

## 施設栽培における土壌空気について

梅 林 正 直\*

「土は生きている」とよくいわれるが、これは土壌が全体として酸素を消費し、炭酸ガスを発生することを示しており、「土壌は呼吸する」ということにほかならない。土壌中には、無数の微生物が棲息しており、そのうち多くのものは有機物を分解して酸素を消費し、炭酸ガスを発生する。また植物の根も呼吸作用を営み、土壌中のいろいろな小動物も、同じように呼吸している。

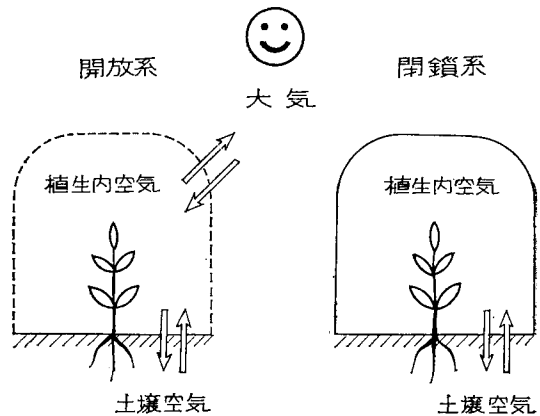
表一 土壌空気と大気と比較

大気の組成		土壌空気の組成	
N <sub>2</sub>	78.09 vol%	≤	75—90 vol%
O <sub>2</sub>	20.95	≥	2—21
Ar	0.93	≤	0.93—1.1
CO <sub>2</sub>	0.03	≪≪	0.1—10
Ne	18 ppm		
He	5.2		CH <sub>4</sub>
CH <sub>4</sub>	2.2		volatile organic acids
Kr	1		NH <sub>3</sub> , amines
N <sub>2</sub> O	1		N <sub>2</sub> O, NO, NO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	0.5		H <sub>2</sub>
Xe	0.08		H <sub>2</sub> S, mercaptans
O <sub>3</sub>	0.01		
R. H.	30—90%	<	ca. 100%

土壌空気は、大気に比較して、表一のように、炭酸ガスが多く酸素が少ないのが特徴で、水蒸気（R. H. Relative Humidity, 相対湿度で示してある）も多い。窒素の増加は、一部は脱窒による絶対量の増加もあるが、多くは炭酸ガスなどが土壌水に溶けた結果、相対的な比率が増えたものである。その他、有機物の還元分解に伴い、メタン、揮発性有機酸、アンモニア、アミン、亜酸化窒素、酸化窒素、二酸化窒素、水素、硫化水素、

\* 三重大学農学部

メルカプタンなどが発生し、これらが土壌空気中に含まれる場合がある。



図一 植物のガス環境と土壌空気

閉鎖系の施設栽培では、開放系の露地栽培と異なり、土壌空気と植生内空気の関係がより密接である。図一に示すように、開放系では、土壌空気⇄植生内空気⇄大気との交換がよく行なわれるのに対して、閉鎖系では、土壌空気⇄植生内空気との交換が大部分であるため、土壌の通気性、土壌からの炭酸ガスの供給、有害ガスによる障害などが、施設栽培での重要な問題となる。植物のガス環境と土壌空気との関係を解析する場としても、施設栽培は格好の場といえる。

これらの問題のうち、土壌物理の面からみて重要と思われる土壌空気の組成と通気性の問題にしばって、従来までに得られた実験結果を紹介して、御批判を仰ぎたい。

### 1. ガスクロマトグラフィーの土壌空気組成解析への導入

土壌空気組成を調べるには、ガス分析が行なわれるが、表二に各種ガス分析法の比較を示した。これらの分析法のうちで、ガスクロマトグラフィーは、土壌空気の主成分である窒素、酸素、炭酸ガス、メタン、亜酸化窒素などの分離定量が可能であり、試料量が少なくすむ特徴がある。著者は、昭和34年に農林省農業技術研究所に

表-2 ガス分析法の比較

吸収・燃焼法	一般ガス分析, 含量1%以上, 試料量多い
滴定・重量・比色法	特定のガスには適する
検知管法	微量成分の検出, 半定量
ガスクロマトグラフィ	分離定量 (N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O), 試料量少ない
質量分析法	m/eの差で分離, 微量でも可, 装置が高価
赤外線吸収分析法	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> Oなど, 三成分系以下
熱伝導度法	熱伝導度の差のある二成分系
磁化率法	気体酸素計 (O <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> ), レスポンス遅い
ポーラログラフィ	溶存酸素計 (テフロン膜), ODR計 (白金線)

国産ガスクロマトグラフ装置がはじめて入って以来, 昭和38年に三重大学に転じて現在にいたる約10年間にわたり, 土壌空気組成を解析して土壌空気の動態を把握するために, ガスクロマトグラフィによる分離定量法を確立し, 安価で実用的な土壌空気採取容器を考案して, 2 ml以下の少ない試料量で繰返し多点分析が行なえる土壌空気組成の分析法を組立てた<sup>2,3)</sup>。以下にその概略について簡単にふれることにする。

