

## 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

助成研究者：北野雅治（高知大学農学部暖地農学科）

共同研究者：松岡孝尚（高知大学農学部暖地農学科）

河野俊夫（高知大学農学部暖地農学科）

## 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。

一方、園芸作物の中で比較的高い耐塩性を有するトマトの生産においては、果実の糖濃度を高めるために、培養液の塩濃度を高める塩ストレス処理や節水栽培による水ストレス処理が行われているが、長期間のストレス処理によって、(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)果皮の硬化などが栽培上の問題になっている（Ho, 1996; Cuartero and Fernandez-Munoz, 1999; Dorais *et al.*, 2001）。そこで本研究では、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ことを試みる。すなわち、濃縮深層水の短期間施用による急激な塩ストレスによって植物体に浸透圧調節機能を発現させ、糖、酸、および深層水由来のミネラル等が高濃度に集積した高品質高糖度トマトの生産が可能かどうかを検証することを目的とする。

## 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、NFT（Nutrient Film Technique）による水耕栽培をおこなった。4列の NFT 栽培ベッド（長さ 10 m、幅 30 cm、深さ 7 cm、勾配 1/70）に、それぞれ 40 個体を定植した。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 A 処方液を標準濃度の 1/2 単位で用いた。4 列の栽培ベッドの内の 2 列では、栽培期間中

の給液の電気伝導度 (EC) を  $1.2 \text{ dSm}^{-1}$  とし、対照区 (Control 区) とした。さらに、残り 2 列の栽培ベッドでは、Fig. 1 に示すように、果実の肥大最盛期の受粉後 3 週目から 2 週間だけ、Control 区の培養液に濃縮海洋深層水を加えて EC を  $13.5 \text{ dSm}^{-1}$  に高める塩ストレス処理区 (Salt 区) を設けた。全ての栽培ベッドの培養液は、1 週間毎に新鮮な液に入れ替えた。

## 2.2 測定方法

### 2.2.1 根の物質吸収機能の測定

栽培に用いた NFT 栽培ベッドにおいて、栽培中の植物個体群の根群による水および元素の吸収速度の経時変化および積算値を評価できるシステムを確立し (安武ら、2004)、根の物質吸収機能に対する濃縮深層水の短期間施用の効果を調べた。

### 2.2.2 葉の生理機能に関する測定

葉のガス交換機能に対する濃縮深層水の短期間施用の効果を調べるために、携帯用光合成蒸散測定システム (LI-6400, LI-COR, inc., Lincoln, USA) を用いて、栽培中のトマト葉の光合成速度、蒸散速度、気孔コンダクタンスおよび葉内炭酸ガス濃度と光強度との関係を測定した。測定は、各処理区の 3 個体の植物体の成熟した小葉に対して午前中に実施した。また、濃縮深層水の短期間施用に伴う急激な塩ストレスによって植物体に発現する浸透圧調節機能を確認するために、各処理区の 5 個体の植物体から

成熟した小葉を日出直前に採取し、急速凍結の後に、サイクロメータ (Tru Psi, Decagon Devices, Inc., Pullman, USA) 内で融解させて、葉の浸透ポテンシャルを測定した。

### 2.2.3 果実への物質集積および果実の品質の測定

トマト果実への汁液、糖、ミネラルなどの集積の多くは、師管を経由する師部輸送に依存するので、果実への師部輸送に対する濃縮深層水の短期間施用の効果を、新規に確立した師部輸送の評価法を用いて調べた。すなわち、小果柄の一部 (長さ 1 cm 程度) を加熱処理 (heat-ring 処理) して果実への師部輸送を阻害した果実と阻害しない果実への、汁液および可溶性固形物 (糖, K, Na, Mg, Ca 等のミネラル) の 1 週間の集積量を比較することによって、汁液と可溶性固形物の師管経由の集積量および師管液中の可溶性固形物の濃度の

