

# 都市スケールモデルおよび水田上の境界層乱流の類似性に対する建物アスペクト比の影響

RELATIONSHIP BETWEEN BUILDING ASPECT RATIO AND SIMILARITY OF TURBULENCE STATISTICS ABOVE OUTDOOR URBAN SCALE MODEL AND ABOVE RICE PADDY

森脇 亮<sup>1</sup>・藤井恵人<sup>2</sup>・藤森祥文<sup>3</sup>

Ryo MORIWAKI, Keito FUJII and Yoshifumi FUJIMORI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 修(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 sets of field measurements of air turbulence above a outdoor urban scale model (aspect ratio (H/W, ratio of buluding height to street width) is 1 and 4.3) and a rice paddy field; the fields are adjacent each other. This study is aimed to find out the similarity and dissimilarity between turbulent statistics over urban-like canopy and those over vegetation canopy. This paper especially focus on the effect of building aspect ratio on the similarity of turbulence statistics.

Momentum flux of the urban scale model increased with H/W. Turbulent statistics and quadrant analyses indicate that momentum transfer properties of the urban scale moded with high building ratio (H/W = 3.3) is similar to that of rice paddy field. However, spectral analyses show that frequency characteristic is different between two. The frequency of the turbulence over rice paddy is affected by the waving motion of rice ear.

**Key Words :** *Boundary layer turbulence, Urban canopy, Vegetation canopy, Outdoor field experiment, Flexibility*

## 1. はじめに

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はキャノピー構造に支配されるため複雑である。しかしながら、キャノピー近傍および接地層における大気乱流は、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ため極めて重要である。

森林上に発達する大気乱流に関する研究は1980年代から行われているが、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 Tavangar<sup>1</sup>), Watanabe<sup>2</sup>)。一方、都市キャノピーの乱流に関する研究は森林よりも遅れているのが現状である。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(例えばRoth<sup>3</sup>)がある一方で、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 Kanda<sup>4</sup>), Kanda et al.<sup>5</sup>)。

森脇ら<sup>6</sup>)は、この問題に関して明確な答えを出すために都市スケールモデルと水田キャノピー上で乱流の同期計測を実施し、その知見の一つとして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ことを明らかにした。そして、その違いの原因の一つにフロントルエリアインデックス(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)の差異を挙げている。しかしながら、十分に検討されていない点もあり、たとえば、都市と植生キャノピーの大きな違いである粗度要素の可撓性が乱流輸送に及ぼす影響などは未解明のままである。

本研究では、上記の研究をさらに発展させるべく、都市モデルのフロントルエリアインデックスを大きくした実験を行い、都市スケールモデルと水田キャノピー上の乱流特性の違いに関してさらなる検討を行った。また水稲の揺動に関する観測も補完的に行い、キャノピーの揺れと乱流輸送との関係についても検討を行った。

## 2. 都市模型および水田における実験概要

### (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 (図-1) において、2008年9月と2009年8-9月に行った。実験水田の北・西・南方向にはさらに別の水田や農地が数百mに渡って広がっており、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。水田の一角に模型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。周囲の水稻は植生キャノピーとなる。

### (2) 都市模型と水田の諸元

2008年と2009年の実験の違いは、建物模型のアスペクト比 (通路幅に対する建物高さの比) である。2008年の実験ではアスペクト比を1とし、2009年の実験ではアスペクト比を3.3とした。平均建物高さ (30cm) と建蔽率 (0.25) は2008年と2009年で同一にしてある。

2008年の実験では、一辺30cmの塩化ビニル製立方体 (厚みは3 mmで内部は空洞) 400個を等間隔に配置した (詳細は森脇ら<sup>6)</sup> を参照されたい)。2009年の実験では高さ30cm、幅9.0cmの木杭4489本を等間隔に配置した。都市模型の様子を図-2に示す。

一方、比較の対象となる水田について述べる。イネの品種はあきたこまちで、植栽密度は条間が30cm、株間が20 cm、観測期間中のイネの高さは2008年と2009年ともに約76 cmである。過去に同場所で微気象計測を行った大上<sup>7)</sup> 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。

各キャノピーの諸元を表-1にまとめた。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.<sup>8)</sup>、Raupach<sup>9)</sup>によるキャノピーの密度 (具体的には、建蔽率 $\lambda_p$ やフロントルエアインデックス $\lambda_f$ ) 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を計算した。なお、 $\lambda_f$ 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。H/W=1の都市モデルでは $\lambda_f$ は0.25、H/W=3.3の都市モデルでは $\lambda_f$ は0.83である。水稻を円柱と仮定して試算すると水田の $\lambda_f$ は2となり、都市モデルのそれよりも大きい。

