水分移動特性に基づく有機・無機培地内水分環境の評価

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	宮本,英揮 吉田,敏 筑紫,二郎 江口,壽彦 伊藤,祐二
発行元	日本植物工場学会
巻/号	21巻2号
掲載ページ	p. 72-78
発行年月	2009年6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

水分移動特性に基づく有機・無機培地内水分環境の評価

宮本英揮[1]・吉田　敏[2]・筑紫二郎[2]・江口壽彦[2]・伊藤祐二[2]

[1]佐賀大学文化教育学部　840–8502　佐賀市本庄町1番地
[2]九州大学生物環境調節センター　812–8581　福岡市東区箱崎6–10–1

Estimation of Moisture Conditions in Organic and Inorganic Growing Media Based on Hydraulic Properties

Hideki MIYAMOTO[1], Satoshi YOSHIDA[2], Jiro CHIKUSHI[2], Toshihiko EGUCHI[2] and Yuji ITO[2]

[1]Faculty of Culture and Education, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga 840–8502, Japan
[2]Biotron Institute, Kyushu University 6–10–1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812–8581, Japan

Abstract

Although coconut coir has been drawing a lot of attention as an alternative medium instead of rockwool in hydroponics, the adequate use of coconut coir has not been established due to the lack of information on its hydraulic properties. To reveal the properties and their differences among coconut coir and other growing media, we measured water retention curves and hydraulic conductivities of sand, rockwool, and coconut coir in a wide range of moisture conditions. The coconut coir, consisting of many smaller pores, could securely hold more moisture than other media, but did not permit active water flow due to its minimal hydraulic conductivity. Based on these measurements, we determined physical parameters characterizing each hydraulic property and simulated moisture conditions in the media under testing for a subirrigation system accompanying steady surface-evaporation of 1.0 cm d^{-1} and a continuous water supply from ground water at a shallow depth. For the sand and the rockwool, suction of water less than 15 cm was simulated near their surfaces and thus the profile of volumetric water content (θ) locally decreased in the zone. Although a similar θ-profile was simulated for the coconut coir as well, the suction at the surface showed more than 160 cm. Judging from these results, we concluded that the moisture condition of horticultural media tested here was sensitive to boundary conditions such as evaporation, irrigation, and drainage as well as their hydraulic properties.

Keywords: boundary condition, hydraulic conductivity, pore-size density, water retention curve

緒　言

近年，作物の周年安定生産や生産効率向上を目的として，養液栽培が盛んに実施されている．なかでも，透水性と通気性に優れたロックウールを培地として用いる栽培方法は，花卉や果菜類の施設栽培に広く利用されている．その一方で，使用後のロックウールは，産業廃棄物として取り扱われるため，廃棄あるいは再利用のための特殊処理を施す必要がある．その方法として，粉砕して土壌改良材あるいは鉢物の培地素材としての利用や，再利用が挙げられる[1]．しかし，前者は処理量に限界があること，また後者はロックウールの品質維持が困難である[1]．他にも埋め立てによる廃棄処理があるものの，高い処理コストに加え，環境保全の精神にも反するな

2008年10月　9日受付
2009年　2月　6日受理
Corresponding author：Hideki Miyamoto
(b1098@cc.saga-u.ac.jp)

どの問題点がある[1]. そのため, 使用後の処理費用が安価で, 且つ環境負荷の小さい新たな培地の開発が切望されている.

養液栽培に用いる理想的な固形培地の性質として, ①材料が均一で変質しないこと, ②入手が容易で安価なこと, ③水および養分管理が行いやすいこと, ④塩類, 毒物, 重金属等の阻害物質が含まれないこと, ⑤雑草の種子, 病原菌が含まれないこと, ⑥使用後の処理が安全かつ容易にできることなどが挙げられる[2,3]. また, 高設化を行うイチゴ栽培では, 培地が軽量であることが望ましい[4]. これらをすべて備えた培地は存在しないが, 昨今, 使用後の土への還元が容易であるヤシ殻資材, ピート, バークなどの有機培地の利用が検討されている[4-7].

作物の生育や品質は, 培地の根群域の水分状態に強く依存する[8,9]. よって, 有機培地を有効に活用するためには, 第1に水分の保持や移動の難易を表す保水性や透水性, すなわち水分移動特性を把握すること[7], 第2にそれが培地内の水分環境に与える影響を予測することが必要である. しかし, 有機培地中の水分動態に関する研究例は少なく, その実態は十分に解明されていない.

