

# 寒冷乾燥地域における土壌水分の TDR 測定： 温度依存性と凍結・融解の影響

## TDR Measurement of Soil Moisture in a Cold-Arid Region： Effects of Temperature Variation and Soil Freezing/Melting phenomena

山中 勤\*・開発一郎\*\*

Tsutomu Yamanaka and Ichirou Kaihotsu

### はじめに

TDR (Time Domain Reflectometry) は今日もつとも広く用いられている土壌水分量の測定方法の一つである。この手法は、非破壊かつ自動的なモニタリングが可能であり、特殊な土壌を除けば個々にキャリブレーションを行わなくとも数%以内(体積含水率)の精度で土壌水分量を求めることができるとされている。しかしながら、土壌水分のモニタリングが様々な気候・土壌条件下で展開されるようになったことで、幾つかの問題点が浮上してきている。

本稿では、寒冷かつ乾燥という特殊な気候条件下にあるモンゴルの草原地帯において実施した土壌水分モニタリングの結果を示し、そこで見られる TDR 測定の問題、特に温度依存性と土壌の凍結/融解の影響について報告する。

### 研究対象地域

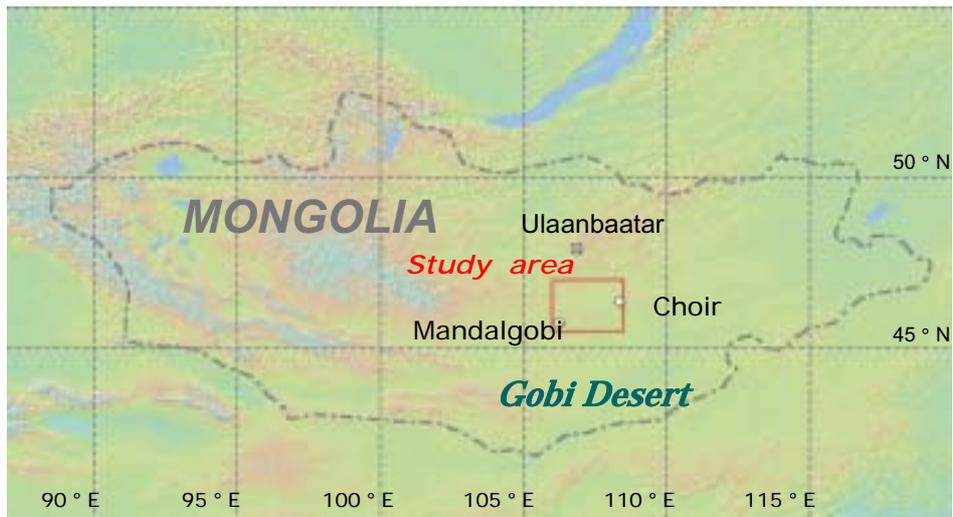
対象地域はゴビ砂漠北縁部のやや北に位置し(第 1 図)平均標高は概ね 1350 m 程度である。比高 100 m ~ 200 m の緩やかな起伏はあるものの、広域的にはほぼ平坦な地形であると言える。年降水量は 100 mm ~ 150 mm 程度と極めて少なく、恒常的な河川

は存在しない。年平均気温は 0 をわずかに上回る程度であり、季節凍土が形成される。植生の大部分は、*Allium polyrrhizum*(ユリ科)、*Carex duriuscula*(カヤツリグサ科)、*Stipa spp.*(イネ科)、*Artemisia spp.*(キク科)などの短草型草本植物によって占められ、場所によって *Achnatherum splendens*(イネ科)などの長草や *Caragana microphylla*(マメ科)などの灌木が生育する。また、一部の低湿地には *Salsola passerina*(アカザ科)などの塩性植物もみられる。

