

せん断技術と被せん断面の性状



村川正夫*

Shearing Techniques and Their Resulting Sheared Surfaces

Masao MURAKAWA

1. ま え が き

材料をある形状を持つた製品、半成品へと加工する際に例えば圧延、鍛造といった塑性加工の手段が古くから用いられており、これらの塑性加工技術の進歩により今日の大量生産の時代がもたらされたということは周知であろう。しかしながら、これらの製品、半成品を完成させようとする時に必ずといって良いほど「切る」という工程が必要となつてくることも忘れてはならない。本解説では、主としてせん断技術からなるこの「切る」技術にはどんな技術があるか、また当該技術によつてどんな被加工面が得られるかということの説明し、読者の参考に供したい。

2. せん断加工の特徴

2.1 せん断加工における材料の変形

普通に用いられる図1(a)のような一对のポンチとダイスで材料をせん断する際のせん断加工現象を考えてみる。まず、ポンチが下降し材料に接すると、材料はポンチ面とダイス面により圧縮力を受け、その結果クリアランス領域近辺の材料はせん断変形を受け始める。せん断加工における材料の変形状態を示す図1(b)以下において、ポンチに加えられる力が増すと、材料は降伏し、ポンチ、ダイスとも材料内への食い込みを始める(図1(b))。ただしこの際に材料繊維の分断が発生していないのが、せん断加工の特徴であり、さらに外力によるポンチ、ダイスの食い込み増加が続くと、材料はその加工硬化能による抵抗力で外力とのバランスを保持するが、ある食い込み量以上になると(図1(c))それ以上のせん断変形に材料が耐えられなくなり、き裂が発生し、成長して材料の破壊分離が発生する(図1(d))。

2.2 せん断切口面の特徴

図2にせん断加工により得られる一般的切口面の特徴を示す。

(1) だれ：だれは工具切刃部により周辺の材料が引張り込まれたために生ずる。まただれはせん断過程の初

期の状態から前述の加工硬化能が尽きる食い込み状態まで(ほぼ最大荷重点まで)成長していく。そのため加工硬化係数(n 値)の大きい材料ほどだれも大きくなる。

(2) せん断面：せん断面は材料内に食い込んだ工具側面によつてバニシされてできる平滑な面である。ただし通常は切刃刃先付近の傷や、刃先付近についた溶着金

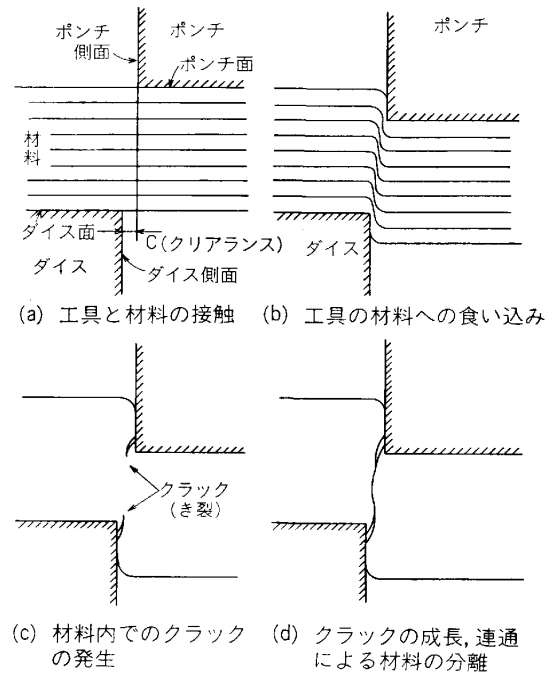


図1 せん断加工における材料の変形機構

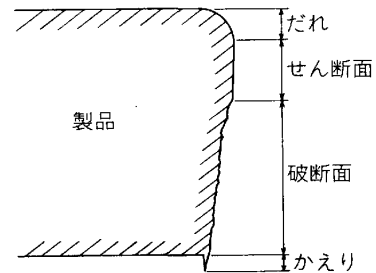


図2 せん断加工による切口面

昭和59年8月13日受付 (Received Aug. 13, 1984) (依頼解説)

* 日本工業大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nippon Institute of Technology, 4-1 Gakuendai Miyashiro-cho Minamisaitama-gun Saitama pref. 345)