そこで, 本研究では, ロックウールに劣らない高い保水性を持ち, また撥水性が小さく過度の水ストレスを与えることも可能な有機培地[3]として利用が進んでいるヤシ殻繊維 (以降, ヤシ殻と表記) を対象に, 保水性と透水性を評価した. そして, それらの測定結果を砂やロックウールの結果と比較することにより, ヤシ殻の水分移動特性を特徴付けることを試みた. また, 培地中の1次元鉛直水分移動シミュレーションを実施し, 各培地を同一条件で長期利用した時に生じ得る水分環境の差異とその原因を追究した.

材料および方法

1. 水分移動特性モデル

土中の1次元鉛直水分流れの支配方程式は, 次のRichards式で表される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right)\right] \tag{1}$$

ここで, zは高さ (cm), θは体積含水率 ($m^3\ m^{-3}$), tは時間 (d), Kは水分移動の難易を表す透水係数 ($cm\ d^{-1}$), hは土中水の圧力水頭 (cm) を示す (以降, 圧力水頭を圧力と略す).

(1) 式中のKはθの関数として, 次のvan Genuchtenの式[10]で与えられる.

$$K(\theta) = K_s S_e^{1/2}\left[1 - \left(1 - S_e^{1/2}\right)^m\right]^2 \tag{2}$$

$$S_e(h) = \frac{1}{\left[1 + (a|h|)^n\right]^m} \tag{3}$$

ここで, K_sは飽和透水係数 ($cm\ d^{-1}$), a, n, m ($= 1-1/n$) はvan Genuchtenパラメータと呼ばれ, 土の水分移動特性を特徴付けるフィッティングパラメータである. なお, (2) 式および (3) 式中のS_eは, 全間隙体積に占める水分の体積比, すなわち飽和度を表し, 次式で与えられる.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{4}$$

(4) 式中のθ_sは飽和体積含水率 ($m^3\ m^{-3}$), θ_rは残余体積含水率 ($m^3\ m^{-3}$) を表す.

2. 保水性および透水性の計測

本研究に用いた砂 (4号珪砂, 西戸崎興産), ロックウール (製造元は不明), ヤシ殻 (ココベッド, カネコ種苗) の土粒子密度, 乾燥密度, 間隙率をTable 1に示す. なお, ヤシ殻は, 加水してほぐした後, 風乾させたものを供試した. 砂の土粒子密度は2.60 $Mg\ m^{-3}$, 間隙率は0.41 $m^3\ m^{-3}$である. 一方, ロックウールおよびヤシ殻の土粒子密度は砂の1/2以下で, また間隙率は2倍以上であるため, 両者は軽量で間隙率の高い培地であると認められる.

保水性の評価のために, hとθとの関係, すなわち水分特性曲線を2種類の方法で測定した. $-30\ cm \le h \le 0\ cm$におけるθの計測には, 吸引法[11]を採用した. 各培地を充填した内径5.4 cm, 高さ3.0 cmの真鍮製円筒シリンダーを, アクリル製チャンバー (Tempe cell, Soil moisture社) 内に敷設したフィルター上に設置し, その下端から蒸留水を毛管飽和させた. そして, フィルター底面に−3 cm程度の圧力を与えて土中水の排水を促し, 排水開始から排水がほぼゼロになるまでの総排水量を測定した. その後, 培地に与える圧力を数段階に分けて−30 cmまで低下させ, 各段階において同様の総排水量計測を実施した. −30 cmにおける総排水量の計測後, 培地を105℃の炉内で乾燥させ, 乾燥前後の質量差に

表1 砂, ロックウール, ヤシ殻の土粒子密度, 乾燥密度, 間隙率の一覧.

Table 1 Particle density, bulk density, and void ratio for sand, rockwool, and coconut coir.

