

抽水植物群落による航走波の減衰に関する数値計算

Numerical Simulation of Ship Wave Damping by Emergent Vegetation Community

飯村耕介¹・谷本勝利²・N. Xuan Hien³・赤川嘉幸⁴・湯谷賢太郎⁵

Kosuke IIMURA, Katsutoshi TANIMOTO, N. Xuan HIEN, Yoshiyuki AKAGAWA
and Kentaro YUTANI

Damping effects of ship waves by an emergent vegetation community have been investigated with numerical simulations based on Boussinesq-type equations. The resistance due to the emergent vegetation community is modeled by wave forces on a group of vertical cylinders. The applicability of the numerical model is confirmed by comparing with experimental results on the wave damping by a group of vertical cylinders in a laboratory flume and field observation data on the maximum height of ship waves. The numerical simulations demonstrate that ship waves on a sloping bottom are significantly damped by the emergent vegetation community on a shoaling and surf zone.

1. はじめに

湖や河川の岸辺に生息する抽水植物群落には、風波や航走波を減衰させる機能があると言われている（福岡ら, 1986; E. E. Bouter, 1991）。また、一方では波の作用が群落を衰退させる原因にもなっているという指摘もある（高崎ら, 2003）。そのため、波と抽水植物の相互作用に関して多くの研究が行われている（Hugo Coops ら, 1996; 林ら, 2000; 茂木ら, 2006）。しかし、浅水域を航行する船舶によって発生する航走波について、斜面上の抽水植物群落がどのような減衰効果を有するかについてはほとんど明らかにされていない。

そのため、本研究では、これまで開発してきた航走波の数値計算法（赤川ら, 2005）に抽水植物群落による抵抗の項を取り入れ、数値計算によって、植生群による航走波の減衰特性を明らかにすることを目的とした。具体的には、まず1次元規則波を対象とした数値計算法に植生群による抵抗の項を取り入れ、茂木ら（2006）の実験結果と比較し、数値計算の適用性を確認する。次に、荒川を対象とした航走波の数値計算を行い、2001～2003年に実施した荒川における現地観測結果と比較して適用性を確認する。そして、その数値計算法に植生群による抵抗の項を取り入れ、植生群による航走波の減衰効果を明らかにする。

2. 基本式と各モデル

(1) 基本式

数値計算は Madsen & Sørensen (1992) によるブシネスク型の基本式を、微小船幅を仮定して、船舶に相当する湧き出しと吸い込みを分布させた線状移動境界条件の下に ADI 法で解いていくものである。碎波・遡上モデル、および植生群による抵抗を取り入れた基本式は以下のとおりである。

$$b \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} - R_{bx} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{f_x}{\rho} \\ & = \left(\beta + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial t \partial x \partial y} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} \right) \\ & + \beta g h^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) \\ & + \beta g h^2 \left[\frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right] \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial y} - R_{by} + \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{f_y}{\rho} \\ & = \left(\beta + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial t \partial x \partial y} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial t \partial y^2} \right) + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} \right) \\ & + \beta g h^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) \\ & + \beta g h^2 \left[\frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right] \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 η は水位、 Q_x 、 Q_y はそれぞれ x 方向（船の進行方向）、 y 方向（船の進行方向と直角方向）の線流量、 t は時間、 h は静水深、 g は重力加速度、 β は分散項の補正係数で 1/15 としている。 R_{bx} 、 R_{by} はそれぞれ x 、

1 学生会員 埼玉大学大学院理工学研究科 環境システム工学系専攻
2 フェロー 工博 前埼玉大学大学院理工学研究科教授
3 修(工) Researcher, Institute of Meteorology and Hydrology, Vietnam
4 正会員 修(工) セントラルコンサルタント(株)
5 正会員 博(学) 埼玉大学大学院理工学研究科助教

y 方向の碎波減衰項, τ_{bx} , τ_{by} はそれぞれ x , y 方向の底面せん断応力, f_x , f_y はそれぞれ x , y 方向の植生群による単位面積あたりの抵抗力, b は底面透水層の間隙率, A は水面下の単位幅あたりの通水断面積である。

