



回転同心円筒間溶液流動に於ける滴環の形成

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2012-11-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 武田, 文司 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.32150/00000938

回転同心円筒間溶液流動に於ける渦環の形成

武 田 文 司

北海道学芸大学函館分校物理学教室

Bunji TAKEDA : Formation of Vortex Rings in a Liquid
Flowing between Concentric Rotating Cylinders

It has been known by Taylor's experiment⁽¹⁾ that vortex rings are formed in a liquid flowing between the concentric rotating cylinders. In my recent publication,⁽²⁾ rotating velocity of the inner cylinder is limited to 1000RPM. This experimental foundation is reported in this paper.

序

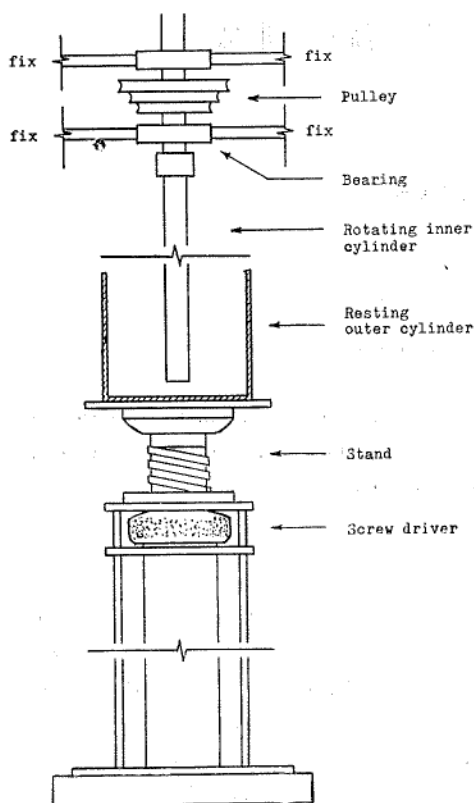
同心円筒間に溶液を入れ、内筒亦は外筒を回転させるか或は両者を同時に同一方向亦は逆向きに任意の速度で回転させた場合、溶液は一般に同心円流とはならずいくつかの規則正しい安定な渦環流となる。かかる渦環流の形成についての実験並びに流体力学的理論については、既に古く1923年 G. I. TAYLOR⁽¹⁾ によつてなされた。近時此の研究が再び行われ、S. CHANDRASEKHAR⁽²⁾、R. J. DONNEIY⁽³⁾、W. H. REID⁽⁴⁾、D. MEKSYN⁽⁵⁾等に依る報告がある。筆者も1957年以来日本物理学会に於いて報告し、特に、1961年に、内筒の長さとの関係から溶液の動粘性がかかる流動に重要な要因である事、亦実験結果を解析する事によつて、回転同心円筒間溶液の流動に於ける境界領域での純末端効果及び動粘性効果の影響範囲を指摘した。⁽⁶⁾ 筆者の実験は、外筒を固定し、内筒のみを回転した場合で、内筒の回転数を1000RPMに限定した。回転数を特に1000RPMに限定した理由については、前記報告⁽⁶⁾にも述べた如く、使用した半径0.50cmの内筒に於いて最も安定した渦環を形成するからである。筆者は本報告で、限定した実験的根拠を述べる。尚本文中、実験装置並びに測定方法の一部については、前記報告⁽⁶⁾と重複するものである事を了承されたい。

測 定 方 法

回転同心円筒装置の概略をFig.1に示す。図より明らかな如く、本装置は、外筒を固定し、内筒のみが回転出来るものである。

支持台(stand)をscrew driverで最低の位置におき、容器(outer cylinder)に測定溶液を入れる。内筒(rotating cylinder)を一定の回転数で回転しつつscrew driverで支持台を上昇させ内筒を徐々に溶液中に入れる。液中の内筒の長さが増加すると、急激に円筒間溶液に一对の渦環を形成する。対をなしている2個の渦環は、既に古くTAYLORによつて報告されているように、回転方向が互に逆向きであり、外部より観察する場合に、此れら渦環の接触面は層となつて見える。内筒の深度増加に共なつて、渦環は不安定となり分裂を起し、更に2個の新しい渦環を層の部分から形成する。深度増加につれて、その都度どれか任意の1層で新しい渦環を生ずる。その結果、内筒の深度に無関係に渦環の増加は2個づつとなる。前報告⁽⁶⁾で定義したcritical Kinematic viscosity ν_c よりも小さい領域の溶液では、最初層は瞬時にして大体内筒を三等分する点に形成されるが、 ν_c よ

