

不飽和シラス地盤での蒸発を考慮した伝熱・浸透挙動のモデル化

Modeling taken account of evaporation for heat transfer and seepage in unsaturated soil

宮本 裕二*, 酒匂 一成**, 島田 龍郎***, 北村 良介****

Yuji MIYAMOTO, Kazunari SAKO, Tatsuro SHIMADA, Ryosuke KITAMURA

*正会員 工博 鹿児島県土木部 (〒890-8577 鹿児島市鴨池新町 10-1)

**学生員 工修 鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程システム情報工学専攻
(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

***学生員 鹿児島大学大学院博士前期課程海洋土木工学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

****正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

The heat transfer and seepage behavior in unsaturated soil should be investigated to analyze the mechanism of slope failures and predict their occurrence due to heavy rainfall. From this view point the numerical model taken account of evaporation was proposed in this paper. The numerical experiments were carried out to prove the validity of proposed model, i.e., the amount of rainfall and temperature in soil were used as input data and the calculated suction was compared with that obtained by field measurement. It was found that the proposed model may be promising for the investigation of heat transfer and seepage behavior in unsaturated soil.

Key words : phase change, temperature, model for voids, heat transfer, suction, unsaturated-saturated permeability coefficient

1. まえがき

鹿児島県本土を含む南九州には、火砕流堆積物の非溶結部であるシラスを含む地盤が広く分布している。梅雨期、台風期の降雨によるシラス斜面崩壊は、表層すべり型の斜面崩壊に分類される¹⁾。一方、通常の気象条件下ではシラス台地縁辺部の斜面は鉛直に近い角度で自立する。これは、シラスの土粒子形状や固結によるインターロッキング効果、サクシオン等が影響している²⁾。北村ら³⁾は降雨による斜面崩壊を予知するためのシステムを提案している。本システムは、現地で計測される降雨時の雨量と気温・地中温度、無降雨時の気温・地中温度を入力データとして計算されるサクシオンによって斜面の安定性を常時監視しようとするものである。すなわち、無降雨時のサクシオン変化をシミュレートするためには不飽和土の間隙水の挙動をモデル化する必要がある。

本論文では、不飽和地盤の蒸発について若干の考察を行い、宮本ら⁴⁾が提案している伝熱・浸透モデルを発展させ、蒸発を考慮した数値力学モデルの提案とそれを用いた数値実験を行っている。すなわち、実測降雨データ、温度データを用い、サクシオンの現地計測結果と計算結

果を比較・検討することにより提案モデルが実地盤の伝熱・浸透挙動を定量的に評価できることを明らかにしている。

2. 蒸発挙動のモデル化

地盤を構成する土は土粒子、間隙水、間隙空気から成り立っている。地盤での蒸発とは、日射等によって、間隙内に存在する水が水蒸気へ相変化⁵⁾し、地表面から大気へ放出される現象である。日射、風力、湿度の変化等によって生じる間隙水の蒸発は、地盤の含水状態に深く関連している。蒸発量は、バルク式に基づく方法や需要(大気)、供給(土壌)の関係を比較して評価している⁶⁾。前者は風速、気温、比湿、地表面の温度、地表面の粗度を用いて上は圧量を近似的に評価している。渡辺⁷⁾は蒸発散量の測定、及び植生の違いによる蒸発散量の違いについて研究を進めている。本論文では、表層に日射により表層へ与えられる熱量を簡易に測定できる地中温度より仮定し、蒸発挙動をモデル化する。図-1 は、一次元地盤表層部の伝熱挙動および蒸発についての模式図である。本論文では、日射による地盤への熱流量は、温度変

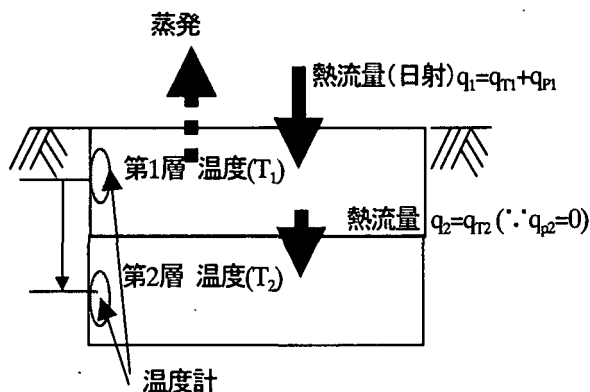


図-1 一次元地盤での伝熱・蒸発の模式図

化に費やされる熱量と蒸発に費やされる熱量として次式で表す。

$$q_x = q_{Tx} + q_{Px} \quad (1)$$

ここに、 q_x : x 層への熱流量、

q_{Tx} : x 層で温度変化に費やされる熱量、

q_{Px} : x 層で蒸発に費やされる熱量。

熱伝導は、物質の移動なしに熱が高温部から低温部へ伝達される現象である。対象とする土塊の熱伝導率がわかれば熱伝導方程式による解析が可能である。しかし、土は土粒子（固相）、水（液相）、空気（気相）により構成されるため、温度、飽和度、間隙比等の地盤状態の変動に伴い熱伝導率も変化する。よって、宮本ら^{8,9)}は室内試験および土の熱伝導率のモデル化により土の熱伝導率を検討し、次式を提案した。

$$q_i = \lambda_i \cdot \Delta T \cdot \frac{A_i}{h} \quad (2)$$

$$q_x = \sum q_i \quad (= q_{\text{soil particle}} + q_{\text{water}} + q_{\text{air}}) \quad (3)$$

($i = \text{soil particle, water, air}$)

ここに、 q_i : 各相（土粒子、水、空気）の熱流量、

λ_i : 各相の熱伝導率、

ΔT : 2点間の温度差、

A_i : 各相の面積

（飽和度、間隙比による換算断面）、

h : 2点間の距離。

時間 t で温度 $T_x(t)$ の第 x 層に、 α 分間で Δq_{Tx} の熱量が与えられるとき、時間 $(t+\alpha)$ の第 x 層の温度 $T_x(t+\alpha)$ は次式で示される。

$$T_x(t+\alpha) = T_x(t) + \frac{\Delta q_{Tx}}{\sum c_i \cdot \rho_i \cdot V_i} \quad (4)$$

