九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ロックウール培地の物理的特性 : 水分特性

山中, 捷一郎
九州大学農学部農業機械学研究室

https://doi.org/10.15017/23359

出版情報：九州大學農學部學藝雜誌. 46 (1/2), pp.1-7, 1991-10. 九州大學農學部
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌 (Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.)
第46巻 第1・2号 1-7 (1991)

ロックウール培地の物理的特性
―水分特性―

山 中 捷一郎
九州大学農学部農業機械学研究室
(1991年3月4日 受理)

Physical Properties of Rockwool Propagation Media
―Moisture Characteristics―

SHOICHIRO YAMANAKA
Laboratory of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture,
Kyushu University Fukuoka 812

I 緒 言

近年，園芸栽培技術の発展と多様化にともない土に代わる新たな園芸培地（高橋，1986；安井，1986）が数多く出現してきている．これらの培地は固形培地と無固形培地に大別でき，前者には砂，れき，くん炭，ウレタン，ロックウール，また後者には水が用いられている．これらの培地の出現により植物の生産技術も大きく進展し，ロックウール栽培，NFT (Nutrient Film Technology)，湛水水耕等が各地で見られるようになった．これらの培地の使用に当たって重要なことは，植物の地下環境の制御（原，1983）であり，その中でも根系群に養液と多くの酸素を供給することが最も重要となる．このため，NFTでは傾斜させた栽培床に薄層となる養液を流して酸素の取込みを行っており，湛水水耕ではウェアーを設置したパイプから空気を取入れ，養液と酸素を栽培装置に送りこんでいる．

一方，ロックウール栽培では，灌水強度により酸素の取込みを調節している．ロックウール培地の構造は固相，液相，気相から成っており，ロックウール繊維間の間隙には水分や空気等の可動部分が存在し，この中で液相と気相が重要である．ロックウール培地内の水分は固相に働きかけて内部の物理的特性，すなわち，保水性，透水性，排水性，拡散性等を支配し，その増減は気相の率およびこの運動量に影響を与え，さらには植物の生理的水分としての役割を持ち，栽培時の養分や溶解やその運動量をも規制している．灌水によりロックウール培地内の間隙に保持される水分量とその分布度は酸素量の多少を決定するため，水分と空気の挙動を明らかにする必要がある．

そこで，本研究では固形培地の一つであるロックウール培地内の水分状態と酸素量に寄与する基礎的な特性を明らかにするため，土壌物理学的な手法により市販の4種類のロックウール培地を供試して，実験により水分吸引圧―体積水分率，飽和透水係数，計算により不飽和透水係数を求めた．さらに，これらの結果よりロックウール培地の保水性と排水性の関係を検討した．

II 水分特性の概念

1．保水性

培地の保水性は植物に水分を供給する時の重要な特性の一つである．保水性に関与する培地内の水分機能には，重力水，毛管水，吸着水がある．これらのうち毛管水に関連する水分特性を表す指標にpF値がある．pF値とは培地が水分を保持する力を毛管上昇の高さで表現し，その値を対数に換算したものである．毛管上昇高さは毛管の半径との関係が深く，毛管の半径が小さいほど，大きくなる．一般に，この関係はpF―水分率曲線で表される．また，この特性は水の可動性の指標となる水の自由エネルギーの高低を表すもので，この関係は水の運動方向および根の吸水の難易を評価できる．

2．透水性

ロックウール培地の水分フラックスや水の挙動を計算するためには，トータルポテンシャル勾配とともに透水係数を知る必要がある．透水性は培地内の水分移動量とその速度の程度を表す指標である．この値の大きさはロックウール培地内の幾何学的形状，すなわち間隙の大きさ，全間隙率，内部表面積，繊維の配列状態に左右される．

一般に土壌物理学では，培地内の水の流れをダルシーの法則（三好・丹原，1977）によって[1]式により定義している．

$$Q = \frac{KA\triangle H}{L} \qquad [1]$$

ここで，Q：通過する水量（cm^3/s）
A：培地の断面積（cm^2）
$\triangle H$：水頭損失（cm）
L：培地の長さ（cm）
K：透水係数（cm/s）

[1]式より培地を通る水量は，断面積，水頭損失，透水係数に比例し，培地の長さに反比例する．

[1]式を流束密度（q）で表すと，[2]式となり，[2]式から単位時間，単位断面積を通って流れる水量は，流れの方向の単位距離当りの水頭損失（$\triangle H/L$：トータルポテンシャル勾配）に比例することが分かる．

