イオン濃度制御キュウリ養液栽培において NH₄-N 濃度設定値が培養液の pH 変動に及ぼす影響

霧村雅昭^{1,2}・位田晴久^{1,2}

¹ 宮崎大学農学部 889-2192 宮崎市学園木花台西 1 丁目 1 番地

² 鹿児島大学大学院連合農学研究科

Effect of Set Point of NH₄-N Concentration on pH Fluctuation in Ion Concentration Controlled Hydroponics in Cucumber

Masaaki KIRIMURA^{1,2} and Haruhisa INDEN^{1,2}

¹ Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, Miyazaki 889-2192, Japan

² United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University

Abstract

To establish an environment-friendly hydroponics system, the ion concentration control method for nutrient solution was developed. This demonstrated to be superior to the EC control method in respect to reduction of effluent and increase of yield. In this study, the technique for keeping a suitable pH value without using acid and/or alkali was examined; plants were cultivated under three concentrations of NH₄-N. When the set point concentration of NH₄-N was high, the pH value of nutrient solution fell rapidly after compensation of the component. However, when the set point of concentration of NH₄-N was 5–8 mg l⁻¹, the pH was rather stable. The pH value becomes stable when the ratio of NO₃-N to NH₄-N of nitrogen source is around 30 (total N : 120–240 mg l⁻¹). From the result of the comparative experiment on nutrient solution control methods on cucumber, it was suggested that new ideas on NH₄-N supply should take into consideration of the ion concentration control method and that it includes not only set points of NH₄-N concentration value but also the ratio of NH₄-N to NO₃-N in the ion concentration.

Keywords : hydroponics, NH₄-N concentration, NO₃-N : NH₄-N

緒 言

養液栽培には多くのメリットがあり広く世界で行われているが、近年「環境負荷の少ない生産技術」への志向から、排液処理システムを導入した閉鎖系への転換 (Okano *et al.*, 1999 ; Takaichi *et al.*, 2002) が検討されている。しかし、現行の培養液管理法である電気伝導度 (EC, electric conductivity, 単位 dS m⁻¹) を指標

とする EC 制御法では、培養液組成のアンバランスを補正するには定期的に培養液の交換を行わなければならない (Inden, 1997), EC 制御閉鎖系の実現は難しいと考えられる。この問題に対して著者らは培養液の各要素の濃度を明らかにさえすれば直ちに「補充すべき肥料の種類と量」を回答する“イオン濃度調整プログラム (以下, IonAdjuster)”を開発し (Inden and Kubota, 1995a ; Inden and Kubota, 1995b ; Inden *et al.*, 1996 ; Inden *et al.*, 2000), それに基づくイオン濃度制御法を考案した (特開平成 13-103855)。その結果 EC 制御法に比べ培養液の低減および果実の増収が可能となった (Kubota *et al.*, 2001 ; Inden *et al.*, 2001)。

また、養液栽培は省力栽培法として有効と考えられるものの、我国ではまだまだ広く普及しているとは言えな

2005 年 4 月 11 日受付

2005 年 9 月 9 日受理

Corresponding author : Masaaki Kirimura

(kga307u@student.miyazaki-u.ac.jp)

い、その原因の一つとして、生産者に「培養液管理技術は難しい」と思われていることがあげられる。さらに、培養液管理が最も重要な技術の一つであるにもかかわらず、生産者は適切な管理方法に関する情報が得にくく、そのために十分な収量を得られない場合が少なくない。そのため、適切な培養液管理技術を確立すれば生産者は培養液管理を容易に行えるようになり、養液栽培の一層の普及が期待できる。

養液栽培の培養液管理では、培養液中の各成分濃度と EC の管理と同様、pH 管理も重要である。培養液の pH は多くの養分の可溶性ならびに作物の利用効率に関わっており、生育に大きな影響を及ぼすので、少なくとも適範囲内に維持する必要がある (Inden, 1997; Tsukago-shi, 2002)。

一般的な培養液の pH 管理では、pH を下げるには硫酸やリン酸、硝酸などを用い、pH を上げるには水酸化ナトリウムや水酸化カリウムを用いている。このため、 $\text{SO}_4\text{-S}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Na、K が養分として追加されることになり培養液組成が変動してしまう。特に、植物体によってあまり吸収されない $\text{SO}_4\text{-S}$ や Na が培養液中に蓄積するために培養液中の成分バランスが崩れ培養液の交換が必要となる。さらに、酸やアルカリの取り扱いに危険が伴うことや作業の煩雑さが懸念される。

