

植生群中の底面せん断力評価と局所洗掘特性

Experimental Studies for Shear Stress and Local Scour on the Bed with Plants

林 建二郎¹・齋藤 良²

Kenjirou HAYASHI and Ryou SAITOU

The shear stress acting on the bed around vertical circular cylinders and artificial seaweeds installed in a wave flume with multiple rows are measured by using a shear stress sensor. The sand movement and local scour around these plant models are also observed. The close agreement between the time variation of shear stress measured by the shear sensor and the estimated values from the theoretical values of boundary layer equation in harmonic flow with laminar flow are obtained in the case of regular wave with smooth bed. The shear stress on the smooth bed with vertical circular cylinders increase compare to the shear stress on the bed without circular cylinders. The sand in side of these plant models move mainly in the direction of shoreline. These phenomena may be due to the disappearance of ripple on the sand bed with circular cylinders.

1. はじめに

水辺の環境保全や有効な防災機能施設としての評価に伴い、海岸や汽水域の植生群（マングローブやアマモ等）が注目されている。これら植生群の保持・育成においては、植生の耐波特性の検討に併せて、波や流れに対する植生基盤の安定性確保も重要である。植生基盤で生じる局所洗掘や地盤高変化を規定する要素の一つとして、植生基盤表面上に作用する底面せん断応力が挙げられる。

筆者等は、河川に生育しているヨシ等の抽水植物やセキショウモ等の沈水植物および樹林帯が有する流れの抵抗則を明らかにすることを目的として、これら植生群に作用する流体力（林・今野，2007）や床面に作用する底面せん断力（林・齋藤，2010）の計測を行ってきた。その結果、植生の茎や樹幹部に作用する流体力の抗力係数や、床面に作用する底面せん断応力の底面摩擦係数は、植生の生育密度を示す樹林帯密度 λ （＝単位床面積に占める茎や樹幹部の断面積比）の増加に伴い増加する現象を明らかにした（林ら，2001，林・齋藤，2010）。

植生基盤上の底面摩擦係数の増加は、河床土砂の移動限界流速の低下を引き起こす。同様な現象は、波動場に生育する植生群（マングローブやアマモ等の）においても生じるものと推測される（林・齋藤，2009）。

本研究では、波に対する植生基盤の安定性を調べることを目的として、植生群の樹幹や茎部を模擬した直立円柱群中の底面せん断応力に対する直接計測を、小型せん断力計を用いて行なった。併せて、円柱群やポット内で育てた実アマモ群落を用いた室内移動床実験を行ない、

植生群落内の局所洗掘や砂の侵食・堆積特性を調べた。

2. 実験装置および方法

実験には、図-1に示す長さ40m、幅0.8m、高さ1mの吸収式造波装置付き2次元造波水槽を用いた。本水槽中央の床面下部には砂層ボックス（長さ2.5m、幅0.8m、深さ0.3m）が設けられている。

(1) 波場場における固定床上の底面せん断力計測

ヨシの茎部やマングローブの樹幹部に見立てたアクリル製の円柱（直径 $D=3\text{cm}$ 、長さ $=100\text{cm}$ ）が、一辺 $S=20\text{cm}$ の正三角形の千鳥配置となる円柱群（長さ $B=176\text{cm}$ 、幅 60cm ）を、砂層ボックス上に設けたアクリル板製の水平固定床上に鉛直設置した（図-2参照）。流れ方向の配列数は11列、水路横断方向への配列数は7列である。円柱Bの中心軸を座標の原点とし、波進行方向を x 軸の正、その横断方向を y 軸の正とした。

単位床面積に占める円柱部の断面積比を樹林帯密度 $\lambda=\pi D^2/(2*3^{1/2}*S^2)$ と定義すると、本円柱群の樹林帯密度は $\lambda=0.02$ である。現地に生育しているマングローブや海岸林およびヨシ原群等の樹林帯密度 λ の平均値は0.01以下と小さく、その最大値は0.02以下である。

この円柱群に周期 $T=2\text{s}$ 、波高 $H=9\text{cm}$ 、水深 $h=50\text{cm}$ の規則波を作用させ、円柱群内の底面上に作用するせん断

