

波・流れ場における人工海藻の水理特性

太田 隆 夫*・小林 信 久**

本研究は、流れ場、波浪場、波・流れ共存場における、植生周辺の流動構造および植生による波高減衰について検討を行ったものである。人工海藻を用いた水理実験を行うとともに、流速分布や乱れ特性について、混合層の流速分布、微小振幅波理論、植生の影響を水平方向の抗力のみで取り込んだ運動方程式を用いたモデルを構築し、実験値と比較した。その結果として、流れ場における平均流速およびレイノルズ応力の鉛直分布、波浪場および波・流れ共存場での波動流速成分の鉛直分布については、モデルによる値が実験値とよく一致することが示された。しかし、波・流れ共存場の植生抗力に関してはさらに検討を必要とする。

1. はじめに

海岸付近における水中の植生は、波浪・漂砂制御といった工学的観点、および生態系を含めた海岸環境の保全の点から、その有効性および重要性が認識されるようになってきた。人工海藻を含む植生による波浪・漂砂制御機能や、波浪場での植生周辺の水理特性に関しては、実験的、理論的研究および数値モデルによる検討が多数行われている(たとえば、浅野ら, 1988; Kobayashi ら, 1993; 伊福, 1997; 田中ら, 1999; 田村・灘岡, 2002)。また、開水路の流れ場における植生に関しても、流れの抑制、砂や汚染物質の輸送などの観点から、その機能や周辺の水理特性について、水理学・河川工学分野で詳細な研究がなされている(日野・歌原, 1977; 室田・福原, 1984; 清水ら, 1991; Nepf・Vivoni, 2000)。しかしながら、実際の沿岸域で一般的な状況と思われる、波・流れ共存場における植生の影響に関する検討は、これまでほとんど行われていない。その一因は、波・流れ・植生間の相互作用の複雑さにあると思われるが、現地への適用を考えると波・流れ共存場も含めて植生の影響を明らかにしておく必要がある。そこで本研究では、流れ場、波浪場、波・流れ共存場を対象に、海藻周辺の流動構造と波浪制御機能について、実験的および理論的に検討を行った。

2. 実 験

実験は、長さ 30 m, 幅 0.6 m の循環流発生装置付き造波水路で行った。用いた人工海藻は、幅 6 mm, 厚さ約 0.1 mm のポリエステル製テープで、長さの異なる 4 本を一束として、厚さ 18 mm のアクリル板に固定してある。海藻は、水槽横断方向に 2 cm 間隔で、造波方向に 5 cm 間隔で配置されており、造波方向の海藻部分の長さは 4.8 m (2.4 m×2) である。実験においては、水深を 45 cm, 入射波を周期 1.4 s, 2.0 s の規則波とし、流れは波に対して逆流とした。流れがあるケースでは、流れ場が十分安定するように循環流発生後 30 分以上経過するのを待ち、波を作用させる場合は造波開始から 3 分後に計測を始めた。水位変動と流速をサンプリング周波数 25 Hz で約 328 秒間測定した。第 1 の実験として、図-1 に示すように 6 本の波高計と 3 台の ADV (3 次元) を配置し、流速は $z = -13.2, -19.2, -25.2$ cm の 3 点で測定した。第 2 の実験としては、図-2 に示すように海藻上の 5 点を挟んで波高計を設置し、また海藻中央部 ($x = 2.4$ m) で 1 台の ADV により鉛直方向に 2 cm 間隔で流速を測定した。ビデオ画像から読み取った海藻境界面の平均的な位置を表-1 に示す (h は海藻境界面の水深, d は海藻境界面の底面からの高さ)。

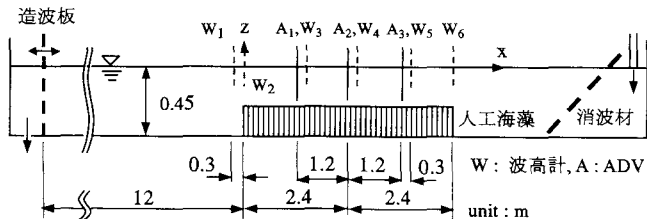


図-1 実験装置 (実験 1)

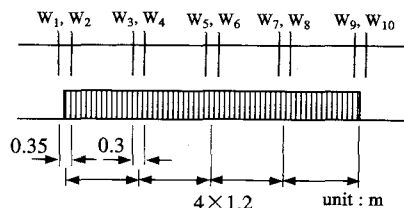


図-2 波高計配置 (実験 2)