($i = \text{soil particle, water, air}$)

$$\Delta q_{Tx} = q_{Tx} - q_{Tx+t} \quad (5)$$

ここに、 Δq_{Tx} : 第 x 層に供給された熱量、

c_i : 各相の比熱、

ρ_i : 各相の密度、

V_i : 各相の体積。

以上を用いることによって、日射の地表面への熱流量 q_1 を算定することができる。算定の手順を次に示す。

- ① 第1層の温度 T_1 を α 分間隔で計測する。
- ② 第1層の温度変化がない場合は、蒸発に用いられる熱量 q_{p1} は0とする。
- ③ 第1層の温度が変化する場合、時間 t での第1層、第2層の温度 T_1 , T_2 を式 (2), (3) に代入し、第1層から第2層への熱流量 q_2 ($=q_{T2}$) を計算する。
- ④ 時間 t , $(t+\alpha)$ に第1層で計測した温度 $T_1(t)$, $T_1(t+\alpha)$ を式 (4) に代入し、 Δq_{T1} を計算する。
- ⑤ 式 (5) に③, ④で計算した q_{T2} , Δq_{T1} を代入することにより q_{p1} が算定できる。

近藤¹⁰⁾は、地球上の平均値では地表面が吸収した放射エネルギーの約80%は地表面に存在する水を蒸発させるのに費やされるとしている。そこで、日射の地表面への熱流量 q_1 は、放射エネルギーに比例すると仮定する。そのとき、蒸発に費やされる熱量 q_{p1} は次式で示される。

$$q_{p1} = \beta' \cdot q_1 \quad (6)$$

ここに、 β' : 放射エネルギーに依存する係数 ($\beta' \approx 0.8$)。

式 (1), (6) より次式となる。

$$q_{p1} = \beta \cdot q_{T1} \quad (7)$$

ここに、 $\beta = \beta' / (1 - \beta')$

($\beta' \approx 0.8$ のとき、 $\beta = 4.0$)。

相変化の過程である蒸発は熱の吸収を伴い、それを蒸発潜熱という¹¹⁾。図-2に水の蒸発潜熱と温度の関係を示す。図-2より、蒸発潜熱は温度が高いほど小さい値を示す。これは、水の温度が高いほど小さい熱量で蒸発過程が進行することを意味している。蒸発量は次式で示される。

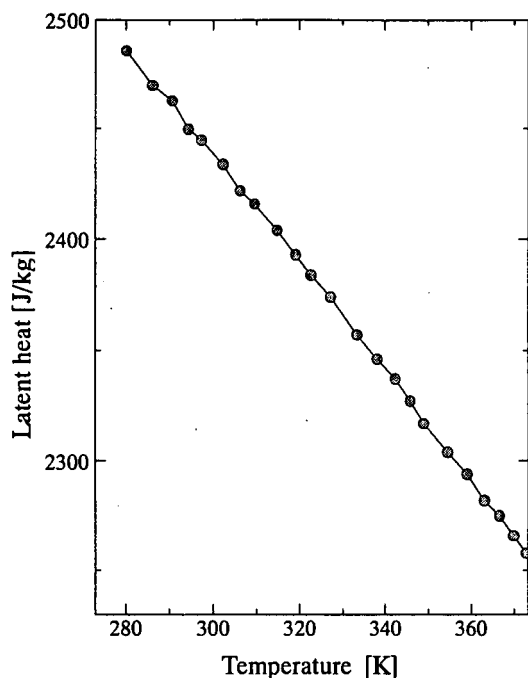


図-2 水の蒸発潜熱と温度の関係¹¹⁾

$$\Delta V_w = \frac{q_{pl}}{\rho_w \cdot Q_w} \quad (8)$$

ここに、 ΔV_w ：蒸発量、
 Q_w ：蒸発潜熱。

式 (8) 中の蒸発に費やされる熱量 q_{pl} は式 (1) ～ (7) で説明したとおり、地中温度 (10cm, 20cm) から算定している。密度・蒸発潜熱も温度に依存する物性を示すことから、図-2、式 (8) より、地中温度が高いほど蒸発しやすい状態にあることがわかる。

3. 伝熱・浸透挙動のモデル化⁴⁾

地盤の伝熱形態には、熱伝導、対流熱伝達、輻射が考えられる。しかし、輻射による伝熱は他と比較して微小であるので、地盤内の伝熱は熱伝導と間隙流体の移動による対流熱伝達によるものとする。伝熱・浸透モデルに関しては、宮本ら⁴⁾が既に提案しているため、ここでは、モデルの特徴である間隙モデルの説明のみを行う。

間隙モデルは、試料の体積含水率-サクション関係 (水分特性曲線)、体積含水率-不飽和・飽和透水係数の関係を求めるためのものである。図-3(a) は、2, 3 個の土粒子からなる土塊の一要素を示したものであり、これを図-3(b) のように間隙部分を管径 D 、傾き θ の円管に、土粒子実質部分を円管以外の不透水性の個体にモデル化した。このようにモデル化されたものを間隙モデルと称している。間隙モデルに、いくらかの力学的及び確率論的成果を援用することによって、間隙比 e や体積含水率 W_v 、

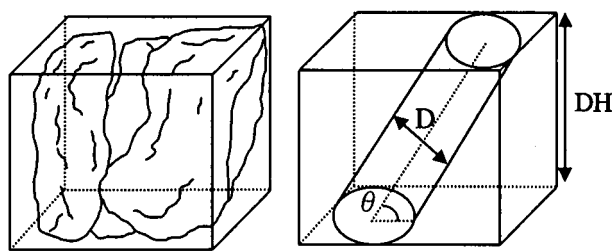


図-3 (a) 土塊の微小要素 図-3 (b) モデル化された一要素
図-3 間隙のモデル化

水頭 h_c 、サクション s_u 、不飽和・飽和透水係数 k が以下に示す式のように得られる。

$$e = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (9)$$

$$W_v = \frac{e(d)}{1+e} = \frac{1}{1+e} \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (10)$$

$$h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma_w \cdot d} \quad (11)$$

$$s_u = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (12)$$

$$k = \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\pi \gamma_w D^3 \sin \theta}{128 \mu (D/\sin \theta + DH/\tan \theta)} P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (13)$$