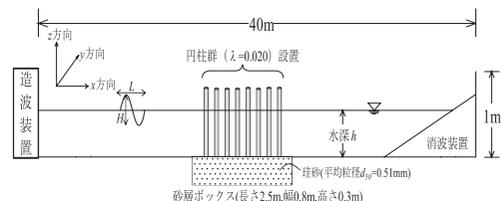


図-1 実験装置の概略

1 正会員 Ph.D. 防衛大学校建設環境工学科准教授
2 学生会員 学(工) 防衛大学校大学院理工学研究科前期課程

面せん断応力が小さいため、ゲージ率確保の面から広面積のshear plateが必要とされる。本せん断力計においては、これらの影響を少なくするために、直径10mm、厚さ0.09mmのshear plateと半導体ゲージを使用している。shear plateの側部や下部に付着する小さな異物や空気を排泄するために、せん断力計の間隙部側壁には内径1mmの排泄パイプを取り付けている。

計測に先立ち、本せん断力計の静的検定を行った。0~50mgf/cm² (4.9N/m²)の荷重範囲において荷重と出力電圧の比例関係は十分であり、1mgf/cm² (0.098N/m²)以下の分解能を有することを確認した。また、静水中における本せん断力計の固有振動数は $f_{nw}=38\text{Hz}$ であった。本せん断力計の精度確認のために、円柱群を取り除いた本水槽内に一方向流を発生させ、開水路流れにおける底面せん断力応力計測を行った(林・齋藤, 2010)。

3. 結果および考察

(1) 波動場における固定床上の底面せん断力計測

波の進行方向にx軸、底面に垂直にz軸をとる。微小振幅理論による波動場の底面近傍での波の水平方向速度成分 u_b 、および底面近傍の層流境界層内の水平方向速度成分 u は、式(3)と式(4)式で示される。

$$u_b = \frac{\sigma H}{2 \sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \dots\dots\dots (3)$$

$$u = \frac{\sigma H}{2 \sinh kh} \left\{ \cos(kx - \sigma t) - \exp(\beta z) \cos(kx - \sigma t + \beta z) \right\} \dots\dots\dots (4)$$

Hは波高、 σ は角周波数、 k は波数、 $\beta = \{\sigma(2\nu)\}^{1/2}$ である。滑面な底面に働くせん断応力(摩擦応力) $= \mu(du/dz)_{z=0}$ は、式(5)で示される(岩垣・樫木, 1979, 堀川, 1991)。

$$\tau_b = \frac{\sqrt{2}u\beta\sigma H}{2 \sinh kh} \cos\left(kx - \sigma t - \frac{\pi}{4}\right) \dots\dots\dots (5)$$

式(5)より、底面せん断応力 τ_b は、波形および底面での水平方向速度成分 u_b に対して、位相が $\pi/4$ だけ進んでいることがわかる。境界層厚さは小さいので、底面での水平方向速度成分 u_b を境界層外縁流速と見なせる。

$T=2\text{s}$, $H=10\text{cm}$, $h=50\text{cm}$ の波動場において本せん断力計で計測したせん断応力 τ_b 、その真上 $z=5\text{mm}$ での水粒子の水平速度成分 u_b 、ならびに水位変化 η の時間変化を図-5に示す。計測値 τ_b は、 η と u_b に対して位相が約 $\pi/4$ だけ進んでいることが確認され、(5)式の理論値と同様の位相差が得られている(林・齋藤, 2009)。

本せん断力計を用いて波動場の底面せん断応力を計測した。使用した規則波は、静水深 $h=50\text{cm}$ 、周期 $T=2,3,4$ 秒、波高 $H=2\sim 24\text{cm}$ である。波動場における底面摩擦

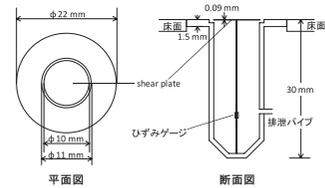


図-4 小型せん断力計の概略

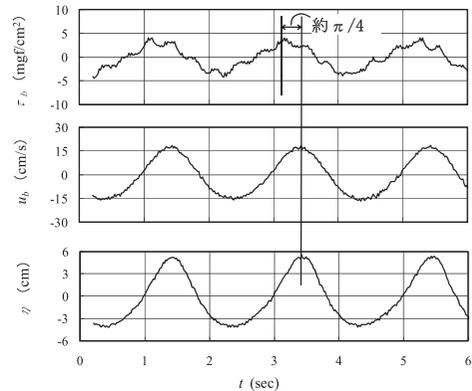


図-5 τ_b , u_b , η の記録例 ($T=2\text{s}$, $H=10\text{cm}$, $h=50\text{cm}$)

