

博士論文

塩土壌におけるイネ科作物の干ばつ
抵抗性に関する作物学的研究

平成 25 年 9 月

哈布日

岡山大学大学院

自然科学研究科

目次

第1章	総合緒言	1
第2章	土壤水分が限られた塩土壤におけるコムギとオオムギの水利用	
	緒言	3
	材料と方法	3
	結果	5
	考察	6
第3章	塩土壤における異なる限られた土壤水分条件下のコムギとデュラムの水利用	
	緒言	16
	材料と方法	16
	結果	17
	考察	19
第4章	土壤の塩濃度と量の違いがイネの水利用と乾物生産に及ぼす影響	
	緒言	30
	材料と方法	30
	結果	31
	考察	33
第5章	塩土壤で土壤水分が限られているときイネの水利用と乾物生産の品種間差	
	緒言	44
	材料と方法	44
	結果	45
	考察	46
第6章	土壤水分欠乏状態の塩土壤における蒸発散量のイネ品種間差の要因	
	緒言	55
	材料と方法	55
	結果	56
	考察	58
第7章	総合考察	71
	謝辞	72
	引用文献	73

要旨	77
Abstract	78
発表論文	80

第1章 総合緒言

塩土壌は世界各地に存在し、とくにオーストラリア、北・中央アジア、および南アメリカに多い。全塩土壌の面積は、地球上の耕作可能な面積の約10%に相当する9.54億ヘクタールにのぼると推定されている (Kovda and Szabolcs 1979)。塩土壌の多くは天然に存在するものであるが、乾燥地および半乾燥地を中心に不適切な灌漑や排水設備の不備などによって塩化した土壌は年々増え続けており (瀧島 1987, Flowers and Yeo 1995)、毎年150万ヘクタールの灌漑農地が主として塩化によって放棄されている (Ghassemi ら 1995)。また、地球温暖化による海面の上昇が起こると、アジアのデルタなど海拔が低い沿岸地域において河道への海水の浸入や地下水の塩水化が進行し、広範囲にわたる農地の塩害も予測される (海津 2001)。世界の人口は1971年には38億人から2011年に69億人を超え (FAO 2011)、最近の予測では2050年には95億人前後となっている。増え続ける人口に対して食糧生産基盤である農地面積は15.4億ヘクタールで新たな優良耕地の増加が見込めない。人口の増加に従って重要となる食糧問題を解決するために、塩土壌を利用することが必要であると考えられた。

一方、地球規模の環境変動 (IPCC 2007) にともない、とくにアジアやアフリカの低緯度地域を中心として干ばつが増加し、塩化した農地において水不足が発生すると予測されている (Balasubramanian ら 2007, Bhattacharjee ら 2011, Prabhakar ら 2011, Singh ら 2011)。このように塩土壌では塩ストレスと同時に水ストレスが作物生産の障害になるであろう。したがって、これら二つのストレスが同時に起こる条件での作物生産の向上に関する研究は不可欠と考えられるが、複合ストレスに関する研究はまだ少ない (Homaee ら 2002, 王ら 2007)。

一般に、作物の成長は水消費に比例的で (Black ら 1969, Teare ら 1973, Loomis and Connor 1992)、干ばつ条件下においても作物の乾物生産は蒸散量に比例的に増加する (Ludlow and Muchow 1990, Loomis and Conner 1992, Kobata ら 1996)。一方、水利用効率は水分が十分である条件下で塩の影響をあまり受けない (Shalhevet 1994, Flowers ら 1988)。したがって、塩土壌における干ばつ条件下でも作物の乾物生産は蒸発散量に比例的に増加すると考えられたが、このことを明らかにした研究は見当たらなかった。

作物の水分吸収は土壌水分含有率の低下にともない阻害され、土壌に塩が高濃度に含まれるときには土壌溶液の浸透ポテンシャル低下によってさらに阻害される (Kramer and Boyer 1995)。一方、根の成長は塩ストレスによって阻害されるので (Akbar ら 1972, Lutts

ら 1995, 劉ら 2008), 根域が小さくなるとともに根域内にある利用できる土壌水分量が減少する. このように塩土壌の干ばつ条件下で水利用は土壌塩濃度あるいは根の成長に依存すると考えられるが, どちらの要因がより強い影響を持っているのか分かっていなかった.

作物は土壌乾燥条件下で土壌深くまで根を伸長させることにより多くの水を吸収し (Sharp and Davies 1985), 深根性の品種が耐干性を有することが過去の多くの実験結果において明らかにされた (Ludlow and Muchow 1990, Turner ら 2001, Serraj and Sinclair 2004). しかしながら塩土壌における干ばつ条件下で根系の成長能力に品種間差があるかどうかを調べた研究は見当たらなかった. 塩土壌では土壌に過剰に存在するナトリウムなどの有害なイオンが作物に吸収され, イオン過剰害が発生する (間藤 1991, 但野 1983). イオン過剰に対する反応は品種間差があり, 品種による耐塩性の違いに貢献しているが, このような違いが塩土壌における干ばつ条件下で果たす役割を明らかにした研究は見当たらなかった.

そこで本研究では, 塩土壌において作物の乾物生産が利用できる土壌水分量に依存するのか, そうであれば利用できる土壌水分量は根の成長あるいは土壌塩濃度に左右されるのかを明らかにした. さらに十分に土壌水分がある条件での耐塩性の品種間差との関係も検討した. まず, 第 2 章と第 3 章では畑作物のコムギ, オオムギ, デュラムをポットに栽培して, 土壌水分が限られた塩土壌で乾物生産が蒸発散量に比例するのかどうか, 蒸発散量は根の成長あるいは土壌塩濃度のどちらにより依存するのかを明らかにした. 次に第 4~6 章では湛水条件下で栽培が始められるイネをポットに栽培して, ムギ類と同様に乾物生産と蒸発散量との関係, 蒸発散量を制限する要因を明らかにした. また, 耐塩性程度の異なる複数の品種を用いてこれらの関係に品種の耐塩性がどのように関与しているのかを明らかにした. これらの結果に基づき最終章では塩土壌で干ばつが起こる条件における作物栽培の改善方法について検討した.

第2章 土壤水分が限られた塩土壤におけるコムギとオオムギの水利用

緒言

現在、塩土壤がオーストラリア、北・中央アジア、および南アメリカを中心とする世界各地に分布しており、その全面積は地球上の耕作可能な面積の約 10%に相当する 9.54 億ヘクタールにのぼると推定されている (Kovda and Szabolcs 1979). 同時に、乾燥、半乾燥地域を中心に不適切な灌漑などによって塩化した土壤は年々増え続けている (瀧島 1987, Flowers and Yeo 1995). 乾燥・半乾燥地域は降雨が少なく、干害もまた作物生産を大きく低下させる. 例えば、オーストラリアの天水コムギ地帯では、心土に塩化があり、降雨の状態によって干害と塩害が起こる (Grewal 2009). このように塩化した土壤では塩ストレスと同時に水ストレスが作物生産の障害になっている. したがって、これら二つのストレスが同時に起こる条件での作物生産の向上に関する研究は不可欠と考えられるが、複合ストレスに関する研究は少ない (Homaee ら 2002, 王ら 2007).

一般に、作物の成長は水消費に比例的である (Black ら 1969, Teare ら 1973, Loomis and Connor 1992) ため、利用できる土壤水分が限られているとき、どれだけ多くの土壤水を吸収できるかで成長量が決まる. 土壤乾燥条件下で、土壤深くまで根を伸長させることにより多くの水を吸収し (Sharp and Davies, 1985), 深根性の品種が耐干性を有することが過去の多くの実験結果において明らかにされている (Ludlow and Muchow 1990, Turner ら 2001, Serraj and Sinclair 2004). すなわち根が土壤の深いところまで伸長して、吸水量が多いほど乾物生産が高い. 一方、根の成長は塩ストレスによって阻害され (Akbar ら 1972, Lutts ら 1995, 劉ら 2008), 吸水は塩濃度の上昇による土壤水ポテンシャルの低下によっても抑制される. したがって、塩土壤で土壤水分が限られているとき乾物生産は根の成長抑制および高土壤塩濃度による吸水量の低下とともに減少すると考えられた. そこで、塩がコムギとオオムギで根の成長と水利用の関係に及ぼす影響を検討した.

材料と方法

コムギ (*Triticum aestivum* L.) 品種農林 71 号およびオオムギ (*Hordeum vulgare* L.) 品種宝城皮 8 を用いた. 実験は、岡山大学農学部研究圃場のガラス室で行った. 2006 年 12 月 9 日に長さ 5 cm, 内径 7.1 cm の塩ビ管 (VU65) に湿った土を詰め、バットの上に配置し 1 本当たり 4 粒の種子をまいた. 12 月 23 日、2 葉期の苗を塩ビ管 1 本当たり 2 個体に間引

いて、次に示す長いポットに移植した。

長さ 32 cm, 内径 7.1 cm の塩ビ管 (VU65) 3 本を接着剤と粘着テープでつなぎ、全長 96 cm の円筒を作り、その底にキャップを取り付けて、ポットとした (第 2-1 図)。ポットは 18 個作成した。自然乾燥させた土壌約 4 リットルに畑用の化成肥料 (N:P₂O₅:K₂O=8:8:8) を 7 g 混ぜ、ポットに詰めた。ポット当たり 1200 mL の水に 7 g, および 14 g の塩化ナトリウム (NaCl) を溶かして入れ、NaCl-7 g 区および NaCl-14 g 区とし、塩を加えないポットを NaCl-0 g 区とした。ポット上部 5 cm の部分に 2 個体を移植した (第 2-1 図)。また、移植後 3 日目に水 500 mL を加えた。なお、NaCl 添加量ポット当たり 7 g および 14 g は、当研究室で水稻を栽培したとき穂の乾物重が NaCl を加えない条件に比べて、30~50%低下する量であった (王ら 2007)。すなわち、塩土壌が作物の生存ではなく収量に及ぼす影響を調べる量と考え設定した。

移植した日から 5 日ごとに葉齢、草丈、茎数を調査するとともに、ポット全体の重さを測定した。そして、ポット全体の重さの減少量を蒸発散量とした。平均蒸発散速度の差が 1 g pot⁻¹ day⁻¹ 以下になり、蒸散が停止したとみなされたときに収穫した。収穫後に枯死部、葉身、茎および根に分け、80 °C で 3 日乾燥させた後、乾物重を測定した。土壌は 16 cm ごとの層別に採集した。各層の土壌をバットに入れ潰し、無作為に 3 か所からそれぞれ約 5 g の土壌を採集して瓶に入れた。重さを測定した後 110 °C に設定したオーブン内で 1 週間乾燥を行って乾物重を測定し、土壌の水分含量を計算した。乾土 5 g に 25 mL の蒸留水を入れよく混ぜた。上澄みの Na⁺含有率は、イオンメーター (HORIBA, コンパクトイオンメーター, C-122) で測定した。層別の土壌をざるに入れ、土壌を水で流して根を取り、取った根をサンプル瓶に入れ水を加えた。層別のサンプル瓶の根を 6 個の透明バットに広げ、スキャナを用いて解像度 300 dpi で根のデジタル画像を得た。これらの画像を Scion Image Root Measure (Kimura ら 1999, Kimura and Yamasaki 2001, 2003) で解析し、根長を算出した。

枯死部、葉身、茎の乾物重を測定後、各器官の乾物試料を小型粉砕機で粉砕し、0.2 g を秤量し一晚 80 °C に設定したオーブン内で乾燥させた。乾物重を測定し約 12 mL の蒸留水とともに試験管 (120 mL 容) に入れ、180 °C に設定したホットプレートで 3 時間熱湯抽出した。得られた抽出液はメスフラスコを用いて 25 mL にメスアップし、上記のイオンメーターにより Na⁺含有率を定量した。部位ごとに Na⁺含有率と乾物重の積として Na⁺含有量を算出し、その合計を地上部の Na⁺含有量とした。この値を地上部乾物重で割って地上部

の Na⁺含有率とした。

実験は、3 反復の完全無作為配置によった。第 1 表の Tukey 多重比較は、Wessa (2010) で行った。

結果

葉齢はコムギとオオムギで 1 日当たり 0.11 増加し、出葉は 10 で止まった (第 2-2 図)。草丈の増加過程もコムギとオオムギで類似しており、葉齢および草丈ともに NaCl 添加による影響は明らかでなかった。莖数はコムギとオオムギともに移植後しばらく増加が遅い期間があり、それから急速に増加した後ほとんど変化がみられなくなった。莖数の増加速度は 2 作物ともに NaCl-14 g 区で小さく、増加停止時期が他の 2 区よりも早かったため、NaCl-14 g 区の莖数の最大値は NaCl-0 g 区と NaCl-7 g 区の 83%にとどまった。

蒸発散速度はコムギとオオムギともに移植後しばらく増加が小さく、それから急速に増加して、移植後 50 日ごろ最大になった (第 2-3 図)。この時期まで蒸発散速度の区間差は明確でなかった。蒸発散速度は移植後 50 日から低下しはじめ、NaCl-0 g の値は他の 2 区より大であった。平均蒸発散速度の差が 1 g pot⁻¹ day⁻¹ 以下となったとき、蒸散が停止したものとみなして収穫した。収穫日は 2 作物とも、NaCl-0 g 区は移植後 75 日であり、他の 2 区より 10 日早かった。

収穫時の層別土壌残存体積水分率は、NaCl-0 g 区では上層と下層の差は小さく、全層で 0.03~0.04 g cm⁻³ と少なかった (第 2-4 図)。層別土壌残存体積水分率は NaCl 添加区で下層になるほど高くなり、NaCl-14 g 区の第 5, 6 層では両作物で平均 0.14 g cm⁻³ であった。層別土壌残存体積水分率は NaCl-7 g 区でも下層になるほど高くなったが、NaCl-14 g 区に比べると低かった。

収穫時の根長密度はコムギとオオムギともに第 1 層より第 2, 3 層の方が多かったが、さらに下の層になると大きく減少し、第 6 層で最低であった (第 2-5 図)。根長密度は、下層でのみ NaCl 添加によって減少した。なお、コムギとオオムギの根はともに太さ 0.23 mm 以下のものであり、NaCl 添加によって太さ別根長は影響を受けなかった (データ表示なし)。

土壌層別の Na⁺含有率は、コムギとオオムギともに NaCl-7 g 区と NaCl-14 g 区で下層になるほど増加した (第 2-6 図)。土壌 Na⁺含有率は、とくに層 4~6 で高いとともに NaCl-14 g 区の値は NaCl-7 g 区の倍以上であった。

土壌層別の土壌残存体積水分率, Na^+ 含有率および根長密度の相関関係を第 2-7 図に示した. 土壌 Na^+ 含有率と根長密度との相関関係は有意であったが, かなりのばらつきがあった. 根長密度と土壌残存体積水分率の相関関係も有意であり, 根長密度が高いほど土壌残存体積水分率が低下した. この相関関係に比べ, 土壌 Na^+ 含有率と土壌残存体積水分率の相関関係は著しく強く, 土壌残存体積水分率は土壌 Na^+ 含有率が高いほど大であった.

地上部乾物重, 蒸発散量および地上部 Na^+ 含有率は, コムギとオオムギで変わらなかったものの NaCl 添加によって有意に変化した (第 2-1 表). そこで, 2 作物の平均値で比較すると地上部 Na^+ 含有率は, NaCl 添加量が多くなるほど高くなった. これに対して, 乾物重と蒸発散量は NaCl 添加量が増えるほど低下した. ただし, 地上部乾物重は有意ではないが NaCl -0 g 区のほうが NaCl -7 g 区より小さかった. なお, 総根長は作物および NaCl 添加によって変わらなかった.

考察

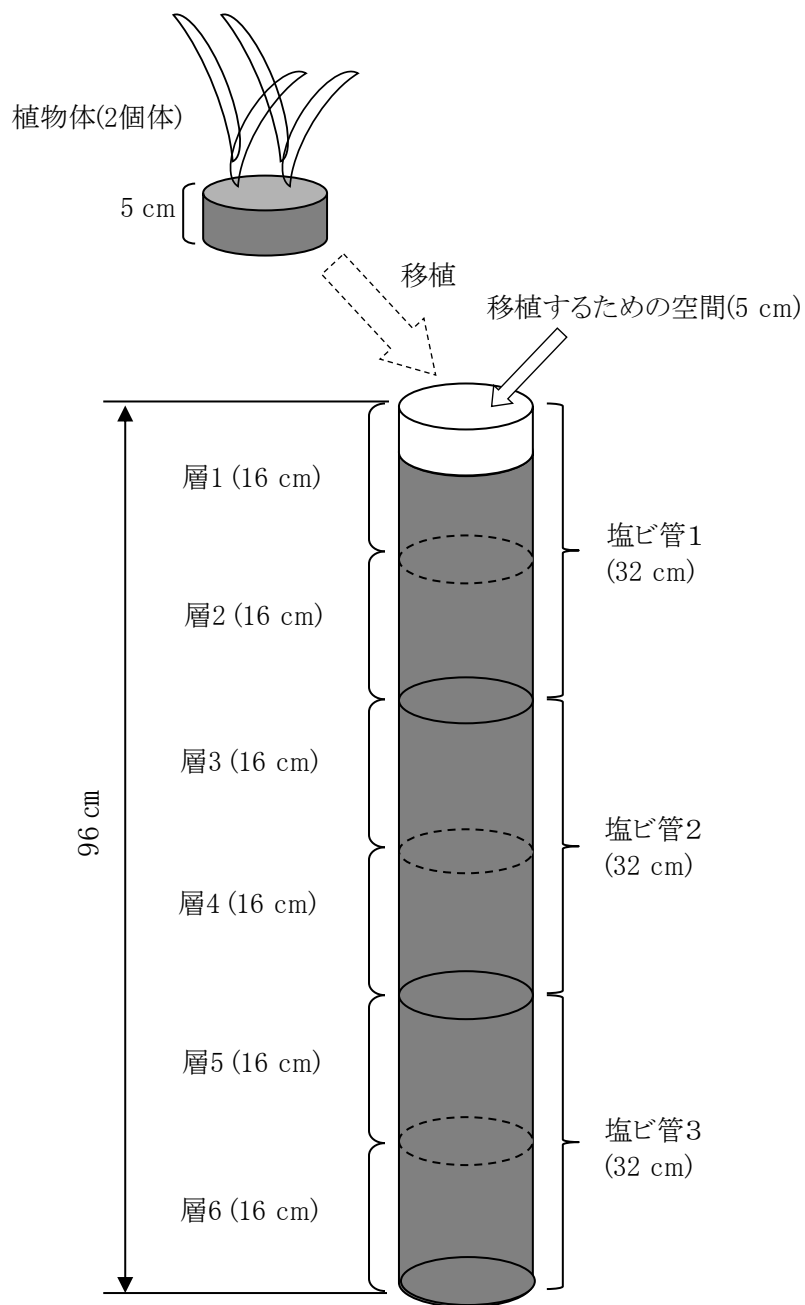
土壌水分が限られた異なる NaCl 濃度の土壌でコムギとオオムギをポット栽培したところ, 2 作物ともに土壌 NaCl 濃度が高いほど蒸発散量が低下した (第 2-1 表). 本研究で蒸発散量の減少は, 土壌中で吸収されず残った水が増えたことと同じであった. 土壌 NaCl 濃度の増加による吸水と蒸発散の減少は, 植物体の Na^+ の蓄積によって気孔が閉鎖するとともに成長が止まったためかもしれない. 一方, 地上部の Na^+ 含有率は 2 作物の平均で見ると NaCl を添加した 2 つの区で 9.2 mg g^{-1} および 18 mg g^{-1} であった. これらの値は他の研究 (津田ら 2010) でみられたような枯死するような Na^+ 含有率の値 42 mg g^{-1} 以下であった. したがって, 吸水と蒸発散の低下は植物体の Na^+ 蓄積による気孔の閉鎖などの障害よりも, 根で吸水できなかったものと考えられた.

一般に根の成長は NaCl を与えると阻害される (Akbar ら 1972, Lutts ら 1995, 劉ら 2008) ので, 土壌中の水を吸収できなかったのは根が十分に成長しなかったためである可能性がある. ポット当たりの総根長は塩によって影響を受けなかった (第 2-1 表) が, NaCl 添加区の下層で根長密度の低下が認められた (第 2-5 図). しかし, 根長密度が変わらなかった層においても土壌残存体積水分率が高いうえに層別の根長密度と土壌残存体積水分率の相関は小さかった (第 2-4, 5, 7 図). むしろ土壌残存体積水分率は Na^+ 含有率と強い相関関係が認められ, この相関は根長密度が $0.2 \sim 7.8 \text{ cm cm}^{-3}$ の大きな違いがあっても成り立っていた (第 2-7 図). 一般に土壌の水ポテンシャルは, Na^+ 含有率が高いほど低下する. し

たがって Na^+ 濃度が高いと吸収されない水が増えたのは、根の成長阻害よりも土壌の水ポテンシャルの低下によると考えられた。なお、水耕されたイネでは、塩によって細い根と中程度の太さの根が減ると報告されたが（劉ら 2008）、本研究で塩による太さ別根長に特定の影響は認められなかった。

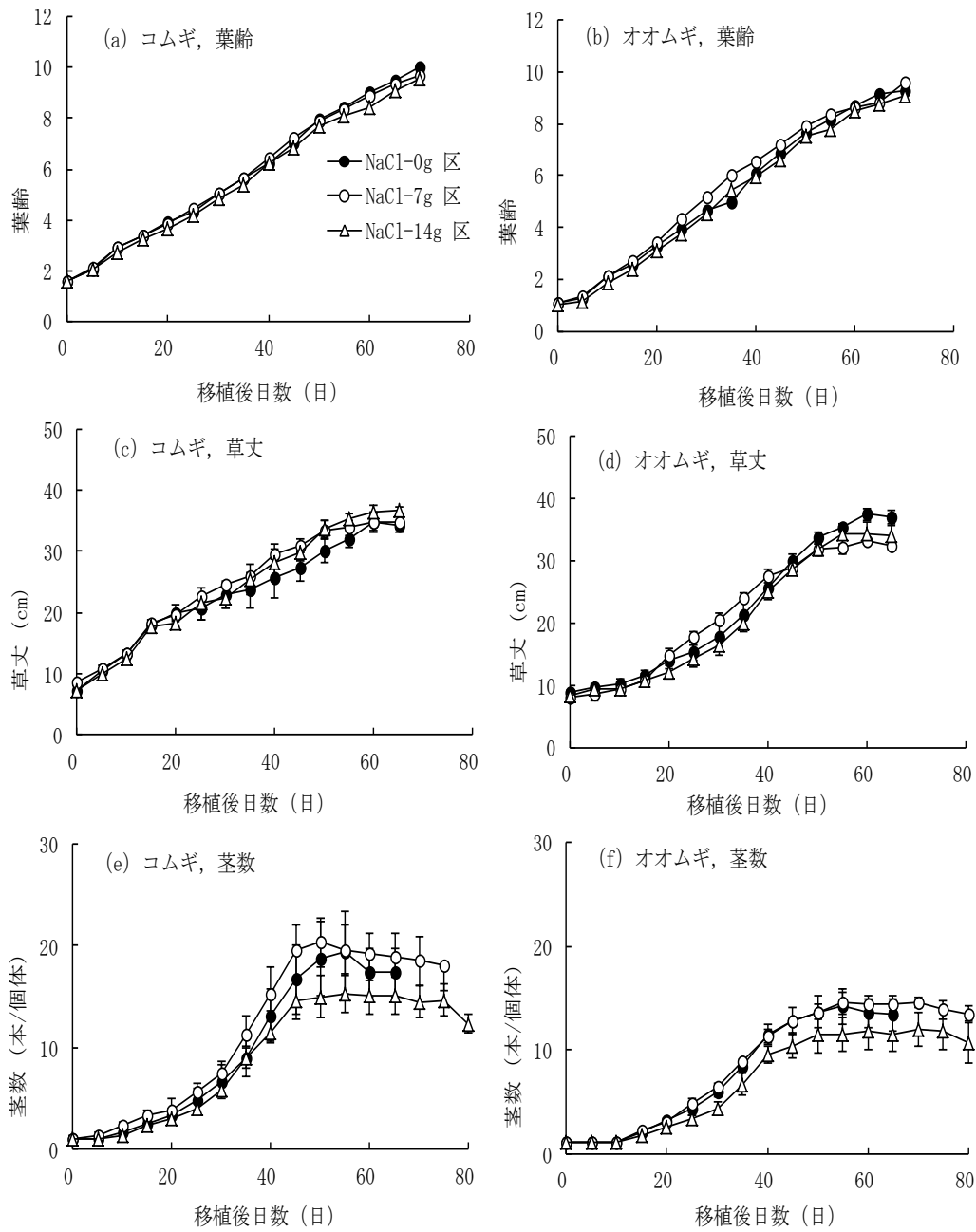
蒸発散量の NaCl 添加による減少は、乾物生産量の低下と対応していた（第 2-1 表）。ただし、最も蒸発散量の多かった NaCl -0 g 区で乾物重は NaCl を添加した区と有意差がなく、このことは蒸発散量に対する乾物生産量すなわち水利用効率が低かったことを示している。水利用効率は NaCl 添加による光合成速度の変化など植物体の生理的变化のみでなく、太陽放射、湿度などの蒸発環境の違いによっても変わる（Loomis and Conner 1992）。蒸発散速度は NaCl -0 g 区で他の 2 区よりも高い時期があり、蒸散が無視できる程度に低下する時期は 10 日早まった（第 2-3 図）。このように NaCl -0 g 区における水利用効率の低下は、成長期間の環境条件の違いも要因であるかもしれない。土壌が乾燥していく条件下で NaCl が水利用効率にどのような影響を与えるかは、さらに研究が必要であろう。一方、成長期間が変わらなかった 2 つの NaCl 添加区の間で蒸発散量の減少と乾物生産の低下が対応していたことは、 NaCl 添加量の増加にともなう乾物生産の低下は蒸発散量の減少によっていることを示すと考えられた。

コムギとオオムギにおいて土壌が乾燥していく条件下で NaCl 添加による生育阻害は葉齢の増加と草丈の伸長ではほとんどみられず、主に分けつの減少で認められた（第 2-2 図）。このように土壌水分が限られた NaCl 土壌において、コムギとオオムギは分けつが抑えられるとともに塩が集積による土壌水ポテンシャルの低下によって吸水、蒸発散量が減少し、乾物生産が低くなると考えられた。

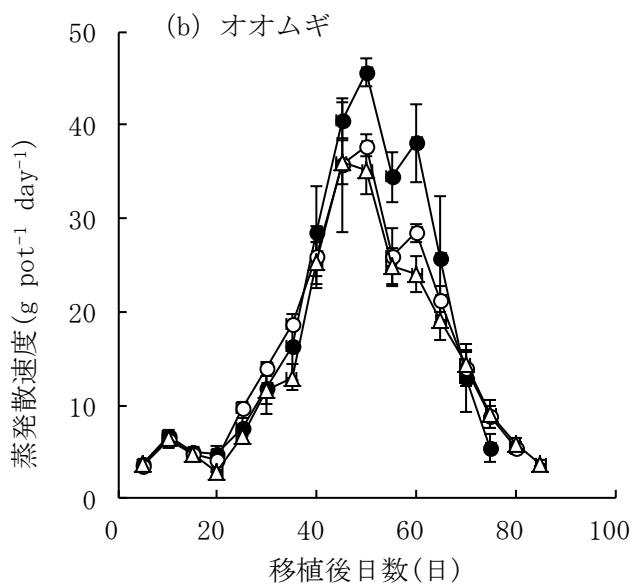
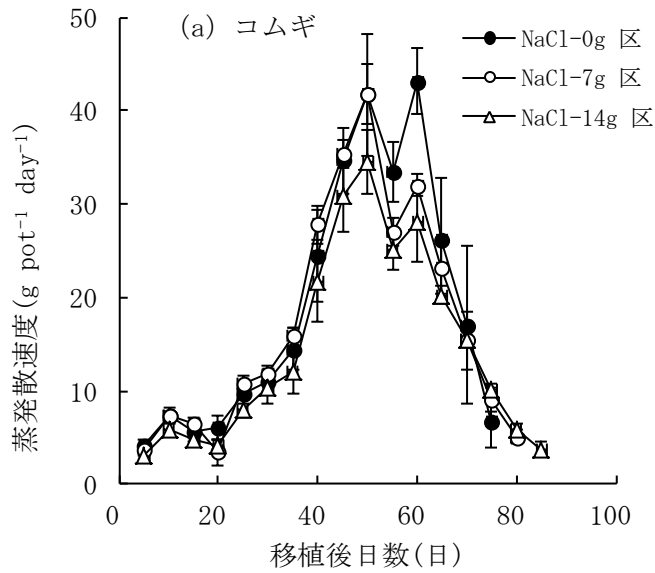


第 2-1 図 ポットの模式図.

