

# 押出し現象の動的3次元可視化とフローガイド設計の最適化

牟禮雄二\* , 中西賢二\*\*

## Real-Time Visualization and Measurement of Three-Dimensional Plastic Flow in Extrusion by Using Physical Simulation and Optimization of Flow Guide Design

Yuji MURE and Kenji NAKANISHI

In the present investigation, real time measurement and visualization of three-dimensional material flow in the profile extrusion of flat bar with multiple fins extruded from a cylindrical billet was carried out by using the physical forming simulation system and model material of copper. Precise and detailed material flow conditions involving dead zone configuration and dynamic changes of material flow velocities of the surface area of a billet affected with the dead zone configuration and friction at the die bearing section could be measured and visualized successfully. Those quantitative data are useful to carrying out optimum design of the flow guide to achieve profile extrusion product with little bending and little distortion.

**Keyword :** Extrusion, C1020, Physical simulation, Three-dimensional metal flow, Flow guide design

### 1. 緒 言

優れた熱伝導性と高い導電率を有する銅製押出し材が、高性能CPU用放熱部品やモータの整流子片など各種の電気・電子機器用機能部品として広く利用されている。押出し加工では、ダイス孔の出口近傍に形成されるデッドゾーンに起因する材料流出速度の不均一さにより成形品に曲がりや歪みが発生する。

平面ダイスによる押出し加工では、一般にデッドゾーン形状を適正化して材料の流出速度を均一にするためにフローガイドが用いられるが、適正形状のフローガイド設計は容易ではない。もし、ダイス出口近傍における塑性流動を動的に3次元で可視化できればフローガイド設計が極めて容易になる。

塑性流動を可視化する方法として、有限要素法等の論理シミュレーションと物理実験により加工現象を解明する実験シミュレーション<sup>1) 2)</sup>がある。実験シミュレーションは実金属材料あるいはそれに類似した変形特性を示すモデル材料を用いて、実寸あるいは相似縮尺下での加工試験により、被加工材の塑性流動と形状変化を時系列で解明する手法である。

著者らは実験シミュレーションの新手法として、固体材料が金型内部で塑性変形する3次元の非常塑性流動現象を動的に可視化・解析するシステム<sup>3)</sup>(以下、動的3次元可視化システム)ならびに同システムで使用する各種金属

材料のモデル材料<sup>4)</sup>を開発した。モデル材料は、油粘土に硬度調整用の無機粉末および延性調整用の油成分を混合したものである。なお、モデル材料の真応力-真ひずみ曲線は、混合物の配合成分と配合量を変えることにより各種金属材料固有の加工硬化あるいは加工軟化現象に類似させることができる。

本研究では、500℃以上で動的再結晶による加工軟化を伴った変形挙動を示す無酸素銅(以下、C1020)製の4列フィンを有するヒートシンク前方押出し加工におけるデッドゾーン形状ならびにビレット表層部の塑性流動を動的3次元可視化システムとC1020に最適化したモデル材料を用いて可視化し、フローガイド設計を最適化した。

### 2. 押出し加工の可視化実験

#### 2.1 動的3次元可視化システム

ステレオ構成のX線発生器(発生器間距離120mm)、これと相対させて設置するX線I. I. カメラおよびX線発生器とX線I. I. カメラの間に設置する押圧装置(加圧能力9.8kN)、360°回転とXYZの3軸動作が可能な回転台、画像キャプチャーボード、PCおよび画像処理ソフトで構成したシステムを図1に示す。なお、実験時の加工力と加圧量はシステムに組み込んだ計測器により計測する。

#### 2.2 塑性流動の3次元可視化方法

押出し加工における塑性流動の3次元可視化は、軟質モデル材料に埋め込んだ硬質指標(以下、トレーサ)の移動量を2台のX線発生器の照射時期を制御しつつX線I. I. カ

\*生産技術部

\*\*鹿児島大学(現 鹿児島大学名誉教授)

