

揺動物質(海草等)上の流れと砂移動

Flow Mechanism and Sediment Transport over Flexible Substance like SeaWeed

辻 本 剛 三

Gozo TSUJIMOTO

1. はじめに

近年の海岸工学を取り巻く問題は複雑さを増し、それらの諸問題を解決するために、従来の枠組みを越えた知識や技術等が必要となりつつある。海岸・沿岸域の開発の実施に当たっては、その開発により消失した部分の回復、いわゆるミチゲーションの考え方が海浜地形、水質、生態系、景観、生活等に対して導入されつつある。過去、海浜変形や水質に関連した研究は数多くなされ、本夏期講習会においても講演がされている。また生態系に対しては、本講習会においても日野(1978)、上北(1986)、野田(1989)、川那部(1990)、高橋(1991)、辻本(哲)(1991)による講演がされている。海岸工学においても生態系を考慮した取り組みがなされ始めているが、波動場の物理量と生態系の関連について、検討が必要な課題は数多くある。

さて海岸の生態系の一部であるところの藻場が与える海岸環境への効果は、①日射の受熱・放熱過程変化を与える②流れを減衰させ、藻場内に水塊を捕捉し長い滞留時間を与える③海水の捕捉が慣性質量を持つために、短周期の波動の低減をもたらす④藻場と流体の相対速度が小さくなるために、岩礁と比較して遊泳力の小さい生物が定着しやすい水域を形成するなど、きわめて重要な働きをもっていることが従来より指摘されている。

また昨今、景観等を配慮した従来の剛な構造物に代わる、親水性の高い海岸構造物が考え出されている。前述の藻場の特性を生かした人工海草と称されている侵食対策工法やフラップボードと称した波浪制御構造物の開発が行われている。このように藻場、人工海草、フラップボードに共通する事項は、物質が流れによって揺動するために波動場との相互作用により複雑な流れ場が形成されていることである。

本小論では波動場で揺動する海草のような物質が存在する場の流れや砂移動についてのこれまでの取り組みについて述べる。

2. 藻場に関する研究

2. 1 現地の藻場の特性

中谷(1986)は藻場の区分を次のようにしている。海岸の浅瀬には、陸上の森や草原似た植生群落が存在する。このような海中の森や草原は”藻場”と呼ばれているが、特に大型の褐藻の群落に対しては、”海中林”と呼んで、藻場と区別をしている。水辺植物は生長様式の違いや環境適応のやり方によって三つに分けられる。①底土または大型の海草上に着生する単細胞または糸状細胞の微小着生植物群で下草的な性格をもつもの②大型の海藻で、基盤上または中に付着するために仮根をもち、海水に支えられて直立するもの③維管束植物の草本か木本タイプで、根は基盤に付着するだけでなく、栄養や水を吸収するために分化しているもの。中谷は②を”海藻”、③を”海草”と称して区別している。特に③の海草は陸上の顕花植物に似た特性があり浅瀬に分布しているので、底質と水質に深い関わりを持っている。以後の記述では”海草”と”海藻”を区別せずに”海草”と記述する。

さて、実際の藻場での観測例は、海岸工学の分野では余り見られず水産工学の立場からの検討が主である。以下は川合(1991)からの抜粋である。

(1) 藻場の抵抗

流体中に置かれた物体は抗力として流れに作用するために何らかの影響を流れに与えている。抗力 F_D は一般に、流体と物体の相対速度 u_s の二乗に比例する(2.1)で与えられる。

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot u_s^2 \quad (2.1)$$

ここに C_D : 抗力係数、 ρ : 流体の密度、 A : 流れに垂直な射影面積である。このような問題においては、抗力係数の決定が極めて重要となってくる。抗力係数はレイノルズ数の関数であることは知られており、実際の藻場でもレイノルズ数の増大に伴いこの値が減少する事が示されている。例えばコンブ類では $C_D = 5.03 \text{ Re}^{-0.718}$ 、ホンダワラ類では $C_D = 2.850 \text{ Re}^{-0.75}$ とされている。しかしながら現地の実草等では流れに対して積極的に抵抗しない形状であり、また葉体の緑辺部が波縮(波状の縮れ)している実草では、摩擦抵抗が増大するために、抗力係数を明確に表すことが難しいとされている。

(2) 流速場について

陸上の植生群落上の風速分布は地表面の粗度が粗いと考えると、対数則分布(2.2)になるとされている。

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left\{ \frac{z-d}{z_o} \right\} \quad ; \quad z > H > d+z_o \quad (2.2)$$

ここで H : 植生群落の平均高さ、 d : 地面修正量、 u_* : 摩擦速度、 k : カルマン定数、 z_o : 粗度高さである。群落内では群落の抵抗と風の接線応力の変化の釣り合いより(ここでは相対速度を考慮していない)、

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot F \cdot \rho \cdot u^2 \quad (2.3)$$

ここで、 τ : 風の接線応力、 ρ : 空気の密度、 F : 葉面積密度である。混合距離 $1z$ で接線応力を表し、混合距離を一定として(2.3)を解くと、

$$u = u_H \cdot \exp \left[-\alpha \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right], \quad \alpha = H(C_D F / 4l_z) \quad (2.4)$$

となり指数関数的に流速が減少し、実草内においても密度成層がない場合は(2.4)が成立するとしている。実際の流速の観測例は潮流を対象としたHarlin and Thorne-millerの観測例がある。彼らは海底面上から1cmと20cmにおいて実草の有無による流れの変化を測定している。

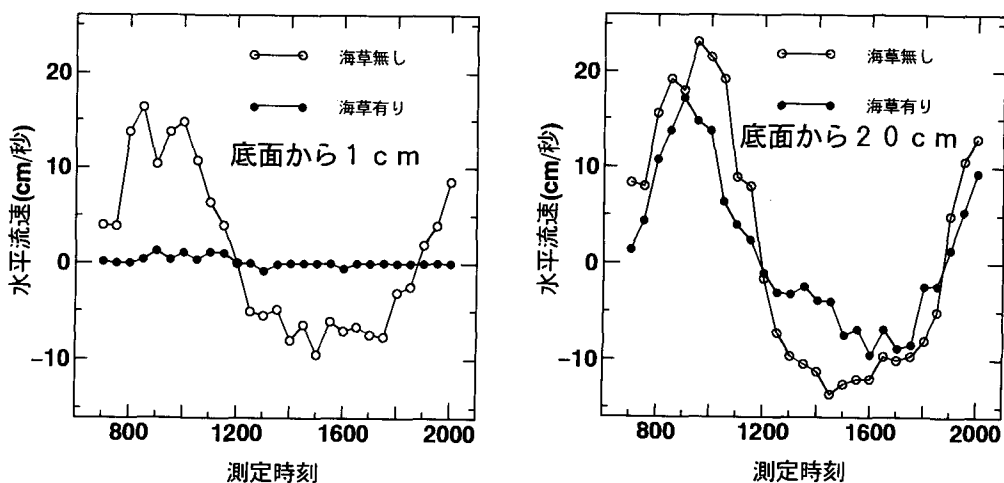


図 2-1 流速の時間変化 (Harlin and Thorne-miller 1982)

図2-1はその測定結果の図である。海草の有無により最大で 14 cm/s の流速差が生じていることがわかる。しかし(2・4)式による検証はなされていない。

(3) 堆積物の変化

砂泥地の海草にとっては、底質の増加や減少は生存に関わるきわめて重要な問題である。底面の変動は流れに関連し、流れには海草が関係している。実際の海草は流れによって揺動する事で、流れから受ける抵抗を減少させている。水路に移植したアマモの場合、平均的な流速とアマモの曲がり角度を測定すると、曲がり角度は流速に対して対数的に減少し、 55 cm/s で実質的に横倒しになるとされている。横倒しとなった海草は互いに重なりあうことにより、流れによる海底面の侵食から根と茎を保護して、流れの方向を上方に変え、堆積物を増加させている。Harlin and Thorne-millerは前述の流速測定を行った場所で堆積物の変化を計測している。流速値や海草の有無によって堆積、侵食の関係が正反対になることもあり、流れと地形変化の明確な関係は見出されていない。藻場では流れ、海草の量、底質の間において微妙なバランスが成立していることを示唆している。その他、水温成層に伴う密度流に関する現地観測もなされている。

2. 2 藻場の適地に関する研究

海岸工学で扱う海域の中の静穏な浅海域の砂地や泥地には、前述の海草であるアマモが生育している場所がある。写真2-1は千葉県富津市相沢下の水深約3mにおけるアマモの分布である。アマモは顕花植物で二種類の増え方をする。一つは春に花が咲き、その種子が冬に発芽して新しい株を生長する形式で、もう一つは秋に枝分かれして生長する形式である。草丈は季節変動をするが、6月に最大(約 120 cm)となり夏を過ぎると次第に枯れ、冬から春にかけて再び生長を繰り返す海草である。このようなアマモ場は直接食用にはならないが、魚介類の幼稚魚の生存場としてきわめて重要であり、1年当たりの有機炭素の生産量も $500\sim2000\text{ g cm}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ で、熱帯雨林での生産量($1500\text{ g cm}^{-2}\text{ yr}^{-1}$)に匹敵し、地球環境に大きな影響を及ぼしているとされている。しかしながら近年の沿岸海域の開発や水質の悪化に伴いアマモ場の面積が減少しつつある。そのために、将来はこのような生態系を考慮した開発やさらには消失したアマモ場の修復や代替藻場の造成等の措置について検討しなければならない。実際にアマモ場を造成するには、



