

自動サククション制御による不飽和砂質土壌中の 下方浸透水採取装置の開発

東 直子*・森也寸志**・井上光弘*

Development of Automated Suction Controlled Flux Sampler for Unsaturated Sandy Soil

Naoko HIGASHI*, Yasushi MORI** and Mitsuhiro INOUE*

* Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori 680-0001, Japan

** Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University,

1060 Nishikawatsu, Matsue 690-8504, Japan

Abstract

A sandy field has the potential hazard of nitrate contamination because of its low fertilizer holding capacity. A suction controlled flux sampler (SCFS) consisting of an automated vacuum system and a sampling filter device has been developed for accurate measurement of water flux from the root zone. Knowing that water content in sandy field was highly sensitive to suction change, a buffer container was placed between the pump and a sampling bottle to apply moderate suction and avoid accidental over-sucking. A sampling device with a glass filter was placed in a dune sand column and infiltration experiments were conducted. A moderate suction was achieved and the resulting water-collecting efficiency was from 94 to 109% under continuous rainfall. It showed that SCFS collected infiltrated water effectively without disturbing the infiltration streamline.

Key words : dune sand, suction control, unsaturated soil, water-collecting efficiency.

1. はじめに

酸性雨や農薬等化学物質の土壌への投与などにより、様々な化学物質が土壌水と共に移動して土壌や地下水が汚染されていくことに対し、近年大きな関心が寄せられている。1982年に環境庁が実施した全国の地下水質測定結果において、最も検出率の高かった物質は硝酸性および亜硝酸性窒素であることが報告された(小川, 2000)。そして、施肥などによる環境への負荷が懸念される地域や環境的に重要な地域を中心に土壌・水質のモニタリングの強化(長谷川ら, 2002)が図られている。近年は灌漑・施肥技術の発達によって、有機物に乏しく、保肥性・保水性に劣る砂質土壌でも営農活動が可能になっている(松本, 1993)。また世界的に見れば、蒸発散量は多

いが灌漑・排水の条件さえ整えば高い収量が期待できる乾燥・半乾燥地域(環境土壌学編集委員会, 1998)の土性は砂質土壌であることが多い。その砂質土壌は透水性が高く、肥料の溶脱リスクも高いため厳格な水管理と施肥管理が求められ、特に根群域下に流出する浸透水の管理が必要と考えられる。実際、砂質土壌への多量の施肥後の灌水あるいは降雨によって下層へのイオン集積が引き起こされ、土壌イオンの損失や地下水へのイオン負荷の増大という問題につながる可能性が明らかにされている(中村ら, 2003)。したがって、砂質土壌に注目した下方浸透水の管理技術を確立しておくべきである。

降雨に伴う地下水位の応答は一般的には日単位で現われることが多く(日本地下水学会編, 2001)、地下水の水質分析結果のみから物質の排出負荷量を算出して対策を

* 鳥取大学乾燥地研究センター 〒680-0001 鳥取市浜坂 1390

** 島根大学生物資源科学部 〒690-8504 松江市西川津町 1060

キーワード: 砂丘砂, サククション制御, 不飽和土壌, 採水効率

講じるには限界がある(鈴木・志賀, 2004)。そのため、下方浸透水を直接採水し、根群域からの浸透水の水量および水質を正確に把握するための装置が開発されてきた。しかし、パンライシメータ法を適用した大型設備や簡易型ライシメータの設置により浸透水を採取し硝酸態窒素の動態を解析した実験では、測定器具の設置工事時に土壌を攪乱し、土壌構造・透水性の変化が測定結果に影響していること(小川, 2000)、費用が高額であること、降水量に対する採水率が火山砂放出物の未熟土で特に低い(長谷川ら, 2002)などという問題があった。

流線を乱すことなく最も効率よく採水する方法として、フィルターにかかるサクシオンを制御することにより、土壌中の下方浸透水量と同水量を採取できるサクシオンコントロールサンプラーが開発されている。これは採水装置のサクシオンを周囲の土壌と等しく制御することで周囲のポテンシャルプロファイルを乱さず、つまり、浸透水の流線を自然状態から変えずに採水することを目指した装置である。van Grinsven *et al.* (1988) は砂壤土において、定常・非定常降雨下でフィルター直上とその周辺土壌のマトリックポテンシャルの差が10%未満になるようサクシオンを制御するシステムを報告し、小杉(2000)は豊浦砂を用いた室内実験や森林土壌の屋外実験において、土壌水分状態の攪乱を最小限に抑えた採水が可能な装置を開発している。しかし、いずれの研究でも、採水用フィルターの選定は行われておらず、また、サクシオンの制御方法を土壌の種類ごとに細かく変更するような工夫も為されていない。そのため、現在のところ様々な土壌に適用可能な下方浸透水の直接的な採水方法は確立されていない。特に、砂質土壌は僅かなサクシオン変化に対して土壌水分量が大きく変化し

てしまうため、既存のサクシオンコントロールサンプラーを用いるには砂質土壌に適したフィルターの選定や厳密なサクシオン制御を行う必要がある。

本研究の目的は、既存のサクシオンコントロールサンプラーを改良して、砂質土壌で下方浸透水の流線を乱すことなく定量的な採水が可能な装置を開発することである。室内カラム実験で異なる降雨強度に対する採水性能を評価し、サクシオンをかけて採水を行う条件判定と弱いサクシオンをかける工夫について特記した。採水効率の向上を目指し、フィルターサクシオンを自動制御するシステムのうち、砂質土壌での採水のために留意すべき改良点を示した。

