

# アシ *Phragmites australis* の生長の予測モデルと 水質改善に対する効果

## Dynamic modelling of the growth of *Phragmites* and its effects to water quality

浅枝 隆\*・シロミ カルラナツヌ\*・藤野 毅\*  
Takashi ASAEDA, Shiromi KARUNARATUE, and Takeshi FUJINO

### 1. はじめに

アシ *Phragmites* は、湿地、湖沼、河岸に群落をつくって生育し、汚染物質の吸収、発達する地下茎による河岸の保護など様々な用途に利用されている。ところが、その利用にあたってはその効果の評価は経験に頼らなければならず、導入にあたって多くの問題を抱えている。そうした背景のもと本研究ではアシの定量評価を目的とし、アシの生活史や栄養塩吸収量をを定量的に評価解析するモデルの作成を行った。

従来より、植物の生活史の定量的な解析としてはバイオマスをそれを支配する量による多変量解析によって表現する方法と、植物体の中で性質の異なる機能を有したいくつかの部分に分け、それぞれについての生産量、消費量、相互の部分の交換を評価してバイオマスの変化を予測する方法(例えば Asaeda and Bon, 1997)の大きく二つの方法が存在している。ここでは、より応用範囲の広い後者の方法によるものとする。

### 2. アシの年間の概略生活史と予測モデル

アシはイネ科の多年生植物であり、その生活史の概略は次のようなものである。温帯では冬では地上部は枯れ、地下茎によって越冬し、春になると発芽し葉茎に生長する。成長初期には地下茎に蓄えられた物質を利用するが、成長とともに光合成が主たる生産手段となり、それとともに成長速度も早まる。穂の形成とともに光合成生産物および葉茎を形成する物質の一部は穂の形成に利用され、葉茎の成長は停止する。また、老化の進行とともに葉茎を構成する物質および光合成生産物は地下に輸送され、既存の地下茎に貯蔵されまた新しい地下茎の形成に利用される。

本研究では、アシのバイオマスをそれぞれの機能と性質に応じて、地下茎、新しくその年に形成した地下茎、根、葉茎、穂に分けてそれぞれの部分のバイオマスの変化を解析する。以下に、それぞれの部分のバイオマスの変化について示す。なお、利用を考えてここでは単位面積当たりのバイオマス量で表現するものとする。

#### 2.1 地下茎

地下茎のバイオマスは次のように表されることになる。

$$\frac{\partial B_{rhi}}{\partial t} = -R_{rhi} - D_{rhi} + CD_{rhi} - R_{hif} + \varepsilon_{shi} B_{shi} \gamma_{shi}^f + \varepsilon_{ph} P h_{shi} \gamma_{ph}^f \quad (1)$$

キーワード：水環境，水質，アシ，成長モデル

\*埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 浦和市下大久保 255, asaeda@envi.env.civil.saitama-u.ac.jp)

ここで、 $B_{rhi}$  は地下茎のバイオマス、 $R_{rhi}$  は地下茎の呼吸量、 $D_{rhi}$  は地下茎の枯死量、 $C$  は枯死に伴って周囲に再配分される物質質量、 $R_{hif}$  は初期の葉茎や根の生長に対して地下茎から輸送される物質質量、 $\varepsilon_{shi}$  は葉茎から地下茎に輸送される割合、 $y$  はそのうち元々の地下茎に輸送される割合、 $\varepsilon_{ph}$  は光合成によって形成される物質が輸送される割合である。地下茎の呼吸量および枯死量は、地下茎のバイオマス量に比例すると考え、 $R_{rhi} = \gamma\beta_{mri} \theta^{(T-a)} B_{rhi}$ 、 $D_{rhi} = \gamma_{mri} \theta^{(T-a)} B_{rhi}$  とおく。ただし、呼吸量や枯死量に対する温度の影響については十分な観測がなされておらず、通常アレニウスの式を用いる。

