マリモ球状体に回転運動を引き起こす阿寒湖 チュウレイ湾の風波特性

中山 恵介¹・伊藤 権吾²・若菜 勇³・北村 武文³
佐藤 之信⁴・駒井 克昭⁵・竹内 友彦²

¹正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail:nakayama@mail.kitami-it.ac.jp

²学生会員 北見工業大学 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³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 株式会社豊水設計部長 海洋マネジメント部 (〒065-0033 札幌市東区北33条東16丁目2-2)

⁵正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

北海道北東部に位置する阿寒湖に存在するマリモは、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、糸状体と呼ばれる糸状の藻体が多数集まって球状の集合体を形成することでよく知られ、わが国では北海道阿寒湖の集団が国の特別天然記念物に指定されている。この回転運動を発生させる外力として、適度な波浪の関与が想定されているものの、その実態は十分に分かっていない。本研究の成果として、マリモが水中で回転する様子を湖底に設置したビデオカメラによって記録するとともに、波高計と風向風速計による風波の観測を同時に行い、数値計算モデルも利用することで、マリモを回転させる風波の条件を明らかにすることが出来た。

Key Words : wind wave, fully nonlinear, strongly dispersive, FSI model, wave height

1. はじめに

阿寒湖のマリモは、国の特別天然記念物に指定されており釧路市の重要な観光資源となっている。しかし、1900年代の前半から近年までにかけて実施された森林の開拓や電源供給施設の開設、阿寒湖周辺の観光地化等のさまざまな環境変化から、マリモの群生地、個体数ともに減少傾向にあり、かつて4箇所あった群生地は現在2箇所となってしまっている。

阿寒湖に生息するマリモは、代表長さ3 cm～4 cmの糸状の細い藻が無数に集まり、球状集合体の破損断片に由来する小型の楕円形もしくは楔形の集合体が回転しながら表層の全面で光合成を行い1つの球体を形成することで生成ことが確認されており、糸状体が放射状に満遍なく伸長生長して最大で直径が30 cmを超えるようなマリモの存在も確認されている^{1,2)}。直径が30 cmを超えるようなマリモは、世界でも阿寒湖でしか確認できず、それが国の天然記念物に指定される大きな要因となっている³⁾。そのような巨大マリモを含め、近年、マリモの個体数の減少が報告されており、これ以上のマリモ群生地の減少が生じないよう対策を講じる必要がある^{4,5,6)}。

過去の研究において、6年から9年周期の強風によ

るマリモの湖岸への打ち上げが、マリモの個体数の更新を促しているのではないかと考えられている^{7,8)}。マリモの打ち上げを解析した論文では、その後の研究で検討された値と比較して過大な有義波高1 mが用いられており信頼性に問題があるが、その現象自体はほぼ吹き寄せによる輸送であることが解明されている⁹⁾。

一方で、通常の風波により回転している可能性が示されているが、そのメカニズムは解明されていない。今後、例えば、有義波高を減少させる可能性がある水草を刈り取ることにより、球体化を促進する等の対策が有効であるかを検討する上で、マリモ球体化のメカニズムを解明することは必須条件であると考えられる^{10,11)}。マリモは糸状の細い藻が無数に集まり形成されており、内部まで藻が詰まっているわけではなく、外皮のような形で数cmの藻の集まりが球形を形作り、内部は嫌気状態の水で満たされていることが確認されている¹⁰⁾。そのため、水中でのマリモの比重は1よりも僅かに大きい程度であり、少しの擾乱でも簡単に浮上・移動しやすい状態であると考えられる。つまり、湖底2 mから3 mに生息するマリモであるが、それほど大きな風波でなくてもマリモは風波により移動・回転している可能性がある。

図-1 阿寒湖のマリモ。水深約2mにて撮影。

図-3 St. 2 に設置された気象観測装置。

そこで本研究では、マリモがどの程度の風波で移動・回転し始めるかを確認するために、マリモ群生地周辺での湖上での風速の計測、ビデオカメラを利用したマリモの回転角速度の計測、および波高・波向計を利用した波の観測を実施した。そして、その結果を利用して強非線形共分散表面波モデルによる流れ場の解析を実施し、マリモ球体化に影響を及ぼしている要因の解析を行うことを目的とする。

2. 風波を発生させる風の特徴

阿寒湖は、北海道東部に存在する湖であり、阿寒国立公園内に位置し、水表面積13.28 km²、最大水深約45 m のカルデラ湖である(図-1, 図-2)。マリモの群生地は、最大のものが北部のチュウレイ湾(図-1中のSt. 1に対応)に位置し、もう一つの群生地は同じ北部で東側に位置するキネタンペ湾に存在する。最大の群生地であるチュウレイ湾における風波の解析を実施するために、本研究ではSt. 2の水表面から2 mの高さに風速・風向計(風車型高精度センサー, YOUNG社製)を設置した(図-3)。過去の研究でも、チュウレイ湾上の風と阿寒湖のAMeDAS地点(St. 3)の風は大きく異なることが指摘さ

