

乱流後流の構造

種子田, 定俊
九州大学応用力学研究所 : 教授

天本, 肇
九州大学応用力学研究所 : 助手

石井, 幸治
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

<https://doi.org/10.15017/4743652>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 57, pp.129-138, 1982-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



乱流後流の構造

種子田 定俊* 天本 肇†
石井 幸治‡

概 要

水槽及び風洞を使用して、円柱後方の乱流後流の構造を流れの可視化技術により調べた。本実験の結果から想像される乱流後流の構造は次のとおりである。

(1) 乱流後流はいろいろの種類不安定波から成り立つ。(2) 不安定波の中で最も基本的な波は、平均速度分布の 2 次元不安定性の結果として発生するカルマン渦列型不安定波 (K 波) である。(3) K 波は二次的に遠心力不安定性に基づくゲルトラー渦型不安定波 (G 波) を発生する。(4) G 波はさらに微小な不安定波 (H 波) を発生する。

Key words: Turbulent wake, Artificial disturbances, Flow visualization, Flow structure

1. 緒 言

以前の報告で明らかにしたように、乱流後流中には 2 次元長波長の波動運動が存在する¹⁾²⁾。また、人工的に後流に加えられた長波長の 2 次元攪乱は常に下流に向かって増幅される³⁾⁴⁾。しかし、乱流後流中には 2 次元波動運動以外にもいろいろの種類秩序運動が存在している。

本研究の目的は、乱流後流中に存在する秩序運動の種類とそれぞれの発生機構ならびに相互関係を明らかにすることである。

2. 実験装置と方法

実験は風洞と水槽の両方を使用して行なわれた。

風洞は応用力学研究所の水平循環式大型低速風洞で、測定部の幅 4 m, 高さ 2 m, 長さ 6 m, 風速範囲 0.1 m/s から 60 m/s, 乱れの強さ 0.12 % である。図 1 は実験装置の略図を示す。風洞測定部の前端中央部に直径 3 cm, 長さ 2 cm の円柱が鉛直に固定され、その後方 150 cm の位置に攪乱発生器が置かれている。図 2 は攪乱発生器の断面形状を示す。モーターの回転運動は変換装置により回転振動に変えられ、攪乱発生器を駆動する。周波数範囲は 0 から 10 Hz, 片振幅 15° である。流れの可視化にはスモークワイヤー法を使用した。直径 0.127 mm, 長さ 150 cm のニクロム線に流動パラフィンを塗り、電

* 九州大学教授, 応用力学研究所

† 九州大学助手, 応用力学研究所

‡ 九州大学応用力学研究所技官

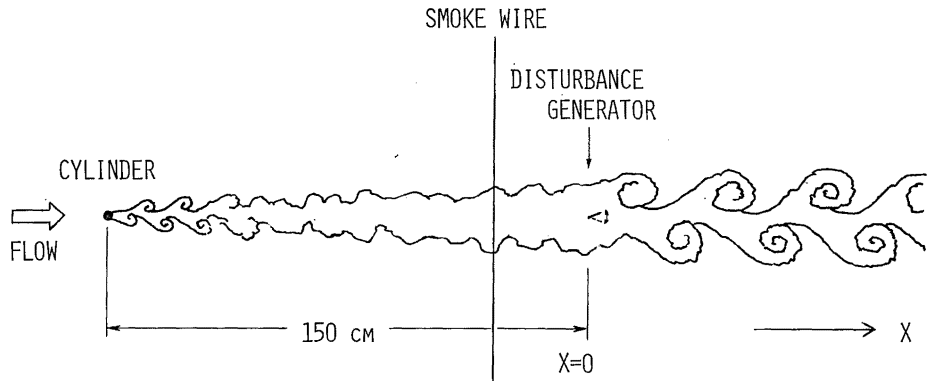


図1 風洞実験の装置略図

流を流して加熱することにより、白煙を発生させることができる。一回の発煙時間は約5秒である。照明には500W写真ランプ10個と1kWスライドプロジェクター5台を使用、35mm一眼レフカメラ及び16mmシネカメラにより撮影した。

