

# 現地観測によるアシ原の乱流場及び 熱・物質交換の測定

池田 駿介<sup>1</sup>・山田 知裕<sup>2</sup>・杉本 高<sup>2</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2丁目12-1)

<sup>2</sup>学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

植生を有する場では、裸地とは異なる複雑な乱流構造が存在し、その乱流構造に密接に関連した運動量、熱・物質輸送が行われている。本研究では 1996 年 7 月 27 日に東京都大田区の大摩川河口部から 1 km ほど上流の地点に広がるアシ原において放射計、超音波式風速・温度計、赤外線式炭酸ガス・水蒸気変動計、サーモグラフィなどを用いて行った観測をもとに、植生場で起こる乱流構造と運動量、炭酸ガス、水蒸気の鉛直方向輸送及び熱輸送の時空間分布を調べた。その結果、各輸送形態の特徴をとらえ、輸送量を定量的に把握することができた。また、熱画像により平面的な組織渦の伝播を捉えることができた。

**Key Words :** field observation, vegetation, organized vortex, flux

## 1. はじめに

植生キャノピーを有する場では、風、植生の諸条件により周期的な大規模組織渦の発生が見られ、裸地上の流れ場とは異なる特有の現象を示す。例えば、稲田で見られるような可撓性を有する植生場では植生の揺動があたかも波のように風下へと伝わる「穂波」と呼ばれる現象が発生する。

この周期的大規模組織渦の発生はキャノピー層の境界付近に流速の変曲点が存在する事に起因する変曲点不安定によることが指摘されており<sup>1)</sup>、この組織渦を含む乱れによって植生層内、植生層外の間で運動量、熱、各種物質が交換されていることが野外観測により知られている。例えば、村上ら<sup>2)</sup>は水稻について植生の揺らぎと乱流輸送に着目し、出穂期の水稻群落において揺らぎが炭酸ガス輸送に大きく寄与していることを報告している。また、植生キャノピー層上の乱流の組織構造を野外観測をした例として、Gao et al.<sup>3)</sup>が森林内外の乱流同時測定により、森林キャノピー層の 2 倍程度の高さまで達する組織渦構造を観測したことが挙げられる。彼らは、組織渦の特徴として下降流であるスウィープ運動が強く、上昇流であるイジェクション運動は弱いこと、気温の時間変動としてイジェクション運動に伴うゆっくりとした上昇とその後のスウィープ運動に対応した急激な下降という特徴を有するランプパターンを報告している。なお、都市キャノピー層上におい

ても孟ら<sup>4)</sup>がランプ現象を捉え、組織渦の存在を示唆している。

更に、最新の乱流測定法を用いた実験的研究や、乱流モデルを用いた数値解析が行われている。実験的研究では、池田ら<sup>5)</sup>が PIV(Particle Image Velocimetry)により、模擬沈水植生層近傍に生じる大規模組織渦の 3 次元像を計測し、その結果前傾した楕円形状を有し横断方向に対をなした組織渦を捉えている。数値解析では神田ら<sup>6)</sup>が流れと植生間の相互作用を定式化し、LES を用いた数値計算を行い、植生キャノピー上に発生する大規模組織渦はローラーとリップで特徴づけられる 3 次元構造を有することを報告している。

本研究では、現地において超音波風速・温度計(カイジョー社製、WA(T)-395 型)、赤外線式炭酸ガス・水蒸気変動計(アドバネット社製、E009A 型)などを用いて植生場に起こる特有な乱流構造を測定し、熱や炭酸ガス、水蒸気の輸送量との関連を調べた。また、既報<sup>7)</sup>により、植生頂上部の気温変動は風速の変動に追従していることが判明しているが、この結果を基にサーモグラフィ(アビオニクス社製、TVS-2000MkII LW)を用いてアシ原の上方から温度分布を計測することにより、間接的に、植生層上に発生する大規模組織渦の平面時空間構造を捉えることを試みた。

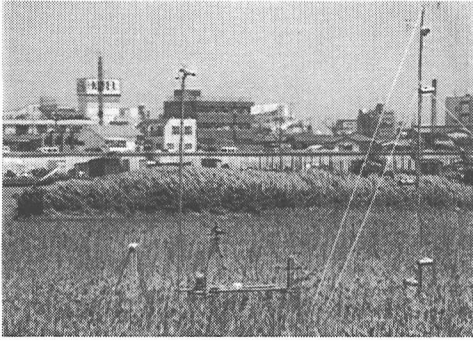


写真-1 観測地の概観

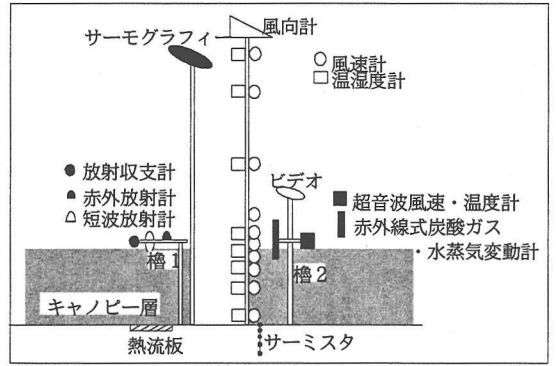


図-1 観測機器配置の概要

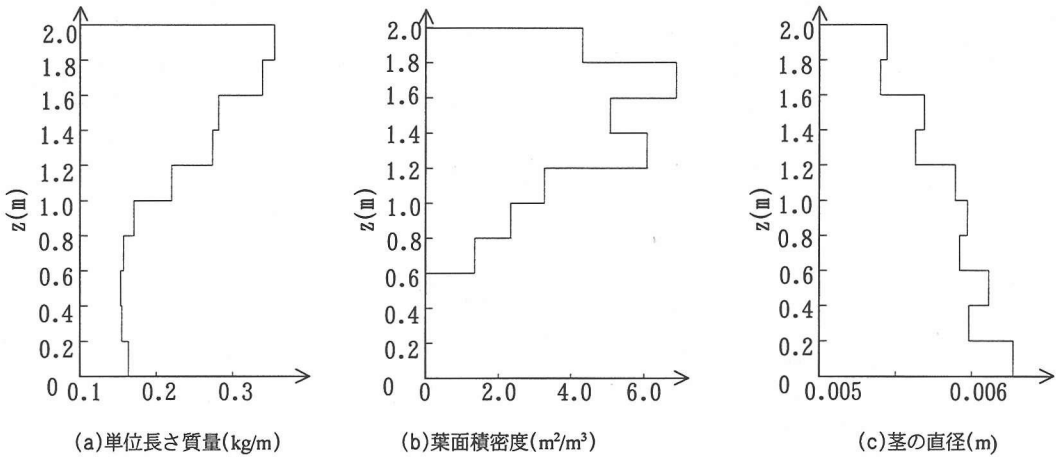


図-2 アシの物性値の鉛直方向分布

## 2. 観測概要

現地観測は1996年7月27日に東京都大田区羽田の多摩川河口部から上流に約7kmの地点の右岸に広がるアシ原(写真-1)において行った。アシ原の広さは南北方向に約150m、東西方向に約400mである。このアシ原は広く、かつアシの高さがそろっており、流れの構造を観測するのに適切な場所であると思われる。このアシ原のほぼ中央部に半径5mほどの円形にアシを刈り取った観測地を設定した。

