

平成23年台風12号による熊野那智大社裏山における 大規模斜面崩壊の解析条件設定に関する研究

Analysis method of the large landslide occurred behind the Kumano Nachi-Taisha shrine
triggered by Typhoon Talas

藤本将光¹・石田優子²・梅本啓介³・小杉賢一朗⁴・里深好文⁵・深川良一⁵

Masamitsu Fujimoto, Yuko Ishida, Keisuke Umemoto, Ken'ichirou Kosugi, Yoshifumi Satofuka,
and Ryoichi Fukagawa

¹立命館大学助教 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

²立命館大学研究員 総合科学技術研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Researcher, Ritsumeikan University, Research Organization of Science and Engineering

³奈良県庁 (〒630-8213 奈良県奈良市登大路町30)

Nara Prefectural Government

⁴京都大学准教授 大学院農学研究科, CREST JST (606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Associate Professor, Kyoto University, Graduate of Agriculture, CREST JST

⁵立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

The Typhoon Talas in September 2012 caused the landslide and debris flow behind the Kumano Nachi-Taisha shrine. The total amount and peak of rainfall by Typhoon Talas were 707 mm and 93 mm/hr, respectively. A large landslide occurred at the peak rainfall around 3 pm September 4 and hit the building of shrine as debris flow. Based on the filed investigation and topographical analysis, the landslide with about 30 m wide, 50 m long, 15m depth was collapsed at the peak of rainfall event. Our results indicated that the large landslide was simulated by considering the deep weathered bedrock conditions.

Keywords : Kumano Nachi-Taisha shrine, landslide, rain infiltration, slope stability, weathered bedrock

1. はじめに

平成23年台風12号によって南紀地方にもたらされた豪雨は広範囲で崩壊・土石流や大規模深層崩壊、また、天然ダムの形成を引き起こした。結果として南紀地方では多くの死者・行方不明者を出す甚大な被害にみまわれた。和歌山県那智勝浦町那智川流域では主に土石流による被害が大きかったが、金山谷川源頭部では大規模な斜面崩壊が発生したように、土石流源流部では深層崩壊には至らないまでも比較的大規模な斜面崩壊の発生が報告されている¹⁾。世界遺産である那智大



写真1 那智大社の被災状況
(那智大社提供)

社を襲った土石流（写真 1）の源流部においても崩壊深 10m を越える大規模斜面崩壊の発生が確認された。これまでの斜面崩壊の研究の多くは主として崩壊深が最大 2~3m 程度までの表層崩壊を対象として行われてきた。そのため、深層崩壊を含む大規模斜面崩壊を対象とした研究²⁾は少ないといえる。表層崩壊の発生は表層土層の崩壊現象として捉えることができるが、大規模斜面崩壊は土層以深の風化基岩層を含めた崩壊現象として取り扱う必要がある。しかし、これまでの研究では降雨浸透解析・安定解析において風化基岩層を解析対象としておらず、解析条件の設定に関して十分な知見は得られていない。そこで本研究では那智大社裏山の大規模斜面崩壊における解析条件の設定に関して、現地調査、崩壊前後の DEM（数値標高モデル）および土層のみならず風化基岩層を対象とした降雨浸透解析・安定解析を行うことによって検討することを目的とした。

2. 斜面崩壊の実態

(1) 降雨特性

那智川流域では 9 月 4 日未明に複数の支川で土石流が発生し、被害が生じている¹⁾。熊野那智大社で記録された雨量データでは 9 月 4 日午前 2 時に時間雨量 82 mm、午前 3 時に同 93 mm の非常に降雨強度の大きい雨が観測された（図 1）。また、降雨ピークまでの積算雨量は 578 mm、総降水量は 707 mm であった。なお、那智大社に設置された雨量計は古かったため、雨量が実際より過小評価されている可能性がある。那智大社の職員に対するヒアリングから 9 月 4 日午前 2 時半ごろに雷雨による停電、午前 3 時ごろに被災した大社境内への泥水の氾濫が確認されており、土石流の発生時刻は 9 月 4 日午前 3 時過ぎと推定される。