ここに、 V_p ：円管の体積

DH ：素体積高さ、

V_e ：素体積全体の体積

$P_d(D)$ ：管径 D の確率密度関数、

$P_c(\theta)$ ：円管の傾き θ の確率密度関数

T_s ：水の表面張力、

μ ：水の粘性係数、

α ：毛細管と水の接触角、

γ_w ：水の単位体積重量、

d ：間隙水を保持する円管の最大管径。

4. 現地計測および数値実験

4.1 サクション、温度の現地計測¹²⁾

図-4 に現地計測の概略図を示す。現地計測システム設置の目的は、原位置における地盤内の浸透挙動を把握することである。本論文では地盤内の水分状態を把握するため、テンシオメータを用いて地盤内のサクションを計測している。本報告で用いている基本的な計測システムはテンシオメータ（20、40、60、80cm の深さに計 4 本）、転倒ます式雨量計、温度計（深さ 0、10、20、30、40cm）とデータロガーから構成される。

計測データは、電話（有線、無線）、光ファイバケーブル等の通信手段を介して研究室のパソコンに回収されている。また、テンシオメータのセンサーは防水でないことと、水タンク部に直射日光が当たることを避け日周期の変動を抑える目的からテンシオメータ上部水タンク部を断熱カップで覆い保護している。

