

養液栽培トマトの生育，光合成および果実成熟に及ぼすホウ素過剰の影響

名田和義^{1*}・中井広樹¹・吉田洋人¹・磯崎真英²・平塚 伸¹

¹ 三重大学大学院生物資源学研究科 514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

² 三重県農業研究所 515-2316 三重県松阪市嬉野川北町 530

The Effects of Excess Boron on Growth, Photosynthesis and Fruit Maturity of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Grown in Hydroponic Culture

Kazuyoshi Nada^{1*}, Hiroki Nakai¹, Hirohito Yoshida¹, Masahide Isozaki² and Shin Hiratsuka¹

¹ Graduate School of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514-8507

² Mie Prefecture Agricultural Research Institute, Matsusaka, Mie 515-2316

Abstract

To clarify a critical concentration of excess boron (B) in nutrient solution for hydroponically cultured tomato, the influences of excess B on growth, photosynthesis and fruit maturity were investigated. In tomato topped at the first truss, B concentrations higher than 2 ppm in nutrient solution resulted in a significant increase in leaf B concentration. At the fruit developmental stage, fresh weights of leaf and fruit were suppressed at 8 ppm and 4 ppm B in nutrient solution, respectively. Photosynthetic rate, respiration rate and stomatal conductance decreased with excess B at 4 ppm or higher concentration from the first truss flowering stage to fruit developmental stage. When tomato was topped at the second truss and limited to two fruits in each truss, excess B did not affect fruit growth or maturation in the first truss. However, fruit size and Brix were reduced in the second truss. These may be caused by decrease in the photosynthate distribution to fruit in the second truss because of the decrease in photosynthetic activity. Furthermore, excess B could promote fruit maturity in the second truss because of production of ethylene with increase in injured leaves. Based on these results, we suggest that the critical concentration of B in nutrient solution is 4 ppm for long-term hydroponic cultivation of tomatoes.

Key Words : ethylene, excess boron stress, fruit development, respiration

キーワード : エチレン, ホウ素過剰ストレス, 果実肥大, 呼吸

緒 言

近年、環境に配慮した農業が求められており、養液栽培においても環境保全技術の導入が必要とされている。オランダでは1996年から、バラ、ラン類を除くすべての作物、1998年からは、バラを含めたあらゆる作物において閉鎖循環式のシステムを導入し、排水を捨てることなく再利用することが義務付けられた(糠谷, 1999)。一方、日本では2001年に水質汚濁防止法施行令が改正され、硝酸化合物などが新たに排水規制物質に指定されており、この法律が農業分野へ適用された場合には、現在、トマトの養液栽培において最も多く利用されている、かけ流し式ロックウール耕は利用できなくなり(梶原ら, 2005)、培養液を廃棄せずに循環利用するシステムの開発が急務である。

トマトの養液栽培では、環境への負荷を軽減させる観点から、回収した排水を殺菌、調製して再利用するシステム

が開発され、収量を維持しながら排水量を大幅に減少させることが可能となったが(磯崎ら, 2004)、貯留タンク内の培養液のホウ素濃度が特異的に上昇し、最大で4 ppmに達することが示され(磯崎ら, 2005)、トマトの生育や収量および果実品質に対するホウ素過剰の影響が心配されている。

トマトは、ホウ素過剰ストレスに対して比較的強く(山内, 1976)、培地のホウ素濃度が25 ppm程度までネクロシスの発生や生育抑制が起こらないことが報告されている(高下・高橋, 1976)。しかしながら、これらの実験におけるトマトのホウ素処理期間は14日間と短く、栄養成長段階での結果であるため、長期栽培トマトの生育や収量、果実成熟に及ぼすホウ素過剰の影響についてはいまだ不明のままである。そこで本研究では、異なるホウ素濃度の培養液を用いてトマトを湛液水耕栽培し、トマトの生育、光合成関連要因および果実の成熟や品質に及ぼすホウ素過剰の影響を調査し、ホウ素過剰によって最も影響を受ける部位とホウ素過剰によって生じる生理的变化を明らかにすることを目的とした。

2009年7月29日 受付. 2009年11月11日 受理.

