

揺動する海藻群落上を伝播する波の特性

浅野敏之*・出口 浩**・間瀬 肇***・小林信久****

1. 序 論

沿岸域に生育する海藻群落は、海岸水理学的には波浪に対する抵抗の機能を持ち、その力学機構を理解することはそれ自体興味深い問題である。南カリフォルニア海域には全長 20 m に達する giant kelp と呼ばれる海藻群落があり、内部波の伝播に大きな影響を与えるとの観測結果が報告されている (Jackson, 1984)。

工学的観点においては、沿岸域の開発利用にあたって地元水産業との協調がこれまで以上に重要となり、海岸構造物の周辺海域に生育する藻場への影響調査、代替藻場の造成が求められる趨勢にある (丸山ら, 1987)。また海岸環境の保全や親水性海岸の整備の要請から、さまざまな新しいタイプの海岸保全工法が考案されているが、人工海藻を用いた波浪制御工法もその一つである。この人工海藻の実用化にあたっては、海藻群落上を伝播する波の特性を明らかにする必要がある。著者らは数年前から理論的・実験的な検討を行っている (浅野ら, 1988a, b; 間瀬ら, 1989)。

海藻群落による波の変形が、透過性防波堤や潜堤などによる波の変形と最も異なる点は、海藻群落自体が波によって揺動し、抵抗特性が変化することである。本研究は、浅野ら (1988) (以下前報と呼ぶ) の理論的取扱いを海藻の揺動効果を取り込んで精密化し、前報で示した実験結果と比較検討したものである。

2. 海藻群落上を伝播する波の理論

水粒子速度場を速度ポテンシャルと回転速度成分に分ける前報での取り扱い、底面及び界面でのせん断応力による減衰を表現することができるが、そのままでは分散方程式に海藻の抗力抵抗の効果が入らないので、小林が提唱するように取り扱いを修正する (Kobayashi, Raichle, Asano: 1991)。

前報と同様に海藻群落を有する内部領域と、その上部

の外部領域の 2 層からなる 2 次元流速場を考える (図-1)。ここに h は上層の水深、 d は下層の水深で長さ l_0 の海藻群落の平均の高さに等しい。波の振幅は微小であるとし、海藻による抗力抵抗が卓越するとして界面および底面でのせん断抵抗を無視する。

上層における運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $u_1 = (u_1, w_1)$ は水粒子速度、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 p_1 は波による動圧力である。

下層における運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_2 - \frac{1}{\rho} \mathbf{F} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式で、 $\mathbf{F} = (F_x, F_z)$ は、海藻への抗力の反作用として生じる流体の付加応力であり、前報と同様次のように表されると仮定する。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{1}{2} \rho C_D b N u_r |u_r| \\ F_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 b は海藻葉状体の単位長さ当りの投影面積、 N は単位面積当りの植生密度、 $u_r = u_2 - u_{sw}$ は水粒子平速度 u_2 と海藻の揺動速度 u_{sw} との相対速度である。(3) 式の F_x を線形抗力係数 D で表す。

$$\frac{1}{2} \rho C_D b N u_r |u_r| = \rho D u_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

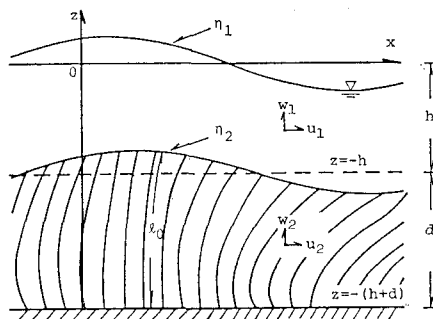


図-1 2層流モデル

* 正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木開発工学科

** (株)積水ハウス

*** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科

**** 正会員 Ph. D. Professor Univ. of Delaware Dep't. of Civil Eng.

ただし、 D は両辺の差の二乗誤差 $\overline{E}_i^2$ を最小にする条件 $\partial \overline{E}_i^2 / \partial D = 0$ より求められる。すなわち、

$$D = \frac{1}{2} C_D b N \frac{\int_{-(h+d)}^{-h} u_r |u_r| u_z dz}{\int_{-(h+d)}^{-h} u_z^2 dz} \quad \dots\dots\dots (5)$$

