

画像計測による海草周辺の水理特性に関する実験的研究

辻 本 剛 三*・山 田 浩 之**・柿 木 哲 哉***・日 下 部 重 幸****

コルク材, アクリル材, 鉄材を用いた模型海草周辺の流動場を PTV 画像計測により位相を制御して計測し, 流速, 乱れ強度を算出した。模型海草先端部で発生している正負の渦度の存在による鉛直流れが確認できた。また, コルク材が実海草の運動に類似していることも分かった。浮遊砂濃度を画像の砂粒子数より算定し, 各瞬間における鉛直濃度分布を推定することが可能となった。移動床に淡水性の実水草を用いて地形変化実験を行い, 水草が底面地形の変化を制御していることが確認できた。これは水草の生長による砂層の硬化でなく, 流れ場の制御に伴う影響であった。

1. はじめに

藻場の有する有効性が様々な角度から指摘され, 藻場の保全や人工的な藻場造成が検討されている。アマモ場, ガラム場等の藻場は, 魚介類の幼稚仔の保育場であるとともに, 栄養塩類の吸収や酸素の放出によって海洋環境の保全に重要な役割を果たし, 水産資源涵養としての機能が従来から認識されている。しかし, 東京湾, 伊勢湾, 瀬戸内海の内湾海域では, 埋め立て等の開発と環境の悪化により藻場が減少の一途をたどっている。そのために近年沿岸生態系の保全の観点から, 海岸・港湾事業でもその保全等が試みられている。

保全対策としては, 藻場形成に関わる要因を明らかにし, 藻場造成適地の選定や効果的な造成方式の検討などが行われている。藻場造成は播種法や株移植による手法が中心であるにも関わらず, 海草の生態に立脚した対策でないために十分な成果が得られていない。播種法の場合は種子の着底, 株移植の場合は地下茎の伸長が海草の発芽・成長する過程で重要な生態である。そのために藻場造成を行う際には, 藻場内外の流動機構と底面地形との相互作用の解明が不可欠である。

このような背景より本研究では, 従来計測が困難であった藻場内外の流動機構や底質の浮遊機構を画像計測により解明し, 流れと底質の挙動から海底地形の変化を調べ, 藻場内外の水理学特性を実験的に検討した。

海草, 藻場, 人工海草と流れ, 波浪, 底質などの水理学的諸量に関する研究は著者らを始め, 浅野ら(1988), 小田ら(1991), 菅原ら(1990), 伊福ら(1991), があり, 藻場の保全, 人工的な造成, 海岸侵食防止としての機能について着目した研究が行われている。近年では, 林ら(2001)の水辺植生群の消波特性に関して模型と実ヨシ群を用いた実験, 田村ら(2002)の藻場の可撓性の有無が藻場キャノピーに与える影響に関する実験, 金沢ら(2002)の藻場造成の補助的手段としての人工海草による

底面地形抑制効果に関する実験的研究がある。

2. 流速計測実験

(1) 模型海草

実際の海草は, やや岸側よりの位置で波の周期に近い位相で運動している。また, 画像計測を行うためにレーザー光が模型海草を通過する必要がある。これらの条件を満たす模型海草として, コルク材の一部を OHP シートで加工して模型海草を作成した。模型海草の運動形態による流動の変化を比較するため, 自力で復元するアクリル材と運動しない鉄材を用いて模型海草を作成した。

(2) 実験方法

実験は神戸市立工業高等専門学校の 2 次元造波水槽(長さ 18 m, 高さ 0.8 m, 幅 0.6 m)で行った。流速計測は 2 次元性を確保するため, 図-1 に示すように高さ 15 cm の模型海草を 8.5 cm 間隔で設置した。

