Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-05

数値計算によるマリモの移動限界と波動による回転角度の推定

林，典子
中山，恵介
尾山，洋一
駒井，克昭

(Citation)
土木学会論文集B1（水工学）,75(2):I_775-I_780

(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/20.500.14094/90008109

土木学会論文集B1(水工学) Vol.75, No.2, I_775-I_780, 2019.

数値計算によるマリモの移動限界と波動による回転角度の推定

林　典子[1]・中山　恵介[2]・尾山　洋一[3]・駒井　克昭[4]

[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 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail:181t128t@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 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail:nakayama@phoenix.kobe-u.ac.jp

[3]非会員　釧路市教育委員会マリモ研究室(〒085-0467 北海道釧路市阿寒町阿寒湖温泉 1-1-1)

[4]正会員　北見工業大学工学部地球環境工学科(〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

国の特別天然記念物に指定されている「阿寒湖のマリモ」は湖内環境の変化によって減少傾向にあり，対策が求められているが，現時点ではマリモの挙動に関して十分な知見は得られていない．また，自身の回転や強風時の湖岸への打ち上げもマリモの成長サイクルの一部であるが，回転角度やどの程度の流速でマリモが移動するのかは未解明である．そこで本論文では，液相にオブジェクト指向型流体解析モデルである Fantom を，固相計算に Distinct Element Method を用いたモデルの改良とともに，本モデルを用いたマリモの限界移動速度，回転角度に関する推定を行った．その結果モデルの再現性を向上させることができ，限界移動速度にはマリモの半径，密度，配置が影響を及ぼす可能性が確認できた．風波によるマリモの回転角度計算については不規則波の影響を考慮する必要性が示された．

Key Words: *Distinct Element Method, non-hydrostatic model, critical velocity, object-oriented programming*

1. はじめに

マリモ（*Aegagropila linnaei*）は，北半球の高緯度地方の湖沼や河川に広く分布する淡水緑藻の一種であり, 2～3cm 程度の糸状の藻体が多数集まって球状化し，直径が 20cm 以上に成長する[1) 2) 3) 4)]．過去には，直径が 30cm を超えるものも報告されている[1)]．1900 年代には，世界の数カ所で球状マリモの存在が知られていたが，周辺地域の開発により姿を消してしまい，現在では北海道阿寒湖が世界で唯一残された群生地となっている．阿寒湖においてもマリモの減少傾向に歯止めがかからず，現在では，レッドデータブックで最も危急度の高い絶滅危惧 I 類に指定されている．

実際，1897 年の発見当初，マリモは阿寒湖の西部（シュリコマベツ湾・大崎）と北部（チュウルイ湾・キネタンペ湾）に群生していたが，上流域での森林伐採・木材流送に伴う土砂流入によりマリモが埋没するなどして, 1940 年頃までに西部の群生地は消失した．さらに，湖水の富栄養化が進み，チュウルイ湾のマリモも 1973 年から 1985 年までの 12 年間で約 6 割へと減少した[1) 2) 3)]．その後，1980 年代に湖水の浄化対策が実施され，近年になって阿寒湖では透明度の上昇傾向が確認されているものの，湖底の光環境が改善されたことで水草が繁茂しはじめ，マリモの成長を阻害していることが報告されている．そのため，マリモを健全な状態に保つために必要な対策を講じる必要があると言える．

マリモの成長に関して，著者らの研究により徐々にその生態が明らかにされつつある[5) 6) 7) 8)]．マリモは, 直径が 10cm 以上になると，その内部では光合成が行われないため嫌気化し空洞となる．そのため，直径が大きくなるに連れて，何も外力がかからない状態では球状形態が崩れ扁平化し，割れて断片が阿寒湖内を漂うこととなる. 過去の研究[5) 6)]で明らかにされているように，5 月から 6 月にかけて卓越する海陸風による海風が河道に沿って阿寒湖まで到達し，風速 5m/s 以上の南風をマリモが存在するチュウルイ湾に与えることで風波が発生する．その風波が，不規則波として共鳴することで大きな楕円運動をマリモに与え，マリモが回転することで扁平化を防ぐだけでなく，表面に溜まった有機物をふるい落とすことで球状形態を維持していることが，過去の研究

