

# 自由せん断乱流の構造

前川 博\*

## Structures of Free Shear Flows

by

Hiroshi MAEKAWA

Univ. of Electro-Communications

### ABSTRACT

The use of direct numerical simulations to study structures of free shear flows is discussed. Both spatially and temporally developing simulations have been performed. The instability modes obtained from the linear stability spatial and temporal theories are used as the inflow boundary and initial conditions of DNS respectively. With the fidelity of the numerical solution established, basic studies of the various structures and their modification using the instability modes are considered. The non-linear mechanism of vortex tilting/stretching or vortex dilatation are important to generate the free shear structures, but also the 3-D subharmonic disturbances in the nonlinear regime which grow downstream play a crucial role to make the large-scale structures observed in the experiments. A reduction in the normalized growth rate found in recent experiments on compressible mixing layers is explained using linear stability analysis.

**Key Words:** direct numerical simulation, free shear flows, structures, linear stability of compressible/incompressible free shear flows.

#### 1. はじめに

安定性理論により得られた不安定攪乱が成長し対応する自由せん断流の構造が直接数値シミュレーションによって明らかにされた。また、複数の攪乱モードの非線形相互作用の結果生じる構造を議論することによって、自由せん断流における乱流遷移現象の多様性が理解できる。その中の非線形領域で形成される斜低調波が下流で成長することによって、実験的に観察される様ならずと下流の三次元構造を形成する上で重要な役割を果していることが示される。

#### 2. 不安定攪乱

実験と同様な空間発展問題と計算に固有

な時間発展問題においてそれぞれ上流境界条件や初期条件に導入する不安定攪乱  $d_j^s, d_j^t$  は以下の様に書ける。

$$d_j^s(x_2, t) = \frac{1}{2} \sum_i [\hat{d}_j(x_2) e^{i\omega_p t} + c.c.] \quad (1)$$

$$d_j^t(x_1, x_2, x_3, 0) = \text{Real}[\hat{d}_{2D}(x_2) e^{i(\alpha x_1 + \theta)} + \hat{d}_{3D}(x_2) e^{i(\alpha x_1 + \beta x_3)} + \hat{d}_{3D}(x_2) e^{i(\alpha x_1 - \beta x_3)}] \quad (2)$$

ここで、 $\omega_p$  は不安定波の角振動数を、 $\alpha, \beta$  は不安定波のそれぞれ流れ方向と  $x_3$  方向波数を表す。ただし、後流等に見られる絶体不安定性は対流不安定性を示す自由せん断流と異なり、導入した攪乱の影響が上流にも伝播する。与えた攪乱を含む初期条件が構造に影響を与えることになる。

\*電気通信大学 電気通信学研究科

### 3. DNS と構造

#### 3.1 計算法

DNS は非圧縮性および圧縮性自由せん断流において以下のように空間微分には Mapped Spectral collocation や Galerkin method さらに Lele(1992) によって与えられた modified Pade Scheme を用いる。自由せん断流においては時間発展スキームは 3 次コンパクトまたは 4 次 Runge-Kutta スキームを用いる。

#### 3.2 非線形機構

導入した不安定攪乱の非線形相互作用によって自由せん断流の乱流遷移過程には多様な構造が現れる。発達した乱流自由せん断流に向う渦運動を支配している機構は歪速度テンソルと渦度のクロス項である。

$$\frac{D(\omega_1)}{Dt} = (S_{11}\omega_1 + S_{12}\omega_2 + S_{13}\omega_3) + \text{viscous terms} \quad (3)$$

ここで、 $S_{11}$ ,  $S_{12}$  および  $S_{13}$  は歪速度テンソルであり、これらの項は自由せん断流の発達の初期にはサドル点に集中し発達の後期にはスパン渦のコアに集中する。

圧縮性流体では、さらに渦度膨張項と傾圧項が圧縮性固有の項として重要である。

$$\begin{aligned} \frac{D\omega_3}{Dt} = & -\omega_3(\partial u_1/\partial x_1 + \partial u_2/\partial x_2) \\ & + 1/\rho(\partial p/\partial x_1 \partial \rho/\partial x_2 \\ & - \partial \rho/\partial x_1 \partial p/\partial x_2) \end{aligned} \quad (4)$$

渦度の変化割合は式(4)における右辺の正味の結果であることが分かる。圧縮性後流を例として後流基本構造が形成される時点における渦度膨張項と傾圧項の瞬間的分布をそれぞれ Fig.1 と Fig.2 に示す。この計算は最も増幅率の大きい基本波のみを初期条件に導入して圧縮性後流の構造が形成される時点で渦度膨張項と傾圧項が渦構造の形成に影響を与えていることを示している (unpublished)。歪音速攪乱が成長する際にも、これらの 2 項の影響の大きさにより非圧縮渦構造との相違を観察する。

このように、層流乱流遷移後期を理解する機構は発達した乱流せん断流の主要な渦構造の時間発展を理解する上でも大切である。これらの下流の構造の発達は実験的にも研究されている。(例えば Cimbala ら(1988) によってハニカム形状の Far Wake 構造が報告されているが、Williamson(1993) は円柱の斜はく離渦と不安定二次元攪乱の相互作用によって同様な構造が得られると推論している。) DNS によってその斜低調波群が非線形相互作用(二次元波と 3 次元ノイズとの

