閉鎖型苗生産システムにおける栽植密度および気流速度がセル成型トマト実生苗の生育およびその均一性に及ぼす影響

横井真悟¹・後藤英司¹・古在豊樹²・西村将雄³・田口勝教⁴・石神靖弘¹

¹千葉大学園芸学部 271-8510 千葉県松戸市松戸 648

²千葉大学 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

³株式会社山武 環境事業推進本部 210-0015 神奈川県川崎市川崎区南町 1-1

⁴株式会社ピーシーワークス ネットワーク事業部 163-0805 東京都新宿区西新宿 2-4-1

Effects of Planting Density and Air Current Speed on the Growth and That Uniformity of Tomato Plug Seedlings in a Closed Transplant Production System

Shingo YOKOI¹, Eiji GOTO¹, Toyoki KOZAI², Masao NISHIMURA³,
Katsunori TAGUCHI⁴ and Yasuhiro ISHIGAMI¹

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

²Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522, Japan

³Environmental Business Center, Yamatake Corporation, 1-1 Minami-cho, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-0015, Japan

⁴Network Division, PC Works Corporation, 2-4-1 Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-0805, Japan

Abstract

Tomato seedlings were grown in plug trays at three planting densities (700, 1100, or 1600 m⁻²) under two air current speed conditions (0.3 or 0.7 m s⁻¹) either in a closed transplant production system or in a greenhouse without air current speed control. The growth and that uniformity of the tomato plug seedlings decreased with an increase in the planting density in the closed transplant production system. At the higher air current speed, the growth increased without a decrease in the growth uniformity and excessive stem elongation. The growth and that uniformity of seedlings grown in the closed transplant production system were greater than those of seedlings grown in the greenhouse. These results indicate that the closed transplant production system under the higher air current speed condition enabled transplant production using plug trays with higher planting densities than those in the greenhouse. The environments in the closed system and greenhouse were measured and compared. Based on the results, high integrated light intensity and light sources with a high red to far-red ratio in the closed system appeared to be the reasons for the decrease in excessive stem elongation and increase in growth uniformity when compared with those in the greenhouse.

Keywords: artificial lighting, fluorescent lamp, *Lycopersicon esculentum*, plant factory

緒 言

2006 年 12 月 19 日受付

2007 年 6 月 10 日受理

Corresponding author: Shingo Yokoi
(yokoi238@graduate.chiba-u.jp)

近年、閉鎖型苗生産システム(以下、閉鎖型システム)が
開発および市販され普及しつつある^{1, 2)}。閉鎖型システムは、

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、もしくはそれらの交換の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と定義される³⁾。閉鎖型システムはシステム内の物理環境を精密に調節しやすいために、高品質な苗を省資源・省力的に、かつ周年的に安定して、かつ短期間に大量生産できる³⁾。

閉鎖型システムのみならず、温室や露地においても、単位面積当たりの苗生産数を増大させて、苗個体当たりの生産コストを削減させるには、栽植密度を高めることが有効である⁴⁾。しかし、栽植密度を高めると苗同士の相互遮蔽が起りやすくなる。そのため、苗が徒長し、生育の均一性も悪くなり、定植後の生育に大きく影響する⁵⁾。ゆえに、苗の品質を保ちつつコストを最小限にできる最適な栽植密度を求めることが重要である。しかし、温室や露地では、季節や天候によって変動する物理環境によって変化する最適な栽植密度を求めることは難しい。そのため、温室や露地では苗の品質を重視するあまり、栽植密度を必要以上に低くした育苗がなされ、苗の生産コストを高める要因となっている。

閉鎖型システムは育苗に適した物理環境を維持しやすいために、最適な栽植密度を求めることが容易である。また、高い物理環境調節能力によって、温室および露地よりも高い栽植密度でも徒長せず均一な苗の育成が可能であると考えられる。実際に閉鎖型システムでは温室の標準的な栽植密度の2倍にしても、温室の標準的な栽植密度で育成された苗と比較しても遜色のない乾物重を保持し、また徒長しにくく均一な草姿が得られることが閉鎖型システム使用者に経験的に知られている。しかしながら、この理由は明らかではない。