写真2-1 アマモ場(中瀬らによる)

①海底に直接種子を蒔く②苗を育成して海底に移植③自然に生育している藻を移植などの手法が考えられているが、例えば海藻の種子は流速が5cm/secを越える様な流れ場では底面に留まることが難しいとされている(川合、1991)ため、底面近傍の流れについて十分に把握しなければならない。写真2-1に示すようにアマモは砂地や泥地に生息しているため、流れと海藻の相互作用により海底地形が変化し、移植後埋没や流失したりする恐れがある。このような立場から藻場の人工造成やその維持に関する研究が行われてきた。

(1) アマモ場適地の岸側限界(丸山1987)

丸山らは浅海砂泥域のアマモ場の造成技術の開発に努め、生物学的知見を蓄積してきた。この過程において、想定海域の波浪条件と底質条件が藻場造成の成否を左右する一因となることを明らかにしている。

一般にアマモは海岸線に沿って帯状に分布する形態であるために、沖側と岸側に生育限界が存在する。この生育限界は生物学的知見と海岸工学的な知見を総合すれば、沖側は光合成、岸側は波・底質が関係する。現地観測等によれば約10cm程度の底面地形の変化量が、アマモの岸側生育限界であるとしている。丸山らはこの結果に基づいて水理実験によりアマモ場の底質の移動限界としてはシールズ数の0.08が海岸工学上の限界値であるとしている。

(2) 海浜変形手法を用いたアマモ場成立条件(中瀬ら1992、1993)

中瀬らは平面的な広がりが藻場の造成には重要であるとして、現地観測(千葉県竹岡海岸)により藻場の存在範囲を底質と物理的外力より把握することを試みている。現地のアマモの分布の有無とその現地の海域の海浜流、底質移動のシミュレーションを行い、図2-2に示すようなアマモの存在範囲の物理的条件を示している。そしておよその目安として、水深:-5.5m以浅、泥分割合:19%以下、流速:8.0cm/s以下、シールズ数:0.6以下、地形変化量-0.5~4.0cm/日の条件下において、アマモの分布が見られるとしている。この条件下の現象は「種子に対しては適度な堆積傾向、生長したアマモ場に対しては地下茎や茎が露出しない程度までの砂移動」としている。

ただし堆積傾向の領域でも、シートフロー状態よりも、浮遊砂が卓越している領域が最も多くアマモが分布している。これはアマモの生育にとって、適度に堆積物を浮遊状態にして移動させるために、アマモの葉表面に土砂等が付着しない状態や葉表面の生物付着が漂砂によって防止される状態が望ましい環境であることを示唆している。

他の海域のアマモの分布と物理的外力の条件を検討すると、前述の竹岡海岸よりも外力が穏やかな、底質が掃流状態で移動しているような海域にアマモの分布が多く見られる。このような比較的静穏な海域では、

アマモが周年かなりの密度で分布し、その分布変動も小さくなっている。つまり底質状況が安定した場所では周年群落を維持できるが、底質の移動が激しい状態では、アマモ群落は季節的な消長を繰り返すと推察される。そのためにアマモ群落を周年維持するためには、中瀬らの示した前述の外力の条件より、静穏な状況を維持する必要がある。

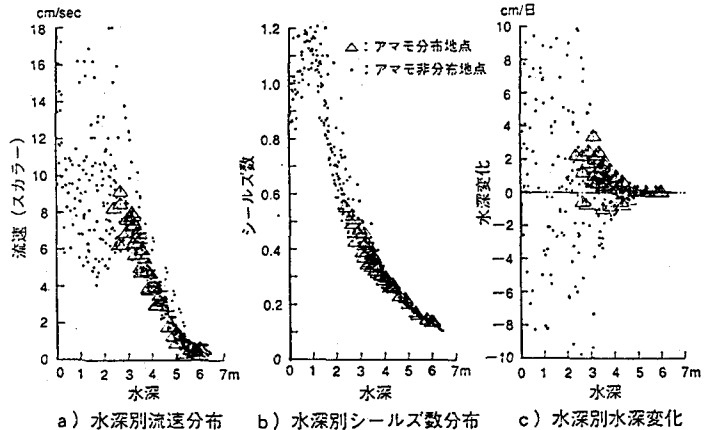


図2-2 水深別物理的条件

2. 3 藻場上の流れ (辻本1992)

著者はこのような藻場が存在する場合における流れと砂粒子の移動について実験的検討を行っている。2次元の造波水路水路に海藻の素材としてポリプロピレンの荷造り用のテープを金網に取り付けたものを海底に設置して藻場として流速場計測し、また藻場に砂粒子を敷設して浮遊砂濃度の測定を行った。

(1) 平均流速、乱れ強度

図2-3に水平方向流速とその乱れ強度の位相変化を示している。岸向き流れを正とし、以後海藻が直立している時の先端を原点として、上方を正、下方を負とした。流れ場を藻場の内部領域(-3cm以下)、先端領域(-3cm~5cm)、外部領域(5cm以上)の3つ分類して考える。流速の位相変化は内部領域で位相が先に進み、最大流速の発生は底面に近いほど早くなり、先端領域では逆に位相が遅れている。流速の振幅は外部領域から先端領域にかけて増大し、内部領域に向かっては減少していく。先端領域の流速波形は海藻の揺動の影響で歪んでいる。

乱れ強度は外部領域では流速波形の反転直後に急激に発生しピークとなっている。先端領域でも流速の反転直後にピークが見られ、また値は小さいが全位相において乱れが生じている。内部領域では顕著なピークは見られないが、常に乱れが見られ、底面近くよりも藻場の中間付近で乱れ強度が大きくなっている。

図2-4は水平方向流速とその乱れ強度の鉛直分布を示している。図中の上の波形は水面の変化を示し(波は左から右に進行している)、破線は静水面を表している。水面がゼロアップとなる位相では、外部領域を除いて岸向き流れとなる。波の峰が通過し始めると内部領域では流速は減速し始めるが、

海藻先端周辺から外部にかけてはほとんど減速せずにむしろ増大し、特に先端領域では著しくなる。水面がゼロダウンとなる位相では、内部領域では流速は0に近くなり、外部では岸向きに卓越した流れとなっている。冲向きに反転後は内部領域と外部領域では冲向きの流れが生じているが、先端領域では岸向きのままである。そのために鉛直方向には一様とはならず、くびれた流速分布である。これらの傾向は各ケースにおいて見られる。このように流速の鉛直分布の一部にくびれが生じているが、日野ら(1977)は一様流中に吹き流

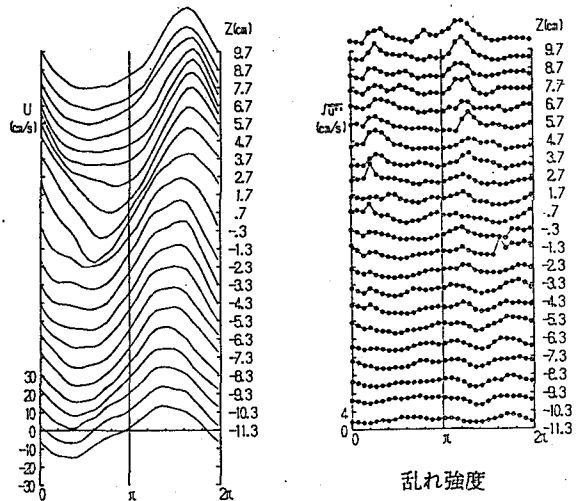


図2-3 水平流速と乱れ強度

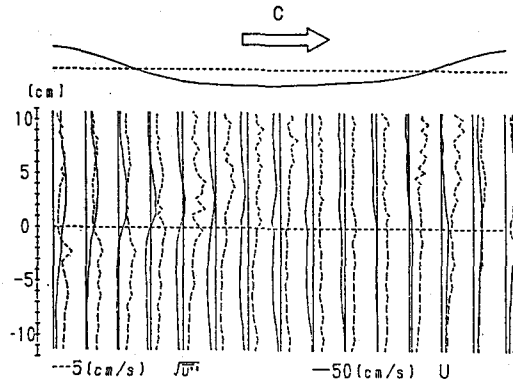


図2-4 水平流速と乱れ強度の鉛直分布

しのような水草を2層配列した実験において流速分布にくびれができると報告している。また植生群落上の風速分布においてもくびれができる事をLandsbergら(1971)が報告している。その後は波の谷が通過する位相では底面近傍を除いて鉛直方向にはほぼ一様に冲向きの流れとなっている。

乱れ強度は、水面がゼロアップ、ゼロダウンをする位相付近で先端領域から外部領域にかけて著しくなる。この時の水平方向流速の値は小さくゼロに近いが、海草がほぼ直立になっている位相であるために流れの抵抗を受け易くなり、乱れが大きくなると考えられる。流速値が比較的小さいケースでも海草は同様に揺動するにも関わらず、先端領域や外部領域での乱れ強度は極めて小さい。室田ら(1983)の一樣流中の実験で揺動が微弱な状態では、平均流のエネルギーから乱れエネルギーへの移行は小さいと報告している。つまり揺動が小さい場合平均流のエネルギーの大部分が海草の摩擦等によって損失され、乱れエネルギーへの移行が少なくなるとしている。揺動が著しい場合はエネルギー損失以上の揺動による乱れが発生するものと考えられる。