$f_{sht}$  と  $f_{ph}$  は、それぞれ以下で定義する積算温度  $T_x$  に依存する。

$$\text{積算温度 } T_x (\text{degree-day}) = \sum_{\text{1st ユリウス日, 日平均気温} > 5^{\circ}\text{C}}^{\text{TI}} [\text{日平均気温} (^{\circ}\text{C})]$$

ここで、積算温度  $< 559.5$  のとき、 $f_{sht} = 0.0$ 、 $f_{ph} = 0.0$ 、  
 $559.5 < \text{積算温度} < 1819.8$  のとき、 $f_{sht} = 0.0$ 、 $f_{ph} = 1.0$ 、  
 $1819.8 < \text{積算温度}$  のとき、 $f_{sht} = 1.0$ 、 $f_{ph} = 0.0$  である。

## 2.2 根

根の構造は大きく栄養塩や水分の吸収に寄与する根毛と植物体を支える部分とに分けられる。しかし、ここでは、全体をまとめて扱うことにする。根の生長は積算温度 182.3 に達した後始まるものとする。すなわち、

$$\frac{\partial B_n}{\partial t} = -R_n - D_n + CD_n - nR_{hif} + xR_{hif} + G_n \quad (2)$$

で表す。ここで、 $x$  は葉茎から根に輸送される物質質量の割合を示す。呼吸および枯死については、 $R_n = \beta_{mri} \theta^{(T-a)} B_n$ 、 $D_n = \gamma_{mri} \theta^{(T-a)} B_n$  で表す。また、新しく地下茎を形成する場合に利用される物質のうち、その一部は根から供給される。これは、 $nR_{hif} = \gamma_n B_n$  で表される。

## 2.3 新しい地下茎

その年にも新しく地下茎が形成される。これは、積算温度が 1400.2 に達した後始まるものとする。その物質質量の変化は地下茎と同様に、

$$\frac{\partial B_n}{\partial t} = -R_n - D_n + CD_n + \gamma_n B_n + \varepsilon_{shi} B_{shi} (1-y) f_{shi} + \varepsilon_{ph} Ph_{shi} (1-y) f_{ph} \quad (3)$$

で表される。呼吸量および枯死量は、 $R_n = \beta_{mri} \theta^{(T-a)} B_n$ 、 $D_n = \gamma_{mri} \theta^{(T-a)} B_n$  で与える。

## 2.4 葉茎のバイオマス

葉茎の生長は、光合成、呼吸、枯死、枯れた部分から周囲への物質の再配分、生長初期の地下茎からの輸送、老齢期の葉茎から地下茎への輸送、光合成生成物の地下茎への配分、新しい地下茎および芽、あるいは穂の形成、根の形成時における利用の結果として生ずる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial b_{shi}(i)}{\partial t} = & Ph_{shi}(i) - R_{shi}(i) - D_{shi}(i) + CD_{shi}(i) + (1-x)Rhif(b_{shi}(i)/B_{shi}) \\ & - \varepsilon_{shi} b_{shi}(i) f_{shi} - \varepsilon_{ph} Ph_{shi}(i) f_{ph} - (\varepsilon_p b_{shi}(i) - kPh_{shi}(i)) ff - G_n \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、積算温度  $< 1574.9$  のとき、 $ff=1.0$ 、それ以上では  $ff=0.0$ 。

生長速度が鈍化した時点で葉茎の頂部で穂の形成が始まる。この穂の形成にはその時点での光合成生産物の一部と、それまで葉茎に蓄積された物質が用いられる。その割合をそれぞれ  $k$  と  $\varepsilon_p$  とおく。

光合成量は、光合成に有効な日射量と栄養塩量に伴って増加し、老化とともに減少する。すなわち、

$$Ph_{shi}(i) = Ph_m \theta^{T-a} \frac{I_{PAR}(i)}{K_{ph} + I_{PAR}(i)} \cdot \frac{N}{K_N + N} \cdot \frac{P}{K_P + P} \cdot \frac{K_{age}}{K_{age} + Age_{shi}} b_{shi}(i)$$

