

野菜の施設生産における土壌ストレス緩和技術に関する研究[†]

中野明正

(平成13年12月19日受理)

Study on the Development of a Method to Alleviate Stress on Rhizosphere for Vegetable Production in Protected Cultivation.

Akimasa NAKANO

Synopsis

In this report, soil conditions under protected cultivation in Japan were analyzed and it was found that salt accumulation and ion imbalance were main problems. To address these issues, Low sulfate-slow release-fertilizer (LSR) was found to be effective for alleviating soil excessive sulfate ion stress compared with conventional chemical fertilizers. To alleviate the damage caused by basal dressing, drip fertigation technique was found to be effective and an organic fertigation method using Corn steep liquor (CSL) as a liquid fertilizer was developed. All these techniques enabled to improve the yield of tomato through the alleviation of stress on the rhizosphere.

Key words: Tomato, Rhizosphere, Protected cultivation, Low-sulfate slow-release fertilizer (LSR), Fertigation, Fruits quality, Blossom-end rot

目次

	1 養液土耕がトマトの生育と根系に与える影響	201
	2 養液土耕がトマトの収量と品質に与える影響	207
	3 養液土耕が土壌の生物性に与える影響	221
	V 総合考察	225
	VI 摘要	233
	引用文献	235
	Summary	238
I 緒論		181
II 施設土壌の問題の現状評価とその対策		188
1 施設土壌の現状評価		188
2 施設における土壌ストレスへの対策		189
III 低硫酸根緩効性肥料が土壌ストレス軽減を介して トマトの生育、収量、品質に与える影響		190
1 低硫酸根緩効性肥料がトマトの生育と根系に 与える影響		190
2 低硫酸根緩効性肥料の連用がトマトの収量 と品質に与える影響		197
IV 養液土耕が土壌ストレス軽減を介してトマトの 生育、収量、品質に与える影響		201

I 緒論

1 施設生産における土壌ストレス緩和技術—本研究の
基本的課題—
ビニールやガラスで被覆された環境で野菜を生産する

〒470-2351 知多郡武豊町字南中根 40-1 果菜研究部

[†] 本論文は名古屋大学学位審査論文に一部加筆修正を加えたものである。また、本論文の一部は、①生物環境調節, Vol. 38, 211-219(2000), ②土と微生物, Vol. 55, 19-25. (2001), ③土壌肥料学会誌, Vol. 72, 237-244(2001), ④土壌肥料学会誌, Vol. 72, 385-393 (2001), ⑤土壌肥料学会誌, Vol. 72, 505-512 (2001)において発表した。

技術である施設生産では、一般に、過剰な肥料が投入される傾向がある。被覆された環境では降雨が遮断されるため、露地とは異なり、土壌に塩類が集積しやすい。施設生産においては、このような過剰塩類が問題となっており、対策としては除塩が一般的であるが、系外に排除された塩類による環境汚染の危険性も指摘されている。また、過剰塩類ストレスにより活性の低下した根系は病害に感染しやすくなっており、それを防除するために、一般に薬剤を用いた土壌消毒などが行われる。これらの現在広く実施されている対策は、環境保全型農業といった時代の要請に対しては逆行するものである。

従来、除塩や土壌消毒などの対処療法については、多くの研究が行われてきたが、これらの問題を根本的に解決するには、施設土壌ストレスの本質を明らかにした上で、それを克服する技術を確認する必要がある。

本研究では、肥料の種類や施肥体系が異なる、全国7県の施設生産土壌を分析し、ストレスの実態を明らかにすることを最初の課題として設定した。その結果、全体に共通する問題として、土壌における全般的な塩類の過剰集積に加え、イオン組成が不均衡になっている問題が明確になった。

次に、これらの問題に対する技術的対策として、本研究では2つのアプローチを設定した。一つは、アンバランスになりがちな残留肥料成分を矯正する目的で、植物の必要量以上に施用される傾向にある硫酸イオンを含まない肥料の有効性を検証しようとした。すなわち、トマトを用いて、従来の緩効性肥料と比較することにより、イオンのアンバランスが矯正された施肥体系において、トマトの収量と品質がどの様に改善されるのかを明らかにすることを試みた。

もう一つのアプローチは、特に初期生育において根系に負荷されるストレスを量的に制御し改善しようとする試みで、従来行われてきた基肥施肥と、液肥を植物の必要量に合わせて少量ずつ点滴灌漑する、いわゆる「養液土耕」とを比較することにより、塩類および水分ストレスが矯正された施肥体系が、トマトの収量と品質に及ぼす影響を明らかにしようとした。

以上、現在の施設生産土壌における問題を解決し、環境保全的かつ持続的な施設生産を目指した技術体系構築のための基礎的な知見を得ることを、本研究の基本的課題とした。

2 野菜の施設生産の現状

我が国の耕地面積は、1997年には485万haになり、

ここ数十年の漸減傾向が続いている。野菜作付け面積は全耕地面積の約1割あるが、最近では1985年を境に再び減少傾向になり、1998年には52万ha余りにまで落ち込んできている(野菜・茶業試験場1999)(図1-1)。特に、野菜生産では集約化が図られている背景もあるが、生産額自体も減少傾向にある。

このように、野菜生産を含め日本農業が衰退傾向にある中、ガラス温室(温室)とプラスチックハウス(ハウス)で行われる、いわゆる施設栽培は1960年ごろから盛んになり、今やその面積は5.4万ha余り、全野菜生産の11%に達し、今後さらに増加することが見込まれている。施設生産においては、特に果菜類の生産が盛んであり、図1-2に示すように、トマト55%、キュウリ41%、ピーマン37%、イチゴ81%と主要な果菜類のかなりの部分が施設栽培で生産されている(施設園芸協会1999)。稲作では減反が推進され、キャベツや大根などの露地作の野菜では価格の低迷から、2000年にはその廃棄率が過去最高のものとなっている(農業新聞2000)。このような日本農業の状態にあって、収益性の高い施設果菜類の生産を経営に取り入れようとする農家が増加している。21世紀に入りより一層その傾向には拍車がかかると考えられる。

3 野菜施設生産の問題点 —土壌化学性の悪化—

野菜作農家意向調査によると、連作は全体の約7割の

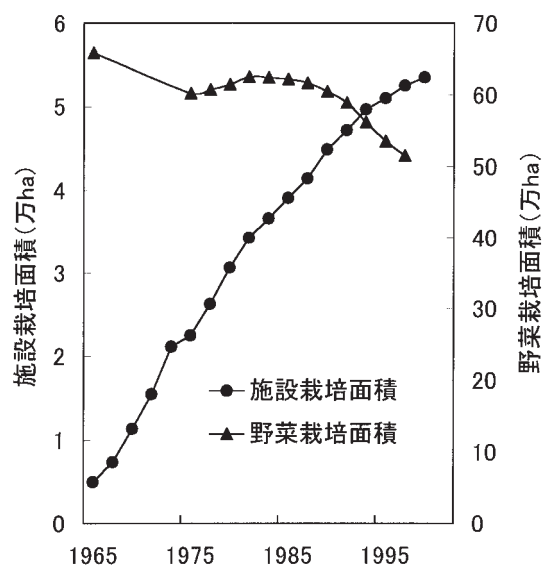


図1-1 日本における施設栽培面積と野菜栽培面積の推移
(野菜・茶業試験場1999)

農家で行っており、うち10年以上の連作が38%をも占めている（農林水産省統計情報部、1983）。野菜生産において連作障害は大きな問題であり、それぞれの作付けを行っている農家で、露地キュウリで70%、露地トマトで74%、施設キュウリで70%、施設トマトで70%と、いずれも非常に高頻度で連作障害が生じている。障害の内容としては、病害によるものが多く、特に土壌病害による被害が大きい（図1-3）。施設栽培でも病害が多いという傾向は同じであり、その他に、要素欠乏や土壌の酸性化など、土壌化学性の悪化に伴う障害も、露地栽培と同様に認められている。その一方で、施設生産では塩類過剰の割合が31.8%と高く、これは施設生産特有の問題であることが認識されている。

野菜の連作障害を全般的に見ると、土壌の物理性や化学性そのものに由来すると考えられる障害は病害に比べ少ないが、これらの土壌環境の悪化は病害発生を誘発している場合も多いと考えられる。例えば、過剰塩類などによる根の活性低下は、養分吸収量を抑制するだけでなく、作物が土壌病原菌に感染しやすくなり、病気を発生・助長することが指摘されている（堀 1994）。したがって、土壌環境の健全化が野菜の持続的生産において重要な技術的課題となっている。

一方で、このような土壌化学性の悪化は、環境問題とも密接に関連している。農業がはたす食料生産以外の役

割として、環境保全機能の重要性が認識されるようになってきた（OECD 編 1998）。農地や森林には、水資源涵養機能、土砂流出防止機能など、さまざまな公益的な機能があり、その効果についての経済的試算までなされている。しかし、農業生産が環境汚染の原因となる場合もある。そのひとつに肥料による水資源の汚染がある。環境庁は1999年2月に①硝酸性窒素および亜硝酸性窒素、②フッ素、③ホウ素の3項目を水質汚濁法に基づく環境基準項目に追加した。それまでに設定されていた24項目の中で肥料に含まれている成分は無く、今回肥料成分が追加されたことで、今後、農業に対しても具体的に規制がかけられることになる。

土地利用形態と地下水の硝酸性窒素濃度の関係を表1-1（初倉 1990）に示す。特に、施設生産では、一般に施肥量が多いことから、地下水汚染に与える影響が大きい可能性がある。また、集積した塩類から考えると施設生産は潜在的な地下水汚染源でもある。したがって、塩類集積の実態を明らかにするとともに、系外への塩類溶出の制御が環境保全的な施設生産を展開する上で重要となる（木村 1999）。

4 化学性悪化の実態

施設生産では上記のような土壌環境の劣化によって、野菜類の生産性が低下することは、以前から指摘されて

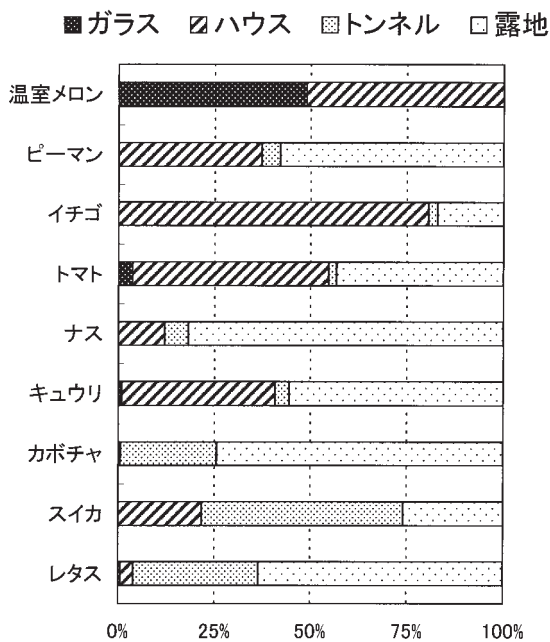


図1-2 各種野菜の栽培面積に占める施設の割合 (施設園芸協会 1999)

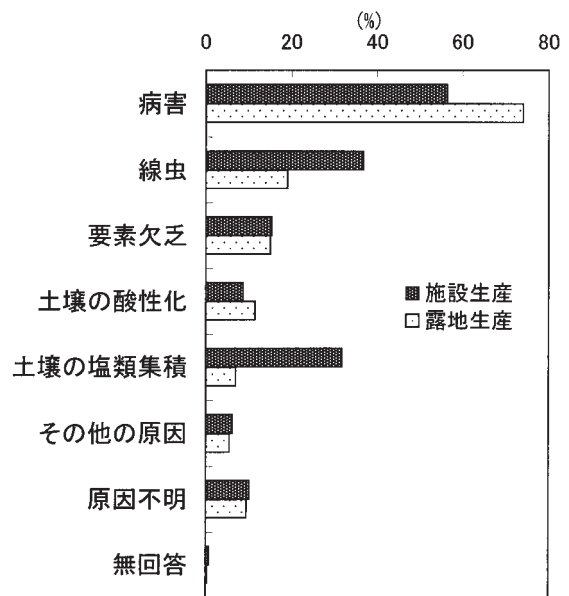


図1-3 施設および露地野菜生産における連作障害の原因 (農林水産省統計情報部 1983)

表1-1 土地利用形態と地下水の硝酸性窒素濃度*

土地利用形態	NO ₃ -N (ppm)	
	範囲	平均
水田	0.0~16.0	2.2
畑	0.1~45.2	11.0
樹園地	0.9~24.8	10.6
施設園芸	0.1~77.4	16.0
畜産	0.0~13.1	5.5

*対象は全国各地 (初倉 1990)

きた (相馬 1985a, b), 施設土壌における塩類集積の調査は, ビニールハウスの普及にしたがって 1960 年代から各地で行われ, 硝酸イオンの過剰集積 (関東ハウス土壌研究グループ 1966) やリン酸イオンの集積を指摘する報告 (今泉 1988) などがある. 奈良県 (宗林ら 1990) や愛知県 (瀧・沖野 1991, 瀧 1992) の調査では, 硫酸イオンが土壌溶液の EC を上昇させる原因物質となっている場合があることが指摘されている. 肥料成分が収穫後にバランス良く残存している場合は, 次の作付けの時に, その分だけ全体に施肥量を控えれば良いが, 一般にはアンバランスであり, 施肥量を全体的に控えるだけでは不十分である. 現場の診断においては, 測定が比較的簡単な土壌の電気伝導度 (EC) が用いられる. 栽培後の EC が高い場合には次の作付け時に施肥量は控えられる. しかし, 実際には EC を基に施肥量を控えた場合, 窒素欠乏症状が現れる事例が報告されている. これは, 先に述べたように, 残存している肥料成分が, アンバランスであるためと考えられる. つまり, 高い EC は硫酸イオンや塩素イオンにより構成されていることがあり, 生産により密接に関わっている窒素成分を反映していない場合が, 近年の施設生産で増加している可能性がある. このことを検証するために, より広範な地域における塩類集積とその組成の実態を調査する必要がある.

5 塩類過剰によって生じるストレス

このような施設土壌で生じる塩類集積に対する耐性は, 野菜の種類により異なることが知られている. 野菜の初期生育に対する土壌溶液の適正 EC は, レタスで $2\sim 3\text{dSm}^{-1}$, ホウレンソウとトマトでは $2\sim 4\text{dSm}^{-1}$, スイートコーンでは $3\sim 5\text{dSm}^{-1}$ である. 中には, イチゴのように 0.5dSm^{-1} 以上で収量が低下する感受性の高いものもあるが, 野菜種間の差はそれほど大きなものではない. 多くの野菜における最適土壌溶液 EC は 4dSm^{-1} 程度であると言われており (位田 1981), これは, 海水の約

10 分の 1 の濃度に相当する. 以上述べてきた値は, 土壌溶液の結果であるので, これに 0.15 を乗じて, 一般的に用いられる 1:5 土壌抽出液に換算すると, 最適 EC は 0.6dSm^{-1} 前後であると考えられる. 現在の施設土壌において, 1:5 土壌抽出液の EC は, 収穫後でも 1.5dSm^{-1} を越える場合もありこの値は, 土壌溶液に換算すると 10dSm^{-1} 相当となる. つまり, この場合栽培期間中には, 少なくとも海水の 4 分の 1 程度の濃い塩溶液に根が接していることになる. また, このような浸透圧ストレスの他, 上記のように残留イオンのアンバランスに伴う化学ストレスも根に負荷されていると考えられ, これらのストレスの軽減が, 特に多肥されがちな施設生産で求められている.

6 従来の土壌化学ストレス回避技術

以上述べてきたような化学ストレスを回避する肥培管理法が, これまでにいくつか提案されている. 湛水除塩, 客土, クリーニングクロップの栽培などがそれであるが, それぞれ一長一短ある (土岐ら 1991). 湛水除塩は, 表層から十分灌水し, 過剰に集積した塩類を作土から洗い流すものである. 除塩直後の土壌環境は, 改善されると言われているが, 灌水が不十分な場合, 地下から再び塩類が上昇することもあり, 効果が一定しないとの評価もある (土岐ら 1991). また, たとえ除塩できたとしても施設土壌から流れ出した塩類は地下水を汚染するという問題がある (横山・甲斐 1996).

客土による対応も問題解決の可能性はある (土岐ら 1991). 問題の無い土壌を入れることによって, 一時的に生産は回復するが, 一旦下層に押しやられた塩類は, 同じ栽培条件下では, 必然的に再び地表へと上昇し集積する. さらに, 多大な費用と労力を必要とし, 問題の多い方法だと言わざるを得ない.

逆に問題土壌を取り除く排土も, 多大な費用と労力がかかる点は客土と同じであるが, 過剰に集積したイオンを確実に除ける点で, 効果が大きいと言える. レタスとホウレンソウを用いた実験で, 1:5 土壌抽出液の EC が 1.0dSm^{-1} を越えるような状況では, 排土による効果が認められると言われている (土岐ら 1991). しかし, 棄てられる作土は, 長年かけて作られた貴重な資源でもあり, 再生して使う方向を目指すべきである.

また, 栽培後に過剰の塩類を他の植物に吸収させる, クリーニングクロップを用いる方法もある. トウモロコシやスーダングラスを用いて除塩を試みた例があり, 有効である (武井 1978). このように連作を避け, 他の

植物を導入することも、結果的に生産性を上げるひとつの方法であるが、現場の生産性を考えたとき、収入に直接結び付かない作物を長期栽培することは、必ずしも望まれている訳ではない。可能な限り時間をかけず効率良く除塩していく方法が求められている。

これら様々な除塩法は対処的であり、根本的には使用する肥料や施肥法を改善する必要がある。

7 施設生産土壌の化学ストレス軽減のためのアプローチ —低硫酸根緩効性肥料による施肥の質的制御—

化学肥料から放出される過剰なイオンに由来するストレスを制御する方法の一つとして緩効性肥料の使用があり、現場への有効性が検討され始めている（庄子 1995）。緩効性肥料には、大きく分けて2種類があり、窒素自体が化合物として組み込まれ、その化合物が分解しないと窒素が放出されないもの（窒素縮合型：ウレアフォームやCDU等）と、肥料の粒自体がポリオレフィン系の薄膜等で覆われているもの（被覆型：LP ロング等）がある。どちらも、主に窒素成分の溶出を緩やかにすることにより、根系に負荷されるストレスを抑え、窒素利用率を上昇させようとするものである。

また、近年、硫酸イオンや塩素イオンなど、過剰になりがちな副成分を極少量しか含まない肥料を施用するノンストレス施肥法が提案され（小野・藤井 1994, 小野・森 1996）、実用面での検討がなされている（村山ら 1998）。さらに、最近では、このような考えに基づき、必要以上に肥料に含まれる傾向にある硫酸イオンをケイ酸イオンで置き換えた低硫酸根緩効性肥料 LSR（Low-sulfate slow-release fertilizer）が開発された。しかし、この肥料が、果菜類等の収量や品質に与える影響を明らかにした報告はこれまでに無く、過剰塩類による化学ストレスの問題を抱えている施設生産での適用性を明らかにする必要がある。

8 施設生産土壌の化学ストレス軽減のためのアプローチ —養液土耕による施肥の量的制御—

施設における肥培管理は、作物の作付け前に基肥を施用して、その後の作物の生育に合わせて追肥を行うのが一般的である。しかし、農家ではそれぞれの経験に基づいて行うので、必要量以上の施肥が行われていることがしばしばある。このことが、肥料成分の過剰な、あるいは不均衡な集積を起こす主因であると考えられる。このような問題点を解決し、合理的な施肥法を徹底させる目的で開発されたのが、栄養診断と連結した Drip fertigation（ドリップファーティゲーション）である（HOCHMUTH 1992, HARTZ and HOCHMUTH 1996, 六本木・加藤 2000）（図1-4）。

現代のドリップファーティゲーションの基礎技術は、1930年にイスラエルのプラスが開発したと言われる（渡辺 2000）。それ以降、チューブやエミッターの開発が行われ、現在では高い精度で厳密な施肥および灌水管が可能となっている。液肥に関しても植物栄養学の視点から様々な改良が加えられ、作目毎の肥料および施肥法が検討されている。

ドリップファーティゲーションは、日本では「養液土耕」として認識されつつあるが、新しい技術であるため、その訳語および定義が厳密には定まっていない。

まずは、いくつかの文献から「養液土耕」の定義もしくは、関連する記述を紹介しておく。「土壌肥料用語事典」（藤原ら 1998）では、「養液土耕：養液栽培と土耕栽培の利点を取り入れた方法である。土壌の持つ養分供給力、養分保持力、緩衝作用を活かしながら灌水の中に混入した肥料養分を供給していくもので、作付け前の施肥は行わないのが原則である。現在、市販されている装置は液肥混入機、点滴チューブ、液肥タンクなどから成り、時間あたりの灌水量は点滴チューブの敷設長によ

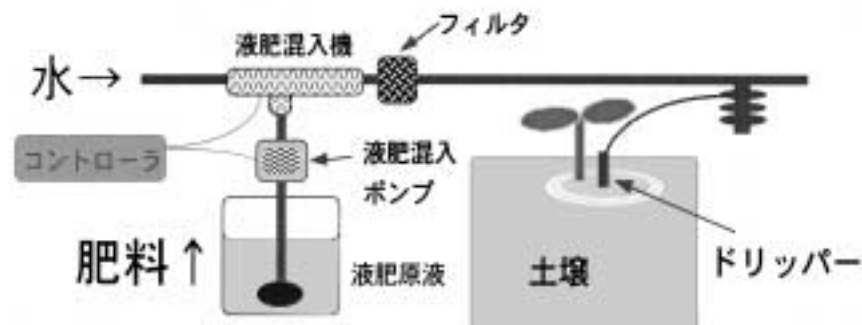


図1-4 Drip fertigation（養液土耕）の概念図
施肥量低減や根に負荷されるストレス軽減が期待される養液土耕法
液肥を適宜希釈し、植物の必要量に合わせて施用する。

て決まる。作動中に灌水量が分単位で表示されるために、タンク内の液肥の養分濃度を把握し、希釈倍率、作動時間を自由に設定することにより、必要とされる養水分をタイマーを用いて決められた時刻に全自動で供給することができる。養液土耕栽培の利点は養水分管理の省力化のほか施肥量の節減が図れることである。特に植物体または土壤養分を指標としたリアルタイム診断によって養水分の供給の調製を図れば効率的な施肥に結びつけることができる。キュウリ、ナスで行った結果では、土壤の無機態窒素は2~3mg/100gでも汁液中の養分は適正に保持され、根に対する過剰養分のストレスが軽減されることから、生育は良好になる。”とある。

また、「トマト 生理と栽培技術」(青木 1998)では、“新しい肥培管理技術である養液土耕は、トマトのような長期栽培作物にとってはきわめて有効なものと考えられる。トマトの根圏環境を良好に維持し、根群の活力を長期にわたって高め、土壤の力強い潜在能力を活用しようとするものである。施肥はトマトの必要とする肥料成分を中心に、吸収されやすい培養液を与えて必要以上の過剰施肥をひかえて、作物にも土壤にも周辺環境にも悪影響を及ぼさないように工夫された画期的な新技術であり今後の普及が期待される。”と紹介されている。

栃木県農業試験場グループ(古口 1999)は、“少量に分けて多回数、時間をおいて灌水すれば(養液は)横方向に浸潤する。この原理を利用して、点滴状態で養液を地表面へ間断給液すれば、根圏域は栽培床の表層25cm以内に密生し、施用した養液の吸収能力の向上が図られる。これを基肥を施用せず作物の成長と気象条件に応じて制御すれば、必要最小限の水と肥料で最大の生産が期待できる。この栽培法が「養液土耕」であり、この技術の理念は栃木農試のオリジナルである。”と述べている。

以上のように、概念や強調点に若干の違いはあるが、期待される効果としては、施肥効率の上昇、環境汚染の低減、根圏ストレスの軽減、施肥管理の省力化などが挙げられる。先に述べた施設生産の問題点の解決に有効な手法であると考えられる。“養液土耕”という用語自体は、栃木農試が最初に提唱したものであり、上述のように液肥の点滴による根域制御が主要な内容である。それ以降、さまざまな改良された手法が提案され、現在では、栃木農試が提案したのものから、さらに大きな広がりを持つ技術として、“養液土耕”という言葉が用いられつつある(川田 1999)。

広義の養液土耕の概念自体について言えば、その始ま

りは非常に古いものである。養液土耕が、基本的な考え方として、希釈した液肥を灌水と同時に施用する技術を含んでいるため、人糞尿を希釈して肥料として作物に施した時からその歴史が始まっているとも言える。現在では、コンピュータや灌水チューブなどのハード面の進歩により、作物の生育に合わせて、作物が必要とする養分を適切な量で与えるといった厳密な管理が可能になり、養液土耕として具現化されたといえる。

本論文では、以後、養液土耕をドリップファーティゲーションと同義語で使うこととする。実際の栽培試験の結果、栽培期間中の土壤の無機態窒素含量は、養液土耕条件下で通常の基肥中心の施肥に比べ低く推移し、毎日少量ずつ施肥した窒素が効率よくキュウリやナスなどに吸収利用されていることが報告されている(六本木・加藤 2000)。普及技術としては、さらに、コスト面や、装置に関する検討が必要であるが、技術開発の方向性としては、環境保全型農業といった時代のニーズに対応し、将来に向けて発展していく技術と考えられる。特に、根系へのストレスを軽減するために施肥を量的に制御する手法として、この養液土耕を採用した。

9 野菜の有機栽培の現状

野菜栽培においては土づくりの重要性は古くから指摘されてきた。一般に、適切な有機物施用により、土壤の物理性、化学性、生物性が良好に保たれると言われているため、何らかの形で圃場に有機物を施用する農家が増えてきている(西尾ら 1988)。

また、畑地への有機物の還元は、畜産廃棄物処理の問題とも関連し、野菜畑も家畜堆肥を受け入れる場として、今後ますます重要な一翼を担うこととなる。しかし、畜産廃棄物は、組成のばらつきが大きいことなどから、土壤還元に伴う生育への影響を、一律に定量的に把握することは困難である。特に種類の多い野菜類での種毎の効果に関しては、いまだ研究の蓄積は極めて不十分であり、今後の発展が望まれている。

現在、家畜排泄物由来の肥料成分排出量を試算すると、日本の全農地に還元してもなお余りある量の量が排出されていることになる(有機質資源化推進会議 1997)。また、家畜排泄物の排出量には地域な偏りがあり、排出量の多い地域では、深刻な環境問題を引き起こしている。特に、鹿児島・宮崎などの南九州地域、徳島・香川の東四国地域、愛知・神奈川・群馬を中心とする関東東海地域で農耕地への負荷が大きなものとなっている(原田 1997)(図1-5)。全国レベルで見ると、いまだ、堆肥

化装置の普及が十分でない地域もあり、また、生産された堆肥の流通経路が確立していない地域もあり、堆肥の十分な利用が図られていないのが現状である。政策面では、「家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」や「持続性の高い農業生産方式の導入に関する法律」が制定され、家畜堆肥処理と消費者の有機農産物へのニーズとを結びつけるような方向に進みつつある(徳江 1999)。

さらに、最近では、有機農産物に対する消費者の関心が高い。特に、遺伝子組換え体の表示問題により、その関心もさらに増している。それは、有機農産物の新しい規格(JAS)において、有機農産物であることを満たす条件のひとつに、遺伝子組換え体で無いことが盛り込まれていることとも関連している。安全性を求める消費者の関心は単なるブームではなく、確固とした方向性として定着しつつある(水野 2000)。このような、食品の安全性に対する関心を通して有機農産物の需要はますます増加し、施設栽培も含めた野菜生産においても、厳しい基準を満たす栽培法の確立が求められてくることは確

実である。

10 養液土耕と有機栽培との融合技術としての有機養液土耕の提案

有機養液土耕は、上述の養液土耕の考え方と有機栽培の考え方を融合させた技術である。土壌の有機物分解能力を超えない程度、少量ずつ有機性の液肥を土壌に還元することにより作物の生育を制御する手法である。従来、有機物資材の利用に関しては、脱水や堆肥化といった時間やコストを必要とする行程が不可欠であると考えられてきたが、希釈倍率、施用量、洗浄プログラム、点滴位置などを適切に定めることにより、未熟液体有機物の土壌還元が可能であることを証明することを試みた。

従来の養液土耕では、土壌の特性を活かしているとは言えども、その物理性、化学性のみにも留まっていた。本論文で提案する有機養液土耕は、有機性の液肥を使用するため土壌の生物性をも利用している点で画期的である。また、このような栽培による生産物は、農薬を使用しなければ、有機農産物になり得るものであり、消費者のニーズに答えることのできる栽培法でもある。

今回、有機性の液肥として使用した物質はコーンステーパーリカー(CSL)であり、製紙、繊維、医療等さまざまな分野で広範に用いられるトウモロコシ澱粉の製造過程で生じる副産物である。このような製糖会社は、日本全国で12社あり、東海地方を中心に全国に10以上の工場がある。特に関東東海地方にはその半数以上が集中している(図1-5)。現在、CSLは微生物培養用の基質や、乾燥させて家畜飼料として用いられているが、このように大量に生産される副産物に対し、環境保全的な側面から新たな処理および用途が求められている。家畜堆肥の生産量も考え合わせると、関東東海地域では、未利用の有機物を大量に生産していることにもなる(図1-5)。また、この地域は全国有数の施設生産地域でもあり、有機養液土耕のような有機物を積極的に活用する技術が、施設生産においても求められている。

11 研究の目的と本論文の構成

以上の背景と問題点の検討を踏まえ、本研究では、日本各地の野菜生産施設土壌の化学性における特性を、とくに塩類集積に注目し、露地畑土壌と比較しつつ明らかにしようとした。さらには、塩類集積に由来する土壌ストレスの緩和技術として開発されてきた過剰なアニオンを含まない肥料や、施用量を厳密に制御し得る施肥法の、トマトの収量や品質、あるいは土壌の化学性に対する効



図1-5 農耕地に対する家畜排泄窒素の負荷量が200 kgN/ha/年を超える県とCSL(コーンステーパーリカー)を生産する工場の分布

(家畜は排泄窒素に関しては原田の文献(1997)から、CSL工場数に関してはサンエイ糖化(株)からの情報(1999))

果を評価しようとした。

そのために、本論文のⅡ章では、7県から、施設土壌89点、また、それぞれに隣接する露地畑か32点の土壌を採取し、とくに化学性に関し広範な項目について分析した。その結果、多くの施設土壌において土壌ストレスが存在し、それは主に塩類過剰に由来するものであることが判明した。

このことを踏まえてⅢ章では、主に施肥養分の質的な制御による、そのような土壌における化学的ストレスの緩和の技術的可能性を検討した。具体的には、過剰の硫酸根を含まず、施用後の土壌ECの上昇を低く抑える目的で開発された低硫酸根緩効性肥料を使用した。従来から市販されている緩効性肥料と比較し、この肥料の、トマトの品質と収量性に対する効果を、特に根系の発達や活性に注目しつつ、詳細に評価した。

つづいてⅣ章では、もう一つの土壌ストレス緩和技術として、これまで使われてきた、施肥量の厳密な制御が可能な養液土耕に、有機栽培の観点を導入する目的で有機液肥を肥料として用いる方法を検討した。すなわち、トマトの施設栽培において、土壌の化学性、根に負荷されるストレスの実態、収量や品質に対する効果を、慣行の無機肥料の基肥を基本にした施肥体系や、無機肥料を用いた養液土耕と、このような養液土耕と有機栽培を融合させた有機養液土耕との間で比較した。このことにより、有機養液土耕の問題点と優位性を明らかにしようとした。

終始一貫して、ご指導頂いた名古屋大学大学院生命農学研究科の山内章先生、巽二郎先生に感謝の意を表する。また、同研究科の飯嶋盛雄先生、矢野勝也先生からも貴重なご助言を頂き、感謝の意を表する。

また、本研究で用いた低硫酸根緩効性肥料を提供いただいた、日本合同肥料の石井和夫氏（故人）、山中澄夫氏、佐藤雄夫氏に感謝の意を表する。また、有機養液土耕法に関する研究のきっかけを与えて頂いた、三井物産株式会社 松尾隆次氏、栽培研究を一部担当して頂いた、サンエイ糖化株式会社内藤秀雄氏、根系サンプリングの協力をしていただいた名古屋大学大学院生命農学研究科 荒木英樹博士に感謝の意を表します。最後に、一連の研究において、分析等の補助をしていただいた伊藤とし子氏に厚くお礼申し上げます。

Ⅱ 施設土壌の問題の現状評価とその対策

1 施設土壌の現状評価

a 緒言

本章では、全国的にも施設生産圃場において、同様の塩類集積が進行しているのかわらかにするために、より広範な地域における土壌の実態を調査する必要があると考え、日本各地の施設土壌の分析を行い、現状把握を試みた。

b 材料および方法

実験には、表2-1に示す7県の施設土壌、計89点の試料を用いた。土壌は栽培が終了、もしくは栽培後期のものであった。対照土壌としては、隣接する露地畑から採取した計32点の試料を用いた。試料は表層から15cmまでの土壌で、圃場内の数地点から合計約500gを採取した。愛知県の土壌には、野菜・茶業試験場施設生産部圃場の試料が28点（施設25点、露地3点）含まれており、これらの試料は表層から5cmまでの土壌とした。

採取した生土は、分析時までビニール袋中に入れ低温（4℃）で保存した。含水率を測定し、乾土：水が1：5になるように、生土に蒸留水を添加し、30分間振とう後、pHとECを測定した。その後、Toyo濾紙No5Bで濾過し、濾液を遠心分離し、土壌粒子を取り除いた。さらに、0.45μmのニトロセルロースフィルターを通して分析試料とした。硝酸イオン、硫酸イオン、塩素イオン、リン酸イオンに関しては、イオンクロマトグラフィーを用い、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、ナトリウムイオンに関してはICPプラズマ発光分析法を用いて測定した。

c 結果および考察

施設土壌は露地畑に比べ、多肥および降雨の遮断が原因と考えられる塩類集積が進行する傾向にある。今回分析した結果では、露地畑の1：5土壌抽出液の平均ECは0.11dSm⁻¹であり、施設土壌のその平均ECは0.68dSm⁻¹であった（図2-1）。地域によっても異なると考えられるが、ほぼ6倍の塩類が施設土壌で集積していた。土壌のpHについては、平均すると、施設土壌でアルカリ化する傾向にあった。緒言で述べたように（図1-3）、施設栽培における連作障害の原因に関する聞き取り調査でも、土壌の塩類化をその原因と考える農家が多かった反面、土壌の酸性化に関しては、それを原因と考える農家が少なかったことも、これらの結果と符合するところである。

ECに関して、0.25dSm⁻¹ごとにグループ化して（1.5

表 2-1 化学性分析に供した施設および露地土壌

県名	採取年度	場所	点数	主な栽培作物	主な土壌
佐賀	1998	施設	5	イチゴ	赤色土
		露地	4	サツマイモ	
山口	1998	施設	6	トマト, ホウレンソウ, レタス	黄色土
		露地	6	ホウレンソウ	
香川	1998	施設	4	トマト, メロン, ホウレンソウ, ナス	褐色森林土
		露地	2	イチゴ, ホウレンソウ	
愛知	1996 および 1998	施設	28	トマト, イチゴ	黄色土
		露地	5	ハクサイ, キャベツ	
岐阜	1998	施設	4	トマト	灰色低地土
		露地	4	無植栽	
静岡	1998	施設	3	トマト, ホウレンソウ	黒ボク土
		露地	3	ホウレンソウ	
群馬	1998	施設	39	トマト, キュウリ	黒ボク土
		露地	8	ゴボウ, ネギ, ホウレンソウ, エダマメ	