そこで、本研究では養液栽培における培養液管理の省力化と pH 補正に使用する酸やアルカリによる危険の回避を目的として、キュウリ養液栽培における培養液 pH の安定化を目指した培養液管理技術について検討した。すなわち、培養液無交換栽培での EC 制御法とイオン濃度制御法の栽培結果から培養液の pH 変化の要因を特定し、酸やアルカリによる培養液 pH の補正を行わず、かつ培養液組成を栽培適正範囲に保つことのできる培養液管理法を検討した。

実験 1. イオン濃度制御法と EC 制御法の比較

目 的

養液栽培における培養液管理の省力化と pH 補正に使用する酸やアルカリによる危険の回避を目的とした。pH 補正を行わずに栽培した場合の pH 推移と各イオン濃度推移の関係を調査するため、培養液無交換かつ pH 補正なしの条件下で EC 制御法とイオン濃度制御法による栽培試験を行った。

材料および方法

栽培方法

キュウリ (*Cucumis sativus* L.) を供試し、春夏作は品種「アルファー節成」(久留米原種育成会) を 2000 年 4 月 5 日に、秋冬作は品種「翠星節成 2 号」(久留米原種育成会) を 2000 年 9 月 18 日に温度勾配恒温器 (日本医化器械, AD-100) で、25°C で 24 時間催芽処理を行った。その後、ウレタンマット 1 ブロックごとに 1 粒播種した。昼温 (8:00-20:00) 夜温 (20:00-8:00) とともに 28°C で子葉展開まで恒温器内で管理した。育苗は子葉展開後、春夏作 4 月 18 日、秋冬作 9 月 30 日に 1/2 単位大塚 SA 処方 (大塚化学(株), Table 1) 培養液を入れた容器 (60 cm × 30 cm × 20 cm) に移植し、自然条件下のシクスライトハウス内で本葉が 5 枚展開するまで湛液育苗した。本葉が 5 枚展開した自根苗を、春夏作は 5 月 14 日、秋冬作は 10 月 22 日にシーアイ化成 SS 果菜用ベッドを湛液式に改造したもの (400 cm × 36 cm × 21 cm, 地上高 62 cm, 4 列) に定植した。春夏作は株間 50 cm, 1 ベッド当たり 7 個体、秋冬作は株間 60 cm, 1 ベッド当たり 6 個体を定植し、循環式湛液水耕大塚 SA 処方 で栽培を行った。整枝法は、春夏作は力枝 2 本の子づるつる下げ誘引とし主枝を 20 節で摘心、秋冬作は子づる 2 節摘心法とし主枝を 18 節で摘心した。各区の培養液量 (ベッド内 × 2 + タンク内) は、春夏作は 450 L, 秋冬作は 530 L で、ポンプの吐出口直後に設けたバルブを調整し培養液の一部をタンク内へ落下させることでタンク内培

Table 1 The composition of “Otsuka SA” prescription and “Yamazaki cucumber” prescription.

	Concentration (mg l^{-1})						
	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	K	Ca	Mg	$\text{SO}_4\text{-S}$
SA ^z	237.0	8.0	45.8	398.5	164.4	36.2	53.0
YC ^y	182	14	31	234	140	48	64

SA^z: “Otsuka SA” prescription

YC^y: “Yamazaki cucumber” prescription

養液の溶存酸素濃度を保った。果実は果長 22 cm 前後で収穫し、A 品 (曲がりの程度が 1.5 cm 以内)、B 品 (曲がりの程度が 1.5~3.0 cm)、C 品 (曲がりの程度が 3.0~5.0 cm)、不可販果実 (曲がりの程度が 5.0 cm 以上および先細り、肩こけ、くびれ、先太りが顕著なもの) に分けた。