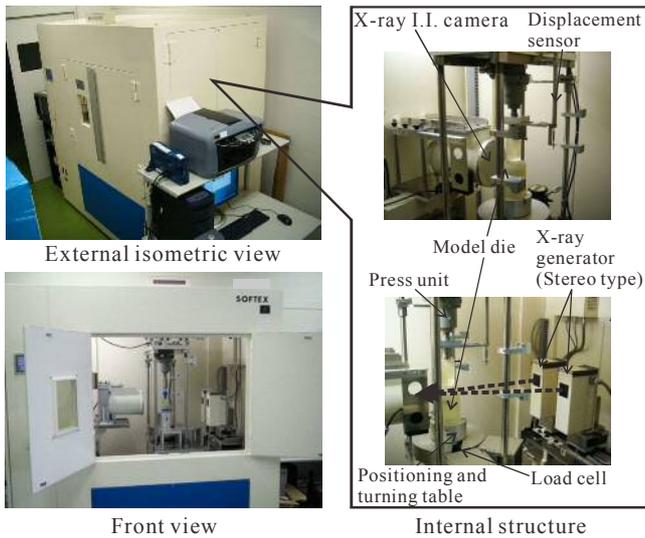


図1 動的3次元可視化システム

メラで撮影することで可能となる<sup>3)</sup>。すなわち、同カメラで得たNTSC信号を1フレーム(1/30秒)ごとにX線照射方向別にステレオ画像として保存し、押し出し過程におけるトレーサの2次元(重心)位置座標を前記ステレオ画像のフレームごとに画像処理により定めた。以上の時系列かつX線照射方向別のトレーサの2次元位置座標をもとに3次元位置座標を算出してトレーサ移動座標を実時間で3次元計測した。

2.3 モデル型と可視化実験条件

可視化対象の押し出し成形品は、線対称の4列フィンを有する長尺のヒートシンク部品である。実験用モデル型の外観図と座標系、ダイス形状およびビレット(円柱素材)への超硬製トレーサ(φ1.2mm)の埋め込み状態を図2に示す。モデル型はX線を透過しやすい樹脂製とし、ダイス、ビレット、押圧板をコンテナ内部に設置した。ダイスは、押し出し比(ビレット断面積/ダイス孔面積)を5.78とし、ベアリング長さ(ダイス孔の厚さ)を3mmとした。

ビレットは、500℃におけるC1020と同様に塑性流動曲線が加工軟化現象を示すモデル材料である。同ビレットは、原材料を真空土練機で混練・脱気後、直径40mmに押し出し成形し、高さ30mmに切断したものである。また、実験に先立って均質な機械的性質を確保するために恒温器内に20℃で24時間以上保持した。

平面ダイスを用いた押し出し加工では、押し出し過程の初期段階にデッドゾーンがダイス上側に形成され、その後定常押し出し状態となる。すなわち、この定常押し出し過程においてビレット表層部は、デッドゾーン界面をせん断すべりを起こしながら塑性流動して成形品の表層部となる。したがって、ビレット表層部の押し出し過程における塑性流動状態は、ダイス出口における成形品の表面状態、曲がりと密接な関連がある。このことから、トレーサは、ビレット外周