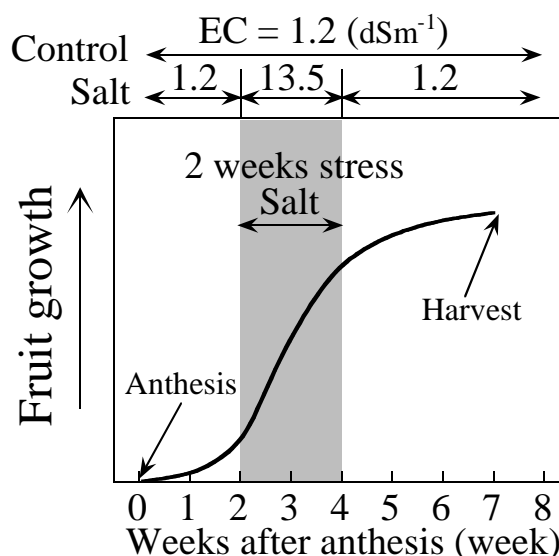


Fig.1 Schematic diagram of time course of the salt stress treatment. Two weeks after pollination, the concentrated deep seawater was added to the nutrient solution for two weeks at the stage of rapid fruit growth. Electric conductivity (EC) of the nutrient solution under the salt stress condition (Salt) with the concentrated deep seawater was raised to  $13.5 \text{ dSm}^{-1}$ , while EC under the non-salt stress condition (Control) was kept at  $1.2 \text{ dSm}^{-1}$ . The gray zone indicates the period of the salt stress condition.

評価をおこなった。そこで、受粉後 2 週間経過後から収穫時（受粉後 7 週間）まで、1 週間毎に、小果柄の師部輸送を阻害した果実と阻害しない果実をそれぞれ 5 個ずつ各処理区から採取し、新鮮重、乾物重、元素濃度を測定した。師部輸送を阻害しない果実については、糖度（Brix）と酸度も測定した。元素濃度としては、浸透圧調節物質のひとつであるカリウム、深層水の主成分ナトリウム、ニガリの主成分マグネシウムおよび難移動性で果実への集積不足によって尻腐れを発症するカルシウムの濃度を原子吸光分析法で測定した。とくに、トマト果実の旨味にも関与すると言われているマグネシウムとカリウムの濃度に着目した。小果柄の師部輸送を阻害した果実と阻害しない果実の 1 週間後の新鮮重の差を、1 週間の師管液集積量とし、乾物重の差および元素含有量の差をそれぞれ師管経由の可溶性固形物集積量および元素集積量とした。さらに、可溶性固形物集積量と元素集積量を師管液集積量で除したものを、それぞれ師管液中の可溶性固形物濃度および元素濃度として評価した。

さらに、濃縮深層水の短期施用によって栽培されたトマト果実の特異性を、食べた人の感覚に基づいて検証するための官能試験も実施した。官能試験用の材料植物として、新たに 16 個体のトマトをポット（1 L）による水耕で栽培した。培養液条件としては、前述の NFT 栽培の同じ培養液条件の 2 処理区の他に、濃縮深層水の代わりに、食塩（NaCl）または表層海水を加えて EC を高めた 2 処理区を設けた。すなわち、対照区（Control 区）、濃縮深層水区（DSW 区）、食塩区（NaCl 区）および表層海水区（SSW 区）の 4 処理区でそれぞれ 4 個体を栽培した。11 名のパネリスト（学生）に、試料果実の処理区を知らせずに、4 処理区の果実を試食させた。色、香り、肉質、皮の硬さ、甘味、酸味、旨味、総合評価の項目に対して、1 位～4 位の順位付けをさせ、順位の平均値の比較によって、各処理区の果実の特異性を検証した。

### 3. 研究結果および考察

#### 3.1 根の物質吸収機能に対する効果

濃縮深層水を施用しない場合、植物 1 個体当りの 1 日の吸水量は晴天日に 1 L 以上に達したが、濃縮深層水の施用によって、培養液の浸透ポテンシャルが 0.4 MPa 低下したために、根の吸水量は約 35% 減少した。しかしながら、濃縮深層水に含まれる多量元素、とくに、ナトリウムや深層水のニガリ由来のマグネシウムの根吸収量は著しく増加した。また、果実の尻腐れの発症に関与するカルシウムについては、濃縮深層水の施用による塩ストレスによって、根による吸収が著しく減少することが予想されたが、水耕液中の濃度が濃縮深層水の施用によって約 2 倍に増加したために、根による吸収量は 40% 減にとどまった。以上のように、深層水の施用によって水耕液の浸透圧が上昇して根の水吸収は抑制されるが、深層水に豊富に含まれる元素については、根による吸収が増加することが確認された。

