

促成栽培トマトの収量に対する施設内の温度, 相対湿度, 飽差 および二酸化炭素濃度の影響に関する現地調査

稲田秀俊・菅谷龍雄・袴塚紀代美*・中原正一**・植田稔宏

Air Temperature, Relative Humidity, Vapor Pressure Deficit and Concentration of CO₂
in the Greenhouse of Commercially Cultivated Tomatoes

Hidetoshi INADA, Tatsuo SUGAYA, Kiyomi HAKAMATSUKA,
Masaichi NAKAHARA and Toshihiro UETA

Summary

In the present study, the environmental conditions in greenhouses and the total fruit weight observed in a long-term forcing culture of tomatoes were investigated in 4 greenhouses used for cultivation of tomato from the beginning of November 2009 to the end of April 2010. Although the diurnal changes in the air temperature, relative humidity, and vapor pressure deficit in the greenhouses were similar among the 4 greenhouses under study, the CO₂ concentration significantly varied from the night to early morning. The variation in the CO₂ concentration of the 4 greenhouses may also be influenced by the type of greenhouse and the amount of organic amendment in the soil. The CO₂ concentration in the 4 greenhouses on clear-sky days and cloudy days were significantly reduced to 240 ppm and 216 ppm, respectively, just before greenhouse air ventilation.

キーワード：温度, 相対湿度, 飽差, 二酸化炭素濃度, トマト, 収量

I. 緒言

近年, 我が国でも施設野菜の収量を飛躍的に高める必要に迫られてきており, オランダ型栽培施設を利用した多収のための最適な施設内環境条件に関する研究も進んでいる(細野ら, 2004; 久枝・仁科, 2007)。我が国の従来型栽培施設は, 全般的に装置化や自動化が進んでおらず, 施設内環境は主に生産者の経験と勘に基づいて管理されることが多い。そのため, 施設内環境条件の実態については不明な点が多く(吉田, 2008), また生産者自身も施設内環境を品質および収量との関係から十分把握しているとは言えないのが実態である。例えば, 施設内温度の日変動については体感的にかなり正確に把握しているものの, 相対湿度や二酸化炭素濃度の日変動などを意識している生産者は少ない。環境制御技術の水準だけがトマトなどの収量を決定するとは言えないが, 従来型施設においても高

度な環境制御技術を適用できる可能性があると考えられる。

そこで, 本研究では収量の異なる現地の生産圃場の施設内環境をデータ化することにより, 従来型栽培施設の内部環境の実態および環境管理の改善点を明確化することを目的に, 県内の複数の促成トマト栽培施設の環境を測定した。また, 同時にそれぞれの施設の果実の重量を調査し, 施設内環境要因がトマトの収量に及ぼす影響についても若干の知見を得たので報告する。

II. 材料および方法

1. 調査圃場および耕種概要

2009年11月から2010年6月にかけて, 茨城県つくば地域の施設栽培トマト圃場から, 前作(2008年冬季~2009年春季)の単位面積当たりの収量が異なる4圃場(多:AおよびB圃場, 中:CおよびD圃場)

* 茨城県県南農林事務所つくば地域農業改良普及センター

** 現: 茨城県農業総合センター農業大学校

Table 1 Size of greenhouses and ventilation equipment, cultivation methods and organic amendment application in 4 tomato greenhouses.

Farms	Size of greenhouses			Ventilation equipment	Cultivation methods	Organic amendment application materials (kg/10a)
	Long × Wide (m×m)	Total area (a)	Eave height (m)			
A	24.0×29.0	7	2.6	automatic	soil cultivation	rice bran (500), rice husk compost (1000)
B	32.4×40.0	13	1.9	manual	soil cultivation	bark compost (200)
C	20.0×55.0	11	2.2	manual	hydroponic soil cultivation	rice bran (150)
D	20.0×60.0	12	2.2	manual	soil cultivation	rice bran (600)