Property	Unit	Sand	Rockwool	Coconut coir
Particle density	$Mg\ m^{-3}$	2.60	1.09	1.07
Bulk density	$Mg\ m^{-3}$	1.54	0.16	0.13
Porosity	$m^3\ m^{-3}$	0.41	0.86	0.88

基づいてθを計算した．このθと総排水量データに基づき，各圧力に対するθを逆算した．

一方，$h \leq -52$ cmにおけるθの計測には，遠心法[12]を採用した．各培地を充填した内径5 cm，高さ5.07 cmの真鍮製円筒シリンダーを蒸留水中に浸し，水分飽和状態とした．遠心分離機 (H−1400 pF，株式会社コクサン) に水分飽和状態の培地をセットし，−52 cmの圧力に相当する回転速度下で1時間の脱水処理を行った後，脱水後の培地質量を測定した．その後，培地を遠心分離機に再びセットし，植物の永久しおれ点 ($pF = \log_{10}|h| = 4.2$) に相当する$h = -15849$ cmまで数段階に分けて回転速度を増加させ，また各段階において脱水後の培地質量測定を行った．そして，−15849 cmに対するθを炉乾法で求め，このθと遠心法で測定した培地質量に基づき，$h \leq -52$ cmにおける$h-\theta$関係を求めた．なお，ロックウールおよびヤシ殻については，高回転速度下で脱水処理後に体積の収縮が認められたが，本研究では，収縮の主因が大きな間隙の圧縮に起因し，また微細な間隙構造に及ぼす影響は小さいと考え，収縮の影響を無視して各hに対するθを算出した．

遠心法に用いたシリンダーに各培地を充填して毛管飽和させた後，飽和した各培地の飽和透水係数 (K_s) を変水位透水試験 (JIS A 1218に準拠) により測定した．得られたK_s値と，前述の吸引法または遠心法で測定した$h-\theta$関係とを基に，van Genuchtenパラメータとθ_rの最適値を定めた．そして，得られた全パラメータを (2)，(3)，(4) 式に代入し，広範な水分条件における各培地の水分特性曲線および不飽和透水係数を決定した．

3. 鉛直水分プロファイルの予測

砂，ロックウール，ヤシ殻を，同一条件で利用した際に生じ得る水分状態の差異を確認するために，本研究では，1次元数値シミュレーションにより，底面給液条件における培地内水分状態を推定した．Fig. 1は，数値シミュレーションの概略図である．培地表面から外界からの蒸発要求に従って定常的な水分蒸発が生じ，また，高さ−15 cm (培地表面高さを0 cmとする) の位置に維持された地下水面から給排水が行われると考えた．

養液栽培は多種多様な状況下で行われるが，本研究では底面給液条件を検証事例として取り扱った．その理由として，次の3点を挙げる．第1に1次元の水分移動が予測される系であること，第2に上下端の境界条件を単純な数式で記述できること，第3に極度の乾燥を伴う系では数値解法の安定性が低下するが，本研究のように浅い位置にある地下水面から定常的な培地への給水が行われる系では，安定した計算が実施できることなどが挙げられる．

数値シミュレーションには，土中の水分，溶質，熱移動計算ソフトであるHYDRUS-1D[13]を用いた．HYDRUS-1Dは様々な境界条件を模擬可能な豊富なオプションを備えているが[14]，Fig. 1の条件を再現する条件として，上端境界条件 (Surface B.C.) として可能蒸発速度1.0 cm d^{-1}，下端境界条件 (Bottom B.C.) として一定圧力 (0 cm) を与えた．そして，各培地の水分移動特性として前節の実験で得たvan Genuchtenパラメータを与え，また培地の初期条件は水分飽和とした．

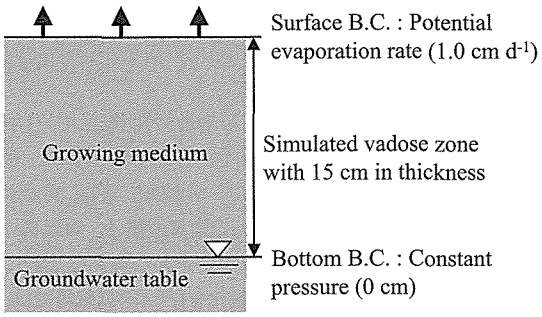

図1　1次元数値シミュレーションの模式図．
Fig. 1　Schematic diagram of one-dimensional simulation.