2. 実験装置及び方法

2.1 サクシオンコントロールフラックスサンプラー

砂質土壌での吸引採水のために改良した圧力制御の吸引判定値や採水容器の大きさなどについては、次節2.2および結果3.1で詳細を述べる。ここでは、まず改良の結果を反映させたサクシオンコントロールフラックスサンプラー(Suction Controlled Flux Sampler; 以後SCFS)の概略図を図-1に示し、装置全体について概説する。

van Grinsven *et al.* (1988) や Inoue and Dirksen (2000) の報告を基に作製されたSCFSは、採水フィルター(Sampling Filter Device; 以後SFD)と圧力を自動制御する部分(Automated Vacuum System; 以後AVS)から成る(図-1)。土壌中に埋設するSFDには、透水性の高い砂質土壌における採水に適するフィルターを選択した。吸引採水に耐え得る空気侵入値を持ち且つ透水性が高く、目詰まりしにくく、圃場での取り扱いが

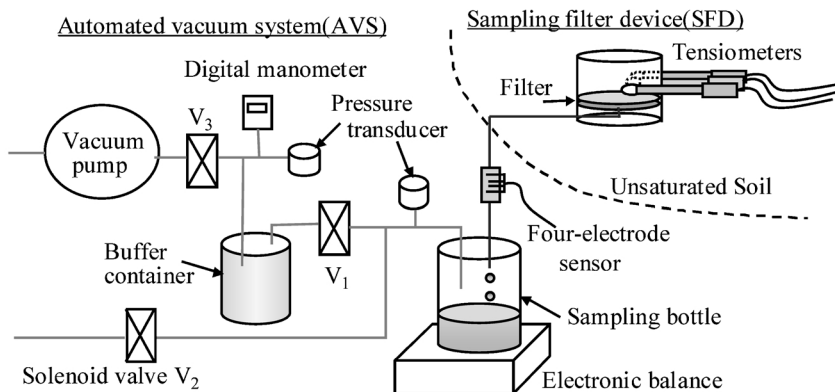


図-1 サクシオンコントロールフラックスサンプラー(SCFS)の概略図

Fig. 1 Schematic of the suction controlled flux sampler (SCFS).

容易であるガラスフィルター（光信理化学製作所製）を用いた（東・井上，2003；東ら，2004）。ガラスフィルターの詳細は表-1のとおりである。SFDには，AVSによる制御の乱れが少々あったとしても採水フラックスを確保できるように高さ4 cmの側壁を設け，それを通してフィルターの2.5 cm上にテンシオメータ1本を挿入した。このテンシオメータが測定するフィルター直上のマトリックポテンシャル (h_c) と，同深度の自然土壌中のマトリックポテンシャル (h_L , h_R) の3分間の平均値がそれぞれ記録される。 h_c とフィルター外のマトリックポテンシャルの平均値 (h_{LR}) から吸引判定を行い，AVSによりフィルターにかかるサクシオンを制御した。SFDから採水容器へと続く採取チューブ内は水理学的連続が保たれており，途中で挿入した自作の4極塩分センサーで採取した水溶液の電気伝導度 (EC) をモニターした。なお，このEC値は本研究の範囲では考察に使われていない。

AVSは吸引判定用テンシオメータ，真空ポンプ，電磁弁，圧力変換器，バッファ容器，採水容器，および電子天秤で構成され，一台のデータロガー (CR10X；Campbell Scientific社製) が5分を1サイクルとするプログラムで制御している。弱いサクシオンを実現するためのバッファ容器は，真空ポンプと電磁弁 V_3 によって常に80 cm以上のサクシオンが保たれている。実際には次のようなタイミングで採水を行った。

下方浸透の無い場合は， $(h_c - h_{LR}) = -5$ cmで平衡となる。これは，次章3.1.1で詳述する実験結果から得られたものであり，すなわち， $(h_c - h_{LR}) = -5$ cmがAVSによる吸引判定の基準である。したがって，フィルター深度に浸透水が到達し， $(h_c - h_{LR}) > -5$ cmとなると，電磁弁 V_1 が10秒間開き，バッファ容器と採水容器を接続することでフィルターにサクシオンをかけ，採水する。一方，フィルター直上が設定値以上に乾燥した ($h_c - h_{LR}) \leq -5$ cmの場合，電磁弁 V_2 を10秒間開いて採水容器を大気に開放し，フィルターサクシオンが大気圧

に近づくことで徐々に採水が行われなくなる。以上のようにして自然状態のポテンシャルプロファイルを維持し，流線を乱すことなく浸透水を採取するようにした。

2.2 自動圧力制御システムの改良

2.2.1 吸引判定値

本実験で使用した鳥取砂丘砂の土壌水分特性曲線を描くと，図-2に示すように僅かなサクシオンの変化で大きな水分移動が生じてしまうことが明らかであった。したがって，サクシオンの制御をより厳密に行うこととし，二次元土中水分・塩分移動予測汎用プログラムであるHYDRUS-2D (ver. 2.05；Šimůnek *et al.*, 1999；取出・井上，2004) を利用してシミュレーションを行い，その結果から吸引判定値を検討した。なお，シミュレーションでは，SCFSのようにフィルターサクシオンを自動制御するような条件選定が不可能であることを考慮し，以下のような設定とした。

