

# トマト水耕栽培におけるリン栄養状態と リンの昼夜間吸収

寺 林 敏・滝 井 謙  
藤 田 真 由 美・並 木 隆 和

SATOSHI TERABAYASHI, KEN TAKII, MAYUMI FUJITA  
and TAKAKAZU NAMIKI

## Relationship of phosphate uptake and nutrient status of tomato grown in water culture

**要旨:** トマトをリン欠如培養液で15日間水耕栽培した後、園試処方50%濃度液を基本とした完全培養液に移し、リンの昼間及び夜間吸収量を測定した。リン濃度  $2 \text{ me/l}$  の園試処方50%濃度液に移した場合、それまでリン濃度  $2 \text{ me/l}$  の園試処方50%濃度液で栽培されてきたものに比べリン吸収の増加が顕著に認められた。その増加の程度は、昼間より夜間で大きく、リンの夜間吸収率が高くなった。一方、リン濃度  $8 \text{ me/l}$  に変更した園試処方50%濃度液に移した場合、リン吸収量は増加したが、夜間吸収の増加程度はリン濃度  $2 \text{ me/l}$  の園試処方50%濃度液の場合に比べて小さく、リン夜間吸収率はそれまで園試処方50%濃度液で栽培されてきたものと差がなかった。

硝酸態窒素、カリウム、カルシウムをそれぞれ欠如させた培養液でトマトを一定期間水耕栽培した後、園試処方50%濃度液に移し昼夜間の養水分吸収量を測定し、リン以外の養分の吸収がリンの昼夜間吸収に対していかなる影響を及ぼすか調査した。完全培養液である園試処方50%濃度液に移された後の欠如された養分の吸収増加は、硝酸態窒素において顕著であり、その結果としてリン吸収が抑制された。その影響は夜間において大きかった。カリウム、カルシウム欠如培養液で栽培された場合、完全培養液に移された後のリン吸収は抑制されなかった。リンの夜間吸収率にも大きな変化はなかった。

### 緒 言

特定の養分を欠如させた培養液で、ある一定期間栽培された植物体は、その養分が与えられるとその養分の吸収が急激に高まる(高橋ら, 1955; 三井と熊沢, 1957; Jacksonら, 1976)。いわゆる飢餓吸収が起こる。この飢餓吸収はリン欠如植物体のリン吸収において顕

著に認められ、場合によってはリンが過剰に吸収されリン過剰症の発生をみることがある(Greenら, 1973)。このような特定の養分が欠乏した植物体では、欠乏養分の吸収を促すため培養液の施与濃度よりも高い濃度、つまり濃縮された状態で吸収される。培養液を濃縮して吸収する現象は養分欠乏の植物体に限らず通常の栽培においても認められる。この培養液の施与濃度に対する吸収濃度の比(濃縮率)は、これまでの

実験結果からいずれの養分も、昼間に比べ夜間の方が高いことが明らかになった (Terabayashiら, 1991)。硝酸態窒素, リン, カリウム, カルシウム, マグネシウムの5つの養分の中ではリンがいちばんその傾向を強く示す。一時的であれ, リン吸収に対して強い要求性を持つ状態にトマト植物体がおかれている場合, リンは高い濃縮率で吸収されることになる。この時, 夜間の吸収がどのような反応を示すか注目される。リン吸収に対して強い要求性を有する状態での測定を行うため, リン欠如培養液で水耕栽培したトマト植物体を用い, リンが旺盛に吸収されている場合の昼間と夜間のリン吸収量を比較し, リンの昼間及び夜間の吸収の意義について検討した。さらに, 窒素, カリウム, カルシウムの欠乏植物体を作りこれら養分の吸収を増加させ, これら養分の吸収とリンの吸収との関係を昼間夜間それぞれについて調査し, リンの昼夜間吸収について検討を加えた。

