

往復流下における柔軟な植生周りの流れに関する研究

田中厚至*・長岡 裕**・原 恒司***

1. はじめに

人工植生によって作られた海藻群落を一つの海洋透過性構造物とみなした場合、植生群落は波浪に対する抵抗機能を持つことから波浪の制御に有効であることが知られており(浅野ら, 1991; 萩原ら, 1997), また, 砂粒子の移動限界波高を増大させ、漂砂の堆積効果をもつことから、海岸侵食過程において重要な漂砂の制御に対する有効性が報告されている(辻本, 1992; 伊福ら, 1995; 小田ら, 1991)。

しかしながら、このような植生を利用した波浪および漂砂の制御には、①十分な波浪・漂砂の制御効果を得るためには広大な設置領域が必要である ②生物などの付着堆積固形物によって重量が増すと植生は容易に倒れてしまい、所期の機能を失う恐れがあるなどの問題点を有している。これらの問題点の解決には、揺動する植生群落と波動場の相互作用による複雑な流れ構造の解明が必要である。

植生周辺の流れ構造を決定する要因には様々なものがあるが、その中の一つとして、植生領域で発生する乱れに注目する。波動に起因する往復流により植生物質が揺動することで生じる乱れは付着堆積固形物の剝離を促し、植生領域で行われる乱れエネルギーの散逸は波高の減衰特性に影響を与えたと考えられる。

これらの背景に基づき、本研究では、植生領域で発生する乱れに着目し、波の性質、植生密度などの条件が流速の乱れ成分および乱れエネルギーの特性に与える影響を実験的に検討することで、疑似植生周りの流れ構造の解明を試みる。

2. 実験装置

(1) 実験水路

実験には、幅 0.6 m × 高さ 1.0 m × 長さ 26 m の図-1 に示すような造波水路を用いた。水路後部(岸側)には、反射波を抑えるための消波装置として約 3.9 m にわた

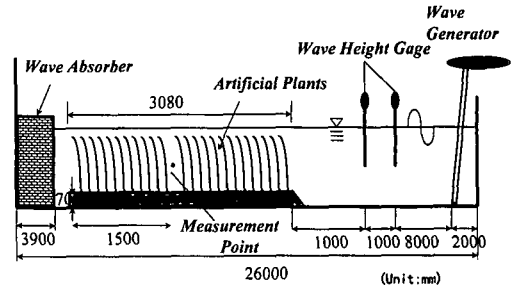


図-1 実験水路

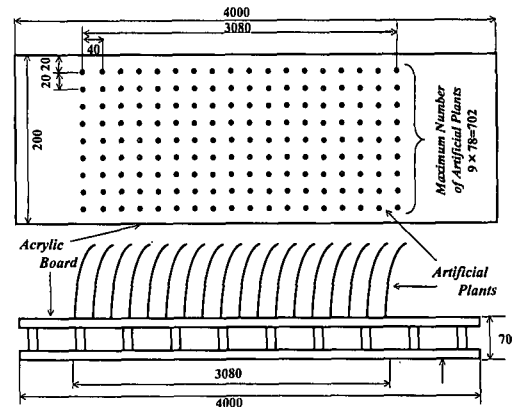


図-2 植生装置

り海草状のゴムを設置し、造波装置には造波板の周期と振幅の変化が可能なフラップ型造波装置を使用した。

また、水路上部(沖側)より約 10 m と 11 m の位置に 2 器の波高計センサーを設置し、容量式波高計による水面変動の時系列変化の記録から、入射波の波高、波長などの波動条件の算出を行った。

(2) 疑似植生

実験水路上部より約 12 m の位置より幅 0.2 m × 長さ 4.0 m × 高さ 7 cm の図-2 に示すような植生装置を水路内に設置した。植生範囲は 3.08 m であり、格子状配列(78 行 × 9 列)で、自由に植生本数を変化させることが出来る。

疑似植生には内径 4.0 mm, 外径 5.0 mm の剛性の異

* 正会員 工博 武蔵工業大学助手 工学部土木工学科
** 正会員 工博 武蔵工業大学助教授 工学部土木工学科
*** 工修 武蔵工業大学大学院 工学研究科(現川崎市水道局)

