

新塑性加工技術シリーズ 4

せん断加工

— プレス切断加工の基礎と活用技術 —

日本塑性加工学会 編

コロナ社

■ 新塑性加工技術シリーズ出版部会

部会長	浅川基男	(早稲田大学名誉教授)
副部会長	石川孝司	(名古屋大学名誉教授, 中部大学)
副部会長	小川茂	(新日鉄住金エンジニアリング株式会社顧問)
幹事	瀧澤英男	(日本工業大学)
幹事	鳥塚史郎	(兵庫県立大学)
顧問	真鍋健一	(首都大学東京)
委員	宇都宮裕	(大阪大学)
委員	高橋進	(日本大学)
委員	中哲夫	(徳島工業短期大学)
委員	村田良美	(明治大学)

(所属は2016年5月現在)

刊行のことば

ものづくりの重要な基盤である塑性加工技術は、わが国ではいまや成熟し、新たな展開への時代を迎えている。

当学会編の「塑性加工技術シリーズ」全19巻は1990年に刊行され、わが国で初めて塑性加工の全分野を網羅し体系立てられたシリーズの専門書として、好評を博してきた。しかし、塑性加工の基礎は変わらないまでも、この四半世紀の間、周辺技術の発展に伴い塑性加工技術も進歩も遂げ、内容の見直しが必要となってきた。そこで、当学会では2014年より新塑性加工技術シリーズ出版部会を立ち上げ、本学会の会員を中心とした各分野の専門家からなる専門出版部会で本シリーズの改編に取り組むことになった。改編にあたって、各巻とも基本的には旧シリーズの特長を引き継ぎ、その後の発展と最新データを盛り込む方針としている。

新シリーズが、塑性加工とその関連分野に携わる技術者・研究者に、旧シリーズにも増して有益な技術書として活用されることを念じている。

2016年4月

日本塑性加工学会 第51期会長 真 鍋 健 一

(首都大学東京教授 工博)

■ 「せん断加工」 専門部会

部会長 古 閑 伸 裕 (日本工業大学)

■ 執筆者

古 閑 伸 裕 (日本工業大学) 1, 2, 5 章, 7.3 節
笹 田 昌 弘 (神奈川大学) 3 章
広 田 健 治 (福岡工業大学) 4 章
村 川 正 夫 (日本工業大学) 5.1.1 項
井 村 隆 昭 (アイダエンジニアリング株式会社) 6 章, 7.1 節
江 口 浩 (株式会社アマダ) 7.2 節
吉 田 佳 典 (岐阜大学) 8 章

(2016 年 4 月現在, 執筆順)

青 木 勇	鈴 木 浩 興
青 木 恒 夫	関 根 文 太 郎
足 立 達 也	中 川 威 雄
遠 藤 順 一	松 本 芳 洋
大 内 信 隆	村 川 正 夫
小 松 勇	山 下 明 雄
近 藤 一 義	横 井 秀 俊
神 馬 敬	(五十音順)

ま え が き

塑性加工技術シリーズ『せん断加工』初版の「まえがき」にも記されているように、せん断加工は、塑性加工の現場で最も多く見受けられる加工法である。すなわち、素材製造の現場ではシヤーによるせん断と圧延が繰り返し行われ、最終工程ではスリッターによるトリミングや定尺サイズへの切断がせん断加工により行われる。プレス加工の分野においても、ブランク取りのためのシヤーリングや打抜き、成形後のトリミングや穴あけなどの切断加工が、プレスせん断加工により行われる。このようにせん断加工が多用される理由は、せん断加工が他の切断加工法に比べ、高い生産性を有するためである。そして最近では、金型の加工技術進歩やプレス機械の高精度化や高剛性化とも相まって、せん断加工と他の塑性加工との複合加工が可能となり、加工の高効率化や機能部品のせん断を含む塑性加工への工法転換が進められるなど、せん断加工の需要はますます拡大している。