* Corresponding author. E-mail: nada@bio.mie-u.ac.jp

材料および方法

1. トマトの生育と光合成関連要因に及ぼすホウ素過剰の影響 (実験 1)

1) 栽培およびサンプリング方法

トマト (*Solanum lycopersicon* L.) ‘ハウス桃太郎’ (タキイ種苗) の種子をろ紙を敷いたシャーレ内で催芽させ、ガラス温室内でパーミキュライトを入れたパット内に2004年10月15日に播種した。第2本葉展開時の苗を素焼き鉢(3号)に鉢上げし、1/2倍濃度ホーグランド液を使用して湛液液育苗を開始した。第5本葉展開時の苗を25L容(37cm×53cm×13cm)栽培槽に5個体1反復で定植し、培養液のホウ素濃度が0.5, 2, 4, 8および12ppmとなるようにホウ酸 (H_2BO_3) を添加し、それぞれ対照区, 2, 4, 8および12ppm区とした。培養液は適宜全量交換した。第1花房の花がすべて開花した時期(第1花房開花期)に第1花房上位2葉を残して摘心した。

5個体すべての植物体を根, 茎+葉柄, 葉および果実に分け、ホウ素処理後56日目(果実肥大期)に採取し、それぞれ生体重を測定した後に凍結乾燥させた。

2) 光合成関連要因の測定

ホウ素処理後33日目(第1花房開花期)および55日目(果実肥大期)に第1花房直下の葉位の先端付近の十分展開した小葉を対象に、自然太陽光下で光合成関連要因の測定を行った。小葉を開放系小型同化箱(PLC-4, 島津製作所; 葉面積6.25cm²)ではさみ、大気を流速400mL・min⁻¹で同化箱に導入し、導入前後の大気CO₂濃度および水蒸気密度を携帯型光合成蒸散測定装置(LCA-4, 島津製作所)で測定した。測定中の同化箱温度は30±1°Cとし、測定光強度条件は1,100μmol・m⁻²・s⁻¹以上とした。6枚の小葉について測定を行い、正味の光合成速度(Pn)、呼吸速度(Rd)および気孔伝導度(Gs)をvon Caemmerer・Farquhar(1981)の式に基づいて算出した。

3) 植物体のホウ素濃度の測定

植物体各部位のホウ素濃度は、クルクミン法(石塚, 1985)により測定した。植物体乾燥粉末100mg中のホウ素を0.5N塩酸で抽出し、クルクミン-シュウ酸試薬を加えた後に乾

固させ、エタノールで再抽出した溶液の吸光度540nmを分光光度計(UV-1200, 島津製作所)で測定した。

2. トマト果実の成熟と品質に及ぼすホウ素過剰の影響 (実験 2)

1) 栽培およびサンプリング方法

トマト‘ハウス桃太郎’を2007年1月18日に播種し、実験1と同様の方法で育苗し、第5本葉展開時の苗を25L容量の培養槽に4個体2反復で定植した。定植直後にホウ素処理を行い、培養液のホウ素濃度は、0.5, 4および8ppm(それぞれ対照区, 4および8ppm区とする)とした。第2花房上位2葉を残して摘心し、各花房において、着花数を2個に制限して開花時には着果促進剤(トマトーン, 武田園芸(株))を散布した。対照区の果実が十分に着色した時期に果実のサンプリングを行い、第1および第2花房の果実をそれぞれホウ素処理後59および76日目に採取した。果実の生体重、糖度および硬度を測定した後に、果実を-30°Cで凍凍保存した。この一部をリコペン濃度測定試料とし、残りを凍結乾燥させ、実験1と同様の方法で果実のホウ素濃度を測定した。果実糖度は、ポケット糖度計(PAL-1, ATAGO)を用いて測定した。また、果実側部の硬度は、果実硬度計(KM-5, KM)で測定した。