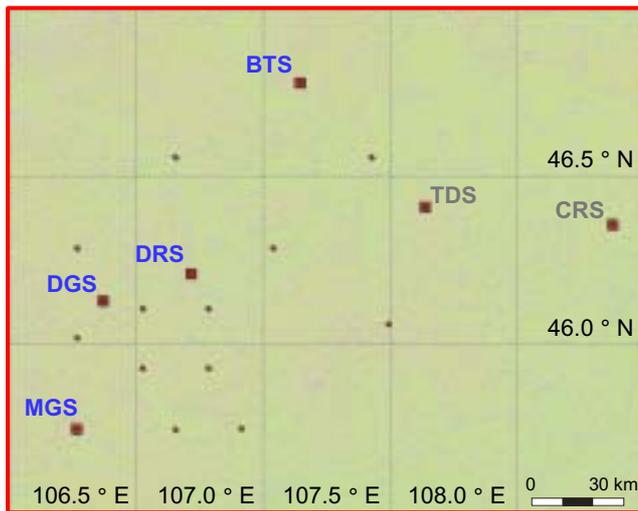
土壌水分量のモニタリングは、人工衛星搭載高性能マイクロ波放射計による土壌水分リモートセンシングのための地上検証実験である AMPEX( ADEOS

Mongolian Plateau Experiment) プロジェクトの一環として実施した。対象地域内には 6 つの自動気象観測ステーション ( Automatic Weather Station; AWS) と 12 の自動土壌水文観測ステーション ( Automatic Station for Soil Hydrology; ASSH) が設置されている(第 2 図)。本稿ではこのうち、MGS・DGS・DRS・BTS の 4 地点における最初の 1 年間のモニタリング結果を用いる。第 3 図に、MGS に設置された AWS の概観を示す。観測方法の詳細は Yamanaka et al. ( 2002a, b, c, d ) を参照されたい。

気象条件の季節推移の一例として、MGS における



第1図 調査対象地域 (赤の枠線内)

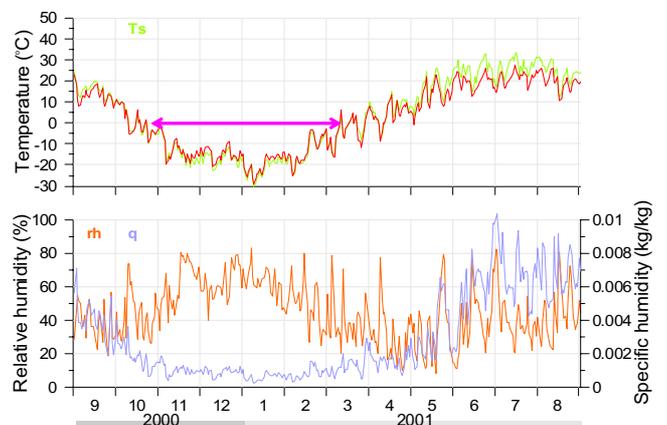


第2図 モニタリングサイト  
(赤四角は気象観測および土壌水分観測、  
赤丸は土壌水分と地温のみ)

