

砂丘地ベイドゾーンにおける鉛直方向の土壤水分観測

Field observation of soil water in sand dune: From the surface to the water table

河合隆行*・井上光弘**

Takayuki Kawai and Mitsuhiro Inoue

はじめに

近年、水資源の重要性が再認識され、既存資源の有効活用や新たな水資源開発が研究課題となっているなか、島嶼部や大陸沿岸域に多く分布する砂丘に注目が集まっている。砂丘が貯水槽の役割を果たし、沿岸湧水へ大きく寄与していると期待されているからである。

砂丘地湧水および地下水を資源として管理、利用するには砂丘の水収支解明が必要となってくる。しかしながら、現在までに実際に地下水湧出量を観測できるほどの規模の砂丘で水収支解析が行われた例は皆無といっても良い。地下水の湧出口が海底にあるケースが多く、また野外観測に適したフィールドの絶対数が少ないことがその要因となっている。

鳥取大学乾燥地研究センター内には**70m**近い比高を持つ砂丘が存在する。全区域が実験区に設定され、また年間を通じて枯れることの無い湧水地が存在しており、砂丘水収支を解析するにあたって最適な条件といえる。ここで現在、蒸発散、降下浸透、地下水流動、湧出量を実測し水収支を解析する研究をおこなっている。本稿では砂丘という特殊な土壌、地形条件において研究を進める際に得られた、砂地特有の測器の設置方法、および土壤水分の浸透形態について報告する。



図1 研究対象地

研究対象地は、鳥取県東部の千代川右岸(北緯 35° 東経 134° ,図 1)に位置する鳥取大学乾燥地研究センター内の砂丘であり、洪積世末期に形成されたものである。この砂丘は鳥取市と福部村にまたがる鳥取砂丘(浜坂砂丘)の西部分にあたり、斜面の規模は頂部が標高 **73m**、低部が **11m**、比高は約 **60m**、水平距離が約 **600m** となっている (図 2)。

地表面の被服状況は基本的に砂の裸地であり、*Carex kobomugi Ohwi* (カヤツリグサ科)や *Ischaemum anthophoroides Miquel* (イネ科)等の砂丘植物が所々に生育している。また *Vitex rotundifolia L. fil.* (クマツヅラ科)等の灌木類や、人間が植林したクロマツの防風林も点在している (写真 1)。

研究対象地概要

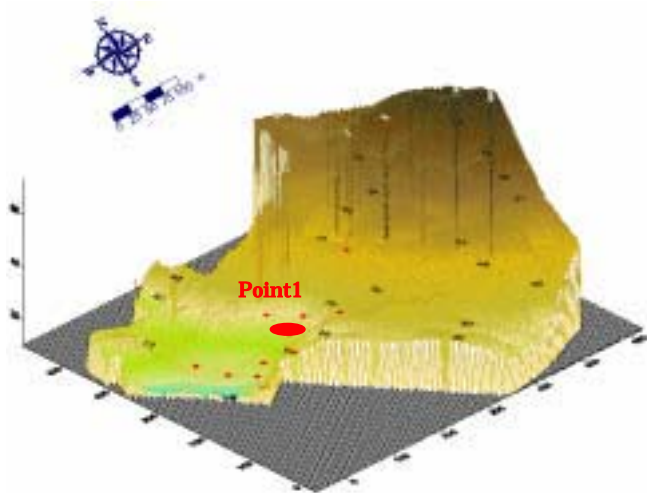


図 2 試験流域



写真 1 砂丘の被覆状況

この砂丘は、斜面の中腹で急激に傾斜が変わりロウト状に収束する地形形態を持つ。これはスリバチと呼ばれる鳥取砂丘独特の地形であり、鳥取砂丘全体では大小 30 近くのスリバチが知られている。規模の大きいスリバチ底部では多くの場合湧水が確認され、本研究対象地の砂丘スリバチ低部でも図 2 の青色部分で示されている地点で湧水がわき出している (写真 2)。

また、図 2 における赤点は地下水位観測を行っている井戸を示したもので、10 本の観測井が設置されている。スリバチ斜面の中ほど、標高 25.5m の地点、Point 1 (図 2、大きい赤点) では、地下水位に加えて地表面から地下水面までのベイドゾーンで土壌水分観測を行っている。



