



ℳ Shinomiya

## 加工発熱の利用および金型への伝熱を制御した低荷重・高精度プレス成形法の開発

四宮 徳章\*

### 1. まえがき

プレス成形時の塑性変形仕事のうち 90%程度は熱に変わると言われている(以下、「加工発熱」と称す)。理論的に計算すると、変形抵抗 1000MPa の鋼系材料を相当塑性ひずみ 1.0 まで圧縮した場合、材料温度が約 250℃上昇するほどその発熱量は大きい。一般的に、材料の変形抵抗は温度上昇に伴って低下することから、この加工発熱を利用して被加工材の温度上昇を達成できれば、通常の冷間加工と比較して低荷重での成形が可能になると考えられる。しかし現実には、成形中の被加工材は金型に接しているため、発生した熱の大半は金型に伝導し、発生熱を成形に利用できるほど効果的な被加工材の温度上昇は望めない。また、成形品の寸法精度の観点からは、塑性ひずみの大小により加工発熱量が異なるため、成形品の部位ごとに成形中の温度が異なり、その後の熱収縮によって寸法精度を悪化させる。

一方、温間加工では、被加工材を炉で加熱することや金型をヒータで加熱して成形を行うことで、冷間加工に比べ成形荷重の低減や成形限界の向上を達成できるが、被加工材や金型を積極的に加熱するため、エネルギー消費は大きい。地球温暖化対策の観点から生産現場では省エネルギー化が一層求められており、エネルギー消費を抑えた新しい成形方法の開発が望まれている。

本研究では、金型材料に熱伝導率の低い材料を用いることや、サーボプレスのスライドモーション制御を活用することにより、被加工材-金型間の伝熱を制御することを試みる。それにより、加工発熱を被加工材の均一な昇温に活かし、省エネルギー効果が高く、成形性・寸法精度に優れた冷間加工法の確立を目指す。

### 2. 研究の手順

本研究では、まず、①単純な圧縮試験により、断熱効果の高い金型材料、および、変形抵抗に及ぼす材料の昇温の影響が大きい素材(被加工材)について調べた<sup>1)</sup>。その後、②実成形において効果を検証するため、昇温による変形抵抗の低下が大きい素材を対象に、円筒深絞り加工を行った。それにより、断熱効果の高い金型材料を用いて成形した場合に、成形性の向上や他の有用な効果があるのかを調べた<sup>2)</sup>。また、加工時の発熱が製品の成形性や寸法精度に及ぼ

す影響も大きいと考え、③角筒絞り加工やアルミニウムの衝撃押し出し成形において、サーボプレスのスライドモーション制御により素材温度を適切にコントロールし、成形性および寸法精度の向上を図ることを試みた<sup>3)</sup>。以下、順に、それぞれの検討結果を示す。

### 3. 圧縮試験による検討

#### 3.1 実験条件

圧縮試験は、富士電波工機㈱製の熱間加工再現試験装置 THERMECMASTOR-Z (FTZ-203A) を用いて行った。図 1 に試験装置の概略を模式的に示す。被加工材はオーステナイト系ステンレス (SUS304) および純チタン 2 種 (TW340) とし、直径 8mm の引抜き材から直径 8mm、高さ 12mm ( $\pm 0.05\text{mm}$ ) の円柱試験片を切り出して試験に用いた。金型形状は直径 20mm、高さ 10mm の円柱状圧板とし、金型材料には、一般的な冷間加工用金型材料である SKD11、熱伝導率の低い材料としてジルコニア ( $\text{ZrO}_2$ ) とステライト、熱伝導率の高い材料として超硬合金 (WC) を採用した。被加工材と金型材料の熱物性(熱伝導率、比熱、密度、温度伝導率)の参考値を表 1 に示す。なお、温度伝導率は、熱伝導率を熱容量(比熱と密度の積)で除したもので、材料内の温度の伝わりやすさを示す物性である。

試験片が金型に凝着する程度は金型材種によって異なるため、試験片と各金型との摩擦条件を統一することを目的に試験片と金型の間に天然雲母板(直径 20mm、厚さ 0.2mm、熱伝導率 0.7W/(m・K)、比熱 206J/(kg・K)、密度 2,700kg/m<sup>3</sup>) をセットして試験を行った。また、試験片が大気から熱的影響を受けないように、チャンバー内を真空(1.5Pa 程度)にすることで対流の影響を小さくし、試験片周辺をアルミ箔で覆うことで放射の影響を小さくした。圧縮速度は、0.1mm/s、1.0mm/s、10mm/s の三段階に設定し、試験片の温度上昇に及ぼす圧縮速度の影響を調べた。圧縮中の試験片の温度は、R 型熱電対(素線径 0.2mm) を円柱試験片の側壁中央部表面に溶着して測定した。

