

高ひずみ速度超塑性アルミニウム合金の高速精密鍛造加工法の開発

徳島大学 工学部 機械工学科

教授 佐藤 梯介

(平成4年度研究開発助成 AF-92004)

1. 研究の背景と目的

超塑性の発現するひずみ速度は通常 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度の比較的低速度であるため、これまで超塑性の塑性加工への利用は板成形あるいは耐熱材料の恒温鍛造などの分野に限られていた。しかし、近年、鍛造プレスでの変形速度に近い 1s^{-1} 以上の高ひずみ速度で超塑性を示す M/A アルミニウム合金¹⁻³⁾ が開発され、鍛造分野への超塑性の応用が可能になりつつある。

そこで、本研究ではメカニカルアロイングにより実用アルミニウム合金 (A2024) への高ひずみ速度域での超塑性の付与を試み、併せて端面拘束圧縮試験での限界圧縮率によりその鍛造性を検討した。

ところで、アルミニウム合金の鍛造においては、製品の表面性状を支配する潤滑も非常に重要である。潤滑の評価法として、試験の簡便さからリング圧縮試験が広く用いられているが、製品の形状が複雑で新生面の拡大率が高い加工の場合、リング圧縮試験の結果がそのまま適用されるとは限らない。そこで、鍛造時の過酷条件下に適用できる潤滑評価法の開発を目的として、比較的新生面の発生が多い側方押し鍛造を利用した潤滑評価法を提案し、その有用性についても検討を行った。

2. 超塑性特性と鍛造性

2.1 供試材および実験方法

実験には、表1に示すようなアルミニウム合金2024の噴霧粉に0.5~1.5%の無定形炭素(以下、炭素と記す)を機械的合金化し、熱間押しによって固化したものをを用いた。炭素は、IN9021¹⁾やIN90211^{2,3)}などにおけるのと同様に安定な微細組織を得るための添加元素であると同時に、ミリング助剤としても作用する。M/A粉末の作成および固化の手順と条件を図1に示す。超塑性特性に対する熱処理の影響を見るため、押し出した板材の一部は押し出のままを用い、また残りには熱処理(773K×1hの溶体化後、598K×1h過時効処理)を施した。その後いずれの材料にも減面率70%の冷間圧延を行い、この素板より機械加工によって平行部長さ7mm、幅4mmの試験片を切り出し引張試験片とした。引張試験では、初期ひずみ速度および試験温度の組合せを種々変えて伸びおよびピーク応力の変化を求めた。

表1 使用粉末の諸元

a) 2024 powder										
Particle size/ μm	10		20		32		44			
wt. %	8.4	29.2	40.7	15.4	6.3					
element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al	
wt. %	0.11	0.25	4.77	0.56	1.61	0.13	0.04	0.03	Ba	
b) Carbon (amorphous)										
Particle size	-44 μm , min. 95wt. %									
ash content	0.70wt. %									

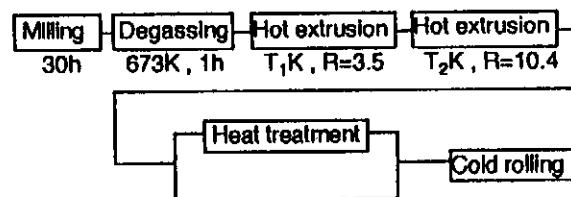


図1 試料の作成手順および条件

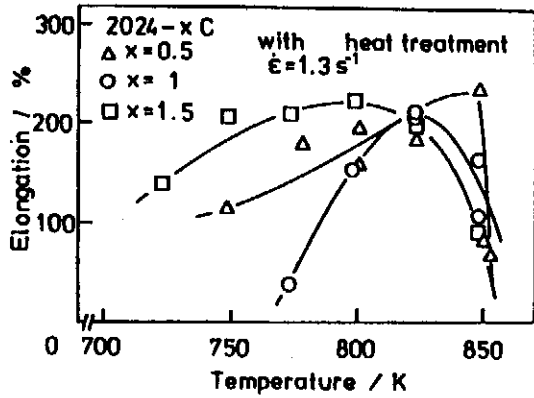
また、押し出した棒材より直径10mm、高さ15mmの溝付き円柱試験片を作成し、冷間鍛造性試験に準じて端面拘束圧縮試験を行った。