結局、(2) 式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial x} - D u_2 \\ \frac{\partial w_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

基礎方程式は、(1)、(6) 式および上層・下層における連続式の計 6 式であり、これを以下に示す 6 つの境界条件式の下に解くことになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta_1}{\partial t} &= w_1, \quad p_1 = \rho g \eta_1; \quad z = 0, \\ \frac{\partial \eta_2}{\partial t} &= w_1 = w_2, \quad p_1 = p_2; \quad z = -h, \\ w_2 &= 0; \quad z = -(h+d) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

自由表面での水位変動 η_1 を複素波数 $k = k_r + i k_i$ を用いて次式で表す。

$$\eta_1 = a \exp \{i(kx - \sigma t)\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

最終的な解は次式のように求められる。

$$u_1 = \frac{g k a}{\sigma} \left\{ \cosh(kz) - \frac{\sigma^2}{g k} \sinh(kz) \right\} \cdot \exp \{i(kx - \sigma t)\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$u_2 = \frac{g \alpha^2 a}{\sigma k} \left\{ \cosh(kh) - \frac{\sigma^2}{g k} \sinh(kh) \right\} \cdot \frac{\cosh[\alpha(z+h+d)]}{\cosh(\alpha d)} \exp \{i(kx - \sigma t)\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

p_1 は $(\rho \sigma / k) u_1$ より、 p_2 は $\{\rho(\sigma + iD)/k\} u_2$ より求められる。また w_1, w_2 は u_1, u_2 を通じて連続式より容易に求められる。界面での水位変動 η_2 は次式となる。

$$\eta_2 = a \left[\cosh(kh) - \frac{g k}{\sigma^2} \sinh(kh) \right] \cdot \exp \{i(kx - \sigma t)\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

分散方程式は次式となる。

$$\sigma^2 = g k \frac{k \tanh(kh) + \alpha \tanh(\alpha d)}{k + \alpha \tanh(\alpha d) \tanh(kh)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{k}{\sqrt{1 + i(D/\sigma)}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

さて、(12) 式において抗力が十分小さい ($\sigma \gg D$) 場合を考える。(13) 式は

$$\alpha \approx k \left(1 - i \frac{D}{\sigma} \right)^{1/2} \approx k \left(1 - i \frac{D}{2\sigma} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

であるから、 $\varepsilon = D/2\sigma$ とおくと、 $\alpha = k(1 - i\varepsilon) + O(\varepsilon^2)$ で

あり、分散方程式 (12) は次式となる。

$$\sigma^2 = g k \tanh[k(h+d)] \left[1 - i\varepsilon \frac{2kd + \sinh(2kd)}{\sinh[2k(h+d)]} \right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

複素波数 $k = k_r + i k_i$ とおくと、(15) 式の実数部・虚数部からそれぞれ次式が得られる。

$$\sigma^2 = g k_r \tanh[k_r(h+d)] \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{k_i}{k_r} = \varepsilon \frac{2k_r d + \sinh(2k_r d)}{2k_r(h+d) + \sinh[2k_r(h+d)]} \quad \dots\dots\dots (17)$$

(16) 式は、 $\varepsilon = D/2\sigma \ll 1$ であれば、海藻によって分散方程式は変化しないことを意味している。また (17) 式から $k_i/k_r = O(\varepsilon)$ がわかる。

3. 波による海藻の揺動

海藻は曲げ剛性と浮力を復元力として、波による流体運動に応答する。いま、1本の海藻要素の運動を柱体の横振動で近似できるとしてモデル化する(石田・近田, 1984)。図-2 に示すように、静止状態の海藻の中心軸を鉛直軸 z とし、そこからの水平方向変位を ξ とすると、その運動方程式は次式で表される(酒井・浅野・上田, 1989)。