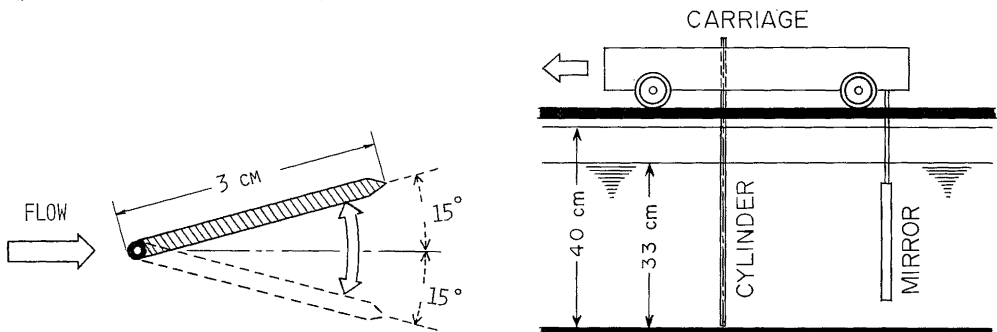


図2 攪乱発生器略図

図3 水槽実験の装置略図

水槽実験は長さ4m、幅0.4m、深さ0.4mの側面ガラス張り静水槽を用いて行われた。図3は実験装置の略図を示す。試験円柱として直径1.2cm、長さ50mの真鍮製丸棒を使用した。円柱は水槽上を水平に移動する台車に鉛直に取り付けられ、0.1cm/sから10cm/sの速度範囲で移動させることができる。円柱の下端と水槽底面の隙間は5mm、実験時の水深は33cmである。流れの可視化には電解沈澱法を使用した。円柱を陽極にして水槽の水を電気分解することにより、円柱表面から白色の微粒子を発生させ、統合流脈膜を観察することができる。流れの写真撮影は水槽側面のガラス窓を通して行われた。円柱後方30cmの位置に反射鏡を斜めに取り付け、後流の鉛直横断面内の流れを側面から撮影することも可能である。

3. 実験結果

3.1. 乱流後流の2次元的秩序構造

乱流後流中に存在する2次元的秩序構造の発生機構を調べるため、乱流後流に及ぼす2次元的周期攪乱

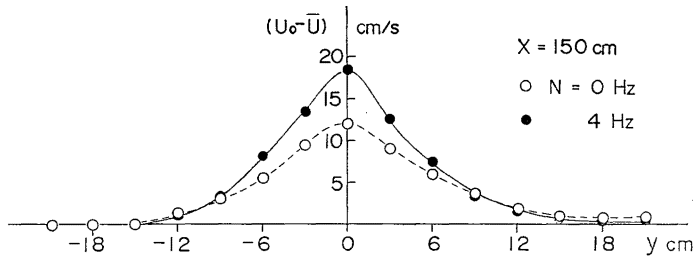


図4 乱流後流の平均速度分布

の効果を観察した。

図4は風速 1 m/s, $x=150$ cm における後流の平均速度分布を示す。ここに, x は攪乱発生器からの距離を示す。攪乱周波数 $N=0$ Hz のときの速度欠損が 4 Hz の場合よりも小さいのは, $N=0$ Hz のとき攪乱発生器の羽根が流れに平行であるため, 抵抗が小さいからである。後流幅 δ 及び排除厚 δ^* (図5参照) は攪乱周波数にほとんど無関係にそれぞれ 30 cm 及び 12 cm である。

