

都市および植生キャノピー上における 境界層乱流の同時観測

FIELD MEASUREMENT OF TURBULENCE STATISTICS BOTH ABOVE
OUTDOOR URBAN SCALE MODEL AND ABOVE RICE PADDY

森脇 亮¹・青木伸悟²・藤森祥文³

Ryo MORIWAKI, Shingo AOKI and Yoshifumi FUJIMORI

¹正会員 博(工) 愛媛大学准教授 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8550 愛媛県松山市文京町3番)

²愛媛大学 工学部環境建設工学科(〒790-8550 愛媛県松山市文京町3番)

³正会員 博(工) 愛媛大学助教 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8550 愛媛県松山市文京町3番)

We conducted a set of field measurements of air turbulence above an outdoor urban scale model and a rice paddy field; the fields are adjacent each other. This study is aimed to find out the differences between turbulent statistics over urban-like canopy and those over vegetation canopy. This paper shows the setup of the measurement system and some preliminary results.

Momentum roughness of the rice paddy field was larger than that of the urban scale model. This is probably due to the large frontal area index of the paddy field. Quadrant analyses indicate that momentum is efficiently transferred by turbulence on the paddy field. Spectral analyses also indicate that the momentum is efficiently transferred at a specific frequency. These features are not clear for the turbulence over the urban scale model.

Key Words : *Turbulent statistics, Urban canopy, Vegetation canopy, Outdoor field experiment,*

1. はじめに

地表面上に発達する大気乱流は大気-陸面間のエネルギー・物質循環に大きな影響を与えるが、都市や森林などキャノピーを有する地表面では大気乱流の構造は極めて複雑である。大粗度地表面上に発達する大気乱流に関する研究は主に森林分野で1980年代から行われはじめ、高次の乱流統計量やシア関数などいくつかの重要な乱流統計量において既存のモニターオブコフ相似則があてはまらないことが指摘されてきた。しかし乱流の組織構造に関しては十分に理解が進んだとは言えず、現在においても精力的に研究が行われている(例えば、Shaw and Tavangar¹⁾, Watanabe²⁾)。一方、都市キャノピーの乱流に関する研究は森林よりもさらに遅れているのが現状であり、キャノピーによる流れの変曲点不安定を有するという共通点から、都市キャノピーの乱流構造は植生キャノピー乱流に類似するとの考えが主流である(例えばRoth³⁾)。しかし、近年では長期タワー観測や屋外都市スケールモデルによって都市キャノピー内外の乱流統計

量が詳細に検討され、都市キャノピー乱流は、植生キャノピーよりもむしろ草原のような粗度の小さい地表面上の乱流に似ているのではないかとの主張もある(例えば、Moriwaki and Kanda⁴⁾)。またKanda et al.⁵⁾による数値シミュレーションによっても同様のことが指摘されている。

この問題に関して明確な答えが出されていないことの原因として、外部入力としての気象条件、計測手法、解析方法などが統一されていないため、都市と植生におけるキャノピー乱流の詳細な比較が行われてこなかったことが挙げられる。都市キャノピーと植生キャノピーにおける乱流構造を詳細に検討するためには、外部条件を揃えた下での都市と植生乱流の同期計測および統一された乱流解析が必要不可欠である。そこで、著者らは同一気象条件下における都市と植生キャノピー上の乱流構造を比較検討し、キャノピー上乱流の発達メカニズムを解明することを目的として、都市モデルおよび植生上において乱流の同時観測を開始している。まだ短期間の測定結果ではあるが、都市および植生キャノピー上の乱流特性に関して興味深い結果が得られつつあるので、速報性を重視して、その一部を報告する。

2. 都市模型および水田における乱流の同期計測

隣接する模型都市および植生上において乱流観測を実施し、それぞれのキャノピー上で乱流計測を行った。愛媛大学農学部附属施設である水田の一角である12 m四方の敷地に、一辺30 cmの塩化ビニル製立方体400個を等間隔に配置することで擬似的な都市キャノピーを作成した。なお周囲の水稲は植生キャノピーとなる。これらの都市模型および植生上に超音波風速計を設置して乱流データを取得した。本論文では、計測を開始した2008年9月8日から稲の収穫が行われた9月16日までに取得されたデータを対象として解析した。

