 研 究

延性金属板のせん断加工機構 (第 2 報)

—工具によって与えられる材料拘束条件の影響—

近 藤 一 義*

Mechanism of the Shearing Processes of Ductile Sheet Metals (2nd Report)

—Effect of the Supporting Condition of the Specimen and the Tool Clearance—

Kazuyoshi KONDO

This research is being carried out with the purpose of interpreting consistently the phenomena encountered in the shearing process based on some general principles of the metal forming processes.

In the previous report, 4 kinds of working conditions which might effect the mode of deformation of the specimen in this series of experiments were accounted for and only 2 of these were dealt with.

This report deals with the rest two restraining conditions, i. e. the support of the specimen and the tool clearance on the quality of the sheared surface.

When the supporting condition is altered alone, the height of the smooth portion in the sheared surface is also changed corresponding to the magnitude of the hydrostatic pressure prevalent in the material near the cutting edge. This is also true for the change in the tool clearance within a certain limit. Therefore, effect of these conditions on the quality of the sheared surface can be discussed almost consistently with the effect of other two working conditions which were already dealt with.

The effect of the tool clearance larger than a certain limit on the height of the smooth portion seemed extraordinary and left not understood.

1. 緒 論

著者は、せん断加工を分離面の創成に関する塑性変形および破断過程とみなし、塑性加工の一般原則にのっとり加工諸現象を統一的に解釈し、あわせて加工目的に応じた最適加工条件の合理的選定に資することを目的として研究を進めている。

前報においては¹⁾、工具ならびに材料形状を一定した場合に材料の変形挙動を支配する因子として、材料の機械的性質、工具面摩擦、材料の支持条件および工具すきまの四つを考え、そのうち前二者が分離面形状におよぼす影響を論じた。

本報においては、残された二つの材料拘束条件、すなわち、支持条件および工具すきまが分離面形成におよぼす影響について取り扱うが、刃角近傍の静水圧の寄与という前報と同じ観点からどこまで一貫性のある解釈が可

能となるかを検討しようと思う。

2. 実験条件

実験装置は前報に用いたものと同じで、逃げのない直線複刃により帯状試片を 32.630 mm のポンチ刃先間隔で二箇所せん断し、加工中のポンチ垂直成分力および水平成分力を分離検出するものである。

供試材料も前報と同じ厚さ 1 mm のアルミニウム板第 3 種の硬質材 (H 材) および焼なまし材 (O 材) で、その寸法と機械的性質は表 1 のとおりである。

表 1 供試材料の寸法および機械的性質

アルミニウム板第 3 種 1.00×20.0×84 mm					
種 別	硬度 H_v	0.2%耐力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	一様伸び %	硬化指数 n^*
硬 質 材	52.3	17.2	18.8	2.4	0.024
焼なまし材	24.4	2.5	8.8	26.2	0.233

* 正会員 名古屋大学工学部

* $\sigma = c\bar{\epsilon}^n$, σ : 真応力, $\bar{\epsilon}$: 対数ひずみ

他の条件はつぎに箇条書きされたごとくである。

(i) 支持条件

両端固定, 自由支持およびはね上り管制

はね上り管制とは押え板をダイス面から板厚距離以上に離しておき, 抜きくず端のはね上り量がある値に制限した場合をいい, 両端固定および自由支持の中間状態である (図 3(b) 参照)。

(ii) すきま条件

通常アルミニウムについて推奨されている板厚の 6% のすきまを中心に, つぎの 7 種類のすきまを選んだ。

2.0, 4.5, 6.0, 8.5, 12.0, 16.0, 20.0%

(iii) 潤滑剤

本報を通じマシン油に一定した。

実験条件

アルミニウム第3種焼なまし材, 板厚: 1.020 mm, すきま: 板厚の12%, 潤滑油: マシン油

図 1 分離面形状 (支持条件の影響)

3. 実験結果

3.1 材料支持条件の影響

焼なまし材についてすきまおよび潤滑条件を一定にし, 支持条件のみを変更した場合に加工現象がいかなる変化を示すかを調べた。図 1 は分離面プロファイル形状の測定結果を示し, また図 2 はこれに対応するポンチ荷重の経過を示す。支持条件は自由支持および両端固定のほか, はね上り管制を 4 種類行ない, 材料の拘束程度に段階的な差異を与えた。