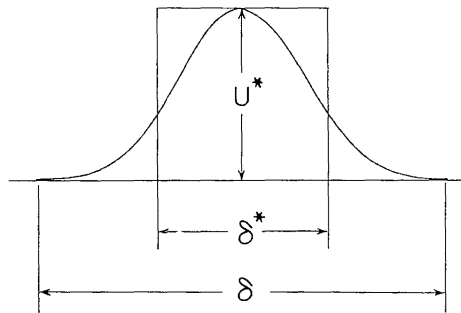


図5 後流幅 δ と排除厚 δ^*

図6は攪乱周波数による乱流後流の変化を示す。

攪乱周波数は写真の上から順に 0 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 8 Hz である。 $N=0$ Hz の場合には層流と乱流の境界線の形状はかなり不規則であるが, 波長 $2.4 \delta^*$ 程度の大規模秩序構造が高い頻度で現われる。 $N=3$ Hz の場合, 3 Hz の攪乱波 (波長約 $2.8 \delta^*$) は後方へ向かって増幅され, カルマン渦列と非常によく似た渦列を形成する。そしてその渦列ははるか下流まで (少なくとも 300 cm 以上) 安定に存在する。 $N=5$ Hz の場合, 攪乱波 (波長約 $1.6 \delta^*$) は攪乱発生器のすぐ後方からカルマン渦列によく似た渦列を形成するが, $x=200$ cm 付近から急速に減衰する。そして, $N=8$ Hz の場合には攪乱波 (波長約 δ^*) は僅か数波長で減衰し消滅する。人工攪乱波が消滅した後, 後流は再び不規則な流れになるが, ここでは $2.4 \delta^*$ 程度の波長をもつ大規模秩序構造が高い頻度で現われる。

図7は乱流後流の側面図の例を示す。写真からわかるように, 低周波の攪乱波は長く下流まで生き延びるが, 高周波の攪乱波は急速に減衰される。

3.2. 乱流後流の3次元秩序構造

図7の写真からもわかるように, 乱流後流中には長波長の2次元波動運動のほかに, いろいろのスケールの3次元な波動運動が存在する。図8は図7(a)の流れの横断面を後方から観察した例を示す。乱流後流の中に多数の縦渦の断面を見ることができる。

図9, 10は水槽実験で得られた写真例を示す。図9は側面図, 図10は横断面図であるが, 2次元的なカルマン渦列の流脈膜面上に多数の縦渦が重畳していることがわかる。

これらの写真例からわかるように, 乱流後流の主な構造は長波長の2次元波動運動とそれに重畳す

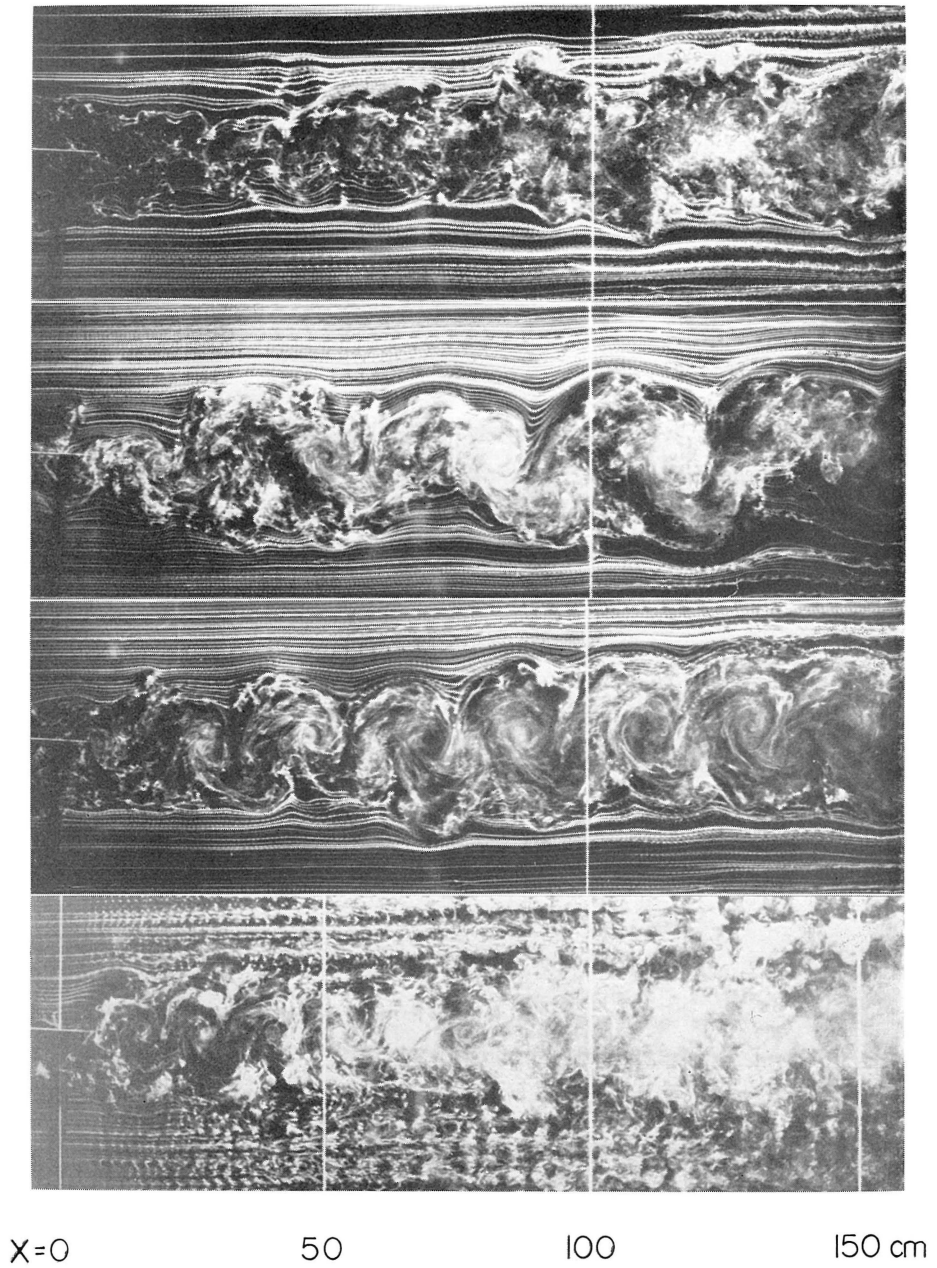
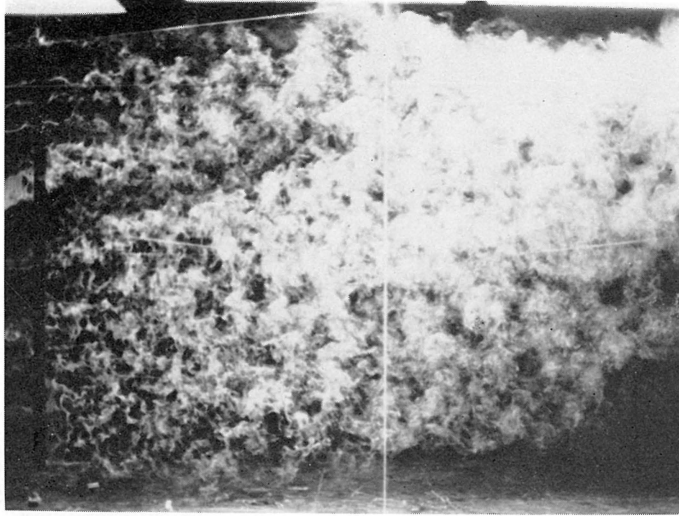


