

浮体植生による波浪変化と断面地形変化に関する基礎的研究

辻本 剛三¹・山本 航²・外村 隆臣³

¹フェロー会員 熊本大学大学院 先端科学部土木建築学科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail:tgozo@kumamoto-u.ac.jp

²非会員 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

E-mail:yamamotowt@newjec.co.jp

³正会員 熊本大学工学部技術部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail:hokamura@tech.eng.kumamoto-u.ac.jp

浮島のように浮遊している植生群としてヘチマロンを用いた。ヘチマロンの設置形態を変化させ波浪減衰機能と岸沖断面地形変化について実験と解析、数値モデルで検討した。設置長さBと波長LのB/Lの増大と共に波浪減衰が顕著となった。設置間隔を設けることで見かけ上のBを大きくするでき、修正された直立透水堤の透過率の解が適用できる。侵食型波浪下において、沿岸砂州の形成がより汀線近くになり、汀線の後退を著しく改善することができる。また、堆積型波浪下においては堆積機能を阻害することはない。

境界適合座標系、Macroscopicモデル、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを結合した数値モデルにおいて、浮体植生周辺の流動場、波浪変形、乱流諸量を算出した。実験結果との比較において反射率はほぼ同程度であり、透過率は過少となった。

Key Words : vegetated platform, transmission coefficient, $k-\epsilon$ turbulence model, beach profile changes

1. はじめに

沿岸域に限らず河口域や湖岸の保全において植生が重要な役割を果たしている。植生は波や流れのエネルギーを減衰させながら、生態系に対しても貴重な空間を提供している。外洋に面した海岸において植生を用いることは困難であるが、淡水湖では植生が繁茂できるため、湖岸の砂浜のみならず湖岸植生帯の保全にもつながる。



図-1 湖岸の被災状況

図-1は2013年10月30日の琵琶湖の北湖の東側に位置する湖岸緑地栗見新田前の砂浜である。多量の流木が湖浜の汀線に打ち上げられている。これは、同年3月9日16日台風18号に伴う降雨により琵琶湖の水位が約1 m程度急激に上昇し、平均風速10 m/秒の北西の風が4時間程度吹き、発達した波浪によるものである。

琵琶湖では雪解け水による水位上昇と、北西の季節風による波浪により各湖岸において砂浜が侵食され、面的防護を基本とした保全対策がなされている。しかしながら、一定の効果が見られるものの、景観や生態系の観点から保全施設によらない対策が望まれている¹⁾。

宇多ら²⁾は琵琶湖で植生による湖岸保全機能の調査を行い、植生が湖岸保全に適用できる可能性が6種類あり、例えば、ヨシ群落や樹木の離岸堤効果や導流堤効果があることを示した。中村ら³⁾は霞ヶ浦での湖岸植生帯の減少要因のとして波浪による侵食を指摘し、その対策として、水環境技術で使用されている人工浮島による消波機能を現地で検証した。消波率が40%程度あり、年間の波浪エネルギーが約50%削減されたことを示している。

本研究では景観や生態系にも配慮可能な植生による湖岸保全の可能性を検討するため、現地の具体的な植生を想定したものではないが、植生の特性である透過性と浮

上性が模擬できる実験材料としてヘチマロンを使用し、水位変化にも対応可能にするために浮体形式とした。ハードな浮体構造物の知見は多数存在するが、透過性浮体構造物の研究は波動場では極めて少なく、消波特性や地形変化への影響を明らかにする。

2. 浮体植生の事例

波動場における植生に関する研究は多数存在しており、アマモやマングローブのような底面に着底した沈水性の植生を対象とし、波浪減衰、流体力、地形変化等についての研究がなされている^{4,7)}。一方、水面上に浮遊した植生の研究は極めて少なく、k-ε乱流モデルを用いてChenら⁸⁾はvegetated platformとして波動場を対象としてFLUENTのCFDコードを用いて、Ausustirら⁹⁾の沈水性の植生場の波浪減衰やPlew¹⁰⁾の開水路における浮体植生場の流動場との比較を行いモデルの検証を行っている。Zhao¹¹⁾らは開水路でsuspended canopyとしてDelft3D-FLOWを用いてChenらと同様にPlewの実験結果との比較を行っている。さらに、Wangら¹²⁾もvegetated platform場において孤立波を対象としてOpenFOAMを用い、モデルの検証にはLiuら¹³⁾の開水路での沈水性固定植生場での流速比較、Plewの浮体植生場での流動場比較、Huangら¹⁴⁾の沈水性固定植生場での孤立波の測定値で検証している。しかしながら、既存の研究では浮遊した植生場において、波動場による実験は極めて少なく、さらに移動床を用いた検討はなされていないのが現状である。

