

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

池田駿介¹・舘健一郎²・山田知裕³

¹正会員 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二丁目12-1)

²正会員 建設省土木研究所研究員

³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

アシ原において現地観測を行い、アシの振動と風速変動、運動量フラックス、気温変動等を測定した。その結果、穂波は大きな運動量輸送(スウィープ)と同時に発生しており、その成因が流れの変曲点不安定に起因する組織渦の通過であることが確認された。また、アシの振動のスペクトルは穂波の周波数にピークを持ち、高周波域では急速に減衰する形状を有していた。実植生の形状を考慮した植生の振動方程式を用いて不規則応答解析を行った結果、アシの振動のスペクトルとスペクトル解析から求められるスペクトルが関係付けられた。

Key Words : honami, field observation, spectral analysis, shear instability, organized vortex

1. 緒言

稲穂などの可撓性を有する植生層上を風が吹くとき、植生の変形が波状となって下流側に伝播していく現象がみられる。この現象は「穂波」といわれており、植生層の境界に流速の変曲点が存在することに起因する変曲点不安定によって周期的組織渦が発生し、その通過に伴って引き起こされる植生の変形がその実体であると考えられている¹⁾。

前報²⁾において、著者らは模擬植生を用いて風洞実験を行い、そのデータを用いて不規則応答解析を行った。その結果、植生の振動スペクトルと主風速の変動スペクトルが関係付けられ、植生振動のパワースペクトル密度が最大値をとる周波数は植生の固有振動数と一致し、穂波の周波数と必ずしも一致しないことが判明した。さらに卓越周波数の比較により、穂波の原因は変曲点不安定によって植生境界に発生する組織渦の通過であることが結論付けられた。しかし実験に使用した模擬植生はナイロンブリッスルであり、その形状は軸方向に一樣な円柱であって、理想化された条件下での結論である。

以上のように、理想化された実験においては植生

の振動の機構、穂波と植生の固有振動の関係等が把握されたが、本来穂波は実際の自然環境の中で起こる現象であり、植生の揺れのメカニズムを正確に把握するためには野外観測により実際の植物を対象として検討を行うことが必要である。穂波現象が見られる稲、麦、アシなどの植生は茎、穂、葉を持つ複雑な形状をしており、単純な模擬植生とは振動の仕方に違いがあると考えられる。さらに自然風であることから、植生の振動を引き起こす風の乱流構造にも風洞流れとは違いがあるはずである。従って、実際の植生の振動は模擬植生の振動と違った形となると考えられる。例えば、秋期の稲田などでは穂が実ることで植生上部が重くなり、大きな穂波が発生するようになることが知られている。

現地の植生の振動(および植生層内外の流れ)を取り扱った観測としては、米谷ら³⁾による歪みゲージを用いた小麦の揺れの測定がある。その結果によると小麦の揺れのスペクトルには固有振動と穂波の周波数に相当する2つのピークがみられた。また、村上ら⁴⁾は水稻とアカマツについて植物の揺らぎと風速や運動量、熱、H₂O、CO₂フラックスとの関係を調べている。しかし、実際の植生の振動スペ

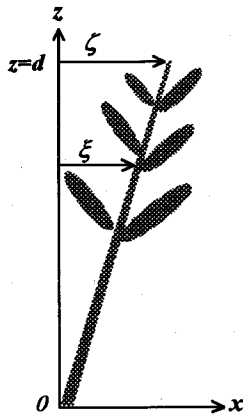


図-1 植生の変位と座標系

クトルと風速スペクトルの関係を理論的に解明した例はなく、従って模擬植生によって得られた結果が果たして実際の植生に適用しうるかという確証はない。

以上の理由により、ここでは実際の植生（アシ）に関して現地観測を行い、不規則応答解析を行う。そして風洞実験及び解析で得られた結果の妥当性を確認するとともに、実験と現地でみられた現象の相違点を検証する。植生の振動の方程式を立てるに当たっては、現地で植生を採集、計測を行うことにより方程式上で必要となる諸パラメータの値を得る。

2. 植生の振動方程式の導出と不規則応答解析

植生（アシ）の運動方程式を立てる際に、植生の形状が複雑であることからいくつかの点が問題となる。葉の存在は風に対して抵抗として働くため、それによって植生に加わる力を見積もらなければならない。また、葉はそれ自身が重さを持つため、植生の慣性にも影響する。それぞれの葉は茎に一点で付いているので、葉の効果はその付け根一点を介して茎に伝わる。つまり葉によって茎に与えられる力は離散的な集中荷重である。しかし茎に付いている葉の枚数と位置は個々の植生によって違ううえ、葉自身が振動することによって風から得たエネルギーが減衰することも考えられるため、個々の葉から茎に伝わる力を見積もるのは難しい。したがって個々の葉について考慮した扱いをすることは非常に困難であり、方程式を立てるに当たっては、葉の扱いについて何らかの近似を用いなければならない。

ここでは植生の葉面積密度を用いて葉による抵抗

を表わし、葉の重さは付け根の位置周辺の茎に含めて考えることとする。そうすることにより個々の葉を方程式で記述する必要がなくなる。このような葉面積密度を用いた葉の抵抗の見積もりは、気象の分野において植生キャノピー内の流れに働く抵抗を記述する場合に用いられている⁹⁾。また茎の直径、曲げ剛性、振動の減衰定数等の高さによる違いも考慮されねばならないが、曲げ剛性、減衰定数を高さ毎に把握するのは困難である。したがってそれらの値に関しては、全高さで一様と近似する。

