A219 分散系 ER 流体における Layer の生成崩壊の可視化

秋山 寛[○]、中務 貴之、岡本 孝司、班目 春樹 (東京大学)

Visualization of particle layer in electrorheological fluid

Hiroshi AKIYAMA, Takayuki NAKATSUKASA, Koji OKAMOTO and Haruki MADARAME

Abstract

The electrorheological(ER) effect is known as a phenomenon that shows reversible increase of apparent viscosity by applied electric field. The electric field induces the particle polarization, resulting in the chains between the electrodes.

In this study, the ER fluids in the channel with two parallel electrodes were visualized under the pressure flow and the constant flow rate. The laser light sheet and transparent electrodes were used in the experimental apparatus to visualize the particles under 10wt% concentration. The particle chain structure in the channel was clearly visualized. Under higher voltage condition, particle layers were formed at the neighbor of the electrodes. The layer gradually becomes thick, at last it is destroyed. By comparing the visualized image and the mass flow rate, the relation between the layer and the mass flow rate were investigated.

Keywords: Electrorheological fluid, Visualization, Particle layer, Mass flow rate, Pressure history

1. 緒論

電気粘性流体 (Electro-rheological Fluids:ER 流体) は電界を印加することにより、流体の見かけ上の粘度を可逆的に変化させることのできる流体で、この性質は ER 効果と呼ばれている^[1]。分散系 ER 流体とは絶縁油に誘電性の微粒子を分散させた流体で、分散系には粒子に水を含む含水系と含まない非含水系がある。一般に説明されている ER 効果の機構は、流体に電界を印加することにより分極した流体中の粒子が静電気力により互いに引き付け合い、極板間に鎖状構造物を形成し、これが流動抵抗となり、流体の粘度が見かけ上増加するというものである。

ER 流体はダンパーやバルブ、クラッチなどの振動制御や圧力制御への利用が提案、研究されている^[2]。また ER 流体の開発、ER 効果のメカニズムに関する理論的な研究も数多く行われてきた。実験的な研究は、同軸回転型の粘度計で印加電界の強さや剪断速度を変化させ、剪断応力の変化を調べたものや^[3]、平行極板間流れにおける圧力差を調べたもの^[4]が多い。また、高電圧を印加した平行極板間における粒子挙動の可視化研究は、低い粒子濃度 (0.04wt%) や^[5]、高い粒子濃度 (10wt%) におけるもの^[6]がある。高

い粒子濃度における ER 流体中の粒子挙動を可視化した研究では、ヘッド一定条件において、ある強さ以上の電界を印加した際に粒子の堆積層 (Layer) が発生することがわかった。

そこで本研究ではヘッド一定実験及び流量一定実験を行い、生成崩壊を繰り返す Layer の挙動を定量的に明らかにすることを目的とし、そのためにレーザーシート光とビデオを用いて流体中の粒子の可視化を行った。さらにテストセクションから流出する分散系 ER 流体の質料流量を電子天秤を用いて測定することにより、Layer 崩壊が流量に与える影響を定量的に評価する。

2. 実験装置

本実験では二枚の平行極板を有する矩形流路をテストセクションとした。実験装置の概略図を Fig.1に示す。本実験ではヘッド一定条件と流量一定条件での流動抵抗及び流動状態を調べた。テストセクションはアクリル製の矩形流路で、高さ (極板間隔: d) は 10mm のものと 2mm のものを用いた。流路の上下に配置された極板は長さ 100mm で、高電圧源 (グラスマン製: MJ15P1000-10) により 0 ~ 1.5

Fig. 1: Experimental setup

kV/mm の電界を印加した。極板に導電性・透過性の ITO ガラスを用いることで、極板に対して垂直にレーザーシート (Nd:YAG(532nm)) 光を入光でき、極板間を流れる流体中の粒子を照明することができる。

ヘッド一定実験においてはテストセクションにヘッドタンクを利用して、一定圧力を加える。この状態で、時間 $t=0$ で瞬時に一定電界を印加し、流量は電子天秤、粒子挙動はビデオカメラにより同時計測を行った。

流量一定実験では電動スライダを用いモータ操作によりスライダを等速度で移動させることで一定流量で流入できる。テストセクションの上流側に圧力計を設置し圧力を測定した。

