

硬質塩化ビニルのせん断加工における せん断クラック発生ならびに成長時のひずみ分布

金 枝 敏 明*

*岡山理科大学工学部機械工学科

(昭和62年9月30日 受理)

1. 緒 言

プラスチックの強度は一般に金属よりも劣り、加工に要する力そのものは小さくてすむが、良い加工面は得にくい場合がある。たとえば機械加工の中でも素材の二次加工としてよく使われるせん断加工においてはプラスチック特有の現象が見られ、良好な切り口面が得られない場合がある。北条ら¹⁾はその点に着目し、各種プラスチックのせん断現象や切り口面の形状を調べた。さらに熱可塑性の代表的な樹脂である硬質塩化ビニルについては青木ら²⁾がそれ固有の現象である形状記憶効果を利用してせん断機構を力学的に解明しようとした。しかしいずれの研究においてもせん断現象を微視的もしくは直接観察したものではなく、またせん断領域の力学的状態を詳細に説明するものではない。

そこで著者は硬質塩化ビニルのせん断過程を走査電子顕微鏡内加工実験装置を用い、微視的、直接かつ動的に観察するとともにビジオプラスティシティ法によって硬質塩化ビニル特有のせん断機構、特に切り口面の加工精度を支配するせん断クラックの発生および成長機構を力学的に明らかにしようとした。

2. 実験装置および方法

本実験ではせん断過程を微視的に観察する必要があるので、今回は実験装置に走査電子顕微鏡(日本電子製JSM-35)内加工実験装置³⁾を使用した。それに組み込んだせん断実験用アタッチメントを図1に示す。

実験に際してはせん断荷重を八角リングにて測定する。また工作物の湾曲を防ぐため、板押えおよび逆板押えを付加する。実験中の工作物の変形状態を正確に知るために、1インチ当り250本のグリッドを持つメッシュを工作物の観察面上に置き、スパッタリング装置にて白金を転写させてグリッドを描き、時々刻々の変形状態をわかり易くする。なおグリッドの間隔は約0.1mmとなる。

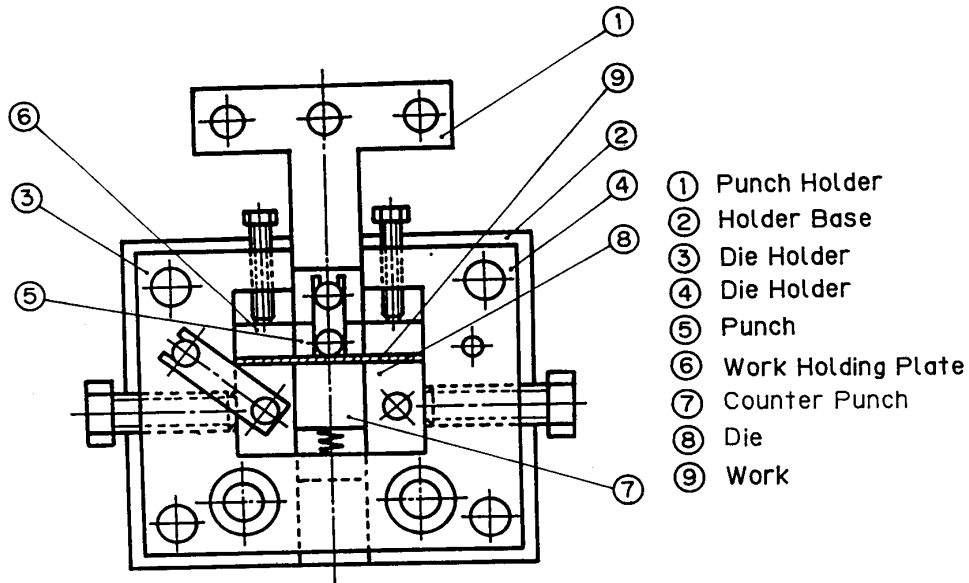


Fig. 1 Shearing set up

また変形状態をさらに正確に記録するためには以下の方法を採用する。プラスチックにはそれ特有の遅延弾性やクリープといった金属と異なる問題があり、それを避けるためせん断過程を中断しその変形状態を撮影するといった方法はとらず、走査電子顕微鏡像を図2に示すようにTVスキャニングユニットを経た後VTRに記録し、そして一旦VTRにて記録した画像をその後再生し、微小時間（今回は2秒）ごとに撮影する方法をとる。

