

特集 ハニカム成形時の粘土流れの可視化*

Visualization of Extruded Clay Flows of Monolithic Honeycombs

水谷 圭祐

Keisuke MIZUTANI

光木 功次郎

Kojiro MITUKI

中西 友彦

Tomohiko NAKANISHI

To obtain clear design guidelines and to produce excellent monolithic honeycombs, we need to know the clay flow in the die and clasp regions during the extruding process in order to obtain sufficient strength of the skin part. Using a transparent clasp, a transparent silicone compound resin which has the same viscosity as clay (added SiC particle as a tracer) and collimated light, we have developed a new visualization method in which the flow in the die and clasp regions can be observed three-dimensionally.

The principle of this method is as follows: first, place an observation camera directly above the die, let the collimated light obliquely. In this case, the camera can catch both the actual tracer and the shadow of the tracer which is projected on the die. Observing the two-dimensional information (X-Y planer axis) of the flow from the actual tracer movement, and calculating the Z-axis flow based on the length between the actual tracer and the shadow of the tracer simultaneously projected on the die, a three-dimensional clay flow using one camera was obtained. Using a high-speed camera and by processing the obtained image with in-house software, the three-dimensional coordinates were calculated in an actual situation.

By analyzing the clay flow in both the lattice direction and diagonal direction of the die, the following two results were obtained.

- (1) The clay flows towards the center of the clasp and is transferred from the die side to the clasp side in both the lattice direction and diagonal direction of the die.
- (2) The flow rate at the point where the clay flow contacts the cell part in the lattice direction of the die is higher than that of the flow rate in the diagonal direction of the die.

Key words: Visualization, Clay flow, Monolithic honeycombs

1. 緒言

Fig. 1 に示すように、自動車から排出される HC・CO・NO_x などの有害成分は、ハニカム構造体のセル壁表面に保持された触媒金属により浄化される。このハニカム構造体は三角状、四角状あるいは六角状のセル壁部および外周強度確保のためのスキン部から構成されており、一般的にはコーディエライト (2MgO・2Al₂O₃・5SiO₂) に代表される高耐熱性かつ低熱膨張であるセラミックス材料が使用されている。触媒金属の使用量低減はセル壁部の六角状化、触媒金属の早期活性化はセル壁厚の薄壁化が有効であり、最近の金型加工技術の進歩により、セル壁厚が 2 mil (50 μm) である六角状超薄壁ハニカム構造体も開発されているが、セル壁厚が 4 mil (100 μm) である四角状薄型ハニカム構造体が主流である。なお、セル壁厚は mil (milli inch length, 1/1000 inch) で表記される場合が多い。

Fig. 2 に材質がコーディエライトであるハニカム構造体の製造工程を示す。まず、天然鉱物であるカオリン、タルクおよびアルミナや水酸化アルミニウムなどのア

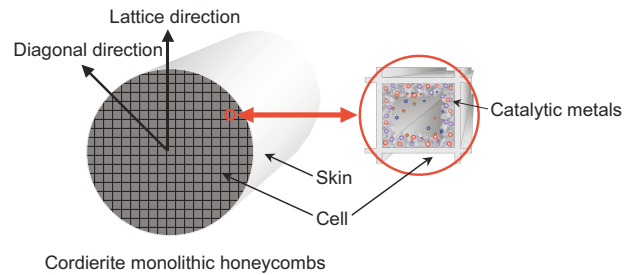


Fig. 1 Automotive catalytic substrate

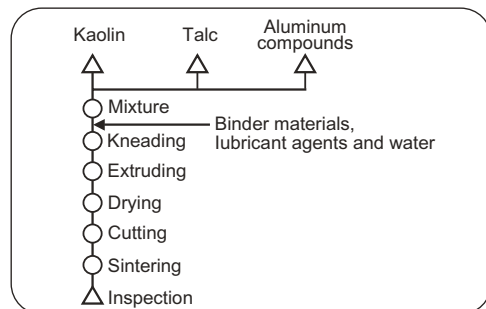


Fig. 2 Manufacturing process of cordierite monolithic honeycombs

* 2008年2月27日 原稿受理

ルミニウム源からなるコーディエライト組成の混合粉にバインダ、潤滑剤および水を加え、それらを十分に混練することで、均一組成の粘土にする。この粘土を成形機側面に設置した金型から連続的に押し出し成形することでハニカム構造体を得られ、焼成して、その材質をコーディエライトとする。

