培養液へのヨウ素添加がトマト、ホウレンソウの生育およびヨウ素蓄積に及ぼす影響

権田かおり^{1*}・山口秀幸²・丸尾 達³・篠原 温³

¹ 千葉大学大学院自然科学研究科 263-0022 千葉市稲毛区弥生町

² 関東天然瓦斯開発株式会社 297-8550 茂原市茂原

³ 千葉大学園芸学部 271-8510 松戸市松戸

Effects of Iodine on Growth and Iodine Absorption of Hydroponically Grown Tomato and Spinach

Kaori Gonda^{1*}, Hideyuki Yamaguchi², Toru Maruo³ and Yutaka Shinohara³

¹ Graduate school of science and technology, Chiba University, Inage, Chiba 263-0022

² Kanto Natural Gas Development Co., Ltd., Mobara, Chiba 297-8550

³ Faculty of horticulture, Chiba University, Matsudo, Chiba 271-8510

Abstract

The effects of I^- and IO_3^- on the growth and iodine absorption of tomato and spinach plants were investigated using a non-recirculating hydroponic system. Tomato and spinach plants were grown under 4 treatments; containing iodine I^- 0.1 mM, I^- 0.2 mM, IO_3^- 0.2 mM and 0 mM (control) for tomato, and I^- 0.05 mM, I^- 0.1 mM, IO_3^- 0.1 mM and 0 mM (control) for spinach. The results indicated that I^- treatment was more toxic to plants than IO_3^- . I^- treatments reduced the absorption of nutrient solution. Spinach was more sensitive to iodine than tomato. Spinach grown with a higher I^- concentration showed symptoms of necrosis and leaf abscission. Based on these findings, tomato and spinach showed clear differences between their sensitivity to iodine. Further research will be required to achieve the final goal of using iodine as the disinfectant for hydroponic systems while avoiding toxicity to plants. In both species, iodine was found in high concentrations in leaf tissue. Therefore, a leafy vegetable like spinach might be a suitable crop to increase dietary iodine intake. Similarly, tomato fruits were found to accumulate iodine, thus, this crop might also contribute to achieving that objective.

Key Words : disinfectant, hydroponics, iodate, iodide, iodine enriched food

キーワード : 殺菌剤, 養液栽培, ヨウ化物イオン, ヨウ素富化食品, ヨウ素酸イオン

緒 言

ヨウ素は, 世界の生産量の約4割が日本で生産されている数少ない国産天然資源であり, 様々な分野においてヨウ素の利用方法が研究されている. 例えば, ヨウ素は幅広い殺菌作用を持つため医薬品などに利用され, 最近では, 使用が禁止された臭化メチルの代替品としてのヨウ化メチル利用や養液栽培における殺菌剤としてのヨウ素利用をはじめ, 農業分野でも利用方法が検討されている (Gan・Yates, 1996; Mackowiak ら, 2005). しかし, ヨウ素はイネの赤枯れ病を引き起こすなど, 植物の生育に悪影響を及ぼすことも報告されている (Mackowiak・Grossl, 1999; Watanabe・Tensho, 1970; Zhu ら, 2003). また, ヨウ素 (I_2) は, 養液栽培において殺菌剤として使用する場合には培養液成分などと反応してヨウ化物イオン (I^-) に変化すること, 土壤溶液中では大部分がヨウ素酸イオン (IO_3^-) の形態で存在することが知られて

いる. したがって, ヨウ素が植物の生育に及ぼす影響を明らかにするためには, 濃度だけでなく形態の影響についても調査する必要がある. 一方, ヨウ素は動物にとっては必須の元素であることから, 食物を通してのヨウ素栄養強化を目的に, イネなどを対象としたヨウ素富化食品の研究が行われている (Mackowiak・Grossl, 1999; Muramatsu ら, 1989). しかし, 吸収されたヨウ素の多くは葉や根に蓄積し, 子実中のヨウ素はごくわずかであるため, ヨウ素富化食品として十分な結果は得られていない. 一方で Zhu ら (2003) が, ホウレンソウを用いた研究において, 地上部に多くのヨウ素が蓄積されることを示していることから, 野菜, 特に葉を食用とする葉菜類は, ヨウ素富化食品として利用できる可能性がより高いと考えられる. 本研究では, ヨウ素が植物の生育に及ぼす影響および植物体中のヨウ素濃度を明らかにすることを目的とし, 異なる濃度のヨウ素イオン (I^- , IO_3^-) を添加した培養液でトマトとホウレンソウの養液栽培を行った.

