

# 土 壌 の 通 気 性 測 定 の 評 価

安 田 環\*

Evaluation of Measuring Soil Aeration

Tamaki YASUDA

Department of Greenhouse Cultivation

Vegetable and Ornamental Crops Research Station

## 1. はじめに

土壌の通気性が作物の生育と密接な関連を持っていることはいまさらいうまでもない。これに関しては、わが国に比べ諸外国において大変多くの検討がなされてきた。その理由として、わが国では水田土壌の研究に主体がおかれ、また畑では火山灰土壌が多く、これは比較的ポーラスであるため、土壌の通気性はあまり問題にならなかったものと考えられる。

ところで東海地方に分布する赤黄色土地帯は、いくつかの農業用水の完成をみるに及んで、その土地生産性の向上が急務とされるに至った。この地帯の土壌は腐植に乏しく、構造が未発達で密である<sup>14)</sup>。また酸性を呈し各種塩基あるいは微量元素にも欠乏しがちである。このように物理、化学性が劣悪であるが、化学性の改良については多くの成果を得ており<sup>15, 22, 23)</sup>、また物理性についてもいくつかの試験が行われてきたが<sup>16, 29)</sup>、なかでも通気性の改善は最も重要な因子とされている。

これらのことから、著者は土壌空気と作物生育に関心を抱き、まず土壌空気組成の実態調査、続いてその動きについて研究を進めてきた。そのなかで、通気性の改善を目的とした場合、何を規準にするかは色々の測定法によって異なっており、それら測定法をどう評価するか、またそれらの相互関連についても明らかにしておく必要性がある。

通気性の良否を判定する方法として従来から気相率を用いられてきた。また土壌空気組成の分析<sup>6, 7, 17)</sup>、通気係数あるいは透過係数<sup>13, 25)</sup>、拡散係数<sup>27)</sup>の測定が行われ、白金電極法によるODR(酸素拡散速度)の測定法も紹介されている<sup>26)</sup>。本報ではこれら各種測定法をどう評価するかを論じてみたい。