(3) 定常流成分、平均乱れ強度

図2-5は一周期平均された水平流速成分(定常流成分)、とその乱れ強度の鉛直分布を示す。海草の先端領域では岸向きの流れとなっており、その流れを補う形で内部及び外部領域では冲向きに流れとなっている。この傾向は他のケースも同様である。乱れ強度は海草先端部では揺動のために乱れがやや大きくなっているが、鉛直方向にはほぼ一様である。

(4) 浮遊砂濃度

揺動する物質がもたらす底面地形の変化は、中瀬らも述べているように藻場自身の死活に関わる問題でありきわめて重要である。実験を通じて非海草部は平坦床のままでほとんど砂粒子は動いていないにも関わらず、海草部には海草間隔とほぼ同じ波長(波高: 1.5 ~ 2.0 cm)の砂漣が形成され、海草の有無により著しく底面形状が変化する。図2-6に浮遊砂濃度の位相変化を示す。前述の3つの領域で考えると海草が短いケースの場合、内部領域では波の谷や峰が通過直後に濃度が高くなり、ピークが2回生じる。先端領域でも同様な変動をするが値は小さい。外部領域での変動はほとんどなく値も小さい。海草が長いケースの場合、内部領域では波の谷が通過時にピークが1度生じ、海草の先端に近づくにつれて変動が小さくなり一定値となる。先端及び外部領域の変動は類似している。なお-2.5~0cmの間は、海草が濁度計に接触するので測定していない。図2-7は一周期平均された浮遊砂濃度の鉛直分布である。従来より浮遊砂濃度の鉛直分布には直線型、“く”の字型、逆“く”の字型の3タイプが存在することが指摘されており、今回の実験では海草長の長い方が逆“く”の字型、短い方が“く”の字型、直線の分布に近い傾向を示している。また直線の変曲点は海草の先端よりやや下であり、各

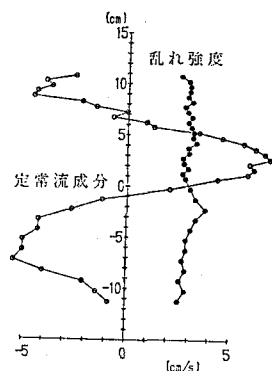


図2-5 定常流と平均乱れ強度

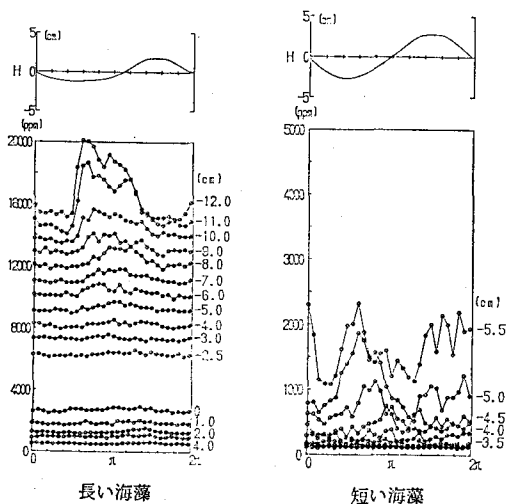


図2-6 浮遊砂濃度の位相変化

ケース共にほぼ同一地点となっている。海草の揺動は先端に近いほどその変位量が激しく、濃度分布の変曲点の位置はこの海草の変位量の著しい下の限界にきわめて近い。海草長の長い方が内部に及ぼす揺動の影響が著しく砂粒子が浮遊しやすくなっている。しかし海草の先端部が内部から外部への流出口を覆うような挙動をするために、砂粒子の外部領域への浮遊を妨げ砂粒子が拡散しにくくなっている。一方、海草長が短い場合は海草の揺動が内部に及ぼす影響は小さく砂粒子の拡散は小さい。ところが内部から外部への流出口が海草の先端部によって覆われないために、浮遊してきた砂粒子は下から団扇のように海草の揺動で煽られ上方へ浮遊しやすくなると考えられる。

3. 海岸構造物としての揺動物質

前述の海草の特性を生かした新しい海岸構造物が近年考案され様々な呼び方がなされている。それらは波浪制御、漂砂制御、流れの制御、漁礁効果などの目的のために検討がなされている。

3. 1 海浜の堆積促進への人工海草 (Priceら1968, 1970)

Priceらがポリプロピレンを素材とした人工海草を用いて、移動床で底質の移動に関する実験を行い、砂粒子が岸側に移動して堆積する事を示している。また水粒子の速度場を二層流でモデル化し、岸向きの流れが人工海草により増加することを示し、その計算結果はプロベラ流速計を用いた流速測定とほぼ一致している。しかしながら彼らのモデル化には人工海草の特性 (例えば海草のサイズ、設置密度) を考慮せずに人工海草部の動粘性係数を実験結果に合わせるようにして計算を行っている。また、海草の設置密度を変化させた実験を行い、密度の増加に伴い岸向きへの移動速度が減少することを示している。

3. 2 人工海草による波高減衰モデル (浅野ら1988)

Priceらの取り扱いでは海草の特性が考慮されていないので、浅野らがそれらを考慮して波高減衰の特性について検討を行った。彼らは室田・福原(1988)の考えにならって運動方程式中に海草による付加応力を線形化して取り込み、図3-1のように流体場を2層 (海草内部と外部) に分けて考えている。速度場はDarlymple-Linの底泥上の波動の解析にならって、非回転成分と回転成分に分けて基礎式を解いている。得られた速度場にエネルギーの釣り合いを用いることにより、波高減衰係数を算出している。以下にその内容を簡単に説明する。

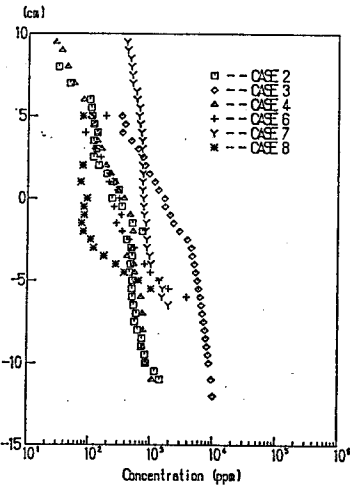


図2-7 平均浮遊砂濃度の鉛直分布

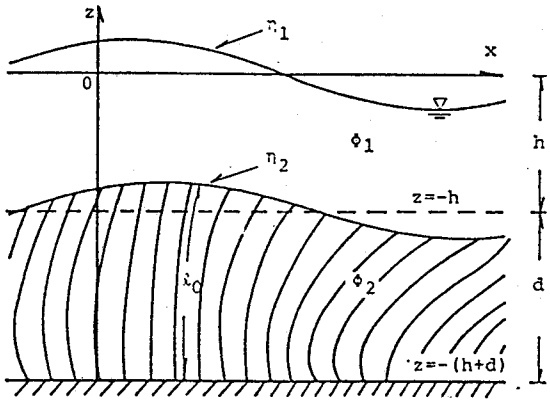


図3-1 2層流モデルの模式図

(1) 流速場の解析

内部領域における運動方程式を(3・1)で表す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} - \frac{1}{2} C_D C_v d_o u |u| \quad (3.1)$$

ここに、 u ：水平流速、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 τ ：せん断応力、 C_D ：海草1本当たりの効力係数、 C_v ：水平面内の海草の面密度、 d_o ：海草の等価直径である。(3・1)式中の右辺第3項が海草の存在により生じた、流体への付加応力である(ここでは、海草の揺動は考えていない)。この項を(3・2)のように線形する。

$$\frac{1}{2} C_D C_v d_o |u| u = \frac{4}{3\pi} C_D C_v d_o \hat{u} \cdot u = D u \quad (3.2)$$

Darlymple-Liuの解析にならい(3・3)のように速度場を分離する。

$$\begin{aligned} u &= \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right) + U_1 & : -h < z < 0 \\ u &= \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) + U_2 + U_3 & : -(h+d) < z < -h \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで、 ϕ_1 、 ϕ_2 ：上層、下層の速度ポテンシャル、 U_1 、 U_2 ：界面から発達する上層、下層の回転成分、 U_3 ：底面から発達する下層の回転成分である(図3-1)。

ϕ_1 、 U_1 に対する方程式は、次式のようなる。

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad (i=1, 2) \quad : -h < z < 0, -(h+d) < z < -h \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = \epsilon_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial z^2} \quad : -h < z < 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = \epsilon_2 \frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} - D \cdot \left(U_i + \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) \quad (i=2, 3) \quad : -(h+d) < z < -h \quad (3.6)$$

速度ポテンシャル ϕ_1 を線形化された境界条件下で求めると次式のようなになる。

$$\phi_1 = -\frac{iga}{\sigma} \cdot \sinh kz [(\sigma^2/gk) + \cosh kz] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (3.7)$$

$$\phi_2 = -\frac{iga}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h+d)}{\cosh k(h+d)} e^{i(kx - \sigma t)} = -i\Phi_2 \cosh k(z+h+d) e^{i(kx - \sigma t)} \quad (3.8)$$

ここに、 a ：水位変動の振幅である。

(3・5)より U_1 の一般解は、

$$U_1 = C_1 \exp[-\beta(z+h)] \cdot \exp[i(kx - \sigma t + \beta(z+h))] \quad (3.9)$$

ここで $\beta = \sqrt{\sigma/2\epsilon_1}$ 、 C_1 ：複素係数、 k ：複素数の波数であり、 $k = k_r + i k_i$ とすると、 $\exp(-k_i x)$ の減衰項が生じる。