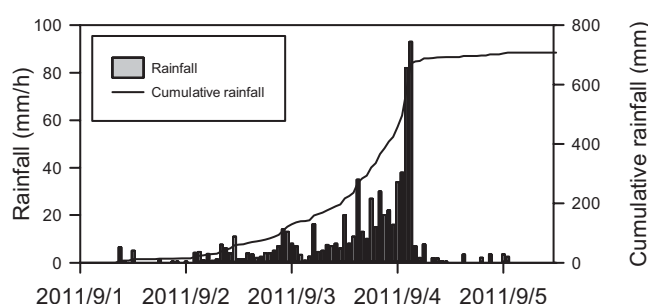


図 1 那智大社における雨量

(2) 斜面崩壊の形状および規模

崩壊発生前後の地形図および崩壊後のオルソ画像を図 2 に示す。崩壊前の地形図は国土地理院の 10m メッシュの数値標高データ、崩壊後の地形図は国土交通省近畿地方整備局の 1m メッシュ LP データを基に作成した。崩壊前後の地形データはメッシュサイズ、測定方法が異なるため、同一地点でも標高差が見られ、データの取り扱いが難しい場合がある。しかし、本研究では崩壊地上部における非崩壊地の標高が崩壊前後で差が見られなかったことと崩壊地の標高の低下が顕著であったため、単純な比較から崩壊形状について解析を行った。崩壊は 2 つの小さな谷に挟まれた急峻な尾根部で発生し（図 2b）、幅約 30m、長さ 50m 程度の大きさだったと考えられる（図 2c）。図 3 に崩壊の中心部に沿った縦断線の崩壊前後の断面図を示す。崩壊の主要部は大きく標高を低下させ、最大で深さ 12m 程度標高が低下した。滑落崖は上流部の尾根から水平距離 20m 下流に存在し、高さは約 15m であった。滑落崖では風化した花崗斑岩が露出し、明瞭な節理の発達を観察された。現地調査およびオルソ画像（図 2a）から、滑落崖より下流では大規模崩壊による土砂および倒木の崩積が確認されたため、実際の崩壊深は 12m より深いと推察される。そのため、実際の崩壊のすべり面は図 4 中の破線のように推定される。また、主要崩壊部末端および下流域では崩壊前後で明瞭な標高差は認められなかった。現地調査結果を考慮すると、実際には崩壊・土石流化によって斜面上部から流下した土砂によって浸食が発生したが、その後の流下した土砂の堆積によって崩壊前後の標高差に差がみられなかったと考えられる。那智大社裏山の源頭部での大規模崩壊は約長さ 50m、幅 30m、深さ 15m 程度の規模であったと推定された。

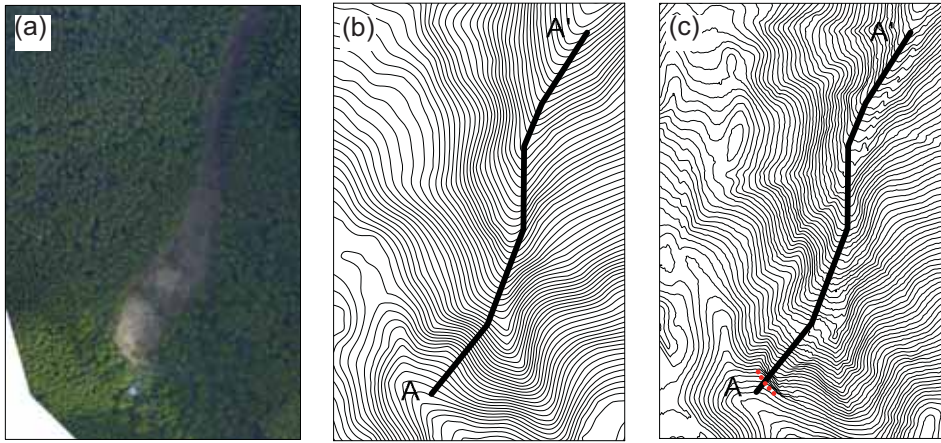


図2 崩壊斜面の特徴：(a) 崩壊後のオルソ画像，(b) 崩壊前の地形図，(c) 崩壊後の地形図
(地形図の等高線は2m 間隔)

