

セラミックス押出し成形における材料流動の可視化と金型設計への適用

桑原田 聡*, 牟禮雄二*, 中西賢二**

Visualization of Material Flow in Extrusion Process of Ceramics and Application to Die Design

Satoru KUWAHARADA, Yuji MURE and Kenji NAKANISHI

We had developed the visualization and analyses method of material flow using stereo x-ray for fabrication of metals and its application to the extrusion processes of ceramics was investigated. The movement of tiny steel particles which embedded into a cylindrical alumina was picturized in an extrusion process. The material flow and flow velocity in the inside of an extrusion dice were measured by analyzing the image sequences obtained for every time progress. Those quantitative data are useful to carrying out the optimazation of die design in the extrusion of ceramics.

Keyword : Extrusion, Ceramics, Material flow, Die design

1. 緒 言

セラミックスの押出し成形は、可塑性原料（以下、グリーン材）に圧力を加え、金型をとおして一定断面形状品を得る成形方法で、長尺物の成形に適し、量産性に優れている特徴がある。また、押出し金型の形状を変えることで、様々な断面形状の製品に対応することが可能であり、各種のセラミックス製保護管、絶縁基板、自動車用排ガス基材（以下、ハニカムセラミックス）等へ利用されている¹⁾。特にハニカムセラミックスは、近年の自動車排ガス規制強化の影響や金型加工技術の進歩により、ハニカム構造体の壁厚が $50\mu\text{m}$ 以下になるものなど、微細化が進んでいる^{2)~4)}。

一般的に押出し成形品の形状不良や内部欠陥などは、グリーン材が金型から押出し成形される際の材料流動状態と密接に関連することが知られているが、複雑な粘弾性挙動を呈する材料流動状態を解析する実用的評価方法は確立されておらず⁵⁾、金型設計者の経験則に依存したり、グリーン材の水分量や添加剤等の配合量といった可塑性の調整で対応しているのが現状である。

一方、塑性加工過程における材料流動の可視化解析に関連して、筆者らは、金属素材の圧造や押出し加工の解析に金属と類似した変形特性を有する粘土材を用いて、成形加工時の型内部における材料流動をステレオX線画像で可視化・解析する成形加工実験シミュレーション装置を開発し、実用化している^{6) 7)}。

そこで本研究では、セラミックス中空部品の押出し成形における型内部の材料流動を、上記実験シミュレーション装置を用いて可視化実験・解析を行うとともに、押出し金型形状の最適化手法について検討した。

2. 実験方法

2. 1 実験試料

押出し成形実験に用いるセラミックス材料としては、高純度アルミナ（大明化学工業(株)製タイミクロン、平均粒径 $0.1\mu\text{m}$ ）を用いた。アルミナ100部に対して、水20部、バインダー（ユケン工業(株)製セラランダー）5部、湿潤剤（エチレングリコール）2部、潤滑剤（ユケン工業(株)製セラランダーB）0.3部を配合した。各材料を予備混合した後、加圧ニーダで混練して、アルミナグリーン材を調整した。各種実験用試料は、押出成形機を用いて $\phi 40\text{mm}$ の円柱形状に成形した後、任意の長さに切断した。

2. 2 実験シミュレーション装置の概要

図1に実験シミュレーション装置の概略図を示す。同装置は2台のX線発生器とX線カメラ、押出し加工装置、回転台、機器制御装置およびパーソナルコンピュータ（以下、PC）で構成されている。加工荷重と変位は、システムに組み込まれた計測器によって測定し、PCからの制御で加圧・

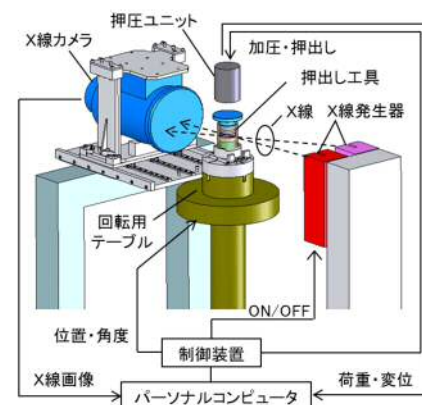


図1 実験シミュレーション装置の概略図

*生産技術部

**鹿児島大学（現 鹿児島大学名誉教授）

押し出しと同時に2台のX線発生器のON/OFFを1フレームごとに切り替えながら照射する。回転台の上に設置したモデル型の材料流動の様子をX線カメラで撮影し、画像データはPCに保存される。なお、本実験で用いる押し出し工具およびモデル型は、X線透過に影響の少ない樹脂製とした。

