

イオンクロマトグラフィーを利用した 水耕栽培ミニトマトの養分吸収の定量*

安藤 秀俊
川崎市立御幸中学校

A Study on Nutrient Absorption by Cherry Tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a Hydroponic Culture

Hidetoshi ANDO
KAWASAKI CITY MIYUKI JUNIOR HIGH SCHOOL

SUMMARY

The purpose of this investigation was to quantitatively determine the change in nutrient absorption during the growth of a cultivar of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* cv. Mini carol). The tomatoes were grown by hydroponic culture in a nutrient solution lacking nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium or iron. To measure nutrient absorption, the types and quantities of cations and anions in the nutrient solution were separately analyzed by ion chromatography at regular intervals. Absorption of Cl^- and SO_4^{2-} varied little throughout all growth stages in a complete nutrient solution, while that of NO_3^- , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ and NH_4^+ increased throughout the hypertrophic stage from fruit development to harvesting. Though it is known that nitrogen is absorbed in the form of NO_3^- and NH_4^+ at around pH 7 in tomatoes, in the present study it was absorbed in the form of NO_3^- . Because the activity of NO_3^- reducing enzyme is dependent on lighting conditions, the result of this study support the conclusion that more NO_3^- is absorbed than NH_4^+ under strong lighting.

はじめに

植物の養分の吸収に関する研究は, SACHS (1860) と KNOP (1861) が植物に必要な無機養分を実験的に調べるために考案したのをきっかけに, 植物生理

学や植物栄養学の分野で始められた。この土壌を使わずに植物を生育させる技術, すなわち Hydroponic culture (水耕栽培) は, 肥料の損失が少なく病害虫の抵抗性も大きくなる¹⁷⁾などの理由から営利規模で発展し, 現在では植物栽培法の重要な一方法となっている。

しかし, 養分の欠乏や過剰に起因する栄養障害や, 収量低下などの水耕栽培上の問題点については, 山崎¹⁹⁾, 高橋ら¹⁶⁾によって研究がなされているが, 生育ステージに伴う植物の各養分の吸収量や,

1995年3月19日受理。

*本研究の一部は平成5年度に, 日本生物教育学会
(広島大学: 広島市) および日本植物学会
(香川大学: 高松市) で口頭発表した。

陰イオン, 特に Cl^- , SO_4^{2-} などの吸収に関する研究は, これまで十分になされておらず, 水耕栽培を行う上での課題となっている.

植物の養分の吸収に関して学習指導要領では, 小学校5年で「植物の成長には日光や肥料が関係していること」¹²⁾, 中学校1年で, 「水が根毛で吸収され, 根や茎にある維管束の中の道管を上昇すること」¹³⁾と「師管が水に溶けた有機物の通り道であること」¹³⁾を学習し, 高等学校では, 生物の「生物の構造と機能」の単位の中で取り扱われている¹⁴⁾.

こうした中で, 筆者は既に水耕栽培の技術を教材として利用することを実践してきた¹⁾が, 生徒達に植物の養分吸収を理解させるのに, 水耕栽培を利用することは極めて有効な手段であると考えられる.

しかし, 培養液の減少から, 植物が水に溶けた養分を吸収している事実は理解できても, 実際にどれくらいの無機物が植物に吸収されているのかという, 具体的な吸収量の確認が教師側としてもあやふやになりがちであり, 定量的な科学的事実(データ)の押さえが必要である.

そこで今回, 植物の生育に伴う養分吸収を定量的に測定することを目的として, ミニトマトを材料に水耕栽培中の培養液のイオン組成と量をイオンクロマトグラフィーによって定期的に分析した^{2,3,4)}のでその結果を報告する.