図-2 阿寒湖。☆: ビデオカメラとウェーブハンター。
○: 気象観測装置。

図-4 St. 2 と St. 3 (AMeDAS) における (a) 風向の発生割合と (b) 16 方位での平均風速。

れており¹⁰⁾、本研究ではその影響をより詳細に評価するために、風向・風速観測を2014年7月3日から11月5日までの4ヶ月にわたり実施した。

阿寒湖は海陸風の影響を受けていることが報告されており、湖上のSt. 2における卓越風向が南南東と北であることから、その特徴を計測することができていた(図-4a)。しかし、AMeDAS地点であるSt. 3では、卓越風向が東と南西であり、周辺地形の影響を受けた結果、湖上と大きく異なる風向を示すことが分かった。さらに、風速

(a) 8th of July, 2014

(b) 9th of July, 2014

図-5 マリモの個体番号. (a)2014年7月8日. (b)2014年7月9日.

も大きく異なっており、卓越風向の南南東におけるSt. 2での平均風速が約5 m/sであるにも関わらず、AMeDAS地点では約1 m/s程度を示していた(図-4b)。この結果、チュウレイ湾上での風波の検討を行う際には、St. 2付近での直接計測が必要であることが確認された。なお、水面上10 m風速(以降、10 m風速)に変換するための粗度は0.0001 mを用い、2 mにおける計測風速を1.16倍することで10 m風速とし、第3章以降の解析で利用したことにご注意願いたい。

3. ビデオカメラを利用したマリモの回転に関する解析

マリモが風波により球体化していることを確認するために、最大のマリモ群生地であるチュウレイ湾(St. 1)において水中ビデオカメラを設置し、マリモの動きを計測した。撮影はNHK釧路放送局により実施された。マリモの回転の検討には、表面にキズ等の特徴を持つ画像を抽出し、解析を行うこととした。撮影は6月から7月にかけて行われたが、プランクトン等による濁りの発生等の影響、風が弱く回転しない等により、明確に回転が確認できたのは、2014年7月8日16時40分から17時10分の30分間、2014年7月9日8時30分から9時30分の60分間のみであった。なお、それぞれ回転を特定できたマリモに個体番号を与えた(図-5)。

ビデオ画像から解析できる最大回転角が180度であり、最小5分間で180度の回転が発生していたことから、回転角速度の単位は(deg/5 min)とした。回転を確認した例として、風速が測定されていないので利用していないが、明確に回転を確認できる2014年6月11日におけるマリモの回転のようすを図-6に示す。この時は波が画像上で右上から左下に向かって進行しており、白丸で示されるマリモのキズが、進行方向とは逆に移動し回転していることが確認された。波の進行方向とは逆にマリモの上面が移動・回転する現象は、回転が確認された全てのマリモにおいて発生していた現象であった。

St. 2において風速が10分間隔で測定されていたこ

図-6 マリモの回転の様子. 青矢印: 水粒子の軌道.

とから、マリモの回転が確認された期間における回転角速度と風速の関係を取りまとめた(表-1, 表-2)。過去の研究でマリモの直径は、風速と回転角速度との関係に影響をおよぼさないことが示されている⁹⁾ことから、各風速に対する全てのマリモの回転角速度を取りまとめた

表-1 2014年7月8日における St.2 における 10m 風速 (m/s) , 風向およびマリモの 5 分間での回転角 (degree) .

時間	風速	風向	J8①	J8②	J8③	J8④	J8⑤	平均値	標準偏差
16:40	7.0	南南東	60	30	10	35	5	28	20
16:50	6.4	南南東	20	10	0	20	0	10	9
17:00	6.5	南南東	5	30	5	5	0	9	11
17:10	5.2	南南東	15	0	0	10	5	6	6

表-2 2014年7月9日における St.2 における 10m 風速 (m/s) , 風向およびマリモの 5 分間での回転角 (degree) .

時間	風速	風向	J9①	J9②	J9③	J9④	J9⑤	J9⑥	J9⑦	平均値	標準偏差
8:30	6.0	南南東	20	35	15	20	35	15	15	22	8
8:40	6.8	南南東	30	25	35	15	70	25	25	32	16
8:50	7.6	南南東	15	60	60	5	30	15	10	28	22
9:00	7.8	南南東	25	50	50	10	130	35	15	45	38
9:10	7.8	南南東	20	90	35	15	未推定	70	20	42	28
9:20	8.3	南南東	25	60	20	20	150	25	10	44	46
9:30	8.9	南南東	25	140	45	15	未推定	50	5	47	45

(図-7) . その結果, 風速が大きくなるほど回転角速度の標準偏差が大きくなるが, その平均値は風速と強い関係があり, 図中で示される関係式が存在することが分かった. この図から, マリモが回転し始める最小の10 m風速は $61 / 12.5 = 4.88$ m/sであると得られ, 約5 m/sがマリモが回転し始める閾値であることが分かった. なお, 表にも示されているとおり, マリモが回転する際の風向は全て, 卓越風向である南南東であった.