分析に使用した土壌の採取地, 採取年, 栽培履歴および土壌の種類を一覧表とした。

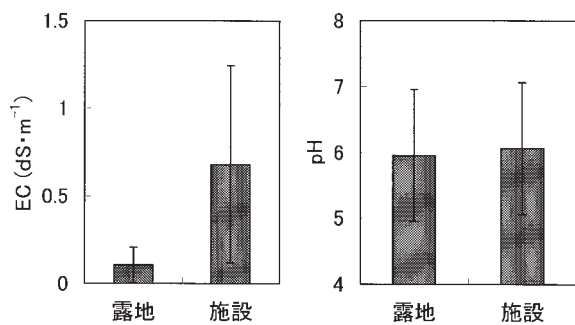


図 2-1 施設および露地土壌の EC と pH
表 2-1 の土壌について, 1:5 土壌抽出液の EC と pH を測定した。
露地 38 点, 施設 89 点の平均値を示す。縦棒は標準偏差。

dSm⁻¹ 以上は一つのグループとしてある), 解析した結果を図 2-2 に示した。土壌は施肥により酸性化すると言われ (嶋田 1967), 今回の結果もほぼ同様であった。

構成する塩類については, 従来, 硝酸やリン酸が環境汚染源として主に注目されてきたが, 宗林ら (1990) や瀧・沖野 (1991) の指摘にもあるように, 硫酸イオンの集積も同様にあることが認められた (図 2-3)。また, カチオンについてはカルシウムやマグネシウムの集積が顕著であった。このように, 用いられる肥料の違いから土壌の集積塩類も時代とともに変化する可能性が考えられる。特に, 少ない作土に多量の施肥が行われる傾向にある施設生産においては, 急速に土壌化学性の変化が生じる可能性もあり, 定期的な現状把握が全国規模の広い範囲で行われる必要がある。

土壌改善の実験において 1.0dSm⁻¹ 以上の塩類集積土

壌では排土した場合, 次作において, 収量増加が認められるとの報告があり (土岐ら 1991), 1.0dSm⁻¹ は塩類集積土壌か否かの大きな境界値となると考えられる。この基準で考えると今回分析した試料のうち 25% にあたる土壌に問題があると判断された。

2 施設における土壌ストレスへの対策

前節で明らかとなったように, 施設土壌における一つの問題は, 残留する肥料が土壌の EC を高め, 高い EC そのものが, 高い浸透圧ストレスとして, 野菜の生産性を低下させていると考えられることである。もう一つの問題は, 硫酸イオンや塩素イオンといった作物にとって要求量の低い養分が, 硝酸イオン, リン酸イオンなど, 要求量の高い養分に匹敵するかなりの量残っていることである。つまり, イオンのアンバランスな残留が植物に与えるストレスがもう一つの問題と言える。

これらの問題は, 除塩などの措置を取らない場合, 次作の苗に浸透圧およびイオンの不均衡に由来するストレスを負荷してしまうことになり, 生育低下を引き起こすことが考えられる。

通常の野菜類の施肥は基肥中心で行われ, 作期を通じて必要とされる, 施肥量の半量以上が, 基肥として施される。前節で示したように, 通常の栽培を行っても, かなりの残存肥料があるため, 残存肥料に由来するストレスと, 作付け時に施肥される肥料に由来するストレスが合わさり, 次作の苗の根系には, かなりのイオンストレスが負荷されることが考えられる。

肥培管理に基づく根本的な対策としては, 野菜の必要

量以上の肥料成分を圃場に持ち込まないことであり、そのような施肥法または肥料を用いることである。具体的

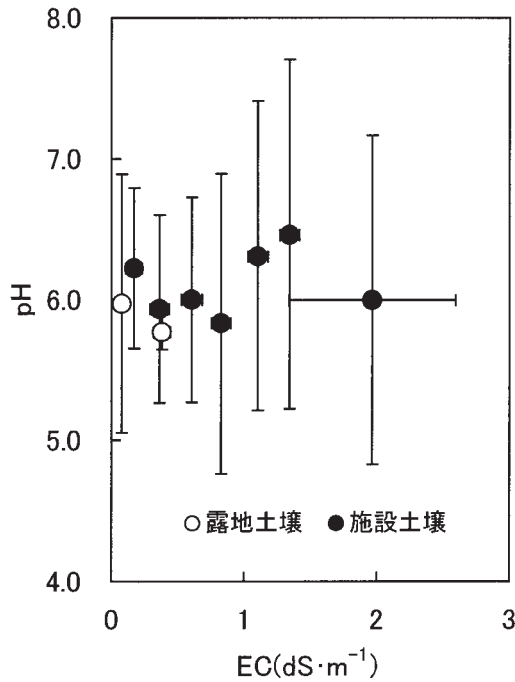


図2-2 露地および施設土壌におけるpHとECの関係

表2-1の土壌について、1:5土壌抽出液のECとpHを測定した。

露地38点、施設89点の測定値を基に、ECに関して、0.25dS・m⁻¹ごとにグループ化して表示した。

ただし、1.5dS・m⁻¹以上のサンプルは、ひとつのグループとした。

横棒および縦棒は標準偏差を示す。

には、無硫酸根緩効性肥料 (Low-sulfate slow-release fertilizer: LSR) が開発されていることから、それを用いることで、特に過剰になりがちな硫酸イオン残留を低く抑えることができると考えられる。このような肥料を用いることによりバランスの取れたイオン環境に生育期間を通じて整えていくことが可能となると考えられる。その他の肥培管理に基づく対策としては、肥料そのものを分施する技術の適用である。液肥を植物の必要量に合わせて少量ずつ点滴施用する、いわゆる「養液土耕」のシステムを導入することが有効な対策と考えられる。

III 低硫酸根緩効性肥料が土壌ストレス軽減を介してトマトの生育、収量、品質に与える影響

1 低硫酸根緩効性肥料がトマトの生育と根系に与える影響

a 緒言

施設生産における土壌化学性の悪化は、塩類そのものの過剰集積も問題であり、前章で述べたように、日本の7県からの施設土壌についての調査で、1:5土壌抽出液のECは、1.0dSm⁻¹を超える地点が25%あり、塩類集積が進行していることが明らかとなった。また、集積している塩類としては、硝酸イオンやリン酸イオンのほか、硫酸イオンが認められ、これらがイオンのアンバランスを生じさせる原因物質となっている場合があることが認められた。

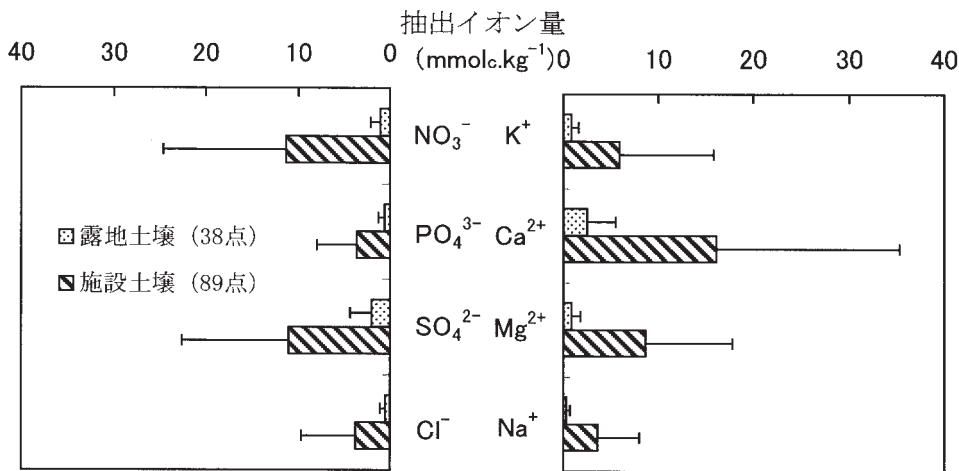


図2-3 施設および露地土壌の1:5抽出液無機イオン組成
横棒は標準偏差を示す。

佐賀、山口、香川、愛知、岐阜、静岡、群馬、計7県から採取した露地または施設土壌の1:5土壌抽出液を分析した。

このように施設土壌で問題となっている塩類集積を回避する方策として、近年、硫酸イオンや塩素イオンなど、過剰になりがちな副成分を極少量しか含まない肥料を施用するノンストレス施肥法が提案された（小野 1996）。しかし、この施肥法が、野菜類、特に果菜類等の収量、品質に与える影響を明らかにした研究はない。

そこで、本章では、硫酸イオンを極力排除して製造された緩効性窒素肥料である低硫酸根緩効性肥料（Low-sulfate slow-release fertilizer：LSR）でトマトを栽培し、LSR が、トマトの生育、収量、果実品質および土壌の化学性に与える影響について検討した。

特に、本節では、根箱法により LSR と CDU が根に与えるストレスを根系形態および根の活性の指標のひとつと考えられる出液速度（森田・豊田 2000）から明らかにすることを試みた。また、それらの根系への影響と果実収量および品質との関連を明らかにした。

b 材料および方法

1) LSR と CDU の肥料特性の検討

CDU と LSR（表 3-1）それぞれの肥料を 5g 秤量し、100℃で 5 時間乾燥して、それぞれの肥料の含水率を求めた。粉碎後 0.5mm の網ふるいを通して試料とした。3.0g の肥料を 250ml のメスフラスコに計り取り、蒸留水 200ml を加え、40rpm で 30 分振とうした。250ml に定容後、乾燥濾紙で濾過し分析試料とした。前章と同様の方法でカチオンおよびアニオンの分析を行った。

2) LSR が初期の根系発達と生育に与える影響 （実験 1）

根箱（内法 40×25×2.7cm：図 3-1 左）に下記の肥料を混和した木曾川沖積土壌（壤質砂土）を、仮比重が 1.2gcm⁻³になるように充填した。CDU 肥料区（CDU 区）には、CDU 化成 S222（12-12-12）を用い、LSR 肥料区（LSR 区）には低硫酸緩効性肥料（10-11-11）を用いた（表 3-1）。施肥は、それぞれの肥料を乾燥土壌 1kg 当たり窒素で 0.17g、0.50g、1.50g 与える 3 段階を設けた。カルシウムとマグネシウムはマグカル（白石カルシウム）を、乾燥土壌 1kg 当たり、窒素 0.17g 区には 0.42g、窒素 0.50g 区には 1.30g、窒素 1.50g 区には 3.80g 与えた。

この様な根箱に、播種後 20 日間 128 穴セルトレイで生育させたトマトセル苗（品種：サターン）を定植し、30 日間生育させた後、地上部をサンプリングした。その後、地下部はピンボード法で根系形態を保持した形で

採取した（KONO et al, 1987）。得られた根系は、根箱中央線から上部と下部に分けてスキャナーで取りこみ、MacRhizo V3.10A（REGENT INSTITUTES 社製）を用いて、それぞれの根長を測定した。反復数は 3 で実験を行った。

3) LSR がトマトの根系発達と生育・収量に与える影響（実験 2）

LSR の施用量が根の形態、生育、果実の収量および品質に与える影響を評価するため、大型の根箱を用いて長期栽培実験を行った。1997 年 6 月 24 日にセルトレイに播種したトマトを 1997 年 7 月 24 日に、根箱（内法 89×71×2cm：図 3-1 右）に定植し、第 3 果房まで収穫した。用いた肥料は実験 1 と同様であり、以下の条件で表層 30cm に混和した（図 3-1 右）。CDU および LSR を、乾燥土壌 1kg 当たり窒素で 0.07g（L 区）、0.20g（M 区）、0.59g（H 区）を与える 3 段階を設けた。カルシウムとマグネシウムはマグカル（白石カルシウム）を、乾燥土壌 1kg 当たり、L 区には 0.22g、M 区には 0.65g、H 区には 2.00g 与えた。追肥は 51 日目（1997 年 9 月 13 日）に L 区と M 区において基肥と同量施肥した。

灌水は底面および上面から行った。底面灌水の場合は、水槽に根箱を入れ、水位を根箱上面から 45cm に設定し、定植直後および、萎れが生じた 2 日間（1997 年 9 月 26 日、同 10 月 13 日）について行った。また、着花までは 1 日当たり約 0.5 リットル、その後は、1 日あたり約 1 リットルを上方から灌水した。

移植後 82 日目に地際から 5cm のところで地上部を切除し、予め重量を正確に測定した脱脂綿（約 2.8g）で切り口を覆い、蒸発を抑えるために、さらにその上をビニール袋で覆い、10 月 14 日 19 時から翌朝 7 時までの 12 時間静置した。脱脂綿の重量増加分から出液量を計算し、出液速度を推定した。

根系のサンプリングは、移植後 83~84 日目（1997 年 10 月 15 日~16 日）にかけて行った。土壌を、トマトの根系配置が崩れないように緩やかに洗い流し、黒不織布上に展開させた根を写真撮影した。一つの根系に対して根域を上部から約 9cm ごとに切断し、それぞれの層に含まれる根の長さをルートスキャナーで測定した。実験は 3 反復で行った。

c 結果および考察

1) LSR と CDU の肥料溶出特性

肥料からの肥料成分の溶出は、EC で比較した場合

表3-1 実験に供した肥料の性質

使用した肥料 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	肥料成分 (%)											24時間溶出量 (mmol.g ⁻¹) ^{*1}							pH	EC ds·m ⁻¹	
	N					P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Si			
Total	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	CDU ^{*2}	UF ^{*3}																	
CDU ^{*4} (12-12-12)	12	4.5	-	7.2	-	12	12	-	4	4.1	0.8	1.8	0.1	1.1	0.0	0.0	4.4	0.0	6.7	7.6	
LSR (10-11-11)	10	-	-	-	10	11	11	-	2	0.4	0.2	0.8	0.1	0.4	0.0	0.1	0.5	0.4	8.2	1.3	
リン硝安カリ (16-10-14)	16	6.5	9.5	-	-	10	14	-	-												

*1 ICP およびイオンクロマトにより測定. (n=2)

*2 CDU: Cyclo-di-urea

*3 UF: Urea form

*4 本試験では CDU 化成 (S222) を対照肥料とした.

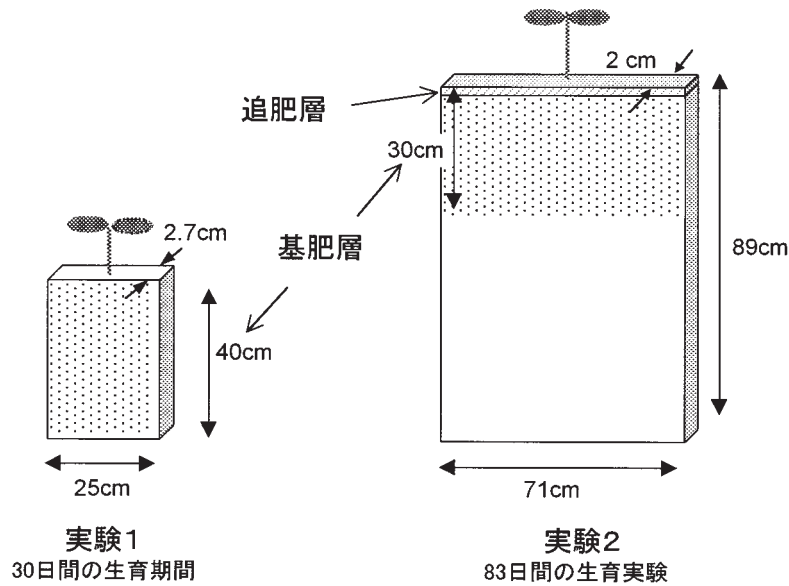


図3-1 実験に用いた根箱の外観図

CDU は LSR に比べ約 5.8 倍高く、イオンストレスとしては、LSR の方が低く抑えられていると考えられた。24 時間で溶出してくるイオン濃度から、CDU では、特に硫酸イオンの濃度が高く、アニオンの 8 割が硫酸イオンであった (表 3-1)。一方、LSR では、溶出してくるイオン濃度が低いとともに、際だって高くなるイオンも無く比較的バランスの取れた溶出を示した。カチオンについても CDU ではカリウムが際だって多いのに対して、LSR ではカチオン濃度が全体的に低いという特性を持っていた。

2) LSR が初期の根系発達と生育に与える影響

図 3-2 にそれぞれの処理における典型的な根系画像を示した。LSR 区に比べ CDU 区において根系発達が抑制され、特に CDU を施肥した H 区においては、根系は定植時のセル苗の範囲から出でず、極度のストレスが根系に負荷されたと考えられた。全体的に見て、

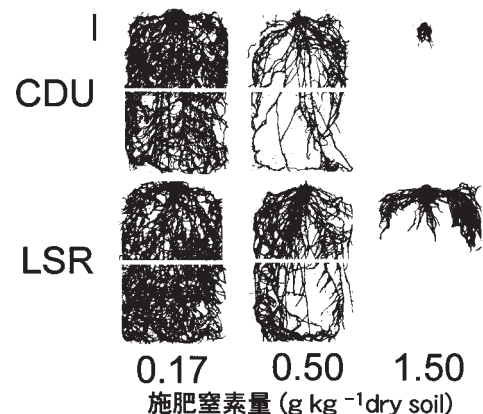


図 3-2 肥料の種類および施肥量がトマトの根系形態に与える影響

CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む
LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料
縦棒は 5cm

LSR 区においても施肥量の増加に伴い根系発達が抑制されていたが、その抑制程度は CDU 区に比べ小さかった。

図 3-3 に、CDU 区と LSR 区の施肥濃度に対するトマトの地上部および地下部の初期生育反応を示す。同じ窒素施用量においては、LSR 区の方が CDU 区に比べ、地上部および地下部ともその生育抑制が緩和されていた。施肥量増加に伴う地上部および地下部の抑制程度は CDU と LSR 処理区間の差は小さく、したがって S/R (Shoot/Root) 比には顕著な差は認められなかった。

含水率を 20% と仮定して、与えた肥料から表 3-1 に示す肥料溶液が溶出したと仮定して、その EC と全生育量の関係を調べると (図 3-4)、CDU 区と LSR 区は推定 EC 濃度に対する生育抑制程度は、ほぼ同じと考えられ、生育量そのものの抑制は高塩類障害が主因であると考えられた。トマトにおいて生育が半減する塩類濃度は、NaCl で 4500ppm であり (大沢 1960)、この濃度は、EC

に換算すると約 8dSm^{-1} である (亀和田 1997)。本実験で得られた EC は約 10dSm^{-1} であり、これとほぼ同様の値であって、土壌溶液のイオンに由来する高い EC が生育低下の主因と考えられた。

一方で、同じ横軸に対して、縦軸に S/R 比をプロットしたところ、CDU 区と LSR 区は異なる反応を示した (図 3-4)。これは、同じ塩類障害を受けた場合でも、CDU 区の方が、地上部に比べ相対的により地下部に乾物を分配するように働いていることを示している。塩類過剰 (EHRET and HO 1986) はもとより、他のストレス、例えば物理的刺激 (PETERSON et al. 1991) や、水分欠乏 (SHARP 1996) などのストレスを受けた場合でも S/R 比が低下することを示す報告がある。本実験の場合 CDU の H 区は、ほとんど生育していないことから例外として除いたとしても、塩ストレスの増大により S/R 比が増加していた。今回認められた過剰施肥の反応は物理的的刺激や過剰塩類などの他のストレスの反応と

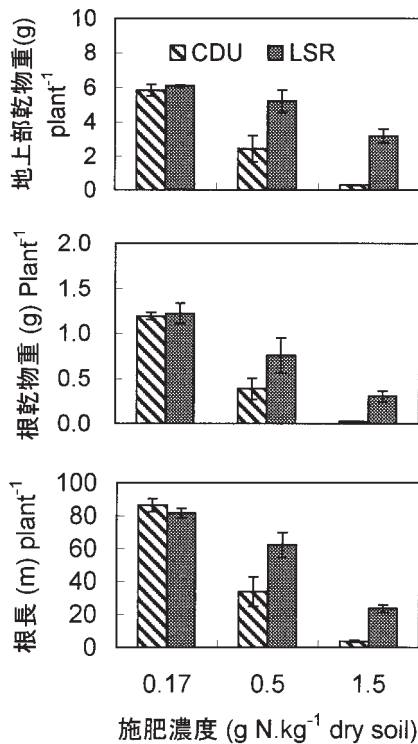


図 3-3 肥料の種類および施肥濃度がトマトの地上部および地下部の生育に与える影響
 CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む。
 LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料。
 縦棒は標準誤差 (n=3)

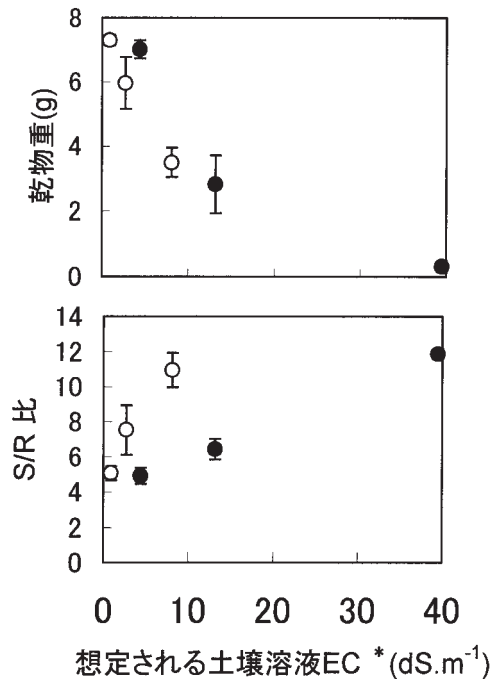


図 3-4 肥料の種類および施肥濃度がトマトの乾物生産および S/R 比に与える影響
 ● CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む。
 ○ LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料。
 縦棒は標準誤差 (n=3)
 * 含水率を 20% として、それぞれの肥料から表 3-1 に示す肥料溶液が溶出したと仮定した。

は異なる可能性が考えられた。また、同じ塩類ストレスで同じように生育阻害を受けた場合でも、CDU区でS/R比が低下することから、CDU区では塩類ストレス以外のストレス、例えばイオンのアンバランスに伴うストレス等が作用していると推察した。

MOHAMMADら(1998)の結果は、同じ塩ストレスが負荷された場合でも、他の栄養条件が良い場合は、地上部への乾物分配が根へのそれよりも優先されることを示していた。本実験においても、CDU区における高塩類ストレス以外の他のストレスが、さらなる根への乾物分配を促した一方で、LSR区ではイオンの不均衡が少なく栄養状態が相対的に良いと考えられる地上部への分配が促進されたと考えられた。

3) LSRがトマトの根系発達と生育・収量に与える影響

図3-5に示すように、草丈に関してはL区では、差は認められなかったが、M区ではCDU区の方が高く、H区ではLSR区の方が高く推移していた。H区では初期の伸長が抑制されていることから、高塩類ストレスが負荷されていたと推察された。葉緑素計の値も草丈と同様に窒素の吸収を反映している挙動を示した(図3-6)。すなわち、L区とM区に関しては、定植後35日後、値の上昇が認められなくなり、蓄積吸収できる窒素は少なくなっていると考えられた。M区では、最初にCDU区で高くなり、その後は差が認められないが、H区では全体的にCDU区が高く推移していた。用いたCDU

肥料には、窒素の内38%程度のアンモニウム態窒素が含まれており、これが速効性窒素として作用し、高い葉緑素値の原因となったと考えられた。

図3-7に、CDU区およびLSR区のそれぞれの施肥区における典型的な根系を示した。L区とM区については、外見上大きな差異は認められないが、H区においては、顕著な差異が認められた。すなわち、CDU区では1本ないし数本の不定根(写真では、1本のみ)が、高濃度に施肥された施肥層を突き抜けて、下層に達し、そこで多くの側根を発達させていた。また、このときの施肥層の根は、褐変しており、側根の伸長も抑制されていた。

図3-8に根長の垂直分布を示す。総根長はCDU区とLSR区で、それぞれ、L区では $690 \pm 9\text{m}$ と $754 \pm 53\text{m}$ 、M区では $699 \pm 33\text{m}$ と $702 \pm 47\text{m}$ 、H区では $690 \pm 62\text{m}$ と $806 \pm 22\text{m}$ と、処理区間での差異はそれほど大きいものではなかった。

H区の施肥濃度は、施肥層の部分では、 0.59gN kg^{-1} dry soilであり、小型根箱の最高濃度である 1.5gN kg^{-1} dry soilよりは低く設定されていたため、根系もかなり発達していた。図3-3から考えると、 $0.59\text{gN kg dry soil}^{-1}$ の施肥濃度では、CDU区はLSR区の3分の1程度に生育が抑制されるはずであるが、実際に総根長で比較すると、20%の減少程度で留まっていたことになる。施肥層のみ(26.4cmまで)の根長を比べた場合でもCDUとLSR区でそれぞれ、 $257 \pm 25\text{m}$ 、 $372 \pm 25\text{m}$

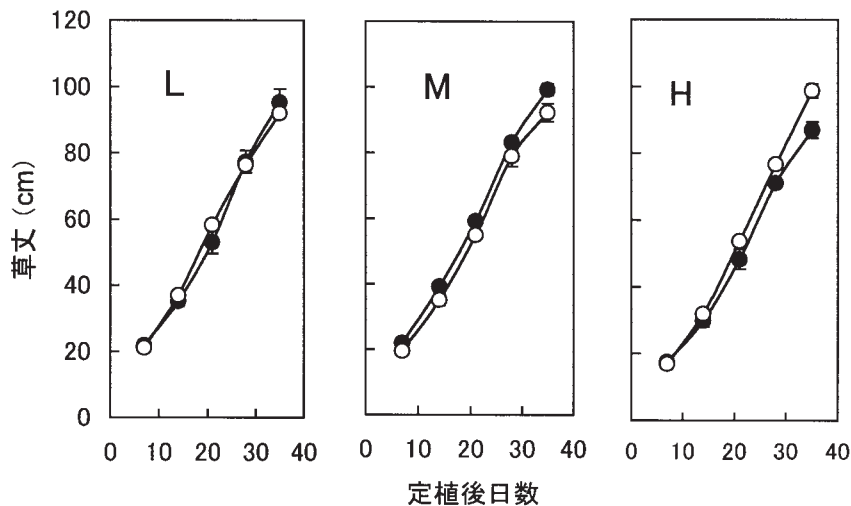


図3-5 肥料の種類および施肥濃度がトマトの草丈に与える影響

● CDU: 緩効性窒素としてCDUを含む化成肥料S222 (12-12-12)、硫酸イオンを含む。
○ LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11)、硫酸イオンを含まないように調製された肥料。
基肥として、表層から30cmの部分に、それぞれ窒素で、L: 0.07g 、M: 0.20g 、H: 0.59g N. kg^{-1} dry soil与えた。
縦棒は標準誤差 (n=3)

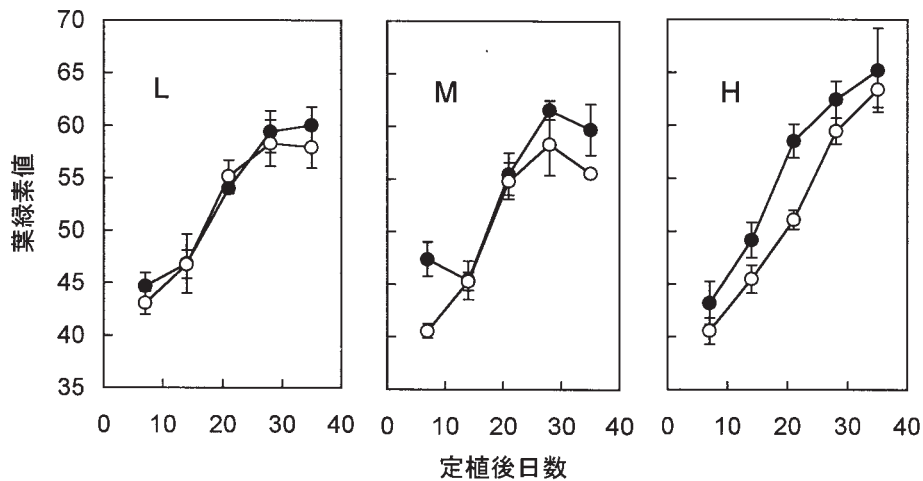


図 3-6 肥料の種類および施肥濃度がトマトの葉緑素値*に与える影響

● CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む.
 ○ LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料.
 基肥として、表層から 30cm の部分に、それぞれ窒素で、L: 0.07g, M: 0.20g, H: 0.59g
 $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry soil 与えた.

*:葉緑素値は SPAD メーターで測定した。縦棒は標準誤差 (n=3)

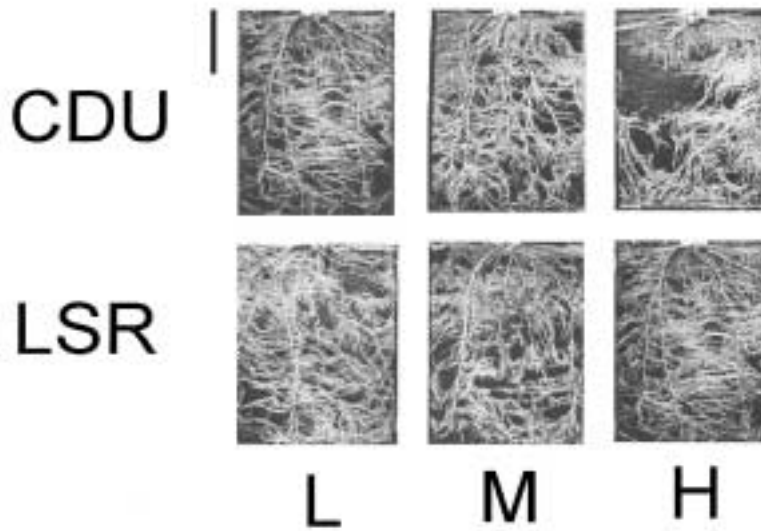


図 3-7 肥料の種類および施肥量がトマトの根系形態に与える影響

CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む.
 LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料.
 基肥として、表層から 30cm の部分にそれぞれ窒素で、L: 0.07g, M: 0.20g, H: 0.59g ·
 kg^{-1} dry soil で与えた.

L 区と M 区については、定植後 51 日目に追肥として基肥と同量与えた.

縦棒は 30cm

となり、31%の減少程度で留まっていたことになる。

CDU 区における根長の低下が実験 1 に比べ軽度で留まったのは、下層に伸びた根が、そこから水を吸収し、施肥層に位置する根系の機能を維持したためと考えられる。例えば、根を介した土壌間での水の移動は、Hydraulic lift として多くの植物で認められているが、

この現象がトマトでも認められており (DOWSON 1993)、本実験においても、下層から施肥層へ水が輸送され、施肥層の根に負荷される高濃度イオンストレスを緩和した可能性が考えられた。

収量及び果実糖度の結果を図 3-9 に示す。LSR 区では CDU 区に比べ収量が同程度またはそれ以上あり、特

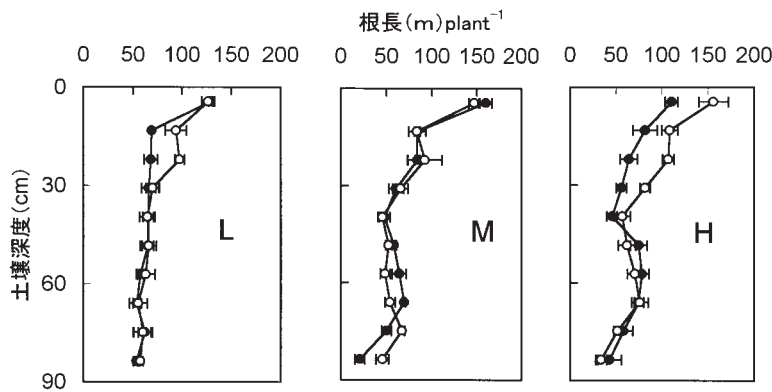


図3-8 肥料の種類および施肥濃度がトマトの根の垂直分布に与える影響

- CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む.
 - LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料.
- 基肥として, 表層から 30cm の部分に, それぞれ窒素で, L: 0.07g, M: 0.20g, H: 0.59g N. kg⁻¹ dry soil 与えた. L区とM区については, 定植後 51 日目に追肥として基肥と同量与えた. 縦棒は標準誤差 (n=3)

に H 区での収量差が大きかった. LSR 区は多量施肥された場合でも肥料としての効果が維持されたと言える. 糖度は LSR 区では CDU 区に比べ, L 区では同程度, M 区または H 区では低くなった. トマトにおいて根系にストレスが負荷された場合, 収量が低下し, 果実糖度が上昇したとする報告 (EHRET and Ho 1986) があるが, 本実験の結果も同様に, 高濃度の CDU 施用によって根が塩類過剰ストレスを受けて糖度が上昇したものと考えられた. 根がストレスを受けたと考えられたのは, 図3-10 に示す出液速度からも読み取れる. すなわち, CDU 区は LSR 区に比べ, 出液速度が同程度かそれ以下であり, 特に H 区においては, CDU 区は LSR 区に比べ 39% の減少となった.

以上の結果から, LSR 区では過剰に施肥した場合でも CDU 区に比べ, 根に与える塩類過剰ストレスなどを軽減することが明らかとなった. そして LSR では, これにより根の発達および吸水に与える抑制的な影響が緩和され, 栽培期間を通じて肥効を維持させることができたと考えられた.

環境汚染を軽減する施肥法として局所施肥などが検討されている (金田ら 1994) が, 本実験では, このような施肥を想定した株元への施肥の上限値が明らかとなった. 本実験では, 粉碎した肥料を用いたため, 通常の緩効性肥料以上のイオンストレスが負荷されたと考えられるため, 厳密には改めて試験する必要がある. LSR では 0.59gN kg⁻¹ dry soil 程度まで施肥することが可能であると考えられた.