観測項目を表-1に、観測機器配置の概要を図-1に示す。短波放射計2台、赤外放射計および放射収支計は、観測地に組んだ檣1に設置した。これらの設置高さは、植生層内外の放射量の収支を測定するため、植生層上端よりやや高い2.5mとした。熱流板は刈り込んでいないアシ原の中に日射の影響がないよう数mmの厚さの土をかけて設置した。風向

計は高さ8mの塔の頂上部に設置し、その下に三杯式風速計5台と熱線風速計5台、温湿度計を8台設置した。今回用いた熱線風速計は、計測と同時に温度補正を行い補正値を出力する方式の機器である。サーミスタは熱流板と同じ場所で地中深さ60cmまで鉛直方向に6個設置した。風向計を除く以上の機器のデータは、日変化に関しては30分時間移動平均を、鉛直分布に関しては30分時間平均を施し整理した。超音波風速・温度計、赤外線式炭酸ガス・水蒸気変動計は檣2のアシの頂上部付近(地上2.45m)に設置した。今回用いた超音波風速・温度計、赤外線式炭酸ガス・水蒸気変動計の応答時間は0.1秒である。又、檣2にはビデオカメラを置きアシの揺動の状況を記録し、その後方から高さ7mのポール上端に設置したサーモグラフィによりアシ原の平面温度変動を測定した。また、拡散型ボロメータを用いて植物の蒸散、光合成有効放射量などを

表-1 観測項目

観測項目		観測機器 (観測精度)	測定位置	測定間隔
放射	下向き短波放射	短波放射計	地上 2.5(m)	連続測定(1Hz)
	上向き短波放射	短波放射計		
	下向き長波放射	長波放射計		
	放射収支	放射収支計		
	地中伝導熱	熱流板	地表面	
風向		矢羽式風向計	地上 8.0(m)	毎 1 分
鉛直分布	風速	三杯式風速計	7.5, 6.5, 4.5, 3.0, 2.5(m)	連続測定(1Hz)
		熱線風速計	2.25, 2.0, 1.7, 1.0, 0.3(m)	連続測定(1Hz)
	気温	温湿度計	7.5, 6.5, 4.5, 2.5, 2.0, 1.7, 1.0, 0.3 (m)	連続測定(1Hz)
	湿度			
地中温度分布		サーミスタ	地中 1, 5, 12.5, 25, 40, 60(cm)	連続測定(1Hz)
高周波変動成分	揺動	ビデオカメラ		連続測定
	風速	超音波風速温度計	地上 2.45(m)	連続測定(8Hz)
	気温			
	炭酸ガス			
	水蒸気			
アシ原の温度分布		サーモグラフィー		
植生の作用		拡散型ボロメータ	地上 1.0~1.5(m)	毎 60 分

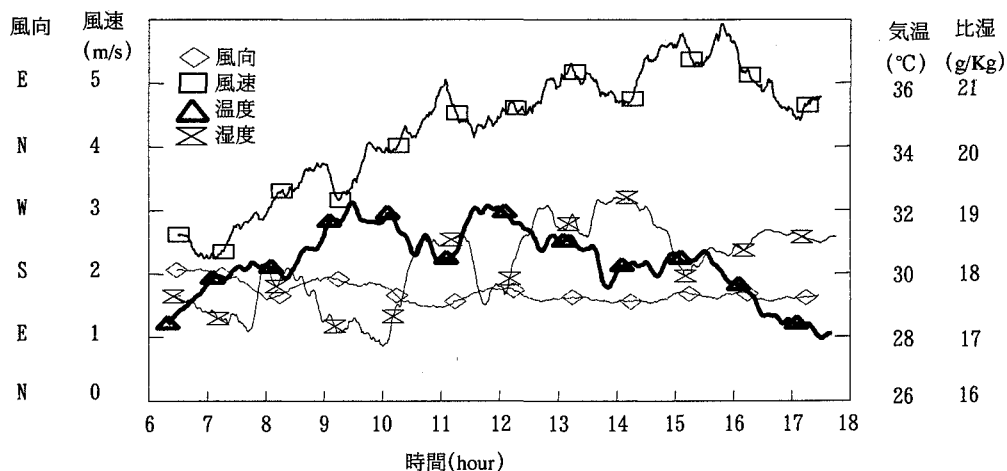


図-3 風向, 風速, 気温, 湿度の日変化

60 分毎に測定した。

観測に際し、アシの特徴を計測した。アシ原の密生度は 174 本/m<sup>2</sup> であり、アシの平均高さは H<sub>0</sub>=2.18m であった。また、高さ方向 10cm 毎に測定した単位長さ質量、葉面積密度、茎の直径をそれぞれ図-2(a)~(c)に示す。図中 z は地面からの高さを表す。なお葉面積密度は、採取した植生を葉も一緒に高さ方向に 10cm 毎に切断して葉面積を測定し、密生度 174 本中に存在する片側面の葉面積を表したものである。

