

平成 17 年度
丹沢大山保全緊急対策委託
流域総合調査報告書

平成 18 年 2 月
国立大学法人東京農工大学

目 次

土壌浸食量調査	1
1. はじめに	2
2. 調査地および調査方法	3
(1) 調査地概要	3
(2) 調査方法	5
3. 結果と考察	16
(1) 樹幹通過雨量と林床植生被度別の土壌浸食量	16
(2) リター堆積量、林床植生量と土壌浸食量	18
(3) リターの下方移動量と風・雨の関係および斜面でのリター移動量	22
(4) リターの供給量と腐朽速度	33
(5) リター堆積量変化の推定	34
(6) 浸透能に関する調査方法の比較	36
(7) リター堆積量と浸透能	44
(8) 浸透率	45
(9) 土壌浸食量と浸透率の季節による比較	47
(10) 降雨量と pF 値の関係	50
(11) 降雨後の pF 値の変化時間	55
緊急土壌浸食対策の検討	56
1. 植生衰退地における一般的な土壌浸食対策	57
2. 堂平の特性に合った緊急土壌浸食対策	57
3. 結論	58
4. おわりに	60
5. 参考文献	60
水流出過程調査	61
1. 調査の目的と概要	62
(1) 調査の目的	62
(2) 土砂礫の輸送	62
(3) 浮遊砂濃度と流量間のヒステリシス	63
(4) 調査地の概要	65
2. 調査方法	68
(1) 雨量	68
(2) 流量	68

(3) 浮遊砂濃度	69
(4) 濁度	71
(5) 土壌水分計	72
3 . 結果および考察	73
(1) 降雨と流量	73
(2) 降雨と浮遊砂濃度	74
(3) 降雨、流量および浮遊砂濃度	76
(4) 濁度計による浮遊砂濃度の補完	78
(5) 流量と浮遊砂濃度	79
(6) 土壌水分変化	82
4 . 結論	83
5 . 引用文献	83
渓流水質調査	84
1 . 調査の目的	85
2 . 調査方法	86
(1) 渓流水の採取	86
(2) 分析方法	87
3 . 結果と考察	89
(1) 水質の季節変動	89
(2) 採水点ごとの水質	89
(3) 地形と水質	95
(4) 水温と水質	97
(5) 流域の植生と水質	99
(6) 採水点の溪畔林と水質	99
(7) 中津川上流域の平均物質濃度	100
(8) 丹沢山地の渓流水質	102
4 . まとめ	104
5 . 文献リスト	105

土壤浸食量調査（堂平地区）

1 はじめに

東丹沢の堂平地区（神奈川県清川村）ではシカの採食圧により林床植生であるスズタケが衰退し、これに伴ってリター（落葉・落枝）の堆積量も減少し、広範囲で土壤侵食が進行し深刻な問題となっている。表層土壤の侵食は樹木の根を露出させ、倒木の一因となっているだけでなく、林床に生息する生物相に影響を与え、さらに土壤が流下する溪流の生態系にも悪影響を与えている。流出した土壤は濁水となって水源を汚濁し、また貯水ダムに流入して堆砂を進行させ耐用年数の低下をひきおこす可能性がある。

土壤侵食に対する林床植生やリターの機能としては一般に次のようなものがあるとされている（三原、1951）。1) 土壤層表面を保護し、雨滴侵食を弱める。2) 森林土壤の発達に寄与し、透水性を良好に保つ。3) 雨滴エネルギーを抑止し、クラスト（難透水性の土壤）の形成を妨げ、浸透能の低下を防止する（恩田・湯川、1995）。4) 地表流の流速を弱めて層状侵食を緩和する。一般の健全な森林では林床植生やリターが多量に存在しているため土壤侵食は抑止されている。

堂平地区では、通常の裸地における土壤侵食とは異なり、シカの採食圧により林床植生が衰退してはいるが上層木としてブナ林が存在しているため毎年秋にはリターフォールによってリターが多量に供給されている。しかし、供給されたりターは地表流や風などによって運搬・移動され、さらに微生物による分解を受け、一部シカの採食などによって時間の経過とともに減少し、時期によっては地表面の露出が発生している。そのため、林床植生およびリターの堆積量は季節により変化しており（三浦、2000）、これに伴って土壤侵食量も変化していると考えられる。

そこで本研究では、東丹沢の堂平地区の林床植生が衰退したブナ林において、樹冠通過雨量と土壤侵食量の関係、林床植生量およびリター堆積量と土壤侵食量の関係を明らかにするとともに、林床植生量とリター堆積量の季節変化と土壤侵食量の季節変化の関係を明らかにし、これらの結果を基に堂平に適する土壤侵食対策手法を提案することを目的とする。

次に、林床植生の衰退およびリター堆積量の減少が表土層の浸透能の低下に与える影響を明らかにする。具体的には浸透能と浸透率に関連する 3 種類の試験方法を実施して被度およびリター堆積量の違いと浸透能・浸透率の関係を明らかにし、さらに、浸透能・浸透率と土壤侵食量の関係について明らかにする。

2. 調査地および調査方法

(1) 調査地概要

調査地は神奈川県愛甲郡清川村、東丹沢堂平地区である。調査位置図を図 1 に示す。地質は海成火砕岩類を主体とする新第三紀層丹沢層群である。表層は厚さ 2~3m のローム（火山灰）で覆われ、透水性は比較的良好である。標高は約 1,190m で、斜面勾配は 5 度~33 度程度である。調査箇所の植生はヤマボウシ・ブナ群集で、高さ十数 m のブナが卓越している。林床植生は 20 年前まではスズタケが卓越していたが、現在では衰退してほとんどみられず、モミジイチゴ、バライチゴ、オオバノヤエムグラ、アザミ類等のシカの不嗜好性植物が一部で見られる。本調査地の斜面は南向き斜面で比較的日射は良好である。

林内の林床植生はシカの採食圧により衰退しているが、一部ではシカによる採食を防ぐために試験的に植生保護柵が設置されている。写真 1 に示す植生保護柵は平成 9 年度に設置された柵であり、柵内では植生はかなり回復している。



