

II-46

不飽和土壌中の雨水流出機構に関する研究

室蘭工業大学工学部 正員 藤 間 聡

室蘭工業大学大学院 学生員 熊 谷 恭 人

1. まえがき

近年、山腹斜面で生起する水文現象の素過程に関する研究が活発に行われ、飽和・不飽和域における雨水の移行機構が定性的に解明されつつある¹⁾。しかし、既往の研究成果に基づく物理モデルを実際の斜面域流出に適用するには、その斜面を形成する土壌の不飽和透水係数、水分特性曲線、初期飽和度等の水文地質学的パラメータを正確に評価する必要がある。

本研究では、丘陵試験地から採取した攪乱土および未攪乱土の浸透特性を実験で求め、試験地における飽和・不飽和領域における雨水の流出過程を物理的に考察するものである。

2. 不飽和土壌中の浸透特性

不均質・等方性土壌中の二次元不飽和浸透流の支配方程式は、次式で与えられる²⁾。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

ここに、 $C(\psi)$ は比水分容量であり、 $C(\psi) = \partial \theta / \partial \psi$ で定義される。また、 $k(\psi)$ は不飽和透水係数で、サクション(圧力水頭) ψ または体積含水率 θ に依存する関数である。

不飽和透水係数 $k(\psi)$ は土壌ごとに異なるものであるが、理論解析を行う際には、体積含水率 θ 、サクション ψ の関数形で表現することが望ましい。この見地から水分特性曲線を用いて不飽和透水係数を定量的に推定する研究が行われている。現在提案されている手法の中で、土壌の実験結果と比較的良好一致するといわれるVan Genuchten法が多用されている。

Van Genuchtenは、有効飽和度 S_e -サクション ψ 間に次式が成立することを実験的に見出した³⁾。

$$S_e = \{1 / [1 + (\alpha |\psi|)^n]\}^m \quad (2)$$

$$\text{ここに、} \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (3)$$

また、 α 、 n は定数、 $m = 1 - 1/n$ 、 θ は体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率。

(2)、(3)式中のパラメータ α 、 n 、 θ_r 、 θ_s をpF試験で得られた水分特性曲線を用いて同定したのち、次式により不飽和透水係数を算定する。

$$k(\psi) = k_s \frac{\{1 - (\alpha \psi)^{n-1} [1 + (\alpha \psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{m/2}} \quad (4)$$

ここに、 k_s は飽和透水係数である。

以上の展開から斜面構成土壌に対する $k(\psi)$ と $C(\psi)$ が定式化されると、雨水の不飽和土壌域における過渡的挙動が推定できることになる。

3. 不飽和透水係数測定法

上述のように、不飽和浸透流は水分特性曲線の形状特性によってその流動が規定される。したがって、水分特性曲線と透水係数とを実験で求めたのち、Van Genuchten法で整理した結果を述べる。

Study on Unsaturated Infiltration Process in a Hillslope

by Satoshi TOHMA and Yasuhito KUMAGAI.

3.1 水分特性曲線の測定

土壌中のサクシオン ψ -体積含水率 θ の関係を求める試験は、低 pF (サクシオンの常用対数変換値)測定に有効といわれる土柱法を用いた。測定装置は直径12.5cm、長さ70cmの塩ビ製試料円柱と越流水槽からなり、試料円柱は体積含水率測定のため、軸方向に2分割できるようになっている。

測定は排水過程と吸水過程に分けて行い、吸水過程では試料の初期状態を残留体積含水率 θ_r とし、また、排水過程では初期状態を飽和体積含水率 θ_s に保ち、15日間静置したのちサクシオン ψ (cm)と体積含水率 θ (cm^3/cm^3)を測定した。

A_0 (黒ボク土)及び A_1 (砂混じりシルト)層の吸・排水過程における実験値と Van Genuchten法による水分特性曲線を図-1に示す。実験はいずれも pF 値が0~2の低サクシオン領域であり、両層の保水機構は土粒子表面保水より空隙保水が卓越し、保水容量は毛管効果と空隙径分布に依存する。また、 A_0 、 A_1 層ともに吸水過程と排水過程との間にヒステリシス現象が発生している。