#### 3.2 実験結果

各金型および各圧縮速度条件における、圧縮率 60% (ストローク 7.2mm) 時の荷重を図 2 に示す。SUS304、TW340 とともに、どの金型材料を用いた場合においても、圧縮速度が高いほど荷重が低かった。また、ほとんどの条件で、金

\*大阪産業技術研究所 加工成形研究部 主任研究員

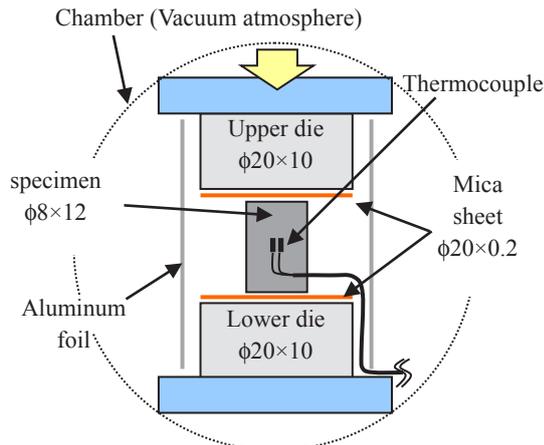


図1 Schematic illustration of experimental apparatus for compression test

Table 1 Thermophysical properties of specimen and die

	Thermal conductivity $\lambda$ [W/(m·K)]	Specific heat $c_p$ [J/(kg·K)]	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermometric conductivity $\lambda/(c_p \cdot \rho)$ 10 <sup>-6</sup> [m <sup>2</sup> /s]
SUS304	16.3	502	8,030	4.0
TW340	16.7	522	4,500	7.1
A5052	138	963	2,700	53.1
SKD11	29.3	460	7,800	8.2
ZrO <sub>2</sub>	3.0	500	6,000	1.0
Stellite	15.0	381	8,500	4.6
WC	41.9	250	13,900	12.1

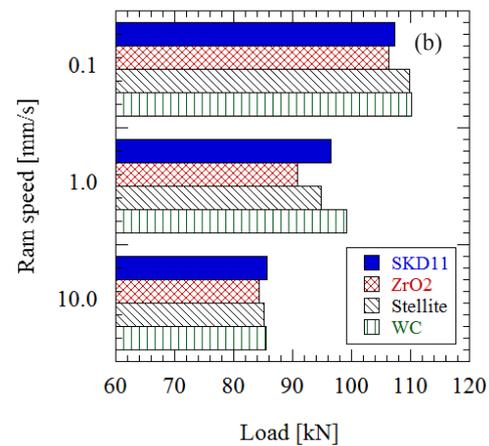
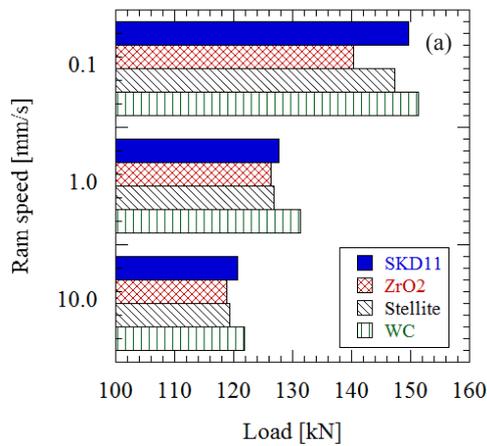


図2 Variation of compressive load in each case :(a)SUS304, (b)TW340 (stroke 7.2mm)

型材料の熱伝導率が低いほど荷重が低く、金型材料に ZrO<sub>2</sub> を用いた場合では、他の金型材料を用いた場合と比較して、SUS304, TW340 とともに、どの速度条件においても荷重は低かった。また、素材により荷重に及ぼす圧縮速度の影響は異なり、SUS304 では 0.1mm/s において、TW340 では 1.0mm/s において、金型材料に ZrO<sub>2</sub> を用いることで、荷重を大きく低減できた。SUS304 と TW340 の熱伝導率はほぼ同等であることから、素材の温度伝導率が荷重の低減に影響を及ぼすと考えられ、温度伝導率が低い材料ほど荷重低減効果の大きい圧縮速度は低いと思われる。

