

(60) 草高分布の定式化によるヨシ地上部現存量の算出手法の提案とその適用

Proposal of an Estimation Method for Standing Crops of Reed Communities  
by the Formulation of Reed Heights Distribution and its Application

田中周平\*、藤井滋穂\*、山田淳\*\*、澤本直樹\*\*\*

Shuhei TANAKA\*, Shigeo FUJII\*, Kiyoshi YAMADA\*\* and Naoki SAWAMOTO\*\*\*

**ABSTRACT:** Various studies have been conducted on reed communities for management coast environment around Lake Biwa, but most of them are based on qualitative description, which are difficult for quantitative evaluation. The objectives of this study are to propose an estimation method of standing crops of reed communities and to apply this method on the change of standing crops after reed plantation. The method was induced based on distribution patterns of reed heights, using three kinds of surveys carried out around Lake Biwa. One was a survey of a reed growth both in a natural and planted reed community on August 2001. Another was growth investigation of reeds planted in deep-pond experimental facilities every two weeks from March 2001 to January 2002. The other was that on a reed plantation field every month from December 1997 to October 2001. The following conclusions are drawn: 1) An estimation procedure was proposed for standing crops of reed communities. 2) This procedure estimates a change of standing crops after reed plantation. 3) At a low water level, reeds began to grow and contributed the pattern of reed heights distribution.

**KEYWORDS:** Standing crops of reed community, Formulation, Reed heights distribution, Observation of reed growth, Lake Biwa

## 1. はじめに

自然再生推進法案には、自然再生事業着手後においても、自然再生の状況を監視し、その結果に科学的な評価を加え、事業に反映させなければならないとの記述がある。琵琶湖沿岸域では、湖岸道路の建設などによりヨシ群落が減ったため、ヨシを植栽することで沿岸環境の修復を図る事業が進められているが、それらを科学的に評価した例は少ない。初期に投入した栄養塩量を把握し、群落遷移後の植物群落に固定された栄養塩量を推定し定量的に評価することは、湖沼等の沿岸環境を管理する上で重要である。ヨシの場合、地上部現存量を測定するには刈取り手法が用いられるが、刈取りは群落を傷つけるため好ましくない。また、ヨシ草高を調査し、重量との関係から現存量を回帰する方法が考えられるが、ヨシの平均草高を調査するには、すべての草高を測る必要があり困難である。筆者らは、各種植栽工法<sup>1)</sup>で1997年10月にヨシが植栽された琵琶湖南湖東岸の実験施設で、ヨシの生育観察調査をほぼ月1回の頻度で実施し、茎個体数密度を目的変数として植栽工法別の生育特性を検討してきた<sup>1)</sup>。本研究では、1999～2001年に実施したヨシ草高に関する調査<sup>1,2,3)</sup>結果から草高分布を定式化し、地上部現存量の推定手法を検討した。そして、本手法を利用し、植栽後の現存量変化を示すとともに、茎密度と現存量によるヨシの生育特性評価の差を検討した。

## 2. 調査の方法

本研究では、琵琶湖周辺のヨシ群落、深池型実験施設<sup>3)</sup>内のヨシ群落、琵琶湖岸のヨシ植栽地に0.5m四方のコドラートを多数設置し、コドラート内のすべてのヨシ草高、茎個体数を測定した。調査方法の詳細を以下に示す。

\* 京都大学大学院工学研究科附属環境質制御研究センター (Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)

\*\* 立命館大学理工学部環境システム工学科 (Dept. of Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan Univ.)

\*\*\* 立命館大学大学院理工学研究科 (Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.)

## 2.1 琵琶湖周辺の ヨシ群落調査

2001年8月20日  
～9月4日に、琵琶  
湖周辺ヨシ群落内の  
5地区(図1)16測  
線について、各測線  
の琵琶湖標準水位  
(B.S.L.)を基準とす  
る地盤高0.1mごと

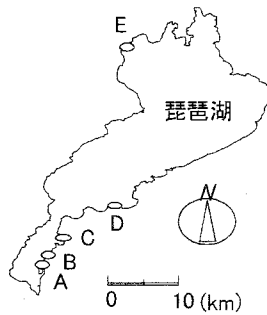


図1 調査地区

に0.5m四方のコドラートを設置し、コドラート  
内のヨシの茎個体数および各ヨシ茎の草高、乾  
燥重量を測定した(調査A<sup>2)</sup>)。各測線の特徴およ  
びヨシが存在したコドラートの数を表1に示す。  
ヨシが存在した0.5m四方のコドラート数は94  
であり、ヨシ形状の平均値は、茎個体数密度が  
52本/m<sup>2</sup>、草高が201cm、茎径が6.0mmであった。