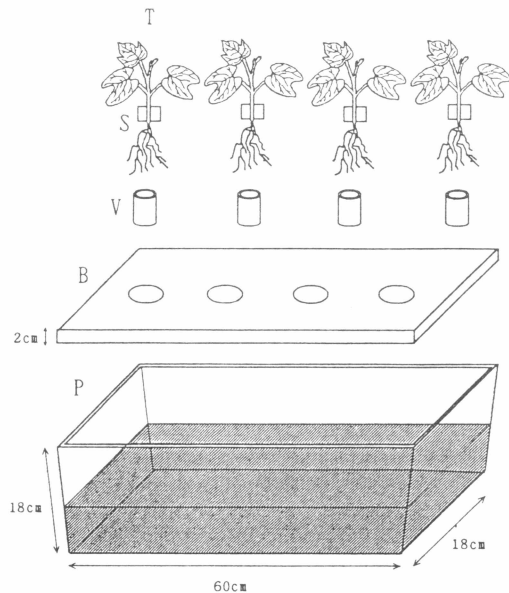
材料および方法

水耕栽培の実験に用いる材料としては, 従来ダイズ¹¹⁾, イネ⁶⁾, ウキクサ⁷⁾, イチョウウキゴケ¹⁵⁾等が用いられてきたが, 近年, 実際の栽培品種として最もポピュラーで, かつ扱い易く, また果実が収穫できることを考えて, ミニトマト(正確にはチェリートマトと呼ばれる, *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* cv. 'Mini carol')の播種御約30日程度の幼苗を用いた.

水耕装置は, 第1図のように, 塩ビパイプを通した発泡スチロールの蓋をかぶせた, 18×60×18cmのプランター(101)を利用した. 幼苗は, 1本ずつスポンジで固定し, 1つの容器について4本移植した.

培養液は, ARNON (1938) の培養液の組成及び園試処方⁸⁾を参考に作製した. まず第1表に示した原液を調製し, 次に原液を第2表のように組み合わせ

た後, 1000倍に希釈し培養液とした. 培養区は, T



Schematic diagram of the hydroponic system.

T : tomato plant, S : sponge, V : vinyl chloride pipe, B : styrene form board, P : plastic box.

第1図 水耕栽培装置の構成図

ー1からT-7まで, 完全培養区を含む7つの区を設定した. この際, 原液及び培養液はすべて蒸留水を用いた.

苗ははじめの1週間は完全培養区で栽培し, その後各培養区に移して要素欠除試験を行った. 栽培はガラス室を利用し, 培養液へのエアレーションは行わない静止法で約2か月間行い, その他の管理については慣行に従った.

第1表 原液の化学組成

Stock solutions	Chemicals	Components	$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
A	NH_4NO_3	NH_4^+ , NO_3^-	71.4
B	Na_2HPO_4	Na^+ , PO_4^{3-}	117.4
C	K_2SO_4	K^+ , SO_4^{2-}	36.6
D	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Mg^{2+} , SO_4^{2-}	91.2
	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mn^{2+} , SO_4^{2-}	4.2
	H_3BO_3	B^{3+}	2.8
E	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Ca^{2+} , Cl^-	26.0
F	$\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$	Fe^{3+}	32.0

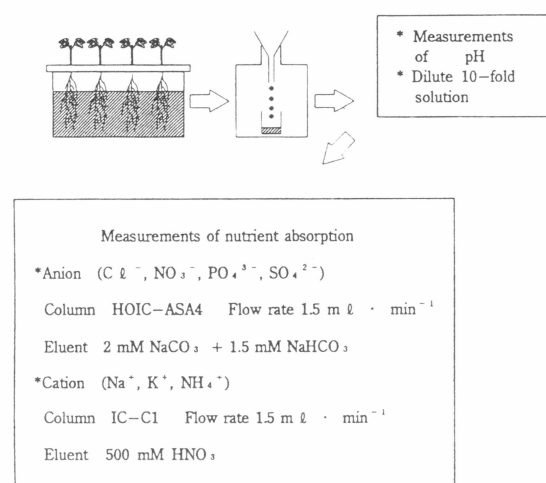
第2表 原液の組み合わせと培養区の設定

Experimental conditions	Combination of stock solution
① T-1 (Control)	A, B, C, D, E, F
② T-2 (-N)	B, C, D, E, F
③ T-3 (-P)	A, C, D, E, F
④ T-4 (-K)	A, B, D, E, F
⑤ T-5 (-Ca)	A, B, C, D, F
⑥ T-6 (-Mg)	A, B, C, D-Mg, E, F
⑦ T-7 (-Fe)	A, B, C, D, E

培養液の更新は1週間毎に行い、培養液のサンプリングは3ないし4日毎とした。各培養区から30mlずつサンプリングした培養液は、直ちに0.2μmのメンブランフィルター（Cellulose Nitrate 東洋濾紙社製）で吸引濾過し、pHを測定した後、冷蔵庫に保存した。

