

隔離床栽培における土壌可給態リン酸含量がトマトの養分吸収に与える影響

誌名	日本土壌肥料學雜誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	小宮山,鉄兵 藤澤,英司 新妻,成一 加藤,雅彦 森国,博全
発行元	日本土壌肥料學會
巻/号	80巻5号
巻号補足	
掲載ページ	p. 516-521
発行年月	2009年10月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



隔離床栽培における土壌可給態リン酸含量がトマトの養分吸収に与える影響

小宮山鉄兵¹・藤澤英司¹・新妻成一¹・
加藤雅彦^{1,2}・森国博全¹

キーワード 土壌可給態リン酸, 汁液診断, マグネシウム欠乏, 無機イオン

1. はじめに

施設栽培においては, 単一作物の連作による土壌病害や土壌の塩類集積が問題となっている. とくに, 施設土壌における土壌リン酸蓄積は他の地目と比較して顕著に進行している. 全国の施設土壌の可給態リン酸含量の平均値は 2250 mg kg^{-1} (P_2O_5 として) であり (小原ら, 2004), 国の地力増進基本指針 (農林水産省, 1997) で定められている改良目標値の $100 \sim 1000 \text{ mg kg}^{-1}$ (普通畑, 黒ボク土) を大きく上回っている.

一方で, 2007~2008 年にかけて, バイオエタノール用作物の増産, 途上国における肥料需要の高まりなどから肥料およびその原料の国際相場が高騰した. とくにリン酸資源は有限であり, 現在の技術で経済的に採掘できる量と 2003 年の生産量 (U.S. Geological Survey, 2004) をもとに耐用年数を試算した場合, 2004 年の時点で約 130 年で枯渇すると計算された.

今後も肥料, とくにリン酸肥料の価格は高騰, もしくは大きく変動することが予想され, リン酸の適正施肥による施肥コスト削減技術の確立が強く求められている.

土壌リン酸過剰を回避し, 適正施肥を推進するためには, そのリスクや弊害を科学的に明らかにし, 農業生産者や営農指導員に対して広く情報を発信していくことが必須である.

これまでに報告されている土壌リン酸過剰による弊害

として, 村上ら (2004) はアブラナ科作物の根こぶ病が助長されることを示した. また, 作物栄養の面からは, リン酸過剰によるダイズの亜鉛欠乏症の発生 (二見・藤井, 1985), コムギの鉄欠乏クロロシスの発生 (田中ら, 1989) などが報告されている. 本来, リン酸は過剰害が出にくい要素であると考えられていたが, 過度にリン酸が蓄積した土壌においては, 作物の生育, 養分吸収に何らかの影響があると考えられる. リン酸過剰による養分欠乏は亜鉛や鉄のような微量元素のみならず, 多量要素の欠乏も報告されている. 相馬ら (1983) はリン酸施肥量の増加に伴う作物体内リン酸濃度の上昇が作物体内カリウム (ホウレンソウ, シュンギク, ニンジン), カルシウム (ホウレンソウ, トウモロコシ) およびマグネシウム (シュンギク, トウモロコシ) 濃度の低下を引き起こすことを報告した.

可給態リン酸含量が異なる土壌を充てんした隔離床栽培においてトマトを栽培したところ, リン酸過剰土壌において中位 (3 段果房周辺)~上位葉 (5 段果房周辺) の葉脈間が黄化する現象が数作連続して発生し, 観察による栄養診断および葉分析の結果よりマグネシウム欠乏症と断定した.

本研究では, 隔離床栽培において, リン酸可給力が異なる土壌でのトマトの養分吸収特性を検討し, 特に施設栽培で散見されるマグネシウム欠乏症との関係を明らかにした.

2. 材料および方法

1) 黄化葉の養分分析

本試験とは別に可給態リン酸含量が異なる土壌における栽培試験で黄化症状が見られた葉 (5 段果房周辺) の養分分析を行った. 葉は黄化症状の程度によって“無”, “中程度”および“高程度”に分けて採取し, 乾燥後に葉のカリウム, カルシウム, マグネシウム, リン酸, 鉄, 銅, 亜鉛含量を測定した. なお, “中程度”とは葉の葉脈間がやや黄化している状態で, 葉全体としてはモザイク状に黄化が見られる状態を示し, “高程度”とは葉の大部分が黄化している状態であった. これらの黄化症状の分類は筆者らが便宜的に用いたものであり, 目視による分類である.

