

# 促成栽培トマトの生育に伴う換気ハウスの気象特性および CO<sub>2</sub> 濃度の変化

誌名	農業気象
ISSN	00218588
著者	河野, 徳義
巻/号	43巻1号
掲載ページ	p. 15-20
発行年月	1987年6月

# 促成栽培トマトの生育に伴う換気ハウスの気象特性およびCO<sub>2</sub>濃度の変化

河野 徳 義\*

(愛媛県農業試験場)

Changes in CO<sub>2</sub> Concentration and Climate  
in the Ventilated Greenhouse with Forced Tomato Crops

Tokuyoshi KONO \*

(Ehime Agricultural Experiment Station,  
Kaminanba, Hojo, Ehime)

## 1. はじめに

栽培施設の換気は、日中の気象環境調節において最も重要である。強制換気時のハウス内気象環境が矢吹(1964)、森ら(1968)、藤本ら(1968)、卜部ら(1971)などの研究によって理論的に解明され、換気装置設計指針の標準化がなされている。

ハウス内CO<sub>2</sub>濃度の微気象的研究はMorrisら(1954)、矢吹・今津(1965)、伊東(1970;1972)等によって行われ、とくに、日出後の換気前のCO<sub>2</sub>濃度の低下が明らかにされ、CO<sub>2</sub>施用の有効性が認められた。他方、換気時においてもCO<sub>2</sub>濃度の低下がみられ、換気時の光合成速度を維持するためにはハウス内CO<sub>2</sub>環境の改善が必要となる。

本研究では、促成トマト栽培ハウスで、天窓換気、強制換気を行った場合について、ハウス内の気温、日射量、風速、CO<sub>2</sub>濃度を測定し、トマトの生育に伴う換気時のこれらの特性を比較し、とくに、天窓換気と強制換気におけるCO<sub>2</sub>濃度分布の差異を屋外風速との関連において明らかにした。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試ハウス

供試ハウスとして、床面積100m<sup>2</sup>、表面積213m<sup>2</sup>、容積275m<sup>3</sup>、保温比0.47の南北棟両屋根式ハウスを用

いた。被覆資材としては、屋根にFRA小波板(厚さ0.7mm)を、側壁にはビニールフィルム(厚さ0.1mm)を用いた。天窓換気装置と強制換気装置を併設し、天窓換気の場合は、強制換気装置の運転を停止し、強制換気の場合は、天窓を閉じて測定を行った。天窓は、開口部の長さ18.0m、幅0.8m、両開きで、窓面積28.8m<sup>2</sup>、窓比率14%、全開角度26度であった。強制換気に用いた換気扇は、羽根直径0.5mの有圧型で、出力0.3kW、定格換気風量105m<sup>3</sup>・min<sup>-1</sup>(静圧2.5mmH<sub>2</sub>O)のもので、南妻面の中央部2.0m高さに取付けた。吸気口は、直径0.45mの吸気口2個を換気扇反対側妻面の2.0m高さに取付けた。

### 2.2 測定測器および測定法

気温は、直径0.3mmの銅-コンスタンタン熱電対を、日射量は、全天日射計(エコーMS-61)と管形日射計(エコーMS-3)を用いて測定し、風速は、携帯型熱線風速計(アネモマスター)を用いて移動測定を行った。CO<sub>2</sub>濃度は、赤外線ガス分析計(東芝ベックマンK-1052)に内径6mmの塩化ビニール管を取付けて、1l・min<sup>-1</sup>の空気を吸引して測定した。

気温とCO<sub>2</sub>濃度分布は、ハウス中央部と南、北妻面からそれぞれ3m内側の3断面で測定した。各断面では、中央、中央から左右の側壁までの中間部の計3点において、5cm、1m、2mの3高度で測定した。測点の合計は27である。

日射量の分布は、ハウス中央横断面の中央、中央と左右の側壁までの中間の3カ所に、5cm、1m、2mの高さの測点を設けて測定した。

風速分布の測定は、ハウス内棟方向を6等分し、妻面を除いた5断面で行った。各断面では、中央、中央から

昭和59年12月7日 中国・四国支部大会にて発表

昭和61年11月25日 受理

\*現在 愛媛県中予病害虫防除所

Present address: Ehime Chuyo pest and disease control station, Matsuyama, Ehime

左右側壁までの中間部の計3点において、5 cm, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m の4高度で測定した。測点の合計は60である。

