

DPIV による乱流の coherent 微細渦の計測

東工大工 店橋 護(Mamoru Tanahashi)

荏原製作所 福島 誠(Makoto Fukushima)

東工大工 宮内 敏雄(Toshio Miyauchi)

1. 緒論

著者らによる一様等方性乱流の微細構造に関する研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾から、乱流中には平均的に Kolmogorov scale の約 10 倍の直径と二乗平均変動速度程度の最大周方向速度を持つ coherent 微細渦が存在することが明らかにされている。Coherent 微細渦は一様等方性乱流のみならず、乱流混合層⁽⁴⁾⁽⁵⁾、channel 乱流⁽⁶⁾等にも存在し、流れ場や Reynolds 数が異なっても Kolmogorov scale と二乗平均変動速度を用いてスケーリングできる。これらの平均周方向速度は Burgers 渦で良く近似でき、周囲に比較的大きな散逸領域を形成することから、散逸率の間欠性に直接関係する。

本研究では、高空間分解能 DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) ⁽⁷⁾を用いた乱流混合層の実験を行い、乱流混合層中の coherent 微細渦の存在を実験的に証明し、それらの特性を明らかにすることを目的としている。

2. 乱流混合層実験装置および DPIV 計測システム

図 1 に本研究のために製作された乱流混合層実験装置の概略図を示す。本実験装置は作動流体として水を使用し、作動流体を重力落下で駆動する循環式の閉水路である。テスト・セクションの座標系は流れ方向を x 、分離板に垂直な方向を y 、スパン方向を z とし、原点を分離板後端でテスト・セクションの中心部に設定した。以下の DPIV 計測は全て $z=0$ の x - y 平面内で行われた。

図 2 に DPIV 計測システムの概略図を示す。本計測システムは Ar^+ レーザ、レーザー・シャッター、レーザー・シート生成光学系、ファンクション・ジェネレータ、パルス・ジェネレータ、PC および 1008×1008 ピクセル、256 階調グレースケー

ルの CCD カメラから構成されている。Ar⁺レーザからのレーザ光はレーザ・シャッターでパルス状にされた後、ガルバノメータ・スキャナ、放物面鏡および円筒面レンズによりシート状に引き伸ばされ計測領域を照射する。レーザ・シートにより照射された粒子の散乱光は毎秒 30 枚のレートで CCD カメラから PC に取り込まれる。取得された画像は実験終了後に解析され、速度ベクトルが算出される。

3. 実験方法および実験条件

DPIV による速度ベクトルの算出法には異なる時刻で撮影された 2 つの画像の相関から速度ベクトルを算出する相互相関法を採用した。微小検査領域 32×32 ピクセル毎に相関関数を計算し、60×60 点の速度ベクトルを算出した。過誤ベクトルは微小検査領域の大きさにより決まる DPIV の空間分解能に応じたローパスフィルターを施し、その除去を行った⁽⁸⁾。混入したトレーサ粒子はポリエチレン粒子（平均粒径 12μm, 比重 0.92）である。表 1 に本研究の実験条件を示す。実験は計測位置 x , 高速側主流速度 U_1 , 低速側主流速度 U_2 がそれぞれ異なる 6 つのケースが行われた。ここで、 x^+ は $x^+=Rx/\lambda_0$ (R は速度比, λ_0 は不安定波長) で定義される無次元長さであり、 $x^+=2, 4, 8$ がそれぞれ混合層の大規模構造の 1 回目, 2 回目, 3 回目の合体に対応している。したがって、CASE 6 が乱流混合層が最も発達した段階になっている。

4. 実験結果および考察

図 3 は本実験で計測された典型的な乱流混合層の速度ベクトル分布を示している。図の速度ベクトルは DPIV で得られた速度から主流平均速度を引いたものである。計測領域は 3cm×3cm で、下部が高速側、上部が低速側に対応する。図 3 から非常に微細なスケールの渦の存在が確認される。