### 3.2 葉の生理機能に対する効果

濃縮深層水の施用に伴う塩ストレスによる浸透圧調節機能の葉での発現を確認するために、成熟葉の細胞内の浸透ポテンシャルを測定した。その結果、濃縮深層水の施用によって培養液の浸透ポテンシャルは 0.4 MPa 低下したが、葉の細胞内の浸透ポテンシャルは 0.7 MPa 低下した。すなわち、濃縮深層水施用による塩ストレス下で植物体に浸透圧調節機能が発現したことが示唆された。葉の最も重要な働きはガス交換機能（光合成と蒸散）である。そこで葉のガス交換機能に対する効果を確認するために、光合成速度、蒸散速度、気孔開度および葉内間隙中の  $\text{CO}_2$  濃度と光強度との関係を測定した。培養液に濃縮深層水を施用した場合、培養液の浸透ポテンシャルの低下に伴う根の吸水抑制のために気孔開度は約 40 % 低下したが、晴天日の光強度（PPFD  $800 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）までは光合成速度は抑制されず、その結果、葉内間隙内の  $\text{CO}_2$  濃度も低かった。このことから、塩ストレスによって気孔開度が低下しても、濃縮深層水の施用によって葉緑体での炭酸固定の能力が高められることが示唆された。葉の細胞内のマグネシウムは、葉緑素の生合成に関わる中心的な構成元素であるとともに、炭酸固定の能力を支配する多様な酵素の補因子として酵素活性を高める元素であることが知られている（笹川、2001）。そこで、葉のマグネシウム濃度を測定したところ、ニガリの主成分であるマグネシウムの葉内濃度は、濃縮深層水の施用によって約 1.7 倍になった。これらのことから、濃縮深層水施用による塩ストレスによって気孔開度は低下するものの、葉に高濃度に集積するニガリ由来のマグネシウムによって、炭酸固定の能力の著しい低下は回避されることが推察された。

### 3.3 果実への物質集積および品質に対する効果

トマト果実への汁液、糖などの集積の多くは師管を經由する師部輸送に依存するので、果実への師部輸送に対する濃縮深層水の短期間施用の効果を調べた。**Fig. 2** に果実への師管液の集積量および師管経由の可溶性固形物（トマトの場合は主にスクロース）の集積量の受粉後 3 週目から 7 週目までの経日変化を示す。深層水施用による塩ストレスによって、果実への師管液集積は抑制され、師管液集積量は約 35% 減少した。一方、師管経由の可溶性固形物の集積は逆に、濃縮深層水施用によって約 40% 促進された。**Fig. 3** に師管液中の可溶性固形物濃度の

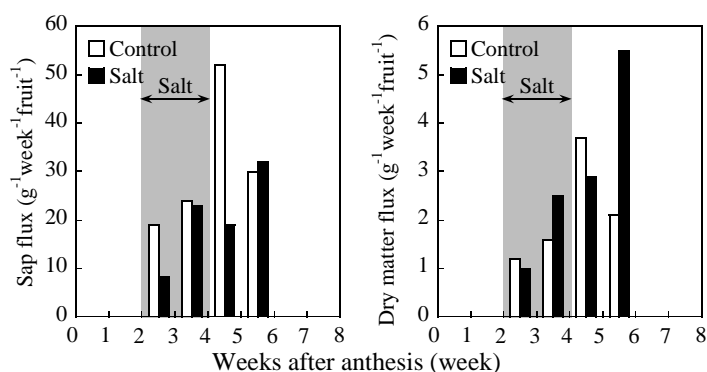


Fig.2 Time courses of fluxes of phloem sap and soluble solids via phloem accumulated into fruits under the non-salt stress condition (Control) and the salt stress condition with the concentrated deep seawater (Salt). The gray zone indicates the period of the salt stress condition. Means of five fruits are shown.

受粉後3週目から7週目までの経日変化を示す。師管液中の可溶性固形物の濃度は、濃縮深層水を施用しない場合は5~6% (重量%) でほぼ一定であったが、濃縮深層水の施用によって濃度が2~3倍に上昇し、深層水除去後も高濃度に保たれた。

