

山地斜面からの流出過程について

開発土木研究所河川研究室 ○市川嘉輝

1. はじめに

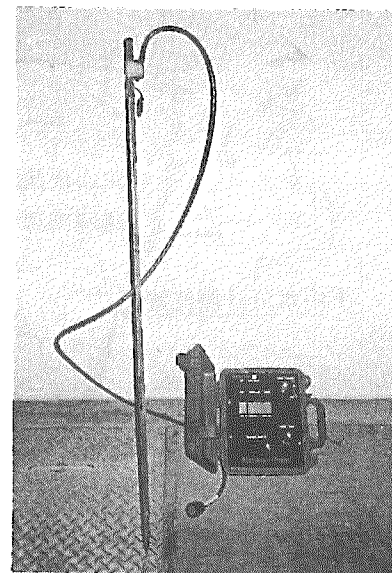
物理的に流出解析を行う場合、降雨の発生によって土壌中の水分量がどの様に変化し、移動するのかを把握することは大きな課題である。これまで、現地斜面において土壌の水分の挙動を把握する方法として、テンシオメータで土壌中のサクシオン圧を計測する方法が広く用いられてきた。サクシオン圧と土壌の体積含水率とは相関関係があり、水分量の推定を行うことは可能である。しかしながら、テンシオメータの計測値から体積含水率の値を推定する為には、これらの関係式が必要であり、精度は式および式中のパラメータに依存する。また、テンシオメータは、この先端に有る、素焼きのポーラスカップと土壌との馴染み具合や、外的要因による不安定性、メンテナンスなどの問題がある。著者らも数年においてテンシオメータを用い計測を行っているが、計測期間の全てで満足するデータが得られたことは無い。

近年、土壌の体積含水率を直接計測可能な計測器が開発された。これは、*Time Domain Reflectometry* 方式を用いた計測器（以後 TDR と呼ぶ）で、テンシオメータと合わせて計測を行った。土中水分の挙動の一つと考えられる中間流出は、斜面断面に採水器を設け、採水および計測を行った。実斜面において行った計測から、体積含水率とサクシオンの関係を示し検討を行う。また、体積含水率とサクシオンの関係についてのパラメータを求め二次元流出計算を行い、この計算結果と実斜面計測値との比較を行い、実斜面土壌の水分変化について検討解析を行う。

2. TDR について

本研究で用いた TDR（カナダ GS.gabel 社製）は、大きく分けてセンサープローブと、データロガー及び制御部である本体からなり、外これらを繋ぐケーブルと AC 電源ケーブルからなる（写真—1）。

センサープローブは槍状の形をしており、設置の際、土壌に同形状の鋼棒を打ち込み、引き抜いた後に挿入するため、ほとんど土壌を乱すことなく設置可能である。一本のセンサープローブは単位プローブの組み合わせによって様々な長さになる。本研究で用いたものは上から 15cm, 15cm, 15cm, 15cm, 30cm の計 90cm のタイプである。計測は物質の誘電率の作用を用い、範囲はプローブを中心に半径約 3cm



写真—1 土中水分計(TDR)

Yoshiteru ICHIKAWA

第40回(平成8年度)北海道開発局技術研究発表会

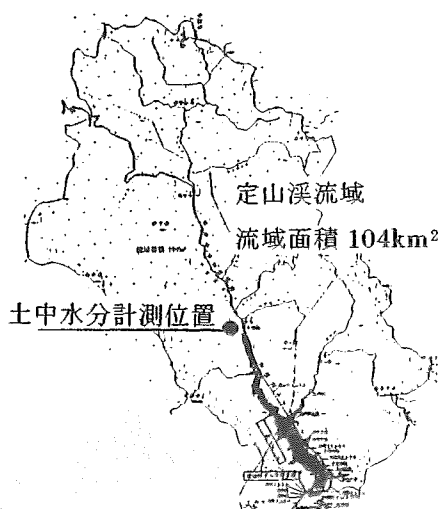
～5cm の円柱状内であり、この範囲内の平均値として出力される。値は直接、体積含水率として示される。

室内において疑似土壌を作り、これの飽和状態から徐々に水分量を減少させたとき（ここで、減少量は任意である）の体積含水率の変化について、TDR の一単位プローブについて計測した値と、土壌を直接採取して計測した値との比較を行い、この結果を図—1 に示す。ここで、白点と線は土壌を採取して求めた値、線は TDR の計測値、