### (3) 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。計測機器の設置場所は図-1の通りである。2008年と2009年で計測機器の設置場所が異なっているが、これは現場周辺の制約上の問題による。Inagaki and Kanda<sup>10)</sup> 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 (図-3)。良好なフェッチを確保するため、2008年では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、2009年では南西の風向を中心として $\pm 20^\circ$  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2008年に16セット、2009年には17セット取得された (表-2)。

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、McMillen<sup>11)</sup> 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。表-2に示すように、風速の範囲は $0.5 \sim 2.7 \text{ m s}^{-1}$ と微弱風が中心であるが、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。

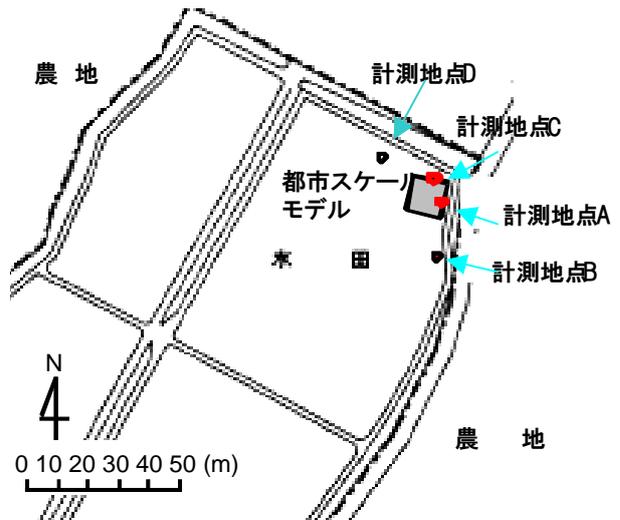


図-1 計測サイトおよび周辺の平面図

A, B : 2008年の計測地点, C, D : 2009年の計測地点

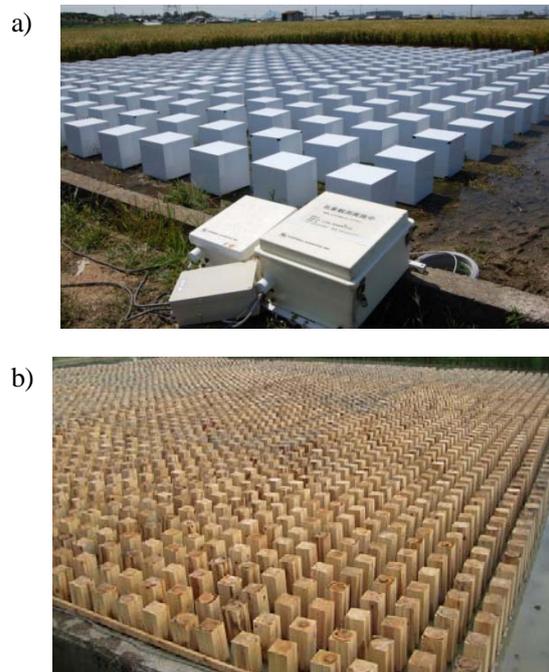


図-2 都市モデルの外観図

a) H/W=1.0, b) H/W=3.3

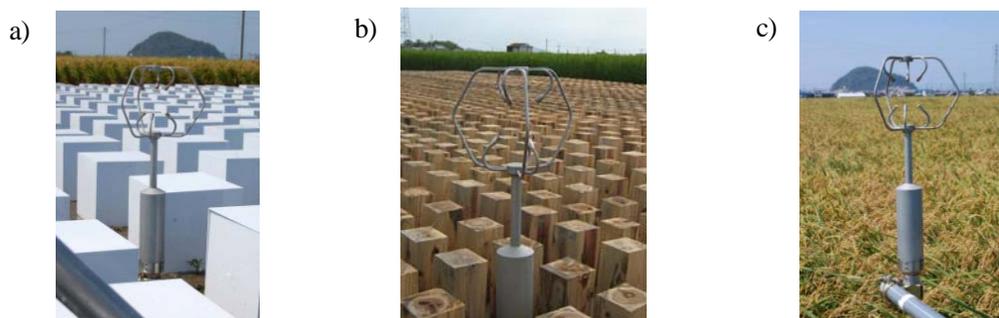


図-3 a)都市モデル (H/W=1.0) , b)都市モデル (H/W=3.3) , c)水田上に設置した計測機器

表-1 キャノピー諸元

	都市モデル (H/W=1)	都市モデル (H/W=3.3)	水田
広さ	12 m x 12 m	12 m x 12 m	約70 m x 100 m
キャノピー高さ $H$	0.3 m	0.3 m	0.76 m
アスペクト比 $H/W$	1	3.3	—
密集度の指標	建蔽率 $\lambda_p$ : 0.25 フロントルエリア インデックス $\lambda_f$ : 0.25	建蔽率 $\lambda_p$ : 0.25 フロントルエリア インデックス $\lambda_f$ : 0.83	LAI:4~5 PAI:6~7
乱流計測高度 $z_s$	0.6 m (=2H)	0.6 m (=2H)	1.52 m (=2H)
ゼロ面変位 $d/H$	0.45	0.45	0.82

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	LST	風速 (m s <sup>-1</sup> )	$u_*$ (m s <sup>-1</sup> )	$\overline{w'T'}$ (m s <sup>-1</sup> K)	大気安定度 ( $z_s - d$ )/L	Data No.	Day of year	LST	風速 (m s <sup>-1</sup> )	$u_*$ (m s <sup>-1</sup> )	$\overline{w'T'}$ (m s <sup>-1</sup> K)	大気安定度 ( $z_s - d$ )/L