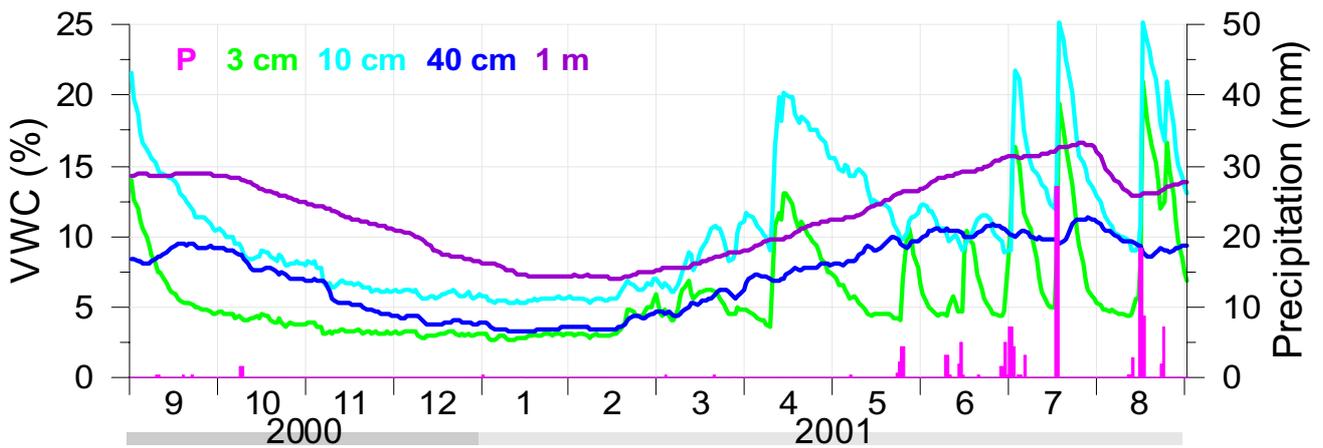


第3図 MGSにおけるモニタリングシステムの概観

日平均の気温・地表面温度・相対湿度ならびに比湿の年変化を第4図に示す。日平均気温は1月初旬の-30 から7月中旬の+30 まで変化しており、年変化幅はおよそ60 に及んでいる。10月中旬頃から日平均気温は零下を示し、3月中旬に再び0 を上回るようになる。相対湿度は半年周期の変動を示し、夏期と冬期に相対的に大きな値を示すが、冬期の比湿は1 g/kg 以下と極めて小さい。



第4図 気温 ( $T_a$ )・地表面温度 ( $T_s$ )・相対湿度 ( $rh$ )  
ならびに比湿 ( $q$ ) の日平均値の年変化



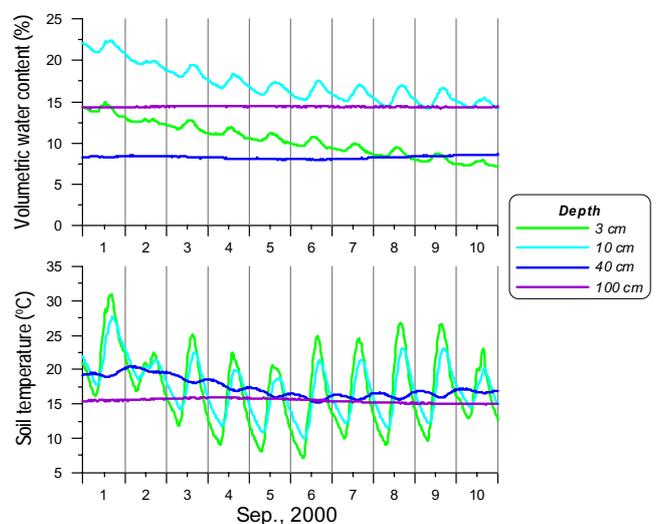
第5図 MGSにおける日雨量(P)と4深度の土壌水分測定値の日平均値

### 土壌水分測定結果

MGS・DGS・DRSの3地点では3 cm、10 cm、40 cm および 1 m の4深度で、BTSでは基盤岩が浅層に位置していたため3 cm、10 cm、20 cm および 40 cm の4深度で、それぞれ土壌水分量と地温の測定を行った。土壌水分量の測定にはIMKO社(独)のTDRセンサーであるTrime-ITを用いた。測定結果の一例として、MGSにおける4深度の土壌水分測定値に関する日平均値の年変化を日雨量と共に第5図に示す。深度3 cm および 10 cm では降雨イベントに対応した土壌水分の応答が明瞭に認められる。これに対し、深度40 cm および 1 m では個々のイベントに対する応答は明瞭でなく、無降雨期間中のやや大幅な落ち込みが目立つ程度である。また、冬期に小さく夏期に大きいという年周期変化は深層で顕著である。このような経日的あるいは年周期的な変動は特に不自然ではなく、一般的に予想される変化傾向であると考えられる(ただし、4月中旬の急増傾向については後で詳述する)。

一方、土壌水分測定値の日変化はやや不自然な傾向を示す。第6図上段に、第5図と同じくMGSにおける4深度の土壌水分測定値を、30分間隔の生データとして示す。図より、浅層の2深度では日中増加して夕方から夜間にかけて減少するという日変化