以上より、断熱効果の高い ZrO<sub>2</sub> は、加工時の発熱を成形に利用するのに有効な材料であることがわかった。

#### 4. 断熱工具を用いた円筒深絞り加工

次に、上述の発熱による荷重低減効果を実成形において検証するために、SUS304 の円筒深絞り加工において、熱伝導率の低い ZrO<sub>2</sub> を金型材料に用いることや、断熱フィルムを素材に貼付することを検討した。また、加工誘起変態に及ぼす成形温度の影響を調べるために、成形品の残留

オーステナイト量を調べた。

#### 4.1 実験方法

##### 4.1.1 供試材料および工具

供試材料には公称板厚 1.0mm で、直径 80mm に打抜き加工を行った SUS304 板を使用した。室温から 150℃ までで引張り試験を行った結果を図 3 に示す。室温から 150℃ までの間で、引張り強さ、および、全伸びは大きく低下した。これは、鋼材等で一般的に見られる温度依存性（温度が高いほど強度が下がり伸びが上がる）とは異なる。

潤滑油はプレス油（豊国石油㈱製 A101）を用い、素板の両面に塗布した。工具には、SKD11 製の平頭パンチ（外径 40mm, 肩 R=4mm）と、SKD11 製および ZrO<sub>2</sub> 製（富士ダイス㈱製 FCY20A, 熱伝導率;5W/(m·K)）のダイ（内径 42.5mm, 肩 R=8mm）およびしわ抑えを用いた。また、素板両面に厚み 0.055mm の表面保護テープ（トラスコ中山 TSP-510B, 熱伝導率 0.2W/(m·K) 程度、以降、フィルムと称す）を貼付することにより、SKD11 製の工具を使用した場合でも、工具への熱移動が抑制できるのかを調べた。

##### 4.1.2 試験機器および試験条件

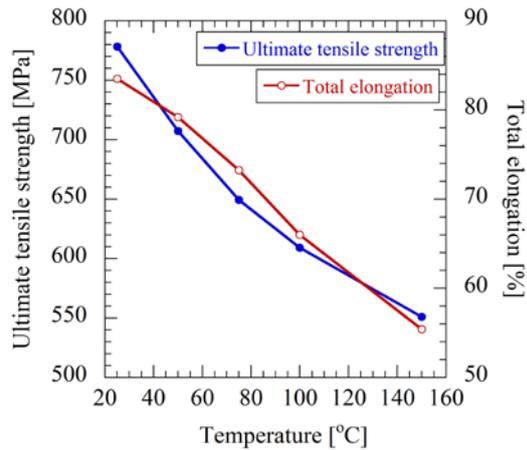


図3 Mechanical property of specimen

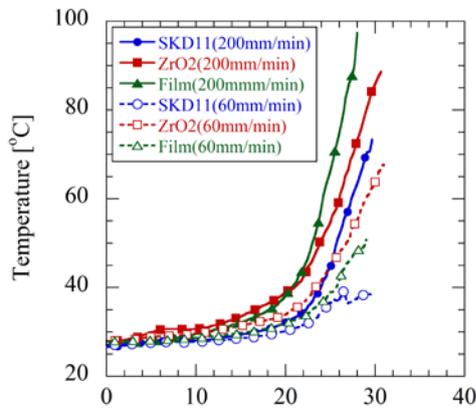


図4 Effect of tools and punch speed on blank temperature

実験には、自動型万能絞り試験機（㈱東京試験機製 SAS-200D）を用いた。成形速度は 200mm/min および 60mm/min に、しわ抑え力は 8kN に設定した。素板温度は、素板圧延方向の端部にあらかじめ K 型熱電対（素線径 0.2mm）を溶着することによって測定した。また、残留オーステナイトの測定は、X 線応力測定装置（㈱リガク製 AutoMATE）を用いて素板の圧延方向について行った。なお、X 線の線源としては Co-K $\alpha$  線を用いた。

## 4.2 実験結果

### 4.2.1 素板温度

まず、成形中の素板温度に及ぼす工具およびフィルムの影響を調べた。成形中の素板温度を図 4 に示す。成形の後期で熱電対は外れてしまうが、フランジ端部がダイ R 部に到達するストローク 30mm 程度まで、素板温度を測定できた。いずれの型材においても成形速度 200mm/min の方が素板温度は高く、ZrO<sub>2</sub> やフィルムを用いた場合には、SKD11 を用いた場合より素板温度が高くなった。成形速度 200mm/min では、フィルムを用いた場合に素板温度が最も高く、ストローク 28mm 付近で概ね 100°C にまで達した。また、成形速度 60mm/min では、フィルムを用いた場合より ZrO<sub>2</sub> を用いた場合の方が素板温度は高く、成形速

