濃厚粒子分散系の流動反転時における壁面近傍粒子の特異挙動

Anomalous behavior of dispersed particles near the wall surface after flow reversal of concentrated suspension

○学 五十嵐 文弥 (新潟大院自) 正 鳴海 敬倫 (新潟大工) 正 牛田 晃臣 (新潟大工)

Fumiya IGARASHI, Graduate School of Niigata University, 8050, 2-no-chou, Ikarashi, Nishi Ward, Niigata

Takatsune NARUMI, Faculty of Engineering Niigata University, 8050, 2-no-chou, Ikarashi, Niigata

Akiomi USHIDA, Faculty of Engineering Niigata University, 8050, 2-no-chou, Ikarashi, Niigata

Key Words: Complex Fluid, Concentrated Suspension, Transient Response, Particulate Microstructure

1. 緒言

工業上で扱われる粒子分散系は多様で、塗料、充填剤を含むプラスチック融液、食品など様々な系が存在する。しかし、それらの粒子の流動構造は複雑であり、不明な点も多い。例えば、流体に粒子を高体積分率で分散させた系は、流動反転時に粒子の流動構造に起因する過渡応答が生じる。これまで、この過渡応答について、球形粒子をニュートン流体・粘弾性流体に高体積分率で分散させた系の過渡挙動について、大振幅を伴う振動流 (LAOS 流動)¹⁾、流動反転を伴う加速流動²⁾を用いて、マクロ的な流動特性の変化の観点から検討されてきた。しかしながら、この過渡挙動中の粒子の具体的な流動構造の変化については明らかにされていない。

そこで、本研究では、流動反転時の粒子の具体的な流動構造の変化について検討する目的で、分散媒がニュートン流体の比較的単純な濃厚粒子分散系にトレーサーとして黒色単分散粒子を混合した系に対して流動反転実験を行い、その時のトレーサー粒子の挙動を観察した。具体的には、試験流体に予せん断として一定せん断流動を印加した後に、流動を静止させ、その後に予せん断の向きに対して同方向または逆方向に再度一定せん断を加え、再せん断の方向を変化させた場合の、主に壁面近傍の粒子の挙動を比較し検討を行った。

2. 試験流体

本実験では、Liquid Paraffin (比重 0.86, 和光純薬工業㈱, 以下 LP) に Polybutene (比重 0.89, 新日本石油㈱, 以下 PB) を 46wt% 溶解した溶液を分散媒として使用した。この濃度は、後述の分散粒子と屈折率が同程度となるように調節した結果である。なお、この液体はニュートン流体である。分散粒子には、粒子径分布が広い多分散粒子であるアクリル樹脂製球形粒子 MA1010 (比重 1.2, 平均粒径 $d=10.2\mu\text{m}$, 粒子径分布標準偏差 $\sigma=3.79\mu\text{m}$, 日本触媒㈱) を用い、粒子体積分率 $\Phi=0.50$ で上記の分散媒に分散させた。この濃厚粒子分散系は分散媒と分散粒子の屈折率が近いので光をよく透過する。そこにトレーサー粒子として、粒子径分布の極めて狭い単分散粒子で、黒色に染色されたメラミン樹脂製球形粒子 GP-HC110 (比重 1.4, $d=10\mu\text{m}$, $\sigma=0.35\mu\text{m}$, 日本触媒㈱製) を全体の体積分率に影響しないよう微量 ($\Phi \leq 5 \times 10^{-4}$) 分散させた系を試験流体として用いた。

3. 実験装置と実験方法

本実験では、顕微鏡 (Olympus 社, BX60) に取り付けられたひずみ制御型せん断流動観察ユニット (Linkam Scientific Instruments 社, CSS450) とデジタルカメラ (NIKON 社, COOLPIX P5000) を用いて流動時におけるト

レーサー粒子の挙動を 30fps で撮影し、動画解析ソフトによってトレーサー粒子の 1 フレームごとの速度を算出することで評価を行った。試料は Fig.1 に示すように、2 枚のガラス円板のすき間 ($h=100\mu\text{m}$) に設置し、予せん断を定常状態になるのに十分な時間かけ、その後、10s 間流動を静止させた。続いて、予せん断の向きに対して、同じ方向 (順方向) または逆の方向 (反転方向) に一定のせん断速度

で流動 (再せん断) を加えた。再せん断時のせん断速度 $\dot{\gamma}$

は 0.5s^{-1} または 1.0s^{-1} の 2 種類とした。また、粒子の挙動は二円板間の高さ方向の位置によって異なる可能性があるため、Fig.1 の様に上部ガラス円板下面につけたマーカーにピントを合わせることで、原点を定め、そこから下向きに z 軸を定義した。原点に対して相対的に対物レンズを下ろすことで観察位置 z を変えて撮影を行った。しかしながら $z=50\mu\text{m}$ 以降については、光の屈折や散乱による影響が大きく、鮮明な粒子像が観察できなかったため、観察面の位置 z は $0 \sim 50\mu\text{m}$ とした。