が明瞭に見てとれる。これは第6図下段に示した地温の日変化と同様であり、深度3 cm に対する深度5 cm の測定値の位相の遅れなどを含めて極めて酷似している。一般的には、日中の蒸発散により表層の土壌水分量は減少し、夜間に下層からの給水がなされることにより回復するという日変化を示すものと考えられる(例えば、Jackson, 1973)。表層で気化した水分が下層で凝結することにより、これと逆の位相をもった日変化が生じうるといふ観測例も存在するが(例えば、山中ほか, 1994; Cahill and Parlange, 1998)、深度3 cm から 10 cm に及ぶ土



第6図 MGSにおける土壌水分量(上段)と地温(下段)の測定値(30分間隔)

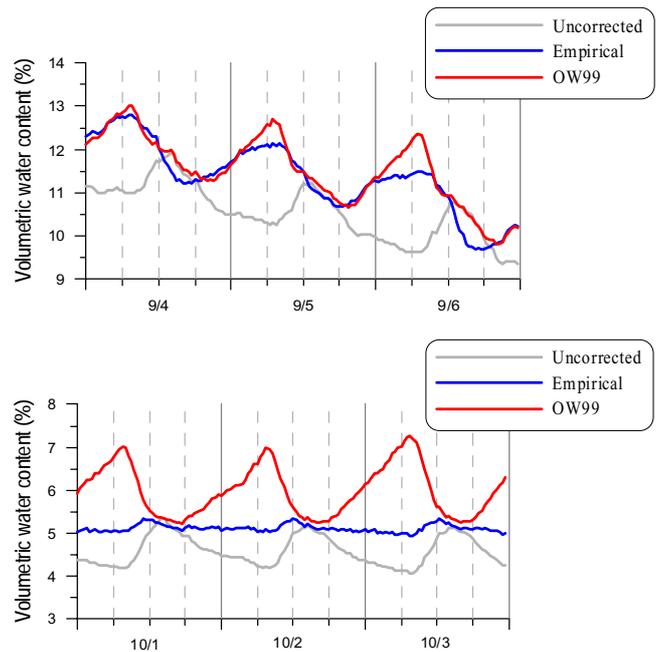
壤層において、数%にもおよぶ体積含水率の増加をもたらすほど大量の下向き水蒸気輸送が存在するとは考えにくい。したがって、このような土壌水分測定値は地温変化の影響を受けた見かけ上の変動である可能性が考えられる。

### 温度依存性

TDR による土壌水分量測定のパイオニア的存在である Topp et al. (1980) の論文では、中程度の水分状態（体積含水率 = 32.4%）の Clay Loam を対象とした測定結果をもとに、有意な温度依存性はないと報告されているが、実際には必ずしも無視し得るものではないということが近年明らかになってきた。Wraith and Or (1999) の説明によれば、温度が上昇すると自由水の誘電率はわずかに減少するが、同時に土粒子表面に強く引きつけられた結合水が開放され自由水へと転換することにより、（結合水の誘電率は自由水のそれよりも著しく小さいので）土壌水全体の誘電率は増加することも有り得る。そのため、例えば粗粒土壌で水分が豊富にある場合（自由水の存在比率が高い場合）は温度と TDR 測定値の間には負の相関が現われ、細粒土壌で水分が少ない場合（結合水の存在比率が高い場合）は正の相関が現れる。一般的な傾向として、粗粒土壌は保水性が乏しく、細粒土壌は保水性に富むので、上記の二つのプロセスが相殺しあい、結果的に温度依存性は顕著でなくなるが、どちらか一方のプロセスが卓越するような条件下では無視することができなくなる。したがって、乾燥地域では例え細粒の土壌であっても土壌水分量は少なくなるので、土壌水分量の TDR 測定値は地温と正の相関をもつ可能性がある。

そこで筆者らは、TDR 測定値と温度の関係ならびにその時空間的な差異を表現する経験モデルを構築し、Or and Wraith (1999) の理論モデルと併せて、実測値の補正を試みた。両モデルの詳細は山中ほか (2003) を参照されたい。

