ヨシ生育に及ぼす水位および地盤変化の影響

田中周平* 藤井滋穂**
山田 淳*** 市木敦之***

Influence of Water Depth and Ground Level Change on Reed Growth

Shuhei TANAKA*, Shigeo FUJII**
Kiyoshi YAMADA*** and Atsushi ICHIKI***

* Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ., Nojihigashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

** Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

*** Department of Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan Univ., Nojihigashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

Abstract

Reed growth was observed at an experimental field located in the eastern shore of Lake Biwa's South Basin from December 1997 to October 1999. This study aims to investigate effects of water depth and ground level change on reed growth. In the results, findings are as follows: (1) Average density of reed shoots in the autumn of the second year after planting was 94.0, 72.8, 51.8 and 31.6 shoots $\cdot m^{-2}$, respectively for Mat Method, Pot Method, Sand Bag Method and Big Stump Method. (2) Reeds were able to sprout very well on the ground higher than -30cm of the Lake Biwa standard water level (B.S.L.). On the ground lower than B.S.L. -30cm, reeds planted with Mat Method produced the highest density of reed shoots among all of the methods applied. (3) Correlation analysis between water level and increase rate of reed density showed that deeper water levels (about 30cm for the first year, about 40cm for the second year) tend to inhibit reed growth, but that submerged conditions less than 30cm promote that compared with dry condition.

Key words: reed growth, planting method and condition, Lake Biwa, water level, ground level change

1. はじめに

琵琶湖岸のヨシ群落は、水生植物や魚類、鳥類の生息空間として極めて重要な役割を果たしている。ところが、特に1964年から1977年にかけて、湖岸線に沿った道路の建設などにより、琵琶湖岸のヨシ群落面積は約260haから約130haへと半減した¹⁾。1990年代に入り、滋賀県や水資源開発公団などにより人工的にヨシが植栽されてきたが、遠浅の部分が減少した現在では、沿岸域への波の影響が強いために、単純な植栽方法では、その後の活着はあまり望めない。よって、今後、琵琶湖ではヨシの植栽に付帯して、地盤の整形や消波施設の設置も重要であると考えられるが、地盤形状のあり方と植栽後のヨシの生育との関係はあまり検討されていない。

筆者らは、(財)琵琶湖・淀川水質保全機構が琵琶湖南湖東岸に設置した琵琶湖・淀川水質浄化共同実験センター(以下Biyoセンター)内のヨシ植栽地において、ほぼ月1回の生育観察調査を実施し、水ヨシ²⁾(琵琶湖周辺では、水面域に生えるヨシを「水ヨシ」と呼んで区別している³⁾)の生育に及ぼす植栽条件の影響を詳細に検討してきた。そして、①調査日、植栽工法、植栽位置の3

因子とその交互作用がそれぞれ危険率0.1%の有意性を示す。②調査日、植栽工法がヨシ茎個体数に大きく寄与する。③マット植栽法で植栽されたヨシの水深や浸食に対する耐久性が、他の工法に比べて高い。④ヨシの生育と水位との関係では、年間平均水深が32cmを超える区域で無発芽となる株の割合が急激に増加し、全体的にヨシ茎個体数が減少する。等の結果を示した⁴⁾。

本研究では、植栽2年後も生育観察を継続し、さらにデータを蓄積するとともに、これらデータから地盤高(比高)に焦点を当てた検討を進め、植栽後1,2年目それぞれのヨシ生育と地盤高との関係を明らかにした。また、植栽株ごとに調査日間の水位を算出することで、時間的な影響を考慮したヨシ茎の増加と水位との関係を検討し、茎密度の増加速度を減少させる水深を推察した。

2. 調査方法

本研究は、Biyoセンター内にある半閉鎖型の実験施設で実施された。Fig.1に示すように、実験施設は3000m²の面積を持ち、消波施設として鋼矢板が両側1/3部分に打ち込まれ、中央部で外部との水交換が可能となっている。鋼矢板は、琵琶湖標準水位(以後B.S.L.と記す)約