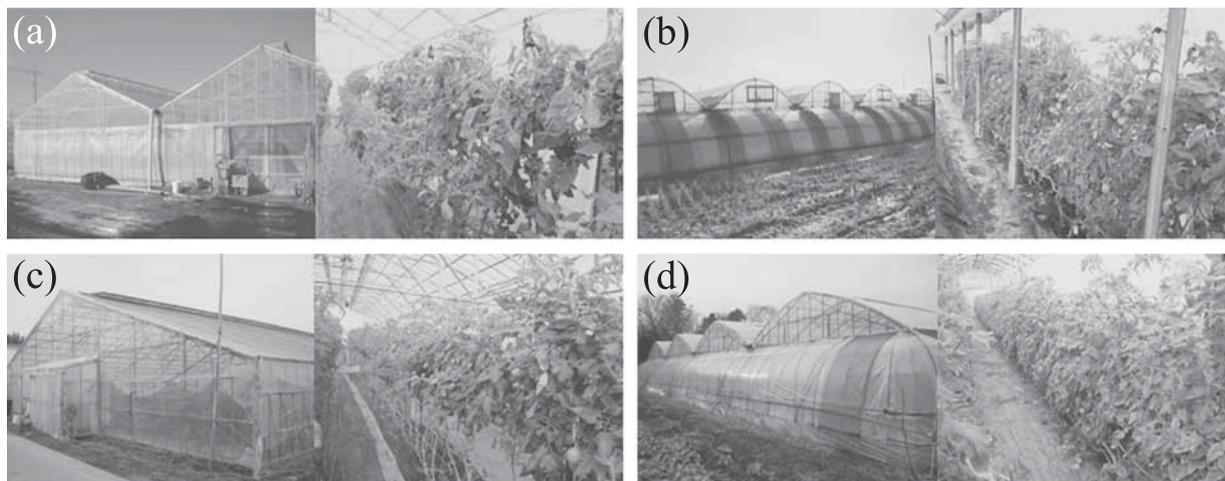


Fig. 1 The appearance of greenhouses and tomato plants. (a), greenhouse A; (b), greenhouse B; (c), greenhouse C; (d), greenhouse D.

を選定した。各圃場間の距離は約 15km 以内にあり、気象条件は近似している。栽培施設 A, B, C および D の面積は、それぞれ 7a, 13a, 11a, 12a であり、いずれも南北棟で低軒高型（軒高 1.9～2.6m）である（Table1）。A 圃場は両屋根式 3 連棟，C 圃場は両屋根式大型単棟，B および D 圃場はそれぞれ丸屋根式 6 連棟および 4 連棟である（Fig. 1）。なお，A 圃場は自動換気式，B, C および D 圃場は手動換気式である。

いずれの圃場も品種は‘麗容’（8月中旬～下旬定植）である。有機質肥料として A 圃場では米糠およびモミガラ堆肥を，B 圃場ではバーク堆肥を，C および D 圃場では米糠を定植前に施用している（Table1）。いずれも土耕栽培で，C 圃場は養液土耕栽培である。また，いずれの圃場も CO₂ 施用は行っていない。

2. 環境調査方法

促成栽培トマトの冬季における典型的な施設の施設内環境を把握するため，2009年12月9日から2010年1月12日までの温度，相対湿度および二酸化炭素濃度を測定した。温湿度測定には 2 チャンネル式温度ロガー（Thermo Recorder TR-71Ui, T and D 社製）を使用し，一方の温度センサ部を蒸留水で湿らせたガーゼで包むことにより湿球温度を測定した。測定値は 15 分

毎に記録した。これらの乾球および湿球温度を用いて，相対湿度および飽差を下記の式より算出した。

相対湿度(%) = 実際の水蒸気圧 / 飽和水蒸気圧 × 100

$$= \frac{6.11 \times 10^{(7.5 \times \frac{t}{t+237.3})} - 0.008 \times P \times (t - t')}{6.11 \times 10^{(7.5 \times \frac{t'}{t'+237.3})}} \times 100$$

(*t* : 乾球温度, *t'* : 湿球温度, *P* : 気圧)

飽差 (hPa) = 飽和水蒸気圧 - 実際の水蒸気圧

$$= (1 - \frac{RH}{100}) \times 6.11 \times 10^{(7.5 \times \frac{t}{t+237.3})}$$

(*t* : 乾球温度, *RH* : 相対湿度)

二酸化炭素濃度の測定には CO₂ センサ (CO₂ Engine K30, SenceAir 社製) を，データの記録には電圧ロガー (Voltage Recorder VR-71, T and D 社製) を使用し，15 分毎に測定値を記録した。乾湿球計および CO₂ センサは，ハウス中央の高さ 1.5m の位置に設置した。

