

藻場が存在する場における流れと浮遊砂濃度

辻 本 剛 三*

1. はじめに

一般に沿岸の静穏な浅海域の砂地や泥地には海藻の一種であるアマモが生育している場所がある。このようなアマモ場は魚介類の幼稚魚の生存場としてきわめて重要である。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。今後の沿岸海洋の利用の際には地元の水産業との協調がきわめて重要となってくる。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、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。例えば海藻の種子は流速が 5 cm/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)。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。また、近年波と共に揺動する物体(例えば人工海藻)による波浪制御や海岸侵食対策などが検討されている。これらの事柄の共通点は、揺動する物質(物体)と波動場の相互作用により複雑な流れが形成されていると言うことである。

前者に関しては、砂地や泥地に生育しているアマモを対象として、代替藻場を人工的に造成・維持する立場からその方法やアマモの造成適地について検討がなされている。川崎ら(1990)はアマモの生育に重要な要因について(例、水温、塩分、漂砂現象、水中光量)を調べ、それぞれに対する基準値を提示している。Yamauchi(1984)は人工的に藻場を育成する模式図を提案し、中瀬ら(1990)は現地観測によりアマモ場の造成適地として、シールズ数が 0.11~0.5 の範囲であると報告している。

後者に関しては、浅野ら(1991)が海藻の揺動効果を考慮して2層モデルにより藻群上の波の変形特性を調べ、その減衰率の検討を行っている。辻本ら(1991)も

人工海藻の長さを用いたパラメーターで藻場上の波高減衰や底面地形の変化を検討している。また菅原ら(1990)は人工海藻を用いることにより、砂粒子の移動限界波高が増大し漂砂の堆積効果があることを実験により示している。小田ら(1991)も硬質型の人工海藻で漂砂制御の検討を行っている。

以上のように人工海藻による波浪や漂砂制御、あるいは人工藻場の造成などの立場からも揺動する物質の存在する場における流れの構造やそれに伴う砂移動については十分に検討しなければならない課題が多い。そこで本研究では人工藻場の造成の手がかりを得るために、波に揺動する物体が波動場に存在する時の流れや砂移動について実験的・理論的に検討したものである。

2. 実験方法・装置

実験は神戸市立工業高等専門学校土木工学科所有の2次元造波水路(長さ 18 m, 高さ 1.0 m, 幅 0.6 m)を用いた。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固定床の海底に設置して藻場とした。海藻の設置形態は文献(辻本, 1991)を参照。流速測定は水平2次元の電磁流速計(フレック電子)を用いて海藻の間の中央を鉛直方向に 5 mm 間隔で計測した。移動床実験は水路の横断方向の中央部が長さ 2.5 m, 幅 0.4 m, 深さ 8 cm にわたって掘り込まれているので、この部分に中央粒径 0.014 cm の圭砂を敷設した。海藻はコンクリートブロックに取り付けて、砂面の中央部に設置した。波を作用させて底面が安定してから濁度計により浮遊砂濃度の測定を行った。またビデオ撮映により海藻や砂粒子の挙動を観測した。波高計を電磁流速計及び濁度計と並べて設置し、波高計の出力をトリガーとして測定値のサンプリングし、各出力をAD変換しパソコンに取り込み処理した。波形、流速、浮遊砂濃度の測定時間間隔は0.05秒とした。波の周期は1.47秒の1種類に設定した。実験条件を表-1に示す。