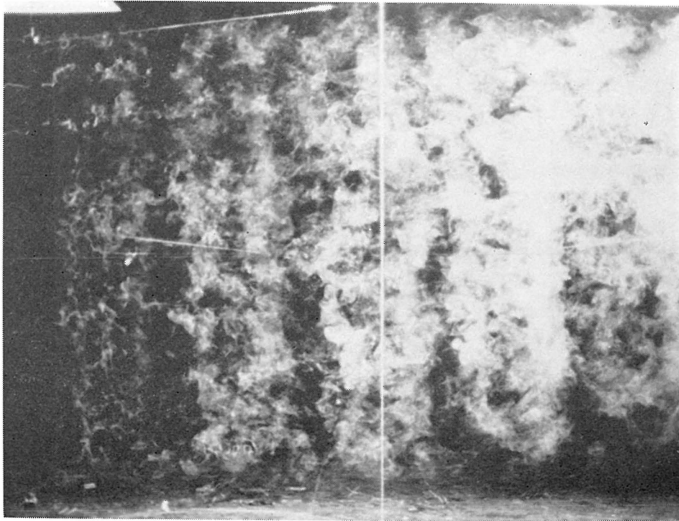
図6 乱流後流の攪乱周波数による変化(平面図)
 攪乱周波数は上から0, 3, 5, 8 Hz (風洞実験, スモークワイヤ法)