施設内の環境要因は外部の気象条件の影響を受けやすいため，測定データは，日照時間が 8.9～9.5 時間の日を晴天日，0～1.3 時間の日を曇天日として，晴天日と曇天日に分けて解析した。気象庁ウェブサイトの気象統計情報 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)

に基づき、晴天日として2009年12月18日、19日、20日、21日、22日、23日、24日の7日間を、曇天日として2009年12月9日、11日、16日、26日、30日、2010年1月11日、12日の7日間を選定し、それぞれ施設内測定値の平均値を求めた。

3. 土壌成分分析方法

土壌成分分析を行うために、栽培終期に当たる2010年6月23日に調査対象圃場から土壌を採取した。表層より20cm深および40cm深の土壌を各圃場4箇所から採取し、風乾、磨砕後に成分分析を行った。N含量およびC含量はCNコーダー (Vario MAX CN,elementar Analysensysteme GmbH,ドイツ製)により、NO₃-N含量はイオンクロマトグラフシステム (L-7470, 日立製作所製)により測定した。K, Ca, Mg含量は原子吸光度法、P含量はトルオーグ法で測定し、風乾土100g当たりの含量として算出した。

4. 果実調査方法

果実重量および着果数の調査は11月5日、12月15日、1月7日および28日、2月17日、3月8日およ

び30日、4月27日の計8回実施した。果実調査を開始した11月5日の時点で収穫が始まっていない株を5株選定し調査株とした。各施設とも天窗からの風向や受光量を考慮し、異なる畝から1株ずつ調査株を選定した。果実の形状・品質にかかわらず果実を球体とみなし、果実の横径から調査日毎に果実重量を算出した。果実は、1回目の調査から次の調査までに生産者により収穫、出荷されるものが多いため、概ね横径5cm以上の果実は次の調査までに収穫されていると仮定し、各調査日も概ね5cm以上の果実のみを調査し、果房段毎の全調査日の合計値を各果房段の総果実重量とした。果実重量および着果数は、第1果房から第16果房まで測定し、一果重は各段位当たりの総果実重量を各段位総着果数で除した値とした。