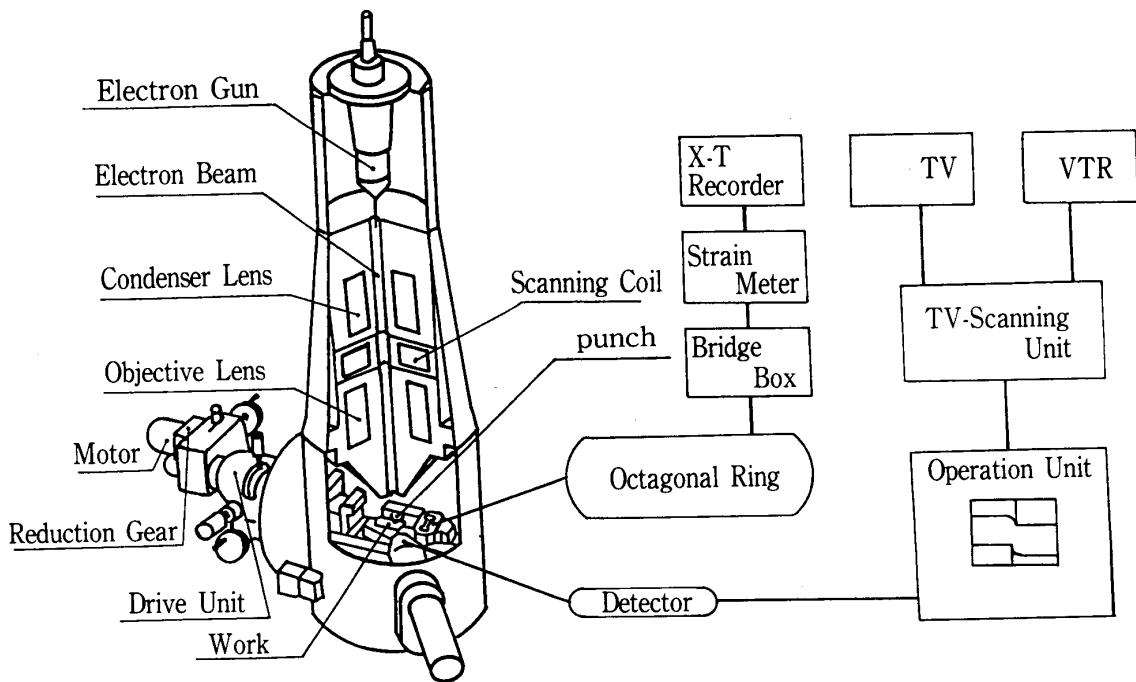


Fig. 2 General view of scanning electron microscope main unit and block diagram of image recording system

工作物にはタキロン株式会社製のカレンダープレス法で製造された硬質塩化ビニルとそれと比較するために金属の純アルミニウム (A1100) を選ぶ。硬質塩化ビニルは分子量53,000, 降伏強さ41.2MPa, 引張強さ73.5MPa, 引張弾性率3.5GPaである。純アルミニウムは1/2硬化材であり, 耐力は78.4MPaである。

表1に実験条件を示す。

Tab. 1 Shearing condition

| Work Material | Polyvinylchloride | Aluminum |
|--------------------------------|-------------------|----------------|
| Dimension of Work | 24 × 8 × 1 mm | 24 × 8 × 1 mm |
| Clearance | - 10 ~ 10 % | 10 % |
| Shearing Speed | 0.5 mm/min | 0.5 mm/min |
| Holding Plate Counter Punch | given given | given given |

3. 実験結果および考察

図3は, 硬質塩化ビニルおよび純アルミニウムをせん断した場合に得られたせん断荷

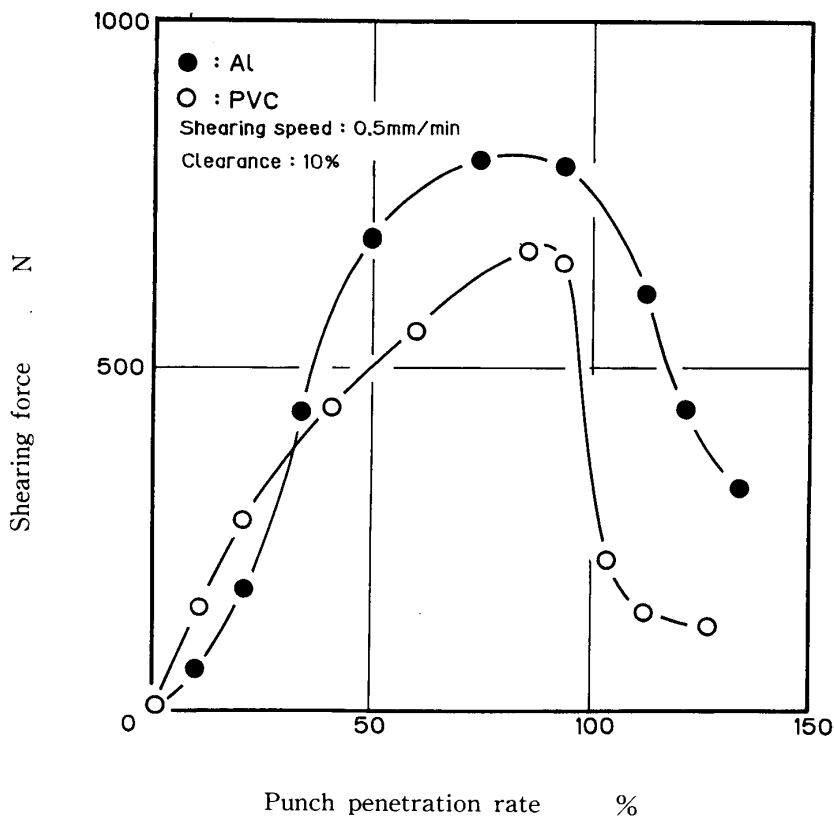


Fig. 3 Shearing force-punch penetration rate curve

重一ポンチ押し込み量曲線図である。クリアランスは両者とも10%である。図からわかるように純アルミニウムの場合ポンチ押し込み量75%で最大荷重に達した後、ゆるやかにせん断荷重が低下している。一方、硬質塩化ビニルではポンチ押し込み量90%で最大値を示した後、急激に低下し純アルミニウムのそれとは様相が異なっている。硬質塩化ビニルの最大せん断荷重は666.4Nである。またせん断変形抵抗は53.9MPaで、降伏応力41.2MPaの131%となり、金属のそれら⁴⁾と異なった値を呈している。また純アルミニウムの場合、最大せん断荷重は764.4Nでせん断変形抵抗は47.8MPaである。せん断変形抵抗は耐力78.4MPaの61%となり、Jhonsonら⁴⁾の示している値に近いものとなる。