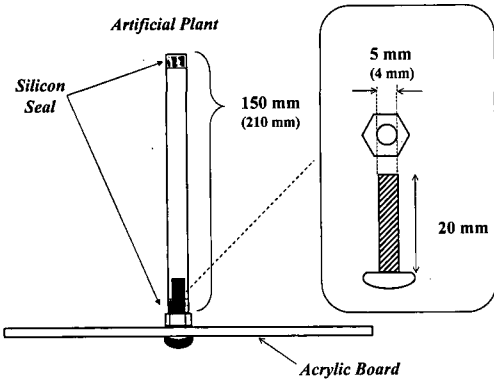


図-3 疑似植生

なるシリコンチューブ (ヤング率 $2.4 \times 10^6 \text{ Pa}$), ラバークューブ (ヤング率 $1.2 \times 10^6 \text{ Pa}$), アクリルパイプ (ヤング率 $1.5 \times 10^6 \text{ Pa}$) の 3 種類を使用した。図-3 に示すように、疑似植生と植生装置との接合部にはシリコンを塗布することで固定すると同時に接合部からの水の浸入を防ぎ、また、シリコンチューブとラバークューブの先端には、シリコンを充填することにより先端部からの水の浸入を防ぎ、チューブ内の空気により疑似植生が水中において直立するようにした。

3. 実験方法

(1) 実験条件

実験で使用した波動の水利条件と疑似植生の植生条件を表-1 に示す。植生密度 λ の定義は [疑似植生全表面積/植生範囲面積] である。

(2) 流速変動の測定

流速の測定には後方散乱型 2 次元レーザードップラー流速計を使用し、波動の進行方向および鉛直方向の流速成分を測定した。流速の測定周波数は 100 Hz, サンプリング数は 4096 とし、流速の経時変化を測定した。

測定位置は約 3.0 m にわたる植生範囲の中央部 (植生装置先端部より 2.5 m の位置) とし、疑似植生層内の流速変動を測定した。測定ポイントは水路底面より 10 mm 間隔とし、鉛直上方向に水面付近まで測定した。また、波動によって揺動する疑似植生がレーザードップラー流速計のレーザーを遮らないように測定ポイント周辺の疑似植生を取り除いた。

(3) 流速変動の波、乱れ成分の分離および乱れエネルギーの算出

流速変動を高速フーリエ変換法によりスペクトル解析し、フィルター法により、波動成分と乱れ成分とに分離した。フィルター法では、入射波の基本周波数の低周波領域における Harmonic peaks が途切れる周波数をカットオフ周波数とした。

表-1 実験条件

Case	A.V.	V.L. (cm)	D	λ	h (cm)	H (cm)	T (s)	C (cm/s)	L (cm)	h/L	H/L
1-1	Silicon tube	21	76×5	2.5	25	6.9	2.3	190	420	0.060	0.016
1-2						6.1	2.6	180	480	0.052	0.013
1-3						14	2.6	180	460	0.054	0.030
1-4						7.1	3.2	150	480	0.052	0.015
1-5						3.1	3.5	140	500	0.050	0.0061
2-1	Silicon tube	15	76×5	1.8	23	6.7	3.2	150	470	0.049	0.014
2-2						3.1	4.1	120	500	0.046	0.0062
2-3						11	2.3	230	530	0.043	0.020
2-4						2.5	4.2	130	520	0.044	0.0048
2-5						8.4	2.9	150	410	0.056	0.020
3-1	Silicon tube	15	76×9	3.2	23	3.6	3.2	190	600	0.038	0.0060
3-2						5.0	3.2	160	510	0.045	0.0097
3-3						7.1	3.0	150	460	0.050	0.015
3-4						12	2.3	150	340	0.068	0.034
3-5						3.8	2.2	150	330	0.070	0.012
3-6						7.3	2.1	140	280	0.082	0.026
3-7						11	2.0	230	470	0.049	0.023
3-8						2.4	3.5	200	680	0.034	0.0035
4-1						3.4	2.7	170	460	0.050	0.0073
4-2						2.1	3.7	200	740	0.031	0.0029
4-3	5.1	2.2	160	350	0.066	0.014					
4-4	4.9	2.9	190	530	0.043	0.0093					
4-5	6.8	2.1	130	280	0.082	0.024					
4-6	7.5	2.6	150	390	0.059	0.019					
4-7	8.5	2.1	140	300	0.077	0.028					
4-8	9.1	2.8	100	290	0.079	0.031					
4-9	11	2.0	240	480	0.048	0.023					
4-10	8.5	3.4	190	660	0.035	0.013					
5-1	Rubber tube	15	76×3	1.1	23	2.3	3.5	210	740	0.031	0.0031
5-2						4.7	2.5	160	390	0.059	0.012
5-3						5.3	2.8	150	420	0.055	0.013
5-4						7.1	2.6	160	420	0.055	0.017
5-5						8.9	3.0	160	470	0.049	0.019
5-6						11	2.1	220	470	0.049	0.024
6-1						3.4	3.1	130	400	0.058	0.0084
6-2						5.6	2.6	150	380	0.061	0.015
6-3						8.2	2.6	150	390	0.059	0.021
6-4						9.1	2.0	120	240	0.096	0.038
6-5	14	2.0	120	240	0.096	0.060					
6-6	11	3.0	140	420	0.055	0.025					
7-1	Acrylic pipe	15	76×9	3.2	23	3.6	3.4	170	570	0.040	0.0063
7-2						4.6	2.9	150	440	0.052	0.011
7-3						7.4	2.8	190	530	0.043	0.014
7-4						8.1	2.1	150	320	0.072	0.025
7-5						11	2.4	170	400	0.058	0.027
7-6						11	2.0	180	360	0.064	0.031
7-7						12	2.7	180	480	0.048	0.025