黒点と線は水位を表す。疑似土壌は、約直径 1m 高さ 0.8m の水槽に硅砂 7号を深度 60cm に敷き詰め、底から徐々に水分が抜けるように作成した。TDR のセンサーは、土壌面から直下に位置するものを代表として用い、土壌の採取は TDR の位置する深度より行った。図中の点線から上の範囲は、センサー設置位置及び土壌採取深度を示す。

図—1 によると、試験開始時は水深が 60 cm で、土壌全体が飽和状態にある。この時の体積含水率は、TDR と採取値の双方で 0.35 から 0.40 の範囲内に位置している。試験開始より 7 時間を経過した頃は、水位の低下とともに水分量が減少しているのがわかる。このとき、TDR と採取値はほぼ同じ値を示している。試験終了時は、TDR と採取値に多少違いが見られる。試験全体では、TDR は水位の変化に伴う体積含水率の変化を良く表しているものと考えられる。

3. 試験斜面および計測結果

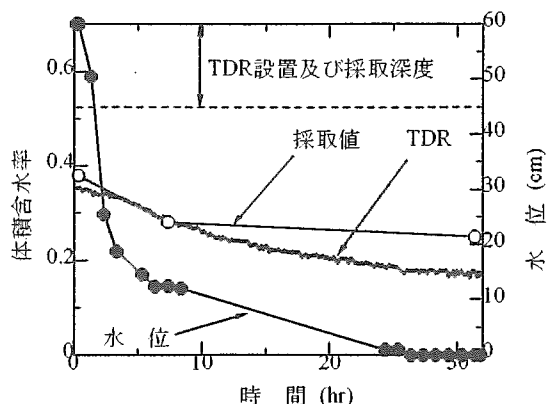


図—2 試験斜面位置図



写真—2 現地写真

現地計測は、図—2 に示す定山渓ダム流域のダム湖上流に位置する小樽内川近傍の一斜面で行った。斜面は、およそ 33° ～39° のほぼ一様と見られる勾配であり、エゾマツ・トドマツ等の植生が生息している（写真—2）。地質状態は、表層の 20cm から 50cm が腐植土層で、以下が凝灰質砂礫層で形成されている。地表から下、鉛直深度の 4m から 5m