このような閉鎖型システムと温室や露地とで育成された苗の生育の差異は、物理環境の差異によって引き起こされると考えられる。そのなかでも、閉鎖型システムのファンによる強制通風が引き起こす苗個体群内外を流れる水平気流の総合的効果が主因である可能性がある。具体的には、強制通風に伴う、苗個体群内の水蒸気飽和差（以下、飽差）の増大、明期 CO_2 濃度の増大、ガス交換速度の増大（蒸散・光合成促進）、植物体の揺れに伴う下葉への光侵入および物理刺激などである。

そこで、本研究では、閉鎖型システムを用いて高い栽植密度にて育苗を行い、栽植密度が苗の成長量およびその均一性に及ぼす影響を調査すること、および、閉鎖型システムにおける強制通風が苗の成長量およびその均一性に及ぼす影響を調査することを目的とした。また、従来の育苗方法の一例として、温室にて育苗を行い、閉鎖型システムにて育成した苗の品質と比較した。

材料および方法

育成装置

本研究にて使用した閉鎖型システムは、千葉大学園芸学部内に建設された閉鎖型植物生産研究施設⁶⁾である。閉鎖型システムには、断熱壁で囲われた部屋（縦 2.5 m、横 8.3 m、高さ 5.4 m）に 4 台の基本モジュールが設置されている。基本モジュールとは、セル成型苗トレイ（30 cm × 60 cm、以下、トレイ）が横に 8 トレイ入る棚が縦に 7 段連なったものである。棚ごとに 16 W および 32 W の白色高周波蛍光管（FHF16-EXN および FHF32-EXN、松下電器産業（株））がそれぞれ 3 本および 16 本ずつ取り付けられ、調光器（NQ21575-321、松下電器産業（株））によって光強度が調節できる。また、基本モジュールごとにエアコン（S259TSX-W、ダイキン工業（株））3 台、加湿器（WM-BNB2000、ウエットマスター（株））1 台およびファン（CC-V9060、三洋電機（株））3 台が取り付けられており、気温、相対湿度および気流速の調節ができる。

本研究にて使用した温室は、千葉大学園芸学部内に建設された南北棟ガラス温室（縦 28.6 m、横 7.2 m、高さ 4.5 m）を用いた。温室にはコンクリートの床面に、網状の金属製の可動式テーブルが配置されている。また、側窓および天窓を有し、側窓には防虫網が張られている。さらに、開閉式の遮光カーテン（遮光率 50%）を有する。

試験区

3 水準の栽植密度のトレイ（それぞれの栽植密度は 700、1100 および 1600 m^{-2} 、株間は 38、30 および 25 mm、セル当たりの容積は 25.5、12.7 および 8.6 cm^3 ）を使用した。試験区は、2 水準（0.3 もしくは 0.7 m s^{-1} ）の気流速に設定した閉鎖型システムにて栽植密度を変えた 6 試験区、および温室にて栽植密度を変えた 3 試験区の計 9 試験区とした。供試したセル成型トマト実生苗個体群（以下、個体群）は、培地（土太郎、スミリン農産工業（株））を充填したトレイにトマト（*Lycopersicon esculentum* Mill., 品種：ハウス桃太郎）を各セルに 1 粒ずつ播種したものとした。発芽処理として、暗黒、気温（16 h/8 h）28℃/18℃、相対湿度 80% および CO_2 濃度 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ の環境下に 3 日間配置した。その後、それぞれの試験区にて 12 日間育成した。この日数は栽植密度 700 m^{-2} のトレイにおける標準的な育苗期間である。また、芯止まりなどの奇形の判断が可能となる播種後 7 日目に、未発芽種子および奇形実生をあらかじめ同様の栽植密度および環境条件にて育成しておいた正常な実生と交換して、栽植密度を正確にそろえた。なお、この時点の苗個体群は子葉のみが展開した状態であり、いずれの栽植密度においても苗

同士の相互遮蔽はほとんどなかった。育成期間中の閉鎖型システムの処理区における環境設定は、気流速度 0.3 もしくは 0.7 m s^{-1} 、明期 16 h d^{-1} 、PPF (光合成有効光量子束) $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、気温 (明期 16 h / 暗期 8 h) $28^\circ\text{C} / 18^\circ\text{C}$ 、相対湿度 80% および CO_2 濃度 $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ とした。温室の処理区は 2003 年の 7 月 18 日から 8 月 1 日の間に行い、温室内気温が 25°C を超えた場合に側窓および天窓を開け、遮光カーテンを閉じた。全ての試験区の灌水は、毎日明期開始前に液肥 (大塚ハウス A 処方、大塚ハウス肥料 1 号: 1.5 g l^{-1} , 2 号: 1.0 g l^{-1} , 大塚化学 (株)) を底面灌水することで行った。

