

根域制限下で栽培したキクの光合成, 蒸散特性と葉の形態に及ぼす 養水分供給頻度の影響

後藤丹十郎*・松野太樹・吉田裕一・景山詳弘

岡山大学農学部 700-8530 岡山市津島中

Photosynthetic, Evapotranspiratory and Leaf Morphological Properties of Chrysanthemum Grown under Root Restriction as Affected by Fertigation Frequency

Tanjuro Goto*, Taiki Matsuno, Yuichi Yoshida and Yoshihiro Kageyama

Faculty of Agriculture, Okayama University, Tsushimanaka, Okayama 700-8530

Summary

This experiment was conducted to clarify the effect of fertigation frequency (once or 8 times per day) on the growth, evapotranspiration rate, and photosynthetic and leaf morphological properties of chrysanthemum (*Dendranthema grandiflorum* Kitamura cv. Pinky) grown under different restricted root zone volumes (30, 100, and 300 ml).

Shoot growth was reduced with decreased root zone volume, but, the growth reduction was smaller when the plants were fertigated 8 times per day rather than once per day. Although the evapotranspiration rate did not decrease when the plants were fertigated frequently, the rate decreased significantly when the total water consumption nearly equaled the water-holding capacity of the medium (50% of the volume), especially in 30-ml or 100-ml containers. Stomata size decreased with a decrease in fertigation frequency and container size. The percentage of open stomata (open / total stomata \times 100) and consequently, transpiration rate, net photosynthetic rate, and leaf CO₂ concentration were significantly lower in the plants grown in 30-ml and 100-ml containers, and fertigated once per day, compared to the four other treatments.

The rates of photosynthesis and evapotranspiration of the plants fertigated 8 times per day remained faster than those fertigated only once per day. Consequently, vegetative growth of the plants fertigated frequently was equal to or more vigorous than those grown with three fold greater root zone volume but fertigated only once per day.

Key Words: evapotranspiration, fertigation frequency, photosynthesis, root restriction, stomata.

緒 言

近年, セル苗生産, 鉢物生産ならびに少量培地耕など, 根域が制限された条件下でキクが栽培される場面が増加している. 他の植物と同様に, 根域容量の減少に伴い通常キクの生育は抑制される(後藤ら, 1997). 根域制限による植物の生育抑制の要因として, 養水分ストレス(Hameedら, 1987), 根への物理的ストレス(Thomas, 1993), 酸素不足(Petersonら, 1991), 植物生長調節物質の増減(Carmi・Heuer, 1981)などが指摘されているが, 前報(後藤ら, 2001)では, 養水分の供給頻度を高めることにより根域制限下でのキクの生育が改善されることを

明らかにし, 根域制限によるキクの生育抑制の主要因は, 養水分, 特に水ストレスであることを示した.

水ストレス下にある植物では, 水ポテンシャルが低下し葉の伸長生長が抑制される. また, 気孔の閉鎖に伴い光合成・蒸散速度が低下し, その結果, 生長速度が低下する(伊藤, 1994). キクのセル苗生産や鉢物生産においては, 省力化やコスト削減のため, 徐々に培地量を少なくする傾向にある. この場合, 生長速度を低下させないためには水ストレスを生じさせないことが最も重要であろう. 根域制限下で植物が受ける水ストレスの程度は日射量や飽差などの気象条件にも影響されるが, 根域容量と培地の保水性の多少ならびに給液頻度の高低によって変動する根圏の水分が最も大きく影響すると考えられる.

前報(後藤ら, 2001)においては, 根域制限下でのキクの初期生育に及ぼす給液頻度の影響について検討したが,

2000年12月20日 受付. 2001年7月16日 受理.

*Corresponding author.

植物体が受ける水ストレスの程度については明らかにできなかった。培地を含む植物体の全重量を連続的に計測し、蒸発散速度の変化を算出することによって(石原・平沢, 1985), 根圏の水分保持量の変化と植物体が受ける水ストレスの程度を同時に推定することができると考えられる。そこで, 本実験では, 異なる根域容量と給液頻度で育成したキクの生長とともに, 蒸発散速度および光合成特性を調査することにより, 給液頻度が水ストレスの程度に及ぼす影響について検討した。さらに, セル苗, 鉢物生産や少量培地耕などの根域制限条件下で生じる水ストレスを回避するための給液制御方法に関して考察した。

