

低硫酸根肥料を用いたトマトの養液土耕（灌水同時施肥）栽培で生じる硫黄欠乏はマルチ処理による根域環境の均一化により改善する

中野明正・上原洋一

野菜茶業研究所 果菜研究部 環境制御研究室

要 旨：日本の施設生産土壌では硫酸根（硫酸イオン， SO_4^{2-} ）が集積している場合が多い。近年，施設生産で普及している養液土耕（灌水同時施肥）栽培で使用されている低硫酸根肥料は，このような日本の施設生産の土壌環境を改善するために開発された経緯がある。しかし，根域が隔離された場合，低硫酸根肥料の使用で葉緑素値が低下するという硫黄欠乏症状が認められた。これは，隔離床栽培では植物への土壌からの硫黄の給源の範囲が限られるため，硫黄欠乏が出やすくなったと考えられた。このような硫黄欠乏は，養液土耕を含めたドリップ灌漑により生じる土壌中での不均一な塩類分布，すなわちドリップ周辺での塩類集積部位の形成により助長された。このときマルチ処理により硫黄欠乏が改善されたが，その理由としては，ドリップ周辺部位の含水率が高く，この部分の塩類濃度が低く保たれ，根がここに存在した硫酸イオンを吸収できたためと推察された。

キーワード：硫黄欠乏，根系分布，低硫酸根肥料，マルチ栽培，養液土耕

Mulch Improved Sulfate Deficiency of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Caused by Drip Fertigation with Low-sulfate Fertilizer : Akimasa NAKANO and Yoichi UEHARA (National Institute of Vegetable and Tea Science, Aichi 470-2351, Japan)

Abstract: Salt accumulation and ion imbalance caused by residual fertilizer in greenhouse cultivation have been serious problems in Japan since the 1970s. Because an excess of sulfate ions was considered to be one of the causes of these problems, low-sulfate fertilizers were developed to solve this problem. However, when low-sulfate fertilizers were used in root restricted cultivations, chlorophyll indexes were decreased comparing with in the non-restricted cultivations, because total available sulfate resources to tomato plants were limited by rooting zone restriction. The chlorophyll indexes were higher on the treatment covering over soil surface with mulch of silver vinyl film than those of without mulch treatment. Especially, in the drip fertigation, salt accumulation including sulfate was caused on the surface part of soil surrounding area of dripping spot without mulch. Because the condition of rhizosphere of soil surface area was improved as for water and ion concentration by using mulch, the roots distributed there were able to absorb inorganic elements, especially to sulfate ion.

Keyword: Drip fertigation, Low-sulfate fertilizer, Mulch, Root distribution, Sulfate deficiency

1. 緒言

養液土耕法は，株元に希釈した液肥を灌水と同時に供給する施肥法であり，灌水同時施肥法ともいわれる。本施肥法は，施肥および灌水量を植物の生育状態に合わせて調節できることから，生産物の品質が安定するため，高品質生産物が要求される果菜類を中心に普及が進んでいる（六本木・加藤 2000，青木ら 2001）。また，根域が点滴部分に集中し効率的な養分吸収が行われるため，窒素利用効率が高く（林ら 2003），施肥量を削減する環境保全的な施肥技術として評価されている（木村 1999）。本施肥法に用いられる肥料は，様々なものが開発されているが，

硫酸根（硫酸イオン， SO_4^{2-} ）を含まない肥料も開発され使用されている。現在，日本の果菜類収穫量の約 6 割は施設栽培の生産物である（池田 2002）。このような栽培環境においては，施肥した肥料成分が残留する傾向にあり（中野ら 2001a），近年では硫酸根の集積が生じている場合も多い。したがって，施設生産で普及している養液土耕に使用される液肥も，このような日本の施設生産の土壌環境を反映して開発された経緯がある（小野・藤井 1994）。

しかし，隔離床栽培で，このような無硫酸根肥料を使用して栽培を行ったところ，硫黄欠乏が認められた（中野ら 2001b）。これは，根域

が制限されているため、植物への土壌からの硫黄の給源の範囲が限られ、相対的に硫黄欠乏が出やすい状態になったためと考えられた。一方で、このような場合の土壌の硫酸イオンの濃度分布を調査したところ、ドリップ近傍の硫酸イオンが低く、その周辺で高くなっており、ドリップ灌漑に特有の不均一なイオン分布が生じ、利用されない硫酸イオンが土壌に存在していた(中野ら 2001b)。