ここで、 $Ph_m$ は最大光合成率、 $I_{PAR}(i)$ はその高さにおける有効日射量、 $Age_{shi}$ は光合成開始日からの日齢、 $N$ と $P$ は、それぞれ地中の窒素およびリン酸濃度である。 $K_i$ はそれぞれの半飽和係数である。

呼吸量および枯死量はそれぞれ  $R_{shi}(i) = \beta_{mshi} \theta^{(T-a)} B_{shi}$ ,  $D_{shi}(i) = \gamma_{mshi} \theta^{(T-a)} B_{shi}$  で与える。

葉茎ののび速度は、生長開始より穂形成までの期間は上昇し続ける。しかし、穂の形成開始後は低下し、その後の伸びは僅かである。伸び率は層ごとに考え、そこでのバイオマスの増加量と関係させ、

$$\text{伸び率} = \frac{i \text{層におけるバイオマス増加率} \times q}{i \text{層におけるバイオマス} - i \text{層におけるバイオマス増加率} \times q} \times \text{層厚さ}$$

で求める。ここで、定数  $q$  はバイオマスの増加のうち伸びに利用される割合である。

## 2.5 穂のバイオマス

穂の形成する割合は、葉茎が十分発達していること、陰が少ないこと、晴天日が多いこと、土壌が肥えていることなどに依じて上昇し、しかも、大型の株には大きな穂が小型のものには小さな穂が形成する。基本的にはどの株も穂をつける可能性を秘めており、解析では一様に穂をつけるものとする。穂の形成には葉茎に蓄積されている物質および光合成生産物が用いられる。すなわち、

$$\frac{\partial B_p}{\partial t} = (\varepsilon_p b_{shi}(i) + k Ph_{shi}(i)) ff \quad (5)$$

である。光合成に利用される日射量  $I_{TPAR}$  は、全日射量の 40%-45%にあたる。また、ある高さでの有効日射量は、Lambert-Beer の法則を用い、植物頂からその高さまでの葉面積密度の積分値(LAI)の関数  $F$  として表される。すなわち、 $I_{PAR}(i) = I_{TPAR} e^{-kF}$  である。ここで、Kvet et al.(1969)は南モラビアの Nestyt Pond において、アシの葉茎のバイオマスと LAI との関係について図 1 のように示した。これより、図中の直線は  $LAI = 0.013552 \times [\text{葉のバイオマス}(i)]^{1.0179}$  であり、ここではこの関係を用いる。

## 2.6 解析法

解析では初期条件として地下茎のバイオマスを与え、積算温度が満たされた段階で発芽、葉茎の生長、穂の形成、地下への物質輸送などの物質収支をそれぞれ求めた。空間的には水平な層を考え、それぞれの層におけるアシのそれぞれの部分のバイオマスの変化を求めた。また、葉茎のバイオマスについては伸びた量分上向きにシフトさせていった。なお、それぞれの係数値および積算温度については、チェコ、オーストラリア、日本の 3 カ国での実験結果に対してキャリブレーションにより決定し固定した。

## 3. 野外観測への適用

アシの生長についてはいくつかの観測結果が報告されているが、ここでは、比較的よくまとまった結果に対してモデルの適用を試みた。ここでは、Kvet et al.(1969)によって 1966-1971 年に行われた Czech の南 Moravia の Nesyt fishpond における観測結果に対し適用した例を示す。気象データについては、対象年のものを、日射については対象年のものが利用できないため、1984-1991 年の平均気温の年間変化を用いた。

図 2 は、Nesyt fishpond における、アシの葉茎（葉および茎）、穂および LAI についての計算結果と観測値を比較したものである。計算結果は観測値をほぼ再現しており、特に、生長初期には成長速度が遅いが、その後加速し、穂の形成と共に葉茎の生長が停止し、バイオマスが減少していく傾向が

