

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

辻 本 剛 三*

1. はじめに

海岸域の藻場は、産卵場、幼稚魚の育成場として魚類・甲殻類・軟体動物などの生物の生産・再生産の場となり、また海岸環境の保全に重要な役割を担っていることが、近年科学的に明らかにされてきている（倉敷市，1994）。そのために砂地や泥地においてアマモ場の造成手法の開発やその適地に関する物理的条件の検討がなされている（例えば、辻本 1994）。実際に藻場造成を行う上で底質の運動機構の把握が重要である。特に藻場は流れに対して抵抗として作用し、またそれ自身が運動を行うために流れとの相互作用によって、より複雑な流れ場を形成している。さらに、近年は柔軟な材料を用いた海岸構造物による波浪・漂砂制御を行う試みがなされている。

本研究ではこのように流れと共に運動する藻場における流れの構造とそれに伴う砂粒子の濃度分布について実験的、数値計算により検討を行った。

2. 実験手法

実験には 2 次元造波水路（長さ 18 m、高さ 1.0 m、幅 0.6 m）を用いた。実際の藻場を想定するには、配置形状、素材等解決しなければならない様々な問題がある。ここでは藻場が流れと共に単純な正弦運動を行うように、 d ：高さ 12 cm の薄いアクリル板（以下、海藻と称す）に細い切れ目（1 mm 程度）を長さ 10 cm まで入れて水路幅に設置して、単純化した藻場とした。海藻の本数と設置間隔によって藻場の設置形態を変化させた。流速測定は鉛直 2 次元の電磁流速計（アレック電子）を用い、水平方向、鉛直方向に 2 cm 間隔で計測を行った。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 に渡って掘り込まれている箇所、中央粒径 0.014 cm の珪砂を敷設し、前述の藻場を同様に設置した。浮遊砂濃度の計測には濁度計（計測技研）を用いた。また振動台によって用いた海藻の固有振動数を測定したところ、それらはおおよそ 4.5~5.5 Hz であった。波高計、電磁流速計及び濁度計の出力の AD 変換（0.05 秒間隔）を

表-1 実験条件

ケース	波高 (cm)	水深 (cm)	周期 (sec)	設置間隔 (cm)	数	測定項目
1	4.1	30	1.22		1	u, w
2	3.6	21	1.22		1	u, w, c
3	7.3	21	1.22		1	c
4	4.8	21	1.22	10	2	u, w
5	3.1	21	1.72	10	2	u, w, c
6	3.9	21	1.22	10	3	u, w
7	4.6	21	1.22	20	2	u, w
8	4.3	21	1.22	20	3	u, w

行い、パソコンに取り込み処理をした。表-1 に実験条件を示す。表中 u, w, c は水平流速、鉛直流速、浮遊砂濃度を表している。以下の図では、沖側の海藻上を水面がゼロアップした位相を原点 ($t/T=0$) としている。また、図中の横軸上の $\uparrow$ は海藻の設置位置を示す。

3. 実験結果について

3.1 流速ベクトル

図-1(a) にケース 2 の流速ベクトルを示す。なお図中の空白部は、測定器が海藻と接触するために測定が不可能な箇所である。図-1(b) にケース 2 の条件で運動をしない海藻上の流れも示す。波動場に物体を設置すると流れの剝離に伴う渦が形成され、その形成位相は最大流速付近であると一般に言われている。海藻のような流れと共に運動する藻場での剝離渦は、流れの反転時に形成され、運動をしない藻場での渦は波の峰の通過時に形成される。両者には $1/4$ 周期の位相差が存在し、その発生位置も異なっている。そのために放出後の剝離渦の挙動は、自由水面に対して追従するようになり、運動をしない藻場上の渦の挙動とは異なる（図省略）。

図-2 には複数海藻を設置したケース 8 の流速ベクトルを示す。剝離渦は海藻に拘束された境界では明確には形成されないが、岸側の海藻付近には岸向きから沖向きの反転時に剝離渦（反時計回り）が形成されるが、その規模は図-1 と比較して小さい。さらにその近傍には、時計回りの渦が見られる。この渦は半周期前の海藻の揺動に伴う流れが、海藻先端付近に波状の境界の形成し、その流れに沿って発生したものと考えられる。一方、沖側