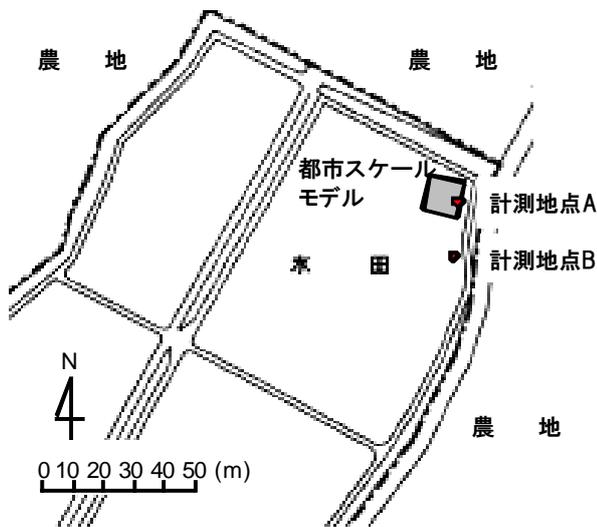


図-1 計測サイトおよび周辺の平面図

(1) 計測サイト

観測は愛媛大学農学部附属農場内にある実験水田で行った(図-1)。本観測場所は、卓越風が西風であり、風上側である実験水田の西側にはさらに別の水田や農地が数百mに渡って広がっている。またそれ以外の方向についても、周辺地域は農地であり、接地層における微気象観測を行うには適したサイトである。イネの品種はあきたこまちで、移植日は6月10日、植栽密度は条間が30 cm、株間が20 cm、観測期間中のイネの高さは約76 cmである(草丈は98 cmであったが稲穂の撓みのため地表面からの高さは小さくなっている)。過去に同場所で微気象計測を行った大上⁶⁾を参考にすれば、観測期間の葉面積指数(LAI)は4~5程度、植物体面積指数(PAI)は6~7程度であると推定される。

水田の一角である12 m四方の敷地(図-1の塗りつぶし区画)に一辺30 cmの塩化ビニル製立方体(厚みは3 mmで内部は空洞)400個を等間隔に配置することで擬似的な都市スケールモデルを作成した(図-2a)。このような都市スケールモデルを用いた実験はKawai et al.⁷⁾

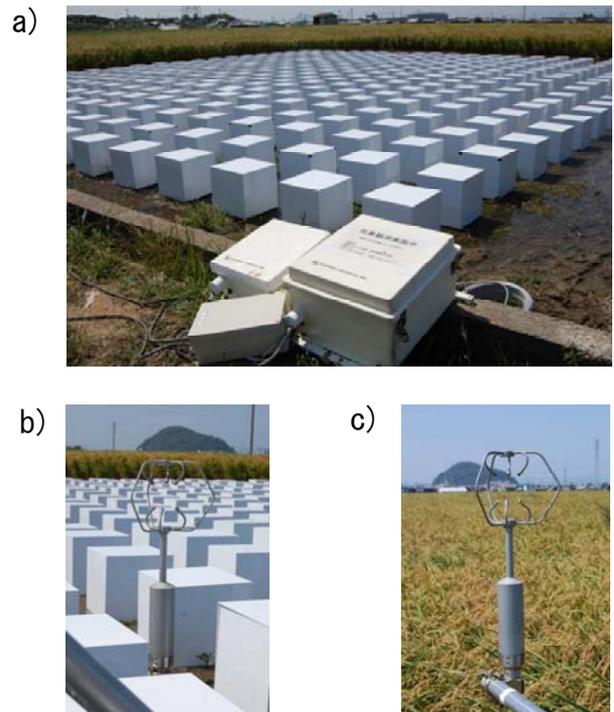


図-2 計測サイトの様子 a) 都市スケールモデル, b) 都市モデル上に設置した計測機器, c) 水田上に設置した計測機器

表-1 乱流の同期計測キャノピー諸元

	都市モデル	水田
キャノピー高さ H	0.3 m	0.76 m
広さ	12 m x 12 m	約70 m x 100 m
密集度の指標	建蔽率: 0.25 フロントルエリア インデックス: 0.25	LAI: 4~5 PAI: 6~7
乱流計測高度 z_m	0.6 m (=2 H)	1.52 m (=2 H)
ゼロ面変位 d/H	0.45	0.82