縦50 cm×横20 cmの砂質土壌の鉛直二次元断面を作成し，4 cmの側壁を設けたフィルターが砂質土壌中に埋設されているとした。フィルター内外には，吸引判定用のテンシオメータのように観測点を設け，その地点のマトリックポテンシャルの経時変化を注視した。フィルターサクシオンは50 cm一定，フィルター外側の境界条件もサクシオン50 cm一定とした。HYDRUS-2Dで入力した物質の各パラメータ (van Genuchten-Mualem Model) は，砂質土壌： $\theta_r = 0.0486$ ， $\theta_s = 0.4132$ ， $\alpha = 0.03$ cm $^{-1}$ ， $n = 5.5$ ， $K_s = 760.48$ cm d $^{-1}$ ， $l = 0.5$ ，採水フィルター： $\theta_r = 0.0283$ ， $\theta_s = 0.33$ ， $\alpha = 0.01$ cm $^{-1}$ ， $n = 5.0$ ， $K_s = 50.97$ cm d $^{-1}$ ， $l = 0.5$ である。初期の水分条件を飽和とし

表-1 ガラスフィルターの規格

Table 1 Specification of the glass filter

| Filter No. | G4 |
|--|-------------------------------|
| Diameter (cm) | 10 |
| Thickness (cm) | 0.8 |
| Pore size (μ m) | 5~10 |
| Air entry value (cm) | 90~130 |
| Saturated hydraulic conductivity (cm s $^{-1}$) | $5.8(\pm 0.3) \times 10^{-4}$ |

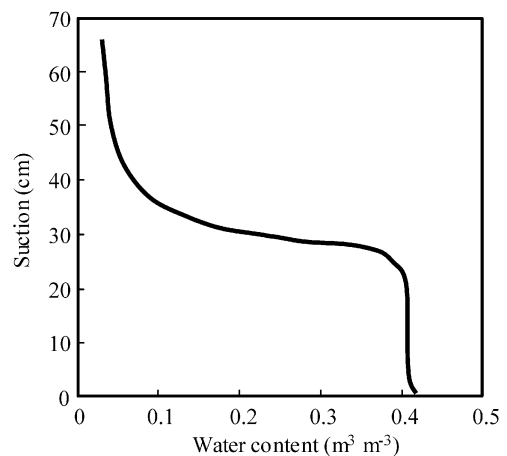


図-2 鳥取砂丘砂の水分特性曲線

Fig. 2 Water retention curve of the Tottori dune sand.

て1日自然排水させた後、降雨強度 20 mm h^{-1} の連続降雨が1日発生したと仮定し、その2日間の計算を行った。

2.2.2 バッファ容器の採用と採水容器の大きさ

短いサイクルでフィルター内外のマトリックポテンシャルをモニターし、強いサクシオンを瞬間的に適用させる採水方法 (Kosugi and Katsuyama, 2004) が森林土壌では功を奏している。しかし、砂質土壌で採水するためには弱いサクシオンをかける必要があり (中尾ら, 2003), 強いサクシオンをかけることは許されない。微妙なサクシオンを制御できるポンプの採用も考えられるが、システムを安価に仕上げるために、ここではバッファ容器を採用することにした。すなわち、ポンプと採水容器との間にバッファ容器を設置し (図-1), その容器内が常に弱いサクシオンを保つように制御した。これにより、ポンプ稼動時にしばしば見られる過剰な運転と、それに伴う過剰なサクシオン変化を防ぐことができる。今回使用した容積 $3,500 \text{ cm}^3$ のバッファ容器を、真空ポンプによって15秒間吸引すると最高到達サクシオンは 300 cm であった。また、鳥取砂丘砂の土壌水分量の減少がほとんど起こらなくなるサクシオンは 80 cm (図-2 参照) と考えられる。そこで、フィルターサクシオンを $0 \sim 80 \text{ cm}$ で制御するため、フィルターにかかるサクシオンは 80 cm が上限となるよう、バッファ容器のサクシオンは $80 \sim 300 \text{ cm}$ に調整した。実際には、ポンプが稼動してサクシオン 300 cm になったバッファ容器は、採水容器に接続される毎にそのサクシオンを減じ、サクシオン 80 cm を下回ったところで再びポンプが稼動し、 300 cm まで吸引されるということを繰り返す。

バッファ容器を採用した場合、採水容器がバッファ容器より大きすぎると採水に十分なサクシオンをフィルターに反映できず、さらに、採水容器には採取した浸透水を貯留させる役目もあることを考えると容器が過小でも採水が困難となる。このように採水容器の大きさについて検討する必要があると考えられた。そこで、 $630, 1,500, 3,500, 4,300, 6,600 \text{ cm}^3$ の密閉可能な容器を用意し、予めサクシオン 80 あるいは 300 cm に保たれたバッファ容器と10秒間接続した際に、各容器が到達するサクシオンを測定し、最適な容積の採水容器を選出した。

2.3 室内土壌カラム実験

図-3に室内土壌カラム実験の概略を示す。内径 20 cm 、高さ 105 cm のPVCカラムに 0.85 mm の篩に通した鳥取砂丘砂を乾燥密度 1.55 Mg m^{-3} となるよう湿式充填した。目詰まりを防ぐためカラムの底 (深度 105 cm) から深度 70 cm までは洗浄砂を用い、 70 cm 以上は洗浄して