で示唆されている．しかし，マリモの挙動に関しては研究が始まったばかりで，対策に要される科学的な知見の集積が求められる．さらに，台風の通過などによる強風時にマリモが湖岸に打ち上げられ，崩れて湖内を漂い，重なって下になっていたマリモが新しいマリモとして世代交代することも，マリモの維持に重要であると言われているが，どの程度の流速で湖岸に打ち上げられるか未解明である．

水中における外力が与えられた際のマリモの挙動を解析する手法として，室内実験，現地観測，および数値実験をあげることができる．マリモは国の特別天然記念物であることから，何度も室内実験や現地観測を行うことは困難であり，数値計算の利用が望まれる．過去の研究[7)8)]において，基礎的な検討であるが，オブジェクト指向プログラミング[9) 10)]を利用した Fantom[11) 12) 13) 14)]によるマリモの再現計算が試みられている．過去に提案されたマリモモデルについては，マリモ自身の回転の影響が考慮できていない点や，複数個体の再現計算は 3 次元で行うことができない点，マリモの個体数の増加が容易でない点といった課題点が存在した．そこで本研究では，過去に提案されているマリモモデルを改良し，その再現性の検討を行うとともに，一様流が与えられる際のマリモの移動限界，および波動が与えられる際の回転角度に関する検討を行うことを目的とする．

2. マリモモデル

それぞれのマリモを 1 つのオブジェクト[15) 16)]として考え，オブジェクト指向型流体解析モデルである Fantom に組み込む．マリモ自体に関しては，個別要素法（Descrete Element Method：DEM）[17) 18)]を適用することとする．マリモのダッシュポッドの粘性係数 αと弾性定数 k の決定方法については，林ら[8)]を参照いただきたい．林ら[8)]に比較して大きな変更点は，マリモをオブジェクトとして考慮することにより，3 個以上のマリモを同時に計算できるようになった点である．具体的な計算スキームは以下の通りである．

① 流体計算において，マリモも含めた領域における外力項による予測子の計算を実施する．
② マリモ計算において，予測子により与えられた流速を個々のマリモの内部において平均化し，その値をマリモの移動速度とする．
③ マリモ計算において，マリモの移動速度を用いて移動させる．その際，DEM として以下のマリモ同士の法線方向の方程式も解き，移動先を決定する．

$$\frac{\mathrm{d}\overrightarrow{v_n}}{\mathrm{d}t} + \alpha\overrightarrow{v_n} + k\eta\overrightarrow{n_n} = 0$$

ここで，$\overrightarrow{v_n}$：マリモ同士が接している場合の中心を結んだ方向の速度ベクトル，η：マリモ同士が接触している際の重複距離，$\overrightarrow{n_n}$：一方のマリモの中心からもう一方のマリモの中心へ向かう方向ベクトルの単位ベクトルである．

表-1 marimo1，marimo2 の粘性係数α, 弾性定数 k，密度差比

	半径(cm)	α	k	密度差比
marimo1	5.0	2.0	50	2.05×10^{-2}
marimo2	7.2	3.0	50	2.40×10^{-2}

④ 流体計算において，移動したマリモ内の鉛直流速を利用し，マリモ内で一様な流体の鉛直流速として与える．
⑤ 流体計算において，マリモが移動したことによる鉛直流速が流体に与えられたため，予測子の計算と合わせて連続の関係が満たされなくなっている．そこで，ポアソン方程式を解くことにより修正子を計算し，連続関係を満足させる．
⑥ 自由表面に関して，保存計算を行った後，①からの計算を繰り返す．①から⑥までの計算で 1 タイムステップの計算が終了する．

マリモモデルの重要な点は，マリモが藻の集合であることから透水性が高く，流体計算の圧力もマリモ内に容易に伝搬する点である．ステップ⑤の計算を行うことにより，マリモ内に与えられる流体計算の圧力を計算できることになり，マリモを回り込む流れ等が自動的に計算され，特別にマリモによる抗力や摩擦力を考える必要がなくなる．

流体部分の計算では，Generic Length Scale（以下 GLS）モデル[19) 20) 21)]が用いられており，本研究では k-εモデル（CA フィルタ）が用いられている．運動量の移流成分には風上差分，スカラー量に関しては Ultimate Quickest が適用されている．