本研究では、このような無硫酸根肥料を用いた養液土耕栽培における硫黄欠乏の発生機構を解明するとともに、マルチによって根域の水分環境等を均一化することにより硫黄欠乏を改善する方策について検討した。

2. 材料および方法

1) 栽培条件

300mL 容量の育苗ポットに育苗用培土を充填し、トマト“サターン”を8月20日に鉢上げした。第1花房が開花し始めた苗を2002年9月20日に1/2000aポットに定植した。ポットには5mmのふるいにかけて土壌(細粒黄色土)と容積で3分の1量のパーク堆肥を混合した培土を充填し、野菜茶業研究所(愛知県武豊町)温室内において養液土耕栽培を行った。第1図に示すように、中央に定植した苗とポットの縁との間にアロードリッパー(Netafim社)を差し込み、液肥施用および灌水を行った。マルチ区は、シルバーマルチ(シーアイノビ・ハイメタリックシルバー、厚さ0.1mm)でポットの上を覆った。施肥は養液土耕用化学肥料OK-F-1(15-8-17,大塚化学)を用い、1日当たりの窒素施用量および灌水量は平均で100mgおよび1Lとした。ポットの下部からの養液の流出はほとんど無かった。無マルチ区とマルチ区の2処理区を設け4反復で行った。

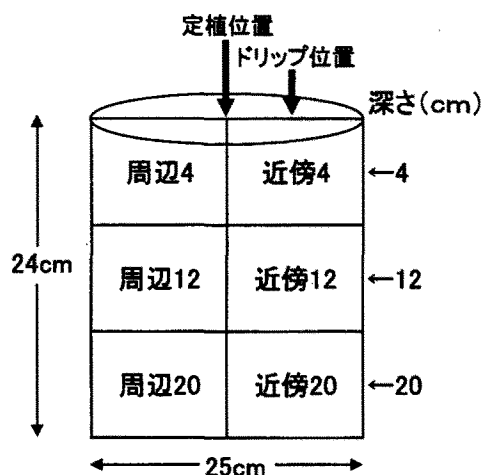
2) 地上部のサンプリング

ほぼ1週間に1度の頻度で催色期のトマトを収穫し、その都度果実重を測定した。2003年1月17日(定植後119日目)を最終収穫日として、未熟果実も全て収穫した。また、果房直上の葉の先端部の小葉について、葉緑素値をデジタル葉緑素計(SPAD-502)で測定し、その後、茎葉部を収穫した。茎葉部は、果実のついていた果柄を中心にし、上に2葉、下に1葉の部分を果実に対応する茎葉部とし、これを1つの段として、葉と葉の間すなわち節の中央部の茎を切断した。従って、本研究では第1果房から第5果房までを収穫したので、茎葉部もそれに対

応して、1から5段に分けて採取した。それぞれの部位を80℃で3日間乾燥させ乾物重量を測定し、その後一部を粉碎機で粉碎して分析試料とした。

3) 土壌と根部のサンプリングとEC, pHの測定

第1図には、ポット中央の植物体とドリップを結ぶ直径部分を基準線として、基準線を通る、土壌表面と垂直な面を示した。この面を基準として、土壌円柱の左・右をそれぞれドリップ周辺・近傍として分けた。その後、それぞれの部分を地表面から8cmずつ3等分にして、ビニール袋に採取した。土壌部分と根の部分を袋の中でほぐし、根が入らないようにそれぞれの部分の土壌を取り出し、含水率を測定した。採取した生土を用いて、乾土:水が1:5になるように蒸留水を添加し、30分の振とうの後、ECをECメーター(CM-30V, 東亜電波)で、pHをpHメーター(M-12, 堀場製作所)で測定した。根部は、上記でビニールに採取した土壌と根の混合物から、水洗により土壌を取り除き取り出した。洗い出した根を80℃で3日間乾燥させ乾物重量を測定した。



第1図 株とドリップの位置および土壌採取部位

4) 植物体および土壌の無機イオン組成

植物体の無機イオン組成分析は、上記で調製した粉碎試料100mgを栓付きの試験管に分取し、5.00gの蒸留水を添加し、オートクレーブ抽出(120℃, 15分間)したものを試料とした。土壌の無機イオン組成分析は上記で調製した土壌溶液を試料とした。それぞれ遠心分離(10,000gで10分間)を行いその上清を分析試料とした。

