超塑性 Zn-22 wt%Al 合金の盛り上げ変形挙動に 及ぼす超音波振動の影響*

松木 賢司**・高田 修一***・時沢 貢**

Effect of ultrasonic oscillations on behavior of close-die extrusion
of superplastic Zn-22 wt%Al alloy*

UDC:669.45'71: 534.838

Kenji MATSUKI**, Shuichi TAKATA***
and Mitsugu TOKIZAWA**

Superplastic Zn-22 wt%Al alloy was extruded by close-die sets with three types of punch to which ultrasonic oscillations are applicable. The extrusion load (W) is related to the extrusion speed (V) by the equation $W \propto V^m$. The values of m generally 0.4 to 0.5 are comparable to those of strain rate sensitivity index m in superplastic deformation in tension or compression. In the extrusion condition in which severe frictional restraint arises, however, m decreases down to 0.3 or less. If ultrasonic oscillations are applied, the extrusion load decreases, and m does not decrease even in the extrusion condition described above. Application of ultrasonic oscillations is effective to flatten the top shape of specimens and to increase the extrusion speed at a constant load. The degree of extrusion load and increase of extrusion speed by applying ultrasonic oscillations are mainly due to the decrease of frictional constraint.

Key words: Zn-22 wt% alloy, superplasticity, close-die extrusion, ultrasonic oscillation, friction

(Received January 14, 1985)

1. 緒 言

微細結晶粒超塑性合金は、温度とひずみ速度が適切な変形条件における伸び・延性が著しく大きく、しかも変形中ほとんど加工硬化しない低流動応力状態を示す。この超塑性特性を板材やブロック材の塑性加工に応用し低加工力で、複雑形状部品の一工程成形、固相接合と併用した一体化加工、加工型面微細凹凸の精密転写などが可能であるなど、加工事例も多く報告されている¹⁾。一方、その実施過程でいくつかの加工利用上の問題点も明らかにされ、その対策が考えられている²⁾。それらの問題点のうちには、張り出し成形における肉厚の不均一、型なじみの不足、焼付き、離型時の材料変形等、型と材料間の摩擦が関係すると思われるものも多い。また型面形状が複雑かつ微細なほど、加工中摩擦の影響を受け易く、加工時間増大の原因になると考えられる。超塑性加工にとって加工時間の短縮は重要な課題である²⁾。適切

な潤滑剤の使用は摩擦力低減に役立つが、型面微細部に潤滑剤がたまる場合にはむしろ材料のなじみを阻害する³⁾。超塑性の優れた低流動応力特性を有効利用するための基礎研究の一環として、超塑性変形においても摩擦現象およびその低減の種々の検討が必要であろう。

著者らはこのような観点から、前報⁴⁾で Zn-22%Al 共析合金の超塑性圧縮変形における摩擦現象を詳細に検討し、変形中の超音波振動の重量は摩擦および変形応力の低減に役立つことを報告した。本研究では、前回試作した超音波付加試験装置を用いて超塑性 Zn-22%Al 共析合金の盛り上げ加工⁵⁾試験を行い、幅の狭い平行みぞやテーパみぞへの材料の盛り上り変形過程および充満性におよぼす超音波振動付加の効果を基礎的に検討した。本実験の盛り上げ加工では、材料の盛り上り方向と工具振動方向が平行かまたはそれに近いので、塑性流動方向と振動方向が直角な圧縮変形における結果⁴⁾と併せて、超音波振動付加の効果を一層明確にできる。

* 超塑性変形挙動に及ぼす超音波振動付加の影響に関する研究 第2報

** 富山大学工学部 (富山市)。Faculty of Engineering, Toyama University (Toyama)。

*** 富山大学大学院 (現(株)不二越)。Graduate School, Toyama University (now Fujikoshi, Ltd.)。

2. 実験方法

2.1 試験片および試験装置

本実験で使用した試験片の化学組成および作成手順は前報⁴⁾と同様で、試験片寸法は直径 7.6 mm、高さ 8 mm である。盛り上げ加工試験に際しては、前報で述べた超音波付加圧縮試験装置の圧縮用ホーンを、先端に盛り上げ加工用ポンチ（直径 7.6 mm、長さ 10 mm）を一体化加工した新たなホーン（段付きホーン）に取り換えた。さらに圧縮受圧台上に、Fig. 1 に示したように、子午面で 2 分割できるダイをダイホルダーに組み込んで配置した。このような盛り上げ加工装置の共振系はポンチ先端までであり、共振系全体で 2 波長共振するように設計した。前述した段付きホーンの振幅拡大率⁵⁾は 1.033 であり、その先端振幅 (u) は、超音波発振器出力電流が同じならば前報の圧縮用ホーンの先端振幅にほぼ等しい。

