

棒材の精密せん断

Precision Cropping of Bar

中 川 威 雄*

Takeo NAKAGAWA

せん断加工の中でも棒材の精密せん断は最も技術的に高度なものと言える。本稿では棒材せん断の困難さを分析し、最近開発された精密せん断法である拘束せん断法と高速度せん断法について、その加工機構と適用の限界を深る。

1. はじめに

せん断加工の対象材料は、おおよそ一般に使用される工業材料全てにわたっていると言ってよい程広範囲ある。しかしこれは材質的な面でのみ言えることであり、形状的な面ではほとんど板材に限られてしまう。棒材の切断作業ではほとんどの場合切削切断に頼っており、せん断により切断されている例は多くはない。棒材のせん断を拒んでいる最大の理由は、せん断切口面の精度不良であり、切削切断面に比べてかなり劣ることによる。せん断切口面の精度さえ向上すれば、プレスせん断は生産性が高く材料ロスも少ないことから言っても他の追従を許さない方法であり、今後適用される例は益々多くなると思われる。

このような問題点に対し、筆者らは先に金属材料の高圧縮応力下で高延性を示すことを利用した拘束せん断法と称する棒材の精密せん断法を開発した¹⁾この方法はすでに実生産に生かされており、また最近では管材の精密せん断にも適用されるに至っている²⁾もう一つの棒材の精密せん断法として高速度せん断法がある。この方法の可能性はかなり古くから注目され、かなり長期にわたって開発が進められていたが、最近になって実用化に成功した例が報告されるようになった。本稿では、棒材のせん断加工の問題点を述べ、これに対しこれらの精密せん断法がどのように適用し得るかを論じたい。

2. 棒材せん断の特異性

1). 切口面積比

棒材せん断では、板材の打抜きと比較すると、一般にせん断製品表面中に切口面の占める割合が大きい。現在多量にせん断されているものは、切断長さは直径に比べて比較的短かいものが多い。そのため特にこの傾向は顕著となり、たとえば丸棒で直径と同じ長さのせん断では切口面は全表面積の $\frac{1}{2}$ を占め、直径の半分の長さのせん断では $\frac{1}{2}$ を占める。このことは棒材のせ

ん断では切口面の品質が板材の打抜きに比べてはるかに重要な要素となっていることを物語っている。

2). 棒材直径

棒材せん断が最も広く用いられているのは鍛造用素材取りである。勿論この場合にも素材精度を上げるため精密せん断が要望されている。これら棒材の直径は20~30mm以上のものが大半を占め、10mm以下のものは比較的少ない。一方板材のせん断で、いわゆる精密せん断が行なわれているものの板厚は5mm以下が大半で、最高でも10mm程度である。その理由の一つに板材の精密せん断の手法では板厚10mm以上では金型寿命等の技術的問題が解決されていないことを挙げることができる。したがって、板材の精密せん断の技術をそのまま棒材に適用しても成功するとは言えない。

3). せん断長さ

棒材せん断で材料ロスがなく歩留りが極めて高いことを生かし、本来ならば板材より打抜いたものを棒材せん断に置き換えたい要望も多い。例えば直径の半分以上の長さでせん断するというような場合である。しかしながら慣用の棒材せん断では、余りせん断長さが短かいとシェーピングのようになり、切断するどころか切粉を作ってしまう。その他精度上の問題もあって一般には直径の $\frac{1}{2}$ が長さの限界と言われている。

4). 片面せん断

棒材せん断では、片面せん断の切落し形式で行なわれるので、材料ロスなしにせん断できる利点はあるが、同時に板材の打抜きで抜きかす部に相当する切断面も製品の一方の切口面となる。一般の板材の精密せん断法では、抜きかす部の切口面を犠牲にしつつ製品側切口面の精度を得ているのであるが、棒材せん断では両切口面が製品となるために板材の精密せん断の手法は、そのままでは適用できない困難さがある。

特に片面せん断では、切刃を境としてその両側の支持条件に違いがあるので、当然き裂の発生と伝播状態は異なり、切口面性状も両者に差があるのが普通である。例えば丸棒のせん断で半円形の可動刃を使う場合、切落される製品側は図1のようにせん断と同時に曲げを受ける。そのため、かなり大きな圧こんを残し、き

