

良品多収のための環境管理基準の設定に関する研究（第3報）

低日射期におけるビニールハウス内の炭酸ガス環境と トマトの光合成について

久 富 時 男 ・ 森 岡 和 之

A study on the standardization of the Environmental Control for Increasing the Fruit Production of Vinyl House Crops. 3.

The carbon dioxide environment in a vinyl house and photo- synthesis of tomato during low light intensity.

Tokio HISATOMI and Kazuyuki MORIOKA.

緒 言

施設栽培におけるトマトは、その生育ステージのいずれかの段階が低温で日射量の少ない期間に遭遇しているため施設の構造はできるだけ保温力を増すため気密性を高めるように努力がはらわれている。

一方、低日射期間は昼間の施設内の温度は栽培適温以上になる時間が短く、換気のコストが少ない。したがって、施設の密閉時間が長いのでトマトの幼小時を除いては日中の炭酸ガス濃度の低下が予想される。密閉された施設内の炭酸ガス濃度は作物の繁茂度や光合成能力、日射量、土壌からの発生量、施設の換気率などで異なるが換気をしていても大気濃度より低い濃度で経過していることが認められている。

トマトの栽培施設内の炭酸ガス濃度の経時変化について矢吹¹⁵⁾、伊東⁶⁾は晴天日であれば、いずれも70~80ppmという極めて低い濃度を報告している。しかし、低日射期、長期間にわたっての炭酸ガス濃度を測定した例はない。

本調査は、低日射期における施設トマトの増収と品質向上を計るための炭酸ガス環境の改善及び日射量を基準にした複合制御の基礎的な知見を得るためおこなった。

まず、低日射期の炭酸ガス環境実態を知るために12月~3月の3か月間にわたり、トマトの生育量が最大に達した時、群落状態での炭酸ガス濃度の日変化を日射量との関連で測定し同時に施設内土壌からの炭酸ガス発生量を調べた。次に、群落状態におけるトマト個体の光合成の日変化を日射量の多少および炭酸ガス濃度別に調べ、ト

マトの炭酸ガス補償点も調べ光合成の実態を明らかにしようとした。

I. トマト栽培施設内の炭酸ガス濃度の消長

材料及び方法

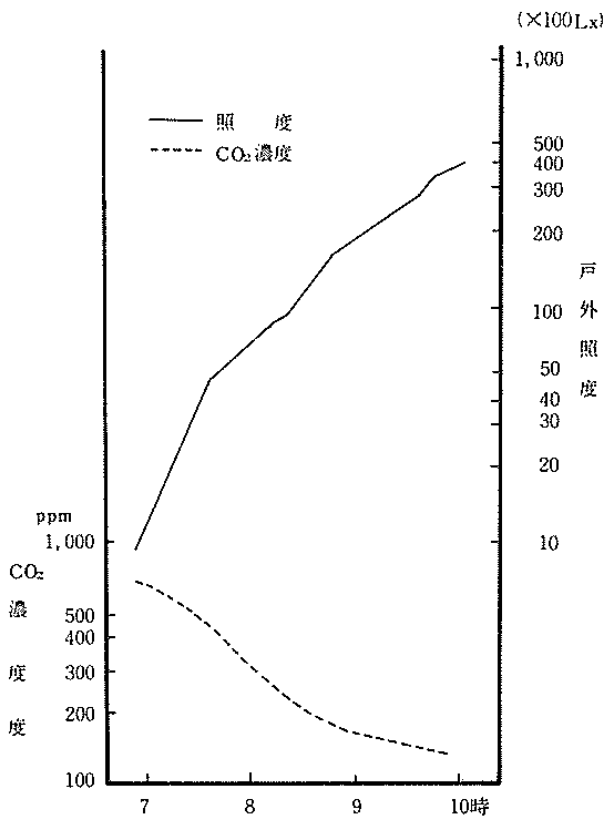
1974年12月上旬から1975年2月下旬までの3か月間、南北棟で間口7.5m、奥行20m、面積150m²、内容積450m³のビニールハウスに換気率80回/hの強制換気装置をつけ換気開始温度を26℃~27℃に設定した。

トマトの栽培は7月10日播きの長期栽培および9月19日播きの促成栽培で共にLAIが2.3~2.5前後で生育している状態で測定した。

炭酸ガス濃度の測定は赤外線ガス分析計（日立掘場、ASS-2.0~600.0~3,000ppm）を用い、草丈1.8m前後の群落内の畦間部の地上1.0~1.5m付近に配したプラスチック管により0.4ℓ/min採取した。照度は東芝SPI-7型を用いレコーダーにより記録した。日射量は農試電試型日射計（SRI-525）、温度はNi抵抗を用いて測定した。密閉したビニールハウスの換気率は外風0.7~3.5m/secの範囲内で0.6~1.3回/hであった。

調査結果及び考察

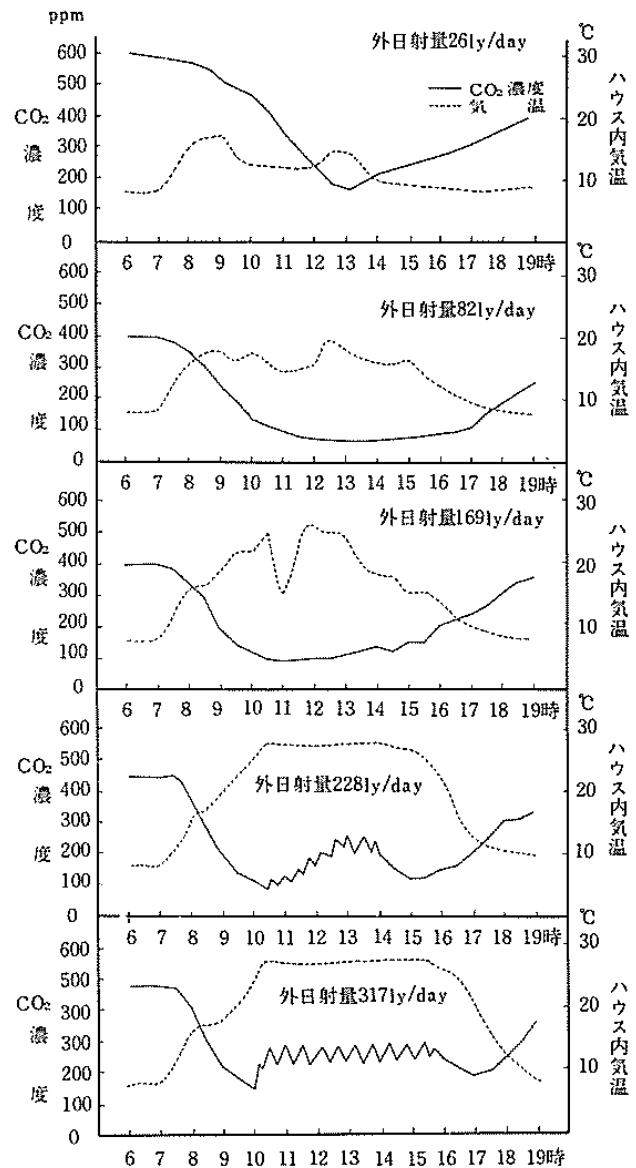
早朝の戸外照度とトマト施設内の炭酸ガス濃度低下をみると、早朝の日の出前は500~600ppmの濃度が維持されているが、戸外照度が1,500lx程度より炭酸ガス濃度が