属等によつて材料がこすられるために、材料にはせん断方向に細かい傷がつく。ただし刃先をシャープにし、溶着物がつきにくい加工条件を選べば、せん断面のあらさを $10 \mu\text{m}$ 以下とすることもそう困難ではない。

このせん断面の大きさは工具が材料にき裂の発生するまで食い込める量に比例するので、一般的にはき裂の発生しにくい、延性の大きい材料ほど大きくなると言えよう。ただしせん断面の大きさは材料の特性のみによつて定まるのではなく、工具のクリアランス及び切刃の丸味等の加工条件によつても大きく影響を受ける。

(3) 破断面：破断面は前述したように材料の変形能が尽きた時点で発生するき裂が成長してできるものであり、一般的にはせん断面にくらべてずつとあらい面であるが、き裂の方向の制御によつては種々の破断面を得ることができる。

(4) かえり：かえりとは、切刃先端の応力状態が高圧縮応力状態にあるため図 1 (c) に示したようにき裂発生が切刃先端よりわずかに側面に入ったところでおこることで発生するものであり、加工硬化して硬く、鋭利な形状をしている。このかえりは切刃が摩耗し丸味を帯びるに従つて大きくなる。また過大なクリアランスでせん断した場合にも大きくなる。

被せん断面形状とは結局以上説明した、だれ、せん断面、破断面及びかえりによつて規定されると考えて良い。

3. 各種せん断技術とその特徴

せん断加工で得られる切口面の内、だれ、破断面、かえりは特殊な場合を除いてせん断製品の欠点とされる。従つてこれまで研究、開発されてきた各種新せん断技術はほとんどの場合、前記せん断製品の欠点を除き、より高精度のせん断製品を得ることを目的としている。本解説が対象とする材質は鋼材が主たるものであるが、プラスチック材についても一部触れておく。なお材料の形状としては、板材が主たる研究対象となつており、その他棒材の新せん断技術も幾つか開発されているが、ここではページ数の関係上後者については割愛する。

3.1 平滑な切口面を得ることを目的とするせん断技術

3.1.1 精密打ち抜き法¹⁾

一般に金属材料は高い静水圧力下においてその延性が高まることが実験、理論により示されている。この原理をせん断加工に積極的に応用したのがここで説明する精密打ち抜き法と呼ばれる方法である。

すなわちこの方法は、図 3 に示すように、板をダイスと板押さえの間で加圧し、ポンチ下の材料も逆押さえにより加圧することにより、せん断変形部の材料を高い静水圧縮応力状態に保つて、き裂を発生させずにせん断分離を行う方法である。なお静水圧を高める補助手段として、クリアランスは $1/100 \text{ mm}$ 程度の極めて小さな値とし、ダイス切刃に多少の丸味をつける。ポンチ切刃に丸

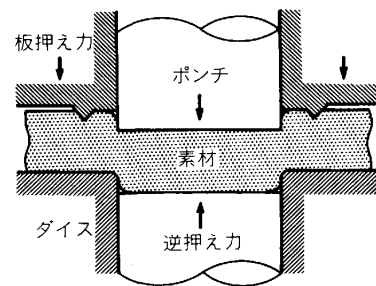


図 3 精密打ち抜き法の原理

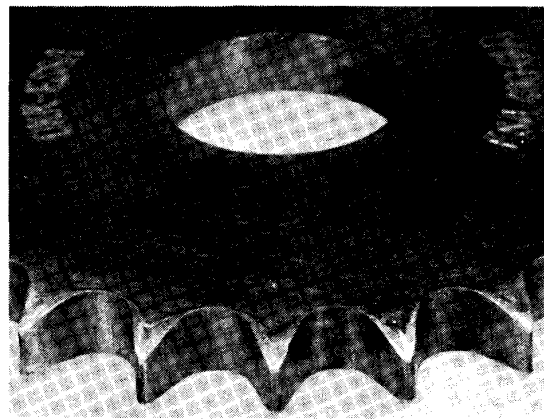


写真 1 精密打ち抜きにより得られた製品の例 ($t=8 \text{ mm}$)

味をつけることは、打ち抜き製品のかえりを増大させるのでむしろ有害である。

板押さえ力の役割はダイス面上の板をしっかりと固定し、せん断過程中刃先付近に生ずる圧縮応力を高めることにあり、突起はこの板押さえの働きを効果的に高める作用を行つているもので、通常三角形の形状が用いられる。