硝酸イオン、硫酸イオンおよび塩化物イオンはイオンクロマトグラフ(陰イオン分析システ

ム、島津製作所)で、カリウムイオン、カルシウムイオンおよびマグネシウムイオンは ICP 発光分析装置 (SPS7700, セイコー電子工業) で測定した。

3. 結果および考察

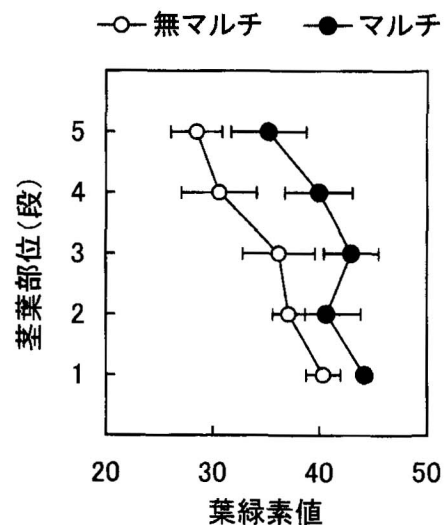
栽培後期 (定植後 80 日目ごろから) において、無マルチ区、マルチ区ともに葉色の低下が認められた (写真 1)。上位葉、特に無マルチ区でその傾向が顕著であり、最終収穫日までその傾向は継続した (第 2 図)。Fisher の有意差検定を行ったところ、葉緑素値はそれぞれの段においてはマルチの有無による有意差は認められなかったが、全体としてはマルチ有りの方がマルチ無しよりも 1% 水準で有意に高かった。



写真 1 定植後 96 日目の無マルチおよびマルチ区のトマトの生育状態
左の無マルチ区において葉色の低下が認められた。

本実験で用いた OK-F-1 は過剰になりがちな硫酸イオンを含まない肥料であることから、両処理区で葉緑素値の低下が認められたが、第 1 表に示すように、硝酸イオンを含めたその他のイオン濃度には処理区間での顕著な低下は認められず、硫酸イオン濃度のみが顕著な低下を示したことから窒素欠乏などによるものではなく、葉緑素値の低下は硫黄欠乏であると判断した。また、マルチによるイオン濃度の上昇も硫酸イオンで最も高かった。4,5 段の葉の硫酸イオン濃度は 1 段のその 10 分の 1 以下と処理区にかかわらず低い値となった。Gaines ら (1982)

は、硫黄欠乏を生じさせたトマトにおいて、総硫黄含量 (TS) とタンパク態の硫黄含量 (PS) を測定し、TS から PS を差し引いた値として NPS (非タンパク硫黄) を求めている。これはほぼ硫酸イオンに相当するものと考えられる。この報告では硫黄欠乏が出始めたころの植物体の NPS 濃度は 0.03 %、すなわち $19\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ に相当する。この値はトマトの部位によって変動すると考えられるが、本実験においても、特に上位葉では無マルチとマルチの両区とも硫黄が欠乏気味であったと考えられた。このような低い値にも関わらず、マルチ区の 5 段目の葉色が高く維持されたのは、比較的硫黄濃度が高い下位葉からの転流があったためと考えられた。