画像計測は PTV 計測(ダブルパルス Nd:YAG レーザー, 制御用コンピューター, CCD カメラ)を用いた。Nd:YAG レーザーの波長は 532 mm, パルス幅は 5~7 ns, 出力は 1 パルス当たり 25 mJ である。CCD カメラは, 解像度 1008(H)×1018(V)ピクセルであり, Nd:YAG レーザーと同期させて任意の時間間隔(最高 5 μs)で連続して 2 枚画像を得ることができる。2 枚の画像は 15 Hz でサンプリングができる。

計測点直上の水位変化をトリガーとしてレーザーを制御して照射し, 波の峰前後, 波の谷前後, ゼロアップ,

二次元造波水槽

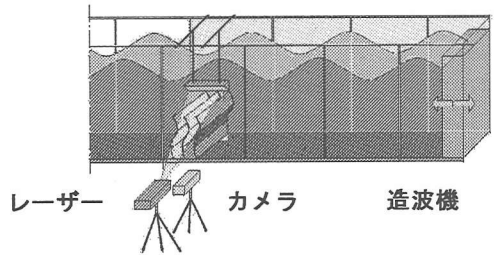


図-1 実験装置

* フェロー 工 博 神戸市立工業高等専門学校 教授
** 学生会員 神戸市立工業高等専門学校専攻科
*** 正 会 員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校 講師
**** 正 会 員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校 教授

ゼロダウンの6つの各位相において、約100組の画像を取り込んだ。PTVアルゴリズムは、竹原らによる Super-resolution KC 法を用いた。この方法は現在提案されている PIV アルゴリズムの中で最も空間解像力が高いものの1つである。実験条件はコルク材模型では、水深40 cm、周期1.96 s、波高6.7 cm、アクリル材・鉄材模型では、水深35 cm、周期1.85 s、波高7.4 cmとした。

3. 実験結果

(1) 流速・乱れ強度

図-2, 3にコルク材模型海草上の各位相毎の流速ベクトルと最大流速で無次元化された乱れ強度の分布を示す。図中の線は模型海草を表している。流速値は各位相での100組の瞬間値を空間平均して算定し、乱れ強度は平均流速と瞬間流速場の偏差より求めた。コルク模型海草は一周期の大半を岸側で屈曲して振動し、実海草と同様な挙動を示している。ゼロアップ位相では、模型海草上部は鉛直流れのみであり、内部は岸向きの流れである。底面は近くには沖向きの流れが生じている。海草内部に沿って乱れが著しい場所が見られる。波の峰通過前後では、海草上部、内部、底面共に岸向き流れになっており、一部鉛直上向きの流れも見られる。峰の通過後は水平方向流れの加速が著しい。ゼロダウン後、沖向き流れが上部、岸向き流れが先端部に見られ、渦の形成が確認される。波の谷通過前後には、海草の内部、上部は沖向き流れとなっており、海草先端部には反時計回りの流れがある。乱れ強度は波の峰通過前後に模型海草の先端やその

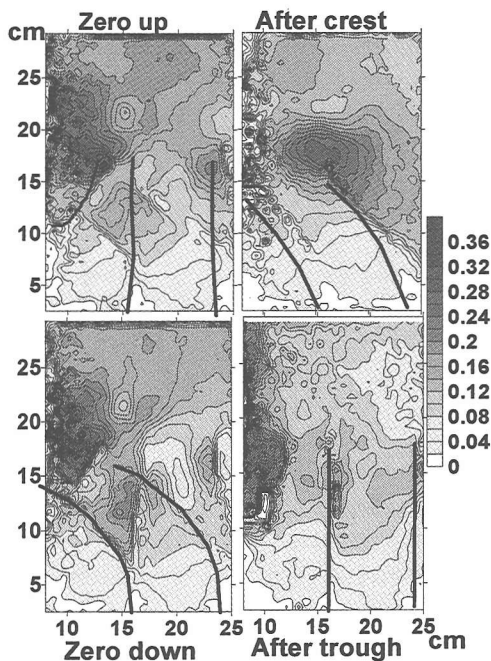


図-3 乱れ強度 (コルク模型)