これらの製造工程のうち、押し出し成形過程におけるハニカム構造体の作製概要を Fig. 3 に示す。ハニカム構造体のセル壁部は目的形状および壁厚相当に加工されたスリットを通過させることで得られる。一方で、スキン部はスキン厚さ相当の金型および口金間の領域において、金型を通過した粘土の流れを変化させ、セル壁部と接合させることで得られる。以下、金型および口金間の領域は、スキン形成領域と称す。

従って、良質なハニカム構造体を得るには、スキン部が形成される際のセル壁部とスキン形成領域の速度バランスが重要となり、そのバランスに乱れが生じることで、Fig. 4 に示すような、スキン部への供給粘土不足によるササクレやハニカム構造体の曲がりといった不具合が発生し、更にセル壁形状の歪化が生じることでハニカム構造体の強度低下の原因となる。

そこで、良質なハニカム構造体を作製可能とする設計指針を得るためには、スキン形成領域における金型格子方向および金型対角（45°）方向の粘土流れを把

握し、差異を明確化する必要がある。

本報では、スキン形成領域における粘土流れを複雑な装置構成を必要とせず、3次元的に観察できる新規可視化手法を確立し、セル壁形状が四角状である金型を使用した場合の金型格子方向および金型対角（45°）方向の3次元流れ軌跡および流れ速度を解析した事例を紹介する。

2. 3次元可視化手法

2.1 3次元可視化原理

考案した3次元可視化手法の原理（Fig. 5）は、スキン形成領域の粘土流れを可視化可能な状態とするため、透明口金およびトレーサを添加した透明粘土を使用する。

観察カメラを金型に対して垂直方向に設置し、コリメート光を斜め方向から照射する。この場合、観察カメラにて透明粘土に添加した実トレーサと共に金型に投影されるトレーサ影を撮らえることができる。実トレーサが口金側に存在するほど、実トレーサおよびその影間の距離が一次比例して拡大することを利用し、実トレーサ挙動の追跡から流れ2次元情報（X-Y平面座標）、同時に実トレーサおよびその影間の距離に基づいた流れZ軸座標を算出することで、1台の観察カメラで流れの3次元可視化が可能となる。

