

Dune 上の非定常空気乱流に関する実験的研究

Experimental Study on Unsteady Air Flows over Dune

金子浩士*・Tu Haizhou**・河原能久***・玉井信行****

By Hiroshi KANEKO, Haizhou TU, Yoshihisa KAWAHARA & Nobuyuki TAMAI

Unsteady flows were generated over smooth and rough, wavy beds in a wind tunnel with the section of 80cm×80cm and length of 820cm. Seven waves were placed in the tunnel and the measurement was carried out over the sixth bed. Longitudinal and vertical velocity components were measured with a X-type hot-wire anemometer at 9 sections over the wavy beds. For all the sections, the velocities were taken from the bed surface to the top of the tunnel. At each point, the measurements were repeated 5 times. The large volume of data obtained are used to calculate the ensemble-mean velocities as well as the Reynolds stresses.

Keywords : unsteady flow, dune, Reynolds stress

1. はじめに

我々が本研究で扱うことになる流れは、非定常空気乱流である。これまで定常乱流の特性については数多くの研究がなされてきたが、非定常乱流に関する研究は限られる。また、実際の洪水流を対象とした研究例は少なく、不明な点も多い。本研究の目的は実際の洪水流に応用できるような、非定常空気乱流の特性を議論することにある。

非定常流に関する実験的な研究の例として、Tu & Graf(1992) や、Song & Graf(1995)、瀬津ら(1994)などがホットフィルムやレーザードップラー流速計を用いて開水路の非定常流を測定したもの、金子ら(1994)による非定常空気乱流の測定をした例がある。いずれの実験結果からも非定常流乱流の特性として共通の結論が得られていることは興味深い。本論文では、時間的とともに空間的な加速と減速を持った流れの特性を検討するために、多数のデータを実験によって計測し結果を解析した。今回の論文には実験結果の考察をするにとどめ、数値計算は次回に報告することとする。

* 学生員 東大大学院 土木工学専攻 (〒113 文京区本郷 7-3-1)

** 正会員 工博 (株) パシフィックコンサルタンツ 水工部 (〒163-07 新宿区西新宿 2-7-1)

*** 正会員 工博 東京大学工学部助教授

**** フェロー会員 工博 東京大学工学部教授

2. 実験概要

2. 1 実験装置

本実験には主に以下の2つの装置を使用した。

(a) 風洞

測定洞の形状と装置全体の概略は図-1に示す通りである。この風洞はコンピュータからの入力により流れを操作することが出来る。また、実験風洞の床には図-2のような坂路(DUNE)を7波長分しきつめた。

(b) 熱線流速計

本研究のすべての実験にお

いて計測に使用したのは、X型熱線流速計である。熱線流速計から得られる信号は一般的に流速に対して非直線になっているため、これを直線化するためにリニアライザを用いた。熱線流速計の検定は、ピトー管による風速データを用いて各実験毎に行った。

2. 2 実験方法

実験は滑面(D1)と粗面(D2)の2ケースを測定し、詳細を表-1と図-3に示す。坂路(DUNE)は塩化ビニル製の表面の滑らかなもので、芝は1本の高さ8mm 幅1mm で表面密度が90本/cm²の人工芝を使用した。DUNEの座標軸の原点は、風洞入り口から590cmの風洞床面にとっている。測定は流れの主流方向の速度 u とそれに垂直な鉛直速度成分 v 、さらにそれぞれの方向の乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{v'^2}$ 、レイノルズ応力 $-u'v'$ である。

表-1 実験条件

CASE	表面形状	相当粗度(ks)(cm)	測定点
D 1	無	0	風洞に座標軸を図-3のようにとり、y = 40cm まで1cm 間隔。
D 2	芝	0. 5	それより上方で2cm 間隔。

データはサンプリングレート 100Hz で取得し、これを5回繰り返してアンサンブル平均を求めた。また、風洞に発生させる風速変化はコンピュータからの出力グラフ(図-4)にしたがっている。十分に流れを安定させるために15秒間定常流を流し、データの取得はその後から始めた。

