

テイラー渦流れの様子と波動テイラー渦流れへの遷移*

(第二報 固定端における偶数セルの場合)

戸谷 順信**・植木 良昇***

Status of Taylor Vortex Flow and Transition
to Wavy Taylor Vortex Flow

(2nd Report The Case of Even Cell in Symmetric End Condition)

Taylor vortex flow between concentric rotating cylinders, especially inner Cylinder is rotating and outer cylinder is at rest, in the symmetric end conditions was investigated by means of a flow visualization technique. The experiments have been performed on an apparatus of particular small aspect ratio to study the transition from Couette flow to Taylor vortex flow, from Taylor vortex flow to wavy Taylor vortex flow, and from wavy Taylor vortex flow to turbulent flow. Also the cell structure, the variance of cell height relative to Reynolds number, and the critical Reynolds number from Taylor vortex flow to wavy Taylor vortex flow were investigated.

In the symmetric end conditions, there are only even number of cells but not odd number cells. And the structure depends on an aspect ratio. There are no difference of the variance of height between the upper and bottom cell. The critical Reynolds number from Taylor vortex flow to wavy Taylor vortex flow was revealed. This shows the stability of Taylor vortex flow.

1. 緒 言

同軸回転二重円筒間における粘性流体の流れは、内円筒の回転速度が増加していくとクエット流からトーラス状の流れ（セル流れ）が積み重なったテイラー渦流れが発生することが良く知られている。この流れを線形範囲内で理論的に、実験的に初めて明らかにした G. I. Taylor⁽¹⁾ 以来、多くの研究報告がなされている。これらの理論的、実験的研究において定められている円筒の長さの条件は無限に長いとされていることが多い。これは G. I. Taylor の初めの報告が円筒の長さが無限に長い場合について行われており、その上この仮定において、理論的結果と実験的結果が非常に良く一致しているためであると思われる。しかし、円

* 昭和62年3月 日本機械学会、第16回学生員卒業研究発表講演会にて発表

** 機械工学科 助手

*** 機械工学科 助教授

原稿受付 昭和62年9月29日

筒の長さが有限であるときには端面の影響が大きくなり、そのために実験結果は円筒長さにより異なってくる。しかし有限円筒長さにおける実験的、理論的研究は僅かであり⁽²⁾⁽³⁾ 余り進んではいない。著者らは前報⁽⁴⁾ においてアスペクト比（内外円筒の隙間の長さに対する円筒の高さの比）が小さい場合において、特に自由端（流体の上面が自由表面の場合）についてのテイラー渦流れの変化と波動テイラー渦（前報では波状テイラー渦と表現した）への遷移に関して述べた。本報はアスペクト比が小さい場合の固定端（流体の上表面と下端が剛体で囲まれている場合）についてテイラー渦流れの変化と波動テイラー渦への遷移に関して述べる。

記号

R_1 : 内円筒の外半径	R_2 : 外円筒の内半径
D : 内外円筒の隙間 ($=R_2 - R_1$)	L : 作動流体の高さ
R_1/R_2 : 半径比	Γ : アスペクト比 (L/D)
ν : 動粘度	ω : 角速度
Re : レイノルズ数 ($=\omega R_1 D/\nu$)	

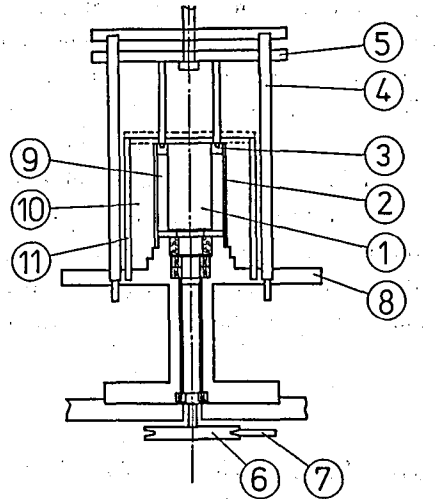
2. 実験装置及び実験方法

2-1 実験装置

本実験で使用した実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は前報で使用した実験装置に固定端を装置の上面に追加設置したものである。スライドリングはアクリル樹脂製でガイドロッドを通して滑らかに任意の位置に設定できるようになっている。その他の項目に関しては前報と同じなので省略する。

