

## 実流域斜面における土中水分の変化について

開発土木研究所河川研究室 正員 市川 嘉輝  
 北海道開発局 正員 渡邊 康玄

### 1. はじめに

河川への流出量は降雨量の大小や降雨強度の強弱によって異なり、降雨に対する流出の応答はいつも同じ割合ではない。降雨は様々な過程を経て河川へ流出する。降雨が河川へ流入するまでの過程として最も多いのは流域斜面からである。山地流域では面積のほとんどが斜面であり、それらは樹木などの植生によって覆われている。流出までの過程のうち一部の水分は樹幹や葉に遮られ蒸発し、残りは樹幹を通り抜けるか伝わるかして土壌に達する。土壌に達した水分も蒸発散する成分、土壌に貯留される成分、流出する成分などに分かれる。流出する成分は表面流出・中間流出・地下水流等に分けることができるが、これらの流出量および流出形態は、土壌中に貯留されている水分量の違いや変化によって異なるものと思われる。流出解析を行うとき、降雨と流出の関係パラメータを求め導く流出モデルは多いが、降雨の浸透流出を物理的に表す研究も行われている<sup>1)</sup>。森林流域での長期間の計算を行うモデルを作成する場合には、土壌、蒸発散や地下水などを総合的に考えなければならない<sup>2)</sup>。しかしながら、土中の水分量の変化は実際には非常に複雑で把握する事が困難な場合も多いため、本研究では山地流域斜面の一部をモデル斜面として測定し、土中の水分が時期的にまた時間的にどのように変化するか、これにより土壌水分量の違いがどのように流出に影響するかを検討することとした。

### 2. 測定地点

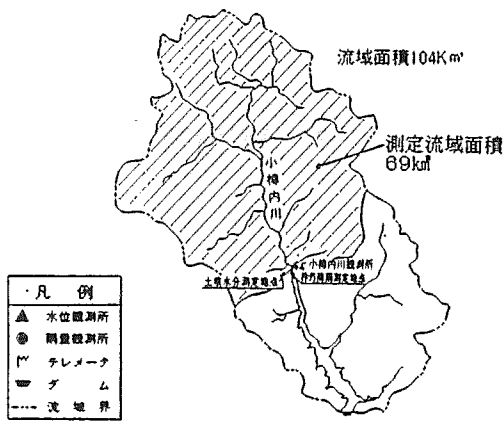


図-1 測定流域図

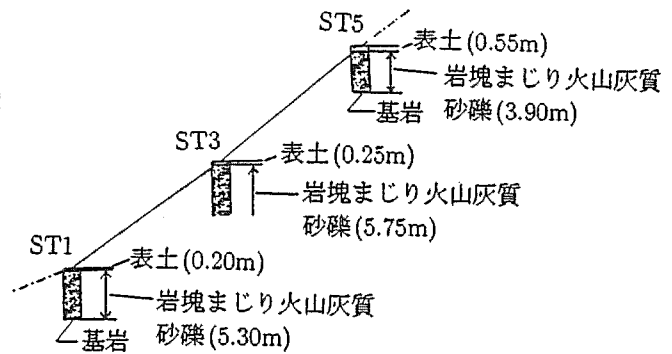


図-2 測定斜面柱状図 (ST1, ST3, ST5)

測定対象流域は図-1に示す小樽内川流域(流域面積 104km<sup>2</sup>)の小樽内川観測所から上流(流域面積 69km<sup>2</sup>)である。流域にはエゾマツやトドマツなどの針葉樹やブナやナラなどの広葉樹が生息し、水源涵養林とされている。土壌の水分変化の測定は小樽内川下流の河川に面する斜面の一部で、植林されたと思われる針葉樹林が立ち並ぶ斜面で行った。樹木間の横断幅はおよそ 3 m、測定を行った斜面の法面長は 5 0 m、斜面こう配はおよそ 33°から 39°でほぼ一様と見られる斜面を用いた。測定斜面の下端からは積雪期間を除いた各期間で伏起流と思われる流水を確認することができる。測定斜面の基岩までの土質状態を柱状図で図-2に示す。