2.3 促成栽培トマトの栽培法と測定期間

品種は“東光K”を用い、1980年9月25日に播種し、12月1日に、1.35 m間隔のうねに株間0.25 mで定植した。うね立ては南北として、4うねを設け、床面は全面マルチング(厚さ0.05 mmのポリエチレンフィルム)した。測定期間は1980年11月から1981年5月までである。

3. 測定結果

3.1 気温と日射量

Fig. 1は、トマトの生育に伴う天窓換気、強制換気ハウスの正午における中央横断面の気温分布とハウス内日射量の分布の例を示したものである。

天窓換気の場合、定植前の裸地状態では、高度別の平均気温の差がほとんど認められなかった。草丈が1.65 m, LAIが1.0になると、中央横断面では2 m高さの平均気温に比べ1 m高さ、5 cm高さの値は、それぞれ1.1℃, 1.8℃低くなった。また、東側壁付近の気温が低くなった。

3横断面の高度別平均気温では、2 m高さの気温は1 m高さの値とほとんど変わらないが、5 cm高さでは0.8℃低くなった。LAIが2.0になると、中央横断面の高度別平均気温の差はほとんどみられないが、3横断面の高度別平均気温では、2 m高さの気温に比べ1 m高さ、5 cm高さの値はそれぞれ0.9℃, 1.2℃低くなった。

強制換気の場合、定植前の裸地状態で、中央横断面の気温分布をみると、2 m高さの平均気温に比べて、5 cm, 1 m高さともに気温が低くなった。しかし、3横断面の高度別平均気温では差がほとんど認められなかった。LAIが1.0になると、中央横断面では2 m高さと同様の傾向であるが、5 cm高さの値は1.8℃低くなった。LAIが2.0になると、中央横断面では、2 m高さの平均気温に比べ1 m高さと同様の傾向であるが、5 cm高さの値がそれぞれ2.8℃, 4.2℃低くなった。3横断面の高度別平均気温では、2 m高さに比べ1 m, 5 cm高さの値がそれぞれ1.0℃, 2.9℃低くなった。

このように、両換気法ともにトマトが繁茂するにしたがって5 cm高さ、1 m高さの植被内の平均気温は低くな

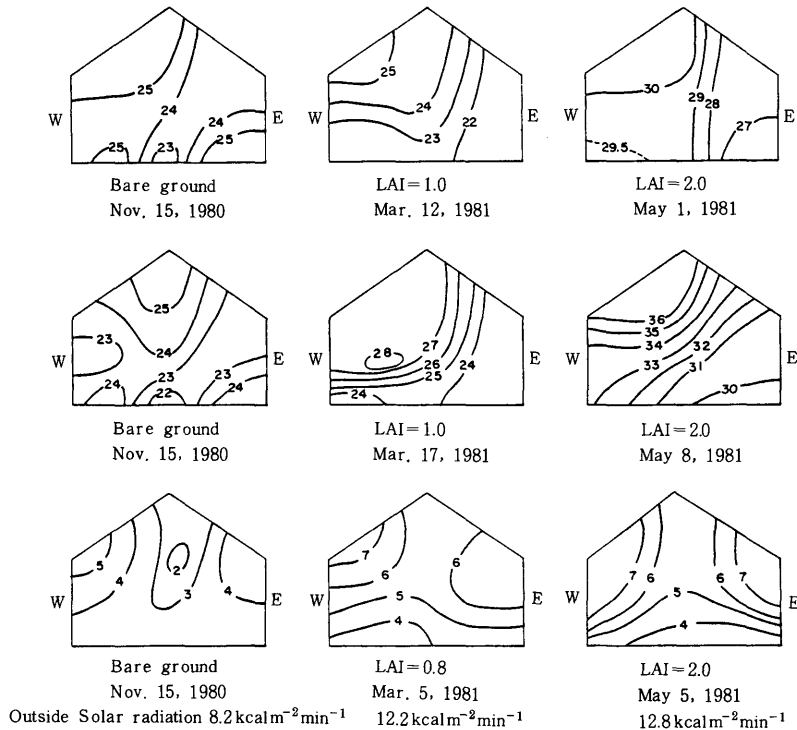


Fig. 1 Cross sectional distribution of temperature and solar radiation at noon in the greenhouse with forced tomato crops.  
 Upper: temperature under natural ventilation (°C),  
 Middle: temperature under forced ventilation (°C),  
 Lower: solar radiation ( $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