なお、各測定においてアシの刈り込んだ影響があると思われる測定項目においては、刈り込みの影響が極力小さくなるように測定機器を風上側に設置した。

### 3. 観測結果

#### (1) 場の特性

図-3 に 8m の高さにおける風向, 7.5m の高さに

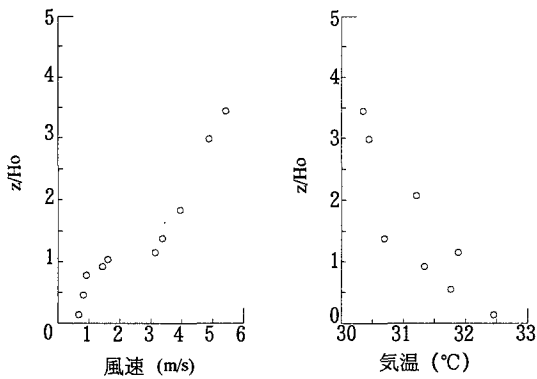


図-4 風速, 気温, 絶対湿度の鉛直分布

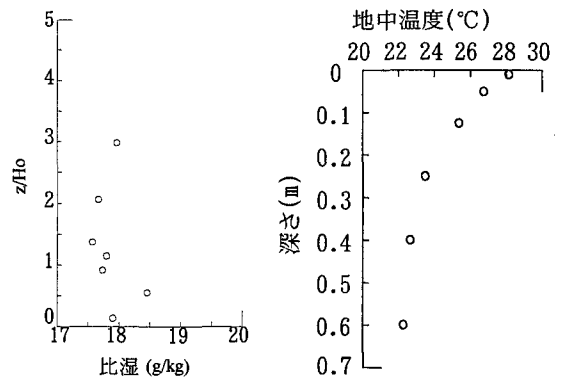


図-5 地中温度分布

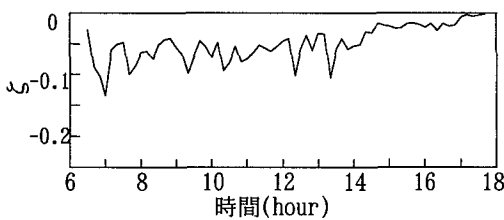
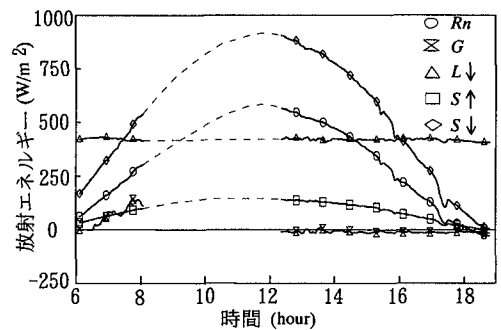
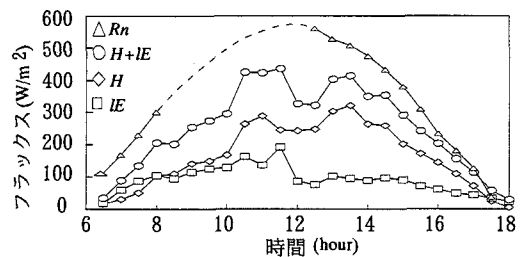


図-6 安定度の日変化



(a)測定した各放射量



(b)熱収支  
図-7 放射収支

おける風速, 6.5m の高さにおける気温, 比湿の日変化を示す。風向は1日中南風であり, 東京湾方向からの風であった。上空 7.5m の高さの風速は午前 11 時頃までは 4m/s であったが, 午後になると 5m/s 程度の強さの風が吹き続け, アンを大きく揺らした。気温は朝方から昼にかけて上昇し, ピークを迎えるが, そのピークも 32°C と極端に暑い日ではなく, 比湿もそのピークは 14 時頃の 19.1g/Kg と比較的低く, 真夏の東京を代表する典型的な高温多湿の夏日ではなかった。

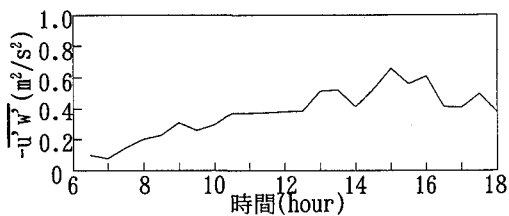
図-4 に 15 時から 15 時 30 分の間の平均風速, 気温, 比湿の鉛直分布を示す。風速の鉛直分布は植生の存在のため, 植生層内で減少している。植生上空では風速は高さとともに増大し, 植生境界部付近には風速分布に変曲点が見られる。気温の鉛直分布は, 植生層内で上空より 1°C 以上高くなっており, 上空に行くに従い低くなっている。植生層内は日射により暖められ, 顕熱は上空に向かって輸送されていると考えられる。比湿の鉛直分布は, 植生層内で若干高い値を示しているが, 植生層内外で有意な差異は見られなかった。

図-5 に 15 時から 15 時 30 分の間の地中気温鉛直分布を示す。地表での 28°C 程度から地中 0.6m における 22°C 程度まで, ほぼ指数分布を示している。

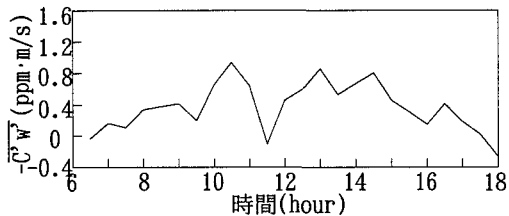
図-6 にゼロ面変位から超音波風速計が設置されている位置までの高さをモニ・オブコフの安定度スケールで割った無次元高度  $\zeta$  を示す。ゼロ面変位は, 植生が存在するために, 基準面を実際の地面から修正した高さである(本観測では地面からの高さ 1.79m)。一般に  $\zeta=0$  で中立,  $-1 < \zeta < 0$  で不安定であるので, 日中を通じて弱不安定であり, 若干の自然対流が存在する状態となっていると考えられる。

(2)熱収支

図-7(a)に測定した正味放射量  $R_n$ , 地中に伝わる



(a)運動量



(b)炭酸ガス

図-8 運動量, 炭酸ガス輸送の日変化

方向を正とした地中伝導熱  $G$ , 下向き長波放射  $L\downarrow$ , 下向き短波放射  $S\downarrow$ , 上向き短波放射  $S\uparrow$  のそれぞれの日変化を示す。ただし、測定時間中、データロガーの不備により 8 時から 12 時までデータを取ることができなかった（その間の予想される変化を点線で示した）。地中伝導熱  $G$  は午前 8 時までかなり大きい値を示しているが、設置場所に日光が当たっていたので、その影響を受けたのではないかと考えられる。午後からは殆どゼロに近い値であった。大気からの長波放射量  $L\downarrow$  はおよそ  $420(\text{W}/\text{m}^2)$  で、日中を通してほぼ一定であった。12 時 30 分のボロメータでの測定では、葉温は  $38.9(^{\circ}\text{C})$  であり、上向き長波放射量を見積もると  $536(\text{W}/\text{m}^2)$  となる。この値は、図-7(a)で上向き長波放射量がこの時間帯で  $500(\text{W}/\text{m}^2)$  以上となっていることとよく対応している。正味放射量  $R_n$  の変化の傾向は日射と一致しており、その値は日射量のおよそ 6 割である。入射日射量と反射量の比であるアルベドは 0.18 であった。(b)に正味放射量  $R_n$  と、渦相関法により求めた顕熱フラックス  $H$ 、潜熱フラックス  $IE$  及び顕熱フラックスと潜熱フラックスの和  $H + IE$  の日変化を示す。顕熱フラックスは 13 時過ぎにピークを迎えている。潜熱フラックスは 12 時前にピークをとり、その後はやや小さい値を示している。潜熱フラックスの供給源としては葉による蒸散作用、地表からの潜熱フラックス、朝露が考えられるが、朝露に関しては早朝にしか見られず、日中のその寄与は小さいものと思われる。熱収支は植生層内に蓄積される熱量を無視すれば

$$R_n = H + IE + G \quad (1)$$

で表される。本観測において  $G$  の値はほぼ 0 であるので  $H$  と  $IE$  の和は  $R_n$  と一致するはずであるが、 $H$  と  $IE$  の和は  $R_n$  より 2 割ほど小さな値であった。超音波風速・温度計では測定できない小さな渦の存在や渦相関法における平均操作(30 分平均)より大きな変動があったこと、植生層内への熱量貯蓄など

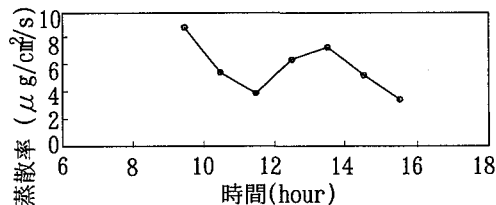


図-9 蒸散率の日変化

が一致しない原因としてあげられる。

### (3)各輸送量の日変化

図-8(a), (b)に渦相関法により求めた運動量輸送、炭酸ガス輸送の日変化を示す。尚、渦相関法における時間平均操作は 30 分平均とした。(a)の運動量輸送は、15 時頃に最も大きく、この時間は図-3 に示した風速のピークと一致している。(b)の炭酸ガス輸送は、午前中 11 時頃に極大値をとること、その後大きく減少していることが図-7(b)に示した潜熱フラックスの日変化と同じ傾向を示し、日射を受けている間はアシの炭酸同化作用により炭酸ガスは植生層内に取り込まれていることを示している。