測定項目

育成終了時に成長量として、乾物重、生体重、茎長、茎径、葉面積および本葉数を測定するために、試験区当たり 9 個体を標本として採取した。トレイの中央および周辺部にて苗の生育は異なるため、トレイを横 3 等分、縦 3 等分して、トレイ当たり 9 区画として、それぞれの区画の中心にある個体を標本とした。乾物重および生体重の測定には電子天秤 (AW320, (株) 島津製作所) を、茎長および茎径の測定にはデジタルノギス (CD67-S20PM, (株) ミットヨ) を、使用した。葉面積は子葉を含む葉をスキャナーにてパーソナルコンピュータに取り込み、画像解析ソフトウェア (LAI32 ver. 0.376 $\beta 1$ <<http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/index.html#author>>, 山本) にて測定した。葉数は、 1 cm 以上の本葉数を数えた。また、徒長の度合いを示すために乾物重の茎長に対する比 (以下、DM/SL 比)、および乾物率を算定した。成長量の均一性を示すために、上記の測定および算定項目の Gini 係数⁷⁾を算定した。Gini 係数は、0 から 1 の数値をとり、数値が小さいほど標本の均一性が高いことを示す。本来、Gini 係数は経済学にて使用されているが、変動係数よりも正しく均一性を評価出来るとされ、植物生態学などの分野でも使用されている^{7, 8, 9)}。Gini 係数の算定式を以下に記す。

$$Gini = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - x_j|}{2 \bar{x} n (n - 1)}, \quad (n \geq 3)$$

ここで、 n は標本数を、 x_i および x_j は標本 i および標本 j の成長量の値を、 $\bar{x}$ は全標本の成長量の平均値をそれぞれ示す。

試験最終日の明期に個体群内外の気流速度、気温、絶対湿度および CO_2 濃度を測定した。測定点は、トレイの中心かつ、キャノピー面から $1 \sim 2 \text{ cm}$ 上部および下部とした。気流速度は熱線式風速計 (Model 6521, Kanomax Japan Inc.) のプローブ (先端部: $\phi 1.0 \text{ mm}$, 支持部: $\phi 11 \text{ mm}$) を測定点に直接挿入することで測定した。気温はスチールパイプ ($\phi 2.5 \text{ mm}$) の先に自作の T 型熱電対 ($\phi 0.025 \text{ mm}$) を取

り付け、それを測定点に挿入することで測定した。絶対湿度は測定箇所からステンレスパイプ、テフロンチューブ ($\phi 3.0 \text{ mm}$)、流量計および、吸気ポンプを介して流量を $0.25 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ に調節して吸気した空気をプラスチックケース (容積: 40 cm^3) 内に装着した自作の T 型熱電対 ($\phi 0.025 \text{ mm}$) および相対湿度計 (CH-UPS, TDK Corp.) にて測定した。 CO_2 濃度はプラスチックケースに吸気された空気を CO_2 分析計 (LI-6252, LI-COR Inc.) に通すことで測定した。上述のように流量を比較的少なく調節したのは、吸気による個体群内外の気流への影響を極力少なくするためである。それゆえ、測定器の時定数が大となるため、測定は各測定点にて 20 分間行い、値が安定する後半の 10 分間の測定値を使用した。測定間隔は 1 秒とした。気温、絶対湿度および CO_2 濃度は上記の測定装置を 2 つ用意し、2 点の測定点を同時に測定した。個体群内外の気温および絶対湿度から飽差を算定した。

育成期間中における閉鎖型システムおよび温室の PPF、気温、相対湿度、および CO_2 濃度を測定した。測定にはそれぞれ、PPF 計 (LI-190SB, LI-COR Inc.), T 型熱電対 (SUS316, (株) チノー), 相対湿度計 (CH-UPS, TDK Corp.) および CO_2 分析計 (ZPF9, 富士電機インスツルメンツ (株)) を用いた。全ての測定項目において、測定間隔は 1 分とした。そのデータから、試験期間中の積算 PPF、明期および暗期の平均気温、試験期間中の平均飽差および CO_2 濃度を算定した。苗個体群のキャノピー面上 $1 \sim 2 \text{ cm}$ の気流速度も測定した。測定には熱線式風速計 (Model 6521, Kanomax Japan Inc.) を用いた。気流速度は測定間隔を 1 分として、試験期間中の平均を求めた。本試験の反復は 3 回とした。