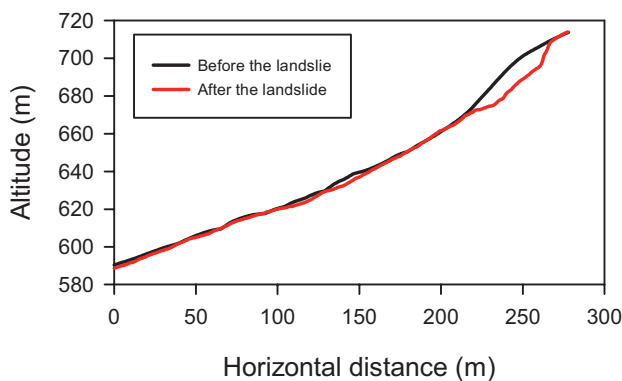


図3 崩壊地の断面図 (図2A-A'断面)

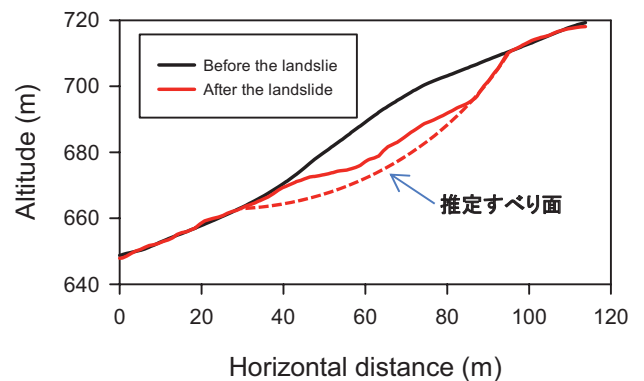


図4 崩壊地の断面図および推定すべり面

(3) 崩壊地の土壌特性

滑落崖上部の非崩壊地 5 地点 (図 2c の赤点) において簡易動的コーン貫入試験を行い、土層の厚さを調査した。土層深は、0.5m、0.9m、1.7m、1.8m、3.3m であった。北西方向ほど土層深が薄くなる傾向を示した。また、露頭面の土層は地表面に近いほど粘土化しており、鉛直下方ほど粒径の大きい粒子の割合が増え、基岩の風化の進行が認められた。風化基岩と土層の境界は不明瞭であり、漸移的に粒度、強度が変化していた。土層の鉛直方向の水理特性の差を見るために、土壌サンプルは露頭面の土層を鉛直方向 3 層 (上層 1 層、中層 2 層、下層 3 層) に分けて採取した。採取したサンプルを実験室に持ち帰って、変水位透水試験によって飽和透水係数 K_s を計測した。その結果、表層： $K_s = 4.0 \times 10^{-6}$ cm/s、中層： $K_s = 1.8 \times 10^{-6}$ cm/s、下層： $K_s = 7.7 \times 10^{-6}$ cm/s であり、鉛直方向に大きな差は見られなかった。また、一般的な森林土壌に比べて比較的低い透水係数を示した。また、pF 試験を実施し、保水性を計測した。その結果、上層から下層に向けて保水性が低下する傾向を示した (図 5)。

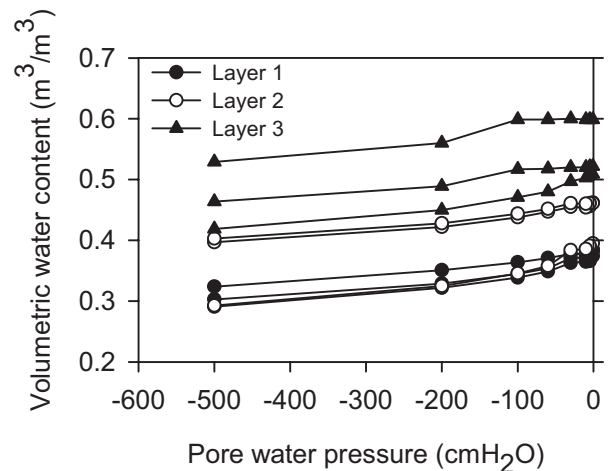


図5 土壌サンプルの水分特性曲線

3. 崩壊発生に関する降雨浸透・斜面安定解析

(1) 解析方法

本研究では有限要素法による雨水流動の数値シミュレーション³⁾を行った。この方法では、雨水流動の数値シミュレーションによって、流域内の各点における圧力水頭（間隙水圧） ψ [cm]と体積含水率 θ [cm³/cm³]の鉛直分布が計算される。数値シミュレーションにおける土壌の保水性（ θ と ψ の関係）と透水性（ K の ψ の関係）は、それぞれ次式で表現される⁴⁾。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = Q \left(\frac{\ln(\psi / \psi_m)}{\sigma} \right) \quad (1)$$