また, 実験 1 からは, 初期の根系発達が抑えられると,

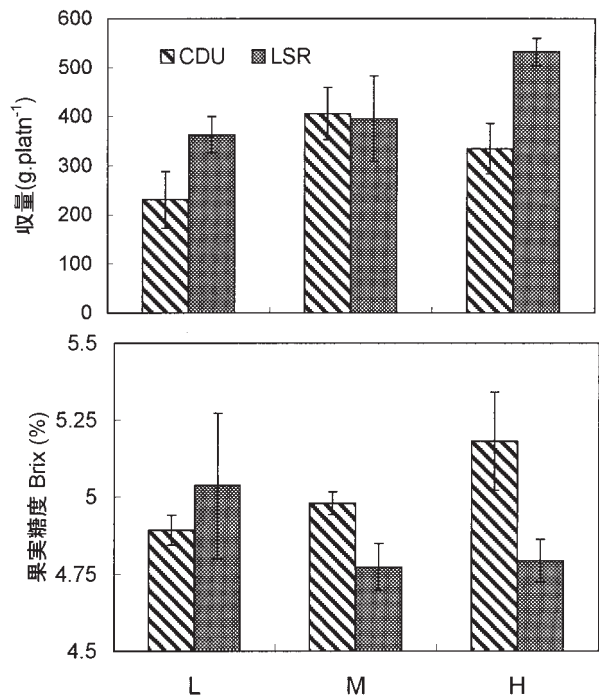


図3-9 肥料の種類および施肥濃度がトマトの収量および果実糖度に与える影響

- CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む.
 - LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料.
- 基肥として, 表層から 30cm の部分に, それぞれ窒素で, L:0.07g, M:0.20g, H:0.59g N. kg⁻¹ dry soil 与えた. L 区と M 区については, 定植後 51 日目に追肥として基肥と同量与えた. 縦棒は標準誤差 (n=3)

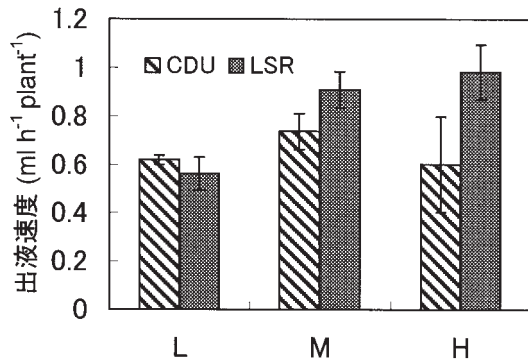


図3-10 肥料の種類および施肥濃度がトマトの出液速度に与える影響

CDU:緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む。

LSR:低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料。

基肥として, 表層から 30cm の部分に, それぞれ窒素で, L:0.07g, M:0.20g, H:0.59g N. kg⁻¹dry soil 与えた。

L 区と M 区については, 定植後 51 日目に追肥として基肥と同量与えた。

縦棒は標準誤差 (n=3)

植物の生育自体が全く望めない状況になりうることを示した(図3-2)。しかし, 一方で, 実験2の結果に見るように, 施肥によるストレスが作土層に負荷されたとしても, 根がその高ストレス層から下層の低ストレスの層に達することができれば, その下層の部分での根長を増加させることによって, 植物全体としての生育を維持させることができると考えられた。つまり, 通常では, 枯死するような浸透圧ストレスに置かれたとしても, 他の部分が吸水できる部分にあった場合, そこからの吸水が生じており, 肥料を吸収していたと考えられた。このように, 根が様々な環境に配置されることにより, 局所のストレスを最少にするように根系全体として機能している可能性が示唆された。

2 低硫酸根緩効性肥料の連用がトマトの収量と品質に与える影響

a 緒言

前節では, ノンストレス型施肥を具現化した LSR を用いて根箱法による栽培実験を行った。その結果, LSR が従来の緩効性肥料である CDU に比べ, 根系に与えるストレスが低減されることを示した。本節では, これらの化学肥料を用いて, 実際の圃場で連作することにより, それぞれの肥料の実用面での特性を明らかにすることを試みた。

b 材料および方法

1) LSR 施肥に伴う土壌化学性の変化

野菜・茶業試験場(武豊)温室において, 作土層を 40cm の厚さとし下層との境に遮根シートを敷いた簡易隔離床 (1.4m×1.5m, 上原 1990) で試験を実施した(土壌:細粒黄色土)。施肥は表3-1に示す成分の肥料を使用した。施肥および栽培条件は表3-2に示した。1試験区当たり8株のトマト苗を定植し, 試験は4反復で行った。灌水は, 散水チューブで行い, 早熟栽培は, 1株当たり1日平均2リットル, 抑制栽培は1日平均1リットルの灌水を行った。いずれの区においても萎れは生じなかった。

1996年度早熟栽培後および1998年度抑制栽培後に, 作土を0~5cm, 5~15cm, 15~25cmの3層に分けて採取し, EC, pH, および1:5土壌抽出液中の無機イオン組成を前章と同様の方法で測定した。

2) LSR 施肥がトマトの果実収量および品質に与える影響

果実の収穫は, 表3-2に示す期間においてほぼ1週間に1度の頻度で行い, トマトが赤く色付いたものから収穫した。その都度, 収量および尻腐れ果の発生を調査した。

3) LSR 施肥がトマトの出液速度に与える影響

1997年度早熟栽培後および1998年度抑制栽培後に, 出液速度の測定を行った。1997年7月23日および1999年2月17日のそれぞれ午後7時に, 収穫を終えたトマトの地上部を, 地際から約5cmで切断し, 残った株切断面に, あらかじめ重量を測定しておいた脱脂綿(3.30g)を被せ, その上をさらにビニールで覆い輪ゴムで固定した。10時間後の翌日午前5時に回収し, 重量を測定し出液速度を計算した。

c 結果および考察

1) LSR 施肥に伴う土壌化学性の変化

施設生産される野菜類に関しては, 特に硫黄の要求量の高い作物は無い。それにもかかわらず肥料成分の中には, 要求量以上の硫酸イオンが含まれる傾向にある。今回実験に用いた肥料の性質を表3-1に示す。過剰の硫酸イオンに伴う化学ストレスを軽減することを目的として開発された LSR は, CDU に比べ, 水抽出される硫酸イオン量が11%と低かった。他のイオンの溶出に関

表3-2 施肥量および栽培条件

	1996年		1997年		1998年	
	早熟	抑制	早熟	抑制	早熟	抑制
基肥 ^{*1}	N, P, K 対照区: CDU ^{*3} 480g LSR区: LSR 572g	対照区: CDU 480g LSR区: LSR 750g	対照区: CDU 480g LSR区: LSR 720g	対照区: CDU 480g LSR区: LSR 720g	対照区: CDU 480g LSR区: LSR 572g	対照区: CDU 480g LSR区: LSR 572g
	Ca, Mg 両区とも: マグカル 144g		両区とも: マグカル 144g		両区とも: マグカル 144g	
追肥 ^{*1}	N, P, K 対照区: リン硝酸カリ 56g LSR区: LSR 67g (両区とも2回ずつ)	なし	対照区: リン硝酸カリ 56g LSR区: LSR 38g (対照区のみ計2回)	対照区: リン硝酸カリ 56g (対照区のみ1回)	なし	なし
定植日	1996年4月18日	1996年9月17日	1997年4月17日	1997年9月9日	1998年4月14日	1998年9月10日
収穫開始日	1996年6月21日	1996年12月6日	1997年6月12日	1997年10月31日	1998年6月1日	1998年10月12日
収穫終了日 ^{*2}	1996年7月30日	1997年1月17日	1997年7月22日	1998年1月19日	1998年7月8日	1999年2月15日

*1 施肥量は1区(1.4×1.5m, 8本植え)当たりの量を示す。
 *2 第4果房収穫終了時を示す。
 *3 CDU化成肥料(S222)を示す。

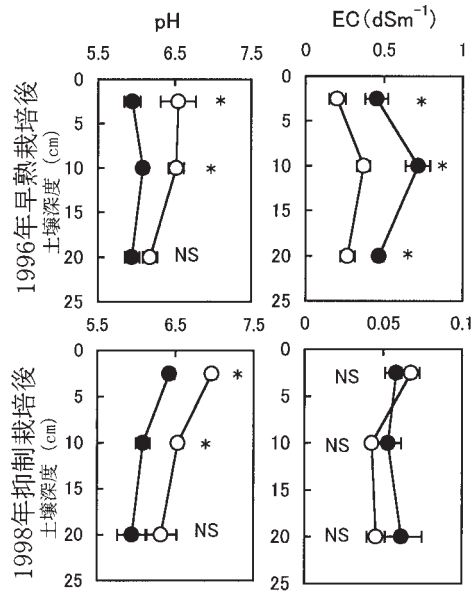


図3-11 LSR施肥が作後の土壌pHおよびECに与える影響

● CDU: 緩効性窒素としてCDUを含む化成肥料S222(12-12-12), 硫酸イオンを含む。
 ○ LSR: 低硫酸根緩効性肥料(10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料。
 横線は標準誤差を示す。(n=4)
 Fisher's LSDにより有意差検定を行った。
 NSは有意差なし, *は5%の危険率で有意差あり。

しても LSR で低く抑えられており、EC は CDU の 17% に抑えられていた。

これらの肥料を用いた連用試験において、残留している総イオン量は肥培条件によっても異なった。1996 年度の早熟栽培においては、追肥を行ったため（表 3-2）両区とも残留するイオン量が多くなったと考えられた（図 3-11）。また、pH はイオン残留量の多い CDU 区の表層で低くなった。1998 年度抑制栽培後の EC は、前作から追肥を控えたこともあり、1996 年度抑制栽培の 10 分の 1 程度に抑えられていた。また、灌水が過剰

になった場合、作土層下へと肥料が溶出した可能性も考えられた。このように、EC が低く抑えられた場合でも、1996 年度早熟栽培同様に、LSR 区で、土壌の EC は全体的には低く抑えられる傾向があり、土壌の酸性化も抑えられていた。

残留イオンが多い 1996 年度栽培の場合は、CDU 区のアニオンでは、リン酸、硫酸が、カチオンでは、カルシウム、マグネシウムが主要なイオンとなった（図 3-12）。このとき、CDU 区での硫酸およびナトリウムイオンの寄与率は比較的低いが、残留イオン濃度の低い

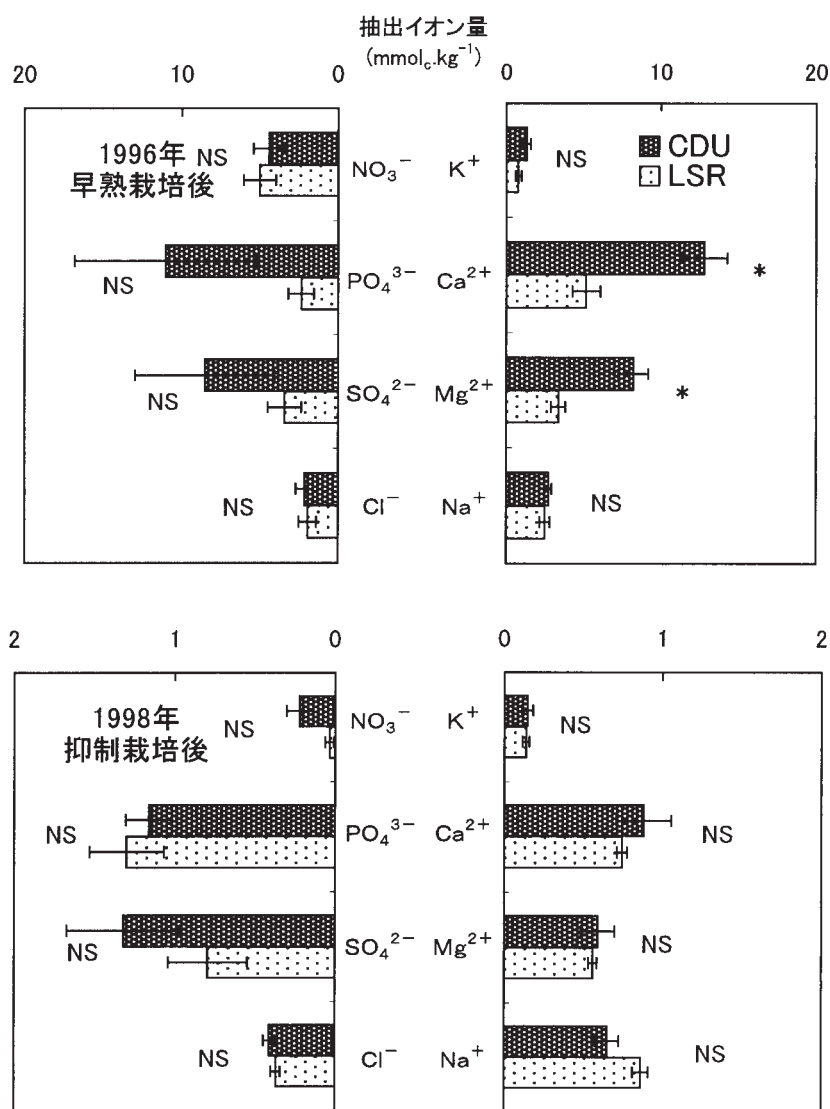


図 3-12 LSR 施肥が作後の 1:5 土壌抽出液無機イオン組成に与える影響
 CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12), 硫酸イオンを含む。
 LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11), 硫酸イオンを含まないように調製された肥料。
 Fisher's LSD により有意差検定を行った。
 NS は有意差なし, * は 5% の危険率で有意差あり。
 横線は標準誤差を示す。(n=4)

1998年度のような状況では、全イオンに占めるそれぞれのイオンの割合が増加し、土壌イオンの不均衡を引き起こす一因と考えられた。どちらも、植物の要求量の低いイオンであり、栽培後期には、これらのイオンが要求量の高いイオンの吸収を阻害し、果実収量や品質に影響を与える可能性が考えられた。

2) LSR 施肥がトマト果実の収量と品質に与える影響

LSR 施肥がトマトの収量および尻腐れ果の発生に与える影響を3年間6作にわたり調査した。最初の3作では収量に差は認められなかったが、1998年度作ではLSR区がCDU区の約1.2倍の収量になった(図3-13)。硫酸根を含む肥料と無硫酸根で構成した肥料で、キュウリの抑制栽培を行った報告(川原 1985)では、1年目では収量の大きな差は無かったものの、3年目から無硫酸根系列がまさったという結果が示されている。このときの

ECは無硫酸系列で低くなったことも示されている。これは、今回、トマトで得られた結果と同様の結果である。LSR肥料は新規に導入されようとしている肥料であるが、本試験成績を全体的に見ると、従来の肥料とほぼ同等の収量が得られると判断された。

尻腐れ果率は、期間全体を平均して、CDU区が33%発生したのに対しLSR区では23%の発生に抑えられていた。1997年度の早熟栽培では、両区とも尻腐れ果率が激増したが、これは、灌水不足などが原因であったと考えられる。馬西ら(1996)は、尻腐れ果の発生要因として、土壌のECの上昇、土壌中のミネラルバランスの不均衡などを指摘している。また、尻腐れ果の発生には根圏のイオンストレス、水ストレス、果実の肥大速度などが影響を与えることが示されていて、尻腐れ果発生率は、施肥を含めた栽培状況によって異なる(大西ら 1983)。図3-13に示す結果の変動から、尻腐れ果の発生には、

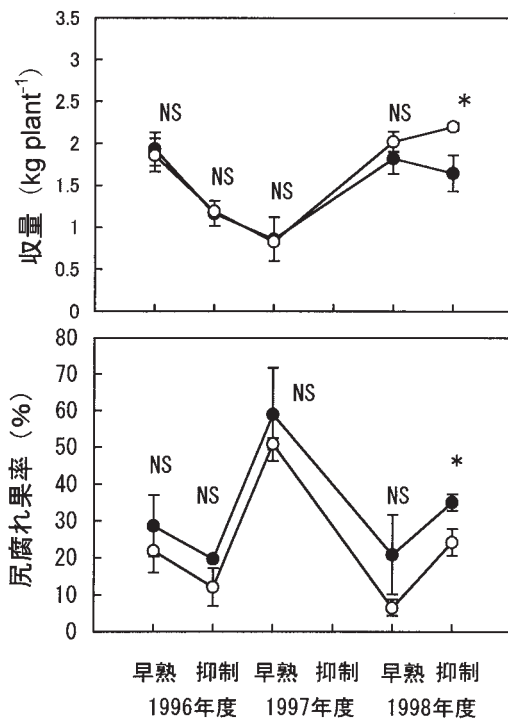


図3-13 LSR 施肥が収量および尻腐れ果発生率に及ぼす影響

CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12)、硫酸イオンを含む。

LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11)、硫酸イオンを含まないように調製された肥料。

縦棒は標準誤差を示す。

1996年度早熟栽培、1998年度早熟栽培および抑制栽培: n=4,

1996年度抑制栽培: n=2, 1997年度早熟栽培: n=3

Fisher's LSD により有意差検定を行った。

NSは有意差なし、*は5%の危険率で有意差あり。

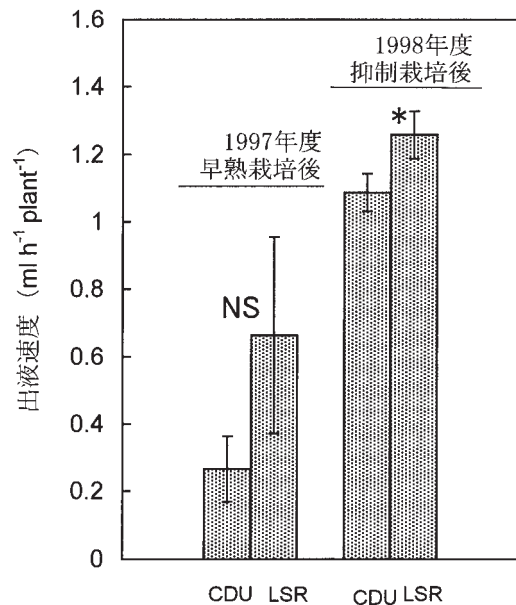


図3-14 LSR 施肥が作後の出液速度に与える影響

CDU: 緩効性窒素として CDU を含む化成肥料 S222 (12-12-12)、硫酸イオンを含む。

LSR: 低硫酸根緩効性肥料 (10-11-11)、硫酸イオンを含まないように調製された肥料。

縦棒は標準誤差を示す。(n=16)

Fisher's LSD により有意差検定を行った。

NSは有意差なし、*は5%の危険率で有意差あり。

葉部と果実部の生育のバランスや、病害や根腐れなど、果実部への養水分の移行を阻害する施肥以外の要因も大きく作用していることが示唆された。

3) 出液速度と収量および品質の関係

トマトの収量および品質には、養分吸収能力を含めた根の活性が関係していると推察され、このような根の活性を評価する指標の一つとして出液速度が挙げられる(森田・阿部 1999)。出液速度には、土壌の水分環境、根量、根の呼吸量などいくつかの要因が複雑に作用しているため、現場の圃場で因果関係を明らかにすることは困難であるが、今回測定した条件では、収量性との関連性があった。

1997年度早熟および1998年度抑制栽培後の出液速度を測定したところ、1998年度抑制の方が1997年度早熟に比べ高かった(図3-14)。また、肥料の違いによる差も認められ、LSR区で出液速度が速い傾向が認められた。また、早朝にトマトの葉から出る溢泌液量はLSR区で多いことが観察された。溢泌現象は、出液と同じ機構で生じていると考えられるため、栽培期間中でも、このような出液速度の差はあったと考えられた。

このときの果実収量を見ると、1998年度抑制の方が1997年度早熟より収量が多く、尻腐れ果の発生率も低く、総合的な収量性が高くなっていた(図3-13)。尻腐れ果以外の果実収量と出液速度との相関を、これら4点を用いて計算したところ、 $r^2=0.84$ と高い正の相関が認められた(図3-15)。

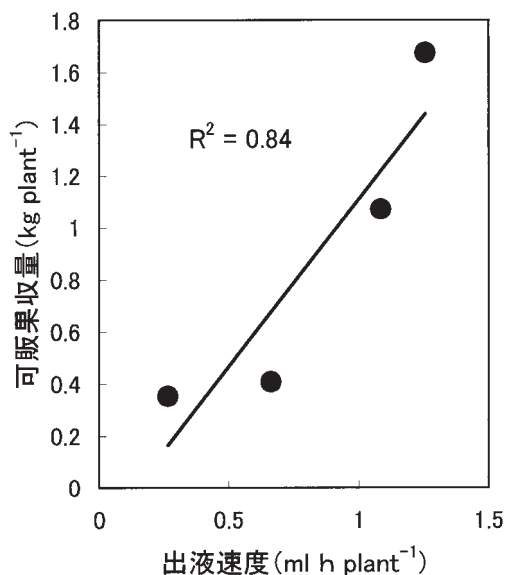


図3-15 可販果収量と出液速度の関係
図3-13および図3-14の実験結果に基づく

LSR区で出液速度が速かった原因としては、土壌水分条件がほぼ同じとすると、(1) 残留したイオンによる浸透圧がLSRで低いこと(2) 過剰のイオンストレス回避により根の呼吸量がLSR区で維持されたこと(3) ストレスが緩和されたため、LSR区で根量が増加したこと等が考えられる。

今後、これらの原因を検証し、根圏のイオンストレスと果実収量・品質との因果関係を明らかにし、根圏ストレスの指標として出液速度が適用できるのか否かを検討していく必要がある。

IV 養液土耕が土壌ストレス軽減を介してトマトの生育、収量、品質に与える影響

1 養液土耕がトマトの生育と根系に与える影響

a 緒言

施設果菜類の栽培においては、収量および品質を確保するため、養分吸収量を大きく上回る肥料が施される傾向がある。しかし、降雨による溶脱がないこともあり、施設栽培では施肥に由来する過剰の塩類の集積が指摘されている(土岐ら 1991)。持続的な栽培を行うため、また、環境保全の見地から、肥料の利用効率を上げて施肥量を減らすことが重要な課題の一つとなっている。

施肥量削減の方策の一つとして、近年、研究が進められている養液土耕(灌水同時施肥)がある。この方法は、希釈した液肥を灌水チューブから植物の必要量に応じて少量ずつ多頻度に施用する方法であり、土壌への残留量の低減および施肥量削減の効果を上げている(六本木ら 2000)。養液土耕は、海外では、欧米を中心に、トマト、キュウリ、ピーマンなど多くの野菜での適用が試みられている(HOCHMUTH 1992, HARTZ and HOCHMUTH 1996)。我が国では、花きを中心に導入が試みられているが(加藤 1994, 岡部ら 1994)、野菜への応用例はまだ少ない(六本木 1995, 斎藤・糠谷 1998, 六本木・加藤 2000)。今後、野菜栽培への導入を促進するために、基礎的知見の蓄積が必要である。

本章では、根系発育や養水分動態に関する知見を得るため、根箱を用いた養液土耕を模した栽培試験を行った。栽培期間中に与える窒素成分量は同量にして、基肥で全層に施肥する慣行の施肥法に相当する区と、液肥で分割して与える養液土耕に相当する区とを設け、それぞれの処理区が、トマトの地上部および地下部の生育に与える影響を明らかにしようとした。

養液土耕に見られる肥料利用効率の改善は、根系の発

育と養分吸収などの機能への影響が大きいと考えられるが、養液土耕と根系形態の関係に関する知見は少ない。そこで、本章では、画像解析による根系形態評価を試みた。また、養液土耕では、根に負荷されるストレスが少なくなると言われているが（六本木・加藤 2000）、実際にストレス低減の効果を評価した研究はない。そこで、根へのストレスの指標として、イネなどで適用が試みられている出液速度（森田・阿部 1999）と重水の吸収から、養液土耕がストレスを緩和しているか否かを判断することを試みた。

本研究ではさらに、これまで報告例の無い有機性の液肥を加える処理区を設けた。いわば「有機養液土耕」を念頭に置いたものである。

用いた有機液肥は、コーン スティープ リカー（Corn steep liquor:以下 CSL と略す）である。CSL は、トウモロコシ穀粒からコーン スターチを製造する過程で副産物として大量に生産されてくる、粘稠性の高い褐色の液体である。CSL を排出する製糖会社は、日本全国で 12 社あり、東海地方を中心に全国に 14 の工場がある。CSL は、主に微生物培養用の基質や家畜飼料として用いられているが、わが国で年間生産量 15 万トンという大量に生産される副産物であるため、新たな用途が求められている。したがって、本研究での有機養液土耕は、廃棄物処理の考えも内包している。

このような有機性液肥の野菜生産への利用を目指して、従来の無機性の液肥と比較し、その特性を明らかにしようとした。

b 材料および方法

1) CSL の性質解析

CSL は、サンエイリップ（サンエイ糖化株式会社、肥料登録：愛知県第 1535 号）を用いた。CSL の諸性質のうち、比重、含水率、全窒素および無機態窒素含量を分析した。全窒素はケルダール分解後、アンモニア態窒素は希釈後、水蒸気蒸留し、滴定法により（中村ら 1978）、また、硝酸態窒素はイオンクロマト法により測定した。アミノ酸は、日本食品分析センターで分析し、タンパクおよびペプチド態窒素は、便宜上、全窒素から無機態窒素とアミノ酸の窒素を差し引いて算出した。

以下の成分に関しては、サンエイ糖化株式会社で測定した。リン酸はバナドモリブデン酸吸光度法、カリウムとマグネシウムは原子吸光法、カルシウムは過マンガン酸カリウム滴定法を用いた。還元糖および、乳酸は滴定法で、灰分は直接灰化法で求めた。以上の残りの成分は

デンプンが多いと考えられたので、デンプンと他の成分とした。

2) CSL 添加土壌の微生物性および化学性の解析

CSL の分析は以下の手法で行った。CSL を 200ml 容量のガラス容器に、0.91g（窒素相当 30mg）とり、蒸留水を加えて全容 12ml とした。対照としては、この同量の容器に大塚液肥 OK-F-1（15-8-17）を窒素相当で 30mg 入れて蒸留水を加えて 12ml としたもの、ブランクとしては、脱イオン水を 12ml とったものをそれぞれ用意した。これらの容器に、野菜・茶業試験場（武豊）で採取した土壌（細粒黄色土）の風乾細土 100g を添加して均質に水分を含ませ、ポリ塩化ビニルフィルムで蓋をし、28°C で暗所に静置した。

0, 1, 3, 5, 14, 21, 28 日後に、CSL, 対照, ブランクのそれぞれの処理についてサンプリングを行い、細菌の計数およびアンモニア態窒素、硝酸態窒素、全窒素の分析を行った。好気性細菌の計数は YG 培地を用いた希釈平板法で行った（加藤 1992）。アンモニア態窒素は 10% KCl 抽出液を水蒸気蒸留し、滴定法により求めた。硝酸態窒素は、土壌抽出液にデバルダ合金を加え、硝酸態窒素をアンモニア態窒素に還元してから蒸留し、滴定により測定し、最初に測定したアンモニア態窒素分を差し引くことにより求めた。全窒素は風乾土をケルダール分解後水蒸気蒸留し、滴定法により求めた（中村ら 1978）。

3) CSL 施用がトマトの根系形態と吸水活性および、土壌の化学性に与える影響

(1) 栽培条件

透明塩化ビニール製の根箱（縦 40cm×横 25cm×幅 2.7cm）に木曾川河口の沖積地から採取された土壌（壤質砂土）を、比重 1.2gcm^{-3} になるように充填した。充填後の実際の土壌量は、2.5L（縦 37cm×横 25cm×幅 2.7cm）であった。施肥に関しては表 4-1 に示す化成肥料を土壌全体に混和した区を基肥区とし、土壌に均一に加えるために肥料は乳鉢で磨砕してから用いた。標準的な施肥量は、トマトのプランター栽培で推奨されている用土 10L 当たり 15g の化成肥料（カルシウム肥料を含まない量）を目安として用い、実際には、用土 10L 当たり 14.7g を標準区として設定し（表 4-1）、これを中濃度区（M 区）とした。M 区の 3分の1 を与えた区を低濃度区（L 区）、また、3 倍を与えた区を高濃度区（H 区）とした。無機液肥施用区（無機養液区）では土壌への基肥の混和はせず、有機液肥施用区（有機養液区）

表 4-1 各処理区に用いた肥料の種類と量*

処理	用いた肥料	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-CaO-MgO (%)	施肥量 (g plant ⁻¹)
基肥区	粉碎した肥料	硝酸アンモニウム (N: 34.4)	1.45
		過リン酸石灰 (P ₂ O ₅ : 17.5)	1.43
		硫酸カリウム (K ₂ O: 50)	0.8
		炭酸石灰** (CaO-MgO: 34-15)	1.5
無機養液区	液肥	OK-F-1 (15-8-17-6-2)	0.11×30回
有機養液区	液肥	CSL (3.3-3.4-3.2-0.04-1.1)	0.5×30回
	有機質石灰 (基肥)	セルカ (CaO-MgO-: 48-0)	1

* 中濃度区 (M区) での施肥量を示した。L区はこの3分の1の量を、H区はこの3倍の量を施用した。
 ** CaOに関してはアルカリ分表示からMgO量を差し引いて算出した。

ではかき殻石灰 (セルカ) のみを基肥として加えた。

128穴セルトレイに、催芽したトマト (品種 ‘サターン’) を播種し、25日目の苗を上述の根箱に1株ずつ定植し、直後に500ml灌水した。その後、無機養液区と有機養液区には、それぞれ以下にあるように3段階の濃度で無機あるいは有機液肥を施用した。無機養液区では液肥用化学肥料 (大塚化学, OK-F-1) を用い、L区、M区およびH区にはそれぞれ、36.6mg (5.6mgN), 111mg (16.7mgN) および333mg (50mgN) を100mlの水道水に溶かして1回分の肥料として施用した。有機養液区では、表4-2に示した組成を持つCSLを無機養液区と窒素量をそろえた条件で施した。定植時の1999年4月1日から24日間は毎日、基肥区では100mlの水道水を添加し、有機養液と無機養液区では上述の有機あるいは無機液肥を100mlずつ添加した。25日目以降の4日間は、午前と午後の2回、計200mlの水道水あるいは液肥を添加した。灌水後に根箱外への余剰液の浸出はほとんど無く、ほぼ土壌に保持できる範囲にあったと考えられた。なお、根箱を遮光資材 (シーアイノービ・ハイメタリックシルバー、厚さ0.1mm) で覆い、根域には光が入らないようにした。

実験はガラス温室内で行い、12℃以下で加温、25℃以上で換気が行われるように設定した。なお、栽培期間中の平均外気温は14.3℃であった。

(2) トマトの吸水および出液速度の測定

作物根の活性の指標として出液速度を測定し、表層の根の吸水特性を明らかにするために、重水を用いた吸水実験を行った。

定植後29日目の午前9時に地際から3cmのところまで地上部を切除した。あらかじめ重量を測定しておいた脱脂綿で切り口を覆い、その上をビニール袋で覆って、袋の口を輪ゴムで茎に固定した。同時に9.98atm%の重

表 4-2 CSL 原液の諸性質*

比重 (g・ml ⁻¹)	1.22 ± 0.02
pH	3.85 ± 0.02
成分	(%)
含水率	50.8 ± 0.6
全窒素	3.31 ± 0.17
(内訳) NH ₄ -N	0.33 ± 0.01
NO ₃ -N	0.04 ± 0.06
アミノ態窒素	0.98 ± 0.11
タンパクおよびペプチド態窒素	1.96 ± 0.04
P ₂ O ₅	3.40 ± 0.15
K ₂ O	3.15 ± 0.24
CaO	0.04 ± 0.01
MgO	1.11 ± 0.06
還元糖	1.57 ± 0.28
乳酸	11.5 ± 0.3
粗灰分	8.09 ± 0.03
澱粉およびその他	16.9 ± 1.0

* 異なる3ロットの平均値の標準偏差

水20mlを土壌表層面に添加した。添加の仕方は、10mlの重水添加後に10mlの水道水を添加し、これを2回繰り返した。12時間後に脱脂綿を回収し、重量を測定して出液速度を算出した。出液中に含まれる重水の濃度はTCD検出器を装着したガスクロマトグラフィー (佐久間ら 1989) で測定した。

(3) 土壌溶液および植物体の無機イオン組成測定

出液採取後に、根箱を横に寝かせ、黒のプラスチックネット上で解体した。板状になっている土壌の上に直径3mmのステンレス棒を垂直に立て、土壌を下に押し出して、それをサンプルとした。このようなサンプリングは2cmの格子点について、根箱の上半部と下半部に分けて行った。得られた土壌について1:5 (乾土:蒸留水) 水浸出液を調製し、ろ紙によるろ過の後、0.45μmの

ニトロセルロースフィルターを通してイオン分析用試料とした。カリウム、カルシウム、マグネシウム、ナトリウムは、ICPで分析し、硝酸、リン酸、硫酸および塩素の各イオンは、イオンクロマトグラフィーで分析した。有機物は強熱損失法（中村ら 1978）により分析した。

出液測定時に得られた地上部は、80℃で3日間乾燥後、ボールミルで粉碎し、無機分析に供した。植物体の窒素は、土壌の全窒素と同一の方法で分析した。アニオンは、乾燥、粉碎した100mgの試料に蒸留水を5ml添加し、オートクレーブした液を調製し、適宜希釈した後イオンクロマトグラフィーにより分析した。その他の無機イオンは、硝酸分解後ICPで分析した。

(4) 根系形態のサンプリングと解析

土壌サンプリング後、板状になった土壌に適度な強さで水道水をかけて、土中での形態を保持した形で根系を洗い出した。写真撮影後に、根系を土壌表面から地表下36cmまでを9cm間隔で4等分し、それぞれの深さごとの根の画像をスキャナーで取り込み（600dpi）、根系解析ソフト（Mac Rhizo Ver. 3.1 REGENT社）を用い、根の太さ別の根長を測定した。

c. 結果および考察

1) CSLの土壌中での分解と微生物動態

CSLを加えた有機養液土耕区では、添加後1週間以内に急速なバクテリアの増殖が生じ、それに伴いアンモニウムイオンが生成した（図4-1）。有機養液区の無機窒素濃度は7日目以降ではほぼ一定になり、それまでにおよそ8割が無機化されたことになる。7日目以降は硝化作用によると思われるアンモニウムイオンの減少と硝酸イオンの増加が認められた。CSLはアミノ酸、ペプチドなど易分解性の窒素成分を多く含み、C-N比も4程度と低いため、無機化率も高く、窒素飢餓は起こらないと考えられた。

2) CSLがトマトの生育に与える影響

本研究で用いたCSLは、トウモロコシ穀粒からの一貫した製糖工程により生産されてくる廃棄物であるためか、組成のばらつきは少なかった。また、肥料としては3要素が全て3%程度含まれるというバランスの取れた資材であった（表4-2）。マグネシウム等過剰が懸念されるイオンにおいてもその含量が低く、液肥に適しているといえる。類似の素材として、トウモロコシ未熟種子抽出物を野菜栽培に利用した報告（葭田 1991）がある