## 材料及び方法

### 実験1.

トマト品種‘大型福寿’を1983年2月7日に園芸培土には種し, 鉢上げ後, 久保田式果菜用水耕ベッドで育苗した。4月1日よりリン欠如培養液で15日間栽培した後, 完全培養液に移し, 昼間と夜間の養水分吸収量の測定を行った。

リン欠如培養液は, 園試処方50%濃度液からリン酸一アンモニウムを除去して作成し, アンモニア態窒素の不足は硫酸アンモニウムで補った。リン欠如培養液で栽培した植物体の半数を園試処方50%濃度液 (リン濃度  $2\text{ me/l}$ ) に移し, 残る半数をリン濃度  $8\text{ me/l}$  に変更した園試処方50%濃度液に移し, 養水分吸収量の測定を行った。供試個体数は各区10本で, 5本植えの2反復とした。リンを欠如させずに園試処方50%濃度液で栽培し, 同培養液で測定を行った区をC/C区, リン欠如培養液で栽培した後, 園試処方50%濃度液に移して測定した区を-P/C区, リン濃度  $8\text{ me/l}$  の園試処方50%濃度液に移して測定した区を-P/C(8)区として表す。

### 実験2.

トマト品種, ‘大型福寿’を1984年5月2日に園芸培土には種し, 鉢上げ後, 久保田式果菜用水耕ベッドで育苗した。生育段階がほぼ第1花房開花期の7月11日から1週間, 以下に述べる各々の養分欠如培養液で栽培した。処理区は硝酸態窒素欠如区, カリウム欠如区, カルシウム欠如区そして完全培養液 (必要養分を備えた培養液という意味で, ここでは園試処方50%濃

度液である) 栽培する対照区である。培養液は園試処方50%濃度液を基準にして作成した。硝酸態窒素欠如培養液では硝酸カルシウム, 硝酸カリウムを使用しないため, カルシウムとカリウムを塩化カルシウムと塩化カリウムで与えた。カリウム欠如, カルシウム欠如培養液は硝酸カリウム, 硝酸カルシウムを使用しないため, 硝酸態窒素はいずれの区も硝酸ナトリウムで与えた。各処理培養液で1週間培養した後, 完全培養液である園試処方50%濃度液に移し2日間の養水分吸収量を昼間夜間別に測定した。容積25lの栽培槽を使用し, 1栽培槽あたり4本植えて2反復とした。

実験1, 実験2ともに, 昼間は7:00から19:00まで, 夜間は19:00から翌朝7:00までとした。

## 結 果

### 実験1.

測定終了時の植物体の生育段階は, いずれの区も第1花房開花期であった。-P/C区, -P/C(8)区の植物体は, 葉が暗緑色で, 葉脈が紫色を帯びた典型的なリン欠乏症状を示した。C/C区に比べ, -P/C区, -P/C(8)区の植物体は草丈で約10cm低く, 展開葉数で2~3枚少なく, 地上部と地下部重合計の乾物重が約半分と生長量に大きな差があった。

乾物100gあたり4日間の水分及びリンの吸収量を第1表に, リンの濃縮率を第1図に, 夜間吸収率を第2表に示した。昼夜間合計の水分吸収量はC/C区が4.1l, -P/C区が3.5l, -P/C(8)区が3.5lで, リン欠如培養液で栽培された植物体は水分吸収量が少なかった。リン吸収量はC/C区が昼間6.9me, 夜間5.6me, -P/C区が昼間26.2me, 夜間26.2meで, リン欠如培養液で栽培された植物体のリン吸収量の増加が著しかった。-P/C区の夜間のリン吸収濃度は  $38.9\text{ me/l}$  で施与濃度  $2\text{ me/l}$  の19.4倍に相当し, 濃縮率は3つの処理区の測定中最も高かった。-P/C(8)区の濃縮率はC/C区に比べ昼間夜間ともに大きかったが, -P/C区に比べ低かった。水分の夜間吸収率は3つの区の間でほとんど差がなかった。リンの夜間吸収率は-P/C区が50%で最も高く, -P/C区と-P/C(8)区との間では差がなかった。

Table1. Rate of water and phosphate uptake by P-starved tomato plants.