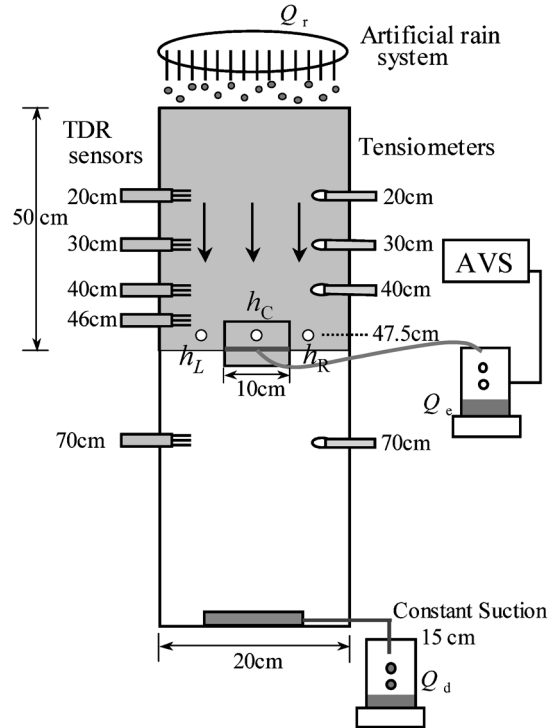


図-3 室内土壌カラム実験概略図。色付は深度 50 cm までの水分貯留量変化 (q_s) の算出対象とした部分。

Fig. 3 Schematic of the soil column experimental set up. Upper part of the column indicates the area of the q_s for WCE estimation.

いない風乾砂を使用した。SFDのフィルター表面が深度 50 cm 、吸引判定用のテンシオメータ3本は深度 47.5 cm になるよう設置した。カラム内の不飽和流や土壌水分量変化を観察するため、予め校正したTDRセンサー (プローブ直径 1.8 cm 、ロッド長 6 cm 、ロッド数3本: サンケイ理化製) を深度 $20, 30, 40, 46, 70 \text{ cm}$ に、マイクロテンシオメータ (UNSUC: サンケイ理化製) を深度 $20, 30, 40, 70 \text{ cm}$ に挿入した。カラムの底にも表-1に示したガラスフィルターと同じものをアクリルセルで固定して設置し、そのサクシオンを 15 cm 一定とした。定流量ポンプに接続した人工降雨装置を用いて、カラム上部から降雨強度 (q_i) が2あるいは 10 mm h^{-1} となるよう蒸留水を供給した。Run-1は $q_i = 2 \text{ mm h}^{-1}$ の連続降雨で飽和に近い定常状態であり、SCFSのAVSを使用せず、フィルターサクシオンは 15 cm に固定した場合とした。Run-2およびRun-3は、それぞれ $q_i = 2 \text{ mm h}^{-1}$ 、 10 mm h^{-1} の連続降雨でフィルターサクシオンをAVSにより制御した効果を調べた。SCFSの採水チュー

ブの滴下点はフィルターの深度と同じ 50 cm に設置し、採水チューブによってフィルターにかかるサクシオンはゼロとしたため、フィルターサクシオンは採水容器内のサクシオンに等しくなる。

2.4 採水効率の算出

本研究では雨水もしくは灌漑水の下方浸透水をどれほど自然に近い状態で採水できるかを焦点に置いているため、フラックスを比較し、SCFS の採水性能を以下のように採水効率 (Water-Collecting Efficiency ; 以後 WCE) を求めることにより評価した。まず、降雨・採水条件の異なる Run ごと (1Run は 12 時間) の積算降雨量 Q_r (cm^3) をカラム面積および Run 時間で除して降雨フラックス q_r (cm h^{-1}) とする。また、SCFS からの積算採水量 Q_e (cm^3) を採水フィルター面積と Run 時間で除して採水フラックス q_e (cm h^{-1}) を算出する。一方、これらの値は土壌中の水分貯留量に影響されるため、TDR センサーにより求められる深度別の土壌水分量の変化から、カラム内の 0~50 cm 深 (図-3 の上部色付部分) における単位時間の水分貯留量変化 q_s (cm h^{-1}) を算出した。この q_s を考慮に入れ、SCFS の WCE を (1) 式により求めた。

$$\text{WCE}(\%) = 100 \times q_e / (q_r - q_s) \quad (1)$$

WCE が 100% 未満の時は浸透水の流線が SFD を避けるように乱されて採水量が少なくなったと考えられ、逆に 100% 以上の場合には SFD の範囲外から土壌水を多く集めてしまったと考えられる。なお、カラム底部からの積算排水量を Q_d (cm^3) とし、雨量に対する採水および排水量の割合を、カラム内全体の水分貯留量の増減を示す値 (Change of Water Storage in the column ; 以後 CWS) として以下の (2) 式により算出し、参考値として付記した。CWS が 100% 未満であればカラム内全体の水分貯留量が増加、CWS が 100% を超えるとそれが減少していることになる。

$$\text{CWS}(\%) = 100 \times (Q_e + Q_d) / Q_r \quad (2)$$

3. 結果および考察

3.1 砂質土壌に適した自動圧力制御システム

3.1.1 吸引判定値

これまで、吸引判定値を $(h_c - h_{LR}) = \pm 0.5 \text{ cm}$ とする案 (Inoue and Dirksen, 2000) や、 h_c と h_{LR} が全く同じになるように制御する案 (小杉, 2000) が報告されていた。いずれの場合も、 $(h_c - h_{LR}) = 0$ が平衡であることが前提である。しかし、HYDRUS-2D によるシミュレーションの結果、図-4-a のように、連続降雨下で h_c と h_{LR} は一定の差を保って平衡となり、 $(h_c - h_{LR}) = 0$ とならな