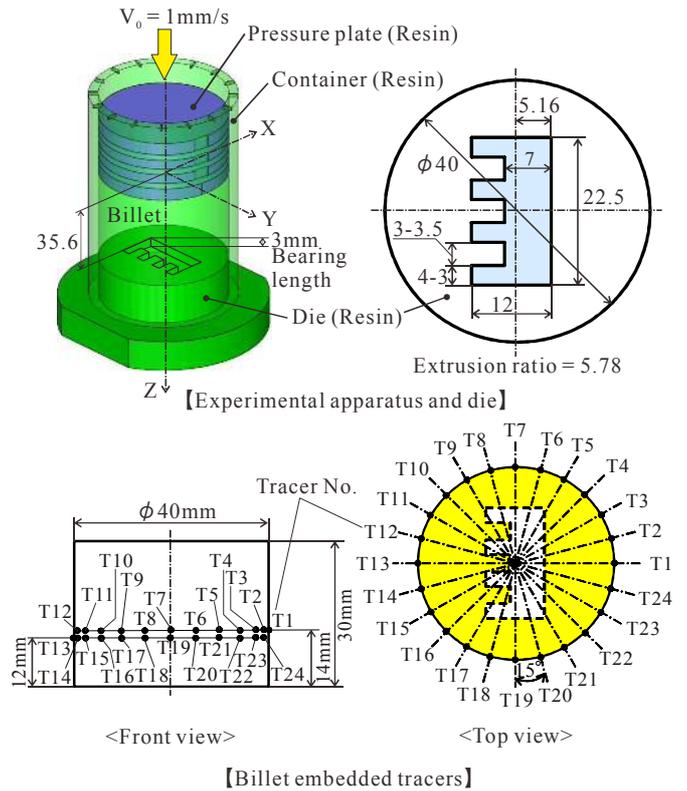


図2 実験用モデル型とトレーサの埋め込み状況

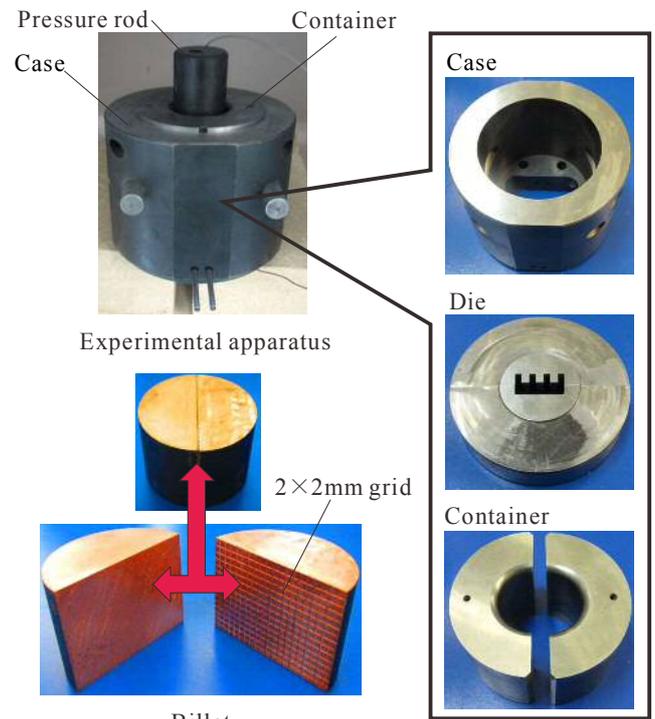


図3 C1020の熱間押し出し金型

部に15° 間隔で24個を、X線透過画像におけるトレーサの重なりによる視認性の低下を極力回避する様に、底面から12mmと14mmの位置に各12個ずつ埋め込んだ<sup>5)</sup>。

デッドゾーンの3次元形状は、ビレット表層部に埋め込んだトレーサの定常押し出し過程におけるコンテナ内周部からダイス孔への移動軌跡をステレオX線で透過撮影するこ

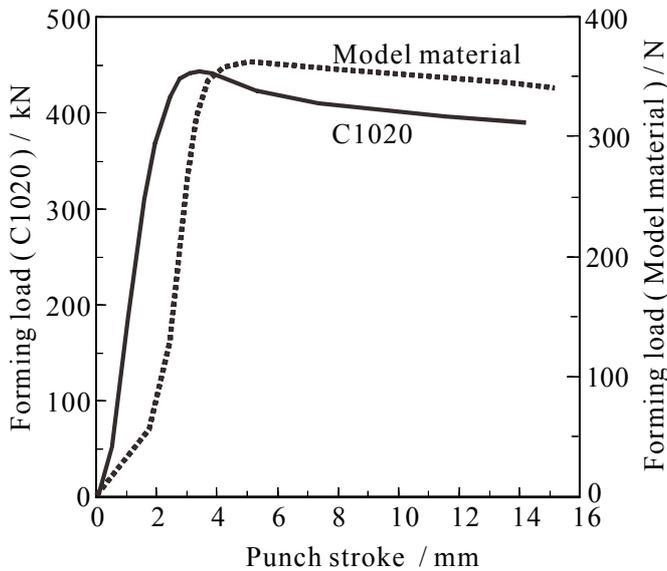


図4 加工荷重－パンチ変位曲線

とで計測し、可視化した。押し出し加工実験は潤滑剤として石けん水を用い、加圧速度1 mm/sで加圧量が28mmに達するまで連続的に加圧した。ステレオX線は、管電圧100kV、管電流0.1mAとした。以上のモデル材を用いた押し出し加工実験を検証するため、500℃の成形温度でC1020をビレットとする熱間押し出し加工実験を並行して実施した。実験金型と素材を図3に示す。ビレットは、図2のT1-T13断面を分割面とし、一方の分割面のみに変形状態を確認するための2mm間隔の格子線を機械加工した。

