



研究ノート

高分子流体の急絞り部の流れ

中村喜代次*, 千葉訓司**

1. はじめに

高分子流体は粘度がずり速度により変化する非ニュートン粘性を示し、さらにワイセンベルグ効果のような弾性的性質をも有しているため、粘弾性流体と呼ばれている。高分子流体はニュートン流体とは異なった、きわめて複雑で特異な流動現象を呈する。ここでは、高分子流体及び繊維懸濁液の急絞り流路における流れについて述べる。

急絞り部の流れの特徴は、流路の形状が急変するため流体粒子は加速され変形速度が急激に増加することである。このため、多くの高分子流体の流れでは急絞り部上流に循環二次流れが発生するが、その原因は高分子流体のshear-thinning粘性と法線応力差にあると考えられてきた。しかし、この両者に原因を求めるだけでは不十分で、流体が持っている伸長特性も考慮する必要がある。そこで、まず安定な循環二次流れが存在する範囲で繊維懸濁液(純粘性流体)と高分子水溶液(粘弾性流体)に対して循環二次流れの挙動を流体の伸長特性に着目して考察する。次に循環二次流れが変動する高分子溶液の不安定な流れについて述べる。

2. 安定な流れ

図1, 図2は絞り比10:1の流路を用いて高分子水溶液の流れを可視化したものである。図3は水飴(ニュートン流体)にガラス繊維を混入したものである。図1は0.1wt%PAA水溶液

を用い、レイノルズ数 $Re=0.403$, ワイセンベルグ数 $We=0.479$ の場合である。流れは壁面に沿っており、ニュートン流体の流れと同じである。図2は0.5wt%PAA水溶液を用い、 $Re=0.534$, $We=0.776$ の場合である。絞り部の両側に大きな循環二次流れがあり、主流はワイングラスの形をしている。このように粘弾性的性質が強くなると循環二次流れが成長する。このような流れはニュートン流体では見られない。図3は水飴にガラス繊維を交ぜた繊維懸濁液(繊維長3.2mm, アスペクト比276, 体積分率0.045%)で、やはり循環二次流れが生じている。しかし、主流の境界は直線状で図2の形とは異なる。

つぎに、繊維懸濁液の数値計算結果を示す。図4は、連続の式

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

Cauchyの運動方程式

$$\rho D\mathbf{v}/Dt = -\operatorname{grad} p + \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

ニュートン流体の繊維懸濁液に対する構成方程式²⁾

$$\boldsymbol{\sigma} = 2\eta D + \phi\mu D : \langle \mathbf{p} \mathbf{p} \mathbf{p} \mathbf{p} \rangle \quad (3)$$

を用いて数値計算をした結果である。ここで、 η はニュートン流体の粘度、 ϕ は繊維の体積分率、 μ は物質定数、 D は変形速度テンソル、 \mathbf{p} は繊維の配向ベクトル、 $\langle \cdot \rangle$ は配向分布関数の統計的平均である。なお、 μ は繊維のアスペクト比 r_a が十分大きい場合には

$$\mu = \eta r_a^2 / \ln(r_a) \quad (4)$$

とおける。(3)式は単純剪断流れでは法線応力差を示さず、伸長流では

*中村喜代次(Kiyoji NAKAMURA), 大阪大学工学部,

産業機械工学科, 教授, 工学博士, 高分子工学

**千葉訓司(Kunji CHIBA), 大阪大学工学部, 産業機械工学科, 助教授, 工学博士, 高分子工学

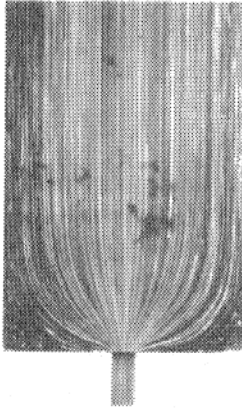


図1 0.1wt% PAA水溶液の流動状態
($Re=0.403$, $We=0.479$)