## 2.2 深池型実験施設内のヨシ群落調査

2001年3月6日～2002年1月12日に、琵琶湖・淀川  
水質浄化共同実験センター内深池型実験施設の植栽ヨシ  
群落を対象に、ヨシの生育観察調査を約2週間に1度の  
頻度で実施した。施設の概要を図2に、諸元を表2に示  
す。施設では1997年2月に直径0.25mのポット苗を4  
株/m<sup>2</sup>の密度で図2に示す区画に植栽した。植栽面積は  
60m<sup>2</sup>であり、植栽後、群落は陸方向に衰退し、2000年7  
月のヨシ群落面積は約51m<sup>2</sup>であった。施設では流入側か  
ら中間域にかけて、0.5m四方のコドラートを20設置し、  
コドラートの水深、ヨシ茎個体数および各ヨシの草高を  
測定した(調査B<sup>3)</sup>)。

## 2.3 琵琶湖 岸のヨシ植栽 地調査

1997年に6  
種類の工法<sup>1)</sup>  
で表3に示す  
条件で琵琶湖  
岸の実験地に

ヨシが植栽された。ヨシは沖陸方向に並列に植栽工法別に植栽  
されており、植栽工法の影響を比較することが可能な配置であ  
る。本植栽地に0.5m四方のコドラートを1,240設置し、全コド  
ラート内のヨシ茎個体数、最長草高、水深を測定した。調査期  
間は1998年～2001年であり、約1月に1回の頻度で計32回の調査を実施した。また、1999年～2001年に  
13のコドラートでヨシを刈取り、すべてのヨシの草高、乾燥重量を測定した(調査C<sup>1)</sup>)。

表1 調査地点の特徴とコドラート数

| 地区名*         | 測線  | 分類** | 消波<br>施設 | コドラ<br>ート数 | 平均水深<br>(cm)*** | 土壌濃度(mg/kg)<br>窒素 リン |
|--------------|-----|------|----------|------------|-----------------|----------------------|
| 南山田<br>(A)   | A-1 | 自生   | 無        | 7          | 28              | 725 135              |
|              | A-2 | 植栽   | 無        | 8          | 25              | 375 155              |
|              | A-3 | 自生   | 無        | 8          | 27              | 117 97               |
|              | A-4 | 自生   | 無        | 6          | 39              | 150 125              |
| 北山田<br>(B)   | B-1 | 自生   | 無        | 13         | 46              | 225 85               |
|              | B-2 | 植栽   | 無        | 12         | 39              | 150 75               |
|              | B-3 | 植栽   | 無        | 3          | 5               | 75 80                |
| 守山市<br>木浜(C) | C-1 | 植栽   | 無        | 1          | 54              | 275 170              |
|              | C-2 | 植栽   | 有        | 2          | 54              | 350 260              |
|              | C-3 | 自生   | 無        | 8          | 31              | 425 150              |
| 近江<br>八幡(D)  | D-1 | 自生   | 無        | 4          | 42              | 200 93               |
|              | D-2 | 植栽   | 有        | 3          | 28              | 150 195              |
|              | D-3 | 植栽   | 有        | 8          | 31              | 1675 250             |
| 今津(E)        | E-1 | 自生   | 有        | 4          | 23              | 525 420              |
|              | E-2 | 植栽   | 有        | 5          | 27              | 450 440              |
|              | E-3 | 植栽   | 有        | 2          | 20              | 1500 380             |