Van Genuchten法に含まれるパラメータ α 、 n 、 θ_r および θ_s はPowell法を用いて最適同定化したもので、表-1にその値を掲示している。パラメータ α と n はともに排水過程より吸水過程で大きな値を示す。これらのパラメータの物理的意味を考えるために、最適同定された4個のパラメータの内、 α と n の値のみ変動させた場合の水分特性曲線の形状変化を求めた。図-2(a)は A_0 層について、 α のみを同定値の10倍及び1/10倍とし、他のパラメータを同定値に固定した状態での水分特性曲線を示す。同図において α が同定値の10倍の場合、最適同定された水分特性曲線を1オーダー下方へ平行移動した曲線が得られる。また、 α が1/10倍では、1オーダー上方へ平行移動した曲線が得られる。一方、 A_0 層について n のみを同定値の10倍および1/10倍とし、他のパラメータの値を同定値に固定した状態での水分特性曲線を図-2(b)に示す。残留体積含水率から体積含水率までの勾配が n の増加に伴い減少する傾向が見られる。これらの検討の結果、 α は毛管メニスカスの曲率半径で示される空隙径の特性を、 n はサクシオンの単位変化当たりの水分含量の変化を示す(1)式中の比水分容量 $C(\psi)$ の逆数であり、 n が小さいと曲線の勾配はより緩やかになり、ある特定のサクシオンを越えると少量の水しか残存し

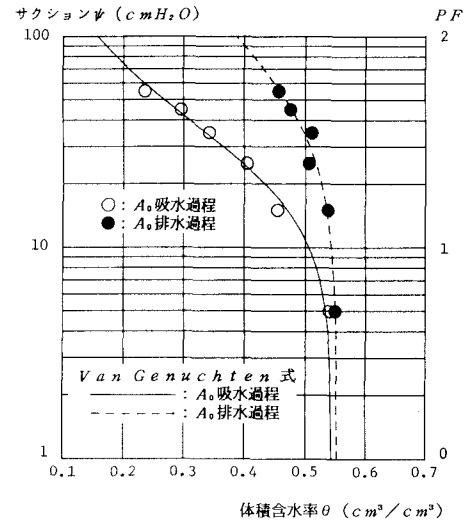


図-1(a) A_0 層の水分特性曲線

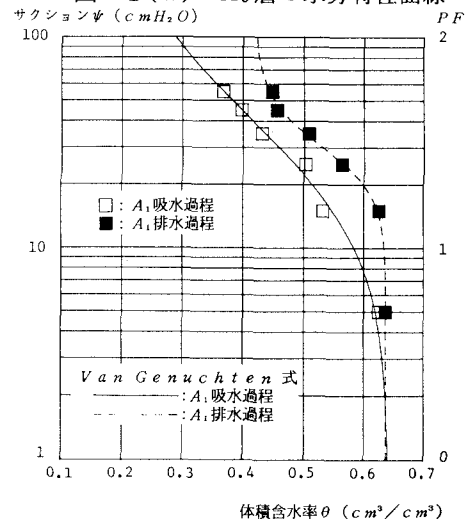


図-1(b) A_1 層の水分特性曲線

表-1 Van Genuchten法のパラメータ

過程 分類	吸 水 過 程				排 水 過 程			
	α	n	θ_r	θ_s	α	n	θ_r	θ_s
A_0	0.0387	1.893	0	0.544	0.0145	1.542	0.005	0.553
A_1	0.0494	1.522	0.029	0.643	0.0364	4.006	0.418	0.637

ないことを表す。従って、 n は空隙径分布の特性を表現するパラメータと考えられる。

3.2 不飽和透水係数の測定

透水係数は、原理的には、定常流、非定常流システムのいずれにおいても決定できる。一般に、定常流システムによる測定が比較的容易であり、また精度の高い測定値が得られる場合が多い。

本研究で用いた透水係数測定法は定常加圧法であり、測定装置の概要を図－3に示す。気乾状態の未攪乱土または攪乱土を直径12cm、高さ5cmの試料室に充填したのち、55cmH₂Oから15cmH₂Oまで10cmH₂O刻みの正圧をかけて所定の体積含水率 θ の水分状態をつくる。その後、一定の水頭差で流量 q を供給し、試料室内で定常不飽和浸透流を発生させる。この条件下で $\Delta z=2.5$ cm隔てた直径6mmのテンシオメータのサクション差 $\Delta\psi$ を測定すると、次式から吸水過程における不飽和透水係数 $k(\psi)$ が求められる。