第 7 図に MGS の深度 3 cm のデータに対する補正



第 7 図 MGS の深度 3 cm のデータに対する補正前後の土壌水分量変化

（灰色：未補正，青：経験モデルによる補正值，赤：理論モデルによる補正值）

前後の土壌水分量変化を示す。上段の 9 月 4 日から 6 日の期間では、理論モデルと経験モデルによる補正值は概ね等しく、日中減少し夜間回復するという日変化傾向を示す。未補正の値と比較すると変化の位相がほぼ反転しているが、前述のように補正後の日変化のほうが物理的にみて妥当であると言える。一方、下段の 10 月 1 日から 3 日の期間においては、理論モデルと経験モデルの補正值の間で相違が見られる。理論モデルでは 9 月の測定結果と同様の日変化を示し、土壌水分の日変化幅も 2% 程度で変化がない。これに対し、経験モデルによる補正值はほとんど日変化を示していない。9 月上旬と 10 月上旬を比較すると、正味放射量は概ね半減し、また土壌水分量自体 11~12% から 5~6% へと、やはり半減している。当然、蒸発散量も大きく減少していると思われる。したがって、土壌水分の日変化幅にほとんど変化の見られない理論モデルによる補正は十分に機能しているとは言いがたく、むしろ経験モデルのほうが有効であると考えられる。

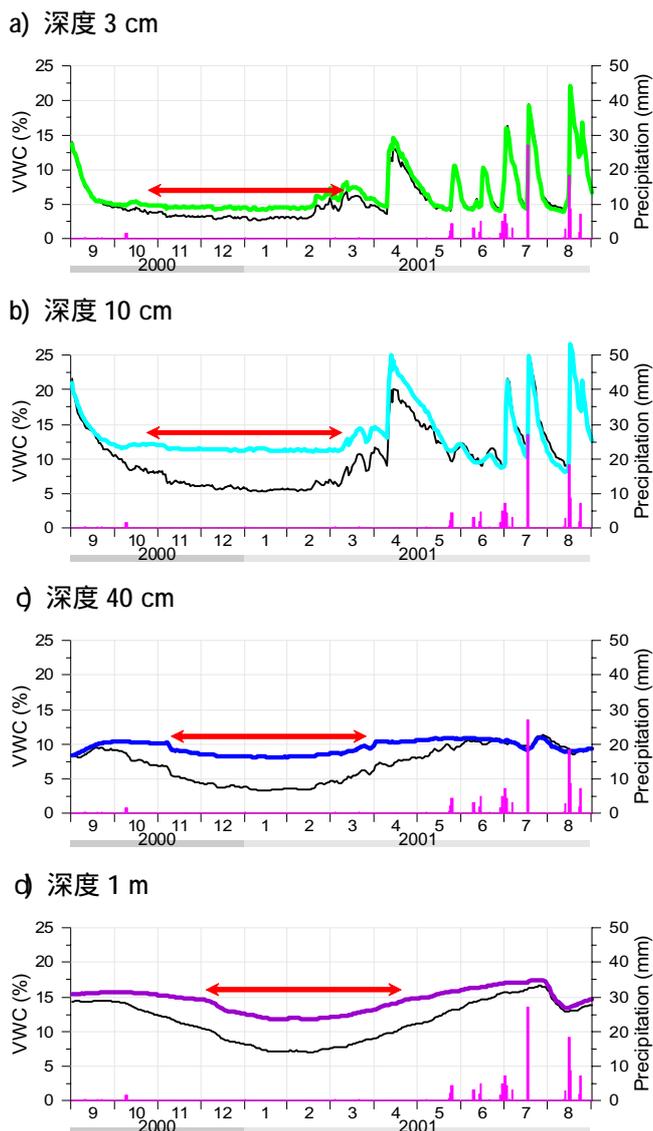
第 8 図に、経験モデルによる補正前後の土壌水分量変化を各深度ごとに示す。この図からみてとれるように、土壌凍結期間を除いたとしても、メーカー公称精度を上回る 5%近い差が生じている。特に、深度 40 cm および 1 m において認められた土壌水分の年周期変化はほぼ完全に地温の年変化に伴う見せかけの変動であり、実際には顕著な年周期変化は存在しないことが明らかである。このように、TDR 測定 of 温度依存性は、日平均値などで見ると気づきにくい、実際には長周期的な変動においても無視できるものではない。ややもすると見過ごしてしまい、実際には生じていない変動を容認してしまう危険性があるため、注意が必要であろう。