図1 調査位置図 (神奈川県愛甲郡清川村、丹沢堂平地区)



写真1 堂平の植生保護柵と林床植生 (左側は植生保護柵内)

(2) 調査方法

①試験斜面による土壌浸食量、リター流出量調査、地表流量の測定

堂平地区のブナ林の林床植生の被度とリター堆積量の違いによる土壌浸食量、リター流出量および地表流の流出量の違いを検討するために、図 2 に示す試験斜面枠 ($2\text{m}\times 5\text{m}=10\text{m}^2$) (A タイプ) を 3 箇所設置した。斜面勾配は 33 度と同一であり、林床植生の被度大 (植被率約 80%) (以降、被度大と呼ぶ)、被度中 (植被率約 40%) (以降、被度中と呼ぶ) の試験斜面は植生保護柵内に、被度小 (植被率約 1%) (以降、被度小と呼ぶ) の試験斜面枠は柵外に設置した (図 3)。それぞれの試験斜面を写真 2、写真 3、写真 4 に示す。また、各試験斜面は同一の斜面上にあり最も離れている被度中と被度小でも約 50m 以内であり近接している。各試験斜面には図 2 に示すように、樹冠通過雨量を測定するための雨量計 (転倒弁式、1 転倒 0.5mm) を 1 個ずつ、また、試験斜面の下部に土砂、リター、地表流を捕捉するためのステンレス製の捕捉箱 (幅 40cm、奥行 40cm、長さ 2m) を 1 個ずつ設置した。捕捉箱の内部には不織布を設置してあり、これにより捕捉箱へ流下してきた土砂やリターの混ざった地表流を濾過し、土砂やリターと水に分ける。濾過された水の流量は転倒弁式の量水計 (1 転倒 500ml) により測定した。なお、2005 年 7 月から 11 月まで被度大、被度中、被度小の試験斜面内に深さ 10cm、20cm のテンシオメータを各々 1 台、計 6 台設置して pF 値の変化を測定した。

樹冠通過雨量と地表流の流出量は 1～2 分間毎に計測し、樹冠通過雨量については 3 箇所を平均したものを本調査地林内の樹冠通過雨量とした。2004 年 7 月 5 日～11 月 21 日の期間に 1 週間から 2 週間毎に計 15 回および 2005 年 3 月 20 日～12 月 4 日の期間に 1 週間から 2 週間毎に計 28 回、捕捉箱に堆積している土砂、リターを採取して東京農工大学の実験室に持ち帰り、土砂とリターを分離した後に、乾燥機を用いて 105℃で乾燥して、それぞれの絶乾質量を計測した。また、表層土のサンプルを採取して絶乾質量を測定した。

土壌浸食量を USLE を用いて推定する場合には、斜面長による影響を表すパラメータである斜面長係数 L および斜面勾配による影響を表すパラメータである傾斜係数 S を求める必要がある。このため、斜面長を 5m、10m、20m と変化させて試験斜面 (B タイプ) を、いずれも同じ斜面勾配 33°、植生被度約 1%の斜面に設置した (図 4、写真 5)。また、斜面勾配を 12°、19°、33° と変化させて植生被度 1%の斜面に、幅 2m、長さ 5m の試験斜面 (C タイプ) を設置した (図 4、写真 6)。試験斜面 (B)、(C) では斜面の下部に不織布を設置して、水は濾過して、土壌およびリターのみを捕捉する構造となっている (図 4)。

