



根圏ガス環境の制御に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2009-08-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 北宅, 善昭 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00009326

根圏ガス環境の制御に関する研究

北 宅 善 昭

Studies on the Control of Gaseous Environment in the Rhizosphere.

Yoshiaki KITAYA

Laboratory of Environmental Control in Agriculture, College of Agriculture

Summary

It has been emphasized that soil aeration is important to promote plant growth, because the decrease in O_2 concentration in the soil inhibits plant root activity. But O_2 concentration in the soil doesn't usually approach the critical value below which plant growth is inhibited. On the other hand, CO_2 concentration in the soil may be more important for plant growth, because it easily increases up to 2 - 3 %.

In this study, the influence of the increase in CO_2 concentration in the rhizosphere on plant growth was investigated. The results made it clear that the increase in CO_2 concentration in the rhizosphere suppressed the photosynthetic rate and plant growth via inhibition of water absorption of the root. In addition, methods to improve the gaseous environment in the rhizosphere in order to promote plant growth are stated in this paper.

The results are summarized as follows:

(1) CO_2 concentration in the soil increased in proportion to the amount of organic matter contained in the soil. It reached 3 % in sand containing 2.5% compost (based on dry weight) after irrigation. Change in CO_2 concentration after irrigation differed among different soils. In sand, the concentration after irrigation was five times as much as that before irrigation, while in vermiculite and Kanuma soil, they were three times and double, respectively.

Change in CO_2 concentration in the soil after irrigation was caused by change in gaseous diffusion coefficient in it. In sand, the coefficient was 0 cm^2/sec immediately after irrigation and still retained 0.035 cm^2/sec four days after irrigation. While in vermiculite and Kanuma soil, the coefficients increased rapidly with drying soils and reached 0.05 cm^2/sec one day after irrigation, although they decreased temporarily just after irrigation. In the soil containing small solid particles as sand, CO_2 concentration increased up to high level with a rapid decrease in gaseous diffusion coefficient by irrigation, and then decreased very slowly because of slow recovery of the coefficient.

(2) The effects of CO_2 and O_2 in the rhizosphere on the photosynthetic rate were investigated. The photosynthetic rate of cucumber plant decreased two hours after the beginning of aeration with air containing 3 - 5 % CO_2 into the rhizosphere. After four hours,

the photosynthetic rate at the treatment of 10% CO₂ declined up to 85% of that before the treatment, while it retained 95% when treated with 10% O₂. As described above, it was proved that the effect of increasing CO₂ was more significant than that of decreasing O₂ in the rhizosphere.

The transpiration rate was also suppressed as CO₂ concentration increased in the rhizosphere. Therefore it was suggested that the plant experienced a water stress by CO₂.

Long term effects of 1 – 2 % CO₂ concentration in the rhizosphere which normally exist in the cultivated soil on the photosynthetic rate of sweet potato were investigated. The rate at the treatment of 1 % CO₂ declined up to 80% of that before the treatment four days after the beginning of it and that at the treatment of 2 % CO₂ declined to the same level after two days. Both declined up to 70% after five weeks.

In addition, the effect of CO₂ appeared more significantly at the lower temperature in the rhizosphere.

(3) The effect of CO₂ concentration in the rhizosphere on growth of cucumber was investigated. The growth suppression occurred at 0.5– 2 % CO₂ in the rhizosphere. Total dry weight and leaf area of cucumber plant decreased up to 85% by the increase in CO₂ concentration to 2 – 5 %.

Water content in a plant decreased and water vapor diffusion resistance of leaves increased under high CO₂ concentration in the rhizosphere. Therefore the growth suppression may be due to the inhibition of water absorption ability of the root.

(4) Fresh air saturated with water vapor was sent into the soil with a compressor in order to decrease CO₂ concentration in rhizospheres of some vegetable crops. Fresh weight of tubers of sweet potato, roots of radish and fruit of cucumber at the treatment of 2.5 l/min aeration for one meter long ridge increased by 24%, 23% and 17% respectively in comparison with those at non aeration treatment. In addition, the yield of tubers of sweet potato increased by 20% when aerated for only 15 minutes once a day.

目 次

緒 論	1
第 1 章 灌水後の土壤中 CO ₂ 濃度の変化	1
1. まえがき	1
2. 土壤中の有機物含有量と灌水後の土壤中 CO ₂ 濃度の変化	2
(1) 実験方法	2
(2) 結果および考察	3
3. 各種培地内 CO ₂ 濃度の灌水後の変化	4
3-1 灌水後の土壤中 CO ₂ 濃度の変化	4
(1) 実験方法	4
(2) 結果	5
3-2 灌水後の培地内ガス拡散係数の変化	6
(1) 実験方法	6
(2) 結果	7
3-3 考察	9
第 2 章 作物の生育に対する根圏の CO ₂ 濃度の影響	10
1. まえがき	10
2. 根圏の空気組成と作物の光合成	11
2-1 根圏の空気組成と光合成	11
(1) 実験方法	11
(2) 結果および考察	12
2-2 根圏の CO ₂ が光合成および蒸散におよぼす影響	12
(1) 実験方法	12
(2) 結果および考察	13
2-3 根圏の CO ₂ が光合成におよぼす長期の影響	14
(1) 実験方法	14
(2) 結果および考察	15
2-4 光合成および蒸散に対する根圏 CO ₂ の影響と温度との関係	15
(1) 実験方法	16
(2) 結果および考察	16
3. 根圏の CO ₂ 濃度と作物の生育	17
3-1 根圏 CO ₂ 濃度と生育との関係	17
(1) 実験方法	17
(2) 結果および考察	18

a. 栽培土壌中の CO ₂ 濃度	18
b. キュウリおよびサツマイモの生育	19
3-2 生育に対する根圏 CO ₂ の影響と温度との関係	21
(1) 実験方法	21
(2) 結果および考察	22
第 3 章 根圏ガス環境の改善	22
1. まえがき	22
2. 土壌中への強制通気による根圏ガス環境の改善	23
2-1 土壌中への強制通気による各種作物の生育促進および収量増加	23
(1) 実験方法	23
(2) 結果および考察	23
a. 土壌中 CO ₂ 濃度	23
b. 作物の生育および収量	24
2-2 生育促進に対する強制通気の効果と温度との関係	26
(1) 実験方法	26
(2) 結果および考察	27
3. 栽培土壌中へ強制通気を行う場合の通気量および通気時間間隔と作物の生育	28
3-1 土壌中への通気量とキュウリの生育	28
(1) 実験方法	28
(2) 結果および考察	29
3-2 土壌中への通気量とサツマイモの生育	30
(1) 実験方法	30
(2) 結果および考察	31
3-3 土壌中への通気時間間隔とサツマイモの生育	32
(1) 実験方法	32
(2) 結果および考察	32
結 論	33
謝 辞	34
引用文献	34

緒 論

植物はその生育に必要な水分や養分を主に根から吸収しているが、このような根の吸収機能は根圏の環境に大きく依存している。このように、根圏の環境が作物の生育に大きな影響をおよぼすことから、地中温度あるいは土壌水分の研究が古くから行われ、その成果には大きいものがある。また根圏環境の一要因であるガス環境についても、その重要性が古くから指摘されている。特に根圏 O_2 濃度の低下は根の呼吸を抑制することから、作物の生育を促進させるためには、根圏土壌の通気性を良好に保つ必要のあることが強調されてきた。しかし根圏ガス環境の問題については、それがきわめて重要であると指摘されながらも、現実には土壌中の空気組成を調節するという考えかたがなく、もっぱら農業物理学的な範囲の研究に留まり、積極的には取り上げられていない。しかし最近の農業生産施設や生産資材の開発、発展により、地上環境の調節とともに根圏ガス環境調節の可能性も生まれてきた。本研究では土壌ガス環境条件と作物の生育、収量との関係を求め、さらに人為的に土壌ガス環境を調節した場合の作物収量の増加について研究を行い、土壌ガス環境の調節技術を確立するための基礎的知見を得た。

土壌中の空気組成は、根や微生物の呼吸量および通気性の変化により大きく変動する。従来から土壌空気組成の作物生育におよぼす影響を問題とする場合には、ほとんど O_2 濃度の低下による生育抑制について議論されてきた。しかし土壌中の O_2 濃度は一般の栽培条件下では 15~21% であり、ほとんどの場合大気中の濃度 21% と大差なく、作物生育に影響するといわれる濃度 9~12% 以下までに低下することは稀にしか見られない。一方、 CO_2 濃度の変動は著しく、灌水あるいは降雨後に CO_2 濃度が急激に高まり、数% にも達する場合がある。このような根圏の CO_2 濃度増加は、作物の根の呼吸を阻害することが考えられる。そこで本研究では、根圏の空気組成中でも特に CO_2 濃度と作物の生育反応との関係を求め、さらに根圏ガス環境を改善して作物生育を促進させる有効な方法を求めた。

本論文は 3 章より構成されている。第 1 章では、土壌中 CO_2 濃度の動態を把握するため、有機物含有量の異なる土壌および構造の異なる土壌の灌水後

の CO_2 濃度の変化ならびにガス拡散係数の動態について述べた。第 2 章では作物の光合成および生育に対する土壌空気組成、特に CO_2 濃度の影響について述べた。第 3 章では、ガス環境を調節することにより作物の生育が促進され、収量が増加することを実験的に明らかにした。

なお本論文は、著者が昭和 60 年 12 月に大阪府立農学部提出した学位請求論文の概要である。

第 1 章 灌水後の土壌中 CO_2 濃度の変化

1. まえがき

土壌中の CO_2 濃度に関する研究は、すでに 19 世紀後半から行われており、初期の研究ではドイツの Wallney 一派のものが有名である。ついでその研究はイギリスに移り、Russell ら¹⁾ (1915) の有名な研究が行われた。その後には Boynton ら²⁾ (1938)、位田³⁾ (1952)、Monteith ら⁴⁾ (1963)、小川ら⁵⁾ (1970) および梅林⁶⁾ (1972) などの研究がある。また Callebaut ら⁷⁾ (1982) は、地下水位と土壌空気組成との関係を調べている。一方、土壌のガス拡散係数については、Buckingham⁸⁾ (1904)、Penman⁹⁾ (1940)、van Bavel¹⁰⁾ (1951)、Millington ら¹¹⁾ (1971) などの研究があるが、特に Currie^{12,13)} (1960, 1961) は、土壌構造とガス拡散係数の関係について完璧に近い業績を残している。

一般に土壌中の CO_2 分圧は次式で表される。

$$\xi_a \frac{dC_z}{dt} = D \frac{d^2C_z}{dz^2} + \beta \alpha \quad (1)$$

ここで ξ_a は土壌の空隙率、 C_z は CO_2 の分圧 (mm Hg)、 t は時間 (sec)、 D は土壌中のガス拡散係数 (cm^2/sec)、 z は地表面からの深さ (cm)、 α は CO_2 発生量 ($mg/cm^3/sec$)、 β は土壌中における CO_2 量の分圧への換算係数 ($mmHg \cdot cm^3/mg$) である。

今、定常状態を考えると、(1)式は次のようになる。

$$D \frac{d^2C_z}{dz^2} = -\beta \alpha \quad (2)$$

(2)式より、

$$\frac{dC_z}{dz} = -\frac{1}{D} \beta \alpha z + c_1 \quad (3)$$

(c_1 は積分定数)

ここで CO_2 が発生し拡散する土層深さを L (cm) とすると、 $z=L$ の時、 $dC_z/dz=0$ であるので、 c_1

$= \beta \alpha L/D$ となり、(3)式は次のようになる。

$$\frac{dC_z}{dz} = \frac{\beta}{D} \alpha (L-z) \quad (4)$$

(4)式より、

$$C_z = \frac{\beta}{D} \alpha \left(Lz - \frac{z^2}{2} \right) + c_2 \quad (5)$$

(c_2 は積分定数)

となる。地表面 ($z = 0$) における CO_2 分圧を C_0

(mmHg) とすると $c_2 = C_0$ となり、(5)式より深さ z (cm) における CO_2 分圧 (mmHg) は次式で表される。

$$C_z = \frac{\beta}{D} \alpha \left(Lz - \frac{z^2}{2} \right) + C_0 \quad (6)$$

(6)式から、土壌中 CO_2 濃度は CO_2 発生量に比例し、ガス拡散係数に反比例することがわかる。さらに地表面から深くなるほど CO_2 濃度が高くなることも重要である。しかし実際の栽培土壌中では、温度の日変化にともない土壌微生物や根の呼吸速度が変化し、また降雨や蒸発散にともない拡散係数が変化するので、定常状態であることはまれである。さらに長期的には作物の生長にとまらぬ根の量の増加や土壌微生物量の変化なども考えられ、 CO_2 濃度に影響する様々な要因の変動が常に見られる。特に灌水や降雨の後にガス拡散係数は短時間に著しく変化し、それにともない CO_2 濃度も大きく変動する。このようなことから、根圏ガス環境と作物の生育との関係を求めるうえにおいて、まず土壌中 CO_2 濃度の変動を知る必要がある。

しかし従来の研究では、土壌中の有機物含有量と CO_2 濃度との関係を定量的に求めた研究や、灌水後の CO_2 濃度変化を土壌のガス拡散係数の観点より解析した動的な研究はあまり見られない。そこで本章では、施設園芸で多く使われている培地を用いて、有機物含有量の異なる土壌および構造の大きく異なる土壌中の CO_2 濃度の灌水による変化を調べた。

2. 土壌中の有機物含有量と灌水後の土壌中 CO_2 濃度の変化

(1) 実験方法

培地中の CO_2 濃度および O_2 濃度の測定は、ガラス室内において1981年7月28日から8月1日まで行った。有機物として堆肥を用い、図1-1aに示すような深さ45 cm、用量40 lのプラスチックポッ

トに、川砂と堆肥を混合して充填した。土壌空気を採取するため、ポットには培地表面から深さ5 cm毎に土壌空気採取管を取り付けた。最下部の土壌空気採取口は、土壌表面から30 cm下方、ポット底面より13 cm上方になった。ポット底面には排水口として、直径1.4 cmの円形の穴を5ヶ所に設けた。

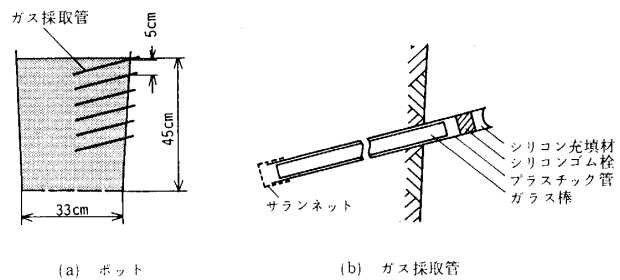


図1-1 土壌中の CO_2 濃度を測定するためのポットおよびガス採取管

土壌空気採取管の詳細を、図1-1bに示す。内径0.6 cm、長さ21 cmのプラスチックパイプの中に、直径0.5 cm、長さ20 cmのガラス棒を挿入してデッドスペースを少なくした。灌水時に管内に水が侵入しないように、プラスチックパイプを水平に対して20度傾けて取り付けた。土壌中のプラスチック管開口部をサランネット(1.6 mmメッシュ)で覆い、土粒子の管内への侵入を防ぎ、ポット外側のプラスチックパイプ側端にはシリコンゴム栓を封入し、さらに気密性を高めるため、シリコン充填剤を充填した。土壌空気の採取には硬質ガラス注射器を用い、注射針を土壌空気採取管のシリコンゴム栓に差し込み採取した。土壌空気採取管内および注射器内に残留している空気による誤差を小さくするため、まず1 ccを採取して捨てた後、2本の注射器に2.5 ccずつ採取して、一方を CO_2 、他方を O_2 および N_2 の分析に供した。分析にはガスクロマトグラフ(日立663)を用いた。

1ポットあたりの川砂の量は40 lとし、混入する堆肥は風乾重350 g(全容積1 l)を1単位として、対照区(川砂のみ)、1単位区、2単位区および4単位区を設けた。堆肥は1年間屋外で腐熟させ、風乾後に粉碎して5 mmメッシュのふるいにかけたものを用いた。ポットに充填後、1週間に1度灌水

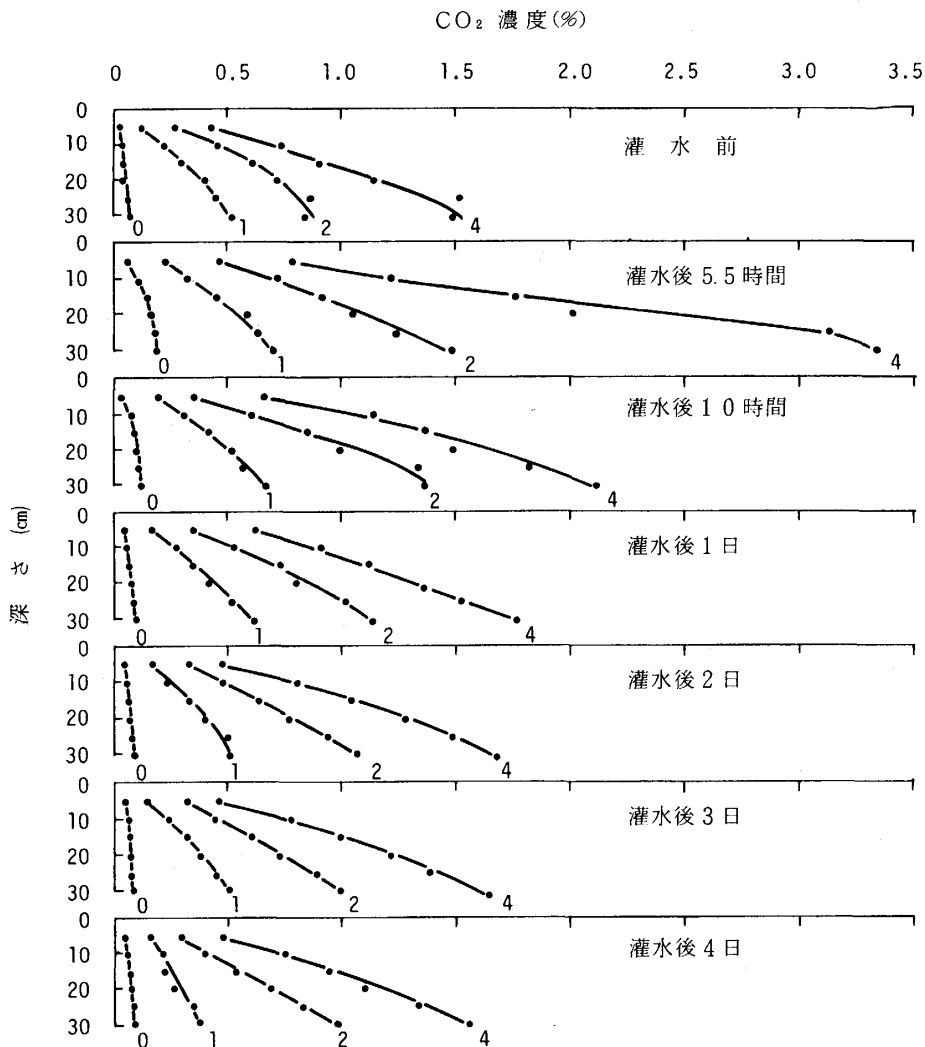


図1-2 堆肥含有量の異なる川砂培地内 CO₂ 濃度の灌水後の変化

図中の数字は、1ポットあたり40ℓの川砂に対して混入された乾燥堆肥の量(ℓ)を示す。堆肥1ℓの風乾重は350gである。

し、1ヶ月経過後に土壌中の空気組成の測定を開始した。測定時の灌水量は各区それぞれ10ℓ(80m)とした。

(2) 結果および考察

図1-2に灌水前後の土壌中CO₂濃度の垂直分布を示す。当然のことながら、堆肥含有量が多くなるほどCO₂濃度は増加しており、また各区とも深くなるほどCO₂濃度は高まり、理論的に示される典型的な分布の形になっている。ただし灌水前の深さ30cmでは、25cmに比べてCO₂濃度が低くなっているが、これはポット底部の排水口からもガス交換が行われていたためであろう。

各区の灌水によるCO₂濃度の変化については、

深さ25cmのCO₂濃度は、1単位区、2単位区および4単位区の順に、灌水前には0.46%、0.88%および1.53%であったが、灌水5.5時間後にはそれぞれ、0.64%、1.25%および3.14%となり、灌水によりCO₂濃度は1.4~2.1倍に増加した。10時間後にはやや低下して、それぞれ0.58%、1.36%および1.83%となったが、まだ灌水前の1.2~1.5倍の高濃度であった。以後、時間経過にともないCO₂濃度は低下していったが、各深さの平均CO₂濃度が灌水前の値に戻るまで、各区とも3日間を要した。

図1-3に土壌空気の主要なガス組成、すなわちO₂、CO₂およびN₂濃度の関係を示す。これらの値は4単位区において、灌水後10時間経過した時

のものである。各深さにおける O₂ 濃度と CO₂ 濃度の和は約 21% であり、O₂ 濃度の低下量が CO₂ 濃度の増加量に相当することがわかる。

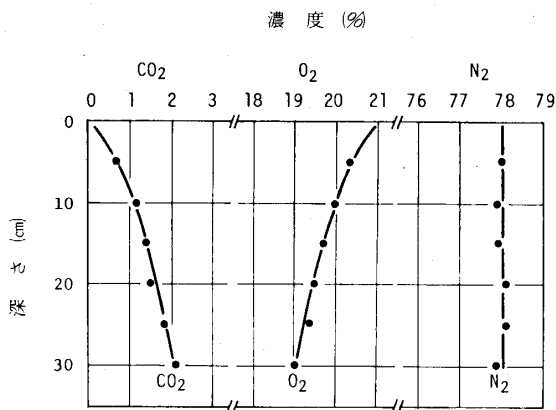


図 1-3 堆肥を混入した川砂培地中の主要な空気組成
培地は川砂 40 l と乾燥堆肥 4 l (風乾重 1400 g) を混合したものである。灌水 (80 mm) してから 10 時間後に測定した。

