

半乾燥地域平地での広域地下水涵養 -モンゴル高原での観測結果解析-

開発一郎*・山中 勤**・池淵周一・小尻利治

* 広島大学総合科学部

** 筑波大学陸域環境研究センター

要 旨

モンゴル高原の広大な試験域において、半乾燥地域の地下水涵養の実態を探るべく、気象・水文モニタリングを複数点で実施した。2001年夏から2002年夏までのモニタリングデータ解析の結果、夏季に集中的に降雨があり、それに応じて下方への水分移動が生じた。発散ゼロフラックス面(DZFP)は常時地表面薄層付近にあり、それより上方は蒸発散に、それより下方は地下水涵養に寄与している。しかしDZFPより下層の年間の土壌水分貯留量は非常に少なく、降水量の数%であり、蒸発散がほとんど占め、地下水涵養は夏季に極くわずかであることが明らかとなった。

キーワード：モンゴル高原，半乾燥地域，広域，土壌水分，蒸発散，地下水涵養

1. はじめに

半乾燥地域・乾燥地域(Thorntwaite, 1948)における水の挙動は自然災害の根源的な要因でもあり、水資源の確保という立場からも十分把握する必要がある。特に、降水-土壌水-蒸発散の要素系のモニタリングや評価は水資源の立場から極めて重要であり、地下水涵養評価には不可欠な研究テーマである。

東アジアのモンゴル高原はほとんどが無河川流域であり、自然性は極めて高く、地球環境センサーとしての役割が大きい。また、モンゴル国から中央アジアにかけての乾燥地域では広大な牧草が広がり、遊牧にとっては重要な地域である。一般に半乾燥・乾燥地域では降水量の年変動が激しい(Goudie and Wilkinson, 1980)ことや蒸発散および土壌水分の測定が容易でな

いため、水循環の実態もあまり精度よく捉えられていない。従って、大気-地中水循環という基本的な機構の理解が不十分なため、水資源の算定や保全および予測・確保、さらには河川や旱魃・砂漠化という自然災害の予測が困難なことが多い。

本研究は水循環要素の変動性の大きい半乾燥地域・乾燥地域に焦点を当て、具体的にはモンゴル高原に試験域を設け、そこでの広域の地下水涵養の実態を気象・水文観測から明らかにしようとしたものである。

2. 研究方法

広域場の土壌水分・地下水涵養変動を捉えるために、モンゴル国ウランバートル市の南約250kmのマンダルゴビ市を中心にしたモンゴル高原に120km x 160

Table 1 Measurement elements of ASW

Component	Instrument	Measurement point (m)				
		MGS	DRS	DGS	BTS	TDS
Air temperature	Ventilated platinum resistance thermometer	1.6	1.5	1.5	1.5	2.0
Relative humidity	Ventilated capacitance humidity sensor	1.6	1.5	1.5	1.5	
Wind speed 1	Propeller anemometer with wind vane	3.2	3.1	3.2	3.15	3.2
Wind speed 2	3 cups	1	1	1	1.2	-
Wind direction	Wind vane	2.5	2.4	2.45	2.4	3.2
Surface temperature	Infrared radiation thermometer	1.5	1.4	1.45	1.45	1.8*
Net radiation	Net radiometer	1.5	1.4	1.4	1.5	1.1
Heat flux in the soil	Soil heat flux plate	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
Soil temperature 1 :ST1	Platinum resistance thermometer (TDS:thermistor)	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.05
ST2	"	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
ST3	"	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2
ST4	"	-1	-1	-1	-0.4	-0.5
ST5	"	-	-	-	-	-1
Soil water content 1 :SM1	TDR sensor	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.05
SM2	"	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
SM3	"	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2
SM4	"	-1	-1	-1	-0.4	-0.5
SM5	ADR sensor	-	-	-	-	-1
Precipitation	Tipping bucket rain gauge	1.15	1	1.05	1	3.0
Air pressure	Barometer	1.1	1	1.1	1.1	1.7
Solar radiation	Pyranometer	-	-	-	-	2.8*
	* installed points	Measurement time interval :10 min (MGS, DRS, DGS, BTS), 60(TDS)				

km の試験地を設け、その中に 4 つの自動気象・水文ステーション (AWS : Automatic Weather Station) をそれぞれ 4 つのサイト (BTS、DGS、DRS、BTS) に 30-50km/台の空間密度で設置した。AWS については 2000 年 8 月からモニタリングを開始した。Table 1 は各サイトのモニタリングシステムと測定項目を示している。

