高電気伝導度養液土耕における灌水頻度のコマツナへの影響

有水賢吾^{1,2}・澁澤 栄³・岩崎泰永^{4*}

¹ 東京農工大学大学院連合農学研究科 183–8509 東京都府中市幸町 3–5–8

² 森林研究・整備機構森林総合研究所 305–8687 茨城県つくば市松の里 1

³ 東京農工大学大学院農学研究院 183–8509 東京都府中市幸町 3–5–8

⁴ 農業・食品産業技術総合研究機構野菜花き研究所 305–8666 茨城県つくば市観音台 3–1–1

Effects of Irrigation Frequency on Komatsuna under High Electrical Conductivity Fertigation

Kengo USUI^{1,2}, Sakae SHIBUSAWA³ and Yasunaga IWASAKI^{4*}

¹United Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology,
3–5–8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183–8509, Japan

²Forest Research and Management Organization Forestry and Forest Products Research Institute,
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305–8687, Japan

³Tokyo University of Agriculture and Technology, 3–5–8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183–8509, Japan

⁴NARO Institute of Vegetable and Floriculture Science, 3–1–1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305–8666, Japan

Abstract

In order to utilize high EC water for fertigation, the effects of irrigation frequency, fertilizer concentration, salinity for Komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) were investigated. We observed significant interactions between fertilizer concentration and salinity on the number of leaves and shoot fresh weight, and between salinity and irrigation frequency on root dry weight. We found that low fertilizer concentration increased leaf length and shoot fresh weight at the beginning of cultivation, whereas leaf length, shoot fresh weight, shoot dry weight, root dry weight decreased at the end of cultivation. Additionally, we found that salinity decreased leaf length, number of leaves, shoot fresh weight, leaf area, shoot dry weight, and root dry weight. High irrigation frequency increased leaf length and root dry weight. The average soil volumetric moisture content increased after adding salt in the high-fertilizer concentration plot. High fertilizer concentration increased the average soil moisture content on the low-frequency irrigation plot. Overall, the average soil volumetric moisture content was higher in the high-frequency irrigation plot than in the low-frequency irrigation plot. It is considered that the root area can be maintained in the wet state, which contributes to water-efficient cultivation. Growth analysis showed no significant interactions among all the parameters studied, but showed a clear trend in the relative growth rate (RGR), net assimilation rate (NAR), and leaf area rate (LAR) in each growth period. There were significant correlations between RGR and NAR and between RGR and LAR. Correlation between RGR and NAR was higher than that between RGR and LAR. It suggested that the changes in dry weight yield were due to the changes in photosynthetic rate.

2017 年 8 月 4 日受付

2017 年 11 月 30 日受理

*Corresponding author: Yasunaga Iwasaki
(iwasakiy@affrc.go.jp)

Keywords: growth analysis, komatsuna, salinity, soil moisture content, water management

緒 言

自然環境の保全が重要視される現在、水利用の多くを占める農業に対する節水需要が高まっている¹⁾。多くの場合農地においては電気伝導度 (EC) の低い水が必要とされているが、世界的には低 EC 水にアクセスできる地域は多くはなく、高 EC 水の利用が急務である。特に NaCl などの塩類を含む高 EC の水を利用した場合には生育障害が容易に発生する。地球規模で水利用効率の改善が求められている現在、これまで利用が困難であった高 EC 水を灌水に利用することで、灌漑用水が容易に確保できない地域でも灌水を行うことが可能である。加えて、高 EC 水による塩類ストレスを付加することによって生長を促すという報告もあり²⁻⁴⁾、高 EC 下水再生水の灌水利用も検討されている⁵⁾。

そこで、農業における水利用問題の解決と高品質作物生産に向けて本研究では高 EC 水の灌水への適用を検討する。

高 EC 水によって生育障害が発生する理由は主に浸透圧ストレスと作物への塩類吸収によるものであり⁶⁾、浸透ストレスによって根への水・養分移動が阻害されることで生育障害が発生する。そこで高 EC による浸透ポテンシャルの影響を軽減するために、本研究では灌水回数を変化させ土壤の水ポテンシャルを低く保つことで作物への影響を低減させた。