Treatment	Time of absorption	Rate of uptake	
		Water (g/100gDW/4days)	PO <sub>4</sub> -P (me/100gDW/4days)
C/C*	day	3.36	6.9
	night	0.78	5.6
	whole day	4.14	12.5
-P/C	day	2.83	26.2
	night	0.67	26.2
	whole day	3.50	52.4
-P/C (8)	day	2.77	61.2
	night	0.73	47.7
	whole day	3.50	108.9

\* Pretreatment/treatment

C:complete solution (Enshi soln) , -P:P-free solution.

( ) : phosphate concentration (me/l).

Table2. Rate of water and phosphate uptake at night to that in whole day.

Treatment	Rate of uptake at night to that in whole day (%)	
	water	P
C/C	19	45
-P/C	19	50
-P/C (8)	21	44

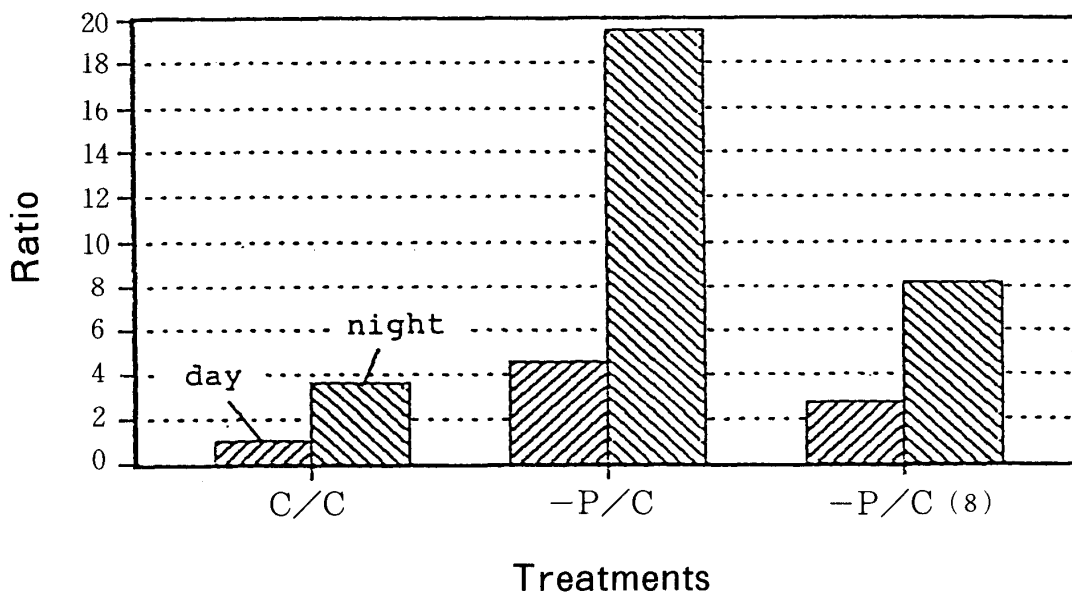


Fig. 1. Ratio of rate of nutrient to water absorbed to concentration of nutrient in the culture solution. Pretreatment / treatment, C: complete solution, -P: P-free solution C (8) : complete solution (high concentration of phosphate, 8me/l)

## 実験 2.

対照区の乾物100gあたり2日間の養水分吸収量を100とした相対値で表した各区の養水分吸収量を第3表に示した。養分の吸収濃度を第4表に、養水分の夜間吸収率を第5表に示した。昼夜間合計した養水分の相対吸収量を見ると、培養液から欠如させた養分の、完全培養液における吸収は硝酸態窒素が132、カリウムが122、カルシウムが105で吸収の増加の程度は測定した養分の中では硝酸態窒素が最も大きかった。欠乏養分の対照区の昼間及び夜間の吸収量に対する増加の程度は硝酸態窒素の場合では、夜間の方が大きかったのに対し、他の養分では昼間の方が大きかった。硝酸態窒素欠乏区のリン相対吸収量は昼間が96、夜間が58で夜間のリン吸収の減少が大きかった。いずれの養分も

