

## 二次元パターン認識による開水路乱流構造の検討

Investigation of the Coherent Structure of Turbulent Open Channel Flow  
by Two-Dimensional Pattern Recognition

京都大学防災研究所 上野鉄男 Tetsuo UENO  
京都大学防災研究所 宇民 正 Tadashi UTAMI

The horizontal cross-sections of the uniform open channel flow was visualized and two-dimensional velocity distribution in each cross-section was obtained by picture processing.

Two-dimensional pattern recognition method was introduced into the obtained velocity data. Two-dimensional patterns of vorticity distributions was proposed to detect the typical arrangement of vortex motions.

Ensemble averaged pattern of two-dimensional distribution of velocity vectors, x- and z-components of velocity vectors, vorticity and two-dimensional divergence around the detected points were shown. Based on these patterns, mechanism of sweeps and ejections, and one-dimensional methods to detect these events were examined.

Keywords: Coherent Structures, Pattern Recognition, Flow Visualization,

### 1. はじめに

著者らは前報<sup>1)</sup>において開水路流れの水平断面の可視化写真を画像処理し、得られた流速ベクトルに関するデータから各種の二次元相関係数を計算した。その結果から、乱流構造を理解する上で個々の渦の構造とそれらの配列状況を明かにすることが重要であることを指摘した。本研究は、前報と同じデータに二次元パターン認識の手法を適用し、乱流構造の特徴的なパターンを抽出し、それらの二次元的な配列パターンならびに渦対構造の周辺の流速分布、渦度分布、二次元発散などの分布特性を明かにしようとするものである。

プローブ計測のデータにパターン認識法を導入し、せん断乱流中の組織構造を抽出する方法は Wallaceら<sup>2)</sup>によって提起された。その方法では、抽出モデルに適合する流下方向流速成分  $u$  の経時変化のパターンが計測データの中に認識され、その周辺の  $u$ 、鉛直方向流速成分  $v$  および  $u v$  の経時変化がアンサンブル平均されて抽出される。これによって、ejection、sweep、interaction といった事象の発生に伴い、 $u$ 、 $v$  および  $u v$  が平均的にどのような経時変化を示すが壁面からの位置毎に明かにされた。

著者ら<sup>3)</sup>は流れの可視化と画像解析の手法を用いて、壁面近くの乱流構造を検討し、乱流構造は壁面に近接して存在する渦系群、それらが組織化されて形成される馬蹄型渦、ならびに馬蹄型渦を数個まとめて形成される縦渦から構成されるという多重構造をもつことを指摘した。これらの構造は時間とともに発生、発達、消滅を繰り返し、周辺の渦構造と相互に影響を及ぼしあっている。この様な乱流構造をパターン認識の方法で把握するには、渦度の二次元的な分布に関する抽出関数を採用する方がより明解であると考えられる。

### 2. 二次元パターン認識法と渦対構造の抽出

$y^* = 21$  の断面における流速の流下方向成分  $u$  および渦度の鉛直方向成分  $\omega_y$  の分布を図-1 および図-2 に示す。図-1 において、 $u$  は乱れ速度  $u'$  で無次元化されており、 $z = 0\text{cm}$  が水路の中央（水路幅は 40cm）に位置する。図-2 の  $\omega_y$  分布において、異なる符号をもつ渦度の大きな領域が対をなして分布しており、これが馬蹄型渦の水平断面に相当する。これらの配置に何等かの法則性があることが伺える。そこで、図の渦度分布をもとにして、次のような方法で渦対の分布の様子を調べた。

先ず、これら渦対を検出するための「検出モデル」として図-3 の様な 16mm x 16mm の範囲の渦度分布を想定した。次に、図-2 の渦度分布図の各格子点を中心として、検出モデルと同じ面積をもつ小領域の渦度

