

土壌空気と作物生育

——水田変換畑における大豆栽培を中心として——

阿 江 教 治*

Response of Soybean Growth to Soil Aeration

—— Relevant to Crop Diversification in paddy Fields ——

Noriharu AE

Chugoku National Agricultural Experiment Station

1. はじめに

水田再編対策の実施にともない、排水土壌管理技術について数多くの報告がある。しかし、種々の土壌の通気性と作物生育との間の法則性については、十分に解明されてはいない。多様な転換畑作物（大豆、ソルガム、トウモロコシ、ハトムギ、牧草など）を対象とするとき、耐湿性に対する生理的特性と土壌の通気性との関係は、より複雑なものになると思われる。

しかし、このような問題を解決する方法として、久保田¹⁾は、作物根系の生理的特性を把握し、土壌環境（特に、土壌中の酸素・炭酸ガス分圧、温度、塩類濃度、水分など）に対する作物根の臨界点を明らかにすることによって、土壌管理技術の方向が呈示できるものと指摘している。

中国農業試験場においても、1979年以来転換畑大豆の栽培試験が実施されてきた。大豆以外にソルガムを供試して、種々な種類の水田土壌を使用してその生育を比較検討した結果、土壌の物理的な計測値が作物生育の絶対的な指標とはなり得ないことが痛感された。すなわち、作物の種類によりその生理的臨界点が異なり、そのため

圃場における作物収量と土壌の物理性との関連づけることは困難な場合が多いことである。

本報告では、地下水位が高い多湿条件下の火山灰土壌では通気性が著しく劣り湿害の発生しやすい環境にあることを確認するとともに、土壌の空気あるいは通気性に関して、作物サイドからの評価をこころみた。

また、作物の生理的な臨界点を考慮した上で、多様な土壌の通気性を統一的に評価する上で、O.D.R.（酸素拡散係数）が適していることについての一連の研究を紹介する。

2. 転換初年目土壌における大豆の生育

中国地域を代表する6種類の水田土壌を充填したライシメータ（強グライ土、グライ土、灰色低地土灰色系、灰色低地土灰褐色系、黄色土、黒ボク土）が1970年、中国農試に設置された²⁾。その後、水稻が栽培されてきたが、1979年には地下水位を20cmに、1983年には40cmに設定して、転換畑初年目の大豆栽培が実施された。得られた子実収量の結果を表-1に示したが、黒ボク土で最も低収となった。この表には、水稻の無窒素栽培の試験結

表-1 転換初年目土壌における大豆の収量 (g/m²)

土 壌	ダ イ ズ			水稻無窒素栽培 1970~1979年
	1979年*		1983年**	
	初 年 目	初 年 目		
強 グ ラ イ 土	423	396	314	416
グ ラ イ 土	397	384	201	526
灰色低地土 (灰色系)	418	353	263	341
灰色低地土 (灰褐色系)	407	374	311	369
黄 色 土	478	347	217	417
黒 ボ ク 土	363	312	272	470

* 地下水位20cm

** 地下水位40cm

*中国農業試験所

表-2 統群別水田土壌における転換初年目*の土壌物理性と大豆の収量

土 壤	仮比重	粗孔隙率 (%)	8月30日			10月3日		大豆子実収量 (g/m ²)
			気相率 (%)	透水係数 (ml/cm ² ・S)	O. D. R. (10 ⁻⁸ /cm ² ・min)	Mn ²⁺ (mg/100g)		
強 グ ラ イ 土	1.19	9.3	18.1	5.11×10 ⁻³	10.95	0.79	423	
グ ラ イ 土	1.20	7.3	6.5	3.28×10 ⁻⁵	10.52	0.65	397	
灰色低地土(灰色系)	1.27	11.3	17.4	2.99×10 ⁻³	15.61	0.70	418	
灰色低地土(灰褐色系)	1.18	8.6	14.2	3.40×10 ⁻³	11.45	0.72	407	
黄 色 土	1.19	5.7	12.8	5.40×10 ⁻⁴	17.13	0.91	478	
黒 ボ ク 土	0.67	4.9	6.8	2.91×10 ⁻⁴	4.34	1.81	363	
大豆子実重との 相 関 (r=)	0.664	0.103	0.494	0.126	0.888*	- 0.506	1.000	