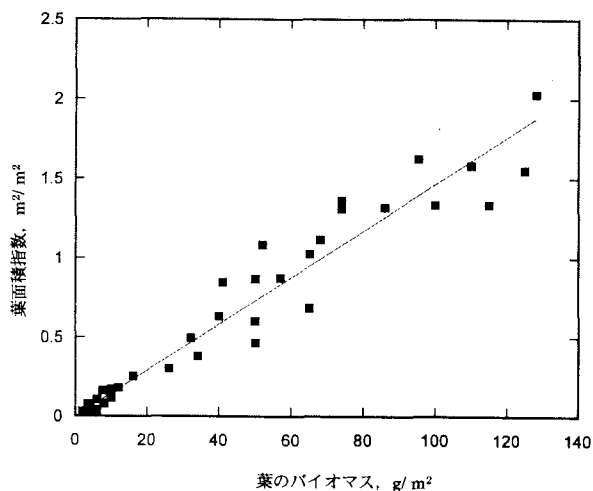


図1 アシの葉茎のバイオマスと LAI との関係

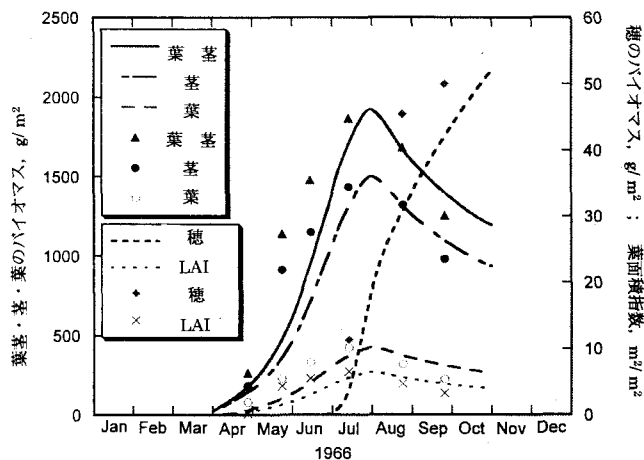


図2 アシの地上部のバイオマスの年変化  
(線：計算値；ドット：観測値)

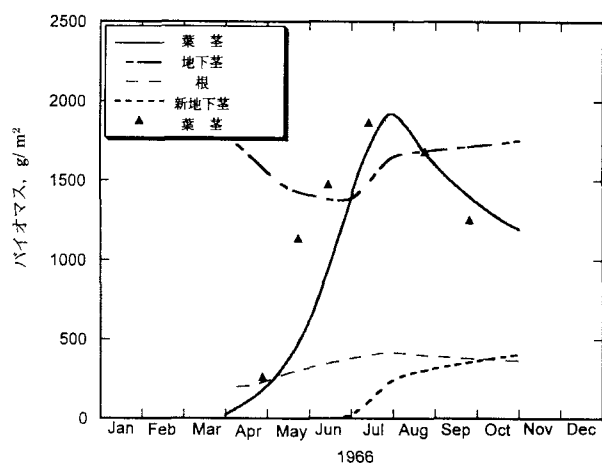


図3 アシの地下部のバイオマスの年変化  
(線：計算値；ドット：観測値)