一方、(3・6)の界面近傍の流速 U_2 は次式で与えられる。

$$U_2 = C_2 \exp[\mu(z+h)] \exp[i(kx - \sigma t + \nu(z+h))] + \xi \cosh k(z+h+d) \exp[i(kx - \sigma t)] \quad (3.10)$$

ここに、

$$\mu + i\nu = -(D - i\sigma)/\epsilon_2^{1/2} \quad (3.11)$$

$$\xi = \frac{kD\Phi_2}{\epsilon_2 k^2 - D + i\sigma} \quad (3.12)$$

である。(3・11)、(3・12)の C_1 、 C_2 は次の境界条件より決定される。

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} + U_1 = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} + U_2 \quad : \quad z = -h \quad (3.13)$$

$$\epsilon_1 \frac{\partial U_1}{\partial z} = \epsilon_2 \frac{\partial U_2}{\partial z} \quad : \quad z = -h \quad (3.14)$$

以上より、

$$C_1 = \frac{\xi \cosh kd + \epsilon_2 k \sinh kd}{\xi + \lambda} \xi \quad (3.15)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 k \sinh kd - \lambda \cosh kd}{\xi + \lambda} \xi \quad (3.16)$$

ただし、

$$\xi = \sqrt{(D - i\sigma) \epsilon_2} \quad \lambda = \sqrt{-i\sigma \epsilon_1} \quad (3.17)$$

である。

底面近傍の流速 U_3 についても (3.6) より求めることができ、その解は次式で与えられる。

$$U_3 = C_3 \exp[-\mu(z+h+d)] \exp[i\{kx - \sigma t + \nu(z+h+t)\}] + \xi \cosh k(z+h+d) \exp[i(kx - \sigma t)] \quad (3.18)$$

境界条件は

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial x} + U_3 = 0 \quad : \quad z = -(h+d) \quad (3.19)$$

より、 C_3 が次のように求められる。

$$C_3 = -k \frac{\epsilon_2 k^2 + i\sigma}{\epsilon_2 k^2 - D + i\sigma} \Phi_2 \quad (3.20)$$

(2) 波高減衰係数の誘導

波高減衰係数は運動方程式に水平流速 u を乗じて $z = -(h+d)$ から $z = \eta_1$ まで積分し、時間平均を行うと、波のエネルギー密度 E に関する式が得られる。

$$\frac{dE}{dt} = C_g \frac{dE}{dx} = -P_s - P_D \quad (3.21)$$

ここで、 P_s : せん断力によってなされるエネルギー逸散、 P_D : 海草の流体抵抗に起因するエネルギー逸散を表す。 ϕ_2 、 U_1 、 U_2 、 U_3 の記述式を上式に代入すると、

$$P_s = \rho e^{-2kix} \left\{ \epsilon_1 \frac{\beta |C_1|^2}{2} + \epsilon_2 \left[\frac{(\mu^2 + \nu^2)(|C_2|^2 + |C_3|^2)}{2\mu} + |\xi|^2 k \left(\frac{\sin 2kd}{2} - kd \right) \right] \right\} \quad (3.22)$$

$$P_D = \rho e^{-2kix} D \left\{ \frac{|C_2|^2 + |C_3|^2}{4\mu} + \frac{1}{4k} |k\phi_2 + \xi|^2 \left(\frac{\sinh 2kd}{2} + kd \right) \right\} \quad (3.23)$$

となる。

いま、水位変動を次式で与えると

$$\eta_1(x) = a_0 e^{i(kx - \sigma t)} \quad (3.24)$$

波高減衰係数 k_i は次式で計算される。

$$k_i = \frac{1}{g C_g a_0^2} \{ R.H.S. (3.22) + R.H.S. (3.23) \} \quad (3.25)$$

図3-1に示すように揺動のために海草の長さ l と内部領域の高さ d は異なるが、本解析では同じとしている。また抗力係数は室田・福原の考えを用いて

$$C_D = 640 \cdot R_e^{-0.72} \quad (3.26)$$

また、海草の面密度 C_v は

$$C_D = \frac{N}{B \cdot L} \cdot \frac{l}{d+h} \approx \frac{N}{B \cdot L} \frac{d}{d+h} \quad (3.27)$$

ここで、 N ：海草の本数、 $B \cdot L$ ：植生面積、 ε_1 、 ε_2 ：渦動粘性係数で $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $10 \text{ cm}^2/\text{s}$ である。図3-2に水平流速の鉛直分布を示す。ポテンシャル成分からのずれは、底面近くで著しい。図3-3に周波数 f と波高減衰係数 k_i の関係を示す。周波数の増加に伴い k_i の減少が見られ、実験結果と定性的に一致している。その後、浅野ら(1991)は前述のモデルに揺動の効果を取り入れて精密化を行い検討を行い、図3-4に示すような波高減衰に関する理論値と実験値の比較を行い、良好な一致を示している。しかしながら揺動が著しい場合には、乱れ応力や海草の変位の増加に伴う鉛直方向の抗力を考慮する必要があるとしている。また、海草を個々に取り扱うのではなく、群体としての抗力係数の見積が必要であるとしている。

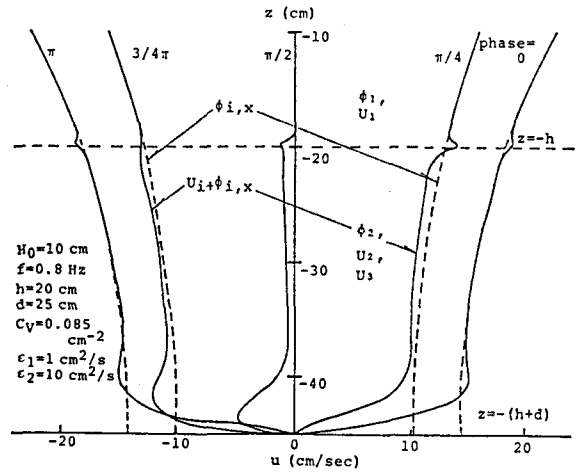
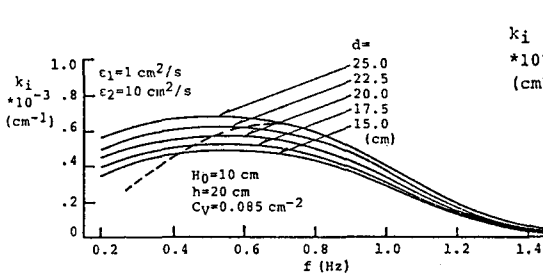
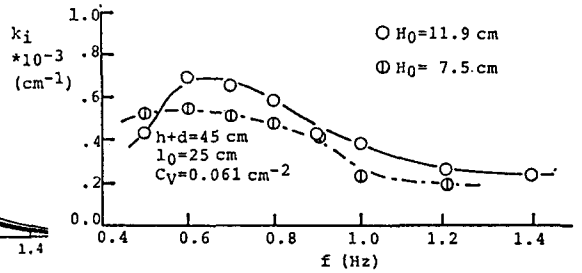


図3-2 水平流速の鉛直分布



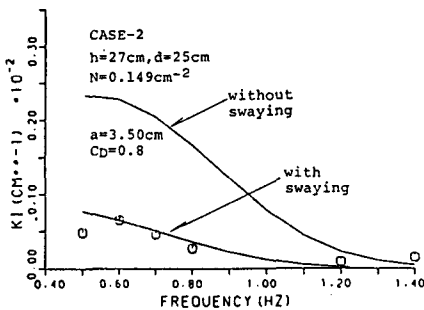
計算結果



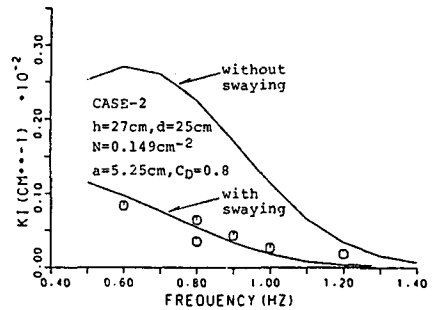
(b) $C_V=0.061 \text{ cm}^{-2}$

実験結果

図3-3 周波数と波高減衰係数の関係



(a) 波高の小さいケース



(b) 波高の大きいケース

図3-4 波高減衰率 k_i に関する実験値と計算値の比較

3. 3 人工海草による底質制御（菅原ら1990、1992）

菅原らは人工海草による底質の移動に関する検討を行っている。移動限界波高が海草の存在により増大し、岸向きへの漂砂効果と堆積効果がある事を実験的に示している。さらに堤体前面の重複波領域の洗掘、海岸侵食の対策工法としての人工海草の可能性を検討している。写真3-1は彼らの用いている人工海草である。堤体前面の洗掘に対して、洗掘領域に堆積効果のある人工海草を岸沖に波長の1/4程度設置した場合、最大洗掘深が40～50%減少し、またその沖側の堆積域に岸向き漂砂効果のある人工海草を設置すれば、洗掘深も35%程度減少することを示している。また図3-5に海岸侵食に対する実験の結果を示している。人工海草を砕波点のすぐ沖側およびさらにその沖側の岸沖に1/4波長程度設置すれば底質は植生区域から岸側に著しく堆積する。

