

イオン交換樹脂および逆浸透膜を用いたコムギとオオムギの塩水灌漑栽培

津田 誠・横溝 友香・高見 晋一^{a)}

(応用植物科学コース)

Saline Irrigation using Ion-exchange Resin and Reverse Osmosis Membrane in Wheat and Barley

Makoto Tsuda, Yuka Yokomizo and Shinichi Takami^{a)}

(Course of Applied Plant Science)

Saline irrigation equipped desaline apparatus in a root zone was tested to save fresh water resources. Pots of 56 mm inner-diameter and 40 cm in length were used. Amberlite (ion-exchange resin) and reverse osmosis membrane, both of which had a desalinating ability, were set at the bottom of each pot in desaline plots, respectively. In the control plot, a lovesheet (non-woven cloth) that had no ability to desaline was set. Wheat and barley were transplanted into these pots, which were filled with soil, and the pots were irrigated through the bottom either by fresh or saline water. The two crops responded to desaline methods and irrigation similarly. Growth and development in the two crops were suppressed largely by saline irrigation in the control plot. Amberlite did not affect the growth and development under fresh water irrigation. Shoot dry weight was increased by amberlite under saline irrigation, but the final values of sodium concentration of shoot and soil was not affected. The sodium concentration was reduced by reverse osmosis membrane, whereas the growth and development were suppressed under both fresh and saline irrigations. Amberlite and reverse osmosis membrane improved the growth and development and sodium concentration, but it should be a challenge to improve desaline ability of amberlite and water permeability of reverse osmosis membrane.

Key words : Amberlite, Desaline method, Reverse osmosis membrane, Saline irrigation

緒 言

地球は、しばしば水の惑星と呼ばれる。それは、表面に大量に水が存在する、太陽系では唯一の惑星だからである。この地球表面は、その7割が水で覆われている。しかしこの水の97.5%は海水と塩水で、淡水は残りの2.5%である。しかも淡水の大部分は氷雪であるため、人間生活や経済活動に利用可能な淡水資源は河川水、地下水など、地球上の水の約0.8%にすぎない^{4,11)}。さらにこの潜在的に利用可能な0.8%の水のうち比較的容易に利用できる河川水や湖沼水として存在する淡水資源は、地球上の水のわずか0.007%であるという。一方、近年、淡水の使用量が急増するとともに淡水の汚染が進んでいる。そのため2025年時点で世界人口の30~35%の人が、一般的な渇水基準以下の地域に住むことになるという予測もある^{8,11)}。

農業は大量の水を必要とするため、淡水の部門別使用割合は農業が全体の60%~70%を占めている。一方、生活用水や工業部門の水利用が増加しているので、農業用水が不足している。したがって、農業部門でも淡水の使い方を改善する必要があると考えられている。この状況

に対応して水田では灌漑水の節約³⁾、畑地ではマイクロ灌漑¹⁾など、淡水の使用量を減らす技術が開発されている。そして一方で無尽蔵といってもよい海水と塩水を利用することによって、農業用水を確保するという対策が考えられている⁸⁾。

農業部門の作物栽培に海水や塩水を用いるのは困難である。海水や塩水は、塩が多量に溶けているため水ポテンシャルが著しく低い。そのため海水や塩水を与えるとまず作物の吸水が抑制されるからである⁷⁾。そして多量に存在する塩が作物の養分吸収をかく乱する、あるいは作物の体内に蓄積するなどして生育を阻害するからである。したがって、海水や塩水を淡水化してから使うと安全に作物栽培に使える。現在のところ淡水化技術は逆浸透膜処理が主流である¹²⁾。また小規模なものとしては凍結濃縮法がある⁹⁾。これは生活排水を部分凍結させて生成した氷を分離、回収、溶解して塩分等の不純物の少ない再生水を作るというものである。しかし淡水化はコス

Received October 1, 2009

a) 近畿大学農学部

(Faculty of Agriculture, Kinki University)

トがかかるのが問題である。さらに、淡水化施設と栽培地までの輸送にともなうコストと損失もまたこの方法の制限要因になっている。そこで、安価で、かつ栽培現場で海水、塩水を使うことのできる方法の開発が望まれている。

これを解決する方法は、塩水の使用が短期間である、あるいは少量であれば作物の生育阻害が小さいとして、塩水と淡水を交互に灌漑する循環灌漑^{2,10)}や、点滴灌漑などのマイクロ灌漑^{1,5)}が行われている。前者では塩を流すだけの十分な淡水、後者では降水による塩の溶出によって塩類集積を防いでいる。この方法では海水や塩水を使ったとき、これらが作物に直接接触するため、生育阻害を防ぐことができない。そこで、海水や塩水を作物の根域に与えたときに、これらが作物の根に直接接触することなく、水だけが作物に供給される方法が期待される。本研究では淡水化に使われる逆浸透膜とイオン交換樹脂を根域に設置することによって海水や塩水の灌漑が可能かどうかを検討した。