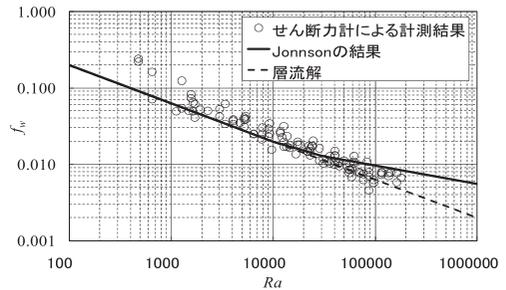


図-6 f_w の軌道振幅レイノルズ数 R_a に対する変化特性

係数 f_w と軌道振幅レイノルズ数 R_a は次式で表わせる。

$$f_w = \tau_{bmax} / (0.5 \times \rho u_{bmax}^2) \dots\dots\dots (6)$$

$$R_a = u_{bmax}^2 T / (2\pi\nu) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 τ_{bmax} は底面せん断応力の最大値、 u_{bmax} は底面における波の水平水粒子速度流速の最大値(=片幅振幅)、 a_m は底面での水粒子軌道半径、 ρ は水の密度である。

本実験で計測された τ_{bmax} と u_{bmax} を、式(6)と式(7)式に代入して求めた f_w と R_a の関係を図-6示す。図中にはJonsson (1966)の結果(層流+滑面乱流境界層)を実線で、層流境界層に対する理論式 $f_w = 2 / (R_a)^{1/2}$ を点線で記入している。本せん断力計で計測された τ_{bmax} を用いて算出した f_w と、これら値との一致は良好である。

水深 $h=50\text{cm}$ 、周期 $T=2\text{s}$ 、波高 $H=9\text{cm}$ の規則波中に設置された円柱群中の $x/D=-3$, $y/D=2$ の位置における底面

せん断力 τ_b 、底面境界層外縁 ($z/D=0.17$, z : 底面からの上方距離) の波の水平水粒子速度 u_b 、ならびに水位変化 η の時間変化の一例を図-7に示す。図中には、比較のために円柱群がない場合の結果を合わせて示す。円柱からの強い後流渦が通過する位相 ($t=1.8s, 3.8s, 4.8s$) では u_b が急激に増加し、 τ_b も大きく増加していることが分かる。

上記と同じ規則波中に置かれた円柱群中の底面せん断力の片幅最大振幅値 τ_{bmax} の増加率 ($=\tau_{bmax}/\tau_{0max}$) の平面分布特性を図-8に示す。 τ_{0max} は円柱群がない場合の底面せん断力の片幅最大振幅値である。円柱後流渦の影響を受け、 $x/D=-4, y/D=2$ 付近に×印で示す $3 < \tau_{bmax}/\tau_{0max}$ の大きな増加領域が生じている、また、円柱の極近傍においても馬蹄形渦等の影響を受けた大きな増加がみられる。

(2) 円柱群を用いた移動床実験

円柱群を設置した海底面の砂面高の変動特性を、図-9に示す。砂層ボックス区間は $x/D=-30 \sim 220cm$ であり、その中の円柱群設置区間は $x/D=0 \sim 173cm$ である。図-3に示す円柱列が設置された流下線上 ($y/D=10$) の結果を図中の上側に、円柱列がない流下線上 ($y/D=8.3$) の結果を下側に示す。横軸を基準円柱からの波進行方向距離、縦軸を砂面高とする。なお、図中には円柱群を設置しない時の砂面高の変動特性を比較として載せている。初期の砂面高を $0cm$ として赤の実線で示している。

図中には、各ケース毎に円柱群を設置した場合の底面摩擦係数 f_w とシールズ数 ψ も併せて記入している。これら f_w とシールズ数 ψ の算定に必要な海底面のせん断力 τ_b の値には、固定床上に設置した円柱群中の本せん断力計による計測値を使用した。以下のことが明らかである。

- a) Case A の場合、円柱群がない場合のシールズ数 $\psi=0.035$ は限界シールズ数 $\psi_c=0.05$ より小さいため砂漣は生じず、海底面での砂移動も生じていない。一方、円柱群設置の場合は、円柱群の沖側部で海底が大きく低下し、岸側部では円柱群内から岸方向へ移動する砂が堆積している。これは円柱群の設置により底面せん断力の最大値が増加し、岸向きの掃流砂量が増大した結果と考えられる。円柱群内においては、規則的な砂漣の形成は認められず、浮遊砂による沖方向への砂移動量も少ない。
- b) Case C の場合、円柱群がない場合のシールズ数 $\psi=0.205$ が限界シールズ数 $\psi_c=0.05$ よりも大きいため、砂漣が生じている。波の峰が到達すると、砂は波進行方向に砂漣の表面に沿った掃流砂として移動し、砂漣の岸方向への前進が起こる。一方、波の谷が到達すると、砂漣背後に形成される渦は浮遊砂を巻き込み浮き上がる。この浮遊砂は沖側に運ばれ拡散し沈降する。一般に、浮遊砂による沖方向への砂移動量は、掃流砂による岸方向への移動量より大きい。従って、砂漣が