Fig. 4に、カリウム、ナトリウム、マグネシウムおよびカルシウムの師管経由の果実への集積量の受粉後3週目から7週目までの経日変化を示す。植物体の重要な浸透圧調節物質であるカリウム、深層水の主成分であるナトリウム、ニガリの主成分であるマグネシウムの果実への師管経由の集積は、濃縮深層水施用によって促進されたが、果実への集積不足によって尻腐れを発症するカルシウムについては、果実への集積は促進されなかった。Fig. 5に師管液中のカリウム、ナトリウム、マグネシウムおよびカルシウム濃度の受粉後3週目から7週目までの経日変化を示す。植物体の重要な浸透圧調節物質であるカリウムの師管液中の濃度は、他の元素に比して突出して高く、濃縮深層水の施用によって約2倍になり、除去後も高濃度に維持された。また、深層水の主成分であるナトリウムおよびニガリの主成分であるマグネシウムも、短期間の濃縮深層水の施用によって2~10倍の高濃度で師管液中に集積された。一方、難移動性であるカルシウムの師管液中の濃度は他の元素濃度に比べて著しく低く、深層水施用による塩ストレスによってさらに低下した。

これらのことから、果実肥大の活発な時期の短期間の深層水施用によっても、師管内へ

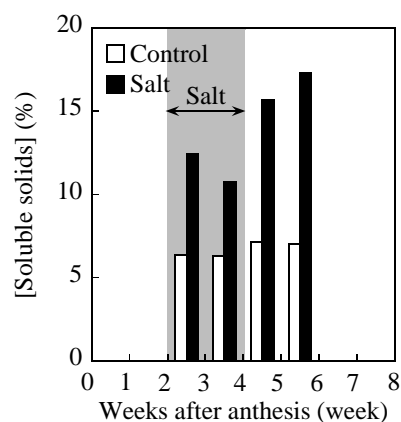


Fig.3 Time courses of soluble solids concentration in phloem sap accumulated into fruits under the non-salt stress condition (Control) and the salt stress condition with the concentrated deep seawater (Salt). The gray zone indicates the period of the salt stress condition. Means of five fruits are shown.

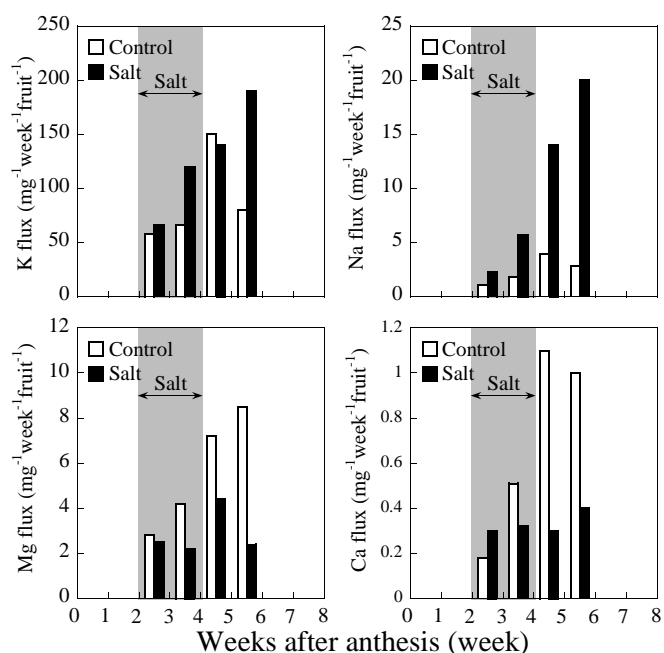


Fig.4 Time courses of fluxes of K, Na, Mg and Ca via phloem accumulated into fruits under the non-salt stress condition (Control) and the salt stress condition with the concentrated deep seawater (Salt). The gray zone indicates the period of the salt stress condition. Means of five fruits are shown.

のスクロースやカリウムの取り込みを促進し、師管内の圧流を維持しようとする浸透圧調節機能が師部にも発現し、難移動性であるカルシウムを除く可溶性固形物（スクロース、カリウム、深層水由来物質）が師管内に高濃度集積されることが示唆された。

Fig. 6 に果実の新鮮重、乾物重、乾物率および糖度（Brix）の受粉後 3 週目から 7 週目までの経日変化を示す。濃縮深層水施用による塩ストレスによって、果実肥大（新鮮重の増加）は徐々に抑制されたが、濃縮深層水除去後の乾物重の増加（可溶性固形物の集積）が著しく促進された。対照区では、果実の乾物率は 6% および糖度 6 付近で推移したが、濃縮深層水を施用することによって、乾物率と糖度が有意に高められ、とくにストレス解除後の上昇が顕著であった。Fig. 7 に果実中のカリウム、ナトリウム、マグネシウムおよびカルシウム濃度の受粉後 3 週目から 7 週目までの経日変化を示す。果実内のカリウム、ナトリウムおよびマグネシウム濃度も師管液中の濃度と同様に上昇した。一方、果実内のカルシウム濃度は塩ストレス処理によって低下したが、尻腐れは発症しなかった。尻腐れの発症は、着果直後の果実肥大初期におけるカルシウムの集積不足が誘因と考えられている (Saure, 2001)。本研究では、濃縮深層水の施用による塩ストレス