3. 実験概要

(1) 実験装置

実験は2次元造波水槽（長さ30 m、高さ1.0 m、幅0.5 m）透水機能（後述）の異なる2種類のヘチマロン（以後、植生と称す）を用いた。高さ5 cmと奥行き50 cmは一定とし、長さは20, 40, 60 cmと変化させた。図-2は長さ20 cmのタイプ2の植生である。底面4隅に発砲スチロールを付け、図-3示すように鉛直パイプで固定することで浮

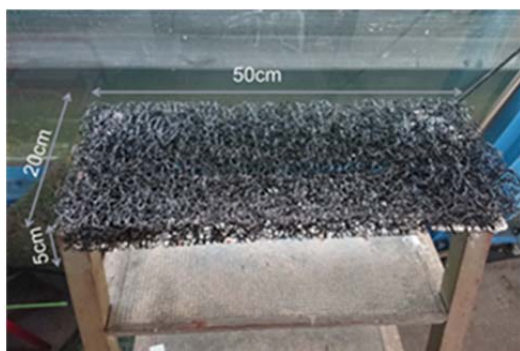


図-2 植生模型

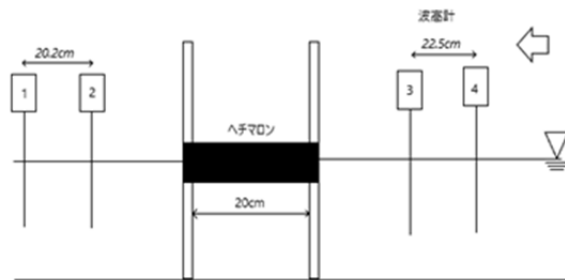


図-3 模型の設置状態

タイプ	長さ	設置パターン
1	20cm	■
2	40cm	■
3	60cm	■
4	20cm空間	■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■
5	40cm空間	■ □ □ ■ □ □ ■ □ □ ■

図-4 設置タイプ

遊上下動させた。岸側に中央粒径0.47 mmの底質で1/8勾配の移動床を作成した。堆積型、侵食型の波を作用させ、レーザー距離計で地盤高さを計測した。

(2) 実験方法

図-4に示すように植生の設置タイプは5種類とし、タイプ4, 5は長さ20 cmの植生を2枚の設置間隔を変化させて設置した。また、植生を固定することで運動の影響を検討した。水深を0.3 mとして6種類の周期、12種類の波高を用いた。植生前後に波高計を設置し、入反射分離を行い、反射率、透過率、エネルギー損失率を求めた。

植生による地形変化の影響を検証するために2種類の設置タイプを用いた。地形の平衡状態を想定していないので3時間波を作用させ、1時間毎に計測を行った。

植生の透水機能については、開水路に植生を設置し、流量を変化させて水面勾配： I 、平均流速： u を計測し、Dupuit - Forchheimer則に基づいて式(1)より植生の固有透過率： K と抵抗係数： C_F を回帰直線から決定した。図-5、表-1にその結果を示す。緑の植生の方がやや透水機能が小さくなっている。