なお、本研究とは別に坂路模型上の定常流(steady) 実験と、模型を用いず平板(FLAT)で行った非定常実験(金子ら、1994、1996)を今後の考察で引用し比較する。

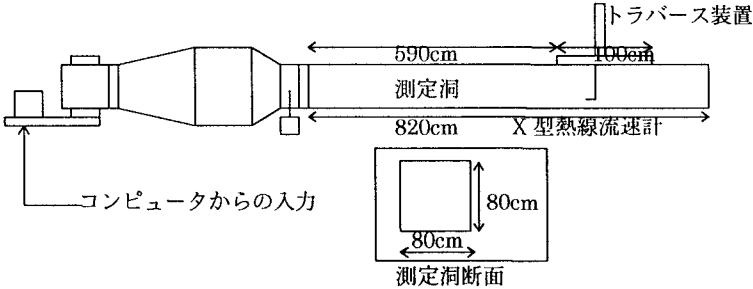


図-1 エッフェル型風洞

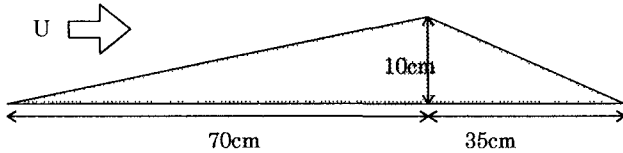


図-2 坂路(DUNE)模型

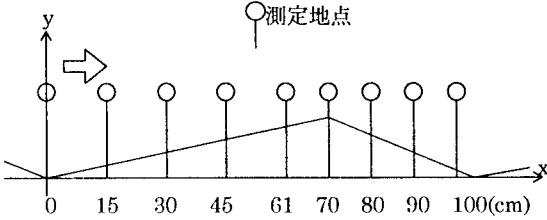


図-3 DUNE 測定点

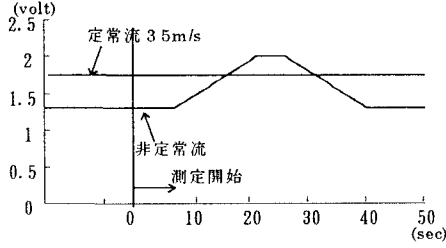


図-4 コンピュータからの出力

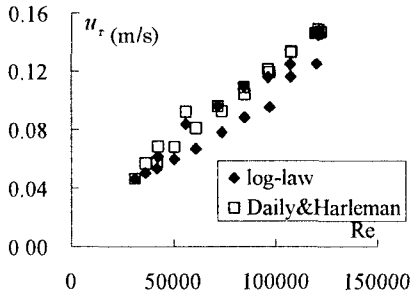


図-5 摩擦速度の評価

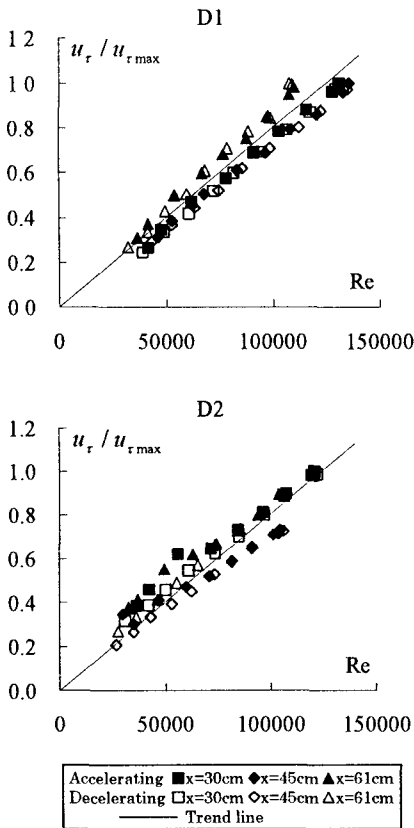


図-6 摩擦速度の変化

3. 実験結果および考察

ここでは空間的な加速減速という意味で、加速域、減速域、時間的な加速減速という意味で、加速期、減速期という言葉を使用する。本研究では、それぞれ前者は $X=0\sim 70\text{cm}$ が加速域で、 $X=70\sim 105\text{cm}$ が減速域であり、後者が $t=7\sim 23\text{sec}$ が加速期で、 $27\sim 43\text{sec}$ が減速期である。なお後述の $t=15\text{sec}$ と 33sec は実験結果から計算しほぼ同じ流量であった時間である。

