

CO₂ 濃度, 気温および湿度制御が異なる環境管理様式が トマトの乾物生産および分配に及ぼす影響

岩崎泰永・梅田大樹・鈴木真実*

(平成 28 年 12 月 26 日受理)

Effect of Varying Combinations of CO₂ Exposure, Temperature, and Relative Humidity on the Production and Distribution of Dry Matter of Greenhouse-Grown Tomatoes

Yasunaga Iwasaki, Hiroki Umeda and Mami Suzuki

I 緒言

トマトなど果菜類の施設栽培においては, 近年高度な環境制御に対する関心が高まりつつあり, ハウス内 CO₂ 濃度, 相対湿度および気温などを積極的に制御する試みが行われるようになってきている. とくに CO₂ 施用は生産現場への導入が急増しているが, 収量の増加に結びつかない場合も報告されている (中野ら, 2010; 畔柳, 2014). CO₂ 施用が収量の増加に結び付かない理由として, (1) 光合成量が増加しない, (2) 光合成量は増加しても光合成産物が果実に分配されない, ことがあげられる. 具体的には, 前者の場合は, 施用時間が短い場合, CO₂ 以外の環境要因 (気温, 光, 湿度, 気流速, 養分供給) が不適切な場合などが考えられ, 後者については, 着果数が少ない場合, 葉から果実への転流がすすまない場合などが考えられる.

従来国内の CO₂ 施用基準は日の出直後から換気を開始するまでの 2～3 時間, CO₂ 濃度 1000～2000ppm (大須賀, 2003) とされてきた. 一般に, 東海地域をはじめとする太平洋側の地域では, 低温期でも日中は日射が強いので昇温を抑制するために換気を行う必要があり, CO₂ 施用は低温期 (12～2 月) のしかも早朝 (日の出直後 (6～7 時) から換気開始まで (8～9 時)) の数時間に限定される場合が多い. 短時間でしかも, 日射が弱く気温が低い時間帯を中心とする CO₂ 施用は, 光合成速度の向上はあまり見込めず, 収量増加に結びつかない

場合が生じると考えられる. 最近, 換気をできるだけ抑え, CO₂ 施用を行う時間をできるだけ長くする施用方法が提案され, 収量増加の効果が実証されつつある (加藤ら, 2015; 津田ら, 2015). これらの知見から, CO₂ 施用の効果を高めるためには, CO₂ 濃度と同時に温湿度制御を考慮することが重要であることが示唆されている. そこで本実験では小規模な実験用ハウスを利用して, CO₂ 施用の方法や, 気温管理を変えた条件を設定し, CO₂ 濃度, 気温および湿度制御が異なる環境管理様式がトマトの総乾物重や器官別分配率に及ぼす影響について調べ, 効率のよい CO₂ 施用方法を確立するための基礎的な知見を得ることを目的とした.

なお本研究の実施にあたり, 農研機構野菜茶業研究所武豊野菜研究拠点 (現在閉所) において, 業務 1 科武豊駐在であった河野真人氏, 初山敏夫氏, 施設野菜生産技術研究グループ契約職員, 横尾美喜子氏, 中里有里氏, 藤井栄美氏には多大な援助をいただいた. 本研究の一部は「農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業, CO₂ 長期長時間施用を核とする環境制御技術によって東海の園芸産地を活性化する (2012～14)」の助成を受けて実施した.

II 材料および方法

実験は農研機構野菜茶業研究所武豊野菜研究拠点 (2015 年 3 月閉鎖) において行った. 南北棟のガラス温室 (間口 8m, 奥行き 20m) の内部に同型の PO フィル

ムを展張した小型ハウス（間口2m×奥行3m、軒高2m）を設置した。トマト品種‘りんか409’を2013年12月24日に播種し、閉鎖型苗生産装置（苗テラス、三菱樹脂アグリドリーム）にて育苗後、2014年1月14日にロックウールポット（10cm角）に鉢上げした。培養液（大塚A処方、EC0.6dS/m）を給液しながら育苗し、2月3日に小型ハウス内中央に設置した1台の栽培ベッド（NFT）に株間20cmとして定植し、左右に振り分けて誘引した。培養液濃度を0.6～1.2dS/mとして、日中（6～18時）連続給液、夜間（18～翌6時）は15分給液、15分停止の間断給液として養液栽培した。それぞれの小型ハウスにはCO₂濃度センサ（CO₂engine K30 SenseAir）、相対湿度センサ（ES2-HB、オムロン）、気温センサ（PT100、E52-P10AEY、オムロン）、冷房暖房用ファンコイル（RFS-40F、ダイキン）、CO₂供給ノズル、ミストノズル（BIMV4504 S303/SN303、いけうち、水圧0.2MPa、空気圧0.4MPa、噴霧量4.8L/hr、平均粒子径20μm）を1個ずつ取り付けた。また、気温によって自動的に開閉する巻き上げ式側窓を設置した（図-1）。