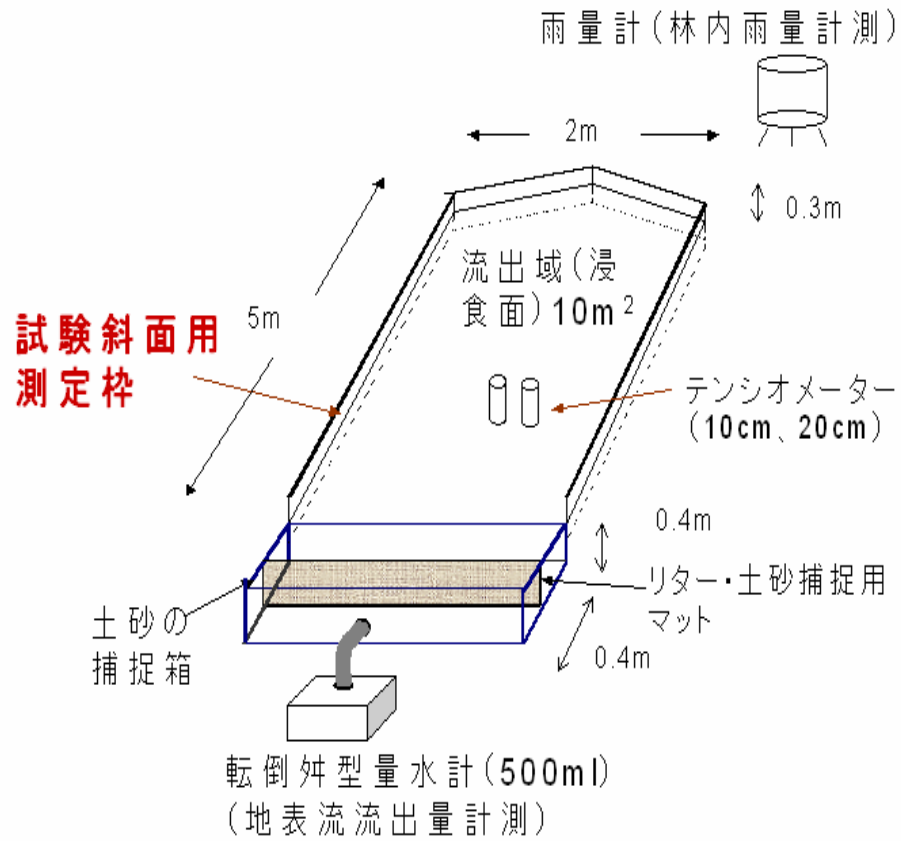


図2 試験斜面(Aタイプ)の模式図

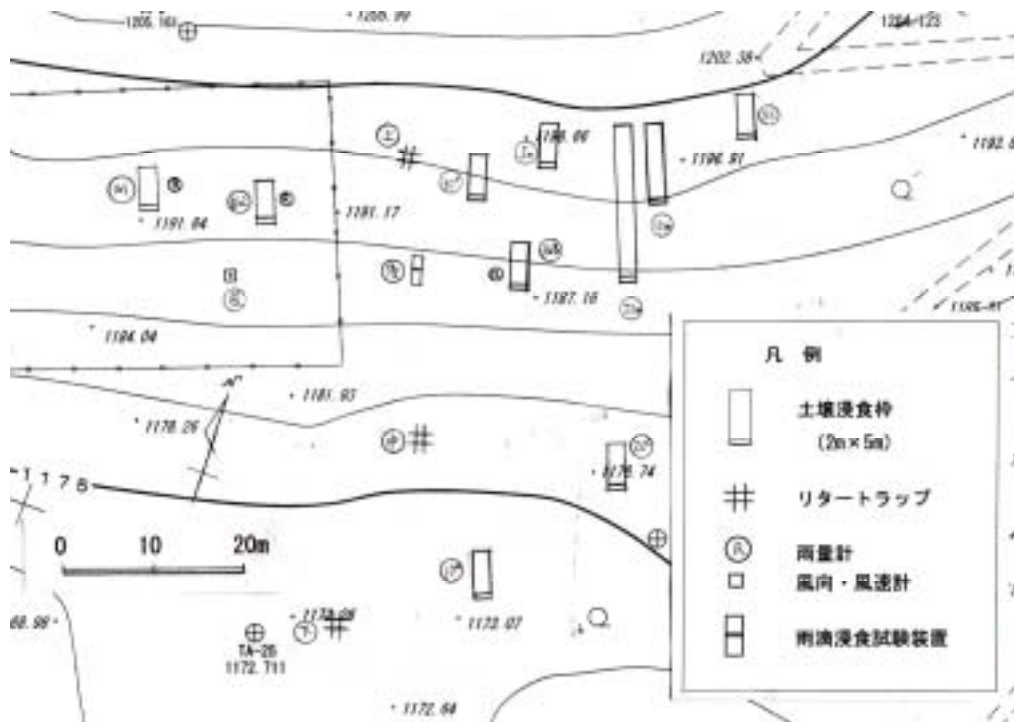


図 3 堂平地区土壤浸食調査施設配置図



写真 2 試験斜面、被度大



写真3 試験斜面、被度中



写真4 試験斜面、被度小

簡易試験斜面(B)、(C)の模式図【簡易調査】

(斜面長、斜面勾配の影響)

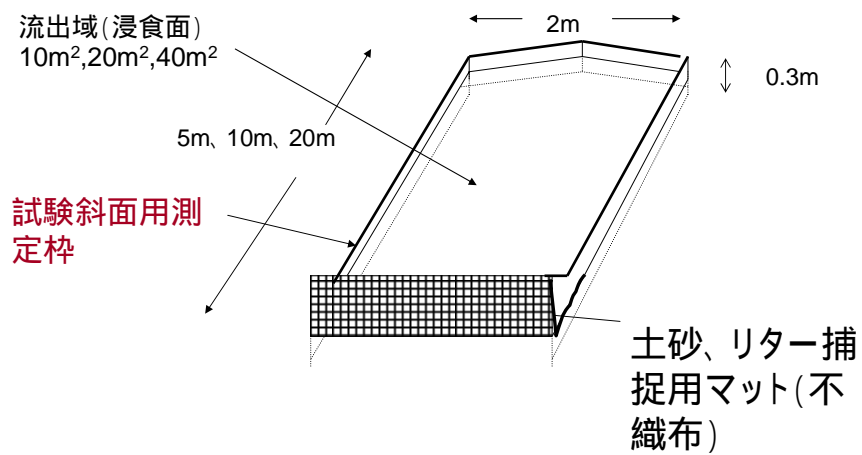


図4 試験斜面(B,Cタイプ)模式図

試験斜面(Bタイプ)



写真5 試験斜面(Bタイプ)

試験斜面(Cタイプ)



写真6 試験斜面(Cタイプ)

②リター堆積量調査

試験斜面内の林床植生やリター堆積の状態を攪乱することを避けながら、各試験斜面の被度（大、中、小）と同じ状態での林床植生量とリター堆積量を測定するために、試験斜面の付近で試験斜面内と同程度の植生量かつリター堆積量が存在すると判断される箇所に 0.25m^2 ($0.5\text{m}\times 0.5\text{m}=0.25\text{m}^2$)の調査枠を設置し、その調査枠内の植生とリターを採取した。なお、調査枠の位置は少しずつ移動させた。調査枠内から採取した林床植生およびリターは実験室に持ち帰り、**105度C**で乾燥して絶乾質量を測定した。なお調査枠内の林床植生およびリター堆積量は**2005年4月2日～11月20日**の期間に**1週間**から**3週間**毎に計**17回**採取を行い測定した。

リターは落葉、落枝、樹皮、ブナ球果等から構成されている。リターの中でも落葉部分が雨滴侵食の抑制に特に効果が高いと考えられる。また、落葉部に比べ落枝、樹皮等の割合は比較的多く、季節的な変化もあったため、リターを、落葉部と落枝、樹皮、ブナ球果に分離してそれぞれの質量を測定した。さらに落葉部の中でも未分解の大きな落葉（**12mm** ふるいにとどまるもの）、分解を受けた小さな落葉（**12mm** のふるいを通りし **2mm** のふるいにとどまるもの）とに分類してそれぞれ質量を測定した。

③樹冠からのリター供給量、リター移動量およびリター腐朽速度調査

リター堆積量の季節変化・年間収支を明らかにするためとリターの移動機構を解明するために、風向風速を観測し、樹冠からのリター供給量、リターの移動量およびリターの腐朽速度の調査を行った。