結果および考察

閉鎖型システムにおける栽植密度の影響 成長量の比較

茎長は、栽植密度が高いほど大となった (Table 1)。また、茎径、乾物重、生体重、葉面積、本葉数、乾物重 / 茎長 (DM/SL) 比および乾物率は小となった。一般的に、トマト実生苗は、DM/SL 比が大きく、かつ茎径、乾物重、生体重、葉面積および乾物率が高い、および本葉数が多い方が良くとされる。なぜなら、このような苗は定植後の生育が良く、物理的耐久性が高いために輸送および定植作業に適するからである。これらのことから、栽植密度を高めるほどトマト実生苗の品質は低下するといえる。

茎の伸長は、高栽植密度ほど促進された。これは、栽植密度が高いほど相互遮蔽が増大することが主因であると考え

Table 1 Effects of air current speed and planting density on the growth of tomato plug seedlings at 15 days after sowing.

System	Air current speed (m s ⁻¹) ^y	Planting density (m ⁻²)	Stem length (mm)	Stem diameter (mm)	Dry mass (g)	Fresh mass (g)	Leaf area (cm ²)	No. of true leaves	DM/SL ratio (g m ⁻¹) ^x	Dry mass ratio ^w
CTPS ^z	0.3	700	65	2.3	0.105	1.11	24	3.0	1.62	0.094
		1100	64	2.2	0.089	0.96	20	2.7	1.39	0.093
		1600	66	1.9	0.055	0.67	15	2.5	0.83	0.079
	0.7	700	72	2.6	0.113	1.26	27	2.8	1.57	0.089
		1100	72	2.3	0.090	1.02	22	2.8	1.25	0.086
		1600	82	2.0	0.065	0.78	17	2.5	0.79	0.081
	Significance ^v									
	Air current speed (A)		**	**	*	**	**	ns	ns	ns
	Planting density (P)		**	**	**	**	**	**	**	**
	A×P		**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Greenhouse	0.2	700	120	2.3	0.074	1.19	29	2.9	0.62	0.061
		1100	143	2.2	0.064	1.09	24	3.0	0.45	0.059
		1600	146	2.0	0.051	0.93	20	2.6	0.35	0.054

^z Closed transplant production system^y The values were measured at center of the plug trays and at approximately 1–2 cm above the canopy surfaces.^x DM/SL ratio was calculated by dividing the dry mass (DM) by stem length (SL).^w Dry mass ratio was calculated by dividing the dry mass by fresh mass.^v ns, *, and ** indicate non-significance, significance at P<0.05, and at P<0.01 by ANOVA, respectively.

られる。相互遮蔽の増大によって、植物体当たりの受光量は減少する。そして、受光量の減少によって茎の伸長は促進される¹⁰⁾。また、赤色光はトマトの葉に90%以上吸収されるが、遠赤色光は50%程度しか吸収されない¹¹⁾。ゆえに、葉の相互遮蔽が増大するほど、遮蔽された個体はR/FR（赤色光/遠赤色光の光子数比）の低い光を受けるため、茎の伸長が促進される¹²⁾。これらのことから、葉面積が増えるに従って、光強度を強める、もしくは光源のR/FR比を高めることによって、茎の伸長を抑制できると考えられる。

乾物重、生体重、葉面積および本葉数は、高栽植密度ほど小となった。これは、栽植密度が高いほど、個体当たりの受光量が減少して、個体当たりの純光合成速度が減少したためであると考えられる。

DM/SL比および茎径は、高栽植密度ほど小となった。これは、栽植密度が高いほど光合成産物を茎の伸長に優先的に使用したためであると考えられる。徒長は主に茎の細胞の伸長によって引き起こされ、伸長した細胞は内部を満たすために多くの水を含有する¹³⁾。そのため、栽植密度が高いほど、乾物率も小となったと考えられる。

均一性の比較

茎径、乾物重、生体重、葉面積、本葉数、DM/SL比および乾物率の均一性は、栽植密度が高いほど低くなる傾向となった (Table 2)。一般的に、苗の成長量の均一性は高い方が

良い。これは、定植後の生育の均一性が高くなる、接ぎ木作業が容易になる、などの利点があるためである。ゆえに、この結果は、栽植密度を高めるほど成長量の均一性は低くなり、苗の品質が低下することを示す。

