

培養液のリン濃度がキュウリの生育および リン吸収に及ぼす影響

安 東赫・岩崎 泰永・河崎 靖
東出 忠桐・中野 明正・鈴木 克己

(平成 25 年 9 月 25 日受理)

Influence of Phosphorus Concentration in the Nutrient Solution on the Growth and Phosphorus Absorption of Hydroponic Cucumber

Dong-Hyuk Ahn, Yasunaga Iwasaki, Yasushi Kawasaki,
Tadahisa Higashide, Akimasa Nakano and Katsumi Suzuki

I 緒 言

近年、リン資源の枯渇が懸念されており（黒田ら、2005）、肥料価格の高騰による生産コストの上昇など、生産者の負担が増えているため、野菜生産におけるリン施用量を軽減するとともに利用効率を向上させる技術の開発が求められている。

リンは重要な多量元素として、作物の生育に欠かせない栄養分である（Schachtman ら、1998）。体内のリンが欠乏すると光合成が抑制され、成長速度が低下する（Sawada ら、1982, 1990；Sharkey・Vanderveer, 1989；von Caemmerer・Farquhar, 1981；Zhang ら、2012）とされ、リンは施肥管理において重要な要素である。作物は一般的に低リン条件に強いとされ（渡辺、2009）、過剰施用による障害が出にくく、土壌の種類によっては施用効率が低いことから、吸収量に比べて大量に施用される傾向がある。実際に作物が栽培されている施設の土壌では、リン酸の蓄積が著しく増加しているとする報告もあり（小原・中井、2004；小宮山ら、2009）、蓄積したリンの有効利用に関する取り組みも増えている。

作物のリン含有量は窒素やカリウムに比べて少ないが（尾和、1996）、施肥量に従って吸収量も増加する、いわ

ゆる贅沢吸収の傾向がみられる。

施肥効率が高いとされる養液栽培でも吸収量に応じた処方にも関わらず、リンの施用量は吸収量に比べて高めに設定されている処方が多い（日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会、2012）。したがって、栽培方法に関わらず、既存の施肥体系の見直しやリン施用量を軽減する技術の確立が必要とされる。

一方、葉柄汁液分析は養分の吸収状況や根域の養分濃度を簡易に予測するのに有効とされる方法で、窒素、リン、カリを中心に多くの研究がなされ（Hochmuth, 1994）、リンについても栄養診断のツールとして利用される事例がある（山崎・六本木、2006）。古くから土壌中のリン濃度の判定方法やリン濃度に対する生育反応を調べた研究は多い。しかし、土壌中におけるリンの可溶化機構が複雑であり、リン濃度の設定が難しいため、汁液診断値のばらつきが大きく、根域のリン濃度と生育およびリンの吸収との関係性の解析が困難である。また、キュウリにおいて根域のリン濃度と物質生産との関係を評価した例は少ない。特にリン吸収と生産性との因果関係は不明な部分が多いため、リンの吸収および利用効率を定量化するとともに、根域と体内のリン濃度の変動を明確にする必要がある。

そこで、本研究では、キュウリ栽培におけるリン施肥

量を見直すための基礎的知見を得ることを目的として、異なるリン濃度の養液栽培におけるキュウリの生育反応を調べるとともに、リン吸収と物質生産との関係について評価した。

II 材料および方法

本研究は野菜茶業研究所（愛知県武豊町）内のガラスハウス（80 m²、軒高 2.2m）で行った。施設の促成栽培で一般的に用いられるキュウリ「エテルノ」（ときわ研究所）を供試し、2012年9月10日に72穴セルトレイに播種した。閉鎖系苗生産システム（苗テラス、三菱樹脂アグリドリーム株）を利用して昼温 25℃、夜温 20℃、日長 12 時間、CO₂ 濃度 900ppm 条件下で育苗後、9月27日に湛液水耕栽培装置に定植した。水耕栽培装置として、プラスチック製コンテナ（長さ 65 × 幅 40 × 高さ 15 cm）3 つに 200L の液肥タンクを連結したものをを用いた。水位調節弁により、植物体が吸収した培養液を自動的に補充し、コンテナ内の水位が常に 12 cm を維持するようにした。1 コンテナ当たり 4 個体を 2 条千鳥植えて定植した。各処理は 4 個体 × 3 反復の計 12 個体としたが、両端の 2 個体はボーダーとして調査対象からは外した。栽植密度は約 3.4 plant m⁻² であった。主枝は摘心せず、すべての側枝を除去しながら、1 本仕立てで誘引を行った。誘引の高さはベッドから 1.7m とし、上段に達すると約 30 cm ずつ下しを行った。また、最上位完全展開葉から第 14 葉以下の葉は定期的に摘葉し、重量を調査した。