図—1 室内における TDR と採取値の比較

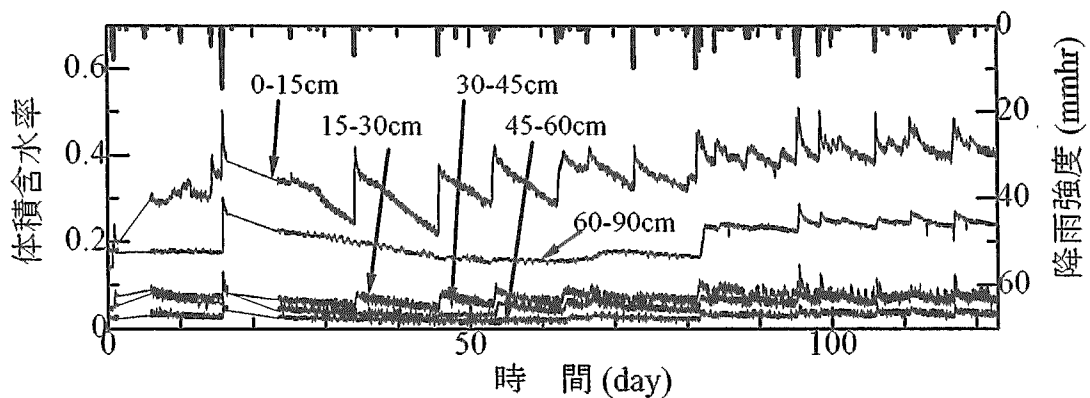


図-3 体積含水率および降雨強度図

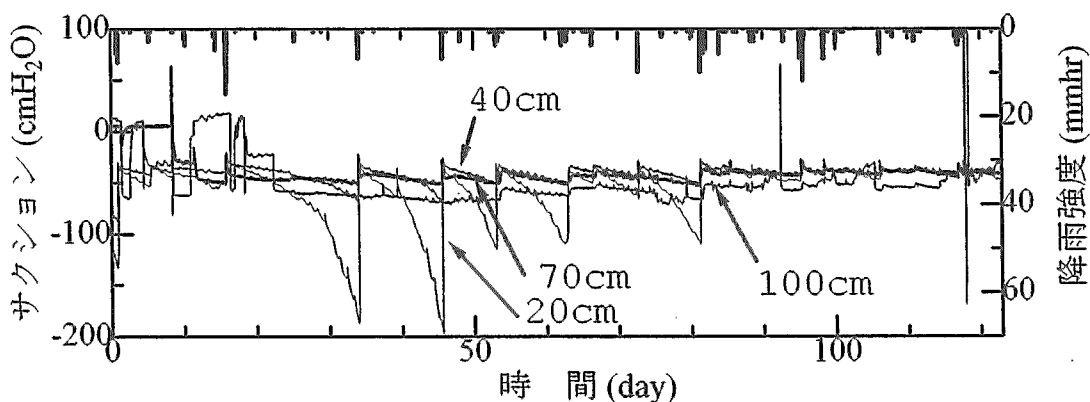


図-4 サクシオンおよび降雨強度図

ほどの所に基岩層が有る。

テンシオメータは、試験斜面の下から上へ10m間隔に5箇所(斜面下方からst1, st2, st3, st4, st5とする)に配置し、1箇所当たり4深度(20cm, 40cm, 70cm, 100cm)に設置している。TDRは、テンシオメータ設置個所のst1, st3, st5付近の同じ標高の所に設置した。斜面土壤中からの流出は、st1付近の同じ斜面高に、幅100cm深さ60cmの断面を作り、ここに採水器を設置し、流出した水分を採取したと同時に転倒ますで計測を行った。ここで用いた計測データは、平成8年7月1日から10月31日までのものである。降雨データは北海道開発局の小樽内川観測所の既存のデータを用いた。

試験斜面におけるTDRを用いた体積含水率の計測結果を図-3に、サクシオン圧の計測結果を図-4に示す。ここで、図-3および図-4は土壤中の水分変化の様子を現す代表としてst1の計測結果を用いた。図-4において、サクシオン圧の値が負値へ向かうとサクシオンが大きくなるとし、正值へ向かうとサクシオンが小さくなるとした。

図-3および図-4によると、土壌の水分量が減少するとサクシオンは大きくなり、降雨が発生し土壌の体積含水率が急に大きくなるとサクシオンは急に小さくなっている。これらの現象から試験斜面においても、明らかに相関関係があるものと考えられる。土壌の体積含水率およびサクシオンの増加・減少の変化は、土壌が連続的に降雨を受けたことによって土壌の貯留量が増加したことから小さくなり、同時に透水性が高くなったため、深度の深いセンサーにおいても降雨強度の影響が現れやすくなっている。深度の一番浅い位

置で、現象が外より大きく現れているのは、浸透や植生の影響および降雨を直接受けるためと考えられるが、地質的影響が最も大きいと考えられる。

4. 二次元流出計算

試験斜面における流出の物理的な解析を行うため、二次元不飽和浸透解析²⁾³⁾を行い、その基礎方程式として、(1)式の Ricard's の式を示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで、 θ は体積含水率、 t は時間、 x は斜面方向単位長、 z は斜面と鉛直方向の単位長、 V_x は x 軸方向の流速、 V_z は z 軸方向の流速を示す。