2008							2009						
08-1	255	13	1.96	0.289	0.0618	-0.016	09-1	234	7	0.98	0.163	-0.007	0.010
08-2	255	14	1.78	0.263	0.0524	-0.017	09-2	234	8	0.92	0.159	0.002	-0.003
08-3	255	15	1.14	0.226	0.0416	-0.022	09-3	234	9	0.78	0.165	0.004	-0.006
08-4	255	16	0.85	0.147	0.0137	-0.026	09-4	234	10	1.00	0.171	0.006	-0.007
08-5	256	9	0.90	0.133	0.0417	-0.107	09-5	234	11	1.59	0.255	0.022	-0.008
08-6	256	10	1.03	0.154	0.0439	-0.073	09-6	234	12	2.17	0.289	0.064	-0.015
08-7	256	11	1.32	0.209	0.0688	-0.046	09-7	234	13	2.37	0.355	0.073	-0.009
08-8	256	12	1.19	0.185	0.0788	-0.076	09-8	234	14	2.66	0.381	0.082	-0.009
08-9	256	13	0.99	0.161	0.0393	-0.058	09-9	234	15	2.38	0.325	0.067	-0.011
08-10	256	15	0.71	0.127	0.0096	-0.029	09-10	234	16	2.20	0.312	0.039	-0.007
08-11	257	11	1.49	0.213	0.0688	-0.043	09-11	234	17	1.96	0.273	0.006	-0.002
08-12	257	12	1.03	0.154	0.0546	-0.092	09-12	235	10	1.58	0.308	0.081	-0.019
08-13	257	13	0.84	0.143	0.0389	-0.081	09-13	235	11	1.97	0.350	0.077	-0.012
08-14	257	14	0.75	0.128	0.0282	-0.081	09-14	235	12	1.63	0.300	0.071	-0.018
08-15	257	15	0.76	0.116	0.0159	-0.062	09-15	235	13	1.429	0.264	0.060	-0.022
08-16	257	16	0.54	0.102	0.0053	-0.031	09-16	235	14	0.965	0.194	0.048	-0.045
							09-17	235	15	0.656	0.153	0.016	-0.031

#### (4) 水稲の揺れの画像計測

水田キャノピーの揺れと乱流輸送の関係について検討を行うため、水稲の揺動をビデオ撮影し水稲の揺れの振動周期を調べた。

風向きに垂直になるようにビデオカメラをセットし、

1秒間30フレームの映像を1分間撮り、それをエル・イー・ビー社のPV Studio 2Dを使い動画解析した。動画解析は映像上の水稲の一点に注目し、その点を画素ごとの動きで追尾し水平変位を出力させた。