2.2 超塑性特性

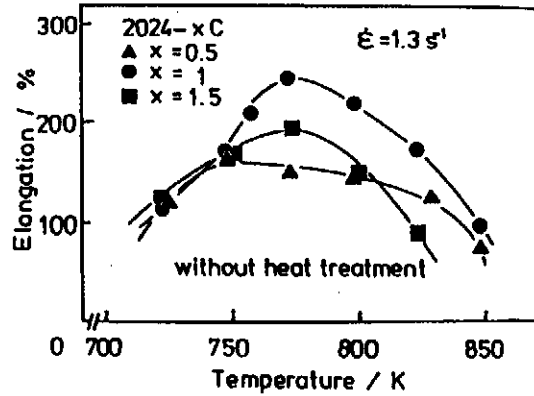
高ひずみ速度域での超塑性発現の可能性を検証するため、初期ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1.3 \text{s}^{-1}$ で試験温度を種々変えて引張試験を行い、伸びに及ぼす試験温度の影響を調べた。その結果を図2に示す。熱処理の有無や炭素含有量にもよるが、試験温度の選択により高ひずみ速度のもとで200%以上の伸びが得られ、高力アルミニウム合金としては良好な変形能を示している。図3は、試験温度を図2で最大の伸びが得られた温度に固定して、伸びに対するひずみ速度の影響を調べた結果であり、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1.3 \text{s}^{-1}$ 付近で最も伸びが大きくなっている。このときの変形抵抗は図4のようになり小さく、同時にひずみ速度感受性指数 m もかなり小さいことが特徴である。

2.3 端面拘束圧縮試験による鍛造性の評価

材料の鍛造性はその機械的性質やトライボロジー特性に依存する。機械的性質に関して、開発した超塑性アルミニウム合金は低い変形抵抗と大きな引張り伸びを有し、これ

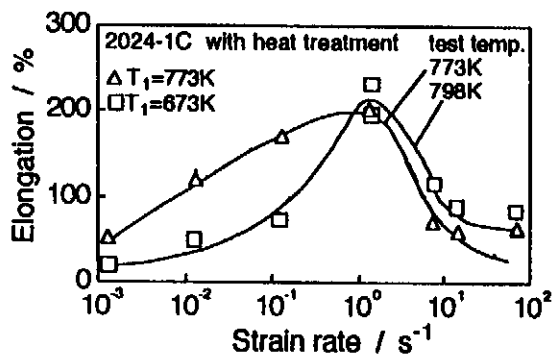


(a) 熱処理材

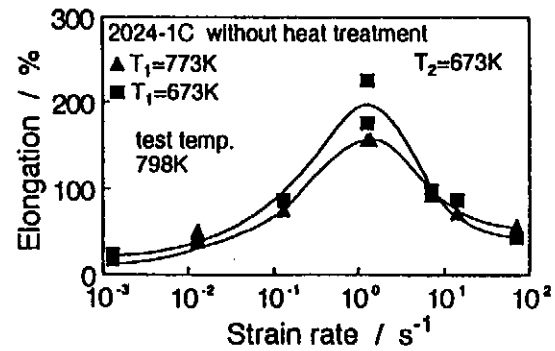


(b) 非熱処理材

図2 伸びと試験温度の関係



(a) 熱処理材



(b) 非熱処理材

図3 伸びとひずみ速度の関係

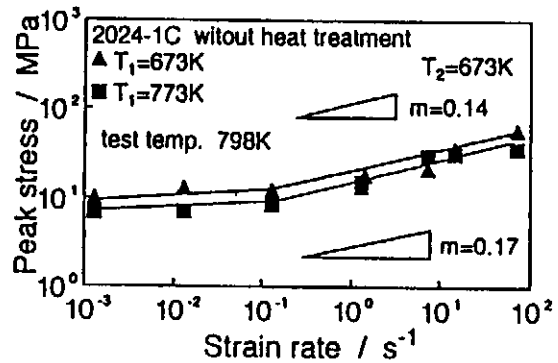
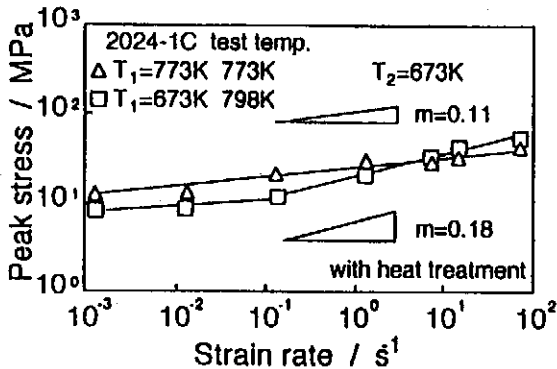


