

トマトの果柄に処理した ^{45}Ca の果実への移動

野村 眞史・長谷川 博^{a)}・梶田 正治

(作物機能調節学講座)

Movement of Calcium (^{45}Ca) to Fruit from Peduncle of Tomato Plants

Motofumi Nomura, Hiroshi Hasegawa^a and Masaharu Masuda

(Department of Eco-physiology for Crop Production)

Movement of calcium (^{45}Ca) from the peduncle to fruit of tomato during the day and night was investigated. Further, the effects of additional NaCl to the culture solution on the water potential in plants and ^{45}Ca movement to fruit were also examined.

The activity of ^{45}Ca on a dry weight basis in the peduncle was higher during the day than at night, however, in calyx and fruit the ^{45}Ca activity was similar both during the day and night. Import of ^{45}Ca into the leaves from the peduncle was not different between the day and the night.

Additional NaCl to the culture solution resulted in a greater water saturation deficit (WSD) of the immature leaves just below the 2nd and 3rd trusses, unlike with the mature leaves below the 1st truss where the WSD did not decrease with NaCl treatment. On the other hand, the activity of ^{45}Ca in the peduncle and calyx was not different between the NaCl treatment and the control. However, the activity in the distal part of the fruits was lower with NaCl treatment than in the control.

These results suggested that the high WSD effectively decreased the import of calcium into fruits from the peduncle. It seems that the import of ^{45}Ca into fruit is not only dependent on the conductive tissues but also a possible driving force in xylem water flow, and that NaCl interferes with movement of calcium in the fruits.

Key words : Tomato fruit, NaCl-stress, ^{45}Ca movement

緒 言

トマト果実の尻ぐされ症は果実の生育初期における局所的カルシウム欠乏によって生じる生理障害とされている。この発生を予防するため、新葉と花房に対して0.5%塩化カルシウム散布が行われることがある¹²⁾。和田らはカルシウム溶液の効果的な散布時期は、育苗段階では2、3葉から8葉展開時にかけて計3回、または、花房の発達段階では出らい時に果房の上下各3葉に散布するのが良いとしている¹⁴⁾。また、キレート効果のある植物抽出成分に $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (カルシウム濃度8%) を加えた薬剤に亜鉛

あるいはショ糖脂肪酸エステルを添加した処理液を散布すると、尻ぐされ果の発生を有意に抑制すると報告もある¹⁵⁾。趙らは果実に冷風を送ると、尻ぐされ症の発生を完全に抑制できること、この効果は冷風が果実からの蒸散を促進することによって、果実への水分とカルシウムの移行が促進されたことによるものと考察している⁵⁾。

一方、著者らはこれまで、昼夜間における根から

Received October 1, 1997

a) 滋賀県立大学環境科学部 522 彦根市八坂町
(School of Environmental Science, the University of
Shiga Prefecture, Hassaka-cho, Hikone 522)

果実への放射性同位体 ^{45}Ca の移行について検討し、同一重量の果実において昼間より夜間にカルシウム流入が増大することを明らかにし¹¹⁾、このカルシウム移行特性を実際栽培における尻ぐされ症の抑制にどのように適用するかが今後の課題であるとした。本報では、果実へのカルシウム移行を人為的に増大させるための手段として、果柄に木綿糸を貫通し毛管作用を利用して組織内にカルシウム (^{45}Ca) を浸透させ、各部位での ^{45}Ca 比活性を昼夜間で比較検討した。また、尻ぐされ症の発生しやすい条件、つまり塩化ナトリウムを培養液に添加したときの、樹体の水分状態、並びに果柄処理 ^{45}Ca の各部位への移行についても調査した。