\*A～Eは図1に対応

\*\*ヨシ植栽区域のコドラート数が全体の半数以上を占める測  
線を”植栽”と分類、植栽後3年以上が経過した群落を選定

\*\*\*各測線の平均的な地盤高における2001年の年間平均水深

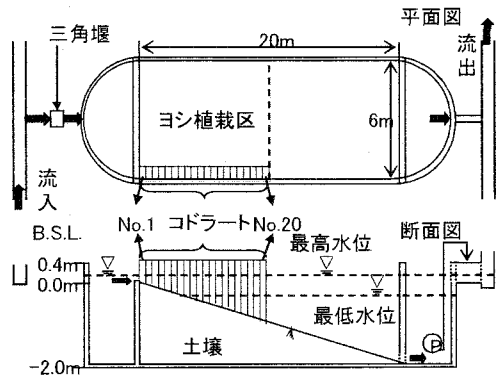


図2 深池型浄化実験施設概要図

表2 深池型実験施設の諸元

|      |                       |
|------|-----------------------|
| 原水   | 葉山川河川水                |
| 流量   | 10(m <sup>3</sup> /h) |
| 規模   | L(20m)×W(6m)×D(2m)    |
| 滞留時間 | 約24時間                 |
| 水位変動 | 最大水位差49cm(最高4月、最低11月) |
| ヨシ群落 | ポット苗移植法により植栽(1997年2月) |

表3 植栽条件の概要

| 植栽工法名       | 植栽密<br>度(/m <sup>2</sup> ) | 植栽面<br>積(m <sup>2</sup> ) | 初期条件       |
|-------------|----------------------------|---------------------------|------------|
| ビットマン<br>工法 | 5本<br>4本                   | 38<br>53                  | 長さ50cm     |
| 地下茎工法       | 10根                        | 10                        |            |
| 大株移植法       | 1株                         | 91                        | 1辺50cm角    |
| ポット苗<br>移植法 | 4株<br>2株                   | 53<br>38                  | 4年育成苗      |
| 土のう工法       | 4株<br>2株                   | 50<br>41                  |            |
| マット植栽法      | 0.5枚                       | 91                        | 125cm×80cm |

## 2. 4 調査間の相互比較

解析に使用したデータの一覧を表4に示す。本解析では、草高分布は調査A, Bの結果を対象に、草高と乾燥重量との関係は調査Cの結果を対象に行った。

## 3. ヨシの草高分布特性とその定式化

### 3. 1 ヨシ草高の分布特性

調査Aを対象にコドラート内の乾燥重量とヨシ茎個体数および最長草高との関係を図3に示す。両者とも正の相関が見られたが、ばらつきがあり十分に回帰されていない。コドラート内のヨシの草高分布例を図4に示す。なお、非超過確率の計算ではHazen plotsを利用した。草高はさまざまな分布型を示したが、全コドラートの70.2%で草高分布が正規分布に近い形（草高と非超過確率値の決定係数 $R^2$ が0.90以上）を示した。

### 3. 2 草高分布の測線別の変動特性

調査Aを対象に、ヨシ草高分布の変動係数をコドラート別に図5に示す。琵琶湖周辺ヨシ群落の草高分布の平均変動係数は0.37であった。コドラート別の変動係数は、最小0.01から最大1.00の範囲に、測線別平均では最小0.14から最大0.61の範囲にばらついた。一元配置分散分析の結果、地区別、測線別に有意な変動が認められた（危険率1%）。琵琶湖周辺のヨシ群落の草高分布は、地区、測線別に多様なことが示唆された。

コドラート内のヨシの平均・最長草高と、草高分布の変動係数との関係を図6に示す。平均・最長草高と変動係数は負の相関関係を示し、平均草高で強い関係が示された。8月下旬において、ヨシ茎の上部方向への生長がほぼ完了したヨシ群落では、新芽の出芽が少なく平均草高が高くなり、変動係数が小さくなることが示唆された。一方で、低地盤高のヨシ群落では、8月下旬においてもヨシの出芽が認められ、変動係数が大きくなる傾向があった。

コドラート内のヨシ茎個体数と変動係数の関係を図7に示す。茎個体数が増加するにつれ、変動係数がわずかながら小さくなる傾向を示した。そこで、目的変数を草高分布の変動係数、説明変数を茎個体数 $n$ (本/0.25 $m^2$ )と

表4 解析に使用したデータ一覧

| 調査 | データ数   |      |      | 調査年       | 調査月  |
|----|--------|------|------|-----------|------|
|    | 茎個体数密度 | 草高   | 乾燥重量 |           |      |
| A  | 96     | 1241 | 96   | 2001      | 8    |
| B  | 242    | 7935 |      | 2001      | 3~12 |
| C  | 39680  | 760  | 760  | 1998~2001 | 3~10 |