* 東京大学生産技術研究所 第2部

裂は曲げの引張り側である可動切刃側から発生する。このき裂の成長のみで破断分離するならば、せん断切口面は切落される可動刃側は凸面、残された固定刃側は凹面を呈することになる。

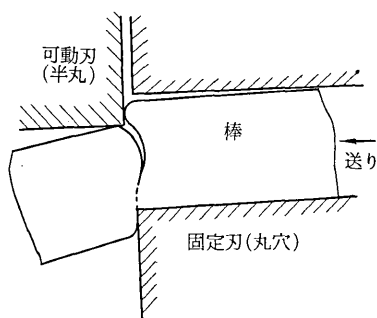


図1 片面せん断による曲げ

この状態を改善するため、可動刃側にも丸穴切刃を用いて、曲げを防ぐことが行なわれる。この場合はせん断終了後何らかの方法で製品をロックアウトする必要が生ずる。丸穴の可動刃を用いることにより、両切刃付近の材料の応力状態は似たものとなり、き裂が両切刃より同時に発生することとなる。

5. 棒材支持条件

両切刃より発生したき裂の先端をうまく会合させなければ滑らかな破断面を得ることはできない。このき裂の会合にはクリアランスの調節が最も重要であるが、同時に棒材を強く固定させない方がよい。つまり両切刃より発生するき裂は互いにすれ違うように伝播し、最終的にはゆるやかなS字を描く破断面となるので、き裂の成長中に棒材が自由に後方に移動できる支持条件の方がき裂の会合も容易であり、切口面が互いにこすり合って傷をつける障害もなくなる。さらに自由支持の方がき裂発生時期も早くなるため、せん断面が少なく切刃の摩耗や損傷を減少する。しかしながら切刃の両側の棒材の支持条件を等しく自由にすることは実際にはそれ程簡単ではない。例えば棒材の定寸装置や送り装置は支持条件に影響を与えるので何らかの工夫を要する場合もある。せん断時の棒材の動的な挙動も含めて両切刃近傍の材料の応力状態を等しくし、両切刃より同時にき裂を発生させることは容易ではない。

6. 均一クリアランス

き裂の会合に最も大きな影響を与えるのが両切刃間のすきまであるクリアランスであることは板材の場合と同様である。

クリアランスが小さ過ぎる場合や、棒の両端を固定した場合は、図2に示すように停留き裂が残り切口面に有害なタングやかさぶたや2次せん断面が発生する³⁾。一方クリアランスが大き過ぎると階段状の切口面とな

る。板材の場合適当なクリアランスを選ぶことによりき裂先端の会合は比較的容易である。しかし棒材の場合には、例えば円形断面の丸棒の場合、両切刃の間隔を一定に保つようなクリアランスをとったのでは、せ

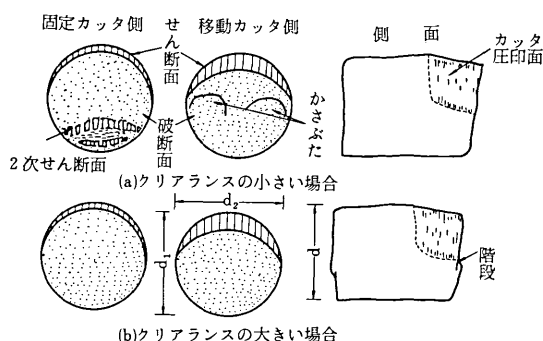


図2 棒材せん断切口面（工藤，田村）³⁾

ん断厚さに対するクリアランスの割合は中央部で最小となり、左右両端部で最大(∞)となる。したがって、このままの状態でせん断すると、中央部ではクリアランス適正の時は左右両端部ではクリアランス過大となって階段が生じ、一方両端部のクリアランスを適正とすれば中央部でクリアランス過少となって停留き裂を生ずる。このような欠陥をなくすため、クリアランスは材料厚さに比例してつけるのが良い結果を得る。丸棒のせん断の場合には図3のように切刃側面に円弧の溝をつけるか、または切刃側面の半分に傾斜をつけて平面研削を行なうことにより板厚に対する均一クリアランスを得ることができる。