植生の運動方程式を導くに当たって、座標系を以下のようにとる。静止状態の直立している植生の中心軸を鉛直z軸、これから水平方向への座標をx軸とする（図-1）。このとき、運動方程式は次式となる。

$$m \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + C_1 \frac{\partial \xi}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial z^4} = \left(\frac{1}{2} \rho C_D b + \rho C_m \frac{S}{N} \right) |u - \frac{\partial \xi}{\partial t}| \left(u - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) + mg \frac{\partial \xi}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 $m(z)$ は単位長さ当り質量、 $\xi(z)$ は葉を含む水平方向変位、 $u(z)$ はx方向風速、 $b(z)$ は植生の直径、 $S(z)$ は葉面積密度であり、これらの物理量に関してはz方向の分布を考慮する。 C_1 は減衰定数、 EI は曲げ剛性、 C_D は円柱（茎）の抵抗係数、 C_m は葉面抵抗係数、 N は密度度であり、これらの諸量は高さによらず一様とする。葉面積密度は通常単位容積に定める葉面積の総計 $S(m^3/m^3)$ で表されるが、個々で必要なのは1本の植生に関する葉面積密度である。従ってそれを密度度 N (本/ m^3)で割り、 $SN(m^2/m^3)$ とすることで植生1本当りの葉面積密度を表す。また、 ρ は空気密度、 g は重力加速度、 t は時間である。式(1)中、左辺第1項は慣性項、第2項は減衰、第3項は剛性による復元力を表し、右辺第1項は流体抵抗、第2項は重力項である。流体抵抗のうち、茎によるものは円柱の抵抗係数を用いて、葉によるものは1本当りの葉面積密度を用いて表している。

前報²⁾と同様に風速は十分大きいと仮定し、 $u - \partial \xi / \partial t$ を正として、

$$\left| u - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right| \left(u - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) = \left(u - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^2 \quad (2)$$

とおく。植生頂部の水平変位を ζ とし、 z の高さにおける変位は、式(1)の左辺第3項を除いて $\xi = (z/d)\zeta$ と線形近似できるものとする。ただし d は植生の高さ、 ζ は植生頂部の変位である。また、植生層内の u につ

いては、

$$u(z) = u_b \exp \alpha(z-d) \quad (3)$$

と置く⁶⁾。ここに u_b は植生上端の風速、 α は係数であり、植生層中の風速通減を表すパラメータである。以上の仮定の下に式(1)を $z=0$ から d まで積分すると以下の式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{d} \int_0^d m z dz \frac{d^2 \zeta}{dt^2} + \frac{1}{2} C_{1d} \frac{d\zeta}{dt} \\ & + \frac{24EI\alpha^3 (e^{2\alpha d} - 1)}{e^{2\alpha d} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} \zeta \\ = & u_b^2 \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_{Db} + C_m \frac{S}{N} \right) e^{2\alpha(z-d)} dz \\ & + \frac{2}{d} u_b \frac{d\zeta}{dt} \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_{Db} + \rho C_m \frac{S}{N} \right) z e^{\alpha(z-d)} dz \\ & + \frac{1}{d^2} \left(\frac{d\zeta}{dt} \right)^2 \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_{Db} + \rho C_m \frac{S}{N} \right) z^2 dz \\ & + \frac{g}{d} \zeta \int_0^d m z dz \end{aligned} \quad (4)$$

ただし式(4)を導くに当たって、式(1)中で植生の剛性による復元力を表す左辺第3項の積分は以下のように取り扱われている。この項は、植生の変位分布によって決定されるが、上述の線形近似を行った場合には0となってしまう。したがって、何らかの植生の変位分布の仮定が必要となる。ここでは荷重分布として柱体の各高さに風速の2乗に比例するような力が作用した場合を仮定する。なぜならば植生を変形させる力としては風速による抗力が支配的と考えられるからである。この仮定を用いた場合、植生層内の風速分布は式(3)となることから、指数分布の荷重が加わったときの変位分布を仮定することとなる。したがって剛性による復元力は

$$EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial z^4} = P e^{2\alpha z} \quad (5)$$

と置ける。式(3)の中での u_b 、 d などは全て P の中に含まれる。上式を積分すると植生の変位分布は

$$\begin{aligned} \xi(z) & = \frac{P}{48EI\alpha^4} [3e^{2\alpha z} - e^{2\alpha d} (4\alpha^3 z^3 - 12\alpha^2 z^2 + 6\alpha z^2) - 6\alpha z - 3] \end{aligned} \quad (6)$$

となる。式(6)は式(1)の右辺第2項で表される重力項を流体力と比較して十分小さいとした場合の定常

解に相当する。上式に $z=d$ を代入し、 P を植生頂部の変位 ζ で表すように変形すると

$$P = \frac{48EI\alpha^4}{e^{2\alpha d} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} \zeta \quad (7)$$

となる。したがって、式(1)の左辺第3項の積分は

$$\begin{aligned} & \int_0^d EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial z^4} = \int_0^d P e^{2\alpha z} dz \\ & = \int_0^d \frac{48EI\alpha^4}{e^{2\alpha d} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} \zeta e^{2\alpha z} dz \\ & = \frac{24EI\alpha^3 (e^{2\alpha d} - 1)}{e^{2\alpha d} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} \zeta \end{aligned} \quad (8)$$

