26 板押さえの効果



(a) 星形と円周形状の打抜き



(b) 三種類の角度の歯形の打抜き

図 7.27 回転可能な工具による成形手法と製品例 (1)

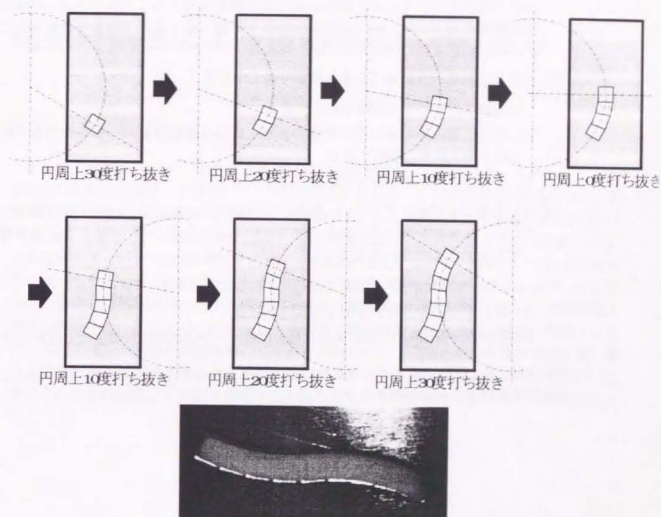


図 7.28 回転可能な工具による成形手法と製品例 (2)

7.5 本章のまとめ

三次元成形が可能な汎用の加工装置について検討した。

1. 加工装置を製作した。加工装置の概要は以下のようなものである。

- (a) 製品形状を容易に変更できるタレットパンチプレス形である。加工工程をソフト上で変更することにより製品形状はある程度変更することができる。大幅な製品形状の変更に対しては工具交換により対応する。工具交換を容易にするため、工具の取り付け部分は標準化してある。
- (b) 三次元成形を行うために必要な機能を備えている。
 - i. 成形素材として丸線材を加工できる。
 - ii. 加工位置決めが豊富である。材料が移動平面内で回転できる。材料が軸まわりに回転できる。
 - iii. パンチの下死点を指定できる。
- (c) 良好な加工を可能とするため、材料と工具の変形を抑えるための工夫が施されている。丸線材の加工では板材の加工に比べ側方が大きい。このことを考慮して具体的に用いた手法は以下のようなものである。
 - i. パンチの動きがダイによりガイドされるようにする。
 - ii. 材料がちょうどはまる溝を工具に設ける。
 - iii. 板押さえを用いる。特に必要な場合にはパンチに専用の板押さえを組み込む。

2. 成形実験を行い、本装置により良好な成形が可能であることを確認した。製品例として医用微細鉗子のわに口部品をとりあげた。

第 8 章

磁気研磨法による微細部品のバリ取り

8.1 はじめに

これまでにプレス加工により精密微細部品が成形できることを示した。しかし、この方法を用いて部品を成形した場合、バリの発生が避けられず、その除去方法が問題となる。本章ではバリを除去するための方法について検討する。ここで考えている製品の大きさは 0.1 ～ 数 mm と小さく、局所的に見れば数十 μm の成形部分もある複雑な三次元形状である。このため本体の形状を損なわずにバリのみを除去することは非常に難しい。このような対象に対して有効なバリ取り方法として、ここでは磁気研磨法を取り上げる。まず、小さなものに対する磁気研磨法の研磨特性を調べるために基本的な研磨実験を行い、これを基に適切な研磨条件、さらには、バリ取りを実行する際に考慮すべき事項を明確にする。そして、形状の異なる複数の微細試料のバリ取り実験を行い、磁気研磨法の適用の妥当性を調べることにする。後に述べるが、この方法によるバリ取りが可能であれば、前章において開発された成形装置にバリ取り機能を組み込むことが可能であり、結果として加工速度が向上する。

8.2 磁気研磨法

磁気研磨法とは粒状の磁性砥粒を用い磁場を利用して各種部品の精密表面仕上げとバリ取り・エッジ仕上げを行う加工法である。ここでは磁気研磨法の中でも対向磁極を用いた方法を例に取り説明する。対向磁極形の磁気研磨装置により試料が加工される様子を図8.1に示す。磁性研磨材は対向する2つの磁極の間に生じた磁場中に充てんされ、試料はその中

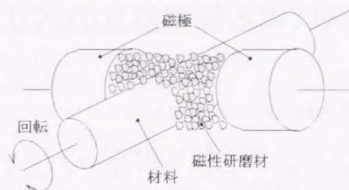


図 8.1 対向磁極形磁気研磨法の原理

に挿入される、すると試料と研磨材の間には互いを押し合う力が生じる。ここで試料を磁性研磨材に対して運動させると研磨材により試料は研磨される。磁気研磨法はロシア、ブルガリア、ドイツなどで活発に研究が行われてきたものであり [62]、国内では進村らにより積極的な研究が継続して行われている [63]、また、新たな各種研磨材による試みが安斎・中川らによって行われている [64]、バリ取りの観点からは進村らが、最近では安斎・中川らが微細部品のバリ取り [65]、さらに同氏はインラインでバリ取りできる装置の試作を行っている [66]、磁気研磨法を用いれば試料と研磨装置との間に数mmのすき間をあけることができる。この点から磁気研磨法は複雑な形状をもった試料のバリ取りに有効であるとされている。ここではさらに試料自体の大きさも小さく、三次元の複雑な形状を持つ対象に対する磁気研磨法のバリ取り性能を調べる。また、磁気研磨法で用いられる磁性研磨材にスチールファイバーを添加することによりその研磨能率が向上することが報告されている [67]、そこでここでも磁性研磨材にスチールファイバーの混入を試み、その効果の有無を調べる。

8.3 実験装置

8.3.1 実験装置

図8.2に実験装置を示す。材料はドリルチャックに保持され、スピンドルを介し変速モー

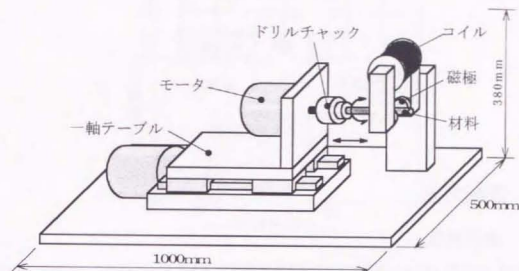


図 8.2 実験装置

タで回転される。その最高速度は 5000rpm である。これらは一軸テーブルの上に固定され、軸方向に往復動できる。ドリルチャックに取り付けられた試料は図8.3に示した磁気回路の磁極の間で軸周りの回転と軸方向の往復運動をする。

8.3.2 研磨材

磁性研磨材は軟鉄粉 (SS400, 100 μ m)、ダイヤモンド砥粒 (粒径: 0.5~30 μ m)、スチールファイバー (ϕ 50 μ m, 長さ: 2.7mm) を混合して用いる。混合方法は乳鉢の中で混ぜ合わせるという最も簡便な方法を採用した。混合時間は約 5 分一定とした。過去の研究成果を参考にして混合比は重量比で鉄粉が 80%、ダイヤモンド砥粒が 10%、スチールファイバーが 10% を基本構成とした。検討因子は、1) 混合時の加圧力、2) 研磨材に混合されるダイヤモンドの粒径、3) 磁束密度、4) 研磨材にスチールファイバーを混入することの効果である。

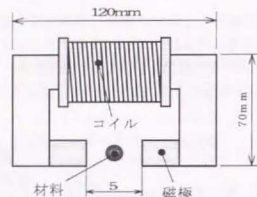


図 8.3 磁気回路

8.4 実験方法

8.4.1 基礎実験

試料としてまず、直径1mmの丸線の研磨実験を行った。材料はアルミニウム (A1100W)、銅 (C1100W)、ステンレス (SUS304) の3種類を用意した。研磨能力は単位時間当たりに研磨された総重量で評価した。次に2mm角の銅の角材の研磨実験を行い、角部の研磨特性について検討した。

8.4.2 バリ取り実験

バリ取り用の試料として医用鋏の部品などを用意した。ここに示すのは切削によって製作した連結板 (SUS304)、わに口部品 (A1100W)、そしてプレス加工によって製作したわに口部品 (A1100W) である。バリ除去能力は、光学顕微鏡と電子顕微鏡により観察して評価した。なお、バリ取り実験は後処理を考慮してすべて無潤滑で行った。

8.5 実験結果と考察

8.5.1 基礎実験

図8.4に研磨時間と研磨除去量との関係を示す。今回の研磨条件の範囲内ではいずれの材

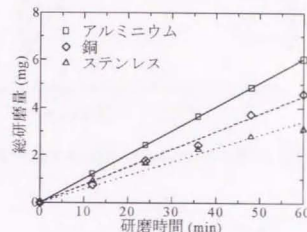


図 8.4 研磨時間と研磨量との関係

料についても総研磨量 (累積研磨量) は研磨時間に比例するので、以後、単位時間当たりの研磨量 (研磨速度) で研磨能力を評価する。

図8.5にダイヤモンド粒径を変えた場合の研磨特性の変化を示す。図から分かるようにダイヤモンド粒径が12~25 μ mの場合、最も研磨速度が高いことが分かる。この理由は粒径と切れ刃数の兼ね合いによると思われる。一般に大きな砥粒は大きな除去能力を持つが、切れ刃密度は小さい。他方、小さな砥粒は切れ刃密度は高いが、除去能力は小さい。こうしたことから最適な値が生じたものと考えられる。今後はすべてこの粒径のダイヤモンド砥粒を用いて実験を行う。

次に研磨材混合時の加圧力の影響を図8.6に示す。この図から適切な加圧力が存在することがわかる。

励磁電流の大きさを変え、磁束密度の影響を調べた。結果を図8.7に示す。磁束密度はガウスメーターによる実測値である。磁束密度の低い領域では磁束密度の増加とともに研磨速度は増加していくが、さらに磁束密度を高くしていくと研磨速度は一定値へと飽和していく。次にスチールファイバー添加の効果を図8.8に示す。図の例ではスチールファイバー添加により研磨能力が約3倍向上していることが分かる。

ここまでの結果からダイヤモンド砥粒の適切な粒径が選定され、またスチールファイバーを添加することにより研磨能力が向上することが明らかとなった。このように選択された研磨条件下で鋭い角部 (角の初期丸み: 5 μ m以下) を持つ角材の研磨実験を行い特性を検討

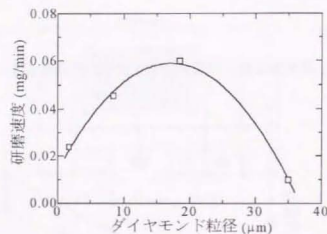


図 8.5 研磨能力及ばすダイヤモンド粒径の影響

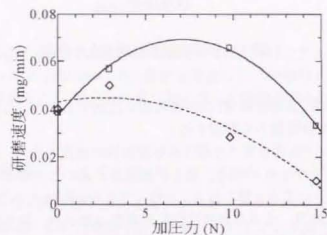


図 8.6 研磨能力及ばす加圧力の影響

した。条件として角材を一方向のみに回転させた場合と両方向に回転させた場合との比較を行った。図 8.9 は角部の電子顕微鏡写真である。この図から一方向のみに回転させて研磨した場合、図の上側の面に偏った研磨が行われていることがわかる。断面の輪郭の形状を観察してみると図 8.10 のように確かに非対称となっている。これに対し両方向に回転させた場合には均等な研磨が行われており、特定の方向や部分に偏らず均等な研磨特性を得るには、研磨材に対する試料の運動が一方向に偏ってはいけなことが分かる。以下のバリ取り実験では回転方向を両方向に設定した。