Silber らは根域における一定の最適含水率を維持するために連続灌漑間の時間間隔を短縮することにより、栄養分濃度の変動を減少させることができ、これにより植物への利用率を高め、根域の下での浸出を減少させることができるとしており⁷⁾、多くの研究において高頻度灌水による作物生育向上効果が確認されている⁸⁻¹²⁾。

そこで本研究では高 EC 水の灌水利用のために植物に対する害に関する栽培試験の供試作物であり¹³⁾、栽培期間が短く浸透ポテンシャルの影響を把握しやすいコマツナを用いて肥料および塩類によって EC を上昇させた水を用いて灌水頻度を変化させることによる作物生育に対する基礎的な知見を得ることを目的とした。

材料および方法

1. 栽培条件

国立研究開発法人野菜花き研究所 (茨城県つくば市) 内のガラスハウスを用いて試験を実施した。供試作物はコマ

ツナ (サカタのタネ) を使用し、栽培期間は 2017 年 5 月 14 日から 2017 年 6 月 14 日とした。空調制御は実施しなかった。栽培期間中のハウス内の最高気温は 40.8℃、最低気温は 13.4℃、平均気温は 23.6℃であった。

2017 年 5 月 14 日に 128 穴セルトレーに満たした培土 (たね培土 1 号, スミリン農産工業株式会社) に播種し、初期成育をそろえるために人工光閉鎖型苗生産装置苗テラス (三菱樹脂アグリドリーム株式会社) で気温明期 25℃ / 暗期 18℃、明期時間 16 h、CO₂ 濃度 1000 ppm で育苗した。5 月 23 日にあらかじめ土壌を 5 kg 充填しておいたワグネルポット (1/5000 a) に各ポット 3 株ずつ定植した。土壌吸着および透水の時間遅れの影響を排除するため、土壌は礫まじり砂 (礫分 5.2%, 砂分 94.7%, 細粒分 0.1%) を使用した。定植時に各ポット 250 ml ずつ水道水を灌水した。施肥および灌水は養液を用いて行った。養液灌水はドリッパ (PCJ-LCNL ドリッパ 2L/H, ネタフイム) より灌水チューブ経由でポット中心に対して行った。

塩類および肥料濃度は養液にて調整した。OAT アグリオ A 処方 1/2 単位および 1/4 単位に対し塩類 (NaCl) 無添加および 5000 ppm 添加区を設定した。塩類濃度は Shaw の示す収量半減 EC を目標とした¹⁴⁾。灌水回数は 1 回区と 5 回区とし、1 回区は 1 日分の灌水量を毎日朝 6 時に、5 回区は 1 日の灌水量の 1/5 量を朝 6 時より 2 時間おきに分けて自動灌水した。各試験区は Table 1 のとおり設定し、1 試験区あたり 18 個体とした。

定植後から 5 月 25 日までは水道水を毎日 1 回 200 ml ずつ灌水し、その後 5 月 26 日より各試験区で養液灌水を行った。1 日の灌水量は天候と成長量を考慮し 6 月 2 日まで 200 ml、6 月 3 日に 300 ml、6 月 4 日後 400 ml とした。また、栽培期間中各試験区 1 ポットずつ排水量および EC を計測し

Table 1 Fertilizer concentration, salinity and irrigation frequency of each treatment.

Treatment	Fertilizer concentration	Salinity (ppm)	Irrigation frequency (d ⁻¹)
1	High	0	1
2	High	0	5
3	High	5000	1
4	High	5000	5
5	Low	0	1
6	Low	0	5
7	Low	5000	1
8	Low	5000	5

た。排水量はワグネルポット下部穴からの排水量をそれぞれタンクに貯め、一定期間毎に質量を測定した。この際に排水 EC を電気伝導率計 (CM-31P, 東亜ディーケーケー) にて計測した。

2. 土壌水分の計測

各試験区 2 ポットずつドリッパ直下深さ 10 cm の位置に水平方向に土壌水分センサ (EC-5, Decagon Devices) を設置した。土壌水分は 5 月 23 日から 6 月 14 日まで 5 分間隔で計測した。各試験区 1 ポットずつポット中心部深さ 10 cm にポーラスカップ受感部および圧力計 (AP-C30, キーエンス) からなるテンシオメータを設置し、1 分ごとに土壌水分ポテンシャルを観測した。