試験域はマンダゴビ市(北緯 45° 44.488', 東経 106° 15.878', 1393m)を原点として東に 160km, 北へ 120km の長方形の範囲であり, 標高は 1300m 台から 1500m 台であった。試験域の平均地形勾配は 1/500 から 3/5000 であり, 平坦な地表面を呈している。地表面は牧草で覆われ, イネ科の牧草が広く分布し, 毎年の降雨状況にもよるが, 平均草丈は 20 から 30cm である。また地表面の凹地では, 小さな池や水溜りが干し上がったと思われるが, ところどころ塩類が析出している。土壌は大体が砂質系であり, シルトもところどころみ

られた。

3. 結果と考察

3.1 モニタリング結果

試験域 AWS の 2001 年 9 月から 2002 年 8 月までの土壌水分と降水量 (実質的には降雨量) のモニタリング結果を Fig. 1 に示す。DGS については, 残念ながら 2003 年 6 月 13 日から 7 月 29 日までは電源系のトラブルのためにデータが取れなかった。また, 本試験域では毎年冬季-春季にいくらかの降雪があるが, 本モニタリングではその量を測定できていない。モンゴル国全土に展開している自然環境モニタリングステーション (NEMS) のルーチン気象観測によれば, 本試験域では 10 月下旬から降雪があり, 特に 3 月・4 月に積雪が多い。近年では大体その量は降水量の数%から 10%を

