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。時刻0.060 sにおいて、金型領域に流入した粉末は散逸し水平方向に広がっていた。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。その後、気泡は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、降下中の下杵と隙間の開いた状態で、粉末が金型領域に流入していた。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。その後、気泡は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、降下中の下杵との間に隙間がある状態での粉末の流入および気泡の噴出が起きていた。降下中の下杵と粉末間の距離は、下杵の降下速度が大きいほど長かった。降下中の下杵と粉末の間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。またこの隙間があったために、金型内部に空気が入り込み、気泡が生じたと考えられる。

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、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、各ケースにおける充填完了時間とした。Case1-1において充填完了時間が最も長く、Case1-3において充填完了時間が最も短かった。Case1-2および1-4における充填完了時間は同程度であった。

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り、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と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。

　ここで、Case1-1では見られない充填初期における高いフラックスが他の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、その降下初期に粉末の充填が促されていたことがわかる。充填終盤にフラックスのピークが現れるタイミングの早い順番は、充填完了の早い順番と一致していた。また、充填終盤にフラックスのピーク現れる理由は、気泡が金型領域から噴出したことにより、粒子が勢いよく金型領域に流れ込むためである。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ること、および、気泡が排出され充填が完了される時間は下杵の降下速度に比例していないことが明らかとなた。

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4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。一方他の3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、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くことによって、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。

上述したように、下杵の降下速度に比例して充填完了時間が早くならない理由は、気泡の排出にある。金型内部における気泡の挙動について明らかにするため、下杵の降下を伴うCase1-2, 1-3および1-4の結果を比較し、考察を行う。

図12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多く存在する領域、黒く示されている領域が空気の多く存在する領域である。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、気泡の移動に伴い、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。次にCase1-3および1-4の結果について述べる。どちらのケースにおいても、Case1-2と同様に、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おり、その後気泡の移動に伴って粉末の流入路が細くなっていた。しかし、時刻0.070 sおよび0.100 sにおいて、粉末の流入路の細さはケース毎に異なっており、下杵の降下速度が大きいほど細かった。また時刻0.130 sにおいて、Case1-4では粉末の流入路が潰れていた。さらに、金型領域からの気泡の排出完了時刻も異なっていた。時刻0.160 sにおいて、Case1-4で気泡が金型領域内に多く残っていた。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9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多くの空気の量が取り込まれたためと考えられる。また、Case1-4において気泡の排出が遅れた理由は、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。

ここから、下杵の降下速度が大きくなるほど、金型内部に気泡を取り込みやすいことから、粉末の流入路が細くなりやすいことが明らかとなった。また、粒子の流入路が細すぎる場合には、それが気泡の水平方向の移動により潰れてしまい、粒子の流入が大きく妨げられる、充填完了を遅らせてしまうことが明らかとなった。

以上より、下杵が降下速度の変化が粉末の充填メカニズムに与える影響について、2つの重要な影響が明らかとなった。1つ目の影響は、下杵の降下初期に粉末粒子に作用する流体抗力および圧力勾配による力を変化させることである。下杵の降下速度が大きいほど、粉末粒子に作用するこれらの力は大きくなる。この作用は、粉末の充填が促進させ、充填完了時間を短くする。2つ目の影響は、気泡の排出が完了する早さを変化させることである。下杵の降下速度が大きいほど、粒子の流入路が細くなるため気泡が上方向だけでなく水平方向にも移動しやすくなる。この作用は、気泡の排出を遅れさせ、粉末の充填完了時間が長くする。また、これら2つの影響が合わさることにより、下杵の降下速度に対して充填完了時間は極小値をとることが明らかとなった。