Ⅳ. 結果・考察

　下杵の降下を伴う粉末金型充填の物理メカニズムを明らかとするため、下杵の降下速度を変化させた4つのケースについて数値解析を実行し、結果の比較を行った。

　図3に数値解析結果のスナップショットを示す。まずCase1-1の結果について述べる。時刻0.060 sにおいて、金型領域に流入した粉末は水平方向に広がるように散逸していた。時刻0.100 sにおいて、金型領域内の水平面に対して、中心部分に粉末があり、両方の側壁面沿いに気泡が存在していた。気泡は時間の経過とともに上昇し粉末領域上部から噴出した。次にCase1-2の結果について述べる。時刻0.020 sにおいて、粉末と降下中の下杵の間には隙間が開いていた。時刻0.060 sにおいて、金型領域内の水平面に対して、中心部分に粉末があり、両方の側壁面沿いに気泡が存在していた。気泡は時間の経過とともに上昇し粉末領域上部から噴出した。Case1-3および1-4においても、Case1-2と同様に、粉末と降下中の下杵との間に隙間がみられ、また、気泡の噴出が起きていた。このとき、粉末と降下中の下杵の隙間は、下杵の降下速度が大きいほど大きかった。粉末と降下中の下杵に隙間があった理由は、粉末粒子の落下速度と下杵の降下速度に差があったためと考えられる。

図4に下杵の降下速度に対する充填完了時間を示す。ここで、各ケースにおける粉末充填量が、Case1-1おける最終的な状態の99%の粉末充填量に達した時間をそれぞれのケースにおける充填完了時間とした。速度0 mm/s(Case1-1)において充填完了時間が最も長く、速度500 mm/s(Case1-3)において充填完了時間が最も短かった。速度 300 (Case1-2)および速度 700 mm/s(Case1-4)では、速度500 mm/s(Case1-3)のときよりも少し充填完了時間が長かった。また、速度300(Case-1-2)および速度700(Case1-4)では充填完了時間がほとんど同じであった。

図5に金型領域に対する粒子の流入フラックスの時間変化を示す。まずCase1-1の結果について述べる。フラックスの値は、充填開始から時刻0.12 s付近までほとんど一定であった。その後一度大きく上昇した後に減少し、時刻0.23付近で0となった。次にCase1-2の結果について述べる。充填の開始直後、つまり下杵の降下開始直後、の時刻において、フラックスの値が最も高かった。その後フラックスの値は時刻0.08 s付近まで減少し続けた。時刻0.08 s付近から0.12 s付近までフラックスの値に大きな変化はなかった。その後時刻0.12s付近から、フラックスの値はピークをとった後に0となった。Case1-3および1-4においても同様のフラックスの値の変化が見られた。つまり、フラックスの値は、充填開始直後に最も高い値であり、そこから減少した後に一定の値で推移する時間帯があり、充填終盤にピークをとった後0となった。しかしCase1-2, 1-3および1-4において、充填開始直後のフラックスの値は異なっていた。その値は、下杵の降下速度が大きいほど、大きかった。また、全てのケースにおいて、充填終盤にフラックスのピークが現れるタイミングが異なっていた。そのタイミングは、Case1-3において最も早く、Case1-1において最も遅かった。Case1-2および1-4では同程度の早さであった。また、充填終盤にフラックスのピークが現れる順番は、図4と見比べると、充填完了が早い順番と一致していた。ここで、充填初期における高いフラックスがCase1-1において見られなかったことに対して、他の3ケースにおいて見られたことから、下杵の降下によって充填初期（下杵の降下初期）に粉末の充填が促されていたことがわかる。ここから、下杵の降下速度が大きいほど充填初期に粉末の充填が促されたことが明らかとなった。さらに、充填終盤にフラックスのピークが現れる順番が充填完了の順番と一致していることから、このピークが現れる原因が粉末の充填完了時間に影響していることがわかる。

図6および図7に、充填開始初期において粉末粒子に作用していた、流体抗力および圧力勾配による力をそれぞれ示す。図6において、Case1-1では流体抗力が粉末粒子にほとんど作用していなかった。一方、Case1-2, 1-3および1-4において、金型の外部からその内部へと向かう方向に、流体抗力が粉末粒子に作用していた。作用していた流体抗力は、下杵の降下速度に比例して大きかった。またCase1-2, 1-3および1-4において、粉末粒子に作用していた流体抗力は時刻0.008 s（下杵の降下開始直後）に最も大きく、時間の経過とともに減衰していた。図7をみると、圧力勾配による力も、図6における流体抗力と同様に、Case1-2, 1-3および1-4においてのみ金型の外部からその内部へと向かう方向に粉末粒子に作用していた。また、下杵の降下速度に比例して作用していた力が大きかったこと、下杵の降下開始直後に力が最も大きく時間の経過とともに減衰していたことも、図6における流体抗力と共通していた。ここから、図5においてCase1-2, 1-3および1-4で充填初期にフラックスが高い値をとった理由は、流体抗力および圧力勾配による力が合わさって粉末粒子に働き、粉末粒子を金型内に引き込んだためである。つまり、下杵の降下は、流体抗力と圧力勾配による力を、その降下初期に、粉末に作用させることによって粉末の充填を促進している。