## 2. 実験方法

### 1. 土壌空気組成

小川ら<sup>17)</sup>の方法に従いガスクロマトグラフを用いて分析した。

### 2. 透過係数

Evans ら<sup>3)</sup>の方法によった。その概略を図-1に示した。透過係数は次式から求める。

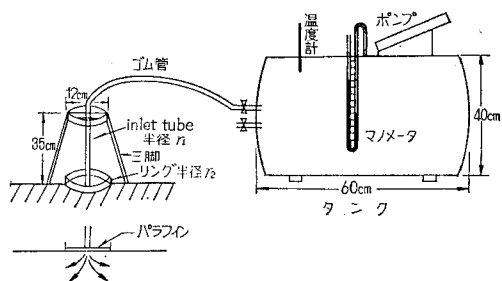


図-1 現場通気性測定装置の模式図

$$K = \frac{\mu V}{APt} \ln \frac{y_0}{y_1}$$

ここで  $K$  : 透過係数, ダーシー

$\mu$  : 空気の粘性, ポアズ

$V$  : タンク容積,  $\text{cm}^3$

$A$  :  $4r$  ( $r$  = inlet tube の半径),  $\text{cm}$

$P$  : 大気圧

$t$  : 測定時間, 秒

$y_0$  : 測定開始時のタンク内部圧, (水柱)  $\text{cm}$

$y_1$  : 測定開始  $t$  秒後のタンク内部圧, (水柱)  $\text{cm}$

$K$  の次元は  $L^2$  である。

### 3. 通気係数

長田<sup>13)</sup>の方法によった。その概略を図-2に示した。通気係数は次式から求める。

\* 野菜試験場施設栽培部

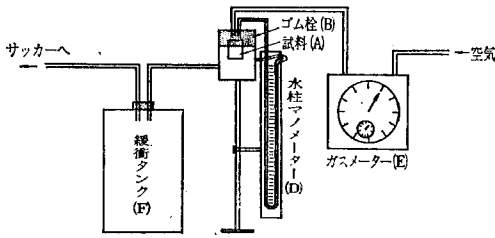


図-2 室内実験法の通気性測定装置模式図

$$q = A \cdot K_a \cdot \frac{\Delta P}{L}$$

ここで  $q$  : 空気平均容積流量, cc/sec

$A$  : 試料の断面積,  $\text{cm}^2$

$K_a$  : 通気係数

$\Delta P$  : 試料両端の圧力差, 水柱 cm

$L$  : 試料の長さ, cm

今  $\Delta P$  を水柱の高さの差  $\Delta h$  として  $K_a$  について求めると

$$K_a = \frac{q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta h}$$

となり,  $LT^{-1}$  の次元をもつ速度の単位として表示される。

#### 4. 拡散比

図-3 に示した装置を用い, 次式から拡散比 (空気中におけるガス拡散係数に対する多孔質物体中におけるガス拡散係数の比) を求める<sup>27)</sup>。

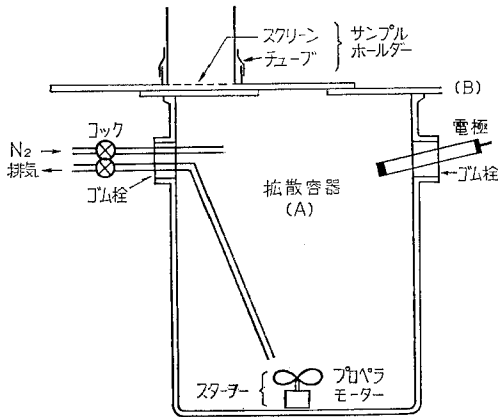


図-3 拡散速度測定装置

$$V \frac{dc}{dt} = D_0 a \frac{C_0 - C}{L}$$

ここで  $V$  : 拡散容器の容積,  $\text{cm}^3$

$C$  : ガス濃度,  $\text{mol}/\text{cm}^3$

$t$  : 時間

$D_0$  : 空気中におけるガスの拡散係数

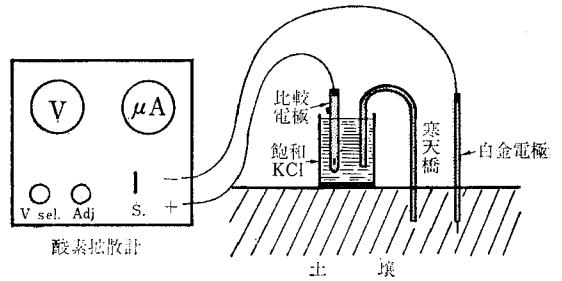


図-4 ODRの測定装置

$a$  : 拡散比

$A$  : 拡散可能なホルダー部の断面積,  $\text{cm}^2$

$L$  : 試料の長さ, cm

#### 5. ODR

装置の概略を図-4 に示した。白金電極とカロメル電極の間に流れる電流値から ODR を求める。

$$i \cdot 10^{-6} = nFfA$$

ここで  $i$  : 電流,  $\mu A$

$n$  : 酸素 1 分子を還元するに要する電子数

$F$  : ファラデー恒数

$f$  : 電極表面へ拡散する酸素の流量すなわち ODR,  $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  (一般には  $\text{g} \cdot 10^{-8} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  で表わす。以下 ODR の単位は省略する)

#### 3. 測定例と問題点

##### 1. 透過係数

表-1 は土性の異なる畑土壌で透過係数を測定した例である。一般に気相率と通気性は比例すると考えられ, またそれを前提として論議される場合が多い。しかし

表-1 透過係数の測定例

地名	土性	K ダルシー	気相率%	
武 豊	作 土	SCL	10.7	33.3
	作土下	LiC	1.2	4.8
扶 桑	作 土	LS	24.1	49.0
	作土下	LS	14.8	40.2
各 務 原	作 土	CL	17.7	29.5
	作土下	CL	10.5	24.4
美濃加茂	作 土	HC	63.0	35.7
	作土下	HC	tr.	7.5