材料および方法

試験1. 果柄に処理した ^{45}Ca の果実への昼夜間における移行

トマト品種 'TVR-2' の種子を3月15日、ビニールハウス内でバーミキュライトに播種し、第2本葉展開期にロックウールキューブ(縦7.5cm×横7.5cm×高さ5.0cm)に移植した。園試処理標準濃度培養液の1/2濃度のもの(以後、園試1/2液とする)を灌水し30日間育苗した。第7~8葉展開した苗を園試1/2液を灌水したロックウールマット(縦60cm×横90cm×高さ5cm)に計10株定植した。整枝は主枝1本仕立てとし、花房当り2~3個の花が開花した時に花房全体に4-CPA(トマトトーン)の100倍液を処理した。茎は第1果房上2葉を残して摘心し、果房は2果を残して摘果した。果実径が約2~3cmとなった5月18日午後6時、5株に $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 形態のカルシウムを $40\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ 含む溶液に放射性同位体 $^{45}\text{CaCl}_2$ を 1.1MBq 加えた処理液をサンプル管に入れ果柄に通した木綿糸をひたした。果柄への木綿糸の処理は縫い針を用いて十字に貫通させ、その位置は主茎から約2cmの部位で果柄の離層部からは3cm以上離れた(Fig. 1)。12時間後の午前6時に株毎に果房および最上位節の先端小葉を採取し、果房は果柄・がく・果実に分けた。果柄の採取部位は離層部より先の果実側のみとした。また同日午前6時、他の5株に同様の処理を行い、12時間後の午後6時に採取した。

採取試料は80℃で3日間乾燥させた後デシケータ内に貯蔵した。試料は500℃で12時間灰化させた後、

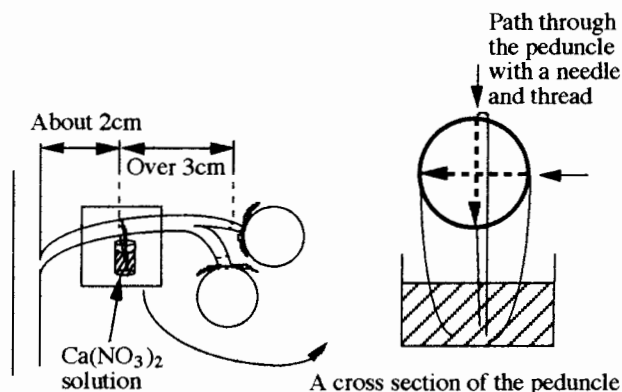


Fig. 1 Diagram illustrating the ^{45}Ca treatment to the peduncle.

6 N-HClで抽出・乾燥し、シンチレーションカウンター・ハンディ・スケーラー(アロカ社, TDC-103)を用い ^{45}Ca の放射能を測定した。

試験2. 培養液への NaCl 添加が樹体内の水分状態に及ぼす影響

トマト種子を4月22日にバーミキュライトに播種し、第2本葉展開期にロックウールキューブに移植した。園試1/2液を灌水し16日間育苗した。第6葉が展開した苗を園試1/2液で満たした1/2000アールのワグネルポットに計10株定植した。培養液への通気は30分毎に15分間行った。整枝は主枝1本仕立てとし、4-CPA(トマトトーン)処理は試験1と同様とした。また主茎は無摘心、無摘果とした。

第2果房開花約1週間前の6月11日にポット内の残存培養液を更新し、NaClを $2000\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ となるよう添加した区と、対照区をそれぞれ5ポットづつ設けた。NaCl処理開始12日後の晴天時に第1・2・3段果房直下葉を採取し新鮮重を測定した後、水分欠差を測定するため新鮮重測定後に湿度100%、気温30℃のチャンパー内に葉を24時間静置し飽和葉重を測定した。水分欠差は(飽和葉重-新鮮重)/飽和葉重×100の計算式で求めた。

試験3. 培養液への NaCl 添加が果柄に処理した ^{45}Ca の果実への移行に及ぼす影響

トマト種子を4月13日にバーミキュライトに播種し、試験1と同様に25日間育苗した。第7~8葉が展開した苗を園試1/2液で満たした1/2000アールのワグネルポットに1株ずつ計12株定植した。ポット内の培養液量が半量となった時点で同組成の培養液を加え、塩類濃度 $\text{EC}: 1.4\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, $\text{pH}: 6.0$ に調整した。培養液への通気は45分毎に15分間行い、摘

心は第2果房上2葉を残して行い、その他の栽培管理は試験1と同様とした。

6月15日にワグネルポット内の残存培養液を更新し、6ポットにNaClを2500mg・ℓ⁻¹となるよう添加した。この時の生育ステージは第2段の果実径が約2cmであった。その2日後の午前10時、放射性同位体⁴⁵CaCl₂の2.2MBqを連続3日間果柄に処理した。採取試料は株毎に果柄・がく・果実に分けた。また、果実はさらに赤道面で基部と末端部に二分し分析に供した。放射能の測定は試験1の方法にしたがった。