船舶境界条件式についてはこれまでのもの (谷本ら, 1999) と同様であるので, ここでは省略する。

(2) 遡上モデル

本研究では, Kennedy ら (2000) による透水性モデルを採用した。このモデルは, 地盤面下を非常に小さな間隙率を有した透水層とすることによって, 特別な考慮なしに遡上域の計算を行うものである。これにより地盤面下を含めた流動の計算が可能であり, 地盤面と水面との交点を各時間における波の先端とするものである。間隙率 b , 通水断面積 A の式は赤川ら (2005) と同様であるので, ここでは省略する。

(3) 碎波モデル

碎波モデルについても, Kennedy ら (2000) によって提案された手法を採用し, それを簡略化した形で用いた。すなわち, Kennedy らのように 1 波 1 波を追跡して水位の上昇速度を求め, 碎波による減衰を評価するのではなく, 観測点を固定し, その点での水位の上昇速度からその点での碎波による減衰を評価している。碎波減衰項 R_{bx} , R_{by} の与え方については赤川ら (2005) と同様であるので, ここでは省略する。

(4) 底面摩擦

底面摩擦はマンニングの粗度係数を用いて評価し, 底面せん断応力 τ_{bx} , τ_{by} はそれぞれ式 (4), (5) で与える。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2}{A^{2/3}} Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2}{A^{2/3}} Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \quad (5)$$

ここに, n はマンニングの粗度係数である。

(5) 植生群による抵抗

植生群の影響を評価するために, 抽水植物を円柱として考える。円柱 1 本に作用する波の進行方向波力 F はモリソン式で評価でき, 式 (6) で与えられる。

$$F = \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| dz + \int_{-h}^{\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad (6)$$

ここに, C_D は抗力係数, C_M は慣性力係数, u は水粒子の水平速度成分, D は円柱の直径, z は鉛直上向きの座標である。円柱が設置されているのは浅水域であるので, 流速 u は平均流速 $\bar{u}$ で近似できるとする。平均流速 $\bar{u}$ と線流量 Q の関係は式 (7) で与えられ, 式 (6) に代入すると式 (8) を得る。

$$Q = \bar{u} A \quad (7)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D \frac{Q |Q|}{A} \int_{-h}^{\eta} dz + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial (Q)}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} dz \quad (8)$$

さらに, 単位面積あたりの円柱の設置本数を γ とすると, 単位面積あたりの波の進行方向の抵抗力 f は式 (9) で与えられる。

$$f = \frac{1}{2} \frac{\rho \gamma C_D D}{A} Q |Q| + \rho \gamma C_M A \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial (Q)}{\partial t} \quad (9)$$

3. 1 次元数値計算と実験結果との比較

(1) 計算条件

水路および円柱群の設置については, 茂木ら (2006) の実験と同じ条件で計算を行う。実験水路の概略を図-1 に示す。水路の長さは約 20 m, 斜面部の勾配は 2 段になっており, 前方部は 1:4.7, 後方部は 1:20.5 で, 一定水深部の水深は 0.375 m である。円柱群は外径 0.5 cm のものを長さ 5 m にわたって千鳥配置で鉛直に設置している。このときの円柱間の中心間隔は 5.8 cm であり, 単位面積 (1 m²) あたりの設置本数は 343 となる。抗力係数 C_D は 1.0 を用い, 慣性力係数 C_M は 0, 1, 2 の 3 ケースで計算して実験結果と比較し, 適切な値を検討する。なお, この場合の Manning の粗度係数は 0.01 としている。

(2) 計算と実験結果の比較

図-2 は円柱群を設置しない条件での計算結果と実験結果を比較したものであり, 図-3 は円柱群を設置した条件での計算結果と実験結果を比較したものである。一定水深部での入射波高 H_I については 6.0 cm と 10.0 cm の 2 ケースを示している。波高は碎波点近傍においてやや過小評価, 碎波後はやや過大評価になっている。これはブシネスク方程式が弱非線形であることによるもので, こうしたことを除けば, 本数値計算は概ね碎波変形および植生群による減衰効果を再現していると言える。また, 図-3 において数値計算結果は C_D を 1.0 で固定し, C_M は 0, 1, 2 の 3 ケースについて計算し, 各波高に対して 3 ケースすべてをプロットしている。 C_M を変化させても, 3 ケースとも結果はほぼ完全に一致しており,

