

閉鎖型苗生産システムのCO₂および水利用効率に及ぼすト マト実生個体群の葉面積指数および換気回数の影響

| | |
|-------|--|
| 誌名 | 植物環境工学 |
| ISSN | 18802028 |
| 著者 | 横井, 真悟 古在, 豊樹 長谷川, 智行 全, 昶厚 久保田, 智恵利 |
| 巻/号 | 17巻4号 |
| 掲載ページ | p. 182-191 |
| 発行年月 | 2005年12月 |

閉鎖型苗生産システムのCO₂ および水利用効率に及ぼす トマト実生個体群の葉面積指数および換気回数の影響

横井真悟¹・古在豊樹¹・長谷川智行¹・全 昶厚²・久保田智恵利³

¹ 千葉大学園芸学部 271-8510 千葉県松戸市松戸 648

² ソウル大学校農業生命科学大学 151-921 韓国ソウル市

³ Department of Plant Sciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

CO₂ and Water Utilization Efficiencies of a Closed Transplant Production System as Affected by Leaf Area Index of Tomato Seedling Populations and the Number of Air Exchanges

Shingo YOKOI¹, Toyoki KOZAI¹, Tomoyuki HASEGAWA¹, Chanhoo CHUN² and Chieri KUBOTA¹

¹ Faculty of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Chiba 271-8510, Japan

² College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 152-921, Korea

³ Department of Plant Sciences, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, U. S. A.

Abstract

The closed transplant production system is defined as a transplant production system covered with opaque and insulated walls, where the energy and mass transfer between inside and outside the system is controlled and/or restricted, and using artificial lights. CO₂ utilization efficiency of a closed transplant production system, *CUE*, was defined as the ratio of the amount of CO₂ fixed by plants to that supplied into the system. Water utilization efficiency of the system, *WUE*, was defined in the same way as *CUE*. Tomato seeds were sown on plug trays and grown for 20 days in the system. *CUE* and *WUE* increased with increasing leaf area index (*LAI*) and decreasing the number of air exchanges. Maximum *CUE* (0.93) and *WUE* (0.95) during the present study were obtained at maximal *LAI* of 1.2 and minimal number of air exchanges of 0.02 h⁻¹. Results suggest that a high *LAI* and a low number of air exchanges provide high *CUE* and *WUE* values.

Keywords : CO₂ balance, CO₂ enrichment, evapotranspiration rate, fluorescent lamps, net photosynthetic rate, water balance

緒 言

閉鎖型苗生産システム(以下、閉鎖型システム)とは、光に不透明な断熱壁で囲われ、システム内外のエネルギーおよび物質の交換が著しく制限されている、もしくは人

為的制御が可能であり、人工光源を用いる苗生産システムである(Kozai, 1999)。この閉鎖型システムに関する一連の研究が1998年以降行われ、閉鎖型システムの特長と利点が示されている(Ohyama *et al.*, 2003)。

閉鎖型システムは植物育成時に施用されるCO₂、水および肥料などの資源量を最小限にできることが示唆された(Kozai, 1999)。それを受けて、閉鎖型システムのCO₂および水収支が調べられ、温室などの開放型苗生産システムと比べて、システムのCO₂および水利用効率(システム内に投入されたCO₂および水のうち、システム内に有効に利用された割合)が高いことが実験

2005年3月18日受付

2005年8月23日受理

Corresponding author : Shingo Yokoi

(yokoi238@graduate.chiba-u.jp)

的に示された (Ohyama *et al.*, 2000; Yoshinaga *et al.*, 2000).

Ohyama *et al.* (2000) および Yoshinaga *et al.* (2000) の報告において算定されたシステムのCO₂および水利用率は、植物育成期間中の平均であった。しかし実際には、植物育成期間中のシステムのCO₂および水利用率は、その中の植物個体群の葉面積指数(LAI)およびシステムの換気回数に影響される。すなわち、LAIの増大に伴って、植物個体当たりのCO₂および水固定速度が増大するために、CO₂および水利用率は増大する。また、閉鎖型システムでは、植物体の純光合成速度を促進させるために、通常、外気よりもCO₂濃度を高める。その場合、換気回数が大きいほど閉鎖型システム外へCO₂が流出しやすいために、一般に、システムのCO₂利用率は低くなる。同様に、閉鎖型システムの換気回数および閉鎖型システム内の水蒸気密度が高いほど、システム外へ水蒸気が流出しやすく、システムの水利用率は低下する。

そこで、本研究では、それらの影響を実験および計算によって検討した。同時に、純光合成速度および蒸発散速度の測定を各2通りの方法で比較し、それらの測定精度について検討した。

材料および方法

閉鎖型システム

実験に用いた閉鎖型システム(千葉大学園芸学部内の閉鎖型植物生産研究施設(Chun and Kozai, 2000))は、光に不透明な断熱壁(熱貫流係数:天井面および側面0.3 W m⁻² K⁻¹, 床面0.4 W m⁻² K⁻¹)に囲われた空間(2.5 m(W), 8.3 m(L), 5.4 m(H))に、56トレイ(8枚/段×7段)収容可能な育苗棚が4棚設置されたものである。棚1段の横断面図をFig. 1に示す。それぞれの育苗棚には32 W白色高周波蛍光管(FHF32-EXN, 松下電器産業(株))112本(16本/段×7段)、16 W白色高周波蛍光管(FHF16-EXN, 松下電器産業(株))21本(3本/段×7段)、家庭用エアコンディショナー(S259TSX-W, ダイキン工業(株)、暖房時消費電力1125 W, 冷房時消費電力1170 W; 以下、エアコン)3台、ファン(CC-V9060, 三洋電機(株)、消費電力345 W)3台が設置されている。また、閉鎖型システム内には、セルトレイ用底面噴射式自動かん水装置(Murase, 2000)(以下、かん水装置)および、CO₂分析計(GMW20, ヴァイサラ(株))、電磁弁(USB2-M5-1, シーケーディ(株))およびCO₂供給装置(M-0901,

