



回転円錐周りのテイラー渦

伊藤 龍 象*

回転円筒周りのテイラー渦については、理論的予測が先行し、後に実験的に証明された少数例の1つとして古くから有名であり、ご存知の方も多いと思うが簡単に説明しておこう。外円筒の内に中心軸を合わせて内円筒を設置し、それらの環状部に液体（一般には流体）を満たし内円筒をある一定の速度で回転させる。回転数が小さいと、環状部の液体は図1に示す層流の旋回流動をするが、回転数が大きくなり、テイラー数と呼ばれる無次元数 ($Ta = (\omega r_i d / \nu) \sqrt{d/r_i}$; ω : 角速度, r_i : 内円筒半径, $d = r_o - r_i$: 環状部巾, ν : 動粘度) が臨界値 Tac を越すと、図2に示すように内円筒に巻きついた渦列（テイラー渦）の流れとなる。さらに回転数を高くし Ta 数が1万以上になると、規則的な渦構造がくずれて無秩序な乱流状態となる。

もし、外円筒を円錐に変えると間隙 d が高さ方向に（中心軸に沿って）連続的に変化する。また、頂角の等しい2ヶの円錐を用いると d は一定となるが内半径 r_i が高さ方向に変化する。さらに、外円筒と内円錐を組み合わせると d と r_i が共に変化する。これらの配置では、いずれも高さ方向に Ta 数が変化することになる。

高さ方向に Ta 数が変化すれば、どのような現象が起るであろうか。図3(a)の外円筒・内円筒の場合、高さと共に局所の Ta 数は大きくなり、適当な回転数のとき、下部では $Ta < Tac$ で層流旋回流（図1）、上部では $Ta > Tac$ となりテイラー渦流れ（図2）となるであろう。図3の他の配置でも同様の条件を満足させることができる（図3(c)では上下が逆になる）。ここまでは簡単に推測できるが、ここで問題となるのは、層流領域とテイラー渦領域の境界面ではどのような状態になっているか、換言すれば、

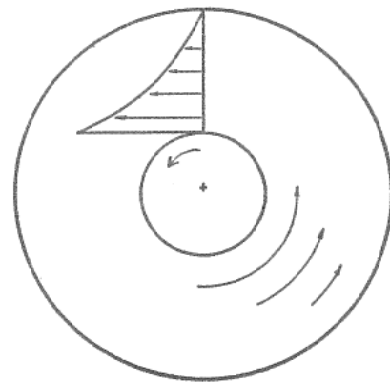


図 1

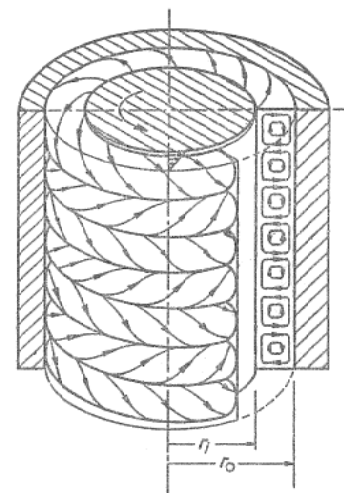


図 2

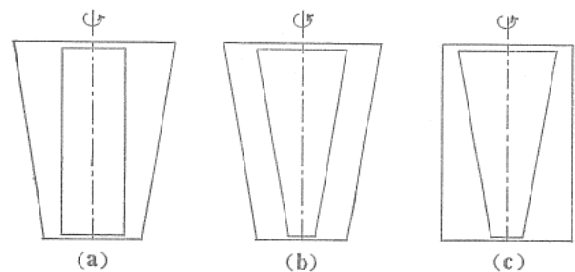


図 3

層流と渦流れとが1つの装置内で安定に共存し得るか、である。

そこで、図3(c)に示す外円筒・内円錐の装置

*伊藤龍象 (Ryuzo ITO), 大阪大学, 基礎工学部, 化学工学科, 教授, 工学博士, 輸送現象

を作り、流れを可視化するため、試料液体（水あるいはグリセリンで粘度を調節した溶液）にアルミ粉末を浮遊させ、側面からスリットを通した光を当てる光切断法を用いた。装置の寸法は外円筒の半径 $r_o = 5$ cm, 高さ $H = 40$ cm, 内円錐の半径 r_i は上面で 4 cm, 下面で 2 cm である。

円錐の回転数を適当に設定すると、上部が層流, 下部がテイラー渦流れの状態が得られた。そして実験するまでは予測されなかったことであるが、何対かの積み重なったテイラー渦が層流域に向って上昇し、最上位の渦がある臨界高さ Z_c を越えると渦運動は解消されて層流旋回流となる。同時に、これまで 2 番目の渦が当然最上位の渦となり層流域を浸蝕しながら上昇を続ける。こうして、左巻き・右巻きの 1 対のテイラー渦が層流域で粘性破壊されると、渦列の最下部に 1 対の渦が新たに形成され直ちに上昇運動を開始する。渦対の上昇速度は下部ほど速く上部になるほど遅くなる。また、渦対の大きさは環状部の間隙 d に規制され、下部ほど大きく上部になるにつれて小さくなる。1 対の渦をみると、左巻きの渦はすぐ下の右巻きの渦よりも常に大きい。