2) 果実のリコペン濃度の測定

トマト果実のリコペン濃度は、永田ら(1992)の方法に従って測定した。果肉1gに含まれるリコペンをアセトン・*n*-ヘキサン(v/v, 4:6)溶液で抽出し、上澄み液の吸光度663nm(A₆₆₃), 645nm(A₆₄₅), 505nm(A₅₀₅)および453nm(A₄₅₃)を分光光度計(UV-1200, 島津製作所)で測定した。リコペン濃度は以下の式によって算出した。

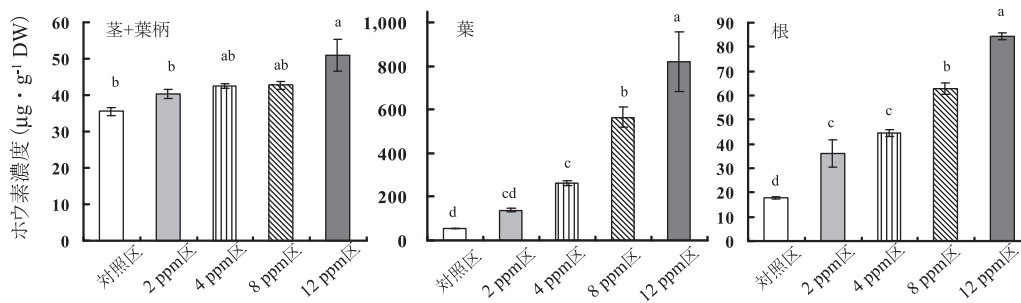
$$\text{リコペン濃度 (mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}) = 0.372A_{505} + 0.204A_{645} - 0.0458A_{663} - 0.0806A_{453}$$

果実のリコペン濃度は、生体重100g当たりの重量(mg)で表示した。

結 果

1. トマトの生育と光合成関連要因に及ぼすホウ素過剰の影響 (実験 1)

第1図に植物体の部位別ホウ素濃度を示した。茎+葉柄



第1図 1段摘心栽培したトマト植物体のホウ素濃度に及ぼすホウ素過剰の影響

図中の縦線は標準誤差 (n=5) を示す

図中の異なる英字間には Tukey 多重検定により 5%水準で有意差のあることを示す

のホウ素濃度は対照区に比較して 12 ppm 区で有意に高かったものの、その他のホウ素処理区では 35 ~ 45 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{DW}$ の範囲であり、対照区と有意差はなかった。これに対して葉と根のホウ素濃度は、ホウ素処理濃度の上昇にともなって有意に増加した。また、各部位のホウ素濃度は葉で最も高く、ホウ素が過剰となった場合の主要な蓄積部位は葉であることが示された。また、果実が肥大し始めた時期から 4 ppm 以上のホウ素過剰処理区でネクロシス症状が葉縁部や葉の中央部に観察され、このホウ素過剰による可視障害は処理期間が長く、また、処理濃度が高まるほど激しくなった。

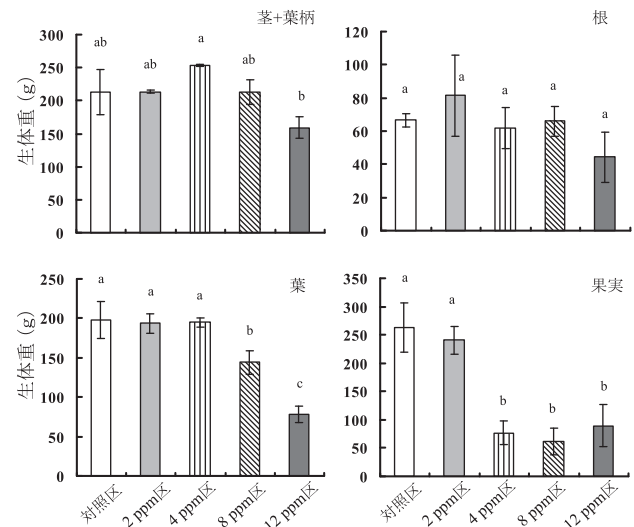
茎 + 葉柄の生体重は、対照区に比較して 12 ppm 区で有意に低下したがその他の区では有意差はなかった (第 2 図)。根の生体重において、処理間に有意な差は認められなかった。一方、葉の生体重は、2 および 4 ppm 区では対照区とほぼ同等の値となったが、8 ppm 以上のホウ素処理では有意に低下した。また、果実の生体重は、4 ppm 以上のホウ素処理で有意に低下した。

