



振動流場におけるアマモ場内の流動解析

田多, 一史
中山, 恵介
中西, 佑太郎
佐々木, 大輔
駒井, 克昭

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 75(2):I_25-I_30

(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/20.500.14094/90008114>



振動流場におけるアマモ場内の流動解析

田多 一史¹・中山 恵介²・中西 佑太郎³・佐々木 大輔⁴・駒井 克昭⁵

¹正会員 中電技術コンサルタント株式会社 沿岸整備部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

E-mail: ktada@cecnet.co.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)

³非会員 株式会社建設技術研究所 大阪本社 構造部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町 1-6-7 北浜 MID ビル)

⁴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)

⁵正会員 北見工業大学准教授 工学部地球環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

近年の研究において、波・流れと水草の連成計算を可能とするオブジェクト指向型プログラミングを利用した「波・流れ水草連成モデル (Submerged Aquatic Vegetation model : SAV model)」が構築されつつある。そこで本研究では、振動流場においてSAV modelを使用したアマモ場内の流動解析を行い、水中CO₂分圧を決定づけている溶存無機炭素濃度 (Dissolved Inorganic Carbon : DIC) の変動特性の検討を行った。検討の結果、波動場ではアマモの葉長が長くなるほど、ストークスドリフトの影響範囲が小さくなり、鉛直モードは波の周期が短くなるほど大きくなることが分かった。また、DICの正味の吸収量はアマモの葉長に大きく依存し、波の影響は二次的なものであることが分かった。

Key Words : SAV model, oscillational conditions, DIC, stokes drift

1. 序論

アマモ場などのブルーカーボン生態系では、CO₂の正味の吸収効果が報告されていること^{1,2}から、アマモ場内の流動変化に伴う物質輸送の変動を把握することは極めて重要である。アマモ場は、沿岸域におけるCO₂の吸収源になりうるとともに、アマモ草体の更新に伴い、地上部及び地下部の枯死体の一部が、炭素ストックとして海底に貯留されやすいという働きをもっている³。このため、アマモ場内の流動場を把握することで、CO₂の吸収や炭素ストックを効率的に促進させることが可能になると考えられる。

アマモ場では、波・流れの影響を受けて水中物質が移流・拡散しており、アマモと波・流れが相互に影響しあっていることから、これらの流動解析を高精度に検討することは困難であった。過去の研究においては、水草を弾性体として扱い、ヤング係数を用いた流れによる抗力、浮力を考慮した研究^{4,5}、摩擦力を考慮した研究等が存在する。しかしながら、これらの研究は、流れとの連成は不十分であり、水草から流れ場への再現性は高くなかった。なお、流れ場への影響として、固定物体として抗力や底面粗度を考慮する手法等が挙げられる。

流れ自体を解く手法は、様々なモデルが存在するが、流れと物体の連成を解くことに適した手法の1つとして、オブジェクト指向型プログラミングを利用したFantomが

適したモデルであると考えられる^{6,7}。このモデルは、実験室レベルだけではなく実現象においても高精度な再現が可能^{8,9}となっており、オブジェクト指向を利用することで、波・流れと水草との連成が比較的容易になるという利点がある。近年の研究においては、アマモをパルク的に考慮せずに、波・流れと水草の連成計算を可能とするオブジェクト指向型プログラミングを利用した「波・流れ水草連成モデル (Submerged Aquatic Vegetation model : SAV model)」が構築されつつある^{10,11}。そこで本研究では、振動流場においてSAV modelを使用したアマモ場内の流動解析を行い、水中CO₂分圧を決定づけている溶存無機炭素濃度 (Dissolved Inorganic Carbon : DIC) の変動特性について検討することを目的とした。

2. 数値計算法

(1) SAV model

本研究では、SAV (アマモ) を弾性体と考えた際に得られる振動モードを計算し、アマモ全体で鉛直モード3程度までの動きを再現できるように、葉長1 mのアマモは20個のセグメントで分割し、21個の回転ヒンジを用いて表現することとした。SAV modelでは、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ものとして仮定した。