まず, 現場で多数の土壌空気試料をサンプリング出来るように, 図-2に示すような土壌空気採取容器を考案した。内径5 mmのガラス管の上端をシリコンゴムで封じ, 管内のデッドスペースを少なくするために, 径5 mm弱のガラス棒を入れ, ガラス管の下端を任意の長さで切り, 先端を少しつぶしたものに, 有孔プラスチック球(内容積25 ml)を装着したもの, あるいは装着しないものを作る。原理的には, 木下<sup>1)</sup>, 矢吹<sup>2)</sup>, Yamaguchiら<sup>10)</sup>の方法と大同小異であるが, 簡単なガラス細工で自作出来る上に, 安価で実用的であることが特徴である。有孔プラスチック球を装着したものは, 気相部分の少ない土壌で土壌空気の採取が困難な場合や, 微量成分の確認のために試料量を多く採取したり, 時間的変化を細かく検討するためにサンプリングを頻繁に行なう際の土壌空気の攪乱を少なくする場合などに適している。

この土壌空気採取容器を,

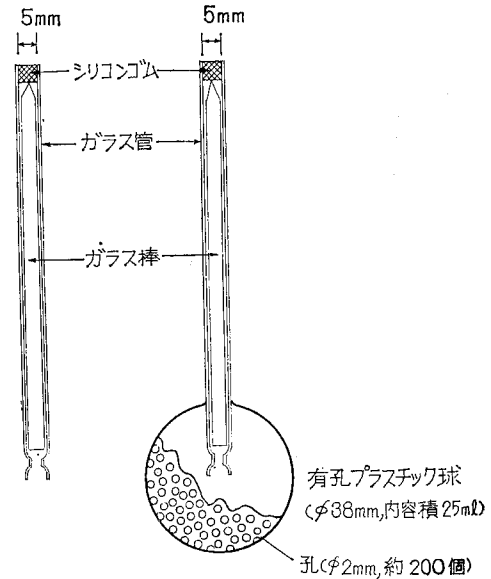


図-2 土壌空気採取容器

圃場の各所に, 種々の深さに埋め込み, 上端のシリコンゴムで封じた部分が地表面に出ているようにする。実際に土壌空気をサンプリングする場合には, 横穴針付注射器(共通摺合せ注射器, 10 ml~20 ml)で, 採取容器の上端のシリコンゴムを貫通させて, 静かにゆっくりと土壌空気を吸引し, 注射器内が大気圧と等しくなってから針を引き抜き, 直ちに別に用意したシリコンゴム栓に針を差込み, 外気と遮断する。図-3にその大要を図示した。このようにして採取した土壌空気は, 注射器に入れたまま実験室に持ち帰り, 一定量(1 ml~2 ml)を分取してガスクロマトグラフ装置に注入する。