3. 室内実験による再現性の検討

林ら[8)]により実施された 2 つのマリモを用いた衝突の室内実験結果を利用して再現性の検討を行った．実験水槽の大きさは，縦・横・高さ，それぞれが 0.385m・0.385m・0.50m であり，中立状態での水深を 0.47m とした．水槽底面に半径約 7.2cm のマリモ(marimo2)を置き，2 つのマリモが水平面に対して 35 度の角度で接触するように，水深 0.40m から半径約 5.0cm のマリモ(marimo1)を落下させた．その際，マリモのダッシュポッドの粘性係数αと弾性定数 k は，林ら[8)]に従い**表-1** のように与えた．

マリモのモデル化に要する各係数を求めるため，および個体の大きさによってその挙動に差異が生じるのかを確認するため，大きさの異なる 2 つのマリモの落下実験を行った．カルキ抜きし水温調整した水で満たした水槽（横 38.5 cm，奥行き 38.5 cm，高さ 50 cm）にマリモを一つ入れ，水槽全体が映るように高速カメラを水槽の正面に設置した．実験には marimo1, marimo2 の 2 つのマリモを用いた．半径は

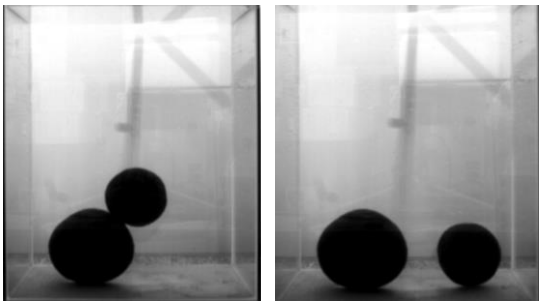

図-1 室内実験におけるマリモ同士の衝突時と落下後 6.0 秒時点の画像

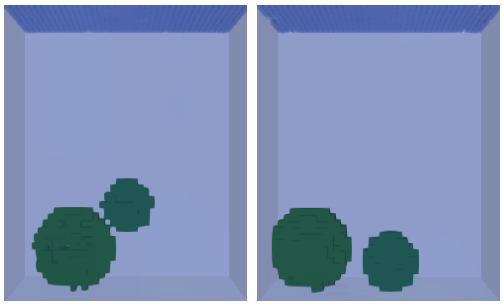

図-2 林ら [8]のモデルにおけるマリモ同士の衝突時と落下後 6.0 秒時点の画像

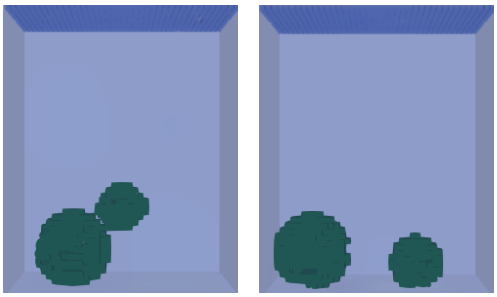

図-3 今回作成したモデルにおけるマリモ同士の衝突時と落下後 6.0 秒時点の画像

表-2 室内実験，林ら [8]のモデル，今回作成したモデルにおける marimo1 の移動距離

	marimo1 の移動距離(cm)	室内実験との差(cm)
室内実験	5.8	
林らのモデル	1.9	-3.9
今回のモデル	7.4	1.6

それぞれ約 5.0cm, 7.2 cm であり，密度は 1021kg/m^3 と 1025kg/m^3 を与えた．

マリモの挙動に関しては，高速カメラを利用し，1 秒間に 125 コマの映像を撮影することで，それぞれのマリモの挙動を計測した．カメラの解像度は 1024×1024 ピクセルであった．

2 つのマリモの衝突による marimo1 の移動距離について，室内実験，林ら [8]のモデル，今回作成したモデルの比較を行った(**図-1**，**図-2**，**図-3**)．marimo2 に関しては，実験に用いた個体の断面が楕円形であったため底面との接触面が広く，数値計算より大きな摩擦力が加わったことで移動距離が過小となっており，比較には適さないと考えられるため，モデルの精度の比較には marimo1 の移動距離のみを用いることとした．

