

中空粒子を用いたER流体における粒子密度効果

栗延俊太郎*・桜井彰久*・佐藤宏和**

Effects of Particle Density on ER Fluids using Balloons

Shuntaro KURINOBU, Sakurai AKIHISA
and Hirokazu SATO

ABSTRACT

The relation between the densities of particles in ER fluids and the shear stress was investigated. Micro balloons used as particles, were dispersed in silicon oil which was used as the base fluid. Sample 4 containing particles with densities much lower than that of silicon oil, sample 3 containing particles with densities slightly lower and slightly higher than that of silicon oil, sample 2 containing particles with densities higher than that of silicon oil and sample 1 containing a mixture of these particles were used. Shear stresses as a function of shear rate were measured for ER fluids in the range of 0-1000 V/mm using a parallel disk type rheometer which was constructed. The shear stress increased with an increase in shear rate for all samples. When ac fields were applied, the shear stress increased in the order of sample 3, sample 4, sample 2 and sample 1. For dc fields, only sample 1 exhibited a high shear stress, while the shear stress of the other samples were similar to that of each other. In addition, the clusters of particles in ER fluids were observed for all samples under ac and dc fields of 1000 V/mm. It was found that the clusters were thin for samples which showed low shear stress.

1. まえがき

ER流体 (Electrorheological fluids) についてはダンパーやクラッチ等への応用を目的として、多くの研究が行われているが、ER流体の実用化に際しては、まだ様々な解決すべき問題がある⁽¹⁾。その1つは懸濁している粒子の密度と溶媒の密度の差が、その性能に及ぼす影響である。従来長時間ER流体を使用しないで置くと、粒子が沈降し、場合によっては凝集を起こして、応答が遅くなる点が指摘されてきた。これに加えて、ER流体に電圧を印加している時でも、粒子の密度が溶媒の密度より大きいと粒子が沈降し、粒子の密度が溶媒の密度より小さいと浮上して、ER流体は十分な性能を発揮しなくなると考えられる。分散媒より密度の大きい粒子が実験で使用される場合が多く、分散媒より密度の小さい粒子を使用した場合についてはほとんど報告されていない。本研究では、分散媒の密度より大きい密度や小さい密度を有する中空粒子をER流体の粒子として用い、異なった密度の粒子を含むER流体の特性を実験的に調べた。

本研究では円板型回転粘度計を作製し、シリコンオイルに中空粒子を分散させたER流体を用いて、エレクトロレオロジー効果の重要な特性であるずり応力とずり速度の関係を条件を変えて測定した。円板型回転

* 電子・電気工学科

** 富士電機

粘度計を使用したのは、電極が粒子の観察によく使用されるような上下に電極を配置した構造であり、粒子密度の効果を調べるのに最適と考えたからである。

また電圧印加時のER流体中の粒子の状態が観察できる簡単な実験装置を作製し、密度の異なった粒子を含む試料中のクラスターの様子を観察した。

2. 実験方法

本研究では円板型回転粘度計を作製し、シリコンオイルに中空粒子を分散させたER流体を用いて、ずり応力とずり速度の関係を条件を変えて調べた。円板型回転粘度計を使用したのは、回転中でも電極間に粒子密度により、粒子の分布が生じると考えられるからである。作製された円板型回転粘度計の模式図が図1に示してある。電極はステンレスの円板で、その直径は38.5mmであり電極間距離は1mmである。下の電極はER流体を入れる容器内にあり、モーターに接続してある。上の電極はトルクを測定するために微小荷重ロードセルに取り付けてある。1000Vまでの直流電圧及び交流電圧(60Hz)が電極間に印加された。直流電圧を印加した場合、上の電極が正、下の電極が負でアースしてある。装置は恒温器に入れ、25℃で実験を行った。測定されたトルクから次のような方法で、ずり応力とずり速度の関係が求められる⁽²⁾。平行円板型粘度計の上部電極の周縁のずり速度 D は、次式で与えられる。

$$D = R\omega / h \quad (1)$$

ここで R は電極の周縁までの半径で、 h は電極間距離であり、 ω は円板の角速度である。また円板の周縁におけるずり応力 τ は、次式で与えられる。

$$\tau = \frac{D}{2\pi R^3} \left[\frac{dM}{dD} + \frac{3M}{D} \right] \quad (2)$$