図 1-4 に、堆肥含有量と土壤中 CO₂ 濃度の関係を示す。各点は深さ 20 cm のもので、堆肥混入区の CO₂ 濃度から対照区 (川砂のみ) の CO₂ 濃度を差し引いた値、すなわち混入された堆肥からのみ発生した CO₂ の濃度である。

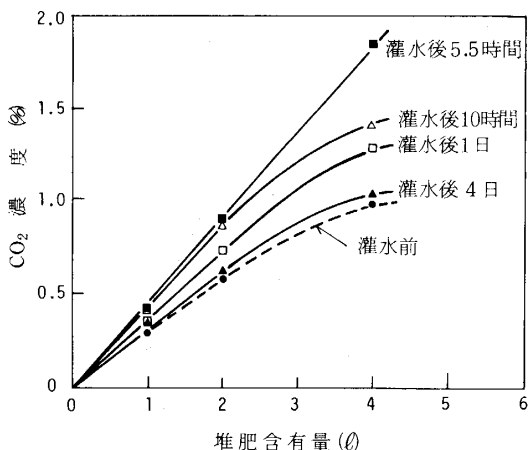


図 1-4 土壤中の堆肥含有量と CO₂ 濃度との関係
横軸は、川砂 40 l に混合した乾燥堆肥の量 (l) を示す。1 l の風乾量は 350 g である。

図 1-4 より、灌水後 5.5 時間で土壌含水量の多い時の CO₂ 濃度は、堆肥含有量に比例している。しかし灌水後、時間が長くなるにともない、堆肥含

有量の多い 4 単位区の濃度が比例関係から外れる傾向が顕著になり、CO₂ 濃度低下率が他の区に比べて大きくなっている。この傾向は他の深さでも同様に見られた。(1)式に示すように、ガス拡散係数が一定である場合、土壌中の CO₂ 濃度は CO₂ 発生量に比例する。CO₂ 発生量は堆肥含有量に比例すると考えられるので、土壌中 CO₂ 濃度は堆肥含有量に比例することになる。本実験結果において、灌水後の時間経過にともない 4 単位区が比例関係から外れた原因として、4 単位区の土壌のガス拡散係数の灌水後の変化が、他の区と異なったことが考えられる。すなわち、灌水により一時的に低下したガス拡散係数が、その後の乾燥にともない増加するが、このような乾燥にともなうガス拡散係数の増加速度が 4 単位区で最も大きくなり、土壌中の CO₂ が大気中へ拡散しやすくなったためであろう。これは、4 単位区の土壌中には体積にして約 9% の堆肥が含まれるため、その土壌構造が他の区と大きく異なることに起因すると考えられる。このような土壌構造とガス拡散係数ならびに土壌中 CO₂ 濃度との関係については、次節で詳述する。

3. 各種培地内 CO₂ 濃度の灌水後の変化

前節では、土壌構造が異なる場合に、灌水後の土壌中 CO₂ 濃度の変化が異なることが示唆された。そこで本節では、構造の異なる 3 種の園芸用培地を用いて、ガス拡散の観点から灌水後の CO₂ 濃度の変化を調べた。

3-1 灌水後の土壌中 CO₂ 濃度の変化

(1) 実験方法

図 1-1 a に示すような深さ 45 cm、容量 40 l のプラスチック製ポットに、川砂、パーキュライトおよび鹿沼土を充填した。各培地の入ったポットは温室に置き、それぞれのポットにエンバク (*Avena sativa* L. 品種名“オホーツク”)、またはイネ (*Oryza sativa* L. subsp. japonica、品質名“オカボノウリンモチ 20 号”) を栽培した。エンバクは 1980 年 1 月 9 日に播種、1 月 28 日に定植した。イネは 1980 年 3 月 27 日に播種、5 月 30 日に定植した。幼苗 5 個体をまとめて、各ポット中央に植えた。灌水は 1 週間毎に十分に行い、灌水後、肥料としてホーグラン D 第 2 溶液を 500 ml 与えた。

土壌空気中の CO₂ 濃度測定は前節と同様にして行い、CO₂ 分析にはガスクロマトグラフ (Yanaco

モデル G 80) を用いた。エンバクを植えた 3 ポットの測定期間は 1980 年 4 月 29 日から 12 日間であり、灌水 3 日前に第一回目の測定を行い、二回目以降の測定は灌水 5 時間後から 24 時間毎に行った。イネを植えた 3 ポットの測定は 1980 年 7 月 23 日に行い、灌水直前、灌水後約 2 時間および 4 時間後に測定した。測定時の灌水量は 1 ポットあたり 10 l (80 mm) とした。なお測定時にはエンバク、イネとも出穂していた。

(2) 結果

エンバクを栽培したポット内における、灌水前後の土壌中 CO_2 濃度の経時変化を図 1-5 に示す。第一回目(図中の灌水前)の測定はその前の灌水から 14 日経過後に行ったので、土壌中 CO_2 濃度は定常状態に近い値と考えられる。図に示すように、川砂区では上層の濃度が低く下層ほど高くなり、理論的に示される典型的な形となっているが、バーミキュライト区および鹿沼土区では、深さによる濃度の変化は少なくなっている。さらに濃度そのものも川砂 > バーミキュライト > 鹿沼土の順に低くなり、それぞれの平均値は、1180 ppm、660 ppm および 350 ppm であった。この分布は定常的とはいえ地温およ

びガス拡散係数に影響された日変化を示すので、時刻によっても異なるが¹⁵⁾、これらの結果から、培地の種類によって CO_2 濃度が大きく異なることがわかる。

灌水後の CO_2 濃度については、川砂区においてその増加が著しく、灌水 5 時間後には各深さとも灌水前の 3~5 倍の濃度となり、特に 30 cm では 1540 ppm から 7420 ppm に増加した。灌水により急増した CO_2 濃度は、時間経過とともに徐々に低下したが、灌水 4 日後においても、深さ 30 cm では 3750 ppm であった。灌水 11 日後には CO_2 濃度はかなり低下し、深さ 30 cm では 1720 ppm となったが、なお灌水前より高い値を示した。

バーミキュライト区の場合にも、灌水後に CO_2 濃度の増加が見られ、灌水 5 時間後には深さ 30 cm で 640 ppm から 2380 ppm に増加した。翌日から急激な低下を示し、各深さとも 1400 ppm 以下となった。灌水 11 日後には各深さでの CO_2 濃度が 600~800 ppm となり、灌水前の値とほぼ等しくなった。

鹿沼土区の場合は、灌水によりわずかに増加した CO_2 濃度は、その後 11 日経過してもほとんど変化

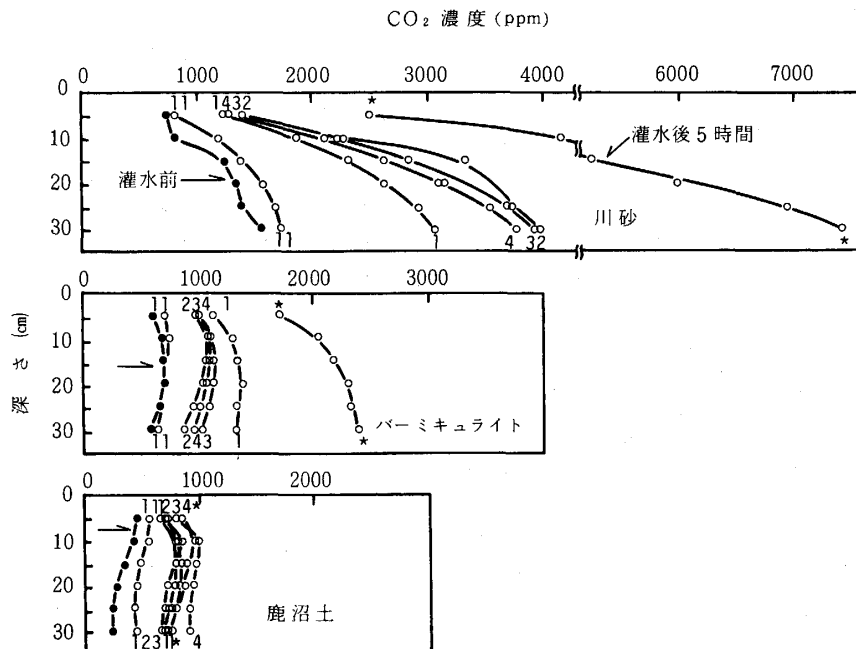


図 1-5 各種培地内 CO_2 濃度の灌水後の変化

図中の数字は灌水後の日数を示す。各培地 40 l をポットに入れ、エンバクを植えてガラス室内に置いた。灌水後 1 日目は雨天、その他は晴天であった。

せず、1000 ppm 以下の低濃度を維持し続けた。

土壌中 CO₂ 濃度の垂直分布を見ると、川砂区では灌水直後は深さによる CO₂ 濃度差が顕著であるが、その後の日数の経過にともないその差が小さくなった。これは乾燥にともない、土壌中のガス拡散係数が大きくなったためと考えられる。しかしパーミキュライト区の灌水後1日以降および鹿沼土区では、深さ10~20 cm における CO₂ 濃度が、他の深さに比べて高くなる傾向が見られ、時間経過にともないその傾向は強くなった。これは次節で述べるが、これらの培地のガス拡散係数が大きいため、土壌面はもちろんポット底面の排水口からの拡散も大きく影響しているものと考えられる。

CO₂ 濃度測定と同時に O₂ 濃度も測定した。O₂ 濃度は、地表面から深くなるほど低下し、また灌水後一時的に低下するが、その後の乾燥にともない徐々に増加し、CO₂ 濃度変化とは逆の変化を示した。しかし、CO₂ 濃度が 0.74% と最も高くなった川砂区の、深さ 30 cm の灌水 5 時間後においても、O₂ 濃度は 20.1% であり、ほとんど大気中の値と等しかった。

図1-6に、イネを栽培したポット内における灌水後短時間の土壌中 CO₂ 濃度の経時変化を示す。各培地区ともエンバク根圏と同様、灌水による CO₂ 濃度の増加が見られ、深さ 30 cm において、灌水後約 2 時間ですでに灌水前の 1.5~2 倍となった。川砂区では灌水後 4 時間 20 分でも CO₂ 濃度は増加したままであり、深さ 30 cm では約 5000 ppm にもなった。それに対してパーミキュライト区では、深さ 30 cm において、灌水後 2 時間で 1750 ppm となったが、4 時間 30 分後には 1460 ppm となりすでに低下の傾向を示した。鹿沼土区ではエンバク根圏の場合と同様、灌水後の CO₂ 濃度の増加が少なく測定期間中ほぼ一定値を示し、灌水の影響はほとんど見られなかった。

3-2 灌水後の培地内ガス拡散係数の変化

(1) 実験方法

灌水後に土壌中の CO₂ 濃度が急速に増加する現象は、灌水により土壌空隙が水で満たされ空隙率が減少し、ガス拡散係数が低下したことによるものと考えられる。そこで、灌水後の培地のガス拡散係数の経時変化を求めた。そのためにまず灌水後の各培

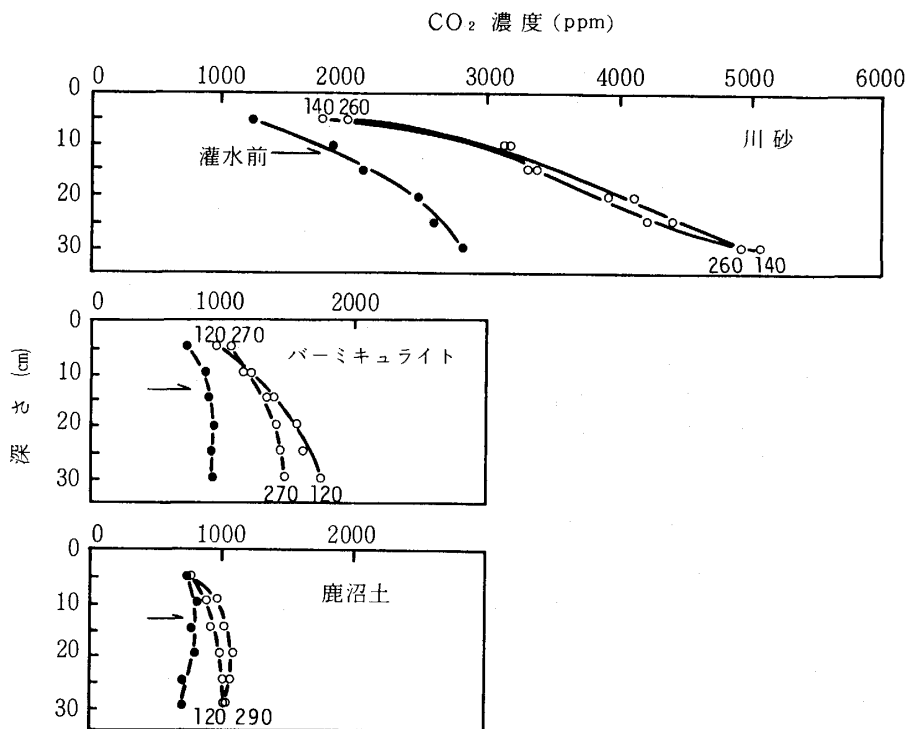


図1-6 各種培地内 CO₂ 濃度の灌水後の変化

図中の数字は灌水後の時間(分)を示す。各培地 40 l をポットに入れ、イネを植えてガラス室内に置いた。

地の含水率の経時変化を求め(実験1)、さらに培地の含水率とガス拡散係数との関係を求め(実験2)、その結果を実験1の結果に対応させて、灌水後の培地のガス拡散係数の経時変化とした。

実験1 乾燥にともなう各種培地の含水率の変化
試料には、川砂(粒径1.9~2.0 mm)、鹿沼土(粒径2.0~4.76 mm)、およびパーミキュライトを用いた。これらの試料は予め1ヶ月以上、暗所で水に浸漬しておいた。試料370 cm³(全容積)を、図1-7に示すような底部にサラネット(1.6 mmメッシュ)が張り付けられたプラスチック製円筒に充填した。

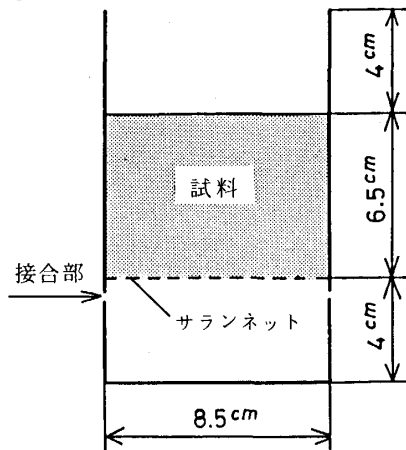


図1-7 培地の含水率を測定するためのポット

充填後に灌水し、重力水が流出した後プラスチック製円筒下部を取り付け、接合部を密閉した。これらの資料を風乾するため、気温27±2℃、相対湿度35±5%、風速30 cm/secに設定した人工気象室内に設置し、経時的に試料の重量を秤量して、試料全体の平均体積含水率の変化を求めた。

実験2 各種培地のガス拡散係数と体積含水率との関係

ガス拡散係数の測定にはCurrie¹²⁾(1960)の手法を用いた。ただしここでは、拡散ガスとしてO₂を用いた。本研究は土壌中のCO₂を問題としているので、本来CO₂ガスを用いるべきであるが、CO₂は水に溶解し易いため、土壌の含水率が高い時には誤差を生ずることが考えられる。そこで、水に対する溶解度がCO₂の約1/30であるO₂を用いた。拡散係数算出にあたっては、静気中におけるCO₂とO₂の拡散係数の比、0.775を測定値に乗じて、CO₂拡散係数とした。

測定順序として、まず直径5.1 cmの円筒に試料100 cm³を入れ、円筒上端を閉じ、試料上面と円筒上端の間の空間にO₂ガスを充填した。そしてO₂ガスが試料中を通り、円筒下端から大気中へ拡散していく過程において、ガス拡散式(7)より導かれた(8)式を用いて、試料上部空間のO₂濃度の低下する速度より、試料中のガス拡散係数を算定した。

$$\frac{dc}{dt} = \frac{D}{\xi} \frac{d^2c}{dx^2} \quad (7)$$

$$\frac{c_s}{c_0} = \frac{2h \cdot \exp(-D\alpha^2 t / \xi)}{l(\alpha_1^2 + h^2) + h} \quad (8)$$

ここで、t:時間、c:tにおける試料内O₂濃度と大気中O₂濃度の差、x:深さ、D:ガス拡散係数、ξ:空隙率、c_s:試料上表面のO₂濃度と大気中O₂濃度の差、c₀:初期の試料上表面のO₂濃度と大気中O₂濃度の差、l:試料の長さ、α₁:α tan α l = hの根のうちで正の最小のもの、h:h = ξ/a、a:最初にO₂ガスを充填する試料上部空間の長さである。

(8)式より、t+Δt時間後のO₂濃度をc_s+Δcとすると、

$$D = \frac{\xi \ln \{c_s / (c_s + \Delta c)\}}{\alpha_1^2 \Delta t} \quad (9)$$

となり、O₂濃度の対数値の低下速度よりDが算定できる。

ガス拡散係数の測定には、実験1と同様の川砂、パーミキュライトおよび鹿沼土を用いた。各試料の含水率を変えるため、水を加えたりあるいは風乾したものを十分に攪拌した後、サンプル管に一定容積充填した。

O₂濃度の測定には、酸素分析計(Fieldlab 溶存酸素分析計、39553 O₂センサー、beckman社製)を用いた。拡散係数測定値の再現性は、乾燥試料を用いた場合には±0.001 cm²/sec以内であった。実験は気温18±2℃のもとで行った。

(2) 結果

灌水後の各種培地の、乾燥にともなう体積含水率の経時変化を図1-8に示す。灌水直後の体積含水率は、川砂区、パーミキュライト区、鹿沼土区について、それぞれ34.3%、46.1%および50.1%であり、空隙率は10.7%、29.8%および21.9%であった。各培地とも乾燥にともない、含水率はほぼ指数関数的に低下した。川砂の初期の低下は急激で

あり、60 時間ごろまで直線的に低下し、100 時間後には 5 % となったが、それ以後の低下は緩慢であった。それに対してパーミキュライトおよび鹿沼土の場合、含水率の低下が緩慢であり、100 時間後にはそれぞれ 17 % および 23 % となった。

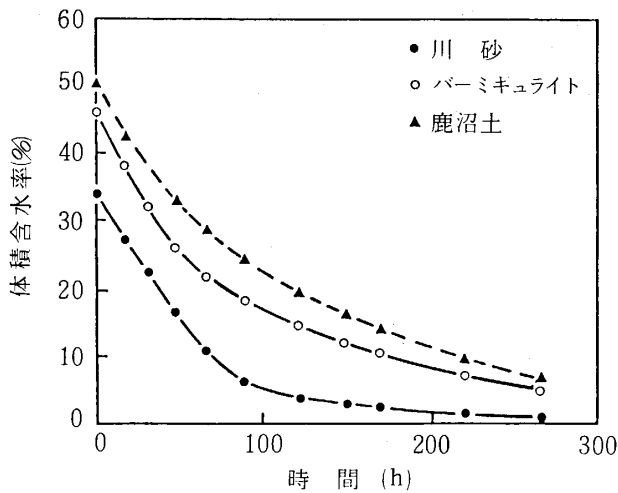


図 1-8 灌水後の培地内含水量の変化

各種培地のガス拡散係数と体積含水率との関係を図 1-9 に示す。各培地とも体積含水率の増加にともない、ガス拡散係数は小さくなった。川砂の場合、体積含水率 0 %、すなわち完全に乾燥した時のガス拡散係数は $0.039 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、体積含水率 5 % ま

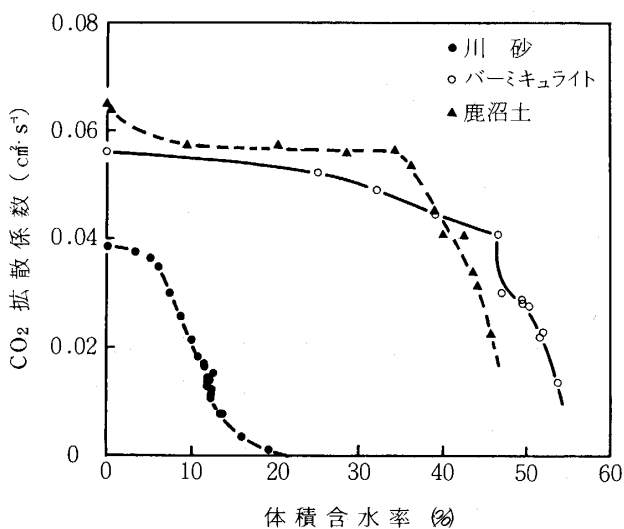


図 1-9 培地内の含水率と CO_2 ガス拡散係数との関係

ではガス拡散係数はわずかに低下した。以後体積含水率の増加にともない指数関数的に低下し、体積含水率が 20 % を超えると、ガス拡散係数はほぼ $0 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となった。なお、体積含水率 12 % 付近で不連続に変化する点が見られた。体積含水率 12 % 以上の時の変化は、Currie (1961) の結果に従えば、粒状物質の場合の変化に類似し、12 % 以下では不整形物質の場合の変化を示している。Currie による砂を用いた結果では、粒状物質の変化であり、不整形物質的な変化は見られていないが、本実験結果から、砂についても不整形物質的な変化を示すことがわかる。