表-2 に示すように，移動距離に関して今回のモデルの方が林ら [8]のモデルより再現性が高いという結果が得られた．林ら [8]による解析と比較し，ステップ③における衝突の際に利用していたダッシュポッドの粘性係数αと弾性定数 k を調整したためによりよい再現性を得ることができたと考えられる．新モデルについて，室内実験における marimo1 の移動距離に占める誤差は 27.6%と大きいものとなった．このように数値計算における marimo1 の移動距離が過大となった原因は，本計算において，底面との静止摩擦力を考慮していなかったためであると考えられる．

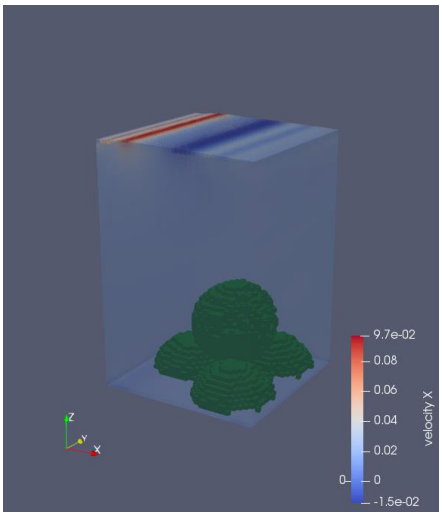

図-4 case1 におけるマリモの配置（3 次元）

4. 一様流による移動限界

マリモ群生地では，マリモが密集し重なり合って生息している状況が確認されている．群生地においてマリモが湖岸に打ち上げられる流速に関する知見を得るため，本章では密に重なったマリモにどの程度の流速が加わると流速が与えられた方向に配置が崩れるのか，前章で作成したモデルを用いて数値計算を行うことによって推定する．

底面に 3 つのマリモを密に配置し，その上方に 3 個体の中心位置を結んだ三角形の重心を中心として配置したマリモに対して x 方向に一様流を与えた場合，底面のマリモに乗り上げ，乗り越える限界の流速v_{lim}をそれぞれ求めることとした(**図-4**)．計算対象

表-3　各パターンにおける設定半径，密度差比，得られたv_{lim}の値

No.	半径 (cm)	密度差比	限界移動流速v_{lim} (m/s)	
			case1	case2
1	8.0	1.99×10^{-2}	1.0×10^{-2}	2.5×10^{-2}
2	10.0	2.54×10^{-2}	1.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}
3	10.0	1.64×10^{-2}	1.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}
4	10.0	1.15×10^{-2}	1.0×10^{-2}	1.5×10^{-2}
5	12.0	1.46×10^{-2}	2.0×10^{-2}	2.5×10^{-2}

