養液イオン濃度調製プログラムを使用したキュウリの栽培

久保田 豊^{1,2}・位田晴久¹・東 順正^{1*}・中原光久³

¹宮崎大学農学部 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

²鹿児島大学大学院連合農学研究科

³九州電力(株)総合研究所農業電化試験場 849-0922 佐賀市高木瀬東 1-10-1

*佐々木食品工業(株) 879-0615 大分県豊後高田市大字界 276

Hydroponic Culture of Cucumber Using the Software for Automatic Ion Control of Nutrient Solutions

Yutaka KUBOTA^{1,2}, Haruhisa INDEN¹, Yorimasa HIGASHI^{1*} and Teruhisa NAKAHARA³

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

²United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University

³Agricultural Electrification Testing Center, Kyushu Electric Power Co., Inc., Takagise-Higashi, Saga 849-0922, Japan

*Sasaki Foods Co., Ltd, Bungotakada, Ohita, 879-0615, Japan

Abstract

Using the developed software for the automatic ion control of nutrient solution ('IonAdjuster'), the hydroponic culture of cucumber (*Cucumis sativus* L.) was carried out. It was compared with the practical culture managed by EC value of the nutrient solution. In the ion concentration control method using 'IonAdjuster', each ion concentration of NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, K, Ca, Mg could be maintained around the set value except for a short while. In the EC control method, each ion concentration greatly fluctuated, this meant it shifted considerably from the initial value in the later stage of cultivation, and the ionic balance also collapsed. The value of pH decreased gradually as usual in the cucumber solution culture, however, adding the pH stabilization routine to the ion concentration control method could solve it. Though there was a little difference in early yield and total yield between the two methods, the first class fruit rate rose about 15% in the ion concentration control method, and the marketable yield also increased. In addition, the system using 'IonAdjuster', there are also some effects of environmental loading reduction by decreasing waste nutrient solution at renewal, fertilizer reduction, and labor saving of solution preparation, so it seems to be useful.

Keywords : hydroponics, nutrient solution, ion concentration, software program, cucumber

緒 言

養液栽培における一般的な培養液管理法は専ら電気伝導度(EC)を指標として行われ、長期間の栽培で組成が変化することには、定期的な培養液の全量交換により対

応している。しかし昨今の環境に対する意識の向上にともない、全量交換時の培養廃液による地下水のNO₃-Nイオン汚染などに対する社会の目は厳しくなりつつある。すでにヨーロッパでは規制が行われており¹⁾、日本でも遠からず実施されると考えられる。これらの規制に対処するため培養液のリサイクルを行うことが考えられ、各種の方法が試みられている²⁾。筆者らはこの問題に対し培養液のオートサンプリング、自動分析、各濃厚肥料溶

2001年1月16日受付

2001年2月7日受理

液の自動注入, などの自動化を視野に入れ, 長期間にわたり培養液の全量交換無しに培養液の組成や濃度を維持するソフトウェアである IonAdjuster (養液イオン濃度調製プログラム) を開発し, 評価・改良を行ってきた³⁻⁶⁾。

本報では手動サンプリング, 肥料の手動注入と併用してこのソフトウェアでキュウリを栽培し, 培養液中の各イオン濃度の変化や植物体に及ぼす影響を従来の EC に基づく制御法と比較し検討した結果について報告する。

材料および方法

栽培方法

キュウリ (*Cucumis sativus* L.) 品種 '永緑' (丸種) を供試した。1999 年 10 月 4 日に 25°C に設定した温度勾配恒温器 (日本医化器械, AD-100) で 24 時間催芽処理を行った後, パーミキュライト 2: パーライト 1 (v/v) を入れた育苗箱 (33×47×8 cm) に播種し, 昼温 (8:00-20:00) 28°C, 夜温 (20:00-8:00) 18°C で管理した。出芽後, 育苗箱を自然条件のビニルハウスへ移した。10 月 15 日に山崎キュウリ処方⁷⁾培養液を入れた容器に移植し, 本葉が 3 枚展開するまで湛液育苗した。11 月 2 日にシーアイ化成 SS 式果菜用ベッドを湛液用に改造したもの (400×36×21 cm, 地上高 62 cm, 4 列) に株間 50

