

No.17

球クエット系の層流－乱流遷移における攪乱消滅の受容性

中林功一(名工大), 余 偉明(東北大), 菅原里志(名工大)

Receptivity on relaminarization in laminar-turbulent transition of spherical Couette system

K.Nakabayashi*, W.Sha**, S.Sugawara*

* Nagoya Institute of Technology, ** Tohoku University

ABSTRACT

Receptivity of relaminarizing flow in the laminar-turbulent transition process has been investigated by the introduction of outside disturbances into the super-critical flow modes with one toroidal TG vortex for clearance ratio $\beta=0.14$ in the spherical Couette flow with an inner rotating sphere. The onset Reynolds number of toroidal TG vortex, spiral TG vortex and travelling waves are not influenced by the outside disturbance. However, the onset Reynolds number of the relaminarization is influenced by them. The receptivity of the super-critical disturbance modes to the outside disturbances is greater in the relaminarizing Re-range than the lower Re-range.

Key Words: chaos, transition, spherical Couette flow, correlation dimension, disappearance of disturbance

1. はじめに

回転2球間クエット流における層流－乱流遷移では、すきま比が $\beta \approx 0.14$ の場合、遷移過程において攪乱消滅現象(再層流化現象)が生じる。この時の遷移のシナリオが[定常状態→周期状態→準周期状態→カオス→周期状態→定常状態→周期状態→カオス]となることが明らかにされたが、そのメカニズムが不明である。本報では上述の再層流化現象に対し外部より微少な擾乱を印加した場合の受容性について考察する。

2. 主な記号

d: 相関次元, f_0 : 内球の回転周波数, t: 実時間 [s]

f_i : 印加擾乱周波数, t^* : 無次元時間= tf_0

R_1 : 内球半径, R_2 : 外球半径

Re: 回転レイノルズ数= $2\pi R_1^2 f_0 / \nu$

Rec₁: テイラー不安定による低位臨界レイノルズ数

R*: レイノルズ数比= Re/Rec_1 (Rec₁=860)

Recs: 2次不安定による臨界レイノルズ数

R₀: 攪乱消滅現象の生じる臨界レイノルズ数

U₀: 赤道面上における内球周速度

\tilde{v}_ϕ : 方位角方向速度変動成分

\tilde{v}_θ : 天頂角方向速度変動成分

β : すきま比= $(R_2-R_1)/R_1$

3. 実験装置及び実験方法

内球回転外球静止の同心2球間クエット流の実験装置を図1に示す。作動流体はグリセリン50%水溶液である。流体温度は天頂角 $\theta=45^\circ$ と 90° に取り付けた熱電対型センサーで常に一定になるように温度コントロールされている。外部擾乱は次の2つの方法で子午線方向擾乱として印加した。一つの方法は正弦波信号をスピーカに与えスピーカに連動したピストンを振動させ、外球上部に取り付けた薄膜を振動させた。もう一つの方法は、カムを用いてチューブを押し、機械的に圧力変動を与えた。流速測定にはレーザ・ドップラ流速計(LDV)を使用し、赤道面上における速度変動 $\tilde{v}_\phi, \tilde{v}_\theta$ を測定した。

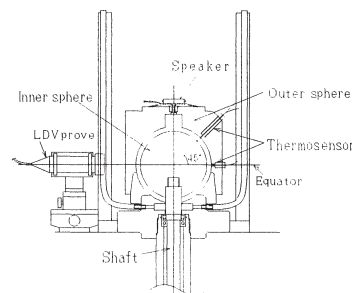


図1 実験装置

4. 実験結果

4.1 環状 TG 渦発生時のテイラー不安定の臨界レイノルズ数に及ぼす擾乱の影響

1次不安定(環状 TG 渦発生)はサドル・ノード型であることが明らかにされている。この時の臨界レイノルズ数の決定はこれまで実験的にはトルク係数から求めるか、または流れの可視化観測によって求められていた。可視化観測による場合に

は準静的な Re の上昇条件で最初に環状 TG 渦が観測される Re とされていたが、 Re が一定に保たれていても時間経過につれて環状 TG 渦が発生することが実験の結果からわかってきた。そこで、その時の Re を初生レイノルズ数 Re_F と定義し、図2に示すように準静的加速率における環状 TG 渦の初生レイノルズ数 Re_F と初生時間 t_F との関係を求めた。図の波線は、各条件における Re_F のデータを結んだ曲線である。それらは $t_F \rightarrow \infty$ でほぼ同じ Re_F の極限值に収束すると考えられる。従ってその極限値を低位臨界レイノルズ数 Rec_l と定義する。準静的な加速状態で回転レイノルズ数を増大させた場合には従来と同様にテイラー不安定の臨界レイノルズ数 $Rec=900$ が得られるが、上述の方法によると $Rec_l \approx 860$ となる。●印は擾乱を加えた場合の結果である。初生時間は擾乱を与えた場合の方が大きくなるが、 Rec_l の値は変化しない。これより外部擾乱は1次不安定には影響を与えないことが明らかになった。