2.2 実験準備

2.1節で述べた可視化原理を具現化するため、可視化材料を選定し、光軸ユニットを作製した。

(1) 可視化材料の選定

透明口金材料は押し出し成形時の成形圧力に耐えうる強度を確保可能なアクリル樹脂、透明粘土材料は透明度が高く、常温で流動性を有するシリコン系樹

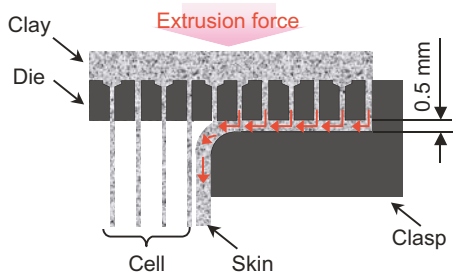


Fig. 3 Mechanism of cell and skin formation



Fig. 4 Defect cases of monolithic honeycombs

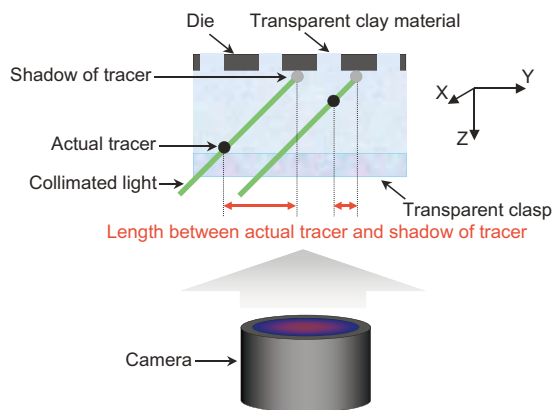


Fig. 5 Principle of three-dimensional visualization

脂を選定した。また、トレーサ材料は、スリット幅が4 mil (100 μm) である金型の使用を念頭に置き、スリット幅を通過し、粒子着色判断が可能であるメジアン径45 μmの炭化珪素 (SiC) を選定した。

本実験では、透明粘土材料として用いるシリコン樹脂の粘弾性を流動粘土と同等にすることで、粘土流れを再現できるものとした。SiC 粒子をシリコン樹脂に添加し、それらを均一分散させるためにはシリコン樹脂の混練を要する。この過程でシリコン樹脂の粘弾性が大きく低下する (Fig. 6) ことから、粘弾性の異なる種々のシリコン樹脂を用いて混練検討を重ねた結果、流動粘土と同等の粘弾性を示すシリコン樹脂 A を選定した (Fig. 7)。更に、種々の割合で SiC 粒子をシリコン樹脂へ添加し、混練後の分散程度を光学顕微鏡で観察した結果、SiC 粒子の添加割合はシリコン樹脂に対して0.01w%程度が好ましいと判断した。

(2) 光軸ユニットの作製

正確な光軸からコリメート光を照射するために、Fig. 8 に示す光軸ユニットを作製した。観察カメラに対して光源を45°に設置し、観察カメラおよび光源は同軸上に位置している。また、光源は高出力なメタハライドを使用し、ピンホール板をはさむ一対のアクロマティックレンズを通過させることでコリメート化を実現した (Fig. 9)。

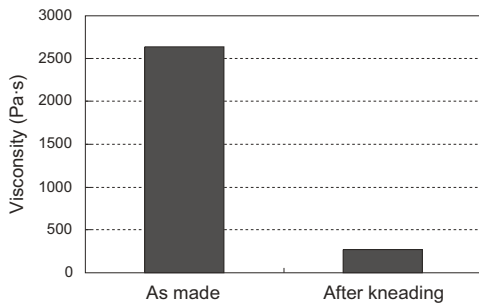


Fig. 6 Viscosity of silicone compound resin

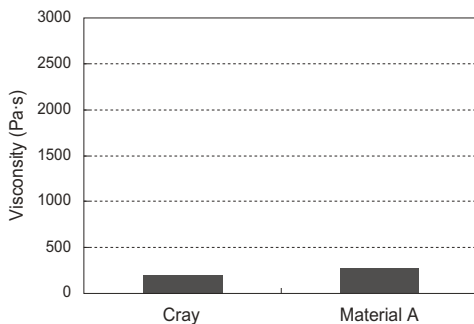


Fig. 7 Viscosity of silicone compound resin after kneading (Material A)