った。また、高度別の気温差は天窓換気が小さく、天窓直下にあたる2m高さの気温は、強制換気比べ天窓換気の方が低くなった。

ハウス内日射量分布をみると、定植前の裸地状態では、棟直下の部分に日射量の低下が観測された。LAIが0.8になると棟直下と植被下層ほど日射量が減少した。LAIが2.0になると植被下層ほど日射量がさらに低下することが明らかとなった。

### 3.2 風速分布

Fig. 2は、トマトの生育初期のハウス内風速水平分布の例である。天窓換気の場合、西風の吹き込む中央から東側壁の間の5cmから1.5mの各高度で10~30 cm・sec<sup>-1</sup>という風速の大きい部分がみられた。これに対し、強制換気では、吸気口付近に40 cm・sec<sup>-1</sup>の風速の大きい部分がみられるが、5cm高さでは15 cm・sec<sup>-1</sup>となり、0.5m高さ以上の中央部から換気扇側では5 cm・sec<sup>-1</sup>となった。これは吸気した空気が密度流となって地表近くまで降下したのちハウス全体に拡散し、換気扇側へ流れることを示している。

Fig. 3は、トマトが最も繁茂したLAIが3.5の時の風速分布である。天窓換気の場合、ハウス外の風の吹き込む、高さ1.0mから1.5mの東側壁の間に10~20 cm・sec<sup>-1</sup>の風速の大きい場所がみられるが、その外の場合は3~5 cm・sec<sup>-1</sup>の風速であり、ほとんど無風の状態であった。これに対し、強制換気では、生育初期に比べて吸気口付近からハウス中央部までの範囲で風速が10~30 cm・sec<sup>-1</sup>と大きくなった。

### 3.3 CO<sub>2</sub>濃度分布

裸地状態での天窓換気時と強制換気時のハウス内CO<sub>2</sub>濃度は、ハウス外CO<sub>2</sub>濃度よりわずかに5 ppm高い値であり、濃度差はほとんど認められなかった。

Fig. 4は、生育初期(LAI≒1)のハウス外とハウス内のCO<sub>2</sub>濃度差の高度

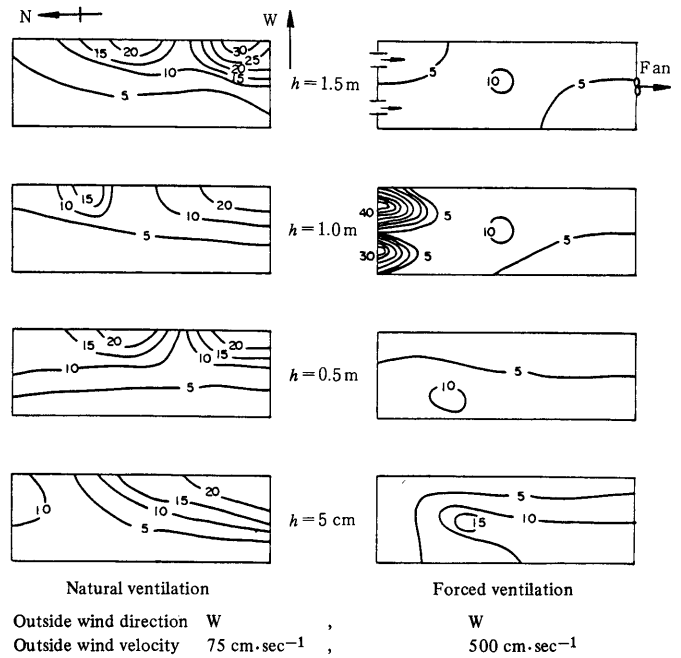


Fig. 2 Horizontal distribution of air flow velocity at different heights inside the greenhouse at the early stage of tomato crops. LAI=0.5, Jan. 8, 1981, (unit: cm・sec<sup>-1</sup>), h; height from floor surface.

