

阿寒湖チュウル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

山本省吾*・若菜 勇**・中瀬浩太***・島谷 学****

北海道阿寒湖の特別天然記念物マリモは、強風によって6～9年に1度の頻度で、数万個が湖浜に打ち上げられている。マリモ打ち上げ時の波浪条件の定量的評価や打ち寄せ・打ち上げ機構を明らかにすることは、マリモの保全上重要である。本研究では、2002年10月の大量打ち上げ発生時の現地風データから風波を推算し、波・流れ場の平面2次元数値計算を実施した。さらに、慣性力を考慮したシールズ数を用いたマリモの移動限界評価式を提案し、現地打ち上げ観測記録との比較により、評価式の妥当性を確認した。また、波による振動流速下で移動状態になった球状体マリモが湖浜流により湾奥へ運ばれると推測した打ち寄せ・打ち上げ機構が実現象を十分説明できることも確認した。

1. はじめに

北海道阿寒湖の特別天然記念物マリモは、強風によって6～9年に1度の頻度で数万個が湖浜に打ち上げられている。2002年10月2日の台風21号来襲時には、同湖北東部に位置するチュウルイ湾の湖岸長60m、幅7～12mにわたり、直径1～20cmの球状体マリモの大量打ち上げが発生した(図-1、写真-1)。マリモの打ち上げは藻体の乾燥を招き枯死へと至る(阪井, 1991)ため、マリモにとって重大な出来事である。

阿寒町教育委員会は、マリモ保全のための調査研究として、マリモ生育量計測、湖底の水中ビデオ観察、風向・風速連続観測など、生育状況と生育環境の調査を行っている。若菜・岸(1997)は、マリモ打ち上げ機構として、南風による波動が湖底のマリモを大きく動揺させ浅水域へと押し上げ、それを速い流れが湖岸沿いに運ぶものと推測した。しかしながら、マリモ打ち上げ時の外力条件に関する定量的な評価はほとんどなされていない。したがって、マリモ保全のために、打ち上げ時の波・流れ条件の定量的評価や打ち寄せ・打ち上げ機構を明らかにすることは重要である。

本研究では、強風時の波・流れ特性と球状体マリモの打ち寄せ・打ち上げ機構の解明を目的として、現地風データから風波を推算し、波・流れ場の平面2次元数値計算を実施した。さらに、球状体マリモの移動限界評価式を提案するとともに、現地の打ち上げ観測記録との比較により、評価式の妥当性を検証した。

2. マリモの概要

(1) マリモの生態および物理特性

マリモは北半球の高緯度地方に広く分布する淡水生緑藻の一種である。マリモの形態は、着生糸状体、浮遊糸状体、集合体の三つに大別される(若菜ら, 1999)。この

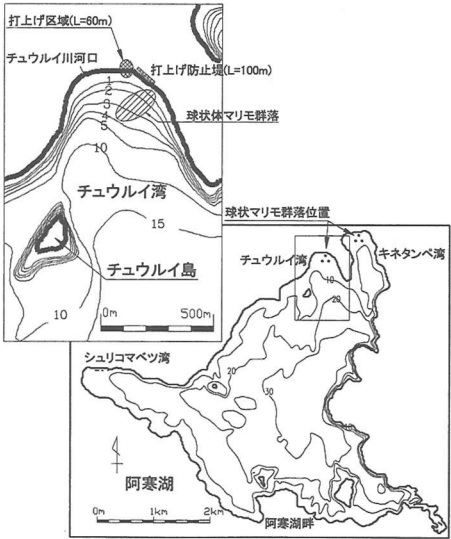


図-1 阿寒湖およびチュウルイ湾



写真-1 湖岸に打ち上げられたマリモ (2002.10.3撮影)

うち、集合体は球状あるいは密な塊で、湖底に積もるように集まったり、湖底を漂いながら生活する。ピロード状の表面をもつ球状体マリモ(毬藻)は糸状体が中心部から放射状に広がり、直径20cm～30cm程度にまで生長する。球状体の比重は1.2～1.3とされ、大きなマリモよりも小さなマリモの方が比重が大きい(福富ら, 1952)。