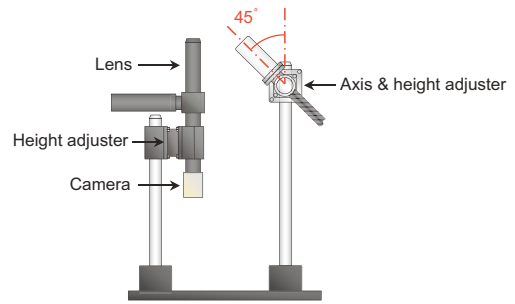


Fig. 8 Visualization system

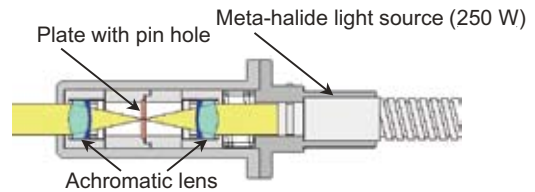


Fig. 9 Schematic image of collimated light

2.3 考案可視化手法の実験的確認

小型プランジャ成形機に四角状であるスリット幅が4 mil (100 μm) の金型および内径φ16 mmである透明口金を設置した。スキン形成領域はスキン厚さ (金型および透明口金間のクリアランス幅) を0.5 mmと設定し、透明口金の中心からφ30 mm以内とした。CCD (Charge Coupled Device) カメラを用いて、トレーサを添加した透明粘土が押し出される様子を観察し、押し出しを開始してから一定時間経過後の金型格子方向撮影画像を Fig. 10 に示す。この場合、コリメート光は紙面向かって斜め下方向から照射しているため、観察された黒点群の下方が実トレーサ、上方が金型に投影されたトレーサ影となる。一対の実トレーサおよびその影間の距離がそれぞれ異なる現象は、実トレーサおよびその影間の距離が拡大しているほど、実トレーサは透明口金側に存在していることを示しており、2.1節で述べた可視化原理を用いてスキン形成領域の粘土流れを把握できることを実験的に確認できた。

2.4 3次元座標取得方法

背景差分処理 (Fig. 11) および点群中心座標取得アルゴリズム (Fig. 12) を活用し、実トレーサおよび金型に投影されたトレーサ影の座標を取得した。具体的には、背景差分処理により抽出された設定検索範囲内の点群の内、輝度が基準値以下であり、かつ最大面積となるものを実トレーサあるいは金型に投影されたトレーサ影として自動認識させ、それらの中心座標を

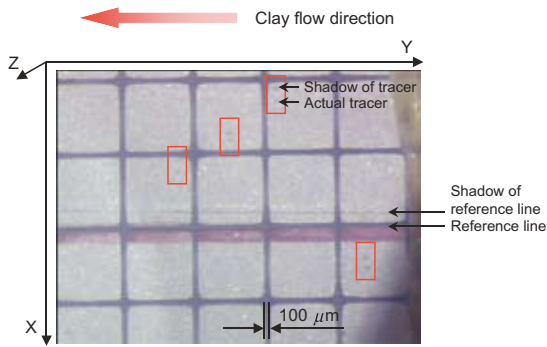


Fig. 10 Recorded image of clay flow in lattice direction of die

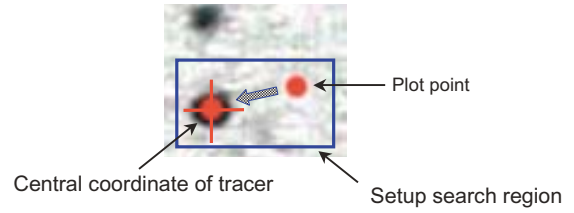


Fig. 12 Algorithm for obtain central coordinate of point group

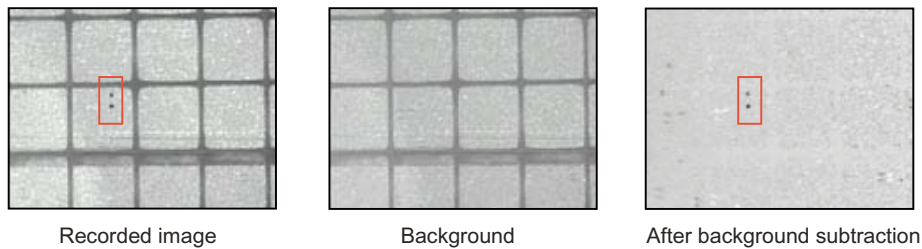


Fig. 11 Background subtraction

取得するものである。実トレーサの X-Y 平面座標を連続的に取得することで、スキン形成領域における流れ 2 次元情報を把握できる。更に、Fig. 10 に示すように、透明口金に記した基準線および金型に投影されたその影間の距離を、設定した金型および透明口金間のクリアランス幅として補正し、得られる補正係数を実トレーサ座標および金型に投影されたトレーサ影座標から算出される距離に適用することで、透明樹脂による屈折率の影響を無視することができ、正確な実トレーサ Z 座標の取得が可能となる。