2) 処理区概要 (試験 1)

神奈川県平塚市の JA 全農営農・技術センター内のガラス温室でトマト (*Solanum lycopersicum*) の隔離床栽培を行った. 隔離床にはくみあいスーパードレンベッド 85 (幅 0.85 m, 土層 0.15 m) を用い, 長さ 4.0 m を 1 区として行った. 表 1 には栽培前土壌の理化学性 (全区の平均値) を示した. この土壌はアロフェン質黒ボク土であり, CEC が高いという特徴がある. 交換性塩基含量は前作 (トマト) 終了後に炭酸カルシウム, 硫酸マグネシウムおよび塩化カリウムを用いて地力増進基本指針 (農林水産省, 1997) に示されている塩基バランスとなるように調整した. 実際には交換性カルシウム: マグネシウム: カリウムの当量比は全区画の平均で 69: 22: 9 であった.

表 2 には試験 1 の試験区の概要を示した. 前作栽培前に

Teppei KOMIYAMA, Eiji FUJISAWA, Seiichi NIIZUMA, Masahiko KATO and Hiromasa MORIKUNI: The influence of soil available phosphorus level on nutrient uptake of tomatoes in isolated bed culture

¹ JA 全農営農・技術センター肥料研究室 (254-0016 平塚市東八幡 5-5-1)

² 現在, JA 全農福岡肥料農業事業所 (812-0039 福岡市博多区冷泉町 5-35 福岡祇園第一生命ビル 5F)

2009 年 4 月 6 日受付・2009 年 7 月 9 日受理

日本土壌肥科学雑誌 第 80 巻 第 5 号 p.516~521 (2009)

表1 栽培前土壌の理化学性（可給態リン酸含量を除く）

	pH	交換性塩基 (cmolc kg ⁻¹)				塩基飽和度 (%)	Ca : Mg : K 当量比	CEC ^{*1} (cmolc kg ⁻¹)	リン酸吸収係数 ^{*1} g P ₂ O ₅ kg ⁻¹
		Ca	Mg	K	Na				
分析値 ^{*2}	6.3±0.2	28.7±3.7	9.0±0.7	3.8±0.7	0.8±0.2	87.0±9.1	69:22:9	47.7	17.3
改良目標値 ^{*3}	6.0~6.5	—	—	—	—	60~90	(65-75) : (20-25) : (2-10)	15以上	—

*1 原土

*2 全区画の平均値±標準偏差

*3 地力増進基本指針（農林水産省, 1997）による

表2 試験区概要（試験1）

処理区	初期土壌リン酸濃度 ^{*1}	リン酸施肥量 (g P ₂ O ₅ 株 ⁻¹)
低 P-P0	低 (55±35 ^{*2})	0
低 P-P5	低 (55±35)	5
適正 P-P0	適正 (390±28)	0
適正 P-P5	適正 (415±7)	5
高 P-P0	高 (910±226)	0
高 P-P5	高 (830±99)	5
過剰 P-P0	過剰 (3105±177)	0

*1 土壌可給態リン酸含量（トルオーグ法）：mg-P₂O₅ kg⁻¹

*2 分析値±標準偏差

重過石を用いて土壌可給態リン酸含量（トルオーグ法）がおよそ 50（低 P 区）、500（適正 P 区）、1000（高 P 区）、3000（過剰 P 区）mg-P₂O₅ kg⁻¹ の 4 段階となるように調整し、前作終了後の土壌を蒸気消毒後、そのまま本試験に用いた。従って、実測値は目標値をやや下回ったが、リン酸肥料と土壌との反応が十分に進行していたと考えられ、よりリン酸蓄積の実態にあった土壌状態であると考えられた。処理区はそれぞれの土壌リン酸濃度につきリン酸無施用区（P0 区）と株あたりリン酸を 5g 施用した区（P5 区）を設けた。ただし、過剰区ではリン酸無施用区のみとした。なお、窒素およびカリウムについては生育阻害要因とならないよう、被覆 NK 化成（100 日溶出タイプ）および硝酸加里を用いて定植前に充分量（窒素：10 g 株⁻¹、カリウム 9.5 g 株⁻¹）施用した。試験は 2 連で行った。

3) 耕種概要および調査方法（試験1）

品種は“桃太郎なつみ”（タキイ種苗）を用い、1 区あたり 19 株のちどり植えとした。栽植密度は 5.6 株 m⁻² となり、株あたりの土壌容量は約 27 L 株⁻¹ であった。2008 年 2 月 26 日に播種し、市販の育苗培土でポット育苗を行った後、4 月 8 日に定植を行い、7 月 17 日に栽培を終了した。5 段果房の上葉 2 枚を残して摘心し、1 段あたり 5 果を目標に摘果した。栽培にあたっては暖房により最低気温が 10℃を下回らないように管理した。