樹冠からのリター供給量、リターの移動方向、リターの移動量、リターの移動の要因を明らかにするため図5、写真7に示すようなリター移動量測定柵を設置した。リター移動量測定柵は図3に示すように植生保護柵外において、斜面上部の勾配約**30°**の箇所と斜面下部の勾配約**5°**の箇所に**2004年12月7日**に設置し、斜面中部の勾配約**20°**の箇所には**2005年5月22日**に設置した。このリター移動量測定柵は高さが約**0.9m**で斜面の最大傾斜方向（ほぼ南北方向）とこれに直角な方向（ほぼ東西方向）の計4方向に幅**1.0m**の開口部を持っており、これらの4方向（東、西、南、北）の開口部により風や地表流により移動したリターをメッシュ幅約**2mm**の網で捕捉できるようになっている。さらに、柵の中央部には、樹冠より落下してくるリターを捕捉するため開口部が**1.0m×1.0m**の網（リタートラップ）を設置した。設置後、定期的にこれらのリター移動量測定柵内に堆積しているリターを採取して実験室に持ち帰り**105度C**で乾燥し絶乾質量を測定した。斜面上部、下部は**2005年3月20日～12月4日**の期間に**1週間**から**2週間**毎に計**27回**、斜面中部は**2005年5月29日～12月4日**の期間に**1週間**から**2週間**毎に計**20回**採取をおこなった。風向風速計はシカ柵内に設置し、**2005年3月20日13時08分～10月16日11時28分**の期間に**5分間**毎に前**5分間**の風向風速の平均値の測定・記録をおこなった。斜面上部がほぼ北方向であるため、リター移動量測定柵の斜面上方向を

風向の北、斜面下方向を風向の南に対応させた。

地表面に供給されて堆積したリターが月日の経過とともに分解されてその重量が減少する速度を調査するために、大きさ $25 \times 30 \text{cm}$ 、メッシュ幅約 2mm の合成樹脂製の袋に、絶乾質量 16.5g のリターを詰めてリターバッグを製作した。2004年12月5日にこれらのリターバッグを、斜面勾配 12° 、 19° 、 33° の簡易試験斜面脇に各8個、計24個設置した。これらは設置後2005年4月、8月、12月に各2個ずつ回収してリターバッグ内のリターの絶乾質量を測定した。

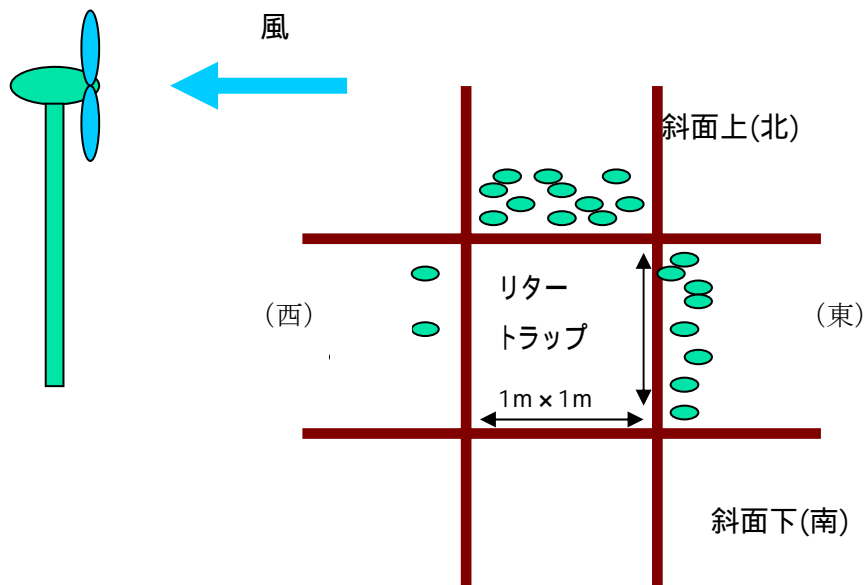


図5 リター移動量測定柵の模式図



写真7 リター移動量測定柵（斜面下部）

④リター堆積量変化の推定とリターの年間収支のモデル化

堂平におけるリター堆積量の変化の模式図を図6に示す。林床に堆積しているリターは、風や地表流による流出により減少し、流出せずに残っているリターは腐朽によって徐々に減少する。一方、上層木が存在するためリターフォールによってリターが供給されてリター堆積量は増加する。これらを基にリター堆積量変化の推定式を式(1)のようになてた。

$$L_{n+1} = L_n - L_l - \{(L_n - L_l) \times D_d \times d\} + L_f \times \cos \theta \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 L_{n+1} ：ある時点でのリター堆積量、 L_n ：次の時点でのリター堆積量の推定量、 L_l ：リター流出量、 D_d ：日腐朽率、 d ：日数、 L_f ：樹冠からのリター供給量、 θ ：斜面勾配である。