各イオンの濃度は、培養液を10倍に希釈した後、イオンクロマトグラフィーで分析を行った（第2図）。

イオンクロマトグラフィーは、イオン一般を測定対象とする高速液体クロマトグラフィーのことで、無機の陰・陽イオン及び有機酸、金属イオンなどの分析定量に用いられる測定機器であり、近年、土壤肥科学及び植物栄養学の分野では、水耕栽培の培養液の分析などに主に利用されている。



Procedure of measurements

第2図 培養液のサンプリングと分析手順

陰イオン (Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) の測定は、Dionex社製 Model 2000i を用いて行い、分析の条件は次の通りとした。

分析条件：

プレカラム HPIC-AG4A

分離カラム HOIC-AS4A

溶離液 2 mM Na₂CO₃ + 1.5 mM NaHCO₃

再生液 12.5 mM H₂SO₄

陽イオン (Na^+ , K^+ , NH_4^+) の測定は、島津製作所製 HIC-6A を用いて行い、分析条件は以下の通りとした。

分析条件：

プレカラム IC-GC1

分離カラム IC-C1

溶離液 5 mM HNO₃

結果と考察

第3図及び第4図は、完全培養区における移植後2週目（5/26）から7週目（6/30）までの培養液をイオンクロマトグラフィーで分析し、各イオンの吸収量を測定した結果である。Cl⁻・SO₄²⁻については、全生育ステージを通じて、養分吸収量の大きな変化はみられなかったが、NO₃⁻・PO₄³⁻・Na⁺・K⁺・NH₄⁺については、生育後半の果実肥大期から果実収穫期にかけて吸収量が増加する傾向がみられた。

Cl⁻は、ふつう水道水中に2 ppm程度含まれているが、植物では35 ppm以上になると有害である。植物にとっては、光合成の際の水の分解によるO₂発生機構に関与しているとされる¹⁹⁾が、詳しいことはまだよくわかっていない。必要量はごく微量とされ今回の実験でも吸収量は低かった。

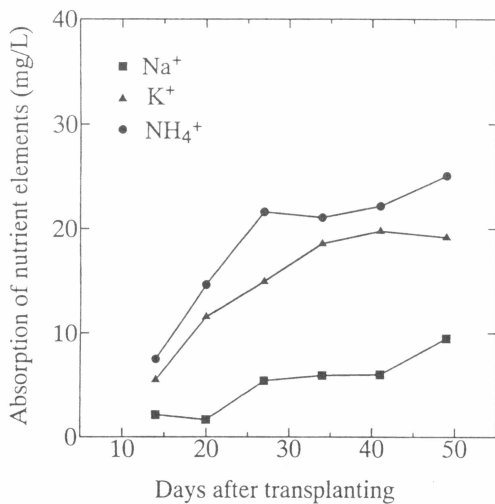
SO₄²⁻は、トマトでは果実部にほとんど分配されず、主として茎葉部に分配される傾向があり、このため果実肥大期には養分吸収量が減少し培養液中に蓄積されることが予想されたが、減少はみられなかった。

Nは植物にとって極めて重要な元素であり、トマトはpH 7付近では、Nを硝酸態窒素とアンモニア態窒素の両方の形で吸収すると言われている¹⁰⁾が、今回の実験では、硝酸態 (NO₃⁻) での吸収率が高い傾向がみられた。また、生育後半にはNa⁺・K⁺の吸収が増大したが、これは、植物のK吸収は受動的で

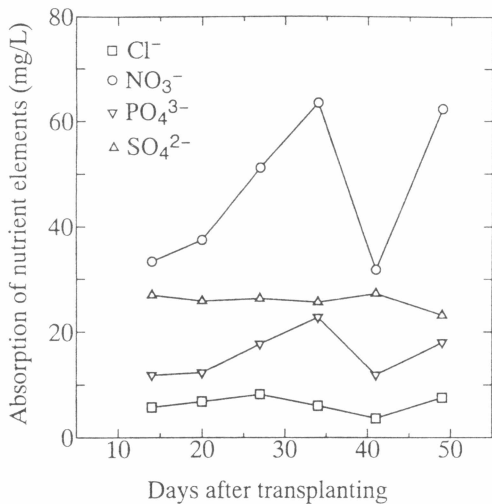
水分の吸収と並行することが知られており⁵⁾、果実への蓄積としての吸収とともに、夏期高温による蒸散に伴う水分の吸収と関係していると思われる。