材料および方法

栽培概要

秋ギク型品種‘ピンクキ’を供試した。1999年8月20日に, 展開葉2枚を付けた長さ5 cmの挿し穂の基部にIBA(商品名オキシベロン)800 mg・liter⁻¹溶液を瞬間浸漬した後, パーライト:ピートモス=3:1(v/v)に混合した培地をつめたセル容量6 mlの448穴セルトレイに挿し芽し, 間欠ミスト下に置いた。9月2日に, 間欠ミスト下から搬出して順化し, 9月4日に塩化ビニルパイプと塩化ビニル硬質板を用いて作成した底面に排水孔を持つコンテナに定植した。各コンテナはビニルハウス内に20 cm間隔で配置した。培養土は, ピートモス:砂=3:1(v/v, pHは約6に調整)に混合したものをを用いた。定植後2日間は8:30に水のみを与えた。前報(後藤ら, 2001)の結果, 根域容量300 ml以上で給液回数8回以上の処理区では定植35日後の生育に差が生じなかったことから, コンテナ容量(内径×高さ, cm)は, 30 ml(3.1×4.0), 100 ml(4.3×6.9)および300 ml(6.7×8.5)の3種類とした。1日当たりの給液回数は, 1回(8:00から8:30の間に2回に分けて全量与える)および8回(8:00から15:00の間に30~90分間隔で与える)の2水準とした。1/3濃度園試処方(N80 ppm)培養液を24 ml・min⁻¹で点滴給液した。1日に与える培養液量は各処理区とも同量として, 給液時には最も容量が大きい300 mlのコンテナの底面からリーチングするように植物体の生育に伴って液量を徐々に増加させた(80~160 ml・plant⁻¹・day⁻¹)。暗期中断は, 昼光色蛍光灯(PPFD 2 μmol・m⁻²・sec⁻¹)で実験期間を通じて4時間(22:00~2:00)行った。

生長量の測定

定植3日後から7日ごとに3個体ずつ, 葉身長(L), 葉身巾(W)および地上部乾物重を測定した。葉面積(LA)はあらかじめ求めておいた回帰式(LA = L × W × 0.66; r² = 0.96)により算出した。7日間ごとの地上部乾物重の相対生長率を算出した。

蒸発散速度の測定

重量変化の測定には, 引張圧縮用ロードセル(LRU-5K, NTS製)を用いた。ロードセルに3コンテナを吊り

下げ, A/Dコンバータ(Green Kit88, ESD製)を介してロードセルからの出力と日射量を10分ごとにコンピュータに取り込んだ。個体当たりの重量減少速度を蒸発散速度とした。1日当たり8回給液で育成した根域容量30 ml, 100 mlおよび300 mlの植物体に十分給液した後, 定植26日と46日後(それぞれ9月30日と10月20日)に測定を行った。測定時のハウス内の最高-最低気温は9月30日が37-32℃, 10月20日が30-19℃であった。

別に, 根域容量100 ml, 給液頻度8回で生育させた植物体を用いて, 1日1回(8:00), および8回(8:00~16:00の間に60~90分間隔)給液したときの重量変化を測定した。この測定は, 定植34日と44日後(それぞれ10月8日と10月18日)に行った。測定時のハウス内の最高-最低気温は10月8日が32-23℃, 10月18日が27-20℃であった。

光合成および気孔の形態の測定

定植24, 31, 44日後(それぞれ9月28日, 10月5日, 10月18日)の晴天時に, それぞれ測定時における中位葉の光合成特性をビニルハウス内で2時間ごとに携帯式光合成測定装置(LCA-3, 島津製作所製)で測定した。測定時のハウス内の最高-最低気温は9月28日が35-28℃, 10月5日が32-23℃, 10月18日が27-20℃であった。定植45日後(10月19日)の12:00に展開20~25日後の葉身背軸面の表皮組織の形態をスンプ法で検鏡した。

結果および考察

生長

定植3日後から7日ごとの地上部乾物重および葉面積の推移を第1図に示した。1回-30 ml(給液頻度-根域容量)区および1回-100 ml区は他の区と比べて, 定植10日後の地上部乾物重および葉面積が小さかった。8回-30 ml区は葉面積が定植10日後から, 地上部乾物重が定植24日後から他の処理区と比較して小さくなった。それぞれ17日および31日後には8回-300 ml区と比較して著しく小さくなった。8回-100 ml区では生育抑制の程度は小さかった。

定植3日後から45日後まで7日間ごとに算出した地上部乾物重の相対生長率の平均値を第2図に示した。給液回数にかかわらず, 根域容量が小さいほど相対生長率は低下する傾向にあり, その低下の程度は給液頻度1回で顕著であった。

蒸発散速度

定植26日および46日後における植物体当たりの蒸発散速度の変化を第3図に示した。葉面積は定植46日後が26日後の1.7~2.1倍と大きく異なったが, 蒸発散速度は定植26日後が定植46日後より大きかった。蒸発散速度は, 日射量, 気温および飽差の影響を強く受けることが知られており, 両測定日における差は環境条件, 特に日射量の違いによるものであろう。給液直後の蒸発散速度

