イオン濃度制御法と EC 制御法を融合させた新しい培養液管理法の開発

霧村雅昭・位田晴久

宮崎大学農学部 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

Development of New Ion Adjuster System Integrated with EC Control Method for Controlling Nutrient Solution in Hydroponics

Masaaki KIRIMURA and Haruhisa INDEN

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

Abstract

“Integrated Ion Adjuster System (IIA System)” integrated an ion concentration control method with an EC control method for controlling nutrient solution in hydroponics was developed. The IIA System adopted the EC control method for real-time control of total ion concentrations, and adopted the ion concentration control system for preparation of the stock solutions which could adjust ion composition of nutrient solutions. Cultivation of cucumber using the IIA System led to labor savings, sustained good condition of rhizosphere, and increased yields. Moreover saving initial and running cost should be possible in the IIA System, and consequently the IIA System may contribute to promotion of closed hydroponic system.

Keywords: cucumber, hydroponics, ion concentration

緒 言

現行の養液栽培では、一般的な培養液管理法として培養液中の塩類の総量と相関の高い電気伝導度 (EC, electric conductivity) によるモニタリングに基づいて肥料塩の濃厚液を補充する EC 制御法が用いられている。しかし、長期間の栽培では植物による養分吸収量と施肥量のずれにより培養液の組成が変化するため、生育障害の懸念から定期的な培養液の交換が必要となる (Inden, 1997; Kubota *et al.*, 2001)。また、培養液交換時の廃培養液による地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ イオンやリン酸イオン汚染などの懸念から、培養液のリサイクルについて検討されるようになり、各種の方法が試みられている (Okano *et al.*, 1999; Takaichi *et al.*, 2002)。この問題に対し

て当研究室では、培養液中のイオンバランスを維持することにより生育の改善を図るとともに、更新によって生じる廃培養液の量を低減させるため、培養液中の各イオン濃度さえ明らかにすれば直ちに「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、Ion Adjuster) 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 (以下、インテリジェントシステム) を考案した (特開平 13-103855)。その結果、培養液無交換栽培が可能となり (Nakahara *et al.*, 2000)、また EC 制御法に比べ廃培養液の低減、増収が可能となった (Kubota *et al.*, 2001; Inden *et al.*, 2001)。

近年、培養液中のイオン組成を考慮するシステムの開発が他の研究者 (Hashimoto and Udagawa, 1991; Udagawa and Hashimoto, 1991; Savvas and Adamidis, 1999) によっても行われている。しかし、その多くが IF 関数を用いており、条件によっては計算の優先順位が低い成分に誤差が集中し、大きな誤差が生じる可能性がある。さらに、自動制御ではない

2005 年 7 月 8 日受付

2006 年 7 月 14 日受理

Corresponding author: Masaaki Kirimura

(kirimura@cc.miyazaki-u.ac.jp)

ためにリアルタイム制御が行えず、結局は一時的な補正であり持続的に管理することは困難であった。一方、インテリジェントシステムではその点について改良を加え、誤差が各成分に分散されるように改善し (Kirimura and Inden, 2004), リアルタイム制御により栽培期間を通して目標濃度を維持することを可能としている。

インテリジェントシステムは、もともと植物工場のようにある程度初期投資を多くしてでも全自動化が望ましい場合を想定して開発されており、オートサンプラーと2台のイオンクロマトグラフ、さらに全自動濃厚液注入装置を組み合わせ、リアルタイム制御を行う場合に最も真価が発揮される。一方、投資レベルに応じた様々なシステム構成も可能であり、例えば小規模の養液栽培農家では、IonAdjuster ソフトとハンディイオンメーター (Inoue, 2000) を用い、手動で肥料を投入することでもイオン濃度制御が行える (Popular Edition of Intelligent System, 以下 PEIS) (Inden *et al.*, 2001)。

しかし、これまでの研究結果から、養液栽培における培養液管理を PEIS で行った場合、全自動システムに比べて補正間隔が長くなってしまい、肥料をまとめて投入することになるため、培養液中の各成分濃度や pH の変動が大きくなり (Inden *et al.*, 2001; Kubota *et al.*, 2001), 植物体にストレスを与える恐れがあった。