Fig. 1 回転同心円筒装置



り多少大きい領域では二等分点に一層を形成する。よりかなり大きい領域の溶液では、溶液表面に近く且つ内筒の近傍から形成される。従つて層の深度測定は、回転を続行しつつ *micrometer microscope* で測定した。層が外筒壁へ向つて上昇の形をとる場合は、内筒壁での層深度を測定値とした。

実験に使用した溶液は *Polystyrene-Benzene* 溶液であり、揮発性のため実験中の濃度変化に充分の考慮を行い、亦溶液の調製にあつては、不均一性（不完全溶解）をなくするために熱処理法⁽⁷⁾を用いた。

測定温度は25°Cであり、室内で行つたため温度誤差は±0.5°Cである。

記号及び円筒

- r_o ……外筒内半径 (cm)
- r_i ……内筒半径 (本報告では1種類のみで $r_i = 0.50\text{cm}$)
- c ……溶液の濃度 (g/l)
- L ……液中の内筒の長さ (cm)
- H ……液表面より層迄の長さ (深度) (mm 亦は cm)
- G ……2筒の円筒の間隔 (mm 亦は cm)
- R ……内筒の一分間当りの回転数 (RPM 亦は r/m)

$\frac{G}{H}$ …… = $(r_o - r_i)/H$, 渦環断面の扁平度合を表わし, 1.00よりずれるにつれて扁平となる。

実験に用いた外筒及び内筒の半径並びに *gap* は下記の通りである。いずれも硝子製である。尚, 下記外筒記号 a, b, c, d, e は Fig. 11~14 に於いてそのまま表示されている。

外筒記号	内半径 (cm)	gap (cm)
a	1.95	1.45
b	2.35	1.85
c	2.95	2.45
d	3.20	2.70
e	3.35	2.85
内筒半径 (r_i)	0.50	

実験結果

I. L一定の場合の各種濃度溶液に対する H と R の関係.

$L = 3.75\text{cm}$ と固定して, 内半径 (cm) がそれぞれ 1.95, 2.35, 2.95, 3.20 の4種の外筒を用い, 溶液濃度 g/l が 90, 100, 120, 160, 200, 220, 250, 280, 300 の場合についての H と $\log R$ との関係を Fig. 2~5 に示す。

各図に於いて, 上記各濃度溶液の一部実験曲線が見出されないものがあるが, これは与えられた条件下で対をなす渦環が形成されない事を意味する。例へば, Fig. 2 で $c = 250, 280, 300$ の曲線