第 3 図にホウ素処理後 33 日目 (第 1 花房開花期) および 55 日目 (果実肥大期) の葉の光合成速度、呼吸速度および気孔伝導度に及ぼすホウ素過剰の影響を示した。ホウ素処理後 33 日目において、ホウ素処理濃度 4 ppm 以上の処理区の光合成速度は、対照区および 2 ppm 区と比較して有意に低下した。呼吸速度は、ホウ素過剰処理区において低下する傾向が認められた。気孔伝導度は、光合成速度と同様に、対照区および 2 ppm 区と比較して 4 ppm 以上のホウ素過剰処理区で有意に低下した。処理後 55 日目において、12 ppm 区では葉のネクロシス症状が著しく、同化箱に葉を挟むことができず測定できなかった。4 および 8 ppm 区の光合成速度および呼吸速度は、対照区および 2 ppm 区に比

較して有意に低下した。また、気孔伝導度はホウ素処理濃度が増加すると低下する傾向があったが、低下程度はホウ素処理後 33 日目よりも小さかった。

2. トマト果実の成熟と品質に及ぼすホウ素過剰の影響 (実験 2)

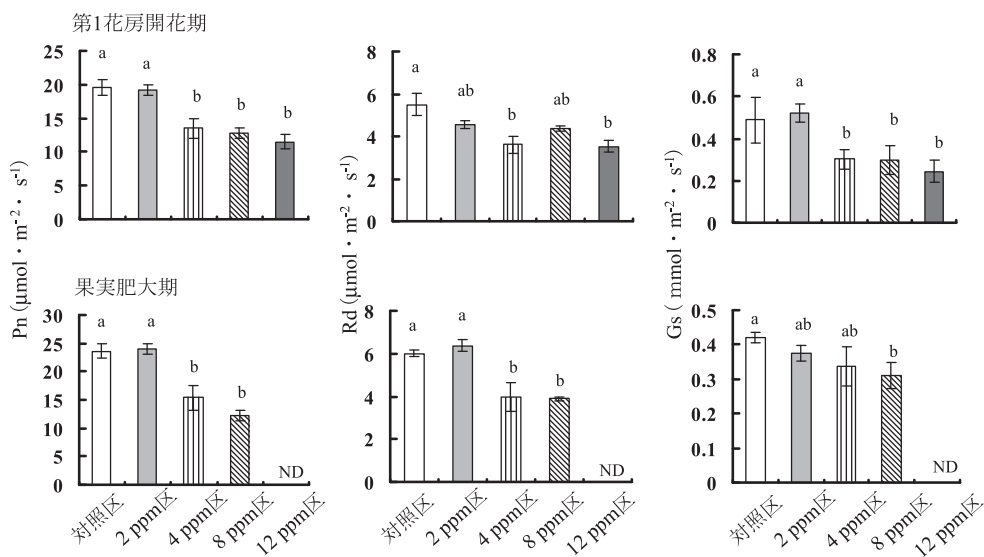
果実のホウ素濃度は、ホウ素過剰処理によって有意に増加したが、各処理区において花房間には有意差はなかった (第 1 表)。第 1 花房の果重は、処理間に有意差はなかった。第 2 花房の果重は、対照区に比較して 4 ppm 区では有意差