そこで培養液のイオンバランスを栽培適正範囲に保ち、かつ培地環境変動を小さくするため、EC 制御法とイオン濃度制御法を統合した Integrated IonAdjuster System (以下 IAS) を考案した。IAS は培養液の濃度管理を EC 制御装置により自動かつリアルタイム制御で行い、EC 制御に用いる濃厚液の調製に必要な培養液の分析と肥料調製を PEIS の手順で行った。IAS では、培地環境の変動抑制や生育の改善効果に加えて、EC 制御装置による半自動化により培養液の分析と肥料調製の回数を減らすことで省力化が期待でき、さらに低コストでのシステム構成が可能となる。

本報では IAS の評価試験としてまず IAS だけの運用試験を行い、続いて PEIS との比較試験を行ったので報告する。

開 発

IAS の作業手順を Fig. 1 のフローチャートに示す。すなわち、培養液管理の当初は自動で EC 制御を行い、濃厚液がある量以下まで減るとタンクから培養液をサンプリングし、イオンクロマトグラフ (IC) によって培養液中の各成分濃度を測定する。次に IAS では“IonAdjuster”の前処理が二種類あり、培養液の分析結果や培養液量などのデータから養分吸収量を考慮した濃厚液作成に必要な成分量を初回の補正

図1 IASシステムのフローチャート
Fig. 1 Flowchart of Integrated IonAdjuster System.

は First Calculation (Fig. 2), 二回目以降の補正は Second Calculation (Fig. 3) により算出する。さらにその結果から“IonAdjuster”によって濃厚液作成に必要な肥料種と量を算出する。最後にその結果に従って濃厚液を作成する。ただし、本実験では操作を簡略化するため、濃厚液の枯渇後に培養液のサンプリングを行った。First Calculation と Second Calculation に用いた入力項目を Table 1, 2 に示す。

図 2 First Calculationのフローチャート
Fig. 2 Flowchart of First Calculation.

図 3 Second Calculationのフローチャート
Fig. 3 Flowchart of Second Calculation.

表1 First Calculationの入力項目
Table 1 Input items of First Calculation.

Variables	Descriptions	Unit
V	The amount of nutrient solution	l
a_0	The concentration of the element X in the initial nutrient solution	$\text{mg } l^{-1}$
a_{now}	The concentration of the element X in the nutrient solution before the current compensation	$\text{mg } l^{-1}$
a_{next}	The target concentration of the element X in the nutrient solution as of the next compensation	$\text{mg } l^{-1}$
Xs	The amount of supply of element X from the initial stock solution.	mg
D_0	The interval between the start of control and the first compensation	days
D_{next}	The target interval between the current and the next compensations	days
N_i	The number of plants	plants

表2 Second Calculationの入力項目
Table 2 Input items of Second Calculation.

Variables	Descriptions	Unit
V	The amount of nutrient solution	l
a_{LBO}^z	The concentration of the element X in the nutrient solution before the last compensation but one	$\text{mg } l^{-1}$
a_{last}	The concentration of the element X in the nutrient solution before the last compensation	$\text{mg } l^{-1}$
a_{now}	The concentration of the element X in the nutrient solution before the current compensation	$\text{mg } l^{-1}$
a_{next}	The target concentration of the element X in the nutrient solution as of the next compensation	$\text{mg } l^{-1}$
Xs_{LBO}	The amount of supply of the element X from the stock solution prepared for the last time but one	mg
Xs_{last}	The amount of supply of the element X from the stock solution prepared for the last time	mg
Xs_{next}	The amount of supply of the element X from the stock solution prepared for this time	mg
D_{LBO}	The interval between the last compensation but one and the last	days
D_{last}	The interval between the last and the current compensations	days
D_{next}	The target interval between the current and the next compensations	days
N_i	The number of plants	plants

^z LBO; Last But One.

1. 計算原理

(1) First Calculation

植物体によるある成分 X の吸収量 (absorption) Xa は式 (1) によって導かれる.

$$Xa = Xs + (a_0 - a_{now})V \quad (1)$$

ただし, ここで用いた記号の意味は以下の通りである.