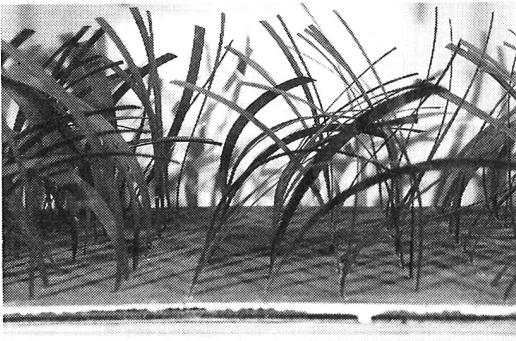


写真3-1 人工海草（菅原らによる）

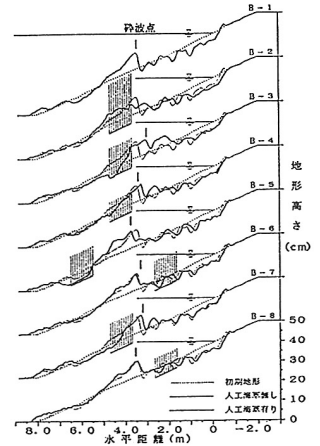


図3-5 断面形状の変化

3. 4 硬質型人工海藻による漂砂制御（小田ら1991）

小田らを中心とする研究グループ（HOKK研究会）は近年の揺動する人工海草では、設置領域を広くする必要があり、生物の付着により重量が増加し倒れるために波浪や底質の制御が充分に行うことができないとして、硬質型の人工海草と称した構造物で漂砂制御を検討している。2次元造波水路の移動床の斜面に人工海草を設置したところ、汀線付近の侵食がなくなり、人工海草の設置帯では顕著な堆積効果が見られる。この硬質型の人工海草の基礎的な漂砂制御の機構の検討するために、直線状の人工海草を用いて砂粒子の挙動を調べている。実験結果より考案された合成繊維による現地実験用の人工海草（写真3-2）を用いて現地での実験が行われている。

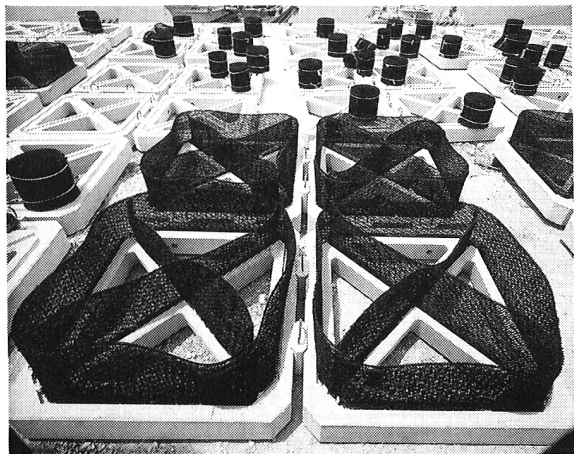


写真3-2 現地用人工海草（小田らによる）

3.5 フラップボード（運輸省第三港湾建設局1992）

小島ら（運輸省第三港湾建設局）

は片岡らの運輸省第三港湾局（1990）が剛性の小さい物質で養浜工の検討を行った経緯から剛性の必要性を痛感し、硬質ゴムを用いた構造物（フラップボードと称している）で波浪制御を試みている。写真3-3にフラップボードを示す。

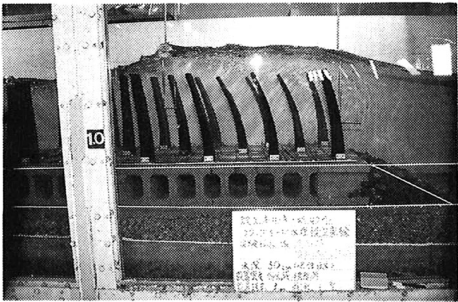


写真3-3 フラップボード（運輸省第三港湾建設局による）

3.6 非対称人工海草（小林ら1993）

小林らは従来の人工海草のようにそれ自体の変位が左右対称にならない、波の峰の通過時に波の進行方向に変位し、波の谷の通過時には直立する人工海草を用いて、水粒子の運動をより積極的に制御することを検討している。図3-6が彼らの提案している人工海草であり、凸面側から凹面側へ容易に変位する構造になっている。図3-7に示すように人工海草を設置することにより、浮子がより積極的に岸向きに促進されることを示している。

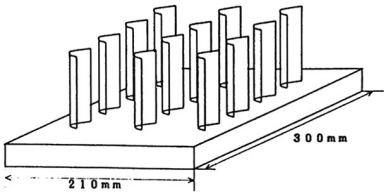
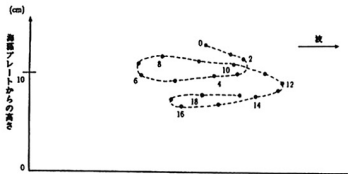
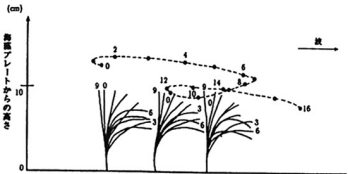


図3-6 非対称人工海草



(a) 人工海草を設置しない場合



(b) 人工海草を設置した場合

図3-7 浮遊粒子の運動機構

4. 揺動物体上の流れの機構（辻本ら1993）

波動中に存在する物体が変位、揺動することにより従来にはない種々な現象が生じている（例えば、流れや漂砂の移動が岸向きあるいは波高減衰が著しくなるなど）。そこで揺動しない物体（以後固定と称する）と揺動する物体（以後揺動と称する）を用いて現象を単純化して取扱い、揺動が及ぼす影響について検討した。以下は著者の最近の研究内容である。実験方法等は（辻本1992）とほぼ同じである。揺動は長さ0.12mの亚克力板で作成した鉛直板（固定）に切れ目を入れて作成した。実験条件は表4-1に示し、周期は1.22秒とした。表中のHon、Hofは各々物体から岸側126cm、沖側95cmの地点での波高、h：水深である。固定では沖側に多少の反射波が見られた。以後の図では波の峰が物体上を通過した時をゼロとし、一周を25分して描いている。なお垂直板上（固定）における渦や砂移動に関しては日野ら（1971a、b）、池田ら（1985、1983）の研究例がある。

表4-1 実験条件

		(h) (cm)	H_{on} (cm)	H_{of} (cm)
揺動	1	30	3.54	4.06
	2	21	2.84	3.63
固定	3	30	3.71	3.82
	4	21	2.95	4.26

4. 1 実験結果

(1) 図4-1に揺動(ケース2)、固定(ケース4)の流速ベクトルを示す。剥離に伴う渦の形成位相が両者では異なり、固定では波の峰の通過時($t/T=0$)に岸側に渦 V_n が形成され、流れの反転時($t/T=0.25$)まで成長を続け、さらに沖へ移動しその際に沖側の渦 V_f を誘起させる。これらの渦は渦対を形成して、自由表面に接近する。波の谷が通過時($t/T=0.5$)に岸側の渦 V_n が自由表面に衝突し、水面が静水面を横切る頃($t/T=0.75$)に遅れて渦 V_f が水面に到達する。

一方、揺動では波の峰の通過時($t/T=0$)には渦 V_n は形成されておらず、半周期前の渦 V_f が自由水面近傍に見られる。流れの反転時($t/T=0.25$)に渦 V_n が形成され、その位置は固定の場合と比較して物体より離れたやや下方に形成されている。この位相の水面近傍では半周期前の渦 V_f の存在が明確である。波の谷が通過頃($t/T=0.5$)にその形状を崩しながら沖側へ移動し、物体の前面では水平流速が発達している。水面が静水面を横切る頃($t/T=0.75$)に沖側に渦 V_f が形成されこれらの渦は対をなして移動する。波の峰の通過前に渦 V_n が水面に到達し、水面が低下する位相に渦 V_f が自由水面に衝突する。

以上の様に固定と揺動では渦の形成位相とその場所が異なり、固定では水面形状が谷から峰へと上昇する位相、揺動では波の峰から谷にかけて水面形状が低下する位相である。

(2) 渦度の分布

図4-2に図4-1と同じ実験条件における渦度の分布の一部を2(1/s)の間隔で示す。渦度の位置と渦とは必ずしも一致しないが、渦の存在を渦度で把握する事はできる。固定では波の峰の通過時に渦 V_n の形成による負の渦度が発達し、流れの反転に伴い上方に移動し、波の谷の通過時には渦 V_f による正の渦度が発生している。負の渦度は自由水面に衝突後、横方向に引き伸ばされた形状となり減少する。また正の渦度も流れの反転時頃に水面付近で減少していく。しかしながら渦度の消長が完全ではなく沖側に拡散している。

一方、揺動では波の峰の通過時に半周期前に形成された渦 V_f の正の渦度が分布し、流れの反転時の渦 V_n の負の渦度の形成時にはほぼ減衰している。波の谷の通過時には正の渦度は成長し、流れの反転時にかけて水面近傍に移動し減衰する。このように揺動では渦の消長が明確であり渦度の拡散は見られない。

