## 土壌水分量に基づく森林斜面での不飽和鉛直浸透・ 先行降雨指標・流出量の検討

# STUDY ON UNSATURATED VERTICAL FLOW, ANTECEDENT PRECIPITATION INDEX AND DISCHARGE OF FOREST SLOPE ON THE BASIS OF WATER CONTENT OF SOIL

#### 坂本康<sup>1</sup>·芳賀弘和<sup>2</sup>·伊芸奈津子<sup>3</sup>·藤田昌史<sup>4</sup>·西田継<sup>5</sup>

Yasushi SAKAMOTO, Hirokazu HAGA, Natsuko IGEI, Masafumi FUJITA and Kei NISHIDA

<sup>1</sup>正会員 工博 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部(〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
 <sup>2</sup>正会員 博(農) 山梨大学 日本学術振興会特別研究員(〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
 <sup>3</sup>学生会員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部修士課程(〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
 <sup>4</sup>正会員 博(工) 山梨大学助手 大学院医学工学総合研究部(〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
 <sup>5</sup>博(工) 山梨大学助教授 大学院医学工学総合研究部(〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

To clarify the mechanism of water movement through a natural forest slope, its soil water content was measured and discussed on the relation between its change rate and unsaturated vertical flow, antecedent precipitation index (API) and slope discharge. Soil water content was measured during and after rainfall events by electric reflectometers at 3 depths (from 0.1 to 1.0m) of 3 places and its change rate was calculated. The relation between water content of shallow soil and its change rate suggested that the vertical water percolation was caused under conditions of unsaturated hydraulic conductivity proportional to  $(\theta-\theta_r)^{n_1}$  ( $\theta$ : volumetric water content,  $\theta_r$ : residual volumetric water content,  $n_1$ : constant) and hydraulic head gradient equal to 1. The relation between averaged water content and values of several types of API showed that  $API_2(t)=\sum_i b^2 P(t-i)$  (P(t-i): precipitation on the i-th day before the t-th day,  $b_2$ :contant) is good as a slope API. The slope discharge could be expressed as a function proportional to  $(\theta-\theta_r)^{n_2}$  ( $n_2$ :constant) with  $\theta$  averaged spatially and this function could estimate the discharge from a slope during rainfall.

Key Words: unsaturated vertical flow, antecedent precipitation index, slope discharge, soil water content

#### 1.はじめに

流出解析は河川環境解析の基本となる.そのためパラ メータ数の少ない分布型流出モデルを用いる研究<sup>1)</sup>が盛 んであるが,パラメータの物理的意味の保証は十分とは いえない.これは,蒸発散,不飽和浸透という2大問題 について実用的な解(少ないパラメータで表現できる原 理)が得られていないことによる.著者らは,このうち 不飽和鉛直浸透について,実際に浸透が起こっていると きの土壌水分量の変化の測定により得られた知見を報告 した<sup>2)</sup>.そして,整地された平地での表層土壌の水分量 の観測により,降雨の影響が強い時期を除いてd/dt = k( - \_)<sup>n</sup>(ここに, \_:残留体積含水率,k:定数, n:定数)で表現できることを示し,これは不飽和透水係数が( - ,)<sup>n</sup>に比例しかつ全水頭勾配が1で近似できるためと解釈した.本報では,実際の森林土壌の斜面でも同じような結果が得られるかを検討し,さらに土壌水分量と先行降雨指標(API: antecedent precipitation index),斜面流出水量との関係を検討した.

### 2.方法

(1) 観測場所・観測期間

観測場所は,山梨県北杜市に位置する瑞牆山山麓の流 域面積0.65haの森林斜面(植生:カラマツ,標高:約



図-1 観測地域・地点の概要



表-1 対象降雨イベント										
降雨イ ベント	降雨開始 日時	雨開始 日時 (hr)		ピーク降 雨強度 (mm/hr)						
1	9月28日 19時	31	31	7.6						
2	10月 3日 1時	72	84	6.8						
3	10月 8日 6時	35	112	8.8						
4	10月12日 20時	10	3	1.2						
5	10月19日 7時	52	123	13.6						
6	10月26日 8時	12	11	2.4						
7	10月30日 9時	18	21	3.0						

1500-1550m, 土層厚:約1-2m)である.観測場所の地形図 と断面の概略図を図-1に示す.土壌水分量の観測は,観 測点 P2 の表層より0.1,0.3,0.6-0.75m,P2.5の0.1, 0.65,0.9-1.05m,P2.5bの0.1,0.6,0.9mの場所で行っ た.いずれも0.1mの点はA層中にある.P2からの水平距 離高度差は,それぞれP2.5で11.3,2.8m P2.5bで19.1, 5.2m である.また,斜面流出量の観測はP2からの距離 30.0m,高度差5.8mの斜面末端の湧水部で行った.土壌 水分量の観測期間は,2004年10月2日16:50-11月3 日 12:20である.この間の降雨強度と斜面流出量の変化 を図-2に示す.表-1に降雨の特性を示す.