押し出し成形における塑性流動は、セラミックス材料の内部の定位置にφ1.2mmの超硬製球を複数個埋め込んで、変形指標（以下、トレーサ）とし、その移動量を2台のX線発生器の照射タイミングを制御しながらX線カメラで撮影することで可能となる。セラミックス材料中のトレーサは、両者の密度の違いから黒点となって撮影される。同カメラで得られた画像データは、1/30秒間隔にX線照射方向別に収録される。左右のX線発生器ごとに保存されたデータは、画像処理によって2次元（重心）位置座標を同定する。以上の時系列かつX線照射方向の異なるトレーサの2次元位置座標をもとに3次元位置座標を算出すると、トレーサ移動座標の実時間3次元計測が可能となる。

2.3 モデル型と型形状の検討

押し出し成形のシミュレーション実験は、円柱形状のアルミナグリーン材（外径40mm×長さ40mm）から外径10mm×長さ10mm、肉厚1.5mmの四角形の中空材への押し出し成形を対

象とした。成形用の押し出し型は、中空体の壁を成形する部分である出口長さを5~20mm、材料供給側の穴径をφ3~6mmに変えた複数の形状を設計・作製し、型形状の違いによる成形状況を比較検討した。図2に押し出し型形状と寸法、図3にモデル実験装置と押し出し成形中の材料流れの概念図を示す。同図に示すとおり、1) 押し出し成形前に円柱形状の材料が、2) 4本の円柱に分岐し、3) 分岐した材料が再度合流して、4) 中空形状を成形しながら押し出される。材料が分岐される際の入口径の違い（φ3~6mm）と分岐後に再度合流し、中空形状を成形する出口長さ（5~20mm）の影響を検討した。

2.4 可視化実験条件

アルミナグリーン材内部へのトレーサ埋込み手順を図4に示す。まず、図4a)に示す外径40mm×長さ40mmの円柱試料を10mm間隔で4分割し、それぞれの底面にトレーサを埋込んだ。トレーサの埋込みは対称条件を考慮して、図4b)に示す22.5° 間隔に16分割したラインのうち、図4c)に示す1/4（1~4）のライン上だけとした。逆に2次元画像の片側に2列以上のトレーサがあるとトレーサ同士の重なりのため、経時変化における位置の特定が困難となる。したがって、すべてのトレーサを個別に視認し、かつ、時系列