3. 実験結果について

3.1 平均流速, 乱れ強度

図-1 はケース 1 の水平方向流速とその乱れ強度の位

* 正会員 工博 神戸市立工業高等専門学校土木工学科 助教授

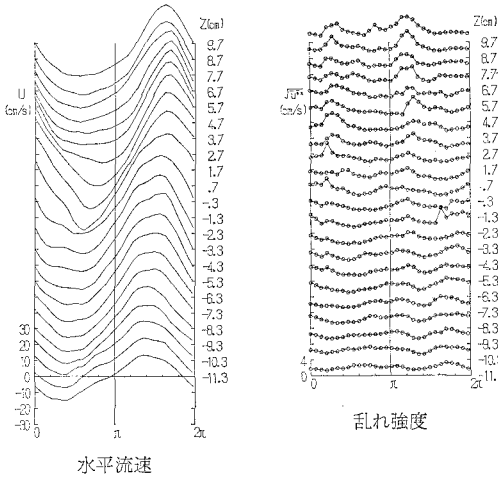


図-1 水平流速と乱れ強度の位相変化

相変化を示している。乱れ強度は各位相、各測点における30個のデータを用いて、各瞬間流速と位相平均流速の差 u' を求め、二乗平均平方根 $\sqrt{u'^2}$ として求めた。岸向きの流れを正として、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。流れ場を海藻場の内部領域（-3 cm 以下）、先端領域（-3 cm ~ 5 cm）、外部領域（5 cm 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、また値は小さいが各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、底面近くよりも海藻場の中間付近で乱れ強度が大きくなっている。

図-2 はケース1の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

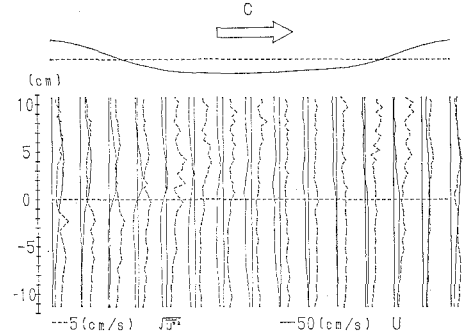


図-2 水平流速と乱れ強度の鉛直分布

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の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）は一樣流中に吹き流しのような水草を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樣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、海藻が最も横倒しになった状態から直立に向かう位相であり、海藻の揺動が著しいために乱れが大きくなると考えられる。流速がケース1と比較して小さいケース2や3では同様に海藻が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藻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いとしている。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。

3.2 定常流成分、平均乱れ強度

図-3 は一周期平均された水平流速成分（定常流成

表-1 実験条件

ケース No.	波高 H (cm)	水深 h (cm)	波長 L (cm)	海藻高 d (cm)	測定項目
1	7.9	30	231	12.5	u, u', v, v', c
2	3.9	30	231	12.5	u, u', v, v', c
3	3.0	20	194	12.5	u, u', v, v', c
4	5.5	40	257	12.5	u, u', v, v', c
5	7.8	30	231	6.5	c
6	3.7	30	231	6.5	c
7	3.0	20	194	6.5	c
8	5.6	40	257	6.5	c

分)とその乱れ強度の鉛直分布を示す。海藻場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沖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。乱れ強度は海藻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。

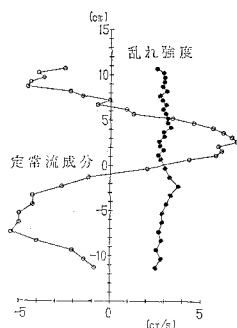


図-3 定常流成分と平均乱れ強度

3.3 浮遊砂濃度

揺動する物体で漂砂制御を行うためにも、また人工的に藻場を造成するにもこれらの物質による底面地形の変化を把握する事は重要である。実験を通じてケース1, 5の非海藻部には砂漣(波長 6.0 cm, 波高 1.5 cm)が形成され、海藻部の砂はほとんど消失していた。他のケースの非海藻部は平坦床のままでほとんど砂粒子は動いていない。また藻場部には海藻間隔と同じ波長(波高: 1.5~2.0 cm)の砂漣が形成されていた。図-4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藻が短いケース8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値も小さい。海藻が長いケース3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、海藻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-2.5~0 cmの間は、海藻が濁度計に接触するので測定していない。図-5は一周期平均された浮遊砂濃度の鉛直分布である。