図4 ピーク応力とひずみ速度の関係

らの性質は鍛造に利用する上で好都合である。ところで、粉末アルミニウム合金の固化では、粉末表面の強固な酸化物を破壊するために一般に押し出しが採用されるが、押し出し方向に比較してこれに直角な方向の延性はやや低下する傾向が見られる。このため、据込みのように軸方向に圧縮されて円周方向に引張りを受ける加工においてしばしば割れなどの問題を生じる。そこで、溝付き試験片を用いた端面拘束圧縮試験によってこれを検討した。

図5は、2024-1Cを初期ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 3.3s^{-1}$ で据込んだ際の圧縮率による割れの有無を試験温度を変えて調べ

た結果である。限界圧縮率は770K付近で最大となり、この温度は最大の引張り伸びの得られた温度にほぼ等しい。据込み時のひずみ速度による限界圧縮率の変化を図6に示す。熱処理の有無によって多少の変化はあるが、溝付き試験片であることを考慮しても図5、6の限界圧縮率は低いレベルに留まっている。図7は、引張り試験での伸びと端面拘束圧縮試験での限界圧縮率の関係である。伸びが最大となるひずみ速度域 ($1s^{-1}$ のオーダー) で限界圧縮率も増大し、両者の間には正の相関が見られる。しかし、超塑性伸びを鍛造に利用するにはその限界圧縮率はまだ低く、押し出し条件

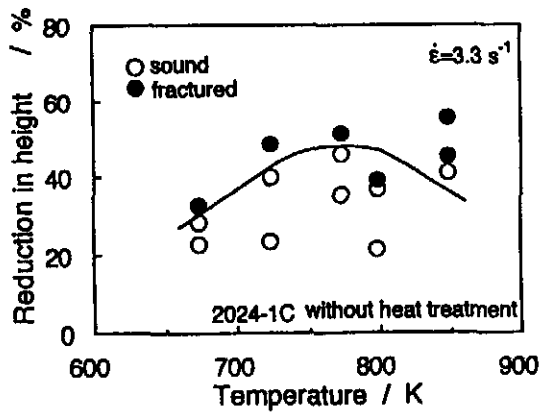


図5 端面拘束圧縮試験での割れ発生に対する試験温度の影響

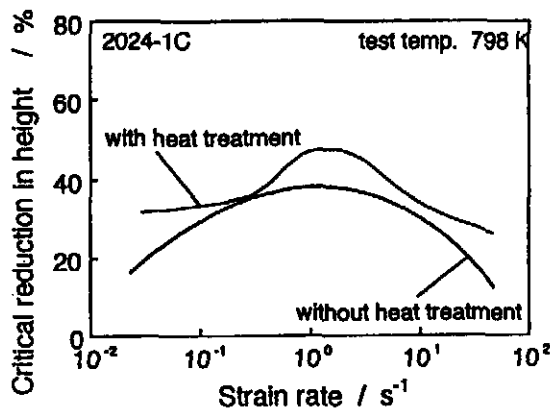


図6 限界圧縮率とひずみ速度の関係

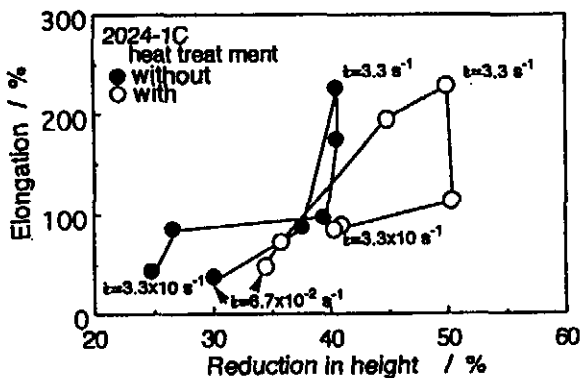


図7 伸びと限界圧縮率の関係

および試料採取方向による延性の変化などについてさらに検討する必要がある。

2.4 まとめ

- 1) M/Aによる炭素添加により、2024アルミニウム合金に高ひずみ速度域での超塑性特性を付与することができた。
- 2) 鍛造性を溝付き試験片を用いた端面拘束圧縮試験により評価した結果、限界圧縮率は50%程度に留まり、超塑性を鍛造に有効に生かすためには今後さらに押し出し条件あるいは異方性などについて検討する必要があることが明らかとなった。