き裂の会合の困難さはこの他せん断時に棒に加わる力が、せん断方向ばかりでなく棒の中心方向に向って働く成分の影響も無視できないと思われる。そのことは、例え均一クリアランスにしても、き裂の発生と成長および会合の仕方に棒の中央部と左右両端部に差があることから予想される。

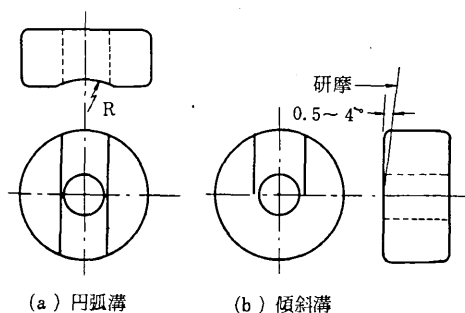


図3 材厚に応じた均一クリアランス

7). 軟質棒材のせん断

切口面精度は被加工棒材の材質によっても異なる。棒材せん断ではき裂をうまく会合させ平滑な破断面を得ようとしているため、軟質材よりやや脆い硬質材の方が精度の高い切口面が得られる。鋼材でいえば中高炭素鋼や合金鋼はき裂の方向も比較的せん断方向に近くこのき裂の会合も容易であるが、軟鋼では炭素含有量が少なく軟かい材料程難しい。したがって材料を脆性化してせん断することも良質な切口面を得る一つの工夫であり、焼鈍材より未焼鈍材、軟質材より加工硬化を受けた冷間引抜き材の方がせん断の容易な材料となる。しかし棒材せん断で特に精度向上が要求されている冷間鍛造用素材では軟鋼をはじめとして軟質材が多く、さらにあらかじめ焼鈍済のものを精度よくせん断しなければならない場合が多い。

8). 切口面のゆがみ (真円度)

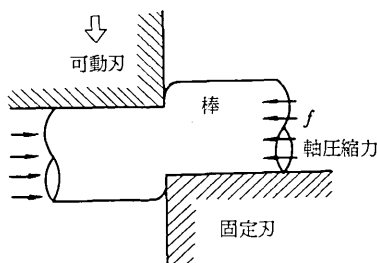
棒材せん断の欠陥のうち、切口面精度の他に重要なものに「だれ」による切口面のゆがみがある。板材のせん断の場合にもだれは生ずるが、せん断端面を接触面とする時以外は余り問題となることは少ない。しかし棒材せん断の場合は同じ割合のだれを生じて、切口面の真円度を著しくくずすことになるので、殆んどの場合大きな欠陥となる。だれの量はせん断の方法を工夫してもさほど改善されない。だれの量は被加工材質、特に伸び特性によって大きく影響を受けるので、棒材をあらかじめ冷間引抜きをしてせん断すればかなりゆがみを少なくすることはできる。

3. 棒材の精密せん断

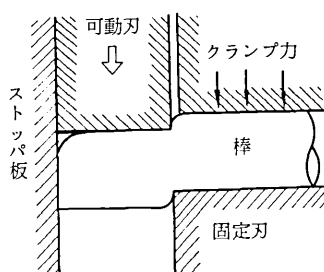
前述のように慣用のせん断方式によって棒材を精密にせん断することはかなり困難を伴ない高度の技術を要することが理解できる。さらに材質的制約もあって肝心の軟質材のせん断切口面の精度は低い。また、たとえ全てが好条件でせん断できたとしても、切口面が破断面で構成される以上板材の精密せん断のような平滑なせん断面と寸法精度は得られない。慣用せん断でクリアランスをつける以上切口面は棒軸と直角とはなり得ない。さらに溝状の均一クリアランスは切断面をわずかながら円弧状にする。したがって大幅な精度の向上を獲得するには以下に述べる精密せん断法に頼らざるを得ない。

1). 拘束せん断法¹⁾

棒材の慣用せん断法における切口面性状の改善の努力が主としてき裂の発生を早めその伝播を制御して平滑な破断面を得ることにあった。拘束せん断法は板材の精密せん断で加口面を全面せん断面とする方法を棒材に適用したものといえる。この方法が確立する初期にはき裂抑制の手段として図4(a)のように棒軸方向から圧縮力を付加する軸圧縮せん断法が試みられていた