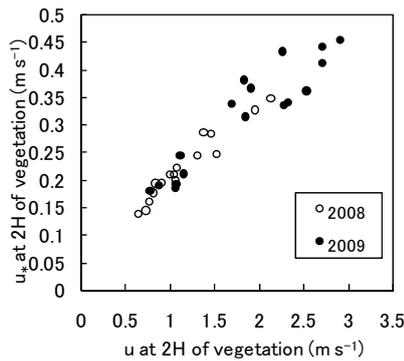


図-4 2008年と2009年における水田上の  $u$  と  $u_*$  の関係

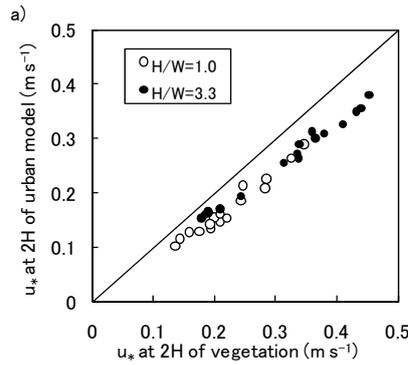
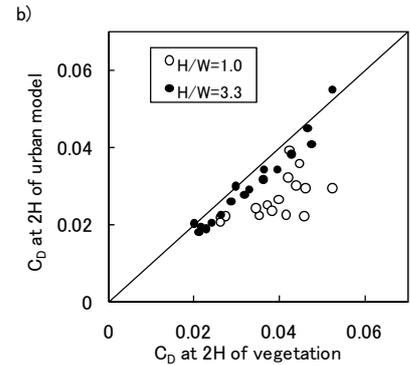


図-5 都市モデルおよび水田上におけるa) 摩擦速度  $u_*$ , b) 抵抗係数  $C_D$  の比較



### 3. 結果と考察

図-4は2008年および2009年における植生キャノピー上の風速  $u$  と摩擦速度  $u_*$  の関係を比較したものである。2008年と2009年で  $u$  と  $u_*$  の傾きには大きな差はなく、両年では植生キャノピーの乱流特性は変化していないことが確認できる。このことより、植生キャノピーを基準とすることにより、異なるアスペクト比 ( $H/W=1.0$ ) と ( $H/W=3.3$ ) の都市モデルを比較する。

#### (1) 摩擦速度と抵抗係数

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倍で計測された摩擦速度  $u_* (= \sqrt{-u'w'})$ 、およびそれらから算出された抵抗係数 ( $C_D = u_*^2 / u^2$ ) を図-5に示す。

図-5aより水田に比べて都市モデルの摩擦速度が小さくなり、これらは森脇ら<sup>6)</sup>が報告したとおりである。しかしながら、図-5bの抵抗係数にはアスペクト比によって顕著な違いが見られた。今回新たに実験を行った都市モデル ( $H/W=3.3$ ) の抵抗係数は  $H/W=1$  のモデルに比べて値が大きくなり、水田と同レベルの大きさになっていた。以上のように水田との相対的な比較により、都市モデル ( $H/W=1.0$ ) より都市モデル ( $H/W=3.3$ ) の方が効率的に運動量を吸収していることが明らかとなった。Barlow and Belcher<sup>12)</sup> は風洞実験において、建物アスペクト比

( $H/W$ ) の増加に伴いスカラー交換速度が増大することを指摘している。ところが、彼らの実験においては  $H/W$  が  $0 \sim 0.65$  の範囲だけでこの傾向がみられたのに対し、本研究の屋外スケールモデルにおける運動量抵抗係数では  $H/W$  が  $1.0 \sim 3.3$  の範囲でもこの傾向がみられており興味深い。都市キャノピーの密度が粗度に及ぼす影響に関してはこれまで多くの研究 (主に風洞実験) が行われており、建蔽率  $\lambda_p$  やフロントアルエリアインデックス  $\lambda_f$  による粗度の変化が調べられてきた。多くの研究が示す傾向として、 $\lambda_p$  が  $0.3 \sim 0.4$  程度、 $\lambda_f$  が  $0.15$  付近で粗度 (つまり運動量輸送) がピークをもち、それより  $\lambda_p$  や  $\lambda_f$  が大きくなると粗度は小さくなる (例えば、Grimmond and Oke<sup>13)</sup>)。これは都市キャノピーが密になることで、都市キャノピー内外の流れが分離され (“Skimming flow” という流れレジーム)、キャノピーによる運動量