以上の条件のもとで，(1) 式を差分法で解くことにより，鉛直水分プロファイルの経時変化を計算した．なお，砂およびロックウールでは約1 dでθプロファイルが一定値に収斂したものの，ヤシ殻では1 d以降も変化が継続した．よって，砂およびロックウールでは1 d後，ヤシ殻では十分な時間が経過した100 d後における計算結果をそれぞれ定常状態のプロファイルと考え，各培地内の水分状態を比較した．

結果と考察

1. 水分移動特性と間隙構造

砂，ロックウール，ヤシ殻の水分特性曲線 ($h-\theta$関係) および透水特性 ($\theta-K$関係) をFig. 2に示す．なお，Fig. 2(a)の横軸は圧力の負値，すなわちサクション ($-h$) を表し，また図中に併記した3つの曲線 (実線，破線，1点鎖線) は，Table 2にまとめたvan Genuchtenパラメータに基づく計算値を表す．

砂のθは，サクションが6 cm以下の領域において水分飽和状態 (θ =0.38 m^3 m^{-3}) を維持した (Fig. 2(a))．しかし，それを超えるとθはサクションの増加とともに大きく減少し，なかでも6 cmから20 cmに増加する過程では，全体の85%を超える水分が失われた．一方，Kは，水分飽和状態において最大値123 cm d^{-1}であったが (Table 2)，θの低下とともに指数関数的に減少した (Fig. 2(b) の実線)．水分は，水で満たされた間隙内を移動するため，θと連動したKの低下は，水平

表 2　最適化した砂，ロックウール，ヤシ殻の van Genuchten パラメータ．

Table 2　Optimized van Genuchten parameters for sand, rockwool, and coconut coir.

Parameter	Unit	Sand	Rockwool	Coconut coir
θ_s	$m^3\ m^{-3}$	0.38	0.86	0.88
θ_r †	$m^3\ m^{-3}$	0.022	0.009	0.173
α †	–	0.082	0.039	0.047
n †	–	4.872	3.483	1.344
m ‡	–	0.795	0.713	0.256
K_s	$cm\ d^{-1}$	123	280	11.9

† Parameters obtained by a non-linear least square method, ‡ $m = 1-1/n$

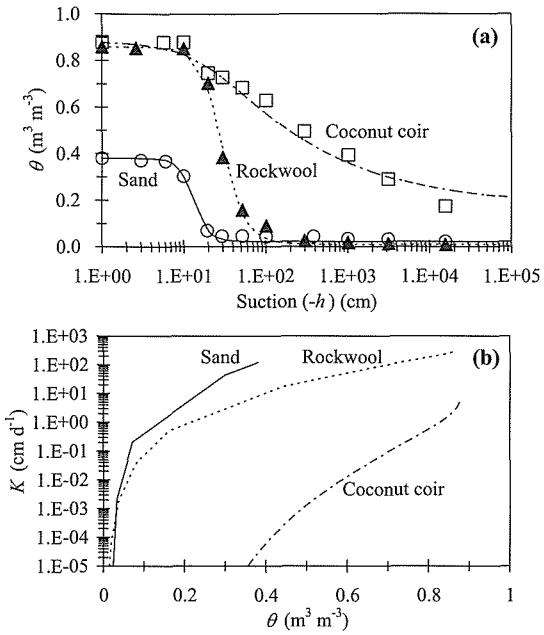

図 2　砂，ロックウール，ヤシ殻の (a) 水分特性曲線および (b) 不飽和透水特性．

Fig. 2　(a) Water retention curves and (b) hydraulic conductivity for sand, rockwool, and coconut coir.

断面における通水可能な間隙の割合が減少したことに起因する．

ロックウールの場合，水分飽和状態におけるθは 0.86 $m^3\ m^{-3}$ であり，砂の 2 倍強の高い水分保持量を示した (Fig. 2(a))．砂と同様に，ロックウールにおいても特定のサクションを超えるとθが急減した．ただし，そのサクションが 10 cm から 102 cm であり，また同一サクションに対するθも大きい．既往の研究 [15] においても類似した結果が報告されていることから，ロックウールは砂よりも高い保水性を有すると考えられる．

一方，Kは，水分飽和状態においては 280 $cm\ d^{-1}$ であったが (Table 2)，そこからθの低下とともに指数関数的に減少した (Fig. 2(b) の破線)．θに対する評価範囲は異なるが，同一のθにおいて砂のKと比較すると，ロックウールの方が全般的に小さなものとなった．