(3) 乱れエネルギーの分布

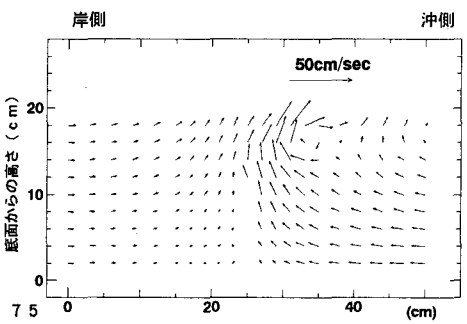
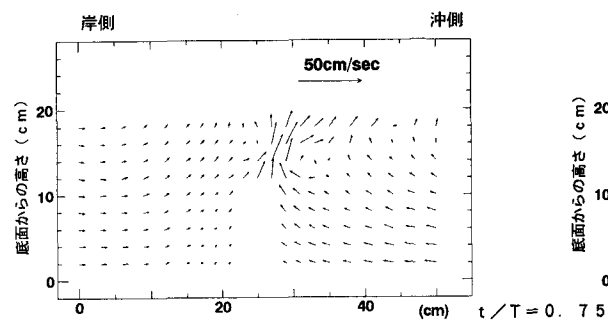
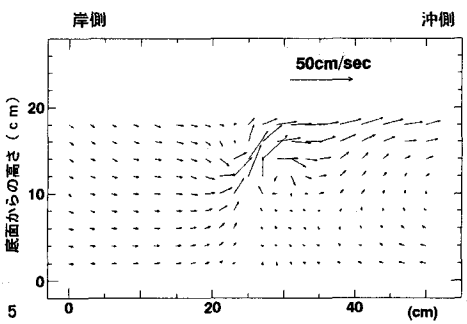
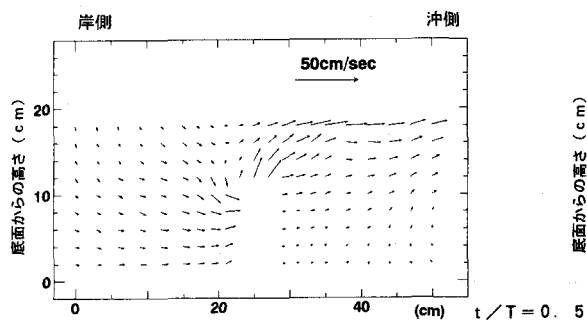
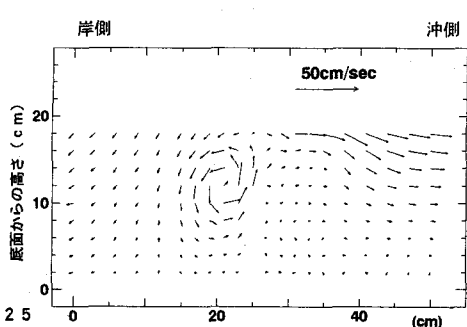
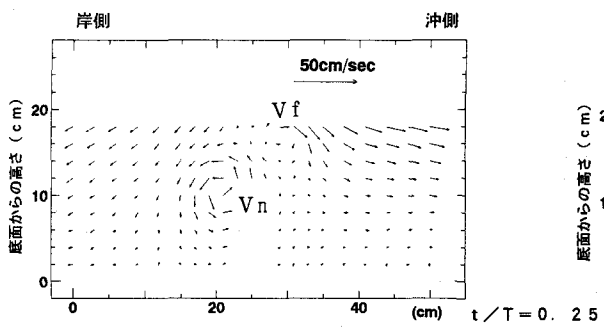
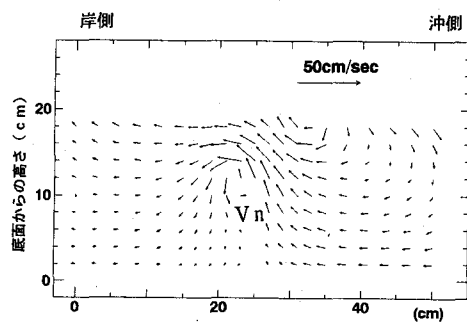
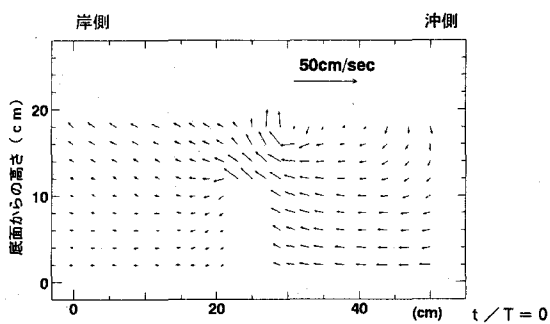
渦の形成、渦度の分布の相違が固定、揺動に見られるがこれを乱れエネルギーの分布から検討する。図4-3にその分布を示す。固定では渦が形成しその移動に伴い高い乱れが見られる($t/T=0.5$)。また渦対の自由水面への衝突による乱れも見られる($t/T=0.75$)。しかしながらこの渦対は波を分散させ、半周期後の波の峰の通過時において沖側の水面形状に変動をもたらす。そのために全周期を通じて沖側には乱れの成分が生じているが、レイノルズ応力との相関がない単なる変動成分がかなり含まれている。

一方、揺動では渦の形成による乱れ小さく($t/T=0.75$)、渦対の水面への衝突後($t/T=0.5$)に水面近傍で乱れが見られる。

4. 2 理論的検討

揺動物体を波動場中に設置することにより、剥離に伴う渦の形成、自由水面の影響、境界の移動などによって複雑な流れ場が形成されている。これらの影響を同時扱うことはきわめて困難であり、前述の浅野らの取り扱いでは、流れの乱流構造までを把握することはできない。

近年、乱流モデルを用いて植生上の流れを検証する試みがなされている。Wilsonら(1977)のcanopy flowに関する研究、辻本(哲)ら(1991)や灘岡ら(1993)が植生の存在する場の開水路流れ場へ乱流モデルを適用してその内部構造の検証を行っている。しかし、波動場の様な非定常流れには著者(1992)が乱流モデルを適用しているが実験結果を十分に説明できていない。これらのモデルは揺動物体を抗力として運動方程式に持ち込み、さらに揺動体よる乱れの生成量やその逸散量をモデル化して取り扱っている。しかしながら、



振動

固定

図4-1 流速ベクトル

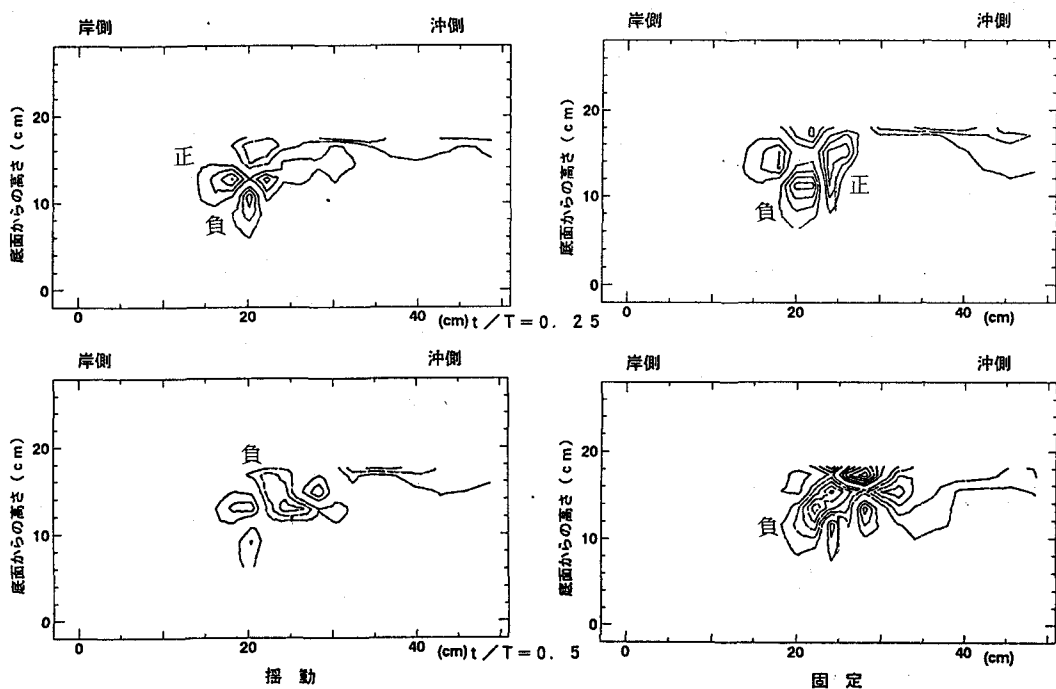


図 4-2 渦度の分布

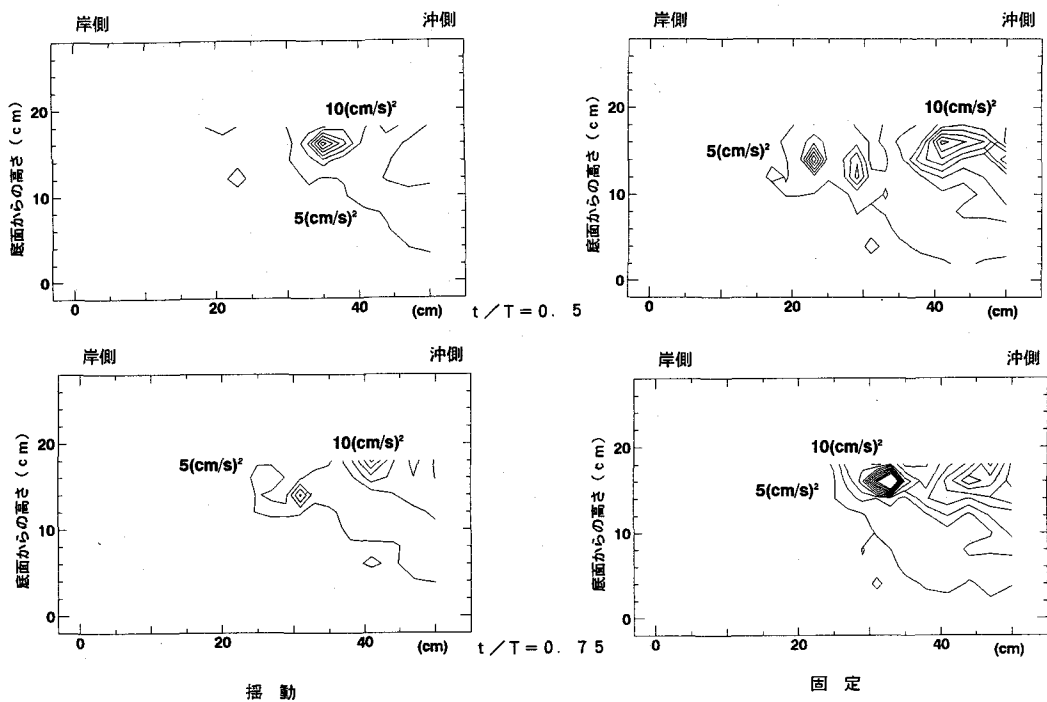


図 4-3 乱れエネルギーの分布

揺動体自身が発生する乱れの機構に関する十分な知見が少なく、特に波動場のような非定常流場では物体の揺動の変動が著しいためにどのようにモデル化するのが重要である。さらに抗力を評価する際の抗力係数には曖昧さが残されており、この抗力に依存する乱れの生成量やその逸散量については明確にされていない。そこで現時点では既存の乱流モデルに特別な項を付加しない（つまり基礎方程式群に抗力を考慮しない）で検討を行う。ただし基礎式には抗力を含んだ型で表示する。

