

## 論文の内容の要旨

論文題目 超音速せん断流れ内に形成される縦渦の構造  
および混合促進効果に関する研究

氏名 大坂 淳

### 1. はじめに

次世代宇宙往還機のエンジンとして、スクラムジェットエンジンに注目が集まっている。スクラムジェットエンジンの実現を妨げる問題の一つに、超音速空気流と燃料流の混合に関する問題がある。このような圧縮性の大きな流れ場では、流れ場内に存在する微小擾乱の増幅率が低下し、渦構造の成長ひいては乱流混合の抑制が引き起こされる。この結果、燃焼効率およびエンジン性能の低下へとつながる。

流れ方向に軸を持つ縦渦は、上記のような圧縮性の影響を受けにくいということが過去の研究により示唆されている。本研究においても縦渦構造が研究対象である。一般に、速い流れと遅い流れが平行に流れるせん断流れは、流れ方向擾乱に対して不安定である（一次不安定性）。この結果、流れ場内の流れ方向擾乱が成長して、せん断層内にはスパン方向渦列が形成される。さらに、スパン方向渦列を含むせん断流れはスパン方向擾乱に対して不安定であり、三次元的な縦渦構造が発達することが知られている（二次不安定性）。非圧縮性せん断流れにおいては、実験および解析的に、縦渦構造に関する研究が行われてきた。本研究では、圧縮性せん断流れにおいて、二次不安定性によって励起される詳細な縦渦構造および縦渦の混合促進効果を調べることを目的としている。

### 2. 線形安定性解析

本研究において対象とする流れ場を第 1 図に示す基本流れとして、双曲正接型速度分布を採用した。流入部および流出部における数値計算上の問題を避けるために、基本流れは

全域超音速とした。その結果、速度比 0.6、密度比 1.0、移流マッハ数 0.4 の流れ場を採用した。

線形安定性解析では、スパン方向渦列を含むせん断流れ（基本流れ）の、擾乱に対する不安定性を調べた（二次不安定性問題）。一次不安定性問題から得られた解を基本流れとして用いた。

二次不安定性解析の結果、スパン方向擾乱と流れ方向擾乱のスケール比が 0.733 となるスパン方向擾乱が最も成長しやすいことが明らかとなった。第 2 図には、 $y-z$  平面における渦度、速度場が示されている。(a)、(b)はそれぞれコアおよび鞍線が存在する平面である。両者において、流れ方向渦が存在し、その回転方向は逆向きであることがわかる。

### 3. 空間発展計算

対象となる流れ場のパラメータは、線形安定性解析と同様のものが用いられた。流入部において擾乱を課すことにより、渦構造を誘起した。

本研究では、議論を明快にするために、以下に示す 3 種類の場合を採用した。

- 1). 最も増幅率の大きな擾乱のみを含む場合 (case 1) .
- 2). 上記の擾乱およびその倍波擾乱を含む場合 (case 2) .
- 3). 増幅率が正である全ての擾乱を含む場合 (case 3) .

本節では、case1 および case3 の結果のみを示す。流入部において付加される乱れの周波数によって、これらは区別される。擾乱の周波数は、一次不安定性問題から定められた。三次元渦構造を励起するために、固有関数にスパン方向の変形を与えた。Case3 において、スパン方向擾乱の波長による影響が調べられた。このため、最も成長しやすい流れ方向擾乱の波長に対して 0.5 倍から 3.0 倍の範囲で、スパン方向擾乱の波長を変化させた。

本研究では、支配方程式として Navier-Stokes 方程式を採用した。基本量を 3 次精度 MUSCL 内挿した SHUS 法を用いて流束を評価し、粘性項は 2 次精度の中心差分によって評価し、時間積分には 3 階 3 次精度の R.K.法を用いた。

第 3 図(a)に、Case1 における二次元計算の結果を示す。流入部において導入された擾乱が成長し、飽和に至っている様子がわかる。第 3 図(b)~(d)に、Case1 における三次元計算の結果を示す。スパン方向渦構造が飽和に至った後、スパン方向渦に絡み付くように成長する、細い管状をした渦構造（図中 ）が観察される。この渦構造により、スパン方向渦は、スパン方向に変形を受けている。以下では、スパン方向に変形した渦構造を、「完全にスパン方向に回転軸を持つ」スパン方向渦と区別するため、「コア」と呼ぶことにする。このような細い管状の渦構造は、二次元計算では存在しない。第 3 図 (d) には、流れ方向渦度の等値面が示されている。黒と白の領域では、それぞれ、 $x$  軸正の向きおよび逆向きの回転軸を有している。第二不変量が正かつ、流れ方向渦度が存在する領域に、縦渦構造が存在することとなる。これより、管状の渦構造は縦渦であることがわかる。過去の非圧縮性せん断流れに関する研究においても、同様の渦構造が観察されている。これより、第 3 図

