

海洋深層水濃縮廃液を活用した高品質高糖度トマトの多段周年栽培の実用化

北野 雅治¹, 松岡 孝尚², 松添 直隆³, 圖師 一文⁴, 和島 孝浩³, 日高 功太¹

¹九州大学大学院農学研究院, ²愛媛大学大学院連合農学研究科,

³熊本県立大学環境共生学部, ⁴尚絅大学短期大学部

概要 海洋深層水を原料とする多様な商品の製造過程で排出される濃縮海洋深層水を再利用する高品質トマト生産を検討している。その過程で、濃縮海洋深層水を短期間施用した場合の生理的効果のメカニズムを、塩ストレスに対する植物体の適応機能という観点から明らかにすることも目的としている。2005、2006 年度においては、植物体での浸透圧調節機能と抗酸化機能の発現および果実の高品質化の評価法を確立するとともに、4 段栽培における各段の果房に対して異なる回数(3 回, 2 回, 1 回)の短期間(1 週間)塩ストレス処理を行った。その結果、短期間の断続的な塩ストレス処理によって、浸透圧調節機能や抗酸化機能が発現するが、2 回以下の短期間塩ストレス処理では高品質化の効果は十分ではなかった。そこで、2007 年度においては、各段の果房に対して均等に 3 回の短期間塩ストレスを付与し、果実生長、浸透圧調節機能、抗酸化機能、果実への有用物質(糖, ミネラル, 抗酸化物質など)の集積および食味などに対する効果を、長期間連続塩ストレス処理と比較して検討した。材料植物としては、トマト(*Lycopersicon esculentum* Mill.) 品種「ハウス桃太郎」を用い、NFT 水耕システムを用いた 4 段栽培をおこなった。収穫まで基本培養液(電気伝導度 1.0 dS m^{-1})のまま栽培する区を対照区とし、基本培養液に濃縮海洋深層水を添加して、1 週間の塩ストレス処理を 1 週間間隔で断続的に繰り返す短期間繰り返し塩ストレス処理区と長期間添加する長期間連続塩ストレス処理区を設けた。

濃縮海洋深層水を適度の濃度で施用する 1 週間の塩ストレス処理を、4 段栽培での各果房の果実肥大期に 1 週間間隔で 3 回繰り返す処理によって、多様な項目(糖度, 酸度, ミネラル濃度, 浸透圧調節機能, 抗酸化機能, 食味)において、長期間連続塩ストレス処理と同等以上の均質な高品質化の効果が認められた。多段栽培での長期間連続塩ストレス処理では、極端な小玉果や尻腐れ果が生じるとともに、樹勢の低下も懸念されるが、短期間繰り返し塩ストレス処理によって、これらの低減とさらなる長段栽培への応用の可能性が示唆された。本研究では、海洋深層水のような有用な天然資源を活用して、適度な強度の環境ストレスを適当な期間、植物体に付与することによって、植物が有するストレス適応機能を発現させ、農産物の付加価値を高める栽培技術を提示できた。

1. 研究の背景と目的

海洋深層水に関しては、深層水が有する特性(低温性, 富栄養性, 清浄性, 安定性)を考慮した多目的、多段階利用の取り組みが展開され、深層水を原料とした多様な製品が市販されている(中島, 2002)。海洋深層水を原料とする製品(ミネラル飲料水, 天然塩など)を製造する過程では、深層水に含まれる塩とミネラル成分が高濃度で残存する濃縮深層水が大量に排出され、一部は河川や沿岸域へ

投棄されている。しかしながら、投棄には多くの労力と費用を要するとともに、河川や沿岸域の環境への悪影響が懸念されており、濃縮海洋深層水の効果的な再利用法が求められている。

海に囲まれた日本では、昔から身近にある天然資源として海水や海藻が農業に用いられている。また、海水が多く含まれる干拓地や台風による高潮の被害を受けた低平地の田畑で、品質の良い作物が収穫できる例はよく知られて

いる。なかでも、主要な園芸作物で耐塩性が強いトマトについては、八代市(干拓地)の塩トマトや高知市(沿岸低平地)の徳谷トマトが有名である。さらに、養液栽培においては、培養液に塩化ナトリウムを添加して電気伝導度(EC)を高めることによって、根系に塩ストレスを付与する栽培などが行われている(Adams, 1991; Adams and Ho, 1989; Ehret and Ho, 1986)。これらの栽培で生産されたトマト果実は一般に「高糖度トマト」と呼ばれ、果実が小玉になるにもかかわらず、食味成分(糖, 有機酸, アミノ酸)、機能性成分(リコピン, 還元型アスコルビン酸)などの濃度が高く、食味も良いことから、高値で取引されている。Fig. 1 に示すように、根域での高塩濃度条件によって、根の吸水が抑制され、植物体が水分欠乏に陥り、浸透圧ストレスが誘発される。さらに、高塩濃度条件下では、水分欠乏にイオンストレス(ナトリウムイオンや塩素イオンの過剰)も加わり、葉の光合成が抑制され、過剰な光による光合成系の障害(光阻害)も生じる(Long *et al.*, 1994; Melis, 1999)。植物は光合成により酸素を発生させるために、細胞内の酸素濃度が高く、光合成系の障害によって電子伝達系で生じた余剰電子が活性酸素(スーパーオキシドラジカルや過酸

化水素)を発生しやすく、酸化ストレスが誘発される(Cakmak and Marshner, 1992; Wise and Naylor, 1987)。根域でのストレス要因によって植物体に誘発される浸透圧ストレスと酸化ストレスに応答して、植物体ではそれぞれ浸透圧調節機能と抗酸化機能が発現する。これらのストレス応答は、ストレスシグナルの受容、伝達およびそれに続く多様な遺伝子の発現によってもたらされ、シグナル伝達物質として誘導されるアブシジン酸(ABA)や細胞内の二次的なシグナル伝達を担うカルシウムイオンなどが重要な働きをしている。これらのシグナル伝達物質によって誘導される遺伝子発現によって、水分子、糖、アミノ酸、塩類の膜輸送に関わる膜輸送タンパク質(チャンネル, トランスポーター, ポンプ)、浸透圧調節機能における適合溶質(糖および糖の誘導體, プロリン, グリシンベタイン等)の合成酵素、活性酸素消去系における解毒酵素等の多様な機能タンパク質が合成され(Hasegawa *et al.*, 2000; 幸田ら, 2003)、その結果、収穫対象器官(例えば、トマト果実)に有用物質(糖, 有機酸, アミノ酸, 抗酸化物質等)が高濃度に集積することが期待される。

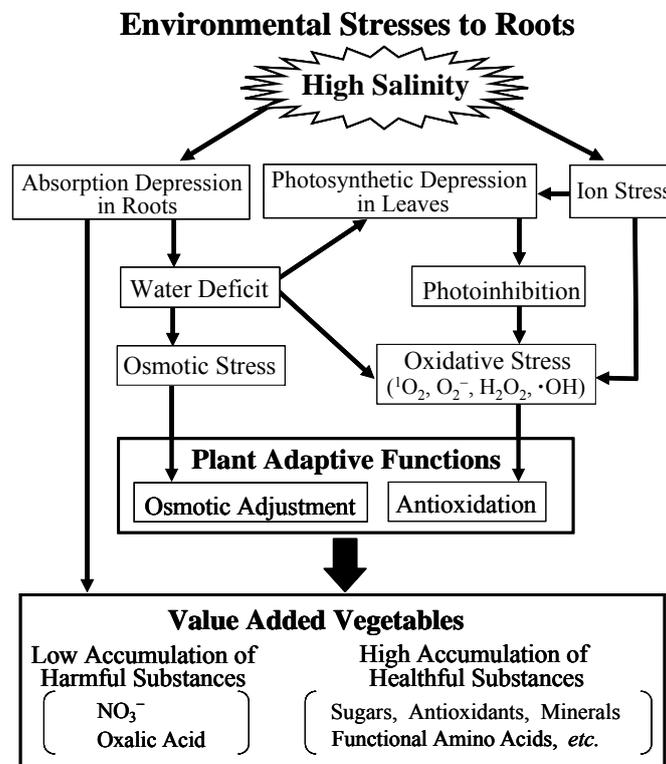


Fig. 1. Application of high salinity stress to roots in the soil-less culture for production of value-added vegetables

植物体における浸透圧調節機能は、低温条件下での凍結回避、吸水制限下での細胞からの脱水防止と細胞内の膨圧維持、高塩濃度条件下での細胞内への塩の侵入防止のために発現するが(幸田ら, 2003)、高塩濃度条件下による吸水制限下において、師管内の溶質濃度を高めて師管内の圧流を維持(師部輸送を維持)するためにも発現することが、トマト果実への師部輸送で確認されている(北野ら, 2005; Kitano *et al.*, 2008; 和島ら, 2006b)。植物体における抗酸化機能は、活性酸素を消去する仕組み(活性酸素消去系)に依存している。活性酸素消去系は、代謝プール(細胞質、葉緑体、ミトコンドリアなど)に存在し、酵素や酸化還元物質の働きで活性酸素を最終的に水に変える系である。活性酸素の中で最も多く発生するスーパーオキシドアニオン(O_2^-)は、スーパーオキシドディスムターゼ(SOD; Super oxide dismutase)によって、酸素と過酸化水素(H_2O_2)に分解される。さらに、過酸化水素は、還元型アスコルビン酸(ASA; Ascorbic acid)とアスコルビン酸ペルオキシダーゼ(APX; Ascorbate peroxidase)によって還元されて水になる。この時、ASA は酸化されて酸化型アスコルビン酸(DHA; Dehydro ascorbic acid)に変化するが、デヒドロアスコルビン酸レダクターゼ(DHAR; Dehydro ascorbate reductase)などによって還元され再生する(Asada, 1999; Bowler *et al.*, 1992; Foyer *et al.*, 1994; Shalata and Tal, 1998)。このような浸透圧調節機能や抗酸化機能の過程で産生される有用物質の高濃度集積による野菜の高付加価値化のほか、健康に有害な物質(硝酸やシュウ酸)の低減による高付加価値化も考えられる(Fig. 1)。

このように、適度の塩ストレス処理によって浸透圧調節機能や抗酸化機能を発現させることによって、トマト果実の高付加価値化をもたらすことが期待されるが、長期間の塩ストレス処理が、(1)果実の極端な小玉化、(2)果実へのCaの集積不足による尻腐れの多発、(3)果皮の硬化、(4)樹勢の低下などを引き起こすことが栽培上の問題になっている(Ho, 1996; Cuartero and Fernandez-Munoz, 1999; Dorais *et al.*, 2001)。そこで、これらの栽培上の問題点の解決策および濃縮海洋深層水の再利用法として、トマト果実の肥大最盛期の短期間にだけ培養液に濃縮海洋深層水を施用する高品質トマト水耕栽培を検討している(北野ら, 2005; 北野ら, 2006; 北野ら, 2007; Kitano *et al.*, 2008; 和島ら, 2006ab)。その過程で本研究は、濃縮海洋深層水

の短期間施用による塩ストレス処理の生理的効果のメカニズムを、塩ストレスに対する植物体の適応機能という観点から明らかにするとともに多段周年栽培法を確立することを目的としている。

初年度の2005年においては、塩の短期間施用が繰り返し可能な水耕栽培システムを構築するとともに、塩の短期間施用に伴う活性酸素消去系と浸透圧調節機能の消長、果実への有用物質(糖、ミネラル、抗酸化物質、機能性アミノ酸など)の集積および食味の定量的評価法を導入し、深層水トマトの高付加価値化について調べた。2006年度においては、塩ストレスの短期間処理が繰り返し可能な水耕栽培システムを用いた4段栽培において、繰り返し回数異なる短期間繰り返し塩ストレス処理と長期間連続塩ストレス処理を導入し、果実生長、浸透圧調節機能、抗酸化機能、果実への有用物質(糖、ミネラル、抗酸化物質、機能性アミノ酸など)の集積、食味および尻腐れの発症などに対する効果を比較検討した。最終年度の2007年度においては、4段栽培の各段の果房に3回の短期間塩ストレス処理を導入する栽培法を試み、果実の高付加価値化に対する効果を長期間連続塩ストレス処理と比較して実証し、周年栽培法として提案した。

2. 研究方法

2.1 果実の高付加価値化の評価

2.1.1 材料および栽培方法

材料植物としては、トマト(*Lycopersicon esculentum* Mill.)品種「ハウス桃太郎」を用い、湛液ポット(10 L)による水耕栽培をおこなった。第1果房の上位2節で摘心し、第1果房の果実を4個に制限した。培養液としては、大塚ハウスSA処方液を電気伝導度(EC) 1.0 dS m^{-1} にしたものを用いた。処理区としては3種の異なる塩ストレス処理区と塩ストレス処理をしない区(Control区)を設けた。各処理区はそれぞれ4個体(4ポット)とし、合計16個体(16ポット)を栽培した。3種類の塩ストレス区としては、深層水区(DSW区)、表層水区(SSW区)および食塩区(NaCl区)を設けた。塩ストレスをかけないControl区では、収穫時までEC 1.0 dS m^{-1} のまま栽培した。各塩ストレス区では、Ca不足による尻腐れが果実内部で発症する果実肥大初期の塩ストレス処理を避け、開花後3週目から2週間の果実肥大最盛期だけ、塩ストレス処理を導入した(北野ら, 2006;

Kitano *et al.*, 2008; 和島ら, 2006ab)。すなわち、DSW 区では濃縮海洋深層水(高知県室戸市採取)を、SSW 区では表層海水(高知県手結海岸採取)を、また NaCl 区では食塩(NaCl)を、果実肥大最盛期の 2 週間だけ培養液に施用し、培養液の浸透ポテンシャルが葉の日中の水ポテンシャルと同程度になるように、EC を 15 dSm^{-1} まで高め、2 週間の塩ストレス処理後は、Control 区と同じ培養液に戻した。Table 1 に、濃縮海洋深層水、表層海水および四つの処理区の培養液の EC、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} を示す。濃縮海洋深層水は表層海水よりもイオン濃度が 1.5 倍程度高かった。DSW 区では、NaCl 区よりも K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 濃度が高く、特にニガリ成分の Mg^{2+} の濃度上昇が顕著であった。また、DSW 区と SSW 区とは顕著な差は認められなかった。ここで、 K^+ は植物体の浸透圧調節機能に関与し、 Mg^{2+} はニガリの主成分で、 K^+ とともに果実の旨味に関与しているといわれている(吉川, 2002)。また、 Na^+ は海水の主成分であり、 Ca^{2+} は難移動性のために果実への集積不足によって尻腐れが発症するといわれている(Saure, 2001)。

2. 1. 2 果実品質の定量的評価

四つの各処理区から完熟期の果実を 8 個ずつ採取し、5 個を新鮮重、乾物重、糖度、酸度、ミネラル濃度、抗酸化機能、アミノ酸濃度の評価に、3 個を食味による官能試験に供し、果実を 8 等分した切片の対角線上の 2 切片を 1 組として分析試料とした。糖度(Brix)および酸度の測定のために試料をミキサーで均一になるまで混ぜ合わせ、糖度を液体糖度計(PAL-1, ATAGO)および酸度をフルーツテスター(SFT-1, シロ産業)で測定した。

果実内の K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 濃度の測定のために、乾燥試料をミキサーで粉碎した後、0.5 g を電気炉(600°C)で 12 時間焼却した灰を希釈酸(塩酸:硝酸:水=3:1:1)に溶かし、純水を加えて 100 mL 溶液にして分析試料とした。分析には、土壤・作物体総合分析計(SPCA-6210, 島津製作所)を用い、 Mg^{2+} と Ca^{2+} は原子吸光法で、 K^+ と Na^+ は炎光法で測定した。

塩ストレス処理によって植物体にもたらされると考えられる活性酸素に対する抗酸化機能(Fig. 2)に関わる酵素の活性および抗酸化物質の濃度を収穫果実において評価した。まず、活性酸素の中で最も多く発生するといわれているスーパーオキシドアニオン($\text{O}_2^{\bullet-}$)を酸素と過酸化水素(H_2O_2)に変えて不活化するスーパーオキシドアニオン不活化酵素(SOD)の活性を評価した。評価には、SOD Assay Kit-WST(同人化学研究所)とプレートリーダー(NJ-2300, ナルジェヌンクインターナショナル)を用い、水

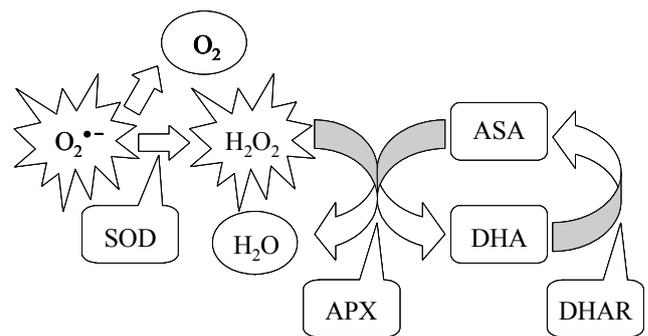


Fig. 2. Reactive oxygen species and antioxidants in plants. $\text{O}_2^{\bullet-}$, superoxide anion; SOD, superoxide dismutase; H_2O_2 , hydrogen peroxide; APX, ascorbate peroxidase; ASA, ascorbate; DHA, dehydroascorbate; DHAR, dehydroascorbate reductase.

Table 1. Electric conductivity (EC) and concentrations of ions in the concentrated deep seawater, the surface seawater and the nutrient solutions under the different salt stress treatments

	EC (dSm^{-1})	$[\text{K}^+]$ (mg L^{-1})	$[\text{Na}^+]$ (mg L^{-1})	$[\text{Mg}^{2+}]$ (mg L^{-1})	$[\text{Ca}^{2+}]$ (mg L^{-1})
Concentrated deep seawater	70.5	6.3×10^2	1.2×10^4	1.7×10^3	7.6×10^3
Surface seawater	47.5	5.0×10^2	0.8×10^4	1.1×10^3	5.3×10^3
Control	1	129	10	14	63
DSW	15	262	2370	329	173
SSW	15	252	2350	275	170
NaCl	15	129	2690	14	63

Control, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

溶性デトランジウム塩(WST-1)の還元による発色を阻害する程度からSOD活性を評価する方法を採用した(詳細略)。さらに、Fig. 1に示すように、過酸化水素の不活化に関与する還元型アスコルビン酸(ASA)と酸化型アスコルビン酸(DHA)の濃度を、慣行の試料調整法および抽出法に基づいて、HPLCを用いて分析した(詳細略)。

アミノ酸としては、トマトの旨味に関与するグルタミン酸とアスパラギン酸の濃度を、HPLCを用いた慣行法で測定した(詳細略)。また、機能性アミノ酸として、植物体において環境ストレスに対する防御作用を持つ γ -アミノ酪酸(GABA)および細胞内の塩濃度が上昇した時においてもタンパク質を安定化する機能があるプロリンの濃度を、それぞれHPLCを用いた慣行法で測定した(詳細略)。

2. 1. 3 食味による官能試験

4処理区(DSW区, SSW区, NaCl区, Control区)で収穫されたトマト果実を、15名のパネラーに食べさせ、甘味、酸味、旨味および嗜好(総合評価)について、単純な順位法で評価させた。すなわち、各評価項目について、各処理区のトマトに1~4位の順位づけをさせ、15名の順位の合計で評価した。したがって、15名全員が1位と評価した場合は15となり、全員が4位と評価した場合は60となる。パネラーの熟練度を推定するために、甘味と酸味の食味試験の結果と糖度(Brix)と酸度の測定値との関係を調べた。さらに、旨味に関する食味試験の結果と旨味に関与するアミノ酸(グルタミン酸, アスパラギン酸)の濃度との関係を調べた。

2. 2 短期間繰り返し塩ストレス処理栽培法

材料植物としては、2. 1と同様に「ハウス桃太郎」を用い、ビニルハウスにおいてNFT水耕システムを用いた4段栽培をおこなった。新規に構築したNFTベッド(勾配1/70, 長さ10m, 幅30cm)の3列のそれぞれに40個体ずつ定植し、第4果房の上位2節で摘心して、果房当りの果実数を4個に制限した。基本培養液としては、大塚ハウスA処方液を電気伝導度(EC)1.0 dS m⁻¹に調整して用いた。3列のNFTベッドの一つを対照区(Control区)とし、定植から収穫までEC 1.0 dS m⁻¹の基本培養液のまま栽培した。残りの2ベッドを塩ストレス処理区とし、2006年においては、濃縮海洋深層水を一週間毎に施用することによって、一週間の塩ストレス処理を一週間間隔で断続的に3回繰り返す短期間繰り返し塩ストレス処理区(DSW-S区)と連続的に長期間施用する長期間連続塩ストレス処理区(DSW-L区)を設けた(Fig. 3)。

塩ストレス処理は、第1果房の尻腐れの発症を回避するために第1果房の受粉2週間後から開始した。DSW-S区では、第1果房の果実肥大が活発になる受粉2週間後から1週間間隔で、培養液の水ポテンシャルが葉の水ポテンシャルと同程度になるように濃縮深層水を基本培養液に施用し、ECを1.0 dS m⁻¹から15 dS m⁻¹に高めた(北野ら, 2006; 北野ら, 2007; 和島ら, 2006a)。多段栽培では、1植物体上に異なる発育段階の果房が同時に存在するので、DSW-S区では各果房が受けた塩ストレスの時期と回数が異なり、第1果房と第2果房は1週間の塩ストレス処理を

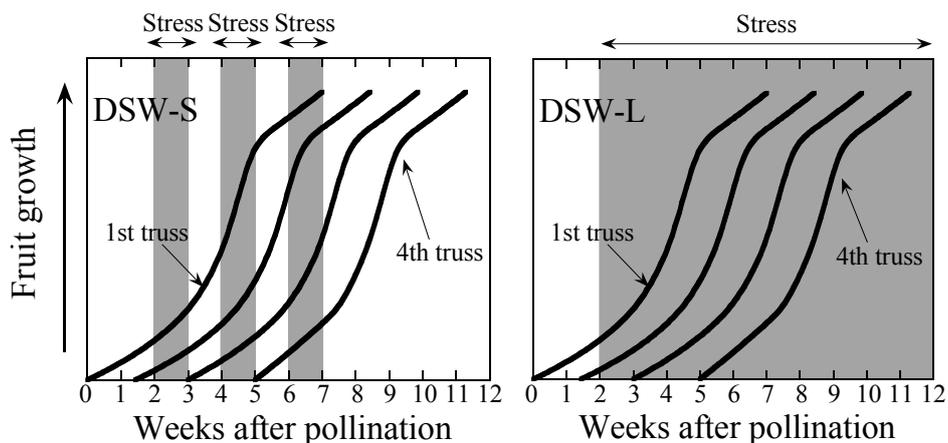


Fig. 3. Schematic diagram of time course of the short-term salt stress treatment (DSW-S) and the long-term salt stress treatment (DSW-L) with the concentrated deep seawater. The gray zone indicates the period of the salt stress treatment: The one-week salt stress treatment was applied three times with intervals of one week.

Table 2. Electric conductivity (EC), osmotic potential (Ψ_{π}) and ion concentration of the nutrient solutions under the different salt stress treatments: Control, the non-salt stress; DSW-S, the short-term salt stress with the concentrated deep seawater; DSW-L, the long-term salt stress with the concentrated deep seawater.

Treatment	EC (dSm^{-1})	Ψ_{π} (MPa)	$[NO_3^-]$ (mgL^{-1})	$[PO_4^{3-}]$ (mgL^{-1})	$[K^+]$ (mgL^{-1})	$[Mg^{2+}]$ (mgL^{-1})	$[Ca^{2+}]$ (mgL^{-1})	$[Na^+]$ (mgL^{-1})
Control	1.0	-0.26	397	62	129	14	63	10
DSW-S	15.0	-0.88	284	44	262	554	217	4550
DSW-L	9.0	-0.61	324	50	214	361	162	2929

3 回、第 3 果房は 2 回、第 4 果房は 1 回だけ受けた。DSW-L 区では、第 1 果房の受粉 2 週間後から第 4 果房の収穫まで、濃縮深層水を基本培養液に添加し、培養液の EC を $1.0 dSm^{-1}$ から $9 dSm^{-1}$ に高め、 EC 値と塩ストレスの期間との積が DSW-S 区と同程度になるようにした。各処理区 (Control 区, DSW-S 区, DSW-L 区) の培養液は、1 週間毎に新しいものに更新した。Table 2 に各処理区の培養液の特性を示す。濃縮海洋深層水の添加によって、培養液の浸透ポテンシャルが顕著に低下し、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ の濃度が著しく上昇し、 NO_3^- と PO_4^{3-} の濃度は、濃縮深層水の添加による希釈効果によって低下した。

さらに、最終年度の 2007 年度においては、培養液条件は 2006 年度と同じにし、Fig. 4 に示すように、濃縮海洋深層水を一週間毎に施用する塩ストレス処理を一週間間隔

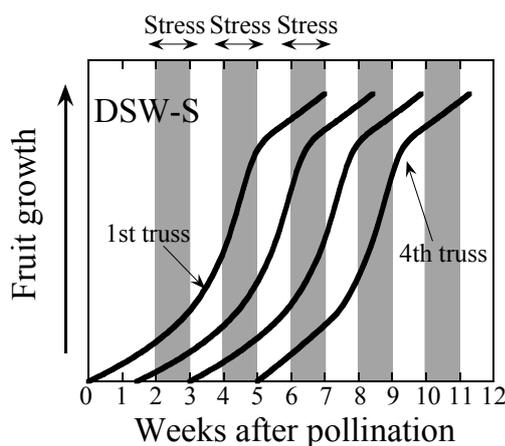


Fig. 4. Schematic diagram of time course of the short-term salt stress treatment (DSW-S) with the concentrated deep seawater. The gray zone indicates the period of the salt stress treatment: The one-week salt stress treatment was applied five times with intervals of one week.

で断続的に 5 回繰り返して、1~4 段までの各果房に均等に 3 回の短期間塩ストレス処理を経験させる短期間繰り返し塩ストレス処理区を DSW-S 区とし、さらに、濃縮海洋深層水を連続的に長期間施用する Fig. 3 と同様の長期間連続塩ストレス処理区 (DSW-L 区) を設けた。

果実品質の定量評価および官能試験は、2006 年度、2007 年度ともに、2005 年度と同様の方法 (2. 1. 2 および 2. 1. 3) でおこなった。

3. 研究結果および考察

3. 1 果実の高付加価値化の評価

Fig. 5 に各処理区の収穫果実の新鮮重、乾物重、乾物率、糖度 (Brix)、酸度および糖酸比を示す。塩ストレス処理により新鮮重は 35% 程度減少し、乾物重も減少する傾向が認められた。しかしながら、乾物重が Control 区よりも有意に減少したのは $NaCl$ 区だけで、DSW 区では乾物重の有意な減少は認められず、乾物率が Control 区よりも有意に高くなった (約 1.4 倍)。Control 区の糖度と酸度はそれぞれ 6 および 0.6% であったが、濃縮深層水の施用によって有意に増加して、DSW 区ではそれぞれ 9 および 1% 以上に達し、Control 区と SSW 区よりも有意に高くなった。糖酸比については各処理区間で有意差は認められなかった。今回の湛液ポット栽培における濃縮深層水の施用効果は、北野ら (2005) および和島ら (2006a) の NFT ベッド栽培の結果とほぼ一致したが、乾物集積の促進効果は NFT ベッドで栽培した方がより顕著であった。

Fig. 6 に各処理区の収穫果実内の K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} および Ca^{2+} 濃度を示す。果実の旨味に関与するといわれている K^+ と Mg^{2+} の濃度がともに濃縮深層水の施用によって

上昇した。また、全ての塩ストレス区において、 Na^+ の濃度は一様に著しく増加し、 Ca^{2+} の濃度は著しく減少した。 Ca^{2+} は植物体内では難移動性で主に道管を輸送経路として果実内へ集積されるが、トマト果実の場合、果実へ到達する道管液量は篩管液量に比べて著しく少なく(Ho *et al.*, 1987)、しかも道管内の流れは塩ストレスの影響を受け

やすいので(Araki *et al.*, 2004)、塩ストレス下では果実への Ca^{2+} の集積が著しく抑制されたと考えられる。しかしながら、本研究では、尻腐れが果実内部で発症する果実肥大初期(受粉後2週間)の塩ストレス処理を避けたために、いずれの塩ストレス処理区においても尻腐れの発症は認められなかった。

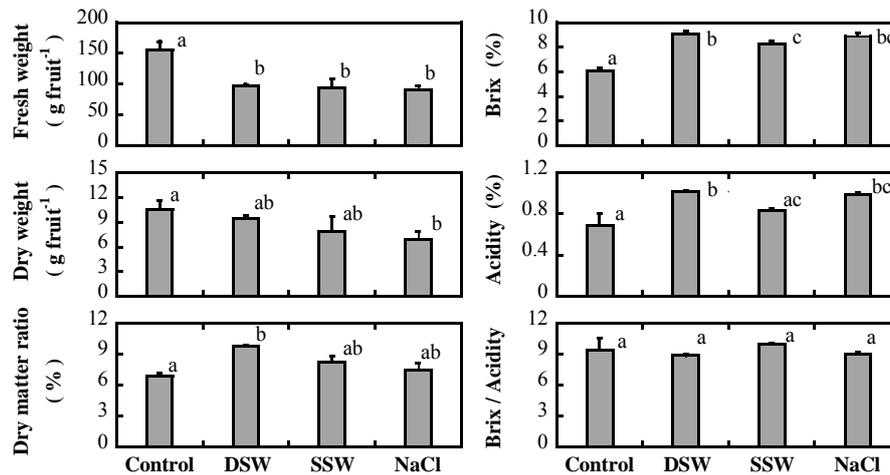


Fig. 5. Fresh weight, dry weight, dry matter ratio, Brix, acidity and ratio of Brix to acidity of harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the least significant difference (LSD) at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

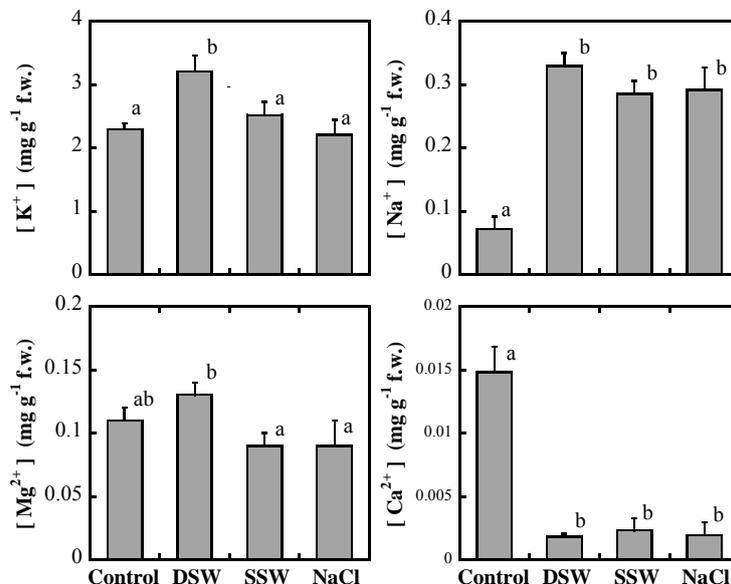


Fig. 6. Concentrations of K^+ , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

Fig. 7 に各処理区の収穫果実内のスーパーオキシドアニオン不活化酵素 (SOD) の活性を示す。SOD 活性は塩ストレス処理によって高まる傾向が認められ、特に NaCl 区では有意に高まったが、DSW 区と Control 区では有意差は認められなかった。3 種の塩ストレス処理区では、同じ EC 値 (15 dS m⁻¹) に設定したにもかかわらず、DSW 区の SOD 活性が有意に上昇しなかったのは、塩ストレスによって誘発される酸化ストレスが、濃縮深層水の施用によって緩和されたためと推察される。

Fig. 8 に各処理区の収穫果実内の還元型アスコルビン酸 (ASA) と酸化型アスコルビン酸 (DHA) の濃度を示す。ASA と DHA ともに全ての処理区においてほぼ同じ濃度であった。ASA はアスコルビン酸ペルオキシダーゼ (APX) の働きによって、過酸化水素を消去することで消費されて DHA に変わるが、その後 DHA からデヒドロアスコルビン酸レダクターゼ (DHAR) の働きによって ASA に再生される。このことから、トマトでは、過酸化水素消去系での ASA の再生システムが十分に機能していることが示唆された。

Fig. 9 に各処理区の収穫果実内のグルタミン酸、アスパラギン酸、 γ -アミノ酪酸 (GABA) およびプロリンの濃度を示す。グルタミン酸濃度には各処理区間に有意差は認められなかったが、アスパラギン酸の濃度は全ての塩ストレス

処理区で一様に有意に減少した。機能性アミノ酸の GABA とプロリンの濃度は、全ての塩ストレス処理区で有意に増加したが、異なる塩ストレス処理区間で必ずしも有意差は認められなかった。

Fig. 10 に各処理区の収穫果実の食味試験によって評価された甘味、酸味、旨味および嗜好 (総合評価) の順位の合計を示す。全ての評価項目について、塩ストレス処理区は Control 区に比べて有意に高い評価を受けたが、異なる塩ストレス間で必ずしも有意差は認められなかった。また、食味試験による甘味と酸味の評価結果は、糖度 (Brix) と酸度の測定値の傾向と当然ながらよく一致した (データ省略)。

Fig. 11 に各処理区の収穫果実の食味試験によって評価された旨味の順位合計と旨味に関与するといわれているグルタミン酸とアスパラギン酸の比を示す。グルタミン酸とアスパラギン酸の比は、全ての塩ストレス処理において有意に増加し、食味による旨味の評価結果と傾向が一致した。このことから、グルタミン酸とアスパラギン酸の比がトマトの旨味を決定し、塩ストレス処理によってその比が上昇するために旨味が増すことが明らかになった。

以上のように、多様な項目 (糖度、酸度、ミネラル濃度、抗酸化機能、機能性とうま味に関与するアミノ酸代謝、食

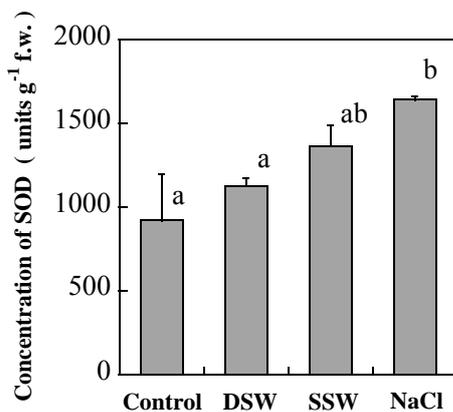


Fig. 7. Activities of superoxide dismutase (SOD) of harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

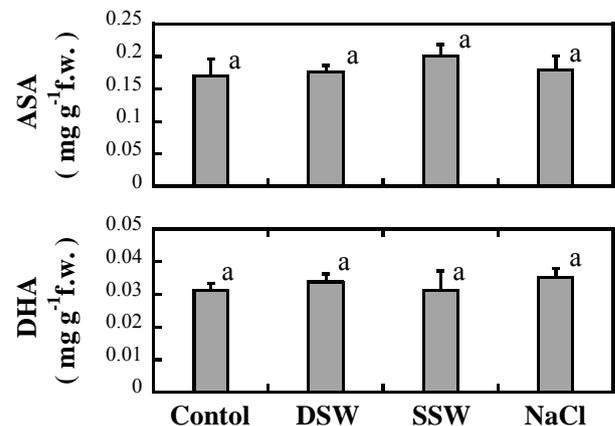


Fig. 8. Concentrations of ascorbate (ASA) and dehydroascorbate (DHA) of harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

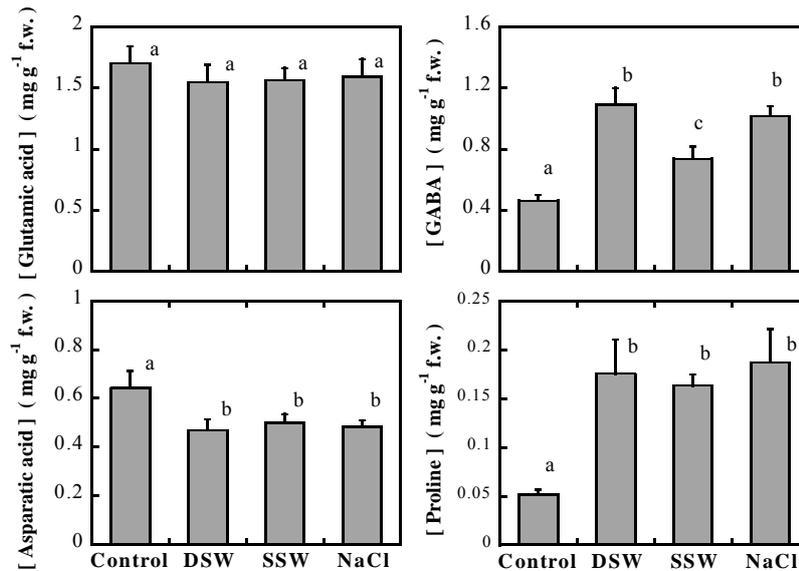


Fig. 9. Concentrations of glutamic acid, asparatic acid, γ -aminobutyric acid (GABA) and proline in harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

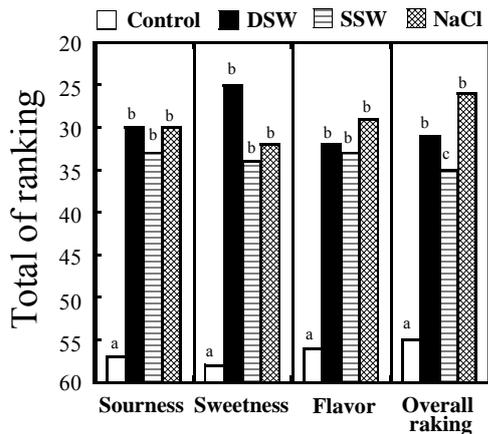


Fig. 10. Sensory evaluations of harvested tomatoes by tasting. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

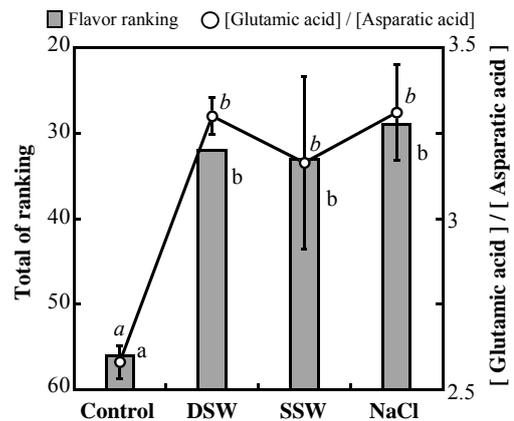


Fig. 11. Relationship of sensory ranking in flavor and ratio of glutamic acid to asparatic acid of harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different in the flavor ranking and in the ratio of glutamic acid to asparatic acid by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress treatment with the concentrated deep seawater; **SSW**, the salt stress treatment with the surface seawater; **NaCl**, the salt stress treatment with pure NaCl.

味)において、濃縮海洋深層水の短期間施用によってトマトの明確な高付加価値化が可能であることが示唆された。また異なる塩ストレス処理区(濃縮深層水区, 表層海水区,

NaCl 区)間では、必ずしも有意な特異性は認められなかったが、塩ストレスによって植物体に引き起こされる酸化ストレスが、濃縮海洋深層水の施用によって緩和される可能

性も示唆された。

3. 2 短期間繰り返し塩ストレス処理栽培法

Fig. 12 に DSW-S 区と Control 区での第 1 果房の上位 2 節から採取した小葉の水ポテンシャル、浸透ポテンシャルおよび膨圧の 1 週間毎の経時変化を示す。葉の水ポテンシャルと浸透ポテンシャルは、1 週間の塩ストレス処理によって有意に低下し、塩ストレス解除期間に回復する傾向が認められた。塩ストレス処理による水ポテンシャルと浸透ポテンシャルの低下幅は同程度であり、その結果、DSW-S 区の葉の膨圧は Control 区とほぼ同レベルに維持され、塩ストレス処理期間中の葉の萎れも認められなかった。このことから、1 週間の断続的な塩ストレス処理によっても、植物体において浸透圧調節機能が発現していることが示唆された。

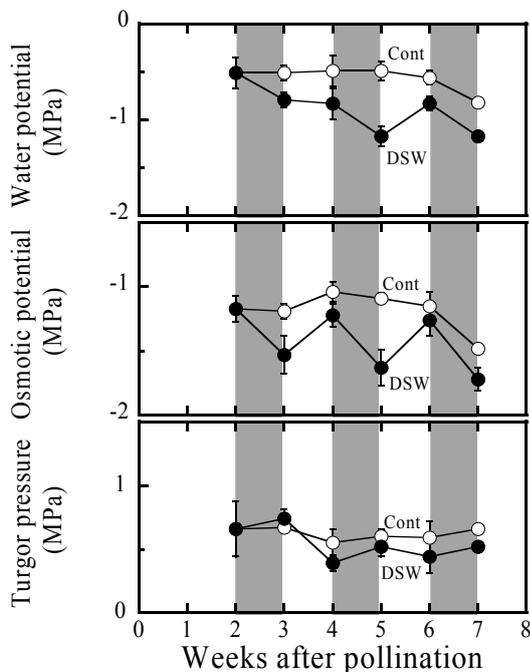


Fig. 12. Time courses of water potential, osmotic potential and turgor pressure of leaflets under the non-salt stress treatment (Control) and the short-term salt stress treatment (DSW-S). The gray zone indicates the period of the salt stress treatment. Means of eight leaflets are shown with the standard deviations.

Fig. 13 に DSW-S 区と Control 区での第 1 果房の果実および第 1 果房上位 2 節から採取した小葉における SOD 活性の 1 週間毎の経時変化を示す。DSW-S 区において 2 回目の塩ストレス処理以降に、果実および葉の両方において SOD 活性が Control 区よりも有意に上昇した。このこ

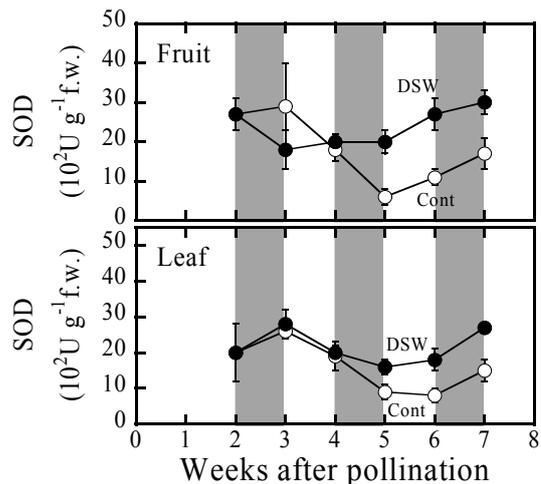


Fig. 13. Time courses of activity of superoxide dismutase (SOD) in fruits and leaflets under the non-salt stress treatment (Control) and the short-term salt stress treatment (DSW-S). The gray zone indicates the period of the salt stress treatment. Means of four fruits and eight leaflets are shown with the standard deviations.

とから、1 週間の断続的な塩ストレス処理によっても、植物体において抗酸化機能が発現していることが示唆された。

Fig. 14 に DSW-S 区と Control 区での第 1 果房の果実の糖度 (Brix) の 1 週間毎の経時変化を示す。果実の糖度はわずか 1 週間の塩ストレス処理で有意に増加し、塩ストレス解除期間中には低下する傾向が認められるものの、DSW-S 区において Control 区と比較して有意に上昇した。前年までの研究では、短期間の塩ストレス処理によっても師部に浸透圧調節機能が発現し、師管液中の可溶性固形物濃度が高まることを明らかにしている (北野ら, 2005; 和島ら, 2006b)。これらのことから、1 週間の断続的な塩ストレス処理によっても、師部に浸透圧調節機能が発現し、果実に糖が高濃度に集積されることが示唆された。

Fig. 15 に DSW-S 区、DSW-L 区および Control 区における各果房からの収穫果実の新鮮重、乾物重および乾物率を示す。塩ストレス処理によって新鮮重は有意に減少したが、DSW-S 区では高品質高糖度トマトの条件である新鮮重 100 g 以上を満足し、1 週間の塩ストレス処理の経験回数が 2 回以下の第 3、第 4 果房では新鮮重の減少幅は小であった。一方、長期間連続的に塩ストレス処理をする DSW-L 区では、上位果房で新鮮重が 100 g 以下の小玉となった。第 1 果房を除いて乾物重も塩ストレス処理によって減少する傾向であったが、減少の程度は新鮮重よりも著

しく小であった。したがって、乾物率は塩ストレス処理によって有に上昇したが、DSW-S 区の塩ストレス処理の経験回数が 2 回以下の第 3、第 4 果房では、乾物率の上昇幅は小であった。

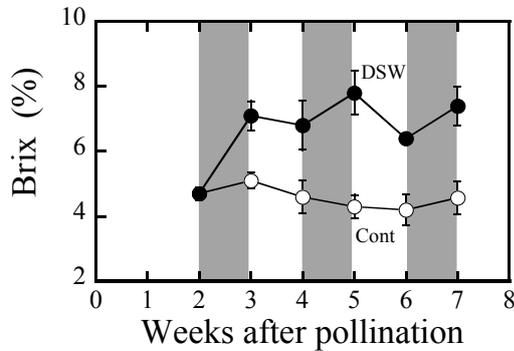


Fig. 14. Time course of sugar content (Brix) of fruits on the first truss under the non-salt stress treatment (Control) and the short-term salt stress treatment (DSW-S). The gray zone indicates the period of the salt stress treatment. Means of four fruits are shown with the standard deviations.

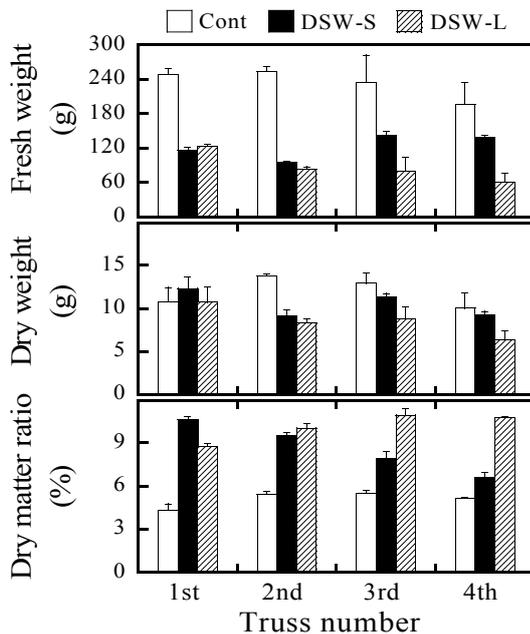


Fig. 15. Fresh weight, dry weight and dry matter ratio of the harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments: Control, DSW-S and DSW-L are explained in Table 1. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

Fig. 16 に DSW-S 区、DSW-L 区および Control 区における各果房からの収穫果実の糖度 (Brix) および酸度を示す。糖度と酸度は塩ストレス処理によって顕著に上昇し、Control 区では糖度が 5%程度であったが、DSW-S 区で 1 週間の塩ストレス処理を 3 回経験した第 1、第 2 果房では、DSW-L 区の果房と同様に糖度は 9%程度に上昇した。DSW-S 区の塩ストレス処理の経験回数が 2 回以下の第 3、第 4 果房では、糖度と酸度の上昇は小幅となった。すなわち、DSW-S 区で 1 週間の塩ストレス処理を断続的に 3 回経験した第 1、第 2 果房では、DSW-L 区の長期間連続塩ストレス処理を経験した果房と同程度の高糖度化の効果が認められた。

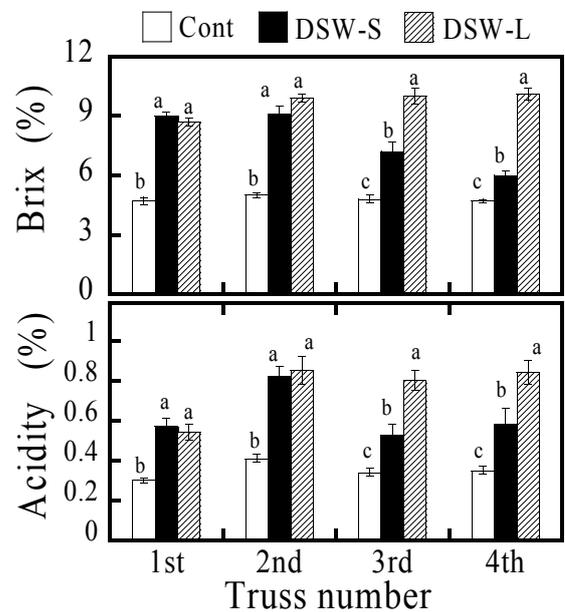


Fig. 16. Sugar content (Brix) and acidity of the harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments: Control, DSW-S and DSW-L are explained in Table 1. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

Fig. 17 に DSW-S 区、DSW-L 区および Control 区における各果房からの収穫果実の K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 濃度を示す。 K^+ 、 Mg^{2+} および Na^+ の濃度は、濃縮深層水の施用による塩ストレス処理によって増加する傾向であったが、尻腐れ果の発症に關与する Ca^{2+} の果実内の濃度は他のイオンに比して著しく低く、DSW-L 区の全ての果房および DSW-S 区の下位果房において減少した。 Ca^{2+} は植物体

内では難移動性で主に道管を輸送経路として果実内へ集積されるが、トマト果実の場合、果実へ到達する道管液量は師管液量に比べて著しく少なく(Ho *et al.*, 1987)、しかも道管内の流れは塩ストレスの影響を受けやすいので(Araki *et al.*, 2004)、塩ストレス処理下では果実への Ca^{2+} の集積が著しく抑制されたと考えられる。

Table 3 に DSW-S 区、DSW-L 区および Control 区での各果房における尻腐れ果の発症率を示す。塩ストレス処

理によって尻腐れ果の発症率は増加するが、尻腐れが果実内部で発症する果実肥大初期(受粉後 2 週間)の全期間に塩ストレス処理を受ける DSW-L 処理区の上位果房において、尻腐れ果の発症が顕著であった。一方、果実肥大初期の塩ストレス処理を避けた第 1 果房においては尻腐れの発症は認められず、また果実肥大初期にける塩ストレス処理期間が短い DSW-S 区においては、尻腐れの発症が抑制された。

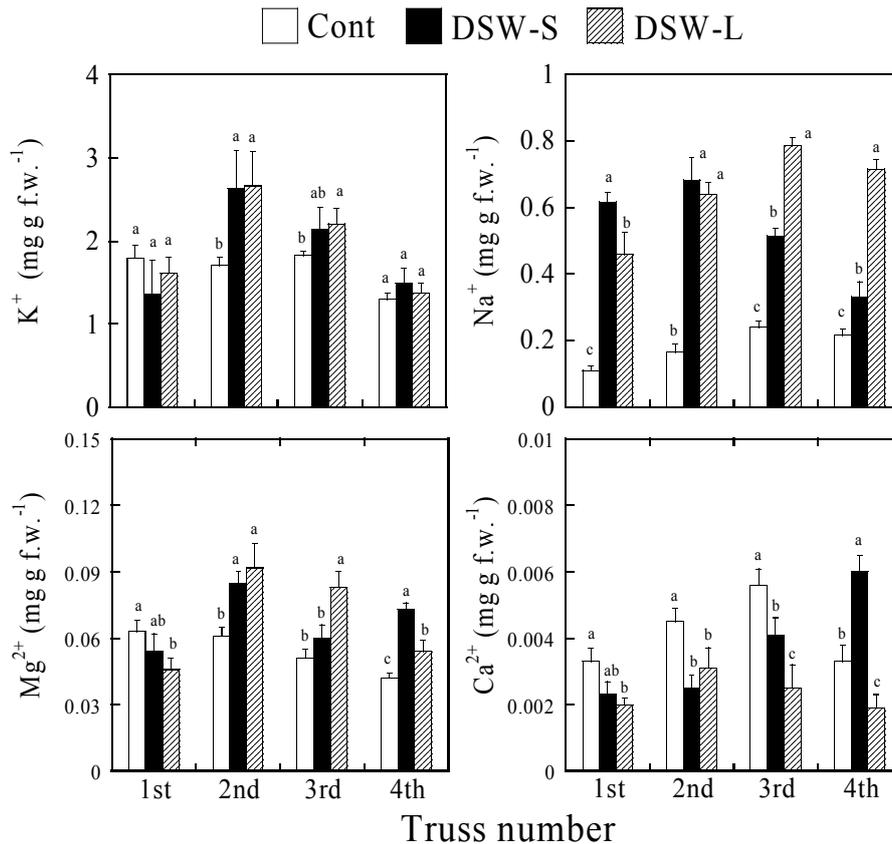


Fig. 17. Concentrations of K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} of the harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments: Control, DSW-S and DSW-L are explained in Table 1. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

Table 3. Incidence of blossom-end rot (BER) on the 1st to 4th truss under the different salt stress treatments: Control, the non-salt stress; DSW-S, the short-term salt stress with the concentrated deep seawater; DSW-L, the long-term salt stress with the concentrated deep seawater.

	Incidence of blossom-end rot (%)			
	1st truss	2nd truss	3rd truss	4th truss
Control	0	0.9	1.4	2.2
DSW-S	0	2.0	1.6	0
DSW-L	0	3.0	4.4	8.4

Fig. 18 に DSW-S 区、DSW-L 区および Control 区における各果房からの収穫果実のスーパーオキシドアニオン不活化酵素 (SOD) の活性を示す。濃縮深層水の施用による塩ストレス処理によって、SOD 活性は有意に上昇した。DSW-S 区において 1 週間の塩ストレス処理を断続的に 3 回経験した第 1、第 2 果房では、長期間連続塩ストレス処理 (DSW-L 区) と同等の効果が認められたが、ストレス処理の経験回数が 2 回以下の第 3、第 4 果房では、SOD 活性の上昇は DSW-L 区に比して抑制された。過酸化水素を消去する還元型アスコルビン酸 (ASA) の濃度は塩ストレス処理によって増加する傾向が認められ、ASA の還元率 (ASA と酸化型アスコルビン酸 DHA の和に対する ASA の割合) は塩ストレス処理下でも高い値 (約 0.8) であった (データ省略)。ASA はアスコルビン酸ペルオキシダーゼ (APX) の働きによって、過酸化水素を消去することで消費されて DHA に変わるが、その後 DHA からデヒドロアスコルビン酸レダクターゼ (DHAR) の働きによって ASA に再生される。したがって、濃縮深層水による塩ストレス処理下のトマトでは、過酸化水素消去系での ASA の再生システムが機能していると考えられる。

Fig. 19 に DSW-S 区、DSW-L 区および Control 区にお

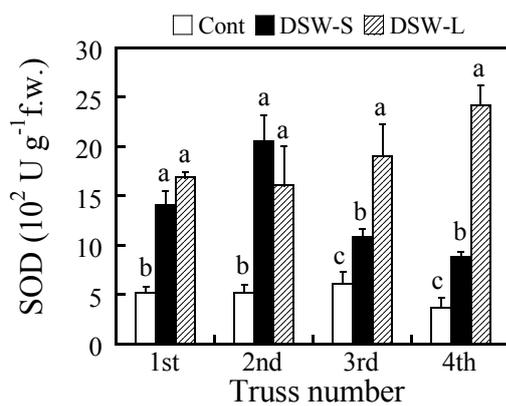


Fig. 18. Activities of superoxide dismutase (SOD) of the harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments: Control, DSW-S and DSW-L are explained in Table 1. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

ける各果房からの収穫果実のγ-アミノ酪酸 (GABA) およびプロリンの濃度を示す。

GABA およびプロリンともに、濃縮深層水の施用による塩ストレス処理によって増加する傾向が認められたが、DSW-S 区においてストレス処理の経験回数が 2 回以下の第 3、第 4 果房では、増加幅が減少する傾向が認められた。GABA およびプロリンは、機能性アミノ酸として広く知られているが、植物体内においても環境ストレスに対する防御機能を有している。これらのことから、DSW-S 区の果房では、1 週間の塩ストレス処理を断続的に 3 回経験することで、長期間連続塩ストレス処理 (DSW-L 区) と同等のストレス防御機能が働いていることが示唆された。食味試験においても、塩ストレス処理によって甘味、香り、うま味および嗜好 (総合評価) が有意に高い評価をえたが、DSW-S 区のストレス処理の経験回数が 2 回以下の第 3、第 4 果房においては、食味への効果も小であった (データ省略)。以上のように、多様な項目 (糖度、酸度、ミネラル濃度、浸透圧調節機能、抗酸化機能、機能性アミノ酸、食味) において、濃縮海洋深層水を施用した塩ストレス処理による高品質化の効果が認められたが、多段栽培での長期間連続塩ストレス処理 (DSW-L 区) では、上位の果房で極端な小玉果

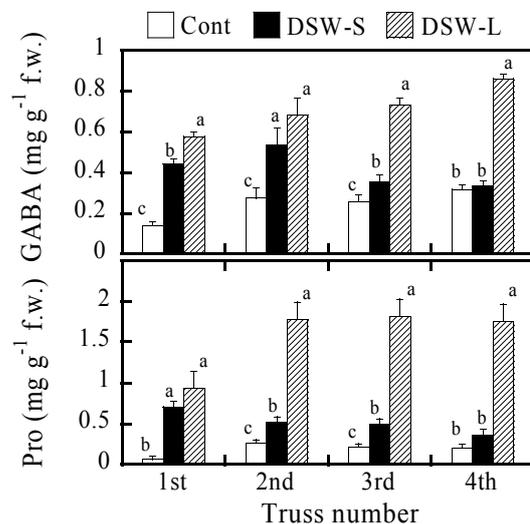


Fig. 19. Concentrations of γ-aminobutyric acid (GABA) and proline of the harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments: Control, DSW-S and DSW-L are explained in Table 1. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

や尻腐れ果が生じるとともに、樹勢の低下も観察された。一方、1週間の塩ストレス処理を1週間間隔で断続的に繰り返す処理(DSW-S区)においても、植物体に浸透圧調節機能および抗酸化機能が働き、3回の塩ストレス処理を受けた果房では長期間連続塩ストレス処理と同等の高品質化の効果が得られた。また、塩ストレス処理を長期間連続処理ではなく短期間断続処理にすることで、極端な小玉果や尻腐れ果の発生および樹勢低下を低減する可能性が示唆された。

そこで、Fig. 4に示すように1週間の塩ストレス処理を1週間間隔で断続的に5回繰り返して、第1から第4果房が着果から収穫までに1週間の短期間塩ストレス処理を3回経験する処理をおこなった。

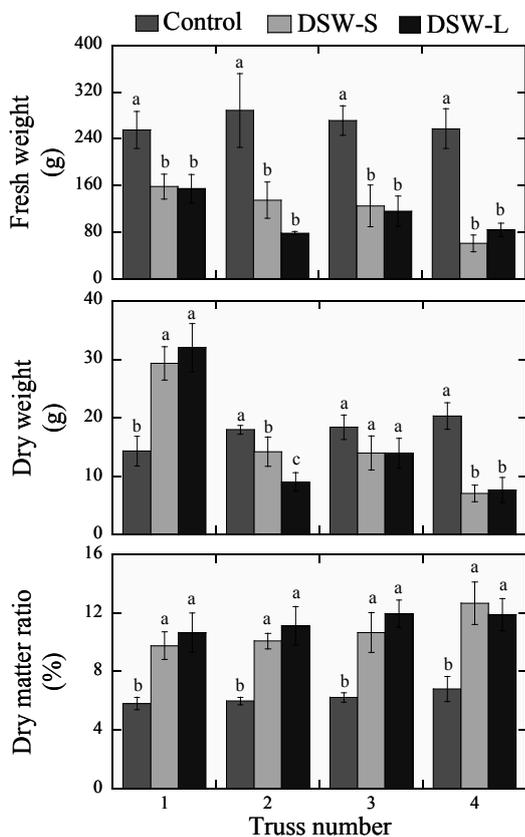


Fig. 20. Fresh weight, dry weight and dry matter ratio of harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments of the non-salt stress condition (Control), the short-term application with the concentrated deep seawater (DSW-S) and the long-term with the concentrated deep seawater (DSW-L). Mean of four fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

Fig. 20に収穫果の新鮮重、乾物重、乾物率を示す。各果房の塩ストレス処理区の新鮮重は、対照区より小となった。しかし短期間繰り返し施用区の果房、特に、第1、2、3果房では100g以上となり、全果房での極端な小玉果は回避された。これは短期間繰り返し施用法の効果と考えられる。一方、第1果房以外の果実の乾物重は、塩ストレス処理によって減少する傾向がみられたが、乾物重の減少は、新鮮重の減少と比べて著しく小であった。その結果、各果房の収穫果実の乾物率は、塩ストレス処理区によって対照区より有意に上昇したが、短期繰り返し施用区と長期間連続施用区との間には有意な差が認められなかった。

Fig. 21に収穫果の糖度と酸度を示す。収穫果の糖度は、各処理区、各果房において6%以上となり、特に、濃縮深層水施用の塩ストレス処理区である、短期間繰り返し施用区、長期間連続施用区は共に10%以上となった。酸度においては、長期間連続施用区の果房はすべて0.5%以上となり、短期間繰り返し施用区でも第1果房から第3果房ま

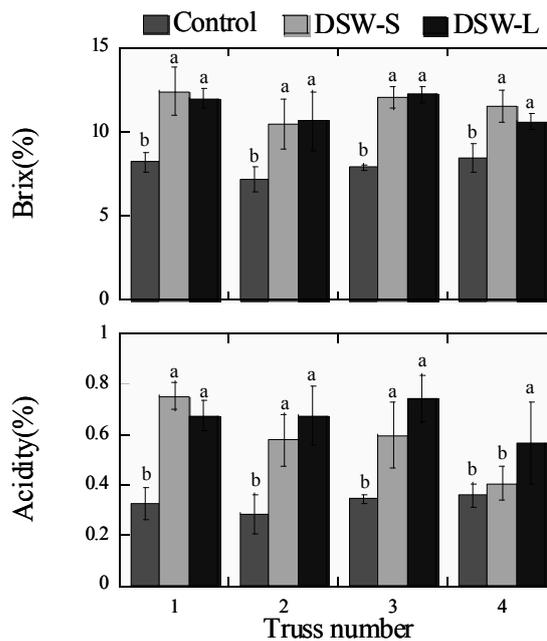


Fig. 21. Brix and acidity of harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments of the non-salt stress condition (Control), the short-term application with the concentrated deep seawater (DSW-S) and the long-term with the concentrated deep seawater (DSW-L). Mean of four fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

で0.5%以上となった。「おいしいトマトの条件」として、糖度6%以上、酸度0.5%以上であることとされている(吉川, 2002)。さらに、糖度8%以上の果実においては、実新鮮重が100g以上のものが高い評価を受けている(田中, 1995)。短期間繰り返し施用区の収穫果は、高い評価を受ける「おいしいトマトの条件」をほぼ満たした。

Fig. 22 に収穫果のイオン濃度(K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+})を示す。旨みに関与するといわれる K^+ , Mg^{2+} 濃度は、短期間繰り返し施用区、長期間連続施用区の収穫果において上昇傾向がみられたが、短期間繰り返し施用区の第4果房では、長期間連続施用区ほどの上昇は認められなかった。一方、濃縮深層水の主成分の Na^+ 濃度は、塩ストレス処理区の収穫果で有意に上昇した。収穫果の Ca^{2+} 濃度は、第1、4果房では短期間繰り返し施用区と長期間連続施用

区ともに対照区より低くなったが、第2、3果房では対照区と有意差はみられなかった。また、短期間繰り返し施用区では、長期間連続施用区より Ca^{2+} 濃度が高くなる傾向がみられ、第2、3果房では短期間繰り返し施用区の方が尻腐れ果の発生が抑えられた。

Fig. 23 に収穫果のSOD活性を示す。短期施用区・長期施用区の収穫果のSOD活性は、第1果房から第4果房までの全ての果房で有意に上昇した。また、全ての果房において、短期施用区と長期施用区との間で有意な差は認められなかった。このことから、濃縮深層水の施用によって塩ストレスを受けた短期施用区・長期施用区の収穫果は、全ての果房において抗酸化機能が発現していることが認められた。

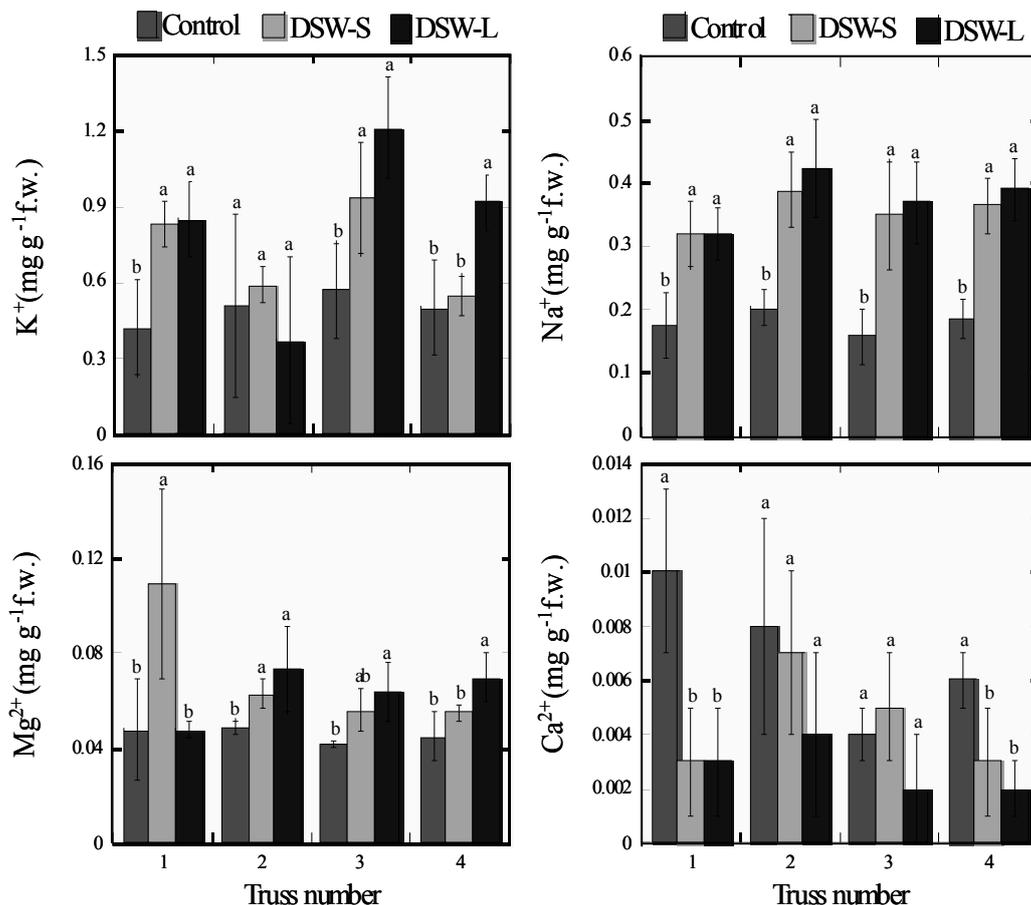


Fig. 22. Concentrations of K^+ , Mg^{2+} , Na^+ and Ca^{2+} in the harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments of the non-salt stress condition (Control), the short-term application with the concentrated deep seawater (DSW-S) and the long-term with the concentrated deep seawater (DSW-L). Mean of four fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

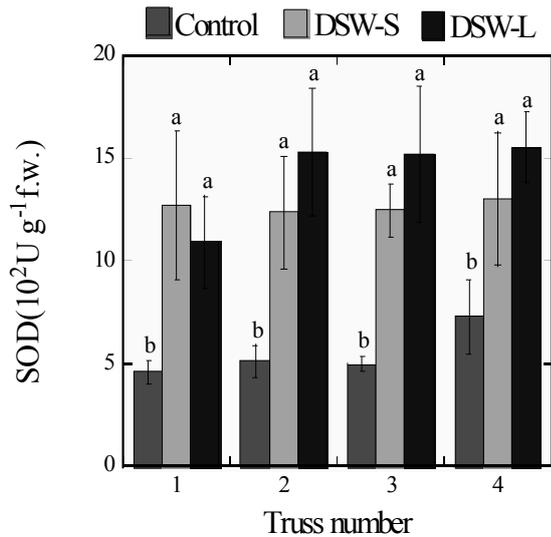


Fig. 23. Concentrations of superoxide dismutase (SOD) of harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt stress treatments of the non-salt stress condition (Control), the short-term application with the concentrated deep seawater (DSW-S) and the long-term with the concentrated deep seawater (DSW-L). Mean of four fruits are shown with the standard deviations. Among the three treatments, means with the same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$.

Fig. 24 に収穫果の食味試験結果を示す。濃縮深層水を施用した塩ストレス処理区の第1果房から第4果房の全ての果房で、甘み、酸味、硬さ、旨み、香り、総合評価の全ての項目において対照区より高い評価となったが、どの項目においても、短期間繰り返し施用区と長期間連続施

用区との間に有意差は認められなかった。すなわち、短期間繰り返し施用法において、果房ごとに受ける塩ストレスの回数を3回に揃えたことによって、全ての果房ではほぼ均等に食味の改善が達成できたと考えられる。

以上のように、海洋深層水濃縮廃液を適度の濃度で施用する1週間の塩ストレス処理を、4段栽培での各果房の果実肥大期に1週間間隔で3回繰り返し短期間繰り返し塩ストレス処理(DSW-S区)によって、多様な項目(糖度、酸度、ミネラル濃度、浸透圧調節機能、抗酸化機能、食味)において、長期間連続塩ストレス処理(DSW-L区)と同等以上の均質な高品質化の効果が認められた。多段栽培での長期間連続塩ストレス処理では、極端な小玉果や尻腐れ果が生じるとともに、樹勢の低下も懸念されるが、短期間繰り返し塩ストレス処理によって、これらの低減の可能性も示唆された。4段栽培では、栽培ベッドに苗を定植後、4段果房の果実が収穫されるまでに4~5か月の栽培期間を要する。また、7月~9月の盛夏期の高温条件下では、生育不良、開花受粉不良、病害などが発生しやすく、盛夏期に塩ストレス処理を導入して正常な栽培を実現することは不可能といっても過言ではない。そこで、盛夏期を避けた9月下旬~7月上旬までの期間に、本研究で提案する短期間繰り返し塩ストレス処理によるトマト4段栽培を2作実施することが妥当と考えられる。本研究では、海洋深層水のような有用な天然資源を活用して、適度な強度の環境ストレスを適当な期間植物体に応用することによって、植物が有するストレス適応機能を発現させ、農産物の付加価値を高める栽培法を実用技術として提示できた。

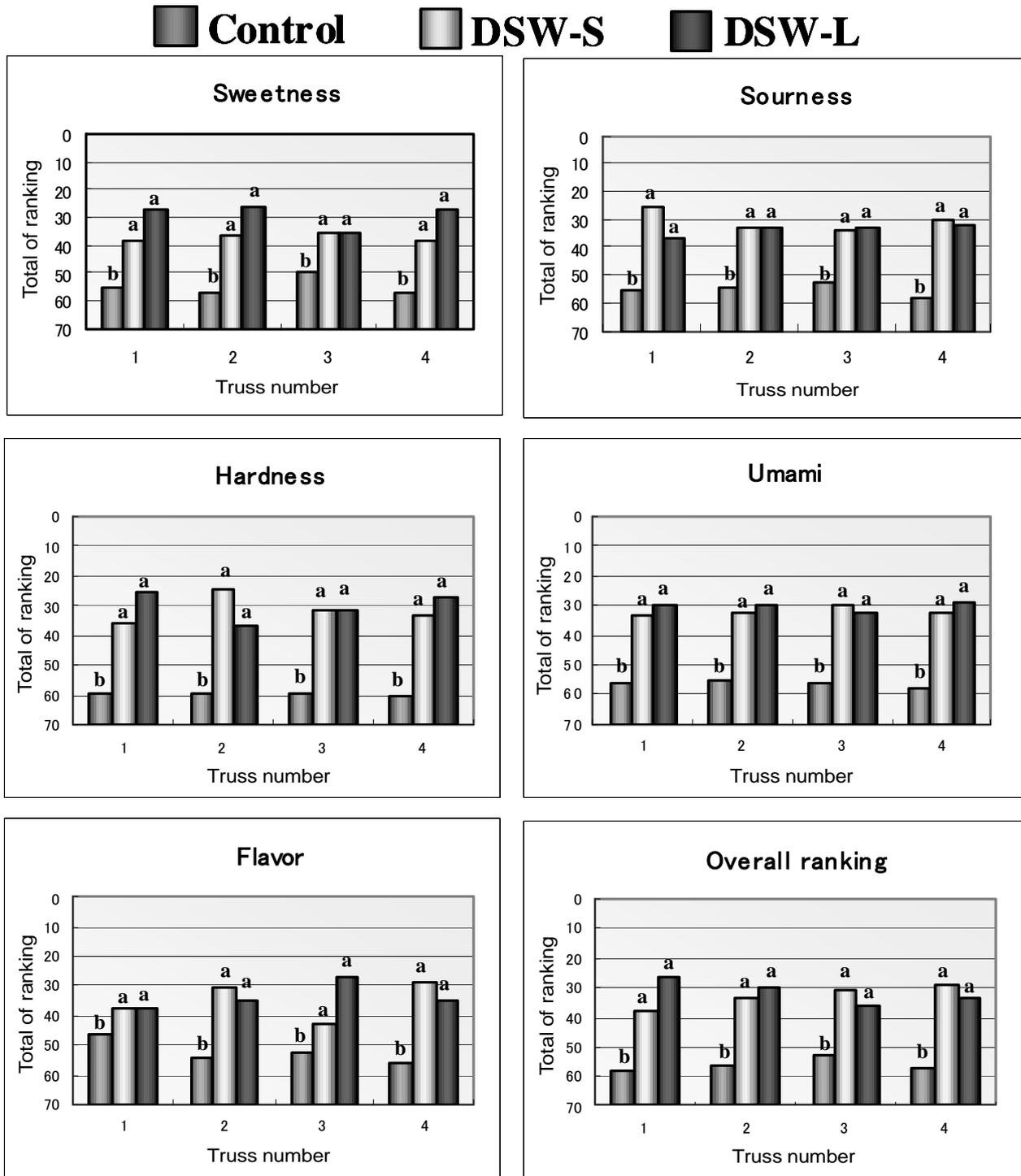


Fig. 24. Sensory evaluation of the harvested tomatoes on the 1st to the 4th truss under the different salt treatments of the non-salt stress condition (Control), the short-term application with the concentrated deep seawater (DSW-S) and the long-term application with the concentrated deep seawater (DSW-L)

文献

- Adams, P., 1991: Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *J. Hort. Sci.* **66**, 201-207.
- Adams, P., Ho, LC., 1989: Effects of constant and fluctuating salinity on the yield, quality and calcium status of tomatoes. *J. Hort. Sci.* **64**, 725-732.
- Araki, T., Eguchi, T., Wajima, T., Yoshida, S. and Kitano, M., 2004: Dynamic analysis of growth, water balance and sap fluxes through phloem and xylem in a tomato Fruit — Short-term effect of water stress —. *Environ. Control in Biol.* **42(3)**, 225-240.
- Asada, K., 1999: The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **50**, 601-639.
- Bowler, C., Montagu, van M., Inze, D., 1992: Superoxide dismutase and stress tolerance. *Annu. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.* **43**, 83-116.
- Cakmak, I., Marshner, H., 1992: Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol.* **98**, 1222-1227.
- Cuartero, J. and Fernández-Muñoz, R., 1999: Tomato and salinity. *Sci. Hort.* **78**, pp. 83-125.
- Dorais, M., Papadopoulos, A. P. and Gosselin, A., 2001: Greenhouse tomato fruit quality. *Hort. Rev. (ed. by Janick, J.)*. Wiley & Sons, New York, **26**, pp. 239-319.
- Ehret, D., Ho, LC., 1986: The effects of salinity on dry matter partitioning and fruit growth in tomatoes grown in nutrient film culture. *J. Hort. Sci.* **61**, 361-367.
- Foyer, CH., Lelandais, M., Kunert, KJ., 1994: Photooxidative stress in plants. *Physiol. Plant.* **92**, 696-717.
- Hasegawa, PM., Bressan, RA., Zhu, JK., Bohnert, HJ., 2000: Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.* **51**, 463-499.
- Ho, L. C., Grange, R. I. and Picken, A.J., 1987: Analysis of accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant Cell Environ.*, **10**, 157-162.
- Ho, L. C., 1996: Photoassimilate distribution in plants and crops, source-sink relationships. In *Tomato (ed. by Zamski, E. and Shaffer, A. A.)*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 709-728.
- 北野雅治, 松岡孝尚, 河野俊夫 2005: 海洋深層水濃縮廃液の有効利用による高品質トマト生産, 財団法人ソルト・サイエンス研究財団 平成 16 年度助成研究報告書.
- 北野雅治, 松岡孝尚, 松添直隆, 圖師一文, 和島孝浩 2006: 海洋深層水濃縮廃液を活用した高品質高糖度トマトの多段周年栽培の実用化, 財団法人ソルト・サイエンス研究財団 平成 17 年度助成研究報告書.
- 北野雅治, 松岡孝尚, 松添直隆, 圖師一文, 和島孝浩 2007: 海洋深層水濃縮廃液を活用した高品質高糖度トマトの多段周年栽培の実用化, 財団法人ソルト・サイエンス研究財団 平成 18 年度助成研究報告書.
- Kitano, M., Wajima, T., Hidaka, K., Sago, Y., Yasutake, D., Araki, T., Ishikawa, K., Matsuo, T., Zushi, K. and Matsuzoe, N., 2008: High quality tomato production by suitable application of concentrated deep seawater. *Acta Hort.* 801:1437-1444.
- 幸田泰則, 桃木芳枝, 三宅博, 大門弘幸, 2003: 植物生理学—分子から個体へ—. 三共出版株式会社, 東京, 224 pp.
- Long, SP., Humphries, S., Falkowski, PG., 1994: Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **45**, 633-662.
- Melis, A., 1999: Photosystem - II damage and repair cycle in chloroplasts: What modulates the rate of photodamage in vivo? *Trends Plant Sci.* **4**, 130-135.
- 中島敏光, 2002: 海洋深層水の利用 —21 世紀の循環型資源—. 緑書房, 東京, 264 pp.
- Saure, M. C., 2001: Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) a calcium- or a stress-related disorder? *Scientia Horticulturae* 90:193-208.
- Shalata, A., Tal, M., 1998: The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in the leaf of the cultivated tomato and its wild salt-tolerant relative *lycopersicon*

pennellii. *Physiol. Plant.* **104**, 169-174.

田中和夫, 1995: 2.2.1. (1)トマト. 野菜・果実・花きの高品質化ハンドブック, (社)日本施設園芸協会編, 養賢堂, 東京, pp. 25-28.

和島孝浩, 荒木卓哉, 北野雅治, 松岡孝尚, 石川勝美, 河野俊夫 2006 a: 濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 1. 果実品質に対する短期施用の効果. *Eco-engineering*, **18**, 119-124.

和島孝浩, 荒木卓哉, 北野雅治 2006 b: 濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 2. 果実への師部輸送に対する短期施用の効果, *Eco-Engineering*, **18**, 181-188.

Wise, R., Naylor, AW., 1987: Chilling-enhanced photooxidation. Evidence for the role of singlet oxygen and superoxide in the breakdown of pigments and endogenous antioxidants. *Plant Physiol.* **83**, 278-282.

吉川年彦, 2002: 11. 3. 4. a. トマト. 植物栄養・肥料の事典, 植物栄養・肥料の事典編集委員会編, 朝倉書店, 東京, pp. 555-556.

研究成果発表論文

1) 和島孝浩, 荒木卓哉, 北野雅治, 松岡孝尚, 石川勝美, 河野俊夫 2006: 濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 1. 果実品質に対する短期施用の効果. *Eco-engineering* **18**:119-124.

2) 和島孝浩, 荒木卓哉, 北野雅治 2006: 濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 2. 果実への師部輸送に対する短期施用の効果, *Eco-Engineering* **18**:181-188.

3) Kitano, M., Yasutake, D., Araki, T., 2007: Measurement of transpiration streams in plants. *Environ. Control Biol.* **45**:223-239.

4) Kitano, M., Wajima, T., Hidaka, K., Sago, Y., Yasutake, D., Araki, T., Ishikawa, K., Matsuoka, T., Zushi, K. and Matsuzoe, N., 2008: High quality tomato production by suitable application of concentrated deep seawater. *Acta Hort.* **801**:1437-1444.

5) 北野雅治, 日高功太, 園師一文, 荒木卓哉 2008: 養液栽培における根への環境ストレスの応用による野菜の高付加価値化, *植物環境工学* **20**:210-218.

6) 日高功太, 北野雅治, 和島孝浩, 安武大輔, M. Affan, F.F., 佐合悠貴, 松岡孝尚, 石川勝美 2009: 濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 3. 根の養水分吸収および葉の光合成に対する短期施用の効果, *Eco-Engineering* **21**(in press).

謝辞

本研究は、財団法人ソルト・サイエンス研究財団の農学分野プロジェクト研究「好塩性生物の研究－基礎と応用」の支援を受けて実施した。また、プロジェクトリーダーの村田紀夫先生には、地域資源である海洋深層水の多目的多段階活用を目指した本研究のような応用研究を、応用植物生理の視点から暖かく見守って頂きました。深甚なる謝意を表します。本研究の実施に際しましては、安武大輔君、ジュン・ヤン君、赤石恵理君、鷺尾雄大君、藤原藍君の献身的な協力を得た。衷心より感謝の意を表します。

Application of Concentrated Deep Seawater for Multi-Truss and Year-Round Production of High Quality Tomato

Masaharu Kitano¹, Takahisa Matsuoka², Naotaka Matsuzoe³,
Kazuhumi Zushi⁴, Takahiro Wajima³ and Kota Hidaka¹

¹The Graduate School of Agricultural Science, Kyushu University

²The United Graduate School of Agricultural Science, Ehime University

³Faculty of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto

⁴Shokei University Junior College

Summary

The concentrated deep seawater has been discharged abundantly in the processes manufacturing many kinds of goods from the deep seawater. In this study, a suitable application of the concentrated deep seawater for the high quality tomato production was examined by analyzing effects of the short-term salt stress treatment with the concentrated deep seawater on plant physiological functions and fruit quality with special reference to osmotic adjustment, antioxidation and sensory properties of fruits. Tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with four fruit trusses were grown in the NFT system with the intermittent applications of the short-term salt stress and the continuous application of the long-term salt stress, where the concentrated deep seawater was applied to the standard nutrient solution. The short-term (one week) salt stress was applied three times to the respective fruit trusses of 1st to 4th at one-week intervals. This three times intermittent applications the short-term salt stress to each fruit truss significantly affected osmotic adjustment and antioxidation in tomato plants and brought the value-added high quality tomatoes enriched in sugar, minerals, antioxidants and flavor etc. Furthermore, the intermittent applications of the short-term salt stress showed the possibility to improve the extreme depression of fruit growth, the higher incidence of blossom-end rot and the depression in plant vigor which were caused by the continuous long-term salt stress treatment. In this study, a new methodology to produce value-added vegetables was demonstrated by applying the natural resource, the environmental stress and plant adaptive functions.