

Case 1-1 (Gravity), Case 1-2 (Suction)

Type of filling??, Punch velocity

Case 2-1~7 (100 ~ 700 mm/s)

IV. 結果・考察

粉末金型充填における下杵の降下の影響を明らかにするため、数値解析を実行した。Case1では、下杵の降下の有無を変化させた結果を比較することにより、下杵の降下が充填に与える影響を調べた。Case2では下杵の降下速度が充填に与える影響を調べた。

A. 下杵の降下の影響

図3に数値解析結果のスナップショットを示す。なおCase1-2において、下杵は計算開始と同時に降下を開始するものとした。Case1-1において、粉末は散逸した状態で金型内に流入した。これは、粉末粒子が金型内部に存在していた空気の抵抗を受けたためと考えられる。一方Case1-2においては、粉末同士が密着しながら金型内に流入した。Case1-1および1-2の両方に共通して、金型内部に溜まった空気が気泡となり、その気泡が上昇し噴出する様子が見られた。

図4に金型内部における粒子数の時間変化について示す。計算の開始直後から、Case1-1とCase1-2では金型内部における粒子数に差が見られた。またどちらのケースにおいても、金型内部における粒子数は収束した。これは、金型内部が粒子で満たされ充填が終了したためである。Case1-2における粒子数の収束はCase1-1よりも早かった。ここから、下杵の降下を伴うCase1-2において充填がより早く終了したことがわかる。

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。Case1-1において、フラックスの値は、計算開始から時刻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0となった。一方Case1-2において、フラックスの値は、計算開始直後に最も高く、その後は時刻0.05 sまで減少し続けCase1-1とほとんど同じとなった。また、時刻0.1 s付近から、Case1-1と同様に、フラックスの値が上昇した後に減少し0となった。Case 1-2において、フラックスの値が充填の初期に高かったことから、下杵の降下初期の時間帯に粉末粒子の金型内への流入が促されたことがわかる。またCase 1-1および1-2の両方において、充填の終盤にフラックスの上昇が見られた理由は、金型内部に溜まった気泡が排出されたことにより、粉末粒子が金型内に勢よく流入したためと考えられる。

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る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においては流体抗力がほとんど作用していなかった。一方でCase1-2において、粒子のベッドから金型内部へ向かう方向に、流体抗力が強く粉末に作用していた。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7をみると、圧力勾配による力も同様の結果であった。

図8に、流体抗力および圧力勾配による力について、鉛直下向き方向に、それぞれが重力より強く作用した粉末粒子の数の時間変化を示す。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それぞれ粉末粒子に強く作用したことがわかる。また、この作用により、Case1-2において充填の初期に高いフラックスが現れたことが説明される。

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。下杵の降下による充填時間の短縮に対して、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の7ケースについて、数値解析を実行した。

図9に数値解析結果のスナップショットを示す。なお、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。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間に隙間が大きく空いていた。またCase2-1では、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なかった。

図10に金型内部における粒子数の時間変化について示す。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。また、Case 2-3, 2-5および2-7では金型内の粒子数の変化が類似していた。

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。Case2-1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11において充填完了時間は500 mm/sの場合に極小値となった。

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のピークが現れることである。このとき、充填完了時間が最も短かったCase2-5において、ピークの出現がもっとも早かった。Case1の結果で述べたように、充填の終盤に現れる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り粉末粒子が金型内に勢いよく流れ込むためである。以上の2つの特徴を合わせて考えると、Case2-5において充填の完了が最も早かった理由は、気泡の排出が早かったためと考えられる。その理由については、後ほど考察する。

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ている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、流体抗力および圧力勾配による力について、鉛直下向き方向に、重力より強く作用した粉末粒子の数の時間変化をそれぞれ示す。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作用し、その後すぐに減衰したことがわかる。

図17に充填終盤における金型内部での気泡の様子および空気の色を示す。図中で白く示されている領域が粉末粒子が多く存在する領域、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。空気の色ベクトルは、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、金型内部では渦状に形成されていた。この渦状の色ベクトル場の形成により気泡の排出が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、気泡の排出が遅くなると考えられる。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よりも、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影響について、2つのことが明らかとなった。

1つ目は、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に対する影響である。下杵の降下速度が大きいほど、これらの力はより強く粉末粒子に作用する。

2つ目は、気泡の排出速度に対する影響である。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色ベクトル場が弱まり、気泡の排出が遅れる。

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性質が科学的に明らかとなった。