第 2 図 1 段階心栽培したトマトの生体重に及ぼすホウ素過剰の影響

図中の縦線は標準誤差 (n=5) を示す

図中の異なる英字間には Tukey 多重検定により 5%水準で有意差があることを示す



第 3 図 1 段階心栽培したトマト葉の正味の光合成速度 (Pn)、暗呼吸速度 (Rd) および気孔伝導度 (Gs) に及ぼすホウ素過剰の影響

図中の縦線は標準誤差 (n=6) を示す

図中の異なる英字間には Tukey 多重検定により 5%水準で有意差があることを示す

第1表 2段摘心栽培したトマト果実のハウ素濃度、果重、糖度、硬度およびリコペン濃度に及ぼすハウ素過剰の影響²

| 花房 | 処理区 | ハウ素濃度 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$) | 果重 (g) | 糖度 (Brix%) | 硬度 (kg) | リコペン濃度 ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{g}^{-1} \text{FW}$) |
|----|-------|----------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 第1 | 対照 | 13.57 ± 1.84 ^{by} | 237.70 ± 17.15 ^a | 6.20 ± 0.34 ^a | 0.55 ± 0.04 ^a | 1.98 ± 0.13 ^a |
| | 4 ppm | 24.05 ± 2.53 ^b | 223.55 ± 20.98 ^a | 6.00 ± 0.09 ^a | 0.53 ± 0.01 ^a | 1.86 ± 0.20 ^a |
| | 8 ppm | 43.61 ± 1.69 ^a | 238.69 ± 24.36 ^a | 5.30 ± 0.25 ^{ab} | 0.60 ± 0.01 ^a | 1.93 ± 0.26 ^a |
| 第2 | 対照 | 11.99 ± 1.30 ^b | 230.00 ± 10.55 ^a | 6.07 ± 0.22 ^a | 0.53 ± 0.04 ^a | 2.21 ± 0.29 ^a |
| | 4 ppm | 21.99 ± 3.08 ^b | 203.65 ± 19.30 ^{ab} | 5.38 ± 0.17 ^{ab} | 0.45 ± 0.03 ^a | 2.37 ± 0.22 ^a |
| | 8 ppm | 35.39 ± 6.27 ^a | 165.50 ± 3.24 ^b | 5.03 ± 0.20 ^b | 0.45 ± 0.02 ^a | 2.75 ± 0.07 ^a |

²平均 ± 標準誤差 (n = 8)³6 処理区において異なる英字間には Tukey 多重検定により 5%水準で有意差があることを示す

はなかったが 8 ppm 区では有意に低下した。果実糖度は、第1花房では処理間に有意な差ではなかったが、第2花房ではハウ素処理濃度が高いほど低下し、特に 8 ppm 区で対照区に比較して有意に低下した。果実硬度は、第1花房では処理間に有意差はなかった。第2花房の果実硬度は、処理間に有意差はなかったものの対照区に比較してハウ素過剰処理区で低下する傾向が認められた。果実のリコペン濃度は、第1花房では処理間に差はなかった。第2花房のリコペン濃度は、処理間に有意差はなかったものの対照区と比較してハウ素過剰処理区で高くなる傾向が認められた。

考 察

循環式養液栽培システムを用いたトマトの長期栽培では、排液の培養液組成において、リン、カリウムといった多量元素が不足ぎみになる一方で、マグネシウム、ナトリウム、ハウ素の濃度が増加することが観察されている(磯崎ら, 2004, 2005, 2006; 岩崎, 1999)。従って、循環式養液栽培を運用するに当たり、栽培期間中に徐々に増加する元素による過剰障害あるいは生育抑制が認められる限界濃度を知ることは、培養液交換、廃棄の時期を決定する上で大変重要である。

糠谷・橋本(1996)は、トマト栽培における培養液中のナトリウムの限界濃度は 322 ppm であることを示しているが、循環式の養液栽培システムを用いて長期栽培した場合の排液のナトリウム濃度は、磯崎ら(2005)は 180 ppm、岩崎ら(1999)は 92 ppm と報告しており、トマト栽培ではナトリウム限界濃度を超えることはなく、原水のナトリウム濃度が高い場合を除いて、ナトリウム濃度上昇への対策は必要ないと考えられる。