* 立命館大学大学院理工学研究科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

** 京都大学大学院工学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

*** 立命館大学理工学部環境システム工学科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

-140cm の地盤高の沖合部に、南側 B.S.L.+30cm、北側 B.S.L.±0cm の高さに設置されている。鋼矢板間の開口部は初め自然状態で放置したが、初年度の調査結果よりこの部分からの土砂流出が著しいと推察されたので、1998 年 8 月に開口部の水深が B.S.L. 約-80cm となるようにフトンかごを設置した。

この実験施設北部の A、B 2 つのゾーン (Fig.1) において、琵琶湖水位の低下した 1997 年 10 月 23 日~28 日にヨシが植栽された¹⁾。ヨシの植栽は、A、B 両ゾーンに 6 種類の工法(ビットマン工法、ポット苗移植法、土のう工法、大株移植法、マット植栽法、地下茎工法)で実施された。全体の植栽数は 1081 株(未植栽 159 区画)であり、その位置・密度などの詳細情報を Fig.2 に図示する。植栽は、A ゾーンが湾奥部に B ゾーンが湾開口部近くに位置し、共に同一の工法・密度で湖岸線に直角に陸から沖合に配置されている。各工法のうち、ビットマン、ポット、土のうの 3 工法では 2 種類の密度となっている。なお、1998 年 12 月に全体のほぼ半数のヨシを対象にヨシ刈りを実施した。

調査の概要を Fig.3 に示す。地盤測量は沖合方向 11 測線、各測線 10 点以上の測点で、土質調査はヨシ植栽地の粒度分布をそれぞれ年 3 回分析した。生育観察調査では、1997 年 12 月からほぼ月 1 回の頻度で、植栽した全区画 (465m²) を対象に、ヨシ茎個体数、最長草高 (区画内最長ヨシ草高) および株近傍の水深を測定した。ヨシ群落の調査では、通常、茎個体数のカウントや茎径、草高の測定などが行われているが、それらは単独で行われることが多く、また調査面積、調査サンプル数も通常少ない^{4,5)}。本調査の特徴は、Table 1 に示す 6 種類の植栽工法のヨシ株がほぼ同条件で存在し、最小 0.5m×0.5m という小調査区画を地盤高別に合計 1240 設定したことにある。

Fig.1 Field map of the experimental field

Fig.2 Arrangement of six planting methods and their survival situations

全区画で一斉調査を行い、並行して地盤測量を実施することで、生育環境や条件との関係の把握を可能とさせた。

3. 結果 および 考察

3.1 植栽工法別の生育概況

植栽ヨシの新芽は植栽後 1 年目の 3 月初旬より陸側から発芽し、春先から夏場にかけて沖合方向に向かって増加した。Fig.4 に植栽工法別にその変化をヨシ茎個体数密度 (以後、茎密度と記す) で示す。ビットマンおよび地下茎工法は全体を通じて 0~2 本・m² とほとんど活着しなかった。なお、ビットマン工法は、元来、春から初夏 (4~7 月) に植栽するのであるが^{6,7)}、その期間は琵琶湖でもっとも水位が上昇する期間にあたり、実際には植栽が困難なため、本実験地では 10 月に実施された。本法での低い活着率は植栽時期が不適当なためといえる。ビットマン、地下茎工法を除く 4 工法は 89% 発芽した¹⁾。植栽後 1 年目は、マット植栽法、ポット苗移植法 (4 株・m²)、土のう工法 (4 株・m²) で顕著に茎密度が増加し、最終的には 80 本・m² を超えたが、大株移植法は、これらの 1/3 程度の茎密度であった。

ポット苗移植法 (2 株・m²)、土のう工法 (2 株・m²) では、植栽後 2 年目に、未植栽区域からの発芽が多く見られた。特にポット苗移植法は植栽後 2 年目にして初期条件 2 株・m² が 4 株・m² の生育状況に近づいた。これは、植栽後の 1 年間で根圏が発達し、ヨシ株の外部にも地下茎が進出した結果であると推察される。植栽後 2 年目の 8 月下旬における平均茎密度は、マット植栽法、ポット苗移植法、土のう工法、大株移植法の順に 94.0, 72.8, 51.8, 30.6 本・m² となった。最長草高も 1 年目の約 200cm から 280cm にまで達するヨシ株が数カ所に存在した。特に、大株移植法の茎密度が顕著に増加し、総じて植栽工法による生育状況の差が 1 年目より明確になった。