3. 収穫調査

各試験区は 6 ポットずつとし、成長の具合を見て 6 月 4 日、6 月 8 日および 6 月 14 日にそれぞれ 2 ポットずつ解体調査を実施し地上部新鮮重、地上部乾物重、地下部乾物重、葉面積、草丈、葉数を測定した。葉面積は葉面積計 (LI-3100, LI-COR) を用いて計測した。乾物重は通風乾燥 (80 °C, 72 h) により求めた。乾燥には恒温器 (JMB-28DPN-S, カトー) を、計測には電子天秤 (FX-3000iWP, エーアンドデイ) を用いた。

4. 成長解析および検定

相対成長速度 (RGR, $\text{g g}^{-1}\text{d}^{-1}$), 純同化率 (NAR, $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) および葉面積比 (LAR, $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) を以下の式によって算出した。

$$\begin{aligned} \text{RGR} &= \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \\ \text{NAR} &= \frac{(\ln W_2 - \ln W_1)(W_2 - W_1)}{(t_2 - t_1)(A_2 - A_1)} \\ \text{LAR} &= \frac{A_2 - A_1}{W_2 - W_1} \end{aligned}$$

ここで、W は乾物重 (g), t は日数 (d), A は葉面積 (m^2) を、添え字は各計測時を表している。各試験区の測定値について解体調査ごとに三元配置分散分析を行った。統計解析には R 3.3.1 を用いた¹⁵⁾。

結 果

1. 肥料濃度、塩類および灌水頻度が及ぼす影響

Table 2 にそれぞれの調査日における各試験区の平均地上部新鮮重、地上部乾物重、地下部乾物重、葉面積、草丈、葉枚数、生存株数、枯死率を示す。Table 2 のうち 6 月 8 日の草丈および葉面積が Bartlett 検定において 1 % で有意であったため Kruskal-Wallis 検定を、他については三元配置分散分析を行った。三元配置分散分析の結果 6 月 8 日

の葉数、地上部新鮮重、6 月 14 日の地上部新鮮重において肥料濃度と塩類の間に有意な交互作用があった。主効果については、塩類は全期間を通じて有意であったものの、肥料濃度は 6 月 4 日の地上部新鮮重、葉面積、6 月 8 日の地下部乾物重、6 月 14 日の草丈、地上部新鮮重、地上部乾物重、地下部乾物重において、灌水頻度は 6 月 4 日の草丈、6 月 14 日の地下部乾物重においてのみ有意な効果が確認できた。主効果の傾向として、肥料濃度について 6 月 8 日までは低肥料濃度区で草丈と地上部新鮮重が大きくなる傾向にあったのに対して、6 月 14 日では高肥料濃度区で草丈、地上部新鮮重、地上部乾物重、地下部乾物重が大きくなる傾向があった。塩類について全期間を通して無添加区で草丈、葉枚数、地上部新鮮重、葉面積、地上部乾物重、地下部乾物重が大きくなる傾向にあった。灌水頻度については高頻度灌水区で草丈と地下部乾物重が大きくなる傾向にあった。

三元配置分散分析の結果交互作用が確認できたものについては Tukey-Kramer 検定により多重比較を行った。葉数については肥料濃度が増加すると塩類添加・無添加の間に差が確認でき、塩類無添加の方が葉数は多かった。地上部新鮮重も同様に肥料濃度増加によって塩類添加・無添加の間に顕著な差が観測でき、塩類無添加区が重くなっていた。この傾向は 6 月 8 日および 6 月 14 日に共通して確認できた。地下部乾物重については塩類無添加の場合には灌水頻度増加によって地下部乾物重が増加傾向にあったのに対し、塩類添加区ではこれらの傾向は見られず、灌水頻度増加による有意な差は観測できなかった。Kruskal-Wallis 検定を実施した項目については草丈、葉面積両者において 1 % 有意であったが、Steel-Dwass 検定による多重比較を実施したところでの試験区間においても有意差は確認できなかった。