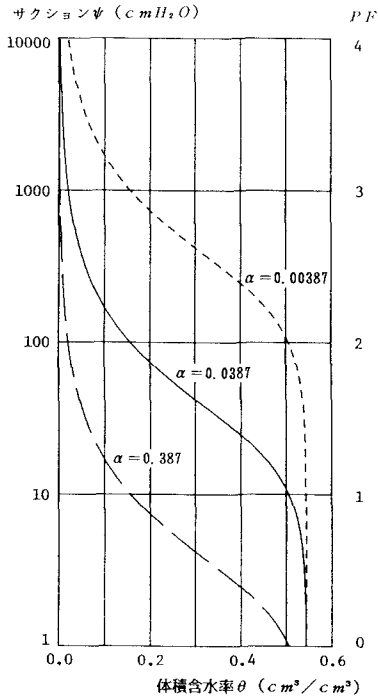
$$k(\psi) = q / (\Delta\psi / \Delta z + 1) \tag{5}$$

次に、加圧プロセスを逆にし、15cmH₂Oから55cmH₂Oに順次加圧して、排水過程での不飽和透水係数を求めた。

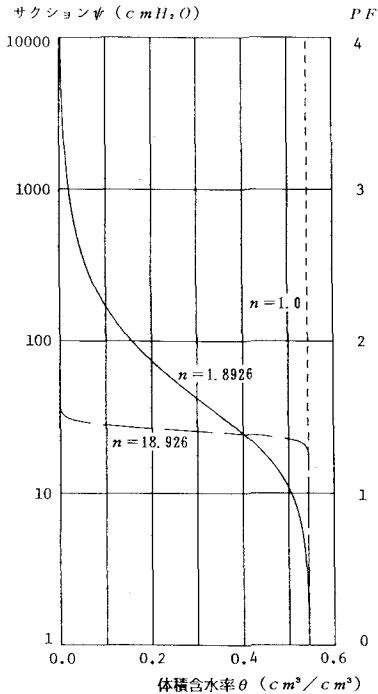
図－4は不飽和透水係数 $k(\psi)$ とサクション ψ との実験値および(4)式で定義するVan Genuchten法による理論曲線を示す。飽和透水係数には定水位試験による平均A₀層： $k_s = 1.46 \times 10^{-3}$ (cm/s)
A₁層： $k_s = 2.38 \times 10^{-3}$ (cm/s)
を用いている。

A₀層の不飽和透水係数の実験値は、未攪乱・攪乱試料の吸水、排水過程ともに Van Genuchtenによる排水過程の曲線を傾向線として分散する。不飽和透水係数はサクションのpF値が1～2の範囲では、飽和透水係数のほぼ1/10程度の値に減少することが認められる。また、サクションと体積含水率との関係には顕著なヒステリシスが存在したが、不飽和透水係数は吸水、排水過程での差異は少なく、ヒステリシスによる影響度は比較的小さい。

A₁層の不飽和透水係数についてはデータが少なく明確な特性を把握できないが、サクションのpF値が2以下では、飽和透水係数とほぼ同じオーダーにある。また、Van Genuchten法による曲線は、サクションの低領域ではA₀層の透水係数より大きいが、サクションが増大するに伴い急激に減少し、最終的にA₀層の透水係数より小さくな



図－2 (a) Van Genuchten法の α の特性



図－2 (b) Van Genuchten法の n の特性

る傾向を示している。この理由を図-1の排水過程における実験値の傾向と併せて検討すると、 A_1 層において、 pF を0.70から1.75に増大すると体積含水率 θ は64%から44%まで20%減少する。

A_0 層では体積含水率 θ は55%から45%まで10%減少するが、含水率の減少量は前者の方が大きい。

このことから A_1 層は砂質分が多く、従って大きな空隙径を有するため、サクシヨンの増大に伴いこれらの空隙から急激に水が失われ、飽和状態では大きな透水係数が急激に減少すると