cm, 1 ベッドあたり 7 個体定植し, 循環式湛液水耕山崎キュウリ処方で栽培を行った。培養液量は各区 (ベッド×2+タンク) 450 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養液の溶存酸素濃度を保った。整枝法は子づるつる下げ誘引とし, 18 節で摘心した。収穫した果実は外観より, A 品 (曲がり果実半径以下), B 品 (曲がり果実直径以下), C 品 (生理障害果) の 3 段階に分けた。

培養液管理

培養液制御法として, 筆者らが開発した IonAdjuster (養液イオン濃度調製プログラム)⁶⁾に改良を加えたもの (Fig. 1) によるイオン濃度制御区と, その対照として慣行の EC 制御区の 2 区を設けた。IonAdjuster の改良点は主に pH に関する部分である。植物体に吸収され, 組成基準より不足した各イオンの濃度を上昇させるため肥料を添加する場合, 使用する肥料の種類がある程度以上になると, その組み合わせと添加量の回答は無数に近く存在することになる。IonAdjuster においては Excel (マイクロソフト) に装備されているソルバーを利用し, その中から設定した複数の条件を満たし, かつ特定の変数が最大, 最小もしくは定数に一番近くなる組み合わせを回答として算出する。この設定する複数の条件の中に,

	A	D	E	G	H	I	K	L	AB	AC	AZ
	ppm	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	S	Ca	Mg	濃度 (mg/L)	濃度 (mM)	添加量 (g)
2	Ammonium Nitrate	11.6	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	68	0.85	30
3	Ammonium Phosphate, Monobasic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
4	Ammonium Sulfate	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
5	Ammonium Chloride	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
6	Potassium Phosphate, Monobasic	0.0	0.0	31.0	39.1	0.0	0.0	0.0	138	1.02	62
7	Potassium Phosphate, Dibasic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
8	Calcium Nitrate, Tetrahydrate	83.2	0.0	0.0	0.0	0.0	119.0	0.0	715	3.03	322
9	Calcium Chloride, Dihydrate	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
10	Potassium Nitrate	69.8	0.0	0.0	194.9	0.0	0.0	0.0	509	5.03	229
11	Potassium Sulfate	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
12	Potassium Chloride	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
13	Magnesium Sulfate, Heptahydrate	0.0	0.0	0.0	0.0	56.8	0.0	43.1	441	1.79	198
14	Sodium Nitrate	15.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94	1.11	43
15	Potassium Hydroxide	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0
124											
125		NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	S	Ca	Mg			
126	sum total (mg/L)	180.0	11.6	31.0	234.0	56.8	119.0	43.1			
253											
254		NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	S	Ca	Mg			養液量 (L)
255	set value (mg/L)	180.0	11.6	31.0	234.0	56.8	119.0	44.2			450

Fig. 1 Setting and calculation table of IonAdjuster on November 2, 1999. The volume of chemicals to be added is shown in AZ 2 to AZ 15 cells.

Table 1 Nutrient solution management of the ion concentration control method

Adjustment date	Set value of ion concentration (mg・L ⁻¹)					
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg
2 Nov.	182	14	31	234	140	48
5 Nov.	182	14	31	234	140	48
10 Nov.	182	14	31	234	140	48
15 Nov.	182	14	31	234	140	48
18 Nov.	182	14	31	234	140	48
22 Nov.	182	18	31	345	210	48
26 Nov.	182	28	31	345	210	48
30 Nov.	182	28	31	345	210	48
6 Dec.	182	28	31	345	210	48
9 Dec.	182	28	31	345	210	48
13 Dec.	182	28	31	345	210	48
16 Dec.	182	28	31	345	210	48
20 Dec.	182	28	31	345	210	48
26 Feb.	182	28	31	345	210	48
28 Dec.	182	28	31	345	210	48
31 Dec.	182	28	31	345	170	48
5 Jan.	182	28	31	345	170	48