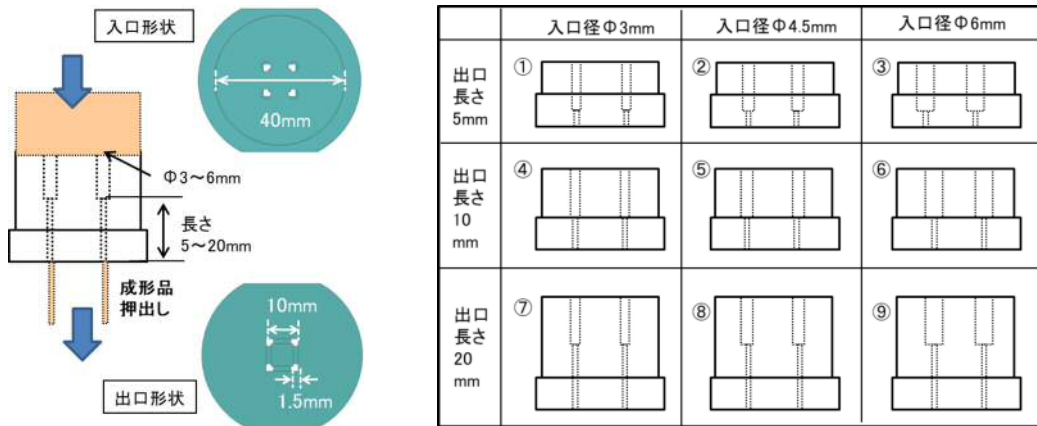


図2 押し出し型の形状と寸法

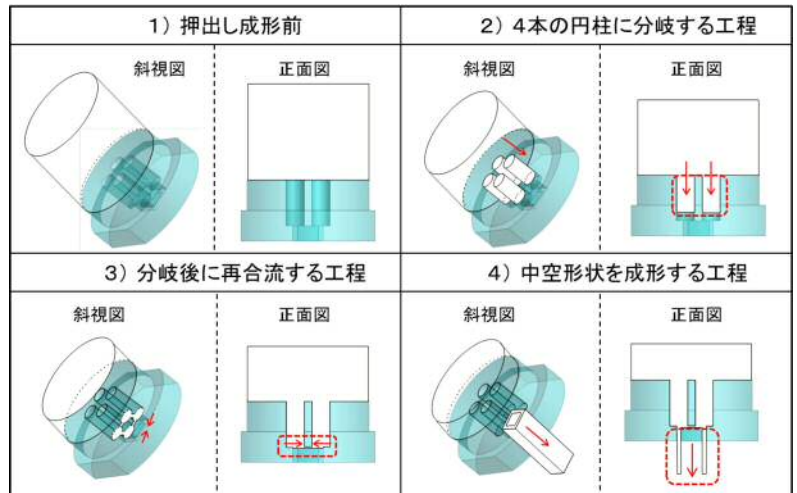
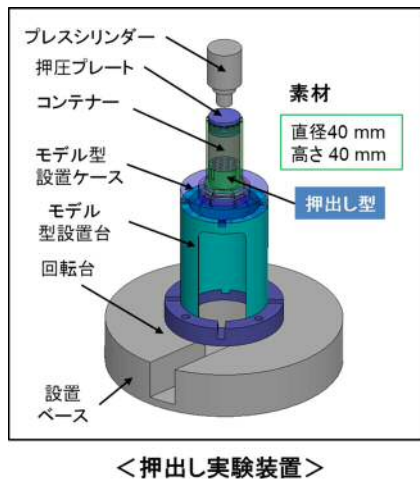


