表3. Simulation conditions

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Type of filling | Punch velocity [mm/s] |
| Case 1-1 | Gravity filling | - |
| Case 1-2 | Suction filling | 500 mm/s |
| Case 2-1 | Suction filling | 100 mm/s |
| Case 2-2 | 200 mm/s |
| Case 2-3 | 300 mm/s |
| Case 2-4 | 400 mm/s |
| Case 2-5 | 500 mm/s |
| Case 2-6 | 600 mm/s |
| Case 2-7 | 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. 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。ここでCase1-2における下杵の降下は、計算開始と同時に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、充填の終盤に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を示す。計算の開始直後から、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。またどちらのケースにおいても、金型内部における粒子数は最終的に一定の値へ収束した。粒子数の収束は、金型内部が粒子で満たされたことにより生じたと考えられ、金型内の充填が完了したことを意味する。Case1-2における粒子数の収束はCase1-1よりも早く起きた。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完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に収束した。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付近まで減少し続けCase1-1とほとんど同じとなった。その後、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に収束した。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。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た、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7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。図8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。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。また、この作用により粉末粒子が金型内に引き込まれ、その結果として、Case1-2において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。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。