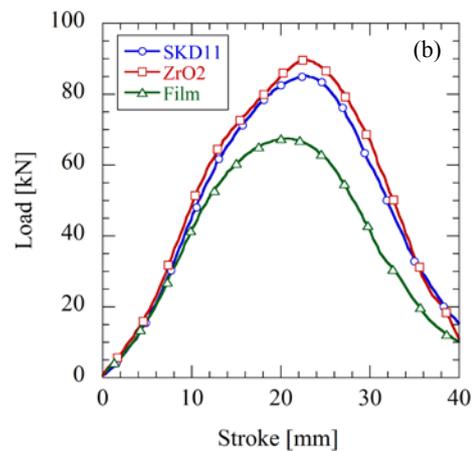
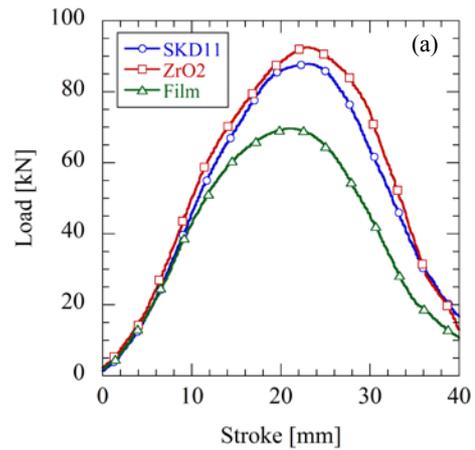


図5 Punch load-stroke curve : punch speed (a)200mm/s ,(b)60mm/s

度により工具への伝熱の様子が異なることがわかった。いずれにせよ、熱伝導率の低い工具やフィルムを用いると加工時の発熱を素板の温度上昇に活用できることが明らかになった。

### 4.2.2 成形荷重

素板温度の上昇が成形荷重に及ぼす影響を調べるため、パンチ荷重線図を比較・検討した。結果を図 5 に示す。図より、200mm/min、60mm/min いずれの成形速度でも、ZrO<sub>2</sub>、SKD11、フィルムの順に成形荷重が低いことがわかる。ZrO<sub>2</sub> は成形中の温度が高いにもかかわらず成形荷重が高い結果となったが、これは素板と工具間の摩擦係数による場所が大きい。また、同図(a)(b)から成形荷重に及ぼす成形速度の影響を調べると、200mm/min では 60mm/min と比較して、最大成形荷重はやや低かった。これは、潤滑油の速度効果による摩擦係数の低減と、素板の温度上昇による材料強度の低下の両者の影響が考えられるが、最大成形荷重の低減は 3%程度であり、加工時の発熱による成形荷重の低減効果は小さいと思われる。

