

非ニュートン流体の直円管内流動について

On the non-Newtonian Flow in a Straight Circular Tube.

岡本 智*
Satoshi OKAMOTO

まえがき

前報¹⁾ウエルド・マークの実験で3wt%前後のCMC溶液流動の可視化観察を行った。その際、二つの流れが出合う接触面が意外な程安定に思われた。曲りの無い非ニュートン流で、単に壁面に平行なずり流動を考えるのが妥当ならば、すべりの無い境界層が消失して二つの流れが直接接触する場合、加速するか乱れるかの変化が起こりそうに考えられる。溶融樹脂でも同様に安定ならば、ウエルド・マーク発生の主因ではないかと考えられる。

また、透明液中を流れ始めた白色液先頭の形状が管中央部のみ特に突出した砲弾型になるのが見られた。流れ指数 n が0.3位の非ニュートン流の円管中の速度分布から考え、plug flow(栓流)に近い先頭形状が予想されるので、初学者には非常に奇異に思われた。これらの理由で、念のためCMC溶液の最も単純な流れとして、水平直円管内の流動を可視化し、その挙動を検討した。

1) CMC透・白二色液による流動観察

写真-1に示す白色液の流入先端の形状は常に生じる

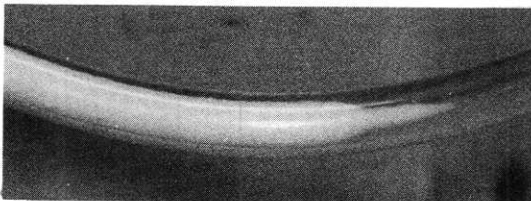


写真1 透明液中に白色液が流入する先端の珍しい形状

のではなく、何かの条件で時折発生するものらしく、前報のウエルド・マークの観察実験の終り頃初めて現れた。それより前は中央の飛び出した部分に相当する単純な形状の先端であった。そして今回述べる内径 ϕ 10, 外径 ϕ 20で長さ100cmの透明アクリル管で行った実験では確実に再現させることはできなかった。けだし、ゆるくわん曲した長いビニール管中に生じた形状から、単にCMCの濃度差だけでなく、あるいはわん曲も関与する現象と

も考えられる。直円管内流動の速度分布は多くの著書に見掛ける第3図の分布で、plug flowに近い形状となるはずである。

そこで、第1図の $n=1$ のニュートン流と $n \approx 0.3$ の非ニュートン流(擬塑性流体の流れで、ある範囲内でべき法則で近似される)の流動形状を可視化して観察した。一定時間の流動形状は速度分布の射影として、速度成分を拡大観察することができるからである。

実験装置は前報¹⁾の第5図に示すもので、切替コックに長さ16cmの ϕ 10透明ビニール管を介して、真直な ϕ 10 \times 100cmアクリル管を継いだものである。まず最初にニュートン流の流動形状を見るため、予めアクリル管中に水を満たしておき、タンク内の約5倍に薄めた

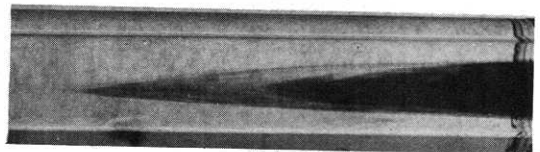


写真2 水中に青インクによるニュートン流

青インクを自然流下させた。その形状を写真-2に示す。これは予想通り放物線の速度分布を証明するものと思われる。

次に非ニュートン流の観察であるが、これには透・白二色のCMC溶液の濃度に関し、3組の組合せについて実験を行った。すなわち

- ① 2.5wt%透明液に3wt% CMC + 3wt% CaCO_3
 - ② 3wt%透明液に3wt% CMC + 3wt% CaCO_3
 - ③ 3wt%透明液に2.5wt% CMC + 0.2wt% CaCO_3
- である。③の CaCO_3 はわずかに白濁する程度に混入した。

流速を変化させるため加えた圧力差は1, 2.5, 3 kg/cm^2 の3通りを①の組合せについて行った。各流動形状は類似しており、本質的差異は認められなかったため、他の②, ③の組合せでは圧力差を2 kg/cm^2 とした。それらの代表例を写真-3, 4, 5に示す。