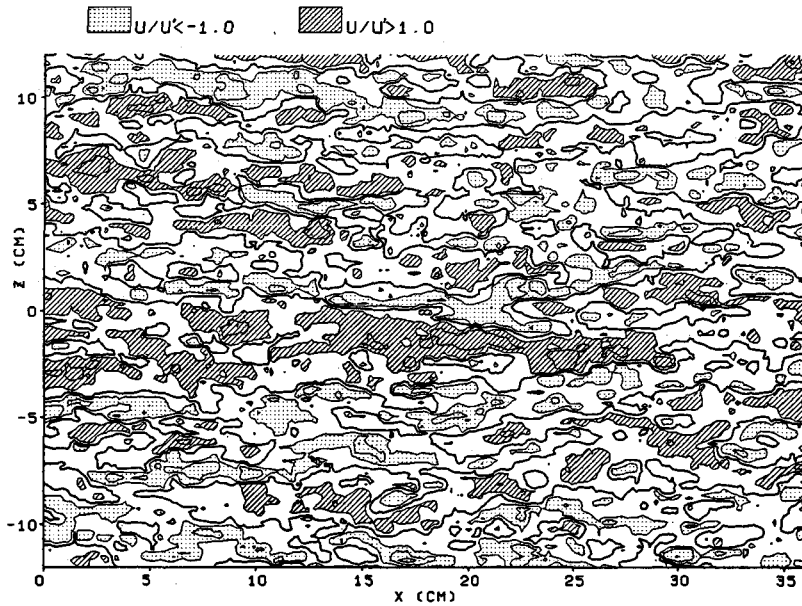


図-1 流下方向流速成分の分布

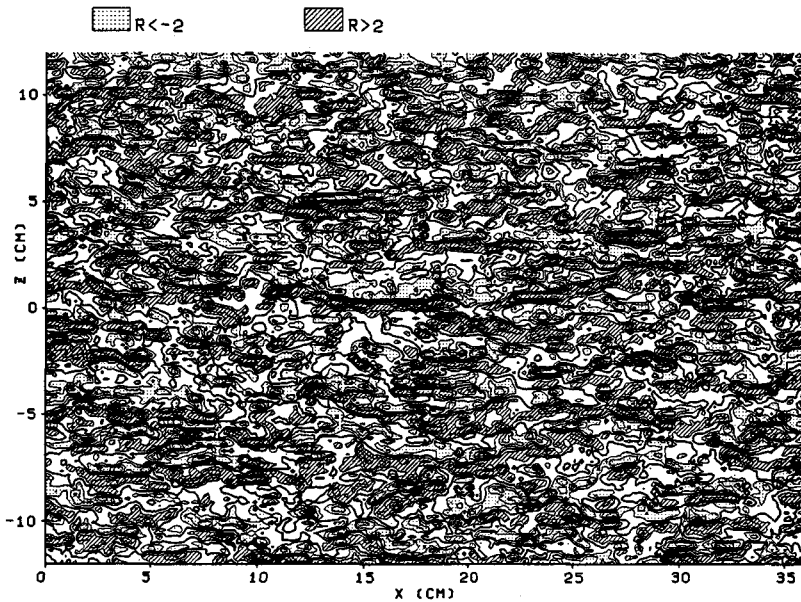


図-2 鉛直方向渦度成分の分布

分布と検出モデルとの間で、次式で表される二次元相互相関係数  $CR(x, z)$  を計算し、パターン抽出を行った。

$$CR(x, z) = \frac{\iint \{\omega_y(x+x_1, z+z_1) \cdot \omega_m(x_0+x_1, z_0+z_1)\} dx_1 dz_1}{\sqrt{\iint \{\omega_y(x+x_1, z+z_1)\}^2 dx_1 dz_1 \cdot \iint \{\omega_m(x_0+x_1, z_0+z_1)\}^2 dx_1 dz_1}} \quad (1)$$

ここで、 $\omega_m$ は検出モデルの渦度分布を表し、 $(x_0, z_0)$ はその中心の座標である。また、 $x_1$  および  $z_1$  は検出モデルの中心からの距離であり、この場合は  $-8\text{mm} \leq x_1 \leq 8\text{mm}$ 、 $-8\text{mm} \leq z_1 \leq 8\text{mm}$  となる。なお、図-3において斜線部および点を施した部分は各々渦度が正および負の絶対値の大きな領域であることを示す。