ヤシ殻の場合，水分飽和状態におけるθは 0.88 $m^3\ m^{-3}$ であり (Table 2)，ロックウールと類似した高い水分保持量が認められた (Fig. 2(a))．θはサクションの増加とともに低下したが，サクションの増加量に対するθの低下量が小さいこと，また最大サクション (15849 cm) 下においても 0.17 $m^3\ m^{-3}$ の水分が保持された点が，他の培地には見られないヤシ殻の特徴である．同一サクションに対するθを比較すると，ヤシ殻は広範な水分条件において最大値を示すことから，最も保水性の高い培地であったと判断される．一方，ヤシ殻のKは，他の培地と同様にθの低下とともに指数関数的に減少したが，全水分域において，他の培地よりも数オーダ小さかった (Fig. 2(b) の 1 点鎖線)．よって，ヤシ殻は，水分の移動が極めて阻害され易い培地であると考えられる．

保水性や透水性は，間隙構造と強く関連する [16]．測定した各培地の水分移動特性の差異の要因を検討するために，サクションの代わりに次式 [16] で示す等価毛管径 (r_e, m) を用いた．

$$r_e = \frac{0.15}{100|h|} \tag{5}$$

Fig. 3(a) は，変換した r_e とθとの関係を示したものである．各培地の r_e– θ関係は，S 字曲線で表される．ここで，(5) 式は，培地間隙が毛細管の集合体であること，また毛細管内面における水の接触角が 0°との仮定に基づく変換式であるため，得られた r_e は実際の間隙径を表すものではないことに注意を要する．しかし，特定のθにおける r_e 値は，水分が保持されている間隙の最大径の目安と考えられる．たとえば，θ= 0.30 $m^3\ m^{-3}$ (Fig. 3(a) の丸印) に対する各培地の r_e を比較すると，砂が 1.5×10^{-4} m，ロックウールは 4.0×10^{-5} m，ヤシ殻は 5.0×10^{-7} m であった．同様の大小関係は，他のθ値においても認められた．ヤシ殻とロックウールとでは間隙率に大差はないが (Table 1)，この r_e の差異は，両者の間隙構造が大きく異なっていることを示唆している．

各培地の間隙構造を評価するために，Fig. 3(a) の縦軸のθを (4) 式に基づいて S_e に変換し，それと r_e との勾配 (dS_e/dr_e)[17] を評価した．r_eとこの勾配との関係は，間隙径分布と呼ばれる．Fig. 3(b) は，r_e と dS_e/dr_e との関係を表す．砂の場合，1.5×10^{-4} m の間隙径における dS_e/dr_e が最大となった．ロックウールでは，砂の場合と比べ，dS_e/dr_e の分布が低 r_e の方向に移動し，dS_e/dr_e が最大値を示す r_e (= 5.1

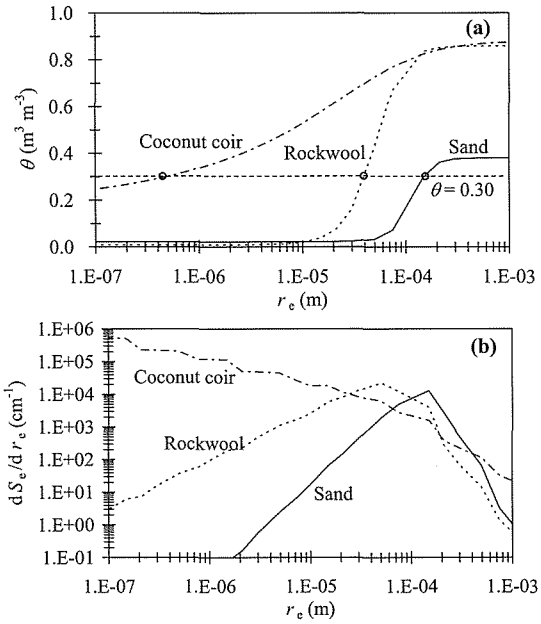

図3　砂，ロックウール，ヤシ殻における等価毛管径 (r_e) と (a) 体積含水率 (θ) または (b) 間隙径密度 (dS_e/dr_e) との関係.

Fig. 3　(a) Volumetric water conetent (θ) or (b) pore-size density (dS_e/dr_e) vs. equivalent pore radius (r_e) for sand, rockwool, and coconut coir.