### (4)植生の作用と熱収支

図-9 に拡散型ボロメータで測定した植物の生理作用のパラメータである蒸散率を示す。植物は日射が与えられると光のエネルギーを植物の活性エネルギーに変換するために光合成を行う。この作用は蒸散作用を伴うが、日射の強い夏には、植物は午前中に活発に光合成を行い、昼間は活性度が落ち光合成が減少することが最近指摘されている<sup>8)</sup>。本観測においても朝の早い時間に蒸散が活発である傾向が示されている。午前 11 時半頃に蒸散率が低下しているが、図-8(b)の炭酸ガス吸収にも同様な傾向が見られる。

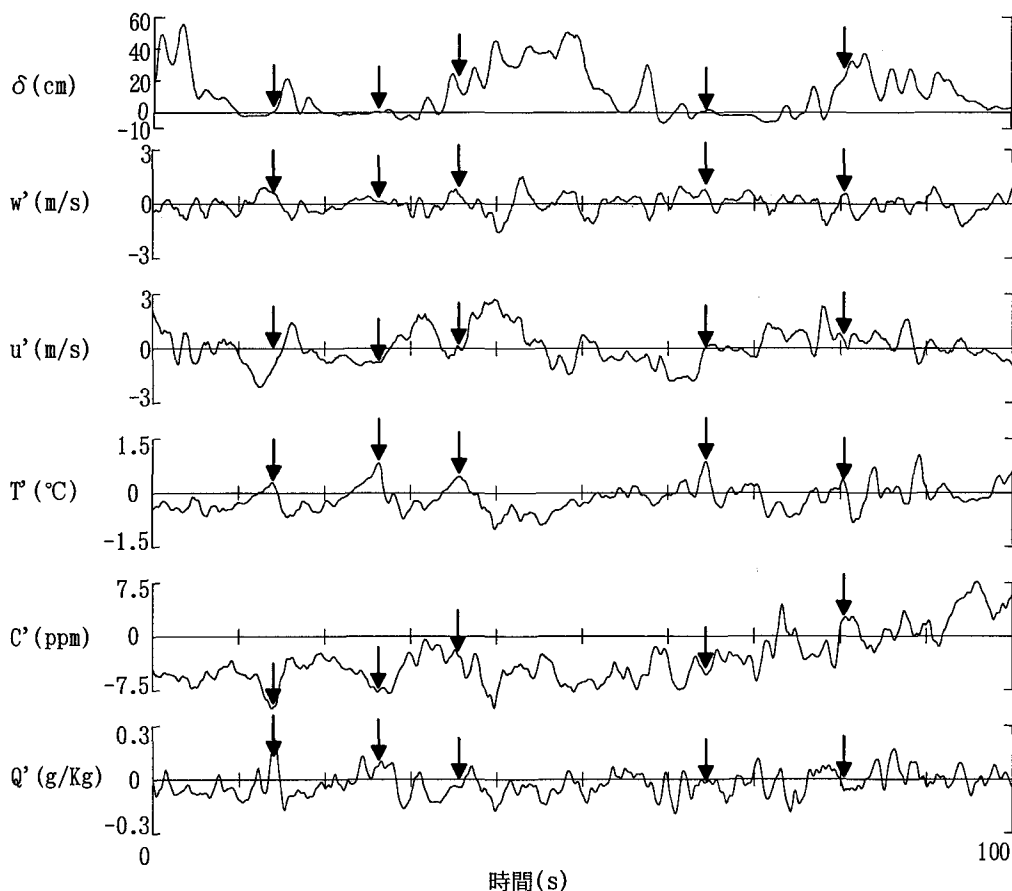


図-10 各種変動の時系列 (午後3時頃)

### (5)各種変動パターン

ビデオカメラで撮影したアシ頂部の風下方向変位  $\delta$ 、植生の上部境界付近に設置した超音波風速・温度計と赤外線式炭酸ガス・水蒸気変動計で測定された鉛直方向風速変動  $w'$ 、水平方向風速変動  $u'$ 、気温変動  $T'$ 、炭酸ガス変動  $C'$ 、水蒸気変動  $Q'$  の 15 時頃の 100 秒間の時系列を図-10 に示す。各量の時系列変動にはランダムな乱れ成分が見られるが、その中に 10 秒強の周期的な変動があり、特に気温変動においてはゆっくりとした上昇とその後の急激な下降という一連のパターンがみられる。気温変動におけるこの一連の変動の極大点を矢印で示す。この変動は Gao et al.<sup>3)</sup>、孟<sup>4)</sup>および著者ら<sup>7)</sup>が報告しているランプ現象であり、ゆっくりとした上昇が上昇流 (イジェクション運動) によるものであり、その後の急激な下降が下降流 (スウィープ運動) に対応していると考えられている。また、アシの揺動は気温変動における極大点の前後で大きくなっており、アシの変位が流れの組織構造と関連性があることが

わかる。炭酸ガス変動、水蒸気変動においてもこの組織構造に対応した動きが見られる。

ここで、高周波の変動を取り除き 10 秒強の運動を抽出するため、午後 3 時前後の時間帯においてランプ現象と判断される 50 個の変動パターンを抽出し、アンサンブル平均操作を施した。図-10 に対応する諸量及び、運動量輸送変動  $-u'w'$ 、顕熱輸送変動  $T'w'$ 、炭酸ガス輸送変動  $C'w'$ 、潜熱輸送変動  $Q'w'$  のアンサンブル平均像を図-11 に示す。なお、アンサンブル平均をとるにあたっては気温変動が極大値をとる時刻を位相の基準とし、前後 10 秒間の時系列を示している。気温変動  $T'$  では、ゆっくりとした上昇と、急激な下降 (ランプ現象) が顕著に見られる。この気温変動は、風速でのイジェクション運動からスウィープ運動への変化に対応している。アシの風下方向変位  $\delta$  は、スウィープ運動時に大きい値を示している。炭酸ガス変動  $C'$  は  $w'$  が上向きのピーク時に負の値、 $w'$  が負の時に正の値をとっているが、逆に水蒸気変動  $Q'$  は鉛直変動  $w'$  と似た変