$$\rho_{sw} b \hat{I} \ddot{\xi} + C_1 \dot{\xi} + E I \xi_{zzzz} = \frac{1}{2} \rho C_D b |u - \dot{\xi}| (u - \dot{\xi}) + \rho(C_M - 1) b \dot{\xi} (\dot{u} - \dot{\xi}) + \rho b \dot{\xi} \dot{u} - (\rho - \rho_{sw}) g b \hat{I} \xi_z \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 $\rho_{sw}, b, \hat{I}, E I, C_1, C_M$ は、それぞれ海藻の密度、幅、厚さ、曲げ剛性、減衰定数、慣性係数である。 $C_1 = 0, \dot{\xi}/u \ll 1$ とし、(18) 式を厳密に解く代わりに海藻頂部の水平変位 ζ によって $\xi = \frac{z}{d} \zeta$ と近似できるものとする、(18) 式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \{ \rho(C_M - 1) + \rho_{sw} \} V \dot{\zeta}^2 + \frac{1}{2} \rho C_D |u| A \dot{\zeta} \\ & + \left\{ \frac{8 E I}{d^3} + (\rho - \rho_{sw}) g \frac{V}{d} \right\} \zeta \\ & = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| + \rho C_M V \dot{u} \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

ここに $A = b d$, $V = b d \hat{I}$ である。上式で $u, \dot{u}$ は $z = -h \sim -(h+d)$ の断面平均流速および加速度を、 $u|u|$ は断面 2 乗平均流速を代入する。海藻の剛性による復元力を表す (18) 式左辺第 3 項は、片持ちばりに一様分布荷重が作用すると考え、その作用力と頂部のたわみとの関係式より次式で与える。

$$\int_{-(h+d)}^{-d} E I \xi_{zzzz} dz = \frac{8 E I}{d^3} \zeta \quad \dots\dots\dots (20)$$

上式で I は断面 2 次モーメントで $I = b \hat{I}^3/12$ となる。いま $\tau = \sigma t$, $\zeta^* = \zeta/d$, $s = \rho_{sw}/\rho$ とし、(19) 式を無次元量で表すと次式となる。

$$\begin{aligned}
 & \{ (C_M - 1) + s \} \zeta^{*''} + C_D \frac{|u|}{\sigma d} \left(\frac{\dot{\zeta}}{d} \right)^{-1} \zeta^{*'} \\
 & + 2 \left(\frac{gd}{u^2} \right) \left(\frac{u}{\sigma d} \right)^2 \left\{ \frac{2}{3} \frac{E}{\rho g d} \left(\frac{\dot{\zeta}}{d} \right)^2 + (1-s) \right\} \zeta^* \\
 & = C_D \left(\frac{|u|}{\sigma d} \right) \left(\frac{u}{\sigma d} \right) \left(\frac{\dot{\zeta}}{d} \right)^{-1} + 2 C_M \left(\frac{u'}{\sigma^2 d} \right) \\
 & \dots \dots \dots (21)
 \end{aligned}$$

ただし、' は τ による微分を表す。

4. 波動運動と海藻揺動の干渉効果

(9)~(12) 式の波動運動の解には α が含まれており、 α は線形抗力係数 D を含む (13) 式で与えられる。 D は (5) 式で波動運動と海藻運動の相対速度を用いて定義されるから、波と海藻の干渉効果は D を通じて現れることになる。

もう一つ、海藻揺動の効果は、海藻群落の平均高さ d に現れ、海藻の長さ l_0 と次の関係で与えられるものとする。

$$d = \frac{l_0 + \sqrt{l_0^2 - \xi^2}}{2} \dots \dots \dots (22)$$

ただし、 ξ は海藻頂部の水平変位の振幅である。

具体的な計算の手順は次の通りである。

- (i) 海藻の揺動がないとして、すなわち $u_{sw}=0, d=l_0$ として速度ポテンシャル、分散関係式を求める。
- (ii) (21) 式に基づいて、海藻の運動を計算し、 u_{sw} を求める。