図-5 は、1996 年の鹿児島県日置郡伊集院町における現地計測結果を示したものである。

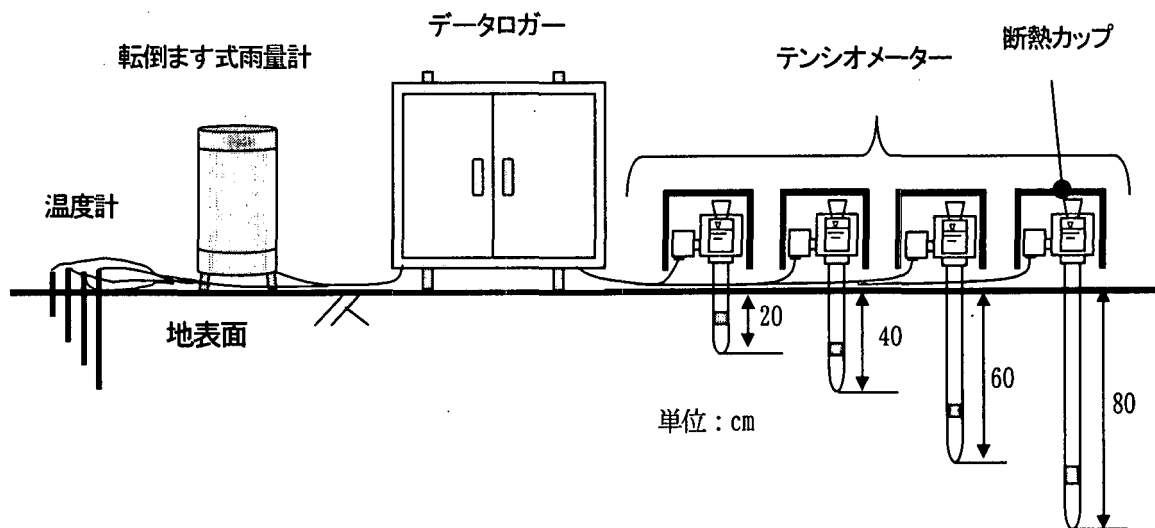


図-4 現地計測システム概略図

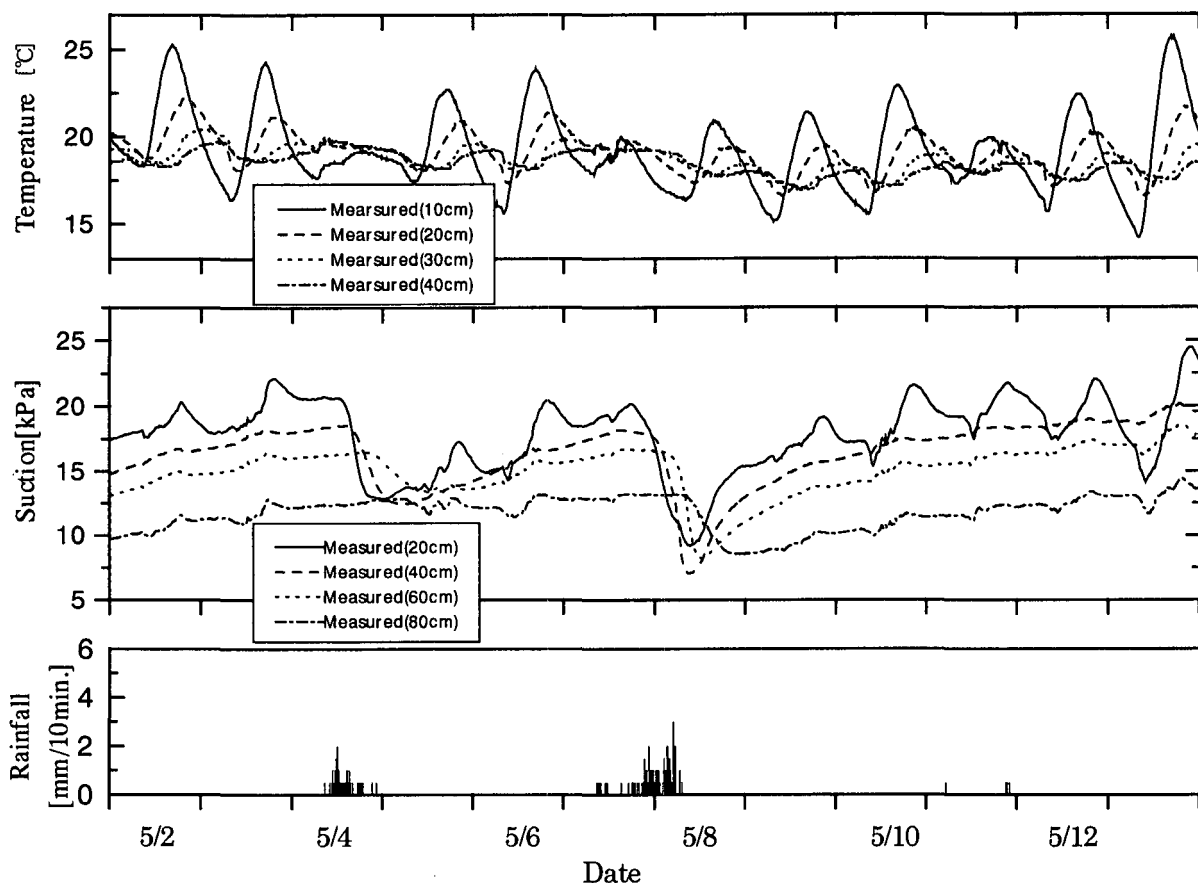


図-5 現地計測結果

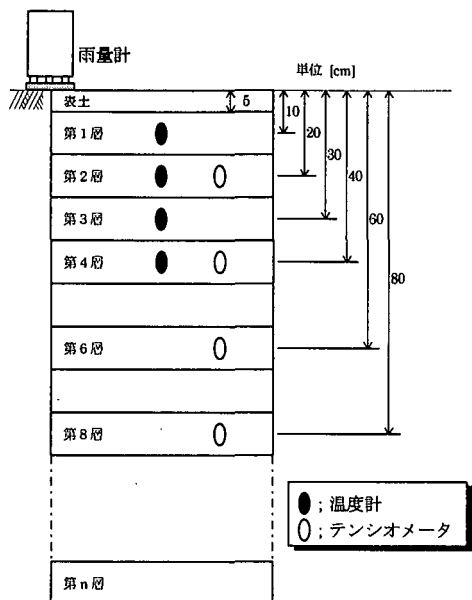


図-6 鉛直一次元地盤の模式図

表-1 地盤条件

層数	30
面積 [cm ²]	100
層厚 [cm]	10
土粒子の密度 [g/cm ³]	2.401
土粒子の比熱 [J/(g・K)]	0.8
土粒子の熱伝導率 [J/(m・K)]	1.5

4.2 数値実験

現地を想定した鉛直一次元での地盤の蒸発を考慮した伝熱・浸透挙動をモデル化し、数値実験を行った。実地盤に対応した模式図および地盤条件を図-6、表-1に示す。数値実験手順のフローチャートを図-7に示し、各項目について説明する。なお、本手順においては各時間ステップでの間隙水の質量保存を確認しながら計算を進めている。

①地盤条件は、初期条件は表-1に示す地盤の諸物理量を入力する。初期値として、現地での計測温度を入力する。深さ40cm以深の層では、深さ40cmと同温を入力する。また、サクシジョンの初期値として深さ20cmに現地計測データを与え、その他の深さの各層では、20cmのサクシジョンから間隙水が移動しない動水勾配を計算し、サクシジョンが生じない飽和領域の間隙水圧は静水圧とした。