写真 2 湧水地

使用測器

土壌水分の観測を行うにあたって、蒸発散量や地下水涵養量を定量的に把握することを念頭に、水分量と水ポテンシャルの両方を観測した。

(1)土壌水分

観測対象地点は海岸に近く、土壌の塩濃度が測器に影響を与える可能性がある。井上(1998)は、電磁波法、共振法、複素誘電率法、TDR 法、ADR 法による 5 種類の土壌水分測定法を比較し、ADR 法がセンサーへの塩の影響が最も小さいことを明らかにしている。そこで土壌水分観測には ADR 法を用いることとした。

ADR 水分計は周波数を固定して電圧を測定することで誘電率を求める方法であり、Gaskin ら(1996)により開発された。この方法は単に電圧の出力だけであるためパルス発信機が非常に小さくてすみ、プローブに発信機、受信機を埋め込んだコンパクトな装置が市販されている。今回用いた測器は DELTA-T 社の ThetaProbe-ML2 型である(写真 3)。これは 100MHz に固定された高周波電気パルスがセンサープローブ内の伝送線区域を往復する際のインピーダンスを測定し、 $\epsilon - \theta$ の関係から土壌水分量 θ を求めるものである。メーカー仕様による精度誤差は体積含水率で 2%、測定温度範囲は 0~40℃、土壌



写真 3 ThetaProbe-ML2



写真 4 UNSUC

電気伝導度の測定範囲は $0\sim 100\text{mSm}^{-1}$ となっている。

一般に、誘電率と体積含水率の関係は **Topp** (1980)によって 3 次の経験式が提案されている。そこで本研究でも電圧と土壌水分量との関係を 3 次式で表すことにした。図 3 に ADR のキャリブレーション結果例を示す。ここで印加電圧は直流 12V、横軸は電圧 (mV)、縦軸は体積含水率(%)である。いずれもアクリル容器に密度一定の条件で締固めた砂丘砂の供試体を、風乾から飽和まで 10 点作成し測定を行った。得られたキャリブレーション結果は全センサーにおいて高い相関が認められた。

(2)土壌水分張力 (水ポテンシャル)

従来は、水銀マノメータによって土壌の吸引圧を測定していたが、この方法は自動記録のシステムとしては適当でなく、また水銀溜りや水タンクが気温、

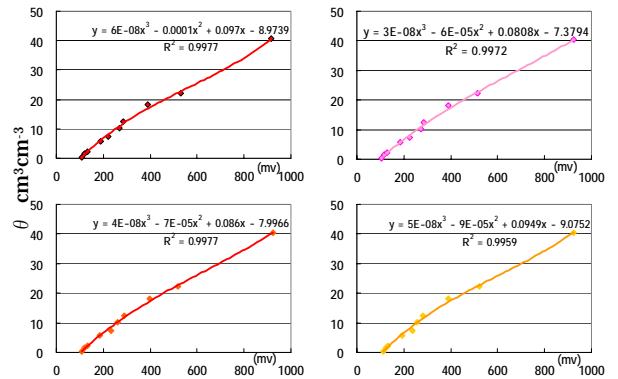


図 3 ADR キャリブレーション曲線

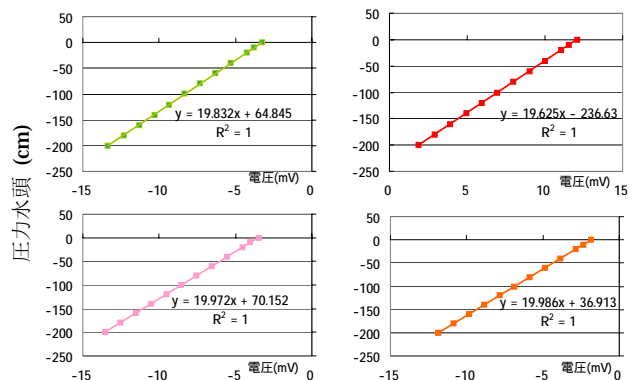


図 4 UNSUC キャリブレーション曲線

地温の影響を受けて正確なデータが取得できないという大きな欠点をもっていた。また、地下 10m 以下の圧力の測定も不可能である。そこで測定部分に直接圧力変換機を取り付けた埋設型感圧センサー、**UNSUC**(サンケイ理化)を使用することにした(写真 4)。**UNSUC** はポーラスカップの受感部に温度補償回路付きの圧力変換機を組み込んだもので、地下に埋めることで気温の影響を最小限に抑え、かつ長期のデータ収集を行うことができるものである。また、コードに大気開放用のチューブが組み込まれているため、測定可能深度に限界がないという利点もある。メーカー仕様による精度誤差は **0.5%**、測定温度範囲は $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 、可能測定範囲は **pF2.7** までとなっている。