表-1 の結果は両者が必ずしも比例関係にない。すなわち美濃加茂における作土の気相率は35.7%でKは63を示したが, 武豊では33.3%の気相率でKが10.7, 扶桑では49%の気相率でKが24.1であった。また作土下では美濃

加茂でほとんど通気が行われなかったのに対し、それよりも気相率の少ない武豊で1.2を示した。これらのことから土性あるいは土壌の構造によって本測定法の値が変るものと推察した。つまり土性層序が均質で、しかも粒状構造の発達した土壌では $K$ と気相率との間に比例関係が求められるようであるが、土性が細かく、塊状構造の土壌ではそれら土塊のすき間あるいは粗度が影響すると思われる、本法の適用はむずかしいと考えられる。

測定上の問題点として、タンク内気温の変化がある。殊に $K$ の値が低い場合、タンク内気温の変化によって、内部圧力が変わることは大きな誤差の原因となる。またパラフィン溶液を溶かす必要があるなど、現場で測定するには不便な点が多い。

2. 通気係数

図-5は武豊土壌で測定した例である。図中白丸は採土後そのまま測定したものであり、黒丸は一旦飽水し、

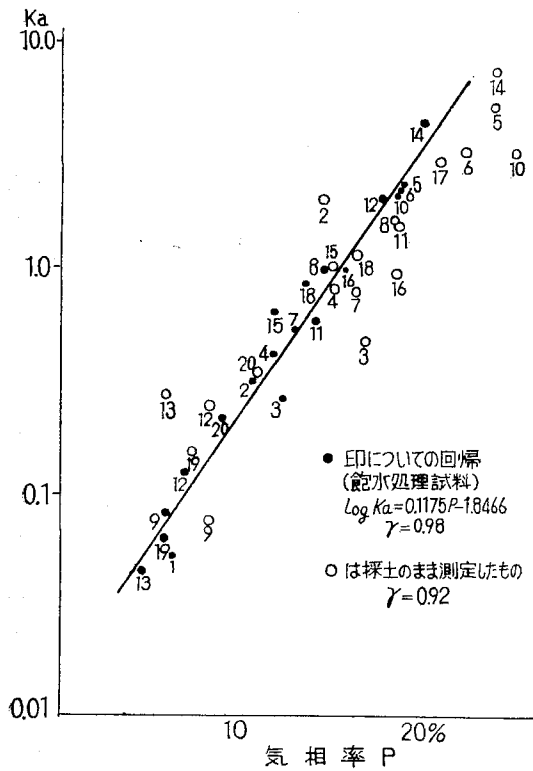


図-5 採土のままと飽水処理の比較

吸引法で $pF$  1.7~2.5にまで脱水して測定したものである。なお数字はサンプル番号を示す。両者について通気係数 $K_a$ と気相率 $P$ の相関関係を求めると、

$$\log K_a = 0.1175P - 1.8466$$

が得られ、相関係数は採土のまま0.92、飽水したもので

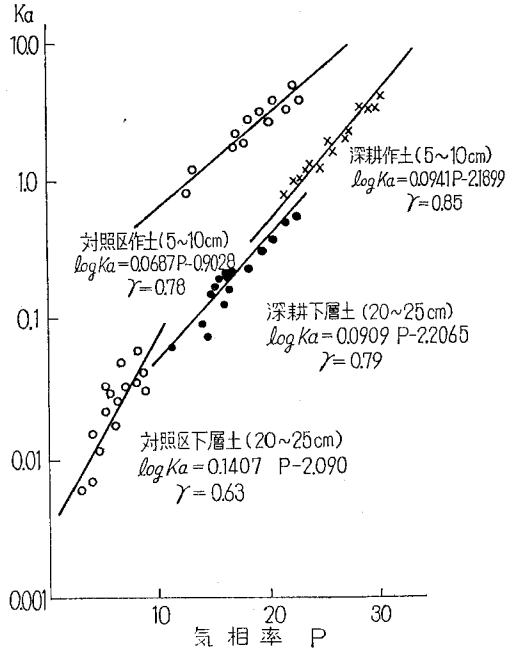


図-6 土層攪乱と通気係数

で0.98であった。つまり採土のままではバラツキが比較的大きく、一旦飽水すると回帰直線上ののってくる。このバラツキの原因として、閉鎖空隙あるいは採土管壁の間隙などが考えられるが<sup>25)</sup>、effective pore space<sup>8)</sup>と、採土のままの気相率が多少異なることを示唆するものである。