3. 1 摩擦速度 u_τ の評価

本研究の場合、 $x=0\sim 15\text{cm}$ と $x=80\sim 100\text{cm}$ のデータは底面に剥離の影響が出ているため、摩擦速度を対数則分布(log-law)から得ることができない。また、 $x=30, 45, 61\text{cm}$ でも対数則が成り立つ対数則域が非常に薄かった。そこで比較的对数則が良好に確認できたケース D2 の $x=30\text{cm}$ のデータについて、対数則分布と Daily&Harleman による経験式(1966)の両方を用いて計算し、まず摩擦速度の評価を行うこととした。Daily&Harleman の経験式は、以下のように示される。

$$(u_\tau / u_c)^2 = 0.123 (10^{-0.678H}) (u_c \theta / \nu)^{-0.268}$$

u_c : 風洞中心風速、 θ : 運動量厚、 $H=H/\delta_*$ 、 δ_* : 排除厚

この結果を示したのが、図-5 である。図中の Re は、 $Re \equiv u_c h / \nu$ (h : 風洞中心までの高さ、 ν : 動粘性係数)で与えられる無次元パラメータである。log-law によって計算した摩擦速度は、本研究の場合かなりばらつきがあり、評価しにくいことが分かる。経験式による摩擦速度の値は、非定常平板実験(金子、1996)においては log-law と非常に良い一致を見せており、Dune 上の流れを扱った Cardoso の論文(1991)の中にも良好な一致が報告されている。そこで、本研究では摩擦速度の計算に Daily&Harleman の経験式を採用することとした。

3. 2 摩擦速度 u_τ の変化

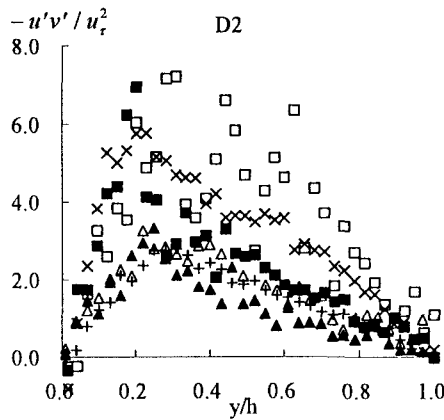
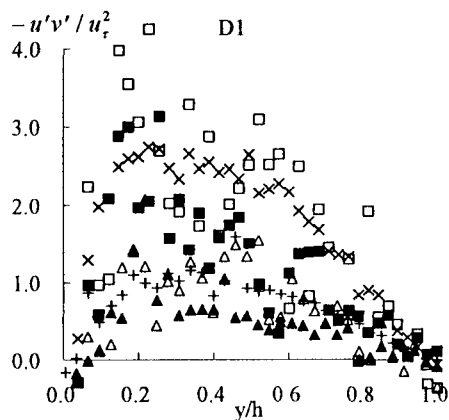
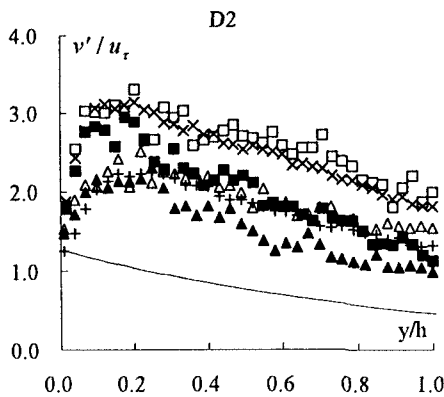
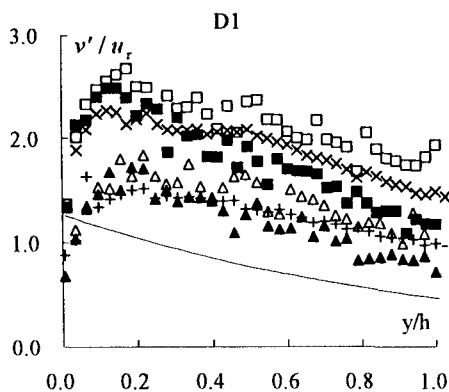
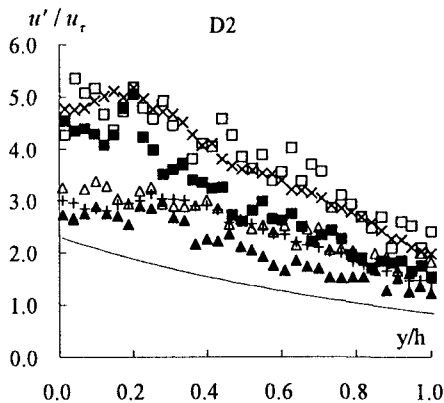
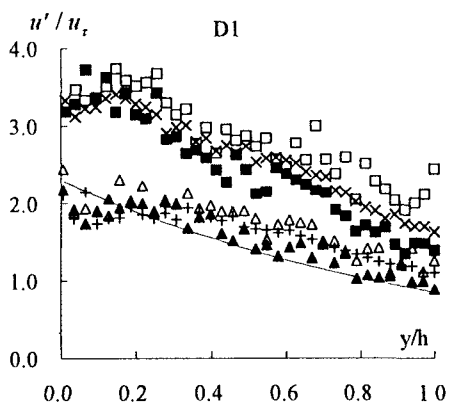
測定点各点における摩擦速度は、図-6 のように整理できた。図中の直線は、FLAT の実験結果から log-law によって求められた実験式