培養液は、硝酸カリウム、硝酸カルシウム、硫酸マグネシウム、硫酸アンモニウムを用い、N, K, Ca および Mg 濃度がそれぞれ 8, 4, 4 および 2 me L⁻¹ になるようにした。リン濃度のみを異にして 5 処理区を設けた。培養液のリン濃度のみを変えるため、培養液のリン濃度が 0.2, 0.4, 0.8, 1.4 および 2.2 me L⁻¹（以降、それぞれ P0.2, P0.4, P0.8, P1.4 および P2.2 とする）になるようにリン酸二水素カリウムを添加した。リン酸二水素カリウムの添加によって生じたカリウムの濃度差は塩化カリウムを用いて処理区を通じて同じ濃度になるように調整した。微量元素として大塚ハウス 5 号（大塚アグリテクノ株）を用いた。実験期間中、培養液の循環は行わず、コンテナの培養液は液肥タンクの培養液と混合されないようにした。コンテナの培養液は 3 日ごとに捨て、液肥タンクの培養液に更新した。定期的にコンテナ内の培養液を採取し、リン濃度の推移を調査した。また、

コンテナ内の培養液には 24 時間エアレーションを行った。栽培期間中、気温が 25℃ 以上になると換気扇が稼働し、天窓、側窓が開くように、15℃ 以下になると温風暖房機が稼働するように設定した。室内の湿度および CO₂ 濃度は成り行きとした。

収穫調査では、100g 前後に達した果実を収穫し、その重量を測定した。栽培は 11 月 30 日まで行い、栽培終了後にすべての株を解体し、生育調査および無機元素分析を行った。

収穫した果実および摘葉した葉について、それぞれの乾物率をもとに乾物重を算出し、栽培終了時の植物体の乾物重と合わせて総乾物生産量とした。

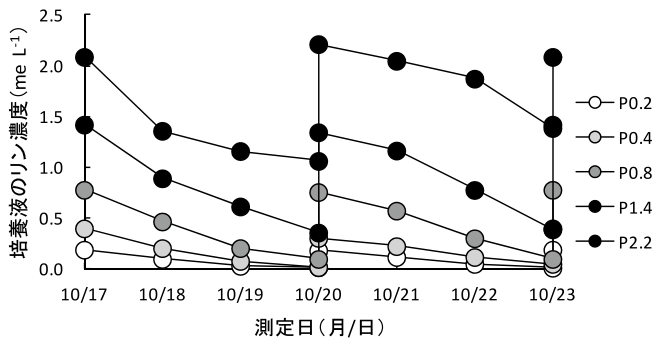
無機元素分析において炭素および窒素は炭素・窒素同時定量装置（MACRO CORDER JM1000CN, J-Science LAB Co., Ltd）を用い、その他の元素は湿式灰化後、ICP 発光分光分析装置（SPS7700, Seiko instruments Inc.）を用いて分析した。

培養液のリン濃度とリン吸収との関係を調べるため、定植後 19, 26, 47, 54 および 64 日目に最上位完全展開葉から第 7 葉を採取し、葉柄汁液のリン濃度および葉のリン含有率を測定した。栽培終了時には株の部位別リン濃度を調べるために、上位葉（第 1 ～ 5 葉）、中位葉（第 6 ～ 9 葉）、下位葉（第 10 ～ 14 葉）に分け、それぞれの葉柄汁液のリン濃度および葉のリン含有率を測定した。葉柄汁液を用いた分析では、葉柄 5g に水 50mL を加えてホモジナイズした後、遠心分離し、上澄み液のリン濃度を定量した。葉のリン含量は、乾燥・粉碎した後、硝酸で湿式分解したもので定量した。いずれもリン濃度の定量にはバナド・モリブデン酸法（石塚, 1985）を用い、分光光度計（U-3010, 日立）で測定した。