3.2 地盤変化と活着状況

本実験地はヨシ植栽直前に人工的に整形した土地のため、波浪などにより、その後、大きな地盤変化が起こった。Fig.5 は地盤整形以前の 1997 年 10 月 20 日と 1999 年 8 月 24 日の横断形状である。なお、各植栽株の地盤高は、地盤測定データから最大 1000 回、相対誤差 0.001 以下の条件の反復計算による 2 次元スプライン補間⁸⁾で推定した。植栽地盤の平均勾配は、地盤整形後から 10 ヶ月間で 1.7% から 3.8% へと急峻化し、整形前の地盤形状とほぼ等しくなった。また、植栽時の土壌は粒径が 2mm 以下の砂分が 60% 近くを占めていたが、植栽 10 ヶ月後にはその大半は流され、粒径が 2mm 以上の礫分が全体の約 80% を占めた。

Fig.3 Schedule of main works in this study

植栽した全 1081 株のうち、1 年目の最終調査 (1998 年 8 月 29 日) 時点で、発芽が認められなかった 449 株の大半はビットマン、地下茎工法であったが、これらを除く株でも 11% は活着しなかった¹⁾。Fig.2 に示すように、これらは開口部付近に集中しており、地盤高が低く浸食の激しい部分でヨシの活着が不良となる傾向となった。

3.3 植生地盤高の影響

毛涯ら¹⁾は、琵琶湖におけるヨシの良好な生育範囲を勾配が緩やかで水深 60~80cm 以浅と述べている。しかし、年間約 1m の水位差のため、琵琶湖では水際線付近で地盤が浸食される。一方、水際線から流された砂粒子は施設奥部に移動、堆積し、施設奥部の地盤高が高くなりやすい。よって、ヨシを植栽する際、現実的には水深ではなく地盤高を基準として、適切な植栽工法を選択せざるを得ない。

Fig.6(a)~(d)に地盤高と活着率との関係を植栽工法別に示す。なお、地盤高別の存在株数を Table 2 に示す。(a) マット植栽法では、比高-40cm 以高ですべての株が活着

し、比高-40cm 以深においても 75% が活着した。(b)土のう工法(c)ポット苗移植法では、比高-30cm 以高で、植栽後 1 年目で 52~77%、植栽後 2 年目で 75~100%の活着率となった。これは、1 年目の無発芽区域や無植栽区域から 2 年目に発芽したヨシが存在することを示し、比高-30cm 以高の地盤高はヨシの発育を促進する環境であったことが推測される。ヨシ活着の観点からは、(a)マット植栽法について(d)大株移植法が優れていることが示された。この原因としては、植栽時のヨシ株サイズが大きいことが挙げられ、そのために波浪や周囲の地盤変化に対して大きな耐久力を持つことが予想される。

ヨシの生育状態の判断基準としては、植栽ヨシ活着率の他に、活着したヨシの出芽密度が考えられる。Fig.7 には株ごとのヨシ茎数と地盤高との関係を示した。図より、植栽後 2 年目に、マット植栽法では比高-20cm 以深で、大株移植法は地盤高の高い場所で顕著なヨシ茎数の増加傾向が認められた。一方、0cm 以上の比高では、マット植栽法は 1 年目から 2 年目にかけて茎数が減少している。土のう工法は植栽後 1 年目に比高-40~-20cm と +10cm 以高で高い茎個体数を示したが、2 年目には比高ごとの変化があまりなかった。ポット苗移植法は植栽後 1、2 年目とも比較的類似した傾向であるが、比高-40cm 以深で 2 年目に茎個体数の減少が見られた。大株移植法は活着率では土のう工法、ポット苗移植法をしのぐ好結果を