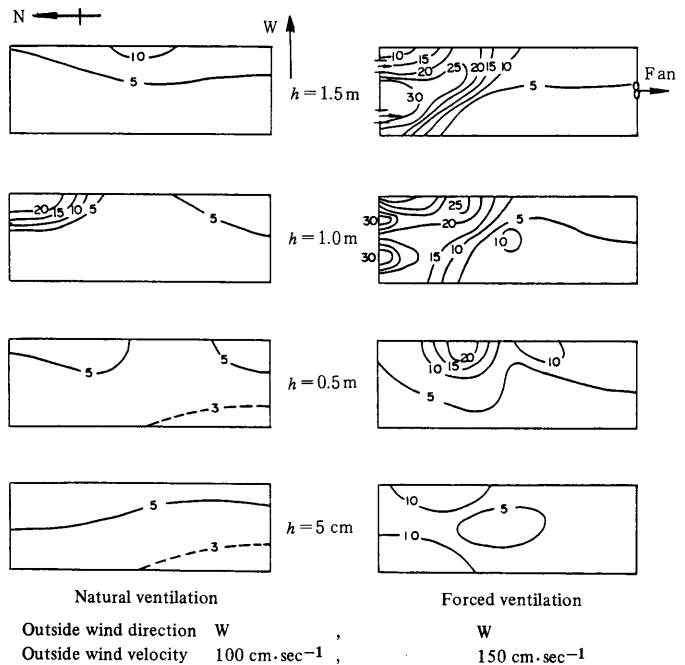


Fig. 3 Horizontal distribution of air flow velocity at different heights inside the greenhouse at the later stage of tomato crops. LAI=3.5, Apr. 27, 1981, (unit: cm・sec<sup>-1</sup>), h; height from floor surface.

別の水平分布である。ハウス内CO<sub>2</sub>濃度は、ハウス外CO<sub>2</sub>濃度より常に低く、場所によっては天窓換気の場合で20 ppm、強制換気で15 ppmほどハウス外CO<sub>2</sub>濃度より低い部分が見られた。

Fig. 5は、最も繁茂したLAIが3.5の場合のCO<sub>2</sub>濃度差の高度別の水平分布である。天窓換気の場合、2 m高さの水平面でハウス外CO<sub>2</sub>濃度よりハウス内CO<sub>2</sub>濃度の方が最大45 ppm低い部分が見られた。しかし、天窓直下では25 ppmのCO<sub>2</sub>濃度の低下であった。強制換気では、同様に、ハウス外CO<sub>2</sub>濃度よりハウス内CO<sub>2</sub>濃度は、最大35 ppm低くなった。吸気口妻側では低下が少なく、換気扇側では低下が大きくなった。西側吸気口付近のCO<sub>2</sub>濃度の低下が東側吸気口付近に比べて大きいのは、吸気口の開閉板が十分に開いていなかったためであった。

4. 考察

4.1 気温と日射量の関係

生育ステージごとの気温測定は、いずれも快晴日に行ったのでほぼ同じ条件であった。したがって、これらからLAIの増加に伴って植被下層になるほど平均気温が低くなることがわかった。

日射量は、LAIの増加にともなって植被下層になるほど少なくなったことから、低日射条件が植被下層の気温低下の原因になったと云える。

4.2 風速分布とCO<sub>2</sub>濃度分布の関係

天窓換気時あるいは強制換気時のハウス内風速がハウス内CO<sub>2</sub>濃度におよぼす影響は、次のようになる。

本実験では、ハウス内土壌から発生するCO<sub>2</sub>は測定しなかった。しかし、矢吹・青木(1981)の測定によると、0.75 ton/10 a以下の堆肥の施用量では、土壌中からの発生量は少なく、地上部への影響はほとんど認められていない。今回のトマト栽培では、堆肥1 ton/10 a施用し、床面は全面マルチングしていたこと、および定植前の裸地での換気時のハウス内外のCO<sub>2</sub>濃度差が、わずか5 ppmであったことな