精密打ち抜きの場合、だれは慣用せん断法に比べてかなり少なくなるが、かえりは打ち抜き数の増大にともないかなり大きくなつてくるので、通常はバレル加工等によつてかえり取りを行う必要がある。

写真 1 に精密打ち抜きで得られた製品の切口面の例を示しておく。

3.1.2 仕上げ抜き法²⁾

この方法は図 4 に示すように、クリアランスをほぼゼロの状態にして、ダイス切刃に丸味 R_d をつけて打ち抜き方法で、この丸味及び小さなクリアランスの効果により切刃付近材料内の静水圧が高められ、せん断過程中に生ずるクラックの発生が押さえられるので、平滑なせん断面をもつた打ち抜き品が得られる。いわば精密打ち抜き法の簡易版であり、材料の種類によつては十分その目的を達成することができる。切刃につける最適 R_d は、被加工材の材質、板厚等によつて異なるが、板厚の 10% 程度が一応の目安である。すなわち、小さすぎると静水圧効果を高める作用がなくなるし、大きすぎると大

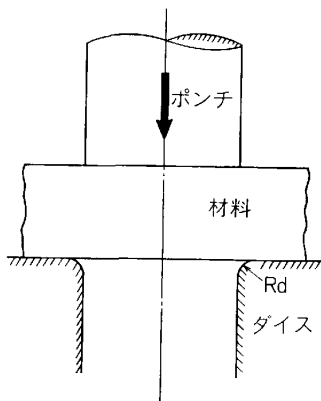


図 4 仕上げ抜き法の原理

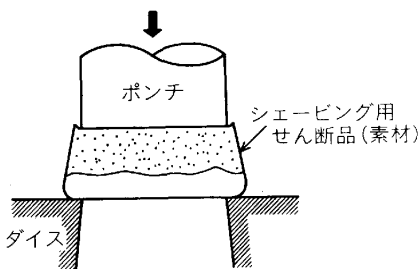


図 5 (冷間)シェーピング法の原理

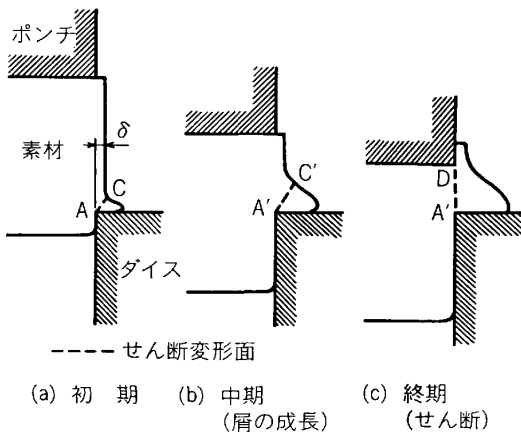


図 6 シェーピング加工機構

きなかえりが発生したり、わん曲が大きくなりこれまた良くない。

3.1.3 冷間シェーピング法⁹⁾

通常板厚が例えば 3 mm 以上と大きくなると、クリアランスを小さくしただけでは満足な製品を得ることはできない。これを良好に仕上げる方法にシェーピング法がある。図 5 に示すように、いつたんせん断された切口面を再度同様なせん断工具で削り取り、平滑な切口面を得る方法である。

この方法の特徴は、図 6 に示したシェーピング加工機構図⁴⁾からもわかるように、加工の初期(図 6 (a))においては面 AC に沿って素材のせん断変形が起こること

である。図 6 (c) に示す加工の終わりに近づくと、面 A'C' でのせん断変形よりも面 A'D に沿ってのせん断変形の方が起こりやすくなり、この面での通常のせん断加工が行われる。

シェーピング法においては前述の説明からもわかるように、削り代 δ が小さいほど、屑が流れやすくなり切削機構の全ストロークに占める割合が大きくなり、良いシェーピング加工面が得られる。ただし δ が小さすぎるとシェーピング素材の破断面を取り切れないので、 δ の最適値は、被加工材の材質にもよるが、板厚の 5 % 程度とされている。

シェーピング法の利点は、他の精密せん断法と異なり、切削行程が全ストロークのかなりの部分を占めているので、被加工材の延性に関係なく、ほとんどの材料に適用できるという点である。ただ実際には板厚が大きくなってくると、板厚の大部分を平滑面にするのはかなり困難となってくる。従って精密打ち抜き法が普及した現在では鉛入り黄銅、アルミ合金、ペークライトといった延性がとぼしく精密打ち抜きが困難な材料にもつばらシェーピング法が用いられているのが実情であろう。