4AWS Site Sep,2001~Aug,2002

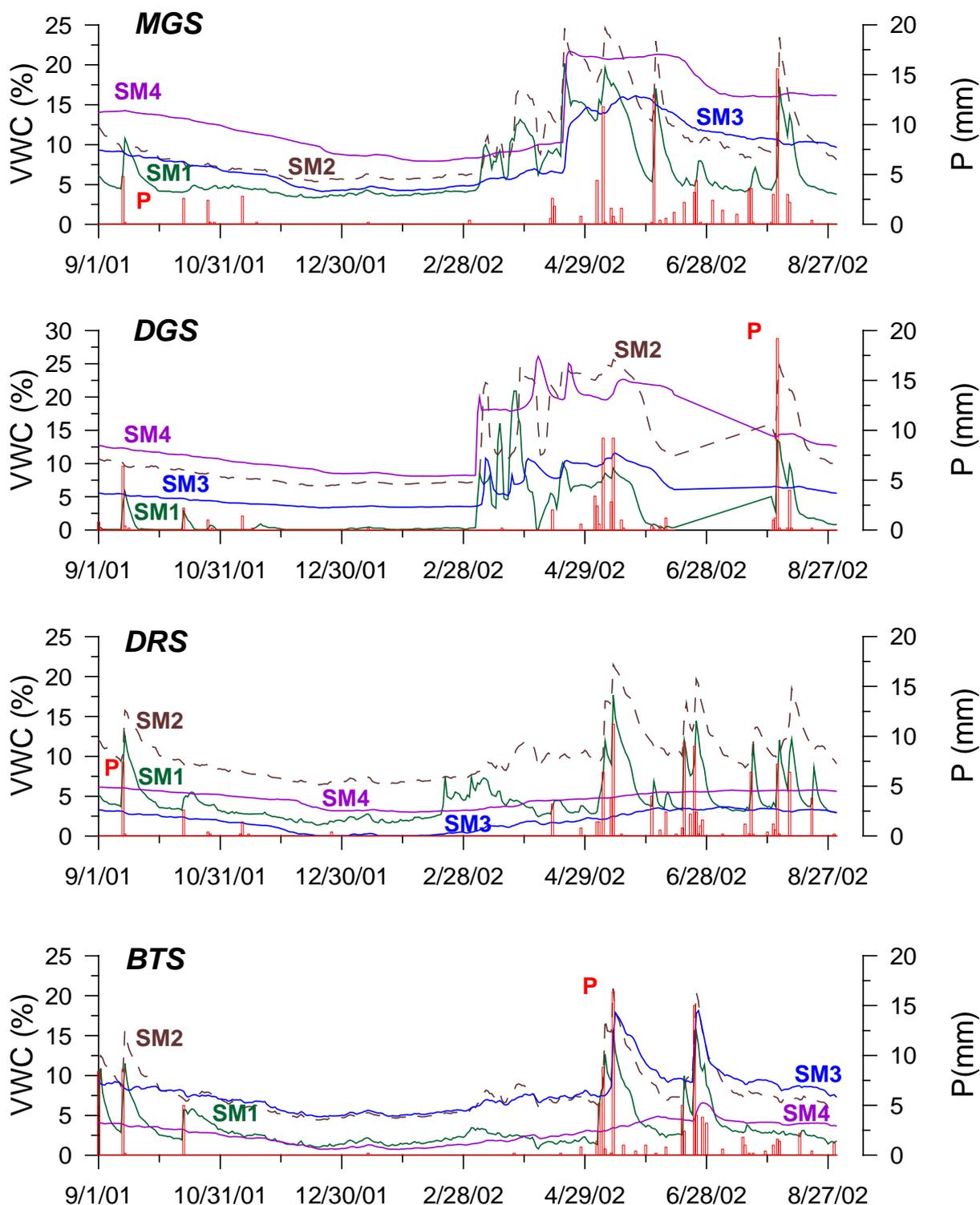


Fig. 1 Monitoring results of AWS at four sites (P: precipitation, VWC: volumetric water content of soil moisture) from Sep. 2001 to Aug. 2002 at BTS, DGS, MGS and DRS of AWS)[Ts: surface soil temperature, Ta: air temperature, ST: soil temperature, 1: 3 cm depth, 2: 10 cm depth, 3: 40 cm depth, 4: 100 cm depth]

超える範囲である。降水量は MGS, DGS, DRS, BTS でそれぞれ 102.4mm, 73.2mm, 103.4mm, 105.0mm であった。この結果は半乾燥地域の降水量としては少ないほうである。さらに 2001 年 9 月上旬や 2002 年 5 月上旬の降雨は 4 つのサイト全てに共通してみられるが、それら以外はそうではなく、全試験域降雨と試験域内の局所的降雨があることを意味している。

Fig.1 において 10 月下旬から 2 月下旬までは気温・地温は零下であり、2 月末から 3 月にかけて降雪の影響もあるが、気温上昇に伴って地表面付近土壌 (DGS 以外) は凍結・融解を繰り返しながら土壌水分を激しく変動させている。DGS の土壌はバイパス的な流れのために地表面薄層または積雪の融解水が一気に下方深くに浸透していると思われる。実際、DGS の土壌は他のサイトと比べて細かなレキが多く、また牧草や灌木の根も多く、そのためトレンチ表面の観察ではいずれのサイトでも大間隙が多々見られた。

5 月から 8 月にかけて 10mm/日を超える降雨が多く、この降雨に伴って土壌水分の応答が明確であり、全深度の土壌水分が降雨に素早く応答して増加している。年降水量のほとんどが夏季に集中(約半分)していた。

3.2 発散ゼロフラックス面

AWS の設置時にトレンチを掘って土壌調査を実施した。その結果、どのサイトの土壌も地表面から深度 10-20cm までは若干の有機砂質土壌でそれ以下は小さなレキ交じりの砂質土壌であった。深度 10-20cm 土壌の間隙率は 34% から 48%、飽和透水係数は 10^{-2} から 10^{-4} cm/sec のオーダーであったが、深度 10cm のそれは相対的に最も小さく、透水性の悪い土壌層があると思われる。深度 40cm の土壌の間隙率は 29% から 44%、飽和透水係数は 10^{-2} cm/sec のオーダーであった。深度 100cm のそれらは 29% から 44% および 10^{-3} cm/sec のオーダーであった。これらは現地土壌を採取し、JIS 規格物理試験 (土質工学会教育関係資料編集委員会編, 1975) を実施して求めた。