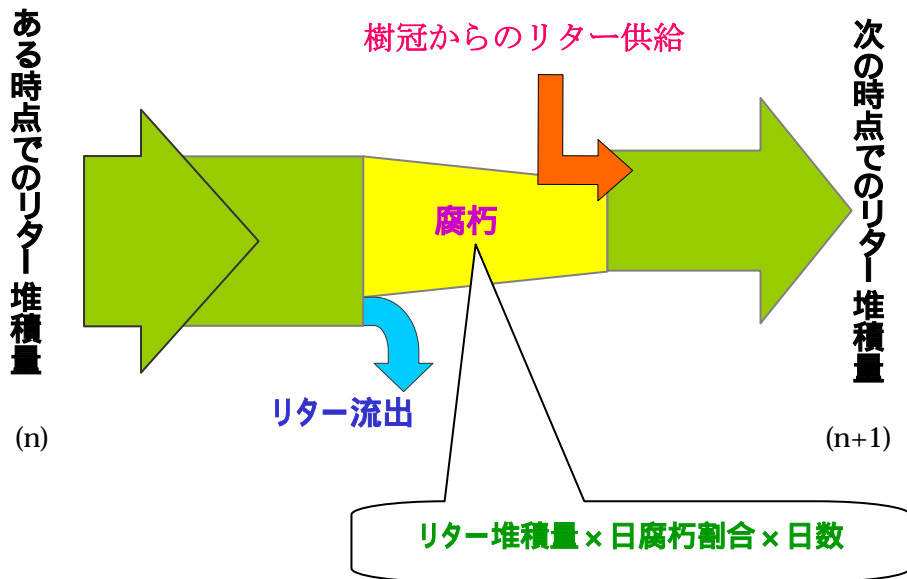


図6 リター堆積量変化の推定式の模式図

⑤冠水型浸透計による浸透能の測定方法

冠水型浸透計は斜面の多数の地点で迅速かつ簡便に浸透能を測定するために開発された測定器である(写真 8)。上部のタンクから下部の円筒管の水位が一定になるように水を補給して、円筒内が湛水状態の時の地表面から地盤内への浸透能を測定するものである。今回の試験では円筒の内径が 10.5cm のものを用いた。浸透量の変化は測定開始(湛水開始)から 3 分毎に 30 分間継続して測定した。開始 0~3 分間を初期浸透能、24~30 分間で浸透能がほぼ一定になった状態を最終浸透能と呼ぶ。測定地点は土壤浸食測定枠を設置した被度大・中・小(No.2・No.1・No.3)の他に簡易型土壤浸食測定枠を設置した勾配 12°・19°・33°、長さ 5m①・5m②・10m・20m の計 10 箇所(図 3)で、被度大・中・小(No.2・No.1・No.3)の付近がそれぞれ 7 回ずつ、勾配 12°・19°・33°、長さ 5m①・5m②・10m・20m の付近でそれぞれ 2 回ずつ測定した。



写真 8 冠水型浸透計

⑥定水位飽和透水試験による飽和透水係数の測定方法

土中における自由水の移動のしやすさを表す土の性質を透水性と呼ぶ。土の透水性は、透水係数として定量的に表されるが、土の種類、密度や飽和度などによって大きく異なる。本研究では浸透に大きな影響を与える表層土の飽和状態における透水係数を求めることを目的としている。供試体として被度大・中・小(No.2・No.1・No.3)と勾配 12°・19°・33° の計 6 箇所の土壌浸食測定枠付近の表層土を持ち帰ってこれらについて定水位飽和透水試験(図 7)を行った。本試験は以下の手順で行った。

- 1) 供試体をセットした透水円筒を、脱気水を満たした水浸減圧容器に静かに入れる。
- 2) 水浸減圧容器をセットし、真空ポンプにつなぐ。
- 3) 真空ポンプで容器内を徐々に減圧し、透水円筒から気泡が出なくなるまで減圧を続ける。
- 4) 気泡が出ないことを確認できたら、徐々に容器内の圧力を大気圧まで戻す。
- 5) 1)～4)の作業で供試体が飽和状態に達した後、水浸減圧容器の蓋を取り、透水円筒に透水円筒カラーを取りつける。
- 6) 水を満たした越流水槽に透水円筒を空気が入らないようにしながら静かに移し替える。
- 7) 透水円筒カラーに注水し、越流口から越流させ、給水側の水位を一定に保つ(図 2-10,2-11)。
- 8) メスシリンダーを越流口において時間 t_1 (s)から、はずすまでの時間 t_2 (s)をストップウォッチではかり、その間にメスシリンダーに流れ込んだ水量で流出水量 Q (cm^3)を求める。
- 9) 8)の測定を 3 回以上行う。
- 10) 8)の状態を保ち、透水円筒カラーの水位と越流水槽の水位の差 h (cm)をはかる。
- 11) 越流水槽の水温 $T^\circ\text{C}$ を⑧,⑨の作業毎に測定する。
- 12) 測定時の水温 $T^\circ\text{C}$ に対する透水係数 k_T (cm/s)を(2)式から求める。

$$k_T = \frac{L}{h} \cdot \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、L:供試体の長さ(cm)、h:水位差(cm)、Q:流出水量(cm^3)、A:供試体の断面積(cm^2)、 (t_2-t_1) :測定時間(s)である