Fig. 2~5 各種濃度の溶液に於ける層の深度と回転数との関係

Fig. 2

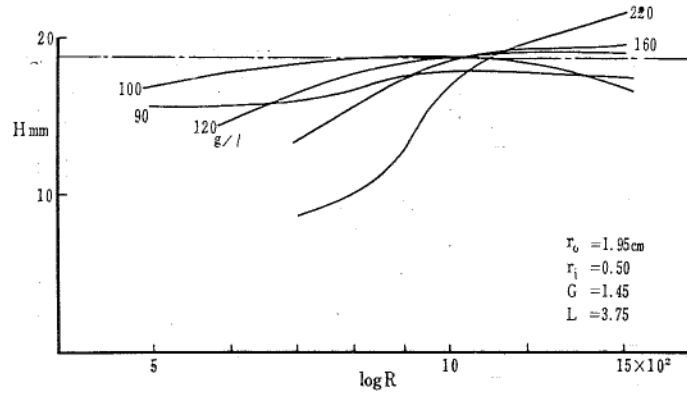


Fig. 3

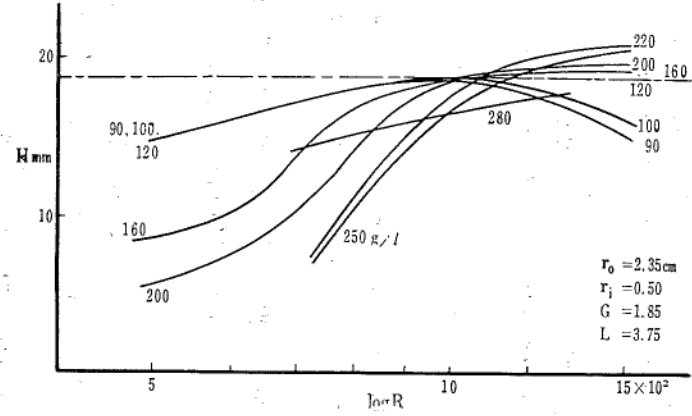


Fig. 4

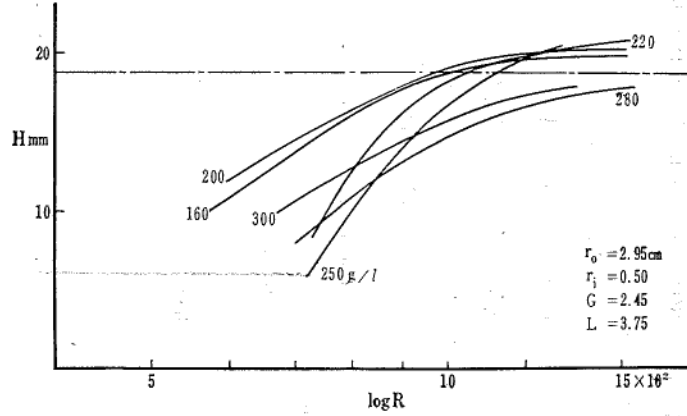
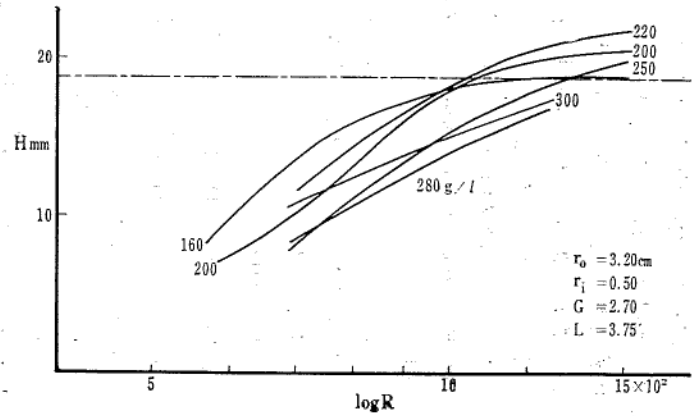


Fig. 5



が見られないが、これは *Weissenberg effect* を共い、 $G=1.45$ では対の渦環が形成されない事を示し、Fig. 5 で 120 g/l 以下の曲線が存在しないのは、この濃度以下の溶液は $G=2.70$ では2層を形成し渦環は3箇になるが、 $L=3.75$ では渦環形成の条件に不適当なため形成されない。

実験結果より次の事項が認められる。

- 1). 濃度の増加につれて $dH/d \log R$ は大きくなる。即ち一定の R では濃度が大きい程 H は小さく、 ΔR に対する ΔH が大きい。但し、*Weissenberg effect* を共うような濃度 (250 g/l 以上) では、 $dH/d \log R$ は再び減少する。
- 2). R が $1000 \sim 1200$ の領域で $dH/d \log R = 0$ となるのは、Fig. 2, 3 で 200 g/l 以下の溶液である。
- 3). いづれの r_0 に於いても 200 g/l 以上では $dH/d \log R$ は 0 とならない。かかる濃度の領域では、 L を大きくした場合にも多くの渦環を形成せず、従つて渦環形成の実験には不適当なものである。⁽⁶⁾
- 4). $R > 1600$ では流動不安定で測定不能となり、 1800 でに攪乱状態となり渦環は形成されない。
- 5). Fig. 2~5 で $H=1.88$ に破線で示したのは $\frac{L}{2}$ の値であり、 $dH/d \log R$ が $1000 < R < 1200$ で 0 に近づくのは $H = \frac{L}{2}$ である事を示している。

各種濃度の溶液について流動を調べるためには、 R の値如何によつて H が変動するのでは意味がなくなり、亦多少 R に変動が起つてもその変動による H の変動が殆ど 0 に近い R をあらかじめ決定しなければならない。