$$I = u \left(\frac{v}{K} + \frac{C_F}{\sqrt{K}} |u| \right) \quad (1)$$

4. 実験結果

(1) 反射率と透過率

潜堤等の構造物の波浪変化に影響を及ぼす諸量として天端幅と波長との関係が重要であることはよく知られて

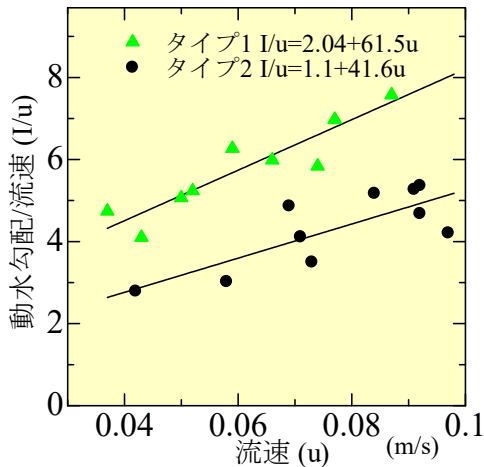


図-5 動水勾配と流速の関係

表-1 植生の透水機能

タイプ	固有透水率:K	抵抗係数:C _F
1	4.90E-07	4.31E-02
2	9.09E-07	3.97E-02

おり、本研究においても設置長さ B と波長 L の B/L で反射率、透過率、エネルギー損失率の整理を行った。

図-6に植生種類の違いを示す。 B/L の増加に伴いエネルギー損失率が大きくなり、通常の消波構造と同様な傾向である。透過率に関しては植生種類の差異は小さいが、反射率に関しては透水機能がやや小さい緑の植生の方が大きくなっている。

図-7に三角は透過率、四角は反射率で植生の可動の有無の違いを示す。植生の高さは5 cm であり静水面上は2.5 cmである。実験の入射波高は2~10 cmあり、固定の場合は植生を越水することになるが、植生の上面からの透水の効果により岸側まで越流するケースは少なく、また、植生の空隙の存在により底面からの浮力や抗力が大きく寄与しないことや入射波高が相対的に小さいこともあり、上下の可動も顕著ではないため、 B/L の値によらず両者の差は見られない。

水面上に設置される浮体構造物は遮光するため海中への太陽光が減少することになり、生態系への影響等が懸念されることがある。図-8に設置空間を設けたタイプ2、

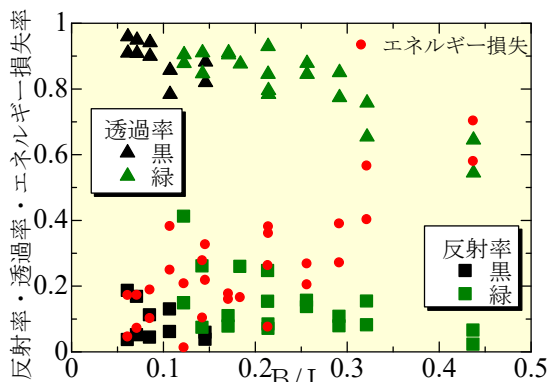


図-6 植生別の比較

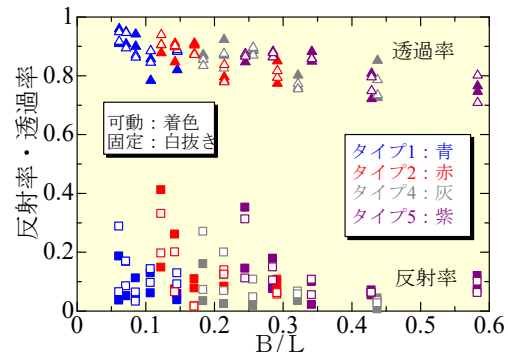


図-7 可動の有無の比較

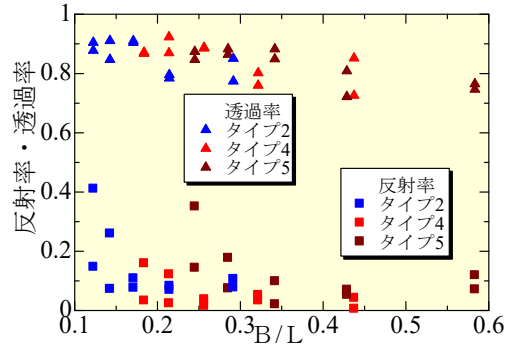


図-8 設置タイプの比較

4、5の可動の場合の比較を示す。タイプ4、5は設置空間を考慮して $B=60, 80$ cmとした B/L を用いた。空間を設けることで見かけ上の B/L を大きくすることが可能であり、 B/L の増加に伴い透過率も減少している。

(2) 透過率の理論的検討

Madsenら¹⁵⁾は線形長波理論に基づいて直立透水堤の透過率 K_t の理論解を求めており、ここでは省略された項を考慮した式(2)の理論解を用いた。ここで、 f 、 λ は抵抗係数と空隙率(=0.84)、 T は周期、 ν は動粘性係数、 u は水平流速である。水平流速は位相変化するため、ここでは微小振幅波の水面における振幅程度として、 $u = H/T$ とした。

$$Kt = \frac{1 + f \frac{B\pi}{L\lambda}}{1 + 2f \frac{B\pi}{L\lambda}} \quad (2)$$

$$f = \frac{T}{2\pi} \left(\frac{\nu}{K} + \frac{C_F}{\sqrt{K}} |u| \right) \quad (3)$$