となる。この項は式(4)の左辺第3項に現れている。次に u_b 、 ζ を時間平均値とその変動成分に分け、 $u_b = U_b + u_b'$ 、 $\zeta = Z + \zeta'$ (U_b 、 Z は平均値、 u_b' 、 ζ' は変動成分)とおくと、式(4)は

$$\begin{aligned} & \frac{1}{d} \frac{d^2 \zeta'}{dt^2} \int_0^d m z dz + \frac{1}{2} C_{1d} \frac{d\zeta'}{dt} \\ & + \frac{24EI\alpha^3 (e^{2\alpha d} - 1)}{e^{2\alpha d} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} (Z + \zeta') \\ = & (U_b^2 + 2U_b u_b') \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_{Db} + \rho C_m \frac{S}{N} \right) e^{2\alpha(z-d)} dz \\ & + \frac{2}{d} U_b \frac{d\zeta'}{dt} \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_{Db} + \rho C_m \frac{S}{N} \right) z e^{\alpha(z-d)} dz \\ & + \frac{g}{d} (Z + \zeta') \int_0^d m z dz \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ここで u_b' 、 ζ' の二乗の項は高次項として省略し、線形近似を行っている。植生層内の風速変動に関しても、式(3)のような指数分布のしぼりを入れる形となっているが、大規模渦構造の特性により植生上端の風速変動 u_b' に対応して植生層内でも風速変動が連動している⁷⁾、このしぼりは妥当であると考えられる。上式の時間平均をとると、変動成分の時間平均は0であるので以下の平衡状態の式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{24EI\alpha^3 (e^{2\alpha d} - 1)}{e^{2\alpha d} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} Z \\ = & U_b^2 \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_{Db} + \rho C_m \frac{S}{N} \right) e^{2\alpha(z-d)} dz \\ & + \frac{g}{d} Z \int_0^d m z dz \end{aligned} \quad (10)$$

表-1 アシの物性値

密生度 N (本/ m^2)	185	
長さ (m)	2.70	
直径 b (m)	高さ 10cm	7.31×10^{-3}
	高さ 50cm	6.70×10^{-3}
	高さ 100cm	6.81×10^{-3}
	高さ 150cm	6.61×10^{-3}
	高さ 200cm	6.44×10^{-3}
	高さ 250cm	5.75×10^{-3}
単位長さ質量 m (kg/m)	高さ 0~30cm	2.86×10^{-2}
	高さ 30~60cm	2.35×10^{-2}
	高さ 60~90cm	2.13×10^{-2}
	高さ 90~120cm	2.36×10^{-2}
	高さ 120~150cm	2.61×10^{-2}
	高さ 150~180cm	2.88×10^{-2}
	高さ 180~210cm	3.88×10^{-2}
	高さ 210~240cm	4.23×10^{-2}
高さ 240~270cm	2.44×10^{-2}	
1本当りの葉面積密度 S/N (m^2/m)	高さ 0~30cm	0
	高さ 30~60cm	0
	高さ 60~90cm	0
	高さ 90~120cm	0
	高さ 120~150cm	1.1015×10^{-2}
	高さ 150~180cm	1.2016×10^{-2}
	高さ 180~210cm	5.8722×10^{-2}
	高さ 210~240cm	9.7966×10^{-2}
高さ 240~270cm	1.1480×10^{-1}	
固有周期 (s)	3.93	

式(9), (10)から植生頂の変動成分 ζ' に関する運動方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{d} \frac{d^2 \zeta'}{dt^2} \int_0^d m z dz + \frac{1}{2} C_1 d \frac{d \zeta'}{dt} \\
 & + \frac{24EI\alpha^3 (e^{2ad} - 1)}{e^{2ad} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} \zeta' \\
 & = 2U_b u_b' \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_D b + \rho C_m \frac{S}{N} \right) e^{2\alpha(z-d)} dz \\
 & + \frac{2}{d} U_b \frac{d \zeta'}{dt} \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_D b + \rho C_m \frac{S}{N} \right) z e^{\alpha(z-d)} dz \\
 & + \frac{g}{d} \zeta' \int_0^d m z dz
 \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)を簡単のため以下のようにおく。

表-2 曲げ剛性EI

サンプルNo.	1		2		3	
荷重位置 (cm)	180	100	180	100	180	100
平均 EI (kgcm ³ /s ²)	1.22	1.05	1.88	1.98	0.89	1.18

$$M_1 \frac{d^2 \zeta'}{dt^2} + M_2 \frac{d \zeta'}{dt} + M_3 \zeta' = M_4 u_b' \tag{12}$$

ここに,

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \frac{1}{d} \int_0^d m z dz \\
 M_2 &= \frac{1}{2} C_1 d - \frac{2}{d} U_b \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_D b + \rho C_m \frac{S}{N} \right) z e^{\alpha(z-d)} dz \\
 M_3 &= \frac{24EI\alpha^3 (e^{2ad} - 1)}{e^{2ad} (3 - 6\alpha^2 d^2 + 8\alpha^3 d^3) - 6\alpha d - 3} - \frac{g}{d} \int_0^d m z dz \\
 M_4 &= 2U_b \int_0^d \left(\frac{1}{2} \rho C_D b + \rho C_m \frac{S}{N} \right) e^{2\alpha(z-d)} dz
 \end{aligned} \tag{13}$$

