

イオン濃度制御法を用いた養液栽培に関する研究

霧村 雅昭

2006

Studies on the hydroponics using the ion control system

Masaaki Kirimura

2006

目次

緒言	1
第1章 イオン濃度制御養液栽培における培養液補正計算の最適化	2
第2章 イオン濃度制御キュウリ養液栽培において $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度設定値が 培養液の pH 変動に及ぼす影響	10
実験 1. イオン濃度制御法と EC 制御法の比較	10
実験 2. $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給制限による培養液 pH の安定化	12
総合考察	13
第3章 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 (IIAS: Integrated IonAdjuster System) の開発	15
開発	15
栽培試験	18
実験 1. キュウリ養液栽培での IIA システムの運用試験	18
実験 2. PEI システムと IIA システムの比較実験	20
総合考察	22
第4章 イオン濃度制御キュウリ養液栽培における $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給方法の検討	32
実験 1. キュウリ水耕栽培における培養液の初期 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収速度と 培養液 pH の変動に及ぼす影響	32
実験 2. IIAS を用いたキュウリ養液栽培における $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給方法の検討	34
第5章 イオン濃度制御法 IIAS (Integrated IonAdjuster System) における養分吸収量予測法の検討	46
実験 1. キュウリの積算養分吸収量予測法の検討 —First Calculation と Second Calculation, Third Calculation の比較—	46
実験 2. キュウリの積算養分吸収量予測法の検討 —三次回帰式による養分吸収予測法と実用化試験—	47
実験 3. キュウリ養液栽培における ECCS と PEIS, IIAS, 三種の培養液管理法の比較ならびに $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給方法の実証試験	50
総合考察	64
総括	68
要旨	73
Summary	74
謝辞	76
引用文献	77

緒言

養液栽培は土壌の病害虫や塩類集積による連作障害の心配がないこと、作物の収量や品質の向上が望めることなどから広く世界中で施設園芸にとどまらず露地栽培でも行われている優れた栽培技術である。さらに植物工場や将来の宇宙農業を意識した“人工的な閉鎖生態系”いわゆる CELSS (Controlled Ecological Life Support System) においても採用されている。また食糧問題の解決策である乾燥地帯や砂漠地帯にある発展途上国での食料生産や都市型農業を実現する技術として期待されている (Schwarz, 2003)

養液栽培においては、培養液管理は作物の収量や品質に大きな影響を与えるため特に重要である。その最適管理には培養液の組成・濃度を作物の種類・生育段階に応じて調整することが必要であるが、肥料塩混合の計算と手間が煩雑すぎ、既成の全国一律の標準処方を経営時期に関係なく採用しているのが現状である。そのため、培養液の成分バランスと植物体による各成分の吸収量にずれが生じると、組成やpHが大きく変動し、生育遅延や生理障害の発生、培養液交換の必要性が生じ、培養液無交換による長期的な栽培は不可能となる (Lopez *et al.*, 1996; Zekki *et al.*, 1996)。また多量の廃培養液が生じた場合、廃培養液中に含まれるNO₃やPO₄イオンによる湖沼や河川、地下水の汚染が懸念される。

その様な背景から、近年「環境負荷の少ない生産技術」への志向が高まり、排液処理システムを導入した閉鎖系への転換 (Raviv *et al.*, 1998; Okano *et al.*, 1999; Savvas, 2000; Mine, 2001; Savvas and Gizas, 2002) が検討されるようになってきた。著者らの研究グループは早くから、慣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 (Graves, 1983) では、培養液組成のアンバランスを補正するため定期的な培養液の交換が不可避で環境汚染につながることから、新たな培養液管理法開発の必要性を唱えた (Inden, 1997)。そして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、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)。

これらの成果を踏まえ、さらに培養液管理における省力化や自動化、システムコストの削減、生育の向上を図り、イオン濃度制御法の生産農家への普及性を高めることを目的として、1) イオン濃度制御養液栽培における培養液補正計算の最適化、2) 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 変動に及ぼす影響の調査、3) 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 (IIAS) の開発について研究を行った。

第1章 イオン濃度制御養液栽培における培養液補正計算の最適化

当研究室では培養液の各要素の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、IonAdjuster）”を開発し、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）（Fig. 1-1）を考案した（特開 2001-103855）。本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が多くて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。しかし、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を用い、手動で肥料を注入することもイオン濃度制御が行える。

本研究では、インテリジェントシステムを普及させるため、これまでの実証試験で明らかになった種々の問題点について検討し、改良を図った。即ち、リアルタイム制御時には濃厚液が極微量ずつ短間隔で注入されるため、無視して良かった各イオン濃度の変動が、手動注入では無視できなくなり得る。従来“IonAdjuster”による培養液補正の計算では、プログラムが時によりある特定の成分、 $\text{NH}_4\text{-N}$ や Mg について設定濃度よりかなりずれた値を回答することがあった。例えば、設定濃度の低い $\text{NH}_4\text{-N}$ が倍以上の濃度で、他の成分についてはほぼ設定濃度通りという組み合わせを指示する場合があります、その時には、培養液中の各成分の比率がアンバランスになってしまう。そこで各成分について設定濃度からのずれ（誤差）を少なくするため、“IonAdjuster”の補正精度のプログラムに改良を加えた。改良点は、新たに投入目標値に一定範囲の許容誤差を設け、その範囲に補正するために必要な肥料の種類と最少肥料量を求めるようにしたことである。しかし、誤差を許容範囲内に抑えることができない場合にエラーが発生することや、誤差の特定成分への集中の緩和がまだ不十分であるなど問題があった。そこで改善策として、最小二乗法（Tajima and Kojima, 1986）を用いて各成分の誤差を分散させ、培養液中の成分バランスを保つことを試みた。

計算法

培養液補正に必要な肥料量を求める際に、「従来法」と「許容誤差法」、「最小二乗法」の3種の計算法を“IonAdjuster”に組み込み、その精度について比較検討した。

「従来法」は培養液の分析結果と補正後の各成分の目標濃度（ mg l^{-1} ）を入力すると、「培養液補正後の各成分の濃度誤差の総和」と「使用する肥料量」が最も小さくなる解を求めるものである。

「許容誤差法」は「従来法」の各成分の投入量目標値に20%の補正許容誤差を設け、計算されることにした。これにより「従来法」では誤差がある特定の成分に集中し目標値の20%以上となることがあったが、その成分の誤差を20%以下に抑え、他の成分に誤差を分散させることを試みた。

「最小二乗法」は誤差を「許容誤差法」以上にバランス良く分散させるために、培養

液の各成分の濃度設定値を分母とし、「各成分の投入量計算結果－各成分の投入目標値」の二乗を分子とした値の総和 S

$$S = \sum \frac{(\text{投入量計算結果} - \text{投入量目標値})^2}{\text{培養液濃度設定値}}$$

が最小となるよう最小二乗法を組み込み、設定値が比較的低濃度である成分の補正精度を向上させ、各成分の誤差バランスを改善することを試みた。

補正対象のデータには、2002年3月から行った手動管理によるキュウリの水耕栽培における補正前の培養液の実測値 23 サンプル (Table 1-1) を用い、大塚 SA 処方 (大塚化学 (株), Table 1-1) への補正計算を行った。

その他のパターンとして、実測データにおける各成分の最大値と最小値の範囲で乱数を発生させ、50 サンプルのデータを作成し、補正計算を行った。

次に、培養液の補正を必要とする目安である培養液中の各成分の設定値からの誤差 $\pm 20\%$ の範囲と、設定値から実測値の最小値の範囲で乱数を発生させ、それぞれ 50 サンプルのデータを作成し、補正計算を行った。

結果

1. 実測値 23 サンプルを用いた場合

1) 設定値と補正後の値との絶対誤差 (mg l^{-1}) からの見解

「従来法」では、誤差の平均 (Fig. 1-2) と誤差範囲 (最大値と最小値の差, Table 1-2) のいずれもが $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度で最も大きく、ついで $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度で大きかった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度では誤差の平均が -7.5 付近と比較的正確に補正できており、また誤差の標準偏差が大きかったことから、正確に補正できる場合と補正がうまくできない場合との差が大きい、即ち計算結果にばらつきがあるといえる。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ でも同様な傾向がみられた。このように「従来法」では $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の補正に問題があった。

「許容誤差法」では $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の誤差の標準偏差が従来法よりも小さくなったことから (Fig. 1-2)、計算結果のばらつきは小さくなったといえるが、K と Ca の標準偏差は大きくなった (Fig. 1-2)。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Mg 濃度では「従来法」よりも誤差範囲が小さくなったことから、これらの成分に集中していた誤差が他の成分に分散されたと考えられる (Table 2)。

「最小二乗法」では $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Mg 濃度の誤差の標準偏差が他の二法よりも小さくなり、一方、K と Ca の標準偏差は「従来法」よりも大きくなった (Fig. 1-2)。

三法の計算結果をまとめると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Mg の成分では「最小二乗法」、「許容誤差法」、「従来法」の順に、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と K、Ca では「従来法」、「最小二乗法」、「許容誤差法」の順に補正精度が高い傾向がみられた (Table 1-2)。また、 $\text{SO}_4\text{-S}$ ではほとんど差がみられなかった。これは補正対象のデータの中で、 $\text{SO}_4\text{-S}$ 濃度が他の成分と異なり、設定値よりも高い場合に補正対象にならなかったことが原因と考えられる。

誤差の成分間での偏り具合をみるために、計算後に各成分で発生する誤差 (ERR)

の標準偏差 (SD_{ERR}) を基に成分間の標準偏差 ($SD_{element}$) を以下の様に求めると、

$$SD_{ERR} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ERR_i - \overline{ERR})^2}$$
$$SD_{element} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (SD_{ERRk} - \overline{SD_{ERR}})^2}$$

X_i : 変数= ERR_i : 計算後に各成分で発生する誤差, n : 計算に用いた培養液のサンプル数, SD_{ERRk} : 各成分における標準偏差, N : 培養液の補正計算を行った成分数

「従来法」が最も小さく、ついで、「最小二乗法」、「許容誤差法」の順となり (Table 1-4)、濃度のみに注目すると、「従来法」が最も成分間の偏りの小さい計算法であると判断してしまうおそれがあると考えられた。

2) 各成分における設定値と補正後の値との相対誤差 (%) からの見解

「従来法」では補正後の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が設定値の 4 倍以上になる場合があり、誤差が $\text{NH}_4\text{-N}$ と Mg に集中した (Fig. 1-3)。「許容誤差法」では従来法に比べ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度への誤差の集中が緩和されたが (Fig. 1-3)、設定許容誤差である 20%以上の誤差が生じる場合もあった (Table 1-3)。「最小二乗法」では $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度への誤差の集中がみられず (Fig. 1-3)、最大で $\text{PO}_4\text{-P}$ 23%, Mg 16%, Ca 11%の誤差を生じたが、他の成分では $\pm 10\%$ の範囲に補正することが可能であった (Table 1-3)。誤差の成分間での偏り具合をみるために、成分間の標準偏差 ($SD_{element}$) を求めると、「従来法」>「許容誤差法」>「最小二乗法」となり、「最小二乗法」による計算が成分間でばらつきに偏りがなく、最もバランス良く補正できると考えられた (Table 1-4)。

2. 実測データにおける最大値と最小値間で発生させた乱数をデータに用いた場合

培養液サンプルとして乱数を用い補正計算を行ってみたところ、実測データとほぼ同様の傾向がみられた。絶対誤差においては若干異なる結果となったが、相対誤差 (%) では「従来法」で $\text{NH}_4\text{-N}$ に誤差が集中し、「許容誤差法」で誤差が各成分に分散され、「最小二乗法」で各成分の標準偏差が小さくなった。また、「許容誤差法」と「最小二乗法」では有意差はみられなかったものの、「従来法」よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ の補正誤差が有意に小さくなった (データ略)。各成分の誤差の標準偏差から各成分間の標準偏差を求めると「最小二乗法」<「許容誤差法」<「従来法」となり、あらゆる培養液組成パターンで「最小二乗法」による補正計算が優れている結果となった (Table 1-4)。

特に、手動によるイオン濃度制御の場合、培養液組成の変動は設定値より大きくなることは希で、最小値から設定値の間であることが多く (Table 1-1)、その補正計算の結果は Fig. 1-3 と同様な傾向がみられた。また各成分の誤差の標準偏差から成分間の標準偏差を求めた結果も、「最小二乗法」<「許容誤差法」<「従来法」となり、「最小二乗法」が最もサンプルの影響を受けず、最もばらつきが小さい結果となった。

考察

以上のように、「従来法」では濃度 (mg l^{-1}) に基づいて補正を行うため、特定の成分に誤差が集中する傾向があり、特に設定濃度が低い $\text{NH}_4\text{-N}$ に関しては一時的であるにせよ、設定値の4倍の濃度になる可能性があることを明らかにした。このことから「従来法」では $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量を完全に制御できているとは言えず、もし $\text{NH}_4\text{-N}$ が設定値よりも多量に供給された場合には、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を優先吸収するイチゴやキュウリ、メロンなどの栽培時には培養液の pH が著しく低下し (Ikeda and Osawa, 1981)、逆に $\text{NH}_4\text{-N}$ が枯渇し窒素源が $\text{NO}_3\text{-N}$ のみになると pH は上昇し (Tsukagoshi, 2002)、結果的に植物体の生育阻害を引き起こす危険性がある (Ikeda and Osawa, 1983)。培養液の pH 変化を抑制するために自動 pH 調整水耕装置 (Moritsugu, 1977) の利用も考えられるが、pH 調製に使用する酸やアルカリ溶液と同時に $\text{NO}_3\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$, K, Na が添加されることとなり、培養液組成の乱れやシステムコストの上昇、管理の複雑化などの問題が浮上してくる。

一方、「最小二乗法」では各成分の設定値の大きさを考慮し、各成分の設定値に対する誤差比率の和を最小化することにより、特定の成分への誤差の集中を回避することができた。そこで「最小二乗法」を“IonAdjuster”に組み込むことにより、より精度の高い培養液管理が可能となった。特に培養液組成の補正を手動で行う際には、リアルタイム補正を行うことができないために補正間隔が長くなり、完全自動制御よりも培養液濃度が低下する。そのような場合にも培養液中の特定成分に補正誤差が偏らず、バランスの取れた培養液組成へ濃度補正することが可能となった。

また、これまでもイオン濃度制御法を用いたイチゴの栽培が行われ、イオン濃度制御法の有効性が示されているが (Hashimoto and Utagawa, 1991; Utagawa and Hashimoto, 1991)、その際の培養液組成割合の推移をみると EC 制御法で起こる特定成分の枯渇は回避されるが、培養液中の $\text{NO}_3\text{-N}$ と Ca の組成比率の制御が不完全であった。本研究の結果、培養液組成を目的の濃度に補正する精度が向上したことから、今後この手法を用いて、より緻密な培養液組成管理を行った栽培実験が行えると考えられる。また、植物体の生育段階に応じた培養液組成の変更も精度良く容易に行え、付加価値のある新たな培養液管理法が行えると考えられる。

Table 1-1

Statistical data of element concentrations of 23 nutrient solution samples used for compensating calculation to the composition of "Otsuka SA" prescription.

	Concentration (mg l ⁻¹)						
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
Max.	219.8	8.2	56.3	370.6	182.0	42.0	72.1
Min.	145.3	0.0	0.0	255.5	113.3	25.6	39.7
Average	179.4	4.7	32.2	313.8	133.9	30.7	49.6
S.D. ^z	17.5	2.4	15.8	36.8	15.4	4.1	9.5
SA ^y	237.0	8.0	45.8	398.5	164.4	36.2	53.0

S.D.^z: Standard Deviation

SA^y: " Otsuka SA " prescription

Table 1-2

The maximum and the minimum of errors between the target and the output concentration in each element when 23 nutrient solution samples described in Table1 were used for compensating calculation.

Method		Concentration (mg l ⁻¹)						
		NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
Conventional	Max.	19.05	24.83	10.49	0.00	17.64	5.78	19.09
	Min.	-38.54	-3.60	0.00	0.00	0.00	-9.05	0.00
Tolerance	Max.	11.75	0.94	10.49	22.53	28.25	5.78	19.09
	Min.	-42.11	-6.64	-9.16	-28.59	-10.22	-6.49	-2.66
Least Square	Max.	8.97	0.15	10.49	39.70	17.64	5.78	19.09
	Min.	-22.86	-0.04	-1.52	-15.53	-6.41	-5.03	-2.37

Table 1-3

The maximum and the minimum element concentration of 23 nutrient solution samples indicated as relative value to the target concentration after compensation by respective calculating method (%).

Method		NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
Conventional	Max	108.04	410.39	122.90	100.00	110.73	115.96	136.02
	Min	83.74	55.04	100.00	100.00	100.00	74.99	100.00
Tolerance	Max	104.96	111.73	122.90	105.65	117.18	115.96	136.02
	Min	82.23	16.94	80.00	92.82	93.78	82.08	94.99
Least Square	Max	103.78	101.94	122.90	109.96	110.73	115.96	136.02
	Min	90.36	99.51	96.68	96.10	96.10	86.11	95.52

Table 1-4

Standard deviation from standard deviations of errors in each element calculated from the data by respective calculating method.

Method	Original data		Max-Min Random		±20%Random		Set-Min Random	
	mg·L ⁻¹	%	mg L ⁻¹	%	mg L ⁻¹	%	mg L ⁻¹	%
Conventional	4.16	37.72	7.16	49.17	11.68	5.70	5.96	17.34
Tolerance	5.32	5.34	5.46	26.91	13.22	2.03	5.92	9.61
Least Square	4.69	2.99	7.56	3.73	12.62	2.01	7.72	2.09

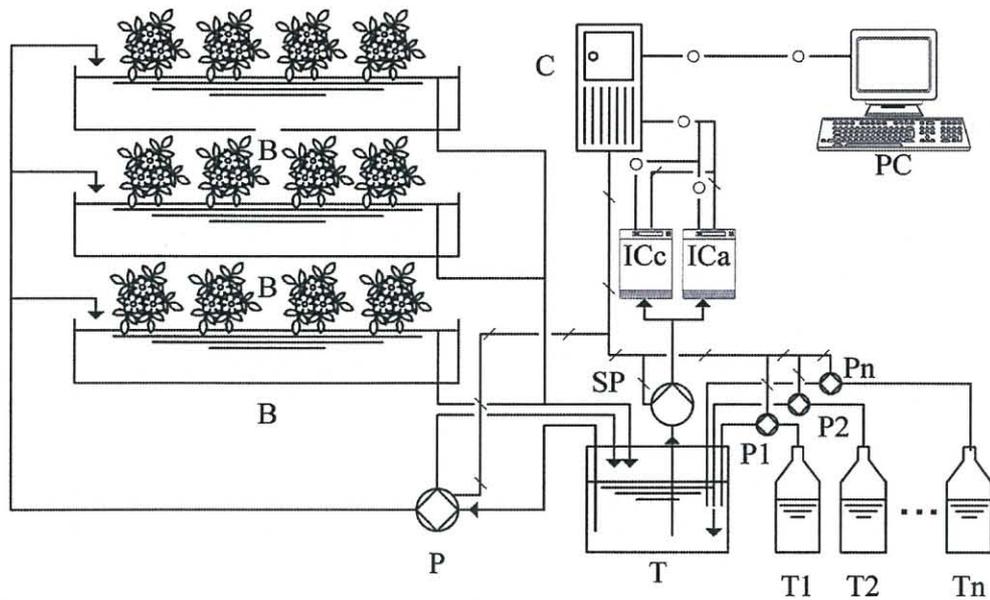


Fig.1-1 Schematic diagram of “Intelligent System”.

B	Culture bed	ICa	Ion chromatography for ANION
P	Circulation / diffusion pump	ICc	Ion chromatography for CATION
P1-n	Injection pump	C	Control board
SP	Sampling pump	PC	Intensive surveillance equipment
T	Nutrient solution storage tank	—/—	Signal
T1-n	Conc. fertilizer solution tank	-○-	Data

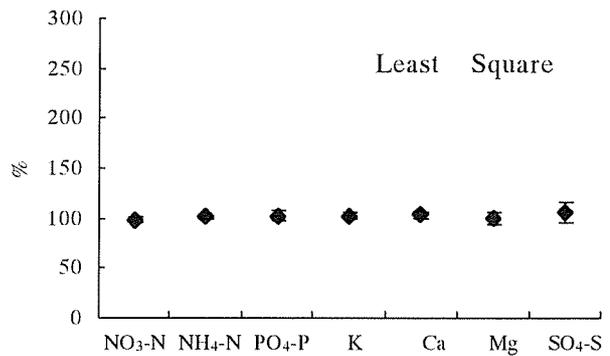
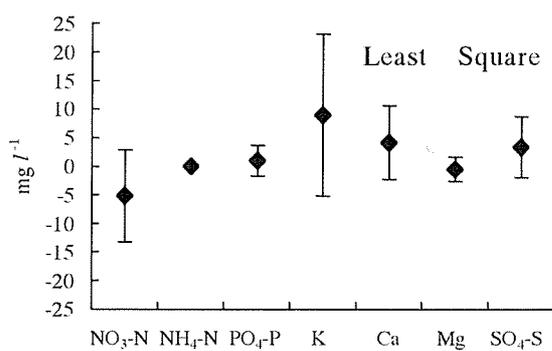
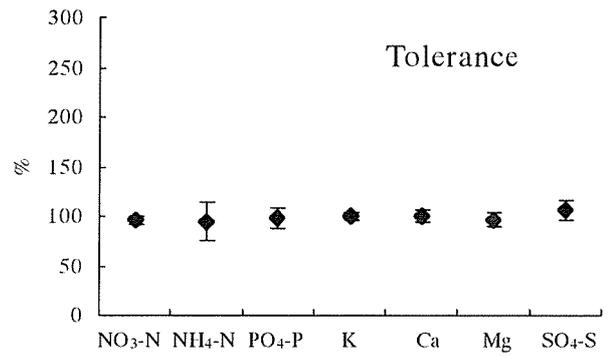
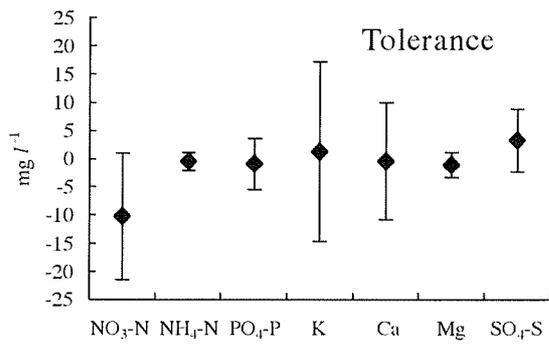
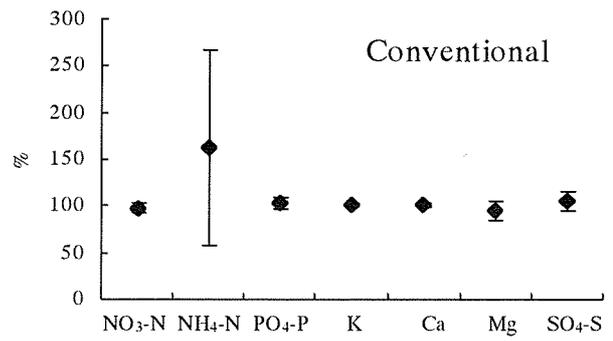
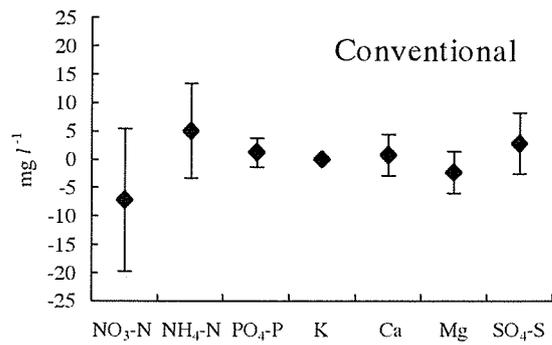


Fig.1-2 The error between the compensated result by respective calculating methods and the set point (mg L⁻¹). The vertical bars indicate ±S.D.