茎長、茎径、葉面積および本葉数の均一性は、乾物重および生体重の均一性よりも高い傾向となった。これは、外見上は均一性の高い苗であっても、乾物重および生体重は均一性が低いために、定植後に均一な生育をするとは限らないことを意味する。苗生産者および消費者は、苗の外観によって均一性を評価していると考えられるが、外観だけではなく、乾物重および生体重の均一性を調べることも苗の均一性の評価をするうえで重要である。

茎径、乾物重、生体重、葉面積、本葉数および乾物率の均一性は、高栽植密度ほど低くなる傾向となった。これは、高栽植密度ほど相互遮蔽が起こりやすくなり、個体当たりの受光量が不均一になったことが主因であると考えられる。

茎長の均一性は栽植密度の影響を受けなかった。また、他の成長量と比較して、均一性が高い傾向となった。他の個体によって遮蔽された個体は受光量が減少し、かつ他の個体の葉を透過してきたR/FR比の低い光を受けるために、茎が伸長しやすい。その結果、自身よりも茎長の長い他の個体と同じ高さに比較的早く追いつくと考えられる。このような茎の伸長の調節機能によって、茎長は均一性が比較的高く、かつ栽

Table 2 Effects of air current speed and planting density on the growth uniformity of tomato plug seedlings at 15 days after sowing.

System	Air current speed (m s^{-1}) ^y	Planting density (m^{-2})	Gini coefficient ^x							
			Stem length	Stem diameter	Dry mass	Fresh mass	Leaf area	No. of true leaves	DM/SL ratio ^w	Dry mass ratio ^v
CTPS ^z	0.3	700	0.05	0.04	0.13	0.10	0.09	0.06	0.12	0.05
		1100	0.04	0.03	0.09	0.07	0.07	0.08	0.08	0.04
		1600	0.05	0.07	0.21	0.14	0.13	0.11	0.20	0.10
	0.7	700	0.04	0.04	0.12	0.08	0.08	0.08	0.12	0.06
		1100	0.05	0.05	0.17	0.10	0.09	0.07	0.15	0.08
		1600	0.06	0.06	0.2	0.12	0.12	0.13	0.19	0.10
	Significance ^u									
	Air current speed (A)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
	Planting density (P)		ns	*	**	*	**	*	**	**
	A×P		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Greenhouse	0.2	700	0.05	0.10	0.17	0.15	0.15	0.09	0.15	0.04
		1100	0.03	0.09	0.10	0.12	0.09	0.05	0.10	0.07
		1600	0.08	0.10	0.22	0.19	0.18	0.12	0.18	0.06

^z Closed transplant production system^y The values were measured at center of the plug trays and at approximately 1–2 cm above the canopy surfaces.^x Gini coefficient indicates dispersion intensities of the growth and development parameters.^w DM/SL ratio was calculated by dividing the dry mass (DM) by stem length (SL).^v Dry mass ratio was calculated by dividing the dry mass by fresh mass.^u ns, *, and ** indicate non-significance, significance at $P < 0.05$, and at $P < 0.01$ by ANOVA, respectively.

植密度の影響を受けにくかったと考えられる。

閉鎖型システムにおける気流速度の影響

成長量の比較

気流速度の高い方が、茎長、茎径、乾物重、生体重および葉面積は大となった (Table 1)。これらの結果は、気流速度を高める方が苗の生育を促進できることを示す。

茎の伸長は、高い気流速度によって促進されたが、DM/SL 比に対する気流速度の影響は有意ではなかった。これは、高い気流速度によって茎は伸長したが、その伸長は徒長によるものではなく、純光合成速度の増大によって個体全体が大きくなったためであることを示す。つまり、気流速度を高めれば、徒長させずに、純光合成速度を増大させて生育を促進できる。これらのことから、気流速度を高めれば、純光合成速度を増大させ、更なる高栽植密度における育苗、もしくは育苗期間の短縮が可能になると考えられる。

茎径、乾物重、生体重および葉面積は、高い気流速度の方が大となった。これらの結果の主因は、気流速度を高めたことによる純光合成速度の増大であると考えられる。具体的には、個体群内外のガス交換速度の増大に伴う個体群内の明期 CO_2 濃度の増大、および葉に直接気流が当たることによる葉面境界層抵抗の減少、などである。実際に、気流速度が大である試験区は飽差および CO_2 濃度の個体群内外の