鹿沼土のガス拡散係数は、体積含水率 0 % では $0.065 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、体積含水率の増加にともない指数関数的に低下するが、体積含水率 35 % でも $0.056 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度で、低下率は極めて小さく、通気性の良いことがわかる。しかし 35 % を超えるとガス拡散係数は急激に低下し、最小容水量にあたる体積含水率 45 % において $0.022 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となり、川砂とは非常に異なった関係を示した。

またパーミキュライトのガス拡散係数は、体積含水率 0 % では $0.056 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、体積含水率 46 % まで徐々に低下して、 $0.041 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となった。しかし 46 % を超えると、鹿沼土と同様にガス拡散係数は急激に低下し、最小容水量にあたる体積含水率 54 % では $0.013 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となった。両培地に見ら

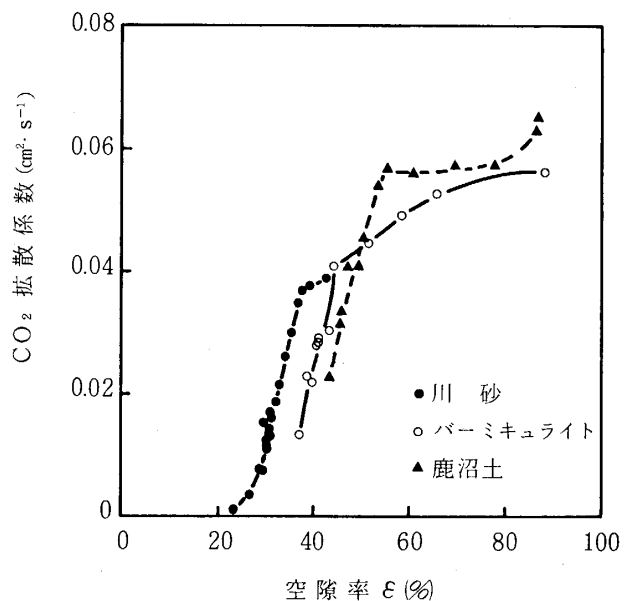


図 1-10 培地内の空隙率と CO_2 ガス拡散係数との関係

れるこれらの不連続点は、後述の図1-12より、団粒構造土壌に見られる変異点を示すと考えられる。

各培地間において、体積含水率とガス拡散係数との関係が異なるのは、各培地の孔隙率が異なるためである。ここで用いた川砂、パーミキュライトおよび鹿沼土の孔隙率は、それぞれ42.7%、88.4%および87.0%であった。川砂の孔隙率は他の培地の1/2であり、それゆえ体積含水率が小さいにもかかわらず空隙率が小さいので、ガス拡散係数が他の培地に比べて小さくなる。そこで、空隙率とガス拡散係数の関係を求めると、図1-10に示すような結果が得られた。各培地のガス拡散係数は、ほぼ共通の空隙率の関数となることがわかる。

図1-11は以上の結果をもとに、灌水後の乾燥にともなう各種培地のガス拡散係数の経時変化を示したものである。灌水直後では各培地とも体積含水率が大きいため、ガス拡散係数は小さくなったが、時間経過にともない体積含水率が低下した結果、ガス拡散係数は増加した。灌水後初期では、パーミキュライトのガス拡散係数は鹿沼土より大きくなったが、両者とも乾燥にともないガス拡散係数は急激に増加して、30時間後には $0.05 \text{ cm}^2/\text{sec}$ になった。これに対して川砂では、灌水後約30時間までガス拡散係数は $0 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、80時間後においても $0.03 \text{ cm}^2/\text{sec}$ までしか増加せず、ガス拡散係数の回復は著しく遅くなった。

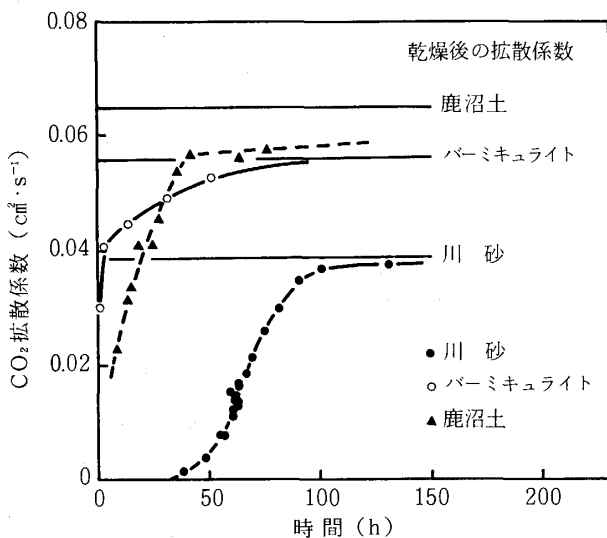


図1-11 灌水後の培地内CO₂ガス拡散係数の変化

3-3 考察

(6)式から、理論的には土壌表面より深くなるに従い、また土壌中のガス拡散係数が小さくなるに従って、土壌中CO₂濃度が高くなる。図1-5および図1-6において、川砂の場合は深くなるに従いCO₂濃度が高くなり、理論値に近い垂直分布を示したが、パーミキュライトおよび鹿沼土の場合は必ずしも理論値のような分布を示していない。このように局所的に濃度が高くなった理由として、第一にこれらの培地のガス拡散係数が非常に大きいので、ポット底面の排水口からも空気との交換が行われていたこと、第二に根の分布が一様でなく、深さ5~15cmの所に多く分布してCO₂発生場所に偏りのあったことが考えられる。川砂の場合は上述のように、下層ほど濃度が高くなっているが、培地の深さが45cmであったので底面付近の含水率は上部より高くなっており、それゆえ底面のガス拡散がわずかしかなかったためと考えられる。

土壌中のCO₂濃度垂直分布に相違を生じさせる主な要因は、培地中のガス拡散係数およびCO₂発生量である。本実験において、培地中のCO₂発生源は主に根の呼吸によるものである。ここでは根の呼吸量が測定されていないので、正確な3区の比較は困難であるが、培地の種類により土壌中CO₂濃度に大きな差のあることは明白である。

このような差が生じたのは、灌水後の土壌表面からの乾燥にともなう土壌中のガス拡散係数の変化が、培地の種類により異なったためである。培地のガス拡散係数は、含水率に影響される。含水率が高くなると、培地内の空隙が水で置き換えられて空隙率が減少し、その結果、空隙率の関数であるガス拡散係数が低下する。しかしその後、乾燥により培地の含水率が低下し、それにともないガス拡散係数が増加することによって、土壌中CO₂濃度は低下する。

川砂の場合、灌水により培地中のガス拡散係数が極めて小さくなったため、CO₂濃度が著しく高くなったが、その後の時間経過にともないガス拡散係数が増加し、CO₂濃度は低下していった。しかし乾燥にともなうガス拡散係数の増加が、他の培地に比べて非常に緩慢であるため、CO₂濃度の低下速度は遅く、長時間高濃度を維持することになる。砂は透水性が大きいことから、通気性も大きいように推測されがちであるが、実際にはガス拡散係数が小

さく、特に灌水直後には土壤空気の拡散がほとんど起こらない。この点については、栽培上注意しなければならない。

一方パーミキュライトおよび鹿沼土では、灌水直後に一時的にガス拡散係数は低下するが、 $0 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とはならず、しかも乾燥にともない急激に増加して、数時間で灌水前の状態に回復する。それゆえ土壤中 CO_2 濃度は全般に低く、ガス拡散係数が回復した後は、日射量、気温および地温などの環境条件が根の呼吸に参与して^{16,17)}、土壤中 CO_2 濃度に大きく影響するものと考えられる。

一般にガス拡散係数は空隙率の関数となるが、詳細に見るとその関係は培地の種類により異なる。そこで図1-12に示すように、空隙率とガス拡散係数の関係をそれぞれ乾燥時の値に対する比率で求めると、鹿沼土およびパーミキュライトと川砂ではその関係の異なることがわかる。すなわち鹿沼土およびパーミキュライトでは、空隙率を小さくしても始めのうちは D/D_t があまり小さくならないが、 ξ/ξ_t がそれぞれ0.6および0.5以下では D/D_t は急激に低下する。一方川砂では空隙率を小さくすると、 D/D_t は最初から急激に低下する。

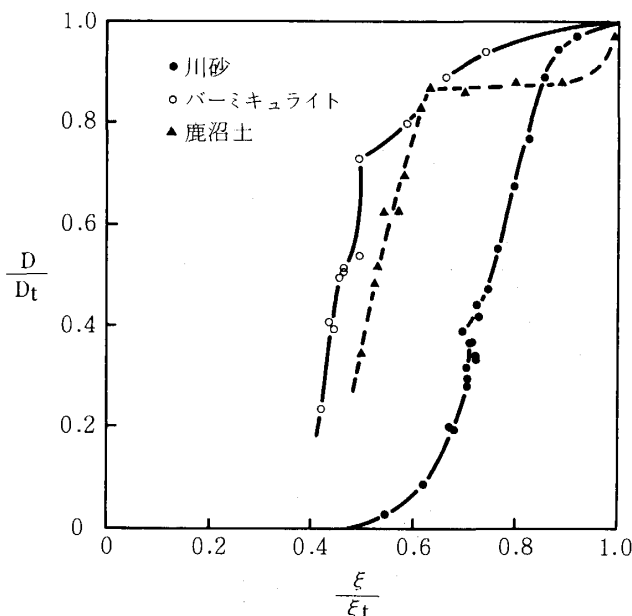


図1-12 培地の乾燥過程における、ガス拡散係数 D と空隙率 ξ との関係

ξ_t および D_t はそれぞれ、乾燥状態での空隙率およびガス拡散係数である。

このような培地の通気特性は、主にその粒子の形状に起因するものと考えられる。すなわち川砂は粒子状物質の集合体で単粒構造となっているが、パーミキュライトおよび鹿沼土の粒子は有孔であり、いわゆる団粒に似た構造を呈している。Currie¹³⁾ (1961)の結果によると、団粒構造土壌では灌水後、乾燥にともない最初に団粒間空隙が増加し、その後団粒内空隙が増加する。土壌のガス拡散経路は主に団粒間空隙であるから、団粒間空隙に含まれる水分が蒸発して、団粒間空隙が飽和に達するまでは、ガス拡散係数が急激に増加するが、団粒内空隙からの水分蒸発過程に入ると、ガス拡散係数の増加は緩やかとなる。しかし砂は単粒構造のため、団粒構造のような変異点は見られないとしている。ところが本実験では、 ξ/ξ_t が0.7の時に砂にも変異点が見られた。これは試料内部に生じた砂粒と水の小さな集合体が、ガス拡散に関して団粒と同様な働きをしたためと考えられる。本実験で用いた川砂の空隙率は43%であり、Currieの実験の場合の38%に比べて大きかったことが一因であろう。

以上のように、含水率の変化にともなうガス拡散係数の変化が培地により異なり、その特性が土壤中 CO_2 濃度に大きく影響する。川砂のような細かい粒子状物質から成る土壌では、灌水により通気性が著しく悪化し、土壤中 CO_2 濃度が増加すると同時に O_2 濃度が低下する。実際の栽培土壌中において、根や有機物の含有量が多い場合には、 CO_2 濃度が数%に達することがあり、灌水や降雨によるガス拡散係数の低下にともない、一時的に土壤空気組成の著しい変化が起り得る。このような根圏ガス環境の変化は、作物の根の呼吸を抑制し、生育に重大な影響をおよぼすことが推測される。

第2章 作物の生育に対する根圏の CO_2 濃度の影響

1. まえがき

土壌中では根や微生物の呼吸により O_2 が吸収され、そのため根圏の O_2 濃度が低下して、植物の生育が抑制されるという報告は多くあるが、このような生育抑制は一般に O_2 濃度が9~12%にまで低下した場合に生ずると考えられている。しかし通常、地表面近くの根圏空気の O_2 濃度が9~12%まで低下するという事はほとんど見られず、そのような

O₂濃度になる前にCO₂濃度が数%にまで増加する。それゆえ実際の栽培においては、O₂濃度の低下よりもむしろ、しばしば見られる1~3%というCO₂濃度の増加^{14,18)}の影響の方が大きいと考えられる。

根圏空気中のCO₂濃度と作物の生育との関係について、Geisler¹⁹⁾(1967)は、CO₂濃度2%でオオムギとエンドウの生育が抑えられたことを報告し、また長村ら²⁰⁾(1978)は、2~5%でキクの生育に影響が見られたことを報告している。一方、CO₂濃度20%でも、トウモロコシとダイズは十分に生育し、^{21,22)}またO₂濃度1%の時に、CO₂濃度20%と0%処理下でタバコを栽培した結果、両処理の間には生育の差が見られなかったと²³⁾いう報告もある。これらの差が作物の差異によるものか、実験方法によるものかは不明であるが、この問題にはなお検討を要する点がある。そこで本章では、生育に対する土壌中のCO₂の影響を明らかにするため、根圏空気中のCO₂濃度と作物の光合成および生育との関係を調べた。

2. 根圏の空気組成と作物の光合成

本節では、作物の物質生産の基本である光合成におよぼす根の周囲の空気組成、特にCO₂の影響について述べる。

2-1 根圏の空気組成と光合成

(1) 実験方法

根圏空気中の組成と作物の光合成との関係を求めるために、キュウリ (*Cucumis sativas* L. 品種名、山東

四葉)の根圏にCO₂濃度およびO₂濃度の異なる空気を通気して光合成速度を測定した。供試体のキュウリは、ガラス温室内において、れき耕法により素焼き鉢(容量350cc)で栽培した。培養液にはホーランド第2溶液を用いた。

実験装置の概略を図2-1に示す。人工光型グローブキャビネット内に供試体を入れ、根圏の約半分が培養液中にあるように鉢を固定し、鉢の底面よりパイプを通してCO₂濃度およびO₂濃度を調節した空気を通気した(通気量1.8ℓ/min)。O₂濃度は標準空気と100%N₂ガス、CO₂濃度は標準空気と100%CO₂ガスを混合して調節した。これら混合空気の各ガス濃度は、O₂濃度の測定値から算定した。O₂濃度の測定には酸素分析計(Fieldrad 溶存酸素分析計、39553 O₂センサー、Beckman社製)を用いた。また光合成速度の測定には差型赤外線CO₂分析計(LIA 2型、堀場製作所製)を用い、開放型同化箱法により行った。供試体として、播種後20~30日経過して、7~8葉展開したキュウリの第4あるいは第5葉位の単葉(葉面積200~250cm²)を用いた。測定手順としてまず根圏に標準空気を通し、2~3時間経過して光合成速度が安定してから、O₂濃度あるいはCO₂濃度を調節した空気を根圏に通して光合成速度の経時変化を調べた。各種組成空気処理毎にそれぞれ異なる個体を用いた。供試体は午前中にグローブキャビネット内に入れ、日没前までに測定を終了させた。

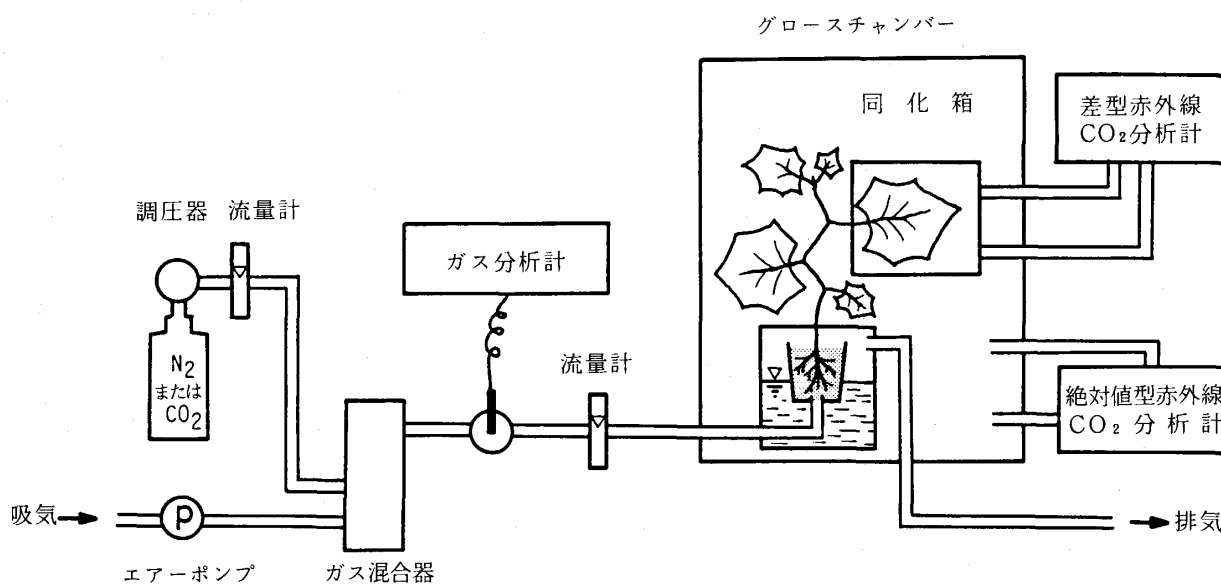


図2-1 根圏に各種組成の空気を通した状態で、光合成速度を測定するための装置

グロースキャビネット内は気温 26℃、相対湿度 55% に設定した。その結果、同化箱内は気温 27 ± 1 ℃、相対湿度 78 ± 4 % となった。供試葉面上の光強度は 0.39 ± 0.02 cal/cm²/min であった。根圏に通した高 CO₂ 濃度の空気がグロースキャビネット内に洩れないように留意し、通気空気を実験室外に排出した。なおグロースキャビネット内の CO₂ 濃度を絶対値型 CO₂ 分析計により測定し、CO₂ が洩れていないことを確認した。

(2) 結果および考察

まず根圏に標準空気を通した状態での光合成速度 ($P_{a,i,r}$) を測定し、次に各組成空気を通して 2、3 および 4 時間後に光合成速度 (P_t) を測定した。 $P_{a,i,r}$ の値は個体によりやや異なったので、光合成速度の変化の比較を容易にするために、図 2-2 に示すように $P_t/P_{a,i,r}$ で表した。上図は標準空気と N₂ ガスを混合して O₂ 濃度を調節した空気を根圏に通した場合の、根圏 O₂ 濃度と $P_t/P_{a,i,r}$ の関係を示し、下図は標準空気と CO₂ ガスを混合して CO₂ 濃度を調節した空気を根圏に通した場合の、根圏 CO₂ 濃度と $P_t/P_{a,i,r}$ の関係を示したものである。ただし下図の場合は、CO₂ 濃度の増加にともない O₂ 濃度は低下し、CO₂ 濃度 20% の時の O₂ 濃度は 16.8% であった。

上図に示した結果では、O₂ 濃度の低下にともなって光合成速度は低下したが、O₂ 濃度 15% 以上での影響は小さく、10% 以下において、光合成速度の低下が著しくなることを示している。一方、下図に示した結果では、O₂ 濃度が光合成速度にほとんど影響しない 15% 以上であっても、CO₂ 濃度の増加にともない光合成速度は直線的に著しく低下し、時間経過とともにその低下率は増加した。一般の栽培土壌中でも見られるような CO₂ 濃度 3% (O₂ 濃度 20.3%) でも、光合成速度への影響が見られた。特に 4 時間後において、O₂ 濃度 10% (CO₂ 濃度 0.02%) では処理前の光合成速度 $P_{a,i,r}$ の 5% の低下に留まったのに対し、CO₂ 濃度 10% (O₂ 濃度 18.9%) ではその低下率は 15% となった。これらの現象は、根圏空気の O₂ 濃度の低下が作物の生育を抑制する以前に、CO₂ 濃度の増加による生育抑制が起こることを明確に示したものと見える。

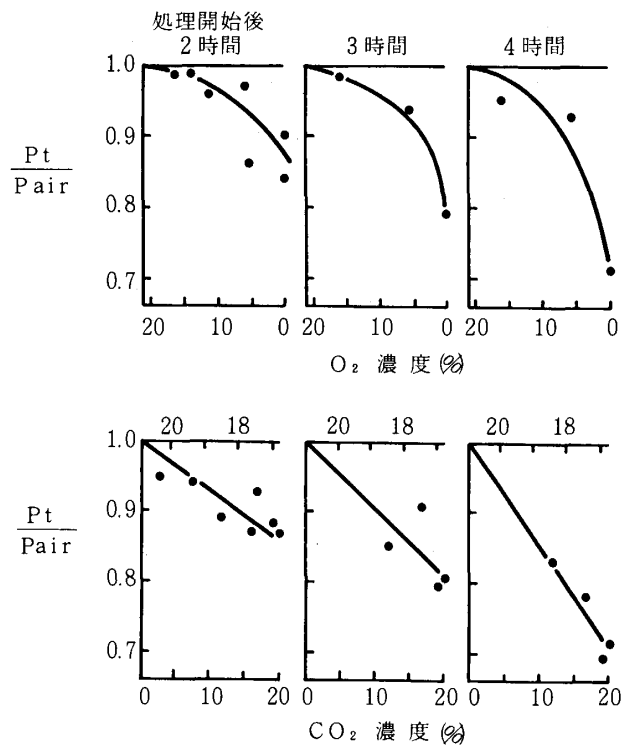


図 2-2 キュウリの光合成速度に対する根圏の O₂ および CO₂ 濃度の影響

$P_{a,i,r}$ は根圏に標準空気を通した時の光合成速度を示し、 P_t は各種組成の空気を通した時の光合成速度を示す。

2-2 根圏の CO₂ が光合成および蒸散におよぼす影響

前節では、根圏の CO₂ 濃度が光合成速度に大きな影響をおよぼすことがわかったので、本節では、さらに、作物の活性に対する根圏 CO₂ 濃度の影響を詳細に見るため、根圏に CO₂ 濃度の異なる空気を通した後の光合成速度の変化を調べると同時に、蒸散速度および葉温も測定して、植物体の水収支に対する根圏 CO₂ 濃度の影響についても検討を加えた。

