

## ボタンウキクサの成長動態モデルの改良

鹿児島大学 学生会員 肥後拓馬 正会員 安達貴浩 小橋乃子

**1. はじめに** ボタンウキクサ(*Pistia stratiotes*)は、熱帯から亜熱帯に分布する多年草であり、我が国でも1990年代から野外における発生事例が報告されるようになった。繁殖力が極めて強く、湖沼や河川の水表面を覆い尽くすことで生態系や人間活動に悪影響を与えることから、世界最悪の侵略的外来種と言われることもある。近年の暖冬の影響もあって、鹿児島県の北西部に位置する鶴田ダム貯水池(大鶴湖)では2020年度にボタンウキクサが異常繁茂し、多大な金銭的・時間的コストをかけて駆除作業が行われた。大鶴湖に限らず、各地で外来浮草の異常増殖が問題となっていることを考慮すると、浮草管理のため浮草の現存量を定量評価できるモデルの構築が不可欠である。既にEid *et al.*(2016)<sup>1)</sup>によってボタンウキクサを対象とした成長動態シミュレーションが実施されているが、パラメータの設定方法等に問題があり、その汎用性には疑問がある。このため本研究では、既往の知見を基にボタンウキクサの成長動態モデルを改良し、大鶴湖への適用を試みた。

**2. 既往のモデルの概要** Eid *et al.*(2016)により、ボタンウキクサの成長動態を解析するための数値モデルが構築されている。ボタンウキクサのバイオマスを  $B(\text{g-dry}/\text{m}^2)$  とすると、成長動態は次式で与えられる。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{Shoots Growth} - \text{Resp} - \text{Mort} \quad (1)$$

ここで、*Shoots Growth* は葉の光合成による成長、*Resp* は呼吸による損失、*Mort* は枯死による損失である。Eid *et al.*(2016)は、表-1、2に示すモデル式とパラメータを用いることで、ボタンウキクサの観測結果を概ね再現できることを報告している。しかし、(1)パラメータの多くが他種からの引用や複数のパラメータのチューニングによって決定されている(表-2)、(2)過密時の成長抑制効果や温度依存性の評価が不十分である、といった問題がある。

**3. モデルの開発** 以上を踏まえて文献調査や培養実験によってボタンウキクサ固有の増殖特性やパラメータを再考した。具体的には、過密時の成長制限、呼吸速度、増殖の温度依存関数について検討を行った。なお、今回は簡単化のため葉と根を分離せず、比率で取り扱っている。

**3.1 過密時の成長制限** 水面を浮遊する植物であっても植生密度が過密状態になると、光や栄養塩、空間の競合により成長速度が低下することが知られている。Eid *et al.*(2016)においてもその影響が光依存関数によって評価されているが、ボタンウキクサを対象とした既往の実験結果<sup>2)</sup>とは異なっている。そのためReddy *et al.*(1984)<sup>2)</sup>によって報告されているボタンウキクサの観測結果から密度制限関数を以下のようにモデル化した。

$$f_{den} = 5.0 \times 10^{-7} \times W^2 - 0.0015 \times W + 1 \quad (2)$$

ここで、 $f_{den}$ は密度制限関数、 $W$ は植生密度( $\text{g-dry}/\text{m}^2$ )である。本研究では式(2)を適用することから、光依存関数 $f_i$ については表-3のように与えた。

**3.2 呼吸速度の温度依存性** 次にボタンウキクサの呼吸速度における温度依存性を調べるために、8℃と27℃の条件下で培養実験を実施した。実験は大鶴湖の湖水を培地(8L)とし、それぞれの条件下(8℃: 12hr 日長, 27℃: 暗条件)で一定期間実施した。8℃条件下では湿潤重量の経時変化から呼吸速度を求めた。また、27℃条