### 4.2.3 残留オーステナイト量

SUS304 の深絞り成形品に見られる時期割れは、加工誘起変態や残留応力に深く関係すると言われている。成形中

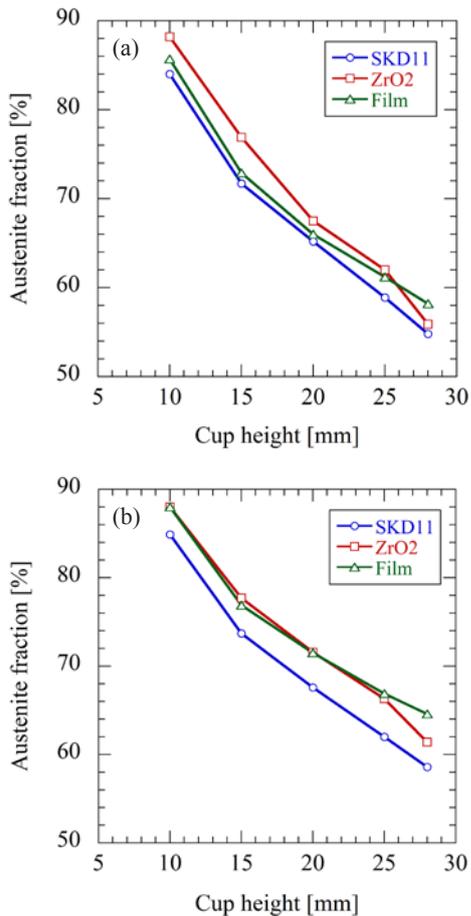


図6 Effect of tools on austenite fraction : punch speed  
(a)200mm/s, (b)60mm/s

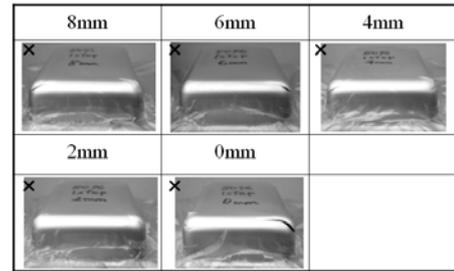
の温度は加工誘起変態に大きく影響を及ぼすことから、加工時の発熱も影響を及ぼすものと考えられる。そこで、成形品の残留オーステナイト量を調べることで、加工発熱が加工誘起変態に及ぼす影響を調べた。図6に成形品側壁の残留オーステナイト量を示す。成形品高さの高い位置（端部に近い位置）ほど残留オーステナイト量は少なく、加工誘起変態率が高かった。これは、端部に近い位置ほど加工度（塑性ひずみ）が高いためである。また、成形中の素板温度が高い条件ほど、残留オーステナイト量が多かった。つまり、加工時の発熱を利用することにより、残留オーステナイト量を増大でき、時期割れ防止に活用できる可能性を見出した。

## 5. モーションコントロールによる角筒絞り加工の成形性向上

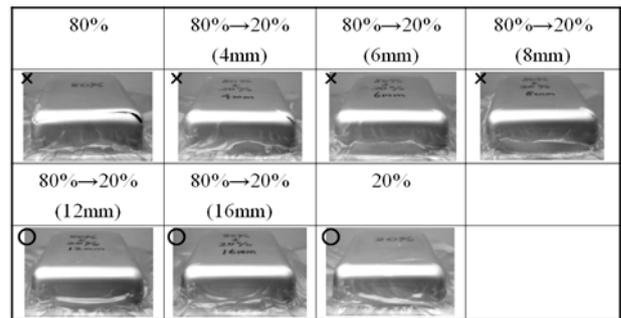
SUS304の角筒絞り成形において、サーボプレス of モーションコントロールを活用して成形性の向上を試みた。

### 5.1 実験条件

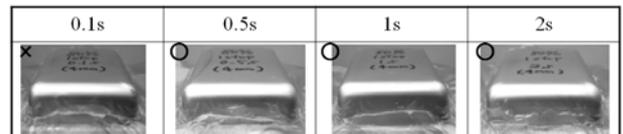
成形には2000kNリンク式ACサーボプレス（コマツ産機, H1F200）を用い、工具には、SKD11製の平頭角形パンチ（幅37.8mm、奥行き57.8mm、肩R4mm）、ダイ（ク



(a) Step motion



(b) Deceleration motion



(c) Stop motion

図7 Effect of slide motion patterns on formability

リアランス1.1mm、肩R2mm）、および、しわ抑えを用いた。供試材料には公称板厚1.0mmで、直径120mmのSUS304板にフィルムを両面貼付したものを用いた。成形ストロークは17mm、しわ抑え力は50kN一定とし、スライドモーションとしては、①パルス（下死点上2~8mmで3mmスライドを上昇した後に再下降）、②減速（リンクモーションの50spmを100%として、80%から20%）、④一時停止（下死点上4mmで0.1~2秒）を設定して、それぞれの成形性に及ぼす影響を調べた。

### 5.2 実験結果

成形した結果を図7に示す。同図(a)より、成形途中でスライドを逆転するパルスモーションでは、下死点上2mmおよび4mmでスライドを引き上げることで、割れの範囲が小さくなり、若干成形性が向上することがわかる。しかし、割れを回避できるまでには至らなかった。また、同図(b)より、スライド速度を20%で一定、あるいは、下死点上12mmおよび16mmにおいて減速を開始することで割れない成形品が得られることがわかる。同図(c)からは、成形途中で0.5秒以上スライドを停止することで、割れない成形品が得られることもわかる。以上を考察すると、本成形では、パルスモーションでの成形性向上が小

さいことから潤滑油の再供給効果<sup>4)</sup>は小さく、また、スライドの減速により成形性が向上したことから応力緩和による成形性の向上<sup>5)</sup>も言いがたい。割れの発生するパンチ肩部では、成形時の加工発熱により局所的に温度が上昇しているものと考えられ、SUS304 特有の温度上昇による強度と延性低下 (図 3 参照) が割れの要因と考えられる。よって、SUS304 の角絞り成形では、パンチ肩部の温度上昇を抑制できるモーション、つまり、低速や停止モーションが成形性の向上に有効であると言える。

## 6. 衝撃押し出し加工におけるモーションコントロールによる金型への伝熱制御

工業用純アルミニウムの衝撃押し出し加工において、スライドモーションが寸法精度に及ぼす影響について調べた。

### 6.1 実験および解析条件

成形には 2000kN リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機, H1F200) を用い、工具には、SKD11 製のパンチおよびコンテナを用いた。また、パンチ上部に設置した SKD11 製の円柱ブロックにひずみゲージを貼付して、成形荷重を測定した。図 8 に概略図を示す。素材には、化成皮膜処理を行った直径 19.5mm、高さ 6mm の A1070 材 (耐力:86MPa, 引張強さ:95MPa, 伸び:28%) を用いた。成形品の内・外径の測定には、三次元形状測定機 (ミットヨ, Quick Vision PRO) を用いて、スタイラスにより内径で 8 点、外径で 6 点の座標を測定し、円近似することで直径を求めた。