UNSUC のキャリブレーションには、アクリル板で作成した専用校正箱を用いた。校正箱に **UNSUC** をセットし十分な脱気を行った後、各圧力における

出力値を求めた。校正に用いた圧力は大気圧である **0 cmH₂O** から **-200cmH₂O** までの計 **12** 点である。図 4 に作成した検定曲線の例を示す。ここで印加電圧は直流 **10V**、横軸は電圧 (mV)、縦軸は圧力水頭 (cm) である。いずれも相関係数は **0.9999** 以上と直線性の高い結果が得られた。

測器のインストール

野外観測において測器をインストールするには、**1. 測定深度の決定、2. 測定深度までのトレンチ等の掘削、3. 測器の設置、4. 掘削土の埋め戻し**、という手順がとられる。この中で、作業の大きな障害となるのがトレンチ等の掘削、及び埋め戻し作業である。

一般的に、観測孔の掘削にはハンドオーガーや簡易貫入試験器等を用いるか、あるいはボーリングマシンや重機などの大掛かりな装置を用いる。しかし、ハンディな道具では数メートル以上の掘削には非常な労力と時間を要し、また重機を用いる場合はコストに加えて広大な空間も求められてくる。そのため測定深度に制限が生じることも少なくない。

また、目的の深度に測器を設置したとしても、測器と土壌の密着性のような条件をクリアできず埋め戻しに失敗すると、取得データの信頼度は低下する。

このように測器のインストールの成否は、掘削と埋設にかかってくるが、砂丘においては「吸引法」を使用することで上記の問題を容易に解決することができる。吸引法とは、一般的に市販されている乾湿両用集塵機に簡易加工を施した器具を取り付けて用いる方法であり、砂丘においては他のどの方法より容易に、かつ短時間で作業を行うことができる。以下に、吸引法を用いて **ADR**、**UNSUB** を **Point 1** (図 2) にインストールした事例を説明する。

(1) 埋設深度の決定

測器の埋設は、地表面から地下水面までの全ベイドゾーンで行うこととした。使用する測器は **ADR** 土壌水分計が計 **10** 本、**UNSUB** が計 **3** 本である。土壌水分計は十分な本数が用意できたため、地

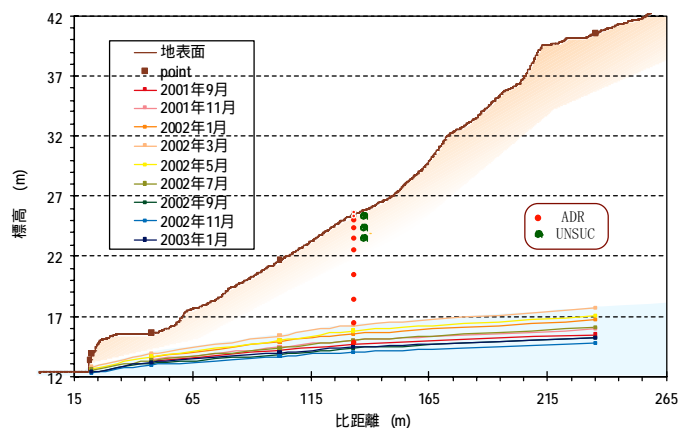


図 5 地下水位の季節変化および測器埋設深度

表 1 測器設置深度

測器	設置深度 (cm)	合計
ADR	5,20,50,100,200,300,500,700,900,1050	10本
UNSUB	20,100,200	3本

表面から地下水面まで均等に、また蒸発散の影響を受けやすい地表面付近は密に設置することにした。**UNSUB** は地表面付近のみを選択した。**Point 1** の地下水位は、冬季に約 **9m**、夏季に約 **12m** となるため (図 5)、最も深い **ADR** の観測点は **10.5m** とした。他の設置深度は表 1 の通りである。