Xs : 初期濃厚液による成分 X の供給量 (mg)

a_0 : 初期培養液中の成分 X の濃度 ($\text{mg } l^{-1}$)

a_{now} : 補正前の培養液中成分 X の濃度 ($\text{mg } l^{-1}$)

V : 培養液量 (l)

濃厚液調製に必要な成分 X の供給量 Xs_{next} は吸収量と培養液の目標濃度との差から求められる.

$$Xs_{next} = Xa + (a_{next} - a_{now})V \quad (2)$$

ただし,

a_{next} : 次回補正時の培養液中の成分 X の目標濃度 ($\text{mg } l^{-1}$)

さらに, 補正間隔の変化と病虫害や栽培管理による植物個体数の変化を考慮すると, 最終的な各成分の供給量 Xs_{next} は式 (5) で表される.

$$\begin{aligned} Xsf_{next} &= Xs_{next} \times \frac{D_{next}}{D_0} \times \frac{N_{next}}{N_0} \\ &= \{Xs + (a_{next} - 2a_{now} + a_0)V\} \times \frac{D_{next}}{D_0} \times \frac{N_{next}}{N_0} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし,

D_0 : 制御開始から現在 (初回補正) までの間隔 (days)

D_{next} : 初回補正から次回補正までの目標補正間隔 (days)

N_0 : 制御開始時の植物個体数 (plants)

N_{next} : 次回補正時の予測植物個体数 (plants)

D_0 は初期濃厚液の濃度と量, 栽培システムのサイズによって異なり, 実際の結果を入力する. D_{next} は濃厚液調製の予定日までの日数で, 希望する日数を入力する. それぞれの入力値は濃厚液調製に必要な肥料量の計算に反映される.

(2) Second Calculation

濃厚液調製に必要な肥料量は「前回の吸収量」をもとに「前々回の吸収量と前回の吸収量の推移と同様な変化をする」と仮定して「次回の吸収量」を予測し, 導く.

前回補正時から現在までのある成分 X の植物体による吸収量 Xa_{last} は式 (6) によって導かれる.

$$Xa_{last} = Xs_{last} + (a_{last} - a_{now})V \quad (6)$$

ただし,

Xs_{last} : 前回調製した濃厚液による成分 X の供給量 (mg)

a_{last} : 前回補正前の培養液中の成分 X の濃度 (mg l^{-1})

a_{now} : 今回補正前の培養液中の成分 X の濃度 (mg l^{-1})

V : 培養液量 (l)

同様に前々回から前回までの成分 X の吸収量 Xa_{LBO} は式 (7) によって導かれる。

$$Xa_{LBO} = Xs_{LBO} + (a_{LBO} - a_{last})V \quad (7)$$

ただし、

Xs_{LBO} : 前々回調製した濃厚液による成分 X の供給量 (mg)

a_{LBO} : 前々回補正前の培養液中の成分 X の濃度 (mg l^{-1})

ここで、1 個体 1 日当たりの吸収量の増減比を RC (ratio of change) とすると式 (8) のように表される。

$$RC = \frac{Xa_{last}}{Xa_{LBO}} \times \frac{D_{LBO}}{D_{last}} \times \frac{N_{LBO}}{N_{last}} \quad (8)$$

ただし、

D_{LBO} : 前々回補正時から前回補正時までの補正間隔 (days)

D_{last} : 前回補正時から現在の補正間隔 (days)

N_{LBO} : 前々回補正時から前回補正時までの植物個体数 (plants)

N_{last} : 前回補正時の植物個体数 (plants)

現在から次回補正時までの吸収量 Xa_{next} を式 (9) と仮定する。

$$Xa_{next} = Xa_{last} \times RC \times \frac{D_{next} \cdot N_{next}}{D_{last} \cdot N_{last}} \quad (9)$$

ただし、

D_{next} : 次回補正時までの目標補正間隔 (days)

N_{next} : 次回補正時の予測植物個体数 (plants)

ゆえに、今回調製する濃厚液による成分 X の供給量 Xs_{next} は式 (10) のように表される。

$$\begin{aligned} Xs_{next} &= Xa_{next} + (a_{next} - a_{now})V \\ Xs_{next} &= \frac{(Xs_{last} + (a_{last} - a_{now})V)^2}{Xs_{LBO} + (a_{LBO} - a_{last})} \\ &\quad \times \frac{D_{LBO} \cdot D_{next} \cdot N_{LBO} \cdot N_{next}}{(D_{last} \cdot N_{last})^2} + (a_{next} - a_{now})V \end{aligned} \quad (10)$$

以上のようにして濃厚液調製に必要な各成分の量を算出した。

次に培養液調製に必要な肥料の種類とその量を、上記で求めた濃厚液調製に必要な各成分の量から “IonAdjuster” を用いて算出した。

本実験では、EC 制御法とイオン濃度制御法を組み合わせ新たなシステムの具現化を目的としたため、簡素な計算方法で行ったが、より高精度な養分吸収量の予測には日射量や気温などの環境要因も考慮する必要があり、栽培データの蓄積や解析が今後の課題である。