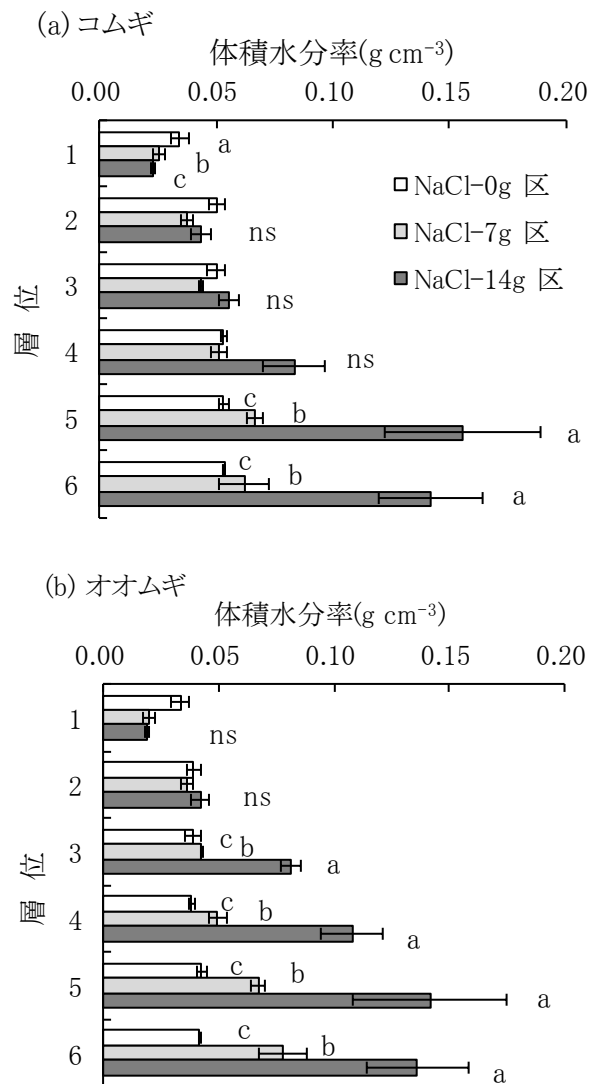
長さ 5 cm のポットで育苗し(左), 長さ 96 cm のポットに移植した (右).



第 2-2 図 NaCl 添加量の違いがコムギとオオムギの葉齢, 草丈, 茎数に及ぼす影響。
 NaCl-0 g 区, NaCl-7 g 区および NaCl-14 g 区は, それぞれポット当たりの NaCl 添加量が
 0 g, 7 g および 14 g であった。値は 3 ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す。

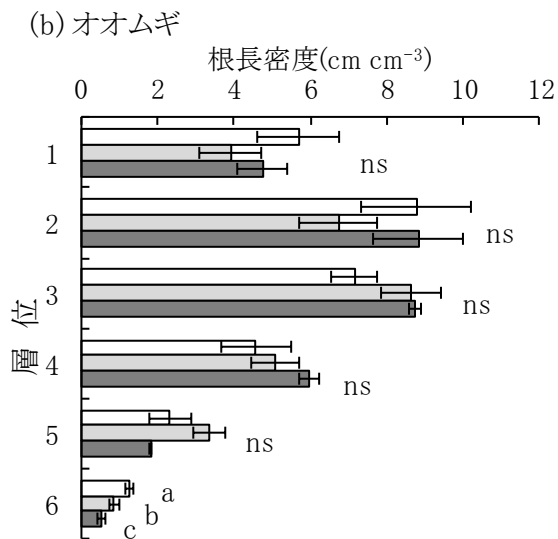
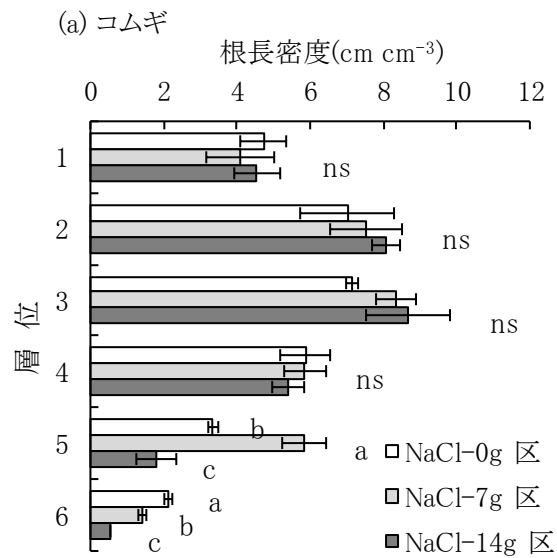


第 2-3 図 NaCl 添加量の違いがコムギ (a) とオオムギ (b) の蒸発散速度に及ぼす影響。
NaCl-0 g 区, NaCl-7 g 区および NaCl-14 g 区は, それぞれポット当たりの NaCl 添加量が
0 g, 7 g および 14 g であった. 値は 3 ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す.



第2-4図 NaCl添加量の違いがコムギ (a) とオオムギ (b) の層別土壌残存体積水分率に及ぼす影響.

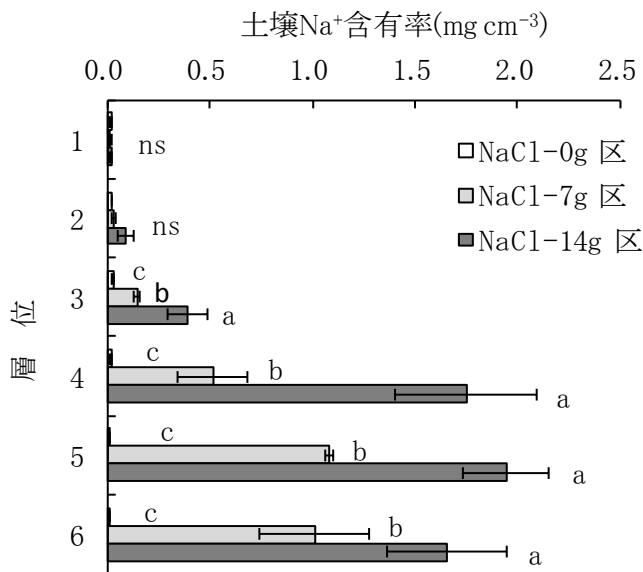
NaCl-0 g 区, NaCl-7 g 区およびNaCl-14 g 区は, それぞれポット当たりのNaCl添加量が0 g, 7 g および14 gであった. 層位は, 第1図を参照. 値は3ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す. 同じ層の同じアルファベットの間にはTukey法で有意な差がないこと, nsは平均値間に有意な差がないことを示す.



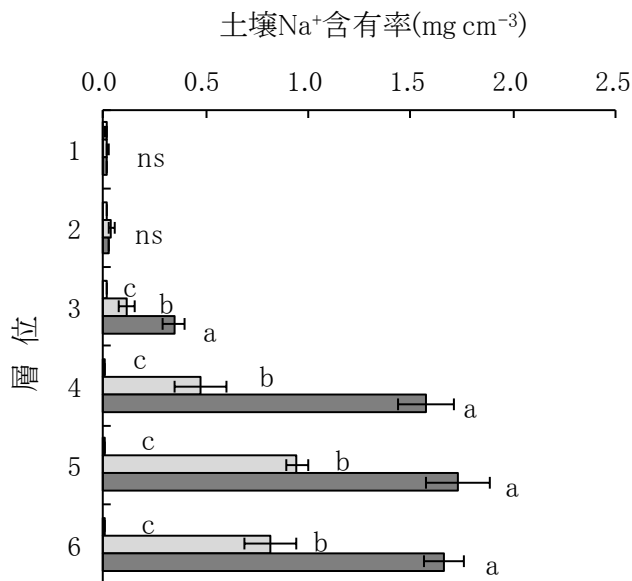
第2-5図 NaCl添加量の違いがコムギ (a) とオオムギ (b) の収穫時の層別根長密度に及ぼす影響.

NaCl-0 g 区, NaCl-7 g 区および NaCl-14 g 区は, それぞれポット当たりの NaCl 添加量が 0 g, 7 g および 14 g であった. 層位は, 第1図を参照. 値は3ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す. 同じ層の同じアルファベットの間には Tukey 法で有意な差がないこと, ns は平均値間に有意な差がないことを示す.

(a) コムギ

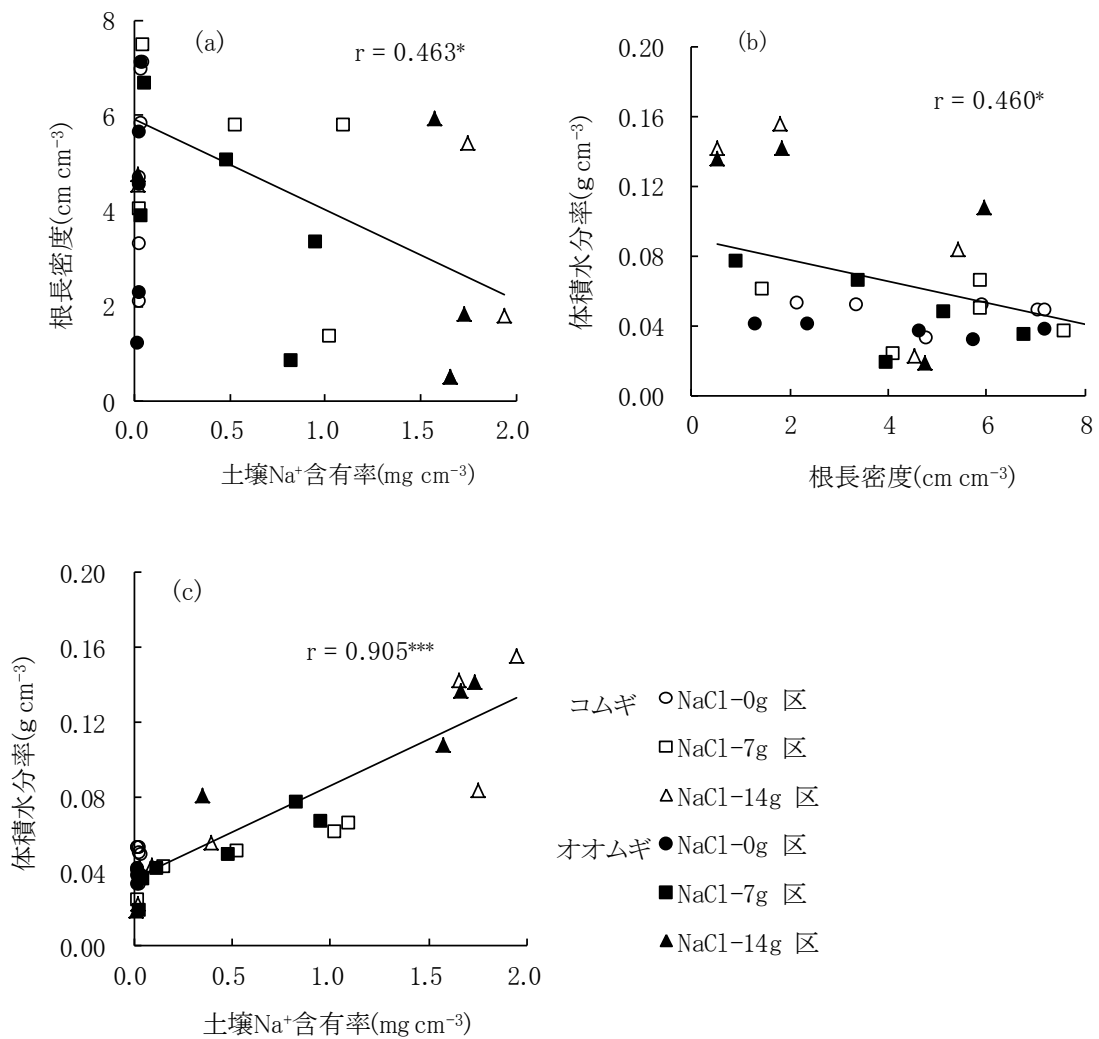


(b) オオムギ



第2-6図 NaCl添加量の違いがコムギ (a) とオオムギ (b) の収穫時の層別土壌Na⁺含有率に及ぼす影響.

NaCl-0 g 区, NaCl-7 g 区および NaCl-14 g 区は, それぞれポット当たりの NaCl 添加量が 0 g, 7 g および 14 g であった. 層位は, 第1図を参照. 値は3ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す. 同じ層の同じアルファベットの間には Tukey 法で有意な差がないこと, ns は平均値間に有意な差がないことを示す.



第 2-7 図 層別の土壌 Na⁺含有率と根長密度 (a), および層別の根長密度と土壌残存体積水分率 (b), ならびに層別の土壌 Na⁺含有率と土壌残存体積水分率 (c) の関係.

値は, 3 ポットの平均値である. r はすべての値 ($n=36$) を用いた相関係数で, *と***は 5% と 0.1%水準で有意であることを示す.

第 2-1 表 NaCl 添加量の違いがコムギとオオムギの収穫時の地上部乾物重，蒸発散量，総根長と地上部 Na⁺含有率に及ぼす影響.

NaCl 添加量 (g pot ⁻¹)	乾物重 (g pot ⁻¹)	蒸発散量 (g pot ⁻¹)	総根長 (m pot ⁻¹)	地上部 Na ⁺ 含有率 (mg g ⁻¹)
0	5.5 ab	1500 a	190	1.5 c
7	5.8 a	1424 a	197	9.2 b
14	4.8 b	1254 b	189	18.1 a
分散分析				
処理間	*	***	ns	***
作物間	ns	ns	ns	ns
交互作用	ns	ns	ns	ns

値は，コムギとオオムギの平均値である.

分散分析で ns, *と***はそれぞれ有意差なし, 5%と 0.1%水準で有意であることを示す. 各形質で同じアルファベットの値の間には Tukey 法で有意差がないことを示す.

第3章 塩土壌における異なる限られた土壌水分条件下のコムギとデュラムの 水利用

緒言

将来増加すると予測されている塩土壌における干ばつ条件下における作物生産改善のために、塩土壌における作物の水利用と乾物生産との関係を調べてきた。第2章では土壌水分が限られている塩土壌でコムギとオオムギを栽培したところ、乾物重は蒸発散量の減少とともに低下した。蒸発散量の減少は土壌に残存する体積水分率の増加と対応しており、体積水分率は根長密度より土壌 Na^+ 含有率とより強い相関があった。このことから土壌水分の吸収は根の成長よりも土壌 Na^+ 含有率おそらく土壌水ポテンシャルの低下に左右されることが示された。

土壌中の塩分布は一般に均質ではなく水平垂直方向に不均一である (Bazihizina ら 2012)。そして塩分布が不均一な培地で栽培すると作物の吸水は、主として塩濃度の低い部分から行なわれた (Kong ら 2012)。一方、第2章の実験で土壌塩分布は不均一で、土壌 Na^+ 含有率は上層で低く下層で高かった。したがって、第2章で吸水が土壌 Na^+ 含有率に依存していたのは、土壌塩分布が不均一であったためであったかもしれない。いいかえれば均質な塩分布の土壌で作物の吸水は、土壌塩濃度よりも根の成長に依存していることが予測された。

乾物重増加量が蒸発散量に比例的に増加することは一般的に知られているが、塩土壌でもこの関係があるのかどうかははっきりしていなかった。第2章では土壌塩濃度の増加による乾物重の低下が蒸発散量の減少をともなっていたことから、塩土壌でも乾物重の増加量が蒸発散量のそれと比例的であると考えられたが、明瞭ではなかった。また、乾物重と蒸発散量、土壌の Na^+ 含有率と残存体積水分率および根長密度との関係は、コムギとオオムギで類似しており、明らかな作物間差は認められなかった。

そこで本研究では塩分布が均質な土壌を用い、土壌に含まれる水分量を変えた条件で、コムギとデュラムを栽培し、蒸発散量と乾物重増加量、根の成長および土壌塩濃度と土壌残存体積水分率との関係を明らかにするために行なった。

材料と方法

実験は、岡山大学農学部ガラス室で2009年に行った。コムギ (*Triticum aestivum* L.)

品種農林 71 号とデュラム (*Triticum durum* Desf.) 系統 st 36 を用いた。11 月 25 日に 1 穴に 1 粒ずつ 1 品種 40 粒をみのるポットに播種して、育苗した。

内径 7.1 cm の塩ビ管 VU65 を長さ 32 cm, 64 cm, 100 cm に切断し、円筒の底にキャップを取り付けた 3 種類のポットを作成した。篩った水田土壌を乾燥させて、土壌 1 kg 当たり畑用の化成肥料 (N:P₂O₅:K₂O=8:8:8) を 1.6 g 混ぜた。長さ 32 cm, 64 cm, 100 cm のポットにポット当たり 1440 g, 2880 g, 4320 g の土壌を入れた。そして土壌重量の 28% の水に土壌 1 kg 当たり 1.6 g および 3.2 g の塩化ナトリウム (NaCl) を溶かして入れ、NaCl-1.6 g 区および NaCl-3.2 g 区とし、塩を加えないポットを NaCl-0 g 区とした。ポットをサランラップで封をして 2 日間放置し、土壌が沈んで、安定後にムギを移植した。移植後には給水せず、土壌からの蒸発を減少させるためにポット開口部をアルミテープで封をした。移植日は 12 月 18 日で、苗は 2 葉期であった。ポット全体の移植前と移植後の重さを測定して記録した。実験区は 3 反復とした。

移植した日から朝 9 時にポット全体の重さを測定した。そして、ポット全体の重さの減少量を蒸発散量とした。平均蒸発散速度の差が 1 g pot⁻¹ day⁻¹ 以下になり、蒸散が停止したとみなされたときに収穫した。収穫後に地上部を枯死部、茎、葉、穂に分け、80 °C で 3 日乾燥させ、乾物重を測定した。

土壌は 16 cm ごとの層別に採集した。各土層の土壌をバットに入れ潰し、無作為に 1 か所当たり約 25 g の土壌を採集して瓶に入れた。瓶の重さを測定した後 110 °C に設定したオーブン内で 1 週間乾燥を行って乾物重を測定し、土壌の水分含量を計算した。瓶に入れなかった残りの土壌を水で洗い流して、2.0 mm 目のメッシュで根を回収した。根を 80 °C で 3 日乾燥させ、乾物重を測定した。試験管 (120 mL 容) に乾燥した土壌 10 g を入れ、蒸留水 50 g 加えたのちよく混ぜ、EC メーター (横河電機 (株), パーソナル SC メーター Model SC82) により EC を測定した。

枯死部、茎葉部の乾物重を測定後、各器官の乾物試料をはさみで長さ 5 mm に細かく切り、80 °C に設定したオーブン内で一晩乾燥させ、室温で 30 分間放冷後、0.2 g を秤量した。乾物を 50 mL の蒸留水と 1 mL の硝酸とともにサンプル瓶に入れ、80 °C に設定したオーブン内で 24 時間抽出した。得られた抽出液はろ紙で濾過し、原子吸光分光光度計 (島津製作所 (株), AA-660) により Na⁺含有率を定量した。

結果

蒸発散速度は全てのポットの NaCl-0 g 区と NaCl-1.6 g 区でコムギとデュラムともに移植後 24 日から急速に増加して最大になり、それから急速に低下しはじめた (第 3-1 図)。これに対して、NaCl-3.2 g 区の蒸発散速度は移植後 24 日から除除に増加し、低下も遅かった。蒸発散速度は塩濃度の増加によって遅くなった。平均蒸発散速度の差が $1 \text{ g pot}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 以下となったとき、蒸散が停止したものとみなして収穫した。

蒸発散量はコムギとデュラムとも NaCl-0 g 区と NaCl-1.6 g 区ではほとんど塩濃度の影響を受けずポットの長さに従い増加した (第 3-2 図)。塩濃度が高い NaCl-3.2 g 区の蒸発散量は他の 2 つの塩濃度区の値に比べ著しく小さいとともにポットの長さによる違いは小さかった。蒸発散量はコムギとデュラムの間で大差がなかった。

地上部乾物重はコムギがデュラムより大きかったが、土壌の塩とポットの長さが乾物重におよぼす影響は 2 作物で類似していた (第 3-3 図)。地上部乾物重はそれぞれのポットの長さで NaCl-0 g 区と NaCl-1.6 g 区ではほとんど変わらず、NaCl-3.2 g 区では著しく小さかった。そして NaCl-0 g 区と NaCl-1.6 g 区の値はポットが長いほど大となったが、NaCl-3.2 g 区の値はポットによる違いは小さかった。このように土壌の塩とポットの長さが乾物重におよぼす影響は、それらが蒸発散量に及ぼす影響と類似していた。

地上部 Na^+ 含有率はコムギとデュラムとも塩濃度の増加にしたがい増加したが、ポットの長さに影響されなかった (第 3-4 図)。なお、地上部 Na^+ 含有率はデュラムのほうがコムギより著しく高かった。地上部 Na^+ 含有率は、NaCl-0 g 区でコムギでは平均 0.6 mg g^{-1} 、デュラムで 6.8 mg g^{-1} 、NaCl-1.6 g 区ではそれぞれ 4.0 mg g^{-1} と 10.7 mg g^{-1} 、NaCl-3.2 g 区ではそれぞれ 8.9 mg g^{-1} と 28.0 mg g^{-1} であった。

層別根重密度は、コムギとデュラムの NaCl-0 g 区とコムギの NaCl-3.2 g 区ではポットの長さに関わらず下層になるほど減少した (第 3-5 図)。層別根重密度は NaCl-1.6 g 区で上層と下層の差が小さく、NaCl-3.2 g 区でコムギでは第 3 層まで根があるのに対しデュラムでは第 1 層しか見られなかった。

層別土壌残存体積水分率はコムギとデュラムともにポットの長さに関わらず NaCl-0 g 区と NaCl-1.6 g 区の間は差が小さく、NaCl-3.2 g 区より小さかった (第 3-6 図)。コムギとデュラムともに NaCl-3.2 g 区で土壌水分が多く残った。

層別土壌 Na^+ 含有率は、全てのポットの NaCl-0 g 区で 2 品種ともに上層と下層の差がほとんど見られず約 0.2 mg cm^{-3} だった (第 3-7 図)。層別土壌 Na^+ 含有率は NaCl-1.6 g 区と NaCl-3.2 g 区で全てのポットで下層になるほど減少傾向があったが、上層と下層の差が小

さかった。層別土壌 Na^+ 含有率はコムギとデュラムとも全てのポットで塩濃度の増加に従い増加した。

土壌層別の土壌残存体積水分率、 Na^+ 含有率および根重密度の相関関係を第 3-8 図に示した。土壌 Na^+ 含有率と根重密度および土壌 Na^+ 含有率と土壌残存体積水分率の相関関係はばらつきが大きかった。根重密度と土壌残存体積水分率の相関関係は根重密度が大きいほど土壌残存体積水分率は減少した。

地上部 Na^+ 含有率、乾物重増加量および蒸発散量の相関関係を第 3-9 図に示した。地上部 Na^+ 含有率の乾物重増加量と蒸発散量との相関関係は地上部 Na^+ 含有率が増加するほど乾物重増加量と蒸発散量が減少する傾向があったが、地上部 Na^+ 含有率の乾物重増加量の相対値と蒸発散量の相対値との相関関係を出したところばらつきが大きかった。これに対して、蒸発散量と乾物重増加量の相関関係は明らかで蒸発散量が多くなるほど乾物重増加量が増加した。