Fig.1 Main part of experimental apparatus

4. 実験結果および考察

まず、定常状態において測定された gap (z) 方向に対する粒子の速度分布を Fig.2 に示す。図の横軸はピント位置 z をガラス円板のすき間 h で除して基準化した値である。マーク (●) は測定された粒子の速度の平均値を、直線は理想的なクエット流れの場合の速度分布を示している。なお、 $z/h=0.05$ ($z=5\mu\text{m}$) のデータは、ピント位置をガラス下面に合わせた場合の結果であるが、粒子の中心位置の値として示している。グラフからおおよそ $z/h \leq 0.2$ 以下の領域では、理想的なクエット流れの場合に比べ全体的に高くなっており、特に静止壁面においても速度は 0 にならないことがわかる。透明粒子も含め動画を詳細に検討したが、壁面近傍で静止している粒子は観察されなかったことから、静止壁面で粒子が滑っていると考えられる。続いて、運動再開時の粒子の過渡的な速度変化について述べる。Fig.3

に代表例として $\dot{\gamma} = 1.0\text{s}^{-1}$, $z = 10\mu\text{m}$ の場合の再せん断(反転方向)開始時の粒子速度 v の時間変化を青いラインで示す。図から粒子の速度は常に変動していることが分かる。これは z 方向に隣接する速度の違う密な粒子群に対し相対的に移動する際に、左右上下の微動と速度変動が生じることに起因していると考えられる。実際に左右方向の微変動も測定されている。また、Fig.3 では粒子の速度は徐々に増加していき、数秒後におおよそその定常値となっていることが分かる。ここでは示さないが、再せん断の方向が順方向の場合は粒子の速度は急速に上昇して定常値に至っていた。この様に、流動反転時の速度の増加の遅れる傾向（以下、過渡挙動と呼ぶ）は再せん断が反転方向の場合でのみ特徴的な傾向であると考えられることから、本報ではこの過渡挙動を中心に検討を行った。過渡挙動について定量的に評価するために、粒子速度 v が概ね定常値となるまでの時間 t_e を代表量として導出した。Fig.3 のように粒子の速度変化（青）に対して大まかに近似線（赤）を引き、その近似線において概ね一定値となるまでの時間を t_e として定義した。この t_e について検討したところ、 t_e の値はせん断速度に依存し、 $\dot{\gamma} = 0.5\text{s}^{-1}$ の場合で $\dot{\gamma} = 1.0\text{s}^{-1}$ の場合に比べて 2 倍程度となった。すなわち、過渡挙動が終了するタイミングは t_e と $\dot{\gamma}$ の積で見積もられるひずみ量で整理できると予想される。そこで、それらの積で定義した、過渡挙動が終了するまでのひずみ量 γ_e を用いて検討した。この γ_e と z/h , $\dot{\gamma}$ の関係について整理した結果を Fig.4 に示す。図より、

再せん断が反転方向の場合で、静止壁面近傍の粒子の速度の増加が遅れており、遅れが見られる範囲は最大で、おおよそ $z/h=0.4$ 程度となっている。 γ_e の代表値として静止壁面に一番近い $z/h=0.05$ の値を考えると、おおよそ 2-3 程度となっている。従来の全体量としての過渡応答に関する研究においても、その過渡応答が終了するタイミングはひずみ量で整理できることが分かっており、今回用いた分散系と条件に近い系の場合の過渡応答が終了するひずみ量は 2.5-3.0 程度²⁾であった。このように、粒子の過渡挙動は全体量の過渡応答とはある程度対応していると言え、どちらも流動反転時の異方性構造の変化に起因するものと推測される。今回の実験では運動面側の粒子の挙動を確認できていないが、静止面側の粒子の挙動に方向依存性があることから、予せん断流動で静止面近傍の粒子が形成する構造に異方性があることは自明である。順方向に回転を再開する場合には静止状態から図 2 に示すような壁面での滑りを伴う状態に、非常に少ない変形で復帰することになる。この図 2 の速度分布ではクーエット流れの状態よりも壁面での応力が高くなることが予想される。一方で、逆方向に流動を再開する場合には、予せん断で形成された構造が一旦崩壊するため、図 3 のような粒子の動きの遅れが生じると考えられる。その間、壁面近傍では、図 2 に示す速度より遅い運動をしており、壁面に伝わる応力は低いと考えられる。すなわち、見かけ上の粘度が下がることになる。全体量で測定した過渡応答は、装置が応力制御型であったため、直接的な比較はできないが、こちらも見かけ上の粘度が下がる現象であることは同じであり、本実験結果と対応すると考えられる。運動面近傍でも同様な挙動が生じていると考えられるが、今後正確に検証する必要がある。

5. 結言

本研究において、ひずみ制御方式で、予せん断を加えた後に再せん断を加える実験を行った結果、再せん断で反転させる場合には順方向の場合に比べ、壁面近傍粒子の速度の増加が遅れる特異な挙動が観察された。この現象は全体量の過渡応答と同様に流動反転時の異方性構造の変化によって生じていると考えられる。詳細なメカニズムについてはさらに検討が必要であるが、流動方向の反転によって局所的な粒子の挙動に変化が生じたことは非常に興味深い。

参考文献

- (1) 吉田 鮎美, 鳴海 敬倫, “粘弾性濃厚サスペンションの大振幅振動せん断流大振幅振動せん断流における流動反転時の過渡応答”, 日本レオロジー学会誌 Vol.39 No.4, 173-180 (2011)
- (2) 吉田 鮎美, “粒子分散系粘弾性流体の非定常流動化での過渡応答” 修士論文, 新潟大学大学院 (2012)

Fig.2 Velocity distribution near the stationary wall measured in the case of $\dot{\gamma} = 1.0\text{s}^{-1}$

Fig.3 Particle velocity growth after shear reversal at $z = 10\mu\text{m}$

Fig.4 Influence of shear direction on characteristic strain γ_e corresponding to velocity growth