材料と方法

栽培装置は、内径56 mm、長さ40 cmの塩ビ管 (A) の一方にジョイント付きのフランジ (B) を固定し、これを底部とした (Fig. 1)。底部には全面パッキン (C) と土壤支持体 (D) を別のフランジ (E) の間に挟みボルト (F) で固定した。除塩処理をしない区で土壤支持体として不織布ラプシートを用い、ラプシート区とした。イオン吸着物質としてイオン交換樹脂のアンバーライトを用いる区をアンバー区とし、土壤支持体としてラプシートを用

い、底部にアンバーライト約120 gを深さ3 cmに詰めた (G)。逆浸透膜で除塩処理を行う区では土壤支持体として逆浸透膜 (H) を用いた。逆浸透膜は、日東電工マテックス株式会社製 ES20、直径75 mmとした。これらのような3種のポットにアンバー区では風乾土を700 g、ラプシート区と逆浸透膜区では風乾土870 gを入れた。なお、土壌にはポットあたり粒状化成肥料 (16:16:16) を2 g混和した。

コムギ品種農林71号とオオムギ品種宝城皮麦8を用いた。2006年12月8日に容量180 mlのポットに土を詰め、5粒播種した。苗をポットあたり2個体とし、同年12月23日に上記の3種の除塩処理を行う栽培装置に移植し、水道水550 mlを加えた。ポットは40×30×25 cmのコンテナの中に置き、塩水区で1% NaCl 溶液、淡水区で水道水をそれぞれ20 L 入れた。水深は15 cmであった。コンテナ上部の開口部分はビニールで覆い、蒸発を防いだ。実験要因は灌漑水の2塩水準 (塩水、淡水)、除塩処理の3種 (ラプシート、アンバー、逆浸透膜)、および作物2種 (コムギ、オオムギ) で、反復は設けなかった。

出穂日を記録し、植物体が枯死あるいは成熟したと認められた日に植物体を採集し、茎葉部と穂の乾物重を測定した。茎葉部の乾物200 mgを試験管に入れ、3時間熱湯抽出した。抽出液に蒸留水を加え50 mLとして、イオンメータ (Horiba C-122) でNa濃度を測定した。装置の土壌を約8 cmの層別に採取し、土壌水分含量、土壌Na濃度、及び根長を測定した。根長の測定は画像解析ソフト Scion Image で木村のマクロプログラム Root length 1.80を用いて行なった⁶⁾。

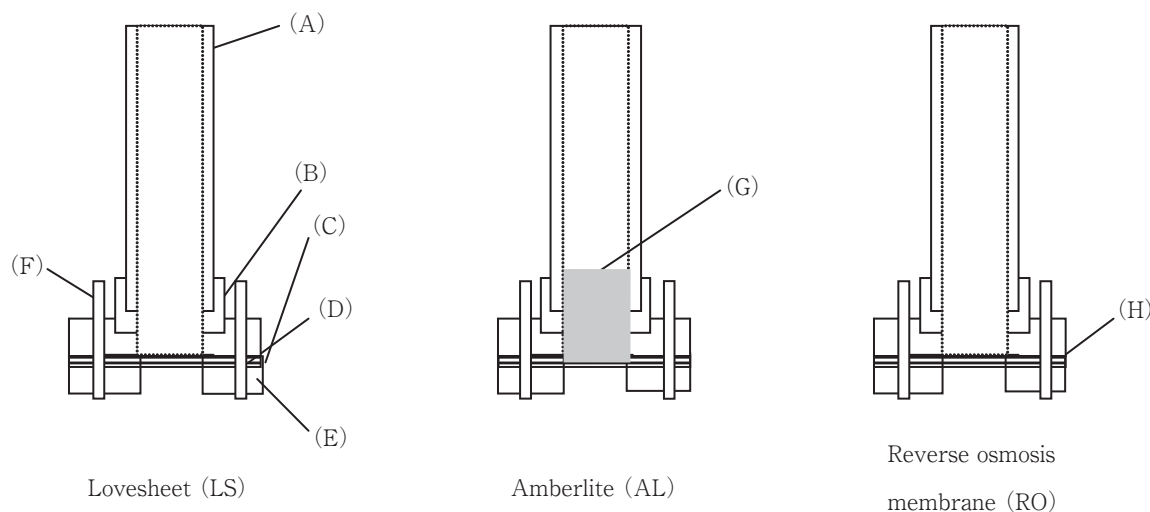


Fig. 1 Longitudinal section diagram of three desalination plots.

A "pot" consists of polyvinyl-chloride pipe inner diameter 56 mm, length 40 cm (A), fixed with jointed flange (B). The flange (B) and a flange (E) are fixed by four bolts and nuts (F). In lovesheet plot (LS), circular lovesheet (C) and flat gasket (D) are inserted between the two flange (B and E), closing the bottom of the pipe (A). The pipe is filled with soil. In amberlite plot (AL), the pipe is filled with 3 cm-thick amberlite (G) at the bottom and the rest is soil. In reverse osmosis membrane plot (RO), circular reverse osmosis membrane (H) is fixed instead of circular lovesheet (C).