ガスクロマトグラフィによる分離定量は, 以下に述

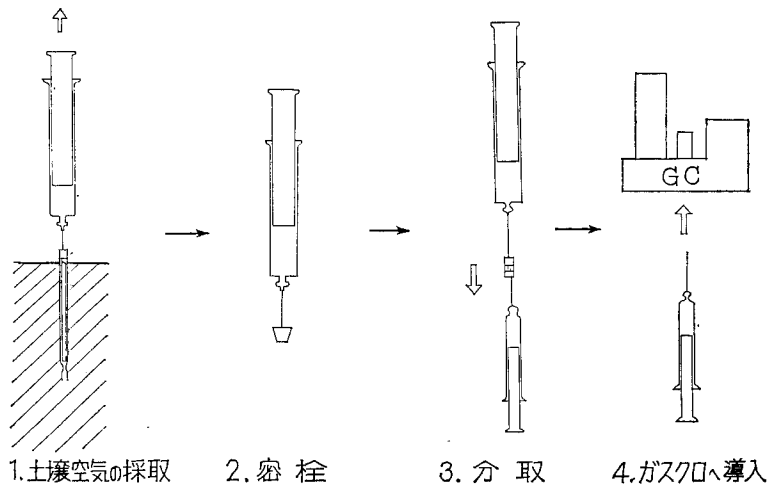


図-3 土壌空気の採取とガスクロへの導入

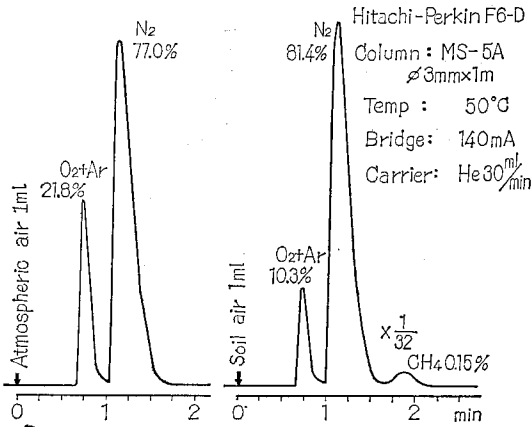


図-4 窒素, 酸素, メタン分の分離定量

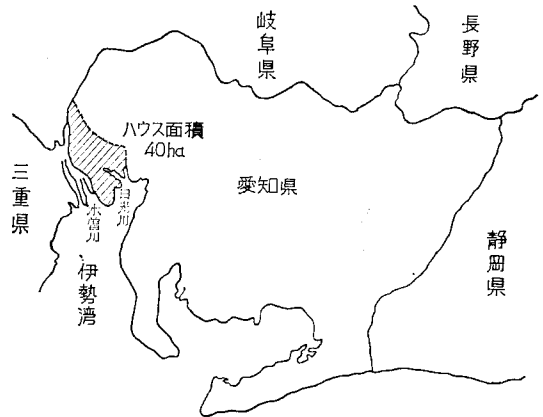


図-6 愛知県海部郡の位置

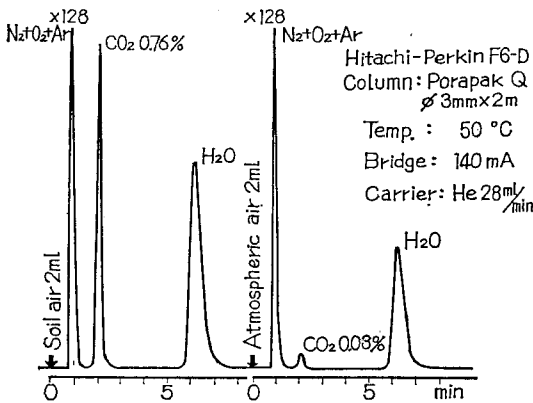


図-5 炭酸ガスの分離定量

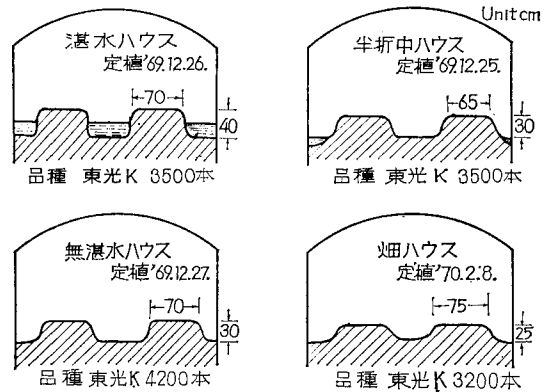


図-7 半促成トマト栽培様式

べる実験条件を定めて行なった。窒素, 酸素, メタンの分離定量には, 充填剤としてモレキュラーシーブ 5 A を, 炭酸ガス, 亜酸化窒素などの分離定量には, 充填剤として“Porapak Q”を用い, 日立パーキンエルマー F 6 D 型ガスクロマトグラフ装置により分析した。それぞれの実験条件および得られたクロマトグラムを, 図-4 と図-5 に示した。クロマトグラムのピークの面積は半値幅法により算出し, 標準混合ガスまたは標準空気を用いて求めた検量線から各成分ガスを定量する。

従来の古典的な吸収法・滴定法や, 赤外線吸収分析計による方法は, 試料量が 50 ml ~ 100 ml 程度必要であり, 連続測定の場合にはかなりの土壌空気を動かすことになり, 攪乱が大きい。ガスクロマトグラフィーは, 厳密な意味での連続測定は出来ないが, 試料量が少なくてよく, かつ多点分析に適するので, 著者の組立てた分析方法により, 土壌空気組成の経時的変化を追跡することが可能である。実際の圃場での土壌空気の動態を把握する上で, きわめて有効な方法であることを実証してき

た<sup>3-8)</sup>。

## 2. 低湿地帯水田ハウスの通気性

愛知県農業総合試験場園芸研究所土壌肥料研究室と協同して, 木曾川デルタ低湿地帯における水田ハウス土壌空気の実態を調べ, 通気性の改善試験を行なった。

愛知県海部郡一帯は, 図-6 の斜線部分で示されるように, 木曾川下流のデルタ地帯であり, 海拔 0 m の低湿地帯が多い。耕地の約 95% が水田で, ハウス面積は 40 ha に達しており, 昭和 38 年以來春作トマトの指定産地になっている。このような地下水位の高い低湿地帯における土壌空気組成の経時的変化が, 作物に与える影響について明らかにする必要があると考え, 愛知県海部郡弥富町の農家の半促成トマト栽培水田ハウスと畑ハウスに調査区を設定して, 土壌空気組成の実態を調べた<sup>7)</sup>。

図-7 に示すような栽培様式別に, 湛水栽培, 半折中栽培, 無湛水栽培の水田ハウスと, 対照としての畑ハウスの計 4 区を設定した。

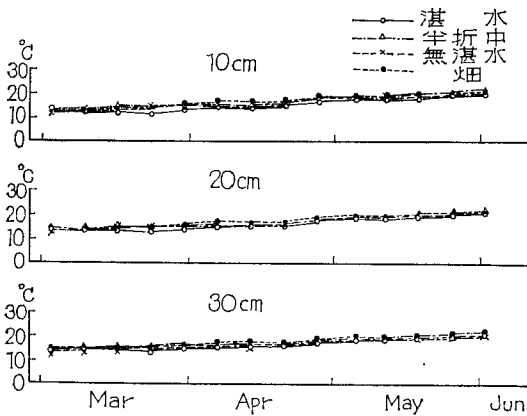


図-8 地温の変化

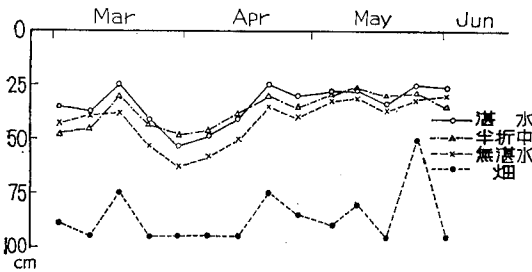


図-9 地下水位(畦面下)の変化

この地方の特徴的な栽培様式である灌水栽培とは、稲の収穫後にくね田と呼ばれる高畦を作り、1月～4月の間は地下水を畦間に深さ20cm前後灌水して、生育初期の保温をはかるもので、古くから行なわれてきた栽培様式であるが、作業能率の点などから現在では無灌水化への