図 4 は CASE 6 の実験結果から抽出された 359 個の全ての微細渦について平均した平均周方向速度分布を一様等方性乱流 (HIT)⁽⁹⁾ および時間発展乱流混合層 (T-TML)⁽⁴⁾ の直接数値計算結果から抽出された coherent 微細渦の平均周方向速度分布と比較したものである。以下で*を付した物理量は Kolmogorov scale と二乗平均変動速度を用いた正規化を行ったものである。流れ場が異なる coherent 微細渦, また直接数値計算結果から抽出された coherent 微細渦の平均周方向速度

分布と本実験結果が良く一致していることがわかる。また、これらの微細渦の周方向速度は Burgers 渦の速度分布で良く近似することができる。

図 5 は個々の微細渦の直径 D^* と最大周方向速度 v_m^* の確率密度関数 (PDF) を示している。直径の PDF は $D^*=11$ 付近でピークを示しており、 $D^*=11$ 程度の微細渦の存在確率が最も高いことがわかる。最大周方向速度の PDF は、CASE 1 では $v_m^*=0.8$ 付近でピークを示している。これに対して、乱流混合層が発達した CASE 5 と 6 では、約 $v_m^*=0.5$ でピークを示している。したがって、最も存在確率が高い v_m^* の値は乱流混合層の発達に伴って減少していることがわかる。

図 6 は x^+ に対する微細渦の直径と最大周方向速度の平均値の依存性を示している。著者らの時間発展混合層⁽⁴⁾および空間発展混合層⁽⁵⁾の直接数値計算による研究では乱流混合層の発達に伴い $\langle D^* \rangle$, $\langle v_m^* \rangle$ が減少することが示されている。これに対して、図 6 では x^+ の増加、すなわち乱流混合層の発達に伴い $\langle D^* \rangle$ は増加している。これは乱流混合層の発達に伴いランダムな方向を向く coherent 微細渦が増加する⁽⁴⁾⁽⁵⁾のに対し、本実験では計測平面が一定であるので、本実験結果が計測平面に対して傾いた微細渦を含む結果であるためと考えられる。 $\langle v_m^* \rangle$ は x^+ の増加に伴い次第に減少し、二乗平均変動速度の約 0.7 倍に漸近している。

次に、乱流混合層中の coherent 微細渦の非軸対称性について検討を行う。図 7 は個々の coherent 微細渦の半径 r_c の 0.25 倍となる位置において周方向波数 $k_\theta=2$ のモードを基準として位相平均操作を行った平均周方向速度(a)と平均半径方向速度(b)の等値線および速度ベクトル(c)を示している。図の半径は $2r_c$ である。比較のために、図 8 に一様等方性乱流から抽出された coherent 微細渦の結果⁽¹⁰⁾を示す。本実験結果の周方向速度の等値線は coherent 微細渦中心付近で明確な楕円形を示しており、一様等方性乱流中の coherent 微細渦の断面形状と良く一致している。

5. 結言

本研究では、乱流混合層の実験結果から抽出された微細渦の解析により、理論および直接数値計算による研究結果から予測されていた乱流の coherent 微細渦の存在を実験的に証明し、それらは普遍的な構造を持つことを明らかにした。