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{K \cdot \triangle H}{L} \qquad [2]$$

培地内の水の移動は間隙の中を水が飽和している場合と空気が存在する条件下での移動とに大きく区分されるが，前者を飽和透水現象，後者を不飽和透水現象と言う．飽和透水現象は比較的大きい間隙の中を水が移動する現象である．透水性の良否を表す一つの指標に飽和透水係数がある．これは[2]式の比例定数 K であり，前述のようにトータルポテンシャル勾配に対する流速密度の比で表現でき，次元は LT^{-1} となる．この透水係数は培地の全間隙率，間隙分布等の特性や流体密度，粘性等の流体特性によって変化する．

一方，不飽和透水現象は毛管間隙の中を通過する水の移動であるから，不飽和時の水の流れに関しては，圧力勾配が吸引圧勾配となるとともに，透水係数は一定でなく水分率，水分吸引圧，透水係数が複雑に関連している．この物理量は間隙の形態および分布等によって決定されるが，現状ではこれらの基礎的な関係は明確に説明できず，培地の物性値から不飽和状態における不飽和透水係数を実験から容易に測定する方法はない．そのため，多くの研究者によって理論的，実験的に他の水分特性から不飽和透水係数を求める方法（土壌物理研究会編，1979）が試みられてきた．例えば，水分量と圧力水頭の関係を培地の水分特性に対照させて，分布データの間隔の大きさから不飽和透水係数を計算する方法である．この方法は多くの研究者によって，実験結果と比較しながら簡略化されてきた．その結果，マーシャル等による方法（土壌物理研究会編，1979）が簡単で妥当性があると考えられてきた．これは任意の水分量（飽和時）における透水係数の測定値と計算値の比をマッチング・ファクターとして表し，不飽和透水係数を求める方法である．

マッチング・ファクターを用いたマーシャル等の考え方を拡張したジャクソン（1972）の式は[3]で表される．

$$K_i = K_s\left(\frac{\theta_i}{\theta_s}\right)^p \frac{\sum_{j=i}^{m}[(2j+1-2i)h_j^{-2}]}{\sum_{j=i}^{m}[(2j-1)h_j^{-2}]} \qquad [3]$$

ここで，K_s：θ_s における飽和透水係数
K_i：θ_i における不飽和透水係数
θ_s：飽和時の体積水分率
θ_i：不飽和時の体積水分率
p：間隙径の変化による影響を補正する定数
h_i：圧力水頭
m：計算に用いた体積水分率の分割数

定数 p の値は多くの研究者によって，0～2 と仮定して，得られた不飽和透水係数の値の妥当性を検討している．また，体積水分率の分割数は 10～20 とすれば，十分である．

3．排水性

植物の成育にとって望ましい培地とは，その間隙に適当な水分と酸素が含まれていることである．一般にロックウール培地は，繊維の特性とその方向性によって，上下方向の水分移動が容易で保水力が優れている．このことは，外的な要因が働かない限り，内部に水分が多く保持される傾向になる．この水分が多く存在することは，植物，特に根系に悪影響を与え，過湿による根の機能低下を発生させる．そのため，水分吸引圧

を加えたり，培地に傾度を与えて，内部の水分と酸素の割合をコントロールすることが重要となる．したがって，排水性を水分分布および体積水分率との関係で明らかにする必要性がある．

III 実 験 方 法

1．供試材料

ロックウール培地の物理的な特性は，ロックウール繊維の太さと長さ，繊維内の間隙および形成時の間隙，硬度等により異なり，この違いは主に原料の組成と溶融粘度にあると言われている．そこで，互いに関連しあう物理的な特性，特に水分特性に及ぼす影響を明らかにするため，現在，市販されているロックウール培地を4種類選んで供試材料とした．供試したロックウール培地の区別はA，B，C，Dの記号で表示する．ロックウール培地の形状は，7.5×7.5×7.5 cm と 10×10×10 cm（切断用）である．ロックウール培地には繊維の方向性があるので，実験では実際に使用されている方向，すなわち繊維が縦方向になるように設置して，その時の水分特性を測定した．