塑性加工技術シリーズ『せん断加工』は、初版第1刷が1992年に出版され、今日に至るまで、多くの技術者や研究者に購読いただき、新技術の開発や従来技術の改善などに活用いただいた。本書においては、それ以降に新たに塑性加工の対象となった、高強度鋼板やマグネシウム合金などの新材料のせん断加工技術、進歩の著しいサーボプレス機械などの塑性加工機械の紹介やその活用技術に関する内容を加筆した。さらに、塑性加工のなかで唯一破壊を伴う加工であることから、その解析が困難とされてきた、せん断加工のFEM解析についても新たに加筆した。

本書も塑性加工技術シリーズ『せん断加工』と同様に、せん断加工に携わっ

ておられる技術者や研究者に有効な書として活用されることを願って止まない。

本書を発刊するにあたり，現在，国内でせん断加工を中心に研究を行っておられる大学の先生方，塑性加工機械の開発に携わっておられるメーカーの研究開発者の方々にご協力いただいた。ここに改めて御礼申し上げる。

2016年4月

「せん断加工」専門部会長 古閑 伸裕

目 次

1. せん断加工の役割

1.1	切断加工としてのせん断加工	1
1.2	せん断加工の分類と適用例	2
1.3	プレスせん断加工の分類	5
1.4	最近のせん断加工技術の傾向	6
1.4.1	打抜き品の軽薄短小化	6
1.4.2	半導体関連の電子部品の打抜き	6
1.4.3	打抜きを含めた複合加工	6
1.4.4	新素材加工	7
1.4.5	自動化と高速化	7
1.4.6	多品種少量生産	7
1.5	金 型 技 術	8
1.5.1	金 型 材 料	8
1.5.2	金 型 製 作	8
1.6	プ レ ス 機 械	9
	引用・参考文献	9

2. せん断加工特性

2.1	加 工 現 象	10
-----	---------	----

2.1.1	せん断加工の特性と種類	10
2.1.2	各部名称	11
2.1.3	変形過程	12
2.1.4	せん断線図	17
2.1.5	せん断機構の理論	19
2.2	せん断荷重とせん断エネルギー	22
2.2.1	せん断荷重	22
2.2.2	せん断エネルギー	26
2.2.3	側方力	28
2.2.4	押込み力とかす取り力	29
2.3	せん断製品の切口面	29
2.3.1	クリアランスと切口面	29
2.3.2	工具条件と切口面	31
2.3.3	加工条件と切口面	34
2.3.4	材料特性と切口面	35
2.4	せん断製品の寸法精度と湾曲	36
2.4.1	寸法精度	36
2.4.2	湾曲	41
	引用・参考文献	44

3. 工 具 寿 命

3.1	工 具 摩 耗	46
3.1.1	せん断加工における工具摩耗	46
3.1.2	工具切れ刃の摩耗形状	46
3.1.3	工具切れ刃の摩耗機構	48
3.1.4	工具刃先の欠損	52
3.1.5	工具摩耗に及ぼす工具条件の影響	53
3.1.6	工具摩耗に及ぼす加工条件の影響	58
3.1.7	加工力に及ぼす工具摩耗の影響	62
3.1.8	製品性状に及ぼす工具摩耗の影響	63

3.2 か え り	64
3.2.1 かえりの形状	64
3.2.2 かえりの発生機構	65
3.2.3 かえり高さと工具摩耗	67
3.2.4 欠損とかえり	69
3.2.5 加工条件とかえり	69
3.2.6 表面処理とかえり	70
3.2.7 かえりの処理	71
3.3 かす上がり, かす詰り	72
3.3.1 問題点	72
3.3.2 発生原因	73
3.3.3 対策	76
引用・参考文献	78

4. 精密せん断加工

4.1 精密せん断加工の目的	80
4.2 ファインブランキング	81
4.2.1 加工の概要	81
4.2.2 加工機構	83
4.2.3 金型	85
4.2.4 加工事例	88
4.3 各種精密せん断加工	89
4.3.1 仕上げ抜き	89
4.3.2 シェービング	93
4.3.3 対向ダイスせん断法	97
4.3.4 かえりなしせん断法	102
4.3.5 だれなしせん断加工	107
4.4 微細部品のせん断加工	107
4.4.1 加工の特徴	107
4.4.2 リードフレーム打抜きにおける形状不良	108