今回検討を加えたサーボプレスのスライドモーションを図 9 に示す。リンクモーションの 50spm を 100% として、①100%一定モーション、②20%一定モーション、③下死点上 5mm で 100%から 20%に減速するモーション、④下死点上 4mm で 100%から 20%に減速するモーション、⑤100%の速度で下死点上 4mm において 0.1s 停止するモーション、⑥100%の速度で下死点上 4mm において 1s 停止するモーションの 6 種類を検討した。以降、①②を一定モーション、③④を減速モーション、⑤⑥を停止モーションと称す。

解析には、鍛造シミュレータ (NTT データエンジニアリングシステムズ, simufact.forming10.0) を用いた。二次元の軸対称問題とし、素材は弾塑性体、工具は弾性体と定義した。工具形状は上述の三次元形状測定機を用いてパンチ外径について 2 断面およびコンテナ内径について 9 断面の測定を行い、解析に用いた。また、素材および工具の機械的特性には、ソフトウェアに収録されているライブラリデータをそれぞれ引用し、素材には速度依存性 (ひずみ速度  $0.001 \sim 10s^{-1}$ ) および温度依存性 ( $20 \sim 120^{\circ}C$ ) を考慮した 1000 番系のアルミニウム、工具には SKD11 を設定した。実際の成形では、スライド条件によりひずみ速度  $10s^{-1}$  や素材温度  $120^{\circ}C$  を超える変形箇所が存在すると思われるが、素材の変形抵抗はひずみ速度の低い範囲で支配的に変化し、また、温度依存性については変形時の素材温度を概ね包含していると考えられるため、大きな差異はないもの

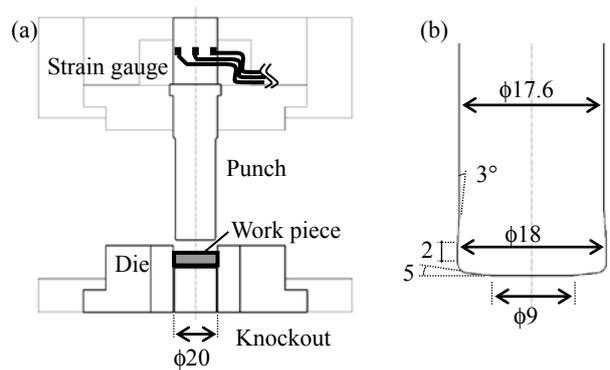


図 8 Schematic illustrations of (a) cross section of experimental apparatus and (b) front edge of punch

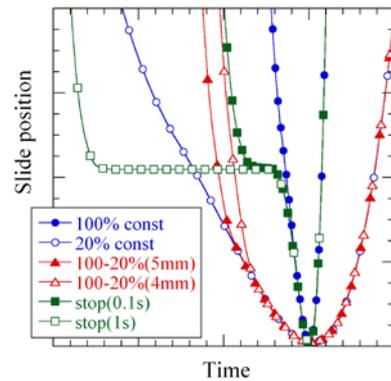


図 9 Various slide motion patterns used in this study.

と思われる。摩擦係数としては、素材-パンチ、素材-コンテナともせん断摩擦係数を 0.1 に設定し、素材および工具の初期温度は  $20^{\circ}C$ 、素材-工具間の熱伝達率は  $20kW/(m^2 \cdot K)$  に設定した。サーボプレスのスライドモーションの設定には、実際にプレスから出力される時間-ストロークデータを用いた。また、直径は、加工発熱により昇温した成形品の冷却解析を行い、熱収縮後の最終形状を三次元の STL 形式で出力して求めた。

### 6.2 実験および解析結果とその考察

#### 6.2.1 実験および解析結果

設定したスライドモーションと実際のスライド動作にかい離がないかを確認するために、まず、各モーションのスライド速度について調べた。図 10 は、スライド速度を下死点からの距離で整理したものである。100%一定モーションでは、下死点上 5mm の位置まで急激に速度が低下し、その後 1mm 付近まで  $40mm/s$  程度のほぼ一定速になった。これは実験に使用したサーボプレスのリンク機構に起因するものである。また、20%一定モーションでは、100%の 20%程度の速度 ( $8mm/s$  程度) になっており、設定どおりに動作したと言える。減速モーションでは、下死点上 5mm および 4mm において 20%の速度に向けて減速を開始するため、2mm および 1mm 付近まで 20%の速度に減速できていなかった。また、停止モーションでは、常に 100%の速度設定であるにも関わらず、成形開始の 6mm 付