第1図 早朝における外照度とトマト施設内のCO₂濃度の経時変化

低下し始め、晴天であれば約1時間後、照度が1万lx前後で大気濃度の300ppmまで下り、それ以後はさらに炭酸ガス濃度の低下は継続する(第1図)。

次に強制換気ハウスにおける1日の日射量別にトマト施設内の炭酸ガス濃度変化を示したのが第2図である。1日の日射量が50ly以下の日は、施設内の気温は20℃以上にならないため換気扇の作動は全くないが、炭酸ガス濃度低下も緩慢で200ppm以下に低下することは少ない。50~100ly/dayの天気の日も20~25℃前後の時間帯が少なく換気はほとんどなく、早朝の1~2時間を除いては1日中200ppm以下で100ppmまで低下する。100~150



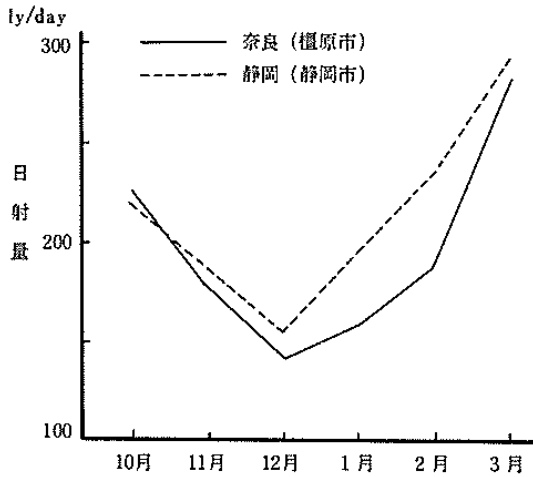
第2図 日射量別トマト栽培施設内の気温とCO₂濃度経時変化

ly/day前後の日も施設内は25℃以上になる時間は短く、50~100ly/dayの日と同様に低い炭酸ガス濃度の状態が1日中継続する。150~250ly/dayの日は25℃以上になる

第1表 日射量(天候)別にみた施設内の1日の炭酸ガス濃度の状態

天候	日射量ly/day	ハウス内気温	換気	ハウス内における1日の炭酸ガス濃度の状態
雨天	49以下	20℃以下	なし	200ppm以下にならずほぼ250ppm以上を保っている
曇>雨天	50~99	20℃以下	なし	6~7時間は200ppmになり4~5時間は100ppm以下になる
曇>晴	100~149	25℃以上少ない	少ない	50~99ly/dayの日とほぼ同じ、外気時々入り一時的に濃度があがる
晴>曇	150~199	25℃以上少ない	時々	6~7時間は200ppm以下になり2~3時間は100ppmになる
晴	200~249	25℃以上多い	や、多い	早朝の換気までの時間以外はほぼ250ppmの濃度を保っている
快晴	250以上	25℃以上多い	多い	ほぼ230~280ppmを保っている

時間帯がかなり長く換気扇も1日数回から十数回前後作動するが、早朝1時間程度を除いては200ppm以下になる時間が長く100ppmまで下る時間帯がある。250ly/day以上の日は換気時間が長く午前中の一部と午後の後半は200ppm以下になるが換気による外気の導入でほぼ250ppm前後の濃度は維持している。この日射量と炭酸ガス濃度との関係を示したのが第1表である。



第3図 奈良、静岡の月別日平均日射量 (1972年10月～1975年3月3か年平均)

間の10月～3月の低日射期における月別日平均日射量を比較したものである。年度により多少の差があるが静岡市の方が12月は9%、1月、2月は20～23%多く10月、11月、3月は差がなく両地域において大きな差はみられない。したがって、施設園芸地帯の多くはこのような炭酸ガス環境条件下にあることが推察される。

第2表は柎原市において、1972年～1977年の5か年間の11月～3月の5か月間の1日の日射量を測定し、日射量を50ly/dayづつに区分した日数である。この日射区分別日数と前述の日射量と炭酸ガス濃度との関係から11月～3月の期間中の25%を占める250ly/day以上の日は換気前の午前8時30分頃から10時までの時間は300ppm以下になるがそれ以外は換気による外気の導入で極端な炭酸ガス濃度低下はなく、また、50ly/day以下の約8%の日は光が少なく炭酸ガス飢餓現象はない。しかし、5か月150日のうち残りの65%の約100日は午前8時30分～9時頃より5～7時間は300ppm以下になり、このうち、4～5時間は200ppm以下、100ppmまで低下する時間帯もあり著しい炭酸ガス飢餓状態にあることが判明した。なお、昼間におけるこの栽培施設内の土壌からの炭酸ガス発生量は約250～300mg/m²/h前後であった。

II. 施設栽培土壌からの炭酸ガス発生量

土壌からの炭酸ガス発生量は、有機資材の施用量と施

第2表 5か年間 (1972年～1977年) の月別日射区分別日数

		49ly/day 以下	50～99 ly/day	100～149 ly/day	150～199 ly/day	200～249 ly/day	250～299 ly/day	300ly/day 以上	合計
11月	5か年平均日数	2.4 ^日	4.2	4.0	5.4	7.0	5.6	1.4	30
	同比率	8.0%	14.0	13.3	18.0	23.3	18.7	4.7	100
12月	5か年平均日数	3.6	4.2	7.4	7.4	7.8	0.3	0.3	31
	同比率	11.7	13.6	24.0	24.0	25.3	0.7	0.7	100
1月	5か年平均日数	1.6	4.2	6.6	8.0	7.2	3.2	0.2	31
	同比率	5.2	13.6	21.3	25.8	23.2	10.3	0.6	100
2月	5か年平均日数	3.2	3.0	2.8	3.8	6.6	3.8	5.0	28.2
	同比率	11.3	10.6	9.9	13.5	23.5	13.5	17.7	100
3月	5か年平均日数	1.4	2.2	2.8	1.4	5.2	3.6	14.4	31
	同比率	4.5	7.1	9.0	4.5	16.8	11.6	46.5	100
11～3月	合計	12.2	17.8	23.6	26.0	33.8	16.4	21.2	151
	同比率	8.1	11.8	15.6	17.2	22.4	10.9	14.0	100

第3図はこの調査をした柎原市 (奈良農試) と施設園芸地帯で冬期比較的、日射量が多いとみられる静岡市 (静岡農試) における1972年10月～1975年3月までの3か年