* 正会員 博(工) 鳥取大学助手 工学部社会開発システム工学科
** Ph.D. デラウェア大学教授 応用海岸研究センター

表-1 海藻境界面の平均的な位置

	周期 (s)	h (cm)	d (cm)
流れ	—	27.5	15.7
波	1.4	30.2	13.0
	2.0	28.5	14.7
波・流れ	1.4	28.0	15.2
	2.0	25.4	17.8

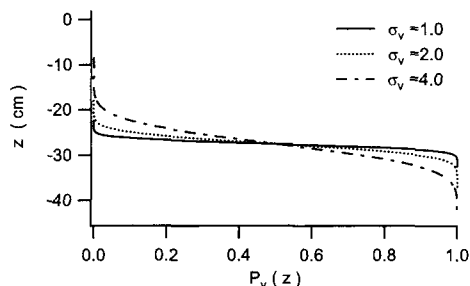


図-3 海藻が存在する確率

3. モデル化および実験結果との比較

(1) 流れ場

時間平均した水平方向の運動方程式は、式(1)のよう
に表される。

$$\frac{\partial \tau_c}{\partial z} = \rho g s + \overline{F_x}; \quad -(h+d) \leq z \leq 0 \quad (1)$$

ここに、 τ_c はレイノルズ応力、 ρ は水の密度、 g は重力加速
度、 s は平均水位の勾配 ($= \partial \bar{\eta} / \partial x$)、 $\overline{F_x}$ は水平方向の
抗力であり、式(2)で与えられる。

$$\overline{F_x} = \frac{1}{2} \rho C_D b N P_v |u_c| u_c \quad (2)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 b は海藻の幅、 N は植生密度、
 u_c は水平方向の流速である。 P_v はある水深のところに
海藻が存在する確率で、動揺する海藻境界面の影響を取
り込むために導入したものである。ここでは、海藻高さ
の確率分布が標準偏差 σ_v の正規分布に従うと仮定し、次
式のように与える。

$$P_v(z) = \int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_v}\right)^2\right\} dz \\ = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z+h}{\sqrt{2}\sigma_v}\right) \quad (3)$$

ここに、 erfc は誤差関数である。図-3に示すように、 σ_v
が大きくなるにつれて海藻高さの分布幅が広がることが
わかる。つぎに、平均水平流速の鉛直分布については、
Ghisalberti・Nepf (2002)と同様に、次式のように近似さ
れる混合層の流速分布を用いた。

$$\frac{U-\bar{U}}{\Delta U} = \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{z-\bar{z}}{2\theta}\right)$$

$$; \quad \Delta U = U_2 - U_1, \quad \bar{U} = (U_1 + U_2)/2 \quad (4)$$

ここに、 U_1 、 U_2 は混合層の上・下層における一様流速
($U_2 > U_1$)、 $\bar{z}$ は流速が $\bar{U}$ となる位置、 θ は混合層の運動
量厚さであり、

$$\theta = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{4} - \left(\frac{U-\bar{U}}{\Delta U} \right)^2 \right\} dz \quad (5)$$

と定義される。本研究では、実験結果より式(4)で $U_1 = 0$
とし、 $\bar{U} = U_2/2 = u_i$ 、 $U = u_c$ 、 $-\bar{z} = h_i$ (添字 i は変曲
点を意味する) において平均水平流速の鉛直分布を次の
ように表す。

$$\frac{u_c}{u_i} = 1 + \tanh\left(\frac{z+h_i}{2\theta}\right) \quad (6)$$

また、実験結果に基づいて半経験的に $\theta = \max[h/(\alpha+\beta), d/(\alpha-\beta)]$ 、
 $h_i = (h-\beta\theta)$ と与える。ここに、 α は h_i と θ に
関する値、 β は $(h-h_i)$ と θ との比であり、実験結果より
 $\alpha=5$ 、 $\beta=0.4$ とした。式(1)を z に関して積分し、底
面 $z = -(d+h)$ で $\tau_c = 0$ と仮定すると

$$u_i = -\left[\frac{gs(d+h)}{C_D b N \theta F(r_0)} \right]^{1/2}; \quad s > 0 \quad (7)$$

となり ($s > 0$ は平均水位が x 方向に増加する場合)、さら
に

$$\frac{\tau_c}{\rho} = gs \left\{ z + (d+h) \frac{F(r)}{F(r_0)} \right\} \quad (8)$$