ER 流体として粒径 $25\mu\text{m}$ の結晶セルローズ (旭化成製: PH-M25) をシリコンオイル (信越化学工業製: KF96) に分散させた懸濁液を使用した。粒子の分散濃度は 10wt% で、シリコンオイルの動粘度 (ν) は 100cS に固定した。また含水率固定のためにデシケータを用いた。デシケータ内の湿度を 30% に固定し ER 粒子をその中で保存することにより、含水率を約 4% に固定している。

本研究において、ヘッド一定実験では極板間隔 10mm で、また流量一定実験では極板間隔 10mm と 2mm で実験

を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1. ヘッド一定実験

本実験ではテストセクションにヘッドタンクを利用して、一定圧力を加える。ヘッド差 (h) は 100、200、400mm にし、それぞれ時間 $t=0$ で電界を印加し質量流量を電子天秤で測定した。Fig.2 はヘッド差 $h=200\text{mm}$ での時間経過に対する質量流量の変化を示している。始めに電界を印加しない状態で流体を流動させた状態から、 $t=0$ で電界を印加することにより、質量流量は印加電界の強さに応じてある値まで瞬時に減少する。 $E=0.1 \sim 0.7\text{kV/mm}$ では時間が経つとともに徐々にではあるが流量は減少し、最終的にはある値に収束する。 $E=0.8 \sim 1.0\text{kV/mm}$ では $E=0.1 \sim 0.7\text{kV/mm}$ のときと同様に時間変化とともに質量流量が減少していくが、あるところで減少増加を繰り返すようになる。この質量流量の振幅の大きさは電界の強さに応じて大きくなる。そして E が 1.1kV/mm を超えるとある時間で質量流量が $0[\text{g/sec}]$ となってしまう、ER 流体が極板間につまってしまう (Chain stuck)。

ヘッド差を一定に保つことにより、圧力を一定に保っているため、電界印加直後は質量流量が変化することは考えられるとしても、十分な時間が経過した後は定常流になることが考えられる。 $E=0.1 \sim 0.7\text{kV/mm}$ にみられる質量流量がそれである。ところが、 $E=1.1\text{kV/mm}$ では質量流量がおおよそ 0.5g/sec から 1.5g/sec の間で振動しており、定常流とはなっていない。

このように質量流量は流体に印加する電界に応じて変化する。これは他のヘッド差 ($h=100, 400\text{mm}$) においても同様の傾向が測定された。

本実験では質量流量と同時に極板間粒子挙動の可視化画像も記録した。Fig.3, Fig.4 はそれぞれ、Fig.2 上における A ~ D の各点における可視化画像である。印刷画像のためはっきり表示できないが、印加電界により分極した分散粒子が結合して鎖状構造を形成し、流体による力を受けて弓形の形状で下流側へと流動していることがわかる。この極板間に形成される弓型の鎖状構造が流動抵抗、すなわち ER 効果となって、質量流量は Fig.2 に見られるように減少する。Fig.3, Fig.4 $E=1.1\text{kV/mm}$ においては極板上側の

Fig. 2: Mass flow rate ($h=200\text{mm}$)

近傍には粒子が堆積した層 (Layer) が形成されている。粒子の鎖状構造はこの Layer の間を弓型の形状を保ったまま流動している。幾つかの鎖状構造は流動により破壊され、Layer に吸収されることが観測された。

この Layer は時間経過と共に A $\rightarrow$ B に示すように成長し、流路幅は減少する。A 点では Layer が成長しきっておらず流路幅が広いので質量流量が他の点に比べて大きい。時間が経過すると B 点のように徐々に Layer が成長し、そのため流路幅は狭まり流動抵抗が増すために質量流量が減少している。

さらに時間が経過すると C 点のように Layer が成長しきって、流路幅は最小になるため、質量流量も最小になっている。この成長しきった Layer が C $\rightarrow$ D では、段階をふんではいるが Layer が流され崩壊し、Layer の層が再び薄くなるために流路幅が回復し質量流量が A 点とほぼ同じ値になっている。

この印加電界では Layer の成長崩壊という Fig.3, Fig.4 の A $\rightarrow$ B $\rightarrow$ C $\rightarrow$ D $\rightarrow$ A というサイクルを繰り返す。

このため、弓形の鎖状構造による抵抗だけでなく、Layer による抵抗も増加する。そして Layer が一定の厚さになると一斉に Layer が流され消滅してしまう。