用後の日数、地温、土壌水分などにより大幅に変動する。増井⁹⁾や安田¹⁰⁾はメロン温室でベッドの敷わらからの炭酸ガス発生量を測定している。

本調査は標準的なトマト栽培の土壌からの炭酸ガス発生量を知り、施設内の炭酸ガス環境にどの程度影響しているかをみたものである。

材料及び方法

1974年11月中旬に10a 当たり2トンの生わらを施用してトマトを栽培し、4か月後の3月18日～23日の期間に測定した。

測定は直径70cm、高さ120cm、内容積385ℓの塩化ビニール製のチェンバーの下部10cmを施設内の栽培土壌中に埋設し、完全閉鎖回路を作り赤外線ガス分析計 (ASS-20～3,000ppm)を用いて測定した。チェンバー内の炭酸ガス濃度は2,000～2,500ppmになると300ppmの大気と交換し、継続して測定した。測定は3か所でおこないその測定値を平均した。

腐植の測定はTyurin法によった。土壌は沖積層壤土である。

結果及び考察

調査圃場からの1日の炭酸ガス発生量は約4.5～5.0g/m²であり、このうち昼間10時間の発生量は全発生量の55～

第3表 施設内土壌からの炭酸ガス発生量

	18時～8時		8時～18時		1日発生量 CO ₂ mg/m ²
	CO ₂ mg/m ²	平均地温	CO ₂ mg/m ²	平均地温	
3月18日～19日	2,206	15.1	3,138	18.7	5,344
3月19日～20日	1,937	16.1	3,138	19.3	5,075
3月20日～21日	1,973	17.1	2,385	19.0	4,358
3月22日～23日	1,902	15.6	2,821	18.9	4,723

腐植含量：2.3%

60%と夜間の14時間より多かった。これは昼間の方が地温が2～3℃高いことによるものと考えられる(第3表)。

土壌からの炭酸ガスの発生量は有機資材の施用量によって大きく変動し、増井ら⁹⁾はメロン温室で敷わらからの発生により8,000～10,000ppmの炭酸ガス濃度を測定しており、安田¹⁰⁾は1作(3か月)、1m²当たり11kgの稲わらを入れたメロン温室で1,250mg/m²/h、有機資材を入れない金網ベッドでも340mg/m²/hの炭酸ガスを定量している。この1,250mg/m²/hは1日の発生量にすると30g/m²となり、本調査の数倍の発生となるが、このように多くの発生量があっても光合成は日中の限られた時間帯のみであるため炭酸ガス不足をきたすとしている。

屋外と空気の入れ替えの少ない施設内の炭酸ガス環境について内島^{13,14)}は温度やグロースチェンバー内の炭酸ガス濃度に対する光強度、換気率、植被の繁茂度などを近似的に考慮して、グロースチェンバーの炭酸ガス収支式をあらわしておりグロースチェンバー内の平衡炭酸ガス濃度は主として作物の全葉面積、換気量と群落の総光合成量によって変化し、グロースチェンバーへの炭酸ガス供給量としては作物の呼吸や土壌からの放出量は非常に少なく、ほとんど換気量に支配されており、水稻の実験例から自然条件下の少なくとも90%の光合成速度をグロースチェンバー内で維持するためには単位葉面積当たりの換気量は約1,500ml/cm²/hが必要であるとしている。この量を葉面積指数2.5のトマトハウスに適用するとハウスの換気率は約15回/hとなる。

一方、自然換気が全くない気密ハウスを仮定すれば、ハウス内への炭酸ガス供給は土壌からの発生量のみとなる。本調査の炭酸ガス発生量である5g/m²/dayだけが作物の光合成にどれほど寄与するかをみると、いま、トマトの光合成速度を10 CO₂mg/dm²/hとすると、葉面積指数が約0.2の群落の炭酸ガス要求量を充足させることができる。この栽培時期は一般に10a当たり4,000本前後の栽植本数があるため、これを1個体の葉面積に換算すると500cm²となる。これは本葉が8～9枚、第1花房開花前のもので定植当時の生育ステージでも土壌からの発生量では賄いきれない。なお、繁茂が最大に達した標準的な群落では必要量の8%の供給量にとどまることになる。

Ⅲ トマトの炭酸ガス補償点

換気速度の小さい密閉施設における日中の炭酸ガス濃度低下は著しく、これが光合成速度を低下させ、さらに炭酸ガス濃度が低下すると光合成と呼吸が平衡になる炭酸ガス補償点に達する。トマトの炭酸ガス補償点について伊東⁷⁾は40～60ppmの範囲にあるとしており新井ら²⁾は30Klx、25℃下で40ppmを報告している。

本調査はこれらより生育の進んだ第4花房開花期、葉面積が5,000～6,000cm²の1株全体の炭酸ガス補償点を調べた。

材料及び方法

1974年9月18日に播種した強力日光1号の第4花房開花期の株全体を、1975年3月2日～5日に直径70cm、高さ120cm、上部が円錐型で厚さ3mmの塩化ビニール製のチェンバーに入れ、土壌からの発生量を測定したのと同

じ完全閉鎖回路を作り赤外線ガス分析計（ASS-2 0～600ppm）で測定した。測定は自然条件の光のもとで行なった。日射量の測定はチェンパー内は太陽電池（S. P. D）によって測定した。

結果及び考察

測定個体は第4花房開花期で葉数は25枚前後あり新葉や老熟葉が混在し、下葉は自己遮蔽により光の不均一があり栽培の実態に近いものであった。この状態における炭酸ガス補償点は光の強さによって異なり日射量が0.33

第4表 炭酸ガス補償点

	日射量ly/min	温度℃	補償点ppm
3月2日（9時00分）	0.33	26.0	60
3月3日（9時00分）	0.33	29.0	50
3月4日（10時40分）	0.27	30～31.0	75
3月5日（10時30分）	0.25	29.0	105

/ly/min で50～60ppm、0.25～0.27ly/minで75～105ppmで伊東⁷⁾の測定値とほぼ一致した（第4表）。

炭酸ガス補償点は光強度によって変り新井ら²⁾は一般に照度が低下すると炭酸ガス補償点は上昇する傾向がみられ、トマト、ピーマンでは10Klx以下になると急上昇することを報告している。また、炭酸ガス補償点は温度の上昇に伴い上昇することが認められている。

本調査においても光が弱くなるに従い炭酸ガス補償点は上昇する傾向がみられ、幼植物より生育の進んだものは老化葉があり、受光条件も悪くなることから炭酸ガス補償点は上昇するものと考えられる。

炭酸ガス濃度と光合成速度との関係について、伊東⁷⁾は炭酸ガス濃度が70～300ppmの範囲で光度を変えて、トマトの単葉における光合成速度を測定し、いずれの光度でも炭酸ガス濃度の低下に伴い光合成速度は直線的に低下し80ppmでは300ppmの時の35%に低下したとしており新井ら²⁾は炭酸ガス濃度100ppmにおける光合成速度を300ppmに対する比率で示すと40%弱になることを報告している。