背後において生じ、最大流速の約30%程度になっている。波の谷通過前後には、模型海草先端付近の乱れは海草内部に移動し減衰する。波の谷通過時は著しい乱れは生じない。

図-4にアクリル材模型の流速・乱れ強度を示す。水平流速の反転時に自力で元の位置に戻るため、岸側、沖側に対して対称に振動する。ゼロアップ時は、上部は鉛直上向きの流れがあり、模型上部と内部とは水平方向の流向が反対である。波の峰前後では、模型内外ともに岸向き流れが卓越し、底面近傍では反時計回りの流れが見られる。ゼロダウン時も上部と内部での水平方向の流向が反対であり、底面に集中する流れが見られる。波の谷通過後は模型内部で時計回りの循環流的な流れが生じている。乱れの発生している場所や位相はコルク模型に類似しているが、その分布空間スケールが広い。大きさは最大流速の20~30%程度である。

図-5に鉄板模型の流速・乱れ強度を示す。通常の水面変動に対応して誘起される流れ場となっているが、全位相で模型内部では反時計回りの大きな循環流が形成されており、波の峰前後には模型先端部に小さな時計回りの循環流も見られる。わんど内の流れに類似している。乱れ強度は全位相を通じて小さく、他の模型海草と比較して極めて小さい。このように、海草模型の運動形態に応じて流動形態が著しく異なる。

(2) 鉛直分布

図-6, 7にコルク材模型海草間の中央における水平流

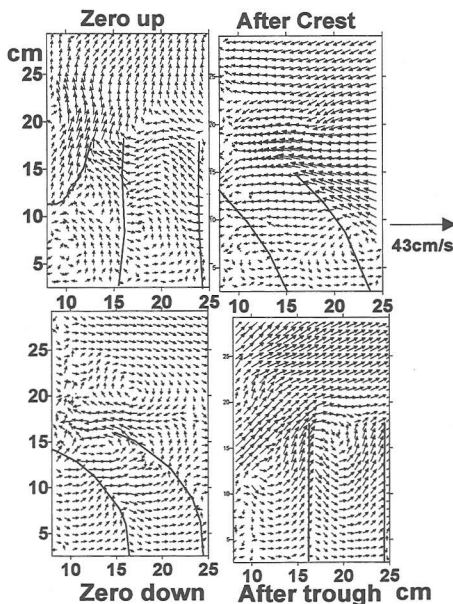


図-2 流速ベクトル (コルク模型)