を得る。ここに、 $r = -(z+h_i)/(2\theta)$ 、 z と r の範囲は $-(d+h) \leq z \leq 0$ 、
 $r_0 \leq r \leq r_b$ であり、 r_b は $z = -(d+h)$ での、
 r_0 は $z = 0$ での r の値を表す。式(8)での関数 $F(r)$ は
以下のように定義される。

$$F(r) = \frac{1}{2} \int_{r_0}^r \operatorname{erfc}\left[\frac{\delta}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{2r}{\beta} \right) \right] [1 - \tanh(r)]^2 dr \quad (9)$$

ここに、 $\delta = (h-h_i)/\sigma_v$ で実験結果により決定した。式
(9)で $\delta=1.0$ とし、式(7)において $s=0.000523$
(実験値)、 $b=0.6$ cm、 $N=0.1$ 本/cm² として u_i を求め、
その値と式(6)から得られた u_c を実験結果とともに
図-4に示す。この図より、平均水平流速の鉛直分布は混
合層の流速分布でよく表されることが、上述のモデルで
 $C_D=1.3$ とした場合が実験値とよく一致していることが
わかる。図-5には式(8)により与えられるレイノルズ
応力 (逆流では τ_c は負) と実験値を示す。両者の対応は
比較的よいが、海藻内部の下層では差異が見られる。

(2) 波浪場

波浪場については、まず海藻による波高減衰に関して
述べる。Kobayashiら (1993) は、海藻によって波高が
指数関数的に減衰すること、海藻の影響が水平方向の抗
力のみで表せることを仮定して、波高減衰率 k_t が以下の
ように与えられることを示した。

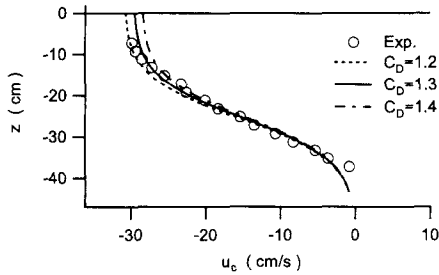


図-4 平均水平流速 (流れ場)

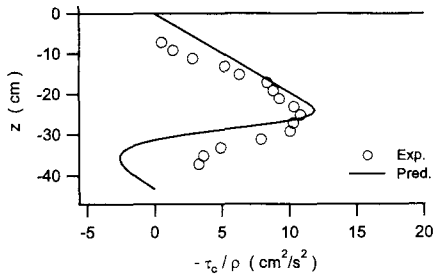


図-5 レイノルズ応力 (流れ場)

$$\frac{k_i}{k_r} = \frac{\sqrt{8} C_D b N \sigma_0}{9\pi} \cdot \frac{\sinh(3k_r d) + 9 \sinh(k_r d)}{\sinh[k_r(h+d)] \{2k_r(h+d) + \sinh[2k_r(h+d)]\}} \quad (10)$$

ここに、 k_r は波数、 σ_0 は $x=0$ における水位変動の標準偏差であり、ここでは波高に代えて用いている。海藻上における水位変動の標準偏差 σ_0 の実験値と、式(10)で求めた k_i から

$$\sigma_0(x) = \sigma_0 \exp(-k_i x) \quad (11)$$

で与えられる値を図-6に示す。□と○は実験値であり、図-2に示した5点を挟む2本ずつの波高計の平均をとったもの、一点鎖線および点線は実験値に対して式(11)を仮定して最小2乗法で求めた σ_0 と k_i による値、破線と実線は式(10)で $C_D=1.3$ としたときの値である。実験値より求めた σ_0 は3.65 cm ($T=1.4$ s)と3.70 cm ($T=2.0$ s)である。また、実験値および式(10)から求められた k_i は、 $T=1.4$ sのケースで 0.0283 m^{-1} と 0.0340 m^{-1} 、 $T=2.0$ sでは 0.0458 m^{-1} と 0.0545 m^{-1} であり、式(10)による値はやや過大である。

第2に、波浪場における流速変動については以下のような検討を行った。図-7に、最初の50波分のデータから位相平均法で求めた流速変動の波動成分($u_{w \text{ rms}}$, $w_{w \text{ rms}}$)と乱れ成分(u'_{rms} , w'_{rms})を示すが、乱れ成分の値は小さく、また波動成分は乱れ成分に比べてかなり大きい。そのためここでは乱れ成分を無視し波動成分についてのみ検討した。海藻上のある点における σ_0 が式(11)