考えられる。しかし、 A_1 層は pF が2付近では A_0 層に比較して大きな体積含水率を有することから、空隙径が広く分布していると考えられる。

4. 雨水流出機構の物理的解析

前章までで把握された各層の飽和透水係数の特性を考慮して、丘陵斜面流出試験における雨水の流出機構の物理的解析を行う。

4.1 丘陵斜面試験地の流出特性

試験地は室蘭工業大学から北西方向約500mにある東向きの丘陵斜面地であ

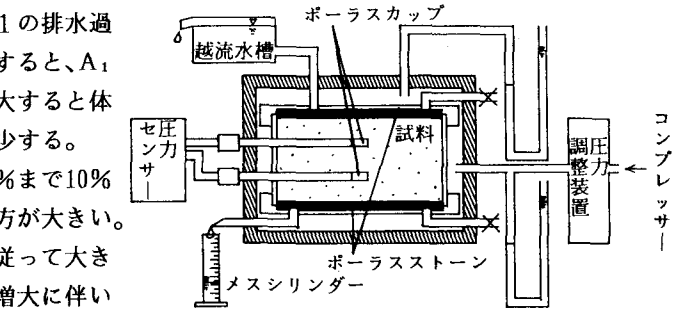


図-3 不飽和透水係数測定装置

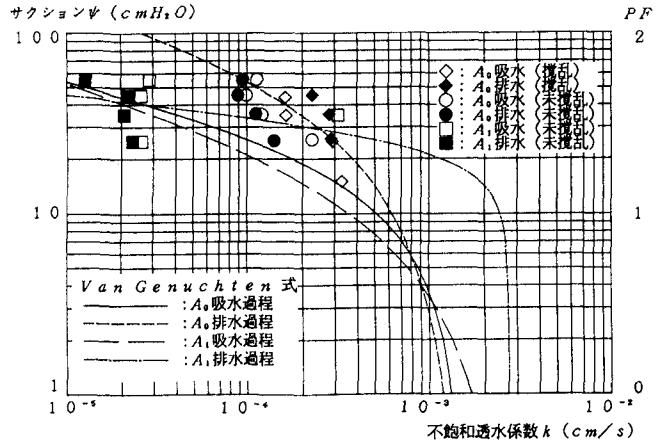


図-4 A_0 , A_1 層の不飽和透水係数の実験値と推定値

る。流域形状の概要と標高を図-5に示す。河道は標高96mに源流があり、長さ55m、平均幅1.59m、平均河床勾配8度であり、夏の渇水期においても河川水が枯渇することはない。本試験地で得られるハイドログラフは、始めに降雨ピークに即応した小さなピークが現れ、続いて流出の主要なピークが出現する。図-6は1990年8月10日から17日までの8日間にわたって観測されたハイト・ハイドログラフを示す。10~11日の総降雨118.5mmによるハイドログラフは、降雨の極値に1時間の遅れで応答する数個の極値と最終降雨ピークから26時間後に出現する最大ピーク2.95ℓ/sを有する。なお、この降雨による流出率は $f=0.10$ である。一方、15日の総降雨99.0mmによるハイドログラフにおいても同様な応答特性を示しているが、先行土壌水分によって流量の最大ピーク11.56ℓ/sの出現は13時間後と早くに応答することが認められ、流出率は $f=0.37$ に達し、本試験地で得られた既往最大流出率 $f=0.39$ に次ぐ値をとる。本試験地の雨水流出は、洪水到達時間が流域規模に比較して遅く、流出率が小さく、かつ渇水期においても河川水が枯渇しないことから中間流出及び基底流出が卓越する。

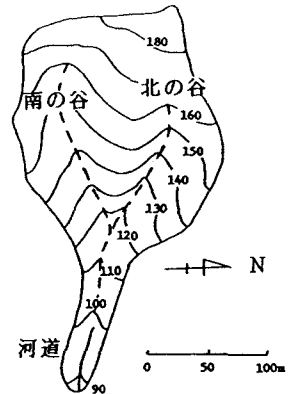


図-5 流出試験地概要図

4.2 地下水流動特性⁴⁾

試験地の土層は A_0 層が厚さ0.30~0.80mで分布しており、河川に近づくに従いその厚さを増す傾

向を示す。流域の7箇所において掘削した土壌調査孔の長さはほぼ2mであり、この範囲では基岩等の明確な遮水層に達するまで至らないためA₁層の層厚分布を正確に把握することができなかったが、厚さは0.80m以上と推定される。