2-2 実験方法

流れの様子は円筒の外側から流れの全体を観察する方法と、円筒にスリット光を当てることによって断面を観察する方法をとった。又、偶数セルの高さの変化を Re 数の変化に対して求めた。セル数は2, 4, 6, 8個のセルに関して行った。テイラー渦流れの状態は Re 数が増加すると、セルとセルの境界が円筒軸方向へ波打つようになる。この状態を波動テイラー渦流れという。一方、テイラー渦は Γ の値に関してセルの数が異なり、そのうえ同じ Γ の値でも異なった数のセルが発生することが明らかになっている。よって Γ に対して存在し得る全ての数のセル流れに関して波動テイラー渦へ遷移する臨界レイノルズ数 (Rc) を求めた。実験方法の詳細は前報と同じである。



1. Rotating Inner Cylinder. 2. Fixed Outer Cylinder. 3. Slide Ring. 4. Guide Rod. 5. Slide Disc. 6. Velt Wheel. 7. V-Velt. 8. Table. 9. Working Fluid. 10. Transparent Liquid. 11. Outer Bath

図1 装置

3. 結果と考察

3-1 流れの可視化観察

3-1-1 レイノルズ数に対する流れの状態

流れの状態の写真の例を図2と図3に示す。Re数が小さいとき流れの状態はクエット流であるが、Re数が増加すると内円筒表面近くから外円筒へ向かって流れが発生し外円筒表面に達した流れは、今度は上下に分かれ逆に内円筒へ向かって流れていき、結局湧き出す流れと吸い込む流れが構成される。既に多くの研究報告⁽⁵⁾にあるように固定端の場合における

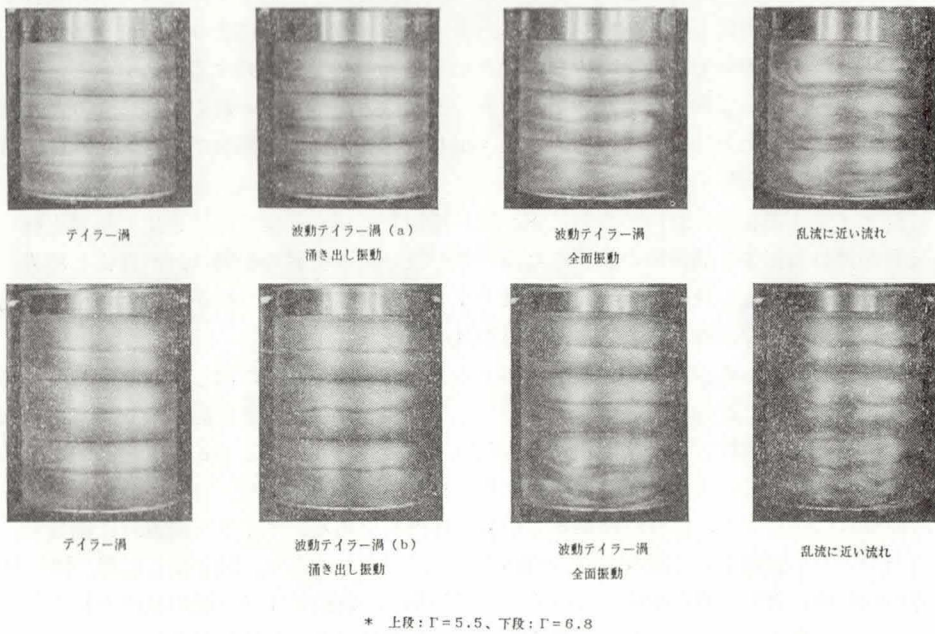


図2 流れの状態写真(6セル)

