

## 土壌ガス代謝と作物の生育

誌名	農業技術
ISSN	03888479
巻/号	2610
掲載ページ	p. 473-476
発行年月	1971年10月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



**適地** 県下の標高700m以下で「トドロキワセ」「ホウネンワセ」を栽培している地帯。しかしこの地帯の中でも病害虫、災害の常発地帯を除く。栽培計画面積は、昭和45年300ha、昭和46年3,300haで10,000haを限度とし、生産物は自主流通専用にする。

**命名の由来** 長野県で育成し、熟色良好で、とくに時

代に即応したすぐれた良質品種であることをあらわす。

この品種を育成するにあたり、ご助言をたまわった前場長、岡村勝政氏および直接ご指導をたまわった作物部長、神谷十郎氏に厚く感謝を申し上げます。

(長野県専門技術員)

## 土 壌 ガ ス 代 謝 と 作 物 の 生 育

安 田 環

### はじめに

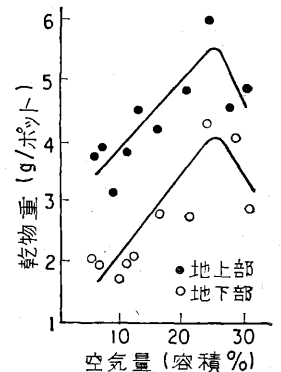
土壌学でいう土壌とは、地殻の表層若干の厚さを占めている膨軟な物質で、岩石が物理、化学、生物的作用によって変化をうけたものに植物遺体などが分解した有機物が加わったものと定義されていますが、農業という産業上からみますと、土壌は上記の物質(固相)と水(液相)、それに空隙をうめている空気(気相、土壤空気)のいわゆる三相から成っています<sup>1)</sup>。後者の見地からしますと、それは植物生育の場であり、三相のそれぞれについて、その性質および植物に与える影響についての研究がなされねばなりません。従来から土壌(固相)の研究はきわめて多く、また、水(液相)についても多くの研究がなされてきていますが、土壤空気(気相)についての研究は比較的少なく、ことにわが国におきましては、最も手がけられていない分野の1つであります。いうまでもなく、植物は日中地上部では炭酸同化作用を営み、太陽エネルギーを獲得していますが、根では常に呼吸作用、つまり酸素(O<sub>2</sub>)を消費し、炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)を放出しています。もし畑作物が根の呼吸に必要な酸素が充分供給されない状態におかれますと、いろいろの障害がでてまいります<sup>2)</sup>。すなわち直接的には体内の酸化還元酵素の作用力が衰え、養分の吸収がおさえられ、間接的には培地を還元化して硫化物などの有害物質を生成せしめ、これが根の活性を低下せしめます。畑が水分過多になりますと、作物は障害をうけますが、これを一般に湿害とよんでおります。湿害は過剰水分による直接的なものではなく、むしろ酸素不足による生理的現象と考えられています。水稲や沼沢植物では通気組織が発達している、葉から根へ酸素が運ばれますので<sup>3)</sup>、いわゆる畑作物のような湿害はできません。さらに畑においても土壌が還元的になりますと、施肥窒素の一部が酸化2窒素(N<sub>2</sub>O)や窒素ガス(N<sub>2</sub>)として揮散することが最近明らかにされ<sup>4)</sup>、水田における脱窒現象が畑でもおきることが実証されました。このように土壌ガスは複雑であり、

直接、間接作物に影響を与えているものと推定されます。

以下に私達の研究室でおこなった成績を中心として、土壌ガスの実態と作物の生育について述べてみようと思えます。

### 空気量と作物生育

多くの畑作物は、それが健全な生育をするためには、土壌中の空気量がある程度確保されねばなりません。第1図は武豊の鉦質土壌を鉢につめ、容積重(g/100cc)を135から160まで5きざみに設定し、それぞれの水分をpH 1.0, 1.4, 1.7および2.0の4段階に変えて菜豆の初期生育(38日間)をみたものです<sup>5)</sup>。この処理によって空気率は3%から30%、逆に水分率は40%から20%の範囲内でいろいろに変化することになります。この図から明らかなように、地上部、地下部とも、ある空気率のときに最高の生育量を示し、それ以下あるいはそれ以上では減少いたします。この最高の生育量を示したときの空気率を臨界空気量とよびます。菜豆と同じ設計でいろいろの作物についておこなった結果によりますと、臨界空気量は作物によって異なることがわかりました。すなわちキャベツ、菜豆では24%、大麦、小麦、カブ、キウリ、コンモンベッチでは20%、エン麦、ソルゴーでは15%、水稲、イタリアンライグラス、結球前のタマネギで10%ないしそれ以上を示しました。このことは作物が湿害に強いか弱いのおおよその尺度でもあり、臨界空気量が高い作物は湿害に弱いということになります。