A.V.: 疑似植生, V.L.: 植生長さ (cm), D: 植生配置, λ : 植生密度, h: 水深 (cm), H: 波高 (cm), T: 周期 (s), C: 波速 (cm/s), L: 波長 (cm), h/L: 相対水深, H/L: 波形勾配

植生領域内部で発生する乱れの特徴を把握するために式 (1) を用いて乱れエネルギーの算出を試みた。レーザードップラー流速計による流速の測定は 2 次元であるために、奥行き方向の乱れ成分は算出できない。よって、本研究においては奥行き方向の乱れ成分は鉛直方向の乱れ成分と等しいと仮定した。

$$k = \frac{1}{2} (U_i^2 + V_i^2 + W_i^2) = \frac{1}{2} (U_i^2 + 2V_i^2) \dots \dots (1)$$

ここで、k: 乱れエネルギー, U_i : 水平方向乱れ成分, V_i : 鉛直方向乱れ成分, W_i : 奥行き方向乱れ成分 (= 鉛直方向乱れ成分) である。

波動成分, 乱れ成分および式 (1) より算出した乱れエネルギー空間分布状態の全体的な特徴を知るために式 (2) を用いて各成分の平滑化を行った。

$$\tilde{U}_N = \frac{1}{3} (U_{N-1} + U_N + U_{N+1}) \dots \dots (2)$$

ここで、 \tilde{U}_N : 平滑化後の成分値, U_N : 平滑化前の成分値

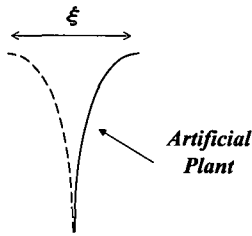


図-4 疑似植生の揺動

表-2 植生揺動の振幅

Case ξ (cm)	Case ξ (cm)	Case ξ (cm)	Case ξ (cm)	Case ξ (cm)	Case ξ (cm)	Case ξ (cm)	Case ξ (cm)
1-1 11	2-1 7.5	3-1 1.5	4-1 0.50	5-1 2.5	6-1 2.0		
1-2 7.0	2-2 2.5	3-2 2.0	4-2 1.5	5-2 3.0	6-2 2.0		
1-3 12	2-3 8.5	3-3 3.0	4-3 3.0	5-3 5.0	6-3 6.0		
1-4 8.0	2-4 1.0	3-4 4.5	4-4 1.5	5-4 5.0	6-4 9.0		
1-5 7.5	2-5 2.5	3-5 1.5	4-5 4.0	5-5 6.0	6-5 8.0		
3-6 4.0	4-6 4.5	5-6 10	6-6 13				
		3-7 6.0	4-7 7.0				
		3-8 1.0	4-8 5.0				
			4-9 5.0				
			4-10 5.5				

である。

4. 実験結果

(1) 観察結果

波動下における疑似植生先端の振幅 (図-4) を表-2 に示す。アクリルパイプを使用したケースにおいては、揺動は見られず、頂部の変位は観察されなかった。他の柔らかい素材を用いたケースにおいて植生は波の波形に沿うように揺動し、特に植生先端部においては、波高が大きくなると2次元的な横振動に加えて3次元的な植生の揺動が観察された。