つぎに、硬質塩化ビニルのせん断過程観察中に見られた特徴的なところを図4に示す。この図の場合クリアランスの設定は-7%であるが、装置の若干の剛性不足のためせん断時には0%になる。これはポンチ側とダイス側のクラック発生時期をずらせたりはするものの、クラックの発生や成長時のひずみ分布そのものは本質的には変わらないものと考えられる。

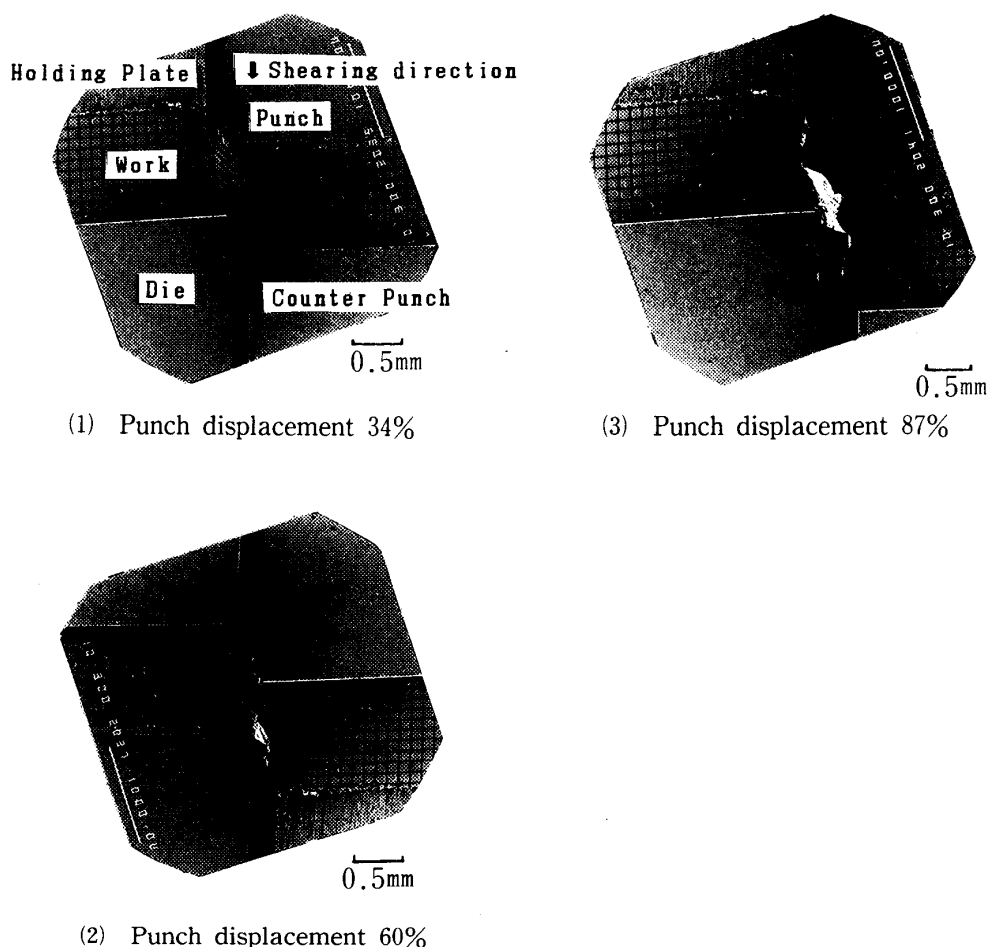


Fig. 4 Shearing process of Polyvinylchloride observed by scanning electron microscope

同図(1)のポンチ押し込み量34%では、工作物の上面側のポンチと板押えとの間に純アルミニウムや他の金属と違い大きなだれ面が存在し、そのだれ面に非常に小さなクラックが発生していることが認められる。その発生場所は純アルミニウム等の金属と異なりポンチのエッジ部近傍ではない。

同図(2)のポンチ押し込み量60%においては、だれ面に発生したクラックがさらに成長して大きくなっている。しかしクラック先端の位置はポンチ押し込み方向に対しポンチのエッジ部よりも後方となっている。また、ダイス側にもこの段階ポンチ押し込み量42%でクラックが発生しており、すでに成長していることが認められ、その発生形状はポンチ側のそれとよく類似していることが観察される。

さらに同図(3)のポンチ押し込み量87%になると、ポンチ側、ダイス側の両方のクラックも充分大きく成長している。しかしその後、最終的にそれらは合体せずにポンチとダイスのエッジ部の接近と遭遇とによって工作物は切断されてしまう。一般に金属ではクラックの成長方向がポンチ押し込み方向に似たようなものになり、硬質塩化ビニルの場合も成長方向は同様である。しかし硬質塩化ビニルの場合クラック発生場所がポンチおよびダイスエッジ部近傍から少し離れており、その上クラックの成長機構も金属の変形モードIIの面内せん断形とは異なり、変形モードIの開口形で、クラック開口面のポンチ側では下面、ダイス側では上面の部分がそれぞれポンチおよびダイスのエッジ部で強く引張られるため特異なクラック成長形式をとる。