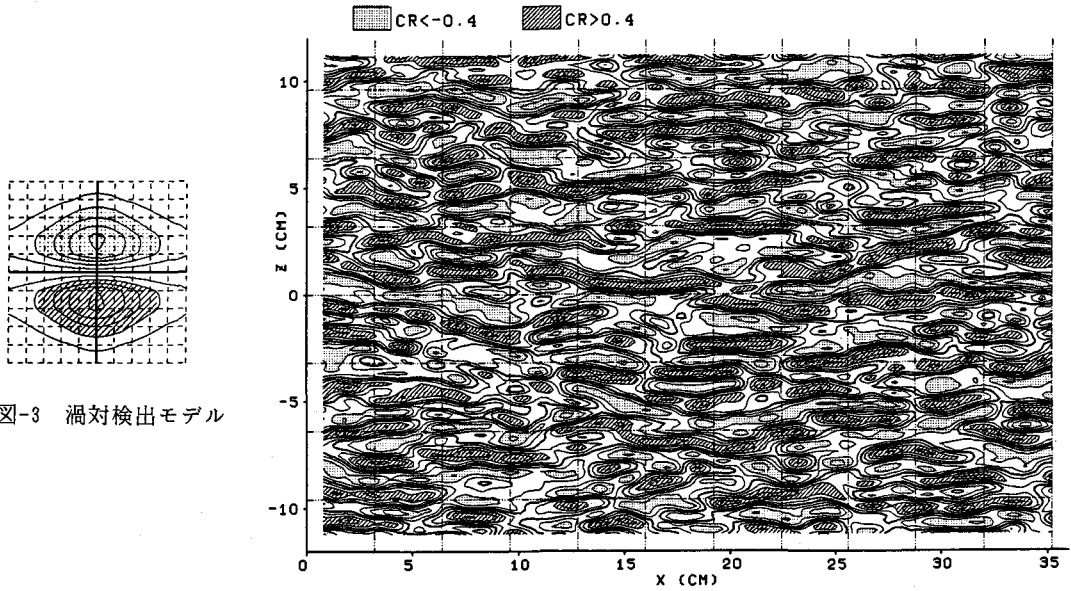


図-3 渦対検出モデル

図-4 渦対検出モデルによる二次元相互相関係数の分布

CR の分布を示すと図-4 の様になる。図で  $CR > 0.4$  の範囲に斜線を施してあるが、そのピーク付近に渦対の中心があると考えられる。実際、本図と図-1 とを比較すると、CR が大きな領域は  $u$  の低速部に対応している。一方、点を施した CR が負のピーク付近は  $u$  の高速部に対応し、ここでは渦対同士が隣合うことにより、sweep が発生していると考えられる。図から、渦対が流下方向に数個連続するもの、渦対が横断方向に僅かにずれながら流下方向に連なっているもの、渦対が千鳥状に交互に並んでいるもの等が認められる。

### 3. 渦対構造の配列

渦対の配列状況を把握するために、渦対構造の各種の配列パターンを抽出するための検出モデルとして図-5 に示すようなものを設定し、先と同様に元の渦度分布との間で二次元相互相関係数 CR を計算した。図-5 において、(a) は渦対構造が流下方向に連続するパターン、(b)、(c) および (d) は上流側の渦対が横断方向にそれぞれ 1/4 波長、1/2 波長および 3/4 波長ずれて配列されているパターンを示している。また、モデルの範囲は 38.4mm x 12.8mm である。ここでは、(a)、(c) の二つの場合について検討する。

(a) の検出モデルにより計算された CR の分布を図-6 に示す。本図においては、CR の大きな領域が流下方向に細長く連なっており、それらが横断方向に 100 - 200  $\nu/u$  の間隔で交互に分布していることがわかる。また、検出モデルから考えると、CR の値の大きな領域を挟んで馬蹄型渦が流下方向に連なって配列されており、全体として縦渦を形成している。この縦渦の長さは 1000  $\nu/u$  にまで達している。