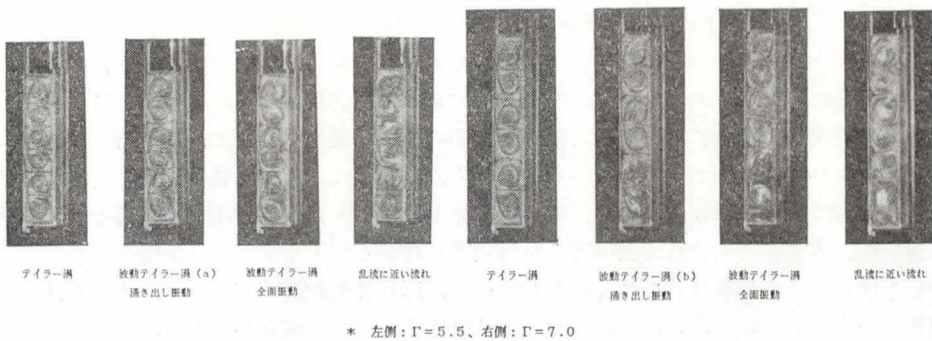


図3 セルの断面写真(6セル)

セルの数は偶数個である。このセルの構造は湧き出し境界が最上位と最下位に位置するようになる。テイラー渦の構造に関しては他の研究報告⁽⁶⁾では吸い込み境界が最上位と最下位に位置するような構造を成す場合が報告されているが本実験においてはそのような構造は発生しなかった。又、制御パラメータの条件によっては奇数個のセルも発見されているが、本実験においては偶数個のみであった。

さらに Re 数が増加するとテイラー渦流れは波動テイラー渦流れになる。波動テイラー渦流れは前報でも述べたようにその波の打ち方によって二つに分類することができる。すなわち(a)最も中央にある湧き出し境界（奇数本の湧き出し境界の場合は一本、偶数本の湧き出し境界の場合は二本）が振動し、その後の Re 数の増加により中央の湧き出し境界から上下の方向の湧き出し境界へ順番に振動する場合と(b)最上位と最下位のセルに三日月型の模様が発生し外円筒の回転方向と同じ方向へ移動し、その後 Re 数の増加により最上位と最下位の端の湧き出し境界が振動し、次第に中央の湧き出し境界が順番に振動する場合である。但しこの場合、条件によって最下位の湧き出し境界の振動の方が強く Re 数の増加により最下位の湧き出し境界から上方に向かって次第に湧き出し境界が振動する場合がある。これは装置の僅かな非対称性から生ずると思われる。

波動テイラー渦状態においてさらに Re 数が増加していくと全ての湧き出し境界と吸い込み境界が波打ち出す全面振動の状態になる。この吸い込み境界の振動は、湧き出し境界の振動と周期、振幅ともに異なっている。波動テイラー渦には二種類の型があったが全面振動についてはどちらもほぼ同じ状態であると思われる。

全面振動の状態からさらに Re 数が増加すると全面振動がさらに激しくなりその波動テイラー渦状態は乱流に近い状態になる。しかし、かなり Re 数が大きな値になってもそのセルの構造はそのまま維持され崩壊することはない。本実験においても Re 数を約3000まで増加させたが全体としてのセルの構造の変化はみられなかった。

断面写真に注目する。写真に向かって左側が外円筒である。テイラー渦流れに関して、セルの一つ一つが規則正しく積み重なっていることが明らかであり、湧き出し境界、吸い込み境界が回転軸に対して垂直を成していることがわかる。波動テイラー渦の状態を見ると、テイラー渦の状態に比較し、写真状で白く写っている部分があり、流れが乱れていることがわかる。又、湧き出し境界が外円筒側で外円筒に対して垂直でなく振動していることがわかる。全面振動、乱流に近い流れになると、乱れた部分が増加している。