Fig.1-3 The result of compensation by three kinds of method (%).The vertical bars indicate ±S.D.

第2章 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

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; Tsukagoshi, 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、SO₄-S や PO₄-P、NO₃-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 SO₄-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℃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℃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 2-1) 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 式果菜用ベッドを湛液式に改造したもの (400cm×36cm×21cm, 地上高 62cm, 4 列) に定植した。春夏作は株間 50cm, 1 ベッド当たり 7 個体、秋冬作は株間 60cm, 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 dm³，秋冬作は 530 dm³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。果実は果長 22 cm 前後で収穫し，国の標準規格を参考に A 品（曲がりの程度が 1.5cm 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 3.0~5.0cm），不可販果実（曲がりの程度が 5.0cm 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，肥料を組み合わせで添加した。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，NH₄，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（NO₃，PO₄，SO₄，Cl）はイオン分析計（東亜 DKK，IA-100，PCI-201S カラム）を用いて行った。

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 NH₄-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）。NH₄-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. 2-1）。春夏作では養分吸収が盛んであったためか，補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 SO₄-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，SO₄-S の濃度が設定値よりも高く推移した。NH₄-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 NH₄-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，NH₄-N 濃度の低下，つまり植物体による NH₄-N の吸収とともに pH が低下し，さらに NH₄-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 NH₄-N が存在する場合は NH₄-N の優先吸収により pH が低下し，NH₄-N が枯渇すると N 源として NO₃-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 (Table 2-1) ために、培養液の pH 低下がより明らか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が多かった。

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 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 50cm 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} 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

NH₄-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. 2-2)。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 NH₄-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、NH₄-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 NH₄-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 NH₄-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 NO₃-N : NH₄-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 NH₄-N 比率が大きいほど培養液 pH の低下が大きく、pH を安定化するには NO₃-N : NH₄-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 NH₄-N 濃度の推移と pH の推移に関連性がみられ、NH₄-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 NO₃-N : NH₄-N のうち NH₄-N の供給比率、つまり NH₄-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 NH₄-N 濃度に準じた制御を行うのではなく、NH₄-N 濃度の設定値を下げ、かつ NH₄-N の供給比率を NO₃-N : NH₄-N = 30 : 1 に抑えることで NH₄-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 NH₄-N 濃度または N 源の供給比率によって NH₄-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なく、N 源の供給比率 NO₃-N : NH₄-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り、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。

Table 2-1

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

	Concentration (mg l ⁻¹)						
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -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

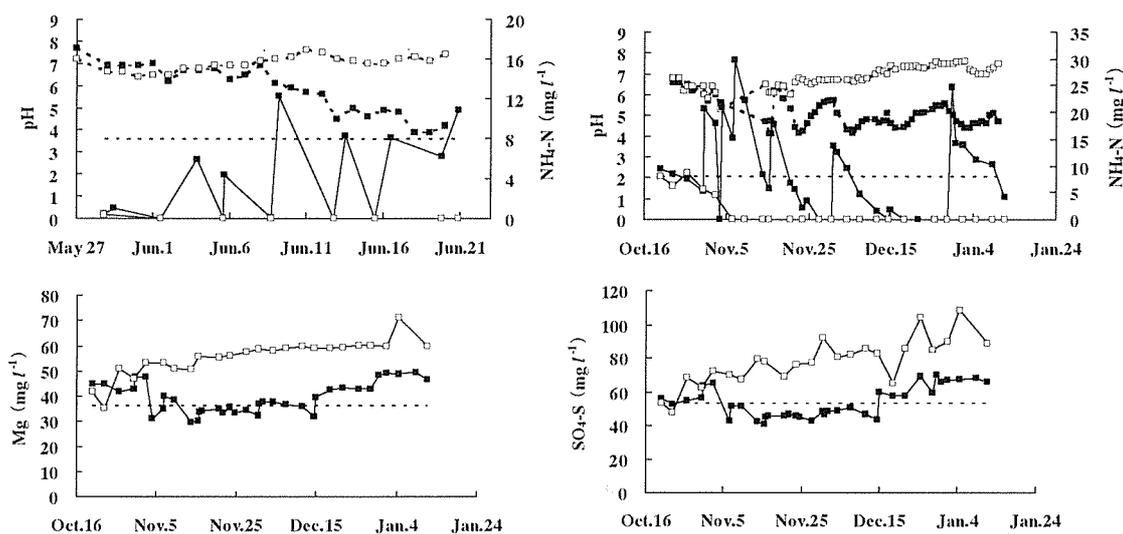


Fig.2-1 Changes in pH values and concentration of NH₄-N and Mg, SO₄-S in the nutrient solution of the ion control method and the EC control method. Dotted line shows the initial value of respective ion concentration levels in the EC control method. ●— Ion control method (pH) □— EC control method (pH) ■— Ion control method (NH₄-N) □— EC control method (NH₄-N) ■— Ion control method (Mg) □— EC control method (Mg) ■— Ion control method (SO₄-S) □— EC control method (SO₄-S)

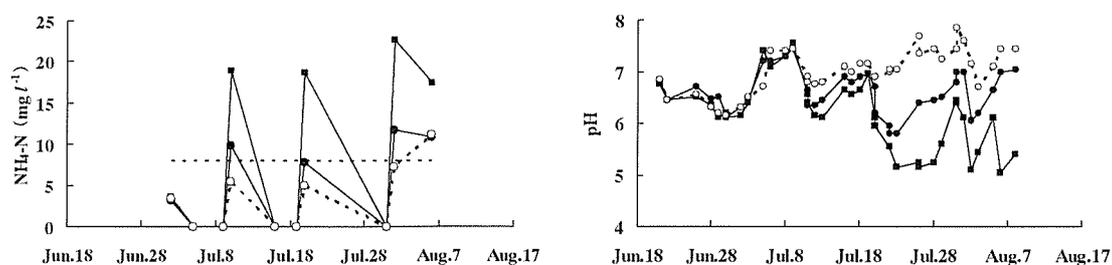


Fig.2-2 Changes in pH values and concentration of NH₄-N in the nutrient solution of the ion control method. Dotted line shows the initial value of NH₄-N concentration in the EC control method. ■— High concentration control ●— Medium concentration control ○— Low concentration control

第3章 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 (IIAS: Integrated IonAdjuster System) の開発

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 関数を用いた計算法であり、条件によって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。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た (Kirimura and Inden, 2004b)。また、これまでに考案されたイオン濃度制御法は自動制御でないため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が、インテリジェントシステムは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。しかし、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、手動で肥料を注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、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 IIAS) を考案した。IIAS は培養液の濃度管理を EC 制御法により自動でリアルタイム制御を行い、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はイオン濃度制御法により手動で行った。IIAS では、培地環境の変動抑制や生育促進効果に加えて、EC 制御法による半自動化により、省力化とともに低コストでのシステム構成が可能となる。

本報では IIAS に用いる IonAdjuster のプロトタイプを開発し、キュウリを用い IIAS の評価試験を行ったので報告する。プロトタイプでは濃厚液の調製を濃厚液が枯渇後に行い、養分吸収量の予測方法には First Calculation と Second Calculation, Third Calculation の三種を準備したが、本論文では開発段階として前二者だけを用いた方法について述べる。

開発

IIAS の開発目的は培養液中のイオン濃度を PEIS のように管理でき、なおかつシステムの低コスト化と省力化を実現することにある。低コスト化についてはインテリジェントシステムにおける培養液の分析と肥料調製を手動で行い、また省力化について

はイオン濃度制御法の理論に基づいて調製した濃厚液を用いる EC 制御によって培養液の補正間隔を延長し培養液の分析と肥料調製の回数を減らすことで可能となる。

IIAS の概要は、培養液管理を直接行うリアルタイム制御には EC 制御法を用い、EC 制御に用いる濃厚液作成時には補正時の培養液濃度と設定濃度との差に植物による養分吸収量を加味し、必要な肥料量を IonAdjuster により算出することで肥料計算にイオン濃度制御法を用いるものである。

培養液の補正間隔については、これまで行ってきた一連のイオン濃度制御法によるキュウリ栽培実験より、設定値の 2/3 程度以上に保つには月に 2 回程度で良いと考えられた。2/3 程度以上の維持を改良前のイオン濃度制御法を用い手動で行おうとすると、3~6 日間隔で培養液の補正を行う必要があり結構煩雑であるが、IIAS では補正の間隔を 15 日以上に延長できる可能性があり、濃厚液調製の作業負担を 1/3 程度に軽減することが期待でき、PEIS 改良版として普及させることができると考えられる。

IIAS の作業手順を Fig. 3-1 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し、養分吸収量を考慮した肥料の種類と量を “IonAdjuster” により算出し、その結果に従って濃厚液を作成する。ただし、本実験では濃厚液の枯渇後に培養液のサンプリングを行った。IIAS 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初回の補正は First Calculation (Fig. 3-2)、二回目以降の補正は Second Calculation (Fig. 3-3) により濃厚液作成に必要な成分量を計算し、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。First Calculation と Second Calculation に用いた入力項目を Table 3-1, 3-2 に示す。

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(supply)(mg)

a_0 : 初期培養液中の成分 X の濃度(mg l^{-1})

a_{now} : 補正前の培養液中成分 X の濃度(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

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 Xsf_{next} は式(5)で表される。

$$Xsf_{next} = Xs_{next} \times \frac{D_{next}}{D_0} \times \frac{N_{next}}{N_0}$$

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

ただし、

D_0 : 制御開始からの現在 (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)

(2) Second Calculation

「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
 するとして」次回の吸収量を予測し、濃厚液調製に必要な肥料量を導く。

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} : 前回補正時からの現在までの補正間隔 (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.

$$Xs_{next} = Xa_{next} + (a_{next} - a_{now})V$$

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

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.

上記で求めた濃厚液調製に必要な各成分の量を“IonAdjuster”に入力・計算を実行し, 培養液調製に必要な肥料の種類とその量を求めた.

本実験では EC 制御法とイオン濃度制御法を組み合わせた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る, 栽培データの蓄積や解析が今後の課題の1つである.

栽培試験

考案した IIAS のプロトタイプの運用試験をキュウリの湛液型循環式水耕にて行った. 初めに IIAS のアルゴリズムをテストするため IIAS だけの栽培試験を行い, 続いて PEIS との比較試験を行った.

実験 1. キュウリ養液栽培での 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°C 恒温器内で管理した. 子葉展開後の 3 月 18 日に シクスライト温室内の容器 (60cm×30cm×20cm) 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 (400cm×36cm×21cm, 地上高 55cm, 2 列) に株間 50cm 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×1+タンク内×1) は 260 dm³ 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

3-3) と微量要素 (Table 3-4) 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 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 , $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 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 $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ を 29.6:1 から 74.6:1 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^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 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 NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Cl^- はイオン分析計 (東亜 DKK, 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 値の設定についてはいくつかの異なる管理方法が行われていることから、一方のベッドを 1.75 dS m^{-1} の定値制御 (set-point control, SPC) とし、もう一方のベッドは 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。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物を用いた。なお本実験は IonAdjuster の改良 (Kirimura and Inden, 2004b) 以前に行ったため、計算には改良前の旧バージョンを用いている。EC 制御には SS 式肥料管理機 (CI 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, M-8) と電気伝導度計 (東亜 DKK, TCX-90i) を用いた。

結果および考察

濃厚液調製は両ベッドとも3回 (SPC; 5月2, 7, 20日, RC; 4月25日, 5月7日, 23日) 行った (Table 3-5)。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、今回の IIAS を用いた栽培ではみられなかった (Fig. 3-4)。これは IIAS におけるリアルタイム制御に用いた EC 制御が適切に働いた結果といえる。

また、培養液中の各成分濃度の推移をみると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$, Mg を除く他の成分は安定して推移した (データ略)。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は5月7日に両ベッドとも検出できないほどに低下し、pH も 0.5 程低下した。この現象は、キュウリ栽培では培養液中に $\text{NH}_4\text{-N}$ 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), また $\text{NH}_4\text{-N}$ の追加供給量よりも吸収量が多くなったためと考えられる。その後 $\text{NH}_4\text{-N}$ は IIAS の補正によって設定値よりも高い 6 mg l^{-1} で推移した。設定値よりも高くなった原因として、IonAdjuster での肥料計算と養分吸収量予測に生じた誤差が考えられる。実際に5月20日に行った SPC 区の肥料計算では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の目標値は 0 g であったのに対して計算値は 1.33 g であった。また培養液中に $\text{NH}_4\text{-N}$ が存在していたにも関わらず、培養液の pH の低下がみられず、実験 2 とは異なる結果となった。その原因として初期濃厚液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の比率が低かったこと、品種の違い、栽培時期の違い、培養液量の違い、他の養分との拮抗などが考えられるが、本実験ではその原因を特定することはできなかった。

IIAS は IonAdjuster による肥料計算と養分吸収量予測の精度に若干問題はあ

の、PEISの問題点であった培養液の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。

実験2. PEISとIIASの比較実験

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50cm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はNH₄-Nの設定濃度が8 mg l⁻¹の大塚SA処方とした。本実験では最小二乗法により計算精度を高めたIonAdjusterを用いた。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処理区、IIASを2処理区の計3処理区とし、各区の培養液量は300 dm³とした。栽培の途中で培養液のpHが低下したため後述のようにNH₄-Nの供給制限を行ったIIAS区とPEIS区をそれぞれIIASL区、PEISL区とした。また、NH₄-Nの供給制限を行わなかったIIASの区をIIAS区とした。培養液管理は、PEISL区では約1週間おきに手動添加による補正を行い、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の栽培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 3-6)。

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における補正間隔のばらつきは養分吸収量予測の精度が低いと推測され、改良が必要と考えられる。一方、PEISL区では10月17日から10月24日の間の培養液中のNO₃-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NO₃-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. 3-5)。従ってIIASL区は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24日に0.1M KOH 200 mlを添加してpHの補正を行った。

IIASL区では11月8日の濃厚液作成時からNH₄-Nの供給量を制限したが、培養液中に残存したNH₄-N濃度が高く(Fig. 3-6)、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NH₄-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NH₄-Nの吸収が抑制されていたと考え

られる (Matsumoto, 1991). 一方 PEISL 区の pH は培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の低下と共に短期間の内に上昇し、その後 pH 5.5 前後で推移した. IASL 区では IAS 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 ($\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}=1.3:1$), 培養液の pH が低下したと考えられる. 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 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量の総量は IAS 区とほぼ同量であった. その原因として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} に変更したこと等が考えられる. 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. システム内の培養液量が多くなかったことも関係しており、培養液量が十分多かった場合には、IASL 区と近い値を示した可能性がある.

$\text{NH}_4\text{-N}$ 供給制限後にみられる IASL 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), IASL 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 pH の上昇が遅延したと考えられる. IAS 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 IAS 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. IAS 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 $\text{NH}_4\text{-N}$ が十分に供給させず、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収が制限されたことが、次回の補正までに吸収されると予測される量に反映され、次回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. 従って何らかの要因によって栽培初期の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収量の比率が大きかった場合、IAS ではその影響が次回の供給量に反映され、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の過剰供給が行われると考えられる.

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 IAS 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.

培養液中の各成分濃度と EC 値の推移は IASL 区と IAS 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. 3-7, 3-8).

総収量は IASL 区と IAS 区の間に有意差はみられなかったが、IASL 区と IAS 区

は PEISL 区よりも有意に多かった (Fig. 3-9, Table 3-7). 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 IAS 区が PEISL 区より有意に多かった. IASL 区の総収量は PEISL 区より多かったことから, IAS 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繋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, IAS の三種の制御法の中では IAS が最も優れているといえる.

総合考察

本研究の結果, イオン濃度制御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 IAS 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, IAS 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 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ 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 IAS 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 IAS 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生育促進の可能性が示された. 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いて利点が大きいと考えられる. 植物工場用全自動システムの場合にも, IIA 法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め, また培地環境の変動抑制が期待できることから植物体にとって望ましい培養液管理法といえる. さらに増収が認められたことから, 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とともに栽培システムの改良を行う予定である. 特に, 本実験では養分吸収量予測の精度が低く補正間隔がばらつく結果となったため, 精度を高めるとともに, 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.

Table 3-1 Input items of First Calculation.

Variables	Descriptions	Unit
V	The amount of nutrient solution	dm^3
a_0	The concentration of the element X in the initial nutrient solution	mg l^{-1}
a_{now}	The concentration of the element X in the nutrient solution before this correction	mg l^{-1}
a_{next}	The target concentration of the element X in the solution as of the next correction	mg l^{-1}
X_s	The amount of supply of the element X by the initial stock solution.	mg
D_0	The interval from the control start to the first correction	days
D_{next}	The target correction interval from this time to next time	days
N_i	The number of plants	plants

Table 3-2 Input items of Second Calculation.

Variables	Descriptions	Unit
V	The amount of nutrient solution	dm^3
a_{LBO}^z	The concentration of the element X in nutrient solution before the last correction but one	mg l^{-1}
a_{last}	The concentration of the element X in the nutrient solution before the last correction	mg l^{-1}
a_{now}	The concentration of the element X in the nutrient solution before this correction	mg l^{-1}
a_{next}	The target concentration of the element X in the solution as of the next correction	mg l^{-1}
X_{SLBO}	The amount of supply of the element X by the stock solution made for the last time but one	mg
X_{Slast}	The amount of supply of the element X by the stock solution made for the last time	mg
X_{Snext}	The amount of supply of the element X by the stock solution made for this time	mg
D_{LBO}	The correction interval from the last time but one to the last time	days
D_{last}	The correction interval from the last time to the last time but one	days
D_{next}	The target correction interval from this time to the next time	days
N_i	The number of plants	plants

^zLBO; Last But One.

Table 3-3 Composition of macroelements in the nutrient solutions (mg l^{-1}).

	Concentration (mg l^{-1})						
	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	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

Table 3-4 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

Table 3-5 Content of macroelements in the stock solutions (g).

Date	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N} / \text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	K	Ca	Mg	$\text{SO}_4\text{-S}$
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
SPC	May. 07	23.71	1.33	17.84	4.08	37.42	15.48	1.38
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
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
RC	May. 07	44.49	4.09	10.88	1.67	53.63	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

Table 3-6 Content of macroelements in the stock solutions (g).

	Date	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
IIASL	FSS	11.85	0.40	2.29	19.93	8.22	1.81	2.65
	Oct. 17	8.89	0.60	10.25	28.79	3.74	1.57	2.07
	Oct. 29	14.77	11.45	0.00	0.00	4.75	0.00	0.00
	Nov. 05	18.15	7.22	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	17.84	133.13	30.27	3.88	8.07
IIASL	FSS	11.85	0.40	2.29	19.93	8.22	1.81	2.65
	Oct. 29	7.54	2.68	0.00	11.40	1.11	0.00	0.00
	Nov. 05	34.92	5.99	0.00	60.55	10.36	4.70	6.20
	Nov. 27	12.98	0.57	4.51	21.93	9.43	0.07	0.09
	Total	67.30	9.65	6.80	113.81	29.12	6.58	8.94
PEIS	Oct. 17	0.00	0.28	21.76	26.68	0.00	0.00	0.00
	Oct. 27	0.75	1.68	0.00	0.00	1.07	0.00	1.93
	Oct. 29	8.29	2.42	0.00	3.33	6.68	0.00	0.00
	Nov. 05	13.31	2.44	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	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	0.00	9.49	5.39	0.61	0.80
	Dec. 04	6.03	0.27	0.00	7.73	4.66	0.27	0.67
	Total	59.61	7.69	21.76	100.82	39.48	3.28	6.56

FSS: First Stock Solution

Table 3-7

Effect of control system of nutrient solution on the yield of cucumber in hydroponics.

Treatment	Early stage		Mid stage		Late stage		Total	
IIASL	10.5	a ^z	16.2	ab	13.3	a	40.0	a
IAS	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).

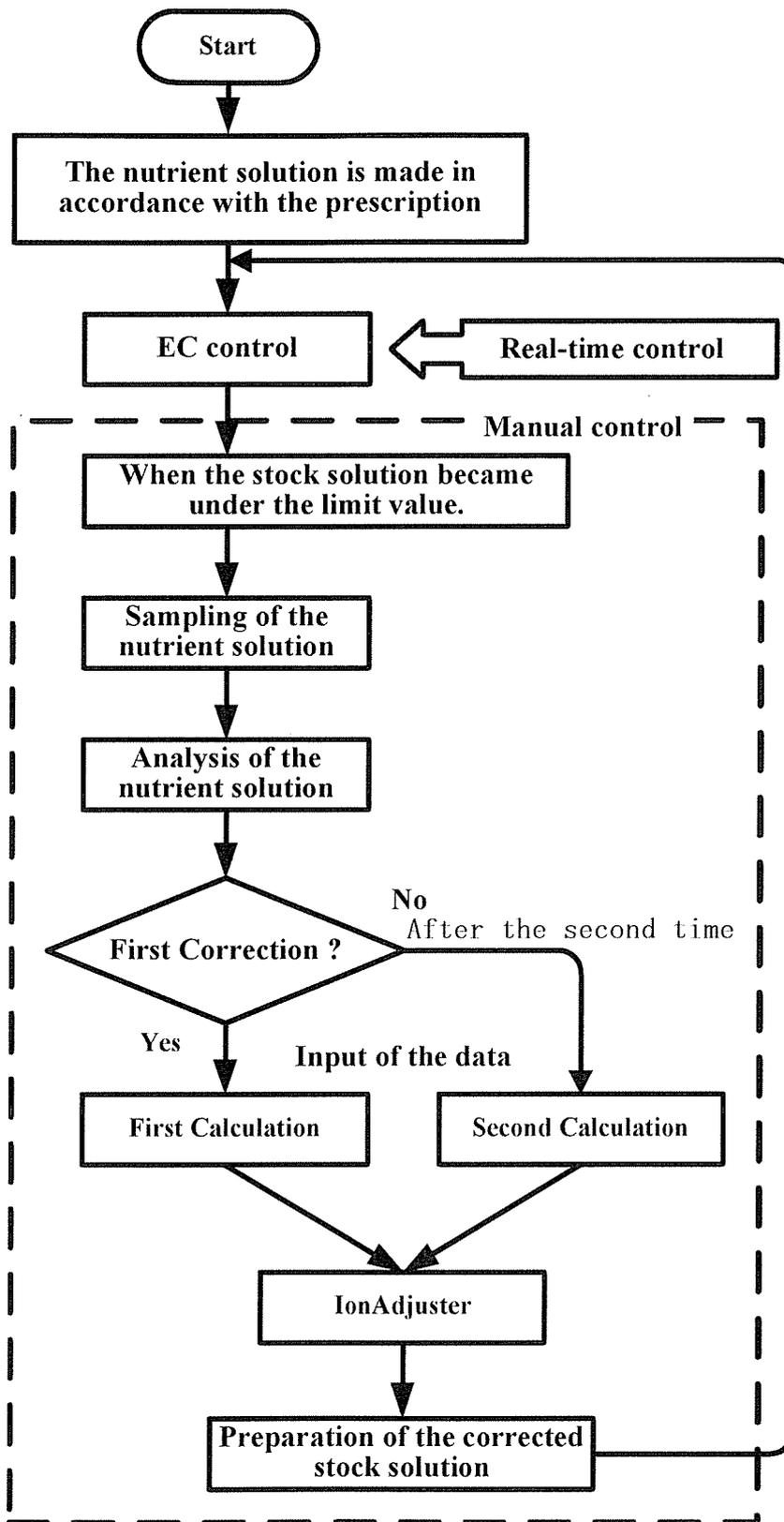


Fig.3-1 Flowchart of Integrated IonAdjuster System.