流れ場によるアマモの運動を考えるにあたり、基礎方

程式には波・流れによる抗力係数および揚力係数による抵抗^{4),5)}、アマモと流体の密度差によって生じる浮力^{4),5)}、アマモと流体間の摩擦抵抗、そして弾性体としての性質を再現するためにヤング係数による弾性係数^{5),12),13)}の5種類の応力を考慮した。また、アマモの挙動を表現するために、アマモの変位と周辺流体との相互作用を考慮し、抗力や摩擦力等と同様に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ている¹⁰⁾ (式(1)、式(2))。

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

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

ここで、 ρ_s ：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_s ：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)、 ζ_s ：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 ：アマモのセグメント（先端の葉先～根元）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_s ：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。各係数については、 $C_D=1.0$ 、 $f_c=0.30$ 、 $C_L=0.10$ 、 $EI=17 \times 10^4 \sim 67 \times 10^4$ (N m^2) とした。

アマモから流れ場へのフィードバックについては、抗力と摩擦力を考慮し、式(3)、式(4)に示すとおり、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¹⁰⁾。

$$M_x = -\rho_w \frac{|u-u_s|(u-u_s)}{2} (C_D A_z + f_c A_x) \quad (3)$$

$$M_z = -\rho_w \frac{|u-u_s|(w-w_s)}{2} (C_D A_x + f_c A_z) \quad (4)$$

ここで、 M_x ：水平方向の追加の運動量、 M_z ：鉛直方向の追加の運動量である。

これらの要素を考慮することにより、アマモの挙動の再現モデルを構築した。その概念図は、図-1に示すとおりとなる。

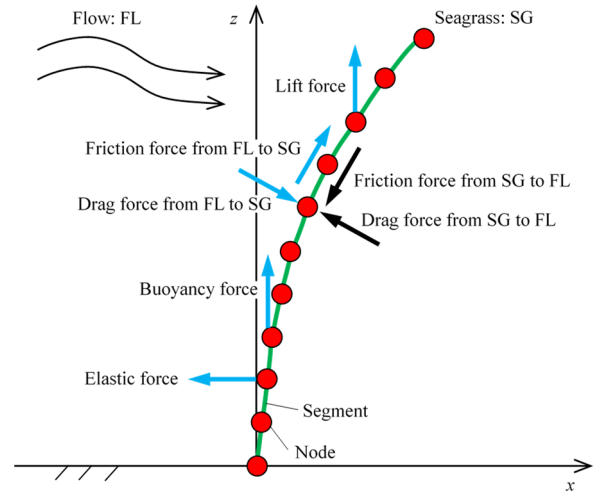
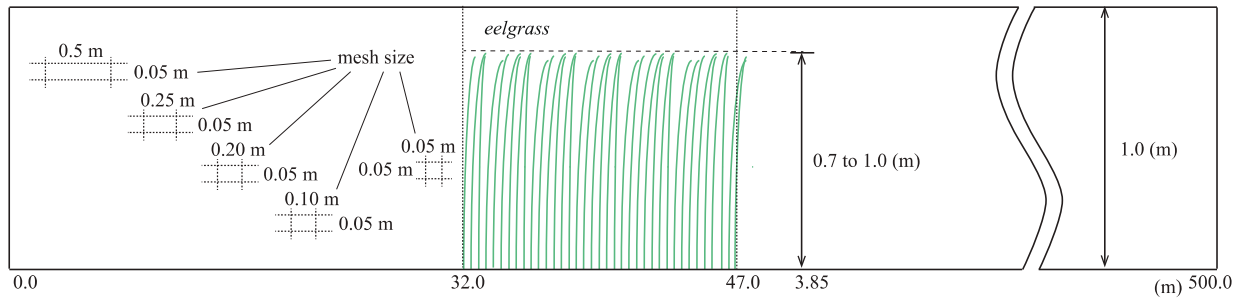