1. IIAS の運用試験

材料および方法

キュウリ (*Cucumis sativus* L.) 品種 ‘アルファー節成’ を供試し、2002 年 3 月 3 日に播種し、子葉展開まで 28℃ 恒温器内で管理した。子葉展開後の 3 月 18 日に シクスライトハウス内の容器 (60 cm × 30 cm × 20 cm) に移植し、本葉が 4 枚展開するまで湛液育苗した。培養液には 1/2 大塚 SA 処方 (大塚ハウス肥料) を用いた。4 月 17 日にベッド (400 cm × 36 cm × 21 cm, 地上高 55cm, 2 列) に株間 50 cm で 1 ベッド当たり 6 個体ずつ 2 ベッドに定植し、湛液型循環式水耕にて栽培した。各区の培養液量 (ベッド内 + タンク内) はボールタップを用いて常に 260 l 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。基本培養液処方は大塚 SA 処方とし、多量要素 (Table 3) と微量要素 (Table 4) を共に単肥 (NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KH_2PO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,

表3 培養液の多量要素組成
Table 3 Composition of macroelements in the nutrient solutions.

	Concentration (mg l^{-1})						
	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	K	Ca	Mg	$\text{SO}_4\text{-S}$
“Otsuka SA” prescription	237.0	8.0	45.8	398.5	164.4	36.2	47.3
Modified “Otsuka SA” prescription	237.0	3.0	45.8	398.5	164.4	36.2	53.0

表4 培養液の微量要素組成
Table 4 Composition of microelements in the nutrient solutions (mg l^{-1}).

	B	Mn	Zn	Cu	Mo	Fe
Micronutrient	0.5	0.5	0.05	0.02	0.01	3.0

H₃BO₃, MnCl₂ · 4H₂O, ZnSO₄ · 7H₂O, CuSO₄ · 5H₂O, NaMoO₄ · 2H₂O, EDTA-Fe)を用いて調製した。また、培養液のpH低下リスクを低減する (Kirimura and Inden, 2005) ために、最初の濃厚液はNO₃-N/NH₄-N比を29.63から74.62に変更した修正大塚SA処方に基づいて作成した。

培養液中の成分分析は、カチオン(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)は高速液体クロマトグラフ(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), アニオン(NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, Cl⁻)はイオン分析計(東亜ディーケーケー, IA-100, PCI-201Sカラム)を用いて行った。

培養液管理は濃厚液枯渇後にIIASで行い、EC値は、一方の試験区を1.75 dS m⁻¹の定値制御(set-point control, SPC)とし、もう一方の試験区はEC値を制御開始日(4月16日)から5月2日までは1.90 dS m⁻¹, 5月3日から5月16日までは2.0 dS m⁻¹, 5月17日から5月20日までは2.1 dS m⁻¹, 5月21日から6月17日までは2.2 dS m⁻¹と徐々に上昇させる制御法(rising control, RC)とした。なおSPC区の5月2日に調製した濃厚液は、機器不調のため最初の濃厚液と同じ組成の溶液とした。

図4.IIASシステムで制御した培養液のEC値とpHの推移
Fig. 4 Changes in EC and pH value in the nutrient solution controlled by IIAS.

なおEC制御にはSS式肥料管理機(シーアイ化成, AS-3)を用いた。培養液のpHとEC値の定期的な測定にはそれぞれpHメーター(堀場製作所, M-8)と電気伝導度計(東興化学研究所, TCX-90i)を用いた。

結果および考察

濃厚液調製は両試験区とも3回(SPC: 5月2, 7, 20日, RC: 4月25日, 5月7日, 23日)行った(Table 5)。PEISでの栽培でみられた培養液のECの変動(Inden *et al.*, 2001, Kubota *et al.*, 2001)は、EC制御装置の導入により解消された(Fig. 4)。

培養液のpHには大きな変動がみられなかった(Fig. 4)。濃厚液として追加投入した肥料のNO₃-N/NH₄-N比は10以上であり、キュウリ養液栽培における培養液のpH低下要因であるNH₄-Nの供給量は、NO₃-N/NH₄-N比の最低値が10以上、平均値が15以上であれば許容範囲内であると推測できる(Table 5, 6, Fig. 5)。