Fig. 2~5 で得られる事は、 R を 1000 RPM から 1200 RPM に限定する事が望ましいと言う事である。但し、内筒の末端が自由な状態にある場合は、 L を大きくすると揺れを生ずるから、限定された R の範囲で出来るだけ R の小さいものを選ぶべきである。

II. c 一定の場合の各 L に対する H と R の関係.

$c = 120$ の溶液を用いて、それぞれの *gap* に於いて H と R の関係が L によつて如何に変化するかを示したのが、Fig. 6~10 である。

- 1). *gap* の如何によらず、I. と同様に $H = \frac{L}{2}$ が成立する。
- 2). 120 g/l の溶液では 200 g/l 以上の溶液と異なり、 R の低いところでも H はさほど $\frac{L}{2}$ よりも小さくなつていないが、*gap* が大きくなるにつれて、 L の小さいものは渦環を形成し難くなる。然し、その場合も H が $\frac{L}{2}$ よりも極めて小さくなるのは $R < 1000$ の領域であつて、 $R >$

Fig. 6~10 溶液濃度一定とした場合の各内筒長さに対する層深度と回転数との関係

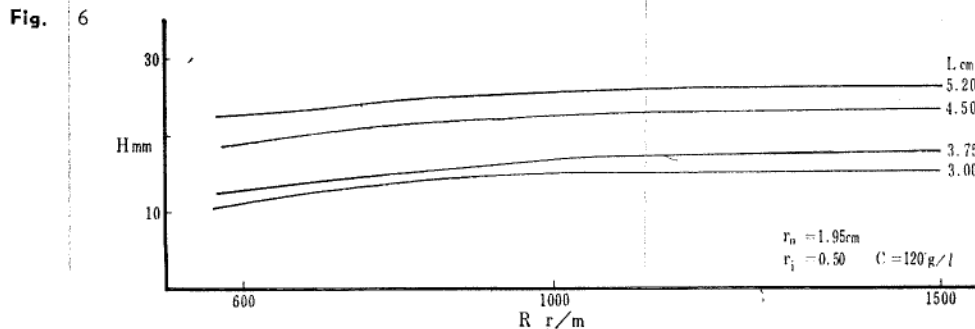


Fig. 7

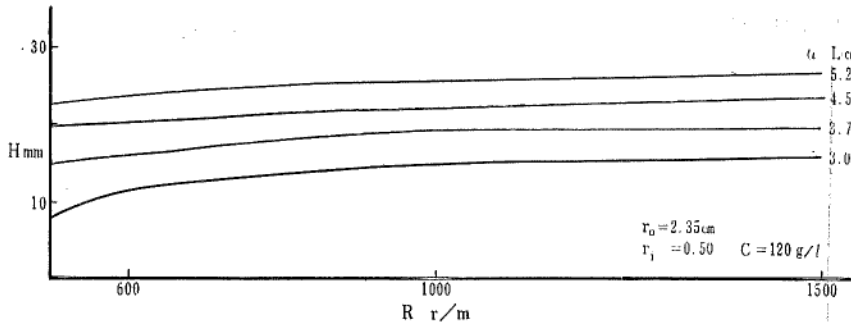


Fig. 8

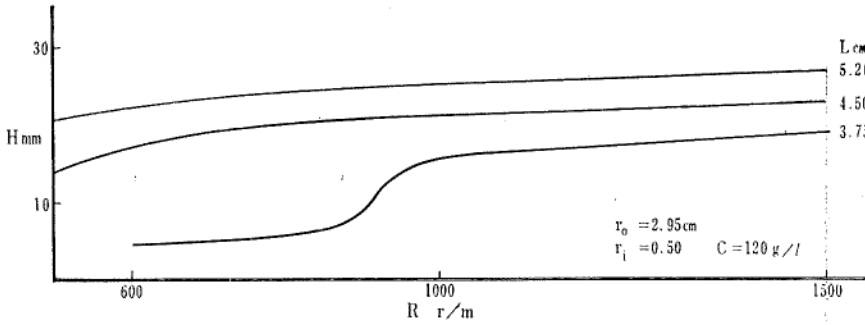


Fig. 9

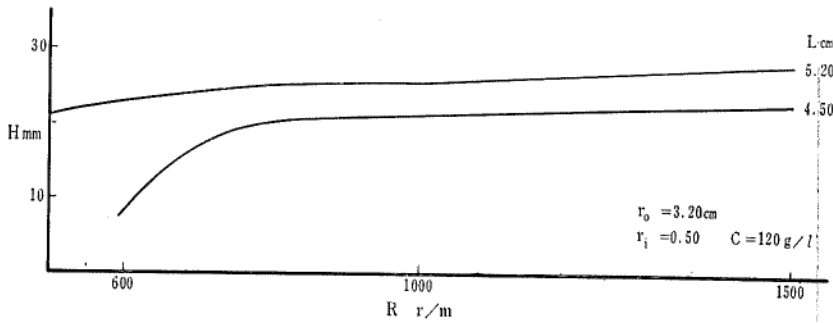
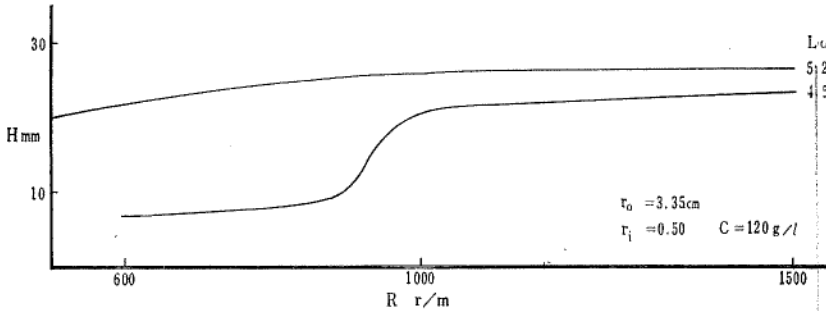