$\times 10^{-5}$ m) は小さくなった．低 r_e における dS_e/dr_e が大きな値を示したことは，ロックウールの間隙に占める小間隙の割合が，砂よりも大きいことを意味する．r_e の低下とともに dS_e/dr_e が増大する傾向はヤシ殻の場合が最も顕著であり，ロックウールよりもさらに小さな間隙の割合が大きかったことが分かる．小さな間隙ほど保水能力が高く，また水分移動時の通水抵抗も大きい．そのため，ヤシ殻の高い保水性と低透水性は，小間隙の存在比の大きさを反映した結果であり，微細な間隙構造の差異が各培地のマクロな水分移動特性の差異に反映されたと解釈できる．

なお，ヤシ殻のような繊維質の培地では，水分は間隙内のみならず素材自身にも吸水され得るため，保水のすべてが間隙内で起こると考える等価間隙径モデルによる一連の考察は，完全なものではないと考えられる．しかし，ヤシ殻は間隙率が極めて高く，水分の大半が間隙内に保持されることから，等価毛管径に基づく本節の考察は，概ね妥当なものと考える．

2. 培地内水分状態

Fig. 4 は，平衡状態における底面給液条件における各培地内のθおよび気相率 (θ_a) の鉛直プロファイルである．なお，縦軸の z は，培地表面を基準 ($z = 0$ cm) としたときの高さ (cm) を表す．

砂の場合，−15 cm から −11 cm にかけた下層部が水分飽和状態にあり，また同位置のθ_aもほぼゼロであった．しかし，−11 cm より上部では，表面に近づくほどθは低下し，逆にθ_aは増加するプロファイルとなった．表層と下層とのθの差が大きく，乾燥層と湿潤層との差が明瞭であることが砂の特徴である．−11 cm より上層部におけるθの低下は，ロックウールにも共通して認められた．ただし，上層と下層とのθの差が小さく，また表層が飽和水分状態に近い高水分状態にあった点が砂との違いである．ヤシ殻においても，他の培地と同様に，表層に近いほどθが大きく低下した．しかし，地下水面直上の培地全域のθが低下し，また表層におけるθの低下がロックウールの場合よりもはるかに大きかった．水分特性曲線の測定結果 (Fig. 2(a)) より，最も高い保水性を示すと判断されたヤシ殻において表層近傍のθが大きく低下したことは，培地内部の水分状態が単に保水性のみによって規定されるのではなく，培地表面や地下水面の高さといった境界条件の影響も強く受けることを意味する．培地内の水分状態は，平衡状態で測定される水分特性曲線のみからは判断できないため，その適切な予測には，境界条件を考慮した数値シミュレーションを実施することが望ましいと考えられる．

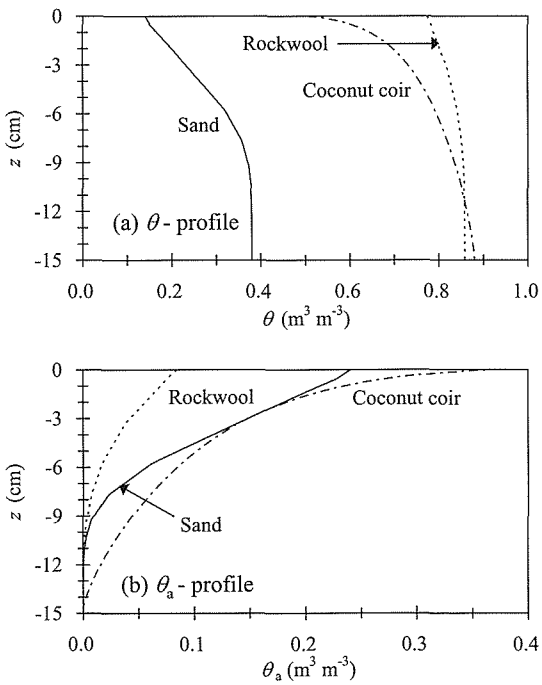

図4　培地内部の (a) 体積含水率 (θ) および (b) 気相率 (θ_a) の鉛直プロファイル.

Fig. 4　Vertical profile of (a) volumetric water content (θ) and (b) the ratio of air-phase (θ_a) in the growing media.