Table 1 Effect of saline irrigation under different desaline methods on days from transplanting to heading and harvest in wheat and barley

Desaline method	Crop	Fresh irrigation (A)		Saline irrigation (B)		B-A	
		Heading	Harvest	Heading	Harvest	Heading	Harvest
		Time from transplanting (days)				(days)	
LS	Wheat	96	137	88	102*	-8	-35
	Barley	97	126	90	101*	-7	-25
AL	Wheat	95	138	95	118*	0	-20
	Barley	96	130	94	105*	-2	-25
RO	Wheat	-	105*	-	146*	-	41
	Barley	110	147	-	123*	-	-24

* Plants were harvested when they withered.

結 果

出穂日はラプシート区とアンバー区で淡水条件下では移植後95~97日であり、塩水条件で数日早まった (Table 1)。逆浸透膜区では出穂は、淡水条件のオオムギのみで見られた。淡水条件では逆浸透膜を除いて130日ごろに成熟したが、塩水条件ではそれよりも20~35日早く枯死し、アンバー区のほうがラプシート区より枯死が遅い傾向が見られた。逆浸透膜区では淡水および塩水の両条件下で成熟にいたらず枯死した。枯死は塩水条件でオオムギでは早まったが、コムギでは遅れた。

このように塩水灌漑によって生育が抑制され枯死が早まると同時に、植物体の乾物重は著しく低下した (Fig. 2)。地上部乾物重は淡水区で除塩処理の影響を受け、逆浸透膜区の値はラプシート区とアンバー区のそれよりも著しく小さかった。塩水灌漑によって地上部の乾物重は低下したが、アンバー区の値が最も大きく逆浸透膜区の値が最小であった。穂の乾物重も地上部乾物重と同様に塩水灌漑によって小さくなるとともに淡水区と塩水区で逆浸透膜区の値が小さかった。茎葉部の Na 濃度は淡水区で小さいとともに除塩処理方法の影響は受けなかったものの、塩水区では著しく高くなった (Fig. 2)。塩水区の Na 濃度は除塩処理方法の影響を受け、ラプシート区とアンバー区で逆浸透膜区のおおよそ3倍高かった。

塩水区の茎葉部 Na 濃度と地上部乾物重の関係は、除塩処理方法によって大きく異なった (Fig. 3)。逆浸透膜区では、茎葉部 Na 濃度アンバー区の茎葉部 Na 濃度はラプシート区と同じであったにもかかわらず、その地上部乾物重はラプシート区の2倍であった。

根長密度の土壌層別分布は、淡水区と塩水区の両方とも除塩処理方法によって異なった (Fig. 4)。淡水区と塩水区ともに根長密度はラプシート区とアンバー区では土壌表面から深さ24 cmまでの上層で高く、それより深いところでは小さかった。逆浸透膜ではこれとは反対に根長密度は深さ24 cmまでは小さく、それより下層で大となった。塩水灌漑によって根長密度は小さくなると同時に低下の様相は除塩処理方法で異なっていた。ラプシート区

とアンバー区の低下は上層で認められ、低下程度はラプシート区のほうが大であった。逆浸透膜区では上層の根長密度は塩水灌漑によってほとんど変わらなかったが、下層のそれは大きく低下した。なお、逆浸透膜区で土壌の深いところで根長密度が高かったのは、膜に沿って多くの根がマット状に成長していたためであった (Fig. 5)。

土壌水分の分布は、除塩処理方法で大きく異なった (Fig. 6)。ラプシート区とアンバー区の体積水分率は同様で、土壌上層から、下層部へ急激に増加した。一方、逆浸透膜区では全層にわたって水分率が低く、下層でもその増加はわずかであった。

土壌の Na 含有率は淡水灌漑条件ではわずかであったが、塩水灌漑条件下では高い値であった (Fig. 7)。塩水灌漑条件下でラプシート区とアンバー区で Na 含有率は大きく異なっていた。コムギでは上層の方が大きい傾向があったがオオムギでは層による違いはあまりなかった。塩水灌漑の逆浸透膜区では Na 含有率の値は著しく小さいとともに下層で大となった。

考 察

ラプシート、イオン交換樹脂あるいは逆浸透膜によって除塩処理を行いながらコムギとオオムギを塩水灌漑によって栽培したところ、除塩処理法の違いによって作物の生育が大きく異なった。ラプシートは除塩能力がないので、これを対照として各除塩方法の特徴を考察した。

まず、アンバーライトを用いることによって、除塩効果がもたらされることが分かった。塩水区の枯死時期が対照 (ラプシート区) より遅く (Table 1)、地上部乾物重も大であった (Fig. 3) からである。ただし、最終的な土壌および茎葉部の Na 濃度は、対照区と同程度であった (Fig. 2, Fig. 7)。したがって、アンバーライト区では、当初、Na の吸着・除去によってその根域への蓄積が遅れ、その間に成長が進んだものと考えられる。しかし、その後は、その吸着容量を超えた Na が土壌に侵入し、最終的には Na が土壌および作物に過剰蓄積することによって作物が枯死したと推測された。本研究ではアンバーライトの量は土壌の約7%であった。したがって、この