(1) 基礎方程式群

ここでは、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて検討を行った。海藻が存在する時の流れの解析を乱流モデルで行うには、前述のような抗力として取り込むか、海藻の形状を差分格子網の中に取り込むか、あるいはその形状を表す座標系を用いれば原理的に流れ場を求めることができる。本研究では揺動体が単純化されているために、実験的に求められた揺動体の位置を差分格子内に取り込む事で考慮した。

2次元デカルト座標系(x_i ($i=1, 2$)) x_1 : 水平方向、 x_2 : 鉛直方向)で $k-\varepsilon$ モデルの方程式群、つまり連続式、運動方程式、乱れエネルギー k と粘性逸散率 ε の保存則である。これらの式を(4.1)～(4.4)に列挙する。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right\} + g \cdot \delta_{i2} - F_i \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + \nu_t \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \underbrace{C_{f_k} \cdot F_j u_i}_G \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \varepsilon}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} \{ C_{1\varepsilon} \cdot G + C_{f_\varepsilon} \cdot F_j \cdot u_j \} - C_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.4)$$

ここで、 u_i : 流速成分、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 ν_t : 渦度粘性係数、 $u_i u_j$: レイノルズ応力、 C_{fk} 、 C_{f_ε} : 海藻の存在による乱れの制御の（助長や抑制）影響を表す係数であり、この値について村上ら（1988）は0.0、清水ら（1991）は0.07と0.16を用いて計算を行っているが、今後の検討の必要性を述べている。式中の の項が抗力により新たに付加された項である。各方程式中に含まれる乱流モデルの定数は一般に提唱されている値を用いている。以下の図中の水平座標（14.8cm）に物体を設置して計算を行っている。

(2) 計算結果

図4-4に流速ベクトルを示す。固定と揺動では渦の形成位相に差があり、固定では($t/T=0$)、揺動では($t/T=0.25$)付近で渦が再現されているが、これらの渦は位相の経過に伴い小さくなるために、沖側に形成される渦は渦対とならずに独立した渦である。図4-5の渦度の分布を見ると、渦度の分布領域は固定の方が広くその値も大きい。発達した渦度は移動する前に減少してしまい、互いに影響を及ぼすことにはならない。図4-6には乱れエネルギーの分布を示している。物体先端から乱れが発生し上方に広がり、反転後に増加する現象が再現されている。また揺動上の方が乱れが小さくなっている。しかしながら、実験結果のように沖側に乱れエネルギーが集中するのではなく計算領域全体に分布している。

(3) 問題点

今回の揺動上の流れの理論的検討の基礎方程式は、波動場における砂漣上の流れの解析を基礎にして計算を行ったが、その結果は充分満足できるものではない。揺動上の流れには剥離による渦、自由水面、境界の移動などの問題が含まれている。

剥離による渦の形成は砂漣上においても見られるが、その時間的・空間的スケールは揺動上のものと比較してきわめて小さい。揺動上の渦スケールは実験結果からも明らかのようにその主流場程度と考えられる。そのために比較的低周波数の領域で乱れエネルギーが生成されるので、その逸散過程においては次の高周波数

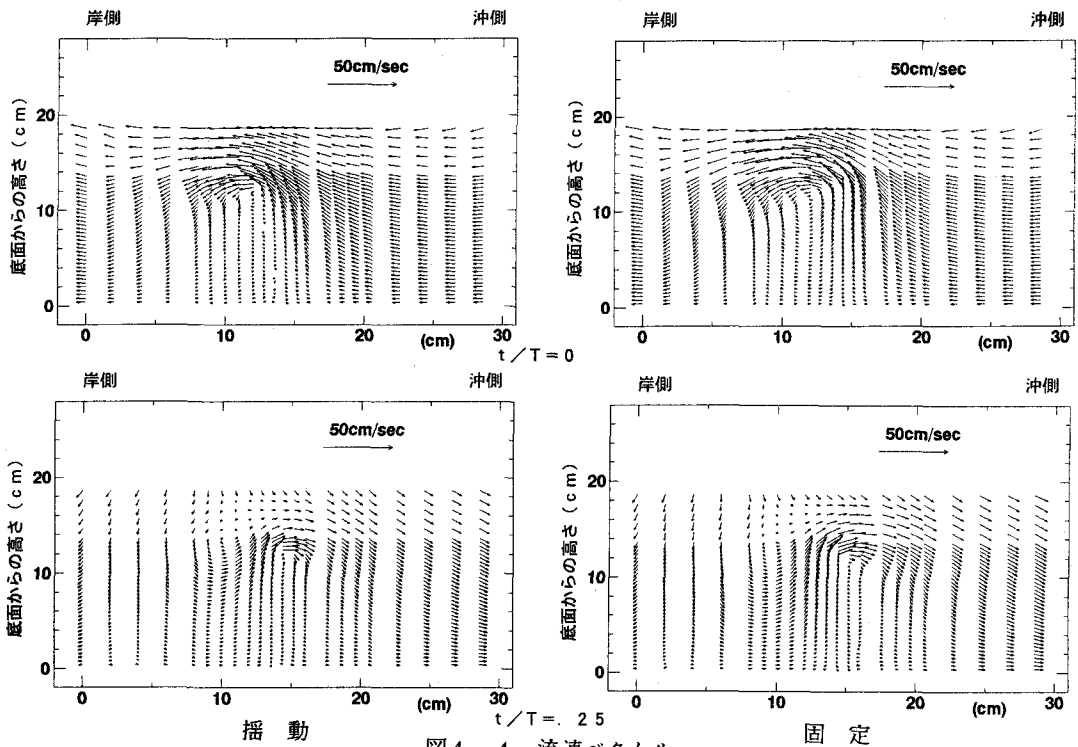


図4-4 流速ベクトル

領域における乱れエネルギーの生成になる。乱れエネルギーのカスケード機構の周波数領域は広い分布を有することになり、従来の単一の長さスケールで代表させる乱流モデルではその適用性には限界がある。

また、揺動物質は水面近傍まで存在するために自由水面の影響を著しく受ける。自由水面は水面に垂直方向の変動速度成分を抑え、水面に平行な速度を強め、乱れエネルギーを減少させたりするが、その影響については十分な検討がなされていない。特に本実験においても明らかのように、波動場では水面が常に上下に変動し、渦対が自由水面に衝突することで水面の変動や沖側に向かう流れが増加したりして、自由水面が及ぼす影響はきわめて複雑である。

境界が移動する場合、通常の流体の流れに加えて計算格子が移動することにより出入りする物理量が存在する。つまり流体が静止していても計算格子が移動することにより物理量の出入りがある。揺動位置を単に計算格子点を与える方法では不十分である。

5. おわりに

波と共に揺動する物質に関して藻場、海岸構造物、理論的扱いについてこれまでの研究の内容を述べた。波動場の流れ中に揺動する物資や物体が存在することにより形成される乱流構造や砂粒子の浮遊機構は海岸工学的にも興味深い。また天然の藻場の効果は前述の内容以外にも、海水中のN、Pなどの吸収能を利用した環境浄化への適用やバイオマス資源資源としての収穫、利用の可能性についても検討がなされている。将来的には天然の藻場を利用した波浪制御、漂砂制御、水質浄化が可能となることを期待している。

本稿をまとめるにあたり貴重な写真を御提供頂いた、運輸省港湾技術研究所（永井紀彦室長、菅原一晃主任研究官）、運輸省第三港湾建設局（小島朗史所長、西村宣信課長、宇戸寿一専門官）、五洋建設（株）（中瀬浩太氏）、HOKK研究会（坂田則彦氏）、また貴重な図面等の引用を快く承諾して頂いた著者の方々に感謝の意を表します。