$$u_\tau / u_{\tau \max} = 8.05 \times 10^{-6} Re$$

である。本研究の摩擦速度の変化は、平板実験(FLAT)の結果のトレンドと非常に類似しており、経験式による摩擦速度の評価が可能であることが確認できる。本研究では摩擦速度の評価が非常に難しく、経験式に頼らざるをえなかったが、今後は底面近傍の非常に薄い部分を綿密に調べてみる必要がある。

3. 3 乱れ強さとレイノルズ応力

次に 3. 2 節の摩擦速度を利用して乱れの強さとレイノルズ応力の無次元化を行い、定常流、風洞および開水路での非定常流との相違を検討した。図-7 が $x=30\text{cm}$ と 61cm の場所における $t=15\text{sec}$ と 33sec の時の乱れおよびレイノルズ応力の分布である。これらは非常に興味深い特徴を示している。空間的な加速により、



■ x=30cm(Accel.) □ x=30cm(Decel.) ▲ x=61cm(Accel.) △ x=61cm(Decel.)
 × x=30cm(Steady) + x=61cm(Steady)

図-7 乱れ強さとレイノルズ応力の変化

$x=61\text{cm}$ では $x=30\text{cm}$ より乱流量はいずれの値も小さくなり、時間的な加速と減速によってどちらの場所でも加速期で小さく、減速期で大きくなる。Song ら、金子らによれば、乱れ強さは加速期において定常流よりも小さくなり、減速期に大きくなる事が報告されている。また、瀬津らによれば空間的な加速流の乱れ強さも小さくなる事が分かっている。本研究の場合流れが非定常な上、空間的に加速流であることから、これら 2 つの流れを併せ持つものとなっている。