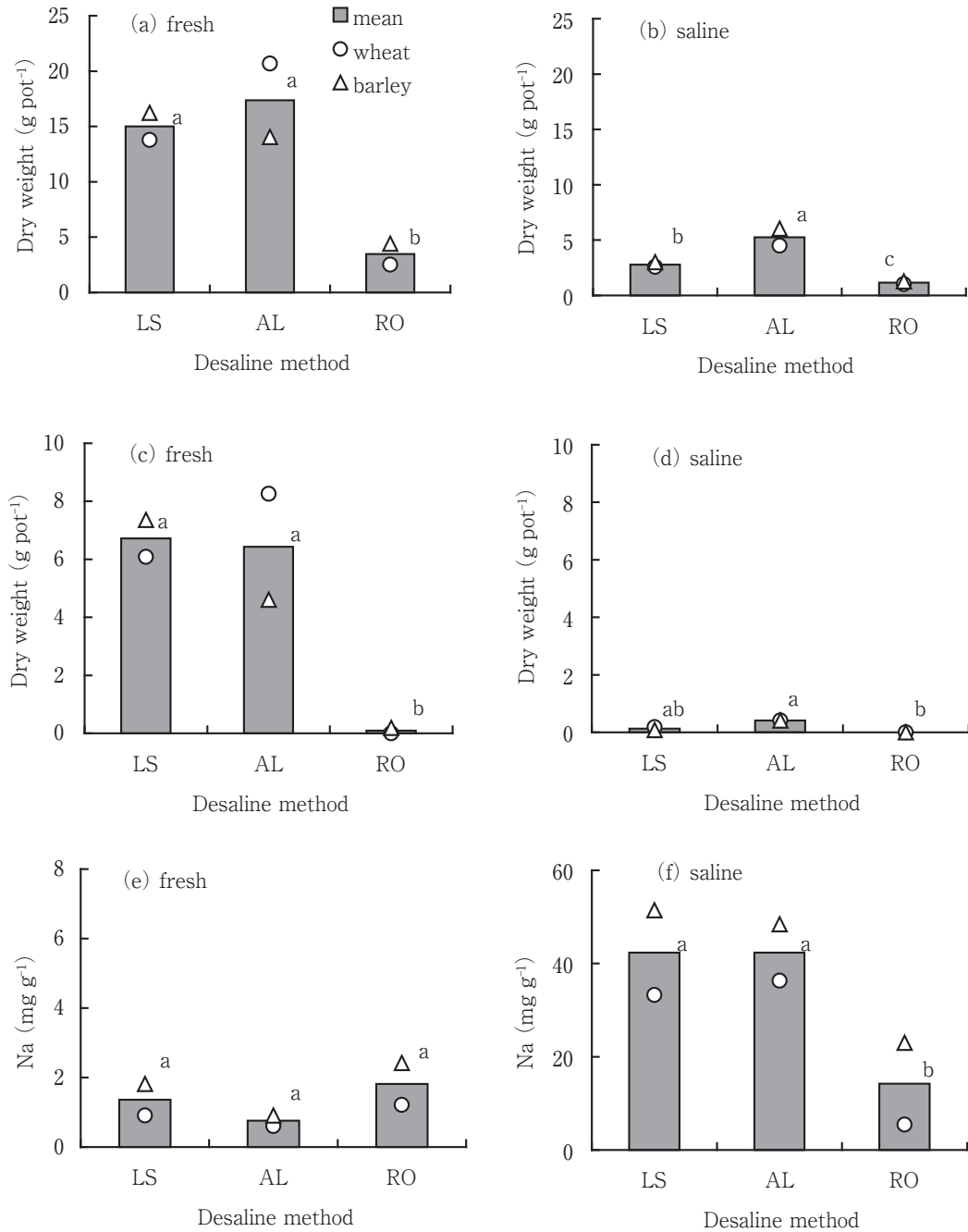


Fig. 2 Effect of three desalination methods on shoot (a, b) and spike (c, d) dry weight and Na concentration of vegetative part (e, f) under fresh and saline water irrigation in wheat and barley.

LS, AL and RO indicate desalination methods: lovesheet, amberlite and reverse osmosis membrane. Mean values with the same characters do not differ significantly by Tukey's HD test at $P < 0.05$.

量ではコムギとオオムギを塩水灌漑によって栽培するには不十分であったと考えられた。なお、淡水灌漑の地上部乾物重はアンバー区とラブシート区で大差なかったので、アンバーライトそのものは作物の成長に影響を与えないと考えられた。

次に、逆浸透膜による除塩処理にも効果があることが分かった。塩水灌漑を行なった場合、茎葉部ならびに土

壤のNa濃度が、対照（ラブシート区）はもちろん、アンバーライトによる除塩処理と比べても低かった (Fig. 2, Fig. 7) からである。しかし、逆浸透膜を用いた区は、淡水区のおオムギを除けば、いずれも出穂に至らなかった。また、コムギ、オオムギとも、その地上部乾物重は対照区、アンバーライト区を著しく下回った (Fig. 2)。また、それと同時に、土壌水分率が著しく低下した (Fig.