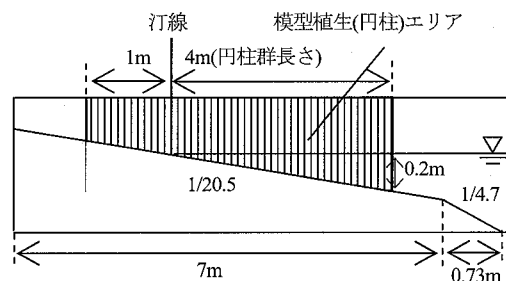


図-1 実験水路の概略図

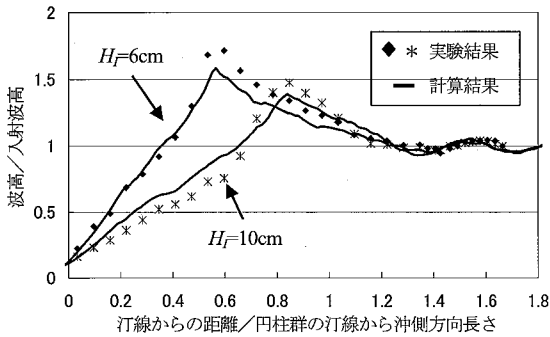


図-2 1次元計算結果と実験結果 (円柱群なし)

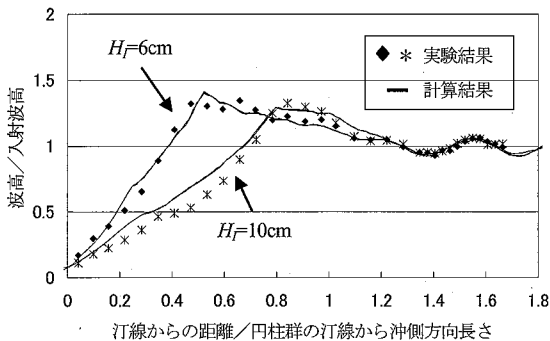


図-3 1次元計算結果と実験結果 (円柱群あり)

慣性力による影響が非常に小さいことがわかる。従って、航走波の数値計算法に植生群による抵抗を取り入れる際には慣性力を無視し、抗力のみを考えることとする。

4. 航走波の数値計算

(1) 計算条件

水路は図-4に示すような一定断面を持った平行等深線水路として、航走波の数値計算を行った。この水路断面は現地観測を行った荒川河口から上流22.4 km付近の横断面を近似したものである。水路の長さは2000 mで、観測を行った左岸汀線から航走線までの距離は140 mである。格子間隔は x , y 方向ともに1.0 mとした。観測地点は潮汐の影響を大きく受け、観測時は基準面上0.6~2.1 mであったが、計算では基準面上1.0 mで固定している。

観測対象船舶は水路を航行する水上バスやタンカーで、長さは28.0~43.5 m、幅は7.4~8.5 m、満載喫水は1.6~2.9 mである。また、観測時の船速は3.4~5.5 m/sの範囲である。数値計算では、最大のタンカー(長さ43.5 m、幅8.5 m)が喫水2.0 mで、5.33 m/sの速度で航行するときを対象とする。なお、航走波の数値計算ではManningの粗度係数は0.02とした。