(a) 軸圧縮せん断



(b) クランプ方式の拘束せん断

図4 拘束せん断法

が、より簡便で同様の効果が得られる拘束せん断法がとってかわりつつある。拘束せん断法は同じく図4(b)のように棒材の送り側をクランプ板と棒材間の摩擦力により材料拘束を行なうものである。一方の端面はストップ板の表面に接しており、この方向の移動も拘束されている。このような拘束状況でクリアランス零の条件でせん断すると棒材は切刃を境として両側に逃げようとする力が働き、その移動を拘束することにより軸圧縮力が発生する。図5は拘束により発生した軸圧を測定した結果であり、せん断抵抗の $\frac{1}{2}$ にも相当す

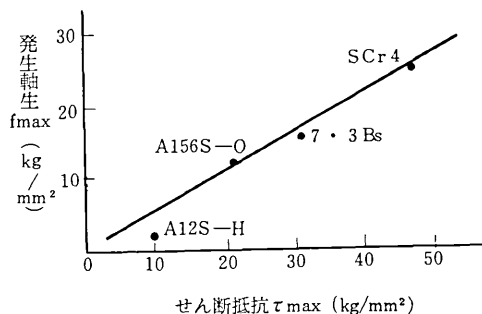


図5 拘束せん断における発生軸圧

る高い軸圧が生じていることを示している。

このような拘束せん断法は加工機構からみると板材の精密打抜き法や仕上げ抜き法と同様なものとみなすことができ、実施に当たっての問題点も共通なものが多い。しかし棒材せん断特有の困難な問題もある。たとえば精密打抜き法では圧縮力を効果的に高める手段として突起の押込みを用いているが、拘束せん断法ではこのような手段は棒材の表面に傷をつけることになるので採用するわけにはいかない。そのためクランプ板の長さを増し拘束力もせん断抵抗の数倍の大きさの値を用いている。

また切刃に丸味をつけてき裂発生を防止する手段についてもかえり発生をとまうことになるので採用することはできない。さらに棒材せん断では切口の両面のいずれの面についても良好な仕上がりを要することも種々の効果的な対策をとりにくい原因となっている。このように一般的には棒材せん断は板材の精密せん断に比べて技術的に困難な点が多いのであるが、逆に有利と思われる点として零クリアランスの実現が容易で型費が安価となる点をあげることができる。

棒材の拘束せん断では対象材料が一般に直径10mm以上となることが多く、そのため型への焼付き、摩耗が激しく、型寿命が短い点も問題である。理論的には精密打抜きに適用されている延性材ならば可能である筈であるが、直径が太いためにダイス切刃に丸味をつけることができないため、鋼材では極軟鋼でも10φ以下の線材に限られている⁴⁾。したがって実用化されている多くは、純銅、純アルミのような非鉄の型寿命に関係のない材料に限られている。この方法では切口面の表面粗さが良好なばかりでなく、だれやゆがみも少なく、慣用せん断で直径の $\frac{1}{2}$ の長さのせん断が冷鍛ピレットとしての限界といわれているのに対し、図6のようにこの方法では硬質材で $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{4}$ まで可能である。

