

レイノルズ数の変化に伴う壁乱流の秩序構造の特徴

The characteristics of coherent structures in the near-wall region of turbulent channel flow changing with Reynolds number

徳山高専	佐 賀 孝 徳	Takanori SAGA
徳山高専	大 成 博 文	Hirofumi OHNARI
徳山高専	渡 辺 勝 利	Katutosi WATANABE
山口大学	斎 藤 隆	Takashi SAITOU

The characteristics of coherent structures in the near-wall region of turbulent open channel flow changing with Reynolds number are investigated using flow visualization. The flow visualization were done in the streamwise view using fluorescent dye illuminated by a sheet of Argon laser light.

Some new aspects of the characteristics are inferred from this experiment. The ratio of the inner length to water depth in turbulent open channel flow is governed by Reynolds number. The greatest number of streamwise vortices are formed in the buffer layer. Further non dimensional vertical and spanwise scale of streamwise vortices are constant changing Reynolds number from 2000 to 7000.

Keywords: Coherent structure, turbulent flow, streamwise vortex, Reynolds number

1. はじめに

著者らは、壁乱流の秩序構造に関する研究を継続的に進めている¹⁾²⁾。その結果、壁乱流の内層には「壁縦渦」¹⁾と呼ばれるヘヤピン型の渦対構造が形成され、それが壁近くの流速変動の形成にきわめて重要な役割を果たすことが明らかにされている。ところが、これらの知見は、比較的低レイノルズ数の実験条件下で得られたものであり、その意味ではある制約を有する結果であったと考えられる。

一方、従来の秩序構造に関する研究においては、秩序構造の本質的な性質はレイノルズ数に依存しないとされ、その例証としては、Brownら³⁾による混合層の可視化実験、Raoら⁴⁾による乱流境界層中のバースト周期の測定、Smithら⁵⁾による粘性底層内のlow speed streaksの横幅間隔の測定などがある。これらの結果に対して、Headら⁶⁾は、可視化と熱線流速計の同時併用実験によって、乱流境界層内に形成された渦構造の解明を行い、それらがレイノルズ数の変化に伴って変化することを明らかにしている。

さて以上の結果を踏まえると、秩序構造には、レイノルズ数の変化に応じて変化する性質とそうでない性質の両側面が共在しているようであり、改めてレイノルズ数の変化に伴う秩序構造の特徴を系統的に考察し、秩序構造の何が変化し、何が不変であるかを明らかにすることが重要な課題となり得る。

そこで、本研究では、滑面開水路乱流においてレイノルズ数を系統的に変化させ、その平均流速分布特性と、内層の秩序構造のなかでもとりわけ重要と思われる壁縦渦構造について若干の考察がなされた。その結果、レイノルズ数変化に伴う壁縦渦構造の特徴に関する2、3の重要な知見が得られた。

2. 流れの可視化法と実験条件

実験は、長さ10m、幅60cm、深さ15cmの総アクリル製滑面開水路で行われた。水路勾配は一定の1/1000

とし、上下流端にはそれぞれ、整流用ハニカムと水位調節用堰が設置された。

流れの可視化法には、横断面視法¹⁾が適用された。また、トレーサーも従来と同じ比重1.005のフルオレセインナトリウム水溶液が用いられた。

実験条件は、Table. 1に示されるように、レイノルズ数が2000から17000まで12種類変えられ、さらに各々のレイノルズ数の下で水深が3種類ほど変えられた。そして各ケースごとに、レーザー流速計（最大出力2ワットのアルゴンレーザー）を用いて平均流速分布が計測され、さらに横断面可視化によるテレビ撮影がなされた（ただし、流れの可視化は、レイノルズ数7000以下で行われた）。