III. 結果および考察

1. 従来型施設における施設内温度、相対湿度、飽差の実態

2009年12月～2010年1月における7日間の晴天日および曇天日の施設内環境測定値の平均値をそれぞ

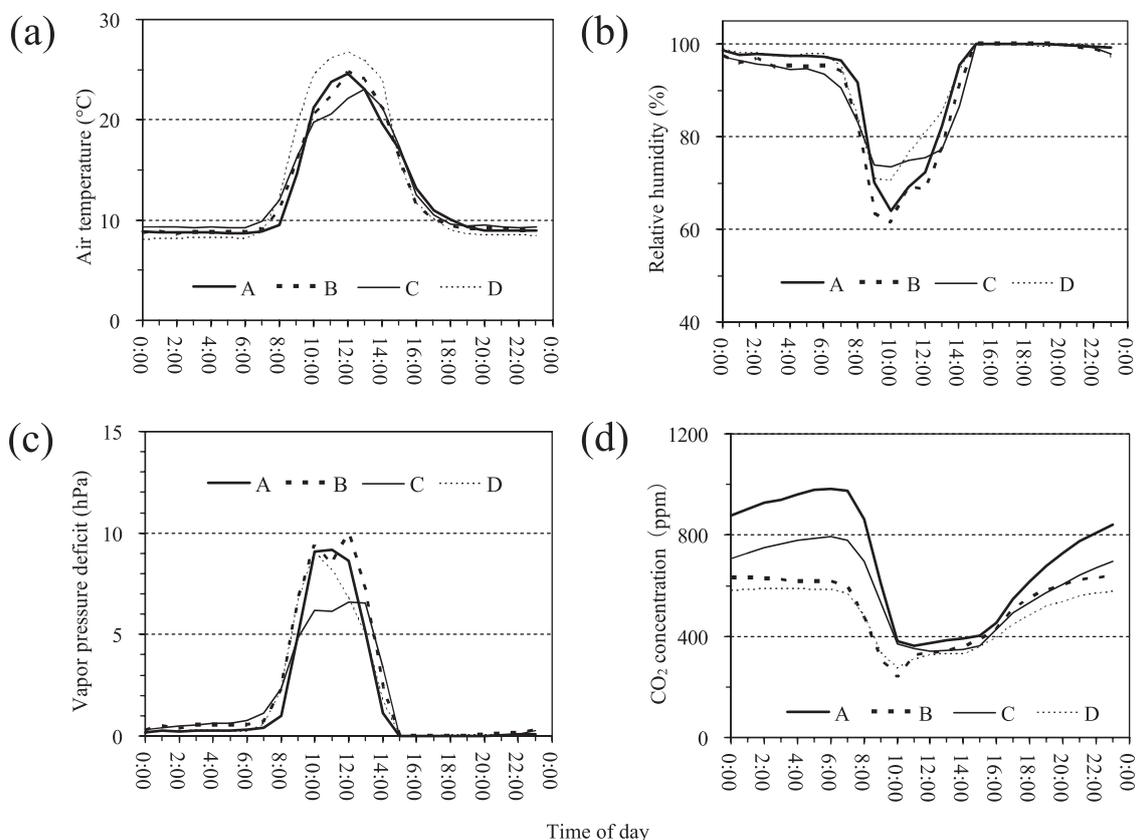


Fig. 2 Environmental conditions in 4 tomato greenhouses on clear-sky days. The data is the mean of 7 days (18, 19, 20, 21, 22, 23 and 24 December 2009).