図5は硬質塩化ビニルと純アルミニウムのせん断切り口面の観察写真を示す。写真からわかるように前者ではだれ面の占める部分が大きく、しかもそれが大きく湾曲して、

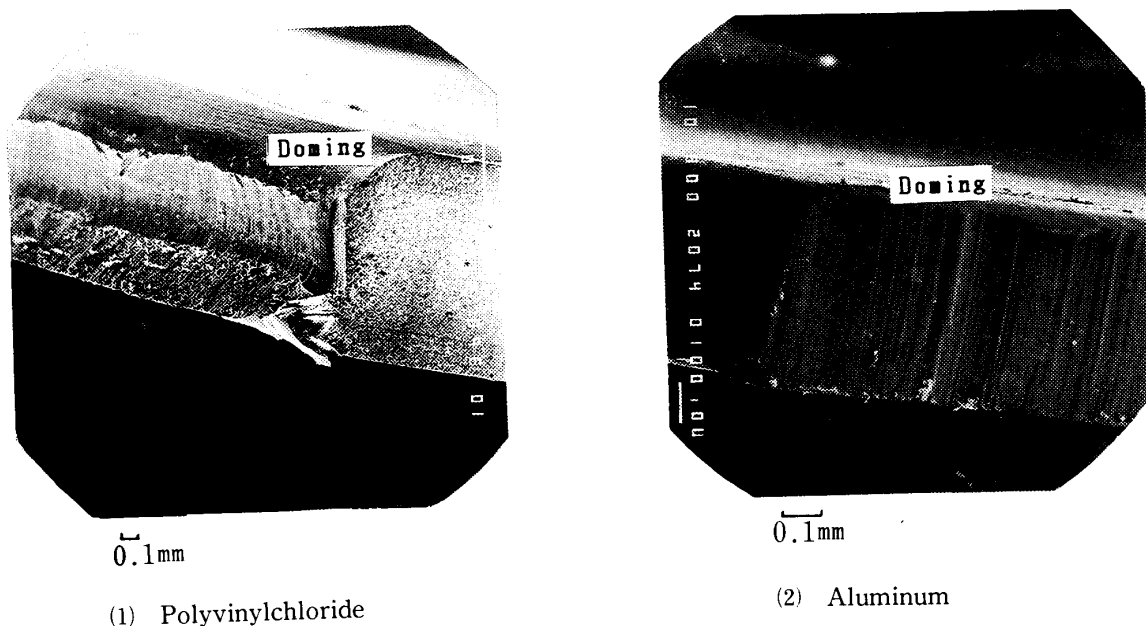


Fig. 5 Sheared surface of Polyvinylchloride and Aluminum

一次破断面が深くへこんでいるのが認められる。さらに図4で明らかなように過酷な破断が行われる二次破断面はいびつになっている。かえりの部分もアルミニウムをはじめ他の一般の金属では見られない特異な形状をしている。

一方純アルミニウムの場合にはだれが小さく、切り口面のほとんどがせん断面でおおわれる良好な面となっている。

4. 解析方法

解析に際しての仮定は以下のものである。工作物は等方性、非圧縮性とする。また加工硬化は等方的に生ずるとして通常行われるような塑性仕事の等価の概念を用い、解析は平面ひずみ*としてひずみ増分理論によって行う。以下の解析方法は主として臼井⁵⁾や藤井⁶⁾によって行われた方法と同様である。

格子点の変動は微小時間（今回は2秒）ごとに撮影された写真上の格子点をタブレットデジタイザによってその座標値を得ることによって求まる。それらの座標値はタブレットデジタイザにつながれたパーソナルコンピュータに入力され、以下のひずみが算出される。

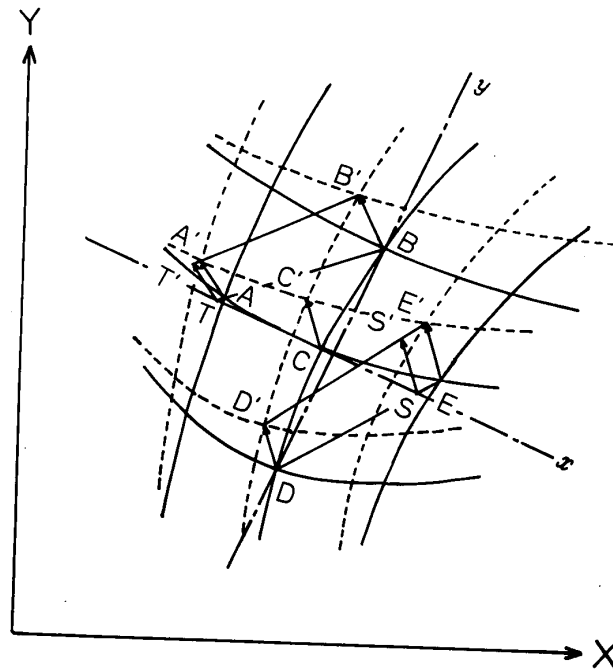


Fig. 6 Calculating method of strain by deformation of grid

* 本実験の解析方法では平面応力下でのひずみを求めていることになるが、平面応力としてひずみを算出しても平面ひずみのそれとは有意差がなく、問題が少ないものと考えられる。

いま図6において工作物側面の格子点A, B, C, D, Eの各点が Δt 時間後にせん断過程の進行とともに変形と移動を生じるが, それらの移動量を差引けば点A', B', C', D', E'が得られる。そうするとベクトル $\overline{AA'}$, $\overline{BB'}$, $\overline{CC'}$, $\overline{DD'}$, $\overline{EE'}$, が変位ベクトルとして求まる。

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} = \frac{(\overline{SS'})_x - (\overline{TT'})_x}{(\overline{TS}) \cdot t} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{\partial \dot{v}}{\partial y} = \frac{(\overline{BB'})_y - (\overline{DD'})_y}{(\overline{DB}) \cdot t} \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{v}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial y} \right) = \frac{1}{2t} \left\{ \frac{(\overline{BB'})_x - (\overline{DD'})_x}{(\overline{DB})} + \frac{(\overline{SS'})_y - (\overline{TT'})_y}{(\overline{TS})} \right\} \quad (3)$$