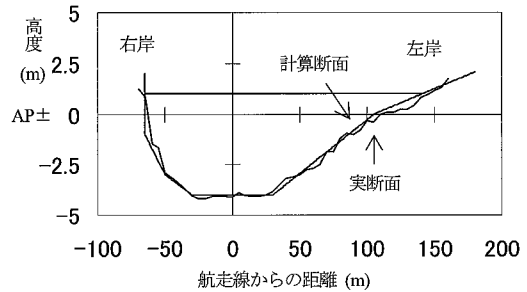


図-4 水路の断面図

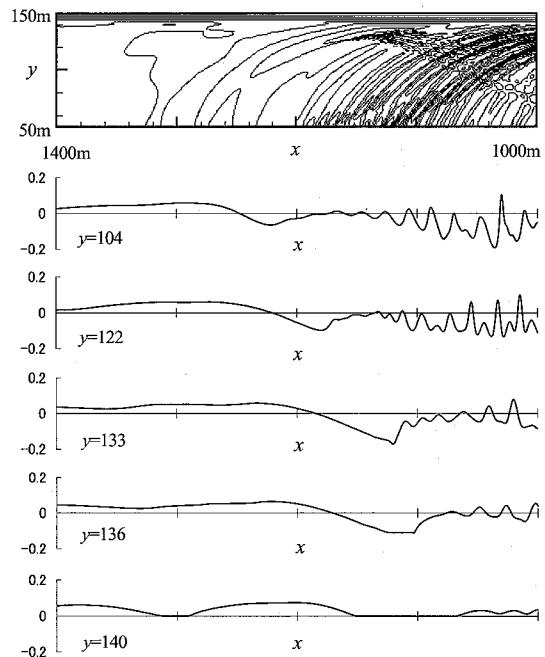


図-5 水位の等値線分布と空間波形

(2) 計算結果

図-5に、 x が1000~1400 m、航走線からの距離 y が50~150 mの範囲における計算水位の等値線分布、および $y=104, 122, 133, 136, 140$ m(水深 $h=1.0, 0.5, 0.194, 0.111, 0.0$ m)での空間波形を示している。船舶が $x=1289$ mにあるときの例であり、等値線分布では航走波の屈折や岸辺からの反射波のパターンが認められる。また、空間波形においては、水底の露出の現象が認められる。

図-6は、航走開始地点からの距離 x が1000 m地点での水深1 m, 0.5 m, 0.1 mにおける計算時間波形を示したものである。このように航走波はまず周期の長い押し波と引き波から始まり、その後周期の短い波が続くという変化を示す。本論文では、前者を先駆波、後者を後続波と呼ぶ。ただし、後続波においても長周期変動が続