Fig. 5は，定常状態における各培地内の透水係数 (K) および圧力 (h) のプロファイルである．Kはθの関数であるため，各培地のKプロファイル (Fig. 5(a)) は，θプロファイル (Fig. 4(a)) と類似した分布となった．なかでも，ヤシ殻のKプロファイルは他の培地と比べて小さく，表層ではロックウールよりも4オーダ以上小さい．一方，砂とロックウールのhは，地下水面から培地表面に向けて概ね直線的に低下した (Fig. 5(b)) が，ヤシ殻のhは表面に近くなるほど大きく曲線的に低下し，大きなサクションと負の圧力勾配とを伴った．

ここで，土中の1次元鉛直水分フラックス (J_w, cm d^{-1}) は，次のDarcy則で与えられる．

$$J_w = -K\left(\frac{dh}{dz}+1\right) \tag{6}$$

(6) 式中のzは高さ (cm)，dh/dzは圧力勾配を示す．本研究のシミュレーションでは，上端境界条件を可能蒸発速度1.0 cm d^{-1}としたため，培地内でも上方へ同一フラックスで水分移動が生じる．そのため，Fig. 5に示した各培地のKと圧力勾配を (6) 式に代入すると，培地内の水分フラックスのプロファイルは，どの高さにおいても1.0 cm d^{-1}となる．具体的に説明すると，(6) 式の括弧内の数値は，Kが1.0 cm d^{-1}の場合は−1 (dh/dzは−2) となり，Kが0.001 cm d^{-1}の場合は−1000 (dh/dzは−1001) となる．このことは，Kが小さいほど，不足する水分移動の駆動力を得るために，圧力勾配が小さくなることを示す．

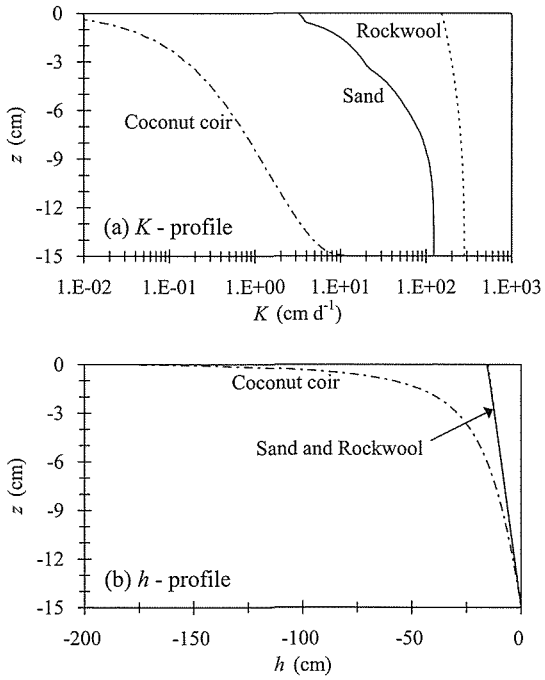

図5　培地内部の (a) 透水係数 (K) および (b) 圧力 (h) の鉛直プロファイル．

Fig. 5　Vertical profile of (a) hydraulic conductivity (K) and (b) pressure (h) in the growing media.

こうしたDarcy則の特性より，ヤシ殻の表層近傍層の著しい乾燥および圧力低下の要因は，Kが他の培地よりもはるかに小さかった (Fig. 2(b)) ためと考えられる．一方，ロックウールの透水係数はヤシ殻よりもはるかに大きかったため，培地内部に作用するサクションは小さく (hは大きく)，またθプロファイルは全体的に大きなものとなったと考えられる．このことは，透水係数の大小が，培地内の水分の量および圧力に多大な影響を及ぼすことを示唆している．

本研究を通じて，同一環境における利用であっても，培地中の水分環境が，保水性や透水性といった培地固有の水分移動特性によって大きく異なることが明らかになった．この水分環境は，マルチの有無や給水方式などによっても変化するため，本研究と異なる肥培条件における水分環境の予測は，別途，検討を行う必要がある．しかしながら，本研究で行った数値シミュレーションでは，水分移動特性が既知であり，また境界条件が数学的に記述可能であれば，実験を行うことなく多種多様な肥培条件における培地内水分状態を容易に予測できる利点を備えている．よって，数値シミュレーションに基づいた水分移動解析は，本研究で実施した所定の条件における水分環境の推定のみならず，作物の生育に適した水管理システムを構築するうえで，非常に有用であると考える．