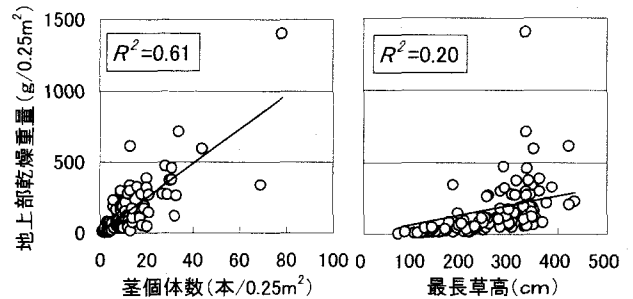


図3 ヨシ茎個体数、最長草高と地上部乾燥重量との関係

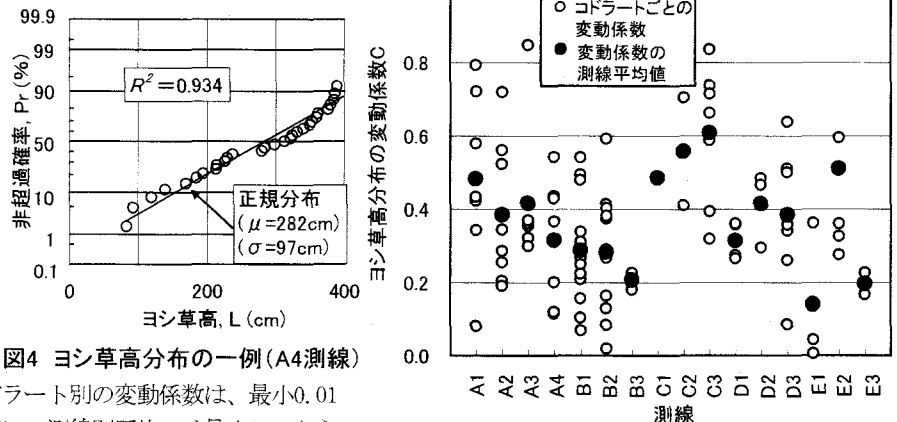


図4 ヨシ草高分布の一例 (A4測線)

図5 測線別のヨシ草高分布の変動係数

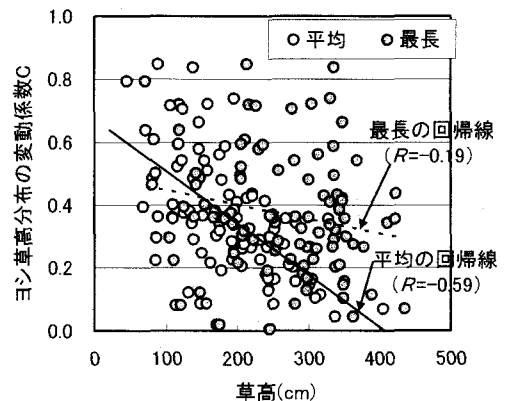


図6 コドラート内のヨシの草高と草高分布の変動の関係

最長草高 $L_m$ (cm)とし重回帰分析を行った。その結果、

$$C = -0.0002n - 0.0005L_m + 0.4836 \quad (1)$$

と回帰できた。よって(1)式より、コドラート内のヨシ茎個体数と最長草高から、ヨシの草高分布のおおよその推定が可能となった。

### 3.3 草高分布の季節別の変動特性

調査Bを対象に、ヨシ草高分布の変動係数の経時変化を図8に示す。深池型実験施設内のヨシ群落草高分布の平均変動係数は0.29であった。コドラート別の変動係数は、最小0.08から最大0.58の範囲に、調査日別平均では最小0.18から最大0.37の範囲にばらついた。二元配置分散分析の結果、調査日別、コドラート別に有意な変動が認められた(危険率0.1%)。

コドラート別の変動係数と水深の経時変化を図9に示す。コドラートNo.1~3では、春から秋にかけて変動係数が徐々に大きくなった。コドラートNo.4~11では、水位の低下時期に変動係数が大きくなる傾向を示し、その時期は沖域ほど遅かった。これらから、水位の低下にともない新たに出芽するヨシの存在が示唆され、ヨシの出芽が草高分布の変動係数に大きく寄与していることが示された。