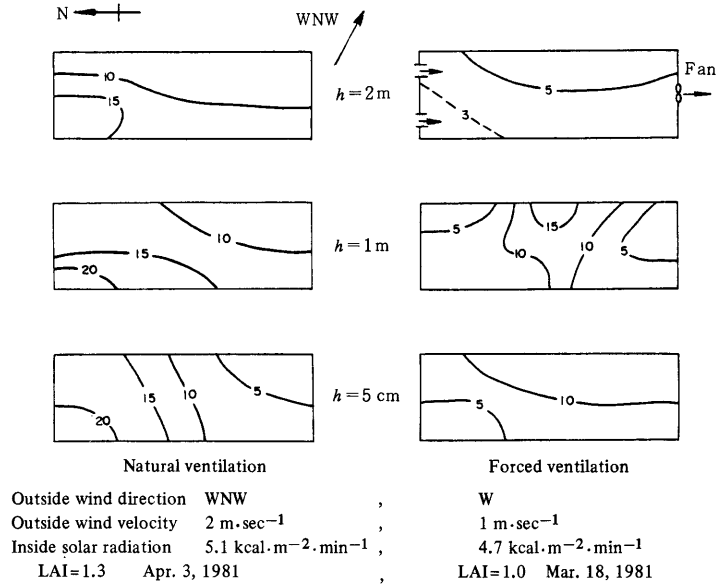


Fig. 4 Horizontal distribution of difference in CO<sub>2</sub> concentration between inside and outside at the early stage of tomato crops. CO<sub>2</sub> concentration is lower inside than outside. (unit: ppm), *h*: height from floor surface.

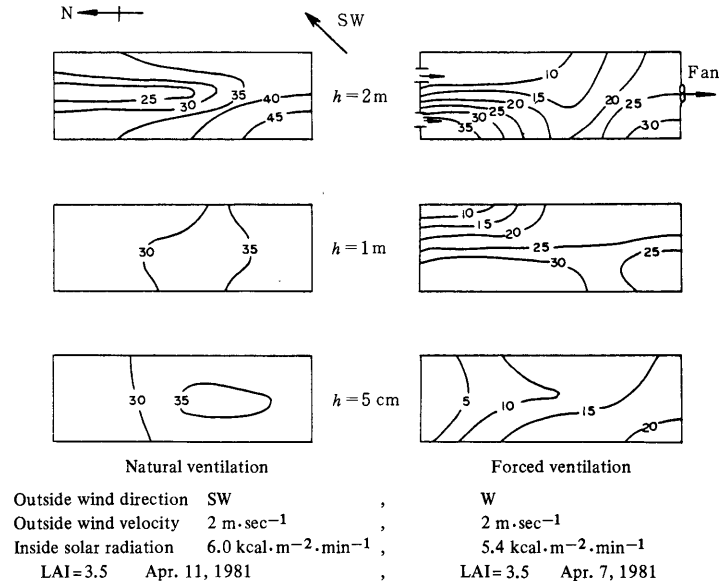


Fig. 5 Horizontal distribution of difference in CO<sub>2</sub> concentration between inside and outside at the later stage of tomato crops. CO<sub>2</sub> concentration is lower inside than outside. (unit: ppm), *h*: height from floor surface.

どから、以後の考察においては土壌中から発生するCO<sub>2</sub>は無視した。

天窓換気を行った場合、生育初期はハウス外の西風が天窓から吹き込むことによって東側壁付近の風速が大き

くなり、この影響が地表近くまで達した(Fig. 2)。CO<sub>2</sub>濃度分布は、風速分布と類似した傾向を示した(Fig. 4)。ハウス外の西風が天窓から吹き込むことの影響はトマトが最も繁茂した場合には、東側壁の上層にとどまり、また、CO<sub>2</sub>濃度分布は、生育初期と同様に風速分布と類似した傾向を示した(Fig. 3, 5)。

強制換気を行った場合、生育初期では吸気した空気が地表近くまで降下するので、この流路にあたる部分のCO<sub>2</sub>濃度の低下が少なくなった(Fig. 2, 4)。

最も繁茂した場合には、風速の大きい部分がハウス内中央部まで広がり、空気は吸気口から換気扇側に向けて流れた(Fig. 3)。Fig. 5のCO<sub>2</sub>濃度分布は、風速分布と類似した傾向を示し、吸気口側から換気扇に行くにしたがってCO<sub>2</sub>濃度の低下が大きくなった。これは、トマトの光合成によってCO<sub>2</sub>が消費されるためである。このことは、強制換気の特徴であり、天窓換気のCO<sub>2</sub>濃度分布と異なるところである。

このように、換気時のハウス内空気の流れが、CO<sub>2</sub>補給の重要な役割を果たしていることが長期測定の結果から明らかになった。

#### 4.3 換気方法と光合成速度の低下割合

伊東(1970)は、天窓換気と強制換気における植被内のCO<sub>2</sub>濃度の垂直分布を明らかにし、最低CO<sub>2</sub>濃度層は、植被の高さに対する比で表わすと天窓換気では地面上0.3~0.7、強制換気では0.5~0.6の高さであると報告している。