* 地下水位20cm
土壌pHを6.5に矯正して大豆栽培を行った

果もあわせて表示してあるが、これより黒ボク土の窒素肥沃度は6種の土壌のうち高い方に属するものと思われた。黒ボク土において、転換初年目大豆が低収となった原因にリン酸欠乏を考えるならば、転換後5年を経過しより酸化的条件下におかれた黒ボク土の大豆もリン酸欠乏を呈し低収になるものと思われた。しかし、同じライシメータで4年間連作した大豆の5年目の収量は強グライ土に次いで高い値を得た。以上の事から、転換初年目の黒ボク土において、大豆の収量が低い原因が窒素肥沃度およびリン酸欠乏によると思われない。

1979年および1983年における転換畑初年目大豆の栽培を通じて、登熟期には大豆の下葉が枯れ上がり、葉色があせるという現象が観察された。地下水値が20cmの試験(1979年)では、この現象は特に顕著であった。この時の土壌物理性については表-2に示した。

6種の土壌のうち、黒ボク土の気相率や粗孔隙率は最も小さい値を示したが、気相率についてはグライ土、粗孔隙率については黄色土と近似した値を示した。しかし、O. D. R. は黒ボク土で著しく低い値を示した。黒ボク土で、大豆の葉色があせてきた登熟期(10月3日)に、土壌中のMn²⁺含量を測定したところ、黒ボク土で高い値(1.81mg/100g)を示し、土壌が還元化していること、そのため大豆根系は湿害をうけたものと思われた。子実収量に影響を与える要因を解析するため、土壌の物理的諸性質との関係を検討したところ、O. D. R. と子実収量との間には正の高い相関が認められた^{3,4)}。

表-3 統群別土壌における土壌酸素濃度(%)*

土 壤	深 さ (cm)		
	10cm	15cm	20cm
強 グ ラ イ 土	20.3	20.2	20.2
グ ラ イ 土	20.1	19.6	19.3
灰色低地土(灰色系)	20.4	20.4	20.3
灰色低地土(灰褐色系)	20.3	20.2	20.1
黄 色 土	20.2	20.1	19.9
黒 ボ ク 土	18.4	18.7	17.5

* 昭和58年9月9日測定(降雨の状態については表-4参照)
地下水位40cm

上述の結果は、黒ボク土が粗孔隙率や気相率の測定値から推察されるよりも、はるかに通気性(O. D. R. と大豆の生育から考えて)が劣っていることを示しているが、この事をさらに確認する目的で、40cmに地下水位を設定したライシメータ(1983年)での土壌空気中の酸素濃度の測定を行った(表-3)。表-3には、測定の前日および前々日にそれぞれ4.0mmおよび7.5mmの降雨があったときの値を示した。地下10, 15, 20cmにおける酸素濃度については、黒ボク土を除く5種類の土壌で降雨後1日を経過すると20%に回復した。一方、黒ボク土は18~17%と酸素濃度は低下した。表-4には、黄色土と黒ボク土の2種類の土壌についても降雨前後の土壌酸素濃度の変化を示した。これからも、酸素濃度の回復が最も遅れるのが黒ボク土であることが判明した。

表-4 前日の降雨が黒ボク土および黄色土の酸素濃度(%)*に及ぼす影響

調査日 (昭和58年)	前日の降雨量 (mm)	黒ボク土(深さ)				黄色土(深さ)			
		10cm	15cm	20cm	30cm	10cm	15cm	20cm	30cm
9月1日	0	20.3	20.2	19.7	19.3	20.5	20.5	20.4	20.2
9月8日	7.5	19.4	19.5	18.8	17.9	20.3	20.3	20.2	20.0
9月9日	4.0	18.4	18.7	17.5	16.5	20.2	20.1	19.9	19.5