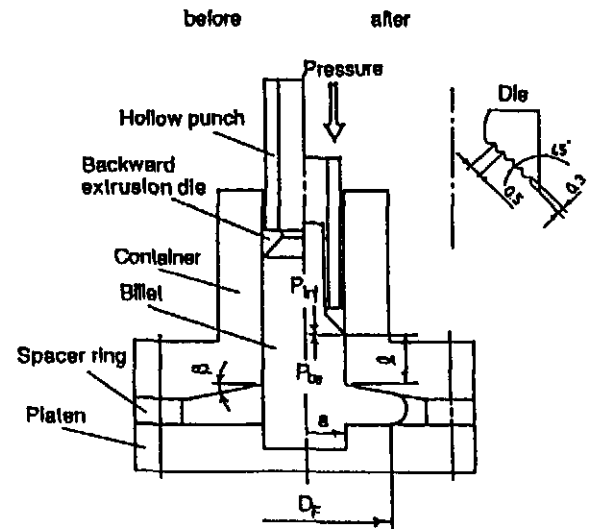


図8 側方押し出し鍛造を用いた潤滑評価試験装置の模式図

3. 側方押し出し鍛造による潤滑評価

3.1 潤滑評価試験

アルミニウム合金の鍛造においては、製品の表面性状を支配する潤滑も非常に重要である。潤滑の評価法として、試験の簡便さからリング圧縮試験が広く用いられている。しかし製品の形状が複雑で新生面の拡大率が大きい加工の場合、リング圧縮試験の結果がそのまま適用されるとは限らない。そこでしばしば現場試験が行われるが、簡単に摩擦係数を評価することは困難で、一般に加工時の加工荷重で比較されることが多い。また摩擦係数を評価しようとする時は材料の変形抵抗を決定する必要がある。しかし加工時の素材温度、ひずみ速度およびひずみ量により変形抵抗値は異なり、加工に応じた変形抵抗値を求める事は容易でない。しかもわずかな変形抵抗値の違いにより、計算される摩擦係数の値は大きく異なったものとなる。そこで材料の変形抵抗を測定する必要が無く、リング圧縮試験より現場試験に近い加工条件でしかも十分な新生面の拡大のある簡便な試験法で、加工時の摩擦状態が把握できれば非常に有益である。

側方押し出し鍛造において鍛造荷重が同じであれば成形されるフランジの直径は潤滑条件に依存することが知られている。本研究では鍛造時の過酷条件下に適用できる潤滑評価法の開発を目的として、比較的新生面の発生が多い側方押し出し鍛造を利用した潤滑評価法を提案し、押し出し条件が潤滑の評価にどのような影響を及ぼすかについて検討した。

本研究で提案する潤滑評価試験の模式図を図8に示す。潤滑剤は試験中ビレットが接する全ての面、すなわちプラテン上面、コンテナ下面および内壁面に塗布する。試験は円柱状のビレットを上方から後方押し出しダイスで上方に材料が流れ出すまで押し出す。そのときコンテナとプラテンの

隙間に押し出されたフランジの直径 D_F と押し残り長さ l を測定する。本試験ではフランジ直径をプラテンとの実接触直径 D_F で定義する。潤滑状態をより厳しく評価するためリムのたる形状は無視した。もし鍛造圧力と押し残り長さが同じであれば、成形されるフランジの直径は潤滑条件に依存する。すなわち潤滑が良い場合は摩擦に抗するエネルギー消費率は少なくよいためフランジは大きく広がり、逆に潤滑が悪いときには材料が後方に押し出されて広がらない。したがって同一鍛造条件の下でフランジ直径を比較すれば潤滑状態の良否の判定が可能となる。試験では鍛造圧力を一定とするため、側方押し出しに後方押し出しを組合わせた。このことは同時に材料の変形抵抗の測定をも不要としている。すなわち、お互いに塑性域が重ならない範囲では側方押し出しに要する圧力 P_{inj} と後方押し出しに要する圧力 P_{be} が釣合う状態でフランジ直径が定まる。