以上の結果と前述の施設内の炭酸ガス濃度の日変化から判断すると、炭酸ガス補償点近くまで濃度が低下していることが認められ、著しい光合成の低下がおこっていることが説明できる。

Ⅳ 低日射期におけるトマト個体の光合成

日射量が少ない期間のトマト栽培施設内の室温は生育適温以上になることが少なく密閉時間が長い。このため炭酸ガス濃度低下が著しく、炭酸ガス補償点近くまで低下していることが認められた。作物の光合成は光条件に恵まれた孤立個体とか生育初期の群落では葉面積当たりの光合成速度と葉面積の積でとらえることができるが生育が進んだり、栽植密度の高い群落では葉面積が増大し、相互遮蔽と弱光条件により受光態勢が極めて悪くなり、光合成速度を制限していることが予想される。

野菜の光合成に関する研究で同化箱法により単葉や幼植物を用いて測定したものは多くあり^{7,8,11,12)}種類別の同化特性や光、温度、風速、炭酸ガス濃度等の環境要因や体内要因と光合成との関係について多くの知見が得られている。また、栽培環境下での大きな個体について鴨田⁸⁾の研究があるが光合成量の不足が特に問題になる低日射期において、施設栽培下での測定例はない。

本実験は第3～4花房開花期の個体（葉面積5,000～6,000cm²）について、実際の施設栽培トマトが遭遇している低日射条件下において、炭酸ガス濃度別の光合成の日変化を長期間、群落状態で調査し光合成の実態を知ろうとした。

材料及び方法

光合成測定装置の概要：本実験における光合成測定装置を第4図に示した。本装置は作物を被覆するチェンパーとこれに通気および流量測定をおこなう部分、被検ガスの測定部分からなる。

チェンパーの材質は厚さ3mmの透明塩化ビニールで直径70cm、高さ120cmの円筒形で上部30cmは円錐形にした。この材質の光透過率は約85%で同じ厚さのガラスとほぼ同じであった。

通風装置と流量測定装置：外気はチェンパー最下部の全円周部から吸入され、吸引はチェンパー最上部、植物体の草冠部からとりチェンパー内のファンにより内部空気を攪拌した。

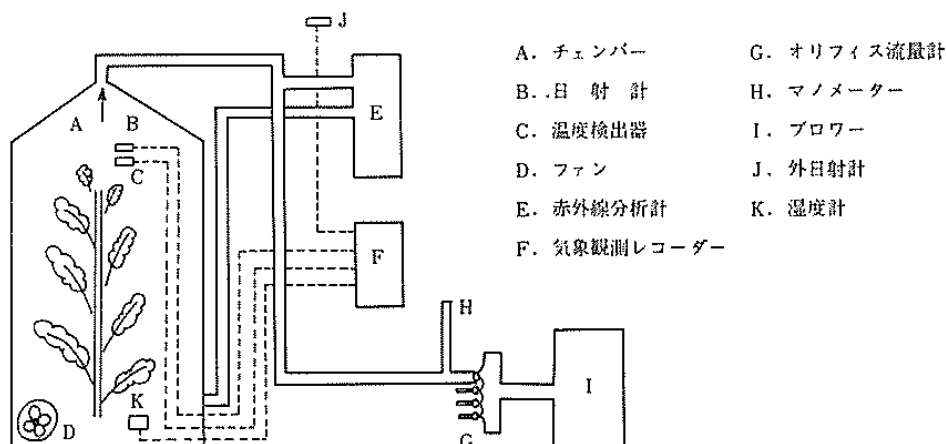
通気装置は大型掃除器を用い、出入口における炭酸ガス濃度差を最高光合成速度時に15%以内にとどめるため毎分100ℓの通気をおこなった。

通気量はオリフィス差圧式流量計で規制した。

光合成の測定は赤外線ガス分析計（日立堀場ASS-2 0～600ppm）により通気出入口の炭酸ガス濃度を計測し出入口の差に通気量を乗じて求めた。

算出は次式によった。

$$P = \sum (C_i - C_o) Q$$



第4図 光合成測定装置

ここではPは1株当たり、1時間当たりのみかけの光合成量 ($\text{CO}_2 \text{ mg / 株} \cdot \text{h}$)、 Co 、 Ci 通気出入口の CO_2 濃度 (mg/m^3)、Q 通気量 (m^3/h)、光合成速度 ($\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$) は上式で求めた値を葉面積 (dm^2) で除し、1時間当たりの値として表示した。

日射量の測定はチェンバー内はシリコン太陽電池 (S. P. D) 露地は農試電試型日射計 (SRI-525) により、チェンバー内の気温、湿度 (通風型)、立体照度も測定した。

供試個体および測定方法：品種、強力日光1号を1973年9月18日播種、第3~4花房開花期、葉面積5,000~6,000 cm^2 /株の個体を用い、測定期間中の土壌水分は $\text{pF} 2.2$ 以下に保った。

測定は栽培施設内の群落状態の中にチェンバーを設置し自然光で測定した。なお、チェンバー内の日射量は屋外の約65%となった。測定期間および時間は1974年1月23日から2月23日の期間中の20日間、午前8時より17時までの9時間連続で測定した。炭酸ガス濃度の調節にはプロパンガス燃焼による Jonson CO_2 generator を使用した。

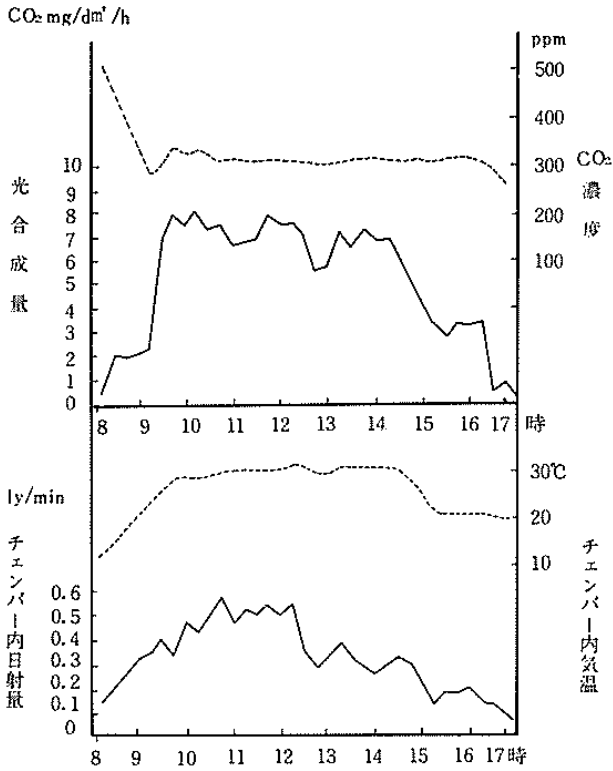
結 果

1月~2月における屋外の平均日射量は180 ly/day 前後でありビニールハウス内はこれより25~30%減少し、その中のチェンバー内は屋外の65%前後となった。第3~4花房開花期で葉面積が5,000~6,000 cm^2 の個体の葉面積指数は2.2~2.6になり、この状態で生育している施設内の炭酸ガス濃度は換気が少なく200ppm以下に低下している時間が長く、100ppm前後まで低下することがある。