* 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所
** 理博 阿寒町教育委員会
*** 正会員 五洋建設(株)環境事業部
**** 正会員 工修 横浜国立大学助手 大学院工学研究院

(2) マリモの分布域

北海道阿寒湖は、図-1に示すように、面積 13.3 km^2 、周囲 25.9 km 、水面標高 420 m 、最大深度 42 m のカルデラ湖である。球状体マリモは、阿寒湖北東部に位置するチュウレイ湾およびキネタンベ湾の水深 2 m 付近の砂地において生育が確認されている。調査の結果、チュウレイ湾での球状体マリモの分布面積は $79,200 \text{ m}^2$ 、生育数は 4.3 億個、このうち長径 20 cm を超える大型球状体生育数は $19,000$ 個と推定されている（阿寒町教育委員会, 1998）。

また、阿寒湖では12月から4月の間は湖面が結氷する。同湖の水位は融雪や降雨、発電時の放水により若干変動するが、北海道電力の記録によると、1980年から2002年までの年間の最高水位と最低水位の差の平均は 60.6 cm で、2002年の差は 73 cm であった。

(3) マリモの打ち上げ

マリモの生育被害の主な要因として、降水量不足などによる湖面水位低下や強風による湖岸への藻体の打上げによって生じる乾燥、湖水の透明度の低下や富栄養化による生育環境悪化、泥の藻体上への堆積による光合成機能低下が挙げられる。これらの要因の中で、最も自然的要因の傾向が強いものは強風による湖岸打上げである。

1957年以降の46年間において、チュウレイ湾における強風によるマリモ大量打ち上げは1957年7月、1965年9月、1972年10月、1978年10月、1987年9月、1995年11月、2002年10月の7回起こっている（若菜・岸, 1997）。そのたびに地元民の協力による打上げマリモの回収と湖底への返還作業が行われてきた。現在チュウレイ湾湖岸には、1966年に設置された打上げ防止用の老朽コルゲートパイプ（高さ 1.3 m 、幅 2.6 m の半円筒形で延長 100 m ）が残存している。

3. 2002年10月のマリモ大量打ち上げ

(1) 打ち上げ時の風況と風波推算

2002年10月2日北海道東部に上陸した台風21号の影響で阿寒湖では強風が発生し、同日朝、マリモの湖岸大量打ち上げが確認された。図-2にチュウレイ島における10分間平均風速時系列図、図-3に風向・風速図を示す。図-2に示すように風速極大値は 23 m/s （10月2日8時）であり、風速 20 m/s 以上の風が90分間（10月2日7:30~9:00）連続した。同時間帯にマリモ水中画像でも激しい攪乱が確認された。

チュウレイ島の通常時の風況は、10/4の風速時系列のように昼間に風が強く、夜間は比較的穏やかである。9/30の18:00以降は、夜間においても $5 \sim 10 \text{ m/s}$ 程度の風速が観測されているが、これは台風の接近によるものと考えられる。図-3に示すように台風の移動に伴い、風

向きが変化しており、10/1ではS~SSW、10/2ではSSW、10/3ではWSW~Wと、卓越風向が時計回りに変化している。

チュウレイ湾におけるマリモ打ち上げ時の波浪諸元をSMB法により推算した。湖畔からチュウレイ湾までの吹送距離を 4 km 、風速を 22 m/s とし、有義波高 $H_{1/3}=1 \text{ m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=3 \text{ s}$ を得た。波向は風向と同じSSWとした。

(2) 数値計算による波・流れ場の評価

チュウレイ湾を対象領域とするマリモ打ち上げ時の波浪場、流れ場計算を行った。計算格子間隔はともに 20 m とした。波浪場計算は磯部（1986）の砕波減衰モデルを考慮したエネルギー平衡方程式を用い、前節で風波推算した波高を沖側境界から入射させた。