における，コアに絡み付く渦構造は，非圧縮性せん断流れ内に成長し得る「リブ構造」と同様の構造であると言える．また，第 9 図中の点線部に注目すると，リブ構造（図中 ）は，コア（図中 ）とは逆向きの回転方向を有していることがわかる．上記の事実は，二次不安定問題の解として得られた流れ場（第 2 図）においても見受けられた点である．コアおよびリブ構造はそれぞれ，二次不安定性問題における，neutral mode およびスパン方向擾乱に対応すると言える．従って，本研究において用いた励起方法によって，流れ場の二次不安定性を励起することが可能であることがわかる．

第 4 図(a)には，Case3 における二次元計算の結果を示す．この場合には，増幅率が正となる全ての擾乱を含むため，スパン方向渦は飽和に至らず，無限に成長し続ける． $x=200$  付近までは，一定の波長を持つスパン方向渦構造が存在している．これは，成長初期段階では，最大の増幅率を持つ擾乱が顕著に成長するためである．このようにして形成された渦構造のエントレインメント効果により，せん断層のスケールは大きくなる．これに伴い，低周波の擾乱が成長しやすくなる． $x=200$  よりも下流では，このような擾乱が成長を始めるため，ペアリングなどの非線形現象が起こる．その結果，一見不規則な渦構造が見受けられるようになる．第 4 図(b)~(d)には，Case3 における三次元計算の結果の一部を示す．Case1 と同様に，コアに絡み付くように成長するリブ構造が存在することがわかる．また，コアとリブが逆の回転方向を持っているという点も，Case1 と共通する点である．これより，渦構造が不規則に成長するような，現実の流れ場に近い場合においても，流れ場の二次不安定性により，リブ構造が成長することがわかる．擾乱のスパン方向波長を 0.5 から 3.0 まで変化させた場合にも，同様のリブ構造が観察された．

リブ構造がせん断層の成長に及ぼす影響を調べるために，せん断層厚さを算出した．ここでは，実験において形成されるせん断流れにより近い Case3 のみを取り扱うこととする．せん断層厚さの定義には，ピトー圧分布を利用した．スパン方向にせん断層厚さを平均することによって，三次元計算の場合におけるせん断層厚さを定義した．第 5 図には，Case3 における， $x$  方向へのせん断層厚さの変化を示す．比較のため，二次元計算の結果も示されている．流入部から  $x=300$  付近までは，リブ構造が成長していない．このため，この領域では二次元計算の場合と比べてせん断層厚さに変化はない． $x=300$  より下流では，リブ構造が十分に成長しており，それぞれの場合において，せん断層厚さに変化が見受けられる．特に，スケール比が 1 となる場合においてせん断層厚さが最も大きくなっていることがわかる．

$x=300$  から 600 までの領域において，せん断層の成長率が見積もられた．成長率は，最小自乗直線の傾きとして与えられる．第 6 図には，せん断層の成長率とスケール比の関係を示す．第 6 図より，いずれの三次元計算においても，二次元計算よりも大きな成長率が得られていることがわかる．特に，スケール比が 1 付近となる場合に成長率は最大となり，二次元計算に比べて約 55%の増加が認められる．