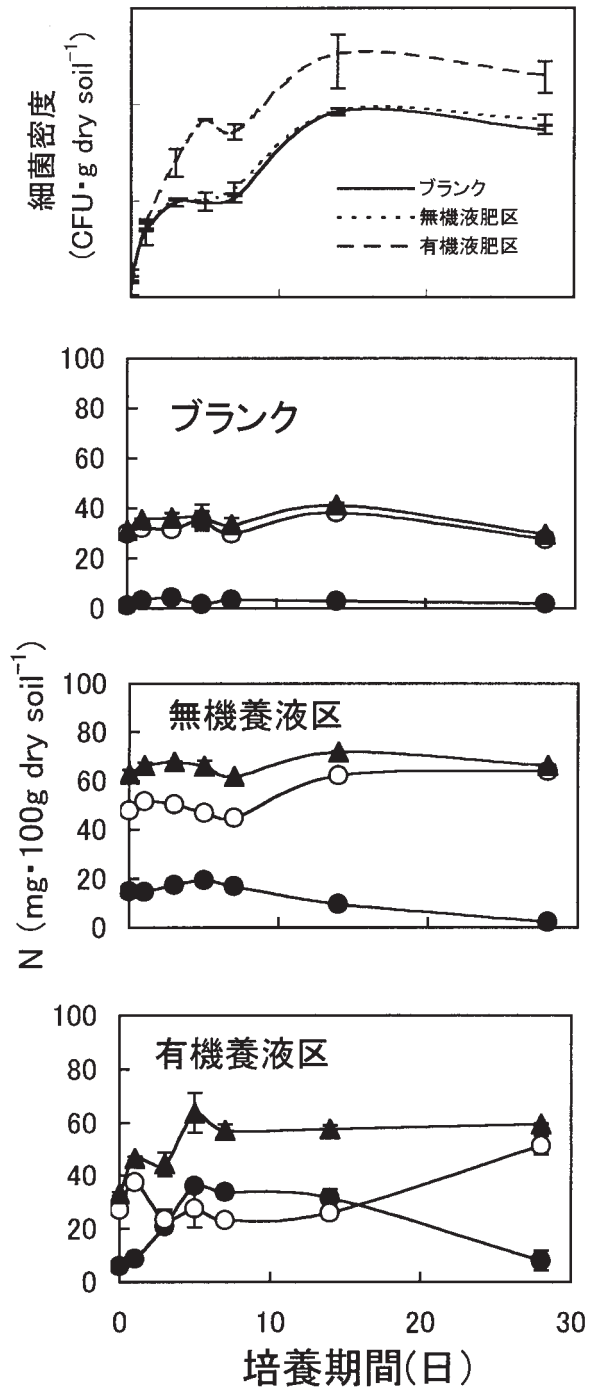


図4-1 無機および有機液肥の添加が土壌細菌の増加および無機化窒素の発現に及ぼす影響
 ブランク:水のみ添加, 無機養液区:大塚液肥 (OK-F-1)
 有機養液区:コーンステーパーリカー (CSL)
 ●:NH₄-N, ○:NO₃-N, ▲:(NH₄+NO₃)-N
 縦棒は標準誤差 (n=2)

が、散布剤として用いられており、肥料としてよりもむしろ、植物ホルモンの効果を期待したものであった。今回の試験は、CSLの肥料としての使用を検討した最初の事例である。

CSLの3要素組成は問題無いが、カルシウム含量は低かった。そこで、かき殻石灰（セルカ）を基肥として全層に施用した。かき殻石灰を用いたのは、日本農林規格（JAS）の有機栽培基準にも適合するように、石灰も天然のものとするためである。セルカの成分としては9割近くが炭酸カルシウムであり、他の肥料要素としての機能や物理性の改良材としての機能は少ないと考えられた。

地上部の生育は、概観すると、無機養液区で最も良く、有機養液区と基肥区はほぼ同程度であった（図4-2）。基肥区では、肥料を吸収するために根系を根箱全体に展開する必要があり、全層に存在する養分の吸収に時間がかかったこと等が、無機養液区に比べ生育が遅れた原因と考えられた。有機養液区での生育の遅れは、CSL中の有機態窒素が分解してアンモニア態窒素が生成するまでに時間がかかったこと、無機化率が100%とはならないこと等が原因と考えられた。しかし、有機養液のM区では、過剰や欠乏障害等の兆候は認められず、トマトの初期生育の液肥としてはCSLのみで十分機能すると判断した。

3) CSLの添加が根系構造に与える影響

根系の生育（根重）は、L区の中では無機養液区が最も良く、有機養液と基肥区が同程度であった（図4-2）。M区では処理間の差は認められず、H区では処理によらず根の生育が頭打ちになった。特に、有機養液のH区では、処理開始後1週間程度で腐敗臭が生じ、3個体中2個体が枯死するに至った。原因については、腐敗性の微生物増殖によって引き起こされた有機酸生成等による害作用と推定された。枯死を免れた1個体においても、生育抑制が認められた。根系の観察結果からは根の褐変が認められるとともに、根長、特に直径0.3mm以下の細根の生長抑制が認められた（図4-3）。0.3mm以下の根系の全根長に占める割合は、基肥区のL、M、H区でそれぞれ60%、50%、57%であったのに対して、無機養液区では、48%、51%、52%と基肥区に比べて低い傾向にあった。有機養液区では49%、44%、35%と細根の占める割合が他の2区に比べて低かった。このことは、有機養液で、根が太くなる傾向が認められたということでもある（図4-4）。この点に関してはさらに詳細な検討が必要である。

4) 根系分布と吸水の関係

施肥方法および施肥濃度の違いが根系分布に与える影響を、根系分布の深さの程度を示す深さ指数（小柳1998）を用いて評価した（図4-5）。深さ指数（RDI）の平均値は、基肥区で19.3cm、無機養液区で15.2cm、有機養液区で13.8cmとなり、根系は液肥添加によって浅くなっていた。このように、肥料と水分が投入される表層部分に、より多くの根を張ることは、それらの効率的な吸収にとっては合理的であると解釈しうる。有機養液区の方が無機養液区に比べ浅い根系を形成したのは、有機液肥添加により増殖した微生物菌体が土壌孔隙を塞ぐなどして、液肥の浸透が浅くなったことが考えられた。それは、根の洗い出しのときに、有機養液区のみ土壌が流れ難くなっていたことから推察され、菌体が土壌を接合していた可能性が示唆された。また、微生物の増殖

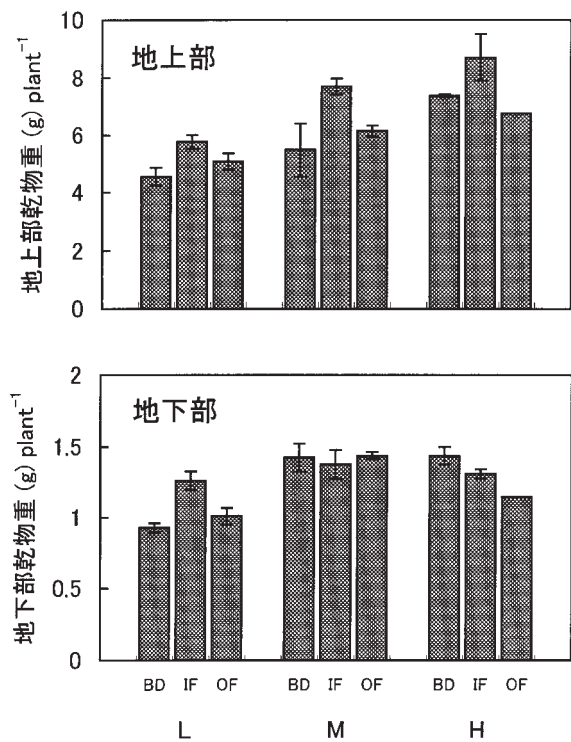


図4-2 養液土耕法によって栽培したトマトの地上部および地下部の乾物重

BD: 基肥区, 粉末化成肥料を混合したもの

IF: 無機養液区, 大塚液肥 (OK-F1)

OF: 有機養液区, コーンステイプリーカー (CSL)

縦棒は標準誤差 (n=3)

ただし、基肥はM区および無機養液のH区はn=2

そして、有機養液のH区はn=1であり、それぞれ土壌病害のために枯死した。

施肥は3段階設定した。L: 低濃度区, 0.17g N plant⁻¹,

M: 中濃度区, 0.50g N plant⁻¹, H: 高濃度区, 1.50g N plant⁻¹

のため表層付近でより活発に、無機化が生じたことも根が浅くなった原因と推定された。

表層に張った根は、吸水効率を高めていた(図4-6)。LおよびM区において、無機養液区では、導管液の重

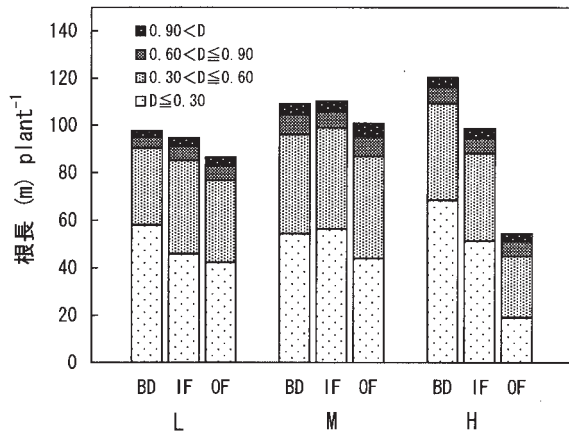


図4-3 養液土耕が大きさ別の根長に与える影響

D: 根の直径 (mm)

BD: 基肥区, 粉末化成肥料を混合したもの

IF: 無機養液区, 大塚液肥 (OK-F1)

OF: 有機養液区, コーンステーパーリカー (CSL)

縦棒は標準誤差 (n=3)

ただし, 基肥のM区および無機養液のH区はn=2

そして, 有機養液のH区はn=1であり, それぞれ土壌病害のために枯死した。

施肥は3段階設定した。L: 低濃度区, 0.17g N plant⁻¹,

M: 中濃度区, 0.50g N plant⁻¹, H: 高濃度区, 1.50g N plant⁻¹

水濃度は基肥区の3.9, 3.3倍, 有機養液区では基肥区の5.3, 3.6倍であった。重水は表層に加えたものであり導管液中の重水濃度が高いことは, 表層からの吸収が多かったことを示している。適度な濃度に調製された液肥が加えられたとき, 根の発達は, 液肥が最初に浸透する表層付近に集中し, そこでの吸水も根量に比例して, 多くなると考えられた。しかし, 表層の根長は2倍程度にしか増加していないので(図4-5), 単位根長あたりの吸水活性自体も増加していると考えられた。

養液添加のH区においては, 出液量, つまり地上部への水移行量が, M区に比べ減少していた。特に, 有機養液のH区では, 前述のように地表部の根量の相対的な減少や, 褐変などの外見的变化も認められ, これらが, 吸水低下の原因と考えられた。また, 無機養液のH区においては根長の減少以上に吸水低下が生じており(図4-5, 図4-6), 過剰イオンによるストレスが根系に負荷されていたことがその原因と考えられた。

重水の地上部への移行量と深さ指数の関係を検討した。有機養液のH区を加えて計算した相関係数は $R^2=0.173$ と低いが, これを除いて計算すると, $R^2=0.533$ となった。さらにすべてのH区を除外して計算すると $R^2=0.93$ と相関係数が高まった。このことは, H区においては表層の根量が多く, そのことが深さ指数を減少させたが, それらの根は, 高濃度イオンストレスなどにより吸水機能が低下していたことを意味している。

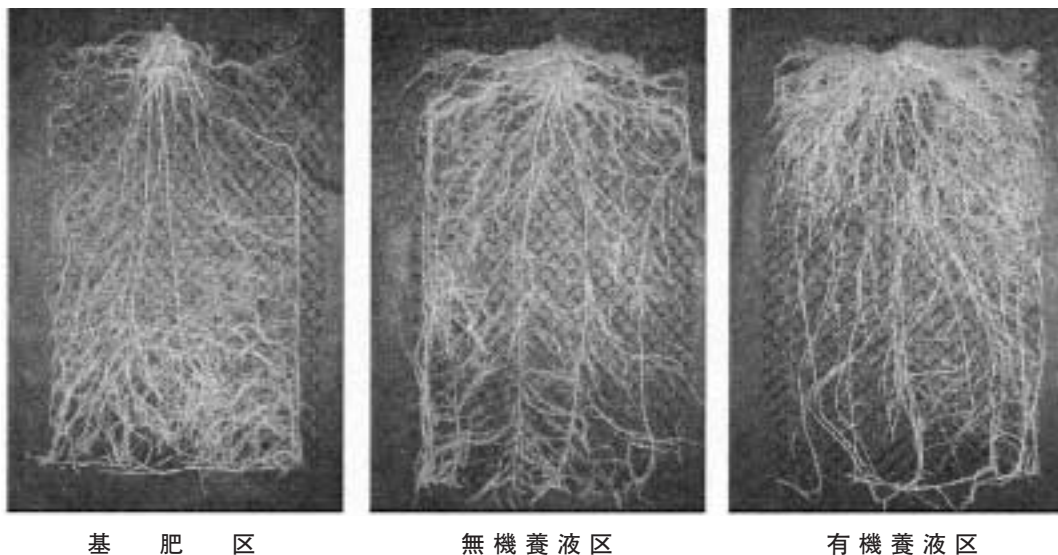


図4-4 養液土耕が根系形態に与える影響

基肥区: 粉末化成肥料を混合したもの

無機養液区: 大塚液肥 (OK-F-1)

有機養液区: コーンステーパーリカー (CSL)

全て, 0.5g N plant⁻¹で施用した。縦棒は5cmに相当する。

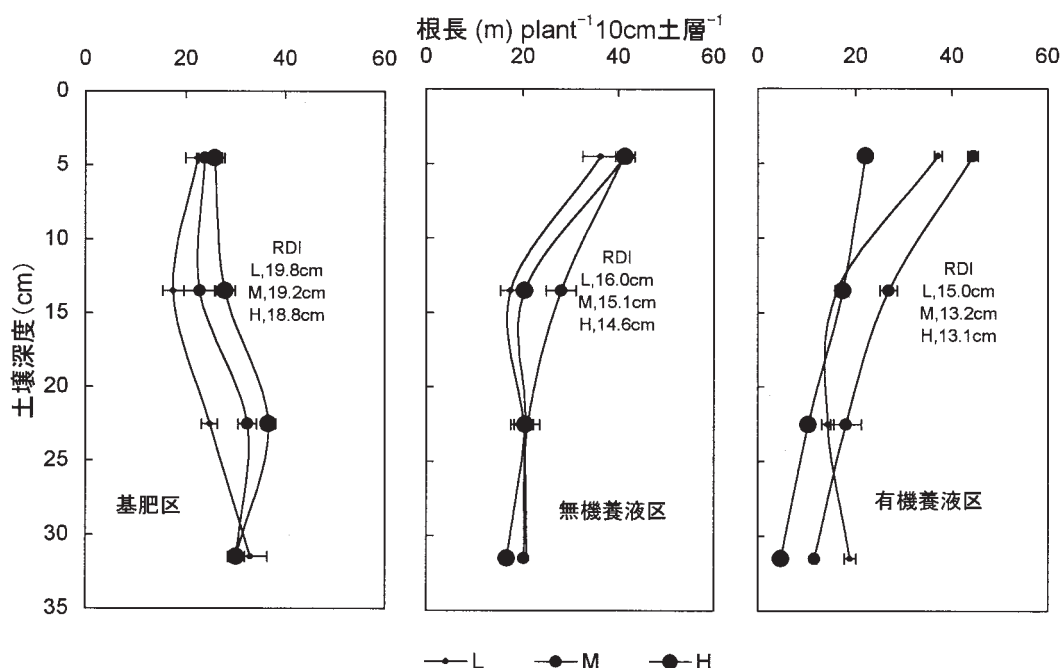


図4-5 養液土耕法によって栽培したトマト根系の土壌深度別の長さ
 縦棒は標準誤差 (n=3), ただし, 基肥区の M 区および無機養液区の H 区は n=2
 そして, 有機養液区の H 区は n=1 であり, それぞれ土壌病害のために枯死した.
 L: 0.17g N. plant⁻¹, M: 0.50g N. plant⁻¹, H: 1.50g N. plant⁻¹
 深さ指数: RID = (4.5a + 13.5b + 22.5c + 31.5d) / 総根長
 a: 0-9cm, b: 9-18cm, c: 18-27cm, d: 27-36cm, それぞれの根長

養液土耕のように表層に根系を形成した場合は表層の水を速やかに利用することができるが, 全層施肥で形成された根系は, 比較的下層の肥料成分が存在する部分へ水が浸透して初めて十分な吸水を行うことができると考えられた.

5) CSL 施用が, 植物体および土壌の無機成分組成に与える影響

栽培終了後の土壌分析の結果を表 4-3 に示す. 表層土の EC は, 処理区間で差は認められなかったが, 下層土の EC は無機養液および有機養液区に比べ基肥区で高く, イオンが集積していた. 各イオンの内, 作物要求量の高いカリウムおよび硝酸イオンでは処理区間の差が認められなかったが, 硫酸, カルシウム, マグネシウムの各イオンに関しては, 基肥区で無機養液および有機養液区に比べ有意に多く残留していた. 有機物含量は有機養液区で高い傾向は認められなかったが. これは, 短期間の実験であったこと, および CSL が易分解性であったこと等によると考えられる. 今後, 現場レベルでの連用により腐植酸等の集積が認められるか否かを明らかにする必要がある.

植物体中の無機成分組成を表 4-4 に示す. 地上部の窒素およびカリウム含有率は, 液肥添加区が基肥区に比べて有意に増加しており, 六本木 (1995) の報告と一致する. アニオンに関しては, 無機養液区で硫酸イオンの濃度が著しく低いのに対して, 硝酸イオンの濃度が高いことが示された. これは, OK-F-1 が, 硫酸イオンや塩素イオンを含まない肥料であるために生じた結果であると考えられる. 過剰になりがちな成分を極力施用しないことは土壌への残留性を考えた場合, 有効な対策であるが (小野・藤井 1994), 排除しすぎると地上部への硝酸イオンの過剰集積を起こす可能性を示唆する結果であり, 今後検討する必要がある.

2 養液土耕栽培がトマトの収量と品質に与える影響

a 緒言

前節で明らかにしたように, トウモロコシを原料とする製糖工程から生じる副産物である CSL は濃度を調整すれば, トマトの液肥としての使用が可能である.

本節では, 液肥としての利用に関する実証レベルでの栽培実験を行った. 現在では, CSL はとうもろこし浸漬液肥料 (愛知県第 1535 号) として肥料登録がなされ

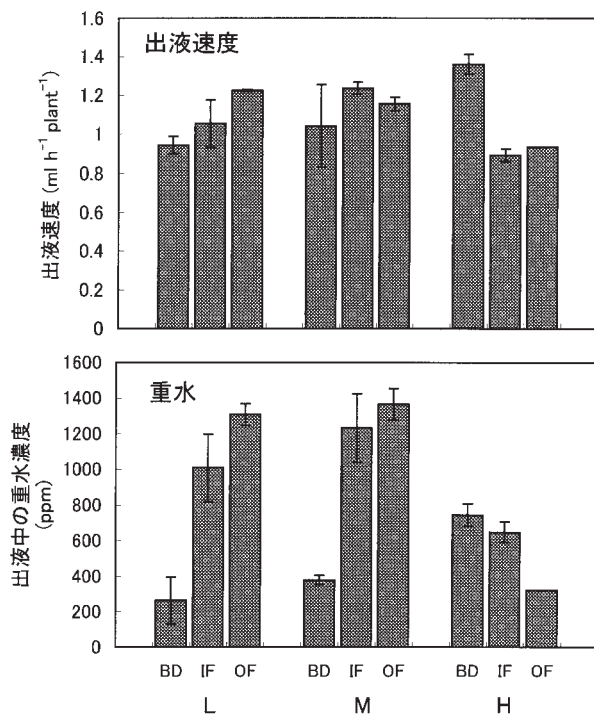


図4-6 養液土耕が出液速度と重水の吸収に与える影響

BD:基肥区, IF:無機養液区, OF:有機養液区, 縦棒は標準誤差 (n=3)

ただし, 基肥区のM区および無機養液区のH区はn=2
そして, 有機養液区のH区はn=1であり, それぞれ土壌病害のために枯死した。

L: 0.17gN. plant⁻¹, M: 0.50gN. plant⁻¹, H: 1.50gN. plant⁻¹

土壌表層からの吸水活性を評価するため, 栽培後のトマトの地上部を切除し, 脱脂綿で切り口を覆うことにより, 出液を採取し, その量と中に含まれる重水濃度を測定した。

ているが, その中に含まれる植物ホルモンを利用した生育促進の検討(葎田 1991)がなされた以外は, 実際の栽培研究事例はない。その大きな理由としては, 液性であるため取り扱いが困難であること, 易分解性有機物を主体とするため, 施用に伴う病害や根腐れが懸念されること等が挙げられる。そこでこれらの問題を回避する目的で, CSLの施用にあたって養液土耕栽培システムの適用を試みた。

システムとしては, 既存の養液土耕装置を改良し, CSLを少量ずつ施用する方法を検討した。養液土耕とは, 原液タンクの濃厚な液肥を, 用水に一定量注入し, 希釈しながら灌水と施肥を同時に行う栽培方法である。野菜についてはキュウリに適用した研究事例(六本木 1995)を除いては, まとまった研究は報告されていない。また, CSLのような有機性の液肥を使用した実験例はない。

既存の養液土耕装置を利用するに当たって想定された問題として, CSLは原液のままでは粘稠性が高すぎ, 点滴チューブの目詰まりを起こす危険性のあることがあった。また, CSLが灌水チューブ中に滞留すると, それが基質となって微生物が増殖し, 菌体フロックによる目詰まりも考えられた。そこで, CSL送液後の洗浄時間を, 液肥注入による養液のEC上昇が, その後の洗浄により, 水道水の値に戻る時間から決定した。また, CSLは原液では腐敗しないが, 希釈液は数日の間に腐敗するため, 液肥タンク原液としては腐敗を抑えなおかつ扱いやすい濃度に, 調製する必要があった。そのため, 希釈率を変えた液肥において, 一定時間後の細菌数を測定し, 微生物の繁殖が抑えられる希釈率を決定した。

表4-3 実験後土壌の化学性

	pH	EC (dS.m ⁻¹)	有機物 含量 (%)	全窒素 (%)	水溶性イオン濃度 (mmol. kg dry soil ⁻¹)						
					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
原土	5.90 a	0.042	0.68 a	0.042	0.67 ab	0.18 a	0.04 a	0.43	0.84 a	0.31	
基肥区	6.12 ab	0.027	1.80 c	0.046	0.49 a	0.68 ab	0.23 b	0.29	0.71 a	0.39	
上層	無機養液区	5.90 a	0.048	1.77 c	0.035	0.78 ab	0.96 b	0.32 b	0.75	0.99 ab	0.09
	有機養液区	6.14 b	0.040	1.55 b	0.041	0.83 b	0.88 b	0.30 b	0.14	1.22 b	0.07
LSD	0.05	ns		ns				ns		ns	
原土	5.90 b	0.042 a	0.68 a	0.042	0.67 a	0.18 a	0.04 a	0.43	0.84 a	0.31 c	
基肥区	5.69 a	0.139 b	1.74 b	0.043	0.71 ab	3.94 b	1.56 b	0.56	4.90 b	0.10 b	
下層	無機養液区	5.83 ab	0.041 a	1.72 b	0.040	0.72 ab	0.80 a	0.25 a	0.39	1.01 a	0.07 ab
	有機養液区	6.06 c	0.040 a	1.71 b	0.039	0.85 b	0.99 a	0.28 a	0.07	1.19 a	0.04 a
LSD	0.05			ns				ns			

Fisher'sLSDにより検定を行った。

nsは有意差無し, その他は5%の危険率で有意差あり。

表 4-4 施肥および施肥法が地上部および地下部の無機イオン組成に与える影響

部 位	処 理	無機成分含量 (%)					水溶性アニオン (mmol _c ・kg DW ⁻¹)		
		N	K	P	Ca	Mg	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
地上部	基肥区	2.34 a	3.48 a	0.24 a	1.51 b	0.34 a	25 a	355 c	189
	無機養液区	3.50 c	4.42 b	0.22 a	1.68 b	0.42 b	274 b	21 a	195
	有機養液区	3.00 b	4.19 b	0.33 b	1.16 a	0.35 a	24 a	211 b	254
LSD (0.05)									ns
上部根	基肥区	1.96 a	1.94 c	0.21	0.80 a	0.28 a	49	74 b	169 c
	無機養液区	2.26 ab	0.80 a	0.20	1.32 b	0.29 ab	90	24 a	38 a
	有機養液区	2.37 b	1.35 b	0.23	0.89 a	0.34 b	52	83 b	96 b
LSD (0.05)				ns			ns		
下部根	基肥区	2.35	2.08	0.30	1.22 a	0.51 b	63 ab	358 b	65
	無機養液区	2.32	1.23	0.26	2.01 b	0.49 b	124 b	81 a	50
	有機養液区	2.28	2.49	0.32	1.49 ab	0.40 a	61 a	177 ab	104
LSD (0.05)		ns	ns	ns					ns

Fisher'sLSDにより検定を行った。

nsは有意差無しを示し、その他は5%の危険率で有意差あり。

以上のように、システム構築の際問題となる点を検討した後、実際にトマトの栽培を行い、CSL施用が、生育、果実の収量および品質に与える影響を評価した。また、栽培期間中の土壌の化学性についても土壌溶液中の無機イオン濃度を測定することにより明らかにしようとした。

また、果実の品質について尻腐れ果を中心に検討した。トマトなどの果菜類に見られる尻腐れ果は、可販果率を減少させる要因の一つである。多くの場合、果実のカルシウム欠乏が原因であり、そのメカニズムとして、初期のイオンストレスが、導管数や導管直径を減少させ、それに伴う果実へのカルシウム供給の減少が起こることが考えられている(Ohta 1997)。このようなカルシウムの果実部分への転流の重要性を指摘する報告のほか、供給源である根圏環境と尻腐れ果に関する研究もあり、根系に加えられたストレスが尻腐れ果率を上昇させることを示した報告も多い(大西ら 1983, 趙ら 1992, 吉田ら 1997, 太田ら 1999)。

根系の生理活性を評価する手法として、出液速度の測定が行われており、イネなどで、収量と出液速度との相関が検討されている(森田・阿部 1999)。しかし、この手法を野菜類に応用した例は少ない(森田・豊田 2000)。尻腐れ果の発生に、根圏ストレスが大きな要因であるならば、出液速度は重要な指標となると考えられることから、その測定を行うこととした。

本研究では、養液土耕と従来の基肥を中心とした施肥法とを比べ、それらが尻腐れ果の発生に与える影響を評

価しようとした。また、根系に付加されたストレスの評価法として出液速度を用い、尻腐れ果発生との関連を検討した。

さらに、出液速度を規定する根系形態および土壌の理化学性から、出液を介した尻腐れ果発生のメカニズムを解明することを目的とした。

b 材料および方法

1) 原液槽における腐敗の可能性の検討

CSLの粘性は高いため、養液土耕用の液肥タンクには、適度に希釈したものを入れておく必要があった。希釈により、微生物の増殖が考えられるため、CSLの希釈に伴う微生物の増殖を評価した。CSLの原液、およびその2, 4, 8, 32, 128, 516倍希釈液を試験管に入れ、シリコ栓をして暗所28°Cで14日および28日間静置し、YG培地を用いた希釈平板法により細菌数を測定した。

2) 洗浄条件の検討

洗浄条件を検討するために、長さ16mのドリップ式の灌水チューブを、野菜・茶業試験場(武豊)の温室内に配置した。本研究では、トマト1株毎に点滴を行うシステムを採用した。洗浄条件検討時の設定としては、灌水量が1時間当たり1リットルであり、2分間の前洗浄の後、11.4倍に希釈した無機液肥または、2.5倍に希釈した有機液肥を13分間導入した。その後、10分間の後洗浄を行った。灌水チューブの最上流に位置するドリッパーから滴下される液と、最下流から滴下される液を、

試験管に13.5mℓずつ採取し、ECを測定した。

3) 栽培および施肥条件

栽培は、幅83cm×長さ940cm×深さ20cm（最浅）～30cm（最深）のドレンベッド（クミアイスーパードレンベット）を用いて行った。間口6m×奥行12m×棟高3mのビニールハウス内に、ベッドを南北方向に3基設置した。土壌は、野菜・茶業試験場施設生産部の長期無栽培圃場の表層30cmから採取した。1cmのふるいに懸けたものをベッドに充填した。

表4-5に示すような施肥条件に関する処理を設定した。基肥区は、基肥として、表中に示す単肥を混合して加え、栽培後期に液肥で2度の追肥を行った。大塚化学社製の液肥OK-F-1を用いた無機養液土耕区（以下、無機養液区と略す）を養液土耕としての対照区とした。有機養液土耕区（以下、有機養液区と略す）は、液肥としてCSL（サンエイリップ、サンエイ糖化株式会社）を用いた。サンエイリップの組成を、表4-5に示す。N、P、Kのバランスが良く取れており、ロット間での変動が小さく均質である。しかし、野菜栽培の肥料としてはカルシウム含量が過少であるので、カキ殻石灰（セルカ）を元肥で施肥した。なお、カキ殻石灰は、有機栽培の要件を満たす肥料であることから選択した。

灌水施肥装置としては、液肥混入機（FERTY-1-A、ネタフィム社）に定量ポンプ（プロ・ポンE-30、共立機巧社）を装備し、コントローラ（メテオ、ネタフィム社）で灌水および液肥混入量を制御した。ドリッピングチューブには目詰まりのし難いドリッパー（アロードリッパー、ネタフィム社）を用いた。

トマト（品種‘サターン’）はセルトレイの園芸用培土上に播種して育て、幼苗を同培土を充填した、3号ポットに鉢上げし育苗した。播種後約2ヶ月経過した1999年5月18日に第1花房開花期に達した苗を定植した。

ベッド内に株間35cmで2列植えた。1m²あたり7株の栽植密度である。

灌水および灌水施肥のパターンは図4-7に示した通りで、毎日ほぼ一定量行った。しかし、曇天が続いた6月23日～6月30日の間は、それらを制限した。施肥は定植から75日目の7月31日で終了し、この時点で有機養液区と無機養液区の総窒素施肥量が基肥区と同じになるようにした。その後、8月2日までの2日間は全区とも灌水のみを行った。期間中の1日、1個体当たりの窒素添加量は、11～215mgの間であり、平均で140mgであった。

4) 生育調査

摘心は、第5結果枝の上部の葉2枚を残して行い、摘心までの生育調査は15株について、草丈、茎直径、および葉緑素値を測定した。茎直径は、草丈の中央部分について測定し、葉緑素値は数cm展開した最上葉から数えて4枚下の葉について、葉緑素計（SPAD-502、MINOLTA）を用いて測定した。

5) 光合成速度

それぞれの処理区において無作為に5株を選び、茎を高さ方向に4分割し、下部から1～4とした。それぞれの部位において、中央に位置する葉の先端部分について光合成速度を測定した。携帯用光合成蒸散測定装置（LI-6400、LI-COR社）を用いて、1999年7月24日午前9時から12時の間に5反復で測定を行った。

6) 葉面積測定

栽培終了時に、それぞれの処理区において無作為に5株を選択し、茎を高さ方向に4分割し、それぞれの部分に存在する葉部を葉面積計（AAC-400、林電工）で測定した。葉面積測定後、80℃で3日間乾燥し乾物重を測

表4-5 各処理区に用いた肥料の種類と量

処理名	施肥	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-CaO-MgO	施肥量 (g plant ⁻¹)
基肥区	単肥混合 (基肥)	硝酸アンモニウム (N: 34.4)	21.8
		過リン酸石灰 (P ₂ O ₅ : 17.5)	21.5
		硫酸カリウム (K ₂ O: 50)	12
		炭酸苦土石灰肥料 (CaO*-MgO: 34-15)	22.5
		OK-F-1 (15-8-17-6-2)	10+10
無機養液区	無機液肥	OK-F-1 (15-8-17-6-2)	70
有機養液区	有機液肥	CSL (3.3-3.4-3.2-0.04-1.1)	317
	有機質石灰 (基肥)	セルカ (CaO*-MgO-: 48-0)	15

* CaOに関してはアルカリ分表示からMgO量を差し引いて算出した。

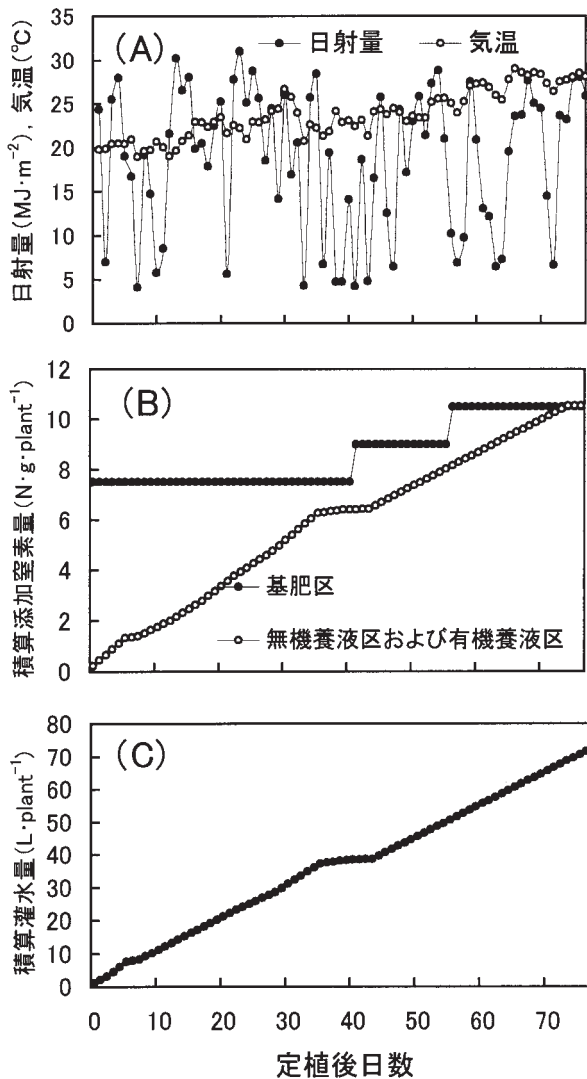


図4-7 栽培期間中の日射量と気温の推移および積算添加窒素量と積算灌水量
(A) 日射量と気温, (B) 積算窒素添加量,
(C) 積算灌水量

定した。

7) 収量・品質調査

継続して生育を調査してきた個体について、6月14日から収穫調査を開始した。ほぼ1週間間隔で、果実全体が赤くなったものを順次収穫し、1個当たりの重量を測定した。収穫は第4果房までとした。品質に関しては、糖度とビタミンCを分析した。糖度はそれぞれの果房で最初と2番目に収穫した果実を磨り下ろして、得られた液の糖度をデジタル糖度計 (PR-1, ATAGO) で測定した。ビタミンCは、果房で最初の果実の磨り下ろし液について、アスコルビン酸測定用試験紙 (Ascorbic acid

test, MERCK 社) と簡易反射式光度計 (RQflex Plus, MERCK 社) を用いて測定した。

8) 土壌の pH, EC と無機イオン組成

土壌の含水率および物理性については、それぞれの処理区で、無作為に4株を選びその株元の土壌について調査した。図4-8に示すようにドリップ位置から5cm (ドリップ近傍) および10cm (ドリップ周辺) の地点において、直径5cmの採土管を用いて、深さ15cmまで3層に分けて土壌を採取した。生土の含水率を測定した後、乾土:水が1:5になるように生土に蒸留水を添加し30分振とう後ECを測定した。この土壌懸濁液を、Toyo濾紙No.5Bで濾過後、濾液を遠心分離し土壌粒子を取り除いた。さらに、0.45μmのニトロセルロースフィルターを通して無機イオンの分析試料とした。土壌硬度は、それぞれの処理区で無作為に抽出した不攪乱の4点について、図4-8に示すようにドリップから5cm離れた位置について、貫入式硬度計DIK-5520 (大起理化学工業(株)) を用いて測定した。

9) 尻腐れ果率調査

1999年6月14日から収穫調査を開始した。ほぼ1週間間隔で、果実全体が赤くなったものを順次収穫し、8月2日に最終の収穫を行った。尻腐れ果率は、収穫終了時にそれぞれの処理区の調査株15個体から得られた全果実について計算した。その後果実をおろし金でおろし、凍結乾燥し、無機成分分析に供した。