(c) の検出モデルから計算された CR の分布を図-7 に示す。本図で、

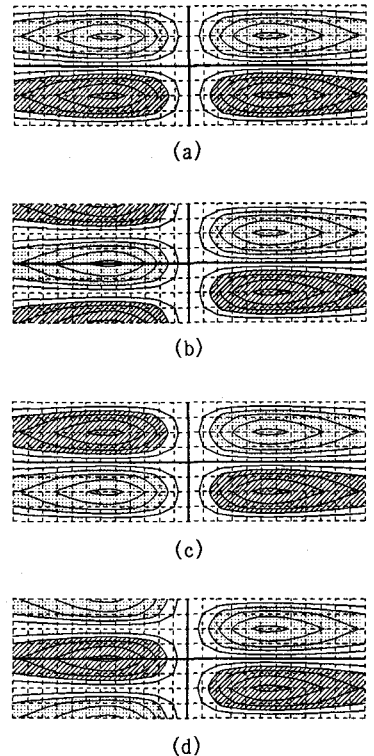


図-5 渦対配列パターンの検出モデル

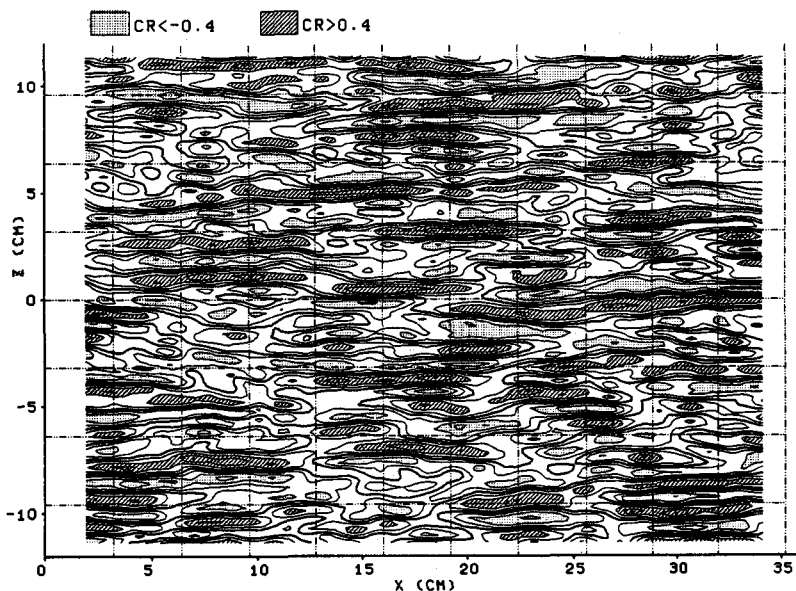


図-6 (a)型配列検出モデルによる二次元相互相関係数の分布

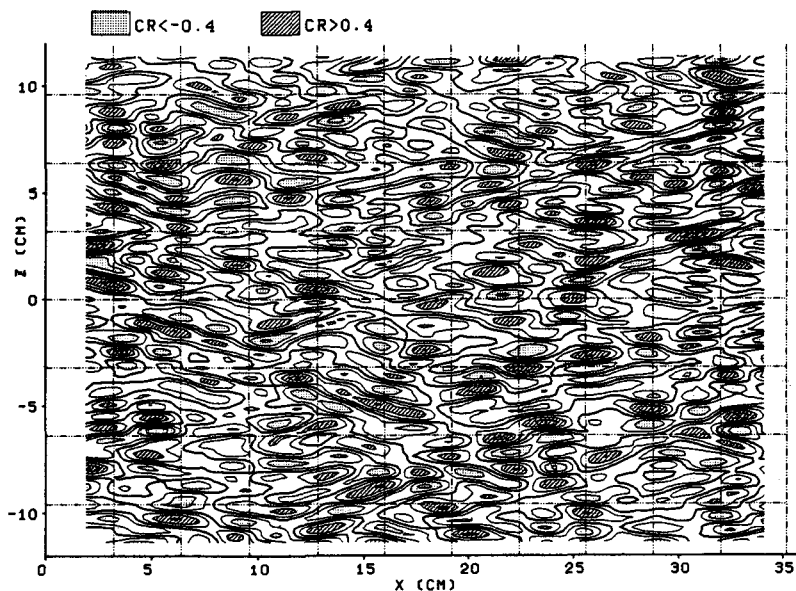
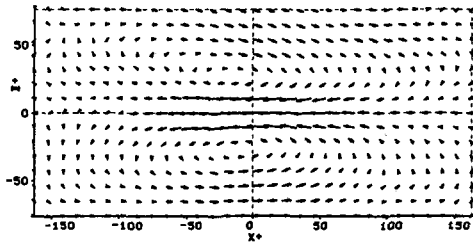
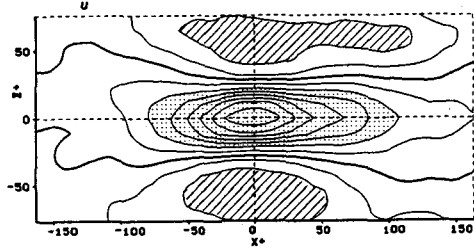