添加する肥料全量中のイオンが“H⁺=OH⁻”となる条件を付け加えた。この条件は正確にはpHの制御をできるものではないが、少なくとも極端なpHの変動はある程度制限できると考えられたからである。培養液組成の基本設定としては前作での栽培結果と生育ステージによる肥料吸収量の変化を踏まえ、イオン制御区、EC制御区共に山崎キュウリ処方(NO₃-N 182, NH₄-N 14, PO₄-P 31, K 234, Ca 140, Mg 48, SO₄-S 64 mg・L⁻¹)とし、微量要素として大塚ハウス 5号(Fe 2.85, B 0.32, Mn 0.77, Zn 0.04, Cu 0.02, Mo 0.022 mg・L⁻¹)を用いた。EC制御区では培養液のEC値が常に2.2 dS・m⁻¹となるよう自動管理機(シーアイ化成, AS-3)で制御した。イオン制御区では週に1~2回培養液をサンプリング・分析し、それぞれのイオン濃度をプログラムに入力し、得られた回答に基づいて薬品を注入し制御を行った。前作での栽培結果と生育時期による吸収量の変化を踏まえ設定イオン濃度を適宜変更した(Table 1)。制御対象イオンは硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン、カリウム、マグネシウム、カルシウムとした。イオン濃度検出はアニオンは比色定量法、カチオンはイオンクロマトグラフィー法(東ソー, EC 8020 および TSKgel IC-Cation I/II)を用いた。

結 果

培養液中のイオン濃度

硝酸態窒素：イオン制御区では11/30まで目標値を上

回って推移したが、それ以降は1週間ごとの調整によりほぼ目標値に復帰した(Fig. 2)。EC制御区では栽培中期以降は組成基準値を上回って推移した。

アンモニア態窒素：イオン制御区では11/22から12/13までは目標値を下回ったが、それ以外の期間はほぼ目標値に復帰した。EC制御区では栽培中期以降はほぼ0に近い値で推移した。

リン：イオン制御区では栽培期間を通じて調整によりほぼ目標値に復帰した。EC制御区では若干の濃度変動が栽培期間を通じてみられた。

カリウム：イオン制御区では栽培後期の一時期を除いて調整によりほぼ目標値に復帰した。EC制御区では11/10から11/26の間は組成基準値よりもかなり低い値となった。

カルシウム：イオン制御区では11/15までは目標値の変更に伴うばらつきがみられたが、それ以降は調整によりほぼ目標値に復帰した。また栽培後期になるに従い植物体の吸収量が増加する傾向がみられた。EC制御区では11/15以降組成基準値よりもかなり高い値で推移した。

マグネシウム：イオン制御区では11/10以外は調整によりほぼ目標値に復帰した。EC制御区では11/5, 11/10に組成基準値を大きく上回った後すぐに減少し、その後は組成基準値を超えたまま増加する傾向がみられた。

pH

イオン制御区では11/22まではソルバー中でpHを調整する条件の優先順位を各イオン濃度の調整条件より下位に設定していたため、pHが低下し続けた(Fig. 3)。

Fig. 2 Changes in concentration of major elements in the nutrient solution of ion control method and EC control method. Gray line shows the set value of concentration of each element of the ion control method. Dotted line shows the initial value of concentration of each element of the EC control method.
 —■— Ion control method —○— EC control method

Fig. 3 Changes in pH values in the nutrient solution of ion control method and EC control method.

—■— Ion control method
—○— EC control method

Fig. 4 Effect of the EC control method and the ion control method on fruit quality and yield by growing stage.