いことが明らかとなった。砂質土壌内に設置した採水フィルターに周辺土壌と同等のサクシオンがかかっていると、前の浸透水の通過後にできた不飽和部分が残ったまま (図-4-b) 次の浸透が起こるため、浸透水とフィルターとの間に空気の封じ込めが起こっている (図-4-c)。今回掲載したシミュレーション結果 (図-4-a) において、 h_c と h_{LR} の差はおおよそ 2.5 cm であるが、物質のパラメータや境界条件の設定値を変化させると差も大きくなった。シミュレーションで 20 mm h^{-1} という非常に高い降雨強度を想定した場合でさえも、フィルター直上は周囲よりも乾燥した状態で平衡となった。したがって、カラム実験で設定したような降雨強度で、もし吸引判定基準を $(h_c - h_{LR}) = 0 \text{ cm}$ としていると、浸透水が到達しているにもかかわらず、いつまでも採水命令が出ないことになってしまう。これらのことから、本実験では吸引判定の際に h_c と h_{LR} を全く同じに合わせるのではなく、フィルターには周囲よりも 5 cm 程度強めのサクシオンをかけて採水することが最良の結果を与えると判断し、吸引判定値を $(h_c - h_{LR}) = -5 \text{ cm}$ と決定した。一般には周囲の土壌と全く同じ値が採水基準として考えやすいが、浸潤前線または排水後退線の移動の結果、不飽和部分がフィルター上に取り残される場合があることが明らかとなった。

3.1.2 バッファ容器の効果と採水容器の大きさ

最高到達サクシオンが 700 cm もあるような真空ポンプを使用した場合でも、容積 $3,500 \text{ cm}^3$ のバッファ容器を 15 秒吸引することで予め 80~300 cm のサクシオンを保ち、これと採水容器とを接続して間接的にフィルターにサクシオンをかけることにより、微妙な圧力制御が可能となった。図-5 には、最高サクシオン 300 cm、あるいは最低サクシオン 80 cm で採水容器に接続したときに実現できるサクシオンを示した。サクシオン 300 cm のときはいずれの容器でも十分な吸引能力を示したが、80 cm の時は容器が大きくなると十分なサクシオンを発揮できなかった。

土壌水分特性曲線 (図-2) から、可動水採水のためにはサクシオン 50 cm までは必要と考え、バッファ容器がサクシオン 80 cm の場合でも採水可能な 50 cm が反映される採水容器の容積を探ると、図-5 から明らかのように 630 および $1,500 \text{ cm}^3$ と判断できた。採取した浸透水の貯留のためには採水容器は大きい方がよいこと、取り扱いの容易さも考慮し、容積 $1,500 \text{ cm}^3$ の容器が採水容器として最適と判断した。また、採水容器とバッファ容器との接続時間は 10 秒間で充分であることを確認した。

3.1.3 バッファ容器と採水容器の接続時間

AVS に指示を与えるデータロガーのプログラムは図-

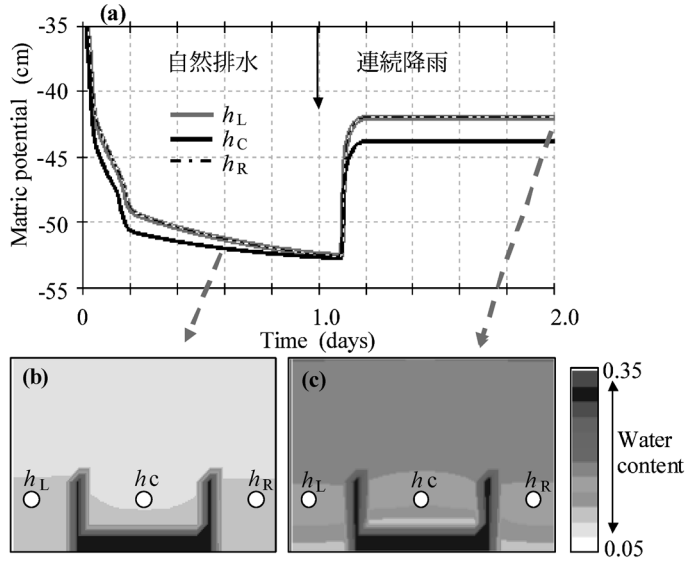


図-4 HYDRUS-2Dによるフィルターサクション 50 cm 固定時のシミュレーション結果
 a: SFD内外のマトリックポテンシャルの変化。
 b: 自然排水時の土壌水分分布。
 c: 20 mm h⁻¹連続降雨下の土壌水分分布。

Fig. 4 Results of the calculation by HYDRUS-2D with 50 cm constant suction at the filter.
 a : Changes of the matric potential inside and outside of the SFD.
 b : Soil water content under free drainage.
 c : Soil water content under continuous rainfall with 20 mm h⁻¹

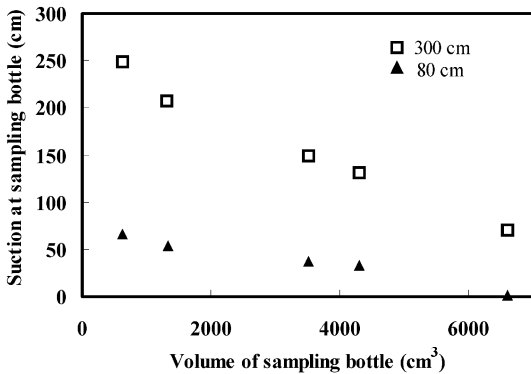


図-5 予めサクション 80 cm (▲) と 300 cm (□) を保ったバッファー容器と、異なる容積の採水容器とを 10 秒間接続した際の到達サクション

Fig. 5 Maximum suction in different sampling bottles connected with the buffer container.