図-7 (c)型配列検出モデルによる二次元相互相関係数の分布

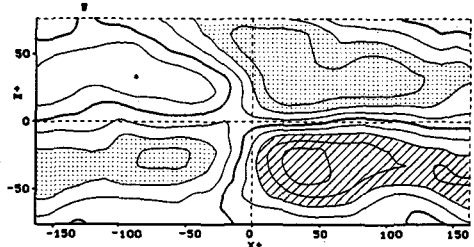
CR の大きな領域は平均的に斜め方向に連なっている。検出モデルの渦度分布から、ピークの上流側は高速領域、下流側は低速領域となっていると予想されるが、実際、本図と図-1 とを比較してみるとそれが確認できる。ところで、このような乱流場をプローブ計測により把握することを考えると、乱流構造が凍結されて流下すると近似的に仮定できるから、CR のピーク付近では急激な加速現象が捉えられることになる。このような急激な加速現象は Blackwelderら<sup>4)</sup>の VITA 法、あるいは Wallaceら<sup>2)</sup>のパターン認識法で捉えられた流速変動の典型的パターンである。彼らが組織構造として捉えたのは、渦構造そのものではなく、渦対の特別



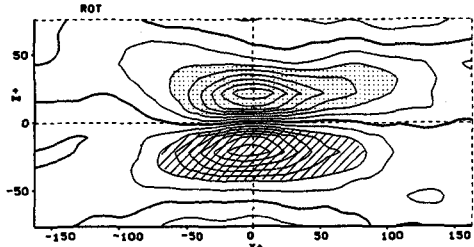
(a) 流速ベクトル



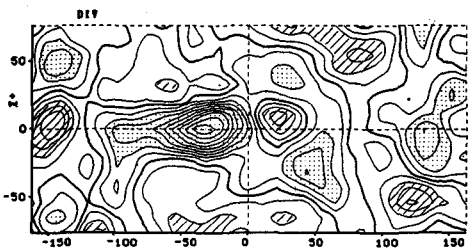
(b) u分布



(c) w分布

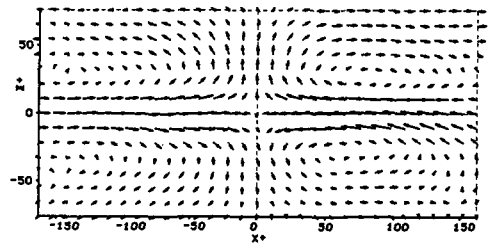


(d) 渦度分布

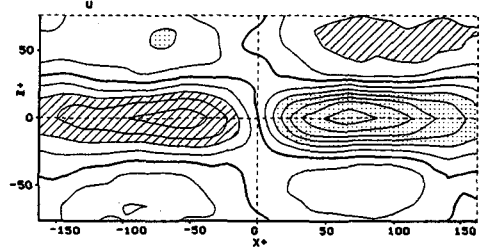


(e) 二次元発散分布

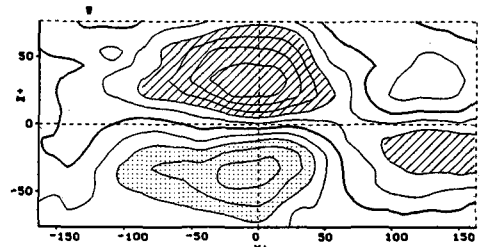
図-8 渦対周辺のアンサンブル平均



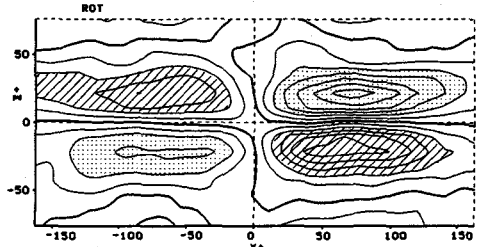
(a) 流速ベクトル



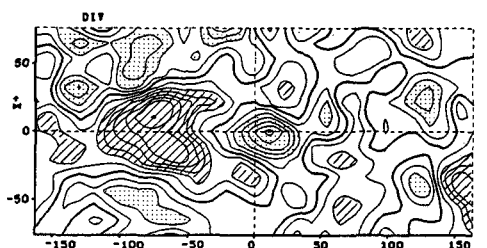
(b) u分布



(c) w分布



(d) 渦度分布



(e) 二次元発散分布

図-9 (c)型配列渦の周辺のアンサンブル平均

な配列によって引き起こされた加速現象であると言える。図-7から、その様な事象は乱流場においてかなり頻繁に発生していることがわかる。

#### 4. 渦対構造の平均的特性

図-4のCRのそれぞれのピーク位置を中心として、その周辺の48mm x 22.4mmの小領域における流速分布、渦度分布、二次元発散分布についてアンサンブル平均を施すことにより、渦対周辺の上記諸量の二次元的な分布を得た。本研究においては、CRのピーク値が0.6を越えるものについてのみアンサンブル平均を施した。CRのその様なピーク位置は図-4に黒点で示されている。計算結果を図-8(a)-(e)に示す。図中の斜線はアンサンブル平均値が正で大きな領域を、点を施した部分は負で絶対値が大きな領域を示す。

(a)-(c)図は流速ベクトルの平均特性を示したものである。渦対の中央部で $u$ は最小となり、 $w$ の絶対値の大きなところで $u$ が0となっていることがわかる。また、当然のことではあるが、(a)図の流速ベクトルは渦の位置を中心として循環するパターンを示している。(d)図の渦度分布においては、実際の乱流場の平均的な渦構造は図-3で示された検出モデルより流下方向に細長くなっている。これらの図のうち最も興味深いのは(d)図の二次元発散の分布である。 $y^* = 21$ 断面は壁面に近いから、二次元発散が負の領域はそこに上昇流があることを意味する。 $(x^*, z^*)$ の座標 $(-30, 0)$ の位置にピークをもつ二次元発散が負の領域は、渦対構造の中央部より上流側の位置で強い上昇流があることを意味しており、これがレイノルズ応力の発生原因であると考えられる。また、この上昇流発生領域の上流側と下流側にその絶対値は大きくはないが二次元発散が正の領域すなわち下降流の発生領域が存在することが注目される。