3.1.4 温間シェーピング法⁵⁾

実際に冷間シェーピング法を行ってみると、満足のいく平滑な切口面が得られなかつたり、2 工程を要することが障害となつたりして、必ずしも満足に使用できないことも多い。そのため振動シェーピング⁶⁾、重ね抜きシェーピング⁷⁾、段付きシェーピング⁸⁾、上下シェーピング⁹⁾ 等種々のくふうが加えられている。

前記くふうの一つとして最近温間シェーピング法が提案され注目をあびている。この方法の要点は 600°C~800°C 程度のいわゆる温間においてシェーピング加工を行うと、前述の最適取り代の許容範囲が冷間の場合にくらべて一桁上昇するので、型の製作精度をかなりゆるやかにすることができるという点にある。また、温間状態にある被加工材は冷間にくらべてはるかに打ち抜きが容易であり、例えば歯車のようなきびしい打ち抜き輪郭を持った部品でも、シェーピング工程に適した破断面の少ないせん断品(シェーピング用素材)をかなりの極厚板まで容易に得ることが可能である。

図 7 に一行程温間シェーピング法の原理図を示す。また写真 2 には得られた製品の一例を示す。S45C 材は難加工材であり、歯車のようなきびしい輪郭の部品は現行の精密打ち抜き法によつても板厚 $t=10$ mm 程度が限界とされているのに対して、本方法では $t=20$ mm 程度の全面平滑切口面を有する歯車部品を容易に得ることができる。この方法は加熱設備を必要とすることが欠点といえはえようが、自動車メーカのように鍛造素材を作るための加熱装置を保有する現場においては、鍛造品を冷却する間にこの鍛造品を用い温間シェーピングを行い得るので、欠点とされることがむしろ利点となる。この方

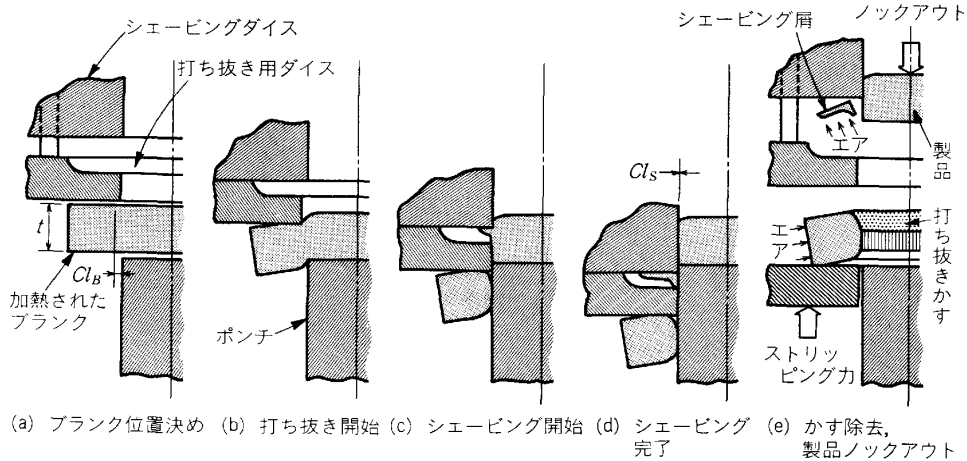


図 7 2 段ダイス 1 行程温間シェーピング法の原理

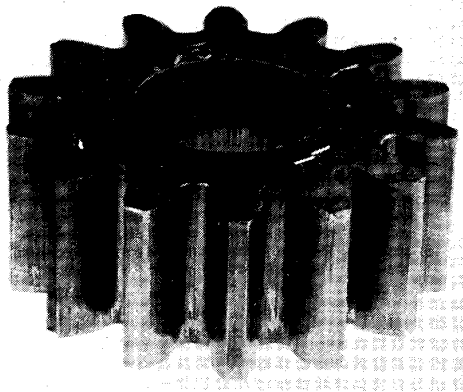


写真 2 温間シェーピング加工による製品例 (S45C, $t = 20$ mm)