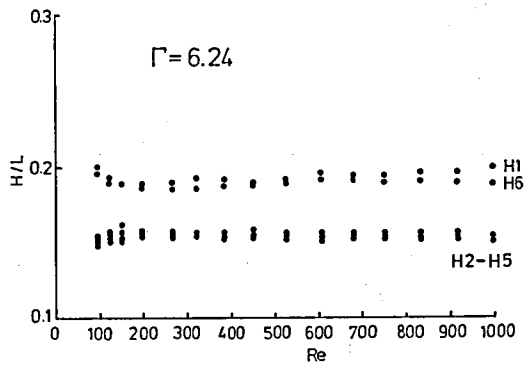
3-1-2 アスペクト比に対するセルの数

固定端におけるセルの数は偶数個である。本実験においてアスペクト比 (Γ) を約 1.3~7.1 まで変化させたときセルの数は 2~10 個であった。偶数個のみが発生したことに関して、前報では自由端の場合において奇数個と偶数個のセルが発生したこと、また他の報告⁽⁷⁾でも固定端において奇数個が発生していることから、本実験においても奇数個が発生するであろうとの推定で実験を繰り返したが、奇数個は発生しなかった。これは他の報告との実験装置の違いか、本実験における方法の違いかは判明しなかった。

発生するセルの個数は Γ に強く依存している。即ち 2 セルは Γ が 2 前後、4 セルは Γ が 4 前後……となっている。この範囲については後に示す図 5 で明らかである。

3-2 レイノルズ数に対するセルの高さの変化

テイラー渦流れのレイノルズ数に対するセルの高さの変化を求めた。その結果を図4に示す。図から明らかのように最上層と最下層のセルの高さはその値と変化のようすが同じであり、Re 数が増加するとき、そのRe 数が小さいときは僅かに高さが減少するが、Re 数が大きくなっていくと次第に一定になる。その他の中間にあるセルの高さはどのセルも値が等しく変化の様子も同じである。さらに最上層と最下層のセルは中間層のセルに比較してセルの高さが高



*. H1 ~ H6 は最下位のセルからの追番を示す

図4 セルの高さの変化

い。故に Re 数に対するセルの高さの変化は軸方向に対称になっているといえる。これらの結果は自由端の場合において最上層のセルが最も高く、次いで最下層のセルが高いということ、さらに最上層のセルは Re 数の増加に対し次第にその高さが増加していき、最下層のセルの高さは Re 数の増加に対し次第に減少していくという結果と異なっている。これは本実験の系の固定端と自由端における対称性の条件の違いからくるものと思われる。

表1 作動流体高さに対するセルの高さの割合

CELL NUMBER	CELL No. / Γ	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈
2	1.68	0.82	0.87	—	—	—	—	—	—
	2.69	1.34	1.35	—	—	—	—	—	—
4	3.98	1.16	0.88	0.85	1.11	—	—	—	—
	4.28	1.23	0.92	0.93	1.21	—	—	—	—
	5.01	1.38	1.14	1.12	1.37	—	—	—	—
6	5.62	1.13	0.85	0.85	0.85	0.84	1.10	—	—
	6.24	1.25	0.96	0.96	0.97	0.93	1.17	—	—
	6.62	1.31	1.04	1.04	1.00	1.03	1.21	—	—
8	6.30	1.02	0.71	0.71	0.71	0.70	0.70	0.70	1.05

内外円筒の隙間に対するセルの高さの割合を表1に示す。各セル、各 Γ における最上位と最下位のセルの高さはほぼ等しく、中間層のセルについてはその高さが全てほぼ等しい。しかも最上層、最下層のセルは中間層のセルに比較しその高さが僅か高くなっており、端面の影響があると思われる。さらに円筒の長さが無限に長いという仮定の場合に関して、セルの高さは隙間の大きさにはほぼ等しいという結果に対しどのセルについても当てはまらない。

3-3 波動テイラー渦へ遷移する臨界レイノルズ数

既に述べたようにテイラー渦流れの状態から Re 数が増加すると波動テイラー渦流れ状態

へ遷移する。この臨界レイノズル数 (R_c) を Γ の全範囲にわたる各セルに関して求めた。その結果を図5に示す。図から明らかなように各セルに対する R_c はある Γ の値でピーク値、またはピークはないが最大値を持つような曲線を示す。このことは自由端における R_c の特性とほとんど同じ結果である。但し自由端の場合は測定した全てのセルに関してピークを持つ変化であったのに対し、固定端の場合はセルの数が増加するとそのピークが次第に丸くなり最大値のみを持つような曲線になることである。