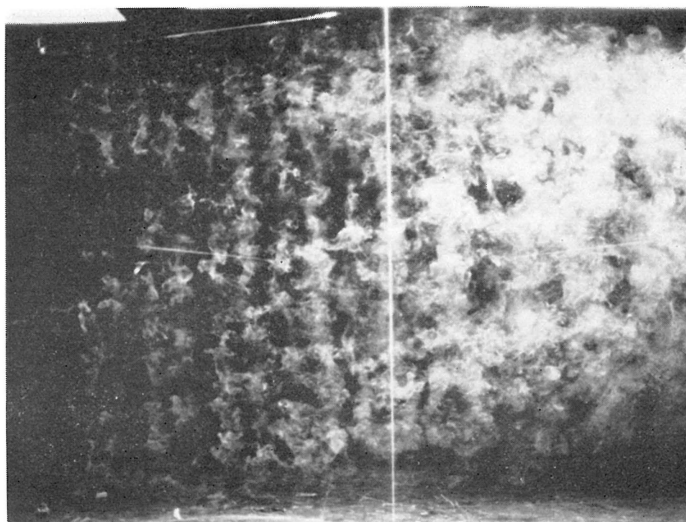
X=0

100 cm

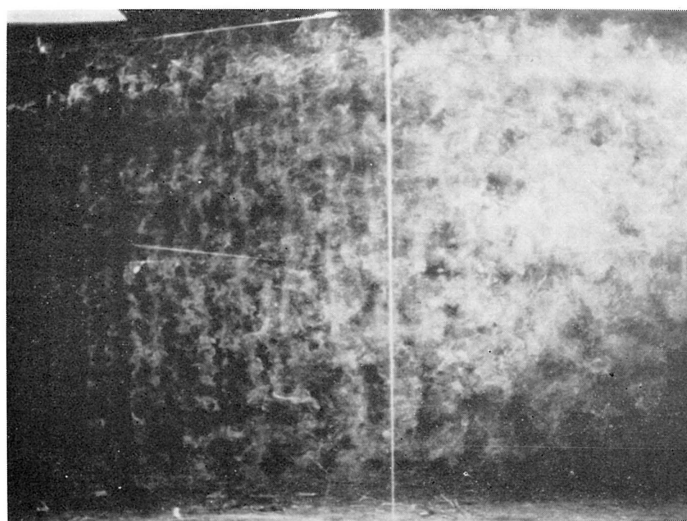
(a)



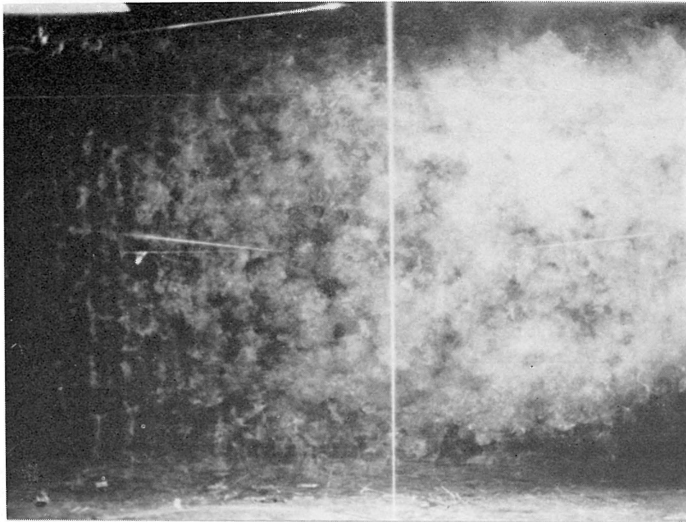
(b)



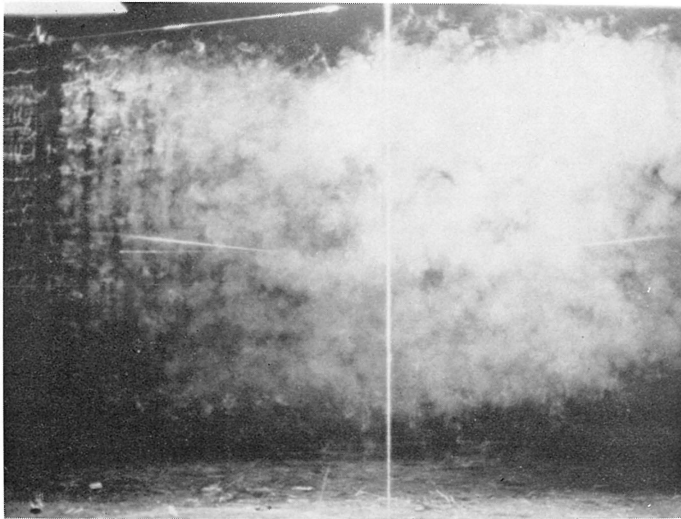
(c)