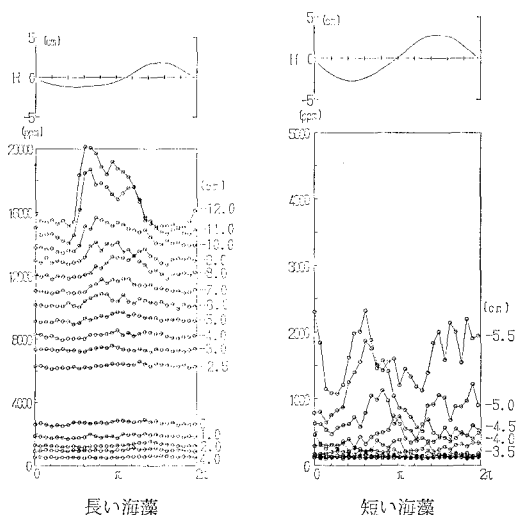


図-4 浮遊砂濃度の位相変化

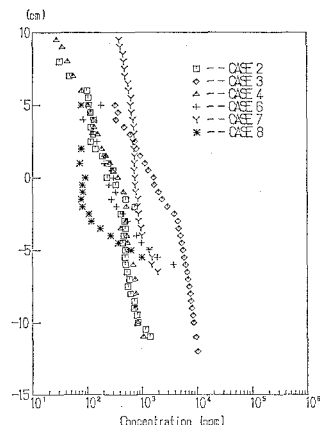


図-5 一周期平均の浮遊砂濃度の鉛直分布

直分布である。従来より浮遊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、今回の実験では海藻長の長い方が逆“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藻の先端よりやや下であり、各ケース共にほぼ同一地点となっている。海藻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藻の変位量の著しい下の限界にきわめて近い。海藻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。しかし海藻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、海藻長が短い場合は海藻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藻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藻の揺動で煽られ上方へ浮遊しやすくなると考えられる。

4. 理論的検討

4.1 従来の研究

海藻の様に流れと共に揺動する物体が流水中に置かれた場合の流れ場については日野ら(1977)、室田ら(1983)の研究がある。他方気象の分野では植物群落の内外における流れの構造についての検討がなされている(大久保, 1975)。ここでは、 $k-\epsilon$ 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は乱流モデルで行うには、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直交曲線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。しかしながら本研究では、海藻が流れと共に揺動するので容易に前述のことは行えない。そこで本研究では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)で式(1)

のような形状抵抗項で海藻の存在を考慮した。このような取扱いは Wilson ら (1977), 村上ら (1988), 清水ら (1991) によってなされている。しかしながら波動場のような非定常流で海藻が揺動する場合についての検討はなされていない。

$$F_i = \frac{1}{2} C_{Di} \cdot \lambda \cdot U_i \cdot \sqrt{U_j^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, F_i : 形状抵抗, C_{Di} : 抵抗係数, λ : 植生密度, U_i : 流体と海藻の相対速度であるが, ここでは海藻は水粒子と同じ速度で揺動するとした。抵抗係数はその形状が変化するために流速値により異なるものと考えられる。例えば陸上の植物のイネの場合, 風速 2 m/s で 0.59, 風速の増加と共に 0.29 まで減少するとされている。海藻においても海藻長さをを用いたレイノルズ数 Re で整理すると $503 \cdot Re^{-0.718}$ になるとされている (川合, 1991)。海藻は流速の増加に伴い横倒し易くなり, 流れに逆らわなくなっている, 抵抗係数が減少するのが揺動する物質の特徴である。しかしながら波動場では, 波の峰や谷が通過する時に海藻が直立するために形状抵抗を受け易くなり, 位相により抵抗係数が異なるために, ここでは理論的検討の第一段階として川合にならってレイノルズ数で抵抗係数を評価した。

4.2 基礎方程式について

基礎方程式群は辻本 (1991) が用いた低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデルの方程式群である。形状抵抗項を運動方程式に付加し, 形状抵抗による乱れエネルギーの生成や逸散率の増加を各方程式の生成項に考慮した。これらの式を (2)~(5) に列挙する。