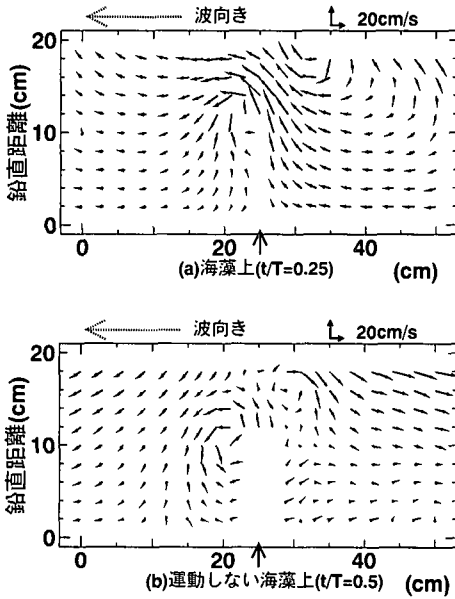


図-1 流速ベクトル (ケース2)

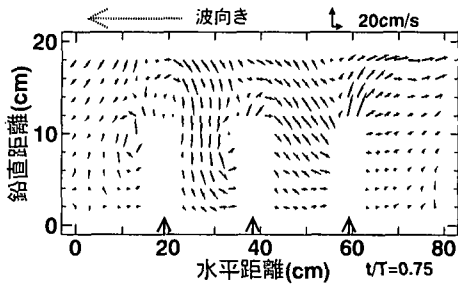


図-2 流速ベクトル (ケース8)

の海藻には剝離渦は明確に形成されていない。

3.2 定常流成分

図-3 に一周期平均された流速を示す。藻場より離れた空間には、平均的な流れが存在しないにも関わらず、藻場の先端付近の流れは空間的に波状に揺動している。藻場の直上から鉛直上向きの流れが発生し、海藻の間に下向きの流れが生じ、一種の循環流を形成している。その空間的な広がり、水深のスケールに匹敵するほどのきわめて大きな規模を有し、底面近傍まで達しているため、海藻間の浮遊砂に影響を及ぼしている。これらの傾向は、海藻の数が2本の場合でも同様に見られる。しかし、海藻の設置間隔が図-3の半分のケース4～6や海藻が1本の場合は海藻の先端付近の流れの揺動が見られず、反射波の影響と思われる沖に向かう流れが卓越する。

3.3 浮遊砂濃度分布

一般に一周期平均された浮遊砂の鉛直分布は“く”の字型、逆“く”の字型、直線型の3つに分類出来る。非

碎波帯の流れ場では、浮遊砂の供給は底面からなされるため（例えば、砂漣上の渦の乱れなど）底面近傍の濃度は高くなり、底面から離れるに伴い減少する分布形状をなす。図-4 にケース3の海藻の設置位置より、沖側、岸側の浮遊砂濃度の鉛直分布をスプライン関数で描く。図中の値は海藻の設置位置からの距離を示す。

変曲点を水深の半ばに有する“く”の字型を示すが、変曲点から上方にかけて一様もしくは増大する分布形状を示している。これらは通常非碎波帯の浮遊砂濃度には見られない分布形状であり、鉛直方向に濃度分布が一樣となるためには、碎波帯や風成流場のように上方からの乱れ等の供給が必要である (Nielsen, 1985; 辻本, 1995)。実験波は非碎波であり、変曲点上の濃度の一様化は、図-1(a) (b)の流速分布より、海藻の先端近傍から形成される剝離渦による乱れ的作用によるものと考えられる。特に岸側の剝離渦は顕著であり空間的スケールも大きいために、底面から浮遊した砂粒子の拡散に寄与している。なお底面には砂漣が形成されていた。

図には示していないがケース4の海藻間の浮遊砂濃度の鉛直分布は、図-3に示された循環流によって鉛直方向にほぼ一樣な分布になっている。ただ、海藻間の壁面近傍の流速値は小さいために浮遊砂濃度値は小さい。