(2) 設置孔の掘削

掘削には吸引法を用いた。吸引法は乾湿両用集塵機に硬質の柄を組み合わせて用いる。今回使用した集塵機はマキタ社のモデル **407** であり、消費電力は **1050W**、最大真空度は **20.6kPa(2100mmH₂O)** である (写真 5)。

吸引する際には、硬質パイプで作成した柄を用いる (写真 6)。この柄は **3m** のイレクターパイプ先端に、刃状に削った単管を溶接したものであり、このような硬質の柄を用いると、穴を垂直に掘ることが可能である。実際、初期の段階では塩ビパイプを使用していたが、**3m** ほど吸引していくと穴が徐々に曲がってしまった。また、柄の先端を刃状にしておくと、



写真 5 乾湿両用集塵機



写真 8 3m まで吸引した様子



写真 6 集塵機に取り付ける柄



写真 9 測器の挿入



写真 7 吸引の様子



写真 10 柄の延長方法

途中で砂丘植物の根があっても容易にせん断できるという利点もある。柄と集塵機とは蛇腹ホースでつながっており(写真 5)、吸引した砂は集塵溜りに直接流れ込むようになっている。

写真 7 に吸引の様子を示す。このように地面に垂直に柄を立て吸引していく。写真 8 は地下 3m まで吸引した様子であるが、ここまでの作業に要する時間は 5 分にも満たない。柄の長さ分だけ吸引が済む

と、目的深度に達するまで数回イレクターパイプをネジで継ぐ作業を行う(写真 10)。11m 深度まで吸引するのに要する時間は、柄を継ぐ作業、タンクに一杯になった砂の除去作業等を含めておよそ 30 分位である。また、吸引の作業中に穴が崩れることは決してない。砂丘の中は、地表面 10cm 付近の乾砂層と呼ばれる層を除けばかなりの湿潤状態にあるため、掘削した穴は常に自立しており崩れ落ちることはないのである。

(3)測器の設置

以上のように目的の深度までの吸引が終わると、次に測器の設置に移る。まず、予め埋設深度にあわせた長さの塩ビパイプを用意しておき、測器のケーブルを通しておく(写真 9)。これには 2 つの利点があり、一つは測器を設置する際に上から力を加えて押し込むことができるということ、二つ目には観測が終了して測器を回収する際、この塩ビ管に沿って吸引することで簡単に回収を行えるということである。測器と塩ビパイプを固定した後、測器を観測孔に入れ(写真 9)、ロッドがきちんと砂に挿入されるように最後に軽く力を加える。

(4)埋め戻し

埋め戻しには予め用意しておいた風乾砂と湧水を使用する。まず風乾砂を少量流し込み、そのあとに湧水で水締めをおこなう。これを繰り返して地表面まで埋め戻していく。

結果

図 6 に断面一次元の体積含水率季節変化を降水量と共に示す。ここで縦軸は深度、横軸は時間であり、色の濃淡で体積含水率の変化を表している。色調は、鳥取砂丘砂の飽和体積含水率である 65% 付近が濃紺色、風乾である 2% 付近が赤色である。また、使用したデータは 2002 年 5 月から 10 月である。この図より、土壌水は降雨に敏感に応答して増減していることが分かる。また段階的に土壌水分が増加するピストン流的浸透は生じておらず、土壌水分の変化は降雨イベントにあわせて断面で一様に生じている。