間隙モデルより水分特性曲線を算定し、各層の飽和度を計算する。境界条件は、側方・下方は断熱・非排水、地表面は熱移動および降雨浸透、蒸発による排水が可能である。

②現地計測の雨量、深さ10cmの温度を与える。

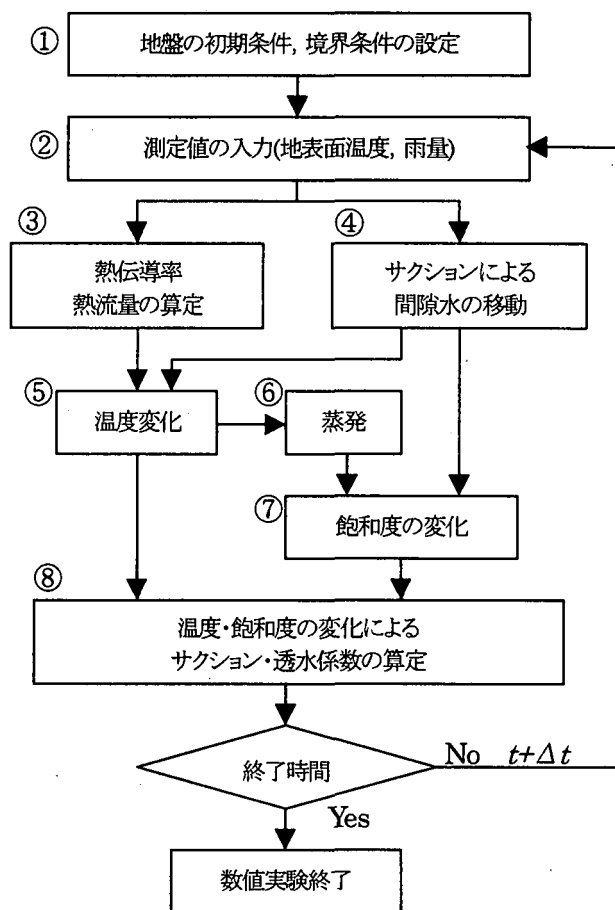


図-7 数値実験手順のフローチャート

③熱伝導率は飽和度、間隙比から換算、熱流量は式(2)、(3)を用いて各層毎に計算する。温度が異なることによって生じる密度差に関する対流熱伝達とは考慮していない。

④各層の温度、飽和度と間隙モデルによりサクシジョン、透水係数を算定し、ダルシー則に従って間隙流体の移動量を算定する。

⑤温度変化は式(4)から計算する。また、温度の異なる層間での間隙流体の移動による温度変化を計算する。

⑥既述した蒸発モデルにより蒸発量を算定する。

⑦サクシジョンおよび蒸発による間隙流体の移動後による各層の飽和度を算定する。

⑧上に示した⑤、⑦により計算した各層の温度・飽和度の変化を重ね合わせてサクシジョン、透水係数を計算する。

室内試験によって得られた採取試料の諸物性値を表-2に示す。間隙モデルの入力に用いた粒径加積曲線を図-8に示す。また、採取試料の保水性試験(土柱法)および飽和透水試験と間隙モデルによる算定結果との比較を図-9に示す。