About a Change of Water During Soil in Mountainous  
 By Yoshiteru ICHIKAWA, Yashuharu WATANABE

### 3. 林内降雨と林外降雨

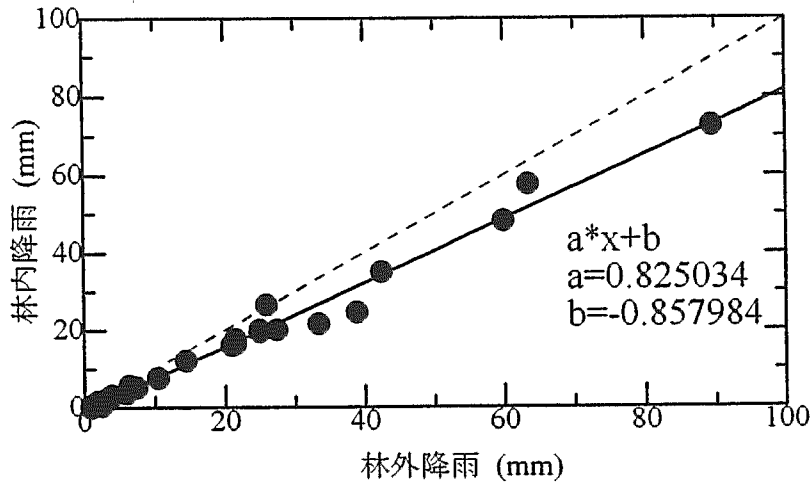


図-3 林内および林外の雨量関係図

降雨のうち河川の流量に影響を及ぼすのは、表面流出や中間流出、地下水流出が大部分を占める。しかしながら、降雨それ自体が地面に達しなければ河川の流出に影響を与えることはできない。山地河川では、流域面積のほとんどを樹木群の幹や枝や葉によって覆われている。一般に降雨が樹木群によって遮断される割合は全降雨を100%とすると、そのうちの20%ほどと言われている。松林ら<sup>3)</sup>の研究によれば広葉樹においては降雨の約72%が樹幹通過降雨となっている。本研究の試験地の植生は、前述に述べたようにエゾマツやトドマツの針葉樹である。広葉樹と針葉樹では葉の面積や重なり具合が明らかに異なっていることから、樹幹を通過する降雨の割合にも相違があるのではないかとと思われる。図-3に林外の降雨量と林内の降雨量の関係図を示す。雨量計は林内の測定斜面部と斜面からやや離れた開けた平地にそれぞれ設置した。図中の点は、降雨発生の前後24時間において降雨の発生がないものを一雨とし、その総量をプロットした。樹木面積の割合は雨量計を中心に100m<sup>2</sup>中の0.49%であった。図中の直線は最小二乗法による林内雨量と林外雨量の相関直線である。この図から降雨量の大小に関わらず、降雨量の約83%が樹幹を通過していることが分かる。針葉樹においても広葉樹ほどではないが降雨をある程度遮断し、林床への到達を減少させる役割をしている。