昼間と夜間で吸収抑制の程度に差がなかった。カリウム欠如区とカルシウム欠如区では完全培養液に戻されたときのリン吸収量は対照区よりもわずかに多かった。硝酸態窒素欠如区の硝酸態窒素、カリウム欠如区のカリウムの吸収濃度はいずれも対照区より高く、特に硝酸態窒素の夜間吸収濃度の上昇が顕著であった。硝酸態窒素欠如区のリン吸収濃度は昼間夜間とも対照区よりも低く、1日平均の吸収濃度が1.0me/lで施与濃度2.0me/lの半分であった。カリウム欠如区とカルシウム欠如区のリン吸収濃度は対照区と大きな差はなかった。

いずれの養分を欠如させた場合でも水分の夜間吸収率に差がなかった。欠乏している養分の夜間吸収率は硝酸態窒素を除きいずれも対照区よりも低かった。リンの夜間吸収率は硝酸態窒素欠如区で34%と低い値を

Table 3. Water and nutrient uptake by nutrient-starved tomato plants.

Treatment	Time of absorption	Uptake (relative value to control)				
		Water	NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P	K	Ca
NO <sub>3</sub> -N-starved	day	99	124	96	61	99
	night	93	151	58	68	119
	whole day	99	132	79	64	107
K-starved	day	92	94	107	144	64
	night	80	91	98	84	66
	whole day	91	94	103	122	65
Ca-starved	day	104	97	120	103	109
	night	99	107	104	96	99
	whole day	103	94	113	100	105

Table 4. Rate of nutrient to water absorbed.

Treatment	Time of absorption	Rate of nutrient to water absorbed (me/l)			
		NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P	K	Ca
NO <sub>3</sub> -N-starved	day	9.3	0.2	2.0	2.2
	night	46.7	8.6	11.7	15.3
	whole day	13.0	1.0	2.9	3.5
K-starved	day	7.6	2.2	4.9	1.5
	night	32.5	16.6	16.6	9.8
	whole day	9.9	3.5	6.0	2.3
Ca-starved	day	7.0	2.2	3.2	2.3
	night	30.9	14.4	15.4	11.9
	whole day	9.4	3.4	4.4	3.3
Control	day	7.5	1.9	3.2	2.2
	night	28.6	13.6	16.0	11.9
	whole day	9.7	3.1	4.5	3.3

Table 5. Rate of water and nutrients uptake at night to that in whole day.

Treatment	Rate of uptake at night to that in whole day (%)				
	Water	NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P	K	Ca
NO <sub>3</sub> -N-starved	10	36	34	40	42
K-starved	9	30	44	26	40
Ca-starved	10	33	43	35	36
Control	11	31	46	37	39

示したが、カリウム欠如区、カルシウム欠如区では対照区と大きな差はなかった。

## 考 察

リン欠如培養液で栽培された植物体の水分吸収量が、完全培養液で栽培されたものに比べ少なかった。リン欠乏ストレスを受けた植物体では蒸散量の低下(Katzら, 1986)や、気孔コンダクタンスの低下(Clarkson・Scattergood, 1982)が起こることが認められており、本実験においても15日間のリン欠如栽培によって、蒸散作用が低下し、水分吸収量が減少したと考えられる。水の夜間吸収率をC/C区と-P/C区で比較するとまったく差がなく、リン欠乏ストレスは昼間の吸水だけでなく夜間の吸水に対しても同様に影響した。