図3 モデル実験装置と中空部品押し出し工程での成形状態の概念図

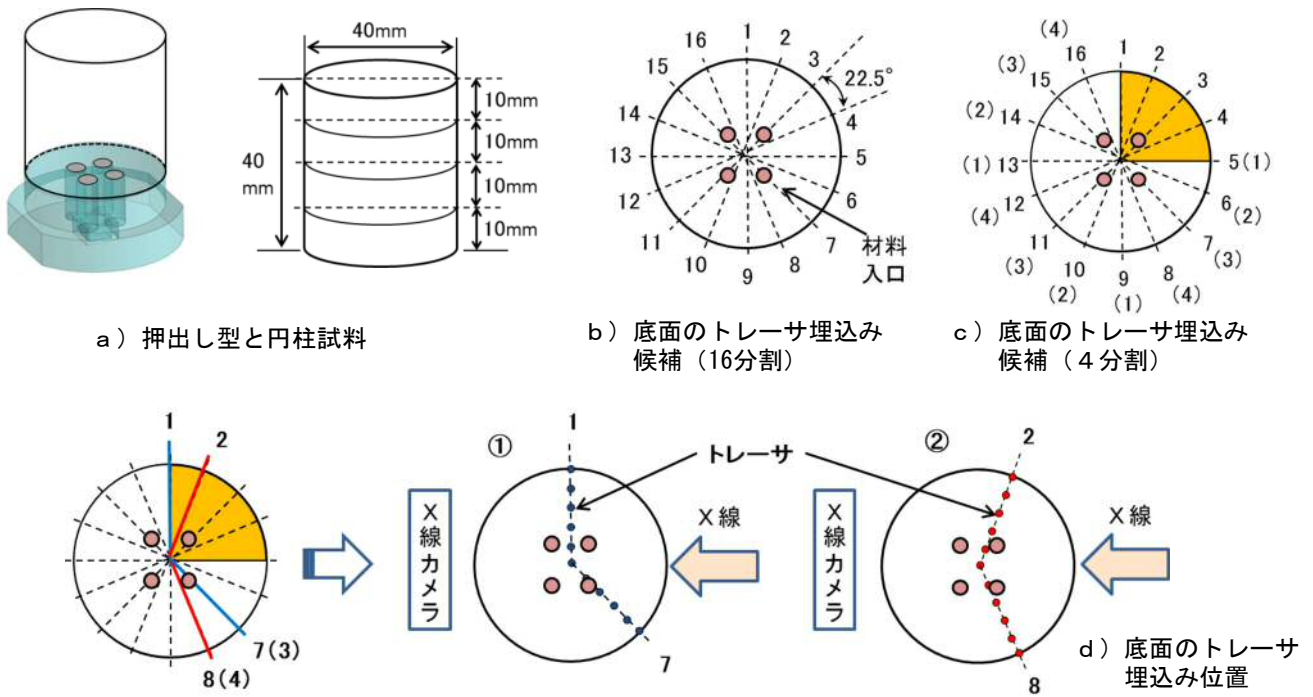


図4 可視化実験試料作製の概念図

での追尾が容易となり、片側2列が重ならない底面のトレーサ位置は、図4d)に示す①1と7の2列、②2と8の2列のライン上にトレーサを埋め込んだ2種類の試験体を作製した。作製した試料は、図3のモデル実験装置コンテナ内に装填して押し出し実験を行った。実験には図2の⑤の押し出し型（入口径 ϕ 4.5mm、出口長さ10mm）を用いて、0.1mm/sの加圧速度で押し出し実験を行った。X線管の出力を電圧100kV、電流0.1mAの条件で時系列による連続的なX線画像を撮影した。

3. 結果と考察

3.1 型形状の検討

図2の押し出し型①、②、③を用いて、出口長さを5mm一定で、材料供給側の入口径を変えたときの押し出し荷重とパンチストロークの関係と、押し出し型①、④、⑦を用いて、入口径を ϕ 3mm一定で出口長さを変えたときの押し出し荷重とパンチストロークの関係をそれぞれ図5、図6に示す。

押し出し成形における押し出し荷重とパンチストローク（変位）の関係は、材料が出口部分から排出されるまでは直線的に上昇するが、排出が始まるとほぼ定常状態となる。また、材料供給孔が大きいほど、もしくは出口までの長さが短いほど押し出し荷重は小さくなる。入口径が6、4.5、3mmのときの定常状態における押し出し荷重は、それぞれ3.5、4.33、6.8kNとなった。ここで入口径が6mmから4.5mmに小さくなる場合は、約23%の押し出し荷重増であるのに対し、6mmから3mmになると約2倍近い押し出し荷重の増加となった。同様に図6では、出口長さが5、10、20mmのときの定常状態

の押し出し荷重は、それぞれ6.8、7.7、9.5kNとなり、出口長さの違いによる押し出し荷重への影響は、2倍の長さ（10mm）で約13%増、4倍の長さ（20mm）で40%増と入口径ほどの差とはならなかった。

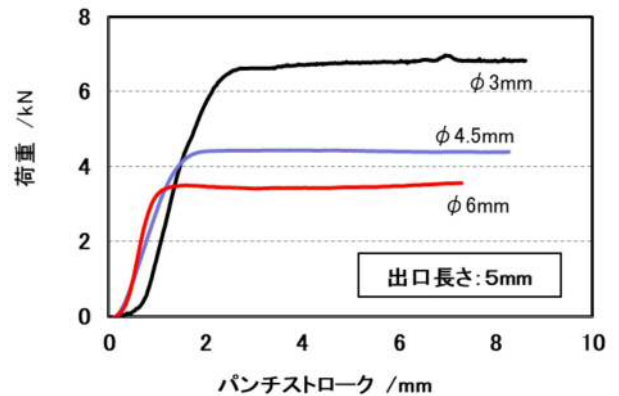


図5 押し出し荷重に及ぼす材料供給側の入口径の影響

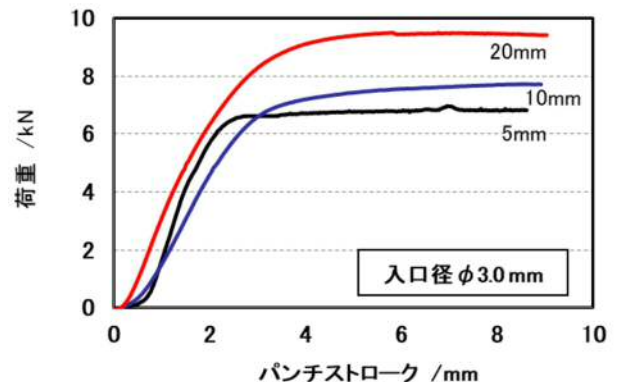


図6 押し出し荷重に及ぼす出口長さの影響

一般的に押し荷重が大きすぎる場合、金型への負荷の増大による金型の損傷、またはセラミックス粒子による金型摩耗の影響が大きくなり、型寿命が短くなるというデメリットもあるため、成形不良等が発生しない範囲において、押し荷重は低い方が都合がよい。