トレーサーである白色水性修正液を投入し、植生層内の流れを観察した。植生内部領域において、トレーサーは植生密度の大きい実験条件ほど早く拡散するのが観察され、また、植生境界面付近においては岸向きに流れながら拡散していくのが観察された。

(2) 流速変動およびスペクトル解析結果

流速測定結果の一例として、Case 3-3 について、植生境界面 (底部から 13 cm) における流速変動の鉛直方向成分を図-5 に示す。植生境界面付近では、波動による変動と乱れによる変動が混在しているのが分かる。

Case 3-3 について、植生境界面における流速変動の鉛直成分をスペクトル解析した結果を図-6 に示す。5.8 Hz 以上の高周波領域ではスペクトルの勾配は全体的に $-5/3$ となっており、この現象は、一般的にいわれている慣性小領域のカスケード過程のエネルギー減衰率と一致している。このスペクトル分布の特性は、他の Case および他の測定ポイントについても共通であった。

(3) 流速変動の波動成分と乱れ成分

流速変動の成分分離結果の一例として Case 4-1~4-10

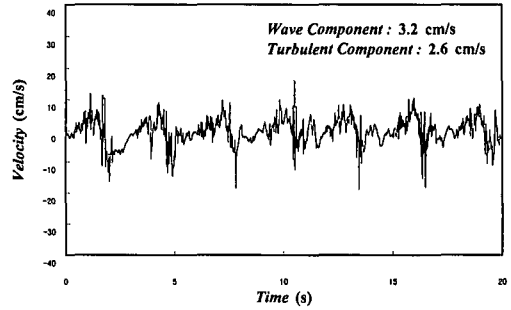


図-5 植生境界面における流速変動 (Case 3-3 鉛直成分, 底部から 13 cm)

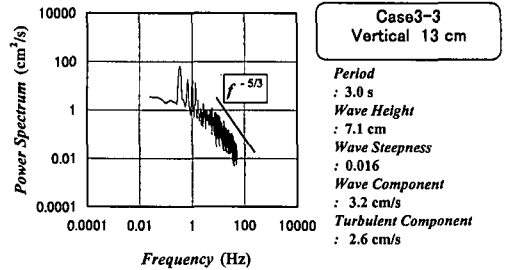


図-6 植生境界面における流速変動のワースペクトル (Case 3-3 鉛直成分, 底部から 13 cm)

における波動成分の鉛直方向成分分布図を図-7 に、水平方向成分分布図を図-8 に示し、乱れ成分の鉛直方向成分分布図を図-9 に、水平方向成分分布図を図-10 に示す。

水平方向の波動成分は、波高が大きい場合、植生境界面付近で分布形状に変化が見られる。これは、植生の流水抵抗により、水平方向の波動成分が減衰したためと考えられる。

鉛直方向の波動成分は水面に近づくにつれ増加しているのがわかる。植生境界面付近で分布形状にほとんど変化がないことから、鉛直方向の波動成分は、植生にほとんど影響を受けないと考えられる。

乱れ成分は、鉛直方向成分、水平方向成分ともに波高が大きいかほど乱れ成分も大きな値で分布し、乱れのピークは、両方向ともに植生境界面付近で現れる傾向が見られる。植生外部領域では、乱れ成分は小さな値で分布している。水平および鉛直方向の乱れ成分は、各ケースにおいて、ほとんど同様な分布形を示している。

(4) 乱れエネルギー

図-11~図-14 にシリコンチューブを疑似植生として用いた場合の乱れエネルギー分布図を示す。乱れ成分分布と同様に、ほとんどのケースにおいて乱れエネルギーのピークは植生境界面付近で現れており、植生外部領域では小さな値で分布している。また、波高が大きい

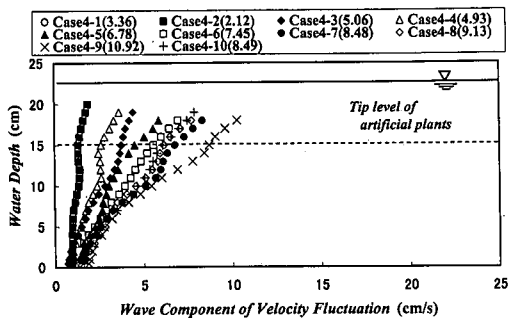


図-7 流速変動の波動成分 (Case 4-1~4-10 鉛直成分)