図 1 の横軸は材料拘束のきびしさの順序のみを示し, 右寄りのものほど相対的に拘束がきびしくなっている。なお自由支持の場合のはね上り量は約 11 mm である。

図において製品と抜きくずのつぶれ角を対比すると, 支持条件により加工中の材料の巨視的変形挙動に図 3 のごとき差異があることが知られる。

実験条件

アルミニウム第3種焼なまし材, 板厚: 1.020 mm, せん断長さ: 20.0 mm × 2, すきま: 板厚の 12%, 潤滑剤: マシン油

図 2 ポンチ荷重線図 (支持条件の影響)

図 3 材料の巨視的変形挙動

すなわち、加工中刃角部の材料は自由支持では(a)のごとくポンチ刃側に凹に、また両端固定では(c)のごとくダイス側に凹に折れ曲っており、はね上り管制 1 mm あるいは 2 mm あたりでは両者の移行形として(b)のごとく折れ曲りのない、いわゆるはさみ形せん断類似の挙動を示している。

また、はね上り量の管制によって製品のつぶれ角およびだれの高さがわずかながら増加していることは、製品に対抗する板押えがないため、抜きくずにきびしい拘束を与えると相対的に拘束の弱い製品側ではかえって材料の変形が強制され、わん曲も大きくなることを示している。

つぎに、分離面性状を表わす主要値として全圧下高さ、すなわち破断き裂発生までの刃物の切込み量に注目すると、材料拘束がきびしくなるとともに製品の全圧下高さ i は単調増加し、抜きくずの全圧下高さ i' は逆に単調減少している。

前報の実験においては、平滑せん断面が塑性変形により形成されたため、破断き裂の発生時期が刃角近傍の静水圧の大きさに依存して決定されることが知られた。上記の全圧下高さの変化の傾向もまた同じ観点から説明されるであろうか。

3.1.1 ポンチおよびダイス刃角近傍における静水圧力
考察の便宜上、前報と同様、工具面に働く成分力を図 4 のように仮定し、垂直成分力 P_V および水平成分力 P_H をそれぞれ次式のように表示しておく。

$$P_V = P_V' + \mu P_H' \quad (1)$$

$$P_H = P_H' + \mu P_V' \quad (2)$$

まず、図 2 についてポンチ荷重の全般的な経過をみると、材料拘束の強化は当然垂直成分力の増加をもたらしているがその程度は約 9% 以下である。

また、水平成分力は上記抜きくずのはね上り量の顕著

な差異により、自由支持の場合が特に大きく、はね上り管制においては、抜きくずの端が押え板に当って拘束が始まると順次自由支持の曲線からはずれて低下してゆき、はね上りのない両端固定において P_H は最も低い経過を示している。

したがって、図 2 の自由支持と両端固定における水平成分力の差異は、ほぼ抜きくずのはね上りによる式(2)右辺の P_H' の増加分の大きさを示すとみてよい。

前報において、式(2)の右辺各項がいずれも刃角近傍の材料に静水圧的負荷を与えるため、 P_H が刃角近傍の静水圧管制量であると考えうることを報じた。これによれば、測定された図 2 の P_H の傾向は、ポンチ刃角近傍の静水圧が自由支持の場合に最も大きく、拘束がきびしくなるとともに減じていることを示している。このように静水圧の差異がもたらされたのは、主として上記の抜きくずのはね上り量の差によるもので、はね上りによる材料の曲げ繊維応力がポンチ刃角部に圧縮勝手に重畳されたことに起因する。

一方、ダイス刃角部では曲げの繊維応力が引張勝手に重畳されることから、材料拘束が弱いほど逆に静水圧は低下しているものと推定される。

3.1.2 分離面性状

以上のポンチおよびダイス刃角部の静水圧の傾向は、上記図 1 の全圧下高さの傾向と定性的に一致し、刃角近傍を支配する静水圧の大きい場合ほど全圧下高さが大きくなっている。このことは、破断き裂の発生時期が刃角近傍の静水圧の大きさによって規定されていることを示し、材料支持条件の影響もまた前報と一貫して解釈しうることが明らかとなった。

つぎに、同一支持条件における抜きくずと製品の全圧下高さを対比すると、破断き裂の発生は常に材料の曲りの引張側から先に起こり、図 3 の変形挙動に対応して自由支持ではダイス刃角から、そして両端固定ではポンチ刃角から先にき裂が発生している。また、はね上り管制 1 mm および 2 mm の中間のはさみ形類似せん断では、破断き裂は同時に発生し $i = i'$ となっている。

以上、 i および i' の傾向のうち注意すべきもう一つの点は、はさみ形類似せん断の前後における i および i' の顕著な差異である。このことは、刃角部の静水圧の大きさが同程度の場合でも重ね合わされる材料の巨視的な曲げ繊維応力の向きが変わると、これによって破断き裂の発生時期はきわめて顕著な影響をこうむることを示すものである。