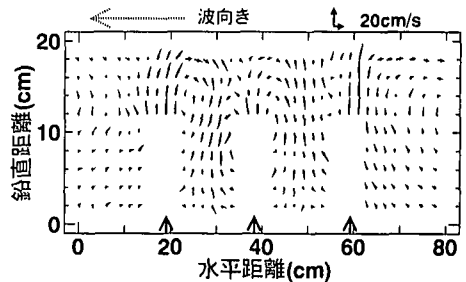


図-3 定常流成分 (ケース8)

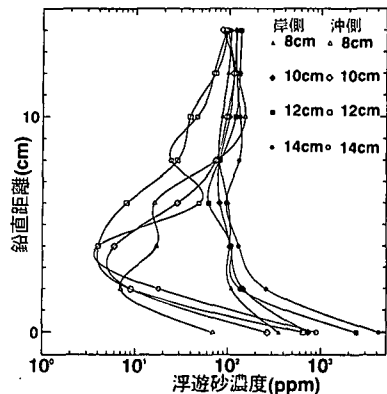


図-4 1周期平均浮遊砂濃度の鉛直分布

4. 数値計算による検討

4.1 従来の研究

藻場のように流れと共に運動する物質が流れ中に存在する場の研究は古くから行われている（例えば日野ら, 1977）。近年, 辻本（哲）（1991）らや灘岡ら（1993）は植生の存在する開水路流れ場に乱流モデルを適用してその内部機構の検証を行っている。波動場のように非定常な流れ場の乱流構造や砂移動機構の検討は極めて少ない。浅野ら（1988）は人工海草による波高減衰モデルを検討しているが、乱流構造までは議論していない。著者（1992）は乱流モデルによる流れや乱流構造の検証を行っているが定量的な議論が出来ていない。伊福ら（1994）も人工海草が設置された場における流れと漂砂現象の検討を行っている。これらの研究の特徴は藻場を抵抗として運動方程式に持ち込んで扱っている点である。乱流構造を議論するには藻場自身による乱れの生成量やその逸散量のモデル化が必要であるが、特に波動場の藻場のように運動が著しい場合の乱れの生成機構について充分な知見が少ない。さらに抵抗としてモデル化する際の抗力係数や仮想質量係数の扱いには曖昧さが残されている。

4.2 基礎方程式群について

基礎方程式群は著者（1989）が砂漣上の浮遊砂濃度の計算に用いた k - ϵ 乱流モデルを基本としているので、異なる箇所についてのみ記述する。また藻場は前述のように抵抗として扱わずに直接差分格子内に取り込んだ。

海藻の固有振動数と実験波の振動数は異なるため、海藻はほぼ実験波と同じ周期で運動する単純な正弦運動として扱った。本来は藻場の運動と流れ場とはリンクさせて扱うべきであるが、ここでは実験的観測より得られた藻場の変位速度を直接与えた。具体的には、藻場表面に垂直な相対速度は存在しないので、藻場表面の法線方向の単位ベクトルを $\mathbf{n}$ 、表面の流体の速度 $\mathbf{v}(u, v)$ 、藻場の速度を $\mathbf{v}'(u', v')$ として (1) 式のように与えた。

$$v_n = v'_n \dots \dots \dots (1)$$

v'_n の値は藻場の変位量より算出し、各計算格子点に直接与えた。また藻場の鉛直方向の変位量は小さいとして鉛直方向の流速は無視した。さらに k, ϵ に関する境界条件は壁面における条件を採用した。浮遊砂濃度 c は 0 とした。

藻場によって形成される乱流境界層は水面近傍まで発達しており自由水面の影響をかなり受けている。特に波動場では自由水面の上下の変動が剥離渦等に直接影響を与えるために、乱流量に関してはモデル化が必要であるが十分な知見がないので、 k, ϵ については鉛直勾配がゼロ、浮遊砂濃度に関しては水面を横切るフラックスがゼロ、水平方向はポテンシャル流を与えた。鉛直方向の流速に