Inagaki and Kanda⁸⁾による実験が先駆的である。本実験では、それらと同様にブロックの間隔は建物高さと同じ(本実験では30 cm)とした。ブロックの配列は東西方向から時計回りに22.5°傾いた西北西、東南東の方向にストリート軸の一つが沿うように配置した(図-1)。

(2) 計測システムおよびデータ解析手法

瞬間的な風速と気温測定には、三次元超音波風速温度計(Kaijo社, SAT-550)を用いた。卓越風が西であることを考慮して、良好なフェッチが確保できるようサイトの東端に近い地点で観測を行った。図-1のAが都市モデルにおける設置地点、Bが水田における計測地点であり、両地点の距離は約20 mである。Inagaki and Kanda⁸⁾に倣い計測高度はキャノピー高さ H の2倍とし、都市モデルでは0.6 m、水田では1.52 mとした(表-1)。都市モデル・水田それぞれの測定システムの外観を図-2b, cに示す。

データは10Hzでデータロガー(Campbell, CR23X)に一時収録した後、ノートPCに自動保存した。測定デー

表-2 本研究で使用するデータセット（都市モデル上で得られたデータを示す）

Data No.	Day of year	Local time (Hour)	風速 (m s^{-1})	相対風向* ($^{\circ}$)	気温 ($^{\circ}\text{C}$)	$u_* (= \sqrt{-u'w'})$ (m s^{-1})	wT' ($\text{m s}^{-1} \text{K}$)	大気安定度 ($(z_s - d)/L$)
1	255	13	1.96	32	26.2	0.289	0.0618	-0.016
2	255	14	1.78	21	26.0	0.263	0.0524	-0.017
3	255	15	1.14	-31	25.5	0.226	0.0416	-0.022
4	255	16	0.85	-3	24.9	0.147	0.0137	-0.026
5	256	9	0.90	25	24.8	0.133	0.0417	-0.107
6	256	10	1.03	22	25.1	0.154	0.0439	-0.073
7	256	11	1.32	4	25.9	0.209	0.0688	-0.046
8	256	12	1.19	19	26.1	0.185	0.0788	-0.076
9	256	13	0.99	4	25.2	0.161	0.0393	-0.058
10	256	15	0.71	-14	24.1	0.127	0.0096	-0.029
11	257	11	1.49	24	25.9	0.213	0.0688	-0.043
12	257	12	1.03	7	25.6	0.154	0.0546	-0.092
13	257	13	0.84	1	25.4	0.143	0.0389	-0.081
14	257	14	0.75	-11	25.6	0.128	0.0282	-0.081
15	257	15	0.76	11	25.2	0.116	0.0159	-0.062
16	257	16	0.54	-18	24.1	0.102	0.0053	-0.031