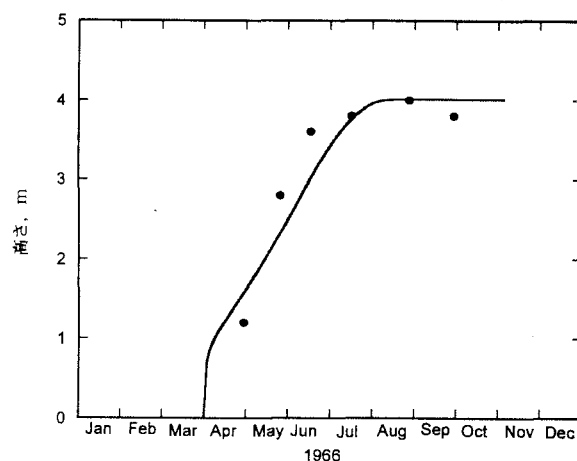
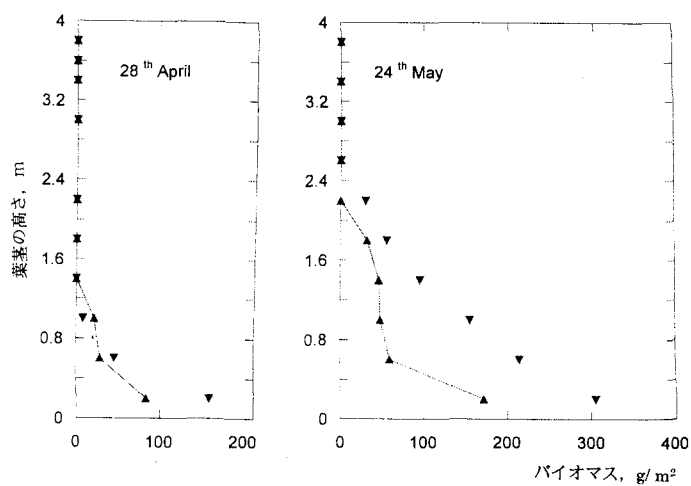
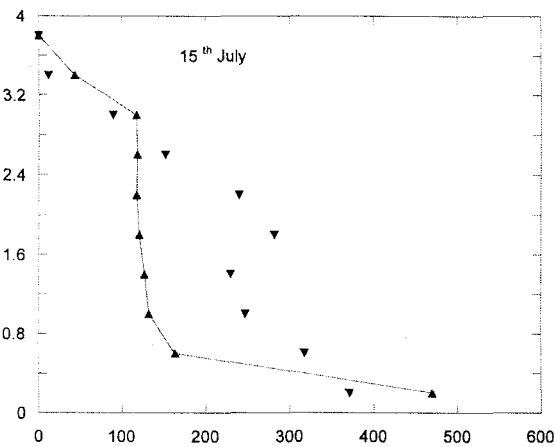


図4 アシの高さの年変化  
(線：計算値；ドット：観測値)



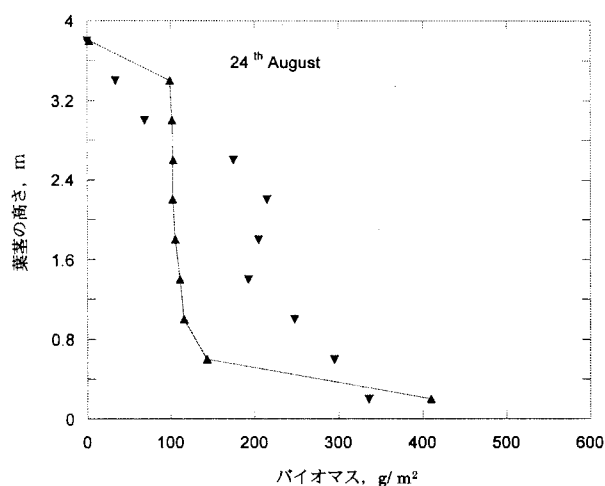
(a) ユリウス日118

(b) 144

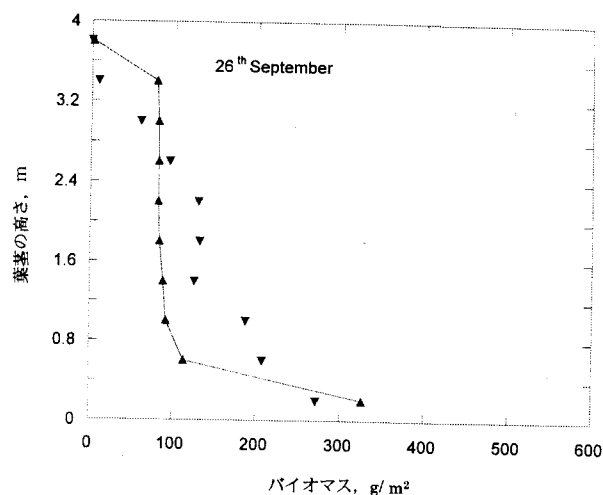


(c) 195

図5 葉茎のバイオマスの鉛直分布 (線：計算値；ドット：観測値)