Table 1 Import of ⁴⁵Ca from peduncle to the truss during the day and night

Time of ^{a)} treatment	Radioactivity (cpm · g DW ⁻¹)			
	Peduncle	Calyx	Fruit	Uppermost leaf
Day	316.3a ^{b)}	58.0a	15.9a	23.4a
Night	92.4b	47.1a	19.0a	34.1a

- a) Plants were pinched with two leaves left above the first truss. Calcium of 1.1MBq in ⁴⁵CaCl₂ was diluted in 40mg · ℓ⁻¹ Ca(NO₃)₂ solution. Duration of ⁴⁵Ca treatment ; Day : 6am-6pm, Night : 6pm-6am.
- b) Values within each column followed by the same letter are not significantly different at p=0.05 by t-test.

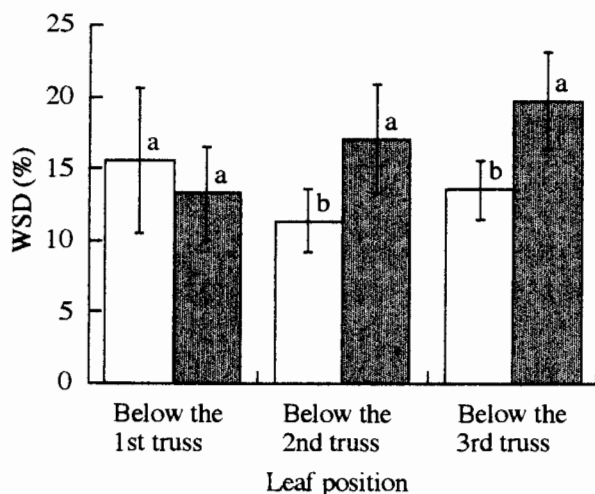


Fig. 2 Effect of NaCl treatment at concentration of 2000mg · ℓ⁻¹ to the solution on WSD (%) in the tomato leaves. □; Control. ■; NaCl treatment. Values within each column followed by the same letter are not significantly different at p=0.05 by t-test.

結 果

試験1. 果柄に処理した ⁴⁵Ca の果実への昼夜間における移行

昼夜間における第1果房各部位への単位乾物重当りの果柄処理 ⁴⁵Ca 移行量を ⁴⁵Ca 比活性として Table 1 に示した。がくでは昼間の58.0に対して夜間では47.1、果実でも昼間の15.9に対して夜間では19.0となり、昼夜間差はがく・果実ともに認められなかった。一方、果柄では昼間の ⁴⁵Ca 比活性が著しく高く、夜間の約3.4倍の値を示した。また、昼夜いずれの時間帯においても葉で放射能が認められ、果柄から葉へも ⁴⁵Ca は移動していることが明らかとなった。

以上より果柄に処理したカルシウムは、昼夜を問わず果実内へ移行することが明らかとなった。

試験2. 培養液への NaCl 添加が樹体内の水分状態に及ぼす影響

NaCl 添加の有無による樹体各葉の水分欠差をみると、成熟葉である第1果房直下葉では NaCl 添加の有無による有意差はみられないが、未成熟葉である第2・3段果房直下葉では NaCl 添加によって水分欠差は有意に増大した (Fig. 2)。

試験3. 培養液への NaCl 添加が果柄に処理した ⁴⁵Ca の果実への移行に及ぼす影響

各部位への単位乾物重当りの果柄処理 ⁴⁵Ca 移行量を ⁴⁵Ca 比活性として Table 2 に示した。果柄・がく・果実基部においては有意な差を示さなかったが、果実末端部では NaCl 区の方が有意に低い ⁴⁵Ca 比活性を示した。末端/基部の値を算出すると対照区の第1果房で約0.4、第2果房で0.5、NaCl 区では第1・2段果房ともに約0.2となった。処理区間における ⁴⁵Ca 比活性の差が大きいにもかかわらず有意差が生じないのは、木綿糸の果柄への貫入位置の違いが影響しているものと思われ、処理した ⁴⁵Ca の果実への移行量をできるだけ均一にする方法について今後検討する必要があると思われた。

果実全体に占める果実末端部での ⁴⁵Ca 比活性の含有比を同重量果実と比較すると、第1・2段果実ともに対照区よりも NaCl 区で ⁴⁵Ca 比活性の含有比は低下した。また、両処理区とも果重の増加に伴って末端部での ⁴⁵Ca 比活性の含有比が高くなり、果実が大きくなるほどカルシウムは末端部に移行しやす