摘　要

水管理条件がヤシ殻培地中の水分環境に及ぼす影響を調べることを目的として，ヤシ殻と他の培地 (砂およびロックウール) の保水性と透水性を測定した．そして，得られた測定結果と土中の鉛直1次元水分移動方程式に基づいて数値シミュレーションを実施し，各培地を同一環境下で用いた場合に予測される水分環境の差異について検討したところ，以下の知見を得た．

(1) ロックウールとヤシ殻は高い水分保持能を持ち，特に緻密な間隙構造を有するヤシ殻は，極めて高い保水性を有することが明らかになった．

(2) 全培地の透水性は，水分量の低下とともに指数関数的に低下した．なかでも，ヤシ殻は，透水性が他の培地よりも数オーダ低かったことから，水分移動が著しく阻害され易い培地であることが明らかになった．

(3) 底面給液条件における数値シミュレーションより，同一条件で水管理を行っても，培地内の水分の量および圧力は培地によって異なること，またその差異が保水性や透

水性といった培地固有の水分移動特性に起因することが明らかになった.

(4) 多種多様な環境下における水分状態を予測できる数値シミュレーションは, 作物の生育に適した水管理システムを構築するうえで有用な手法と考えられた.

謝　辞

本研究の実験は, 佐賀大学農学部の長　裕幸准教授の協力のもと実施した. ここに記して謝意を表す.

引用文献

1) 加藤俊博. 培地・培養液のリサイクル. 社団法人日本施設園芸協会編. 養液栽培の新マニュアル. 誠文堂新光社. 東京. 220–227. 2002.
2) 加藤俊博. 養液栽培のための新固形培地—環境にリサイクルできる新培地の特性. ハイドロポニックス. 11: 60–68. 1997.
3) 加藤俊博. 培地の種類・特性. 社団法人日本施設園芸協会編. 養液栽培の新マニュアル. 誠文堂新光社. 東京. 14–26. 2002.
4) 遠藤昌伸, 渡邊洋平, 切岩祥和, 糠谷　明. 養液栽培における有機培地の連用が培地の理化学的特性とイチゴの生育・収量に及ぼす影響. 農業生産技術管理学会誌. 13(1): 15–20. 2006.
5) 岡　昌二. イチゴ高設栽培装置各方式の特徴と課題 (その 2) システム概略と 2, 3 の課題展望. 施設と園芸. 119: 32–37. 2002.
6) 細川卓也, 小松秀雄, 前田幸二, 中村和洋, 吉田徹志, 福元康文. ヤシガラ・バーク成型培地を用いた養液栽培での日射比例給液制御による長段どりトマトの高糖度果実生産. 園芸学研究. 5(1): 39–44. 2006.
7) Caron J, Nkongolo N V. Assessing gas diffusion coefficients in growing media from in situ water flow and storage measurements. Vadose Zone J. 3: 300–311. 2004.
8) 寺林　敏, 四方恒生, 並木隆和. 湛液式および液面上下式養液栽培におけるダイコン, ニンジンおよびゴボウの根の肥大様相. 生物環境調節. 35(2): 99–105. 1997.
9) Araki T, Eguchi T, Wajima T, Yoshida S, Kitano M. Dynamic analysis of growth, water balance and sap fluxes through phloem and xylem in a tomato fruit: Short-term effect of water stress. Environ. Control Biol. 42(3): 225–240. 2004.
10) van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892–898. 1980.
11) Dirksen C. Soil physics measurement. Catena Verlag. Germany. 24–56. 1999.
12) 土壌環境分析法編集委員会. 土壌環境分析法. 博友社. 東京. 1999.
13) Šimůnek J, van Genuchten M Th, Sejna M. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated medea. Version 3.0. HYDRUS Software Series 1, Dept. of Environmental Sciences, Univ. of California Riverside, USA. 2005.
14) 斎藤広隆, 坂井　勝, Šimůnek J, 取出伸夫. 不飽和土中の水分移動モデルにおける境界条件. 土壌の物理性. 104: 63–73. 2006.
15) 山中捷一郎. ロックウール培地の物理的特性—水分特性—. 九大農学芸誌. 46(1・2): 1–7. 1991.
16) Kutílek M, Nielsen D R. Soil hydrology. Catena Verlag. Germany. 1994.
17) Brutsaert W. Probability laws. for pore-size distributions. Soil Sci. 101: 85–92. 1966.