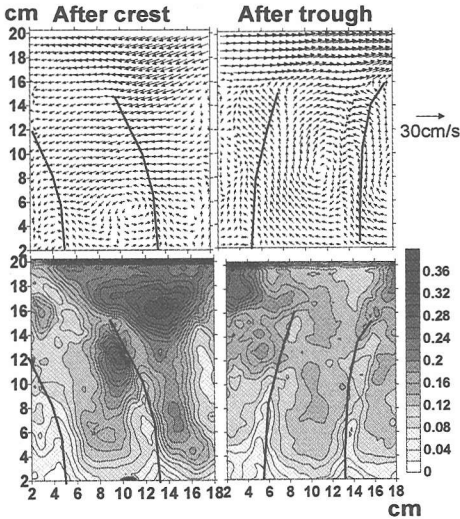


図-4 流速ベクトル・乱れ強度（アクリル模型）

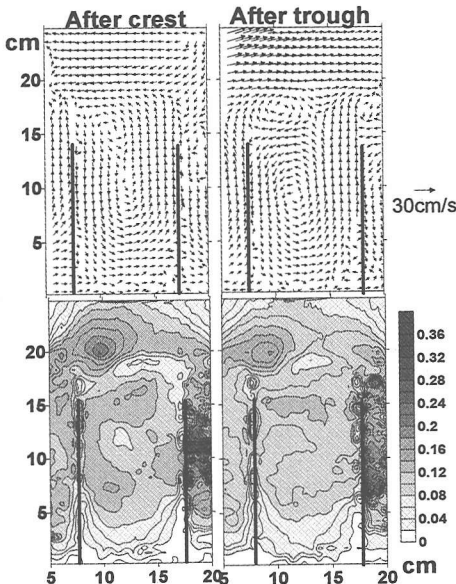


図-5 流速ベクトル・乱れ強度（鉄材模型）

速，乱れ強度の鉛直分布である。マイナス側が岸向き，プラス側が沖向きである。底面から模型海草の先端位置（縦軸 15 cm）付近から境界層が発達している。底面から増大した水平流速は，模型海草先端での乱れより急激に減少することがわかる。この傾向は，実物の海草周辺の Shi ら（1995）や Nepf ら（1997）による計測や観測結果に類似した結果である。彼らは海草の茎と葉の部分が流れに及ぼす影響で，葉の部分の寄与が大きいことも示している。

（3）渦度と鉛直流速

図-8，9 にコルク模型先端部（底面から 15 cm）での

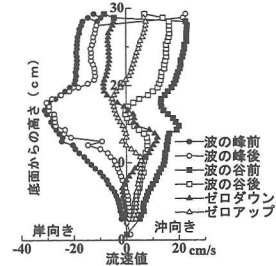


図-6 水平流速鉛直分布

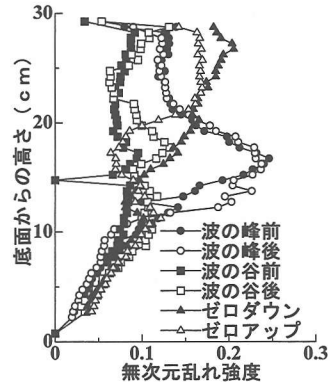


図-7 乱れ強度鉛直分布

海草間（約 8.5 cm）における鉛直流速と渦度の分布を示す。位相により模型海草の先端位置は一定でない。渦度はストークスの定理により，循環値を用いると（1）式で与えられる。

$$\Gamma = \oint U \cdot dl = \int (\nabla \times U) \cdot dS = \int \omega \cdot dS \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで， Γ ：循環値， U ：流速ベクトル， l ：面 S を囲む積分経路， S ：流体要素の面， ω ：渦度である。渦度は（1）式より（2）式によって求めた。

$$\omega = \frac{\Gamma}{4\Delta X \Delta Y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで， ΔX ， ΔY ：積分経路の格子間隔である。

渦度は反時計回りを正，時計回りを負としている。海草間において正負の渦度が交互に見られており，ゼロダウン，ゼロアップでは水平方向の流向が変化する位相であるが，渦度の場所的変化が類似している。波の峰や谷の通過前後は時間的な差が僅かであるにも関わらず，場所的な渦度の変化が著しく，正負の渦度が混在している。この正負の渦度により，図-8 の $\uparrow$ に示すように波の峰前後では場所を移動しながら鉛直上向き流れが生じ，波の谷前後でも上下方向の流れが生じており，これらが海草間の内外との物質交換に寄与すると考えられ，図-10 にそのイメージを示す。