である。

式(12)を用いて不規則応答解析を行うことにより、植生頂変位のパワースペクトル密度と流速の変動のパワースペクトル密度の関係を表す以下の式を得る(応答解析の過程は文献2), 8)と同じであるので省略する)

$$S_{\zeta \zeta'}(\omega) = \frac{M_4^2}{(-M_1 \omega^2 + M_3)^2 + (M_2 \omega)^2} S_{u u'}(\omega) \tag{14}$$

ここに、 ω は角周波数、 $S_{\zeta \zeta'}(\omega)$ は植生頂変位のパワースペクトル密度、 $S_{u u'}(\omega)$ は植生層頂部での流速の変動のパワースペクトル密度である。

なお、 $M_1 \sim M_4$ を求めるに当って必要となる諸パラメータの値は現地で実測した値を用いた。z方向の変化を考慮すべきものに関しては、長さ30cm毎の平均値(表-1, 図-2~4)を用いた。

3. 観測の概要

観測を行ったのは東京都大田区羽田の多摩川河口部右岸に広がるアシ原である(写真-1)。このアシ原の広さは東西に約500m, 南北に約200mであり、観測当日(1995.8.7)の風向は南北方向に卓越していた。アシの頂部の高さは静止した状態で2.2~2.6m程度であった。測定はアシ原のほぼ中央

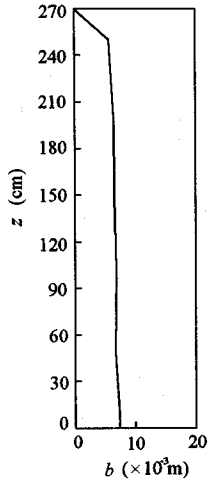


図-2 アシの直径

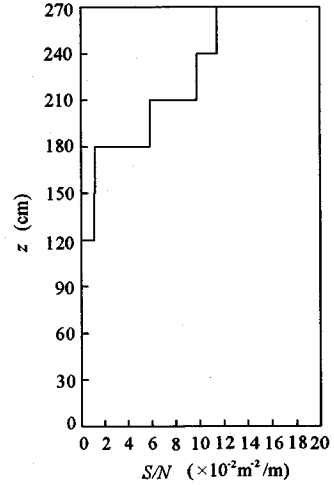


図-4 1本当りの葉面積密度

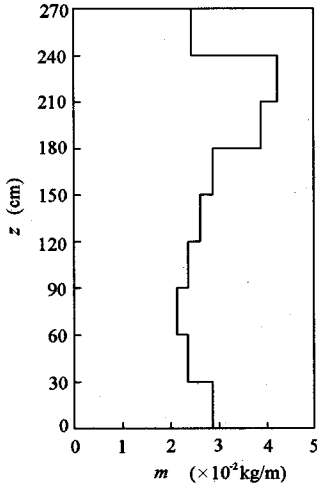


図-3 アシの単位長さ質量

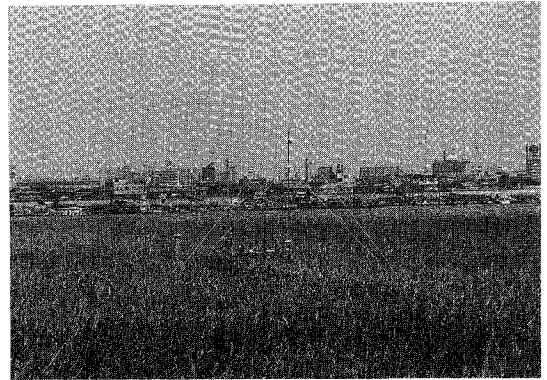


写真-1 観測地

部で半径5m程度の円形に刈り込んだ地点で行い、同時にアシ原内の放射収支、微気象観測も実施した。

アシの振動解析に関係する測定項目は以下のとおりである。高さ9mのポールに風速計を取り付け、風速の鉛直分布(1分平均)を測定した。取り付け高さは8.5m, 6.5m, 5.5m, 4.5m(三杯式風速計, エイコー精器社製), 3.5m, 3m, 2.5m, 1.9m, 1.45m, 1.05m, 0.5m(熱線風速計, KANOMAX社製)であり、同時測定を行った。風速3成分及び気温の変動を1台の超音波風速温度計(カイジョー社製, WA(T)-395型)で測定した。この測定高さは2.6m, 測定周波数は本測定装置の性能上8Hzであり、南南西の風が主風速となる方向に設置した。また植生頂部の変

位(主風速方向)をビデオで撮影し、画像の読み取り(読み取りの精度は1cm)により測定した。その際同位置で定規を撮影することで画面上の変位と実際の変位を対応させた。この測定周波数は6Hzである。密生度、植生長さ、茎の直径、葉面積分布、高さ毎の総重量等の植生の物性値については、植生を採集(葉面積分布に関しては2本、それ以外は10本のサンプル)して計測し、その平均値をとることで求めた。また、植生の剛性については後に述べるような荷重-変位試験を現地で行い、測定した。

4. 測定結果および考察

(1) アシの物性値

直径 b は、ノギスを用いて6点の高さ(10, 50, 100, 150, 200, 250cm)における値を測定した。単

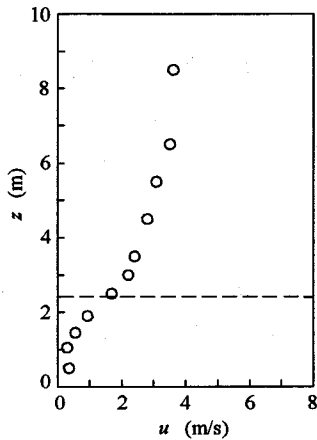


図-5 風速の鉛直分布 (点線は植生上端境界)