図-1 アマモモデルの概念図

(2) 流動場の計算条件

波・流れ場と水草の連成モデルを構築するにあたり、水草の追加が容易であること、波の分散性を再現するために非静水圧成分を考慮することが必要である。このため、水草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するとともに、波・流れ場の再現には環境流体モデルFantomを使用することとした。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のNavier-Stokes方程式となっており、今回の計算においては密度差は考慮していない。メッシュアスペクト比を可能な限り1に近づけることで、波の分散性を考慮した非静水圧での計算とした。移流項の計算には、Ultimate-Quickest法を適用した。また、底面の再現については、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。境界条件は、 $k-\epsilon$ モデルで検討を行ったが、 ϵ は数値計算の結果で $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$ 、コルモゴロフスケールの $(\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ は 0.56 mm となった。メッシュサイズは最小でも 2.0 cm であり、 $(\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ より約40倍大きいため、乱流モデルによる検討が必要である。したがって、乱流モデルの1つである $k-\epsilon$ モデルを採用することとした。

計算領域に関して、Fantomを使用することにより、不等間隔メッシュを導入することができる。アマモを配置した直近の解析対象領域では、最小の水平格子間隔である 5.0 cm のメッシュサイズを与えた。一方、対象領域から離れるにつれて、再現計算で減衰が生じない程度に粗く大きい格子間隔で 10 cm から 100 cm までの可変メッシュを与えた。また、鉛直格子間隔についても同様に、流れ場の再現性を高めるために細かく設定した。底面付近では、境界層を考慮すると細かく設定する必要があるため、底面から 10 cm までの領域は格子間隔を 2.0 cm 、 10 cm から水面までの領域は格子間隔を 5.0 cm とした。総メッシュ数は、 $1,300 \times 1 \times 26 = 33,800$ となった。



注) メッシュは一部のみを記載しており、メッシュの大きさや配置等はイメージとなっている。

図-2 計算解析領域の概念図

計算の水路長は、500 mに設定した。外力条件として、左端から水位を変化させることで波動場を再現した。その際、境界での流速は放射条件により与えた。アマモによる影響を明確に抽出するため、底面はスリップ条件とした。再現計算においては、左端境界から30 mの範囲を増減・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。奥行方向の格子間隔は、アマモの密度が10 cm²あたり1シュートのため10 cmとした。数値計算では、奥行方向に同条件が繰り返し与えられると仮定して、1メッシュのみを与え、側壁はスリップ条件とした。また、水深1.0 mに対してアマモ葉長を0.7 mから0.1 m間隔で1.0 mまでの4種類、波高0.05 mで周期を4 sと8 sの2種類を与えた。アマモを造波境界である左端から32 mの地点から47 mの地点まで1シュート/0.1 m²で配置した。計算領域内右端での境界条件として、波動成分の通過条件を与えているが、完全に反射を無くすことはできない。そのため、なるべく長く解析時間を確保するため、アマモ場の後流域を長く設定した。以上より、計算解析領域の概念図は、図-2に示すとおりである。

(3) DICの計算条件

アマモ場において、呼吸によるDICの増加、および光合成によるDICの減少をモデル化し、振動動場におけるDIC変動解析を行った。過去のアマモ場におけるDIC変動解析結果¹⁴⁾を参考にするとともに、DICのモデル化に関しては、式(5)～式(8)に示すとおり、呼吸は葉密度の関数、光合成は葉密度とJassbyタイプ¹⁵⁾の日射量の関数を用いた。

$$\frac{d}{dt}DIC = \frac{1}{h} \int_0^{ha} R_r dz - \frac{1}{h} \int_0^{ha} R_p dz + \frac{1}{T_E} (DIC_{out} - DIC) \quad (5)$$

$$R_p = P_{max} \tanh\left(\frac{\alpha I}{P_{max}}\right) \quad (6)$$

$$NEP = \frac{1}{h} \int_0^{ha} R_p dz - \frac{1}{h} \int_0^{ha} R_r dz \quad (7)$$