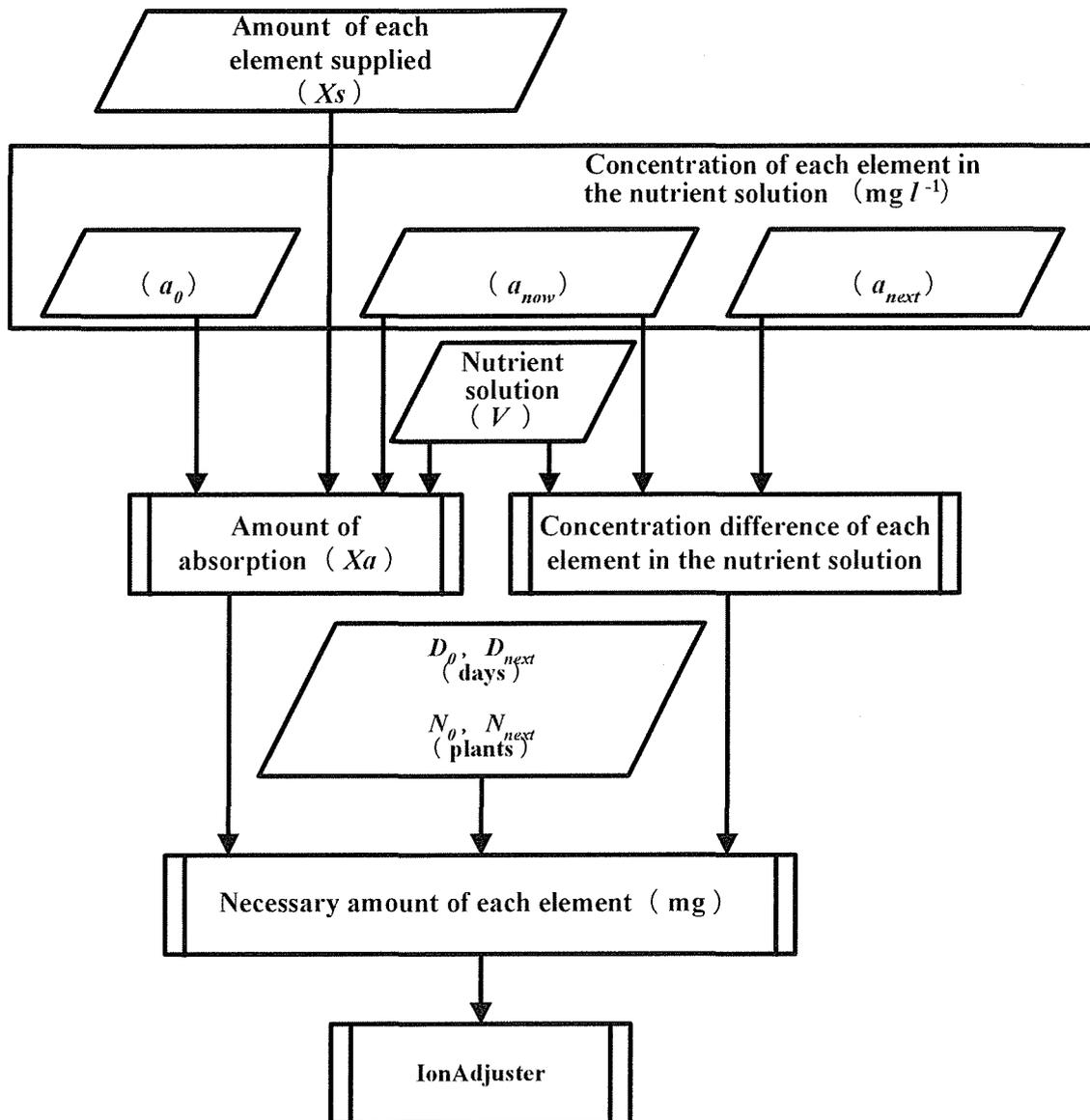


Fig.3-2 Flowchart of First Calculation.

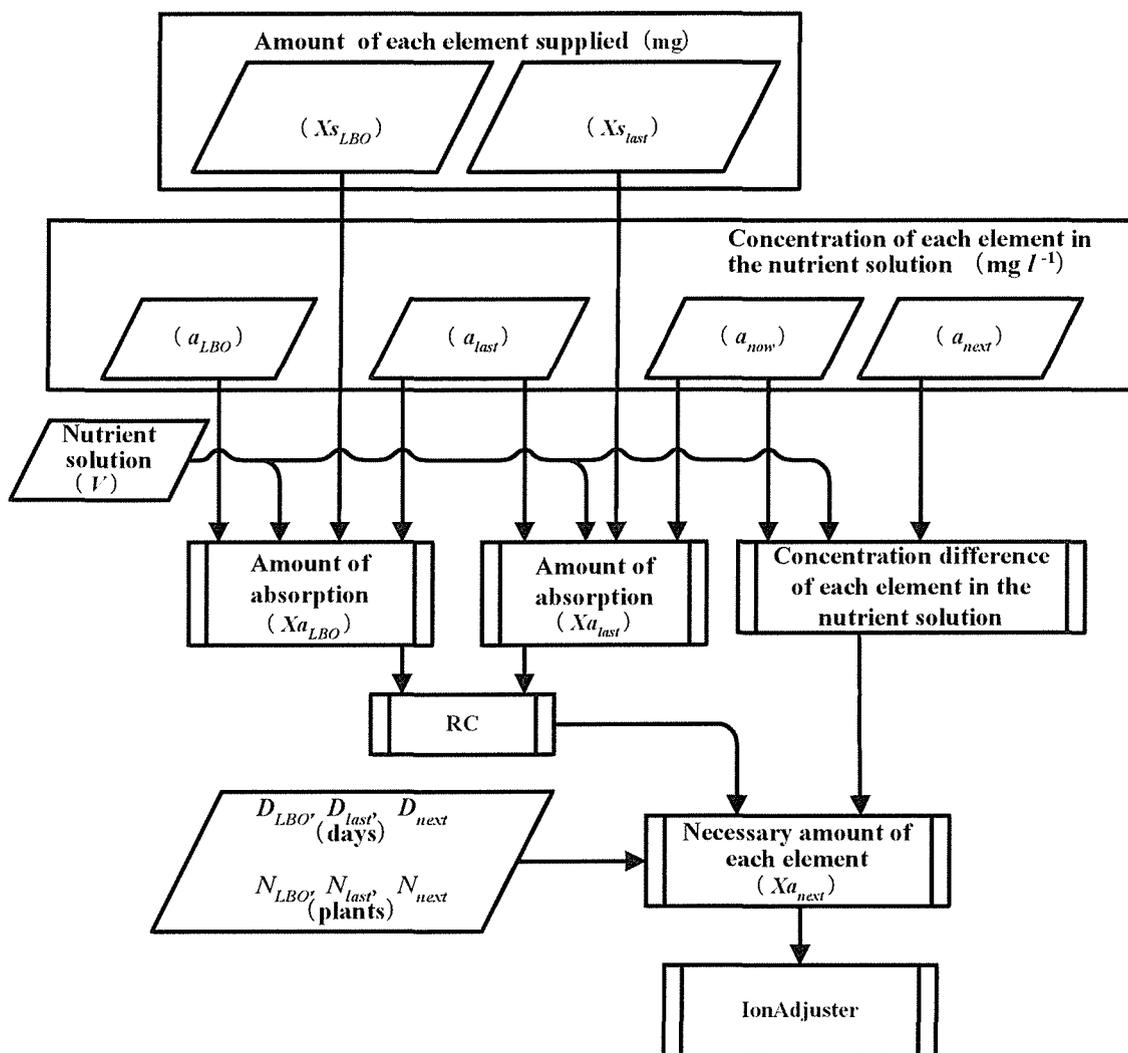


Fig.3-3 Flowchart of Second Calculation.

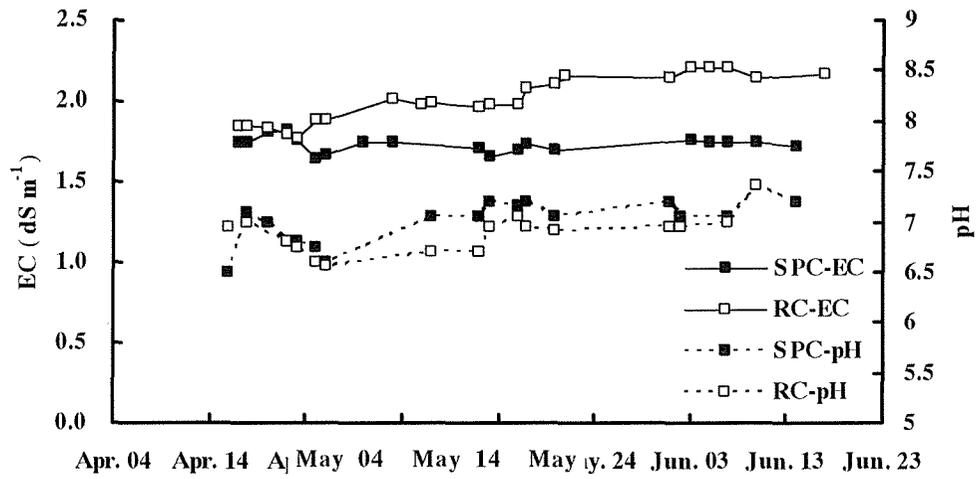


Fig.3-4 Changes in EC and pH value in the nutrient solution controlled by IAS.
 SPC: Set-Point Control.
 RC: Rising Control.

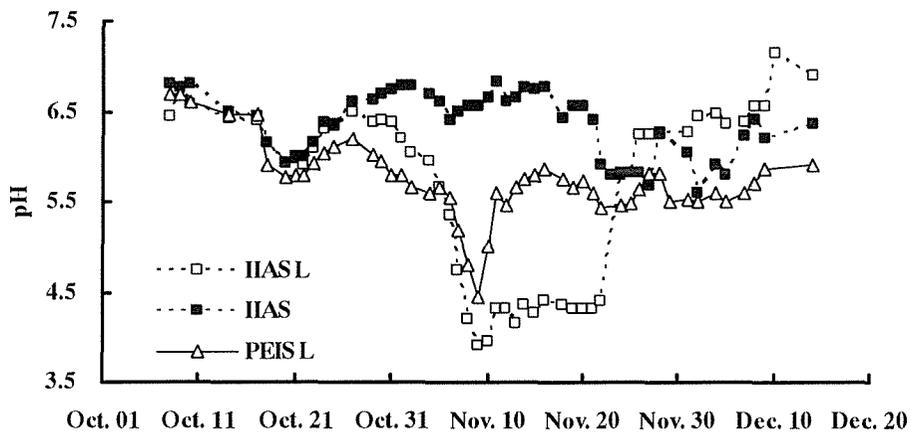


Fig.3-5 Changes in pH value in the nutrient solutions controlled by IASL, IAS and PEIS.

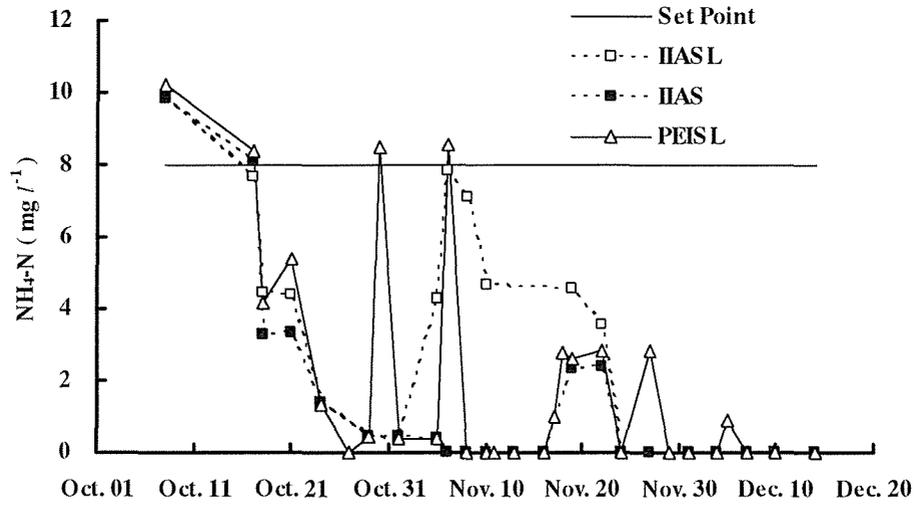


Fig.3-6 Changes in concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the nutrient solutions controlled by IASL, IAS and PEISL.

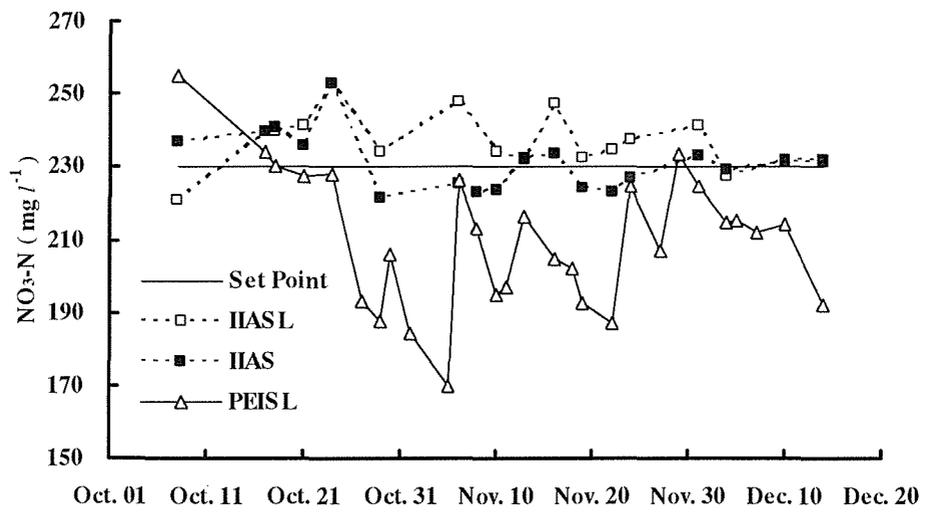


Fig.3-7 Changes in concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ in the nutrient solutions controlled by IASL, IAS and PEISL.

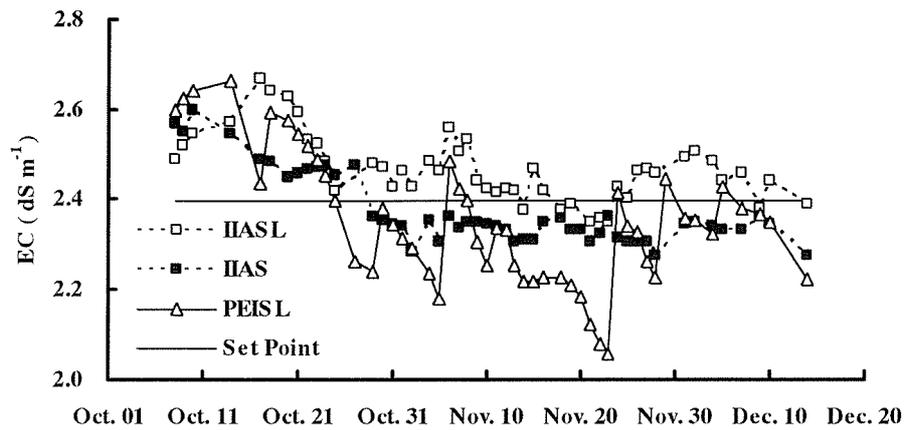


Fig.3-8 Changes in EC value in the nutrient solutions controlled by IASL, IAS and PEIS.

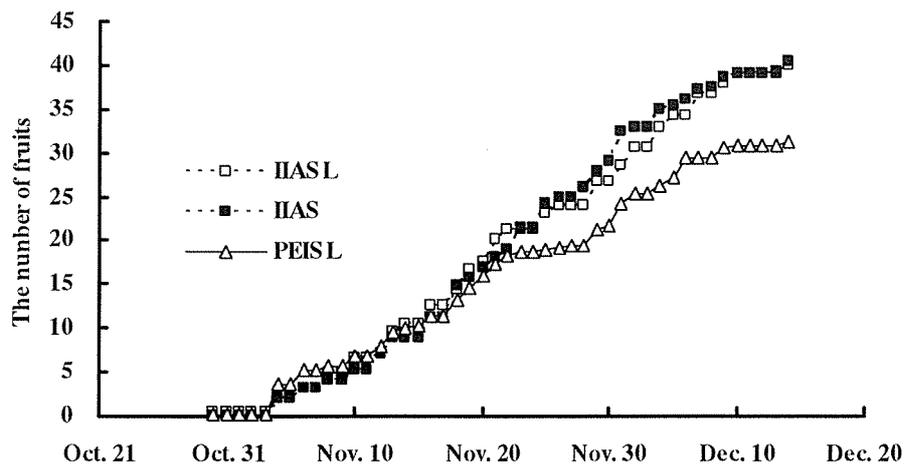


Fig.3-9 Cumulative yield of cucumber fruits grown with nutrient solutions controlled by IASL, IAS and PEISL..

第4章 イオン濃度制御キュウリ養液栽培における NH₄-N 供給方法の検討

従来の EC 制御による養液栽培では栽培経過に伴い、ナス、トマトのように養液の pH が上昇する傾向があるものと、キュウリやレタスのように pH が低下する傾向がみられるものがある (Inden, 1997). しかしイオン濃度制御法ではこれまで供試したいずれの作物においても養液の pH は低下した (Kubota et al., 2001; Inden et al., 2001). この原因は従来の養液栽培の培養液組成をイオン濃度制御法に適用すると、培養液の設定濃度が一定である場合には植物体が吸収した量だけ追加供給されることから、pH 低下の要因となる NH₄-N が連続的に過剰に供給されるためである. さらに、IIAS による養液栽培では吸収量の増加率が供給量に反映されるため、供給した NH₄-N が次の濃厚液調製時まで全て吸収されると仮定した場合、NH₄-N の供給量は理論的には指数関数的に増加してしまう. 一方、培養液の pH 補正には酸やアルカリを用いるため、酸やアルカリに含まれる成分によって培養液中のイオンバランスが崩れる可能性があり、イオン濃度制御法をより確かなものとするためには、作物種に応じた新たな培養液組成や生育に伴い変化する養分吸収パターンに応じた培養液管理法の検討が必要と考えられる.

実験 1. キュウリ水耕栽培における培養液の初期 NH₄-N 濃度が NH₄-N 吸収速度と培養液 pH の変動に及ぼす影響.

本実験では培養液 pH の安定化を図るため、キュウリ栽培における培養液中の初期 NH₄-N 濃度の違いが NH₄-N 吸収速度と培養液 pH の変動、植物体の成長に及ぼす影響について調査を行った.

材料および方法

キュウリ (*Cucumis sativus* L.) ‘アルファー節成’ (久留米原種育成会) を供試し、2003 年 5 月 2 日に播種し、子葉展開まで 28°C 恒温器内で管理した. 子葉展開後の 5 月 15 日にシクスライトハウス内に設置した 60cm×30cm×20cm の容器に浮かせた発泡スチロールに移植し、本葉が 3 枚展開するまで湛液育苗した. 培養液には 1/2 単位大塚 SA 処方 (大塚ハウス肥料) を用い、エアーポンプによって曝気を行った. 6 月 1 日に 1/5000 a ワグネルポット 1 個当たり培養液量 3 dm³、1 個体、各区 4 個体を定植し、エアーポンプにより常時曝気を行い、調査を 6 月 6 日まで行った. 培養液中の NH₄-N 濃度を 0 mg l⁻¹、4 mg l⁻¹、8 mg l⁻¹、16 mg l⁻¹ の 4 段階とした実験区を設け、その他の要素は大塚 SA 処方を目標値として IonAdjuster により必要な肥料量を算出し、多量要素 (Table 4-1) と微量要素 (Table 4-2) を共に単肥 (NH₄NO₃、NH₄H₂PO₄、(NH₄)₂SO₄、KH₂PO₄、Ca(NO₃)₂·4H₂O、KNO₃、MgSO₄·7H₂O、H₃BO₃、MnCl₂·4H₂O、ZnSO₄·7H₂O、CuSO₄·5H₂O、NaMoO₄·2H₂O、EDTA-Fe) を用いて培養液を調製した. 培養液の初期 pH は 6.35±0.05 であった. また、硝酸化成菌などの影響 (Iizuka, 1978) を評価するために、NH₄-N 濃度を 8 mg l⁻¹ とした培養液で植物体を定植しない区も設け調査した. 培養液中の成分分析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 カラムオーブン) を用い、カチオン Na, NH₄-N, K, Ca, Mg は IC-Cation I/II-HR カラム (東ソー)、アニオン

NO₃-N, PO₄-P, SO₄-S, Cl は PCI-201S カラム (東亜 DKK) を用いて行った。培養液の pH と EC 値の測定にはそれぞれ pH メータ (堀場, M-8) と電気伝導度計 (東亜 DKK, TCX-90i) を用いた。6 月 6 日には地上部新鮮重, 地上部乾物重, SPAD 値 (コニカミノルタ, 葉緑素計測器 SPAD-502), 吸水量を測定した。SPAD 値は個体ごとに各葉の先端部を 3 回測定した平均値とした。

結果および考察

葉の SPAD 値と植物体の草丈, 新鮮重, 乾物重には各処理区間で有意な差はみられなかった (Table 4-3)。

培養液の EC 値は全区で上昇する傾向がみられ (Fig. 4-1), 養分の吸収よりも水分の吸収比率の方が多かったと推測される。

培養液の pH は 6 月 3 日には有意差 ($P < 0.01$) がみられなかったが, 6 月 4 日には NH₄-N 濃度 16 mg l⁻¹ 区と 8 mg l⁻¹ 区で NH₄-N 濃度 0 mg l⁻¹ 区よりも有意に低くなり, 6 月 5 日には NH₄-N 濃度 16 mg l⁻¹ 区で 0 mg l⁻¹ 区よりも有意に低く初期値よりも 0.94 低い pH 5.46 という最低値となった (Fig. 4-2)。6 月 6 日には NH₄-N 濃度 16 mg l⁻¹ 区の pH は他の全ての区に比べ有意に低くなった。また, 培養液の NH₄-N 濃度が高い区ほど pH の低下幅が大きくなった。6 月 6 日には全ての区で前日より pH が上昇する傾向がみられたが, これは植物体による養分吸収によって培養液中の NH₄-N 濃度が低下したため, pH が上昇したと推測される (Fig. 4-3)。このことは NH₄-N が優先的に吸収される場合は培養液の pH が低下し, NH₄-N が吸収し尽くされると, pH は変化しないかあるいはむしろ上昇するという報告 (Ikeda and Osawa, 1981) と一致した。その他の成分は若干上昇する傾向がみられた (データ略)。