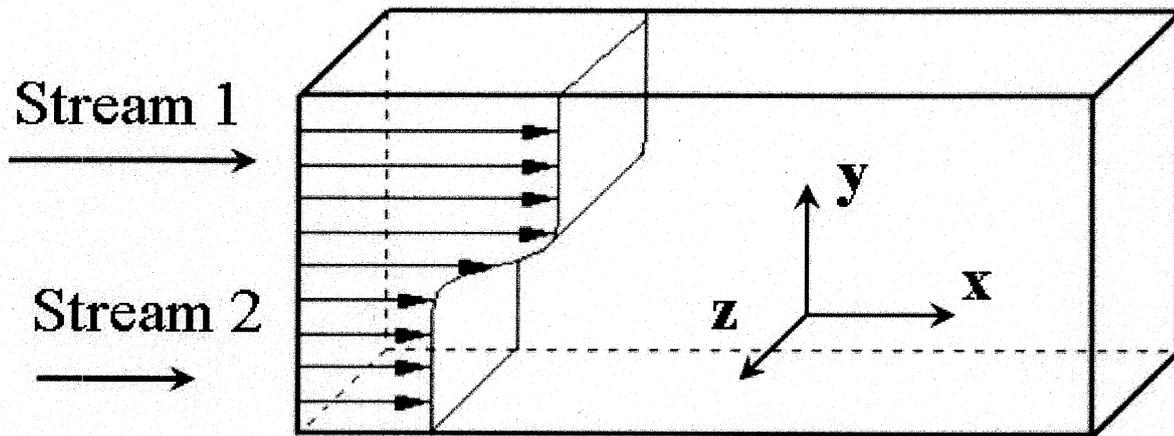
二種類のスパン方向擾乱を含む場合の流れ場の様子が第 7 図に示されている．スケール

比 0.5 と 1.0 のスパン方向擾乱を含む場合 (0.5-1.0 case) と、スケール比 1.0 と 2.0 のスパン方向擾乱を含む場合 (1.0-2.0 case) が採用された。両者において、顕著に成長しているリブ構造のスケール比は 1.0 であることがわかる。この結果より、最大の成長率を与えるスパン方向擾乱が、最も成長しやすいことが確認された。

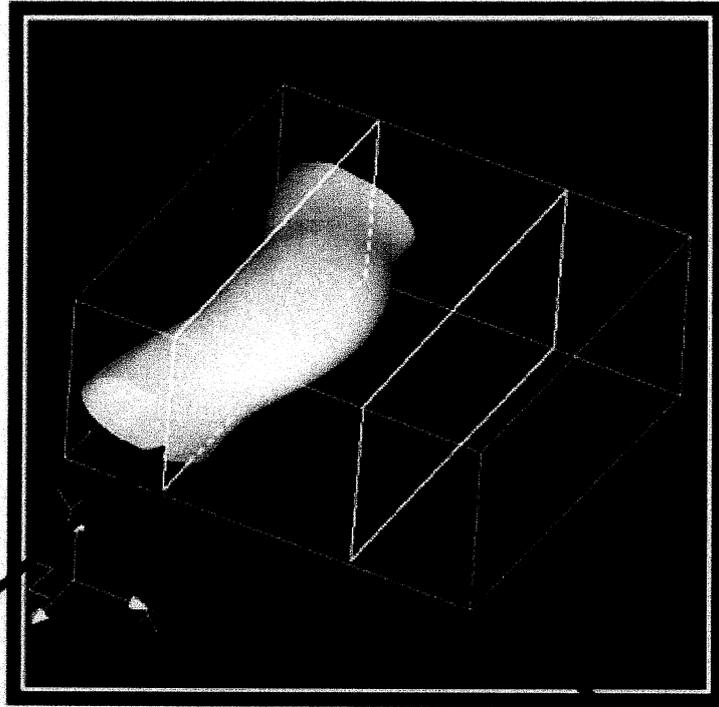
#### 4. 結論

本研究では、超音速せん断流れの二次不安定性により誘起される縦渦構造を調べた。その結果として得られた結論は、以下のようにまとめられる。

- 二次不安定性問題において、コアおよびサドル部に観察された縦渦対の回転方向は逆向きとなった。
- 二次不安定性問題において、最大の増幅率を与えるスパン方向擾乱のスケール比は、0.733 付近の値となった。
- 三次元計算において用いられた励起方法によって、流れ場の二次不安定性を励起することができた。
- 三次元計算において、流れ場の二次不安定性によって励起された縦渦構造の非線形発達を捉えることができた。
- 三次元計算において、縦渦構造の影響により、せん断層厚さおよび成長率は二次元計算の場合に比べて増加した。
- 三次元計算において、最大の成長率を与えるスケール比は 1.0 付近の値となった。
- 複数のスパン方向擾乱を含む場合、最大の成長率を与えるスパン方向擾乱が最も顕著なリブ構造へと成長する。

