

Plastic Behavior of Concentrated Suspensions in a Squeezing Flow

○鳴海敬倫（新潟大工），近江洋祐（キタムラ機械），菅原深（新潟大工），長谷川富市（新潟大工）

Takatsune NARUMI*, Yousuke OUMI*², Shin SUGAWARA*³ and Tomiichi HASEGAWA*⁴

* Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata, 950-2181, Japan

*² Kitamura Machinery Co., LTD, Takaoka-shi, Toyama, 939-1192, Japan*³ Graduate School of Niigata University, Niigata, 950-2181, Japan*⁴ Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata, 950-2181, Japan

We have examined Bingham like property of concentrated suspensions with non-Brownian particles in squeezing flows between a flat plate and a spherical surface with a large radius of curvature. Apparent yield stress has been estimated with a very weak squeezing flow after a pre-squeezing motion. The apparent yield stress grows with repetition of the squeezing test. The suspension of rough particles shows high apparent yield stress and its remarkable growth with the repetition. Moreover, the yield stress is affected with the gap and pre-squeezing velocity. From these features in yield stress, it is considered that the filtration effect generates a clumped or jammed structure at the center of squeezing flow.

1. はじめに

サスペンションの複雑な流動特性の解明は工業上重要な課題である。特に濃厚な系では体積分率の増加と共に Bingham 流体のような固体的な特性が生じる¹⁾。この特性は流動により粒子による凝集構造が生じ、Jamming が生じるためと考えられるが、その詳細については不明な点が多い。特にスクイーズ流れのような複雑な変形機構を有する流れでの凝集および降伏過程の十分な解明はなされていない。

本研究では繰り返しスクイーズ運動を受ける流れ場において、濃厚サスペンションの凝集構造の成長について検討し、諸要因による降伏応力の変化から、その機構を解明することを目的とした。具体的には、一定速度のスクイーズ流れを加えたサスペンションに非常に弱いスクイーズ流れを与え、そのときのすきまおよび荷重の変化から降伏応力を算定した。また、これを繰り返すことによる降伏応力の変化から、サスペンション中の凝集構造の発達について検討した。

2. 供試流体

本研究では濃厚サスペンションとして、シリコーンオイル（500cs, 比重 0.98）に、シグマアルドリッチ調製の破砕体状のポリエチレン粒子 No.43427-2（比重 0.94, 平均径 45 μ m）を体積分率が 40～45% となるように分散させた試料（Suspension R）を作製し、実験に供した。また、試料には攪拌機による十分な脱泡および粒子の均等分散を行った。

3. 実験装置および方法

本研究では、スクイーズ流れ場として曲率半径の十分大きい球面と平面を用いた。そのテストセクションの拡大図を図 1 に示す。接近運動をする上部の球面は直径が 30 mm で曲率半径が $R = 519$ mm の平凸レンズであり、下部平面は直径 50 mm のガラス平板である。なお、この様に曲率半径の大きい球面を用いることにより、容易に対称性のある流れを得ることが出来る。ここでは示さないが、二面の平行度は 3 点支持したマイクロメータヘッドを用いて調整され、二面間のすきまとスクイーズ膜で生じる荷重はそれぞれ 3 個取り付けられた変位計とロードセルで測定される。実験では平凸レンズを準備位置 ($h_c = 1.1$ mm, 1.2 mm, 1.3 mm) の位置から 0.2 mm 下降させた後、最終中心間すきま ($h_{cs} = 0.4, 0.5, 0.6$ mm) まで一定速度 U でスクイーズ運動させ、その後停止

させた。この一段目のスクイーズ流れ(Stage 1)によりサスペンション中に凝集構造が形成されると考えられる。そして、レンズ静止後、下部平板を直接支持しているロードセルがバネ系となるため、非常に弱いスクイーズ流れが続けて生じる。この二段目のスクイーズ流れ(Stage 2)における中心間すきまおよび荷重の変化から、降伏応力を見積もった。本研究ではサスペンション中の凝集構造の成長を調べるため、再び準備位置までレンズを上昇させ、同様の行程を繰り返して、測定を行った。