差が少ない (Table 3)。これは、気流によってガス拡散が促進されていることを示す。また、気流速度を高めることで葉面境界層抵抗が減少して、蒸散を促進させ、水分および養分の吸収速度を増大させたことも要因であると考えられる。

飽差や CO_2 濃度などによっても変化するが、個葉の場合は純光合成速度の促進には $0.5 \sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$ 程度の気流速度が適するとされている¹⁴⁾。本実験では、個体群のキャノピー面上の気流速度を 0.7 m s^{-1} となるようにした試験区であっても、個体群内の気流速度は $0.10 \sim 0.18 \text{ m s}^{-1}$ しかなかった。つまり、密植された個体群では、さらに気流速度を高めれば、純光合成速度の増大がみこまれる。高い気流速度を均一に制御できることは閉鎖型システムの利点である。今後、栽植密度が異なる場合における適切な気流速度を調査することで、更に効率の良い育苗が行えるであろう。

均一性の比較

気流速度は乾物率の均一性のみに有意な影響を及ぼした (Table 2)。気流速度を高めると、個体群内のガス環境が均一になり、成長量の均一性が高まると考えられる。しかし、本実験にて用いた気流速度の範囲 ($0.3 \sim 0.7 \text{ m s}^{-1}$) では、統計的に有意な差は乾物率以外には検出できなかった。 0.3 m s^{-1} の気流速度で個体群内のガス環境は苗の生育に影響を与えない程度に均一になっていた可能性が考えられる。実

Table 3 Environmental conditions outside and inside plug seedling populations on light period at 15 days after sowing.

System	Air current speed (m s^{-1}) ^y	Planting density (m^{-2})	Air current speed (m s^{-1})		Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)		Vapor pressure deficit (kPa)		CO ₂ concentration ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	
			Outside ^x	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside
CTPS ^z	0.3	700	0.24	0.09	25.0	23.2	1.97	0.90	962	947
		1100	0.25	0.08	24.5	23.1	1.94	1.07	949	930
		1600	0.27	0.05	24.6	21.9	1.92	0.93	987	970
	0.7	700	0.72	0.18	24.8	23.7	1.33	0.96	1001	1001
		1100	0.70	0.10	25.2	24.3	1.5	1.07	1001	999
		1600	0.69	0.14	25.1	23.7	1.45	0.97	957	956
Greenhouse	0.2	700	0.21	0.11	26.8	26.4	0.97	0.84	376	379
		1100	0.18	0.1	31.5	29.9	2.59	1.83	343	335
		1600	0.15	0.08	28.7	27.4	1.92	1.44	347	343

^z Closed transplant production system^y The values were measured at center of the plug trays and at approximately 1–2 cm above the canopy surfaces.^x Environment data outside and inside plug seedling populations was measured center of the plug trays and at approximately 1–2 cm above and below the canopy surfaces, respectively.

際、 0.3 m s^{-1} に設定した試験区でも個体群内外の CO₂ 濃度差は 2% 程度であった (Table 3). 外気に触れている個体群周辺部と中心部の濃度差も同程度であると考えられるため、個体群内における CO₂ 濃度の均一性は高かったと考えられる。一方、飽差は個体群内外の差が 50% 程度と大きかった。ただ、内部においても $0.9 \sim 1.0 \text{ kPa}$ 程度と比較的高い値が維持されていたため、蒸散が十分にでき、トレイの周辺部と中心部において生育に差が出にくかった可能性がある。気流速度が成長量の均一性に及ぼす影響を確認するためには、気流速度が更に低い、もしくは高い環境にて育苗を行う必要があろう。

閉鎖型システムと温室との比較

成長量の比較

温室にて本実験と同じ栽植密度および播種後日数にてトマトの育苗を行った既存の研究¹⁵⁾と、本実験の温室にて育成された苗の成長量とを比較した。その結果、本実験にて育成された苗の方が乾物重は大であり、DM/SL 比は大であった。ゆえに、本実験の温室における育苗は温室での育苗としては、比較的大きく、徒長もしていない、品質の高い苗であるといえる。

温室と比較して、閉鎖型システムにて育成された苗の茎長、葉面積および DM/SL 比は小となり、乾物重および乾物率は大となる傾向となった (Table 1)。これらの結果は、閉鎖型システムにて育成された苗は温室よりも品質が高いことを示す。

閉鎖型システムにて茎長が小となる傾向があったのは、主に R/FR 比が大であったこと、積算 PPF が大であったこと (Table 4) とに起因すると考えられる。閉鎖型システムにて使