第 2 図 マルチ処理が定植後 119 日目におけるトマト葉の葉緑素値に与える影響

第 1 表 マルチ処理が定植後 120 日目におけるトマト茎葉部の無機イオン濃度に与える影響

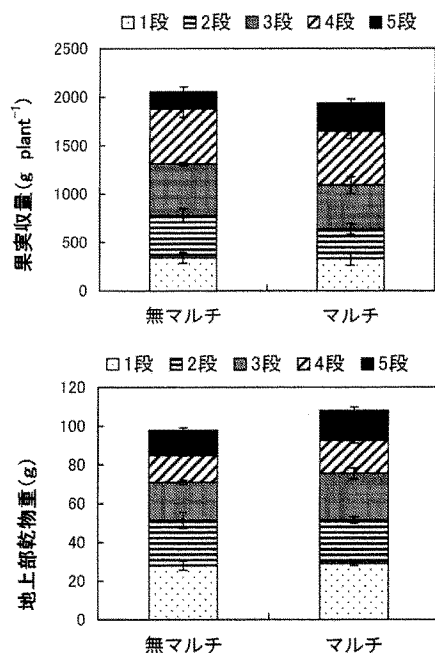
段	マルチ処理	(mmol _e kg ⁻¹ DW)						
		SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
1	無マルチ	97.8	494	689	453	906	585	43.4
	マルチ	155.8 *	552 ns	759 ns	489 ns	1042 ns	643 ns	59.5 ns
2	無マルチ	20.5	666	409	429	768	480	26.5
	マルチ	52.0 ns	500 *	493 ns	425 ns	841 ns	508 ns	36.1 ns
3	無マルチ	6.8	774	310	441	777	470	22.3
	マルチ	15.2 *	701 ns	354 *	387 ns	718 ns	442 ns	25.5 ns
4	無マルチ	4.8	601	275	387	671	384	12.9
	マルチ	8.3 ns	656 ns	283 ns	391 ns	710 ns	418 ns	17.5 ns
5	無マルチ	8.2	549	272	395	660	363	10.9
	マルチ	9.8 ns	570 ns	304 ns	420 ns	695 ns	382 ns	19.2 ns

Fisher の有意差検定において、*は5%の危険率で有意差有り、nsは有意差無しを示す(n=4)。

日本の土壌では降雨により定常的に硫酸イオンが負荷されており、作土層以下の存在量が多く (谷川ら 2003)、圃場栽培では硫黄欠乏は生じにくいとされているが (河野 1987)、根域が制限された栽培環境で低硫酸根肥料を使うと、硫黄欠乏が生じる可能性がある (中野ら

2001b). 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肥料の導入が検討され(小野 1996), 製造販売されている. また一方では, 土壌病害の制御や高品質生産のために, 隔離床栽培も普及している(中野ら 2001b). 本実験で認められた硫黄欠乏症状は, 低硫酸根肥料施肥と隔離床栽培いう二つの技術を併用することによって生じたと考えられ, 今後これらの技術の普及が考えられる施設生産において注意を要する.

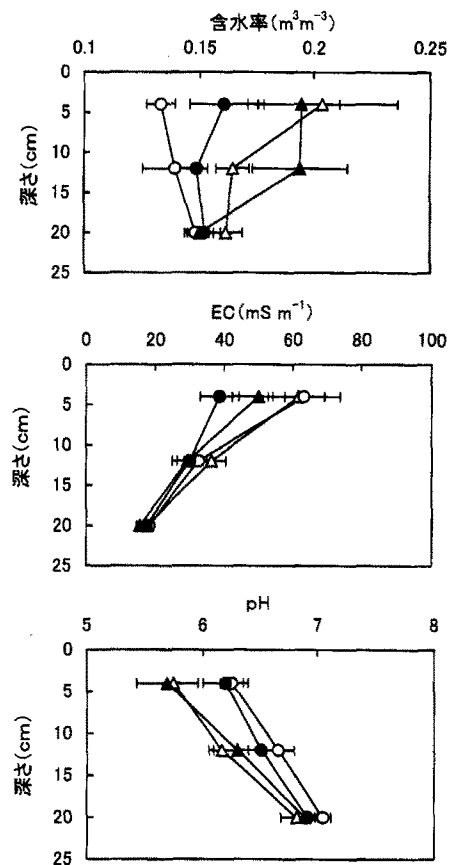
果実収量はマルチの有無で, 全体でも各段でも有意差は認められなかった(第3図). しかし, マルチの有無による収量の差異は, 第5果房で最大になり, マルチ区が無マルチ区の1.67倍の収量になった. 本実験では上位葉ほど葉緑素値が低下したことから, さらに上段まで栽培を継続した場合, 両処理区間の収量差は顕著になると考えられた. 茎葉部の乾物重についても全体および各段で処理区間に有意差は認められなかった. 従って, 果実部を合わせた総乾物生産についても両処理区で有意な差は認められなかった.



第3図 マルチ処理がトマトの収量および茎葉部乾物重に与える影響

次に, マルチ処理によって硫黄欠乏が改善された機構について検討した. マルチによる土壌環境の変化を収穫後(定植120日)の土壌含水率, ECを測定して検討したところ, マルチの有無により異なる傾向が認められた(第4図).