生育期間中の栄養診断として 2 段および 5 段果房の肥大時に果実直下葉の葉柄汁液をニンニク搾汁器で採取し分析に供した。葉柄の採取時刻はいずれも午前 9~10 時の間とした。果実収量については 1 処理区あたり 12 株分の成熟した果実重量を 1 株ずつ測定した。2 段および 5 段果房については 1 処理区あたり 6 果の養分含有率を測定した。ただし、低 P-P0 区では 5 段果房の収穫が不可能であったため、4 段果房の養分含有率を測定した。

4) 処理区概要（試験2）

より詳細な検討を行うために追試としてポット試験を行った。ポットには市販の育苗ポット（容量：1.1 L）を用い、培土としてピートモスとバーミキュライトを容積比が 1 : 1 となるように混合し、炭酸カルシウムで pH を約 6.5 に合わせたものをポットあたり 1 L 充てんした。また、培土には熔成微量要素複合肥料（FTE）を添加した。施肥は養液で行い、培土が乾燥した場合、全てのポットに等量灌水した。

処理区（養液組成）は以下のように設定した。養液のリン酸濃度を試薬のリン酸カリウムによって 0.25, 0.5, 1 (mmol L⁻¹) の 3 段階に設定した。各々のリン酸濃度において試薬の硫酸マグネシウムによってマグネシウム濃度を 0.25, 0.5, 1 (mmol L⁻¹) の 3 段階に設定した。すなわち、計 9 処理区を設けた。窒素およびカリウム濃度はそれぞれ試薬の硝酸アンモニウムおよび硫酸カリウムを用いて全ての区で 5 (mmol L⁻¹) となるように調整した。カルシウムは培土の pH 調整のために炭酸カルシウムを充分量添加したため、養液には添加しなかった。

5) 耕種概要および調査方法（試験2）

品種は“桃太郎 J”（タキイ種苗）を用い、セルトレイ（128 穴）に播種をした。数日間セルトレイで育成した後、2008 年 11 月 17 日に培土に移植し、2009 年 1 月 6 日に栽培を終了した。栽培後は地上部全体（茎葉）を養分分析に供試した。栽培は試験 1 と同じく、ガラス温室内で行い、栽培期間中の温度は 10℃を下回らないように暖房した。

6) 分析方法

葉柄汁液はイオンクロマトグラフ（DX-120, Dionex）法で陽イオンおよび陰イオン濃度を測定した。トマトの茎葉は 80℃で通風乾燥したのち、100℃で絶乾し、乾物生産量を求めた。また、NC アナライザー（Smigraph NC-900, 住化分析センター）により窒素含有率を、乾式灰化-塩酸抽出液を ICP（SPS-3000, セイコーインスツルメンツ）発光分析法により分析し、リン酸および塩基（カリウム、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム）含有率を求めた。

トマトの果実は 70℃で通風乾燥したのち乾物生産量を求め、湿式分解-ケルダール（2300 Kjelttec, Tecator）法により窒素含有率を、乾式灰化-塩酸抽出液を ICP 発光分析法により分析し、リン酸および塩基含有率を求めた。

3. 結果および考察

1) 黄化葉の分析結果

表 3 に黄化程度の異なる葉の分析結果を示した。葉の黄

化の進行に伴ってカルシウムおよびマグネシウム含量が低下した。特に黄化症状が見られた葉のマグネシウム含量は黄化症状が無い葉の21~68%となっており、他の元素と比較して低下割合が大きかった。従って、観察された黄化症状はマグネシウム欠乏症と断定された。また、黄化症状が見られた葉のリン酸含量は症状が無い葉と比較して有意に高かった。

2) 葉柄汁液の養分濃度 (試験1)

表4には2段および5段果房直下の葉柄汁液養分濃度を示した。2段および5段果房いずれの直下の葉柄汁液リン酸濃度も土壌可給態リン酸含量の上昇に伴って増加した。また、低P-P0区を除いて、5段果房直下葉柄汁液のリン酸濃度は2段果房のそれよりも低くなった。とくに過剰P-P0区以外では半分以下の濃度にまで低下した。

林ら(2006)によれば、5段果房直下葉柄汁液リン酸濃度の目標値は150~200 mg-P L⁻¹ (4.8~6.5 mmol L⁻¹)であり、高P-P0区ではこの値を上回っており、栽培前の土壌可給態リン酸含量が1000 mg-P₂O₅ kg⁻¹付近である場合は、施肥リン酸の効果は小さいと考えられた。

また、林ら(2003)はトマトを隔離床で施肥窒素量を変えて栽培した場合、葉柄汁液リン酸濃度と硝酸態窒素濃度との間に有意な負の相関関係があること、すなわち硝酸吸収とリン酸吸収は拮抗関係にあることを示した。本研究ではリン酸欠乏により、特に低P区で葉柄汁液硝酸態窒素濃度が低かった。一方、高P区や過剰P区で硝酸態窒素