(株)千代田精機)によって構成されるCO₂制御装置が設置されている。CO₂ガストレーサー法によって測定した閉鎖型システムの換気回数は0.02 h⁻¹であった。

植物材料およびその育成条件

培地(ナブラ養土, ヤンマー農機(株))を充填したトレイ(300×600×50 mm, 根巻き防止セルトレイ72穴, タキイ種苗(株))の各セルに1粒ずつトマト(*Lycopersicon esculentum* Mill., 品種:桃太郎)を播種したものを、トマト実生個体群(以下、個体群)とした。栽植密度は400 m⁻²であった。

播種直後の56個体群を3日おきに4回、育苗棚を順に満たすように収容した(計224個体群)。この結果、閉鎖型システム内には3日ずつ育成開始後日数の異なる個体群が混在した。各個体群の育成期間は20日間とし、育成終了時に苗個体群を閉鎖型システム外に搬出した。試験期間は29日間であった。育成開始後0-2日目は、非照明、気温19±1°C、3-19日目は、明期16 h d⁻¹、トレイ面上14 cmのPPF(光合成有効光量子束)240±20 μmol m⁻² s⁻¹、気温26±2°C/19±1°C(明期/暗期)で制御した。育成期間を通じて閉鎖型システム内のCO₂濃度は1040±50 μmol mol⁻¹で制御した。相対湿度はなりゆきとした。結果的には明期では平均65%、暗期では平均85%であった。個体群が存在しないときの育苗棚内の風速を0.53±0.07 m s⁻¹に制御した。かん水はかん水養液(大塚A処方, 大塚化学(株))をかん水装置にて明期ごとに与えることによって行った。

測定、算定および推定

葉面積、乾物重および茎長の測定および推定

植物個体当たりの葉面積(AL, square meter per plant), 乾物重(D, gram per plant)および生体重(F, gram per plant)は、式(1), (2)および(3)からそれぞれ推定した。これらの式は、本実験と同じ閉鎖型システムおよび育成条件にて育成した個体群にてあらかじめ測定した値から得られた近似式である。

$$AL = 0.39 \times 10^{-5} \exp(0.23T) \quad (1)$$

$$D = 0.0018 \exp(0.27T) \quad (2)$$

$$F = 0.012 \exp(0.27T) \quad (3)$$

ここで、Tは育成開始後日数である。式(1), (2)および(3)の自由度修正決定係数(R²)は、それぞれ0.99, 0.99および1.00であった。R²とは、回帰式の当てはまりの程度を示す0-1までの値であり、1に近づくほど当てはまりが良いことを示す(Kan, 2000)。また、LAIは閉鎖型システム内の葉面積の総和を閉鎖型シス

テム内の育苗可能面積 (40 m²) で除した値とした。

システムの CO₂ 利用率 (CUE) の算定

本論文で CUE を算定する目的は、閉鎖型システムに投入された CO₂ が植物体にどの程度固定されたかを示すことである。

閉鎖型システムの CO₂ 収支式を以下に記す。

$$CI + CS = CP + CA + CV + CQ \quad (4)$$

ここで、CI: CO₂ 施用速度, CS: 培地呼吸速度, CP: トマト実生個体群による CO₂ 固定速度 (純光合成速度), CA: 空気中の CO₂ 含有量変化速度, CV: 換気によるシステム外への CO₂ 放出速度, CQ: 壁および他の表面による CO₂ 吸収速度, である。単位はすべて 1 日の閉鎖型システムの体積当たりのモル数 (mmol m⁻³ d⁻¹) である (Fig. 1)。

この収支式からシステムの CO₂ 利用率 (CUE) の算定式は以下ようになる。

$$CUE = \frac{CP}{CI + CS} \quad (5)$$

分母の投入量に CS を加えた理由は、CS は培地の種類や体積含水量などの状態によって変化するので、本実験とは異なる培地を使用した場合にも CUE を正しく評価できるようにするためである。

CI は、サーマルマスフローメータ (TF-5300, 東京計装(株)) で CO₂ の気体定数を 8.314 J mol⁻¹ K⁻¹ とし

て測定した。CS は同化箱にてあらかじめ測定した培地のみのトレイの培地呼吸速度 (0.086 mol m⁻² d⁻¹) とした。CV は、閉鎖型システム内外の CO₂ 濃度差に閉鎖型システムの換気回数 (0.02 h⁻¹) および容積 (112 m³) を乗じることで求めた。そのときの外気の分子量は 44.6 mol m⁻³ とした。CA および CQ は、無視できるほど小さいとして、測定しなかった。残りの CP を CO₂ 収支式 (4) から算定した。

システムの水利用率 (WUE) の算定

本論文で WUE を算定する目的は、閉鎖型システムに投入された水が植物体にどの程度保持されたかを示すことである。

閉鎖型システムの水収支式を以下に記す。

$$WI = WP + WS + WA + WD + WV + WQ \quad (6)$$

ここで、WI: かん水速度, WP: トマト実生個体群による水保持速度, WS: 培地の水含有量変化速度, WA: 空気の水含有量変化速度, WD: エアコンによる水凝縮速度, WV: 換気によるシステム外への水放出速度, WQ: 壁および他の表面による水吸収速度, である。単位はすべて 1 日の閉鎖型システムの体積当たりの重量 (g m⁻³ d⁻¹) である (Fig. 1)。

この収支式から閉鎖型システムの水利用率 (WUE) の算定式は以下ようになる。

$$WUE = \frac{WP}{WI - WD - WS} \quad (7)$$

本実験では WD を回収したが、実験の都合上再利用していない。しかし、閉鎖型システムは本来 WD を回収再利用できる。WD を再利用した場合、本実験にて使用した WI は WD の分だけ少なくてすむ。よって、WI から WD を減じた。