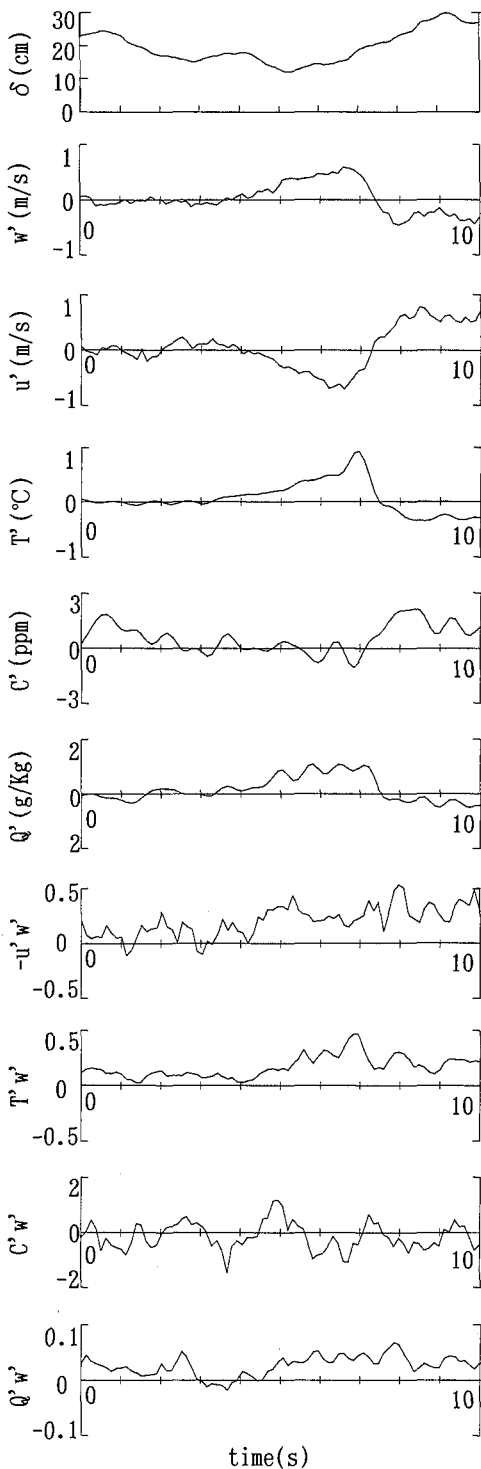


図-11 アンサンブル平均像

動形態を示している。また、植生層内から植生層外へと運ばれる顕熱、水蒸気は、風速変動のピークより遅れた位相でピークをもつが、植生層外から植生層内へと運ばれる炭酸ガスではそのような傾向は見られない。運動量、顕熱、水蒸気各輸送量の変動は、風速が極値をとる時間付近で大きくなり、組織渦の通過に伴い輸送が行われていることがわかる。炭酸ガス輸送変動においては、風速との対応は見られない。

### (6) スペクトル解析

以上のように各種変動特性を調べると、それぞれ相互に強弱に程度の差はあるが、相関を持っていることがわかった。自然条件下での観測結果のため、規則正しい周期性は見られないが、図-10の  $u'$  や  $T'$  からは 10 秒程度の変動の繰り返しが見えなくもない。そこで、各々の変動量についてスペクトル解析を行った。図-12(a)~(f)にアシの変位、水平方向風速、鉛直方向風速、気温、炭酸ガス、水蒸気各パワースペクトル分布を示す。用いたデータは 15:00 から 17 分間のデータ (8096 個) である。それぞれのグラフからは大きなピークは見られないが、(b) 水平方向風速、(c) 鉛直方向風速、(d) 気温及び (f) 水蒸気各スペクトル分布では、いずれについても 0.06Hz (周期約 17s) 付近 (図中矢印で示す) に弱いピークが見られる。水平方向風速変動  $u'$  のスペクトルは慣性小領域でほぼ  $-5/3$  乗則に従っており、アシの変位スペクトルは高周波側の減衰が大きいが、これらは従来の結果と一致している<sup>7),9)</sup>。

また、Ho & Huerre<sup>10)</sup>によると、流速分布に変曲点を有するせん断流れにおいて発生する渦の最大発達率を示す周波数  $f$  は

$$\frac{f\theta}{U_m} = 0.032 \quad (2)$$

で与えられる。ここに  $\theta$  は植生の存在による運動量欠損を  $U_\infty^2$  で割った運動量厚さ、 $U_\infty$  は植生層上で流速がほぼ一定となる値、 $U_m$  はせん断層上 2 境界における流速の平均値である。15 時頃には  $\theta = 0.79\text{m}$ 、 $U_m = 3.0\text{m/s}$  であるので  $f = 0.12\text{Hz}$  (周期 = 8.3s) となり、スペクトルがピークを示す周波数とオーダー的に一致している。

### (7) 各種相関

各変動のそれぞれの相関を調べるため、4 象限解析を行った。用いたデータは 15 時から 15 時 30 分までの 30 分間 (データ数 14400) のものであり、頻度を等高線で表現した (図-13)。各図中の数値は 1 格子内にあるデータの割合である。(a) は水平

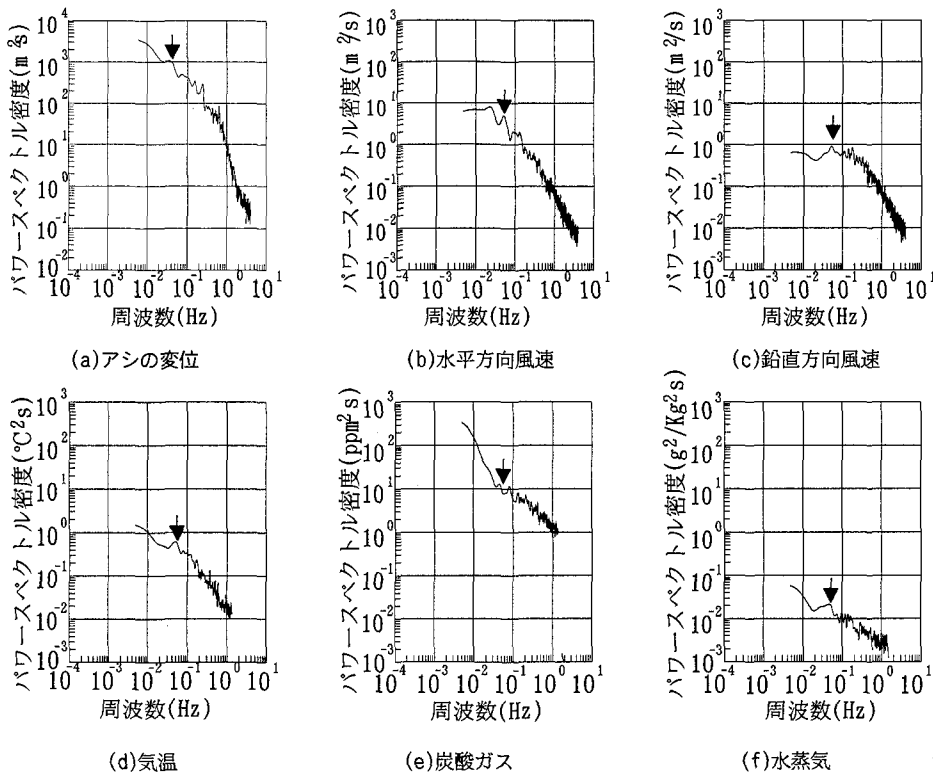


図-12 各種変動スペクトル

方向風速変動と鉛直方向風速変動の相関である。等高線を描くにあたって設定した格子は  $0.1\text{m/s} \times 0.1\text{m/s}$  である。この図から両者の間には負の相関、すなわち正のレイノルズ応力の発生があることが知られる。その内訳は第2象限(イジェクション運動)は頻度は大きい小さな値であり、逆に第4象限(スウィープ運動)は頻度は小さい大きな値を示しており、既報<sup>7)</sup>の結果と一致している。