4. 波高・波向の計測と強非線形共分散表面波モデルによる解析

風速・風向計測, およびビデオ解析により, マリモが風波により回転しており, 風波の進行方向とは逆方向にマリモ上面が移動・回転していることが分かった. そこで本章では, 過去に波の解析モデルとして使用されている強非線形共分散内部波モデル (FSI model) を表面波用に修正したモデルを利用し, 粒子の挙動を解析することとした^{12), 13), 14), 15)}. マリモが存在するため, 渦を考慮すべきかもしれないが, 渦度の計測値が存在しないこともあり, 本研究では渦度を考慮できるFSI modelは利用しなかった^{16), 17)}. FSI modelを利用した理由は, 速度ポテンシャルがべき乗の関数で展開されており, 時々刻々と変化する流速の鉛直分布を高精度に再現できるためである. 参考文献¹²⁾に多層用のFSI modelの解法が示されているので, 表面波用に修正した方程式の詳細を述べるのは, 本論文では省略させていただく.

まず, 数値計算においてどの程度の波を与えるべきかを検討するために, St. 1においてWave Hunterにより計測された有義波高とその周期の観測結果を示す. 計測は2014年7月15日から9月4日まで20分間隔, それ以降11月5

図-7 St.2 での 10m 風速とマリモの回転角速度. ○: 各風速に対応する平均値. 実線: 標準偏差.

日までは2時間間隔で実施された. マリモの回転は南からの波によって発生していることから, 東から南回りで西の風, および同方向の波向を持つデータを抽出した (図-8) . その結果, 風速14 m/s程度でも最大の有義波高は0.3 mであり, 当然ではあるがSMB法では推定不可能であることが確認された. 本論文では, 最初の取り組みとして特徴を理解することを目的とし, 対象地点における有義波高0.2m, 周期2sを与える計算とした.

解析計算領域は, チュウレイ湾の特徴を考慮しつつ簡略化した地形を用いることとした (図-9) . 対象地点は図中のpoint Aであり, マリモが群生する水深2 mを対象とした. FSI modelは, べき乗に展開された速度ポテン

図-8 (a)東から南回りで西までの St.2 での風速と St.1 での有義波高. (b) St.1 での有義波高とその周期.

図-9 強非線形共分散表面波モデルによる計算領域.

シャルを何項まで考慮するかにより再現性が大きく変化する. 鉛直方向に一樣であるべき乗の展開項数1であれば, 長波方程式となり通常の波の再現には不適當である. べき乗の展開項数を2とすることで鉛直方向に一樣に変化する速度ポテンシャルの鉛直分布を考慮することが出来, およそKdV方程式やBoussinesq方程式で示されるソリトン波の高精度な再現計算が可能となる. 本論文では, 水深波長比が1/3程度となる可能性があることから, さらに展開項数を上げ, 展開項数3まで考慮することとした. 過去の研究において, 展開項数3まで考慮することにより, 深海波を再現できることが示されており¹⁷⁾, 本研究で対象としている現象を再現するには十分な再現性を持つと考えられる.

計算領域100 mを500分割し0.2 mメッシュ間隔を与えた. 波長が数mであることを考えると, 6 m波長では30メッシュを考慮できることとなり, 十分なメッシュ数を確保することが出来る. 計算時間ステップは0.0005 sであり, CFLは約100以上を確保した. 計算は図中の左の境界から波を与え, 100 sまで計算を実施した. point Aにおける波の変化が定常状態に達したと思われる時間(計算開始29秒後)以降における1周期の水粒子の動きを取り出した結果, 水表面付近では予想通りStokes Driftが発生しており, 波が左から右に与えられていることから, 粒子は時計回り(黒太実線)に回転していることが確認された(図-10). 注目すべき点は湖底面付近であり, 理論通り扁平化しているが, その回転方向が水表面付近

図-10 point Aにおける水粒子の移動(左図)および0.2周期毎のベクトル図(右図).

とは逆の反時計回り(黒太破線)となっている点である. 図右に0.4 s間隔で取り出した流速ベクトルを示す. 粒子の軌道で示されるとおり, 湖底面付近を除いて時計回りのベクトルが発生し, 湖底面付近では反時計回りのベクトルが発生していた. マリモの上面の移動・回転が波の進行方向とは逆になっていることと関連している可能性があるが, 時計回りの移動がマリモと底面との相互作用によりマリモを回転させている可能性もあり, 今後, 様々な周期および地形勾配を与えた検討および室内実験等を行い確認する必要がある.