Fig. 10



1000ではHは大体正常値となる。正常値になり得ないものは、 $R < 1000$ の領域に於いても既に渦環は形成されていない。

Ⅲ. L 及び c 一定の場合の各種外筒に対する H と R との関係

Fig. 6~10を書き換えて、それぞれのLに於いてHとRとの関係が *gap* によつて如何に変化するを示したのが Fig. 11~14である。

Fig. 11~14 溶液濃度を一定にした場合の各種外筒に対する層深度と回転数との関係

Fig. 11

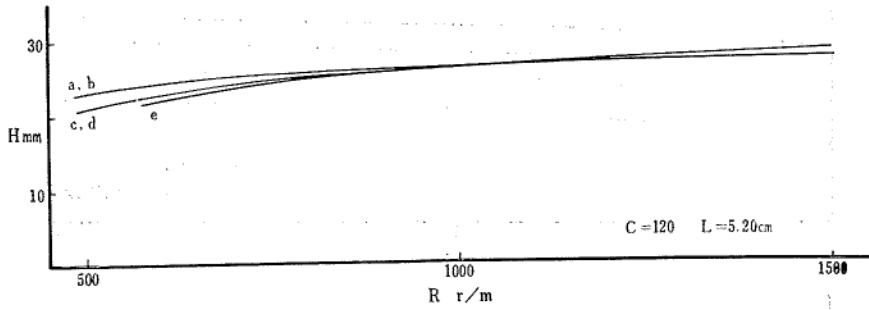


Fig. 12

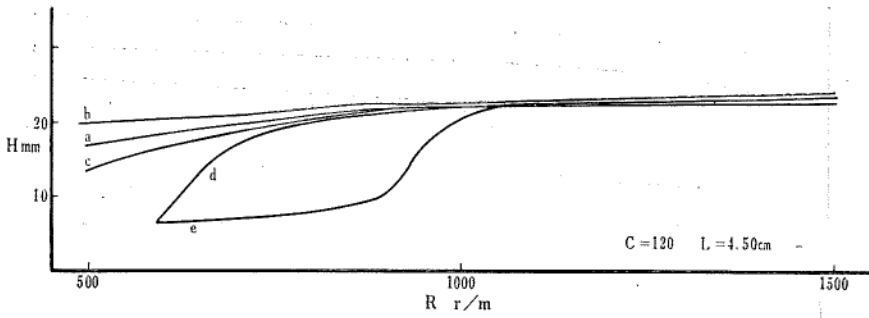


Fig. 13

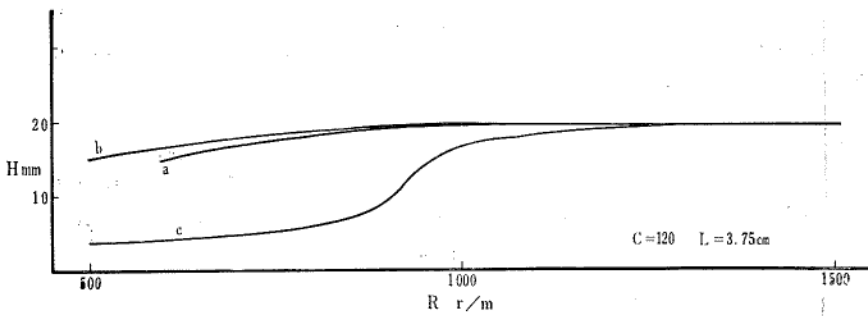


Fig. 14