表-1 モデル式<sup>1)</sup>

$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{Shoots Growth} - \text{Resp} - \text{Mort} \quad (1)$ $\text{Shoots Growth} = P_{max} \times K_{CO_2} \times f_N \times f_i \times f_T \times \gamma B$ $f_N = \frac{TN}{K_N + TN} \times \frac{TP}{K_P + TP}$ $f_i = \frac{PAR \times e^{-K_{le} \times LAI}}{K_{PAR} + PAR \times e^{-K_{le} \times LAI}} \quad (PAR = 0.45 \times \text{全日射量})$ $LAI = 0.314 + 0.018 \times \gamma B$ $f_T = \theta^{(T-20)}$ $\text{Resp} = r^* \times B \times f_T$
<p>γ: 全体に対する葉の比率, <math>f_N</math>: 栄養塩依存関数                  T: 気温(℃), TN, TP: 水中の窒素, リン濃度(mg/L)  <math>f_i</math>: 光依存関数, <math>f_T</math>: 温度依存関数                  LAI: 葉面積指標, B: バイオマス(<math>\text{g-dry}/\text{m}^2</math>)  <math>K_{CO_2}</math>: <math>\text{CO}_2</math> から乾燥物質への変換係数                  (0.83g/g-<math>\text{CO}_2</math>), <math>K_{le}</math>: 光の減衰係数(0.019<math>\text{m}^2/\text{m}^2</math>)                  θ: アレニウス定数(1.07)</p>

\*表-2 参照

表-2 モデルパラメータ<sup>1)</sup>

パラメータ (シンボル)	値	Eid	本研究
最大光合成速度( $P_{max}$ )	0.283	×	○
光の半飽和定数( $K_{PAR}$ )	11.1	△	△
窒素の半飽和定数( $K_N$ )	0.15	△	△
リンの半飽和定数( $K_P$ )	0.01	△	△
呼吸速度( $r$ )	0.01	△	○

×: チューニング, △: 他種からの引用  
 ○: ボタンウキクサ

件下では根と葉の呼吸速度は変わらないものとし、水中 DO の経時変化を計測することで、呼吸速度を推定した。さらに、実験から得られた結果を用いて呼吸速度における温度依存性を定式化した(図-1)。本実験では呼吸と枯死に至る減耗を区別せず、両者を含めた次式でモデル化した。

$$Resp^* = Resp + Mort = r_{20} \times B \times 1.4e^{-0.018T}$$

ここで、 $r_{20}$ は20℃における呼吸速度(0.033day<sup>-1</sup>)である。

**3.2 成長速度の温度依存性** Eid *et al.*(2016)においても指数曲線型の温度依存関数が提案されているが、ボタンウキクサ固有の気温に対する応答を評価している訳ではない。そこで本研究では、Eid *et al.*(2016)の観測結果を用いてボタンウキクサの成長に関する閾値及び温度依存性を定式化した(表-3)。

**4. モデルの検証** モデルの検証は、2020年大鶴湖の網場に囲まれた領域(図-2の着色部分)に繁茂したボタンウキクサを対象に実施した。本研究に用いたボタンウキクサの成長動態の式を以下に示す。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = Growth - Resp^* - Rem \tag{3}$$

ここで、*Growth*は光合成による葉の成長、*Resp\**は呼吸及び枯死による損失、*Rem*は除去作業による減少である。*Rem*については、鶴田ダム管理所より除去重量の経時変化が調べられているため、その実測値を与えた。またボタンウキクサのバイオマス量については、衛星画像から浮草の繁茂面積を算出し、計算結果と比較することにした。ここでは浮草が均等に詰まった状態(生息密度*B<sub>ref</sub>*一定)を仮定し、実際の浮草の繁茂面積*A'*に対して、以下のような相当面積*A*を定義した。

$$\int_{A'} B dA' = B_{ref} \times A$$

上式を用いて基礎式を表-3のように変換し、入力パラメータ並びに観測等により得られた諸量(気温、日射量、栄養塩濃度、浮草除去量)を与えてボタンウキクサの再現シミュレーションを行った。なお栄養塩については別途収支式を用いて評価すべきであるが、栄養塩濃度が高く、栄養塩の入力に対して結果は大きく変わらないことを確認している。計算結果を見ると、8月頃から急激に成長を始めた後、10月に最大繁茂面積(0.38km<sup>2</sup>)に達し、そのまま衰弱段階に入り減少していく挙動が見て取れる(図-3)。試算結果は画像解析の結果や目視での観察とも概ね一致していることから、本モデルによって大鶴湖におけるボタンウキクサの成長動態を再現できたと言える。

**5. まとめ** 本研究の結果、本モデルによりボタンウキクサの成長動態を概ね推定できることが示された。本モデルの活用により、周辺環境へのインパクトを考慮しつつ、経済的な駆除方法を確立できることが期待できる。

参考文献 1) Eid *et al.*(2016): *Rend Fis Acc Lincei*.27:375-382. 2) Reddy *et al.*(1984): *Economic Botany*.,38,229-239.