応力のモール円とひずみ速度のモール円との対応より X 軸から最大せん断ひずみ速度方向まで反時計方向に測った角を ϕ とすると, それは次式で表される。

$$\left. \begin{array}{ll} \dot{\epsilon}_y > 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} > 0 & 2\phi = \tan^{-1} \left| \frac{\dot{\epsilon}_y}{\dot{\gamma}_{xy}} \right| \\ \dot{\epsilon}_y > 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} < 0 & 2\phi = \tan^{-1} \left| \frac{\dot{\gamma}_{xy}}{\dot{\epsilon}_y} \right| + 90^\circ \\ \dot{\epsilon}_y > 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} > 0 & 2\phi = \tan^{-1} \left| \frac{\dot{\gamma}_{xy}}{\dot{\epsilon}_y} \right| + 270^\circ \\ \dot{\epsilon}_y > 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} < 0 & 2\phi = \tan^{-1} \left| \frac{\dot{\epsilon}_y}{\dot{\gamma}_{xy}} \right| + 180^\circ \\ \dot{\epsilon}_y = 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} < 0 & \phi = 0^\circ \\ \dot{\epsilon}_y = 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} = 0 & \phi = 90^\circ \\ \dot{\epsilon}_y > 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} = 0 & \phi = 45^\circ \\ \dot{\epsilon}_y < 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} = 0 & \phi = 135^\circ \end{array} \right\} \quad (4)$$

また最大せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{\max}$ はひずみ速度モール円の半径として次式で求まる。

$$\dot{\gamma}_{\max} = \sqrt{\dot{\epsilon}_y^2 + \dot{\gamma}_{xy}^2} \quad (5)$$

相当ひずみは $\bar{\epsilon}$ は

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \int \dot{\gamma}_{\max} dt \quad (6)$$

で与えられる。

5. 解析結果および考察

ポンチ側のクラックはポンチ押込み量32%でポンチと板押えの間に大きく成長したただれ面が発生する。図7はポンチ側のクラックの発生直前と発生直後の最大せん断ひずみ

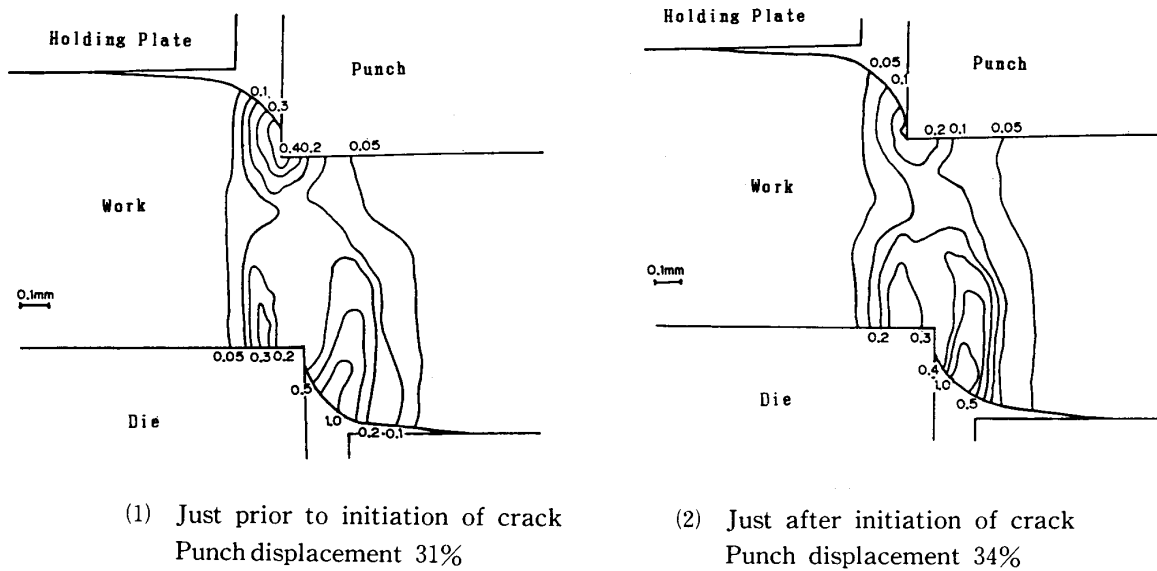


Fig. 7 Change of the maximum shear strain increment distribution at the initiation of crack near punch

増分 $\Delta\gamma_{\max}$ の分布図である。ポンチ押込み量はそれぞれ31%、34%である。発生直前のポンチエッジ部分では $\Delta\gamma_{\max}$ が集中し、その最大値は0.4を示し、この段階でエッジ部からだれ面にかけて変形が集中して生じていることがわかる。一方発生直後では $\Delta\gamma_{\max}$ の最大値も0.2に減少し、また発生直前より全体に大きい $\Delta\gamma_{\max}$ が集中しなくなっている。これらはクラック発生に伴い、ひずみの増加割合が減少し、一種のひずみ緩和的な現象が生じたことを意味する。その場合ダイスエッジ部近傍の分布の状況で0.2の値の分布している領域が直後の方が大きくなっているものの本質的にはそう変わらないものとなっている。

ただこの場合の分布ではクラックが生じないダイス側のエッジ部近傍では値が最大1.0以上の値を示しているのに対しポンチ側で0.4と小さいのは、装置の固有のものと推察される。