6 になっている。Flag2 が ON の間は吸引判定用のテンシオメータによる測定が行われ、Count2 が 400 のとき (1 カウント 0.5 秒) に判定が行われる。ここで

フィルターにサクションをかける場合は V_1 が Count1 の 115 から 135 の間、つまり 10 秒間開き、逆にフィルターを大気圧にする場合は V_2 が 10 秒間開く。また、バッファー容器内を何秒吸引するかは V_3 を開閉するカウント (図-6 では Count1 の 200~230, 15 秒) で決定される。本実験で使用した AVS で鳥取砂丘砂に対して下方浸透水採取を行う場合は、上述のようにサクション 80~300 cm のバッファー容器と 1,500 cm³ の採水容器を 10 秒間接続することが最も効率の良い採水システムとなった。① バッファー容器の有無とその大きさ、② 採水容器の大きさと接続時間、③ どの電磁弁を何秒開くかのカウント指定という 3 点を変更させることにより、さまざまな吸引条件を作り出すことができる。土壌水分特性曲線の勾配が急で、おそらく最も吸引採水が難しいと考えられる砂丘砂において、後述するように効率よく採水可能であったことから、条件を変えることで様々な土壌に AVS を適用させることが可能と考えられる。

3.2 SCFS の採水効率

室内土壌カラム実験中の SCFS の採水状況を図-7 に、算出した WCE を表-2 に示す。Run-1 では $q_i = 2 \text{ mm h}^{-1}$

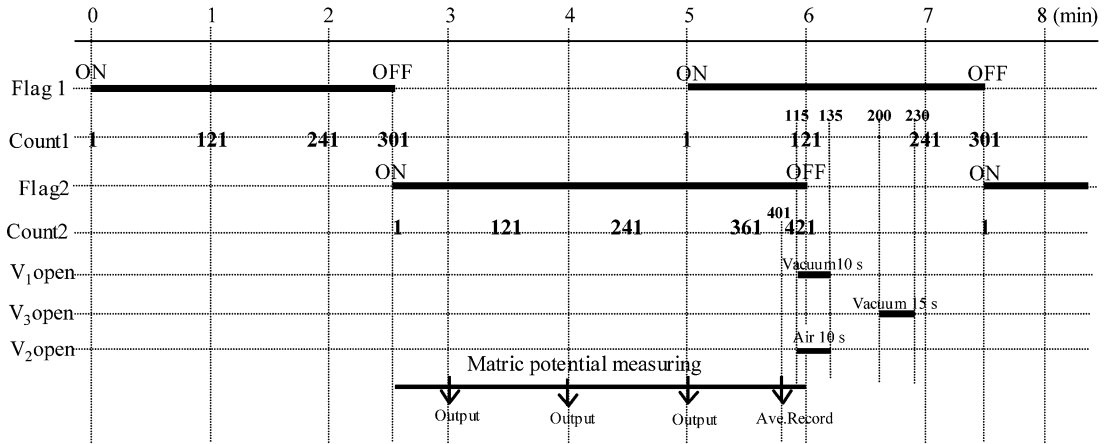


図-6 AVS による圧力制御プログラム

Fig. 6 Time schedule for the suction control by the AVS.

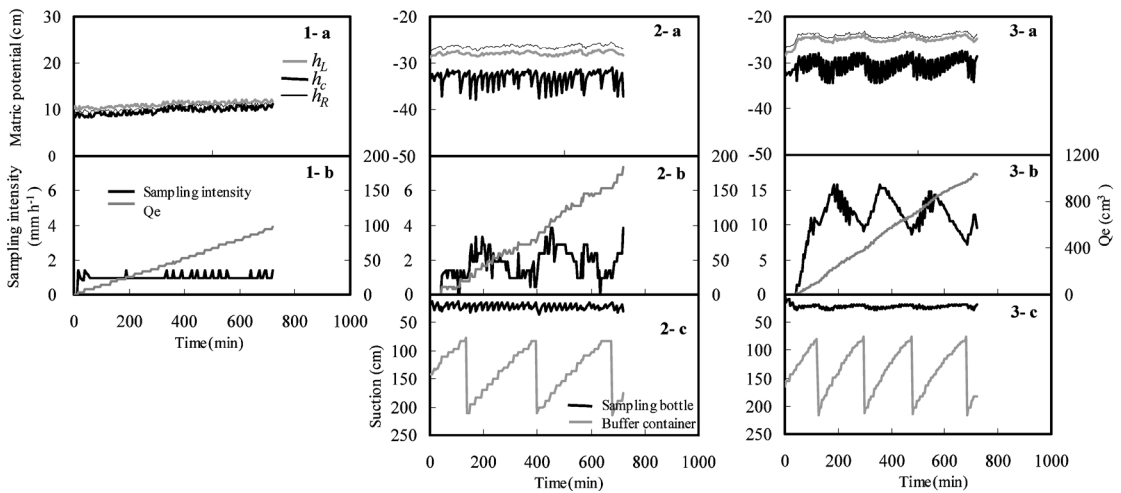


図-7 連続降雨条件下の SCFS による浸透水採水状況

- a: 吸引判定用テンシオメータで測定したマトリックポテンシャルの変化。
- b: 採水強度と積算採水量。
- c: 採水容器とバッファ容器内のサクション変化。

Fig. 7 Infiltration water sampling by SCFS under continuous rainfall.