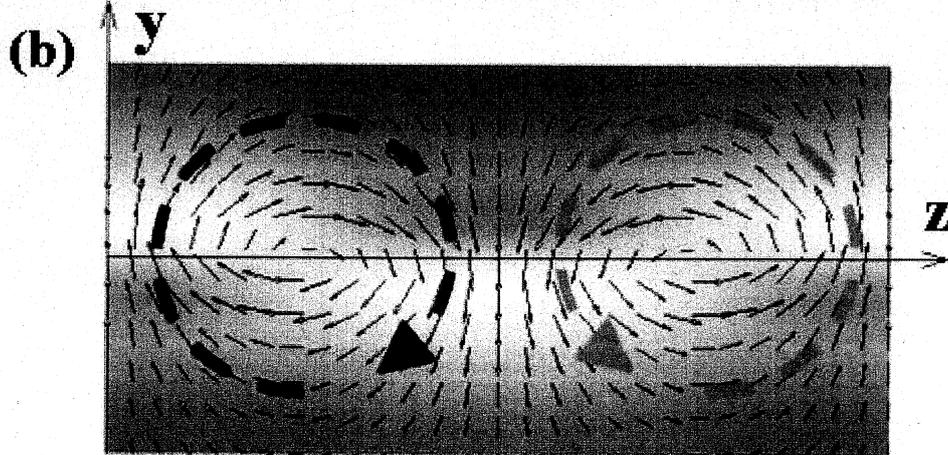
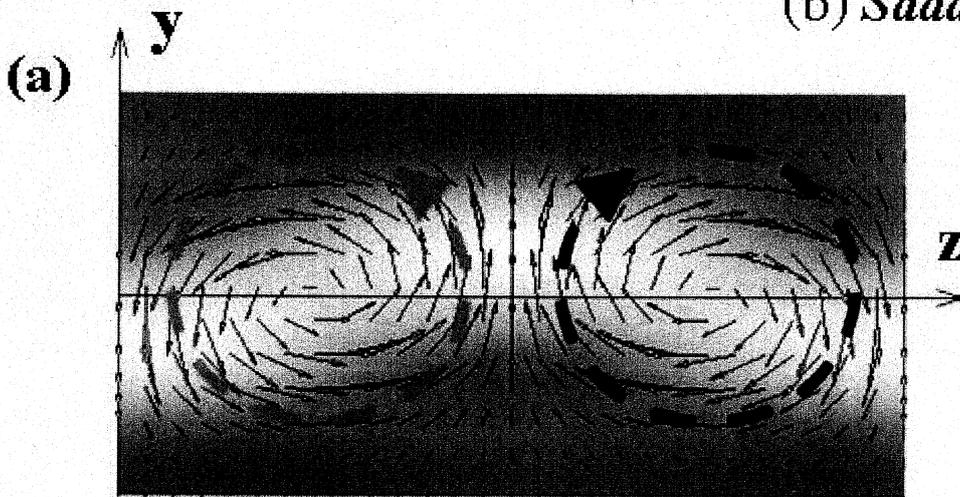


第1図 流れ場の概要.