吸収が生じにくくなることによる。本実験では都市モデルの建蔽率  $\lambda_p$  は変化させず、 $\lambda_f$  を変化させている ( $H/W=1$  では  $\lambda_f=0.25$ 、 $H/W=3.3$  では  $\lambda_f=0.83$ ) ので、アスペクト比が大きい都市モデル ( $H/W=3.3$ ) の方が、運動量輸送が小さくなるとも考えられる。しかし計測結果は逆の傾向を示した。この要因として考えられるのは、 $\lambda_f$  の大きさである。従来の研究では  $\lambda_f$  が  $0 \sim 0.45$  程度の範囲で粗度が調べられてきたが、本研究の都市モデル ( $H/W=3.3$ ) のような大きい  $\lambda_f$  の事例は筆者の知る限りない。大きい  $\lambda_f$  を有する都市キャノピー (細長い棒を並べたようなキャノピー) は個々の粗度要素の幅が小さくなり、都市というよりは植物キャノピーに近くなると思われる。このようなキャノピーでは、流れがキャノピー内部でも生じやすくなり、個々の粗度要素による抵抗によって運動量が効率的に吸収されるのかもしれない。本研究の結果は、都市キャノピーと植生キャノピーの運動量輸送のメカニズムの差異を示唆している可能性があり大変興味深い。

#### (2) 乱流統計量

図-6は水平風速の主流成分  $u$  の標準偏差  $\sigma_u$  と鉛直風速成分  $w$  の標準偏差  $\sigma_w$  をそれぞれ摩擦速度  $u_*$  でスケールした無次元量を都市モデルと水田で比較したものである。 $\sigma_w / u_*$  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-6b)。また  $\sigma_w / u_*$  は  $\sigma_u / u_*$  に比べて狭い範囲 ( $1 \sim 1.3$ ) に集中しており (図-6aに比べて軸の範囲が小さいことに留意されたい)、風速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。一方、水平成分  $\sigma_u / u_*$  に関しては値の範囲が大きく ( $2.3 \sim 4.0$ )、また都市モデルのアスペクト比  $H/W$  によって値が異なる。都市モデル ( $H/W=1$ ) では水田と比べて値が大きくなる傾向が認められる。都市モデル ( $H/W=1$ ) の  $\sigma_u / u_*$  が大きいことは、運動量輸送に寄与しない水平風速の変動成分が、他のキャノピーに比較して相対的に大きいことを意味している。一方、都市モデル ( $H/W=3.3$ ) の水平成分  $\sigma_u / u_*$  は水田とほぼ一致している。このことから、無次元標準偏差という乱流統計量においても、大きい  $\lambda_f$  を有する都市キャノピーの乱流は植物キャノピーの乱流と類似していると考えられる。

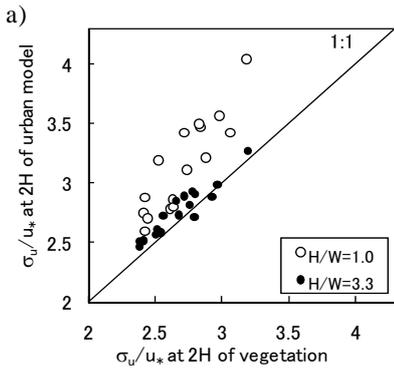


図-6 都市モデルおよび水田における無次元標準偏差の比較

a) 水平風速, b) 鉛直風速

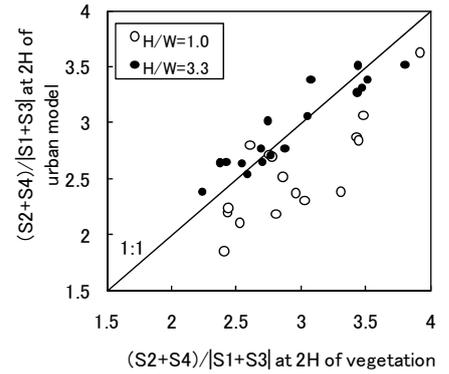
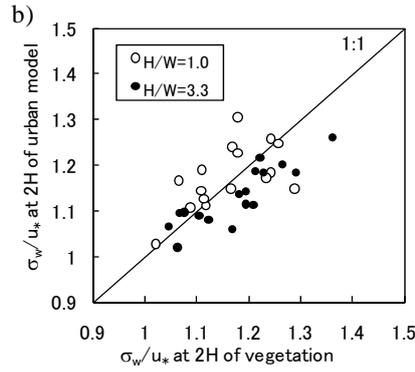