盛り上げ加工試験のポンチ形状は 3 種類とし、その詳細形状を試験片およびダイの配置と共に Fig. 2 に示した。クロスヘッドの下降に伴い、ポンチー A では中央の幅 1 mm の平行みぞへ、そしてポンチー B、C ではポンチとダイ間のリング状の平行みぞとテーパみぞへ材料が盛り上がり変形する。ポンチー A の平行みぞの底部は、工作手法上平らにできなかったが、ポンチー B と C ではいずれも鋭い底部形状となっている。

2.2 盛り上げ加工試験方法

試験温度はダイホルダーに取り付けた熱電対で検出し

Fig. 1 Main part of the testing apparatus for superimposition of ultrasonic oscillation.

て制御し、523K で 1.8 ks 保持後、無潤滑で盛り上げ加工試験を開始した。その際の荷重 (W) の変化は圧縮受圧台下部のロードセルで検出しマルチコーダで記録した。ただし、本試験装置の許容負荷が小さいため、種々のクロスヘッド速度 (V) で試験を開始後、最大荷重 ($W_{\max}$) 2.94 kN に達した直後停止する最大荷重試験と、各種のクロスヘッド速度で試験を開始し、所定の保持荷重 (W_{hold}) に達した後はクロスヘッドの下降と停止を繰り返して荷重を $W_{\text{hold}} \pm 0.1$ kN で一定時間保持する定荷重保持試験の 2 種類の試験を行った。両試験の詳細な条件を Table 1 に示した。定荷重保持試験では、クロスヘッド停止中にクリープ変形が進行して荷重が徐々に減少

Fig. 2 Schematic diagrams of three types of close-die extrusion tool. (a) Punch, (b) Specimen, (c) Die.

Table 1(a) Maximum load test conditions

	Punch-A	Punch-B	Punch-C
Maximum Load $W_{\max}$ (kN)	2.9		
Crosshead Speed V (10^{-3} mm/s)	1.7—8.3	5—33	1.7—25
Temperature T (K)	523		
Amplitude u (μm)	0, 3.5		

Table 1(b) Constant load test conditions

	Punch-A	Punch-B	Punch-C
Constant Load W_{hold} (kN)	2.9 ± 0.1	2.0 ± 0.1	2.9 ± 0.1
Crosshead Speed V (mm/s)	6.7	17	17
Forming Time t (ks)	0.3—1.5	0.12—0.6	0.12—0.6
Temperature T (K)	523		
Amplitude u (μm)	0, 3.5		

するが、ダイみぞへ材料が充満すると荷重が減少しなくなるので、この状態を充満完了の目安にして試験を停止した。

盛り上げ加工試験を停止後ダイから取り出した試験片の盛り上り形状の寸法は、傾角顕微鏡（ユニオン光学製、読取精度1/100 mm）を使用して精密に測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 盛り上げ加工荷重—クロスヘッド ストローク 線図

Table 1(a) に示した範囲のクロスヘッド速度で $W_{\max} = 2.94$ kN に達するまでの最大荷重試験を行い、盛り上げ加工荷重 (W)—クロスヘッド ストローク (S) の関係を最初に測定した。Fig. 3(a), (b) および(c)に、それぞれポンチ-A, -B および-C の結果を例示した。Fig. 3(a), (b) および(c)には、超音波振動無付加 ($u=0$) と付加 ($u=3.5 \mu\text{m}$) 時の W - S 線図をそれぞれ点線と実線で示し、またそれぞれのダイみぞを材料がほぼ充満完了する S を横軸に矢印で示した。Fig. 3(a), (b) および(c) から、3種類のポンチにおいて、 V が増大すると W は大きくなり、超音波振動の付加は W を減少させることが明らかである。Fig. 3(a) と(b)に示した W - S 線図には、一般にストロークの増大に伴い、盛り上り変形初期に荷重が急増した後（第1領域）、定常あるいはやや減少状態を示し（第2領域）、その後再び急増する（第3領域）傾向がある。一定クロスヘッド速度で比較すると、超音波振動を付加することによって、特に第2領域の荷重の減少が明らようで、 $W_{\max}$ に達するまでにスト