拘束せん断法ではせん断時の軸方向の移動を拘束するためにクランプ板により加圧するのであるが、図7

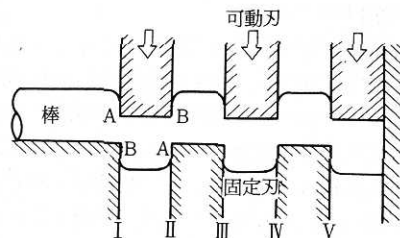


図7 相互拘束による多数面同時せん断

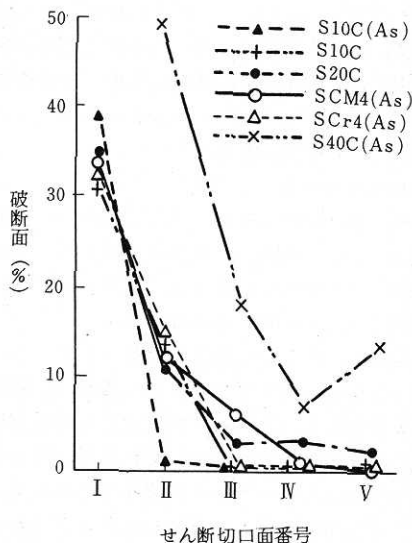


図8 多数面同時せん断による切口面（丸棒10φ）

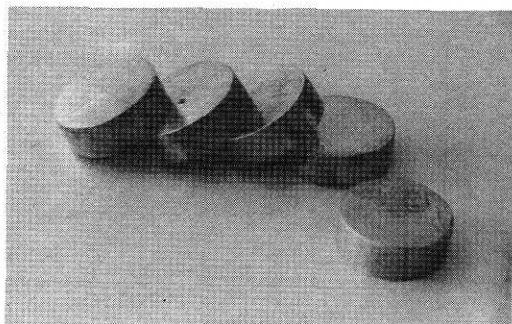


図6 拘束せん断製品（Cu, 9.5φ×3.0）

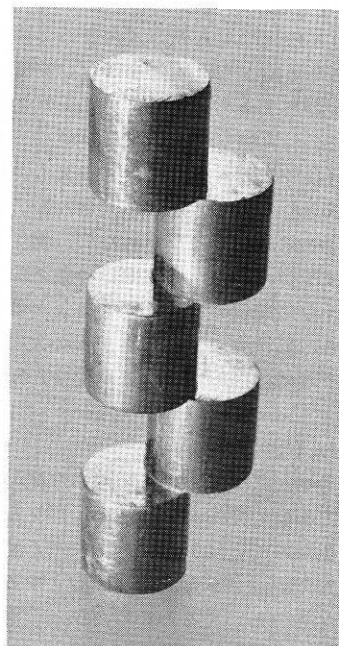


図9 拘束せん断の途中停止によるクランク軸（Cu, 15φ）

のように切刃を並べて同時に多数面のせん断を行えば、互いの切刃で軸方向の移動を拘束し合ってクランプなしで拘束せん断が可能となる。図8はこの方法でせん断した場合の切口に占める破断面の割合を示したもので、拘束が完全になるほど破断面が消えていく様子がわかる。拘束せん断で完全に切断し終らない途中で停止させれば図9のようなクランク軸状の製品ができる⁵⁾。

2). 高速度せん断

棒材の慣用せん断法でもプレスのせん断速度を上昇させることにより鋼材などではある程度破断面が平滑になることが知られているが、より高速度でせん断することによりせん断切口面の精度を大幅に改善できる。この事実はC. Zener⁶⁾によって興味ある物理現象としてとらえられたのが最初であり、その後数多くの研究者によって実際の精密せん断に生かそうとする努力が続けられてきた。図10はMikkers⁷⁾によって行なわれた打抜きにおける速度効果を調べた結果である。この方法では切口面が破断面で構成されることは慣用せん断と同様であるが、この破断面は両切刃を結んで一直線に走っており、表面のうねりがほとんどなく粗さも少ない破断面が得られ、切口精度は慣用せん断法に比

べて大幅に改善される。さらにせん断変形は局部に限定され、したがってだれも少なく切口のゆがみが少ないのも利点である。特に鋼の冷間鍛造が普及し、その素材取りに棒材せん断が使われるようになり、そのせん断精度が問題とされ、さらに高速度せん断の効果が鋼材に顕著に現われることもあって、その実用化が急がれていた。

普通高速度せん断の効果ははっきりと現われるせん断切刃速度は5~15m/secであるが、この程度の速度は、ダイナパック、ペトロフォージ、エアハンマ等の鍛造用に開発された高速プレスによって実現できる。各種のプレスで検討された結果、機械設備が簡単なこともあってエアハンマ方式が実用化されている。図11はスウェーデンのStrandell教授の指導のもとに開発され実用に供せられているエアハンマ方式のプレスの写真である。今のところ比較的小直径(20φ以下)の鋼材がせん断できる能力のものしか市販されていないが、特別大型のエアソースを要しないのが特長である。図12にこのプレスに使われている構造を示す。これ程高速でなくても、普通の機械プレスの数倍から10倍に相当する1m/sec程度でもかなりの速度効果は期待できる。この程度の速度であれば、機械プレスでも容易に実現できるので、専用のプレスが開発されかなり以前より使われている。中・高炭素鋼の場合には、この機械プレスで十分な精度が得られることが多いが、低炭素鋼ではやはり本格的な高速プレスを必要とする場合が多い。