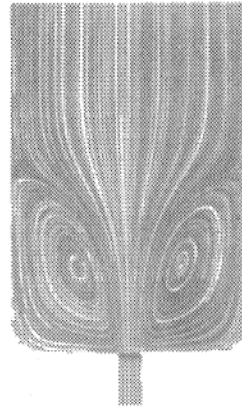


図2 0.5wt% PAA水溶液の流動状態
($Re=0.534$, $We=0.776$)

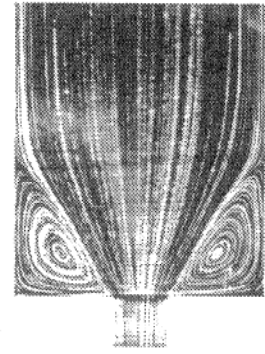


図3 繊維懸濁液の流動状態

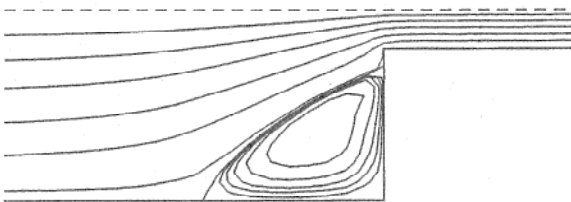


図4 繊維懸濁液の数値計算結果
($Re=1$, $\phi r_a^2 / \ln(r_a)=10$)

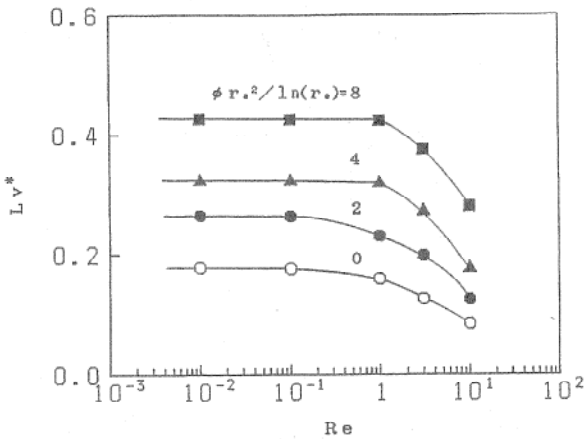


図5 繊維懸濁液の循環二次流れの大きさ

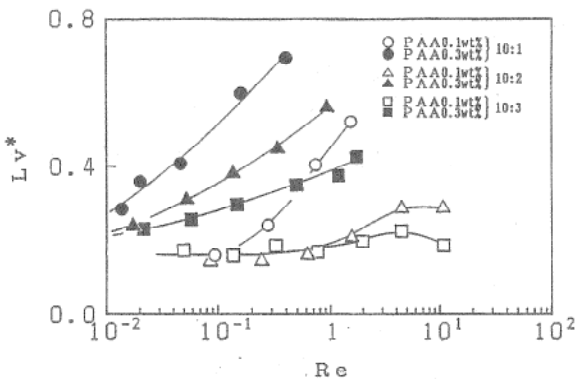


図6 PAA水溶液の循環二次流れの大きさ

$$\eta_e = 3\eta + \eta\phi r_a^2 / \ln(r_a) \quad (5)$$

なる伸長粘度をもつ。また、伸長応力は繊維の体積分率の増加と共に大きくなり、循環二次流れは $\phi r_a^2 / \ln(r_a)$ の値が増加するにしたがって成長する。このことから、循環二次流れの発生、成長には伸長応力が大切であることが判る。

図5に、(1)式から求めた繊維懸濁液の循環二次流れの大きさ Lv^* とレイノルズ数 Re との関係を示す。実験から求めた関係もほぼこれと同じ結果となる。図6はPAA水溶液の実験結果である。これより、繊維懸濁液では循環二次流れの大きさは慣性の影響の小さい範囲でほぼ一定の大きさで、流速を増加しても循環二次流れは成長しない。しかし、繊維の体積分率が大きくなると循環二次流れは成長する。これに対して、PAA水溶液では流速の増加に伴って循環二次流れが成長し、溶液の濃度が高いほど、また絞り比が大きいほど大きく成長する。