次に成形品の形状比較として、出口長さの異なる押し成形品の先端部の写真を図7に示す。同図では、出口の長さが5mmのとき(ダイス①, ②, ③)に、成形品の先端が四角形にならず、中央部付近がへこんだ形状で成形されており、成形後の乾燥中に点線で囲んだ箇所に亀裂が発生していた。これは、供給孔から押し出された材料が密着して四角形を成形するための十分な長さが不足していたためであると考えられる。この傾向は、出口長さが長くなることで

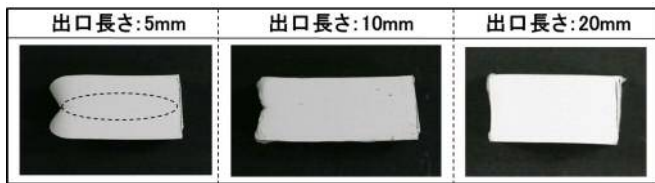


図7 出口長さの異なる押し成形部品の先端形状写真

改善されており、出口長さが10mmの場合で材料同士が密着し、四角形に成形できることが確認できた。

3.2 材料流動と可視化

図8に押し成形過程を撮影したトレーサの2次元X線画像と解析結果を示す。同図の解析結果は、左右2台のX線カメラによる画像中のトレーサ位置を検出し、立体計測法により3次元位置座標を算出したものである。この解析結果では、計測したすべてのトレーサをモデル型内に同時に表示させることで、トレーサとモデル型との位置関係および材料内部の塑性流動の方向と大きさが明確に把握できる。

次に、押し開始から96秒後のトレーサ位置と速度ベクトルを算出した結果を図9に示す。同図において、矢印の向きがトレーサの進む方向を示し、矢印の長さは速度に対応している。このため、矢印が長いほど高速で移動していることを示す。