2．保水性の測定

ロックウール培地の保水性の測定は，間隙水分測定装置（大起理工製）を用いて行った．材料を装置のコラムの形状にあわせるため，先端が鋭利な刃を有する円筒サンプラー（直径5 cm，高さ10 cm）を作り，これを回転させながら材料（10×10×10 cm）に押しつけて円柱状のサンプルを作った．この際，材料の切断によるロックウール繊維の乱れが生じないように円柱側面が鋭利に切断されるよう注意深く行った．また，材料を切断する時の間隙率への影響を把握するため，切断前後の材料の寸法を測定して高さの変化状態を見た．その結果，材料切断後の高さは時間の経過とともに切断前の高さに復元した．測定は切断後，1時間経過した材料をサンプラー（容積10 cm^3）に乱さないよう注意深く挿入した．

装置にセッティングした材料は脱水過程による方法で5段階の吸引圧をかけ，そのつど，排出される水量を読み取って間隙水分を測定し，後で体積水分率に換算した．

3．透水性の測定

一般に土壌の飽和透水係数の測定には専用の装置があるが，ロックウール培地の形状に合わせた測定装置を新たに試作した．装置の概略を図1に示す．この中に7.5×7.5×7.5 cm のロックウール培地を置き，試料と装置の接触面間に水の流れる道ができないようシリコン樹脂を装置壁面とロックウール培地の境界面に塗布した．測定はダルシーの法則に従って，ロックウール培地の上面に水を灌水させ水位差が一定によるよう注意を払い，材料の断面を通過して排出される水量とその時間を計測した．

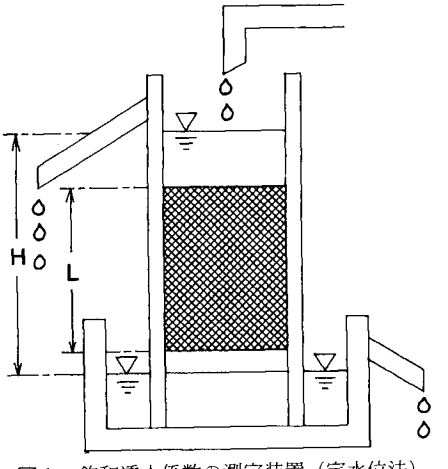

図1　飽和透水係数の測定装置（定水位法）

4．排水性の測定

排水特性を明らかにするため，水で飽和させたロックウール培地を傾斜角度が0°，5°，10°，15°の板の上に置き，体積水分率の変化を測定した．

灌水時のロックウール培地内の垂直方向の水分分布と排水量を調べるため供試材料を5層に切断して重ね合わせ，その各々に水分を与えて傾斜させた板の上に置き，水分分布の時間的な変化を測定した．

また，ロックウール培地の灌水前の体積水分率と灌水後の体積水分率の関係を調べるため，異なる体積水分率を有する供試材料にノズル（イスラエル製）から7.34 cc/min の灌水強度を与え，その時の体積水分率の変化を測定した．ノズルからの流量はポンプからの吐出量をバルブの開閉度で調節した．

IV 実験結果および考察

1．保水性

間隙水分測定装置で求めた試料の体積水分率と水分吸引圧の関係を図2に示す．この図によると，吸引圧が大きくなるにつれてロックウール培地内の大きな間隙の水が空になり，体積水分率が小さくなる．高い吸引圧のもとでは，水は非常に狭い間隙のみに保持されている．平衡状態では，ロックウール培地内に保持されている水分の量は間隙の大きさと容積の関数である．