培養液の NH₄-N の初期濃度に対する 5 日間の 1 個体当たり NH₄-N と PO₄-P の吸収量, 培養液 pH の変動幅のピアソンの積率相関係数はそれぞれ, 0.9596, -0.8839, -0.8237 となり, 無相関の検定では $P < 0.01$ で有意に相関がみられた (Table 4-4)。従って, 培養液の NH₄-N の初期濃度が高くなるにつれ PO₄-P の吸収量が減少し, 培養液の pH の低下幅が大きくなると考えられる。一般的に適性範囲内の pH の培養液では, pH が低いほど培養液中 PO₄-P の有効性は高くなるため (Savvas and Manos, 1999; Tsukagoshi, 2002), 本実験で PO₄-P の吸収量が減少した主な原因は培養液の pH ではなく, NH₄-N 濃度と推測される。

培養液中の当初の NH₄-N 濃度を説明変数 (x 軸), 定植 1 日後の濃度の変化から求めた吸収速度 ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$) を被説明変数 (y 軸) とした最適曲線を求めるため, 得られたデータをゴンベルツ曲線とロジスティック曲線, 直角双曲線 (Michaelis Menten 式), 遅れ S 字曲線, 閾値反応曲線, 二次曲線, 三次曲線にあてはめ, 決定係数 R^2 と赤池弘次氏の情報量基準 AIC (Sawa, 1979; Akaike, 1996; Karita and Ueda, 2003) で適合度を評価した結果, ゴンベルツ曲線が最も適合していると考えられた (Table 4-5)。吸収速度は培養液の NH₄-N 濃度が高くなるにつれ上昇し, 最大値は $7.9 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ になると予測される (Fig. 4-4)。しかし, NH₄-N の吸収量と吸収速度は培養液量や個体数, 環境要因, 生育段階の左右されるため, pH 制御を目的とした NH₄-N 濃度管理を適切に行うのは非常に煩雑と考えられる。

以上の結果から, 培養液の NH₄-N 濃度は少しの差でもその吸収速度は大きく異なる

ため、培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を一定に維持し、植物体に各成分を一定割合で供給することは困難であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度管理により培養液の pH を制御することは非常に困難であるといえる。そこで $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量を他の成分の供給量との比率で管理する方法を検討することにした。

実験 2. IIAS を用いたキュウリ養液栽培における $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給方法の検討。

IIAS の栽培試験の結果、IIAS の特性から $\text{NH}_4\text{-N}$ が連続的に過剰に供給・吸収されるため培養液の pH が低下する傾向がみられた（第 3 章; Kirimura and Inden, posting）。また、イオン濃度制御キュウリ養液栽培に関するこれまでの研究結果から、培養液の pH 低下防止には大塚 SA 処方の濃度よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ を低い濃度に設定し、その供給量を制限する方法が有効であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給は濃度よりも $\text{NO}_3\text{-N}$ との比率に基づき行うべきと提案した（Kirimura and Inden, 2005）。さらに実験 1 の結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度管理は非常に困難であることが示された。本実験では IIAS によるキュウリ養液栽培において培養液 pH の安定化を図るため、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量管理方法を比較検討した。

材料および方法

栽培は実験 1 に準じ、キュウリ (*Cucumis sativus* L.) ‘翠星節成 2 号’（久留米原種育成会）を供試し、2003 年 8 月 18 日に播種、9 月 1 日から湛液育苗した。9 月 24 日にベッド（400cm×36cm×21cm、地上高 55cm、1 列）に株間 50cm で 1 ベッド当たり 6 個体ずつ定植した。1 処理区 1 ベッドとした。整枝方法は力枝 2 本の子づつ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、実験 1 で使用した単肥に加え K_2SO_4 を用いて調製した。各区の培養液量（ベッド内+タンク内）は 300 dm^3 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。培養液管理法は PEIS と IIAS を用い、IIAS では培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の設定値が 8 mg l^{-1} である区（以下、IIA normal）、追加供給する N 源を $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 30 : 1$ とした区（以下、IIA 30:1）、栽培者の判断により培養液の pH の変化に応じて $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量を管理するファジー管理区（以下、IIA fuzzy）を設け、計 4 区にて比較検討した。初期濃厚液は大塚 SA 処方とし、IIAS の濃厚液調製間隔は 14 日とした。PEIS の培養液の補正は週に 1 回行った。EC 値は 2.4 dS m^{-1} の定値制御とし、EC 制御には SS 式肥料管理機（CI 化成、AS-3）を用いた。調査は培養液中の成分濃度と pH、EC 値、収量について行った。果実は果長 22 cm 前後で収穫し、10 月 23 日から 11 月 21 日まで収穫を行った。

結果および考察

IIAS の EC 制御は 9 月 25 日から開始した。IIAS の肥料計算は Second Calculation の不具合や精度が低いなどの理由から全て First Calculation によって行った。濃厚液の調製と培養液の補正の回数は IIAS normal が 4 回、IIAS30:1 が 5 回、IIA fuzzy が 5 回、PEIS が 7 回であった（Table 4-6）。PEIS に比べ IIAS で培養液管理の回数を減らせたが、濃厚液調製間隔が予定よりも短くなった。その原因は肥料計算を行った First Calculation が養分吸収量の増加に対応できなかったためである。今後 First Calculation に代わる肥料計算法を検討する必要がある。

培養液の EC 値は IIAS では 2.4 dS m^{-1} 前後で推移したが、PEIS では培養液の補正前

に低下し、特に養分吸収量の多い生育中期には顕著であった (Fig. 4-5)。

濃厚液または培養液補正で追加供給した各成分量は、生育後期に濃厚液の調製を行った IIAS fuzzy で多くなった (Table 4-7)。供給した N 源に占める $\text{NH}_4\text{-N}$ の比率を比較すると IIAS normal が最も高く、IIA 30:1 が最も低かった。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量が多い区では $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給量が少なくなる傾向がみられた (相関係数 -0.8892)。これは培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなるにつれ $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸収量が減少した実験 1 の結果を裏付けている。

栽培終了日を考慮していなかったため IIAS の濃厚液は栽培終了時に残存していた。従って、栽培期間中に濃厚液を使い切ってしまうためには栽培終了予定日を考慮する必要がある。また IIAS の濃厚液調製間隔は当初 14 日を目標としていたが、ばらつきがあったため養分吸収量予測の改善が必要である。

供給した N 源のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ が占める割合 (%) は IIAS normal と PEIS では約 50% まで大幅に上昇し、IIAS fuzzy では若干上昇し、IIAS 30:1 では約 3% で推移した (Fig. 4-6)。IIAS normal の pH が 10 月 27 日に 4.63 まで低下したため (Fig. 4-7)、10 月 28 日に調製した濃厚液から $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給を停止したが、培養液中に $\text{NH}_4\text{-N}$ が残存するためしばらくの間 pH の低下がみられた (Fig. 4-8)。

IIAS normal では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が目標値 (8 mg l^{-1}) よりも高い値で推移したが、これは初期の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収量増加率によって推定し供給した量に見合うだけの吸収がその後続かなかつたためと考えられる。また、IIAS normal では $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の上昇と同時期に K 濃度の低下がみられた。これは $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収量の多かった生育初期には K 吸収量が比較的少なく、そのため 10 月 16、19 日に調製した濃厚液に K が供給されなかったことが原因と考えられた。

IIAS fuzzy では 10 月 28 日の濃厚液調整時まで pH の上昇が続いたため、 $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ を 30:1 から 10:1 に変え、さらに 11 月 13 日には pH の低下を緩やかにするために濃厚液の $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ を 20:1 に変更した。IIAS 30:1 と IIAS fuzzy では養分吸収が盛んな生育中期に培養液の pH が上昇したが、この時期に $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給比率を適度に高め pH 上昇を抑制できれば育促進が見込める。つまり、生育初期は $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ を 30:1 程度で維持し培養液の pH 低下を抑制し、生育中期は $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給比率を高め培養液の pH 上昇を抑制し、生育後期には $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ を 30:1 に戻すことにより培養液の pH 低下を抑制できると考えられる。一方で、栄養生長期には $\text{NH}_4\text{-N}$ がより良く、生殖生長には $\text{NO}_3\text{-N}$ がより良いという報告 (Kumazawa, 1974) や生育中期から後期が秋から冬期にかかる作型で、弱日照下における草勢を維持するためには適度の $\text{NH}_4\text{-N}$ を加用することが効果的であるという報告 (Ikeda, 1996) もある。今後、生育中期にみられる pH 上昇の開始時期の判断や培養液の pH 変動が生育に及ぼす影響、供給する N 源の $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ などを総合的に考慮した管理方法を検討する必要がある。

収量は処理区間で有意な差はみられなかったが IIAS 30:1 が最も多かった (Table 4-8)。果実搾汁液中無機成分濃度については、多くの成分で有意差はなかったが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量が少ないほど搾汁液中の Ca と Mg、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度が高くなる傾向がみられ、Ca 濃度は IIAS 30:1 で有意に高かった (Table 4-9, 4-10)。これは $\text{NH}_4\text{-N}$ を N 源とした場合に葉中の Ca 含有率が低下したという報告 (Ikeda and Osawa, 1979) と一致

した。Ca は生体膜の構造と機能の維持に、Mg は葉緑素の生成に必須であるため、これらの成分の含有量が高い IAS 30: 1 の植物体が最も良好であったと考えられる。

以上の結果から、前報と同様に IAS を用いることで PEIS よりも培養液の分析回数と肥料調製回数を減らせ、培養液の濃度変動を小さくできることが示された。また NH₄-N の施与方法は、培養液中 NH₄-N の濃度を維持する管理では NH₄-N が過剰に供給され培養液の pH が異常に低下してしまうため、供給される NO₃-N 量との比率に基づき NH₄-N を供給することが必要と考えられた。

摘要

- 1) 培養液中の NH₄-N 濃度が培養液の pH に及ぼす影響を調査した結果、キュウリの養液栽培では培養液中の NH₄-N 濃度が若干高くなると NH₄-N 吸収速度が大幅に増加し、培養液中の NH₄-N はすぐに枯渇した。
- 2) 培養液の pH を制御するには培養液中の NH₄-N について濃度ではなく供給する N 源中の比率を管理する方法が有効と考えられる。
- 3) IAS によるキュウリの養液栽培では、生育初期は NO₃-N: NH₄-N を 30: 1 程度に維持し、生育中期は NO₃-N: NH₄-N をおよそ 10: 1 程度に高め、生育後期はまた 30: 1 程度に戻すことで培養液の pH を正常に維持できると考えられる。
- 4) IAS により培養液中の成分濃度の変動が抑制できたが、さらに NH₄-N の供給法の改善により培養液の pH を適切に管理できればより生育の促進が期待できる。

Table 4-1 Macronutrient composition of the nutrient solutions (mg l⁻¹) on a theoretical basis calculated with Ionadjuster

Treatment	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
SA ^z	237.0	8.0	45.8	398.5	164.4	36.2	47.3
0 mg l ⁻¹	241.3	0.0	45.8	406.3	166.6	38.0	50.1
4 mg l ⁻¹	241.0	4.0	46.0	400.0	164.0	38.0	50.1
8 mg l ⁻¹	240.8	7.9	46.2	393.6	161.4	38.0	50.1
16 mg l ⁻¹	240.2	15.6	46.7	381.1	156.2	38.0	50.1

^z “Otsuka SA” prescription

Table 4-2 Micronutrient composition of the nutrient solution (mg l⁻¹)

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

Table 4-3

SPAD value of leaf, fresh and dry weight of shoot and root in each treatment on June 6.

Treatment	SPAD ^z	Plant height(cm)	FW (mg plant ⁻¹)		DW (mg plant ⁻¹)	
			shoot	root	shoot	root
0 mg l ⁻¹	46.8	66.8	39.9	15.1	4.2	0.4
4 mg l ⁻¹	46.3	62.3	38.3	15.2	3.8	0.4
8 mg l ⁻¹	45.9	66.3	44.1	19.2	4.7	0.5
16 mg l ⁻¹	44.4	60.8	40.2	14.6	3.9	0.4
	ns ^y	ns	ns	ns	ns	ns

^z SPAD is an index representing relative chlorophyll quantity in a leaf.^y No significant differences were found (LSD test, P < 0.01).

Table 4-4

The correlation coefficient and the result of the uncorrelation test of NH₄-N concentration (mg l⁻¹), amount of NH₄-N absorption (mg plnat⁻¹), amount of PO₄-P absorption (mg plnat⁻¹), and variation of pH.

Treatment	NH ₄ -N (mg l ⁻¹)	NH ₄ -N absorption (mg plnat ⁻¹)	PO ₄ -P absorption (mg plnat ⁻¹)	pH variation
NH ₄ -N (mg l ⁻¹)	1.0000			
NH ₄ -N (mg plnat ⁻¹)	0.9596	** ^z	1.0000	
PO ₄ -P (mg plnat ⁻¹)	-0.8839	**	-0.8465	**
pH variation	-0.8237	**	-0.8653	**
			1.0000	
			0.7452	**
				1.0000

^z Population correlation coefficient are not 0 at P < 0.01 level by uncorrelation tset.

Table 4-5 Standard value of model of relation between the concentration of NH₄-N and the absorption speed (mg plant⁻¹ day⁻¹).

	Formula	R ²	AIC ^z
Gompertz curve	$y=ae^{(-bc^x)}$	1.0000	-104.6508
Cubic curve	$y=ax^3+bx^2+cx+d$	1.0000	-65.2643
Logistic curve	$y=a/(1+be^{-cx})$	1.0000	-52.0012
Ogive	$y=a(1-(1+bx)e^{-bx})$	0.9039	-5.3696
Rectangular hyperbola	$y=ax/(b+x)$	0.8533	-3.6788
Threshold curve	$y=a(x/b)^c/(1+(x/b)^c)$	0.9033	-3.3429
Quadric curve	$y=ax^2+bx+c$	0.8673	-2.0780

^zAkaike's information criterion.

Table 4-6 The amount of fertilizer used for making the stock solution or the correction of concentration of nutrient solution (g).

Treatment	Date	NH ₄ NO ₃	NH ₄ H ₂ PO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	KNO ₃	K ₂ SO ₄	MgSO ₄ · 7H ₂ O	Total Weight
IIAS normal	Sep. 25	0.3	1.0	0.0	2.9	18.0	18.5	0.0	7.0	47.6
	Oct. 16	9.5	4.7	0.2	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0	22.1
	Oct. 19	82.6	26.3	2.4	0.0	61.2	0.0	0.0	0.0	172.6
	Oct. 28	0.0	0.0	0.0	0.1	165.8	161.2	0.0	25.7	352.8
IIAS 30:1	Sep. 25	0.3	1.0	0.0	2.9	18.0	18.5	0.0	7.0	47.6
	Oct. 16	0.0	0.2	0.0	8.7	16.0	0.0	0.0	0.0	25.0
	Oct. 23	0.9	0.7	0.0	6.8	67.8	9.2	0.0	3.5	88.9
	Oct. 30	0.0	2.1	3.5	146.3	179.4	0.0	8.9	25.9	366.1
IIAS fuzzy	Sep. 25	0.3	1.0	0.0	2.9	18.0	18.5	0.0	7.0	47.6
	Oct. 09	0.0	0.1	0.3	7.8	43.4	8.7	21.3	0.0	81.6
	Oct. 19	1.2	0.7	0.0	6.5	37.1	23.3	0.0	0.0	68.9
	Oct. 28	21.7	13.3	0.0	59.4	215.8	99.8	0.0	13.9	423.9
	Nov. 13	0.0	6.6	0.5	88.9	203.3	9.3	6.1	35.4	350.1
PEIS	Oct. 02	1.5	10.4	0.0	0.0	20.5	0.0	0.0	4.1	44.4
	Oct. 09	7.3	0.0	3.0	0.0	26.9	16.3	14.1	0.0	67.7
	Oct. 16	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.3
	Oct. 23	0.0	3.9	6.7	0.0	41.5	67.5	0.0	0.0	119.5
	Oct. 30	4.3	14.6	0.0	22.9	68.5	17.1	0.0	9.3	136.6
	Nov. 06	11.4	3.5	0.0	25.6	42.6	39.2	0.0	7.5	129.8
	Nov. 13	9.2	0.0	0.0	0.0	25.7	23.0	0.0	6.9	64.9

Table 4-7 The amount of element used for making the stock solution or the correction of concentration of nutrient solution (g).

Treatment	NO ₃ -N: NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
IIAS normal	3.8: 1	12.816	3.412	1.750	13.592	7.752	0.702	1.031
IIAS 30:1	26.3: 1	7.285	0.277	6.563	12.177	8.541	0.761	1.413
IIAS fuzzy	14.2: 1	17.459	1.230	7.746	25.295	16.342	1.370	2.668
PEIS	4.2: 1	9.669	2.320	3.476	13.947	6.100	0.604	1.064

Table 4-8 Effect of the management of nutrient solution on the marketable yield in cucumber.

Treatment	Number of marketable fruit per plant
IIAS normal	23.7a ^z
IIAS 30:1	24.3a
IIAS fuzzy	23.5a
PEIS	23.7a

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

Table 4-9 Effect of the management of nutrient solution on NO₃-N, PO₄-P and SO₄-S concentration in juice extraction of fruits (mg l⁻¹).

Treatment	NO ₃ -N			PO ₄ -P			SO ₄ -S		
	Oct. 23	Nov. 05	Nov. 18	Oct. 23	Nov. 05	Nov. 18	Oct. 23	Nov. 05	Nov. 18
IIA normal	267.2 a ^z	468.6 a	211.5 a	247.0 a	497.8 a	307.3 a	123.2 b	220.2 a	272.5 a
IIA 30:1	377.4 a	401.5 a	126.6 a	443.6 a	207.7 a	497.5 a	253.2 a	145.9 a	215.2 a
IIA fuzzy	295.0 a	608.1 a	182.9 a	446.7 a	333.7 a	570.7 a	184.0 ab	151.3 a	199.9 a
PEIS	300.0 a	425.3 a	59.4 a	333.4 a	365.6 a	418.3 a	241.1 b	140.5 a	179.5 a

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

Table 4-10 Effect of the management of nutrient solution on Ca, K, Mg and NH₄-N concentration in juice extraction of fruits (mg l⁻¹).

Treatment	Ca			K			Mg			NH ₄ -N		
	Oct. 23	Nov. 05	Nov. 18	Oct. 23	Nov. 05	Nov. 18	Oct. 23	Nov. 05	Nov. 18	Oct. 23	Nov. 05	Nov. 18
IIA normal	612.4 a ^z	629.3 a	554.2 b	191.0 a	38.5 a	166.0 a	385.2 b	419.7 b	439.2 b	110.4 b	353.8 a	286.2 a
IIA 30:1	543.9 a	773.7 a	793.0 a	47.4 a	164.0 a	48.8 a	491.9 a	498.2 a	540.5 a	154.2 a	186.5 a	213.6 a
IIA fuzzy	735.3 a	839.7 a	630.5 b	29.2 a	32.0 a	65.5 a	421.3 b	500.2 a	471.1 b	175.4 a	165.9 a	176.8 a
PEIS	621.2 a	678.5 a	513.5 b	209.3 a	264.4 a	57.5 a	366.4 b	432.5 b	420.2 b	163.8 a	144.8 a	197.6 a

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

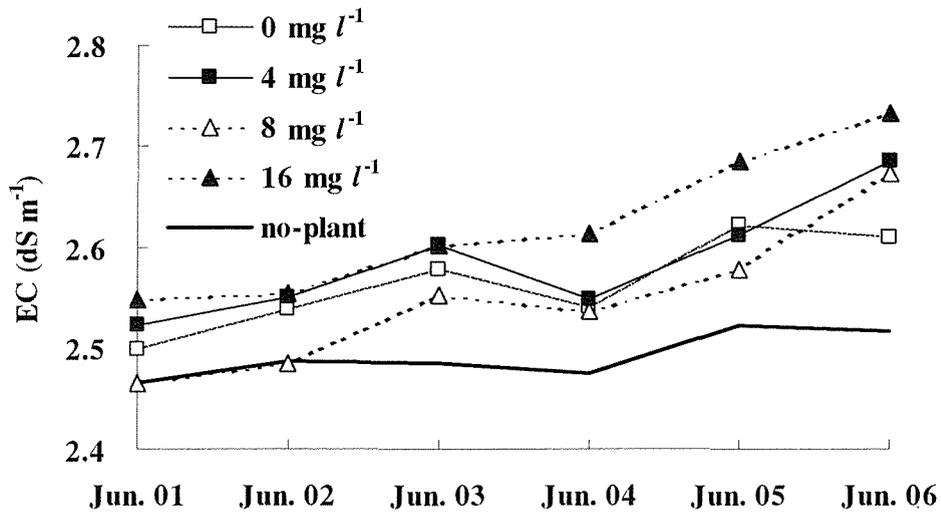


Fig. 4-1 Changes in electric conductivity of the nutrient solutions of various NH_4 concentration.

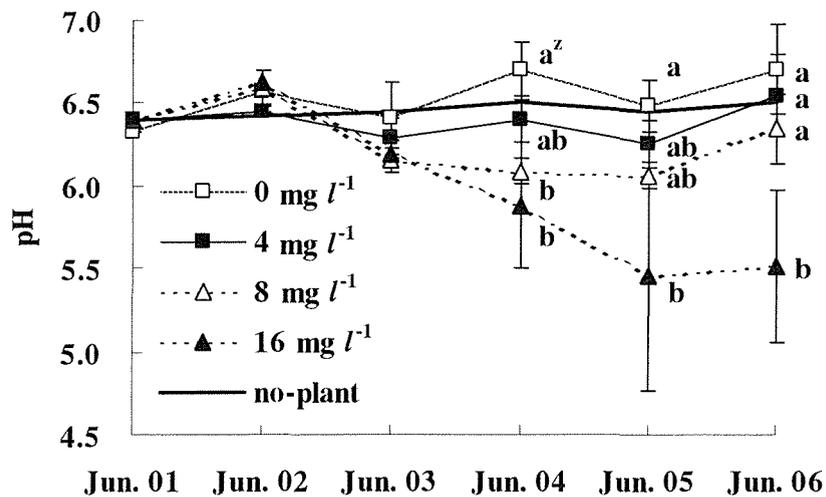


Fig. 4-2 Changes in pH value of the nutrient solutions of various NH_4 concentration.

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

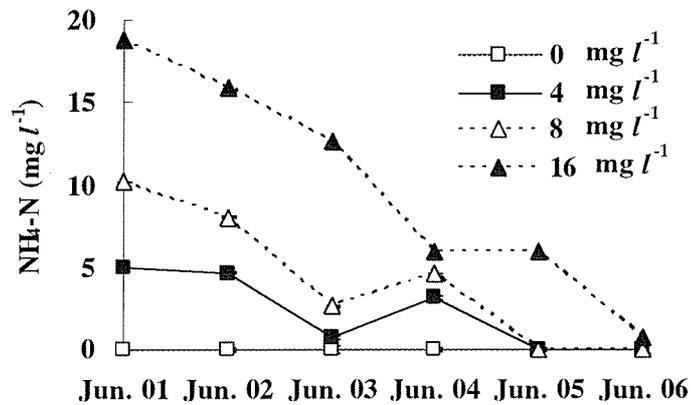


Fig. 4-3 Changes in NH₄-N concentration in the nutrient solutions of each treatment.