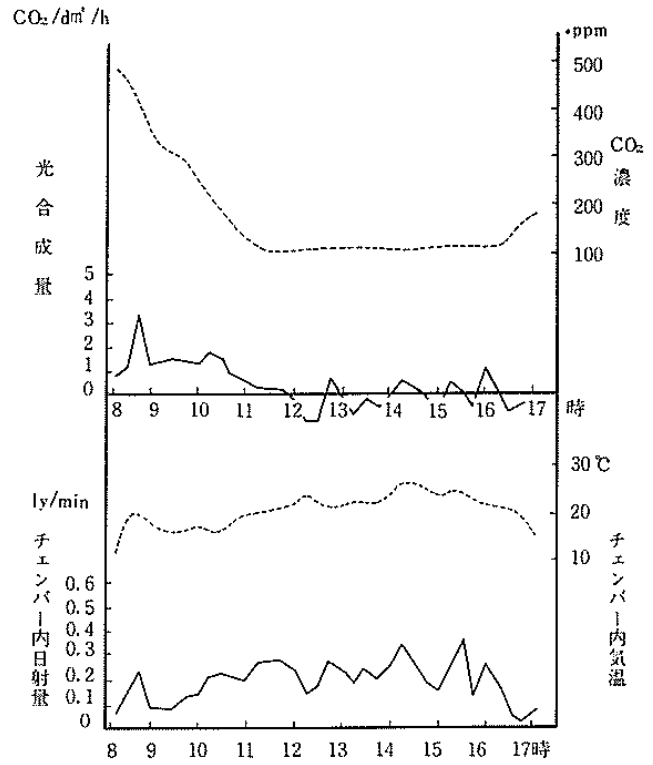
群落状態におけるトマト個体の光合成の日変化は日射と並行関係にあり、日射強度により大きく変動した。屋

外の日射量が200~300 ly/day の範囲の晴天日で強制換気時間が長く、炭酸ガス濃度が250~300ppmの範囲に保たれば、個体の1日、平均の光合成速度は4.8~5.5 $\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$ 、光合成速度の最大値は7~8 $\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$ となり、1日、1株当たりの CO_2 吸収量は2.5~3.0g となった。屋外日射量が200 ly/day 前後では、1日平均の光合成速度は3.0 $\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$ 、光合成速度の最大値は5~6 $\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$ 、1日、1株当たりの CO_2 吸収量は1.5g 前後であった。屋外日射量が150~200 ly/day で施設の室温上昇が少なく、ほとんど密閉状態であると炭酸ガス濃度は100ppmにまで低下する。炭酸ガス濃度が200ppm以下になると日射量が0.3 ly/min 程度あっても光合成速度は低下し始め150~100ppmではみかけの光合成はほとんどなく、この低炭酸ガス濃度下で日射量が0.2 ly/min 以下になるとみかけの光合成はゼロとなった。このような低日射量、施設の密閉による炭酸ガス濃度低下という条件下では、早朝の炭酸ガス濃度の高い時間帯における光合成速度の最大値は3~4 $\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$ と比較的高いが1日、1株当たりの CO_2 吸収量は CO_2 濃度条件の良い日の10%弱となった (第5~9図)。また、第10図は換気前の低炭酸ガス濃度の条件では日射強度が低下しなくても光合成速度は著しく低下するが、この時点で強制換気により外気を導入すると光合成速度が急激に上昇することを示している。

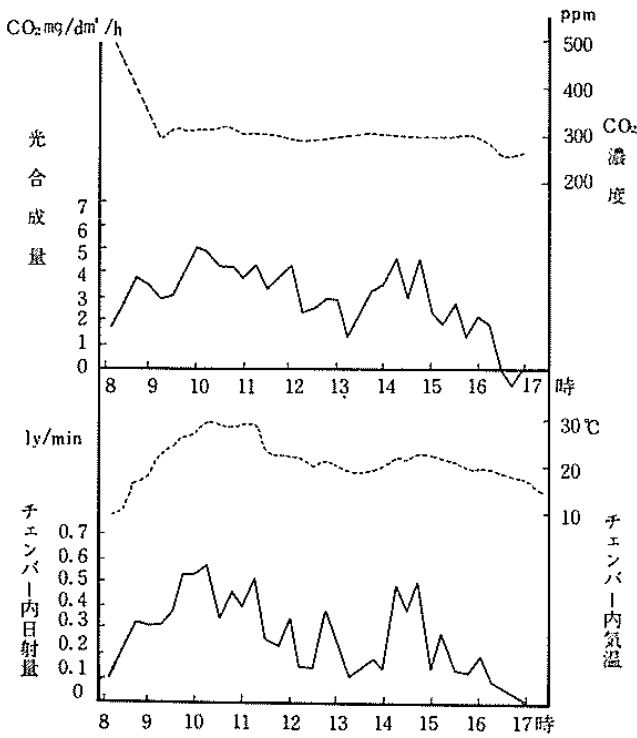
次に炭酸ガス濃度を常時400~500ppmに維持すると日射量が200~250 ly/day の日で光合成速度の最大値は12~13 $\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$ 、1日平均の光合成速度6~7 $\text{CO}_2 \text{ mg/dm}^2/\text{h}$ 、1日、1株当たりの CO_2 吸収量も3.0g以上となった。1日の日射量が250 ly/day 以下の日に炭酸ガス施用をすれば無施用の冬の快晴日で日射量が300 ly/day 以上の日よ



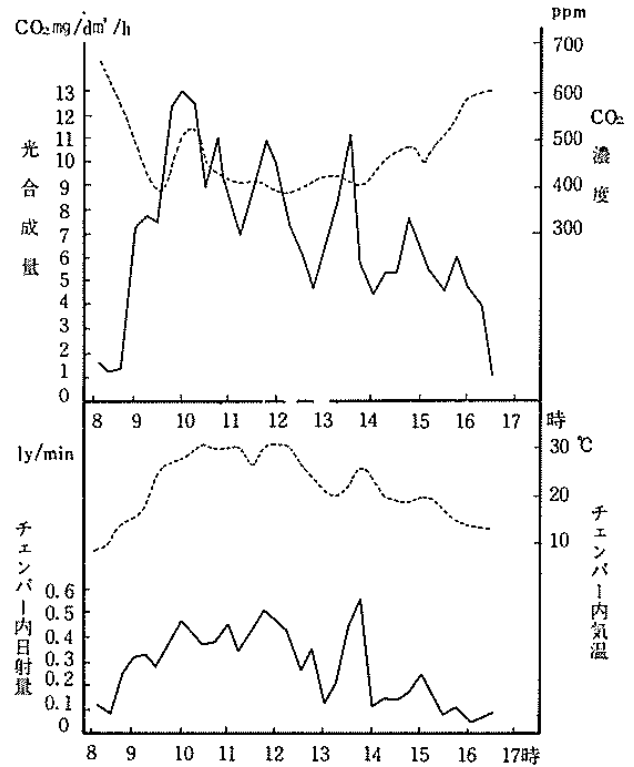
第5図 強制換気下におけるハウス内CO₂濃度とトマトの光合成 (外日射280ly/day)