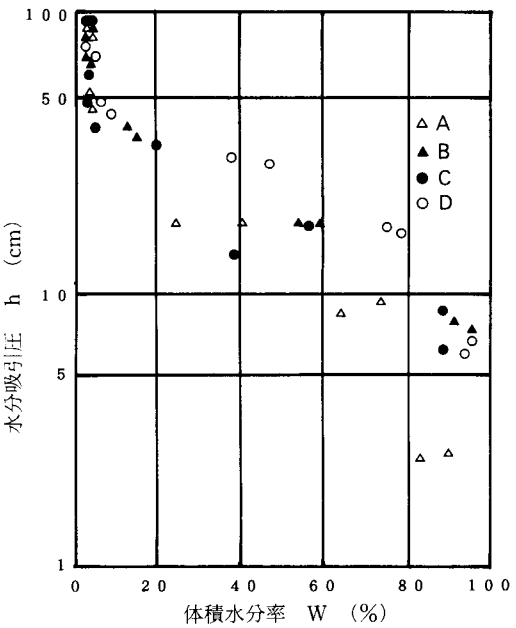

図2　実測したロックウールの水分特性値

この変化を見ると，水分吸引圧がない限り初期体積水分率を保持できるが，吸引圧100 cm付近でロックウール培地内の水分はほとんど吸引され，吸引圧が約20 cmで50%の体積水分率となる．この傾向は砂質系土壌の特徴に類似している．各試料別に見ると，体積水分率の減少の度合は，A>C>B>Dの傾向がある．詳細に見ると，体積水分率10%までは同じ吸引圧での値を示しているが，20%以上になると，ロックウールA，DはB，Cと異なり，前者は高い吸引圧で，後者は低い吸引圧において同様な体積水分率を示す傾向にある．また，体積水分率80～100%の範囲で見ると，B，C，Dは同一な値を示しているが，Aの吸引圧は低く働いている．この差はロックウール培地の繊維の形状，親水性，間隙量と毛管力の違い，即ち，固体部分から発生する種々の吸引力と液気界面に発生する毛管力の大小によるものと思われる．

ここで他の土壌と比較して見ると，砂質系土壌は大きな間隙が多いが，粒子間の毛管力が小さいため水を保持する力は弱い．一方，粘土質系土壌は小さな間隙が多く毛管力が大きいため，保水性は良い．結論的に言えば，間隙量が小さく毛管力が大きいほど保水性は良いと言われている．ロックウール培地の場合，間隙率が95～97%（日本施設園芸協会，1988）であり，砂質系土壌と似た性質を有しているので有効水分は低くなるが，繊維間の水に対する吸着力と繊維間で生ずる毛管力が大きいため，保水性は大きいと考えられる．

2．透水性

4種類のロックウール培地の飽和透水係数（cm/s）の測定には，各々，材料を3個体ずつ供試し，その平均値はそれぞれ0.45(A)，0.33(B)，0.43(C)，0.33(D)であった．ロックウール培地を水で飽和させた時の水分移動の難易差はA>C>D=Bであった．ロックウール培地の種類により透水係数が異なる理由は，前述したようにロックウール培地内の幾何学的形状で決まるが，比較的大きな間隙を有するロックウール培地は全間隙率が小さくとも透水係数は大きくなるからである．結論的に言えば，水の移動は通水抵抗の少ないところを連続して流れるものと考えられる．

ロックウール培地の密度（g/cm^3）を計算すると，0.07(A)，0.11(B)，0.083(C)，0.092(D)となった．このことは密度が小さいほど，ロックウール培地内の気相が占める割合が大きく，間隙量が大きいことを示している．

以上のことを土壌と比較すると，ロックウール培地の飽和透水係数は砂質系土壌の値，1～0.01(cm/s)と近似的に等しい（八幡・田淵・中野，1983）．砂質系土壌の物理性は大きい間隙が多いため通気・通水性は良いが，毛管力が小さいので水分を保持する力は小さいと思われる．また飽和時における透水状態は土粒子間における大きな間隙間での水分移動であると考えられる．したがって，飽和透水係数に大きく影響を与える要因は間隙量の大きさとその分布度である．ロックウール培地の飽和透水係数は間隙率が95～97%であることから，大きいといえる．

しかしながら，植物が栽培されている時の土壌は完全に水で飽和されているのではなく，常に水分と空気が存在している不飽和の状態である．そのため，ロックウール培地の表層から下層への水分移動，さらにはそれに続く下層から表層への水分の上昇などの浸潤，再分布状態を定量的に把握する必要がある．

飽和透水係数と不飽和透水係数を比較すると，前者は試料が水で飽和されているため，水が全ての間隙を満たしているので透水係数は最大となるが，後者では間隙中に占める空気の割合に応じて，試料の断面積中の通水が減少するので，透水係数は小さくなる．

そこで飽和透水係数と体積水分率―水分吸引圧の実験データから不飽和透水係数をマーシャル等の方法により計算し，その結果を図3～5に示す．なお図3は実験より得られた図2のデータを不飽和透水係数を計算