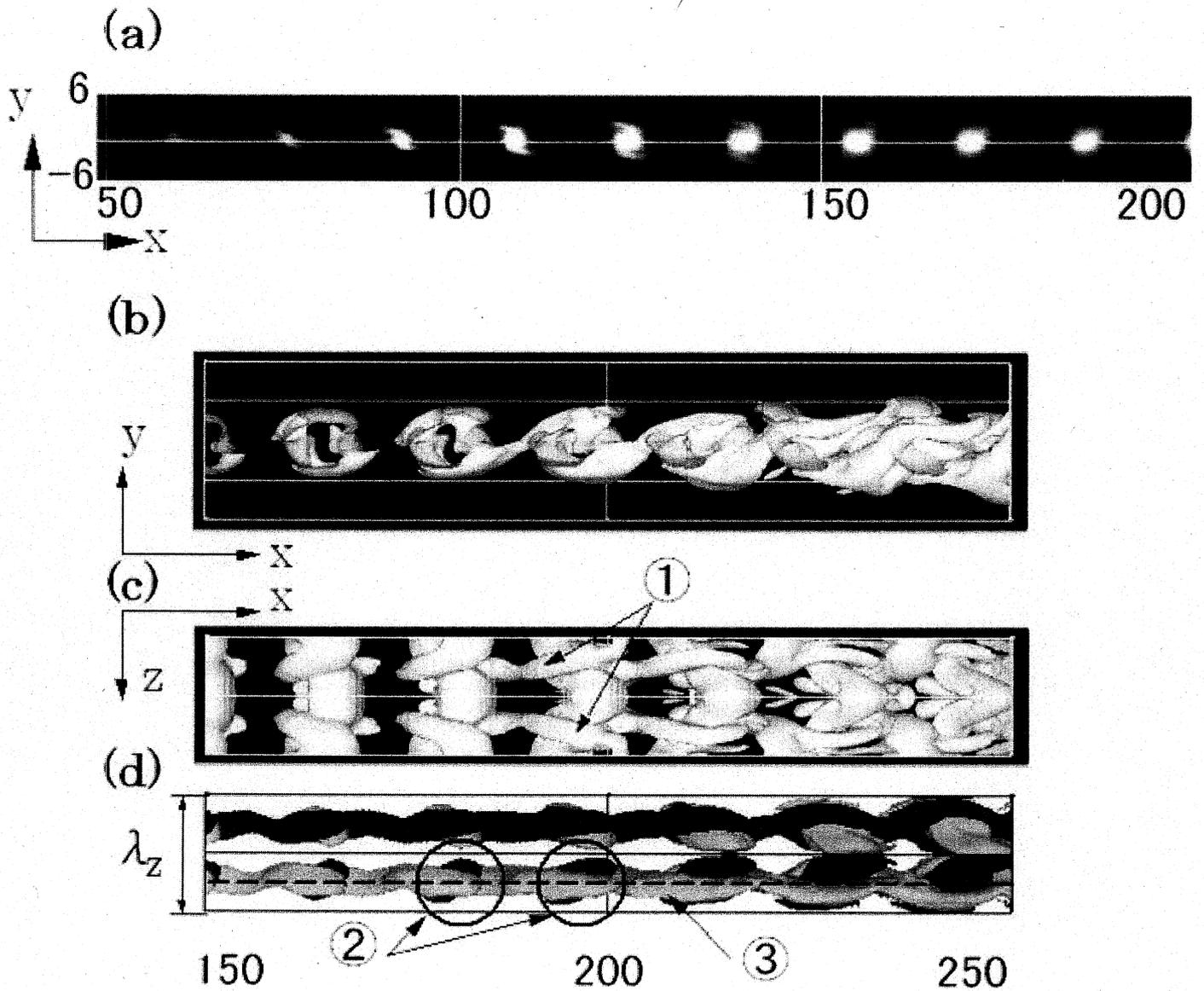


(a) *Core plane*

(b) *Saddle plane*



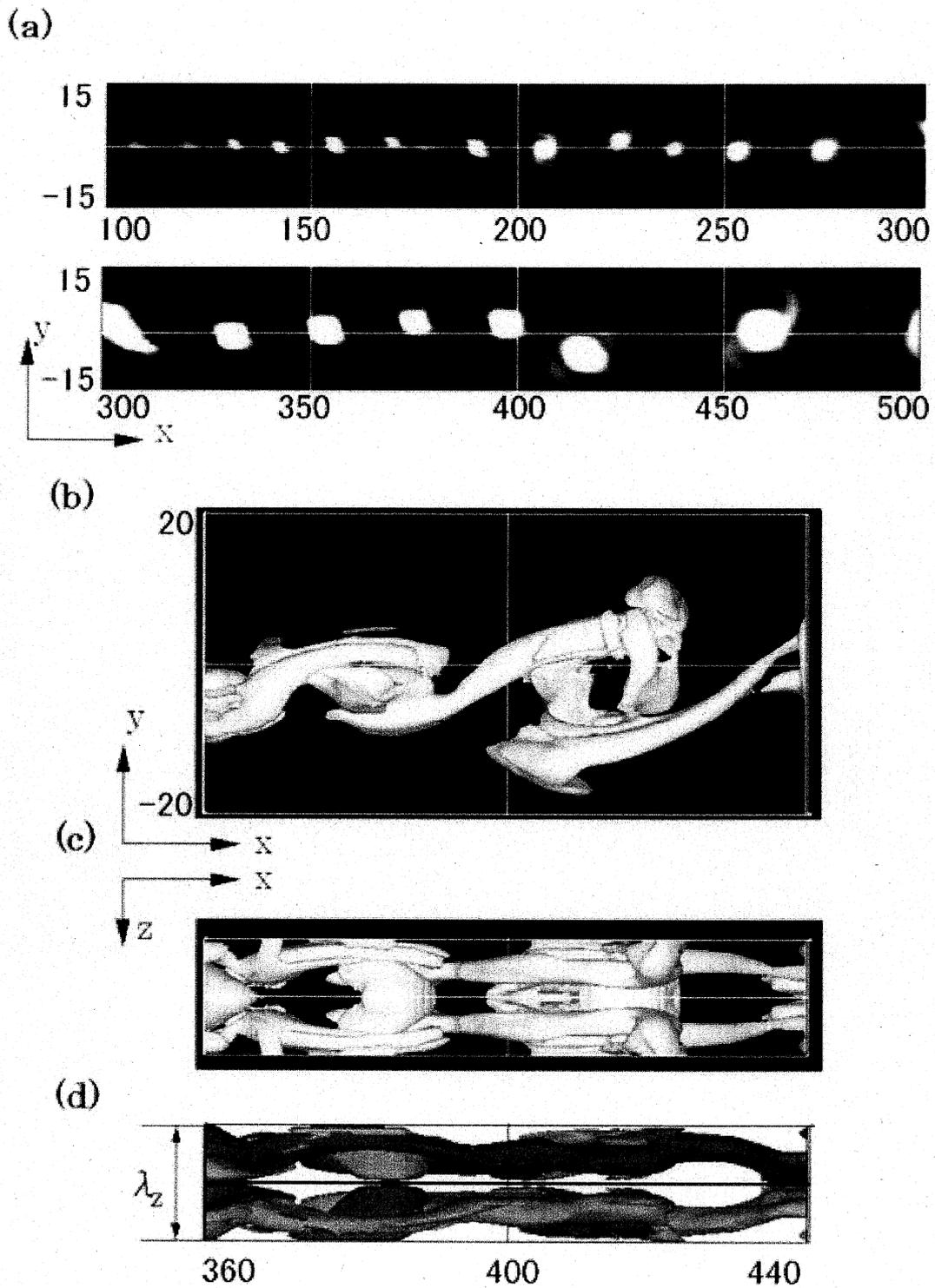
第2図  $y-z$ 平面におけるスパン方向渦度および速度ベクトル場.