ところで、通常の共軸二重円筒で得られるテイラー渦では、隣接する渦間の混合はほとんど起らない（分子拡散による混合効果はあるが、極めて小さい）ことが知られている。上記の円筒・円錐系でテイラー渦が上昇し次々と層流域で消えてゆくと、渦を形成していた流体要素は何処へ行くのか、換言すれば、層流域から渦領域の下部へ流体が流れる経路はどこにあるのか、あるいは、円筒・円錐系でテイラー渦が移動するのは、あたかも水面に拡がる波紋のように、流体要素を保持して移動するのではなく、渦運動の様式だけが粘性によって次々と伝播してだけであるのか。これを明確にするため試料液体と同じ密度・粘度を示すよう調整された墨汁液またはインクで着色した液をトレーサーとして流動中の液に注入した。着色トレーサーの挙動から層流域では円錐に巻きついて上昇し、円筒壁に沿って下降する流れが観測された。渦領域ではテイラー渦に捕捉されたトレーサーは渦に乗って上昇し、層流域境界から渦界面に沿

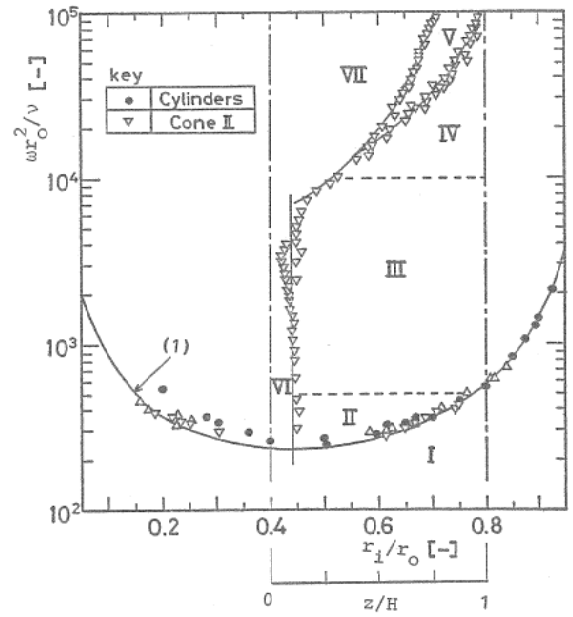


図 4

ってジグザグに、かなり早い速度で渦領域下部へ流れているようである。このような流動は円錐の上下面における遠心力の差によって環状部全体を大きく上下に循環する流れが惹き起こされていることを示している。

以上に記したのは層流とテイラー渦が共存する場合であったが、操作条件を変えれば、乱流とテイラー渦が共存する系を作り出すこともでき、この場合も相互干渉による特異な挙動が観測される。

図 4 の流動状態図は円錐の回転数が与えられると縦軸の値 $\omega r_o^2/\nu$ が決まり、そのとき装置内の位置 z/H によってどのような流動状態が現れるかを図示したものである。曲線(1)は層流域 I の限界を与え、共軸二重円筒で得られている結果と円筒・円錐系で層流域の臨界高さの結果とは一致する。領域 II はテイラー渦が層流域に向って上昇している（前述）状態である。領域 III は上部の層流域がなくなりテイラー渦が一杯につまった状態で、このときにはテイラー渦は移動せず定常な渦流れを呈する。領域 IV はテイラー渦領域であるが、下部に乱流域 VII が共存しているため、テイラー渦の界面は不規則に振動しながら再び上方へ移動している。領域 V は乱れたテイラー渦と乱流にはさまれた領域で、散髪屋の店先にある赤と青の螺旋の縞が回転しな

がら上昇または下降しているように見えるのと全く同じ様に円錐に巻きつきながら乱流域へ向って下降している。この螺旋渦の出現は間欠的である。領域Ⅵは固定された底板の影響をうけ、速度が遅く不規則な流れを示す。領域ⅥとⅦの境界は明確に判定できなかった。

このように1つの流れ場の中に異種の流動様式が共存するとき、もちろん、それらを共存させるために装置形状（境界条件）の変更や操作条件の選定が必要であるが、異種の流動様式の間どのような相互干渉が何を介して起きるのか、それを支配する法則は何か、興味ある課題である。同時に、このような流れ場が反応や分

離操作に対してどのような特殊な効果・機能を示すかを明らかにすることも今後の課題として面白い。

近年コンピュータの発達は著しく、かなり複雑な流れ場でもナビエ・ストークスの式を直接数値解析できるようになって来たが、境界条件（装置形状）をどのように選定するかは、まだまだ人間の直感と洞察に頼らざるを得ないと思われる。人間の洞察が先行し、予備実験で特異性に基づいて定性的な分類をし、コンピュータで定量的な予測をし、精密な測定でそれを確認するという手順を踏むことが大切であろう。