ロークが著しく大きくなる場合があつた。このような場合には試験片の盛り上り高さが著しく増加する。

次に、Fig. 3 のような W - S 線図を測定後、ダイから取り出した各試験片の盛り上り高さ S と W の関係を測定し、Fig. 4 に示した。Fig. 4 では、ポンチ-A, -B および-C による各試験片の盛り上り部のうち、ダイと接触していた高さの最小値をそれぞれ h_a , h_b および h_c とした。Fig. 4 に示したように、3種類のポンチによる盛り上り高さとストロークの関係はほぼ直線で整理できる。これらの直線の内挿から、盛り上り変形を開始するストロークは、各ポンチでおよそ $0.4 \sim 0.5$ mm の範囲にあることが分かる。この値は、Fig. 3(a) と(b)に示した W - S 線図の第1領域から第2領域へ変化するストロークに比較的近い。上野⁷⁾は、超塑性 Zn-22%Al 合金を乾性弗素潤滑剤を使用してホビング加工すると、平均ホビング

Fig. 4 Change of extrusion web heights with crosshead stroke.

Fig. 3 Change of load (W) vs. crosshead stroke (S) curves with crosshead speed (V). (a) Punch-A, (b) Punch-B, (c) Punch-C.

圧力がある押し込み深さ以上ではほぼ一定となり、この付近を境として変形様式が押し込みの非定常変形から後方押し出しの定常変形に移り変わると述べている。

本実験における Fig. 3(a)と(b)の第1領域から第2領域への移行も、試験片とダイの間隙を埋めるすえ込み変形を含めた非定常変形から盛り上りの定常変形へ移る変化に対応していると思われる。一方、本実験は無潤滑で実施しているから、盛り上り変形の進行による摩擦面積の増加、あるいは変形後期のダイみぞのすみ角を満たす段階で摩擦抵抗が著しく増した時に第3領域へ変化する。ポンチ-Cを使用した場合には、盛り上り変形開始後すぐに、上述したすみ角を満たすのと似た変形になるため第2領域が明りようではない。

一般に超塑性変形においては、流動応力(σ)のひずみ速度($\dot{\epsilon}$)依存性が大きい特徴があり、その依存性指数 m ($\sigma = K\dot{\epsilon}^m$) が0.3~1.0の範囲の高い値をとることが超塑性変形の指標にされている⁸⁾。一方、上野ら⁷⁾は前述したホビング加工において、平均ホビング圧力($\bar{P}$)と押し込み速度(V_h)の間に次の関係を見いだした。

$$\bar{P} = KV_h m' \quad (1)$$

ここで K と m' は温度をパラメータとする定数である。そして各温度における m' は圧縮試験で得られた m とほぼ一致し、523K では $m' = 0.41$ になることを報告した。

そこで本実験においても、盛り上げ加工荷重(W)と盛り上げ加工速度すなわちクロスヘッド速度(V)の関係を明らかにし、それに対する超音波振動付加の影響についても検討した。Fig. 5に、ポンチ-Aとポンチ-Bの W - S 線図の第2領域 (Fig. 3(a)と(b)参照)に含まれる各一定の S の値において、 W と V の関係を両対数で整理した。本実験の範囲内において、ポンチ-Aと-Bの

Fig. 5 Dependence of extrusion load (W) on crosshead speed (V) in the extrusion tests used punch-A and Punch-B, respectively, with or without ultrasonic oscillation.

W と V の間には、いずれもほぼ直線関係が認められる。すなわち、 W と V の間には(1)式における同様の関係が存在する。ただ、それらの直線の勾配から求めた、 W の V 依存性指数 m'' の値に対する超音波振動付加の影響は小さく、Fig. 5に示したようにポンチ-Aでは約0.45、そしてポンチ-Bでは0.5に近い値になった。これらの値は、いずれも超塑性変形状態に対応した値と考えられる。一方、Fig. 6にポンチ-Cについて $S=0.3, 0.5$ および 0.7 mmでの W と V の関係を Fig. 5と同様に整理した。その結果、ポンチ-Cについても各条件の W と V の間には直線関係がある。それらの直線の勾配から求めた m'' の値を比較すると、 $u=0$ の場合 $S=0.3$ mmでは $m'' \approx 0.45$ で比較的高い値を示したが、 S の増大によつて減少する傾向があり $S=0.7$ mmでは $m'' \approx 0.29$ になった。しかし $u=3.5 \mu\text{m}$ の場合、 S の増大に伴う m'' の減少はわずかで、 $S=0.7$ mmにおいても $m'' \approx 0.42$ であつた。ポンチ-Cによる盛り上げ変形では、Fig. 3に関して述べたように、ポンチ-Aと-Bの第3領域におけるような変形が起ると考えられる。したがつて、以上の結果から、ダイみぞのすみ角を材料が充満するような、特に摩擦拘束の著しく増大する変形段階では、超塑性が抑制されるが、超音波振動の付加はその抑制を緩和するのに有効であることが明らかである。

3.2 盛り上り形状

3.1で述べた結果にもとづき、ここで述べる定荷重保持試験では、ポンチ-Aと-Bの保持荷重がいずれも第1領域に含まれるような V を選び、荷重保持中の盛り上

Fig. 6 Dependence of extrusion load (W) on crosshead speed (V) in the extrusion tests used punch-C with or without ultrasonic oscillation.