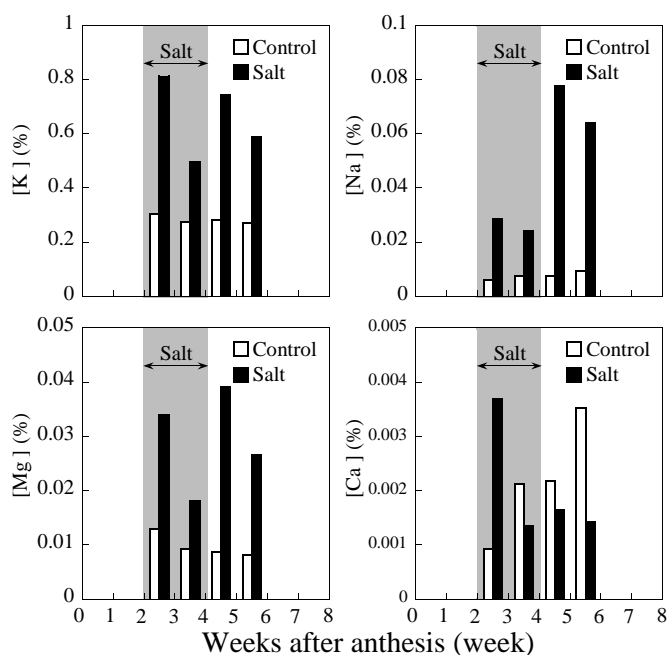


Fig.5 Time courses of concentrations of K, Na, Mg and Ca in phloem sap accumulated into fruits under the non-salt stress condition (Control) and the salt stress condition with the concentrated deep seawater (Salt). The gray zone indicates the period of the salt stress condition. Means of five fruits are

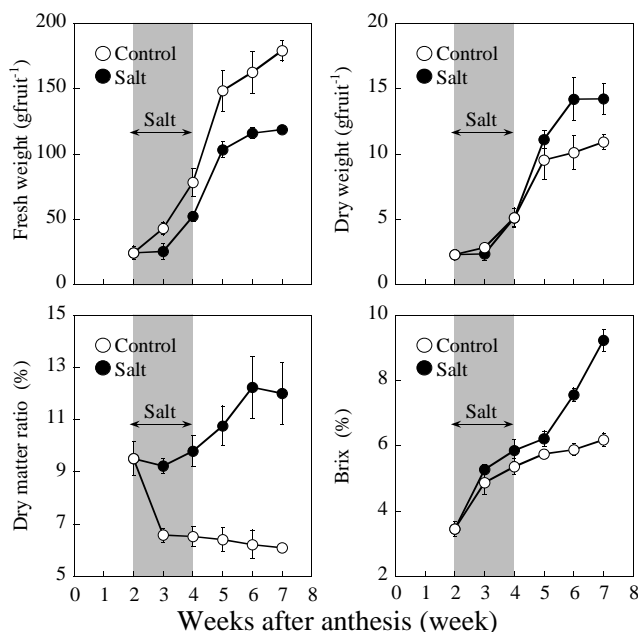


Fig.6 Time courses of fresh weight, dry weight, dry matter ratio and Brix of fruits under the non-salt stress condition (Control) and the salt stress condition with the concentrated deep seawater (Salt). The gray zone indicates the period of the salt stress condition. Means of five fruits are shown with standard deviations (SD).