分母の投入量から WS を減じた理由は、WS はかん水量によって変化するので、かん水量が異なる場合にも WUE を正しく評価できるようにするためである。

WI は、かん水前後の個体群質量を電子天秤 (HP-20K(N), (株) エー・アンド・デイ) によって測定することで求めた。WP は、式 (2) および (3) から推定した。WD は、エアコンによる凝縮水を電子天秤 (EB4300S, 島津製作所(株)) にて測定した。WV は、閉鎖型システム内外の水蒸気密度差および閉鎖型システムの換気回数 (0.02 h⁻¹) を容積 (112 m³) に乗じることで求めた。WA および WQ は、無視できるほど小さいとして、測定しなかった。残りの WS は、水収支式 (6) から算定した。

CUE に閉鎖型システムの換気回数が及ぼす影響

CUE において、換気回数を 0.1 または 1 h⁻¹ とした

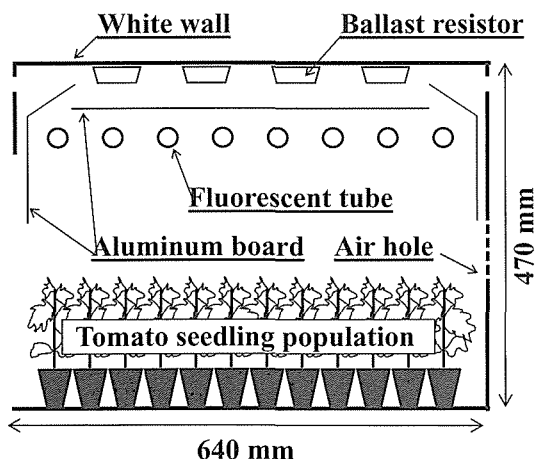


Fig. 1 Cross-sectional view of a shelf of the closed transplant production system and a tomato seedling population. The direction of airflow is from air holes to left. The airflow is for increasing net photosynthetic and evapotranspiration rate and removing sensible heat energy of fluorescent tubes and ballasts resistors.

場合の値を推定した。推定は、換気回数の増大とともに増大する CV を算定し、その CV の増加分を CI に加算することによって行った。

WUE に閉鎖型システムの換気回数および閉鎖型システム内外の水蒸気密度差が及ぼす影響

WUE において、換気回数を 0.1 または 1 h⁻¹ とした場合の値を推定した。さらに、千葉県松戸市よりも乾燥した地域における、閉鎖型システムの、換気回数異なる条件下の WUE を推定した。そのときの閉鎖型システム外気の水蒸気密度を 6.0 g m⁻³ (気温および相対湿度: 35.3°C および 14%) とし、換気回数を 0.02, 0.1 または 1 h⁻¹ とした。この水蒸気密度は、サウジアラビアの首都リヤド (北緯 24 度 43 分: 東経 46 度 44 分) における 1971-2000 年の夏 (6-8 月) の平均値 (理科年表 2002 より) に相当する。推定は、換気回数の増大、システム外空気の水蒸気密度の減少とともに増大する WV を算定し、その WV の増加分を WI に加算することによって行った。

CO₂ 収支による純光合成速度の推定

システムの CO₂ 収支式 (4) から、純光合成速度、すなわち CP を推定した。この値が正確であれば、閉鎖型システムは純光合成速度を推定できるシステムであるといえる。そこで、その正確さを検証するために、乾物重増加速度を式 (1) から算定し、CP との R² を調べた。これは、乾物重増加速度と純光合成速度は正比例関係にあることが一般的に知られているためである。

水収支による蒸発散速度の推定

システムの水収支式 (6) から、蒸発散速度 (WE) を以下の式にて推定した。

$$WE = WA + WD + WV + WQ \quad (8)$$

ここで、WE の正確さを検証するために、蒸発散速度を比較的正確に推定可能だとされる秤量法によって算定した蒸発散速度と 1 対 1 対応させて、そのプロットの正比例式 $y=x$ への R² を算定した。秤量法とは、一定間隔において対象物の重量を測定して、蒸発散速度を算定する方法である。本実験では、かん水前後のトレイ重量の差をとり、そこから (2) 式によって算定した乾物重増加速度を加えることによって WE を算定した。

結 果

生長量

式 (1), (2) および (3) から推定した閉鎖型システム内の個体群の LAI, 乾物重および生体重の試験期間中の経日変化を Fig. 2 に示す。試験開始後 19 日目まで、

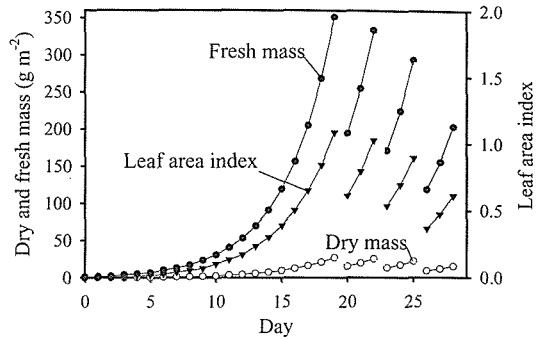


Fig. 2 Time courses of dry (○) and fresh (●) mass (g m⁻²), and leaf area index (LAI, ▼) of the tomato seedling populations in the closed transplant production system. LAI was defined as the ratio of leaf area to the transplant production area (40 m²) of the closed transplant production system. Fifty-six plug trays with seeds were placed in the closed transplant production system on days 0, 3, 6 and 9, and the plug trays were taken out from the closed transplant production system after 19 days of transplant production period (on days' 20, 23 and 26), so that the dry and fresh mass and leaf area index increased discretely.

