小株移植を想定したヨシ (*Phragmites australis*) の 初期生長に及ぼす冠水条件の影響

渡 辺 悟 史¹⁾ 山 田 一 裕^{2),*} 櫻 井 一 平³⁾

Effect of Submergence Factor on Reed Early Growth for Small Stump Transplantation

Satoshi WATANABE¹⁾, Kazuhiro YAMADA^{2),*} and Ippei SAKURAI³⁾

¹⁾ Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology, 35-1 Kasumi-cho, Yagiyama, Taihaku, Sendai 982-0831, Japan

²⁾ School of Engineering, Tohoku Institute of Technology, 35-1 Kasumi-cho, Yagiyama, Taihaku, Sendai 982-0831, Japan

³⁾ Sendai Institute of Ecotechnology, 5-26-104 Sintera, Wakabayashi, Sendai 984-0051, Japan

Abstract

We study small stump transplantation for the regeneration of the reed bed in the Kitakami river mouth that was destroyed by the Great East Japan Earthquake, taking workability into consideration. We experimentally examined the optimal suitable submergence factors (water depth, submergence time and salinity) for small reed stumps harvested with and without above-ground organs. Consequently, a suitable water depth and submergence time for transplanting a small reed stump harvested with above-ground organs were concluded to be less than 20 cm and less than 12 h d⁻¹ (2 cycles d⁻¹, 6 h cycle⁻¹), respectively. Also, even with a submergence time of 12 h d⁻¹ and water depth of 10 cm, a salt concentration of 1.5-2.0‰ was inferred to be inadequate for transplanting a small stump harvested with above-ground organs. In contrast, when reed harvested without above-ground organs was submerged 24 h d⁻¹ at water depths of 10, 20, 30 and 40 cm, early growth was not inhibited. From the above results, for the transplantation of small reed stump harvested without above-ground organs, continuous submergence at water depths of 10-40 cm was inferred to cause no problems.

Keywords: Reed bed at the Kitakami river mouth; Great East Japan Earthquake; Small stump transplantation; Submergence; Harvesting

1. はじめに

北上川河口ヨシ原はかつて約 200 ha あり、その美しい景観は「残したい日本の音風景百選（環境庁、1996）」に選ばれている。また、この地に生息するベッコウシジミ（ヤマトシジミの俗称）は貴重な水産資源であり、刈り取られるヨシは日本有数の茅材として利用されてきた。そして、オオヨシキリ等の野鳥を始め多様な生物の棲家でもある。ところが、東日本大震災の地盤沈下等で面積は半減し¹⁾、特に河口下流部のヨシ原は著しく消失した^{2, 3)}。持続可能な地域づくりのためにも、早急な再生が望まれる。

現地は 1 日の中で周期的な潮の干満があり、移植作業は干潮の時間帯（昼間）のみ行える。また、9 月～翌年 2 月の昼間は作業に適した潮位まで潮がほとんど引かず、引いたとしてもそれが持続する時間は短い。そのため、迅速かつ正確な移植が求められるが、その一方法として筆者らは、株の採取や運搬等の効率を高めることを目的

に、地上部を刈り取った根系のみのヨシを移植できないかと考えた。すなわち、自然繁殖しているヨシの地上部を地際から刈り取った後、20 cm 四方程度の小株を採取し移植するという方法である。

しかしながら、ヨシにとって地上部は重要な役割を担っている。例えば、水辺のヨシは地上部から取り込んだ酸素を地下部へ輸送し、地下部はその酸素を自身の呼吸に利用する⁴⁾。また、塩分ストレスに対しては、根より吸収した Na⁺ を葉茎基部から根へ再輸送することで主に耐性を獲得しているが^{5, 6)}、地上部も体内に浸透圧を作り出すための物質を光合成により生産している⁷⁾。よって、感潮域のような水深・冠水時間・塩分といった冠水条件が混在する場所において地上部を刈り取ることは、ヨシが生長する上で厳しいストレスとなり得る。ゆえに、移植後のヨシを十分に生長させるためにも、生長の初期段階に及ぼす冠水条件の複合的影響を検討しなければならない。しかし、過去の研究では、ヨシの生長に及ぼす水

1) 東北工業大学大学院工学研究科 〒982-0831 仙台市太白区八木山香澄町 35-1

2) 東北工業大学工学部 〒982-0831 仙台市太白区八木山香澄町 35-1

3) 特定非営利活動法人 環境生態工学研究所 (E-TEC) 〒984-0051 仙台市若林区新寺 5-26-104

* 連絡先: yamakazu@tohtech.ac.jp

深^{8~12)}・冠水時間¹³⁾・塩分^{14, 15)}の影響はそれぞれ独立（例えば、水深の影響の検討では、他2条件は考慮していない）させて検討したものが大半であり、複合的に影響を検討した研究はない。