次に風速変動と気温、各物質輸送変動の相関に着目する。(b)、(c)に風速変動と気温変動との相関の頻度分布を示す。設定した格子の大きさは  $0.1\text{m/s} \times 0.1^\circ\text{C}$  である。(b)では負の相関、(c)では正の相関が見られる。つまり、スウィープ運動により気温の低い上空の空気塊が下方に、イジェクション運動により気温の高い空気塊が上方に運ばれている。(b)では第4象限が第2象限よりも頻度は低い、大きい値を示しており、スウィープ時に強く輸送されることを示唆している。また、既報<sup>7)</sup>と同様、(b)、(c)ともに気温変動の値が大きい領域において線形の関係から少し歪んでいる。これは、アンサンブル平均像で見たように、イジェクション運動からスウィープ運動に移る過程において気温変動は風速変動に対

し若干の位相差があるためである。(d)、(e)に風速変動と炭酸ガス変動の相関の頻度分布を示す。設定した格子は  $0.1\text{m/s} \times 0.4\text{ppm}$  である。(d)では弱い正の相関、(e)では弱いながらも負の相関が見られる。すなわち、炭酸ガスは植生層に向かって輸送されていることになる。(f)、(g)に風速変動と水蒸気変動の相関の頻度分布を示す。設定した格子は  $0.1\text{m/s} \times 0.0125\text{g/Kg}$  である。(f)では負の相関、(g)では正の相関が見られ、さらに、水蒸気変動値が大きくなると水蒸気変動軸に近づくという風速変動と気温変動の相関でみられた歪みの特徴が見られる。水蒸気は植生層から大気へ向かって輸送されている。

4象限解析による水平方向風速変動とアシの揺れ  $\delta'$  の相関の結果を図-14に示す。データ数は15時10分から15時24分までの4000個である。データ数の都合上、この場合のみプロット図とした。この図から相関係数 0.15 と弱いながらも正の相関が見られる。すなわち、アシの揺れは組織渦の通過に伴う風速変動に誘起されている。



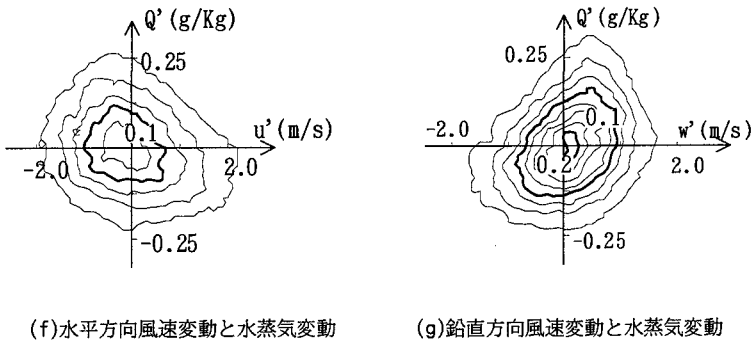
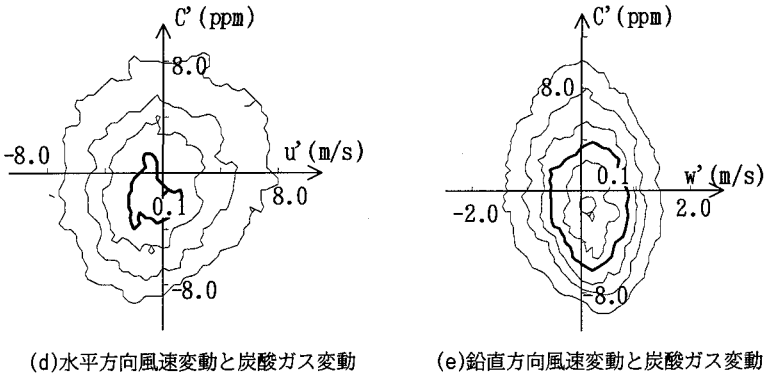
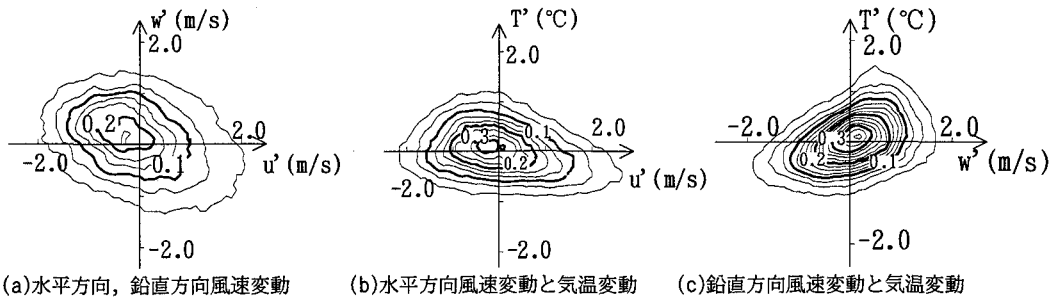


図-13 4象限解析

(8) サーモグラフィーによるアシ原の温度分布の時空間構造解析

サーモグラフィーを用いてアシ原の上空から熱画像を得た。今回使用したサーモグラフィーは、1画像 25600 画素の画像を 5Hz の周波数で 100 秒間 (計 500 画像) 連続して測定することができる。サーモグラフィーは絶対値の精度は高くないが、最小検出温度差は  $0.1^{\circ}\text{C}$  の相対精度がある。植生層内では気温が高く、層外の気中では低くなっていることは 3-1 で既に述べたが、前述の組織渦が通過すると、層外の低温の空気塊が層内に侵入し、葉・茎の温度が下がることが予想される。ここではこのような温度変動をサーモグラフィーにより捉えることが

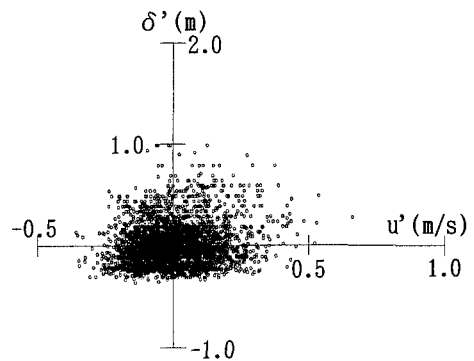


図-14 水平方向風速とアシの揺れの相関

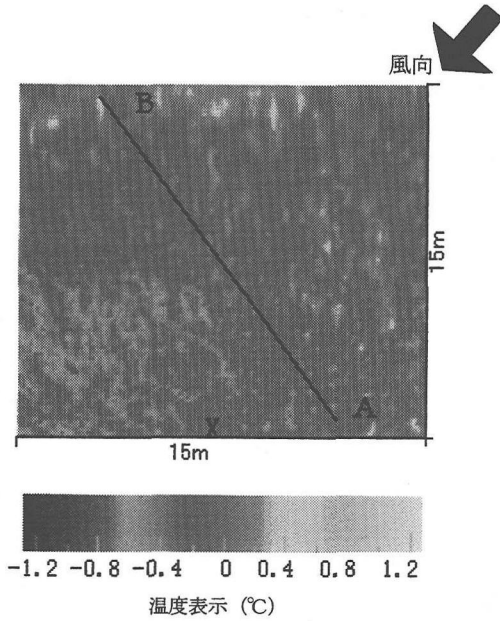


図-15 熱画像の例

できるかどうか検討したものである。

15時頃に撮影した画像の1例を図-15に示す。この画像は斜めから撮影したために生じた歪みを15m四方となるように補正したものである。温度表示に示すような温度変動が色分けにより示されている。矢印の方向に、右斜め上方から風が吹いている。