次に洪積層から成るも密な鈣質土壌をぼろ軟にし、通気性を高めようとのねらいから、武豊土壌を深さ1mまで深耕し、全層を攪乱した。そこで測定した $K_a$ を図-6に示した。ここで4本の回帰直線が画かれているが、白丸の場合は未攪乱状態であって、(a)が作土、(b)が作土下である。これら(a)、(b)、両直線はこう配がやや異なり、作土の方がゆるやかである。つまり作土は気相率が低くても $K_a$ は同一気相率の作土下よりも高いことを示している。

一方土層攪乱した作土及び作土下の $K_a$ はほぼ同一線上に並び、また攪乱区の方が気相率はかなり高まっているが、逆に $K_a$ は低くなっている。

以上のことから、 $K_a$ が気相率と高い相関関係にあるが、条件によって異なる回帰直線を画くものと考えられる。この条件とは恐らく構造的性によるものであろう。長田<sup>13)</sup>は同一試料でも回帰直線に折れ点のあることを認め、空隙半径の差異に基づくものであろうと推論している。土層攪乱は上下層の土性を均一化すると共に、その構造の面でも平均化する。従って攪乱地の作土及び作土

下とも  $K_a$  はほぼ同一線上にプロットされたものと考えられる。すなわち土性あるいは構造の発達いかんが  $K_a$  の値を支配するものであり、単に気相率の比較で通気性の良否を決定することに疑問を抱かせるものである。

なお測定上の問題点として、試料採取時の壁はがれ、き裂の有無が大きな誤差をまねき、また予措として一度飽水処理を加える必要があり、条件規制を厳密に行うことなどがあげられる。

### 3. 拡散比

Penman<sup>18)</sup> によれば、多孔質物体中におけるガス拡散は孔隙に比例するが、空気中におけるよりかなり遅くなるという。

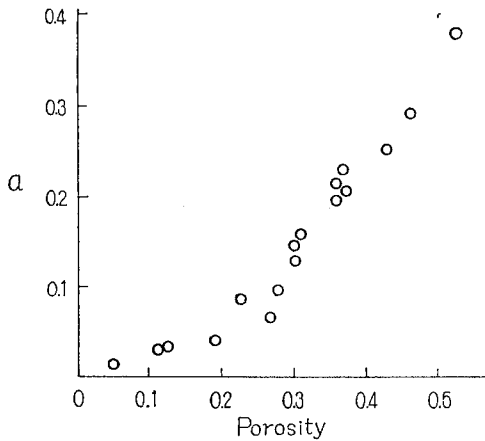
すなわち  $D/D_0=0.66S$

ここで  $D$  : 多孔質物体中のガス拡散係数

$D_0$  : 空気中におけるガス拡散係数

$S$  : 孔隙率

その後 Bakker ら<sup>1)</sup> がまとめたところによれば、研究者によって、あるいは試料の種類によって比例常数はかなり異なる。著者<sup>27)</sup> が武豊土壌を用いて行った結果は図一七に示した通りで、 $S$  が 0.2 より大きいときは  $D/D_0=S-0.15$ 、0.2 より小さいときは  $D/D_0=0.27S$  となった。



図一七 孔隙と  $a$  (PENMANの  $D/D_0$ ) の関係

### 4. ODR

以上三つの測定法は気相中におけるガスの動きをみたものであるが、ODRは直接植物根に供給される酸素の量を測定するものである。すなわち微少な白金線を植物根と仮定し、その表面にある被膜水に溶けてくる酸素を電氣的に還元することによって生ずる電流から、酸素の供給量を知ろうとするものである。この方法は Lemon<sup>9)</sup> によって土壌の分野で紹介されたもので、その後