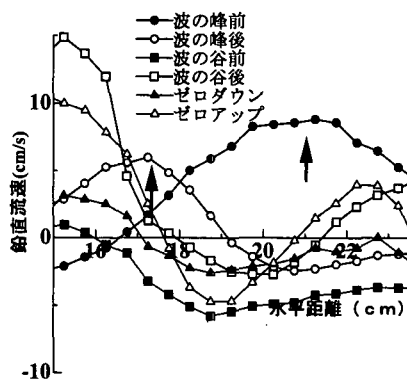


図-8 鉛直流速分布

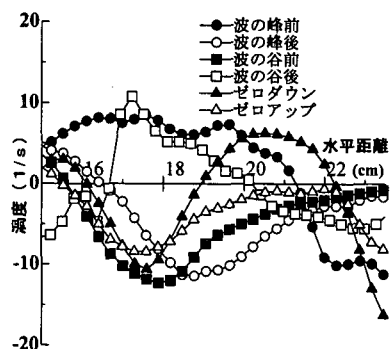


図-9 渦度分布

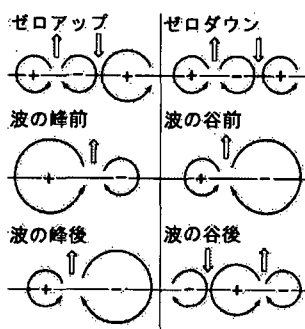


図-10 模型海草先端付近の流れ

4. 浮遊砂濃度計測

(1) 実験方法

海草間の浮遊砂濃度の計測は流速計測と同様に画像計測により求めた。使用した計測機器は流速計測と同じである。浮遊砂濃度は画像の質（輝度分布）に依存し、画像の輝度は照明の照度やカメラの絞り、浮遊砂物質の濃度、粒径などにより光の減衰・散乱の影響を受けやすいことが知られている（灘岡ら1999）。従来の手法では輝度と浮遊砂濃度との間に線形関係を仮定して濃度を算定するが、予備実験においてほぼ均一な濃度場の可視化画像

から輝度値を算定したところ、可視化画像の輝度分布にはかなりのばらつきが見られ、線形関係が保たれていないことが明らかとなったので、本研究では浮遊砂粒子を画像から直接判読し、濃度を推定した。輝度情報から粒子を判別する手法として、粒子マスク相関法（江藤ら、1996）を採用した。

(2) 実験結果

図-11に可視化実験より得られた画像の例であり、直接得られた可視化画像では粒子を判読し難いので色を反転させ調整した。図中の山は砂漣であり、鉛直底面は砂漣の谷を基準とした。この図の波の位相はトラフ付近であるため、ゼロアップ時に巻き上げられた浮遊砂が沖側に輸送される状態である。海草の影響はそれほど著しくない。

図-12は図-11の可視化画像を画像解析した結果である。図中の黒点は抽出された砂粒子である。図-11の可視化画像と粒子の空間分布が類似しており、粒子の抽出過程が適切に行われていることが解る。

図-13は図-12を基にして得られた一周期平均された粒子数濃度の鉛直分布である。ここでの粒子数濃度は、ある一定面積当たりの抽出された粒子数である。ここでは、 25×25 ピクセルとしているので、約 14 mm^2 当たりの粒子数となる。底面から上方に向かって減少し、海草が

