Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-05

水深葉長比を考慮した有効水草高さに関する検討

佐々木，大輔 ； 中山，恵介 ； 中西，佑太郎 ； 中川，康之 ； 田多，一史 ； 駒井，克昭

(Citation)
土木学会論文集B3（海洋開発）,75(2):I_504-I_509

(Issue Date)
2019

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
© 2019 公益社団法人 土木学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007935

土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, I_504-I_509, 2019.

水深葉長比を考慮した 有効水草高さに関する検討

佐々木　大輔[1]・中山　恵介[2]・中西　佑太郎[3]・中川　康之[4]・
田多　一史[5]・駒井　克昭[6]

[1] 学生会員　神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: 1594224t@stu.kobe-u.ac.jp
[2] 正会員　神戸大学大学院教授　工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: nakayama@phoenix.kobe-u.ac.jp
[3] 学生会員　神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
[4] 正会員　九州大学大学院教授 工学研究院海域港湾環境防災共同研究部門
（〒819-0359 福岡市西区元岡 744W2-1127）
[5] 正会員　中電技術コンサルタント（株）沿岸整備部（〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30）
[6] 正会員　北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科（〒090-8507 北見市公園町 165 番地）

地球温暖化対策として，海洋生物によって捕捉・吸収される炭素「ブルーカーボン」が注目されている．アマモ（*Zostera marina*）の成長に伴い CO_2 が吸収され，同時に地上部や地下部でのアマモ生物体の更新により，生物体の一部が海底に炭素ストックとして貯留される．アマモ場に CO_2 を効率よく吸収させる方法を検討するうえで，光合成による CO_2 吸収に影響を与える，一様流場におけるアマモの有効水草高さ（Deflected Vegetation Height : DVH）に関する検討は重要である．そこで本研究では，様々な水深および流速の条件を与えて DVH に関する検討を行った．その結果，一様流場において，水深がアマモの葉長以上の場合とそうでない場合で，異なる傾向を示すことが分かった．さらにパラメータ Ca と B を用いることにより，アマモが水中に完全に水没する限界を推定できることが示された．

Key Words : *CO_2，DVH，Cauchy number(Ca)，the Buoyancy parameter(B)，elastic modulus*

1. はじめに

多発する自然災害は地球温暖化に起因していると考えられており，CO_2をはじめとした温室効果ガスの発生に対する緩和策および適応策を同時に進めていくことが必要とされている[1), 2), 3), 4)]．過去の研究において，海洋に生息する生物により吸収・貯留される「ブルーカーボン」の活用が，緩和策として有効であることが示されている[5)]．特に沿岸域に生息するアマモは難分解性であり，海洋と比較して1％程度の面積であるが，海洋堆積物中の炭素貯蔵量の半分以上を占めており，ブルーカーボンはCO_2削減効果が期待されている[6)]．

沿岸域でのCO_2吸収に寄与する海洋生態系の1つとして，アマモが存在する．アマモ場ではアマモの成長に伴いCO_2が吸収され，同時に地上部や地下部でのアマモ生物体の更新により，生物体の一部が海底に炭素ストックとして貯留されるという働きを持つ[7)]．したがって，アマモを効率的に利用することにより，沿岸域においてCO_2の吸収・固定を促進できる可能性がある．

アマモは流れの影響を受けて大きくその形状が変化するため，光合成において有効となる水塊の体積の増減が激しく，過去の研究において一様流場における有効水草高さ（Deflected Vegetation Height : DVH）に関して検討が必要であることが示唆されている[8), 9), 10)]．しかし，これらの研究では植生と波・流れの連成問題が高精度に再現できていないという課題も残っている．また過去の研究において，アマモは光合成の際に水中のCO_2だけでなく，光合成に利用する炭素のうち約17％を大気中のCO_2から直接吸収していることが確認されているため[7)]，一様流場におけるDVHは，CO_2の吸収量に影響を与えると考えられる．

そこで本研究では，波・流れとアマモの連成計算が可能なオブジェクト指向プログラミングを利用して，アマモと波・流れ場とを連成した数値計算によるシミュレーションを行い，一様流場を対象としたアマモの葉長に対する全水深の比がDVHに与える影響を明らかにすることを目的とした．