カップリング) によって形成されていることを示し、下流において成長することがわかる (unpublished)。ただし、これらの低調波(二次元低調波も含め)は自由せん断流が渦シートの段階で形成され基本波の成長が飽和した後に基本渦構造の中で成長する性質をもっているために、初期構造の後にひきつづき形成される下流での準周期的構造の生成に重要な役割を果していることが明らかである。直接数値シミュレーションの一部は実験結果を支持しその構造の発達の詳細を示している。

最後に、線形安定性理論で得られた圧縮性混合層の増幅率と、実験的に得られた発達した圧縮性混合層の成長率を比較した結果を Fig.3 に示す。線形理論によって混合層の成長率がマッハ数によって減衰することが説明できる。これは、一般的に自由せん断流において構造の種になる不安定攪乱のパラメータ(マッハ数やレイノルズ数)依存性がたいへん重要であることを示している。

### 4. まとめ

自由せん断流においては初期不安定性と二次不安定性が観察される初期乱流構造とその発達機構に直接関係がある。非線形領域で形成される 3 次元低調波変動群がずっと下流で成長することによって実験で観察される変動の準周期性(準大規模組織性)とその構造に本質的役割を果していることがわかる。そして、混合層の例に見られるように移流マッハ数の影響によって成長が急激に減少する現象は、不安定性理論で得られる不安定攪乱のパラメータ(マッハ数)依存性によってよく説明できることが分かった。

#### 文献

- 1) Cimbala, J. M., Nagib, H. M. & Roshko, A., *J. Fluid Mech.*, **190**(1988), 265-298.
- 2) 笠原, 前川, 第 10 回数値流体力学シボジウム講演論文集, (1996), 118-119.
- 3) Hall, J. L., Ph. D. dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1991.
- 4) Maekawa, H., Moser R. D. & Mansour, N. N., *Proc. Turbulent Shear Flows*, **9** (1993), 3-2-1 - 3-2-6.
- 5) Maekawa, H., Mansour, N. N. & Buell J. C., *J. Fluid Mech.*, **235** (1992), 223-254.
- 6) 前川, 米沢, 日本機械学会論文集(B), **60**-579, (1994), 3843-3851.
- 7) Williamson, C. H. K., *J. Fluid Mech.*, **206** (1989), 579-627.

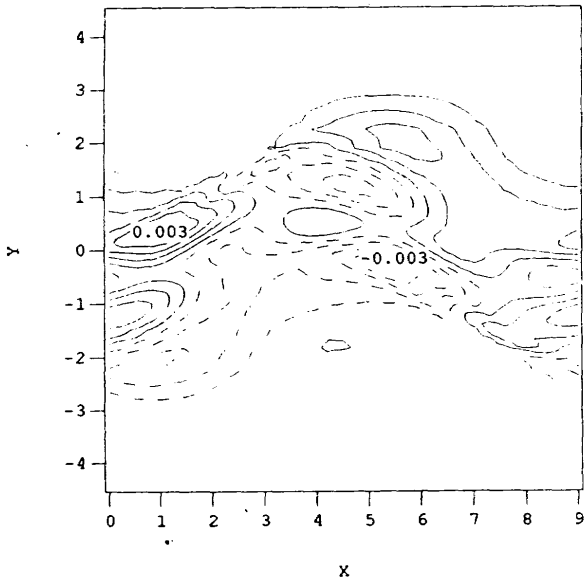


Fig. 1 Dilatational term

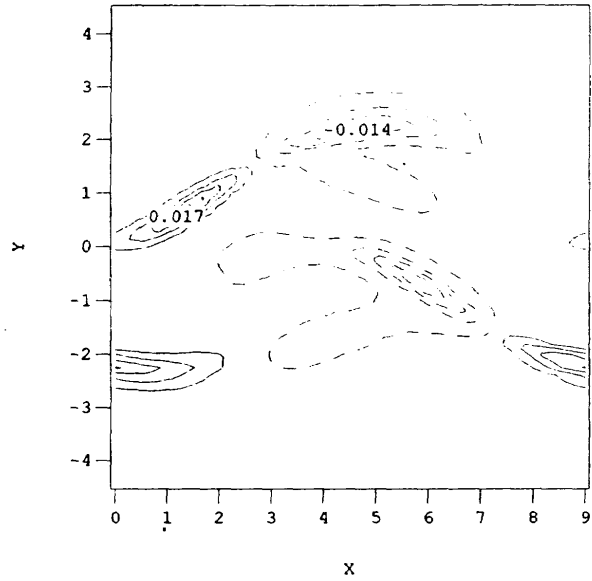


Fig. 2 Baroclinic term

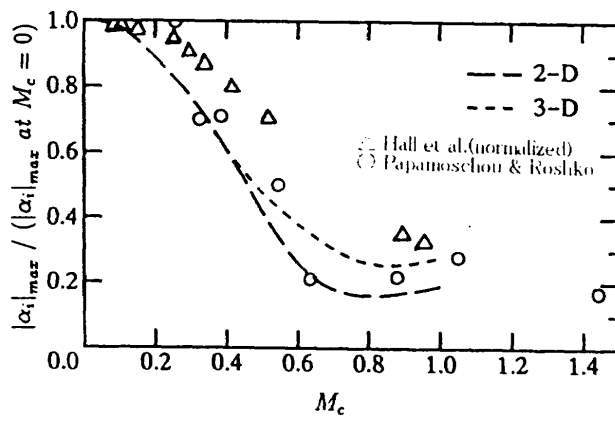


Fig. 3 The normalized maximum amplification rate