また、培養液中の各成分濃度の推移をみると、NH₄-NとPO₄-P, Mgを除く他の成分は安定して推移した(データ略)。特にNH₄-N濃度は5月7日に両試験区とも検出できないほどに低下した。この現象は、キュウリ栽培では培養液中にNH₄-Nが存在するうちはこれを優先的に吸収する傾向が強く(Ikeda and Osawa, 1981, Tsukagoshi, 2002), NH₄-N吸収量が追加供給量を上回っていたためと考えられる。

以上の結果から、IIASはPEISの課題であった培養液のpHとECの変動を抑制でき、また培養液中の各成分濃度の変動も抑制できたことから有効性が示された。

2. PEISとIIASの比較試験

材料および方法

キュウリ(*Cucumis sativus* L.)品種‘翠星節成2号’を供試し、2002年9月5日に播種し、10月8日に株間50 cm

表5 濃厚液中に含まれる各成分量(g)
Table 5 Content of macroelements in the stock solutions (g).

	Date	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N/NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
SPC	FSS	11.19	0.15	74.62	2.29	19.77	7.26	1.57	2.25
	May. 02	11.19	0.15	74.62	2.29	19.77	7.26	1.57	2.25
	May. 07	23.71	1.33	17.84	4.08	37.42	15.48	1.38	1.82
	May. 20	85.75	1.33	64.54	14.72	92.96	82.69	1.51	2.00
	Total	131.84	2.96	44.58	23.38	169.92	112.70	6.04	8.31
RC	FSS	11.19	0.15	74.62	2.29	19.77	7.26	1.57	2.25
	Apr. 25	17.55	0.55	31.89	9.36	39.08	10.36	2.06	2.72
	May. 07	44.49	4.09	10.88	1.67	53.63	31.42	8.34	11.00
	May. 23	115.56	7.43	15.55	1.21	100.44	107.44	0.00	2.71
	Total	188.80	12.22	15.45	14.54	212.92	156.48	11.97	18.68

FSS: First Stock Solution

表6 濃厚液中に含まれる各成分量(g)
Table 6 Content of macroelements in the stock solutions (g).

	Date	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N/NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
IIASL	FSS	11.85	0.40	29.63	2.29	19.93	8.22	1.81	2.65
	Oct. 17	8.89	0.60	14.84	10.25	28.79	3.74	1.57	2.07
	Oct. 29	14.77	11.45	1.29	0.00	0.00	4.75	0.00	0.00
	Nov. 05	18.15	7.22	2.51	0.00	24.58	3.03	0.00	0.00
	Nov. 08	16.05	0.00	—	0.00	36.11	4.45	0.00	0.00
	Nov. 24	5.60	0.00	—	5.31	23.73	6.08	0.50	3.35
	Total	75.31	19.68	3.83	17.84	133.13	30.27	3.88	8.07
IIAS	FSS	11.85	0.40	29.63	2.29	19.93	8.22	1.81	2.65
	Oct. 29	7.54	2.68	2.81	0.00	11.40	1.11	0.00	0.00
	Nov. 05	34.92	5.99	5.83	0.00	60.55	10.36	4.70	6.20
	Nov. 27	12.98	0.57	22.65	4.51	21.93	9.43	0.07	0.09
	Total	67.30	9.65	6.98	6.80	113.81	29.12	6.58	8.94
PEISL	Oct. 17	0.00	0.28	0.00	21.76	26.68	0.00	0.00	0.00
	Oct. 27	0.75	1.68	0.44	0.00	0.00	1.07	0.00	1.93
	Oct. 29	8.29	2.42	3.42	0.00	3.33	6.68	0.00	0.00
	Nov. 05	13.31	2.44	5.45	0.00	18.35	6.14	1.10	1.45
	Nov. 10	6.73	0.00	—	0.00	8.97	5.03	0.51	0.67
	Nov. 17	3.96	0.29	13.44	0.00	3.58	3.40	0.00	0.00
	Nov. 22	13.10	0.00	—	0.00	22.68	7.11	0.79	1.04
	Nov. 28	7.46	0.30	25.04	0.00	9.49	5.39	0.61	0.80
	Dec. 04	6.03	0.27	22.48	0.00	7.73	4.66	0.27	0.67
	Total	59.61	7.69	7.75	21.76	100.82	39.48	3.28	6.56

FSS: First Stock Solution

図5 IIASL区とIIAS区、PEISL区の培養液のpHの推移
Fig. 5 Changes in pH value in the nutrient solutions controlled by IIASL, IIAS and PEIS.