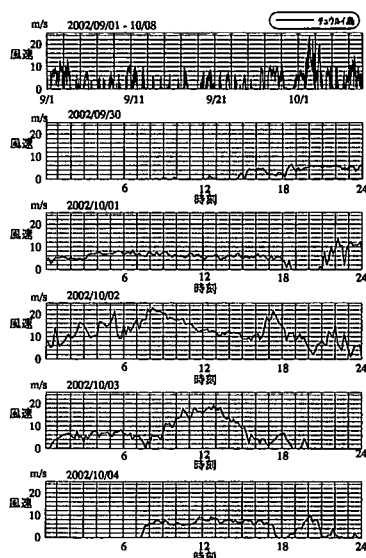


図-2 チュウレイ島における10分間平均風速時系列図

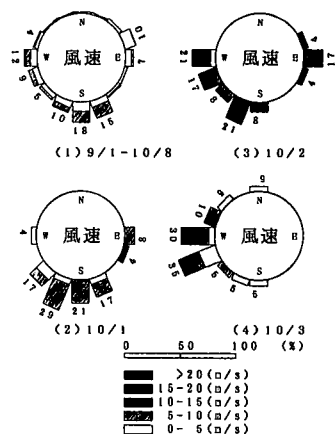


図-3 チュウレイ島における観測風向・風速図

流れ場計算はラディエーションストレスと湖面上に働く風の応力(土木学会, 1999)を考慮した鉛直平均の平面2次元の運動方程式と連続式を用いた。波によって生じる流れ U に、波による底面質量輸送速度 U_m と碎波による戻り流れ U_b を合成させ、流れ場 $(U + U_m + U_b)$ を評価した(以下、湖浜流場と呼ぶ)。質量輸送速度 U_m はLonguet-Higgins (1953)による水平床上輸送速度式を用いた。式(1)に底面における波の進行方向の輸送速度 U_m を示す。また、碎波による戻り流れ U_b は、佐藤ら(1987)、Dibajniaら(1993)にならって、式(2)~(4)とした。なお、戻り流れの向きは、波の進行方向逆向きとした。

$$U_m = \frac{5\pi^2 H^2}{4TL \sinh^2 kh} \dots\dots\dots (1)$$

$$U_b = -22 \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}} \frac{H_{1/3}^2}{hT_{1/3}} P_b \dots\dots\dots (2)$$

$$P_b = \left(1 + \left(\frac{H_b}{H_{rms}}\right)^2\right) \exp\left(-\left(\frac{H_b}{H_{rms}}\right)^2\right) \dots\dots\dots (3)$$

$$H_b = AL_0 \left(1 - \exp\left(-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^4 \theta)\right)\right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 H :波高(不規則波の代表波高としてrms波高を用いた)、 T :周期、 L :波長、 k :波数 $=2\pi/L$ 、 h :水深、 $\tan \theta$:底面勾配(本研究では0.02)、 H_0 :沖波波高、 L_0 :沖波波長、 $H_{1/3}$:有義波高、 $T_{1/3}$:有義波周期、 P_b :レーリー分布を仮定した碎波確率、 H_b :合田(1973)の規則波における近似式による碎波限界波高、 H_{rms} :碎波減衰を考慮しない場合のエネルギー平均波高、 A :定数(0.12~0.18, 本研究では0.12)、である。

図-4に波による底面軌道流速振幅の計算結果、図-5、図-6に湖浜流速 $(U + U_m + U_b)$ の時間平均ベクトル分布の計算結果を、球状体マリモの分布域(阿寒町教育委員会, 1998)とともに示す。これから、長径5cm以上の球状体マリモ分布域において、振幅0.3~0.6 m/sの底面軌道流速(図-4)と湖岸に沿って湾奥に向かう5~20 cm/s程度の流速(図-5)が確認できる。

4. マリモの移動限界評価式

(1) 底質移動状態指標の導出

湖底上のマリモは岸向き・沖向きに細かく変動をする波動流速の作用を受ける。波による振動流速下で移動状態になったマリモが湖浜流により湾奥の浅水域に運ばれ、波の作用によって汀線際に打ち寄せ、打ち上げられるものと考えた。