乱れ強さおよびレイノルズ応力は、加速域を進むに従い小さくなり、時間的な加速期にはさらに押え込まれるように、減速期には大きく膨らむように分布を変えている。また、 $x=30\text{cm}$ で乱れの強さがかなり大きな値を取るの直前の減速域の影響と考えられ、 $D2$ の値がいずれも大きいのは摩擦速度の評価方法に考慮の余地があることを示している。グラフに書き入れた曲線は以下のように表せられる裾津の普遍分布式である。

$$u' / u_{\tau} = 2.30 \exp(-y / h)$$

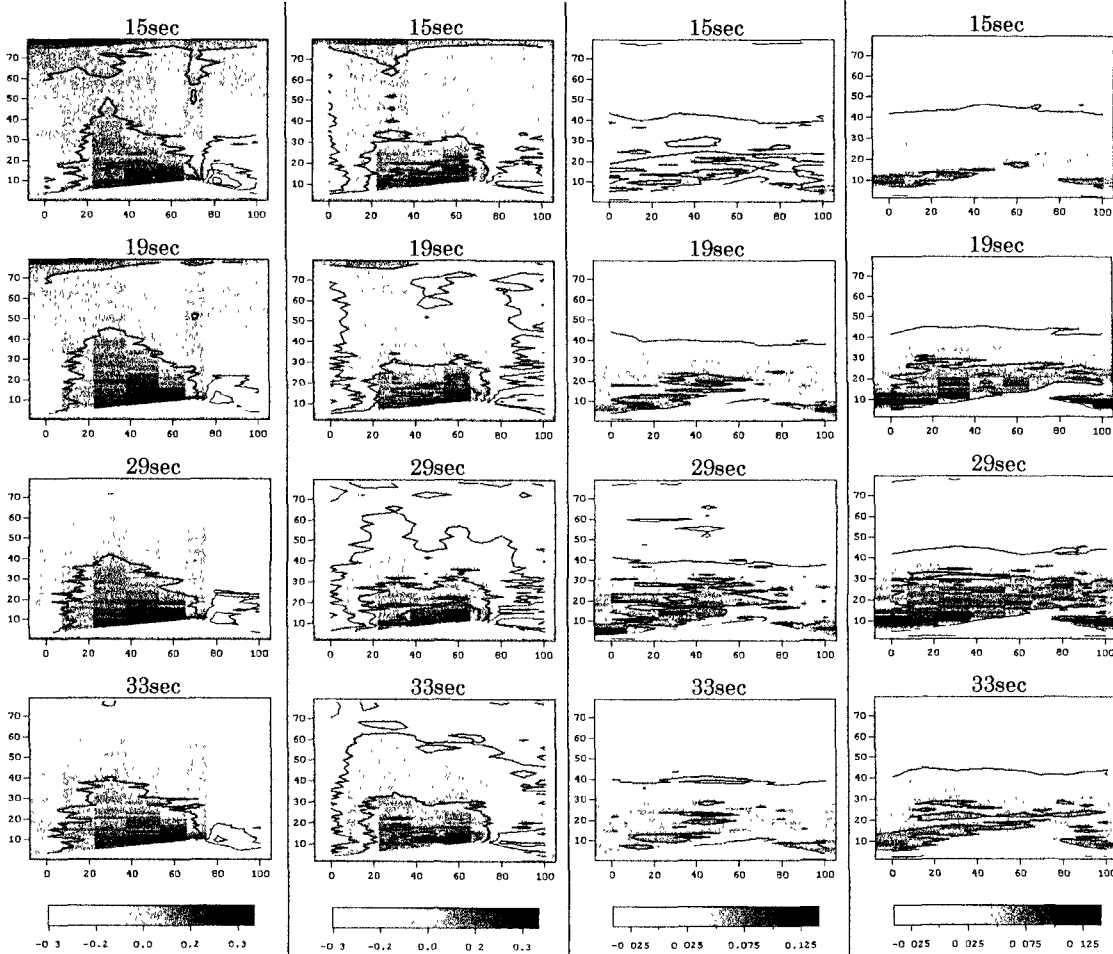
$$v' / u_{\tau} = 1.27 \exp(-y / h)$$

本研究の場合 $x=61\text{cm}$ で近い値を取るもののおおむね大きな値となっており、これは本風洞の特性が出ているものと解釈できるが、 v' の方が u' よりも分布式に対して相対的に大きくなっている。これは、本研究が連続する底面勾配を持つ流れであるため、高さ方向の乱れが大きくなっているものと解釈できる。ここに底面 Dune の影響を見ることができる。