考察

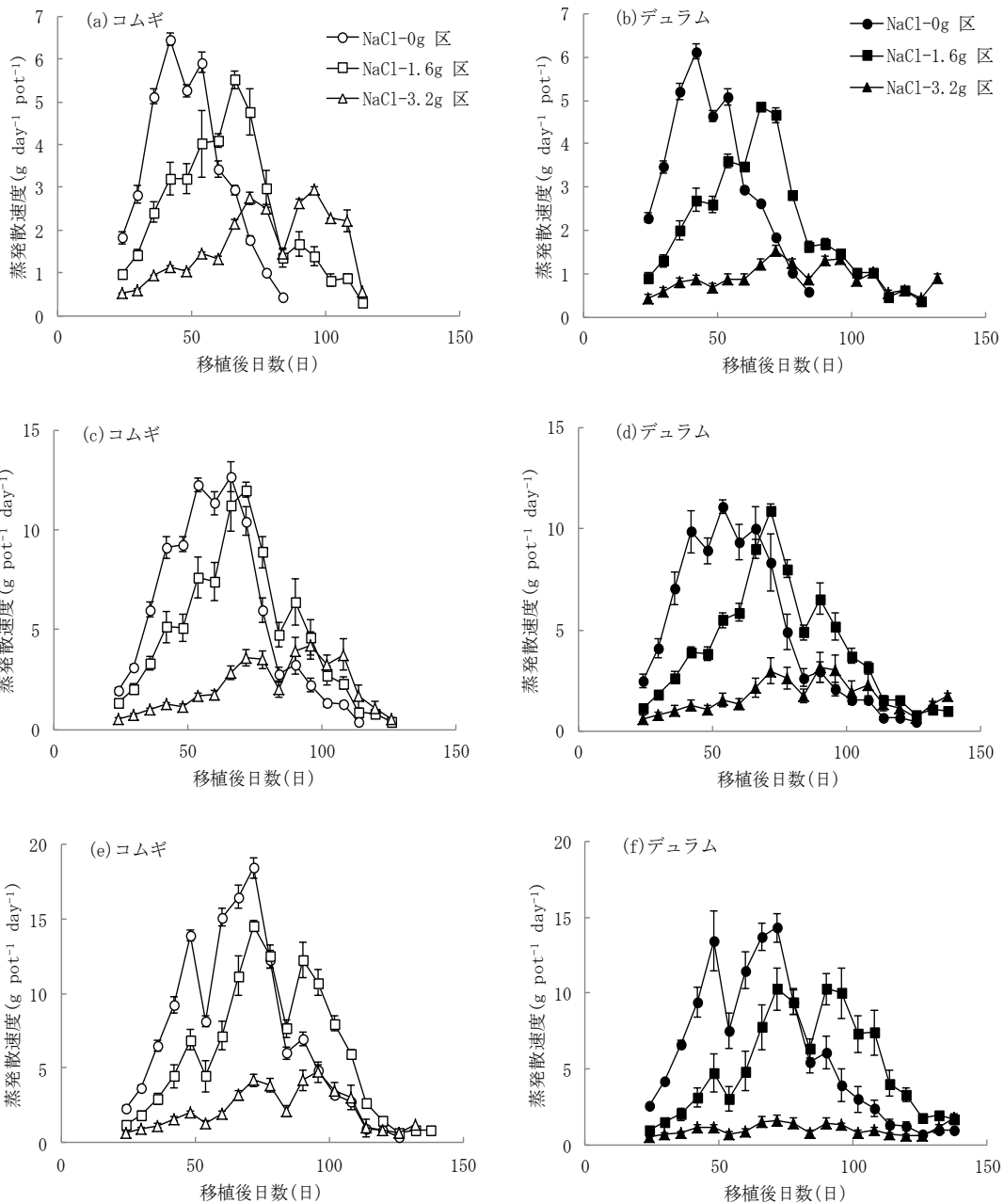
長さの異なるポットに異なる塩濃度土壌を詰め、土壌にある水分のみでコムギとデュラムを栽培し、蒸散が停止したとき（第 3-1 図）に収穫したところ、乾物重増加量は蒸発散量に比例的に増加した（第 3-9 図）。乾物重増加量と蒸発散量の比例関係は、土壌の塩濃度、与えられた土壌水分量、そして作物が異なっても同じとみなすことができた。第 2 章でもコムギとオオムギで乾物重増加量が蒸発散量の減少にともない低下したが、本研究ではそれよりも広い範囲で蒸発散量と乾物重増加量との比例関係が認められた。また、本研究ではコムギとデュラム、第 2 章ではコムギとオオムギで関係がほとんど変わらなかった。したがって、塩土壌における干ばつ条件下では 3 作物で乾物生産と蒸発散量との比例関係は類似していると考えられた。

蒸発散量の減少は、第 2 章と同様に土壌残存体積水分率の増加と対応していた（第 3-2, 6 図）。そして、第 2 章で土壌塩分布が不均一であったのとは異なり、最終的な土壌塩分布は概ね均一であった（第 3-7 図）。そこで、二つの研究を比較することによって、土壌塩分布が異なる条件における土壌残存体積水分率に影響を与える要因が異なるかどうかを調べた。土壌残存体積水分率は土壌 Na^+ 濃度が増加するほど、根重密度が低下するほど大となったが、根重密度との関係の方が強かった（第 3-8 図）。一方、第 2 章では土壌残存体積水分率は土壌 Na^+ 含有率との関係が強かった。したがって、土壌塩分布が均一か不均一かに

よって土壌残存体積水分率に及ぼす要因が異なり，主たる要因は均一な場合は根重あるいは根長密度すなわち根の成長であり，不均一な場合は土壌 Na^+ 含有率すなわち土壌塩濃度であると考えられた．なお，根の成長および土壌塩濃度と土壌残存体積水分率との関係は，コムギとデュラムでほとんど変わらなかった．

デュラムの地上部 Na^+ 含有率は，コムギのそれに比べて著しく高かった（第 3-4 図）．デュラムはコムギより Na^+ を体内に蓄積する性質（Zubaidi ら 1999）があり，土壌乾燥条件で特別にみられることではなかった．地上部 Na^+ 含有率の増加に対する地上部乾物重増加量の反応は，デュラムの方が弱かった．同程度に乾物重増加量が低下するためには，デュラムはコムギの約 3 倍の地上部 Na^+ 含有率にならなければならなかった．

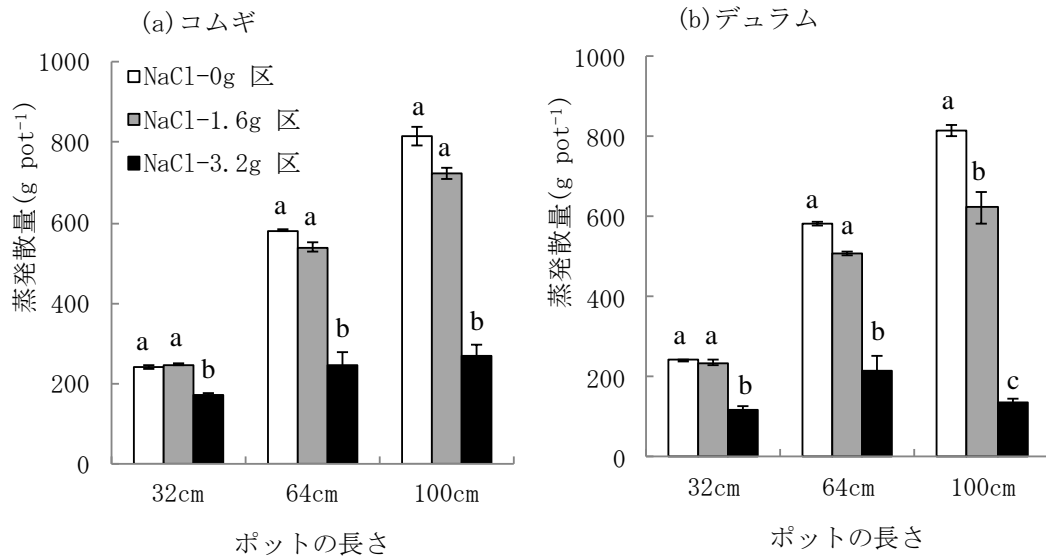
以上のように塩土壌における干ばつ条件ではコムギ，オオムギ，デュラムの 3 作物で乾物重増加量は，蒸発散量に比例的に増加することが見出された．そして，この比例関係は，作物種，土壌塩濃度，植物体の Na^+ 含有率の影響を受けないと考えられた．さらに，蒸発散量および土壌残存体積水分率に影響する要因は土壌塩分布が均一な場合は根の成長，不均一な場合は土壌塩濃度に依存し，これらの関係には 3 作物間で大きな違いはないと考えられた．



第3-1図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギとデュラムの蒸発散速度に及ぼす影響。

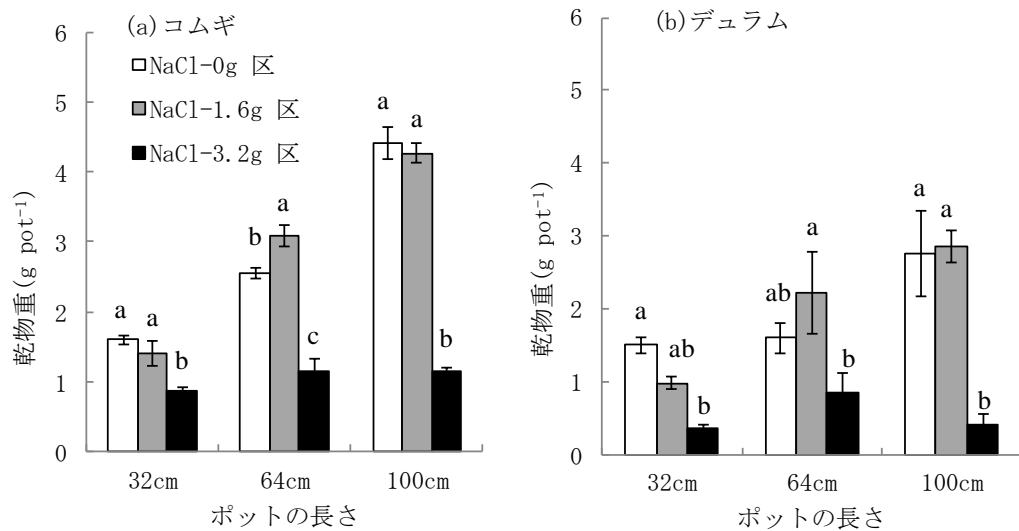
(a), (c), (e) はそれぞれコムギの 32 cm, 64 cm と 100 cm ポット, (b), (d), (f) はそれぞれデュラムの 32 cm, 64 cm と 100 cm ポットを示す。

値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す。



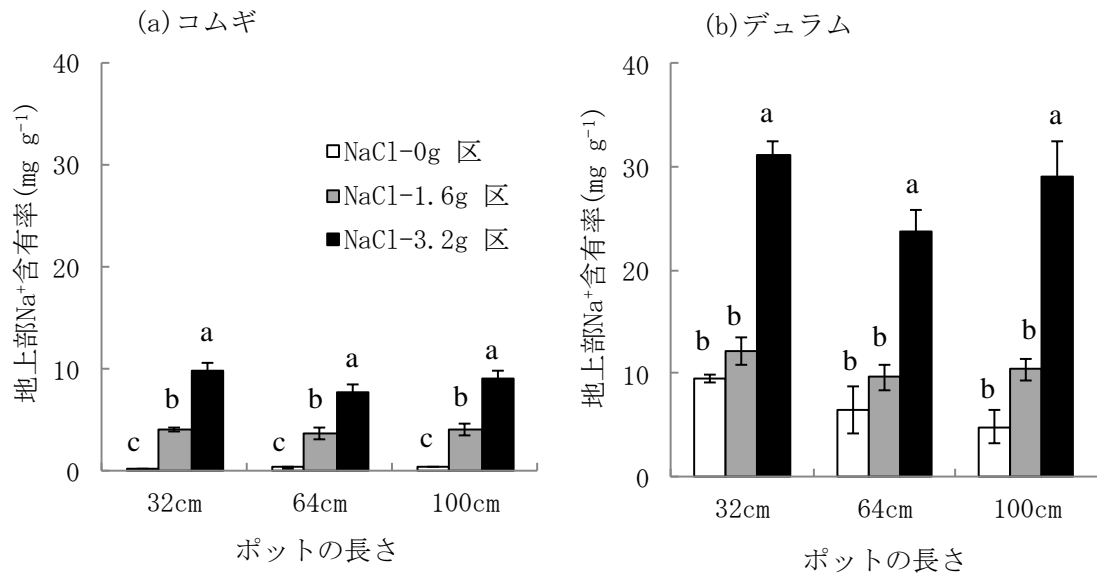
第 3-2 図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギ (a) とデュラム (b) の蒸発散量に及ぼす影響.

値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じポットの長さで同じアルファベットの間には Tukey 法 ($p=0.05$) で有意な差がないことを示す.



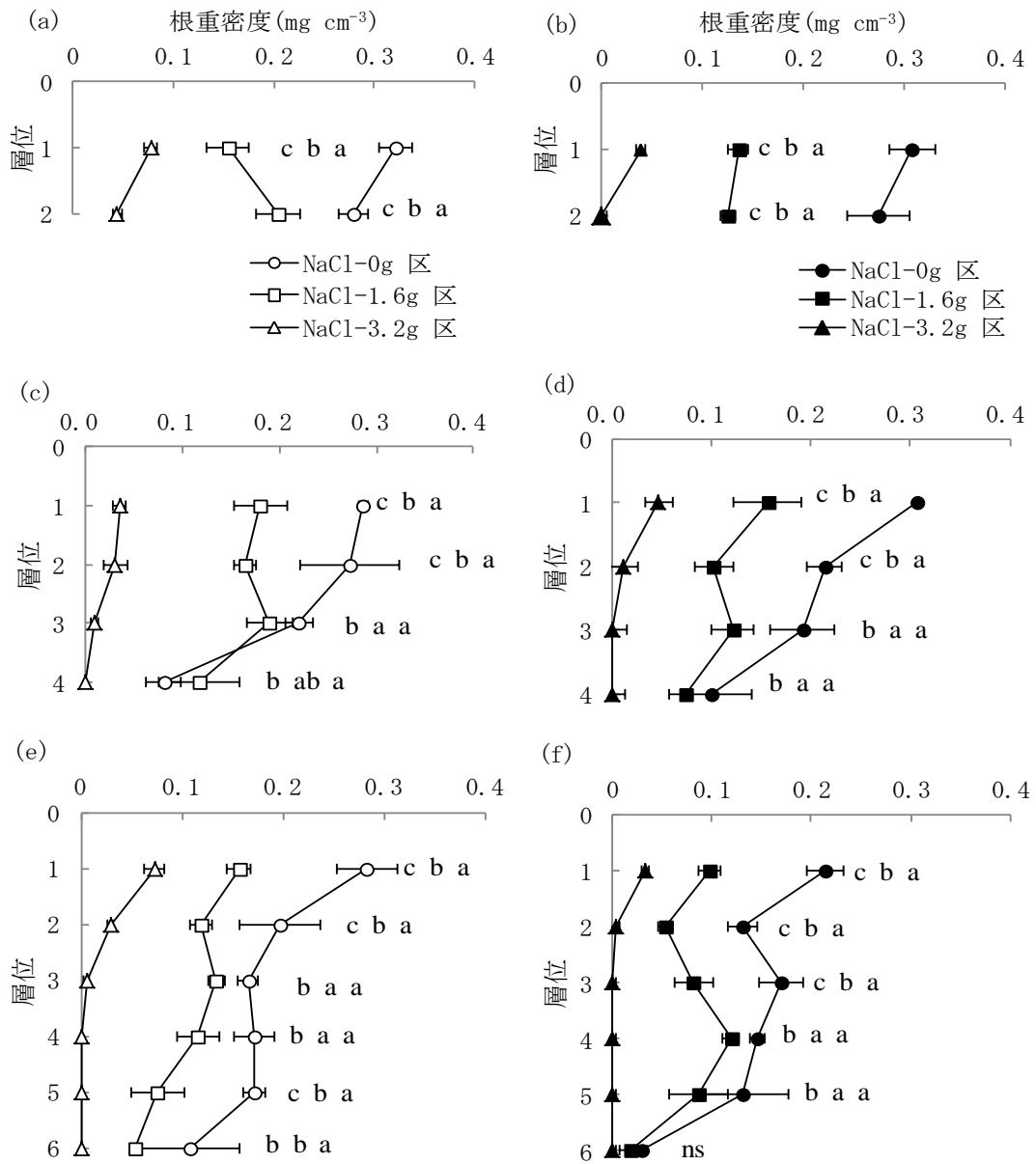
第 3-3 図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギ (a) とデュラム (b) の地上部乾物重に及ぼす影響.

値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じポットの長さで同じアルファベットの間には Tukey 法 ($p=0.05$) で有意な差がないことを示す.



第 3-4 図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギ (a) とデュラム (b) の地上部 Na⁺含有率に及ぼす影響.

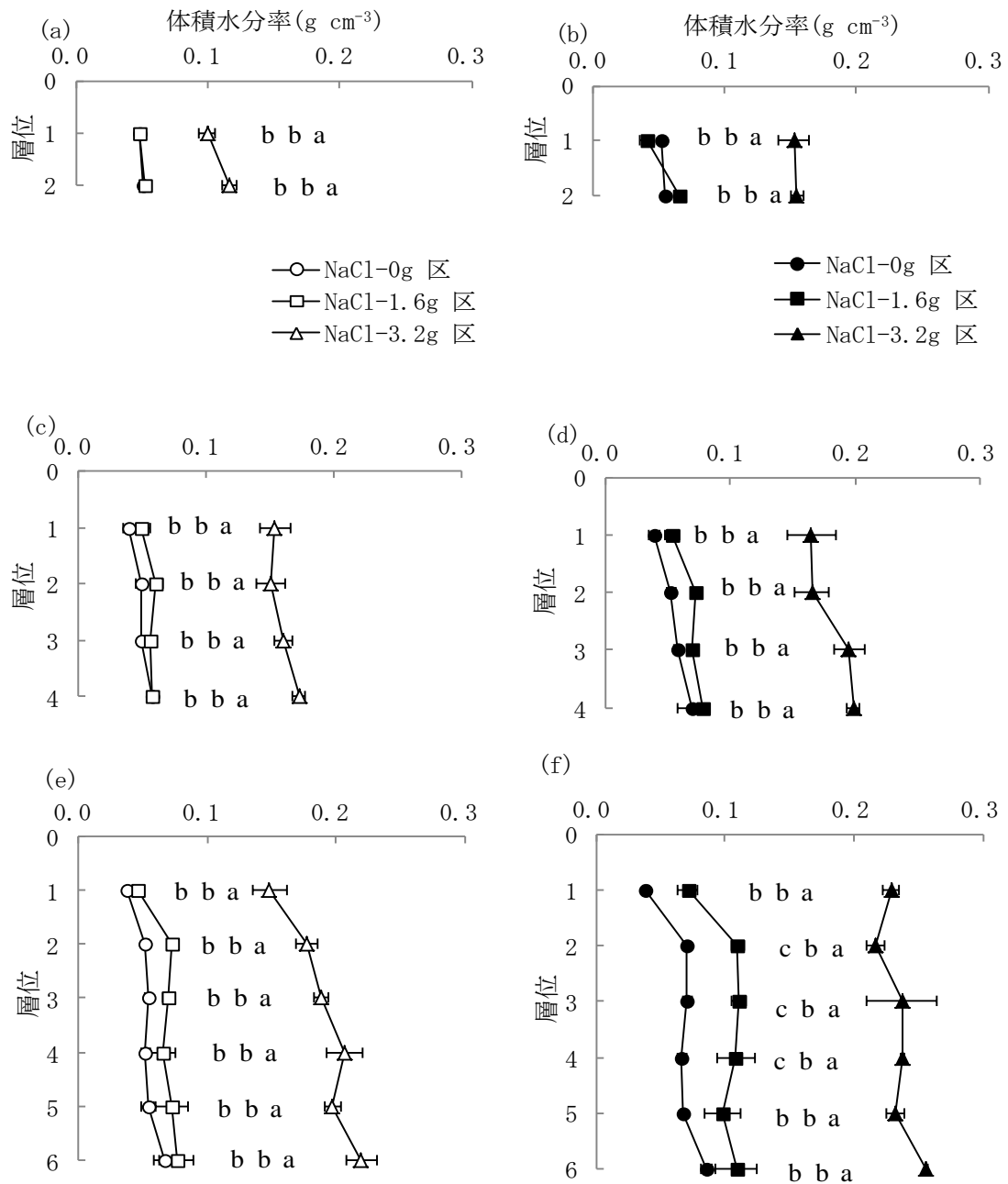
値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じポットの長さで同じアルファベットの間には Tukey 法 (p=0.05) で有意な差がないことを示す.



第3-5図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギとデュラムの層別の根重密度に及ぼす影響.

(a), (c), (e) はそれぞれコムギの32 cm, 64 cm と100 cmポット, (b), (d), (f) はそれぞれデュラムの32cm, 64cm と100cmポットを示す.

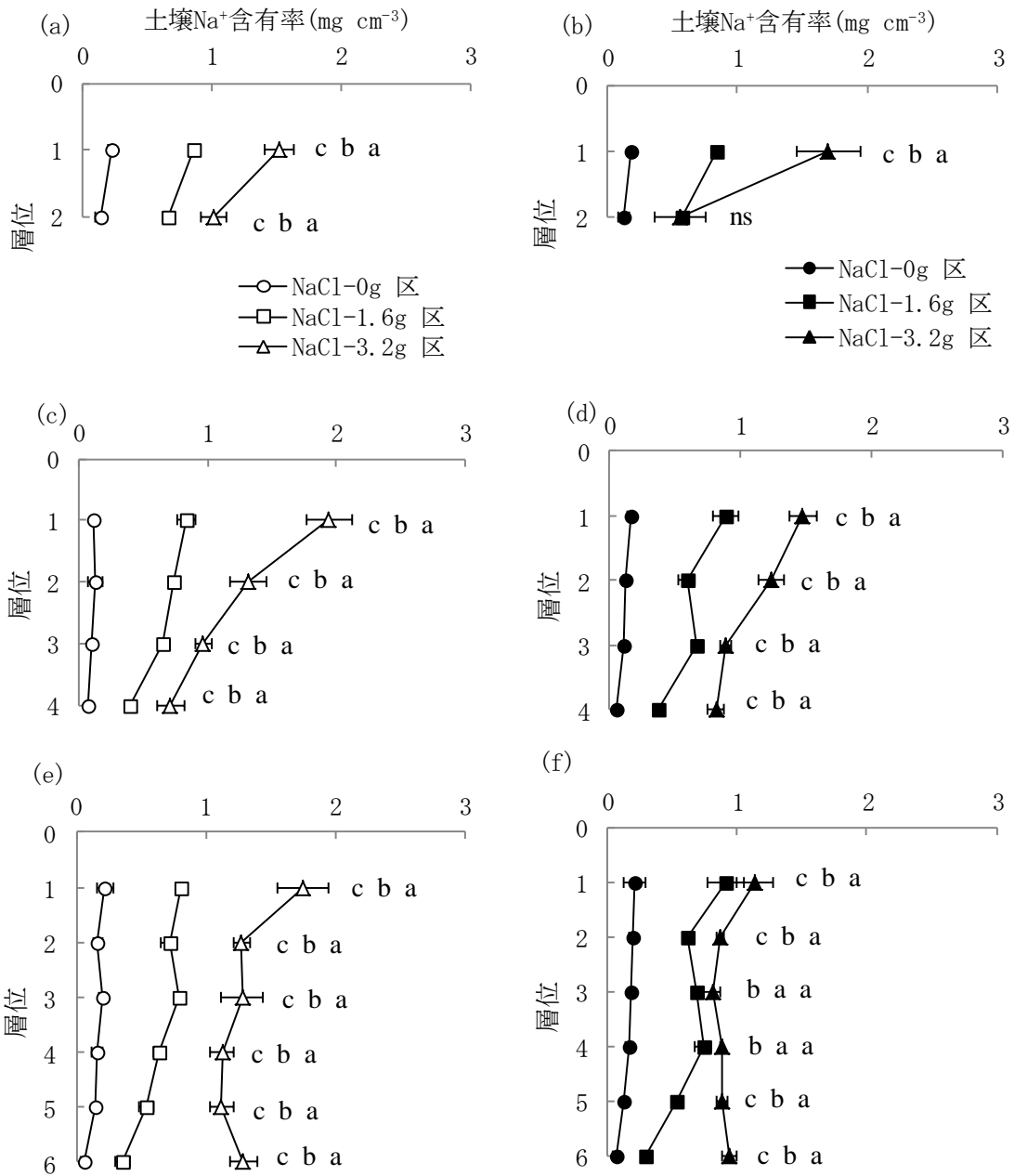
値は3反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じ層位で同じアルファベットの間にはTukey法 ($p=0.05$) で有意な差がないことを示す.



第3-6図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギとデュラムの層別土壌残存体積水分率に及ぼす影響.

(a), (c), (e) はそれぞれコムギの 32 cm, 64 cm と 100 cm ポット, (b), (d), (f) はそれぞれデュラムの 32 cm, 64 cm と 100 cm ポットを示す.

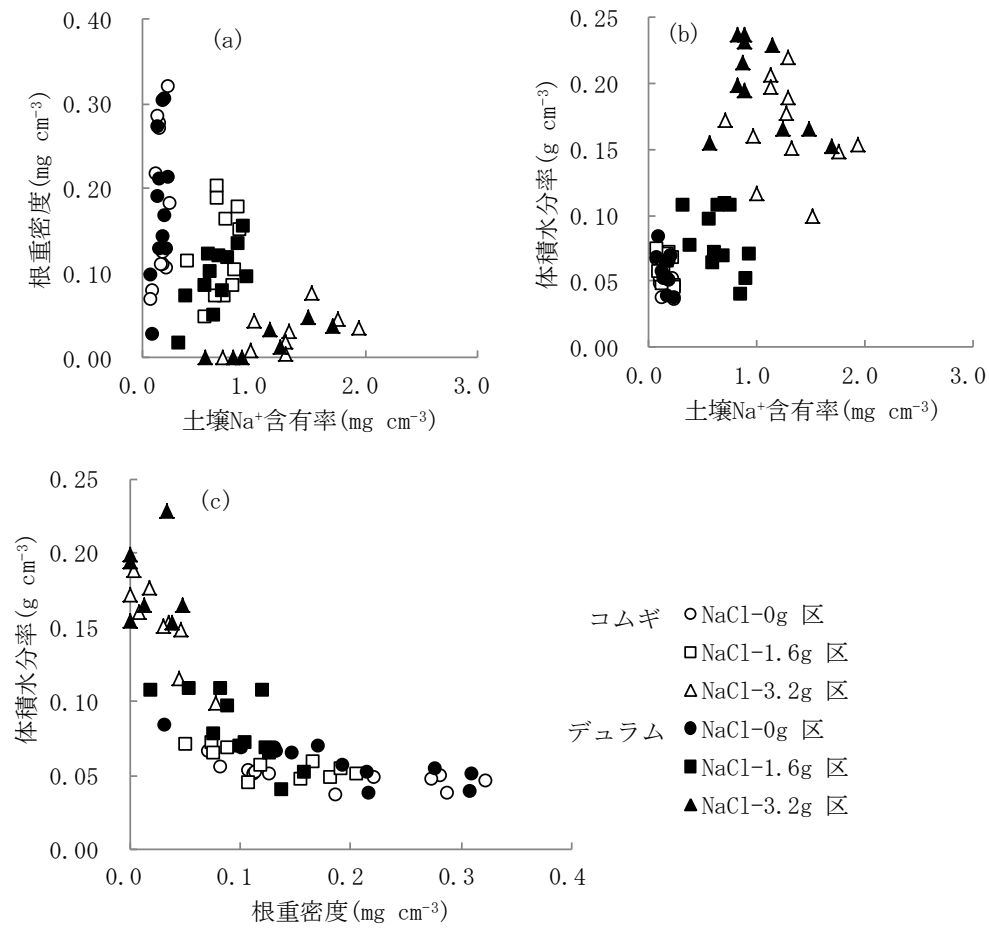
値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じ層位で同じアルファベットの間には Tukey 法 (p=0.05) で有意な差がないことを示す.