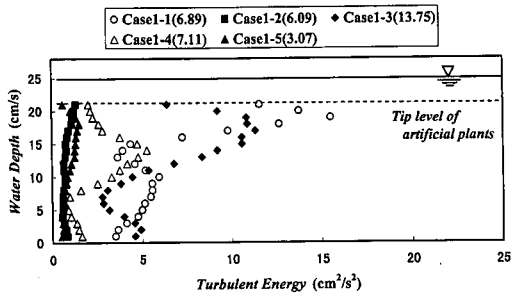


図-11 乱れエネルギー分布 (Case 1-1~1-5)

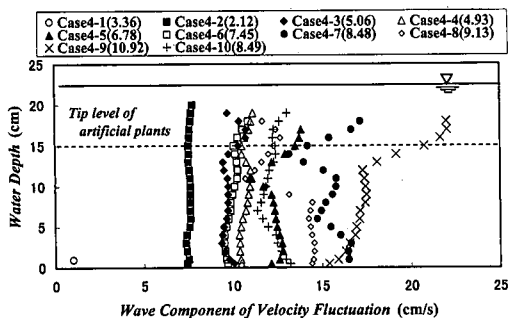


図-8 流速変動の波動成分 (Case 4-1~4-10 水平成分)

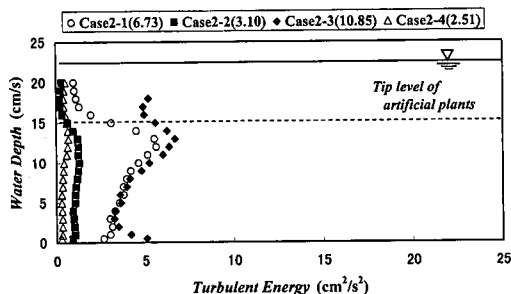


図-12 乱れエネルギー分布 (Case 2-1~2-4)

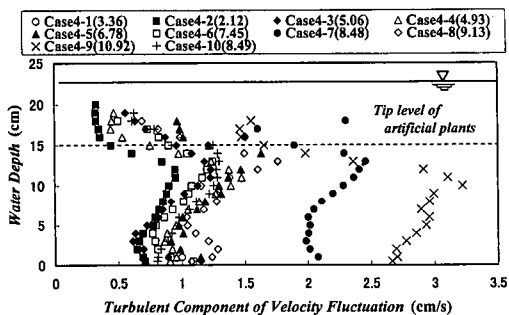


図-9 流速変動の乱れ成分 (Case 4-1~4-10 鉛直成分)

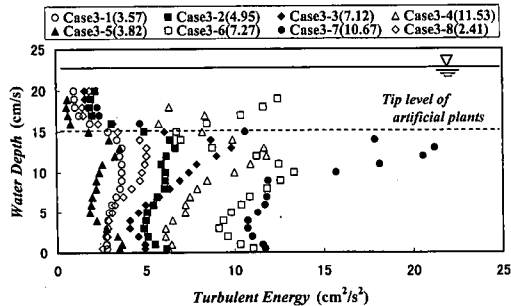


図-13 乱れエネルギー分布 (Case 3-1~3-8)

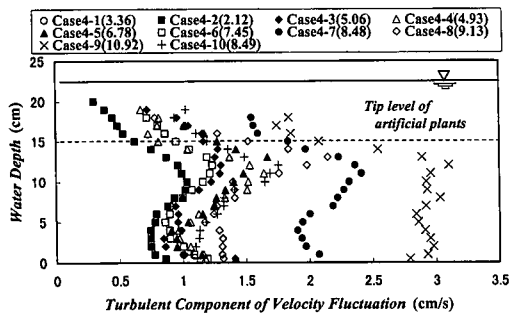


図-10 流速変動の乱れ成分 (Case 4-1~4-10 水平成分)

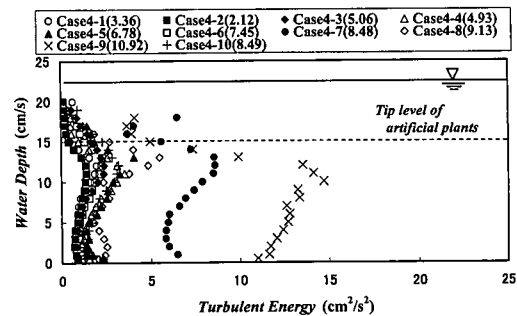


図-14 乱れエネルギー分布 (Case 4-1~4-10)