$$V_x = -K \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \quad (2-a)$$

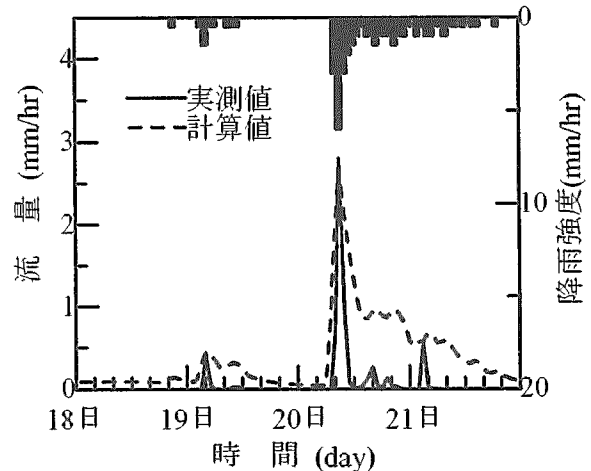
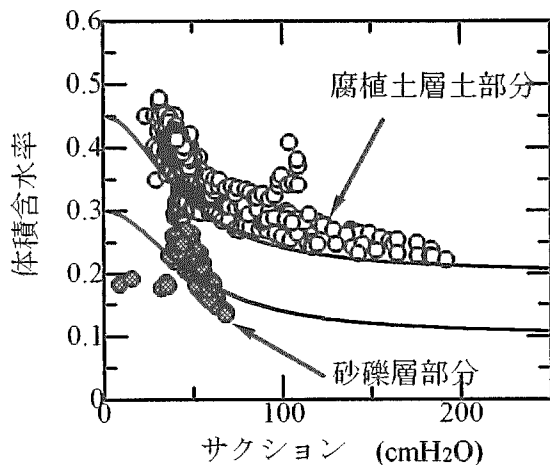
$$V_z = -K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \quad (2-b)$$

V_x 、 V_z はダルシー則に従うと仮定し、(2-a)式、(2-b)式に示す。ここで、 ψ はサクション、 α は斜面勾配、 K は不飽和透水係数を示す。前述の(1)式、(2-a)、(2-b)式に関するサクションと体積含水率との関係、および、不飽和透水係数と体積含水率との関係を(3)式、(4)式に示す。ここで、 K_s は飽和透水係数、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r はもう移動がないと考えられる体積含水率、 a 、 β は定数を示す。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{a^2}{a^2 + \psi^2} \right) + \theta_r \quad (3)$$

$$K = -K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (4)$$

上記の計算式を用い試験斜面に降雨が発生したときの流出計算を行い、現地で計測した値との比較、また、土中の体積含水率とサクションの挙動についての計算結果を示す。これらより、斜面土壌中の水分移動の様子について検討を行う。ここで、計算期間は9月18日1時から9月21日24時までの96時間とし、降雨強度は試験斜面で計測したものをを用いた。物理的に流出解析を行う場合、体積含水率とサクションの関係を把握することが必要であり、この関係を図—3 および図—4 に示した値を用い図—5 に示すこととし、(3)式の関係も合わせて示す。ここで、白丸は腐植土層に位置すると考えられる TDR が 0~15 cm、サクションが 20 cm に位置するセンサーの値を示し、黒丸は砂礫層に位置すると考えられる TDR が 15 cm~90 cm、サクションが 40 cm、70 cm、100 cm に位置するセンサーの値の平均値を用いた。(3)式のパラメータの値として、腐植土層部分には $\theta_s=0.45$ 、 $\theta_r=0.20$ 、 $a=45$ 、砂礫層部分には $\theta_s=0.3$ 、 $\theta_r=0.10$ 、 $a=50$ を用いた。(4)式のパラメータの値として、飽和透水係数 K_s は現地砂から変水位法で得られた値である $K_s=1.5 \times 10^{-2}$ cm/sec で与えられ、 $\beta=2.2$ を用いた。計算において土壌は底面を基岩とする矩形縦断面で、腐植土層を 0.4 m、砂礫層を 3.6 m とし、これらは各層で均質な土壌であるとした。斜面長は 50 m、勾配は $\alpha=35^\circ$ とした。試験斜面からの流出変化と計算による流出変化を図—6 に示す。ここで、計算値は試験斜面の採水断面と同じ深度からの流出値である。図—6 によると、実測値では降雨の発生と停止に対する流出の増加と減衰の様子ははっきり現れており、小降雨に対する応答は殆ど見られない。計算値では、降雨の減衰に対し実測値の様な流出の減衰は見られない。これは、土壌水分の増加時と減衰時では、体積含水率とサクションの関係に二価の関係（ヒステリシス）があり、計算値では一価の式であった



図—5 体積含水率とサクシジョンの関係図 図—6 実流出と計算による流出比較図

ためと考えられ、流出においてこの影響は大きいものと考えられる。また、降雨に対し流出の応答は小降雨や流出のピークで過敏であるが、計算値は実測値の流出形態をほぼ満足しているものと考えられる。