この結果より、流量の変動現象が流量と可視化画像の同時計測により確認された。

3.2. 流量一定実験

本実験ではモータ操作によりシリンダー内の ER 流体を一定流量で流出させる。流入流速 u は $0.02 \sim 0.2\text{m/sec}$ で実験を行った。テストセクション上流に圧力計を設置し、下流は大気開放にしてテストセクション内の差圧を測定した。

A

B

Fig. 3: Visualized images at A and B ($E = 1.1\text{ kV/mm}$)

C

D

Fig. 4: Visualized images at C and D ($E = 1.1\text{ kV/mm}$)

Fig. 5: Pressure history ($u=0.02$ m/sec)

ヘッド一定実験と同様に始めに電界を印加しない状態で流体を流動させた状態から、 $t=0$ で電界を印加することにより、圧力値は印加電界の強さに応じてある値まで瞬時に増加する。Fig.5は極板間隔 10mm、流入流速 $u=0.02$ m/secでの時間経過に対する圧力値の変化を示している。 $E=0.1 \sim 0.5$ kV/mmでは時間が経つとある値に収束する。 $E=0.6 \sim 1.4$ kV/mmでは時間変化とともに圧力値は上昇し、あるところで振動を繰り返すようになる。この圧力値の上昇度合いも振幅の大きさも印加電界の強さに応じて大きくなる。他の流入流速においても同様の傾向が得られた。流入流速を変化させても圧力値つまり流動抵抗の大きさはそれほど変化せず、また印加電界に応じて流動抵抗は増加することがわかる。これは築地ら^[5]による結果と同様のものとなっており、本研究で用いた ER 粒子に特別な性質がないことを示している。

ヘッド一定実験と同様にして、流量一定実験においても極板間粒子挙動の可視化画像を圧力変動測定と同時に記録した。記録した画像から、流入流速に対してある強さ以上の電界を印加した際に粒子の堆積層 (Layer) の存在を確認した。これにより流量一定に保つ場合の圧力の変動の原因を調べた。圧力が定常に落ち着く $E=0.1 \sim 0.5$ kV/mmでは Layer の生成崩壊する様子を見ることはできなかった。しかし $E=0.6 \sim 1.4$ kV/mmでは Layer が生成崩壊を繰り返す様子が確認できた。圧力が急激に減少すると同時に、可視化画像では Layer が崩壊している。圧力が上昇していくにつれて Layer も同じように成長し、次に圧力が急下降する時刻には同じく Layer の崩壊を確認することができる。流量一定の条件に置いてもヘッド一定条件の場合と同様 Fig.3, Fig.4におけるような $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ の Layer 生成崩壊のサイクルを観測することができた。このように、流量一定の条件での圧力の変化も Layer の生成崩壊によるもので両者の周期は一致する。

以上のことから、流量一定実験においてもヘッド一定実験同様 Layer が形成され、ある流量においては圧力が振動する現象は、Layer の生成崩壊によるものであることが確認できた。

4. 結論

ヘッド一定および流量一定条件における ER 流体の流動実験を行い、平行極板間における ER 流体中の粒子の挙動をレーザースリット光を用いて可視化した。

これにより、高い粒子濃度の可視化をすることが可能になった。

Layer の形成によりヘッド一定条件では質量流量が減少し、流量一定条件では圧力の上昇が見られたが、流れが完全に止まる印加電界よりも低いところに流量が振動する電界が存在することが明らかになり、同時に可視化画像を取得することによって、この流量の振動は Layer の崩壊生成の周期と一致することから、この現象は Layer の形成崩壊によるものであることが明らかになった。

参考文献

- 1) T.C.Halsey et al., *Scientific American*, 10(1993), 42.
- 2) J.Y.Wong et al., *CSME*, **17-4B**(1993), p.789.
- 3) C.F.Zukoski et al.: Towards the electrical control of viscosity, *IECON'86*(1986).
- 4) 中野政身, 米川琢哉: 分散系 ER 流体を用いたアクティブダンパとその除振制御への応用, 日本機械学会論文集, **C62-593**(1996), p.33.
- 5) 築地徹浩, 歌代隆行: 電場が正弦波状に変動する場合の電気粘性流体の平行二平板電極間流路での流れ, 日本機械学会論文集, **B63-608**(1997), p.93.
- 6) T.Tomiuga et al.: Visualization Study on Chain Structure in Electro-Rheological Fluids, *Proceedings of the 6th international conference on electrorheological fluids magneto-rheological suspensions and their applications*, (1997)p.139-146