写真-3は①の組合せで流動距離が増大するに従って

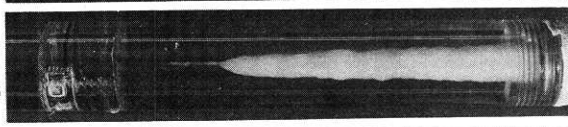
* 相模工業大学

研究速報

(1) 切替コック出口



(2) アクリル管入口 (コックより約20 cm)



(3) アクリル管中央

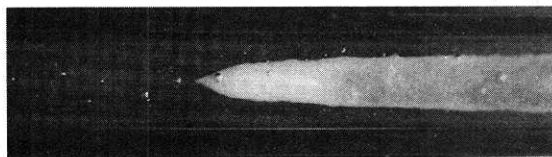


(4) 全 景



写真3 2.5% CMC 透明液中に、3% CMC + 3% CaCO₃ 白色液を 1 kg/cm² で流入させた。

(1) アクリル管入口

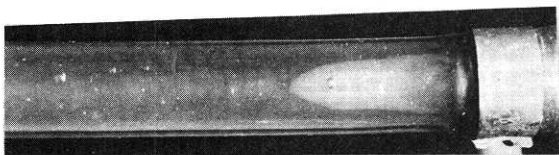


(2) アクリル管中央



写真4 3% CMC 透明液中に、3% CMC + 3% CaCO₃ 白色液 長さ 3 cm を 2 kg/cm² で流入させた。

(1) 切替コック出口



(2) アクリル管入口



(3) アクリル管中央

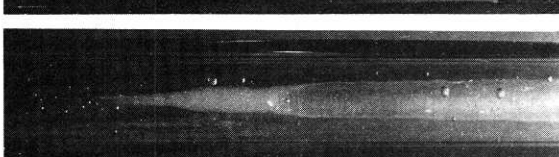


写真5 3% CMC 透明液中に 2.5% CMC + 0.2% CaCO₃ 白濁液 長さ 2 cm を 2 kg/cm² で流入させた。

管中心部先端が細く、特に早く揺れ流れている。(4)に見るように境界層はほとんど流れない。また比較的流れの早い部分では半径方向にも不規則な変動が見られる。これは平均流速を大にした熔融樹脂でメルト・フラクチャーを起こす現象に通ずるものではないかと思われる。以上の通り、予想される栓流型とは大変異なっている。この奇異な現象は、白色液の CMC 濃度がわずかに高いことが原因とも考えられるため、ほぼ同一濃度の液について観察した。

写真-4が②の組合せの例である。管中心軸のみ特に早く流れる現象がない。また最先端のとがり具合も流入初期と末期でほとんど変化しない。しかし境界層近辺はほとんど流れないこと、微弱ながら半径方向の振動が認められ点とは①と共通である。なお、この実験は比較的早い中央部の流れを見るため、白色液は約 3 cm 長さで切り替えたものである。あるいはこの定常流動を栓流と呼ぶのかも知れないが、最先端のとがりは流速分布の形状と合わない。また、このような流速分布が熔融樹脂流に生じているらしいことは、プラスチック丸棒から薄円板を切り取り、加熱変形させると三角帽状になる町田の実験²⁾からも肯定されると思われる。

写真-5は CMC の濃度の対応を①と逆にしてある。この場合、切替コックを出た流入初期には、先端にとがりが無いが、流れるに従って中央部が早くなり、特に早く流れる軸心部分は①の場合より太い。なお白液は長さ約 2 cm 切り替えて実験したので、後方の半透明中心流は境界層部分と同一濃度である。

2) 円偏光による透視観察

前節の二色液による観察では、 $n \approx 0.3$ の非ニュートン流の速度分布から予想される形状とはかなり異なる流動に思われる。そこで第1図に示す方法で、円偏光による流動複屈折の観察を行った。写真-6はその一例である。流れ方向に約 90° に開いた円錐面にほぼ平行に無数の縞模様が見える。この縞模様は写真-7に示

すように静止時には現れず、流れと同時に発生し、露出時間を長くするとボケる。この縞模様は最大せん断応力面に発生する微小すべりに起因すると考えられ、時々刻々発生消滅移動するかに見える。内壁に密着した薄い境界層には認められず、すべらないとする仮定は妥当に思われる。Maxwell³⁾らの実験で流速分布が変化してい