ドリップ近傍の土壌では表層部の含水率に差は認められなかったが, マルチ処理により12cm部位における含水率が高まり, 下方への浸潤が促進される傾向にあった. また, マルチ処理によりドリップ周辺の表層の含水率が増加する傾向にあった. これらの結果は, マルチ処理により表層からの水分の蒸発が抑えられ, 下方および横方向へ水が移動しやすくなったためと考えられた. EC値から, マルチ処理によって表層の塩類集積が抑えられることが示された. 特にドリップ周辺の塩類濃度は, マルチ区が無マルチ区の60%にまで減少した. 含水率と1:5土壌抽出液のEC値から, 単純に抽出溶液が土壌溶液部分に濃縮されたと仮定すると, その部分の土壌溶液のEC値は, マルチ区で1012mS m⁻¹, 無マルチ区で2059mS m⁻¹となり, 無マルチ区では, ドリップ周辺の表層部分の根により大きなイオンストレスが負荷されていた可能性が考えられた(Nakano et al. 2003). pHについては, マルチをすることによる変化は認められなかつ

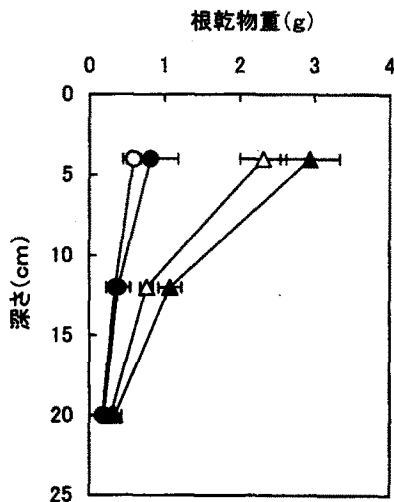


第4図 マルチ処理が定植後120日目における土壌含水率, EC, pH分布に与える影響

△: 無マルチ・ドリップ近傍, ○: 無マルチ・ドリップ周辺, ▲: マルチ・ドリップ近傍, ●: マルチ・ドリップ周辺, n=4, 横棒は標準誤差

た。

マルチの有無による根系分布への影響を調査した。マルチ処理によりドリップ近傍の中央部(第1図の近傍12)では土壌水分が高く維持されたことに伴うと考えられる根の増加傾向が認められたが、ドリップ周辺の表層部分(第1図の周辺4)ではその増加傾向はより少ないものであった(第5図)。ドリップ近傍の表層部分は(第1図の近傍4)、無マルチ区で全根重の51.8%、マルチ区で全根重の51.2%が集積する部分であったが、両者に有意差は認められなかった。マルチにより硫黄欠乏が改善された理由として、マルチ処理により根が養分を吸収するのに有利な分布になる可能性が考えられたが、両処理区の半量以上の根がドリップの部分に集中する傾向が認められ、乾燥していたドリップ周辺への根の分布量は処理区間で差異は無く、量的な変化では説明できなかった。根の比表面積が拡大することにより硫酸イオンの吸収が促進された可能性もあるため、今後は根長等についても検証する必要がある。また、本実験においては、根域の分割数が6と少なく、表層部分をさらに深さ別に分割して根量を測定した場合、処理区間で差が生じる可能性が考えられ、これについても今後詳細に検討する必要がある。



第5図 マルチ処理が定植後120日目におけるトマトの根系分布に与える影響

△: 無マルチ・ドリップ近傍, ○: 無マルチ・ドリップ周辺, ▲: マルチ・ドリップ近傍, ●: マルチ・ドリップ周辺, n=4, 横棒は標準誤差

収穫後(定植後120日目)における土壌中に残留したイオン濃度を見ると、ドリップ周辺の表層部分において、無マルチ区ではマルチ区より高い硫酸イオン濃度になる傾向があった(第

2表)。他の塩類についても無マルチ区ドリップ周辺では塩類の集積が顕著であり、根はこの部分にはある程度分布はしているものの、浸透圧または水ストレスのために、それらの塩類を吸収できない状態にあると考えられた。逆に、マルチ処理により、表層の根がより広い範囲から養分を吸収できた可能性が考えられた。

養液土耕においては、多量要素は灌水と同時に供給されるが、微量元素は土壌中に存在しているものに依存する部分が多い。養液土耕において、これらの欠乏症状が報告されていないのは、これらの要素の要求量が少ないことや、灌水中の成分で補充されている可能性もある。しかし、隔離床で連作を行った場合、本実験で認められたように根域や微量元素供給量の減少により微量元素欠乏が生じる可能性が考えられる。