4. 実験結果および考察

図 2 に本実験で得られた荷重変化の代表例 (Suspension R 45%) を示す。スクイーズ運動の繰り返し回数が、初回、3 回目、10 回目の例を示している。図中 Stage1 では上部球面が一定速度 U で接近しており、Stage2 では球面の停止後ロードセルのバネ系により平板のわずかな上昇を伴う弱いスクイーズ流れが生じている。この図から前半のスクイーズ運動停止後、濃厚サスペンションでは長時間高い荷重を維持し、その値はスクイーズ運動の繰り返し回数に依存することがわかる。この Stage2 の領域で、ポアズイコ流れを仮定したときの球-平面間の平均すきまでの見かけのせん断速度と、Stefan の式を球-平面間に拡張して発生荷重 F から見かけの粘度、さらには見かけの降伏応力を算定した。各体積分率について得られた繰り返し回数に対する見かけの降伏応力の変化を図 3 に示す。すべての体積分率で、往復を繰り返すことにより降伏応力が増加し、流動性が低下している。特に、高体積分率のサスペンションでは十数回の往復で非常

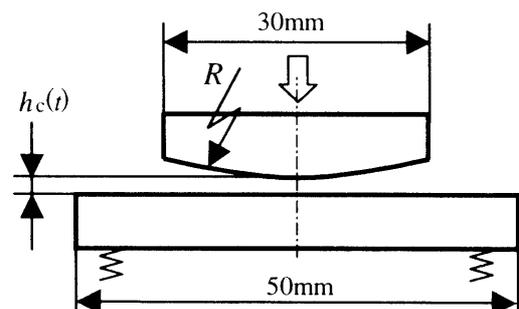


Fig.1 Schema of test section

に高い値にまで見かけの降伏応力が増加していることが分かる。この現象の一つの可能性として、サスペンション中の粒子が凝集構造を形成し、成長していることが考えられる。N. Delhaye ら³⁾は濃厚サスペンションではスクイーズ運動の速度によって、粒子が形成する多孔質媒体中を液体のみが通過する領域が存在すると報告している。本研究においても粒子の移動速度と分散媒の移動速度に差ができ、filtration(濾過作用)のような現象が発生し、サスペンション中に粒子密度の不均一性が生じて粒子密度の高い場所で強い凝集構造を形成すると考えられる。さらに、繰り返しスクイーズ運動を与えることによりその凝集構造が大きく、さらに強固なものへと成長するため、見かけの降伏応力が増加すると考えられる。この予想に対して、場所ごとの体積分率を測定するなどの直接的な検証は困難であるので、ここでは各種ファクターを変化させた場合の降伏応力の成長への影響を調べ、間接的に上記の議論の妥当性を検討する。

まず、スクイーズ流れにおいて最終すきまを変化させたときの降伏応力に関して検討した。なお、最終すきまを0.4mmから0.6mmまで変えたが、スクイーズ運動のストロークは一定とした。図4は繰り返しスクイーズ運動で測定された見かけの降伏応力の最大値を体積分率に対して表している。明らかなすきま依存性が見られ、最終すきまが小さくなると顕著な降伏応力の増加を示す。この点から、今回のサンプルでスクイーズ流れにおいて形成される凝集構造は本実験のすきま程度(サブミリオーダー)のサイズに成長していることが予想される。そして、本実験が球-平面間である点を考慮

すると、すきま依存性は中心近くの狭いすきまでの凝集の影響が強く現れた結果と考えられ、filtrationにより矛盾なく説明できる。

図5は $h_{cs}=1.2\text{mm}$ の位置から最終中心間隙間 $h_{cs}=0.5\text{mm}$ までのStage1のスクイーズ速度を4種類に変えた場合にそれぞれ算定された最大降伏応力を示す。ここでは示さないが1回目の測定における降伏応力の値にはほとんど差はないが、最大値ではスクイーズ速度が増すにつれて降伏応力の値は減少しており、最大値をとるまでの往復回数も減少している。中心付近でのfiltrationを想定した場合、スクイーズ速度が低いほど粒子に働く流体力が小さくなり、粒子が停滞し凝集しやすくなることが予想される。この点は図5の結果と定性的に一致している。

この様にいくつかの要因の塑性挙動に対する影響から、スクイーズ流れでは、filtration的な作用により凝集構造が形成・成長すると考えられる。凝集構造の降伏がどのように生じるかなど未だ不明な点はあるが、本研究で得られた特異な挙動は、他に報告例がなく、サスペンションの流動をより詳細に知る上で貴重なデータになると考えられる。

参考文献

- 1) 松本孝芳, "分散系のレオロジー", 高分子刊行会, (1997), 13-22.
- 2) Stefan, J., Akad. Wiss. Math. Natur., Wien, 69-5 (1874), 713.
- 3) N. Delhaye, A. Poitou, M. Chaouche, J. Non-Newtonian Fluid Mech., 94, (2000), 69-74.

