

## No. 8

## 回転系流動システム内に生じる不安定性

小 濱 泰 昭\*, 飯 野 淳\*

## Instabilities Occurring in a Rotating Fluid System

Y. KOHAMA and J. IINO

Institute of Fluid Science, Tohoku University

Experimental investigation reported here is concerned with instabilities occurring in three-dimensional laminar (Ekman) boundary layer flow. Ekman flow is produced in between two coaxial systems, one is a rotating cylindrical vessel filled up with water and the other is a stationary disk mounted in it. Nature of the instabilities in the boundary layer is visualized by introducing dye from slits grooved on the stationary disk. From previous investigations, two types of instabilities were found, one which appears at lower Reynolds number is called Type II instability, and the other at higher Reynolds number is called type I instability. In the present investigation, we were able to measure type II instability but not Type I. One of the important results of the present investigation is that new type of stationary instability is observed.

**Key Word :** geophysical fluid dynamics, Ekman boundary layer, solid rotation, Coriolis force, pressure gradient, streamline curvature instability, crossflow instability

## 1. はしがき

本研究は、代表的な大気境界層であるEkman境界層に生じる不安定性を明らかにすることを目的としている。過去の研究では、Fallerら<sup>1-5)</sup>によって2つの異なる不安定波が発生することを見い出されている。この2つの不安定性は、境界層厚さを代表長さにとったレイノルズ数で考えると、それぞれ異なるレイノルズ数で発生しており、Faller<sup>1)</sup>は低レイノルズ数で発生する不安定波をType II、高レイノルズ数で発生する不安定波をType Iと名付けた。2種類の不安定性に関する過去の研究結果を表1にまとめる。

時を少しさかのぼり、Gregory, Stuart & Walker<sup>6)</sup>は、航空機の後退翼上にできる3次元境界層の問題を解く上でEkman境界層と類似した流れ場が存在する回転円盤上の境界層について、理論と実験の両面から組織的研究を行っている。Gregoryらは、可視化実験により接線方向に対しておよそ14°の角度を成し一定の間隔で並んだらせん状の渦列が層流域と乱流域の間に発生していることを示した。以後壁面に固定したこの渦列は横流

れ渦と呼ばれ、3次元境界層に特有な現象として注目された。その後航空機関連の3次元境界層の研究<sup>8, 9)</sup>は精力的に続けられ、横流れ渦や位相速度を持つ2つの進行攪乱の存在が観察されている。また最近になって、高木と伊藤<sup>7)</sup>は後退翼上や回転円盤上に横流れ不安定より著しく臨界レイノルズ数の低いもう1つの不安定が存在し、それが流れの流線曲率に基づくものであることを見い出している。高木らは、この不安定がEkman境界層に於けるType II不安定に対応していると述べている。以上のように、地球流体力学上のEkman境界層に於ける不安定性と、航空力学上の研究として調べられてきた様々な3次元境界層の不安定性とは、同様に3次元的にねじれた流れ場でありながら、Ekman境界層には航空流体力学上の3次元境界層に特有な現象である横流れ渦が存在していない等、異なる様相を示している。そこで本研究では、Ekman境界層を実験室レベルにおいて再現し、再び航空機関連の実験との比較検討を加えながら、3次元境界層のメカニズムを詳細に調べることが目標としている。