### 3.4 ヨシ草高分布の定式化

ヨシの平均草高を調査するにはすべての草高を測る必要があり困難である。そこで、コドラート内のヨシ茎個体数と草高分布から平均草高を以下のように確率論的に考察した。

0.5m四方のコドラート内のヨシの茎個体数が $n$ (本)、草高が $L$ (cm)以下である確率を $p(L)$ で表すと、すべてのヨシ草高が $L$ 以下である確率は $(p(L))^n$ となる。このことより、茎個体数 $n$ のヨシ群落において最長草高が $L$ となる確率 $P(L)$ は以下の式で表すことができる。

$$P(L) = (p(L))^n \quad (2)$$

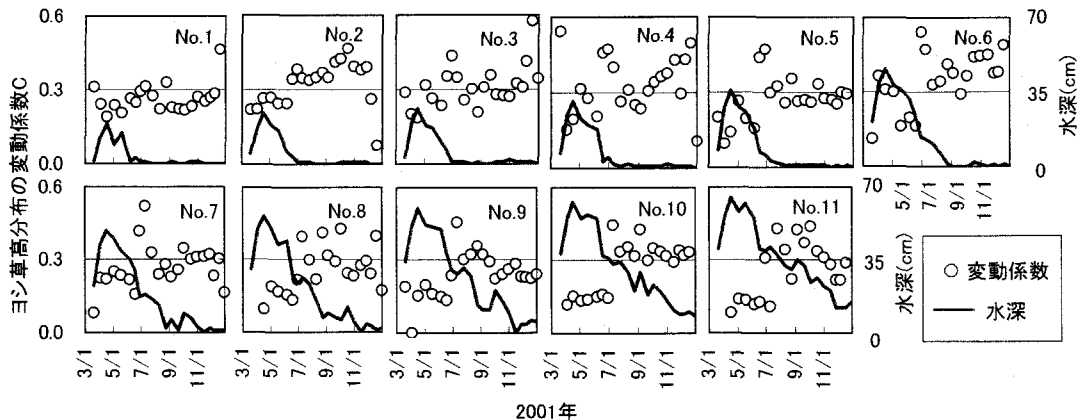


図9 コドラート別ヨシ草高分布の変動係数と水深の経時変化

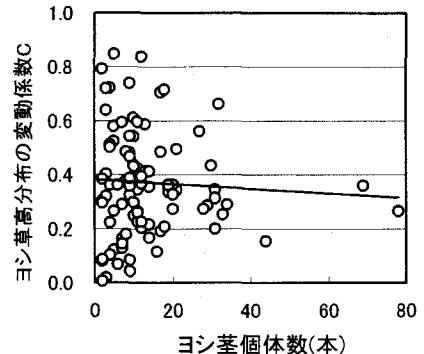


図7 コドラート内のヨシ茎数と草高分布の変動の関係

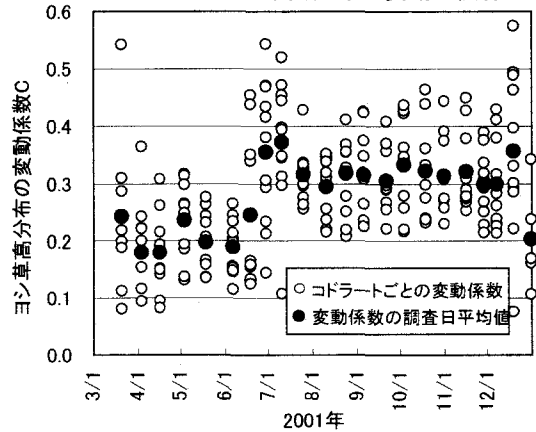


図8 ヨシ草高分布の変動係数の経時変化

草高が平均  $\mu$  (cm)、標準偏差  $\sigma$  (cm) の正規分布に従うと仮定し、 $p(L)$  を標準正規累積分布関数 ( $Nor(z) = \int_{-\infty}^z \{ \exp(-x^2/2) / (\sqrt{2\pi}) \} dx$ ) を利用することで、下記の式となる。

$$p(L) = Nor\left(\frac{L - \mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

非超過確率  $m$ (%) の最長草高  $L_m$  (cm) は、変動係数  $C (= \sigma / \mu)$  と平均  $\mu$  より、以下のように求められる。

$$p(L_m) = \frac{m}{100} = Nor\left(\frac{\frac{L_m}{\mu} - 1}{C}\right)^n \quad (4)$$

これより平均草高  $\mu$  を推定する式を誘導すると、

$$\mu = \frac{L_m}{1 + C \times Nor^{-1}\left\{\left(\frac{m}{100}\right)^{\frac{1}{n}}\right\}} \quad (5)$$