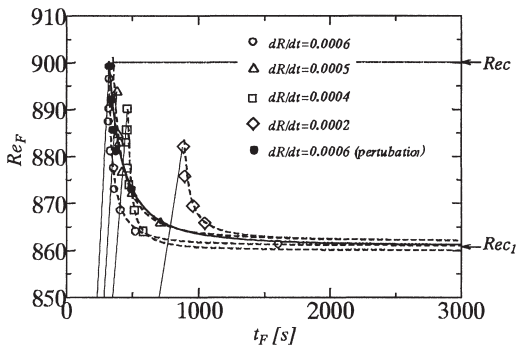


図2 Critical Re of Taylor instability ($f=5.0$ [Hz])

4.2 Hopf 分岐と再層流化の分岐

2次不安定(スパイラル TG 渦の発生)は Hopf 分岐である。図3は速度変動波形(a)及びそのピーク値に対する確率密度分布(b)である。図(b)中のピーク値から分岐図を作成した。その結果、外部擾乱に対する受容性は小さいことが明らかになった。

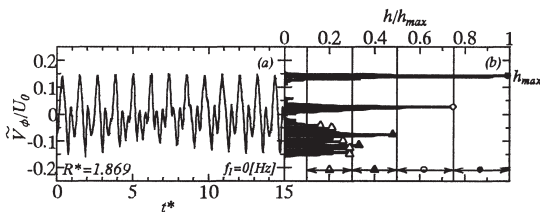


図3 Determination of significant extrema of a time series for bifurcation diagram ((a): time series, (b): PDF)

次に攪乱消滅現象が生じるレイノルズ数領域において同様の分岐図を作成し、その結果を擾乱周波数に対してまとめたのが図4である。図4より

攪乱消滅現象は外部擾乱に対する受容性が大きいことがわかる。また、外部擾乱により攪乱消滅現象の生じる臨界レイノルズ数 R_0 の値は低くなる。

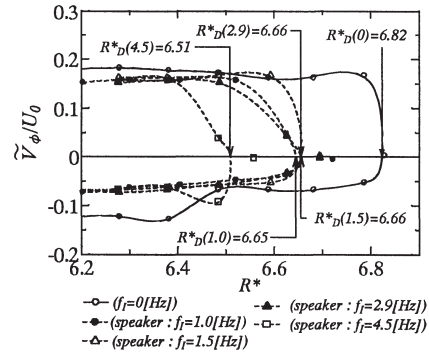


図4 Bifurcation diagram at relaminarization point

4.3 印加擾乱周波数と相関次元, 実効値について

図5に \bar{v}_θ の相関次元 d の R^* 依存性を示す。図5より擾乱を与えた場合、再層流化現象が生じる直前で d の値が大きく変化する。このとき速度変動に対する \bar{v}_θ の rms 値も同様に再層流化現象が生じる直前で大きく変化する。 \bar{v}_θ の相関次元も \bar{v}_θ と同様の变化となるが、rms 値には大きな違いが見られない。

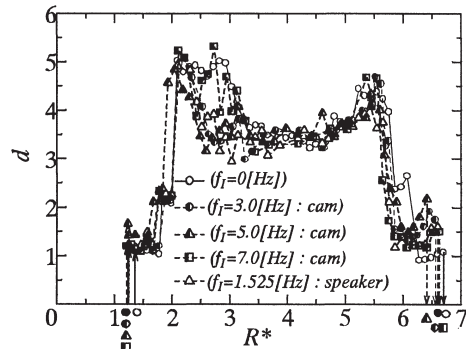


図5 Correlation dimension

5.まとめ

すきま比 $\beta=0.14$ の1渦モードを対象に、流れ系の外部から天頂角方向速度成分に微小な擾乱を与えて、速度変動の消滅現象に対する受容性について考察した。その結果、1次不安定(環状 TG 渦発生)、2次不安定(スパイラル TG 渦発生)などの低レイノルズ数の遷移領域では受容性はほとんどないが、再層流化領域では受容性があることがわかった。

参考文献

1) K.Nakabayashi and Y.Tsuchida, Spectral study of the laminar-turbulent transition in spherical Couette flow, J.F.M., 194 (1988) 101-132.
 2) 中林, 森西, 小林, すきま比 $\beta=0.14$ での回転2球間ケット流の層流-乱流遷移のカオス 機論 B編, 63-615(1997)9-14