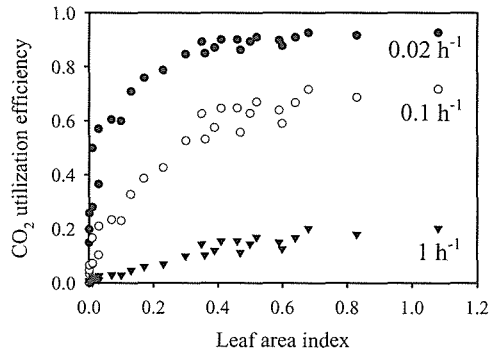


Fig. 3 CO₂ utilization efficiencies of the closed transplant production system (CUE) at varied numbers of air exchanges of 0.02 (●), 0.1 (○) and 1 h⁻¹ (▼) as affected by leaf area index. CUE was defined as "CUE = CP / (CI + CS)". Solid circle (●) indicates calculated values from a result of the present experiment. Blank circle (○) and solid triangle (▼) indicate simulated values.

それぞれ日ごとに増大した。育成を終了した個体群を閉鎖型システム外に取り出した 20, 23 および 26 日目にそれぞれ減少した。LAI, 単位面積当たりの乾物重および生体重の最大値は 1.2, 27 g m⁻² および 350 g m⁻² であ

Table 1 List of variable names and their meanings with units used in equations of mass balances and utilization efficiencies of system. CO₂ and water balance equations of the system are defined as “ $CI + CS = CP + CA + CV + CQ$ ”, “ $WI = WP + WS + WA + WD + WV + WQ$ ”, respectively. CO₂ and water utilization efficiencies of the system are defined as “ $CUE = CP / (CI + CS)$ ” and “ $WUE = WP / (WI - WD - WS)$ ”, respectively.

| Variable | Descriptio | Unit |
|------------|---|--------------------------------------|
| <i>CUE</i> | CO ₂ utilization efficiency of the system | |
| <i>CI</i> | CO ₂ enrichment rate | mmol m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>CS</i> | Substrate respiration rate | mmol m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>CP</i> | CO ₂ fixation rate by tomato seedling populations | mmol m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>CA</i> | Rate of change of CO ₂ content in the air | mmol m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>CV</i> | CO ₂ release rate to the outside by ventilation | mmol m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>CQ</i> | CO ₂ absorption rate by the walls and other surfaces | mmol m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>WUE</i> | Water utilization efficiency of the system | |
| <i>WI</i> | Irrigation rate | |
| <i>WP</i> | Water preservation rate by the tomato seedling populations | g m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>WS</i> | Rate of change of water content in the substrate | g m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>WA</i> | Rate of change of water content in the air | g m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>WD</i> | Water condensation rate at the evaporators of air | g m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>WV</i> | Water release rate to the outside by ventilation | g m ⁻³ d ⁻¹ |
| <i>WQ</i> | Water absorption rate by walls and other surfaces | g m ⁻³ d ⁻¹ |

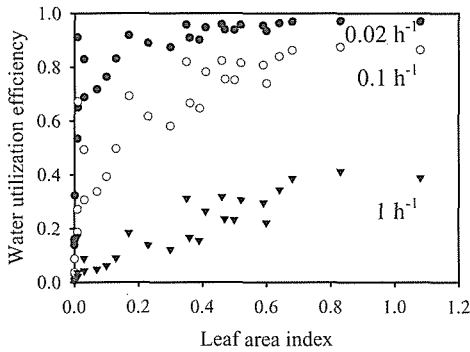


Fig. 4 Water utilization efficiency of the closed transplant production system (*WUE*) at varied numbers of air exchanges of 0.02, 0.1 and 1 h⁻¹ as affected by *LAI*, which was defined as “ $WUE = WP / (WI - WD - WS)$ ”. Water vapor densities inside and outside the closed transplant production system were assumed to be 16 and 10 g m⁻³, respectively. Solid circle (●) indicates calculated values from a result of the present experiment. Blank circle (○) and solid triangle (▼) indicate simulated values.

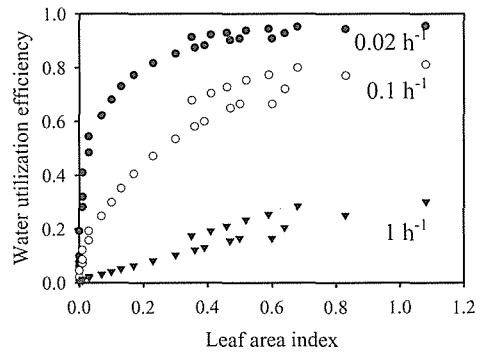


Fig. 5 Water utilization efficiency of the closed transplant production system (*WUE*) in an arid area at varied numbers of air exchanges of 0.02, 0.1 and 1 h⁻¹ as affected by *LAI*, which was defined as “ $WUE = WP / (WI - WD - WS)$ ”. Water vapor densities inside and outside the closed transplant production system were assumed to be 16 and 6 g m⁻³, respectively. All of values indicate simulated values.