## 2. 実験装置及び実験方法

今回の実験装置の概略を図1に示す。実験装置は2つ

\* 東北大学流体科学研究所

表1 エクマン境界層における2種類の不安定波

不安定波の種類		理 論		実 験		
		Faller & Kaylor	Lilly	Faller & Kaylor	Tatro et al.	Caldwell & Van Atta
Type II	臨界 $Re$ 数	55	55	$>70$	$56.3 + 116.8Ro$	56.7
	$\lambda / \delta$	24	21	22~33	$27.8 \pm 2.0$	
	$\epsilon$	$-15^\circ$	$-20^\circ$	$+5^\circ \sim -20^\circ$	$0 \sim -8^\circ$	
	$C/V_0$	0.50	0.57		0.16	
Type I	臨界 $Re$ 数	118	110	$125 \pm 5$	$124.5 + 7.32Ro$	
	$\lambda / \delta$	11	11.9	10.9	11.8	
	$\epsilon$	$10^\circ \sim 12^\circ$	$8^\circ$	$+14.5 \pm 2.0^\circ$	$14.8^\circ \pm 0.8^\circ$	
	$C/V_0$	0.33 ( $11^\circ$ )	0.094	0.023 ( $14.5^\circ$ )	0.034	

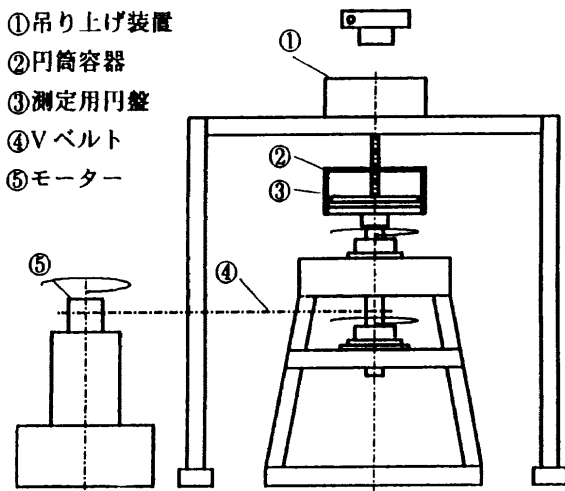


図1(a) 実験装置概略図

の系から成っている。内径280mm，高さ70mmの蓋付きの円筒容器②をモーター⑤によってVベルト④を介して回転させる系と，その中に設置され表面を滑らかに仕上げられた276mmの静止している円盤③の系である。円盤は中心部のシャフトを介して上方の吊り上げ装置①に接続されており，その円盤を吊り上げることで容器の回転とは独立して静止した固体表面を成している。また，容器の上面と側面は透明なアクリルで出来ており，上方と側方からの流れの可視化による観察を可能にしている。

円盤が設置された容器を水で満たし，一定時間同じ回転速度で回転させると水は剛体回転を始める。その後円盤を静止させると，円盤上約1mm前後の流体には粘性の影響により接線方向に境界層が成長する。その結果，半径方向にバランスが取れていた圧力勾配に境界層内と主流との間で不安定な関係が生まれ，結果として接線方向と半径方向に速度分布を持つねじれた境界層，Ekman境界層が作り出される(図2)。

円盤には幅1mmのスリットが，半径40mm，80mm，120mmの位置に円弧上に設けられている(図1(b))。

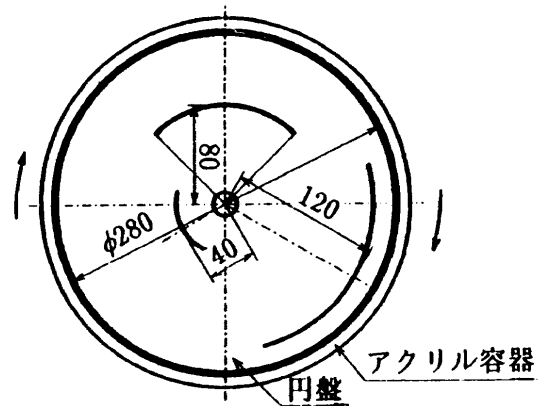


図1(b) 測定部概略図(鉛直上方より)(単位mm)