モデル型の内部を通過したトレーサ速度を詳細に検討した結果を図10に示す。セラミックグリーン材は、0.1mm/sの速度で加圧しているが、押し開始直後は、押し荷

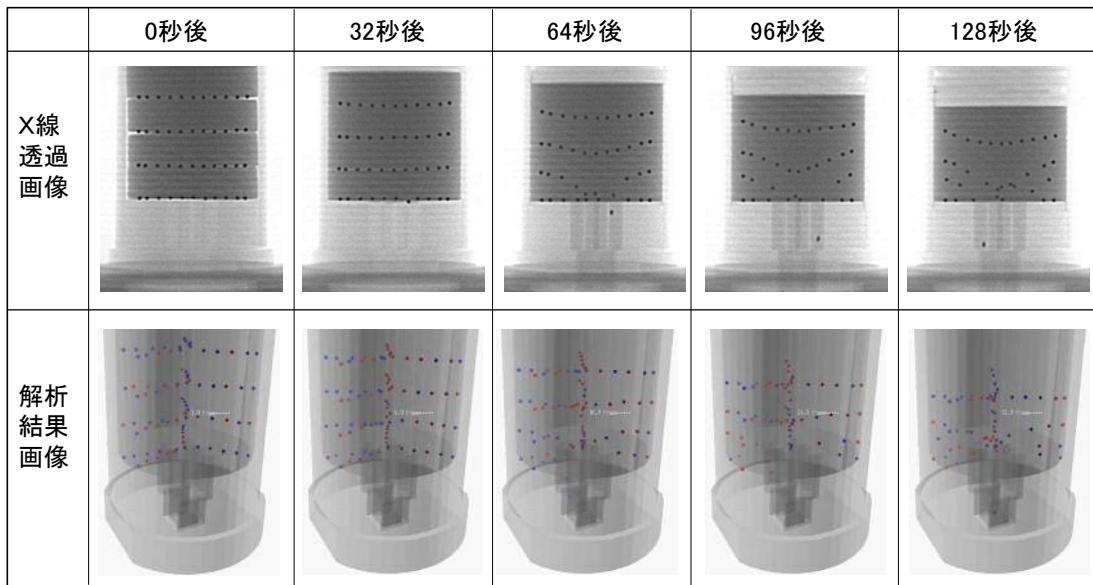


図8 押し成形過程の2次元X線画像と解析結果

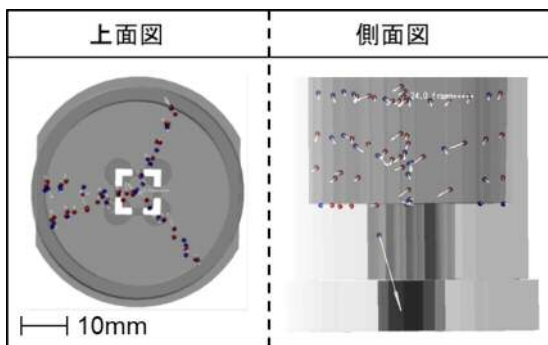


図9 トレーサ位置と速度ベクトルの算出結果

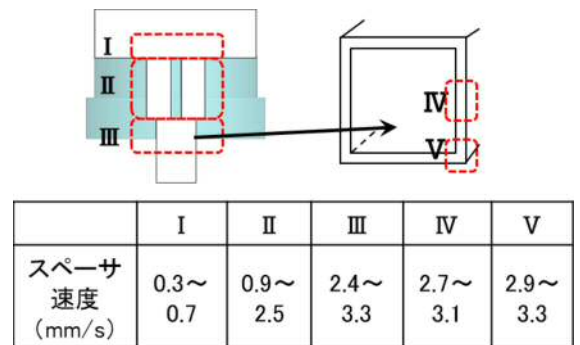


図10 速度解析領域とトレーサ速度

重による型の膨張等の影響から材料の流速は押し速度 (0.1mm/s) よりも遅い。解析結果から算出した最初の数秒間におけるトレーサの流速は、0.01~0.04 mm/s程度であった。このため、図10に示す各領域のトレーサ速度は、最下列に埋め込んだトレーサの結果を除外している。この結果から材料が4本の円柱に入る前は、0.3~0.7mm/sの速度が、4本の円柱内では約0.9~2.5mm/s、四角形となるころでは2.4~3.3mm/sと各過程を進むにつれて速度が上昇している (図3参照)。また、中空部品の押し出口付近の速度として、四角形の断面内で比較すると角付近 (図10のV部) の押し速度が約2.9~3.3mm/sと中央付近 (図10のIV部) の2.7~3.1mm/sよりも速い傾向を示していた。

4. 押し型設計の最適化

前章までの実験および結果の解析において、金属材料の塑性変形で実績のある同手法が、セラミックスの押し成形へ適用できることを確認することができた。しかし、押し成形した形状が回転対称体で、四角形の角付近や中央部の流速差など、材料流動に大きな差が生じにくいことがわかった。このため、材料流動に差の出やすい非対称形状を想定し、流動を制御する押し型設計手法を検討した。

4.1 押し型形状とモデル実験手法

押し成形を行うモデル実験装置と非対称押し型を図11に示す。部品形状は、直角三角形 (R1 : 60° , R2 : 30°) で厚みを2mmとした。押し型は、材料供給径をφ12mm、出口長さを15mm、供給側の穴径は、内径4、6、8、10mm