Brooks and Corey (1964) に従い、各サイト各深度の土壌物理パラメーターを用いて土壌水分を吸引圧に変換した (Fig. 2)。

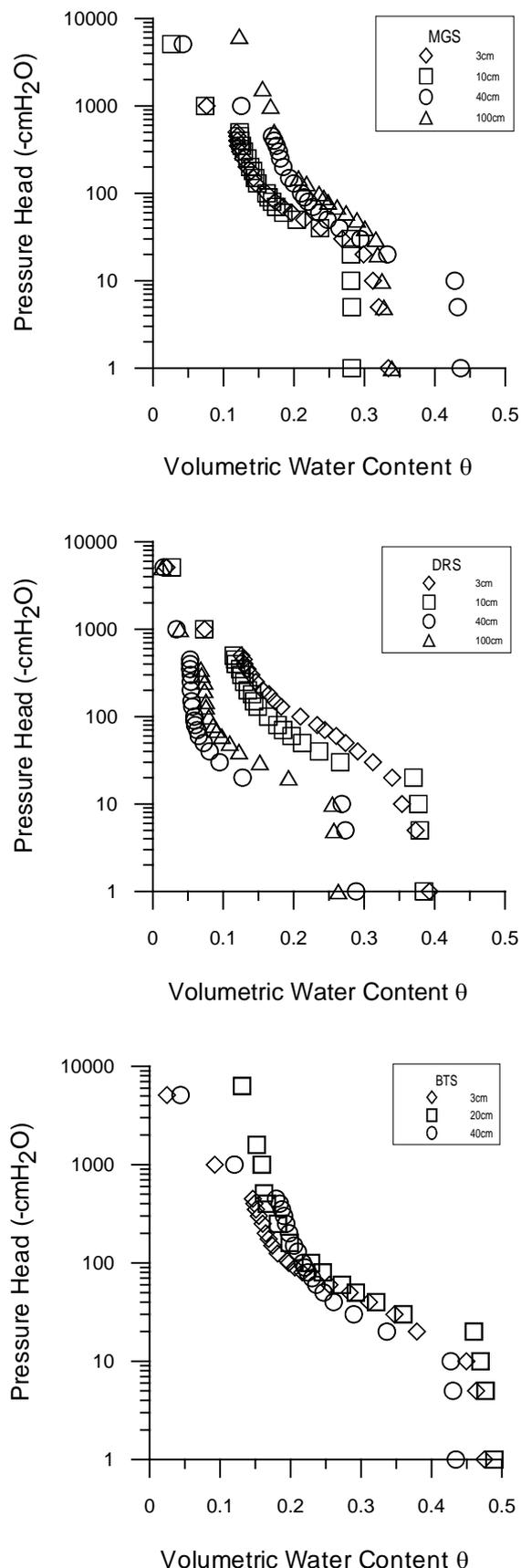


Fig. 2 Relationships between pressure head and volumetric water content of MGS, DRS and BTS soils

ただし、BTS は深度 40cm までについて計算し、DGS については土壌物理パラメーターをまだ取得していないので、解析を行なわなかった。尚、Fig. 2 は吸引法および加圧膜法（圧力水頭が 400cmH₂O 以上）を用いて行い、2 つまたは 3 つの 100cm³ 現地採取試料による実験（土壌物理性測定法委員会編，1976）結果の平均値を用いて表したものである。

その解析例として Fig.3 に DRS の月平均全水頭プロファイルを示す。図から発散ゼロフラックス面（DZFP）が深度 10cm に、収束ゼロフラックス面が深度 40cm に存在することが分かる。土壌水分の測定深度が 4 深度しかないため、両方のゼロフラックス面の存在深度を正確に指摘することは難しいが、土壌条件も踏まえて