しかもその最大値を示す Γ の値はそこにおけるセルの数と同じ値より僅か大きい Γ の値になっている。これらのことは自由端における特徴と僅かではあるが異なっている。さらにセルの数が増加すると R_c 全体が下がってくるのがわかる。又、この特性はテイラー渦流れから波動テイラー渦流れへ遷移する臨界レイノズル数を示したが、これは即ちテイラー渦流れの安定性を示していることになる。

3-1-1において波動テイラー渦に関して二つの型があることを述べたが、ピーク値、または最大値を持つ Γ の値の前後において波動テイラー渦の流れの様子が異なる。つまりその Γ の値より小さい Γ の範囲では流れの様子は波動テイラー渦流れ(a)であり、その Γ より大きい範囲では波動テイラー渦流れ(b)になる。

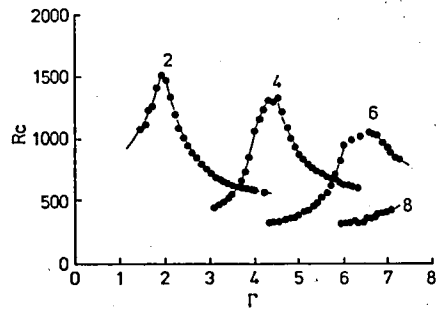
4. 結 論

本研究は同軸二重円筒間の内円筒が回転し、外円筒が静止している場合の粘性流体の流れに関するものであり、特にアスペクト比が小さい場合における円筒の上下面が固定端で囲まれている場合の流れの様子、 Re に対する遷移を調べた。主な結論は次のごとくである。

(1) レイノズル数の増加に対するクエット流れからテイラー渦流れ、波動テイラー渦流れ、乱流に近い流れへの一連の遷移の様子を明らかにした。その結果は従来のアスペクト比が非常に大きい場合の結果とほぼ同じである。又、波動テイラー渦流れに関して二種類の流れの型があることが明らかになった。さらに固定端におけるセルの数は偶数個のみであり奇数個のセルは発生しなかった。偶数個のセルはその個数の値と同じ Γ の値を中心にした前後の範囲であり、 Γ の値が同じであってもセルの個数は一種類ではなく数種類あることがわかった。

(2) レイノズル数の変化に対するセルの高さの変化について明らかになった。レイノズル数が増加すると最上層と最下層のセルの高さは他の中間層のセルの高さに比較し高く、その値、変化の様子は最上層と最下層のセルについて違いはほとんど見られない。又、中間層のセルはそのセルの数、セルの上下方向の位置に関係なく、どのセルも高さの変化の様子は同じである。

(3) テイラー渦流れから波動テイラー渦流れへ遷移する臨界レイノズル数を Γ に対して各セルにおいて求めた。この特性は即ちテイラー渦流れの安定性を示している。



* 図中の数字はセルの数

図5 波動テイラー渦へ遷移する臨界レイノズル数

終わりに本研究に当たり、名古屋大学工学部、中村育雄教授、山下新太郎助教授から御懇篤な御指導を受けました。又、実験装置の製作について、同学部、神田博那、村上初男両技官から多大のご協力を戴きました。ここに厚く謝意を表します。さらには本実験を行うに当たり本校機械工学科卒業生である平野享君に御協力を戴きました。厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Taylor, G. I., Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., A 223, (1923)
- (2) Benjamin, T. B., Proc. R. Soc. Lond. A 359, (1987)
- (3) Cole, J. A., J. Fluid Mech., vol. 75, (1976)
- (4) 戸谷順信, 植木良昇: 自由表面を持つテイラー渦流れの変化と波状テイラー渦への遷移 (第一報 主として奇数セルの場合), 長野工業高等専門学校紀要 第17号 (昭和62年)
- (5) 例えば Snyder, H. A., J. Fluid Mech., vol. 35, (1969)
- (6) Benjamin, T. B., Proc. R. Soc. Lond. A 377, (1981)
- (7) Mullin, T., Benjamin, T. B., Nature, vol. 288, (1980)