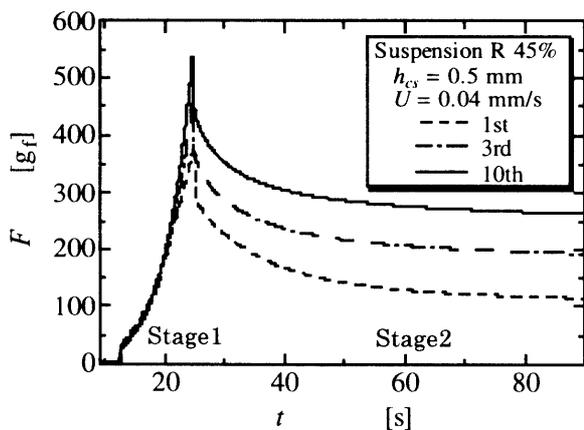


Fig. 2 Transmitting force measured in each squeezing flow

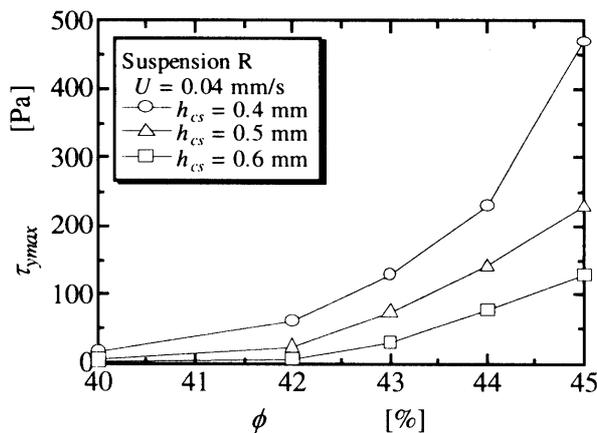


Fig. 4 Gap dependence of maximum apparent yield stress

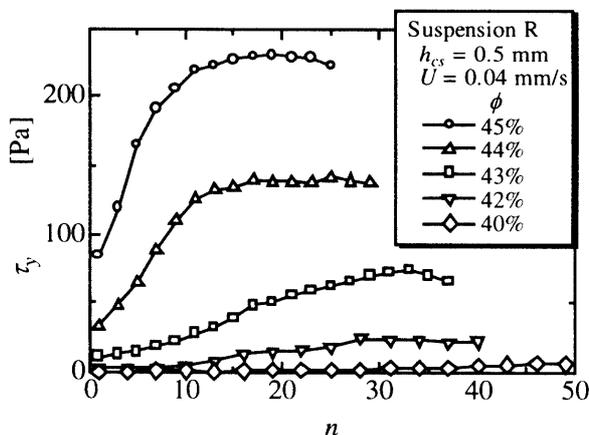


Fig. 3 Growth in apparent yield stress in repeated squeezing flow (n is the number of times of repetition)

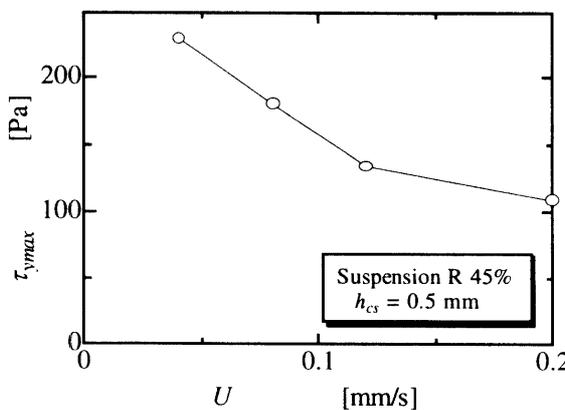


Fig. 5 Influence of squeezing velocity in Stage 1 on maximum apparent yield stress