* 地下水位40cm

3. 大豆根系の生理特徴

黒ボク土において、降雨後の酸素濃度が低下しやすいことを述べたが、酸素濃度が20%から17%へと低下することによって、作物はどのような影響をうけるのか。その生理的な機能を知るために以下の実験を行った。

中国地域で作付されている代表的な大豆、トウモロコシ、ソルガム、ハトムギをポット条件下で栽培し、20~30℃の条件で根系組織の酸素消費量を測定した(表-5)。大豆根は2~4.3 $\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$ と他の3作物

表-5 転換畑作物根菜の酸素消費速度

作物	20-30℃における酸素消費速度* ($\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$)
大豆 根	2.0~4.3
大豆 根粒	10.0~30.0
トウモロコシ	0.8~1.8
ソルガム	1.4~2.4
ハトムギ	1.6~2.8

* 新鮮重あたり

(0.8~2.8 $\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$) と比較して、わずかに高い値を示すにすぎないが、しかし根粒は10~30 $\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$ と著しく高い酸素消費量を示した。大豆の全生育期間における酸素消費量をソルガムのそれと比較した(図-1)。開花期から根粒が着生しはじめると共に根

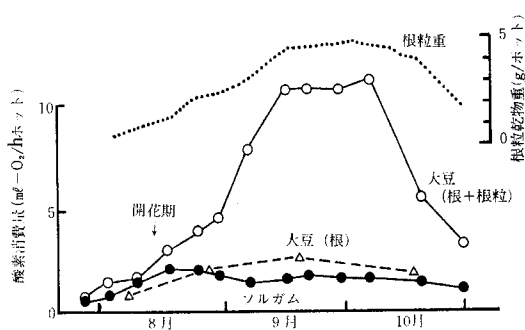


図-1 大豆およびソルガム根系の酸素消費量と大豆根粒重の生育時期別変化

系の全呼吸量は急速に増加し、登熟期には11.0 $\text{ml} - \text{O}_2/\text{h}\cdot\text{ポット}$ と最大に達した。先に、黒ボク土壌では大豆の登熟期に下葉が枯れるなどの湿害症状を呈したことを述べたが、この時期における高い酸素要求量と密接な関係があるものと思われる。根粒を除去した大豆根の酸素要求量は、全呼吸量の約1/4 (2.5 $\text{ml} - \text{O}_2/\text{h}\cdot\text{ポット}$) 以下と著しく少なく、これはソルガム全根系の酸素消費

量とほぼ等しかった^{3,4)}。

酸素分圧に対する根粒の窒素固定量と呼吸量に及ぼす影響を調査した。Tjepkemaら⁵⁾の試験結果と同様、根粒を除く根では酸素濃度が10%以下になると呼吸の阻害が観察された。一方、根粒では窒素濃度が20%以下になると急速に呼吸と窒素固定量に阻害が認められ、10%では窒素固定活性はほぼ皆無となった(図-2)。したがって、酸素分圧が20%から17%へと低下すると、窒素固定

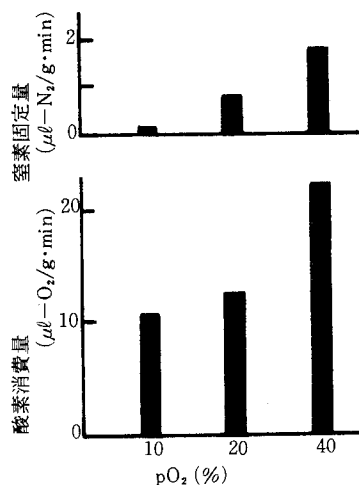


図-2 酸素濃度が大豆根系の呼吸および窒素固定量に及ぼす影響 (30℃, 新鮮重あたり)

量は30%以上も減少するものと試算された。地下水の高い条件下において、黒ボク土の通気性は著しく劣るため、登熟期の大豆根域の土壤酸素濃度は量的にも質的にも低下しやすい条件にある。そのため、表-2で示したように、 Mn^{2+} が増加し、土壤の還元化が促進するものと考えられた。