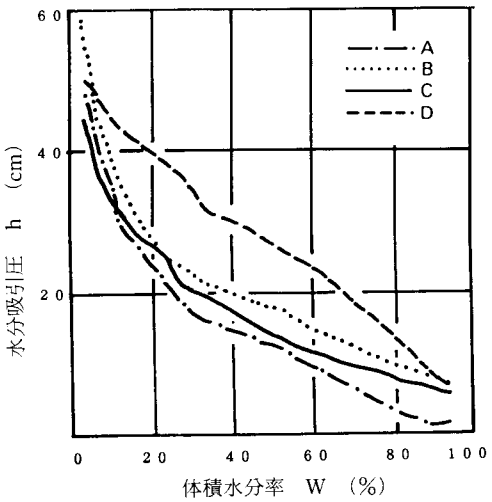

図3　近似化したロックウールの水分特性曲線

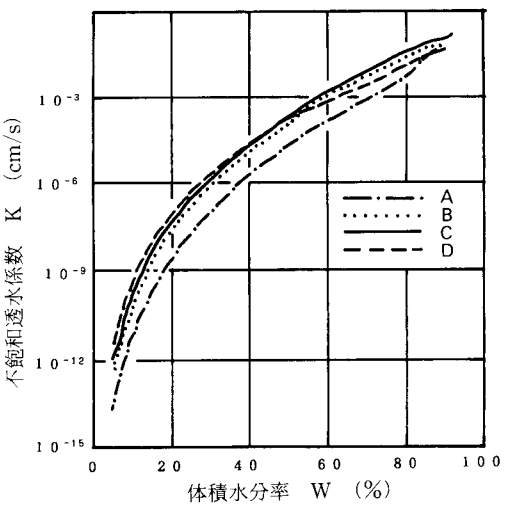

図4　体積水分率と不飽和透水係数

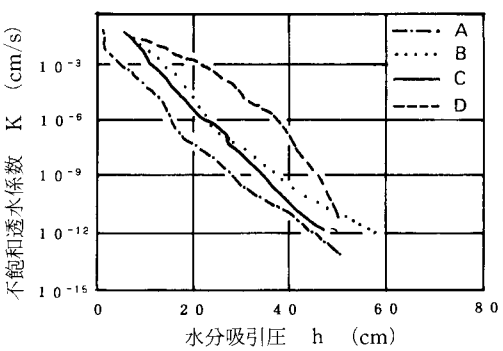

図5　水分吸引圧と不飽和透水係数

するために，近似的に表したものである．

体積水分率と不飽和透水係数の関係は，体積水分率の増加と共に不飽和透水係数は大きく変化し，これらの値は体積水分率 10～90%で，10^{-12}～10^{-1} (cm/s) の範囲である．この理由は不飽和の状態が大きくなると，水の流れの屈曲が多くなるため流路が長くなり，また，体積水分率が減少すると，最初に一番大きな間隙が空になるためである．

水分吸引圧と不飽和透水係数の関係は吸引圧が大きくなると，不飽和透水係数が小さくなる傾向を示した．この理由は前述したように吸引圧が大きくなると，体積水分率が小さくなることから説明できる．また大きな間隙を有するロックウール培地は，吸引圧の増加に伴って，透水性の高い大きな間隙から急激に水分が失われた後，水の流れは小さな間隙に限定されてその通水性が低下するため，不飽和透水係数が減少すると考えられる．小さな間隙を有するロックウール培地では，吸引圧が増加しても，大部分の間隙が水で満たされ通水可能であるので，急激な係数の低下は生じない．供試したロックウール培地を不飽和透水係数と水分吸引圧，体積水分率の関係で見ると，前者では D>B>C>A，後者では，B，C，D とも同様な値を示しているが，特に A が小さな傾向を示した．

3．排水性

ロックウール培地を静置すると，水分はほとんど流出しないと言われている．植物の成育には，培地内への空気の供給が必要であり，酸素の拡散係数を空気中と水中で比較すると，前者の値は 10^4 倍と高い．したがって，空気量がロックウール培地内の水分分布と流れに重要であり，水分が多いと酸素不足と過湿が生じ，植物の成育に悪影響を与える．

ロックウール培地に傾度を与えた時のロックウール培地の排水速度と傾斜角度の関係を図 6 に示す．この図によると，傾斜角度が大きくなると共に排水量はほぼ直線的に増加し，その排水速度は約 0.06(cm^3/min・deg)である．これは傾斜させることによって水分移動が生じ，ロックウール培地内の水分分布が一様でなくなるため，ロックウール繊維間に作用している毛管力と繊維自身が有する水分吸着力の平衡状態が崩れるためと考えられる．傾斜角度が 0° の場合でも重力水が存在するため水分が排水される．このことは，ロックウール培地の保持できる水分はその体積と同一ではなく，同体積であっても，高さと断面積の比で決まることを意味している．ロックウール培地別の差を見ても，ほぼ同様な傾向を示すが，その大小関係は A>D>B>C