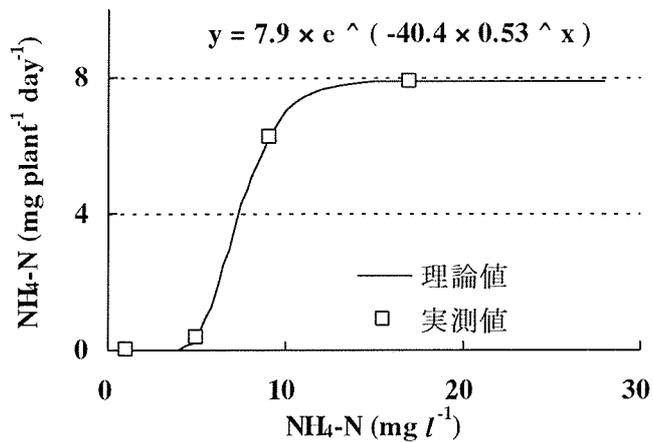


Fig. 4-4 Gompertz model of relation between the concentration of NH₄-N and the NH₄-N absorption rate (mg plant⁻¹ day⁻¹).

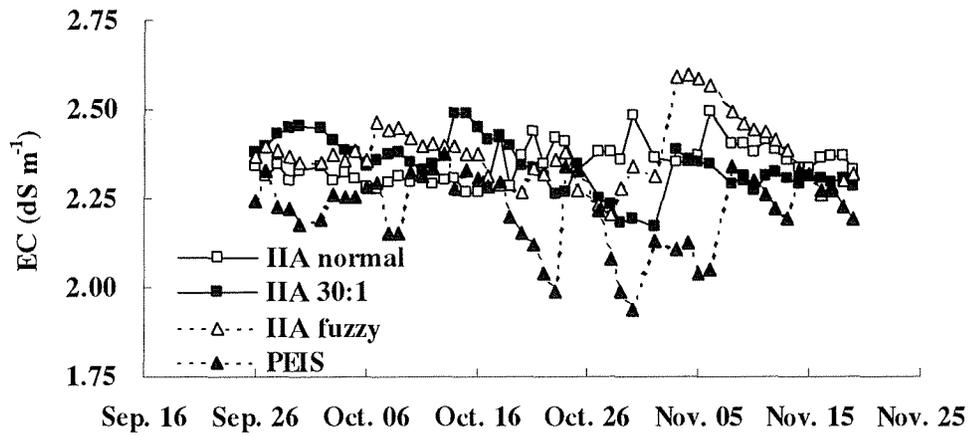


Fig. 4-5 Changes in electric conductivity of the nutrient solutions controlled by various methods.

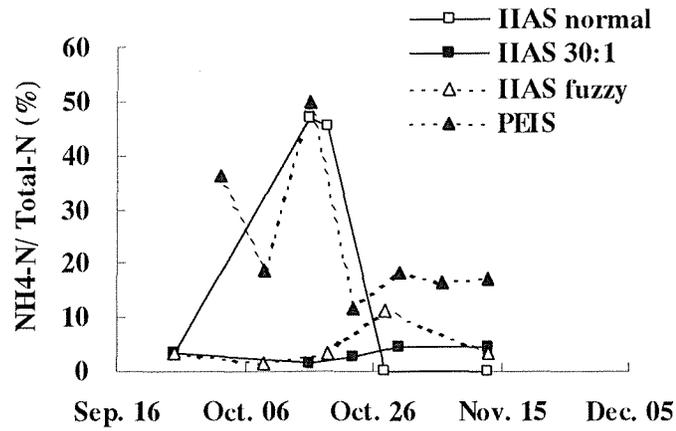


Fig. 4-6 Changes of the percentage of $\text{NH}_4\text{-N}$ in total supplied N sources.

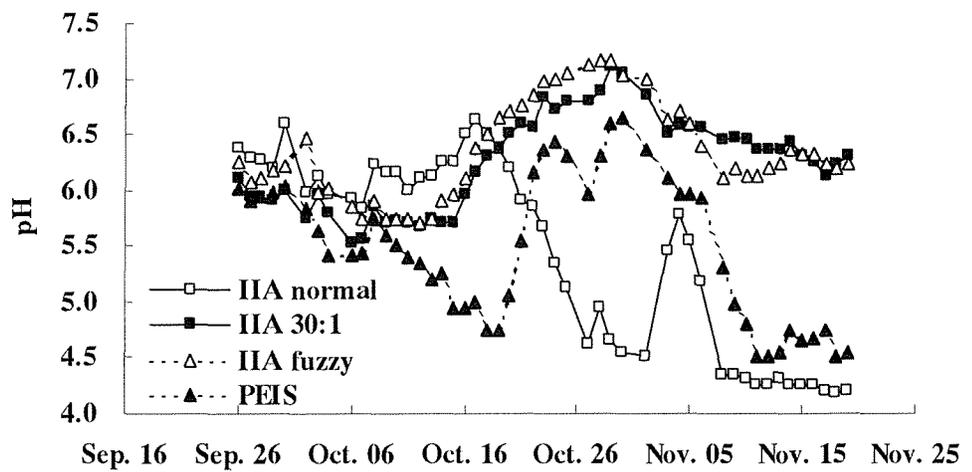


Fig. 4-7 Changes in pH of the nutrient solutions of the nutrient solutions controlled by various methods.

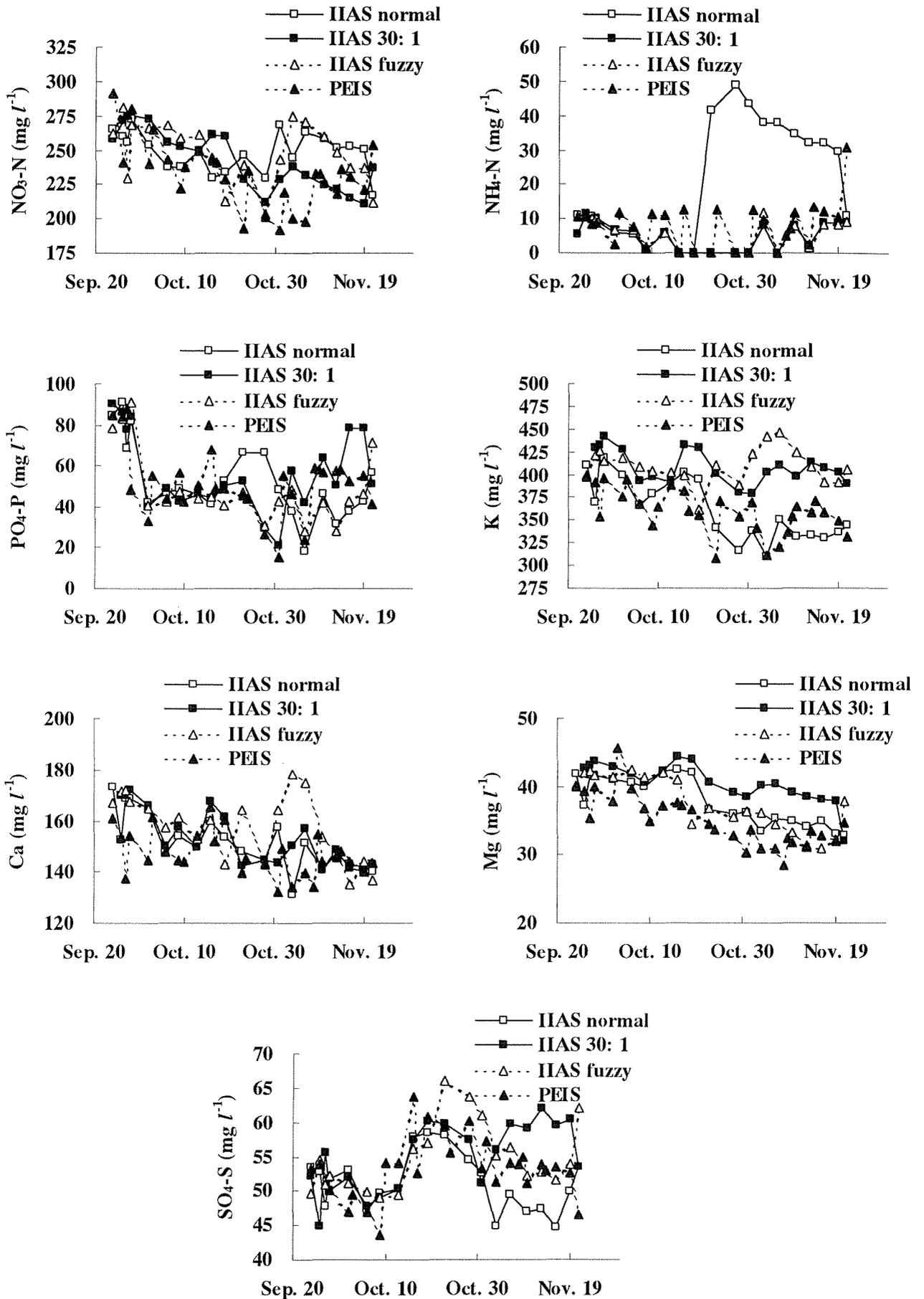


Fig. 8 Changes in macronutrient concentration of the nutrient solutions controlled by various methods.

第 5 章 イオン濃度制御法 IAS (Integrated Ion Adjuster System) における養分吸収量予測法の検討

First Calculation と Second Calculation に代わる養分吸収量予測方法の検討とキュウリの養液栽培における NH₄-N の供給方法の再検討, ECCS と EPIS, IAS の比較試験の結果について報告する.

実験 1. キュウリの積算養分吸収量予測法の検討

—First Calculation と Second Calculation, Third Calculation の比較—

これまでに行った栽培試験の結果, IAS は栽培データの蓄積が無くとも, 培養液中の各成分濃度を制御できる有効な培養液管理法であることが示された. しかし Second Calculation による養分吸収量予測には希望する補正間隔にずれが発生するなど精度的な問題が懸念された. Second Calculation は「前々回補正時から前回補正時と前回補正時から今回補正時までの吸収量の増加率」と「前回補正時から今回補正時までの吸収量」の積を「次回補正時までの養分吸収量」としていたが, 生育中期に過剰な量の濃厚液を調製してしまう傾向がみられた. そこで 2003 年 8 月から行ったキュウリ水耕栽培で得られた養分吸収量のデータを基に養分吸収量の三次回帰式を Microsoft の Excel の「近似曲線の追加」から求めた. また IAS の肥料計算法である First Calculation と Second Calculation, Third Calculation によって肥料調製に必要な養分供給量を算出し, 養分吸収量と養分供給量の当てはまりの良さを比較検討した.

材料および方法

養分吸収量は 2003 年 8 月から行ったキュウリ水耕栽培で調査した, 「肥料によって供給された各成分の供給量 (mg)」と「栽培ベッド中の培養液中各成分濃度の変化量 (mg l⁻¹)」から求めた.

$$X_{a ij} = S_{ij} + (C_{ij-1} - C_{ij}) \times L \quad (1)$$

ただし, ここで用いた記号の意味は $X_{a ij}$: 各成分の養分吸収量 (Absorption, mg) (i : NO₃-N, NH₄-N, . . . ; j : 1, 2, . . . $j-1, j$), S_{ij} : 供給量 (Supply, mg), C_{ij-1} : 前回の濃度 (Concentration, mg l⁻¹), C_{ij} : 補正時濃度 (mg l⁻¹), L : 培養液量 (Liquid measure, d m³) である. 次に各成分の積算吸収量 $TX_{a j}$ (Total $X_{a j}$) を式 (2) で表した.

$$TX_{a ij} = \sum X_{a ij} \quad (2)$$

本研究では簡素化のために各成分の積算吸収量の和を積算養分吸収量 $STX_{a j}$ (Sum $TX_{a j}$) (or Accumulation $TX_{a j}$) とし, 式 (3) で表し, 三次回帰式を求めた (Fig. 5-1).

$$STX_{a jn} = \sum TX_{a ij} \quad (3)$$

積算養分吸収量 $STX_{a j}$ と上述の 3 種の肥料計算法によって導かれた養分供給量を比較するためにシミュレーションを行った. First Calculation と Second Calculation, Third Calculation のシミュレーションはそれぞれ式 (4), (5), (6) で行った. First Calculation は「各成分の養分吸収量の和」=「各成分の供給量の和」とする.

$$Sf_j = STX_{a j} - STX_{a j-1} \quad (4)$$

$$Ss_j = Sf_{j-1} / Sf_{j-2} \times Sf_{j-1} \quad (5)$$

$$St_j = (Sf_{j-1} / Sf_{j-2}) / (Sf_{j-2} / Sf_{j-3}) \times (Sf_{j-1} / Sf_{j-2}) \times Sf_{j-1}$$

$$St_j = Ss_j / Ss_{j-1} \times Sf_{j-1} \quad (6)$$

ただし、 Sf_j と Ss_j 、 St_j は各成分の供給量の和とした。養分吸収量の実測値の計算及びシミュレーションは定植後 10 日間隔で行った。

結果および考察

シミュレーションの結果、First Calculation は初期の供給量 Sf_j が吸収量 STX_{aj} よりも大幅に少なく、実用にあたってはその影響から濃厚液の補正間隔が短く、補正回数が多くなると推測される (Fig. 5-2)。さらに後期は養分吸収量 STX_{aj} を大きく上回る量の肥料量 Sf_j が供給されるため、後期の養分吸収特性に応じて調製した濃厚液が余り、また濃厚液の残量がある間は補正を行わないために培養液組成がアンバランスになる恐れがある。Second Calculation は中期の供給量 Ss_j が吸収量 STX_{aj} よりも多く、その影響から補正間隔が延び、培養液組成がアンバランスになる恐れがある。Third Calculation は中期の供給量 St_j が吸収量 STX_{aj} よりも若干少なく、補正間隔が短くなる可能性はあるが、後期の供給量 St_j と吸収量 STX_{aj} はほぼ同じ値をとり、よく適合していると考えられる。

IIAS は 1 度目の補正を First Calculation、2 度目の補正を Second Calculation、3 度目以降を Third Calculation により濃厚液作成に必要な肥料量 STX_{aj} を算出するが、本実験のシミュレーションの結果、First Calculation と Second Calculation による養分吸収量予測の方法には改良の必要性が認められた。さらに、実際の肥料計算には補正間隔 (日) や株数、初期濃厚液の量などを考慮する必要がある、3 種の計算法について開発・改良、方法の選択の検討を行うことはとても煩雑である。従って、養分吸収量予測をよりシンプルかつ正確に行う方法が必要である。

実験 2. キュウリの積算養分吸収量予測法の検討

—三次回帰式による養分吸収予測法と実用化試験—

IIAS では 1 度目の補正は First Calculation で、2 度目の補正は Second Calculation で、3 度目以降は Third Calculation で濃厚液作成に必要な肥料量を算出するが、3 種の方法を比較するシミュレーションの結果 First Calculation と Second Calculation による養分吸収量の予測に精度的な問題があることが明らかになった。また、実際の肥料計算には補正間隔 (日) や株数、初期濃厚液の量などを考慮する必要がある、3 種の計算法について開発・改良、方法の選択の検討を行うことはとても煩雑である。従って、養分吸収量予測をよりシンプルかつ正確に行う方法が必要である。そこで、実験 1 で積算養分吸収量のシミュレーションに用いた三次回帰式を養分吸収量予測に用いて IIAS の改良を行った。

また、これまでの実験結果から IIAS による管理下で $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 30 : 1$ の条件で $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量を制御して栽培した結果、培養液の pH に急激な低下はみられなかもこの、生育中期に培養液の pH が高くなる傾向がみられた。このため、生育段階に応じて $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量を制御することで、培養液の pH 上昇を抑え適正範囲に保つことにより養分吸収を促し、増収が見込めると考えられる。

本研究では、養分吸収量予測に従来法の First Calculation と Second Calculation、Third

Calculation の代替として三次回帰式を用いて養分吸収量予測精度を高めると共に、培養液の pH 制御を目的として、追加供給する肥料の $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ の最適な管理方法を検討した。

栽培試験前までの改良

改良 1：濃厚液調製に必要な成分量の計算は First Calculation をベースとし、次回補正時までの各成分の和の積算養分吸収量 STX_{a_j} の予測には以前の栽培結果の「定植後日数 (DAP, Day After Planting)」と「全成分 (和) の積算養分吸収量」から導いた三次回帰式を用いた (Fig. 5-1)。次回補正時までの各成分の吸収量の予測値は、簡素化のため前回補正時から今回補正までに吸収された各成分の比率から算出した。さらに「各成分の吸収量の計算 (予測) 値」と「培養液補正に必要な各成分量」の和から必要な肥料量を IonAdjuster により算出した。

栽培試験中の改良

改良 2：これまで濃厚液の枯渇後に新たな濃厚液の調製を行ったが、濃厚液の残量を考慮し、作業計画 (濃厚液調製スケジュール) に従って濃厚液を調製できるようにプログラムの改良を行った。濃厚液の残量から各成分の残量を計算し、新たな濃厚液の調製に必要な成分量から差し引き、その値に従って濃厚液を調製した。

改良 3：DAP を x 軸とした三次回帰式による養分吸収量予測では、異なる条件で栽培したデータを加えて三次回帰式を補正することで精度を高められると考えたが、本実験の IIAS fuzzy 2 では生育後期には R^2 が 0.8 台になった。この方法は生育中期までは決定係数が 0.9 程度であったが、生育後期では新たなデータの方が以前のデータより大幅に大きくなってしまい、三次回帰式の極大値 (DAP 52 付近) が栽培途中に現れてしまった。そこで、三次回帰式に新たなデータを加えず、以前のデータで作成した三次回帰式から次回補正時までの養分吸収量増加率を算出し、「新たに得られた積算養分吸収量」と「三次回帰式から求めた増加率」の積から「次回補正時までの積算養分吸収量」を算出した。

材料および方法

キュウリ (*Cucumis sativus* L.) ‘アルファー節成’ (久留米原種育成会) を供試し、2004 年 3 月 4 日に播種し、子葉展開まで 28°C 恒温器内で管理した。子葉展開後の 4 月 3 日に自然条件下のシクスライトハウス内に設置した $60\text{cm} \times 30\text{cm} \times 20\text{cm}$ の容器に移植し、本葉が 3 枚展開するまで湛液育苗した。培養液には 1/2 単位大塚 SA 処方 (大塚ハウス肥料) を用い、エアーポンプによって曝気を行った。4 月 23 日にベッド ($400\text{cm} \times 36\text{cm} \times 21\text{cm}$, 地上高 55cm , 1 列) に株間 50cm で 1 ベッド当たり 6 個体ずつ 1 処理区 1 ベッドに定植し、湛液型循環式水耕にて栽培した。整枝方法は力枝 2 本の子づるをつけ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、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 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 , $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, EDTA-Fe) を用いて調製した。各区の培養液量 (ベッド内 $\times 1$ + タンク内 $\times 1$) は 300 dm^3 とした。培養液管理法は PEIS と IIAS を用い、IIAS は IIAS 30: 1, IIAS fuzzy 1, IIAS fuzzy 2 の 3 通り計 4 区で栽培試験を行った。IIAS の初期濃厚液は大塚 SA 処方とし、濃厚液調製間隔の目標設定は 14 日とした。PEIS の培養液の補正は週に 1 回行った。PEIS の培養液

中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の設定値と IAS の濃厚液によって供給される肥料の $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ の管理は Table 1 のように行った。また、2004 年 6 月 14 日の IAS fuzzy 2 の肥料計算は、今作の養分吸収量データを用いず 2003 年 8 月から行った栽培試験の養分吸収量データから増加率を求めて養分吸収量を予測した。培養液中の成分分析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）を用い、カチオン Na 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 K 、 Ca 、 Mg は IC-Cation I/II-HR カラム（東ソー）、アニオン $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SO}_4\text{-S}$ 、 Cl は PCI-201S カラム（東亜 DKK）を用いて行った。IAS シリーズの培養液の EC 値は 2.4 dS m^{-1} の定値制御とし、EC 制御には SS 式肥料管理機（CI 化成、AS-3）を用いた。PIES の培養液の EC 値は特に制御を行わなかった。培養液の pH と EC 値の定期的な測定には pH メータ（堀場、M-8）と電気伝導度計（東亜 DKK、TCX-90i）を用いた。果実は果長 22 cm 前後で収穫し、5 月 13 日から 7 月 2 日まで収穫を行った。

結果および考察

濃厚液の調製と培養液の補正の回数は PIES が 7 回、IAS 30:1 が 3 回、IAS fuzzy 1 が 4 回、IAS fuzzy 2 が 5 回であった（Table 5-1, 5-2）。Table 1 の 4 月 23 日は PIES の初期培養液と IAS シリーズの初期濃厚液を示している。5 月 10 日の IAS シリーズの濃厚液調製は三次回帰式から養分供給量を求めた。6 月 14 日に調製した IAS fuzzy 1 の濃厚液中 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ が設定値よりも大きくずれた原因は、濃厚液調製に必要な各成分量が少なかったために肥料計算に大きな誤差が生じたと考えられる。また 6 月 14 日の濃厚液調製は全ての区を改良 2 に従って行った。さらに 6 月 14 日の IAS fuzzy 2 は改良 3 に従って行った（Fig. 5-3）。

濃厚液または培養液補正に使用した 1 個体あたりの各成分量は $\text{NH}_4\text{-N}$ を除き、IAS fuzzy 2 が最も多くなった（Table 5-3）。これは IAS fuzzy 2 において生育後期に濃厚液の調製を行った結果、濃厚液調製に多量の肥料が使われたためである。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量は PIES が最も多く、また $\text{NO}_3\text{-N} / \text{NH}_4\text{-N}$ も最小となった（ $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 6.0 : 1$ ）。

培養液中の各成分濃度は PIES で生育が旺盛で養分吸収量の多い生育中期に $\text{NO}_3\text{-N}$ と K 、 Ca の濃度が培養液補正後から次の補正時までの間に大幅に低下した（Fig. 5-4）。一方 IAS シリーズでは PIES 程の変化はなく、設定濃度を比較的維持することができた。また培養液の EC 値も同様な傾向がみられ、IAS シリーズは 2.4 dS m^{-1} 前後で安定して推移した（Fig. 5-5）。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の推移は PIES が補正毎に設定値付近まで上昇しその後下降する波形となったが、IAS シリーズは生育中期から検出値以下で推移した。PIES は補正毎に $\text{NH}_4\text{-N}$ がまとまって供給されたため $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が上昇し、IAS シリーズは肥料供給をリアルタイム制御かつ $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給が比率制御であるため $\text{NH}_4\text{-N}$ は少量ずつ供給され、さらに植物体によって速やかに吸収されたことにより $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が検出値以下で推移したと考えられる。また生育後期の PIES では $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の低下が緩やかになり、IAS シリーズでは検出されるようになったが、これは生育後期に N 源のうち $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収比率が供給比率よりも下回ったためと考えられる（Table 5-1）。

培養液の pH は PIES の生育後期に低下傾向がみられた（Fig. 5-6）。これは PIES の栽培前、中期に供給された N 源が $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 10 : 1$ 程度であったのに対し、後期には $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸収量が減少し N 源が $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 2 : 1$ の比率で供給されたこ