(1) 実験方法

供試材料に用いたキュウリは昼温 30℃ (7時~17時)、夜温 23℃ (17時~7時) に設定した自然光型グロースキャビネット内において、レキ耕法によりポットで栽培した。測定時には播種後 20~30 日経過して葉が 5~6 枚展開していた。測定の前日に植物体を人工光型グロースキャビネット内に入れ、根

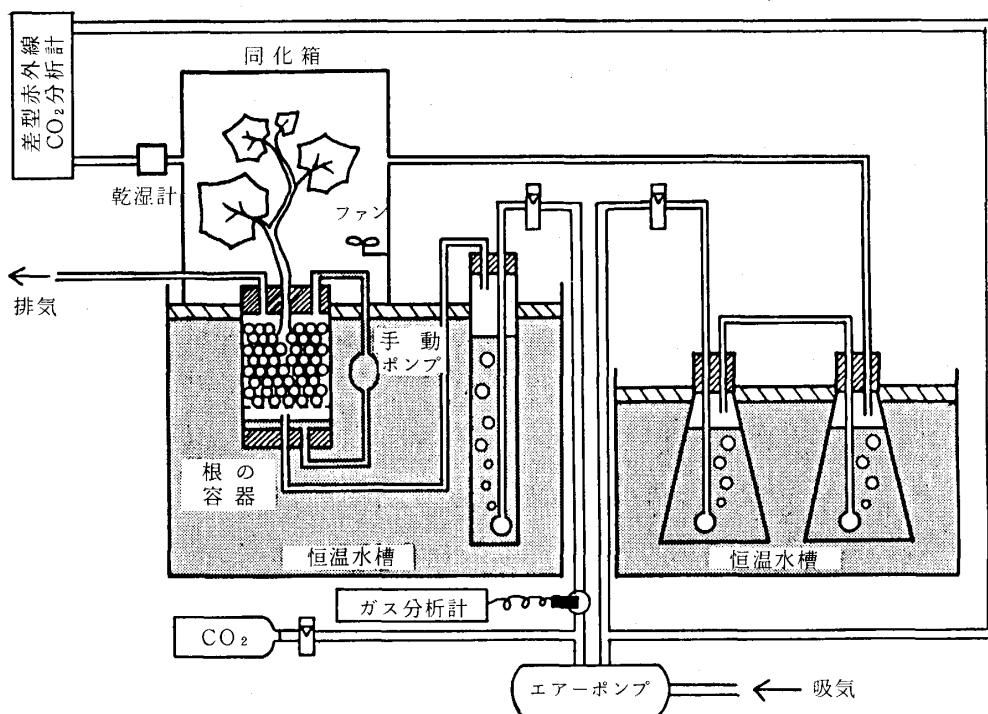


図 2-3 根圏に高 CO_2 濃度の空気を通した状態で、光合成速度および蒸散速度を測定するための装置

圏に標準空気を通し、翌日点灯後に光合成速度が安定してから CO_2 濃度を調節した空気を根圏に通した。測定は光合成速度、蒸散速度および葉温について行った。

図 2-3 に測定装置の概略を示す。根圏温度を一定にするため、栽培ポットを恒温水槽内に入れた。根圏への通気空気は標準空気と 100% CO_2 ガスを混合したもので、水中でバブリングして水蒸気で飽和させてからポット底面より通気し、実験室外に排出した。通気量は 1 l/min とした。通気空気の CO_2 濃度の値は O_2 濃度の測定値から算定した。 O_2 濃度の測定には前節と同様の酸素分析計を用いた。根への給水のため手動式ポンプを用いて、ポット底部に溜めた培養液を定期的に循環させた。

光合成速度と蒸散速度の測定は、開放型同化箱法により植物体地上部全体について行った。同化箱への流入空気は温度と湿度を一定とするため、恒温水槽内でバブリングした。光合成速度は、差型赤外線 CO_2 分析計を用いて測定した。蒸散速度は、同化箱への流入空気と同化箱からの流出空気の水蒸気量の差から求めた。流入空気中の水蒸気量はバブリングに用いた水の温度における飽和水蒸気量とし、流

出空気中のそれは熱電対乾湿球温度計の指示値より算定した。葉温は、2~3枚の葉の裏面に直径 0.1 mm の銅-コンスタンタン熱電対を付着させて測定した。同化箱内をファンで攪拌して、葉面境界層の影響を小さくした。根圏温度および同化箱内温度は 20°C 、光強度は植物体中央部の高さで $0.54 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ であった。

(2) 結果および考察

キュウリの根圏に CO_2 濃度の異なる空気を通した場合の光合成速度、蒸散速度および葉温と気温の差の変化を図 2-4 に示す。光合成速度および蒸散速度については、それぞれ 1 時間毎の平均値がプロットされている。 CO_2 濃度 6%、13% および 28% の空気を根圏に通気すると、光合成速度、蒸散速度とも時間経過にともない低下した。8 時間経過後の各濃度における低下率は、光合成速度ではそれぞれ 7%、14% および 31%、蒸散速度では 11%、14% および 30% となり、 CO_2 濃度が高くなるにともない両速度の低下率は大きくなった。また光合成速度と蒸散速度の低下率はほぼ等しくなった。葉温と気温の差は通気開始後徐々に増加し、8 時間後の葉温の上昇はそれぞれ 0.2°C 、 0.4°C および 0.6°C となり、

蒸散速度の低下にともなって葉温は上昇した。

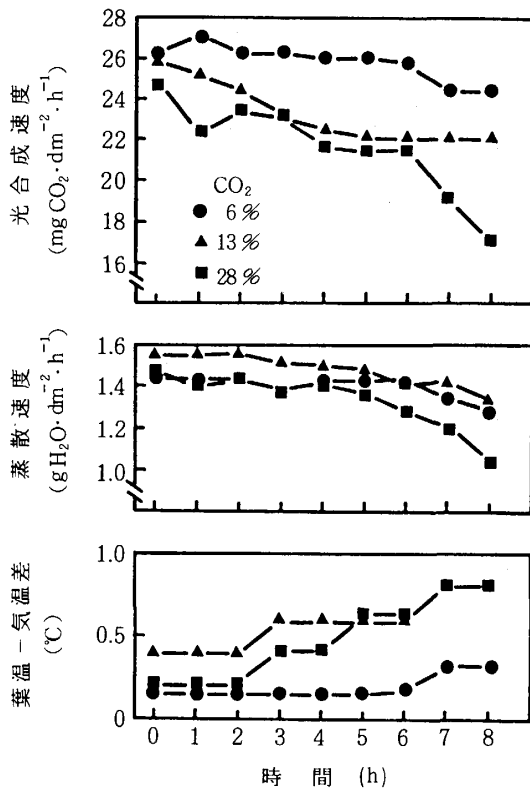


図2-4 キュウリの根圏に CO₂ 濃度の異なる空気を通じた後の、光合成速度、蒸散速度および葉温-気温差の経時変化。

以上のように根圏 CO₂ 濃度の増加により蒸散が抑制され葉温が上昇したことから、根圏の CO₂ によって植物体が水ストレスを受けていることが示唆された。また光合成速度の低下と蒸散速度の低下が類似していたことから、両速度の低下は水ストレスにより葉の気孔開度が小さくなり、拡散抵抗が大きくなったことが主な原因であろう。このような水ストレスは根の吸水機能抑制により生じていると考えられる。Chang ら²⁴⁾ (1945) は CO₂ が根の吸水を抑制することを報告し、また Glinka²⁵⁾ (1962) は高 CO₂ 濃度下で細胞膜の水分透過性が低下することを報告している。これらのことから、根圏の CO₂ 濃度の増加にともない短時間に光合成速度が低下したのは、根の吸水機能低下に起因して植物体を受ける水分ストレスが主な原因と考えられる。

2-3 根圏の CO₂ 濃度がサツマイモの光合成におよぼす長期の影響

これまで根圏の CO₂ 濃度が光合成を抑制するこ

とを実証するため、比較的高 CO₂ 濃度下で実験を行ってきたが、実際の栽培条件下での反応を知るためには、より低い CO₂ 濃度下での長期間の影響を調べる必要がある。そこで本節では、一般栽培土壤中で通常見られる濃度 1~2% の CO₂ の光合成におよぼす影響を見るため、サツマイモの根圏に CO₂ 濃度を調節した空気を通気して約 6 週間にわたって栽培を行い、光合成速度の経時変化を調べた。

(1) 実験方法

本実験では同一葉について長期間の光合成速度を測定するため、供試体にはサツマイモ (*Ipomoea batatas* L. 品種名、高系 14 号) の一葉挿しを用いた。サツマイモの一葉挿しというのは図 2. 5 に示すように、サツマイモのつるから切り取った一節と一葉を培地に挿したものである。栽培箱 (長さ 45 cm、幅 30 cm、深さ 18 cm) はプラスチック製であり、培地にはパーミキュライトを用いた。苗には側枝先端の展開葉から数えて第 5 葉目にあたる健全なものを用い、自然光型グロースキャビネット内で育成した。灌水には大塚ハウス 1 号および 2 号の標準培養液の 1/2 濃度溶液を用いた。グロースキャビネット内の温度は 20℃、相対湿度は 75% とした。挿苗後 6 日目から根圏に標準空気を通気し、16 日目から CO₂ 濃度の異なる空気を通気した。

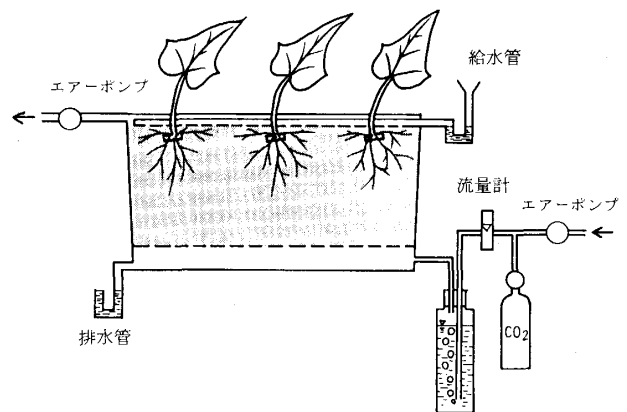


図2-5 根圏の CO₂ 濃度を変えて、サツマイモを栽培する装置の概略

CO₂ 処理区として CO₂ 濃度 1% 区および 2% 区を設け、対照区として標準空気を通気した区を設けた。通気量は 1 l/min とし、CO₂ 濃度は標準空気と 100% CO₂ ガスの混合比を変えて調節した。標

準空気の流量調節にはローターメーターを用いたが、微量の CO_2 ガスの調節には焼き石膏で作った抵抗²⁶⁾を用いた。通気は培地底面から行い、予め水中でバブリングして水蒸気で飽和させた。高 CO_2 濃度の通気空気が地上部に洩れないように、栽培箱上部は銀色ポリエチレンフィルム (厚さ 0.07 mm) で密閉し、地表面から出てくる空気はエアーポンプを用いてキャビネット外に排出した。各区には 6 個体を栽培し、このうち健全な 3 個体を光合成速度測定に供した。

光合成速度の測定は人工光型グロースキャビネット内において、差型赤外線 CO_2 分析計を用いて開放型同化箱法で行った。同化箱内温度は 20°C 、光強度は $0.54 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ であった。

(2) 結果および考察

図 2-6 にサツマイモの根圏に CO_2 濃度 1% と 2% の空気、および標準空気を通気した場合の約 6 週間にわたる光合成速度の変化を示す。標準空気を通気した対照区の光合成速度は、実験期間中はほぼ一定値を維持した。これは一葉挿し栽培であるために葉の老化発現が遅れるためである。²⁷⁾ 一方 2% CO_2 濃度区の光合成速度は、処理後 2 日目に既に対照区に対して 20% 低下し、その後 20~30% 低い値を維持しながら経過した。このことから CO_2 濃度 2% では、慢性的な光合成の抑制が生じていることがわかる。また 1% CO_2 濃度区の光合成速度は 2% CO_2 濃度区よりやや遅れて低下し始め、4 日後には対照区に対して 20% 低下した。しかし、1% CO_2 濃度

区の光合成速度変動の振幅は 2% CO_2 濃度区に比べて大きく、処理開始後 20 日前後に見られるように、対照区との差がほとんど認められない場合も生じた。このことは、 CO_2 濃度が 1% 程度では常に光合成が抑制されているわけではなく、時には回復する場合もあることを示している。しかし処理開始後 5 週間目以降からは 1% CO_2 濃度区も 2% CO_2 濃度区同様、対照区に対して 30% の低下となった。

処理開始から 6 週間後までの各区の平均光合成速度は、対照区、1% CO_2 濃度区および 2% CO_2 濃度区の順に、 $27 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$ 、 $22 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$ および $20 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$ となった。したがって単位葉面積については、1% CO_2 濃度区および 2% CO_2 濃度区の光合成量は 6 週間の間に、対照区に対してそれぞれ 19% および 26% 低下したことになり、根圏 CO_2 濃度の増加にともない、光合成量の低下することが明白であった。

以上のように、根圏の CO_2 濃度が一般の栽培土壌中で見られる 1~2% であっても、2~4 日間で光合成速度が 20% 低下すること、また CO_2 濃度 2% では光合成速度がほとんど回復することなく、慢性的な光合成抑制の生じていることがわかった。

2-4 光合成および蒸散に対する根圏の CO_2 の影響と温度との関係

根圏の CO_2 濃度の増加によって作物の光合成は抑制されるが、このような根圏の CO_2 の影響は、他の環境要因の変動にともない変化することが考えられる。そこで本節では、光合成に対する根圏 CO_2

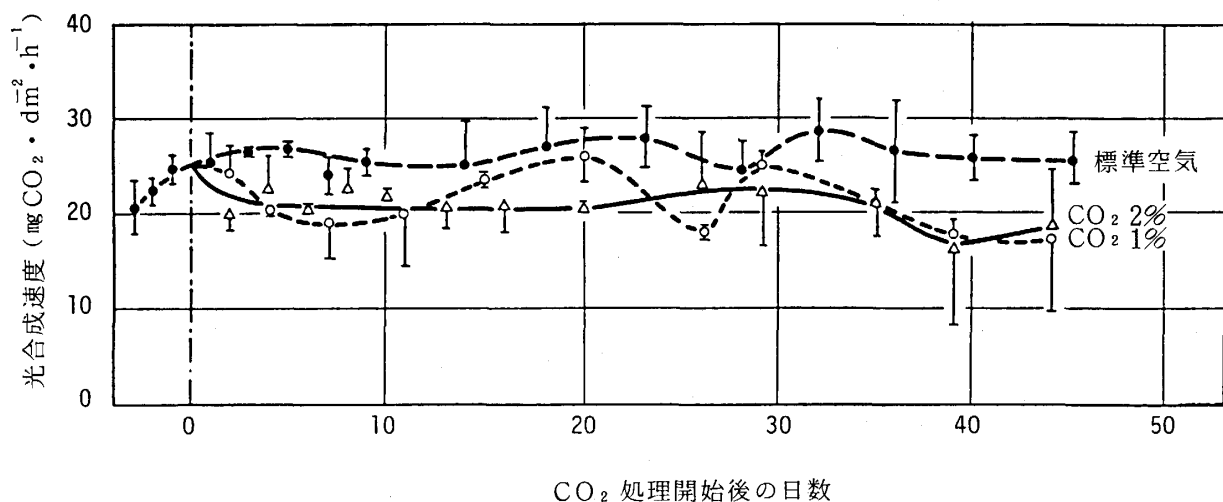


図 2-6 サツマイモの光合成速度に対する根圏の CO_2 濃度の影響

各点は 3 個体の平均値であり、縦棒は標準偏差を示す。

の影響度の温度による違いを調べるため、異なる温度下において、キュウリの根圏に種々の CO₂ 濃度の空気を通気して光合成速度を測定し、同時に蒸散速度および葉温も測定した。

(1) 実験方法

ここでの実験は、本章 2-2 節の実験に用いた装置を使って行った。気温、根圏温度を 30℃、20℃ および 15℃ の 3 段階に変化させ、それぞれの温度下で根圏に CO₂ 濃度 5~20% の空気を通気して、光合成速度、蒸散速度および葉温を測定した。

(2) 結果および考察

図 2-7 は処理開始後 8 時間の光合成速度の変化を示したものである。まず、根圏に標準空気を通気した状態での光合成速度 (P_{air}) を測定し、その後 CO₂ 濃度の異なる空気を通気して経時的に光合成

速度 (P_t) を測定した。P_{air} の値は個体によりやや異なったので、光合成速度の変化の比較を容易にするため P_t/P_{air} で表した。その結果、処理開始後 2 時間における CO₂ 濃度 20% の場合、30℃ ではほとんど光合成速度の低下が見られないのに対し、20℃ では 10% 低下し、15℃ では 15% 低下した。さらに時間経過にともない光合成の速度の低下率は大きくなったが、温度が低いほど CO₂ の影響が顕著となった。

次に蒸散速度の変化を図 2-8 に示す。光合成速度の場合と同様、標準空気を通気した時の値 (E_{air}) と CO₂ 処理後の値 (E_t) の比率 (E_t/E_{air}) が示されている。処理開始後 6 時間における CO₂ 濃度 30% の場合、30℃ では、ほとんど蒸散速度の低下は見られなかったが、20℃ では 10% 低下し、15℃ では 20

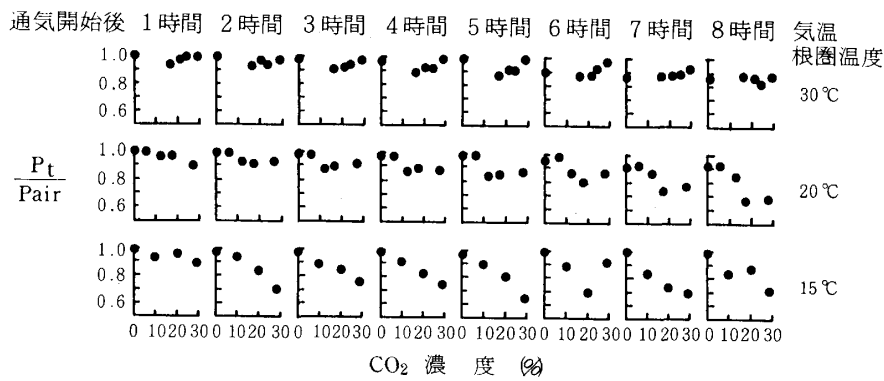


図 2-7 キュウリの光合成速度に対する根圏 CO₂ 濃度の影響と温度との関係

P_{air} は根圏に標準空気を通した時の光合成速度を示し、P_t は高 CO₂ 濃度の空気を通した時の光合成速度を示す。

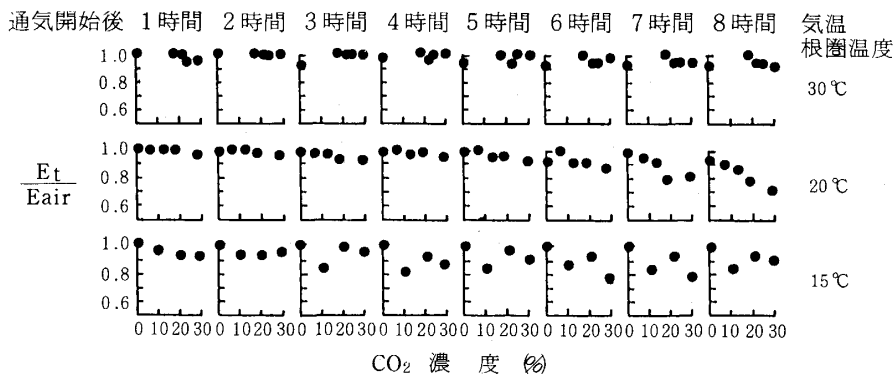


図 2-8 キュウリの蒸散速度に対する根圏 CO₂ 濃度の影響と温度との関係

E_{air} は根圏に標準空気を通した時の蒸散速度を示し、E_t は高 CO₂ 濃度の空気を通した時の蒸散速度を示す。

%低下した。特に 15℃では、CO₂による蒸散抑制は処理開始 1 時間後に既に見られた。このように根圏 CO₂ 濃度の増加にともなう蒸散速度の低下は、光合成速度の場合と同様に温度が低いほど早期に現れ、また顕著であった。

葉温 (T_t) と気温 (T_{air}) の差 ($T_t - T_{air}$) の変化を図 2-9 に示す。各温度条件下とも根圏の CO₂ 濃度の増加にともない ($T_t - T_{air}$) は増加する傾向が見られるが、とくに蒸散速度の低下の著しい 15℃と 20℃において、葉温と気温の差の上昇が顕著になった。

以上のように低温下では、根圏 CO₂ 濃度の増加にともなう光合成速度の低下が著しくなり、同時に蒸散速度の低下も顕著になることがわかった。CO₂ 濃度の増加にともなうこれらの低下は、CO₂ による根の吸水抑制に起因することを本章 2-2 節で述べた。このことから、温度が低いほど CO₂ による根の吸水機能の抑制が著しく、植物体は水ストレスを受け易くなり、そのため光合成抑制が顕著になるものと考えられる。