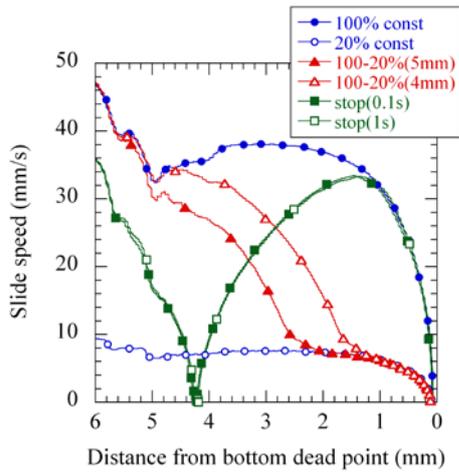


図 10 Slide speed of various slide motion patterns used in this study

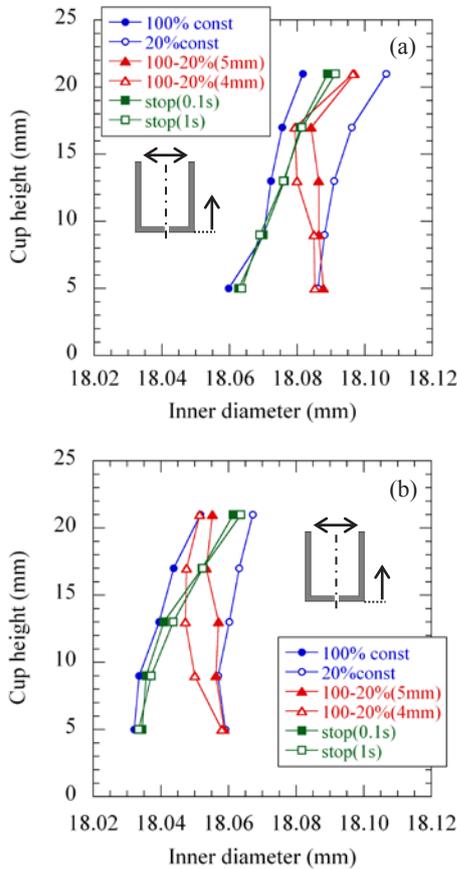


図 11 Variation of inner diameters of impact extruded cup : (a)experimental, (b)calculated

近から 1mm 付近まで、0.1s、1s の両停止モーシオンとも、100%一定モーシオンより速度が低かった。これは、4mm での停止に向けた減速区間とその後の再起動による加速区間が必要なためである。素材と金型の熱移動に及ぼすスライド速度の影響は大きく、それによる素材の熱収縮は大きいと思われる。寸法精度の向上を達成するためには、このような実際のスライド動作を把握することが非常に重

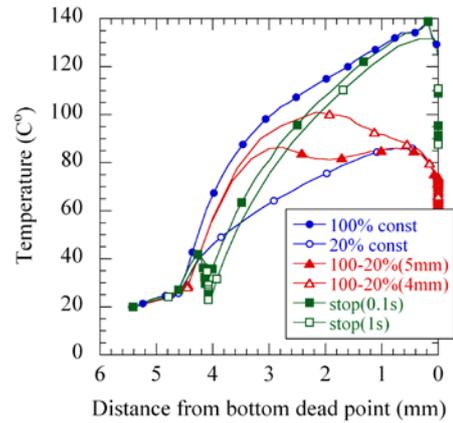


図 12 Effect of slide motion patterns on maximum work piece temperature (calculated)

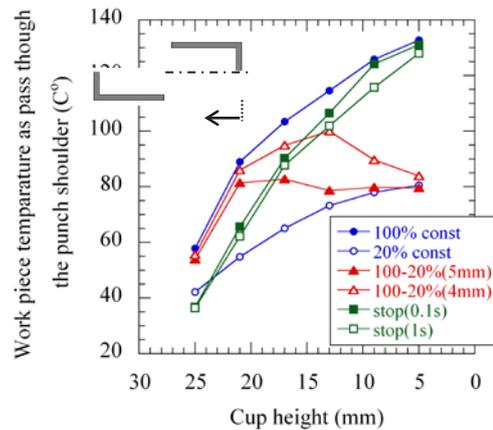


図 13 Distribution of work piece temperature as pass through the punch shoulder (calculated)