図8はダイス側のクラック発生直前、直後の $\Delta\gamma_{\max}$ の分布を示すものである。ポンチ押込み量はそれぞれ41%、44%である。発生直前ではダイスエッジ部にはポンチ側のクラック発生の場合よりも大きい2.0にも到達する大きな値が存在し、分布形状もポンチ側のそれが発生したときとは相当異なりダイスエッジ部に集中して分布している。発生直後

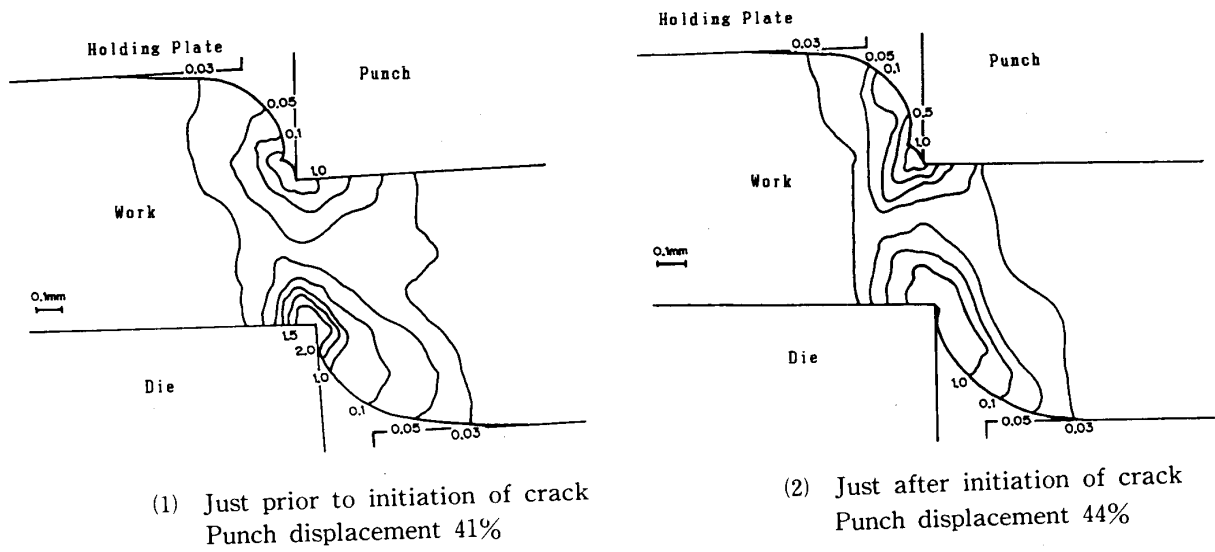


Fig. 8 Change of the maximum shear strain increment distribution at the initiation of crack near die

になるとクラック発生のため $\Delta\gamma_{\max}$ の増加割合が減少し、0.05、0.1といった値がせん断面予定方向に伸ばされたような分布となっている。そしてポンチ側の分布はダイス側の

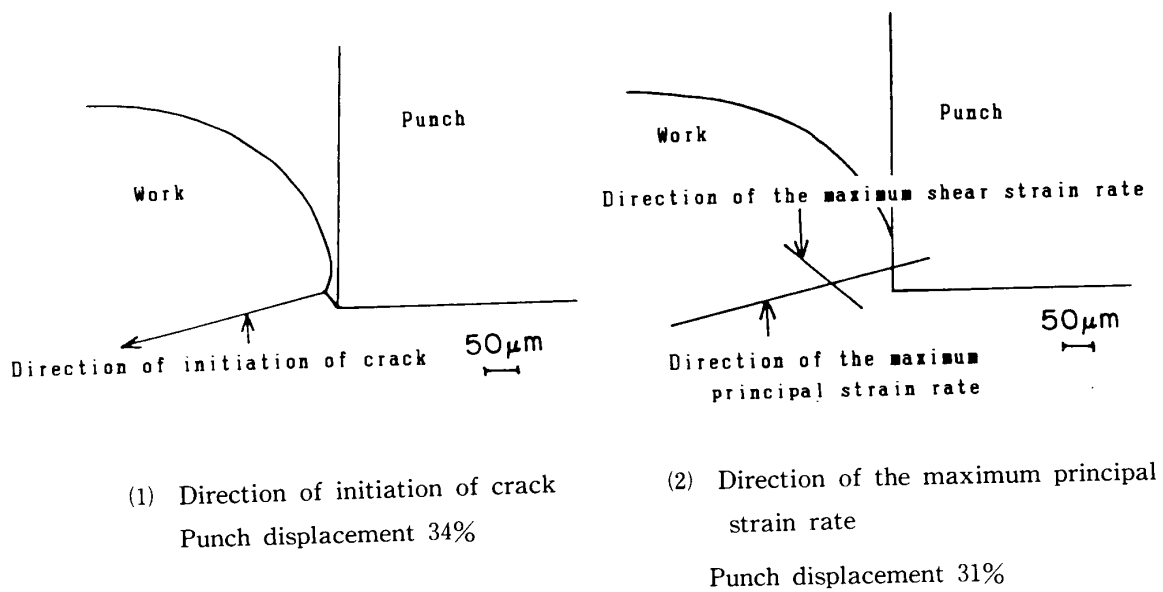
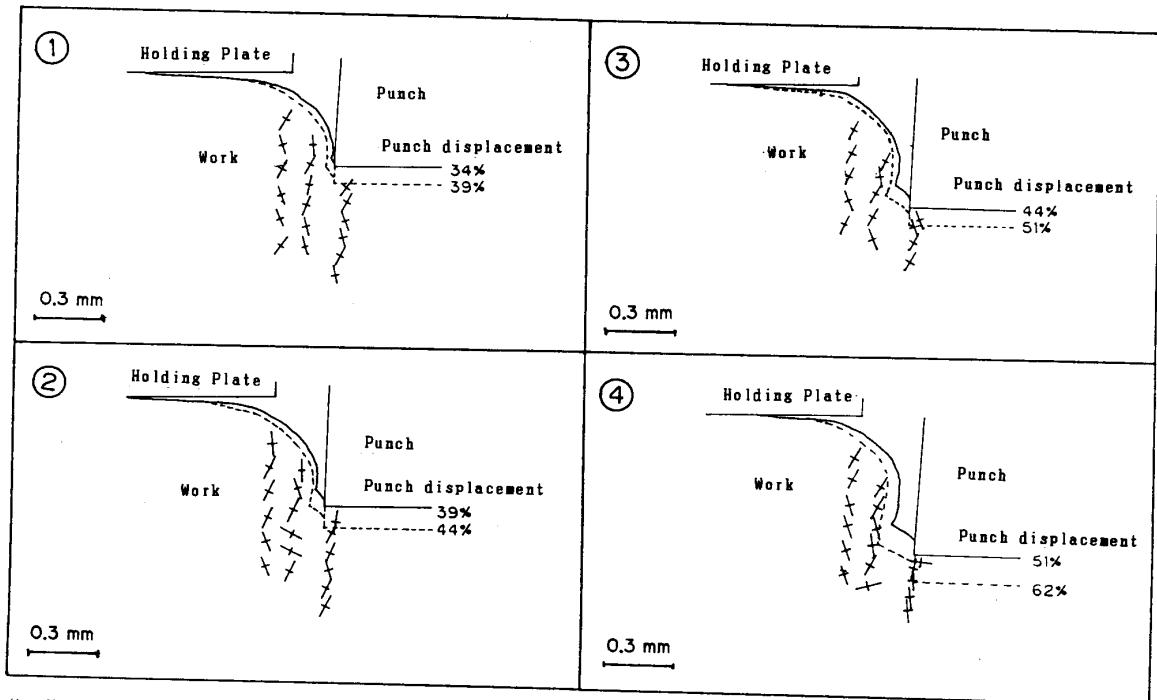