表一 土層攪乱と通気性の比較

区	No.	気相率 %	通気係数 $K_a$	拡散比 $a$
対照区	1	12.9	0.095	0.037
	2	13.5	0.345	0.037
	3	16.4	0.445	0.043
	4	20.1	2.133	0.064
	5	24.6	3.339	0.064
	平均		17.5	1.271
攪乱区	1	13.0	0.024	0.033
	2	13.6	0.027	0.033
	3	15.8	0.024	0.043
	4	18.2	0.246	0.050
	5	21.0	0.914	0.060
	平均		16.3	0.247

van Doren<sup>21)</sup>, McIntyre<sup>11), 12)</sup> によっても検討されている。著者<sup>26)</sup> も実験条件や作物生育との関係を報じた。

表一は前述の土層攪乱ほ場において測定した例である。梅雨時の土壌水分が極めて多い条件を選んだが、対照区に比べ攪乱区ではいずれの深さにおいても高い値で経過している。ODRは現地でもあるいはまた実験室でも比較的簡単に測定できる利点を持っている。しかし白金電極が折れ易いとか、同一場所に何本かの電極をそう入しておく必要があるなど、まだ技術的な面で問題は残っている。

### 4. 各測定法の相互関連

通気性の良否を判定する方法として、いくつかの測定法をあげたが、それらの相互関連について述べてみたい。

すでに指摘したように、透過係数測定は適用範囲が限定され、また測定法上も問題があり、比較対象としない。

通気係数は土性によって異なることを図一六から推定した。そこで通気係数と土性、さらに拡散比との関係を明らかにするため、前記攪乱ほ場の作土を用いて両者の測定を試みた。その結果が表一である。対照区の気相率は平均 17.5%、攪乱区は 16.3%、通気係数は前者で 1.27、後者で 0.25と後者が著しく低い。一方拡散比は前者で 0.049、後者で 0.044と気相率と同じ変化を示した。土性は対照区の作土が SC、攪乱区が LiC であった。つまり未攪乱状態では作土下の土性が LiC~HCであるが、これが攪乱によって全層に混合され、土層全体が均質化したものである。

このように土性が変化したため、通気係数が同一気相

表一三 粒径と通気性 (石英砂)

メッシュ	通気係数	拡散比
10~15	—	0.360
20~30	20.8	0.359
80~150	0.298	0.366
150~200	0.013	0.366

率でも攪乱区で低くなったものと推定したが、さらにこれを確認するため、粒径の異なる石英砂を用い、同一気相率の条件で通気係数と拡散比を測定した。その結果が表一三である。

このように通気係数は粒径が小さくなるにつれ低くなるが、拡散比にはほとんど変化が認められないのである。

このことは表一二を裏付けるものであり、通気係数は土性の違いに基づく孔隙の大きさに左右されるが、拡散はその影響が少ないと結論される。

以上のことからわかるように、気相率に基づいて考えた場合、通気係数を通気性の良否を表わす指標とするには疑問が残る。一方拡散比は Bakker ら<sup>1)</sup>が示したように、材料によって若干の相違はあるにしても、従来からいわれているように、土壌通気の主体が拡散現象によるものであり<sup>18)</sup>、それが気相率と最もよく対応するとすれば、気相率のみで通気性を表わしてもよいことになる。