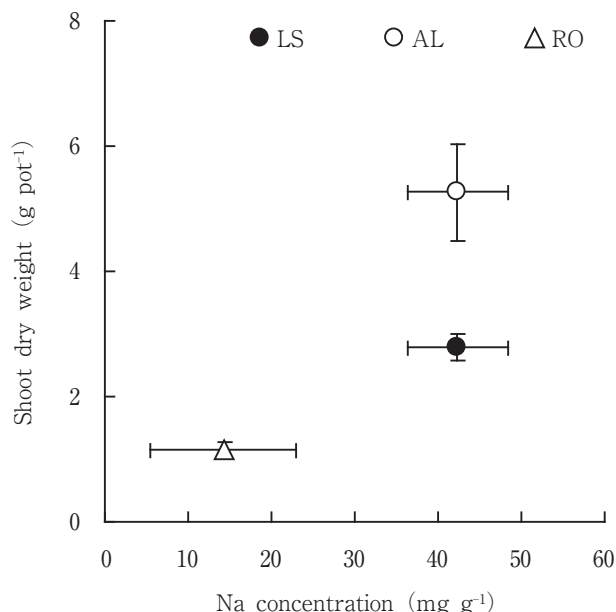


Fig. 3 Relationship between Na concentration of vegetative part and shoot dry weight using three desaline methods under saline water irrigation in wheat and barley.

LS, AL and RO indicate desaline methods: lovesheet, amberlite and reverse osmosis membrane. Values are the means of wheat and barley, and their ranges.

6). さらに、作物の根が膜に張り付くように伸長しており (Fig. 5), 膜の近傍で吸水していたことがうかがえた。したがって、逆浸透膜区では土壤に水が移動せず、作物は十分な吸水ができなかったため、乾燥によって枯死したと考えられた。逆浸透膜を水が通過するためには 0.4 MPa ~ 4 MPa の圧力が必要である¹²⁾。今回の実験では、これだけの圧力差が生じる条件が揃わなかったと考えられる。

以上のように、根域にイオン交換樹脂および逆浸透膜を埋設して塩水灌漑を行う方法は、それぞれに優れた点および解決すべき問題が見出された。まず、イオン交換樹脂では、一定期間の塩除去で乾物生産を対照より増やすことができた。しかし、今回とった方法では、この塩水処理能力に限界があることが分かった。この能力を高めるにはイオン交換樹脂の投入量を増やすか、イオン吸着能力の高い樹脂を使う必要があると考えられた。これに対して、逆浸透膜は塩を根圏土壤に塩を侵入させない効果はあった。しかし、同時に水の移動を阻害したため水ストレスが生じた。水が移動しなかったのは水が膜を透過するために必要な圧力が形成されなかったためである。今回のような栽培条件で生じる低圧差でも機能する逆浸透膜があれば、逆浸透膜法による塩水灌漑も可能であろう。



Fig. 5 Root mat at the bottom of a pot in reverse osmosis membrane (RO) plot.

Root mat was observed inside pipe when white circular membrane was peeled off.

要 約

塩水を農業用水として利用し淡水資源を節約するために、根域に除塩処理を施す塩水灌漑法を検討した。内径 56 mm, 長さ 40 cm の塩ビ製のポットを用いた。ポットの底部には除塩効果があるアンバーライト (イオン交換樹脂) および逆浸透膜を設置する区と除塩効果がないラプシート (不織布) を設置する対照区を設けた。そしてポットに土壤を詰めコムギとオオムギを移植し、ポットの底から淡水および塩水で灌漑した。脱塩処理および灌漑に対する反応は 2 作物で同じであった。対照区では塩水灌漑によって生育が著しく抑制された。アンバーライト区で作物の生育は、淡水灌漑で対照区と変わらなかった。塩水灌漑ではアンバーライトによって乾物生産が対照区より向上したが、最終的な茎葉部と土壤のナトリウム含有率は対照区と変わらなかった。逆浸透膜は茎葉部と土壤のナトリウム濃度を低下させた。しかし逆浸透膜によって作物の生育は、淡水および塩水の二つの灌漑条件で対照区より著しく小さくなった。アンバーライトと逆浸透膜はともに除塩効果があった。しかし、アンバーライトは塩水処理能力の限界があること、逆浸透膜は水の移動が阻害されることが解決しなければならない課題であることが分かった。