### 凍結 融解の影響

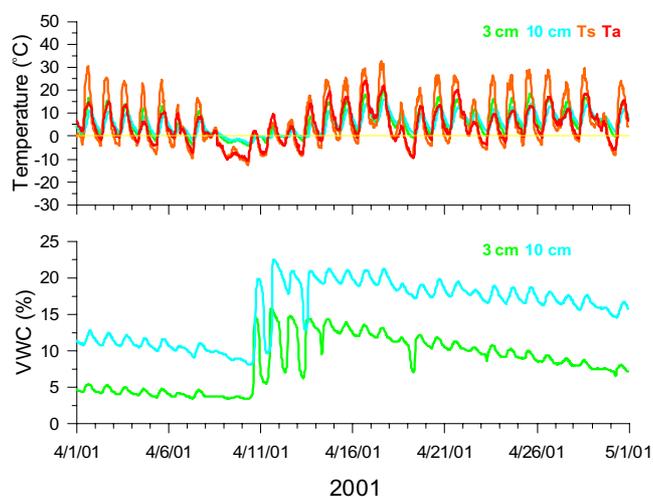
第 8 図に示された矢印の期間は、地温が 0 を下回る、すなわち土壌が凍結していると判断される期間であるが、この期間は温度依存性の補正を施した値も若干変化する傾向を示している。これは土壌水が凍結することによる誘電率の低下が反映されたものと考えられる。ただし、乾燥土壌、結合水および凍結水（つまり氷）の誘電率は比較的近い値を持つため、凍結水と不凍水の絶対量を求めることは難しい。

注目すべきは、深層の 2 深度においては、凍結前の水分量と融解後の水分量とがほぼ等しいという点である。すなわち、凍結期間中、全水分量に占める不凍水の割合が温度と共に変化することにより、前述した温度依存性とはまた別の見かけ上の変動が生じているが、実際の水分量自体は変化していないとみなすことができる。

ところで、浅層の 2 深度においては 4 月 10 日頃に急激な増加が認められる。これは一見、春の雪解け水の浸透であるかのように思われるが、実際にはこの地域における冬期の降雪量は数 mm 程度以下であり、図に示されるような大幅な土壌水分の増加をもたらすことは有り得ない。また、第 9 図に示すよ



第 8 図 経験モデルによる補正前後の土壌水分量変化



第 9 図 MGS における 4 月の気温 (Ta)・地表面温度 (Ts)・地温および土壌水分量 (2 深度)

うに、4月上旬は既に気温・地温ともに0を上回っているにもかかわらず土壤水分は増加しておらず、4月10日になって深度3cmと10cmでほぼ同時に急増している。このような振る舞いは、実際の水の浸透現象によるものとは考えにくく、土壤の融解に伴う誤測定であると考えられる。しかしながら、単なる土壤融解時の誤測定であるならば、温度が0を安定的に上回った状態で解消されるはずであるが、奇妙なことに4月10日以降の土壤水分測定値は比較的高い値を維持し、徐々に減少してゆくという点である。現在のところ、このような誤測定が引き起こされる機構は不明であるが、一つの可能性としては、障害がかなり後にまで持続していることから、土壤水の凍結・融解の繰り返しに伴う土壤の構造変化が関与していると予想される。例えば、凍結・融解が繰り返されると土壤中にアイスレンズ（例えば、Patterson and Smith, 1981）が形成されるが、TDRセンサーのロッドとアイスレンズが交差するような場合、そこで電磁波の反射が生じるため、測定された走行時間は短縮され、結果として土壤水分量が過大評価される可能性がある。このような土壤水分の局在化は、土壤が完全に融解した後の再配分過程において徐々に解消されるであろうし、降雨があれば一気に解消することも有り得る。本研究対象地域では、5月下旬の降雨前後に凍結以前の土壤水分量レベルに戻っていることから、上述の可能性が補強されるが、確実な証拠を得るにはケーブルテスターを用いて電磁波パルスの応答波形を詳細に調べる必要がある。