### 4. 土中水分の変化および河川への影響

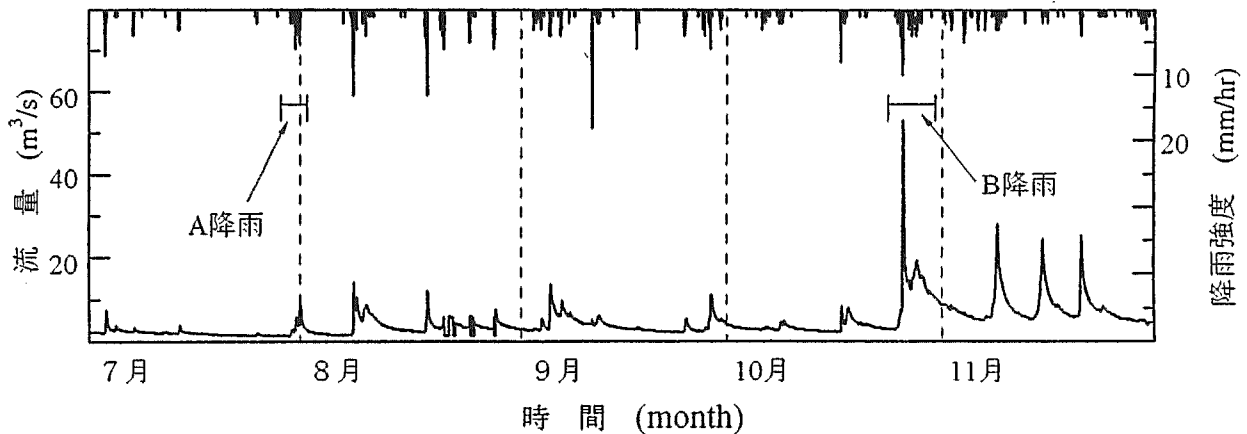


図-4 降雨強度および流量図

山地流域における土壌中の水分量は、降雨の浸透や蒸発散などによって常に変化している。土壌中の水分量の変化や分布は降雨強度や土壌の粒度や構成成分、気温や植生などの違いによって異なる。土壌中の水分量の変化の様子を把握するためサクシオン・ポテンシャル（以後サクシオンと呼ぶ）と同地点において体積含水率を測定した。サクシオンの測定点は斜面方向10m間隔に5ヶ所、これらを下からST1からST5とし、ST1,ST3,ST5には体積含水率を測定するセンサーを設置した。サクシオンは20cm,40cm,70cm,100cmの4深度

(ここで深度とは鉛直深度のことを言う) に設置したテンシオメータによって測定し、体積含水率はTDR(Time Domain Reflectmetry) 測定方式によるセンサー(上から1:15cm,2:15cm,3:15cm,4:15cm,5:30cmの計90cm)のプローブ(カナダ DS gabel社製)で測定した。体積含水率のデータはそれぞれのセンサーのセンサー長の平均値である。本研究では代表測点としてST1のサクシオンおよびTDRのデータを用いた。

河川の流量データおよび雨量データは測定斜面付近に設置されている北海道開発局の観測所から得た既存のデータを用いた。斜面からの流出量を測定するため、表面流出成分と中間流出成分の2成分を採水測定する器具を設置した。この採水器の幅は100cm、中間流出成分採取口の深さは60cm、計測には転倒マス式の雨量計を用いた。土中水分の検討に用いた降雨は、図-4の中の7月のA降雨と10月のB降雨とした。