ここで計算に用いた可容速度場を図9に示す。そこで力

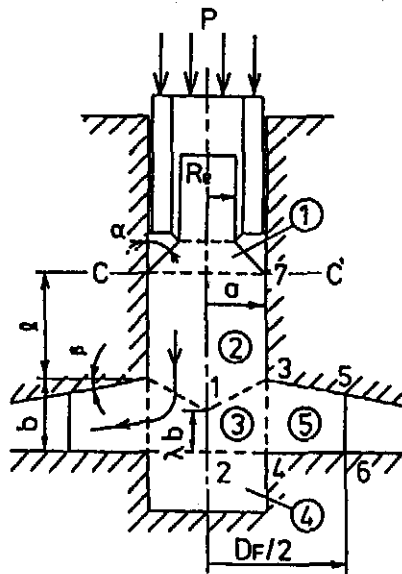


図9 動的可容速度場

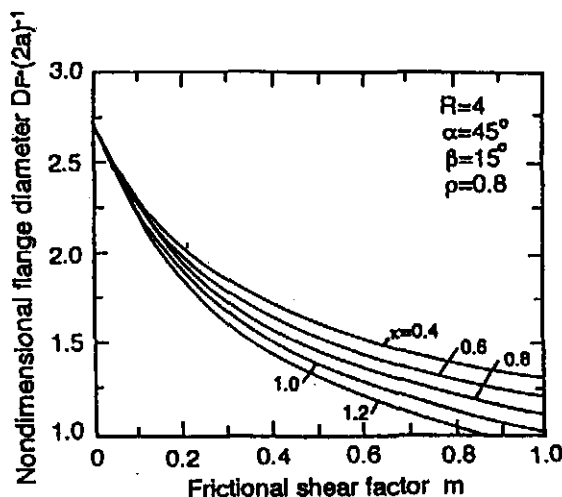


図10 比フランジ直径とせん断摩擦係数の関係

の釣合条件から

$$\frac{P_{be}(\alpha, m_1, R)}{\bar{\sigma}} = \frac{P_{inj}(\rho, \lambda, \theta, \kappa, m)}{\bar{\sigma}}$$

と表される。

ここで $\bar{\sigma}$: 変形抵抗、 α : ダイス半角、 R : 後方押し出し比、 m_1 : 後方押し出しダイスと材料間のせん断摩擦係数、 ρ : 比フランジ厚さ b/a 、 λ : 領域③で円すい状速度不連続面の高さを表す係数、 θ : フランジ傾斜角 ($\theta=0$ は通常の平行フランジを表す)、 κ : 比押し残り長さ l/a 、 m : 側方押し出し領域でのせん断摩擦係数である。

両圧力からフランジ直径と摩擦係数の関係を解析的に求めておけば、試験結果をノモグラムにプロットすることで潤滑剤のせん断摩擦係数を推定できる。

3.2 比フランジ直径とせん断摩擦係数の関係

解析から得られた比フランジ直径 $D_F/2a$ と側方押し出し領域のせん断摩擦係数 m の関係を図10に示す。計算条件は後方押し出し比 $R=4$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $m_1=1$ 、 $\beta=15^\circ$ 、 $\rho=0.8$ で比押し残り長さ κ を変化させた。側方押し出し領域で摩擦を生じる面、すなわちフランジ上下面とコンテナ壁面のせん断摩擦係数は等しいと仮定している。比フランジ直径は比押し残り長さ κ の減少とともに増加するが、低摩擦係数領域では κ によらずほぼ同じになる。図11はフランジ傾斜角 β を変化させた時の $D_F/2a$ と m との関係を示す。 β が大きくなると低摩擦係数の場合には、フランジ直径の増加に伴いリム部の厚さの減少率が大きくなり、変形拘束の増大率が大きくなる。このためエネルギー消費率に占める変形域におけるエネルギー消費率の割合が大きくなり、その結果フランジ直径は小さくなる。一方、高摩擦係数の場合には、エネルギー消費率に占める摩擦に抗するためのエネルギー消費