第3図 Case 1 における流れ場の様子.

(a) 第二不変量(2D)

(b,c) 第二不変量(3D), (d) 流れ方向渦度(3D).



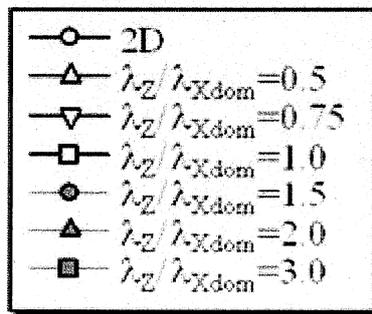
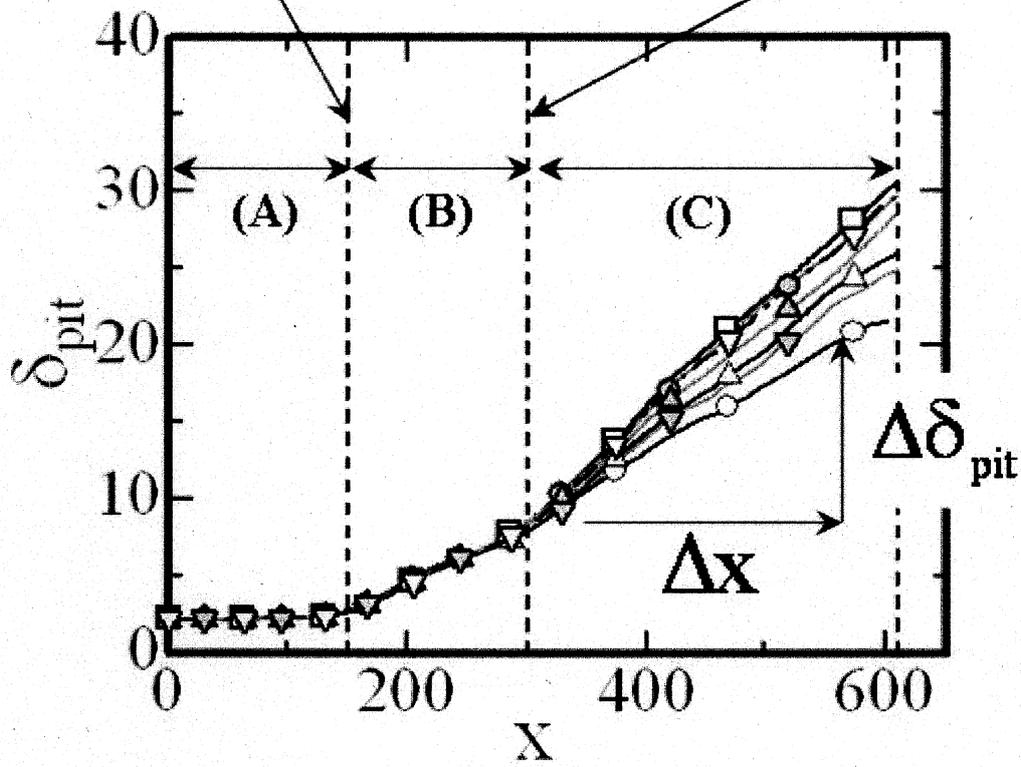
第4図 Case 3 における流れ場の様子.