一方、高下・高橋(1976)は、トマト苗に対してハウ素過剰処理を 14 日間行った場合、培養液中のハウ素の限界濃度は 25 ppm であると示している。磯崎ら(2005)は、循環式の養液栽培システムを用いてトマトを長期栽培した場合の排液のハウ素濃度は 4 ppm であるとしており、従来のハウ素限界濃度からすると問題となるハウ素濃度ではない。しかしながら、本実験で行った湛液水耕におけるトマトの1段摘心栽培においてハウ素過剰処理を 56 日間行った場合、8 ppm 以上のハウ素過剰処理区では、葉の生長が著

しく抑制され、また、4 ppm 区において、葉縁部が褐変する可視障害が見られ、光合成速度が低下し、果重も有意に低下した(第2, 3 図)。これらのことから、トマト長期栽培におけるハウ素限界濃度は従来の 25 ppm より著しく低い、4 ppm であることが明らかとなり、この条件下で栽培を継続すると生育抑制や収量低下といったハウ素過剰の影響があるものと考えられる。

ハウ素は細胞壁の構成成分であるので、葉に存在するハウ素はまず細胞壁に蓄積するが、細胞壁に局在するハウ素の量はハウ素過剰条件下においても大きく変動しないため、余分なハウ素は細胞質に蓄積されることが示されている(Brown ら, 2002; 藤原ら, 2002)。本研究において、ハウ素過剰処理区の光合成や呼吸などの生理機能活性が低下したことは(第3 図)、可溶性ハウ素が細胞質に蓄積し、葉緑体やミトコンドリアなどのオルガネラの機能を低下させたことを示唆する。ハウ素過剰条件下での光合成の低下や気孔の閉鎖は、ペポカボチャ(Lovatt・Bates, 1984)、ブドウ(Gunes ら, 2006)、カンキツ類(Han ら, 2009; Papadakis ら, 2004)などでも認められている。Gunes ら(2006)は、ブドウの幼苗を培養液のハウ素濃度 20 ppm の条件で水耕栽培したところ、気孔抵抗が増加して気孔が閉鎖することを示したが、同時に 10 ppm のハウ素濃度では気孔が閉鎖しなかったことを認めている。また、Han ら(2009)は、培養液のハウ素濃度 5 ppm の条件下で水耕栽培したスイートオレンジの幼苗において、気孔が閉じ気味であるにもかかわらず葉内 CO₂ 濃度が高まること、Rubisco や FBPase といった光合成酵素活性が低下することから、光合成速度の低下の原因は、気孔閉鎖よりも炭酸固定活性の低下であることを示している。これらの作物とトマトのハウ素過剰に対する感受性は異なると推察されるので、直接的な比較は避けるべきであるが、本研究でのハウ素過剰処理区において、Han ら(2009)の結果と同様に、光合成速度低下および気孔閉鎖とともに葉内 CO₂ 濃度の上昇が認められており(未発表)、トマトにおいてもハウ素過剰によってストロマにおける炭酸固定作用が低下した可能性があるものと考えられる。

2段摘心栽培において、第1花房では、果重および糖度に及ぼすハウ素過剰の影響は認められなかったが、第2花

房では、8 ppm 区で果実が小さくなり糖度も低下した（第1表）。果実のホウ素濃度に花房間の差がなかったことから、果重および糖度の低下は果実に蓄積したホウ素の直接的な影響ではなく、光合成の低下や活動葉の減少を含むソース能力の低下によって、シンクである果実への光合成産物分配の低下を引き起こしたためであると考えられる。実験2における2段階摘心栽培において、光合成速度を測定していないので明確なことはわからないが、実験1で光合成速度が生育の早い段階で低下したことを考え合わせると、光合成速度が低いレベルで長期にわたって推移し、ソース能力が低下したことは十分想像できる。このように、ホウ素過剰ストレスは栄養成長器官の活性を抑制し、ソース能力の低下を誘導することによりトマト果実の生長に対して間接的に影響を及ぼしたものと考えられる。