Table.1 Experimental condition

CASE	H (cm)	U _m (cm/s)	U _τ (cm/s)	γ (cm ² /s)	Re (×10 ³)	CASE	H (cm)	U _m (cm/s)	U _τ (cm/s)	γ (cm ² /s)	Re (×10 ³)
A	4.0	5.87	0.43	0.01174	2.0	G	4.0	22.82	1.34	0.01141	8.0
	6.0	4.02	0.34	0.01207	2.0		8.0	11.41	0.68	0.01141	8.0
	8.0	3.02	0.24	0.01207	2.0		10.0	8.13	0.54	0.01141	8.0
B	4.0	8.81	0.58	0.01174	3.0	H	4.0	25.67	1.53	0.01141	9.0
	6.0	5.87	0.40	0.01174	3.0		8.0	12.49	0.78	0.01141	9.0
	8.0	4.40	0.29	0.01174	3.0		10.0	10.27	0.62	0.01141	9.0
C	4.0	11.14	0.77	0.01114	4.0	I	4.0	28.53	1.60	0.01141	10.0
	6.0	7.42	0.52	0.01114	4.0		8.0	14.26	0.76	0.01141	10.0
	8.0	5.71	0.35	0.01141	4.0		10.0	11.41	0.59	0.01141	10.0
D	6.0	9.51	0.59	0.01141	5.0	J	4.0	30.81	1.58	0.01141	10.8
	8.0	7.13	0.45	0.01141	5.0		8.0	15.40	0.76	0.01141	10.8
	10.0	5.75	0.32	0.01141	5.0		10.0	12.32	0.63	0.01141	10.8
E	6.0	11.41	0.70	0.01141	6.0	K	4.0	44.03	2.25	0.01174	15.0
	8.0	8.56	0.50	0.01141	6.0		8.0	22.01	1.14	0.01174	15.0
	10.0	6.85	0.41	0.01141	6.0		10.0	17.61	0.89	0.01174	15.0
F	4.0	19.43	1.11	0.01141	7.0	L	4.5	44.35	2.32	0.01174	17.0
	6.0	9.88	0.54	0.01141	7.0		8.0	24.95	1.21	0.01174	17.0
	10.0	7.99	0.43	0.01141	7.0		10.0	19.96	0.96	0.01174	17.0

3. 平均流速分布特性と内層水深比

Fig. 1には、本開水路乱流における平均流速分布計測の一例が示されている。図内には、同様のレーザー流速計を用いて計測された瀬津ら⁷⁾の結果とそれに基づく提案式が示されている。これより、計測された流速分布は瀬津の式にほぼ従うことが明らかである。この場合、摩擦速度 u_τ はその式より算定されたが、それらが水面勾配より求められた値とほとんど変わらないことが確かめられた。

次に、各レイノルズ数に応じて、内層厚さ l （ l は $y^+=100$ を与える壁からの距離 y に相当する）と水深 H の比である内層水深比 l/H が求められた。Fig. 2には、滑面開水路乱流における内層水深比とレイノルズ数の相互関係が示されている。図中の実線が内層水深比、一点鎖線がバッファ層外端、鎖線が粘性底層外端をそれぞれ表す。この図より、レイノルズ数の増加に伴って、内層水深比は指数関数的に減少し、しかもレイノルズ数が決まるとこの比が一義的に決定されることが明らかである。また、著者らにとっては意外なことであったが、レイノルズ数が一定であれば、水深を