2. 土壌水分推移

栽培期間中の各試験区の土壌水分推移を Fig. 1 に示す。Fig. 1a は 1, 2, 3, 5 区を、Fig. 1b は 1, 2, 4, 6 区の推移をそれぞれ示している。高肥料濃度区では塩分添加によって平均体積含水率が増加し、低頻度灌水区では高肥料濃度区の方が平均含水率が高かった。全体を通して低頻度灌水区よりも高頻度灌水区の方が平均体積含水率が高く維持されており、根域を湿潤状態で維持できていると考えられる。排水量および排液 EC の推移を Fig. 2 に示す。排水量は明確な傾向を観察できなかった。排液 EC については塩類添加区および塩類無添加区でそれぞれ同様の傾向を示した (Fig. 2)。

3. 成長解析

各試験区の RGR, NAR, LAR を Table 3 に示す。5 月 23 日 - 6 月 4 日の NAR (1 %), LAR (5 %), 6 月 4 日 - 6 月 8 日の RGR (1 %), LAR (5 %), 6 月 8 日 - 6 月 14 日の LAR

Table 2 Effect of fertilizer concentration, salinity and irrigation frequency on growth of Komatsuna plant.

	Treatment	Leaf length (mm)	Num. of leaves	Shoot fresh weight (g)	Leaf area (m ²)	Shoot dry weight (g)	Root dry weight (g)	Num. of alive plants	Percentage of dead plants (%)
May 23	—	—	—	0.50	0.0012	0.05	—	10	0
Jun 4	1	224	5	7.19	0.0161	0.68	0.06	6	0
	2	237	5	8.42	0.0181	0.72	0.05	6	0
	3	173	5	4.40	0.0115	0.42	0.04	6	0
	4	189	5	5.09	0.0131	0.46	0.05	6	0
	5	233	6	8.93	0.0218	0.77	0.05	6	0
	6	243	6	8.64	0.0233	0.80	0.07	6	0
	7	168	5	5.16	0.0121	0.41	0.03	5	16.7
	8	192	5	6.63	0.0153	0.47	0.04	3	50.0
Significance ^z	FC ^y	ns	ns	*	**	ns	ns		
	Salinity	**	**	**	**	**	**		
	If ^x	*	ns	ns	ns	ns	ns		
	FC×Salinity	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	FC×IF	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	Salinity×IF	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	FC×Salinity×IF	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
Jun 8	1	337	8 a ^w	25.60 ab	0.0546	1.61	0.12 ab	6	0
	2	345	8 a	30.78 b	0.0625	1.82	0.14 ac	6	0
	3	264	6 b	13.69 ac	0.0302	1.05	0.08 ab	4	33.3
	4	230	6 b	12.44 c	0.0271	0.95	0.06 b	6	0
	5	305	7 ab	20.97 abc	0.0477	1.46	0.12 ac	6	0
	6	325	8 a	24.63 ab	0.0517	1.63	0.18 c	6	0
	7	229	7 ab	15.65 ac	0.0321	1.18	0.10 ab	6	0
	8	260	7 ab	17.61 ac	0.0361	1.20	0.10 ab	6	0
Significance	FC	—	ns	ns	—	ns	*		
	Salinity	—	**	**	—	**	**		
	IF	—	ns	ns	—	ns	ns		
	FC×Salinity	—	**	*	—	ns	ns		
	FC×IF	—	ns	ns	—	ns	ns		
	Salinity×IF	—	ns	ns	—	ns	*		
	FC×Salinity×IF	—	ns	ns	—	ns	ns		
Jun 14	1	410	10	58.33 ab	0.0964	3.79	0.12	6	0
	2	424	10	62.68 b	0.1038	4.19	0.27	6	0
	3	277	8	27.80 c	0.0516	2.09	0.14	6	0
	4	295	8	30.86 c	0.0603	2.39	0.18	5	16.7
	5	367	10	38.52 ac	0.0792	2.91	0.26	6	0
	6	367	9	38.72 ac	0.0793	3.00	0.40	6	0
	7	268	7	21.79 c	0.0430	1.62	0.11	4	33.3
	8	275	8	28.53 c	0.0558	2.24	0.22	6	0
Significance	FC	*	ns	**	ns	*	*		
	Salinity	**	**	**	**	**	**		
	IF	ns	ns	ns	ns	ns	**		
	FC×Salinity	ns	ns	*	ns	ns	ns		
	FC×IF	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	Salinity×IF	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	FC×Salinity×IF	ns	ns	ns	ns	ns	ns		

^z *, ** indicate significant at P < 0.05 and P < 0.01, respectively. ns indicates no significant.