Na⁺は、ある種の塩生植物では必要であるが、一般の植物では必要性はきわめて少なく、この場合もK⁺の機能の一部、例えば浸透圧の調節などを代替していると推察され、今回の増加は植物体の成長に伴って、単にK⁺に追従する相乗作用の結果増加したもののなのか、あるいはその他のいかなる理由によるものなのかは明確にすることができなかった。

PO₄³⁻は、一般に「実肥」と言われているように、花芽分化の促進や果実の肥大に関与している¹⁸⁾が、



第3図 完全培養区 (T-1) におけるCationの吸収量



第4図 完全培養区 (T-1) におけるAnionの吸収量

培養区に移してから5週目頃に吸収量が最大となった。

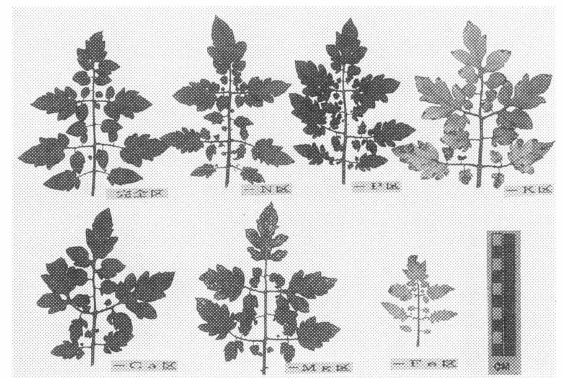
次に、要素欠除試験の結果を第5図に示す。この図は培養区に移してから7週目の、各培養区のミニトマトの葉に現れた代表的な欠乏症を表している。

-N区、-K区において、葉にChlorosisクロロシス等の著しい栄養生理障害がみられ、特に、開花前後の要素欠乏は、果実の着果とともに植物体の生育に影響を与えていることが観察された。また、-P区では葉が赤紫色に変色する様子が見られ、欠乏症は下葉から生じている。

-Ca区では欠乏症は新しい葉から発生し、やがて全体的にクロロシスが生じた。また、根の伸長が抑制され白色を帯びてくる。さらに、トマトでは果実が幼果のうちに黒化してしぼむ、いわゆる「尻ぐされ果」の症状を呈するのが-Ca区の特徴である。

-Mgでは最下位葉から葉脈間クロロシスが生じ、やがて全体に広がっていった。

-Fe区では生育後半になって最も欠乏症が顕著に表される区で、植物全体が黄白色となり成長が著しく抑制された。



第5図 各培養区に現れた代表的な要素欠乏症

以上の結果をまとめると、まず今回の実験で明らかになったことの1つは、春から夏にかけてのミニトマトの水耕栽培において、NO₃⁻の吸収率がNH₄⁺の吸収より高い傾向を示したことである。Nの吸収に関して、園芸学分野では、一般にNO₃⁻よりもNH₄⁺を優先的に吸収すると考えられてきた。つまりN源としてのNO₃⁻とNH₄⁺を比較すると、NO₃⁻は体内に取り込まれても還元されてNH₄⁺にならなければ同化過程に入れないが、NH₄⁺は吸収したものがそのまま利用できるの

利とされた。しかし、植物の生育にとって NO_3^- はかなりの濃度で施用しても障害にはならないが、 NH_4^+ はそれを単独で施用すると NO_3^- よりもはるかに低濃度で障害となることがわかり、 NO_3^- と NH_4^+ のどちらを優先的、あるいは選択的に吸収するかという特性は、植物の種類や培地のpH等の条件によって異なることが池田⁹⁾によって明らかにされている。

今回の実験では、 NO_3^- の吸収率が高い傾向を示したが、これは NO_3^- を還元する酵素の活性が強い光依存性を示し、弱光下ではその活性が低く、本実験のように5～7月にかけての強光下では NO_3^- の方がN源として有利であることを示しているものと推測される。また、池田⁹⁾は春から夏の高温期にかけてのトマト栽培において、両N併用は植物体の生育は推進するものの、「尻ぐされ果」を起こして健全果の収量を低下させることを報告しており、無機塩類を NH_4NO_3 ではなく、むしろ NaNO_3 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ のように NH_4^+ を全く含まない培養液を使用してみることも、教材として水耕栽培を考える上で今後の課題と思われる。

一般に、各養分の吸収曲線は植物によって異なり、また季節や温度、日射量、生育段階等の要因によって左右されることが知られているので、更にこれらの諸条件について検討する必要がある。