謝辞：本研究の一部は，科学研究費補助金基盤研究(B)(No. 09450088)で行われたものである．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- (1) M. Tanahashi, T. Miyauchi and T. Yoshida, *Transport Phenomena in Thermal-Fluid Eng.*, 2 (1996), 1256.
- (2) M. Tanahashi, T. Miyauchi and J. Ikeda, *IUTAM Symposium: Simulation and Identification of Organized Structures in Flows*, Eds. J. N. Sorensen et al., Kluwer Academic Publishers, p. 131-140 (1999).
- (3) M. Tanahashi, T. Miyauchi and J. Ikeda, *Proc. 11th Symp. Turbulent Shear Flows*, 1 (1997), 4-12.
- (4) M. Tanahashi, T. Miyauchi and K. Matsuoka, *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2 (1997), 461.
- (5) M. Tanahashi, T. Miyauchi and K. Matsuoka, to be appeared in *Proc. IUTAM/IUGG Symp. Developments in Geophysical Turbulence*.
- (6) 店橋 護・スサント ダス・小路 健太郎・宮内 敏雄, *日本機械学会論文集(B編)*, 65 巻 638 号 (1999), 3244.
- (7) C. Willert and M. Gharib, *Exp. Fluids*, 10 (1991), 181.
- (8) 店橋 護・福島 誠・宮内 敏雄, *第 34 回伝熱シンポジウム講演論文集*, 2 (1997), 357.
- (9) 店橋 護・宮内 敏雄・池田 淳, *第 35 回伝熱シンポジウム講演論文集*, 1 (1998), 121.
- (10) 岩瀬 識・店橋 護・宮内 敏雄, *第 12 回数値流体力学シンポジウム講演論文集*, (1998), 413.

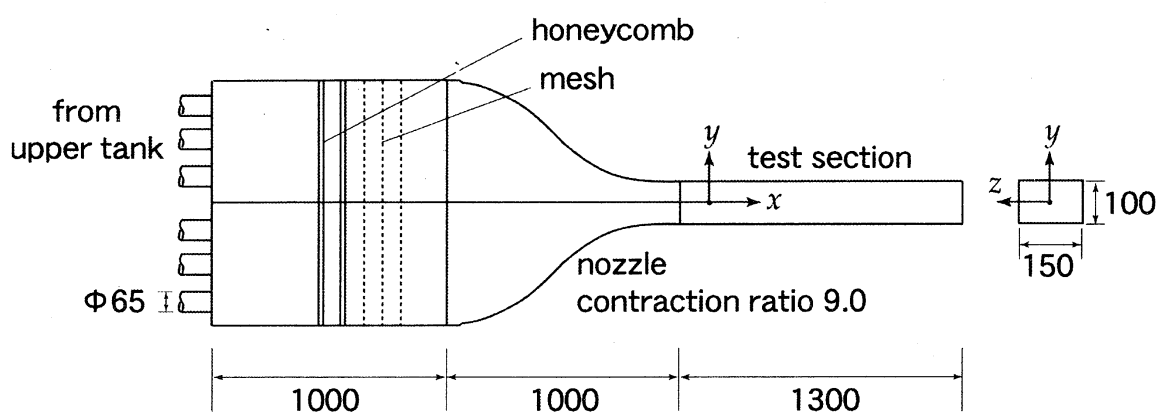
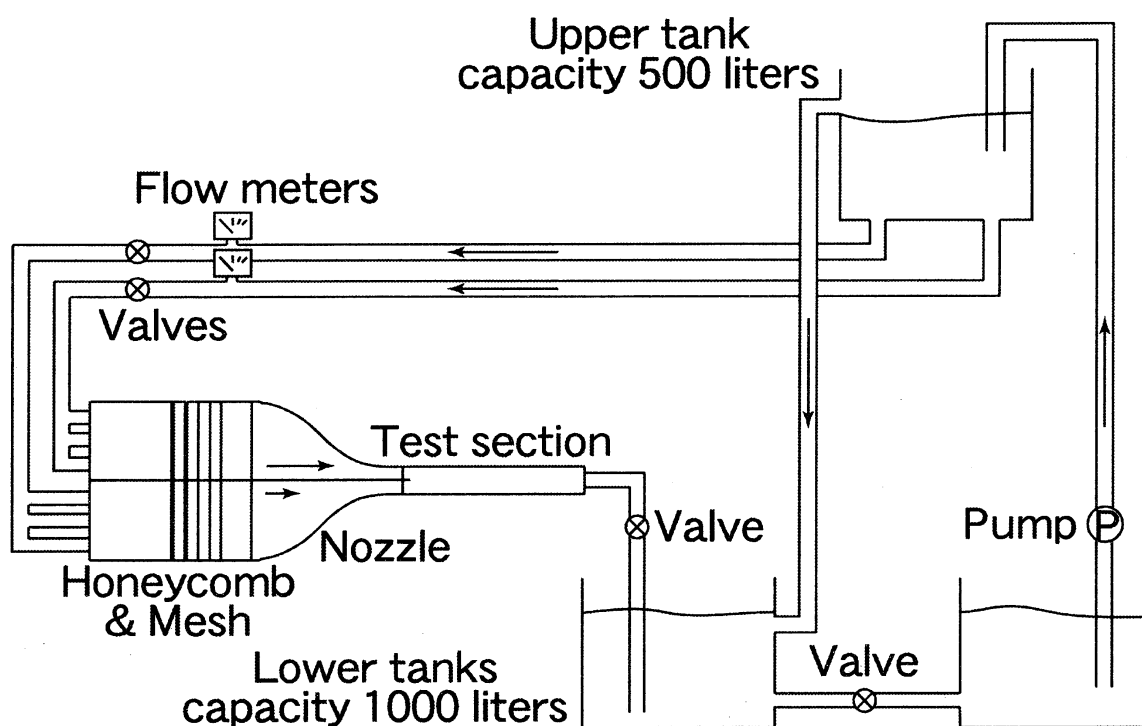