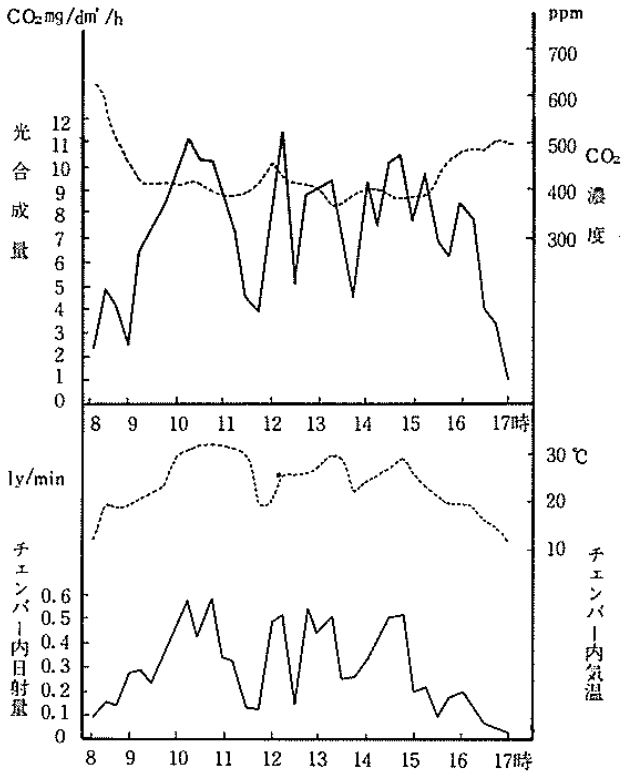
第7図 ハウス閉鎖状態におけるハウス内CO₂濃度とトマトの光合成 (外日射160ly/day)



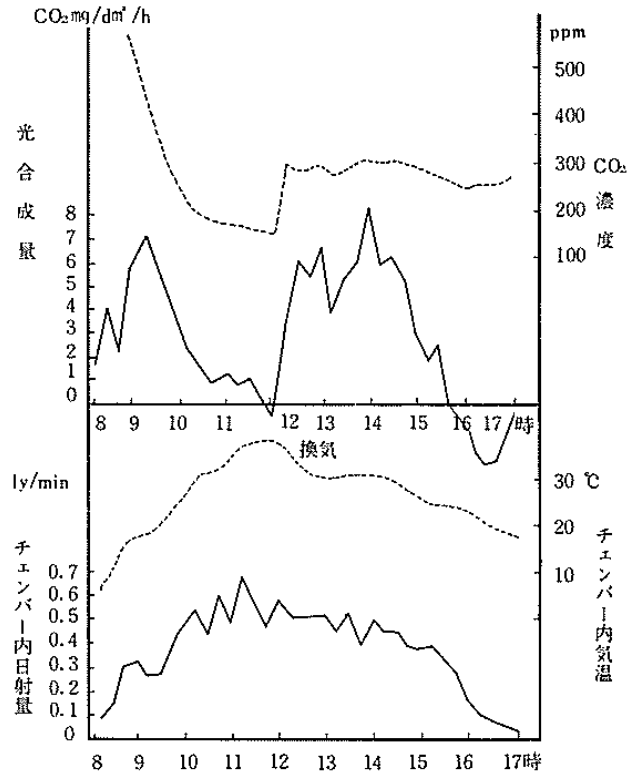
第6図 強制換気下におけるハウス内CO₂濃度とトマトの光合成 (外日射200ly/day)



第8図 CO₂施用した時のトマトの光合成 (外日射220ly/day)



第9図 CO₂施用した時のトマトの光合成 (外日射252ly/day)



第10図 ハウス閉鎖状態におけるハウス内CO₂濃度とトマトの光合成 (外日射285ly/day)

第5表 CO₂濃度の状態とトマト個体の1日の光合成

	日射量ly/day		ハウス内CO ₂ 濃度ppm			湿度%	同化量CO ₂ mg/dm ² /h			換気時間 CO ₂ 施用法
	露地	チェンバー内	1日平均	最高	最低		1日平均	最高	CO ₂ mg/株/day	
ハウス開放 (強制換気)	171	112	261	450	213	86 ~ 92	2.86	6.3	1,332	9.30分換気
	200	138	299	487	247	85 ~ 95	2.88	5.0	1,434	9.07分
	280	178	328	512	267	75 ~ 90	4.82	8.2	2,560	9.25分
	322	200	319	431	266	70 ~ 90	5.65	7.9	3,000	9.03分
ハウス密閉	190	125	210	428	155	87 ~ 96	0.57	4.3	268	—
	160	102	179	496	106	92 ~ 95	0.37	3.3	186	—
CO ₂ 施用	149	89	403	827	307	81 ~ 94	3.89	12.0	1,810	早朝1回
	220	139	478	700	381	85 ~ 95	6.54	13.0	3,036	連続施用
	252	155	433	639	356	86 ~ 92	7.19	11.6	3,338	〃

り1日のCO₂吸収量は多くなった。なお、50ly/day以下の曇雨天日は光合成速度も1.0 CO₂mg/dm²/h以下となり、このような条件下では炭酸ガス濃度を高めても光合成におよぼす影響は極めて少なかった。

1月～2月の低日射期間においてはトマト個体の光合

成は夕刻を除いては午前中と午後との間に差は認められず主に日射強度と炭酸ガス濃度により光合成は規制された。なお、光合成を測定したのと同じ生育ステージの個体の1月下旬～2月下旬の30日間における地上部乾物重の増加は40～45g/株であった。

考 察

本実験は葉面積が5,000~6,000 m^2 あるトマト個体の光合成を圃場において通気法で長時間にわたり測定したものである。同化箱法による測定は箱内の植物体の炭酸ガス吸収によって低下する炭酸ガス濃度を測るもので濃度差を大きくする方が測定精度は上ってくるが、同化箱内の炭酸ガスの低下は光合成速度を低下させることにより実態より低い値を示すことになる。したがって、チェンバー内の出入口の炭酸ガス濃度差は分析計の精度と読取り誤差がない範囲の15%以内で流量を調節した。この流量は被検トマトの単位葉面積当たりの流量 ($\ell/\text{cm}^2/\text{h}$) は $1\ell/\text{cm}^2/\text{h}$ でイネ¹⁰⁾の場合や、Gaastra³⁾や伊東⁷⁾のトマトの場合と同程度であり、巽¹¹⁾や鴨田⁸⁾らのトマト・キュウリの2~9 ℓ に比べて少ないが弱光時、大きな個体を用いる時はこれ以上の流量は炭酸ガス濃度差が小さくなり読取りが困難で測定できない。なお、時間遅れをなくするため集気ビンにより調節した。