材料および方法

トマトは, ‘桃太郎ファイト’ を, 2004 年 4 月 20 日に

2006 年 5 月 15 日 受付. 2006 年 9 月 8 日 受理.

* Corresponding author. E-mail: gonkamo@hotmail.com

第1表 培養液へのヨウ素添加がトマトの生育に及ぼす影響

処理区	葉長 (cm)			葉幅 (cm)			葉色 (SPAD)		
	第1果房 ²	第2果房 ²	第3果房 ²	第1果房	第2果房	第3果房	第1果房	第2果房	第3果房
control	35.0 a ^y	35.5 a	34.2 a	29.2 a	33.2 a	29.2 a	51.2 a	52.4 a	51.7 ab
I ⁻ 0.1 mM	34.3 a	35.2 a	35.5 a	28.3 a	33.8 a	30.2 a	50.1 a	49.3 a	51.8 ab
I ⁻ 0.2 mM	35.0 a	35.5 a	34.0 a	30.3 a	32.5 a	28.8 a	48.8 a	50.5 a	49.7 b
IO ₃ ⁻ 0.2 mM	33.2 a	34.3 a	33.3 a	28.8 a	31.7 a	29.8 a	50.7 a	49.2 a	53.0 a

² 果房直下の葉^y 縦に異なるアルファベット間には Tukey 法により 5%水準で有意差あり

第2表 培養液へのヨウ素添加がハウレンソウの生育に及ぼす影響

処理区	生体重 (g)			葉数 (枚)
	葉身	葉柄	根	
control	20.6 a ²	14.2 a	14.6 a	14.6 a
I ⁻ 0.05 mM	17.8 b	12.1 b	10.8 b	12.8 b
I ⁻ 0.1 mM	9.2 c	6.2 c	3.4 c	9.8 c
IO ₃ ⁻ 0.1 mM	18.3 b	12.3 b	10.9 b	13.2 b

² 縦に異なるアルファベット間には Tukey 法により 5%水準で有意差あり

ロックウール粒状綿を充填した50穴セルトレイに播種した。5月21日に焼成珪藻土を充填した12号ポットに鉢上げし、各処理区20株ずつを株間20cmで定植した。6月29日にI⁻、IO₃⁻添加処理を開始し、7月1日に第3果房上2葉を残して摘心を行い、7月27日に栽培を終了した。培養液は園試処方1/2単位液とし、I⁻、IO₃⁻を添加しないcontrol区、I⁻0.1mM区、I⁻0.2mM区、IO₃⁻0.2mM区の4処理区を設けた。開花時には、花房に100倍希釈したトマトーンを適宜散布した。

ハウレンソウは、‘ミストラル’を2004年12月13日にロックウール微粒綿を充填した288穴セルトレイに播種し、2005年1月17日にもみ殻燐炭を充填した7.5号ポットに鉢上げした。1月28日に、各処理区44株を株間10cmで定植した。2月2日にI⁻、IO₃⁻添加処理を開始し、4月1日に栽培を終了した。培養液は太洋ハウレンソウ処方(NO₃-N:16, PO₄-P:4, K:12, Ca:4, Mg:4me・L⁻¹)1/2単位液とし、I⁻、IO₃⁻を添加しないcontrol区、I⁻0.05mM区、I⁻0.1mM区、IO₃⁻0.1mM区の4処理区を設けた。栽培中は、温室内の夜温が7℃以下にならないように温風暖房機で加温した。

トマト、ハウレンソウのいずれも、栽培はガラス温室で行った。I⁻、IO₃⁻処理区では、それぞれ培養液中にKIまたはKIO₃溶液を添加した。同時に添加されるKについては、培養液中のK濃度と比較して、トマトでは5%、ハウレンソウでは1%以内と微量であり、影響はないと考えられたため、調整を行わなかった。給液される培養液のI⁻、IO₃⁻

濃度を常に一定に保つために非循環式とし、すべての株に同量の培養液が与えられるよう、各ポットにエミッターを設置した点滴式養液栽培装置を作製して給液を行った。給液量は、排水量が給液量の2割程度になるよう天候に応じて適宜調節した。排水は処理区ごとに集め、3日ごとに排水量を測定し、同時にサンプリングを行った。給液量と排水量の差から、みかけの吸水量(以下吸水量)を算出した。また、給排水サンプルの無機成分の分析を行い、ヨウ素および無機塩類について、みかけの養分吸収量(以下吸収量)を算出した。