第2花房果実において、処理間に有意な差はなかったもののホウ素過剰処理区において硬度が低下しリコペン濃度が高まる傾向が認められた（第1表）。また、ホウ素過剰処理区において果実の着色が対照区よりも早いことが観察された。このことは、ホウ素過剰処理区の第2花房では、果実が十分肥大しないうちに成熟が進む傾向にあることを示唆する。このようにホウ素過剰処理区で果実の成熟が早まった原因について、種々のストレスに反応して生成されるエチレンの発生が考えられる。エチレンは、病害虫による植物組織の傷害といった生物的ストレスや、乾燥、低温、オゾン、低酸素、および塩などの非生物的ストレスで発生し（Cao ら, 2007; Morgan・Drew, 1997）、植物体の老化を促進することが知られている。本実験で行ったホウ素過剰ストレスにおいても、まず、障害を受ける葉においてエチレンが発生し、これが果実の成熟を早めた可能性が考えられる。これまでにホウ素過剰ストレスによってエチレンが発生することを指摘した報告はなく、ホウ素過剰条件下における果実成熟とストレスエチレンとの関係の詳細を明らかにする必要があるが、これは今後の課題としたい。

以上より、培養液のホウ素濃度 4 ppm 以上のホウ素過剰条件下でトマトを長期に生育させると、葉にホウ素が大量に蓄積し、光合成や呼吸などの葉の生理機能の低下ともなまって果実の収量が低下し、また、果実の糖度が低い段階で成熟が進む傾向にあることが示された。植物体内における細胞質に蓄積したホウ素の生理機能は現時点ではほとんどわかっておらず、本研究で明らかにした光合成、呼吸および果実成熟の他にもホウ素過剰ストレスに対して感受性を示す植物生理反応が存在する可能性は否定できない。それゆえ、循環式のトマトの長期養液栽培において、培養液あるいは培地のホウ素濃度が 4 ppm 以上の状態を長期にわたって継続することは大変危険であり、ホウ素濃度が 4 ppm となった時点で培養液を廃棄交換する、あるいは、これを超えないホウ素施与方法を開発する必要があるものと考えられる。

摘 要

トマトの水耕栽培における培養液のホウ素の限界濃度を明らかにする目的で、トマトの生育、光合成関連要因および果実成熟に対するホウ素過剰の影響を調査した。1段階摘心栽培したトマトにおいて、培養液のホウ素濃度の増加にともなって葉のホウ素濃度は有意に増加した。果実の生長および収量が抑制される培養液ホウ素濃度は、それぞれ 8 ppm, 4 ppm であった。トマト葉の光合成速度、呼吸速度および気孔伝導度は、第1花房の花がすべて開花する時期に 4 ppm 以上のホウ素濃度で有意に低下し、この傾向は果実肥大期まで継続した。また、2段階摘心栽培したトマトの各花房の果実数を2個に制限した場合、第1花房の果実の生長および成熟に対するホウ素過剰の影響は見られなかったが、第2花房では果実が小さくなり、果実糖度が低下した。これは、果実に蓄積したホウ素の直接的な影響ではなく、光合成の低下を含むソース能力が低下し、果実への光合成産物の分配が低下したためであると推察される。また、ホウ素過剰によって第2花房果実の成熟が早まる傾向が認められたが、これは葉の障害によって発生したと考えられるエチレンの影響を受けた可能性がある。以上より、培養液のホウ素濃度が 4 ppm を超えると、果実収量および糖度が低下することから、トマトの長期栽培におけるホウ素の限界濃度は 4 ppm であると示唆される。