### 3. 可視化結果と考察

#### 3.1 押し出し曲線

押し出し加工実験で計測した加工荷重とパンチ変位の関係を図4に示す。モデル材料およびC1020のいずれの場合も押し出し加工の初期段階で加工荷重が急上昇して最高値を示した後、漸減し、定常状態で加工を終了していることが確認できる。また、両曲線は、ほぼ同様な変動傾向を示しておりモデル実験の妥当性が確認できる。

#### 3.2 塑性流動状況とデッドゾーン形状

押し出し加工過程におけるビレット表層部に埋め込んだトレーサの流動状態を撮影したX線透過画像を図5に示す。同図は、ステレオ画像の内、右側のX線発生器で撮影した画像である。全てのトレーサが、ビレット内部に形成されたデッドゾーン界面に沿って押し出し方向(図の下方向)に移動し、約15秒後にダイス出口から押し出される様子が時系列で確認できる。

図2のT1-T13断面におけるデッドゾーン形状を図6に示す。ここで、(A)は、モデル材料におけるデッドゾーンの2次元形状を表す。すなわち、図中の○はトレーサの移動軌跡を0.5秒ごとに、●は2.5秒ごとにプロットした結

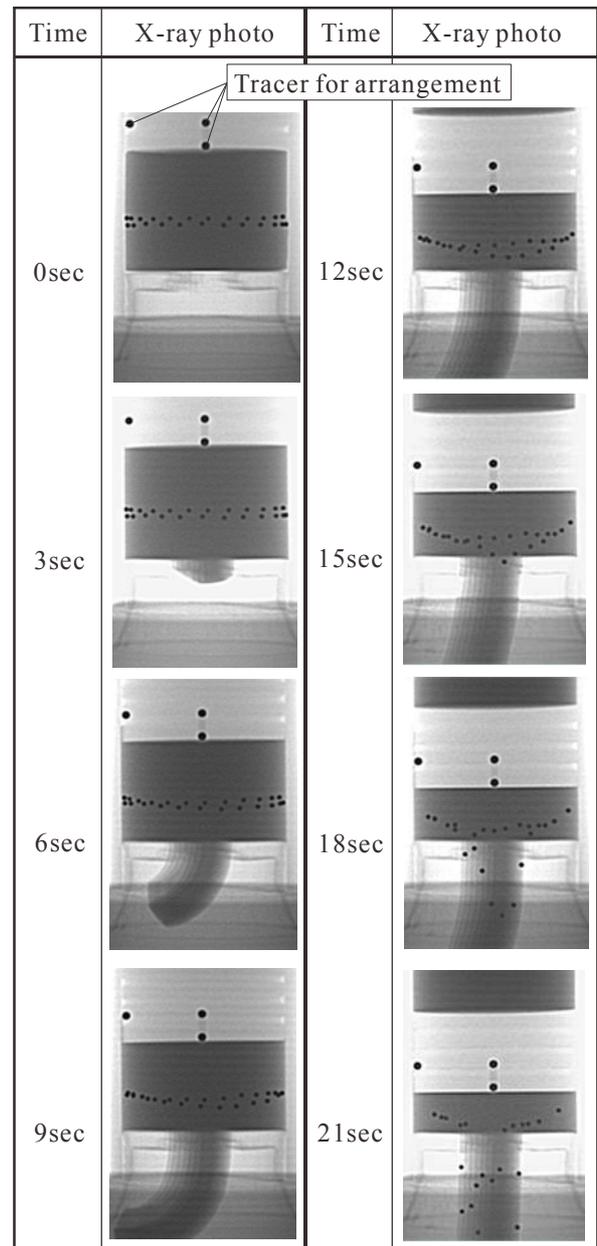
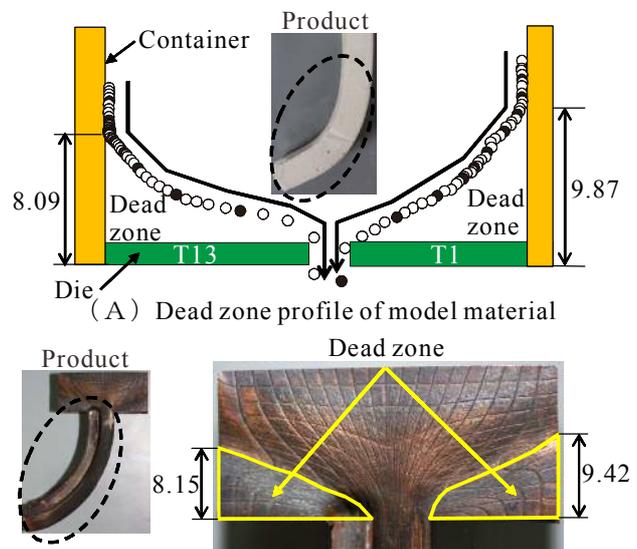