機械設備自体の問題はこのように進歩しつつあるが、当初工具の破損や工具寿命が短いことが問題とされた時期もあった。工具の破壊は工具設計と適当な衝撃エ

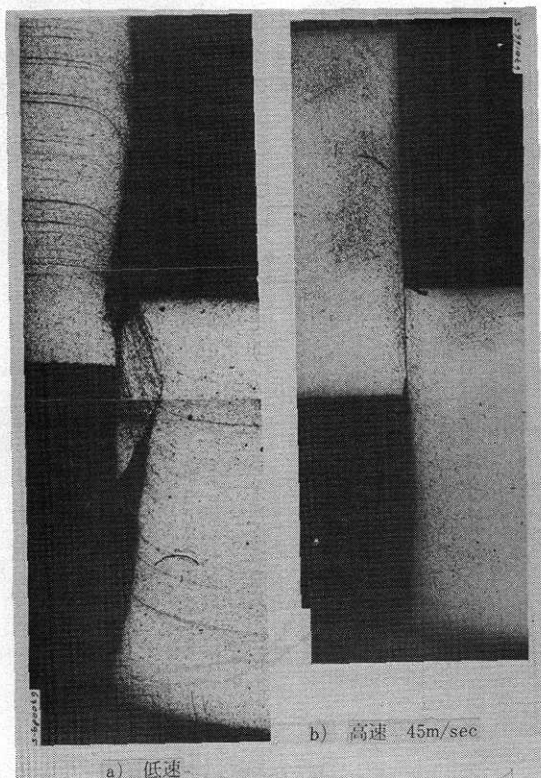


図10 打抜きにおける速度効果, 8m厚軟鋼 (Mikkers)

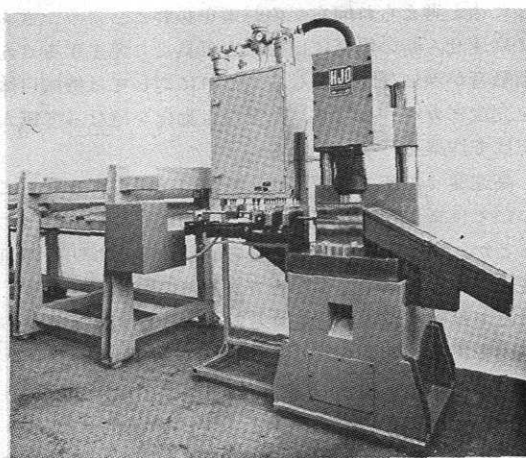


図11 エアハンマ方式による高速度せん断プレス (Hjo Mekaniska Verkstad)

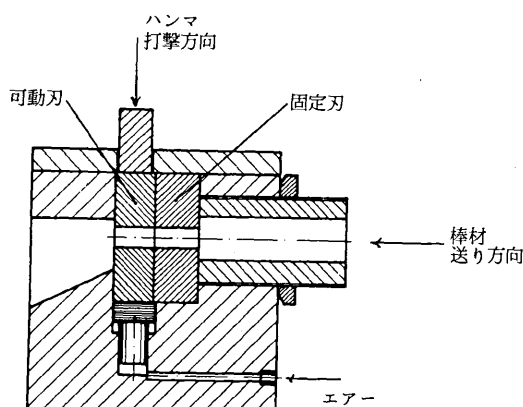


図12 せん断工具 (Hjo Mekaniska Verkstad)

エネルギー吸収装置により、また工具寿命も適当な加工条件と工具材質の選択によりほぼ解決されたといつてよい。特に工具寿命に関してはせん断過程中発生する高熱による摩耗の促進と、早期にき裂が発生することによって摩耗が減少するとの相反する結果が予想されていたが、現実にはせん断加工条件を適当に選択することによって、後者の効果を生かし、実用にまで発展させることができたのである。この他の問題点としては、このような速度効果が非鉄金属材料にはそれ程顕著に現われないので、鋼棒材せん断以外には余り使われていないことが挙げられる。また直径に比べて長さの短いものをせん断する場合、丸穴切刃を使っても必ずしも平滑な破断面が得られない場合がある。これは切落される製品の慣性が少ないために後方に逃げてしまうためと考えられ何らかの対策を必要としよう。さらに高速せん断の場合には機械と工具より発生するせん断騒音が深刻な問題となる。これに対しては機械自体を完全にカバーしたり、完全な自動化を行なって無人室にて作業を行なっている。