3. 根圏の CO₂ 濃度と作物の生育

根圏の CO₂ 濃度の増加にともない、数時間のうちに光合成速度は低下する。CO₂ 濃度が比較的長く短時間の光合成速度低下率が小さい場合でも、長期の栽培では光合成器官である葉の展開も抑制されるため、CO₂ の影響は相乗的に増大し生育抑制は顕著になるだろう。ここでは根圏 CO₂ 濃度が数%の時の作物の生育について検討した。

3-1. 根圏 CO₂ 濃度と生育との関係

キュウリの生育およびサツマイモの塊根肥大におよぼす根圏 CO₂ 濃度の影響を見るため、培地に CO₂ 濃度 0.5~5% の空気を通気して栽培を行った。

(1) 実験方法

キュウリを用いた実験はビニールハウスの中で夏季 (1982 年 8 月 14 日~24 日) および秋季 (1982 年 9 月 20 日~10 月 5 日) に行った。ビニールハウスは南北棟であり、側面と妻面は開放されていた。栽培箱は長さ 180 cm、幅 30 cm、高さ 30 cm であり、東西方向に 30 cm 間隔で 5 個並べられ、各箱それぞれにキュウリ 7 個体を栽培した。栽培箱 1 個を 1 処理区とし、通気空気の CO₂ 濃度設定値を 0.5%、2%、5% とした 3 処理区、および標準空気を通気した対照区の計 4 区をランダムに配置した。さらに光条件を均一にする目的で南端に予備の栽培箱を設置した。

栽培装置の概略を図 2-10 に示す。栽培箱はビニール塗料で防水処理をした厚さ 12 mm の合板でできており、その中に培地として川砂を充填した (深さ 20 cm)。培地底面より通気を行い、ハウス外部へ排出した。通気量は 3 l/min とし、CO₂ 濃度は標準空気と 100% CO₂ ガスの混合比を変えて調節した。標準空気の流量調節にはロータメーターを用いたが、微量の CO₂ ガスの調節には焼き石膏で作った抵抗を用いた。

栽培箱には合板の蓋を取り付け、キュウリを植えるため蓋の中央 1 列に直径 6 cm の穴を 25 cm 間隔

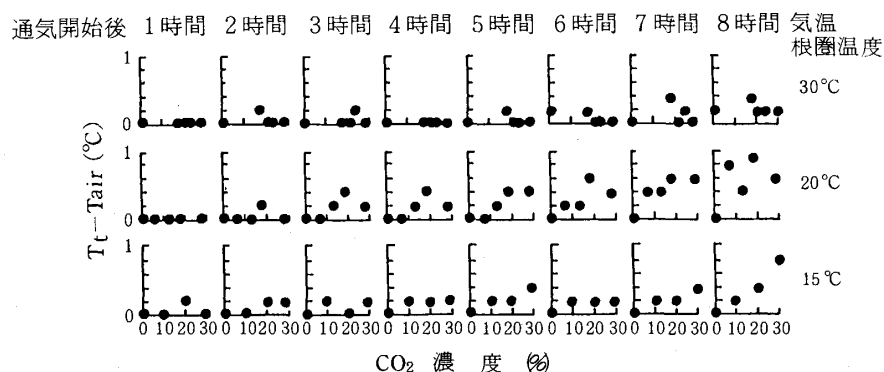


図 2-9 キュウリの葉温に対する根圏の CO₂ 濃度の影響と温度との関係
 T_{air} は根圏に標準空気を通した時の葉温を示し、 T_t は高 CO₂ 濃度の空気を通した時の葉温を示す。

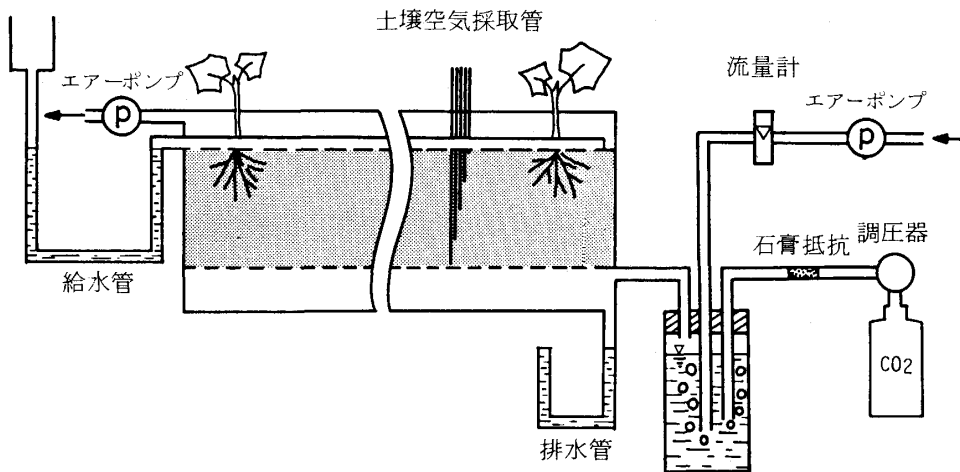


図2-10 根圏にCO₂濃度の異なる空気を通して栽培するための装置

に7ヶ所設けた。各穴にキュウリの種子を3粒ずつ播き、子葉展開後に間引いて各穴とも1個体にした。第1葉が展開した播種後2週間目に通気処理を開始した。高CO₂濃度の空気が地上部へ漏れないように各穴はポリエチレンフィルムで塞ぎ、キュウリの茎にポリエチレンフィルムを巻きつけゴム糸を結んで圧着した。さらに栽培箱流入空気量より排出空気量を多くして栽培箱内部をわずかに負圧にし、外部への空気の漏出を防いだ。

サツマイモを用いた実験はガラス室の中で夏季(1984年7月20日～9月5日)に行った。ガラス室は南北棟であり、側面と妻面は開放されていた。栽培には、キュウリの場合と同様の栽培箱を用い、各箱それぞれにサツマイモ12固体を挿苗した。サツマイモの場合は塊根肥大に対する影響を見るための実験であるので、地上部の繁茂を抑制するため挿苗後に展開葉10枚を残して生長点を切除し、無生長点栽培とした。挿苗後2週間目に、通気処理を開始した。通気空気が地上部に漏れないように、栽培箱上面をポリエチレンフィルム(銀色、厚さ0.07mm)で覆い、フィルムと茎の間の隙間をシリコン充填剤(KE45-T、信越化学工業株式会社製)で塞いだ。茎にシリコン充填剤が接触した部分には外見上の障害は見られなかった。

両作物の場合とも、灌水および施肥のため培養液(大塚ハウス1号および2号の標準の1/2濃度溶液)を毎日3ℓずつ与えた。培養液は図の給水口より、培地上面に2列に置かれた、小孔のあいた塩化ビニール製パイプを通して供給した。

土壌中CO₂濃度を測定するため、深さの異なる3～5地点の土壌空気を採取し、ガスクロマトグラフ(日立、663)を用いてCO₂濃度を求めた。

また本章2-2節で述べたように、根圏CO₂濃度の増加にともない光合成速度および蒸散速度が低下したことから、葉の拡散抵抗が大きくなることが予想されるので、本実験ではサツマイモの生育途中において、葉の水蒸気拡散抵抗値を測定した。測定にはポロメーター(LI-COR社製、モデルLI-60)を用い、各区の同じ葉位の健全な葉をそれぞれ6葉ずつ選んで測定に供した。

(2) 結果および考察

a 栽培土壌中のCO₂濃度

栽培箱内の土壌中CO₂濃度垂直分布の一例として、キュウリの夏季実験での通気開始後6日目ものを図2-11に示す。標準空気を通気した対照区では、土壌表面より深くなるほどCO₂濃度が低くなる傾向があったが、CO₂濃度の高い他の3処理区では逆に高くなった。各区とも灌水によるCO₂濃度の増減はほとんど見られなかった。

各深さのCO₂濃度の平均値は、高濃度のCO₂を通気した2%区および5%区でやや変動したが、実験期間中の平均で見ると、キュウリの場合には対照区、0.5%区、2%区および5%区の順に、夏季実験では0.1%、0.5%、2.6%および5.7%、秋季実験では0.1%、0.5%、2.1%および4.3%であった。またサツマイモの場合には対照区、2%区および5%区の順に、0.4%、2.3%および5.4%であった。なおO₂濃度については各区、各深さとも19～21

%であり、大気中の値とほとんど等しかった。

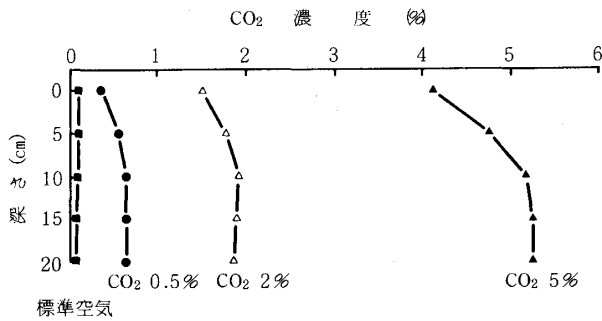


図2-11 CO₂濃度の異なる空気を通した培地内のCO₂濃度分布

b キュウリおよびサツマイモの生育

通気処理開始後のキュウリの生育状態を比較するため、生育の指標として葉面積と草丈を経時的に測定した。生育途中の葉面積は、葉を切除して測定することができないので、葉の縦と横の長さの積より算定した。図2-12に示すように実際の葉面積と算定値との相関係数は0.996であり、かなり良い相関が見られた。

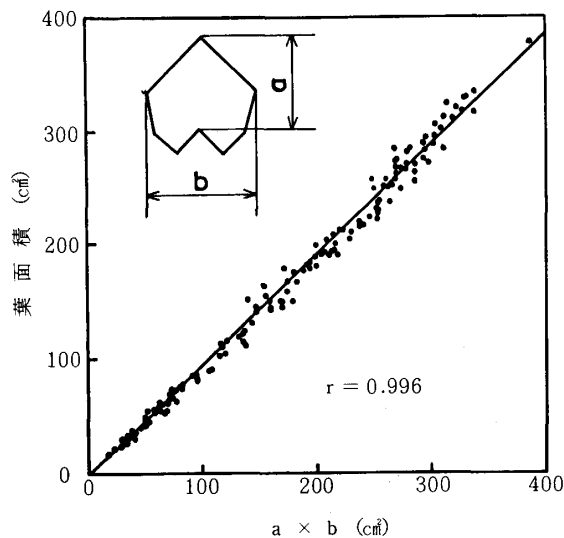


図2-12 キュウリ葉の実際の葉面積と算定値（葉長および葉幅の積）との関係

通気開始後の各区1個体あたりの葉面積の経時変化を図2-13に示す。これらの値は各区7個体のうちで、通気開始時の葉面積がほぼ等しい5個体の平均値である。夏季実験では通気開始後6日目に、2

%区および5%区と対照区の間で有意差が見られ、CO₂処理区の葉面積は対照区より15%小さくなった。また秋季実験では通気開始後5日目に0.5%区および5%区と対照区との間で有意差が見られた。各区間の差は、日数の経過にともない大きくなっていった。

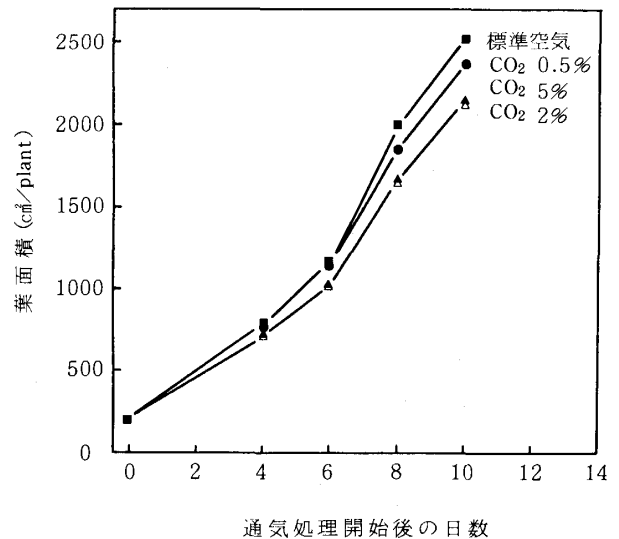


図2-13 キュウリの根圏にCO₂濃度の異なる空気を通した後の葉面積の変化

草丈については葉面積のような明確な差は見られなかったが、葉面積と同様な傾向を示し、対照区が常に最大となった。

キュウリの生育結果を表2-1および表2-2に示す。根重と含水率はいずれも7個体の平均値であるが、その他はすべて前述の5個体の平均値である。夏季の実験結果(表2-1)では、2%区と5%区の葉面積および全乾物重が対照区に比べて15~17%少なくなり、また地上部生重が24%少なくなった。春季の実験結果(表2-2)では、5%区の葉面積が対照区に比べて16%少なくなった。また0.5%区と対照区との間にも差が認められ、0.5%区の葉面積および全乾物重は対照区に比べてそれぞれ14%および12%少なくなった。0.5%区と対照区との差が夏季には見られず秋季に見られたのは、本章1-5節で述べたように、低温下ほどCO₂濃度の光合成に対する影響度の大きいことが一因と考えられる。

ここで興味深いのは、両実験ともCO₂濃度の増加にともない含水率の低下する傾向が見られたこと

表2-1 キュウリの生育に対する根圏 CO₂ 濃度の影響 (夏期) (1 個体あたり)

処 理	根圏 CO ₂ 濃度 (%)	葉面積 (cm ²)	草 丈 (cm)	地上部 生 重 (g)	乾 物 重 (g)					地上部含水率 (乾物重に対する%)
					葉	茎および葉柄	根	地上部	全 体	
標準空気	0.07	2520 (100)	79.5 (100)	146.3 (100)	7.99 (100)	4.71 (100)	1.03 (100)	12.70 (100)	13.73 (100)	1031 (100)
CO ₂ 0.5%	0.51	2369 (94)	74.7 (94)	138.0 (94)	8.12 (102)	4.61 (98)	1.44 (140)	12.73 (100)	14.17 (103)	977 (95)
CO ₂ 2%	2.60	2120 (84)	68.7 (86)	111.1 (76)	6.72 (84)	3.76 (80)	0.94 (91)	10.48 (83)	11.42 (83)	958 (93)
CO ₂ 5%	5.70	2149 (85)	71.7 (90)	111.9 (76)	6.89 (86)	3.72 (79)	0.98 (95)	10.62 (84)	11.60 (84)	937 (91)
L.S.D. (0.05)		273	4.7	16.7	0.70	0.48	-	1.13	1.13	61

実験期間 (1982年8月14日~24日)、各区5個体の平均値である。
()内は標準空気区を100とした場合の各区の比率を示す。

表2-2 キュウリの生育に対する根圏 CO₂ 濃度の影響 (秋期) (1 個体あたり)

処 理	根圏 CO ₂ 濃度 (%)	葉面積 (cm ²)	草 丈 (cm)	地上部 生 重 (g)	乾 物 重 (g)					地上部含水率 (乾物重に対する%)
					葉	茎および葉柄	根	地上部	全 体	
標準空気	0.06	1174 (100)	40.0 (100)	61.9 (100)	3.61 (100)	1.67 (100)	0.67 (100)	5.28 (100)	5.95 (100)	1066 (100)
CO ₂ 0.5%	0.52	1003 (86)	34.4 (86)	53.7 (87)	3.24 (90)	1.41 (84)	0.69 (103)	4.53 (86)	5.22 (88)	1091 (102)
CO ₂ 2%	2.10	1047 (89)	35.5 (89)	56.3 (91)	3.41 (94)	1.52 (91)	0.48 (72)	4.93 (93)	5.41 (91)	1008 (95)
CO ₂ 5%	4.30	989 (84)	36.3 (91)	53.3 (86)	3.21 (89)	1.47 (88)	0.67 (100)	4.68 (89)	5.29 (89)	1028 (96)
L.S.D. (0.05)		170	4.7	10.3	0.44	0.30	-	0.71	0.71	68

実験期間 (1982年9月20日~10月5日)、各区5個体の平均値である。
()内は標準空気区を100とした場合の各区の比率を示す。

である。特に夏季では、対照区に対する CO₂ 処理区の含水率の低下率は、0.5%区、2%区および5%区の順にそれぞれ5%、7%および9%となり、上述の傾向が顕著であった。このことは前節で述べたように、根圏の高 CO₂ 濃度による根の吸水機能の抑制に起因していると考えられる。長期の栽培では根の吸水機能抑制に加えて、養分吸収機能の抑制²⁴⁾の影響も生じ、CO₂ による生育抑制はさらに顕著になるものと考えられる。

以上の結果から、葉面積および全乾物重と根圏 CO₂ 濃度との関係を示したものが図2-14である。両実験を通して、CO₂ 濃度 0.5~2%で生育抑制が起り、2%以上の CO₂ 濃度下での生育は標準空気を通気した時 (CO₂ 濃度 0.1%) の生育より 10~20%低下し、根圏 CO₂ 濃度の増加にともなう生育抑制が明らかとなった。

なお本実験において、光条件を均一にするため実験区の南側に設置した通気を行わなかった区の生育についても調査した。夏季実験ではこの区の土壤中

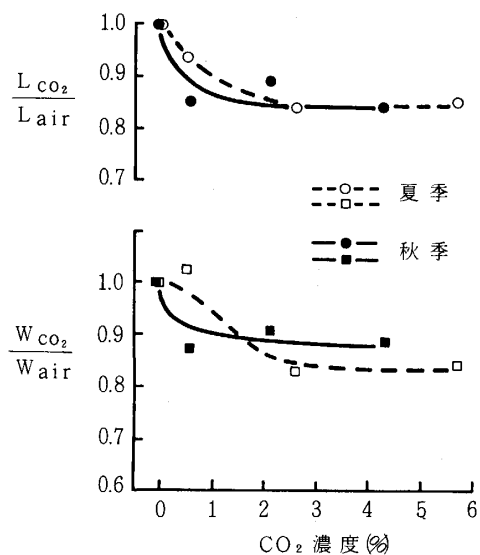


図2-14 根圏 CO₂ 濃度とキュウリの生育との関係

L_{Air} および W_{Air} はそれぞれ、根圏に標準空気を通した場合の葉面積および全乾物重を示し、L_i および W_i はそれぞれ、高 CO₂ 濃度の空気を通した場合の葉面積および全乾物重を示す。

CO₂濃度の平均値は0.3%であり、0.5%区より低くなったにもかかわらず生育が悪く、全乾物重は0.5%区に比べて13%少なくなった。長村ら²⁰⁾(1978)も述べているが、無通気状態では根の表面近くのCO₂濃度が土壌空隙中の平均濃度より高くなっているため、生育抑制が著しくなったものと考えられる。今後は根の近傍のより微細な環境についての調査が必要である。

次にサツマイモの生育結果を表2-3に示す。この場合には生長点が切除されているので、地下部に対する影響だけが考えられる。CO₂処理による地下部の差は明確であり、5%区の塊根生重は標準空気を通気した対照区に比べて17%少なくなった。また根の生育抑制が顕著となり、2%区および5%区の根の乾物重は対照区に対して23~39%少なくなった。また塊根と根をあわせた地下部全体の乾物重では、CO₂処理区が対照区に対して14%少なくなった。植物全体についても、5%区は対照区に対して13%少なくなった。このようにサツマイモの場合もキュウリと同様、根圏CO₂濃度の増加にともなう生育抑制が明らかであった。

葉表面の水蒸気拡散抵抗値は、灌水前で土壌水分が比較的少ない時に測定した。その結果は、対照区が5.0 sec/cmであるのに対して、2%区では6.9 sec/cm、5%区では7.5 sec/cmとなり、値圏CO₂濃度が高くなるほど水蒸気拡散抵抗値は大きくなった。水蒸気拡散抵抗値の増加はCO₂拡散抵抗値の増加を意味し、すなわち光合成速度の低下を意味する。よって本実験での生育抑制は光合成速度の低下が主因であると考えられる。

3-2 生育に対する根圏CO₂の影響と温度との関係

根圏CO₂濃度の増加にともなう光合成抑制は温

度が低いほど著しくなることを本章2-4節で述べた。そこで本節では異なる温度下で根圏のCO₂濃度を変えてキュウリを栽培し、生育に対する根圏CO₂の影響度の温度による違いについて検討した。

(1) 実験方法

気温20℃、25℃および30℃、相対湿度75%に設定した3基の自然光型グロースキャビネット内でキュウリを栽培した。栽培装置の概略を図2-15に示す。栽培箱は長さ60cm、幅40cm、深さ35cmであり、培地には川砂を用いた。各温度に設定したグロースキャビネット内にはそれぞれ栽培箱を4個ずつ設置し、各栽培箱にキュウリ4個体を栽培した。根圏のCO₂濃度を変えるため2個の栽培箱にはCO₂濃度2%の空気を、他の2個には標準空気を培地底面より通気した(通気量1 l/min)。CO₂濃度2%の空気は標準空気と100%CO₂ガスを混合して作った。通気による培地の乾燥を防ぐため、通気空気を水中でバブリングして水蒸気で飽和させた。栽培箱上面は銀色のポリエチレンフィルム(厚さ0.07mm)