となり、本式より、実測の最長草高およびヨシ茎個体数から平均草高の推定が可能となった。

#### 4. 琵琶湖沿岸域における植栽後のヨシ地上部現存量の変化特性

琵琶湖のヨシの地上部現存量の調査報告<sup>4)</sup>として、平均  $731 \pm 170$  (g/m<sup>2</sup>)、最大  $4,500$  (g/m<sup>2</sup>) などが報告されている。また、ヨシの形状特性値に関する報告例<sup>5, 6, 7)</sup>は多く、草高を  $L$ 、茎径を  $D$  とすると、 $D^2 \times L$  が乾燥重量と正の相関にあることが報告されている<sup>8)</sup>が、地上部現存量の経時変化を検討した例は少ない。そこで、平均草高の推定計算結果を用い、ヨシ植栽後の地上部現存量の変化を以下のように定量評価した。

##### 4.1 地上部現存量の推定

調査Cを対象に、ヨシ草高  $L$  (cm) と乾燥重量  $W$  (dry-g/本) の関係を図10に示す。ヨシ草高  $L$  の乾燥重量  $W$  は、

$$W = 2.11 \times 10^{-6} L^3 \quad (6)$$

と回帰できた。(1)、(5)式よりコードラート内の平均草高を算出し、(6)式よりヨシ1本あたりの乾燥重量を推定した。そして、ヨシ平均草高に茎個体数、乾燥重量(g/本)を乗じることで乾燥重量(g/m<sup>2</sup>)を算出した。乾燥重量の推定値(g/m<sup>2</sup>)と実測値(g/m<sup>2</sup>)との関係を図11に示す。多少ばらつきはあるものの、茎個体数および最長草高からコードラート内のヨシ地上部現存量(g/m<sup>2</sup>)がある程度推定可能であることが分かった。

##### 4.2 植栽工法別の経時変化

調査Cを対象に、コードラート内のヨシ茎個体数と最長草高から平均草高を推定し、草高と乾燥重量の関係から、ヨシ地上部の現存量(乾燥重量)を算出した<sup>2)</sup>。茎個体数密度、最長草高、地上部現存量の経時変化を植栽工法別に図12に示す。茎密度と現存量はほぼ同様の变化傾向を示し、草高は植栽後の経年とともに高くなった。植栽工法別の差は、茎密度、現存量では確認されたが、最長草高では小さかった。また、平均茎密度は植栽後2年目に最大であったが、平均現存量は10月を除くと植栽後3年目が最大であった。琵琶湖周辺のヨシ

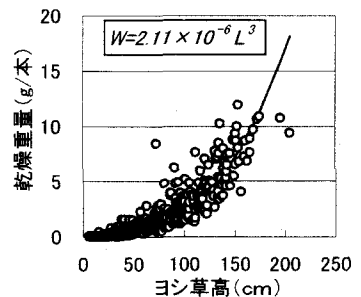


図10 乾燥重量とヨシ草高との関係

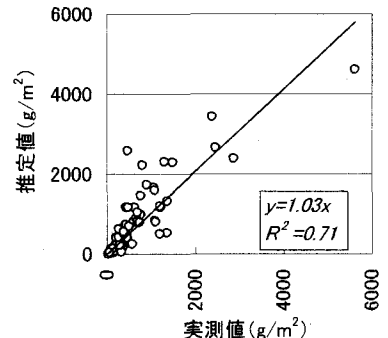


図11 ヨシ地上部現存量の推定値と実測値の関係

群落調査<sup>2)</sup>結果によると、ヨシ地上部の平均現存量は665g/m<sup>2</sup> (標準偏差719g/m<sup>2</sup>) であり、植栽後2年目は平均値を越えたが、3年目には平均をやや下回り、4年目には大きく減少した。マット植栽法の現存量は、植栽後2年目で1,993g/m<sup>2</sup>、3年目で1,612g/m<sup>2</sup>と高かったが、4年目で659g/m<sup>2</sup>と大きく減少した。マット植栽法は茎密度、草高ともに高く、植栽後2、3年目の8月には他植栽法の約2倍以上の現存量となった。大株移植法は茎密度は低いが草高が高く、その結果、現存量はポット苗移植法に近づいた。

## 5. 結論

本研究では0.5m四方コドラート内のヨシ茎個体数と最長草高から、地上部現存量を簡易に求める手法を提案し、ヨシ植栽地におけるヨシ地上部現存量を推定することができた。また、植栽後4年間に及ぶ調査結果から、刈取りを行わずにヨシ地上部の変化を定量評価できた。本研究で得られた主な知見を以下に記す。