ここで M はトルクである。上式から角速度を変えて D と M を測定し、 dM/dD を求めれば、種々のずり速度 D に対するずり応力 τ が求められる。

次に試料の作成方法について述べる。図2に分散媒として用いた中空粒子の写真を示す。中空粒子の殻の主成分は、 SiO_2 と Al_2O_3 である。この中空粒子の粒子径を、ナイロンメッシュふるいを用い $32\mu\text{m}$ ~ $50\mu\text{m}$ にそろえた。次に、この粒子を比重分けするためにエタノール(比重 0.79g/cm^3)で分画し、さらに純水(比重 1.00g/cm^3)によって分画し、3種類の密度の異なった粒子と比重分けの行っていない元の粒子を用いて実験を行った。粒子をそれぞれ室温で乾燥させた後、引き続き 150°C で2日間乾燥して、シリコンオイルに懸濁して実験に使用した。シリコンオイル中における試料の体積パーセントは、10%と20%である。粒子は含水していないものを使用した。含水した粒子を使用した場合、粒子径と粒子密度に分布がある粒子の場合、含水率を一定にすることがかなり困難であると考えられたからである。

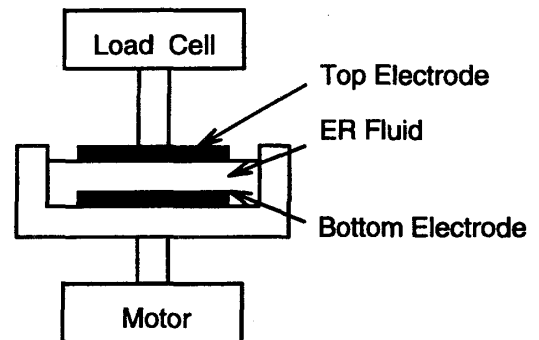


図1 実験装置の模式図

Fig.1 schematic view of experimental apparatus

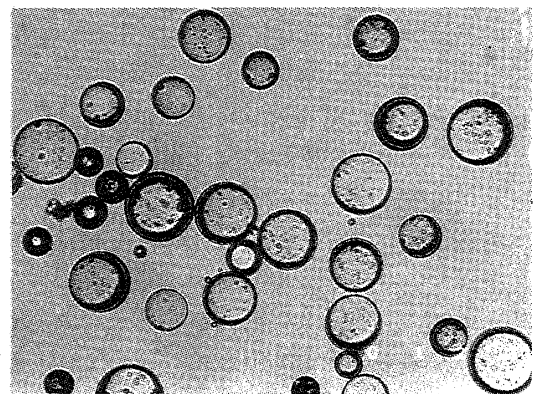


図2 中空粒子の写真

Fig.2 Photograph of micro balloons

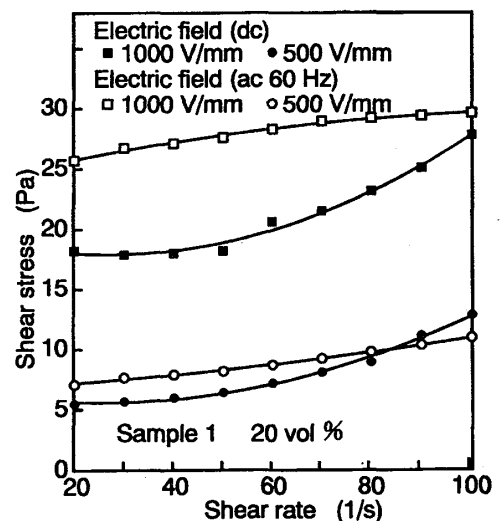


図3 試料1におけるずり応力とずり速度の関係

Fig.3 Relation between shear stress and shear rate for sample 1

表1に実験に使用した試料の番号、粒子の名称、密度の範囲と平均密度、粒子の体積パーセントが示されている。シリコンオイルの密度よりかなり小さい密度の粒子を軽密度粒子、わずかに小さいかわずかに大きい密度の粒子を中密度粒子、シリコンオイルより大きい密度の粒子を高密度粒子、及びそれらを混合した粒子を混合粒子とした。シリコンオイルの密度は 0.935 g/cm^3 で動粘度は 10 cSt である。

3. 実験結果

トルクと回転数の関係が各試料について測定され、その結果が式(2)に代入され、ずり速度 D に対するずり応力 τ の関係が調べられた。図3から図6は、シリコンオイル中に20%の体積パーセントの粒子を加えた試料の、ずり応力 τ に対するずり速度 D 関係を示している。図3が試料1の場合、図4が試料2の場合、図5が試料3の場合、図6が試料4の場合である。すべての特性は、ずり速度の増加に伴いずり応力が増加していることを示している。