4.5 棒管材のせん断加工	114
4.5.1 冷間鍛造用素材取りとしての慣用棒材せん断法	114
4.5.2 高速せん断法	120
4.5.3 拘束せん断法	125
4.5.4 管材のせん断法	125
引用・参考文献	128

5. 特殊材料のせん断加工

5.1 難加工材のせん断加工	131
5.1.1 高強度鋼板	131
5.1.2 マグネシウム合金板	140
5.1.3 アモルファス合金箔	143
5.1.4 セラミックグリーンシート	147
5.2 プラスチック材料のせん断加工	148
5.2.1 熱可塑性プラスチック	149
5.2.2 プラスチック複合材料	154
5.2.3 樹脂複合鋼板のせん断加工	163
引用・参考文献	165

6. せん断型

6.1 型設計	167
6.1.1 せん断型の種類と等級	167
6.1.2 せん断荷重・かす取り力の計算	168
6.1.3 クリアランスの選定	171
6.1.4 抜きレイアウト設計と工程設計	172
6.1.5 型構造の設計と機能	174
6.1.6 パンチ・ダイの設計	177
6.1.7 ストリッパーの設計	179

6.1.8	材料ガイド・パイロットの設計	180
6.1.9	ダイセット, ガイドポスト, ガイドブシュの設計	181
6.1.10	ミスフィード対策	182
6.1.11	型部品の規格と設計	183
6.1.12	精密抜き型, 簡易型	184
6.2	型 材 料	185
6.2.1	鉄 鋼 材 料	185
6.2.2	超 硬 合 金 材 料	186
6.2.3	超硬合金の種類と特性値	188
6.2.4	型用超硬合金材種の選び方	191
6.2.5	セラミックス材料	192
6.2.6	表 面 処 理	193
6.3	型 製 作	194
	引用・参考文献	196

7. せん断機械

7.1	プレス機械	197
7.1.1	せん断加工に用いられる材料	198
7.1.2	せん断加工時の加工温度	199
7.1.3	プレス機械以外の機械によるせん断加工	199
7.1.4	せん断加工に用いられる設備	200
7.1.5	サーボプレス	212
7.2	タレットパンチプレス	214
7.2.1	本体と機能	214
7.2.2	付加機能	216
7.2.3	パンチング金型	219
7.2.4	成形用金型	219
7.2.5	複合機, 複合加工	221
7.3	素材のせん断加工機械	222
7.3.1	スリッター	222

7.3.2 ギロチン式シヤー	230
引用・参考文献	234

8. せん断加工の数値解析

8.1 せん断加工変形解析の特徴	235
8.1.1 せん断加工変形解析の目的	235
8.1.2 せん断加工変形解析の課題	236
8.2 要素配置	237
8.2.1 アダプティブメッシング	237
8.2.2 リメッシング	239
8.3 FEMにおける亀裂の表現	239
8.3.1 節点分離法	240
8.3.2 要素除去法	240
8.3.3 ボイド理論に基づく方法	241
8.3.4 その他の手法	241
8.4 延性破壊条件	242
8.4.1 積分型延性破壊条件式	242
8.4.2 ボイド理論に基づく方法	243
8.5 せん断加工の有限要素解析事例	246
8.5.1 慣用せん断の変形解析	246
8.5.2 工具刃先の取扱	246
8.5.3 亀裂発生および進展予測	247
8.5.4 精密打抜き（ファインブランキング）の変形解析	248
引用・参考文献	249

索引	251
----	-----

1.1 切断加工としてのせん断加工

多くの製品や部品を製造する際に、「切る」という工程は最も基本的な加工法である。素材から切断されてそのまま部品として完成するものもあれば、後工程を経て最終部品となるものも多い。例えば、薄鋼板の製造においては、連続鑄造スラブは切断と圧延が繰り返されてコイル材になる。さらに、この薄鋼板が自動車ボデーに使われる場合、一度輪郭切断された後、深絞り成形され、さらに穴あけや縁取り切断されて成形工程を終了する。このように、最終的に部品の仕上がりまでには幾度となく切断が繰り返されている。これらの切断工程は、ほとんどの場合、せん断加工によって行われている。