処理を肥大最盛期の短期間だけに限定したために、果実の肥大初期のカルシウム濃度は低下せず、尻腐れの発症を回避できたものと推察された。

**Table 1** に、収穫果実の新鮮重、乾物重、乾物率、糖度 (Brix)、酸度およびトマトのおいしさに関与するとされている果実内のカリウムとマグネシウム濃度を示す。濃縮深層水の短期間施用によって、果実の新鮮重は約 35% 減少したが、収穫時の新鮮重は約 120 g に達した。また、乾物の集積は濃縮深層水施用によって有意に促進され、収穫果の乾物重は約 30% 増加し、果実の乾物率、糖度および酸度も上昇した。すなわち、濃縮深層水を施用しない場合の果実の乾物率、糖度および酸度はそれぞれ 6%、6

および 0.5% 程度であったが、濃縮深層水の施用によって、収穫果の乾物率は 12% に達し、糖度も 9 以上、酸度も 0.9% に達した。果実内のカリウムとマグネシウムの濃度も、師管液中の濃度と同様に、濃縮深層水施用によって上昇した。トマトにおいては、糖度 6 以上、酸度 0.6% 以上で、カリウムとマグネシウムの濃度も高いことが「おいしいトマト」の条件とされている (吉川、2002)。さらに、糖度 8 以上の高糖度トマトでは、果実重が 100 g 以上のトマトが高い品質評価を受けている。濃縮深層水の短期間施用によって栽培されたトマトは、これらの条件をいずれも満足した。

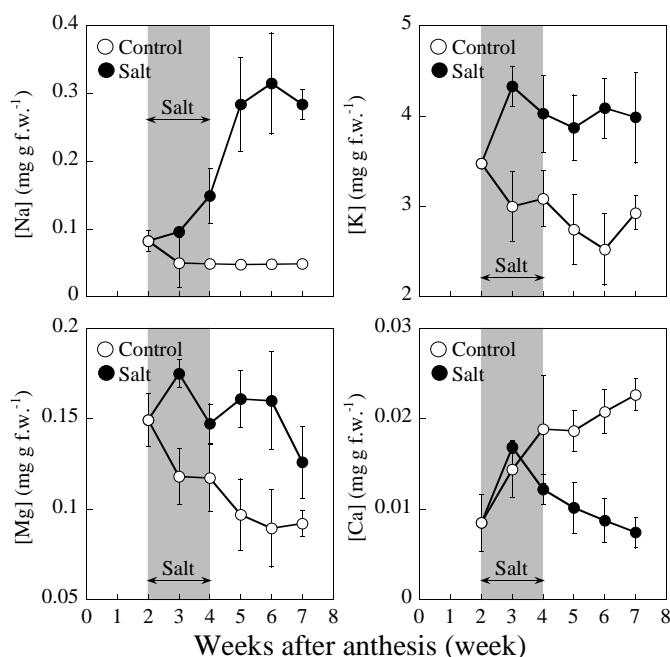


Fig.7 Time courses of concentrations of K, Na, Mg and Ca in fruits under the non-salt stress condition (Control) and the salt stress condition with the concentrated deep seawater (Salt). The gray zone indicates the period of the salt stress condition. Means of five fruits are shown with standard deviations (SD).

**Table 1** Fresh weight, dry weight, dry matter ratio, Brix and concentrations of K and Mg of fruits grown under the non-salt stress condition (Control) and the salt stress condition with the concentrated deep seawater (Salt). Means of five fruits are shown with standard deviations (SD).

	Fresh weight (g fruit <sup>-1</sup> )	Dry weight (g fruit <sup>-1</sup> )	Dry matter ratio (%)	Brix (%)	[ K ] (mg g f.w. <sup>-1</sup> )	[ Mg ] (mg g f.w. <sup>-1</sup> )
Control	179±8	10.9±0.5	6.1±0.1	6.19±0.12	2.93±0.19	0.092±0.007
Salt	119±2	14.2±1.2	12.0±1.2	9.23±0.33	3.99±0.50	0.126±0.020

**Table 2** に、対照区 (Control 区)、濃縮深層水区 (DSW 区)、食塩区 (NaCl 区) および表層海水区 (SSW 区) の 4 処理区で収穫したトマトの色、香り、硬さ、甘味、酸味、旨味、総合評価の項目に対する官能試験の結果を示す。濃縮深層水区のトマトは、いずれの項目

Table 2 Sensory evaluation of tomatoes produced with the non-salt stress condition (Control), the salt stress condition with the concentrated deep seawater (DSW), the salt stress condition with NaCl and the salt stress condition with the surface seawater. Within each column, values followed by the same letter do not differ significantly at  $p = 0.05$

	Color	Aroma	Firmness	Sweetness	Sourness	Flavor	Overall taste
Control	3.1 a	2.9 a	3.4 a	3.0 a	3.9 a	3.3 a	3.3 a
DSW	1.3 b	2.3 a	1.6 bc	1.8 bc	1.5 b	1.9 b	1.8 b
NaCl	3.0 a	2.4 a	2.5 ac	2.8 a	2.4 c	2.8 ac	2.8 ac
SSW	2.6 a	2.5 a	2.5 bc	2.4 ac	2.3 c	2.0 bc	2.2 bc