2. アマモのモデルの構築

(1) アマモのモデル

モデルの作成において 3 つの仮定を考慮した．1 つ目は，アマモは曲げに対して伸び縮みを無視することができる．2 つ目は，アマモを 20 個のセグメントに分割し，セグメント間に回転するヒンジを連結することによってアマモの曲げの運動を表した（図-1）．最後に，各セグメントにかかる流体力はその上部にあるヒンジに集中して作用すると仮定した [11]．波力によるアマモの運動を考えるにあたり，基礎方程式にはアマモに作用する応力として，波・流れによる抗力係数による抵抗 [12)13)14)15)]，アマモと流体間の摩擦抵抗 [11]，波・流れによって作用する揚力，アマモと流体の密度差による浮力 [12)15)]，弾性体としての性質を再現するためにヤング係数を用いた弾性力 [12)14)16)17)]の 5 つの応力を考慮した．本研究では，アマモの変位と周辺流体との相互作用を考慮したアマモの挙動を表現するため，抗力や摩擦力などと同じく流速の関数を未知数として，水平・鉛直方向におけるアマモと流れの連成をモデル化した [18]（式(1)，式(2)）．

$$\rho_a V_s \frac{\partial u_a}{\partial t} = \rho_w \frac{|u-u_a|(u-u_a)}{2}(C_D A_z + f_c A_x) - (EI)_s L_s \frac{\partial^4 \xi}{\partial z^4} \quad (1)$$

$$\rho_a V_s \frac{\partial w_a}{\partial t} = \rho_w \frac{|u-u_a|(w-w_a)}{2}(C_D A_x + f_c A_z) + \rho_w \frac{C_L}{2}|u-u_a|^2 A_x + (\rho_w - \rho_a) g V_B \quad (2)$$

ここで，ρ_a：アマモの密度（kg m^{-3}），V_s：アマモのセグメントの体積（m^3），u：局所水平流速（m s^{-1}），u_a：アマモのヒンジの動く水平速度（m s^{-1}），A_x：セグメントの水平投影面積（m^2），A_z：セグメントの鉛直投影面積（m^2），ξ：波の進行方向のアマモのヒンジの変位（m），ρ_w：流体の密度（kg m^{-3}），C_D：波・流れによるアマモの抗力係数，f_c：アマモと流体間の摩擦係数，C_L：揚力係数，$(EI)_s$：アマモのセグメントの曲げ剛性（N m^2），L_sアマモのセグメント長さ（m），w：局所鉛直流速（m s^{-1}），w_a：アマモのヒンジの動く鉛直速度（m s^{-1}），V_B：アマモのヒンジより上の体積の合計（m^3）である．

アマモの全体の曲げ剛性EIに関しては，室内実験結果との比較から，以下の通り定めた（式(3)）．

$$EI = 120 \times 16 \times \left(3.5 - 0.13(n-1)\right) \times 10^{-6} \quad (3)$$