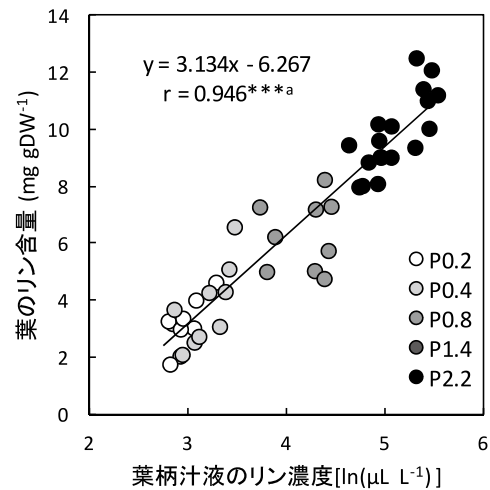
培養液のリン濃度による光合成への影響を調べるために、収穫開始期である定植後 27 日目に携帯型光合成蒸散測定装置（LI-6400, Li-Cor）を用い、個葉光合成速度を測定した。測定箇所は最上位完全展開葉から第 6 葉とした。加湿器でチャンバー内の湿度を 70% 程度に安定させ、CO₂ 濃度 400 および 1000 ppm、光合成光量子束密度（PPFD）1000 および 1500 μmol m⁻² s⁻¹ の条件下で測定を行った。

III 結 果

栽培期間中の各処理区におけるコンテナ内の培養液のリン濃度は、P0.2 区では 0.01 ～ 0.19, P0.4 区では 0.02 ～



図－1 培養液のリン濃度の推移
10月17、20および23日に培養液を更新



図－2 葉柄汁液のリン濃度と葉のリン含量との関係
arは相関係数，***は0.1%水準で有意

表－1 培養液のリン濃度がキュウリの生育および収量に及ぼす影響

処理	茎長 (cm)	節数	雌花数 ^a	葉面積 (m ² plant ⁻¹)	可販果収量 (gFW plant ⁻¹)	器官別乾物重(gDW plant ⁻¹)			
						根	茎	葉	果実
P0.2	375.8	33.3	9.0	0.29	422.8	13.0 (13.9 ^b)	14.6 (15.7)	49.3 (52.8)	16.4 (17.6)
P0.4	427.3	36.5	8.9	0.44	529.1	13.2 (10.7)	18.8 (15.3)	67.1 (54.5)	24.0 (19.5)
P0.8	403.4	36.7	8.3	0.51	484.5	13.1 (10.3)	20.9 (16.3)	72.4 (56.5)	21.8 (17.0)
P1.4	453.0	38.6	8.8	0.51	548.9	13.3 (8.8)	24.3 (16.2)	88.2 (58.7)	24.5 (16.3)
P2.2	444.6	38.8	8.8	0.52	656.5	14.0 (9.1)	24.2 (15.8)	86.6 (56.6)	28.1 (18.4)
r ^c	0.64	0.80	0.16	0.66	0.62	0.18	0.85	0.85	0.66
	** ^d	***	NS	**	*	NS	***	***	**

a 30節までの雌花数

b 全乾物重に対する割合(%)

c 培養液のリン濃度との相関係数

d NSは有意ではない，*，**，***はそれぞれ5，1，0.1%水準で有意

0.40，P0.8区では0.10～0.78，P1.4区では0.36～1.42，P2.2区では1.06～2.21 me L⁻¹の範囲で推移した（図－1）。

1 培養液のリン濃度と生育との関係

表－1に各処理区における収量および栽培終了時の生育調査の結果を示した。雌花数および根の乾物重を除いて、いずれの項目もリン濃度との間には有意な相関関係がみられ、特に葉および茎の乾物重における相関係数は高かった。培養液のリン濃度の低下に伴い、節数、葉面積、ならびに葉と茎の乾物重は有意に減少したが、P0.8区以下では大きく減少した。

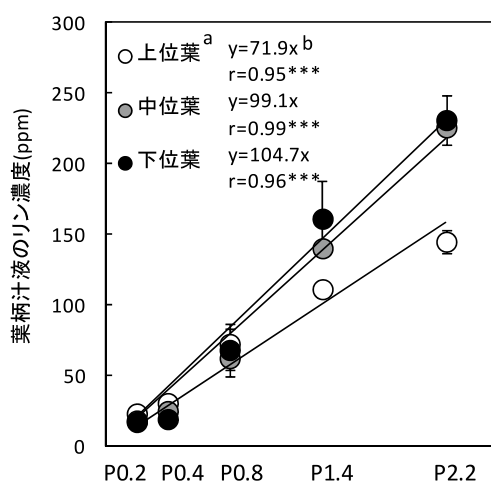
培養液のリン濃度が高くなると、茎と葉の乾物重は顕著に増加し、相関係数はいずれも0.85と果実の0.66に比べて高かった。しかし、根では培養液のリン濃度による

影響は認められなかった。総乾物生産に対する器官別の乾物分配率を計算すると、葉および茎、ならびに果実では処理による変動は少なかったが、根への分配率では他の器官に比べて処理間の差が大きく、培養液のリン濃度が低下すると、根への乾物分配が増加する傾向にあった。