#### 4-1 土中水分の変化

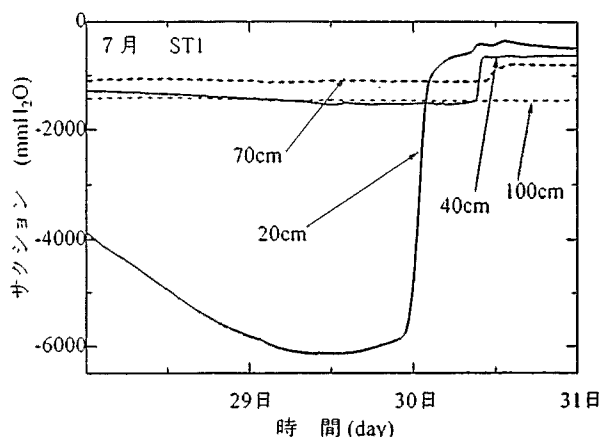


図-5 A降雨時のサクシオン

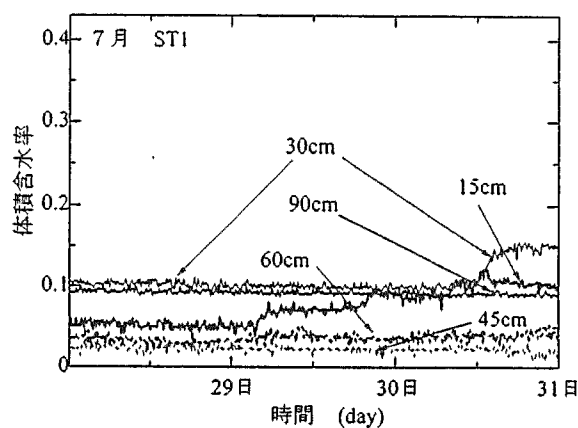


図-6 A降雨時の体積含水率

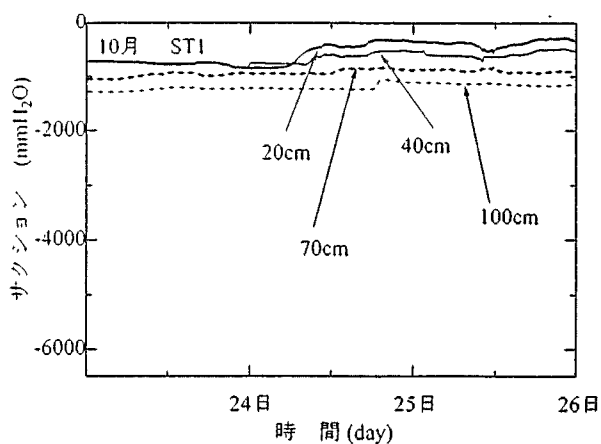


図-7 B降雨時のサクシオン

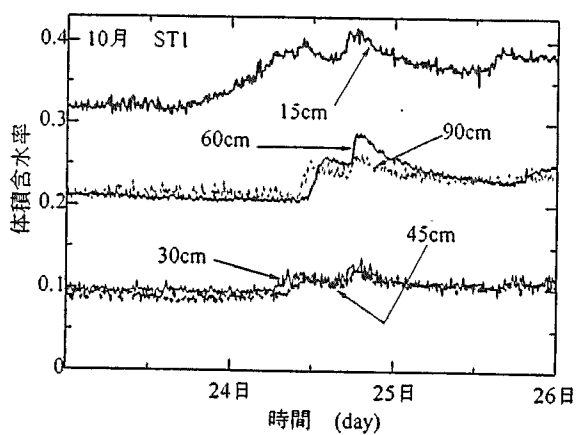


図-8 B降雨時の体積含水率

図-5と図-6にA降雨時のST1のサクシオン変化図と体積含水率の変化図を示す。図-7と図-8にB降雨時のST1のサクシオン変化図と体積含水率の変化図を示す。7月は気温の上昇とともに地温も上昇し、また樹木などの植生の活動が活発化する。このため蒸発散量が多くなり土中の水分量は極めて少ない状態になると考えられる。10月は降雨期を過ぎ、土壌には安定した水分量(ここで安定した水分量とは、重力ポテンシャルやサクシオンポテンシャルなどのポテンシャルが釣り合った状態を言う)か、またそれ以上水分量が貯留されている。これら二つの、明らかに土壌の水分量が異なる時期に降雨が発生した時どのように土壌の水分が変化するかを検討する。

図-5のサクシオン図では蒸発散の影響、特に植生による蒸散の影響が大きいと考えられる値の変化が土壌の表面から20cmのところ設置しているテンシオメータで見られる。他の深度では降雨の発生による影響が現

れるまでは、 $-1000\text{mmH}^2\text{o}$ から $-1500\text{mmH}^2\text{o}$ の間ではほぼ平行な値であるが、深度20cmの所に設置されているテンシオメータだけは $-6000\text{mmH}^2\text{o}$ よりも大きい負の値であり、測定場所が林の中であることから植生の根による吸引力が作用したものと考えられる。