るのに相当しているようである。なお写真に多くの白点があるが普通光では全く透明な液である。

管内前方が空気になっている流動液の最先端を見ると、写真-8になっている。写真-1とは異なるが、中央の早い流れが半球状に突出し、溢れた液は写真9のように、斜前方の壁に薄層の重なった流動になって、つぎつぎに押し付けられ、まだなじまない多数のひだとして見える。管中心部、薄い境界層とその中間部とで単に管軸方向のずりとは異なる複雑な機構で流動すると思われる。定常流も同様に見えるから、二つの流れが平行に近い場合には、接触境界面は互いに押合いの平衡で安定可能と

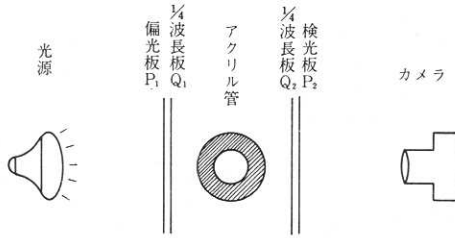


図1 円偏光透視法

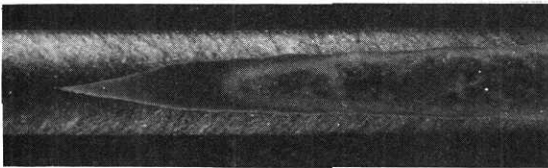


写真6 円偏光透視

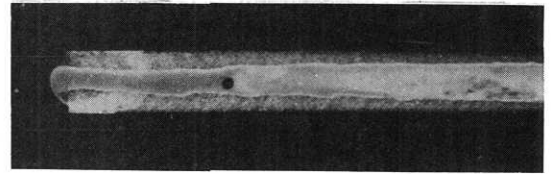


写真8 流入液最先端の円偏光透視 (中央部が半球状に突出している)

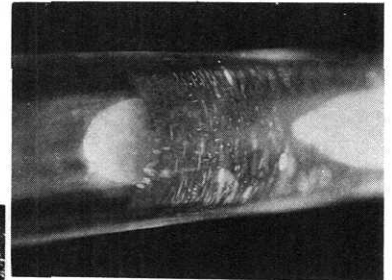


写真9 管外斜前方から見た流入液最先端

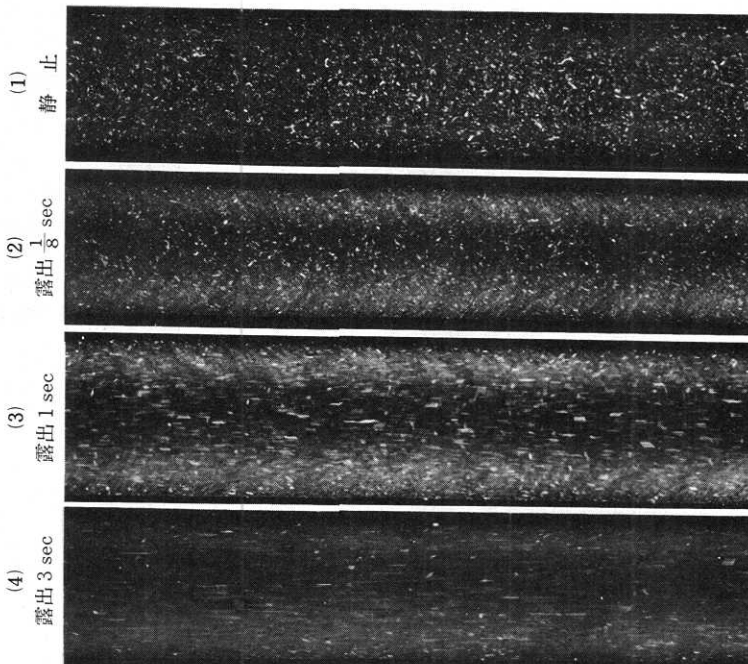


写真7 透明 CMC 25% 溶液の $\phi 10$ 円管内の流動の円偏光透視 (平均流速 1.78mm/sec 右から左へ流す)