法ではすば歯車ができれば、将来普及するものと予想される。

3.2 かえりが出ないことを目的とするせん断技術

通常のせん断加工法では、前述したようにクラックが必ず工具切刃からわずかに側面に入った地点で発生するので、かえりをゼロとすることは理論的に不可能である。この場合かえりを少なくするべく工具切刃を常にシャープにするとか、硬質の材料を用いるといった方策がかえりに対する唯一の対策であろう。かえりを加工原理的にゼロとするためには、何らかの手段により図 8 に示すように製品断面 (分離面) 両端に (大きさはともかく) 何らかのだれ、丸味ないし面取り部分 A, B を設けてやる以外に方法はないように思われる。以下にこのような思想のもとに開発されたかえり無しせん断技術の幾つかを例示、説明する。

3.2.1 上下抜き加工法¹⁰⁾

この方法は前田により開発された最も古いかえり無し打ち抜き法であり、その原理を図 9 に示す。図 9 (b) のようにポンチ P_1 (第 1 工程ポンチ) とダイス D_1 (第 1 工程ダイス) とで材料にある程度のせん断変形を与えた状

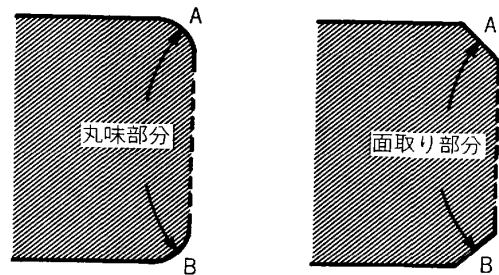


図 8 かえり無しせん断加工の思想

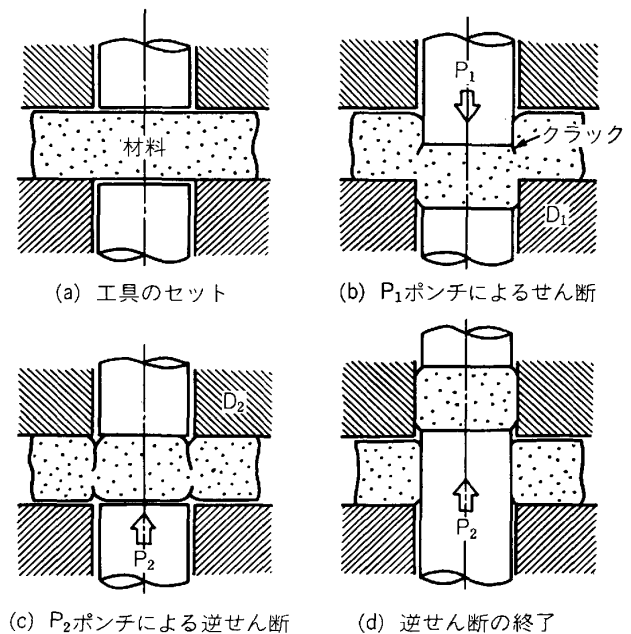


図 9 上下抜き法の原理図

態でいつたん加工を中断し、次に図 9 (c) に示すように、材料に対し初めの工具に鏡面の位置関係をもつた第 2 のポンチ P_2 とダイス D_2 を配置して、このポンチ (第 2 工程ポンチ) で、さきほど受けた材料のせん断変形をもとに戻すように逆方向の加工を行い、(d) の状態

に達する。この場合、(b)のせん断変形の程度が適当であると、(c)の状態になつても、第2工程ポンチの刃先部材料には(b)で得られたせん断面が消失しないで残留する。そしてポンチストロークが進むと、ポンチ側からのクラックは残留したせん断面の先端より発生し、これが