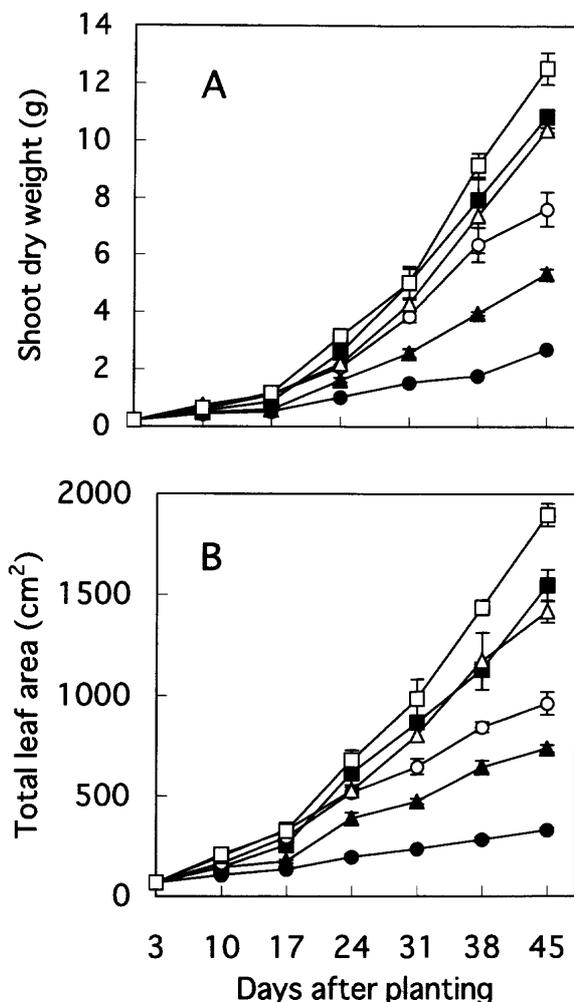


Fig. 1. Changes in shoot dry weight (A) and total leaf area (B) of chrysanthemum cv. Pinky as affected by fertigation frequency and root zone volume. Vertical bars indicate SE (n=3). Following symbols represent fertigation frequency in a day and container volume, ●; 1 time - 30 ml, ▲; 1 time - 100 ml, ■; 1 time-300 ml, ○; 8 times - 30 ml, △; 8 times - 100 ml □; 8 times - 300 ml.

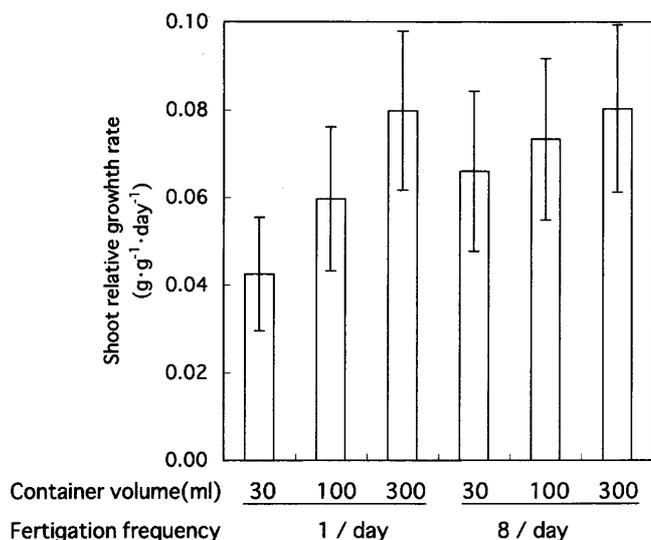


Fig. 2. Relative growth rate of shoot (dry weight basis) in chrysanthemum cv. Pinky as affected by fertigation frequency and root zone volume. Mean of 6 values calculated by Fig. 1A. Vertical bars indicate SE.