図-7 都市モデルと水田における  $(S_2+S_4)/|S_1+S_3|$  の比較

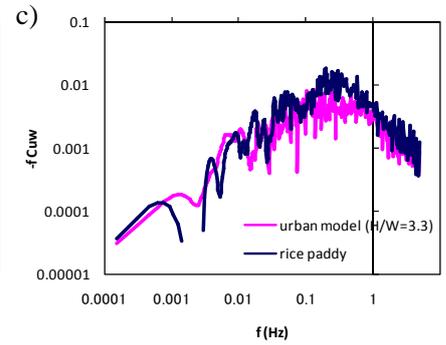
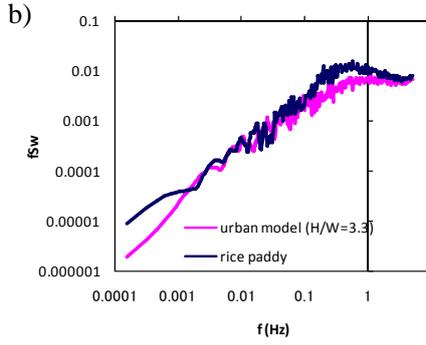
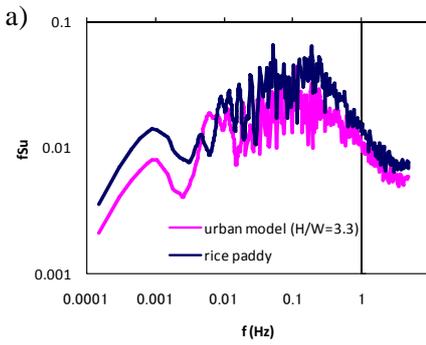


図-8 a) 水平風速, b) 鉛直風速のスペクトル, c) 運動量のコスペクトル

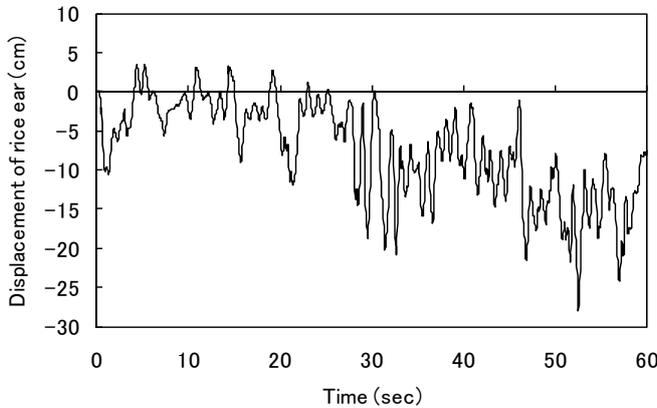


図-9 水稻変位の時系列

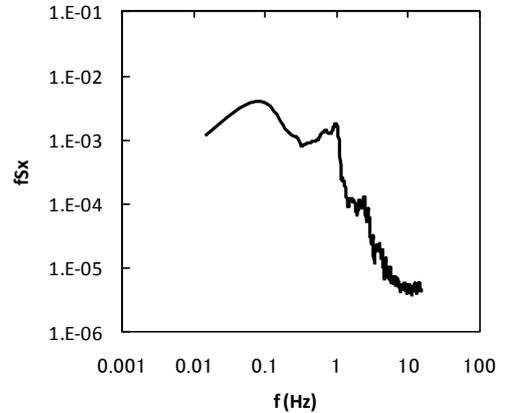


図-10 水稻の変位スペクトル

次に、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。水平風速の変動成分 $u'$ を横軸、鉛直風速の変動成分 $w'$ を縦軸にプロットした場合の各象限 $i$ に含まれる $\overline{u'w'_i}$ 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した。 $|S_1+S_3|$ 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-7に示す。

都市モデル ( $H/W=1$ ) の $(S_2+S_4)/|S_1+S_3|$ は水田と比べて値が小さくなる傾向がある。都市モデル ( $H/W=1$ ) において $(S_2+S_4)/|S_1+S_3|$ が小さいことは運動量輸送に寄与する

乱れの割合が小さいことを示し、前述の無次元標準偏差での議論と合致する。これに対し、 $\lambda_f$ の大きい都市モデル ( $H/W=3.3$ ) では、 $(S_2+S_4)/|S_1+S_3|$ の値が大きくなり、乱れが効率的に運動量を輸送していることが分かった。またその値は水田とほぼ同様であった。図は割愛するが、ejectionとsweep強度の比の目安としてよく用いられる $S_2/S_4$ 比についても、都市モデル ( $H/W=3.3$ ) と水田はほぼ同様の値を示した。以上より、四象限解析においても大きい $\lambda_f$ を有する都市キャノピーの乱流は植物キャノピーの乱流と類似している。