ここで，n：アマモの根元から葉先までのセグメント数である．

アマモから流れ場へのフィードバックは，抗力と摩擦力を考慮し，以下の運動量が水平方向及び鉛直方向に反映されることとした[19]（式(4)，式(5)）．

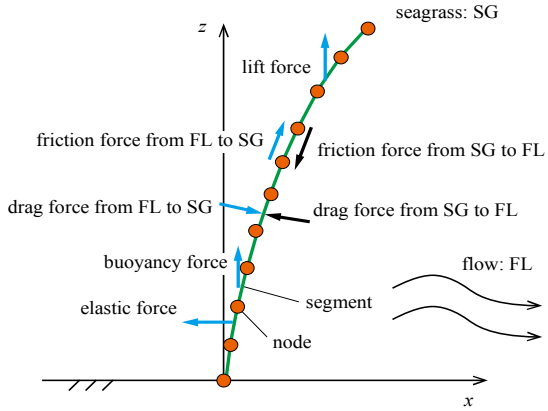

図-1　アマモのモデルの概念図

$$M_x = -r\rho_w \frac{|u-u_a|(u-u_a)}{2}(C_D A_z + f_c A_x) \quad (4)$$

$$M_y = -r\rho_w \frac{|u-u_a|(w-w_a)}{2}(C_D A_x + f_c A_z) \quad (5)$$

ここで，M_x：水平方向の追加の運動量，M_y：鉛直方向の追加の運動量，r：パラメータである．

(2) アマモのモデルの計算条件

本研究では，波・流れ場と水草の連成モデルを作成するために，水草の追加が容易にできること，および波の分散性を再現できる非静水圧成分を考慮することが必須である．そこで水草のモデルの構築にはオブジェクト指向型プログラミングを利用し，波・流れ場の再現には環境流体モデル Fantom を使用した．Fantom の基礎方程式は，ブシネスク近似を利用した非圧縮性流体における Navier-Stokes 方程式である．今回の計算では密度差は考慮していない．メッシュアスペクト比をなるべく 1 に接近させることで，波の分散性を考慮できる非静水圧計算とした．移流項の計算には Ultimate-Quickest 法を利用している．今回の計算において，底面の再現には，成層場における反射高周波内部波の発生を抑えるため，z 座標系における Partial Step が採用されている．境界条件として k-ε モデルで用いて表したところ，ε は数値計算の結果で 10^{-5} m^2/s^3 となり，コルモゴルフスケールである$(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$は 0.56 mm となった．メッシュサイズは最小でも 2.0 cm と大きく，$(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ より約 40 倍大きいので乱流モデルが必要である．よって，乱流モデルの 1 つである k-ε モデルを採用した．

計算領域に関しては，Fantom は不等間隔メッシュを導入することができる．そこでアマモ場前後の解析対象領域では，水平格子間隔を 5.0 cm と最小のメッシュサイズを与え，　対象から離れるにつれて計算時間短縮のため，再現計算で減衰が生じない程度に粗く 10 cm から 100 cm

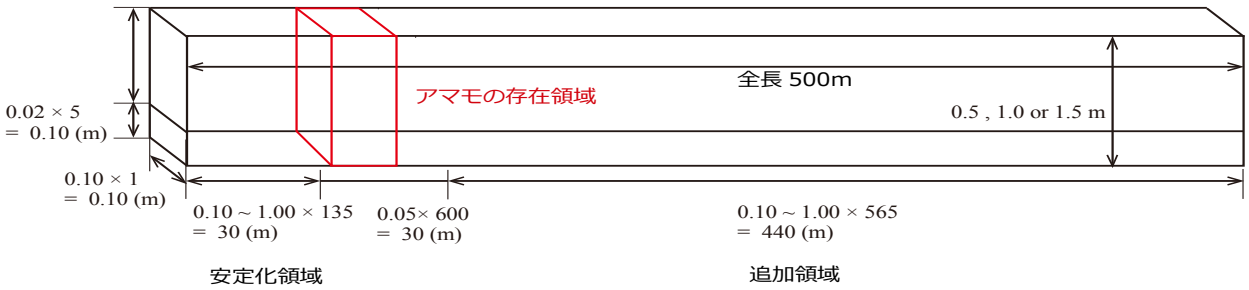

図-2 計算メッシュサイズの概念図

表-1 根元，中間，葉先での曲げ剛性の値（N m²）

	根元(n=1)	中間 (n=10)	葉先 (n=20)
EI	6.72×10^{-3}	4.47×10^{-3}	1.98×10^{-3}

まで大きくなる可変メッシュを与えた（**図-2**）．鉛直格子間隔も，同様に流れ場の再現性を高めるために細かく設定した．また，底面付近では境界層を考慮するとより細かく設定する必要があるため，鉛直格子間隔は，底面から 10 cm の地点までは 2.0 cm とし，10 cm から水面までは 5.0 cm とした．反射による増幅・減衰が生じ干渉がすぐ発生するため，計算の水路長は 500 m に設定した．再現計算では，左端のフラックス境界から 30 m を，増減・減衰が生じないようにするために安定化領域として与えた．幅方向には格子間隔は，アマモの密度が 10 cm² あたり 1 シュートなので 10 cm とした．数値計算では奥行方向には同条件が無限に続くと仮定して 1 メッシュのみを与え，側壁はスリップ条件とした．

また，アマモが水没しないパターンに限っては，水面上に葉が横たわると仮定する．

3. 理論解の適用性に関する検討

(1) 既存の Ca と B の適用

アマモなどの植生と流れとの相互作用に関する研究において，流れによる植生形状の変化である reconfiguration を Cauchy number（Ca）と the Buoyancy parameter（B）を利用して評価することに成功しており，その結果は実スケールへの現象にも適用され，再現性の高さが示されている [8),9),10)]．そこで本研究では，Ca と B を利用して，一様流場を対象としたアマモの DVH の解析を行った．Ca，および B の理論解は以下の通りである [8)]（式(5)，式(6)）．