培養液管理

培養液管理法としてイオン濃度制御法 (以下、イオン制御区) と慣行の EC 制御法 (以下、EC 制御区) の 2 区を設けた。イオン制御区は春夏作と秋冬作の両作とも週に 2 回 (月、木曜日)、タンク内から培養液を採取・分析し、各イオン濃度が大塚 SA 処方の組成となるように IonAdjuster で補充すべき肥料量を計算し、肥料を組み合わせて添加した。EC 制御区は追加培養液を大塚 SA 処方とし、EC が常に 2.4 dS m^{-1} となるように SS 式肥料管理機 (AS-3, シーアイ化成) で制御した。肥料はイオン制御区で大塚 S1 号、2~7 号 (大塚化学 (株))、EC 制御区で大塚 S1 号、2 号、5 号を用いた。

培養液の、カチオン (Na , NH_4 , K , Ca , Mg) は高速液体クロマトグラフ HPLC (東ソー, SD-8022 オンラインデガッサ, CCPS デュアルポンプ, CM-8020 電気伝導度検出器, CO-8020 カラムオープン, IC-Cation I/II-HR カラム) で、アニオン (NO_3 , PO_4 , SO_4 , Cl) はイオン分析計 (東亜 DKK, IA-100, PCI-201S カラム) を用いて測定した。

結果および考察

イオン制御区の培養液イオン濃度は春夏作、秋冬作ともに $\text{NH}_4\text{-N}$ 以外の成分についてはほぼ設定値を維持することができた (データ略)。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は補正の度に上昇したが、その後直ちに低下する傾向がみられた (Fig. 1)。春夏作では養分吸収が盛んであったため、補正直前の分析時には毎回検出値以下まで低下した。

EC 制御区の培養液イオン濃度は春夏作では Mg と $\text{SO}_4\text{-S}$ の濃度が設定値よりも高く推移した。秋冬作では Ca と Mg , $\text{SO}_4\text{-S}$ の濃度が設定値よりも高く推移した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は各作とも栽培初期から検出値以下で推移した。

イオン制御区の培養液の pH は、春夏作は 6 月 8 日を境に下降傾向が続き、6 月 18 日には pH3.9 まで低下した。秋冬作でも同様に下降傾向がみられた。イオン制御区における pH の変動は波形であり、補正後に一時的な上昇をみせ、その後に急に下降し、場合によっては再び緩やかに上昇するのが認められた。pH の推移と培養液 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の推移を比較した結果、培養液調整時に pH が上昇し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の低下、つまり植物体によ

Fig. 1 Changes in pH values and concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ and Mg , $\text{SO}_4\text{-S}$ in the nutrient solution of the ion control method and the EC control method. Dotted line shows the initial value of respective ion concentration levels in the EC control method. ---■--- Ion control method (pH) ---□--- EC control method (pH) —■— Ion control method —□— EC control method

る $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収とともに pH が低下し、さらに $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が検出値以下になると pH が上昇する傾向がみられた。つまり N 源として $\text{NH}_4\text{-N}$ が存在する場合は

$\text{NH}_4\text{-N}$ の優先吸収により pH が低下し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が枯渇すると N 源として $\text{NO}_3\text{-N}$ のみが吸収される (Tsukagoshi, 2002) ために pH が上昇すると考えられた。

EC 制御区の培養液の pH は、各作とも 7 付近で推移し、イオン制御区でみられた様な大きな変動はみられなかった。Kubota *et al.* (2001) が行った EC 制御法による栽培では、培養液の pH が栽培中期に低下したが、その原因もまた $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量に原因があったと考えられる。つまり、本実験で用いた大塚 SA 処方の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は 8 mg l^{-1} であるのに対し、Kubota *et al.* (2001) が用いた山崎キュウリ処方の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は 14 mg l^{-1} であったために、培養液の pH 低下がより顕著に引き起こされたと考えられる。また栽培期間中に追加培養液から供給された N 源の $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ は、春夏作のイオン制御区では 9:1、EC 制御区では 30:1、秋冬作のイオン制御区では 3:1、EC 制御区では 30:1 であり、各作とも供給した N 源中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 比率は EC 制御区に比べイオン制御区で大きかった。このことからイオン制御区における培養液 pH の低下には $\text{NH}_4\text{-N}$ の影響が大きかったと考えられる。

総収量は各作、各区ともに有意な差はみられなかったが、1 個体あたりの A 品果数は春夏作のイオン制御区で 19.0 (A 品割合 49.0%) と EC 制御区の 14.7 (A 品割合 41.1%) より有意に多くなり、秋冬作でもイオン制御区 28.0 (A 品割合 69.6%)、EC 制御区 27.6 (A 品割合 69.2%) と、有意差はみられなかったもののイオン制御区で多かった。