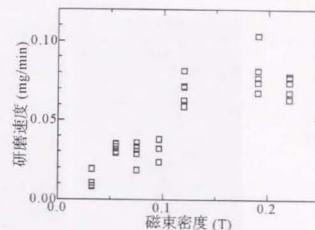


図 8.7 研磨能力及ばす磁束密度の影響

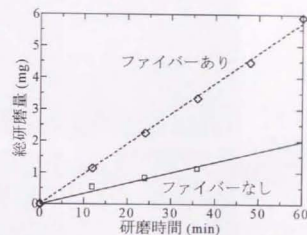
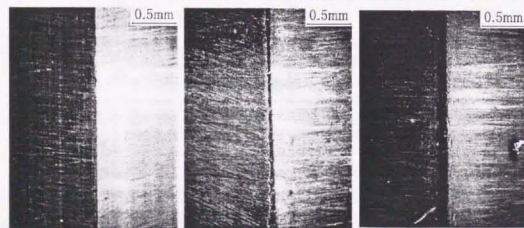
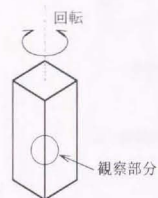


図 8.8 スチールファイバー混入の効果

8.5.2 バリ取り実験

3 種類の試料に対するバリ取り実験の結果を図 8.11～図 8.13 に示す。それぞれ加工方法、製品形状、材料の異なる試料である。それぞれ研磨時間は異なるが、どの試料のバリも良好に除去されている。しかも元々の形状はほとんど損なわれていない。アルミニウムのような柔らかい材料に対しては研磨材が試料に食いつくことが心配されたが、今回実験を行った条件ではそのような問題は生じていない。

さて、本章で利用した磁気研磨法によるバリ取りは、原理的には磁性研磨材の中で製品

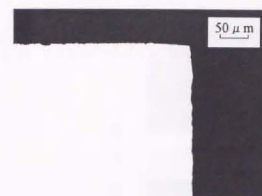


(1) 研磨前

(2) 研磨後
一方向回転
上から見て左回り

(3) 研磨後
両方向回転

図 8.9 角材の研磨実験



(1) 研磨前



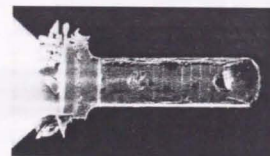
(2) 研磨後
一方向回転



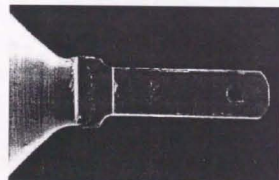
(3) 研磨後
両方向回転

図 8.10 研磨された角材の輪郭

が回転しながら軸方向に移動すればよい。前章において開発された成形装置は材料を回転させる機能も移動させる機能も既に持っている。材料が移動可能な位置に磁気回路を設置すれば、材料がステージ上に固定されたままの状態でもバリ取りを行うことが可能である。磁気回路そのものは極めて簡単なものであり、成形装置に組み込むことは十分可能であると考えられる。こうしたことより、将来的にはバリ取り工程も含めて連続成形の可能な、加工速度の速い成形装置が実現できると考えられる。



(1) バリ取り前



(2) バリ取り後

図 8.11 切削加工されたステンレス製品のバリ取り実験結果
連結板

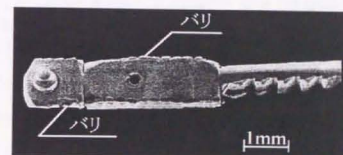


(1) バリ取り前

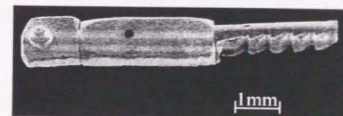


(2) バリ取り後

図 8.12 切削加工されたアルミニウム製品のバリ取り実験結果



(1) バリ取り前



(2) バリ取り後

図 8.13 プレス加工製品のバリ取り実験結果
わに口部品 (アルミニウム)

8.6 本章のまとめ

複雑な三次元形状をもつ微細部品に発生したバリを除去するための方法として磁気研磨法の適用を考え、研磨実験、バリ取り実験を行った。

1. 基礎的研磨特性を調べるため、基本的な研磨実験を行った。

- (a) 丸線材の研磨実験を行った結果、以下のことが明らかになった。
 - i. 研磨速度が最大となるダイヤモンド粒径があり、本実験では $12\mu\text{m}$ から $25\mu\text{m}$ であった。
 - ii. スチールファイバーを混入することにより研磨速度が向上する。
- (b) 角材の研磨実験を行った結果、以下のことが明らかになった。
 - i. 角部の仕上げを良好に行うためには、材料の回転方向を偏らせてはならない。

2. 医用鉗子の部品を例としてバリ取り実験を行った結果、良好なバリ除去が可能であることが明らかになった。

複雑な三次元形状を持つ微細部品のバリ取り手法として磁気研磨法が有効であることが明らかになった。また、本手法によるバリ取りは前章までに開発された成形装置に組み込むことが可能と考えられ、バリ取り工程も含めた極めて加工速度の速い成形装置の実現を可能とするものである。

第9章

工具の耐久性向上

9.1 はじめに

微細三次元形状の成形にせん断加工を用いることの利点として考えられることの中に次の二点がある。

- 1. 安定した成形が可能。
- 2. 製品が安い。

これらの利点は、工具が過酷な繰り返し加工に耐え、製品の高精度が長期にわたって維持されることにより成立する。特に微細形状を成形するために用いられる微細工具は製作が困難で、高価なものであるためこの点が重要となってくる。この目的を達成するためには

- 1. 高精度な金型を製作すること。
- 2. 製作時の精度を長期にわたり維持すること。

が基本となる。2. はいわゆる工具摩耗・工具寿命の問題である。通常のせん断加工では、せん断様式が決まれば、工具面圧と滑り量は決まってくる[68]ので、工具材自体の特性と工具表面性状が重要となる。工具摩耗については詳細な研究が行われており[69]~[84]、これらの問題に対して効果的な表面改質に関しても、これまで各種処理技術について研究されている[85]~[87]。本章では工具寿命の向上に有効で、しかも容易に実行可能な処理方法としてショットピーニングについて検討する。

ここでは、せん断加工のトライボロジーの観点より重要なパンチ側面に的を絞る。潤滑下で加工を行う場合の基本的事項として、パンチ表面性状と加工力、工具寿命について検討した。パンチ側面は加工機構上、大きな摩耗と欠損を生じやすい[88]。表面性状に関しては

- 1. 粗さ
- 2. 表面性状(凸凹状態など)

3. 仕上げ方法

が重要である。ここでは、実務の見地より $0.2 \sim 9 \mu\text{m}$ 程度の粗さ範囲について調べた。また、表面の仕上げ方法として、通常の仕上げ法であるラッピング、研削に加え、ショットピーニングを用いた。ショットピーニングは、主に疲労強度向上に効果的な表面処理として知られているが、表面に形成された微細な球状凸凹は潤滑油を用いる場合の潤滑性能を向上させると考えられ、既に基礎的な滑り摩擦実験でその効果が確認されている [89]、[90]。リング圧縮試験ではピーニング面粗さと潤滑機構の関連が研究されている [91] が、せん断加工ではこの種の研究はほとんどない。現在は微細な硬質ショットが開発され、微細凸凹の形成とその粗さ制御も容易である。研削による粗さ制御も可能である。研削によりつくられる表面の凸凹は方向性があるが、ショットピーニングによりつくられる表面の凸凹には方向性がないという違いがある。研削バリが欠損の起点となり、欠損することを考えるとショットピーニングに優位性がある。またショットピーニングによれば、複雑な形状を持つ微細工具の表面を極めて安価、かつ容易に処理することが可能である。

9.2 評価方法

1. 加工力による評価

せん断工程は、せん断面を形成し、き裂発生に至るまでの工程と、製品をダイ穴内に押し込む押込み工程、さらにパンチを素材から引抜き引抜き工程からなる。パンチ側面の性状を変えているので、潤滑の効果は、刃先から側面にかけて材料との摩擦係数低減としてあらわれる。摩擦係数の違いは、引抜き抵抗と押込み抵抗により比較することができる。特に引抜き抵抗はパンチ側面の摩擦に加え、パンチ刃先欠損の一因となるので重要である。これらの力の各成分を潤滑性能の一評価項目とした。

2. 工具摩擦又は刃先欠損による評価

上記の加工力は最終的には工具摩擦又は工具欠損に関連する。そこで連続打抜き実験により工具摩擦と欠損について評価することとした。

9.3 実験装置及び方法

9.3.1 加工力の計測実験装置及び方法

図 9.1 (1) に示す丸形打抜き装置を用いた。パンチ外径を 10mm 一定とし、ダイ内径でクリアランスを調整する。板押さえはねじ式で材料とのすきまはゼロとした。打抜きは油圧プレスで行い、その加工速度は 3mm/s である。工具はすべて SKD11、硬さ 60HRC である。表 9.1 に示すように、パンチ側面を研削、ラッピング、ショットピーニングで仕上げ、その表面性状を変えている。しかし、パンチ端面、ダイ側面、ダイ端面の仕上げは同

表 9.1 パンチ側面の表面仕上げ

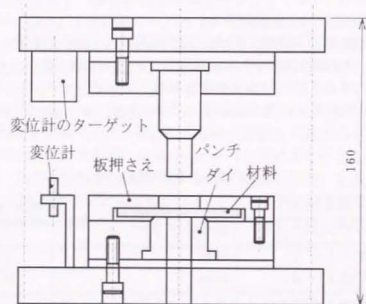
表面仕上げ	加工方法	粗さ $R_y \mu\text{m}$
ラッピング仕上げ	研削後ラッピング	0.2
研削仕上げ A	研削	2.2
研削仕上げ B	研削	9.7
ピーニング仕上げ A	ラッピング後ピーニング	1.5
ピーニング仕上げ B	研削後ピーニング	2.1
ピーニング仕上げ C	ラッピング後ピーニング	9.0

一で、パンチ側面の研削仕上げ A に準ずる。潤滑油は表 9.2 に示すパラフィン系基油と合成潤滑油ポリブデンを用いており、粘度のみが評価対象である。被加工材は表 9.3 に示す

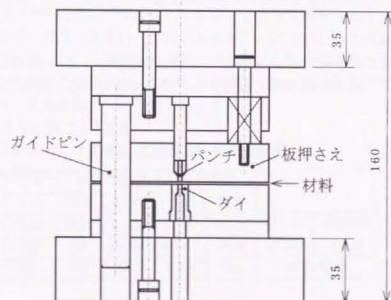
表 9.2 使用した潤滑油の特性

		パラフィン系基油			ポリブデン	
		P32	P100	P460	35R	100R
動粘度 m^2/s	40°C	30.98	90.51	408.4	2800	8300
	100°C	5.35	10.89	30.86	90	220
粘度指数		105	107	107	100	120