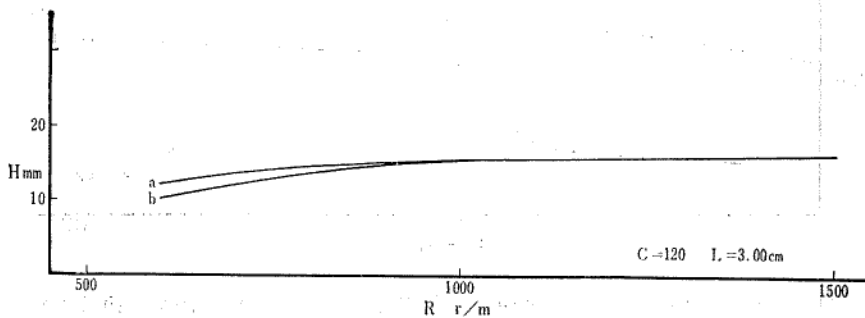


Fig. 6~10 を書き換えたものであるから、図から得られる結論は同一であるが、更に次の点が明瞭となる。

- 1). gap の如何によらず、 $R > 1000$ では $H \doteq \frac{L}{2}$ が成立する。

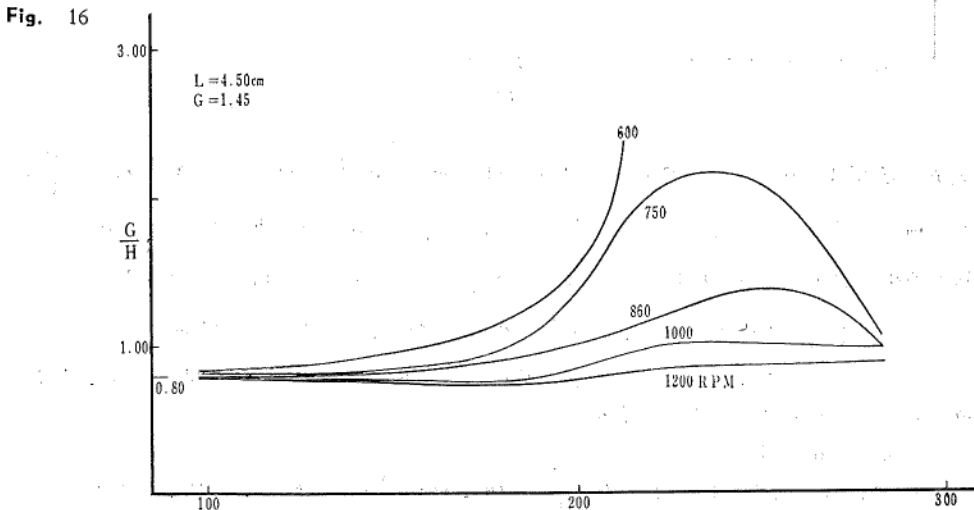
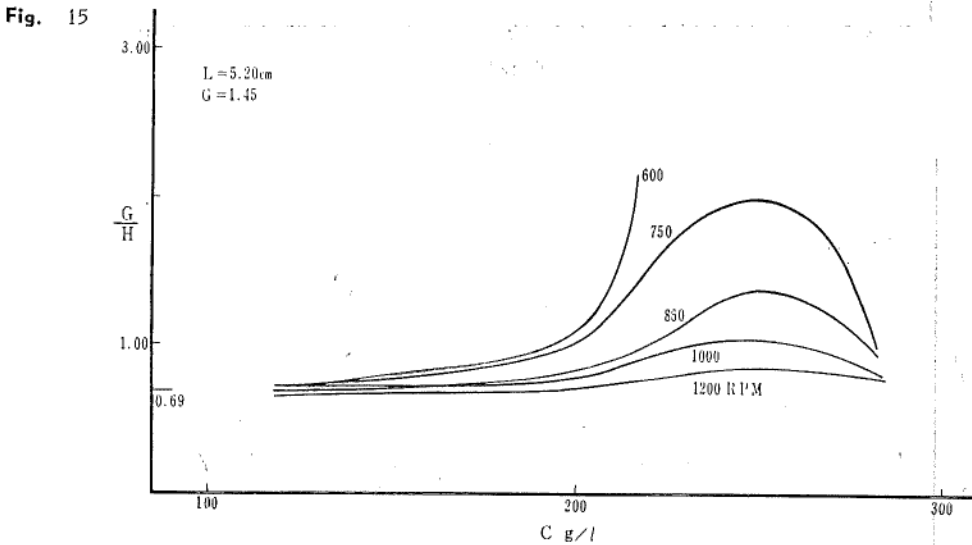
2). $R < 1000$ の領域で $H \ll \frac{L}{2}$ であつて, R を多少変化させても H が大きく変化しない場合は, その使用した外筒と内筒の *gap* に於いて渦環の対が形成されるために必要な L の限界値に近い事を示しており, それよりも小さい L では層を形成しない事を暗示するものと考えてよい。