とが原因と考えられる。そのため、PEIS で用いた定値制御による培養液管理では、NH₄-Nの過剰供給を防ぐためには補正間隔や生育段階に応じてNH₄-Nの供給量を調整する必要があり、適宜NH₄-Nの設定濃度の調整を行わなければならない。しかし、IIAS で用いたNH₄-N供給の比率制御は供給するNO₃-N：NH₄-Nを30：1～20：1の範囲で制御を行うことによりNH₄-Nの過剰供給を防ぐことができかつ培養液のpHを容易に安定化できる。

時期別の可販果数を比較すると、初期収量に有意差はなく、中・後期はPEISよりもIIASシリーズの方が多くなった（Table 5-4）。また、総可販果数はPEISよりもIIASシリーズが有意に多くなった。

養分吸収量における各成分の総量はNH₄-NがPEISで最も多く、その他の成分はIIAS fuzzy 2で最も多くなった。PIESとIIASシリーズを比較すると、NH₄-N以外の成分ではIIASの方が多くなった（Table 5-5）。これは培養液中の各成分濃度の変動が影響していると考えられる。IIASシリーズでは栽培期間中培養液中の各成分濃度を設定濃度にある程度維持できたが、PEISは生育が盛んで養分吸収量が多くなる生育中期に養分濃度が低下し、IIASシリーズに比べ養分吸収速度が低かったためである（データ略）。その傾向はKとCaで顕著であった。

本実験の結果、IIASの養分吸収量予測へ三次回帰式を導入する際は、新たに得られたデータで三次回帰式を修正するのではなく、「三次回帰式から読み取れる増加率」と「新たに得られた養分吸収量」の積から養分吸収量を予測するべきであることが明らかになった。またIIASによる培養液管理は地下部の環境変動が小さく、養分吸収に適した条件を維持でき、PEI Systemに比べ増収が期待でき、これまでの栽培試験の結果を裏付けることができた。

実験 3. キュウリ養液栽培における ECCS と PEIS, IIAS, 三種の培養液管理法の比較ならびに NH₄-N 供給方法の実証試験

これまで ECCS と PEIS または PEIS と IIAS の比較実験しか行われていなかったため、本実験では従来法である ECCS と最新の IIAS の比較試験を行い、同時に PEIS の追試も兼ねて行った。

また、IIAS の養分吸収量予測の改良のため、三次回帰式に代わる回帰式を検討し、栽培を行った。さらに培養液の pH 管理のため、IIAS における濃厚液中の NO₃-N：NH₄-N の最適な管理方法を検討した。

材料および方法

キュウリ (*Cucumis sativus* L.) ‘翠星節成 2 号’ (久留米原種育成会) を供試し、2004 年 9 月 10 日に播種し、子葉展開まで 28℃ 恒温器内で管理した。10 月 14 日に株間 50cm で 1 ベッド当たり 6 個体ずつ 1 処理区 1 ベッドに定植した。培養液管理は ECCS と PEIS, IIAS×2 の 3 通り計 4 ベッドで行った。IIAS の初期濃厚液は大塚 SA 処方とし、濃厚液中の NO₃-N：NH₄-N の異なる IIAS F と IIAS R の 2 区を設け、Table 5-6 に従って制御を行った。EC 制御の濃厚液には水道水中の成分濃度 (Table 5-7) を考慮した初期濃厚液を続けて使用した。収穫は 11 月 15 日から 12 月 21 日まで行った。他の方法は実

験 2 に従って行った。

結果および考察

養分吸収量予測に用いる回帰式は 2003 年 8 月から行ったキュウリ水耕栽培で得られた養分吸収量のデータを基に求めた。決定係数 R^2 と上田の選択基準 R_u 、芳賀の選択基準 R_h 、赤池の情報量基準 AIC から判断しロジスティック曲線を用いた (Table 5-8)。またロジスティック曲線は漸近線に向かって増加するため、三次回帰曲線のように極大値の後に値が低下する様なことはなく、積算養分吸収量を表すのに適していると考えられる。

濃厚液の調製と培養液の補正の回数は ECCS 2 回、PEIS 5 回、IIAS F 3 回、IIAS R 3 回となった (Table 5-9, 5-10)。ECCS の濃厚液は 2 回とも同じ成分比率のものを用いた。従って、IIAS は PEIS より培養液の補正に関する労働を軽減できることが示された。

培養液の EC は、PEIS で培養液の補正操作に従って波形となったが、その他の区ではほぼ一定に保たれた (データ略)。

培養液の pH の推移は IIAS F と ECCS に同様な傾向がみられ、栽培初期に上昇し、pH 7.0 ~ 7.5 の間で推移した。PEIS と IIAS R は栽培初期に低下し、PEIS は pH 6.5 付近、IIAS R は pH 6.0 付近で推移した (Fig. 5-7)。pH の差異は供給した $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ の差異によるもので、PEIS の 11 月 22 日と IIAS R の 11 月 15 日に供給した肥料の $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ が 20 以下であったことが原因と考えられる。また ECCS と IIAS F の pH の推移はこれまでの栽培実験の結果と同様に栽培初期に供給した肥料の $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ が 30 程度であったためと考えられる。従って、培養液の pH を 7.0 以下で維持するためには、栽培初期に供給する N 源の $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ を 10 ~ 17 にする必要があると考えられる。

可販果数と乾物率、葉の SPAD 値には処理区間に有意な差はみられなかったが、総可販果数は IIAS > PEIS > ECCS となった (Table 5-11)。従って、IIAS を用いることによって増収が可能となった。

培養液中の成分濃度の推移は、台風の影響を受け、若干乱れがみられた。また PEIS では主に $\text{NO}_3\text{-N}$ と K の濃度が培養液補正操作に従って波形となった。その他の区では比較的变化が緩やかであった (データ略)。

IIAS で行った養分吸収量予測は、IIAS F で実測値よりも若干少なく予測されたが、IIAS R では精度良く予測できた (Fig. 5-8)。従って、IIAS の養分吸収量予測にロジスティック曲線を用いることが可能であることが示された。

本実験は秋作であったためか、PEIS と ECCS における培養液中の各成分濃度の変化が小さかった。養分吸収が盛んな夏作であれば、IIAS の真価をより鮮明に示すことができたと推測される。

摘要

1) キュウリ養液栽培の培養液管理システムとして IIAS を導入することにより、培養液中の各成分濃度の管理を PEIS と遜色なく行え、濃度変化を抑えることができた。また PEIS よりも増収と省力化が可能となった。

2) キュウリの積算養分吸収量予測法には First Calculation や Second Calculation, Third Calculation よりも三次回帰式が適しており, さらにロジスティック曲線が最適であることが明らかとなった.

3) 濃厚液調製時の濃厚液残量を考慮することにより作業計画に沿って作業ができるように培養液管理方法を改善することができた.

4) ECCS では培養液中の Ca 濃度の低下傾向, $\text{SO}_4\text{-S}$ 濃度の上昇傾向がみられ, イオン濃度制御法の必要性が示された.

5) キュウリ養液栽培では, 栽培初期に追加供給する N 源の $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ を 10 ~ 17 にすることで pH の上昇を抑制でき, 中期以降は 30 以上にすることで pH の低下が抑制できた.

以上のことにより, 養液栽培の培養液管理システムとして IAS を導入し, 濃厚液によって追加供給する N 源の $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ を適切に管理することで培養液の pH 管理が適切に行え, 増収や省力化に有効であることが示された.

Table 5-1 The set point of $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration in the nutrient solution, the setup supply ratio of $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ (SSR) in the stock solution, the actual supply ratio of $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ (ASR), and the absorption ratio of $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ (AR).

Date	Set-point control		IIAS 30: 1		IIAS fuzzy 1		IIAS fuzzy 2	
	Set point (ASR)	AR	SSR (ASR)	AR	SSR (ASR)	AR	SSR (ASR)	AR
2004. 4. 23	8.0 (29.2:1)		30 : 1 (29.2:1)		30 : 1 (29.2:1)		30 : 1 (29.2:1)	
2004. 5. 10	8.0 (2.2:1)	6.2: 1	30 : 1 (29.4:1)	8.0: 1	30 : 1 (28.1:1)	4.7: 1	30 : 1 (33.7:1)	1.1: 1
2004. 5. 17	8.0 (9.7:1)	11.4: 1			20 : 1 (19.1:1)	22.5: 1		29.3: 1
2004. 5. 24	8.0 (7.6:1)	14.8: 1		15.4: 1				
2004. 5. 25			30 : 1 (25.1:1)			13.3: 1		12.7: 1
2004. 5. 31	8.0 (10.0:1)	10.4: 1	30 : 1 (38.5:1)	15.1: 1	20 : 1 (19.1:1)		20 : 1 (18.9:1)	10.6: 1
2004. 6. 7	8.0 (6.8:1)	7.7: 1						
2004. 6. 14	8.0 (1.0:1)	0: 1				13.3: 1		42.7: 1
2004. 6. 21	8.0 (2.2:1)	11.7: 1		106.4: 1	20 : 1 (46.2:1)		20 : 1 (20.5:1)	
		2.9: 1				1: 0		136.6: 1

Table 5-2 The amount of fertilizer used for making the stock solution or the correction of concentration of nutrient solution (g).

Treatment	Ca(NO ₃) ₂ •										MgSO ₄ •			Total Weight
	NH ₄ NO ₃	NH ₄ H ₂ PO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄	4H ₂ O	KNO ₃	K ₂ SO ₄	7H ₂ O						
PEIS	May. 10	2.60	0.00	2.10	0.00	11.38	1.38	7.66	0.00	0.00	0.00	25.12		
	May. 17	7.29	1.20	0.00	13.22	58.60	39.39	0.00	1.04	0.00	0.00	120.74		
	May. 24	6.43	10.58	0.00	23.90	94.80	43.65	0.00	18.76	0.00	0.00	198.12		
	May. 31	11.50	3.65	0.00	34.93	124.50	55.93	0.00	15.75	0.00	0.00	246.27		
	Jun. 07	8.01	3.92	0.00	15.28	62.03	29.40	0.00	11.03	0.00	0.00	129.68		
	Jun. 14	7.49	8.49	0.00	2.20	8.90	0.00	0.00	5.06	0.00	0.00	32.14		
IIAS 30: 1	Jun. 21	7.32	0.00	0.00	0.00	6.49	5.30	0.00	3.89	0.00	0.00	23.00		
	Apr. 23	0.27	0.95	0.00	2.90	17.97	18.54	0.00	6.97	0.00	0.00	47.61		
	May. 10	3.41	0.11	0.24	36.98	75.35	71.13	20.58	12.55	0.00	0.00	220.36		
	May. 25	0.00	12.44	0.00	30.84	278.95	36.61	0.00	15.72	0.00	0.00	374.56		
IIAS fuzzy 1	May. 31	0.02	8.30	0.00	105.42	214.53	98.45	0.00	32.80	0.00	0.00	459.52		
	Apr. 23	0.27	0.95	0.00	2.90	17.97	18.54	0.00	6.97	0.00	0.00	47.61		
	May. 10	0.23	1.70	0.92	67.31	45.80	50.41	9.56	0.65	0.00	0.00	176.58		
	May. 17	6.06	0.00	0.00	6.09	104.99	48.59	0.56	15.07	0.00	0.00	181.37		
	May. 31	0.19	24.82	0.00	90.78	349.67	122.01	0.00	29.70	0.00	0.00	617.18		
	Jun. 14	0.00	0.73	0.00	18.68	34.93	0.00	0.00	17.14	0.00	0.00	71.48		
IIAS fuzzy 2	Apr. 23	0.27	0.95	0.00	2.90	17.97	18.54	0.00	6.97	0.00	0.00	47.61		
	May. 10	0.00	1.88	0.73	51.15	65.64	37.39	20.63	0.00	0.00	0.00	177.42		
	May. 17	1.30	5.27	0.00	9.20	108.93	30.20	0.00	6.37	0.00	0.00	161.28		
	May. 25	13.69	0.00	0.00	21.21	230.14	110.86	0.00	30.18	0.00	0.00	406.08		
	May. 31	0.34	9.24	0.00	147.60	258.25	21.07	0.00	20.66	0.00	0.00	457.17		
	Jun. 14	7.83	3.48	0.00	0.00	165.93	113.17	0.00	26.51	0.00	0.00	316.92		

Table 5-3 The amount of fertilizer used for making the stock solution or the correction of concentration of nutrient solution (g plant⁻¹).

Treatment	NO ₃ -N: NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
PEIS	6.0: 1	12.554	2.077	4.576	15.959	10.165	0.904	1.509
IIAS 30:1	30.2: 1	16.613	0.550	7.545	24.172	16.266	1.107	2.095
IIAS fuzzy 1	20.8: 1	16.390	0.789	8.188	24.796	15.339	1.131	1.837
IIAS fuzzy 2	22.2: 1	24.650	1.112	9.591	33.608	23.475	1.476	2.602

Table 5-4 Effect of the management of nutrient solution on the marketable yield in cucumber.

Treatment	Number of marketable fruit per plant				Unmarketable(%)
	Early harvest	Mid harvest	Late harvest	Total	
PEIS	8.2 a ^z	14.3 c	3.5 b	25.0 b	19.4 a
IIAS 30:1	10.2 a	19.0 bc	12.3 a	41.7 a	12.2 a
IIAS fuzzy 1	7.7 a	26.7 a	8.2 ab	43.3 a	9.7 a
IIAS fuzzy 2	8.2 a	22.5 ab	12.5 a	43.3 a	11.3 a

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

Table 5-5 Effect of the management of nutrient solution on the amount of nutrient absorption by cucumber (g plant⁻¹).

Treatment	NO ₃ -N: NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
PEIS	7.2: 1	14.65	2.04	5.44	11.86	9.04	1.10	0.48
IIAS 30:1	22.6: 1	19.32	0.86	9.34	19.79	17.06	1.62	1.19
IIAS fuzzy 1	20.4: 1	20.64	1.01	10.26	24.34	17.35	1.71	1.31
IIAS fuzzy 2	11.5: 1	22.28	1.94	11.71	24.45	20.07	2.30	1.79

Table 5-6 The systems used in the experiment.

Treatment	System	Initial NO ₃ -N : NH ₄ -N	Supply ratio of N	Supply ratio of non N
ECCS	ECCS	30: 1	Constant ratio	Ratio control
PEIS	PEIS	30: 1	Constant ratio	Setp-point control
IIAS S	IIAS	30: 1	Constant ratio	Setp-point control
IIAS R	IIAS	10: 1	Change Ratio	Setp-point control

Table 5-7 Macronutrient composition of the tap water (mg l⁻¹).

	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
Tap water	2.64	0	0.55	3.38	15.32	3.87	5.61

Table 5-8 Standard value of model of relation between the DAP and the cumulative amount of nutrient absorption (mg plant⁻¹ day⁻¹).

		R ²	Ru	Rh	AIC
Logistic curve	$y=a/(1+be^{(-cx)})$	0.9521	0.9265	0.9339	-51.7234
Gompertz curve	$y=ae^{(-bc^x)}$	0.9479	0.9201	0.9281	-50.1389
Cubic curve	$y=ax^3+bx^2+cx+d$	0.9453	0.9161	0.9245	-49.2074
Quadratic curve	$y=ax^2+bx+c$	0.9429	0.9125	0.9212	-48.4051
Ogive	$y=a(1-(1+bx)e^{(-bx)})$	0.9399	0.9174	0.9257	-49.4345
Rectangular hyperbola	$y=ax/(b+x)$	0.9334	0.9084	0.9176	-47.4759
Threshold curve	$y=a(x/b)^c/(1+(x/b)^c)$	0.9079	0.8588	0.8729	-39.3145

Table 5-9 The amount of element used for making the stock solution or the correction of concentration of nutrient solution (g).

Treatment	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N / NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S	Total Weight
ECCS	Oct. 14	4.68	0.16	29.17	7.92	2.99	0.68	0.90	18.23
	Nov. 15	46.77	1.60	29.17	79.19	29.88	6.81	8.98	182.29
PEIS	Nov. 15	71.80	1.95	36.84	94.93	87.00	6.03	12.61	320.55
	Nov. 22	29.38	1.77	16.60	49.83	22.96	3.81	5.03	126.69
	Nov. 29	45.95	0.32	142.91	0.00	38.54	45.53	3.05	135.71
	Dec. 06	38.80	0.29	132.05	0.00	38.47	35.37	4.15	120.23
	Dec. 13	29.13	1.68	17.35	0.00	68.12	4.36	2.68	109.52
IIAS S	Oct. 14	4.68	0.16	29.17	7.92	2.99	0.68	0.90	18.23
	Nov. 15	45.27	1.45	31.17	66.27	37.24	4.52	7.24	172.69
	Nov. 29	49.57	0.27	180.54	0.20	34.68	57.52	1.04	148.37
IIAS R	Oct. 14	4.68	0.16	29.17	7.92	2.99	0.68	0.90	18.23
	Nov. 15	31.53	2.87	10.97	44.89	45.11	3.25	4.71	173.46
	Nov. 29	32.86	0.65	50.74	0.00	35.58	28.54	1.44	101.50

Table 5-10 The amount of fertilizer used for making the stock solution or the correction of concentration of nutrient solution (g).

	NH ₄ NO ₃	NH ₄ H ₂ PO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	KNO ₃	K ₂ SO ₄	MgSO ₄ · 7H ₂ O	Total Weight
ECCS	Oct. 14	0.27	0.95	0.00	17.97	18.54	0.00	6.97	47.61
	Nov. 15	2.67	9.54	0.00	179.68	185.38	0.00	69.73	476.05
PEIS	Nov. 15	0.00	3.77	0.63	156.93	24.03	6.83	18.53	268.12
	Nov. 22	2.16	1.34	0.00	41.41	26.46	0.00	11.72	100.11
	Nov. 29	0.56	0.00	0.00	82.13	30.20	0.00	7.11	120.00
	Dec. 06	0.51	0.00	0.00	63.80	30.15	0.00	9.67	104.12
Dec. 13	2.94	0.00	0.00	7.87	53.38	0.00	8.25	72.43	
IIAS S	Oct. 14	0.27	0.95	0.00	17.97	18.54	0.00	6.97	47.61
	Nov. 15	4.72	3.05	1.32	223.93	134.38	5.27	46.28	463.05
	Nov. 29	1.60	0.00	0.00	345.82	66.28	20.37	10.67	445.64
IIAS R	Oct. 14	0.27	0.95	0.00	17.97	18.54	0.00	6.97	47.61
	Nov. 15	0.00	20.91	1.74	271.20	0.00	0.00	33.30	485.76
	Nov. 29	0.99	0.00	2.27	171.57	92.93	0.00	14.71	282.48

Table 5-11 Effect of the management of nutrient solution on the marketable yield in cucumber.

Treatment	Number of marketable fruit per plant		
	Early harvest	Late harvest	Total
ECCS	9.0 a	12.8 a	21.8 a
PEIS	11.7 a ^z	12.0 a	23.7 a
IIAS S	11.0 a	15.2 a	26.2 a
IIAS R	10.3 a	15.2 a	25.5 a

^zSame letters within a column denote no significant difference by LSD test, (5% level).

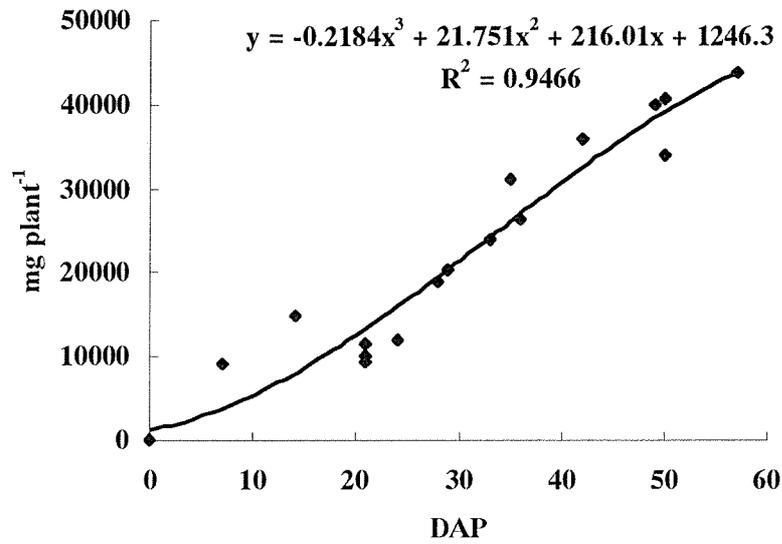


Fig. 5-1 Cumulative amount of total nutrient absorption of cucumber in hydroponics.

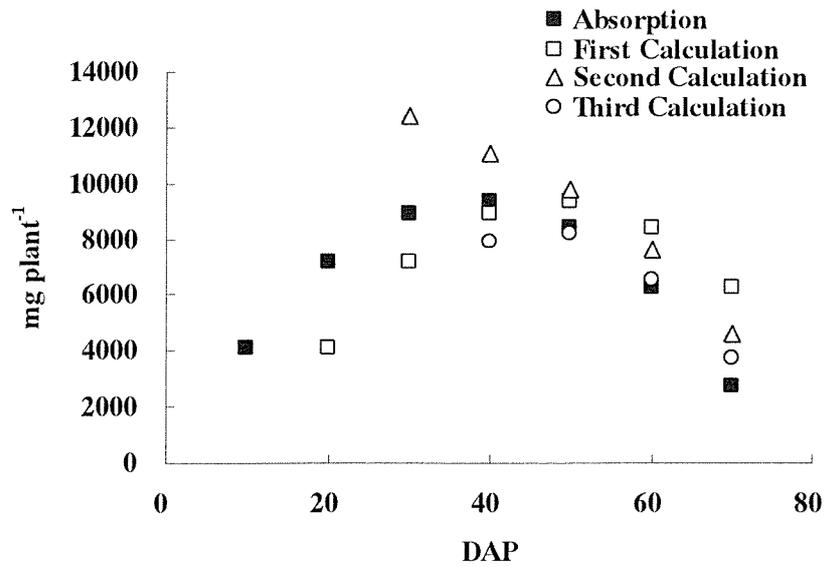


Fig. 5-2 The predicted value and the observed value of total nutrient absorption of cucumber plants in hydroponics.