水田に隣接する転換畑に大豆とソルガムを栽培し、主根付近の土壤酸素濃度を測定した(図-3)。その結果、同一土壌条件下においても、酸素消費量の多い大豆では、ソルガムと比較して、土壤酸素濃度は常に低く推移した。この事は、上述した考察の妥当性を示唆しているものと思われる。

さらに付け加えるならば、多湿条件下の黒ボク土では、非火山灰土壌と異なり土壤通気性が劣る原因として次の事が考察できる。火山灰土壌に特徴的なことは土壤の粒子が均一でかつ微少なこと。そのため著しく広大な土壤の表面積をもつため吸着する水膜(水分)が多く、土壤の孔隙間には連通性がないことが通気性を低下させるものと思われる。また、土壤表面で乾燥収縮による亀裂の発生が鉍質土壌に比較して著しく少ないことであ

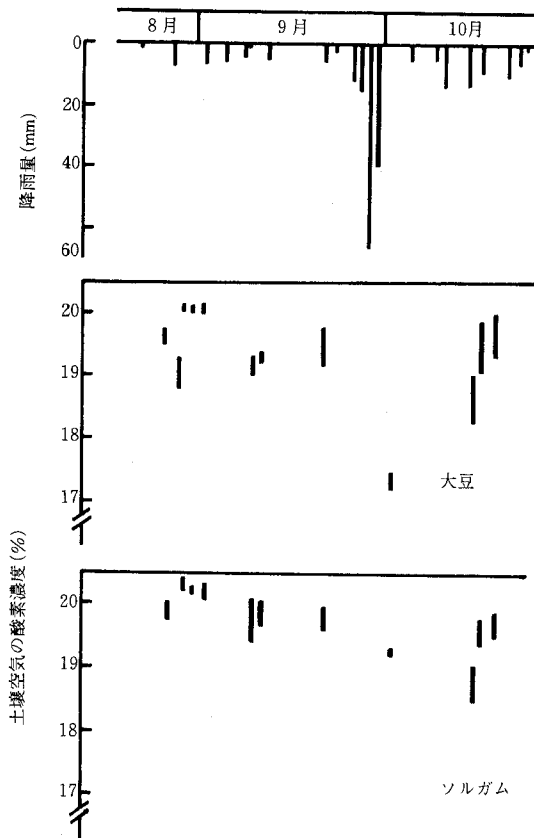


図-3 大豆およびソルガムの作付が土壤中の酸素濃度に及ぼす影響 (地下8-14cmの部位)

る。亀裂の発達が生土壌通気性に及ぼす意義についての説明も必要と考えられた。

4. 各種作物の出芽率とO.D.R.測定の意義

地下水位の高い条件下で酸素要求量の大きい作物(大豆)を栽培した場合、O.D.R.は生育の有効な指標になることを述べたが(表-2参照)、出芽に関しても有効な事例が報告されている。Ericksonら⁶⁾も、テンサイ、ジャガイモ、インゲンを用いて出芽実験を行ったが、O.D.R.が有効な出芽に対する指標となりうると報告している。しかし、Kaackら⁷⁾やHughesら⁸⁾は、O.D.R.よりもむしろ酸素濃度あるいは土壌硬度が出芽を支配する要因であることを示している。また、最近、Callebautら⁹⁾もテンサイの出芽にはO.D.R.の確保が必要で、その臨界点としてStolzyら¹⁰⁾が検討した $20 \times 10^{-8} \text{g/cm}^2 \cdot \text{min}$ という値を採用している。これらの議論の中での問題点は、出芽実験に使用した作物の種類が異なり、そのため出芽の

生理的特性(すなわち出芽に必要なO.D.R.の臨界値)が明らかにされていないことである。

この点に関して、Glinskiら¹¹⁾は、出芽に必要な土壌のO.D.R.は作物の種類により相当広い範囲に及んでいること指摘した。彼らは図-4に示すように、春まき大