降雨の発生によって、体積含水率やサクシジョンの分布がどの様に変化するのか、二次元計算によって推定した結果を時間を追って示す。計算期間における降雨強度図を図—7に、サクシジョンおよび体積含水率の分布をコンター図として図—8 から図—10 に示す。ここで、図—7 中の(1)点から(3)点は、土壤中をコンター図で表す時間を示す。図—8 から図—10 のコンター図は、図中の上段がサクシジョン下段が体積含水率を表し、これらの右が斜面上端、左が斜面下端を表す。図—7 によると、(1)点は降雨の発生前であり、図—8 でサクシジョンは基岩付近で一番高く現れている。体積含水率では、基岩付近で値が高い外、保水性の高い地表面の値も高く現れている。図—7 において降雨期間中である(2)点に当たる図—9 および降雨停止後である(3)点に当たる図—10 によると、降雨の発生中ではサクシジョンの値が地表面で大きく、停止後しばらくして下層に降雨の影響が現れている。体積含水率についても若干ではあるが、地表から下層へ水分の移動がみとめられる。

5. おわりに

土壤の水分変化の様子を把握するため、従来から用いられているテンシオメータによる計測方法の外に、TDRによる計測方法を挙げた。硅砂を用いた室内試験において、採取した試料との比較の結果、TDR は体積含水率の計測を行うのに有効な手法であると考えられる。実斜面での計測結果では、サクシジョンと体積含水率には相関関係が有ることが改めて確認でき、また、土質の異なる土壤による相関関係の違いも明確にすることが出来た。計測結果から得られたパラメータによって行った二次元計算では、斜面土壤からの流出をほぼ再現することが出来、土壤中の水分分布の推定を行うことが可能であった。

参考文献

- 1)市川嘉輝, 渡邊康玄; 実流域斜面における土中水分の変化について, 土木学会北海道支部論文報告集, 52号, 1996
- 2)日野幹雄, 太田猛彦, 砂田憲吾, 渡辺邦夫; 洪水の数値予報, 森北出版株式会社, 1989
- 3)市川嘉輝, 清水康行, 橋本識秀, 藤田睦博, 山本太郎; 地下水流を考慮した流出モデルに関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 49号, 1993