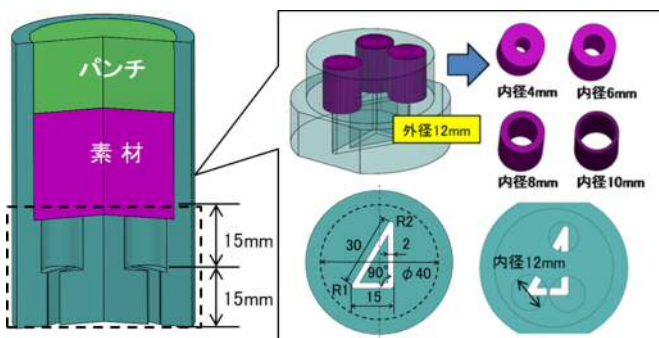


図11 モデル実験装置と非対称押し型

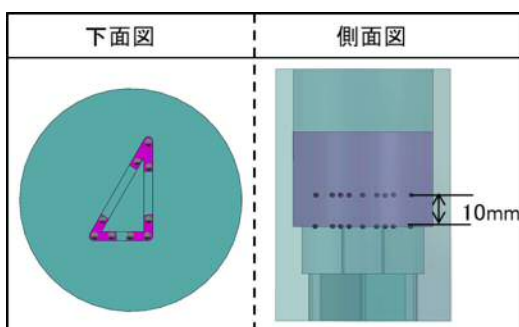


図12 モデル型の鋼球配置の概念図

の穴栓によって径を調節できるように設計した。

材料流動実験は、前章までと同様の材料、実験手法とした。また、内径40mm×高さ40mmの円柱試料を作製し、材料の底面および底面から10mmの位置にφ1.2mmの超硬製球をトレーサとして、直角三角形の真上に相当する位置に配置した。モデル型の鋼球配置の概念図を図12に示す。

4.2 塑性流動解析結果

押し実験による2次元X線画像を図13に示す。測定画像の解析から無次元化による押し型設計の一般化を目的として、(1)式に示すBridge比を求めて、中空部品が成形される際の角度との関係について検討した。Bridge比と成形する角度についての概念図を図14に示す。

$$K \text{ (Bridge比)} = L_{\text{bridge}} / L_{\text{exit}} \quad (1)$$

ここで、 L_{exit} は押しされた三角形の辺の長さ、 L_{bridge} は辺の長さから材料供給側の穴の半径を差し引いた長さである。また、成形時の圧着を促進するため流動角が増大するダイス設計が重要であると考えられる。

直角三角形の各辺 (K1~K3) におけるBridge比と流動角との関係を図15に示す。最適な材料供給側の穴径 (D_I , D_{II} , D_{III}) は図16に示すとおり、それぞれ、φ10mm, φ12mm, φ10mmとなった。以上の結果から塑性流動解析における流動角が最大となるBridge比を求めることで、中空部品成形の材料供給側の穴径を最適化でき、材料流動に差が生じる非対称ダイスにおける金型設計の規則性を見いだすことができた。

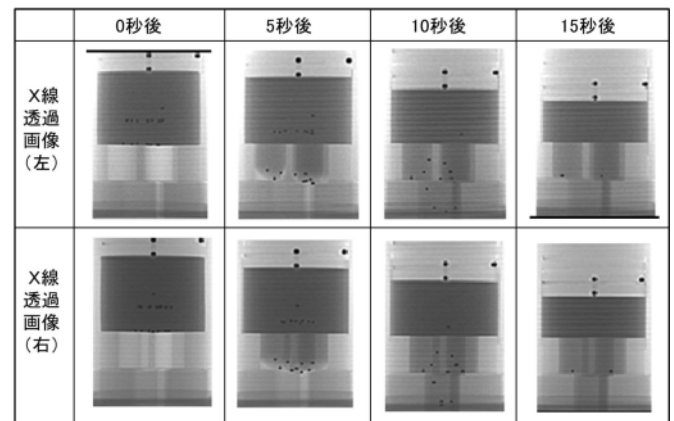
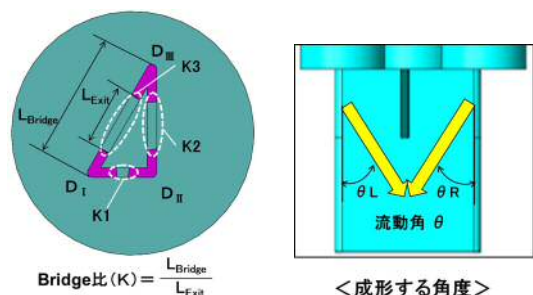