考えられ、ウエルド・マークの実験¹⁾での現象が説明され得よう。

3) 流速分布の測定

複雑な流動機構が存在するならば、簡単な手法では測定にかからないかも知れないが、一応第2図の方法で流速分布を調べた。外径 $\phi 20$ アクリル管上面に長さ 150 mm、間隙 1 mm の第2スリットを軸方向に密着させ、その上方の 100 mm の位置に同様な第1スリットを設け、さらにその上方のコンデンサー・レンズを通して、管の直径と中心軸を含む厚さ 1 mm 長さ 150 mm の区間のみを照明できるように、撮影窓を残してアクリル管を囲む。トレーサーとして適当なもの

研究速報

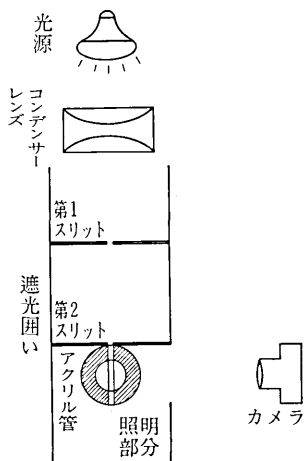


図2 流速分布の測定法

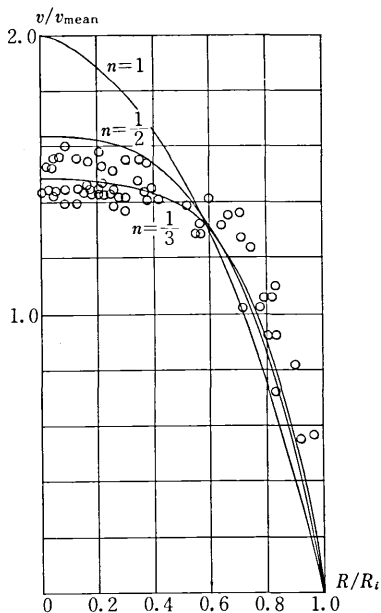


図3 直円管流のべき法則による流速分布曲線と測定例

を考え付かないが、とりあえず微小気泡（後には微小ガラス・ビーズも試みた）を混入し、暗視野での気泡の反射光を撮影、そのトレースと露出時間とから算出する方法である。測定結果の一例は第3図に示すものである。CMC 溶液は流動時構造粘性の低下があり、流れ指数 n もわずかに大きいこと、カメラのシャッター実時間のバラツキ、トレーサー微小気泡の大小等を考慮すると、非ニュートン流ではあるが、流速分布に変化の有無を論ずるのは少し無理と思われる。

微小硝子ビーズをトレーサーに用いる方法も試みつたあるが、別の攪乱因子が未処理のため、流速分布の高精度測定は今後の問題とすることとした。

むすび

初めて非ニュートン流動に取り組んで見て珍しい現象に驚かされる。本研究は他の実験装置を流用した予備的観察で、まだ明確な結論に至らない。ニュートン流での望遠鏡流動 (telescopic flow) では単に管軸方向のずり線で解析されている⁴⁾ ようである。しかし非ニュートン流の場合まだ具体的には不明であるが、より複雑な流動機構が存在しているらしく思われる。

なおこの実験を始めるに当たっては石原智男教授からご賛同を頂き、記録写真については工学院大学大柳康助教授のご検討を頂いた。また永田肇君に種々実験の協力をいただいた。記して厚くお礼申し上げますとともに、さらに大方のご教示を賜われば幸甚に思います。

(1970年2月27日受理)

参考文献

- 1) 岡本智：本号別掲：インフレーション成形におけるウエルド・マークの発生機構について
- 2) 町田，中川，岡井：第28回塑性加工連合講演会論文集(1977-11)，378
- 3) 町田輝史：プレス技術，16-1(1978-1)，12
- 4) A.S.Lodge, 倉田，尾崎共訳：弾性液体，248(1975) 吉岡書店，京都

正誤表(4月号)

頁	段	行	種別	正	誤
144	左	↓ 1.4	(3) 式	δ_k^{ij}	$\delta_k x^{ij}$
"	下		Fig. 2	10ϕ ROD	10ϕ ROD&
145	右	↓ 2, 5, 6, 7	本および(5)式	\ddot{X}_{0MAX}	\underline{X}_{0MAX}