表-2 採取試料の諸物性値

採取試料	シラス
土粒子密度 $[g/cm^3]$	2.401
間隙比	1.287
含水比 $[\%]$	18.9
飽和透水係数 $[cm/sec]$	1.17×10^{-4}

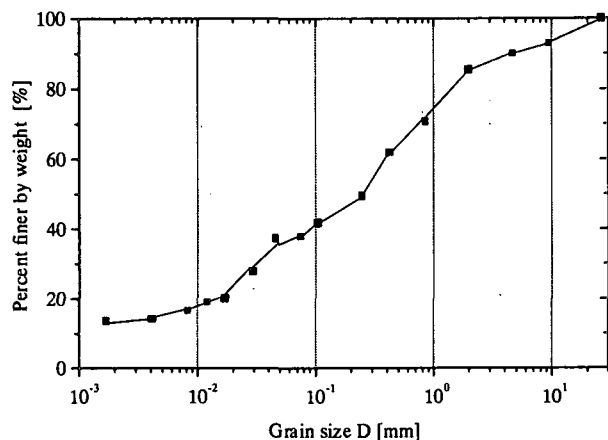


図-8 粒径加積曲線 (シラス)

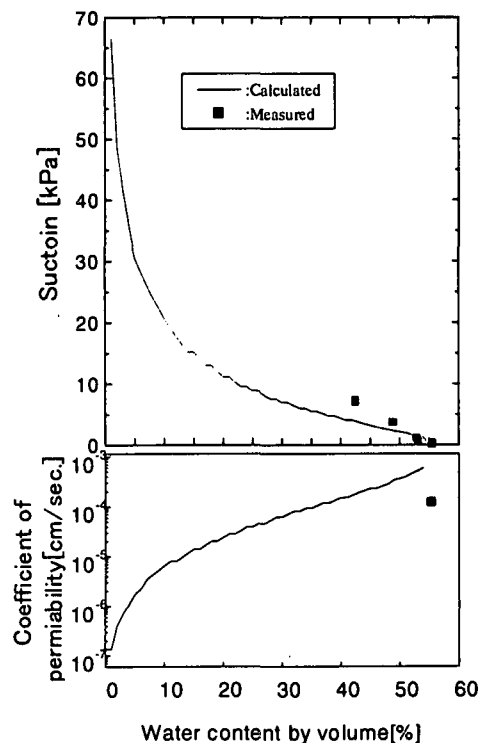


図-9 シラスの水分特性曲線

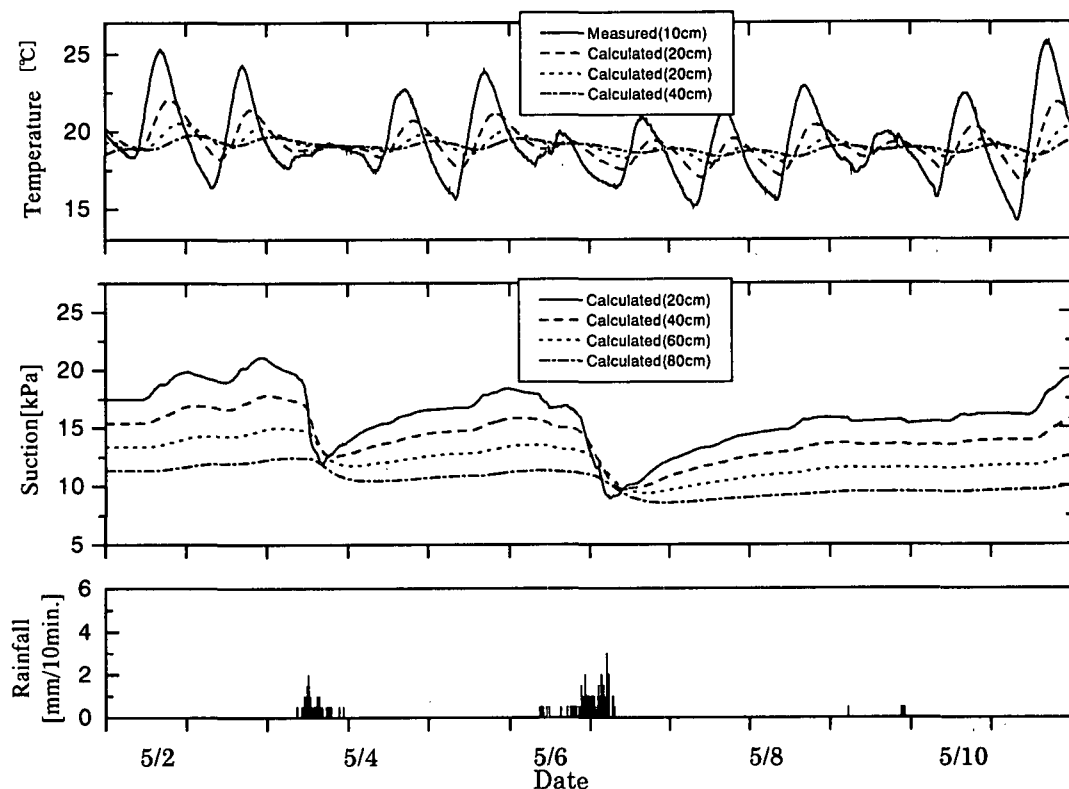


図-10 温度変化、蒸発を考慮した数値実験結果

4.3 実験結果

図-10 は、図-5 に示す 1996 年 5 月の現地計測結果に対応する数値実験結果である。図-5 と図-10 を比較するとサクション、温度ともにほぼ同様の傾向を示していることがわかる。数値実験結果に着目すると、降雨時

に地盤表層に近い深さ 20cm のサクションの変化が大きく、その後のサクションの回復も顕著である。また、表層の蒸発に関しても深さ 20cm のサクションの変化に日周期的な変化がみられる。