11/22にNaOHを添加してpHの回復を図ると共に、プログラムを見直しpH調整条件の優先順位を最上位に移動させた。その結果、11/23以降はpHはほぼ6.5から7.0の範囲で安定して推移した。EC制御区でもpHの低下がみられ、11/23、12/7、12/30の3回NaOHを添加してpHの上昇を図ったが、11/26から12/6までの期間はpH 4.7前後で推移し、その後も6.0前後とイオン制御区よりも低い値で推移した。

収穫果数、果実品質

イオン制御区とEC制御区の間で総収穫果数・各期収穫果数に差はみられなかった。A品割合は収穫初期には両区に差はなかったが、中期、後期ではイオン制御区の方が高くなった。総収穫果数に対する総C品割合はイオン制御区の方が9.0%低く、総A品割合は14.9%高くなった(Fig. 4)。

考 察

キュウリの養分吸収量は作型・栽培環境などによって異なるが、一般的に生育量に比例して増大する。また収

穫期になるとKやPの吸収量が多くなる。これは培養液中のK、Pの吸収が容易であると同時に、キュウリのように生育中期以降に果実が連続して収穫される作物では果実中の存在比が高いKが多く吸収されるためである。その他キュウリでは生育後期に培養液中のCa、Mgの濃度が上昇する例が多く、培養液のpHと無関係に $\text{NH}_4\text{-N}$ を優先的に吸収するとされている⁸⁾。さらにキュウリの NO_3 と NH_4 の比率の好適範囲は NH_4 が NO_3 の1/3以下であるという報告もある⁹⁾。キュウリの養分吸収にはこのような特徴があるため、培養液中のイオンバランスやpHが変動し、さまざまな生理障害が発生する。

イオン制御区において $\text{PO}_4\text{-P}$ は栽培前半はEC制御区とほぼ同様の変動パターンを示したが、栽培後期には植物体の吸収がEC制御区より多く、変動が大きくなった。Kは栽培初期にEC制御区での濃度が大きく落ち込んだがイオン制御区ではほぼ設定値を維持した。Ca、Mgはイオン制御区では生育後期も吸収されていた。これはイオンバランスが良く、カチオン同士の拮抗作用が起きにくかったためではないかと考えられる。前作の結果より $\text{NH}_4\text{-N}$ の設定値を吸収が多くなると考えられる中期以降に高くしたが、植物体の吸収が予想以上に早く設定値の半分以下の濃度となった。しかしEC制御区と比較すると植物体の要求に応えられたと考えられる。イオン制御区では1週間毎の調整でおおむね設定したイオン濃度を保つことができた。キュウリ栽培における養液のpHは6.0~6.5が最適で、5.0~7.0の範囲なら生育に影響がないとされている。本実験の後半ではプログラムの改良によりpHが安定化するようにしたが、まだ完全なものではなく、アルカリ性薬品の添加を考慮する必要があると思われる。これは補給するイオンのうち $\text{NO}_3\text{-N}$ が大きく不足した場合、一般的な肥料塩だけでは不足分を補充することができず、本ソフトウェアでは NaNO_3 を大量に補充する回答が示されるためである。ナトリウムイオンは他のイオンに比べて植物体の吸収量は非常に少なく、培養液調製から時間が経過するに従い培養液中の全イオン中に占める割合が増加する。その結果ナトリウムイオンを含めたカチオンが過剰に存在することとなったことがpH低下の一因と考えられる。池田らの報告¹⁰⁾によれば施与する窒素分のうち、アンモニア態窒素の比率が高くなるとpH低下の傾向が強くなる。これらの問題には現在ソフトウェアのみでの対処は難しいと考えられるので、張らの報告^{11,12)}にあるイオン交換能を持つ資材の培養液中への混入や、篠原らの報告¹³⁾にある重炭酸イオン濃度の能動的調整といった対策など

を検討する必要がある。この方法では $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸収が抑制され、カチオンの吸収が促進されるので、pH の急激な低下が起こりにくいと考えられる。また、池田らの報告¹⁴⁾では、pH 7 の条件下では慣行施与濃度の窒素分のうち半分までアンモニア態窒素に置き換えても地上部乾物重に大きな差はなく、植物体中の硝酸態窒素を低濃度にする事が可能である。これらのことを踏まえ、よりイオン濃度制御に適した生育ステージ別培養液処方が望まれる。