IV. L 及び G 一定の場合の各 R に於ける c と $\frac{G}{H}$ との関係

渦の形態として円形渦流が最も安定である事は論をまたない。然し L を漸次増加し渦分裂を起すまでは, 渦の *spacing* の形態は変化しつづけ, 上下に扁平な渦が上下に長い形に変化する。従つて渦分裂はその扁平度合によつてより安定な渦形態となるため起るものと考えてよい。

$G = 1.45$ とし, 各 L 及び R に対して, 扁平度合と濃度とが如何なる関係にあるかを Fig. 15~18 に示した。

Fig. 15~18 外筒を一定とした場合の各回転数に対する扁平度合と濃度との関係



回転同心円筒間溶液流動に於ける渦環の形成

Fig. 17

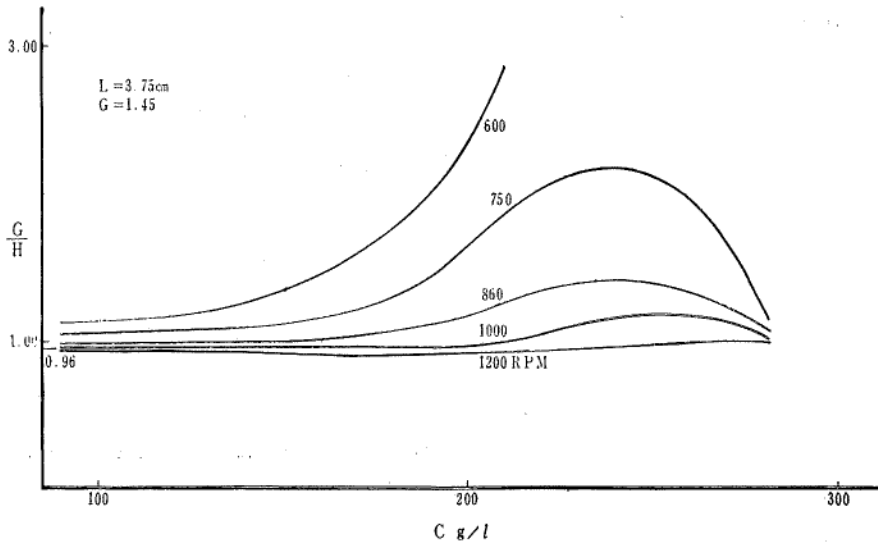
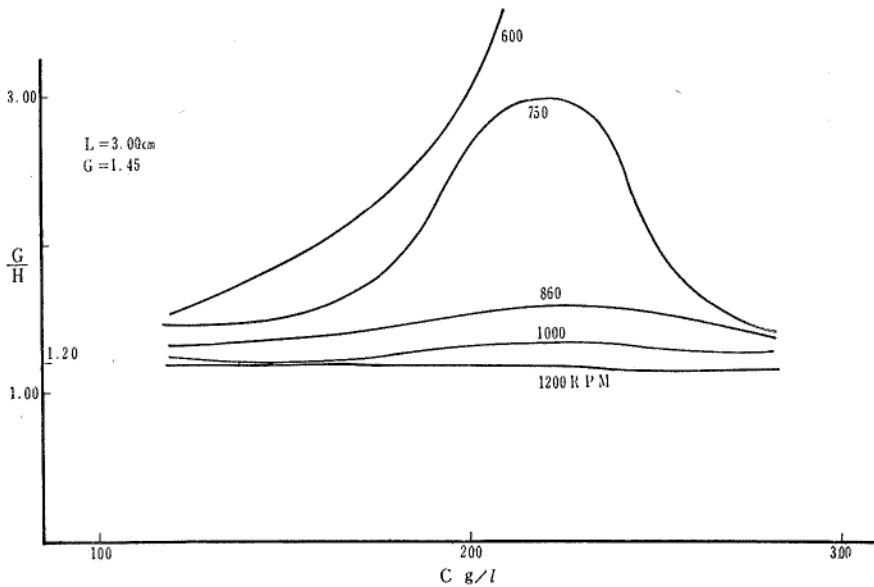