$$K = K_s \left[Q \left(\frac{\ln(\psi / \psi_m)}{\sigma} \right) \right]^{1/2} \left[Q \left(\frac{\ln(\psi / \psi_m)}{\sigma} \right) + \sigma \right]^2 \quad (2)$$

ここで、 S_e ：有効飽和度、 θ_s ：飽和体積含水率 [cm³/cm³]、 θ_r ：残留体積含水率 [cm³/cm³]、 ψ_m ：メジアン孔隙径に対応する圧力水頭 [cm]、 σ ：孔隙径分布を表わす無次元パラメータ、 K_s ：土層の飽和透水係数 [cm/sec]、 Q ：余正規分布関数である。

浸透計算結果に対して2次元簡易 Bishop 法を用いることで安全率を計算する。2次元簡易 Bishop 法では、円弧状のすべり面を仮定した上で、すべり土塊を鉛直方向の線分によって幾つかのスライスに分割し、各スライスのせん断力とせん断抵抗力を合算して円弧全体の安全率を求める。また、本研究ではすべり面形状を仮定せず、最も安全率が小さくなるすべり面形状を探索し、決定する方法を用いた。次式に Bishop 法による安全率（ F_s ）の算出式を示す。

$$F_s = \frac{1}{\sum W_i \sin \alpha_i} \sum \frac{c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi_i}{(1 + \tan \alpha_i \tan \phi_i / F_s) \cos \alpha_i} \quad (3)$$

ここで、スライス i に対して、 u_i ：正の間隙水圧 (N/cm²)、 W_i ：重量 (N)、 b_i ：水平幅 (cm)、 α_i ：すべり面角度)、 ϕ_i ：内部摩擦角 (°)、 c_i ：粘着力 (N/cm²) である。式 (3) の右辺にも、 F_s が含まれるため、 F_s は繰り返し計算によって求められる。

(2) 解析条件

対象断面は水平距離 113m、深さ 15.1m とした。表層土を 1.6m (表層土 0.1m、下層土 1.5m) とし、その下に 13.5m の風化基岩層を設定した。表層土 0.1m は森林土壌 A 層に相当する。また、対象断面を水平方向に等間隔 2m、鉛直方向に表層土 0.1m、下層土、風化基岩 0.5m からなる計算要素に分割した。土層、風化基岩の保水性は現地調査の結果から決定した。下層土に相当する現地土壌サンプルから得られた透水係数は非常に小さかったが、実際の斜面では亀裂やパイプ流を含む素早い浸透流を持つ選択的流出経路を考慮する必要があると考えられる。小型と大型サンプルを用いて透水係数を比較した既往研究⁵⁾では、小型サンプルに比べて大型サンプルの透水係数は 2 オーダー大きいことが報告されている。本研究では、既往研究を参考として、下層土の透水係数を実験結果で得られた値より 2 オーダー程度大きい値に設定した。表層土 (A 層) は下層土に比べて高い透水係数であると考えられるため、下層土より 1 オーダー程度高い値を用いた。また、風化基岩の透水係数は既往研究の結果⁶⁾を参考にして決定した。計算に用いた土壌の水利・強度パラメータを表 1 に示す。浸透計算における対象降雨前の初期条件は、対象斜面から一番近い新宮气象台で観測された

表 1 浸透・安定解析に用いたパラメータ

	θ_s	θ_r	ψ_m (cm)	σ	K_s (cm/s)	c (N/cm ²)	$\tan \phi$
Upper soil	0.54	0.3	-40	1.7	0.0035	0.98	0.3
Lower soil	0.54	0.38	-40	1.7	0.0005	0.98	0.3
Weathered Rock	0.38	0.31	-150	2.0	0.0001	2.45	1.0