他方、地上部を刈り取ったヨシ小株にとって厳しい冠水状況を呈する場所においては、適切な条件になるよう地盤かさ上げを施すなどで対応できると考えられる。しかし、対象とする場所の全域を網羅することは労力やコストの面で困難なため、部分的にはかさ上げを施さずに移植する必要もでてくる。しかし、そうなれば地上部を刈り取ったヨシ小株の移植は難しくなる。よって、地盤かさ上げが困難な場所では、先に述べたヨシ地上部の機能を踏まえ、地上部を刈り取らないヨシ小株の移植が適していると思われる。ところが、地上部を刈り取らないヨシについても、初期生長に及ぼす冠水条件の複合的な影響を検討した研究はない。

そこで本研究では、地上部を刈り取ったヨシ・刈り取らないヨシの初期生長に及ぼす冠水条件（水深・冠水時間・塩分）の複合的な影響を観察し、本ヨシ原再生のための適切な小株移植条件を実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験は本学内ガラスハウスで行った。ヨシは北上川河口左岸4.8 kp地点に生育していたものである。試料として、葉茎の生長が旺盛かつ水平地下茎が発達していた約20 cm四方の小株を採取し（2014年4月・5月・6月、2015年3月・4月）、実験室に持ち帰った。持ち帰った試料は実験までの間（1週間程度）、適宜灌水しながら保管した。

2.1 地上部を刈り取ったヨシの初期生長に及ぼす水深・冠水時間の影響

2.1.1 実験条件および期間

条件は、水深10 cm・20 cm・30 cm・40 cm、冠水時間12 hrs d⁻¹・16 hrs d⁻¹・20 hrs d⁻¹・24 hrs d⁻¹（干出なし）とした。冠水時間の設定は、1日を昼間と夜間に分け、それぞれで冠水と干出を行うようにした。つまり、昼夜とも冠水12 hrs d⁻¹は6 hrs冠水後6 hrs干出、冠水

16 hrs d⁻¹は8 hrs冠水後4 hrs干出、冠水20 hrs d⁻¹は10 hrs冠水後2 hrs干出とした。設定根拠について、現地の日平均冠水時間が約12 hrsであり（2012年3月～5月に大須4.6 kp地点で計測）、それを基準に4 hrs間隔で設定した。実験期間は、冠水12 hrs d⁻¹が2014年4月22日～同年5月23日、冠水16 hrs d⁻¹・冠水20 hrs d⁻¹が2015年5月2日～同年5月30日、冠水24 hrs d⁻¹が2014年5月19日～同年6月16日とした。

2.1.2 実験装置の概略

Fig. 1に実験装置の概略を示す。縦75×横122×高さ55 cm水槽内の支持台（コンクリートブロックと木板）に塩ビ管（内径17 cm、高さ50または70 cm）を置き、その中に塩ビパイプとザルを設置した。ザルには、ヨシ移植場として天然玉石（明石石5分）を高半分程度まで敷き詰めた後、その上に地上部を全て基部から切り、約5～10 cmに剪定した根系（地下茎が白色（生存状態）かつ根が発達していたもの）を互いの節が重ならないよう、ザル1つ当りに3個体移植し、さらに天然玉石をザル満杯まで被せた。実験水には、水道水に液体肥料（ハイポネックス原液、(株)ハイポネックスジャパン）を2万倍希釈で混ぜたものを供した。実験水作成時のPO₄-P、NO₃-N、NH₄-Nはそれぞれ約2 mg L⁻¹、約1 mg L⁻¹、約2 mg L⁻¹であった。なお、各栄養塩の濃度は枯渇するのを防ぐため高く設定した。実験期間中の水温を計測したところ、水深10 cm（左側）の全冠水系を通し約9～35℃となった。ここで、変動幅が大きいのは干満の影響である。また、塩ビ管内の水を均一にするため、全冠水系にエアレーションを設置した。

2.2 地上部を刈り取らないヨシの初期生長に及ぼす水深・冠水時間の影響

実験条件は、水深10 cm・20 cm・30 cm・40 cm、冠水時間24 hrs d⁻¹（干出なし）とした。

実験装置の概略はFig. 1に示した通りであり、実験水については「2.1.2」と同様の方法で作成した。実験に供したヨシについては、約5～10 cmに剪定した根系（地下茎が白色かつ根が発達）に付いた地上部（根系1個体当りに1本）は刈り取らずに水面上まで残存させ（生きた葉茎および枯れ茎）、根系の節が重ならないよう移植し

Fig. 1 Schematic illustration of experimental system, (a) plan, (b) side elevation.