Fig.1 Experimental apparatus of turbulent mixing layer

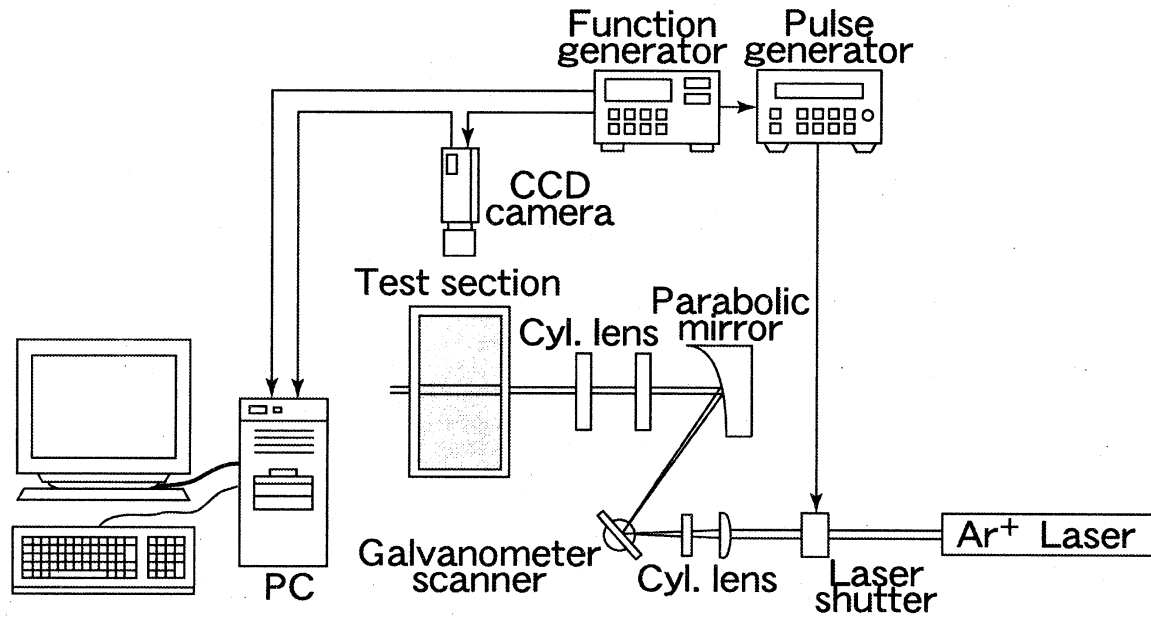


Fig.2 DPIV measurement system

Table 1 Experimental conditions

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5	CASE 6
x [cm]	31.3	31.3	26.3	25.3	28.3	31.3
U_1 [cm/s]	11.7	15.2	18.4	18.7	18.8	18.4
U_2 [cm/s]	5.87	6.80	7.30	6.85	7.56	7.24
R	0.331	0.382	0.431	0.464	0.426	0.435
x^+	5.46	7.20	7.49	7.82	8.04	9.01