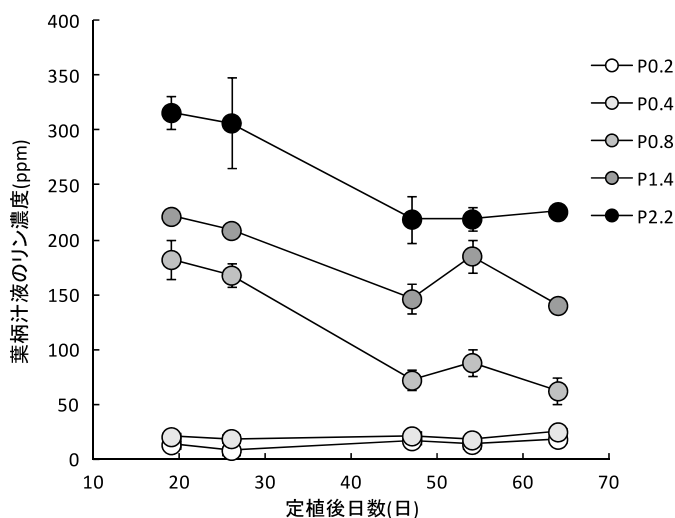
培養液のリン濃度が最も低かったP0.2区でも、栽培終了時までリンの欠乏によると考えられる症状はみられなかった。

2 培養液のリン濃度と葉柄汁液のリン濃度との関係

最上位完全展開葉から第7葉で定期的に測定した葉柄汁液のリン濃度と葉のリン含量との関係を図－2に示した。すべての処理区のデータで計算した結果、葉柄汁液のリン濃度の対数値と葉のリン含量の間には高い正



図－3 培養液のリン濃度と葉位別の葉柄汁液のリン濃度との関係
 図中のエラーバーは標準誤差 (n = 3)
 a 上位葉：最上位完全展開葉から第1～5葉，中位葉：第6～9葉，下位葉：第10～14葉
 b 葉位ごとの関係式および相関係数，***は0.1%水準で有意



図－4 最上位完全展開葉から第7葉における葉柄汁液のリン濃度の推移
 図中のエラーバーは標準誤差 (n = 3)

表－2 培養液のリン濃度が器官別元素含有量に及ぼす影響

器官	処理	C (mg gDW ⁻¹)	N (mg gDW ⁻¹)	P (mg gDW ⁻¹)	K (mg gDW ⁻¹)	Ca (mg gDW ⁻¹)	Mg (mg gDW ⁻¹)	Fe (μg gDW ⁻¹)	Mn (μg gDW ⁻¹)
葉	P0.2	366.1	65.7	2.3	36.1	21.5	6.9	39.4	20.2
	P0.4	346.7	63.4	3.4	43.2	26.4	7.9	42.6	24.6
	P0.8	350.6	65.2	7.4	48.9	30.1	7.4	26.7	21.1
	P1.4	349.8	64.3	14.2	47.3	31.2	8.2	29.1	24.8
	P2.2	344.3	62.9	19.8	44.5	38.0	9.3	27.2	25.6
茎	P0.2	379.8	45.6	1.8	36.6	11.4	2.6	10.8	5.0
	P0.4	376.7	41.0	2.8	45.8	11.0	2.8	8.9	4.6
	P0.8	371.3	41.3	8.0	53.4	10.2	2.3	17.6	3.4
	P1.4	363.2	39.1	15.2	53.9	10.5	2.3	10.6	4.6
	P2.2	366.9	38.0	19.7	54.4	11.0	2.5	11.2	4.1
根	P0.2	400.8	42.7	1.3	59.6	10.5	2.6	389.1	33.2
	P0.4	406.6	43.3	1.1	48.7	8.1	2.4	578.7	6.5
	P0.8	414.4	47.1	1.3	40.3	11.4	2.5	949.2	29.2
	P1.4	413.9	45.4	2.1	39.4	9.9	2.4	895.3	19.4
	P2.2	413.3	43.9	1.7	40.8	10.8	2.5	1208.7	21.7
r	葉	-0.55 ^a * ^b	-0.52 *	0.99 ***	0.46 NS	0.90 ***	0.81 ***	-0.34 NS	0.51 *
	茎	-0.78 ***	-0.81 ***	0.98 ***	0.77 ***	-0.17 NS	-0.36 NS	0.01 NS	-0.19 NS
	根	0.79 NS	0.79 *	0.98 NS	0.80 NS	0.91 NS	0.89 NS	0.51 NS	0.79 NS

a 培養液のリン濃度との相関係数

b NSは有意ではない，*，**，***はそれぞれ5，1，0.1%水準で有意

の相関 ($r = 0.946$, $P < 0.0001$) が認められ，葉柄汁液のリン濃度 (P_{Ps}) と葉のリン含量 (P_L) との関係は，次の回帰式で示すことができた。

$$P_L = 3.134 \times \ln(P_{Ps}) - 6.267 \quad \text{式 1}$$

また，培養液と葉柄汁液のリン濃度の間にも高い正の相関があり，培養液のリン濃度が上昇すると，葉柄汁液

のリン濃度は直線的に上昇した（図－3）。しかし、採取した葉位によっては濃度に差があり、中位および下位葉に比べて第1～5葉の上位葉における葉柄汁液のリン濃度がP1.4および2.2区で低い傾向がみられた。