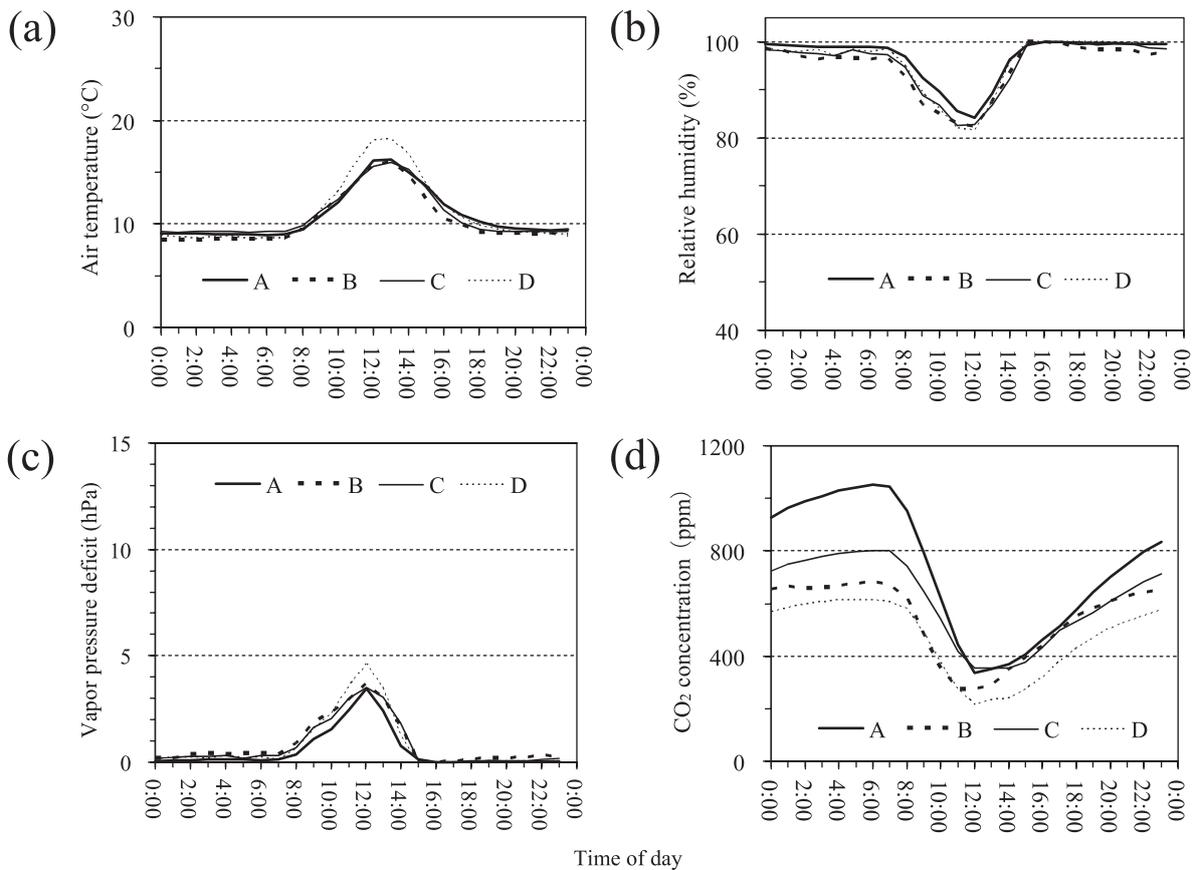


Fig. 3 Environmental conditions in 4 tomato greenhouses on cloudy days. The data is the mean of 7 days (9, 11, 16, 26, 30 December 2009 and 11, 12 January 2010).

れ Fig. 2, Fig. 3 に示す。夜間における温度、相対湿度および飽差は、いずれの圃場においてもそれぞれ 9°C 前後、95% 前後、0.5hPa 前後とほぼ一定であった (Fig. 2a, b, c および Fig. 3a, b, c)。これは、いずれの施設も近似した最低温度設定で暖房機を稼働させていることによると考えられた。

日中の温度については、D 圃場において 8:00 ~ 15:00 の間、他の圃場に比べ 2.6 ~ 5.6°C 高かった (Fig. 2a および 3a)。この施設内温度は 7 日間の平均値を示したものであることを考えると、他の圃場に比べ D 圃場の管理温度は高いことが推察された。また、C 圃場においては晴天日の 9:00 ~ 13:00 の間、他の圃場に比べ飽差が小さかった (Fig. 2c)。C 圃場の施設は両屋根式大型単棟であり、換気効率は低いと考えられる (岡田, 1998)。そのため外気の流入量が少なく、施設内が多湿となった結果、飽差が小さくなったと考えられた。

これまでに相対湿度や飽差といった施設内空気の乾き具合とトマトの収量との関係についての報告例は極めて限られており (Brewitz et al., 1996 ; Bertin et

al., 2000), 我が国の土耕栽培トマトにおいても、相対湿度や飽差の基準値ははっきりしていない。しかし、本研究の結果から晴天日における相対湿度 60% 以上 75% 未満、もしくは飽差 6hPa 以上 10hPa 未満の範囲内であれば、これらの変動が土耕栽培トマトの収量に及ぼす影響は小さいと考えられた。養液栽培で多収を目指す我が国のオランダ型栽培施設では、昼温 20 ~ 30°C、夜温 13°C ~ 18°C の範囲で管理することが多く (細野ら, 2004 ; 久枝・仁科, 2007)、相対湿度は 70% 以上、飽差 5hPa 以下を維持すること (安ら, 2010) が推奨されている。これに対し日本の従来型栽培施設では、低夜温設定と日中の積極的な換気が管理のベースになっており、その結果として相対湿度 60 ~ 80%、飽差 5 ~ 10hPa の範囲において一定の収量と品質が達成されていると推察された。

2. 従来型施設における施設内二酸化炭素濃度の実態

A, B, C および D 圃場における夜間の二酸化炭素濃度は、それぞれ 1,000ppm, 650ppm, 800ppm, 500ppm 程度で (Fig. 2d および 3d)、温度や相対湿度、

飽差に比べて圃場間差が大きかった。いずれの圃場も日の出以降急激に二酸化炭素濃度が低下し、外気の濃度（380ppm程度）を大幅に下回った。晴天日には、換気開始時刻と考えられる10:00におけるA、B、CおよびD圃場の二酸化炭素濃度が、それぞれ379ppm、240ppm、371ppm、270ppmであった（Fig. 2d）。曇天日には、換気開始時刻と考えられる11:00～12:00において、それぞれ354ppm、272ppm、354ppm、216ppmであった（Fig. 3d）。晴天日、曇天日を問わず、このような低濃度の二酸化炭素濃度条件下では葉の純光合成速度は著しく低いため（矢吹，1985）、本調査圃場においても日の出から換気が始まるまでの時間帯の光合成量は少なかったと考えられる。

施設の換気は生育適温を維持する目的で行われることが多いが、積極的な換気を行うことや、適温を確保した上での換気開始時刻の早進化、換気開度の拡大などを行い、光合成に必要な二酸化炭素の施設内への取り込みを促すことによって、生育や収量の向上が期待できると考えられた。