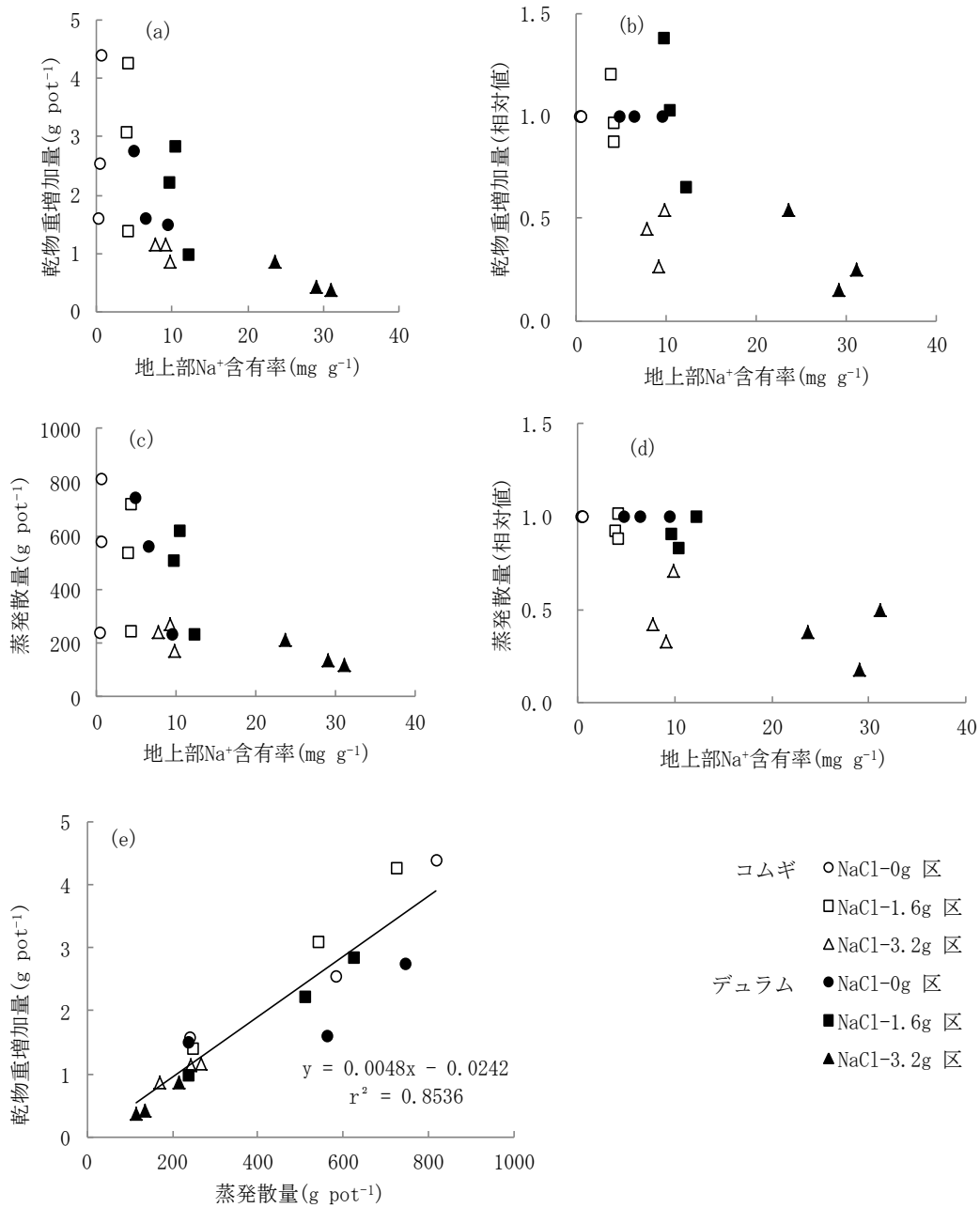
第3-7図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギとデュラムの層別土壌Na⁺含有率に及ぼす影響。

(a), (c), (e) はそれぞれコムギの32 cm, 64 cmと100 cmポット, (b), (d), (f) はそれぞれデュラムの32 cm, 64 cmと100 cmポットを示す。

値は3反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じ層位で同じアルファベットの間にはTukey法 (p=0.05) で有意な差がないことを示す。



第3-8図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギとデュラムの層別の土壌 Na⁺含有率と根重密度 (a), 層別の土壌 Na⁺含有率と土壌残存体積水分率 (b), 層別根重密度と土壌残存体積水分率 (c) の関係に及ぼす影響.



第 3-9 図 長さの異なるポットにおける土壌塩濃度の違いがコムギとデュラムの地上部 Na⁺含有率と地上部乾物重増加量(a, b), 地上部 Na⁺含有率と蒸発散量 (c, d), 蒸発散量と地上部乾物重増加量 (e) の関係に及ぼす影響.

第4章 土壌の塩濃度と量の違いがイネの水利用と乾物生産に及ぼす影響

緒言

ムギ類を用いて第2,3章では塩土壌で干ばつが起こる条件で乾物生産が高くなる作物の要因を調べてきた。一般的に土壌水分が十分な条件下と同様に干ばつ条件下においても作物の乾物生産は、蒸散量に比例的に増加する (Ludlow and Muchow 1990, Loomis and Conner 1992, Kobata ら 1996)。一方、多くの作物で水利用効率は、水分が十分である条件下で塩の影響をあまり受けなかった (Shalhevet 1994)。したがって塩土壌における干ばつ条件下でも乾物生産は蒸発散量の減少とともに低下すると考えられた。第2,3章ではコムギ, オオムギ, デュラムで蒸発散量と乾物生産の比例関係が成り立つことが示された。イネの水利用効率は十分に水がある条件下で塩の影響を受けなかった (Flowers ら 1988)。このことから、イネでも塩土壌においても干ばつ条件下で蒸発散量が多いほど乾物生産が高いと考えられたが、イネでは蒸発散量と乾物生産の関係を調べた研究は見当たらなかった。

干ばつ条件下で作物は根を広く張ることや深根性によって利用可能な水分量を大きくして、蒸散量を増加させた (Yoshida and Hasegawa 1982, Ludlow and Muchow 1990, Kobata ら 1996, Turner ら 2001, Sie ら 2009, Serraj ら 2009)。イネ根の成長は塩ストレスによって抑制される (Akbar ら 1972, Lutts ら 1995, 劉ら 2008) ことから、塩土壌では根域が制限されるため蒸散量が低下すると考えられた。一方、ムギ類の研究において土壌水分の吸収は、土壌塩分布が均一な場合には根の成長が重要であった (第2,3章)。したがって、イネでも塩土壌において利用できる水分は、根の成長低下と高い土壌 Na^+ 含有率によって減少すると考えられるが、どちらの要因がより重要であるかは研究されていなかった。そこで本研究では Na^+ 含有率と量が異なる土壌で土壌に存在する水分のみでイネを栽培し、乾物生産が蒸散量に比例するかどうかおよび吸水される土壌水分量が根の成長に依存するかどうかを検討した。

材料と方法

実験は、岡山大学農学部研究圃場で2008年に行なわれた。イネ (*Oryza sativa* L.)耐塩性品種 IR4595-4-1-13 (以下 IR4595) と対照品種として日本晴を用いた。種籾を水に漬け、25°Cに設定した恒温器内で催芽した。5月15日に成苗移植用ポット (みのる産業株式会社製, みのるポット) に1ポットに1粒ずつ播種して、畑状態で育苗した。

容量 1 L ポットに 1 kg, 5 L ポットに 2 kg と 4 kg, 13 L のポットに 6 kg と 10 kg の篩って乾燥させた水田土壌を入れた。土壌の表面積は土壌 1~10 kg でそれぞれ, 92, 305, 314, 527, 539 cm² となった。土壌 1 kg 当たり高度化成肥料 (N:P₂O₅:K₂O=16:16:16) を 0.8 g 混ぜた。土壌重量の 50%の水に土壌 1 kg 当たり 1 g および 2 g の塩化ナトリウム (NaCl) を溶かしてポットに灌水し, NaCl-1 g 区および NaCl-2 g 区とした。塩を加えない水をポットに灌水したものは, NaCl-0 g 区とした。なお, NaCl 添加量土壌 1 kg 当たり 2 g は, 当研究室で水稻を湛水条件で栽培したとき NaCl を添加しないで栽培したときの約 30% に低下する濃度であった (王ら 2007)。すなわち, 塩土壌が作物の生存ではなく収量に影響をおよぼす水準と考えて設定した。反復は, 1 ポット 1 反復として, 3 反復行なった。水と NaCl 溶液は 6 月 4 日に加え, 6 月 6 日にポット当たり 1 個体を移植した。容器全体の移植前と移植後の重さを測定して記録した。移植後に給水しなかったため, イネは移植時に土壌中に存在する水分のみで成長した。

移植した日から朝 9 時に草丈および伸長中葉身の抽出長を測定した。第 n 葉の抽出長は, 第 (n-1) 葉の葉耳から第 n 葉の先端までとした。測定は 2 日ごととし, 2 日間の増加が 0.5 cm 以下になった日に葉の伸長が止まったとみなして, ポット全体の重さを測定した。蒸発散量は, 移植時から伸長停止日までのポット重減少量とした。そしてポット全体重からポットと土壌乾燥重を引いた値を土壌残存水分量とした。地上部を採集すると同時に根は水で土壌を洗い流して 2.0 mm 目のメッシュで回収し, 80 °C で 3 日間乾燥させ, 乾物重を測定した。枯死部, 茎葉部の乾物重を測定後, 乾物試料を小型粉砕機で粉砕し, 0.2 g を秤量し一晩 80 °C に設定したオープン内で乾燥させた。室温で 30 分間放冷後, 乾物重を測定し約 12 mL の蒸留水とともに試験管 (120 mL 容) に入れ, 180 °C に設定したホットプレートで 3 時間熱湯抽出した。得られた抽出液はメスフラスコを用いて 25 mL にメスアップし, イオンメーター (HORIBA, コンパクトイオンメーター, C-122) により Na⁺含有率を分析した。

結果

第 4-1 図は, 草丈と主茎各葉位の葉身抽出長の変化を例示したものである。移植は主茎第 6 葉が伸長を終えるころであった。第 7, 8 葉の抽出は移植後 8, 12 日まで続いたが, 草丈の増加は 14 日まで認められた。草丈の増加が認められなくなった後, 第 9 葉の抽出が続き, 抽出速度が 2 日で 0.5 cm より少なくなった日は, 移植後 18 日であった。そのとき新

しい葉の抽出は認められず、植物体を採集した。このように求めた葉身の抽出が停止するまでの日数は、土壌の量が多いほど長くなった (第 4-2 図)。葉身の抽出が停止するまでの日数は IR4595 で NaCl 添加の影響をほとんど受けなかったものの、日本晴では土壌 10 kg を除くと NaCl-2 g 区が NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区より短くなった。

最終的な地上部乾物重は土壌の量が多いほど大きく、土壌塩濃度が高いほど小さかった (第 4-3 図 ac)。土壌塩濃度の増加にともなう乾物重の低下程度は、品種で差があった。地上部乾物重は土壌の量が同じ NaCl-0 g 区を基準にして NaCl-1 g 区では日本晴と IR4595 でそれぞれ平均 70%、41%の低下で、NaCl-2 g 区ではそれぞれ平均 91%、81%の低下であった。地上部乾物重は移植時に IR4595 と日本晴でそれぞれ個体当たり 0.11 g および 0.08 g であった。最終的な乾物重は IR4595 で移植時より増えていたものの、日本晴の NaCl-2 g 区では土壌 10 kg を除いて移植時より低下していた。根の乾物重は地上部乾物重と同様に土壌が多いほど大きく、土壌塩濃度が高いほど低下した (第 4-3 図 bd)。なお、乾物重の塩による低下程度は地上部と根で類似していた。例えば各土壌量で NaCl-0 g 区と比較して NaCl-1 g 区の根乾物重は、異なる土壌量の区を平均して日本晴で 74%、IR4595 で 51%の低下であった。このように地上部と根の乾物重の塩による低下程度は、IR4595 より日本晴が大きかった。

地上部 Na⁺含有率は、土壌量にかかわらず土壌塩濃度が高いほど大となった (第 4-4 図)。地上部の Na⁺含有率は、NaCl-1 g 区で日本晴では平均 10 mg g⁻¹、IR4595 で 3 mg g⁻¹、NaCl-2 g 区ではそれぞれ 31 mg g⁻¹、21 mg g⁻¹ となり、日本晴で Na⁺の蓄積が大きかった。

伸長停止日に土壌に残っている水分量は日本晴の方が IR4595 よりも多と同時に、土壌が多いほど、そして土壌塩濃度が高いほど多かった (第 4-5 図 ac)。土壌残存水分含有率は、NaCl-0 g 区では土壌の量と品種による変化はほとんどなく平均約 5%であった (第 4-5 図 bd)。土壌残存水分含有率は塩濃度が高いほど大きくなると同時に、値は日本晴の方が IR4595 よりも大きかった。

地上部乾物重の増加量を各品種の NaCl-0 g 区に対する相対値で表し、地上部 Na⁺含有率との関係を調べた (第 4-6 図)。増加量の相対値は、Na⁺含有率の小さな増加に対して大きく低下した。そして、地上部 Na⁺濃度が 20 mg g⁻¹を超えると乾物重増加量の相対値は負の値になった。なお、乾物重増加量の相対値と Na⁺含有率との関係は品種間でほとんど変わらなかった。

日本晴の NaCl-2 g 区ではほとんど乾物重の増加が見られなかったため、これらの値を除

いてダミー変数を用いた重回帰分析を行なった。その結果、各土壌量で2品種を込みにして蒸発散量が1 kg 増えると地上部乾物重が個体当たり4.9 g 増える関係が認められた ($R^2=0.916$, $P<0.001$) (第4-7図)。このように地上部乾物重の増加量は、それぞれの土壌量で蒸発散量が多いほど大であった。なお、回帰直線とx軸との交点の値は土壌からの蒸発量を示すが、土壌が多いほど大きくなり、約420~3,500 g pot⁻¹の変異があった。蒸発量は土壌の表面積よりも土壌量との相関関係が強かった(データ示さず)。

第4-8図は根重密度と土壌残存水分含有率の関係をまとめ、全体の傾向を示すために指数関数をあてはめたものである。根重密度が30 mg kg⁻¹より小さいと根重密度に関わらず土壌残存水分含有率が大きくばらついたが、この値より大きいと水分含有率は3.4%~8.5%、の範囲で平均5.2%であった。それぞれの塩濃度でみるとNaCl-0 g区では土の量に関わらず根重密度は30 mg kg⁻¹を超えていると同時に水分含有率は平均4.7%と低かった(第4-8図ad)。土壌塩濃度が高いNaCl-1 g区では根重密度はIR4595では30 mg kg⁻¹を上回ったが、日本晴ではほぼその値以下であった(第4-8図b)。これに対応して土壌残存水分含有率はIR4595では平均5.2%であったが、日本晴では8.4%と高かった(第4-8図e)。さらに塩濃度が高いNaCl-2 g区では根重密度はIR4595の方が大きかったが2品種とも平均30 mg kg⁻¹以下であり、土壌残存水分含有率はIR4595、日本晴でそれぞれ平均9.5%、18%と高かった。なお、土壌のNa⁺濃度と水分含有率の相関関係は1%水準で有意であったが、決定係数は0.5に満たない小さな値であった(第4-8図h)。

考察

大きさの異なるポットに塩濃度と量が異なる土壌を詰めて、限られた土壌水分でイネ2品種を栽培した。そして葉身の伸長が停止した日を成長停止日とみなし(第4-1図)、それまでの蒸発散量を利用可能な水分として評価した。土壌は実験開始時には十分水分を保持していたが、成長停止時には厳しい土壌水分欠乏状態であった(第4-5図)。このような条件下で地上部乾物重は、土壌塩濃度の違いにかかわらず蒸発散量に比例的に増加した(第4-7図)。これらのことから、コムギ、オオムギ、デュラム(第2,3章)と同様にイネにおいても干ばつ条件下の塩土壌において蒸発散量が多いほど乾物生産が高いことが分かった。すなわちイネの乾物生産は、水分が限られている塩土壌で利用可能な水分量に左右される。

イネ栽培に用いた土壌は1~10 kgの広い範囲であったため、土壌残存水分量は土壌が多

いほど増えた（第 4-5 図）。ただし、土壤残存水分含有率は NaCl-0 g 区すなわち普通の土壤では土壤量に影響を受けず低かった（第 4-5, 8 図）。そして根重密度は、2 品種ともに高い値であった（第 4-8 図）。このように土壤の量は、塩ストレスがなければイネの根が土壤全体に成長し、水分を吸収できるものであった。一方、土壤塩ストレスを与えた区では土壤残存水分の量と含有率は、普通の土壤における値よりも大であった（第 4-5 図）。したがって、塩ストレス条件下では根の成長が抑制されたか、高土壤 Na^+ 濃度による土壤の水ポテンシャル低下や根の機能低下によって吸水が阻害されたと考えられた。

それでは、根の成長抑制と機能低下のどちらの要因が重要であろうか。土壤 Na^+ 含有率と残存水分含有率の相関が弱く、そして土壤 Na^+ 含有率が高くとも土壤残存水分含有率は根重密度が大ききときにはかなり低い値であった（第 4-8 図）。このことから塩土壤で吸水量が低下したのは、高塩濃度による土壤の水ポテンシャル低下や根の機能低下が主たる要因ではないと推測された。

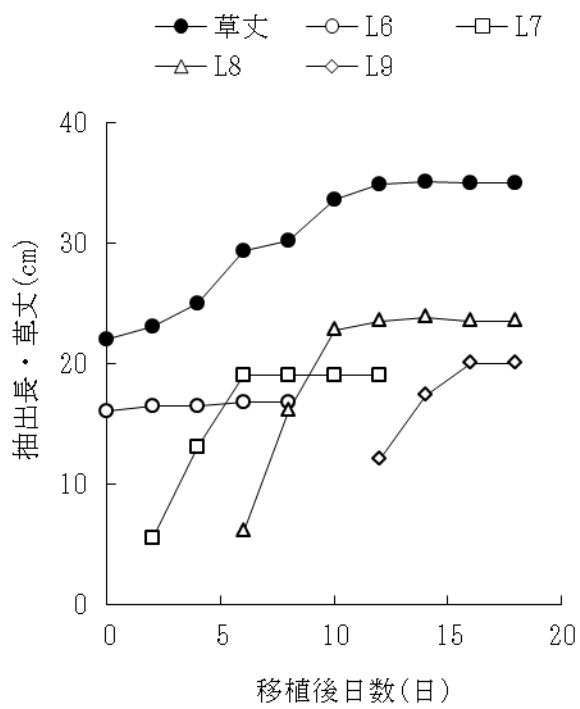
次に根の成長と残存水分含有率との関係を検討した。残存水分含有率は、根重密度が小さいときにのみ高くなるものが認められた（第 4-8 図）。そして水分含有率が高くなるのは、土壤塩濃度が高く土壤が多い試験区でみられ、土壤が少ない区では根重密度が小さくても水分含有率は小さかった。一方、根全体の成長は土壤塩によって著しく阻害された（第 4-3 図）。したがって、土壤の多いところで平均的な根重密度が低くなったのは根の成長が抑制されて、根があまり張っていない部分ができたため、その部分の水分が十分に吸収されなかったためと考えられた。

この検討結果はコムギとオオムギで得られた結論すなわち土壤水分の吸収量が減ったのは根の成長が抑制されたためではなく、主として土壤 Na^+ 含有率が高いことによる（第 2 章）と異なった。しかしコムギとデュラムで得られた結論すなわち土壤水分の吸収量が減ったのは土壤 Na^+ 含有率が高いことによりも、主として根の成長が抑制されたことによる（第 3 章）と同じであった。前者は土壤塩分布が不均一で、後者は均一であった。本研究で土壤塩分布は明らかではないが、NaCl を水溶液として加えているので、土壤塩分布が均一であったと推測された。このため、本研究の結果はコムギとデュラムの結果と一致したものと考えられた。

土壤塩濃度に対する地上部乾物生産の反応に品種間差が見られ、日本晴より IR4595 で塩による乾物重の低下程度が小さかった（第 4-3 図）。地上部 Na^+ 含有率の増加に対する地上部乾物重の低下程度には 2 品種で類似していた（第 4-6 図）ので、日本晴が多く Na^+ を

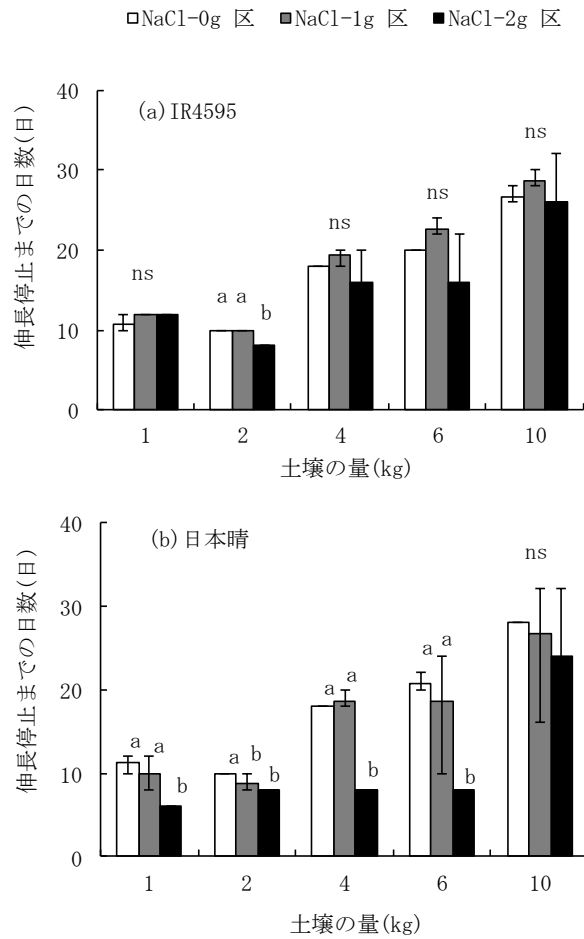
蓄積する（第 4-4 図）ため乾物生産が小さかったものと考えられた。一方、従来からイネの根の成長が塩ストレスによって阻害される（Akbar ら 1972, Lutts ら 1995, 劉ら 2008）ことが報告されてきたが、このような根の成長阻害は干ばつ条件下では利用できる土壌水分量を減少させると考えられた。したがって、塩土壌で水分量が制限されている条件下では植物体内の Na^+ 蓄積によって地上部の成長が抑制されると同時に根の成長が抑制されるために利用できる水分の量が減少して乾物生産が低下すると考えられた。

以上をまとめると、土壌水分が限られた塩土壌では植物体内の Na^+ 蓄積による成長抑制と同時に根が小さくなり、このため利用できる水分が減少し、乾物生産が抑制されることが分かった。



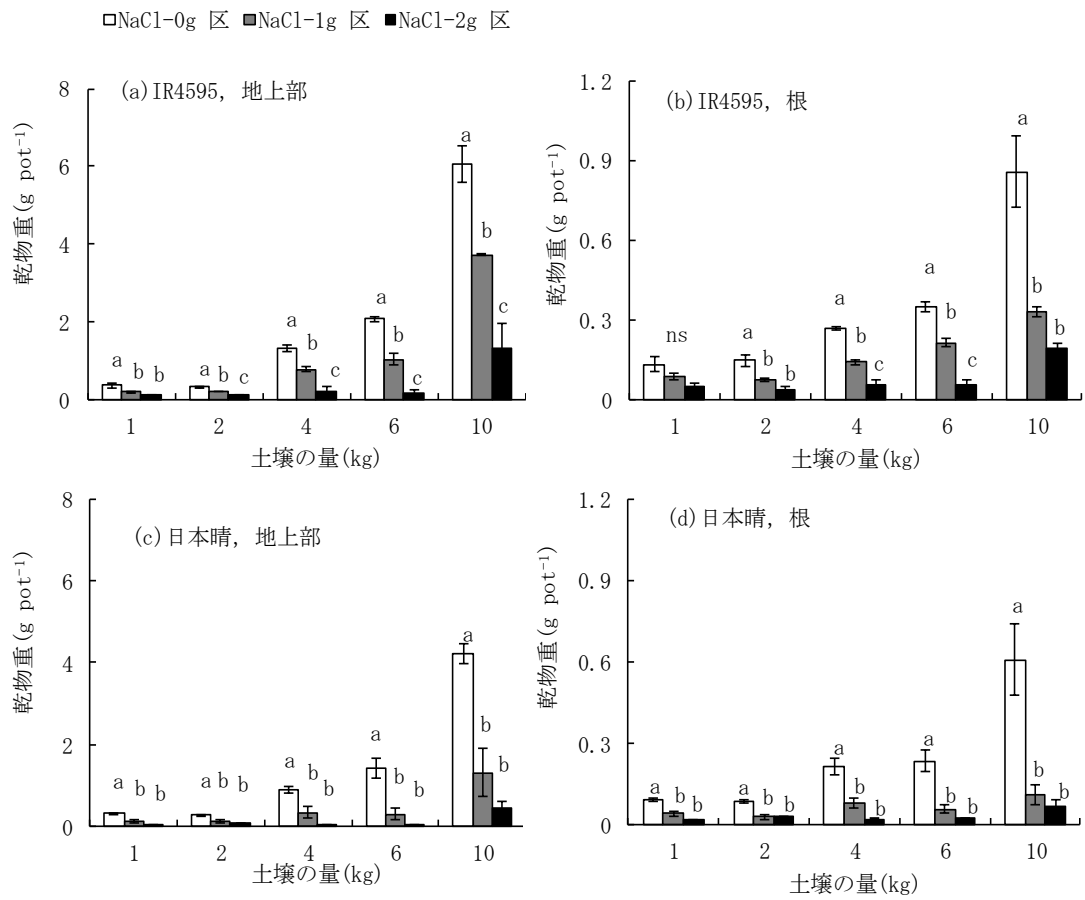
第 4-1 図 草丈と葉身抽出長の推移.