トマトは、栽培中に1週間ごとに生育調査を行い、1処理区6株ずつについて、各果房直下の葉の葉長、葉幅、葉色を測定した。葉色は、葉緑素計を用いて1葉につき無作為に4点を測定し、その平均を測定値とした。栽培終了時に、1処理区6株ずつ植物体のサンプリングを行った。トマトでは、第1果房以下、第1果房から第2果房、第2果房から第3果房、第3果房以上の4つの部分をそれぞれ葉身、葉柄、茎に分け、さらに根と果実を分析試料とした。ハウレンソウでは、株ごとに葉をばらして、展開順に同じ枚数になるように3つに分け、新しい葉から順に上位、中位、下位とし、それぞれの葉身、葉柄と根について分析を行った。植物体のサンプルは、70℃で72時間乾燥させた後に粉碎し、フラスコ燃焼法およびLeipert法(松岡, 1974)を用いて、植物体中に含まれるヨウ素の定量を行った。

結 果

1. 生育

第1,2表にトマトおよびハウレンソウの栽培終了時の生育を示した。トマトでは、I⁻0.2mM区で第1果房以下および第3果房の葉で葉色が低下する傾向が見られたが、葉色、葉長、葉幅ともにcontrol区との間に有意な差異は認められなかった。ハウレンソウでは、I⁻、IO₃⁻処理区で下位の葉の黄化や落葉がみられ(データ省略)、葉数、生体重はcontrol区に比べて低下した。特にI⁻0.1mM区では顕著であり、根の生育が著しく抑制された。IO₃⁻処理でもcontrol区に比べて生体重が低下したが、IO₃⁻0.1mM区でI⁻0.05mM区と同程度であった。

第3表 培養液へのヨウ素添加がトマトの植物体中ヨウ素濃度に及ぼす影響

処理区	植物体中 I 濃度 (mg・kg ⁻¹ DW)				
	茎	葉柄	葉身	根	果実
control	N.D. ^z	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
I ⁻ 0.1 mM	537 b ^y	2764 b	4692 b	1641 a	305 a
I ⁻ 0.2 mM	782 a	4737 a	9824 a	1723 a	388 a
IO ₃ ⁻ 0.2 mM	646 ab	2037 c	5361 b	945 b	339 a

^z Not Detected の略^y 縦に異なるアルファベット間には Tukey 法により 5%水準で有意差あり

第1図 培養液へのヨウ素添加がトマトの養水分吸収量に及ぼす影響

^z 栽培期間中の総吸水量 (L/plant)^y 栽培期間中の総吸収量 (g/plant)

第2図 培養液へのヨウ素添加がホウレンソウの養水分吸収量に及ぼす影響

^z 栽培期間中の総吸水量 (L/plant)^y 栽培期間中の総吸収量 (g/plant)

第3図 培養液へのヨウ素添加がトマト葉身中のヨウ素濃度に及ぼす影響

図中の縦線は標準誤差 (n=5) を表す

第4図 培養液へのヨウ素添加がホウレンソウ葉身中のヨウ素濃度に及ぼす影響

図中の縦線は標準誤差 (n=5) を表す

2. 養水分吸収量

第1, 2図にトマトおよびホウレンソウの処理開始後1か月間の吸水量およびNO₃⁻, Ca各成分の吸収量を, control区の吸収量を100とした割合で示した. トマト, ホウレンソウのいずれにおいても, I⁻処理によって養水分吸収量が低下したが, IO₃⁻処理ではI⁻処理ほど顕著な影響はみられなかった. ホウレンソウはトマトよりもI⁻処理の影響を強く受け, 吸水量はトマトではI⁻ 0.2 mM区でもcontrol区の90%程度であったのに対して, ホウレンソウではI⁻ 0.1 mM区でcontrol区の60%程度まで低下した.

3. 植物体中ヨウ素濃度

第3, 4表に栽培終了時の部位ごとの植物体中ヨウ素濃度, 第3, 4図に葉身中のヨウ素濃度を示した. トマト, ホウレンソウのいずれも, control区の植物からはヨウ素は検出されなかった. I⁻処理では培養液中のI⁻濃度の上昇により植物体中のヨウ素濃度も上昇したが, IO₃⁻処理区の植物体中ヨウ素濃度はその1/2の濃度のI⁻処理区とほぼ同等であった. 部位別に見ると, トマト, ホウレンソウのいずれも葉身中のヨウ素濃度が高く, トマトでは可食部である果実中のヨウ素濃度は, 他の部位に比べて低濃度であった.