さて、切断加工法としてはいろいろな加工法があるが、大別すると表 1.1 のように除去切断と破壊切断に大別できる。除去切断は、材料の一部を除去することにより切断分離するものである。除去切断のうち、機械的除去切断法は、工具を使って材料を少しずつ除去する切断法で、切削加工、砥粒加工およ

表 1.1 各種切断加工法

切断加工	除去切断	機械的 — 切削, 砥粒加工, ウォータージェット 熱 的 — 溶断, レーザー, 電子ビーム, 放電 化学的 — エッチング
	破壊切断	引張り, 曲げ せん断 ナイフ刃切断

2.1 加工現象

2.1.1 せん断加工の特性と種類

一般の塑性加工は、被加工材料に破壊を起こさせない範囲の塑性変形を与えて所望の形状や寸法の製品を得ようとする加工であるが、せん断加工では、ほとんどの場合、被加工材料を破断領域までもっていき、製品を原材料から分離して得る加工である。すなわち、破壊領域の加工であるが、材料分離までの変形過程は破壊を主とする加工ではなく、せん断切口面を形成していく過程は一つの塑性変形過程であり、延性の高い材料の場合は破壊を生じさせることなくせん断切口面が形成される場合もある。

せん断加工における特性は、得られる製品に着目すると、切口面の性状、寸法精度、かえり、反り（湾曲）や変形などがあり、加工する作業面に着目すると、加工荷重、金型寿命、かす上がり、かす詰りなどがある。これらの特性に影響を及ぼす因子は、被加工材料の特性、工具条件、製品形状、加工速度、潤滑などである。これら因子が影響し合ってせん断加工の特性が変化する。特性と要因との関係を理解するには、破壊までのせん断変形の過程を把握する必要がある。

せん断加工には、図1.2に示すように、多くの種類に分類できる。ここでは、最も一般的な打抜きや穴あけにおける材料の変形過程を詳細に述べ、せん断加工の特性を説明する。

3

工具寿命

3.1 工具摩耗¹⁾

3.1.1 セン断加工における工具摩耗

塑性加工は一般に大量生産を身上とする。したがって、工具の摩耗がとりわけ大事であり、せん断加工もこの例にもれない。むしろ、工具摩耗が特に重要視される分野といえる。これは、せん断加工が本質的に亀裂を伴う分離加工であり、この亀裂発生が工具刃先の状態をきわめて鋭敏に反映することによっている。また、せん断加工は、原理的に一对の工具によってなされる加工である。製品精度や切口面の性状が工具の設計、製作の段階で決定されるため、重要なことは製作された工具切れ刃形状をできるだけ最初の状態に保ち、長期にわたり良好な製品を得ることにある。このため、せん断におけるトライボロジーは工具摩耗や欠損が中心になる。

また、潤滑技術などの観点から、切口面の向上や、加工力の低減を図ることが考えられるが、この影響は摩耗の問題に比べるとはるかに小さく、材料の摩擦に起因する加工力成分だけが特に注目される程度である。実務的には摩耗や欠損といった工具損傷による変化のほうがはるかに大きい。したがって、本章では工具切れ刃の損傷を中心に述べることとする。

3.1.2 工具切れ刃の摩耗形状

せん断工具の切れ刃摩耗形状は、模式的に図 3.1 のように表せる。S₁、S₃

4.1 精密せん断加工の目的

せん断加工は生産性の高さが特徴であるが、切口面付近ではせん断変形および破断を伴うため、十分な加工精度が得られない場合がある。具体的には切口面に生じるだれ、破断面、かえり、部品全体で見れば反り、曲がり、ねじれ、輪郭寸法誤差などが挙げられる。これらが問題となる場合には、後加工を要したり他の切断技術が用いられるなど、せん断加工本来の長所が損なわれる。このため、これらの欠陥が生じないような工法が開発され、精密せん断法と呼ばれている。すべての欠陥を抑制するのが理想であるが、実際には抑制対象を絞った開発がなされている。