^y Fertilizer concentration

^x Irrigation frequency

^w Different letters indicate significant differences at P < 0.05

Fig. 1 Soil moisture changes in (a) Treatment 1, 2, 3, 5 (b) Treatment 1, 2, 4, 6. One timestep implies 5 minutes.

Fig. 2 Temporal changes in (a) amount of drainage from pots in treatment 1-4, (b) treatment 5-8 and (c) electrical conductivity of drainage in treatment 1-4, (d) treatment 5-8.

(1%) においては Bartlett 検定が有意であったため、Kruskal-Wallis 検定および Steel-Dwass 検定を行った。

三元配置分散分析の結果試験区間には交互作用は観測できなかった。主効果については 6 月 8 日 - 6 月 14 日の RGR 以外において塩類の、6 月 8 日 - 6 月 14 日の NAR について肥料濃度の効果が有意に確認できた (Table 3)。それぞれの主効果の傾向として、塩類では RGR および 6 月 8 日 - 6 月 14 日の NAR は塩類無添加区の値が高い傾向にあったが、6 月 4 日 - 6 月 8 日の NAR は塩類添加区の値が高い傾向にあった。肥料濃度では高肥料濃度の値が高い傾向にあった。

Kruskal-Wallis 検定を実施した項目については 5 月 23 日 - 6 月 4 日の NAR および LAR (1%)、6 月 4 日 - 6 月 8 日の LAR (1%)、6 月 8 日 - 6 月 14 日の LAR (1%) については有意差が確認できたが、Steel-Dwass 検定による多重比較の結果どの試験区間でも有意差は確認できなかった。RGR は試験区ごとに特徴的な傾向は観測できないものの NAR については塩類添加によって 6 月 4 日 - 6 月 8 日の間で上昇、その後低下した。LAR は反対に塩類添加によって 6 月 4 日 - 6 月 8 日の間で低下、その後上昇した。RGR の変動に対する NAR と LAR の関係を Fig. 3 に示す。ピアソン相関におけ

Fig. 3 Relationship between RGR and NAR (a), and RGR and LAR (b).
r implies correlation coefficient of the parameters.

る無相関検定の結果 RGR と NAR, LAR の間にはそれぞれ有意水準 1 % および 5 % で有意な相関が認められた¹⁶⁾。

考 察

肥料については茨城県の慣行の施肥設計が元肥 12–12–12 kg 10a⁻¹ であるのに対して高濃度肥料区で 41–25–53 kg 10a⁻¹, 低濃度肥料区で 21–12–26 kg 10a⁻¹ 相当の肥料を投入している。したがって、本試験では慣行から慣行の 2 倍程度の肥料を投入しており、養液土耕においては養分利用効率の上昇が報告されているため肥料分の不足はないと考えられる。

本研究では塩類添加による成長促進効果は観測できなかった。榊田らはホウレンソウにおいて NaCl を添加した際に 200 ppm において最も生育が良好であると報告している²⁾。清水らは養液栽培に NaCl 添加による高品質化を試験しているが、大塚 A 処方を使用した場合に 200 ppm にて食味試験を含めた品質向上に及ぼす効果が高いとしている。同時に地上部中および地下部重に関しては 100 ppm で効果が出ているとしている¹⁷⁾。本試験ではさらに高濃度の養液を生育期間を通じて灌水しており、継続的な塩類ストレスが生育に影響を及ぼしている可能性がある。留森はホウレンソウ 13 品種にて希釈海水（全塩類濃度 0, 1000, 2000, 5000 ppm）を灌水した際の影響を調査しており、1000 ppm 区の生葉重は有意に高く、5000 ppm 区では塩分無添加区に対し 50 % と低かったと報告している¹⁸⁾。本試験では塩類添加区の生体重は塩類無添加区に比べて 60 % となっており比較的一致した傾向にあった。江波戸らは高塩類堆肥を用いたコマツナ連作栽培への影響を調査し、1–3 作目については高塩類堆肥区の方が地上部乾物重が多い傾向にあると報告している¹⁹⁾。

また、灌水回数についても先行研究では高頻度灌水によって収量増加があるとされている。吉田らはトマトにおける灌水頻度および肥料濃度の影響を調査しており、マトリックポテンシ