(d)



(e)



(f)

図7 乱流後流の攪乱周波数による変化(側面図)
攪乱周波数は(a) 0 Hz, (b) 2 Hz, (c) 4 Hz, (d) 6 Hz,
(e) 8 Hz, (f) 10 Hz (風洞実験, スモークワイヤ法)

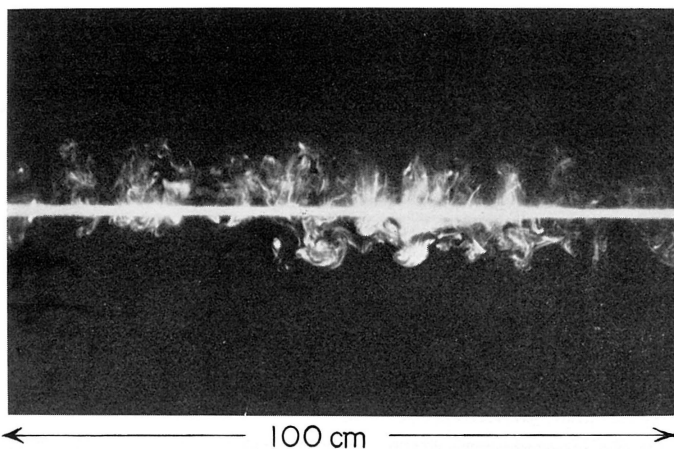


図8 乱流後流の横断面（風洞実験，スモークワイヤ法）
風速 1 m/s, $x=100$ cm, 光膜の厚み 3 cm

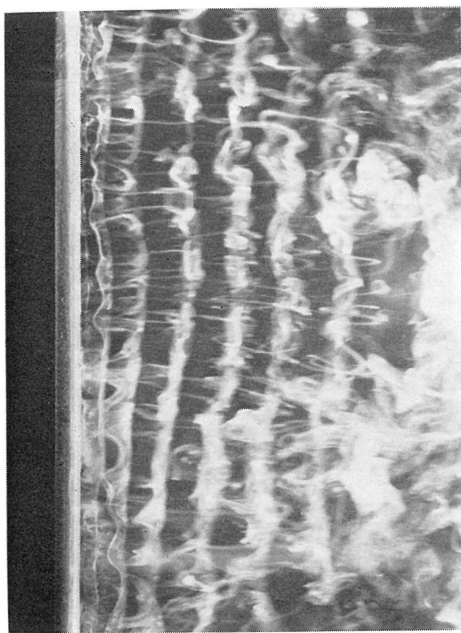


図9 乱流後流の側面図（水槽実験，電解沈澱法）
円柱直径 1.2 cm, レイノルズ数 348

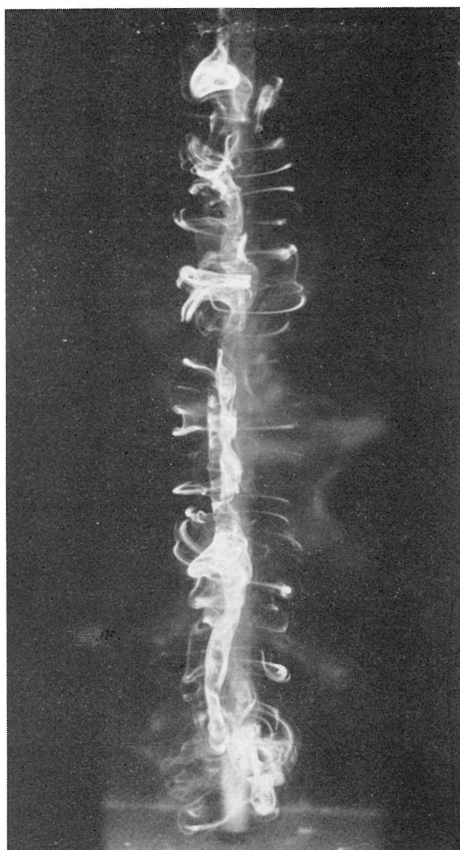


図10 乱流後流の横断面（水槽実験，電解沈澱法）
円柱直径 1.2 cm, レイノルズ数 300,
 $x=6$ cm, 光膜の厚み 3 cm

る3次元的な波動運動から成り立っている。

4. 結 論

本実験により、乱流後流は2次元的な横渦の列と3次元的な縦渦の列の二つの主要な秩序構造を有することが判明した。2次元的な渦列は後流平均速度分布の不安定性の結果として発達する2次元波動運動(K波)であり、縦渦の列はK波の流れの曲面に沿って遠心力不安定性の結果として発達するゲルトラー渦型不安定波(G波)であると思われる。自然の乱流後流は2次元波動運動の位相が3次元方向に揃っていないので一見その存在に気付きにくい、外部から周期的攪乱を加えることによって容易に2次元に揃えることができる。

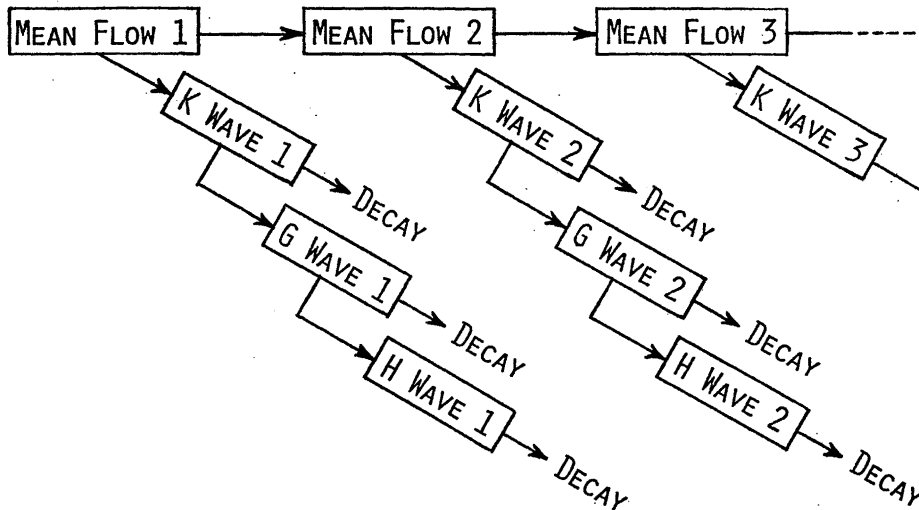


図 11 乱流後流の構造概念図