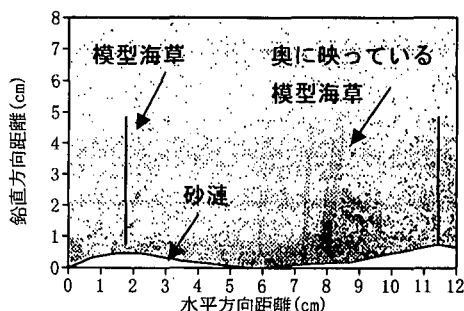


図-11 可視化画像

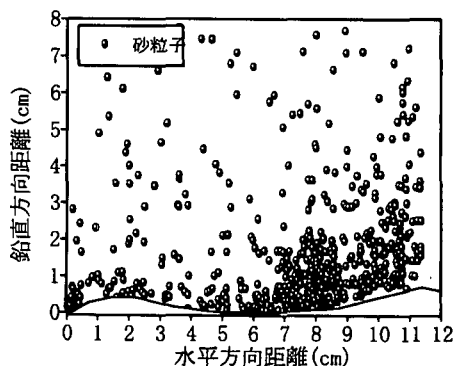


図-12 抽出された粒子の空間分布

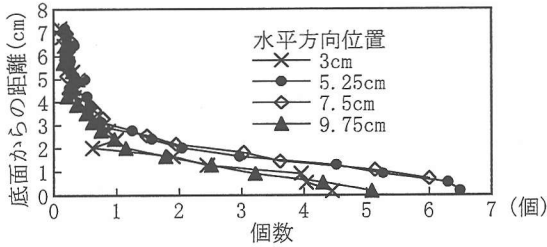


図-13 粒子数濃度の鉛直分布

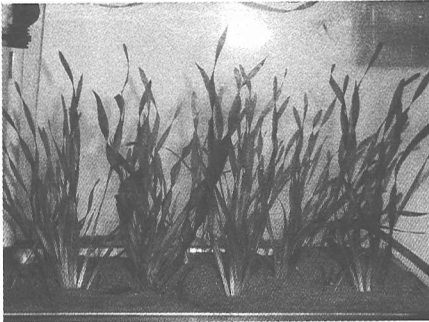


写真-1 実験に用いた水草

らの距離に応じて分布個数が異なり場所による差が見られた。

5. 実植生による地形変化実験

アマモのような海水性の植生を室内実験で使用することは困難であるため、写真-1に示すようにアマモ形状に類似した淡水性の水草スクルーバリスネリアを用いた。十分に根を成長させるため、33 cm×27 cmの容器に10株植え、約1年間水温25度前後の水槽に砂(中央粒径0.5 mm)を入れた容器中で生育させた。1株から3-4の枝葉が出ており、そのスケールは10 cm×0.5 cmであった。

実植生の地形変化への影響として、底質面の硬度と流動場の制御が想定されるために、山中式土壤硬度測定器を用いて水草の成長による底質層の硬度を調べたが、水草の有無による差はなかった。水深16.5 cm、波高6.3 cm、周期1.25の波条件下での地形変化は、海草無し：波高1.1 cm、波長6 cm、海草有り：波高0.7 cm、波長4.5 cmの砂漣が形成され、砂漣スケールが30~40%程度縮小し、沖側への底質移動量が減少した。

6. ま と め

画像計測により模型海草内外の流動場の計測を行った。模型海草としてコルク材が適当であり、藻場先端付近に存在する正負の渦による鉛直上下流れが存在していることが明らかとなった。画像による砂粒子個数から濃度場の推定が可能である。実海草(水草)による底面地形制御を確認することができた。

謝辞：本研究で用いた画像解析のプログラムを提供していただいた近畿大学竹原幸生先生に感謝いたします。また、本研究の一部は科学研究費基盤研究(c)(課題番号14550520)による助成を受けたことをここに付記して謝意を表す。

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回海岸工学講演会論文集, pp. 138-142.
- 伊福誠・岩田充浩・小田一紀(1991): 人工海藻周辺の流れと漂砂-LESとporous body modelによる解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 461-465.
- 江藤剛治・竹原幸生・道奥康治・久野悟志(1996): PTVのための粒子画像抽出法に関する検討-粒子マスク相関法について-, 水工学論文集, 第40巻, pp. 1051-1058.
- 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.
- 金沢 剛・芳田利春・川崎和俊(2002): 波高減衰および地形変化抑制を期待した人工海草設置法に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1316-1320.
- 菅原一晃・入江 功(1990): 人工海草による低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.
- 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, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 341-345.
- 辻本剛三(1994): 揺動物質(海草等)上の流れと砂移動, 水工学に関する夏期研修会講義集.
- 辻本剛三(1995): 乱流モデルによる単純化された藻場上の流れと浮遊砂濃度特性について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 451-455.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・宮崎早苗・森井順之(1999): 現地連続計測型多成分濃度計開発のための基礎的研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1316-1320.
- 林建次郎・高橋 祐・重村利幸(2001): 湖岸や海岸に生育している水辺植生に作用する波力と消波機能の評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 721-725.
- Nepf, H. M., J. A. Sullivan and R. A. Zavistoski(1997): A model for diffusion within emergent vegetation, Limnol. Oceanogr. 42, pp. 1735-1745.
- Shi, Z., J. S. Pethick and K. Pye(1995): Flow Structure in above the Various Heights of a Saltmarsh Canopy: A Laboratory Flume Study, J. Coastal Research, 11, pp. 1204-1209.