振動流場での底質移動状態の指標として式(5)のように、底質を動かそうとする力と底質をとどまらせようとする力の比であるシールズ数 Ψ (堀川, 1985)がよく

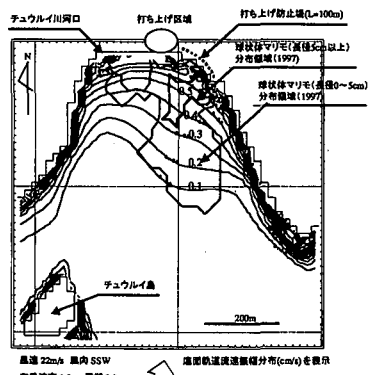


図-4 波による底面軌道流速振幅分布の計算結果

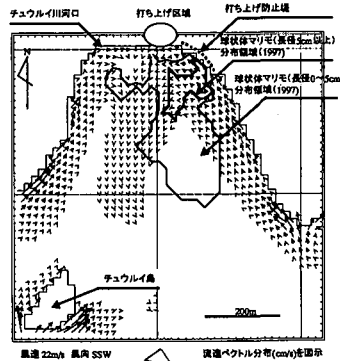


図-5 湖浜流ベクトル分布の計算結果

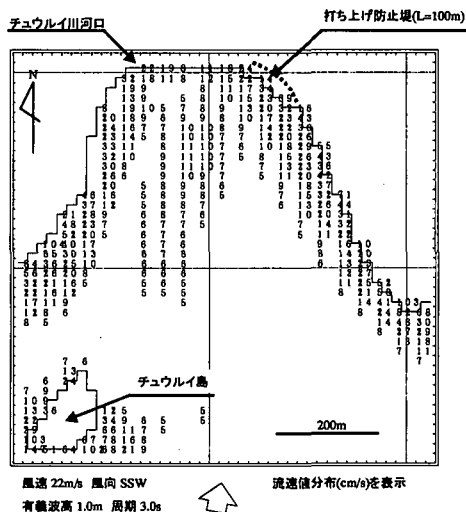


図-6 湖浜流速値分布の計算結果

用いられる。本研究では平均的な球状体マリモ(比重1.25, 長径5cm)に作用する0.3~0.6 m/sの底面流速から判断して、従来無視されていた慣性力 F_i を抗力 F_D に線形的に結合させて評価した式(6)~(8)の修正シー

ルズ数 Ψ' を底質移動状態の指標とした。

$$\Psi = \frac{f_w \cdot \bar{u}_b^2}{2sgd} \dots\dots\dots (5)$$

$$F_{I,\max} = C_M \frac{\pi d^3}{6} \rho \cdot \left| \frac{du_b}{dt} \right| \dots\dots\dots (6)$$

$$F_{D,\max} = C_D \frac{\pi d^2}{8} \rho \cdot \bar{u}_b^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\Psi' = \Psi \left(1 + \frac{F_{I,\max}}{F_{D,\max}} \right) = \Psi \left(1 + \frac{4C_M d \omega}{3C_D \cdot \bar{u}_b} \right) \dots\dots (8)$$

ここに、 f_w ：波・流れ共存場での摩擦係数、 $\bar{u}_b$ ：微小振幅波理論による底面軌道流速振幅、 s ：底質の水中比重（本研究では $1.25 - 1 = 0.25$ ）、 g ：重力加速度、 d ：粒径、 C_M ：慣性力係数（本研究では 1.5 ）、 ρ ：流体密度、 C_D ：抗力係数（本研究では 0.4 ）、 ω ：角周波数 $= 2\pi/T$ 、である。摩擦係数 f_w の算定は、田中・Sana (1996) の摩擦則陽形式近似によった。図-7 は、打ち上げ時の慣性力と抗力の比 $F_{I,\max}/F_{D,\max}$ の計算結果である。長径 5 cm 以上の球状体マリモ分布域での比は $0.8 \sim 1$ 前後、球状体マリモ分布域の沖側では 10 程度になる。