第1図 土壤空気量と菜豆の生育

では圃場の気相分布はどうなっているのでしょうか。もちろん土壌の種類によって異なりますから、すべての土壌にあてはまるわけではありませんが、小川<sup>9)</sup>が武豊の鉾質畑土壌で、梅雨期と夏期に調査した結果が第1表です。

第1表 梅雨期と夏期の土壌空気量

土層の深さ	土 壌 空 気 量 (容積%)			
	6月28日	6月29日	8月18日	8月19日
0~5cm	9.3	21.5	26.6	35.3
5~10	4.6	9.6	23.8	28.0
10~20	4.0	6.1	15.4	22.8
20~30	4.1	3.8	7.2	8.5

注) 1965年調査。

この表にみられるように、梅雨期にはごく表層でも気相率が20%に満たない場合があり、5cm以下では10%以下になっております。したがってこのような圃場では、作物の種類によっては、梅雨期に臨界空気量に満たない場合が生じ、これが数日間続くと障害がでてまいりますし、夏期になりますと水分不足となり、干害が生じたりしますので、誠に厄介な土壌といわなければなりません。

では実際の圃場で空気の不足によって作物の生育が抑制されるでしょう

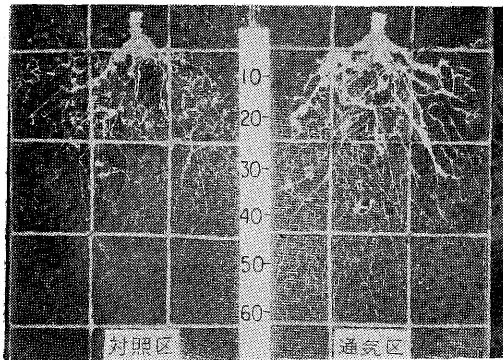
か。これをキャベツを用いて検討した結果が第2表と第2図です<sup>7)</sup>。この試験は自然の構造をこわすことなく、下層(60cm)から強制通気した

第2表 通気とキャベツの生育

重量		処理	
		対照区	通気区
1球重 (生体)		1760g	2030g
根重* g/株	土層の深さ		
	0~25cm	3.20g	5.42g
	25~35	0.62	0.84
	35~60	0.26	0.52
計		4.08	6.78

注) \*乾物重。

ところに特徴があります。すなわち供試圃場の作土下は非常に堅密に堆積した赤黄色土で、山中式硬度計の読みでは22~24mmを示し、一般作物の根の伸長は硬土のため



第2図 通気と根の伸長

に抑制される臨界値20mmをはるかにこえております<sup>5)</sup>。

さらに作土下の気相率は、およそ3%となっております。このような条件の土壌で、1㎡当たり毎分5~10ℓの空気を送った通気区では、地上部、地下部の生育ともすぐれています。ことに第2図にみられるように、根の伸長状況をみますと、通気しない対照区ではほぼ40cmの深さでとまっているのに対し、通気区では60cmの深さまでよく発達していることがわかります。つまり通気によって根の発達がよくなり、これが地上部の生育に反映したものと考えられます。このように作物根はある程度以上の空気量、いいかえると酸素を必要とし、気相が少ない場合には通気をよくすることによって酸素供給量をふやし、作物生育を旺盛にすることができま

す。次に土壌空気量と作物の養分吸収について若干述べますと、土壌空気あるいは土壌酸素が減少しますと、一般に養分の吸収が阻害されます。森ら<sup>6)</sup>はソルゴー、キャベツ、菜豆、タマネギで培地の空気量が少なくなると、窒素、りん酸、カリ、マグネシウムの含有率が低下し、とくにマグネシウムの吸収阻害が著しいことを認めています。作物の養分吸収の機作は非常に複雑で、またむずかしい問題でもありますが、いずれにしても、根の呼吸が阻害されますと、酸化還元酵素系と関連のある要素では吸収阻害がおきるといわれています<sup>8)</sup>。