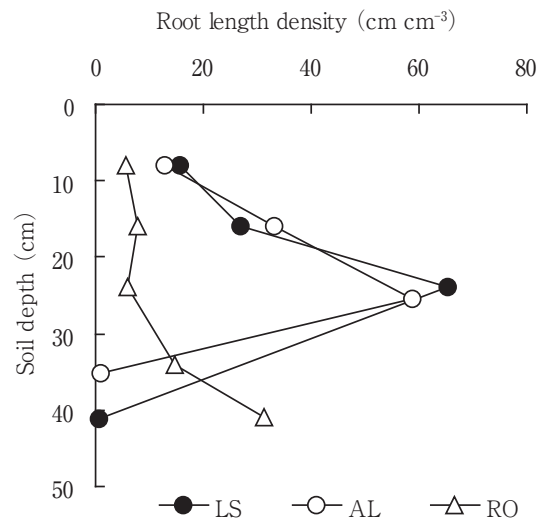
謝 辞

本研究は、科学研究費補助金「萌芽研究」課題番号 18658006 による。ここに謝意を表す。

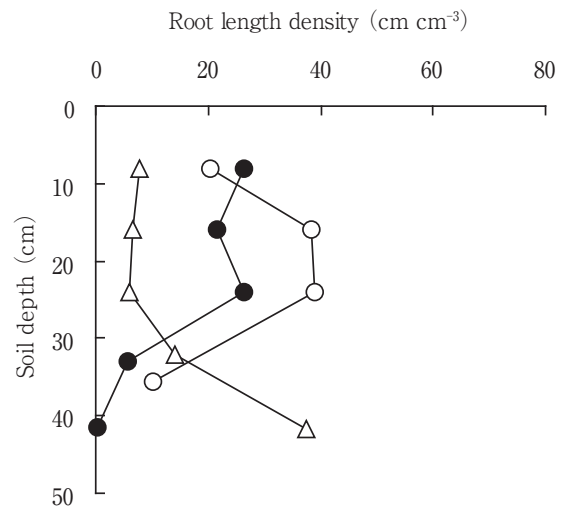
引用文献

- 1) Ayars, J. E., D. A. Bucks, F. R. Lamm, F. S. Nakayama: Introduction. *In* Microirrigation for Crop Production (Lamm, F. R. *et al.* eds.), pp. 1-26, Elsevier, Amsterdam (2007)
- 2) Choudhary, O. P., B. S. Ghuman, A. S. Josan, M. S. Bajwa: Effect of alternating irrigation with sodic and non-sodic waters on soil properties and sunflower yield. *Agric. Water Manag.*, *85*, 151-156 (2006)
- 3) Farooq, A., N. Kobayashi, A. Wahid, O. Ito, and S. M. A. Basra: Strategies for producing more rice with less water. *Adv. Agron.*, *101*, 351-388 (2009)
- 4) 今村奈良臣・八木宏典・水谷正一・坪井伸広: 水資源の枯渇と配分—開発から管理へ. pp. 1-271, 農山漁村文化協会, 東京 (1996)
- 5) Karlberg, L., J. Rockstrom, J. G. Annandale, J. M. Steyn: Low-cost drip irrigation—A suitable technology for southern Africa? An example with tomatoes using saline irrigation water. *Agric. Water Manag.*, *89*, 59-70 (2007)
- 6) Kimura, K., S. Kikuchi, and S. Yamasaki: Measurement of root length and width using image analysis system. *In* Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment. (Ando, T. *et al.* eds.), pp. 683-684, Kluwer Academic Publishers, (1997)
- 7) Munns, R.: Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.* *25*, 239-250 (2002)
- 8) Pitman, M. G. and A. Lauchli: Global impact of salinity and agricultural ecosystems. *In* Salinity: Environment-Plants-

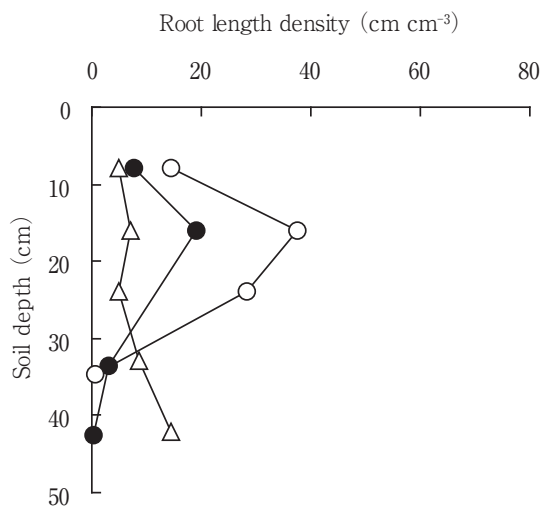
(a) fresh, wheat



(b) fresh, barley



(c) saline, wheat



(d) saline, barley

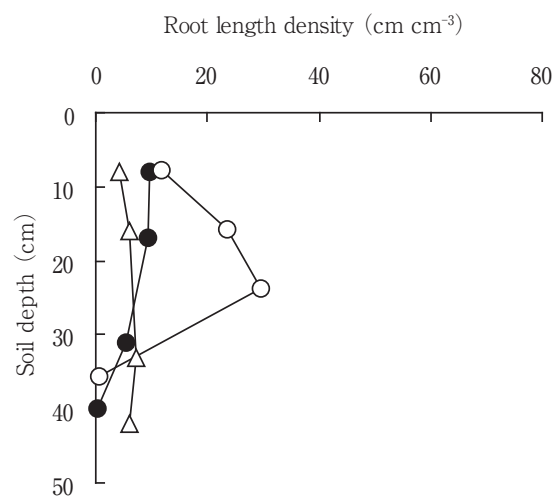


Fig. 4 Effect of three desalination methods on root length density under fresh and saline water irrigation in wheat and barley. LS, AL and RO indicate desalination methods: lovesheet, amberlite and reverse osmosis membrane. Values are single measurement.