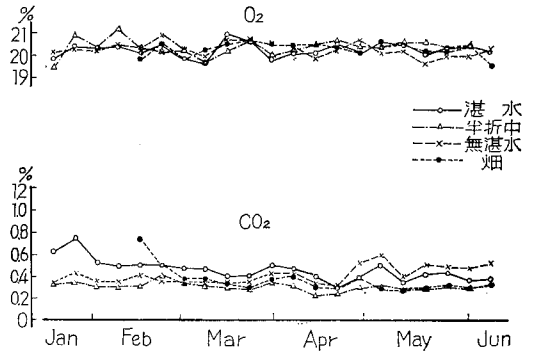


図-11 畦面下10cmにおける酸素と炭酸ガスの経時的変化

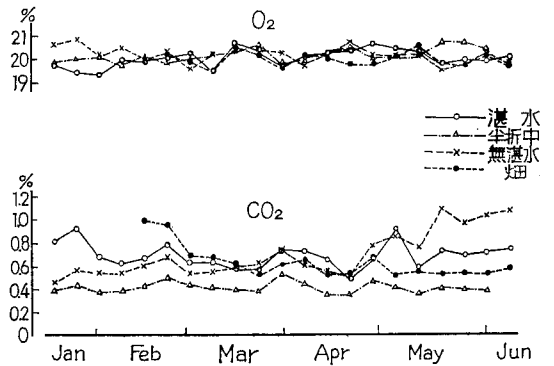


図-12 畦面下20cmにおける酸素と炭酸ガスの経時的変化

方向にある。

図-8に地温の変化を示したが、栽培様式による地温の差、層位別の差も僅かで、急激な変化はなく、6月になるにつれ漸次上昇した。地下水位は、図-9に示すように、畑は低いが、水田ハウスは高く、4月頃から畦面下25cmと高くなっている。

図-10に三相分布を示したが、畑に比較して、水田では液相が多く気相が少ない特徴が認められ、気相率は上層25%、中層10%、下層5%と極めて低い。

ガスクロマトグラフィーにより、各区の畦面下10cm、20cm、30cmの深さにおける土壌空気の酸素と炭酸ガスの経時的変化を調べた結果を、図-11、図-12、図-13に示した。畦面下10cmでは、酸素、炭酸ガスとも栽培様式や時期別には大差なく、酸素は20%

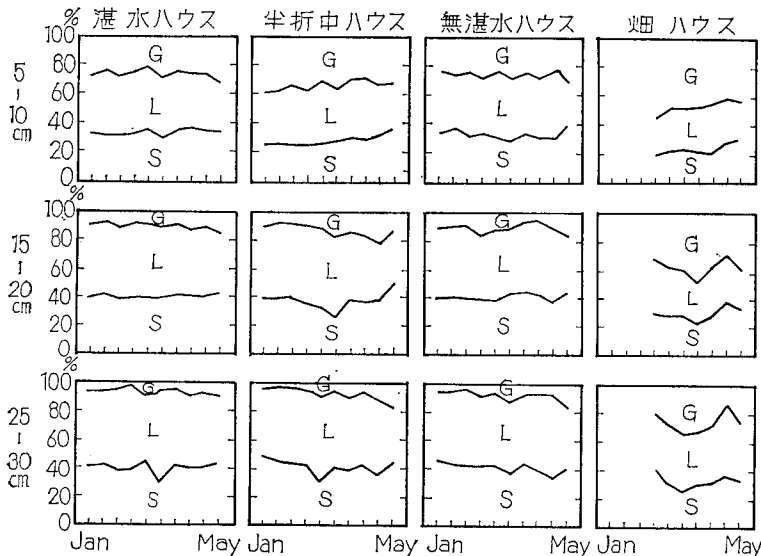


図-10 三相分布

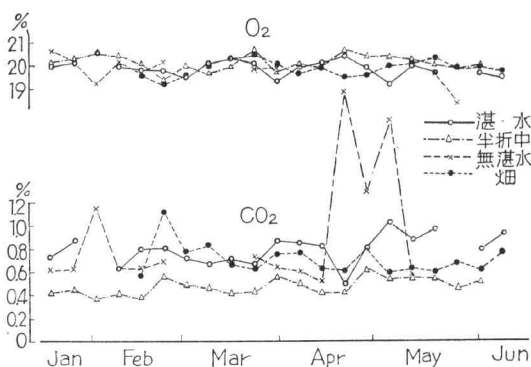


図-13 畦面下30cmにおける酸素と炭酸ガスの経時的変化

前後、炭酸ガスは 0.5%前後の値を示した。畦面下20cmでは、酸素の変動は少なかったが、炭酸ガスは10cmよりもやや高く 0.7%前後で、5月～6月にかけて上昇し、地下水位の上昇と一致した。畦面下30cmでは、土壤空気が採取出来ない場合があったが、酸素は変動が少なく、炭酸ガスは 0.8%前後と高くなり、2～3%に達する時もあった。

このように低湿地帯の水田ハウス土壤は、地下水位の影響を著しく受けているために、液相が多く気相部分の少ない通気性不良の土壤であるが、半促成トマト栽培の栽培期間における土壤空気組成の変動は比較的僅かであり、酸素レベルの極端な低下は認められなかった。従って半促成トマト栽培は、その作期を土壤空気組成の変動の少ない時期に一致させている点で適切であると考えられるが、根の分布が極めて浅い表層に限定されている点や、水田ハウスの周年利用に伴う高温期の土壤空気組成の急激な変動に対処出来るかどうかという点で問題がある。