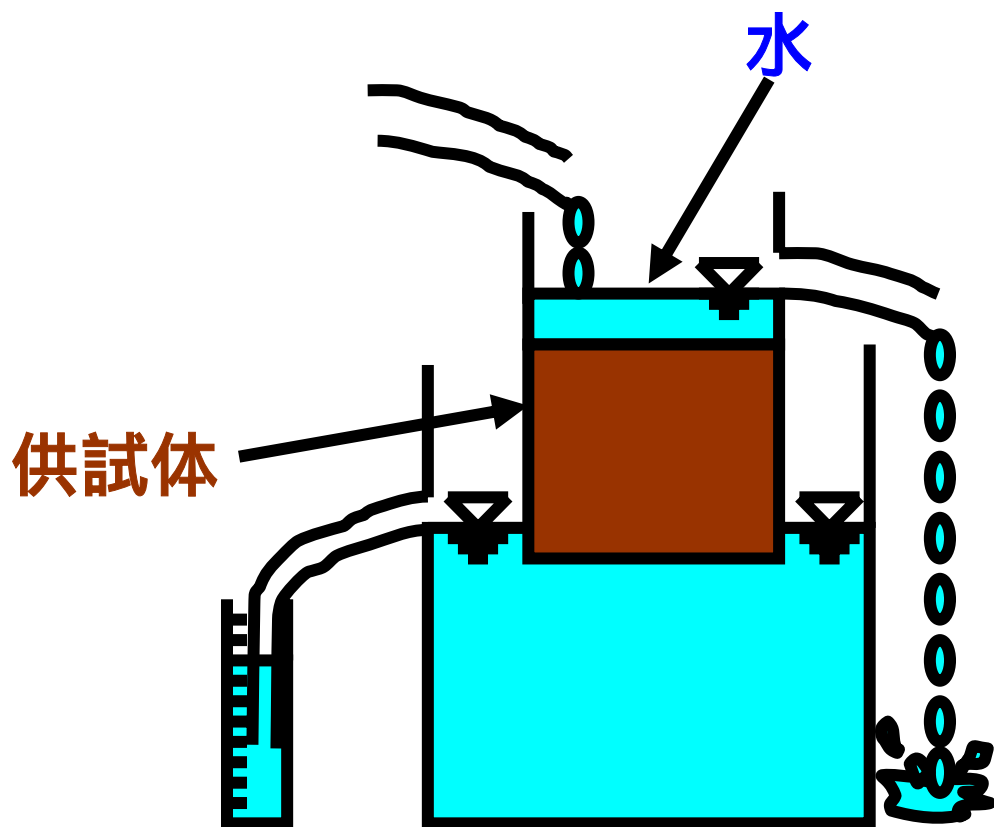


図 7 定水位飽和透水試験の模式図

3. 結果と考察

(1) 樹冠通過雨量と林床植生被度別の土壤浸食量

2004年7月5日～11月21日の観測期間は139日で、期間内の積算樹冠通過雨量は2344mmであった。2005年3月20日～12月4日の観測期間は259日で、期間内の積算樹冠通過雨量は2346.5mmであった。観測期間が異なることを考慮すると2005年は2004年に比べて全体的に降雨量は少なかった。なお、2004年11月22日～2005年3月19日の期間は冬季のため樹冠通過雨量は観測しなかったが、浸食土砂量は捕捉箱に堆積した土砂量により測定した。しかしながら冬季の浸食土砂量は凍結と積雪のため極めてわずか(被度小でも185g)であった。

2004年と2005年の積算樹冠通過雨量と、被度大、被度中、被度小それぞれの侵食測定枠での土壤浸食深(平均浸食深に換算)とリター堆積量の関係を図8に示す。リター堆積量(落葉、落枝等)は2005年8月の測定値の平均値である。図8より、林床植生の被度が小さいほど土壤浸食深は増加し、一方、林床植生被度が小さいほどリター堆積量も小さくなるのがわかる。さらに、林床植生がほぼ1%とほとんどない被度小では年間の土壤浸食深が約1cmにも達し、被度中や被度小と比較して非常に多いことがわかる。

被度大、被度中、被度小における2005年の測定期間毎の樹冠通過雨量と土壤浸食量の関係を図9、10に示す。各観測期間中で最も土壤浸食量が多かったのは、被度大では7月16日～7月31日であり、被度中、被度小では8月7日～8月16日であった。樹冠通過雨量が多い期間には全体的には土壤浸食量も多いが、1年間を通して見ると、同一の雨量でも土壤浸食量は大きく異なり、7月～9月には他の月に比べて同一雨量に対する土壤浸食量が多いことがわかる。土壤侵食量が最も多かった被度小における2005年の測定期間毎の樹冠通過雨量と土壤浸食量の関係を図10に示す。図10のプロット全体の回帰直線の決定係数(R^2)は0.2894であり、積算樹冠通過雨量と土壤浸食量の間には明確な相関は見られず、図7と合わせて考えると、土壤浸食量は雨量のみにより決まるものではなく、季節変化が大きいことが分かる。