### まとめ

本稿では、寒冷乾燥地域における土壤水分モニタリングの実施例を示し、TDR測定における実際上の問題点を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- ・ 気温や地温の年変化・日変化が顕著な寒冷乾燥地域のモンゴルでは、TDR測定に及ぼす温度の影

響により、最大で数%（体積含水率）以上の誤差が生じる。

- ・ 原位置測定データに基づいた経験モデルは実用十分なレベルまで誤差を減少させることができるが、理論モデルには定量的に改良の余地がある。
- ・ 土壤凍結期間中はTDR測定値が過小評価されるが、深層土壤については凍結以前と融解後の測定値に変化はない。
- ・ 表層土壤では、融解期に顕著な過大評価が認められ、その影響は融解後も長期間（e.g. 1ヶ月）残存する。その原因の一つとして、Ice lensの形成が関与していると予想されるが、詳細は今後の課題である。

### 引用文献

- Cahill, A.T. and Parlange, M.B. (1998) : On water vapor transport in field soils, *Water Resour. Res.*, **34**, pp. 731-739.
- Jackson, R.D. (1973) : Diurnal changes in soil water content during drying. In : *Field Soil Water Regime*, pp. 37-55, Soil Sci. Soc. Am., Madison.
- Or, D. and Wraith, J.M. (1999) : Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model, *Water Resour. Res.*, **35**, pp. 371-383.
- Patterson, D.E. and Smith, M.W. (1981) : The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry: results from laboratory tests. *Canadian Geotech. J.*, **18**, 131-144.
- 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.

- Wraith, J.M. and Or, D. (1999) : Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development, *Water Resour. Res.*, **35**, pp. 361-369.
- 山中 勤・檜山哲哉・嶋田 純 (1994): 裸地面蒸発に伴う砂質土壌中の水蒸気の挙動. *ハイドロロジ－* (日本水文科学会誌), **24**, pp. 31-46.
- 山中 勤・開発一郎・ウウィンバータル ダムバラヴィア (2003): TDR による土壌水分量測定値の温度依存性とその原位置測定データに基づく補正. *水文・水資源学会誌*, **16**, (印刷中).
- Yamanaka, T., I. Kaihotsu, M. Ikeda, T. Takasao, D. Oyunbaatar, Ts. Ganbold and AMPEX/AMSR Team (2002a) : Automatic Weather Station Monitoring Results from September 2000 to August 2001 at Mandalgobi, In: Activity Report of AMPEX - AMSR/AMSR-E, Kaihotsu I. ed, Japan Committee for AMPEX-AMSR/AMSR-E, (印刷中).
- Yamanaka, T., I. Kaihotsu, M. Ikeda, T. Takasao, D. Oyunbaatar, Ts. Ganbold and AMPEX/AMSR Team (2002b) : Automatic Weather Station Monitoring Results from September 2000 to August 2001 at Deren, In: Activity Report of AMPEX - AMSR/AMSR-E, Kaihotsu I. ed, Japan Committee for AMPEX-AMSR/AMSR-E, (印刷中).
- Yamanaka, T., I. Kaihotsu, M. Ikeda, T. Takasao, D. Oyunbaatar, Ts. Ganbold and AMPEX/AMSR Team (2002c) : Automatic Weather Station Monitoring Results from September 2000 to August 2001 at Delgertsogt, In: Activity Report of AMPEX - AMSR/AMSR-E, Kaihotsu I. ed, Japan Committee for AMPEX-AMSR/AMSR-E, (印刷中).
- Yamanaka, T., I. Kaihotsu, M. Ikeda, T. Takasao, D. Oyunbaatar, Ts. Ganbold and AMPEX/AMSR Team (2002d) : Automatic Weather Station Monitoring Results from September 2000 to August 2001 at Bayantsagaan, In: Activity Report of AMPEX - AMSR/AMSR-E, Kaihotsu I. ed, Japan Committee for AMPEX-AMSR/AMSR-E, (印刷中).