*西北西（都市モデルのストリート軸方向）をゼロとし、時計回りを正とした角度

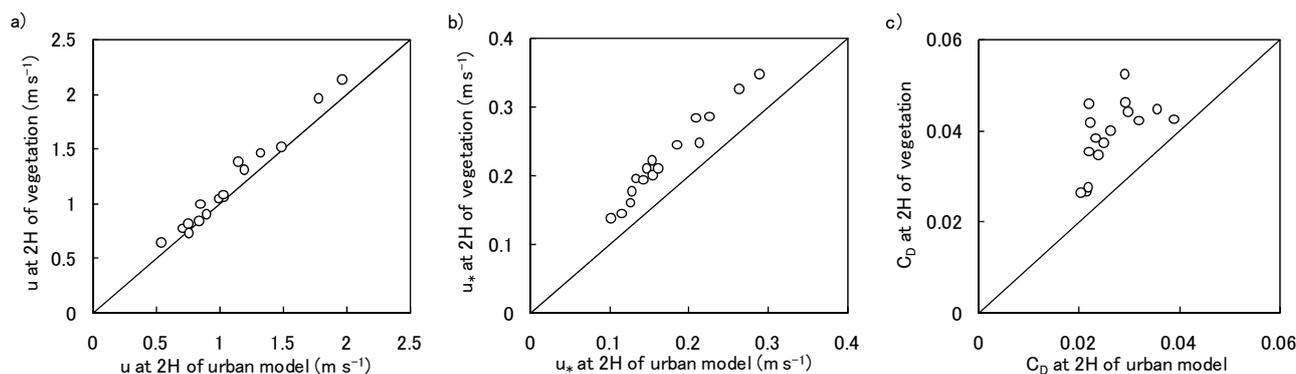


図-3 都市モデルおよび水田上におけるa) スカラー風速 u , b) 摩擦速度 u_* , c) 抵抗係数 C_p の比較

タは60分毎に統計処理した。また超音波風速計のバイアス除去のため、McMillen⁹⁾の方法を用いて傾度補正を行い、渦相関法を用いてフラックスを算出した。データの品質管理として、本論では風向を用いてデータ選別を行った。前述のように良好なフェッチが確保できるのは西風の時なので、都市モデルのストリート軸である西北西の風向を中心として $\pm 35^{\circ}$ の範囲内に風向が存在するデータを用いた。その結果、測定期間中、60分runのデータは16セット取得された。表-2に示すように、風速の範囲は $0.54 \sim 1.96 \text{ m s}^{-1}$ と微風が中心であるが、大気安定度は $-0.11 \sim -0.01$ の範囲内でありほぼ中立に近い大気状態のデータで構成されている。なお、本論文ではゼロ面変位 d （キャノピーの存在による地表面の修正高さ）は、Macdonald et al.¹⁰⁾, Raupach¹¹⁾によるキャノピーの密度（具体的には、建蔽率 λ_p やフロンタルエアインデックス λ_f ）を考慮した提案式を用いてそれぞれ推定し（表-1）、これらの値を用いて大気安定度、粗度などの諸量を計算した。なお、 λ_f は風上方向からみた場合の

建物投影面積と敷地面積の割合である。水田の植物体面積指数（PAI）は6~7（表-1）であるから、水稻を円柱と仮定して試算すると水田の λ_f は2となり、都市モデルのそれ（0.25）よりも1オーダー大きい。

3. 結果と考察

(1) 抵抗係数と粗度

都市モデルと水田上それぞれにおいてキャノピー高さの2倍で計測されたスカラー風速、摩擦速度、およびそれらから算出された抵抗係数（ $C_p = u_*^2 / u^2$ ）を図-3に示す。ゼロ面変位を基準とした計測高度（ $z_s - d$ ）が水田の方が大きいにも関わらず、都市モデルと水田ではスカラー風速に大きな差はない。一方、運動量フラックスの速度スケールである摩擦速度は水田で大きくなる結果が得られた。同様の傾向は抵抗係数にも見られる。抵抗係数は計測高度によって変化するため、直接大小関係を論じられない。そこで次式を用いて運動量粗度を算出した。

表-3 乱流データから算出した粗度

		都市モデル	水田
粗度 z_0 (m)	平均	0.038	0.11
	標準偏差	0.00913	0.0236
無次元粗度 z_0/H	平均	0.128	0.152
	標準偏差	0.0304	0.0315

使用している観測データの気安定度が中立に近い（表-2），粗度は中立状態を仮定した式より求めた。

$$u_* / u = \kappa / \ln[(z_s - d) / z_0] \quad (1)$$

ここで κ はカルマン定数であり本論では0.4を与えた。算出した粗度を表-3に示す。都市モデルの粗度（0.038 m）に比べて水田の粗度（0.11 m）が大きい結果となった。以上より、本観測サイトにおける収穫前の水田は、30cmブロックを並べた都市モデルに比べて大きな運動量のシンクになっていることが明らかとなった。

議論をさらに一般化するために、運動量粗度をそれぞれのキャノピー高さで無次元化した結果も表-3に示した。都市モデルの無次元粗度（ z_0/H ）は0.128である。この値は稲垣・神田¹²⁾による屋外模型実験結果0.06と森脇ら¹³⁾による実都市での結果（0.15）の中間的な値であり、Macdonald¹⁰⁾の提案式（0.13）と同様の結果である。一方、水田の無次元粗度は0.152であり都市モデルのそれ（0.128）よりも大きい（5%水準で統計的に有意）。つまり同じ高さのキャノピーが存在する場合、都市キャノピー（本実験ではブロック配列、実際には建物群）よりも植物キャノピー（本実験では水稲、森林では樹木の群落）の方が運動量を効率的に吸収することを意味する。ここで簡単な思考実験を試みる。先に述べたように水田の λ_f は都市モデルのそれより1オーダー大きく（つまり水田ではキャノピー内で水平風の通過を阻害する抵抗体の投影面積が大きく）、それによって運動量が効率的に吸収され、その結果として無次元粗度が大きくなると推測される。もちろん、キャノピー内における水平風減衰の程度により、その効果は λ_f の差ほど顕著で無くなると考えられる。一方、水稲が撓みやすい性質（可撓性）も運動量輸送の差異をもたらす可能性があるが、これらの議論のためにはさらなる研究が必要である。