った。

システムの CO₂ 利用効率 (*CUE*)

CO₂ 収支式の各項目の値を Table 2 に示す。CA および CQ は無視できるほど小さかったのでゼロとし、Table 2 から除外した。LAI および換気回数が *CUE* に

及ぼす影響を Fig. 3 に示す。試験期間中の閉鎖型システム内外の CO₂ 濃度差の平均は 610 μmol mol⁻¹ であった。換気回数が 0.02 h⁻¹ および 0.1 h⁻¹ の場合、LAI の増大とともに *CUE* は飽和曲線的に増大し、0.9 および 0.7 付近でそれぞれ一定であった。換気回数 1 h⁻¹ のときの値はほぼ直線的に増大した。換気回数の増大と

Table 2 Amounts of CO₂ (mmol m⁻³ d⁻¹) of CP, CI, CS and CV, and amount of water (g m⁻³ d⁻¹) of WP, WI, WD, WS and WV. CA, CQ, WA and WQ were regarded as 0, because their values were negligible.

| Day | CP | CI | CS | CV | WP | WI | WD | WS | WV |
|-----|--------------------------------------|-----|----|----|-----------------------------------|------|------|------|----|
| | mmol m ⁻³ d ⁻¹ | | | | g m ⁻³ d ⁻¹ | | | | |
| 0 | 0 | 5 | 7 | 13 | 0 | 21 | 42 | -29 | 2 |
| 1 | 0 | 7 | 7 | 12 | 0 | 22 | 60 | -41 | 3 |
| 2 | 0 | 7 | 7 | 11 | 1 | 23 | 47 | -28 | 3 |
| 3 | 4 | 4 | 13 | 13 | 1 | 44 | 335 | -295 | 2 |
| 4 | 1 | 4 | 13 | 16 | 2 | 46 | 356 | -313 | 1 |
| 5 | 5 | 3 | 13 | 12 | 2 | 113 | 320 | -210 | 1 |
| 6 | 13 | 5 | 20 | 13 | 3 | 261 | 494 | -236 | 0 |
| 7 | 7 | 0 | 20 | 13 | 4 | 302 | 511 | -213 | 1 |
| 8 | 15 | 6 | 20 | 11 | 5 | 401 | 502 | -108 | 2 |
| 9 | 19 | 5 | 27 | 12 | 7 | 421 | 764 | -353 | 3 |
| 10 | 19 | 5 | 27 | 13 | 9 | 442 | 728 | -299 | 3 |
| 11 | 29 | 14 | 27 | 12 | 12 | 564 | 734 | -185 | 3 |
| 12 | 37 | 22 | 27 | 12 | 16 | 681 | 894 | -230 | 1 |
| 13 | 45 | 31 | 27 | 12 | 21 | 641 | 905 | -288 | 3 |
| 14 | 67 | 53 | 27 | 12 | 28 | 834 | 907 | -105 | 4 |
| 15 | 81 | 67 | 27 | 12 | 36 | 877 | 933 | -96 | 4 |
| 16 | 101 | 86 | 27 | 12 | 48 | 897 | 963 | -116 | 3 |
| 17 | 117 | 102 | 27 | 12 | 63 | 939 | 990 | -116 | 2 |
| 18 | 136 | 122 | 27 | 12 | 82 | 1041 | 1064 | -107 | 2 |
| 19 | 154 | 139 | 27 | 12 | 107 | 1000 | 1092 | -203 | 3 |
| 20 | 111 | 103 | 20 | 12 | 59 | 767 | 829 | -125 | 3 |
| 21 | 128 | 121 | 20 | 13 | 78 | 831 | 855 | -106 | 4 |
| 22 | 147 | 138 | 20 | 12 | 102 | 878 | 880 | -108 | 3 |
| 23 | 100 | 99 | 13 | 12 | 52 | 540 | 612 | -127 | 2 |
| 24 | 113 | 112 | 13 | 12 | 68 | 616 | 645 | -100 | 3 |
| 25 | 107 | 106 | 13 | 12 | 90 | 643 | 587 | -38 | 4 |
| 26 | 64 | 69 | 7 | 11 | 36 | 291 | 326 | -74 | 4 |
| 27 | 71 | 75 | 7 | 11 | 47 | 322 | 323 | -52 | 3 |
| 28 | 71 | 74 | 7 | 10 | 62 | 421 | 274 | 80 | 4 |

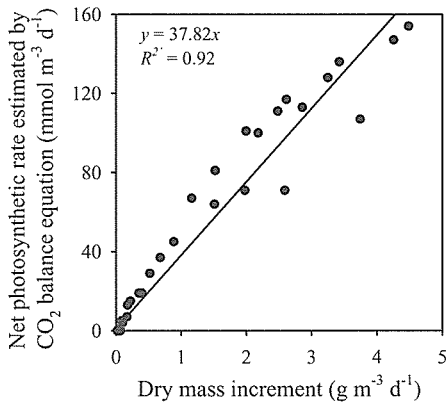


Fig. 6 Correlation between dry mass increment and the net photosynthetic rate estimated by the CO₂ balance equation.

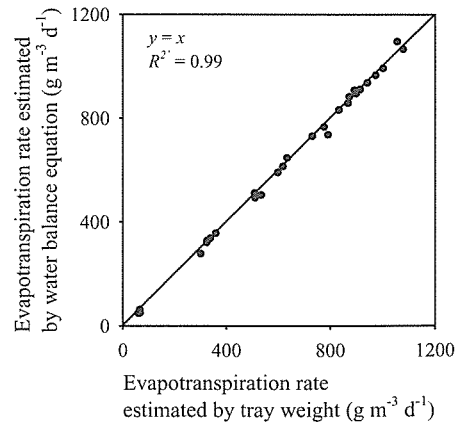


Fig. 7 Correlation between evapotranspiration rates estimated by the tray weight or the water balance equation.