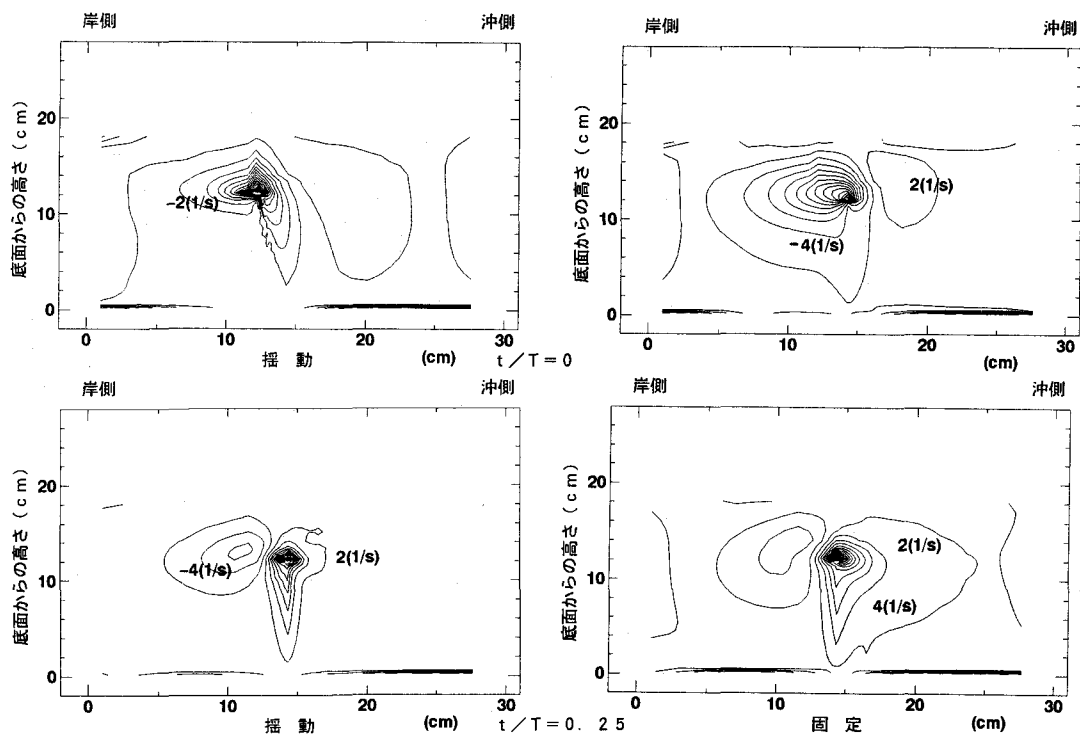


図4-5 渦度の分布

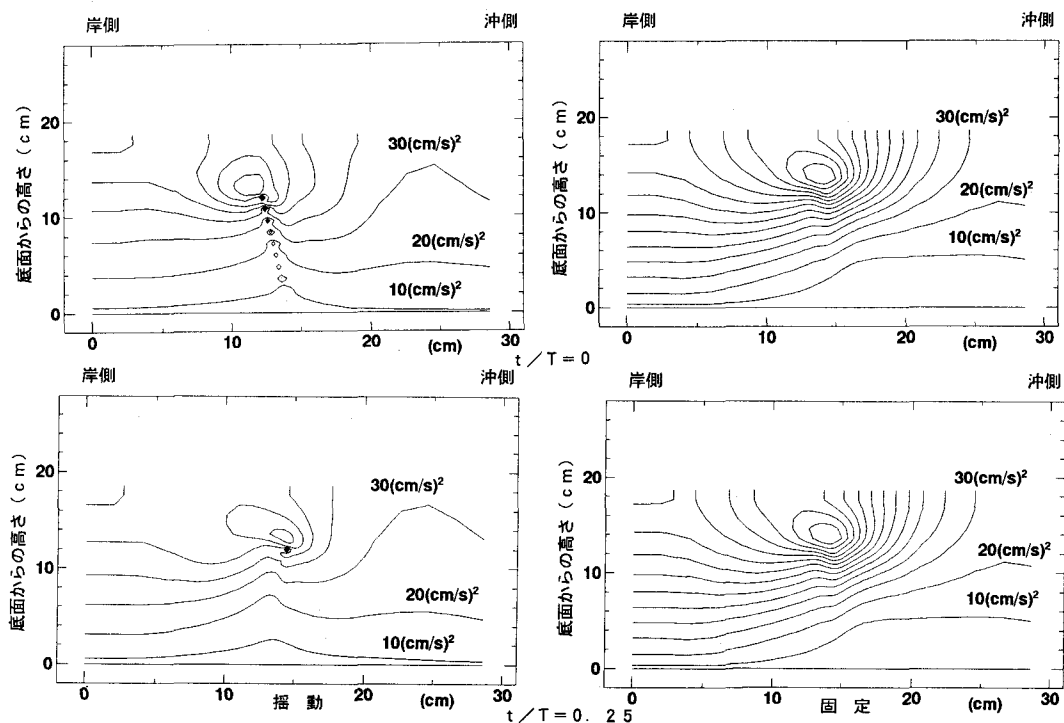


図4-6 乱れエネルギーの分布

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・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
- 上北征男(1986)：増養殖場造成における水工学的諸問題、第22回水工学に関する夏期講習会、Bコース
- 池田駿介・浅枝隆・杉本光由・玉川雅文(1983)：波動場に置かれた垂直板付近の流れと砂の移動に関する研究、第30回海岸工学講演会論文集、pp.284-287
- 池田駿介・浅枝隆・野本健司・木村恵利子(1985)：波動場に置かれた垂直板付近の発生渦の特性とエネルギー逸散、土木学会論文集、第363号、I I - 4、pp.87-96
- 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
- 小島朗史・西村宣信・宇戸寿一(1992)：波エネルギー吸収型波浪制御構造物（フラップボード）の開発について、海洋開発論文集、第8巻
- 片岡真二・岩崎健次・寺川博也(1990)：養浜工としての人工海藻の開発、海洋開発論文集、第6巻
- 川合英夫(1991)：流れと生物と、京都大学学術出版、410p.
- 川那部浩哉(1990)：河川技術者のための(?)生態学 -ほんものの川を求めて-、第26回水工学に関する夏期講習会、Aコース
- 小林智尚・仲座栄三・星野仁・石塚昭彦・石原慎太郎(1993)：非対称人工海藻によつ流れの制御、海岸工学論文集、第40巻、pp.566-570
- 清水義彦・辻本哲郎・北村忠紀(1991)：植生に覆われた砂床上の流れの浮遊砂濃度分布、水工学論文集、第35巻、pp.477-482
- 菅原一晃・入江功(1990)：人工海草による底質移動の制御効果について、海岸工学論文集、第37巻、pp.434-438
- 菅原一晃・永井紀彦(1992)：波による堤体前面の洗掘、海岸侵食に対する人工海草の防止効果、海岸工学論文集、第39巻、pp.461-465
- 高橋稔彦(1991)：浅海域の生物生態について、第27回水工学に関する夏期講習会、Bコース
- 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
- 辻本剛三・高瀬忍・井石昌宏(1991)：人工海藻による波高減衰と底面形状の変化について、土木学会第46回年次学術講演会、pp.1010-1011
- 辻本剛三・長尾嘉浩(1993)：波動場における揺動物体周辺の流れについて、平成5年度関西支部年次学術講演、II-94-1
- 辻本哲郎(1991)：植生のある流れの水理、第27回水工学に関する夏期講習会、Aコース
- 灘岡和夫・八木宏(1993)：SDS & 2DHモデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション、土木学会論文集、No. 473、I I - 24、pp.35-44
- 中瀬浩太・檜山博昭・田中祐一(1992)：海浜変形予測手法を用いたアマモ場の成立条件に関する研究、海岸工学論文集、第39巻、pp.1006-1010
- 中瀬浩太・田中祐一(1993)：海浜変形予測手法によるアマモ場の成立条件の現地への適用、海岸工学論文集第40巻、pp.1061-1065
- 中谷茂(1986)：わが国の藻場造成の展望、沿岸海洋研究ノート、第24巻、第1号、pp.40-52
- 野田英明(1989)：水産土木の現状と問題点、第25回水工学に関する夏期講習会、Bコース

- 日野幹雄(1978):生態系と水理学、第14回水工学に関する夏期講習会、Aコース
- 日野幹雄・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
- 日野幹雄・山崎丈夫(1971a):垂直板による波の反射率・透過率およびエネルギー損失、土木学会論文報告集、第190号、6月、pp.75-80
- 日野幹雄・山崎丈夫(1971b):波による鉛直板よりの渦の形成とエネルギー逸散、第18回海岸工学講演会論文集、pp.61-65
- 丸山康樹・五十嵐由雄・石川雄介(1987):アマモ場の適地選定法(岸側の砂移動限界)、第34回海岸工学講演会論文集、pp.227-231
- 村上周三・加藤信介・B. E. Launder・鈴木啓泰(1988):層流型チャンネル内の気流性状・汚染質拡散性状に関する研究(その6)、生産研究、第40巻、1号、pp.67-70
- 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
- Dalrymple, R. A. and P. L. F. Liu(1978): Wave over soft muds; A two-layer fluid model, J. Phys. Oceano., Vol. 8, pp. 1121-1131
- Landsberg J. J. and G. B. James(1971): Wind profiles in plant canopies(studies on an analytical model), J. Appl. Ecol., Vol. 8, pp. 729-741
- Price, W. A., K. W. Tomlinson and J. N. Hunt(1968): The effect of artificial seaweed in promoting the build-up of beaches, Proc. of 11th Conf. on Coastal Eng., pp. 570-578
- Price, W. A., K. W. Tomlinson and J. N. Hunt(1970): Laboratory test on artificial Seaweed, Proc. of 12th Conf. on Coastal Eng., pp. 959-969
- Wilson N. R. and R. H. Shaw(1977): A higher order closure model for canopy flow, J. Appl. Meteorology, Vol. 16, pp. 1197-1205