トマトの光合成速度について巽¹¹⁾は4葉期の生育ステージの個体について光合成速度の最大値は $31.7\text{CO}_2\text{mg}/\text{dm}^2/\text{h}$ 、鴨田⁸⁾は第3花房着果期の個体で最大値を示す光合成速度は $20\sim 27\text{CO}_2\text{mg}/\text{dm}^2/\text{h}$ 程度であると報告している。これらに比べて本実験の炭酸ガス濃度が300ppmの場合の光合成速度の最大値は $7\sim 8\text{CO}_2\text{mg}/\text{dm}^2/\text{h}$ と非常に低い値であるが、巽¹¹⁾の場合はトマトの飽和照度である 70Klx の光条件下の値であり鴨田⁸⁾の場合は6月上旬で日射量が $1.01\text{ly}/\text{min}$ (約 75Klx)以上の条件下であり、鴨田⁸⁾の同じ実験で9月下旬~10月上旬の測定では晴天日の光合成速度の最大値は $20\text{CO}_2\text{mg}/\text{dm}^2/\text{h}$ 程度であるが曇雨天で日射量が晴天日の $\frac{1}{2}$ である $0.51\text{ly}/\text{min}$ になると光合成速度は $10\text{CO}_2\text{mg}/\text{dm}^2/\text{h}$ と晴天日の $\frac{1}{2}$ になることを報告している。本実験の測定期間である1月~2月の日射量は晴天日でも $0.51\text{ly}/\text{min}$ 以下であり、この期間の光合成速度は非常に低い値を示すものと考えられる。

次に測定個体は葉数が22~23枚あり老葉、幼葉が混在するとともに葉面積指数が2.2~2.6という群落状態で単葉や幼植物の場合に比べ他の株との相互遮蔽や自己遮蔽が大きいことが考えられる。一般に生育の進んだ群落では葉面積が増大し相互遮蔽がおこるので受光態勢が光合成の規定因子となり群落に投射された光は下方で減少するため下葉の受光率は著しく低下し、株全体の葉面に受ける光の平均値は草冠部が受ける光より非常に少ないことが認められている。したがって、本実験の光合成速度が

全般に低い値を示したのは日射量が少なく群落内で各個体の全葉が受ける単位面積当たりの光の平均値は単葉や幼植物に比べると極めて少ないことに起因するものと考えられる。また、環境のvarietyやすい低日射期においては矢吹¹⁶⁾は光、温度、湿度、炭酸ガス濃度の急変は気孔開度に振動がおこり光合成量の過渡現象をおこす原因になりこの過渡現象は平均光合成量の低下を招き環境が急変する自然条件下ではこの現象は常態とも考えられると報告している。この過渡現象も光合成量の低下をもたらす1つの原因になることが考えられる。

実際栽培の施設内の日中の炭酸ガス濃度は大気濃度より低下している時間が長い。この低炭酸ガス濃度下での光合成速度について伊東⁷⁾は300ppmから炭酸ガス補償点まで濃度が低下するに従い光合成速度はほぼ直線的に低下し、光が強いほどこの低下率は大きく、単葉において100ppmまで低下すると日射量が $0.16\text{ly}/\text{min}$ でも300ppm時との対比で25%に低下することを報告している。本測定でも炭酸ガス濃度が100ppmまで低下すると日射量が $0.2\text{ly}/\text{min}$ 程度あってもみかけの光合成はゼロとなった。この結果からみて群落状態における個体は単葉や幼植物の場合より受光条件が悪くなるため炭酸ガス濃度低下による光合成量の低下がより強くあらわれたものと判断される。このため低温期の実験栽培のトマト個体は炭酸ガス濃度低下によりその光合成量は非常に少ないことがわかる。

炭酸ガス濃度と光の強さの間には相互補償作用があることが認められており^{3,4,5)}炭酸ガス濃度の上昇に伴ない光飽和点が増加するとともに、光飽和点下では炭酸ガス濃度が上昇すると光合成速度も増大することが認められている。本実験においても日射量が $250\text{ly}/\text{day}$ の日に炭酸ガス濃度を400~500ppmに高めたときの光合成は、300ppmで日射量が $300\text{ly}/\text{day}$ の日の値を上まわり、日射量の不足分を炭酸ガス濃度を高めることで補う結果となった。トマトの炭酸ガス濃度と日射量との関係について伊東⁷⁾は炭酸ガス濃度を高めるほど光飽和点が増加し日射強度別に炭酸ガス濃度を変えると、日射が $0.041\text{ly}/\text{min}$ (約 $3,000\text{lx}$)以上あれば炭酸ガス濃度を高めることによって光合成速度が増加することを認めている。したがって、日射量の低下が光合成の制限要因となっている時は炭酸ガス濃度を高めることにより光合成量を増やすことが可能であるが本実験では日射量が $0.11\text{ly}/\text{min}$ 以下の曇雨天日では炭酸ガス濃度を高めても光合成速度の増加は極めて少なく、実用的にはこの程度の日射量では炭酸ガス施用の効果は少ないと判断される。

自然条件下で測定したトマト個体の光合成の日変化の

基本パターンは朝夕が少なく日中が多い正規曲線型に属している。炭酸ガス濃度が安定していても雲の去来が多く日射強度の変化の激しい日はこの変化に応じて光合成は激しく変化した。一方、日射量が0.1ly/min以上で安定していても炭酸ガス濃度の変化により光合成速度は大きく変化することが知られた。この結果から低日射期間のトマトの光合成を規制するのは日射強度と炭酸ガス濃度が極めて大きな要因であることがわかる。

一般に光合成の日変化は午前と午後が等しい日射量であれば午前中の光合成量が午後のそれより多いことが知られている。これは、日中、一時的な気孔開度の減少や葉内水分の減少、光合成産物の蓄積等が原因であるとされている。しかしながら、本実験ではこのような傾向は認められず、日射強度や炭酸ガス濃度変化により午前中より午後の方が光合成量が多い場合も認められた。この結果は日射量の不足や炭酸ガス不足によって光合成能力が充分発揮されていない場合は夕刻時を除いて日射量や炭酸ガス環境条件が良くなれば、どの時間帯でも光合成速度は増大するものと推察される。

以上、低日射期間におけるトマト栽培施設内の環境状態をみると日射量の不足と施設内の熱エネルギー損失を押えるための換気不足が原因で炭酸ガス不足を招き、トマト個体は著しい光合成量の低下に陥っていることが明らかになった。

摘 要

1. トマト栽培施設内の炭酸ガス環境

低日射期間におけるトマト栽培施設内における炭酸ガス不足の状態を知るために赤外線ガス分析計を使って長期にわたって炭酸ガス濃度の測定をおこなった。

低日射期の日中は保温のため施設の密閉状態が続き、このような密閉状態にある実用栽培施設内におけるトマト群落内の炭酸ガス濃度は晴れた日は1日中、200~100ppmの濃度の時間の長いことが観測された。このような低炭酸ガス濃度はトマトの光合成を著しく押えているものと考えられる。