そこで、水田ハウス土壤の通気性を改善するために、経済的に安上りで実用的な方策を検討した<sup>8)</sup>。

暗渠排水用フレキシブルタイプのコルゲート管（共立農機製、スパイラル鉄線にビニルコーティングした管の外側を化繊被覆したもので、径5cm）を、比較的浅い土



図-14 コルゲート管処理

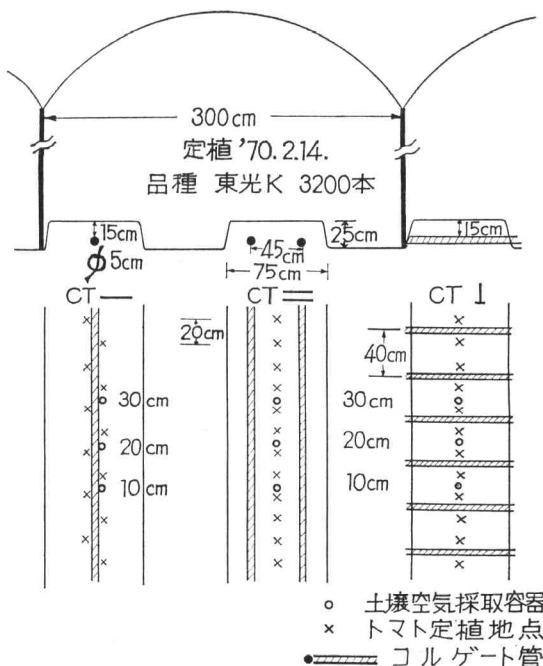
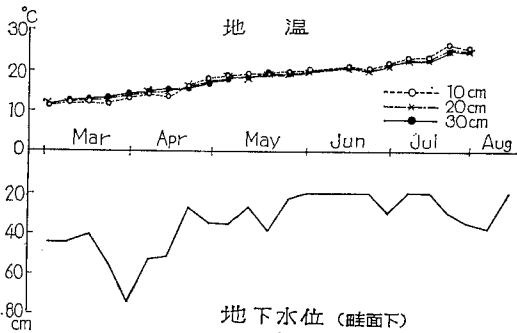
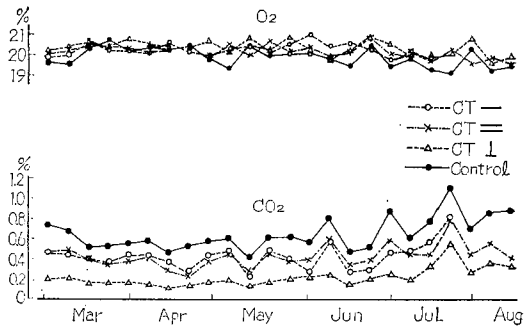


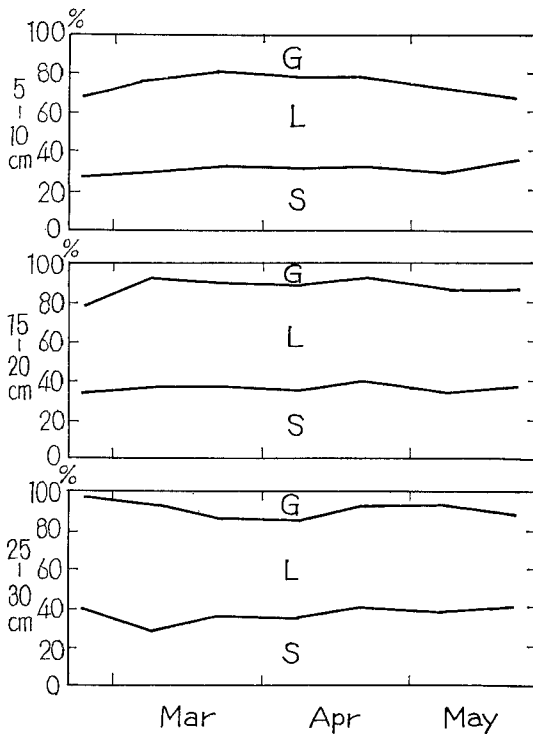
図-15 コルゲート管処理試験栽培様式



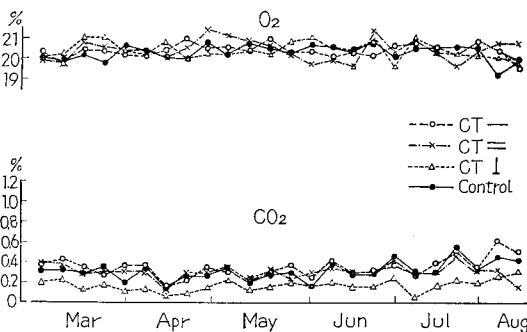
図一16 地温と地下水位の変化



図一19 畦面下20cmにおける酸素と炭酸ガスの経時的変化



図一17 無処理区の三相分布



図一18 畦面下10cmにおける酸素と炭酸ガスの経時的変化

層に埋設し、粗大孔隙を与え、通気孔となるような処理を行なってみた。図一14の写真に示したように、畦面下15cmの深さの所に、コルゲート管を畦に平行に1本、畦に平行に2本（45cm間隔）、畦に直角に数本（40cm間隔）を埋設した区を作り、土壌空気組成の経時的変化を調べた。

試験区は、愛知県海部郡弥富町の半促成トマト栽培水田ハウス（無湛水栽培）を選び、栽培様式その他の詳細は図一15に示した。

図一16に地温と地下水位の変化を示したが、地温は漸次高くなっており、7月～8月には20℃以上になり、地下水位は6月以降高い。

図一17に無処理区の三相分布を示したが、気相部分が少なく液相部分が多い特徴が示され、特に中層、下層においてこの傾向が顕著であった。

ガスクロマトグラフィーにより、各処理区の畦面下10cm、20cmの深さにおける土壌空気中の酸素と炭酸ガスの経時的変化を調べた結果を、図一18と図一19に示した。畦面下10cmでは、無処理区と比較して、コルゲート管を畦に直角に数本埋め込んだ区の炭酸ガス濃度が低く経過した。畦面下20cmでは、各区の差ははっきり現われ、コルゲート管の本数を増すにつれて炭酸ガス濃度の低くなる傾向が明らかに認められた。