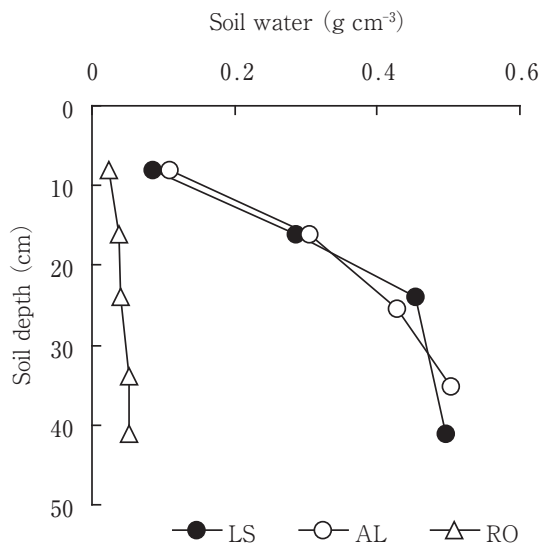
Molecules (Lauchli, A. and U. Luttge eds.), pp3-20, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2002)

- 9) サウジアラビア海洋性沙漠開発プロジェクト 緑化・生物生産グループ：サウジアラビアの沙漠地域に持続可能な緑化システムを構築するプロジェクト—凍結濃縮排水処理技術と深根苗移植栽培技術の開発と利用—, 根の研究16, 13-16 (2007)
- 10) Schaan, C. M., D. A. Devitt, R. L. Morris and L. Clark :

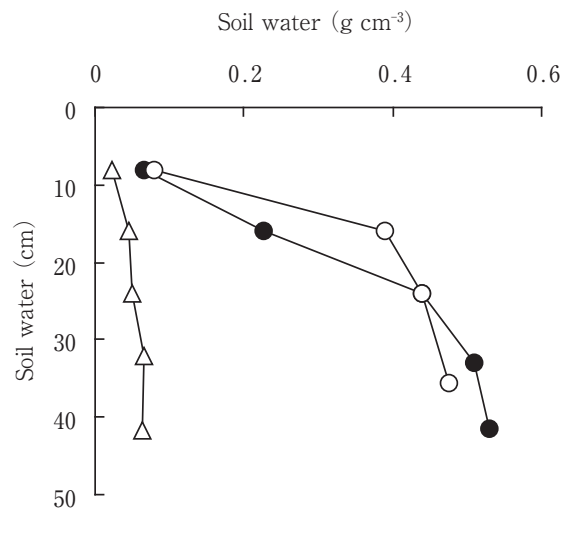
Cyclic irrigation of turfgrass using a shallow saline aquifer. Agron. J. 95, 660-667 (2003)

- 11) 筑波大学水文科学研究室：水文科学. 杉田倫明・田中 正 (編), pp. 1-275, 共立出版, 東京 (2009)
- 12) 浄水膜編集委員会：浄水膜. pp. 1-235, 技報堂出版, 東京 (2003)

