Ⅳ. 結果・考察

　下杵の降下を用いる粉末金型充填の物理メカニズムを明らかとするため、数値解析を実行した。Case1では、粉末の自然落下と比較することにより下杵の降下を用いる粉末金型充填の物理メカニズムを調べた。Case2では下杵の降下速度の変化により充填の物理メカニズムがどのように変化するかを調べた。

A. 粉末の自然落下との比較

　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。Case 1-1および1-2の結果を比較する。時刻0.020 sにおいて、金型領域内にある粉末の位置に差がみられた。Case 1-2において、金型領域のより深い位置まで粉末が流入していた。また、粉末領域からの気泡の噴出が、Case1-1では時刻0.180 sで確認されたのに対し、Case1-2では時刻0.140 sで確認された。つまり、Case1-1と比較して、Case1-2において粉末の充填が早く進んでいた。

図4および図5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Case1-2では、金型の外部からその内部へと向かう方向に、流体抗力が強く粉末粒子に作用していた。またCase1-2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5をみると、圧力勾配による力も、流体抗力と同様に、Case1-2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強く粉末粒子に作用していた。また、圧力勾配による力も、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6に金型内部における粒子数の時間変化を示す。充填の開始直後から、Case1-1とCase1-2の間には金型内部における粒子数に差があった。また2つのケースを比較すると、金型内部における最終的な粒子数はほとんど同じ値となった。これは、いずれのケースにおいても、最終的に金型内部に充填される粒子数がある程度同じになるためと考えられる。

図7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。フラックスの値は、充填開始直後に最も高く、その後は時刻0.05 s付近まで減少し続けた。なお、減少が終わった時刻0.05 s付近では、フラックスの値がCase1-1とほとんど同じとなった。時刻0.05 s付近から時刻 0.10 s付近にかけて、フラックスの値がほぼ一定であった。その後、フラックスの値は、時刻0.10 s付近から上昇した後に減少し、時刻0.18 s付近で0となった。まず、Case1-1および1-2における結果の共通点について考察する。どちらのケースにおいても、フラックスの値が充填の終盤に一度上昇した後に0となった。図3において、フラックスの上昇が見られる時刻のスナップショットをそれぞれのケースについて確認すると、気泡が金型領域の開口部を通り粉末領域からの噴出に向かっている時間帯であることがわかる。ここから、フラックスの値が上昇した理由は、金型内部に溜まった気泡が排出されたことにより、その気泡が存在していた領域に、粉末粒子が勢いよく流入したためと考えられる。またフラックスの値が0となったことは、金型領域が粉末で満たされたことによってそれ以上粉末が入らず、充填が終了したことを意味している。つまり、Case1-2において充填がより早く完了したといえる。次にCase1-1およびCase1-2の結果の相違点について考察する。充填開始直後におけるフラックスの値に差があり、Case1-1と比較して、Case1-2において大きな値であった。また、Case1-1では、フラックスの値が充填開始から時刻0.12 s付近までほとんど一定であった。それに対しCase1-2では、フラックスの値が、充填開始直後から時刻0.05 s付近まで減少し続け、時刻0.05 s付近でCase1-1とほとんど同じ値となった。ここから、Case1-2において、時刻0.05 s付近までに、粉末が金型領域に多く流入し、充填が促進されていたことがわかる。また、その作用によって、Case1-2において充填がより早く完了したことがわかる。

図8に、Case1-2において、充填開始初期に流体抗力および圧力勾配による力が強く作用した粒子の数の時間変化を示す。ここでは、粒子に対して鉛直下向き方向に重力よりも大きな力が加わったとき、力が強く作用したとみなした。なお、Case1-1においては充填開始初期に流体抗力および圧力勾配による力が強く作用した粒子の数は、どちらも0であった。流体抗力または圧力勾配による力が強く作用した粉末粒子の数は、どちらも下杵の降下開始直後にもっとも多く、その後すぐに減少した。ここから、下杵の降下開始直後に流体抗力および圧力勾配による力が粉末粒子にそれぞれ強く作用したことがわかる。この作用によって、Case1-2において、下杵の降下開始直後に粉末の充填が促された。また、その結果として、粉末の充填完了時間が短縮された。

以上より、下杵の降下を用いる粉末金型充填の物理メカニズムが明らかとなった。下杵の降下によって、その降下初期の時間帯に流体抗力および圧力勾配による力が粉末粒子に作用することにより、粉末の充填が促される。そのため、下杵の降下を用いると粉末の充填完了時間が短縮される。ここで、下杵の降下による充填時間の短縮について、従来の研究では圧力勾配による力の影響のみが注目されてきたが、流体抗力も大きく影響を与えていることは本研究で初めて見いだされた。

B. 下杵の降下速度の影響

　下杵の降下速度の変化が粉末の充填に与える影響を明らかにするため、下杵の降下速度を100, 200, ..., 700 mm/sと変化させた7ケースについて、数値解析を実行し比較を行った。