3mm 厚アルミ材 2 種である。打抜き力はパンチにはり付けたひずみゲージで測定した。測定回路は軸方向にはり付けた 2 枚のひずみゲージと軸と垂直方向にはり付けた 2 枚のひずみゲージにより構成されるブリッジ回路である。また、パンチ変位は渦電流形変位計 (電子応用 GAP-SENSOR AEC-5509) で測定した。特に断らない場合、同一条件で 4 回の打抜き実験を行い、平均値で評価した。



(1) 加工力の実験装置



(2) 連続打抜き実験装置

図 9.1 実験装置

表 9.3 使用した材料の機械的特性

材料 (JIS)	厚さ mm	引張強さ N/mm ²	全伸び %
A1100P-H12	3.0	113.0	15.3
A1100P-O	3.0	97.0	35.0
SUS304	0.3	650.0	35.0

9.3.2 連続打抜き実験装置及び方法

図 9.1 (2) に示す丸形打抜き装置を用いた。板押さえは可動ストリッパ方式で打抜き時の板押さえ力は約 500N である。パンチ外径 3mm、ダイ穴内径 3.06mm、工具材質は SKD11、硬さ 60HRC である。パンチ側面は研削仕上げしたもの (粗さ: 2.2 μ mRy: 表 9.1 の研削仕上げ A に準ずる) と、この後ピーニング仕上げを行い、最終的に 2.1 μ mRy としたもの (表 9.1 のピーニング仕上げ B に準ずる) の 2 種類である。パンチ端面、ダイ穴内面の仕上げは同一で、パンチ側面の研削仕上げ A に準ずる。被加工材は表 9.3 に示す厚さ 0.3mm、幅 20mm の SUS304 で、クリアランスは 10% となる。潤滑油は表 9.2 の P32 を用いた。打抜きはエキセンプレスで、毎分 160 回の速度で行った。10,000 枚打抜き後、工具各面を形状測定器、顕微鏡で計測・観察した。

9.4 実験結果及び検討

9.4.1 工具仕上げ面の表面性状

各種の方法で仕上げたパンチ側面の粗さ曲線を図 9.2 に、写真を図 9.3 に示す。

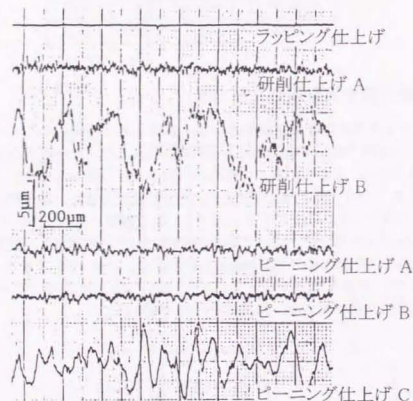


図 9.2 パンチ側面の粗さ曲線

ほぼ同一の粗さであっても加工法により明らかな性状の違いがある。研削仕上げでは研削条痕で、ピーニング仕上げではショット圧痕で工具面が形成される。研削仕上げは円筒研削で方向性を持ち、軸方向粗さが大きくなる。図 9.2 はパンチ側面部の軸方向粗さである。同図より研削仕上げ面は高次の粗さ成分を含んでいるが、ピーニング仕上げ面はこれが少ないことがわかる。また、研削後ピーニング仕上げしたピーニング仕上げ B の高次成分粗さは少なく、ラッピング後ピーニングしたピーニング仕上げ A に近いことがわかる。

9.4.2 セン断線図

セン断線図の一例を図 9.4 に示す。これよりセン断抵抗、押込み抵抗、引抜き抵抗に及

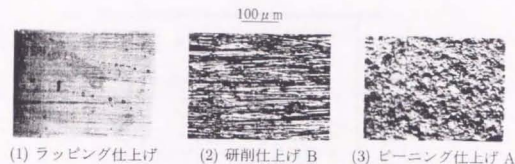


図 9.3 パンチ側面の顕微鏡写真

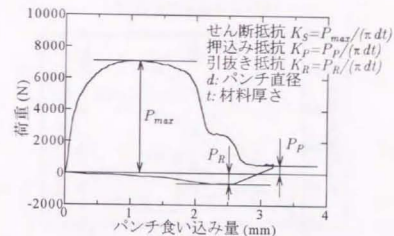


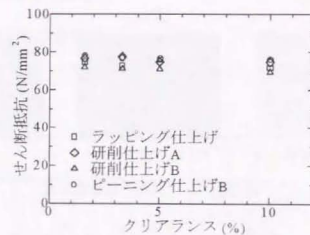
図 9.4 セン断線図の例

ぼす表面性状の影響を調べた。まず潤滑油を表 9.2 の P32 に固定し、その後、動粘度の影響を調べることにした。

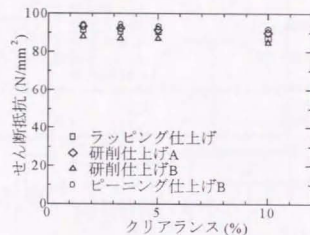
9.4.3 加工力に及ぼす工具表面性状の影響

(1) 研削仕上げ・ラッピング仕上げ

図 9.5 に示すようにラッピング工具に比べ、研削仕上げ B の場合、せん断抵抗は小さいがその差はわずかである。ピーニング仕上げ A の結果もあわせ示すが大差はない。これに比べ、引抜き抵抗及び押込み抵抗に及ぼす表面粗さの影響は明らかである。図 9.6, 9.7 に示すようにいずれもラッピング仕上げ工具の場合、際だって大きく、研削仕上げ A → B と面が粗くなると小さくなり、若干の粗さで急激に抵抗が減少することがわかる。これは円



(1) アルミニウム O 材



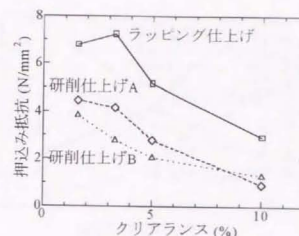
(2) アルミニウム 1/2H 材

図 9.5 せん断抵抗に及ぼす表面処理の影響

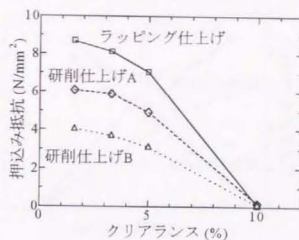
筒研削条痕がパンチ軸方向に粗さを持つため、凸凹部に潤滑油が保持されやすく、凝着を抑制できるためである。このことは加工の安定性とも関連があり後ほど別途記述する。

(2) ビーニング仕上げ

ここではラッピング仕上げ後ビーニング仕上げしたビーニング仕上げ A, C 及び研削仕上げ A 後ビーニング仕上げしたビーニング仕上げ B のそれぞれについて検討している。評価はラッピング仕上げを基準とする。せん断抵抗自体に大きな変化はないことは図 9.5 でふれた。引抜き抵抗は図 9.8 のようにビーニング仕上げによってラッピング仕上げよりも小さくなっている。ビーニング仕上げ C も同様であるが、ほぼ同じ仕上げ面粗さである研



(1) アルミニウム O 材

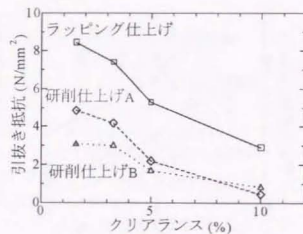


(2) アルミニウム 1/2H 材

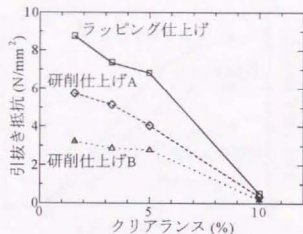
図 9.6 押込み抵抗に及ぼす研削仕上げの影響

削仕上げ B (図 9.7 参照) と比較すると幾分大きい。こうした傾向は図 9.9 に示す押込み抵抗についてもほぼ同様である。

押込み抵抗、引抜き抵抗の低減の観点から仕上げ方法を見ると、研削仕上げの方が効果は大きい。これは円筒研削で円周方向に研削する結果、凸凹が軸方向に形成され、軸方向に運動するパンチのオイルプールを形成しやすいと考えられる。しかし、これで大きな粗さを得ることは、初期摩耗によるパンチ外周寸法の変化を来し、寸法精度を悪化させる。また、大きな粗さは刃先部欠損の原因となりやすい。ビーニング仕上げ面は方向性のない凸凹面であり、オイルプールの形成機能は若干落ちる可能性はあるが、研削面が持つ欠点を回避できる。いずれの場合も、クリアランスが大きくなると抵抗は低減し、10% 付



(1) アルミニウムO材



(2) アルミニウム1/2H材

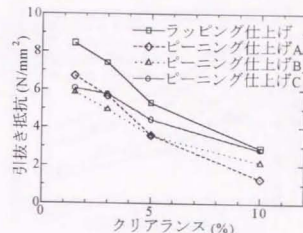
図 9.7 引抜き抵抗に及ぼす研削仕上げの影響

近ではほぼゼロとなり、従来の結果と一致する[92]。

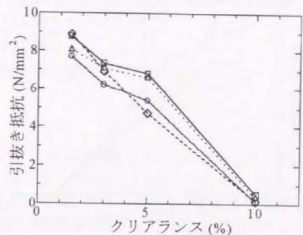
加工の安定性を図 9.10 に示す。これは 16 回のせん断実験より求めた引抜き抵抗の標準偏差であり、ピーニング仕上げ工具がラッピング仕上げ工具の場合よりばらつきが少ないことがわかる。ラッピング仕上げ工具では面粗さが小さく、材料と凝着を生じる確率が大い。したがって、ばらつきも大きくなったと解釈できる。

(3) 動粘度の影響

動粘度を広い範囲に変化させた場合について検討した。ラッピング仕上げとピーニング仕上げ C を対象としている。引抜き抵抗は図 9.11 のように動粘度にかかわらずピーニ



(1) アルミニウム O 材



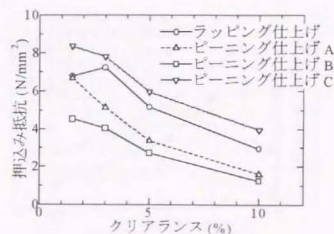
(2) アルミニウム 1/2H 材

図 9.8 引抜き抵抗に及ぼすピーニング仕上げの影響

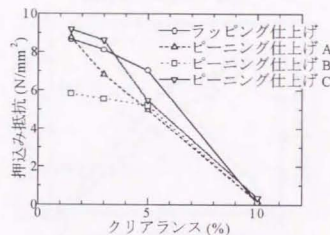
グ仕上げ C が小さい。また動粘度とともにこれらの力が低減するのは従来の報告[92]と一致する。以上のように、パンチ側面に若干の粗さをつけることで、引抜き抵抗と押込み抵抗を相当低減できることが明らかとなった。用いた工具は粗さの最大・最小のものであり、ほかの仕上げ工具の場合も同様と推測できる。

9.4.4 製品性状

パンチ側面の粗さは高々 $9\mu\text{m}$ 程度で、クリアランスを大きく変化させるほどではない。したがって、せん断面割合等に大きな変化はない。しかし、パンチ側面粗さが大きい場合は、図 9.12 のようにダイ上製品内面の平滑面部分の粗さを悪化させる。これからも適切