交流の場合試料1、試料2、試料4、試料3の順にずり応力が大きい。直流の場合は試料1だけずり応力が大きく、他の粒子を含む試料は同じようなずり応力を示している。特に試料1と試料4では、直流電界が 1000 V/mm の場合、ずり速度の増加に伴いずり応力が大きく増加する。また交流と直流の特性を比較した場合、試料1と試料2では交流の場合のずり応力が、直流の場合のずり応力より大きい、ほぼ同じくらいであるのに対して、試料3と試料4の場合は逆に交流の場合のずり応力が直流の場合のずり応力より小さい。

図7と図8に異なった試料に対する、ずり応力と電界の関係が 100 /s のずり速度の場合について示してある。図7に示されているように、交流の場合、試料1、試料2の順にずり応力が大きく試料3と試料4は同じ様な特性を示している。図8に示されている直流の場合は試料1と試料4のずり応力が大きく、試料2と試料3は同じようなずり応力を示している。

図9と図10に混合粒子を使用した場合の、異なった体積パーセントの試料1と試料5におけるずり応力とずり速度の関係を示す。10%の場合のずり応力は20%の場合に比較するとかなり低い。

次に上下方向に 1 mm のギャップを持つ電極を作製し、その中に試料を入れて電極が静止している状態での電圧印加時のクラスターの形成過程を観察した。 1000 V の交流電界を印加した場合の粒子のクラスターの写真を図11に示す。図11(a)は試料1の場合で、図11(b)は試料3の場合である。電圧が印加される前は、試料1では粒子は上部電極から下部電極に向かって分布するように浮遊しており、

表1 試料のパラメータ
Table 1 Parameter of sample

試料名	粒子の名称	粒子密度の範囲 (g/cm^3)	平均粒子密度 (g/cm^3)	粒子量 (vol.%)
試料1	混合粒子	1.2以下	0.63	20
試料2	高密度粒子	1.0-1.2	1.13	20
試料3	中密度粒子	0.79-1.0	0.82	20
試料4	低密度粒子	0.79以下	0.56	20
試料5	混合粒子	1.2以下	0.63	10

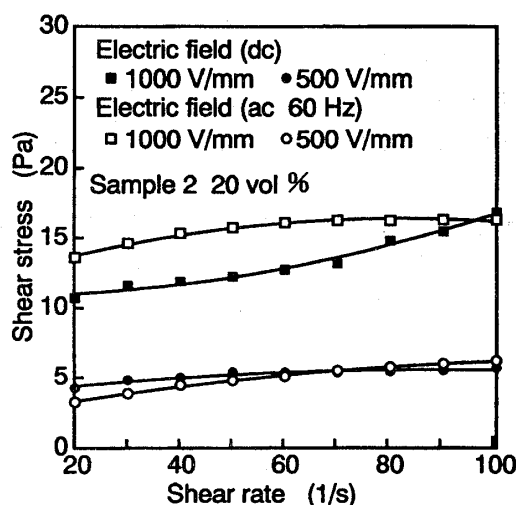


図4 試料2におけるずり応力とずり速度の関係

Fig.4 Relation between shear stress and shear rate for sample 2

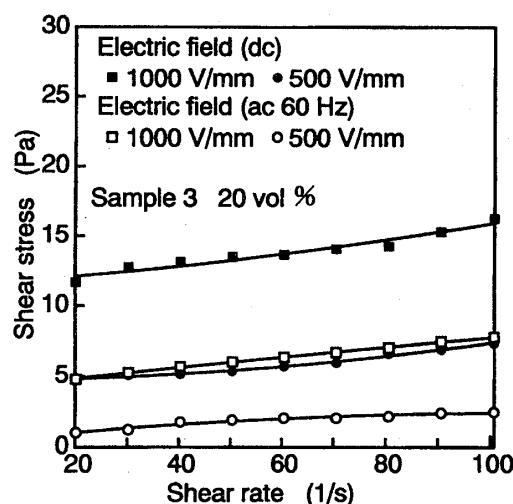


図5 試料3におけるずり応力とずり速度の関係

Fig.5 Relation between shear stress and shear rate for sample 3

下部電極にはほんのわずかの粒子のみ存在している。電圧が印加されると、電極間に分布して存在していた粒子が下部電極に瞬時に移動し、図11 (a) のように太いクラスターが形成される。一方試料3では、電圧を印加する前は、粒子は上部電極付近に浮遊している粒子と下部電極付近に沈降している粒子にわかれている。電圧を印加すると粒子はクラスターを形成するように移動するが、図11 (b) のように上部電極と下部電極からそれぞれ伸びるように粒子が移動した。形成されるクラスターは非常に細い。