た (ザル1つ当りに3個体)。なお、実験開始時の地上部高さは、生きた葉茎が全36本で 107.6 ± 14.6 cm (AVE. $\pm$ S.D.) であり、枯れ茎は全36本が80 cm で一律になるよう切り揃えた。実験期間中の水温を計測したところ (水深10 cm 左側)、水面上まで生きた葉茎を残した系 (以下、生きた葉茎の系) が約 $18 \sim 33$ °C、水面上まで枯れ茎を残した系 (以下、枯れ茎の系) が約 $2 \sim 26$ °C (2 °C 観測時は気温が6 °C 前後) となった。

実験期間は、生きた葉茎の系が2014年6月24日～同年7月24日、枯れ茎の系が2015年3月25日～同年4月22日とした。

2.3 地上部を刈り取ったヨシの初期生長に及ぼす塩分の影響

実験条件は水深10 cm、冠水時間12 hrs d^{-1} 、塩分濃度0.0%・1.0%・1.5%・2.0%とした。なお、水深と冠水時間は「3.1」の淡水実験の結果をもとに設定した。

実験装置は、水槽 (Fig. 1と同様) に Fig. 1 (a) の水深10 cm 部を模したヨシ移植場 (3連) を設置し、それを4槽設けた (塩分1系で1槽)。また、移植場1つ当りに、「2.1.2」と同様の方法で処理したヨシ根系を互いの節が重ならないよう3個体投入した (塩分1系で9個体)。実験水については「2.1.2」と同様の方法で作成し、エアレーションは全塩分系に設置した。実験期間中の水温 (塩分1.0%・2.0%の左側移植場で計測) は約 $13 \sim 36$ °C であり、変動幅は干満の影響である。なお、実験期間は2015年6月13日～同年7月11日とした。

なお、地上部を刈り取らないヨシへの塩分の影響実験は省略した。その理由として、既報^{14, 15)} によれば、ヨシが生長可能な塩分濃度の限界値は約2%である。現地でヨシが繁茂している場所の土壌水の塩分濃度は概ね1%前後¹⁶⁾ で、最大でも2%前後¹⁷⁾ であった。これらを踏まえれば、地上部を刈り取らないヨシ小株の移植に際する塩分濃度は2%程度以下が望ましいと判断できる。

2.4 測定・分析項目およびその方法

測定項目は、新たに生長した葉茎の高さ (以下、新葉茎高さ) や本数、生きた葉茎の高さや葉数 (緑色) 等とした。分析項目は、実験水の pH (ガラス電極法)、DO (酸性インジゴカルミン比色法)、 PO_4 -P (モリブデン青比色法)、 NO_3 -N (還元-ナフチルエチレンジアミン比色法)、 NH_4 -N (インドフェノール青比色法) とした。分析結果は、全実験系を通じ最小～最大値が DO で約 $6 \sim 10$ mg L^{-1} 、pH で $6.36 \sim 9.56$ であった。 PO_4 -P、 NO_3 -N、 NH_4 -N は概ね実験開始時に設定した濃度であった。実験水の分析時の水温は (AVE. $\pm$ S.D.)、冠水12 hrs d^{-1} が 18.1 ± 1.6 °C、冠水16 hrs d^{-1} が 24.3 ± 4.2 °C、冠水20 hrs d^{-1} が 25.2 ± 4.5 °C、冠水24 hrs d^{-1} が 21.7 ± 3.5 °C、生きた葉茎の系が 25.5 ± 2.1 °C、枯れ茎の系が 24.8 ± 2.5 °C、塩分0.0%が 26.5 ± 4.2 °C、1.0%が 26.4 ± 5.0 °C、1.5%が 26.5 ± 5.3 °C、2.0%が 26.0 ± 4.9 °C であった。測定及び分析は、概ね実験開始日から1週間毎とした。

2.5 統計処理

水深間における新葉茎平均伸長速度の有意差検定を行うため、Tukey の検定を用いた。新葉茎平均伸長速度の定義は次の通りである。実験期間における1週間毎の各水深の新葉茎1本ごとの伸長速度を求め、その後、各水深でその平均値を算出した。また、水深10 cm 及び20

cm それぞれで、生きた葉茎の系・枯れ茎の系間の新葉茎平均伸長速度に有意差があるかどうかについて、Welch の T 検定を行った。なお、水深30 cm と40 cm は比較対象から除外した。その理由として、水深30 cm は枯れ茎の系で1本のみの生長であったからである。また、水深40 cm は生きた葉茎の系で生長量が著しく高かったからである。

3. 結果および考察

3.1 地上部を刈り取ったヨシの初期生長に及ぼす水深・冠水時間の影響

Fig. 2 に、冠水12 hrs d^{-1} における各水深の新葉茎数の変化を示す。水深10 cm と20 cm は24日目に最大値 (それぞれ10本、9本) となった。一方、水深30 cm では17日目に最大値10本を示したが、それ以降は減少し31日目には半減した。また、水深40 cm は最大3本しか確認できなかった。本実験に用いたヨシは約5~10 cm の根系だが、実際の移植では20 cm 四方程度の株を用いる。株の状態でも水深30 cm 以上で葉茎数が減少する¹⁰⁾ ことが報告されており、同等の結果といえる。