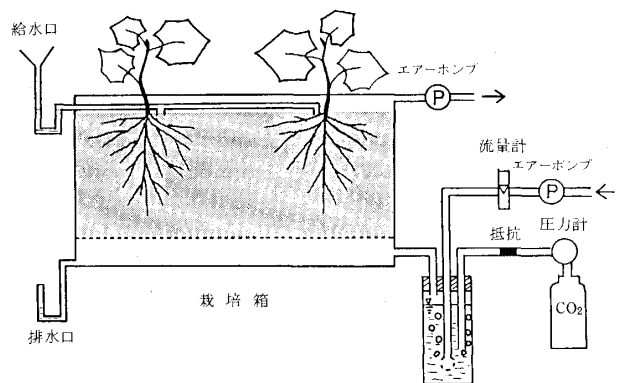


図2-15 栽培装置の概略

表2-3 サツマイモの生育に対する根圏CO₂濃度の影響

処 理	生 重 (g)		葉面積 (cm ²)	乾 物 重 (g)				葉の水蒸気 拡散抵抗値 (sec/cm)	
	地上部	塊 根		地上部	塊 根	根	地下部 全体		
標準空気	92.1 (100)	58.8 (100)	1512 (100)	15.36 (100)	12.58 (100)	5.93 (100)	18.51 (100)	33.87 (100)	5.0 (100)
CO ₂ 濃度2%	97.9 (106)	55.3 (94)	1576 (104)	16.23 (106)	12.23 (97)	3.62 (61)	15.85 (86)	32.08 (94)	6.9 (138)
CO ₂ 濃度5%	82.8 (93)	48.6 (83)	1325 (88)	13.61 (89)	11.41 (91)	4.58 (77)	15.99 (86)	29.60 (87)	7.5 (150)

実験期間(1984年8月3日~9月5日)、各区12個体の平均値である。
()内は標準空気処理区を100とした場合の各区の比率を示す。

で被覆し、地上部に高 CO₂ 濃度の空気が漏れるのを防ぐため、培地中を通して地表面より出てきた通気空気はエアポンプを用いてチャンパー外に排出した。栽培箱からの CO₂ の漏れを調べるため、キャビネット内の CO₂ 濃度を赤外線 CO₂ 分析計を用いて定期的に調べた。

温度処理は播種直後から、また通気処理は播種後 20 日目から行った。灌水および施肥のため培養液として、大塚ハウス 1 号および 2 号の標準の 1/2 濃度溶液を毎日 1 l ずつ与えた。

(2) 結果および考察

キュウリの生育結果を表 2-4 に示す。各処理区においてそれぞれ 8 個体のキュウリを栽培したが、そのうちで処理開始時の葉面積のほぼ等しい 6 個体を生育調査に供した。標準空気区に対する 2% CO₂ 濃度区の全乾物重の低下は、30℃ 下ではほとんど見られなかったが、25℃ では 10% の低下、20℃ では 12% の低下となり、温度の低下にともない両通気処理区の差が大きくなった。地上部生重では更に両区の差が顕著であり、標準空気区に対する 2% CO₂ 濃度区の低下率は 30℃、25℃ および 20℃ の順に 4%、18% および 18% となった。また葉面積の低下率も同様に 4%、15% および 16% となり、温度の低下にともない、標準空気区に対する 2% CO₂ 濃度区の生育抑制は顕著になった。

地上部の含水率については、30℃ では 2% CO₂ 濃度区と標準空気区に間に差は認められないが、25℃ および 20℃ になると、2% CO₂ 濃度区の含水率

が標準空気区に対して 5~7% 低くなっており、低温下では CO₂ 濃度の増加によって含水率の低下する傾向が見られた。本実験結果に加えて、CO₂ 濃度の増加にともなう蒸散速度の低下が低温下で著しいこと(本章 2-4 節)から、温度が低いほど根圏 CO₂ による根の吸水抑制が生じ易いことが明白になった。このような根の吸水抑制は、光合成の場合と同様、生育に対しても低温下ほど根圏 CO₂ の抑制効果を大きくする主な原因であろう。

第 3 章 根圏ガス環境の改善

1. まえがき

前章では、栽培土壌中の O₂ 濃度が作物の生育を阻害する濃度にまで低下する以前に、CO₂ 濃度が数千 ppm~数% にまで増加することにより、生育が抑制されることについて述べた。このことから、土壌中 CO₂ 濃度を低く維持することができれば、作物の生育が促進され、生産性の向上することが期待される。そこで本章では、根圏ガスを大気と交換して土壌中 CO₂ 濃度を低下させるため、栽培土壌中に強制的に大気を通気し、作物生育に対するその強制通気の効果について検討した。

土壌中へ強制通気を行って、作物の生育促進を計ろうとする研究はこれまでに、Boicourt²⁸⁾ (1941) や安田ら²⁹⁾ (1970) により行われているが、その生育促進の原因が土壌中の O₂ 濃度の増加によるものか、あるいは CO₂ 濃度の低下によるものかは明らかにされていない。本研究では生育促進の原因を CO₂

表 2-4 キュウリの生育に対する根圏 CO₂ の影響と温度との関係

温度 (°C)	通気処理	葉面積 (cm ²)	草丈 (cm)	地上部 生重 (g)	乾物重 (g)					地上部含水率 (乾物重に對する%)
					葉	茎および葉柄	根	地上部	全体	
30	標準空気	3594 (100)	130.8 (100)	210.7 (100)	7.65 (100)	6.47 (100)	1.70 (100)	14.11 (100)	15.81 (100)	1392 (100)
	2% CO ₂	3457 (96)	122.3* (94)	201.4 (96)	7.33 (96)	6.29 (97)	2.04 (120)	13.62 (97)	15.38 (97)	1387 (100)
25	標準空気	3280 (100)	101.6 (100)	201.6 (100)	8.30 (100)	5.84 (100)	2.27 (100)	14.14 (100)	16.29 (100)	1343 (100)
	2% CO ₂	2779* (85)	95.7 (94)	166.1* (82)	7.25 (87)	5.08 (87)	2.24 (99)	12.33 (87)	14.63 (90)	1247 (93)
20	標準空気	1165 (100)	24.3 (100)	57.7 (100)	4.53 (100)	1.31 (100)	1.05 (100)	5.83 (100)	6.88 (100)	889 (100)
	2% CO ₂	989* (84)	21.8 (90)	47.5* (82)	3.95* (87)	1.08 (82)	1.01 (97)	5.03* (86)	6.03* (88)	846 (95)

通気処理期間 (1983年7月14日~25日)、播種6月23日、各区6個体の平均値である。

*有意水準 5% で、標準空気区と 2% CO₂ 区に有意差が認められる。

() 内は標準空気区を 100 とした場合の 2% CO₂ 区の比率を示す。

濃度の低下によるものと考え、合理的な強制通気方法の開発にあたり、土壌中 CO_2 濃度を指標として一連の実験を行った。

第1節では栽培土壌中への強制通気の実証するため、通気を行った場合と行わない場合の各種作物の生育を比較した。また、前章では生育に対する根圏 CO_2 の影響が低温下で大きくなることを述べたが、このことから、低温下ほど強制通気による生育促進効果が著しいことが予想される。そこで本節では、異なる温度下での作物の生育促進に対する強制通気の効果の差異についても調べた。

第2節では、実用的な根圏ガス環境調節法を開発するための基礎的知見を得るため、土壌中への通気量および通気時間間隔を変えて栽培を行い、このような根圏ガス交換方式によるガス環境改善法の実際栽培への適用について検討した。

2. 土壌中への強制通気による根圏ガス環境の改善

2-1 土壌中への強制通気による各種作物の生育促進および収量増加

土壌中の CO_2 濃度を下げるために、栽培畝内に強制通気を行った場合の各種作物の生育ならびに収量を調査した。

(1) 実験方法

実験は、大阪府立大学農学部の実験圃場において行った。供試作物には、表3-1に示すように施設園芸で重要な果菜であるキュウリ (*Cucumis sativus* L.)、ナス (*Solanum melongena* L.)、トマト (*Lycopersicon esculentum* MILL.)、ならびに生産量の多い根菜であるサツマイモ (*Ipomoea batatas* LAM.) およびダイコン (*Raphanus sativus* L.) を用いた。表3-1にはまた各作物の品種名、植栽状況および生育調査に用いた個体数も示した。

栽培畝の概略を図3-1に示す。それぞれの作物

について2本の畝を用い、光条件を均一にするため各畝の半分を通気区、残りの半分を無通気区とした。なおサツマイモについては1本の畝を通気区、隣接する畝を無通気区とし、両区の間にも栽培畝を設けた。各畝は幅50 cm、高さ20 cm、長さ10 mであり、畝の中央20 cmの深さに通気用パイプを埋設した。この通気用パイプには内径14 mmの塩化ビニール製パイプを用い、空気の放出口として5 cm毎に直径2 mmの穴を2ヶ所ずつ設けた。通気はエアークンプレッサーを用いて行い、通気による土壌の乾燥を防ぐために、通気空気は水中を通して水蒸気飽和とした。畝長さ1 mあたりの通気量は、サツマイモの場合は1 l/min、その他の場合は2.5 l/minとした。

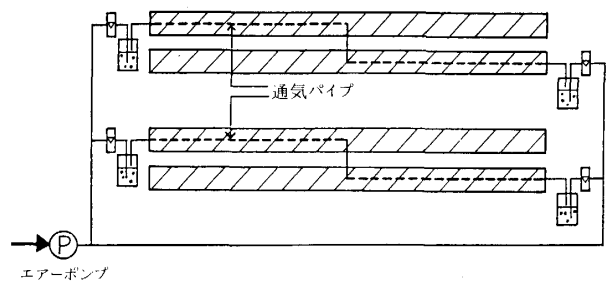


図3-1 栽培畝の概略

土壌空気組成を測定するため、あらかじめ畝に埋設した土壌空気採取管より試料空気を採取し、ガスクロマトグラフで分析した。

2週間毎に培養液(大塚ハウス1号および2号の標準の1/2濃度溶液)を1個体あたり350 cc与えた。また葉のしおれが見られた時に畝間灌水を行った。

(2) 結果および考察

a 土壌中 CO_2 濃度

表3-1 供試作物の種類と植栽状況および調査個体数

作物名	品 種	播 種 日	植え付け日	植え付け方 法	栽植間隔	調査個体数	
						通気区	無通気区
キュウリ	山東四葉	5月4日	6月1日	移植	80 cm	5	5
ナ ス	千 両	5月4日	6月1日	移植	80 cm	8	8
ト マ ト	雷 光	5月4日	6月1日	移植	80 cm	6	7
サツマイモ	高系14号		6月4日	挿 苗	50 cm	18	18
ダイコン	時 無	10月4日	10月30日 (間引き)	直 播	30 cm	7	6

図3-2は通気を行った場合と行わない場合の、サツマイモ栽培畝断面のCO₂濃度分布の一例を示す。測定日前日に降雨があり、テンシオメーターで測定した深さ10cmにおけるpF値は1.8であった。無通気区では地表面から深くなるほどCO₂濃度が高くなり、畝の中心部では1.2%となった。一方通気区では地表面下5cm付近のCO₂濃度は無通気区と大差ないが、中心部に向かうにしたがい低下し、通気パイプ近傍では0.4%となった。図中の8地点の値を平均すると、無通気区の0.9%に対して通気区では0.6%となり、畝全体のCO₂濃度は強制通気により0.3%低下した。

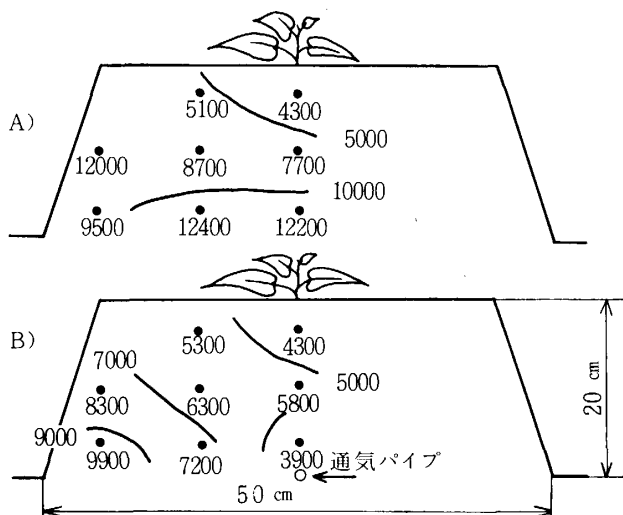


図3-2 栽培畝内のCO₂濃度分布 (ppm)
1983年7月21日、14時30分に測定
A) 無通気区 B) 通気区
通気量は畝長さ1mあたり1ℓ/minである。

図3-3はキュウリ、ナス、トマトおよびダイコンの栽培土壌中におけるCO₂濃度の経時変化を示す。各種は畝の中央深さ5~20cmのCO₂濃度の平均値である。キュウリ、ナスおよびトマトの畝は7月1日までポリフィルム(銀色、厚さ0.07mm)でマルチングされていたため、無通気区のCO₂濃度が3.5%にも達しているが、通気区では0.1%の低濃度を維持している。このように通気区の濃度がサツマイモの場合に比べて極端に低いのは、通気量がサツマイモの場合の2.5倍であることが主な原因と考えられる。マルチフィルムを取り除いた後も、

無通気区は通気区に比べて5~15倍の高濃度であった。ダイコンの場合、通気区および無通気区のCO₂濃度はそれぞれ0.04%および0.3%なり、果菜類の栽培畝内の値に比べてかなり低くなったものの、両区の間で0.2%以上の濃度差が見られた。

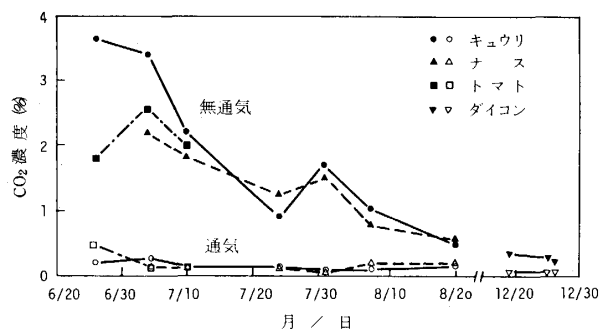


図3-3 各種野菜栽培畝内のCO₂濃度
各値は、畝中央の深さ5cmから20cmまでの平均値である。

なお無通気区および通気区のO₂濃度は18~21%であり、両区の間で大きな差は見られなかった。また両区の地温もほとんど等しかった。

b 作物の生育および収量

表3-2および表3-3にそれぞれ、サツマイモおよびダイコンの生育結果を示す。サツマイモの場合、通気区の塊根生重は無通気区に対して13%増加し、さらに乾物重では20%増となった。また地上部生重では18%の増加となった。ダイコンの場合、通気処理効果は地上部には見られなかったが、根の生重は23%増加した。根の太さは両区とも等しかったが、根の長さが通気区で18%長くなったことから、ダイコンでは通気により根の伸長が促進されることがわかった。

表3-2 サツマイモの生育および収量に対する土壌中への強制通気の影響(1個体あたり)

処 理	地上部生重 (g)	塊根生重 (g)	塊根乾物重 (g)
通 気 区	1210 (118)	926 (113)	282 (120)
無 通 気 区	1025 (100)	824 (100)	235 (100)

()内の数字は、無通気区を100とした場合の通気区の比率を示す。

表3-3 ダイコンの生育および収量に対する土壌中への強制通気の影響
(1個体あたり)

処 理	草 丈 (cm)	葉 数	生 重 (g)			根 径 (cm)	根 長 (cm)
			地 上 部	根	全 体		
通 気 区	21.7 (97)	21.2 (97)	66.6 (94)	194.6 (123)	261.2 (114)	41.7 (100)	22.1 (118)
無 通 気 区	22.3 (100)	21.8 (100)	70.9 (100)	158.5 (100)	229.5 (100)	41.6 (100)	18.8 (100)

()内の数字は、無通気区を100とした場合の通気区の比率を示す。

図3-4および図3-5にキュウリおよびナスの積算収量の経時変化を示す。果実の収穫はキュウリでは150g、ナスでは100gを基準にして行った。キュウリでは、通気開始後30日目(収穫開始後18日目)から通気区の収量が無通気区の収量を上回り、その後徐々にその差は増大した。75日後には通気区が4.3kgに達し、無通気区に対して17%の増加となった。ナスの場合、両区の差異はキュウリの場合ほど顕著でなかったが、通気処理後50日目(収穫開始後19日目)に通気区の収量が無通気区を15%上回った。しかしその後両区の差は小さくなり、70日後には11%、75日後には6%の増加に留まった。このようにナスの場合、通気処理により収穫時期が早くなる傾向が見られた。果実を除いたナスの植物体の生育結果を表3-4に示す。無通気区に対する通気区の増加率は、葉面積では13%、全乾物重では16%となった。トマトの場合、アオガレ病発生のため通気処理後30日で実験を中止したので、果実を収穫できなかった。しかしそれまでの生育結果は表3-5に示すように、通気区の果実が生重および乾物重とも無通気区に対して45%の増加を示し、全乾物重では13%の増加となり、通気による生育促進効果が明白であった。

以上のように、根菜および果菜とも強制通気による増収効果がみられた。本実験では栽培土壌中の O_2 濃度は18~21%であり、一般に生育が阻害されるといわれている濃度9~21%より十分に高濃度である。また土壌水分と地温については、通気による影響がほとんど見られていない。一方土壌中 CO_2 濃度は、通気処理により0.2%~3.4%低下したことから、強制通気による生長促進や収量増加は、 CO_2 濃度の低下に起因していると考えられる。

Boicourtら²⁸⁾(1941)は、バラの苗床に強制通気

を行うことにより、樹高が2倍になったことを報告しているが、その理由の説明は十分になされていない。この場合無通気区の O_2 濃度は18.8%であり、生育を阻害する濃度にまで低下していない。よって

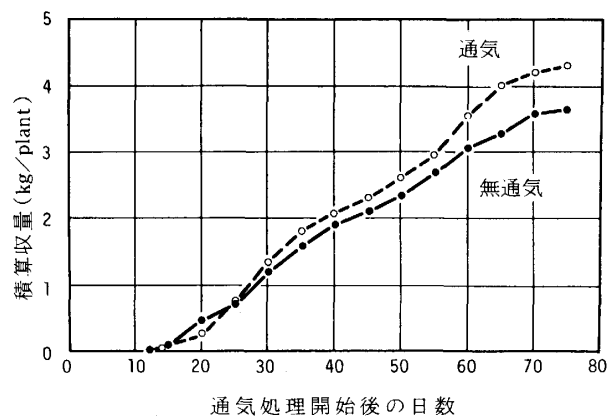


図3-4 キュウリの収量に対する土壌中への強制通気の効果

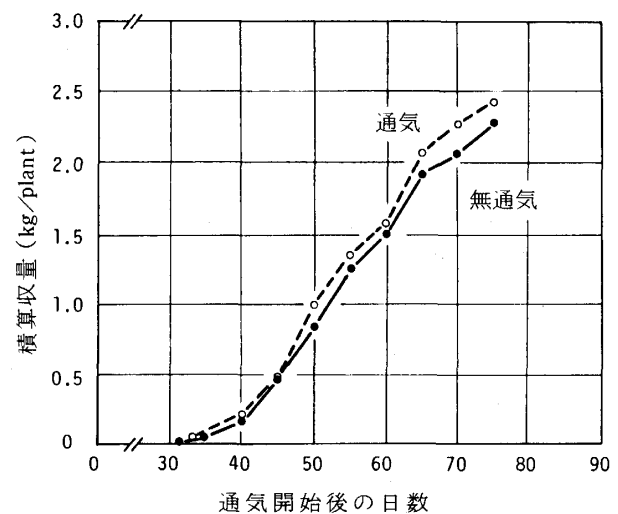


図3-5 ナスの収量に対する土壌中への強制通気の効果

表3-4 ナスの生育に対する土壌中への強制通気の影響 (1個体あたり)

処 理	葉面積 (cm ²)	地上部生重 (g)	乾物重 (g)				
			葉	葉柄+茎	根	地上部	全 体
通気区	6888 (113)	676.8 (114)	41.4 (120)	104.0 (114)	30.5 (113)	145.4 (116)	175.9 (116)
無通気区	6088 (100)	592.1 (100)	34.3 (100)	90.7 (100)	27.0 (100)	125.1 (100)	152.1 (100)

()内の数字は、無通気区を100とした場合の通気区の比率を示す。

表3-5 トマトの生育に対する土壌中への強制通気の影響 (1個体あたり)

処 理	生 重 (g)		乾 物 重 (g)					
	茎	果 実	葉	葉柄+茎	果 実	根	地上部	全 体
通気区	886.0 (109)	317.4 (145)	45.6 (111)	55.8 (108)	19.9 (145)	6.9 (103)	121.3 (114)	128.2 (113)
無通気区	811.4 (100)	218.2 (100)	41.1 (100)	51.6 (100)	13.7 (100)	6.7 (100)	106.4 (100)	113.1 (100)

()内の数字は、無通気区を100とした場合の通気区の比率を示す。

通気を行わなかった場合のCO₂濃度1.5%が通気により0.3%にまで低下したことが、生育促進をもたらした原因と考えられる。また安田ら²⁹⁾(1970)はカンランの栽培土壌中に強制通気を行った場合に生育が促進されたことを報告し、この生育促進は土壌中のO₂濃度の増加およびCO₂濃度の低下により生じたと述べている。しかし無通気区において極端なO₂不足の状態は見られていないので、O₂濃度の影響は少ないと思われる。本研究の結果から、この場合の生育促進も、土壌中CO₂濃度の低下が主な原因であると考えるのが妥当であろう。