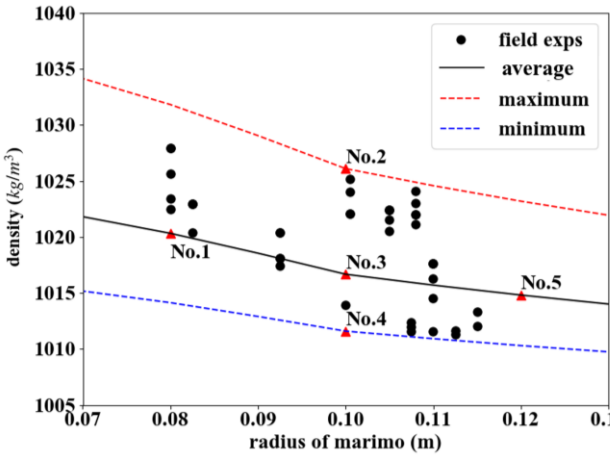

図-5　マリモの密度の平均値，最大値，最小値，実験値

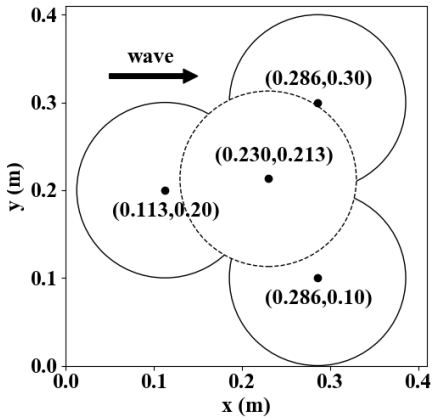

図-6　case1 におけるマリモの配置

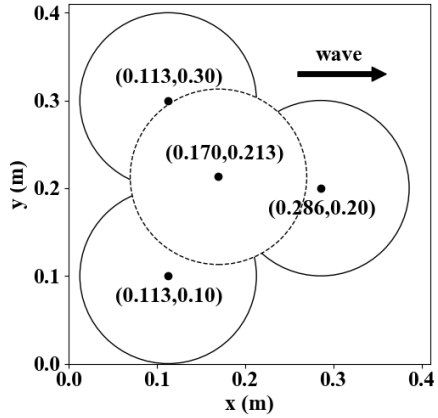

図-7　case2 におけるマリモの配置

は表-3 に示すような 5 パターンであり，マリモのダッシュポッドの粘性係数αと弾性定数 k は，それぞれ 3.0, 50 とした．また，表-3 に示した各半径における密度の平均値，最大値，最小値からそれぞれの密度差比を算出して用いることとした．これらの密度に関する値は，現地実験から得られた 30 個体の半径と落下時間，落下距離のデータに加え，内部の空洞の大きさの推定することによって得られたマリモ全体としての密度の推定値である．これを図-5 に示す．これらのパターンのうち，No.1，3，5 に関しては 8.0cm，10.0cm，12.0cm の半径それぞれについて密度差比の理論値を与えた．No.2，4 は，これらに加えて 0.10m に関して現地実験から得られた最大値，最小値についても比較を行うこととしたものである．

No.1~5 についてそれぞれ得られたv_{lim}についても表-3 に示す．また，表-3 の case1，case2 は No.1~5 のそれぞれの場合についてマリモの配置方法が異なる 2 パターンの計算を行ったものである．case1，case2 の配置方法については図-6, 図-7 に示す通りである．計算上の水槽の大きさは，縦・横・高さをそれぞれ 0.40m・0.40m・0.65m とした．

表-3 より，case1 については半径または密度差比が小さいものはv_{lim}が小さくなっていることが確認された．よって半径が小さく密度の低い，成長不良とされるマリモは湖岸に打ち上げられやすいという可能性が示された．しかし，case2 については case1 のように顕著な傾向は確認できなかった．また，半径の大小によらず case1 より case2 のv_{lim}が大きくなるという結果を得た．したがって，v_{lim}の大きさに影響を与えるのはマリモ自身の大きさや密度差比の違いだけではなく，複数の個体がどのように配置されているかということも重要であると考えられる．

5.　波動による回転角度

マリモの成長には光合成が不可欠であり，マリモ自身の回転によって表面にまんべんなく日光が当たることが良好な成長につながるということが知られている．既往の研究から，阿寒湖においてマリモが回転し始める 10m 風速の閾値は 5.0m/s であり，マリモが回転する際の風向は南南東であることがわかっている [5]．しかしながら，どの程度の波動によってマリモがどの程度回転するのかは解明されていない．したがって，本章ではマリモ群生地における波動とマリモの回転の関係を明らかにすることを目的とし，本研究で作成したモデルを用いてマリモの回転角の推定を試みた．