同じ時間における体積含水率は図-6に示すように、降雨発生前まですべてのセンサーでほぼ一定の値にある。植生の影響で表層土のサクシオンが大きく負値へ変化しているが表層土に位置する体積含水率のセンサーに変化がないことから植生による吸水力には限界があり、ある程度の水分量になると植生の吸水力よりも大きい水分の吸着力が土壌にあると思われる。

降雨発生後、サクシオンの値の変化より深度70cmまでの所で水分が浸透していると思われるが、図-6の体積含水率図では降雨発生後、徐々に含水率が大きくなっているセンサーは深度30cm以深の値に水分が浸透したと確認できる変化は見られない。ここで、テンシオメータの値は急激に変化し体積含水率の値は徐々に変化するのは、点で測定するテンシオメータに対し体積含水率はセンサー長平均というデータの性質の違いから起こるものである。

土壌が乾燥状態にあるとき、微量の水分増加に対してもテンシオメータは反応していることから、あらためてサクシオンと体積含水率は非線形の関係であることが分かる。土壌が乾燥している時期では降雨が発生した時、土壌上層の貯留量が多いため水分が土壌下層へ浸透する量は少なく、また深度が深い場合に水分は浸透しないこともある。

10月のサクシオンの値は7月と比較すると各深度のテンシオメータとも降雨に対する応答性が良くなり負値も多少減少している。7月のA降雨時には応答がなかった深度100cmのテンシオメータにも反応が見られる。体積含水率も降雨による応答がA降雨時よりもB降雨時の方がはるかに良くなっている。土壌が湿潤し、水分が移動することによる抵抗が軽減したためと考えられる。体積含水率の値も各深度で降雨に対する応答が見られ、水分が土壌の深層へ浸透していることが分かる。

図-7のサクシオンデータは土壌深度が大きくなるほど値の変化量が小さくなっている。これに対し、図-8の体積含水率のデータは、センサー1の深度15cmまでと、センサー2,3の深度15cmから45cmまでとセンサー4,5の深度45cmから90cmまでのほぼ3つに値が分かれており、体積含水率の値の大きさは1,4,5,2,3のセンサー順になっている。また、給水状態と排水状態にある時のデータの傾きは深度の深いところにある4,5のセンサーの値の傾きが最も大きく浸透速度が速い。このことからサクシオンの値の大小が必ずしも土中水分の多少にはならないし、土中の水分の分布が多様であることが分かる。測定値含水量の変化を把握するための簡易的方法にテンシオメータを用いる場合があるが、この場合水分が測定地点まで浸透したか浸透しないかの判別はできるがサクシオンの値のみで浸透量を判断することは難しい。サクシオンと体積含水率は線形な関係ではないのでサクシオンデータで水分量の把握をするためには土壌特性を先に把握する必要がある。