濃度の低下は見られず、リン酸過剰による硝酸態窒素の吸収抑制は起こりにくいと考えられた。

葉柄汁液のカリウム濃度は低P-P0区を除く全ての区において2段果房直下よりも5段果房直下が高く、カリウムのトマト体内での移行性は高いと考えられた。5段果房直下の葉柄汁液カルシウム濃度は2段果房直下の43~57%であり、従来指摘されているようにトマト体内でのカルシウムの移行性は低かった。

葉柄汁液のマグネシウム濃度には土壌リン酸の可給性の影響が顕著に表れた。すなわち、葉柄汁液のリン酸濃度とマグネシウム濃度との間には有意(2段, 5段果房直下ともに $p < 0.01$)な負の相関関係があった。その傾向は特に5段果房直下で明確に現れた。特に高い土壌中のリン酸濃度の区ではマグネシウムの移動が抑制され、高P-P0区、高P-P5区および過剰P-P0区の5段果房直下葉柄汁液のマグネシウム濃度は2段果房直下と比較してそれぞれ79, 54および63%に低下していた。観察によれば、生育中期より高P区および過剰P区の中位葉(3段果房周辺)から上位葉にかけて葉脈間が黄化するマグネシウム欠乏症が見られ、その症状はとくに過剰P-P0区で甚だしかった。北村・米山(1994)はキュウリ体内において、リン酸がカルシウムの移行を抑制していることを示した。リン酸とマグネシウムの関係については触れられていないが、マグネシウムはキュウリ葉で比較的不動化しやすい元素であること、すなわち葉の全マグネシウムに対する汁液(葉柄+葉

表3 黄化程度の異なる葉の分析結果

黄化程度	K ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Fe	Cu	Zn
	% * ¹						
	mg kg ⁻¹ * ¹						
無	4.15 (100)* ² a * ³	6.46 (100)a	0.76 (100)a	0.63 (100)b	99.8 (100)a	14.9 (100)b	25.2 (100)a
中程度	3.70 (89) a	5.17 (80) b	0.52 (68) a	2.60 (413)a	75.8 (76) a	19.4 (130)a	44.4 (176)a
高程度	3.85 (93) a	3.71 (57) c	0.16 (21) b	2.16 (343)a	93.3 (93) a	15.7 (106)ab	23.8 (95) a

*¹乾物あたり

*²カッコ内は黄化症状が“無”の葉の含量を100とした時の値

*³異なるアルファベットは養分含量に有意差 ($p < 0.05$) があることを示す (Tukey 法)

表4 2段および5段果房直下葉柄汁液養分濃度 (mmol L⁻¹)

処理区	陰イオン				陽イオン			
	Cl	NO ₃ -N	PO ₄ -P	SO ₄	Na	NH ₄ -N	K	Mg
2段果房直下								
低P-P0	17.0 c	121.6 b	0.2 c	8.4 b	3.8 a	1.1 b	64.6 c	62.4 a
低P-P5	22.2 abc	188.8 a	1.1 c	14.8 a	3.7 a	1.6 b	100.2 b	26.3 b
適正P-P0	26.9 ab	198.1 a	4.0 bc	14.8 a	2.9 a	2.7 ab	130.3 a	21.8 b
適正P-P5	29.4 a	197.3 a	7.2 b	16.5 a	3.5 a	2.2 ab	132.9 a	20.9 b
高P-P0	22.7 abc	204.4 a	14.8 a	15.5 a	2.8 a	3.7 ab	139.1 a	18.3 b
高P-P5	19.6 bc	199.0 a	13.5 a	15.0 a	2.8 a	5.0 a	131.1 a	16.6 b
過剰P-P0	24.4 abc	198.4 a	17.7 a	18.6 a	3.5 a	5.1 a	139.9 a	18.1 b
5段果房直下								
低P-P0	52.5 a	80.3 b	0.2 d	13.5 a	3.8 a	2.6 a	61.7 c	66.5 a
低P-P5	9.4 b	94.8 b	0.3 d	7.9 a	4.2 a	0.8 a	119.6 b	43.5 ab
適正P-P0	19.9 b	127.2 ab	1.7 cd	11.2 a	3.5 a	0.7 a	175.1 a	22.3 bc
適正P-P5	18.1 b	173.0 a	3.3 c	13.2 a	3.7 a	1.0 a	190.6 a	16.5 bc
高P-P0	12.9 b	198.2 a	7.3 b	16.1 a	4.3 a	1.2 a	189.0 a	9.9 c
高P-P5	11.3 b	172.5 a	6.7 b	13.9 a	3.2 a	0.9 a	178.6 a	10.5 c
過剰P-P0	11.5 b	183.2 a	14.2 a	15.6 a	4.6 a	1.1 a	184.6 a	7.3 c