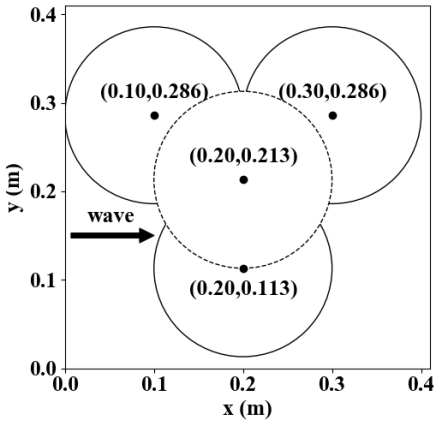

図-8　case3 におけるマリモの配置

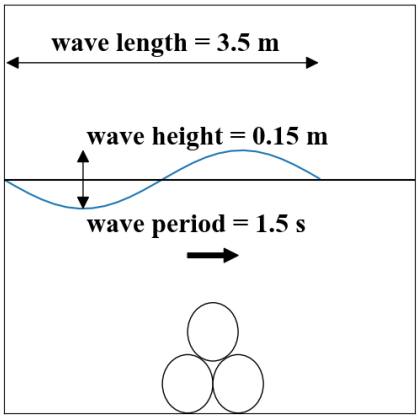

図-9　振動流の条件

表−4　各パターンについて設定した水深，配置方法，および回転角度の計算結果

No.	水深(m)	case	回転角度(°/5min)
1	2.0	1	6.50
2	2.0	3	7.41
3	3.0	1	0.70
4	3.0	3	1.85

マリモの群生地を想定し，**図-6**，**図-8** の case1，case3 に示すように底面に密に配置した 3 つのマリモの上に密に接するように 1 つのマリモを配置し，**図-9** のような条件で微小振幅波理論に基づいて振動流を設定し，配置したマリモには底面から 0.1m 上方の地点における振動流を与えた．波高は 0.15m，周期は 1.5 秒として与えており，これは過去の観測結果から得られた有義波高から推定したものである [5]．水深とマリモの配置を**表−4** のように与え，5 分間における累積回転角度を求めた．また，計算領域は縦・横・高さをそれぞれ 0.40m・0.40m・0.65m とした．

表−4 の 4 パターンについて，水深が浅いほど回転角度が大きいという傾向が見て取れ，水深による流速の変化を考えれば妥当な結果と考えられる．また，配置が case1 より case3 の場合の方が回転角度は大きいという結果から，回転しやすい配置とそうでない配置があると考えられる．実環境におけるマリモの回転角度については，風速 8.0~9.0 m/s の強風時に最大で 90(°/5min)程度とされているのに対し [5]，今回得られた回転角度の値の範囲は 0.70~7.41(°/5min)であった．これは風速 4.0~6.0 m/s の風速時に観測されやすいと考えられている回転角度であり，6.0 m/s 以下の風速は阿寒湖においては比較的小さい値である [5]．このように実現象と差が生じた原因としては，今回与えた振動流の波高には有義波高である 0.15m が用いられたため [5]，実環境においては不規則波が発生することにより，より大きな波高と波長が共鳴により発生していたことが考えられる．したがって，今後与える波動については不規則波による波高の変動を考慮する必要がある．

6.　おわりに

本研究において，マリモモデルを利用することで，以下の結論を得ることができた．

1. マリモをオブジェクトとして捉え，オブジェクト指向型流体解析モデルである Fantom に組み込むことにより，従来のモデルに比べて 3 個以上のマリモの挙動の計算が容易となるモデルを作成することができた．
2. モデルの精度に関しては室内実験，林ら [8]のモデル，本研究で作成したモデルを比較して検証を行い，本研究で作成したモデルの方がマリモの挙動を高い精度で再現できることを確認した．
3. 同じ半径のマリモが密に群生している場合には，マリモが移動し始める限界の流速は，半径の大きさより配置による影響を大きく受ける可能性が示された．また，半径または密度差比が小さい，成長不良の傾向にある個体は比較的移動しやすいと考えられる．
4. 波動を与えた際の回転角度の計算結果から，マリモが密に重なり合っていてもその配置によって回転角度には差が出ると考えられる．
5. 今回のマリモの回転角度に関する計算結果と実環境における回転角度との差は，マリモの密度の非一様性による影響や，与えた有義波と不規則波の大きさの差によって生じたものであると考えられる．したがって今後の計算においては密度の非一様性，および波の条件を与える際に不規則波によって波高が増大する影響を考慮する必要がある．