図13 押し成形過程の2次元X線画像



$$\text{Bridge比 (K)} = \frac{L_{\text{Bridge}}}{L_{\text{Exit}}}$$

< 成形する角度 >

図14 Bridge比と成形する角度の概念図

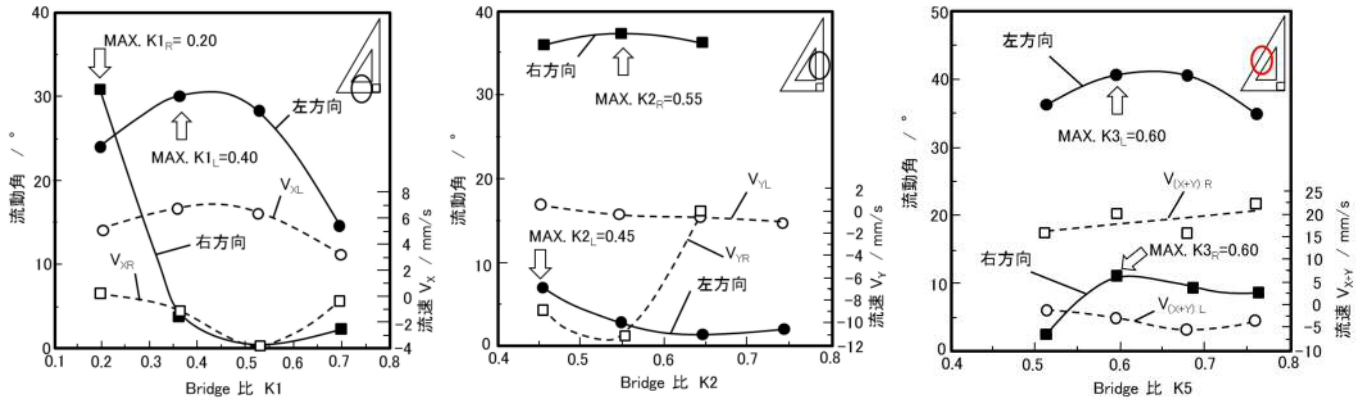


図15 直角三角形の各辺 (K1~K3) におけるBridge比と流動角との関係

分岐穴の内径	Kの値		
	K1	K2	K3
D6 (6mm)	0.694	0.742	0.759
D8 (8mm)	0.526	0.645	0.677
D10 (10mm)	0.359	0.549	0.595
D12 (12mm)	0.194	0.454	0.513
流動角の 最大値	$K1_L=0.40$	$K2_L=0.45$	$K3_L=0.60$
	$K1_R=0.20$	$K2_R=0.55$	$K3_R=0.60$

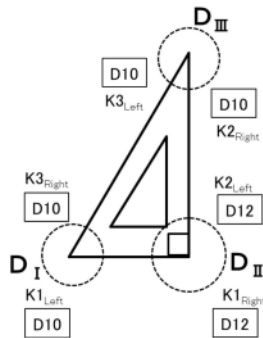


図16 最適な材料供給側の穴径

5. 結 言

本研究は、金属材料の圧造・押し出し加工において実績のある実験シミュレーション装置を、セラミックス中空部品の押し出し成形へ適用し、一連の可視化実験および解析によって定量的に、詳細に解明できることを確認した。本研究で得られた主要な結果は以下のとおりであった。

- (1) 中空部品（四角形）の押し出し成形について、形状の異なる成形型を用いた押し出し実験から、押し出し荷重が低く、成形品に欠陥のない最適な型形状は、材料供給側の入口径がφ4.5mm、出口長さが10mmであった。
- (2) 材料内部へ効果的にトレーサを配置し、加工実験によるX線画像の撮影により、成形型内部の材料流動を可視化することができた。
- (3) 左右2台のX線カメラの画像解析によって3次元位置を求め、型内部における材料の流速を定量的に把握する

ことが可能となった。

- (4) 非対称押し出し型を用いた中空部品（直角三角形）の押し出し成形において、Bridge比による制御法を提案し、材料供給側の穴径を最適化することで材料流動に差が生じる非対称形状における金型設計の規則性を見出すことができた。

謝 辞

本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) 平成24~25年度研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) による研究であり、JSTに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 藤正督, 山川智弘, 渡辺秀夫, 遠藤健司, 高橋実: セラミックス基礎工学研究センター年報, 7, 32(2007)
- 2) 浜中俊行: セラミックス, 35, 34-35(2000)
- 3) 市川周一, 原田節, 浜中俊行: セラミックス, 38, 296-300(2003)
- 4) 山田圭一, 田中政一, 伊藤啓司: デンソーテクニカルレビュー, 7, 50(2002)
- 5) 水谷圭祐, 光木功次郎, 中西友彦: デンソーテクニカルレビュー, 13, 106(2008)
- 6) 桑原田聡, 中西賢二, 牟禮雄二, 松本泰道: 塑性と加工, 593, 582-586(2010)
- 7) 牟禮雄二, 中西賢二: 塑性と加工, 596, 893-897(2010)