Fig. 18



$\frac{G}{H}$ は gap と層深度の比であり、 G 一定とすると H の大きい程 $\frac{G}{H}$ は小さくなる。即ち、 $\frac{G}{H} > 1$ では上下に扁平な渦となり、 $\frac{G}{H} = 1$ では円形、 $\frac{G}{H} < 1$ では軸方向に長い楕円形の渦となる。図の $\frac{G}{H}$ 軸の内側に記入した0.69 (Fig. 15), 0.80 (Fig. 16), 0.96 (Fig. 17), 1.20 (Fig. 18)は、 $H = \frac{L}{2}$ としたときの $\frac{G}{H}$ の値である。 L の大きい場合に濃度の低い部分の実験値の存在しないのは、渦環が形成されないのではなく、多数形成(最初から3箇の渦環、従つて層は2箇)するため、今一層の場合をとりあげているので省略した。

各図より次の諸点を知り得る。

1). $R \geq 1000$ では、 c , G の如何によらず、 $\frac{G}{H}$ の値は $H = \frac{L}{2}$ に一致すると見なしてよい。

2). L の増加, 換言すれば $H = \frac{L}{2}$ を満足する $\frac{G}{H}$ の特定値の増大につれて曲線全体が低濃度側へずれる。

3). I, II, III. と同様に $1000 < R < 1200$ が妥当な回転数である事を示している。

図からは, 渦環の安定性に対する扁平度の寄与は結論されない。理由は, 観測で各渦環の渦中心が中央に存在しない事実から, 各部分での流速の変化従つて内部圧力の非対称性によるものではないかと考えられる。

結 論

1). 1層の場合, $H = \frac{L}{2}$ が成立する。

2). G, L, c の如何によらず $r_1 = 0.50 \text{ cm}$ の場合には, R を 1000RPM から 1200RPM 迄の範囲に限定する事は H の R 依存性を出来るだけ小さくするために必要な事である。

文 献

- 1) G. I. Taylor : Trans. Royal Soc., **A 223**, 289 (1923)
- 2) S. Chandrasekhar : Proc. Royal Soc., **A 246**, 301 (1958)
- 3) R. J. Donnelly : Proc. Royal Soc., **A 246**, 312 (1958)
258, 101 (1960)
- 4) W. H. Reid : Proc. Royal Soc., **A 244**, 186 (1958)
- 5) D. Meksyn : Proc. Royal Soc., **A 187**, 480 (1946)
- 6) 武田文司 : 高分子化学, **198**, 601 (1961)
- 7) 武田文司 : 北学大紀要 (第二部), **10**, 52 (1959)