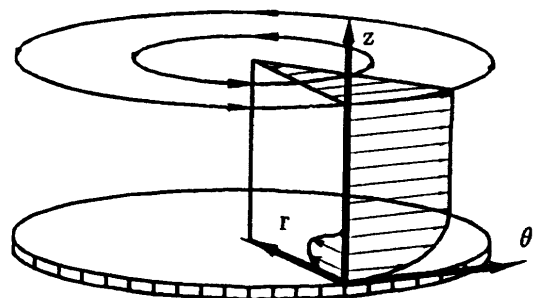


図2 エクマン境界層概念図

それぞれのスリットから染料を注入することによって境界層内の流れを可視化し，その様子を上方からカメラとビデオで撮影した。今回の実験では染料として牛乳を水で薄めたものと，水と比重を等しくした黒いインクを使用している。

### 3. 結果及び考察

図3に回転角速度を変化させた時のEkman境界層の可視化写真を示す。30分以上容器を回転させ流体を剛体回転させてから，染料(牛乳)を半径120mmのスリットより一定の速度で注入し，円盤上方より撮影を行っている。図の黒い部分は円盤表面であり，白く写っている

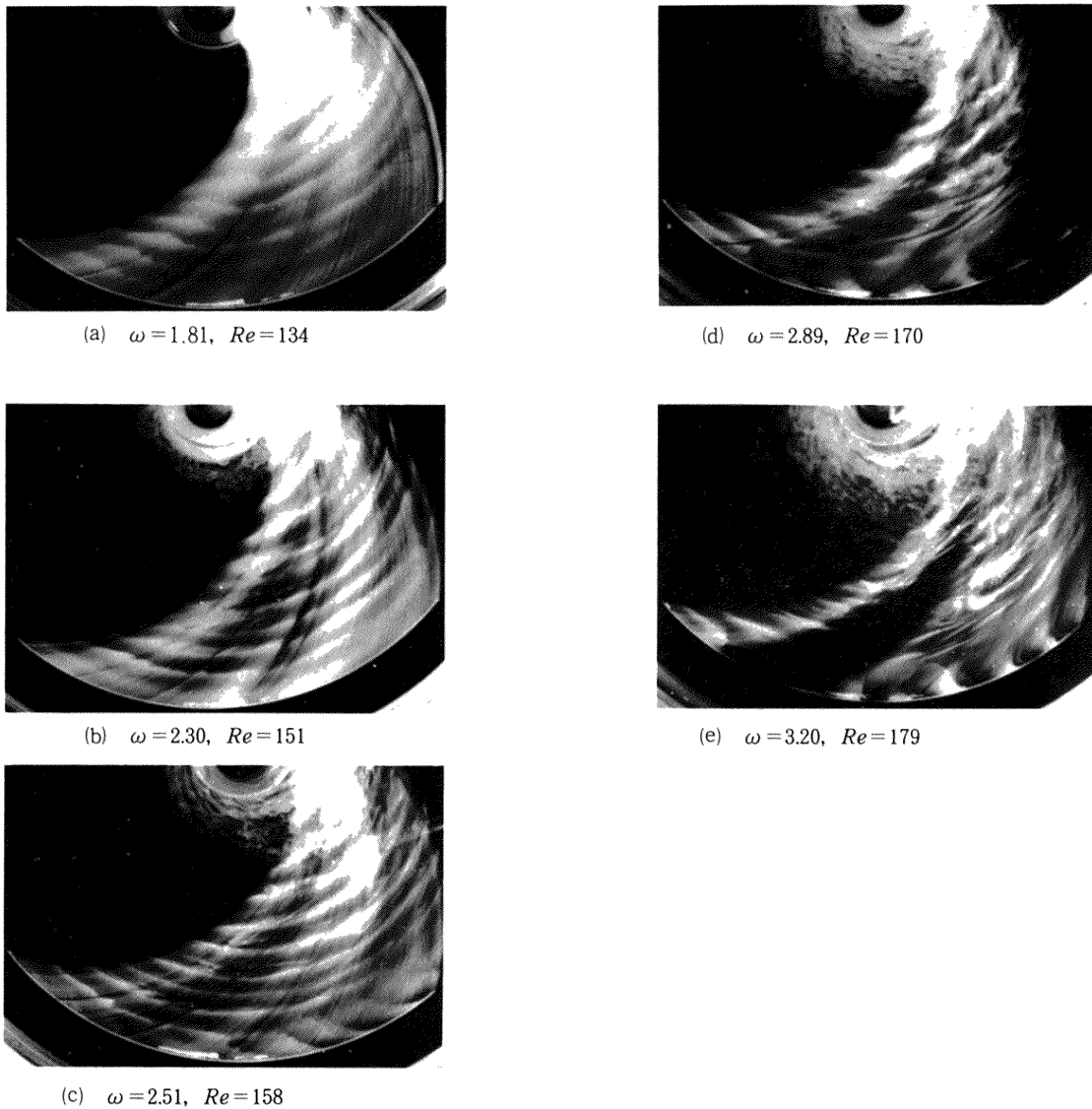


図3 各回転角速度におけるエクマン境界層の可視化写真

部分が染料の存在している流体部分である。境界層流は写真下側のスリットかららせん状に円盤に沿って内側に流れ、中央部（図の上部）において上昇、その後外側に広がっている。一連の可視化写真より2つの非定常な不安定波が観察される。1つは全ての写真において見られる円盤全域に同心円上に広がる波である。もう1つは図3(c)~(e)において観察されるように、スリット付近のみに存在する、接線方向に対し約 $30^\circ \sim 60^\circ$ の角度を持つ波である。ここでは便宜上前者を波動a、後者を波動bと呼ぶことにする。波動a、bは共に進行波であり、前者は半径方向内側に、後者は主流の方向に一定の位相速度を有し、一定波長で進んでいる。そこでビデオで撮影した画像を用いて種々の量を測定した結果を表2に示す。どちらの不安定波もスリット位置で発生していることから、臨界レイノルズ数は、その位置での境界層厚さを代表長さとしている。

Faller<sup>1)</sup>の可視化写真と今回の写真を比較してみると、

表2 波動a、波動bの特性値

		図3(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
	角速度	$\omega = 1.81$	2.30	2.51	2.89	3.20
	Re数	134	151	158	170	179
波動a	$\lambda / \delta$	11.2	10.7	12.5	11.5	