降雨前後のサクションの変化を図-11 に示す。計測値、数値実験による計算値とともに深さ方向に徐々に雨水の

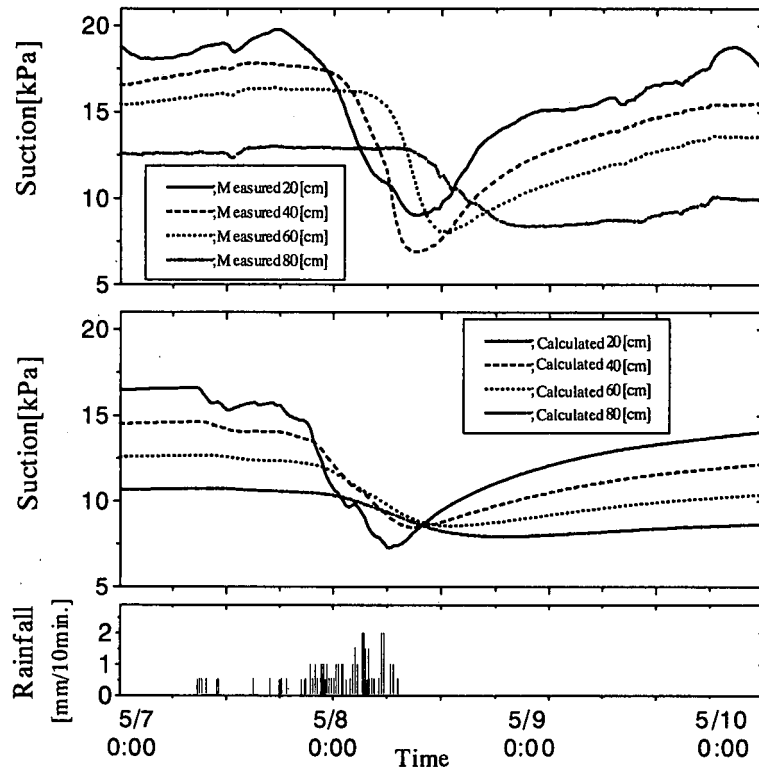


図-11 サクションの計測値と計算値の比較

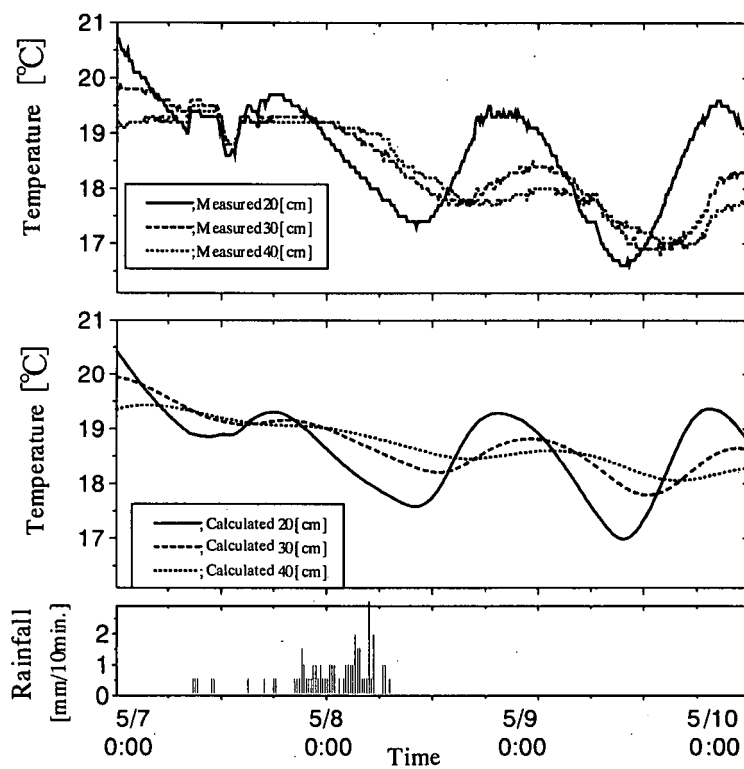


図-12 地中温度の計測値と計算値の比較

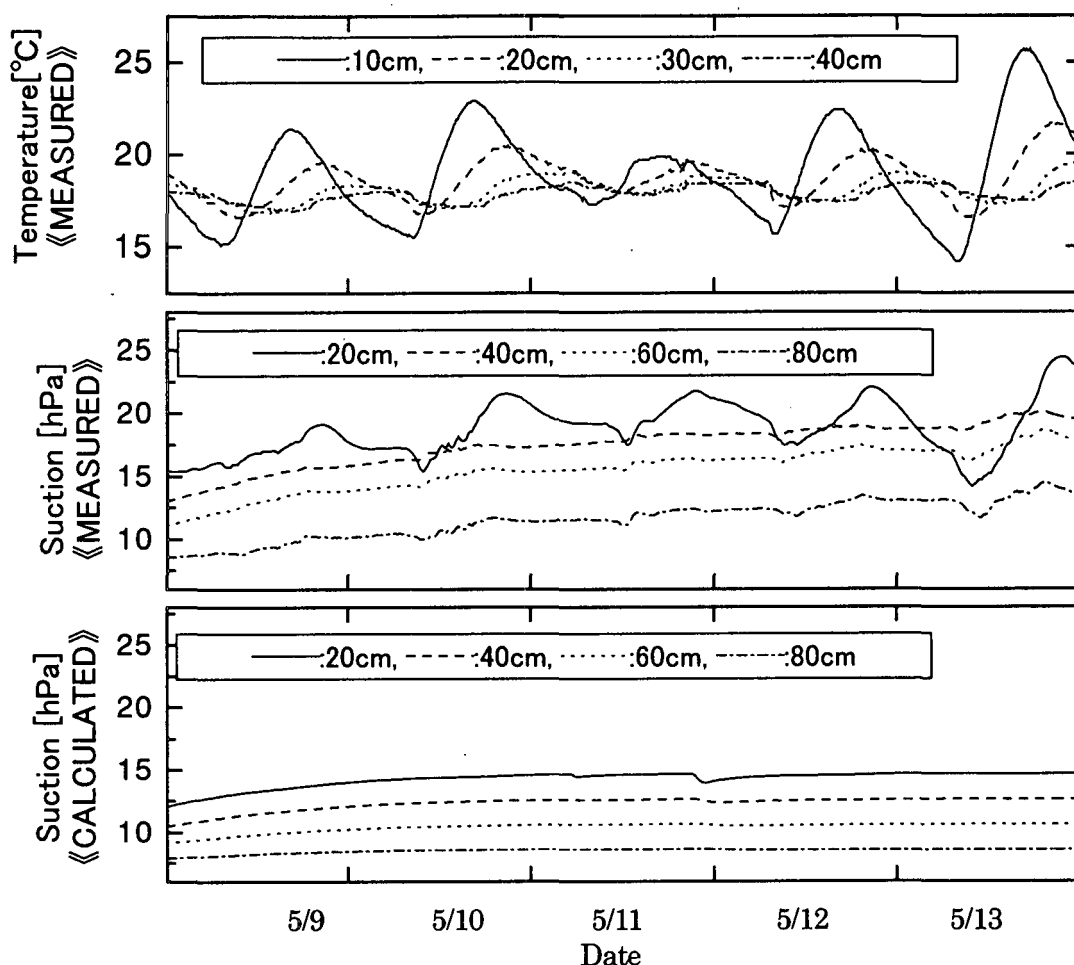


図-13 地中温度、サクシジョンの現地計測結果と温度のみを考慮したサクシジョンの数値実験結果

浸透が起き、深さ 20, 40, 60, 80 [cm] の順にサクシジョンが変化している。降雨後のサクシジョンの回復は、現地計測結果が徐々に大きくなっているのに対し、計算値の回復が小さく、雨水が蓄積される傾向にある。これは、本モデルに表層の蒸発及び地盤最下部の排水を考慮していないためである。

図-12 に、地中温度の計測値と計算値の比較を示す。これより、計測値と計算値ともほとんど一致していることがわかる。以上より、本モデルがシラス地盤の伝熱、浸透挙動をほぼ定量的に評価できることが明らかとなった。

図-13 は、ほぼ晴天が続いた 5 月 9 日から 13 日にかけての地中温度、サクシジョンの現地計測結果と蒸発を考慮しない場合のサクシジョンの数値実験結果である。現地計測結果のサクシジョン値は徐々に増加している。深さ 20cm のサクシジョンの日周期的な変化は、テンシオメータの測定誤差¹³⁾も含まれると考えられ、深さ 20cm の地中温度の日周期的な変化と対応している。一方、蒸発を考慮しない数値実験結果では、サクシジョンの変化はほとんどみられない。これは、本モデルでは図-6 に示すように地中での境界が非排水条件であるため間隙水の移動が制限されるためと考えられる。

図-14 (a) は数値実験の入力値である深さ 10cm の地中温度（現地計測）と深さ 20cm の地中温度（数値実験）および蒸発量・深さ 20cm のサクシジョンの数値実験結果を示している。図-14 (a) に示した期間内で日中の温度変化の大きい 5 月 13 日の蒸発量が最も大きく、温度変化の小さい 5 月 11 日の蒸発量が小さい。これは、蒸発量の算定方法として地中温度を用いているためである。具体的には、式 (2) ~ (4) に深さ 10cm, 20cm の地中温度を入力し、温度変化に費やされた熱量を算定する。それを式 (5) ~ (7) に代入し、蒸発量に費やされる熱量を算定し、式 (8) により蒸発量を求めている。また、蒸発による含水比の減少により、サクシジョンも変化しており、5 月 13 日が顕著である。図-10 の 5 月 3 日、4 日でもサクシジョンの変化が顕著であることから地盤の飽和度が小さい（乾燥した状態）ほどわずかな飽和度の減少でサクシジョンが大きく変化しているといえる。また、図-9 の水分特性曲線から考察すると、低含水比領域でサクシジョンが急激に増加することも要因として考えられる。

図-14 (b) は図-14 (a) の地中温度 (10cm) と蒸発量の関係を示している。図-14 (b) より、蒸発量は温度が高いほど大きい値を示す。蒸発量の算定に用いた式 (8) 中の蒸発潜熱は、温度が高いほど小さい値となる物性を持