Fig. 7 Comparison of specimen shapes extruded at constant loads by using of punch-A, -B, and -C, respectively, with or without ultrasonic oscillation.

り変形に対する超音波振動付加の効果を検討した。すなわち、Table 1(b)に示した条件の定荷重保持試験を3種類のポンチを使用して実施した。Fig. 7に、ダイから取り出した試験片の盛り上り形状の例を示した。Fig. 7において、同一加工条件であっても、超音波振動無付加($u=0$)と付加($u=3.5 \mu\text{m}$)では、試験片の盛り上り高さや先端形状に明りような相違がある。ポンチ-Aと-Bでは、 $u=0$ の場合ダイみぞのすみ部付近の材料の盛り上りが遅れ充填が不充分であるにもかかわらず、 $u=3.5 \mu\text{m}$ では促進されたことが分かる。ポンチ-Cでは、 $u=0$ の場合でもダイみぞのかなり幅の狭い高さ位置まで盛り上り変形しているが、 $u=3.5 \mu\text{m}$ では一層鋭い先端形状が得られた。

つぎに、3種類のポンチを用い種々の保持時間で定荷重保持試験を中断し、ダイから取り出した各試験片の盛り上り部断面形状を精密に測定した。ポンチ-Aによる試験片の測定箇所は、盛り上り部板面に平行な中心軸断面と直角な中心軸断面とし、ポンチ-Bと-Cによる試験片に関しては最も盛り上り高さの小さい中心軸断面とした。その結果得られたポンチ-A、-Bおよび-Cによる盛り上り形状と盛り上り速度におよぼす超音波振動付加の影響をそれぞれ Fig. 8, Fig. 9 および Fig. 10に示した。

Fig. 8 Effect of deformation time (t) and application of ultrasonic oscillation on longitudinal section shape of webs extruded at constant load ($W_{\text{hold}} = 2.9 \pm 0.1 \text{ kN}$) with punch-A.

Fig. 9 Effect of deformation time (t) and application of ultrasonic oscillation on longitudinal section shape of webs extruded at constant load ($W_{\text{hold}} = 2.0 \pm 0.1 \text{ kN}$) with punch-B.

Fig. 10 Effect of deformation time (t) and application of ultrasonic oscillation on longitudinal section shape of webs extruded at constant load ($W_{\text{hold}}=2.9\pm0.1 \text{ kN}$) with punch-C.

各図中には試験片断面の中心軸を一点鎖線で示し、また各試験片断面の最大盛り上り高さを記入した。Fig. 8において、盛り上り部板面に平行な中心軸断面（左側）を各保持時間（ks）で比較すると、 $u=0$ の場合には中心軸寄りの盛り上り変形が先行し側面付近で遅れるが、 $u=3.5 \text{ } \mu\text{m}$ では比較的均一な盛り上り形態を示しダイへの充満を短時間で完了した。Fig. 9に示したポンチ-Bに関する結果からも、 $u=3.5 \text{ } \mu\text{m}$ の方が著しく盛り上り変形が促進されたことが分かる。Fig. 8とFig. 9から $u=3.5 \text{ } \mu\text{m}$ の超音波振動を付加することによって、ダイみぞに材料が充満完了する時間はポンチ-Aでは約40%、ポンチ-Bでは約60%短縮されたことが明らかである。この傾向は超音波振動振幅が増大すれば一層顕著になると思われる。一方、Fig. 10からポンチ-Cにおいても超音波振動付加の効果が明りようで鋭い先端形状が得られた。そこで、Fig. 10の測定に用いた各試験片の盛り上り先端の幅 b と保持時間 t の関係におよぼす超音波振動付加の影響を Fig. 11に示した。Fig. 11において、 $u=0$ では $b=0.2 \text{ mm}$ となるのに約0.48 ks 要し、 $2.94\pm0.1 \text{ kN}$ の保持荷重では b はそれ以下に減少しにくいよう

Fig. 11 Effect of superimposed ultrasonic oscillation on the relationship between deformation time and top width of web (b) extruded at constant load ($W_{\text{hold}}=2.9\pm0.1 \text{ kN}$) with punch-C.