(2) 移動限界条件の検証

打ち上げが観測された台風来襲時、および打ち上げが確認されなかった 1999 年 6 月 23 日の強風観測時（最大風速 10 m/s から有義波高 0.45 m 、有義波周期 2.2 s と推算）を対象として評価指標 Ψ' の計算を行った。図-8 に台風来襲時、図-9 に打ち上げ未確認の強風時の修正シールズ数分布を湖浜流ベクトルと球状体マリモ分布域とともに示す。漂砂において全面移動限界シールズ数は滑面で 0.11 、粗面で 0.06 とされる（渡辺, 1979）。図-8、図-9 から、 $\Psi' > 0.11$ の範囲は、打ち上げの生じた台風 21 号来襲時には長径 5 cm 以上の球状体マリモ分布域全域に、また、打ち上げが確認されなかった風速 10 m/s の条件では、岸近くの一部の領域のみに分布した。本研究のマリモ球状体の移動限界シールズ数は、渡辺 (1996) の漂砂の全面移動限界シールズ数とほぼ一致している。

本研究に類似する研究事例として、海藻の一部が固着基盤や茎部から分離・脱落して海底面を浮遊する流れ藻を滞留させる施設の効果に関する研究がある。川俣・磯上 (1999) は波動下においてブロック型藻留施設から流れ藻が流出する限界式として、式 (9) を提案した。

$$U_a/w = 18.85 + 3.3 \ln(h_b/L) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 U_a ：底面軌道流速振幅限界値、 w ：流れ藻の沈降速度、 h_b ：障壁高さ、 L ：波長、なお、マリモの沈降速度は式 (10) の Rubey の式（土木学会, 1999）を用いた。

$$w = \sqrt{\frac{2}{3}sgd + \frac{36\nu^2}{d^2}} - \frac{6\nu}{d} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 s ：底質の水中比重（本研究では 0.25 ）、 g ：重力

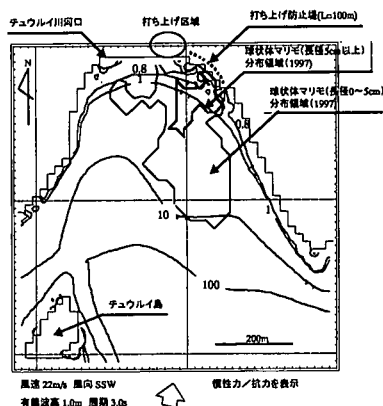


図-7 慣性力/抗力の計算結果

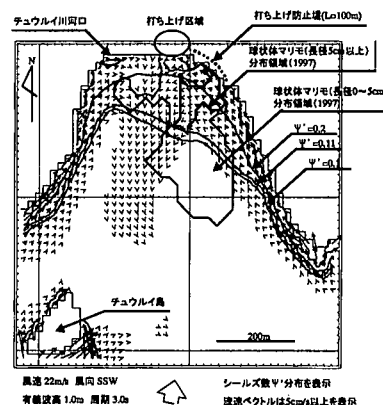


図-8 台風による打ち上げ時の修正シールズ数分布結果

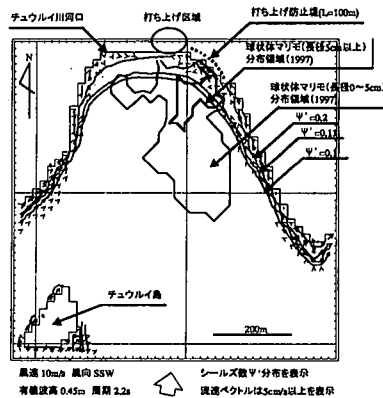


図-9 打ち上げ未確認時の修正シールズ数分布結果

加速度、 d ：粒径（本研究では 5 cm ）、 ν ：水の動粘性係数である。

図-10 には、 5 cm 以上の球状体マリモ分布域において、打ち上げ有無の2つの波・流れ条件を対象として、式 (8) の修正シールズ数による移動限界評価と式 (9)