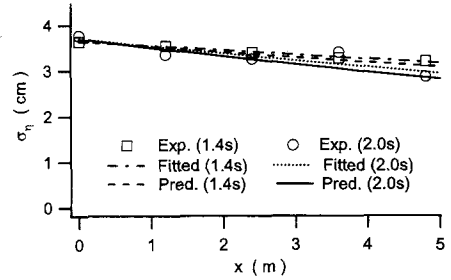


図-6 波高減衰 (波浪場)

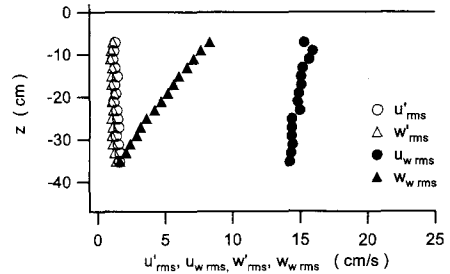
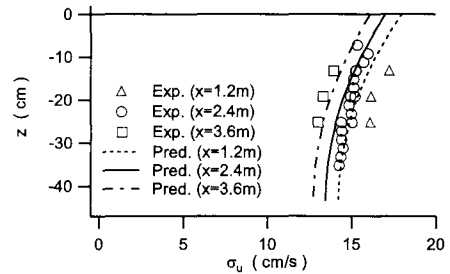
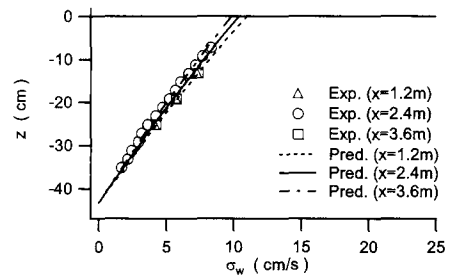


図-7 波動成分と乱れ成分 (波浪場)

図-8 波動流速 (水平, $T=2.0$ s)図-9 波動流速 (鉛直, $T=2.0$ s)

で与えられると、微小振幅波理論より水平および鉛直方向の波動流速成分の標準偏差 σ_u , σ_w は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_u(x, z) &= \sigma_0(x) \frac{g k_r}{\omega} \frac{\cosh[k_r(z+d+h)]}{\cosh[k_r(d+h)]} \\ \sigma_w(x, z) &= \sigma_0(x) \frac{g k_r}{\omega} \frac{\sinh[k_r(z+d+h)]}{\cosh[k_r(d+h)]} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

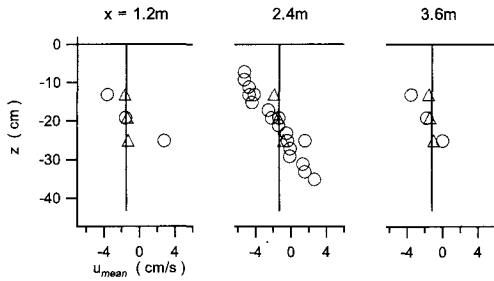
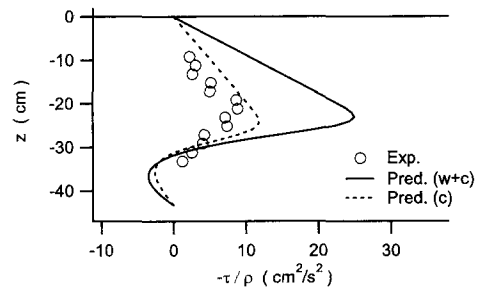
図-10 平均水平流速 (波浪場, $T=2.0$ s)

図-11 レイノルズ応力 (波・流れ共存場)

ここに、 ω は角周波数である。図-8, 9に $T=2.0$ sのケースにおける σ_u , σ_w の実験値と式(12)による値を示すが、海藻上のどの位置 ($x=1.2, 2.4, 3.6$ m)においても両者はよく一致しており、波動流速成分に及ぼす海藻の影響は小さいことがわかる。

第3に、波浪場での平均流速であるが、 $T=2.0$ sのケースでの $x=1.2, 2.4, 3.6$ mにおける海藻有り(○)と無し(△)の場合の平均水平流速と、次式で表される質量輸送速度の平均値(実線)を図-10に示す。

$$\bar{u}(x) = -\frac{gk_r\sigma_u^2(x)}{\omega(d+h)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

海藻無しの場合は鉛直方向にほぼ一様であり、有りの場合は海藻境界より上の層では波の進行と逆向き、海藻内では波の進行と同じ向きの流速となっている。ただし、海藻有りの場合でも、流速の鉛直分布の平均は、式(13)で与えられる値とほぼ一致している。