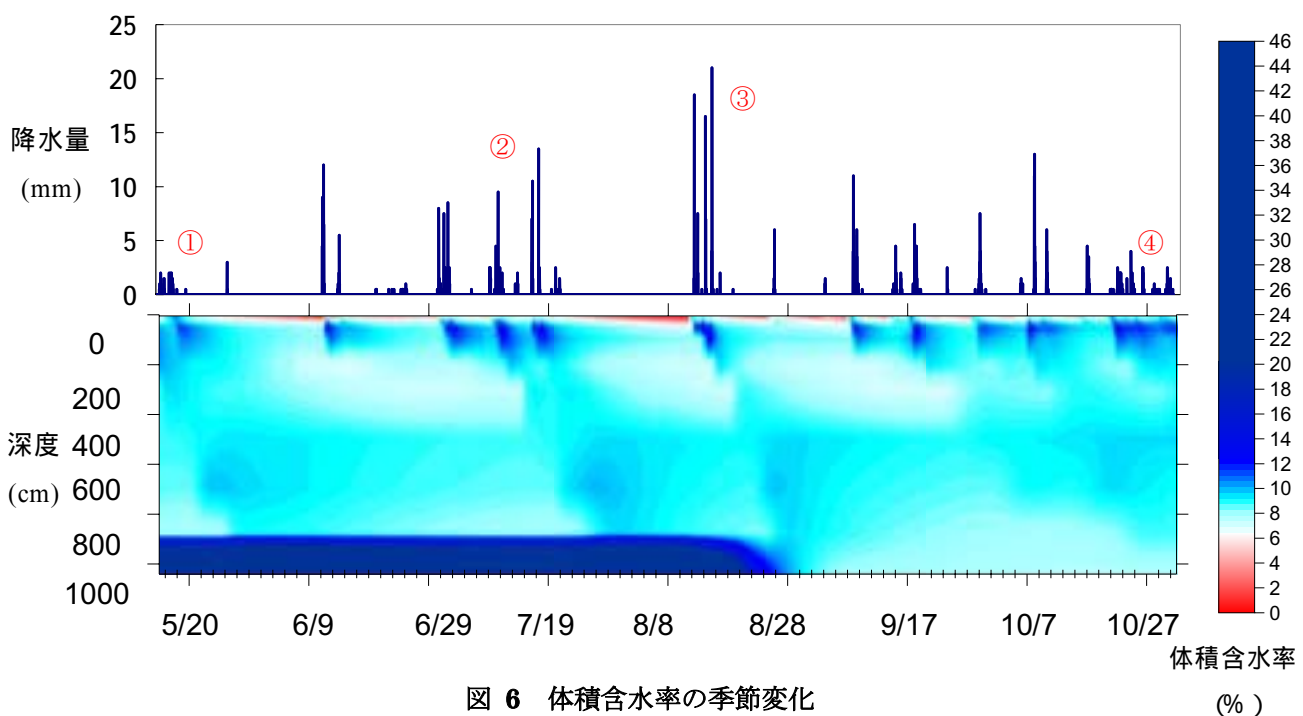


図 6 体積含水率の季節変化

また、季節を通して降雨に敏感に反応しているのは深度 **150cm** 付近までであることが分かる。**200cm** 以深で土壌水分量が大きく変化するのは①**5** 月末、②**7** 月上旬、③**8** 月中旬、④**10** 月中旬の **4** 回しかない。また、地中に浸透した降雨は、多くが **50cm** から **100cm** 周辺にいったん貯留され、徐々に下方浸透しているのが分かる。これは、砂丘砂は透水性が高いために降雨の多くを浸透させるが、深度 **50cm** から **100cm** 付近で何らかの理由により透水性が低下していることを示唆している。この地点は、飽和帯ですべて砂丘砂で形成されており、途中に火山灰層等の明らかに透水性の異なる層は存在しない。また裸地区であるため、植生の根茎も発達していない。このような条件下で、途中の層で透水性が低下し浸透した降雨が宙吊り状態で貯留される理由としては、間隙空気圧の影響が考えられる。しかし今回の観測では空気圧を測定していないため、推測するにとどまる。

地下水涵養ということに注目すると、地下水面までのまとまった排水が生じるのは、ある程度の土壌水分初期条件で且つ一定量以上の降雨のときのみである。どのような条件下で降雨が一度に地下水面まで到達するのかを知るには更なる解析が必要である。

深度 **800** から **1000cm** では、地下水位が低下し飽和帯から不飽和帯へ遷移していく様子が鮮明に現れている。**7** 月下旬までに①、②の **2** 回の大きな降雨イベントが生じ、全バイドスゾーンで土壌水分量が増加しているにもかかわらず、**8** 月下旬には最深部