また試料4では全部の粒子は上部電極付近に浮遊しており、試料2では全部の粒子が下部電極付近に沈降している。電圧を印加すると瞬時に対向している電極へ移動して、クラスターを形成する。試料4でのクラスターはかなり細いが、試料2のクラスターはかなり太かった。クラスターの形成の観察から、試料3のように電極の両側へ粒子があると電極が絶縁されているため粒子が動きにくいものと思われる。

直流の場合の写真を図12に示す。図12 (a) に試料1の場合、図12 (b) に試料3の場合の電圧印加後のクラスターの写真を示す。直流の場合も電圧印加前の粒子の分布は余り変わらないが、直流の場合は電圧印加後粒子の動きが激しく、図11 (b) と図12 (b) の比較からわかるように、試料3では粒子がかき混ぜられ直流の方が交流に比較してクラスターは太くなった。試料3のクラスターは細く、試料1のクラスターは太い。また試料4の場合は試料3に似た状態であり、試料2の場合は、試料1に似ていた。

これらの結果から、ずり応力が大きい場合はクラスターが太いことがわかる。最も良い状態のクラスターは試料3の場合にできると思われたが、実験結果はかなり異なっていた。

4. 考察

試料によっては直流と交流でずり応力がかなり異なる結果が得られている。直流の場合電極が静止している状態で電圧印加後の粒子の動きを観察すると、粒子が電極間を激しく往復し、この動きによりクラスターが太くなることがわかった。これは特に試料3で顕著であった。ずり応力が大きい場合は、静止状態でのクラスターが太い結果が得られているが、ずり応力を測定している場合は電極が回転しているので、クラスターは静止状態とはかなり異なっていると思われる。二重円筒型回転粘度計においては、回転状態でのクラスターが観察されているが⁽³⁾、粒子の動きや速度は電極間における粒子の位置によりかなり異なることが報告されている。本研究で用いた円板型回転粘度計のように電極が上下にある場合でも、今後は電極が動いている状態でのクラスターの観察が必要と思われる。

実験結果では試料1が最も大きなずり応力を示す結果が

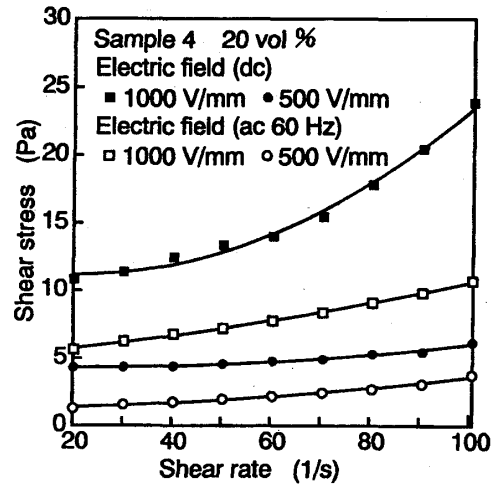


図6 試料4におけるずり応力とずり速度の関係
Fig.6 Relation between shear stress and shear rate for sample 4