この小型ハウスを用いて換気開始設定温度、暖房設定温度、加湿目標湿度、CO₂目標濃度の異なる4つの処理区（以下CNT、I、II、III区）を設定した。図-2にそれぞれの処理区の設定条件を示した。うち一棟は換気開始設定温度12～18時：24℃、それ以外：28℃、暖房設定温度：13℃、加湿制御なし、CO₂施用なしとして対照区（CNT区）とした。I区は従来型のCO₂施用を行う場合の環境管理様式を想定し、CO₂目標濃度を6時～12時2000ppmと設定し、それ以外はCNT区と同じ管理とした。II区は低濃度での長時間CO₂施用に加湿制御を組み合わせ、より光合成量を増大することを意図

し、具体的には、換気を抑え、ハウス内のCO₂濃度を高く維持する時間をできるだけ長くするために換気開始設定温度を高める管理（換気開始設定温度は8時～30℃、16時～26℃、18時～28℃、暖房設定温度は6時～19℃、8時～21℃、16時～17℃、17時～13℃）とし、加湿制御、CO₂施用（6～18時800ppm）を行った。III区はII区と同様に低濃度の長期間CO₂施用と加湿制御により光合成量の増大を意図した上で、作物体への結露を防ぎ病害の発生を抑えることを目的として午前中から少しずつハウス内気温を高める管理（換気開始設定温度：8時～22℃、10時～24℃、12時～26℃、14時～30℃、16時～26℃、日没前15分間8℃、それ以降28℃、暖房設定温度：4時～17℃、6時～19℃、8時～21℃、16時～17℃、17時～13℃）とし、加湿制御およびCO₂施用（6～18時800ppm）を行った。加湿制御はII区、III区共通で、7～16時の間、気温25℃以上、湿度70%以下の場合に、ミスト噴霧30秒、停止60秒を繰り返した。いずれの試験区においても、ハウス内の気温が上昇して換気開始設定温度を上回り、側窓が開いた場合は、ミスト噴霧およびCO₂施用を停止した。第3花房の上に葉を2枚残して摘心し、4月7日に解体調査を行った。葉面積を調査し、葉、莖、果実は器官別に通風乾燥して乾物重を測定した。

III 結果および考察

小型ハウス内の環境要因の一日の変化について、典型的な推移となった2014年3月23日（晴天）のデータを図-3に示した。また、実験期間中の環境要因の平均値および蒸散量を表-1に集計した。この際、平均値は日中（6～18時）、12～16時、夜間（18～翌6時）、一日（24時間）について算出した。気温は日中平

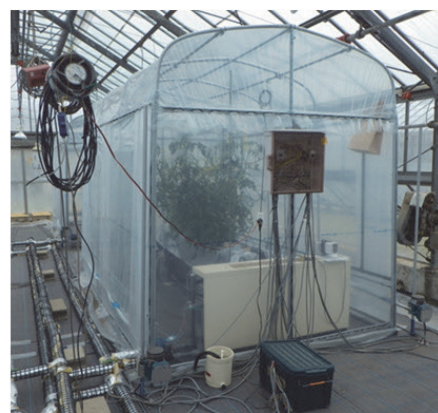
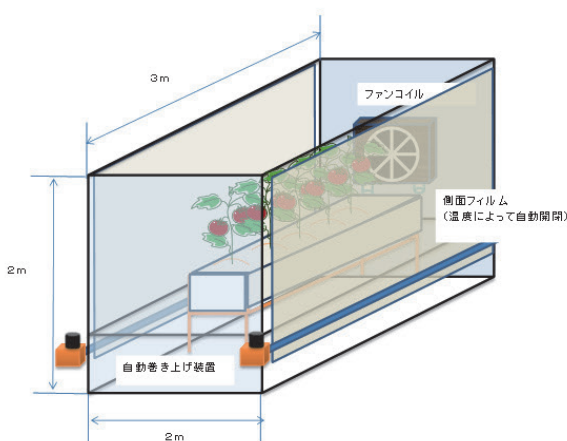