3. 施設内二酸化炭素濃度に対する有機物施用の影響

二酸化炭素は夜間に土壌から放出され施設内に蓄積されるが、圃場によってその程度は異なる。土壌から放出される二酸化炭素量は、土壌への有機物投入量の影響を強く受けることが知られている（吉田，2008；古谷ら，2008）。栽培終期における土壌成分分析では、土壌中のC含量やC/N比については圃場間の差は認められなかったが（Table2）、A圃場では土壌改良資材としてモミガラ堆肥を施用し、有機物施用量が最も多いため（Table1）、土壌中での分解過程において放出された二酸化炭素が、夜間に蓄積した（Fig. 2dおよび3d）と考えられた。なお、C圃場における夜間の二酸化炭素濃度が比較的高かった原因は不明であった。

各栽培施設は大きく形状が異なるため、換気が行わ

れない夜間における二酸化炭素の施設内分布や施設の気密性、暖房機ダクト周辺の風向などについても、施設の構造別に検討する必要があると考えられた。

4. 果実重量および着果数

調査圃場のトマトにおける果房当たりの総果実重量は、いずれの圃場も低段で大きかった（Fig. 4a）。A圃場では第1果房から第3果房までと第13果房において、B圃場では第5果房および第7果房において、C圃場では第6果房および第8果房において、それぞれ他の圃場に比べて総果実重量が有意に大きかった。D圃場では、他の圃場に比べ果房当たりの総果実重量が有意に小さかった。一方、果房当たりの総着果数については圃場間差が小さかった。いずれの圃場も低段における着果数は8～12果程度、上段における着果数は5果以下であった（Fig. 4b）。また、一果重は、いずれの圃場も低段で大きく上段では小さかった（Fig. 4c）。D圃場では、他の圃場に比べ一果重が有意に小さかった。これらのことから、一果重の大きさが総果実重量の圃場間差を引き起こす要因の一つであると考えられた。また、A、B、CおよびD圃場の第1果房から第16果房までの株当たり総果実重量は、それぞれ7.1kg、6.2kg、6.1kg、4.8kgであり、A圃場は他の圃場に比べ有意に大きく、D圃場は最も小さかった（Fig. 5）。

本報では、現地において収量の異なる土耕栽培トマト圃場を調査し、施設内環境要因と株当たり総収量との関連性を解析した。施設の構造や生産者の肥培管理法などは異なったが、施設内の温度や相対湿度、飽差の日変動は圃場間で比較的類似していた。このことから、施設の構造および肥培管理の違いが、これらの環境要因に及ぼす影響は小さいと考えられた。また、いずれの圃場も二酸化炭素施用を行っていないが、施設内の二酸化炭素濃度は圃場間で大きく異なっていた。施設内の二酸化炭素濃度を増加させることにより収量

Table 2 The EC, pH and elemental concentrations in cultivated soil in 4 tomato greenhouses on 23 June 2010.

Farms	Depth (cm)	EC (mS/cm)	pH	C (%)	N (%)	C/N	K ^z (mg)	Ca ^z (mg)	Mg ^z (mg)	P ^z (mg)	NO ₃ -N ^z (mg)
A	20	1.94	5.13	0.20	1.82	9.22	103	482	10	69	0.14
	40	0.31	5.69	0.17	1.52	9.16	12	307	65	66	0.97
B	20	1.16	5.14	0.22	1.79	8.23	51	385	56	177	1.80
	40	0.64	4.31	0.11	1.16	10.63	17	241	38	103	0.36
C	20	0.50	6.01	0.23	2.17	9.29	99	439	57	198	0.45
	40	0.16	6.20	0.20	1.75	8.61	66	415	54	197	0.10
D	20	0.44	5.98	0.31	3.17	10.38	12	520	12	234	1.20
	40	0.64	5.64	0.30	3.17	10.42	108	500	10	265	1.91