以上の結果から、イオン濃度制御法における培養液 pH の低下には $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量が大きく影響していると考えられ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量を適切に管理することにより、酸やアルカリを使用せずとも培養液の pH を栽培適正範囲に抑えることが可能であると考えられた。また、イオン制御区の pH 低下が大きかったにも関わらず、A 品割合はイオン制御区の方が良い傾向がみられたため、培養液中のイオンバランスを適正に保つことの意義が大きかったと考えられた。

実験 2. $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給制限による培養液 pH の安定化

目 的

実験 1 の結果から、イオン濃度制御法における培養液 pH の低下には $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量が大きく影響することが示された。そこで、イオン濃度制御法によるキュウリ湛液水耕において $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を適切に管理することにより、培養液の pH 変動抑制を試みた。

材料および方法

キュウリ (*Cucumis sativus* L.) 品種‘アルファー節成’ (久留米原種育成会) を供試し、2001 年 5 月 17 日に催芽処理を行い、その後ウレタンマットに播種した。子葉展開後の 5 月 31 日から本葉が 4 枚展開するまで湛液育苗した。6 月 21 日に株間 50 cm で 1 ベッド当たり 6 個体ずつベッドに定植した。培養液量は各区とも 260 l (ベッド内+タンク内) とした。整枝方法は力枝 2 本の子づるつる下げ誘引とし、主枝を 20 節で摘心した。基準培養液組成は大塚 SA 処方とし、培養液の補正はイオン濃度制御法により合計 3 回 (7 月 10 日、7 月 20 日、7 月 30 日) 行った。培養液中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の設定値が異なる 3 区を設け、試験区 1 (以下、H 区 (High)) は 20 mg l^{-1} 、試験区 2 (以下、M 区 (Medium)) は 8 mg l^{-1} 、試験区 3 (以下、L 区 (Low)) は 5 mg l^{-1} とした。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の設定値は大塚 SA 処方に準じて 238 mg l^{-1}

Fig. 2 Changes in pH values and concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the nutrient solution of the ion control method. Dotted line shows the initial value of $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration in the EC control method. —■— High concentration control ···●··· Medium concentration control ···○··· Low concentration control

l^{-1} とした。例えば 7 月 10 日の培養液補正後の N 源の濃度 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ (mg l^{-1}) は H 区 223.5 : 19.0, M 区 213.6 : 9.8, L 区 216.1 : 5.2 となった。肥料の調製には大塚 S1 号, 2~7 号 (大塚化学(株)), 単肥 (NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , KCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) を用い, その他の栽培方法は実験 1 に準拠した。

結果および考察

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の設定値が高い H 区と M 区で培養液 pH が低下する傾向がみられた (Fig. 2)。L 区では pH 7 付近で比較的安定していた。追加培養液によって供給された $\text{NH}_4\text{-N}$ は次回の補正時までに検出値以下となり, 植物体によって速やかに吸収されたと考えられる。一方, $\text{NH}_4\text{-N}$ 以外の成分は各区とも同じ濃度条件となるように設定していたため, 培養液 pH の低下には補正時に設定する $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が関与していると考えられる。従って, 培養液管理をイオン濃度制御法によって行う場合に, 培養液の pH を 5.5~7.0 の範囲に抑えるためには $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を 8 mg l^{-1} 以下に設定することが必要と考えられる。また, N 源の供給比率 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ は, それぞれ H 区 6 : 1, M 区 9 : 1, L 区 33 : 1 であり, 肥料として供給された N 源のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ 比率が大きいくほど培養液 pH の低下が大きく, pH を安定化するには $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ を 30 : 1 程度にするのが望ましいと考えられる。また総収量は栽培期間が短かったためか処理区間に差はみられなかった (データ略)。