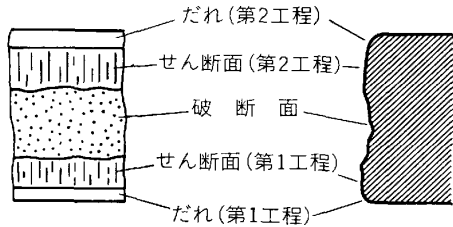


図10 かえり無しせん断法により得られる切口面

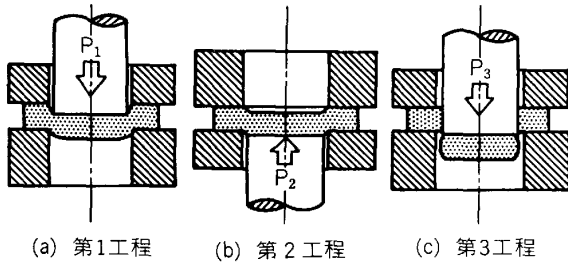


図11 改良された上下抜き法（3工程往復打ち抜き法）の原理

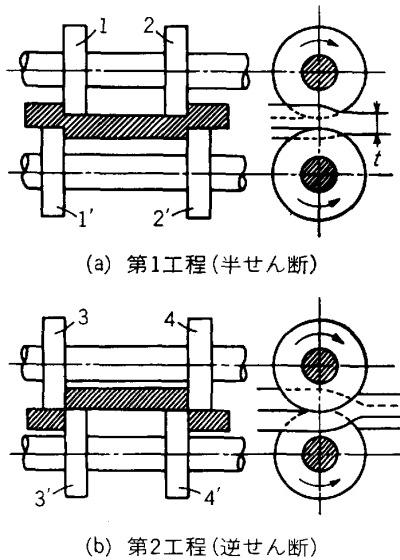


図12 カウンタカット法の原理

成長して切断を完了する。したがって、せん断切口面は図10のようになり、切口には加工原理的にいつて「かえり」が発生しない。

この技術の問題点は型の精度をきわめてきびしくせねばならないという点にあり、これを改善した方法が最近西独で開発された¹¹⁾。この3工程往復打ち抜き法(図11参照)の特徴はクリアランスをあまり小さくしないで済むことにあり、3工程と工程数が増加する点は型構

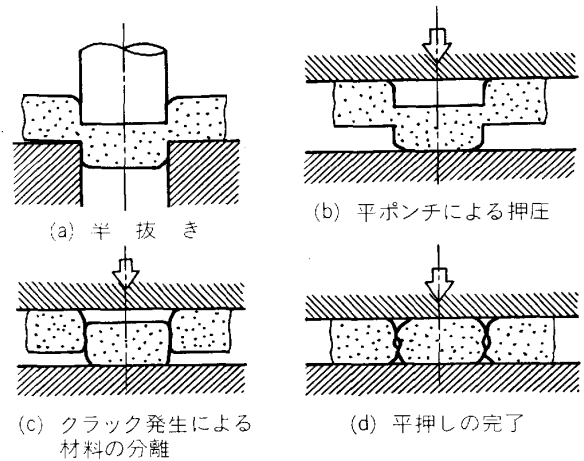
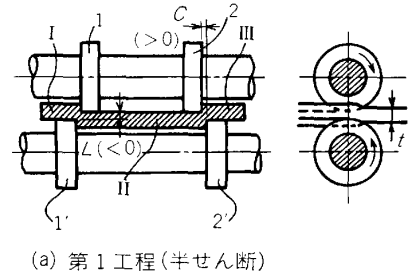
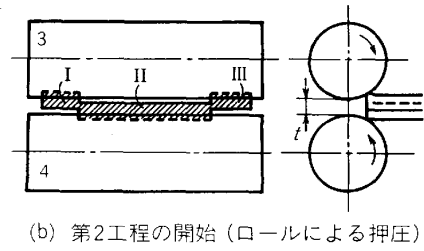


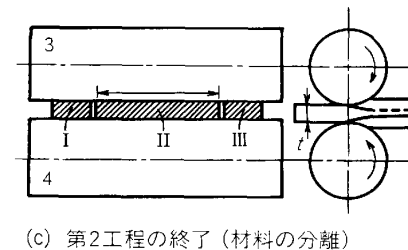
図13 平押し法の原理



(a) 第1工程(半せん断)



(b) 第2工程の開始(ロールによる押圧)



(c) 第2工程の終了(材料の分離)

図14 ロールスリット法の原理

造を順送型とすることにより解決している。

3.2.2 カウンタカット法¹²⁾

この方法は加工原理的には前述の上下抜き法のスリッターともいえる方法であり、その原理を図12に示す。この方法は実際には第2工程の逆せん断工程に問題があり、所望のかえり無しスリット製品を得るためには、第1工程と第2工程のカッターを正確な整合状態に組み付けなければならないのはもちろん、ストリップを第1工程から第2工程へと正確にガイドしてやる技術が不可欠なものとなる。したがって実際上0.5mm以下の薄板コイ