^z Values per 100 g dry soil

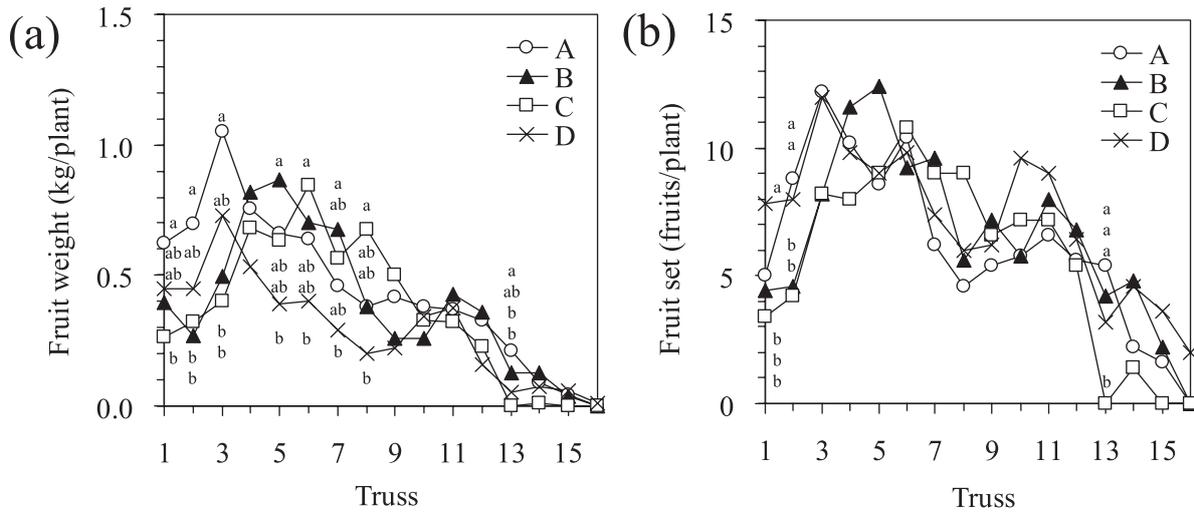


Fig. 4 Total weight and number of fruit set in the trusses and weight per fruit of tomato cv Reiyō in 4 tomato greenhouses (A-D). For measurements of fruit weight (a), number of fruit set in the trusses (b) and weight per fruit (c), randomly selected 5 plants in tomato greenhouse were used. Fruit weight was calculated by the transverse diameter of fruits. Values with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

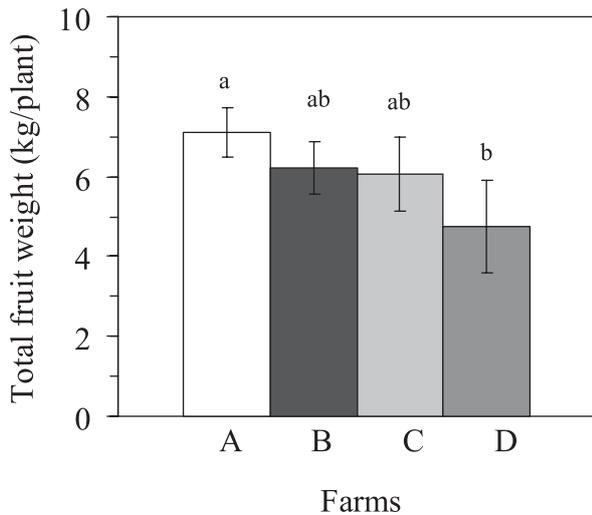
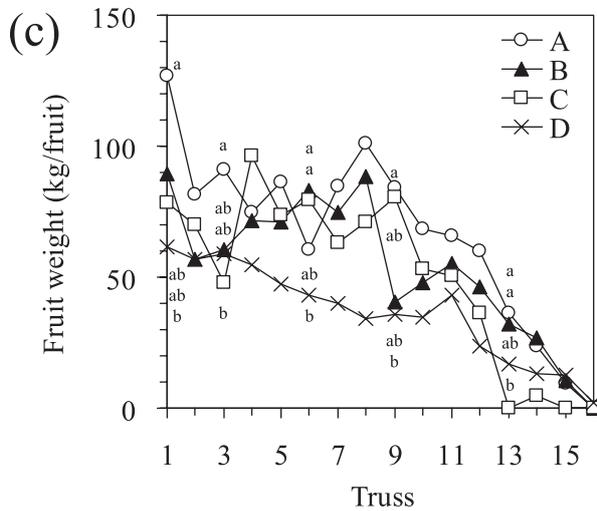