本実験では、天窓換気の最低CO<sub>2</sub>濃度層は明らかにできなかったが、LAIが3.5の場合は、上層の一部を除いた全層にわたりCO<sub>2</sub>濃度の低下がみられた。これに対して強制換気では、最低CO<sub>2</sub>濃度層は植被の高さに対する比で0.5付近に形成された。強制換気の場合のトマトの生育最盛期の群落光合成量は、全層でCO<sub>2</sub>濃度が低下した天窓換気に比べて多かったと推定されるが、換気回数やLAIとの関係において解析する必要がある。

換気回数と光合成速度との関係についてはMorrisら(1954)、高倉ら(1965)による理論的な解析や、伊東(1970)の実験的な研究がある。それらによると、換気回数が少なくなるとCO<sub>2</sub>濃度が低下し、光合成速度は低下する。伊東(1970)のLAI、換気回数、光合成速度の測定結果から、本実験における両換気法による光合成速度の低下割合を求めると次のとおりである。

換気回数は次のようにして求めた。天窓換気の場合、天窓換気の計算法(古在ら1982)によって、15~30回h<sup>-1</sup>を算出した。強制換気の場合、ハウス内静圧を測定し、静圧風量曲線から得られた換気量から、23回h<sup>-1</sup>と推定した。そのときの光合成速度の低下割合は、天窓換気は、

LAIが1.0で7~15%、LAIが3.5で22~32%であった。強制換気は、LAIが1.0で約10%、LAIが3.5で約25%であった。したがって、本実験における4月下旬までの光合成速度の低下割合は、強制換気の方が天窓換気の場合よりもやや小さくなった。

供試した100m<sup>2</sup>ハウスにおいて5月まで強制換気を行う場合の換気量Vは、ハウス内正味放射量を8kcal・m<sup>2</sup>・min<sup>-1</sup>、ハウス内外気温差を5℃として、河野(1984)の実用式から求めると、

$$\begin{aligned} V &= \frac{A}{c_p \cdot \rho} \left( \frac{0.481 a \cdot S_i}{t_i - t_o} - w \cdot k \right) \\ &= \frac{100}{0.24 \times 1.2} \left( \frac{0.481 \times 1 \times 8}{5} - 2.13 \times 0.05 \right) \\ &= 230 (\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}) \end{aligned}$$

となり、このときのハウス内平均風速は、0.26m・sec<sup>-1</sup>となる。しかし、この換気量を得るには既設の換気扇の2倍の能力のものが必要である。

また、ハウス内の平均風速は、矢吹ら(1970)が示した最適風速0.6m・sec<sup>-1</sup>、および伊東ら(1972)が示した植被上で0.5m・sec<sup>-1</sup>、植被内で0.3m・sec<sup>-1</sup>のいずれにも達していない。したがって、本実験装置では強制換気の換気能力の限界となる5月以降は、自然換気に切替えて、ハウス側壁を取りはずすなどして換気量を増加させる工夫が必要となる。また、換気時においてもCO<sub>2</sub>濃度の低下がみられることから、換気時のCO<sub>2</sub>施用法とその効果についてさらに検討する必要性が認められた。

## 5. ま と め

促成トマト栽培における換気時の気温、日射量、風速、CO<sub>2</sub>濃度を、トマトの生育ステージごとに測定し、気温と日射量の垂直分布の関係、風速分布とCO<sub>2</sub>濃度分布の関係、および換気法と光合成速度の低下割合について明らかにした。

(1) LAIの増加によって日射量が植被下層になるほど少なくなるので、ハウス内高度別気温は植被下層で低下した。しかし、天窓換気では、天窓直下のハウス外の風の吹き込む場所に、強制換気比べて気温の低い部分がみられた。

(2) 天窓換気では、草丈が低く、LAIが小さい時期は、ハウス外の風の吹き込みによるハウス内風速の増加が、植被下層まで及んだ。草丈が高くなり、LAIが3.5となると、ハウス外の風の吹き込みの影響は天窓直下のみとなった。風速分布とCO<sub>2</sub>濃度分布は類似の傾向を示し、ハウス内風速の大きい場所は、ハウス内CO<sub>2</sub>濃度の低下が少なかった。

(3) 強制換気では、草丈が低く、LAIが小さい時期は、

吸気した空気は地表近くまで降下し、換気扇側に向かって流れた。草丈が高くなり、LAIが3.5となると吸気された空気は地表近くまで達せず、0.5m以上の高さで風速が大きくなり、換気扇側に向かって流れた。したがって、ハウス内CO<sub>2</sub>濃度は吸気口側で低下が少なく、換気扇側に行くにしたがって低下が大きくなった。