リン欠乏ストレス状態の植物体をリンを含む培養液に移した時、リン吸収速度が急激に高まる。本実験の結果においても-P/C区の昼夜間合計のリン吸収量はC/C区の4倍以上あり、明らかに飢餓吸収が起こっていた。この急激なリン吸収量の増加を昼間と夜間で比較してみると、-P/C(8)区を除き、リン吸収の濃縮率の上昇程度は昼間より夜間の方が大きく、また夜間吸収率の上昇からも飢餓吸収の程度は夜間の方が昼間より強いことがわかる。リンの夜間吸収率はC/C区が45%、-P/C区が50%で、リン欠乏ストレスを受けたことによってリン夜間吸収率が高くなった。ただし、リンを高濃度で与えた-P/C(8)区ではリンの夜間吸収率は44%で、C/C区と変わらなかった。これは培養液中の欠乏養分の濃度が高すぎると、昼間の吸収量は濃度に左右されて増加が大きいにもかかわらず、夜間の吸収は昼間と異なり、ある限度以上には増加しないことが原因していると考えられる。生体内のリン含量が低下し、積極的にリンを吸収しようとしている場合、あるいは逆に培養濃度が高すぎるとして吸収に対して抑制的に働く場合、いずれも夜間における吸収が調節的な役割を果たしていると思われる。植物体が養分欠乏ストレス状態にあって養分の要求が高まっている場合、欠乏養分の培養液中濃度がある濃度の範囲内では、濃縮率を高め夜間の吸収を増加させるように働くことがわかる。

吸収された陽イオンと陰イオンのイオン価数の総和を求めると、C/C区は昼間+1.2、夜間-0.8、一日平均+0.4で、陽イオンと陰イオンのバランスが比較的よく保たれていた。しかし、リン欠乏ストレス状態のトマト植物体の陽イオンと陰イオンの吸収量バランスは-P/C区では、昼間-4.0、夜間-5.9、一日平均-9.9、同じく-P/C(8)区では昼間-7.8、夜間-5.8、一日平均-13.6と吸収イオンが大幅に陰イ

オン側に偏っている。この2つの区のイオン吸収バランスを比較すると、昼間ではリン施与濃度の高い-P/C(8)区の方が-P/C区よりもイオン吸収バランスがマイナス側に大きく傾いていたのに対し、夜間では両区にほとんど差がなかった。

昼間においては養分は蒸散流に乗せられて吸収、移動されやすく、そのため個々の養分の吸収量は施与濃度に左右されやすい。それ故にリン濃度の高い-P/C(8)区では昼間のイオンバランスがマイナス側に傾いたといえる。それに対し、-P/C区と-P/C(8)区の間では培養液のリン濃度の大幅な違いにも関わらず、夜間の吸収バランスは昼間のようにリン濃度に左右されていない。このことは、養分の吸収が培養液濃度によって受ける影響、少なくとも養分吸収バランスが受ける影響が昼間で大きく、夜間で小さいことを示している。

硝酸態窒素、カリウム及びカルシウム欠如培養液で栽培されたトマト植物体が完全培養液に戻された時、リン吸収量は主に次の2つの要因によって強く影響されると考えられる。1つは完全培養液に戻されたときの欠如養分の急激な吸収による影響であり、1つは欠如培養液で栽培されたトマト植物体のリン栄養状態の影響である。完全培養液に戻されたときのリン吸収量は、対照区に比べ硝酸態窒素欠如区で少なかったが、カリウム欠如区とカルシウム欠如区では対照区とほとんど差がないかわずかに多かった。硝酸態窒素欠如区の場合、窒素の飢餓吸収が顕著であった。この処理区のトマトの地上部のリン含量も対照区に比べて少なく(第6表)、硝酸態窒素欠如培養液での栽培において、リンの吸収も抑制されていたことがわかる。よって、窒素欠如培養液で栽培されたトマトは完全培養液では窒素のみならずリンの吸収も増加するものと推察される。しかしリン吸収以上に窒素の飢餓吸収による拮抗作用が強く働き、その結果リンの吸収が抑制されたと考えられる。この窒素がリンの吸収に及ぼす影響は夜間で強く現れることが示された。このように顕著な拮抗関係は他の養分欠如区では認められなかった。リンの夜間の吸収に対して窒素が大きな影響力を持っていることがわかる。カリウム欠如区の場合も窒素欠如区の場合と同様に処理期間中のリン含量の低下、完全培養液でのカリウムの飢餓吸収が起こっていたが、硝酸態窒素の場合と違ってリン吸収は抑制されることがなかった。また、カルシウム欠如区ではカルシウムの飢餓吸収は弱く、リン含量の減少も認められなかった。いずれの区もリンの吸収はカリウムの吸収増加あるいはカルシウムの吸収増加に対応している傾向が認められる。これは吸収イオンの電荷バランスを保つため、陽イオンの吸収増加に対するリンの反応とみることで