図－4に各処理区における定植後19, 26, 47, 54および64日目に採取した葉柄汁液のリン濃度を示した。収穫開始前である定植後19日目に採取した葉柄汁液に比べて収穫開始後の定植後47日目の葉柄汁液のリン濃度がP0.8区以上の処理で低かった。定植後54, 64日目に採取した葉柄汁液のリン濃度も定植後19日目の濃度に比べて低い傾向がみられた。

3 培養液のリン濃度と養分吸収との関係

表－2に培養液のリン濃度と器官別の元素含有量と

の関係を示した。根においては、Nを除いて培養液のリン濃度による影響はみられなかったが、葉および茎においては、培養液のリン濃度とN含有量との間には有意な負の相関関係が、P含有量との間には正の相関関係が認められた。さらに、葉においてはCaおよびMgの含有量と、茎においてはK含有量との間に正の相関関係が認められた。培養液のリン濃度が上昇すると、葉および茎のP含有量は著しく上昇し、P2.2区でそれぞれ19.8および19.7 mg gDW⁻¹と最も高かった。

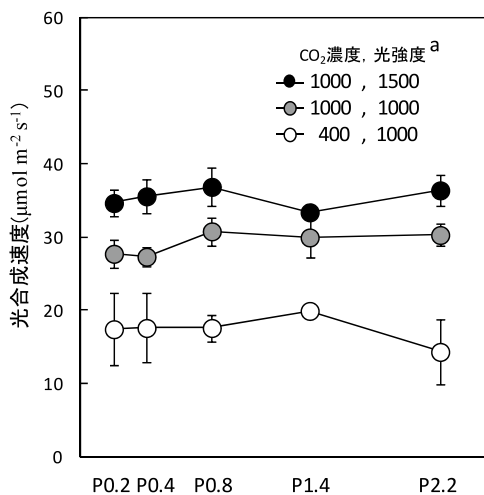
乾物重と無機元素含有量をもとに養分吸収量を算出すると、培養液のリン濃度と各元素の吸収量との間にはFeを除いたすべての元素で高い相関関係が認められた（表－3）。特にPの吸収量との間には極めて高い相関関係があった。培養液のリン濃度が上昇すると、いずれの

表－3 培養液のリン濃度が養分吸収量に及ぼす影響

処理	C	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn
	(g plant ⁻¹)							
P0.2	36.4	5.3	0.2	4.1	1.5	0.5	0.011	0.001
P0.4	46.6	6.8	0.4	6.0	2.3	0.7	0.010	0.002
P0.8	48.3	7.3	0.8	6.7	2.7	0.7	0.012	0.002
P1.4	56.1	8.5	1.8	7.7	3.3	0.9	0.032	0.003
P2.2	56.9	8.4	2.4	7.7	3.9	1.0	0.018	0.002
r ^a	0.79	0.79	0.98	0.80	0.91	0.89	0.51	0.79
	*** ^b	***	***	***	***	***	NS	***

a 培養液のリン濃度との相関係数

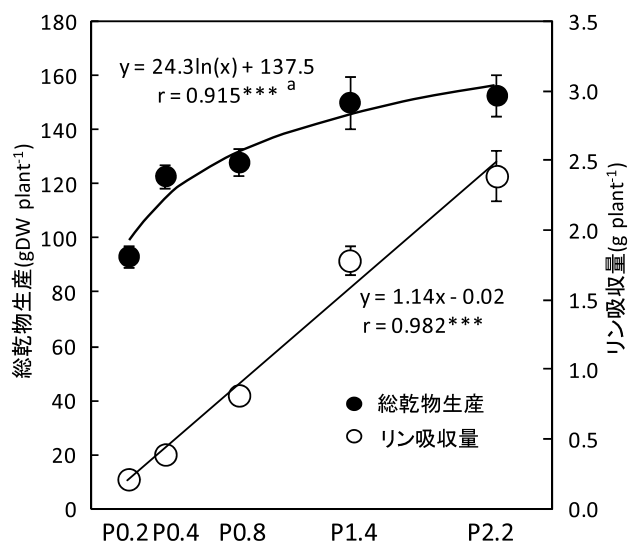
b NSはNonsignificant, ***は0.1%水準で有意な相関あり



図－5 培養液のリン濃度と個葉光合成速度との関係

図中のエラーバーは標準誤差 (n = 6)

a 光合成測定条件: CO₂濃度 (ppm), 光強度 (μmol m⁻² s⁻¹)