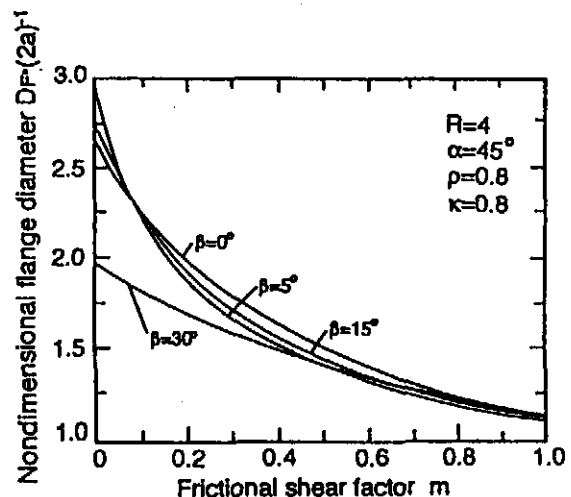


図11 比フランジ直径とせん断摩擦係数の関係に及ぼすフランジ傾斜角の影響

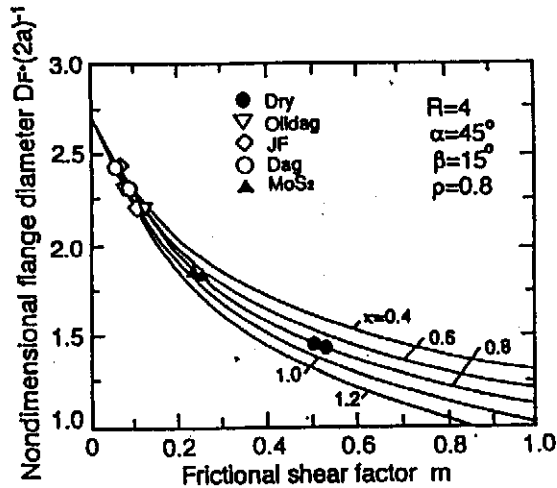


図12 各種潤滑剤に対する実験結果(傾斜フランジ: $\beta=15^\circ$)

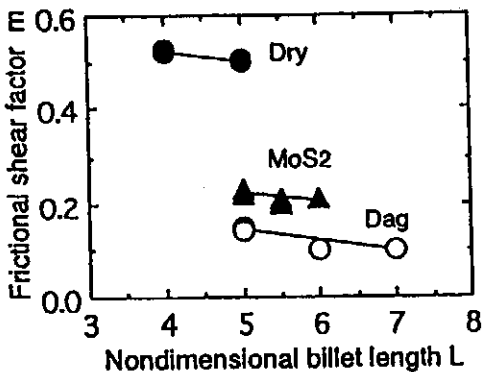


図13 せん断摩擦係数と初期ビレット長さの関係

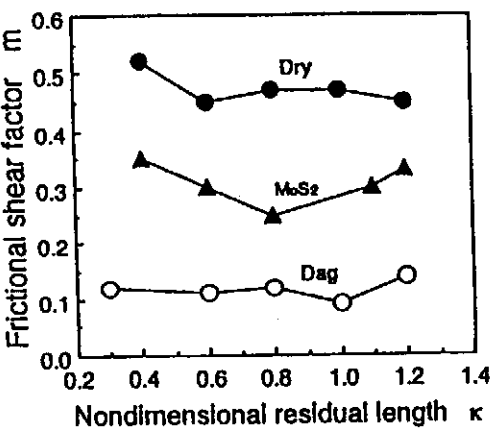


図14 せん断摩擦係数と比押し残り長さの関係 ($R=4, \alpha=45^\circ, \beta=15^\circ, \rho=0.8$)

率の割合が相対的に大きくなり、 β の値によるフランジ直径の差は減少する。

3.3 実験方法

供試材は直径16mmの工業用純アルミニウムで、673K、2hrの焼鈍しを施した後、表面の傷を除去するため、旋削でビレット直径を $15.5 \pm 0.3\text{mm}$ に仕上げた。ビレット長さは潤滑条件に応じて25~60mmまで変化させた。コンテナの穴径は16mmである。試験に用いたコンテナおよびプラ

テンはSKD61材、後方押しダイスはSKD62材でそれぞれ焼入れ、焼戻しの熱処理を施した。後方押しダイスは押し比4、ダイス半角 45° で、ダイスと材料間で摩擦状態が固着となるようにダイス面に溝を設けた。潤滑条件は黒鉛系潤滑剤(Oildag,Dag)、BN系潤滑剤JF、 MoS_2 、および無潤滑の5条件とした。

潤滑剤はビレット側面、コンテナ下面およびプラテン上面に塗布した。黒鉛系およびBN系潤滑剤は刷毛塗り、 MoS_2 はスプレー方式で塗布した。コンテナ、プラテンは試験ごとに800番のエメリー紙で研磨し、アセトン洗浄して潤滑剤を除去した。実験は室温で行った。