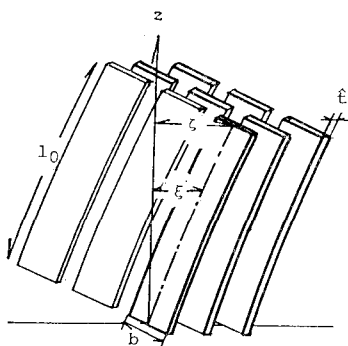


図-2 海藻葉状体の運動モデル

(iii) 相対速度 u_r を計算し、(5) 式から線形抗力係数 D を求める。

(iv) d を (22) 式から計算する。

(v) 速度ポテンシャル、分散方程式を再度計算する。

(vi) 計算を繰り返す、解の収束を図る。

5. 計算結果ならびに考察

(1) 人工海藻による波高減衰実験

ここで展開した理論の妥当性を検討するために、前報で示した実験結果を再整理し、計算結果との比較を行った。実験では図-3に示すように人工海藻を敷設し、その上を伝播する波の水位記録を6本の波高計で測定した。このうち両端の2本の波高計記録は、波の反射・散乱の影響を受けるため解析から除外し、中央4本の波高計の記録から波高減衰率・波速を求めた。人工海藻の素材は幅5.2cm、厚さ30 μ 、比重0.9のポリプロピレンロープである。このロープの幅面が波の進行方向と向き合うよう、アンカーとして用いた鉄製金網板に植え込んだ。実験は表-1に示す水深、植生密度を変えた3つの場合に対して、19~23ケースの波を用いて行った。このうち6ケースについて水槽側面から海藻の揺動をビデオ撮影し、波運動と海藻揺動の関係を調べた。

(2) 波高減衰率および波速の特性

揺動に関する最終的な記述式 (21) には海藻の厚さと下層の水深の比 $\hat{l}/d$ 、抗力係数 C_D 、海藻の比重 s 、 $u/\sigma d$ 等が含まれる、最後のパラメータは波の振幅と下層水深との比 a/d に比例する。波高減衰率 k_i 、波速 c は海藻揺動と波の場の反復計算で得られるので、上述の4つのパラメータ以外に多くの無次元量が関与する。そこで上述の実験条件と近い範囲内で次元変数を動かし、 k_i, c の変化を調べることにする。

表-1 実験条件

	h (cm)	d (cm)	N (cm^{-2})
CASE-1	20.0	25.0	0.149
CASE-2	27.0	25.0	0.149
CASE-3	20.0	25.0	0.110

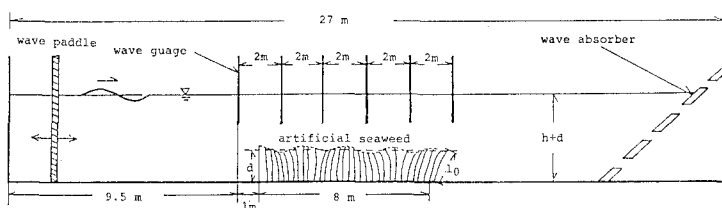
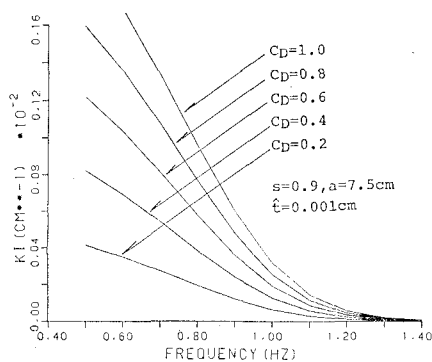
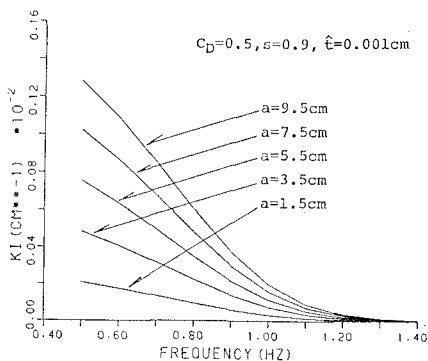


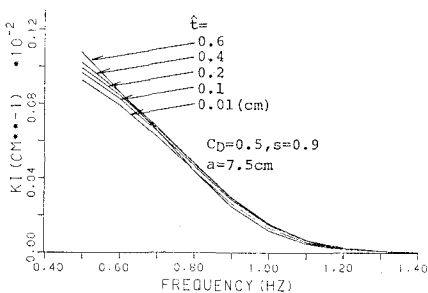
図-3 実験装置



(a)



(b)



(c)