図－6 培養液のリン濃度と総乾物生産およびリン吸収量との関係

図中のエラーバーは標準誤差 (n = 10)

a rは相関係数, ***は0.1%水準で有意

多量元素の吸収量は上昇したが、N、K および Mg では P1.4 区以上で増加傾向は緩慢になった。

4 培養液のリン濃度と光合成との関係

定植後 27 日目の最上位完全展開葉から第 6 葉で CO₂ 濃度および光強度を変え、個葉の光合成速度を測定した (図-5)。光合成速度は CO₂ 濃度や光強度によって変動したが、培養液のリン濃度の影響はなかった。光合成速度は、CO₂ 濃度 1000 ppm、光強度 1500 μmol m⁻² s⁻¹ 条件下で 35 μmol m⁻² s⁻¹ 前後で、CO₂ 濃度 400 ppm、光強度 1000 μmol m⁻² s⁻¹ 条件下で 15 μmol m⁻² s⁻¹ 前後であった。

IV 考 察

キュウリのリン吸収や生育は培養液のリン濃度によって左右され、培養液のリン濃度が高くなると、植物体のリン含量および総乾物重は増加したが、総乾物重については 1.4 me L⁻¹ 以上のリン濃度での増加は大きくなかった (表-3, 図-6)。一方、培養液のリン濃度が常に 0.8 me L⁻¹ より低かった P0.8 区以下の処理において、葉面積や葉および茎の乾物重、ならびに N、K の吸収量が著しく低下する傾向があった。すなわち、培養液の低リン条件によって生育や養分吸収が抑制されないようにするためには、培養液のリン濃度は 0.8 me L⁻¹ 以上に保つ必要があると考えられる。

器官別の乾物分配率をみると、培養液のリン濃度が低下するにつれて、根への乾物分配率が著しく上昇した。これはリン獲得のための根の生理反応によって根への乾物分配が増加した結果であると考えられ、リン欠乏条件下で根への乾物分配率が上昇するといった報告 (Zhang ら, 2012; Cakmak ら, 1994; Ciereszko・Kleczkowski, 2002) と同様の結果であった。

本研究では、リンの低濃度区でもリン欠乏と考えられる症状は確認できず、光合成速度の低下もみられなかった。体内のリン濃度が低下すると、光合成活性が抑制され、光合成速度の低下につながるとされているが (Sawada ら, 1982, 1990; Sharkey ら, 1989)、リン欠乏による光合成抑制に関する研究では、処理としてリンを供給しないか、あるいは培養液のリン濃度が 0.2 me L⁻¹ 以下で栽培を行った事例が多い。本研究では、吸収によって減少した培養液は常に補給されるようになっており、3 日ごとに培養液が更新されたため、欠乏症が出難い条件であったと考えられるが、本研究での P0.2 区

の葉、茎、根のリン含量がそれぞれ 0.23, 0.18, 0.13% であったことから、これ以上の含量であれば光合成は抑制されないことを示唆している。しかし、培養液のリン濃度の低下とともに、節数および葉面積は著しく制限された。これによって、個葉の光合成速度に処理間差は認められなかったものの、栽培期間を通じて積算受光量が減少した結果、総乾物生産量が制限されたと考えられる。

定植後 64 日間の栽培において、培養液のリン濃度 (P_N, me L⁻¹) は、リン吸収量 (P_A, g plant⁻¹) および総乾物生産量 (TDW, g plant⁻¹) との間にはそれぞれ高い相関関係が認められたが (図-6)、リン吸収量との間には直線的な相関 ($r = 0.982$, $P < 0.0001$) が、総乾物生産量との間には曲線的な相関 ($r = 0.915$, $P = 0.0002$) があり、それぞれ次の回帰式の関係であった。

$$P_A = 1.14 \times P_N - 0.02 \quad \text{式 2}$$

$$TDW = 24.35 \times \ln(P_N) + 137.49 \quad \text{式 3}$$

例えば、キュウリのリン吸収量が 0.2 から 1.2 g plant⁻¹ に増えると、総乾物生産量は 97.4 から 139.1 g plant⁻¹ と約 43% 増加するが、リン吸収量が 1.2 から 2.2 g plant⁻¹ に増えても、総乾物生産量は 139.1 から 153.7 g plant⁻¹ と約 10% しか増えない計算になる。このように、リンの供給量を増やせば、いわゆる贅沢吸収によってリン吸収量は直線的に増加するが、物質生産の増加は緩慢になっていくと考えられる。