第4表 培養液へのヨウ素添加がホウレンソウの植物体中ヨウ素濃度に及ぼす影響

処理区	植物体中 I 濃度 (mg・kg ⁻¹ DW)		
	葉柄	葉身	根
control	N.D. ²	N.D.	N.D.
I ⁻ 0.05 mM	683 b ²	1599 c	732 b
I ⁻ 0.1 mM	2617 a	3541 a	1746 a
IO ₃ ⁻ 0.1 mM	814 b	2495 b	1075 b

² Not Detected の略

³ 縦に異なるアルファベット間には Tukey 法により 5%水準で有意差あり

葉身中ヨウ素濃度は、トマトでは上位の葉ほど、ホウレンソウでは下位の葉ほど高かった。

考 察

Borst Pouwels (1961) は、栽培環境中の微量 (0.02–0.2 mg・kg⁻¹) の I⁻ および IO₃⁻ が、いくつかの植物の生育を促進することを報告しているが、本実験では、高濃度 (10 μM 以上) の I⁻ が植物の生育に悪影響を及ぼすという Mackowiak・Grossl (1999), Zhu ら (2003) と同様の結果を得た。これらの報告では、IO₃⁻ 処理では I⁻ 処理に比べて生育に悪影響が出にくいことが示されているが、本実験でも IO₃⁻ 処理区の植物は、同濃度の I⁻ 処理区の植物に比べて植物体中ヨウ素濃度が低く、生育阻害の程度も小さかった。植物が高濃度のヨウ素を蓄積すると、光合成阻害などにより葉の黄化や落葉が起こる (Mynett・Wain; 1973) ことが報告されており、本実験でも、ホウレンソウで下位の葉の黄化や落葉がみられた (データ省略)。また I⁻ 処理により、養水分吸収量はトマトよりもホウレンソウで著しく減少した。培養液中から消失した I⁻ のうち、植物体中に蓄積されているヨウ素の割合を算出したところ、ホウレンソウではほぼ 100% が植物体中に蓄積されていたのに対し、トマトでは 60% と低く (データ省略)、このことが、トマトが I⁻ による生育阻害を受けにくい原因のひとつとなっている可能性も考えられた。培養液中の I⁻ および IO₃⁻ と培地の間には反応性がないことが予備実験において確認されているため、検出されなかったヨウ素の一部は、一度植物に吸収された後にガス化して空気中に放出されている可能性があると思われる。また、トマトはホウレンソウよりも高濃度のヨウ素を葉身中に蓄積しているにもかかわらず、葉の黄化や落葉などの症状がほとんど見られなかったことから、ヨウ素に対する感受性には植物種間で差があると思われる。

ヨウ素を養液栽培システムの殺菌剤として使用する場合、3 ppm 程度の低濃度でも十分な殺菌効果が得られるという報告がある (小粥ら, 2004) が、そのすべてが I⁻ に変化したと考えても、本実験の 0.05 mM (約 6.3 ppm) よりも低濃度であるため、植物の生育には影響を与えずに十分な殺菌効果を得ることが可能であると考えられる。しかし、

循環式の養液栽培では、殺菌の回数を重ねるごとに培養液中の I⁻ 濃度が高まるおそれがあることから、殺菌処理直後に培養液中の I₂ および I⁻ の大部分を取り除き、培養液中の I⁻ 濃度を低く維持する技術の開発が必要である。

成人の 1 日あたりのヨウ素所要量は 0.15 mg、許容上限摂取量は 3 mg 程度とされている (健康・栄養情報研究会; 1999)。植物体中のヨウ素濃度は、葉身部で他の部位に比べて高くなっていったため、葉を食用とする葉菜類は、ヨウ素富化作物としての利用が期待できると考えられた。しかし、ホウレンソウの I⁻ 0.1 mM 区では、地上部中のヨウ素含有量は生体重 100 g あたり約 50 mg であり、10 g 摂取しただけでも上限値を大きく上回ることから、逆にヨウ素が高濃度になりすぎる可能性が高く、より慎重な検討が必要であると考えられた。トマトでは、いずれのヨウ素添加区においても果実中のヨウ素濃度は他の部位に比べて低く、生体重 100 g あたり約 20 mg・kg⁻¹ であった。このことから 100 g のトマトを毎日 1 個食べることで、十分な量のヨウ素を摂取することができ、ヨウ素富化食品としての利用が可能であると考えられた。