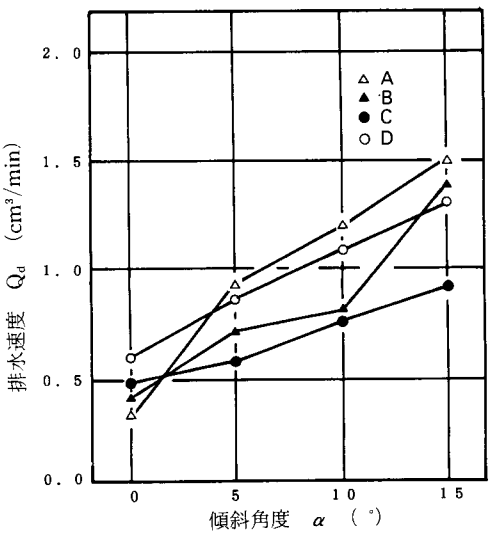

図6　傾斜角度と排水速度

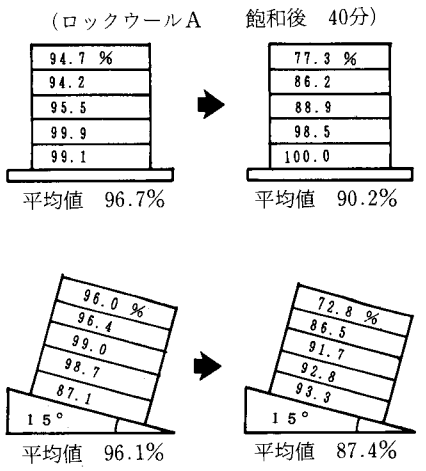

図7　ロックウール層位の体積水分率の経時変化の一例

である．この差はロックウール培地を構成する繊維の状態に起因していると考えられる．

ロックウール培地に傾斜を与えた時の水分分布の経時変化を図7に示す．5層に分割したロックウール培地の水分分布を見ると，傾斜角度が0°，15°の場合とも時間の経過とともに，水分は下層へ移動しているが，後者の方が体積水分率は上部が少なく，下部が大きい．この値は時間の経過とともに減少するので，体積水分率はロックウール培地を傾斜させることでコントロールできる．40分後の状態では，15°に傾斜させたロックウール培地は下部から水が排出されるため，5層に分割した全体積水分率は0°の場合より減少している．ロックウール培地別の体積水分率の変化には，大きな差は認められなかった．

灌水前後のロックウール培地の体積水分率の変化を図8に示す．これによると，ロックウール培地により灌水前の体積水分率と灌水後の体積水分率には大きな相違があることが見られた．Aの場合，灌水前の初期体積水分率と灌水後の体積水分率には比例関係が認められた．一方，B，C，Dの場合，灌水をすることにより灌水前の体積水分率30%は灌水後に70%と急激に増加し，その後，緩やかな勾配で増加するが，灌水前の体積水分率の制約を受けている．この傾向は小菅・高橋（1987）の実験結果と類似している．この理由は，ロックウール培地内に存在する封入空気と間隙の状態により水分は拡散しやすい間隙間（水の道）を通って流れ，水分はその周囲で保持されると同時に底面に分布し，横方向への水分移動はなく垂直方向に移動し，保持できない水は下部から流出するからと考えられる．さらには，ロックウール繊維間の間隙の大小やその分布度および繊維自身の水分吸着力に原因があると思われる．

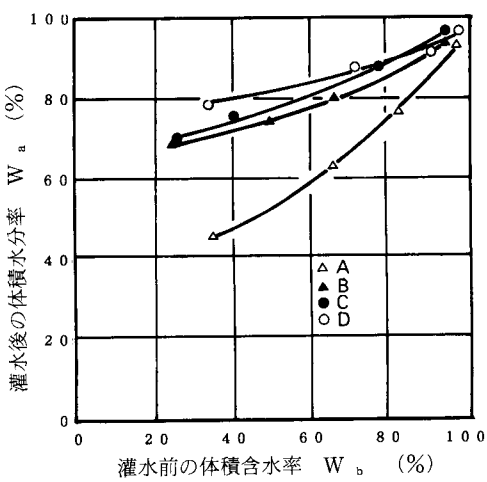

図8　灌水前後における体積水分率の変化

V　摘　　要

本報では，人工培地の一つとして市販されている4種類のロックウール培地の水分特性を調べるため，土壌物理学的な方法より各培地のpF—体積水分率，飽和透水係数の関係および灌水時の培地の水分移動特性を実験により，また不飽和透水係数を計算より求め，培