10) 出液速度の測定

最終収穫が終了した翌日の8月3日の午前9時に地際から3cmのところまで地上部を切除した。あらかじめ重量を測定しておいた脱脂綿で切り口を覆い、さらにビニール袋で脱脂綿を覆い輪ゴムで固定した。12時間後に、脱脂綿を回収し、重量を測定し出液速度を算出した。出液を脱脂綿から搾りだし、無機組成分析に供した。

11) 根系のサンプリングおよび根長・根径測定

根系形態の特性を明らかにするために、モノリス法により根系を土壌ごと切り出した。図4-8右に示すようにドリップ位置とトマト株元を結ぶ直線を中心に点線で囲んだ部分:厚さ3cm, ベッド側壁から32cmの長さを深さ15cmで切り出した。各処理区において3株ずつ切り出した土壌を、少量ずつ水道水で洗い落としながら、土壌中での形態を保持させつつ根系を洗い出した。洗い出

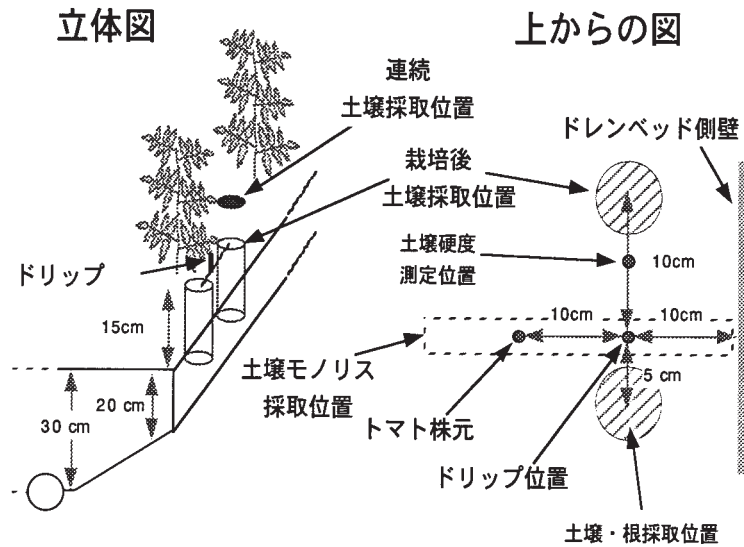


図4-8 土壌および根のサンプリング位置と調査位置

した根系は写真撮影後に、通路側壁から4分割し、それぞれについて根長密度と平均直径を求めた。

根系の鉛直分布を明らかにするために、不攪乱の土壌を4点選び、図4-8左に示すように、コアを用いて表層から5cm毎に3層に分けて15cmまでの土壌をサンプリングし、根を洗い出した後、根長密度と平均直径を求めた。解析には根系解析ソフト (Mac Rhizo Ver. 3.1, REGENT INSTRUMENT 社) を用いて、根の太さ別根長を測定し、平均直径と長さを算出した。

12) 無機イオンの分析

地上部に関しては、栽培終了後に、それぞれの処理区において無作為に5株を選択し、それぞれの株について、葉をつけてまま茎を草丈方向に4等分した。80℃で3日間乾燥し粉碎後分析試料とした。果実は凍結乾燥した試料を用いた。植物体のカチオンは、硝酸分解液を試料とし、アニオンはオートクレーブで、120℃、20分間抽出したものを試料とした。土壌の無機イオン分析には、1:5土壌抽出液の濾液を用いた。全窒素はケルダール分解後、滴定法で測定した。カチオンはICP発光分光分析装置 (SPS7700, Seiko Instrument 社) で、アニオンはイオンクロマトグラフ分析装置 (LC-10AD, 島津製作所) で分析した。

c 結果および考察

1) ドリッライン洗浄方法の検討

CSLの粘性は高いため、養液土耕用の液肥タンクには、

適度に希釈したものを入れておく必要があった。希釈により、微生物の増殖が考えられるため、CSLの希釈に伴う微生物の増殖を評価した。CSLの原液、およびその2, 4, 8, 16, 32, 128, 516倍希釈液を試験管に入れ、シリコ栓をして暗所28℃で14日および28日間静置し、全菌数を希釈平板法で測定した。その結果、原液から8倍希釈までは、菌数の顕著な増加は認められなかったため(図4-9)、施肥用原液として、CSL原液の5倍希釈液を使用することとした。しかしその後、施肥用原液の表面に微生物の増殖が認められたため、希釈率を3倍に留め、施肥用原液は4~7日毎に交換するようにした。それにより、原液槽の微生物の増殖は抑えられた。しかし、1週間程度で施肥用原液表面に被膜が生じることを観察しており、今後、施肥用原液の保存方法をさらに検討する必要がある。

また、CSLは、固形分を含み粘性が高いこと、また微生物を増殖させる可能性のあることから、ドリッラインの詰まりが懸念されたため、希釈して用い、液肥を通した後は必ず十分な洗浄を行う制御設定を検討した。液肥を流した直後、それとほぼ同量の水道水を流すことにより、チューブへの液肥の残留が無くなることを確認した(図4-10)。

ドリッチューブから出てくる液量を測定したところ、栽培期間を通じて一定の滴下速度であった。また、液肥のECも設定した通りであり、pHの変動も無かった。以上の結果から本システムでの目詰まりは起こらず正常に作動したと判断した(図4-11)。

生育状況を示すデータを図4-12に示す。第5段で摘み取るまでの草丈は、有機養液区で他の2区に比べ低く推移し、茎直径も同様に細い傾向を示した(図4-12A, B)。これは、有機態窒素の無機化に時間がかかること、また、与えた窒素分の無機化率が100%ではないことが生育に影響したためと考えられた。

2) 養液土耕が生育および土壌ストレス軽減に与える影響

葉緑素値に関しては、基肥区で高く、無機養液区および有機養液区で低く推移した。基肥区では窒素分を贅沢

吸収していた一方で、無機養液区および有機養液区では、それが抑えられたためと考えられた。35日目で無機養液区の葉緑素値が著しく低下し(図4-12C)、症状からは、窒素または硫黄欠乏の可能性が考えられた。

表4-6に示した土壌の無機イオン組成の変化を見ると、無機養液区の28日日以降では、土壌中の硝酸イオンは有機養液区より多いか、また同等に存在するが、硫酸イオン濃度は他の2区に比べて著しく低くなっていた。ここでは、無機養液区に加えたOK-F-1が、通常は過剰になりがちな硫酸イオンを排除した肥料であることから、無機養液区の葉緑素値が低下した原因は硫黄欠乏である

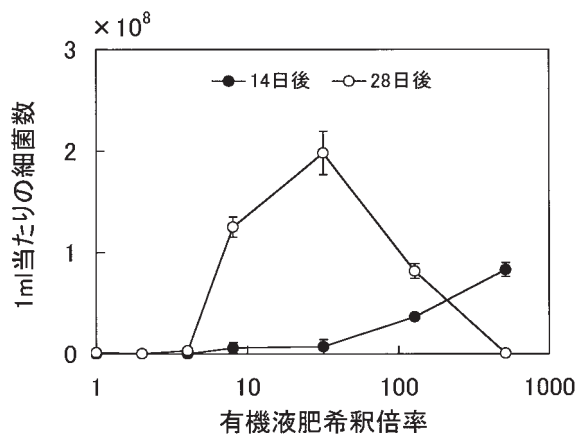


図4-9 有機液肥の希釈倍率および静置日数が細菌数に与える影響
縦棒は標準誤差を示す。(n=2)

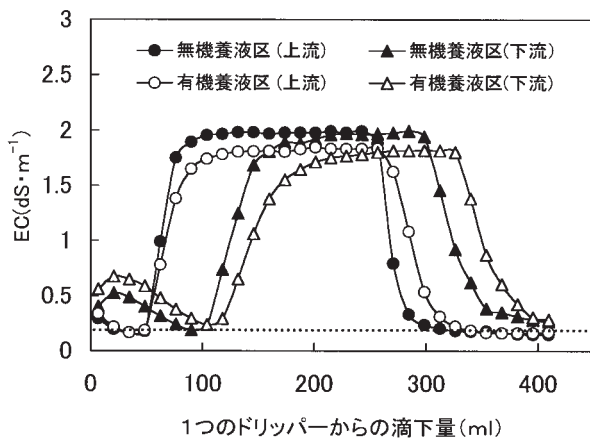


図4-10 液肥混入機の作動状態
設定としては、灌水量 $1L \cdot h^{-1}$ であり、2分のプレリンスの後、11.4倍に希釈した無機液肥または、2.5倍に希釈した有機液肥を13分間導入した。その後、10分のリンスを行った。上流は最も水上のチューブ、下流は最も水下のチューブから滴下された液を示す。
図中の点線は水道水のEC ($0.17dS \cdot m^{-1}$)を示す。

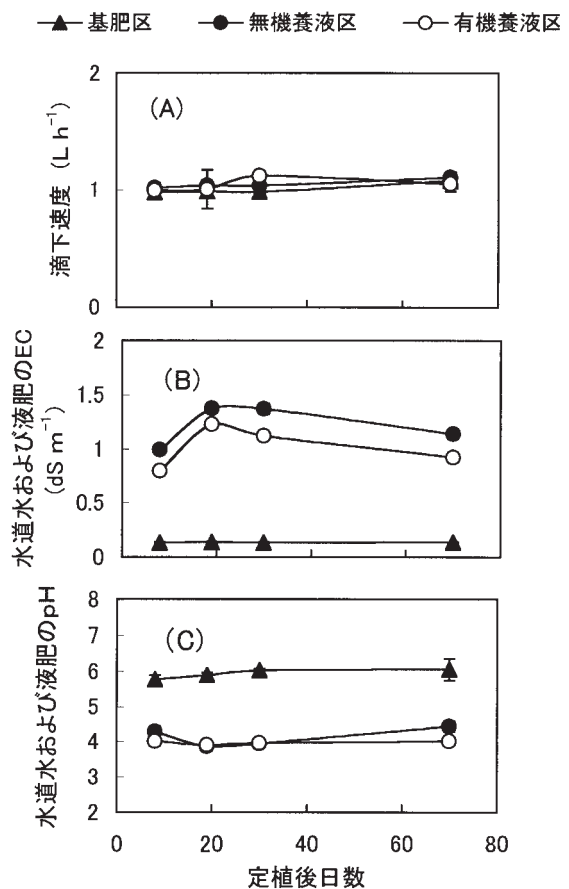


図4-11 水道水および液肥の滴下速度とECとpHの変動

(A) 滴下速度, (B) 水道水および液肥のEC, (C) 水道水および液肥のpH $n=3$ で、縦棒は標準偏差を示す。設定としては、灌水量 $1Lh^{-1}$ であり、液肥混入量は、図4-7に示すように変化させて設定した。定植後、8, 19, 30, 70日目のそれぞれについて、最初に流出する点滴灌漑水について測定した。

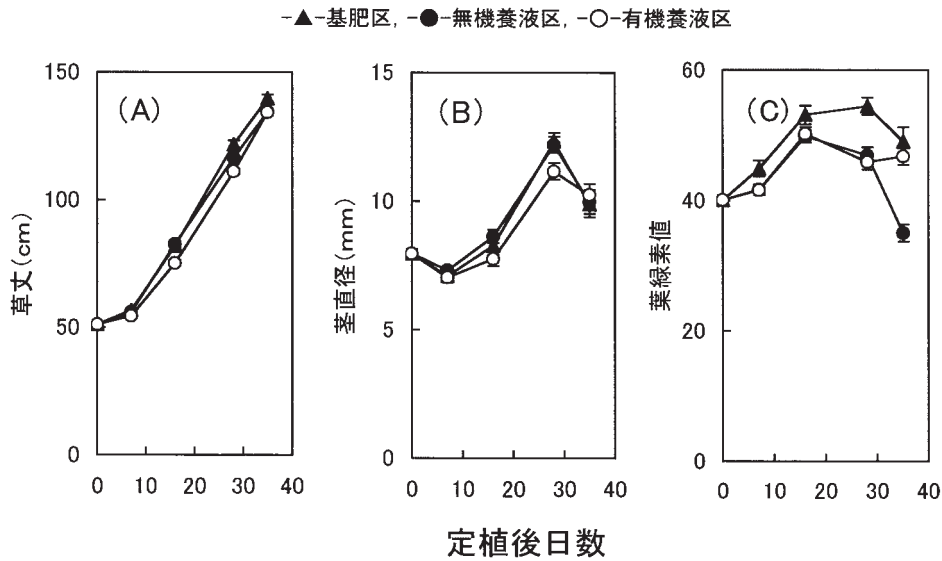


図4-12 養液土耕法がトマトの草丈、茎直径と葉緑素値に与える影響
(A) 草丈, (B) 茎直径, (C) 葉緑素値
n=15, 縦棒は標準誤差を示す。

表4-6 栽培期間中における EC, pH および土壌抽出無機イオン組成の変化

サンプリング時期 (定植後日数)	EC (dS.m ⁻¹)	pH	イオン濃度 (mmol. kg dry soil ⁻¹)						
			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
原土	0.04 ± 0.00	6.0 ± 0.4	0.10 ± 0.00	1.1 ± 0.8	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.0	0.23 ± 0.03	
基肥区	7	0.60 ± 0.02	5.9 ± 0.1	2.32 ± 0.14	11.3 ± 1.2	4.7 ± 0.5	12.3 ± 0.1	12.5 ± 1.8	1.31 ± 0.07
	28	1.79 ± 0.33	5.7 ± 0.1	5.70 ± 0.18	42.7 ± 12.2	19.3 ± 5.9	54.3 ± 14.1	23.8 ± 3.0	6.32 ± 2.40
無機養液区	50	0.72 ± 0.20	6.1 ± 0.2	2.43 ± 0.42	15.1 ± 5.8	6.5 ± 2.2	17.9 ± 4.9	9.2 ± 3.5	1.52 ± 0.65
	7	0.11 ± 0.01	6.4 ± 0.0	0.26 ± 0.07	1.5 ± 0.1	0.7 ± 0.0	2.6 ± 0.0	0.3 ± 0.0	1.26 ± 0.19
有機養液区	28	0.12 ± 0.01	6.6 ± 0.0	0.34 ± 0.07	2.1 ± 1.0	0.7 ± 0.2	3.8 ± 0.2	0.0 ± 0.0	1.10 ± 0.11
	50	0.11 ± 0.00	6.7 ± 0.0	0.12 ± 0.07	1.1 ± 0.0	0.6 ± 0.0	2.8 ± 0.2	0.1 ± 0.0	0.59 ± 0.15
有機養液区	7	0.12 ± 0.01	6.7 ± 0.1	0.32 ± 0.00	1.4 ± 0.1	0.7 ± 0.0	2.1 ± 0.1	0.4 ± 0.0	1.55 ± 0.32
	28	0.14 ± 0.03	6.7 ± 0.1	0.24 ± 0.06	1.5 ± 0.5	0.8 ± 0.2	2.2 ± 0.7	0.5 ± 0.1	1.59 ± 0.33
50	0.18 ± 0.07	6.8 ± 0.0	0.42 ± 0.13	1.9 ± 1.1	1.0 ± 0.5	2.8 ± 1.9	0.5 ± 0.3	2.60 ± 0.65	

n=2, 平均値 ± 標準誤差

と判断した。日本の土壌では、硫黄欠乏は出難いとされているが(河野 1987), 根域が制限された栽培環境で、硫酸イオンを含まない肥料を使うと初作においても硫黄欠乏が生じることを本研究結果は示している。

近年、施設生産では、集積する塩類として硫酸イオンが多い場合があるとの指摘があり(瀧 1992), 硫酸イオンを極力含まないように調製された、いわゆるノンストレス化肥料の導入が検討されている(小野 1996)。また一方では、病害の制御や(上原 1993), 高品質栽培(阿部ら 1994)のために、隔離床栽培も普及し始めている。本実験で認められた硫黄欠乏症状は、これら二つの新技术を組み合わせることによって生じたと考えられ、実際の栽培でも注意を要する。

その他の土壌化学性の特徴としては、基肥区に比べ、無機養液区および有機養液区では塩類ストレスが緩和されていた。基肥区は他の2区に比べ、栽培期間を通じて土壌抽出液の EC が高く、定植後 28 日目には 1.79dSm⁻¹ にもなった。また、変動も大きかった。一方、無機および有機養液区では 0.2dS・m⁻¹ 以下に抑えられ、変動も小さかった。土壌 pH に関しても、無機養液区および有機養液区で、より中性に近い状態で推移した(表 4-6)。図 4-11 に示すように、添加される液肥の pH は低いが、微生物作用も含めて、土壌の緩衝能が有効に作用していたため、中性付近に維持されていたと考えられる。

葉面積の垂直分布は生育の推移を反映していた(図 4-13)。有機養液区では下位葉の葉面積が他の処理区に比

べて低く抑えられていた。これは、図4-12の有機養液区における生育の遅れを反映しているものと考えられた。最上葉部では、このような葉面積の関係は逆転し、有機養液区の葉面積は、無機養液区および基肥区の葉面積より大きかった。無機養液区の葉面積減少の原因は硫黄欠乏である可能性が、基肥区の葉面積の減少は、肥料成分の大きなシンクである下位葉に無機イオンが集積した可能性が考えられた。光合成活性の垂直分布に関しても葉面積と同様の傾向が認められ、無機養液区では、最上部の光合成活性が低下していた。

3) 養液土耕が果実の収量と品質に与える影響

果実重量の結果を図4-14Aに示す。第1果房では有

機養液区で他の2区に比べ劣る傾向があったが、第3果房では他の2区に追いつき、第4果房の有機養液区では他の区に優っていた。総収量としては処理区間の差は認められなかった。これらの結果は、図4-13の葉面積と光合成活性の垂直分布と同様の傾向にあり、施肥法の差異によりもたらされる乾物生産の差異が、収量の差異と密接な関係があると考えられた。

1果重は有機養液区で大きくなる傾向が認められた(図4-14B)。これは、1果房あたりの着果数が有機養液区で減少する傾向にあったためと考えられる。低窒素濃度で栽培された場合、着花数が減少することを示す報告があり(斎藤ら 1963)、有機養液区の場合は土壌中の硝酸イオン濃度が低いことから(表4-6)、このような傾向

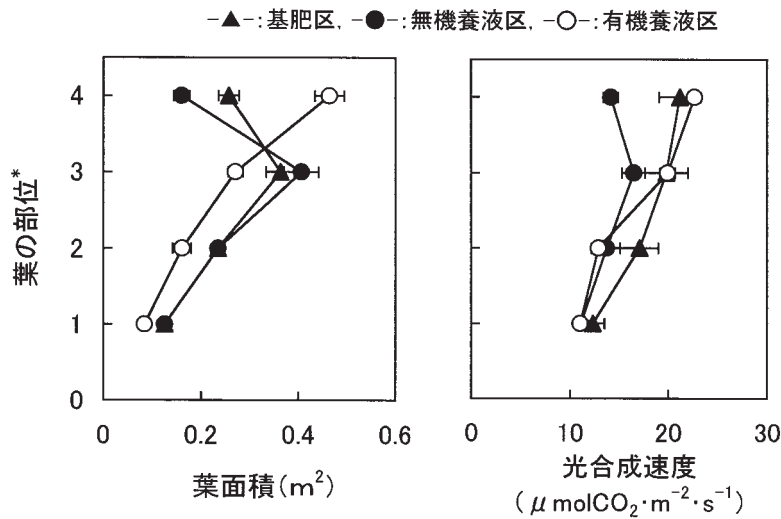


図4-13 養液土耕法がトマトの葉面積と光合成速度に与える影響

n=5で、横棒は標準誤差を示す。

* 茎を高さ方向に4分割し、一番下部についている全ての葉を1、その上を2、3最上部の葉を4とした。

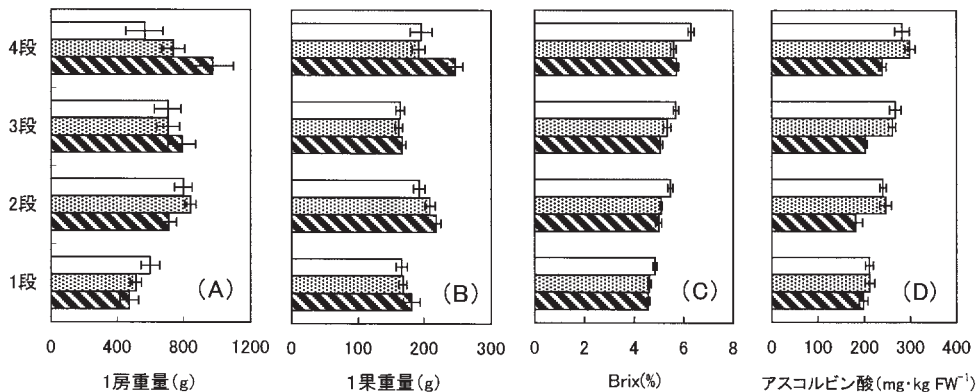


図4-14 養液土耕法がトマトの収量と品質に与える影響

(A) 1房重量, (B) 1果重量, (C) 糖度, (D) アスコルビン酸濃度

n=15で、横棒は標準誤差を示す。

が顕著に表れたと考えられた。

糖度は基肥区で最も高くなった。一般に根系にイオンストレスを負荷することによってトマト果実の糖度が上昇することが知られている(ADAMS 1991)。基肥区の EC が高かったことから(表 4-6)、イオンストレスが原因で糖度が上昇したと考えられた(図 4-14C)。アスコルビン酸は有機養液区で低下していた(図 4-14D)。果実のアスコルビン酸含量は、日当たりによって大きく変化することが知られている(篠原 1986)。今回の実験では、有機養液区は上位葉が繁茂したために(図 4-13)、果実への日照が不足しアスコルビン酸濃度が低下した可能性が考えられた。

有機物施用が野菜の品質に与える影響については、森(1986)によりまとめられ、「緩効性窒素の作用」と「低くしかも安定した水ポテンシャルの維持作用」が品質の向上の要因として挙げられている。馬西(1996)らが検討を行った結果でも有機物の施用にともなう品質の向上が認められている。しかし、本実験の結果からは、有機物施用区が最も良い品質の果実を生産したとは言えなかった。従来手法では、有機物は全層すき込み型の施用を行っていたが、本研究での有機物施用方法は全く異なるため、同様の結果が得られなかったと考えられる。

CSL は、従来、家畜の餌と微生物用の培地として用いられていたが、その用途を拡大し、本研究では液肥として使用し、野菜栽培が可能であることを示した。従来の有機性廃棄物の用いられ方としては、充分腐熟させ堆肥化した後、土壌に混和して栽培に用いるというものであったが、CSL という未熟な有機物でも、土壌微生物の分解能力を超えない程度で、少量ずつ添加することにより、肥料としての利用が可能であることを示した。養液土耕は、無機肥料を用いて行うことが常識であったが、CSL という有機性の液肥も利用可能であることを明らかにした。これは、養液土耕の概念を拡大するものである。

4) 養液土耕が尻腐れ果実発生に与える影響とその発生機構

次に、養液土耕に伴う果実の尻腐れ果の発生について述べる。図 4-15 に、果実の尻腐れ果率を示す。それぞれの処理区において、第 3 果房までは尻腐れ果は生じなかったが、第 4 果房では、基肥区と有機養液区で尻腐れ果が生じた。図 4-15 に見られるように、基肥区では他の 2 区に比べ尻腐れ果率が高かった。尻腐れ果発生の要因として、果実中の低いカルシウム含有率が指摘されている。図 4-16 に示すように果実部のカルシウムに関し

ては、基肥区の第 4 果房の濃度が最も低くなっており、吉田ら(1997)の結果と一致していた。一方で、図 4-17 に示すように葉部のカルシウムは、上位部ほど濃度の低下が認められるものの、処理区間での差は認められなかった。カルシウムは概して移動し難い元素として知られており(佐藤ら 1998)、本実験においても、葉中のカルシウム量と尻腐れ果の発生率とは相関がなかった。

果実部のその他のカチオンは、処理区間での顕著な濃度差は認められなかったが、アニオンでは、硫酸イオンが無機養液区で大きく減少していることが明らかとなった。葉部でも無機養液区の硫酸イオン濃度は非常に低く、その分布パターンも果実と類似していた。

前節で、無機養液区で葉緑素値の低下が認められたことを示したが、全窒素濃度は高いレベルに有り(図 4-17)、その中でも硝酸イオンが葉部に集積していた。したがって、低い葉緑素値は、窒素欠乏が原因ではないと考えられた。一方で上述のように硫酸イオンは非常に低い濃度であったことから、無機養液区の葉色の低下は硫黄欠乏によるものと推定した。現在、ノンストレス型施肥(小野 1996)が注目され、養液土耕栽培用の液肥においても硫酸イオンや塩素イオンを含まない肥料が開発されている。現在まで行われてきた露地栽培でのノンストレス型施肥の試験は、根域が制限されない条件下であったため、根が深層に存在する硫黄を吸収でき欠乏症状が現れなかったと考えられる。本実験のように、特に施設で普及しつつある隔離床栽培の場合、ノンストレス型施肥では顕著に硫黄欠乏を生じる可能性があるため注意を要する。

図 4-18 に各処理区の出液速度を示す。尻腐れ果率の

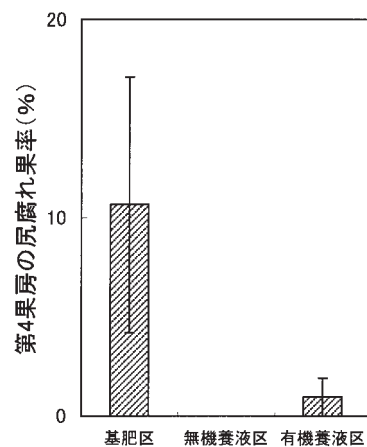


図 4-15 養液土耕法が尻腐れ果の発生率に及ぼす影響

第 4 果房の平均値 (n=15)。縦棒は標準誤差を示す。第 1 から第 3 果房はいずれの区でも尻腐れ果は発生しなかった。

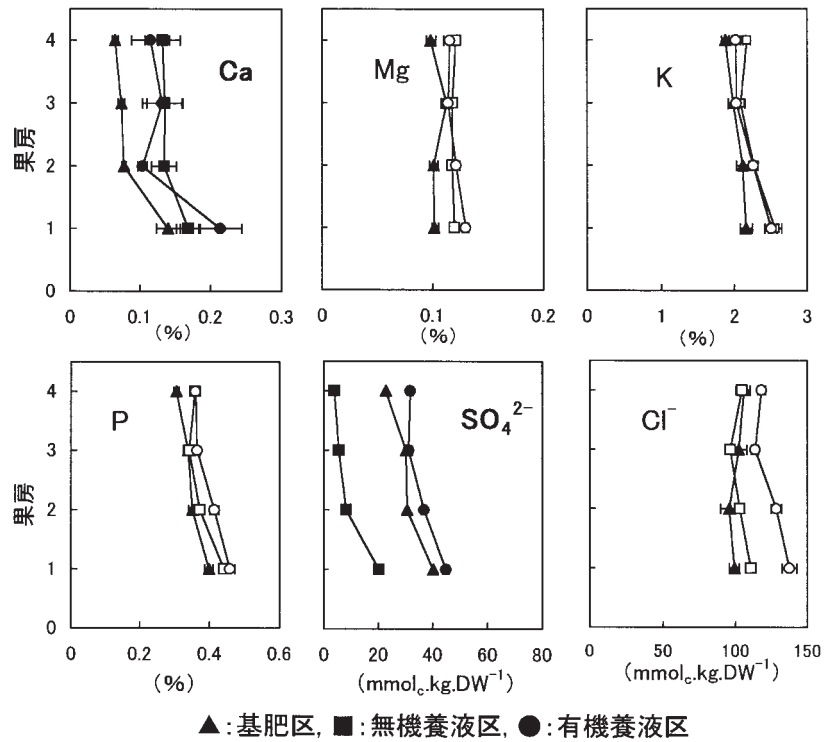


図4-16 トマト果実の無機成分組成
カチオン (n=15), アニオン (n=8) の平均値, 横棒は標準誤差を示す.

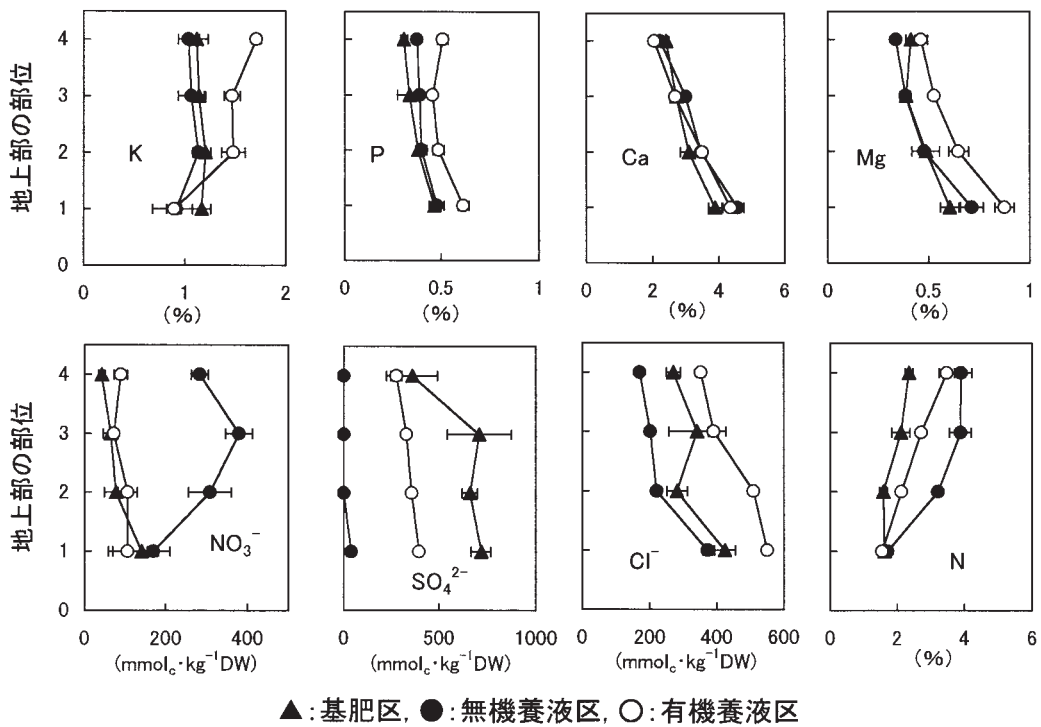


図4-17 トマト葉部の無機成分組成
3株の平均値, 横棒は標準誤差を示す.

高かった基肥区に比べ無機および有機の各養液土耕区ではその速度が速かった。出液中のイオン組成を表4-7に示す。基肥区においては、他の2区と比較してカリウム濃度は高かったもののカルシウム、マグネシウムの濃度は低かった。基肥区のカルシウムおよびマグネシウムイオンの土壌中の濃度はむしろ他の処理区よりも高いにもかかわらず(表4-8)、それに対応した割合では吸収されていなかった。この結果は、培地に大量のカルシウムがあっても必ずしも吸収されるわけではないとする、趙ら(1992)の報告と一致していた。一方で、基肥区の出液中のナトリウム濃度は他の2区に比べて高く、2価カチオンの吸収低下に伴う電気的不均衡を補うための吸

収と考えられた。また、出液中の硝酸およびリン酸イオンの濃度は有機養液区で低下していた。CSLの窒素の9割程度が有機態であり(中野ら1999)、リン酸の主要な形態がフィチン態であるため(菊地1993)、添加された有機態の窒素およびリン酸が完全に無機化されていなかったため、他の区に比べ低い濃度となったと考えられた。

無機養液区では、硫酸イオンの量が著しく低く、土壌における低い存在量を反映していた。一方で、有機養液区では出液中の塩素イオンの濃度が他の区に比べ高く果実と葉部のイオン組成がそれを反映していた(図4-16)。有機養液区では、出液中の硝酸濃度が低いため、そのバランスを取るよう塩素および硫酸イオンの吸収が促進されたと考えられた。

尻腐れ果との関連からカルシウムに着目すると、基肥区の出液中のカルシウム濃度は、有機養液区の95%、無機養液区の69%であったが(表4-7)、出液量そのものは、有機養液区の7.6%、無機養液区の4.9%まで低下していた(図4-18)。

このような出液は、日中の蒸散量と直接には関係しない。しかし、夜間など蒸散に依存しないカルシウムの地上部への移行量が、出液と同程度であると考え、基肥区の移行量は有機養液区の7.2%、無機養液区の3.4%に低下していたことになる。果実における水分動態については、日中の蒸散が多いときは果実は収縮し、水が流入する夜間から明け方にかけて肥大するとの報告がある(OHTA et al. 1997)。今回、処理区間で濃度差が認められた果実中のカルシウムは、その移動が蒸散流に依存しており、葉からの転流が少ない元素であること(佐藤ら1998)を考えると、夜間に、出液量に相当する量だけ吸収された水が、特別な蒸散器官を持たない果実にとって

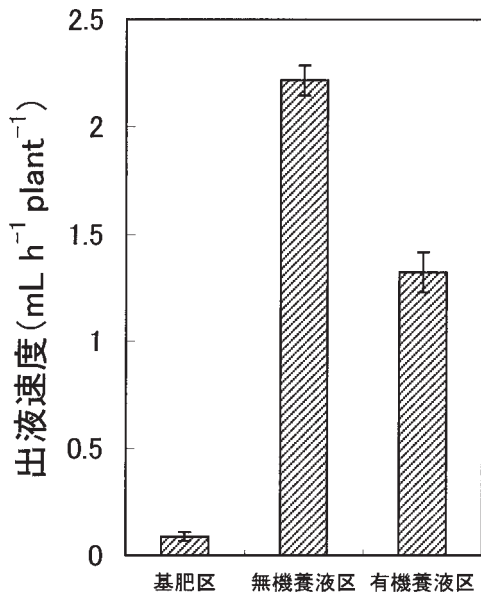


図4-18 栽培法が出液速度に及ぼす影響
出液速度の平均値 (n=8)。縦棒は標準誤差を示す。

表4-7 出液の無機イオン組成とそれにより地上部に移行した1時間当たりのイオン量

	イオン濃度 (mmol _c · L ⁻¹)							
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
基肥区*	11.9	10.5	13.9	4.7	19.7	13.8	1.3	1.2
無機養液区	6.0 ± 0.6	15.3 ± 0.9	33.9 ± 7.4	1.1 ± 0.2	19.2 ± 1.1	13.9 ± 0.7	0.3 ± 0.1	4.7 ± 0.9
有機養液区	8.5 ± 0.4	11.1 ± 0.6	46.7 ± 9.1	2.2 ± 0.4	10.7 ± 1.2	11.9 ± 1.0	3.5 ± 0.4	13.6 ± 1.9
**	移行イオン量 (μmol _c · h ⁻¹)							
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
基肥区*	1.0	0.9	1.2	0.4	1.7	1.2	0.1	0.1
無機養液区	13.3 ± 1.3	33.9 ± 2.0	75.1 ± 16.5	2.5 ± 0.6	42.6 ± 2.4	30.8 ± 1.5	0.8 ± 0.3	10.4 ± 2.0
有機養液区	11.2 ± 0.6	14.7 ± 0.8	61.7 ± 12.1	2.9 ± 0.5	14.1 ± 1.6	15.8 ± 1.3	4.6 ± 0.5	18.0 ± 2.6

* 基肥区は出液を採取した8個体のうち1個体のみからしか分析に必要な量のサンプルを得ることができなかった。無機養液区と有機養液区は、8個体の平均値であり、±以下は標準誤差を示す。

** 下表は、上表と図5の出液速度から計算した値である。

表 4-8 1: 5 土壌抽出液の無機イオン組成

採取* 位置	深さ (cm)	イオン濃度 (mmol _c ・L ⁻¹)								
		K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
基肥区	近傍	2.5	0.46 ± 0.07	3.19 ± 0.72	0.88 ± 0.22	0.69 ± 0.13	0.34 ± 0.17	0.14 ± 0.04	5.32 ± 1.05	0.14 ± 0.04
		7.5	0.40 ± 0.06	2.00 ± 0.51	0.60 ± 0.16	0.65 ± 0.13	0.37 ± 0.16	0.24 ± 0.05	3.45 ± 0.82	0.13 ± 0.02
		12.5	0.36 ± 0.08	1.23 ± 0.54	0.41 ± 0.18	0.49 ± 0.09	0.09 ± 0.04	0.08 ± 0.03	2.02 ± 0.66	0.09 ± 0.01
	周辺	2.5	2.64 ± 0.68	13.31 ± 2.16	5.50 ± 1.05	2.93 ± 0.53	21.35 ± 6.20	0.28 ± 0.03	9.61 ± 0.84	2.11 ± 0.32
		7.5	0.71 ± 0.11	4.44 ± 1.25	1.75 ± 0.43	1.36 ± 0.38	4.67 ± 1.55	0.11 ± 0.03	4.84 ± 1.43	0.59 ± 0.19
		12.5	0.39 ± 0.09	1.23 ± 0.35	0.50 ± 0.14	0.77 ± 0.17	0.92 ± 0.30	0.10 ± 0.04	2.03 ± 0.46	0.15 ± 0.05
無機養液区	近傍	2.5	0.76 ± 0.07	0.17 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.24 ± 0.03	1.08 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.08 ± 0.00
		7.5	0.83 ± 0.06	0.26 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.45 ± 0.06	1.06 ± 0.04	0.08 ± 0.00	0.09 ± 0.01
		12.5	0.88 ± 0.08	0.33 ± 0.03	0.10 ± 0.01	0.14 ± 0.03	0.62 ± 0.05	0.83 ± 0.11	0.08 ± 0.00	0.12 ± 0.04
	周辺	2.5	0.81 ± 0.25	2.64 ± 1.00	1.32 ± 0.51	2.21 ± 0.51	5.93 ± 1.96	0.08 ± 0.01	0.13 ± 0.01	1.93 ± 0.94
		7.5	0.55 ± 0.04	1.09 ± 0.20	0.54 ± 0.10	1.41 ± 0.13	2.69 ± 0.27	0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.55 ± 0.21
		12.5	0.51 ± 0.03	0.79 ± 0.10	0.37 ± 0.05	0.95 ± 0.15	1.90 ± 0.26	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.00	0.23 ± 0.08
有機養液区	近傍	2.5	0.32 ± 0.13	0.44 ± 0.03	0.27 ± 0.03	0.58 ± 0.09	0.30 ± 0.18	0.47 ± 0.11	0.41 ± 0.13	0.20 ± 0.08
		7.5	0.24 ± 0.17	0.33 ± 0.07	0.16 ± 0.03	0.73 ± 0.11	0.10 ± 0.06	0.32 ± 0.02	0.25 ± 0.07	0.10 ± 0.03
		12.5	0.27 ± 0.20	0.30 ± 0.08	0.15 ± 0.04	0.57 ± 0.08	0.08 ± 0.04	0.34 ± 0.03	0.13 ± 0.01	0.13 ± 0.06
	周辺	2.5	0.12 ± 0.06	0.51 ± 0.53	0.28 ± 0.31	1.11 ± 0.56	0.53 ± 0.77	0.20 ± 0.05	0.31 ± 0.22	1.32 ± 1.32
		7.5	0.08 ± 0.04	0.25 ± 0.09	0.12 ± 0.04	0.67 ± 0.22	0.12 ± 0.05	0.23 ± 0.06	0.21 ± 0.05	0.37 ± 0.15
		12.5	0.08 ± 0.07	0.17 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.50 ± 0.07	0.03 ± 0.03	0.27 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.04

n=4, 平均値 ± 標準誤差.

