B 2 0 5

ナノ粒子分散系ER流体の回転せん断流れにおける モルフォロジーとER効果*

中野 政身[○] (東北大学)

Morphology and ER Effects of Nano-Particle Electrorheological Suspension in Rotational Shear Flow Mode

Masami NAKANO

ABSTRACT

In this research, the transient response of induced shear stress and the related flow behavior of an ER suspension containing nano-sized TiO₂ particles dispersed in silicone oil have been investigated when it has been under the simultaneous stimulus of a constant DC or AC electric field and rotational shear using a parallel rotary disk rheometer. The effects of shearing time, electric field strength, DC or AC, and very narrow gap height between disk electrodes on the induced shear stress are investigated in close relation to the morphology of the visualized flow patterns.

Keywords : Non-Newtonian fluid, Electrorheological fluid, Nano-particle, Flow morphology, ER effect

1. 緒 言

粒子分散系ER流体 (Electro-Rheological Fluid) は電場下で分散微粒子が分極することにより鎖状につながりクラスターを形成することによって見掛け上粘性を可逆的に変化させることのできる機能性流体である¹⁾。その電場印加による粘性の変化特性は、印加電場強度によって降伏せん断応力が変化するビンガム流体に類似した挙動を示し、その電場に対する変化速度も数 μsec と速く、ダンパ、バルブ、クラッチなどの多くの機械要素及び機械システムへの応用が試みられてきている。特に、本研究では、ER流体を用いたデバイスのマイクロ化の可能性に着目し、ER流体を作動流体とするマイクロフルードパワーシステム(MFPS)の構築を目的に、マイクロ粒子分散系ER流体の微小間隙でのER効果や流動挙動について検討してきている^{2),3)}。

ここでは、粒子分散系ER流体のマイクロデバイスへの応用を前提に、TiO₂のナノ粒子を分散したER流体を対象に、一方の円盤が相対的に回転運動する平行円盤間微小間隙のせん断流れモードにおけるそのER特性をその可視化した流動挙動との密接な関連のもとに検討している。

2. レオロジー計測と流動場の可視化

供試ER流体として、二酸化チタンTiO₂ (平均粒子径15nm) を30[cSt]のシリコン油中に35[wt%]で分散したナノ粒子ER流体 (MT-150A) を用いた。

Fig. 1に電場印加型高精度レオメータを用いたER流

体のレオロジー計測と流動場の可視化法の概略図を示す。電場印加が可能な直径 $d = \phi 20\text{mm}$ の平行円盤型レオメータ [HAAKE, RheoStress RS150] を用いて、回転せん断流れ場における誘起せん断応力 ($\tau = 16M/\pi d^3$, M : トルク) の時間的な変化特性の測定を1000s 間行った。下側円盤 (直径38mm) は装置下部から流動構造を観察するためITO膜付きガラス電極としている。電極間距離 h は微小間隙におけるレオロジー特性を調べるため0.05, 0.07, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4及び0.5 mmと変化させ、印加電場強度 E は0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 及び5.0 kV/mmと変化させる。円盤外周部で定義したせん断速度は 100 s^{-1} 一定とする。円盤間のER流体が形成する流動パターンの変化を下側のガラス円盤電極の下方からハロゲン光を照射しミラーを介してCCDカメラで撮影し、PCにデジタル記録し

Fig.1 Rheological measurement and flow visualization using a rotary parallel disk rheometer.