3. 不安定な流れ

粘弾性流体が小さいレイノルズ数で急絞り部を流れるとき、急絞り部直前に図2に示すような大きな循環二次流れが生じ、主流はワイングラス状になる。さらに、流速を大きくすると、図7に示すような不安定流動が生じる。これは0.1wt%PAA水溶液を平均流速 $V_m=8.78\text{mm/s}$ ($Re=1.50$) で流したときで左右の循環二次流れが交互に生成、消滅を繰り返している。そして主流は左右に蛇行する。これを模式図にすると

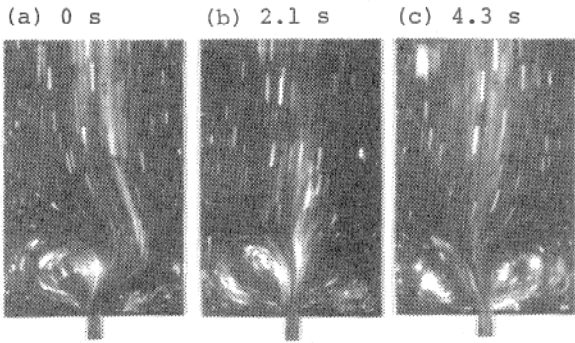


図7 0.1wt% PAA水溶液の不安定流動

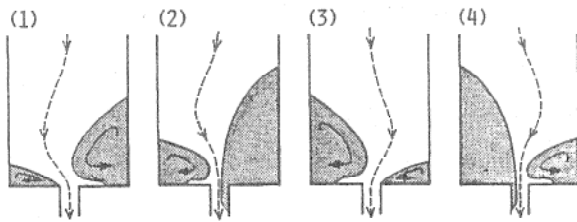


図8 不安定流動時の循環二次流れの模式図

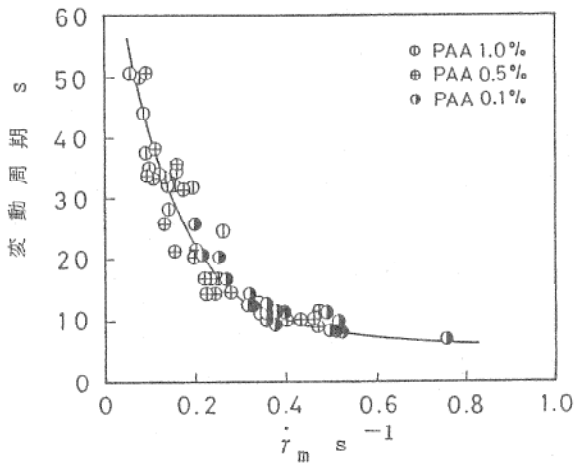


図9 循環二次流れの変動周期

図8となる。さらに、平均流速を大きくすると、それまで周期的に繰返されていた不安定流動が乱れてくる。これに対し、ニュートン流体である水飴では図1に示すように、小さいレイノルズ数では粘弾性流体に見られるような循環二次流れは発生せず、従って、不安定流動も認められない。図9にPAA水溶液における変動周期と平均ずり速度の関係を示す。

4. おわりに

高分子流体の流れはNavier-Stokesの式で表されるニュートン流体の流れと異なった挙動をする。その一つの例として急絞り流路内流れについて述べた。高分子流体力学は、ニュートン流体を対象としたいわゆる古典流体力学のように、まだ体系化が行なわれていない。今後の発展が期待される。

参考文献

- 1) 村上公啓, 修士論文(大阪大学), 1990.
- 2) G.G. Lipscomb et al., J. Non-Newtonian Fluid Mech., 26 (1988), 297.