* 図 4-8 の栽培後土壌採取位置参照, ドリップから 5cm を近傍, ドリップから 10cm を周辺とした.

は重要なカルシウム供給源となっている可能性があり, 出液速度の低下が尻腐れ果の増加に結びついた可能性が考えられる.

出液速度は, 根量とその分布とによっても大きく影響される. 図 4-19 に見るように, 全ての処理区において, 根はドリップ位置周辺により多く分布していたが, 特に無機養液区においてその傾向が顕著であり, 細根の発達著しかった (図 4-20). 有機養液区ではその次に根長が長かった. また, 有機養液区においては, 根が太くなる傾向が認められた.

図 4-21 に深度別の根長を示す. 基肥区では深い部分での根長が発達していた. 溶出した肥料成分が下層に流れ, そこに根が発達したものと考えられた. それぞれの処理区について, 深さ指数(小柳 1998)を求めたところ, 基肥区, 無機養液区, 有機養液区でそれぞれ 8.25cm, 6.61cm, 6.16cm となり, 養液土耕法で, より浅い根系が形成されることが定量的に明らかになった.

養液土耕法では根系が養水分環境の良好なドリップ付近に形成され, 根系の生理活性が高く維持され, それが出液速度の増加として現れたものと考えられた. このように出液速度に影響を与える因子としては, 根量だけでなく, ドリップ灌漑のように局所的な灌漑が行われる場合, 根の分布も重要である.

栽培終了後土壌の理化学性を図 4-22 に示す. 基肥全層施肥でドリップ灌漑を行った場合, 土壌の EC は局所的に上昇し (図 4-22A), 特にドリップ周辺 (ドリップ位置から 10cm) では表層に塩類が集積しているのが肉眼でも確認できた. ドリップ近傍 (ドリップ位置から 5cm) においても, 基肥区での EC は無機および有機養液土耕区に比べて高く, 根系へのストレス負荷が大きかった. 基肥区で集積していた主要な塩類は, ドリップ近傍のカチオンではカルシウム, アニオンでは硫酸イオンであった (表 4-8). 基肥区のドリップ周辺では, 表層における硝酸イオンの集積が顕著であった. この部分では根量が減少しているため, 硝酸イオンが存在しても吸収できない状態にあったものと推察された. 無機養液区では残留イオンそのものの量は少なかったが, 10cm 地点の表層における硝酸イオンおよびカルシウム, ナトリウムイオンの割合が増加していた. 有機養液区は全層を通して, イオンの総量が少ないだけでなく, 割合の変動が少なく, イオン環境としては, ストレスが最も小さく保たれていたと考えられた.

土壌水分に関しては, 含水率 10%前後に保たれていたが (図 4-22B), 基肥区において, 根系が比較的よく発達していた下層で減少する傾向があった. また, 土壌硬度は有機養液区および基肥区で, 無機養液区に比べ高く

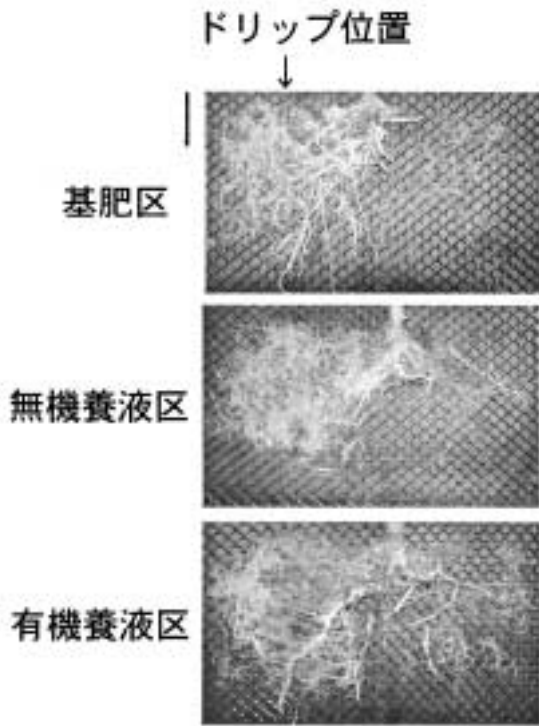
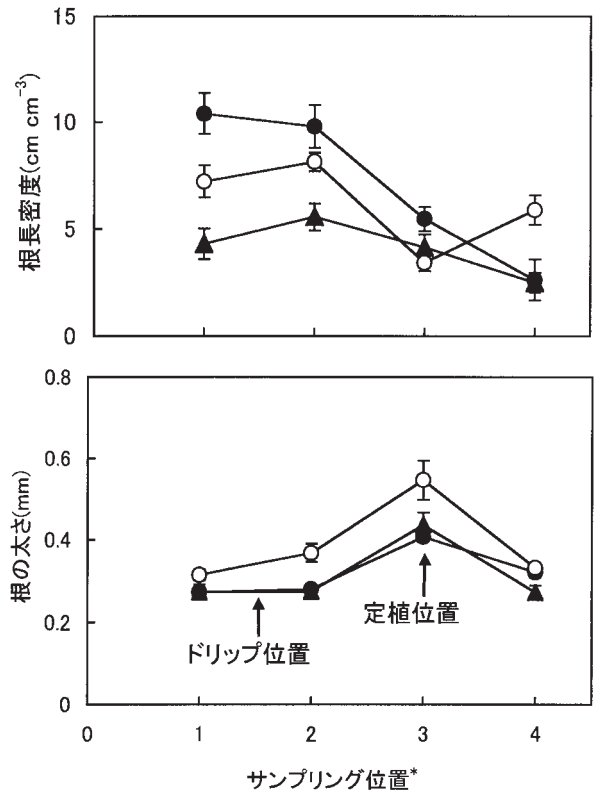


図4-19 養液土耕法が根系形態に与える影響
縦棒は5cm

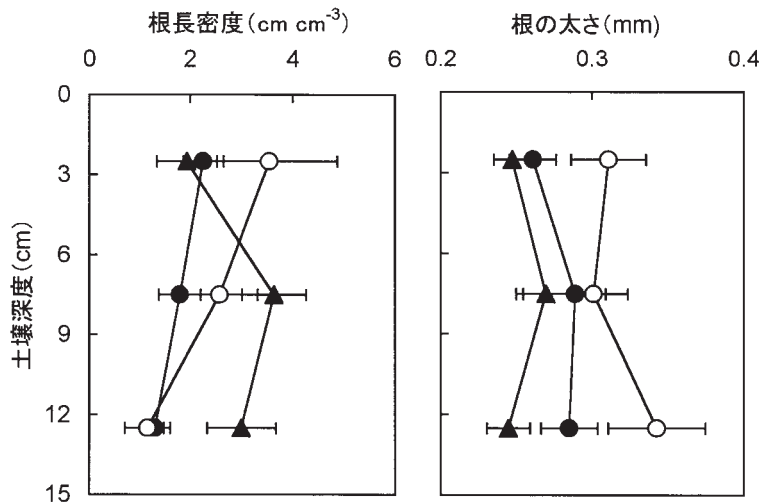


▲:基肥区, ●:無機養液区, ○:有機養液区

図4-20 養液土耕法が根の水平分布と太さに与える影響

3株の平均値, 縦棒は標準誤差を示す.

*サンプリング位置については, 図4-19のようにモノリス法で採取した根系について, 縦に4分割し測定した.



▲:基肥区, ●:無機養液区, ○:有機養液区

図4-21 養液土耕法が根の垂直分布と太さに与える影響
4株の平均値, 横棒は標準誤差を示す.

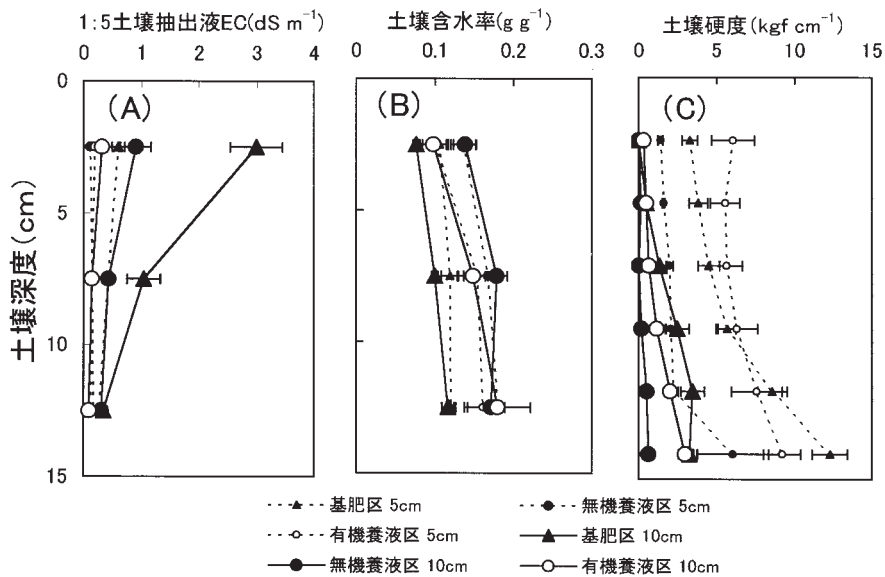


図4-22 養液土耕法が土壌のEC (A), 含水率 (B), 土壌硬度 (C) の垂直分布に与える影響
4地点の平均値。横棒は標準誤差を示す。

なっていた。有機養液区における硬度上昇の原因としては、CSLに含まれるデンプン等の多糖類などが土壌の固結化を生じさせたことが原因と考えられた。圧密な土壌では根が太くなることが報告されている(IIJIMA and KONO 1991)。本実験の場合の土壌硬度は、 $5\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-1}$ 程度であり、根の肥厚化を誘発するレベルに至っていないと考えられた。同じ土壌硬度でも基肥区では、根の肥厚が認められなかったことから、図4-20および21に認められるような根の肥厚は、未熟有機物液肥施用に対する反応と考えられた。

以上見てきた土壌の諸性質のうち、出液速度に大きく関与しているのは、イオンストレスであり、根圏の浸透圧が高まることにより給水が阻害されている可能性が示唆された(図4-22A)。

実際の栽培面では、尻腐れ果発生を抑制するために、果実への塩化カルシウムの散布などが行われているが、管理を容易にするためには、根圏環境を改善しカルシウム吸収を高めるといった抜本的な対策が求められている。無機および有機養液土耕法は、ドリップ近傍への根の集積により、効率の良い養分吸収を達成するとともに、少量ずつ肥料成分を添加することにより根圏のイオンストレスを軽減することにより、尻腐れ果を抑制する栽培法として有望であると考えられた。

3 養液土耕栽培が土壌の生物性に与える影響

a 緒言

前節で、有機養液土耕は現場レベルでのトマト栽培へ

の適用が可能と考えられた。このような有機養液土耕が有効に機能した背景として、土壌微生物と土壌酵素が活発に働いたことが推定された。そこで、土壌における微生物および土壌酵素活性を測定し、慣行の土耕栽培および無機養液土耕と比較し、有機養液土耕が、土壌に与える影響を生物性の面から明らかにしようとした。

特に、CSLの窒素はそのほとんどが有機態であるため、植物が吸収利用するためには無機化される必要がある。これらのプロセスに関与する微生物動態および土壌酵素活性を明らかにすることは、有機養液土耕における物質代謝を考える上で重要であるが、現在まで報告例はない。

本節では、一般に有機物を基質として増殖する好気性細菌と、アンモニアや、亜硝酸を基質として利用する硝化菌の動態を測定した。また、土壌酵素に関しては、CSLに含まれている有機物として、タンパク質およびペプチド、多糖類、フィチン酸が考えられたため、それぞれの分解に関与する土壌酵素として、プロテアーゼ(タンパク質分解酵素)、 α -グルコシダーゼ、 β -グルコシダーゼ(多糖類分解酵素)、ホスファターゼ(フィチン酸など有機態リン酸分解酵素)を想定し、それぞれの活性を測定した。

b 材料および方法

1) 土壌の微生物数と酵素活性の測定

土壌試料は、前節で用いた栽培土壌を用いて行った。栽培期間中、5月25日、6月15日および7月7日の3回採取した。根を傷めないように、株元から15cm離れ

た地点で表層 8cm までの部分を採取した。なお、それぞれの採取時には採取場所を変えた。栽培終了時のサンプリングは、ドリップから 5cm 離れた地点（ドリップ近傍）と 10cm 離れた地点（ドリップ周辺）でそれぞれ深さ 15cm まで行った（図 4-8）。

2) 細菌および硝化菌数の測定

細菌数の測定は、YG 培地を用いた希釈平板法で行った（加藤 1992）。アンモニア酸化菌については、培地中のアンモニア態窒素からの亜硝酸・硝酸態窒素の生成の有無を、また、亜硝酸酸化菌については、培地中の亜硝酸の消失の有無をそれぞれ判定し、MPN 法により測定した（木村 1992）。

3) 土壌酵素活性および可溶性タンパク質の測定

2mm のふるいを通した生土を用いて各酵素の活性を測定した（早野 1992a）。プロテアーゼ活性は、合成ペプチドであるベンジルオキシカルボニルフェニルアラニルロイシン（ZFL）を用い、ロイシンの生成量から測定した。 α および β -グルコシダーゼ活性は、p-ニトロフェニル- α -グルコシド（PNG）および、p-ニトロフェニル- β -グルコシドを用い、p-ニトロフェノールの生成量から測定した。ホスファターゼ活性は、p-ニトロフェニルリン酸ナトリウム（PNP）を用い、p-ニトロフェノールの生成量から測定した。

可溶性タンパク質の抽出は、0.1M リン酸緩衝液（pH7.0）を用いて行い（早野 1992b）、Bradford 法により牛血清アルブミン（BSA）をスタンダードにして測定した（奥村 1996）。

4) 土壌の化学性および腐植形成

土壌試料は風乾後、1mm のふるいを通し、分析に供した。pH と EC は、1:5（乾土：水）土壌懸濁液について測定した。有機物含量は燃焼消失法により求めた（中村ら 1978）。腐植形成については、土壌 1g に 0.5% 水酸化ナトリウムを 5ml 添加し、1 時間振とう後、遠心（15000g×15min）し、上清を 3 倍希釈して試料とした。この試料液について紫外可視吸光度計（U-3010、日立製作所）を用いてスペクトル分析を行い、腐植形成の指標になる指数を吸光度から計算した（本名・山本 1992）。

c 結果および考察

前節に示したように、有機養液区は無機養液区および基肥区と同等の収量が得られた。この結果は、CSL 中

の窒素の約 9 割を占める有機態窒素が高い割合で無機化し、利用されたことを示唆すると考えられる。なお、別に行った室内インキュベーション実験では、見かけ上、CSL 添加区では全窒素の約 80% が 1 週間で無機化する結果が得られている（図 4-1）。

このような速やかな窒素代謝を裏付けるひとつの要因は、図 4-23 に示す栽培期間中における細菌数の増加である。全体的には乾土 1g 当たり $10^7 \sim 10^8$ 個レベルで推移したが、有機養液区では、栽培期間を通じて、基肥区および無機養液区に比べ高く推移した。最も多数となった 28 日目の時点では定植時に比べ 10 倍程度の増加が認

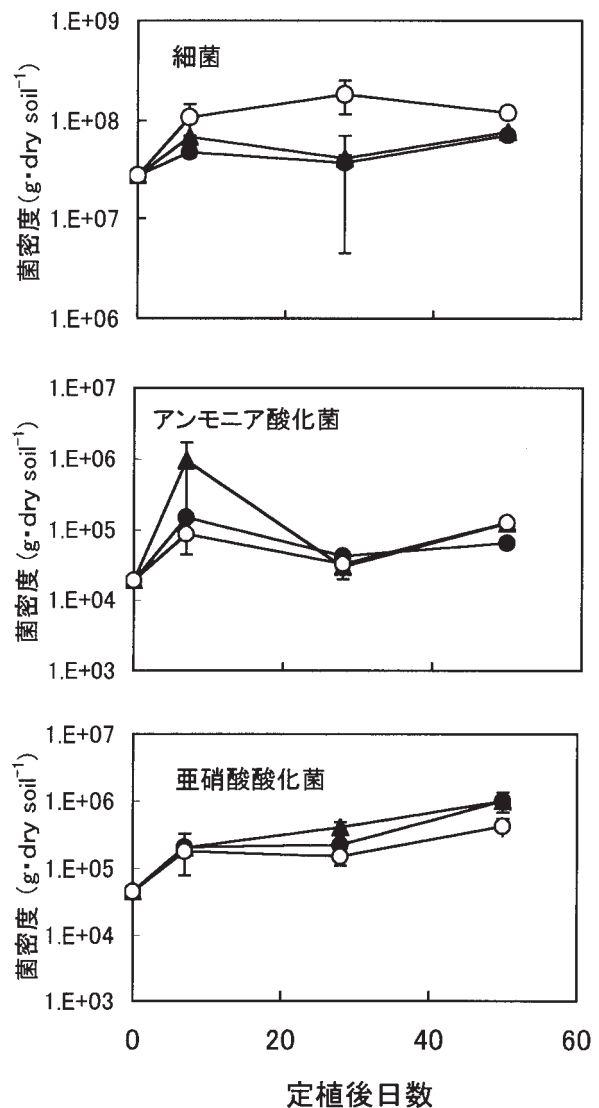


図 4-23 トマト定植後の土壌中の全菌、アンモニア酸化菌および亜硝酸酸化菌密度の推移
▲:基肥区, ●:無機養液区, ○:有機養液区
株間からサンプリングした土壌を用いた。
2 サンプルの平均値で、縦棒は標準誤差を示す。

められた。このように増殖したヘテロトロフにより有機液肥の分解・無機化が円滑化したと考えられる。アンモニア酸化菌、亜硝酸酸化菌については乾土 1g 当たり $10^4 \sim 10^5$ レベルで推移した。アンモニア酸化菌は、定植後 7 日目に基肥区での増加が認められたものの、全体的には処理区間で顕著な差は認められなかった。亜硝酸酸化菌については、栽培後期にかけて徐々に増加する傾向にあったが、処理区間の差は認められなかった。

栽培終了時の土壌における微生物数を図 4-24 に示す。有機養液区のドリップ近傍では細菌数が他の 2 区に比べて 10 倍程度多かった。栽培中の株元から 15cm 離れた土壌では、このような細菌数の差は栽培後期に向けて少なくなる傾向にあったが、これは、サンプリング地点がドリップ位置から離れていたためであり、有機養液区のドリップ近傍では栽培期間を通じて菌数が高いレベルに維持されていたと考えられる。

硝化菌に関しては、ドリップ近傍と周辺においてこのような顕著な差異は、認められなかったが、有機養液区において、他の 2 区と比較してアンモニア酸化菌は多く、

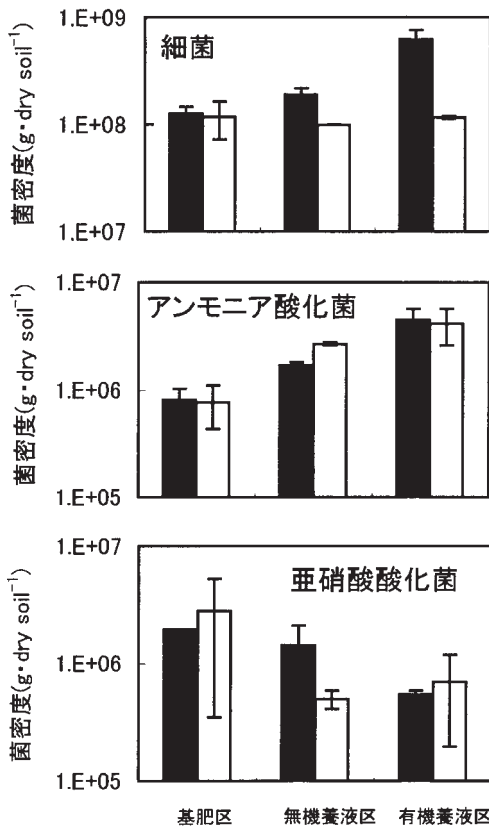


図 4-24 ドリップ近傍およびその周辺における細菌密度と硝化菌密度

ドリップ位置から 5cm 離れた部位:ドリップ近傍 (■)
 ドリップ位置から 10cm 離れた部位:ドリップ周辺 (□)
 2 サンプルの平均値で、縦棒は標準誤差を示す。

亜硝酸酸化菌は少ないという傾向が認められた。これは、栽培中の 50 日目 (図 4-23) と同様の結果であった。周辺部でのアンモニア酸化菌の多かったのは、基質となるアンモニウムイオンが周辺部にも供給されていたためと考えられ、アンモニア酸化菌の増殖により、相対的に亜硝酸酸化菌数が抑えられる傾向にあったと考えられた。

また、これらアンモニア酸化菌と亜硝酸酸化菌数は、加藤らの報告 (1984) と同レベルであり、栽培後の土壌においても亜硝酸の集積は認められず、両菌数は活性の均衡する範囲内であったと考えられた。

各種酵素活性の測定結果を図 4-25 に示す。いずれの酵素活性も有機養液区のドリップ近傍で最も高かった。

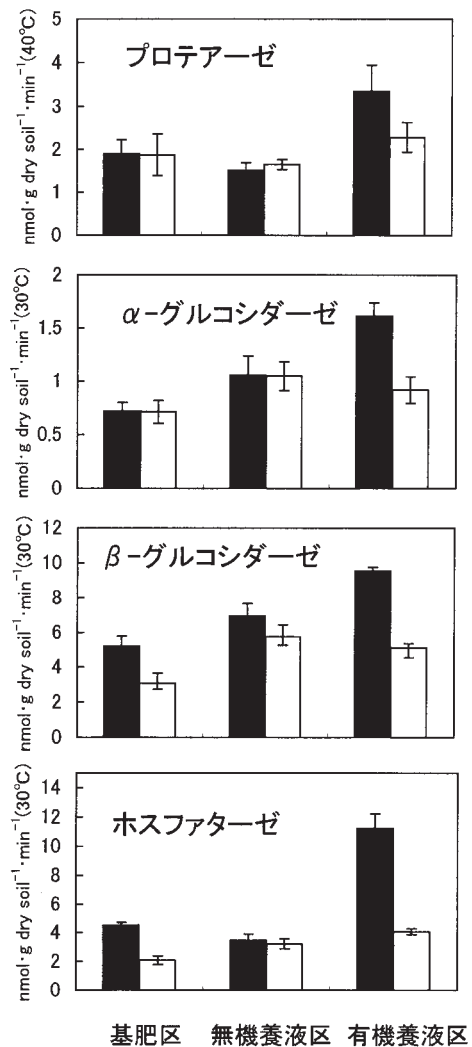


図 4-25 ドリップ近傍およびその周辺における土壌酵素活性

ドリップ位置から 5cm 離れた部位:ドリップ近傍 (■)
 ドリップ位置から 10cm 離れた部位:ドリップ周辺 (□)
 それぞれ深さ 15cm までの土壌を用いた。
 4 サンプルの平均値で、縦棒は標準誤差を示す。

有機物の施用により土壤酵素活性が増加する報告は幾つかあり（早野 1978, 大村ら 1985, 山田・沖野 1989), 今回の結果と一致する。

CSLに含まれていると考えられる有機物として、タンパク質およびペプチド, 多糖類, フィチン酸が考えられたため, それぞれに関連する土壤酵素活性を測定した。CSLに含まれる窒素のうち約6割がタンパク質またはペプチド態として存在するため, それらを分解するためのプロテアーゼ活性が有機養液区で高まっていたと考えられる。また, CSLに含まれるデンプン等を分解するために誘導されたと考えられる α -グルコシダーゼ活性も有機養液区で増加していた。同じくCSL中に残さとして混入していたと考えられるセルロース等を分解するために β -グルコシダーゼの活性も有機養液区で増大したと考えられた。同じグルコシダーゼ中では β -グルコシダーゼ活性が数倍高くなるという傾向があり, これは, 東田らの報告(1996)と一致していた。

有機リンの分解に関しては, 核酸やリン脂質が基質となるほか, 穀粒の主要なリン酸貯蔵形態であるフィチン酸が基質として作用したと考えられた(清水 1998)。フィチン酸は基質として分解され難いものであるが(早野 1997), トマトが正常に生育したことからも, 供給したフィチン酸のかなりの部分がホスファターゼにより分解され有効に利用されたと考えられた。その他, CSLの分解により生じた有機酸で土壤中のリン酸が可溶化した可能性もあり, さらなる検討が必要である。

それぞれの処理区で可溶性の粗タンパク量を測定したところ, 有機養液区のドリップ近傍で多くなり, 土壤酵素活性の傾向と一致していた(図4-26)。しかし, 量的には, 大村らの報告(1985)の10分の1程度であり, 全体的な活性の低さは土壤酵素量そのものが低いことに由来する可能性が考えられた。

また, 異なる地域の土壤酵素活性を測定比較した報告(金澤 1980)によると, 今回の実験に使用したのと同じ土性である安城市(愛知県)の黄色土は, 他の会津市(福島県)のグライ土, 静岡県灰色低地土に比べ, 全体的に酵素活性が低い傾向にあった。土壤酵素活性は, 気象および土壤立地条件ないし肥培管理の結果, 集積した土壤有機物に規定されると考えられ, 今回の測定値が全体的に低かったのは, 土壤特性も一因と考えられる。

土壤酵素活性に関して総括すると, 全体的に既報値より低い傾向にあったが, 各酵素の活性は有機液肥の点滴部分で顕著に増加したと言える。

栽培後の土壤について, EC, 有機物含量および腐植

の特性を測定した(表4-9)。塩類の集積は基肥区で顕著であり, 過剰に施肥されがちな硫酸イオンや, 吸収されずに残った硝酸イオンが集積しているものと考えられた。有機養液区ではドリップ近傍および周辺でのECは同じレベルで低く保たれていた。有機養液区で他の2区に比べ, pHが高かったのは, タンパク質の分解に伴うアンモニウムイオンの影響が考えられた。

有機物含量については, 有機養液区での特異的な集積は認められず, ドリップ近傍と周辺にかかわらず, 基肥区と同等のレベルであった。腐植の形成状態(熊田 1977)を示す $\Delta \log$, MI(小さいほど腐植化が進行している), PI(大きいほど緑がかったP型腐植が集積している), CD(大きいほど腐植化が進行している)のいずれの値においても, 栽培により原土よりは腐植化が進行していることが示されたが, 区間での顕著な差異は認められなかった。

有機養液区で細菌数の増加や土壤酵素の活性化は認められたものの, 土壤有機物や腐植物質の集積は認められなかった。これは, CSLが易分解性であり, 添加した有機物が滞ることなく無機化された結果と考えられた。実際添加したCSL量を計算すると, 10aあたり乾物で1.24トンとなり, 通常の堆肥施用レベルより少なかった。

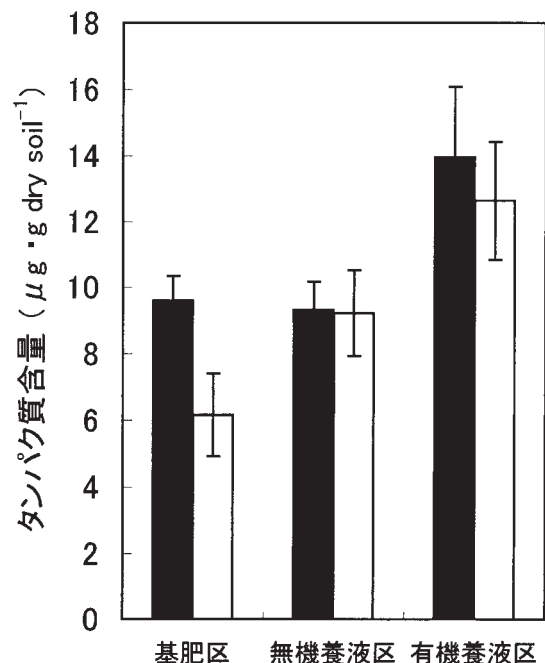


図4-26 養液土耕が土壤中の可溶性タンパク質含量に与える影響

ドリップ位置から5cm離れた部位:ドリップ近傍 (■)
ドリップ位置から10cm離れた部位:ドリップ周辺 (□)
それぞれ深さ15cmまでの土壤を用いた。
4サンプルの平均値で, 縦棒は標準誤差を示す。

表 4-9 養液土耕が土壌の化学性および腐植形成に伴う吸光特性に与える影響

	EC (dS.m ⁻¹)	pH	^z 有機物含量 (%)	^y Δlog	^x MI	^w PI	^v CD
原土	0.03 ± 0.00	6.3 ± 0.2	2.2 ± 0.1	1.13 ± 0.01	2.48 ± 0.01	0.93 ± 0.01	0.26 ± 0.00
^u 原土+パーク	0.05 ± 0.00	6.6 ± 0.0	3.2 ± 0.1	1.08 ± 0.01	2.30 ± 0.02	0.90 ± 0.01	0.38 ± 0.00
基肥区	近傍 ^T	0.28 ± 0.05	6.0 ± 0.1	7.2 ± 0.4	1.04 ± 0.01	2.16 ± 0.01	0.89 ± 0.00
	周辺 ^S	1.38 ± 0.16	5.9 ± 0.1	6.7 ± 0.2	1.16 ± 0.01	2.36 ± 0.02	0.87 ± 0.01
無機養液区	近傍	0.17 ± 0.01	5.5 ± 0.0	5.9 ± 0.5	0.97 ± 0.00	2.08 ± 0.01	0.90 ± 0.00
	周辺	0.43 ± 0.06	6.2 ± 0.0	6.0 ± 0.4	1.09 ± 0.01	2.25 ± 0.02	0.87 ± 0.00
有機養液区	近傍	0.17 ± 0.05	6.5 ± 0.2	6.8 ± 0.3	1.03 ± 0.01	2.16 ± 0.02	0.89 ± 0.01
	周辺	0.16 ± 0.05	6.7 ± 0.1	6.8 ± 0.3	1.05 ± 0.01	2.16 ± 0.02	0.88 ± 0.01

z: 燃焼消法により求めた値, y: Δlog (K₄₀₀・K₆₀₀⁻¹), x: Melanic Index = K₄₅₀・K₅₂₀⁻¹, w: Pg Index = K₆₁₀・K₆₀₀⁻¹,
v: Color density = K₆₀₀・g・dry soil⁻¹
n=4, 平均値 ± 標準誤差. 図 4-8 の栽培後土壌採取位置参照, T: ドリップから 5cm を近傍,
S: ドリップから 10cm を周辺とした.

た(上原 1999).