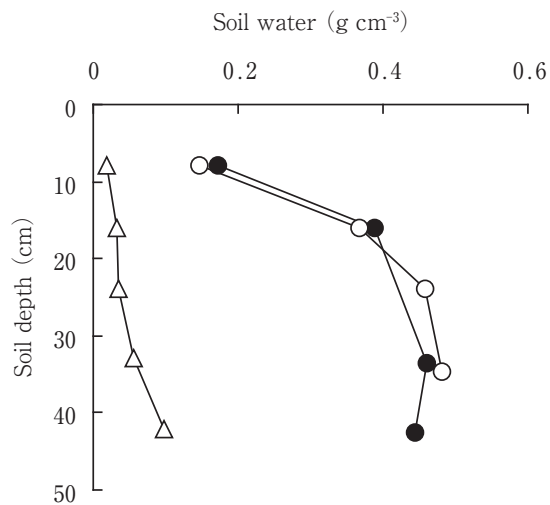
(a) fresh, wheat



(b) fresh, barley



(c) saline, wheat



(d) saline, barley

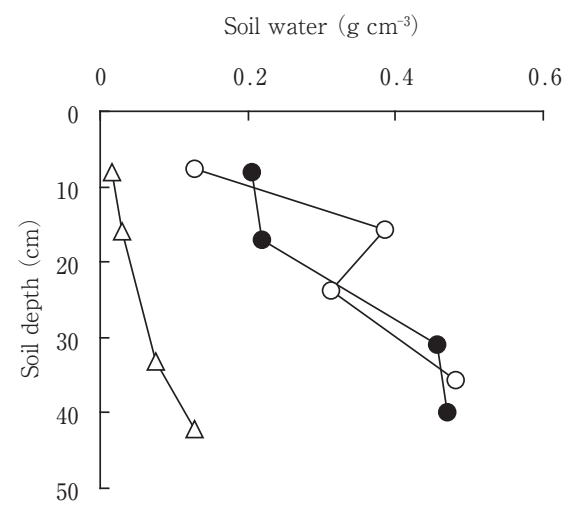


Fig. 6 Effect of three desalinate methods on soil water content under fresh and saline water irrigation in wheat and barley. LS, AL and RO indicate desalinate methods: lovesheet, amberlite and reverse osmosis membrane. Values are single measurement.

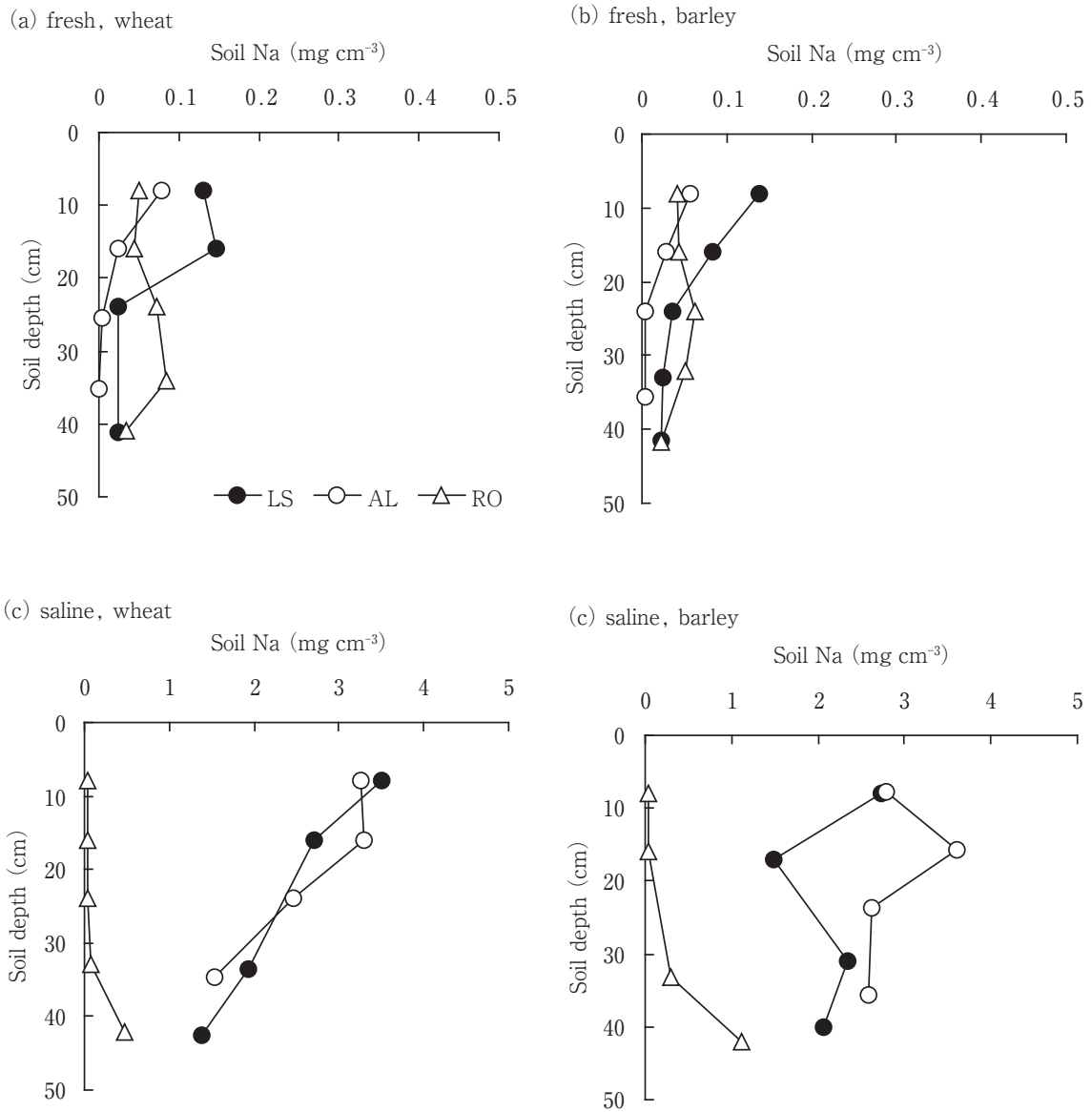


Fig. 7 Effect of three desalination methods on soil Na concentration under fresh and saline water irrigation in wheat and barley. LS, AL and RO indicate desalination methods: lovesheet, amberlite and reverse osmosis membrane. Values are single measurement.