3. 3次元可視化解析

3.1 押し出し成形および観察条件

Fig. 13 に示すように、プランジャ成形機に四角状であるスリット幅が 4 mil (100 μm) の金型および内径 φ70 mm である透明口金を設置した。スキン形成領域はスキン厚さ (金型および透明口金間のクリアランス幅) を 0.5 mm と設定し、透明口金の中心から φ80 mm 以内とした。トレーサを添加した透明粘土を 1.2 m/min (ハニカム構造体成形速度換算) で押し出した場合のスキン形成領域の粘土流れを高速カメラにて観察し、得られた撮影画像を 2.4 節で述べた 3 次元座標取得方法により連続的に解析することで金型格子方向および金

型対角 (45°) 方向の 3 次元流れ軌跡および流れ速度を比較した。なお、解析対象としたトレーサ数は金型格子方向について 59 点および金型対角 (45°) 方向について 78 点である。個々のトレーサについて、スキン形成領域内にその存在を確認した段階から 3 次元座標取得を開始し、セル壁部と接合する直前まで 3 次元座標取得を継続した。

3.2 スキン形成領域の 3 次元流れ軌跡

Fig. 14 には金型格子方向および金型対角 (45°) 方向における、それぞれ任意のトレーサ 10 点の流れ軌跡を Y-X 面および Y-Z 面で示す。この場合、金型は Z=0,

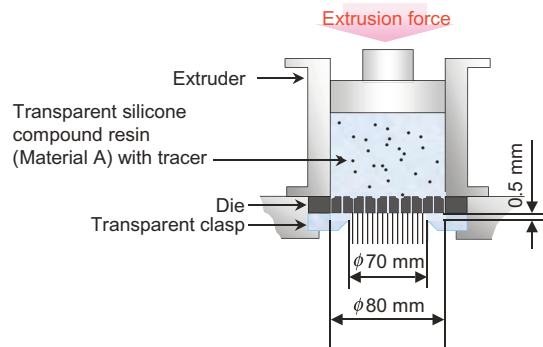


Fig. 13 Condition of extruding and visualization

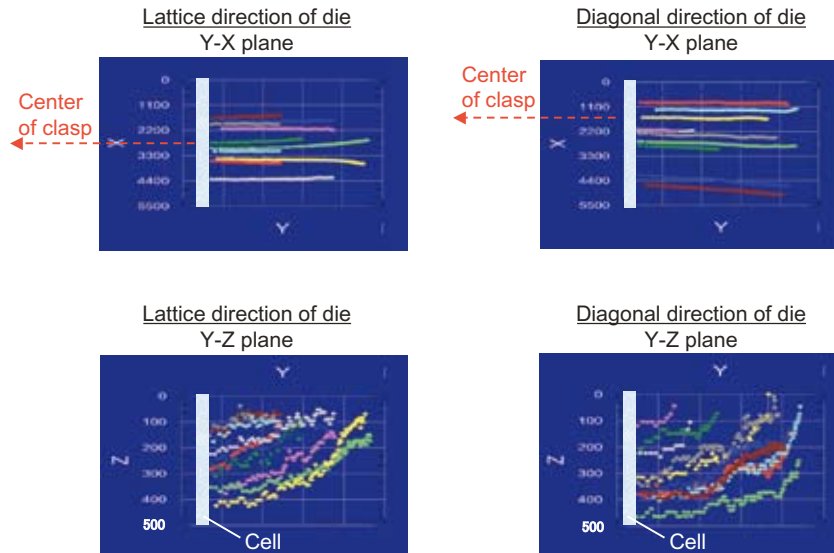


Fig. 14 Analysis results of clay flow

透明口金は Z=500 に位置している。また、個々のトレーサ軌跡毎に配色を変えて示す。

実トレーサの挙動を追跡して得られた Y-X 面の流れ軌跡より、スキン形成領域に現れた粘土は口金の中心へ向かってほぼ平行に流れている。また、実トレーサおよびその影間の距離に基づき導入された Y-Z 面の流れ軌跡より、スキン形成領域に現れた粘土は金型側から口金側へ曲線的に移行しており、金型外周側から現れた粘土ほど口金側へ移行している。これらの流れ軌跡は、金型格子方向および金型対角 (45°) 方向について同様である。