- ① 琵琶湖周辺のヨシ群落の草高分布の約7割が、正規分布に近い分布型であった。
- ② 草高分布の地域別の特徴を一元配置分散分析により検討した結果、地区別、測線別に有意な変動が認められ(危険率1%)、琵琶湖周辺のヨシ群落の草高分布は、地区、測線別に多様なことが示唆された。
- ③ 草高分布の季節別の変化を検討した結果、水位の低下にともない新たに出芽するヨシの存在が示唆され、ヨシの出芽が草高分布の変動係数に大きく寄与していることが示された。
- ④ 実測の最長草高およびヨシ茎個体数から平均草高、コドラート内のヨシ地上部現存量(g/m<sup>2</sup>)のおおよその推定が可能となった。

今後は、ヨシの草高分布に関するデータを蓄積するとともに、さらに他植物を含めた群落の遷移状況を定量評価するための研究を進める予定である。最後に本研究の一部は水資源開発公団関西支社と琵琶湖淀川水質保全機構の援助を受けたことを記し、ここに感謝の意を示す。

## 参考文献

- 1) 田中周平, 藤井滋穂, 山田淳, 市本敦之(1999): 水ヨシ生育に及ぼす植栽条件の影響に関する研究, 環境工学研究論文集, 36, 253-261.
- 2) 田中周平, 藤井滋穂, 山田淳, 尾藤武(2002): 琵琶湖周辺ヨシ群落調査によるヨシの生育環境条件の検討, 環境工学研究論文集, 39, 459-465.
- 3) 松本宏之, 田中周平, 山田淳, 堀野善司, 田井中善雄, 春木二三男, 藤井滋穂(2002): 深池型実験施設を用いたヨシ群落内における栄養塩挙動の把握, 日本水環境学会年会講演集, 36, 336.
- 4) 吉良竜夫(1991): ヨシの生態おぼえがき, 琵琶湖研究所所報, 9, 29-37.
- 5) 細見正明(1995): 河口域の湿地生態系による窒素浄化機能の強化に関する研究, 環境研究助成成果報告書, 14, 2, 37-103.
- 6) 長谷光展(1995): ヨシ、マコモのイカダ栽培で湖沼のクリーンアップ, 福井県農業試験場研究報告, 72, 10-11.
- 7) 原稔明, 加藤正典: 琵琶湖におけるヨシ植栽地での生育調査とヨシ刈り効果, 近畿地方建設局管内技術研究発表会論文集「環境・地域づくり部門」, 2-1~2-8.
- 8) 琵琶湖研究所(1987): 湖岸システムの機能とその評価に関する総合研究報告書, 滋賀県琵琶湖研究所プロジェクト研究報告書, 86A1, 65-102, 110-131.

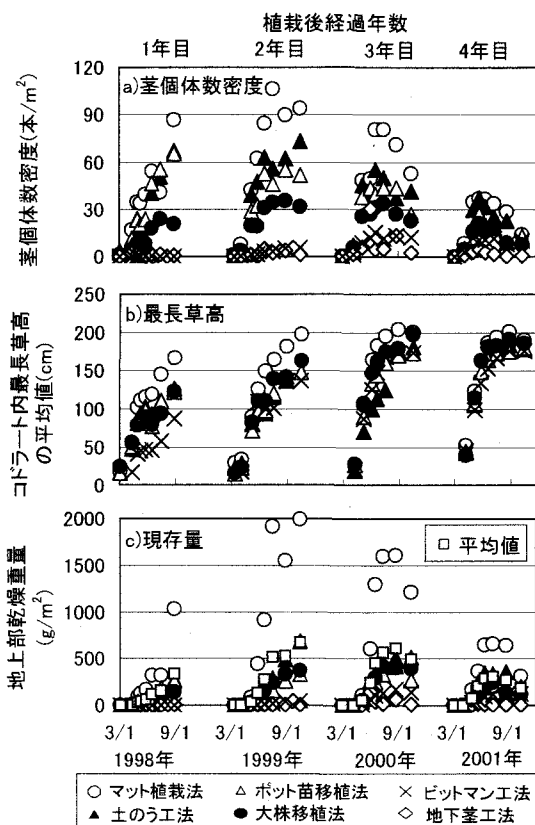


図12 植栽工法別のヨシ茎個体数密度、最長草高、地上部現存量の経時変化