図 11 は本実験から想像される乱流後流の構造概念図である。乱流後流はその平均速度分布の2次元不安定性の結果として排除厚の2.4倍程度の波長をもつカルマン渦列(K波)を発生、その曲面部分には遠心力不安定性に基づく縦渦列(G波)が形成され、G波はさらに微細な不安定(H波)を発生する。しかるに、後流の排除厚は下流に向かって増大するので、一定の波長のK波が長く下流まで生き延びることはできない。その結果として、下流では次々にその場所の排除厚の2.4倍程度の波長をもつK波を新しく発生する。そして、新しいK波は2次的に新しいG波とH波を発生する。このような不安定波の集団が乱流後流であると考えられる。

謝 辞

風洞実験に協力して下さった深町信尊氏及び中村滋伸氏、ならびに原稿の作製を手伝って下さった石村京子さんに感謝する。

本研究は文部省科学研究費補助金(特定研究「乱流現象の解明と制御」)により行われた研究の一部

である。

文 献

- 1) Taneda, S.: *Downstream Development of the Wakes behind Cylinders*, J. Phys. Soc. Japan 14 No. 6 (1959) 843.
- 2) Taneda, S.: *Large Scale Periodic Motions in Turbulent Shear Layers*, J. Phys. Soc. Japan 50 No. 4 (1981) 1398.
- 3) Taneda, S.: *Experimental investigation of Vortex Streets*, J. Phys. Soc. Japan 20 No. 9 (1965) 1714.
- 4) Taneda, S.: *Visual Observation on the Amplification of Artificial Disturbances in Turbulent Shear Flows*, Phys. Fluids (1982) to be published.

(昭和 57 年 5 月 19 日 受理)