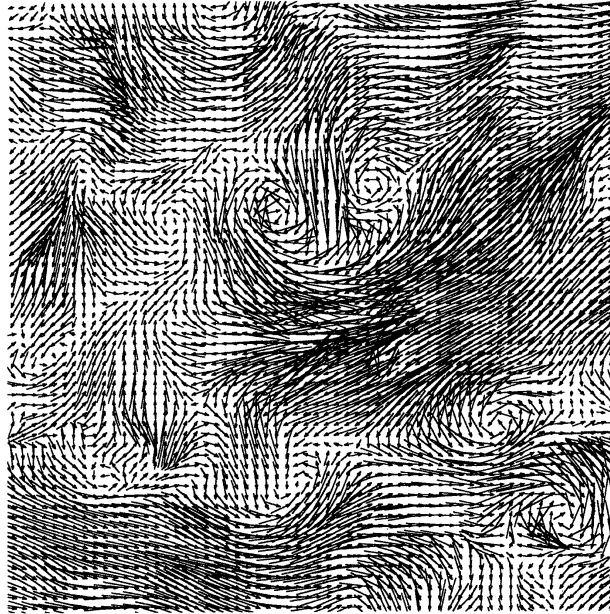


Fig.3 Vecotor plots of velocity of turbulent mixing layer by DPIV (measurement region $3\text{cm} \times 3\text{cm}$)

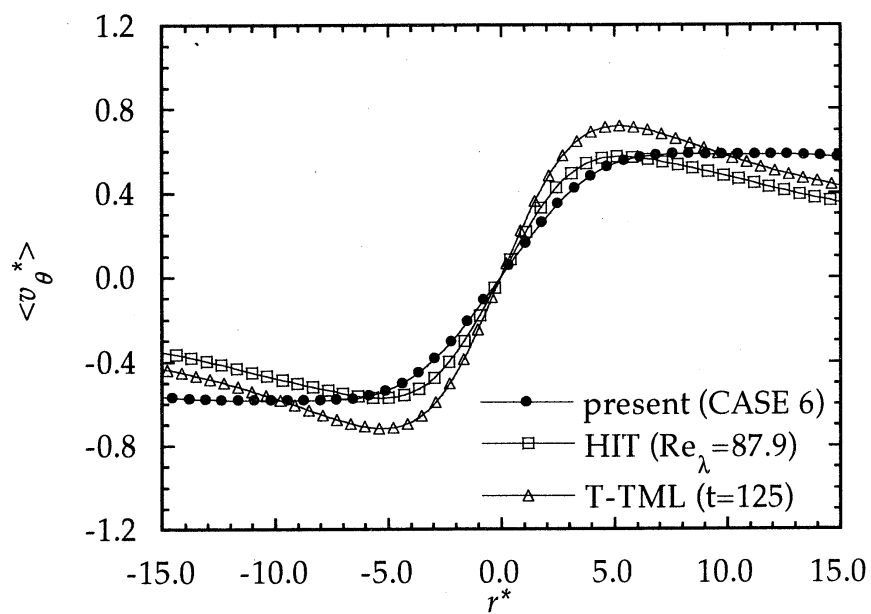


Fig.4 Mean azimuthal velocity profiles of coherent fine scale eddies.