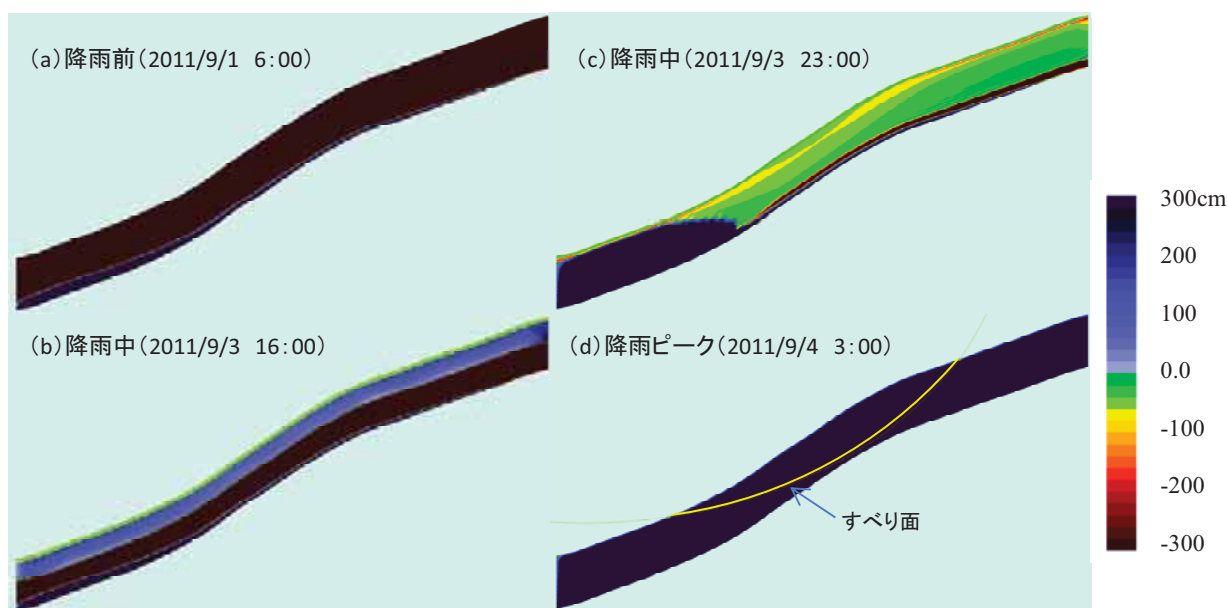


図6 降雨浸透解析の結果およびすべり面形状

対象降雨イベント前の1か月間の雨量を与えることで計算した。初期条件を計算した後、那智大社で観測された実測雨量を用いて解析を行った。

(3) 解析結果

先行降雨として降雨前1か月間の雨を与えた場合、斜面下部から上部にかけて地下深部に地下水帯が存在する結果となった(図6a)。対象とする台風12号は4日間にわたって継続した降雨であったため、地盤内の水分量は乾燥湿潤を繰り返す結果となった。図6bに示すように降雨強度の大きい時(2011年9月3日16:00、35mm/hr)には土層から風化基岩層上部に飽和帯が形成された。降雨が継続し、累積雨量が400mm程度に達すると土層-風化基岩上部に存在していた地下水帯と風化基岩深部に存在していた地下水帯が斜面下部で繋がり、より大きな地下水帯が形成された(図6c)。さらに降雨が継続し、降雨ピーク時(2011年9月4日3:00)には斜面下部の地下水帯が拡大し、斜面全体がほぼ飽和状態に至った(図6d)。