Table 6. Nutrient content of nutrient-starved tomato plants.

Treatment	Content (% of dry matter)			
	N	P	K	Ca
NO <sub>3</sub> -N-starved	2.1	1.5	12.1	2.1
K-starved	3.7	1.4	7.6	3.2
Ca-starved	4.1	1.8	12.4	2.1
Control	3.7	1.8	11.9	3.0

きる。

三井と熊沢 (1957) は、水耕栽培した栄養生長期のイネを1か月の間、特定の養分を欠如させた培養液で栽培した後、完全培養液に移し各養分の48時間の吸収量を測定した。その結果、欠如養分の飢餓吸収の程度はリンがいちばん強く、ついで窒素、カリウムの順であった。カルシウムには吸収量の増加は認められなかった。また、硝酸態窒素欠如区ではリンの吸収が著しく抑制されていた。このような傾向はいずれも本実験の結果と一致している。リンの吸収についてはこれまでの実験結果 (寺林ら, 1984; Terabayashiら, 1991) が示すように、昼間と夜間の吸収量の関係は水分や培養液濃度等、条件によって多少の変動は認められるものの、硝酸態窒素ほどにリン吸収量が影響を受ける要因はないと思われる。

### 引用文献

- 1) Clarkson, D.T. and C.B. Scattergood (1982) : J. Exp. Bot., 33, 865-875.
- 2) Green, D.G., W.S. Ferguson and F.G. Warder (1973) : Can. J. Plant. Sci., 53, 241-246.
- 3) Jackson, W.A., K.D. Kwik and R.J. Volk (1976) : Physiol. Plant., 36, 174-181.
- 4) Katz, D.B., G.C. Gerloff and W.H. Gebelman (1986) : Physiol. Plant., 67, 23-28.
- 5) 三井進午・熊沢喜久雄 (1957) : 土肥誌, 22, 46-52.
- 6) 高橋治助・柳沢宗男・河野通佳・矢沢文雄 (1955) : 農技研報告B4, 16-20.

7) 寺林 敏・滝井 謙・並木隆和 (1984) : 園学要旨秋, 244-245.

8) Terabayashi, S., K. Takii and T. Namiki (1991) : J. Japan. Soc. Hort. Sci. 59, 751-755.

### Summary

Phosphate uptake from Enshishoho solution, the complete culture solution, by tomato plants cultured in P-free culture solution for 15 days, was remarkably higher than P-sufficient plants, especially during the night. Increase in phosphate URN (ratio of the uptake rate during the night to that of the 24-hr day, expressed in percentage) was found in P-starved plants. P-starved plants later transferred to the solution high in phosphate concentration, however, did not show any increase in phosphate URN.

Experimental results suggested that phosphate uptake is influenced not only by phosphate nutritional status of the plants, but also by nutritional status of other elements. Phosphate uptake was inhibited greatly in NO<sub>3</sub>-N starved plants, which was particularly notable during the night. No influence of potassium nor calcium starvation was observed. Phosphate uptake during the night seems to play a very important role in phosphate-starved tomato plants.