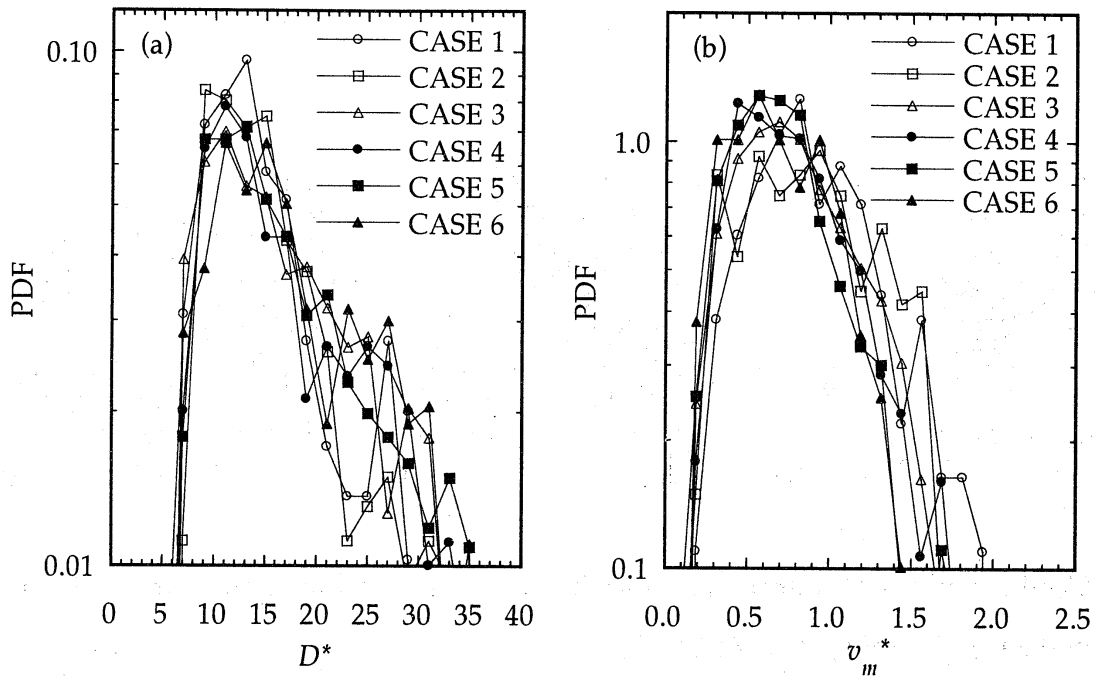


Fig.5 Pdfs of diameters (a) and maximum azimuthal velocities (b) of coherent fine scale eddies.