図-9に植生が可動している結果の比較を示す。実験値との対応は比較的良好であるが、緑植生は計算値が小さくなっている。なお、タイプ4、5において B は40 cmとした。 f/λ をパラメータとして B/L で算定した透過率の理論曲線と実験値との比較を図-10に示す。抵抗係数が小さい場合は良好に透過率が算定できている。 f/λ と B/L の増加に伴い、透過率が低下しており、 f/λ が小さい場合は理論解との対応も良好である。ただ、抵抗係数

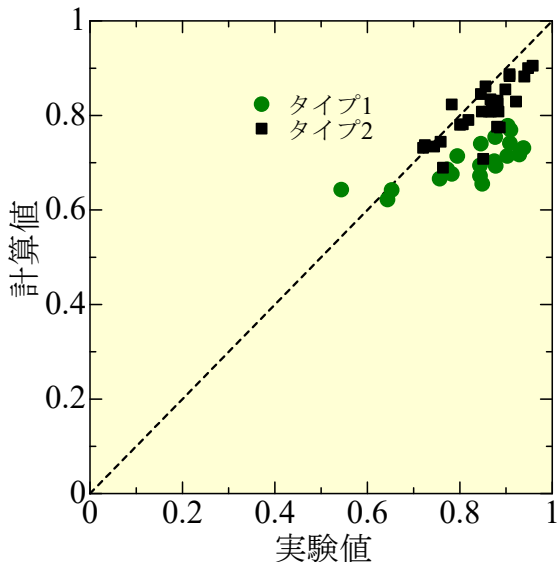


図-9 透過率の実験値と計算値の比較

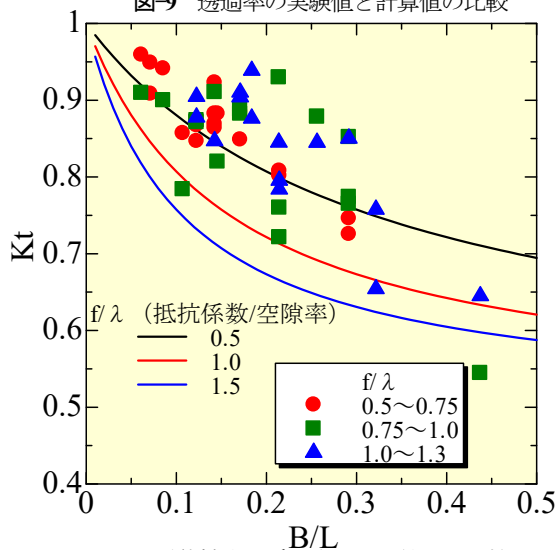


図-10 浮体植生の透過率の理論値との比較

大きくなりB/Lが小さい場合には差が見られる。

(3) 岸沖断面変化

波浪実験においてエネルギー損失が明瞭であった波浪条件からタイプ1, 5の設置条件下において堆積型波浪(周期1.75秒, 波高2.6 cm), 侵食型波浪(周期1.0秒,

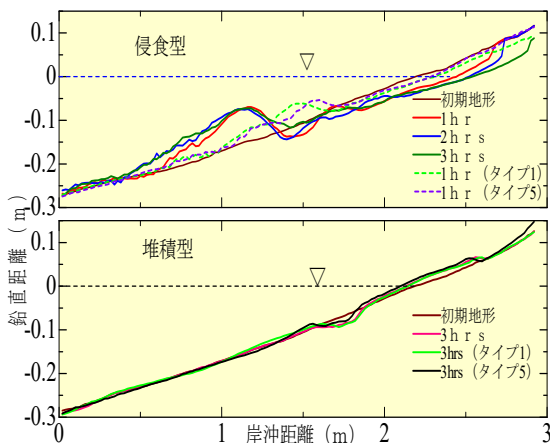


図-11 岸沖断面地形変化の比較

波高7.5 cm) を作用させた。図-11に植生が無い, タイプ1, タイプ5の結果を示す。侵食型において植生を設置した場合, 1時間以後の地形に大きな変化が見られなかったため1時間後の地形を示す。