作期の終りにトマトの根の生育を調べたところ、無処理区では浅根で根量も少く、根の張りも悪かったが、コルゲート管埋設処理により根量が多くなり、根の張りも良好で、根がコルゲート管の方へ向ってのびているのが観察された。

このようなコルゲート管埋設処理によって、極めて大きな孔隙を与え、通気孔を設けることは、低湿地帯水田ハウス土壌の通気性を改善するための実用的で有効な方策であることが明らかになった。

### 3. 冬期加温畑ハウスにおける土壌空気、植生内空気の炭酸ガスの挙動

閉鎖系の施設栽培における土壌空気と植生内空気との密接な関係を明らかにするために、三重県津市江戸橋(三重大学附近)の熱風加温ピーマン冬期栽培畑ハウスを選び、炭酸ガスの経時的变化を1時間半おきに連続30時間にわたり、ガスクロマトグラフィーにより測定した<sup>4)</sup>。

表-3 ピーマン冬期栽培畑ハウスの概要

所 在	津市江戸橋地区	海岸沖積砂壤土畑地
規 模	240坪(2作目)および300坪(1作目)	仙頭式重油ボイラー3台による熱風加温
作付体系	ピーマン	品種: 庄助ピーマン(10月上旬~6月下旬)
施 肥		
元 肥	菜種粕	180kg/10 a (N5.6 P2.0 K1.0)
追 肥	菜種粕	30~40kg/10 a / month
	化成肥料	30kg/10 a × 3 (N15 P15 K10)
	硫酸カリ	20kg/10 a × 1

調査ハウスの栽培様式などの概要を表-3に示したが、菜種粕を主体とする有機質肥料を用いて栽培し、重油ボイラーによる熱風加温を行っており、高知県南国市などで行なわれているピーマン栽培と同じ様式である。

1967年12月に、晴翌日雨の2日間を選び、土壌空気の深さ別(0, 10, 20, 30cm)および植生内空気(0, 0.6m)の炭酸ガスの経時的变化を調べた結果を、図-20に示した。この図は、土層の深さ別の炭酸ガス濃度の変化を示したものであるが、土壌空気では土層が深くなるほど炭酸ガス濃度は高く、晴天の日中光合成によって植生内空気の炭酸ガスレベルが低くなると、土壌空気の方も

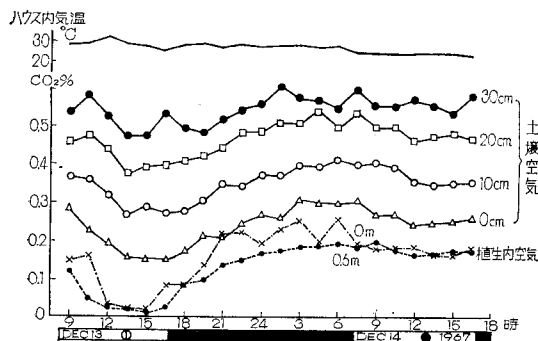


図-20 土壌空気、植生内空気の炭酸ガス濃度の変化

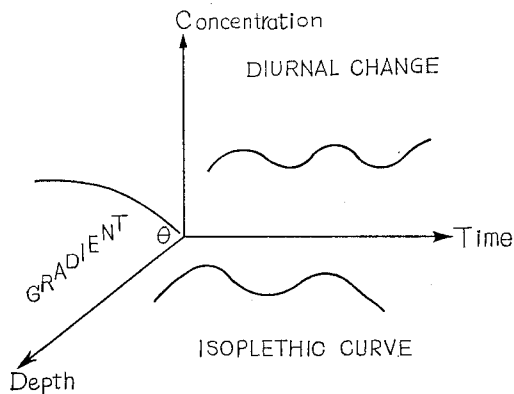


図-21 土壌空気組成の経時的变化の解析

低くなり、夜間は高い傾向が認められた。また雨天の日中は、晴天の日中とは異なり、夜間と同様に炭酸ガスレベルは高く経過した。

土壌空気組成の経時的变化を解析する場合には、図-21に示すように、土壌空気の濃度C、土層の深さD、時間Tの三変数を考え、C-T曲線(それぞれの深さの濃度の時間的变化を表わす消長曲線)

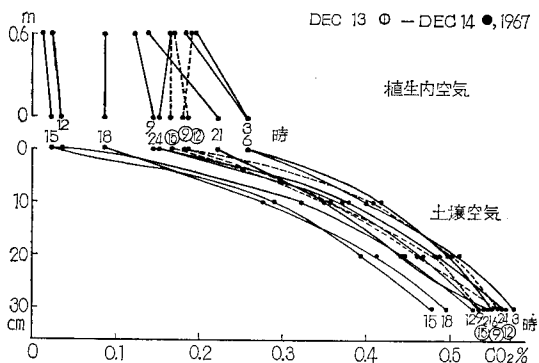


図-22 土壌空気、植生内空気の炭酸ガスのC-D曲線(濃度勾配図)