$$I = I_0 \exp(-k_s z) \quad (8)$$

ここで、 I は光量子密度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 P_{max} と R はモデルにおける最大光合成速度 ($\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$) と呼吸・分解速度 ($\mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)、 α はモデルにおける光量子一純生産速度曲線の初期勾配 ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)、 h ：水深 (m)、 ha ：海底面からアマモ葉先までの高さ (m)、 R_r ：呼吸による単位長さ・単位時間あたりのDICの変化量 ($\mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)、 R_p ：光合成による単位長さ・単位時間あたりのDICの変化量 ($\mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)、 T_E ：移流・拡散によるDICの滞留時間 (s)、 I_0 及び k_s は水面及び水深 z における光の強さ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 k_s は植物プランクトンなどの水中懸濁粒子の濃度や溶存物質濃度に依存する消散係数 (m^{-1}) である。アマモ場内での変化を詳細に検討できるよう、初期条件のDICは10.0 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ と小さくし、計算領域32.0 mから47.0 mのアマモ場内のみに満たした。

光量子密度 I と水深 z の関係は、図-3に示すとおりである。水表面の光量子密度は1,000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、消散係数 k_s は1.0 m^{-1} と設定し、底面での光量子密度は368 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となった。また、光量子密度 I と光合成による単位長さ・単位時間あたりのDICの変化量 R_p の関係は、図-4に示すとおりである。本解析の対象水深帯 (0.0～1.0 m) において、光合成によるDICの変化量 R_p は、-0.0060 ～ -0.0057 $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ の範囲にあることから、底面付近においても光合成活動に必要な光量が確保され、全層にわたって光合成による影響が大きいことが推察される。

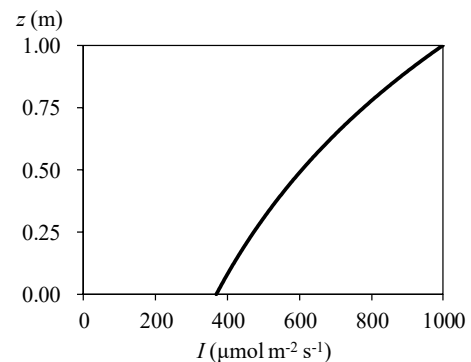


図-3 光量子密度 I と水深 z の関係

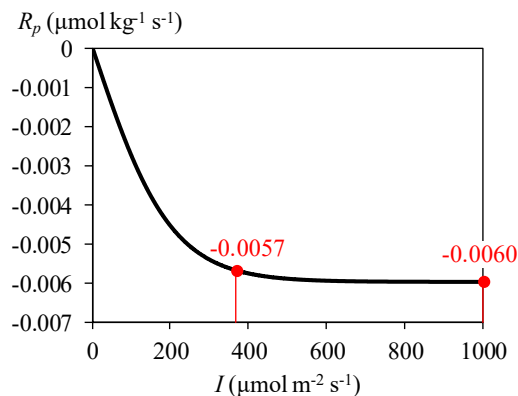


図-4 光量子密度 I と光合成によるDICの変化量 R_p の関係

3. 波動場における流動特性解析

はじめに、振動流場におけるアマモ形状の再現性について、室内実験と数値実験の比較を行った。アマモ場内において最大変位時のアマモ形状を抽出・比較したところ、位相差はほとんど確認されず、アマモの形状を良好に再現していることを確認している¹⁾。

次に、波による波動場への影響を解明するために、アマモ葉長及び波の周期の違いによるアマモ場周辺の水平流速やトレーサの挙動について解析を行った。アマモ葉長0.7 m, 1.0 m, 波の周期4 s, 8 sにおけるアマモ場周辺の水平流速の残差流コンタは、図-5に示すとおりである。(a)葉長0.7 m, 波の周期4 sでは、波の進行方向の流れがほとんど確認されず、逆の流れが底面から約0.30~0.50 m

付近に僅かに発生した。(b)葉長1.0 m, 波の周期4 sにおいても、波の進行方向の流れが殆ど確認されず、逆の流れが底面から約0.30~0.50 m, 約0.80~0.90 m付近に僅かに発生した。(c)葉長0.7 m, 波の周期8 sでは、波の進行方向の流れが底面から約0.80~0.95 m付近、逆の流れが約0.45~0.65 m付近に明瞭に発生した。(d)葉長1.0 m, 波の周期8 sでは、波の進行方向の流れが底面から約0.85~0.95 m付近、逆の流れが約0.50~0.75 m付近に明瞭に発生した。葉長が短いほど、波の進行方向の流速は全体的に小さくなるが、進行流の幅はやや厚くなることが分かった。