関しては連続式を満足するように算出した。

4.3 計算手法・条件

実験条件に合わせて海藻の数を 1 から 3 本、設置間隔を海藻長さの 1 から 2 倍と変化させた藻場上の計算を行った。鉛直方向には 40 分割、水平方向には 40 から 120 分割し、藻場の周辺は特に細かく分割した。また藻場の運動と波動の位相差と藻場の高さの影響を検証するために、これらを変化させた計算も合わせて行った。

5. 計算結果

5.1 流速ベクトルと浮遊砂濃度

図-5(a), (b) はケース 6 の位相 ($t/T=3/10, 9/10$) における流速と浮遊砂濃度の等値線を示す。波の峰の通過時には剥離渦は形成されておらず、海藻の先端付近に波状の流れが形成されている。そのために海藻間の浮遊砂濃度値は小さく、浮遊砂は少ないことが伺える。沖側からの浮遊砂は海藻先端付近まで上昇しているがその値も小さい。図-5(b) では海藻の先端に小さい剥離渦が形成されているが、海藻間の浮遊砂は底面近くに限られ

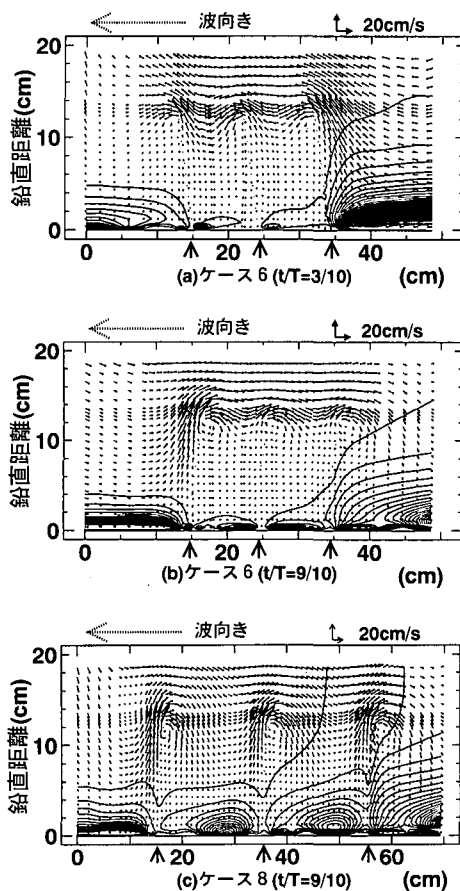


図-5 流速と浮遊砂濃度の等値線

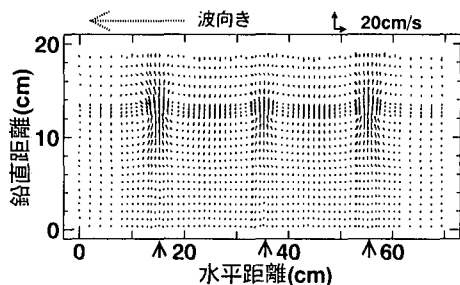


図-6 定常流成分 (ケース 8)

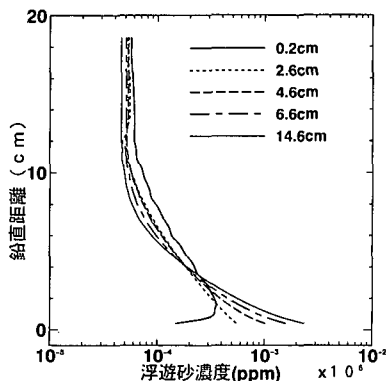


図-7 1 周期平均浮遊砂濃度の計算結果

る。図-5(c) に図-5(b) と同じ位相のケース 8 の計算結果を示す。海藻間隔が広いために剥離渦の成長が容易であり、海藻間の砂粒子の浮遊も活発になり、設置間隔が重要であることがわかる。

5.2 定常流成分

図-6 にケース 8 の定常流成分の分布を示す。藻場の先端付近では実験においても見られた波状的な揺動が見られ、鉛直循環流が形成されていることがわかる。その値は約 20 cm/s で実験値に近い。しかしながら鉛直下向きの流れの計算値は小さくなっている。