(3) 波・流れ共存場

流れ場と波浪場のモデルを組み合わせて、波・流れ共存場のモデルを構築する。まず、(1)のモデルに波の影響を取り込むために、式(2)の流速項に波動による流速を加えて、式(7)、(8)と同様の式が得られる。ただし、 $F(r)$ は式(9)とは若干異なり、以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} F(r) &= \frac{1}{2} \int_{r_0}^r \operatorname{erfc} \left[\frac{\delta}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{2r}{\beta} \right) \right] G(r) dr; \\ r_0 &\leq r \leq r_b \\ G(r) &= \begin{cases} a^2 + b^2/2; & a \geq |b| \\ a^2 + b^2/2 - [2\theta_0 a^2 - 4a|b| \sin \theta_0 \\ + b^2(\theta_0 + 0.5 \sin 2\theta_0)]/\pi; & a < |b| \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

ここに、 $a = 1 - \tanh(r)$, $b = \sqrt{2} \sigma_u/u_i$, $\theta_0 = \cos^{-1}(a/|b|)$ であり、波・流れ共存場における水平方向の波動流速成分の標準偏差 σ_u は

$$\sigma_u(x, z) = \frac{g\sigma_u(x)}{C - U_c} \frac{\cosh[k_r(z+d+h)]}{\cosh[k_r(d+h)]} \quad \dots\dots (15)$$

となる。ここに、 C は波速、 U_c は断面平均流速で式(6)を用いて以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{1}{d+h} \int_{-(d+h)}^0 u_c dz \\ &= u_i \left\{ 1 - \frac{2\theta}{d+h} \ln \left[\frac{\cosh(r_b)}{\cosh(r_0)} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

式(15)の k_r は流れがある場合の波数であり、分散関係式

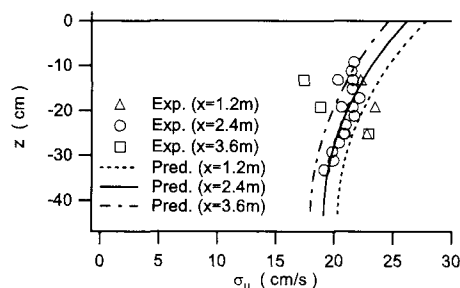
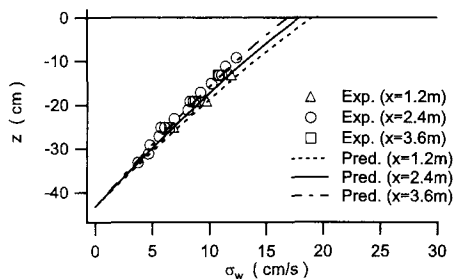
$$(C - U_c)^2 = g \tanh[k_r(h+d)]/k_r \quad \dots\dots\dots (17)$$

を満たすものである。式(14)に示したように、 $F(r)$ が u_i を含んでいるため、流れ場のように式(7)で u_i を一義的に決められない。したがって、式(7)および(14)～(17)を用いて反復計算を行い、 u_i と U_c を求めた。図-11に波・流れ共存場におけるレイノルズ応力の実験値と上述のモデルによる値を示す。図中の○は実験値 ($x=2.4$ m, $T=2.0$ s)、実線は波・流れ共存場のモデルで $C_D=0.6$, $s=0.00116$ (実験値)として得られた値で、 u_i と U_c の計算値は -17.4 cm/s と -18.9 cm/s である ($C_D=1.3$ では u_i , U_c が過小となる)。比較のために、図-5に示した流れ場のモデルによる値を破線で示した。この図より、流れ場のモデルによる値の方が実験値とよく一致していることがわかる。式(8)の計算に対しては平均水位勾配 s の影響が大きく、レイノルズ応力の実験値は流れ場と波・流れ共存場で差があまりないのに対し、 s は流れ場での値の約2倍になっている。これにより波・流れ共存場のモデルによる結果が過大となっている。ただし、 s の値ではこのような差が生じたのにレイノルズ応力に差がない理由については、ここでは明らかにできなかった。