ャル –6.3 kPa 以下で 50 ml 灌水を行うことで草勢維持および収量が増加したと報告している⁸⁾。Cook らは同様に、窒素施肥の頻度増加によって大果および全体の収量が増加したと報告している¹¹⁾。湖東らはアルファルファについて灌水頻度が蒸散速度や成長に及ぼす影響について気象因子も含め調査しており、特に高温期において灌水頻度が蒸散速度に与える差が大きく、高頻度灌水区は低頻度灌水区より 10 % 収量が高いことを報告している¹²⁾。本試験では 6 月 4 日および 6 月 14 日の草丈および地下部乾物重においてこれらの傾向が観測できたが、6 月 8 日の塩類添加区における地下部乾物重は、低頻度灌水と同等もしくは低頻度灌水より低い値であった。灌水頻度の増加による生育促進の要因として、吉田らは根周辺の水分移動による養分吸収促進、根表面の肥料成分濃度の上昇を、安らは根の単位表面積に供給される酸素分子あるいは無機イオン量の増大を挙げている^{8, 20)}。池田によると根域の水分移動が少なくなった場合に根表面に低無機要素濃度層が形成されるとの報告があり²¹⁾、根の周囲での頻繁な水移動によって生育促進効果が見込まれる。本研究では高灌水頻度での草丈および地下部乾物重の増加が確認できたが、これは根表面の低無機要素濃度層の破壊が理由の一つとして考えられる。また、灌水頻度増加による根への水分供給回数の増加により、根表面の無機イオン接触回数も増加していると考えられ、高灌水頻度での草丈および地下部乾物重増加の一因になっていると推察される。一方、吉田らが挙げた根表面の肥料濃度上昇については一定濃度の培養液を灌水していることから発生していないと考えられ⁸⁾、これが先行研究に比べて灌水頻度の効果が明確に出なかった原因の一つと考えられる。

本研究では灌水頻度が高いと平均体積含水率が高くなる傾向にあった。荒木は灌水開始土壌圧力と 1 回あたりの灌水量的変化によって湿潤土層の深さに及ぼす影響について報告しており、灌水量が少ない場合水分が地表付近に分布し、灌水量が多い場合より下層まで分布すると報告している²²⁾。

Table 3 Results of RGR, NAR and LAR in each treatment.

Treatment		RGR ($\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	NAR ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	LAR ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)
May23–Jun4	1	0.22	10.2	0.022
	2	0.23	9.8	0.023
	3	0.18	7.1	0.025
	4	0.19	7.4	0.026
	5	0.23	8.6	0.027
	6	0.24	8.8	0.027
	7	0.18	6.7	0.027
	8	0.19	6.2	0.033
Significance ^z	FC ^y	ns	—	—
	Salinity	**	—	—
	If ^x	ns	—	—
	FC×Salinity	ns	—	—
	FC×IF	ns	—	—
	Salinity×IF	ns	—	—
	FC×Salinity ×IF	ns	—	—
Jun4–Jun8	1	0.21	5.3	0.044
	2	0.23	6.2	0.039
	3	0.23	8.4	0.029
	4	0.14	5.3	0.032
	5	0.17	5.0	0.034
	6	0.19	6.2	0.030
	7	0.27	11.2	0.025
	8	0.24	9.1	0.027
Significance	FC	—	ns	—
	Salinity	—	**	—
	If	—	ns	—
	FC×Salinity	—	ns	—
	FC×IF	—	ns	—
	Salinity×IF	—	ns	—
	FC×Salinity ×IF	—	ns	—
Jun8–Jun14	1	0.15	8.3	0.017
	2	0.14	8.7	0.015
	3	0.10	5.4	0.024
	4	0.15	7.4	0.025
	5	0.11	7.5	0.017
	6	0.10	5.1	0.013
	7	0.04	1.8	0.026
	8	0.10	5.4	0.011
Significance	FC	ns	*	—
	Salinity	ns	*	—
	If	ns	ns	—
	FC×Salinity	ns	ns	—
	FC×IF	ns	ns	—
	Salinity×IF	ns	ns	—
	FC×Salinity ×IF	ns	ns	—

^z *, ** indicate significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. ns indicates no significant.