*¹ 異なるアルファベットは各果房直下において養分濃度に有意差 ($p < 0.05$) があることを示す (Tukey 法)

身) 中のマグネシウムの割合が低いことを示した。

マグネシウム欠乏は通常は下位葉より発現するとされているが、トマトでは中位葉から上位葉にかけてマグネシウム欠乏が発現する事例が報告されており(武井ら, 1977; 中野ら, 2008), これはマグネシウムの下位葉から上位葉への移動速度が遅く(有沢ら, 1978), 果実肥大期には葉から果実への急激な転流が起こるため、マグネシウム蓄積の少ない中位葉～上位葉にマグネシウム欠乏症が表れたものと考えられている。池田ら(1991)は異なる生育ステージにおけるトマトの葉柄汁液の養分濃度を測定しており、本試験の結果と同様に葉位が上がるとともに葉柄汁液のマグネシウム濃度は低下することを示した。また、低位葉と高位葉の葉柄汁液マグネシウム濃度の差は定植後30, 90日よりも生育が盛んな60日で大きいことを示した。

以上より、トマト体内での移行速度が小さいマグネシウムは過剰に吸収されたリン酸により、その移行が抑制されている可能性が考えられた。より詳細に検討するためには各葉位のマグネシウムの形態を細かに分別することが必要である。

3) 作物の収量と養分吸収量(試験1)

図1にトマトの収量を示した。全収量は低P-P0区で有意に低かった。果房別の収量を比較すると、1段～5段果房では処理間に有意な差はなかった。4段果房では低P-P0区で有意に低く、リン酸欠乏によるものであった。5段果房では低P-P0区の収量はほぼ皆無であった。また、低P-P5区では有意差はないが、他区と比較して収量は低く、

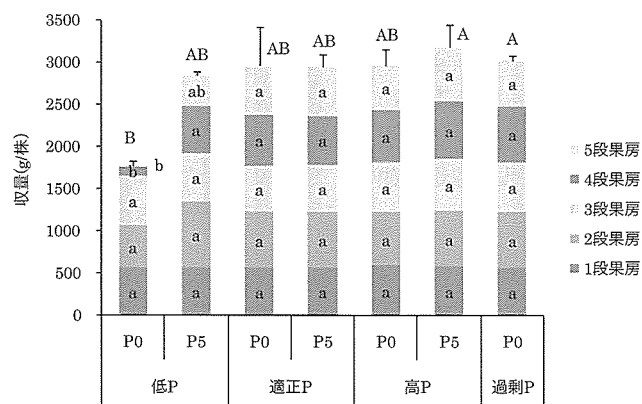


図1 トマトの収量

異なる大文字アルファベットは処理間で全体の収量に有意差($p < 0.05$)があることを示し、小文字は各果房収量に有意差($p < 0.05$)があることを示す(Tukey法)。

収穫が皆無の株もあった。

表5には栽培終了時の茎葉の養分含量を示した。茎葉のリン酸含量は土壌の可給態リン酸含量およびリン酸施肥の有無を良く反映した。葉柄汁液リン酸濃度と茎葉リン酸濃度との間には正の直線関係があり(2段果房: $r=0.97^{***}$, 5段果房: $r=0.99^{***}$), 葉柄汁液を利用したリン酸の栄養診断が馬鈴薯(建部ら, 2001)やキュウリ(山崎・六本木, 2006)と同様にトマトにも適用できると考えられた。

トマト茎葉のカリウム濃度は低P-P0区および低P-P5区で有意に低く、リン酸欠乏による生育低下が原因と考えられた。カリウムとは異なり、カルシウムやマグネシウム含量は低P-P0区で最も高くなった。特に低P-P0区のマグネシウム含量は最も低い高P-P5区の約3倍となった。

表6にはトマト果実の養分含量を示した。果実のリン酸含量は茎葉と同様に土壌の可給態リン酸含量およびリン酸施肥の有無を良く反映した。一方で、茎葉について処理間差が見られたカルシウム、マグネシウム含量は果実では大きな差はなかった。

表7には地上部養分吸収量を示した。リン酸欠乏により生育が低下した低P-P0区および低P-P5区ではほとんどの養分の吸収量は他区と比較して低かった。しかし、低P-P5区におけるマグネシウム吸収量は全ての処理区の中で最も高かった。一方、リン酸供給量の増加に伴い、リン酸吸収量が増加した区では、カリウムおよびカルシウム吸収量が高く、マグネシウム吸収量が低い傾向があった。トマトの塩基の吸収においては、そのバランスが重要であるとされており、水耕試験によってそれらの相互作用が検討されている(田中ら, 1991)。本試験の栽培前には、地力増進基本指針(農林水産省, 1997)に示されている塩基バランスとなるように土壌の調整を行っており、塩基の供給力は全ての区で同等である。それにも関わらず、高P-P5区や過剰P-P0区ではマグネシウムの吸収量が低下していた。