図9に数値解析結果のスナップショットを示す。ここでは、7ケースのうちCase 2-1, 2-3, 2-5および2-7の結果のみを示す。まずCase2-1の結果について述べる。降下する下杵と粉末の間には隙間がなく、粉末は下杵の上にのった状態のまま金型内に流入していた。そのため、いずれの時刻においても金型領域は粉末で充満されており、金型内部に気泡は見られなかった。次にCase2-3の結果について述べる。時刻0.020 sおいて、降下する下杵との間に隙間がある状態で、粉末が金型内に流入していた。また時刻0.060 sから0.180 sにかけて、気泡が金型内に生じ、上昇して噴出していた。Case2-5および2-7においても、Case2-3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。ここで、他のケースと明らかに充填の様子が異なることから、Case2-1は、下杵の降下速度が十分でなく、下杵の降下が充填に与える影響を分析にするのに不適切と考えられる。そのため、以降ではCase2-1を除いた結果について述べる。

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10および図11に、下杵の降下開始直後の時間帯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10において、全てのケースで流体抗力が金型の外部からその内部へと向かう方向に、粉末粒子に対して作用していた。さらに、流体抗力は、下杵の降下開始直後(0.002 s)の時間に最も強く、その後減衰していた。またケース毎の結果を比較すると、いずれの時刻においても、下杵の降下速度が大きいほど粉末に作用していた流体抗力が強かった。図11をみると、圧力勾配による力は、流体抗力と同様に、下杵の降下開始直後に最も強く粉末粒子に作用し、その作用は下杵の速度が大きいほど強かった。ここから、下杵の降下は、その速度が大きいほど、開始直後の時間帯に、強い流体抗力および圧力勾配による力を粉末粒子に作用させ、その結果として粉末を金型内部へ引き込んでいると考えられる。

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Case2-3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Case2-5および2-7の結果について述べる。どちらのケースにおいても、Case2-3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、Case2-7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、Case2-7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、Case2-7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。

図13に下杵の降下速度に対する充填完了時間の変化を示す。下杵の降下速度500 mm/s以下の範囲において、下杵の降下速度が大きいほど、充填完了時間は短かった。一方下杵の降下速度500 mm/s以上の範囲において、下杵の降下速度が大きいほど、充填完了時間は長かった。つまり、下杵の降下速度が500 mm/s(Case2-5)の場合に、充填完了時間は最も短くなった。下杵の降下速度が500 mm/s以下の範囲において、下杵の降下速度が大きいほど充填完了時間が短かった理由は、図10および11で見られるように、下杵の降下初期に流体抗力および圧力勾配による力が粉末に強く作用し、充填が促されやすかったためと考えられる。また下杵の降下速度が500 mm/s以上の範囲において、下杵の降下速度が大きいほど充填完了時間が長かった理由は、図12で見られるように、粒子の流入路が細いことによって気泡が素早く上昇せず排出が遅れたためと考えられる。これらの点について、以下で定量的に結果を確認していく。

図14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Case2-3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。Case2-5および2-7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、充填開始直後のフラックスの値および充填終盤のピークが現れるタイミングに差が見られた。充填開始直後のフラックスの値は、下杵の降下速度が大きいほど高かった。充填終盤のピークが現れるタイミングは、Case2-5において他の2ケースよりも早かった。下杵の降下速度が大きいほど充填開始直後に現れるフラックスの最大値が大きかった理由は、図10および11に見られるように、粉末粒子に作用した流体抗力および圧力勾配による力が大きかったためと考えられる。次に充填終盤のピークが現れるタイミングが異なった理由について述べる。充填終盤のピークは、気泡の排出が完了した直後に、粉末が勢いよく金型領域に流入することによってつくられる。そのため、充填終盤のピークが現れるタイミングが異なった理由は、図12に見られるように、金型内部からの気泡の排出完了時間に差があったためと考えられる。ここから、下杵の降下速度が大きいほど流体抗力および圧力勾配による力の作用によって充填初期に粉末の充填が促されること、気泡が排出される早さが充填完了時間の長さに影響を与えていることわかる。充填初期に流体抗力および圧力勾配による力が粉末の流入に与えた影響、および気泡の排出完了時間について、以下で定量的に評価する。

充填開始直後流体抗力および圧力勾配による力が粉末の流入に与えた影響について、定量的に評価を行う。図15および図16に、充填開始初期において、流体抗力および圧力勾配による力が強く作用した粒子の数の時間変化を示す。ここで、鉛直下向き方向に重力よりも大きな力が加わったものを、強く作用したとみなした。図15および16より、流体抗力および圧力勾配による力の両方とも、充填開始直後に多くの粒子に強く作用していたことがわかる。このとき、下杵の降下速度が大きいほど、多くの粒子に強く作用していた。ここから、下杵の降下速度が大きいほど、下杵流体抗力および圧力勾配による力が、充填初期に粉末に強く作用し金型内部に引き込んだことがわかる。

次に、気泡の排出が完了する早さについて定量的に評価する。図17に、充填終盤における、金型内部の気泡体積の変化率を示す。まず、Case2-3の結果について述べる。変化率は、時刻0.13 s付近までほとんど一定であった。その後、時刻0.13 s付近から負のピークをとった後0となった。Case2-5および2-7においても同様に、負のピークをとったが、そのピークが出現したタイミングが異なった。このタイミングは、Case2-5において最も早かった。変化率が負のピークをとった理由は、気泡が勢いよく排出されたことを意味している。つまり、Case2-5において最も気泡の排出完了が早かった。上で述べたように、気泡の排出完了後に粉末が金型領域に流れ込むことによって充填が完了する。したがって、Case2-5において、充填完了時間がCase2-7よりも短かった理由は、Case2-7において気泡の排出が遅かったためである。

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が明らかとなった。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。さらに、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。