### (3) 乱流と水稲たわみ量の周波数特性

都市モデル (H/W=3.3) と水田の乱流特性の類似性をさらに調べるために、スペクトル解析により乱流変動の周波数特性を検討した。図-8に水平風速と鉛直風速のスペクトル、運動量のコスペクトルの結果 (Data Number 09-15) を示す。縦軸のスペクトルには周波数の重みをつけた。図-8を見ると水田では0.2Hz付近にスペクトルのピークを持ち、0.05Hz付近にもう一つのピークが存在する。この特徴は都市モデル (H/W=3.3) には見られず、両者には差異が認められた。

前節で議論したように乱流統計量においては都市モデル (H/W=3.3) と水田の乱流特性には顕著な差が見られなかったのとは対照的に、乱れの周波数特性には差異が認められた。この原因を探るため、補完的に行っていた水稲のビデオ撮影の情報を用いて、水田キャノピーの揺れと乱流輸送の関係について検討を行った。図-9はある水稲の一点の動きを追って求めた水平変位の時系列であり、水稲が振動している様子がよく分かる。このデータを元にスペクトル解析を行い、水稲の変位スペクトルを求めた (図-10)。変位スペクトルには、1.0Hzと0.09Hzに二つのピークが見られる。風速変動の周波数特性 (図-8) で見いだされたピークと比較すると、周波数帯が一致していないものの、二つのピークが存在している点については共通している。このことより、水田の乱流特性の周波数特性には水稲の揺れが関わっていると考えられる。

しかしながら、周波数帯のずれに関しては現時点で十分には説明するに至っていない。池田ら<sup>14)</sup>によるアシ原における現地観測、日野<sup>15)</sup>による稲の撓みを考慮した植生層乱流のLESでは、植生キャノピー高さでは風速変動と稲先端部の撓みには強い相関があり、スペクトルのピーク周波数も一致することが報告されているが、キャノピー高さの2倍の高度で計測しているため、ピーク周波数が低周波側にシフトしたのかもしれない。

今回の水稲の撓みに関する観測は、風向の制約などの理由で残念ながら乱流計測と完全に同期させることが出来なかった。これについては今後の課題としたい。

## 4. まとめ

建物のアスペクト比を変化させた都市スケールモデルと水田キャノピー上において乱流の同期計測を行い、以下の知見を得た。

1) 水田に比べて都市モデル (H/W=1.0) の方が摩擦速度や抵抗係数が小さくなるが、アスペクト比の大きい都市モデル (H/W=3.3) では、摩擦速度の値がほぼ水田と同じである。2) 風速の無次元標準偏差や四象限解析などの乱流統計量は、大きい $\lambda_r$ を有する都市モデル

(H/W=3.3) と水田における乱流の類似性を示唆している。3) しかし、スペクトル解析により乱流変動の周波数特性を検討したところ、都市モデル (H/W=3.3) には見られないスペクトルのピークが水田には見られ、これには、水稲の揺れが関わっていると考えられる。

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き、愛媛大学環境建設工学科水環境工学研究室の学生諸氏にはスケールモデルの制作にご協力いただいた。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) 森脇, 青木, 藤森, 2009: 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, 土木学会水工学論文集, 53, 253-258.
- 7) 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一, 水文・水資源学会誌, 16, 375-388.
- 8) Macdonald et al., 1998: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, 32, 1857-1864.
- 9) 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.
- 10) Inagaki and Kanda, 2008: Turbulent flow similarity over an outdoor reduced urban model, *J. Fluid Mech.*, 615, 101-120.
- 11) McMillen, 1988: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, 43, 231-245.
- 12) Barlow and Belcher, 2002: A wind tunnel model for quantifying fluxes in the urban boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, 104, 131-150.
- 13) Grimmond and Oke, 1999: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 1262-1292.
- 14) 池田, 館, 山田, 1996: アシの穂波現象に関する現地観測とスペクトル応答解析, 土木学会論文集, II-37, NO.551, 11-20.
- 15) 日野, 2001: 振動する稲穂の波と植生層流れの乱流構造, 第15回数値流体力学シンポジウム講演論文集.

(2009. 9. 30受付)