図-1 供試したミニハウスの外観（左）模式図、（右）試験状況の写真

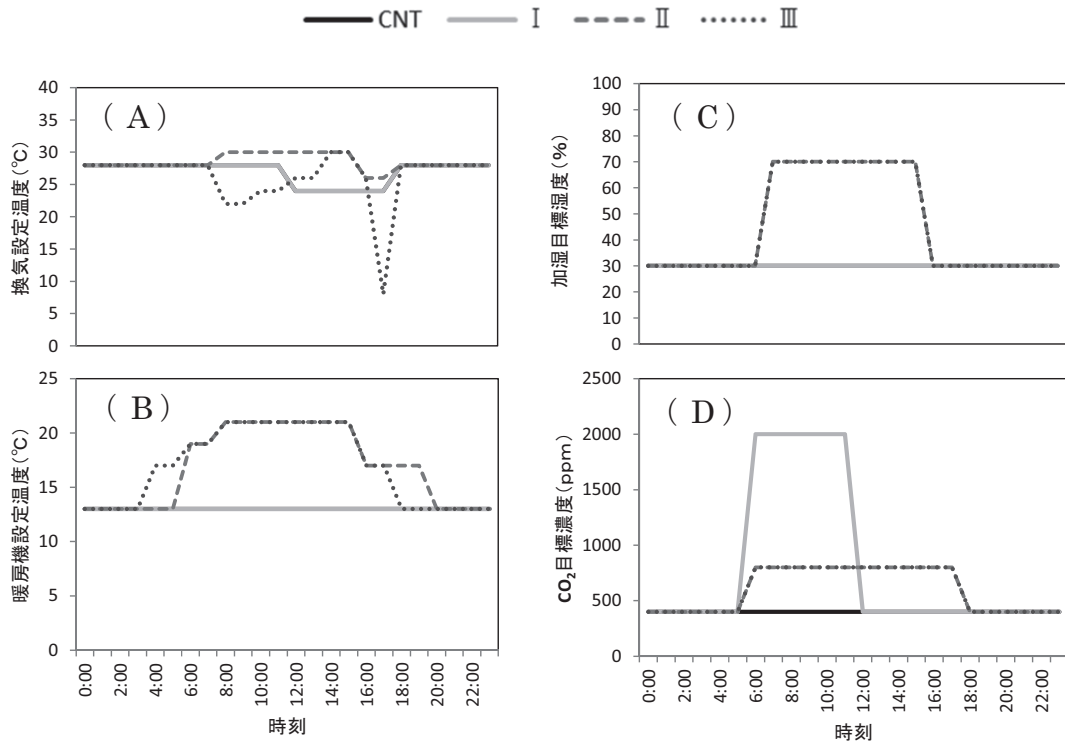


図-2 小型ハウスの環境設定. (A) 換気設定温度, (B) 暖房設定温度, (C) 加湿目標湿度, (D) CO₂ 目標濃度

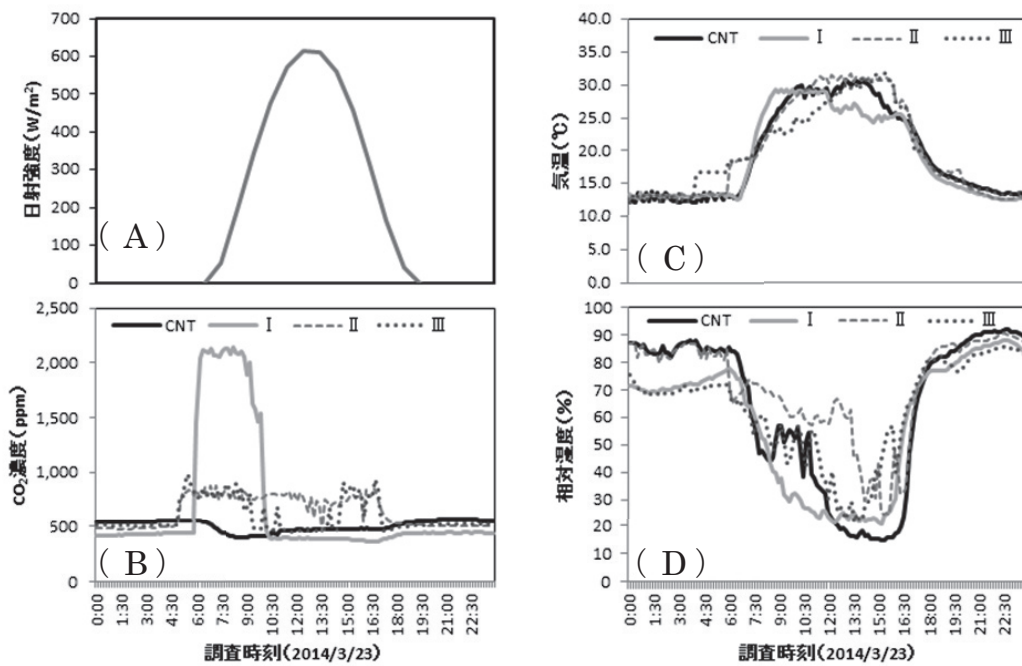


図-3 小型ハウス内環境推移 (2014年3月23日) (A) ハウス内日射強度, (B) CO₂ 濃度, (C) 気温, (D) 相対湿度

均, 12~16時平均, 一日平均ともにCNT区とI区で低く, II, III区でやや高かった. II区は日中の換気設定温度を30°Cと他の試験区より高く設定したたことにより, また, III区は4時から早朝加湿を行ったために平均気温が高くなった. 湿度は日中平均はII区が他の区より

高かった. CNT区, I区は加湿制御を行っていないため, 湿度は低く推移し, III区は加湿制御は行ったものの, 午前中は換気開始温度を低く設定したため換気がおこり, CNT区, I区と同程度の湿度となった. 一方, 12~16時平均は, CNT区とI区が低く, II区とIII区は同

表1 実験期間中の気温、相対湿度、CO₂濃度の平均値および蒸散量

試験区	気温 (°C)				相対湿度 (%)				CO ₂ 濃度 (ppm)		CO ₂ 維持時間 (日中, > 600ppm) (分/日)	蒸散量 (L/株/日)
	日中平均	12-16時平均	夜間平均	一日平均	日中平均	12-16時平均	夜間平均	一日平均	日中平均	12-16時平均		