#### (2) 測定方法

体積含水率の測定には土壌水分センサー(CS616, Campbell Scientific, Inc.)とデータロガー(CR10X) を用いた.キャリブレーションカーブには,観測期間中 に飽和になったときの値と理論上の0のときの値(大気 中での値)を用いた.また,体積含水率とその変化率の 関係を明らかにするために,坂本ら<sup>2)</sup>の報告と同じく,10 分間隔の体積含水率のデータ5個を時間の二次関数で近 似し,この二次関数の微分値を変化率とした.斜面流出 量は三角堰での水位データによる推定値を用いた.

#### 3. 結果と考察

#### (1) 不飽和鉛直浸透による体積含水率変化

表層土壌水分量の時間変化率から浸透量が推定できれば,リモートセンシングによる浸透量推定の可能性もある.そこで坂本ら<sup>2)</sup>の報告と同じく,体積含水率とその時間変化率の関係を検討した.体積含水率 と不飽和透水 係数 k()の関係が次式であると仮定する.

$$k() = k_s( - r)^{n_1}/(s - r)^{n_1}$$
 (1)



図-3 整地面での体積含水率変化<sup>2)</sup>

ここに、k<sub>s</sub>:飽和透水係数, s:飽和体積含水率, ;: 残留土壌水分の体積含水率, n<sub>1</sub>:定数である.また,全水 頭 (=高度水頭+圧力水頭)の勾配d /dz(zは鉛直下 向きの座標)を1とし(数値計算ではこの仮定を用いる 場合が多い),降雨停止後は表層土壌の体積含水率の変化 は鉛直浸透だけによると仮定すると次式となる.

d /dt ( - ,)<sup>m</sup> (2) そこで, - ,とd /dt との関係を,坂本ら<sup>2)</sup>の結果の 図-3 とともに図-4 に示す.図-3 の結果は24 点の平均値 であるが,図-4 は,蒸発の影響がなく比較的安定した変 化を示した一例(P2,0.1m,10月26日,降雨イベント 6)である.図の右下ほど湿潤な状態で体積含水率の変化 率が大きい.なお,両図とも降雨直後に体積含水率の変 化が小さい時期があるが,本報ではこれは観測深度より 上(深さ0-0.1m)の土壌層からの浸透がある時期と解釈 して解析対象とはしなかった.

坂本ら2)の報告では、体積含水率が極端に大きいときに は(2)の比例関係が成り立たないことを示したが,森林斜 面を対象とした本報の例では,比例関係が成り立たない と言い切れる例は見られなかった.したがって,検討対 象とした森林斜面で上層からの浸透による影響がない時 期は, d /dz=1 と式(1),(2)で説明できると考えられる. ただし,定数 n,は降雨により幾分異なることがある.図 -4には,対象降雨の直前のデータから決定したn,と対象 降雨の直後のデータから決定した n<sub>4</sub>による外挿の結果も 示した.図のように,対象降雨の直後のデータから外挿 した場合には,図-3とは異なり(2)の関係よりも大きな 浸透は起こらないようにも見える.しかし,図-3の変化 は、体積含水率0.33程度で実際に微係数の大きな変化が 起こったようにも見えることから,土壌条件(図-3の土 壌は図-4の森林土壌よりも体積含水率が小さくその変化 率が大きい)によっては水分量が極端に大きなときに(2) の関係よりも大きな浸透が起こる可能性は否定できない。



#### 図-4 森林斜面での体積含水率変化 (降雨イベント6)

(2) 土壌水分量と先行降雨指標との関係

先行降雨指標 API は土壌状態と流量を関係づけるため の簡易な指標である.この指標が使えれば,降雨データ のみから流量を推定することも可能となる.そこで,土 壌水分量と API との関係を検討した.従来の標準的 API の定義式は次式である<sup>3)</sup>.

$$\operatorname{API}_{1}(t) = b_{1}^{i} P(t-i)$$
(3)