高速度せん断で良好なせん断切口が得られる理由についてはまだ不明な点が多い。最初は材料が脆性化するとか、塑性変形速度やき裂の成長速度より切刃の速度の方が早くなるためであるとの説があったが、最近ではせん断時に発生する熱によるひずみの集中が主因であると考えられている。

つまりせん断変形によって発生した熱は変形部から周辺へ伝達する時間的余裕がなく、局部的に加熱された状態となり、それが材料の軟化を招いてますますその部分のみ局部的な変形が進行し、ついには薄い層状領域でのみせん断変形を起こすことになる。この層は変形の最も激しい切刃間を結ぶ線上にできるので、

この層に沿ってき裂が成長するか、またはこの層よりひきちぎられることによって分離が完了しているものと考えられている。このような推論を裏付けるものとして著者の行なった実験を紹介しよう。

被加工材は15φの鋼材 (S 15C と S Cr20) 丸棒で前述の多数面同時せん断型による零クリアランスの拘束せん断を行なった。使用機械は低速域は材料試験機、中速域はクランクプレス、高速域はダイナパックプレスである。実験はせん断の途中で停止させ、せん断変形域の状態を硬さ分布と金属顕微鏡による観察によって調べた。

図13は硬さ分布を示すが、プレスのせん断に比べて高速せん断ではせん断変形領域がかなりせまく、だれの減少と対応している。図14は断面をエッチングした顕微鏡写真である。低速の材料試験機によるものではクラックがせん断変形によって生じた繊維に沿って生じている。その前の段階でウロコ状の停留クラックが生じているのは試験材 (S 15C) の高延性と零クリアランス拘束せん断による圧縮力の高まりによっている。

中速域のプレスによるものにクラックが生じていないのは、精密せん断条件 (零クリアランス、拘束) における速度効果と呼んでいるもので、主として発生熱の影響によって材料の延性が上昇しているものと思われる。もちろんこの段階では材料繊維はきれいに流動しており、異常は認められない。

高速のダイナパックによるものはクラックは発生していないが、せん断変形面の中央部に 0.1mm 幅程度で

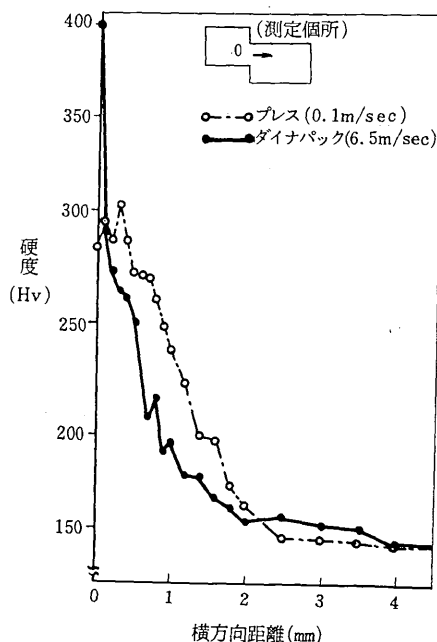


図13 高速度せん断変形部の硬度分布 (S 15C, 15φ)