切口面の品質が重視される部品では破断面の抑制が求められ、4.2節で述べるファインブランキングが広く用いられている。だれは、適度であれば問題となることは少ないが、ギヤの歯先や幅の狭い部品などで顕著になる場合には対策が求められる。かえりは、板厚方向への突出や脱落が問題となる場合に抑制する必要がある。近年その要求が高まっている。微細部品では板厚に対して相対的に部品の輪郭寸法が大きくなり、反りや曲がりのような形状不良が生じやすくなる。また、相似な変形を仮定すると板厚が薄くなるほど、クリアランスの精度や工具刃先の摩耗の影響が大きく現れる。

棒材や管材では長尺品を分断する用途でせん断加工が用いられるが、切断部では厚さの異なる条件でせん断が行われることになり、変形は複雑になる。棒

5.1 難加工材のせん断加工

最近では、自動車などの軽量化のための特殊金属材料、複合材料、高分子材料などの新素材もせん断加工の対象となっている。これらの中には、加工条件を適切に選ばなければうまくせん断できない材料、従来技術だけではうまくせん断できない材料、たとえ、せん断できても極端に工具寿命が短いものなど多くの材料がある。本章では、このような特殊材料のせん断特性、問題点、さらにはこれら材料用に開発された精密せん断法などについて紹介する。

難加工材の特別な定義はないが、ここでは、従来のせん断加工では平滑な切口面が得にくい材料、工具の摩耗が激しく、工具の寿命がきわめて短い材料を指すこととする。一部材料については、3.1節でも触れているため、本章ではそれ以外の難加工材について述べる。

5.1.1 高強度鋼板

ここでは、強度の高い鋼板を汎用的に「高強度鋼板」と定義する。これらの中でもハイテン材と呼ばれる引張強さ（TS）が1200 MPa程度までの冷間圧延鋼板は、自動車用部品の製造に広く用いられている。別の高強度化の試みとして、ホットスタンピングが注目されており、現在ではTSが1800 MPa級までの鋼板の成形が実用化されている¹⁾。このような鋼板は自動車のフロントバンパーのような骨格・構造部材へ適用されているが、これら以外の一般機能部

6

せん断型

6.1 型 設 計

6.1.1 せん断型の種類と等級

せん断型は、加工素材に対して物理的な外力を与え、所定の形状に分断することを目的とした専用工具である。その種類や形式、呼び方は、加工の種類に合わせて各種あり、外形抜き型、穴抜き型、切断型、切込み型、縁切り型などがある。さらに同様な型であっても、角穴抜き型、丸穴抜き型、切離し型など個別の呼び方をしているものもあり、一定していない。

一般的に、これらをその機能、構造から見て分類すると、単抜き型、総抜き型（複合型）、順送型の3種類に大別できる。

〔1〕 単 抜 き 型

所定の一部分を単独に1工程だけ加工する型で、外形抜き型、穴抜き型、切断型、切込み型、縁切り型などがこの範疇であり、簡単な形状のものや、比較的生産量が少ない部品の加工に利用されている。

〔2〕 総抜き型（複合型）

穴と外形を一つの型で、しかもプレスで1ストロークで加工を完了させる形式の型構造を持つ。単抜き型より型費は高価であるが、部品の生産スピードは早く、比較的部品の寸法精度も良い。

〔3〕 順 送 型

一つの型の中に穴や外形を抜く2ステージ以上を配置し、フープ材などを連

7.1 プレス機械

せん断加工を行うプレス機械は、対象材料によって形式あるいは機能が異なる。せん断加工を伴う加工には、つぎのような作業があり、それぞれの作業に合ったせん断機械が選択される。