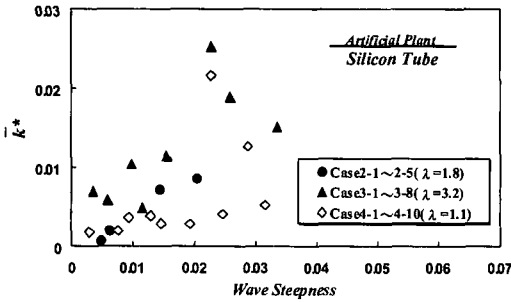


図-15 波形勾配とエネルギー転換率 \bar{k}^* の関係

場合、乱れエネルギーも大きな値で分布しており、植生密度が大きいケースの方が、小さいケースに比べ、乱れエネルギーのピークの突出度合が大きくなっている。

波動の持つエネルギーは波高の2乗に比例するので、波高が大きいほど波のエネルギーも大きい。したがって、波高が大きいほど植生によって発生する乱れエネルギーも大きくなると考えられる。また、植生領域内では、植生のたわみが境界面付近での植生占有体積(植生密度)を増加させ、これにより大きな流水抵抗を生じさせ乱れを発生していると考えられる。植生本数が増えると、その占有体積が増加し、それに伴い抵抗も大きくなり、そこで生じる乱れも大きくなる。この乱れと植生の揺動による乱れが加わることより、植生境界面で乱れエネルギーが最大値となり、また植生密度の大きなケースの方が乱れエネルギーの最大値(ピーク)の突出度合が大きくなると考えられる。

また、植生領域内と植生領域外に位相差が生じていると報告されているが(小田ら, 1991), 位相差が植生近傍で渦を発生させ、その渦によっても乱れが生じると考えられる。

5. 波形勾配と乱れの関係

植生領域で発生する乱れエネルギーは、水理条件などにより影響を受ける。それらを考慮に入れ、得られた実験結果を一般化し他条件の実験との比較を可能にするため、植生領域内で発生する乱れエネルギーの平均値を単位質量あたりの波動エネルギーにより無次元化した。無次元化した乱れエネルギーの平均値 \bar{k}^* を波動エネルギーから乱れエネルギーへの転換率として以下のように定義した。

$$\bar{k}^* = \frac{\bar{k}}{\left(\frac{1}{16}gH^2\right)} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 \bar{k} : 植生領域内の乱れエネルギーの平均値 ($m^2 s^{-2}$), g : 重力加速度 (ms^{-2}), H : 波高 (m), h : 水深 (m) である。

図-15 に波形勾配とエネルギー転換率 \bar{k}^* の関係を示す。波形勾配が大きいかほどエネルギー転換率も大きくなる傾向が見られる。図-15 には弾性係数が同じ疑似植生に関して、植生密度の変化が波形勾配とエネルギー転換率 \bar{k}^* の関係に与える影響が示されている。全体的に、植生密度が大きいかほどエネルギー転換率 \bar{k}^* の値は大きく分布していることが確認できる。とくに波形勾配が0.02付近まではその傾向が顕著である。また、波形勾配が特に大きい場合は、植生が流水抵抗になって生じる乱れに加えて、植生の揺動による乱れが大きくなりエネルギー転換率は急激に増加したものと推定される。

6. 結 論

本研究において以下のような結果が得られた。

- (1) 往復流下の植生周りの流れにおいて、流速変動スペクトルの高周波領域における勾配は約-5/3であり、慣性小領域のカスケード過程のエネルギー減衰率と一致していることが示された。
- (2) 流速の乱れ成分および乱れエネルギーは、波高が大きいかほど大きな値をとる傾向があり、たわみによる植生占有体積の増加が流水抵抗を生じさせることから、乱れおよび乱れエネルギーの最大値は、植生境界面(植生先端)付近で現れることが分かった。
- (3) 波形勾配あるいは植生密度が大きくなると、波動エネルギーが植生層で発生する乱れエネルギーに転換する割合が増大する傾向があることが分かった。

参 考 文 献

浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久 (1991): 揺動する海藻群落上を伝播する波の特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 26-30.

伊福 誠・岩田充浩・小田一紀 (1995): 人工海藻周辺の流れと漂砂, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 461-465.

小田一紀・天野健次・小林憲一・坂田則彦 (1991): 硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 331-335.

辻本剛三 (1992): 藻場が存在する場における流れと浮遊砂濃度, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 276-280.

萩原運弘・林健二郎・重村利幸・藤間功司 (1997): 水辺植生の消波特性に関する模型実験, 土木学会第52回年次学術講演会概要集第II部門, pp. 74-75.