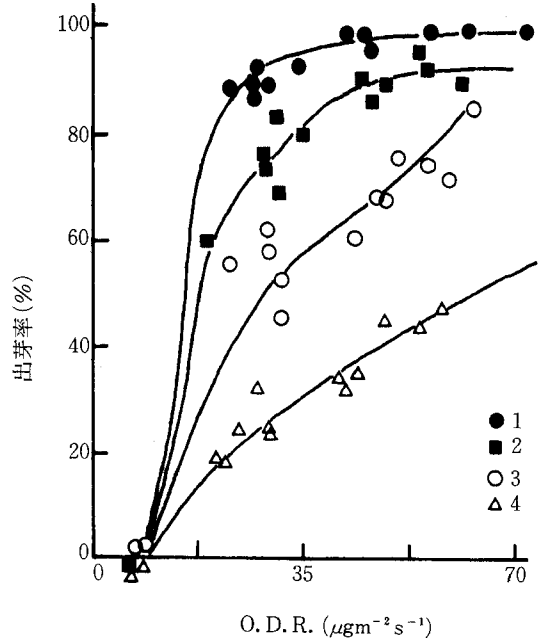


図-4 O.D.R.が穀類の出芽に及ぼす影響
1-春まき大麦, 2-エンバク,
3-秋まき小麦, 4-ライ麦
(Glinskiら, 1981)

麦, エンバク, 冬まき小麦, ライ麦の4種類を供試して出芽の状態を観察した結果、50%以上の出芽を確保するために必要なO.D.R.は $7 \sim 70 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ ($4 \sim 40 \times 10^{-8} \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$)に及ぶことを実証した。この値は、Stolzyら¹⁰⁾の示した値よりも、はるかに広い範囲に及んでいる。

また、Glinskiら¹²⁾は、ポーランドの代表的な3種類の土壌(砂土, レス, ローム)を供試して、土壌の種類が異なる場合においても出芽に対してO.D.R.は有効な指標になり得るか否かの検討を行った。通気性の測定には、O.D.R.以外に土壌酸素濃度、Ehも測定した。図-5には、土壌中の酸素濃度を制御するための実験系を示し、図-6, 7, 8には、土壌酸素濃度、O.D.R.およびEhと最大出芽率との関係を示した。これによると、同一種類の土壌に関しては、O.D.R., 酸素濃度、Ehと出芽率との間にかかなり高い相関が認められるが、3種類の土壌を組み合わせた場合、酸素濃度のみで出芽の良否を正確に決めることは不可能である。特に、土壌がレスの場

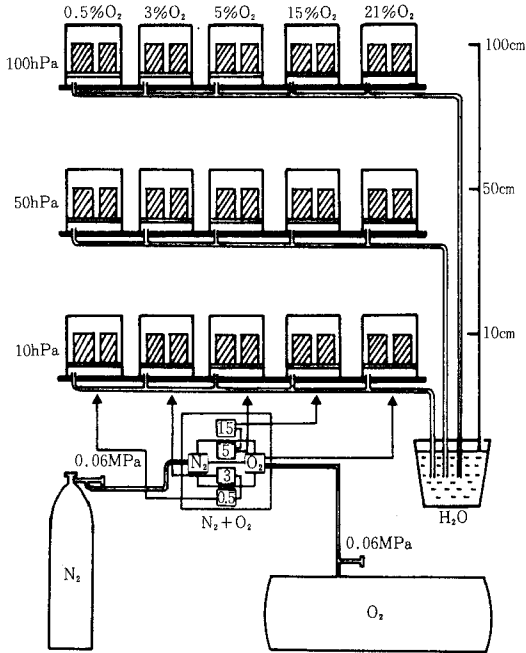


図-5 各種土壤の酸素濃度, O. D. R., Eh 設定のための装置 (Glinski ら, 1981)