(2) 乱れの特性

図-4は水平風速の主流成分 u の標準偏差 σ_u と鉛直風速成分 w の標準偏差 σ_w を都市モデルと水田で比較したものである。上段に σ_u 、下段に σ_w を示しており、a), c)が標準偏差、b), d)が摩擦速度スケール u_* で無次元化した標準偏差である。 σ_u と σ_w は両者とも水田の方が大きくなるが（図-4左図）、摩擦速度 u_* で無次元化すると、 σ_w/u_* はばらつきが大きい1:1の線を中心にプロットされる（図-4右図）。以上のことは、風速の標準偏差に対する水田と都市モデル共通のスケールパラメータとして、鉛直風速には u_* が有効であることを意味している。しかし水平成分 σ_u/u_* は両者で一致せず、水平風速のスケールパラメータとして内部スケールである摩擦速

度は適していない。水平風速成分は大気境界層スケールの大きな変動を伴うため内部スケールである摩擦速度によるスケールリングは適当でない。このことは稲垣・神田¹²⁾によるスケールモデル実験（乱流統計量の鉛直分布の結果）から論じられている。鉛直風速成分は内部境界層スケールのみで説明される統計量であるため、摩擦速度によるスケールリングが有効であると考えられる。なお σ_w/u_* の値は1~1.3の範囲にあり、実都市で報告されている値1.27³⁾と同程度である。

次に歪み度（skewness）に注目する。水平風速成分 u の歪み度 Sk_u の符号は正であり、ばらつきが大きいものの緩やかな相関が認められる（図-5a）。また、都市モデルと水田で系統だった大小関係は認められない。一方、鉛直風速成分 w の歪み度 Sk_w は都市モデルでは負の値になることが多いのに対して、水田では正の値になるという結果が得られ、両者には関係がみられなかった（図-5b）。この原因を調べるため、ある60分データセット（DataNumber 9）の乱流データに対して、 u' と w' の出現頻度分布を調べた。図-6aは都市モデル、図-6bは水田における結果である。水平風速、鉛直風速共に0.1 m s⁻¹毎に区画を区切り、その区画に出現した回数をコンター図で描いている（黒線のコンター間隔は50回）。第二象限（ $u' < 0, w' > 0$ ）と第四象限（ $u' > 0, w' < 0$ ）にデータが偏るのは両者で共通しているが、都市モデルに比べて水田ではデータの頻度分布が w' 方向に広がっている。これが図-4で示したように水田での σ_w を大きくしていることは自明である。また図では少し分かりにくい水田のデータの分布は w' の正方向により広く広がっており、このことが w の歪み度 Sk_w を正にする原因になっている。

ここで興味深いのが、何故水田では w' の分布が正方向により広がるのかということである。地表付近の乱れには先にも述べたように、大気境界層スケールの乱れと内部境界層あるいはキャノピー高さスケールの乱れが相互作用を受けていると考えられる。本実験では隣接した都市モデルと水田で同期計測を行っているので、バックグラウンドとなる大気境界層スケールの乱れは同一条件となる。従って、その差を生み出すのはキャノピーに起因した乱れであると言える。その乱れとしては、キャノピー固有の乱流組織構造、外部からの変動（ガスト）に対するキャノピーの応答（水田で言えば穂波現象）、またはそれらの組み合わせが考えられるが、現時点では詳細は分かっておらず今後の検討課題である。

図-6において風速変動の出現分布に差が認められたので、この乱れが運動量輸送に与える影響を調べるため四象限解析を行った（図-7）。四象限解析とは図-6において各象限 i に含まれる $\langle u'w' \rangle_i$ を全象限に含まれる $\overline{u'w'}$ で無次元化した値を S_i としてその大きさを評価する方法である。 $|S_1 + S_3|$ に対する $(S_2 + S_4)$ の相対的な大きさを都市モデルと水田で比較した結果を図-7aに示す。全般的に都市モデルに比べて水田ではその値が大きく、乱れが効率的に運動量を輸送していることが分かった。