$$\mathrm{Ca} = \frac{\rho b U_w^2 l^3}{EI} \tag{5}$$

$$\mathrm{B} = \frac{(\rho-\rho_v) g b d l^3}{EI} \tag{6}$$

ここで，ρ：流体の密度（kg m⁻³），b：植生の幅（m），d：植生の厚さ（m），l：一様流を与える前の植生高さ（m），ρ_v：植生の密度（kg m⁻³），U_w：流速（m s⁻¹），g：重力加速度（m s⁻²），EI：曲げ剛性（N m²）である．ただし EI は式(3)において，アマモの根元（n=1），中間(n=10)，葉先（n=20）の 3 パターンを与えることとした（**表-1**）．

一様流を与え植生が倒れ始めてから定常状態に達したときの植生高さを l_e とすると，DVH 比（l_e/l）は式(7)で与えられる [8)]．

$$\frac{l_e}{l} = 1 - \frac{(1-0.9Ca^{-\frac{1}{3}})}{1+Ca^{-\frac{3}{2}}(8+B^{\frac{3}{2}})} \tag{7}$$

実際のスケールを対象とした解析を行うために，アマモ場の存在範囲を左側境界から 32.0 m から 15 m とし，0.10 m 間隔でアマモを 150 シュート設置し再現計算を行った．1 シュートで 4 枚の葉が存在するものとした．水深は 0.5 m，1.0 m，1.5 m の 3 種類，流速は 0.10 m/s，0.075 m/s，0.050 m/s の 3 種類とし，合計 9 パターンの検討を行った．

シミュレーションの結果，アマモ場のフロント（アマモ場左端）から後続部終端（アマモ場右端）にかけて，DVH 比（l_e/l）は一定ではなく異なった値をとっていることがわかった．例えば，水深が 1.5 m，流速 0.10 m/s のパターンでは，フロント前面の DVH 比（l_e/l）は 0.54，最大値が発生するフロント周辺では 0.83，一定に収束する後続部周辺での値は 0.73 であった．そのため，理論解との比較の際には，上述の 3 つの特徴的な地点での値を用いて比較すべきであり，DVH 比の最小値が発生するフロント前面（P1），最大値が発生するフロント周辺（P2），および一定に収束する領域（P3）における DVH 比に関して検討することとした．シミュレーションの結果と理論解との比較において，いずれの流速のパターンでも同様の傾向が見られたことから，紙面の都合上，流速が 0.10 m/s のパターンのみを示すこととした（**図-3**）．なお，青色，赤色，緑色はそれぞれ，P1，