有機養液土耕は、通常は無機肥料の代わりに、有機性の液肥を連続的に土壌に加えて作物を栽培する方法である。CSL の成分は有機物がほとんどであるので、作物が吸収するためには、土壌微生物が働いてこれら有機物を分解、無機化する必要がある。この試験の結果、CSL 養液土耕では、土壌微生物数が増加しており、また、有機物分解に関わる酵素活性が増大していることが示され、有機物の集積がなかった事実とともに、微生物による CSL の分解無機化、それについての作物吸収が滞りなく行われたためと考えられた。詳細な点に関してはさらなる検討が必要であるが、これらの知見は有機養液土耕システムが土壌の生物性をより積極的に利用する栽培法であることを裏付けたものであると言える。

V 総合考察

1 施設生産における土壌ストレス緩和技術の位置づけ

本研究は、施設生産土壌における化学的ストレスの実態を解析し、それに基づき、施肥の質的もしくは量的な制御を介した適切な根系の管理法を提示し、それらが地上部の生産性に与える影響を明らかにした。

緒論でも触れたが、野菜生産において大きな問題である連作障害は、その要因の約半数が土壌病害に由来するものと言われている。施設生産特有の塩類集積は、それ自体問題であるが、土壌病害の補因ともなっている。したがって、肥培管理を通して根域の土壌環境条件を良好に維持する技術の開発が施設生産では特に求められている。

根域の管理について考えてみると、露地の野菜生産で

は、耕うんにより、作土層の物理性を改善し、なるべく広い根域を形成させることが、高収量へとつながるものと考えられてきた。根系が広がることによって、施用された養分の回収率も上昇し、また、根域が広いことでストレスが回避されるとも言われている。根域を拡大することによって、このようなメリットがある反面、下層に生息している土壌病害に罹病しやすくなり、また、下層に達した根が地下水を吸水し、思うような灌水制御ができない場合も生じてくる。

施設生産では、このような露地の根域管理に関するデメリットを克服し、高品質や高収量を達成するために、集約的な栽培管理を目指している。つまり、施設生産における栽培技術は、露地栽培で認められる根圏環境における制御困難な因子をできるだけ減らし、管理し易くする方向で組み立てられてきた。すなわち、施設生産では根域を狭め高度に管理するという方向に技術開発が行われてきた。

具体的には、プラスチックの容器や根を通さない遮根シートなどで、作土層と下層土を隔離する技術が挙げられる。培地の量が少なくなることで、消毒や施肥等の管理が容易になるなどのメリットがあり、今後、隔離床を利用することを前提とした、より集約的な施肥技術が導入されてくると考えられる。

本研究で取り上げた、緩効性肥料の施用ないし養液土耕法は、このような、少量化する根圏の環境におけるストレスを制御する有効な技術であり、これらの技術による根系の発育・機能の改善を介して野菜の生産性が向上することが明らかとなり、今後の技術開発の方向が示されたと言える。

2 施設生産土壌の化学性

II章では、施設生産土壌の特性を調査するために7県から異なる栽培履歴を有する施設土壌を採取し、その化学分析を行い、施設生産土壌の化学性の現状を調査した。その結果、施設生産土壌は、露地畑に比べ、約7倍の塩類を集積していることが判明した(図2-1)。一方で、土壌の酸性化は認められなかった。これらの結果は、連作障害の分析を行った聞き取り報告(図1-3)においても、施設生産の問題として、塩類集積を挙げるものは露地に比べ約4倍多かったが、酸性化の問題は施設で特に問題となっていなかった点とも一致する。土壌の酸性化の問題は、塩基の添加量が充分でなかった時代に多く見られたが、現在では石灰等の十分な投入がなされており、pHがむしろアルカリ性に移行する傾向がある。ECに対して、pHをプロットしてみると、ECが 1.0dSm^{-1} を超える場合は土壌がアルカリ化する傾向にあった(図2-2)。構成する塩類を解析したところ、アニオンでは報告例の多い硝酸イオンの他、硫酸イオンが集積している場合もあった(図2-3)。カチオンでは、特にカルシウムが集積していた。硝酸カルシウムより弱い酸性を示す硫酸カルシウムの集積割合が増えたこと、また、弱酸である炭酸との塩類の集積が、土壌の酸性化を抑制しているものと考えられた。

集積する塩類に関しては、全国規模で、かなりの高濃度で硫酸イオンが検出されることが明らかとなった。作後土壌のECを測定して、それにより次作の施肥設計を立てることは、ECの測定が比較的容易なことからしばしば行われているが、近年ECと硝酸イオン濃度が一致しない土壌も多く認められている(瀧 1992)。その原因は硫酸イオンの集積であると考えられている。施設生産が盛んになり始めた1970年代には、施設土壌の分析が精力的に行われ、当時、「作後土壌のECは硝酸イオン濃度との相関が高い」との報告がなされた。そのため残留しているイオンは硝酸イオンと考えられるようになり、それ以降、1980年代に「作後のECを基準に、次作の施用窒素を決めると、生育が悪くなる」という現場レベルでの現象が報告されるまで、ECの中身は硝酸イオンであるという考えはかなり有力であった。その後、荒垣ら(1986)や瀧ら(1990)がECを構成するイオンの中で硫酸イオンも集積していることを指摘し、より詳細な検討が始まったと言える。

今回、全国の様々な土壌に関しても、硫酸イオンが集積しているという傾向の一致が示された。瀧(1992)は、現場での過リン酸石灰の施用量、または、牛糞堆肥や稲

わらの連用と硫酸イオンの集積量との間に関連があることを見出し、集積する硫酸イオンの由来が、過リン酸石灰製造過程で添加される硫酸や有機物資材中の硫黄によるものと推察した。施設においては、過剰な施肥が行われる傾向にあり、化学肥料はもとより、有機物の施用が硫酸根の集積をもたらしているものと考えられ、硫酸イオンの面からも、無機・有機質肥料の施用量を検討する必要があることが明らかとなった。

3 低硫酸根緩効性肥料(LSR)によるイオンストレスの制御

III章では、II章の施設生産土壌における過剰塩類の集積および硫酸イオンの過剰集積の状況を踏まえて、植物の必要量以上に施肥される傾向にある硫酸イオンを少なくした低硫酸根緩効性肥料(Low-sulfate slow-release fertilizer: LSR)を用い、CDU(CDU化成S222)との比較試験を行った。

最初に、それぞれの肥料の施用限界量を見極める目的で、過剰施肥条件下での生育および根系の発達を調査した。乾土1kg当たり 1.5gN の割合で施肥した場合、CDU区のトマト根系は定植時のセル苗の範囲から出ることができず、極度のストレスが根系に負荷されたと考えられた(図3-2)。全体的に見て、LSR区においても過剰に施肥した場合、根系発達が抑制されていたが、その抑制度合いはCDU区に比べ小さかった。CDU区とLSR区の施肥濃度に対するトマトの初期生育反応では、同じ窒素施用量でもLSR区の方がCDU区に比べ、地上部・地下部両方の生育抑制程度が緩和されていた(図3-3)。地上部および地下部の生育抑制の程度はそれぞれの施肥レベルで、CDUとLSR処理区間の差は小さく、S/R比には、顕著な差は認められなかった。

また、含水率を20%と仮定し、実験で求めた割合で肥料溶液が溶出したと仮定して、そのECを横軸にとり、縦軸に全生育量をとったところ、CDUとLSRは同じ曲線上にあると考えられた。つまり、生育はCDUやLSRといった肥料の種類に関係無く培地の塩類濃度の増加に伴い減少していた。そのため、生育抑制は塩類過剰が大きな原因であると考えられた(図3-4)。トマトにおいて生育が半減する塩類濃度は、 NaCl で 4500ppm の濃度とされており(大沢1960)、この濃度は、ECに換算すると約 8dSm^{-1} である(亀和田1997)。本実験で得られたEC値は、これとほぼ同様の値と考えられ、土壌溶液のイオンに由来するECが生育低下の主要因と考えられた。

一方で、同じ横軸にたいして、縦軸に S/R 比をプロットしたところ、CDU と LSR は異なる曲線になった。すなわち、CDU 区の方が塩類濃度増加にともなう地上部生育の抑制が LSR 区に比べ強く生じ、塩類濃度上昇に伴い S/R 比がより低くなった (図 3-4)。

これは、同じ塩類障害を受けた場合でも、CDU の方が地下部により多くの乾物を分配するように働いたことを示している。塩類過剰 (EHRET and HO 1986) はもとより、他のストレス、例えば物理的的刺激 (PERTERSON et al. 1991) や、水分欠乏 (SHARP 1996) などのストレスを受けた場合でも S/R 比が低下することを示す報告がある。本実験の場合 CDU の H 区では、ほとんど生育していないことから、この区は例外として除いたとしても、塩ストレスの増大により S/R 比が増加しており、過剰施肥に対する反応は他のストレスに対する反応とは異なる可能性が考えられた。また、同じ塩類ストレスで、同じように乾物生産の阻害を受けた場合でも、CDU 区で LSR 区に比べ S/R 比が低下することから、CDU 区では塩類ストレス以外のストレス、例えばイオンのアンバランスに伴うストレス等が作用していると推察した。

MOHAMMADら(1998)は、同じ塩ストレスが負荷された場合でも、他の栄養条件が良い場合は、地上部への乾物分配が根へのそれよりも優先されることを示した。本実験においても、CDU 区においては、高塩類ストレス以外の他のストレスが、根への乾物分配を促進した一方、イオンの不均衡が少なく栄養状態が相対的に良いと考えられる LSR 区では、地上部への分配が促進されたと考えられた。

次に、それぞれの肥料がトマト生育に与える影響を、実際の栽培に近い条件で長期間に渡って調査した。年 2 作 3 年間に渡って連作を行った結果、塩類集積は、LSR 施肥により低下する傾向にあった。特に追肥を控えなかった 1996 年早熟栽培では、塩類集積が進んでおり、土壌の深さ別に測定した場合でも、LSR 区は CDU 区に比べ土壌 pH は中性付近になり、EC は低くなっていた (図 3-11)。施肥を控えた 1998 年抑制栽培後も、集積塩類は少ないが、ほぼ同様の傾向が認められた。これらの土壌について分析した結果、CDU 区で各種のイオンが多くなる傾向が認められた。残留しているイオンとしては、アニオンでは、リン酸、硫酸イオンが多く、カチオンとしては、カルシウムとマグネシウムが多かった (図 3-12)。1998 年の抑制栽培では、施肥量を控えたため、全体として残留イオンが低くなったが、このような場合で

も CDU 区の方が LSR 区に比べ硫酸イオンが多くなる傾向があった。CDU の残留イオンに占める、硫酸イオン割合が高くなる傾向は、現場での傾向と一致しており、このようなイオンの不均衡を LSR 施肥により改善できる可能性が示唆された。

この連作試験において、収量は施肥および管理の仕方で大きく変動していたが、CDU 区と LSR 区の処理区間の差は概ね認められず、6 作目でようやく LSR 区の方が多くなる程度の差であった (図 3-13)。尻腐れ果発生率は、常に CDU 区の方が高い傾向が認められたが、最終年度まで有意差はなかった。川原(1985)が、キュウリを用いて、肥料形態を変えた連用試験を行っている。硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸カリウムを用いた硫酸系列、硝酸アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸カリウムを用いた混合系列、硝酸アンモニウム、リン酸アンモニウム、硝酸カリウムを用いた無硫酸系列の 3 系列で比較したところ、初年度では収量の差は認められなかったが、3 年目で、無硫酸系列の収量が他の処理区に比べ優ったという結果を得ている。このときの跡地土壌の EC も硫酸系列で高かったという結果を明らかにしている。この結果は、今回の連作試験の結果とも共通する部分があり、本研究でも硫酸イオンの集積により土壌の EC が上昇し、収量が低下した可能性が示唆された。

これらの土壌環境の変化は、例えば、CDU 区で萎れが認められたとか、葉色が低下したといったように、地上部の生育状態に明瞭に症状として現れることはなかった。一方、土壌環境に反応して変化したと考えられる指標として、出液速度が考えられた。出液速度は、外液と木部液の浸透濃度差に依存するほか、根の代謝に依存している (加藤 1998) ため、根の活性を評価する指標となり得る。また、実際の現場で、出液速度を根の活性の指標として用いようとする試みが、森田 (2000) によりなされている。

本研究での出液速度は、1997 年と 1998 年で大きく異なった。しかし LSR 区の方が高くなることは一致した傾向であった (図 3-14)。また、根箱における長期栽培試験でも、施肥濃度が高くなるにつれ、LSR 区の方が CDU 区に比べ出液速度が高くなった (図 3-10)。中濃度施肥した M 区では、双方の根量は同程度であった。『出液速度 = 根量 × 単位根量当たりの出液速度』と考え、単位根長当たりの出液速度を根の活性と想定すると (森田 2000)、このとき M 区の LSR 区では CDU 区に比べ根の活性が高まったことになる。高濃度施肥した H 区では、根長にも差異が認められたので、この場合

CDU区でLSR区に比べ出液量が減少したのは、根量の低下と、根の活性の低下との相互が影響していたと考えられた。

このような出液速度の差異が、作物の生産性に与える影響も検討されている。SONGMUANGら(1997)は、タイにおいて異なる土壌・施肥条件で栽培した水稻について、登熟期における出液速度を測定した結果、収量との間に高い正の相関を認めている。一方、本研究においても、図3-15に示すように、圃場試験で得られた結果を基に、尻腐れ果実を差し引いた可販果収量に対して、出液速度をプロットしたところ、イネと同様に、両者の間に高い正の相関関係が認められた。出液速度の増加は、トマトに対しては、収量そのものの増加と、尻腐れ果率の減少といった果実への栄養状態の改善を介して、可販果収量の増加に寄与する可能性が示された。

LSRおよびCDUが根系形態に与える影響も、収量同様に異なるものであり、高濃度施肥した場合でもLSRはCDUに比べ根系発達が維持されていた。短期および長期の根箱実験によっても同様な結果であったが、実験系により異なる結果が得られた。つまり、大型根箱のH区の施肥濃度は、施肥層の部分では、 $0.59\text{g N kg}^{-1}\text{dry soil}$ であり、小型根箱の最高濃度である $1.5\text{g N kg}^{-1}\text{dry soil}$ よりは低く設定されていたため、根系もより多く発達できたと考えられる。しかし、図3-4から考えると、 $0.59\text{g N kg}^{-1}\text{dry soil}$ の施肥濃度では、CDU区はLSR区の3分の1程度に生育が抑制されるはずである。実際の大型根箱のH区での総根長は、CDU区で $690 \pm 62\text{m}$ であり、LSR区の $806 \pm 22\text{m}$ に対して14%の減少に留まっていた。施肥層のみ(26.4cmまで)の根長を比べた場合でもCDU区とLSR区でそれぞれ、 $257 \pm 25\text{m}$ 、 $372 \pm 25\text{m}$ となり、31%の減少程度で留まっていたことになる。つまり、大型根箱で栽培した実験系の方が負荷されたイオンストレスの割には生育抑制が軽減されていたことになる。

このように実験系により異なる反応性を示した理由のひとつに、それぞれの処理における根系の分布の違いが考えられた。図3-7に示した図のH区における典型的な根系では、CDU区では1本の不定根が、高濃度に施肥された施肥層を突き抜けて下層に達し、そこで多くの側根を発達させていた。CDU区における根長の低下が小型根箱に比べ軽度であったのは、下層に伸びた根が、そこから水を吸収し、施肥層に位置する根系の機能を維持したためと考えられた。例えば、根を介した土壌間での水の移動は、Hydraulic liftとして多くの植物で認め

られているが、この現象がトマトでも認められており(DOWSON 1993)、本実験においても、下層から施肥層へ水が輸送され、施肥層の根に対するイオンストレスを緩和したものと推察された。

収量の結果を図3-9に示す。LSR区ではCDU区に比べ収量が同程度またはそれ以上あり、特にH区においてLSRの収量はCDUの約1.6倍になった。LSRは多量施肥された場合でも肥料としての効果が維持されたと言える。果実の糖度は、LSR区ではCDU区に比べ、L区では同程度、M区またはH区では低くなった。トマトにおいて根系にストレスが負荷された場合、収量が低下し、果実糖度が上昇する可能性があることが報告されている(EHRET and HO 1986)が、本実験の結果も同様であった。つまり、高濃度のCDU施用によって根が塩類過剰ストレスを受けて糖度が上昇したものと考えられた。根がストレスを受けた可能性は、図3-10に示す出液速度からも示唆される。すなわち、CDU区はLSR区に比べ、出液速度が同程度かそれ以下であり、特にH区においては、CDU区はLSR区に比べ39%減少した。

以上の結果から、LSRはCDUに比べ、過剰に施肥した場合でも根に与える塩類過剰などによるストレスは小さいと考えられ、栽培を通じて肥効を維持させることができたと考えられた(図5-1)。

環境汚染を軽減する施肥法として局所施肥などが検討されている(金田ら 1994)が、本実験は、このような施肥を想定して、株元への施肥量の上限を明らかにした。本実験では、粉碎した肥料を用いたため、通常の緩効性肥料以上のイオンストレスが負荷されたと考えられる。このためCDUでは、 $0.59\text{g N kg}^{-1}\text{dry soil}$ 以下に設定する必要がある。LSRでは $0.59\text{g N kg}^{-1}\text{dry soil}$ 程度まで施肥濃度を増加させることが可能であった。また、小型根箱の実験は、初期の根系発達が抑えられると、地上部発育が完全に阻害されることを示した(図3-2)。しかし、一方で、大型根箱の結果に見るように、過剰施肥によるストレスが作土層に負荷されたとしても、根が、イオン濃度が低く比較的ストレスの小さい層に達することができれば、その部分での根長を増加させることによって、植物全体としての生育を維持させることができると考えられた。つまり、通常では枯死するような高い浸透圧ストレスに曝されたとしても、他の根系部位が吸水できる土層に発達していた場合、そこからの吸水により、施肥層にある根の機能を維持し養分を吸収していたと考えられた。このように、根系がヘテロな土壌環境に発達することにより、補償作用により局所のストレスを最小

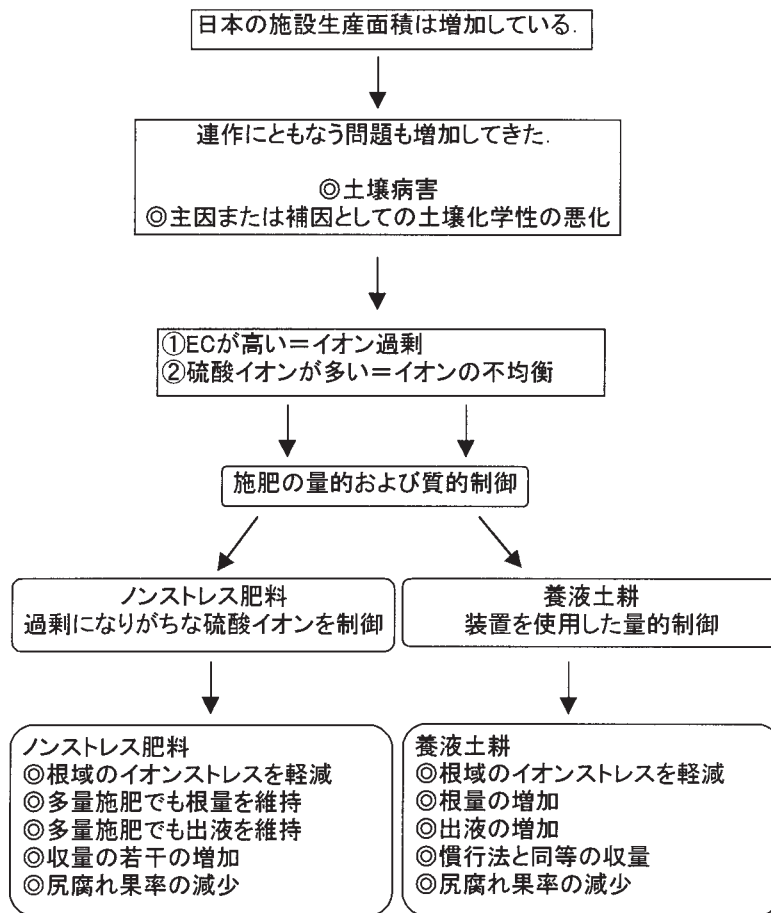


図5-1 施設生産土壌における化学ストレスとその緩和技術の効果

にできるように根系全体として機能している可能性が示唆された。

4 養液土耕によるイオンストレスの制御

次に、IV章では、量的な施肥制御により根圏環境を改善し、高収量、高品質の野菜生産を可能にする養液土耕の研究を行った。また、通常の養液土耕に加え、有機液肥の使用の可能性も検討した。

近年園芸分野で導入が進行しつつある養液土耕は、原液タンク中の濃厚な液肥を、灌水に定量的に送り込み、希釈しながら施肥を行う技術であり、海外では、野菜栽培への適用が多く試みられている。そこで、このシステムを用いて有機性の液肥を少量ずつ土壌に還元していくシステムを確立しようとした。

用いた液肥は、トウモロコシを原料とするコーン スターチ製造行程から生じる副産物であるコーン スティープ リカー (Corn Steep Liquor: CSL) であり、現在、主に、微生物培養用の基質や家畜飼料として用いられている。我が国では、年間15万トン余り生産され、新た

な用途が求められている。性状としては、粘稠性の高い褐色の液体であり、三要素とも3%程度含まれバランスが良いという特長がある。しかし、CSLはトウモロコシという単子葉植物由来であるため、カルシウム含量が低く野菜の肥料としては問題があった。この問題に対しては、同じく生物性の廃棄物であるかき殻石灰(セルカ)の基肥としての施用を考えた。我が国では、かき殻は年間10万トン余りが生じ、既に石灰肥料として用いられているが、需要の拡大が求められている。

最初に無機および有機液肥の施用がトマトの生育に与える影響を、特に根系に注目しつつ明らかにするために、根箱を用いた栽培実験を行った。その結果、CSLはトマトの根系発育に化学肥料とは異なる影響を与えることが明らかとなった。

その一つは根系分布に対する影響である。図4-4に示したように、根の深さは有機液肥区でもっとも浅く、次いで無機液肥区で浅く、基肥区では他の2区に比べ、より深い根系を形成した。また、養液土耕では、浅い根系を形成したが、実際に、安定同位体(重水)を用いた

吸水実験でも、これらの結果を支持する結果が得られた。すなわち、養液土耕では出液中の重水濃度が高く、全体の吸水において、表層の根に依存する割合が高かった。さらに有機液肥区が根系形態に与える影響の特徴として、CSL添加により根の肥大が認められた。この点に関してはさらに詳細な検討が必要である。太い根からはさらに高次の側根を発生する可能性があり、養分吸収を促進する可能性がある。

このような施肥による根系形態の変化は、栽培技術としての応用の可能性もある。例えば、キャベツなどでは地上部を強く支持する根系が必要とされている。このような根系分布や根の太さを制御する手法をキャベツ栽培に応用すれば、収穫の作業性の向上に寄与する可能性もある(吉岡ら1998)。また、根が肥大することにより、罹病性が減少する可能性があり(FUCONI et al. 1999)、今後、それぞれの可能性について検討する必要がある。

次に、栽培実験で養液土耕の特性を明らかにした。試験栽培は、ドレンベッドを用いて行い、灌水施肥装置には普及型の点滴灌漑装置を使用した。基本的には、CSLを点滴灌漑時に180倍程度に希釈し、1日1株当たり、窒素として平均140mg相当量を施用した。その結果CSLを唯一の3要素肥料源としてトマトの養液土耕を行うことが可能であった。このような有機養液土耕では低段の収量は低い傾向であったが、4段までの総収量では慣行の土耕および化学肥料を用いた養液土耕とほぼ同等となった(図4-14)。

ここで、有機養液土耕の概念および特徴を整理しておく。有機養液土耕は、土壌の有機物分解能を超えない程度少量ずつ有機性の液肥を土壌に還元することにより、作物の生育を制御する手法である。従来、有機物資材の利用に関しては、脱水や堆肥化といった時間やコストを必要とする行程が不可欠であると考えられてきたが、一連の研究により、希釈倍率、施用量、洗浄プログラム、点滴位置などを適切に定めることにより、未熟液体有機物の土壌還元が可能であることが明らかになった。従来の養液土耕では土壌特性を活かしているとはいっても、その物理性と化学性のみで留まっており、本研究で開発した有機養液土耕は、有機性の液肥を使用するため、土壌の生物性をも積極的に利用している点で画期的である(図5-2)。さらに、食品工場由来の廃棄物を利用する点から、環境浄化の概念も組み込んでいる。つまり、土壌の持つ物理的なる過、化学的な吸着、微生物や土壌酵素による生物的な分解能力を活かして、総合的に、有機物を分解浄化しようという概念を含んでおり、環境保全

型施設生産をさらに進めて、環境浄化型施設生産を目指した技術である(図5-2)。また、このような生産体系による生産物は、農薬を使わなければ有機農産物になりうるものであり、現在の消費者のニーズに答えることのできる栽培法でもある。

本研究で用いたシステムは、改正JAS法に照らしても肥培管理の面で有機栽培に相当する。一般に"有機栽培"は、"環境にやさしい栽培法"と捉えられがちである。また、「天然系だから環境にやさしい」と漠然と信じられている傾向があるが、その点は科学的に検証する必要がある。無機化学肥料であるか否か以上に、量的制御を視野に入れないければ環境にやさしい有機農業とは言えない。日本のような多雨な環境にあっては露地への過剰な有機物還元は環境汚染を引き起こすため、十分な施肥設計が不可欠である。いずれにしても、現在の有機性廃棄物の処理は、大量処理施設により推進されており、生産された有機質堆肥は、基肥として大量に土壌にすき込まれ栽培されている。このような一般的な有機農業に新たな考え方を導入することも有機養液土耕の開発の目的であった。また、巨大な堆肥化装置を必ずしも必要とせず、数リットルの土をそのままマイクロの堆肥化装置として利用するコンセプトは、新規性があると考えている。有機栽培と養液土耕は相反する技術ではなく、互いに補い合い、有機養液土耕として融合し、確立できると考えている。

このような、有機養液土耕が有効に機能した背景として、土壌微生物や土壌酵素が活発に働いたことが推定されたため、有機養液土耕が土壌の生物性に与える影響を明らかにすることを試みた。特に、CSLはその含まれる窒素の約9割が有機態の窒素であるため、植物が吸収利用するためには無機化される必要がある。このようなプロセスに関与する細菌数と土壌酵素活性(プロテアーゼ、 α -グルコシダーゼ、 β -グルコシダーゼ、フォスファターゼ)を測定した結果、慣行の化学肥料の全層基肥区と無機養液土耕区に比べ、有機養液土耕区では、明らかに細菌数が多く、土壌酵素活性が高かった(図4-25)。このような活発な代謝により、点滴で与えられた有機物が分解され、植物への無機態窒素の供給に貢献したと考えられた。

一方で、有機養液土耕では、未熟有機物を液肥として連続注入するため、土壌中に病原菌が存在していた場合、その増殖を促進させてしまう危険性がある。そのため、栽培前の土壌消毒は有機養液土耕には必須となる。また、CSLが植物に利用されるための無機化に必要な硝化菌

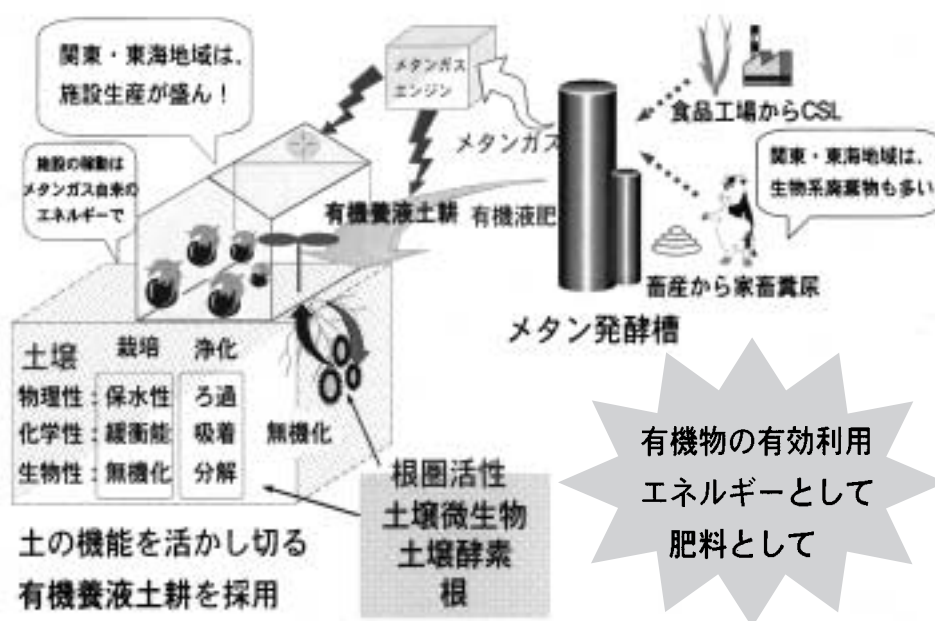


図 5-2 地域循環・環境浄化型施設生産

は、有用な菌として消毒後も土壌中に存在している必要がある。一般に行われる薬剤による土壌消毒は強力すぎて、病原菌も有用菌も同時に殺菌してしまうデメリットがあり、特に有機養液土耕には、窒素代謝の観点から薬剤による殺菌はそぐわないと考えられる。本システムでは、マイルドな殺菌法として、毎作後、蒸気消毒を行っている。スーパードレンベットは、120℃までの耐熱性を有するため、蒸気消毒が可能であった。蒸気消毒は、薬剤による消毒に比べマイルドな殺菌効果を示し、病原菌を中心に死滅させるものの、土壌1グラム当たり $10^5 \sim 10^6$ 個の細菌が残存する。また、窒素の無機化に必要な硝化菌も生存しており、その増殖も蒸気消毒後約10日で回復すると考えられている。隔離床にすることにより、土壌消毒はより確実なものとなるため、4連作を行った現在でも、土壌病害の発生は認められていない。また、硝化菌の働きも維持されているため、CSLの分解も速やかに行われ、有機養液土耕は通常の栽培と同等の収量を得るに至っている。

次に、これら養液土耕が根系に対するイオンストレスを軽減し、尻腐れ果を減少させた可能性について考察する。図4-15に、果実の尻腐れ果率を示した。それぞれの処理区において、第3果房までは尻腐れ果は生じなかったが、第4果房では、基肥区と有機養液区で尻腐れ果が生じた。図4-15に見られるように、基肥区では他の2

区に比べ尻腐れ果率が高かった。尻腐れ果発生の要因として、果実の低いカルシウム含有率が指摘されている。図4-16に示したように果実部のカルシウムに関しては、基肥区の第4果房の濃度が最も低くなっており、既往の結果(吉田ら1997)と一致していた。一方で、図4-17に示したように、葉部のカルシウムは、上位部ほど濃度が低いが、処理区間での差は認められなかった。カルシウムは移動し難い元素として知られており(佐藤ら1998)、本実験においても、葉中のカルシウム量と尻腐れ果の発生率とは相関が無かった。

図4-18に各処理区の出液速度を示した。尻腐れ果率の高かった基肥区に比べ、無機および有機の各養液土耕区では出液速度が速かった。出液中のイオン組成を表4-7に示した。基肥区においては、他の2区と比較してカリウム濃度は高かったものの、カルシウム、マグネシウムの濃度は低かった。基肥区においては、カルシウムおよびマグネシウムイオンの土壌中の濃度はむしろ他の処理区よりも高いにもかかわらず(表4-8)、それに対応した割合では、吸収されていなかった。この結果は、培地に大量のカルシウムがあっても必ずしも吸収されるわけではないとする、趙ら(1992)の報告と一致していた。

尻腐れ果との関連からカルシウムに着目すると、基肥区の出液中のカルシウム濃度は、有機養液区の95%、無機養液区の69%であったが、出液量そのものは、有

機養液区の7.6%、無機養液区の4.9%まで低下していた。このような出液は、日中の蒸散量と直接には関係しない。しかし、夜間など蒸散に依存しないカルシウムの地上部への移行量が、出液と同程度であると仮定すると、基肥区の移行量は有機養液区の7.2%、無機養液区の3.4%に低下していたことになる。果実における水分動態については、日中の蒸散が多いときは、果実は収縮し、水が流入する明け方から夜間にかけて肥大するとの報告(OHTA et al. 1997)がある。今回、処理区間で濃度差が認められた果実中のカルシウムは、その移動が蒸散流に依存しており、葉からの転流が少ない元素であること(佐藤ら1998)を考えると、夜間に出液量に相当する量だけ吸収された水が、特別な蒸散器官を持たない果実にとっては重要なカルシウム供給源となっている可能性があり、出液速度の低下が尻腐れ果の増加に結びついたり考えられる。また、出液速度は、根量と根系分布によっても大きく影響される。養液土耕法では、根系が養水分環境の良好なドリップ付近に良く発達し、その部位での根系の生理活性が高く維持され、そのことが出液速度の増加として現れたものと考えられた。

栽培終了後土壌の理化学性を図4-22に示した。基肥全層施肥でドリップ灌水を行った場合、土壌のECは局所的に上昇し(図4-22A)。特にドリップ周辺(ドリップ位置から10cm)では表層に塩類が集積しているのが、肉眼でも確認できた。ドリップ近傍(ドリップ位置から5cm)においても、基肥区でのECは無機および有機養液土耕区に比べて高く、根系へのストレス負荷が大きかったと考えられた。基肥区で集積していた主要な塩類は、ドリップ近傍においては、カチオンではカルシウム、アニオンでは硫酸イオンであった(表4-8)。基肥区のドリップ周辺では、表層における硝酸イオンの集積が顕著であった。この部分では根量が減少しているため、硝酸イオンが存在しても吸収できない状態にあったものと推察された。無機養液区では残留イオンそのものの量は少なかったが、10cm地点の表層における硝酸イオンおよびカルシウム、ナトリウムイオンの割合が増加していた。有機養液区は全層を通して、イオンの総量が少ないだけでなく、各種イオンの組成変動が少なく、イオン環境としては、最もストレスが少なく保たれていたと考えられた。土壌水分に関しては、含水率約10%程度に保たれていたが(図4-22B)、基肥区においては、根系が比較的良好に発達していた下層で、水分が減少する傾向があった。また、土壌硬度は有機養液区および基肥区で、無機養液区に比べ高くなっていた。

以上見てきた土壌の諸性質のうち、出液速度に大きく関与しているのは、イオンストレスであり、根圏の浸透圧が高まることにより吸水が阻害されている可能性が示唆された(図4-22A)。

実際の栽培では、尻腐れ果発生を抑制するために、果実への塩化カルシウムの散布などが行われているが、管理を容易にするためにも、根圏環境を改善しカルシウム吸収を高めるという抜本的な対策が求められている。無機および有機養液土耕は、ドリップ近傍への根の集積により、効率の良い養分吸収を可能にするとともに、少量ずつ肥料成分を添加することにより根圏のイオンストレス軽減し、カルシウム吸収を高め、その結果として尻腐れ果を抑制する栽培法として有望であると考えられた(図5-1)。

最後に現場でのCSLの利用状況と関連する有機液肥に関する状況を述べる。現在、CSLは農業現場で様々な方法で肥料として使用され始めた。例えば、土壌改良資材として散布や鋤き込みが行われるほか、追肥として葉面散布される。さらに、これまで述べてきたような養液土耕の液肥としても使われはじめている。現場の養液土耕では、熊本県や福島県でトマト、ナス、キュウリ等の果菜類の栽培にCSLが使われ始めた。