さらに、波による物質の長期輸送を解明するため、トレーサ解析を実施した。初期条件として濃度1を左端から32~35 m, 38~41 m, 44~47 mに3 m間隔でトレーサーとして縞状に配置し、乱流モデルを考慮した移流拡散方程式により、移流拡散計算を実施した。アマモ葉長0.7 m, 1.0 m, 波の周期4 s, 8 sにおけるアマモ場周辺のトレーサーの100 s後コンタは、図-6に示すとおりである。

(a)葉長0.7 m, 波の周期4 sでは、縞状（濃度1, 3 m間隔）のトレーサーは、水平方向への拡散がほとんど確認されなかった。(b)葉長1.0 m, 波の周期4 sも、(a)と概ね同様な拡散分布になった。(c)葉長0.7 m, 波の周期8 sでは、縞状のトレーサーが水面付近で水平方向に拡散しており、主に波の進行方向の流れによるものであると考えられる。(d)葉長1.0 m, 波の周期8 sになると、水面付近で波の進行方向の流れが速いことから、(c)と同様に水平方向への拡散が確認された。また、周期の違いによるアマモの変

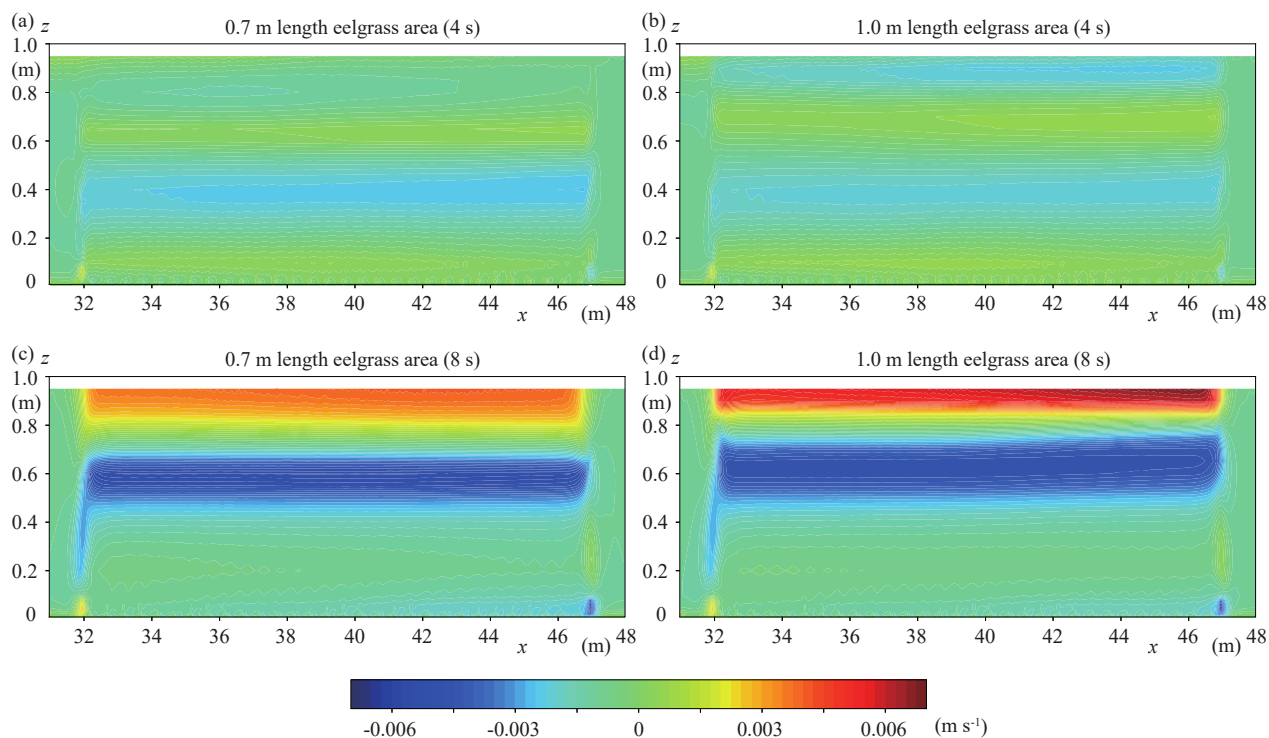


図-5 アマモ場周辺の水平流速の残差流コンタ (a)葉長0.7 m, 波の周期4 s. (b)葉長1.0 m, 波の周期4 s. (c)葉長0.7 m, 波の周期8 s. (d)葉長1.0 m, 波の周期8 s.)

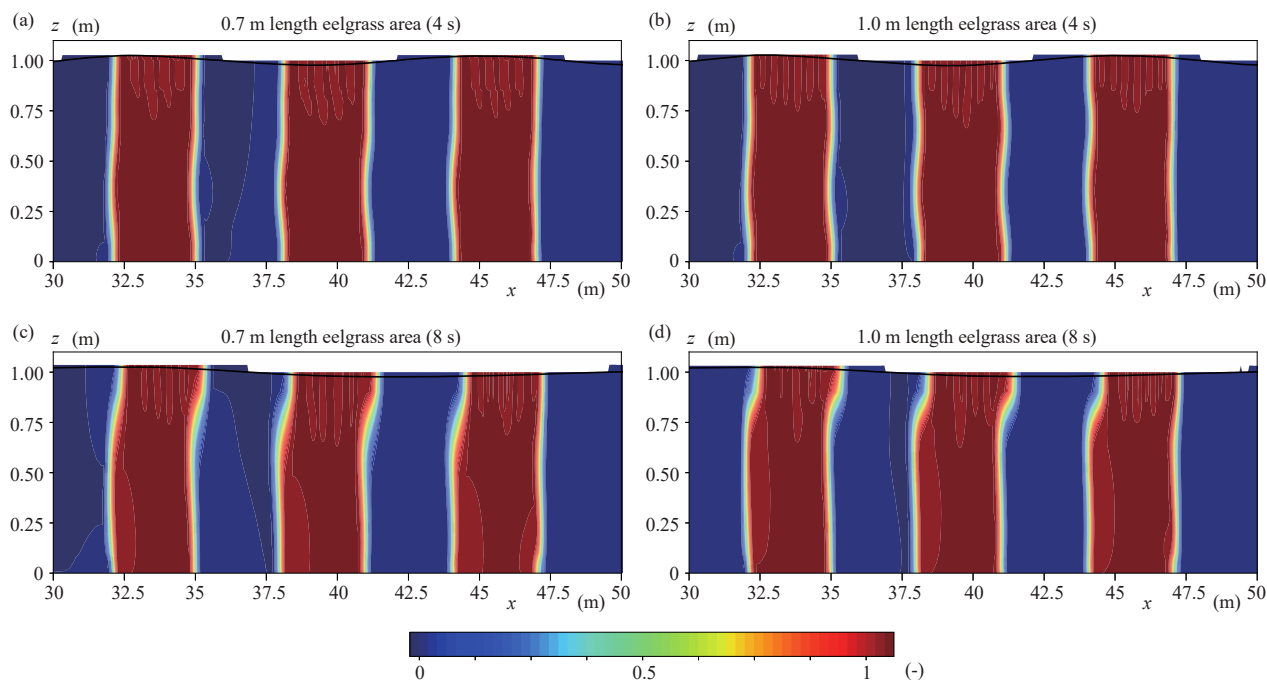


図-6 アマモ場周辺のトレーサーの100s後コンタ((a)葉長0.7m, 波の周期4s. (b)葉長1.0m, 波の周期4s. (c)葉長0.7m, 波の周期8s. (d)葉長1.0m, 波の周期8s.)