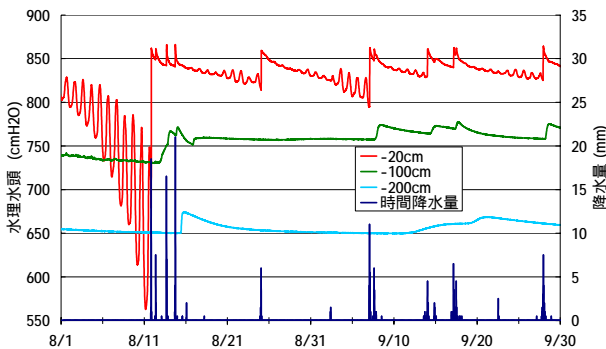


図 7 水理水頭の季節変化

の **ADR**、**1050cm** 地点が不飽和になっている。これは **2** 回の降雨イベントの総量では、流域からの地下水流出量を補えないということを示している。

図 7 に水理水頭の季節変化を示す。ここで縦軸は水理水頭 (**H₂Ocm**)、横軸は時間である。データは **2002** 年 **8** 月から **9** 月のものを用いた。水理水頭は、**UNSUC** による圧力水頭データと観測地点の位置水頭とから求めた。また湧水地の標高を位置水頭における基準点 **0** とした。この図より各深度で降雨に対するポテンシャル変化が認められる。またその変化は深度が深くなるほど変化量が小さくなり、また位相のズレも生じている。深度 **20cm** では日変化が激しく、**8** 月 **1** 日から **11** 日までの特に乾燥した時期に大きな振幅が見られる。これは低水分域での観測が困難であるという **UNSUC** の特徴に加え、地温による影響が圧力センサーに出ているものと思われる。

図 8 に水理水頭の鉛直プロファイルを示す。ここで縦軸は深度、横軸は水理水頭を表している。データには、乾燥日が続いた後の **8** 月 **20** 日、降雨の最中である **8** 月 **25** 日、降雨直後である **9** 月 **22** 日を代表日として用いた。どの日においてもゼロフラックス面は形成されておらず、全体的に下向きの動水勾配を示している。これは深度 **20cm** 以深では蒸発散が生じることなく、土壌水は常に下向きに降下浸透し

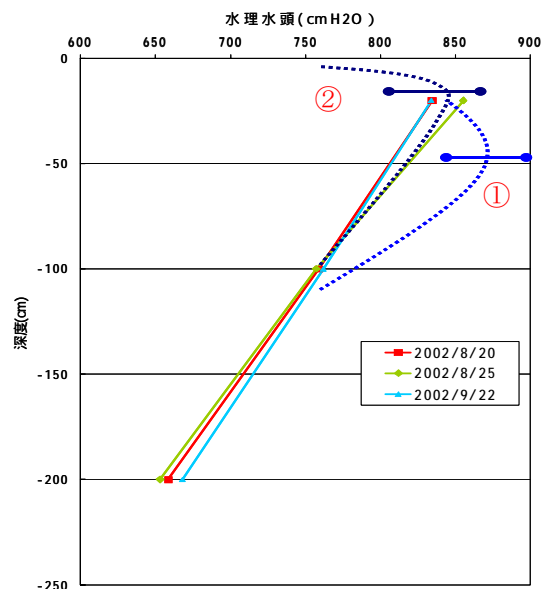


図 8 水理水頭の鉛直プロファイル

ていることを意味している。しかし今回の観測では十分なセンサ数が用意できなかったため観測深度数が少なく、断定するにはデータ数が足りないともいえる。たとえば深度 **50cm** のデータが **20cm**、**100cm** の水理水頭値より高ければ図 8 の①のようなプロファイルになり蒸発散が生じていることになる。

また、ゼロフラックス面が **20cm** 以浅という②のようなパターンも考えられる。大勝 (2002) は砂丘地での詳細なゼロフラックス面位置の把握をしているが、それによると裸地におけるゼロフラックス面は深度 **10cm** から **20cm** の間にあることが多いと観測されている。大勝 (2002) と本研究地とでは研究対象地の条件が極似しているため、本研究でも **10cm** から **20cm** といった浅い層にゼロフラックス面が存在し、表層でのみ蒸発が生じていると考えられる。

夏季における砂丘地の蒸発散特性として乾砂層による毛管遮断現象が良く知られている。これは地表面付近の風乾層がマルチ資材の役割を果たすことによって蒸発散を抑制する現象である。図 6 の体積含水率変化からも分かります。5月から10月までの降雨を除くほとんどの期間で乾砂層が形成されている。このことから本研究地での夏季蒸発散も強く抑制されていると思われ、降下浸透が卓越しているという結果が妥当であると考えられる。