用された蛍光灯の R/FR 比は、12.00 (実測値) であった。これは、温室における日射の R/FR 比である $1.20 \sim 1.30$ ¹¹⁾ よりも大きい。また、温室の積算 PPF が閉鎖型システムよりも小であったのは、気温調節のために遮光カーテンを使用したためである。遮光カーテンを使用しても温室内の気温は最大で 37°C にまで達する場合があった。このように、温室は季節によっては気温調節のために遮光する必要がある、日射の全てを利用できない場合がある。これは、苗生産の効率を低くする要因の 1 つである。また、接触刺激によってトマト実生の茎の伸長が抑制されることが知られている⁵⁾。本研究では閉鎖型システムの気流速度の方が温室よりも大であった。ゆえに、気流による接触刺激も茎の伸長を抑制した要因としてあげられる。

トマトの茎の伸長制御には DIF (明期と暗期の気温差) が有効である¹⁶⁾。本実験における閉鎖型システムでは、純光合成速度を増大させるために明期気温を高くし、暗期の呼吸速度を減少させるために暗期気温を低くした (日平均気温は温室に合わせてある)。つまり、閉鎖型システムの DIF は温室よりも大であった。本来ならば、DIF が大であるほどトマトの茎は伸長しやすくなる¹⁶⁾。しかし、閉鎖型システムでは他の環境要素を調節して茎の伸長を抑制できる。そのため本実験のように、生育を促進させるために DIF を大きくしても徒長させることなく育苗できた。

閉鎖型システムにて乾物重が大となる傾向があったのは、主に積算 PPF、DIF、気流速度および CO₂ 濃度が高く、純光合成速度が増大したことが主因であると考えられる。これに伴い、DM/SL 比も閉鎖型システムの方が 2 倍近く大となったと考えられる。これは、閉鎖型システムの苗は、徒長してお

Table 4 Environmental conditions during the experimental period.

System	Air current speed (m s^{-1}) ^y	Light period (h d^{-1})	Integrated PPF (mol m^{-2}) ^x	Air temperature (light/dark period, $^{\circ}\text{C}$)	Vapor pressure deficit (kPa)	CO ₂ concentration ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)
CTPS ^z	0.3	16	190	27/17	1.4	960
	0.7	16	190	27/18	1.1	960
Greenhouse	0.2	14	110	25/22	0.6	400

^z Closed transplant production system^y The values were measured at center of the plug trays and at approximately 1–2 cm above the canopy surfaces.^x Photosynthetic photon flux

Fig. 1 Tomato plug seedling populations at 15 days after sowing. C and G indicate closed transplant production system and greenhouse, respectively. L and H indicate air current speeds of 0.3 and 0.7 m s^{-1} , respectively. The numbers 7, 11, and 16 indicate planting densities of 700, 1100, and 1600 m^{-2} , respectively.

らず、かつ光合成産物を蓄えた品質の高い苗であることを示す。

また、閉鎖型システムの方が、乾物率が大であった。ゆえに、閉鎖型システムの苗は力学的強度も高いと考えられる。力学的強度が高ければ、輸送や定植による苗へのダメージが減少する。実際、温室の苗は、茎および葉柄が折れやすかった（データ未提示）。

均一性の比較

閉鎖型システムにて育成した個体群は、栽植密度が変わっ

ても個体群の外観に変化は見られなかった (Fig. 1)。しかし、温室の個体群は栽植密度が高くなるほど草丈が高くなり、側方に傾いた。これらの個体群の外観からも閉鎖型システムの個体群は均一であることが確認できる。上述したように閉鎖型システムの苗の品質は温室よりも高く、さらに閉鎖型システムの個体群の外観は均一であるため、苗の購入者の購買意欲は更に高まると考えられる。

閉鎖型システムにおける成長量の均一性は温室よりも高くなる傾向となった (Table 2)。これは閉鎖型システムの苗は温室よりも葉面積が小さく、相互遮蔽が比較的抑制されたことに起因すると考えられる。光強度が強い、もしくは R/FR 比が大であるほど、葉の伸展は抑制されること¹²⁾が知られている。閉鎖型システムの環境は温室よりも葉の伸展を抑制したために、相互遮蔽が減少したと考えられる。また、温室内では、柱などの構造物による陰によって、光強度の均一性の確保は難しい。その結果、温室における成長量の均一性が低くなったことも原因として考えられる。以上より、閉鎖型システムは温室よりも、均一な苗を育成できることが示された。