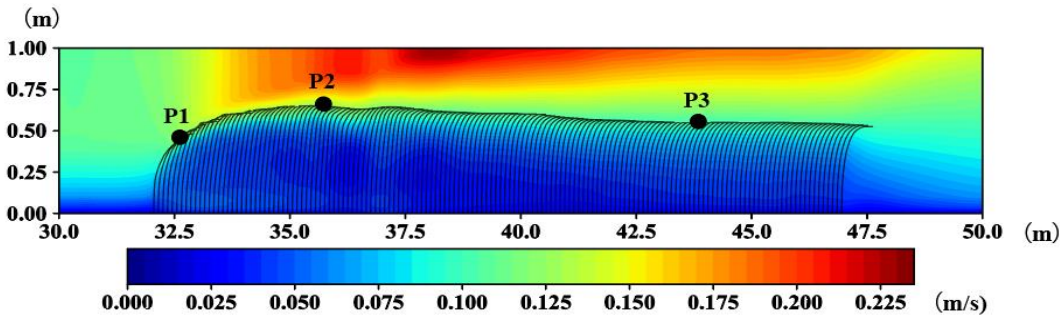

図-4　流速 0.10 m/s，水深が 1.0 m におけるアマモの形状と水平流速コンタ

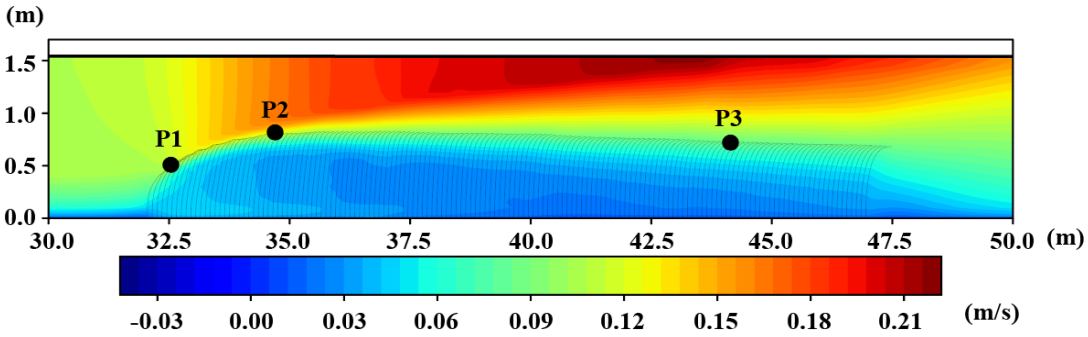

図-5　流速 0.10 m/s，水深が 1.5 m におけるアマモの形状と水平流速コンタ

P2，P3 に対応する．また黒実線，黒破線，黒一点鎖線は，根元（bottom），中間（middle），葉先（top）での曲げ剛性を用いた DVH 比（l_e/l）を示す．

水深がアマモの葉長（l=1 m）より小さい水深が 0.5 m のパターンでは，式(7)とシミュレーションの結果がおおむね一致していた．一方で，水深がアマモの葉長（l=1 m）以上である水深が 1.0 m，1.5 m のパターンでは，式(7)がシミュレーションの結果を下回っており，適用性が低いことが分かった．

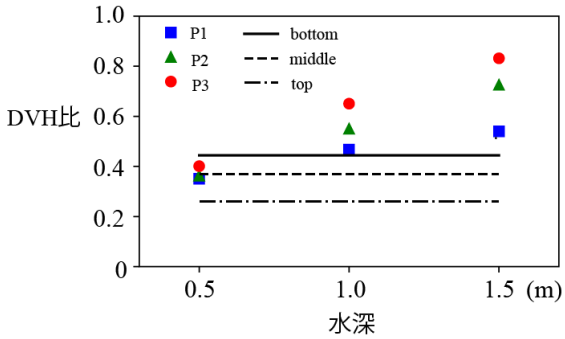

図-3　流速 0.10 m/s における水深と DVH 比（l_e/l）関係

(2) 修正された Ca と B の適用

水深がアマモの葉長（l=1 m）以上である場合，与える一様流速の流速を利用して式(7)を適用すると，実際より小さい DVH 比が得られてしまった（図-3）．シミュレーションの結果によると，アマモ場内では流速が大きく減少することが示されている（図-4，図-5）．つまり，水深がアマモの葉長（l=1 m）以上である場合，アマモ場内の流速がアマモ場前面で与えられている一様流速よりも小さくなったため，DVH 比が過小評価されたと考えられる．そこで，シミュレーション結果により得られたアマモ場内の流速を利用して式(7)により DVH 比を算出した（図-6）．アマモ場内でも特に，水平方向に 33.0 m，鉛直方向に 0.15 m の地点の流速を用いることとした．これは後続部だとアマモ場の影響を大きく受け，流速が小さくなりすぎてしまうためである．その結果，アマモ場内の流速は，水深 1.0 m では 0.052 m/s，水深 1.5 m では 0.048 m/s であり，式(7)による再現性が大きく向上することが確認された．したがって水深がアマモの葉長（l=1 m）以上であるパターンでは，Ca と B を適用し理論解を算出する際に，アマモ場内部の流速を利用する必要があることがわかった．

4.　3 次元数値計算モデルの適用と検討

第 3 章で，水深は 0.5 m，1.0 m，1.5m の 3 種類，流速は 0.10 m/s，0.075 m/s，0.050 m/s の 3 種類とし，合計 9 パターンの再現計算を行った．その 9 パターンの中で，