肥料としての商品化も始まっており、製品として加工された“野菜の友”(王寺コーンスターチ(株))は実際の生産圃場の灌水施肥装置で使用した場合目詰まりしにくいように調製されている。現場圃場では、慣行的な基肥を施用した後に定植し、無機化学肥料に代えて200倍~300倍に希釈した“野菜の友”を灌水チューブで施肥し、試験的な生産が行われている。熊本県でナスを栽培した例では、今のところ作柄は良く、“野菜の友”を灌水施肥した場合、葉面積が広く、葉色が濃く、草茎が太くなり、バランスのとれた草勢となっていた。継続的に施肥した場合、草勢回復、花芽促進等がしばしば観察され、その結果収穫期間が長くなり収穫量が増える傾向があった。これらの知見は、実際の圃場で追肥として利用された場合の結果であり、実験的にきちんと処理区を組んで、施肥量を揃えて通常の栽培と比較したものではないが、その他の事例に関しても生育を促進する傾向が認められている。今後、実際の農家でも使用が増えることが期待される。

現代の点滴灌漑の基礎技術は、1930年にイスラエルのプラスが開発したと言われる。それ以降、チューブやエミッターの開発が行われ、現在では高い精度で厳密な施肥および灌水管理が可能となった(渡辺2000)。液肥

に関しても植物栄養学の視点から様々な改良が加えられ、作目毎の肥料および施肥法が検討されてきた。一方で、これまで述べてきたような有機性液肥の適用はほとんど行われてこなかった。本論文で紹介した CSL を端緒に、様々な有機液肥の適用が、有機農産物への社会的関心の高まりに伴い、また、未利用資源の有効利用のためにも積極的に検討される必要がある。以下に近年開発された、有機液肥製造プラントについて紹介する。

液肥の製造に関しては、海外での進展が著しい。畜産大国で知られるデンマークでは、家畜糞尿による地下水汚染や、臭気の問題などから、処理プラントの開発が進んでいる。BWSC 社（デンマーク）が開発したバイオガスプラントは、家畜糞尿に一部有機系廃棄物を混ぜ、攪拌、発酵させ、これにより発生したメタンガスを使って、ガス発電機により電力および熱を回収するシステムである。有機物は液体として残り、即効性の肥料として使用できる（図 5-2）。

他にも、A・P・S・S（Aerobic Protein Digesting System）と呼ばれるオオタニ（株）が開発したシステムは、レストランや外食産業の調理くず、食べ残し、食品加工業からの加工残さなどを処理対象としている。固形廃棄物を粉碎・液状化し、曝気・攪拌により、発酵分解を促進させる。好気性菌による高温発酵により処理液は 80℃ 以上となり、病原菌を殺菌することができる。3~7 日と短い処理時間であることも特長の一つである。

上述のように、食品・畜産系の廃棄物を含め有機性の液肥を作るシステムが提案されてきているが、その利用法や現場での効果については、詳細な報告は無く、本論文で提案した有機養液土耕を端緒として、今後検討されるべき課題である。

このような、有機性の液肥を使用するに当たって、先にも述べたように病害の問題は注意すべき点の一つである。CSL を初めとする有機性の液肥中には、微生物の繁殖を促す易分解性の有機物を含むため、栽培前の土壌消毒は十分行う必要がある。本実験で使用したシステムでは、消毒を完全に行うために、ドレンベットを用いて根域制限を行い、1 作毎の蒸気消毒を行っている。現在 4 作目になるが、化学肥料区はもとより、未熟有機物である CSL を連用した区においても土壌病害は発生していない。臭化メチルが 2005 年に全廃になることや、有機養液土耕を有効に機能させるための技術としても、隔離床を用いた蒸気消毒ないし太陽熱消毒に関するさらなる研究が求められている。

以上、施設土壌の問題とその対処技術について述べた

が、現在の施設生産土壌の状態は、現代人の健康状態になぞらえることが出来る。食べ物に困らず、欧米型の食生活が定着する中、一日の必要量以上の食べ物を食べると共に、その質も、脂肪類の多いものになってきた。その結果として、動脈硬化や脳血栓などが、死因の上位を占めるようになってきた。現在の施設土壌は、これと非常に似通った状況にあるのではないだろうか。すなわち、施設土壌は、アンバランスな肥料を量的に制御することなく大量に与えられている。そして、その結果生じる塩類集積やイオンの不均衡は土壌の動脈硬化だといえよう。徐々に進行して、将来重篤な病を引き起こしかねない。では、土壌の寿命を延ばすにはどうしたら良いのか。本論文で述べてきたように、それは、バランスのとれた食生活を土壌にもさせてやることであろう。適切な種類の食べ物を適切な量与えてやることによって、健全な農産物を末永く生み出していってくれることであろう。

VI 摘 要

現在の我が国の各地における施設土壌の化学性を調査した。全国 7 県（佐賀、山口、香川、愛知、岐阜、静岡、群馬）の施設土壌（合計 89 点）の 1:5 土壌抽出液を分析した結果、施設土壌では、肥料の残留に由来すると考えられる塩類が、露地に比べ 6 倍程度集積していた。また、硝酸イオンだけでなく硫酸イオンの集積も全国的に進行していた。対策として、残留イオンを低く抑えるような、バランスの取れた肥料を使用することが必要であると考えられた。また、施設は多量施肥が行われる傾向があり、このような残留肥料が多い状態では、次作の苗に対するストレスがさらに大きくなると考えられた。そのため、初期の過剰肥料成分に由来するストレスを軽減するような、植物の生育に合わせた肥培管理法が必要とされたと考えられた。

トマトの初期成育においては、低硫酸根緩効性肥料（Low-sulfate slow-release fertilizer: LSR）は、CDU（CDU 化成 S222）に比べ、過剰施肥に伴う、地上部・地下部の生育抑制が小さかった。CDU を 1.5gNkg^{-1} dry soil で施用した区では、定植したセルの外にはほとんど根が展開できていなかった。このように、根の生育抑制が強く生じたことは、CDU における初期の溶出イオンにおいて、特に硫酸イオンとカリウムイオンが多いことに伴う、浸透圧ストレスおよびイオンのアンバランスに起因すると考えられた。

実験 1 で行った施肥濃度を下げて、表層から 30cm に

施肥層を限定した実験2を行ったところ、L区とM区では生育の顕著な差は現れなかったが、H区においては、LSR区に比べCDU区で、草丈の抑制と施肥層における根長の減少が顕著に生じた。CDUのH区の施肥量は $0.59\text{gNkg}^{-1}\text{dry soil}$ であったが、同程度の施肥濃度にも関わらず小型根箱の $0.50\text{gNkg}^{-1}\text{dry soil}$ 区で見られたような、根長に対する著しい抑制は認められず、総根長はLSR区の $806 \pm 22\text{m}$ に対し、CDU区で $690 \pm 62\text{m}$ と大きな差ではなかった。高い浸透圧ストレスが負荷された場合でも、一部の根が、ストレスの少ない下層へと達した場合、そこで根を発達させ、ストレスが負荷されている施肥層の根の機能が維持される可能性を示している。

LSRおよびCDUを高濃度施肥した、長期栽培試験の場合、根長において、CDU区はLSR区に対して14%の減少に留まったが、収量は37%の減少となり、CDUにおける相対的な塩類またはイオンストレスが果実の収量に影響を与えていたと考えられた。

このような根系にストレスが与えられたことを反映して、H区では、CDU区はLSR区に対して、出液速度も39%低下していた。糖度は、LSR区の $4.8 \pm 0.1\%$ からCDUの $5.2 \pm 0.2\%$ へと、ストレスが負荷されていたと考えられるCDU区で増加する傾向が認められた。圃場においても、過剰の硫酸イオンを制御することを目的として、LSRの連作試験を試みた。LSR施肥によって土壌のpHは酸性からより中性に近づき、ECも低く保たれ、LSRの施用により、硫酸イオンの残留が抑制される傾向にあった。このような土壌化学性の改善はトマトの収量と品質に影響を及ぼすことが推察された。

3年間にわたる連作の間、LSR区の尻腐れ果発生率は一貫してCDU区に比べ低く抑えられる傾向にあった(平均尻腐れ率: CDU 33%, LSR 23%)。収量に関しても、連作3年目には、LSR区がCDU区の約1.2倍になった。

このような収量と品質の差は、根圏における化学ストレスまたは水ストレスの差異に起因するものと考えられた。すなわち、出液速度がLSR区では、高く維持されており、これは、LSR区で根圏に負荷されたストレスがCDUに比べ低かったことを示す。土壌ストレスの軽減により、収量が増加し、尻腐れ果が減少し、収量性が改善されると考えられた。

CSLは、コーンスターチ製造の最初の工程から生じる、茶色の粘稠性の高い液体であり、3要素をそれぞれ3%程度含んでいる。このCSLに含まれる窒素の約9割

はタンパク質等の有機物であるが、土壌の分解能力を超えない程度に、少量ずつに分けて土壌に添加することにより、また、成分として不足しているカルシウムを補うことにより、トマトの肥料としての使用が可能であることが明らかとなった。

CSL原液を180倍程度の適切な希釈濃度で与えた場合には、生育障害は認められず、地上部の生育は無機液肥施用に比べ若干劣るものの、根重はほぼ同等であった。なお、高濃度の有機液肥施用では、3個体のうち2個体が枯死し、残る1個体についても、表層の根の伸長抑制および生育抑制が認められた。この処理区では、土壌からの腐敗臭の発生があり、腐敗に伴う生育阻害が生じたと推定された。

根系形態の特徴として、無機および有機液肥施用により、基肥全層施用に比べ表層の根量が多くなり、これに伴い表層の吸水量も増加した。また、有機液肥施用によって、根が太くなる傾向が認められた。

無機および有機液肥施用では残留イオンの集積が基肥全層施用に比べ低く抑えられ、特に硫酸イオン、カルシウム、マグネシウムの減少が顕著であった。

現在行われている養液土耕では、無機肥料のみが使用されているが、本研究では、トウモロコシを原料とする製糖工程から生じるコーンステープリカー(CSL)という有機性副産物の液肥としての使用を検討した。

CSLの使い方として、(1)腐敗を防ぐために、肥料原液はCSL原液の8倍希釈以下とする、(2)灌水ライン目詰まりを起こさせないために、液肥灌水後、直ちに、同量の水のみによる洗浄を行う、等これらの点に注意して栽培を行ったところ、栽培期間中を通して装置は正常に稼動した。

トマトの生育は、草丈、茎直径および葉緑素値に関しては、有機養液区が低く推移し、他の2区に比べ生育が抑制される傾向にあった。葉緑素値に関しては、定植後28日目以降に無機養液区において顕著な低下が認められた。その原因は、土壌分析の結果、硫黄欠乏の可能性が考えられた。

葉面積と光合成活性に関しては、上位葉において顕著な区間差が認められ、有機養液区では他の2区に比べ、高く維持されており、有機質肥料のため肥効が遅れた結果と考えられた。

葉部の生育状態および、光合成活性を反映して、果実重量は低段において有機養液区で劣る傾向にあったが、高段では他の区に優っていた。総収量としては処理区間の差は無かった。一方で、糖度に関しては基肥区で高く

なった。基肥区の土壌 EC が高かったことから、イオンストレスが原因で糖度が上昇したと考えられた。

CSL は、家畜の餌と微生物用の培地として用いられていたが、従来の用途を拡大し、野菜栽培用の肥料としての利用が可能であることを示した。有機養液土耕法も含めて、養液土耕栽培は、根系へのイオンストレスを軽減する栽培法であることが確認された。

無機および有機養液土耕法においてトマトの尻腐れ果率が減少した。慣行土耕法においては、栽培後期においても土壌中にカルシウムが十分量存在し、導管部や葉部へカルシウムが供給されているにもかかわらず、果実へのカルシウムの供給量が養液土耕法に比べ減少していた。

出液速度と尻腐れの発生率には負の相関があった。根圏環境と根量や根の活性を総合して反映していると考えられる出液速度が尻腐れ果発生指標に使える可能性が考えられた。

養液土耕法によって、根量の分布は影響を受け、土壌全層に均一に施肥する通常の栽培に比べ根がドリッ部分により密集していた。土壌水分および土壌硬度と出液速度の関係は認められなかったが、土壌の EC と相関が認められた。

以上の結果から、無機および有機養液土耕では、ドリッ灌漑部分への根の集積および根圏に負荷されるイオンストレスの改善が図られ、これにより、水移動を介したカルシウム吸収が改善され、特に夜間の果実肥大期におけるカルシウムの吸収が維持されたために、尻腐れ果実の発生が抑制されたと考えられた。

CSL を唯一の肥料源とした養液土耕栽培を行い、栽培条件下での土壌微生物数を測定した。CSL を点滴で与えた部分の好気性土壌微生物数は、無機化学肥料を用いた従来の養液土耕栽培の点滴部分の 10 倍に増えていた。有機物の分解に関する酵素活性（プロテアーゼ、 α -グルコシダーゼ、 β -グルコシダーゼ、ホスファターゼ）は、無機液肥の点滴部分の活性に比べ、有機液肥の点滴部分で高かった。

これらの CSL の添加による微生物と土壌酵素の活性の増加は、CSL の速やかな分解と無機化につながったと考えられた。有機養液土耕におけるトマトの生育が、基肥区や無機養液土耕区と同等だったことから、これらの無機化プロセスがトマトの養分要求に見合う程度、十分働いていたと考えられた。

引用文献

- 1) 阿部晴夫・飯塚浩・茂木正道 (1994)：簡易な根域水分制御システムの開発。群馬農業研究 D 園芸, 11-25.
- 2) ADAMS, P. (1991) : Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on yield, quality and composition of tomato-grown in rock wool. *J. Hort. Sci.*, **66**, 201-207.
- 3) 青木宏史 (1998)：トマト 生理と栽培技術 野菜栽培の新技术。誠文堂新光社, 149-157.
- 4) 荒垣憲一・藤井弘志・中西政則 (1986)：野菜ハウス畑における土壌化学性の実態と問題点。山形県立農業試験場研究報告, **21**, 45-62.
- 5) 趙日煥・野並浩・福山寿雄・逸見彰男・橋本康 (1992)：高カルシウム濃度培養液処理で起こるトマト果実の尻腐れとその要因。植物工場学会誌, **4**: 40-46.
- 6) DOWSON, T. D. (1993) : Hydraulic lift and water use by plants. implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*. **95**: 565-574.
- 7) EHRET, D. L. and HO, L. C. (1986) : The effects of salinity on dry matter partitioning and fruit growth in tomatoes grown in nutrient film culture. *Journal of Horticultural Science*. **61**(3), 361-367
- 8) FUCONI, A., GNAVI, E., TRORRA, A. and BERTA, G. (1999) : Apical meristems of tomato roots and modifications induced by arbuscular mycorrhizal and soil borne pathogenic fungi. *New Phytol.* **142**: 505-516.
- 9) 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎 (1998)：土壌肥料用語事典。農文協, pp193.
- 10) 原田靖生 (1997)：土壌生態系における家畜排泄物の循環。木村真人編。土壌圏と地球環境問題。名古屋大学出版会, pp61-77.
- 11) HARTZ, T. K. and HOCHMUTH, G. J. (1996) : Fertility management of drip-irrigated vegetables. *HortTech*. **6**, 168-172.
- 12) 早野恒一 (1978)：トマト栽培施設圃場の土壌酵素活性について。土肥誌, **49**, 158-162.
- 13) 早野恒一 (1992a)：土壌微生物研究会編。新編土壌微生物実験法。養賢堂, pp366-376.
- 14) 早野恒一 (1992b)：土壌微生物研究会編。新編土壌微生物実験法。養賢堂, pp368.
- 15) 早野恒一 (1997)：新・土の微生物 (2)。土壌微生物研究会編。博友社, pp133-165.
- 16) 東田修司・山神正弘 (1996)：畑土壌における微生物活性の指標としての土壌酵素の特徴。北海道立農業試験場集報, **71**: 7-16
- 17) HOCHMUTH, G. J. (1992): Fertilizer management for drip-irrigated vegetables in Florida. *HortTech*. **2**: 27-32.
- 18) 堀兼明 (1994)：農耕地における土壌診断の研究ならびに診断指標と手法の開発。3 土壌の微生物特性診断。土肥誌, **65**, 578-584.
- 19) 本名俊正・山本定博 (1992)：腐植の簡易分析法—Color Density, $\Delta \log K$, Melanic Index による分類・区分—。土壌構成成分解析法—新しい手法, 新しい考え方—。日本土壌肥料学会編, 博友社, pp7-36.
- 20) IJIMA, M. and KONO, Y. (1991): Interspecific differences of the root system structures of for cereal species as affected by soil compaction. *Japan. J. Crop Sci.* **60**, 130-138.
- 21) 今泉諒俊 (1988)：畑土壌におけるりん酸肥沃度の諸問題

1. りん酸肥沃度の実態と変遷(つづき). 農及園, 63, 81-817.
- 22) 位田藤久太郎(1981): 野菜の土壌生態・検定と肥培. 博友社, pp84-92.
- 23) 加藤潔(1998): 出液と根圧. 根の事典. 朝倉書店, pp353-355.
- 24) 加藤俊博(1994): 切り花の養液管理. 農文協, pp193-209.
- 25) 加藤俊博・浅野峯男・有沢道雄・武井昭夫(1984): 土壌消毒後の土壌養分の動態に関する研究(第3報)施用窒素の形態及び有機物の施用効果. 愛知農総試研報, 16, 219-227.
- 26) 加藤邦彦(1992): 土壌微生物研究会編. 新編土壌微生物実験法. 養賢堂, pp15-16.
- 27) 関東ハウス土壌研究グループ(1966): ハウス土壌の塩類集積の実態-1. 5 浸出法にもとづいて-. 農及園, 41, 1451-1455.
- 28) 亀和田國彦(1997): 土壌環境分析法. 土壌環境分析法編集委員会編, pp202-204.
- 29) 金沢晋二郎(1980): 水田の土壌酵素活性. ペドロジスト, 24, 69-96.
- 30) 金田吉弘・栗崎弘利・村井隆(1994): 肥効調節型肥料を用いた育苗箱全量施肥による水稲不耕起移植栽培. 土肥誌, 65, 385-391.
- 31) 川原祥司(1985): 肥料形態と塩類集積. 農業技術体系 土壌施肥編 6. 作物別施肥技術, 農文協, pp113-116.
- 32) 川田穰一(1999): 「養液土耕」という用語とその技術上の問題点. 農業および園芸, 74, 1268-1271.
- 33) 菊地一徳(1993): コーン製品の知識. 幸書房, pp188-189.
- 34) 木村武(1999): 施設園芸における環境保全型土壌・肥培管理. 土肥誌, 70, 475-480.
- 35) 木村龍介(1992): 土壌微生物研究会編. 新編土壌微生物実験法. 養賢堂, pp210-211.
- 36) 河野憲治(1987): 農業技術大系 土壌肥料編 2 作物栄養 III. 農文協, p70.
- 37) KONO, Y., YAMAUCHI, A., NONOYAMA, T., TATSUMI, J. and KAWAMURA, N. (1987): A revised experimental system of root-soil interaction for laboratory work. *Environ. Control Biol.* 25, 141-151.
- 38) 古口光夫(1999): 養液土耕の基礎知識. 農耕と園芸, 5, 53-57.
- 39) 熊田恭一(1977): 土壌有機物の化学 第2版. 学会出版センター, pp10-119.
- 40) 馬西清徳・福元康文・吉田徹志(1996): 根域制限による水ストレス条件下でのトマトの生育と果実の品質に対する堆肥施用の影響. 土肥誌, 67, 257-264.
- 41) 水野葉子(2000): 水野葉子のオーガニックノート. 星の環会, pp9-40.
- 42) MOHAMMAD, M., SHIBLI, R., AJLOUMI, M. and NIMRI, L. (1998): Tomato root and shoot response to salt stress under different levels of phosphorus nutrition. *J. Plant Nutr.* 21, 1667-1680.
- 43) 森田茂紀・阿部淳(1999): 出液速度の測定・評価方法. 根の研究, 8, 117-119.
- 44) 森田茂紀・豊田正範(2000): メキシコ合衆国バハ・カリフォルニア州の沙漠地域で点滴灌漑栽培したトウガラシとメロンの収穫期における出液の速度と成分. 日作紀, 69, 217-223.
- 45) 森田茂紀(2000): 根の発育学. 東京大学出版会, pp154-159.
- 46) 森敏(1986): 食品の質に及ぼす有機物施用の効果. 有機物研究の新しい展望. 博友社, pp85-137.
- 47) 初倉克幹(1990): わが国の農業地帯における地下水の水質状況. 地下水学会秋季講演会講演要旨, 54-57.
- 48) 村山三郎・上村至・小阪進一(1998): 芝生造成時における緩効性肥料の効果. 農及園, 73, 800-806.
- 49) 中村道徳. 田村学造. 高橋信孝編(1978): 実験農芸化学上(第3版). 朝倉書店, pp278-312.
- 50) 中野明正・山内章・上原洋一(1999): 有機養液土耕法の開発-有機および無機養液土耕法がトマトの生育および土壌環境に与える影響-. 日本土壌肥料学会中部支部会第79会例会講演要旨集, 22-23.
- 51) 嶋田永生(1967): 集約多肥栽培土壌の酸性に関する土壌溶液論的研究. 愛知県園試報, 6, 67-114.
- 52) 西尾道徳・藤原俊六郎・菅家文左衛門(1988): 有機物をどう使いこなすか. 農文協, pp120-178.
- 53) 日本農業新聞(2000): 重要野菜の産地廃棄量過去10年で最大, 11月19日号.
- 54) OECD 編, 農林水産省農業総合研究所監訳. (1998): 農業の環境便益, pp7-13.
- 55) 農林水産省情報統計部(1983): 昭和57年度野菜作農家意向調査報告書. 農林水産統計報告58-2, 園統一.
- 56) OHTA, K., HOSOKI, T., MATSUMOTO, K., OHYA, M., ITO, N. and INABA, K. (1997): Relationship between fruit cracking and changes of fruit diameter associated with solute flow to fruit in cherry tomatoes. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 65, 753-759.
- 57) 太田勝巳・武田栄次郎・吉岡大輔・浅尾俊樹・細木高志. (1999): ミニトマトと大型トマトにおける尻腐れ果発生の比較. 植物工場学会誌, 11, 22-25.
- 58) 大西成長・吉田光二・佳山良正(1983): 過剰塩類の集積土壌環境がトマトの尻くされ症と土壌微生物数に及ぼす影響. 生物環境調節, 21, 19-25.
- 59) 大村裕顕・赤木博・小熊純一(1985): イチゴ施設栽培ほ場の土壌管理と土壌酵素活性. 栃木県農業試験場研究報告, 31, 45-52.
- 60) 大沢孝也(1960): 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究. 園学雑, 29(4), 42-52.
- 61) 奥村宣明(1996): 岡田雅人. 宮崎香 編. タンパク質実験ノート上. 抽出と分離. 羊土社, pp31.
- 62) 岡部陽一・落合悦子・常見讓史・峯岸利長(1994): デルフィニウム・エラータムの養液土耕栽培. 園学雑, 63, 510-511.
- 63) 小野信一・藤井義晴(1994): ハウス栽培における土壌の塩類集積とその回避対策. 土肥誌, 65, 62-65.
- 64) 小野信一(1996): 施設栽培におけるノンストレス型施肥とは. 農及園, 71, 307-311.
- 65) 小野信一・森昭憲(1996): ハウス栽培で施用する化学肥料の形態が土壌に与える化学的ストレス. 土肥誌, 67, 371-376.
- 66) 小柳敦史(1998): 深さの定量化による作物根系の新しいとらえかた. 日作紀, 67, 3-10.
- 67) PETERSON, T. A., REINSEL, M. D. and KRIZEK, D. T. (1991): Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.. cv. 'Better Bush') plant response to root restriction. *J. Exp. Bot.* 42, 1233-1240.
- 68) 六本木和夫(1995): 養液土耕による施設栽培キュウリの養水分管理. 農及園, 70, 909-912.
- 69) 六本木和夫・加藤敏博(2000): 野菜・花卉の養液土耕. 農文協, pp32-97.
- 70) 佐久間敏雄・倉持寛太・斎藤英樹・増谷雪雄・望月美千代・

- 森下諦三 (1989) : 土壌中における重水の挙動追跡法分析精度と試料調製法. 土肥誌, 60, 197-202
- 71) 佐藤毅・渡辺和彦・池田英男・中山道憲 (1998) : トマト葉植物の地上部あるいは地下部に与えたカルシウムおよびリンの吸収と転流. 土肥誌, 69, 626-632.
- 72) 斎藤俊久・糠谷明 (1998) : トマトの点滴施肥灌水栽培における施肥量の違いが生育および養分吸収に及ぼす影響. 静岡大学農学部研究報告, 48, 39-45.
- 73) 斎藤隆・畑山富男・伊東秀夫 (1963) : トマトの生育ならびに開花・結実に関する研究 (第3報) 育苗期の窒素・燐酸・加里の施用量が生育ならびに花芽形成に及ぼす影響. 園学雑, 32(2), 55-66.
- 74) Sharp, R. E. (1996): Regulation of plant growth responses to low soil water potentials. *Hort. Sci.* 31, 36-39.
- 75) 施設園芸協会 (1999) : 園芸用ガラス室ハウス等の設置実面積及び栽培延面積の推移. <http://www.jgha.com/>.
- 76) 篠原温 (1986) : 野菜の栽培条件と品質 - 特に光および施肥条件とアスコルビン酸含量との関係 -. 筑波大農林学研, 3, 61-156.
- 77) 清水幹夫 (1998) : フィチン酸とフィターゼ. 畜産の研究, 52, 335-340
- 78) 宗林正・瀬崎滋雄・島康博・田中康隆 (1990) : 施設栽培における硫酸塩高集積土壌の実態. 奈良農試研報, 21, 34-37.
- 79) 相馬暁 (1985a) ハウス野菜の連作障害の実態と対策 - ハウス土壌における養分過剰蓄積と生理障害 -. 農及園, 60, 1287-1289.
- 80) 相馬暁 (1985b) : ハウス野菜の連作障害の実態と対策 - ハウス土壌における養分過剰蓄積と生理障害 -. 農及園, 60, 1415-1420.
- 81) SONGMUANG, P., ABE, J. and MORITA, S. (1997): Application of rice straw compost to lowland rice and its effects on root morphology in Thai paddy fields. *Root Research (Special Issue1)*. 6, 32-33.
- 82) 庄子貞雄 (1995) : 新農法への挑戦 生産・資源・環境との調和, 博友社, pp64
- 83) 瀧勝俊・沖野英男 (1990) : 県内トマト栽培施設における塩類集積の実態と硝酸態窒素の簡易測定法の検討. 愛知県農総試研報, 22, 285-293.
- 84) 瀧勝俊・沖野英男 (1991) : 施設土壌における硫酸塩蓄積の原因 (1) 東三河地域トマト施設土壌について. 愛知県農総試研報, 23, 271-280.
- 85) 瀧勝俊 (1992) : 施設土壌における窒素診断の問題点 - 硫酸根の集積について -. 農業技術, 47, 207-212.
- 86) 武井昭夫 (1978) : クリーニングクロープの効果. イネ科作物短期作付けによる連作障害の回避. 園芸学会昭和54秋シンポジウム要旨, pp69-75.
- 87) 土岐和夫・下野勝昭・西田忠志・川原洋司 (1991) : ハウス土壌における塩集積の進行とその回避策. 塩集積土壌と農業. 日本土壌肥料学会編. 博友社, pp96-122.
- 88) 徳江倫明 (1999) : 農業こそ21世紀の環境ビジネスだ. たちばな出版, pp13-41.
- 89) 上原洋一 (1990) : 遮根シート利用によるトマト青枯病の防除. 土と微生物, 35, 1-6.
- 90) 上原洋一 (1999) : 野菜作における土壌管理 - 有機物管理を中心として -. 季刊肥料, 83, 53-57.
- 91) 上原洋一 (1993) : 根域制限による野菜・果樹の土壌. 栄養管理1. 根域制限による野菜土壌病害防除. 土肥誌, 64, 344-349.
- 92) 渡辺和彦 (2000) : 養液土耕の歴史 - その開発経緯と資料紹介 -. ハイドロポニックス, 14, 27-29.
- 93) 山田良三・沖野英男 (1989) : 堆肥連用畑土壌における土壌酵素活性. セルラーゼ, プロテアーゼ及びフォスファターゼ活性と基質含量について. 愛知県農業総合試験場研究報告, 21, 273-280
- 94) 野菜・茶業試験場 (1999) : 平成11年度 野菜・花き・茶業対策の概要, pp1-3.
- 95) 横山明敏・甲斐典男 (1996) : 施設野菜圃場における除塩. 農業土木学会誌, 64, 891-895.
- 96) 吉岡宏・河辺知哉・藤原隆広・佐藤文生 (1998) : キャベツセル成型苗の定植後の根系発達について. 園芸学雑誌, 67, 459-461
- 97) 吉田徹志・上田英臣・馬西清徳・福元康文 (1997) : 灌水条件と窒素施用量がトマト果実のカルシウム, 窒素集積に及ぼす影響と尻腐れ果発生との関係. 土肥誌, 68, 178-180.
- 98) 葭田隆治 (1991) : 野菜におけるトウモロコシ未熟種子水抽出物の生長促進効果. 北陸作物学会報, 26, 117-120.
- 99) 有機質資源化推進会議 (1997) : 有機廃棄物資源化大事典. 農文協, pp109-116.

Study on the Development of a Method to Alleviate Stress on Rhizosphere for Vegetable Production in Protected Cultivation.

Akimasa NAKANO

Summary

The chemical characteristics of soils under protected cultivation were analyzed. A fertilizer which was modified to reduce chemical stress was applied, and the effect of the fertilizer on the yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. var. Saturn) was examined.

A total of 89 soil samples under protected cultivation were collected from 7 prefectures (Saga, Yamaguchi, Kagawa, Aichi, Gifu, Shizuoka, Gunma) to analyze the current soil chemical properties in Japan. It was observed that the soils under protected cultivation accumulated nutrients from residual fertilizer at levels almost 6 times higher than those in open field cultivation. Although it had been considered that nitrate was the major residual anion, it was found that a high sulfate accumulation also occurred in soils under protected cultivation.

LSR (Low-sulfate slow-release fertilizer) was developed to prevent the accumulation of residual sulfate. In a short-term experiment, LSR application increased the root growth compared with a conventional slow-release fertilizer, CDU. Because excessive elution was reduced in LSR, osmotic and ion imbalance stresses on the root system were alleviated. In a long-term experiment, excessive fertilization with LSR promoted root development in the fertilized soil compared with CDU. This difference in root growth could account for the increase in fruit yield with LSR to a level of 159% of that with CDU. Increase in the bleeding rate (index of root activity) corresponded to the increase in yield and decrease in sugar content. These results suggested that LSR alleviated the stress imposed on plant roots compared to CDU.

Attempts were made to use LSR to control excessive nitrate and sulfate accumulation. LSR application improved the soil conditions in that the soil pH was more neutral and soil EC decreased, mainly because the amount of residual sulfate was reduced.

These differences affected the fruit yield and fruit quality of tomato. During the three-year period of continuous cropping, blossom end rot (BER) was suppressed using LSR (average BER rate: control 33%, LSR, 23%). And after the third year of LSR application, the yields were 1.2 times higher compared with the application of conventional fertilizer.

These differences were caused by chemical or water stress on the rhizosphere. Bleeding rate of root in the case of LSR application was higher than that in the case of conventional fertilizer application. These results suggested that residual fertilizer reduced the transport of water and nutrients and affected the yield and fruit quality of tomato.

Corn steep liquor (CSL) is an industrial waste from corn starch factories. It is a brown-colored

Received: December 19, 2001

Department of Fruit Vegetables Taketoyo, Aichi, 470-2351, Japan

viscous liquid, which contains many kinds of organic materials and about 3% each of N, P₂O₅ and K₂O.

The use of CSL as a liquid fertilizer was examined. Calcium should be supplemented, because the calcium content is not high enough for vegetable production. Tomato growth was possible through the application of the immature organic material but only if it was applied in small amounts frequently, within the decomposition ability of the soil.

When CSL was applied at appropriate concentrations, the plants grew normally: Shoot weight was about 80%, but the root weight was similar to that in the case of inorganic liquid fertilizer application. The application of liquid fertilizer resulted in a change in the root distribution: When both types of liquid fertilizers were applied, the roots became shallower than in the case of basal dressing in all the layers of soil. As a result, water uptake increased in the surface layer of the plants cultivated with liquid fertilizer. When organic liquid fertilizer was applied, the root became thicker than in the case of inorganic fertilizer application.

Liquid fertilizer application method is effective for reduce in the amount of residual ions, especially for sulfate, calcium and magnesium, from soil.

Attempts were made to develop an organic fertigation system by using CSL as liquid fertilizer, instead of conventional inorganic fertilizer. It was found that CSL had to be diluted less than 4 times to prevent decay and that the irrigation tube had to be rinsed immediately after nutrient liquid application using the same amount of tap water to keep the irrigation tube clean.

A cultivation experiment for practical use was conducted by applying the organic fertigation system, compared with the same system in which inorganic liquid fertilizer was used and with the conventional method. This system was found to be applicable. Height, stem diameter and chlorophyll content of the plants grown with the organic fertigation system were the lowest among the three cultivation methods. Although these reduction did not lead to the reduction of the fruit yield.

Leaf area and photosynthetic activity were higher when the plants were grown with the organic fertigation system compared with the other systems, especially for the leaves at higher positions. Larger leaf area and higher photosynthetic activity of the organic fertigation-grown plants led to a higher yield on higher fruit trusses, compared with the plants grown with the other systems, and the reverse was true for the lower trusses. As a result, about the same yield was obtained among the three cultivation methods. Brix sugar content was the highest in the basal dressing method, presumably because high soil EC values promoted fruit sugar accumulation.

While CSL had been used mainly as feed for livestock, culture medium for bacteria and so on, this system showed that CSL could be used as liquid fertilizer for fertigation to produce vegetables. Moreover, it was observed that fertigation systems including organic fertigation are alternative fertilizer management systems for the reduction of chemical stress on the rhizosphere.

The occurrence of BER in tomato was reduced using the inorganic or organic fertigation method. In the conventional basal dressing method, calcium content of fruit decreased in spite of the adequate calcium content in soil, xylem sap and leaf parts. The occurrence of BER showed a negative correlation with the bleeding rate, hence bleeding rate, an index in which various factors such as rhizosphere conditions, root length and root activity are integrated, could be used as an indicator of the occurrence of BER. Soil EC values affected the bleeding rate more appreciably than soil compaction and soil water content.

The roots of the plants grown with the fertigation method tended to be confined to the dripped soil parts, which reduced soil chemical stress and calcium uptake driven by water flux increased. Especially, because the supply of calcium during the period of fruit enlargement (during the night time) met the demand in the case of inorganic and organic fertigation with a higher bleeding rate, compared with the basal dressing method, as a results, the occurrence of BER of tomato fruits in fertigations decreased.

The number of aerobic bacteria in the soil of the CSL fertigation plot was ten times higher than that of the plot with basal dressing and fertigation using chemical fertilizers(inorganic fertigation). The activity of the soil enzymes related to organic matter decomposition, ie. protease, α -glucosidase, β -glucosidase and phosphatase in the CSL plot was higher than that in the plot with basal dressing and inorganic fertigation.

The increase of the activity of the bacteria and soil enzymes by CSL application led to the rapid decomposition and mineralization of CSL. The processes involved in organic fertigation were effective in supplying a sufficient amount of nutrients for tomato growth, because the yield of tomato grown under CSL application was similar to that of the plants cultivated with basal dressing and inorganic fertigation.