本実験では、トマトでは上位の葉ほど、ホウレンソウでは下位の葉ほどヨウ素濃度が高かったが、その理由として I⁻ 処理開始時期における植物の生育段階の違いが関係している可能性が考えられる。Herrett ら (1962) は、ヨウ素は主に蒸散流によって運ばれ、その後ほとんど転流しないことを報告している。本実験において、摘心時から処理を行ったトマトではすべての葉が同期間のヨウ素処理を受けたため、日照条件がよく蒸散の盛んな上位の葉で比較的高濃度のヨウ素が検出されたが、一方のホウレンソウでは、先に展開した下位の葉により多くのヨウ素が蓄積したと考えられた。

本実験では、トマトはヨウ素処理による影響をほとんど受けなかったが、循環式で長期栽培を行う場合には、培養液および植物体中のヨウ素濃度が徐々に高まるおそれがあり、処理濃度が本実験と同等かそれ以下でも、生育に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、ヨウ素富化された果実を生産するためには、栽培方法やヨウ素処理方法について、より詳細な検討が必要である。

摘 要

I⁻ および IO₃⁻ を添加した培養液を用いた養液栽培で、トマトとホウレンソウを栽培し、ヨウ素が植物の生育に及ぼす影響および植物体中のヨウ素濃度を調査した。I⁻ 処理により、トマトでは養水分吸収量がわずかに低下したが、生育には有意な影響は見られなかった。ホウレンソウでは養水分吸収量が著しく低下し、葉数および生体重の低下が見られたことから、植物によってヨウ素の感受性が異なると考えられた。養液栽培においてヨウ素を殺菌剤として用いるためには、栽培植物の種類に対応した処理方法を検討する必要があると考えられた。植物体中のヨウ素濃度は、ト

マト, ホウレンソウともに葉身部で他の部位に比べて高くなっていたが, トマトでは果実中にもヨウ素が蓄積されていた。よって, ホウレンソウ, トマトともに適切な濃度のヨウ素処理を行うことにより, ヨウ素富化食品としての利用が可能であると考えられた。

引用文献

- Borst Pauwels, G. W. F. H. 1961. Iodine as a micronutrient for plants. *Plant Soil*. 14: 377–392.
- Gan, J. and S. R. Yates. 1996. Degradation and phase partition of methyl iodine in soil. *J. Agric. Food Chem.* 44: 4001–4008.
- Herrett, R. A., H. H. Hatfield Jr., D. G. Crosby and A. J. Vlitos. 1962. Leaf abscission induced by the iodide ion. *Plant Physiol.* 37: 358–363.
- 健康・栄養情報研究会編集. 1999. 第六次改定 日本人の栄養所要量 食事摂取基準. p. 157. 第一出版株式会社. 東京.
- Mackowiak, C. L. and P. R. Grossl. 1999. Iodate and iodide effects on iodine uptake and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture. *Plant Soil*. 212: 135–143.
- Mackowiak, C. L., P. R. Grossl and K. L. Cook. 2005. Iodine toxicity in a plant-solution system with and without humic acid. *Plant Soil*. 269: 141–150.
- 松岡敬一郎. 1974. ヨウ素総説. p. 221–228. 霞ヶ関出版株式会社. 東京.
- Muramatsu, Y., S. Uchida, M. Sumiya, Y. Ohmomo and H. Obata. 1989. Tracer experiments on transfer of radio-iodine in the soil-Rice plant system. *Water Air Soil Pollut.* 45: 157–171.
- Mynett, A. and R. L. Wain. 1973. Herbicidal action of iodine: effect on chlorophyll content and photosynthesis in dwarf bean *Phaseolus vulgaris*. *Weed Res.* 13: 101–109.
- 小粥理絵・山口秀幸・丸尾 達・篠原 温. 2004. ヨウ素を用いたナス科植物青枯病菌に対する培養液殺菌技術の開発に関する研究. *園学雑*. 73 (別 1) : 280.
- Watanabe, I. and K. Tensho. 1970. Further study on iodine toxicity in relation to “reclamation Akagare” disease of lowland rice. *Soil Sci. Plant Nutr.* 16: 192–194.
- Zhu, Y. G., Y. Z. Huang, Y. Hu and Y. X. Liu. 2003. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations. *Environ. Int.* 29: 33–37.