強制通気の効果としては、単に土壌中のCO₂濃度を低下させることのみならず、第2章3-1節で述べたように、土壌空気の流れによって根と土壌空気との間のガス交換を促進させることが考えられる。すなわち、無通気状態では土壌空隙での空気流動が極めて少なく、根の表面近傍のCO₂濃度が土壌空隙中の濃度よりかなり高くなっていると思われる。よって栽培土壌中のCO₂濃度測定値が数千ppmであったとしても、根近傍ではそれ以上の高濃度となっているため、生育に対する影響が著しくなるのであろう。

2-2 生育に対する強制通気の効果と温度との関係

低温下では根圏CO₂による光合成および生育抑

制が、高温下に比べて顕著になることを第2章で述べた。よって栽培土壌中へ強制通気を行って、根圏のCO₂濃度を低下させることによる生育促進効果は、低温下ほど著しいことが予想される。そこで本節では栽培培地の温度を変えてキュウリを栽培し、培地中に強制通気を行った場合と行わない場合の生育を比較検討した。

(1) 実験方法

キュウリを自然光型ファイトトロン内で、円筒型のポットを用いて栽培した。ファイトトロン内温度は日中(7~17時)28~30℃、夜間(17~7時)23℃に設定した。栽培装置の概略を図3-6に示す。ポットは塩化ビニール製で内径20cm、深さ40cmである。培地には川砂を用い30cmの深さに充填した。根圏温度の異なる2区として、培地の温度を23℃とするためにポットを恒温水槽に入れた区(低温区)と、室温中に置いた区(室温区)を設けた。さらに各温度処理区の中で、培地中に通気量1ℓ/minで強制通気を行った区(通気区)と行わない区(無通気区)を設けた。よって実験区としては、低温通気区、低温無通気区、室温通気区および室温無通気区の4区となった。

各実験区は2個のポットからなり、各ポットにはキュウリ2個体を栽培した。温度処理および通気処理は第1葉展開後に開始した。灌水および施肥のた

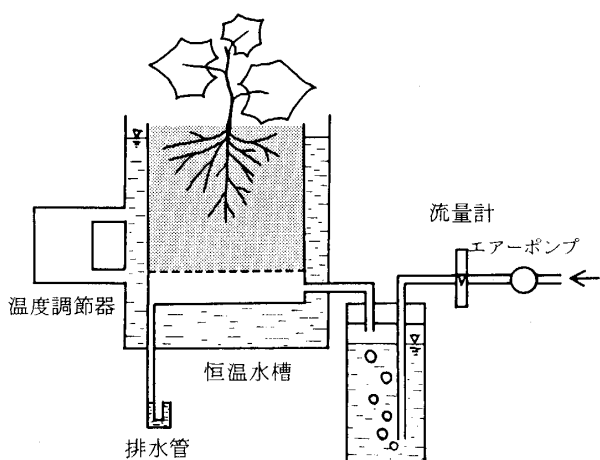


図3-6 栽培装置の概略

め、培地の表層約1cmが乾燥した時に培養液（大塚ハウス1号および2号の標準の1/2濃度溶液）を全区同時に与えた。

培地中のCO₂濃度を求めるため、あらかじめ培地内に埋設した土壤空気採取管から試料空気を採取し、ガスクロトグラフを用いてCO₂濃度を測定した。実験は1983年1月24日～2月10日、1983年9月14日～24日の2回繰り返して行った。

(2) 結果および考察

図3-7に培地中のCO₂濃度の経時変化を示す。これらの値は、灌水前における深さ5cm～30cmまで5cm毎のCO₂濃度平均値である。無通気区のCO₂濃度は最初0.15%であったが、処理開始後15日目には低温区で0.5%、室温区ではさらに高く0.9%まで増加した。一方通気区では、室温区および低

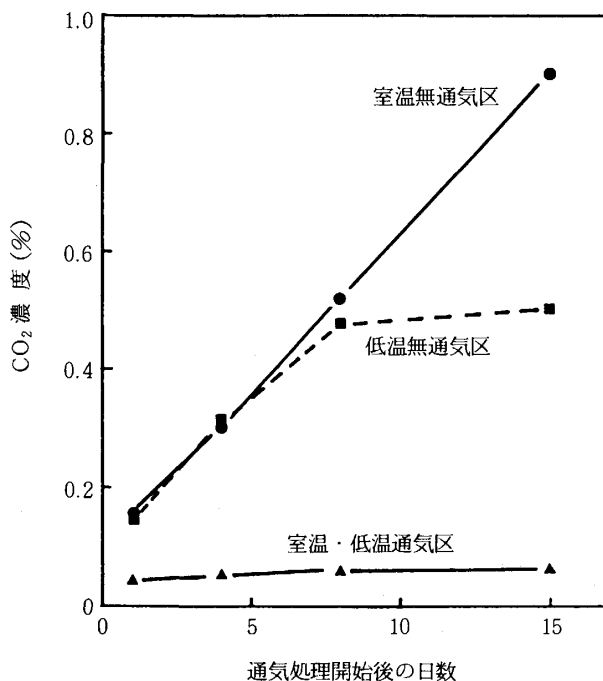


図3-7 通気処理開始後の培地内CO₂濃度の変化
各値は、深さ5cmから30cmまでの平均値である。室温区の培地温度は28/23℃（昼/夜）、低温区の培地温度は23℃（昼夜とも）とした。

温区とも実験期間中0.06%の低濃度を維持した。

表3-6および表3-7にそれぞれ2回の実験結果を示す。表3-6において日中の温度を30℃とした室温区では、通気区と無通気区の生育の差はほとんど見られなかった。一方根圏の温度を23℃に維持した低温区では、通気区の全乾物重が無通気区に対して17%増加、葉面積が21%の増加となり、10日間の通気処理によって生育が約20%促進された。

表3-7において日中の温度を28℃にした室温区

表3-6 キュウリの生育に対する根圏への通気の効果と温度との関係（実験1）

気温 昼/夜	根圏温度 (°C) 昼/夜	通気処理	葉面積 (cm ²)	草丈 (cm)	地上部 生重 (g)	乾物重 (g)				地上部含水率 (乾物重に対する%)	
						葉	茎および葉柄	根	地上部全体		
30/23	30/23	通気	1287 (104)	45.3 (99)	59.4 (100)	2.67 (101)	1.43 (99)	0.48 (102)	4.10 (100)	4.58 (101)	1349 (99)
		無通気	1241 (100)	45.9 (100)	59.6 (100)	2.64 (100)	1.45 (100)	0.47 (100)	4.09 (100)	4.55 (100)	1357 (100)
30/23	23/23	通気	1532 (121)	49.1 (101)	76.2 (120)	3.37 (117)	1.86 (118)	0.65 (112)	5.23 (118)	5.87 (117)	1357 (102)
		無通気	1268* (100)	48.5 (100)	63.6 (100)	2.88* (100)	1.57 (100)	0.58 (100)	4.45 (100)	5.03* (100)	1329 (100)

通気処理期間（1983年9月14日～9月24日）、播種9月1日、各区4個体の平均値である。
*有意水準5%で、通気区と無通気区の間有意差が認められる。
()内は無通気区を100とした場合の通気区の比率を示す。

表3-7 キュウリの生育に対する根圏への通気の効果と温度との関係(実験2)

気温 (°C) 昼/夜	根圏温度 (°C) 昼/夜	通気処理	葉面積 (cm ²)	草丈 (cm)	地上部 生重 (g)	乾物重 (g)				地上部含水率 (乾物重に対 する%)	
						葉	茎および葉柄	根	地上部全体		
28/23	28/23	通気	1749 (107)	86.5 (101)	84.4 (109)	5.11 (112)	3.11 (108)	1.89 (114)	8.22 (111)	10.11 (111)	926 (98)
		無通気	1627 (100)	85.4 (100)	77.6 (100)	4.56 (100)	2.87 (100)	1.66 (100)	7.43 (100)	9.08 (100)	946 (100)
28/23	23/23	通気	1925 (132)	82.8 (105)	94.9 (130)	5.53 (132)	3.40 (125)	1.97 (112)	8.93 (130)	10.89 (126)	983 (103)
		無通気	1463* (100)	78.6 (100)	72.8* (100)	4.18* (100)	2.72* (100)	1.76 (100)	6.89* (100)	8.65* (100)	956 (100)

通気処理期間(1983年1月24日~2月10日)、播種1月4日、各区4個体の平均値である。
 *有意水準5%で、通気区と無通気区間に有意差が認められる。
 ()内は無通気区を100とした場合の通気区の比率を示す。

では、無通気区に対する通気区の生育は全乾物重で11%増、葉面積では7%増であった。一方23°Cの低温区では通気区と無通気区の生育の差はさらに大きく、全乾物重では26%増、葉面積では32%増となった。

通気処理開始後の生育の変化を見るため、生育の指標として葉面積を測定した。生育途中の葉面積は第2章3-1節同様、葉の縦と横の長さの積より推定した。低温区における通気区と無通気区の葉面積の経時変化を図3-8に示す。無通気区に対する通気区の葉面積の増加は、処理開始後4日目ですでに11%となった。時間経過にともない両区の差は顕著になり、10日目にはその差が21%に達した。

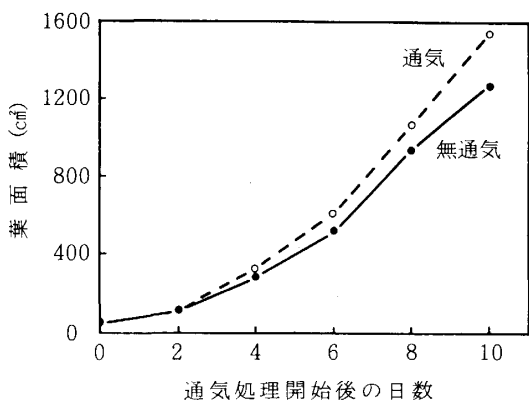


図3-8 通気処理開始後のキュウリ葉面積の変化
 気温は30/23°C(昼/夜)、根圏温度は23°C(昼夜とも)であった。

以上のように根圏温度が低い場合には、通気による生育促進効果が著しくなることがわかった。最近の施設栽培では、冬期の暖房に用いるエネルギー量

を軽減するために栽培温度を下げる傾向にあるが、このような場合には、特に根圏のCO₂による生育抑制が著しいため、栽培土壌中のCO₂濃度を下げる必要がある。

3. 栽培土壌中へ強制通気を行う場合の通気量および通気時間間隔と作物の生育

前節では、エアーコンプレッサーを用いて栽培畝中へ強制通気を行うことにより、各種作物の生育が促進され、また収量が増加することを述べた。このような土壌空気交換方式による根圏ガス環境の制御を行う場合、その通気量あるいは通気時間が問題となる。そこで本節では、栽培土壌中への通気量を変えてキュウリおよびサツマイモを栽培し、通気量と生育との関係を調べた。また通気を断続的に行ってサツマイモを栽培し、通気時間間隔と生育との関係を調べた。

3-1 土壌への通気量とキュウリの生育

(1) 実験方法

キュウリをプラスチック製栽培箱(長さ45cm、幅30cm、深さ18cm)で栽培し、培地への通気量を変えてその生育を調べた。培地には川砂を用いた。キュウリは子葉展開後に栽培箱に移植し、1箱あたり4個体ずつ栽培した。

栽培装置の概略を図3-9に示す。通気はエアーポンプを用いて行い、培地底面から根圏に通気した。通気処理による培地の乾燥を防ぐため、通気空気はあらかじめ水中でバブリングして水蒸気飽和とした。通気処理区として通気量0.3 l/min区、1 l/min区および2 l/min区を設け、対照区として強制通気を行わない無通気区を設けた。通気処理は第1葉展開後に開始した。

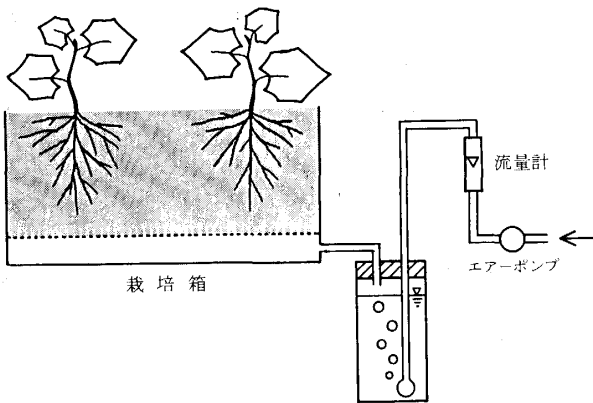


図3-9 栽培装置の概略

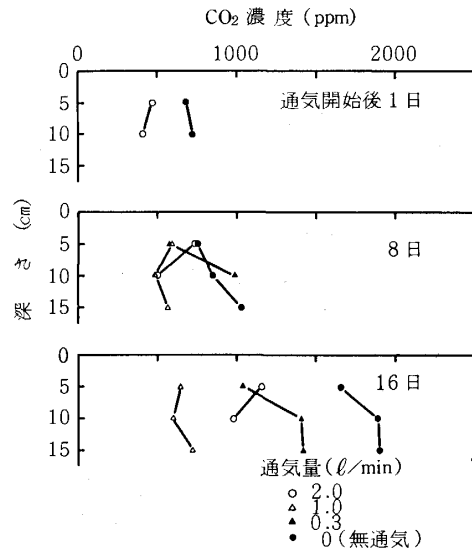
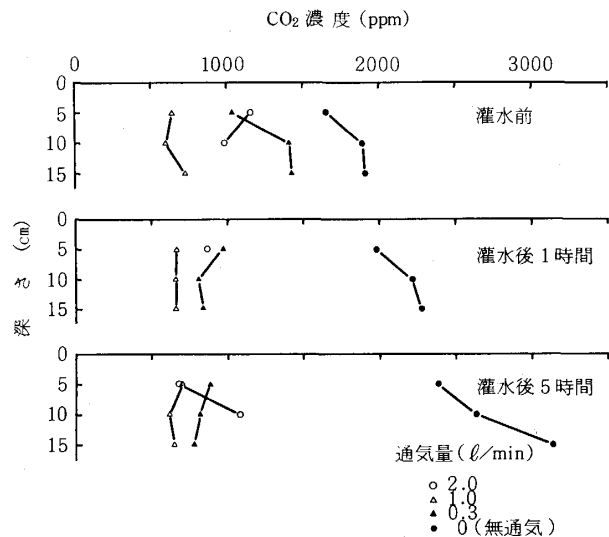
実験は2回繰返された。実験1は昼温28℃(7時~17時)、夜温23℃(17時~7時)に設定された自然光型ファイトトン内において、1981年7月23日から8月14日まで23日間行った。また実験2は葉面と側面が開放されたビニールハウス内において、1981年10月1日から19日まで19日間行った。

灌水および施肥のため前節と同様の培養液を与えた。栽培箱1個あたりの灌水量は、実験1では通気処理開始後13日目まで毎日0.5ℓ、その後は毎日1ℓであり、実験2では2日毎に1ℓであった。土壌中のガス組成を求めるために、栽培箱側壁より注射針を挿入して試料空気を採取し、ガスクロマトグラフを用いてCO₂濃度およびO₂濃度を測定した。

(2) 結果および考察

図3-10に実験2の各区の培地中CO₂濃度の経時変化を示す。キュウリの生育にともない各区のCO₂濃度は増加し、通気量の違いによるCO₂濃度差は顕著になった。通気開始後16日目の培地中CO₂濃度の各深さの平均値は、無通気区、0.3ℓ/min区、1ℓ/min区および2ℓ/min区の順にそれぞれ1800ppm、1300ppm、700ppmおよび1000ppmとなった。2ℓ/min区の濃度が1ℓ/min区より高くなっているが、通気量の増加にともないCO₂濃度は低くなる傾向にあった。これらの値は灌水前のものであるが、土壌中CO₂濃度は土壌水分含量により変動するので灌水後のCO₂濃度の変化を調べた。その結果を図3-11示す。灌水5時間後に無通気区の深さ15cmでは3100ppmになり、各深さ平均で

は2700ppmまで増加したのに対して、通気処理区各深さの平均は700~900ppmとなり、灌水前より低下する傾向があった。なおいずれの場合も、培地中のO₂濃度は20~21%であった。

図3-10 通気処理開始後の培地内CO₂濃度分布の変化図3-11 灌水後の培地内CO₂濃度分布の変化

実験1の通気開始後14日目における深さ5cmでのCO₂濃度は、無通気区、0.3ℓ/min区、1ℓ/min区および2ℓ/min区の順にそれぞれ3100ppm、2100ppm、1100ppmおよび700ppmであり、全般に実験2の値より高くなった。

実験1および実験2の生育結果を、表3-8およ

び表3-9に示す。実験1では各区それぞれ4個体を栽培し、それら全個体を調査対象とした。また実験2では各区それぞれ8個体を栽培し、処理開始後の葉面積のはぼ等しい6個体を調査対象とした。

実験1の結果(表3-8)では、0.3 l/min区、1 l/min区および2 l/min区的全乾物重は、無通気区に対してそれぞれ10%、12%および19%増加し、通気量の増加にともない生育促進が顕著になった。植物体各部分について見ると、通気処理区の根の増加が著しく、無通気区に対する2 l/min区および1 l/min区の根の増加率は、それぞれ47%および31%であった。葉面積では、各通気処理区が無通気区に対してそれぞれ14~15%増加し、また草丈では8~10%増加した。

実験2の結果(表3-9)でも実験1と同様、通気量の増加にともない生育は促進された。全乾物重については、無通気区に対する0.3 l/min区、1 l/min区および2 l/min区の増加率はそれぞれ8%、10%および16%となった。また2 l/min

区の根の乾物重は無通気区に対して31%多くなった。葉面積では、1 l/min区および2 l/min区が無通気区に対して15~17%増加した。

図3-12に実験2のキュウリ葉面積の通気処理開始後の経時変化を示す。生育途中の葉面積は第2章3-1節と同様にして、葉の縦と横より求めた。通気量の増加にともない葉面積が増加する傾向は、通気処理開始後6日目にすでに見られた。そして日数の経過にともない、各通気処理区と無通気区の差は除々に大きくなっていった。

3-2 土壌への通気量とサツマイモの生育

(1) 実験方法

サツマイモを圃場の畝で栽培し、その栽培畝中への通気量を変えて生育を調べた。苗は展開葉7枚の付いた長さ約30cmの健全な枝を用い、50cm間隔に斜め挿しした。通気処理区として、畝長さ1mあたりの通気量を1.25 l/minとした区および2.5 l/minとした区を設け、対照区として強制通気を行わない無通気区を設けた。栽培畝は図3-1に示

表3-8 根圏への通気量とキュウリの生育との関係(実験1)

通気量 (l/min)	葉面積 (cm ²)	草丈 (cm)	乾物重(g)				
			葉	茎および 葉柄	根	地上部	全体
0 (無通気)	1588 (100)	84.0 (100)	3.93 (100)	2.53 (100)	1.34 (100)	6.46 (100)	7.80 (100)
0.3	1826 (115)	90.5 (108)	4.28 (109)	2.84 (112)	1.44 (107)	7.12 (110)	8.56 (110)
1.0	1817 (114)	92.8 (110)	4.22 (107)	2.81 (111)	1.75 (131)	7.02 (109)	8.77 (112)
2.0	1806 (114)	90.5 (108)	4.36 (111)	2.97 (117)	1.97 (147)	7.33 (113)	9.30 (119)
L.S.D. (0.05)	294	7.5	0.85	0.54	-	1.38	1.38

通気処理期間(1981年7月23日~8月14日)、各区4個体の平均値である。
()内は無通気区を100とした場合の各区の比率を示す。

表3-9 根圏への通気量とキュウリの生育との関係(実験2)

通気量 (l/min)	葉面積 (cm ²)	草丈 (cm)	乾物重(g)				
			葉	茎および 葉柄	根	地上部	全体
0 (無通気)	867 (100)	32.7 (100)	2.99 (100)	1.25 (100)	0.80 (100)	4.23 (100)	5.03 (100)
0.3	934 (108)	34.0 (104)	3.17 (106)	1.39 (111)	0.87 (109)	4.56 (108)	5.43 (108)
1.0	1011 (117)	34.8 (106)	3.30 (110)	1.41 (113)	0.84 (105)	4.71 (111)	5.55 (110)
2.0	993 (115)	33.6 (103)	3.36 (112)	1.43 (114)	1.05 (131)	4.79 (113)	5.84 (116)
L.S.D. (0.05)	91	3.1	0.37	0.21	0.20	0.57	0.69

通気処理期間(1981年10月1日~19日)、各区6個体の平均値である。
()内は無通気区を100とした場合の各区の比率を示す。

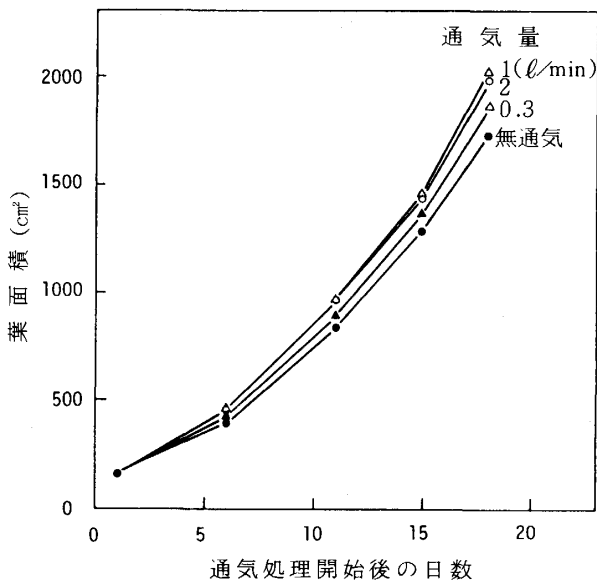


図3-12 通気処理開始後のキュウリ葉面積の変化

したものと同様であり、2本の畝を1組として、光条件を均一にするために各畝の半分に通気処理区、残りの半分に無通気区を設定した。

栽培期間は1984年の8月4日から10月12日までの69日間であり、通気処理は植え付け後2週間目に開始した。通気処理後の灌水は、地上部のしおれが見られた時に行った。