ある。しかし、 $u=3.5 \text{ } \mu\text{m}$ では約0.24 ks で $b\approx0.2 \text{ mm}$ となり、0.6 ks 後には $b\approx0.04 \text{ mm}$ となった。すなわち、超音波振動付加によってダイの細部への充満性が著しく向上した。

つぎに、ポンチ-Bと-Cでは盛り上り変形中の材料は、静止したダイと下降するポンチの、両側で異なった摩擦面に接するから、盛り上り先端形状はその影響を反映するはずである。ポンチ-Cではその形状の影響も加わる。このような観点から、ポンチ-Bと-Cによる盛り上り先端形状を詳細に検討し、その結果をそれぞれ

Fig. 12 Effect of superimposed ultrasonic oscillation on top shape of webs extruded at constant load ($W_{\text{hold}}=2.0\pm0.1 \text{ kN}$) with punch-B.

Fig. 13 Effect of superimposed ultrasonic oscillation on top shape of webs extruded at constant load ($W_{\text{hold}} = 2.9 \pm 0.1 \text{ kN}$) with punch-C.

Fig. 12とFig. 13に示した。各図中に示したように、各変形時間における盛り上り部の最大高さを h_{max} とし、 h_{max} からダイおよびポンチに接触した盛り上り部の高さを差引いた値をそれぞれ Δha および Δhb とし、相互の関係を整理した。Fig. 12およびFig. 13において、それぞれ各一定の h_{max} で比較すると、 $u=0$ では Δha より Δhb が大きい。すなわち、ポンチ側面ではダイ側面より盛り上り変形が抑制されている。しかし、 $u=3.5 \mu\text{m}$ ではポンチ-Bと-Cにおいて、 $u=0$ の場合より Δhb が著しく減少した。このような Δhb の減少はポンチの超音波振動によって、その界面の摩擦拘束力が緩和されたためと理解できる。一方、Fig. 12とFig. 13において超音波振動の付加によって Δha がほとんど変化しなかったのは、試験片内部への振動伝達が少なかったためであろう。

本実験で得られた超音波振動の効果は、摩擦拘束力の低下が主な原因と考えられる。

4. 結 言

超塑性 Zn-22 wt%Al 合金の盛り上げ加工試験を、3

種類のみぞ形状の密閉型を使用して実施した。そして、材料の盛り上り時間や盛り上り形状におよぼす超音波振動付加（振動振幅： $3.5 \mu\text{m}$ ）の影響を検討した。得られた結果を要約すると次の通りである。

1) 盛り上げ加工荷重は、超音波振動の付加によって減少した。

2) 加工速度(V)と盛り上げ加工荷重(W)の間には、 $W \propto V^m$ の関係が認められ、一般に $m''=0.4 \sim 0.5$ の値を示した。この値は、本合金の超塑性引張または圧縮変形で求められているひずみ速度感受性指数 m 値にほぼ近い。ただ、摩擦拘束力が著しく増大する加工条件では m'' は0.3以下に減少したが、超音波振動を付加した場合にはほとんど減少しなかった。

3) 超音波振動付加によって、試験片の盛り上り先端形状が平坦化し、一定荷重下では盛り上り速度が増大した。

4) 盛り上り先端形状および m'' の測定結果に基づけば、上述した超音波振動の効果は主に摩擦拘束力の減少によると考えられた。

終りに、卒業研究として本実験に協力された木村修君（現在：㈱不二越）、中井裕二君（現在：ゴールドウィン㈱）に深く感謝致します。また研究費の一部は文部省科学研究費（一般研究(c)）によった。付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、超塑性研究会編：超塑性の利用開発に関する研究・調査・I, (1981). II, (1982). III, (1983). IV, (1984).
- 2) 小林：機械の研究, 29 (1977), 1406.
- 3) E. G. Thomsen, C. T. Yang and S. Kobayashi 著, 工藤訳：金属塑性加工の力学, p. 380, コロナ社.
- 4) 松木, 高田, 時沢：軽金属学会投稿中.
- 5) 大下, 武井, 山根：日本金属学会誌, 39 (1975), 98.
- 6) 島川：超音波工学, p. 118, 工業調査会.
- 7) 上野, 宮川, 篠原, 諸星：塑性と加工, 16 (1975), 914.
- 8) 松木：機能性アルミニウム材料, 軽金属学会第21回シンポジウム, p. 10.