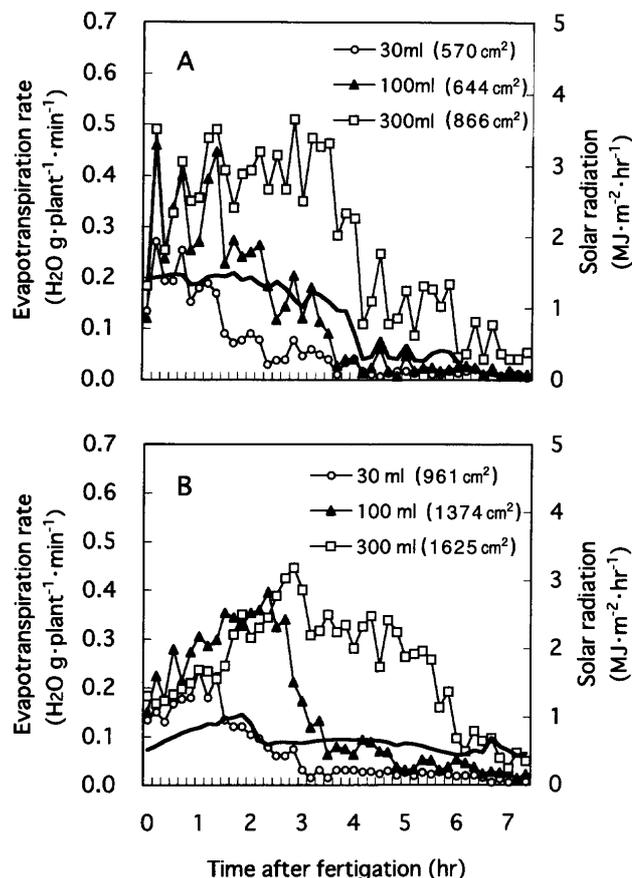


Fig. 3. Diurnal fluctuation of evapotranspiration rate of a plant in chrysanthemum cv. Pinky as affected by root zone volume and solar radiation at 26 days (A) and 46 days (B) after planting. All plants were fertigated 8 times in a day before measurement. Figure legends indicate container volume and mean of total leaf area (values in the parentheses). Solid bold lines represent solar radiation.

は定植 26 日後には 100 ml 区と 300 ml 区がほぼ同じであったが、定植 46 日後には 100 ml 区と比較して、300 ml 区がやや低かった。300 ml 区の植物は各個葉の葉面積が大きかったにもかかわらず、このような結果になった原因は明らかではない。定植 26 日後には 30 ml 区および 100 ml 区でそれぞれ給液 1.5、3 時間後、定植 46 日後にはそれぞれ給液 1.5、2.5 時間後に、蒸発散速度が 300 ml 区と比較して急激に低下した。その後、蒸発散速度はいずれも低い値で推移した。定植 26 日および 46 日後の給液から蒸発散速度が減少し始めるまでの総蒸発散量は、30 ml 区では約 $14 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 、100 ml 区では約 $48 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ であり、それぞれ培地 30 ml および 100 ml の最大保水量 (培地容積の約 50%) に近かった。300 ml 区では定植 46 日後の給液 6 時間後に蒸発散速度の著しい減少が認められた。このときの給液後の蒸発散量は 114 g であり、300 ml 区の最大保水量 (約 150 g) の 80% 以下であった。8 回給液区では定植 45 日後の根乾物重が 300 ml 区で約 2.0 g であったのに対して、30 および 100 ml 区ではそれぞれ約 0.7 および 1.4 g であった。根域容量が小さい場合には明らかに根群分布が密であり、根圏の水分を極めて

有効に利用する能力を持つものと考えられる。

さらに、両測定日の蒸発散速度を比較するため、葉面積当たり日射量当たりに換算した蒸発散速度の変化を第4図に示した。両測定日とも、給液後1時間の蒸発散速度はほぼ同じ値を示した。両測定日とも、30 ml区では給液2-3時間後には低下し、100 ml区では給液4-5時間後に低下した。300 ml区では給液後時間が経過するにつれ、蒸発散速度が増加した。300 ml区では根圏の水分が十分であり、気温や葉温の上昇によって増加したためと考えられた。また、定植26日後の300 ml区の蒸発散速度と比較して、定植46日後の300 ml区の蒸発散速度が低いのは、上位葉によって遮蔽される下位葉の面積が大きいためと考えられた。

給液頻度と蒸発散速度との間の関係には、定植34日後と定植44日後の間に差が認められなかったので、定植44日後の培地を含む植物体重の変化を第5図に示した。測定開始時のみ給液した1回区の蒸発散速度は給液3時間後以降急激に低下した。このときの給液後の蒸発散量は約49 gであり、第3図で急激な蒸発散速度の低下が認められた48 gとほぼ同じ値であった。測定開始直前の給液から60-90分ごとに7回給液した8回区では、蒸発散速度の低下は認められず、給液から次の給液までの蒸発散量は最大24 gであった。

以上のように、植物の大きさにかかわらず、蒸発散量がほぼ培地の最大保水量に達した時点で蒸発散速度の急激な低下が認められ、根圏の水分量が減少すると気孔が閉鎖し蒸散速度が低下するという Davis・Zhang (1991)の報告と一致した。30 ml区において給液から蒸発散速度の