5.3 浮遊砂濃度の鉛直分布

図-7 にケース 2 の一周期平均された浮遊砂濃度の鉛直分布を示す。図中の値は海藻の位置から岸側の距離を示す。本計算では壁面の砂漣の影響を考慮していないので壁面近傍の値は小さいが、海藻の周辺の濃度値は実験値に近い値である。海藻先端付近まで直線的に減少し、そこから上方では一様に分布する“く”の字型を示している。また変曲点の位置が海藻先端付近に現れている。

5.4 渦度の分布

図-8 に位相 ($t/T=0.25$) におけるケース 2 の渦度の分布の実験値を示す。半周期前に形成された沖側の渦による負の渦度とこれから形成される剥離渦による正の渦度が、海藻の先端を中心に見られる。この位相では正の

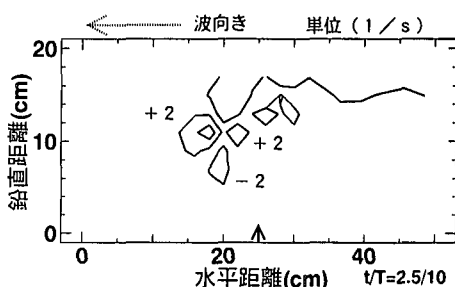


図-8 渦度の実験結果 (ケース 2)

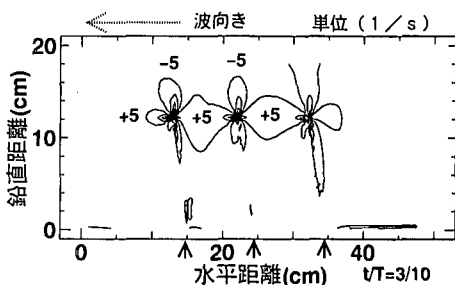


図-9 渦度の計算結果 (ケース 6)

渦度が卓越する位相であるが、海藻の運動と流れの方向が同じであるため正の渦度の生成が遅れている。数値計算においても同様な結果が得られている (図省略)。

図-9 には位相 ($t/T=0.3$) におけるケース 6 の計算結果を示す。個々の渦度は互いに海藻間で合体するために渦自身の成長はあまりなく、海藻先端付近の流れの揺動は小さくなる。図には示していないが、ケース 8 では個々の渦度は合体をすることなく成長する。

5.5 抗力係数

本研究では藻場の影響を計算格子に取り込んだ手法を用いているが、現実の藻場の群落を想定するには空間的に平均化された抵抗として藻場を扱う必要がある。その際には抗力係数等の扱いが重要となる。そこで、数値計算により得られた藻場周辺の圧力分布を積分することにより、各位相での流体力 $F(t)$ を算出し、この流体力を抗力と慣性力に (2) のように分離する。

$$F(t) = 0.5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot u(t) \cdot |u(t)| + C_M \cdot \rho \cdot V \cdot (\partial u(t) / \partial t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $u(t)$: 海藻直上の水面近傍の流速、 C_D : 抗力係数、 C_M : 慣性係数、 A : 基準となる投影面積及び体積、 ρ : 水の密度である。石田ら (1988) の手法にならって隣合う位相間では、 C_D , C_M が変化しないとして上式を連立させてこれらの値を求めた。図-10 にケース 2 の C_D と水平流速の絶対値の位相変化と藻場を固定した場の結果を示す。 C_D は流れの反転位相で増大し、他の位相間ではほぼ一定な 10 前後の値となっている。また、藻場が運動す