合, 同一酸素濃度条件下にあってもテンサイの出芽は劣っている (図-6)。Ehについては, 少なくとも良好な

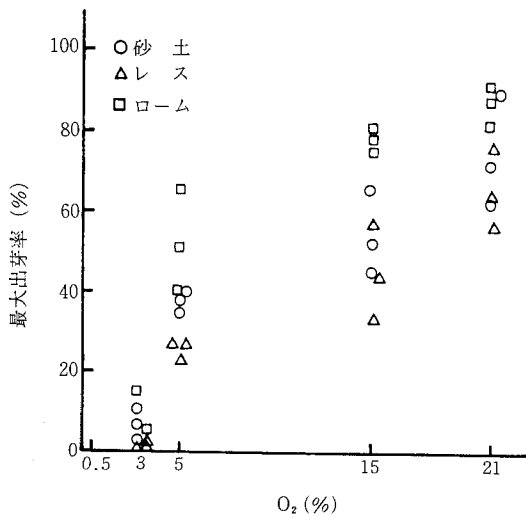


図-6 テンサイの最大出芽率と土壤酸素濃度との関係 (Glinski ら, 1981)

出芽を確保するには土壤の酸化還元電位が400mV以上必要であると指摘できる (図-8)。土壤の種類にかかわらず, 出芽の状態を詳しく把握するには, O.D.R.を測定することが最適であることが理解されよう (図-7)。

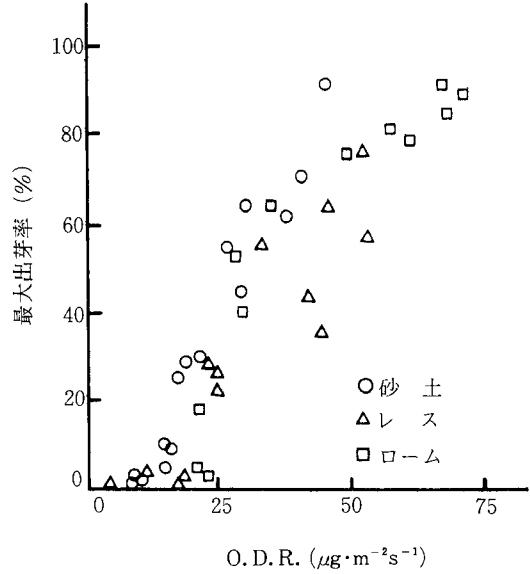


図-7 テンサイの最大出芽率とO. D. R. との関係

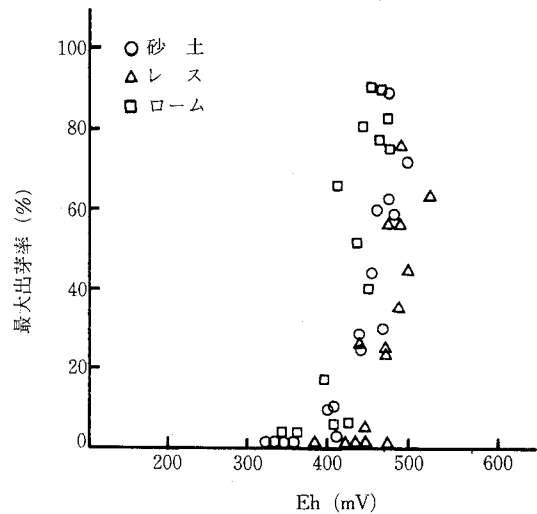


図-8 テンサイの最大出芽率とEhとの関係 (Glinski ら, 1981)

出芽だけでなく, 種々な作物の生育過程で, 良好な生育を保証する臨界O. D. R. がどのように変化するのか, 今後の研究が待たれる。

5. おわりに

作物培地としての土壤を考えると, これまでの土壤物理性の研究は, 主として物理的測定法だけに重点がおかれてきたように思われるが, どうであろうか。多様な作物を対象とする場合, 作物根域における生理的臨界点

をどのような物理的測定値で決めるかが重要となる。本報告では、根系の生理的特性と作物の多様性について論じてきたが、土壌中の酸素の消費を考えると、根圏微生物の存在も無視することはできない。

Trolldenier¹³⁾は、カリ欠乏土壌の根系の呼吸量はみかけ上増加することを報告している。そして、その理由として、K欠乏により作物細胞内の糖代謝が変化し、根面より糖の分泌が促された結果、根面微生物の増殖とその呼吸量が増加したことによると示唆した。土壌空気中の酸素濃度については、土壌の物理的構造や作物根系だけでなく土壌の養分状態によっても影響を受けることを感じざるを得ない。根圏環境の微視的解析が待たれる。