3.4 実験結果

(a) 平行フランジと傾斜フランジの比較

平行フランジの時、フランジがコンテナ下面と接触しないためフランジは半径方向に広がり易く、潤滑が良い場合にはフランジが円形に広がらず異形であったり、リムにくびれや割れを生じる事がある。この異形はフランジが半径方向に大きく広がったときプラテンとフランジの接触界面で潤滑切れが起こり、潤滑状態が変化して半径方向への広がりが部分的に拘束されることに起因している。

リムでの割れやくびれを防ぐため、コンテナ下面に傾斜をもたせフランジの半径方向への広がりを拘束した傾斜フランジの場合、フランジのリムに割れやくびれは生じず、ほぼ円形に広がり、直径の測定は容易であった。傾斜角 $\beta=15^\circ$ の時の試験結果を図12に示す。図中の曲線は上界法による解析結果でプロットは実験点である。

(b) 側方押し条件の影響

本試験法を用いるためには側方押し条件が摩擦特性にどのような影響を与えるか調べておく必要がある。図13に傾斜フランジについて潤滑条件を変えて押し出した時のせん断摩擦係数とビレット長さとの関係を示す。なおLはコンテナ半径aで無次元化している。せん断摩擦係数はいずれの潤滑条件においても横ばいで、試験結果はビレット長さに影響を受けない。図14に潤滑条件を変えた時のせん断摩擦係数に及ぼす比押し残り厚さ κ の影響を示す、 $\kappa=0.6$ 以下に押し出すと後方押しと側方押しとの塑性域が重なり合い、解析が適用出来なくなるものと予想される。そこで試験には両押しの変形域が重ならないよう $\kappa=0.6$ 以上が必要と考えられる。

3.5 まとめ

素材の変形抵抗の測定なしに現場試験に近い加工条件の潤滑状態を推定するため、側方押し鍛造を利用した簡便な潤滑評価法を提案した。その評価法について実験的に検討し、次の結果を得た。

- 1) コンテナ下面に傾斜を持たせた傾斜フランジは現場試

験として有効である。

- 2) 初期ピレット長さはせん断摩擦係数の評価に影響を与えない。
- 3) 比押し残り長さ $\kappa = 0.6$ 以下に押出すと後方押し出しと側方押し出しの塑性域が重なり合っ て解析が適用出来なくなる。そこで試験には両押し出しの変形域が重ならない $\kappa = 0.6$ 以上が必要である。

4. 結び

アルミニウム合金の高ひずみ速度超塑性を利用した精密鍛造技術の開発を目的として

- (i) メスニカルアロイングによる実用アルミニウム合金 (A2024) への高ひずみ速度域での超塑性性能の付与と端面拘束圧縮試験による鍛造性の評価
- (ii) 鍛造時の過酷条件下に適用できるトライボロジー試験としての側方押し出し鍛造を利用した潤滑評価法の提案とその有用性の検討

のふたつの側面から検討を行った。本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成金の補助を受けて行われたものであり、関係各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) T. G. Nieh, P. S. Gilman & J. Wadsworth : Scripta Metall., 19 (1985), 1375.
- 2) T. R. Bieler, T. G. Nieh, J. Wadsworth & A. K. Mukherjee : Scripta Metall., 22 (1988), 81.
- 3) T. R. Bieler & A. K. Mukherjee : Strength Met. Alloy, 1 (1989), 289.

本助成による発表論文

- (1) 西村、Kyin Hoke、佐藤、多田 : 側方押し出し鍛造を用いた潤滑評価法、平5塑性加工春季講演論文集、(1993-5), 95.
- (2) 多田、佐藤、田中、正井 : M/Aアルミニウム合金の超塑性特性に対する押し出し条件の影響、第44回塑性加工連合講演会論文集、(1993-9), 441.
- (3) 西村、佐藤、多田 : 側方押し出し鍛造を用いた耐焼付き性の評価、第45回塑性加工連合講演会論文集、(1994-10), 投稿中.
- (4) 西村、Kyin Hoke、佐藤、多田 : 側方押し出し鍛造を用いた潤滑評価法、塑性と加工、印刷中.
- (5) T. Nishimura, T. Sato, Kyin Hoke, & Y. Tada : Evaluating method of lubrication using injection upsetting, J. Mater. Process. Technol., in contribution.
- (6) T. Nishimura, T. Sato & Y. Tada : Evaluation of frictional conditions for various tool materials and lubricants using injection upsetting method, J. Mater., Process. Technol., in contribution.