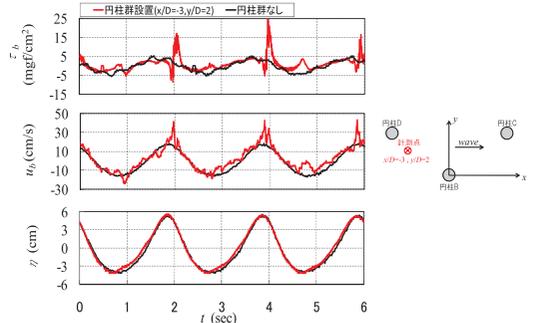


図-7 τ_b, u_b, η の記録例 ($T=2s, H=10cm, h=50cm, \lambda=0.02$)

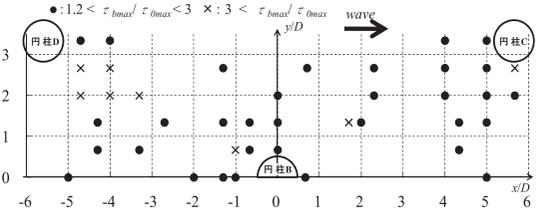


図-8 円柱群中の底面せん断力増幅率の平面分布特性 ($T=2s, H=10cm, h=50cm, \lambda=0.02$)

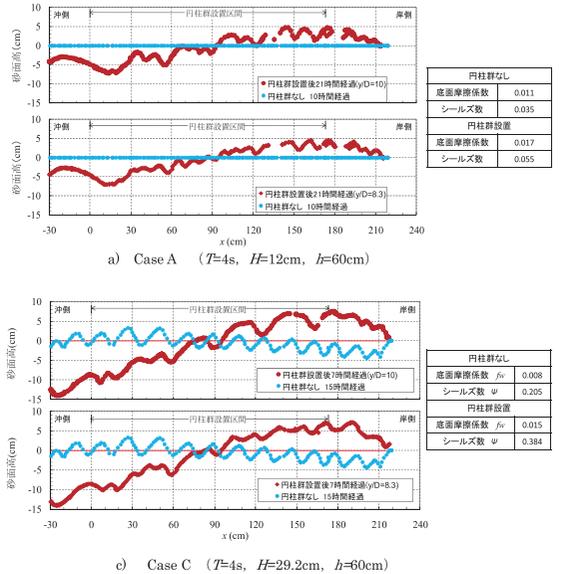


図-9 移動床の変化特性 (円柱群 $\lambda=0.02$)

発生すると海底の砂は相対的に沖側に移動する機会が多い (砂村ら, 1978)。Ursell数が $U_r=120$ となる本ケースにおいても、円柱群がない場合は岸側から沖側への砂移動が生じている。

円柱群を設置した場合は、円柱群内では円柱後流渦等により規則的な砂漣の発生が認められず、円柱群の沖側部で海底が低下し、岸側部では沖側や円柱群内から移動してきた砂が堆積している。これは、円柱群内では砂漣発生が減少し、浮遊砂による沖側への砂移動量は少なく、

掃流砂による岸方向への砂移動量が卓越する結果である。加えて、底面での波動運動が大きい本ケースでは、円柱周辺に顕著な局所洗掘が生じている。

(3) 模型植生群・実アマモ群を用いた移動床実験

図-1に示す本砂層ボックスの中央部に幅40cm, 長さ52cmのアマモ群落模型を設置した。表-1に示すCase Cの波を用いた本模型群内外の砂面変動特性を図-10に示す。アマモ模型には、曲げ剛性が小さく浮力で自立しているアマモと類似した動揺特性を示す発泡部材製(古川電工(株))の短冊(葉長=50cm, 葉幅=1cm, 葉厚=1mm, 比重=0.146)を使用した。短冊3枚を合わせた模型株を、間隔 $S=10\text{cm}$ の正三角形となる千鳥配置で設置した。

本模型群がない場合は、シールズ数は $\psi=0.205$ となり限界シールズ数 $\psi_c=0.05$ よりも大きいため、砂漣が発生し岸側から沖側への砂移動が生じている。本模型群を設置した場合は、模型群内では砂漣の発達は減少し、岸方向に砂が移動している。その結果、模型群の沖側部で海底が低下し、岸側部では沖側や模型群内部から移動してきた砂が堆積している。造波水槽内に設けた1/20勾配の移動床内の一区間に人工海草模型を設置した場合においても、底質は植生区域から岸側に堆積する傾向が多い実験結果が既に報告されている(菅原・永井, 1992)。