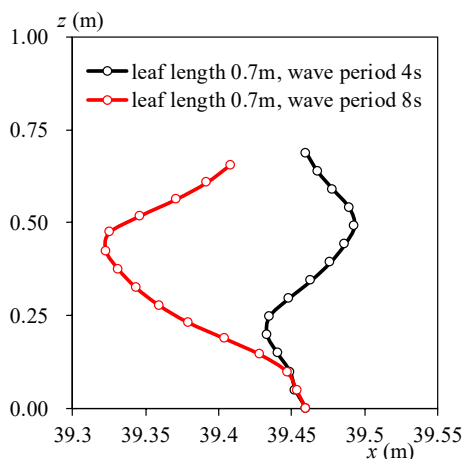


図-7 周期の違いによるアマモの変位の比較 (100s後)

位の比較 (100 s後) は図-7に示すとおり、波の周期が短いほど、アマモの鉛直モードが大きくなった。

以上より、アマモの葉長が水深1.0mと比べて短くなるほど、水表面付近のストークスドリフトによる波の進行方向残差流は小さくなるが、トレーサーは広範囲に輸送

されることが分かった。さらに、波の周期が短くなることにより、アマモの変位の鉛直モードが大きくなることも分かった。

4. 波動場におけるDIC変動解析

アマモ場内のDIC (空間積分値) の時間変化は図-8に示すとおり、移流の効果により解析対象領域内外へのDICの出入りが存在するため、振動流場の周期でDICが変動していた。アマモの葉長が1.0 mの場合、光合成の効果が大きく発揮され、DICの減少率が最大となることが示された (図-8 (a))。また、波の周期が異なることで、DICの変動幅も異なるが、減少率への影響は葉長の効果と比較して小さいことが示された (図-8 (a))。一方で、残差流によりアマモ場外にDICが与えられるため、DICはアマモ場外でも増加傾向にあり、波の周期が大きいほどストークスドリフトの効果が明確に現れ、DICの増加率が大きくなることが分かった (図-8(b))。

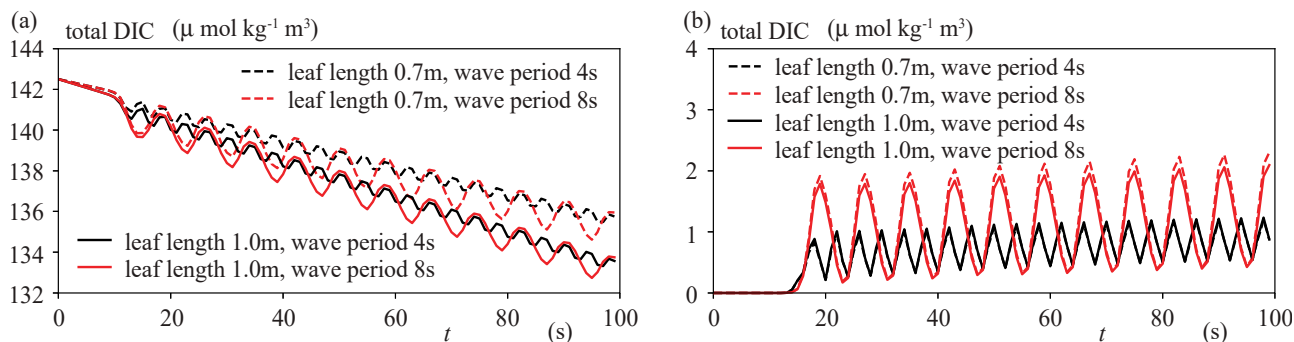


図-8 呼吸と光合成を考慮したDIC (空間積分値) の時間変化 ((a)アマモ場内. (b)アマモ場外.)

5. 結論

- (1) 既往の SAV model に, DIC のモデル化を新たに付加したことにより, 流動流場における流動特性と DIC の変動特性を同時に解析することができたことから, SAV model は汎用性の高いモデルであることが分かった. なお, 弾性力, 浮力, 揚力, 抗力, 摩擦力, 全てが SAV model に組み込まれることで, 高精度な流れ場の再現を可能にしている点は, 過去のモデルに無い特徴であることを記しておく.
- (2) 波動場において, アマモの葉長が長くなるほど, ストークスドリフトの影響範囲が小さくなることが分かった. また, 波の周期が短くなるほど, 鉛直モードは大きくなることが分かった.
- (3) DIC の正味の吸収量は, アマモの葉長に大きく依存し, 波の影響は二次的なものであることが分かった.