#### 5. 急激な加速域の特徴

上と同様にして、図-7のCRのピーク位置を中心にして、その周辺の諸量のアンサンブル平均を求め、それを図-9(a)-(e)に示した。(a)図および(d)図は渦の配列状況をよく表している。(b)図においては、原点の上流側に高速域、下流側に低速域があり、 $z^* = 0$ の位置でプローブ計測したとすると、 $u$ の急激な加速が捉えられる。

次に、(e)図においては、原点付近に上昇流を意味する二次元発散が負の領域があり、その上流側にはそれよりもさらに広い範囲で下降流の領域があることが注目される。強い上昇流の領域は渦対の中央部の $u$ が最小となっている位置より上流側にずれていることがこの場合にも認められる。ところが、Wallaceら<sup>2)</sup>およびAlfredssonら<sup>5)</sup>の計測結果によると、組織構造においては、 $u$ の負のピークの時刻と鉛直方向流速成分 $v$ の正のピークの時刻はほぼ一致しており、本研究の結果と異なっている。一方、強い下降流の発生している領域は $u$ の値が正の大きな領域とほぼ一致していることがわかる。このようなsweep現象は隣あう渦対の相互作用によって発生しているものと考えられ、ejection現象が主として単独の馬蹄型渦により生じることと比較して、発生上の性格を異にしている。

#### 6. おわりに

開水路流れの水平断面の可視化写真を画像処理して得られたデータに、渦対構造そのものを対象とした二次元パターン認識法を適用して、開水路乱流の組織構造を検討した。基本となる渦対構造と急激な加速現象を発生させる配列パターンの周辺の流速分布、渦度分布及び二次元発散分布の特徴が明らかになった。それによると、BlackwelderらのVITA法、あるいはWallaceらのパターン認識法で捉えられた組織構造の加速領域は渦構造そのものではなく、渦対の特別な配列によって引き起こされた現象であるといえる。

#### 参考文献

- 1) 上野鉄男・宇民正・R. F. Blackwelder; 第33回水理講演会論文集、1989, pp. 547-552.
- 2) Wallace, J. M., R. S. Brodkey and H. Eckelman: J. Fluid Mech., Vol. 83., 1977, pp. 673-693.
- 3) Utami, T. and T. Ueno: J. Fluid Mech., Vol. 174, 1987, pp. 399-440.
- 4) Blackwelder, R. F., and R. E. Kaplan: J. Fluid Mech., Vol. 76, 1976, pp. 89-112.
- 5) Alfredson, P. H. and A. V. Johansson: J. Fluid Mech., Vol. 139, 1984, pp. 325-345.