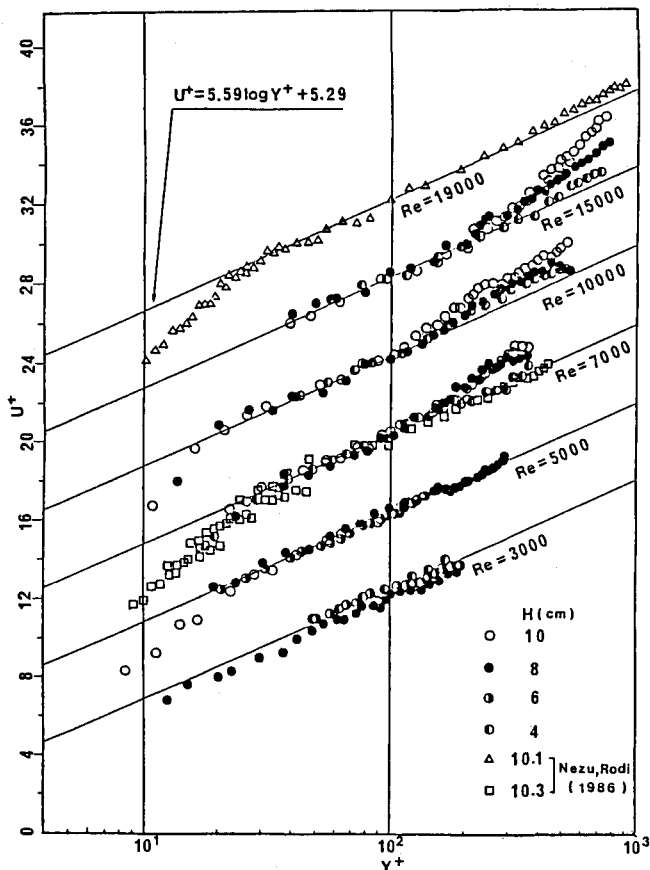


Fig.1 Mean velocity distributions

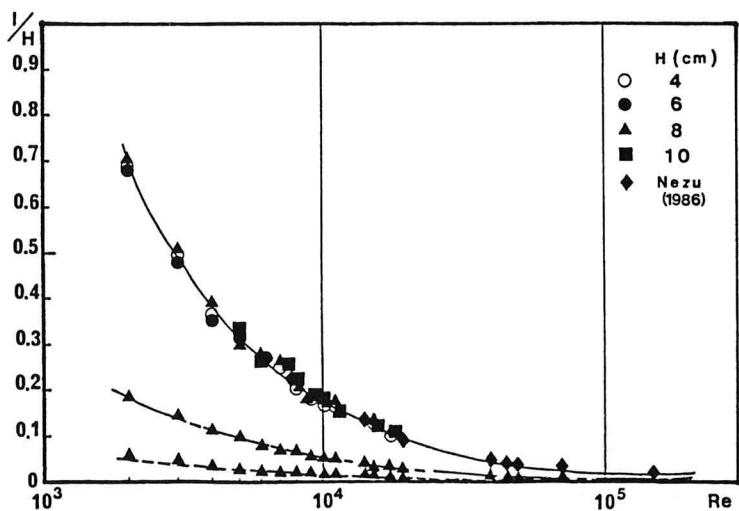
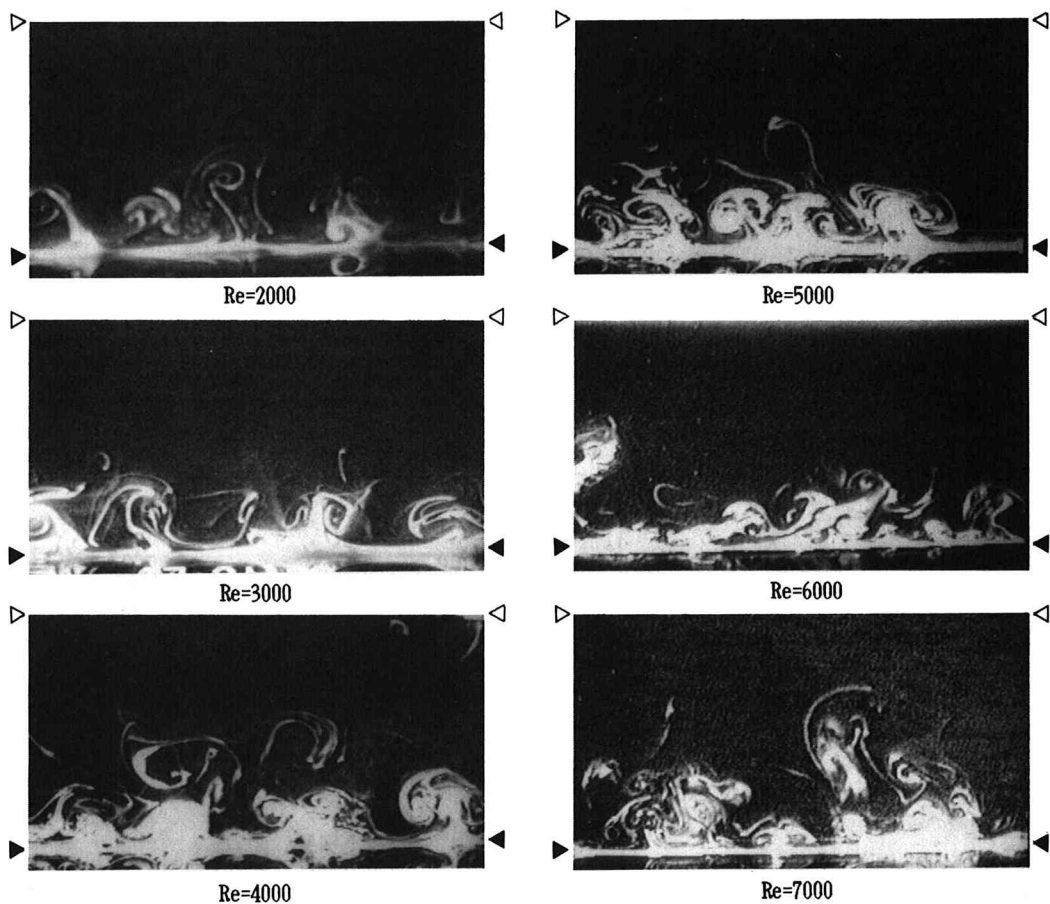