CNT	22.3	25.3	13.7	18.1	54.9	38.9	85.9	70.2	501	483	41	1.07
I	22.2	24.1	13.5	17.9	53.4	44.1	80.4	66.6	851	422	233	1.09
II	23.8	27.2	14.0	19.1	58.7	51.5	80.1	69.2	672	628	426	1.11
III	23.3	26.8	14.3	19.0	51.9	49.1	76.3	63.9	653	686	332	1.05

気温、相対湿度、CO₂濃度、CO₂維持時間は2/20～4/2までの平均
蒸散量は3/4～4/2までの平均(吸水量から推定)
日中:6:00～17:59.
夜間:18:00～翌5:59, 一日 6:00～翌5:59

程度の湿度となった。CO₂濃度は日中平均でみるとCO₂施用をしていないCNT区が最も低く、I区が高くなったが、13～16時平均はII区、III区が高かった。日中、600ppm以上となった時間はCNT区が41分で最も少なく、I区、III区、II区の順に多くなった。蒸散量には試験区間で大きな差はみられなかった。

次に、乾物重と葉面積の調査結果を表2に示した。株当たりの乾物重合計はCO₂施用を行わないCNT区が最も小さく、次いでI区が大きくなり、II区とIII区は同程度で最も大きくなった。一方、果実乾物重はCNT区とI区は有意差がなく、II区とIII区が同等でCNT区とI区より大きくなった。葉乾物重はI区で他の試験区より有意に大きく、茎乾物重はI区とII区で大きかった。乾物重の果実分配率はI区で有意に低く、他の試験区間には有意差がみられなかった。株当たり葉面積は試験区間で有意差はみられなかった。