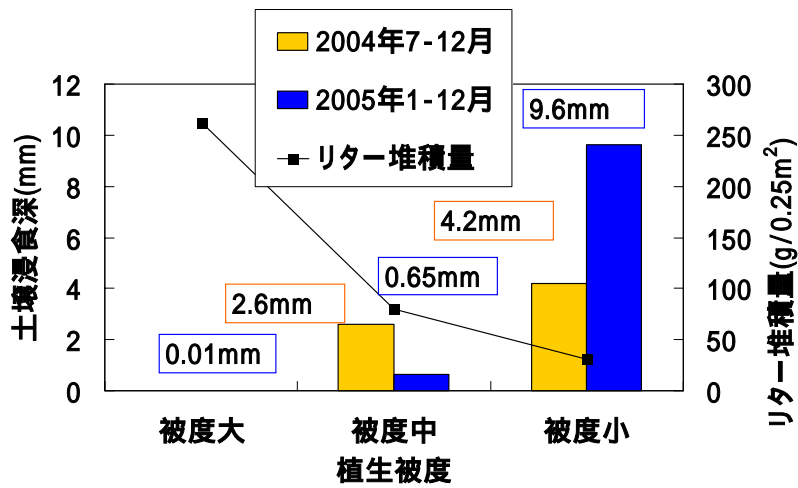


図 8 2004年と2005年の観測期間内の樹冠通過雨量と林床植生被度別の土壤浸食深

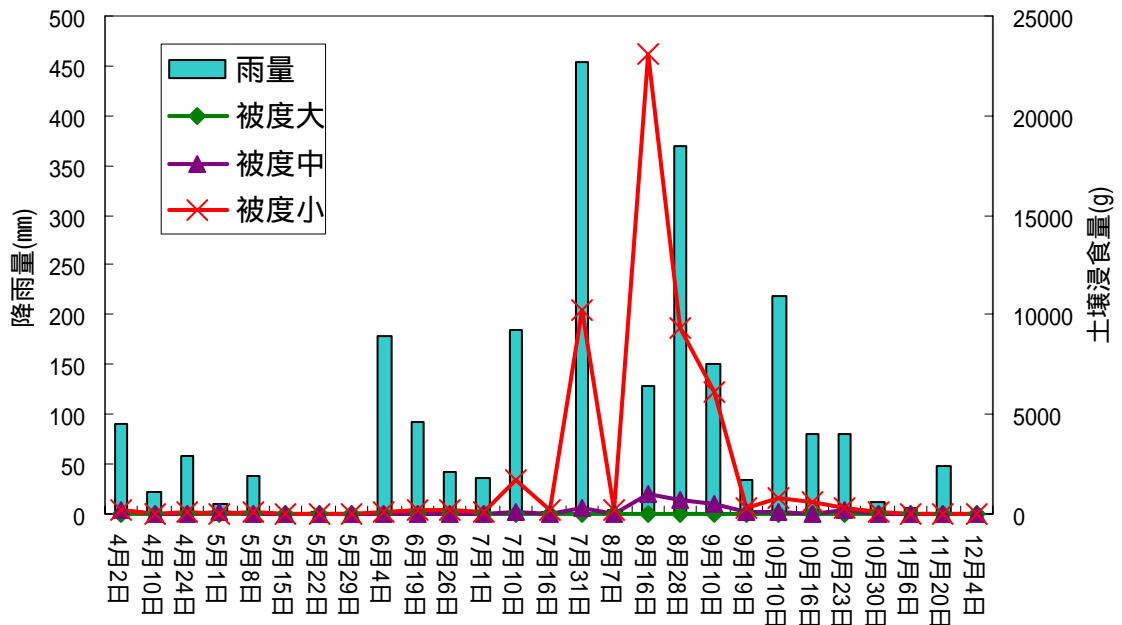


図 9 測定期間毎の樹冠通過雨量と土壤浸食量 (2005年)

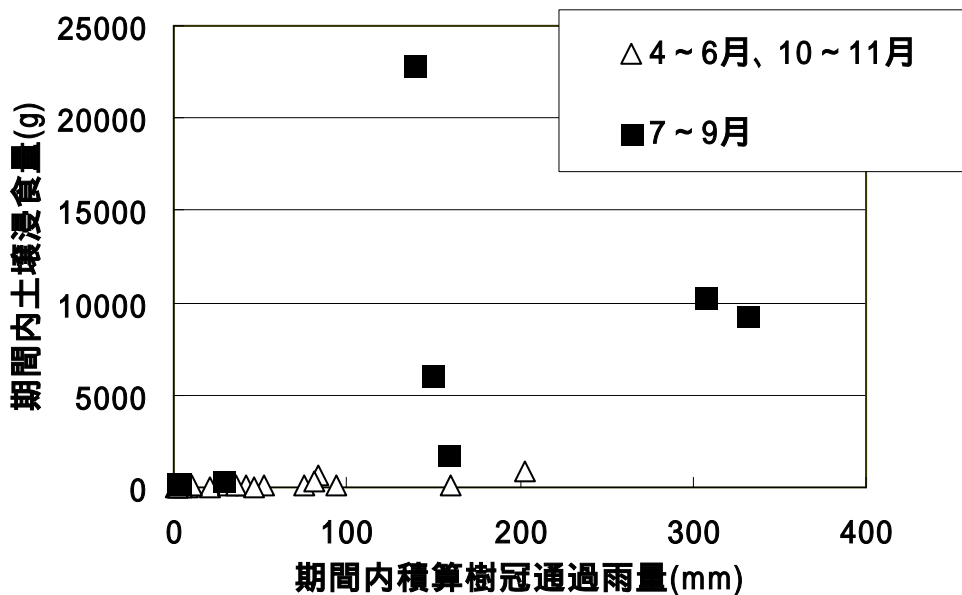


図 10 2005 年の被度小における積算樹冠通過雨量と土壌浸食量

(2) リター堆積量、林床植生量と土壌浸食量

測定期間毎の被度大、被度中、被度小における林床植生量と土壌浸食量の変化を図 11、図 12、図 13 に、リター堆積量（落葉部のみ）と土壌浸食量の変化を図 14、図 15、図 16 に示す。図 8、9、10 と合わせて考えると、被度大では、林床植生量およびリター堆積量の変化とともに土壌浸食量には大きな影響を与えていない。一方、被度中、小では降雨量を考慮しても土壌浸食量が多いのは 7~9 月であり、この時期には林床植生量は 4~11 月の内でも最も多い時期にあたり、リター堆積量は最も少ない時期にあたる。林床植生量およびリター堆積量はともに土壌浸食を抑制する働きがあるので、7~9 月に土壌浸食量が多いのはリター堆積量の減少による影響と考えることができる。特に被度小（被覆率約 1%）の箇所では、林床植生量が極めてわずかであるので林床植生による土壌浸食の抑制効果はほとんどないと考えられ、リター堆積量の増減が土壌浸食量に大きく影響していると考えられる。

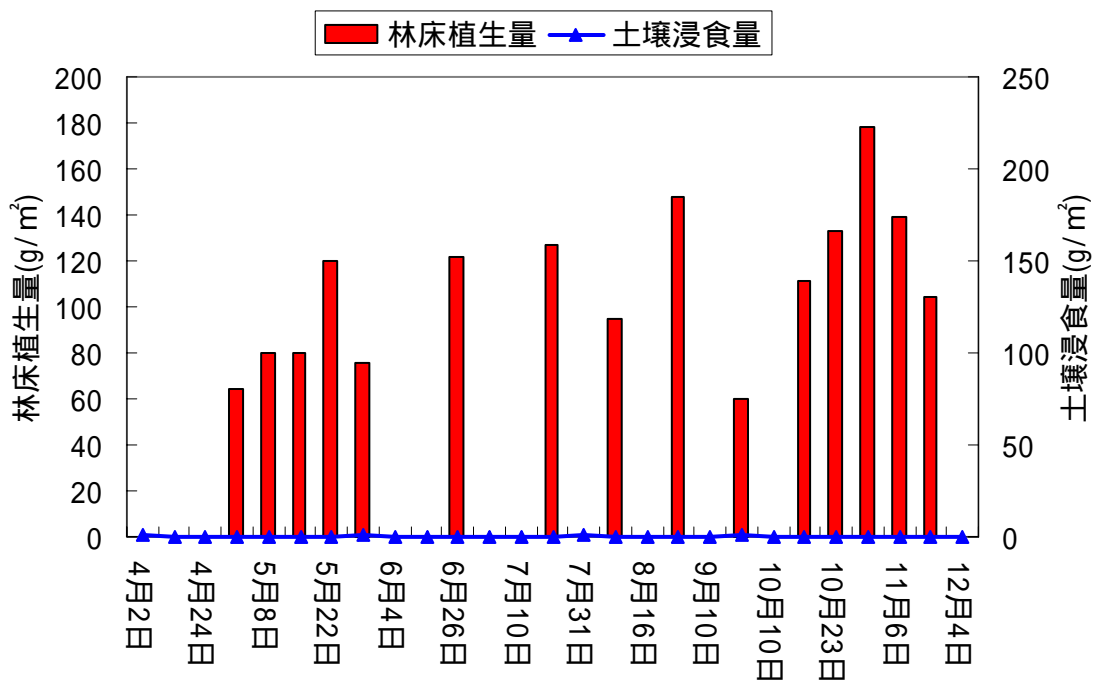


図 11 被度大における林床植生量と土壌浸食量 (2005 年)