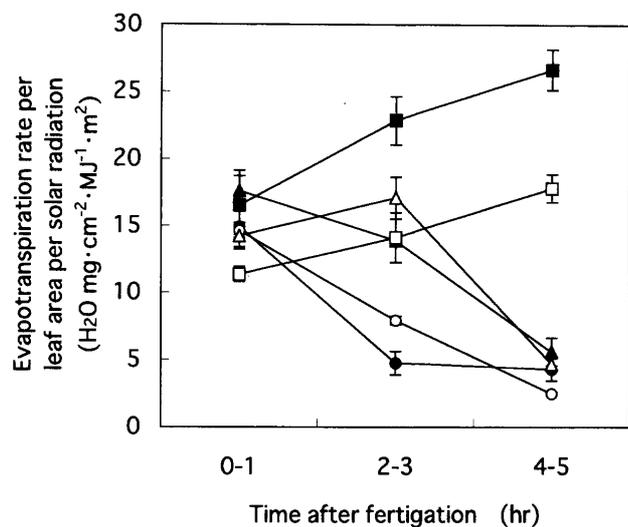


Fig. 4. Changes in evapotranspiration rate based on leaf area and solar radiation in chrysanthemum cv. Pinky as affected by root zone volume and days after planting. All plants were fertigated 8 times in a day before measurement. Following symbols represent container volume and days after planting, ●; 30 ml- 26 days, ▲; 100 ml- 26 days, ■; 300 ml- 26 days, ○; 30 ml- 46 days, △; 100 ml- 46 days, □; 300 ml- 46 days. Values are mean of 6 measurements taken at 10 minutes interval. Vertical bars indicate SE.

急激な低下が認められるまでの積算日射量は、定植26日後および46日後でそれぞれ1.4および1.3 MJ·m⁻²であり、真夏の晴天日の10%以下にすぎない。30 ml区の最大保水量がわずか15 g程度であることから、1回-30 ml区では、定植直後から、晴天時には蒸発散量が保水量を上回り水ストレスが生じていたものと考えられた。さらに、第4図に示したように、給液直後には30 ml区の日射量当たりの蒸発散速度が約15 mg H₂O·cm⁻²·MJ⁻¹·m²であった。実験期間中(9月4日から10月20日)の晴天時には日射が1.5 MJ·m⁻²·hr⁻¹をしばしば越えていたことから、葉面積650 cm²まで生長した段階(定植24日後)では、晴天時の蒸発散速度は15 g H₂O·hr⁻¹を越え、1時間ごとに給液した8回-30 ml区でもかなり強い水ストレスが生じていたのであろう。1回-100 ml区においても葉面積が200-300 cm²·plant⁻¹となる定植10日後頃から、晴天時には保水量が十分でなく、水ストレスが生じていたと推察される。植物が大きい場合や日射量が多い場合など蒸発散速度が高まる条件下では、同じ根域容量であってもさらに早い時点から根圏の水分が消費されて水ストレスが生じ、蒸発散速度が低下するものと予測される。

気孔の形態と光合成

第1表に示したように、給液頻度が低いほど、また根域容量が小さくなるほど単位面積当たりの気孔数は多くなった。しかし、気孔が小さくなった結果、葉全体に占める気孔の面積の比率は小さくなった。特にこの比率は培地が1日の蒸発散量に見合った水分を保持できない1回-30 ml区と1回-100 ml区で小さく、水ストレスに適応した形態を示した。同様に、Spenceら(1986)も、長期間の水ストレス下で栽培したソラマメは水ストレスに反応して孔辺細胞や開孔面積が小さくなることを報告してい

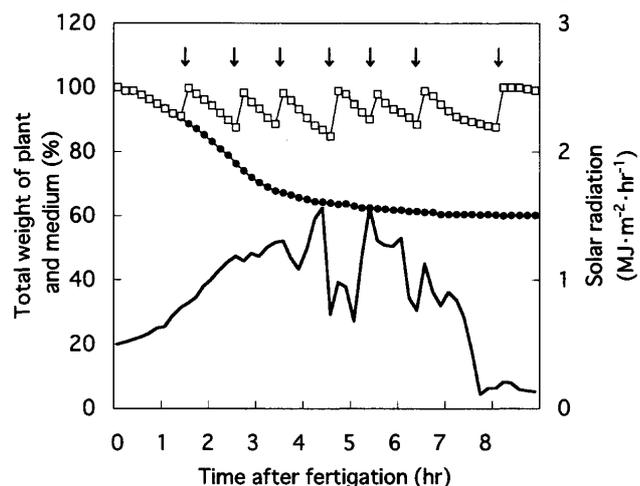


Fig. 5. Diurnal fluctuation of evapotranspiration rate of chrysanthemum cv. Pinky as affected by fertigation frequency (□; 8 times and, ●; once a day) on 44 days after planting. All plants were grown in 100-ml container and fertigated 8 times in a day before experiment. Mean of total leaf area was 1437 ± 32 cm². Total weight of plant and medium at start was calculated as 100%. Solid bold line represents solar radiation. Arrows indicate fertigation.