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{U_i' U_j'} \right\} + g \delta_{i2} - F_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_j k}{\partial x_j} = & -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right\} \frac{\partial k}{\partial x_j} \\ & + \nu_t \left\{ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right\} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \\ & + C_{fk} \cdot F_j U_j \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \varepsilon}{\partial x_j} = & -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right\} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \\ & + \frac{\varepsilon}{k} \{ C_{1\varepsilon} \cdot f_1 \cdot G + C_{f\varepsilon} \cdot F_j \cdot U_j \} \\ & - C_{2\varepsilon} \cdot f_2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで, U_i : 流速成分, k : 乱れエネルギー, ε : 逸散率, P : 圧力, ν : 動粘性係数, ν_t : 渦度粘性係数 ($= C_\mu \cdot f_\mu \cdot k^2 / \varepsilon$), $\overline{U_i' U_j'}$: レイノルズ応力, C_{fk} , $C_{f\varepsilon}$: 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, この値については清水らは 0.07 と 0.16, 村上

らはこの値を 0.0 として計算し今後の検討の必要性を述べている。ここでは海藻内部に 0.07, 0.16, 海藻先端付近に 0.21, 0.48 の値を与えた。式 (5) 中の G は, 式 (4) 中の太線部分を意味する。また式中の $\sim$ の項が海藻の存在により新しく付加された項である。各方程式中に含まれる定数 $C_\mu=0.084$, $C_{1\varepsilon}=0.75$, $C_{2\varepsilon}=1.83$, $\sigma_k=1.69$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, ε の生成項の非回転成分の定数 $C_{3\varepsilon}=2.75$ とした。減衰関数は Reynolds により提唱されている値を用いた。計算格子は水平方向 5 分割, 鉛直方向を 18 分割し, 海藻の先端付近は特に細かくし, 時間刻みは一周を 20 分割した。計算手法は辻本 (1991) が砂漣上の流れの解析を行った手法を用いた。約 20 周期間計算を繰り返すことにより周期解を得ることができた。

4.3 計算結果及び考察

図-6 は各位相の流速ベクトルと乱れエネルギーの平方根で定義した乱れ強度 $k^{1/2}$ の鉛直分布である。海藻の先端付近で流速が加速されている。しかし流速の位相

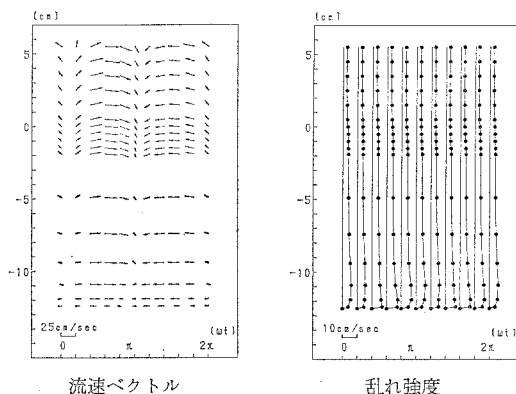


図-6 流速ベクトルと乱れ強度の位相変化

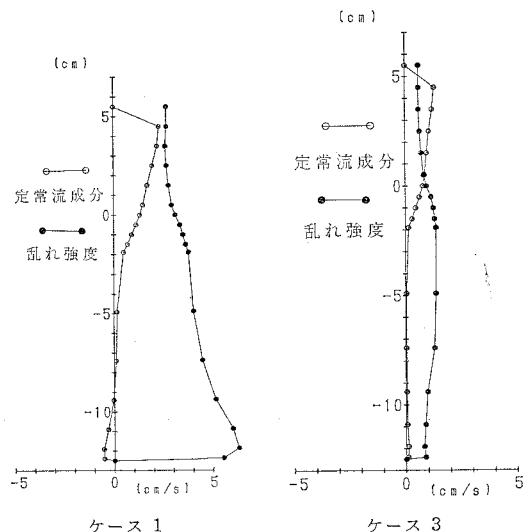


図-7 定常流成分と平均乱れ強度

差や鉛直分布のくびれは現れていない。乱れ強度は鉛直方向にはほぼ一様であり、底面近くのでやや大きくなっており壁面乱流の傾向が強く境界条件等の検討が必要である。

図-7 はケース 1, 3 の一周期平均された水平流速と乱れ強度 $k^{1/2}$ の鉛直分布である。海藻の先端付近で岸向きの流れが発達し、内部領域では沖向きの流れ(ケース 1)となり実験結果と同様な傾向を示している。乱れ強度はケース 1 では内部領域で値が大きくなり、ケース 3 では先端付近で増大しているが、全体的にその値は小さい。ケース 3 はケース 1 と比較して揺動が小さく、また海藻内部における流速も遅いために平均流の持つエネルギーが海藻内で消費されて乱れが抑制されているのではないかと考えられる。