で各区1ベッドに6個体ずつ定植後、湛液型循環式水耕にて栽培を行った。前述のIIASでの栽培試験では培養液のpHの低下がみられなかったため、本実験の培養液の処方ではNH₄-Nの設定濃度が8 mg l⁻¹の大塚SA処方とした。また濃厚液調製に用いる単肥のリストにNH₄H₂PO₄を追加した。培養液の管理方法は、PEISを1区、IIASを2区の計3区とし、各区の培養液量は300 lとした。栽培の途中に培養液のpHが低下したため、以降NH₄-Nの供給制限を行ったIIASの区とPEISの区をそれぞれIIASL区、PEISL

区とした。IIASL区では11月5日に調製したNH₄-N含有率の高い濃厚液の使用を中止し、11月8日からNH₄-N濃度の設定値を0 mg l⁻¹とした濃厚液に切り換え、PEISL区では11月10日からNH₄-N濃度の設定値を1 mg l⁻¹に変更することでNH₄-Nの供給制限を行った。またIIASL区では培養液のpHに回復の傾向がみられなかったため、11月23日に0.1M KOH 200 mlを添加してpHの補正を行った。結果的にNH₄-Nの供給を制限しなかったIIASの区をIIAS区とした。培養液管理は、PEISL区では約1週間おきに手動投入による培養液中の各イオン濃度の補正を行い、IIASL区とIIAS区ではIIASに従いEC値が常に2.4 dS m⁻¹となるように制御した。その他の栽培方法についてはIIASの運用試験と同様に行った。

結果および考察

各処理区の補正回数はIIASL区5回(10月17, 29日, 11月5, 8, 24日), IIAS区3回(10月29日, 11月5, 27日), PEISL区9回(10月17, 27, 29日, 11月5, 10, 17, 22, 27日, 12月4日)であった(Table 6)。

IIASL区の補正回数がIIAS区よりも多くなったのは、IIASL区のEC制御装置の誤作動により栽培初期のEC値が実際の値よりも低く判断され、IIAS区よりも濃厚液が多く

注入されたためである。IIASにおける補正間隔が区内で同間隔でないのは、生育段階によって異なる養分吸収速度にIIASが対応できなかったためであり、改善の余地がある。一方、PEISL区では10月17日から10月24日の間の培養液中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度にほとんど変化がみられなかったため、10月22日に予定していた培養液の補正を行わなかった。しかし、10月24日から10月27日にかけて養分吸収量が急激に増加し、さらに10月29日には10月27日の補正前の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度よりも低くなったため、10月29日に培養液の補正を行った。

IIASL区とPEISL区の培養液のpHには、10月25日頃から下降傾向がみられた (Fig. 5)。従って、IIASL区では11月8日の濃厚液作成時から $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量を制限したが、培養液中に残存した $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高く (Fig. 6)、またpHの回復の兆候がみられなかったため、KOHによりpHの補正を行った。pH補正後に培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が速やかに低下したことから、pH補正前は低pHのため $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収が抑制されていたと考えられる (Matsumoto, 1991)。IIASL区ではIIAS上で $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収量が大きく増加したと判断され、2回目の補正時 (10月29日) に $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給比率が高くなり ($\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N} = 1.29$)、培養液のpHが低下したと考えられる。一方PEISL区のpHは培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が急速に低下すると間もなく短期間の内に上昇し、その後pH 5.5前後で推移した。PEISL区は補正間隔が週に一度であったため、一時的に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなるが直ちに低下し、同時に培養液のpHも低下した。従って、PEISL区でのpHの低下は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が一時的に過剰供給されたためと考えられる。これはKirimura and Inden (2005)と同様の結果となった。ただし、PEISL区の補正操作で供給した $\text{NH}_4\text{-N}$ の総量と $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比の値は、培養液のpH低下がみられなかったIIAS区とほぼ同じであった。これは培養液管理がリアルタイム制御でないことと、途中から培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の設定値を 1 mg l^{-1} に変更したことが関与している。特に培養液管理がリアルタイム制御でなかったことから、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収量が培養液更新回数に規定されて少なく、補正に使われた $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給比率が高くならなかったことが大きいと考えられる。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 供給制限後にみられるIIASL区とPEISL区の培養液のpH変化の差異は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給制限直前に示された培養液のpHの最低値の差異によるものと推測される。一般的に培養液のpHが適性範囲から外れると養分の有効性が低下するため (Tsukagoshi, 2002)、IIASL区ではpHが適性範囲よりも低下していたことにより養分吸収が阻害され、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の低下とその後のpHの上昇が遅延したと考えられる。IIAS区では、10月29日に調製した濃厚液によって