図5 押し出し加工に伴うトレーサの流動画像



(B) Dead zone profile of C1020

図6 T1-T13断面におけるデッドゾーン形状

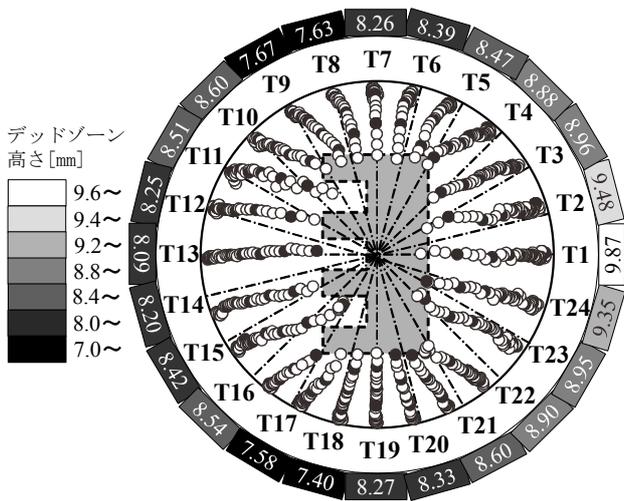


図7 トレーサの流動軌跡とデッドゾーン高さ（上面図）

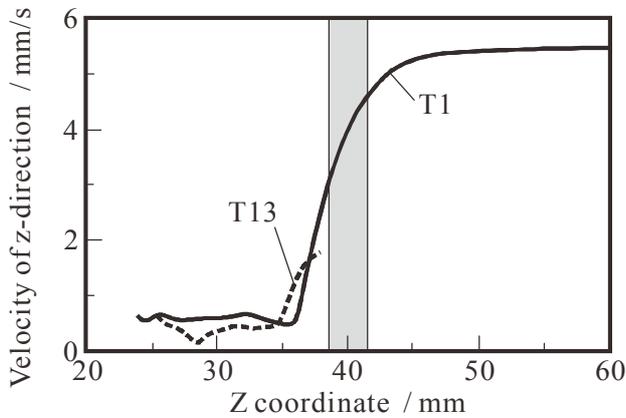


図8 T1とT13における押し出し方向の流動速度

果である。ビレット表層部の塑性流動状態を表すトレーサは、押し出し加工の進行に伴ってコンテナ壁に沿って押し出し方向（図の下方向）へ移動し、変形領域に入るとデッドゾーン界面に沿って移動している。（B）は、C1020の熱間押し出し実験で得た（A）と同一断面におけるデッドゾーン形状である。モデル実験とC1020を用いた実試作の結果を比較すると、それぞれのコンテナ壁面で測ったデッドゾーン高さがほぼ一致することが確認できる。すなわち、C1020の熱間押し出し加工における塑性流動の様相が変形特性を金属材料の変形特性に類似させたモデル材を用いた室温における実験シミュレーションにより高精度で可視化できることを確認した。

全トレーサの流動軌跡（上面図）とコンテナ壁面におけるダイス上端面から計測したデッドゾーン高さを図7に、トレーサ番号T1とT13の押し出し方向の座標と流動速度の関係を図8に示す。なお、図7はTでトレーサ番号を示し、その外側に円周状にデッドゾーン高さを示している。トレーサは、図心に向かって流動している様子が確認できる。トレーサ番号T1のデッドゾーン高さが最大で、T18の高さが最低となる。ダイス孔の線対称軸であるT1-T13におけ