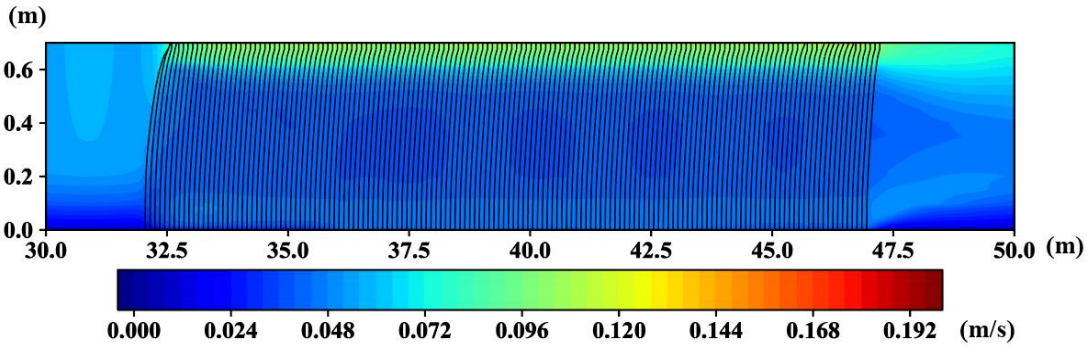

図-7　流速 0.50 m/s，水深 0.7 m におけるアマモの形状と水平流速コンタ

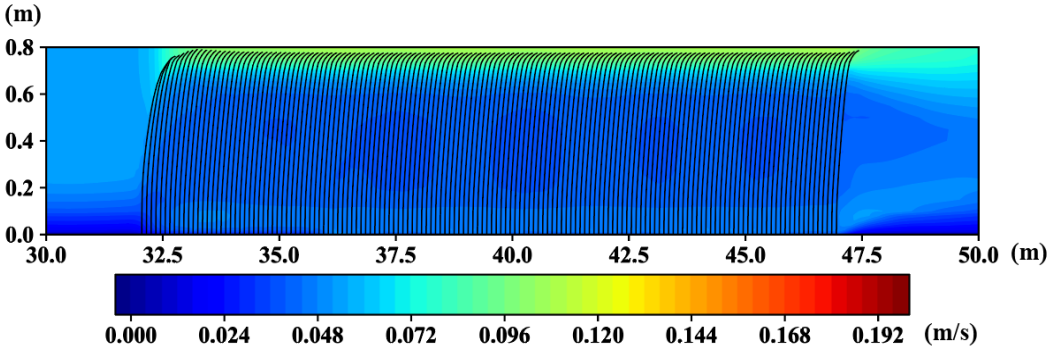

図-8　流速 0.50 m/s，水深 0.8 m におけるアマモの形状と水平流速コンタ

流速が 0.050 m/s，水深が 0.5 m のパターンのみ，アマモが水没しなかった．過去の研究により [11]，アマモが大気中に露出しているか否かが光合成による CO_2 の吸収に影響を及ぼすことが分かっており，アマモの水没に関する研究は，CO_2 の吸収において重要であることが分かっている．そこで，アマモが完全に水没する限界（水没限界水深）を推定する手法を検討するため，流速 0.050 m/s において，水深 0.5m から 0.1 m 単位で水深 1.0m まで変化させてシミュレーションを行った．

水深が 0.7 m ではアマモは水没せず，水深が 0.8 m では水没したことから，水没限界水深はおおむね 0.7 m から 0.8 m の範囲であることがわかった（図-7，図-8）．この時の水没限界水深は，中間（middle）での曲げ剛性を用いた DVH 比（l_e/l）である 0.69 から，根元（bottom）での曲げ剛性を用いた DVH 比（l_e/l）である 0.80 とおおむね一致していた．したがって，アマモの水没限界水深は，理論解として根元（bottom）から中間（middle）での曲げ剛性を用いた DVH 比（l_e/l）を用いておおよそ推定できることが分かった．

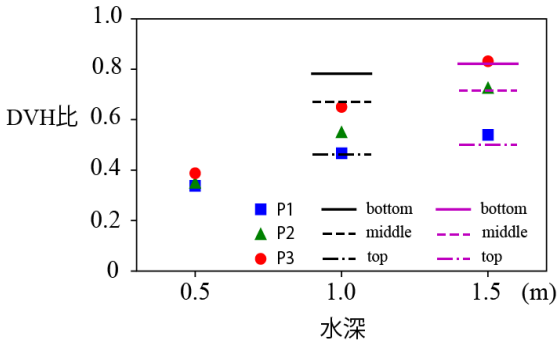

図-6　流速 0.052m/s，0.048 m/s における水深と DVH 比（l_e/l）関係

5.　おわりに

(1)　一様流場において，水深がアマモの葉長（l=1 m）以上のパターンでは，DVH（l_e）の推定に利用する流速はアマモ場前面に与えられる一様流速ではなく，アマモ場内の流速を用いる必要があることが分かった．