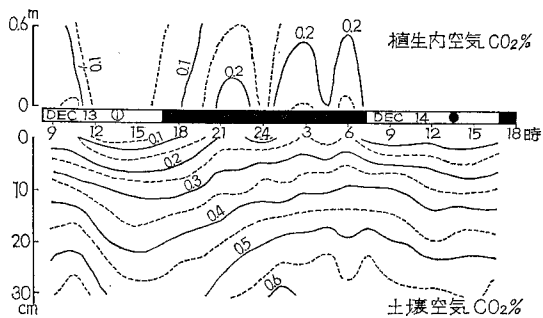


図-23 土壌空気、植生内空気の炭酸ガス濃度のD-T曲線(等値線図)

C-D曲線（それぞれの時点における濃度の垂直分布を表わす勾配図、 $\tan\theta = \text{濃度勾配}$ ）

D-T曲線（C-D-T立体模型のそれぞれの濃度における切断面の投影を表わす等値線図 isoplethic curve）の三種の曲線で表わして解析することが有効である。

C-T曲線で表わされた図-20の結果を、C-D曲線で表わしてみると図-22のようになる。ここでは、第1日目の晴天の日中の正午頃に濃度勾配は最大となり、炭酸ガスが土壌から盛んに供給され、日没直後に濃度勾配は最小となり、炭酸ガスの供給はゆるやかになるという日変化が示され、第2日目の雨天の日中(点線, ○印)は夜間と同じような濃度勾配を示すことが明らかになった。

炭酸ガス濃度の等値線図、すなわちD-T曲線で表わしたものは、図-23のようになる。晴天の日中正午頃は等値線の間隔が密で、炭酸ガスが土壌から盛んに供給されていることを示し、日没直後から等値線の間隔は疎になり、炭酸ガスの供給がゆるやかになることを示しており、日出から日中にかけての炭酸ガス濃度の減少は、土層が深くなるほど時間的な遅れが出ていることが、はっきりわかる。雨天の日中は、等値線が夜間と同様に横ばい状態であり変化していない。

このような解析の結果から、閉鎖系の施設栽培では、土壌空気と植生内空気の炭酸ガスの日変化の間には極めて密接な関係があることがわかった。夜間には土壌からの供給や作物の呼吸によって、植生内空気の炭酸ガス濃度は高くなるが、光合成の盛んに行なわれる晴天の日には午前中に消費され、日中多量の炭酸ガスが絶えず土壌から供給されている。これに対して雨天の日には、光合成による消費が少なく、夜間の場合と似た傾向を示すことが明らかになった。従って閉鎖系の冬期加温ハウス栽培では、土壌から供給される炭酸ガスが光合成に大きく寄与しており、この点で有機物施用の意義は重要であると考えられる。

ガスクロマトグラフィーは、このような土壌空気の動的变化を把握するための繰返し多点分析に適しており、得られたデータを濃度勾配図や等値線図に表わして解析する方法は、土壌空気組成の消長や土壌の通気性の研究に対し極めて有効である。

#### 4. 動的平衡状態にある土壌空気の動きの把握と今後の問題点

現場における土壌空気の動態を研究する場合に、濃度勾配の変化や等値線図を解析する方法が有力な武器になることを述べて来たが、土壌空気の炭酸ガスの濃度勾配についての考え方や、土壌の通気性と土壌空気の拡散について研究を行なっていく上での問題点を指摘したい。

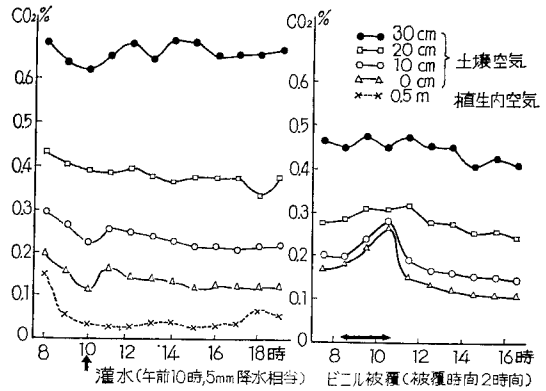


図-24 灌水、ビニル被覆による炭酸ガス濃度の変化

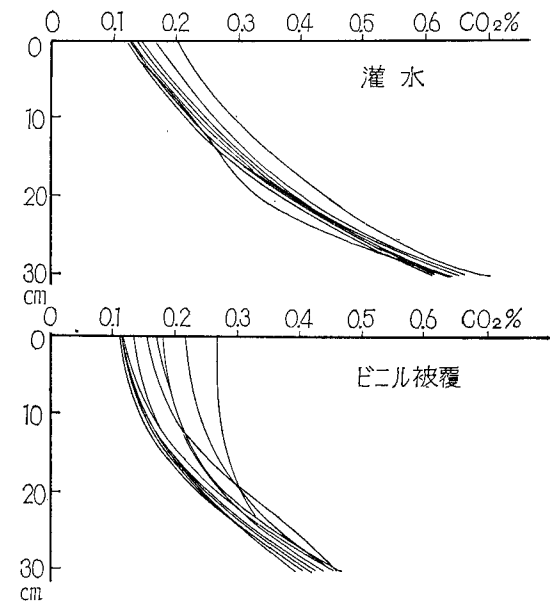


図-25 灌水、ビニル被覆による炭酸ガスのC-D曲線（濃度勾配図）の変化

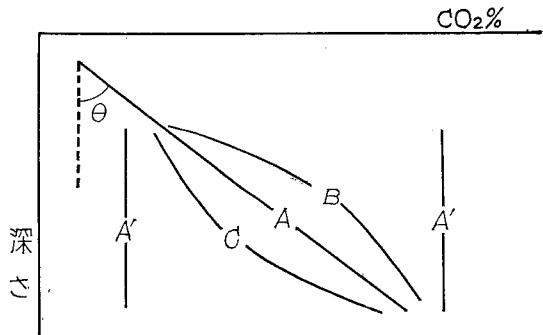


図-26 土壌空気の炭酸ガスのC-D曲線の基本型

前述した冬期加温畑ハウスにおいて、5mm降水相当の灌水を行なったり、2m平方のビニルを土壌表面に被覆したりして、一時的に通気を阻げるような人為的処理を



行なってみると、図-24に示すような結果が得られた。灌水やビニル被覆により短時間土壌空気の炭酸ガスレベルは増加している。これを濃度勾配図に表わしてみると、図-25のようになり、灌水では勾配は変わらないがC-D曲線の平行移動としてとらえられ、ビニル被覆では表層での勾配の減少としてとらえられた。