Fig.4 Average reed density with planting methods

* () shows the number of stumps planted in one meter square

Fig.5 Cross sectional view of A-A'

* Water level range in 1997-1999

Fig.6 Survival ratio of reed stumps with ground level

Table 1 Summary of planting methods and their characteristics

Bittmann Method	To transplant reed shoots only. The best season for the transplantation was reported to be early May to middle July (Bittmann ⁶⁾), and early April to middle May (Sakurai ⁷⁾).
Root Method	To transplant reed roots only. A defect of this method is to damage natural reed colonies ⁷⁾ .
Big Stump Method	To transplant big stumps from natural reed colonies. Bittmann ⁶⁾ recommended transplantation before early June or after November. Sakurai ⁷⁾ suggested that reed stumps can be transplanted in water, if water depth is less than 30cm.
Pot Method	To cultivate reeds from their seeds in pots, and then to transplant them. Pot Method is to direct transplantation, while Sand Bag Method is to use sand bags for protection of reed roots. An advantage of both methods is to avoid damage of natural reed colonies.
Sand Bag Method	
Mat Method	To cultivate reeds from their seeds in pots and to recultivate them in palm filter mats and to transplant as they are. This method shows the highest stability for ground change, but the plantation cost is the highest.

残したが、茎数では、地盤高の低い場所での植栽には適さない傾向を示した。

3.4 地盤の浸食・堆積の影響

地盤高の低い場所でヨシ生育不良の原因には、株周辺地盤の浸食と水位の影響が考えられる。Fig.8 に示すように、植栽地では植栽後 1 年目に-10cm 以深で最大 27cm の浸食が起こり、-10cm 以上では 5cm~最大 30cm の堆積が生じた。植栽後 2 年目でも、比高-50cm 以深で 5~15cm の浸食が起きたが、比高-20~-50cm 付近では堆積する箇所が多く存在した。なお、1998 年 8 月に同施設南部(Fig.1 左側)で地盤整形が実施された。その際に加えられた土が波浪により移動・堆積した影響もあると推測できる。

地盤の浸食・堆積とヨシ株の無発芽率との関係をまとめたのが Fig.9 である。なお、ビットマン、地下茎工法はほぼすべてが無発芽および流出した株であったため、解析では、これら 2 工法を除く 4 工法を対象とした。植栽後 1 年目の無発芽率が全体的に高いが、これは 1 年目にポット苗移植法、土の工法において無植栽区域が存在したためである。この図より、植栽後 1, 2 年目とも浸食厚 5cm 以上の浸食で 4 分の 1 以上の株が無発芽となった。また、植栽後 1 年目は 10cm を越える堆積も無発芽率 34% と高く、植栽直後に土砂が過大に堆積することは、その後のヨシの生育に悪影響を及ぼすと推測された。

3.5 生育時の水深の影響

琵琶湖水位（建設省琵琶湖工事事務所が鳥居川にて測定）とヨシの生育との関係を検討するため、植栽地を沖

合から陸域方向に 4m ごと（最陸部は 3m ごと）に 6 区画に区分して平均茎密度を集計し、その経時変化を Fig.10 に示した。冠水の有無はヨシの成長に大きく影響するといわれる¹⁰⁾。植栽後 1 年目は地盤高の高い区画では 3 月中旬から茎密度が増加し、地盤高の低い区画では琵琶湖水位の低下してきた 7 月以降に茎密度が増加した。一方、2 年目は琵琶湖水位の高い 4 月初旬から 5 月にかけて茎密度の急激な増加が起った。このことから、根圏の発達で陸域からの酸素供給が行われるようになり、高水位時においても成長可能な環境が整ったことが推測された。また、陸域における茎密度は、植栽後 1, 2 年目ともほぼ同様の結果であるが、沖側の平均比高-26cm、-15cm 区域の茎密度は、2 年目に陸域を上回る結果を示した。このことから、ある程度の冠水は 2 年目のヨシの生育に好影響を及ぼすことが推測され、茎個体数の増加には生育時の水深が影響因子になっていると推察できる。