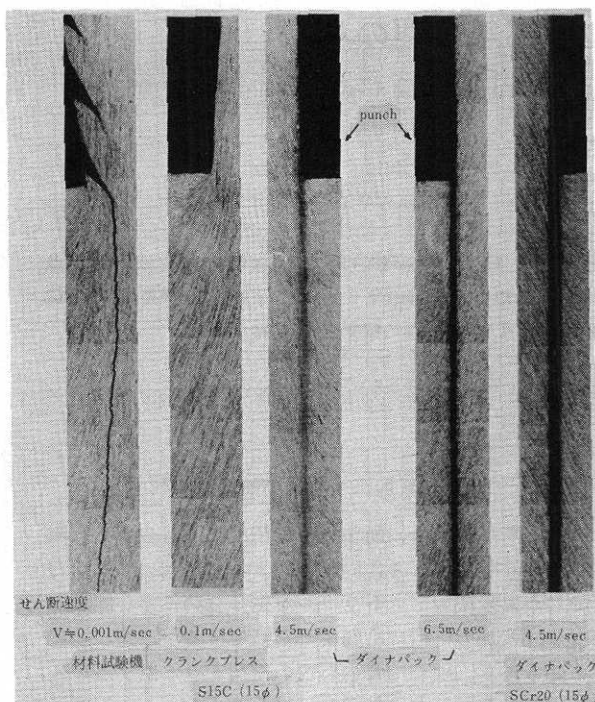


図14 せん断変形領域の顕微鏡写真

材料流れが繊維組織とは明らかに異なる別の組織が生じているのがみられる。中央部の境界では繊維組織が連結していないばかりか完全にすれ違っていることから別組織のようにみえる。0.1mm幅にひずみが集中し断熱的変形をすると仮定するとその温度上昇は極めて大きくなる。図15はそれを拡大したもので、明らかな再結晶の組織が認められる。さらにこの組織を拡大して調べると、高熱発生後の急冷によるマルテンサイト組織も認められる。この焼入れ組織は前述の図13の硬度分布で中央部に異常に高い硬度を示すことから証明できる。このせん断条件は零クリアランスで拘束状態という特殊なものであるが、高速度せん断の現象を現わしていることは言うまでもない。このような熱によるひずみの集中を考えに入れることにより、き裂の発生と成長方向さらに破断面の平滑さといった種々の特徴が理解できる。したがって、高速度せん断の破断面生成のメカニズムもいわゆる単純なき裂の成長ではなく、軟化を伴った領域の分離といった熱切断に近い加工機構を加味して考える必要がある。

(1975年5月13日受理)

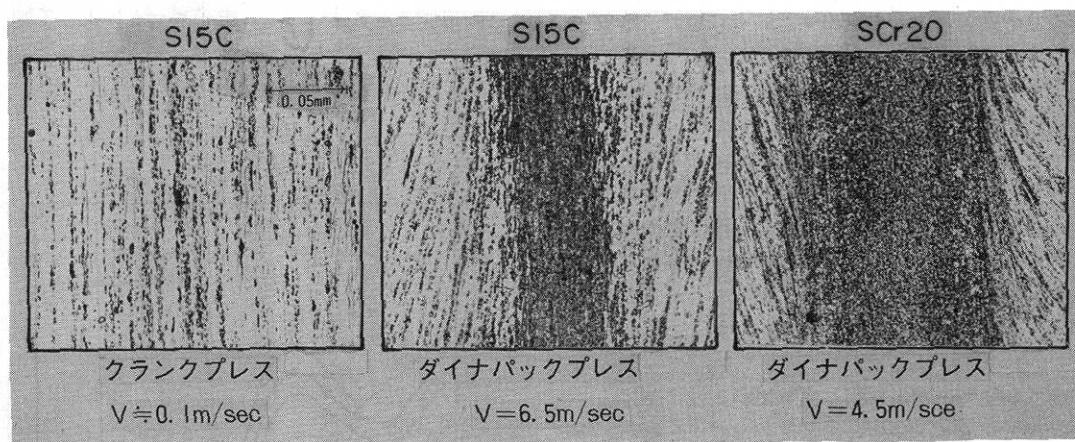


図15 熱変形部の拡大写真

参考文献

- 1) 中川・前田：日本機械学会誌，73，614(1970-3)339-346.
- 2) 中川：昭和49年度塑性加工学会春季講演会前刷集(1974-5)149-151.
- 3) 工藤・田村：塑性と加工，5，43(1964-8)，527-535.
- 4) 中川・大島・浅見：塑性と加工，12，131(1971-12)886-
- 5) 中川・塩森：塑性と加工，14，144(1973-1)78-81.
- 6) C. Zener：Amer. Soc. Metals(1948)3-31.
- 7) J. C. Mikkers：Paper for the Meeting of the C. I. R. P. in Nottingham，(1968-9)1-33.