	$C / V_e$	0.035	0.076	0.088	0.102	
波動b	$\lambda / \delta$				34.6	30.3
	$C / V_e$				0.15	0.12

Type I と波動aはその進行方向、波の接線方向からの角度など非常に似通った性質を示している。さらにそれぞれの特性値を比較すると、無次元波長、無次元位相速度に於いて良い一致がみられ、同じタイプの不安定性であると考えられる。波動bに関しては無次元波長、無次元位相速度の値はType IIと似通っているが、臨界レイノルズ数が明らかに異なっており、Type IIとは異なる

不安定波のように思われる。ビデオで観察すると、波動  $b$  はスリットの左端から発生しているようにも見え、本実験に於いてはこの波の正体を明らかにすることはできなかった。Type I, Type II の不安定波に関しては、過去の研究に於いてもその特性値が多少のばらつきがみられ、更なる詳細な調査が必要と思われる。

これ迄は、いずれも円盤外縁付近に発生する不安定波に注目してきた。しかし図 3 (d), (e) をみると、境界層外縁に拡散した染料に覆われてははっきりしないが、円盤中心付近の境界層中にも何か別の構造があるように見える。そこで半径 80mm のスリットから染料を注入し、円盤中心部の流れを詳しく観察することにした。その様子を鉛直上方から撮影したものが図 4 (a) であり、回転角速度は  $\omega = 2.51$ ,  $Re = 158$  である。この図を見ると、写真右側半分の所に一定の間隔で接線方向に並んだ組織的構造が観察された。この組織的構造は位相速度を持たず、円盤に固定して発生している。この部分を拡大したものが図 4 (b) である。また、比重を等しくした黒いインクを染料として同様の実験を行った結果、同様な構造が確認されている。我々は、この構造がこれ迄回転円盤の実験等で発見された横流れ渦ではないかと考えているが、現在までのところその確証を得るまでには至っていない。その理由としては、これ迄発見された横流れ渦はその渦と渦の間隔が発生位置での境界層厚さの約 4 倍となっていたが、今回の構造は境界層厚さ程度の間隔となっていることや、従来の横流れ渦を上方より可視化すると、それ