謝辞：本研究は，平成 30 年度河川基金一般助成（2019-5211-048），科学研究費基盤 B（18H01545），科学研究費国際共同研究強化 B（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) 佐藤謙・石川靖・大原雅・中瀬浩太・若菜勇：マリモ保護管理計画, http://marimo-web.org/data/marimo_hogokeikaku.pdf, 2012.
2) 公益財団法人学習ソフトウェア情報研究センター：守ろう！地球生き物「阿寒湖のマリモの不思議を学ぶ」 http://www.gakujoken.or.jp/marimo/，2011.
3) マリモ web：阿寒湖マリモ保護年表 http://www.marimo-web.org/data/protect_chronological_table.pdf, 2015.
4) 環境省自然環境局野生生物課：日本のラムサール条約湿地, http://www.env.go.jp/nature/ramsar/conv/ramsarsitej/RamsarSites_jp_web14.pdf, 2012.
5) 中山恵介・伊藤権吾・若菜勇・北村武文・佐藤之信・駒井克昭・竹内友彦：マリモ球状体に回転運動を引き起こす阿寒湖チュウルイ湾の風波特性，土木学会論文集 B3(海洋開発)特集号，第 71 巻 2 号, p. I_945-I_950, 2015.
6) 佐野史弥・中山恵介・山田俊郎・佐藤之信・丸谷靖幸・駒井克昭・尾山洋一：阿寒湖チュウルイ湾におけるマリモに回転運動を与える風波の将来予測に向けて，土木学会論文集 B3(海洋開発)特集号，第 72 巻 2 号, p. I_988-I_993, 2016.
7) 林典子・中山恵介・尾山洋一・若菜勇・山田俊郎・駒井克昭：外的要因が球状マリモ形成に与える影響評価のための固液混相流モデルの開発，土木学会関西支部年次学術講演会概要集，II-32，2018.
8) 林典子・中山恵介・尾山洋一・若菜勇・山田俊郎・駒井克昭：個別要素法を環境流体解析に組み込んだマリモモデルの開発，土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74，No.5，I_517-I_522，2018.
9) Nakayama K., Nguyen H. D., Shintani T. and Komai K.: Reversal of secondary circulations in a sharp channel bend, Coastal Engineering Journal, 1650002-1-1650002-23, 2016.
10) 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.
11) 新谷哲也，中山恵介: 生物の細胞組織構造を模した流体シミュレーターの設計と検証，土木学会論文集 B1（水工学）, Vol.71, No.4, pp. I_751- I_756, 2015.
12) Nakayama K., Shintani T. Kokubo K. Maruya Y. Kakinuma T. 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, 11pp., 2012, doi:10.1029/2012JC008155.
13) 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.
14) Nakamoto A., Nakayama K., Shintani T., Maruya Y., Komai K., Ishida T. and Makiguchi Y.: Adaptive management in Kushiro Wetland in the context of salt wedge intrusion due to sea level rise, Hydrological Research Letters, Vol.7, No.1, pp.1-5, 2013.
15) 中山恵介・中西佑太郎・中川康之・茂木博匡・田多一史：波・流れ場とアマモの連成モデルの構築，海洋開発論文集，第 73 巻 2 号, p. I_821-I_826, 2017.
16) 猪瀬貴茂・石黒美佐子：オブジェクト指向の数値流体力学への応用，第 14 回数値流体力学シンポジウム, C03-2, 2000.
17) 坂口栄一郎・下坂厚子・日高重助ほか：粉体シミュレーション入門粉体工学会編，産業図書株式会社, 1998.
18) 原田英治・後藤仁志：個別要素法を用いた固液混相流モデルによる粒子群沈降過程の高解像度計算，水工学論文集，第 52 巻, pp.967-972, 2008.
19) Umlauf, L., and Burchard, H.: A generic length-scale equation for geophysical turbulence models, Journal of Marine Res., Vol.61, pp.235-265, 2003.
20) Warner, J. C., Sherwood, C. R., Arango, H. G., Signell, R. P.: Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method, Ocean Modelling, Vol.8, pp.81-113, 2005.
21) 新谷哲也：3 次元非構造格子流体シミュレーターへの GLS 乱流クロージャーモデルの組み込みと検証，水工学論文集，第 72 巻 4 号, p. I_667-I_672, 2016.

(Received May 31, 2019)
(Accepted August 7, 2019)

ESTIMATION OF ROTATION ANGLE AND CRITICAL VELOCITY OF MARIMOS DUE TO WAVES AND CURRENTS

Noriko HAYASHI, Keisuke NAKAYAMA, Yoichi OYAMA , Katsuaki KOMAI

Marimos, natural monuments of the country, are in danger of extinction, but the mechanisms of the formation of Marimos has not been understood. To clarify the mechanisms of the formation of Marimos, it is needed to estimate the rotation angle of Marimos due to wind waves and the critical velocity at which Marimos start moving. Therefore, we developed the Marimo model that consists of two different phase models, liquid and solid phases, by coupling a three-dimensional hydrodynamic model (Fantom) and a Distinct Element Method (DEM). The Marimo model has improved the reproducibility from the comparisons with laboratory experiments. The critical velocity is found to be the function of the Marimo radius, density and the bed conditions. In addition, it is revealed that random wave is one of the most significant factors for the rotation of Marimos.