謝辞: 本研究は, 未来世紀都市研究ユニット, 科学研究費基盤B (課題番号: 18H01545), 科学研究費国際共同研究強化B (課題番号: 18KK0119) を受けて実施した. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L. and Grimsditch, G. (Eds): *Blue carbon. A rapid response assessment.*, 80p, United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Norway, 2009.
- 2) Tokoro, T., Hosokawa, S., Miyoshi, E., Tada, K., Watanabe, K., Montani, S., Kayanne, H. and Kuwae, T.: Net uptake of atmospheric CO₂ by coastal submerged aquatic vegetation, *Global Change Biology*, 20, pp.1873-1884, 2014.
- 3) Watanabe, K., and Kuwae, T.: Radiocarbon isotopic evidence for assimilation of atmospheric CO₂ by the seagrass *Zostera marina*, *Biogeosciences*, 12, pp.6251-6258, 2015.
- 4) 浅野敏之, 出口浩, 間瀬肇, 小林信久: 揺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.
- 5) 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, *精密工学会春季大会学術講演会講演論文集*, pp.411-412, 2012.
- 6) 新谷哲也, 中山恵介: 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型流体モデルの開発と検証, *水工学論文集*, 第 53 巻, pp.1267-1272, 2009.
- 7) Shintani, T. and Nakayama, K.: An object-oriented approach to environmental fluid modeling, *The 21st International Symposium on Transport Phenomena*, 2010.
- 8) Nakayama, K., Shintani, T., Kokubo, K., Kakinuma, T., Maruya, Y., Komai, K. and Okada, T.: Residual current over a uniform slope due to breaking of internal waves in a two-layer system, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, C10002, 11p, 2012.
- 9) Nakayama, K., Shintani, T., Shimizu, K., Okada, T., Hinata, H. and Komai, K.: Horizontal and residual circulations driven by wind stress curl in Tokyo Bay, *Journal of Geophysical Research*, Vol.119, pp.1977-1992, 2014.
- 10) 中山恵介, 中西佑太郎, 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 B3 (海洋開発)*, Vol.73, No.2, pp.821-826, 2017.
- 11) 中西佑太郎, 中山恵介, 中川康之, 茂木博匡, 田多一史, Mathew, H., 桑江朝比呂: 波・流れ場とアマモ場の相互干渉解析, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.74, No.2, pp.31-36, 2018.
- 12) 石田啓, 近田美則: 有限振幅波による柱体の振動特性, *海岸工学講演会論文集*, pp.628-632, 1985.
- 13) 酒井哲郎, 浅野敏之, 上田康弘: 波浪による人工海藻の動揺特性, *土木学会年次学術講演会講演論文集* pp.692-693, 1989.
- 14) 田多一史, 中山恵介, 駒井克昭, Jeng-Wei TSAI, 佐藤之信, 桑江朝比呂: 成層を考慮したアマモ場における溶存無機炭素の変動解析, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, Vol.74, No.2, pp.444-449, 2018.
- 15) Jassby, A.D., Platt, T.: Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton, *Limnology and Oceanography*, 21, pp.540-547, 1976.

(2019.3.13 受付)

FLOW ANALYSIS IN EELGRASS MEADOW WITH OSCILLATION FLOW FIELD

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

“Submerged Aquatic Vegetation model (SAV model)” using object-oriented programming that enables analysis of the interaction between wave-current and aquatic plants has been developed in the previous studies. In this study, we investigated mass transport under oscillational conditions with eelgrass meadow by using SAV model. Also, we made an attempt to clarify how eelgrass capture dissolved inorganic carbon (DIC) that determines CO₂ partial pressure in water. As a result, it was found that the shorter the length of eelgrass is, the more the stokes drift transport DIC. In addition, it was demonstrated that the net absorption of DIC largely depends on the leaf length of eelgrass, and the effect of waves is secondary compared to uniform flow.