3.2 工具すきまの影響

潤滑剤を一定にし、自由支持条件の下ですきまを変更

図 4 工具面に働く成分力

(a) 製品側の分離面形状

(b) 抜きくず側の分離面形状

実験条件
アルミニウム第3種焼なまし材, 板厚: 1.020 mm, 潤滑剤: マシン油, 自由支持

図5 焼なまし材の分離面形状 (すきまの影響)

した場合に加工現象がどのように変わるかを調べた。図5および図6はそれぞれ焼なまし材および硬質材における分離面プロファイル形状の測定結果を示し、(a)は製品の分離面、(b)は抜きくずの分離面に対応する。

両図において、すきまの影響は定性的には材質によらずほぼ同様で、その量的な変動の大きさは硬質材において顕著である。板の材質と塑性的変形挙動の結びつきに関するこの種の事実は従来から各所で認められているが²⁾³⁾⁴⁾、われわれはこれをつぎのように理解したい。すなわち、焼なまし材に比べ硬質材は拘束条件に対する一種の敏感性が大きいものと考えたい。現象をこのように解釈すれば、以後の諸現象の理解にきわめて便利だからである。すきまが材料の変形におよぼす影響が材質によって異なる点を上記のように認め、図5および図6を定性的に共通のものとして、以下分離面形状を表わす各曲線の傾向について吟味する。

(a) 製品側の分離面形状

(b) 抜きくず側の分離面形状

実験条件

アルミニウム第3種硬質材, 板厚: 1.000mm, 潤滑剤: マシン油, 自由支持

図6 硬質材の分離面形状 (すきまの影響)

まず両図(b)において、抜きくずはね上り角 β がすきまとともに著しく増加している。これはすきまの増加によって材料拘束が弱まり、材料に比較的自由な変形が許された結果生じ、すきまの変動によって材料がこうむる巨視的変形挙動の最も顕著な差異となっている。

また、両図(a)に併記した製品のだれとつぶれ高さの和の変化も材料拘束の緩和に伴う当然の変化である。

分離面性状の良否はせん断面高さ a あるいは全圧下高さ i によって表わされている。図において a 、 i および i' 曲線がすきまに対して極小値をもつことから、従来知られているようにすきまが小さい場合に良質な分離面がえられるのみでなく、逆にすきまの大きい場合にも良い

実験条件
アルミニウム第3種焼なまし材, 板厚: 1.020 mm, せん断長さ: 20.0 mm×2, 自由支持, 潤滑剤: マシン油

図7 ポーチ荷重線図(すきまの影響)

分離面がえられることが知られた。以下, これら良質分離面が形成される機構について考察してみよう。

3.2.1 ポーチ荷重成分の構成状態

まず, すきまの変更に伴う力の場の変化を知るため, 図5に対応するポーチ荷重線図を示したのが図7である。ここで, 前節式(1)・(2)によって両成分力の構成状態を算定すれば, すきまの変更に伴う両成分力の変化の意味が明らかとなる。

すなわち, 本実験におけるマシン油の摩擦係数を $\mu = 0.15$ と推定し, たとえばポーチ行程50%の場合について右辺各項の大きさを計算すると, 垂直成分力においては摩擦項 $\mu P_H'$ の寄与はただかだか1.5%で, すきまの増加によって材料拘束が緩和すると P_V' が低下していることが知られる。

また, 水平成分力の構成状態の計算結果は図8に示すとおりで, すきまが増した場合抜きくずのはね上りの増加により P_H' が顕著に増加し, 材料拘束の緩和に伴う $\mu P_V'$ の減少に打勝って P_H の増加をもたらしていることがわかる。

3.2.2 抜きくずの分離面性状

測定されたポーチ荷重により, 図5(b)および図6(b)の抜きくず全圧下高さ i' の変化の傾向を吟味しよう。自由支持条件では抜きくずのはね上りによりポーチ刃角部は常に高い静水圧下におかれるため, これまでの議論から当然静水圧の大きさに対応して平滑面の大きさが決まっていることが予期される。しかし, 図7の P_H によれば, すきまの増加に伴って静水圧は単調増加しているこ

図8 水平成分力の構成状態

図9 製品つぶれ幅におよぼすすきまの影響

とになり, すきまの小さい範囲における全圧下高さの右下りの傾向を説明することができない。このことは, 抜きくずのはね上りの差が顕著で, 工具と材料の接触状態に著しい差異がある場合に, 測定された P_H をもってポーチ刃角のごく近傍の静水圧を表わす量としたことに誤りを認むべきものと思われる。