侵食型波浪下では, 通常, 砕波点付近にバーが形成さ, 汀線近傍が侵食・後退し, 本実験においても同様な結果にであり, 連続式から算定される沖向き漂砂量は造波1時間内で約 $2 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{秒}$, その後は約 $0.5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{秒}$ 程度であった。一方, 植生を設置することで波浪減衰により砕波点がより陸側に移動し, 形成されるバーの規模も減少し, 汀線の後退が極めて低減される。造波1時間内の漂砂量は約 $0.5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{秒}$, その後は約 $0.1 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{秒}$ になっている。堆積型波浪では, 植生の設置の有無による地形変化の差異は小さく, 岸向き漂砂量はいずれの条件においても約 $2 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{秒}$ であった。

5. 数値計算方法

(1) 基礎方程式

2章で述べた浮体植生の研究事例では, 植生の可動は考慮されていない。図-7において植生の運動の可動と固定では波浪特性には差は見られないが, ここでは透過性を有する浮体構造物の可動を考慮して検討を行った。連続式と植生の影響を考慮した運動量方程式, 方程式をクローズするために標準k-ε乱流モデル¹⁶⁾を用いた。これらの式を以下に示す。植生の透過性は辻本ら¹⁷⁾が用いたMacroscopicモデルで考慮した式(7)で与えた。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_j \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \overline{u'_j u'_i} \right)$$

$$-g \delta_{i2} - F_i \quad (5)$$

$$-\overline{u'_j u'_i} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$F_j = \lambda \frac{\nu}{K} + \lambda^2 \frac{C_F}{\sqrt{K}} \left[(u_j u_j)^{1/2} u_i + \frac{u_j}{(u_j u_j)^{1/2}} \overline{u'_j u'_i} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_r - \epsilon + C_{fk} u_j F_j \quad (8)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_r + C_{f\epsilon} F_j u_j) F_j$$

$$-C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, P_r = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

ここで, u は位相平均速度, u' は変動成分, x は空間座標, ρ は密度, J は粘性係数比, δ_{ij} はクロネッカデルタ, i, j は1, 2, λ は植生の空隙率(0.84)である。乱流モデルに