上述したように、下杵の降下を伴う粉末金型充填において、充填終盤に現れるフラックスのピークは粉末の充填完了時間と密接に関わっている。粉末の充填完了時間の短さが下杵の降下速度と比例しない理由を明らかとするため、下杵の降下を伴うCase1-2, 1-3および1-4について、充填の終盤における結果を比較し考察を行う。

図8に充填終盤における金型領域周辺での空隙率および空気の速度ベクトルを示す。図中で白く示されている領域が粉末粒子の割合が多い領域、黒く示されている領域が空気の割合が多い領域である。なお、この図は金型領域の奥行方向に対して中心位置の断面を示している。

まずCase1-2の結果について述べる。時刻0.070 sにおいて、金型領域の水平面に対して、中心に粉末領域、両方の側壁面沿いに気泡領域が存在していた。その後、時刻0.070 sから0.100 sにかけて、粒子の流入路が細くなっていた。気泡は、時間の経過とともに上昇し、金型領域から排出されていった。また、気泡の排出完了後に粉末が金型領域に入り込み、充填が完了した。Case1-2における粒子の流入路の様子および気泡の動きは、Case1-3および1-4においても同様に見られた。次に、各ケースの結果の相違点について述べる。相違点は、粉末の流入路の細さおよび気泡の排出が完了する早さの2点である。時刻0.070 sにおいて、下杵の降下速度が大きいほど粉末の流入路が細かった。さらに、時刻0.130 sにおいて、Case1-4では粉末の流入路がほとんど遮断されていた。時刻0.160 sにおいて、気泡領域の大きさに差が見られた。Case1-3では、金型領域が粉末で完全に充填されている一方で、Case 1-2および1-4においては金型領域内に気泡が依然として残っていた。ここで、結果より明らかなように、図5においてフラックスの値が充填の後半でピークをとる理由は、気泡が金型領域から排出されることによって粉末が勢いよく流入するためである。つまり、金型領域からの気泡の排出は、粉末の充填完了時間に対して重要な影響を持っている。全てのケースにおいて、時刻0.070 sから0.100 sにかけて粒子の流入路が細くなった理由は、気泡が上昇するだけでなく水平方向へ移動したためと考えられる。次に、下杵の降下速度が大きいほど金型内部における粉末領域が細かった理由は、図3の時刻0.020 sに見られるように、降下中の下杵と粉末の隙間が大きいことによって金型内に取り込まれた空気の量が多かったためと考えられる。また、Case1-3に対して、Case1-2および1-4で気泡の排出完了が遅れた理由は、それぞれ異なるものである。まずCase1-2において気泡の排出完了が遅れた理由は、下杵の降下速度が遅かったために充填初期における粉末の充填が遅れたためである。一方Case1-4において気泡の排出完了が遅れた理由は、金型内部での粉末領域の細さから、気泡が上向き方向よりも水平方向に進みやすかったためと考えられる。つまり、Cas1-3と比較して、Case1-4において粉末の充填完了時間が長かった理由は、金型内により多くの空気が入り込み粉末の流入路を細くし、気泡の排出完了が遅れたためである。

以上より、下杵の降下を伴う粉末充填の物理メカニズムについて、2つの重要な性質が明らかとなった。1つ目の性質は、下杵の降下初期に流体抗力および圧力勾配による力が作用することによって、粉末の充填が促されることである。ここで、流体抗力および圧力勾配による力の影響は、下杵の降下速度が大きいほど強くなる。2つ目の性質は、下杵の降下速度が金型領域内における気泡の働きに影響を与えることである。下杵の降下速度が大きいほど、金型領域内には多量の空気が入り込み、粉末の流入路を細くする。粉末の流入路が細すぎる場合には気泡が上手く上昇せず、気泡の排出が遅れる。気泡の排出が遅れことによって、粉末の充填完了も遅れる。また、この2つの性質が合わさった結果として、下杵の降下速度に対する粉末の充填完了時間は極小値をとる。