もに CUE は減少した。 CUE の試験期間中の平均および最大値は、換気回数 0.02h^{-1} では 0.83 および 0.93 、 0.1h^{-1} では 0.50 および 0.72 、 1h^{-1} では 0.09 および 0.20 であった。

システムの水利用効率 (WUE)

水収支式の各項目の値を Table 2 に示す。 WA および WQ は無視できるほど小さかったのでゼロとして、Table 2 から除外した。 LAI および換気回数が WUE に及ぼす影響を Fig. 4 に示す。千葉県松戸市の本実験期間中の平均水蒸気密度は 10g m^{-3} (気温および相対湿度: 24.2°C および 49%) であった。試験期間中の閉鎖型システム内外の水蒸気密度差の平均は 6.0g m^{-3} であった。換気回数が 0.02h^{-1} および 0.1h^{-1} の場合、 LAI の増大とともに WUE は飽和曲線的に増大し、 0.9 および 0.8 付近でそれぞれ一定であった。換気回数 1h^{-1} のときの値はほぼ直線的に増大した。換気回数の増大とともに WUE は減少した。 WUE の試験期間中の平均および最大値は、換気回数 0.02h^{-1} では 0.94 および 0.98 、 0.1h^{-1} では 0.74 および 0.89 、 1h^{-1} では 0.23 および 0.45 であった。

乾燥地域にて閉鎖型システムを稼働すると仮定した場合における LAI および換気回数が WUE に及ぼす影響の推定結果を Fig. 5 に示す。この場合、閉鎖型システム内外の水蒸気密度差の平均は 10g m^{-3} (気温および相対湿度: 35.3°C および 14%) であった。Fig. 4 の千葉県松戸市での結果と同傾向であったが、どの換気回数の場合においても WUE は小であった。換気回数異なる場合の WUE の育苗期間中の平均および最大値は、換気回数 0.02h^{-1} では 0.89 および 0.95 、 0.1h^{-1} では 0.62 および 0.80 、 1h^{-1} では 0.14 および 0.28 であった。

純光合成速度の比較

CO_2 収支式 (4) から閉鎖型システム内の個体群による純光合成速度 (CP) を推定した結果と、乾物重増加速度の推定値とを比較した結果を Fig. 6 に示す。両者を直線近似したときの R^2 は 0.92 であった。

蒸発散速度の比較

(8) 式から閉鎖型システム内の個体群による蒸発散速度 (WE) を推定して、秤量法によって算定した蒸発散速度と比較した結果を Fig. 7 に示す。両者の推定法の一致度を示す、正比例式 $y=x$ への R^2 は 0.99 であった。

考 察

システムの CO_2 利用効率 (CUE)

LAI の増大とともに CUE は飽和曲線的に増大した (Fig. 3)。また、換気回数が小さいほど CUE は大であった。ここで、(4) および (5) 式から、

$$CUE = \frac{CP}{CP + CV + CA + CQ} \quad (9)$$

と表せる。これは CP が増大するほど CUE が増大することを示す。そして、最適 LAI (群落光合成速度が最大となる LAI) 以下の場合、 CP は LAI の増大に伴って増大するために、 LAI の増大に伴って CUE は増大する。また、 CV の増大は CUE を低下させる。そして、 CV は換気回数に比例して増大するために、換気回数の増大に伴って CUE は減少する。これらのことから、 CUE を高く維持した植物育成には、システム内の LAI を高く保ち、かつ、換気回数を小さくすることが重要であることが実験のおよび理論的に確認された。

CUE を更にも高めるには、1) 高栽植密度のトレイを使用し、 LAI を高める、2) 発芽するまで閉鎖型システム内への CO_2 供給を行わない、もしくは発芽室を別に設けて、発芽するまでシステム内に配置しない、3) システム内の植物体の育成開始日をずらして、常にシステム内の LAI を高く保つ、4) 換気回数を小さくする、などが考えられる。

特に 1) の方法はシステムの電気利用効率 (システムの消費電力エネルギーに対する植物が固定した化学エネルギーの比) が増大して、苗当たりの電力コストの削減につながるということが知られている (Lok *et al.*, 2002)。しかしながら、密植によって育成後期に最適 LAI 以上になると、単位面積当たりの純光合成速度が減少するために、逆効果になる。ゆえに、植物種ごとの最適 LAI の把握が重要である。

4) の方法はシステムの規模が大となるほど高気密化が困難になり、コストがかかる。また、建築基準法では、人が内部にて作業するシステムである場合、最低でも 0.37h^{-1} (建築基準法行令第 20 条の 2 第 2 項、第 3 項および第 22 条の 3 に基づき、作業人数を 1 人として算定した) の換気回数が要求される。前者は技術的には可能であり、コスト性能比だけが問題となる。後者は、本研究で使用した閉鎖型システムのように、人が内部に入らないフルオートメーション化された施設の開発によって解決できる。他方、換気回数をきわめて小さくすると、システム内のエチレンガス濃度が高くなるなどの弊害が

考えられ (Yoshinaga *et al.*, 2000), そのようなガスに敏感な植物を育成する場合には, 注意が必要である。

Yoshinaga *et al.* (2000) は, CO₂ 施用は植物の生育を促進させ, 苗生産期間を短縮できるために, 閉鎖型システムの電力コストを削減する意味でも重要である, としている。そこで, CO₂ 施用の電力コスト削減に対する効果を検証する。本実験では, 閉鎖型システム内の CO₂ 濃度を 1000 μmol mol⁻¹ に設定し, 換気回数 0.02 h⁻¹ において, 植物体を 20 日間育成した。そのときの植物体当たりを使用した CO₂ 量および電力量は 15 mmol および 1.6 MJ (Yokoi *et al.*, 2003) であった。本実験に使用した CO₂ は 1 mol 当たり 9.4 円 ((株)小沢酸素) であったため, 植物体当たりにかかった CO₂ コストは 0.14 円であった。また, 電力コスト (基本料金を含まない) は東京電力の電気料金表によると, 植物体当たり 2.8-6.6 円であった。電力コストに幅があるのは, 季節および時間帯によって電力料金が異なるためである。よって, 植物体当たり合計で 2.94-6.74 円であった。ここで, システム内の CO₂ 濃度を大気と同濃度まで CO₂ 施用したと仮定して, CO₂ コストを試算する。また, CO₂ 濃度を 1000 μmol mol⁻¹ 程度としてトマトを育成すると, 大気濃度の場合と比べて約 30% 乾物重が増加する (Mortensen, 1987) ため, ここでは単純に植物育成期間は 1.43 (=1.0/0.7) 倍になると仮定した (実際には植物育成時の他の環境要因によってこの値は増減する)。そのときの植物体当たりを使用される CO₂ 量および電力量は 12 mmol および 2.3 MJ (1.6 × 1.43) であり, これは 0.11 円および 4.0-9.5 円であり, 合計で 4.11-9.61 円となる。