についても最も良い順位で、「旨味のあるおいしいトマト」の評価を得た。しかしながら、対照区および食塩区のトマトとは多くの項目で有意差が認められたものの、表層海水区のトマトとは色と酸味を除いては官能試験での有意差が認められなかった。

以上のように、根の物質吸収機能、葉の生理的機能、果実への師部輸送および果実の品質に対する濃縮海洋深層水の施用効果の定量的評価を行った。その結果、果実肥大最盛期の短期間だけトマト水耕液に濃縮海洋深層水を施用する塩ストレス処理によって、糖、酸および深層水由来のミネラルが高濃度に集積した高品質トマトの生産が可能であることが示唆された。

#### 4. 今後の課題

本研究においては、植物体の果房を1段に限定することによって、濃縮海洋深層水の短期間施用の効果をより明確に解析することができたが、生産性の点からは実用的ではない。したがって今後は、実用化を目指して、植物体の果房を4段に仕立てた場合の濃縮海洋深層水の短期間施用法を検討するとともに、短期間の塩ストレス処理の作用機作を、抗酸化機能および浸透圧調節機能の消長および養水分吸収、光合成、師部輸送、果実への物質(糖、ミネラル、抗酸化物質、アミノ酸)集積に着目して調べる必要がある。

#### 文 献

- Cuartero, J. and Fernandez-Munoz, R. (1999) Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae* 78:83-125.
- Dorais, M., Papadopoulos, A. P. and Gosselin, A. (2001) Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews* 26:239-319.
- Ho, L. C. (1996) Tomato. Pages 709 - 728 in E. Zamski and A. A. Schaffer eds. "Photoassimilate distribution in plants and crops. Source-sink relationship." Marcel Dekker, Inc. New York.
- 笹川英夫 (2001) .植物の成育と栄養システム、.1.(6)マグネシウム、「植物栄養学」、文永堂出版、東京
- 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



Saure, M. C. (2001) Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) a calcium- or a stress-related disorder? *Scientia Horticulturae* 90:193-208.

安武大輔、北野雅治、安永隆、和島孝浩、Mohammad Affan Fajar Falah、濱古賀道男、真木太一（2004）根における水および元素の吸収速度の動的評価 *Eco-Engineering*, 16:215-222.

吉川年彦（2002）11.農産物の品質 11.3.4 果菜類、「植物栄養・肥料の事典」、朝倉書店、東京

## High Quality Tomato Production by a Suitable Application of the Concentrated Deep Seawater

Masaharu Kitano, Takahisa Matsuoka and Toshio Kawano  
Faculty of Agriculture, Kochi University

The deep seawater is a profitable natural resource with the stable advantages of low temperature, nutrient-rich and purity which have been applied to many kinds of industries and products. In the processes producing articles such as mineral-enriched table salt and drinking water from the deep seawater, the concentrated deep seawater has been abundantly discharged, which is highly enriched in not only Na but useful minerals such as Mg, K and Ca etc. Therefore, the concentrated deep seawater is expected to be applicable to the production of high quality tomatoes enriched in sugar, acid, minerals and other useful compounds. The present study deals with a suitable application of the concentrated deep seawater to tomato production on the basis of physiological analyses of phloem transport to fruits, root absorption, leaf gas exchange and fruit quality.

In the NFT system, the short-term salt stress was induced by applying the concentrated deep seawater. For only two weeks at the stage of rapid fruit growth, electric conductivity (*EC*) of the nutrient solution in the NFT beds was increased to 13.5 dSm<sup>-1</sup> by adding the concentrated deep seawater to the standard nutrient solution with an *EC* of 1.2 dSm<sup>-1</sup>. Physiological effects of the short-term salt stress with the concentrated deep seawater were analyzed with special reference to expression of the osmoregulation in phloem transport to fruits by applying the newly developed method to evaluate fluxes and concentrations of soluble solids in phloem sap.

From the physiological analyses, it was verified that the short-term salt stress treatment with the concentrated deep seawater at the stage of rapid fruit growth can induce the osmoregulation in phloem transport and results in production of high quality tomatoes enriched in sugar, acid, minerals and good flavor without occurrence of extremely small-sized fruits and blossom-end rot.