図-4 波高減衰率の計算結果

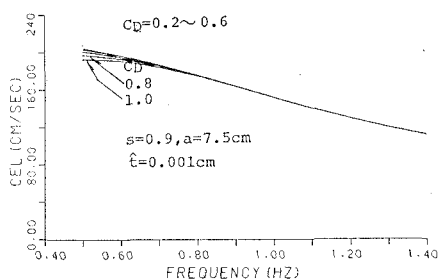


図-5 抗力係数 C_D による波速の変化

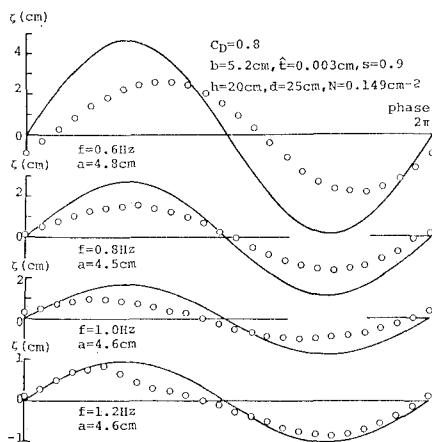


図-6 海藻頂部の水平変位 ζ に関する実験結果と計算結果の比較 (波の峰位相を位相 0 として表示した)

図-6は海藻頂部の水平変位 ζ に関してビデオ撮影による測定結果と計算結果を比較したものである。ただし計算においては $C_D=0.8$ とした。図から低周波数の波になるほど、計算結果は実験結果より過大な水平変位を与えることがわかる。

図-7は波高減衰率 k_i に関して、計算結果と実験結果を比較したものである。ここでは CASE-2 に関する結果を示す。実験結果を波の振幅の大きいケース ($a=4.5\sim6.0$ cm) と小さいケース ($a=2.8\sim4.2$ cm) に2分し、その平均から前者については $a=5.25$ cm、後者については $a=3.50$ cm として計算を行った。図-7より、 $C_D=0.8$ とすると揺動を考慮しない計算値は実験値よりかなり大きくなるが、揺動を考慮すると両者はよく一致することがわかる。ここに示していない CASE-1 と CASE-3 の結果もあわせて、 $C_D=0.8$ で計算値は実験値ともしっかり一致することがわかった。

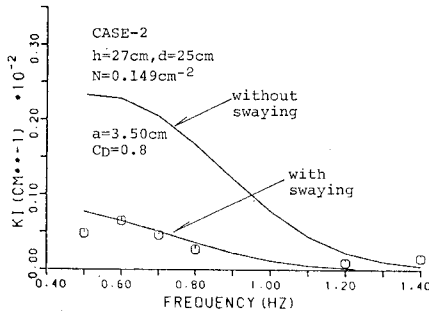
図-8は波速 c に関する結果であるが、揺動を考慮すると低周波数の波に対して実験結果より少し大きめの値となった。

(3) 考察

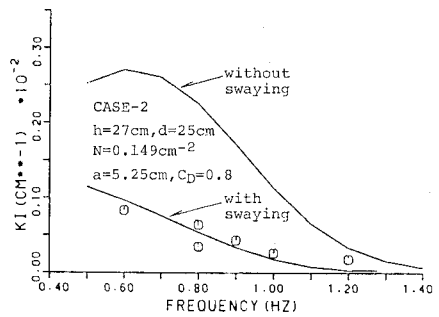
図-6に示したように、低周波数の波、すなわち同じ

図-4(a), (b), (c) は、それぞれ C_D , a/d , $\hat{t}/d$ による k_i の変化を示したものである。 C_D および a/d の増加とともに k_i が増加するのは、波の計算において (5) 式に示した D が大きくなるためで、海藻揺動の効果の寄与はそれに比して小さい。 $\hat{t}/d$ が大きくなると断面2次モーメント $I=b\hat{t}^3/12$ が増加し、揺動特性が変化して k_i が微増する。なお、比重 s を $0.2\sim1.0$ と変化させても、 k_i の変化は無視しうる程度であった。