Fig. 3 に、冠水12 hrs d^{-1} における各水深の新葉茎高さ総延長 (全新葉茎高さの総和) の変化を示す。期間全体では深水ほど低い値となり、特に、水深30 cm と40

Fig. 2 Changes in number of new shoots of *P. australis* in submergence of 12 hrs d^{-1} (2 cycles d^{-1} , 6 hrs cycle $^{-1}$), except that withered new shoots were excluded. Above ground organs were harvested.

Fig. 3 Changes in total new shoot length of *P. australis* in submergence of 12 hrs d^{-1} (2 cycles d^{-1} , 6 hrs cycle $^{-1}$), except that withered new shoots were excluded. Above ground organs were harvested.

Table 1 Average elongation rate (cm d^{-1}) of new shoots of experimental period at 12 hrs d^{-1} (2 cycles d^{-1} , 6 hrs cycle $^{-1}$). Above ground organs were harvested. Values show the mean $\pm$ S.D.

Experimental period	Water depth (cm)			
	10	20	30	40
From 10 to 17 days	0.65 ± 0.49 (n=8) ns	0.59 ± 0.50 (n=3) ns	0.50 ± 0.29 (n=5) ns	ND
From 17 to 24 days	0.47 ± 0.32 (n=9) ns	0.49 ± 0.40 (n=7) ns	0.30 ± 0.49 (n=11) ns	0.64 ± 0.88 (n=3) ns
From 24 to 31 days	0.30 ± 0.36 (n=10) ns	0.44 ± 0.33 (n=9)*	0.04 ± 0.06 (n=11)*	0.29 ± 0.50 (n=3) ns

In the significance test between each water depth, Tukey's test was used. ND (No Data): Excluded because of n=1.

ns: not significant.

* $P < 0.05$

cm は 24~31 日目にかけて減少し、それぞれ 63.5~56.5 cm, 30.5~24.5 cm となった。

Table 1 に、冠水 12 hrs d^{-1} における各水深の新葉茎平均伸長速度 ($\pm$ S.D.) を示す。実験開始後 10~17 日目 (水深 40 cm は n=1 のため除外)、17~24 日目は水深間に有意な差は認められなかった。一方、24~31 日目では水深 20 cm ($0.44 \pm 0.33 \text{ cm d}^{-1}$) と 30 cm ($0.04 \pm 0.06 \text{ cm d}^{-1}$) の間に有意水準 5% で差が認められた。しかし、他の水深 (水深 10 cm と 40 cm はそれぞれ $0.30 \pm 0.36 \text{ cm d}^{-1}$, $0.29 \pm 0.50 \text{ cm d}^{-1}$) の間で有意な差は認められなかった。

なお、冠水 16 hrs d^{-1} は水深 20 cm に 1 本、冠水 20 hrs d^{-1} は水深 40 cm に 1 本確認されたが早々に枯死し、24 hrs d^{-1} では全水深において 0 本となった。

以上より、地上部を刈り取ったヨシ小株の移植に適した水深と冠水時間はそれぞれ 20 cm 以下、12 hrs d^{-1} 以下だと推測された。

3.2 地上部を刈り取らないヨシの初期生長に及ぼす水深・冠水時間の影響

実験開始・終了時のそれぞれの生きた葉茎高さ総延長は、水深 10 cm が 887 cm $\cdot$ 960 cm (伸び幅 73 cm)、水深 20 cm が 1053 cm $\cdot$ 1134 cm (81 cm)、水深 30 cm が 937 cm $\cdot$ 1077 cm (140 cm)、水深 40 cm が 998 cm $\cdot$ 1220 cm (222 cm) で、全水深の生きた葉茎は伸長していた。

Fig. 4 に、生きた葉茎の系における各水深の新葉茎数の変化を示す。水深 40 cm は、13 日目に 6 本確認されてから 30 日目までに 11 本へ増加したのに対し、水深 30 cm は 13 日目に 5 本確認されて以降ほとんど増加せず、30 日目は 6 本となった。

Fig. 5 に、生きた葉茎の系における各水深の新葉茎高さ総延長の変化を示す。水深 10~30 cm は期間を通し同程度の増加量を示したものの、水深 40 cm は 22 日目より、水深 10~30 cm の条件よりもおよそ倍増した。水深 40 cm で生長が旺盛だった要因としては、刈り残しの生きた葉茎の葉数が多かった (実験開始時は全条件で同程度になるよう揃えた) ことで光合成が活発になり、地下茎への養分の転流が促されたことが考えられる。そこで、実験開始後 30 日目の生きた葉茎 (新葉茎が確認された個体を対象) に付いていた生きた葉 (緑色) の枚数を計数

Fig. 4 Changes in number of new shoots of *P. australis* in submergence of 24 hrs d^{-1} , except that withered new shoots were excluded. Above ground organs (living shoots) were not harvested.