Fig. 9 Direction of initiation of crack and the maximum principal strain rate

$\Delta\gamma_{\max}$ の減少のためか逆にそのエッジ部に再び変形が集中するようになる。

つぎに図9はポンチ側のクラックの発生方向と発生直前の発生点での最大主ひずみ速度方向を別々に表示したものである。図からわかるようにクラックの発生方向とその点での最大主ひずみ速度方向が一致していることが明らかである。さらにダイス側のクラックもポンチ側と同様に発生方向は最大主ひずみ速度であったことが確認された。

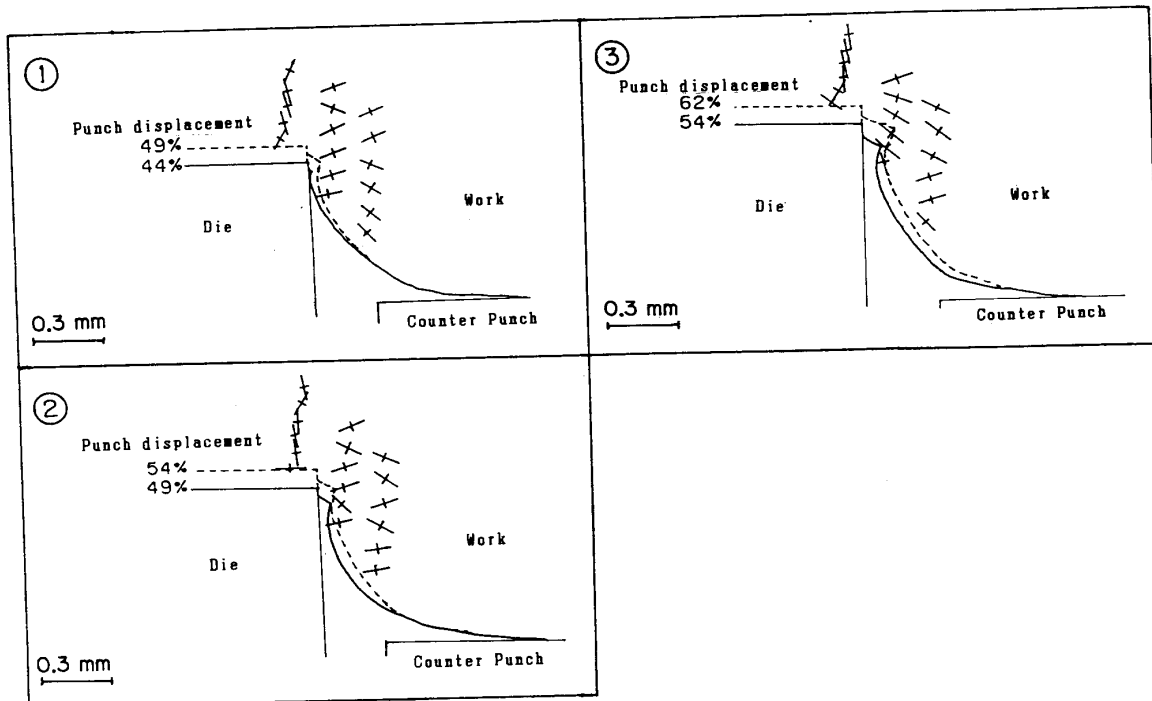


“+” means direction of the maximum shear strain rate (longer line) and the minimum shear strain rate (shorter line).