位長さ当りの質量 m 、1本当りの葉面積密度分布 SN は、アシを30cm毎の長さ部分に分割しそれぞれの部分毎の平均値を求めた。固有周期は、アシの自由振動をビデオで撮影し、その周期を読みとった。

単位長さ質量 m は電子天秤で重さを計測して求めた。このとき葉の質量は付け根の位置に含めた。なぜなら先に述べたように、葉の慣性力は全て付け根を介して茎に伝えられるからである。

1本当りの葉面積密度分布 SN は、サンプル植生に付いている葉の面積と付け根の位置を計測して求めた。葉は細長い形状をしており、ほとんどの葉は枝別れせず1枚ずつ茎に付着し、そこから斜め上方に伸びていた。そのため高さ毎の葉面積を求めるに際して1枚の葉をどの高さに含めるかが問題となるが、ここでも葉の全面積をその付け根の高さに含めて考えた。この理由は、葉の慣性力同様に葉に働く風の流体力も全て付け根を介して茎に伝わるからである。以上の方法により、本来離散的に及ぼされる茎への葉の効果を30cm毎の平均値とした。

図-2～図-4はそれぞれアシの直径 b 、単位長さ当りの質量 m 、1本当りの葉面積密度 SN の鉛直分布図である。アシの直径 b は根元から上に行くに従って細くなっていた。平均して根元から140cmまでは葉は付いておらず、茎だけであった。そのため0～120cmの1本当りの葉面積密度 SN は0となっている。表-1にこのようにして得られたアシの諸物性値を示す。

曲げ剛性 EI は直立したアシの一点に水平方向の集中荷重をかけたときの水平方向変位と荷重の関係から求めた。表-2はアシのサンプルと荷重位置を変えて計測し得られた EI であるが、結果にばらつきが大きく明確な値は求められなかった。減衰定数 C は、

それ自身の計測は困難であるので、式(11)から外力項を除いたアシの減衰自由振動方程式と固有周期の関係(固有周期は慣性項、復元力項、減衰項の係数で決まる⁹⁾)から計算した。

(2) 風速鉛直分布

観測当日午前中は風がそれほど強くなく、アシの揺れも小さかった、しかし午後2時過ぎ頃から比較的強い南風(風速3～4m/s)が吹き始め、アシを大きく揺らした。アシの変形は波のように風下に伝播し、いわゆる穂波現象が引き起こされていた。穂波は平面的にパッチ状に分布しており、主風速に対し横断方向にはそれぞれが10m程度のスケールを持っていた。図-5に15時30分前後30分平均の時間平均風速鉛直分布を示す。植生キャノピーの存在による風速の低減は、地表面から6.5m程度まで達している。植生層内の風速分布には変曲点がみられ、また、式(3)で表わされているような指数型分布に近い形状をとっている。

(3) 風速、運動量輸送、気温、アシの変位の変動

図-6～図-10はそれぞれ15時32分から2分間のアシの頂部変位の変動 ξ 、超音波風速計で計測された $z=2.6$ mでの主風速の変動 u' 、鉛直風速の変動 w' 、単位質量あたりの運動量輸送の変動 $-u'w'$ 、気温の変動 T' である。図中下向き矢印はいずれもアシの頂部の変位が極大値をとった瞬間の30秒までの3例を示しているが、図-9にみられるように同時に大きな運動量輸送(レイノルズ応力)が発生している。その内訳を図-7、8でみると、いずれの場合にも主風速の変動 $u' > 0$ 、鉛直風速の変動 $w' < 0$ となっており、いわゆるスウィープ運動に対応している。それぞれの直後には $u' < 0$ 、 $w' > 0$ のいわゆるイジェクション運動(上向き矢印)がみられるが、それらによる運動量輸送は比較的小さい。

温度変動に関しては、スウィープ時の急降下とイジェクション時の緩やかな上昇が確認される。この結果は、Gao et al.⁷⁾、孟ら¹⁰⁾によって報告されているランプ現象と一致している。ランプ現象とは、植生、都市などのキャノピー上の流れに見られる急激な温度降下と緩やかな温度上昇の繰り返しパターンであり、前者がスウィープによる上層の冷たい気塊の急激な下降、後者がイジェクションによる下層の暖かい気塊のゆっくりとした上昇によって引き起こされるとされる。それらはとりもなおさずキャノピー上の組織渦の通過を示しており、スウィープが渦の前面、イジェクションが渦の後面の

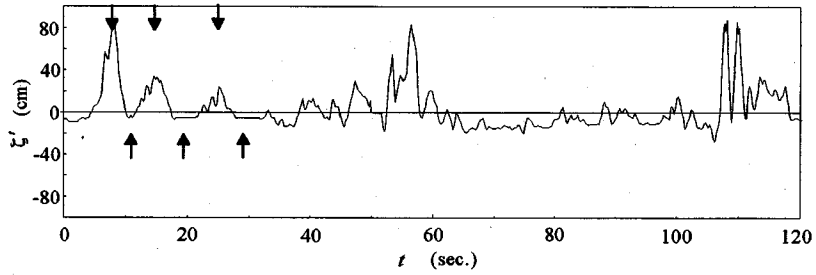


図-6 アシ頂部の変位変動(下向き, 上向き矢印はそれぞれスweep, イジェクションを表す.)