雨水の移行特性を把握するため河川右岸から距離9.7m、標高96.37m(河川との比高4.58m)の地点に観測井を穿孔し、降雨期間の毎正時に地下水位を測定した。なお、観測井の底部は地表下面0.80mでA₀層に位置する。地下水位観測と同時に流出成分の分離を行

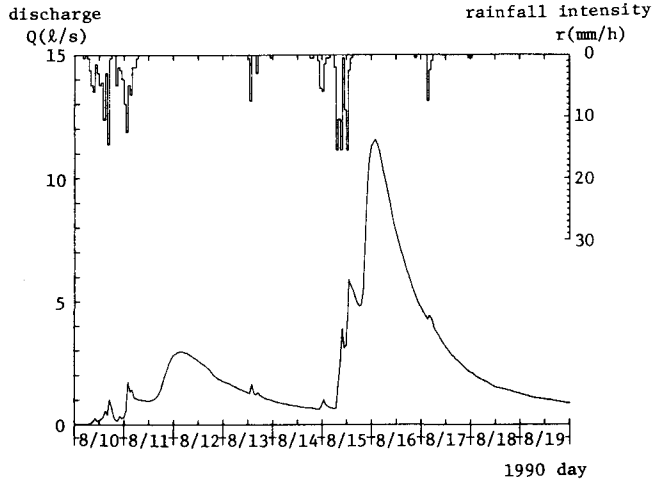


図-6 ハイエーター hidroグラフ

うため、フミン質をトレーサとする水質試験を行った。フミン質の指標として紫外部260nmにおける吸光度(E₂₆₀)を採用し測定を行った。これらの測定結果から、A₀層内の地下水位は最初のピークが hidroグラフの最初小さなピークから1時間程度遅れて出現する。また、地表下面45cmまでのA₀層とそれ以下のA₁層の流出ピークは時間的に一致し、hydroグラフの主要ピークを形成する。

4.3 雨水の移行機構

不飽和透水係数と地下水流動特性から本流出試験地の雨水の移行機構を以下のように推測される。降雨初期において、乾燥したA₀層は透水係数が小さいため、A₀層を被覆する落葉腐食土A₀₀層の遮水層となり、二層の境界面では雨水が重力勾配による下方流とサクションによる垂直流に分離され、下方流は境界面を流下するに従い動植物の活動による孔に集中して、いわゆるパイプ流による早い流出を発生させ、hydroグラフの最初のピークを形成する。

降雨が継続するとA₀₀層から境界面を通してA₀層に浸潤する雨水のフラックスはダルシー則から次式で表される。

$$q = -k \frac{d\psi}{dz} + k g \quad (6)$$

ここに、 q はフラックス、 k は不飽和透水係数、 ψ はサクション、 g は重力加速度、 z は境界面の法線方向の座標軸を示す。二層の境界面における浸潤速度は、当初はサクション勾配 $d\psi/dz$ が大きいので、(6)式の右辺第一項が第二項より卓越し、境界面に垂直に浸潤する。時間の経過とともに通過領域が長くなると、サクション勾配は無視しうるほど小さくなる。逆に、重力勾配 kg が卓越し始め浸潤方向は図-7①に示すように鉛直方向に漸次変化する。通過領域は飽和状態に近いので不飽和透水係数 k は飽和透水係数 k_s に近くなる。