(4) トマトのLAIが3.5に達したときのハウス内CO<sub>2</sub>濃度は、天窓換気時で45 ppm、強制換気時で35 ppm、それぞれ外気よりも低かった。

(5) 換気時のハウス内CO<sub>2</sub>濃度の低下に伴う光合成速度の低下割合を推定したところ、天窓換気ではLAIが1.0で7~15%、LAIが3.5では22~32%であり、強制換気ではLAIが1.0で約10%、LAIが3.5では約25%であった。

### 引用文献

- 藤本幸平・内藤 潔・卜部昇治, 1968: ビニールハウスにおける換気扇による強制換気に関する研究(第1報), 換気扇の設置基準の設定および効果について. 奈良農試研報, **2**, 32-38.
- 伊東 正, 1970: そ菜栽培における作物群落内の炭酸ガス濃度低下. 園芸学雑誌, **39**, 185-192.
- 伊東 正, 1972: そ菜の光合成特性とその栽培的意義(第6報), 換気扇を利用した大型ビニールハウス内のトマトの生育, 収量, 品質. 園芸学雑誌, **41**, 51-60.
- 河野徳義, 1984: ビニールハウスにおける強制換気時の熱収支. 農業気象, **40**, 125-132.
- 古在豊樹・佐瀬勘紀, 1982: 換気計算法. 日本農業気象学会施設園芸研究部会研究資料, **2**.
- 森 俊人・柴田 進・浜田国彦, 1968: ハウス内環境調節に関する研究, 第1報, 大型ビニールハウスにおける農業用換気扇の開発とその利用による強制換気について. 兵庫農試研報, **16**, 101-104.
- Morris, L. G., J. D. Postlethwaite and R. I. Edwards, 1954: Ventilation and the supply of carbon dioxide to a glasshouse tomato crop. *Tech. Memor.*, **87**, Nat. Inst. Agric. Engng, Silsoe, 3-14.
- 高倉 直・杉 二郎, 1965: 温室による植物環境条件制御に関する基礎的問題について, (2)植物の光合成作用からみた換気率について. 農業気象, **21**, 99-103.
- 卜部昇治・内藤 潔・藤本幸平, 1971: ビニールハウスにおける換気扇による強制換気に関する研究(第2報), 低温期の均一換気について. 奈良農試研報, **3**, 55-61.
- 矢吹万寿, 1964: 噴霧冷却方式によるガラス室冷房設計. 生物環境調節, **2**, 14-20.
- 矢吹万寿・今津 正, 1965: ガラス室の炭酸ガス濃度について. 農業気象, **20**, 125-129.
- 矢吹万寿・宮川秀夫, 1970: 風速と光合成に関する研究(第2報)一風速と光合成との関係一. 農業気象, **26**, 137-141.

### Summary

This paper describes climatic factors in the greenhouses ventilated with two different systems; forced ventilation and natural roof ventilation. The author discusses 1) the profile of inside air temperature related to that of solar radiation, 2) horizontal distribution of inside air flow velocity and carbon dioxide concentration, and 3) photosynthetic rate of a tomato crop.

Air temperature varied according to the height from the floor surface. Since the amount of solar radiation at the lower part in the plant canopy was smaller than that at the upper part, the air temperature decreased at the lower part. This decrease in temperature became larger with the increase in LAI. In the naturally ventilated greenhouse, a low temperature spot was observed close to the roof ventilators, through which the outside air came into the inside. The temperature in the spot was lower than that at the same position in the greenhouse ventilated with fans.

Horizontal patterns of inside air flow velocity was similar to those of carbon dioxide concentration. The air flow velocity was large at the early stage of crops, but was reduced at the later stage in the naturally ventilated greenhouse. In the fan ventilated greenhouse, the incoming air descended to the floor surface at the early stage of crops, and thus carbon dioxide was supplied to the crops. As the crop stage became later, the area with large air flow velocity expanded in the whole greenhouse. Under such a condition a clear decline of carbon dioxide was observed from the inlet to the outlet of the air.

The author estimated the reduction of photosynthetic rate due to the drop in carbon dioxide concentration. The percent reduction was 7-15% (LAI=1.0) and 22-32% (LAI=3.5) in the naturally ventilated greenhouse; about 10% (LAI=1.0) and about 25% (LAI=3.5) in the fan ventilated greenhouse.