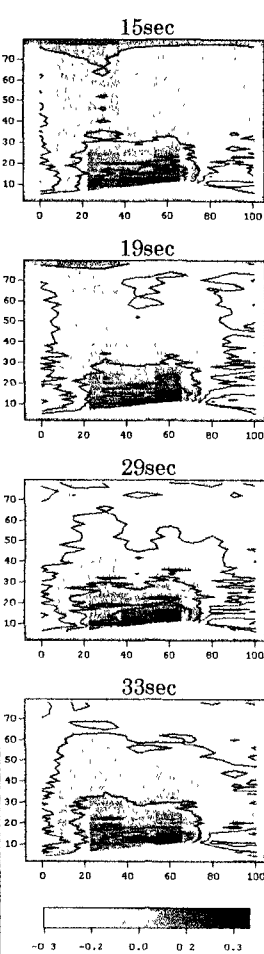
3. 4 流れの変化

流れの全体像をつかむために、流れの諸成分をコンターマップに表してそれらを評価した。一般的に可視化は、同時刻でさまざまな点での挙動を計測するものだが、本研究では別々の時点に得られた結果を基に作図している。図 8～11 は $D1$ と $D2$ の鉛直速度と、応力の分布形状を示したものである。

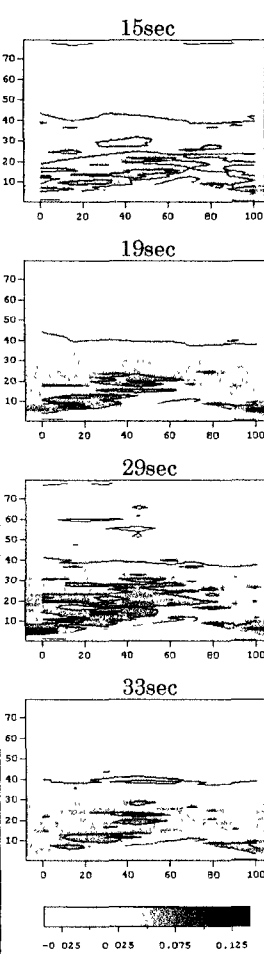
鉛直速度は DUNE の表面に何も無い場合と、人工芝がある場合とで大きな違いがでた。 $D1$ の場合、鉛直



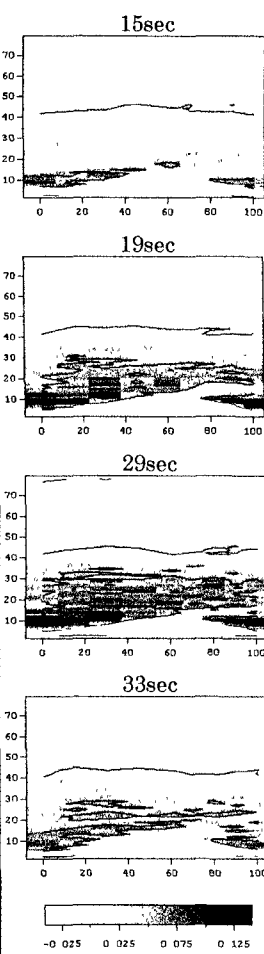
図－8 鉛直速度 v (m/s)
(D 1)



図－9 鉛直速度 v (m/s)
(D 2)



図－10 $-\overline{u'v'}$ (m^2 / s^2)
(D 1)



図－11 $-\overline{u'v'}$ (m^2 / s^2)
(D 2)

速度成分は空間的な加速地帯でプラスに大きくなり、減速地帯でマイナスになっている。当然のことながら、流れが時間的に空間的に加速されればされるほど鉛直速度成分も大きくなる。一方、D2の場合を見てみると、全体的に時間的な加速の影響が少ないことが分かる。空間的な減速域では時間による加速減速がほとんど影響していない。これらの現象は、人工芝によって加速域での乱れが大きくなり、それに伴い減速域への乱れエネルギー輸送が減少し、鉛直速度成分が減少しているということにより説明できる。