本実験は、増収効果の高いCO₂施用方法を明らかにするため、CO₂濃度、気温および湿度制御が異なる環境管理様式が生育や乾物重に及ぼす影響を比較した。I区は国内の従来型のCO₂施用方法を想定し、早朝から午前中のみ高濃度(2000ppm)のCO₂施用を行い(高濃度短時間施用)、温度管理、湿度管理は対照区と同じとした。その結果、乾物重合計はCNT区より有意に(13%)増加した。しかし、果実乾物重にはCNT区との間に有意差はみられず、増加したのは茎および葉の乾物重であっ

た。一方、II区およびIII区の乾物重合計はCNT区に対して有意に増加し(それぞれ25, 21%)、果実乾物重はCNT区に対して有意な増加が見られた(それぞれ35, 24%)。

果実収量を増加させるためには、光合成量を高めるか、光合成産物の果実への転流や分配を高める、のいずれか一方、のどましくは両方が必要である。そこで、最初に環境管理様式が光合成量に及ぼす影響について考察する。従来型CO₂施用を想定したI区と比べると、II、III区はCO₂の施用時間が長く、600ppm以上に維持できた時間が多い、加湿制御によって日中の湿度がやや高めに推移しているといった違いがある。川城ら(2009)はキュウリの栽培において、換気の有無に関わらずCO₂の濃度設定を500ppmとして日中7時間施用するほうが、CO₂の濃度設定を1000ppmで午前中3時間施用した場合よりも収量が増加し、CO₂施用量が少ないことを示している。また、光合成速度は飽差が低いと増加することが報告され(齋藤ら, 1987)、加湿制御によってトマトの収量が増加することも示されている(岩崎ら, 2011)。本実験においてもII、III区は加湿制御によって相対湿度が高めに推移し飽差が低下し、光合成にプラスの影響を及ぼしたと考えられる。これらのことから、II区、III区はI区よりも光合成量が多くなり、乾物重合計が高くなったと考えられる。次に環境管理様式が光合成産物の果実への分配に及ぼす影響について考察する。各処理区

表2 器官別乾物重、乾物重果実分配率および葉面積の比較

試験区	乾物重 (g/株)				果実分配率 (%)	葉面積 (cm ²)
	葉	茎	果実	合計		
CNT	42.6 a	20.0 a	78.3 a	140.9 a	55.6 b	4055 ns
I	56.0 b	26.2 b	76.8 a	159.1 b	48.3 a	4554
II	48.3 a	25.2 b	96.9 b	170.4 c	56.9 b	4605
III	47.5 a	22.2 a	101.6 b	171.3 c	59.3 b	4650

調査日4/7, 同一カラム内の異なるアルファベットはTurkeyの多重検定で危険率5%で有意差があることを示す。nsは有意差無し(n=8)

の気温について着目すると、Ⅱ、Ⅲ区はⅠ区よりも日中平均、一日平均ともに高い。これは、早朝加温を行ったり、換気開始設定温度を高めたことによる。根岸ら(2012)はトマトの促成長期どり栽培においてCO₂施用を行う場合には、慣行の気温管理では草勢過多となり、生育が栄養生長気味に推移し可販果収量が減少したが、日中の気温を慣行より高い管理とすることで、慣行管理に比べて収量が多くなったと報告している。本実験においても気温管理がCNTと同じⅠ区は乾物重合計は有意に増加したものの、果実乾物重は増加せず、果実分配率が低下した。一方、平均気温が高いⅡ区、Ⅲ区では果実乾物重が増加しており、根岸ら(2012)の結果と一致している。このことは、CO₂施用による光合成量の増加を果実収量の増加に結びつけるためには、気温を高めに管理して、果実への転流を促進する必要があることを示す。その理由のひとつとして、気温が低いと光合成産物の転流が不十分となり光合成産物が葉や茎に残る割合が高くなることが考えられる。一般に、低温管理を行うと葉が厚く巻き、茎は太くなりやすく、特に日射量が比較的多い秋や春に夜温を低く管理すると草勢が強くなる傾向がある。これは、昼間の光合成産物が十分に果実に転流せず、葉や茎に残ることによって生じるとされている。長岡ら(1979)は、CO₂施用下で高日照、低夜温化で生長点付近の葉に障害が生じた要因として、転流が不十分で葉に炭水化物が蓄積したためと推定している。吉岡ら(1986)は葉から果実への転流は気温が高いほど多く、気温が低いほど葉に残りやすいことを明らかにしている。また、暖房費の節約に効果があるとされる「変温管理」を行う場合、晴天時には日の入り前からやや高めの温度を数時間維持することによって転流を促進し、その後の時間帯は呼吸抑制のために温度を下げて管理する一方で、曇雨天時は日没後直ちに呼吸抑制温度で管理することが望ましいとされている(堀, 1983; 三浦, 1997)。また、別の理由として、CO₂施用によって光合成量が増加すると、ソース過剰となり、シンク・ソースバランスがくずれることが考えられる。この場合、気温をより高めに管理することによって茎の伸長速度が早くなったり、葉や花房の発生速度が向上するのでシンク能が増加し、シンク・ソースバランスが適切な範囲となり、適度な草勢を維持しやすくなることが期待される。