さて土壌中では各種小動物、微生物、植物根などが呼吸を行っており、従って酸素は消費され、炭酸ガスが放出されている。もし大気とのガス交換がなければ、炭酸ガスが極端に蓄積するはずである。土壌空気組成の分析はこの実態を把握するうえで意味がある。これまで土壌空気組成の測定例は多い<sup>6,7,17,20)</sup>。著者も東海地方の二・三の畑土壌で経時的に測定した<sup>24,28)</sup>。それらによると重粘な土壌で、しかも降雨直後に炭酸ガス濃度が数%になり、酸素濃度は10%以下になることはあるが、それは一時的な現象で、一般には18%以上の酸素濃度を保っていた。従って土壌空気組成からみて作物が酸素不足あるいは炭酸ガスによる障害をうける条件は極めて少ないと考えられる<sup>4)</sup>。しかしガス組成の分析は静的な一面をとらえているにすぎず、作物根は気相中にあるわけではなく液相によってとりかこまれており<sup>2)</sup>、この液相中の酸素濃度が問題視されねばならない。殊に気相率が少ない場合、根の被膜水中の酸素濃度が気相中の濃度と平衡状態にある保障はない。すなわち気相中と液相中でのガス拡散速度は1万倍の差があり<sup>5)</sup>、液相の多い条件下では根のまわりが局部的に酸素不足になる可能性が強い。従ってこの局部的な酸素条件を知ることがより合理的と考え

表一四 土層攪乱とODR\*

区	深さcm	6/8	6/9	6/10
対照区	10	11.3	12.9	16.1
	20	7.7	19.3	17.5
	30	5.4	6.5	9.9
攪乱区	10	45.7	45.0	47.8
	20	42.6	35.6	44.4
	30	24.4	22.2	34.8

\*  $g \cdot 10^{-8} \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$

降水量 7日42mm, 8日47mm

られる。ODRはこの条件を満たしており極めて有効な手段と考えられる。表一四は降雨後土層攪乱は場で測定した例である。対照区では降雨後2日経ても20以下であるが、攪乱区では30cmの深さで降雨直後でも20以上を示している。このことは対照区では停滞水があって空気の流通が著しく阻害されているのに対し、攪乱区では速やかに排水され、それに伴って大気との移動がスムーズに行われた結果と考えられる。このようにODRは直接酸素供給条件を測定することができる。ODRと作物生育については、Letey ら<sup>16,19)</sup>の総説があり、また著者も検討を行っている<sup>26)</sup>。それらによれば、野菜類では30以上が望ましいといわれ、そのときの気相率はおよそ25%以上であるという。

このようにODRは酸素供給の指標として優れているが、元来白金線が水膜で覆われていなければならないので、かなり多水分条件下でなければ適用できない。従って直接拡散比と比較することはむずかしい面がある。この検討は残されているが、現時点でいえることは、いわゆる通気(空気交換, ガス交換)は拡散現象によるものが主体であり、それは気相率で代表してもよさそうである。また作物根に対する酸素供給条件を知る方法としてはODRが適していると考えられる。

おわりに

以上現在測定されている通気性の良否を判定する方法として、いくつかあげそれらの応用例と問題点をあげてきたが、データ不足あるいは説明不足を否めない。この方面への助言を期待したい。

参考文献

1) BAKKER, S.W & A.P.HIDDING: Neth. J. Agric. Sci., 18, 37~48 (1970)  
 2) BIRKLE, D.E., J.LETEY, L.H.STOLZY & T.E.SZUSZKIEWICZ: Hilgardia, 35, 555~566 (1964)