$-\overline{u'v'}$ の変化を図-10と11に示した。D1ではレイノルズ応力は $X=30,45\text{cm}$ 付近の壁近傍で最大を取るが、時間的な減速期では加速期に比べて範囲が大きく鉛直方向に広がっている。この現象はD2の場合にも認められるうえ、平板での実験結果でも同様の性質が見られたことから非定常流に共通にある特徴であることが分かる。時間的な加減速によって流れが層流化、または乱流化するためである。いずれの場合も剥離の影響が認められ、それが次のDUNEの $X=30\text{cm}$ 近辺まで及んでいる。剥離の影響のみを考えると、D1

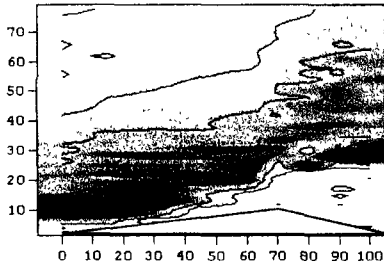


図-12 (凡例は図-10と同じ)

$t=23\text{sec}$ におけるレイノルズ応力(D2)

よりD2の方がより多くの影響を受けていることがコンターラインの長さから読みとれる。D2では $X=15,30\text{cm}$ の床近傍で最大が表れており、減速域の影響がこの地点にまで及んでいることが分かる。

さらに、D2の23秒での分布を調べてみたところ、乱れ強さおよびレイノルズ応力、鉛直方向速度すべてに図-12のような大きな異符号の領域が見られた。本研究では流体量をすべて5回の平均で計算しており、測定自体も異時点で行っていることを考えると、このような現象が常に起こっているといえよう。23秒は加速期が終わり定常状態に入った時間であり、ここで大きな渦が減速域に形成されるものと考えられる。これは定常流にはない、非定常流特有の性質である。

4. おわりに

本研究で、空間的な加速減速域と時間的な加速減速期を同時に議論した。しかしながら両方を総括して議論するには、まだまだその方法が確立していないのが現状である。また流速のパターンが時間によって、場所によってどのように変わるのかをもっと厳密に議論する必要がある。さらに開水路流との比較では、得られた結果の間に定性的な違いが認められる。また、数値計算による流れの再現は現在取り組んでいるところであるが、数値解析に基づいて非定常流れのメカニズムを考察することも今後の課題である。

参考文献

- 1)金子 浩士: 連続した起伏を有する地形上の非定常空気乱流に関する実験的研究, 東京大学修士論文, 1996.
- 2)金子, Tu, 河原, 玉井: 非定常空気流の構造に及ぼす底面粗度の影響, 第26回乱流シンポジウム講演集, pp.250-253, 1994.
- 3)Tu, Kaneko & Tamai: Unidirectional unsteady wind tunnel flows over smooth and rough surfaces, Turbulence, heat and mass Transfer Sympo., Lisbon, Portugal, pp.17.2.1-17.2.6, 1994.
- 4)Tu and Graf: Vertical Distribution of Shear Stress in Unsteady Open-Channel Flow, Proc.Instn Civ.Engers Wat., Mart & Energy, Vol.96, pp.63-69, 1992.
- 5)Song&Graf: Velocity and turbulence distribution in unsteady open-channel flow, J. Hydraul. Eng.
- 6)Cardoso, Graf & Gust: Steady gradually accelerating flow in a smooth open channel, J.Hyd.Res., Vol.29, No.4, pp.525-543, 1992.
- 7)Nezu and Rodi: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, J.Hyd.Eng., Vol.112, No.5, pp.335-355, 1986.
- 8)瀬津, 門田, 戸田: 加速流及び減速流の乱流特性, 第49回土木学会年次講演集, pp.416-417, 1994
- 9)Daily & Harleman: Fluid dynamics, Addison-Wesley Publishing Company, 1966