て流動特性の時間的な変化について検討している。また、レオメータで測定後ER流体を採取し、光学顕微鏡を用いて無電場下での粒子の分散状態の観察も行った。

3. ER効果及び流動場の計測結果と考察

Fig 2にはMT-150Aのせん断流れ($h=0.1$ mm, $\dot{\gamma}=100\text{s}^{-1}$)におけるDC及びAC電場強度 $E=2.0$ kV/mm 印加時の誘起せん断応力の電極間隙 h とせん断時間 t による変化を、Fig 3にはその際の対応する流動挙動の変化を示す。DC電場印加時には、電極間隙が狭い $h=0.05, 0.07$ mmでは凝集塊が、 $h=0.1$ mmでは層状の円環構造が観察でき、せん断応力の値には電極間隙及びせん断時間によってバラつきが見られる。さらに電極間隙が広くなると、この円環が徐々に太くなり、電極間隙が 0.3 mmの時には円環が僅かに観察されるがほぼ消え、せん断応力は著しく低い値を示す。電極間隙 $h=0.4, 0.5$ mmでは流動挙動には大きな変化が観察されず一様となり、せん断時間に対するせん断応力の変動もほぼ見られなくなる。また、せん断応力は電極間隙が大きくなるにつれて徐々に上昇する。一方、AC電場印加時(1 kHz)には、DC電場印加時のものと比較すると、誘起せん断応力は低い値を示すが、比較的狭い電極間隙でも時間的な変動はなく安定しており、電極間隙が大きくなるほどせん断応力も比例的に上昇する

Fig 2 Changes of shear stress of nano-particle ER fluid with electrode gap in terms of shearing time under DC or AC electric field ($E = 2.0$ kV/mm).

Fig 3 Changes of ER fluid shear flow patterns with gap h for MT-150A ($t=600$ sec, $E=2.0$ kV/mm).

ことが分かる。また、Fig 3(b)で観察されるように、AC電場印加時(1 kHz)には流動挙動には電場強度や電極間隙に対して有意な変化は観察されなかった。

Fig 4には、ナノ粒子ER流体にDC電場印加したもの[Fig 4(a)]とDC電場印加した後に続けてAC電場印加したもの[Fig 4(b)]をそれぞれ採取し、光学顕微鏡で粒子の分散状態を観察した結果を示す。DC電場印加したものは[Fig 4(a)], $5\sim 10\mu\text{m}$ 程度の凝集粒子がさらに集合したより大きな二次粒子群を形成しているのに対して、さらにAC電場を印加した場合には[Fig 4(b)], DC印加時に観察された大きな二次粒子群が分解され、 $2\sim 5\mu\text{m}$ 程度の比較的小さな粒子が均一に分散されている。このことにより、DC電場下では $h=0.3\text{mm}$ 以下の微小間隙では時間的に不安定な値をとるのに対して、AC電場印加時には、微小間隙でも時間的に安定したせん断応力を示しているものと考えられる。

Fig 4 Micrograph of particles in ER fluid after applied electric field.

4. 結 言

TiO₂のナノ粒子ER流体は、DC電場下ではナノ粒子が凝集したミクロンサイズの二次粒子がさらに集合した数十ミクロンの粒子群を形成し、微小電極間隙では、マイクロ粒子分散ER流体と同様に、多層円環状パターンや凝集塊を形成しせん断応力に大きな乱れが生じ不安定な値を示す。一方、AC(1 kHz)電場では、DC印加時に観察された数十ミクロンの粒子群が分解され、ナノ粒子からなる数ミクロンの二次粒子が均一に分散されるため、DC電場と比較してせん断応力のレベルは低下するが、微小電極間隙でも時間的に非常に安定した値を示した。その流動挙動にも電場強度や電極間隙の変化に対する有意なパターン形成は認められなかった。

参 考 文 献

- 1) 中野政身：ER/MR流体のレオロジー及び流動特性、可視化情報，Vol.27, No.105 (2007) pp.19-26.
- 2) M. Nakano, et al.: Dynamic shear flow of electro-rheological fluids between two rotating parallel disks, CD-ROM Proc. of the Sixth JFPS Int. Symp. on Fluid Power, Paper No.2D4-5(2005), 612-617.
- 3) 中野政身：ナノ・マイクロ粒子分散系ER流体のマイクロギャップフローとその点字表示システムへの応用，混相流，Vol23, No.2 (2009) pp.135-142.