Fig. 5 Changes in total new shoot length of *P. australis* in submergence of 24 hrs d^{-1} , except that withered new shoots were excluded. Above ground organs (living shoots) were not harvested.

した。その結果、水深 10~30 cm の 29 枚、18 枚、23 枚に対して水深 40 cm は 44 枚と多かった。

Table 2 に、生きた葉茎の系における各水深の新葉茎平均伸長速度 ($\pm$ S.D.) を示す。実験開始後 13~22 日目は水深 10~40 cm の順に $1.01 \pm 0.25 \text{ cm d}^{-1}$, $0.92 \pm 0.67 \text{ cm d}^{-1}$, $1.31 \pm 0.73 \text{ cm d}^{-1}$, $1.60 \pm 0.33 \text{ cm d}^{-1}$ となり、22~30 日目は同順に $0.56 \pm 0.36 \text{ cm d}^{-1}$, $0.55 \pm 0.47 \text{ cm d}^{-1}$, $1.02 \pm 0.85 \text{ cm d}^{-1}$, $1.30 \pm 0.80 \text{ cm d}^{-1}$ となった。しかし、両日において全水深間で有意な差は認められず、同程度の伸長速度となった。

Fig. 6 に、枯れ茎の系における各水深の新葉茎数を示す。水深 10 cm と 20 cm は 14 日目に 4 本確認されて以降、28 日目までにそれぞれ 6 本、8 本へ増加した。また、水深 40 cm は 14 日目に 3 本確認されて以降、28 日目に 6 本まで増加した。一方、水深 30 cm は 14 日目の 1 本確認されて以降 28 日目まで変化がなく、全条件で最少となった。

Fig. 7 に、枯れ茎の系における新葉茎高さ総延長の変化を示す。28 日目までに水深 10 cm, 20 cm, 40 cm がそれぞれ 49.5 cm, 61.0 cm, 34.0 cm となったのに対し、水深 30 cm は 11.0 cm の最低値となった。

このように、水深 30 cm のヨシで初期生長が阻害された。その要因について、実験を行う上でヨシ個体差を平

Table 2 Average elongation rate (cm d⁻¹) of new shoots of experimental period at 24 hrs d⁻¹. Living shoots were not harvested. Values show the mean ± S.D.

Experimental period	Water depth (cm)			
	10	20	30	40
From 13 to 22 days	1.01 ± 0.25 (n=4) ns	0.92 ± 0.67 (n=4) ns	1.31 ± 0.73 (n=5) ns	1.60 ± 0.33 (n=6) ns
From 22 to 30 days	0.56 ± 0.36 (n=8) ns	0.55 ± 0.47 (n=9) ns	1.02 ± 0.85 (n=6) ns	1.30 ± 0.80 (n=11) ns

In the significance test between each water depth, Tukey's test was used.
ns: not significant.

Fig. 6 Changes in number of new shoots of *P. australis* in submergence of 24 hrs d⁻¹, except that withered new shoots were excluded. Above ground organs (withered stems) were not harvested. **Fig. 7** Changes in total new shoot length of *P. australis* in submergence of 24 hrs d⁻¹, except that withered new shoots were excluded. Above ground organs (withered stems) were not harvested.

準化するため、ヨシ試料の選定に加え、各水深でヨシ移植条件を3個体×3連とした。しかし、それにも関わらず生長が阻害されたため、詳細は不明である。

Table 3 に、枯れ茎の系における各水深の新葉茎平均伸長速度 (± S.D.) を示す。ただし、水深 30 cm は n=1 のため除外した。結果を見ると、実験開始後 14~21 日目では、有意水準 1% で水深 20 cm (1.13 ± 0.41 cm d⁻¹) が水深 10 cm・40 cm (それぞれ 0.31 ± 0.09 cm d⁻¹, 0.21 ± 0.08 cm d⁻¹) よりも有意に高かった。しかし、他の水深間に有意な差は認められなかった。また、21~28 日目においても水深間に有意な差は認められず、水深 10 cm,

Table 3 Average elongation rate (cm d⁻¹) of new shoots of experimental period at 24 hrs d⁻¹. Withered stems were not harvested. Values show the mean ± S.D.