Fig. 5 Total fruit weight of tomato cv Reiyō in 4 tomato greenhouses (A-D). The data is the mean of 5 plants in greenhouse. Error bars indicate standard deviation. Values with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

が増加することから (矢吹, 1985), A 圃場における総果実重量の増加は, 施設内の二酸化炭素濃度が高かったことが要因の一つと考えられた。また, 収量に影響する施設内二酸化炭素濃度は, 換気開始時刻や換気開度など, 生産者が日々行う環境管理作業の影響を大きく受ける。そのため, 自動換気装置などを導入して, より合理的な環境制御を行い, さらに積極的に二酸化炭素施用を行うことによって, 収量を高めることが可能であると考えられた。

IV. 摘要

本研究では, 促成栽培トマトにおける施設内環境の実態を調査し, 施設内環境要因と株当たり総収量との関連性を解析した。2009年11月5日から2010年4月27日まで, 茨城県つくば地域において, 収量の異なる施設栽培トマト圃場4箇所の施設内環境要因を詳

細に解析したところ、施設内の温度、相対湿度および飽差の日変動は圃場間にあまり差は無く、いずれの圃場も日中の換気により、相対湿度 60～80%、飽差 5～10hPa に保たれていた。一方、二酸化炭素濃度の日変動は圃場間差が大きく、特に夜間における二酸化炭素濃度に差が認められた。施設内の二酸化炭素濃度が最も高かった圃場は、果実調査における株当たり総果実重量が最も大きかった。この圃場では土壌への有機物投入量が調査圃場の中で最も多く、有機物に由来する二酸化炭素が土壌から放出されやすい条件であった。いずれの圃場も施設の立地条件や構造、生産者の肥培管理法などが異なるが、日の出以降急激に二酸化炭素濃度が低下し、晴天日の換気開始時刻には 240ppm まで、曇天日の換気開始時刻には 216ppm まで低下した。以上のことから、特に二酸化炭素施用を行わない施設でも、二酸化炭素濃度を意識した換気や有機物施用等の管理に注意する必要がある、またより積極的な二酸化炭素施用が既存施設におけるトマトの収量向上に寄与できる可能性があることが分かった。

謝 辞 当研究を実施するに当たり、施設内環境データについて独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センター暖地施設野菜花き研究チーム古谷茂貴氏に貴重なご意見を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。なお、この研究は新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業、C の動態に注目した高生産性施設環境調節技術の開発（課題番号 2050）の一環として実施しました。

引用文献

安 東 赫・池田英男・中野明正. 2010. 光強度および飽差がトマト苗の CO₂ 吸収に及ぼす影響. 園学研. 9 別 1 : 132.

Bertin, N., Guichard, S., Leonardi, C., Longuenesse, J.J., Langlois, D., Navez, B. 2000. Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under Mediterranean conditions, as affected by air vapor pressure deficit and plant fruit load. *Ann. Bot.* 85 : 741-750.

Brewitz, E., Larsson, C.-M., Larsson, M. 1996. Responses of nitrate assimilation and N translocation in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) to reduced ambient air humidity. *J. Exp. Bot.* 47 : 855-861.

古谷茂貴・渡辺慎一・大和陽一. 2008. トマトの促成栽培における未熟粗大有機物の大量施用による炭酸ガス施肥と早期密植の増収効果. 園学研. 7 別 2 : 248.

久枝和昇・仁科弘重. 2007. 大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究 — 積算日射量に基づいたトマトの出荷量予測 —. 植物環境工学. 19 : 11-18.

細野達夫・細井徳夫・川嶋浩樹・古谷茂貴・鈴木克己. 2004. 高温期のトマト栽培中の高軒高ハウスの気温特性. 平成 16 年野菜茶業研究成果情報 : 29-30.

岡田益己. 1998. 施設の環境調節. pp. 135-150. 長野敏英, 清野 豁, 佐瀬勘紀, 塩沢 昌, 石田朋靖, 青木正敏, 内島立郎, 真木太一, 大政謙次, 岡田益己, 蔵田憲次, 皆川秀夫編著. 農業気象・環境学. 朝倉書店. 東京.

矢吹萬壽. 1985. 植物の動的環境. pp. 58-72. 朝倉書店. 東京.

吉田裕一. 2008. イチゴハウスの CO₂ 環境 — 高品質, 多収のためのキーワード —. 施設と園芸. 141 : 23-27.