3.3 セル壁部と接合する直前の流れ速度

Fig. 15 に示すように、セル壁部と接合する直前の Y 軸値において、スキン形成領域 Z 軸を金型側から口金側に向かって a 領域 (Z = 0 ~ 100), b 領域 (Z = 100 ~ 200), c 領域 (Z = 200 ~ 300), d 領域 (Z = 300 ~ 400) および e 領域 (Z = 400 ~ 500) と定義する。Fig. 16 には金型格子方向および金型対角 (45°) 方向における各領域の流れ速度を示す。

セル壁部と接合する直前の流れ速度は、金型対角 (45°) 方向が金型格子方向よりも 5.8 ~ 14.6% 速くなっている。なお、a 領域は到達したトレーサ数が僅かであったため、速度を算出してない。また、速度分布は金型格子方向および金型対角 (45°) 方向共に金型側ほど速くなっている。これは、c 領域を中心部位として捉えた場合、d 領域および e 領域は口金との界面抵抗により流速が徐々に減少している一方で、b 領域におい

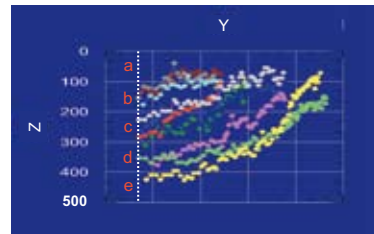


Fig. 15 Division of Z-axis coordinate

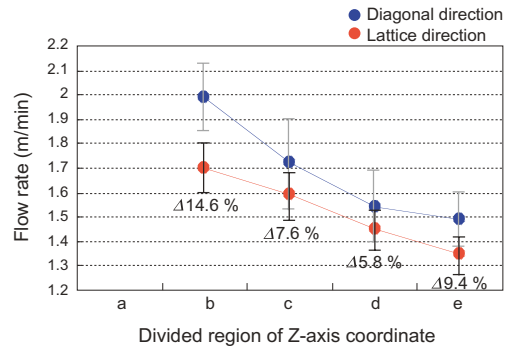


Fig. 16 Analysis results of flow rate

てはスキン形成領域への過剰量の粘土供給が起因して、金型との界面抵抗が緩和されていることが原因と考える。

4. 結言

トレーサを添加した透明粘土にコリメート光を照射し、実トレーサおよび金型に投影されるトレーサ影を撮らえることで、1台の観察カメラでスキン形成領域における粘土流れを3次元的に観察可能な新規3次元可視化手法を確立した。本手法を用いて金型格子方向および金型対角(45°)方向の粘土流れを解析した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 粘土流れ軌跡について、金型格子方向および金型対角(45°)方向共に、口金の中心に向かって平行に流れており、金型側から口金側へ曲線的に移行していた。

(2) セル壁部と接合する直前の流れ速度について、金型格子方向と金型対角(45°)方向には差が生じており、金型対角(45°)方向が金型格子方向よりも5.8～14.6%速くなっていた。

本可視化手法を活用することで、種々の押し出し成形条件下におけるスキン形成領域の粘土流れを把握することができる。これらの解析結果をシミュレーションに反映させることで、金型設計および口金設計を含む最適なハニカム構造体の設計指針が得られるものと期待する。

<著 者>



水谷 圭祐
(みずたに けいすけ)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
セラミック材料に関する研究に従事



光木 功次郎
(みつuki こうじろう)
(株)日本自動車部品総合研究所
試作試験部
セラミック材料に関する試作に従事



中西 友彦
(なかにし ともひこ)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
セラミック材料に関する研究に従事