供給されたN源のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量比率が小さかったためにpHの低下がなかったと考えられる。これは補正計算をするタイミングによってIIAS区に供給されたN源のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量比率が小さかったためにpHの低下がなかったと考えられる。これは補正計算をするタイミングによってIIAS区における $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量が少なくなったためだと考えられる。IIASにおいて $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収量が少なく判断されるケースとしては、1) EC制御装置が稼働し、ある程度まとまっ

図6 IIASL区とIIAS区,PEISL区の培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の推移

Fig. 6 Changes in concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the nutrient solutions controlled by IIASL, IIAS and PEISL.

図7 IIASL区とIIAS区,PEISL区の培養液中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推移

Fig. 7 Changes in concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ in the nutrient solutions controlled by IIASL, IIAS and PEISL.

図8 IIASL区とIIAS区,PEISL区の培養液のEC値の推移
Fig. 8 Changes in EC value in the nutrient solutions controlled by IIASL, IIAS and PEISL.

た量の濃厚液が供給された直後に培養液の分析が行われたために、 $\text{NH}_4\text{-N}$ がある程度残存し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収が少ないように反映された場合と、2) 培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ が枯渇し、濃厚液によって $\text{NH}_4\text{-N}$ が十分に供給されず、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収が制限されたことが、次の補正までに吸収されると予測される量に反映され、次の補正までに供給される $\text{NH}_4\text{-N}$ の量が制限された場合が考えられる。従って逆に栽培初期の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収量の比率が大きいうように反映された場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の過剰供給が行われ、培養液の pH が低下すると考えられる。

本実験の結果より、肥料成分のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ については必ずしも初期の培養液濃度を維持することが作物の生育に良いとは限らないことが示された。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の管理は PEIS だけでなく IIAS においても濃度制御ではなく、量的制御または $\text{NO}_3\text{-N}$ に対する比率制御を採用するのが望ましいと考えられた。この問題については長期的・連続的な栽培による知見が少ないため、N 源の供給方法やその他の環境要因の影響についてさらなる調査が必要である。

培養液中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と EC 値の推移は IIASL 区と IIAS 区では安定していたが、PEISL 区では養分吸収が盛んな時期に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と EC 値に大きな変動がみられた (Fig. 7, 8)。

総収量は IIASL 区と IIAS 区に有意差はみられなかったが、IIASL 区と IIAS 区は PEISL 区よりも有意に多かった

図9 IIASL区とIIAS区,PEISL区におけるキュウリ1個体あたり累積収量

Fig. 9 Cumulative yield of cucumber fruits grown with nutrient solutions controlled by IIASL, IIAS and PEISL.

た (Fig. 9, Table 7). また、収量を収穫期別に比較すると、前期 (10月30日 - 11月14日) と後期 (12月1-14日) には有意差はみられなかったが、中期 (11月15-30日) には IIAS 区が PEISL 区より有意に多かった。IIASL 区の総収量は PEISL 区より多かったことから、IIAS によって培養液環境、特に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変動が緩やかになり、養分吸収量の多い中期に養分が十分に供給されたことが好結果につながったと考えられる。これまでの研究結果 (Inden *et al.*, 2001, Kubota *et al.*, 2001) から PEIS は EC 制御法よりも高品質多収であることが明白であるため、EC 制御法と PEIS, IIAS の三種の制御法の中では IIAS が最も優れているといえる。

総合考察

本研究の結果、PEIS における培地環境変動には、補正ごとにまとめて肥料が投入されることや、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 等の養分吸収特性などが関与しており、それに対し IIAS の利用と $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給制限により培地環境変動を抑制できる可能性が示された。これまでの研究結果 (Kirimura and Inden, 2005) から PEIS においては $\text{NH}_4\text{-N}$ を必ずしも初期の培養液濃度に維持することが、作物の生育に良いとは限らないことが示唆されていたが、IIAS においても同様な結果が得られた。またキュウリの水耕栽培においては培養液中の $\text{NO}_3\text{-N}$ / $\text{NH}_4\text{-N}$ 比よりも pH を適性範囲内に保つことの方が重要であるから (Moritsugu and Kawasaki, 1977)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の管理は PEIS だけでなく IIAS においても濃度制御ではなく量的制御または比率制御を採用するのが良いと考えられた。さらに IIAS の利用により、補正間隔の延長や培地環境の変動抑制による増収が認められた。補正間隔の延長は、培養液の分析回数や肥料調製回数の減少につながることから、システムの簡素化、ランニングコストの低減、省力化など普及における利点が大いと考えられる。植物工場用全自動システムの場合にも、IIAS を組み込むことにより補正間隔が延長され、機器の負担やコストの軽減が見込まれ、新たな培養液管理システムとしての利用価値があると考えられる。