地として重要となるロックウール培地の保水性と排水性について論じた．その結果，次の結果が得られた．

①ロックウール培地の保水性はその繊維の親水性と毛管性および間隙率が大きいため，多くの水分を保持できるが，有効水分は少なかった．水分吸引圧一体積水分率の関係は砂質系土壌に類似しており，体積水分率の急激な変化を見ると，水分吸引圧 50 cm で体積水分率の 90%が失われ，20 cm で 50%の体積水分率となった．

②ロックウール培地の飽和透水係数は 0.32～0.46 cm/s の範囲にあり，この大きさは間隙量とその状態により大きく影響を受ける．一方，不飽和透水係数の値は体積水分率 10～90%で，10^{-12}～10^{-1}cm/s の範囲で変化した．この関係を水分吸引圧で表すと，10～50 cm の範囲であった．

③静置状態でのロックウール培地からの水の排出は重力水による移動だけである．このため過湿になるのでロックウール培地に傾斜をあたえることにより，体積水分率を調節する必要がある．排水速度と傾斜角度の関係は，約 0.06 cm^3/min・deg であった．

④灌水後のロックウール培地の体積水分率は灌水前の初期体積水分率に大きく影響を受けた．この理由はロックウール培地の間隙率の大きさとその分布状態の違いと封入空気の存在に起因しているからと思われる．

文　　献

岩田進午監修　1984　ヒレル：土壌物理学概論．養賢堂，東京

高橋和彦　1986　わが国における養液栽培の現状と今後の展望．農業および園芸，61(1)：pp. 94-100

土壌物理研究会編　1979　土の物理学．森北出版，東京，pp. 242-244

中野政詩・東山　勇監訳　1987　キャンベル：パソコンで学ぶ土の物理学．鹿島出版会，東京

小管敏夫・高橋勤治　1987　かけ流し式および循環式におけるロックウールの物理的特性．園芸学会昭和 62 年度秋季大会研究発表要旨，園芸学会，東京，pp. 346-347

原　道宏　1983　施設栽培における地下環境制御．施設栽培，植物工場における計測と制御，計測自動制御学会，東京，pp. 19-35

Jackson, P. D. 1972　On the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **36**: pp. 380-382

三好　洋・丹原一寛　1977　土の物理性と土壌診断．日本イリゲーションクラブ，東京，pp. 55

日本施設園芸協会編　1988　施設園芸におけるロックウール栽培の手引．日本施設園芸協会，東京，pp. 29

農耕と園芸編集部編　1986　養液栽培の新技術．誠文堂新光社，東京

施設園芸研究部会・情報システム研究部会編　1986　ロックウール耕の現状と将来．日本農業気象学会，東京

土の理工学性実験ガイドブック編集委員会編　1983　土の理工学性実験ガイドブック．農業土木学会，東京

安井秀夫　1986　固形培地式養液栽培の理論，農業および園芸，**61**(1)：pp. 147-159

Summary

The following results were obtained for the water properties of the 4 commercial rockwool propagation media.

1. The water retentivity of the rockwool media is excellent, because the capillary potential and porosity in the rockwool media are large. The moisture characteristics curve of the rockwool media has properties simillar to those of sandy soil. On some observations for change of volumetric water content, it was found to loose 90% of volumetric water content at a suction of 50 cm and 50% of it at a suction of 20 cm.

2. The saturated permeability ranged from 0.32 to 0.46 cm/s, and its values are affected considerably by the state and the distribution of pores in the rockwool media. The unsaturated permeability calculated by the Jackson-method varied from 10^{-12} to 10^{-1} cm/s in the range of 10 to 90% of volumetric water content.

3. The volumetric water content of the rockwool media was controlled by irrigation intensity and drainage rate at the various inclinations of the rockwool media.

4. The volumetric water content after irrigation was affected by the initial water content. It depends on the degree of porosity of the rockwool media, the geometry of rockwool fiber and the existence of entrapped air in the rockwool media.