Table 2 Import of ⁴⁵Ca from the peduncle to the truss as affected by NaCl treatment to the solution

Truss No.	Treatment ^{a)}	Radioactivity (cpm · g DW ⁻¹)			
		Peduncle	Calyx	Fruit	
				Proximal	Distal
1	Control	2829.9a ^{b)}	1510.6a	499.4a	254.1a
	NaCl	4947.7a	1647.1a	332.0a	77.4b
2	Control	2649.6a	1159.7a	325.6a	131.4a
	NaCl	3901.1a	1979.1a	267.3a	44.0b

a) Plants were pinched with two leaves left above the second truss. NaCl (2500 mg/l) was treated to a half strength of Enshi standard solution. Calcium of 2.2 MBq in ⁴⁵CaCl₂ was diluted in a 40 mg · ℓ⁻¹ Ca (NO₃)₂ solution.
 b) Values within each column followed by the same letter are not significantly different at p=0.05 by t-test.

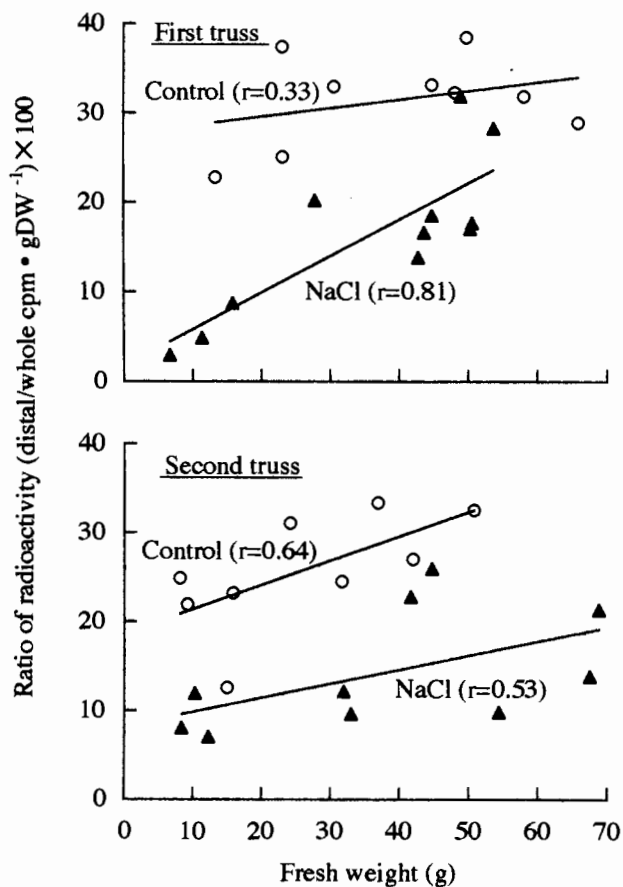


Fig. 3 Ratio of ⁴⁵Ca radioactivity of tomato as affected by NaCl treatment to the solution.

くなることが示唆された (Fig. 3).

考 察

昼夜間における果房各部位での ⁴⁵Ca 比活性は果柄で昼間の活性が高く夜間の約3.4倍の値を示した

(Table 1). これは、昼間は葉からの蒸散が盛んであるため樹体に水分欠差が生じ、その欠差を緩和するために果柄から処理液が果柄内に流入したものと想われた。

根から吸収したカルシウムは木部導管を通過して昼間は蒸散の盛んな葉に移行し、夜間は根圧により頂葉や果実など低蒸散器官へ移行する^{7,9,13)}、師管液にはカルシウムはほとんど含まれていない⁸⁾。しかし、本処理法での木綿糸は木部だけでなく師部も貫通していると考えられ、果柄から流入した ⁴⁵Ca は木部・師部の両通道組織を通じてがく・果実に移行したのではないかと推測された。しかし、果柄と比べてがく・果実の ⁴⁵Ca 比活性が低いのは、カルシウムは吸着性の高いイオンであるため、⁴⁵Ca のほとんどが果柄内に吸着し、がく・果実への移行は少なくなったものと考えられた。一方、わずかではあるが葉でも活性が認められたことから果柄から茎葉方向への ⁴⁵Ca の移行が明らかとなった。朝倉はメロン果実への水分移動量を測定し、果実への水分移動は昼間水ストレスを受けている時には果実から茎葉に向かい、また、灌水後や夜間には茎葉から果実の方向に移動すると報告している³⁾。トマト果実でも同様の水分移動が考えられ、その移行に伴って ⁴⁵Ca は茎葉に移行すると考えられた。しかし、⁴⁵Ca の茎葉への移行が昼間と同程度に夜間でも認められたことから、⁴⁵Ca の移行は水の流れだけでは説明し得ず、細胞間拡散移動も関与しているのではないかと考えられた。