### 土壌ガスの組成

気相中にはいろいろのガスが含まれていますが、とくに大気と異なる点は、水蒸気で飽和されていること、炭酸ガス濃度が数倍から300倍も高いことなどがあげられます。炭酸ガス濃度が高いのは土壌中で炭酸ガスが放出され、それが大気とただちに交換されずに土壌中に蓄積するからと考えられます。ではこの炭酸ガスが放出される源は何でしょうか。それは植物根が地上部で同化した炭素化合物を呼吸によって分解し、最終産物として炭酸ガスを放出いたします。また土壌中に生棲するバクテリアの数は乾土1g当り $10^6 \sim 10^7$ に達するといわれ<sup>9)</sup>、これらのバクテリアが土壌中の有機物を分解し、酸素を消費して炭酸ガスを放出いたします。あるいはまたバクテリア以外のカビ、放線菌それに小動物も炭酸ガスを放出いたします。われわれが武豊の圃場で炭酸ガスと酸素の濃度を春から秋にかけて経時的に調査した結果<sup>10)</sup>、まず炭酸ガス濃度は作物がない状態で5cmおよび10cmの深さでの最高は4.5%でしたが、大部分の期間はおよそ1%前後で推移しました。20cmの深さになりますと、それよりも高くなり、30cm、40cmでは3~6%、最高は8%を示しました。一方炭酸ガスとうらはらの関係にある酸素濃度は、炭酸ガスとまったく逆の傾向であり、浅いところ

では20~21%、作土下30~40cmの深さでは14~17%の範囲で変動していました。しかもこの炭酸ガスが高まり、酸素が低下するのは、土壌が多水分で、かつ地温がかなり高い条件下で著しいことが明らかとなりました。すなわちそのような現象は夏期の降雨時にみられ、ことに梅雨どきには顕著にあらわれます。このように土壌ガスの組成は深さによって、あるいは季節によって異なりますが、表層では大気との交換が比較的小おこなわれやすく、そのため極端な炭酸ガスの蓄積はおきないものと考えられます。一方30cm以下では孔隙(気相)が少ないうえに多量の降雨後には1時的に水が停滞することがあり、通気性がきわめて不良になっております。そのため空気の更新がおこなわれにくく、炭酸ガスが蓄積しやすくなります。

第3表 上 壤 空 気 の 組 成

区・深 さ	7 月 10 日				8 月 18 日	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
対照区10cm	15.3	2.50	81.5	tr	20.1	0.70
30	5.2	7.05	85.9	1.0	17.5	3.88
通気区10	20.3	0.37	79.7	—	20.8	0.22
30	19.9	0.55	80.2	—	20.8	0.24

注) 1969年調査。7月10日は降雨後、湿潤状態、8月18日は乾燥状態。

第3表は梅雨時の土壌空気組成の一例を示したものです<sup>7)</sup>。この調査の約1カ月前にm<sup>2</sup>当り200gの窒素を化成肥料で施してあります。さらに調査前の5日間に140mmの降雨があり、1時的に灌水状態となりました。対照区(自然放置区)では炭酸ガス濃度が高く、ことに30cmの深さでは7~8%に達し、それに伴って酸素濃度が極端に低下しております。Geisler<sup>11)</sup>は炭酸ガス濃度をゼロとし、酸素濃度を7%以下にした場合、あるいは炭酸ガス濃度を8%以上にした場合、オオムギおよび豆の根の伸長が著しく妨げられたことを報告しています。したがって炭酸ガスが蓄積する条件下、たとえば梅雨期などでは気相も不足し、なおかつ酸素濃度が大気の1/4にも満たない程度にまで低下すれば、生育阻害がおこるおそれが生ずるものと考えられます。今仮に気相率が5%で、酸素濃度が10%としますと、100ccの土壌中に酸素量はわずか0.5ccしか含まれていないことになります。一方作物根は土壌ガス中の酸素を直接利用するのではなく、いったん水に溶けたものを利用いたします。土壌ガス中の酸素が少なくなればなるほど土壌水分に溶ける酸素量も少なくなりますから、ますます酸素不足の状態となります。このように孔隙が水で満ちされている、土壌空気の更新が妨げられますので、過剰水の排除は大変重要な意