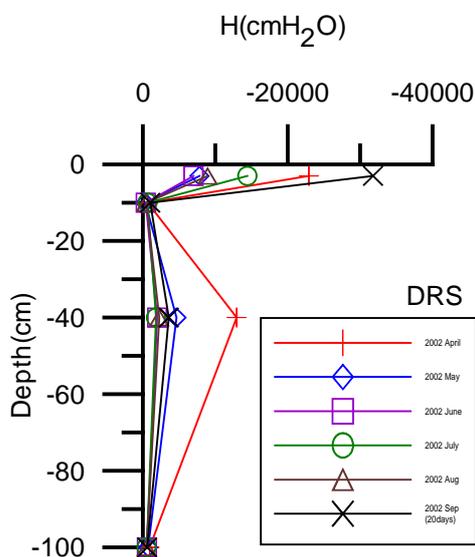


Fig. 3 Monthly mean total head profiles of DRS from April to September in 2002

考えると、少なくとも DZFP は深度 10cm にあると判断しても良い。このような DZFP は他のサイトでも同様に出現しており、深度 10cm より上方に水分移動、つまり蒸発散に寄与する土壌水があることが分かる。さらにその動水勾配は大きく地中蒸発散活動が激しいことが推測される。

BTS では見られなかったが、MGS と DRS では深度 40cm には CZFP が出現し、それは夏に向かって徐々に消失していった。これは降雨が多くなり、それに伴って下

方への水分移動が激しくなってきたため、土壌マトリックスの水分が増加（吸引圧が減少）していることを意味している（Fig. 1）。この傾向はやはり他のサイトでも同様であった。Fig. 3 から必ずしも深度 40cm の土壌の保水性が高いわけでもないことが分かる。ただ相対的に透水係数は高く、横方向の水分移動があるかまたは前述のようにバイパスの鉛直水分移動の可能性も高く、そのため結果として CZFP も見られると思われる。いずれにしても Fig. 1 にあるように、夏季にはイベント降雨に応じて全深度の土壌水分増加が顕著に見られ、集中的な下方への水分移動が明らかであり、土壌マトリックスのポテンシャル解析と合わせて考えるとマトリックス的な流れを伴いながら、根群やレキによる大間隙的な水分移動が深部まで達すると考えられる。

3.3 水収支

AWS のモニタリング結果を基に、試験域の 2001 年 9 月から 2002 年 8 月までの各サイトの水収支計算を行ない、地下水涵養量の推定を試みた。ただし、本研究では土壌水分ポテンシャルの発散ゼロフラックス面より下の土壌水分変化が直接地下水涵養に寄与すると仮定した。従って、地下水涵養量 GR を以下の水収支計算式から推定した。

$$GR = P - E \quad S_{0-15/25} \quad (1)$$

ここで P は降水量、 $S_{0-15/25}$ は深度 0 から 15cm (MGS, DGS, DRS サイト) または 25cm まで (BTS) の土壌水分貯留量、 E は蒸発散量である。計算対象不飽和帯は地表面から深度 100cm であり、BTS については深度 40cm までとした。

蒸発散量は高橋の方法（高橋，1979）を用い、月平均気温と月降水量の値から月単位で蒸発散量を推定し、月単位で水収支計算を実施した。

本計算において、本試験域は非常に平坦であることおよび各サイトの地表面の降雨時の観測で表面流出がないことを確認（2001 年 8 月の観測によるが、BTS では確認していない）しているため、表面流出は無いと

仮定して計算した。なお、本試験域での高橋の方法の適用については、2000年夏から2001年夏までの気象・水文モニタリングデータを用い、蒸発散量の他の方法との比較検討を行って十分有効であることを確かめた (Kaihotsu et al., 2003)。Table 2 はその計算結果(年計算)を表したものである。

Table 2 Water balance calculation results of four sites from Sep. 2001 to Aug. 2002

	MGS	DGS	DRS	BTS
P (mm)	102.4	(73.2)	103.4	105.0
E (mm)	100.3	(70.1)	100.3	98.6
$S_{0-10/25}$ (mm)	2.1	(-0.9)	4.6	7.1
GR (mm)	0	4	-1.5	-0.7