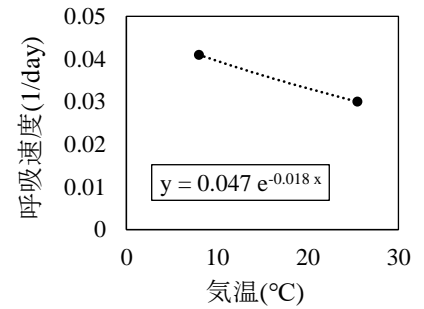


図-1 気温と呼吸速度の関係

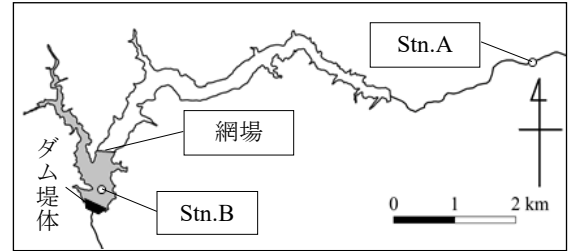


図-2 観測地点の概略図と計算領域

表-3 モデル式

$$\frac{\partial A}{\partial t} = Growth - Resp^* - Rem \tag{3}$$

$$Growth = \mu \times f_{den} \times f_N \times f_l \times f_{T1} \times \gamma A$$

$$f_{den} = 5.0 \times 10^{-7} W^2 - 0.0015W + 1$$

$$W = B_{ref} \times M \quad B_{ref} = 55482 \times \sqrt{A}$$

$$f_N = \frac{TN}{K_N + TN} \times \frac{TP}{K_P + TP}$$

$$f_l = \frac{PAR}{K_{PAR} + PAR} \quad (PAR = 0.45 \times (\text{全日射量}))$$

$$f_{T1} = f_{Tmin} \quad (T < T_{min})$$

$$= \frac{f_{Topt} - f_{Tmin}}{T_{opt} - T_{min}} \times (T - T_{min}) + f_{Tmin} \quad (T_{min} \leq T < T_{opt})$$

$$= f_{Topt} \quad (T \geq T_{opt})$$

$$f_{Tmin} = 0.9 \quad f_{Topt} = 1.5$$

$$Resp = r_{20} \times A \times f_{T2}$$

$$f_{T2} = 1.4e^{-0.018T}$$

$$Rem = \frac{Remvals}{B_{ref}}$$

$\gamma$ : 全体に対する葉の比率,  $f_{den}$ : 密度制限関数  
 $W$ : 植生密度(t-dry/km<sup>2</sup>),  $f_N$ : 栄養塩依存関数  
 $T$ : 気温(°C),  $f_l$ : 光依存関数,  $f_T$ : 温度依存関数  
 $TN, TP$ : 水中の窒素, リン濃度(mg/L)  
 $T_{min}$ : 生育最低温度(14°C),  $A$ : 繁茂面積(km<sup>2</sup>)  
 $T_{opt}$ : 生育最適温度(20°C),  $B_{ref}$ : 密度(t-wet/km<sup>2</sup>)  
 $M$ : 乾燥重量/湿潤重量(0.04)  
 $Remvals$ : 単位時間あたりに回収される浮草(t-wet/day),  $\mu$ : 基準成長速度(0.21day<sup>-1</sup>)  
 $r_{20}$ : 20°Cにおける呼吸速度(0.033day<sup>-1</sup>)

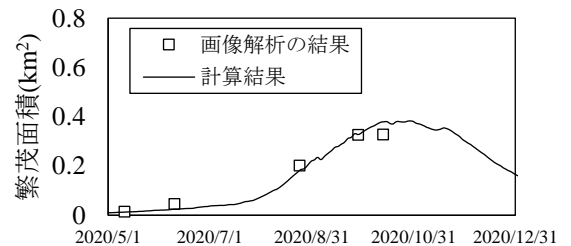


図-3 計算結果