図 9 に冬季、2002年1月15日から3月31日における体積含水率の変化を示す。図 6 と同じく縦軸に

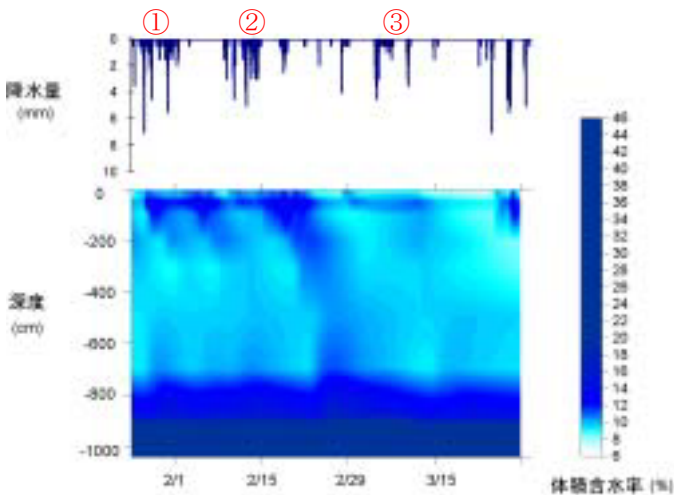


図 9 冬季における体積含水率の変化

深度、横軸に時間、色の濃淡で体積含水率を示している。降雨グラフで示した①、②、③は降雪期間であり、それぞれ約 10cm から 30cm の積雪が観測された。この図より、冬季には地下水位が 9m 付近に確認され、また土壌中の体積含水率も平均 10% 付近と夏季と比較して高くなっている。特に降雪後の融雪日に土壌水分量が全ベイドスゾーンで増加しており、融雪が地下水涵養に大きく寄与していることが分かる。

まとめ

本稿では、砂丘という特殊な土壌帯での土壌水分観測を、地表面から地下水面までの全ベイドスゾーンにおいて行った事例を紹介した。得られた知見は以下の通りである。

- ・ 砂丘における土壌水分観測の手法として、**ADR**法、埋設型感圧センサー (**UNSUC**) が地表面から地下水面までの全ベイドスゾーンにて有用であることが確認された。
- ・ 砂丘における観測坑の掘削には吸引法が最も適しており、**10m** 以深の地下水面まで容易に掘削できる。
- ・ 浸透は降雨イベントにあわせて断面で一様に生じる。また、深度 **50cm** から **100cm** 付近で降下浸透水が貯留される現象がみられた。
- ・ 夏季におけるベイドスゾーンでは、全層で常に下向きの降下浸透が卓越し、蒸発散が強く抑制されている。
- ・ 冬季の融雪が地下水涵養に大きく寄与している。

各現象の物理的な解明、また定量的な水収支解析が今後の研究課題である。

参考文献

Gaskin.G.J and J.D. Millker (1996): Measurement

of soil water content using a simplified impedance measuring technique. J. Agric. Eng. Res. , No63, pp. 153-160

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) :
Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16, pp. 574-582.

大勝圭司 (2002) : ゼロフラックス面を用いた蒸発散量推定の研究. 鳥取大学農学部修士論文

大西正巳・近藤正史 (1961) : 『砂丘の生い立ちー山陰の海岸砂丘ー』. 大明堂

井上光弘 (1994) : 埋設型土壌感圧水分センサー. 日本砂丘学会誌 , 41-2, pp.74-79

井上光弘 (1998) : 塩水を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価. 水文・水資源学会誌 , 11-6, pp.555-564

中島誠・井上光弘・澤田和男・クリス ニコル (1998) :
ADR 法による土壌水分量の測定とキャリブレーション. 地下水学会誌 , 40-4, pp.509-519

藤島弘純 編 (1992) : 『鳥取砂丘の住人たちー自然保護の原点ー』 . 富士書店

朴 鐘瑄・丸井敦尚 (2002) :降雨流出過程における間隙空気圧の挙動に関するカラム浸透実験 . 日本水文科学会誌 , 32-1, pp.3-12