波高減衰については、実験値から得られた σ_0 と k_i は、 5.50 cm, 0.0575 m $^{-1}$ ($T=1.4$ s)と 4.89 cm, 0.0508 m $^{-1}$ ($T=2.0$ s)であった。波・流れ共存場における波高減衰率については、Kobayashiら(1993)の理論を拡張して以下のような式を導いた。

$$\frac{k_i}{k_r} = \frac{C_D b N \sigma_0 I}{\sqrt{2} \left(n + \frac{U_c}{C - U_c} \right) \tanh^2[k_r(d+h)]} \quad \dots\dots (18)$$

ここに、

図-12 波動流速 (水平, $T=2.0$ s, 共存場)図-13 波動流速 (鉛直, $T=2.0$ s, 共存場)

$$n = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2k_r(d+h)}{\sinh[2k_r(d+h)]} \right\}$$

$$I = \int_{-(d+h)}^{-h} \frac{\cosh^3[k_r(z+d+h)]}{\cosh^3[k_r(d+h)]} J(z) k_r dz$$

$$J(z) = \begin{cases} |a|^3 + 1.5|a|; & |a| \geq 1 \\ [a^3(2\theta_0 - \pi) + 6a^2 \sin \theta_0 + 1.5a(2\theta_0 - \pi + \sin 2\theta_0) + 2 \sin \theta_0 - (2/3) \sin^3 \theta_0] / \pi; & |a| < 1 \end{cases}$$

$$a = U_c / (\sqrt{2} \sigma_w),$$

$$\theta_0 = \cos^{-1}(-a); 0 < \theta_0 < \pi$$

式(18)において、 $C_D=1.3$ 、 $U_c=-20$ cm/sとして計算すると、 $T=2.0$ sのケースで k_i の値は 0.1 m^{-1} 程度となり、実験値よりもかなり過大となった。したがって、流れ場のデータから得られた $C_D=1.3$ は波・流れ共存場では過大であり、式(2)で植生の影響を統一的に説明するのは難しい。

図-12, 13には、最初の50波分の実験データを用いて位相平均法で求めた波動流速成分の標準偏差(水平、鉛直方向)と、式(12)において流れがある場合の波数(式(17)により計算)を用いて求めた値を示す。水平方向の $x=3.6$ mの場合を除いて両者の対応はよく、波浪場のケースと同様に波動流速成分に及ぼす海藻の影響は小さいといえる。

4. おわりに

本研究では、流れ場、波浪場、波・流れ共存場における植生の影響について、人工海藻を用いた実験と、混合層の流速分布・微小振幅波理論および運動方程式を用いたモデルにより検討を行った。流れ場および波浪場においては、実験結果とモデルによる値はよく一致し、波・流れ共存場での実験結果については、流れ場あるいは波浪場での実験結果との差異が小さく、(非線形な)相互作用は見られなかった。今後、流れ場と波・流れ共存場で

平均水位の勾配に2倍程度の差異が生じた理由などについて、さらに検討を行う必要がある。

謝辞: 実験装置をご提供いただいたデラウェア大学 James T. Kirby 教授、人工海藻の模型を作製された Allison Bridges さん(当時デラウェア大学大学院生)に謝意を表します。

また、本研究は第一著者がデラウェア大学滞在中に行ったものであり、その機会を与えていただいた鳥取大学 木村 晃教授、松見吉晴助教授に感謝いたします。

参考文献

- 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎(1988): 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性, 第35回海講論文集, pp. 138-142.
- 伊福 誠(1997): 人工海藻による波・流れの制御と選砂, 海工論文集, 第44巻, pp. 536-540.
- 清水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠紀(1991): 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 438/II-17, pp. 31-40.
- 田中厚至・長岡 裕・原 恒司(1999): 往復流下における柔軟な植生周りの流れに関する研究, 海工論文集, 第46巻, pp. 806-810.
- 田村 仁・灘岡和夫(2002): 可撓性に着目した藻場キャノピー周辺の流動・乱流構造に関する実験的研究, 海工論文集, 第49巻, pp. 341-345.
- 日野幹夫・歌原英明(1977): 水草のある流れの水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第266号, pp. 87-94.
- 室田 明・福原輝幸(1983): 水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第338号, pp. 97-103.
- Ghisalberti, M. and H. M. Nepf (2002): Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows, J. Geophysical Res., 107(C2) 10. 1029/2001 JC 000871.
- Kobayashi, N., A. W. Raichle and T. Asano (1993): Wave attenuation by vegetation, J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE, 119(1), pp. 30-48.
- Nepf, H. M. and E. R. Vivoni (2000): Flow structure in depth-limited, vegetated flow, J. Geophysical Res., 105(C12), pp. 28547-28557.