要と考えられる。

成形品の内径の測定結果を図 11 に示す。なお図中、縦軸は成形品の底部を 0mm としてその高さを示し、本研究では、高さ方向の直径の差が小さい場合に寸法精度が良いものとして評価した。図 11(a)より、減速モーシオンを除く他のモーシオンでは、内径は、底部（高さ 5mm）から端部（高さ 21mm）に向かって徐々に大きくなることがわかる。また、20%一定モーシオンと比較して、100%一定モーシオンでは、底部から端部のいずれにおいても内径が小さかった。これらは成形時の加工発熱に応じた加工後の熱収縮が原因と考えられる。一方、減速モーシオンでは、高さ方向に対する直径の差が他のモーシオンに比べて小さく、下死点上 5mm の減速モーシオンでは内径の差が小さかった。停止モーシオンでは、0.1s、1s とともに高さ方向に対する直径の差が大きかった。また、外径についても同様の傾向が確認できた<sup>3)</sup>。これらは成形中の素材温度に起因するものと考えられるが、詳しくは次項で考察する。以上より、スライドモーシオンが製品寸法精度に及ぼす影響は大きく、スライドを適切に制御することで高さ方向の直

径の差を小さくすることができた。また同図(b)に示した解析結果においても、内径・外径に及ぼすスライドモーションの影響は実験結果に近い傾向を示し、減速モーションでは、高さ方向の直径の差が小さいことを確認できた。

### 6.2.2 成形中の素材温度と寸法精度の考察

内径寸法および外径寸法は成形中の素材温度によって大きく影響を受けると考え、成形中に最も素材温度が高くなると考えられるパンチ肩近傍の素材温度の推移を、解析により調べた。結果を図12に示す。図より、スライド速度が100%と高い場合は素材温度の上昇が大きく、最高で約140℃に達することがわかる。一方、スライド速度が20%と低い場合は、最高温度が85℃程度であった。これは、スライド速度が低速の場合、加工により発生した熱が金型へ多く移動するためと考えられる。また、減速モーションでは、成形初期に素材温度が上昇した後、成形中期以降で素材の昇温が抑制された。特に、下死点上5mmの減速モーションでは、下死点上3mm以降の素材温度が80~85℃程度でほぼ一定であった。一方、停止モーションでは、スライド停止の下死点上4mmまでに素材温度の上昇がほとんどないため、素材温度の低下に対する効果は小さかった。また、再起動後は素材の温度が急激に上昇し、100%一定モーションとほぼ同程度の約140℃にまで達した。

次に、成形品側壁部の各部位が成形中パンチ肩近傍を通過する際の温度を図13に示す。図より、100%一定モーションや停止モーションでは、成形品底部に近いほど成形時の温度がきわめて高く、熱収縮により寸法が小さくなると考えられる。一方で、下死点上5mmの減速モーションは、各高さの成形温度が約80℃で一定であり、成形高さごとの熱膨張、熱収縮の差が小さいと考えられる。これらは、図11に示した内径と同様の傾向を示し、成形途中のスライドの減速は、素材温度の適切な制御を可能にするため、成形品高さ方向の直径の差を小さくできることがわかった。

## 7. おわりに

加工時の発熱を素材の昇温に利用すること、および、金型への伝熱を制御することで、成形荷重の低減や寸法精度の向上が可能であるか検討した。

SUS304,TW340の圧縮試験では、金型材料や加工速度を検討した結果、金型材料にZrO<sub>2</sub>を用いることで荷重を低減できた。また、SUS304の円筒深絞り加工では、金型材料にZrO<sub>2</sub>あるいは素材に保護フィルムを貼付することで成形中の素材温度を大きく上昇でき、加工誘起変態を抑えることができた。SUS304の角筒絞り加工では、スライドモーション制御を活用して、スライドの減速あるいは一時停止することで成形性が向上できた。また、衝撃押出し成形では、スライドを減速することで素材温度の調整を行うことができ、その結果、成形品の寸法精度を高めることができた。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 四宮徳章, 白川信彦, 中本貴之: 日本機械学会論文集(A編), 77-779(2011), 1051-1055.
- 2) 四宮徳章, 白川信彦, 中本貴之: 第63回塑性加工連合講演会, (2012), 137-138.
- 3) 四宮徳章, 白川信彦: 日本機械学会論文集(A編), 79-804(2013), 1107-1111.
- 4) 玉井良清, 山崎雄司, 吉武明英, 井村隆昭: 塑性と加工, 51-592(2010), 450-454.
- 5) 山下裕之, 上野宏明, 中井浩之, 檜垣貴大: Honda R&D Technical Review, 24-1(2012), 142-148.