2. 土壌からの炭酸ガス発生量

トマト栽培施設内土壌からの炭酸ガス発生量は夜間より昼間の方が多く、1日の発生量は5g/m²であった。

3. トマトの炭酸ガス補償点

トマトの炭酸ガス補償点は光の強さによって異なるが0.33ly/minで50~60ppm、0.25~0.27ly/minで75~105ppmであった。

4. 低日射期における施設内のトマト個体の光合成

この実験は1月~2月の期間に実用栽培ハウス内におけるトマト個体の光合成の実態を知るために自然光下で同化箱法により測定した。

光合成速度の日変化は日射量と並行関係にあり、日射強度と炭酸ガス濃度により大きく変動した。炭酸ガス濃度とトマト個体の光合成との関係を知るため100~500ppmの炭酸ガス濃度の範囲で測定した。

日射量が300ly/dayの状態では炭酸ガス濃度を300ppmに保てば光合成速度の最大値は7~8CO₂mg/dm²/h、1日平均の光合成速度は4.8~5.5CO₂mg/dm²/hとなった。炭酸ガス濃度が200ppmまで低下すると日射量が0.3ly/minあっても光合成速度は低下し始め、さらに100ppm前後まで低下すると0.2ly/minの日射量があっても光合成速度はゼロとなった。これに対して炭酸ガス濃度を500~600ppmまで高めると光合成速度の最大値は12~13CO₂mg/dm²/hとなった。しかし、日射量が50ly/day以下の曇り日は炭酸ガス濃度を高めても光合成速度を高める効果は少なかった。

日射量が制限因子となって光合成の潜在能力が充分発揮されていない時は夕刻を除いて午前と午後との間に光合成速度の差は認められなかった。

引用文献

- AKITA, S., A. MIYASAKA and Y. MURATA 1969. Studies on the differences of photosynthesis among species.
 - Differences in the response of photosynthesis among species in normal oxygen concentration as influenced by some environmental factors. Proc. Crop. Sci. Soc. Japan, 38:507-524.
- 新井和夫・高橋和彦・木下耕一 1976. 光合成と物質生産に関する研究. 低CO₂濃度条件下における果菜類の光合成とCO₂補償点. 昭和50年度野菜試栽培部年報3:55-57.
- GAASTRA, P. 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. Mended. Landb Hoogeschool Wageningen. 59:13:1-68.
- HOPEN, H. J. and S. K. RIES 1962. The mutually compensating effect of carbon dioxide concentration and light intensities on the growth of *Cucumis sativus* L. Proc. Amer. Soc. Hort.

- Sci. 81:358-364.
5. 今津正・矢吹万寿・織田弥三郎 1965. フダンソウの生育に対する炭酸ガス濃度と日射の相互補償について. 農業気象. 21. 2:41-46.
 6. 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. 園学雑. 39(2): 87-94.
 7. ——— 1973. 蔬菜の生育・生理におよぼす炭酸ガス環境の影響. 千葉大園学特別報. 7. 1-134.
 8. 鴨田福也・伴義之・志村清 1974. 野菜の光合成及び蒸散に関する研究. I. 光合成・蒸散の作物間差異及び土壌水分との関係. 野菜試報A1. 109-139.
 9. 増井正夫・藤沢敏寛 1972. メロンのわら床からの炭酸ガス発生量. 農及園. 47(2): 371-372.
 10. 村田吉男 1961. 水稻の光合成とその栽培学的意義に関する研究. 農技研報. D9 : 1-169.
 11. 巽 稔・堀 裕 1969. そ菜の光合成に関する研究 I. 光の強さとそ菜幼植物の同化特性. 園試報. A 8 : 127-140.
 12. ——— 1973. 同上. III. トマトおよびキュウリ苗における同化度の日変化. ———A 12 : 101-112.
 13. 内島善兵衛 1965. Growth Chamber 内の微気候. (1) 微気候と換気との関係. 農業気象. 21 : 105-112.
 14. ——— 1966. ———. (2) 室内の炭酸ガス環境. ———. 22 : 65-70.
 15. 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.
 16. ——— 1976. 作物の生育環境と光合成(2) 農及園 51(10) : 1215-1220.
 17. 安田環 1976. メロンハウスのCO₂発生量に関する調査. 野菜試施設栽培年報 1 : 13-14.

Summary

1. Carbon dioxide environment in the greenhouse.

CO₂ concentration in air was measured by infrared gas analyser in order to define the CO₂ depletion in a greenhouse under poor solar radiation.

The greenhouse was closed tightly to prevent cold air from entering it during the cold season. In case of practical culture under the airtight condition, such as in a greenhouse, minimum CO₂ concentration within the tomato canopy on a clear day was about 100-200 ppm. This depletion was observed almost throughout the day, and it means that photosynthesis was strongly suppressed.

2. Soil respiration.

The CO₂ flux from the soil surface in greenhouse in the daytime was higher than that in the nighttime and it was approximately 5 g/cm² a day.

3. Carbon dioxide compensation point for tomato.

CO₂ compensation point for tomato in relation to light intensity was affected by strength of light intensity. It was 50-60 ppm at 0.33 ly/min and 75-100 ppm at 0.25-0.27 ly/min.

4. Photosynthesis of tomato plant community in a greenhouse under poor light intensity.

This investigation was made to know the photosynthesis of tomato plants in actual conditions of greenhouse.

The continuous measurement of photosynthesis of tomato plant under the natural sunlight condition in a greenhouse from sunrise till sunset was made by using the chamber method and an infrared gas analyser from January to February.

The diurnal change in the total photosynthesis of tomato plant fluctuated correspondingly with the variation of light intensity and CO₂ concentration.

In order to investigate photosynthesis, the relationship between CO₂ concentration (from 100 ppm to 500 ppm) and photosynthetic rate was measured under the solar radiation.

In the atmosphere containing 300 ppm of CO₂, the maximum rate of photosynthesis was 7-8

CO₂ mg/dm²/h and the mean rate of it 4.8 — 5.5 CO₂ mg/dm²/h respectively under 300 ly/day of solar radiation.

While the CO₂ concentration fell to 200 ppm, the photosynthetic rate decreased considerably though light intensity was 0.3 ly/min.

In the further depletion, when CO₂ concentration dropped to nearly 100 ppm, the photosynthetic rate diminished to zero, even if light intensity was 0.2 ly/min.

On the other hand, when CO₂ concentration level was enriched up to 500-600 ppm, the maximum photosynthetic rate was 12-13 CO₂ mg/dm²/h, while on a cloudy day below 50 ly/day, supplementary CO₂ concentration treatment did not exhibit any obvious effect on photosynthetic rate.

When solar radiation was the limiting factor of photosynthesis, there was no diurnal fluctuation in the photosynthetic activity from morning to afternoon, except for dusk.