表8には跡地土壌(深さ約0.1m)の交換性および水溶性マグネシウム含量を示した。処理間で有意差は得られなかったが、トマト茎葉のマグネシウム含量や地上部マグネシウム吸収量と負の相関関係が得られ、リン酸供給力が低い土壌ではトマトによるマグネシウム吸収量は多く、反対にリン酸供給力が高い土壌ではマグネシウム吸収量は抑制された傾向があることが示唆された。

以上の結果より、土壌の交換性マグネシウム含量が充分

表5 トマト茎葉の養分含量(乾物%)

処理区	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
低P-P0	2.80 c	0.26 e	2.65 c	5.93 a	3.00 a	0.11 b
低P-P5	3.29 b	0.48 e	4.94 b	5.45 ab	2.19 b	0.14 ab
適正P-P0	3.44 ab	0.82 d	6.78 a	5.17 bc	1.46 c	0.12 ab
適正P-P5	3.46 ab	1.17 c	6.82 a	5.03 bc	1.36 cd	0.13 ab
高P-P0	3.61 ab	1.99 b	7.06 a	4.62 c	1.22 cd	0.12 ab
高P-P5	3.49 ab	2.04 b	7.39 a	4.81 bc	1.08 d	0.11 ab
過剰P-P0	3.63 a	2.80 a	7.32 a	4.62 c	1.09 d	0.15 a

*1 異なるアルファベットは養分含量に有意差($p < 0.05$)があることを示す(Tukey法)

表6 トマト果実の養分含量 (mg g^{-1}) *1

処理区	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
2段果房						
低 P-P0	1.19 c ^{*2}	0.13 e	1.43 c	0.10 a	0.17 ab	0.25 a
低 P-P5	1.25 bc	0.38 d	1.92 bc	0.07 a	0.18 a	0.26 a
適正 P-P0	1.48 ab	0.51 c	2.40 ab	0.07 a	0.19 a	0.24 a
適正 P-P5	1.58 a	0.56 c	2.63 a	0.08 a	0.18 a	0.21 a
高 P-P0	1.34 abc	0.72 b	2.33 ab	0.08 a	0.16 ab	0.24 a
高 P-P5	1.40 abc	0.73 ab	2.18 ab	0.09 a	0.15 b	0.26 a
過剰 P-P0	1.39 abc	0.84 a	2.53 a	0.09 a	0.17 ab	0.20 a
5段果房						
低 P-P0	1.21 ab	0.18 e	1.98 b	0.07 a	0.20 ab	0.18 a
低 P-P5	1.15 b	0.31 d	1.99 b	0.06 a	0.18 ab	0.17 a
適正 P-P0	1.28 ab	0.42 cd	2.48 ab	0.06 a	0.18 ab	0.19 a
適正 P-P5	1.44 ab	0.52 bc	2.84 a	0.06 a	0.20 a	0.19 a
高 P-P0	1.56 a	0.61 ab	3.02 a	0.06 a	0.18 ab	0.14 a
高 P-P5	1.30 ab	0.65 ab	2.77 a	0.06 a	0.17 ab	0.14 a
過剰 P-P0	1.09 b	0.71 a	2.54 ab	0.08 a	0.15 b	0.18 a

*1 生重あたり *2 異なるアルファベットは養分含量に有意差 ($p < 0.05$) があることを示す (Tukey 法)

表7 トマト地上部養分吸収量 (g 株^{-1})

処理区	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
低 P-P0	3.61 d	0.41 d	4.42 c	3.27 b	1.90 b	0.44 b
低 P-P5	6.80 c	1.47 cd	10.7 b	5.78 ab	2.76 a	0.75 a
適正 P-P0	8.32 b	2.38 bc	15.5 a	6.68 a	2.37 ab	0.79 a
適正 P-P5	9.27 ab	3.24 b	17.5 a	7.21 a	2.46 ab	0.78 a
高 P-P0	10.4 a	5.31 a	19.9 a	7.97 a	2.57 ab	0.77 a
高 P-P5	9.37 ab	5.18 a	18.5 a	7.24 a	2.09 ab	0.80 a
過剰 P-P0	9.17 ab	6.52 a	18.5 a	7.11 a	2.11 ab	0.80 a

*1 異なるアルファベットは養分吸収量に有意差 ($p < 0.05$) があることを示す (Tukey 法)

表8 跡地土壌の交換性および水溶性マグネシウム含量 (cmolc kg^{-1})