(1) アルミニウム O 材



(2) アルミニウム 1/2H 材

図 9.9 押込み抵抗に及ぼすビーニング仕上げの影響

な工具面粗さの存在が指摘できる。このほか、寸法精度には面粗さは影響すると考えられ、高精度のせん断では注意が必要であろう。

9.4.5 工具寿命

本実験では最終打抜き枚数を 10,000 枚としたため、摩擦量自体に大きな差異はなかった。しかし表面観察によって刃先部に違いが確認された。打抜き後の刃先近傍を図 9.13 に示す。同図 (1) のビーニング仕上げ工具刃先には欠損はないが、同図 (2) の研削仕上げ工具刃先には微細な欠損が多数認められている。ここで用いた二つのパンチは同じ研削が施された後、一方はビーニングされたものであることから、通常の研削仕上げ工具に対して

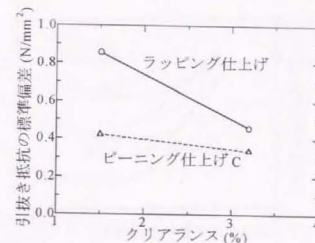


図 9.10 加工の安定性に及ぼす表面処理の影響
アルミニウム O 材

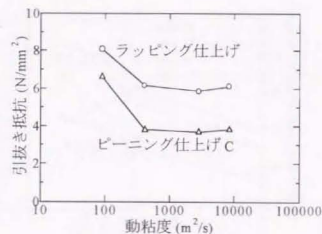
ビーニング仕上げの有効性が確認できたともいえる。

9.4.6 検討

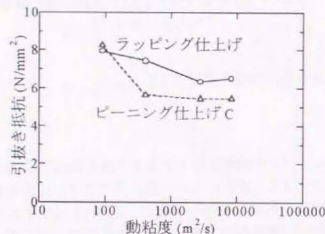
これまでの実験より、パンチ側面を粗くすると引抜き抵抗、押込み抵抗が低減すること、またビーニング仕上げにより、研削仕上げ工具に生じやすい刃先欠損を防止できることを明らかにした。この理由を簡単に考察してみる。図 9.14 に示すように引抜き抵抗は抜きかす穴内壁とパンチ側面の摩擦抵抗であり、押込み抵抗はこれとダイ穴内面と製品側壁との摩擦抵抗の和である。したがってせん断完了後の摩擦抵抗を減少させていることになる。本研究ではその評価をせん断離完了後の摩擦抵抗に限定しているが、せん断加工中も同様の摩擦成分はあるので、こうした効果は分離以前にもあるといつてよい。事実、わずかなせん断抵抗も粗さによって減少しており、加工中の摩擦抵抗成分の現象を示唆している。

せん断加工はほかの塑性加工と若干趣を異にしており、板成形に類似する部分と切削的な要素が混ざり合っており、潤滑油の作用機構にも不明な点も多い。一般的にいえば、刃先で新生面を創生しつつ加工を行うので、刃先への潤滑油供給は困難である。例えば、精密打抜き製品の面粗さは従来から知られるように加工後半で粗くなり、これは潤滑油の“油切れ”に起因することが知られている [93]。この傾向は切れ刃に作用する圧力が高いほど、また厚板ほど著しい。すなわち、せん断加工では加工中、刃先への潤滑油供給が本質的に困難といえる。面粗さを大きくする効果は

1. 凸凹部が潤滑油を蓄えたオイルプールとなること。



(1) クリアランス: 1.6%



(2) クリアランス: 3.3%

図 9.11 引抜き抵抗に及ぼす動粘度の影響
アルミニウム O 材

2. 被加工材料との接触面積が減少すること。

にある。後者は焼き付きを抑制するが、反面、接触圧が増大するので、総合的效果は両者の兼ね合いとなる。過度の粗さは製品内面性状を悪化させるので最適値があろう。これは今後の検討事項であるが、概略 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度と推定される。

微細凸凹を設けた場合の油の挙動は図 9.15 のように考えられる。まず凹部に潤滑油が蓄えられる。せん断が開始し、切れ刃が材料に食い込み新生面の創生を始め、さらに材料内に食い込み、凹部に達するとせん断面の先端部がこの油を引き込む。こうした工程の継続が摩擦面への潤滑油供給を助けることとなる。したがって摩擦等で凹部が消失すると、オイルプールが消失することになり潤滑効果も消えるはずで、このことは滑り摩擦実験で確

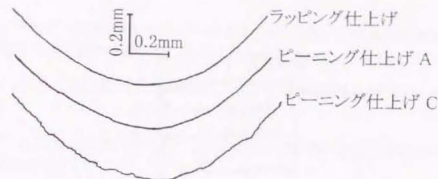


図 9.12 せん断製品の平滑面の表面粗さ
ダイ側製品、アルミニウム 1/2H 材、クリアランス: 5%

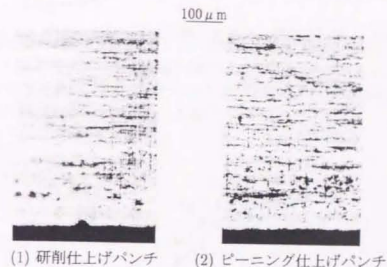


図 9.13 連続打抜き後の切れ刃の比較

認されている [89]。

ミクロプールを設けた板材の加工における潤滑に関しては片岡らの研究 [94] があり、ミクロプールの中の潤滑油が板材の塑性変形に伴い流出し、潤滑状態を良好に保つ機構が説明されている。ミクロプールが工具面側の場合も通常の板成形では、板材の板厚方向変形により類似的作用も考えられる。しかし、本文のように切れ刃により材料がせん断される場合はこの作用の程度は劣り、状況は異なると考えられる。

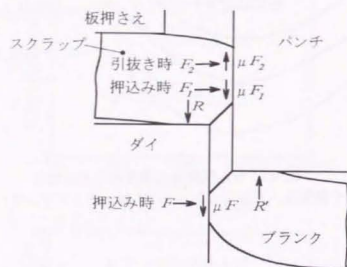


図 9.14 押込み工程、引抜き工程において工具に作用する力

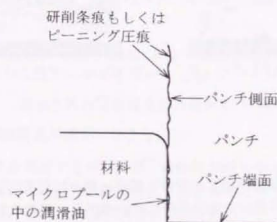


図 9.15 マイクロプールの概念図

9.5 本章のまとめ

研削、ラッピング、ショットピーニングにより SKD11 製パンチ側面の表面性状を変えて行った、潤滑下での打抜き実験より、次のことが確認された。

1. ラッピング仕上げ工具に比べ、研削仕上げ工具の場合は引抜き抵抗、押込み抵抗は減少する。
2. ラッピング仕上げ工具に比べ、ピーニング仕上げ工具の場合は引抜き抵抗、押込み抵抗は減少する。
3. ピーニング仕上げ工具の場合、繰り返し加工における押込み抵抗、引抜き抵抗の値は安定する。
4. この効果は広い範囲の動粘度油に對し認められる。
5. 研削仕上げ工具に比べ、ピーニング仕上げ工具の場合は連続打抜き時の欠損が低減する。

以上は、加工力に関しては、アルミニウム、連続打抜き結果に関してはステンレス鋼について得られたものであるが、一般の金属打抜きに適用できると考えられる。工具表面の凸凹が工具寿命を向上させる。ショットピーニングによれば、複雑な形状をした微細な工具に対しても容易に処理することが可能である。

第 10 章

塑性加工による微細成形技術の開発に関する総合的検討

これまで塑性加工を応用した微細成形技術について多方面から調べてきた。本章ではこれらを総合的に検討し、本手法の意義を考えてみる。

10.1 基礎研究の意義

10.1.1 研究の内容

本論文は成形技術の基礎を取り扱った前半と、具体的技術の提案・検討を行った後半の二部から構成されている。基礎部分とは 2 章：加工中のパンチ変形、3 章：加工力とパンチ移動、4 章：材料流動とひずみ分布、9 章：工具の耐久性向上（後半であるが、位置付けは基礎研究）である。各章の成果がもたらす技術開発への影響を以下に示す。

2 章：加工中のパンチ変形

この章では微細せん断で用いられる微細パンチの変形を調べた。まず、4 カ所のひずみ計測結果を用いて、加工中の微細パンチ変形を求める方法を確立した。そして、対称な形状の打ち抜きに対して次のような結果を得ている。(1) 両端固定のせん断ではクリアランスの小さい方から大きい方へパンチが曲がる傾向を持つ。(2) 両端支持のせん断では、パンチ寸法が板厚よりも小さいときパンチはクリアランスの大きい方から小さい方へ大きく曲がる。これらの結果を考慮すれば微細パンチの変形対策は以下のようになる。

微細工具は曲がりやすいため極力短くした。穴あけパンチは丸線材の径よりも細くなり、これは板厚よりも細いパンチによる打ち抜きに対応する。本章の結果から、実際の成形は以下のようにする必要がある。

1. 加工形状は対称なものとしなければならない。打ち抜き輪郭に関しては例えば丸穴などは上の条件を満たしている。加工位置に関しては、丸線材を直接加工する場合は、

加工位置を丸線の軸上にしなければならない。実際の加工では正確に軸上に加工が行われるよう、ダイに丸線材がちょうどはまる溝を設けた。丸線材を一旦板状に成形してから加工する場合には加工位置を中心からずらすことが可能である。ただし、さん幅の影響を考慮すれば、あまり偏った位置に加工することはできない。

2. 板押さえを用いる必要がある。そうすれば、パンチの曲がりやパンチの位置のずれを是正する作用が期待できる。ただし、パンチ変形の計測結果から分かるように期待できるは正量は高々 $10\ \mu\text{m}$ 程度であり、初期位置でのずれ量が大き過ぎればパンチとダイの干渉を避けることはできない。したがってパンチとダイの位置合わせが重要であることに変わりはない。また、穴あけでは輪郭は閉じたものとなっているが、このことも偏心を是正させるために望ましい条件となっていることが本章で示される。上の条件を満たすことができない場合には型構造などにより別途対策を講じる必要がある。

3 章：加工力とパンチ移動

2 章との関係も含め、本章ではせん断加工における側方力の大きさの計測を行い、偏心は正作用に関する結果を得ている。ここでははさみ形、両端固定などの支持条件の影響を詳しく調べている。そして (1) はさみ形せん断ではクリアランスが大きいと側方力が大きくなること、(2) 両端固定ではクリアランスが小さいと側方力が大きくなること明らかにした。この結果は前章のパンチ変形の計測結果と対応する。また、(3) 板押さえを用いなくても打ち抜き輪郭が閉じていればクリアランスの小さい側の側方力が大きくなること明らかにした。前章と本章の結果から側方力が偏心を是正する方向に働くための条件は材料の変形を拘束することであることがわかる。

また、(4) はさみ形では両端固定よりも側方力が大きくなること、(5) 細長いパンチでも偏心クリアランスにより生じる側方力による偏心は正作用が期待できることが明らかになった。これらの場合、型構造を工夫すればパンチ変形よりも大きな正量を得ることができる。