摘 要

閉鎖型システムにおいて、栽植密度および気流速度を変えてトマト実生苗を育成して、成長量およびその均一性を調査した。また、温室にて育成した苗との比較も行った。

閉鎖型システムにおいて栽植密度が高いほど苗は徒長し、乾物重や生体重が減少し、成長量の均一性は低くなった。また、気流速度が高い方が乾物重や生体重が増大した。徒長、および成長量の均一性は気流速度による有意な影響を受けなかった。これらの結果から、気流速度を高めれば、栽植密度が高くとも、苗を徒長させず、かつ成長量の均一性を保持したまま生育の促進が行えることが示された。

閉鎖型システムの苗は温室よりも栽植密度を高くしても徒長せず、乾物重が大きく、成長量が均一な品質の高い苗であることが示された。

以上から、閉鎖型システムを用いて気流速度を調節することで、温室などの育苗施設よりも、更なる密植育苗もしくは育苗期間の短縮ができることが示された。

謝 辞

閉鎖型システムを使用した育苗に関する貴重なご意見および情報提供をしてくださった太洋興業株式会社の岡部勝美氏に心より謝意を表します。

引用文献

- 1) 大山克己, 古在豊樹, 全 昶厚. 閉鎖型苗生産システムの開発とその利用. 植物工場学会誌. 15(1): 1-10. 2003.
- 2) 古在豊樹, 板木利隆, 岡部勝美, 大山克己. 最新の苗生産実用技術 - 閉鎖型苗生産システムの実用化が始まった -. 農業電化協会, 東京. 1-150. 2004.
- 3) 古在豊樹. 閉鎖型苗生産システムの開発と利用 - 食料・環境・エネルギー問題の解決を目指して -. 養賢堂, 東京. 1-191. 1999.
- 4) ロク イイ ヒン, 大山克己, 久保田智恵利, 古在豊樹. 閉鎖型苗生産システムにおけるサツマイモ増殖体生産速度と消費電力量に及ぼす栽植密度の影響. 植物工場学会誌. 14(1): 10-17. 2002.
- 5) 田中和夫, 島地英夫. 接触刺激を利用したトマトの高密度苗生産. 生物環境調節. 30(2): 59-64. 1992.
- 6) Chun C, Kozai T. Closed transplant-production system at Chiba University. In: Transplant Production in the 21st Century, eds. Kubota C, Chun C. Kluwer Academic Publishers, Berlin. 20-27. 2000.
- 7) Weiner J, Solbrig OT. The meaning and measurement of size hierarchies in plant populations. Oecologia. 61: 334-336. 1984.
- 8) Weiner J. How competition for light and nutrients affects size variability in *Ipomoea Tricolor* populations. Ecology. 67(5): 1425-1427. 1986.
- 9) Bonan GB. Density effects on the size structure of annual plant populations: An indication of neighborhood competition. Annals of Botany. 68: 341-347. 1991.
- 10) 佐々木恵彦. 光質に対する植物の基本的反応, 稲田勝美編, 光と植物生育 - 光選択利用の基礎と応用 -. 養賢堂, 東京. 50-88. 1984.
- 11) Larcher W. Environmental Influences on Growth and Development. In: Physiological Plant Ecology 4th Edition, ed. Larcher W. Springer, Berlin. 297-343. 2003.
- 12) Smith H, Holmes MG. The function of phytochrome in the natural environment-III. Measurement and calculation of phytochrome photoequilibria. Photochem. Photobiol. 25: 547-550. 1977.
- 13) 鴨田福也, 内藤文男. 野菜の光合成及び蒸散に関する研究 II 差動トランス利用による生長記録装置及びこれを用いてのトマト, キュウリなどの伸長肥大の測定, 野菜試験場報告, A2: 33-47. 1975.
- 14) 高倉 直. 湿度と水分. 高倉 直 編著, 植物の生長と環境. 農文協, 東京. 89-116. 2003.
- 15) 西森裕夫, 長岡正昭. セル成形苗によるトマトの若齢苗定植に関する研究 (第2報) 苗齢, セル容量が定植後の初期生育に及ぼす影響. 園学雑. 61 別 1: 248-249. 1992.
- 16) Myster J, Moe R. Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops-a mini review. Scientia Horticulturae. 62: 205-215. 1995.