養液栽培においてキュウリやトマト、ナス、ピーマンなど果菜類で用いられる処方では、培養液のリン濃度は 2 ~ 5 me L⁻¹ が一般的である (日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会, 2012) ことを考えると、本研究で用いたリン濃度は低い範囲であると言えるが、乾物生産の観点から考えると、培養液のリン濃度が 1.4 me L⁻¹ 以上ではリンの施用効率を高める効果は少ないと考えられる。

0.2 ~ 2.2 me L⁻¹ のリン濃度条件下では葉柄汁液のリン濃度と葉のリン含量の間には有意な相関関係があり、低リン濃度管理下でのリンの栄養診断として葉柄汁液分析値の有効性が示唆された。また、リンは他の無機元素に比べて体内での移動が容易で部位別の濃度差が少ないと考えられるが、本研究の結果、葉位や生育ステージによって濃度差が生じることが示された。

葉柄汁液診断の対象を最上位完全展開葉から第 7 葉にした場合、収穫開始から実験終了まで P0.8 区の葉柄汁液のリン濃度は 62.4 ~ 88.2 ppm で推移した。前述したように、生育、養分吸収ならびに総乾物生産の観点から、培養液のリン濃度を 0.8 me L⁻¹ 以上に保つことが必要であれば、葉柄汁液のリン濃度は 90 ppm 以上に維

持するような管理が望ましいと考えられる。しかし、低温期や高 CO₂ 環境、他の無機元素の濃度などによっては変動の可能性が考えられ、更なる検討が必要である。

培養液のリン濃度を 0.2 ~ 2.2 me L⁻¹ とした実験を通して、低リン条件下でのキュウリの生育やリンの吸収および乾物生産の関係から、リンの減肥の可能性や葉柄汁液を用いた診断基準が示された。トマトの窒素施用に関しては、生育ステージに合わせて必要な施用量を週などの単位で与えることで施肥量を節減し、環境負荷を低減する研究が進んでおり (Matsuda ら, 2011; Nakano ら, 2010)、キュウリにおけるリン施用においても、省資源技術の確立のため、今後、施肥体系の見直しや詳細な量管理方法の検討が必要であると考えられる。

V 摘 要

養液栽培および葉柄汁液診断の手法を利用し、低リン条件下でのキュウリの生育反応やリンの吸収および物質生産について評価した。培養液のリン濃度を 0.2, 0.4, 0.8, 1.4, 2.2 me L⁻¹ と異にし、定植後 64 日間、湛液水耕栽培を行った。培養液のリン濃度と植物体のリン吸収量 ($r = 0.982$) および総乾物生産 ($r = 0.915$) との間には、それぞれ高い相関があったが、培養液のリン濃度が 1.4 me L⁻¹ 以上では、総乾物重の増加傾向はみられなかった。0.8 me L⁻¹ 以下の低リン区では、生育や葉面積、養分吸収が制限され、総乾物重は大きく減少した。葉柄汁液のリン濃度 (P_{PS}) と葉のリン濃度 (P_L) との間には、 $P_L = 3.134 \times \ln(P_{PS}) - 6.267$ で示される有意な相関関係 ($r = 0.946$) が認められた。一方、培養液のリン濃度の増加に伴い、葉柄汁液のリン濃度は直線的に上昇した。

本研究の生育および養分吸収の結果から、乾物生産を維持するためには、培養液のリン濃度を約 0.8 me L⁻¹ 以上とし、葉柄汁液のリン濃度を約 90 ppm 以上に保つ管理が望ましいと考えられた。しかし、培養液のリン濃度が 1.4 me L⁻¹ 以上では、リンの施用効率を高める効果は少ないと考えられた。

引用文献

- 1) Cakmak I., C. Hengeler and H. Marschner (1994): Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. *J. Exp. Bot.*, **45**,