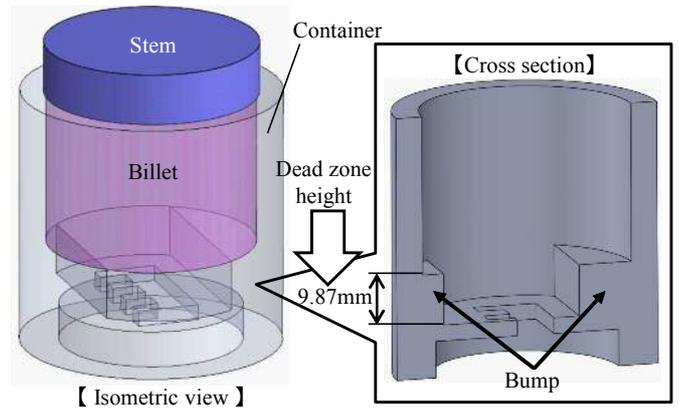


図9 簡易型フローガイド

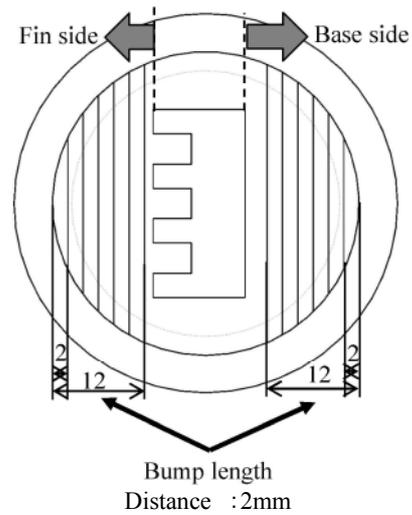


図10 FEM解析における段差寸法

るデッドゾーン高さは非対称となる。このことで、トレーサのダイス出口流出速度は、デッドゾーン高さが高いT1側が、低いT13側よりも増大するために、押し出し成形品はT13側に湾曲した加工品となる。一方、T1-T13の対称軸に関して対称な位置にあるT4-T22, T7-T19, T10-T16のそれぞれのデッドゾーン高さはほぼ一致している。以上によりダイス孔形状が線対称の押し出し成形の場合、線対称軸上のデッドゾーン高さの差異が押し出し品の曲がりに関与することが確認できた。

#### 4. フローガイド設計の最適化

現状のフローガイド設計は、設計者の経験則に依存する部分が多い。これは、ダイス孔近傍の塑性流動状態を定量的に推測する手段が無かったことによる。前章までの結果から線対称ダイス孔の場合、線対称軸上の非対称性のみを解消すれば良いことが判明したため、フローガイド形状を非常に簡略化できる。そこで、新たにBump式フローガイドを提案し、その形状寸法を変化することにより押し出し成形品の曲がり制御できるかについて有限要素法による塑性流動解析により検証した。

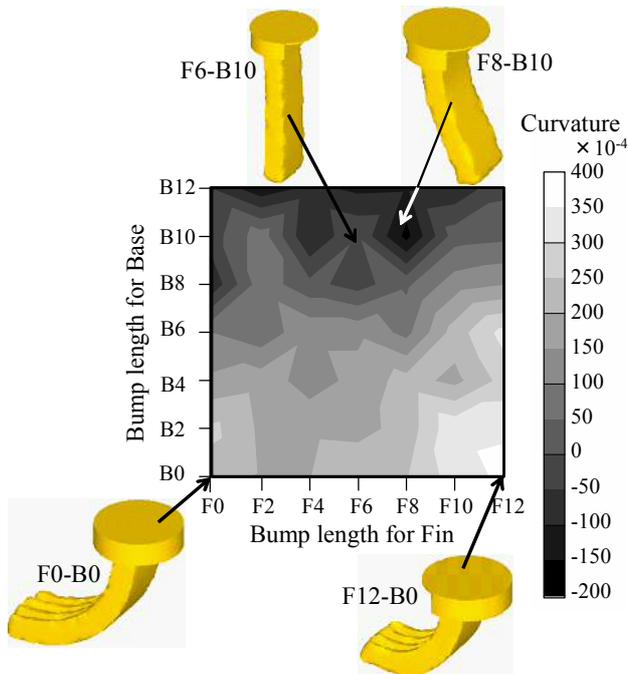


図11 解析結果と押し出し成形品の曲率

#### 4. 1 Bump式フローガイドと解析条件

フローガイドを図9に、その寸法条件を図10に示す。フローガイドは段差状のBump式とし、段差高さは図7で明らかになったデッドゾーンの最大高さ9.87mmとした。また、段差長さはフィン側とベース側のそれぞれで2mm間隔で2~12mmまでの合計48条件を設定し、有限要素法による塑性流動解析を行った。ビレットは、500°CのC1020の熱間押し出し加工を想定し、加圧速度1mm/sとした。