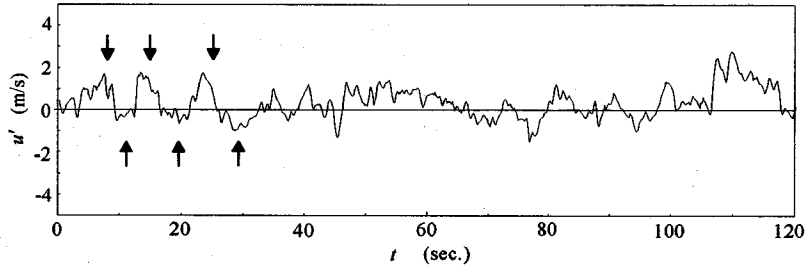


図-7 主風速変動 (z=2.6m)

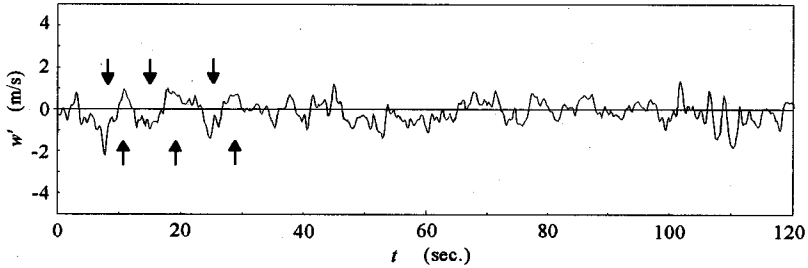


図-8 鉛直風速変動 (z=2.6m)

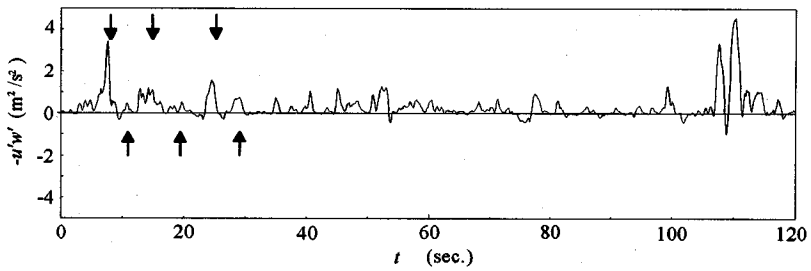


図-9 レイノルズ応力の変動 (z=2.6m)

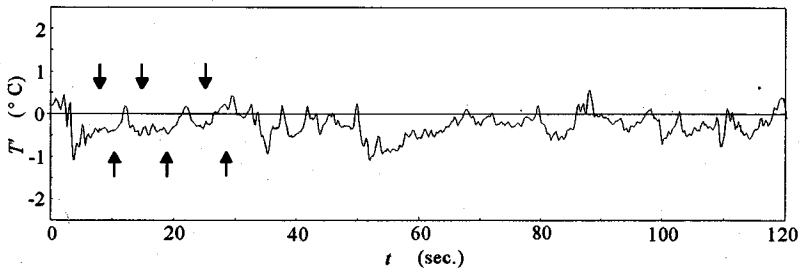


図-10 気温変動 (z=2.6m)

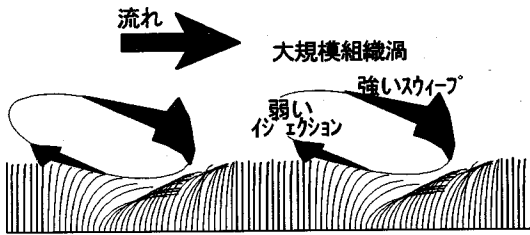


図-11 組織渦と穂波の概念図

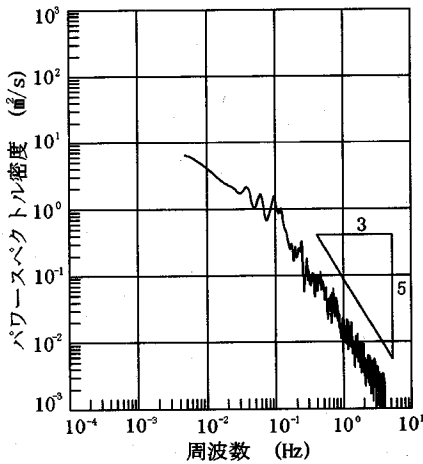


図-12 風速スペクトル ($z=2.6\text{m}$)

通過によるものであると指摘されている。上述のように、キャノピー層上においてはスウィープ運動がイジェクション運動より卓越している。反対に壁面乱流境界層上ではイジェクション運動がスウィープ運動より卓越していることを考えると、これはキャノピー層上特有の現象であり、両者間での乱流組織構造の違いを示しているといえる。

今回の観測では、同時のアシの変位の測定により組織渦の前面の通過がアシを大きくたわませている事が確認された。つまりアシの揺れ(穂波)が組織渦の通過により引き起こされている事が明確となった。図-11に穂波の概念図を示す。グラフから読み取れる穂波の周期および渦の大略の発生周波数は0.1Hz強(周期10秒弱)である。