せん断で輪郭を創成するには開曲線のせん断が避けられない。開曲線のせん断では側方力によるパンチ変形が問題となる。特にはさみ形せん断となる場合には側方力が大きくなりパンチ変形ばかりではなく材料の変形も考慮する必要がある。また丸線材をせん断する場合には板材のせん断に比べて側方力の大きさが大きく、せん断力の約半分となることが第 5 章の計測結果から示されている。この場合、側方力の大きさ、パンチの変形量を概算してみれば以下のようなことになる。例えばせん断抵抗 k_s 、板厚 t の材料を長さ l だけ切り欠くとすればせん断力 P は次のようになる。

$$P = k_s t b$$

側方力の大きさをせん断力の半分とし、板厚を $1\ \text{mm}$ とすればパンチには幅 $1\ \text{mm}$ 当たり図 10.1 のような側方力が働くことになる。これが長さ l 、縦弾性係数 E 、断面二次モーメント

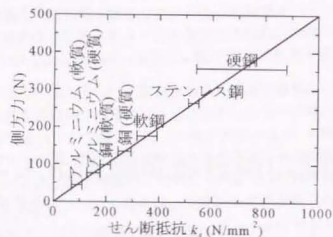


図 10.1 パンチに作用する側方力の大きさ

ント I のパンチ先端に集中荷重として働くとすれば先端の曲がり量 w は次のようになる。

$$w = \frac{Pl^3}{6EI} = \frac{k_s t b l^3}{6EI}$$

パンチの幅を b 、厚さを h とすれば断面二次モーメント I は次のようになる。

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

したがって曲がり量 w は次のようになる。

$$w = \frac{2k_s t l^3}{Eh^3}$$

パンチ長さ l を 2 mm、厚さ h を 2 mm としたときの計算結果を図 10.2 に示す。例えば、ステンレスを加工する場合、 $10 \mu\text{m}$ ほど曲がってしまうこととなる。この問題を避けるため、再掲した図 7.19、20 のように工具構造を工夫した。

1. パンチ変形に対する対策

パンチ変形によりパンチとダイが干渉してしまうのを防がなければならない。図 7.19、20 に示した工具構造ではパンチはダイ穴側面でガイドされ変形が抑えられる。

2. 材料変形に対する対策

材料は丸線のまま加工される場合と一旦板状に成形してから加工される場合とがある。丸線を加工するダイには図 7.19 のように丸線がちょうどまる溝を設け材料変形を抑えた。このような方法が可能なのは丸線材の寸法精度が高いためである。板

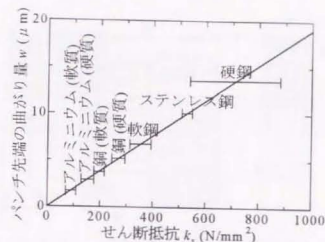


図 10.2 パンチ先端の曲がり量

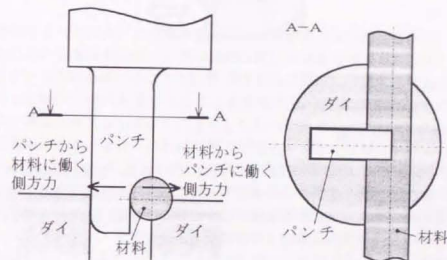


図 7.19 再掲

状に成形された後加工を行う場合、この方法を採用することはできない。前加工により素材形状や寸法が変わってくるためである。そこで板押さえにより、材料変形を抑えることとした。板押さえはなるべくパンチに近い位置に作用することが望ましい。実際の工具では図 7.10 のように板押さえをパンチ内に組み込む構造とすることによりパンチに近接した位置に板押さえが作用するよう工夫した。図の工具構造とすることにより加工に支障を来さないコンパクトさを保った上で板押さえの強さの調整機能をもたせることに成功している。

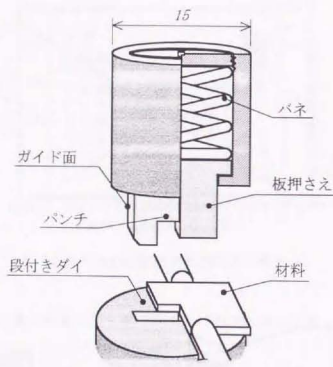


図 7.20 再掲

4 章：材料流動とひずみ分布

この章は Visioplasticity 法を用いたせん断変形解析である。古典的手法にフリーエ位相関法を適用し、精度の高い計測結果を短時間で得られる方法を確立した。得られる結果は一般的せん断加工現象の合理的解釈を補うものである。再掲した図 4.16 に示されるように微細せん断の観点からは次のようなことが確認された。

1. 板厚に対するパンチ寸法の比 r が 1 を境として、材料流動が変わる。
2. r が 1 よりも小さい場合、パンチ下材料がクリアランス部に押し出される。このためパンチ側面の圧力が大きくなる。
3. ダイ上の材料は左右に広がる。
4. この場合、抜きかすは圧縮され薄くなる。

これらの現象はクリアランスの大きさによらずに見られる。小穴抜きに関する以上の結果は従来の研究結果と一致するものである。この結果から示される問題点に対する対策を講じる必要がある。まず良好な形状を得るためにダイ上の材料変形を抑える必要がある。丸

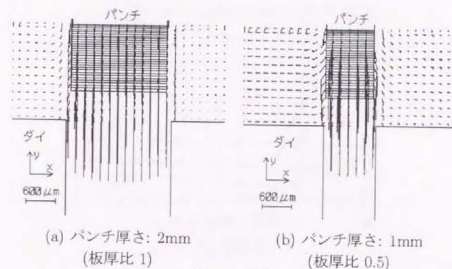
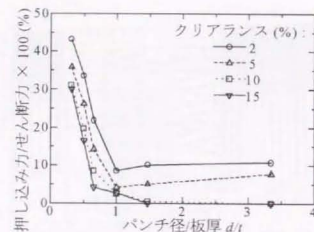


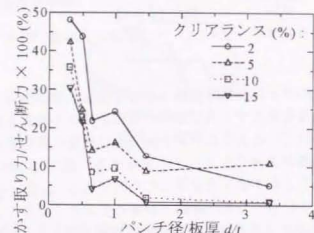
図 4.16 再掲

クリアランス: 5%, パンチ食い込み量: 70 %

線材に穴をあけるためのダイには丸線材がちょうどはまる溝が設けてある。この溝は加工位置を正確に定める役目を果たすと共に材料の変形を抑える役目も果たす。また上記のことがらは従来から言われているようにパンチ刃先及び側面に作用する圧力が極めて大きくなり、工具の摩耗や欠損が大きくなることを意味する。図 10.3 はパンチの直径が小さくなったときの押し込み力とくす取り力を示したものである。 r が 1 よりも小さい場合、どちらの力も極端に大きくなる。これは摩擦力が極めて大きくなることを示している。また小穴抜きでは図 10.4 に示すようにダイ上製品の平滑面が増大し、だれが小さくなる。このことはパンチと材料の間の滑り距離が増すことを示している。両者の影響により特にパンチの側面の摩耗が図 10.5 のように激しくなる。本研究における加工では良好な製品形状を得るためにクリアランスを小さくし、材料を強く拘束している。この条件はだれを少なくし、平滑面を長くするが、これも工具摩耗の点では不利である。この対策には工具材質の交換、表面処理がある。微細な複雑形状工具は成形が煩雑であるから、あまり特殊な硬質材は適さない。また表面処理の多くは工具を高温下にさらす必要があり変形が危惧される。そこでこうしたおそれがない簡便な方法の開発が望まれる。以上の発想は第 9 章に示したピーニングによるパンチ側面のマイクロボール生成につながり、実験的に効果を確認した。本研究が取り扱う工法は生産性を相当重視するものであり、高価な工具の欠損や摩耗の対策は大きな意義があると考えられる。



(1) 押し込み力

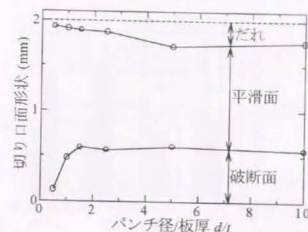


(2) かす取り力

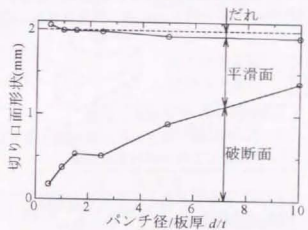
図 10.3 押し込み力とかす取り力に及ぼす相対パンチ直径の影響 [95]
(アルミ半硬質材)

10.1.2 基礎研究の意義のまとめ

以上のように 2 章 ~ 4 章で検討した基礎研究の部分はせん断加工現象の解明はもちろん、後半で述べる成形工具の設計において大きな貢献をしているといえる。基礎研究と実際の成形との関係を視覚的に図示すると図 10.6 のようになる。なお、本図は後半への関わりだけに焦点を当てて描いてある。また実際の成形における問題点と対策を図 10.7, 10.8 に示す。



(1) 焼鈍材



(2) 半硬質材

図 10.4 穴の切り口面形状に及ぼす相対パンチ直径の影響 [52]
(被加工材: アルミニウム 2 mm 厚)

10.2 技術開発の位置付け

10.2.1 研究の内容

後半では塑性加工を応用した微細成形技術について検討した。この節では従来の微細成形技術をふまえ、本技術の位置付け、評価を行ってみる。まず技術開発及び検討事項をまとめると以下になる。

1. 微細成形を行うための基礎的成形手法の研究

(a) 対象製品の特定

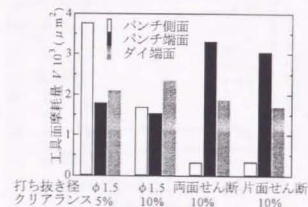


図 10.5 工具摩耗に及ぼすせん断輪郭の影響 [20]
(被加工材: ペーナイト鋼 1 mm 厚, 打ち抜き数: 10000 枚)

研究課題

1. 細長いパンチの解析と計測
2. パンチに働く側方力と工具移動に関する解析・計測
3. せん断加工時の材料変形解析

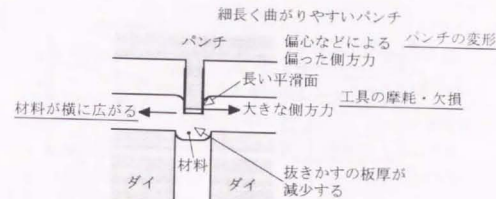
明らかになった事項

1. パンチ変形が偏心を是正する条件
材料変形を拘束することの必要性
(例えば板押さえを使用する。)
2. はさみ形せん断における側方力
工具と材料の変形に対する対策の必要性
3. 微細加工モデルとしての小穴抜きの材料流動の解明
パンチに働く高加工圧力と滑り長さに起因する工具摩耗・欠損対策の必要性

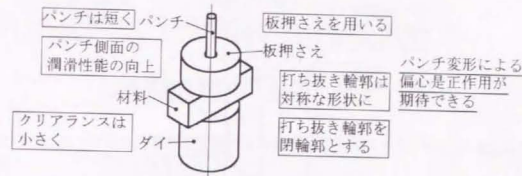
後半で採用した事項

1. 微細せん断では板押さえを必ず用いる構造とする。
2. はさみ形せん断となる場合、パンチ変形、材料変形を抑える型構造とする。
3. 微細工具の潤滑性能を高めるために有効な表面処理を施す。