味をもつことになります。

一般に土壌中で炭酸ガスがふえまると、それと当量の

第4表 施肥窒素の揮散形態とその割合

区	施肥窒素の揮散形態 (%)				
	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	合計
硫安区	0	0	0.6	2.6	3.2
硝加区	0.5	12.0	4.1	0	16.6
硝安区	0.4	12.7	8.4	3.0	24.5
尿素区	0.1	1.2	2.4	18.0	21.7

しかし第3注) 土壌水分30%、30℃で2週間培養。表の7月10日の結果では、酸素と炭酸ガスの含量は12%となります。つまり約9%のものが他のガスで占められた可能性が考えられます。その観点から更に同一サンプルについて分離定量をおこなったところ、窒素ガス(N<sub>2</sub>)が86%、酸化2窒素(N<sub>2</sub>O)が1%の濃度であることがわかりました。大気中には78%の窒素が含まれていますが、これよりも8%高い値を示したわけです。この窒素ガスの過剰分と酸化2窒素を合わせますと、ちょうど9%となり、上記の酸素の不足分を補う形となっています。もちろんこれだけで断定はできませんが、酸化2窒素と過剰の窒素ガスが同時に検出されたことは、施肥窒素がいったん酸化されて硝酸態となり、これが土壌の還元化に伴って、酸素がうばわれて生じたいわゆる脱窒現象ではないかと推定されます<sup>13)</sup>。

施肥窒素の揮散

畑に窒素肥料を施しますと、作物に利用されないものは、その大部分が雨水などによって流亡したものと一般に考えられてきました。しかし先にも述べましたように、条件によっては畑でも水田と同じような脱窒現象がおきている可能性があります。第4表は武豊の鈹質土壌100gに100mgの窒素を硫安、硝加、硝安および尿素で加え、30%の水分とし、容器内の空気を完全にヘリウムガスでおきかえ、30℃で培養し、経時的に容器内の2酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、酸化2窒素(N<sub>2</sub>O)、窒素ガス(N<sub>2</sub>)およびアンモニア(NH<sub>3</sub>)を定量し、14日間の合計を施肥窒素量との割合で示したものです<sup>13)</sup>。もちろん無窒素区でも多少の窒素ガスがでますので、それは差し引いてあります。30%の水分は供試土にとっては飽和に近い多水分で、しかも30℃で培養していますから、条件としては高温、多湿かつ還元のと考えてよいでしょう。そしてこの数値は経時的に分析した合計値であって、必ずしも全部を捕捉したものではありません。収支計算をすると、もっと高い数値になることでしょう。さてこの表からわかるように、揮散する形態は、施肥窒素の形態によって異なり、硫安区はいずれの形態の窒素も最も少なく、尿素

区はアンモニア態で揮散する割合が高くなっておりません。硝酸態を含む肥料は酸化窒素あるいは窒素ガスで揮散する比率が高くなっております。つまり多水分、高温、還元的になりますと、硝酸態窒素は酸素がうばわれて  $N_2O$  や  $N_2$  のガスとして揮散するようになります。ですから易分解性の有機物があると一層還元化が進み、この反応を助長することになります。このような現象は第3表でもみられたように、梅雨時など多雨、高温のときは、実際の圃場でもおこりうることで、これを防止するには排水をよくし、還元的にならないようにすることが必要です。なお近年、ハウス栽培がさかんになっていますが、ハウスでの施肥量は必要以上に多く、しかもワラなどの有機物が加わり、多水分条件となっています。メロンハウスで土壌中のガスおよびハウス内の空気を分析した結果<sup>9)</sup>でも  $N_2O$  が検出されています。施肥管理および農作業の面からも今後注意が必要でしょう。