Table 2 において、DGS はデータ欠測期間が初夏に42日間あったため各値が相対的に小さくなっている。

$S_{0-15/25}$ は全体に小さな値を示しているが、実質的に地表面の植物にとっては重要な水資源であり、非常に少ない降水量で生育することが分かる。

また、結果として降水量のほとんどが蒸発散量であるが、ここでの P は実際には降雪を反映していないので、これに約10%加算して推定降水量とすると、BTSを除くとGRは約10mmから9mmとなり、いわゆる降水量の8から7%になる。BTSについては他のサイトと比べるとわずかに緩やかな斜面上にあるため、GRには結果的に表面流出を含んでいる可能性がある。この結果は年間を通じて蒸発散量が降水量の90%異常を占め、試験域全域で非常にわずかの降水しか浅層地下水(不圧地下水)を涵養しない可能性があることを示唆している。これは予想した値よりはかなり小さめであった。いずれにしても、半乾燥地域でのこのような算定結果はあまりないためここでは比較検討できないが、浅層地下水(不圧地下水)への涵養はおそらく小さな凹地の底部周辺のみ地下水が存在し、地下水涵養もそのあたりで行われ、結果としてそのような凹地の中央に

井戸が掘られていると思われる。これは試験域の井戸分布調査結果からもいえることである。

4. おわりに

得られた結果をまとめると以下ようになる。

1) 夏季に集中的に降雨に応じて下方への鉛直水分移動が見られたが、ポテンシャル解析ではそれは明確ではなく、土壌マトリックスと大間隙の両方による下方への水分移動が推測された。

2) 全水頭プロファイル変化解析から発散ゼロフラックス面が深度10cmに現れ、表層での地中蒸発散が活発であることが伺えた。

3) 本試験域の地下水涵養に寄与している土壌水は降水量の約数%と推定される。

モニタリングデータは十分ではない上、水収支計算には少しまだ精度上の問題があるが、今後さらにモニタリングを実施しながら、広域多点での地下水涵養解析を実施していく予定である。

謝辞

本研究は宇宙航空研究開発機構(JAXA)の支援を受けて行われ、比較研究のために文部科学省科学研究費補助金(No. 13838009)の一部を使用した。

参考文献

- 高橋浩一郎：月平均・月降水量より蒸発散量を推定する式，天気，26巻，12月号，pp.29-32,1979.
 土質工学会教育関係資料編集委員会編：土の試験・調査実習書，東京，401pp.，1975.
 土壌物理性測定法委員会編：土壌物理性測定法，養賢堂，東京，505pp.，1976.
 Brooks, R.H. and Corey, A.T.: *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Papers No3, Colorado State Univ., Ft. Collins, 27pp., 1964.
 Kaihotsu, I., Yamanaka, T., Oyunbaatar D., Ganbold, T., Davaa, G., and Koike, T. Long-term Monitoring by Water Cycle Stations in the Central Part of the Mongolian Plateau, Proceed. 1st Inter. Conf. APHW, 1, pp.117-120, 2003.
 Thornthwaite, C.W.: An approach toward a rational classification of climate, Geogr. Rev., 38, pp., 55-94, 1948.

**Groundwater Recharge at the Several Monitoring Station Sites in Semi-arid Land
- Monitoring Data Analysis in the Study Area of Mongolia -**

Ichiro KAIHOTSU*, Tsutomu YAMANAKA**, Shuichi IKEBUCHI, Toshiharu KOJIRI

* Department of Natural Environmental Sciences, Sogokagaku-bu, Hiroshima University

**Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba

Synopsis

To grasp the real state of groundwater recharge in the large area of the semi-arid land, we carried out monitoring of meteorological and hydrological elements at several sites of the study area that was set up in the Mongolian plateau. The monitoring data analysis in 2001-2002 showed some interesting results to understand real states of downward soil water movement. The divergent zero flux plane (DZFP) occurred at the 10 cm depth from spring to summer in each site. Intensive downward soil water movement with rainfall event in late spring and early - mid summer in the zone below DZFP can be considered to contribute mostly the shallow groundwater recharge. However, the amount of the shallow groundwater recharge was estimated to be less than 10 % of the annual precipitation.

Keywords: Mongolian plateau, semi-arid land, large area, soil moisture, evapotranspiration, groundwater recharge