(4) 風速スペクトル

図-12に超音波風速計で測定した高さ2.6mでの主風速変動からFFT(高速フーリエ変換)により求めた風速スペクトルを示す。用いたデータは15時32分から約17分間(データ数8192)である。0.2Hz以上の高周波域ではKolmogorovの $-5/3$ 乗則に一致して

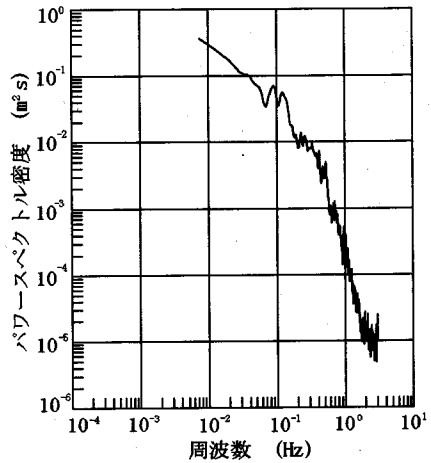


図-13 アシの振動スペクトル(実測)

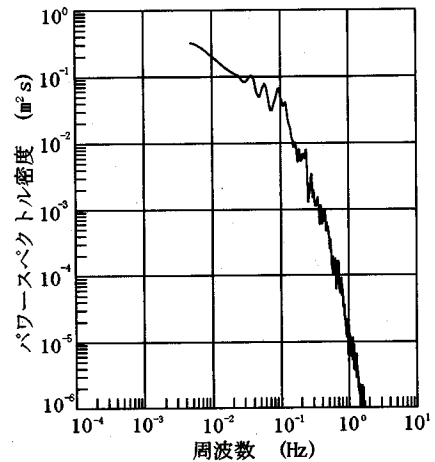


図-14 アシの振動スペクトル(計算)

いる。スペクトルのピークの位置は0.04~0.1Hz(周期25~10秒)周辺にある。

(5) アシの測定振動スペクトル

図-13にアシ上端の変位データから求めたアシの振動スペクトルを示す。用いたデータは15時32分から15時43分(データ数4096)のものである。スペクトルのピークの位置は周波数約0.1Hz(周期約10秒)前後にみられる。これは比較的大きなアシの揺れの周期に対応すると考えられ、穂波の周期と比べてよい。それより高周波側のスペクトルは急激に減衰(約4乗)しているが、アシの固有振動数0.25Hz(周期3.93秒)の周辺で僅かに凸となっている。

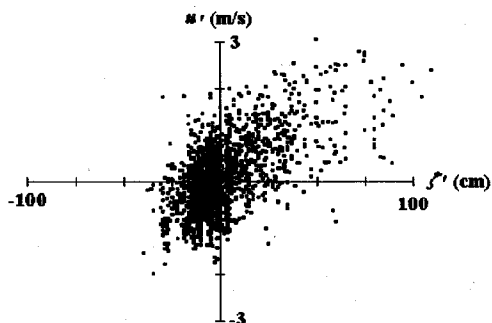


図-15 アシの変位変動と主風速変動の相関

(6) 穂波の周期

Ho & Huerre¹¹⁾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最大発達率を示す周波数 f は以下の式で求められる。

$$\frac{f\theta}{U_m} = 0.032 \quad (15)$$

ここに、 θ は流速分布の持つ運動量厚さ、 U_m はせん断層上下2境界における流速の平均値である。上式に15時30分の測定値 ($\theta=1.00\text{m}$, $U_m=1.81\text{m/s}$)を代入した結果、卓越周波数(周期)は 0.0588Hz (17.3秒)となった。今まで述べた様々な観測結果による穂波(組織渦)の発生周期と比較するとオーダ的に一致しており、風穂波の成因が変曲点不安定により発生する組織渦の通過であることが、風洞実験で得られた結果²⁾と同様確認された。

(7) 不規則応答解析

前述したアシの振動方程式に実測のアシの物性値を代入し、超音波風速計で測定した風速変動のスペクトルを用いて不規則応答解析を行った。

アシを採集して計測した平均のアシの長さは 2.70m であったが、実際に生えているアシの頂部の位置は $2.2\sim 2.6\text{m}$ 程度であった。この違いは、生えているアシは葉の重みで上部が傾いたりたわんだりしていることが原因である。この問題を解決するため、アシの高さ d を 2.4m とし、方程式に代入する際に長さに関係する値は全て $2.4/2.7$ 倍した。

植生内風速分布の式(3)の係数 α は測定した風速鉛直分布から求めた値 0.877 を用いた。また式では風速として植生境界($z=d$)での風速 u_b を用いているが、観測で測定した風速は $z=2.6\text{m}$ での値である。そこで、測定風速を植生上端境界での風速に変換するため測定風速に 0.84 (式(3)から求まる風速 $u_{z=2.6}$

