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の結果を見る。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の結果を見る。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、粉末が金型領域に流入している深さに差がみられた。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、気泡の粉末領域からの噴出が、Case1-1では時刻0.0180 sで確認されたのに対し、Case1-2では時刻0.0140 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、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見られた。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Case1-1とほとんど同じ値となった。その後、時刻0.10 s付近からフラックスの値が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噴出しようとし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、粉末粒子が、金型内部においてその気泡が存在していた領域に、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。加えて、Case1-1よりもCase1-2においてフラックスの値が先に0となったことから、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、フラックスの値が、Case1-1で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のに対し、Case1-2では充填開始直後から時刻0.05 s付近まで減少し続けその後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。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ことおよびその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。時刻0.020 sを見ると、下杵の降下速度が大きいほど、降下中の下杵と粉末粒子の隙間がより大きかった。またCase2-1を除く3ケースにおいて、金型内部へ流入した空気が気泡として存在する様子およびその気泡が噴出される様子が見られた。図10に金型内部における粒子数の時間変化を示す。Case2-1のみ、他のケースと異なり、金型内の粒子数が一定の変化をした。これは、粉末の自然落下速度に対して下杵の降下速度が十分に大きくなかったためと考えられる。Case 2-3, 2-5および2-7では金型内の粒子数の推移の様子が類似していた。図11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以下の領域範囲において、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、充填完了時間は極小値となった。またCase2-1においてのみ、下杵を降下させなかった場合よりも充填完了時間が長かった。これは先程述べたように、粉末の自然落下速度に対して下杵の降下速度が十分に大きくなかったためである。Case2-1の結果には下杵の降下の影響が見られないため、これより後では他の6ケースのみの比較を行う。図12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が最も高い値をとりその後減少することである。このとき、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。すなわち、充填完了時間が最も短かったCase2-5ではなくCase2-7においてフラックスの最大値が大きかった。２つ目の特徴は、充填の終盤に、フラックスの値が、ピークをとりその後0へと収束することである。このとき、充填完了時間が最も短かったCase2-5において、フラックスの値が、最も早くピークをとりその後0へと収束した。Case1の結果で述べたように、充填の終盤にフラックスのピークが現れる理由は、金型内部に溜まった気泡が排出されることによって、粉末粒子がその気泡が占めていた金型内部の領域に勢いよく流れ込むためである。ここで、フラックスの値が0に収束することは粉末の充填完了を意味することから、Case2-5において充填の完了が最も早かった理由は、金型内部からの気泡の排出の完了が最も早かったためと考えられる。この２つの特徴について、以下で詳しく考察していく。図13および図14に、充填開始初期において粉末粒子に作用した、流体抗力および圧力勾配による力をそれぞれ示す。図13において、下杵の降下速度が大きいほど、粉末粒子に作用する流体抗力の影響が大きかった。また図14をみると、流体抗力と同様に、下杵の降下速度が大きいほど、粉末粒子に作用する圧力勾配による力の影響が大きかった。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。図17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となる位置の断面を観測したものである。空気の速度ベクトルが、粉末粒子が金型中心部で流入している領域では鉛直下向き方向、気泡領域では上向き方向であり、金型内部全体としては渦状に形成されていた。この渦状の速度ベクトル場の働きにより気泡の排出は促進されたと考えられる。また、下杵の速度が大きいほど、粉末粒子の流入路が細くなっていた。これらのことから、下杵の降下速度が大きいほど、その粒子の流入路の細さから金型内部での渦の働きが弱く、気泡の排出が促進されにくかったと考えられる。このため、充填の初期にフラックスの値が最も高かったCase2-7で気泡の排出が遅れ、結果としてCase2-5において充填完了が早くなったと考えられる。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。