- 1245-1250.
- 2) Ciereszko I. and L. A. Kleczkowski (2002): Growth and metabolism of cucumber in phosphate-deficient conditions. *J. Plant Nutr.*, **25**, 1115-1127.
- 3) Hochmuth G. J. (1994): Efficiency ranges for nitrate-nitrogen and potassium for vegetable petiole sap quick tests. *HortTechnology*, **4**, 218-222.
- 4) 石塚潤爾 (1985): 最新作物生理実験法、無機成分の測定法, pp281-283. 農業技術協会, 東京.
- 5) 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.
- 6) 小宮山鉄兵・藤澤英司・新妻成一・加藤雅彦・森国博全 (2009): 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. 土肥誌, **80**, 516-521.
- 7) 黒田章夫・滝口 昇・加藤純一・大竹久夫 (2005): リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発. 環境バイオテクノロジー学会誌, **4**, 87-94.
- 8) Matsuda R., K. Suzuki, Y. Nakano, H. Sasaki and M. Takaichi (2011): Nutrient supply and fruit yields in tomato rockwool hydroponics under daily quantitative nutrient management: Analysis and evaluation based on leaf area index. *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 117-126.
- 9) Nakano Y., H. Sasaki, A. Nakano, K. Suzuki and M. Takaichi (2010): Growth and yield of tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.*, **79**, 47-55.
- 10) 尾和尚人 (1996): わが国の農作物の養分収支. 平成 8 年度関東東海農業環境調和型農業生産における土壌管理技術に関する第 6 回研究会 養分の効率の利用技術の新たな動向, pp1-15. 農業研究センター, つくば.
- 11) Sawada S., T. Igarashi and S. Miyachi (1982): Effects of nutritional levels of phosphate on photosynthesis and growth studied with single, rooted leaf of dwarf bean. *Plant Cell Physiol.*, **23**, 27-33.
- 12) Sawada S., H. Usuda, Y. Hasegawa and T. Tsukui (1990): Regulation of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase activity in response to changes in the source/sink balance in single-rooted soybean leaves: The role of inorganic orthophosphate in activation of the enzyme. *Plant Cell Physiol.*, **31**, 697-704.
- 13) Schachtman D. P., R. J. Reid and S. M. Ayling (1998): Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiol.*, **116**, 447-453.
- 14) Sharkey T. D. and P. J. Vanderveer (1989): Stromal phosphate concentration is low during feedback limited photosynthesis. *Plant Physiol.*, **91**, 679-684.
- 15) von Caemmerer S. and G. D. Farquhar (1981): Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta*, **153**, 376-387.
- 16) 渡辺和彦 (2009): ミネラルの働きと作物の健康—要素障害対策から病害虫防除まで, pp26-37. 農文協, 東京.
- 17) 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.
- 18) Zhang B., Q. Chen, S. Luo, C. Zhang, Q. Yang and K. Liu (2012): Effects of NPK deficiencies on root architecture and growth of cucumber. *Int. J. Agric. Biol.*, **14**, 145-148.
- 19) 日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会 (2012): 日本養液栽培のすべて—植物工場を支える基本技術, pp64-69. 誠文堂新光社, 東京.

Influence of Phosphorus Concentration in the Nutrient Solution on the Growth and Phosphorus Absorption of Hydroponic Cucumber

Dong-Hyuk Ahn, Yasunaga Iwasaki, Yasushi Kawasaki,
Tadahisa Higashide, Akimasa Nakano and Katsumi Suzuki

Summary

We used hydroponic culture and performed a leaf petiole sap test to study the influence of low phosphorus (P) availability on the growth, nutrient uptake, and dry matter production of cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plants were grown by the deep-flow technique for 64 days after transplanting, using nutrient solutions with different P levels (0.2, 0.4, 0.8, 1.4, or 2.2 meq L⁻¹). The P concentration in the nutrient solution was strongly and significantly correlated with P absorption ($r = 0.982$) and total dry matter ($r = 0.915$). There was a linear correlation between the P level in the nutrient solution and P absorption. However, the increase in total dry matter in response to the P level in the nutrient solution exhibited a peak, with no additional increase of total dry matter at a P concentration of 1.4 meq L⁻¹ or more. For plants grown with a low P level (≤ 0.8 meq L⁻¹), dry matter production was significantly reduced compared with growth in other treatments because of decreased leaf area development and decreased nutrient uptake. There was a strong and significant correlation ($r = 0.946$) between the P concentrations in the leaf petiole sap (P_{PS}) and in the leaves (P_L):

$$P_L = 3.134 \times \ln(P_{PS}) - 6.267$$

P_{PS} increased linearly with increasing P level in the nutrient solution. These results suggest that to sustain dry matter production, the P concentrations in the nutrient solution and the leaf petiole sap should be maintained at ≥ 0.8 meq L⁻¹ and $\geq 90\mu\text{L L}^{-1}$, respectively. However, at a P concentration in the nutrient solution higher than 1.4 meq L⁻¹, the P fertilization efficiency decreases.