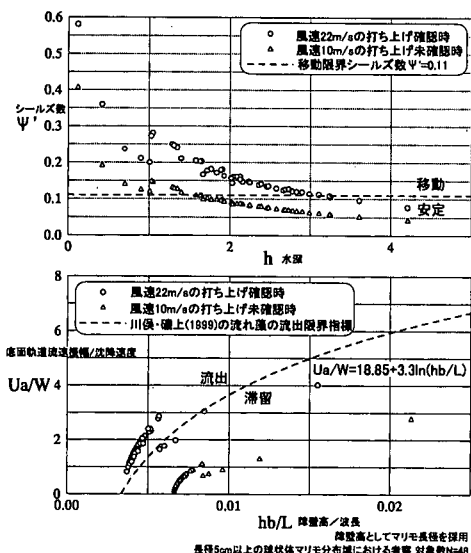


図10 修正シールドズ数と流出限界式による打ち上げ評価

の川俣・磯上(1999)の流れ藻流出限界評価による分布結果を示す。ここでは、障壁高さ h_b としてマリモ長径 5 cm を採用した。これから、式(8)の修正シールドズ数と式(9)の流出限界式ともに、打ち上げ発生有無を良好に評価できることが分かる。

5. おわりに

本研究により、以下のことが明らかになった。

- ① 風速 22 m/s 時の波・流れ場計算から、振幅 0.3~0.6 m/s の振動流速と、湖岸に沿って湾奥に向かう 5~20 cm/s 程度の湖浜流速が結果として得られた。
- ② 風速 22 m/s 時の計算結果から、球状体マリモ分布域において、慣性力/抗力比は 0.8~10 になった。
- ③ 慣性力を考慮した修正シールドズ数 $\Psi' > 0.11$ でマリモ打ち上げ発生有無を評価できた。限界条件は渡辺(1979)の漂砂の移動限界シールドズ数とほぼ一致した。
- ④ 障壁高さをマリモ長径とした川俣・磯上(1999)の流れ藻流出限界式を用いてマリモ打ち上げ発生有無を評価できた。

本研究により、強風に起因した激しい波動流速下で移動状態になったマリモが湖浜流により湾奥浅水域に運ばれ、波の作用によって汀線際に打ち上げられると推測した機構の外力場を定量的に評価し、妥当性を確認できた。

今後、本研究での検討結果の検証と、詳細なマリモ挙動評価のために、球状体マリモの沈降速度実験や湖底面付近の波・流れの現地観測を行うことが重要である。

なお、北海道電力株式会社釧路支店電力部系統運営課、同土木課には阿寒湖水位に関するデータを提供頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 阿寒町教育委員会編(1998): 特別天然記念物「阿寒湖のマリモ」第3次総合調査一報告書概要版一, マリモ研究 特別号, 46 p.
- 磯部雅彦(1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 川俣 茂・磯上孝太郎(1999): 波動下におけるブロック型藻留施設の適用限界, 水産工学, 第36巻, 1号, pp. 11-19.
- 合田良実(1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 第12巻, 第3号, pp. 31-69.
- 阪井與志雄(1991): マリモの科学, 北海道大学図書刊行会, 202 p.
- 佐藤慎司・福濱方哉・堀川清司(1987): 斜面上における不規則波の碎波変形と底面流速に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第34巻, pp. 36-40.
- 田中 仁・A. Sana(1996): 交差する波と流れの抵抗則の検討, 土木学会論文集, 第533号, II-34, pp. 2732-277.
- 土木学会編(1999): 水理公式集, pp. 157., pp. 497-498.
- 福富孝治・楠 宏・田畑忠司(1952): 昭和25年下旬並びに昭和26年8月上旬における阿寒湖, チュウレイ, イベシベツ両湾の陸水学的調査報告, マリモ調査報告.
- 堀川清司編(1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 147-169.
- 若菜 勇・岸 圭介(1997): 1995年11月に発生した阿寒湖チュウレイ湾におけるマリモの打ち寄せ及び打ち上げの経過とその保全措置, マリモ研究, 6, pp. 1-27.
- 若菜 勇・新井章吾・佐野 修(1999): マリモの球化一構造と生成過程からみた球化現象の多様性一, 遺伝, 53巻, 7号, pp. 45-52.
- 渡辺 晃(1979): 振動流境界層と海浜過程, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-3-1-B-3-13.
- Dibajna, Mohammad・清水琢三・渡辺 晃(1993): 現地海岸における縦断地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 406-410.