処理区	交換性	水溶性
栽培前	9.0	—
低 P-P0	7.10 a	0.21 a
低 P-P5	7.48 a	0.42 a
適正 P-P0	8.80 a	1.02 a
適正 P-P5	8.54 a	0.55 a
高 P-P0	8.43 a	0.53 a
高 P-P5	8.59 a	0.81 a
過剰 P-P0	9.21 a	1.68 a

*1 異なるアルファベットは含量に有意差 ($p < 0.05$) があることを示す (Tukey 法)

であり、塩基バランスが適正であったとしても土壌の可給態リン酸含量の増加に伴うトマトのリン酸吸収量の増加がマグネシウム吸収量の低下を誘発する可能性が示唆された。

4) ポット試験による実証試験 (試験2)

ポット試験におけるリン酸およびマグネシウムの吸収量を図2に示した。試験1の結果と同様に養液のリン酸濃度の上昇に比例してトマト地上部のリン酸吸収量は増加した。なお、最も高い養液のリン酸濃度 (Pとして 1 mmol L^{-1}) は試験1の栽培期間における過剰 P-P0 区の土壌溶液濃度 (0.8 mmol L^{-1}) に相当した。

一方、養液のリン酸濃度が一定であれば養液のマグネシ

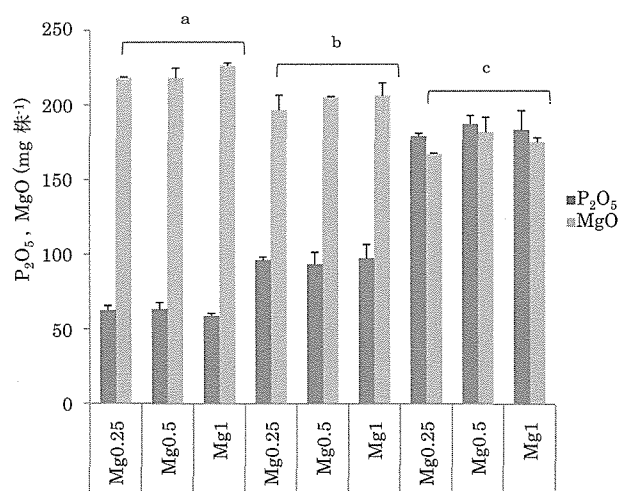


図2 ポット試験におけるリン酸およびマグネシウム吸収量 図中のPおよびMgの後の数字は養液の濃度 (mmol L^{-1}) を表す。また、異なるアルファベットは処理リン酸濃度が異なる処理間でマグネシウム吸収量に有意差 ($p < 0.05$) があることを示す (Tukey 法)。

ウム濃度が上昇してもトマト地上部のマグネシウム吸収量に大きな差は見られなかった。また、養液のマグネシウム濃度によってリン酸吸収量が促進するという傾向もみられなかった。養液リン酸濃度の異なる処理間でトマト地上部マグネシウム吸収量の有意差検定を行ったところ、リン酸濃度が異なる3区におけるマグネシウム吸収量には有意差

(Tukey 法, $p < 0.05$) が認められ, リン酸吸収量の増加に伴いマグネシウムの吸収量は低下した。

一方で, リン酸の吸収量とカリウムおよびナトリウムの吸収量には正の相関 (カリウム $r = 0.727$, $p < 0.01$; ナトリウム $r = 0.808$, $p < 0.01$) があった。

リン酸吸収量とマグネシウムおよびカルシウムの吸収量には負の相関があり (マグネシウム $r = -0.956$, $p < 0.01$; カルシウム $r = -0.924$, $p < 0.01$), この結果は試験 1 の地上部養分吸収量の結果 (表 7) と一致した。

以上の結果より, トマトのリン酸吸収量が増加した場合, リン酸イオンの随伴イオンとしてカリウムやナトリウムが選択され易く, 反対にマグネシウムやカルシウムは選択されにくく吸収量の低下となる可能性が示唆された。

4. 要 約

トマトの隔離床栽培においてリン酸過剰土壌で葉の黄化症状が発生し, 葉分析の結果からマグネシウム欠乏と考えられた。土壌可給態リン酸含量およびリン酸の施肥の有無を変えて, 栽培試験を行った。下位葉 (2 段果房直下) 葉柄汁と上位葉 (5 段果房直下) の葉柄汁分析結果より, リン酸吸収量の増加に伴い, マグネシウムのトマト体内での移行性が低下している傾向が見られた。特に, 高 P 区, 過剰 P 区では栽培期間中に中位葉～高位葉にかけてマグネシウム欠乏症が発生した。