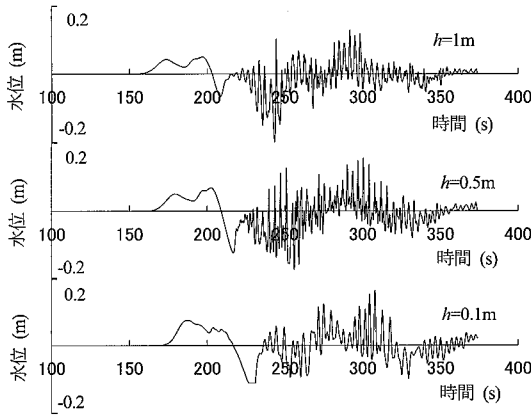


図-6 航走波の時間波形

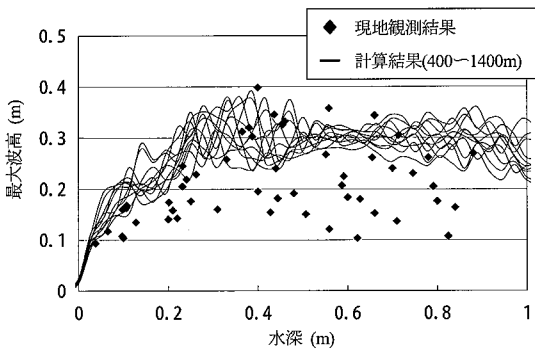


図-7 航走波の最大波高分布

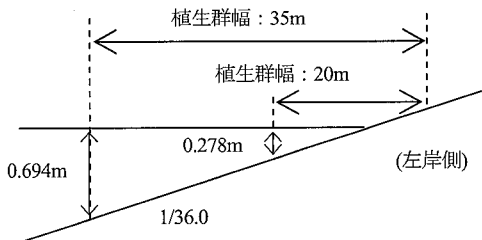


図-8 植生群幅の条件

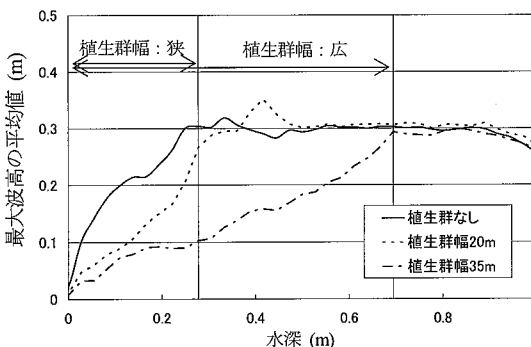


図-9 各側線の最大波高の平均値

いているのが特色である。本論文における航走波の最大波高は現地観測、数値計算共に、長周期成分を除いた後続波の短周期変動成分に対し求めている。

図-7は数値計算と現地観測による最大波高分布図である。航走波の波形は場所により変化する性質があるため、数値計算結果については、種々の測線($x=400 \sim 1400$ mの100 mごと)での分布を示している。一方、現地観測は種々の船舶、速度条件でのものであるため、数値計算と現地観測の比較はそれぞれの結果の上限同士が対応すると考えると、数値計算はほぼ妥当な結果を与えており、碎波減衰もほぼ再現しているとみなせる。

(3) 植生群の抵抗を取り入れた計算

植生として、抽水植物群落を円柱群でモデル化する。林ら(2000)によると、一般に生育しているヨシ群の代表値は直径1.0 cm、樹林占有率 λ は0.0091としている。これを参考に、直径 $D=1.0$ cm、配置は千鳥状で間隔 $S=10.0$ cmとし、抗力係数は1.0とした。図-8に植生群幅の条件を示す。植生群幅については、観測における碎波点近傍から群落がある幅の狭い条件と、碎波点よりも沖側から群落がある幅の広い条件の2ケースを考える。幅が狭い条件では、汀線から沖側に10 m、陸側に10 mの計20 mにわたって分布し、幅が広い条件では汀線から沖側に25 m、陸側に10 mの計35 mにわたって分布するものとした。また、航走線に平行な方向については、航走開始地点から水路端まで2000 mまで一様とする。

図-9に植生群なしの場合、および植生群ありの場合の各測線の最大波高の平均値を示している。植生群幅が狭い場合も広い場合も、最大波高は植生群の開始地点から減衰している。これは茂木ら(2006)の実験とは異なる結果であり、規則波での実験では円柱群の設置により波高の増大が抑えられ、碎波点が岸側に移るが、碎波後は円柱群による減衰効果はほとんど見られなかった。植生群幅が狭い条件では、植生群が碎波帯の中にあるにもかかわらず波高が減衰している。また、植生群幅が広い条件では波高が大きく減衰し、碎波による急減が確認できない。

これは、規則波の場合には同じ波高の波が来襲するため、碎波点が一定であるのに対して、航走波の場合は様々な波高の波から成る不規則波であり、大きな波高をもつ波は水深の大きいところで碎波し、植生群による影響をあまり受けないが、小さな波高をもつ波は碎けないうで植生群の中にはいり、植生群による減衰効果を受けることにもよっていると考えられる。