ここに, P(t-i):t 日より i 日前の降水量, b<sub>1</sub>:定数, 所定の日数(m日とする)までさかのぼった和(i=1~m) である .b<sub>1</sub>としては 0.85-0.95 などが示されている<sup>3)</sup>.こ の他に API として日数の指数関数を提案している例<sup>4)</sup>な どもあり,必ずしも一つの定義が確定しているわけでは ない. そこで,本報では体積含水率の変化がd /dt = k1 ( - ,)<sup>n</sup> (ここに k<sub>1</sub>: 定数) で表せると仮定して, 別 種の API も検討した.上記の常微分方程式の解は -={(1-n)k<sub>1</sub>}<sup>1/(1-n)</sup> t<sup>1/(1-n)</sup>である.つまり, - ,はtのべき 乗関数となる.一方,降雨がt日間ないとき式(3)の定義 式では $API_1(t)=b_1^t API_0 \ge t$ のべき乗関数にはならない(こ こに, API<sub>0</sub>:降雨停止時の API である). もし, API が土 壌水分量の指標であり両者が対応しているのなら, API と - 、とは関数形が一致している必要がある.つまり、 API が水分量の指標であり,水分変化量が「水頭勾配が一 定でかつ透水係数が( - ,)"に比例するときの変化 量」として扱えるなら,土壌水分と直接関係付けられる APIはtのべき乗関数である必要がある.そこで,次式の API も検討対象とした (ここに, b<sub>2</sub>:定数である).

$$API_2(t) = i^{b_2} P(t-i)$$
(4)

そして,このAPI<sub>1</sub>(t),API<sub>2</sub>(t)と森林斜面で観測した土 壌水分量との間にどのような関係があるかを検討した. API<sub>1</sub>(t)については,b<sub>1</sub>=0.8,0.9,1.0,m=5,10,20,30の 場合 API<sub>2</sub>(t)については 20日後の値がAPI<sub>1</sub>(t)のb<sub>1</sub>=0.85, 1.0 の場合に近くなる b<sub>2</sub>=-1,-0.7 の場合を対象とした. 一例として,10mmの降雨後に20日間降雨がない場合を仮





図-5 API の変化傾向(10mmの降雨後に20日間 降雨がない場合を仮定した場合)

図-6 API と斜面体積含水率との相関係数

			P2		P2.5			P2.5b			
	m	b	0.1m	0.3m	0.6- 0.75m	0.1m	0.65m	0.9– 1.05m	0.1m	0.6m	0.9m
	5	0.8	0.88	0.83	0.46	0.63	0.84	0.88	0.49	0.75	0.75
		0.9	0.85	0.87	0.48	0.56	0.79	0.86	0.41	0.68	0.68
		1	0.79	0.88	0.48	0.47	0.71	0.81	0.33	0.60	0.60
API1	10	0.8	0.87	0.85	0.55	0.59	0.83	0.87	0.43	0.72	0.68
		0.9	0.75	0.83	0.56	0.41	0.71	0.77	0.24	0.54	0.49
		1	0.46	0.61	0.44	0.12	0.43	0.50	-0.04	0.24	0.16
	20	0.8	0.87	0.85	0.54	0.61	0.84	0.87	0.44	0.72	0.69
		0.9	0.75	0.83	0.58	0.42	0.71	0.76	0.22	0.54	0.47
		1	0.29	0.44	0.43	0.00	0.27	0.29	-0.15	0.12	0.04
	5	-0.7	0.88	0.80	0.45	0.63	0.86	0.88	0.49	0.75	0.75
		-1	0.88	0.75	0.42	0.66	0.87	0.86	0.53	0.77	0.78
API2	10	-0.7	0.87	0.81	0.52	0.57	0.85	0.86	0.41	0.70	0.68
		-1	0.88	0.76	0.47	0.64	0.88	0.86	0.49	0.76	0.74
	20	-0.7	0.84	0.80	0.53	0.55	0.83	0.83	0.38	0.68	0.65
		-1	0.87	0.76	0.48	0.63	0.87	0.85	0.48	0.75	0.73

表-2 API と斜面各位置の体積含水率との相関係数行列

(m: API 計算で考慮する日数, b: 定数. 0.87 以上を網掛け)