図 10.6 基礎研究の意義



(1) 問題点



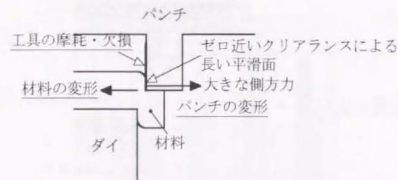
(2) 対策

図 10.7 小穴抜きにおける問題点と対策

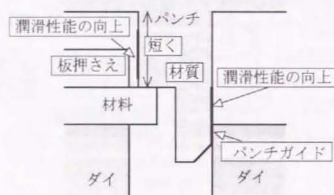
- (a) 丸線素材を用いることの意味と妥当性
- (c) 丸線素材を用いた加工要素技術の検討
- (d) 単型を用いた成形手法の検討

2. 多様な微細成形を可能とする成形システムの開発と評価

- (a) タレット方式加工の提案
- (b) 回転金型の提案
- (c) 仕上げ方法
- (d) 製品精度の検討



(1) 問題点



(2) 対策

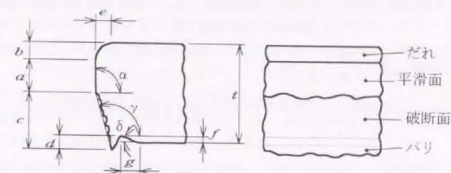
図 10.8 開曲線輪郭の切り欠きにおける問題点と対策

10.2.2 複雑微細成形技術としての位置付けと評価

加工技術の評価といった場合には、一般論をいえば相当複雑になる。ここではある程度議論を限定して、検討してみる。元来が切削を中心とする製品の塑性加工への代替ということから話が始まっているので、この観点から始めるのが妥当と考えられる。すなわち、理想は 1) 加工面は切削並に平滑である。2) 精度はおおよそ $5\mu\text{m}$ 程度を達成できる。3) 製品形状はできるだけ任意な形状が創生できる。4) 生産性に優れることなどがあげられる。

I 加工面性状

図 10.9 が示すように通常のせん断加工面は、だれ、平滑面、破断面、バリで構成される。通常の切削ではバリは生じるがほとんどは平滑な面である。せん断バリは切削バリより小さく除去しやすいのであるが、その他の部分についてはせん断切り口は切削に比べ劣



a : 平滑面長さ e : だれ幅 α : 平滑面の傾き角
 b : だれ量 f : 圧こん深さ γ : 破断面の傾き角
 c : 破断面長さ g : 圧こん幅 δ : 厚こんの傾き角
 d : バリ高さ t : 板厚

図 10.9 せん断切り口面の形状と各部の名称

る。この点に関してはせん断加工の特性を考慮することにより以下のような方法で改善を図った。

1. 平滑面、破断面

切り口面形状は材料特性により変わる。平滑面、破断面割合は特に板厚取りとの相関が強いことが知られている。板厚取りが大きい材料では破断面が少なくなる。したがって、製品に必要とされる性質を満たしうる材料の中からなるべく延性の高い材料を用いるのが望ましい。

(a) 加工機構

微細加工で用いるせん断は板厚に比べ、小さな工具を用いる場合が多く、せん断用語でいえば小穴抜きに相当する。第 4 章で述べたようにこの場合、パンチ下材料をクリアランス部とだれ部近傍に排除しつつ穴内面を創成する結果、押し込み加工に近づく。したがって面はほとんどが平滑面となり、だれも小さくなる。せん断加工としては相当良好な切り口面となり平滑面は板厚の 90% 程度以上を占める。切り込む形状が角部を持っている場合、その形状によっても材料が拘束されるため切り口面は良好となる。本システムではわずかな切り込みによって形状創成する場合が多い。この場合、切り込みがわずかであればシェービング加工に類似し、ほとんどが平滑面となる。

(b) 加工条件

微細せん断ではクリアランスは小さく、材料を強く拘束することが望まれる。この条件はだれを少なくし、平滑面を長くする。また丸線せん断においてゼロ近いクリアランスで良好な製品形状が得られることが第5章において明らかになった。反面、工具摩耗の点では不利であるがこれに関しては既に述べたように別途対策を講じることができる。

以上のように破断面はほぼ抑制できることがわかる。残る問題はだれとバリである。

2. だれ

だれは通常板厚の5%程度であり、板厚1mmの場合50 μ mとなり、特に大きな問題とならない。またわずかずつ切り込むシェーピング加工とすることによりさらに減少させることは可能である。丸線材を加工する場合は工具により切り込み量が決まってしまう。したがってシェーピング加工をするためには工具の数を増やさなければならない。板状の素材を加工する場合は同一工具で材料位置をずらしていくことによりシェーピング加工を容易に行うことが可能である。

3. バリ

バリの発生は慣用せん断を採用する限り回避できない。しかしその大きさは1-2%程度であり、切削により生じるバリに比べればむしろ小さい。切削、せん断いずれの場合も最終的にはバリ取りが必要であり、8章の磁気研磨でこれを行うことができる。磁気研磨によればバリと共に破断面の凸凹も処理することができる。製作した加工装置の一部分として組み込むことが可能であることも磁気研磨法の利点である。

良好な切り口面が得られる加工条件を模式的に図10.10に示す。

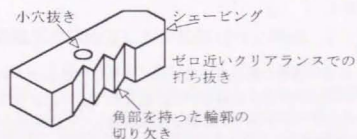


図10.10 良好な切り口面を得るための加工条件

II いかに複雑な形状を成形できるか

1. 加工方式に依存する限界

本研究の目的を一言に要約すれば、複雑な三次元形状の創成技術ということになり、その詳細は1章で述べた。つまりできるだけ多様な形状が創生できる。しかも大きな段取り替えを伴わず速やかに対応できることが望ましい。

ここで用いる手法は基本的に型を用いるものであり、機械加工に比べ明らかに不利である。この不利を克服するため、タレット方式、回転金型方式、追い抜きせん断技術、及びこれらの組み合わせによってある程度成形の多様性を高めることはできた。こうした検討により、直線と円弧等の組み合わせ、立体形状も断面が多角形のように複雑でなければある程度成形できる見通しを得た。

こうした検討を通して本手法の限界も明らかとなってきた。それは真に複雑な形状に対しては製品に対応した型によらなければならないということである。これはプレス成形、あるいは塑性加工の本質であり、高価な型経費を大量生産で相殺することそのものである。

しかし、工学的観点からはある程度製品形状を絞り、その中で創成形状の多様性を求めることも十分価値があることである。本加工機で得られた成果はこのように評価すべきものと考えている。鉗子の代表形状はすでに文中で示したが、実際は図10.11の模式図が示すように多様である。このようにわずかな変更、それも少量生産品に関し

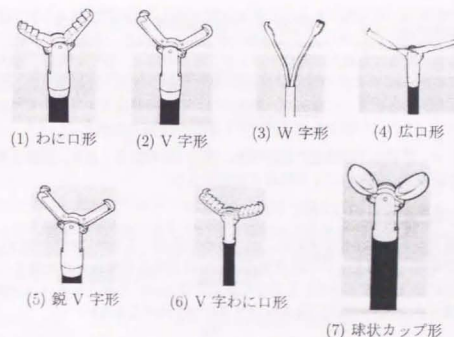


図10.11 わに口鉗子の様々な形状[96]

では、タレット工具のわずかな交換や工具経路の変更で対応できる。

ところでプレス加工のみで最終製品を得ることは生産性の観点からも望ましいことであるが、わずかな機械加工、例えば切削を加えることで飛躍的に創成形状の多様性が増す場合がある。図 10.11 の球状カップ形鉗子などが好例である。また鉗子端部は球面状とすることが望ましいが、せん断のみでは容易でない。特定形状型による鍛造も一法であるが明らかに切削が優れる。このようにわずかな切削加工を付け加えることで near-net shape から net shape へと付加価値は飛躍的に増大する。この考えは塑性加工 + 切削加工であり、一般に用いられている方法である。問題は加工機械が異なるために半製品を付け替えなければならず、製品が微細であることを考えると製品の位置決めや付け替えの作業が煩雑になることである。こうした観点からは「同一座標系で型成形-切削加工を行う複合加工装置」とすれば良いと考えている。もちろん機械加工の割合はできるだけ抑えることが望ましく、この点についての検討は必要となる。

III いかに微細なものを成形できるか

100 μm ~ 1 mm 程度の複雑形状製品がターゲットであり工具は概して小さくなる。この小さくなることとどのような問題を引き起こすであろうか。

1. 型製作の困難さ

鍛造であろうとせん断であろうと基本は型である。本研究で考える型は逐次鍛造、追いつきせん断の例にあるように特定形状でないものと、総形抜きの特定制の二つに分かれる。前者は比較的問題は小さいが、後者の場合、成形の可否、精度、経費は型技術に大きく依存する。現在の型技術、精密切削、研削、放電加工等の進歩で相当小さいものができるようになった。割型では、その限界はダイヤ法にしては数十 μm であろう。これは型製作の限界からくる製品の下限である。

今ひとつの限界は工具強度である。特に問題は打ち抜きであり、微細工具の場合、長柱の座屈限界、圧縮力による圧壊の問題がある。

(a) 圧縮による限界

丸穴をあける場合を考える。パンチの直径を d とすればせん断輪郭の長さは πd である。板厚を t とすればせん断切り口面の総面積は πdt である。板のせん断抵抗を k_s とするとき、最大せん断荷重は $\pi dt k_s$ で表される。パンチ材料の圧縮強さを σ_c とすれば、次式が満たされなければならない。

$$\frac{\pi}{4} d^2 \sigma_c > \pi d_p t k_s$$

$$\frac{d}{t} > 4 \frac{k_s}{\sigma_c}$$

この式からいえることは加工が微細化するかどうかに関わらず、あけることのできる穴の大きさが板厚に対する比で制限されるということである。例えば、パンチの圧縮強さを 2100, 6200 N/mm^2 としたときの各種材料の限界を図 10.12 に示す。板厚に対して小さな穴をあけたい場合には、圧縮強さの大きい材料を

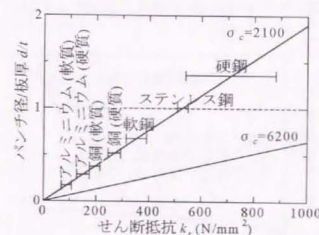


図 10.12 圧縮によるパンチ直径の限界

使ってパンチを製作する必要がある。

(b) 座屈による限界

オイラーの公式によれば、端条件により座屈荷重は次のようになる。

$$\frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad \text{両端固定}$$

$$2.046 \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad \text{一端固定、他端回転自由}$$

ここで I は断面二次モーメントであり円柱の場合には $\frac{\pi d^4}{64}$ である。パンチの根本側の端条件は固定としている。最大せん断荷重が観察されるのはパンチが材料に食い込んだときである。したがって材料側の端条件は固定と回転の間にあり、座屈荷重は次式のようになる。

$$n \frac{\pi^3 d^4 E}{64 l^2} \quad (2.046 < n < 4)$$

この力が最大せん断荷重よりも小さくなくてはならない。

$$n \frac{\pi^3 d^4 E}{64 l^2} > \pi dt k_s$$

パンチの長さは材料の厚さよりも長くなければならない。パンチの長さを材料の厚さの m 倍とする。

$$\frac{d}{t} > 4 \left(\frac{m^2 k_s}{n\pi^2 E} \right)^{\frac{1}{3}}$$

パンチの縦弾性係数を $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ としたときの計算結果を図 10.13 に示す。通常用いられる材料では圧縮による限界よりも緩いものとなることがわ