引用文献

- 1) 久保田徹：作物培地のための土壌物理，土壌の物理性，47, 1 (1983)
- 2) 阿江教治・大山信雄・仁紫宏保：中国地域における主要類型土壌の有底枠試験による水稻生産力の比較，中国農試報告(E), 17, 57-74 (1980)
- 3) 阿江教治・仁紫宏保：ダイズ根系の酸素要求特性および水田転換畑における意義，土肥誌，54, 453-459 (1983)
- 4) Ae, N : Oxygen demand characteristics of soybean relevant to crop diversification in paddy fields, JARQ, 18, 20-26 (1984)
- 5) Tjepkema, J. D. and Yocum, C. Y. : Respiration and oxygen transport in soybean nodules, Planta (Berl.), 115, 59-72 (1973)
- 6) Erickson, A. E. and VanDoren, D. M. : The relation of plant growth and yield to soil to soil oxygen availability, Seventh Int. Soils Congress III. 428-434 (1960)
- 7) Kaack, K. and Kristensen, K. J. : Emergence and seedling growth related to oxygen content and oxygen diffusion rate in different soils, Agron. J., 59, 541-544 (1967)
- 8) Hughes, T. D., Stone, J. F., Hiffine, W. W. and Gingrich, J. R. : Effect of soil bulk density and soil water pressure on emergence of grass seedlings, Agron. J., 58, 549-553 (1966)
- 9) Callebaut, F., Magunda, M. K., Gabriels, D. and De Boodt, M. : Oxygen diffusion and redox potential as influenced by crust formation in a clay soil, The 9th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, ISTRO, 423-428 (1982)
- 10) Stolzy, L. H. and Letey, J. : III Correlation of plant response to soil oxygen diffusion rates, Hilgardia, 35, 567-576 (1964)
- 11) Glinski, J. and Stepniewski, W. : Model investigation of the effect of soil oxygenation on the emergence of cereal plants, Folia Societatis Scientiarum Lublinensis, 23, 45-51 (1981)
- 12) Glimski, J., Przywara, G. and Stepniewski, W. : The effect of oxygen conditions in the soil on the emergence of sugar beet, Roczniki Gleboznawole, 32, 61-72 (1981)
- 13) Trolldenier, G. and Rheinbaden, W. V. : Root respiration and bacterial population of roots, I. Effect of nitrogen source, potassium nutrition and aeration of roots, Z. Pflanzenernaehr. Bodenk., 144, 366-377 (1981)

質疑応答

座長 阿江さんの御講演は、土壌の構造、物理性を評価する場合に作物の生理的特徴を考慮するとかなり多様性があり、特にエアレーションと作物根系との関係について述べられ、作物生育との関係では ODR がよい指標になることを示されました。この点につきまして御質問をお願いします。

原口 (四国農試) 一般的に考えると、黒ボク土の方がグライ土よりも孔隙も多いし、通気性もよいように思われますが、お話しでは逆のようです。ところで土壌空気中の酸素濃度はどの部分で何点とられたのでしょうか。

阿江 (中国農試) 酸素濃度は 4-5 点の平均値です。

諸遊 (農環研) ライシメータは冬期間に採取し広場に積んでおき後に順次充填した。その際深さ 20cm 分づつコンクリート槽に入れて、木製突固め器具で固めた。ち密度の目標は山中式硬度計で 18mm とした。

安田 (農環研) 黒ボク土でのダイズの生育不良は根粒による酸素消費のために、根の呼吸に必要な酸素が欠乏するためなのか、根粒の活性が低下するためなのかどちらとお考えですか。

遅沢 (農環研) 実際何%もの酸素を根粒が消費するのは疑問に思うのです。根の重さと根粒の重さの比率を教えてください。

阿江 ソルガムとダイズを比較しますと、ダイズの方がはるかに酸素濃度の低下が大きい。したがって、降雨によって土壌の通気性が悪化されるとさらにこの傾向は強くなると思う。しかし、実際の畑では根が回りへはるから根粒がどれくらいあるかはお答えできません。