定したときの API の値の変化を図-5 に示す.また, API と各位置・各深度での体積含水率との相関係数行列を表 -2に, API と平均体積含水率(全測定点での平均値)と の相関係数を API 計算で考慮する日数に対して図-6 に示 す.表-2より API は斜面の下部にある P2 では表層,中部 にある P2.5 では底層での体積含水率との相関係数が大 きく,最も上部にあるP2.5の体積含水率との相関係数は 小さいことがわかる.したがって,APIと斜面下部や斜面 中部の深層の体積含水率とを関係付けることは可能であ るといえる.図-6より,いずれのAPIでもmが大きいほ ど相関係数は小さくなり,さかのぼる期間5日までで土 壌水分量との相関係数が十分大きい API となることがわ かる.また,API1で b=1.0 としたとき,つまり観測時ま での降雨量を足し合わせただけの指標では 5日を超える と土壌水分量との相関係数が極端に小さくなることがわ かる相関係数が大きいのはAPI1のb1=0.8とAPI2のb2=-1 のときで両者の差は小さい.また,本報で示した式(4)の API,はパラメータの値に対する感度が小さく,パラメー タ推定に不確実性があっても影響は少ない, ロバスト性 を持つ指標と考えられる.

#### (3) 土壌水分量と斜面流出量との関係

流域の流出については,斜面流出と斜面近傍の湿地 (riparian zone)の影響で説明できるという説がある<sup>5)</sup>. この説によると,もし斜面と斜面近傍の湿地からの流出 量をそれぞれモデル化できれば,全体の流出量を再現で きることになる.一方,実験室で用いられる人工の湿っ た傾斜土層からの流出量は単純な2次の線形モデルで表 現でき<sup>6)</sup>森林斜面からの流出も同様に単純なモデルで表 現でき<sup>6)</sup>森林斜面からの流出も同様に単純なモデルで表 現できる可能性がある.そこで,体積含水率の全測定点 での平均値と斜面流出量との相関を検討した.両者の時 間変化を図-7 に,相関を図-8 に示す.体積含水率は日平 均値を用い,斜面流出量は,各日の0時のデータを用い た.図-8 では,降雨後の流斜面流出量の減少期の日とそ れ以外の日を異なる記号で示した.また,平均体積含水 率と斜面流出量を同じ日のデータで比べたときの相関係



#### 図-9平均体積含水率の関数の対数値 と流出量の対数値との関係

数は0.76であり,一日ずらせたデータで比べたときの相 関係数もほとんど同じ値であった.相関係数が比較的大 きく,図-8から両者の関係は非線形だが定式化が可能の ようにみえることから,降雨後の減少期については,流 出量 q と斜面平均水分量 には次式の関係があるのでは ないかと想定した(ここにK:定数,n<sub>2</sub>:定数).

q=K{( - ,)/( ,- ,)}<sup>m</sup> (5) この式では,式(1)とは異なり , ,, ,の値として観 測点全体の平均的な値を使っている.式(5)の考え方によ り,図-9に, ln{( - ,)/( ,- ,)}と ln qと の関係を示す., ,としては全体の最大値0.726,最 小値0.266を用いたときと最大値の平均値0.612,最小値 の平均値0.484を用いたが,前者の回帰係数が0.87であ るのに対し後者では0.66であったことから前者の図を示 した.図-9のように,降雨後の流量減少期には ln {(

- ,)/( <sub>s</sub>- ,)}と ln q とは線形関係になり,式 (5)で斜面流出量は表現できるといえる.これは,水頭勾 配は斜面勾配と一致して不変であり,平均的透水係数は

図-10 斜面流出量の実測値と式(5)による推定値

( - ,)<sup>№</sup>に比例する値として表現できるためと解釈で きる.これにより, API やリモセンなどで土壌水分量を 推定することで,斜面流出量を推定することが可能とな る可能性もある.

ここで、斜面流出に寄与する斜面土壌の体積は一定で V であるとすると,次式が想定できる.

$$q = - V d / dt$$
 (6)

式(5)と(6)が同時に成り立つとすると,両式の右辺どうしが等しいとおいて微分方程式が得られ,その解を用いると次の関係が得られる(n<sub>2</sub>-1).

$$t^{n_2/(1-n_2)}$$
 (7)

一般に使われる流量低減曲線の式<sup>7)</sup> (ここに, $q_0$ :低減開始時の流量, :定数, t:時刻)

α

$$q = q_0 \exp(-t)$$
 (8)

は,流域全体の流出量に関する式で,式(7)は斜面からの 流出量に関する式である.両式がともに流出現象の物理 式として正しいならば,式形の違いは,斜面での流出機 構をそのまま河川水の形成機構と考えることはできない ことを示唆しているともいえる.もし,式(8)で表される 流出量を基底流量と考えるかわりに式(5),(7)で表せる 流出量を基底流量と考えれば,低減期以外の全流出量と 基底流量(斜面からの流出量)の差から斜面近傍の河畔 湿地からの表面流出量を推定できるかもしれない.