日本晴, 土壌 4 kg の NaCl-0 g 区 1 個体の測定例で, L6~L9 は第 6~9 葉を示す.



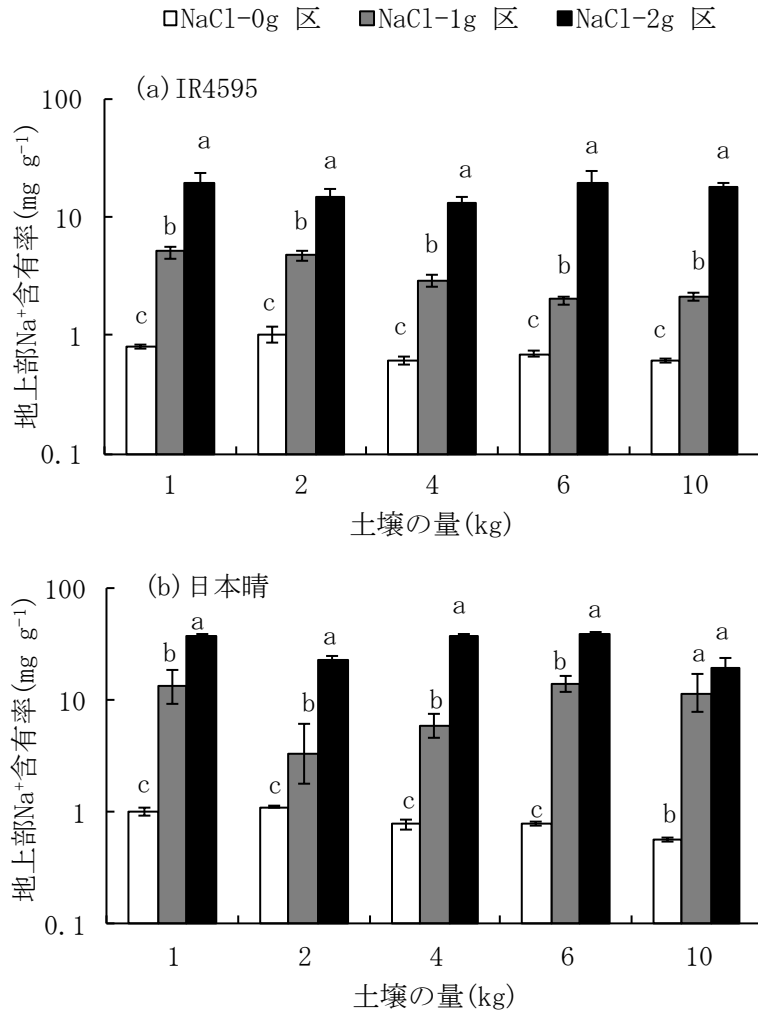
第 4-2 図 イネ 2 品種 IR4595 (a) と日本晴 (b) における土壌の塩濃度と量が移植から葉身の伸長停止までの日数に及ぼす影響。

NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区, NaCl-2 g は, それぞれ土壌 1 kg 当たり NaCl を 0 g, 1 g, 2 g 混和した. 値は 3 ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す. 同じ土壌の量で同じアルファベットの間には Tukey 法で有意な差がないこと, ns は平均値間に有意な差がないことを示す.



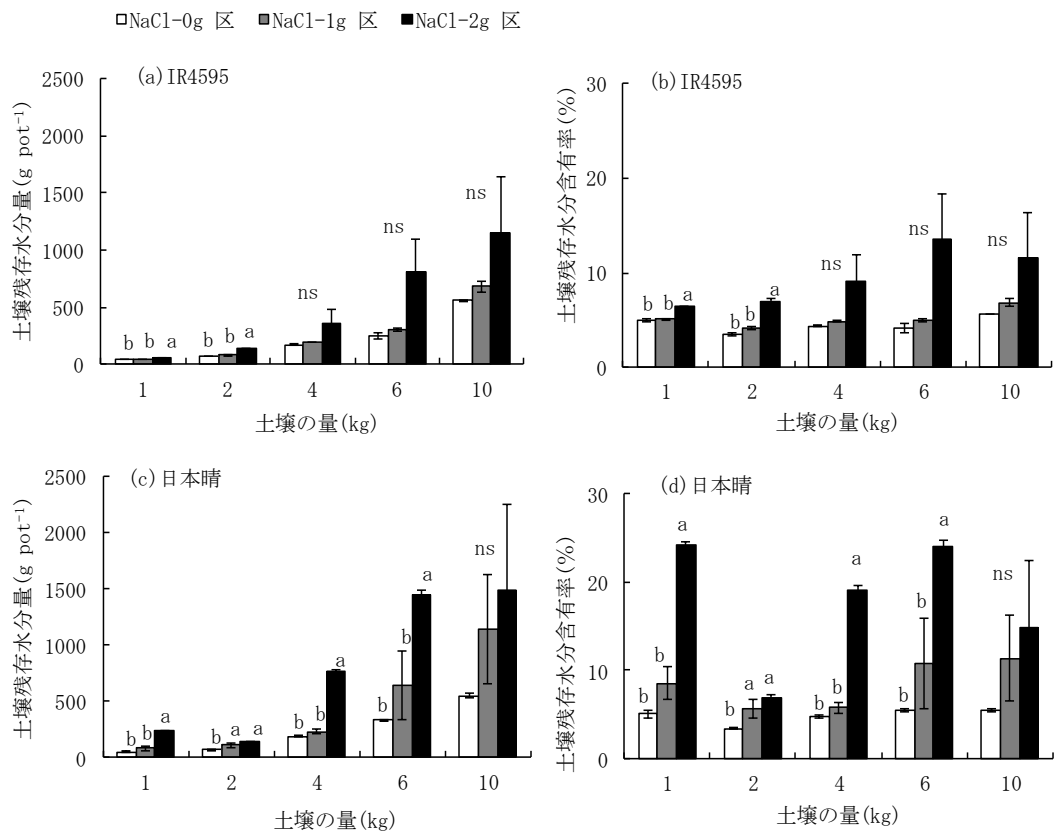
第 4-3 図 イネ品種 IR4595 (a, b) と日本晴 (c, d) における土壌の塩濃度と量が葉身抽出停止日の地上部 (a, c) と根 (b, d) の乾物重に及ぼす影響。

NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区, NaCl-2 g は, それぞれ土壌 1 kg 当たり NaCl を 0 g, 1 g, 2 g 混和した。値は 3 ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す。同じ土壌の量で同じアルファベットの間には Tukey 法で有意な差がないことを示す。



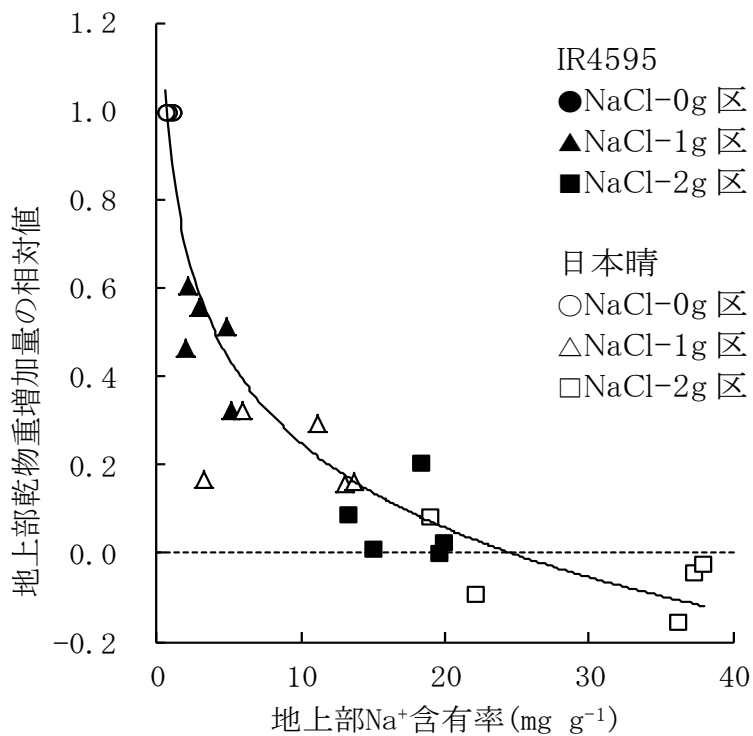
第 4-4 図 イネ品種 IR4595 (a) と日本晴 (b) における土壌の塩濃度と量が地上部 Na⁺含有率に及ぼす影響。

NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区, NaCl-2 g は, それぞれ土壌 1 kg 当たり NaCl を 0 g, 1 g, 2 g 混和した。値は 3 ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す。同じ土壌の量で同じアルファベットの間には Tukey 法で有意な差がないことを示す。



第 4-5 図 イネ 2 品種 IR4595 (a, b) と日本晴 (c, d) における土壌の塩濃度と量が土壤残存水分量 (a, c) と土壤残存水分含有率 (b, d) に及ぼす影響.

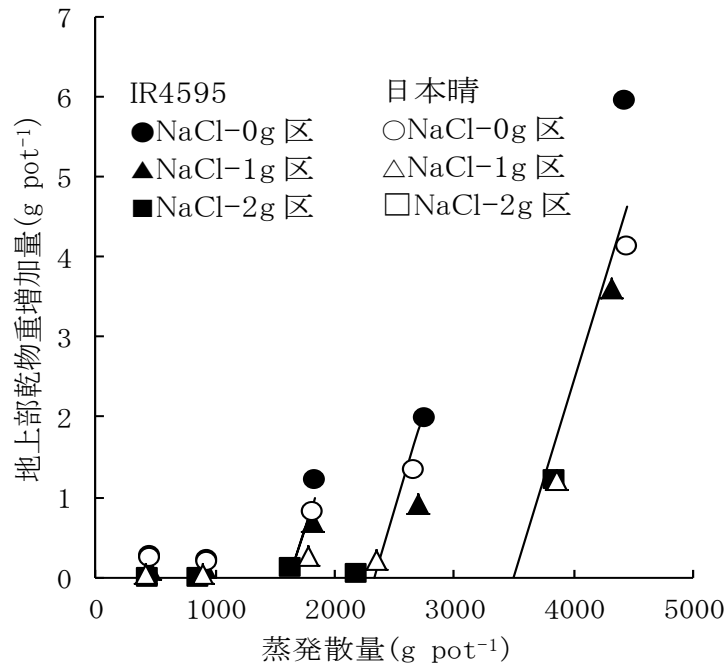
NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区, NaCl-2 g は, それぞれ土壌 1 kg 当たり NaCl を 0 g, 1 g, 2 g 混和した. 値は 3 ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す. 同じ土壌の量で同じアルファベットの間には Tukey 法で有意な差がないこと, ns は平均値間に有意差がないことを示す.



第4-6図 土壌の塩濃度と量が異なるポットで栽培したイネ品種IR4595と日本晴の地上部Na⁺含有率と地上部乾物重増加量の相対値の関係。

NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区, NaCl-2 g は, それぞれ土壌 1 kg 当たり NaCl を 0 g, 1 g, 2 g 混和した区を示す。図中の曲線はすべてのデータを用いてあてはめた。

$$y = 0.784 - \ln(x - 0.270) \quad R^2 = 0.942 \quad (P < 0.001) \text{ である。}$$



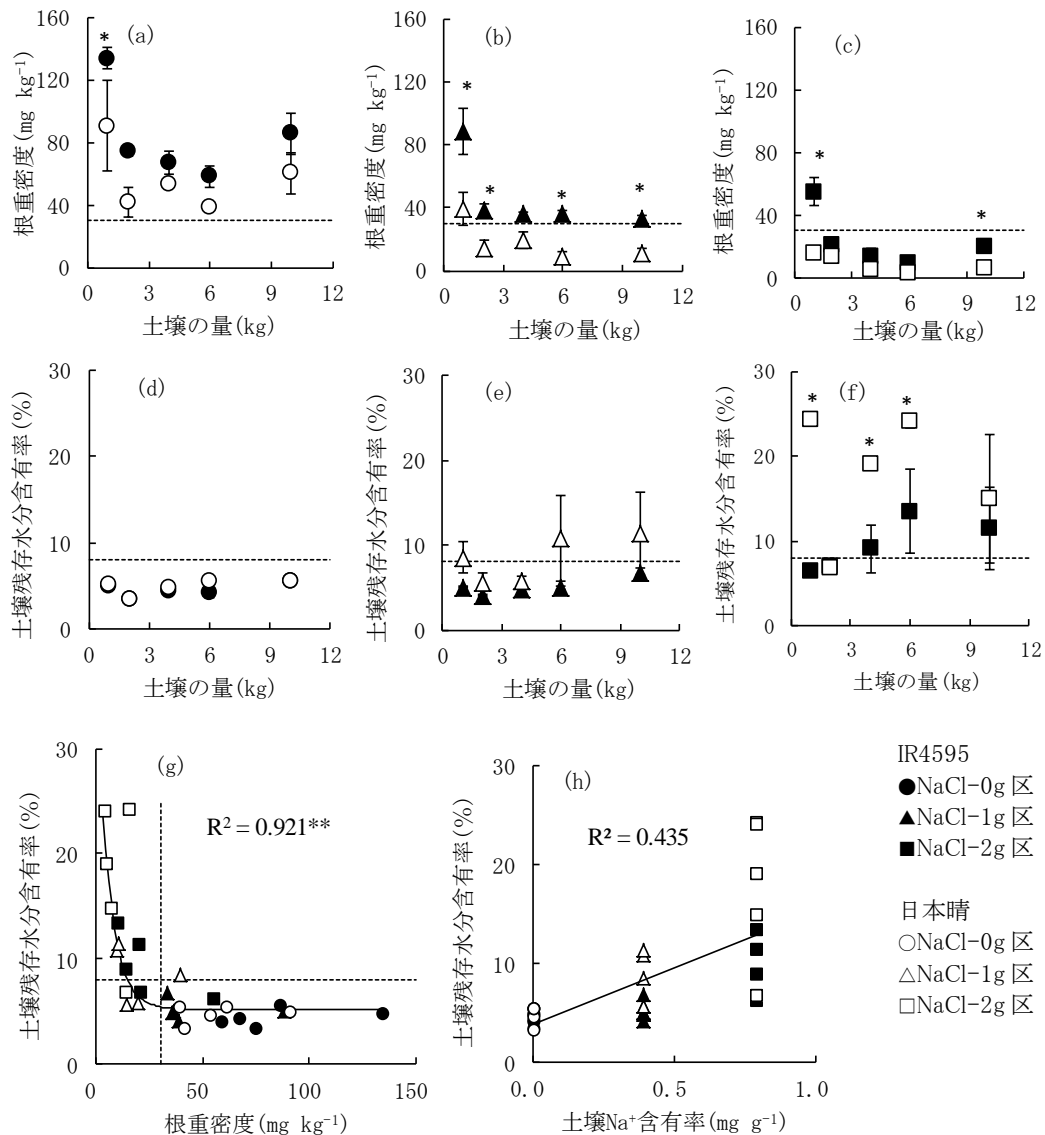
第4-7図 土壌の塩濃度と量が異なるポットで栽培したイネの蒸発散量と地上部乾物重増加量の関係に及ぼす影響。

NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区, NaCl-2 g は, それぞれ土壌 1 kg 当たり NaCl を 0 g, 1 g, 2 g 混和した。データのグループは左から土壌の量 1 kg, 2 kg, 4 kg, 6 kg, 10 kg である。なお, 日本晴 NaCl-2 g 区の値は除いた。

図中の直線はダミー変数を用いた重回帰である。

$$y = 0.00488x + m \quad (R^2=0.916, P<0.001)$$

m の値は土壌の量によって異なり, 1 kg; -2.038, 2 kg; -4.32, 4 kg; -8.03, 6 kg; -11.46, 10 kg; -17.16 である。



第4-8図 土壌の塩濃度と量が異なるポットで栽培したイネ品種IR4595と日本晴における根重密度，土壌のNa⁺含有率および残存水分含有率の関係。

NaCl-0 g 区，NaCl-1 g 区，NaCl-2 g は，それぞれ土壌 1 kg 当たり NaCl を 0 g，1 g，2 g 混和した区を示す。(a)～(c) の破線，(g) の縦破線は根重密度 30 mg g⁻¹ を，(d)～(f) の破線，(g) の横破線は水分含有率 8% を示す。(a)～(f) では同じ土壌量において 5% 水準で品種間差が認められたところのみに*を示した。(g) の曲線は，すべてのデータを用いてあてはめた。 $y=32.3 e^{-0.166 x}+5.25$ ($R^2 = 0.921$, $P<0.001$)，(h) の直線は， $y=11.5x+3.88$ ($r^2=0.435$, $p<0.01$)。

第5章 塩土壌で土壌水分が限られているときイネの水利用と乾物生産の品種間差

緒言

塩土壌で干ばつが生じる条件下で作物生産を改善する方法を見出すために乾物生産と蒸発散量すなわち作物が利用できる土壌水分の関係を検討してきた。従来の研究で乾物生産が蒸散量に比例的に増加するのは、土壌水分が十分な条件下、干ばつ条件下 (Ludlow and Muchow 1990, Loomis and Conner 1992, Kobata ら 1996)、水分が十分である塩条件下で示されてきた (Flowers ら 1988, Shalhevet 1994)。土壌水分が限られた塩土壌においても蒸散量と乾物生産の比例関係が成り立つかどうかを第2, 3章ではムギ類, 第4章ではイネを用いて実験を行なったところ, これらの作物で乾物生産は蒸発散量の増加に比例的であることを見出した。

蒸発散量の増加は作物が根を広く張ることや深根性によって利用可能な土壌水分を増やすことによるとともに品種間差が知られている (Yoshida and Hasegawa 1982, Ludlow and Muchow 1990, Kobata ら 1996, Turner ら 2001, Sie ら 2009, Serraj ら 2009)。一方, 第4章で示されたように耐塩性イネ品種は蒸発散量が多く, 塩土壌における干ばつ条件下で土壌水分の吸収が優れていた。したがって, 耐塩性品種のみでなく耐干性品種も塩土壌において土壌水分の吸収が維持され, その結果乾物生産が改善されると考えられた。しかし塩土壌における干ばつ条件下でこのような品種間差を調べた報告は見当たらないので, 本章で検討した。

材料と方法

実験は, 岡山大学農学部研究圃場で 2009 年に行った。イネ品種 IR4595-4-1-13 (以下, IR4595), Kala-Rata1-24 (以下, Kala-Rata) (耐塩性) と Dular, 戦捷 (耐干性) および日本晴, 桂朝 2 号 (以下, 桂朝) (普通) を用いた。5 月 15 日に種籾を水に漬けた。5 月 19 日に 1 穴に 1 粒ずつ 1 品種 49 粒みのるポットに播種した。

内径 7.1 cm, 長さ 32 cm の塩ビ管 VU65 を 2 本, 接着剤と粘着テープでつないだ全長 64 cm の円筒の底にキャップを取り付けたポットを用いた。篩にかけ自然乾燥させた水田土壌を 2.8 kg 入れ, 土壌 1 kg 当たり高度化成肥料 (N:P₂O₅:K₂O=16:16:16) を 0.8 g 混ぜた。土壌重量の 50%の水に土壌 1 kg 当たり 1 g および 2 g の濃度になるように塩化ナトリウム

(NaCl) を溶かしてポットに入れ、NaCl-1 g 区およびNaCl-2 g 区とし、塩を加えないポットをNaCl-0 g 区とした。ポットをサランラップで封をして2日間放置し、土壌の沈下が安定した後にイネを移植した。移植日は6月6日で、苗は5葉期であった。ポット全体の移植前と移植後の重さを測定して記録した。試験区は4反復とした。

第4章と同様に移植した日から朝9時に草丈および伸長中葉身の抽出長を測定した。第n葉の抽出長は、第(n-1)葉の葉耳から第n葉の先端までとした。長さの測定は移植後には6日間隔で行ない、成長速度が低下すると2日間隔とした。2日間の増加が0.5 cm以下になった日に葉の伸長が止まったとみなして収穫した。地上部の収穫後にポット全体の重さを測定した。移植から収穫までのポットと土壌重量の差を蒸発散量とした。そして収穫時の土壌水分量を土壌残存水分量とした。植物体を枯死部、茎葉部に分け、分別して80℃で3日間乾燥させ、乾物重を測定した。枯死部、茎葉部の乾物重を測定後、各器官の乾物試料を小型粉碎機で粉碎し、0.4 gを秤量し一晩80℃に設定したオーブン内で乾燥させた。室温で30分間放冷後、乾物重と試験管を測定し、乾物重を約15 mLの蒸留水とともに試験管(120 mL容)に入れ、180℃に設定したホットプレートで3時間熱湯抽出した。得られた抽出液は、蒸留水を加えて30 mLとした。抽出液のNa⁺含有率は、イオンメーター(HORIBA, コンパクトイオンメーター, C-122)を用いて定量された。

結果

第5-1図は、日本晴を例にして主茎各葉位の葉身抽出長の変化を例示したものである。移植時に抽出中であった葉身は第6葉であったが、最終的に抽出していた葉はNaCl-0 g区とNaCl-2 g区で第10葉であり、抽出速度が2日で0.5 cmより小さくなった日はそれぞれ38日目と28日目であった。最終的に抽出中であった葉身はNaCl-1 g区で第11葉であり、抽出停止日は40日目であった。このように伸長停止までの日数は、土壌塩濃度が高くなるほど長くなることも短くなることもあった。

土壌塩濃度が葉身の伸長停止までの日数に及ぼす影響は、品種によって異なった(第5-2図)。伸長停止までの日数は、桂朝と耐干性2品種戦捷とDularでNaCl-0 g区よりNaCl-1 g区が長くなり、NaCl-2 g区では短くなった。耐塩性品種Kala-RataとIR4595では伸長停止までの日数は、塩添加量が多いほど長くなった。なお、品種を込みにすると伸長停止日はNaCl-1 g区が他の2区よりも長かった。伸長停止までの日数はNaCl-2 g区で耐塩性2品種が他の4品種より大であった。

移植時の個体当たり乾物重は、戦捷の 0.0412 g から IR4595 の 0.0752 g までの範囲であった。地上部乾物重の増加量は土壌 NaCl 濃度の影響を受けて、NaCl-1 g 区では NaCl-0 g 区と変わらなかったものの NaCl-2 g 区では低下した（第 5-3 図）。ただし、Kala-Rata で乾物重増加量は NaCl-0 g 区より NaCl-1 g 区の方が有意に大きく、有意ではないものの日本晴でも NaCl-1 g 区の方が大きかった。地上部乾物重増加量の品種間差は NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区では見られなかったものの、NaCl-2 g 区では明瞭であった。乾物重増加量は NaCl-2 g 区で耐塩性 2 品種が他の 4 品種より著しく大であった。

蒸発散量は NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区では品種間差が認められず約 1200 g で、加えた水分が 1400 g であったことから、ポット当たり約 200 g の水分が残存していた（第 5-4 図）。蒸発散量は NaCl-2 g 区のみで低下するとともに品種間差が認められ、耐塩性の 2 品種が他の 4 品種よりも大きかった。移植に土壌に存在した水分は同じであったので、蒸発散量の違いは土壌残存体積水分率に対応していた（第 5-5 図）。土壌残存体積水分率は NaCl-2 g 区のみで増加すると同時に品種間差が認められ、耐塩性の 2 品種が他の 4 品種よりも小さかった。

地上部 Na⁺含有率は NaCl-0 g 区では少なく 1 mg g⁻¹ 以下であったが、NaCl-1 g 区で約 5 mg g⁻¹ に増加した（第 5-6 図）。地上部 Na⁺含有率は NaCl-2 g 区でさらに増えるとともに品種間差が明瞭に認められて、耐塩性の 2 品種で平均 10 mg g⁻¹ 前後と低かったが、他の 4 品種では 36~46 mg g⁻¹ と高かった。

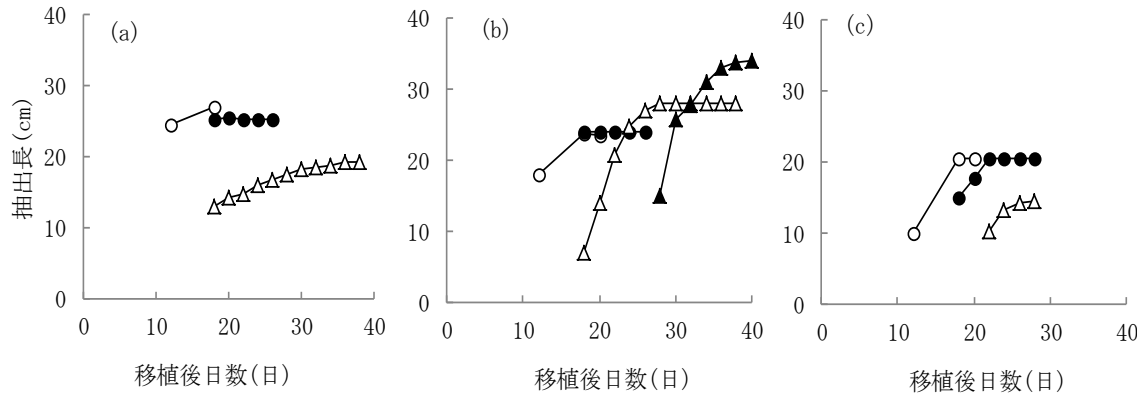
伸長停止までの日数、乾物重増加量、蒸発散量と地上部 Na⁺含有率の 4 つの要因の相関関係を第 5-7 図に示した。伸長停止までの日数が長くなるにしたがい乾物重増加量と蒸発散量はともに大きくなった。ただし、両者の関係は NaCl-2 g 区では比例的であったが、NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区ではばらつきが大きかった。蒸発散量と乾物重増加量の関係は極めて密接であり、土壌塩濃度が異なっても乾物重は蒸発散量に比例的に増大することが認められた。乾物重増加量を NaCl-0 g 区の値で標準化して、地上部の Na⁺含有率との対応関係を調べたところ、Na⁺含有率の増加にともない乾物重増加量が低下する関係が認められた。ただし、NaCl-1 g 区では日本晴と Kala-Rata の乾物重増加量の相対値が約 1.5 となり、これら 2 品種で 3~6 mg g⁻¹ 程度の Na⁺蓄積では乾物重が増えることが認められた。