(a) 第二不変量(2D)

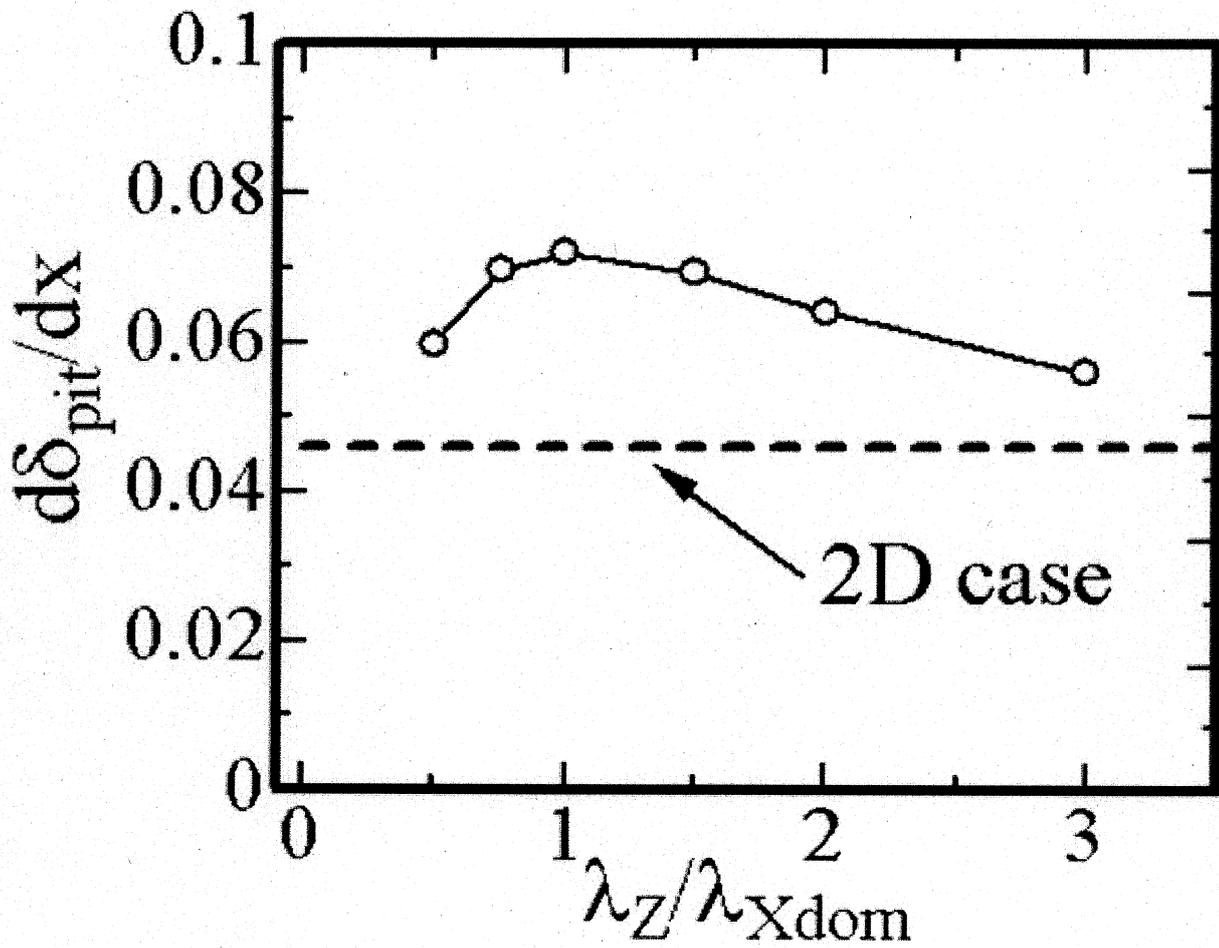
(b,c) 第二不変量(3D), (d) 流れ方向渦度(3D).