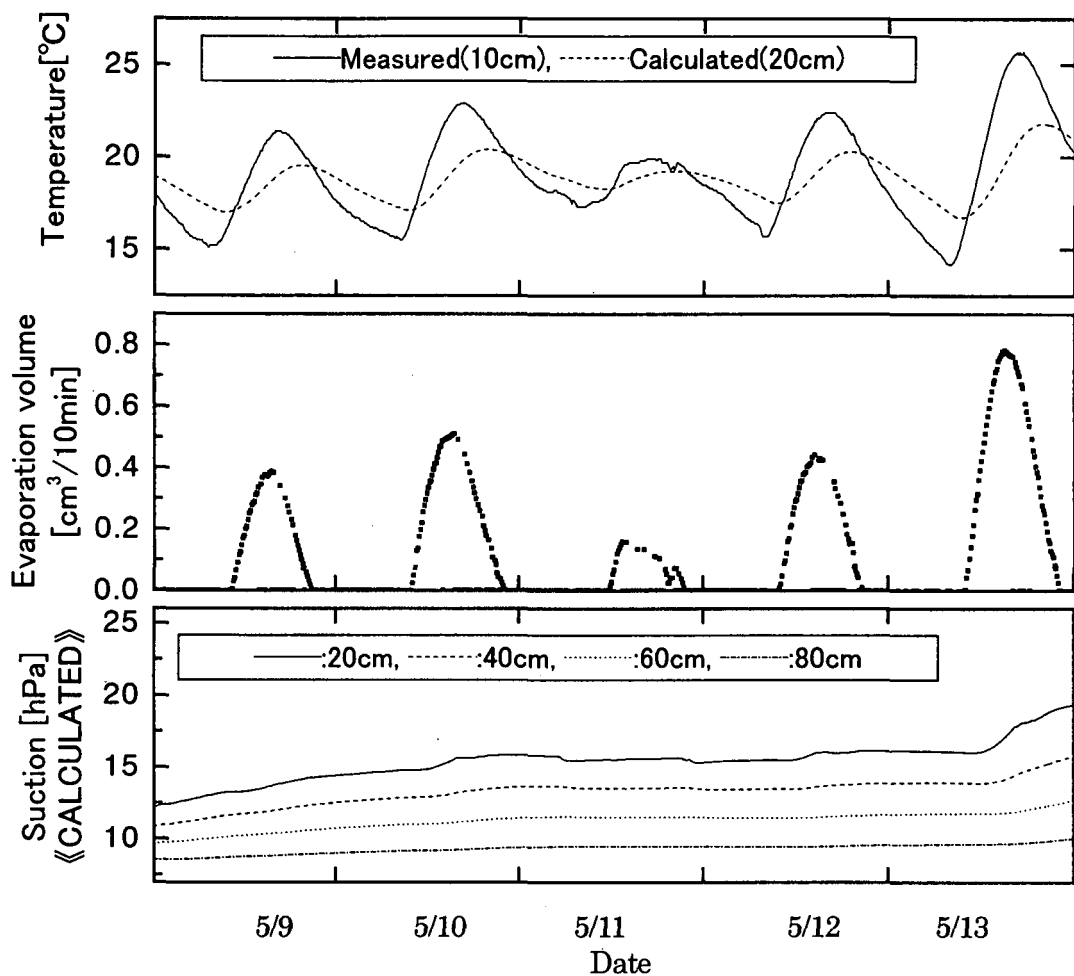


図-14(a) 蒸発を考慮した地中温度、蒸発量、サクシンの数値実験結果

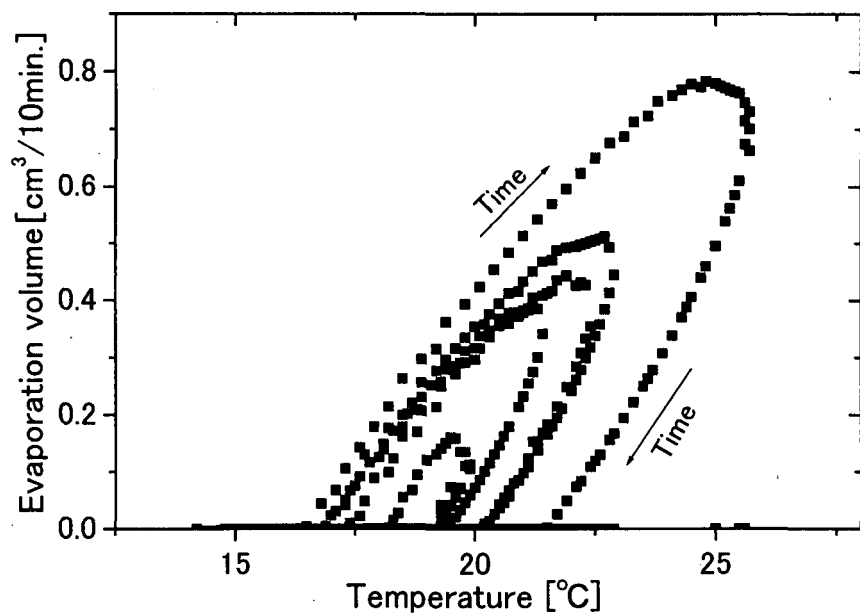


図-14(b) 深さ10cmの地中温度と蒸発量の関係

つ。つまり、蒸発に費やされる熱量が同じでも、温度が高い（蒸発潜熱が小さい）ほど蒸発量が大きくなる。図-14 (b) に示す温度と蒸発量の関係は、図-2 に示す水の蒸発潜熱と温度の関係と傾向が一致する。よって、本モデルが定性的・定量的に蒸発量を評価できる可能性を明らかにしている。

5. あとがき

地盤は日射や降雨浸透など乾湿を繰返しており、不飽和土の地盤工学的諸問題を検討するには、浸透特性のみならず、蒸伝熱現象の解明が必要である。

本論文では、不飽和シラス地盤での蒸発を考慮した伝熱・浸透挙動のモデル化および数値実験、現地計測結果との比較を行い、日々刻々と変化する地盤環境の伝熱・浸透現象を定量的に評価した。今後は、数値力学モデルの精度の向上、斜面崩壊予知への適用等への活用等を検討していきたいと考えている。

謝辞：本研究に対して科研費（地域連携：No. 12792009）の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 春山元寿；豪雨による南九州の斜面崩壊，自然災害資料解析，pp. 80-88，1974.
- 2) 高田誠；しらす地盤の地盤工学的特性に関する研究，鹿児島大学博士論文，pp. 45-47，1998.
- 3) 松尾和昌，酒匂一成，北村良介；斜面崩壊予知戦略

-南九州シラス地帯を例として-，自然災害科学，2002. (掲載決定済み)

- 4) 宮本裕二，城本一義，北村良介：不飽和地盤の温度・サクションの現地計測およびモデル化，土木学会応用力学論文集，Vol. 2，pp. 593-598，1999.
- 5) 小島和夫；エンジニアのための化学熱力学入門，培風館，p. 90，1989.
- 6) 近藤純正：水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-，朝倉書店，pp. 185-207，1994.
- 7) Watanabe K. and Tsutsui Y. A new equipment used for measuring evaporation in field, Proc. 7th Congr. IAEG, 1994.
- 8) 宮本裕二，北村良介；不飽和土の熱拡散率測定と伝熱に関する一考察，平成 8 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 506-507，1997.
- 9) 北村良介，宮本裕二；熱を考慮した不飽和土の数値力学モデルの提案，不飽和土の透水に関わる諸問題シンポジウム発表論文集，pp. 201-208，1996.
- 10) 近藤純正：水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-，朝倉書店，pp. 1-4，1994
- 11) 水科篤郎，荻野文丸；輸送現象，産業図書，pp. 360，1981.
- 12) 北村良介，川井田実，阿部廣史，城本一義，寺地卓也；砂質土地盤でのサクションの現地計測システムの開発，土木学会論文集，No. 652/III-51，pp. 287-292，2000.
- 13) 宮本裕二，北村良介：テンシオメーターによるサクション計測誤差に関する一考察，土木学会第 53 回年次学術公演会概要集共通セッション，pp. 2-3，1998. (2002 年 4 月 19 日)