- (1) コイル材を巻きほぐしながら一定の長さに切る作業を、定尺せん断加工という。この加工を行う機械を定尺せん断ライン、もしくは、単にシヤーラインという。
- (2) 定尺せん断加工された定尺材料をさらに小さく切り分ける、短尺材せん断加工がある。最近は数値制御装置で自動化された送り装置付きのシヤーが用いられることが多い。
- (3) コイル材をロール成形装置で連続的に成形しながら、一定の長さにせん断する機械がある。ロール成形装置は連続的に運転されるので、走行成形された連続材料を、停止させることなくせん断する必要がある。そのため、せん断機械の刃物は、せん断中は通過する材料と同じ速度まで加速され、相対速度0のまま走行しながらせん断作業を終わる。用いられるせん断装置を走間せん断機、もしくは、フライングシヤーという。
- (4) コイル材料を切断型あるいはブランキング型で、必要な形に切断したり、ブランキングするせん断加工機械および装置をブランキングラインと呼び、用いられるプレスをブランキングプレスと称す。

8.1 せん断加工変形解析の特徴

せん断加工の加工条件を実験的手法のみによって最適化することは非効率的であり、このため理論的な解決手法の登場が望まれてきた。そのような状況において、近年、塑性加工の分野において有限要素法（finite element method, FEM）をはじめとする数値解析法が普及しかつ成果を挙げており、せん断加工においても、これらを用いた研究がさらに活発に行われ、加工技術の高度化が期待される。

しかしながらせん断加工は、もともと一体であった連続体を複数の領域に材料分離する特異な加工である。材料分離は、FEMの理論においては元来想定されていない現象であるため、さまざまな工夫を施して計算を進める必要がある。本章では、FEMをせん断加工の変形解析に適用する際に考慮しなければならないポイントについて触れ、その対応策について解説し、関連の研究事例について紹介する。

8.1.1 せん断加工変形解析の目的

図8.1に板材の慣用せん断加工の概念図を示す。板押え（ストリッパー）とダイ上面との間で素材を固定し、パンチの降下によってパンチとダイの間（工具クリアランス）において、せん断変形を生じさせることで最終的に材料分離を実現する。せん断加工部においては、パンチおよびダイ刃先の押込みに

精密せん断	80			複合加工	88, 221
セラミックグリーンシート		【な】		複合型	167
	147	ナイフ刃による突切り	154	複合機	221
セラミックス	192	斜めくぼみ摩耗	47	複合材料	154
せん断エネルギー	26	斜め摩耗	47	縁取り加工	5
せん断荷重	22, 168	【に】		プレス機械	197
せん断型	167	二次せん断	16	プレスせん断	2
せん断仕事	22	二次せん断断面	30	フローパンチング法	95
せん断線図	17	二重突切り型	126	フローブランピング法	95
せん断速度	24, 61	【ぬ】		分断加工	5
せん断抵抗	22, 150	抜きレイアウト	172	粉末高速度工具鋼	186
せん断面	11	【ね】		【へ】	
【そ】		熱可塑性プラスチック	149	偏 心	40
総抜き型	167	【は】		【ほ】	
側方力	28	パイロット	181	棒管材のせん断加工	114
【た】		破壊切断	1	【ま】	
ダ イ	11, 177	刃角丸み	90	マグネシウム合金板	140
対向ダイスせん断法	97	箔	143	マトリックスハイス	186
ダイセット	181	薄層せん断	20	【み】	
だ れ	11	破断面	11	ミスフィード	182
タレットパンチプレス	214	パンチ	11, 111, 177	【ゆ】	
だれなしせん断加工	107	パンチング金型	219	有限要素法	235
単純せん断	19	【ひ】		【り】	
単抜き型	167	被加工材	61	リリーフ	120
断熱効果	121	表面処理	56, 70, 193	理論解析	19
【ち】		表面焼け	121	【ろ】	
超音波振動打抜き	160	平押し法	105	ローリングカットシヤー	232
超硬合金	186	疲 勞	132	【わ】	
【つ】		疲労強度	139	湾 曲	41
突切り型	126	【ふ】			
【と】		ファイブブランピング	81		
取り代	94	フェノール樹脂積層板	155		

【P】

PW パンチ

92

【V】

V字形突起

86

せん断加工——プレス切断加工の基礎と活用技術——

Shearing — Basis and Utilized Technology of Press Shearing

© 一般社団法人 日本塑性加工学会 2016

2016年6月30日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 一般社団法人
日本塑性加工学会
東京都港区芝大門1-3-11
Y・S・Kビル4F
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04374-7 (横尾) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします