

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 (高知大学農学部暖地農学科)
 松岡 孝尚 (高知大学農学部暖地農学科)
 松添 直隆 (熊本県立大学環境共生学部)
 圖師 一文 (熊本県立大学環境共生学部)
 和島 孝浩 (愛媛大学大学院連合農学研究科)

1. 研究目的

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、濃縮深層水の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。そこで、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; 和島ら, 2006)。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ことを目的としている。初年度の2006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、深層水トマトの特異性について調べた。本報告では、濃縮海洋深層水、表層海水および食塩を施用した異なる3種の塩ストレス処理の効果の比較実験の結果についてのみ報告する。

2. 研究方法

2.1 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 dSm⁻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EC1.0 dSm⁻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; 和島ら, 2006)。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 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 (d Sm ⁻¹)	[K ⁺] (mg L ⁻¹)	[Na ⁺] (mg L ⁻¹)	[Mg ²⁺] (mg L ⁻¹)	[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.

Table 1 に、濃縮海洋深層水、表層海水および4つの処理区の培養液の EC, K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺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⁺, Mg²⁺, Ca²⁺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. 2 果実の品質評価

2. 2. 1 定量的評価

4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砕した後、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^+ は蛍光法で測定した。

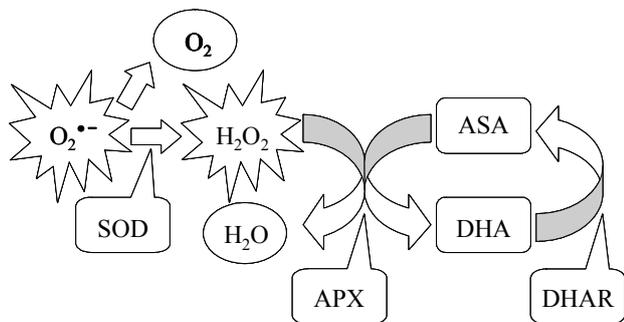


Fig. 1 Reactive oxygen species and antioxidants in plants. $O_2^{\bullet-}$, superoxide anion; SOD, superoxide dismutase; H_2O_2 , hydrogen peroxide; APX, ascorbate peroxidase; ASA, ascorbate; DHA, dehydroascorbate; DHAR, dehydroascorbate reductase.

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. 1)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($O_2^{\bullet-}$)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, ナルジェンクインターナショナル)を用い、水溶性デトランゾリウム塩(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. 2. 2 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。

3. 研究結果および考察

Fig. 2 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、前報(北野ら, 2005; 和島ら, 2006)での 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. 3 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。

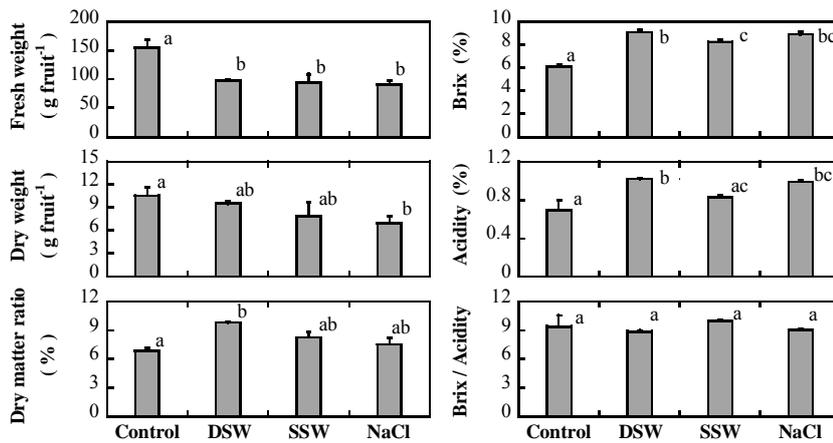


Fig. 2 Fresh weight, dry weight, dry matter ratio, Brix, acidity and ratio of Brix to acidity of harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the least significant difference (LSD) 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.

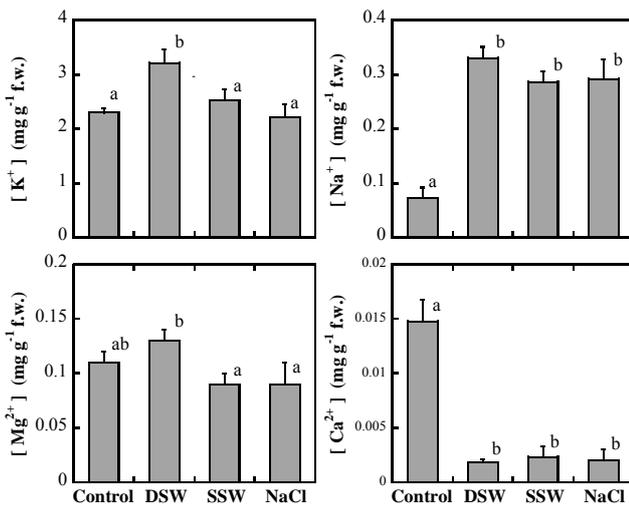


Fig. 3 Concentrations of K^+ , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, 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. 4 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 dSm⁻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. 5 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. 6 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. 7 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. 8 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。

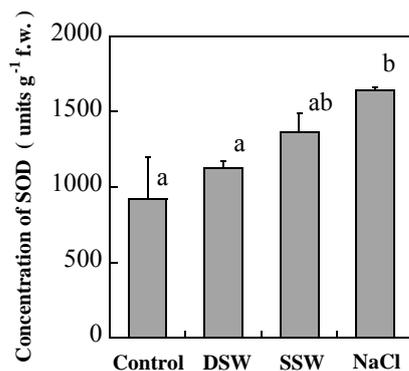


Fig. 4 Activities of superoxide dismutase (SOD) of harvested tomatoes.

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.

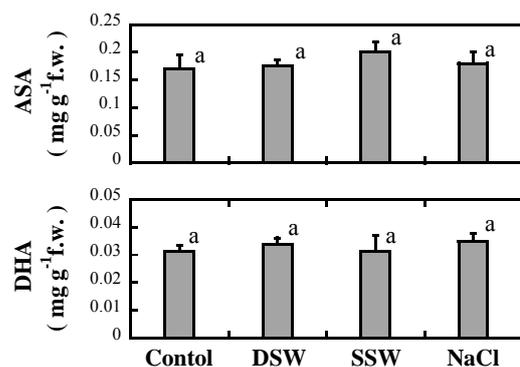


Fig. 5 Concentrations of ascorbate (ASA) and dehydroascorbate (DHA) of harvested tomatoes.

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.

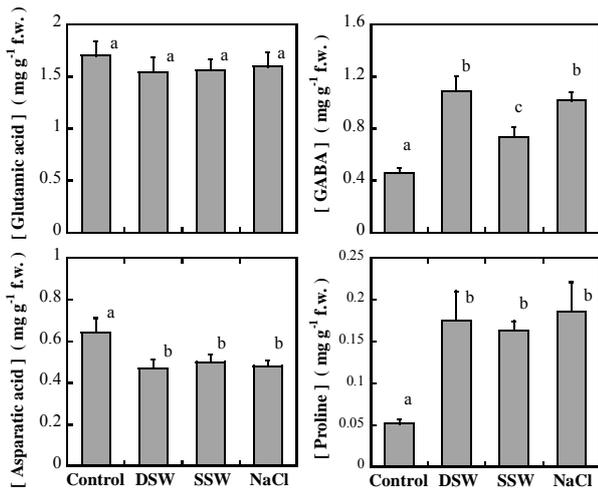


Fig. 6 Concentrations of glutamic acid, asparagic acid, γ -aminobutyric acid (GABA) and proline in harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, 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.

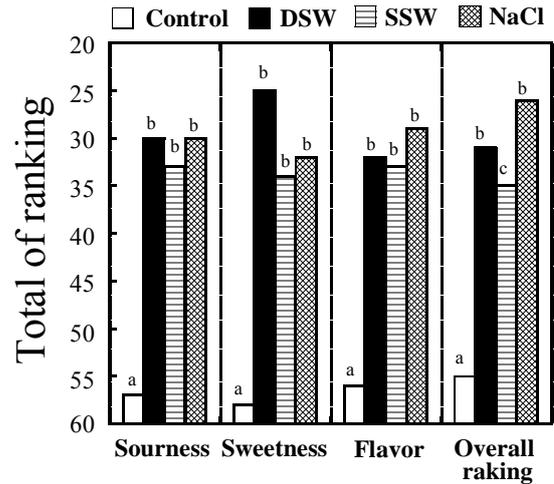


Fig. 7 Sensory evaluations of harvested tomatoes by tasting. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different by the LSD at $P \leq 0.05$. **Control**, the non-salt stress treatment; **DSW**, the salt stress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

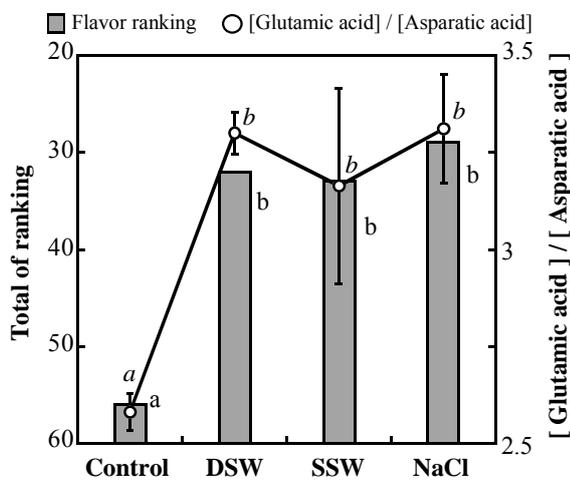


Fig. 8 Relationship of sensory ranking in flavor and ratio of glutamic acid to asparagic acid of harvested tomatoes. Means of five fruits are shown with the standard deviations. Among the four treatments, means with same letter are not significantly different in the flavor ranking and in the ratio of glutamic acid to asparagic 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.

4. 今後の課題

今後は、果実と同時に葉においても浸透圧調節機能、抗酸化機能およびアミノ酸代謝の短期間塩ストレス処理後の経時変化を調べ、トマト植物の塩ストレスに対する適応機能の動態を明らかにする必要がある。特に、多段周年栽培において、短期間塩ストレス処理を繰り返した時の、浸透圧調節機能、抗酸化機能および果実への機能性物質などの集積の消長を調べ、濃縮海洋深層水の施用による塩ストレス処理の最適化を検討する必要がある。

文献

- 中島, 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.
- 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
- 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*, 16, 2006年7月発刊予定
- 吉川, 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.
- Saure, M. C., 2001 : Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) a calcium- or a stress-related disorder? *Scientia Horticulturae* 90: 193-208.
- 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.
- 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.

Application of Concentrated Deep Seawater to High Quality Tomato Production.

Masaharu Kitano*, Takahisa Matsuoka*, Naotaka Matsuzoe**,
Kazuhumi Zushi** and Takahiro Wajima***

*Faculty of Agriculture, Kochi University

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

***The United Graduate School of Agricultural Science, Ehime University

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 on plant physiological functions and fruit quality with special reference to osmotic adjustment, antioxidant system, amino acid metabolism and sensory properties of fruits. Tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) were grown in the NFT system or the hydroponic pots with three different salt stress treatments. In each of the salt stress treatments, the concentrated deep seawater or the surface seawater or pure NaCl was applied for the short-term salt stress treatment for only two weeks at the stage of rapid fruit growth. Fresh and dry weights, dry matter ratio, sugar content, acidity, activity of superoxide dismutase and accumulations of minerals, antioxidants and amino acids of the harvested fruits were measured, and furthermore the sensory test was conducted by tasting.

The short term application of the concentrated deep seawater significantly affected osmotic adjustment, antioxidant system and amino acid metabolism in tomato plants and brought high quality tomatoes with higher concentrations of sugar, minerals and functional amino acids and with good flavor. This indicates possibility of the hydroponic production of value-added high quality tomatoes by the short term application of the concentrated deep seawater. The significant differences in fruit quality were not necessarily found among the different three salt stress treatments with the deep seawater, the surface seawater and pure NaCl, but it was suggested that the application of the deep seawater can relieve the oxidation stress induced in the plant under the salt stress treatment.