ここで、図-15中Xの地点に設置した超音波風速・温度計を用いた同時計測によって、計測時間100秒間の中で渦の通過と思われる急激な気温下降時(図-10参照)を基準時間として、条件付きサンプリング抽出を行い、植生の温度変化を追ったものが図-16である。なおこの図は、基準時間より2秒前から4秒後までの計6秒間の時間経過を示しており、温度表示は図-15と同じである。左下へ向かう風向と同方向に伝わる温度降下が捉えられ、渦の前面が移動していることがわかる。この移動速度は6秒間で20m程度移流していることから3m/s程度である。

次に、図-15上の測線A-Bにおける温度変動の時系列変化を図-17に示す。それぞれの軸はA-B測線の空間軸、時間軸、温度軸である。周期が20~30秒程度の温度のゆっくりとした上昇と急激な下降、及びその1周期中に含まれる数個の小さな変動が捉えられている。それらの変動は、ローラー的な渦と流れ方向に伸びるリブ的な縦渦構造から成り立っている。

図-18(a)~(c)にX点において超音波風速・温度計により測定した気温変動とサーモグラフィーによ

り測定した温度変動及びアシ頂部の風下方向変位の同時時系列を示す。(a)の超音波風速・温度計による気温変動には10秒弱の比較的短い周期の変動が見られるが、(b)のサーモグラフィーによる植生の温度変動では30秒強の比較的長い周期の変動が顕著で、10秒弱の変動は弱い。この理由として小さな組織渦と大きな組織渦が階層的に存在していることが考えられ、小さな渦の通過は超音波風速・温度計により測定可能であるが、小さな渦にはアシの葉、茎の温度変化が追従できず、サーモグラフィー画像には小さな周期の組織渦の影響が反映されなかったと考えられる。周期10秒弱の変動については式(2)から周期が8.3秒であることからせん断不安定によるものであると考えられるが、約30秒の変動についてはその原因は現在の所、不明である。(c)のアシ頂部の風下方向変位は、超音波風速・温度計とサーモグラフィーの両方で測定される大きな組織渦の通過にほぼ追従している。高温域ではアシの変位はほぼ0であるが、スイープに伴い、上空の冷たい大気がアシに向かって吹きおろされている時間帯ではアシは風下方向に大きく変位している。

組織渦の移流速度が3m/s程度であることから、30秒強の周期で伝わる組織渦は移流方向に90m程度の大きさであり、10秒弱の組織渦は20m程度の大きさであると想像される。

#### 4. 結論

本研究ではアシ原での観測結果から微気象を把握し、流速場及び熱・物質の交換機構を確認し、更に組織渦の平面二次元構造を推測した。以下に得られた結論を述べる。

1)風速、気温、炭酸ガス、水蒸気の各変動を測定することにより、植生場では熱・物質(炭酸ガスを除く)の交換が組織渦に強く支配されていることが明らかとなった。上昇流によって植生層内から外の大気に向かって輸送される顕熱、水蒸気は風速変動とは若干の位相の遅れを伴う。大気から植生層内へ輸送される炭酸ガスについては、本観測では風速変動との相関は見られなかった。

2)アシ原の熱画像から植生場に発生する大規模組織渦は、ローラー渦とリブ構造を持つ縦渦が組み合わさった構造を有していることが推測された。さらに、本観測地の植生場に発生する組織渦は、約8秒周期の比較的小さなものと約30秒弱周期の比較的大きなものが階層的に組み合わさり伝播していくことがわかった。

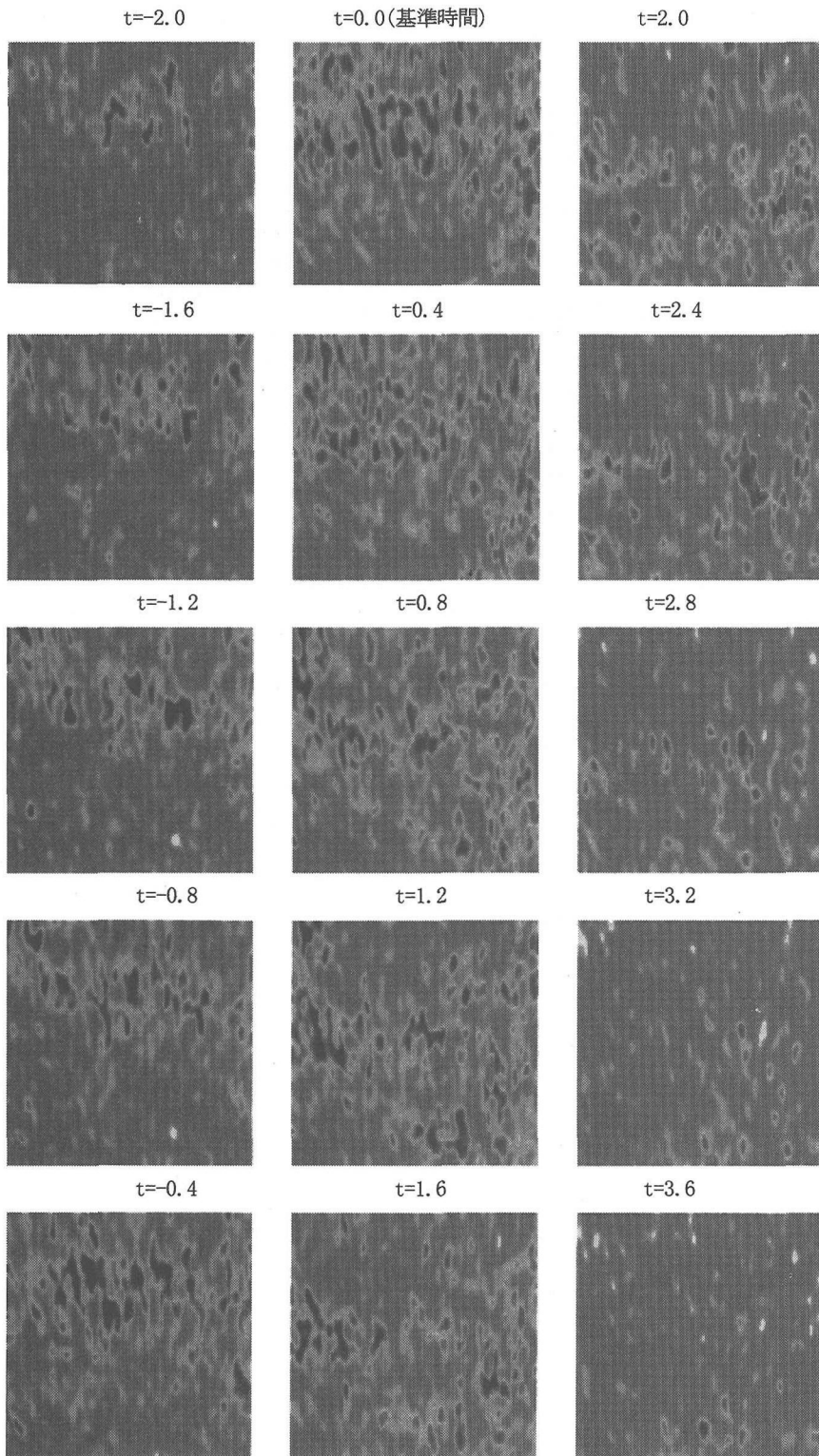


図-16 平面空間温度分布の時間変化 (時間の単位は秒)