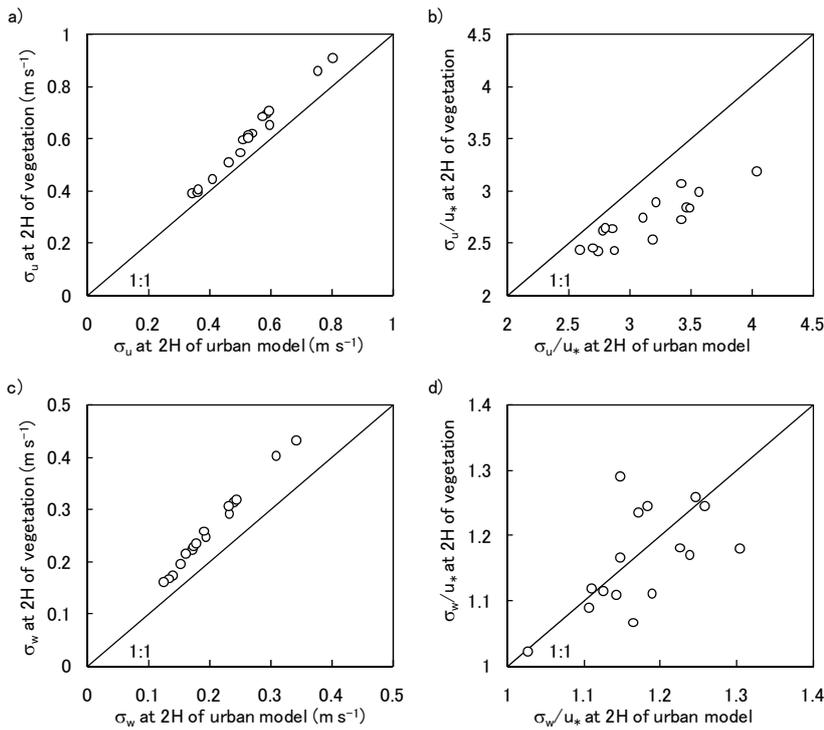


図-4 水平風速のa) 標準偏差, b) 無次元標準偏差, 鉛直風速のc) 標準偏差, d) 無次元標準偏差

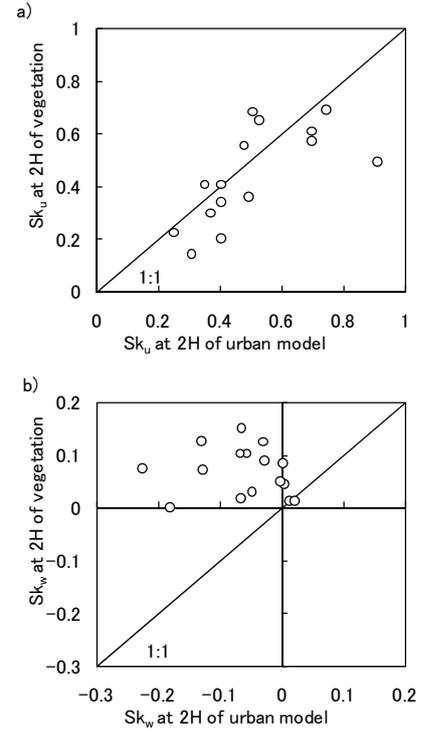


図-5 歪み度 a) 水平風速, b) 鉛直風速

図-7bは上昇気流 (ejection) モード S_2 と下降気流 (sweep) モード S_4 の比を示している. S_2 / S_4 は一つのデータを除いて1より小さく, sweepモードが運動量輸送に卓越していた. 先述の w' の分布が正方向に偏る (大きい上昇気流が生じやすくなる) 現象により S_2 モードの増大が期待されたが, 都市モデルと水田で大きな差は生じなかった.