CO₂施用の効率を高めるため、加湿制御を行ったり、換気頻度を抑える管理を行うと、ハウス内の湿度が高く推移しやすくなり、灰色カビ病や葉カビ病の発生が懸念される(Kuroyanagi, 2016; De Gelderら, 2012;

Seginerら, 1997)。そこで本実験では、Ⅱ区と同様にCO₂の長時間施用と加湿制御を行いつつ植物体への結露を防ぎ病害発生を抑えるため、早朝加温を行うとともに午前中の換気開始温度を低く設定したⅢ区を設定した。その結果、ハウス内の湿度は低下し、結露は少なくなったものの、換気が行われたため、CO₂濃度を高く維持できる時間がⅡ区よりも短くなり、日中の平均CO₂濃度はⅡ区よりも低くなった。しかしながら、Ⅱ区とⅢ区で乾物重合計に差がみられなかった。この理由については本実験の結果からだけでは明らかにできないが、一つの可能性として以下のように考察した。3月23日についてみると、日射強度は6~12時までの平均値で274W/m²に対して、12~16時までの平均値は562W/m²でほぼ倍近い。日射が強い時間帯にCO₂濃度と湿度を高めることができれば、1日の中でのその時間帯の光合成量が相対的に多くなり、早朝~午前中の光合成が物質生産に寄与する割合はそれほど大きくならないことが考えられる。Kuroyanagiら(2014)はCO₂収支からトマトの日中の光合成速度推移を算出して求めたところ、時間帯によらず日射量との間に強い相関があるとしている。

Ⅲ区の管理では、気温の上昇が緩やかになることに加えて、早朝加温や換気による湿度の低下により、作物体への結露は少なくなったが、本実験ではいずれの処理区においても病害の発生が少なく、環境管理が病害の発生に及ぼす影響は確認できなかった。

以上のことから、CO₂施用と温湿度管理を適切に組み合わせることによって、乾物重や果実重の増加が見込めることが示唆された。今後、本実験では十分に検討できなかった病害抑制に配慮した湿度管理や、本実験では扱っていないが、省エネルギーについても検討を加え、最適なCO₂施用技術を検討する必要がある。

Ⅳ 摘要

本実験では、CO₂濃度、気温および湿度制御が異なる環境管理様式がトマトの乾物重と果実分配率に及ぼす影響を小型ハウスを用いて調べた。その結果、CO₂施用は日の出~換気開始までの高濃度施用よりも、低濃度長時間施用に加湿制御を組み合わせて行ったほうが乾物重増加に対する効果が高いことが示唆された。また、CO₂施用によって増加した光合成産物を果実へ分配させるためには高めの気温管理が有効である可能性が明らかとなった。さらに、作物体の結露を防ぎ、病害の発生を抑えるために、午前中に換気を行っても、乾物生産に及ぼす影響は少ないことも明らかとなった。