また、今回の水耕栽培は培養液を循環させない静止法で行ったが、実際の水耕栽培ではエアレーションを行うのが普通であり、培養液に通気を行って液中の溶存酸素量を高めることが、良好な生育を得るためには重要と考えられるので、根を痛めないエアレーションの方法を考える必要がある。

なお、本研究の一部は、平成3年度下中科学研究助成金により行われた。本研究を進めるにあたり、分析機器の使用に関して便宜をお図り頂き、貴重なご助言、ご指導を終始賜った鳴門教育大学の米澤義彦教授、また培養液についての文献をご恵送下さった島根大学の今木正教授に謝意を表します。

摘 要

植物の生育ステージに伴う養分吸収量を測定する目的で、ミニトマトを用いて水耕栽培を行った。実験区は、完全培養区を含めて7区設定し、それぞれ定期的に培養液をサンプリングし、イオンクロマト

グラフィーで定量分析した。

その結果、完全培養区において、 Cl^- 、 SO_4^{2-} は全生育ステージを通して大きな変化はみられなかったが、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 Na^+ 、 K^+ 、および NH_4^+ については生育後半の果実肥大期から果実収穫期にかけて吸収量が増加した。また、窒素については、硝酸態での吸収率が高くなった。これは、本実験を行った時期が春から夏にかけての強光下であったため、 NO_3^- を還元する酵素の活性が強い光依存性を示しており、 NO_3^- の方がN源として有利であるためと推定された。

引用文献

- 1) 安藤秀俊. 1990. 自作の水耕器を用いた植物の要素欠除試験. 平成2年度東レ理科教育賞受賞作品集. 財団法人東レ科学振興会. 48-51.
- 2) 安藤秀俊・米澤義彦. 1993. 水耕栽培の教材化に関する基礎的研究Ⅰ. イオンクロマトグラフィーによる養分吸収の定量. 日本生物教育学会第55回全国大会研究発表予稿集. 18.
- 3) 安藤秀俊・米澤義彦. 1993. 水耕栽培の教材化に関する基礎的研究Ⅰ. イオンクロマトグラフィーによる養分吸収の定量. 生育教育. 日本生物教育学会. 46-47.
- 4) 安藤秀俊・米澤義彦. 1993. イオンクロマトグラフィーによる水耕栽培ミニトマトの養分吸収の定量(予報). 日本植物学会中国四国支部第50回香川大会講演要旨. 18.
- 5) BOWLING, D. J. F. (柳沢宗男訳). 1980. 植物によるイオン吸収. 産業図書. 50.
- 6) 福田 直. 1983. 水耕法. 石原勝敏・山上健次郎編: 図説教材生物(上). 共立出版. 206-208.
- 7) 浜島繁隆・鈴木達夫. 1982. ウキクサの生物実験教材への活用. 昭和57年度東レ理科教育賞受賞作品集. 財団法人東レ科学振興会. 29-32.
- 8) 池田英男. 1981. 作物の栄養実験. 大阪府立大学農学部園芸学教室編: 養賢堂. 139-146.
- 9) 池田英男. 1988. 作物の栄養特性からみた培養液管理. 農業および園芸. 養賢堂. 61(1). 125-131.
- 10) IKEDA, H. and T. OSAWA. 1981. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 50. 225-230.
- 11) 石田寿老・佐藤重平. 1957. 生物の実験法. 裳華房. 100-103.

- 12) 文部省. 1989. 小学校指導書理科編. 教育出版. 57-74.
- 13) 文部省. 1989. 中学校指導書理科編. 学校図書. 127-129.
- 14) 太田次郎・丸山工作. 1993. 高等学校 生物 I B. 啓林館. 46-47.
- 15) 西田雄行. 1986. イチョウウキゴケの成長実験. 全国理科教育センター研究協議会編: 身近な自然を生かした生物教材の研究. 東洋館出版. 98-101.
- 16) 高橋英一・吉野 実・前田正男. 1980. 作物の要素欠乏過剰症. 農山漁村文化協会. 82-200.
- 17) 武川満夫. 1986. 水耕栽培百科. 富民協会. 32-33.
- 18) 渡辺和彦. 1991. 野菜の要素欠乏症と過剰症. タキイ種苗宣伝出版部. 57-62.
- 19) 山崎肯哉. 1982. 養液栽培全編. 博友社. 64-72.