考察

土壌水分が限られた異なる NaCl 濃度の土壌で耐塩性、耐干性の異なる 6 品種をポット

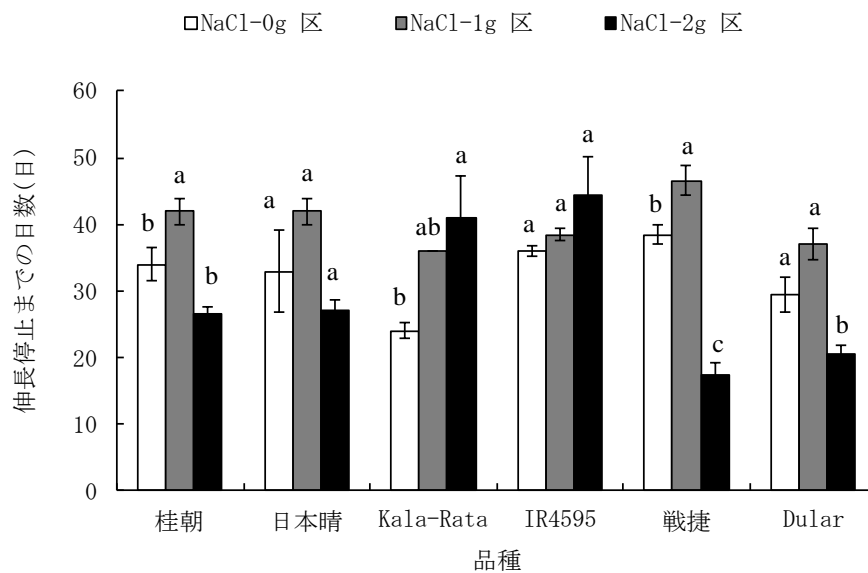
栽培した。そして葉身の伸長が停止した日を成長停止日とみなし（第 5-1 図）、それまでの蒸発散量を利用可能な水分として評価した。土壌は実験開始時には十分水分を保持していたが、成長停止時には土壌水分欠乏状態であった（第 5-5 図）。このような条件下で地上部乾物重は、土壌塩濃度と耐性の違いにかかわらず蒸発散量に比例的に増加した（第 5-7 図）。これらのことから、すべての作物と品種においても干ばつ条件下の塩土壌において蒸発散量が多いほど乾物生産が高くなると考えられた。

塩添加によるイネの反応は異なった（第 5-2, 3 図）が、NaCl-2 g 区で土壌塩濃度に対する地上部乾物生産には品種間差がみられ、耐塩性品種のほうが耐干性品種と普通品種より著しく高かった（第 5-3 図）。その品種間差の要因はなんだろう。第 4 章で土壌水分が限られた塩土壌では植物体内の Na⁺蓄積による成長抑制と同時に根が小さくなり、このため利用できる水分が減少し、乾物生産が抑制されることから、まず、地上部 Na⁺含有率をみると地上部 Na⁺含有率は NaCl-2 g 区で品種間差が見られ、耐塩性 2 品種で他の 4 品種より低く、耐塩性 2 品種の平均値は 10 mg g⁻¹ 前後であり、他の 4 品種のそれは 36~46 mg g⁻¹ と高くなった（第 5-6 図）。地上部 Na⁺含有率と乾物重増加量の相対値の相関関係は、地上部 Na⁺含有率は高くなるほど乾物重増加量は減少した（第 5-7 図）。このことから乾物生産の品種間差は植物体内の Na⁺蓄積によるものかもしれない。一方、蒸発散量は NaCl-2 g 区で耐塩性 2 品種のほうが他の 4 品種より多かった。乾物生産は蒸発散量に比例的に増加することから乾物生産の品種間差は根で吸収されず残った水の品種間差でもあると考えられた。根の吸水には塩による成長阻害と土壌塩濃度による水ポテンシャル低下や根の機能低下など考えられるが品種間差に貢献するのはどれであるかはさらに研究が必要である。



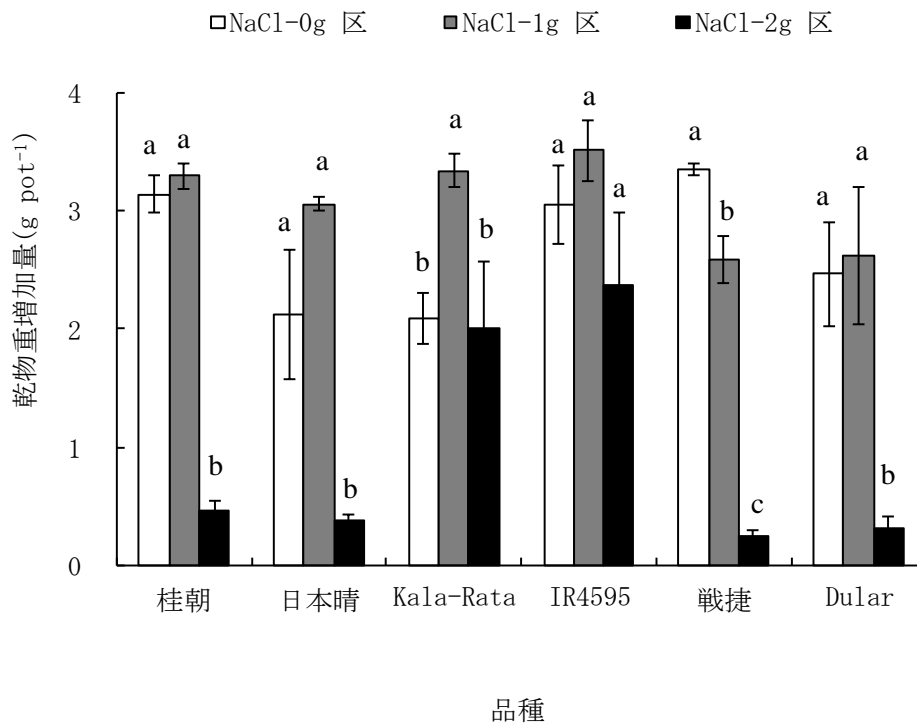
第 5-1 図 水分が限られた土壌における塩濃度の違いが日本晴の葉身の抽出長に及ぼす影響.

(a), (b), (c) はそれぞれ日本晴の NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区, NaCl-2 g 区を示し, シンボルは○第 8 葉, ●第 9 葉, △第 10 葉, ▲第 11 葉を示す.



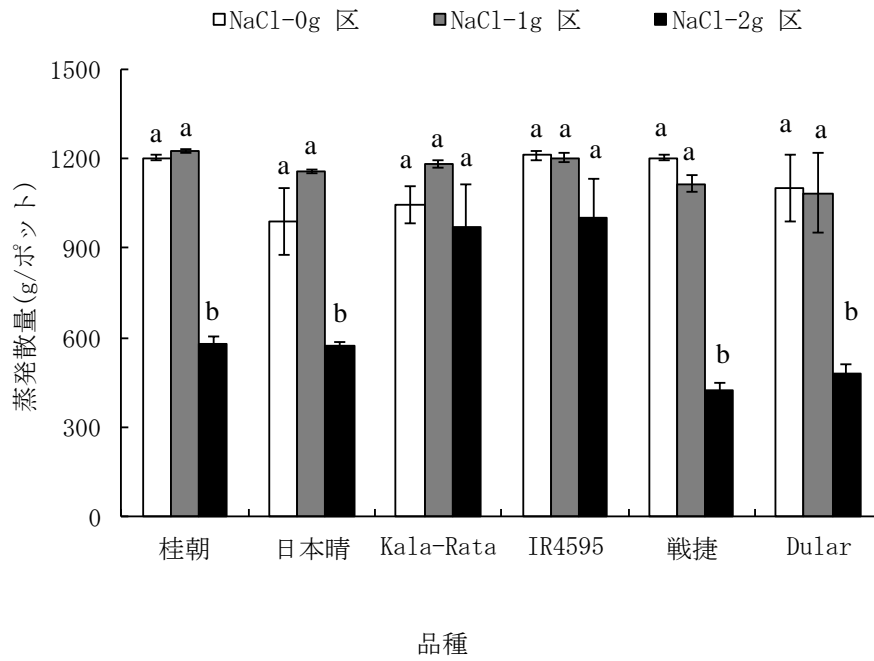
第 5-2 図 水分が限られた土壌における塩濃度の違いがイネ品種の葉身伸長停止までの日数に及ぼす影響.

値は 4 ポットの平均値で、バーは標準誤差を示す。品種内で同じ記号が付けられた平均値の間には 5%水準で Tukey の検定で有意な差がないことを示す。

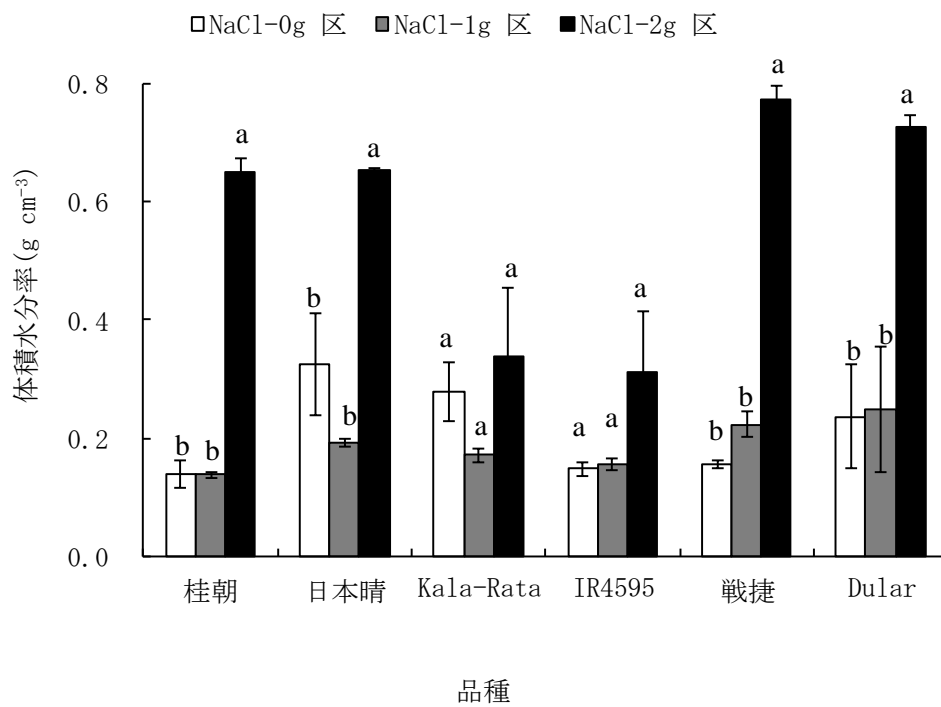


第 5-3 図 水分が限られた土壌における塩濃度の違いがイネ品種の乾物重増加量に及ぼす影響.

値は 4 ポットの平均値で, バーは標準誤差を示す. 品種内で同じ記号が付けられた平均値の間には 5%水準で Tukey の検定で有意な差がないことを示す.

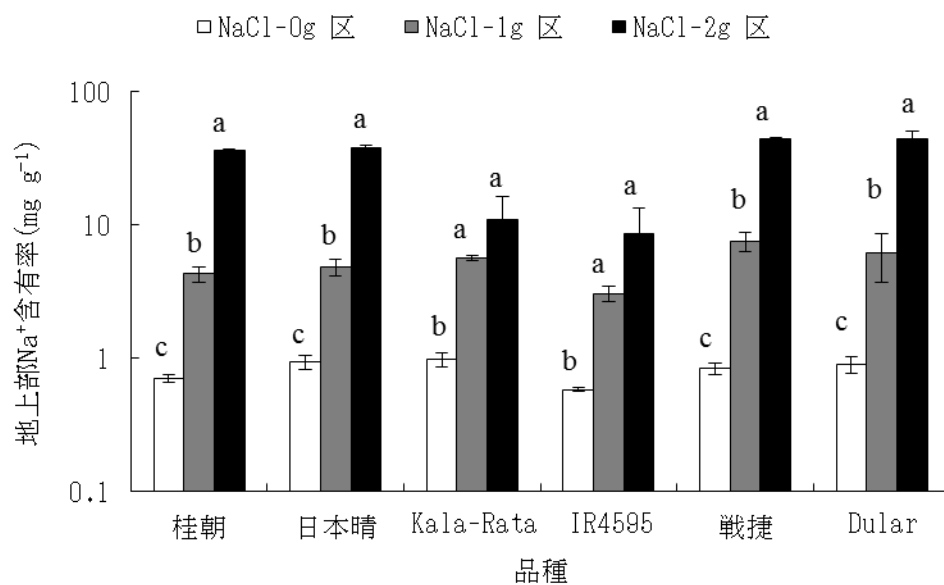


第 5-4 図 水分が限られた土壌における塩濃度の違いがイネ品種の蒸発散量に及ぼす影響。値は 4 ポットの平均値で、バーは標準誤差を示す。品種内で同じ記号が付けられた平均値の間には 5%水準で Tukey の検定で有意な差がないことを示す。



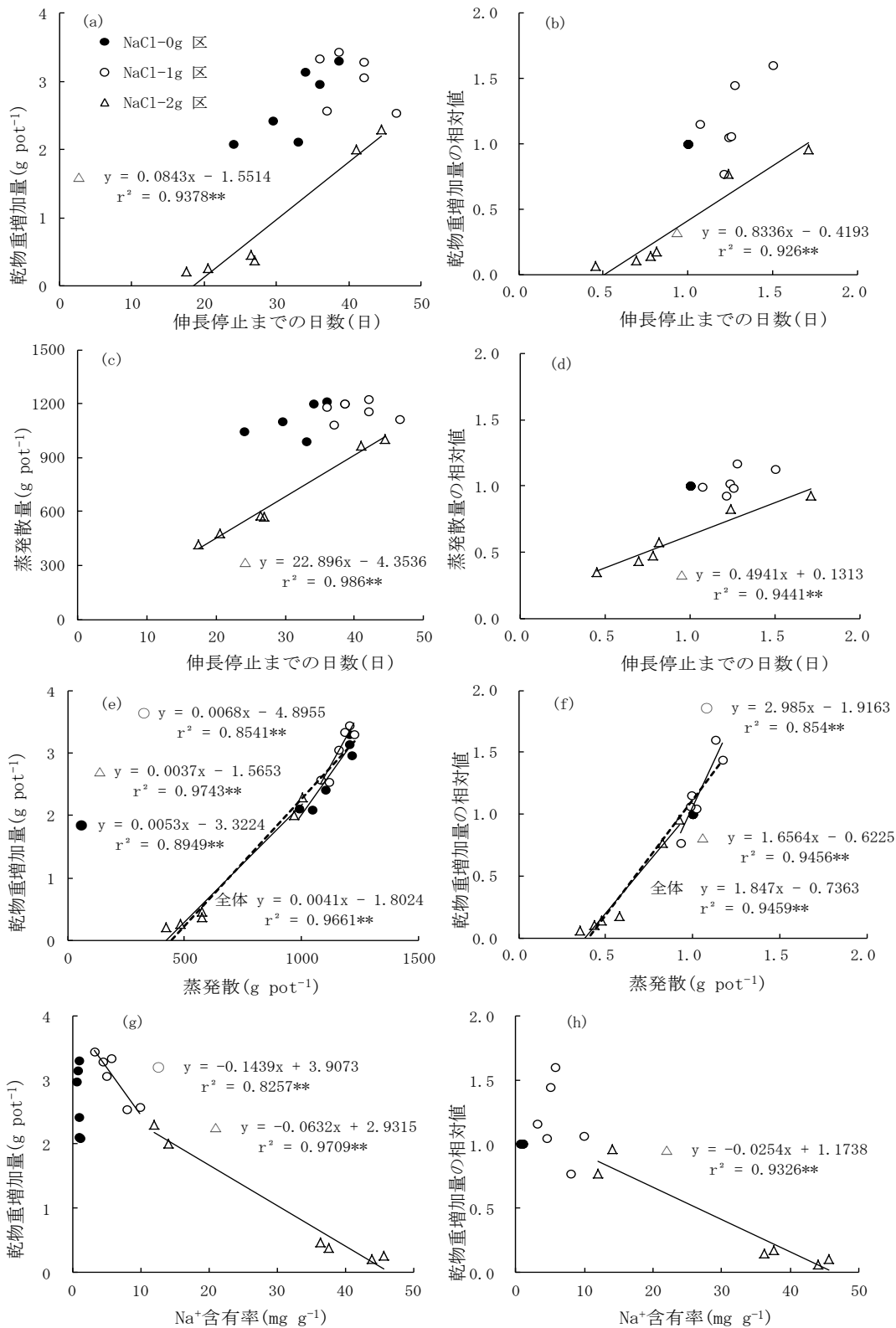
第 5-5 図 水分が限られた土壌における塩濃度の違いがイネ品種の土壌残存体積水分率に及ぼす影響.

値は 4 ポットの平均値で、バーは標準誤差を示す。品種内で同じ記号が付けられた平均値の間には 5%水準で Tukey の検定で有意な差がないことを示す。



第 5-6 図 水分が限られた土壌における塩濃度の違いがイネ品種の地上部 Na⁺含有率に及ぼす影響.

値は 4 ポットの平均値で、バーは標準誤差を示す。品種内で同じ記号が付けられた平均値の間には 5%水準で Tukey の検定で有意な差がないことを示す。



第5-7図 水分が限られた土壌における塩濃度の違いがイネ品種の伸長停止までの日数、蒸発散量、地上部 Na⁺含有率と乾物重増加量の値と NaCl-0 g 区 の値を基準とした相対値の相互関係に及ぼす影響。

第6章 土壤水分欠乏状態の塩土壤における蒸発散量のイネ品種間差の要因

緒言

塩土壤で干ばつが生じる条件下で作物生産を改善するために塩土壤で土壤水分が限られている条件下で作物の土壤水分の利用を検討してきた。その結果、ムギ類（第2, 3章）およびイネ（第4, 5章）で干ばつ条件の塩土壤において乾物生産は蒸発散量に比例的に増加することが見出された。このことは土壤水分を吸収する程度が蒸発散量を決定し、ひいては乾物生産を左右することに外ならない。

土壤水分の吸収程度を示す土壤残存水分率は土壤 Na^+ 含有率と根長密度あるいは根重密度と関係があったが、これらの関係はコムギ、オオムギ、デュラムで作物間差がみられなかった（第2, 3章）。またイネではこれらの関係に品種間差は見られなかった（第4章）ことから、これらの関係は相当安定したものと考えられた。

ところが、イネを用いた第5章では塩濃度が高い土壤で蒸発散量に大きな品種間差が認められた。蒸発散量の品種間差はやはり根の成長の違いによっているのか、あるいは根の水分吸収能力の違いによっているのか分かっていなかった。しかし塩土壤における根の吸収能力に関する研究は見当たらなかった。そこで本研究で明らかにしようとした。

材料と方法

実験は、岡山大学農学部研究圃場で2011年に行った。イネ品種 Pokkali, IR4595-4-1-13（以下、IR4595）（耐塩性）と NERICA1, 戦捷（耐干性）および日本晴, NERICA-L-60（以下は、NERICA60）（普通）を用いた。6月10日に種籾を水に漬け、催芽した。6月14日に1穴に1粒ずつみのるポットに播種し、畑状態で育苗した。

内径7.1 cmの塩ビ管を長さ100 cmに切断して、片方の切り口にキャップを取り付けて栽培ポットとした。水田土壤1 kgあたりに高度化成肥料（16:16:16）を0.8 g混ぜた4.5 kgを入れた。土壤重量の40%すなわち1.8 Lの水に土壤1 kgあたり1 gおよび2 gの塩化ナトリウム（NaCl）を溶かしてポットに入れ、NaCl-1 g区およびNaCl-2 g区とし、塩を加えないポットをNaCl-0 g区とした。ポットをサランラップで封をして2日間放置し、土壤が安定した6月6日にイネを移植した。移植後に土壤からの蒸発を減少させるためにポットをアルミテープで封をした。ポット全体の移植前と移植後の重さを測定して記録した。実験区は3反復とした。

移植日から朝9時にポット全体の重さ、草丈および伸長中葉身の抽出長を測定した。第n葉の抽出長は、第(n-1)葉の葉耳から第n葉の先端までとした。長さの測定は移植後には6日間隔で行ない、成長速度が低下すると2日ごととした。2日間の増加が0.5 cm以下になった日に葉の伸長が止まったとみなし収穫した。地上部の収穫後にポット全体の重さを測定した。植物体を茎、葉身と枯死部および根に分け、地上部を80℃で3日間乾燥させ、乾物重を測定した。

ポットを土壌の表面から16 cmごとの層別に切り取り採集した。各土層の土壌をバットに入れ潰し、無作為に1か所当たり約25 gの土壌を採集して瓶に入れた。瓶の重さを測定した後110℃に設定したオーブン内で1週間乾燥を行って乾物重を測定し、土壌水分量を計算した。瓶に入れなかった残りの土壌を水で洗い流して、2.0 mm目のメッシュで根を回収した。根をサンプル瓶に入れ水を加え、実験室に持ち帰った。層別のサンプル瓶の根を6個の透明バットに広げ、スキャナを用いて解像度300dpiで根のデジタル画像を得た、これらの画像を解析し、根長を算出した。試験管(120 mL容)に乾燥した土壌10 gを入れ、蒸留水50 g加えたのちよく混ぜ、ECメーター(横河電機(株)、パーソナルSCメーター Model SC82)によりECを測定した。

枯死部、茎葉部の乾物重を測定後、各器官の乾物試料をはさみで長さ5 mmに細かく切り、80℃に設定したオーブン内で一晩乾燥させ、室温で30分間放冷後、0.2 gを秤量した。乾物を50 mLの蒸留水と1 mLの硝酸とともにサンプル瓶に入れ、80℃に設定したオーブン内で24時間抽出した。得られた抽出液はろ紙で濾過されたのち、炎光光度計(BWB-XP)でNa⁺含有率が分析された。

結果

第6-1図は、Pokkaliの葉身抽出長の変化を葉位別に例示したものである。移植日には第5葉が抽出中であつた。主茎の葉身の抽出速度が2日で0.5 cmより小さくなった日にイネの成長が停止したと判断し植物体を収穫した。

葉身の伸長停止までの日数は、NaCl-0 g区で品種間差は認められず平均35日であつた(第6-2図)。伸長停止までの日数はNaCl-1 g区で戦捷を除けばNaCl-0 g区と有意な差がなかったものの、NaCl-2 g区で日数が有意に増加した。ただし、Pokkaliでは土壌塩濃度は、伸長停止までの日数に影響を与えなかった。伸長停止までの日数の品種間差はNaCl-1 g区とNaCl-2 g区で明らかでなかった。

地上部乾物重増加量は、NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区の間は有意な差がなく、NaCl-2 g 区より大きかった (第 6-3 図)。地上部乾物重増加量は NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区で品種間差が見られなかったものの、NaCl-2 g 区で品種間差が明瞭であり、耐塩性品種 Pokkali と IR4595 が最大で、次いで普通品種日本晴と NERICA60、そして耐干性品種戦捷と NERICA1 が最も小さかった。

蒸発散量はすべての品種で NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区の間には差が見られず、1300 g であった (第 6-4 図)。これに対し、蒸発散量は NaCl-2 g 区で品種間差が認められ、地上部乾物重と同様に耐塩性品種 Pokkali と IR4595 が最大で、次いで普通品種日本晴と NERICA60、そして耐干性品種戦捷と NERICA1 が最も小さかった。

地上部 Na⁺含有率はすべての品種で塩濃度の増加にしたがい増加した (第 6-5 図)。地上部 Na⁺含有率は NaCl-0 g 区で 0.5 mg g⁻¹ より少なく、NaCl-1 g 区で約 6 mg g⁻¹ になり、さらに NaCl-2 g 区で約 30 mg g⁻¹ まで増加した。地上部 Na⁺含有率は NaCl-2 g 区で耐塩性の 2 品種で平均 6 mg g⁻¹ であり、他の 4 品種ではそれぞれ日本晴で 8 mg g⁻¹、NERICA60 で 25 mg g⁻¹、戦捷で 18 mg g⁻¹ と NERICA1 で 31 mg g⁻¹ であった。このように地上部 Na⁺含有率は耐塩性 2 品種 のほうが他の 4 品種より低かった。

層別土壌残存体積水分率はすべての品種で下層になるほど増加した (第 6-6 図)。層別土壌残存体積水分率は IR4595 の下 3 層を除けばすべての品種で NaCl-2 g 区のほうが NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区より多かった。層別土壌残存体積水分率は耐塩性 2 品種で層ごとに NaCl 添加による差が小さく、他の 4 品種では層ごとに NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区で差が小さく、NaCl-2 g 区より少なかった。

層別根長密度は、すべての品種では下層になるほど減少したが、減少程度が塩によって異なった (第 6-7 図)。層別根長密度は NaCl-0 g 区ではすべての品種で上層から急速に減少したが、NaCl-1 g 区では Pokkali と日本晴で急速に減少し、IR4595 と NERICA60 で第 1 層から第 2 層までに減少が少なく、第 2 層から急速に減少した。戦捷と NERICA1 の根長密度は NaCl-1 g 区で減少が NaCl-0 g 区に比べて緩やかであった。根長密度は NaCl-2 g 区で IR4595 を除けばすべての層で NaCl-0 g 区と NaCl-1 g 区より少なかった。

層別土壌 Na⁺含有率は、すべての品種の全層で塩濃度の増加にしたがい増加した (第 6-8 図)。層別土壌 Na⁺含有率は、すべての品種の NaCl-1 g 区と NaCl-2 g 区で第 4 層まで減少が速く、第 4 層から変化が少なく、第 6 層が第 5 層より多かった。土壌 Na⁺含有率は NaCl-0 g 区では変化がなく、ほとんど 0 だった。