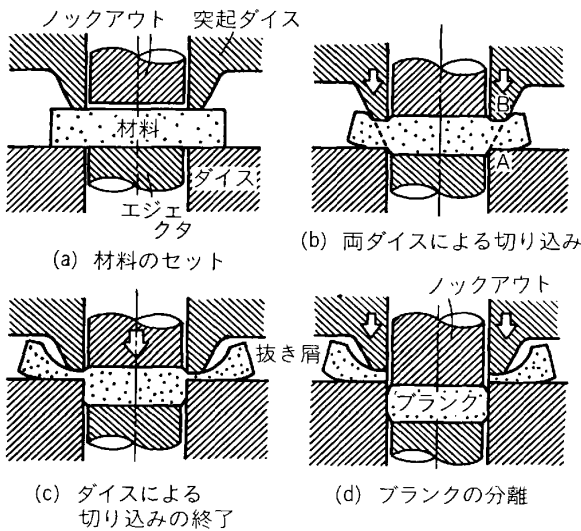
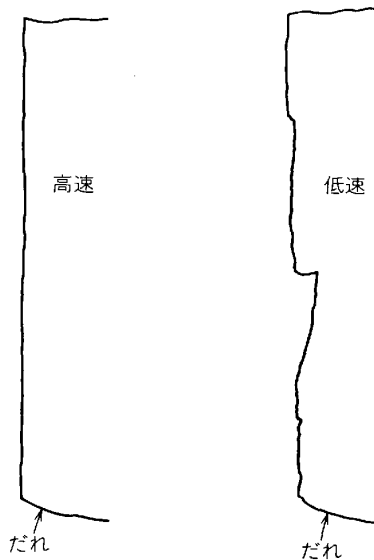


図15 対向ダイス法の原理



(a) 高速せん断加工 (b) 慣用(低速)せん断加工
 図16 高速せん断, 慣用せん断による切口面の比較 (軟鋼板, $t = 8 \text{ mm}$)

ルには適用が困難である。

3.2.3 平押し法¹³⁾

この方法の原理を示す図 13 からわかるように、この方法は第 2 工程の逆せん断工程に一对の平板工具を使用している点の特徴であるが、上下抜き法の簡易版と言えよう。平押し後の製品取り出しに幾分難点がある他、製品の切口面直角度があまり良くないという点が、打ち抜き加工法として見た場合の平押し法の欠点といえよう。

3.2.4 ロールスリット法¹⁴⁾

この方法の原理図 (図 14) からわかるように、この方法は平押し法のいわばスリッター版とも言えよう。ただスリッターの場合には前述の平押し法の欠点はほとんど問

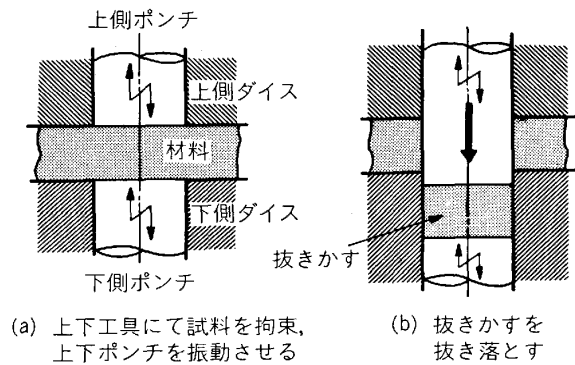


図17 振動仕上げ抜きの具体的手順

題にならない。なぜならばスリッピングでかえりが問題になるのは薄板コイルの場合が多く、そのような板厚では製品断面の直角度は問題にならないし、平押し法のような製品のストリッピングということもロールスリット法では必要が無いからである。ロールスリット法は 0.3 mm 程度の薄板にも適用可能であるし、前述のカウンタカットのような欠点もないので、現在国内で実用化されている。