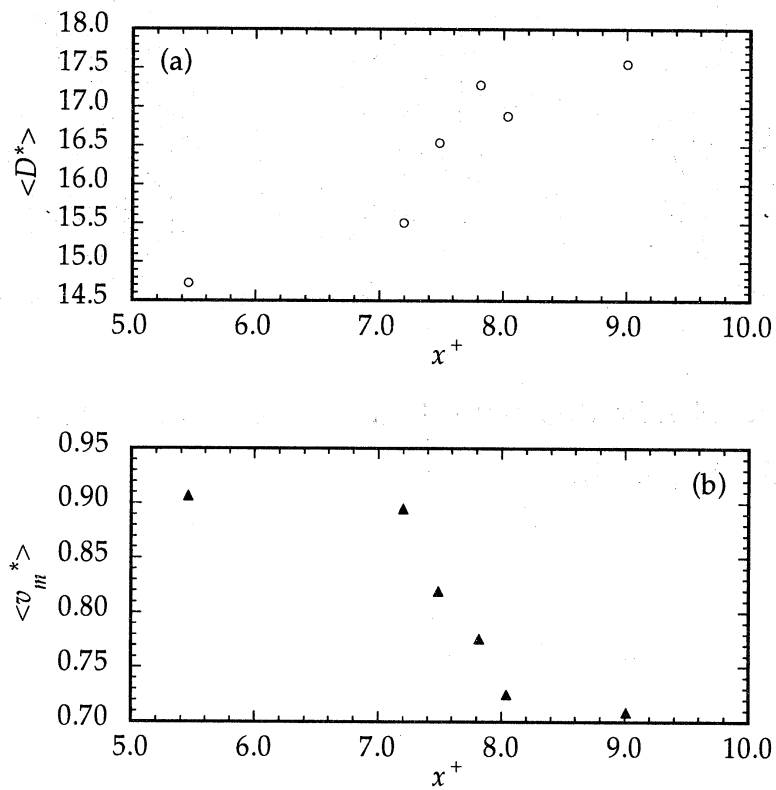


Fig.6 Dependences of mean diameter (a) and mean maximum azimuthal velocity (b) on x^+ .

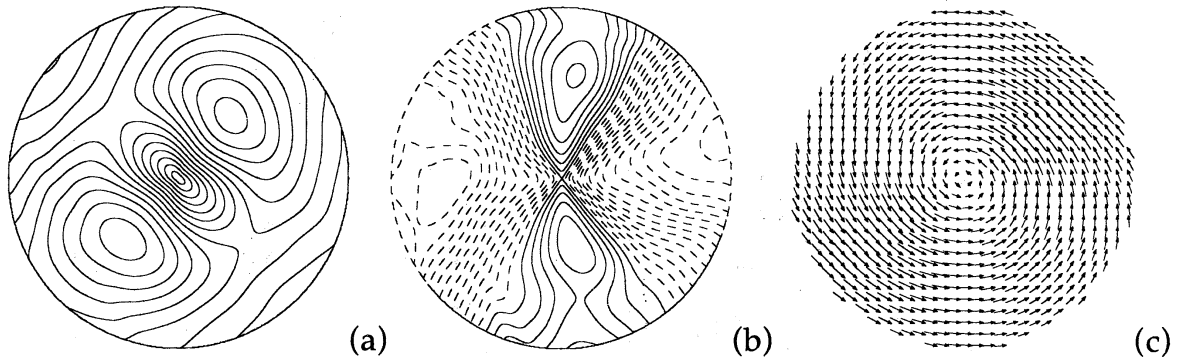


Fig.7 Contour plots of azimuthal velocity (a), radial velocity (b) and vector plots of velocity (c) (CASE 6, $Re_\lambda=71.1$).

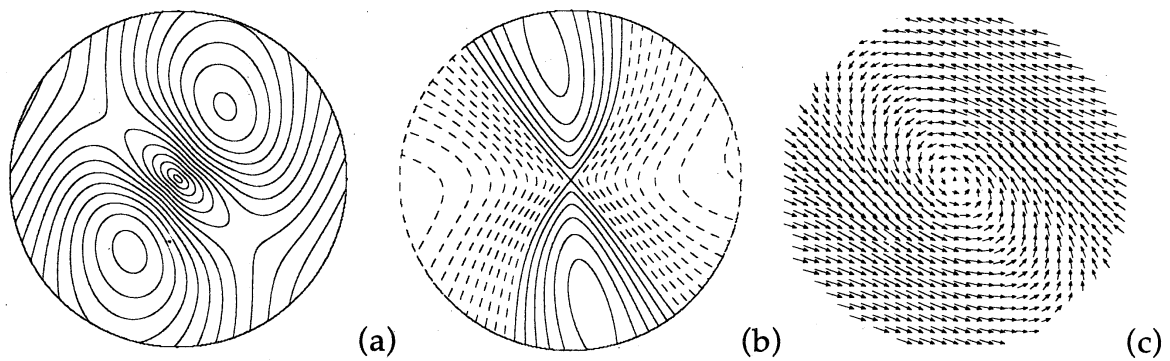


Fig.8 Contour plots of azimuthal velocity (a), radial velocity (b) and vector plots of velocity (c) (HIT, $Re_\lambda=87.9$).