(d) ユリウス日 236



(e) 286

(図5 続き)

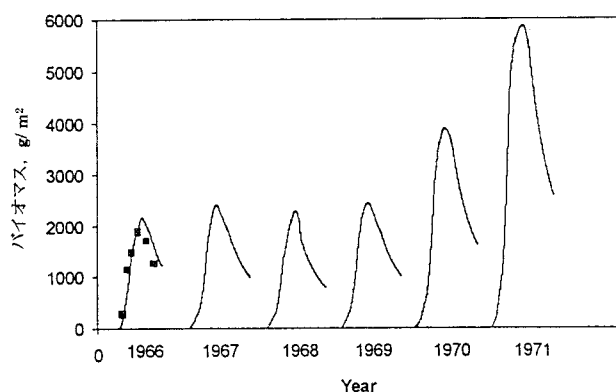


図6 5年間の地上部のバイオマスの変化

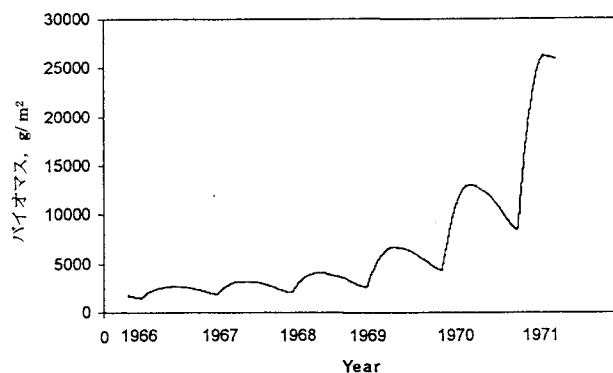


図7 5年間の地下部のバイオマスの変化

よく表されている。次に、図3は、地下のバイオマスについて地下茎、根、新しく形成した地下茎の計算結果を示す。葉茎の生長初期には、地下茎から葉茎が生長するための栄養の輸送が行われるために地下茎のバイオマスが減少するが、その後、老化に伴って、葉茎での生成物質が蓄積されるために地下茎のバイオマスが増加する傾向がよく表現されている。図4は、アシの高さの年間変化の計算結果であるが、穂の形成と共に伸びが止まることがわかる。図5(a)-(e)は、それぞれの層におけるバイオマスの鉛直分布を示す。図1からの式でわかる通り、これはLAIの鉛直分布に関連した量である。ユリウス日195(7月15日)と236(8月24日)において、中下層部で誤差が大きくなっているが、観測値を実用上十分な程度には再現している。

図6と図7は、この式を用いて、5年間の地上、および地下のバイオマス変化を計算したものである。比較に利用できるデータは報告されていないが、特に地下のバイオマスは徐々に増加する状況が再現されており経験的に得られている結果に一致している。また、年の終わりにも多少のバイオマスが残っているが、地上のバイオマスの寒冷期に枯れる原因が明確ではないために、十分な表現が成し得ないためである。