3.3 その他の精密せん断技術

3.3.1 対向ダイス法¹⁵⁾

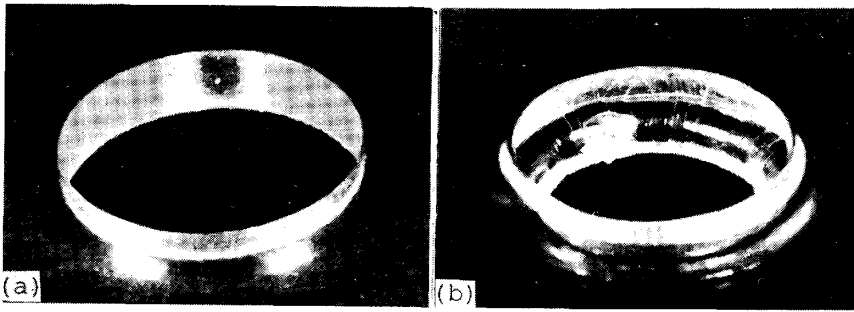
図 15 に対向ダイス法の原理図を示すが、この方法はシェービング法と同様加工ストロークの大部分が切削機構によつて支配されているので、だれを少なくできる、延性のとぼしい材料でも全面平滑切口面を得られるという利点を得られる。なお、加工原理からも理解されるようにこの方法はかえりを発生させないという特徴も有している。ただし精密打ち抜きと同様、特殊プレスを必要とするので、精密打ち抜きではむずかしい延性のとぼしい材料の精密せん断法として用いられている。

3.3.2 高速打ち抜き法¹⁶⁾

通常精密せん断法では全面せん断切口面とすることが目的とされているが、この方法においては全面平滑な「破断面」を得ることが目的とされている。すなわち炭素鋼では打ち抜き速度を 1 m/s 以上の高速度にすると、せん断の初期に発生したクラックの貫通路がほぼポンチとダイスを結ぶ直線状となり、材料の変形域がせばめられ、だれが少なく、直角度が良く、平滑な破断面がほぼ板厚全面を占める製品を得ることが出来る (図 16)。ただ高速の効果はアルミ、銅といった材料にはほとんどあらわれないという問題点がある。また打ち抜き時の騒音が大きという問題点もある。

3.3.3 振動仕上げ抜き法¹⁷⁾

この方法の原理を図 17 に示す。この方法ではせん断領域での局所的な熱生成を利用して同領域での材料変形能を大幅に向上させ、クラックの発生を防止しており、プラスチックなど熱軟化点、熱伝導率の低い素材の切口



(a) 振動仕上げ抜き (b) 慣用せん断加工
 写真 3 振動仕上げ抜きと慣用せん断加工による切口面(穴)の比較
 (ポリカーボネート, $t=2\text{mm}$)

面平滑化には威力を発揮する (写真 3 参照)。

最後に棒材のせん断加工については、文献18), 19)を参照されたい。

文 献

- 1) 前田禎三, 中川威雄: 塑性と加工, 9 (1968), p. 627
- 2) 森田 稔, 音田一造: 塑性と加工, 2 (1961), p. 79
- 3) 山内信也: プレス技術, 4 (1966), p. 38
- 4) 益田森治, 神馬 敬, 山内信也: 日本機械学会論文集, 31 (1965), p. 855
- 5) 村川正夫, 大川陽康, 古閑伸裕, 鈴木 清, 中川威雄: 昭和 59 年塑性加工春季講演会 講演論文集 (1984), p. 79
- 6) 親松 弘, 萩原 賢: プレス技術, 4 (1966), p. 43
- 7) 中村虔一, 容具昌幸: 塑性と加工, 4 (1963), p. 387
- 8) C. STROMBERGER and K. H. BUTTSTÄDT: Werkstatt u. Betrieb, 102 (1969), p. 225
- 9) O. W. STOECKI and E. SHARPE: The Tool and Manufacturing Engineer, 60 (1968), p. 38
- 10) 前田禎三: 機械の研究, 10 (1958), p. 140
- 11) L. LIEBING: Proc. 18th MTDR Conf. (1977), p. 369
- 12) J. BROCKHAUS and H. SINGER: Blech Rohre (1970) 8, p. 16
- 13) 牧野育雄: プレス技術, 13 (1975), p. 93
- 14) 村川正夫, 前田禎三: 塑性と加工, 20 (1979), p. 270
- 15) 近藤一義: プレス技術, 8 (1970), p. 10
- 16) J. C. MIKKERS: Paper for the meeting of the C. I. R. P. in Nottingham September 1968 (1968), p. 1
- 17) 横井秀俊, 中川威雄: 塑性と加工, 25 (1984), p. 410
- 18) R. LAWSON: Metallurgia and Metal Forming (1976) Feb., p. 40
- 19) M. K. DAS and S. A. TOBIAS: 同上 (1976) Feb., p. 47