Fig.2 Ratio of inner length to water depth in turbulent open channel flow



(水深は全て8cm) Δ:water surface, ▲:wall surface

Fig.3 Streamwise view of turbulent open channel flow changing with Re number

変化させても内層水深比はほとんど変わらないことも明らかである。この内層水深比曲線を両対数表示すると、それは直線となり、それより次式が得られる。

$$l/H = 529.6 \operatorname{Re}^{-0.875} \quad (1)$$

また(1)式より摩擦速度が容易に求められ、さらに、抵抗則においては、Blasiusの滑面管路での実験式 $f = 0.3164 \operatorname{Re}^{-1/4}$ と対応する。ここに、 f は摩擦損失係数である。

4. レイノルズ数の変化に伴う壁縦渦構造の特徴

(1) 横断面可視化写真

Fig. 3には各レイノルズ数における開水路乱流の横断面可視化写真がそれぞれ示されている。各写真のスケールはほぼ同一であり、それぞれの上下部には、水表面と底壁面の一部が写し出されている。これらの写真を詳しく観察すると、レイノルズ数の増加に伴って、壁縦渦の横断面スケールが徐々に減少し、さらに壁縦渦の集団としての形象においてより複雑さを呈するようになることが明らかである。

(2) 壁縦渦の形成領域と頻度

内層における壁縦渦の形成頻度が以下の要領で調べられた。テレビ画像内に可視化された開水路乱流内層の横断面形象の中から、壁縦渦を見出し、その渦対を構成する渦の中心座標が、0.1~0.5秒(各ケースで読み取りの画像間隔が異なる)ごとに読み取られ、その読み取り個数はそれぞれ600であった。これより壁からの距離に応じて渦の形成頻度が求められ、そのレイノルズ数ごとの比較がFig. 4に示されている。

この図より、壁縦渦の形成頻度は、バッファー層 ($10 < y^+ < 30$) において最大となり、壁から離れるにしたがって徐々に低下していることが明らかである。また、その頻度分布はレイノルズ数の変化にあまり影響されないことも明らかである。もう一つの特徴として、壁縦渦の形成が内層境界 ($y^+ = 100$) 付近でほとんど認められなくなることである。これは、壁縦渦の形成の有無によって、内層と外層が区別され得ることを示唆しているように思われる。一方、Kline⁸⁾は $y^+ < 80$ の領域内に強い内部せん断層 (strong internal shear layers) の形成がなされることが、最近の共通理解の一つであることを報告しているが、その領域は、この壁縦渦の頻度分布とも対応し得る。すでに著者らは、壁縦渦が壁近くの大規模の流れ方向流速変動の形成に重要な寄与をなすことを明らかにしている²⁾が、この変動自身が強い内部せん断層を形成させる原因となり得ることから、壁縦渦の形成領域とこのせん断層が領域的に重なることは当然のことのように思われる。またFig. 4内には、Klebanoffら⁹⁾による乱れエネルギーの生成確率分布とKimら¹⁰⁾によるバースト発生周期の頻度分布に関する結果が示されているが、これらの分布形状と、壁縦渦の形成頻度分布形状が類似していることも、真に興味深いことのように思われる。