引用文献

- 1) De Gelder A, J. A. Dieleman, G. P. A. Bot, L. F. M. Marcelis (2012) : An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, **87** (3), 193-202.
- 2) 堀裕(1983) : トマトにおける光合成産物の転流. 園学雑, **52**(1), 113-115.
- 3) I. Seginer, Zlochin I. (1997) : Night-time greenhouse humidity control with a cooled wetness sensor. *Agricultural and Forest Meteorology*, **85**, 269-277.
- 4) 岩崎泰永, 三浦慎一・大月裕介 (2011) : トマトおよびイチゴ促成栽培における加湿制御が生育および収量に及ぼす影響. 園芸学研究, **10** (別2), 455.
- 5) 加藤賢治・小林克弘・嶋本千晶・中村嘉孝・小島寛子・大藪哲也・番喜宏・岩崎泰永 (2015) : イチゴ促成栽培におけるミスト噴霧と CO₂ 長時間施用が生育・収量に及ぼす影響. 愛知農総試研報, **47**, 51-60.
- 6) 川城英夫・土屋和・崎山一・宇田川雄二 (2009) : 低濃度二酸化炭素施用が促成栽培キュウリの収量に及ぼす影響とその経済性評価. 園学研, **8**, 445-449.
- 7) 畔柳武司 (2014) : 温室の二酸化炭素施用の歴史と効率適施用に向けた工学的アプローチ. 農及園, **89**, 143-148.
- 8) Kuroyanagi, T. K. Yasuba, T. Higashide, Y. Iwasaki, M. Takaichi. (2014) : Efficiency of carbon dioxide enrichment in an unventilated greenhouse. *BiosystemsEngineering*, **119**, 58-68.
- 9) Kuroyanagi, T. (2016) : Current Usage of Air Circulators in Greenhouses in Japan. *JARQ*, **50** (1), 7-12.
- 10) 三浦周行 (1997) : 野菜の生理生態からみた最適環境制御. 社団法人日本施設園芸協会編, 最新施設園芸の環境制御技術, 22-31. 誠文堂新光社, 東京.
- 11) 長岡正昭・高橋和彦・新井和夫・花田俊雄・吉岡宏 (1979) : 光の強さ・夜温・CO₂ 濃度が施設トマトの生育・収量に及ぼす影響. 野菜試験場報告, **A6**, 105-122.
- 12) 中野明正・安東赫 (2010) : 低炭素社会に適合した施設生産の CO₂ 施用技術. 農及園, **85**, 1071-1079.
- 13) 根岸直人・木野本真沙江 (2012) : 二酸化炭素施用と温度管理によるトマト高品質多収生産技術の確立. 栃木農試研究成果集, **30**, 19-20.
- 14) 大須賀隆司 (2003) : 二酸化炭素制御. 社団法人日本施設園芸協会編, 5 訂施設園芸ハンドブック, 170-181. 社団法人日本施設園芸協会, 東京.
- 15) 齋藤邦行・石原邦 (1987) : 水稲葉身の光合成速度に及ぼす飽差の影響. 日作紀, **56**, 163-170.
- 16) 津田千織・奥村義秀・平野哲司・堀田真紀子・岩崎泰永・山口徳之 (2015) : バラ栽培における超微粒ミスト噴霧が CO₂ 施用に及ぼす影響. 愛知農総試研報, **47**, 69-75.
- 17) 吉岡宏・高橋和彦・新井和夫 (1986) : 果菜類における光合成産物の動態に関する研究 (9) トマトにおける 14C 同化産物の転流に及ぼす温度の影響. 野菜試験場報告, **A 14**, 1-9.

Effect of Varying Combinations of CO₂ Exposure, Temperature, and Relative Humidity on the Production and Distribution of Dry Matter of Greenhouse-Grown Tomatoes

Yasunaga Iwasaki, Hiroki Umeda and Mami Suzuki

Summary

The use of environmental control systems in greenhouse horticulture is essential to increase dry matter production and fruit yield. This study assessed the effect of different combinations of CO₂ concentration given over varying application periods, and temperature and relative humidity (RH) control on the dry matter production and distribution to the fruits of tomatoes grown in a greenhouse during winter (December-April). Compared with the control (no CO₂ supplementation) and the conventional environmental control method (2000 ppm CO₂ supplementation from 06 : 00 to 12 : 00), the longer period of CO₂ application at lower concentration (800 ppm) combined with RH control led to an increase in the total dry matter production of 3-month-old tomato plants. The results indicated that CO₂ supplementation is more effective for increasing dry matter distribution to the fruits at higher greenhouse temperatures. They also indicated that ventilation early in the morning to prevent dew formation on leaves and fruits does not decrease dry matter production.

Accepted : December 26, 2016

Division of Vegetable Production System

3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8519 Japan