Experimental period	Water depth (cm)			
	10	20	30	40
From 14 to 21 days	0.31 ± 0.09 (n=4) **	1.13 ± 0.41 (n=4) **	ND	0.12 ± 0.08 (n=3) **
From 21 to 28 days	0.49 ± 0.61 (n=6) ns	0.41 ± 0.37 (n=7) ns	ND	0.46 ± 0.43 (n=5) ns

In the significance test between each water depth, Tukey's test was used.
ND (No Data): Excluded because of n=1.

ns: not significant.

** P<0.01

Table 4 A comparison of reed growth contents at the system of living shoots and withered stems.

Growth contents	System of living shoots	System of withered stems
Number of new shoots (No. 3 PVC pipes ⁻¹)	9 (9)	6 (8)
Total new shoot length (cm 3 PVC pipes ⁻¹)	127.0 (112.0)	49.5 (61.0)

() Show the values of water depth 20 cm. In other values show the water depth 10 cm.

20 cm, 40 cm でそれぞれ 0.49 ± 0.61 cm d⁻¹, 0.41 ± 0.37 cm d⁻¹, 0.46 ± 0.43 cm d⁻¹ となり、同程度の伸長速度を示した。

以上より、地上部 (生きた葉茎・枯れ茎) を刈り取らないヨシ小株の移植において、水深 10~40 cm が常時続くような冠水条件は問題ないことが推測された。なお、水深 40 cm を超える影響は今後の検討課題である。

ヨシ地上部の有無で生長に大きな差が生じる要因として、ヨシ等の水辺に生息する植物は地下部の呼吸に、地上部から輸送された酸素を利用する⁴⁾。したがって、地上部を失った状態では酸素を十分取り込めず、さらに水中という低酸素条件が重なり、地上部の無いヨシ根系は嫌気呼吸に頼らざるを得ない。嫌気呼吸においては、ATP 生産効率は好気呼吸に比べはるかに悪く生命維持が困難であるため¹⁸⁾、組織の腐敗や崩壊が起きると考えられる。現に、冠水 16 hrs d⁻¹・冠水 20 hrs d⁻¹・冠水 24 hrs d⁻¹ の根系の大半は、実験終了時には軟化または腐敗していた。

ちなみに、現地で地上部を刈り取らないヨシ小株を移植する際、地上部は「生きた葉茎」と「枯れ茎」のどちらがより好適なのかを検討するため、両地上部で水深ごとに新葉茎数と高さ総延長 (実験終了時)、平均伸長速度 (実験開始後約 2~3 週目, 約 3~4 週目) を比較した。その結果、水深 10 cm の新葉茎数 (**Table 4**) は生きた葉茎の系 9 本、枯れ茎の系 6 本であった。また、新葉茎高さ総延長 (**Table 4**) についてはそれぞれ 127.0 cm, 49.5 cm であり、生きた葉茎の系が約 2.5 倍高かった。そして、新葉茎平均伸長速度 (**Table 5**) は実験開始後約 2~3 週目において、生きた葉茎の系 (1.01 ± 0.25 cm d⁻¹ (± S.D.)) が枯れ茎の系 (0.31 ± 0.09 cm d⁻¹) よりも有意に高かった (P<0.01)。しかし、実験開始後約 3~4 週目では系統間に有意な差は認められず、生きた葉茎の系が 0.56

Table 5 Average elongation rate (cm d^{-1}) of new shoots for system of living shoots and withered stems at water depth 10 cm (above table) and 20 cm (bellow table). Values show the mean $\pm$ S.D.

Experimental period	System of living shoots	System of withered stems
From about 2 to 3 weeks	1.01 ± 0.25 (n=4) **	0.31 ± 0.09 (n=4) **
From about 3 to 4 weeks	0.56 ± 0.36 (n=8) ns	0.49 ± 0.61 (n=6) ns

Experimental period	System of living shoots	System of withered stems
From about 2 to 3 weeks	0.92 ± 0.67 (n=4) ns	1.13 ± 0.41 (n=4) ns
From about 3 to 4 weeks	0.55 ± 0.47 (n=9) ns	0.41 ± 0.37 (n=7) ns

In the significance test between each system, Welch's test was used.

ns: not significant.

** $P < 0.01$

$\pm 0.36 \text{ cm d}^{-1}$, 枯れ茎の系が $0.49 \pm 0.61 \text{ cm d}^{-1}$ であった。

一方、水深 20 cm について見てみると、新葉茎数 (Table 4) は生きた葉茎の系 9 本, 枯れ茎の系 8 本であった。また、新葉茎高さ総延長 (Table 4) はそれぞれ 112.0 cm, 61.0 cm であり、生きた葉茎の系が約 1.8 倍高かった。そして、新葉茎平均伸長速度 (Table 5) は実験開始後約 2~3 週目において、生きた葉茎の系が $0.92 \pm 0.67 \text{ cm d}^{-1}$, 枯れ茎の系が $1.13 \pm 0.41 \text{ cm d}^{-1}$ であったが系統間に有意な差は認められなかった。また、実験開始後約 3~4 週目でも有意な差は認められず、それぞれ $0.55 \pm 0.47 \text{ cm d}^{-1}$, $0.41 \pm 0.37 \text{ cm d}^{-1}$ であった。