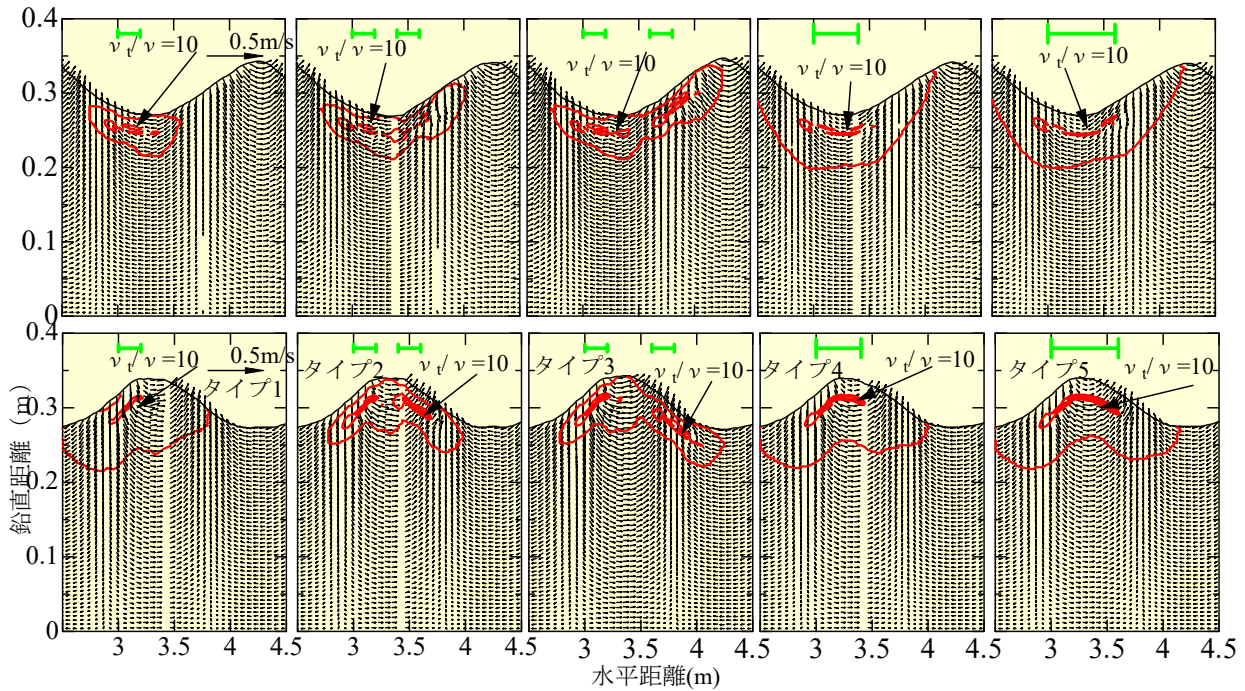


図-12 設置タイプ毎の流動場と渦動粘性係数

は植生による乱れの影響に關与する項を k -方程式、 ε -方程式の生成項に式(7)付加した¹⁶⁾。これらの方程式を境界適合座標系を用い、可動する浮体としての扱いを用いた。乱流モデルの係数は標準値を用いた。式(7)の透水機能は表-1の値を用い、式(8)、(9)中の C_{fk} 、 $C_{f\varepsilon}$ に關する知見が十分でないため0.07、0.01とした。水平方向を3 cm間隔で200分割、鉛直方向を100分割、時間間隔を0.001秒として計算を行った。詳細は辻本ら¹⁸⁾¹⁹⁾を参照のこと。

(2) 計算結果

図-12に同一波浪条件において設置タイプ毎の流速場と渦動粘性係数の分布を示す。植生は水平距離3mを起点として設置している。波浪減衰に寄与する渦動粘性係数は動粘性係数で無次元化している。渦動粘性係数は植生の設置位置付近で大きくなっており、設置空間を設けることで値の高い部分が波の進行方向に拡大する反面、下方への広がりはやや小さくなっている。その傾向は波の峰、谷の通過時において同じである。

図-13に反射率と透過率の比較を示す。反射率の値は実験や計算とも0.1程度であるが、実験値は計算値の2倍程度で大きくなり両者の差異は大きい。一方、透過率の値は、計算値が実験値より平均15%程度大きい程度で両者の対応は良好である。ただし、特に透過率小さい場合が両者の差が顕著である。計算による波浪減衰が小さく図-12に示すように渦動粘性係数が小さいこともその要因の1つである。

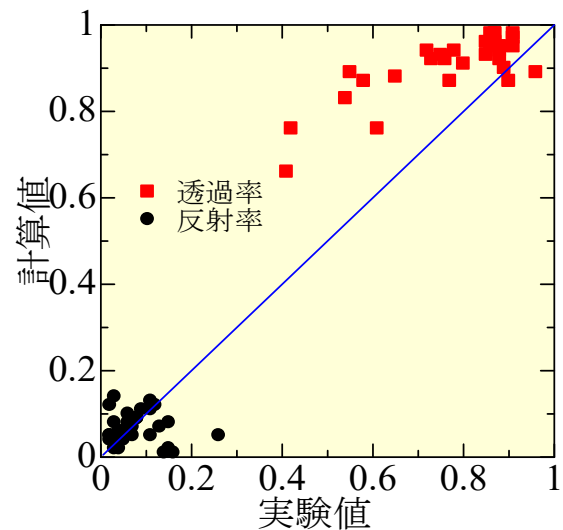


図-13 反射率と透過率の比較

6. まとめ

湖岸の保全で景観や生態系に配慮し出水時の急激な水位上昇にも対応可能な、浮体植生を念頭において、波浪減衰や地形変化について検討を行い、以下の知見を得た。

- ①植生の間隔を開けて設置をしても消波機能は低下しない。反射率は植生の透水機能によらず平均0.1程度であった。
- ②植生の摩擦係数と透水機能をパラメータとして、天端長さと波長の比で透過率を推定することが可能である。
- ③海浜変形では侵食性波浪作用下において、汀線の後