そこで, P_H 以外にポーチ刃角近傍の静水圧の大きさを推定しうる基準量として製品のつぶれ幅を考えた。すきまを変えた場合, 工具面への垂直力の差異は図7に明らかのようにさほど顕著でないため, つぶれ幅の差異は材料と工具の接触部に働く垂直圧の平均強度(intensity)の差異を表わし, これによって刃角部の静水圧の差異を推定して差しつかえないと思われる。

図9は図6と同じ硬質材について測定した製品つぶれ幅である。図からポーチ刃角近傍の静水圧はあるすきまにおいて極小値を持つことが読みとられる。このことは, すきまの増加により材料拘束が弱まる効果と, 抜きくずのはね上りにより曲げの圧縮繊維応力が付加される効果が重畳された結果と考えられる。両図の対比により, この場合においてもポーチ刃角近傍の静水圧の大きさと抜きくずの全圧下高さの対応が明らかとなった。

3.2.3 製品の分離面性状

つぎに, 図5(a)および図6(a)において, 製品の全圧下

高さ i およびせん断面高さ a はやはりあるすきまの値において極小値をもち、一見、抜きくずの場合に類似して見える。しかし、ダイス刃角近傍ではすきまが増加すると摩擦せん断力 $\mu P_V'$ は図 7 によりやや減少し、これに加えて抜きくずのはね上りが P_H を著しく減殺するため、ダイス刃角近傍の静水圧がすきまの増加とともに顕著に低下することは明らかで、ポンチ刃角近傍と同一視することはできない。

すなわち、すきまの小さい範囲においては静水圧が高いために良質分離面がえられ、すきまの増加に伴って刃角近傍の静水圧が低下すると a および i が減少しており、これらはすでにのべた塑性変形によって平滑せん断面が形成される場合と理解して矛盾がない。

しかし、すきまの大きい範囲における a および i の増加の傾向は、これまでの解釈とは明らかに矛盾している。この場合は逆に静水圧が低いほど平滑せん断面の形成が持続されており、これまでと同一のせん断機構を前提にしては説明不可能である。このため、たとえば新たに塑性変形によらない平滑せん断面の形成機構というようなものがありはしないかと疑われるのである。

著者は、この点を検討するために新たに材料内部の変形状態を微視的に観察し、塑性変形による平滑せん断面形成機構のほかに、切削類似の機構により平滑せん断面が形成される事実を確認した。これによって、上記すきまの大きい場合の現象はむしろ、その他多くのせん断現象の理解がきわめて明白になったが、これについての詳細は次報においてのべる。

4. 結 論

せん断加工における諸現象を、塑性加工の一般原則にのっとってできる限り統一的に解釈しようとする立場から研究を進めた。

本報では、本実験系列において材料の変形挙動を支配すると考えられる四つの加工条件のうち、残された材料支持条件および工具すきまが分離面形成におよぼす影響

を調べ、つぎのような結論をえた。

- 1) 材料支持条件の影響についても、材料拘束の変更に伴う刃角近傍の静水圧の変化に対応して破断き裂の発生時期が規定されており、前報までと一貫した態度で分離面形状を論ずることができた。
- 2) 材料支持条件の差異によってもたらされる刃角近傍における材料の巨視的な折れ曲りの方向の変化が分離面形成にきわめて著しい影響をもたらすことが知られた。
- 3) 工具すきまの影響において、ポンチ刃角からの破断き裂の発生時期ならびにすきまの小さい範囲におけるダイス刃角からの破断き裂の発生時期は、いずれもそれぞれの刃角近傍における静水圧の大きさによって規定されていることが判明した。
- 4) 以上、前報の結論を含めて、各加工条件において常に塑性変形により平滑せん断面が形成されているという観点から、刃角近傍の静水圧の大きさにより一貫して分離面性状を論じたが、すきまの大きい場合において逆に静水圧が低いほど容易に平滑せん断面が形成される事実を確認した。この形成機構については次報においてのべる。

終わりに、本研究が春日保男教授の懇切なご指導のもとに行なわれたものであることを付記して感謝の意を表わしたい。

(1965, 2月5日受付)

文 献

- 1) 近藤一義：延性金属板のせん断加工機構（第1報），精密機械，31巻6号（1965）476.
- 2) D. M. Woo: On the Variation of Tension in Stretch-Forming a Metal Strip, J. Appl. Mech., Vol. 25, No. 4 (1958) 623.
- 3) G. Murray: Research into Deep Drawing, Sheet Metal Indust., Vol. 35, No. 377 (1958) 657.
- 4) 春日保男，近藤一義：深絞りにおける荷重伝達部のひずみと摩擦，第4回塑性加工シンポジウム前刷（1960）70.