以上より、水深 10 cm 及び 20 cm とともに、生きた葉茎の系・枯れ茎の系間で新葉茎数と伸長速度に明確な差はなかった。しかし、バイオマス量 (高さの総延長) は生きた葉茎の方が約 1.8~2.5 倍高かった。つまり、水深 10 cm 及び 20 cm で常時冠水する場所に地上部を刈り取らないヨシ小株を移植する際、地上部バイオマス量の観点から生きた葉茎の方がより好適だと推測された。

3.3 地上部を刈り取ったヨシの初期生長に及ぼす塩分の影響

Fig. 8 に、各塩分における新葉茎数の変化を示す。塩分 0.0% が 28 日目までに 4 本確認された。また、1.0% については、28 日目に 4 本へ減少したものの 14~20 日目では全条件で最多の 6 本となった。一方、1.5% と 2.0% は 28 日目において 1 本のみであった。

Fig. 9 に、各塩分における新葉茎高さの総延長の変化を示す。塩分 0.0% は 7~28 日目にかけて増加し続け (10.0~60.0 cm), 1.0% も 20 日目までに 64.0 cm となった。一方、1.5%・2.0% は 28 日目までほぼ増加せず、それぞれ 4.5 cm・8.5 cm となった。

このように、塩分 1.5% 以上でヨシ初期生長が著しく阻害された。ヨシは、根より吸収した Na^+ の多くを葉茎基部より根へ再輸送することで塩分ストレスに耐えるが^{5, 6)}、一方で、地上部の光合成産物は体内の浸透圧を作り出すのに利用される。ヨシが生長可能な塩分濃度の限界値は約 2.0%^{14, 15)} とされているが、地上部を刈り取ったことで少なからず耐性が低下し、生長可能な塩分濃度の限界

Fig. 8 Changes in number of new shoots of *P. australis* in each salinity, except that withered new shoots were excluded. Above ground organs were harvested. Submergence factors: (1) water depth 10 cm, (2) submergence of 12 hrs d^{-1} (2 cycles d^{-1} , 6 hrs cycle $^{-1}$).

Fig. 9 Changes in total new shoot length of *P. australis* in each salinity, except that withered new shoots were excluded. Above ground organs were harvested. Submergence factors: (1) water depth 10 cm, (2) submergence of 12 hrs d^{-1} (2 cycles d^{-1} , 6 hrs cycle $^{-1}$).

値も低下したと推察される。

以上より、地上部を刈り取ったヨシ小株の移植にとって塩分濃度 1.5~2.0% は、冠水 12 hrs d^{-1} ・水深 10 cm の条件であっても不適であることが推測された。

4. おわりに

本研究では北上川河口のヨシ原再生に向け、干満の状況を考え株の採取や運搬などの効率を高めるため、地上部を刈り取った・刈り取らないヨシ小株が、移植後生長する上で適した冠水条件 (水深・冠水時間・塩分) を実験的に検討した。その主要な成果を以下に記す。

- ①地上部を刈り取ったヨシ小株の移植に適した水深と冠水時間はそれぞれ 20 cm 以下, 12 hrs d^{-1} (2 cycles d^{-1} , 6 hrs cycle $^{-1}$) 以下だと推測された。また、塩分濃度 1.5~2.0% は、冠水 12 hrs d^{-1} ・水深 10 cm の条件であっても同小株の移植には不適であることが推測された。
- ②地上部 (生きた葉茎と枯れ茎) を刈り取らないヨシを水深 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm の条件で 1 日当たり 24 時間冠水させた時、初期生長は阻害されなかった。

このことから、水深 10~40 cm が常時続く冠水条件は、移植後の地上部を刈り取らないヨシ小株の生長を阻害しないことが推測された。

謝 辞

本研究を進める上で、河川整備基金（公財法 河川財団）より助成頂いたほか、国土交通省北上川下流河川事務所・同飯野川出張所、北上追波漁業協同組合、北上町長尾地区自治会、NPO りあすの森、本学山田研究室 4 年生・卒業生より多大なるご支援を頂いた。ここに記し謝意を表す。