5. 結 論

本研究では人工藻場の造成法や人工海藻による漂砂制御の立場から揺動する物体を用いて流れ場や浮遊砂濃度場の検討を行い次の様な知見を得た。

①海藻が存在する流れ場は鉛直方向に 3 つの領域に分割でき、藻場内部では流速の振幅は小さくなる。また、藻場内部と外部では沖向きの定常流が卓越し、藻場の先端付近では岸向きの定常流が卓越している。

②乱れ強度の鉛直分布はほぼ一様となる。

③ $k-e$ 乱流モデルを用いて海藻内部の沖向きの定常流や先端領域で岸向きの定常流を表すことができる。

④浮遊砂濃度の位相変化は内部領域ではピークが 1~2 個生じている。外部領域ではほぼ一様な分布である。一周期平均の浮遊砂濃度分布は海藻長が短い方が“く”字型分布、長い方が逆“く”字型分布となる。

⑤藻場内の砂粒子は流れにより浮遊しやすくなり、海藻先端の岸向きの定常流成分により岸向きに移動する。

本研究では、海藻による乱れの制御効果(助長、抑制)を形状抵抗で表わしており、揺動する海藻場においては常に乱れの制御効果が生じている訳ではない。今後は、波の非定常性による揺動の形態の位相変化を基礎方程式中に考慮したモデルの検討が必要である。

海藻内の漂砂は海藻場と非海藻場の境界に堆積しており、特に岸側に堆積した量が多い。海藻内部では砂粒子は海藻によってその移動が妨げられており、内部での漂砂の移動は少ないと考えられる。一方、流速分布や浮遊砂濃度分布の測定結果からも明かなように、先端付近で

の濃度変動はほとんどなくほぼ一定であり、定常流成分は岸向きであることを考えると、先端付近の漂砂は岸向きに移動することになり、小田らの観測結果と同様な傾向となっている。しかしながら Li ら(1973)の植生を対象とした一様流中の実験では、植生の配置形態によって砂粒子の移動量が著しく異なると報告されているようにこの点についてもさらに検討が必要である。

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.
- 大久保 明(1975): 生態学と拡散, 筑地書館, 217 p.
- 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.
- 川合英夫(1991): 流れと生物と, 京都大学学術出版会, 410 p.
- 川崎保夫・石川雄介・丸山康樹(1990): アマモ場造成の適地選定法, 沿岸海洋研究ノート, 第27巻, 第2号, pp. 136-145.
- 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.
- 辻本剛三(1991): 砂運上のような斜離を伴う流れ場への乱流モデルの適用について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 216-220.
- 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.
- 中瀬浩太・楢山博昭・田中裕一(1991): アマモ場造成工法の開発(その1), 五洋建設技術研究年報, 第20号, pp. 7-14.
- 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.
- 村上周三・加藤信介・B. E. Launder・鈴木啓泰(1988): 層流型クリーンルーム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.
- 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.
- Li, R. and H. W. Shen (1973): Effect of tall vegetations on flow and sediment, ASCE, Vol. 99, HY5, pp. 793-814.
- Wilson, N. R. and R. H. Shaw (1977): A higher order closure model for canopy flow, J. Appl. Meteorology, Vol. 16, pp. 1197-1205.
- Yamauchi, K. (1984): The formation of Sargassum beds on artificial substrata by transplanting seedlings of *S. horneri* (Turner) C., Bull. J.S.S.F., Vol. 50 (7), pp. 1115-1123.