- a: Matric potential for suction control.
- b: Sampling intensity and cumulative amount of sampled water.
- c: Suction in the sampling bottle and the buffer container.

の連続降雨によってカラム内の0~50 cm 深までの平均土壌水分量が $\theta = 0.33 \pm 0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となった。CWS は 114% であり、フィルター以深で排水がやや過剰であったことになる。 h_c と h_{LR} にほとんど差は認められず(図-7-1-a), WCE は 56.5% であった(表-2)。WCE の低さ

は、浸透水がフィルターを避けてしまったためと考えられた。これが AVS を使ってサクションを自動制御し、流線を乱さない採水を目指す理由である。

Run-2 では、CWS が 111%、0~50 cm 深の平均土壌水分量は $\theta = 0.19 \pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となり、WCE は 93.6%

表-2 様々な降雨条件下での SCFS の採水効率

Table 2 Water-collecting efficiency under various rainfall conditions

| Run | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|--------|--------|
| q_i (mm h ⁻¹) | 2 | 2 | 10 |
| Q_r (cm ³) | 753.6 | 753.6 | 3768.0 |
| Q_d (cm ³) | 760.6 | 652.7 | 2237.8 |
| Q_e (cm ³) | 97.5 | 183.7 | 1031.0 |
| CWS (%) | 113.9 | 111 | 86.8 |
| q_s (cm h ⁻¹) | 0.017 | -0.008 | -0.008 |
| q_r (cm h ⁻¹) | 0.2 | 0.2 | 1.0 |
| q_e (cm h ⁻¹) | 0.104 | 0.195 | 1.094 |
| Standard deviation (mm h ⁻¹)* | --- | 0.79 | 2.07 |
| WCE (%) | 56.5 | 93.6 | 108.5 |

* Standard deviation of sampling intensity (mm h⁻¹) under steady state condition.

であった (表-2)。同じ降雨強度にも関わらず Run-2 が Run-1 よりも高い WCE となったのは、AVS を用いて自動でフィルターサクションを制御した効果といえる。Run-2 の WCE は 100% 未満になったことから、わずかにフィルターを避けるような浸透水の流れが発生していたことが推察される。実験中に h_c は、 h_L や h_R と 5 cm の差を保って同じように変化しており (図-7-2-a)、プログラムどおりの圧力制御が行われていることを示した。降雨強度 2 mm h⁻¹ に対し、採水強度は 0~4 mm h⁻¹ で変化した (図-7-2-b)。採水容器内のサクションは AVS によって頻繁に制御され、最高サクションは 35 cm であった (図-7-2-c)。

Run-3 では、0~50 cm 深の平均土壌水分量は $\theta=0.22 \pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となり、AVS はフィルターサクションを最高 27 cm で制御した (図-7-3-c)。WCE は Run-3 でも 108.5% と高くなった (表-2) が、Run-3 は Run-2 と反して WCE が 100% を超え、僅かではあるがフィルターの外から浸透水を多く集めたことが推察された。降雨強度 10 mm h⁻¹ に対し、採水強度は 0~15 mm h⁻¹ で変化した (図-7-3-b)。なお、Run-3 では降雨強度が高く、実験期間の最後にはカラム底部が飽和に近い状態となったため、CWS が 100% に至らなかった (表-2)。高さ 105 cm の砂質土壌カラムで一様な水分プロファイルを作ることはほぼ不可能であるため、カラム底部で土壌水分量が高くなったが、フィルターを通過する時点での採水効率は Run-2、3 とともに 100% 近くを実現しているので目的は達成できていると判断した。

AVS 制御を行わなかった Run-1 においては採水強度

が安定していた (図-7-1-b) のに対し、Run-2、3 では明らかに採水強度に大きな差が認められ、降雨強度を超えるときもあった (図-7-2-b, 7-3-b)。そこで採水強度のばらつきについて検討した。実際の砂質圃場で定常浸潤状態となることは無いが、室内のカラム実験の場合は Run-2 および Run-3 のような連続降雨を行うことにより、定常状態を作り出すことができた。深度別に挿入した TDR センサーの測定値からカラム内の 0~50 cm 深の水分貯留量の変化が少ないことを確認し、この定常状態で採水強度の標準偏差を比較した (表-2)。Run-2 よりも Run-3 の方が採水強度のばらつきが大きい、これは降雨強度の影響を受けていると考えられた。降雨強度が異なった場合でも、吸引判定に用いる h_c の変動 (図-7-2-a, 7-3-a) に応じてフィルターサクションの制御をより頻繁に行うことにより、Run-2、3 共に高い採水効率を得ている。AVS は離散的に制御を行うために採水強度にばらつきがでるが、採水効率は確保されており、フィルターサクションの自動制御の効果を確認することができた。