引用文献

- Brown, P. H., N. Bellaloui, M. A. Wimmer, E. S. Bassil, J. Ruiz, H. Hu, H. Pfeffer, F. Dannel and V. Römheld. 2002. Boron in plant biology. *Plant Biol.* 4: 205–223.
- Cao, W-H., J. Liu, X-J. He, R-L. Mu, H-L. Zhou, S-Y. Chen and J-S. Zhang. 2007. Modulation of ethylene responses affects plant salt-stress responses. *Plant Physiol.* 143: 707–719.
- 藤原 徹・高野順平・小林正治・三輪京子. 2002. 生物におけるBの輸送と機能—植物を中心に—. 植物の生長調節. 37: 99–109.
- Gunes, A., G. Soylemezoglu, A. Inal, E. G. Bagci, S. Coban and O. Sahin. 2006. Antioxidant and stomatal responses of grapevine (*Vitis vinifera* L.) to boron toxicity. *Sci. Hortic.* 110: 279–284.
- Han, S., N. Tang, H-X. Jiang, L-T. Yang, Y. Li and L-S. Chen. 2009. CO₂ assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. *Plant Sci.* 176: 143–153.
- 石塚潤爾. 1985. 無機成分の測定 (6) ホウ素. p. 294–297. 北條良夫・石塚潤爾編著. 最新作物生理実験法. 農業技術協会. 東京.
- 磯崎真英・糀屋 齊・小西信幸・黒田克利・佐藤法子・古田堅持・鈴木啓史・田中一久・富川 章. 2006. 実規模トマト栽培での排液再利用式ロックウールシステム

- の有効性の検証. 園学研. 5: 135–140.
- 磯崎真英・小西信幸・黒田克利・佐藤法子・古田堅持・田中一久・富川 章. 2005. 排液再利用ユニットを取り付けたロックウールシステムで栽培したトマトの収量および培地内培養液の無機成分濃度の推移. 園学研. 4: 63–68.
- 磯崎真英・小西信幸・黒木 誠・野村保明・田中一久. 2004. 培養液の廃棄を削減する余剰液再利用ロックウールシステムにおけるトマトの生育および培養液成分濃度の推移. 園学研. 73: 354–363.
- 岩崎泰永・佐々木丈夫・千葉佳朗・三枝正彦. 1999. 土壌を培地としたトマトの循環型灌水施肥システムにおける排液イオン組成の変動. 園学雑. 68: 1161–1169.
- 梶原真二・延安弘行・藤原朋子・國田丙午・香口哲行. 2005. バラの排液循環型ロックウール栽培における $\text{NH}_4\text{-N}$, Fe および Mn の添加が収量および培養液組成に及ぼす影響. 園学研. 4: 181–186.
- 高下正則・高橋英一. 1976. 植物のホウ素栄養に関する比較生理的研究 (第1報) ホウ素に対する植物の生育反応の種間差異. 土肥誌. 47: 133–137.
- Lovatt, C. J. and L. M. Bates. 1984. Early effects of excess boron on photosynthesis and growth of *Cucurbita pepo*. J. Exp. Bot. 35: 297–305.
- Morgan, P. G. and M. C. Drew. 1997. Ethylene and plant responses to stress. Physiol. Plant. 100: 620–630.
- 永田雅靖・壇 和弘・山下市二. 1992. トマト果実に含まれるクロロフィル, カロテノイドの同時, 簡便定量法. 園学雑. 61 (別2): 686–687.
- 糠谷 明. 1999. オランダの施設園芸における閉鎖系栽培システム. 土壌の性質と活用. p. 8の20–8の23. 農業技術体系土壌施肥編3. 農文協. 東京.
- 糠谷 明・橋本 永. 1996. トマトのロックウール栽培における培養液中の NaCl 濃度が生育および養分吸収特性に及ぼす影響. 園学雑. 65 (別2): 370–371.
- Papadakis, I. E., K. N. Dimassi, A. M. Bosabalidis, I. N. Therios, A. Patakas and A. Giannakoula. 2004. Effects of B excess on some physiological and anatomical parameters of ‘Navelena’ orange plants grafted on two rootstocks. Environ. Exp. Bot. 51: 247–257.
- von Caemmerer, S. and G. D. Farquhar. 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves. Planta 153: 376–387.
- 山内益夫. 1976. B適応性の作物種間差. 土肥誌. 47: 281–286.