- 3) EVANS, D.D. & Don KIRKHAM: Soil. Sci. Soc. Am. Proc., 14, 65~73 (1949)
- 4) GEISLER, G.: Plant Physiol., 42, 305~307 (1967)
- 5) GRABLE, A.R.: Adv. Agron., 18, 57~106 (1966)
- 6) 位田藤久太郎: 三重大学農学部学術報告, 4, 37~46 (1952)
- 7) 木下彰: 土肥誌, 29, 545~548 (1959)
- 8) KOHNKE, H.: Soil Physics p.p. 160~170, Mc Graw Hill, New York (1968)
- 9) LEMON, E.R. & A.E. ERICKSON: Soil Sci. Soc. Am. Proc., 16, 160~163 (1952)
- 10) LETEY, J. & L.H. STOLZY: Hilgardia, 35, 545~554 (1964)
- 11) McINTYRE, D.S.: Aust. J. Soil Res., 4, 95~113 (1966)
- 12) McINTYRE, D.S.: Soil Sci., 103, 118~125 (1967)
- 13) 長田 昇: 農業土木研究別冊第7号, 37~42 (1963)
- 14) 野本亀雄: 東海近畿農試研報, 栽培第2部, 2, 15~57 (1960)
- 15) 野本亀雄, 岸田達男: Ibid, 2, 58~67 (1960)
- 16) 小川和夫: 東海近畿農試研報, 18, 192~352 (1969)
- 17) 小川和夫, 森哲郎, 安田環: Ibid, 19, 81~97 (1970)
- 18) PENMAN, H.L.: J. Agric. Sci., 30, 437~462 (1940)
- 19) STOLZY, L.H. & J. LETEY: Hilgardia, 35, 567~576 (1964)
- 20) 梅林正直: 土壌の物理性, 26, 38~46 (1972)
- 21) VAN DOREN, D. M. Jr. & A. E. ERICKSON: Soil. Sci., 102, 23~28 (1966)
- 22) 山本毅, 戸田敏郎, 高橋和司, 松本猛: 愛知農試彙報, 13, 39~63 (1958)
- 23) 山本毅, 高橋和司, 松本猛, 沖村逸夫: Ibid, 13, 65~77 (1958)
- 24) 安田環, 荒木浩一: 土肥誌, 41, 413~417, (1970)
- 25) 安田環, 大崎玄佐雄: 東海近畿農試研報, 24, 94~104, (1972)
- 26) 安田環, 土肥誌, 43, 223~230 (1972)
- 27) 安田環, 土肥誌, 45, 543~545 (1974)
- 28) 安田環, 未発表
- 29) 湯村義男, 石原暁: 東海近畿農試研報, 22, 84~97 (1971)

## 植物栄養土壌肥料大事典

編集委員長 東大教授 高井康雄博士  
 同副委員長 農技研肥料化学科長 早瀬達郎博士  
 編集幹事 東大教授 熊沢喜久雄博士

ほかに専攻家 224 氏共著

### 目次大略

第I編 植物栄養 1. 植物の栄養, 2. 植物体の組成, 3. 植物の物質代謝 4. 主要無機元素の生理作用, 5. 植物の養分吸収, 6. 植物体内における物質の転流, 7. 乾物生産, 8. 植物の栄養と生産物の品質, 9. 植物の組織培養と無菌栽培, 10. 植物栄養における同位元素の利用。

第II編 土壌 1. 土壌学, 2. 土壌の生成, 分類及び調査, 3. 土壌構成成分, 4. 土壌物理, 5. 土壌の生物, 6. 土壌の物理化学

第III編 土壌肥沃度と施肥 1. 土壌肥沃度の原理, 2. 施肥法の原理, A 水稻 1. 水田の肥沃度, 2. 水稻の施肥法, B 畑作物, C 野菜・花卉, 1. 野菜栽培と土壌管

理, 2. 野菜の施肥, 3. 花の施肥, D 果樹, 1. 園地の肥沃度, 2. 果樹の施肥 E 茶, F 桑, G 牧草・飼料作物, H 林木, I 水系

第IV編 肥料 1. 肥料, 2. 配合と化成, 3. 土壌中での変化, 4. 肥料の反応, 5. 肥料取締り, 6. 窒素肥料, 7. リン酸肥料, 8. 加里肥料, 9. カルシウム(石灰)肥料, 10. マグネシウム(苦土)肥料, 11. ケイ酸肥料, 12. 微量要素肥料, 13. 複合肥料, 14. 農薬肥効調節, 肥効増進肥料, 15. 販売有機肥料, 16. 自給肥料, 17. 特殊肥料

第V編 土壌—大気—植物系の物質循環と環境汚染, 3. 環境汚染, ○索引

○関係付表 (17頁) ○索引 (30頁)

株式会社

養賢堂発行

東京文京区東大正門前 (〒 113-91)  
 振替・東京2-25700・電話(814)0911

B 5 上製1370頁・図1000個

定価 1万4千円 720円