また, 茎葉養分含量および地上部養分吸収量の結果より, リン酸吸収量の増加に伴いマグネシウム吸収量自体が抑制されていた。

より精密に検討するためにポット試験を行った結果, トマトのリン酸吸収量とマグネシウムおよびカルシウム吸収量との間には有意な負の相関があり, 反対にカリウムおよびナトリウム吸収量とは有意な正の相関があった。従って, トマトのリン酸吸収の際の随伴イオンとしてマグネシウムは選択性が高くなく, 過剰にリン酸が吸収される際は吸収量が低下する可能性がある。

以上の結果よりリン酸過剰土壌 (可給態リン酸含量 (トルオーグ法) $3000 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 程度) ではトマトのリン酸吸収量が増加し, 作型や栽培体系によってはマグネシウムなどの吸収が抑制され, またそれらの体内移行性が低下する。その結果, 栄養診断や土壌診断の結果が適切に反映されなくなることも考えられる。今後は, 特に施設栽培においてリン酸過剰が作物の養分吸収に及ぼす影響を解明していく必要がある。

謝 辞: 本研究を実施するにあたり, 栽培試験および分析にご協力いただきました, (株) 全農ビジネスサポート

平塚支店肥料グループの皆様深く感謝いたします。また, ご指導・ご助言を賜った JA 全農営農・技術センター技術主管上野正夫博士に深く謝意を表します。

文 献

- 有沢道雄・早川岩夫・浅野峯夫・稲垣育雄 1978. 水耕栽培トマトの黄化葉に関する研究 (第2報) 形態別マグネシウムの転流について. 愛知農総試研報, B10, 15-20.
- 二見敬三・藤井 浩 1985. 土壌蓄積リン酸が大豆の生産性と養分吸収に及ぼす影響. 兵庫県農業総合センター研究報告, 33, 21-26.
- 林 康人・新妻成一・久保省三 2003. 灌水施肥 (溶液土耕) 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.
- 林 康人・加藤雅彦・小林 新・久保省三 2006. 点滴灌水施肥栽培における土壌の養分含量を考慮したリン酸の適正施肥. 土肥誌, 77, 555-561.
- 池田英男・宇留嶋美奈・鈴木芳夫 1991. 園芸作物の栄養診断に関する研究 (第2報) 試料の調整法ならびにトマト葉柄より採取した汁液の無機要素濃度. 園学雑, 60, 330-331.
- 北村秀教・米山忠克 1994. 培地カルシウムの違いがキュウリ, コマツナの生体液のカチオン・アニオン濃度におよぼす影響. 土肥誌, 65, 660-669.
- 村上圭一・中村文子・後藤逸男 2004. 土壌のリン酸過剰とアブラナ科野菜根こぶ病発病の因果関係. 土肥誌, 75, 453-457.
- 中野明正・河崎 靖・佐々木英和・中野有加・安場健一郎・鈴木克己・高市益行 2008. トマトの根域加温はマグネシウムの吸収を促進することにより葉の黄化を抑制する. 根の研究, 17, 41-44.
- 農林水産省 1997. 地力増進基本指針. http://www.maff.go.jp/j/study/kankyo_hozen/03/pdf/ref_data2.pdf
- 小原 洋・中井 信 2004. 農耕地土壌の可給態リン酸の全国変動 農耕地土壌の特性変動 (II). 土肥誌, 75, 59-67.
- 尾和尚人 1996. わが国の農作物の養分収支. 平成8年度関東東海研究会 養分の効率的利用技術の新たな動向, p. 1-15. 農林水産省農業研究センター, つくば.
- 相馬 暁 1983. 野菜栽培土壌の富栄養化に対応した肥培管理法の確立 第6報 P 過剰蓄積に伴う養分吸収の抑制. 土肥要旨集, 29, 219.
- 武井昭夫・有沢道雄・早川岩夫・稲垣育雄 1977. 水耕トマトの黄化葉に関する研究. 愛知農総試研報, B9, 29-35.
- 田中啓文・磯部泰宏・鈴木康広 1989. リン酸過剰コムギにおける鉄の不活性化と鉄クロロシス. 名城大学農学部学術報告, 25, 1-6.
- 田中啓文・扇本隆浩・佐橋秀男 1991. トマト幼植物葉中のカルシウムとマグネシウム含有率に及ぼす水耕培地中のこれら塩基の相互作用. 土肥誌, 62, 507-511.
- 建部雅子・細田洋一・笠原賢明・唐澤敏彦 2001. パレイショの葉柄汁液を用いた栄養診断. 土肥誌, 72, 33-40.
- U.S. Geological Survey 2004. Mineral Commodity Summaries, January 2004.
- 山崎晴民・六本木和夫 2006. 葉柄汁液の無機リンを指標としたキュウリの栄養診断. 土肥誌, 77, 691-694.
- 安田 環・藤井義晴 1983. 培地のリン濃度とトマトの生育および体内リン濃度との関連性について. 土肥誌, 54, 406-410.