肥料として補給しないこのような成分については、マルチをすることにより、根域の水分条件等を均一化し、養分吸収が十分行える状態にすることが必要となる。

第2表 マルチ処理が定植後120日目における土壌の無機イオン濃度に与える影響

深さ (cm)	位置	マルチ処理	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
(mmol, kg ⁻¹ DW)									
4	近傍	無マルチ	0.97	22.5	1.3	3.87	6.36	3.01	3.0
		マルチ	1.31 ^{ns}	17.4 ^{ns}	2.5 ^{ns}	2.36 ^{ns}	4.99 ^{ns}	2.22 ^{ns}	4.2 ^{ns}
	周辺	無マルチ	4.02	8.2	14.7	0.23	4.76	2.38	12.3
		マルチ	1.75 ^{ns}	7.1 ^{ns}	6.6 [*]	0.17 ^{ns}	2.27 ^{ns}	1.05 ^{ns}	7.0 ^{ns}
12	近傍	無マルチ	0.54	9.0	4.2	0.33	2.35	1.02	5.1
		マルチ	0.82 ^{ns}	6.8 ^{ns}	3.8 ^{ns}	0.22 ^{ns}	2.05 ^{ns}	1.01 ^{ns}	4.6 ^{ns}
	周辺	無マルチ	1.23	2.3	8.2	0.15	1.47	0.83	6.1
		マルチ	0.85 ^{ns}	1.3 ^{ns}	8.1 ^{ns}	0.12 ^{ns}	1.32 ^{ns}	0.68 ^{ns}	5.6 ^{ns}
20	近傍	無マルチ	0.84	3.4	2.5	0.17	1.16	0.81	3.3
		マルチ	0.28 ^{ns}	1.8 ^{ns}	2.3 ^{ns}	0.21 ^{ns}	1.07 [*]	0.84 ^{ns}	3.0 ^{ns}
	周辺	無マルチ	1.07	1.9	4.2	0.24	1.08	0.84	3.5
		マルチ	0.37 ^{ns}	0.8 ^{ns}	3.9 ^{ns}	0.22 ^{ns}	1.04 ^{ns}	0.81 ^{ns}	3.3 ^{ns}

Fisherの有意差検定において、*は5%の危険率で有意差有り、nsは有意差無しを示す(n=4)。

引用文献

- 青木宏史・梅津憲治・小野信一 2001. 養液土耕栽培の理論と実際. 誠文堂新光社, 東京. pp12-19
- Gaines, T.P. and Phatak, S.C. 1982. Sulfur fertilization effects on the constancy of the protein N:S ratio in low and high sulfur accumulating crops. *Agronomy journal*, 74:415-418.
- 林康人・新妻成一・久保省三 2003. 灌水施肥(養液土耕)栽培の肥効は高いのか. 施肥量を段階的に変えた場合のトマトの施肥窒素利用率. *土肥誌* 74: 175-182.
- 池田英男 2002. 野菜の施設利用周年生産における課題. 平成14年度課題別研究会資料. 新しい施設構造に応じた環境制御および栽培管理技術の現状

- と問題点. 野菜茶業研究所 pp1-7.
- 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.
- 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, 東京. pp70
- 中野明正・上原洋一・山内章 2001a. 施設土壌にお
ける塩類集積の現状と低硫酸根緩効性肥料による
化学ストレスの改善. 土肥誌 72 : 237-244.
- 中野明正・上原洋一・山内章 2001b. 養液土耕法に
よる根圏ストレス軽減がトマトの尻腐れ果発生を
抑制する. 土肥誌 72 : 385-393.
- Nakno, A. Yamauchi, A. and Uehara, Y. 2003. Effects of
application of low-sulfate slow-release fertilizer (LSR)
on shoot and root growth and fruits yields of tomato
(*Lycopersicon esculentum* Mill.) Japan Agricultural
Research Quarterly. 37.121-127.
- 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.
- 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.
- 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.
- 六本木和夫・加藤俊博 2000. 野菜・花卉の養液土耕.
農文協, 東京. pp14-30
- 谷川東子・高橋正通・今矢明宏・稲垣善之・石塚和
裕 2003. アンディソルとインセプティソルにおけ
る硫酸イオンの断面分布と現存量. 土肥誌 74 :
149-155.