(3) 壁縦渦の横断面スケール

テレビ上の横断面可視化画像から、内層に形成された壁縦渦の縦横スケールが、それぞれのレイノルズ数ごとに読み取られた。一枚の画像ごとの読み

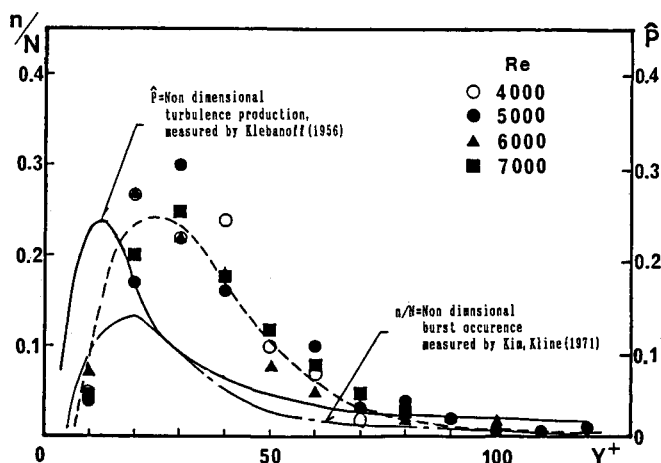


Fig. 4 Histogram of the region to form streamwise vortices

取り間隔と総読み取り個数は、Fig. 4の場合と同一である。

Fig. 5には、バッファ層内に形成された壁縦渦の縦横スケールの平均値がレイノルズ数ごとに（水深一定の8 cm）プロットされている。これより、壁縦渦の横断面縦横スケールは、レイノルズ数の変化とはあまり関係なく、ほぼ20 wall unit（壁スケール単位）前後の一定値を示すことが明らかである（ただし、レイノルズ数が増加するにしたがってわずかに壁縦渦の縦横スケールが増える傾向も認められるので、一定値と見なした判断は微妙である）。これらの平均値は、著者らがすでに求めた同じ値と比較して若干大きめの値を示している。この相違は、テレビ画像からの読み取りとスチール写真からの読み取りの差によって生じたものと思われる。今後、読み取り個数と読み取り領域を増やして、本スケールに関するより詳細な検討が必要である。

Fig. 6には、前図の作成において読み取った壁縦渦の縦横スケールの頻度分布が示されている。この図より、壁縦渦の縦横スケールの頻度は、レイノルズ数の変化には依存せず、 y^+ が20程度で最頻値を示し、分布は最頻値よりも大きい側にやや広がりを見せている。しかし、その縦横スケールの両者では、その頻度分布特性が少し異なるようであり、その横スケールの方が、最頻値よりも大きい側により広がりを見せているようである。

以上のことから、バッファ層内に形成された壁縦渦構造は、レイノルズ数の変化にほとんど依存しないと見なせるであろう。

(4) 壁縦渦の時空間構造

Fig. 7には、レイノルズ数の異なる流れ場における、壁縦渦の時空間構造の比較の一例が示されている。この図は、1/30秒ごとに画像を時間の経過方向に重ね合わせることによって描かれたものである。この図よりも明らかなように、壁縦渦は、レイノルズ数の増加に伴って、その実寸を減少させるが、バッファ層内においては、その無次元長さをほとんど変化させないようである。

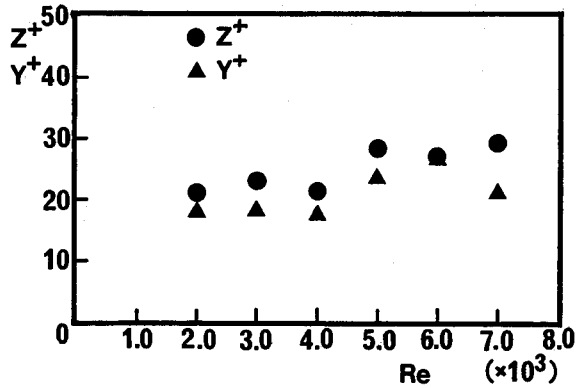


Fig. 5 Vertical and spanwise mean scale of streamwise vortices in buffer layer changing with Re number