果実に関しては、収穫中期から後期にかけてイオン制御区では A 品の、EC 制御区では C 品の収穫果数が増加した。C 品は市場価値が無いにも関わらず担果負担はかかるため、増加すると草勢低下を招きさらに生理障害果が発生しやすくなる。これは収穫が進むにつれより顕著となった。摘果するとしても無駄な労力負担となる。それに対し、イオン濃度制御区では曲がりや生理障害果の発生程度が小さく可販収量が増加し、果実品質改善効果が認められた。

以上のように培養液のイオン濃度制御法は従来の EC 制御法に比べ、改良の余地はまだあるもののキュウリをはじめいろいろな作物の養液栽培において有効と考えられ、他の作物でも検討中である。

引用文献

- 1) 糠谷 明：オランダにおける排水の規制に関して、ハイドロポニックス，5(1)：3-5(1991)
- 2) Papadopoulos, A. P., Hao, X., Tu, J. C. and Zheng, J., Tomato production in open or closed rockwool culture system with NFT or rockwool nutrient feedings, Acta Horticulturae 481：89-96(1999)
- 3) 位田晴久，久保田 豊，田中豊秀：培養液調整のための半自動プログラムの開発，園学雑，64(別1)：30-31(1995)
- 4) 位田晴久，久保田 豊，田中豊秀：培養液調整のための半自動プログラムの開発(第2報)マンマシ
- ンインターフェースの改良および演算時間の短縮について，園学雑，64(別2)：38-39(1995)
- 5) 位田晴久，久保田 豊，田中豊秀：パソコンによる培養液濃度の自動調節について，日本植物工場学会平成8年度大会学術講演要旨集，pp.73-74(1996)
- 6) Inden, H., Kubota, Y., Okamoto, K. and Kitahara, K.: Software for the automatic ion control of nutrient solutions, J. SHITA, 12(3)：22-27(2000)
- 7) 山崎肯哉，鈴木芳夫，篠原 温：主要野菜の養液栽培(水耕)に関する研究，特に培養液管理とみかけの吸収濃度(n/w)について，東教大農学部紀要，22：53-100(1976)
- 8) 但野利秋，田中 明：アンモニア態および硝酸態窒素適応性の作物種間差-1-生育初期におけるアンモニア態および硝酸態窒素選択吸収能と生育反応-比較植物栄養に関する研究，土肥誌47(7)：321-328(1976)
- 9) 安井秀夫，本田藤雄：野菜の生育制御に関する生態学的研究-I 野菜の生長解析，野菜試報告 C3：17-50(1977)
- 10) 池田英男，大沢孝也：水耕培養液中の NO_3 と NH_4 の濃度並びに比率が野菜の生育，葉中 N 成分及び培養液の pH に及ぼす影響，園学雑，52(2)：159-166(1983)
- 11) 張 洪基，福山寿雄，逸見彰男，橋本 康：人工ゼオライト(アルカリ処理した石灰)の養液栽培への有効利用(第2報)-温室メロンの育苗期における Ca 型人工ゼオライト添加が生育に及ぼす影響-，植物工場学会誌，7(4)：216-223(1995)
- 12) 張 洪基，福山寿雄，逸見彰男，橋本 康：メロンの養液栽培に及ぼす各種イオン交換添加剤の影響，植物工場学会誌，8(1)：28-34(1996)
- 13) 篠原 温，正森啓司，塚越 覚，丸尾 達，伊藤 正：養液栽培における培養液中の重炭酸イオンの測定および調整の方法に関する研究，千葉大園学報，51：1-6(1997)
- 14) 池田英男，大沢孝也：施用窒素形態とその野菜の適応性(第1報)水耕栽培において硝酸，アンモニア，亜硝酸を窒素源とした果菜の生育並びに窒素同化，園学雑，47(4)：454-462(1979)