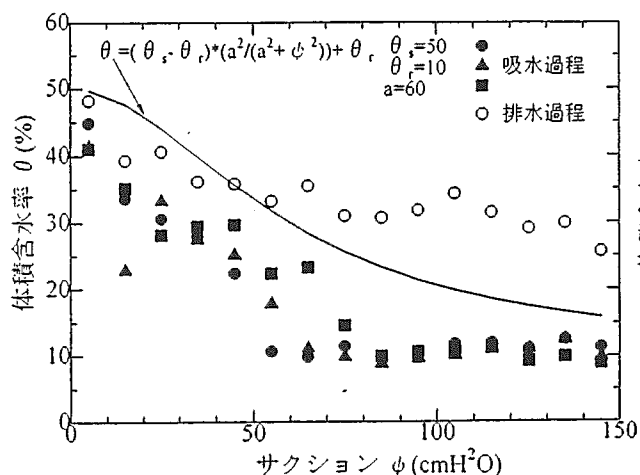


図-9 土壌のサクシオン $\psi$ と体積含水率 $\theta$ 関係図

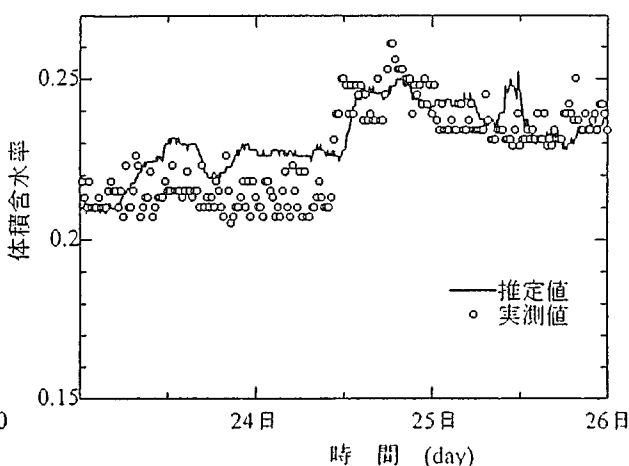


図-10 含水率の推定値と計算値

図-9に流域土壌のサクシオンと体積含水率の給排水実験による関係図を示す。この図中の曲線はサクシオンと体積含水率との関係式より求めたものであり(1)式で表される。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{a^2}{a^2 + \psi^2} \right) + \theta_r \quad (1)$$

ここで、 $\theta$  は体積含水率、 $\theta_s$  は最大含水率、 $\theta_r$  は水分移動ができないと思われる含水率、 $\psi$  はサクシオン、 $a$  は定数である。なお図-9中の曲線は(1)式で、 $\theta_s = 0.5, \theta_r = 0.1, a = 60$ としたものである。(1)式の $\psi$ に図-7の70cmのサクシオンデータを代入し、求めた $\theta$ を $\theta$ の推定値として、図-8の60cmの体積含水率の実測値と比較したものが図-10である。図-10によると、(1)式のような近似式でも $\theta \sim \psi$ の関係をほぼ表現可能と思われる。しかしながら、図-9に示すように、 $\theta \sim \psi$ の関係は吸水過程と排水過程では異なる傾向が明らかに見られ、より正確な体積含水率を把握するためには、 $\psi$ から間接的に $\theta$ を求めるのではなく、今使用したTDRによる $\theta$ の直接測定が必要となる。

#### 4-2 河川への影響

蒸発散量が大きく土壌の水分量が少ないと思われる時期と降雨期後の土壌が湿潤している時期とで、河川への流出にどのような影響を与えるかを検討する。降雨前の土壌が乾燥していると思われる時期のA降雨と、降雨後の土壌が十分に湿潤状態にある時期のB降雨との二降雨の総降雨量、総直接流出高、流出率を表-1に示す。

表-1 流出率表

	A降雨	B降雨
総降雨量(mm)	45.7	158.0
総直接流出高(mm)	6.1	89.1
流出率	0.13	0.56

表-1の流出率図よりA降雨とB降雨の総降雨量は45.7mmと158.0mmであり、このときの流出率はA降雨時は0.13、B降雨時は0.56である。降雨量に大きな違いこそあるが流出率に4倍以上もの差があるのは、これら二つの時期の貯留量の差を示すものである。

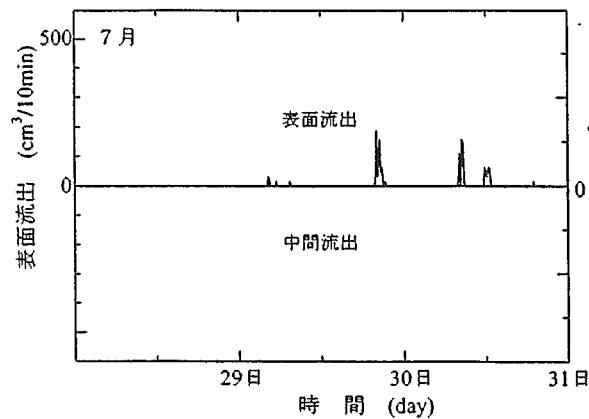


図-11 A降雨時の表面流出と中間流出(ST1)