以上の結果から, 1000 μmol mol⁻¹ 程度の CO₂ 施用を行うことで, 植物体当たり 1.17-2.87 円のコスト削減になる。しかしながら, これが換気回数 1 h⁻¹ の場合には 1000 μmol mol⁻¹ 程度の CO₂ 施用をする場合, CO₂ のコストは 1.8 円になる。このことは, 換気回数が 1 h⁻¹ 以上になると, 削減した電力コストを超える可能性を示す。すなわち, 換気回数を小さくすることが CO₂ 施用による電力コスト削減に効果があるといえる。実際には, CO₂ 施用による育成期間の短縮によって, 人件費なども削減されるために, CO₂ 施用のコスト削減効果は更に高い。

システムの水利用率 (WUE)

LAI の増大とともに WUE は飽和曲線的に増大した (Fig. 4)。また換気回数が大きいくほど WUE は減少した。ここで, (6) および (7) 式から,

$$WUE = \frac{WP}{WP + WV + WA + WQ} \quad (10)$$

と表せる。これは WP が増大するほど WUE が増大することを示す。そして, WP は LAI の増加に伴って増大するために, LAI の増大に伴って WUE は増大する。また, WV の増大は WUE を低下させる。そして, WV は換気回数に比例して増大するために, 換気回数の増大に伴って WUE は減少する。これらのことから, WUE を高く維持した植物育成には, システム内の LAI を高く保ち, かつ, 換気回数を小さくすることが重要であることが実験のおよび理論的に確認された。WUE を高めるには, CUE を高めるとときと同様の処理が有効であろう。

また, WV は換気回数だけでなく, システム内外の水蒸気密度差に影響される。一般的に植物の純光合成速度の促進に適する気温および相対湿度は 20-35°C (Wardlaw, 1979) および 75-85% (Yabuki, 1985) 付近とされる。この範囲内の気温および相対湿度の場合には, 一般に閉鎖型システム内の水蒸気密度の方が外気よりも高いために, 水蒸気の輸送方向は常に内部から外部である。よって, WUE を高く保つためには, 換気回数を小さくして, WV を減少させることが重要となる。他方, 苗に乾燥耐性をつけるなどのために相対湿度を低くして育苗する場合には, 外気の水蒸気密度の方が高くなりうる。このような場合, 換気回数が高くなるほど外気の水蒸気が閉鎖型システム内部に流入してエアコンの除湿水として回収され, その結果 WUE は高くなる。しかし, 前述の CUE は換気回数とともに減少するために, コスト的に高い CO₂ を優先するならば, 換気回数を小さくすることが重要となる。ちなみに換気回数 0.02 h⁻¹ の場合, 水に要したコストは植物体当たり 0.001 円以下であった。

換気回数 0.02 h⁻¹ の場合, 実験期間中の WUE の平均は 0.89 であった。また, エアコンによる除湿水を再利用しない場合の WUE の平均は 0.05 であった。このことは除湿水の再利用が WUE の増大には特に重要であることを示す。除湿水は蒸発散由来の蒸留水であるので, 不純物は極めて少ない。そのため再利用は比較的容易であり, 殺菌装置および不純物濾過装置などにかかるコストは非常に小さいと考えられる。

乾燥地帯において, LAI が増大するほど WUE が高くなる傾向 (Fig. 5) は千葉県松戸市での結果 (Fig. 4) と同様であった。しかし, 換気回数が 0.02 h⁻¹ の場合は WUE の平均が千葉に比べて 5% しか減少していないのに対して, 換気回数が 1 h⁻¹ の場合には, 9% 減少

した。これは、換気回数が大となるほど WV が増大して、 WUE が大きく減少することを示す。しかしながら、例えそうであっても、換気回数 0.02 h^{-1} の場合、 WUE の平均は 0.89 と高く、水資源の乏しい乾燥地帯の利用にも、閉鎖型システムを使用することは水の有効利用において有用である。

Fig. 4 に対して Fig. 5 のプロットはばらつきが少なかった。これは、乾燥地帯での推定では全期間でシステム外の水蒸気密度を等しくしたためである。換気回数が小さい閉鎖型システムにおいても WUE はシステム外の水蒸気密度の変化に少なからず影響を受けることがわかった。よって、外気の影響を少なくするために換気回数を少なくすることがここでも重要であることが示された。**純光合成速度 (CP)**

CO_2 収支から推定した純光合成速度は乾物重増加速度と相関が高く、概ね一致した (Fig. 6)。これは、換気回数および CS をあらかじめ調べておけば、 CO_2 供給速度および閉鎖型システム内外の CO_2 濃度差を測定することにて、純光合成速度を推定できることを意味する。

なお、乾物重増加速度が 2.7 および $3.8 \text{ g m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 付近にて下方に外れている 2 点は、作業のために人が内部に入ったことによる。乾物重増加速度が増大するに従って、純光合成速度の増加率が減少しているのは、 CS が原因だと考えられる。本研究では、 CS はあらかじめ同化箱において 1 日間測った値を使用した。しかし、本実験では育成終了時に培地表面に菌糸が確認されるものもあり、育成日数が進むにつれて生菌数が増大して、実際の CS はあらかじめ測った値からずれた可能性がある。 CS の増大は CI を減少させ、そこから推定している純光合成速度を減少させる。このことから、更に正確な純光合成速度を推定するためには、培地呼吸速度をより正確に予測もしくは測定することが重要であることがわかった。