#### 4. 2 塑性流動解析結果

塑性流動解析で得られた押し出し品のダイス孔出口から流動した成形品の曲がり形状は、円弧近似が可能であったため、曲がりの程度を曲率で整理することとした。すなわち曲率が0の場合は真っ直ぐに押し出され、曲率が正の場合はフィン側に、曲率が負の場合は、ベース側に曲がることになる。フィン側およびベース側の段差長さと曲率の関係を図11に示す。横軸は、フィン側の段差長さであり、縦軸は、ベース側のそれである。図のグレースケールの濃淡は、曲率の程度を示している。

フローガイドを用いないF0-B0（フィン側およびベース側の段差長さ0mm）の場合、曲率が $222 \times 10^{-4}$ となった。これに対し、F12-B0（フィン側の段差長さ12mm、ベース側の段差長さ0mm）では、さらに曲率が増大し、 $361 \times 10^{-4}$ となり、成形品の曲がりが促進されることが確認できる。逆に、F8-B10（フィン側の段差長さ8mm、ベース側の段差長さ10mm）では、曲率が $-166 \times 10^{-4}$ で負となり、F0-B0とは逆向きに曲がることを確認できる。この様に、フィン側とベース側の段差長さを適切に変化させることで、押し出し加工品の曲がりを制御できることを確認できた。本研究の

様な線対称の4列フィンの場合、F6-B10（フィン側の段差長さ6mm、ベース側の段差長さ10mm）で曲率が0となり、図に示すとおり曲がりの無い成形品を得ることができる。

### 5. 結 言

本研究で提示した実験シミュレーション法は、熱間押し出し加工の塑性流動を、変形特性を実金属の高温変形特性に類似させた低い変形抵抗値のモデル材料を用いて常温で詳細に解明できることから、フローガイドの適正化設計に有用と考える。本研究で得た主要事象を以下に記す。

- (1) 純銅押し出し加工における3次元塑性流動現象を、ステレオX線を利用した動的3次元可視化システムならびに純銅の高温変形特性に類似させたモデル材料を用いて定量的に計測できることを確認した。
- (2) 円柱ビレットから平面ダイスを用いて前方押し出しする際のデッドゾーン形状ならびに成形品形状をビレット表層外周部に埋め込んだ複数個のX線計測用トレーサを用いて定量的に3次元計測した。
- (3) 平面ダイスを用いた押し出し過程で、円柱ビレットの表層部がコンテナ壁-デッドゾーン界面-ダイベアリングを順次塑性流動して成形品の表層部に成形される様相を定量的に解明した。
- (4) 押し出し加工過程における成形品形状の動的変化および成形品のダイス出口からの流出方向とデッドゾーン形状の影響を受けたビレット表層部の3次元塑性流動との関連を明らかにした。
- (5) Bump式フローガイドを提案し、フィン側およびベース側の段差長さを適切に調整する（本研究の場合、フィン側の段差長さ6mm、ベース側の段差長さ10mm）ことで曲がりの無い押し出し加工品を得ることができる。

### 謝 辞

本研究の一部は、日本銅学会平成24~25年度研究助成金による研究である。日本銅学会に厚く御礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) Dwivedi, S. N.:Trans. ASME, J. Eng. Ind., **105**, 197-202(1983)
- 2) F. Yoshida, M.Itoh:Journal of the JSTP, **72**, 34-39 (1992)
- 3) Y. Mure, K. Nakanishi:Journal of the JSTP, **596**, 893-897(2010)
- 4) S. Kuwaharada, K. Nakanishi, Y. Mure, Y. Atsumoto: Materials Transactions, **52(8)**, 1589-1594(2011)
- 5) 牟禮雄二：特許第5909725号（2016）