*Spanwise vortex structure*  
starts to grow.

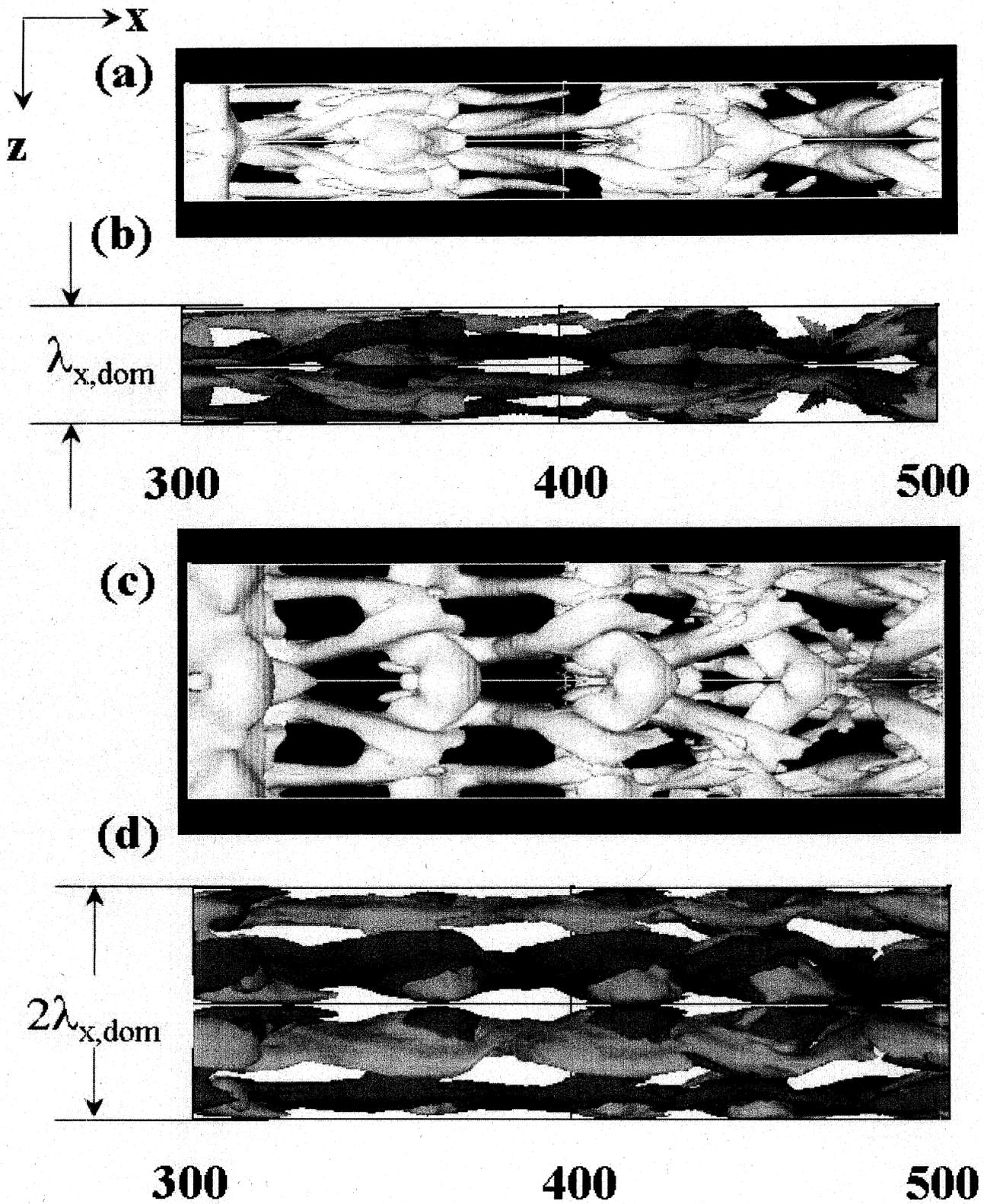
*Rib structure* starts to grow.



第5図 せん断層厚さのx方向推移.



第6図 せん断層の成長率とスケール比の関係.



第7図 二種類のスパン方向擾乱を加えた場合の流れ場.

(a,b) 0.5·1.0case, (c,d) 1.0·2.0case.