最後に乱流変動のスケールを検討する. 水平風速と鉛直風速のスペクトル解析の結果を図-8a, bに示す (DataNumber 9のデータセットを用いた). 変動に寄与する周波数成分を強調したいため, 縦軸のスペクトルには周波数の重みをつけ, またリニアスケールで表示した (スペクトルは各成分の分散で無次元化してある). 図-8aを見ると水平風速の変動には0.03~0.04Hz付近にピークが存在するが, これ以外にも0.01~0.1Hzの広い周波数帯にかけて複数の小さいピークが存在している. 水平風速成分には大気境界層スケールの大きな変動や地表との運動量交換で生み出される小さな変動が影響するため, このように広い周波数域の変動を有する. また都市モデルと水田では, 水平風速変動のスペクトル波形をほぼ同様である. 一方, 鉛直風速変動はピーク周波数0.2~1Hz付近に集中しており, 水平風速のような広い範囲のピークは見られない. 都市モデルのスペクトル波形が高周波領域にシフトしているのは, 都市モデルにおける計測高度が水田に比べて低いために, 地表近傍の小さい渦を計測していること, 粗度要素 (ブロック) が作り出す小スケールの渦を計測していること, などが考えられる. 図-8cは運動量コスペクトルの結果である. 都市モデル・水田ともに $n = 0.1$ 付近にピークが存在している. 水田のピークは狭い周波数帯に集中しており, この付近の帯域

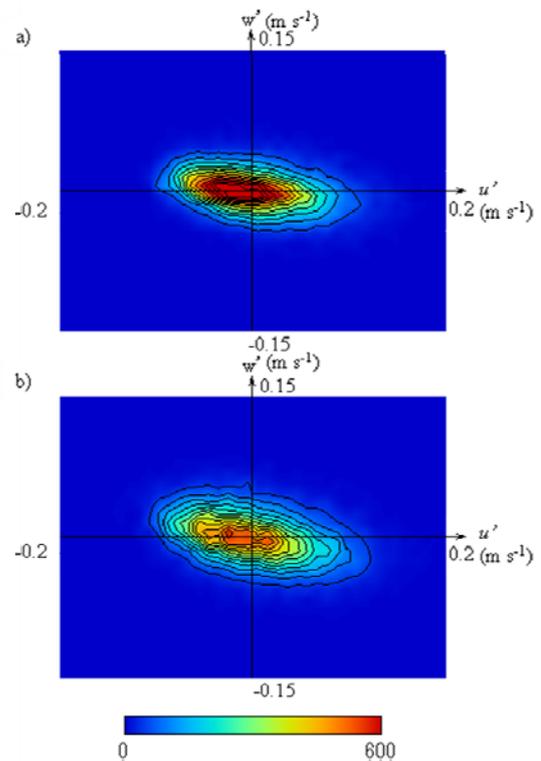


図-6 u' と w' の出現頻度分布 a) 都市モデル, b) 水田

で運動量輸送が効率的に行われているようである. 他のデータセットにも同様の傾向がみられ, 両者の差異は5%水準で統計的に有意であった.

今後は水稻の撓みに関する観測も同期させることにより, 水田と都市モデル上の乱流特性の違いを明らかにしていく予定である.