Table 1. Characteristics of stomata in chrysanthemum cv. Pinky as affected by fertigation frequency and root zone volume. Data were recorded 45 days after planting on leaves which had unfolded 20 to 25 days prior to harvest.

Fertigation frequency (day ⁻¹)	Root zone volume (ml)	No. of stomata (mm ⁻²)	Longitudinal diameter of stomata (μm)	Transverse diameter of stomata (μm)	Stomatal area ^z (%)	Open/total stomata ^y (%)
1	30	63.5 ± 1.65 ^x	37.9 ± 0.83	20.3 ± 0.73	15.3	49.4 ± 1.90
	100	56.7 ± 1.39	41.1 ± 0.71	25.2 ± 0.77	18.4	48.6 ± 2.52
	300	52.3 ± 1.13	46.8 ± 0.63	26.0 ± 0.83	20.0	58.3 ± 1.87
8	30	59.6 ± 0.67	42.6 ± 0.90	23.8 ± 0.40	19.0	59.8 ± 4.02
	100	52.3 ± 0.71	51.1 ± 0.94	25.1 ± 0.69	21.1	60.1 ± 1.91
	300	51.8 ± 0.94	53.3 ± 0.75	25.3 ± 0.60	21.9	66.4 ± 3.21
Significance						
Fertigation frequency(F)		**	**	**	*	*
Root zone volume(R)		**	**	**	**	**
F × R		NS	**	**	NS	**

^zProportion of stomatal area/leaf area.

^yNo. of open stomata/total stomata × 100.

^xMean ± SE.

*, **and NS indicate significance at $P=0.05$, 0.01 and nonsignificance, respectively, by 2-way analysis of variance.