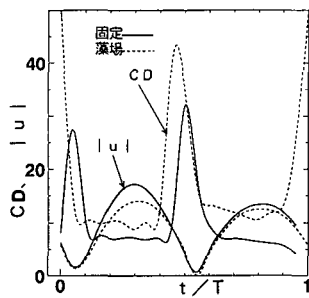


図-10 抗力係数の位相変化

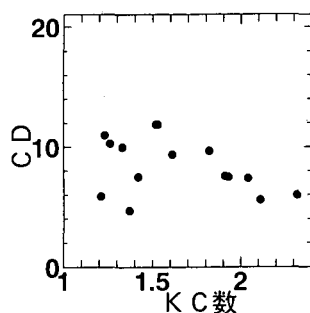


図-11 抗力係数と KC 数の関係

る事により C_D は増加する。 C_D は位相によって変化し、与える流速によって一義的に決まらないので、通常は抗力が最大値となる波の峰、谷の通過位相における値を KC 数 ($= u \cdot d / T$) で議論されることが多い。藻場と波動場の運動の位相差は、実験によればほぼ $\pi/2$ ずれているが、設置条件や藻場の種類により位相差は変動する。

図-11 に藻場と波動場との位相差を 0 から $3\pi/2$ まで変化させた場合の C_D 値と KC 数の関係を示す。KC 数の増加に伴いほぼ一定値 (5~6) に漸近している。石田らの円柱構造物での実験とは異なるが、得られた値やその傾向は類似している。また図示していないが、(2)式の流体力は位相差が π の時に最大となるのは自明であるが、位相差が $\pi/2$ の時と位相差が $3\pi/2$ の時では藻場の運動方向と流れの方向が逆となる時間的長さが同じであるにも関わらず、前者はほぼ倍の値となる。このことは、波動場のような振動流では加速期と減速期の乱流構造の相違 (沢本ら, 1989) に起因するのではないかと考えられる。

6. まとめ

流れと共に運動する藻場を単純な正弦運動をする海藻

で作成し、その藻場上の流れの構造や浮遊砂の挙動を実験および乱流計算により検討を行った。

藻場の運動により先端付近では流れ場の波状的な揺動が発生し、水深スケールの鉛直循環流が形成されることが明らかとなった。また、剥離渦が水深の中間部で形成されるために、それに付随する乱れの効果によって、浮遊砂濃度の分布が通常の新碎波の流れ場には見られない鉛直方向に一様あるいは増加する分布形状を示した。

藻場の効果を直接取り入れた乱流計算により剥離渦の形成位相の遅れや浮遊砂濃度の鉛直分布の一様化等が再現でき、海藻の設置距離の影響が明らかにされた。さらに藻場を抵抗として表示する際の抗力係数は、KC 数によって異なるが通常の平板での値 (2.01) の数倍になることがわかった。また、海藻の運動と波動場との位相差の重要性が明らかになった。

謝辞：本研究の一部は、長尾嘉浩、有馬浩、伊藤雪、益田右吾の元本校学生諸君の協力、文部省科学研究費補助金、一般研究 C (代表者辻本剛三、課題番号 07650610) の補助を受けた。ここに、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.
- 石田 啓・田村賢一 (1988): 非剥離流および対称渦対状態における波動場の円柱の抗力係数, 土木学会論文報告集, 第 393 号/II-9, pp. 121-130.
- 伊福 誠・岩田充浩・米澤泰雄・坂田則彦: 人工海藻周辺の流れと漂砂, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 566-570.
- 倉敷市 (1994): 倉敷市大島地先アマモ場環境調査学術報告書, 83 p.
- 沢本正樹・唐木 毅・佐藤栄司 (1989): 粗面振動流境界層の乱流構造, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 1-5.
- 辻本剛三・市山 誠・早川典生・福嶋祐介・中村由行 (1989): 乱流モデルによる砂礫上の浮遊砂濃度と浮遊砂輸送機構, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 284-288.
- 辻本剛三 (1992): 藻場が存在する場合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 (1994): 揺動物質 (海藻等) 上の流れと砂移動, 第 30 回水工学に関する夏期講習会
- 辻本剛三・H. G. Stefan・日下部重幸 (1995): 風成流場における浅い湖での底質の浮遊機構に関する研究, 水工論文集, 第 39 巻, pp. 799-804.
- 辻本剛三 (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
- 日野幹雄・歌原英明 (1977): 水草のある水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第 266 号, pp. 87-94.
- Nielsen, P. (1984): Field measurement of time-average suspended sediment concentrations under waves, Coastal Engineering, Vol. 8, pp. 51-72.