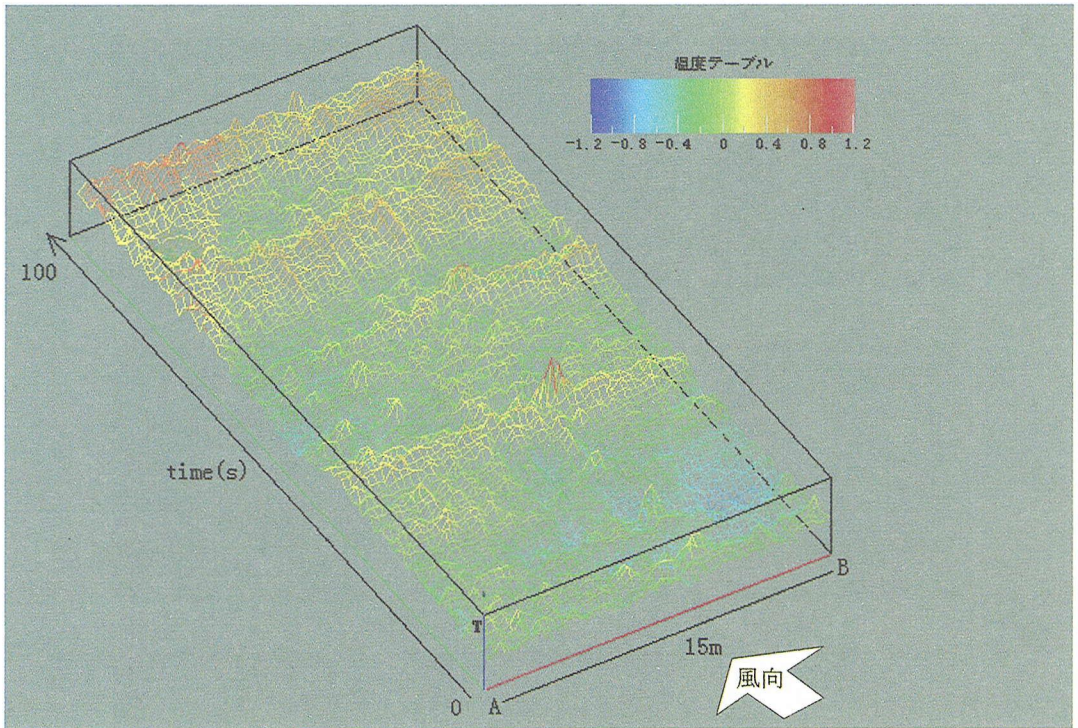


図-17 A-B測線上の植生温度の時間変動

謝辞：野外観測に際しては、東京工業大学水工研の職員・学生の援助を得た。また、本研究は文部省科学研究費（基盤研究 A2, 07555451）の補助を受けて行われたものである。記して謝意を示します。

参考文献

- 1)池田駿介, 館健一郎：スペクトル応答解析による穂波の成因に関する研究, 土木学会論文集, 539号, pp.43-52, 1996.
- 2)村上智美, 原菌芳信, 川村隆一, 西沢利栄：気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用 2. 植物の揺らぎと群落上の乱流輸送特性への影響, 筑波大学水理実験センター報告, 14号, pp.15-29, 1990.
- 3)Gao, W., Shaw, R.H.and Pawu, K.T.: Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 47, pp. 349-377, 1989.
- 4)孟岩, 老川進：都市キャノピー近傍における組織的乱流運動, ながれ, 第14巻, pp.233-244, 1995.
- 5)池田駿介, 金沢稔, 太田賢一：可撓性を有する沈水性植生層上の流れ及び組織渦の三次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, 515号, pp.33-43, 1995.

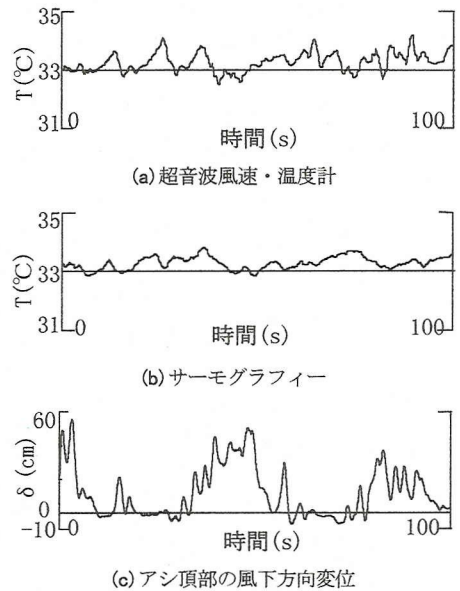


図-18 超音波風速・温度計, サーモグラフィーによる同一地点での温度変動の比較及びアシ頂部の風下方向変位

- 6) Kanda, M. and Hino, M.: Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.68, pp.237-257, 1994.
- 7) 池田駿介, 館健一郎, 山田知裕: 現地観測に基づく植生場の乱流構造特性と運動量・顕熱輸送に関する研究, 水文・水資源学会誌, 9号, pp.520-527, 1996.
- 8) 小杉緑子: 気孔コンダクタンスの計測とモデリング, 水文・水資源学会誌, 9号, pp.221-230, 1995.
- 9) 池田駿介, 館健一郎, 山田知裕: 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, 551号, pp.11-20, 1996.
- 10) Ho, C. M. and Huerre, P.: Perturbed free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.16, pp.365-424, 1984.

(1997.4.10 受付)

## AN OBSERVATION ON TURBULENT FLOW AND TRANSPORTS OF HEAT AND SUBSTANCES AT REED FIELD

Syunsuke IKEDA, Tomohiro YAMADA and Takashi SUGIMOTO

A field observation was conducted at a reed field which locates near the mouth of Tama river in 1996 summer, in which structure of turbulent flow, transports of heat, momentum and substances were measured. The structure of organized vortex above reed canopy were observed by ultrasonic anemometer, infrared CO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O meter and thermography. The vortices were observed to be composed of sweep and ejection, and the temporal variation of sensible heat showed ramp pattern. Transports of heat, fluid momentum and vapour are found to be closely correlated with organized vortices. 2D-horizontal structure of vortices was detected by thermography.