4. おわりに

サクションをかけて採水することが難しい砂質土壌において、下方浸透水を高い採水効率で採水可能な装置を開発した。その結果、採水吸引判定値 (h_c-h_{LR}) を周囲と同じというよりは僅かに (5 cm) 乾燥側に設定すること、土壌組成 (本実験の場合は砂) の違いに応じ、バッファ容器を設けることによってフィルターにかけるサクションを調整できること、これらの結果を反映させた採水装置 SCFS は砂質土壌で 94~109% の高い採水効率をあげることが明らかとなった。SCFS やセンサー技術を併用した環境負荷物質の下方浸透モニタリングを行うための基礎となる成果を提供できた。土壌や地下水汚染を引き起こす前に予防的な措置を施す際や、効率的で適切な灌漑および施肥管理のあり方を提案する際の一助となるシステムであると考えている。今後は SCFS を用いて砂質圃場での長期にわたる採水実験を行い、実際の下方浸透水の水質を分析する。

謝 辞

フィルターの選定に関して鳥取大学農学部の猪迫耕二助教授より有益な助言を頂いた。圧力制御システムは鳥取大学乾燥地研究センター 国外客員教授 (1999~2000 年) であった C. Dirksen 博士によって製作されたものを基に改良した。本研究は科学研究費補助金 (基盤研究 B; 16380159) および 21 世紀 COE プログラムの補助を受けた成果である。記して謝意を表す。

引用文献

- 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編著 (2002) : 環境負荷を予測する. p. 23, pp. 42-44, 博友社, 東京.
- 東 直子・井上光弘 (2003) : 自動土壌溶液サンプラーの実用化に関する研究—砂丘砂に適用するフィルターの選定—. 第 55 回農業土木学会中国四国支部講演会, 62-63.
- 東 直子・森也寸志・猪迫耕二・井上光弘 (2004) : 自動土壌溶液サンプラーの砂丘畑不飽和土壌への適用. 平成 16 年度農業土木学会講演要旨集, 376-377.
- Inoue, M. and Dirksen, C. (2000) : An Automatically operated soil water flux meter of improved design. 平成 12 年度農業土木学会講演要旨集, 636-638.
- 環境土壌学編集委員会 (1998) : 豊かな土づくりをめざして—環境土壌学—. pp. 98-99, 農業土木学会, 東京.
- 小杉賢一朗 (2000) : 不飽和土壌中の鉛直浸透水の不攪乱採取手法の開発. 水文・水資源学会誌, 13 (6) : 462-471.
- Kosugi, K. and Katsuyama, M. (2004) : Controlled-suction period lysimeter for measuring vertical water flux and convective chemical fluxes. Soil Sci. Soc. Am. J., 68 : 371-382.
- 松本 聡 (1993) : 砂丘土壌における有機物施用の意義. 日本砂丘学会誌, 40 (2) : 77-80.
- 中村公人・三野 徹・廣野祐平 (2003) : 畑地における窒素の挙動とその制御 (3) —畑地土壌中の浸透過程における窒素動態—. 畑地農業, 536 : 2-9.
- 中尾友紀・猪迫耕二・井上光弘・田熊勝利 (2003) : フラックスメータによる砂中降下浸透水の採取効率. 平成 15 年度農業土木学会講演要旨集, 334-335.
- 日本地下水学会編 (2001) : 雨水浸透・地下水涵養. pp. 50-57, 理工図書, 東京.
- 小川吉雄 (2000) : 地下水の硝酸汚染と農法転換. p. 25, pp. 66-82, 農山漁村文化協会, 東京.
- Šimůnek, J., Sejna, M. and van Genuchten, M. Th. (1999) : The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. IGWMC-TPS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- 鈴木慶次郎・志賀弘行 (2004) : 浸透水の硝酸性窒素濃度から見た網走地域の黒ボク土畑における投入窒素限界量. 日本土壌肥科学雑誌, 75 (1) : 45-52.
- 取出伸夫・井上光弘監訳 (2004) : Modelling variably saturated flow with HYDRUS-2D (Japanese translation). HYDRUS-2D による土中の不飽和流れの計算. pp. 1.1-1.53, 農業土木学会土壌物理研究部会 HYDRUS グループ.
- van Grinsven, J.J.M., Booltink, H.W.G., Dirksen, C., van Breemen, N., Bongers, N. and Waringa, N. (1988) : Automated in situ measurement of unsaturated soil water flux. Soil Sci. Soc. Am. J., 52 : 1215-1218.

要 旨

土壌・地下水の汚染過程を解明するためには、根群域からの下方浸透水の水量および水質を正確に把握する必要がある。フィルターの圧力を調整することで、土壌中の下方浸透水量の流線を乱すことなく採取できる装置を、肥料の溶脱リスクも高い砂質土壌に適用させるため、フィルターサククションの自動制御システムの改良を行った。選出したガラスフィルターに、予めサククションを保った状態のバッファ容器から間接的にサククションをかけることで、僅かなサククション変化で土壌水分量が大きく変化する砂質土壌において下方浸透水の効率良い採水が可能となった。室内カラム実験で連続降雨時の採水性能を評価し、94~109%の高い採水効率で採水可能な装置を開発することができた。

受稿年月日：2005年2月28日

受理年月日：2005年7月12日