(2) 結果および考察

図3-13に各区の土壤中CO₂濃度の経時変化を示す。各値は畝中央の深さ5、10、15および20cmのCO₂濃度の平均値である。無通気区のCO₂濃度は0.4%から1.0%の範囲で大きく変化しているが、1.25 l/min区のおよび2.5 l/min区のCO₂濃度はほぼ一定を維持している。各測定値を平均すると、無通気区、1.25 l/min区および2.5 l/min区の順にそれぞれ0.60%、0.26%および0.20%となり、無通気区のCO₂濃度は通気処理区の約2.5倍になった。なお無通気区のCO₂濃度の変動に関して、9月3日から9月25日までのCO₂濃度の上昇は根量の増加によるものと考えられ、9月25日以後のCO₂濃度低下は、地温の低下によるものと考えられる。

図3-14は、各区の畝中央における土壤中CO₂濃度垂直分布の一例として、9月5日の測定値を示す。無通気区では地表面から深くなるほどCO₂濃度の増加する傾向が見られるが、通気処理区では深

さ20cmの位置に通気用パイプが埋設されているため、深くなるほどCO₂濃度は低下した。2.5 l/min区と無通気区の地表面付近のCO₂濃度は、ともに約0.35%と等しいが、塊根の多くが形成される深さ15cm付近ではそれぞれ0.15%および1.05%となり、無通気区のCO₂濃度は2.5 l/min区の約7倍であった。

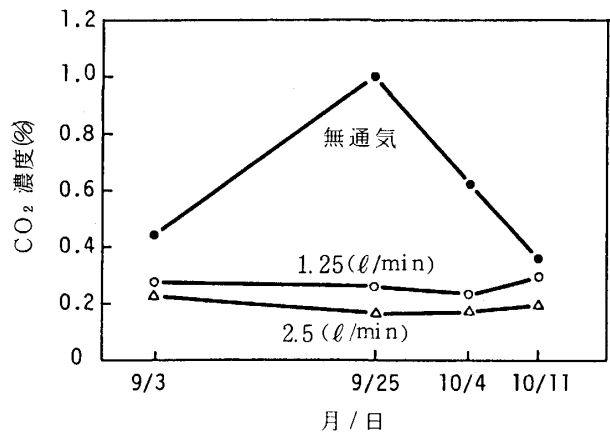


図3-13 栽培畝内への通気量と土壤中CO₂濃度
各値は深さ5-20cmの平均値であり、図中の数字は畝長さ1mあたりの通気量を示す。

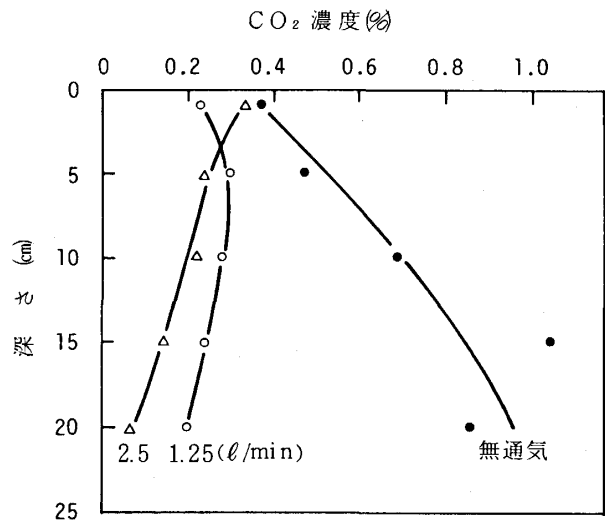


図3-14 通気量の異なるサツマイモ栽培畝内のCO₂濃度分布 (1984年9月25日に測定)

このような根圏ガス環境下でのサツマイモの生育結果を表3-10に示す。調査個体数は無通気区、1.25 l/min区および2.5 l/min区の順に31、15および16個体であった。塊根収量については、1.25 l/

min区および2.5 l/min区の塊根生重が、無通気区に対してそれぞれ18%および24%の増加となり、乾物重ではさらに19%および26%の増加となった。また2.5 l/min区の地上部生重は無通気区に対して26%多くなった。

以上のように栽培土壌中への通気量を増加させることにより、サツマイモの塊根収量が増加した。また畝の長さ1mあたり毎分1.25 l/min通気するだけでも、2割の増収効果が得られることがわかった。

表3-10 栽培土壌中への通気量とサツマイモの生育 (g/plant)

通気量	地上部生重	塊根生重	塊根乾物重
対照(無通気)	584.2 (100)	249.2 (100)	68.1 (100)
1.25 l/min	600.9 (103)	297.4 (118)	81.0 (119)
2.5 l/min	735.6 (126)	309.9 (124)	85.8 (126)

()内は対照区を100とした場合の各区の比率を示す。
供試個体数 対照区: 31、1.25 l/min区: 15、2.5 l/min区: 16
栽培期間(1984年8月3日~10月14日) 通気開始 8月17日

3-3 土壌中への通気時間間隔とサツマイモの生育

(1) 実験方法

サツマイモの栽培はビニールハウス内において、栽培箱を用いて行った。ビニールハウスは南北棟で表面および側面は開放されていた。栽培箱は合板製で、長さ90cm、幅90cmおよび深さ35cmであった。培地には、壤土140 lと鹿沼土10 lの混合土壌を用いた。苗は1箱あたり30本ずつ直立挿しで植え付けた。ここではサツマイモの塊根肥大に対する通気の効果を調べるのが目的であるので、地上部の繁茂を抑制するため、挿苗後14日目に展開葉10枚を残して生長点を除去した。

通気にはエアープンプを用い、培地底部から根圏に通気した。通気空気はあらかじめ水中を通して水蒸気飽和とし、通気量は1栽培箱あたり10 l/minとした。処理区として連続的に通気した区(連続通気区)、タイマーを用いて4時間毎に15分間通気した区(4時間毎通気区)および24時間毎に通気した区(24時間毎通気区)を設け、対照区として強制通気を行わない無通気区を設けた。

栽培期間は1982年6月30日から9月2日までの64日間であり、通気処理は挿苗後17日目に開始した。施肥のためにあらかじめ培地には、複合肥料(アンモニア性窒素8.0%、可溶性リン酸8.0%、水溶性カリ8.0%)500gを混合しておいた。灌水は植え付け後16日目までは毎日行い、それ以後は2日毎に行った。1栽培箱あたり1回の灌水量は10 lであった。

(2) 結果および考察

図3-15に、無通気区と連続通気区の土壌中CO₂濃度の経時変化を示す。各値は、午前10時(灌水前)に測定した深さ5、10、15および20cmの平均値である。無通気区のCO₂濃度は、通気処理開始後12日目まで1%以上であったが、その後急激に低下して、23日目以後は0.3~0.4%となった。一方連続通気区では、常に0.1%の低濃度を維持した。無通気区におけるCO₂濃度の変動は、土壤微生物の呼吸によるCO₂発生量の変化に起因すると考えられる。すなわちここで用いた壤土は圃場から採取したので、有機物が微生物により分解される過程でCO₂が多く発生したが、その後有機物含量の減少にともないCO₂発生量が低下したと思われる。

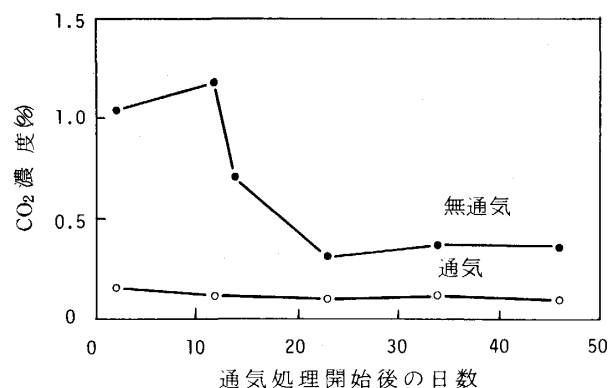


図3-15 通気処理開始後の土壌中CO₂濃度の経時変化
各値は、深さ5cmから20cmまでの平均値である。

図3-16に各区の土壌中CO₂濃度日変化の一例として、通気処理開始後12日目の測定値を示す。各値は深さ5、10および15cmにおけるCO₂濃度の平均値である。無通気区のCO₂濃度は、11時の灌水により、1.1%から1.6%まで0.5%増加したが、その後徐々に低下して、翌日の10時には1.0

%となった。一方24時間毎通気区では10時に15分間通気を行ったため、灌水によるCO₂濃度の増加は0.15%に留まった。4時間毎通気区では、通気後のCO₂濃度低下が顕著に見られた。連続通気区ではCO₂濃度の日変化はほとんど認められなかった。1日のCO₂濃度の平均は無通気区、24時間毎通気区、4時間毎通気区および連続通気区の順にそれぞれ1.2%、0.8%、0.5%および0.1%となり、通気時間間隔が短くなるほど土壌中CO₂濃度は低くなった。

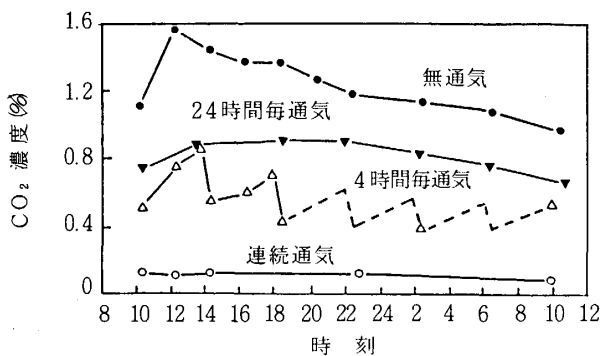


図3-16 培地内CO₂濃度の日変化

各値は、深さ5cmから15cmまでの平均値である。灌水は11時に行った。

このような根圏ガス環境下でのサツマイモの生育を表3-11に示す。塊根については30個体の平均値、地上部については中央10個体の平均値を用いて、栽培面積1m²あたりに換算した。サツマイモは生長点が除去されているため、各区の葉面積およ

表3-11 根圏への通気時間間隔とサツマイモの生育 (1m²あたり)

処 理	塊根乾物重 (g)	地上部乾物重 (g)	葉 面 積 (cm ²)
無 通 気	676 (100)	664 (100)	5940 (100)
24時間毎通気	836 (124)	616 (93)	5000 (84)
4時間毎通気	860 (127)	732 (110)	6200 (104)
連 続 通 気	948 (140)	724 (109)	6260 (105)

栽培期間(1982年6月30日~9月2日)、通気開始 7月17日
()内の数字は、無通気区を100とした場合の通気区の比率を示す。

び地上部乾物重の差異は明確でない。しかし塊根については各区の差異が著しく、無通気区に対する各通気処理区の塊根乾物重の増加率は、24時間毎通気区、4時間毎通気区および連続通気区の順にそれぞれ24%、27%および40%となった。

以上のように通気時間間隔を短くして土壌中CO₂濃度を低くするほど、サツマイモの塊根収量は多くなった。また1日1回15分間の通気によってもサツマイモの生育促進に効果のあることがわかった。

結 論

根圏のO₂濃度が21%近くであり、大気中の値とほぼ等しい場合でも、CO₂濃度が数千ppmになると作物の生育が阻害される。一般の栽培土壌中ではほとんど常に数千ppm以上になっており、特に有機物含有量の多い場合、さらに土壌水分含量の多い場合にはCO₂濃度は著しく高くなる。また最近プラスチックフィルムで地表面を覆うマルチング栽培が広く行われているが、このような土壌中のCO₂濃度は、深さ20cmで5%にも達する場合があります¹⁸⁾、生育に対する影響は無視できない。

根圏のCO₂が作物の生育を抑制する機構は、以下のものであろう。すなわち、まず根圏のCO₂により根の呼吸が抑制され、吸水機能が低下する。そのため植物体内の水分が減少し、葉のガス拡散抵抗値が増大する。このガス拡散抵抗値の増大は、主に気孔の閉鎖によるものと考えられる。抵抗値の増大にともなって葉内へのCO₂の取りこみが制限され、光合成速度が低下し、物質生産量の減少が生育を抑制する。また単位面積あたりの光合成量の減少に加えて、葉の展開速度も遅くなり葉面積の増加が抑えられるため、植物体全体の光合成量の減少が顕著になり、生育への影響はますます大きくなる。

このように、根圏のCO₂が作物の生育を抑制することから、栽培土壌中のCO₂濃度を低く維持できるならば、生育は促進され、収量は増加する。本研究では土壌中CO₂濃度を低下させる方法として、エアークンプレッサーを用いて土壌中に大気を強制的に送りこみ、土壌空気を交換した結果、増収効果が得られた。従来から土壌の通気性を良くする方法として、団粒構造土壌を用いたり、畝立て栽培が行われたりしており、また最近では温室でのメロン栽培などで、金網のベッドに土壌を入れてガスの拡散

面を広くすることが行われている。しかしいずれの場合も土壌空隙が水で満たされた時には、ガス拡散係数が低下して通気性が悪化することから、灌水量や灌水方法が問題となる。それに対して本研究で検討した土壌空気交換方式では、土壌中に通気しておれば灌水後の CO₂ 濃度の変動がほとんど見られないので、複雑な灌水技術を必要としない。

またこの根圏ガス環境調節法は、有機物含有量の多い土壌やマルチングされた土壌で効果が大きいと考えられる。前述のように有機物の施用や土壌表面のマルチングは、土壌中 CO₂ 濃度を増加させるため、根圏ガス環境の観点から見ると生育の抑制をもたらす。しかし有機物施用には、養分維持や土壌の膨軟化などの効果があり、またマルチングには、地温の上昇、水分保持および団粒構造の維持などの効果があるので、栽培上の意義が大きい。このようなことから、有機物を施用した土壌やマルチングした畝に強制通気を行い、根圏ガス環境を改善することにより、生育がいっそう促進されることが期待できよう。

実際の栽培にこの土壌空気交換方法を採用するためには、通気量や通気時間が問題となる。本研究の結果では通気量が多いほど、また通気時間が長いほど土壌中 CO₂ 濃度は低下し、生育促進効果が著しくなった。しかしサツマイモの塊根収量を2割増加させるためには、連続通気の場合には畝の長さ1 mあたり1 l/minの通気量で十分であり、また間欠通気の場合には土壌面1 m²あたり12 l/minの通気を1日1回15分間行うだけで十分であった。今後この方法を実用的な栽培技術とするためには、通気に要するエネルギー量に対する収量の増加率を考慮して検討する必要があるが、以上のことから、実用化の可能性は十分にあると考えられる。

本方式を実用化するための一試案として、CO₂ 分析計とエアーコンプレッサーを組合わせたシステムが考えられる。このシステムでは、栽培土壌中の CO₂ 濃度を CO₂ 分析計を用いて測定し、ある一定濃度以上になった時にエアーコンプレッサーが作動して、土壌中に空気を送り CO₂ 濃度を低下させる。この場合、通気を開始する時の CO₂ 濃度の設定値は、時刻や季節によって変化させる必要がある。例えば冬期の午前中は地温が低いので、作物の光合成や生育に対する根圏の CO₂ の影響が大きいので、

土壌中の CO₂ 濃度を比較的低い値に維持しなければならない。また日射量の少ない時には光合成量も少ないので、CO₂ 濃度をそれほど低下させる必要はないかもしれない。特に夜間は光合成が行われないので、慢性的な根の機能障害の生じない程度の CO₂ 濃度に設定する。場合によっては、夜間の強制通気はまったく行う必要がないかもしれない。このように、どの程度まで CO₂ 濃度を低下させなければならないのかを知るため、さまざまな環境の下での根圏 CO₂ 濃度と生育との関係を求める必要がある。また作物の種によって、根圏の CO₂ に対して感受性の高いものや低いものがあり、同じ種でも生育段階によってその感受性が異なることも考えられるので、各種作物について各生育段階ごとに、根圏の CO₂ に対する生育反応を調べることも今後の課題といえよう。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切な御指導、御鞭達をいただき、さらには本論文を御校閲いただいた大阪府立大学農学部環境調節工学講座、矢吹万寿教授に心から感謝いたします。

また本論文を御校閲していただき、懇切な御指導を賜った大阪府立大学農学部土地造成学講座、中谷三男教授ならびに同農業気象環境学講座、小元敬男教授に深く感謝いたします。さらには同環境調節工学講座、清田信助教授および原蘭芳信助手には、御指導、御援助いただいたことに深く感謝いたします。

また大学院生、松浦寛樹氏および糸田川晶子氏には、生育調査等に御援助いただいたことに深く感謝いたします。

引用文献

- 1) RUSSELL J. and APPLEYARD A. (1915) . The atmosphere of the soil: its composition and the causes of variation., *J. Agric. Sci.*, 7, 1-48.
- 2) BOYNTON D. and REWETHER W. (1938) . A way of sampling soil gases in dense subsoil and some of its advantages and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 3, 37-42.
- 3) 位田藤太郎 (1952) . 蔬菜園の土壌空気組成、農業および園芸、27、989-991.
- 4) MONTEITH J.L. (1963) . *Environmental control*

- of plant growth* [Evans L. T., ed.] . Academic press, N. Y.
- 5) 小川和夫・森哲郎・安田環 (1970) . 土壌の物理的要因と作物の生育に関する研究 (第3報) 土壌空気の組成について、東海近畿農試研報、19、81-97
 - 6) 梅林正直 (1972) . 施設栽培における土壌空気について、土壌の物理性、26、38-46
 - 7) CALLEBAUT F., GABRIELS D., MINJAUW W. and De BOODT M. (1982) . Redox potential, oxygen diffusion rate, and soil gas composition in relation to water table level in two soils, *Soil Sci.*, 134, 149-156.
 - 8) BUCKINGHAM E. (1904) . Contributions to our knowledge of the aeration of soils. *U. S. Dep. Agric. Bur. Soils Bull.*, 25, 5-52.
 - 9) PENMAN H. L. (1940) . Gas and vapour movements in the soil (2) . *J. Agric. Sci.*, 30, 570-581.
 - 10) Van BAVEL C. H. M. (1951) . A soil aeration theory based on diffusion. *Soil Sci.*, 72, 33-46.
 - 11) MILLINGTON R. J. and SHEARER R. C. (1971) . Diffusion in aggregated porous media., *Soil Sci.*, 111, 372-378.
 - 12) CURRIE J. A. (1960) . Gaseous diffusion in porous media. Part 1. A non-steady state method. *Brit. J. of Appl. Phys.*, 11, 314-317.
 - 13) CURRIE J. A. (1961) . Gaseous diffusion in porous media. Part 3. Wet granular materials. *Brit. J. of Appl. Phys.*, 12, 275-281.
 - 14) 矢吹万寿 (1965) . 高畝内土壌空気の炭酸ガス濃度、農業気象、21、113-114
 - 15) 矢吹万寿 (1966) . グリーン研究所報告集、10、1-17
 - 16) 矢吹万寿 (1976) . 作物の生育環境と光合成 (4)、農業および園芸、52 (12) , 1461-1464
 - 17) 位田藤太郎 (1977) . 養液栽培の培地管理 (施設園芸の環境と栽培、位田藤太郎編著)、誠文堂新光社
 - 18) 矢吹万寿・北宅善昭・松浦寛樹、(1985) . 根園ガス環境の改善に関する研究 (2)、農業電化の研究事例、第9集、87-95.
 - 19) GIESLER G. (1967) . Interactive effects of CO₂ and O₂ in soil on root and top growth of barley and peas. *Plant Physiol.*, 42, 305-307.
 - 20) 長村智司・ト部昇治 (1978) : はち物用標準培養土に関する研究 (第4報) キクの生育と培養土内CO₂の関係について、奈良農試研報、第9号、36-47
 - 21) GRABLE A. R. and R. E. DANIELSON (1965-a) . Effect of Carbon Dioxide, Oxygen, and soil moisture suction on germination of corn and soybeans. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29, 12-18.
 - 22) GRABLE A. R. and R. E. DANIELSON (1965-b) . Influence of CO₂ on growth of corn and soybean seedlings. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29, 233-238.
 - 23) WILLIAMSON R. E. and W. E. SPLINTER (1968) . Composition of root environment upon root development and growth of *Nicotiana tabacum* L., *Agronomy J.*, 60, 365-368.
 - 24) CHANG H. T. and W. E. LOOMIS (1945) . Effect of Carbon Dioxide on absorption of water and nutrients by roots. *Plant Physiol.*, 20, 221-232.
 - 25) GLINKA Z. and L. REINHOLD (1962) . Rapid change in permeability of cell membranes to water brought about by Carbon Dioxide & Oxygen. *Plant Physiol.*, 37, 481-486
 - 26) KOHL H. C. (1961) . Note. *Soil Sci.*, 91, 74.
 - 27) 矢吹万寿・上和田勉 (1976) . 甘藷の節挿し法による栽培について、農業気象、32、83-85
 - 28) BOICOURT A. W. and ALLEN R. C. (1941) . Effect of aeration on growth of hybrid tea roses. *Amer. Soc. Hort. Sci.*, 39, 423-425.
 - 29) 安田環・荒木浩一 (1970) . 土壌への通気とカンランの生育、日本土壌肥科学雑誌、41、413-417