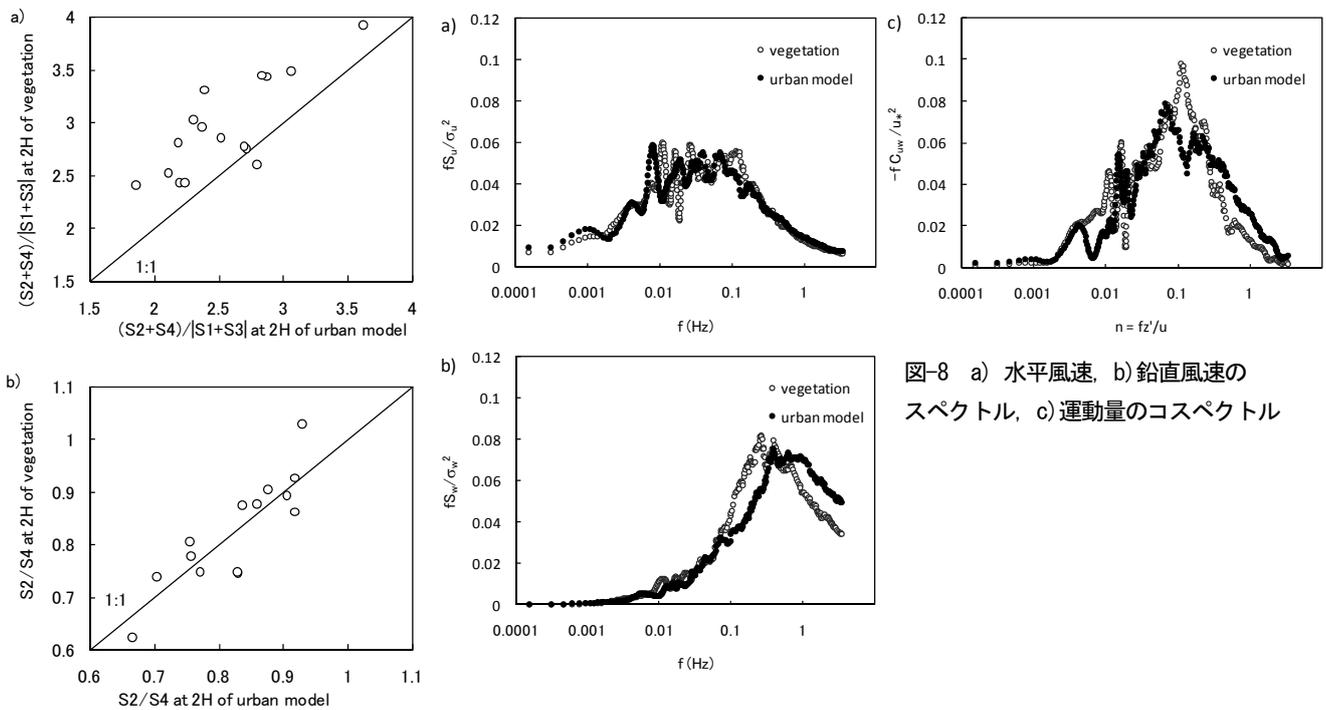


図-7 四象限解析 a) $(S_2+S_4)/|S_1+S_3|$, b) S_2/S_4

4. まとめ

隣接した水田と都市スケールモデル上において乱流の同期計測を行い、以下の知見を得た。1) 水田では都市モデルに比べて運動量輸送が大きく、キャノピー高さで無次元化した粗度を比べても水田の方が大きい。その理由として、水田のフロントルエアインデックスが大きいことが挙げられる。2) 運動量輸送に対して四象限解析を行ったところ、都市モデルに比べて水田では乱れが効率的に運動量を輸送している。3) 水田において運動量コスpekトルのピークは尖った形状をしており、ある周波数帯で効率的に運動量が輸送されている。

本論文では収穫直前の水田と都市モデルにおける乱流特性を比較した。今後、水稻の振動と乱流の関係、水稻の成長と乱流特性の変化、収穫前後の(植生の有無による)運動量交換の差異、などを明らかにしていきたい。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費補助金若手研究(B)(課題番号: 20760332)による財政的援助を受けた。また、愛媛大学農学部には計測場所を提供していただいた。ここに合わせて謝意を表す。

参考文献

1) Shaw and Tavangar, 1983: Structure of the Reynolds stress in a canopy layer, *J. Appl. Meteorol.*, 22, 1922-1931.
 2) Watanabe, 2004: Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies, *Boundary-Layer Meteorol.*, 112, 1-35.

3) Roth, 2000: Review of atmospheric turbulence over cities, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126, 941-990.
 4) Moriwaki and Kanda, 2006: Flux-gradient profiles for momentum and heat over an urban surface, *Theoretical and Applied Climatol.*, 84, 127-136.
 5) Kanda et al., 2004: Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube array, *Boundary-Layer Meteorol.*, 112, 343-368.
 6) 大上, 2003: 水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究(I)-イネの気孔コンダクタンスと個葉光合成のモデル化-, 水文・水資源学会誌, 16, 375-388.
 7) Kawai et al., 2007: Validation of a numerical model for urban energy-exchange using outdoor scale-model measurements, *Int. J. Climatol.*, 27, 1931-1942.
 8) Inagaki and Kanda, 2008: Turbulent flow similarity over an outdoor reduced urban model, *J. Fluid Mech.*, 615, 101-120.
 9) McMillen, 1988: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain., *Boundary-Layer Meteorol.*, 43, 231-245.
 10) Macdonald et al., 1998: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, 32, 1857-1864.
 11) Raupach, 1994: Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-Layer Meteorol.*, 71, 211-216.
 12) 稲垣, 神田, 2007: 屋外都市スケールモデルで観測された乱流統計量の鉛直分布, 土木学会水工学論文集, 51, 247-252.
 13) 森脇, 神田, 木本, 2004: 都市境界層における風速・温度のシア関数, 土木学会水工学論文集, 48, 139-144. (2008. 9. 30受付)

図-8 a) 水平風速, b) 鉛直風速のスペクトル, c) 運動量のコスペクトル