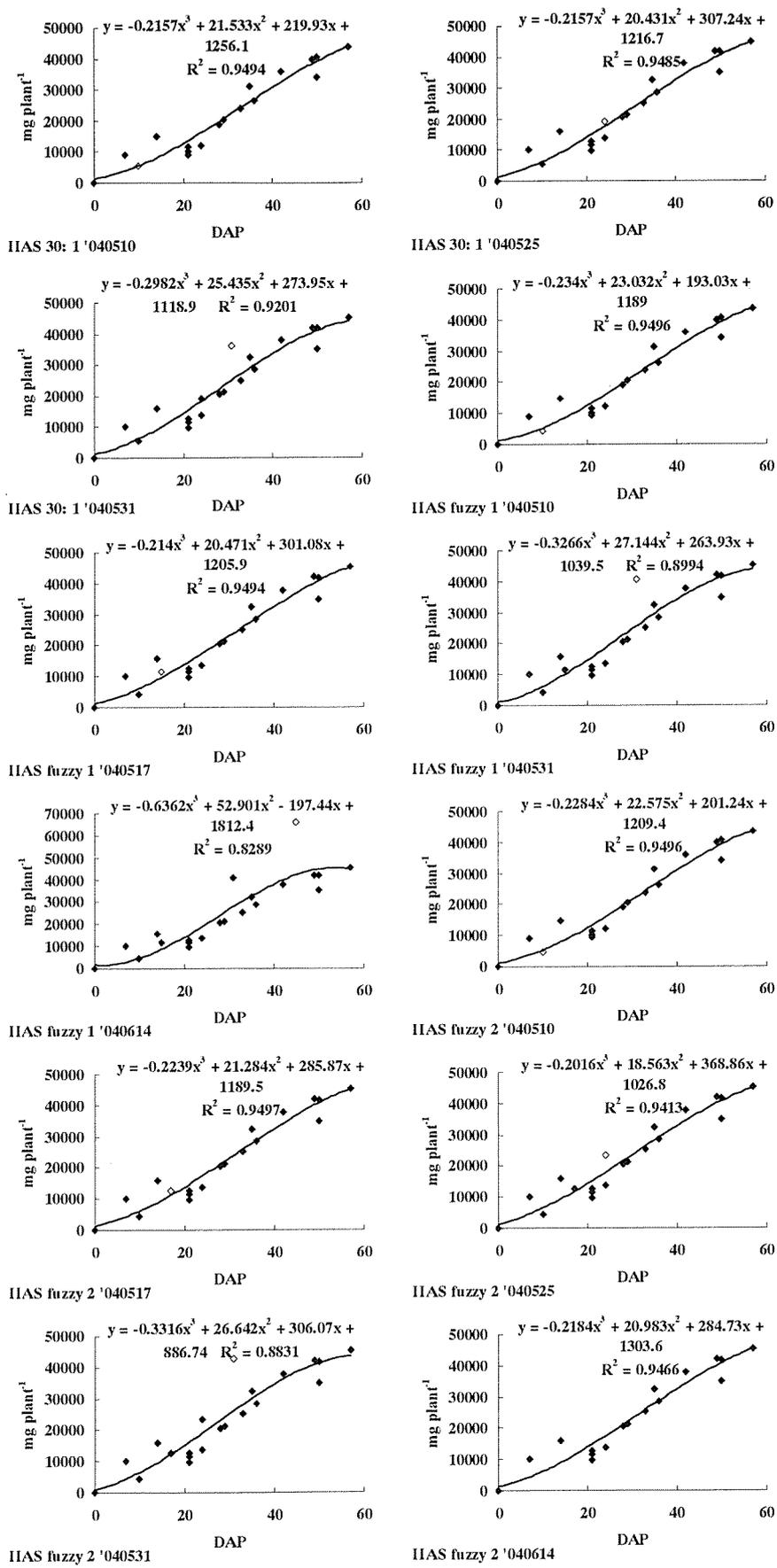


Fig. 5-3 The cubic curve used for predicting the total amount of nutrient absorption.

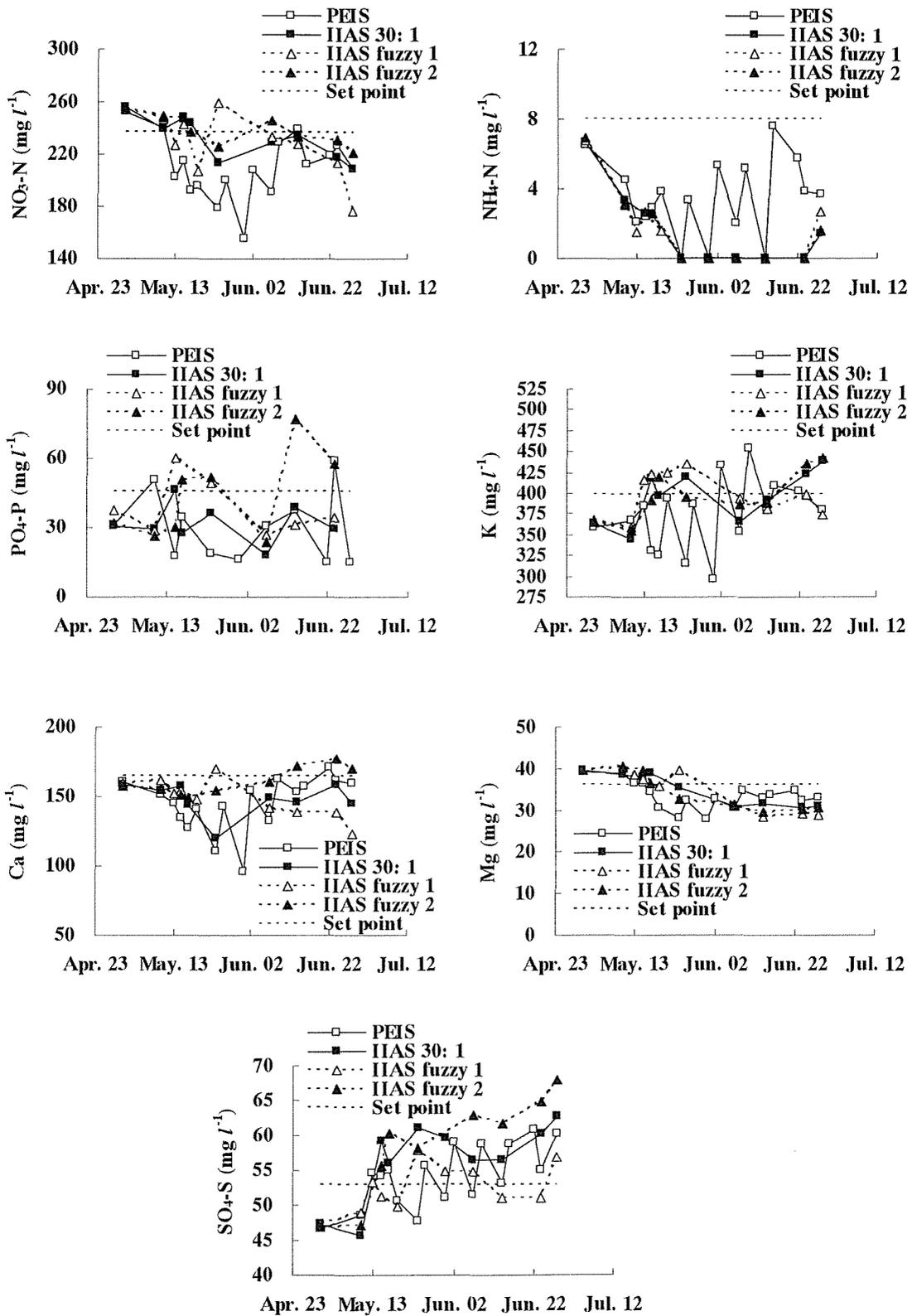


Fig. 5-4 Changes in macronutrient concentration of the nutrient solutions controlled by various methods.

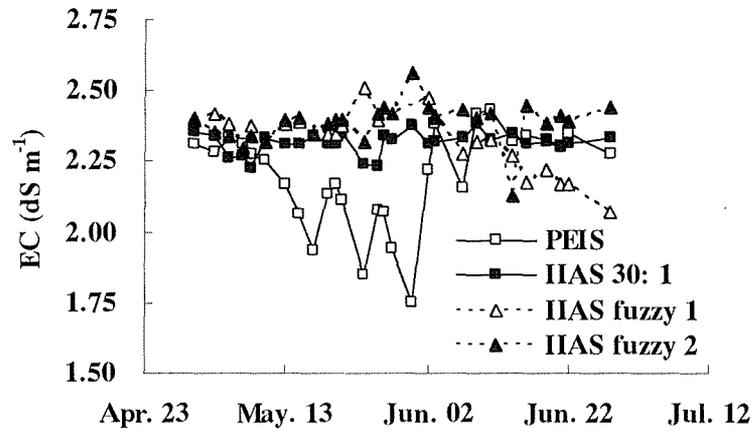


Fig. 5-5 Changes in electric conductivity of the nutrient solutions controlled by various methods.

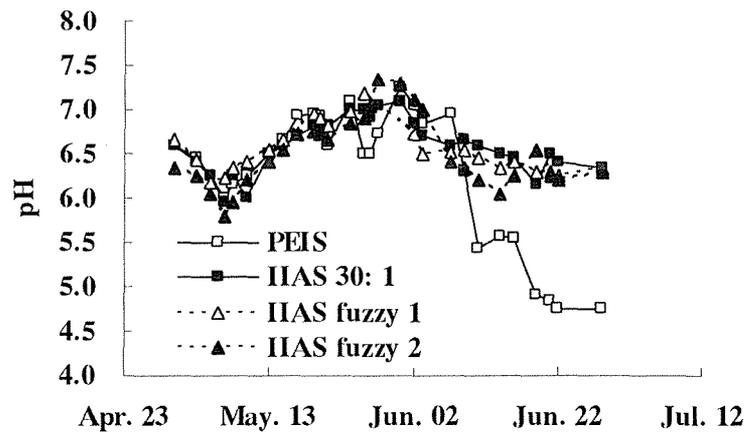


Fig. 5-6 Changes in pH of the nutrient solutions controlled by various methods.

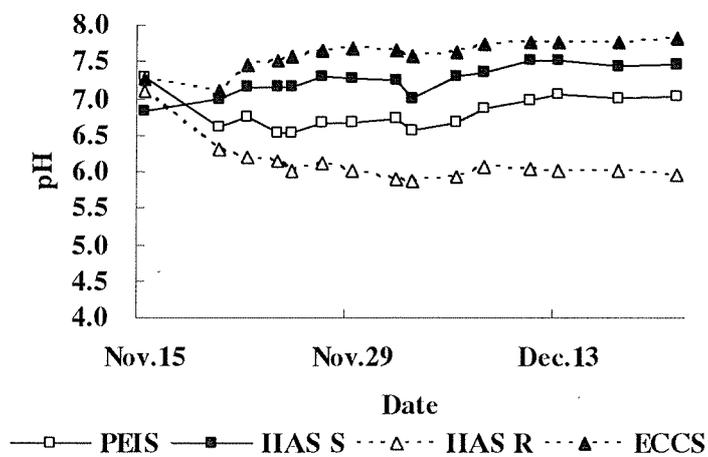


Fig. 5-7 Changes in pH of the nutrient solutions controlled by various methods.

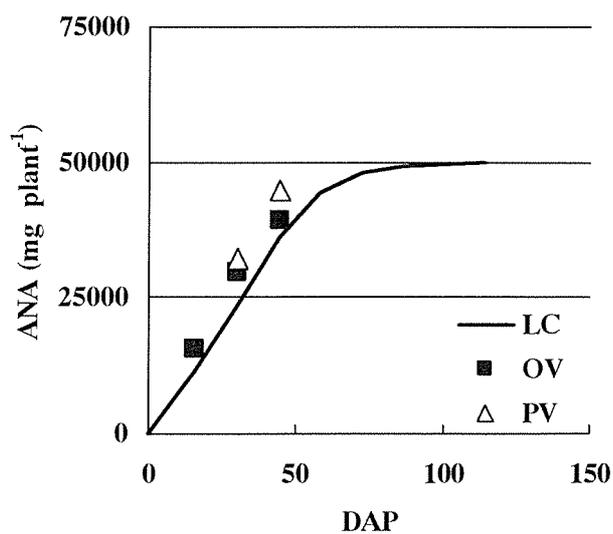


Fig. 5-8 The observed value (OV) and the predicted value (PV) of total amount of nutrient absorption (ANA), and the Logistic curve (LC) used for predicting the amount of nutrient absorption of cucumber plants in hydroponics.

総合考察

養液栽培における培養液管理は作物の収量や品質に大きな影響を与えるため特に重要である。その最適管理には培養液の組成・濃度を作物の種類・生育段階に応じて調整することが必要であるが、肥料塩混合の計算と手間が煩雑すぎ、既成の全国一律の標準処方を経営時期に関係なく採用しているのが現状である。そのため、培養液の成分バランスと植物体による各成分の吸収量にずれが生じると、組成や pH が大きく変動し、生育遅延や生理障害の発生、培養液交換の必要性が生じ、培養液無交換による長期的な栽培は不可能となる(Lopez et al., 1996; Zekki et al., 1996)。また多量の廃培養液が生じた場合、廃培養液中に含まれる NO_3^- や PO_4^{3-} イオンによる湖沼や河川、地下水の汚染が懸念される。その解決策ならびに生育促進や増収を目的として著者らの研究グループは培養液のイオン濃度制御法について研究を進めてきた。その結果、肥料計算ソフト IonAdjuster をベースとした全自動イオン濃度制御管理システムであるインテリジェントシステムを開発したが (Inden and Kubota, 1995a; Inden and Kubota, 1995b; Inden et al., 1996; Inden et al., 2000; Kubota et al., 2001)、これは植物工場での全自動化を対象としたもので初期コストが高く、一般農家への普及性は低かった。

そこでシステムコストを抑えた手動制御による廉価版イオン濃度制御管理システム(以下 PEIS, Popular Edition of Intelligent System)の開発に取り組み (Inden et al., 2001)、IonAdjuster のインターフェースの改良と肥料計算精度の向上を図り (第 1 章; Kirimura and Inden, 2003; Kirimura and Inden, 2004)、さらに EC 制御法とイオン濃度制御法を統合しシステムの低コスト化と省力化を両立させた IIA 法 (以下 IIAS, Integrated IonAdjuster System) を開発した (第 3 章)。

肥料計算の最適化について

肥料計算方法の改良により、偶発的に起こり得る特定の成分への計算誤差の集中、すなわち特定イオンのみが過剰あるいは過小に供給されるという不具合を回避でき、課題であった $\text{NH}_4\text{-N}$ 等の補正精度を高めることができた。 $\text{NH}_4\text{-N}$ は適量であれば生育促進効果 (Jung H. B. and Ito T., 1994) がある一方、植物に対する毒性があること (Levitt, 1972) や培養液の pH 変動に大きく関与する (Ikeda and Osawa, 1981; Ikeda and Osawa, 1983; Lea-Cox et al., 1999) ことなどから、養液栽培においては重要な管理要素である。特にキュウリ養液栽培では植物体による吸収が盛んで、培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は急速に低下し、同時に培養液の pH の低下を伴う。培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が若干異なるだけで、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収速度と培養液の pH 変化が大きく異なるため (第 4 章; Kirimura and Inden, posting)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の補正精度を向上できたことは非常に有意義な成果といえる。さらに、他の成分の補正精度を犠牲にしても目的の成分の補正精度と高めたい場合には、目的の成分の補正誤差の許容範囲を $\pm 0\%$ にする (制約条件を設ける) ことで可能となり、高度な要望があれば目的に応じた計算パターンを用いることができる。現状では計算パターンの選択は人間の判断に頼るところが多く、栽培者個人の知識の蓄積と判断能力に依存している。そのため今後は状況に応じた最適な条件

や方法の選択を個人の能力に依存せずに選択できる技術が必要と考えられる。そのためには栽培に関するあらゆる情報について収集・データベース化を行い、シミュレーションモデルの構築 (Kano, A. and Cornelius H. M. V. B., 1985; Kano, A. and Cornelius H. M. V. B., 1988; Le Bot et al., 1998) やニューラルネットワーク, ファジィ, 遺伝的アルゴリズムを用いたエキスパートシステムの構築 (Morimoto et al., 1993; 萩原, 1994) などの重要性が高まると考えられる。それらのシステム構築においては標準化を行い, 情報を共有・利用できる最適な環境を検討することも必要である。さらに栽培管理の最適化には生産量や収益, コストパフォーマンス (Takatsuji, 1993) などの中から環境や状況に応じて何を目的として選択するかも重要である。

培養液管理システムについて

これまでに他の研究グループによって行われた培養液組成に関する研究の多くは, 培養液中の成分濃度の初期値を一時的・短期的に調整・把握したものであり, 時間の経過とともに変化する培養液中の各成分濃度やpH, EC値などを総合的・長期的に把握・制御した報告はあまり見受けられない。特に果菜類は定植から栽培終了までの栽培期間が長く, その多くは栄養成長と生殖生長が並行するため, 経時的に変化する養分吸収特性などを把握し, 培地環境を管理することは困難であった。今回開発したIIASはそれらの問題を克服するため, EC制御法とイオン濃度制御法を統合し, 低コスト化と省力化を実現したイオン濃度制御システムである。IIASは培養液中の各イオン濃度の長期的・連続的な管理が可能で, 生育とともに変化する養分吸収特性に応じた培養液組成の管理が容易に行えた。キュウ리를供試した実証栽培において, EC制御法で見られる培養液組成のアンバランスや, 手動イオン濃度制御法 (PEIS) の補正時にみられる培養液の急激な濃度変化が解消でき, 増収が可能となった。従来のシステムでは困難であったが, IIASでは培養液の全量交換を行わずに特定の生育ステージに特定の成分濃度の比率を変えることが比較的容易に行え, かつ植物体へのストレスを抑えるために緩やかに変化させることが可能である。例えば, ホウレンソウなどの収穫物中のNO₃-N濃度の低減を目的として, 栽培中期から収穫期にかけて培養液中のNO₃-Nを段階的に低下させたり, ピーマンなどの果菜類では食味を向上させるため収穫期までに培養液中のK濃度を高めたりすることも可能である。

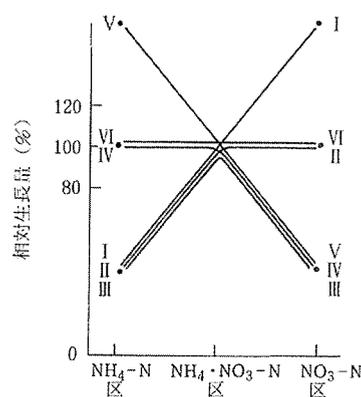
食品に対する消費者ニーズの変化にともない農産物への要求も, 収量から外見や味覚 (見栄え, 美味しさ, 栄養), 更には健康(安全性や機能性)へと大きく変わってきている。消費の面からは業務用(中食・外食)が多くなってきている。今後, このようなニーズに応じることのできる栽培技術としてIIASが重要な役割を担うと思われる。

培養液のpH管理について

培養液のpHは各養分の有効性に大きな影響を及ぼすため, pHに関して多くの研究が行われてきた (Inden, 1982)。その管理法としてはイオン交換樹脂による制御 (Harper, 1976), 酸とアルカリによる自動制御 (Moritsugu and Kawasaki, 1977), NH₄-N/ Total-Nによる制御 (Savvas and Gizas, 2002) などがある。イオン交換樹脂を用いたpH制御は実験規模では可能であったが, コストや目詰まりなどの問題のためか現在普及してお

らず、また培養液のNH₄-N/ Total-NによるpHの管理技術は未だ研究段階であり確立されていない。そのため現在一般的に酸やアルカリを用いた管理が行われているが、酸やアルカリに含まれる成分によって培養液中のイオンバランスが崩れる可能性や薬品の取り扱いに危険が伴うという問題がある。そこで、培養液のpHに大きな影響を及ぼすといわれているNH₄-Nに着目し、IIASを用いてNH₄-Nによる培養液のpH制御について研究を行った。その結果、NH₄-N供給による培養液のpH制御には、培養液のpHを帰還量とし、NH₄-N供給比率を制御対象としたフィードバック制御によって行えた。キュウリを供試した実証栽培において、初期培養液のNH₄-N濃度を8 mg l⁻¹とし、栽培初期に追加供給するN源のNO₃-N/ NH₄-N比を10 ~ 17, 中期以降は比を30以上にすることで培養液のpHを正常に維持でき、収穫物の品質向上ならびに増収が図れた。IIASの導入によって、追加供給するN源のNO₃-N/ NH₄-N比について長期的・連続的に制御することが可能となった。キュウリ栽培では培養液に含まれるN源が全てNH₄-Nであっても、pHが5に維持された場合、培養液に含まれるN源が全てNO₃-Nのものと同等に生育するという報告 (Moritsugu and Kawasaki, 1977) から、培養液のpHを制御することは重要である。従って、本研究で確立した、酸やアルカリを用いず、供給するN源のNO₃-N/ NH₄-N比の管理により

培養液のpHを栽培適性範囲内に抑える技術は今後大いに活用されると思われる。ただし、N源に対する生育反応は作物種によって異なり (第1図, Tadano and Tanaka, 1976)、土耕と水耕の培地における硝化能の違い、光 (Jung et al., 1992)や温度 (Frota and Tucker, 1972) 条件などによっても異なるため、今後窒素同化のモデリングやNO₃-N/ NH₄-N比管理によるpH制御技術の確立、pH管理を支援するpH計算プログラムの開発を図っていく必要が有ろう。



生育良好な区	作物の種類
I. NO ₃ -N区	アズキ, カラシナ, キュウリ, テンサイ
II. NO ₃ -N区, NH ₄ +NO ₃ -N区	ハクサイ, ダイコン, キャベツ, ダイズ, ジャガイモ, トマト, トウガラシ, タマネギ
III. NH ₄ +NO ₃ -N区	ソバ, エンパク, トウモロコシ, コムギ
IV. NH ₄ +NO ₃ -N区, NH ₄ -N区	イネ, オオムギ
V. NH ₄ -N区	レタス
VI. NO ₃ -N区, NH ₄ +NO ₃ -N区, NH ₄ -N区	ニンジン, ネギ

第1図. 培地の窒素形態に対する生育反応の作物間差異
NH₄-N (6 me l⁻¹), NH₄-N+NO₃-N(各 3 me l⁻¹)および NO₃-N(6 me l⁻¹)
に対する生育反応の作物種間差.

新たな展開

本研究の結果、IIASの導入により培養液の分析回数や肥料投入による培養液補正の回数を減らすことができ、培養液の補正間隔の延長が可能となった。さらにシステムの簡素化やランニングコストの低減、作業の軽減が可能となったことからイオン濃度制御法の普及に貢献でき、他の分野への応用技術としての可能性が高まった。

現在、地球上ではさまざまな人為的環境問題が発生しており、環境と調和した経済社会システムの構築が必須である。そのためには資源の有効利用、廃棄物の減量化お

よび資源の循環を図ることが必要であり，効率的かつ効果的に3R（Reduce, Reuse, Recycle）技術を開発・普及させることが重要である．その一例として高濃度の窒素やリンを含む水へ，イオン濃度制御法を応用し養分を加え植物の生育に適した肥料組成とすることで富栄養化対策にも結びつく環境保全型農業が可能となる．さらに，にがり（Kirimura and Inden, 2004a）や海草の洗浄液，堆肥，モルトセラミック（アサヒビール（株）），石炭灰など，ある程度の肥料成分を含む副産物や産業廃棄物に対して不足する肥料分を追加することで土壌改良資材や肥料として有効活用することも可能と考えられる．

食料問題に対しても養液栽培は有効であり，これまでに土耕栽培が困難であった土地での食料生産が可能である．例えば清浄な水やにがりなどが副産物として生じる製塩工場と植物工場を融合（Kirimura and Inden, 2004a）することにより，海岸付近の砂漠地帯において豊富な日射量を有効活用した食料生産が可能と考えられる．

研究分野では研究手法の強力なツールとなり，培養液のみならず他の環境要因と組み合わせた研究がこれまでよりも容易に行え，一般的な高品質化のみならず，ビタミン類や必須アミノ酸，機能性成分などの増強を目指した植物工場的発想の研究にも有用と考えられる．

本研究の成果が社会において有効に活用されれば幸いである．

総括

慣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, 培養液の成分バランスと植物体による各成分の吸収量にずれが生じると, 組成や pH が大きく変動し, 生育遅延や生理障害の発生, 培養液交換の必要性が生じ, 培養液無交換による長期的な栽培は不可能となる. また多量の廃培養液が生じた場合, 廃培養液中に含まれる NO_3 や PO_4 イオンによる湖沼や河川, 地下水の汚染が懸念される.