と $u_{z=d}$ の比)をかける操作を行った。

結果を図-14に示す。曲げ剛性 EI の値は $1.8(\text{kg}\cdot\text{m}^3/\text{s}^2)$ を用いた。この値と周期 $3.93(\text{s})$ から求められる減衰定数 C_1 は $1.29(\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s})$ であり、計算でもこの値を用いた。また、円柱の抵抗係数 C_D は 1.0 、葉面抵抗係数 C_m の値は 0.5 ⁵⁾とした。スペクトルの形状はほぼ実測値に近い形となっている。実測値と比較して高周波域での減衰が大きいが、これは理論値は基本の1次振動モードのみを考えているのに対し、実測値では植生の先端部の細い部分による細かい振動モードも含まれているためであると考えられる。図-12の風速変動スペクトルにはかなりのノイズがみられるが、式(14)を用いて計算されたアシ頂部の振動スペクトルはノイズが比較的小さい。これは高周波域の勾配が急になったためノイズが目立たなくなったことが原因である。風洞実験で得られた模擬植生の振動のスペクトル形²⁾と比較すると、模擬植生では固有振動数での振動が支配的であり、固有振動数の位置で大きなエネルギーのピークがみられたのに対し、アシの場合には固有振動の位置にそれほどはっきりとしたピークは現れない。この理由は、用いた模擬植生は曲げ剛性による復元力の寄与が流れによって与えられる流体力の寄与よりも相対的に大きいため、固有振動のモードで比較的強く振動したのに対し、アシは相対的に曲げ剛性が小さいため、スペクトル形状が風速変動により強く支配されたためである。

図-15はアシの変位変動 δ と主風速変動 u' の実測値の四象元解析の結果である。これらの間には正の相関があることが分かる。両者の相関係数は 0.62 である。このことはアシが風速変動に追従して振動していたことを如実に表しており、模擬植生のように固有振動モードが強い場合、植生は風速変動と独立に振動するため風速変動と植生変位変動の相関は低くなることが予想される。また、 $u' > 0$ のときに大きなたわみが存在しており、風下方向に大きく揺れる穂波独特の現象は前にも述べたようにスウィープ時に生じていることがわかる。

村上ら⁴⁾の観測によると、水稻の揺れの特徴には生育段階による違いがあることが知られている。出穂期の葉や稈が柔らかい段階には水平方向の風速変動に依存して揺れていたが、登熟期には稈が比較的堅くなり固有振動で揺れていた。刈り取り直前には穂が重く垂れ下がり根元から水稻全体が揺らぎ穂波が発生していた。このように植生の構造の違いによって揺れ方に違いがあるが、今回得られた風洞実験と現地観測による植生の振動スペクトルの差はこ

のことを端的に表していると考えられる。

5. 結論

以下に本論文の主要な結論を述べる。

- 1) 現地観測によりアシの振動スペクトルを求めた結果、穂波の周期にピークを持ち高周波域で急激に減衰する形状を示していた。また、著者ら²⁾の測定による模擬植生の振動スペクトルと異なり、実植生の固有振動数では大きなピークはみられなかった。この理由は、模擬植生に比べ、実植生では流れによって与えられる流体力の寄与が曲げ剛性による復元力の寄与よりも相対的に大きいからである。
- 2) 実植物の形状を考慮した振動モデルを導入し、アシについて不規則応答解析を行った。その結果、風速変動スペクトルとアシの振動スペクトルを関係付けることができた。
- 3) 植生の大きな変位(穂波)の発生はスウィープ現象と同時に起こっており、穂波は植生層上に発生する組織渦の前面の通過に伴うものであるといえる。穂波の周波数が、線形理論による変曲点不安定によって発生する組織渦の卓越周波数にオーダー的に一致していることもこれを裏付けている。

本研究により、質量や葉面積が一樣でない植生についての不規則応答解析法が得られた。この方法は、他の植生、例えば森林、稲などに基本的に適用が可能であり、今後これらについても適用していく予定である。

謝辞：野外測定に際しては、建設省京浜工事事務所に便宜を図って頂き、東京工業大学工学部土木工学科水工研の職員ならびに学生諸氏の援助を受けた。また、本研究は文部省科学研究費(代表：池田駿介、課題番号：07555451)の補助を受けて行われたもの

である。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 池田駿介, 笹健一郎: 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.
- 3) 米谷俊彦, 瀬尾琢郎: 小麦畑における風速, 気圧変動と植物体の揺れの測定, 農業気象, Vol. 39(3), pp. 165-171, 1983.
- 4) 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.
- 5) 神田学, 日野幹雄: 大気-植生-土壌系モデル (NEO SPAM) による数値シミュレーション, 水文・水資源学会誌, 第3巻3号, pp. 37-46, 1990.
- 6) Finnigan, J.J. and Mulhearn, P.J.: Modelling waving crops in a wind tunnel, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 14, pp. 415-431, 1978.
- 7) 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.
- 8) 山坂昌成, 池田駿介: 乱れエネルギースペクトルを考慮した乱流中の球の沈降速度, 土木学会論文集, 417号, pp. 173-179, 1990.
- 9) 小坪清真: 土木振動学, 森北出版, pp. 37, 1992.
- 10) 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.
- 11) Ho, C.M. and Huerre, P.: Perturbed free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 16, pp. 365-424, 1984.

(1995. 11. 29 受付)

FIELD OBSERVATION AND SPECTRAL ANALYSIS ON HONAMI IN A REED FIELD Syunsuke IKEDA, Kenichiro TACHI and Tomohiro YAMADA

A field observation was performed in a reed field, measuring vibration of a reed, air velocity fluctuation, Reynolds stress, temperature fluctuation, etc.. It was found that the honami occurs simultaneously with large vertical Reynolds stress peaks, which confirms that the honami is induced by organized vortices generated by a shear instability of flow. Measured vibration spectrum of a reed has a peak corresponding to the frequency of honami, and it attenuates rapidly in the high frequency area. A spectral response function is derived based on a vibration equation regarding live reed. The predicted profile of spectrum for reed vibration agrees very well with the result of measured one.