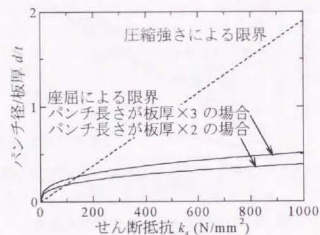


図 10.13 座屈によるパンチ直径の限界

かる。

座屈に関しては支持条件が問題であり、理論的には高精度の支持があれば相当微細長柱状工具が使える。ここでは支持プレートの製作如何で結局、この型製作技術ということになる。これはほぼダイに準ずるからやはり数十 μm 程度となる。

他方、細くなるメリットとして自動調心の効果があることは既に述べた。

2. 型経費

経費は素材経費と加工経費である。一般には加工経費が大きいが、大きな型では素材の経費（超硬、ダイヤ、各種セラミックなどの場合は特に）は無視できない。それに比して、微細工具ではかなり高価な素材も惜しみなく使えるという利点がある。

最後に成形寸法の限界と形状の多様性を示す概略数値を図 10.14 に示す。本研究の中で明らかになったことがら、小穴抜き、シェービング加工、さん幅の影響などせん断加工に関する従来の研究により明らかになっていることがらをもとにした値である。ただし、板部分を加工する場合の限界数値は板厚により変わる。板部分は様々な厚さに加工することが可能であるが、図では板厚が 300 から 100 μm と考え、関係する部分の数値は幅を持たせて示した。

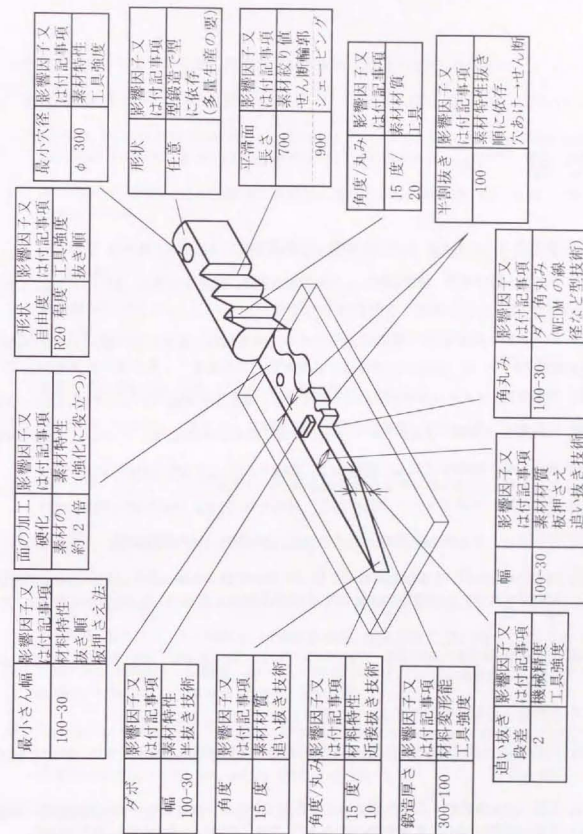


図 10.14 成形寸法の限界及び形状の多様性を示す概略数値
(素材は $\phi 1 \text{ mm}$ または 1 mm 厚の軟鋼又はステンレスを想定している 単位は μm)

文 献

- [1] 藤田博之, マイクロマシンの世界, 工業調査会, (1993).
- [2] 山形豊・樋口俊郎, 精密切削による微細形状創成, 精密工学会誌, **61**-10 (1995), 1361-1364.
- [3] 和井田徹・岡野啓作, 研削によるマイクロ形状創成, 精密工学会誌, **61**-10 (1995), 1365-1368.
- [4] 佐藤健夫, マイクロ放電加工による形状創成, 精密工学会誌, **61**-10 (1995), 1369-1372.
- [5] 山口勝美・中本剛, 光造形法による形状創成, 精密工学会誌, **61**-10 (1995), 1385-1388.
- [6] 斉藤正美, 微細管状部品の塑性加工, 塑性と加工, **33**-379 (1992), 923-929.
- [7] 上田雅信, 半導体リードの曲げ加工, 塑性と加工, **33**-379 (1992), 938-942.
- [8] 村川正夫, セン断加工機構, 塑性と加工, **38**-440 (1997), 794-799.
- [9] Aoki, I., Yano, T. and Higuchi, T., Development of Piezoelectric Micro-press and its Application to Press Blanking, J. Advanced Automation Technology, **4**-2 (1992), 71-76.
- [10] 益藤森治・神馬敬・山内信也, シェーピング加工に関する研究, 機械学会論文集, **31**-225 (1965), 855-863.
- [11] 森田稔・音田一造, 仕上げ抜き, 塑性と加工, **2**-6 (1961), 79-82.
- [12] 前田禎三・中川威雄, 精密打抜き加工の実験的研究-第1報-, 塑性と加工, **9**-92 (1968), 618-626.
- [13] 近藤一義・渡辺亮・高田久於男・吉田元昭, プレス, 型構成および炭素鋼厚板への適用性, 一対向ダイスセン断法の活用 I-, 塑性と加工, **12**-129 (1971), 733-741.
- [14] 前田禎三, 上下抜加工法, 機械の研究, **10**-1 (1958), 140-144.
- [15] 牧野青雄, かえりなしせん断法, プレス技術, **13**-5 (1975), 93-98.
- [16] 村川正夫・前田禎三, かえり無しスリッティング, 塑性と加工, **20**-219 (1979), 270-275.
- [17] Liebing, H., Counter-Blanking, A Shearing Process for Producing Blanks without any Burr, Proceedings 18th International MTDR Conference, (1977), 369-375.
- [18] 高石和年・前田禎三, 小径打抜き工具摩耗に及ぼす半径の影響, 塑性と加工, **25**-276 (1984), 8-11.
- [19] 前田禎三・青木勇, ベーナイト鋼薄板の打抜き工具の摩耗, 塑性と加工, **16**-179 (1975), 1139-1147.
- [20] 高石和年・前田禎三, ベーナイト鋼板の小径打抜き, 塑性と加工, **25**-278 (1984), 189-194.
- [21] 前田禎三・青木勇, 工具寿命に及ぼす被加工材の硬さの影響(ベーナイト鋼薄板の打抜き工具の摩耗 2), 塑性と加工, **17**-189 (1976), 812-817.
- [22] 銘司春栄・前田禎三, ステンレス鋼板のせん断寿命試験, 塑性と加工, **19**-207 (1978), 316-324.
- [23] 高石和年, ステンレス鋼打抜きにおける小径打抜き工具の摩耗特性, 塑性と加工, **29**-330 (1988), 695-700.
- [24] 増沢隆久, 微細放電加工, 精密工学会誌, **57**-6 (1991), 963-967.
- [25] 日本塑性加工学会, 第164回塑性加工シンポジウム「塑性加工のためのFEMシミュレーションシステムの現状と将来展望-もの作りの現場が望むシステム像とは-, (1995).
- [26] 高石和年・前田禎三, セン断加工の有限要素解析, 塑性と加工, **21**-236 (1980), 784-791.
- [27] 竹増光家・尾崎龍夫・山崎進, パーティクル流れモデルによる板材のせん断加工の数値解析, 塑性と加工, **36**-418 (1995), 1318-1323.
- [28] Taupin, E., Breiling, J., Wu, W., Altan, T., Material Fracture and Burr Formation in Blanking Results of FEM Simulation and Comparison with Experiments, Journal of Material Processing Technology, **59** (1996), 68-78.
- [29] 大飼住彦・吉田住典・湯川伸樹・石川孝司・神馬敬, セン断加工の剛塑性FEMによる変形解析 (第1報) 刃先形状及びクリアランスの影響, 平成8年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1996), 422-423.
- [30] 小森和武, セン断加工の数値シミュレーション, 塑性と加工, **38**-433 (1997), 129-134.

- [31] Thomsen, E. G., Yang, C. T., Kobayashi, S., Mechanism of Plastic Deformation, (1965), The Macmillan Co. (工藤英明代表訳, 金属塑性加工の力学, (1967), 176-181, コロナ社.)
- [32] 中川威雄・大島正巳・浅見和也, 軟鋼線材の拘束せん断における寿命試験, 塑性と加工, 12-131 (1971), 886-892.
- [33] 田村公男・寺崎正好・工藤英明, 塑性疲労切断における切り口形状(丸棒の塑性疲労切断法 I), 塑性と加工, 12-131 (1971), 893-902.
- [34] 中川威雄・塩森幸一, 拘束せん断によるクランク軸の製造, 塑性と加工, 14-144 (1973), 78-81.
- [35] 前田禎三・銘菊春榮, ナイフ刃状工具によるプラスチック材料の切断加工における二, 三の問題(工具寿命及び棒と管の切断), 塑性と加工, 17-183 (1976), 329-333.
- [36] Das, M. K., Lui, S. W., Tobias, S. A., Die Wear Characteristics in High Speed Cropping, Int. J. Mach. Tool Des. Res., 19 (1979), 221-235.
- [37] 工藤英明・中川威雄・田村公男, 冷間鍛造用素材取りとしての棒材せん断(その技術と加工機構 I), 塑性と加工, 22-241 (1981), 150-158.
- [38] 柳原直人・斉藤博・中川威雄, 汎用プレス用空圧式加速装置と棒材高速せん断への適用, 塑性と加工, 22-242 (1981), 245-249.
- [39] 篠原宗憲・宮川松男, 高静水圧下のせん断加工における変形と破壊(丸棒のせん断特性 II), 塑性と加工, 23-262, 1109-1116.
- [40] 中川威雄・工藤英明・田村公男, 冷間鍛造用素材取りとしての棒材せん断, 塑性と加工, 24-271 (1983), 830-839.
- [41] 村川正夫・呂言・古閑伸裕・大川陽康, 可変速式丸棒材せん断試験機の試作といくつかの試験結果-板・棒材のせん断特性に関する研究 V-, 塑性と加工, 33-374 (1992), 296-301.
- [42] 前田禎三・銘菊春榮, 細長比の大きいボンチによる両面せん断, 塑性と加工, 18-196 (1977), 329-336.
- [43] 神馬敬・足立達也, 微細電子部品の高精度加工技術, 塑性と加工, 33-379 (1992), 898-903.
- [44] 青木勇, 精密微細部品の打抜き・せん断加工, 塑性と加工, 33-379 (1992), 943-948.