地上部 Na⁺含有率，地上部乾物重増加量，蒸発散量および総根長の相関関係を第 6-9 図に示した。地上部 Na⁺含有率の地上部乾物重増加量と蒸発散量との相関関係は地上部 Na⁺含有率が増加すると地上部乾物重増加量と蒸発散量が減少したが，ばらつきが大きかった。これに対して，蒸発散量と地上部乾物重増加量の相関関係が明らかで蒸発散量が多くなるほど地上部乾物重増加量が増加した。総根長と蒸発散量の関係は，総根長が多くなるほど蒸発散量が多くなった。

土壌残存体積水分率，根長密度と土壌 Na⁺含有率の相関関係を第 6-10 図に示した。土壌 Na⁺含有率の土壌残存体積水分率と根長密度との相関関係が認められなかった。根長密度と土壌残存体積水分率の相関関係は根長密度が高くなるほど土壌残存体積水分率が減少する。

NaCl-2 g 区のみ土壌残存体積水分率，根長密度と土壌 Na⁺含有率の相関関係を第 6-11 図に示した。土壌 Na⁺含有率の土壌残存体積水分率と根長密度との関係より根長密度と土壌残存体積水分率の関係は明らかで，根長密度が増加すると土壌残存体積水分率が減少した。そして耐塩性品種のほうが根長単位当たり土壌残存体積水分率が少なかった。

考察

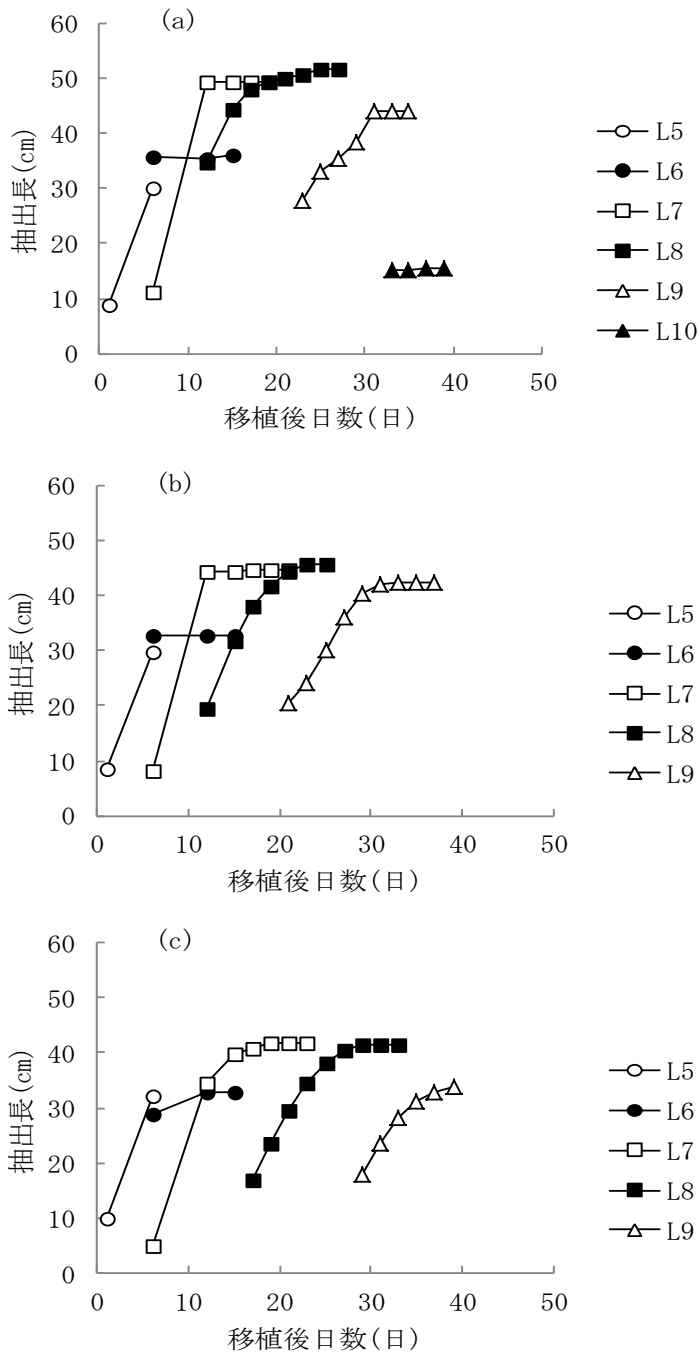
第 5 章と同様に耐塩性と耐干性が異なる 6 品種を土壌水分が限られた異なる NaCl 濃度の土壌でポット栽培した。そして葉身の伸長が停止した日を成長停止日とみなし（第 6-1 図），それまでの蒸発散量を利用可能な水分として評価した。これまでの研究結果と同様に乾物重増加量は，蒸発散量に比例的に増加した。そして，第 5 章のように蒸発散量に大きな品種間差が認められた。

土壌塩分布は，やや上層の塩濃度が高かった（第 6-8 図）。土壌残存体積水分率は，他の土壌塩分布が均一であった研究（第 3 章）のように土壌 Na⁺含有率よりもむしろ根長密度との関係が強かった。根長密度と土壌残存体積水分率の関係は土壌塩濃度の低い NaCl-0 g 区，NaCl-1 g 区では品種で違いが認められなかったものの，土壌塩濃度の高い NaCl-2 g 区では品種間差が認められた（第 6-10, 11 図）。根長密度が同じとき土壌残存体積水分率は耐塩性品種で最も小で，耐干性品種で最も大であった。このことは耐塩性品種の吸水能力が最も大きく，このため蒸発散量が大となったものと考えられた。

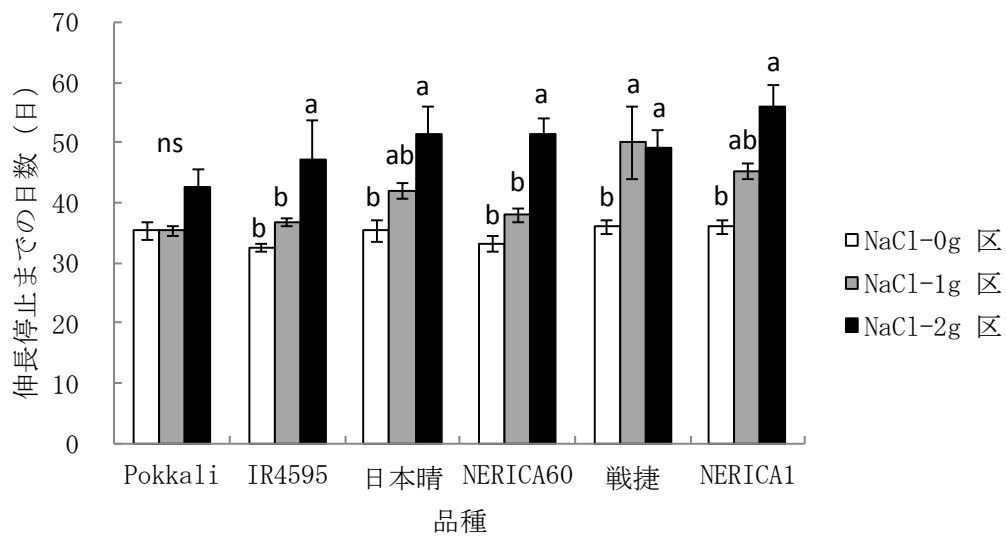
耐塩性品種の吸水能力が大きい理由は，何であろうか。一般に塩土壌あるいは乾燥土壌で作物の吸水が阻害されるのは，土壌の水ポテンシャルが低下し，作物根の水ポテンシャルよりも低くなるためであると考えられている。作物根は土壌水ポテンシャルが低いとこ

ろから吸水するために浸透調節により浸透ポテンシャルを低下させる。耐塩性品種はこのような浸透調節能力に優れていた可能性がある。この仮説が正しいかどうかを明らかにするためには、さらなる研究が必要である。

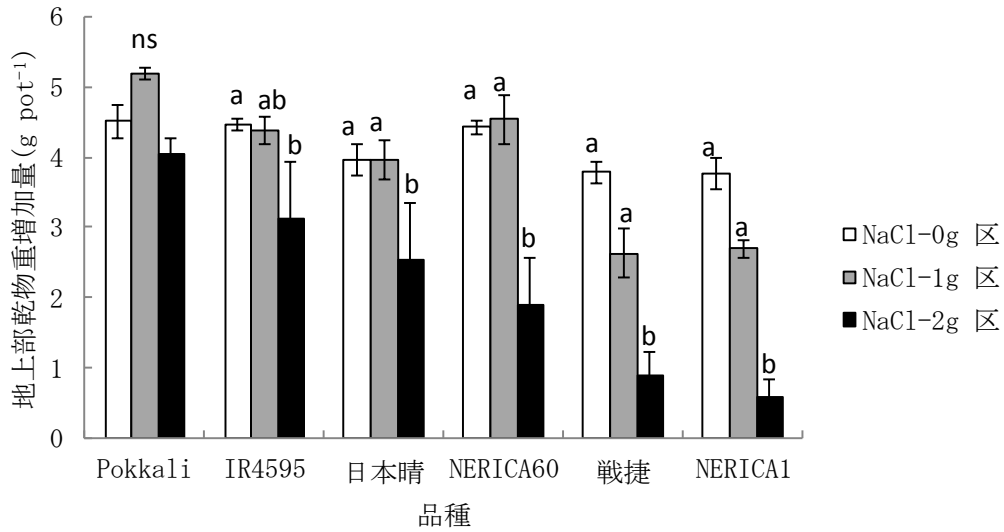
これまでの研究では根の吸水能力について作物間差、あるいは品種間差がほとんど認められなかった（第 2, 3, 4 章）。本研究で初めて塩土壌におけるイネ根の吸水能力の品種間差が認められた。この吸水能力の差は、乾物生産を左右する蒸発散量の差をもたらす。したがって吸水能力の改善は土壌塩濃度の高い塩土壌における干ばつ条件下で作物生産を改善するものと考えられた。



第 6-1 図 イネの葉身抽出長の推移. (a), (b) と (c) はそれぞれイネ品種 Pokkali の NaCl-0 g 区, NaCl-1 g 区と NaCl-2 g 区を示し, L5~L10 は第 5~10 葉を示す.

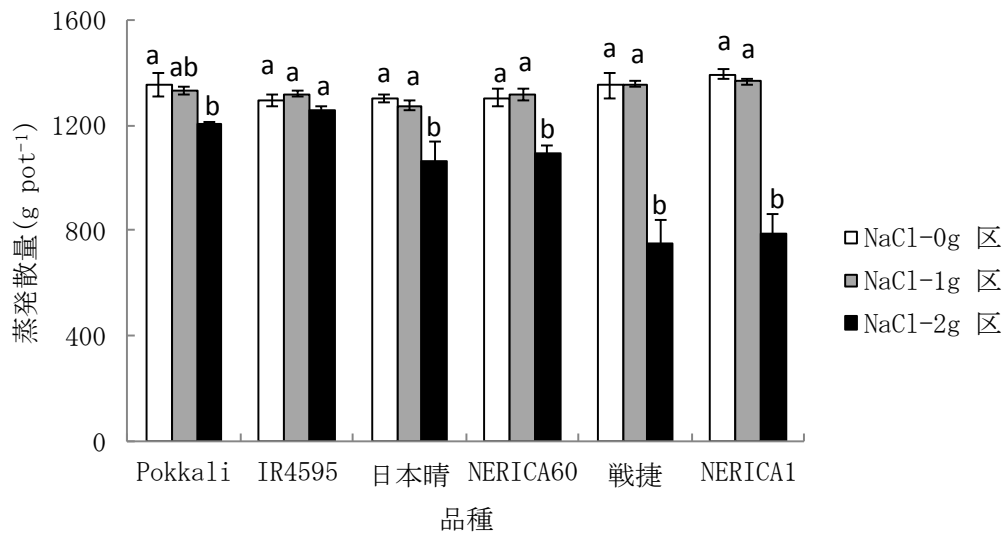


第 6-2 図 土壌塩濃度の違いがイネ 6 品種の葉身伸長停止までの日数に及ぼす影響。
 値は 3 反復の平均値，バーは標準誤差を示す。同じ品種で同じアルファベットが付けられた値の間には Tukey 検定 ($p=0.05$) で有意差がないことを示す。ns は品種内で有意差がないことを示す。



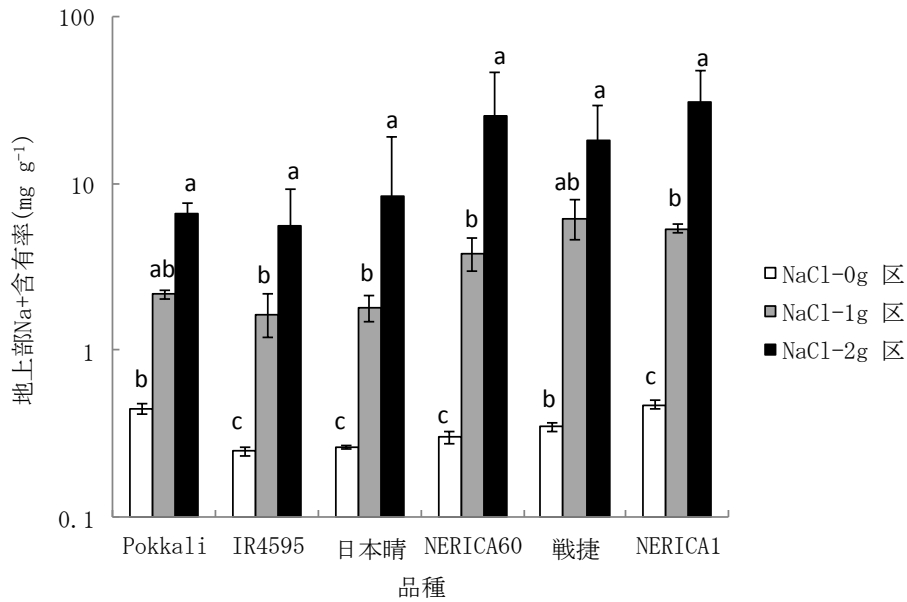
第 6-3 図 土壤塩濃度の違いがイネ 6 品種の地上部乾物重増加量に及ぼす影響.

値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じ品種で同じアルファベットが付けられた値の間には Tukey 検定 ($p=0.05$) で有意差がないことを示す.



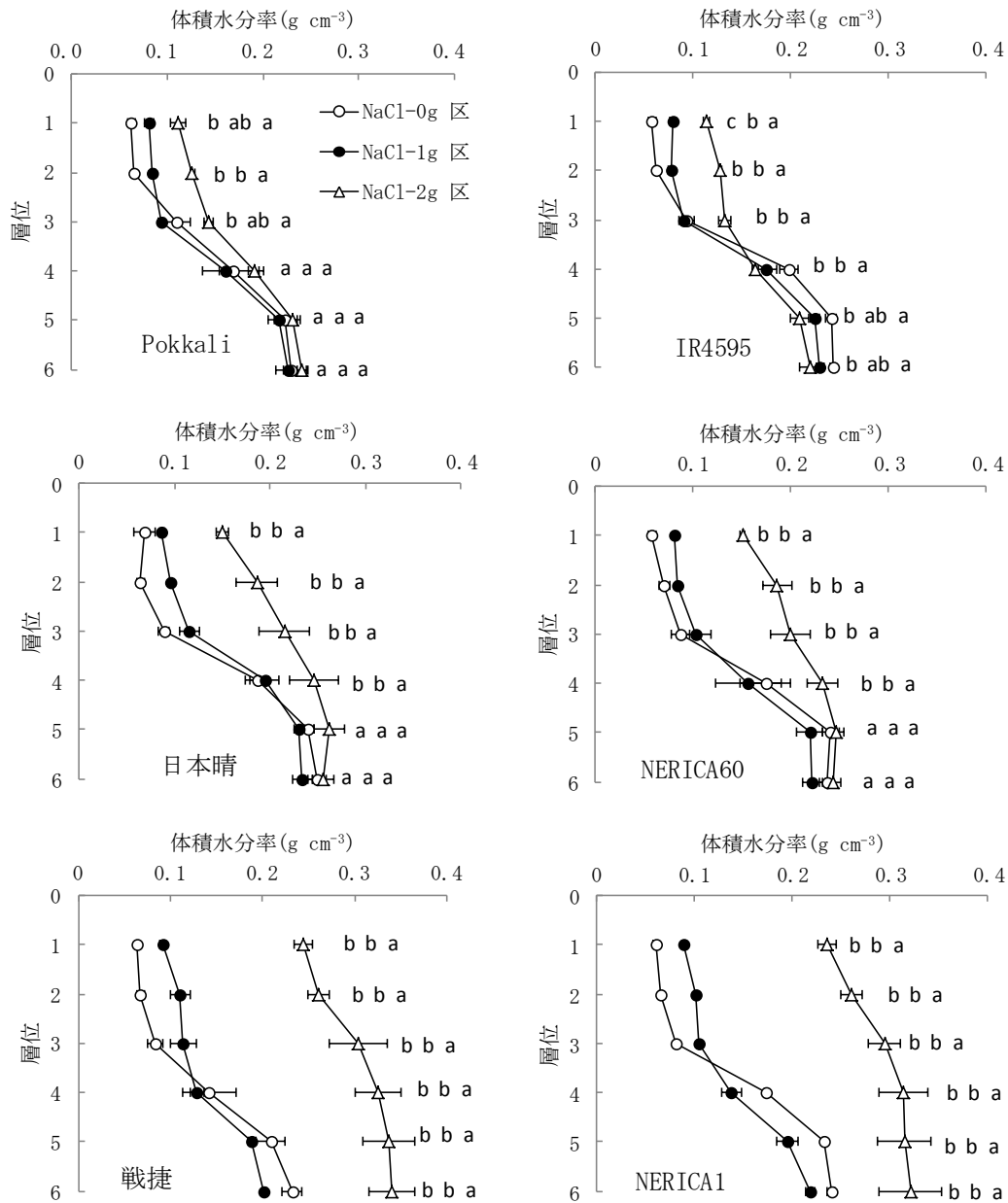
第 6-4 図 土壤塩濃度の違いがイネ 6 品種の蒸発散量に及ぼす影響。

値は 3 反復の平均値，バーは標準誤差を示す。同じ品種で同じアルファベットが付けられた値の間には Tukey 検定 ($p=0.05$) で有意差がないことを示す。

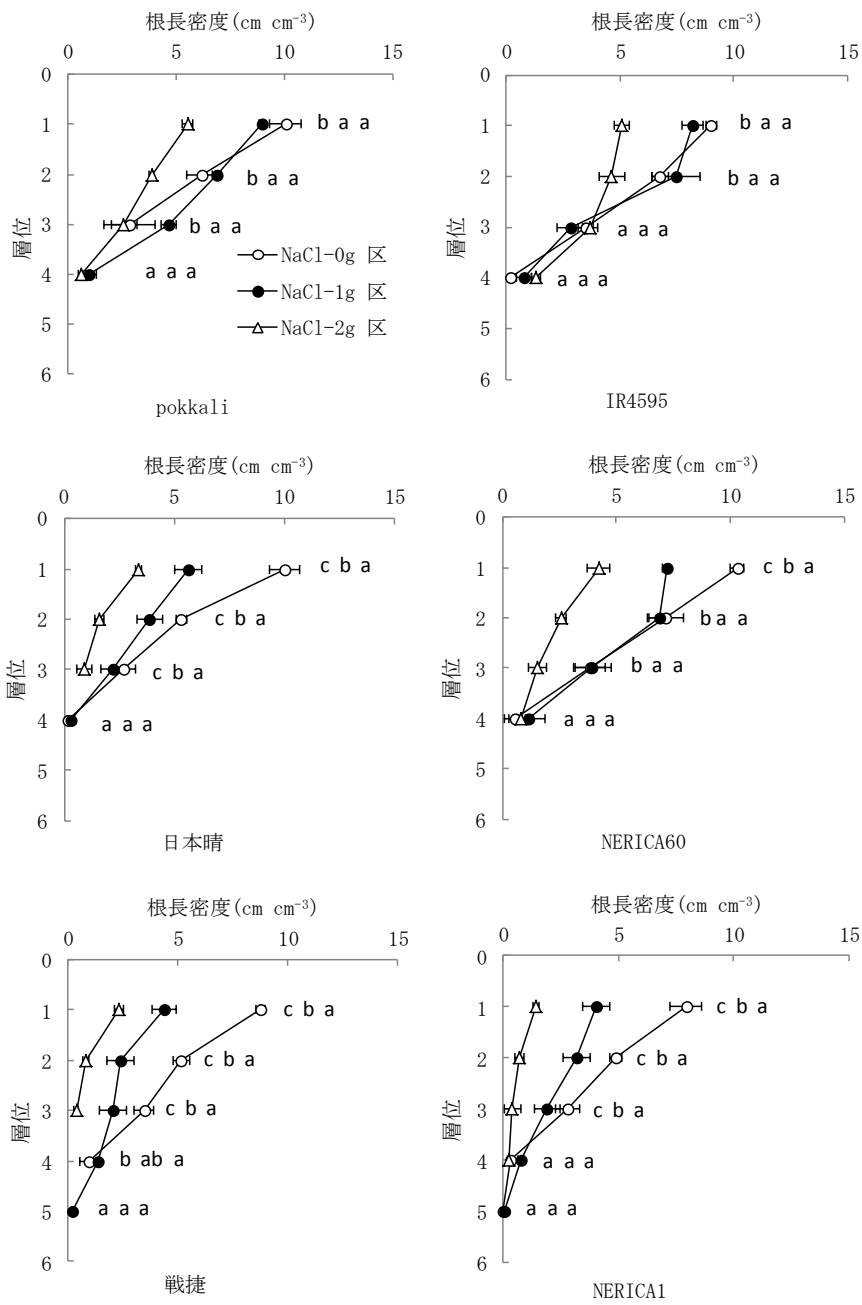


第 6-5 図 土壤塩濃度の違いがイネ 6 品種の地上部 Na⁺含有率に及ぼす影響.

値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じ品種で同じアルファベットが付けられた値の間には Tukey 検定 (p=0.05) で有意差がないことを示す.

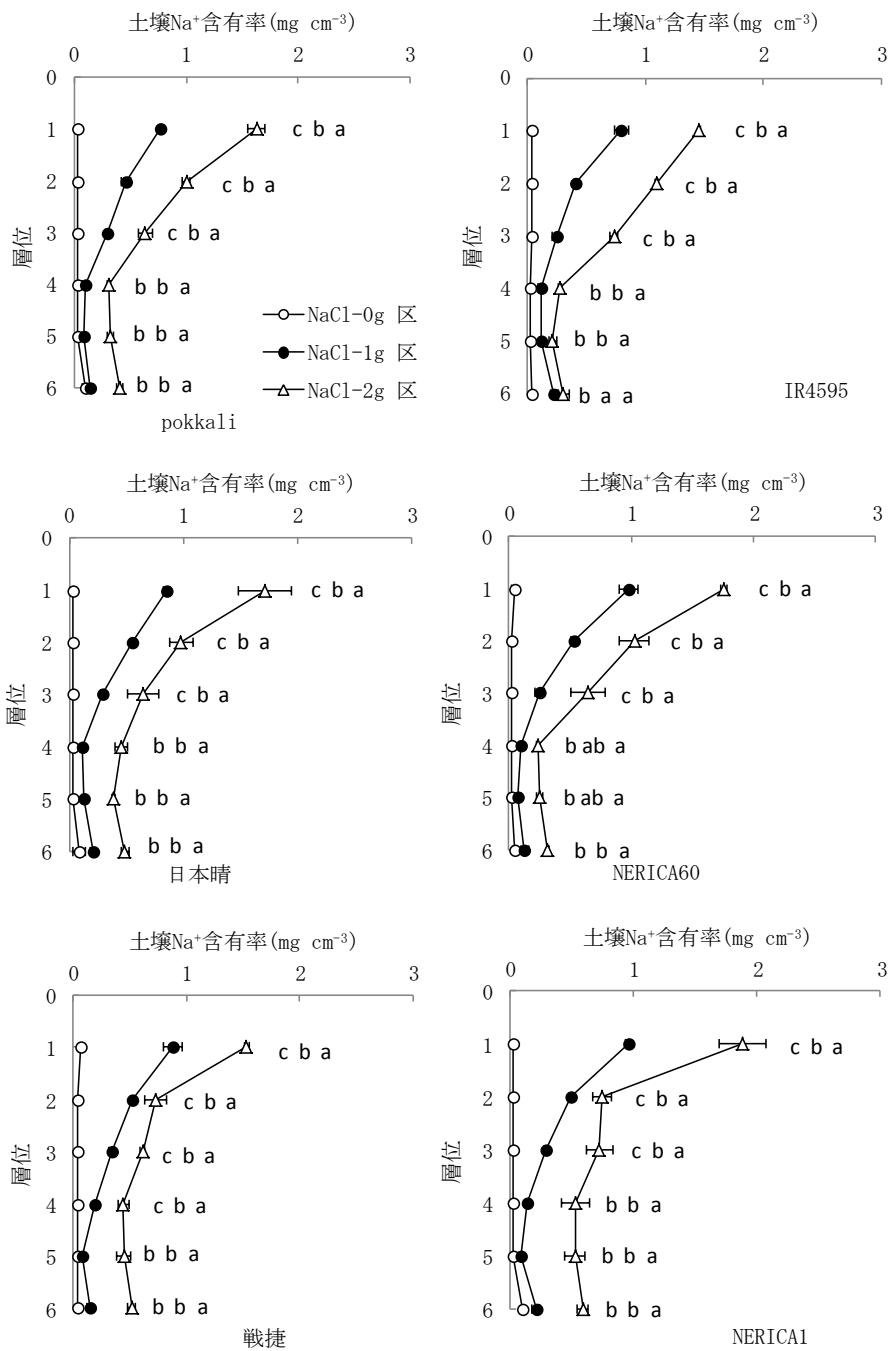


第 6-6 図 土壤塩濃度の違いがイネ 6 品種の層別土壤残存体積水分率に及ぼす影響。値は 3 反復の平均値，バーは標準誤差を示す。同じ品種で同じアルファベットが付けられた値の間には Tukey 検定 ($p=0.05$) で有意差がないことを示す。

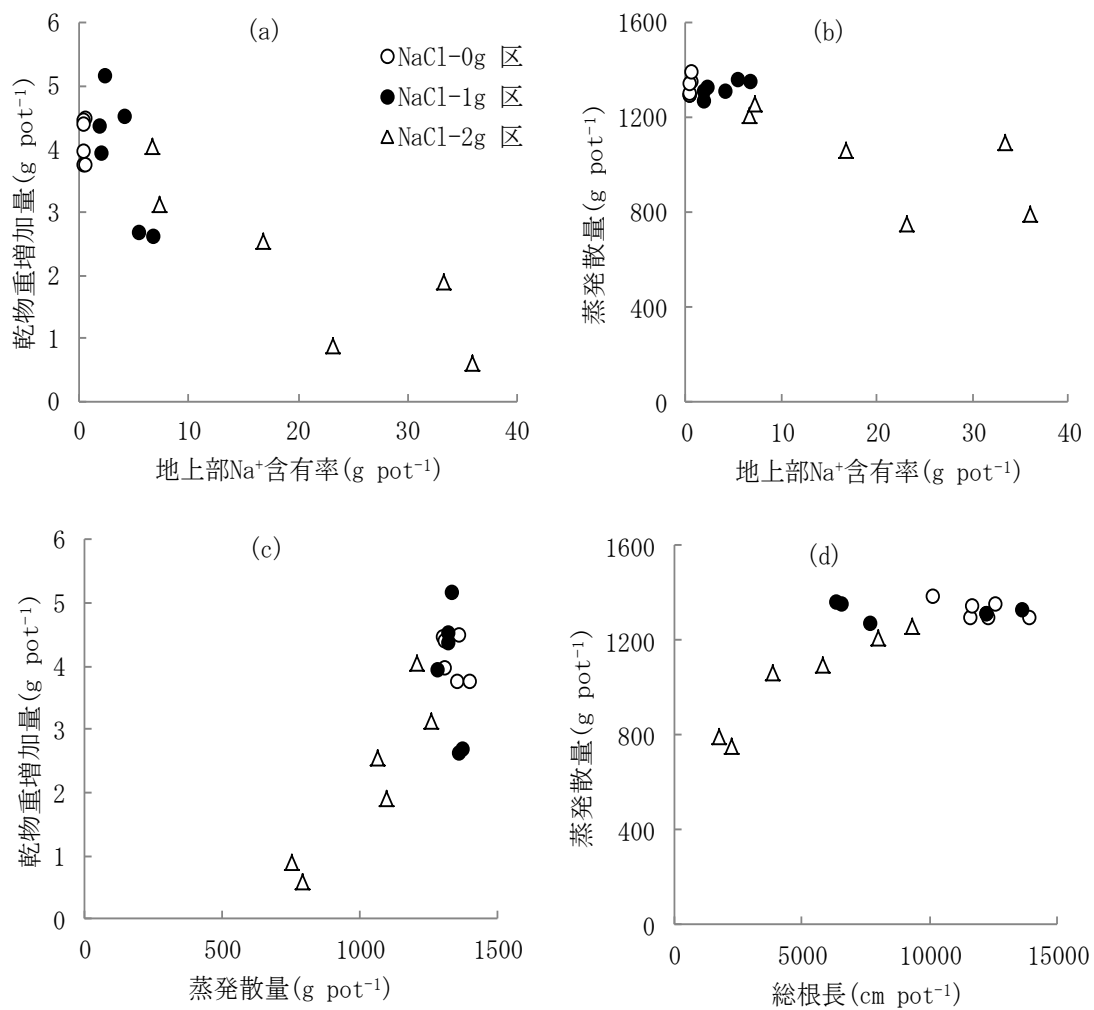


第 6-7 図 土壌塩濃度の違いがイネ品種の層別根長密度に及ぼす影響.