（原稿受付 2015 年 11 月 17 日）

（原稿受理 2016 年 5 月 13 日）

参 考 文 献

- 1) 中村圭吾, 2012. 東日本大震災津波による河川汽水域への影響－北上川河口を例として－. 河川 68(10), 41-46.
- 2) 田中周平, 辻直亨, 水谷沙織, 西川博章, 藤井滋穂, 2014. 北上川河口部ヨシ群落の植生分布および植物種構成に及ぼす地盤沈下および津波の影響. 土木学会論文集 G (環境) 70(7), III_403-III_411.
- 3) 遠藤希実, 大沼克弘, 天野邦彦, 2012. 東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下が汽水域植生に与える影響の分析. 河川技術論文集 18, 53-58.
- 4) Armstrong, J., Armstrong, W., Beckett, P.M., Halder, J.E., Lythe, S., Holt, R., Sinclair, A., 1996. Pathways of aeration and the mechanisms and beneficial effects of humidity- and Venturi-induced convections in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Aquatic Botany 54(2), 177-197.
- 5) Matsushita, N., Matoh, T., 1991. Characterization of Na⁺ exclusion mechanisms of salt-tolerant reed plants in comparison with salt-sensitive rice plants. Physiologia Plantarum 83(1), 170-176.
- 6) Matsushita, N., Matoh, T., 1992. Function of the shoot base of salt-tolerant reed (*Phragmites communis* Trinius) plants for Na⁺ exclusion from the shoots. Soil Science and Plant Nutrition 38(3), 565-571.
- 7) 高橋英一, 1997. 自然と科学技術シリーズ 生命にとって塩とは何か 土と食の塩過剰. 農山漁村文化協会, 東京.
- 8) Yamasaki, S., Tange, I., 1981. Growth responses of *Zizania latifolia*, *Phragmites australis* and *Miscanthus Sacchariflorus* to varying inundation. Aquatic Botany 10(3), 229-239.
- 9) Vretare, V., Weisner, S.E.B., Strand, J.A., Granéli, W., 2001. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. Aquatic Botany 69(2-4), 127-145.
- 10) 田中周平, 藤井滋穂, 山田淳, 市木敦之, 2001. ヨシ生育に及ぼす水位および地盤沈下の影響. 水環境学会誌 24(10), 667-672.
- 11) Coops, H., van den Brink, F.W.B., van der Velde, G., 1996. Growth and morphological responses of four helophyte species in an experimental water-depth gradient. Aquatic Botany 54(1), 11-24.
- 12) Squires, L., van der Valk, A.G., 1992. Water-depth tolerances of the dominant emergent macrophytes of the Delta Marsh, Manitoba. Canadian Journal of Botany 70(9), 1860-1867.
- 13) Mauchamp, A., Blanch, S., Grillas, P., 2001. Effects of submergence on the growth of *Phragmites australis* seedlings. Aquatic Botany 69(2), 147-164.
- 14) 堀江毅, 細川恭史, 三好英一, 関根好幸, 1987. 植物体 (ヨシ) による浄化能力の検討. 港湾技研資料 (591), 2-18.
- 15) 加藤智博, 徐開欽, 千葉信男, 榎内孝信, 細見正明, 須藤隆一, 1998. 浸漬ヘドロ上におけるヨシ原の創出手法の開発とその評価. 土木学会論文集 594/VII-7, 1-10.
- 16) 山田一裕, 江成敬次郎, 小林豊, 2013. 東日本大震災後の北上川河口ヨシ原の現状とその再生のための実験的検討. 第 47 回日本水環境学会年会講演集, p.225.
- 17) 渡辺悟史, 山田一裕, 小林豊, 櫻井一平, 2014. 被災後の北上川河口ヨシ原の現状評価と製鋼スラグを用いたヨシ原再生方法の検討. 第 48 回日本水環境学会年会講演集, p.662.
- 18) 山本良一, 櫻井直樹, 2013. 絵とき植物生理学入門改訂 2 版. オーム社, 東京.

【論 文 要 旨】

本研究では、東日本大震災により消失した北上川河口ヨシ原の再生に向けた小株移植について、作業性を考慮し、地上部を刈り取った・刈り取らないヨシ小株の移植に適した冠水条件（水深・冠水時間・塩分）を実験的に検討した。その結果、地上部を刈り取ったヨシ小株の移植に適した水深と冠水時間はそれぞれ 20 cm 以下、12 hrs d⁻¹ (2 cycles d⁻¹, 6 hrs cycle⁻¹) 以下だと推測された。また、塩分濃度 1.5~2.0% は、冠水 12 hrs d⁻¹・水深 10 cm の条件であっても同小株の移植には不適であることが推測された。一方、地上部（生きた葉茎と枯れ茎）を刈り取らないヨシを水深 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm の条件で 1 日当り 24 時間冠水させた時、初期生長は阻害されなかった。このことから、地上部を刈り取らないヨシ小株の移植において、水深 10~40 cm が常時続くような冠水条件は問題ないことが推測された。

キーワード：北上川河口ヨシ原；東日本大震災；小株移植；冠水；刈り取り