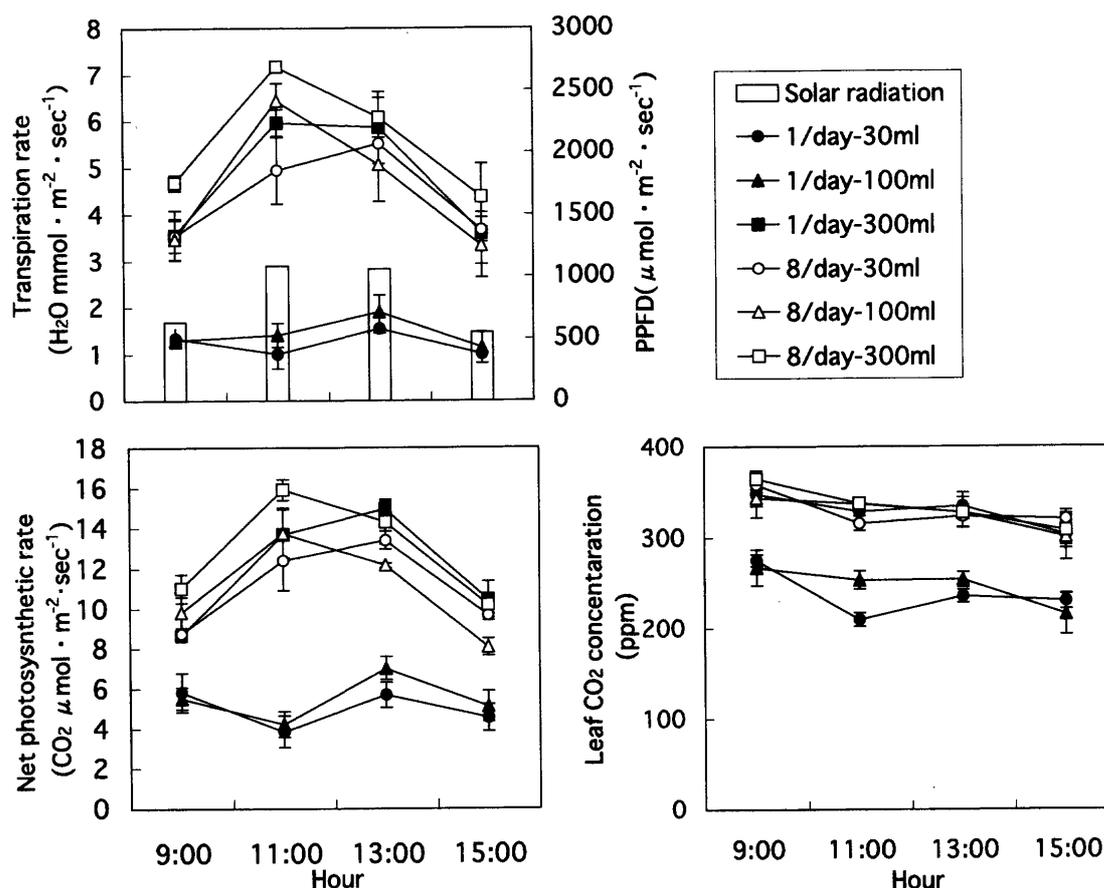


Fig. 6. Changes in photosynthetic properties in leaves of chrysanthemum cv. Pinky as affected by fertigation frequency and root zone volume. Measurements were carried out 24 days after planting on leaves which had unfolded 20 to 25 days, earlier. Vertical bars indicate SE (n=3). Figure legends represent fertigation frequency and container volume.

る。また、晴天日正午の気孔開孔率(開いている気孔数/全気孔数×100)も1回-30ml区と1回-100ml区で著しく低かった。

定植24日後の蒸散速度、光合成速度および葉内CO₂濃度の変化を第6図に示した。定植24日後には早くも処理区間に差がみられ、蒸散速度、光合成速度および葉内CO₂

濃度は、1回-30 ml区と1回-100 ml区が著しく低かった。この2処理区では1日を通してほとんど変化しなかったが、他の4処理区では日射量の変動に対応した日変化を示した。8回-30 ml区と8回-100 ml区の蒸散速度および光合成速度は、8回-300 ml区と比較すると1日を通してわずかに低かった。定植31日および44日後にも光合成速度を測定したが、測定した3回ともほぼ同様の傾向を示した。

植物の生長には光合成が不可欠であるが、水ストレス条件下にある植物は、気孔が閉鎖し、光合成速度が低下する(Hsiao, 1973)。スターフルーツ(Ismail・Noor, 1996)やキュウリ(Robbins・Pharr, 1988)では、根域容量が小さく給液頻度が低い場合には、植物体が比較的小さい段階から水ストレスによって気孔が閉じ、光合成速度が低下する。本実験の1回-30 ml区と1回-100 ml区のように著しく根圏の水分保持量が不足する場合には、水ストレスに適応するため、水ストレス条件下で展開する葉の気孔の開孔面積が小さくなり(第1表)、ガス交換能力が低下するのであろう。その結果、葉内水ポテンシャルは高かったと考えられる9:00(給液30分後)においても、光合成および蒸散速度が他の処理区と比較して著しく低い値を示したと考えられる。

一般に、植物の生長量は指数関数的な変化を示し、葉面積の変化が生長量の変化に大きく影響することが知られている。すなわち、個葉の光合成速度の差は小さくてもその差が複利的な影響を及ぼし、長期的には全乾物生産量の差として現れることになる。定植24日後における8回-30 ml区と8回-100 ml区の光合成速度は8回-300 ml区と比較してわずかに低かった(第6図)。この光合成速度の差と第1図Bに示したような処理区間の全葉面積の差との相乗的な影響の結果が乾物生産量の差として現れたと考えられる。1回-30 ml区と1回-100 ml区では継続的に著しい水ストレス下におかれた結果、他の処理区と比較して葉面積と光合成能力の両者が顕著に低下し、生長が著しく抑制されたのであろう。

第4図から1日の積算日射量 $10 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ の日には、葉面積 2000 cm^2 のキクの総蒸発散量は $300 \sim 500 \text{ g}$ に達すると推定される。培地の保水量が約 15 g の30 ml区で水ストレスを回避するため総蒸発散量 10 g 程度で給液するとすれば、 $0.2 \sim 0.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (最大日射 $2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ として6~10分)ごとに40回程度、培地の保水量 50 g の100 ml区では積算日射量 $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ごとに約10回(40~100分間隔)給液すれば、水ストレスが回避できることになる。盛夏期はさらに日射が強い上、高温、低湿度、風など他の環境要因も蒸発散を促進することから、さらに頻繁な給液が要求されるであろう。ただし、根圏が水分で飽和した状態になる水耕においても、地上部/地下部比(乾物)が5.7では地上部の生育が抑制されなかったが、6.1であった根域容量30 mlでは、地上部の生育が抑制さ

れた(後藤ら, 2001)。地上部の蒸発散に見合った水分を吸収するためには、一定以上の根量が必要であり、蒸発散量の変動に応じて十分な頻度で給液する場合であっても、水ストレスによる生育抑制を回避するためには乾物重で目標とする地上部生育量の20%程度の根量が確保できるだけの根域容量が必要と考えられる。