そこで、各区画の水深測定結果と琵琶湖水位から、区画ごとの調査日ごとの地盤高を算出し、琵琶湖水位との関係から、植栽後 2 年間の水深の経時変化を推定した。なお、陸地の水深は 0cm とおき、土砂の浸食、堆積による地盤変化については、株ごとに隣接する調査間で直線補間した。2 調査連続で陸地であった株については、その調査間も陸地であると仮定した¹⁾。

上記の手法で株ごとに算出した水深と茎密度の平均日増加量（以後増加速度と記す）との関係を検討した。

Fig.11 は、ビットマン、地下茎工法を除いた 866 区画について、植栽後 1, 2 年目それぞれのデータを対象として、各調査間の平均水深と茎密度増加速度、株内最長草高成長速度との関係を示した図である。図では、水深の

Table 2 The number of planting stumps for each planting position and method

Ground level compared with B.S.L.(cm)	~ -40	-40 ~ -30	-30 ~ -20	-20 ~ -10	-10 ~ ~0	0~ 10	10~ 20	20~ 30
Mat Method	4	1	3	9	12	4	6	7
Sand Bag Method	26	16	26	32	29	27	144	64
Pot Method	21	19	45	74	84	41	23	57
Big Stump Method	8	2	6	8	9	16	23	19

Fig.7 Average number of reed shoots with ground level

Fig.8 Relation between ground level and its change

*First year: level change from 1997/10/20 to 1998/8/3

**Second year: level change from 1998/8/26 to 1999/8/24

□ First year(1998/8/29)

■ Second year(1999/8/28)

Fig.9 Relation between reed growth and ground level change

範囲ごとにデータを分け、それぞれで平均の茎密度増加速度、株内最長草高成長速度を示した。

植栽後1,2年とも3月から5月初旬にかけては全区画がほぼ冠水し、それぞれの水深にほぼ同数の株が存在した。Fig.11(a)より、植栽後1年目は水深が0~20cmの区画で最も茎密度の増加速度が高くなり(0.1~0.9本・m⁻²・d⁻¹)、水深が深くなるほど小さくなる傾向が明らかである。特に、その傾向は5月の期間に顕著に現れており、平均水深が30cmを超える場所では茎個体数が減少する結果となった。このことから、ヨシが発芽し茎個体数を顕著に伸ばす4月から5月にかけての高水位が、植栽後1年目のヨシ茎の増殖に大きな影響を与えていることが推測された。また、1年目の水深範囲ごとの平均値データについて、生育水深と茎増加速度の相関係数 R を求めると、 $R=-0.41$ となり、負の相関関係にあることが示された。

植栽後2年目の増加速度は、4月初旬から5月初旬にかけて0.3~1.6本・m⁻²・d⁻¹と高いが、水深40cm以深では、春先を除いてあまり増加は見られない。40cmを超える深い水深での生育期間が長期になり、日射量の低下や水圧によりヨシの増殖が妨げられたと考えられる。全体を通じて、無冠水区画よりも、水深30cm未満の区画で茎増加速度が高い傾向にある。これらのことから、ある水深を超える高水位はヨシの茎個体数の増加を抑制するが、無

Fig.10 Average density of reed shoots with planting position

Fig.11 Effects of water depth on reed growth rate

冠水状態もヨシの増殖には好ましくなく、根圏の発達してきた植栽後2年目には、30cm未満の水位がヨシの生育に良好な影響を与えると推測された。

ヨシの株内最長草高の変化と水深との関係を Fig.11(b) に表す。草高は植栽後1, 2年目とも4月初旬から5月初旬に $2\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 程度の大きな伸びを示し、以後、8月下旬まで生育水深に関わらず $0.5\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 程度で安定して増加した。この理由としては、株内の最長草高を指標としていくと、水面上に存在するヨシの成長には生育水深はあまり影響しないことが考えられる。一方、茎数の増加は主に水中で起きるため、生育水深が大きく影響すると推測できる。