#### 4. 栄養塩の吸収量の解析

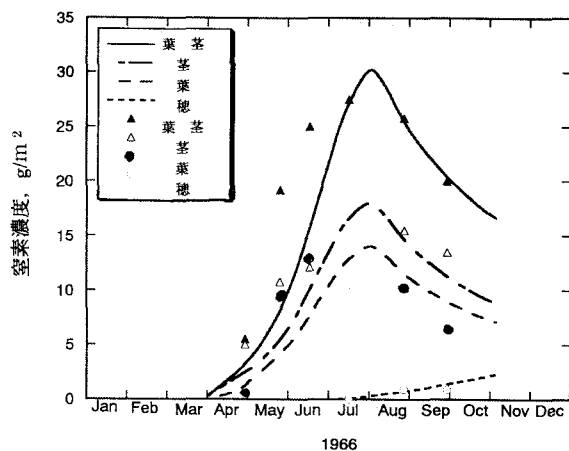


図 8 アシの地上部の窒素量の年変化

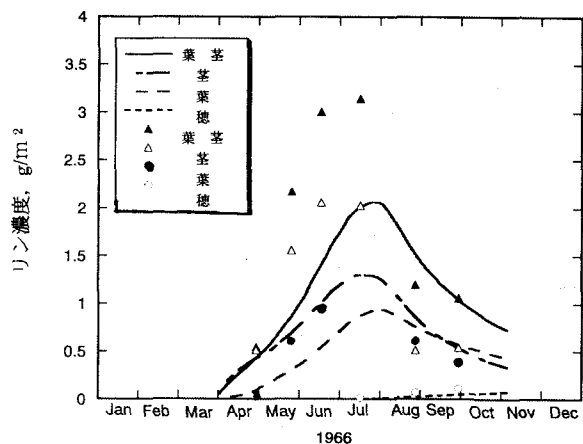


図 9 アシの地上部のリン量の年変化

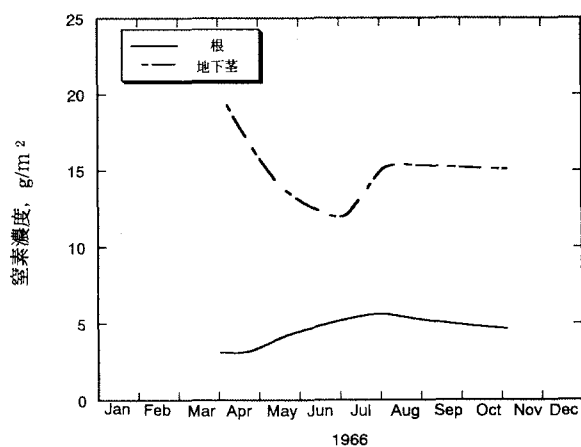


図 10 アシの地下部の窒素量の年変化

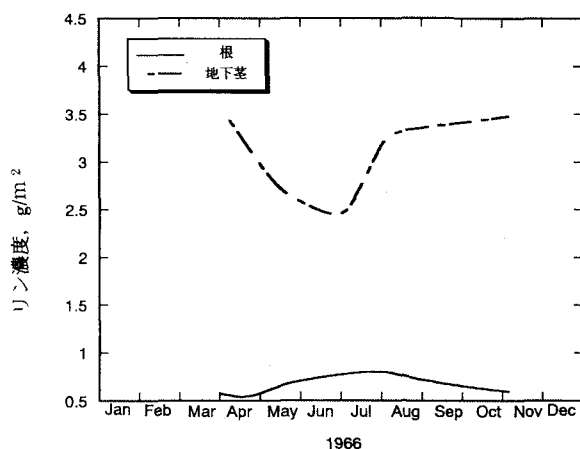


図 11 アシの地下部のリン量の年変化

栄養塩の吸収量は、バイオマスに蓄えられた濃度より求めることが可能である。ここで、バイオマス各部に蓄えられた濃度をそれぞれの部分に対しユリウス日の関数で求め、観測値との比較を行う。図 8 から図 11 は、それぞれ植物体の各部に蓄えられた窒素およびリンの濃度の年間の変化を示す。リンについて多少の誤差があるが実用上は問題のない程度で表現できているといえる。

## 5. まとめ

アシの様々な利用に際して応用可能な、植物体を機能別にわけそれぞれの部分での物質生産量、消費量および相互の交換量を定量評価するモデルを作成し、そのモデルを用いた観測値の再現計算を行い実用十分な程度に表現できることが確認された。

## 参考文献

- 1) Asaeda, T. and Bon, T.V. (1997) : Modelling of effects of macrophytes on algal blooming in eutrophic shallow lakes, *Ecological Modelling*, 104, 261-287.
- 2) Kevt, J., Svoboda J., and Flala K. (1969) : Canopy development in stands of *Typha Latifolia L* and *Phragmites Communis Trin* in South Aoravia, *Hidrobiologia*, 10, 63-75.