このように、純光合成速度を経時的に把握することができれば、植物体の純光合成速度を最大にする環境条件を植物育成時に与えることが容易になると考えられる。本研究では、1 日ごとの純光合成速度の推定を行った。しかし、今後は更に短い間隔での推定を行うことも意味がある。

蒸発散速度 (WE)

水収支から推定した蒸発散速度は秤量法にて推定したそれと高い相関があった (Fig. 7)。このことは、システムの換気回数をあらかじめ調べておきさえすれば、 CI およびシステム内外の水蒸気密度差を測定することによって、容易に蒸発散速度を把握できることを意味す

る。

蒸発散速度をこのように経時的に把握することができれば、適切なかん水時期を決定することなどが容易になる。具体的には、蒸発散速度が減少してきた時点にてかん水をする方法がある (Naito, 1974)。また、乾燥条件に移植する苗に水ストレスをかけて、乾燥耐性を持つ高付加価値苗生産も考えられる。植物の蒸発散速度を知ること、そのような水ストレスを与えながらの育成が容易になると考えられる。

施設内にある植物の生育の状態を純光合成速度や蒸発散速度などの数値情報として得られれば、動的に変化している施設内環境に対する植物応答の把握が可能となり、環境要因の相互関係に対する理解が深まる (Kano, 1992) とされ、純光合成速度や蒸発散速度を、自動で、正確、かつ短い間隔で推定できれば、閉鎖型システムにおける環境制御技術のさらなる発展に貢献できるであろう。

結 論

従来の研究 (Ohyama *et al.*, 2000; Yoshinaga *et al.*, 2000) では、閉鎖型システムの CO_2 および水利用効率は育苗期間中の平均値しか算定されていなかった。そのため、それらの利用効率を変化させる主要因であるにも関わらず、苗の生育がそれらの利用効率に及ぼす影響が把握されていなかった。本研究では、閉鎖型システムの CO_2 および水利用効率は LAI が増大、もしくは換気回数が減少するほど大となることが示された。このことは閉鎖型システムにて省資源的な植物育成をする場合、生育の進んだ苗もしくは栽植密度を高めた苗によって閉鎖型システム内の LAI を高く保ち、換気回数を小さくすることが重要であることを示す。 LAI が最も高い 1.2 および換気回数が最も低い 0.02 h^{-1} の場合では、システムの CO_2 および水利用効率は 0.93 および 0.95 と、高い数値であった。また、閉鎖型システムは純光合成速度および蒸発散速度が比較的容易および正確に推定できるシステムであることが示された。これは植物育成管理におけるの利点となるであろう。

謝 辞

(株)テクノバの酒見幸助氏、(有)エヌアイシステムの林泰正氏には、千葉大学園芸学部内の閉鎖型植物生産研究施設の管理および使用法のご指導をして頂いた。ここに感謝の意を記す。

引用文献

- Chun, C., Kozai, T. 2000. Closed transplant-production system at Chiba University. In : Transplant Production in the 21st Century, ed. by Kubota, C., Chun, C., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 20-27.
- Kan, T. (菅 民郎) 2000. Practice of multivariate analysis for beginners (in Japanese) (初心者が楽々読める多変量解析の実践). Gendaisugakusya, Tokyo, 25-85.
- Kano, A. (狩野 敦) 1992. Application of computer (in Japanese) (コンピュータの利用). In : Protected Horticulture (施設園芸), ed. by Kozai, T. (古在豊樹) *et al.*, Asakurashoten, Tokyo, 205-206.
- Kozai, T. (古在豊樹) 1999. Development and Application of Closed Transplant Production System (in Japanese) (閉鎖型苗生産システムの開発と利用). Yokendo, Tokyo, 1-191.
- Lok, Y. H., Ohyama, K., Kubota, C., Kozai, T. 2002. Sweetpotato propagule production rate and electric energy consumption in a closed transplant production system as affected by planting density (in Japanese). J.SHITA 14(1) : 10-17.
- Mortensen, L. M. 1987. Review : CO₂ enrichment in greenhouses. Crop responses. Scientia Hort. 33 : 1-25.
- Murase, H. 2000. Microprecision irrigation system for transplant production. In : Transplant Production in the 21st Century, ed. by Kubota, C., Chun, C., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 33-37.
- Naito, F. (内藤文男) 1974. Applications of optimum irrigation and evapotranspiration ratio on the protected horticulture (in Japanese) (施設栽培における適正水と蒸発散比の応用). Agriculture and Horticulture (農業および園芸) 49 (5) : 671-675.
- Ohyama, K., Kozai, T., Chun, C. 2003. Development and application of closed transplant production system (in Japanese). J.SHITA 15 (1) : 1-10.
- Ohyama, K., Yoshinaga, K., Kozai, T. 2000. Energy and mass balance of a closed type transplant production system (3) water balance (in Japanese). J. SHITA 12(4) : 217-224.
- Wardlaw, I. F. 1979. The physiological effects of temperature on plant growth, Proc. Agron. Soc. NZ. 9 : 39-48.
- Yabuki, M. (矢吹万寿) 1985. Dynamic environments of plants (in Japanese) (植物の動的環境). Asakurashoten, Tokyo, 1-200.
- Yokoi, S., Kozai, T., Ohyama, K., Hasegawa, T., Chun, C., Kubota, C. 2003. Effects of leaf area index of tomato seedling populations on energy utilization efficiencies in a closed transplant production system (in Japanese). J.SHITA 15(4) : 231-238.
- Yoshinaga, K., Ohyama, K., Kozai, T. 2000. Energy and mass balance of a closed type transplant production system (2) CO₂ balance (in Japanese). J. SHITA 12(4) : 225-231.