(2)　DVH（l_e）の推定の際に，アマモの根元（bottom）と中間（middle）における EI を利用するべきであることが分かった．

(3)　Cauchy number（Ca）と the Buoyancy parameter（B）を用いて，アマモが完全に水没する限界（水没限界水深）を推定できることが示された．

(4)　今後は，一様流場だけでなく，波動場においても検討が必要である．

参考文献

1) Hirabayashi Y., Mahendran R., Koirala S., Konoshima L., Yamazaki D., Watanabe S., Kim H., Kanae S. : Global flood risk under climate change, Nature Climate Change 3, pp.816-821, 2013.
2) Tezuka S., Takiguchi H., Kazama S., Sarukkalige R., Sato A., Kawagoe S. : Estimation of the effects of climate change on flood-triggered economic losses in Japan, International Journal of Disaster Risk Reducation,Vol.9,pp.58-67,2014.
3) Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.) : Contributions of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel, Climate Change, Cambridge University Press,Cambridge, 996p., 2007.
4) Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (Eds.) : Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel, Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 1535p., 2013.
5) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch G.(Eds). : *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment.*, United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, Norway, 2009.
6) 国際連合環境計画(UNEP)：BLUE CARBON, The Role of Health Oceans in Binding Carbon, 2009.
7) Watanabe K. and Kuwae T. : Radiocarbon isotopic evidence for assimilation of atmospheric CO2 by the seagrass Zostera marina. Biogeosciences, Vol.12, pp.6251-6258, 2015.
8) Luhar M., and Nepf, H. ：Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation,Limnol.Oceanogr.Methods,56(6),2003-2017,doi:10.4319/lo.2011.56.6.2003., 2011.
9) Luhar M., and Nepf, H. ：From the blade scale to the reach scale:A characterization of aquatic vegetative drag, Adv.WaterResour.,51,305-316,doi:10.1016/j.advwatres.2012.02.002, 2013.
10) Luhar M., and Nepf, H. ：Waved-induced dynamics of flexible blades,J.Fluid Struct.,61,20-41, 2016.
11) 水産土木工学部，川俣茂，木元克則 ： 波浪による海藻の流失に関する研究，沿岸漁場整備開発調査(直轄)報告書，pp.100~117，1999.
12) 浅野敏之，出口浩，間瀬肇，小林信久：振動する海藻群落上を伝播する波の特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻 pp.26~30, 1991.
13) 辻本哲郎：植生を伴う流れの水理，水工学シリーズ 91-A-5，pp.1~22，1991.
14) 服部敦：流れによる変形を考慮した高茎草本植物の抵抗則, 土木学会論文集No.782, pp.H-70-65~H-70-80, 2005.
15) 小川純，鈴木育男，山本雅人，古川正志：仮想水中環境下における人工海藻の挙動の解析， 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp.411~412，2012.
16) 石田哲，近田実則：有限振幅波による柱体の振動特性, 第 3.3 回海岸工学講演会論文集，pp.628~63.3，1985.
17) 酒井哲郎，浅野敏之，上田康浩：波浪による人工海藻の動揺特性, 第 44 回土木学会年次学術講演会講演論文集, No.II, pp.692~693，1989.
18) 中山恵介，中西悠太郎，中川康之，茂木博匡，田多一史・桑江朝比呂：波・流れ場とアマモの連成モデルの構築， 土木学会論文集， 第 73 巻， pp.821~826， 2017.

(2019.2.7 受付)
(2019.4.24 受理)

THE EXAMINATION OF DEFLECTED VEGETATION HEIGHT CONSIDERING THE RATIO OF THE LENGTH OF SAV AND WATER DEPTH

Daisuke SASAKI, Keisuke NAKAYAMA, Yutaro NAKANISHI,
Yasuyuki NAKAGAWA, Kazufumi TADA and Katsuaki KOMAI

To reduce the impact of global warming, “blue carbon” has been received attention as carbon stocks which can be captured and stored by marine plants and animals. With the growth of eelgrass, *Zostera marina*, carbon dioxide can be absorbed, and the captured carbon can be stored at the sea bottom due to the renewal of eelgrass. When considering how eelgrass meadow efficiently absorb carbon, it is important to evaluate deflected vegetation height (DVH) in a uniform flow field since it affects the absorption rate of carbon by photosynthesis of SAV. This study thus aims to examine DVH based on conditions of water depth and flow rate. It was found that the ratio of the length of SAV and water depth is an important factor to control deflected vegetation height. It was found that completely submersion limit can be presumed by using Ca and B.