^y Fertilizer concentration

^x Irrigation frequency

吉田らも同様に灌水量が少なく灌水頻度が多いほど水分が地表近くに分布し湿潤域が小さくなる傾向がみられた、と報告している⁸⁾。本研究では灌水量を同一にしていること、ポット下端を自由排水としていることから低頻度多量灌水時に灌水点とポット下端の土壌水ポテンシャル差が大きくなり、きわめて迅速に排水がなされたと考えられる。高頻度少量灌水時にはポテンシャル差が比較的小さいため、ポット内の水分滞留時間が長く、体積含水率が高くなると推察され、これらの報告と一致する結果が得られた。よって、高頻度灌水は下層への浸透を抑制できる点から節水に効果があると考えられる。Fig. 2で示した排水量は日積算日射量と相関傾向がみられ ($r = -0.57$)、日射量の変化によって光合成量が変化することで作物の吸水量が変化していると推測される。また、排水 EC はおおむね変動が少なく推移していたが、塩類添加区が栽培末期に上昇する傾向があった。本試験では作物生育に合わせて過不足なく灌水量を変化させていたが、栽培末期にのみ一時的に灌水量が不足する状態となったため、結果的に EC 濃度の上昇につながったと考えられる。

成長解析の結果を踏まえると、RGRとNAR および LAR の間には有意な正の相関が確認でき、かつ NAR の相関係数は LAR に比べ高かった。よって RGR の変化への寄与は NAR の方が高いと考えられ、本研究における乾物生産速度の変化は主に光合成速度の変化によるものと推察される。これは、塩類ストレスにより NAR が低下するというこれまでの知見と一致する²³⁾。

以上のように、高 EC 水の灌水への利用を目指した基礎的知見として、コマツナにおいて NaCl による塩類ストレス影響が大きく確認できること、灌水頻度増加による地下部乾物重向上効果が見込めるものの塩類ストレスによる影響を抑える程度の影響は見られないことを示した。本試験内では高 EC 水を灌水に用いた際の基礎的知見を得たが、今後はこれらの影響を抑制する手法の提案が必要であると考えられる。

摘 要

高 EC 水の養液土耕への利用のために灌水頻度、肥料濃度、塩類を変化させてコマツナを栽培し影響を把握した。葉数および地上部新鮮重に対し肥料濃度と塩類の交互作用、地下部乾物重について塩類と灌水頻度の交互作用を確認した。主効果の傾向として、肥料濃度について栽培期間初期に低肥料濃度区で草丈と地上部新鮮重が大きくなる傾向にあったのに対して、末期には高肥料濃度区で草丈、地上部新鮮重、地上部乾物重、地下部乾物重が大きくなる傾向があった。塩類について全期間を通して無添加区で草丈、葉枚数、地上部新鮮重、葉面積、地上部乾物重、地下部乾

物重が大きくなる傾向にあった。灌水頻度については高頻度灌水区で草丈と地下部乾物重が大きくなる傾向にあった。栽培期間中の各試験区の土壤水分推移は高肥料濃度区では塩分添加によって平均体積含水率が増加し、低頻度灌水区では高肥料濃度区の方が平均含水率が高かった。全体を通して低頻度灌水区よりも高頻度灌水区の方が平均体積含水率は高く維持されており、根域を湿润状態で維持できていると考えられ、節水に効果があると推察される。成長解析の結果、各期間の RGR, NAR, LAR において交互作用は確認できず、明確な傾向は見られなかった。RGR と NAR, LAR の間にはそれ有意な相関が認められた。よって RGR の変化への寄与は NAR の方が高いと考えられ、本研究における乾物生産速度の変化は主に光合成速度の変化によるものと推察された。