今後は N 源の供給方法の検討やその他の環境要因のデータの収集・解析を行い、多くの作物で検証試験を進める

表7 培養液制御法の違いがキュウリの時期別収量に及ぼす影響(果数/株)

Table 7 Effect of control system of nutrient solution on the yield of cucumber in hydroponics (Number of fruits per plant).

Treatment	Early stage	Mid stage	Late stage	Total
IIASL	10.5 a ^z	16.2 ab	13.3 a	40.0 a
IIAS	9.0 a	20.0 a	11.3 a	40.3 a
PEISL	10.0 a	11.7 b	9.7 a	31.3 b

^z Different letters within columns represent significant differences by LSD test, (5% level).

とともに栽培システムの改良を行う予定である。さらに、養分吸収速度の変化に対応できるような養分吸収量予測法の検討や、濃厚液の残量がある場合でも新しい濃厚液を調製できるように改良する予定である。

引用文献

- Hashimoto, M., Udagawa, Y. 1991. Effect of control ion concentration of nutrient solution on growth and yield of strawberry plants 'Reiko' (in Japanese). Jour. Japan. Soc. Hort. Sci. 60 (SUPPL. 1): 382-383.
- Ikeda, H., Osawa, T., 1981. Nitrate- and ammonium-N absorption by vegetables from nutrient solution containing ammonium nitrate and the resultant change of solution pH, Jour. Japan. Soc. Hort. Sci. 50(2): 225-230.
- 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. 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. 73-74.
- Inden, H. (位田晴久) 1997. Management of the 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., Kitahara, T. 2000. Software for the automatic ion control of nutrient solutions. J. Soc. High Tech. Agric. 12(3): 176-181.
- Inden, H., Kirimura, M., Kubota, Y., Nakahara, T. 2001. Hydroponic culture of cucumber by ion concentration control method using mixed fertilizer (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. 2001 SHITA Annual Meeting (農業環境工学関連4学会2001年合同大会講演要旨), Ibaraki. 237.
- Inoue, J. 2000. Analytical instrument of nutrient solution "Culturyzer-mini" (in Japanese) (養液測定装置 Culturyzer-mini), Hydroponics, 14(1): 20-21.
- Kirimura, M., Inden, H. 2004. Optimization of calculation for the ion concentration control in hydroponics (in Japanese). J. Soc. High Tech. Agric. 16(4): 198-203.
- Kirimura, M., Inden, H. 2005. Effect of set point of NH_4N concentration on pH values in ion concentration controlled hydroponics of cucumber (in Japanese). J. SHITA 17(4): 199-204.
- 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. Soc. High Tech. Agric. 13(2): 104-109.
- Matsumoto, H. 1991. pH regulation in rhizosphere induced by plant (in Japanese). Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr. 62(5): 563-572.
- Moritsugu, M., Kawasaki, T. 1977. Production of hydroponic system that automatically adjusts pH of nutrient solution (in Japanese). Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr. 48(7, 8): 243-247.
- Nakahara, M., Ootsu, K., Inden, H. 2000. Continuous hydroponic culture of lettuce using nutrient solution controlled by ion concentration control method (in Japanese) (培養液のイオン濃度制御によるサラダナの連続栽培). In: Proc. 2000 SHITA Annual Meeting, Okayama. 174-175.
- 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.
- Savvas, D., Adamidis, K. 1999. Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. J. Plant Nutr. 22: 1415-1432.
- Takaichi, M., Nakano, Y., Gomi, A., Watanabe, S., Higashide, S., Kawashima, H. 2002. Growth and yield of tomato in rockwood culture with closed hydroponic system (in Japanese). Jour. Japan. Soc. Hort. Sci. 71 (SUPPL. 2): 351.
- 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.
- Udagawa, Y., Hashimoto, M. 1991. Nutrient elements concentration, growth and yield of strawberry plant 'Nyoho' grown under condition of different solution control (in Japanese). Jour. Japan. Soc. Hort. Sci. 60(SUPPL. 2): 292-293.