- [45] 青木勇・高橋俊典, 微細せん断の加工機構に関する研究(第1報)工具の曲げ変形量の測定, 第44回塑性加工連合講演会講演論文集, (1993), 201-204.
- [46] 前田禎三, せん断工具に作用する側方力の測定, 精密機械, 24-11 (1958), 575-585.
- [47] 斉藤博, せん断工具刃先の荷重分布の推定, 塑性と加工, 4-25 (1963), 87-96.
- [48] 前田禎三・中川威雄・村上功・芽野茂, せん断製品の精度について, 日本機械学会誌, 67-542 (1964), 423-430.
- [49] 近藤一義, 延性金属板のせん断加工機構(第4報)-せん断荷重に関する考察-, 精密機械, 34-3 (1967), 188-194.
- [50] 春日保男・堤成晃・森敏彦, せん断加工におけるダイス上面の圧力分布の測定(測圧ビンによる方法), 塑性と加工, 17-189 (1976), 805-811.
- [51] 益田森治・神馬敬, 薄板の打抜きに関する塑性学的研究, 塑性加工専門講演会講演論文集, (1957), 15-18.
- [52] 尾崎龍夫・吉海照直, 小穴の打抜きの加工機構, 塑性と加工, 13-140 (1972), 683-688.
- [53] 青木勇, 精密微細部品の打抜きせん断加工, 塑性と加工, 33-379 (1992), 943-948.
- [54] 古閑伸裕・工藤武・村川正夫, Visioplasticityによるせん断加工現象の解析, 塑性と加工, 33-383 (1992), 1362-1367.
- [55] 堤成晃, 格子法, 塑性と加工, 13-133 (1972), 149-157.
- [56] Kuglin, C. D., Hines, D. C., The Phase Correlation Image Alignment Method, Proc. Int. Conference Cybernetics Society, (1975), 163-165.
- [57] Büsch, F. and Stäger, A., Feinschneiden genauer Fertigteile in der Stanzertechnik I, Werkstatt und Betrieb, 96-9 (1963), 607-611.
- [58] 小川芳明・加藤修司, 半円柱金属素子のせん断加工装置, 昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, (1979), 217-218.
- [59] 遠藤順一, レーザ加工機とタレットパンチプレスの複合加工/複合加工機について, 塑性と加工, 29-332 (1988), 931-936.
- [60] 日本塑性加工学会編, せん断加工, コロナ社, (1992), 209-210.
- [61] (株)アマダ技術資料

- [62] Makedonski, B. G. and Kotschimidov, A. D., Schleifen im Magnetfeld, Fertigungstechnik und Betrieb, 24 (1974), 230-234.
- [63] 進村武男・波田野栄十・高沢孝哉, 平面磁気研磨装置の開発とその研磨性能, 精密工学会誌, 52-6 (1986), 1080-1086.
- [64] 安斎正博・遠藤博司・須藤亨・中川威雄, PPM 磁性砥粒の酸洗によるドレッシング効果, 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990), 305-306.
- [65] 安斎正博・大滝久規・川島悦哉・中川威雄, 磁気研磨による複雑形状部品のバリ取りへの応用, 1992 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1992), 131-132.
- [66] 川島悦哉・中川威雄・安斎正博, 磁石を用いたバリ取り, 1994 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1995), 861-862.
- [67] 武井孝明・高松洋・宮崎英児・植松哲太郎・北島弘一・鈴木清, 対向磁極型円筒磁気研磨への短繊維混合研磨材法の適用 (短繊維状磁性研磨材を用いた磁気研磨法に関する研究: 第5報), 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991), 481-482.
- [68] 青木勇, せん断工具の摩耗と影響因子, 塑性と加工, 27-300 (1986), 140-150.
- [69] 田村公男, RI を利用した工具摩耗の測定法, 塑性と加工, 3-13 (1962), 173-176.
- [70] 助川政之, 打抜き工具の寿命に関する一実験, 塑性と加工, 3-23 (1962), 822-824.
- [71] 斉藤博, せん断工具の摩耗試験, 塑性と加工, 5-38 (1964), 225-231.
- [72] 日比野文男・柴田昌典・宮川正威・木下素男, せん断輪郭と型寿命及び製品形状に関する一考察, 塑性と加工, 5-46 (1964), 779-786.
- [73] 斎田洋一, 超硬せん断工具の摩耗, 塑性と加工, 7-64 (1966), 228-236.
- [74] 前田禎三・松野健一, 打抜き型の摩耗, 塑性と加工, 7-64 (1966), 265-273.
- [75] 山内信也, 鉄系材料のせん断加工における工具面の摩耗について, 塑性と加工, 7-65 (1966), 291-298.
- [76] 長屋稔, せん断型の摩耗, 塑性と加工, 10-99 (1969), 269-275.
- [77] 中川威雄・大島正巳・浅見和也, 軟鋼線材の拘束せん断における寿命試験, 塑性と加工, 12-131 (1971), 886-892. 17-188 (1976), 713-721.
- [78] 前田禎三・銘苅春榮, 細長比の大きいパンチによるコバル薄板のせん断寿命試験, 塑性と加工, 17-188 (1976), 713-721.

- [79] 前田禎三・青木勇, 工具材種と板押えの影響 (ベークナイト鋼薄板の打抜き工具の摩耗 III), 塑性と加工, 18-199 (1977), 627-632.
- [80] 前田禎三・村川正夫・飯田祐弘, スリット方式によるカット摩耗及び被加工材のすべり挙動の差異 (スリッティング加工に関する基礎的研究 III), 塑性と加工, 19-206 (1978), 191-198.
- [81] 青木勇・前田禎三, 高速せん断機によるせん断工具の摩耗試験, 塑性と加工, 24-268 (1983), 505-509.
- [82] 青木勇, アモルファス合金箔のせん断加工における工具の摩耗 (アモルファス合金箔のせん断加工 II), 塑性と加工, 27-308 (1986), 1078-1083.
- [83] 村川正夫・青木勇, せん断加工製品の精度と加工寿命, 塑性と加工, 29-324 (1988), 60-68.
- [84] 高石和年, ステンレス鋼打抜きにおける小径打抜き工具の摩耗特性, 塑性と加工, 29-330 (1988), 695-700.
- [85] 青木勇・柏原宏人・飯野光明, 打抜き工具の摩耗に及ぼす表面処理の効果, 塑性と加工, 30-342 (1989), 982-988.
- [86] 古閑伸裕・村川正夫, コーテッド打抜き工具の寿命調査, 平成6年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1994), 83-86.
- [87] 高橋正春・小木曾久人・中野禪, イオン注入技術と金型の改質, 塑性と加工, 34-395 (1993), 1295-1301.
- [88] (社) 塑性加工学会編, プロセスライポロジー, (1993), コロナ社, 220-221.
- [89] 青木勇, 潤滑性能に及ぼすショットピーニングの効果, 第43回塑性加工連合講演会講演論文集, (1992), 311-313.
- [90] 青木勇, 潤滑性能に及ぼすショットピーニングの効果 (第2報) 工具硬さと面圧の影響, 平成5年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1993), 459-462.
- [91] Schey, J. A. and Lonn, A. H., Durability of Graphite Films in Plastic Deformation, Transactions of the ASME, Ser. F, Journal of Lubrication Technology, 97 (1975), 289-295.
- [92] 前田禎三・青木勇, 丸形打抜き時のかす取り力と押し込み力に及ぼす材料支持条件と潤滑の影響, 塑性と加工, 22-240 (1981), 26-30.

- [93] Birzer, F., Papers presented: International Feintool Fineblanking Symposium, 16th to 19th, (1984), 143.
- [94] 片岡征二・木原諒二・相澤龍彦, 塑性加工におけるミクロブールメカニズムに関する研究動向, トライボロジスト, **37-1** (1992), 35-41.
- [95] 青木勇・森田真二, 打抜き加工における押し込み力とかす取り力に関する研究, 昭和63年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1988), 331-334.
- [96] オリンパス光学工業株式会社, 消化器内視鏡用処置具カタログ.

謝辞

本論文は、神奈川大学工学部機械工学科において、青木勇教授の御指導のもと、著者が1993年4月から1996年12月までの約4年の間に行った研究の成果をまとめたものである。本研究を行う機会を与えてくださり、研究当初より懇切丁寧なご指導を賜ったことに深甚なる謝意を表します。また、直接・間接に有益な助言と指導を賜った東京大学教授・樋口俊郎博士に厚く御礼申し上げます。また本論文を御査読いただき有益なご助言を賜りました東京大学教授・須賀唯知博士、東京大学教授・増沢隆久博士、東京大学教授・横井秀俊博士、東京大学助教授・黒澤実博士に厚くお礼申し上げます。

本研究に協力していただきました日本工業大学教授・鈴木清博士、三菱電線工業(株)三原慎一郎様、理化学研究所・山形豊博士に厚くお礼申し上げます。

実験の遂行にあたり、ご協力賜った日立湘南電子(株)、オムロン(株)、三菱電線工業(株)、(株)出光興産、ヘガネスジャパン(株)、THK(株)の各社に感謝申し上げます。

さらに、実験及び解析を熱心にお手伝いいただいた当時神奈川大学大学院生の斉藤啓君、上野晴哉君、篠田一成君、後藤明君、坂本琴さんに厚くお礼申し上げます。

本研究は微細素子をせん断加工で製作することを目的として行ったものである。さらに詳細に研究する余地は多々あるが、これまでの機械加工による微細成形技術の一部として寄与できる部分もあるのではないかと考えている次第である。

本研究に関連して発表した論文

- [1] Aoki, I., Takahashi, T., Mihara, S., Yamagata, Y., Higuchi, T., Trial Production of Medical Micro-Tool by Metal Deformation Processes Using Moulds, Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, (1995), 344-349.
- [2] 高橋俊典・青木勇, パンチ変形の新たな決定法 -微細せん断の加工機構 1-, 日本塑性加工学会誌, **36**-409 (1995), 155-160.
- [3] 青木勇・高橋俊典, せん断加工力と工具寿命に及ぼすパンチ表面性状の影響, 日本塑性加工学会誌, **36**-414 (1995), 749-754.
- [4] I. Aoki, T. Takahashi, Improvement of Lubricity on Die Mould of Micropool Effect by Shot Peening, Proceedings of 3rd International Conference on Die & Mould Technology, (1995), 375-381.
- [5] 高橋俊典・青木勇, 画像処理を使った Visioplasticity 法によるせん断変形解析, 日本機械学会論文集 (C 編), **62**-600 (1996), 256-261.
- [6] Takahashi, T., Aoki, I., Development of Analyzing System Applicable for Large Plastic Deformation, Proceedings of the 5th International Conference on Technology of Plasticity, 2 (1996), 583-590.
- [7] Aoki, I., Takahashi, T., Development of Metal-Forming Machine for Fabricating Micromechanical Component, Proceedings of SPIE, 2879 (1996), 347-355.
- [8] 青木勇・高橋俊典・上野晴哉・樋口俊郎, 三次元マイクロ素子成形プレスマシンの開発, 日本塑性加工学会誌, **37**-430 (1996), 1199-1206.
- [9] 青木勇・高橋俊典・斉藤啓・後藤明・坂本琴, せん断加工における偏心クリアランスは正作用と側方力に関する基礎研究, 日本塑性加工学会誌, **37**-431 (1996), 1316-1321.
- [10] Aoki, I., Takahashi, T., Suzuki, K., Finishing and Deburring of Medical Micro-Parts by Using Magnetic Abrasive Machining, Proceedings of the ICPE'96 and 6th SJSUT, (1996), 115-118.