総合考察

本研究の結果, 培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の推移と pH の推移に関連性がみられ, $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高い場合はその後 pH が低下した。また, N 源の供給比率 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給比率, つまり $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収比率が高くなるにつれて培養液 pH の低下が大きくなった。以上のことから培養液無交換かつ pH 制御を行わない湛液水耕でイオン濃度制御法による培養液管理を行う場合, 単に培養液処方の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に準じた制御を行うのではなく, $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の設定値を下げ, かつ $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給比率を $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 30 : 1$ に抑えることで $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量を制限すれば, 培養液 pH の変動を抑制できることが明らかとなった。養分吸収特性がキュウリとは異なる作物種をイオン濃度制御法で栽培する場合にも, 培養液補正時に設定する $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度または N 源の供給比率によって $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量を適切に管理する必要があると考えられる。つまり, イオン濃度

制御による培養液管理では, 培養液の各成分濃度を一定に保つだけではなく, N 源の供給比率 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ については養分吸収特性に応じて一定比率で供給制限をする必要がある, そのことによって培養液 pH の安定化も可能であることが示唆された。

また, 肥料の手動添加によるイオン濃度制御法ではリアルタイム制御でないために補正時にまとまった量の肥料が添加され, 培養液中の成分濃度が波形に変動するため, これまで一度に添加していた肥料の供給を数回に分けるなどの工夫が必要と考えられる。そのことにより, 培養液の EC と pH の変動幅が小さくなり植物体へのストレスが軽減され, 植物体の成長促進や増収が期待される。なぜならば, 実験 1 の結果, イオン制御区で pH が変動しているにも関わらず, EC 制御区よりも A 品割合が高くなったことから, 培養液中のイオンバランスと pH を栽培適正範囲に保つことによって相乗効果が期待できるからである。従って, イオン濃度制御法にみられる培養液補正時の濃度変化をリアルタイム制御によって緩やかにするなど, 培養液管理システムのさらなる改良が課題の一つである。

引用文献

- Inden, H., Kubota, Y. 1995a. Development of a semi-auto program to aid mixing nutrients for hydroponics (in Japanese). Jour. Japan. Soc. Hort. Sci. 64 (SUPPL. 1) : 30-31.
- Inden, H., Kubota, Y. 1995b. Development of a semi-auto program to aid mixing nutrients for hydroponics. II. Improvement of man-machine interface and processing time (in Japanese). Jour. Japan. Soc. Hort. Sci. 64 (SUPPL. 2) : 38-39.
- Inden, H., Kubota, Y., Tanaka, T., 1996. Automatic control of the concentration of the nutrient solution in hydroponics by personal computer (in Japanese) (パソコンによる培養液濃度の自動調節について). In: Proc. of 1996 SHITA Annual meeting (日本植物工場学会平成 8 年度大会学術講演要旨), Hokkaido. 22-25 July, B12 : 73-74.
- Inden, H. (位田晴久) 1997. Management of nutrient solution (in Japanese) (培養液管理). In: Handbook of Plant Factory (植物工場ハンドブック), ed. by Takatsuji, M., Tokai University Press, Tokyo, 86-94.
- Inden, H., Kubota, Y., Okamoto, K., Nakahara, T. 2000. Software for the automatic ion control nutrient solutions. J.SHITA 12(3) : 176-181.
- Inden, H., Kirimura, M., Kubota, Y., Nakahara, T. 2001. Hydroponic culture of cucumber using mixed fertilizer by ion concentration control method (in

- Japanese) (複合肥料を用いたイオン濃度制御によるキュウリの養液栽培). In: Proc of 2001 joint conference of Japanese four societies related agricultural engineering (農業環境工学関連4学会2001年合同大会講演要旨), Ibaraki. 27-29 June, P51: 237.
- Kawashima, H. 2002. Growth and yield of tomato in rockwool culture with closed hydroponic system (in Japanese). Jour. Japan. Soc. Hort. Sci. 71 (Suppl. 2): 351.
- Kubota, Y., Inden, H., Higashi, Y., Nakahara, T. 2001. Hydroponic culture of cucumber using the software for automatic ion control of nutrient solutions (in Japanese). J.SHITA 13(2): 104-109.
- Okano, K., Sakamoto, Y., Watanabe, S., Nakashima, T. 1999. Establishment of a closed hydroponic system in single-truss tomato by the reuse of concentrated drainage (in Japanese). Environ. Control in Biol. 37: 63-71.
- Tsukagoshi, S. (塚越 覚) 2002. pH (in Japanese). In: New manual of hydroponics (養液栽培の新マニュアル), ed. by Japan Greenhouse Horticulture Association, Seibundo-Shinkosha, Tokyo, 180-183.