#### 土壌の通気性

土壌はある程度の気相で占められ、かつ酸素濃度が大気に近いことが望ましいことを述べてまいりました。では土壌ガスが大気と異なって炭酸ガスが蓄積しやすいことについて少し考えてみましょう。土壌の表面では多かれ少なかれ絶えず炭酸ガスが放出され、酸素が大気から土壌中に流入しております。このような大気と土壌ガスが交換されることを土壌通気と呼びますが、それには大別して2とおりのものがあります。その1つは、“空気交換”とよばれるもので、主として気候的な要因によっておこるものです<sup>14)15)</sup>。すなわち1番目として温度変化があります。気体は温度が高いほど膨張しますから、気温が土壌温度より高ければ、土の中へ大気が入ってゆきますし、土壌温度が大気より高ければ逆の現象がおこります。つまり日中と夜では上記のような現象によって土壌空気の一部は更新されます。2番目として水の動きがあります。降雨、かんがい、凍結あるいは蒸発によって土壌水分は常に変化し、それに伴って気相率も変化いたします。3番目として気圧の変化があります。いわゆるボイルの法則にしたがうわけで、気圧が高まれば空気は収縮し、大気から土壌中へと動きます。逆に気圧が低下しますと土壌空気は膨張し、土壌空気の一部は大気中へ出てゆきます。以上3つの要因のほかに、風によっても一部は交換されるといわれていますが、いずれにしても、“空気交換”は、土壌空気を大気と交換させる要因としては、本質的なものではないとされています。では、本質的なものとは何でしょうか。それは、次に述べる拡散現象とされています。これを、“空気交換”にたいして“ガス交換”とよんでいます。“ガス交

換”はそれぞれのガスの分圧（大気は水銀柱760mmですがそのうち窒素は78%ですから、 $760 \times \frac{78}{100} = 600\text{mm}$ 、酸素は  $760 \times \frac{21}{100} = 160\text{mm}$  の分圧となります）に応じて移動します。すなわち分圧の高いほうから低いほうに移動します。たとえば前述しましたように、土壌空気は大気より酸素濃度が低く、炭酸ガス濃度が高いので、酸素は大気から土壌中へ、炭酸ガスは土壌中から大気への移動がおこります。しかし当然のことながら、それぞれのガスの分圧が大気と異なっているにもかかわらず、土壌孔隙が閉ざされた場合や、表面にクラストのような通気を阻害する膜がありますと、“ガス交換”はおこなわれにくくなります。“ガス交換”の速さは孔隙（気相）の量に比例することが知られ、しかもそれが10%程度のときはガスの移動が少なく、15~20%になってはじめて交換されやすくなります。10%程度の孔隙率の場合、それが閉ざ孔隙（パイプの一方がつまっているような状態）が大部分を占め、通気には意味をなしません。孔隙率が15~20%となりますと、1日に20回も交換されるといわれます。土壌ガスを作物の好適な状態に保つには、土壌の気相をある程度確保する、すなわち耕耘、中耕、有機物・土壌改良剤の使用、かん排水設備の完備などが重要になります。

#### おわりに

これまであまり関心をもたれていなかった土壌ガスについての概要を述べてまいりましたが、これらの研究もガスクロなどの機器分析が導入されてから可能となったものです。しかしまだまだこの分野でのデータは不足ですし、たんに土壌ガスの濃度を知るだけでは、静的な面をとらえているにすぎません。これを動的にとらえ、実際に農家が活用できるようなデータの集積が必要でしょう。

(東海近畿農試畑作部土肥1研究室)

#### 引用文献

- 1) 野口弥吉監修：農学大事典。p. 128, 養賢堂 (1961)。
- 2) 山崎 伝：農技研報B, 1, 1 (1952)。
- 3) 相見霊三：日作紀, 29, 51 (1960)。
- 4) 東海近畿農試畑作部土肥研究室昭和45年度成績書。p. 62
- 5) 森 哲郎・小川和夫：東海近畿農試報, 16, 77 (1967)。
- 6) 小川和夫：東海近畿農試報, 18, 192 (1969)。
- 7) 安田 環・荒木浩一：土肥誌, 41, 413 (1970)。
- 8) 石塚喜明・田中 明：水稻の栄養生理, p.9, 養賢堂(1963)
- 9) 土壌微生物研究会編：土と微生物, p.73. 岩波書店(1966)
- 10) 小川和夫・森哲郎・安田環：東海近畿農試報, 19, 81(1970)
- 11) Geisler, G.: *Plant Physiol.*, 42, 305 (1967)。
- 12) Kohnke, H.: *Soil Physics*, p. 160 Mc Graw Hill (1961)。
- 13) 井田 明・森 哲郎：東海近畿農試報, 21, 135 (1971)。
- 14) レプート原著, 農林水産技術会議事務局 調査資料課技術資料課技術資料 54, p. 109, 畑地農業振興会 (1968)。
- 15) Grable, A.R.: *Advan. Agron.*, 18, 57 (1966)。