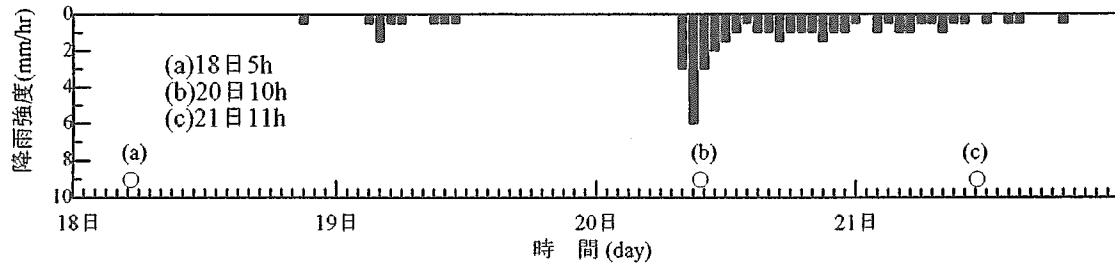


図-7 降雨強度図

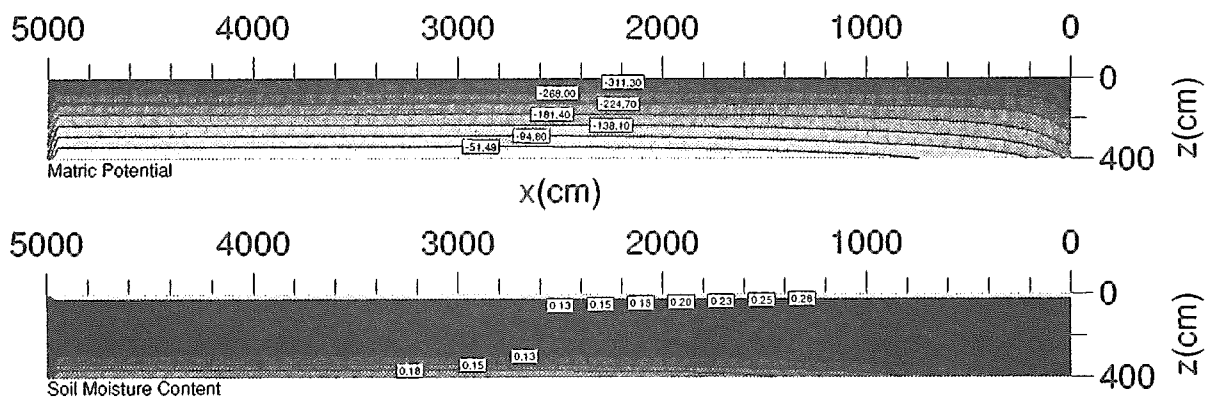


図-8 サクシオンおよび体積含水率の分布図 (a) Time=18日5h

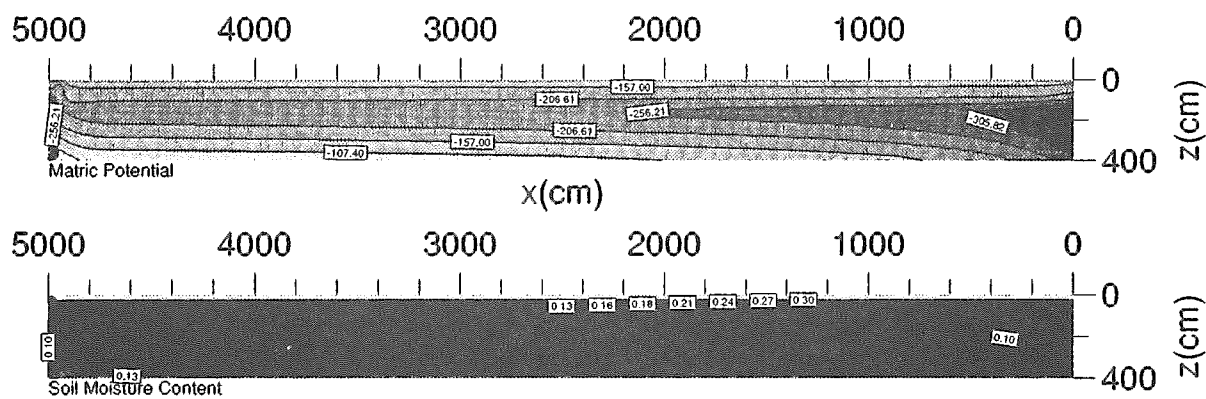


図-9 サクシオンおよび体積含水率の分布図 (b) Time=20日10h

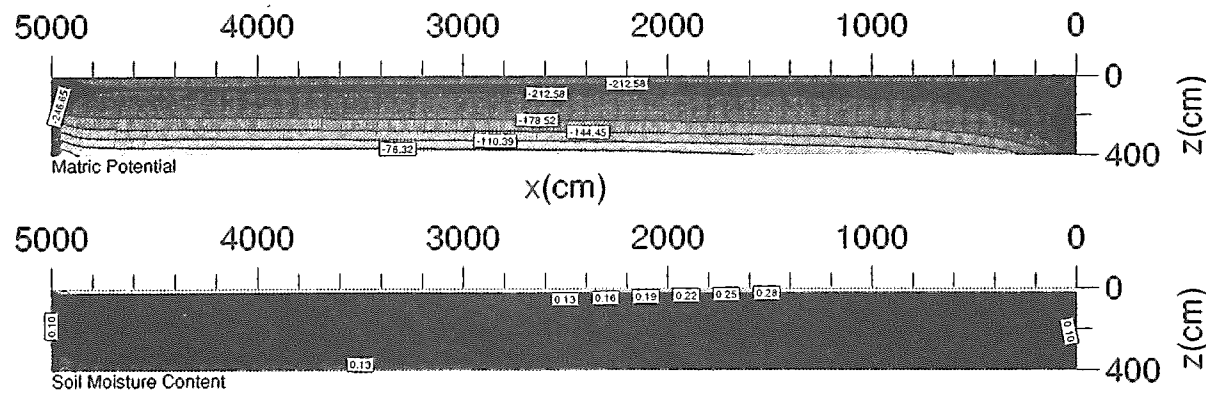


図-10 サクシオンおよび体積含水率の分布図 (c) Time=21日11h