Ⅳ. 結果・考察

　粉末金型充填において下杵の降下が粉末の充填に与える影響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が粉末の充填に与える影響を調べた。Case2では下杵の降下速度が粉末の充填に与える影響を調べた。

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の結果を見ていく。時刻0.060 sにおいて、金型領域に流入した粉末粒子は散逸し水平方向に広がっていた。時刻0.100 sにおいて、金型領域内では、粉末粒子が中心部分にあり、気泡が壁面沿いに存在していた。その後、気泡は、金型領域内の中心部分にある粉末粒子の流入路を潰しながら上昇し、粉末領域上部から噴出した。次にCase1-2の結果を見ていく。時刻0.020 sにおいて、降下中の下杵と少し隙間の空いた状態で、粉末粒子が金型領域に流入していた。時刻0.060 sにおいて、金型領域内では、粉末粒子が中心部分にあり、気泡が壁面沿いに存在していた。その後、気泡は、金型領域内の中心部分にある粉末粒子の流入路を潰しながら上昇し、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と考えられる。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の結果を示した。ここから、下杵の降下は、その降下の開始初期に粉末粒子に強い力を作用させ、金型内部に粉末粒子を引き込んでいると考えられる。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つのケースを比べると、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、金型内部に充填される粒子がある程度同じ数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。Case1-1において、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。一方Case1-2において、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付近までは、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の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、Case1-1よりもCase1-2においてフラックスの値が先に0となったことと合わせて考えると、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と考えられる。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といえる。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。Case1-2において、この作用により粉末粒子が金型内に引き込まれ、充填の初期に高いフラックスが現れたと考えられる。以上より、下杵の降下によって粉末の充填時間の短縮が起きる理由が科学的に明らかとなった。充填時間の短縮が起きる理由は、下杵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強く作用し、粉末粒子の金型内部への流入が促されるためである。また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が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の結果のみが示されている。まずCase2-1の結果を見ていく。粉末は降下する下杵の上に積まれた状態のまま金型内に流入していた。また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、気泡が溜まることはなかった。次にCase2-3, 2-5, 27の結果を見ていく。時刻0.020 sおいて、粉末が降下する下杵と隙間が空いた状態で金型内に流入していた。このとき、下杵の降下速度が大きいほど、下杵と粉末の隙間が大きかった。また時刻0.060 sから充填の終盤において、気泡が金型内に形成され後上昇して噴出していた。さらに、この3ケースと同様の結果が、図9に示されていないCase2-2, 2-4, 2-6においても見られた。ここから、Case2-1は、下杵の降下速度が十分でなく、粉末の充填に与える影響について他のケースと比較するには不適切と考えられる。したがって、以降ではCase2-1を除いた結果のみを示す。

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、流体抗力が粉末粒子に作用していた。全てのケースにおいて、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。またケース間の結果を比較すると、下杵の降下速度が大きいほど、作用していた流体抗力がより強かった。図11をみると、圧力勾配による力も流体抗力と同様の結果を示した。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、強い力を粉末粒子に作用させ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見ている。まず、全てのケースに共通している結果を見ていく。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、壁面沿いに気泡領域が存在していた。このとき、金型内部における速度ベクトルは、粒子が流入している領域で下向き、気泡のある領域で上向きであった。気泡は、時間の経過とともに上昇し、金型領域から流出していった。次に、相違点を見ていく。時刻0.070 sおよび0.100 sにおいて、下杵の降下速度が大きいほど、金型領域内にある粒子の流入路が細かった。また、下杵の降下速度が大きいほど、時刻0.130 sおよび0.160 sにおいて、気泡が金型領域から排出される早さが異なっていた。気泡の排出は、Case2-5, 2-3そして2-7の順に早かった。ここで、下杵の降下速度が大きいほど粉末の流入路が細かった理由は、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の大きいことにより、金型内に取り込まれる空気の量が多かったためと考えられる。また気泡の排出が遅れた理由は、粉末の流入路が細くなった結果として、気泡が上向き方向よりも水平方向に進みやすくな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くなるほど、充填完了時間は減少した。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くなるほど、充填完了時間は500 mm/sのときの値から増大した。つまり、下杵の降下速度が500 mm/sの場合に、充填完了時間は最も小さくなった。

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。示した3ケースの全てにおいてフラックスの時間変化の特徴は共通しており、2つの特徴が見られた。1つ目の特徴は、充填の開始直後、つまり下杵の降下開始直後の時間にフラックスの値が最も高い値でありその後減少したことである。2つ目の特徴は、充填の終盤に、フラックスの値が上昇したのち0となったことである。

2つの特徴それぞれについて、ケース間で異なる点を見ていく。1つ目の特徴について、下杵の降下速度が大きいほどフラックスの最大値も大きかった。2つ目の特徴について、Case2-5において、最も早く、フラックスの値が上昇しはじめその後0となった。また、Case2-3および2-7において、フラックスの値が上昇しはじめる時刻およびその後に0となる時刻がほとんど同じであった。

下杵の降下速度が大きいほどその降下初期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。Case2-5において、最も早く、フラックスの値の上昇および0その後に0となった理由は、図12に見られるように、金型内部からの気泡の排出が早いためと考えられる。ここから、

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、下杵の降下開始直後に最も強く粉末粒子に作用し、その後すぐに減衰したことがわかる。ここから、流体抗力および圧力勾配による力が、粉末を金型内部に引き込むことにより、充填初期の高い流入フラックスを出現させたことがわかる。

以上より、下杵の降下速度の変化が充填に与える２つの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。２つ目の影響は、気泡の排出促進作用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金型内部に発生する渦状の速度ベクトル場が弱まり、気泡排出の働きが弱まる。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理由が科学的に明らかとなった。