本試験で果柄に処理したカルシウム溶液は Ca を 40mg · ℓ⁻¹含む Ca (NO₃)₂溶液に ⁴⁵CaCl₂を添加した

ものであるが、Brown and Ho は果柄で切り取ったトマト果実に切り口から $^{45}\text{CaCl}_2$ を処理する試験では、 ^{45}Ca は単独ではなく培養液 (N ; 180, P ; 30, K ; 350, Ca ; 200, Mg ; $80\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, EC ; $3\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, pH ; 5.8), に添加して処理するべきであると報告している⁴⁾。本試験では ^{45}Ca を培養液ではなく $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 溶液に添加しているが、これはカチオンイオンの競合を少なくし、果実へのカルシウム流入をよりスムーズに行わせようとするためである。

近年のトマト栽培において、より高品質な果実を生産するため、NaCl を用いて高浸透圧条件を設定し、果実の糖度を高める方法が水耕栽培においてよく研究されている^{1,2)}。そこで培養液への NaCl 添加がトマト葉の水分ストレスに及ぼす影響について調査した。葉の水分欠差は成熟葉である第1果房直下葉では NaCl を添加しても欠差に有意差が生じなかったのに対して、未成熟葉である第2・3段果房直下葉の欠差は有意に増大した (Fig. 2)。つまり、栄養生長過程にある未成熟葉においてのみ、NaCl の添加による葉内浸透圧の増加によって肥大過程にある葉内細胞は萎縮し、細胞間隙が大きくなると推測できる。その結果、水分飽和状態下での水分吸水能が増大したものと思われた。

^{45}Ca 果柄処理を連続3日間行った試験3では、 ^{45}Ca 比活性は有意な差を示さなかったものの、果柄、がくでは NaCl 区の方が、果実では対照区の方が高い値となる傾向を示した (Table 2)。NaCl 処理により培養液の塩類濃度が高くなると、樹体の水ポテンシャルが低下し、樹体の水分に対するシンク能が高まり、NaCl 区では果柄処理液の果柄内への流入が増大したものと考えられた。しかし流入した処理液は果実と比べてより大きい蒸散器官である“がく”へほとんど移行するので、果実の ^{45}Ca 比活性は対照区と比べて低くなったと考えられた。

Ehret and Ho は高浸透圧条件によってトマトのがくの単位重量当りカルシウム含有量は増大し、果実では減少すると報告しており⁶⁾、根から果房内へ流入したカルシウムと本試験で果柄から果房内へ流入したカルシウムは同じ移行特性を示すことが示唆された。

果実基部より末端部で ^{45}Ca 比活性が低くなる傾向は対照区よりも NaCl 区で強く (Table 2, Fig. 3)、この結果は塩類濃度の増加にしたがって果実末端部

のカルシウム含量は減少するという Ehret and Ho や Ho and Adams の報告と一致する^{6,10)}。

Adams and Ho は培養液に NaCl を添加すると、果実中のナトリウム含有量が増加し、カリウム含有量が減少すると報告している¹⁾。本試験でも NaCl 添加により果実内へのイオン流入に競合が生じ、果実中のナトリウム含有量が増加したと推測でき、果実特に末端部の ^{45}Ca 比活性が減少したものと考えられた。トマト樹体内におけるカルシウムの動態に関しては、果実へのイオン流入における他のイオンとの競合および果実内でのカルシウム移行特性・吸着程度等について解明する必要性が示唆された。

本試験の結果より、木綿糸を用いて果柄に処理したカルシウムは果実に流入することが明らかとなった。今後、流入したカルシウムの果実内での動態と作用について明らかにし、同処理がカルシウム欠乏に起因する尻ぐされ症の抑制に有効であるかどうか検討する必要がある。