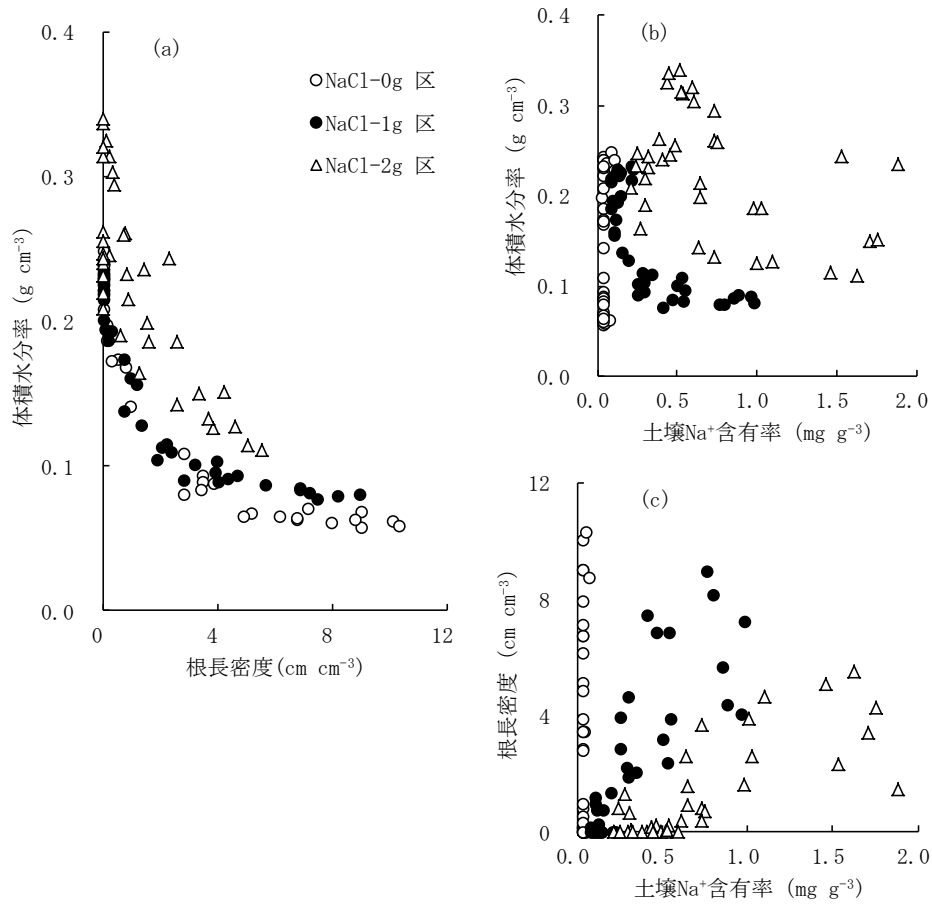
値は 3 反復の平均値, バーは標準誤差を示す. 同じ品種で同じアルファベットが付けられた値の間には Tukey 検定 ($p=0.05$) で有意差がないことを示す.



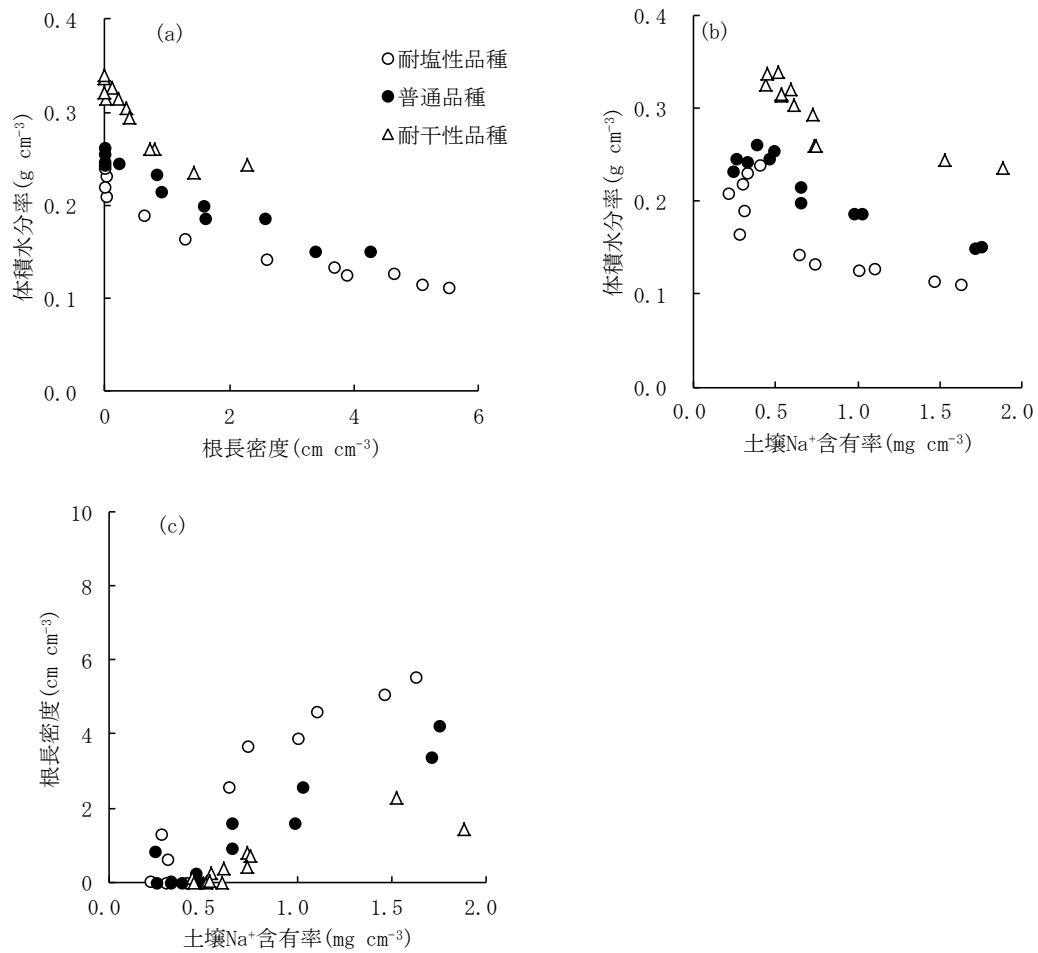
第 6-8 図 土壤塩濃度の違いがイネ 6 品種の層別土壤 Na⁺含有率に及ぼす影響。
 値は 3 反復の平均値，バーは標準誤差を示す。同じ品種で同じアルファベットが付けられた値の間には Tukey 検定 (p=0.05) で有意差がないことを示す。



第 6-9 図 土壤塩濃度の違いがイネ品種の地上部 Na⁺含有率と地上部乾物重増加量 (a), 地上部 Na⁺含有率と蒸発散量 (b), 蒸発散量と地上部乾物重増加量 (c), 総根長と蒸発散量 (d) の関係に及ぼす影響.



第 6-10 図 土壤塩濃度の違いがイネ品種の根長密度と土壤残存体積水分率(a), 土壤 Na^+ 含有率と土壤残存体積水分率(b), 土壤 Na^+ 含有率と根長密度(c)の関係に及ぼす影響.



第 6-11 図 高土壤塩濃度(NaCl-2 g 区)における耐塩性と耐干性の異なるイネ品種の根長密度と土壤残存体積水分率(a), 土壤 Na⁺含有率と土壤残存体積水分率(b)ならびに根長密度(c)の関係に及ぼす影響.

第7章 総合考察

これから増えると予測されている塩土壌における干ばつ条件下で作物生産を改善するため、土壌水分が限られた塩土壌でムギ類とイネを用い研究を行なった。塩土壌における干ばつは水不足に加えて塩とくに Na^+ の毒性が成長を抑制する環境である。一般に、作物の成長は水消費に比例的で (Black ら 1969, Teare ら 1973, Loomis and Connor 1992) あることが、塩土壌の水不足条件下でも当てはまるのかを確かめることから始めた。

移植時の土壌水分のみで作物を栽培した実験で、コムギ、オオムギ、デュラムのムギ類および数品種のイネで、乾物生産は蒸発散量に比例的に増加することが見出された (第2～6章)。さらに蒸発散量に対する乾物重増加量の値は、それぞれの環境において土壌塩濃度の影響をほとんど受けなかった。このように蒸発散量は、乾物生産を左右することが明らかとなった。

本研究では移植時に存在する土壌水分のみで作物を栽培したので、蒸発散量は土壌に残存する水分含量が少ないほど大となる。このように蒸発散量は作物が土壌水分をどれだけ多く吸収するかに依存しており、利用できる土壌体積水分率の下限すなわち土壌残存体積水分率が小さいほど多くなる。土壌残存体積水分率は土壌塩分布が不均一なとき土壌塩濃度が高いほど大となり (第2章)、土壌塩分布が均一のときは根の成長が小さいほど大となった (第3, 4, 6章)。このように、土壌残存体積水分率を左右する要因は、土壌塩分布によって変わることが分かった。

それでは、土壌残存体積水分率と土壌塩濃度および根の成長との関係は、作物あるいは品種によって変わるのであろうか。コムギとオオムギにおける土壌塩濃度と土壌残存体積水分率の関係 (第2章)、コムギとデュラムにおける根の成長と土壌残存体積水分率の関係 (第3章) は、どちらも作物の間で明瞭な差は見られなかったことから、ムギ類ではこれらの作物間の差は大きくないと推定された。これに対してイネでは土壌塩濃度が低いときには根の成長と土壌残存体積水分率の関係は品種で変わらなかった (第4, 6章) もの、土壌塩濃度が高いときにはこの関係に品種間差が認められた (第6章)。

これらのことから、土壌条件によって乾物生産を改善する作物の特性が推測された。土壌塩分布が不均一なところあるいは灌漑方法などで不均一にできるところでは土壌塩濃度の低いところへ根を伸ばし吸水できる作物が適しているであろう。これに対して、土壌塩濃度が均一なところでは根を成長させることができ、さらに根当たりの吸水機能が優れている作物あるいは品種が適していると考えられた。

塩土壌で根の成長を維持する能力は、塩土壌でも成長を維持できる耐塩性品種が優れているであろう。なぜならば、耐塩性品種は Na^+ 障害に強く、光合成を維持できるので、根の成長を促すエネルギー供給力に優れていると考えられるからである。また、根の吸水機能を維持できるのも耐塩性品種であった（第 6 章）。耐塩性品種は浸透調節に優れていることが要因であると考えられた。このように耐塩性品種は十分に土壌水分がある条件ばかりでなく、干ばつ条件でも蒸発散量の増加を通して、作物生産の改善に貢献すると考えられた。

本研究の結果から、土壌塩分布を不均一にすること、塩土壌で根の成長を維持できる特性および根当たりの吸水能力が高い特性を持つ作物あるいは品種を採用することによって塩土壌における干ばつ条件下で作物生産を改善できるものと考えられた。

謝辞

本論文の実験計画、遂行および結果の取りまとめに当たり、最後まで多大なるご指導を賜った岡山大学大学院自然科学研究科（農学系）津田誠教授に、心から感謝申し上げます。

本論文を取りまとめるに当たり、貴重なご指摘、ご助言を頂きました岡山大学大学院自然科学研究科（農学系）齊藤邦行教授、岡山大学大学院自然科学研究科（農学系）平井儀彦准教授に厚く御礼申し上げます。また研究を進めるにあたって多大なご協力をいただいた岡山大学農学部作物学研究室の方々に御礼申し上げます。

引用文献

- Akbar, M., T. Yabuno and S. Nakao 1972. Breeding for saline-resistant varieties of rice. I. Variability for salt tolerance among some rice varieties. *Jpn. J. Breed.* 22: 277-284.
- Balasubramanian, V., M. Sie, R.J. Hijmans and K. Otsuka 2007. Increasing rice production in sub-Saharan Africa: Challenges and opportunities. *Adv. Agron.* 94: 56-133.
- Bazihizina, N., E. G. Barrett-Lennard and T. D. Colmer 2012. Plant growth and Physiology under heterogenous salinity. *Plant Soil* DOI 10.1007/s11104-012-1193-8.
- Bhattacharjee, R., B.R. Ntare, E. Otoo and P.Z. Yanda 2011. Regional impacts of climatic change: Africa. In *Crop Adaptation to Climatic Change*. Eds S.S. Yadav, R.J. Redden, J. L. Hatfield, H. Lotze-Campen and A.E. Hall. John Wiley and Sons Ltd, Chichester. 66-77.
- Black, C.C., T.M. Chen and R.H. Brown 1969. Biochemical basis for plant competition. *Weed Sci.* 17:338-344.
- FAO (2011): FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/default.aspx>.
- Flowers, J.T., F.M. Salama and A.R. Yeo 1988. Water-use efficiency in rice (*Oryza sativa* L.) in relation to resistance to salinity. *Plant Cell Environ.* 11: 453-459.
- Flowers, T.J. and A.R. Yeo 1995. Breeding for salinity resistance in crop plants: Where next? *Aust. J. Plant Physiol.* 22: 875-884.
- Ghassemi, F., A.J. Jakeman and H.A. Niaz 1995. Salinization of Land and Water Resources - Human causes, extent, management and case study. CAB International, Wallington Oxon. 1-526.
- Grewal, H.S. 2009. Response of wheat to subsoil salinity and temporary water stress at different stages of the reproductive phase. *Plant Soil* 330: 103-113.
- Homaee, M., R.A. Feddes and C. Dirksen 2002. A macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress. *Soil. Sci. Am. J.* 66: 1764-1772.
- IPCC 2007. Climate change 2007: The physical science basis. <http://www.ipcc.ch>.
- Kimura, K., S. Kikuchi and S. Yamasaki 1999. Accurate root length measurement by image analysis. *Plant Soil* 216: 117-127.

- Kimura, K. and S. Yamasaki 2001. Root length and diameter measurement using NIH Image: application of the line-intercept principle for diameter estimation, *Plant Soil* 234 : 37-46.
- Kimura, K. and S. Yamasaki 2003. Accurate root length and diameter measurement using NIH Image: use of Pythagorean distance for diameter estimation. *Plant Soil* 254: 305-315.
- Kobata, T., T. Okuno and T. Yamamoto 1996. Contribution of capacity for soil water extraction and water use efficiency to maintenance of dry matter production in rice subjected to drought. *Jpn. J. Crop Sci.* 65: 652-662.
- Kong, X., Z. Luo, H. Dong, A.E. Eneji and W. Li 2012. Effect of non uniform root zone salinity on water use, Na⁺ recirculation, and Na⁺ and H⁺ flux in cotton. *Experimental Botany* 63(5): 2105-2116.
- Kovda, V.A. and I. Szabolcs 1979. Modelling of soil salinization and alkalization. *Agrokem. Talajtan* 28: 1-208.
- Kramer, P.J., and J.S., Boyer 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, San Diego.
- 劉健・辺嘉賓・塩津分隆・Chandra・豊田正範・楠谷彰人 2008. 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. *日作紀* 77: 326-332.
- Loomis. R.S. and D.J. Connor 1992. *Crop Ecology : productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University press, Cambridge. 1-538.
- Ludlow, M.M. and R.C. Muchow 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.* 8 : 264-276.
- Lutts, S., J.M. Kinet and J. Bouharmont 1995. Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *J. Exp. Bot.* 46:1843-1852.
- 間野吉郎・武田和義 2001. コムギの発芽時と幼植物における耐塩性の遺伝資源の検索. *日作紀* 70: 215-220.
- Prabhakar, S.V.R.K. 2011. Climatic change impacts in Japan and Southeast Asia: Implications for crop adaptation. In *Crop Adaptation to Climatic Change* Eds S.S. Yadav, R.J. Redden, J. L. Hatfield, H. Lotze-Campen and A.E. Hall. John Wiley and

- Sons Ltd, Chichester. 131-142.
- Serraj, R. and T.R. Sinclair 2004. Osmolyte accumulation : can it really help increase crop yield under drought conditions? *Plant Cell Environ.* 25 : 333-341.
- Serraj, R., G. Dimayuga, V. Gowda, Y. Guan, Hong He, S. Impa, D.C. Liu, R.C. Mabesa, R. Sellamuthu and R. Torres 2009. Drought-resistant rice: physiological framework for an integrated research strategy. In R. Serraj, J. Bennet and B. Hardy eds. *Drought Frontiers in Rice: Crop Improvement for Increased Rainfed Production*. IRRI. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore. 139-170.
- Shalhevet, J. 1994. Using water of marginal quality for crop production: major issues. *Agric. Water Manage.* 25: 233-269.
- Sharp, R.E. and W.J. Davies 1985. Root growth and water uptake by maize plants in drying soil. *J. Exp. Bot.* 36 : 1441-1456.
- Sie, M., K. Futakuchi, H. Gridley, S. Mande, B. Manneh, M.N. Ndjiondjop, A. Efisue, S.A. Ogunbayo, M. Moussa, H. Tsunematsu and H. Samejima 2009. Drought research at WARDA: current situation and prospects. In R. Serraj, J. Bennet and B. Hardy eds. *Drought Frontiers in Rice: Crop Improvement for Increased Rainfed Production*. IRRI. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore. 61-73.
- Singh, N.P., M.C.S. Bantilan, A.A. Kumar, P. Janila and A.W.R. Hassan 2011. Climatic change impact in agriculture: vulnerability and adaptation concerns of semiarid tropics in Asia. In *Crop Adaptation to Climatic Change*. Eds S.S. Yadav, R.J. Redden, J. L. Hatfield, H. Lotze-Campen and A.E. Hall. John Wiley and Sons Ltd, Chichester. 107-130.
- 但野利秋 1983. 作物の耐塩性とその機構. *科学と生物* 21: 439-445.
- 瀧島康夫 1987. 海外における塩類土壌調査覚書き. *土肥誌* 58: 101-110.
- Teare, I.D., E.T. Kanematsu, W.L. Powers and B.S. Jaxobs 1973. Water-use efficiency and its relation to crop canopy area, stomatal regulation and root distribution. *Agron. J.* 65:207-211.
- 津田誠・横溝友香・高見晋一 2010. 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. *岡山大農学報* 99: 63-70.
- Turner, N.C., G.C. Wright and K.H.M. Siddique 2001. Adaptation of grain legumes

(pulses) to water limited environments. *Adv. Agron.* 71: 193-231.

海津正倫 (2001) アジアのデルタにおける海面上昇の影響, In: 海面上昇とアジアの海岸 (海津正倫, 平井幸弘編), 古今書院, 東京, pp. 16-34.

王俊剛・津田誠・平井儀彦 2007. 塩土壌における幼穂形成期の水ストレスに対するイネの感受性の増加. *日作紀* 76 : 540-547.

Wessa, P. 2011. Free statistics software, Office for research development and education, version 1.1.23-r6, URL. <http://www.wessa.net/>

Yoshida, S. and S. Hasegawa 1982. The rice root system: its development and function.

In *IRRI Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice*. IRRI. Los Banos. 97-114.

Zubaidi, A., K. G. McDonald and G. J. Hollamby 1999. Nutrient uptake and distribution by bread and durum wheat under drought conditions in South Australia. *Animal Production Science* 39(6): 721-732.

要旨

作物の栽培育種に関する研究は生産性の高い環境における収量向上をもたらし、水や塩のストレスが制限要因である干ばつ条件や塩害地における収量改善を可能にしてきた。しかし、今後増大すると予測されている塩土壌における干ばつのような複数のストレス条件下における作物生産改善に関する研究はまだ少ない。そこで本研究ではムギ類とイネを用いて、塩土壌における干ばつ抵抗性を明らかにした。

非塩土壌において作物の乾物生産量は蒸発散量に比例的であるが、塩土壌においてもこの比例関係が成り立つかを調べた。土壌水分が限られた塩濃度の異なる土壌でムギ類（コムギ、オオムギ、デュラム）および数品種のイネを栽培したところ、それぞれの環境条件において土壌塩分濃度が高いほど利用できる水分量（蒸発散量）は減少したが、乾物生産量は土壌塩分濃度、植物体内 Na^+ 含有率にかかわらず蒸発散量に比例的に増加した。

土壌塩分による蒸発散量の減少は、与えられた土壌水分量が同じとき蒸散、成長が停止したときに土壌に残存する水分含有率の増加によっていた。土壌残存水分含有率は土壌上層の塩濃度が低いときには土壌 Na^+ 含有率が増加するほど大となり、高い Na^+ 含有率が吸水を制限していた。これに対して塩が均一に分布している土壌で土壌残存水分含有率は土壌 Na^+ 含有率よりも根長密度、根重密度との相関が著しく強かったので、根の成長抑制が吸水制限要因であると考えられた。根の成長と土壌残存水分含有率の関係はムギ類の作物間でほとんど変わらなかったため、ムギ類では高塩濃度の土壌で根の吸水機能は大きな違いがないと推定された。イネでは大きな品種間差が認められ、高塩濃度の土壌で根の吸水能力は耐塩性品種で非耐塩性品種、耐干性品種よりも大であった。

以上のように塩土壌で干ばつが起こる条件では根の成長による蒸発散量の向上が重要であることが分かった。そして少なくともイネでは耐塩性品種は土壌水分が十分である条件のみならず土壌水分が不足する環境でも収量の安定と向上に貢献すると考えられた。

Abstract

Many studies on agronomy and plant breeding have improved crop yields under favorable environments and studies on plant stress responses contribute the improvements of crop production under the drought and the saline conditions where water and salt stresses respectively are limiting factors. A few studies were conducted to improve crop production under drought conditions on the saline soils where complex stresses of water and salt may limit yields. This study was conducted to clarify the drought resistance on the saline soils in cereals such as wheat, barley, durum and rice.

First, it was examined whether crop dry matter production increases proportional to evapotranspiration on the saline soils as well as on the non-saline soils. Wheat, barley, durum and rice were grown exclusively on the stored soil water in the soils with various salt concentrations. Evapotranspiration was decreased by soil salinity. There were clear relationships between dry matter production and the evapotranspiration in each environment, irrespective of soil salt concentrations and plant Na^+ concentrations.

The decrease of evapotranspiration corresponded to the increase of amount of water remained in the soils when transpiration and growth ceased. Concentration of soil water remained was related to soil Na^+ concentration in the soils with heterogeneously distributed salt, so high soil Na^+ concentration suppressed root water absorption. Concentration of soil water remained was related to root length and weight density in the soils where salt evenly distributed, so poor root growth may be responsible for reduction of water absorption. Relation between root growth and soil water concentration was similar among wheat, barley and durum, indicating similarity of water absorption capacity among them. In the soil of high salt concentration, there was a distinct variation of water absorption capacity between rice cultivars. Salt-tolerant cultivars may have better ability to absorb water in saline soils comparing normal and drought resistant cultivars.

It was concluded that evapotranspiration may be a dominant factor to improve crop production under drought in the saline soil. Especially in rice, salt-tolerance may

contribute to improvement crop production in the saline soil under drought as well as well watered conditions.

発表論文

第2章

哈布日・津田誠・平井儀彦 2012. 土壤水分が限られた塩土壤におけるコムギとオオムギの水利用. 日作紀 81: 64-70.

第4章

哈布日・津田誠・平井儀彦 2014. 土壤の塩濃度と量の違いがイネの水利用と乾物生産に及ぼす影響. 日作紀 83 (印刷中).