5. おわりに

本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。マリモの回転に関しては現時点で2つの可能性があり、今後の研究課題である。

- 1) マリモが群生するチュウレイ湾上での風速・風向は阿寒湖のAMeDAS地点と大きく異なるため、解析にはチュウレイ湾上での測定結果を用いるべきであることが分かった。
- 2) 画像解析と風速の観測結果から、マリモが回転し始めるのはチュウレイ湾上での10 m風速が4.88 m/sを超えるときであることが分かった。また、マリモの回転角速度は風速の関数として再現できる可能性が示された。
- 3) マリモ群生地付近での有義波高はSMB法で推定されるよりもかなり小さく、適用不可能であることが示された。
- 4) FSI modelを適用した結果、波によりマリモの回転と同じ方向の移動が底面付近にて発生していることが分かった。本現象の発生要因は未解明であるが、マリモを回転させている可能性があると考えられる。
- 5) マリモを回転させている他の要因として、底面とマリモの相互作用も考えられる。その際のマリモは、波により底面付近以外で卓越して発生しているマリモの回転と反対方向の移動により、回転させられている可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 羽生田岳昭, マリモの分子系統学的研究—その起源, 分類, 生物地理—, 235-237p, 2002.
- 2) 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, 21p, 2012.
- 3) 環境省, 平成 26 年度世界自然遺産候補地詳細調査検討業務報告書要旨, 3p, 2014.
- 4) マリモ web, 阿寒湖マリモ保護年表

- http://www.marimo-web.org/, 2015.
- 5) 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.
- 6) 北海道庁, 北海道ブルーリスト 2010, 33p, 2010.
- 7) 阿寒町教育委員会編, 特別天然記念物「阿寒湖のマリモ」第 3 次統合調査—報告書概要版—, マリモ研究特別号, 46p. 1998.
- 8) 山本省吾, 若菜勇, 中瀬浩太, 島谷学, 阿寒湖チュウレイ湾におけるマリモの湖岸打ち寄せ・打ち上げ機構に関する考察, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 611-615, 2003.
- 9) 伊藤権吾, 中山恵介, 若菜勇, 北村武文, 佐藤之信, 駒井克昭, 阿寒湖のマリモ形成要因に関する検討, 北海道支部論文集, 1-4p, 2015.
- 10) 阿寒湖のマリモ保全対策協議会, マリモ保護管理計画, 120p., 2012.
- 11) 若菜勇, Arni Einarsson, 小川麻里, 阿寒湖とミューヴァトン湖におけるマリモ集合体の維持・崩壊過程, 第 34 回極域生物シンポジウム, 2p, 2012.
- 12) Nakayama K. and T. Kakinuma, Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.62(5), pp.574-590, 2010, doi: 10.1002/fld.2037.
- 13) 中山恵介・柿沼太郎・及川正行・辻英一・丸谷靖幸, 内部ソリトン波の 3 次オーダー解による再現性の検討, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.1-5, 2010.
- 14) 中山恵介・柿沼太郎・及川正行・辻英一・丸谷靖幸, ソリトン共鳴により発生する大振幅ソリトンの解, 海岸工学論文集, 第 58 巻, pp.6-10, 2011.
- 15) 中山恵介・柿沼太郎・辻英一・及川正行, 振幅の違いを考慮したソリトン共鳴による大振幅ソリトンの解析, 海岸工学論文集, 第 59 巻, pp.1-5, 2012.
- 16) 柿沼太郎, 中山恵介, 渦度を考慮した非線形波動方程式による表面波及び内部波の数値解析, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.6-10, 2007.
- 17) 吉江祐人, 中山恵介, 渦度を考慮した強非線形共分散方程式により再現されたソリトン波の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_1-I_5, 2014.

INVESTIGATION OF WIND WAVES WHICH INDUCE ROTATIONAL MOTION OF MARIMO IN LAKE AKAN

Keisuke NAKAYAMA, Kengo ITO, Isamu WAKANA, Takefumi KITAMURA,
Nobuyuki SATO, Katsuaki KOMAI and Tomohiko TAKEUCHI

Marimo is a spherical algae, which consists of freshwater filamentous green algae, in Lake Akan. The process for making a spherical algae, whose diameter is up to 30 cm, has not been clarified. Although Marimo is registered as a nationally protected species, the number of Marimo has been revealed to decrease. Wind wave is considered as one of the most significant factors for a formation of Marimo. However, the mechanisms of the formation have not been clarified, which could provide policies how to protect Marimo in Lake Akan. This study thus aims to investigate how a spherical shape is formed under wind wave conditions by using video camera, wave measurements, and meteorological observations. As a result, wind wave is revealed to be one of the significant factors that form Marimo in Lake Akan.