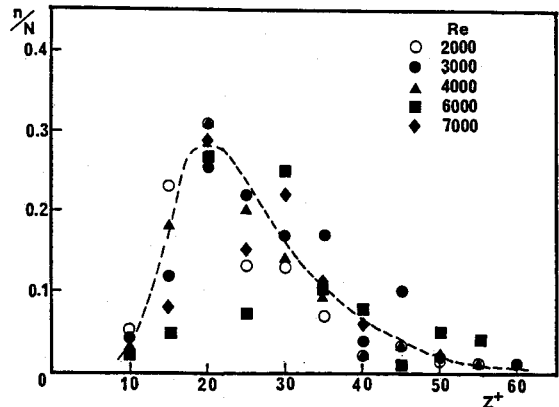
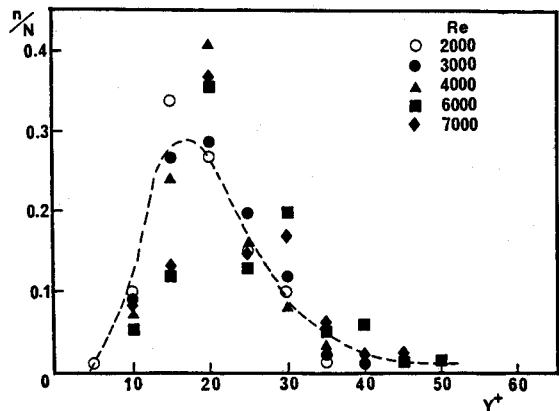


Fig. 6 Histogram of vertical and spanwise scale of streamwise vortices in buffer layer changing with Re number

5. おわりに

開水路乱流における内層水深比とレイノルズ数の相互関係が明らかにされた。また、レイノルズ数を変えて、壁縦渦の形成領域および規模が検討された。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 開水路乱流の内層水深比は、レイノルズ数によって一義的に決定され、レイノルズ数の増加とともに減少する。

(2) 壁縦渦はバッファー層においてもっとも多く形成され、そこでの壁縦渦の無次元横断面スケールは、レイノルズ数の変化にほとんど依存しない。

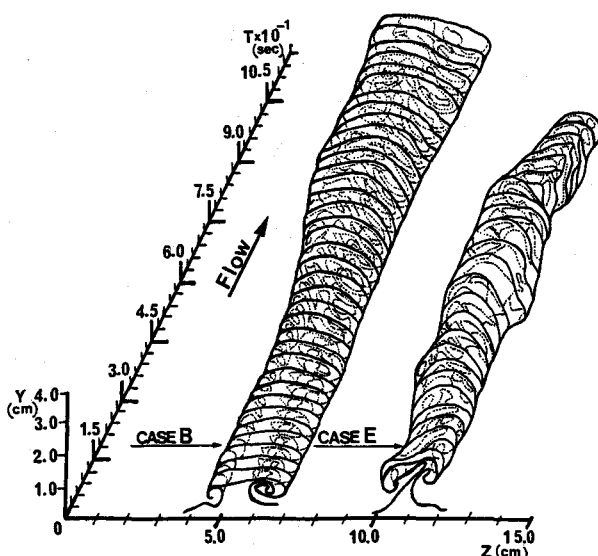


Fig.7 Time-space structures of streamwise vortices in the case of different Re number

謝 辞

本実験およびデータ整理に協力していただいた本校在学生の児玉隆裕，上田清次郎，池辺俊之，藤井毅，西村努の諸氏に謝意を表します。なお，本研究の一部は，昭和63年度文部省科研費奨励研究（A）および一般研究（C）の援助のもとに遂行された。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大成博文他：開水路乱流内層の縦渦構造，土木学会論文集，第363号／Ⅱ-4，pp.135-144，1985.
- 2) 佐賀孝徳他：開水路乱流内層の渦構造と流速変動の相互関係，土木学会論文集，第393号／Ⅱ-9，pp.131-140，1988.
- 3) Brown, G.L. et al: On density effects and large structure in turbulent mixing layers, J. Fluid Mech., 64, pp. 775-816, 1974.
- 4) Rao, N.K. et al: Bursting in a turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., 48, pp. 339-352, 1971.
- 5) Smith et al: The characteristics of low speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., 129, pp. 27-54, 1983.
- 6) Head, M.R. et al: Combined flow visualization and hot wire measurements in turbulent boundary layers, Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, pp. 98-129, 1978.
- 7) Nezu, I. et al: Open channel flow measurements with a laser doppler anemometer, ASCE, 112, 5, pp. 335-355, 1986.
- 8) Kline, S.J.: Quasi-coherent structures in the turbulent boundary layer, Zoran P. Zaric Memorial International Seminar on Near-Wall Turbulence, pp. 1-22, 1988.
- 9) Kulebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient, NACA Tech. Note No. 3178, 1954.
- 10) Kim, H.T. et al: The production of the wall region in turbulent flow, J. Fluid Mech., 50, pp. 133-160, 1971.