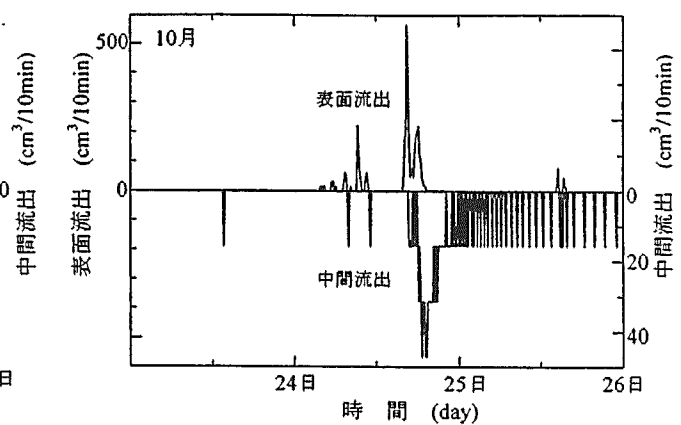


図-12 B降雨時の表面流出と中間流出(ST1)

図-11にA降雨時の表面流出と中間流出の図を、図-12にB降雨時の表面流出と中間流出の流出図を示す。図-11には表面流出の発生は確認できるが中間流出は確認できない。図-12では表面流出と中間流出の両方が確認することができる。蒸発散の量が大きい時期は土壌の貯留量が極めて少なく、特に表層付近は乾燥の度合いが高い。このため降雨の浸透性が良くないため表面流出が発生しやすい状態にある。また浸透した水分は土壌の上方から貯留され水分の移動がなく、中間流出の発生は見られない。よって降雨による流出は表面流出のみであるため流出時間は短く流出率は小さいと推定される。

土壌が湿潤している時期に土壌の浸透能力を上回る降雨強度が発生した場合、表面流出成分として降雨は流出する。この時の表面流出は斜面に水位が発生して流れる感じではなく、腐食土壌を伝わるように流下していた。浸透した水分のうち、土壌が貯留可能な量まで貯留し、土壌中を浸透して流出する。この時の河川への流出量は速い中間流出成分が加わるため多く、流出時間も長く河川への流出は大きくなると考えられる。

## 6. おわりに

樹木の降雨遮断率は低くはなく、特に山地流域では流域面積のほとんどが樹木で覆われているため、流出解析を行う場合考慮する必要があると思われる。降雨に対する流出の応答量が土壌中に貯留されている水分量によって異なることを流域のサクションや体積含水率の測定、斜面からの流出を採水し測定することで明確になった。蒸発散量の多い時期の降雨は浸透しても土壌の上方から貯留されるため土壌内を浸透し河川に流出する水分はほとんどなく、表面流出による河川への流入がほとんどである。降雨期によって土壌の貯留量は安定し降雨は表面流出と中間流出の二成分となって河川へ流入する。土壌の貯留量は河川への流出に大きく影響を与えるため、山地流域において流出量を予測するときは、土壌の貯留量の変化も考慮する必要がある。

### 参考文献

- 1) 藤田陸博, 岡泰道, 下島栄一, 藤間聡, 坂本康, 渡辺邦夫, 山田正; 土壌における降雨の浸透過程の研究, 水理講演会論文集 Vol.32, 1988
- 2) 端野道夫, 吉田弘, 岡村浩爾; 森林水循環モデリングと水収支の評価, 水工学論文集 Vol.36, 1992
- 3) 松林宇一郎, 高木不折, G. T. ベラスケス, 貴家尚哉, 鷲見哲也; 山腹斜面における浸透性と雨水流出経路への植生の影響, 水工学論文集 Vol.38, 1994
- 4) 近藤純正; 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.4
- 5) 市川嘉輝, 渡邊康玄, 清水康行; 現地実験斜面における流出測定について, 土木学会北海道支部論文報告集, 51, 1994