以上のように、根圏の水分保持量とキクの蒸発散速度との間に密接な関係がみられ、根域容量が小さいと定植直後から水ストレスが生じ、生育が著しく抑制された。しかしながら、養水分を1日8回に分けて供給して根圏の水分を高く維持することによって、根域制限下で栽培されたキクの蒸発散速度や光合成能力が高く維持され、約3倍の根域容量で1日1回の養水分供給によって栽培されたキクとほぼ同様あるいはそれ以上の大きさにまで生育させることが可能であった。従って、セル苗、鉢物生産や少量培地耕等の根域制限条件下での栽培においても蒸発散量の変動に応じて養水分を供給し、水ストレスを回避することによって、キクの生育を改善することが可能と考えられる。蒸発散量は植物体の大きさ、日射以外の気象条件によっても大きく変動するが、キクの蒸発散量は日射量の変動とほぼ一致することが知られており(小西, 1984)、日射量を中心とした蒸発散量予測技術の確立がまず必要であろう。

摘 要

1日当たりの給液頻度(1日1回, 1日8回)および根域容量(30, 100, 300 ml)がキク‘ピンキー’の生育、蒸発散速度、光合成特性と気孔の形態に及ぼす影響について調査し、セル苗や鉢物生産などの根域制限下で生じる水ストレスの程度について検討した。

根域容量が小さいほど地上部の生長は抑制されたが、給液頻度を高くすると生育抑制の程度は軽減された。蒸発散速度は根圏の水分量と密接な関係にあり、根域容量が30 mlか100 mlの場合は蒸発散量が根圏の最大保水量とほぼ等しくなると蒸発散速度は著しく低下した。しかし、給液頻度が高い場合には蒸発散速度は高く維持された。気孔は給液頻度が高いほどまた根域容量が大きくなるほど大きくなった。1回-30 ml(給液回数-根域容量)と1回-100 mlの植物体では、気孔が小さいばかりでなく、気孔開孔率(開いている気孔数/全気孔数)が著しく低かった。また、光合成・蒸散速度および葉内 CO_2 濃度も、1回-30 mlと1回-100 mlの植物体が著しく低かった。

以上のように、養水分を1日8回に分けて供給することによって、根域制限下で栽培されたキクの蒸発散速度や光合成能力が高く維持され、約3倍の根域容量で1日1回の養水分供給によって栽培されたキクとほぼ同様あるいはそれ以上の大きさにまで生育させることが可能であった。

引用文献

- Carmi, A. and B. Heuer. 1981. The role of roots in control of bean shoot growth. *Ann. Bot.* 48: 519-527.
- Davis, W. T. and J. Zhang. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 55-76.
- 後藤丹十郎・景山詳弘・小西国義. 1997. 根域容量がシュクコンカスミソウ, カーネーションおよびキクの主枝と側枝の生長に及ぼす影響. *岡山大農学報.* 86: 43-49.
- 後藤丹十郎・高谷憲之・吉岡直子・吉田裕一・景山詳弘・小西国義. 2001. 根域制限下でのキクの生育抑制に及ぼす養水分ストレスの影響. *園学雑.* 70: 760-766.
- Hameed, M. A., J. B. Reid and R. N. Rowe. 1987. Root confinement and its effects on water relations, growth and assimilate partitioning of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Ann. Bot.* 59: 685-692.
- Hsiao, R. G., A. P. Gay and A. C. Mountfield. 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- 石原 邦・平沢 正. 1985. 蒸散と吸水の測定. p.101-107. 北條良夫・石塚潤爾編. 最新作物生理実験法. 農業技術協会. 東京.
- Ismail, M. R. and K. M. Noor. 1996. Growth, water relations and physiological processes of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) plants under root growth restriction. *Scientia Hortic.* 66: 51-58.
- 伊藤亮一. 1994. 作物の生長に対する水ストレスの影響. p.118-124. 石井龍一編. 植物生産生理学. 朝倉書店. 東京.
- 小西国義. 1984. 生育と水環境. p.117-127. 塚本洋太郎編. 原色花卉園芸大事典. 養賢堂. 東京.
- Peterson, T. A., M. D. Reinsel and D. T. Krizek. 1991. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. 'Better Bush') plant response to root restriction. II. Root respiration and ethylene generation. *J. Exp. Bot.* 42: 1241-1249.
- Robbins, N. R. and D. M. Pharr. 1988. Effect of restricted root growth on carbohydrate metabolism and whole plant growth of *Cucumis sativus* L. *Plant Physiol.* 87: 409-413.
- Spence, R. D., H. Wu, P. J. H. Sharpe and K. G. Clark. 1986. Water stress effects on guard cell anatomy and the mechanical advantage of the epidermal cells. *Plant Cell Environ.* 9: 197-202.
- Thomas, T. H. 1993. Effects of root restriction and growth regulator treatment on the growth of carrot (*Daucus carota* L.) seedlings. *Plant Growth Regulation* 13: 95-101.