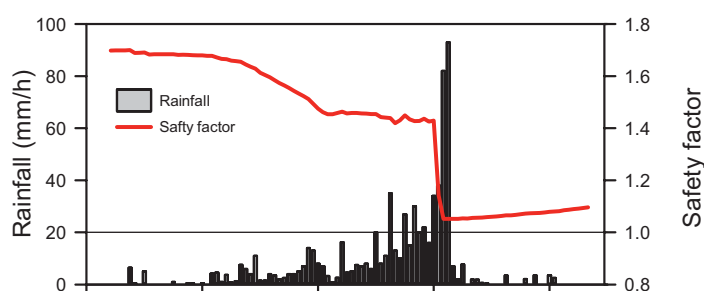


図7 安全率の計算結果

図7に安全率の計算結果を示す。降雨前(2011年9月1日6:00)の安全率は1.7であった。降雨の継続に伴って安全率は徐々に低下し、9月4日午前2時に安全率は大きく低下し、1.05となった。解析結果の安全率は1.0を下回っていないが、安全率の値そのものは設定した強度パラメータに依存するため、安全率が急激に低下し、1.0前後となった4日午前2時以降に崩壊が発生したと考えられる。また、計算されたすべり面の形状(図6d)は、地形解析と野外調査から推定されるすべり面の形状(図4)と非常によく似た結果を示した。以上の結果から解析結果は崩壊の発生過程を再現できたと考えられる。

解析結果の安全率の低下は飽和帯の拡大と一致する傾向を示した。この結果から安全率の低下が飽和帯の拡大に伴う土塊重量の増加によって生じていると考えられる。本研究では、亀裂や選択的流出経路を考慮し、実測した土層の透水係数の値に比べてより大きな透水係数の値をパラメータとして与えている。解析結果が妥当であるとすれば、仮定した亀裂や選択的流動経路のような素早い水移動を可能にする地盤内部の構造が

存在していることを示している。土壌の小容量のサンプルから得られる透水性だけでなく、原位置透水試験の実施や透水性の面的な空間分布を把握することでより実現象に即した透水性を把握することが実際の崩壊発生機構を再現する上で重要となるといえる。

4. おわりに

平成 23 年台風 12 号によって発生した熊野那智大社裏山の大规模斜面崩壊について野外調査および降雨浸透・斜面安定解析を行った。崩壊は源頭部で発生し、約幅 30m、長さ 50m、深さ 12~15m 程度の大規模なものであった。解析の結果、降雨ピーク時に斜面内部全体がほぼ飽和状態となり、安全率が急激に低下し、崩壊が発生したと考えられた。また、すべり面の形状も崩壊形状から推察される形状とよく似ており、本研究の結果から土層以深の風化基岩層を降雨浸透・斜面安定解析の解析対象とすることで規模の大きな斜面崩壊を再現できる可能性が示された。しかし、解析条件において土層の透水係数は亀裂や選択的流出経路を考慮し、実測の土層の透水係数より大きな値を設定している。また、風化基岩層の水理特性は実測していない。降雨時の水分変動は水理特性のパラメータ設定に依存することから、地盤内部の亀裂や選択的流動経路などの不均質性が水移動に与える影響を定量的に評価し、解析に組み込むことが必要となるといえる。

謝辞：本研究は、地盤工学会関西支部「『想定外』豪雨による地盤災害への対応を考える調査研究委員会」の活動の一環によるものであり、調査の一部は和歌山大学平成 24 年度独創的研究支援プロジェクトおよび財団法人レントオール奨学財団の支援を受けて行われた。また、熊野那智大社と国土交通省近畿地方整備局木下篤彦様より情報およびデータを提供頂いた。ここに付記して、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 永野英次, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智: 2011 年台風 12 号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.43-53, 2012
- 2) 堤大三, 藤田正治, 宮本邦明, 今泉文寿, 藤本将光, 国領ひろし, 泉山寛明: 台湾高雄県小林村の深層崩壊発生機構に関する解析, 水工学論文集, 第 55 卷, pp.721-726, 2011
- 3) 小杉賢一朗: 森林の水源涵養機能に土層と透水性基岩の果たす役割の評価, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No.3, pp.201-213, 2007
- 4) Ken'ichirou Kosugi: Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resources Research, Vol. 32, pp.2097-2703, 1996
- 5) 大手信人, 鈴木雅一: 森林土壌の土壌水分特性 (II) 大型土壌サンプルを用いる飽和・不飽和透水試験による体積含水率・圧力水頭関係の測定法とその適用, 日本森林学会誌, Vol. 72, No. 6, pp. 468-477, 1990
- 6) 藤本将光, 馬場直輝, 奥憲二, 小杉賢一朗, 深川良一, 谷誠: 風化花崗岩山地におけるトレーサを用いた基岩地下水の流動特性の把握, 第 124 回日本森林学会発表要旨集, pp.189