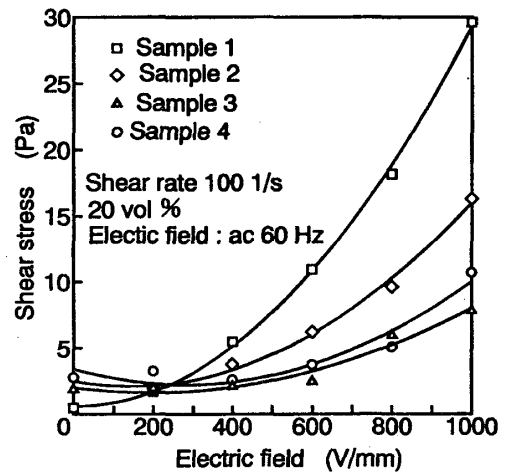


図7 交流におけるずり応力と電界の関係
Fig.7 Relation between shear stress and ac electric fields

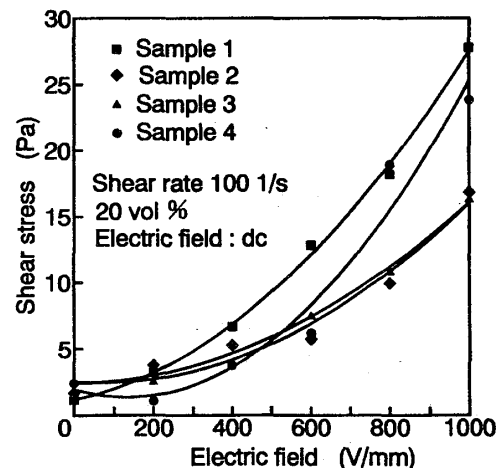


図8 直流におけるずり応力と電界の関係
Fig.8 Relation between shear stress and dc electric fields

得られている。電極が静止している状態で、各試料について電圧印加時の電流の時間変化を測定したところ、他の試料と比較して試料1のみ大きな電流が流れた。一般に分散させている粒子が導電性であるとずり応力が大きくなることが報告されており⁽⁴⁾、これが試料1が大きなずり応力を示す一因と考えられる。試料2、試料3、試料4は試料1から分離した粒子で作製したので、中空粒子は水につけるとその特性が変化するものと思われる。

またシリコンオイルの密度に最も近い密度を持つ試料3が大きなずり応力を示さないのは、電圧を印加する前に上部電極付近に浮遊している粒子と下部電極付近に沈降している粒子が、電圧印加時に電極間に電流が流れるのを阻止していることがその一因と考えられる。このように電圧印加時にクラスターを容易に形成させるためには電極間に電流が流れることが重要であることがわかった。

5. まとめ

本研究では円板型回転粘度計を作製し、シリコンオイルに中空粒子を分散させたER流体のずり応力とずり速度の関係を条件を変えて調べた。ER流体として、シリコンオイルの密度よりかなり重い粒子を含む試料2、わずかに軽いか重い粒子を含む試料3、かなり軽い粒子を含む試料4及びそれらを混合した粒子を含む試料1を用いた。ずり応力とずり速度及び印加電圧の関係を各試料について測定した結果、下記のことが明らかにされた。

(1) 1000 V/mm及び500 V/mmの電界で、すべての試料においてずり速度の増加に伴いずり応力は増加している。交流の場合試料1、試料2、試料4、試料3の順にずり応力が大きい、特に試料1がずり応力が大きい。直流の場合は試料1だけずり応力が大きく、他の試料は同じようなずり応力を示している。

(2) シリコンオイル中に懸濁させた粒子の量を増加させると、ずり応力は増加する。

(3) 印加電圧を1000 Vまでの範囲で変えた場合、印加電圧の増加に伴いずり応力はすべての試料で増加した。300 V以上では試料1が最もずり応力が大きく、次に試料2がずり応力が大きく、試料3と試料4は余り差がない。

以上得られた結果から、混合粒子を含む試料が最も大きなずり応力を示しており、良い試料であることがわかる。

文献

- (1) D. L. Hartsock, R. F. Novak, and G. Chaundy: J. Rheol., 35, p.1305 (1991).
- (2) 川田裕郎: “粘性”, コロナ社, p.122 (1977).
- (3) 喜多義範, 大島竜也, 高瀬英生, 近藤伊知朗, 藤沢新坪: 日本機械学会論文集 (B編), 59, p.1816 (1993)
- (4) 井上昭夫, 真庭俊嗣, 佐藤富雄: 日本レオロジー学会誌, 20, p.67 (1992)

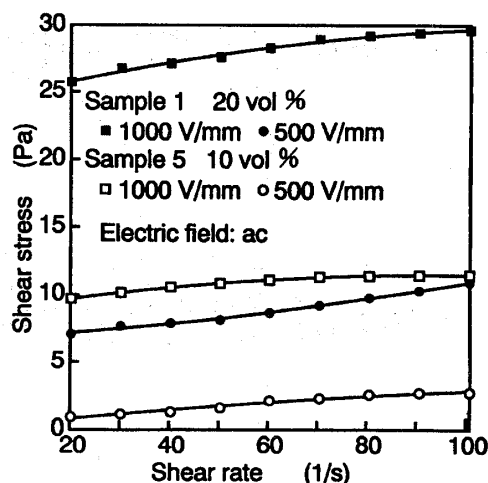


図9 交流電界印加時の異なる体積パーセントにおけるずり応力とずり速度の関係

Fig.9 Relation between shear stress and shear rate for different volume percents under ac electric fields