その様な背景から, 著者らの研究グループは培養液中の各イオン濃度を制御する新たな培養液管理法開発に着手した. これまでに培養液の各イオン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 “IonAdjuster” を開発し, それに基づくイオン濃度制御法を考案した. その結果, 培養液無交換栽培が可能となり, 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. しかし, 全自動イオン濃度制御システムではイニシャルコストが高く, また手動イオン濃度制御 (以下 PEIS, Popular Edition of Intelligent System) では肥料調整の手間や培養液補正周期によって濃度が増減する問題が確認された.

そこで, 培養液管理における省力化や自動化, システムコストの削減, 生育の向上を図り, イオン濃度制御法の生産農家への普及性を高めることを目的として, 1) イオン濃度制御養液栽培における培養液補正計算の最適化, 2) イオン濃度制御キュウリ養液栽培において $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度設定値が培養液の pH 変動に及ぼす影響の調査, 3) 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 (以下 IAS, Integrated IonAdjuster System) の開発について研究を行った. その結果は次のようであった.

1. イオン濃度制御養液栽培における培養液補正計算の最適化

リアルタイム制御時には濃厚液が極微量ずつ短間隔で注入されるため, 無視して良かった各イオン濃度の変動が, 手動注入では無視できなくなり得る. 従来の “IonAdjuster” による培養液補正の計算では, プログラムが時によりある特定の成分, $\text{NH}_4\text{-N}$ や Mg について設定濃度よりかなりずれた値を回答することがあった. 例えば, 設定濃度の低い $\text{NH}_4\text{-N}$ が倍以上の濃度で, 他の成分についてはほぼ設定濃度通りという組み合わせを指示する場合があり, その時には, 培養液中の各成分の比率がアンバランスになってしまう.

そこで各成分について設定濃度からのずれ(誤差)を少なくするため, “IonAdjuster” の補正精度の向上を目的とし, プログラムに改良を加えた. 改良点は, 新たに投入目標値に一定範囲の許容誤差を設け, その範囲内に補正するために必要な肥料の種類と最少肥料量を求めるようにしたことである. しかし, 誤差を許容範囲内に抑えることができない場合にエラーが発生することや, 誤差の特定成分への集中の緩和がまだ不十分であるなど問題があった. そこで次なる改善策として, 最小二乗法を用いて各成分の誤差を分散させ, 培養液中の成分バランスを保つことを試みた.

その結果, 各成分の設定値の大きさを考慮し, 各成分の設定値に対する誤差比率の

和を最小化することにより、特定の成分への誤差の集中を回避することができた。特に PEIS のように培養液組成の補正を手動で行う際には、リアルタイム補正を行うことができないために補正間隔が長くなり、完全自動制御よりも培養液濃度が低下する。そのような場合にも培養液中の特定成分に補正誤差が偏らず、バランスの取れた培養液組成へ濃度補正することが可能となった。

2. 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

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。

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、SO₄-S や PO₄-P、NO₃-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 SO₄-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。

その結果、培養液中の NH₄-N 濃度の推移と pH の推移に関連性がみられ、NH₄-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 NO₃-N : NH₄-N のうち NH₄-N の供給比率、つまり NH₄-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 NH₄-N 濃度に準じた制御を行うのではなく、NH₄-N 濃度の設定値を下げ、かつ NH₄-N の供給比率を NO₃-N : NH₄-N = 30 : 1 に抑えることで NH₄-N 供給量を制限すれば、培養液 pH の変動を抑制することが明らかとなった。また、肥料の手動添加によるイオン濃度制御法 (PEIS) 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であることが明らかになった。

3. 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 (IIAS: Integrated IonAdjuster System) の開発

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手動添加によるイオン濃度制御法 (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、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、

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 IIAS）を考案した。IIAS は培養液の濃度管理を EC 制御法により自動でリアルタイム制御を行い、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は PEIS の手順に従って手動で行った。IIAS では、培地環境の変動抑制や生育促進効果に加えて、EC 制御法による半自動化により、省力化とともに低コストでのシステム構成が可能である。

IIAS のプロトタイプを開発し、キュウリの湛液型循環式水耕にて IIAS の評価試験を行った結果、IIAS は IonAdjuster による肥料計算と養分吸収量予測の精度に若干問題はあるものの、PEIS の問題点であった培養液の 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。

IIAS と EPIS の比較試験の結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 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必要性が認められた。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生育促進の可能性が示された。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いて利点が多い。また増収が認められたことから、新たな培養液管理システムとしての利用価値が見出された。

4. キュウリ水耕栽培における培養液の初期 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が

$\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収速度と培養液 pH の変動に及ぼす影響

培養液 pH の安定化を図るため、キュウリ栽培における培養液中の初期 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を 0 mg l^{-1} 、 4 mg l^{-1} 、 8 mg l^{-1} 、 16 mg l^{-1} の 4 段階とした実験区を設け $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収速度と培養液 pH の変動、植物体の成長に及ぼす影響について調査を行った。

その結果、培養液中の当初の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を説明変数 (x 軸)、定植 1 日後の濃度の変化から求めた吸収速度 ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$) を被説明変数 (y 軸) とした場合、ゴンペルツ曲線が最も適合し、吸収速度は培養液の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなるにつれ上昇し、最大値は $7.9 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ になると予測された。培養液の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は少しの差でもその吸収速度は大きく異なるため、培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を一定に維持し、植物体に各成分を一定割合で供給することは困難であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度管理により培養液の pH を制御することは非常に困難であることが明らかになった。

5. IIAS を用いたキュウリ養液栽培における $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給方法の検討

IIAS によるキュウリ養液栽培において培養液 pH の安定化を図るため、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量管理方法を比較検討した。そこで $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給量を他の成分の供給量との比率で管理する方法を検討することにした。培養液管理法は PEIS と IIAS を用い、IIAS では培養液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の設定値が 8 mg l^{-1} である区（以下、IIA normal）、追加供給する N 源を $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 30 : 1$ とした区（以下、IIA 30:1）、栽培者の判断により培養液の pH の変化に応じて $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給量を管理するファジー管理区（以下、IIAS fuzzy）を設

け、計4区にて比較検討した。

その結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の施与方法は、培養液中 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度を維持する管理では $\text{NH}_4\text{-N}$ が過剰に供給され培養液のpHが異常に低下してしまうため、供給される $\text{NO}_3\text{-N}$ 量との比率に基づき $\text{NH}_4\text{-N}$ を供給することが必要と考えられた。

6. キュウリの積算養分吸収量予測法の検討

—First Calculation と Second Calculation, Third Calculation の比較—

これまでに行った栽培試験の結果、IIASは栽培データの蓄積が無くとも、培養液中の各成分濃度を制御できる有効な培養液管理法であることが示された。しかしSecond Calculationによる養分吸収量予測には希望する補正間隔にずれが発生するなど精度的な問題が懸念された。Second Calculationは「前々回補正時から前回補正時と前回補正時から今回補正時までの吸収量の増加率」と「前回補正時から今回補正時までの吸収量」の積を「次回補正時までの養分吸収量」としていたが、生育中期に過剰な量の濃厚液を調製してしまう傾向がみられた。

そこで2003年8月から行ったキュウリ水耕栽培で得られた養分吸収量のデータを基に養分吸収量の三次回帰式をMicrosoftのExcelの「近似曲線の追加」から求めた。またIIASの肥料計算法であるFirst CalculationとSecond Calculation, Third Calculationによって肥料調製に必要な養分供給量を算出し、養分吸収量と養分供給量の当てはまりの良さを比較検討した。

その結果、Third Calculationは比較的良い結果であったが、First CalculationとSecond Calculationによる養分吸収量予測の方法には改良の必要性が認められた。さらに、実際の肥料計算には補正間隔(日)や株数、初期濃厚液の量などを考慮する必要があるため、3種の計算法について開発・改良、方法の選択の検討を行うことはとても煩雑であるため、養分吸収量予測をよりシンプルかつ正確に行う方法が必要となった。

7. キュウリの積算養分吸収量予測法の検討

—三次回帰式による養分吸収予測法と実用化試験—

養分吸収量予測に従来法のFirst CalculationとSecond Calculation, Third Calculationの代替として三次回帰式を用いて養分吸収量予測精度を高めると共に、培養液のpH制御を目的として、追加供給する肥料の $\text{NO}_3\text{-N}:\text{NH}_4\text{-N}$ の最適な管理方法を検討した。

培養液管理法はPEISとIIASを用い、IIASはIIAS 30:1, IIAS fuzzy 1, IIAS fuzzy 2の3通り計4区で栽培試験を行った。

その結果、IIASの養分吸収量予測へ三次回帰式を導入する際は、新たに得られたデータで三次回帰式を修正するのではなく、「三次回帰式から読み取れる増加率」と「新たに得られた養分吸収量」の積から養分吸収量を予測するべきであることが明らかになった。

8. キュウリ養液栽培におけるEC制御法(ECCS: electric conductivity control system)

とPEIS, IIAS, 三種の培養液管理法の比較ならびに $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給方法の実証試験

これまでECCSとPEISまたはPEISとIIASの比較実験しか行われていなかったた

め、従来法である ECCS と最新の IIAS の比較試験を行い、同時に PEIS の追試も兼ねて行った。また、IIAS の養分吸収量予測の改良のため、三次回帰式に代わる回帰式を検討し、栽培を行った。さらに培養液の pH 管理のため、IIAS における濃厚液中の $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ の最適な管理方法を検討した。

その結果、ECCS では培養液中の Ca 濃度の低下傾向、 $\text{SO}_4\text{-S}$ 濃度の上昇傾向がみられ、イオン濃度制御法の必要性が示された。キュウリ養液栽培の培養液管理システムとして IIAS を導入することにより、培養液中の各成分濃度の管理を PEIS と遜色なく行え、濃度変化を抑えることができた。また PEIS よりも増収と省力化が可能となった。キュウリの積算養分吸収量予測法にはロジスティック曲線が最適であることが明らかとなった。キュウリ養液栽培では、栽培初期に追加供給する N 源の $\text{NO}_3\text{-N} / \text{NH}_4\text{-N}$ を 10 ~ 17 にすることで pH の上昇を抑制でき、中期以降は 30 以上にすることで pH の低下が抑制できた。

要旨

養液栽培における培養液管理は作物の収量や品質に大きな影響を与えるため重要である。その最適管理には培養液の組成・濃度を作物の種類・生育段階に応じ調整する必要があるが、肥料塩混合の計算と手間が煩雑すぎ、既成の全国一律の標準処方を栽培時期に関係なく採用しているのが現状である。そのため、培養液の成分バランスと植物体による各成分の吸収量のずれから組成や pH が変動し、それにより生育遅延や生理障害が発生するので、培養液を廃棄して更新せざるを得なくなる。多量の廃培養液は、含まれる NO_3 や PO_4 イオンによる湖沼や河川、地下水の汚染という問題を引き起こす。

これらの問題に対して著者らのグループ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、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）。

そこで、培養液管理における省力化や自動化、システムコストの削減、生育の向上を図り、イオン濃度制御法の生産農家への普及性を高めることを目的として、1) イオン濃度制御養液栽培における培養液補正計算の最適化、2) イオン濃度制御キュウリ養液栽培において $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度設定値が培養液の pH 変動に及ぼす影響、3) 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（IIAS）の開発について研究を行った。

本研究の結果、“IonAdjuster”による培養液補正計算へ最小二乗法を組み込むことにより特定の成分への誤差の集中を回避でき、課題であった $\text{NH}_4\text{-N}$ 等の補正精度を高めることができた。また、キュウリ養液栽培において培養液の pH に大きな影響を及ぼす $\text{NH}_4\text{-N}$ について、既存の濃度を基準とした定値制御だけではなく比率制御の必要性を明らかにした。すなわち、キュウリ栽培では初期培養液の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を 8 mg/L とし、栽培初期に追加供給する N 源の $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比を 10 ~ 17、中期以降は比を 30 以上にすることで培養液の pH を正常に維持できた。また、IIAS の開発により従前の手動イオン濃度制御に比べ培養液管理の省力化や培養液中の成分濃度と pH などの培地環境変動の抑制、増収を可能とした。

養液栽培の培養液管理に、開発した IIAS を導入することで、生育ステージごとに培養液組成を容易に制御でき生育促進や増収を図れたことから、有用な技術と考えられる。

SUMMARY

Recently, hydroponic cultivation of vegetables and ornamental plants has been increasingly shifted to closed systems. The main advantage of closed systems is the avoidance of surface and ground water pollution through greenhouse effluents, which are rich in nitrates and phosphates. Moreover, recycling excess nutrients in the run off solutions after each watering application results in considerable savings in fertilizer costs. However, systems based on continual nutrient solution recirculation prove to be rather unfavorable for long-term crops. This has been attributed to the progressive imbalance of nutrients in the recirculating solution.

Therefore, to establish an environment-friendly hydroponics system, an ion concentration control method for nutrient solution handling was developed. This was shown to be superior to EC control with respect to reduction of total effluent volume and increase of crop yield.

In this study, the optimization of calculation for ion concentration control, the effect of $\text{NH}_4\text{-N}$ supply method, and the development of a new ion adjuster system were integrated with EC control methods for controlling nutrient solutions in hydroponics.

1) Software for automatic ion control of nutrient solutions in hydroponics, named “IonAdjuster”, was developed and its practical application was tested. As ion imbalance problems in the nutrient solution sometimes developed due to uneven distribution of ion error range in the software, tolerance method and least squares method were developed and examined in order to improve the precision of calculation.

Least squares method was suggested to be the most suitable way to calculate the supply of fertilizer in the nutrient solution in order to compensate for changes in ion

concentrations.

2) “Integrated Ion Adjuster System (IIAS)” integrated with an ion concentration control method and 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 ion concentrations, and adopted the ion concentration control system for preparation of stock solutions and adjustment of ion concentration in the nutrient solution. Cultivation of cucumber using the IIAS allowed good root environment control, and resulted in labor savings and the increase of yields. Still more saving of the initial and running cost should be possible for the IIAS, and consequently, the IIAS can contribute to the introduction of closed hydroponic systems.

3) Cucumber plants were grown in solution culture for 6 days in 4 levels of $\text{NH}_4\text{-N}$.

As a result, $\text{NH}_4\text{-N}$ absorption speed increased drastically and solution pH decreased for higher $\text{NH}_4\text{-N}$ levels. After plants had exhausted $\text{NH}_4\text{-N}$ in the nutrient solution, solution pH was unchanged or greatly increased. $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration management was thought to be very difficult.

The next experiment was carried out in order to investigate the effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ to $\text{NH}_4\text{-N}$ ratios and concentrations of each N source on growth and solution pH when controlled by the IIAS.

The results indicated that ratios of $\text{NO}_3\text{-N}$ to $\text{NH}_4\text{-N}$ in the supplied nutrient solution under IIAS should be kept at 30 in the early stage, 10 to 17 in the mid stage, and more than 30 in the late stage of cultivation.

謝辞

本研究を行うに当たり、御指導と御鞭撻、さらに本稿の御校閲を賜った宮崎大学農学部位田晴久教授に謹んで感謝致します。また、有益な御助言および御意見を賜った宮崎大学農学部山下研介教授ならびに鹿児島大学農学部衛藤威臣教授に深く感謝致します。またご多忙中にも関わらず、学位審査をして頂いた佐賀大学の田代洋丞教授、宮崎大学の永田雅輝教授に心から感謝致します。

また、研究遂行にあたり、多大な援助を頂いた宮崎大学農学部促成園芸学研究室専攻生各位に感謝の意を表します。特に同研究室、久保田豊氏には多大なるご協力を頂きました。記して厚くお礼申し上げます。

なお、本研究は文部科学省平成 13～14 年度科学研究費補助金（基盤研究 (C) (2) ）課題番号 13660263 の助成を受けました。記して謝意を表します。

引用文献

- Akaike, H. 1996. AIC, MDL and BIC. *Operations research*. 41(7): 375 – 378.
- Graves, C.J. 1983. The nutrient film technique. *Hort. Rev.* 5, 1–44.
- Frota, J. E., Tucker T. C. 1972. Temperature influence on ammonium and nitrate absorption by lettuce. *Soil Sci. Am. Proc.* 36: 97-100.
- Hagiwara, M.(萩原将文) 1994. ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム. Sangyotosho, Tokyo.
- Harper J. E., Nicholas J. C. 1976. Control of nutrient solution pH with an ion exchange system: effect on soybean nodulation. *Physiol. Plant.* 38: 24-28.
- Hashimoto, M., Utagawa, U. 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.
- Iizuka, T. (飯塚隆治) 1978.水耕培養液中のアンモニア態窒素の硝酸化について (in Japanese). *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 49 (2): 296 – 303.
- Ikeda, H. 1996. The adjustment of the service water and the nutrient solution (in Japanese) (用水と培養液の調整). In: *The latest manual of hydroponics (最新養液栽培の手引き)*, ed. by Japan Greenhouse Horticulture Association, Seibundo-Shinkosha, Tokyo, 140-166.
- Ikeda, H., Osawa, T. 1979. Comparison of adaptability to nitrogen source among vegetable crops I. Growth response and nitrogen assimilation of fruit vegetables cultured in nutrient solution containing nitrate, ammonium, and nitrite nitrogen (in Japanese). *Jour. Japan. Soc. Hort. Sci.* 47 (4): 454 – 462.
- 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.
- Ikeda, H., Osawa, T. 1983. Effects of ratios of NO₃ to NH₄ and concentrations of each N source in the nutrient solution on growth and leaf N constituents of vegetable crops and solution pH (in Japanese). *Jour. Japan. Soc. Hort. Sci.* 52 (2): 159 – 166.
- 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., 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, 237.
- 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., Okamoto, K., Nakahara, T. 2000. Software for the automatic ion control nutrient solutions. J.SHITA 12(3): 176-181.
- 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, T. (位田藤久太郎) . 1982. 水耕栽培法に関する諸問題 [5] 一水耕液の pH 管理一.農業および園芸. 57: 327-331.
- Inoue, J. 2000. Analytical instrument(Measuring device) of nutrient solution "Culturyzer-mini" (in Japanese) (養液測定装置 Culturyzer-mini), Hydroponics, 14(1): 20-21.
- Jung H. B., Ito T. (鄭顯福, 伊東正) 1994. 昼温と培養液へのアンモニア態窒素添加が水耕栽培トウガラシの生育・収量に及ぼす影響. Environ. Control in Biol. 32 (1): 41-46.
- Jung H. B., Maruo T., Shinohara Y., Ito T. (鄭顯福, 丸尾達, 篠原温, 伊東正) 1992. トウガラシのNFT栽培における遮光と培養液中の窒素形態が生育, 収量に及ぼす影響. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 61(SUPPL. 2); 304-305.
- Kano, A., Cornelius H. M. V. B. 1988. Design and test of a simulation model of tomato

- growth and yield in a greenhouse. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 56(4): 408-416.
- Kano, A. (狩野敦), Cornelius H. M. V. B. 1985. 温室トマトの生長量と収量のシミュレーションモデル. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 54 (別1): 262-263.
- Karita, M., Ueda, T. 2003. Excel でできる最適化の実践らくらく読本. Doyukan, Tokyo, 140 – 170.
- 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.
- Kirimura, M., Inden, H. 2003. Improvement of interface of the software for automatic ion control of nutrient solutions (in Japanese) (イオン濃度調整プログラム ‘IonAdjstuter’ のインターフェースの改良) . In: Proc of 2003 joint conference of Japanese five societies related agricultural engineering (農業環境工学関連 5 学会 2003 年合同大会講演要旨) , Iwate. 27-29 September, 311.
- Kirimura, M., Inden, H. 2004a. 海水培地を用いた養液栽培.In: Proc. of 2004 joint conference of Japanese four societies related agricultural engineering (農業環境工学関連4 学会2004年合同大会講演要旨) , Fukuoka. 9-8 September, 212.
- Kirimura, M., Inden, H. 2004b. Optimization of Calculation for the Ion Concentration Control in Hydroponics(in Japanese). *J.SHITA* 16(4) : 198-203.
- Kirimura, M., Inden, H. 2005. Effect of set point of NH₄-N concentration on pH values in ion concentration controlled hydroponics of cucumber. *J.SHITA* 17(4): 199-204
- Kirimura, M., Inden, H. posting. Development of New Ion Adjuster System Integrated with EC Control Method for Controlling Nutrient Solution in Hydroponics. *J.SHITA*.
- 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.
- Kumazawa, K. 1974. The compendium of the nutrition of the plant (in Japanese) (植物栄養学大要) . Yokendo, Tokyo, 102 - 103.
- Le Bot, J., Adamowicz, S. and Robin, P. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae.* 74: 47-82.

- Levitt, J. 1972. NH₃. In: Responses of plants to environmental stresses, ed. by Kozlowski T. T, Academic Press, New York, 542 – 543.
- Lea-Cox, J.D., Berry, W.L., Stutte, G.W., Wheeler, R.M. 1999. Nutrient dynamics and pH/charge-balance relationships in hydroponic solutions. *Acta Hort.* 481, 241–248.
- Lopez, J., Tremblay, N., Voogt, W., Dube, S., Gosselin, A. 1996. Effects of varying sulphate concentrations on growth, physiology and yield of the greenhouse tomato. *Sci. Hort.* 67, 207–217.
- Matsumoto H. 1991. pH regulation in rhizosphere induced by plant(in Japanese). *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 62(5): 563-572.
- Mine Y. (峰洋子) 2001. 養液栽培における循環培養液利用技術の現状と展望. (in Japanese) SHITA REPORT No.17 21世紀における植物工場生産の展望: 66 - 72.
- Morimoto T., Takeuchi T., Hashimoto Y. (森本哲夫, 竹内利信, 橋本康) 1993. 遺伝アルゴリズムおよび人工ニューラルネットワークを利用した水耕栽培の最適制御法. *Environ. Control in Biol.* 31 (1) : 21-27.
- 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 controlled nutrient solution 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
- Raviv, M., Krasnovski, A., Medina, S., Reuveni, R. 1998. Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. *J. Hort. Sci. Biotech.* 73, 485–491.
- Savvas, D. 2000. Nutritional management of gerbera (*Gerbera jamesonii*) grown in a closed soilless culture system. *Acta Hort.* 554, 175–182.
- Savvas, D. Gizas, G. 2002. Response of hydroponically grown gerbera to nutrient solution

- recycling and different nutrient cation ratios. *Scientia Horticulturae*. 96: 267-280.
- Savvas, D., Manos, G. 1999. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture system. *J. Agric. Engng Res.*73: 29 – 33.
- Savvas, D., Adamidis, K. 1999. Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration rations. *J. Plant Nutr.* 22: 1415–1432.
- Sawa, T. (佐和隆光) 1979. 回帰分析. *Asahisyoten*, Tokyo, 150 – 153.
- Schwarz M. 2003. Future trends in soilless culture. In: *Proc.(Abstracts) South Pacific Soilless Culture Conference*, New Zealand. 10 – 13 Feb. 36.
- Tadano T., Tanaka A. (但野利秋, 田中明) 1976. アンモニア態および硝酸態窒素適応性の作物種間差 (第1報) . *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 47 (7): 321-328.
- Tajima, M., Kojima, K. (田島稔, 小島和雄) 1986. 最小二乗法の理論とその応用. *Toyotosho*, Tokyo, 2 – 9.
- Takatsuji M. (高辻正基) 1993. 完全制御型植物工場の経済性の解析. *J.SHITA* 4 (2): 111-117.
- Tsakagoshi, 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.
- Utagawa, U., 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.
- Zekki, H., Gauthier, L., Gosselin, A. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 121, 1082–1088.