Fig. 10 Direction of the maximum shear strain rate in propagation of crack near punch

図10はポンチ側クラックの成長過程とクラック周辺の最大せん断ひずみ速度方向を発生直後のポンチ押し込み量34, 39, 44, 51, 62%にわたって図示したものである。図中の+印が最大および最小せん断ひずみ速度方向を示す。+印の長い線の方が最大せん断ひずみ速度方向である。図からわかるように34~39, 39~44, 44~51%のいずれの段階においてもクラックの成長方向はその近辺の最大せん断ひずみ速度方向とほぼ一致することが認められる。しかしポンチ押し込み量51~62%に至っては34~51%の場合とは異なり最大せん断ひずみ速度方向と45°をなす最大主ひずみ速度方向にクラックが成長している。これらはポンチ押し込み量は42%で発生したダイス側のクラックが押し込み量50%以上にもなるとある程度成長し、そのことがポンチ側のひずみ分布に微妙に影響を与えるため、クラックの成長方向が34~51%の場合と異なる最大主ひずみ速度方向になったものと思われる。

図11はダイス側のクラックの成長過程とクラック周辺の最大せん断ひずみ速度方向を



“+”means direction of the maximum shear strain rate (longer line) and the minimum shear strain rate (shorter line).

Fig. 11 Direction of the maximum shear strain rate in propagation of crack near die

図10の場合と同様に+印で表わしたものである。ポンチ押し込み量44~49%では成長方向が最大主ひずみ速度方向, 49~54%ではせん断ひずみ速度方向と最大主ひずみ速度方向の間, 54~62%では最小主ひずみ速度方向となり, いずれも成長方向が異なる。今回の実験の場合ポンチ側のクラックはダイス側のそれよりも先に発生しており, ダイス側のクラックのひずみ分布を求める場合はポンチ側のクラックの成長の影響を不可避免的に受けるため純粹のダイス側のクラック発生および成長時のひずみ分布が求められなかったと思われる。

6. 結論

硬質塩化ビニルのせん断切り口面の精度を支配するせん断過程時のクラック発生および成長機構を明らかにするため, 走査電子顕微鏡内加工実験装置を用いビジオプラスティシティ法によって工作物内のひずみ分布を求めた結果, つぎのことが明らかとなった。

- (1) 硬質塩化ビニルのせん断荷重—ポンチ押し込み量曲線 (クリアランスは0%) においては最大荷重が押し込み量90%にて生じ, せん断変形抵抗は53.9MPaで, これは降伏応力の131%となり, 純アルミニウム等の金属の約61%と比してかなり大きい。
- (2) 硬質塩化ビニルの切り口面は金属の場合と異なりだれ面と破断面を有する形状をな

し、それはクラックの発生および成長に由来する。

- (3) ポンチ側のクラック発生はポンチ押込み量31%で発生し、発生方向は最大主ひずみ速度方向である。その後クラックは最大せん断ひずみ速度方向に成長する。
- (4) ダイス側のクラックはポンチ押込み量42%で最大主ひずみ速度方向に発生し、その成長方向はポンチ側のクラックの成長と同時に最大せん断ひずみ速度方向になると思われる。

参考文献

- 1) 北条英典, 升森宏介, 影山陽道, 高橋利定, 熱可塑性高分子材料の室温におけるせん断加工, 塑性と加工, 9, 88(1968) 304.
- 2) 青木 勇, 高石和年 形状効果を利用した塩化ビニル樹脂のせん断分離過程の観察, 塑性と加工, 25, 286(1984) 1021.
- 3) 金枝敏明, 微視的加工機構解明のための走査電子顕微鏡内加工実験装置の製作, 岡山理科大学紀要, 16(1981) 73.
- 4) Jhonson, W. & Slater, R. A. C., Further Experiments in Quasistatic and Dynamic Blanking of Circular Discs from Various Materials, Proc. Instn. Mech. Engrs., (1965) 180.
- 5) 臼井英治, せん断形切りくず生成機構の塑性学的解析(第1報)—実験および解析の方法について, 精密機械, 32, 12(1966) 312.
- 6) 藤井義也, 田上 潔, 松野 勝, 三浦勝英, 鉛—すず合金による二次元切削機構の解析, 機械学会論文集, 35, 275(1969) 1558.

Strain Distribution on Initiation and Propagation of Crack in PVC Shearing Process

Toshiaki KANEEDA

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Okayama University of Science

1-1 Ridai-cho Okayama 700

(Received September 30, 1987)

Sheared surfaces of Polyvinylchloride (PVC) are not smooth as expected, although the strength is lower than that of conventional metals. The shearing mechanism for PVC has been studied by using a machining set up in a scanning electron microscope (SEM). A visio-plasticity method is used to investigate strain distribution of the work. The direct SEM observation results show that shearing phenomenon of PVC is different from that of conventional metals, because of shape of the crack in the shearing process. The punch side crack initiates on the severely domed surface. The fracture mode of the initiating crack is mode I (opening crack tip) and that of the propagating crack is mode II (shearing on plane). The strain distribution calculated by the method shows that the punch side crack initiates along the maximum principal strain rate direction and propagates along the maximum shear strain rate direction. On the other hand, the die side crack also initiates along the maximum principal strain rate direction and may propagate along the maximum shear strain rate direction.