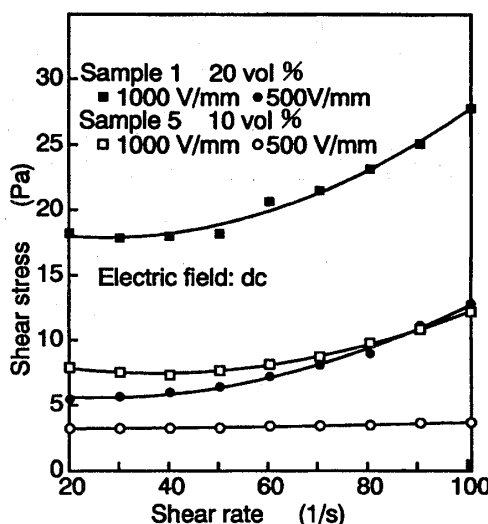
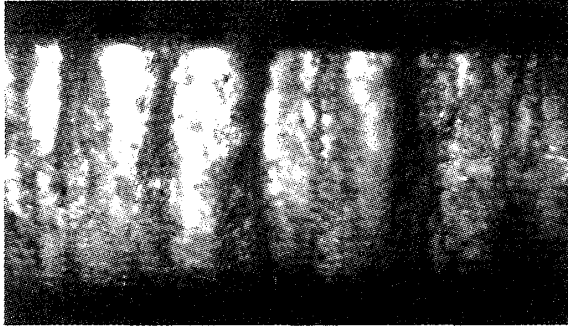
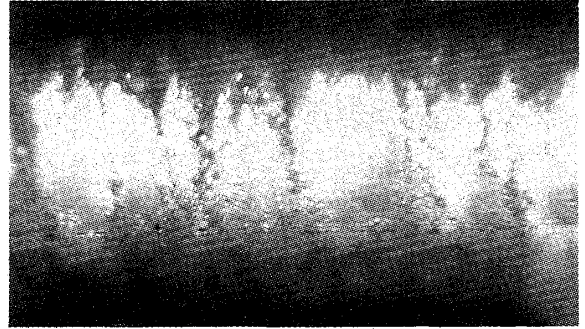


図10 直流電界印加時の異なる体積パーセントにおけるずり応力とずり速度の関係

Fig.10 Relation between shear stress and shear rate for different volume percents under dc electric fields

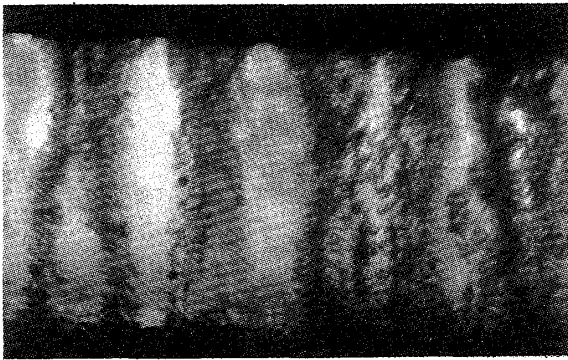


(a) 試料 1
(a) Sample 1

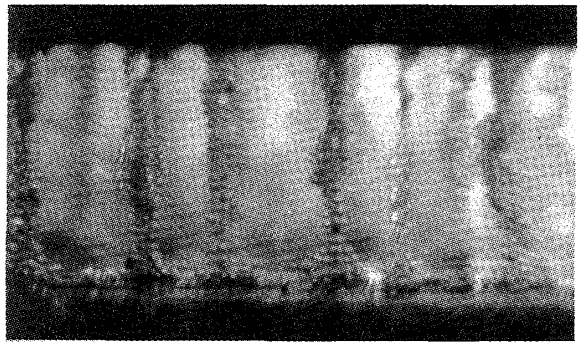


(b) 試料 3
(b) Sample 3

図11 交流電圧印加時のクラスター
Fig.11 Clusters under ac electric fields



(a) 試料 1
(a) Sample 1



(b) 試料 3
(b) Sample 3

図12 直流電界印加時のクラスター
Fig.12 Clusters under dc electric fields