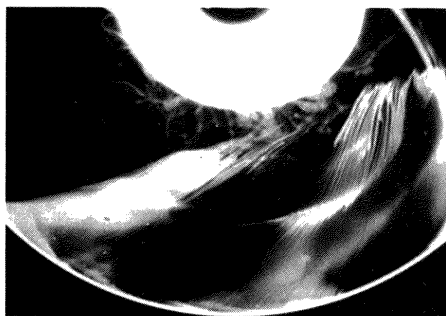
ぞれの渦にその構造に原因し、軸の両側に染料の濃淡がみられていたが、今回の構造にはその濃淡が確認できなかったことなどが挙げられる。しかし、これらの規則的な構造が境界層中の不安定を原因として発生していることはほぼ間違いなく、従ってこの構造が横流れ渦である可能性がある和我々は考えている。

## 5. おわりに

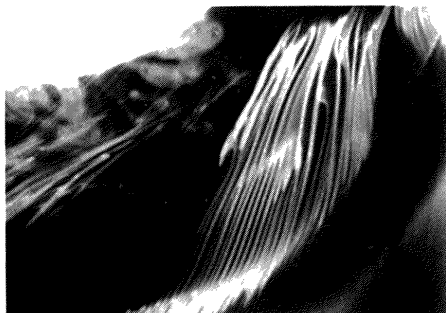
Ekman 境界層を発生する装置を実験室レベルに於いて設計製作し、染料を境界層内に注入することによって流れ場を可視化し、その流れ場に発生する不安定性を調べた。今後の予定としては、実験装置を改良し (スリット部など)、特に横流れ渦と思われる組織的構造に注目して調べていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Faller, A. J. : An experimental study of the instability of the laminar Ekman boundary layer, *J. Fluid Mech.* **15**, (1963), 560–576.
- 2) Faller, A. J. and Kaylor, R. E. : Investigation of stability and transition in rotating boundary layers, Tech. Note BN-427, Institute for Fluid Dynamics and Applied Mathematics, University of Maryland. (1965).
- 3) Tatro, P. R. and Mollo-Christensen, E. L. : experiments on Ekman layer instability, *J. Fluid Mech.* **28**, (1966), 531–543.
- 4) Caldwell, D. R. and Van Atta, C. W. : Characteristics of Ekman boundary layer instabilities, *J. Fluid Mech.* **44**, (1969), 79–95.
- 5) Lilly D. K. : On the instability of Ekman boundary flow, *J. Atmos. Res.* **23**, (1966), 481–494.
- 6) Gregory, N., Stuart, J. T. and Walker, W. S. : On the stability of three-dimensional boundary layers with application to the flow over a rotating disk, *Phil. Trans. A* **248**, (1955), 155–199.
- 7) 高木正平, 伊藤信毅 : 回転円盤流における進行波の観察—孤立粗度励起—, 第 26 回 流体力学講演会講演集, (1994), 193–196.
- 8) Kohama, Y. and Suda, K. : Crossflow Instability in a spinning disk boundary layer, *AIAA Journal*, **31**, (1993), 74–79.
- 9) 小濱泰昭, Saric, W. S. and Hoos, J. A. : 後退翼における境界層の乱流遷移, 日本機械学会論文集 (B編), **58**, (1992), 3053–3059.



(a)  $\omega = 2.51$ ,  $Re = 158$



(b) 拡大写真  $\omega = 2.51$ ,  $Re = 158$

図 4 エクマン境界層中心部の可視化写真