要 約

トマト果柄に木綿糸を通してカルシウム (^{45}Ca) を処理し昼夜間別に果房各部位への ^{45}Ca の移行、ならびに、培養液に NaCl を添加した場合の樹体内の水分状態と果実への ^{45}Ca 移行について調査した。

昼夜間における単位乾物重当りの ^{45}Ca 比活性は果柄で昼間に有意に高くなったが、がく・果実では昼夜間差は生じなかった。また、葉でも昼夜間差はなく昼夜同程度に ^{45}Ca の移行が認められた。

培養液に NaCl を添加しても、第1果房直下葉 (成熟葉) の水分欠差に差が生じなかったが、第2・3段果房直下葉 (未成熟葉) では NaCl 添加によって水分欠差は有意に増大し、果柄・がくの ^{45}Ca 比活性も高くなる傾向を示した。しかし、果実末端部の ^{45}Ca 比活性は有意に低くなり、同時に、果実全体に占める果実末端部での ^{45}Ca 比活性も NaCl 添加によって減少した。

本試験の結果から、木綿糸処理液の果柄内への流入は樹体の水分欠差に影響を受けると考えられた。果柄内に流入した ^{45}Ca は、水の流れだけでなく他の要因によっても各部位に移行するものと思われた。また、培養液への NaCl 添加により、果実末端部へのカルシウム移行がより強く抑制されるのは、果実内でのカチオン移動に競合が生じるからではないか

と推察された。

文 献

- 1) Adams, P. and L. C. Ho : Effects of constant and fluctuating salinity on the yield, quality and calcium status of tomatoes . J. Hort. Sci., **64**, 725-732 (1989)
- 2) Adams, P : Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. J. Hort. Sci., **66**, 201-207 (1991)
- 3) 朝倉利員 : メロン果実重変化の測定法と果実重変化の水ストレス指標としての有効性. 園芸学会雑誌, **63(別1)**, 272-273 (1994)
- 4) Brown, M. M. and L. C. Ho : Factors affecting calcium trans- port and basical IAA movement in tomato fruit in relation to blossom-end rot. J. Exp. Bot., **44**, 1111-1117 (1993)
- 5) 趙 日煥・仁科弘重・田中基司・橋本 康 : 自然光利用型植物工場の夏期昼間の局所冷房 — トマトの尻腐れとの関連も含めて —. 植物工場学会誌, **4**, 30-39 (1992)
- 6) Ehret, D. L. and L. C. Ho : Translocation of calcium in relation to tomato fruit growth. Ann. Bot., **58**, 679-688 (1986)
- 7) Guttridge, C. G., E. G. Bradfield and R. Holder : Dependence of Calcium transport into strawberry leaves on positive pressure in the xylem. Ann. Bot., **48**, 473-480 (1981)
- 8) Ho, L. C., R. I. Grange and A. J. Picken : An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. Plant Cell Env., **10**, 157-162 (1987)
- 9) Ho, L. C : Environmental effects on the diurnal accumulation of ^{45}Ca by young fruit and leaves tomato plants. Ann. Bot., **63**, 281-288 (1989)
- 10) Ho, L. C. and P. Adams : Effects of diurnal changes in the salinity of the nutrient solution on the accumulation of calcium by tomato fruit. Ann. Bot., **64**, 373-382 (1989)
- 11) 榎田正治・長谷川博・野村眞史 : トマトの昼夜間における根から果房への ^{15}N と ^{45}Ca の移行. 園芸学会雑誌, **65**, 571-577 (1996)
- 12) 森 俊人 : トマトの生理障害の原因と対策. 農業技術大系2, pp. 355-360, 農山漁村文化協会, 東京 (1973)
- 13) Palzkill, D. A. and T. W. Tibbitts : Evidence that root pressure flow is required for calcium transport to head leaves of cabbage. Plant Physiol., **60**, 854-856 (1977)
- 14) 和田光生・池田英男・池田政文 : トマト植物体地上部への Ca 剤施与方法ならびに施与時期が尻腐れ果発生に及ぼす影響. 園芸学会雑誌, **64(別1)**, 250-251 (1995)
- 15) 和田光生・池田英男・池田政文・古川 一 : Ca 剤葉面散布がトマトの尻腐れ果発生に及ぼす影響. 園芸学会雑誌, **65**, 553-558 (1996)