一般に土壌中の炭酸ガスの濃度勾配や各層の濃度は、時間的に変化するが、ある時点におけるC-D曲線は、それぞれの土壌に特有のものであると考えられる。土壌空気の炭酸ガスのC-D曲線には、図-26に示すように基本的な三つの形がある。

- A. 直線（全体に濃度勾配が均一、A'は濃度勾配0）
- B. 上に凸（上層にいくほど濃度勾配が大）
- C. 上に凹（上層にいくほど濃度勾配が小）

この三つの組合せで、いろいろなC-D曲線が表わされる。

C-D曲線は、動的な平衡状態が保たれている土壌中の、その時点における拡散の方向を示すものであるから、この曲線の形と勾配から直ちに土壌の通気性について論ずることは出来ない。しかし、C-D曲線で示される拡散の実態は、温度一定の時には主として(1)ガスの発生量と(2)通気拡散を支配する土壌構造（ガスの通路となる非毛管孔隙の三次元的分布）の二つの因子の関数であると考えられ、一方の因子が一定であれば、C-D曲線の変化から他の因子の変化を推定出来る。

実際の土壌では、これらのガス発生量と土壌構造の二つの因子が同時に変化している場合が多く、このような場合にはガスの発生量をおさえるか、土壌の通気拡散係数を測ってC-D曲線を解析することが出来る。また、灌水やビニル被覆などの人為的処理によって一方の因子を短時間変化させ、C-D曲線の時間的変化を追跡することにより、動的平衡状態での解析が可能となる<sup>9)</sup>。

現在このような観点から、土壌のガス拡散係数を測定する装置を検討しており、従来の圧力差による通気係数とは異なるそれぞれのガス成分に対応した拡散の実態を把握することが必要であると考えている。その際、通気拡散に関与する非毛管孔隙の形態と三次元的分布により、拡散の状態がどのように異なるかを明らかにしたい。また、動的平衡状態にある土壌空気の動きを把握する際には、土壌の三相のうち、変化する液相と気相の関係を考慮するとともに、気相、液相、固相の三相間の各成分ガスの平衡を常に重視しなければならない。

以上の問題点を解決しながら、今後も施設栽培の現場で、「植物のガス環境と土壌空気の解析」についての研究を進めていきたいと考える。

終りに、低湿地帯の水田ハウスで協同研究をして頂いた愛知県農業総合試験場園芸研究所嶋田永生・武井昭夫技師に対して厚く御礼申し上げます。また三重大学農学部北岸確三教授には、終始御指導を頂き、感謝の意を表するとともに、実験の一部を実施された三重大学大学院生の高橋利郎・吉田吉明の両君に感謝する次第です。

#### 引用文献

- 1) 木下彰：土壌構造と通気の関係—土壌空気の組成と陸稲、大豆の生育、農技研土壌物理研試験研究成績、昭和30年度、1—14（1955）
- 2) 梅林正直・益子洋一郎・松尾英俊：土壌中より発生する各種ガスのガスクロマトグラフィーによる分離定量(第1報)  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO$ ,  $N_2O$ ,  $NO_2$  の分離定量、土肥要旨集, 9, 支16（1963）
- 3) 梅林正直・北岸確三・高橋利郎：同上(第2報) ハウス土壌空気およびハウス内空気の  $CO_2$  の定量、土肥要旨集, 14, 臨59（1968）
- 4) 梅林正直・高橋利郎・北岸確三：同上(第3報) 土壌空気および植生内空気における  $CO_2$  の日変化に対する解析への応用、土肥要旨集, 15, 118（1969）
- 5) 梅林正直・高橋利郎・北岸確三：同上(第4報)  $CO_2$  濃度勾配の日変化・年変化について、土肥要旨集, 16, 臨5（1970）
- 6) 梅林正直・高橋利郎・吉川操次・石崎博一・北岸確三：同上(第5報) マルチングが土壌空気組成におよぼす影響について、土肥要旨集, 16, 113（1970）
- 7) 梅林正直・武井昭夫・吉田吉明・嶋田永生・北岸確三：植物のガス環境と土壌空気の解析的研究(第1報) 低湿地帯における水田ハウス土壌空気の実態、土肥要旨集, 17, 108（1971）
- 8) 武井昭夫・梅林正直・吉田吉明・嶋田永生・北岸確三：同上(第2報) 低湿地帯における水田ハウス土壌のコレクター管処理による通気性の改善、土肥要旨集, 17, 108（1971）
- 9) 矢吹万寿：高畦内土壌空気の炭酸ガス濃度、農業気象, 21, 113—114（1965）
- 10) Yamaguchi, M., F.D. Howard, D.L. Hughes, and W.J. Flocker: An Improved Technique for Sampling and Analysis of Soil Atmospheres. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26, 512—513（1962）