退を低減させることができ、保全対策としての有用性を確認した。

④数値計算では透過率は概ね良好に再現できるが、反射率は過小評価になり、数値計算の検証には流動場や植生上の波浪変化の情報が必要である。

参考文献

- 1) 瀧健太郎, 児玉好史, 都築隆禎, 伊藤禎和, 加藤陽平: 琵琶湖湖辺域における湖岸保全施設によらない湖岸管理の実現可能性に関する一考察, リバーフロント研究所報告, 第 18 号, pp.137-144, 2007.
- 2) 宇多高明, 吉田隆昌, 西蔦照毅, 富士川洋一: 植生を利用した湖浜保全に関する一考察—琵琶湖を例として—, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.1111-1115, 1994.
- 3) 中村圭吾, 門倉信行, 宗像義之, 島谷幸宏, 宇多高明: 消波浮島による湖岸植生帯の復元に関する研究, 環境システム研究, Vol.70, pp.305-314, 1999.
- 4) 浅野敏之, 筒井勝治, 酒井哲郎: 海藻が繁茂する場の波高減衰特性, 海岸工学論文集, 第 35 巻, pp.138-142, 1988.
- 5) 辻本剛三: 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, 第 30 回, B.1-20, 1994.
- 6) 辻本剛三: 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, 1995.
- 7) 林建二郎, 荻原運弘, 上原正一, 藤間功司, 重村利幸: 水辺植生の推理特性について, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.1121-1125, 1998.
- 8) Chen, X., Chen, Q., Zhan, J., and Liu D.: Numerical Simulation of Wave Propagation over a Vegetated Platform, *Coastal Engineering*, Vol.110, pp.64-75, 2016.
- 9) Augustin, L.N., Irish, J.L., and Lynett, P.: Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation, *Coastal Eng.*, 56, pp.332-340, 2009.
- 10) Plew, D.R.: Depth-Averaged Drag Coefficient for Modeling flow through suspended canopies, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.137(2), pp.234-247, 2010.
- 11) Zhao, F., Huai, W., and Li D.: Numerical Modeling of Open Channel Flow with Suspended Canopy, *Advances in Water Resources*, Vol.105, pp.132-143, 2017.
- 12) Wang Yanxu, Yin, Z., and Liu, Y.: Numerical Study of Solitary Wave Interaction with a Vegetated Platform, *Ocean Engineering*, Vol.192, pp.1-15, 2019.
- 13) Liu, D., Diplas, P., Fairbanks, J.D., and Hodges, C.C.: An experimental study of flow through rigid vegetation, *J. Geophys. Res.-Earth*, 113(F4), pp.1-16, 2008.
- 14) Huang, Z., Yao, Y., Sim, S.Y., and Yao, Y.: Interaction of solitary waves with emergent rigid vegetation, *Ocean Eng.*, Vol.38 (10), pp.1080-1088, 2011.
- 15) Madsen, O.S., and White, S.M.: Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwater, *Tech.Rept. No.207, parsons Lab.*, Dept. of Civil Engrg., MIT, 1975.
- 16) 辻本剛三: 藻場が存在する場における流れと浮遊砂濃度乱流モデルによる砕波点近傍の流れ場の数値計算, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.276-280, 1992.
- 17) 辻本剛三, 柿木哲哉, 浜浦雄大, 重松孝昌, 日下部重行: Macroscopic 乱流モデルを用いた透過性構造物内外の底質移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.456-460, 2005.
- 18) 辻本剛三: 乱流モデルによる砕波点近傍の流れ場の数値計算, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.101-105, 1997.
- 19) 辻本剛三, 沖和哉, 山田文彦ら: ダブルバリア型浮消波堤の透過率算定と平面波動場への適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, pp.761-765, 2009.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

WAVE DEFORMATION AND BEACH PROFILE CHANGES WITH A VEGETATED PLATFORM

Gozo TSUJIMOTO, Wataru YAMAMOTO and Takaomi HOKAMURA

For shoreline protection in fresh water region like lakes, a vegetated platform made of porous media which has been using as wave absorber was used. The interval and type of the vegetated platform changed, and experiments on wave damping and beach profile changes have been conducted. And a numerical simulation was conducted using a $k-\epsilon$ turbulent model and a macroscopic approach.

The wave attenuation was noticeable with the increasing of the ratio B/L between the installation interval B and wavelength L . Modifying the transmission formula of a rectangular porous breakwater proposed by Madsen and White was used to estimate the transmittance coefficient over the vegetated platform. Under even erosive wave actions, the offshore bar is formed more closer shoreline and the retreat of shoreline will be reduced significantly. The numerical results indicated that the reflection coefficient was almost identified in comparison with experimental results, and the transmission coefficient was underestimated.