謝 辞

本研究の一部は「平成 29 年度国際共同研究パイロット委託事業（イスラエルとの共同公募に基づく共同研究分野）」「水質の異なる再生水の農業利用における処理、利用および影響に関する研究」において実施した。本研究を進めるに当たり、農業・食品産業技術総合研究機構野菜生産システム研究領域の皆様情報提供や助言を頂いた。ここに記して関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 1) FAO. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW). -Managing systems at risk. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. 1-285. 2011.
- 2) 榊田正治, 野村眞史. 水耕培養液への NaCl 添加による人工光下ホウレンソウの生育促進. 植物工場学会誌. 9: 29-35. 1997.
- 3) 三村聡, 星岳彦, 高辻正基. 塩化ナトリウム添加養液による養液栽培ホウレンソウの育成促進. 植物工場学会誌. 7: 151-155. 1995.
- 4) 磯部勝孝, 荻島恵梨, 佐藤竜司, 杉山光, 肥後昌男, 鳥越洋一. キノアの発芽と初期生育における耐塩性の品種間差と作物間差. 日本作物学会紀事. 83: 9-14. 2014.
- 5) 重松賢行, 吉田綾子, 山下尚之, 田中宏明. 畑地灌漑を想定した下水再生水の水質評価. EICA. 13: 109-115. 2008.
- 6) Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. Annu. Rev. Plant Biol. 59: 651-681. 2008.
- 7) Silber A, Xu G, Levkovitch I, Soriano S, Bilu A, Wallach R. High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. Plant Soil. 253: 467-477. 2003.
- 8) 吉田千恵, 岩崎泰永, 牧野周, 池田英男. 養液土耕における灌水管理の違いがトマトの生育および収量に及ぼす影響. 園芸学研究. 10: 325-331. 2011.
- 9) 上山啓一, 小野寺康子, 大沼康. 夏秋トマトの養液土耕栽培における栄養診断に基づいた養水分管理方法. 宮城県農業・園芸総合研究所研究報告. 41-47. 2004.
- 10) Xu G, Levkovitch I, Soriano S, Wallach R, Silber A. Integrated effect of irrigation frequency and phosphorus level on lettuce: P uptake, root growth and yield. Plant Soil. 263: 297-309. 2004.
- 11) Cook WP, Sanders DC. Nitrogen application frequency for drip-irrigated tomatoes. Hortscience. 26: 250-252. 1991.
- 12) 湖東朗, 大沼洋康, 角張嘉孝, Suhail AI, HAFAR I. 灌水頻度と環境因子がアルファルファの蒸散速度, 葉温及び生育に及ぼす影響. 日本緑化工学会誌. 15: 12-19. 1990.
- 13) 昭和 59 年 4 月 18 日付け 59 農蚕第 1943 号農林水産省農蚕園芸局長通知. 植物に対する害に関する栽培試験の方法. 1984.
- 14) Shaw RJ. Soil Salinity - Electrical Conductivity and Chloride. In: Soil analysis : an interpretation manual, eds. Sparrow LA, Peverill KI, Reuter DJ. CSIRO Pub, Collingwood. 129-146. 1999.
- 15) R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2016.
- 16) Spiegel MR, Schiller J, Srinivasan RA. Probability and Statistics. McGraw-Hill, New York. 1-423. 2009.
- 17) 清水愛, 畑瀬房次, 大塚紀夫, 田中政信. 高温期のコマツナ養液栽培における品質向上. 九州農業研究. 64: 173. 2002.
- 18) 留森寿士, 遠山柁雄, 竹内芳親. ホウレンソウ栽培における希釈海水の灌水効果. 日本砂丘学会誌. 43: 15-18. 1996.
- 19) 江波戸宗大, 栗原三枝. 高塩類堆肥を用いた野菜栽培での土壌溶液組成および陽イオンバランスの経時変化 (2): コマツナ連作栽培の場合. 日本土壌肥科学雑誌. 80: 233-240. 2009.
- 20) 安東赫, 池田英男. 根域への積極的な水分管理は露地土耕においても作物の生育, 収量と肥料利用効率の向上に役立つ. 園芸学研究. 8: 439-443. 2009.
- 21) 池田英男. 植物の根の周辺の無機要素の分布と流れからみた根域の養水分管理. 池田英男編著, 養液土耕と液肥・培地管理. 博友社, 東京. 7-27. 2005.
- 22) 荒木陽一. かん水時の土壌水分吸引圧と一回のかん水水量が湿润土層深とトマトの生育に及ぼす影響. 野菜・茶業試験場研究報告. 125-131. 1997.
- 23) 劉建, 辺嘉賓, 塩津文隆, Ghosh Subhash C, 豊田正範, 楠谷彰人. 水耕栽培で塩ストレスを与えた水稻品種の耐塩性と根系形態. 日本作物学会紀事. 77: 326-332. 2008.