そこで問題となるのは,降雨停止後の流量減少期につ いて得られた式(5)の関係が他の時期にも当てはまるか ということである.図-9を見る限りではあてはまらない ようにも見える.この検討のために式(5)の関係を観測期 間全体に適用した結果を図-10 に示す.図よりピークが1 日ずれる場合もあるが,図の左端の10月3日から6日の 値を除き,式(5)は斜面流出水のピーク流量をもある程度 再現できていることがわかる.10月3日から6日は図-2 に示したように期間全体を通じても流量の増加が極端で あった時期である.これは,それまで別々に存在した地 中水が連続したために起こった変化と推定している.こ のように森林斜面について流出量が比較的単純な式で再 現できたことから,流出現象を複雑にしているのは,湿 った層までの浸透量に関係する地上到達水量(蒸発散量) と不飽和浸透量であり,斜面そのものの応答は単純な関 係で表現できると考えられる.流域全体の流出量につい ては,数値地形情報により斜面と斜面近傍の河畔湿地を 分離した上で,土壌水分量の単純な関数となる斜面流出 量に湿地での表面流の流出量を加えることで,比較的単 純に表現できる可能性があるといえる.

#### 4.まとめ

実際の森林斜面の降雨イベントに対する土壌体積含水 率の変化を検討することで下記の知見が得られた.

- 1) 森林斜面の表層に近い土壌での降雨停止後の体積含水 率とその変化率との関係は,全水頭勾配が1で,不飽 和透水係数は(-,)<sup>™</sup>に比例するという鉛直浸透 過程として表現できた.
- 2) 土壌水分量と関係付けられる先行降雨指標として,降 雨後の経過日数のべき関数である

$$API_{2}(t) = i^{b_{2}} P(t-i)$$

が考えられる.この指標は,平均体積含水率との相関 係数が大きく,ロバスト性を有する.

3) 斜面からの流出流量は,斜面の平均的 を用い, {( - ,)/( ₅- ,)}<sup>™</sup> に比例するとして表現できた.これは,全水頭勾配は斜面勾配と一致して不変であり,平均的透水係数は( ,)<sup>ne</sup>に比例する値として表現できるためと解釈できる.また,この関係と一般的な流量低減曲線での関係と の違いは,斜面での流出機構をそのまま河川水の形成 機構と考えることはできないことを示唆しているともいえる.

4) 3)の関係を,流量低減期以外に適用した場合でも斜面からの流出量をある程度再現できる.

今後の検討課題としては,流出システムの内部状態(土 壌水分量)と出力(斜面流出量)の関係に基づく入力(地 上到達水量,蒸発散量)の逆推定,同時に行った土壌水・ 流出水の水質観測結果の解析,晴天時の土壌水分量変化 の解析などを予定している.

謝辞:本研究で用いたデータの取得では,山梨大学大学院医学 工学総合教育部修士課程,山上善久君,山梨大学工学部土木環 境工学科平成17年度卒業生,阿部陽一郎君の協力を得た.記し て謝意を表したい.

#### 参考文献

- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. and Todini, E. : Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL, Journal of Hydrology, Vol.175, pp.293-338, 1996.
- 2) 坂本康,山上善久,芳賀弘和,藤田昌史:単木周辺部の不飽 和表層土壌層での降雨直後の水分量と浸透量の時間変化と空 間分布,水工学論文集,第49巻,pp.61-66,2005.
- Linsley, R.K. and Franzini, J.B.: Water-Resources Engineering, pp.45-47, 1979.
- 4) Descroix, L., Nouvelot, J.-F. and Vauclin, M. : Evaluation of an antecedent precipitation index to model runfoff yield in the western Sierra Madre (North-west Mexico), J. Hydrology, 263, pp.114-130, 2002.
- McGlynn, B. L., McDonnell, J. J., Seibert, J. and Kendall, C.: Scale effects on headwater catchment runoff timing, flow sources, and groundwater-streamflow relations, Water Resources Research, Vol. 40, W07504, 2004.
- 6) 坂本康,竹内邦良:水質情報に基づく降雨-流出システム解析についての一考察第31回水理講演会論文集 pp.143-148, 1987.
- 7)土木学会水理委員会水理公式集改訂委員会:水理公式集, p.147,1985.

(2005.9.30受付)