A₀層の浸潤前線がA₁層との境界面に達すると、不飽和状態では、A₁層のサクションが大きいので雨水が比較的大きな空隙へ侵入することを妨げられる結

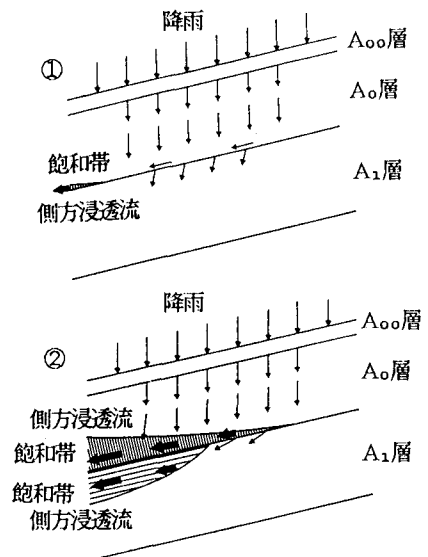


図-7 雨水の浸潤・流出過程

果、遮水層の役割を果し、境界面上で雨水が貯留され、 A_0 層内で側方浸透流を発生させることになる。

A_0 層の浸潤過程が継続すると、 A_0 層で述べた浸潤機構が同様に予測され、始めに A_1 層の小さな空隙が飽和し、サクシオンを次第に減少させて大空隙を順次飽和させて行く。 A_0 層が A_1 層の飽和透水係数に見合うだけの浸透流を維持できる場合、境界面上での雨水の浸透方向は次式を満足するように変化する。

$$\tan \beta_1 = k_{s1} \tan \beta_0 / k_{s0} \quad (7)$$

ここに、 β は雨水の浸透方向と境界面法線との交角、 k_s は飽和透水係数を示す。

両層の飽和透水係数は、実験結果から $k_{s0} < k_{s1}$ の関係を有することから(7)式で $\beta_0 < \beta_1$ となり、境界面を通過した A_1 層の浸透流は図-7②に示すように、その方向を斜面下方へ変化させると予測される。この結果、 A_0 、 A_1 層は境界面を挟んで飽和帯が形成され、側方浸透流が発生し、ハイドログラフの最も大きな第2ピーク及び減水部に寄与するものと思われる。 A_0 、 A_1 層の排水過程の水分特性曲線の傾向から乾燥化に伴う体積含水率の減少が小さく、減水期間が比較的長期にわたると考えられる。

5. 結 論

流出試験地から土壌試料を採取し、水分特性曲線を土柱法で、不飽和透水係数をRichardsの加圧型透水試験装置で測定を行い、その浸透特性に基づき丘陵斜面域の雨水浸透および流出機構について検討を加えた。得られた結果を要約すると以下の通りである。

① A_0 、 A_1 の両層の低pF領域における不飽和透水係数の実験値は、Van Genuchten法による理論曲線を傾向線とし、比較的狭い範囲に分布する。

②Van Genuchten法のパラメータの内、 n は水分特性曲線の形状特性を表し、 n が大きな場合には体積含水率 θ が低下してもサクシオン ψ の変化が微小な緩勾配を有する水分特性曲線になる。一方、 α は水分特性曲線の形状特性には寄与せず、 α が大きな場合には、水分特性曲線の位置をサクシオン ϕ の値が小さくなる方向へ平行移動し、 α が小さくなるとサクシオン ψ が大きくなる方向へ平行移動する。 α の値を基準値の1/10にすると ψ は10倍になり、10倍にすると ψ は基準値の1/10になる。

③ A_1 層の不飽和透水係数が A_0 層より小さなため、雨水の浸透-吸水過程では A_1 層が遮水層となり、 A_0 層との境界面上で飽和帯が形成され、側方浸透流が発生すると考えられる。

④境界面近傍の A_0 、 A_1 両層で飽和帯が形成されると、 A_1 層の飽和透水係数が大きいことから浸透流の流動方向は鉛直方向から斜面方向に変化し、飽和側方浸透流を形成すると考えられる。

以上、 A_0 および A_1 層の不飽和・飽和透水係数と水分特性曲線の室内測定結果から丘陵斜面における雨水の流出機構を検討した。今後は、予測した流出過程を現地で検証する所存である。

本研究を進めるに当たり、実験及び現地観測については室蘭工業大学土木工学科河海工学講座の学部学生、池田弘英、奥田光秋両君の協力を得たことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) カークビー [日野・榎根・尾田・高山・玉光・塚本・山田共訳]: 新しい水文学、朝倉書店、pp. 105-124, 1983.
- 2) 土壌物理研究会編: 土の物理学、森北出版、pp. 240-241, 1979.
- 3) 日野・太田・砂田・渡辺: 洪水の数値予報、森北出版、pp. 72-75, 1989.
- 4) 嵯峨・藤間: 小流出試験地(室蘭)の流出特性・流出解析、第33回水理講演会論文集、pp. 25-30, 1989.