図-10は長周期変動を含めた航走波の最高水位と最低水位の平均値を示したものである。これによっても、植生群の効果が確認できる。

ところで、植生群によって航走波の水位のみならず流

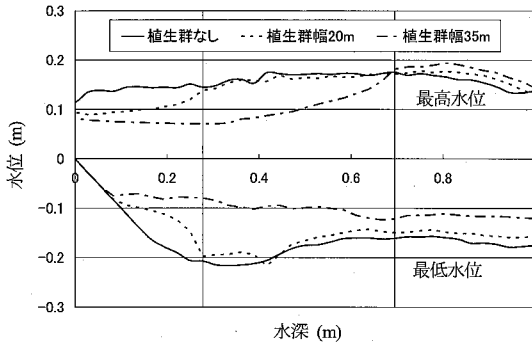


図-10 航走波の最高水位と最低水位

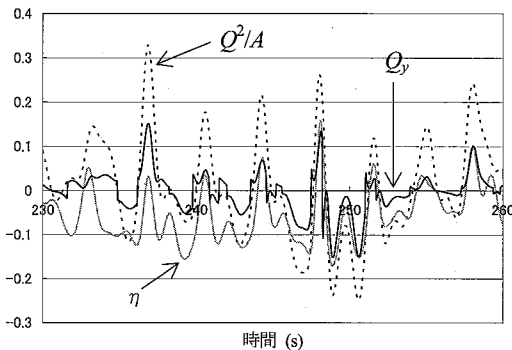
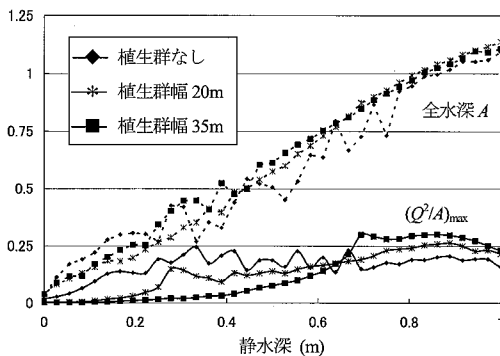


図-11 水位・線流量等の時間変化

図-12 Q^2/A の最大値と全水深 A の空間分布

速も変化する。植生に働く波力や底面での摩擦応力が変化する。図-11は植生がない場合の $x=1000$ m, $y=115$ m 地点での水位 η , y 方向線流量成分 Q_y , および植生群に働く抵抗力に係る Q^2/A の時間変化を示したものである。ここに、 Q は水位計算点での線流量であり、 Q_x と Q_y から求めており、符号は Q_y にあわせてある。この Q^2/A の正のピークの起時は η および Q_y のピークの起時とはほぼ一致していることがわかる。

図-12は Q^2/A の最大値とそのときの全水深 A の空間分布である。植生群の中に入ると Q^2/A の値が急減する

ことがわかる。一方、植生幅が広い場合には植生先端での値が逆に大きくなっており、抵抗力が大きくなる危険性を示唆している。これには水位と流速が関係しており、そのまま流速の増大を意味するものではないけれども、航走波の場所的変動性をも踏まえてさらに検討が必要である。

5. む す び

以上、植生群による航走波の減衰に関して、数値計算により検討した。本研究によって、航走波の数値計算法に植生群による抵抗を取り入れ、砕波・遡上領域を含めて減衰効果を評価できるようになった。荒川への適用の結果、植生群の効果が確認され、砕波帯の中でも植生群による減衰が生じることが明らかとなった。これは、規則波に対する研究で明らかにされていた、砕波帯の中では減衰効果はほとんどないという結論と異なる結果である。この点については、今後、不規則波での実験的検証等が必要である。また、本研究は抽水植物を剛な円柱群でモデル化したものであり、今後、実植生の動揺や形状特性などを考慮したモデルの構築が必要である。

参 考 文 献

- 赤川嘉幸・Dam Khanh Toan・Nguyen Ba Thuy・Vu Hai Dang・谷本勝利(2005): 航走波の砕波を考慮した数値計算と最大波高算定法, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 36-40.
- 高崎忠勝・大嶋吉雄・市川義隆(2003): 荒川下流ヨシ原保全における航走波の影響について, リバーフロント研究所報告, 第14号, pp. 225-232.
- 谷本勝利・小林豪毅・Vu Thanh Ca(1999): 矩形断面水路における浅水航走波の数値計算, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 61-65.
- 福岡捷二・甲村謙友・渡辺明英・三浦央晴(1992): 船が造る波のエネルギーを減衰させる河岸ヨシ原の効果, 水工学論文集, 第36巻, pp. 713-716.
- 林健二郎・藤井優宏・重村利幸・萩原運弘(2000): 粗な樹林密度に配置された円柱群に作用する波力と消波機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 766-770.
- 茂木勇佑・谷本勝利・湯谷賢太郎(2006): 斜面上の抽水植物群落による波高減衰に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 691-695.
- E.E.Bouter(1991): WAVE DAMPING BY REED An investigation in environmentally friendly bank protection, P.I.A.N. C, pp. 56-63.
- Hugo Coops, Gerard Van der Velde, Effects of waves on helophyte stands (1996): mechanical characteristics of stems of *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris*, Aquatic botany, vol. 53, pp. 175-185.
- Kennedy, A. B., Q. Chen, J. T. Kirby and R. A. Dalrymple(2000): Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. I: 1D, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 39-47.
- Madsen, P. A. and O. R. Sørensen(1992): A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., Vol. 18, pp. 183-204.