神奈川県水産技術センター内の幅34cm, 54cm, 高さ10cmの容器内で播種・育成し30~40cmの長さに成長した実アマモ群落を、本砂層ボックス内の中央部に設置した。 $T=3\text{s}$, $H=10\text{cm}$, $h=50\text{cm}$ の作用波に対する海底砂面の変動状況を写真-1に示す。

アマモ群落がない場合、シールズ数は $\psi=0.036$ となり、限界シールズ数 $\psi_c=0.05$ より小さいため砂漣は生じない。

一方、実アマモ群を設置した場合は、写真-1に示すように、実アマモ群落周りには顕著な砂漣が発生している。これは、アマモ群落の存在による流れの乱れが、砂漣発生を引き金となることに起因している。アマモ群落内では、砂漣の発達は減少し砂は岸方向に移動している。その結果、アマモ群落の沖側前縁付近では砂底面が5cmも低下し、岸側部では砂が顕著に堆積している。

4. おわりに

主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 波動場の円柱群中の底面せん断応力 τ_b を、せん断力計を用いて計測した。円柱後流渦等の影響を受け、円柱近傍の τ_b は大きく増加することを定量評価した。
- (2) 移動床に設置された円柱群, 模型アマモ群, 実アマモ群落内の砂の移動特性を調べた。これら間隙体内においては、砂漣の発生・発達が間隙体からの後流渦等により減少し、浮遊砂による沖側への砂移動量は少なく、掃流砂による岸方向への砂移動量が卓越する。そ

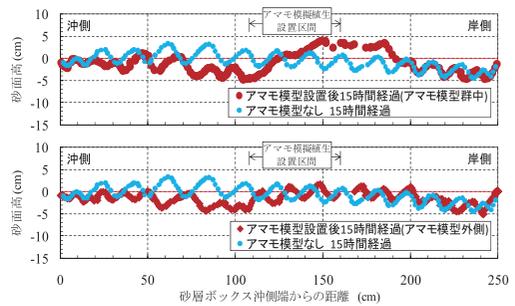


図-10 移動床の変化 (模型植生 $T=4\text{s}$, $H=29.2\text{cm}$, $h=60\text{cm}$)

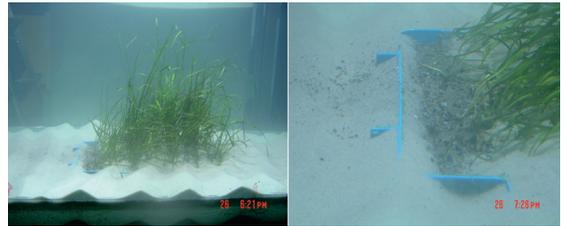


写真-1 実アマモ周りの砂漣発達と局所洗掘

の結果、群落前縁の沖側部では海底が侵食低下し、群落後縁の岸側部では砂が堆積する場合が多い。

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C)), 課題番号21560548)による成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 岩垣雄一・樫木 亨 (1979): 海岸工学, 共立出版会, pp. 84, 1979.
- 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行: 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(2) - 海底摩擦力の測定について -, 第11回海岸工学講演会講演集, pp. 62-68.
- 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.
- 砂村継夫・阪東浩造・堀川 清 (1978): 非対称砂漣上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第25回海岸工学講演会講演集, pp. 250-254.
- 林 建二郎・藤井優宏・重村利幸 (2001): 開水路中における円柱群に作用する流体力, 水工学論文集, 第45巻, pp. 475-480.
- 林 建二郎・今野正則 (2007): 流れによる変形や振動を考慮した河道内植生に作用する流体力と抵抗則の評価, 水工学論文集, 第51巻, pp. 1231-1236.
- 林 建二郎・斉藤 良 (2009): 波動場に設置された円柱まわりの河床せん断力評価, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 1251-1256.
- 林 建二郎・斉藤 良 (2010): 開水路中に設置された直立円柱群中の河床せん断力評価, 水工学論文集, 第54巻, pp. 985-990.
- 堀川清司 (1991): 「新編」海岸工学, 東京大学出版会, 257p.
- 森田健二・竹下 彰: アマモ場分布限界水深の予測評価手法, 土木学会論文集 N0.741/VII-28, pp. 39-48, 2003.
- Jonsson G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 127-148.
- Madsen O.S. and Grant W.D. (1976): Quantitative description of sediment transport by waves, 15th Coastal. Engrg. Conf., pp. 1093-1112.