調査日間ごとの解析では、各水深に存在する株数が異なるため、特に6月以降では、水深の深い部分についての検討が困難となる。そこで、季節変化を考慮しない解析として Fig.12 に全886区画の茎密度の増加速度(7調査間)と、調査間の平均水深との関係を示す。この図から、植栽後1年目の特徴として、30cm未満の冠水は、無冠水よりもヨシの増加速度が大きいこと、また、水深が30cmを超えるとヨシの増加速度が大きく低下する傾向が示された。一方、植栽後2年目もこの傾向は顕著に表れるが、増加が阻害される水深が40cmと深くなることが示された。

4. まとめ

本研究では、ヨシ植栽後約2カ年に及ぶ生育観察調査を実施し、ヨシの生育に及ぼす水位および地盤変化の影響を比較、検討した。主要な成果を以下に記す。

①植栽後2年目における茎個体数密度は、マット植栽法>ポット苗移植法>土のう工法>大株移植法の順で、ビットマン、地下茎工法で植栽されたヨシは、ほぼすべてが無発芽または流出株。②植栽後2年目の比高-30cm以高では各工法とも大部分のヨシが活着し、比高-30cm以深ではマット植栽法、大株移植法が他の工法と比べて

Fig.12 Relation between water depth and reed growth

高い活着率。③植栽後2年目に、マット植栽法では比高-20cm以深で、大株移植法は地盤高の高い場所で顕著なヨシ茎数の増加傾向。土のう工法、ポット苗移植法は地盤高別の違いが比較的小さい。④植栽後1, 2年目とも浸食厚5cm以上の浸食で4分の1以上の株が無発芽。植栽後1年目は、10cmを超える堆積も無発芽率が3割以上と高く、植栽直後の過大な土砂の堆積量は、その後のヨシの生育に悪影響。⑤植栽後1年目で30cm, 2年目で40cmを超える高水位はヨシ茎個体数の増加を抑制するが、無冠水状態もヨシの成長には好ましくない。根圏の発達してきた植栽後2年目には、特に30cm未満の水位がヨシ茎個体数の増加を促進。

ヨシの植栽条件の総合的な評価には、さらに長期にわたる生育観察も必要であるため、本調査は現在も継続して行っている。今後はデータのさらなる蓄積を図り、沿岸環境と最適なヨシ植栽工法との関係について詳細な検討を行う予定である。なお、本研究の一部は、科学研究費(基盤B(2)09450199)および(財)琵琶湖・淀川水質保全機構の受託研究として行なわれた。また、データ収集や調査実施に際して、水資源開発公団関西支社および立命館大学学生、大学院生の協力を得た。各位に対しここに心から感謝する。

(原稿受付 2000年11月16日)

(原稿受理 2001年7月30日)

参考文献

- 1) 滋賀県(1994)環境白書, pp.56-64.
- 2) 倉田亮(1993)ヨシの浄化機能, 水情報, 13(3), 3-5.
- 3) 田中周平, 藤井滋穂, 山田淳, 市木敦之(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.
- 4) 大塚泰介, 岩崎敬二, 熊谷明生, 小西民人(1996)琵琶湖南湖東岸における抽水植物帯面積の減少について, 陸水学会誌, 57(3), 261-266.
- 5) 中村宣彦, 山下祥弘, 北政正之(1993)琵琶湖におけるヨシ植栽, ダム工学, 9, 66-76.
- 6) Bittmann, E.(1965) Grundlagen und Methoden des biologischen Wasserbaus, *Der biologische Wasserbau an den Bundeswasserstrassen*, 17-78.
- 7) 桜井善雄(1991)抽水植物群落復元技術の現状と課題, 水草研究会会報, 43, 1-8.
- 8) 藤原正弘, 宗宮功, 津野洋, 藤井滋穂(1985)水質汚濁濃度分布パターンのスプライン法による推定と合理的測定点配置の検討, 水質汚濁研究, 8(2), 100-109.
- 9) 毛涯卓郎, 中村宣彦, 大塚俊匡, 原稔明(1996)琵琶湖開発事業と環境保全, 大ダム, 154, 11-20.
- 10) 桜井善雄(1988)土木工事と水性植物群落—その現状と問題点—水草研究会会報, 33, 34.