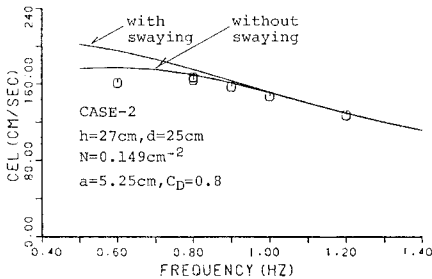
図-5は C_D による波速 c の変化を示したもので、低周波数域で c は C_D とともに若干増加することがわかる。 a/d による c の変化も図-5とほぼ同様であり、また $\hat{t}/d$, s による c の変化は無視できる範囲にある。



(a) 波高の小さいケース



(b) 波高の大きいケース

図-7 波高減衰率 k_i に関する実験値と計算値の比較図-8 波速 c に関する実験値と計算値の比較
(CASE-2, 波高の大きいケース)

振幅に対しては流速振幅の大きい波では、実験で得られた海藻頂部の水平変位は計算値のように大きくなり、波高減衰率 k_i に関しては、 C_D を 0.8 とすれば揺動を考慮した計算値は実験値とよく一致するが (図-7)、低周波数の波に対して波速 c は揺動を考慮するとむしろ実験値と一致しなくなることがわかった (図-8)。揺動が大きくなるとここで提示したモデルが実験結果を説明しなくなるとは、次のような理由によると考えられる。

(i) 実験の観察から、揺動が大きい場合には界面および底面で発生する水粒子運動の乱れが大きくなるが、本理論は乱れの応力を考慮していないこと、(ii) 揺動が大きくなると、海藻の運動も図-2 に示したような整然とした横振動ではなく、葉状体の捻れ・折れ等によって波運動に対する投影面積も異なること、(iii) 本理論では抗力は (3) 式のように水平抗力のみを考慮しており、この点で振幅が小さい場合に適用が限定されること。

抗力係数 C_D は葉状体の寸法と相対速度からなる Reynolds 数等の関数となろうが、本モデルでは低周波数側で海藻・流体間の相対運動を実際より小さく評価したことになり、それを考慮すれば波高減衰の実験結果と一致する C_D の値は小さくなる。また一般に海藻の植生密度は高いから、 C_D は単独の葉状体ではなく、群体に対するものとして考えるべきで、隣接効果を含む必要がある。

6. 結 語

本研究は線形抗力係数 D を結び目として、海藻揺動と波運動の相互干渉効果を表現し、両者の理論的表示式を導いたものである。その計算結果を著者らによる実験結果と比較検討した。5.(3) で述べたように、海藻の揺動が大きくなると、流速場はきわめて複雑となりモデルの限界が生じるが、波高減衰率に関する計算値と実験値は図-7 に示す程度の良い一致が見られ、また理論表示式から波速と波高減衰率に関する一般的な特性が見通せた。本研究によって、海藻群落上を伝播する波の特性の解明が一段階進んだものと考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたって文部省科学研究費 (国際共同研究・代表者前野賀彦鶴高専助教授) の補助を得たことを付記し、謝意を表する。

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回海岸工学講演会論文集, pp. 138-142.
- 浅野敏之・酒井哲郎・筒井勝治(1988): 人工海藻による海浜変形制御, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 171-176.
- 石田 啓・近田美則(1985): 有限振幅波による柱体の振動特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 628-632.
- 丸山康樹・五十嵐由雄・石川雄介(1987): アマモ場適地選定手法, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 227-231.
- 間瀬 肇・古田幸也・酒井哲郎・浅野敏之・柳生忠彦(1989): 傾斜海浜に設置した人工海藻による波浪変形解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 90-94.
- 室田 明・箱原輝幸(1984): 直立性の植物を有する開水路の流れ構造について, 第28回水理講演会論文集, pp. 225-231.
- 酒井哲郎・浅野敏之・上田康弘(1989): 波浪による人工海藻の動揺特性, 第44回土木学会年次学術講演会講演論文集, II, pp. 692-693.
- Jackson, G. A. (1984): Internal wave attenuation by coastal kelp stands, J. of Physical Oceanography, Vol. 14, pp. 1300-1306.
- Kobayashi, N., A. W. Raichle and T. Asano(1991): Wave attenuation by vegetation, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE(submitted).