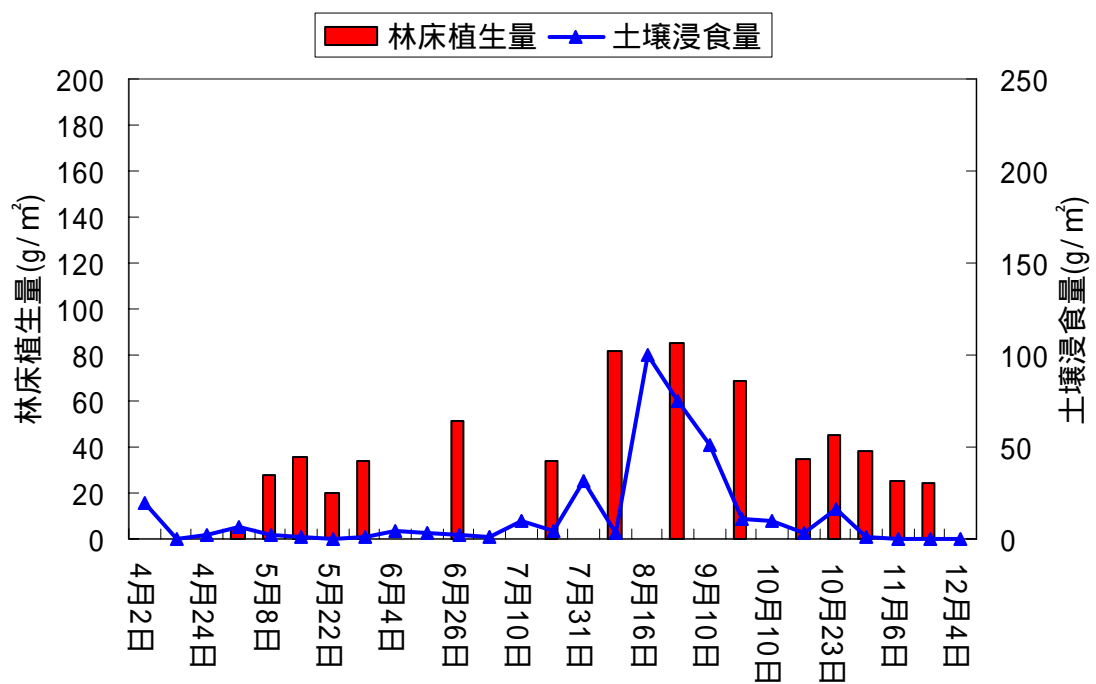


図 12 被度中における林床植生量と土壌浸食量 (2005 年)

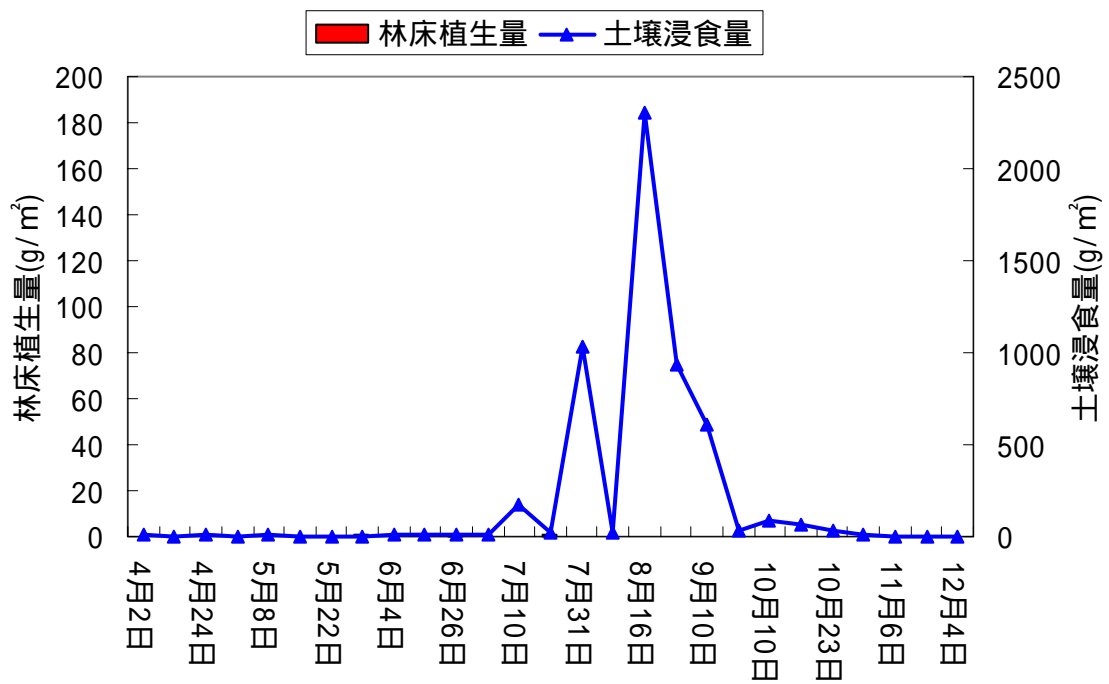


図 13 被度小における林床植生量と土壌浸食量（2005 年）

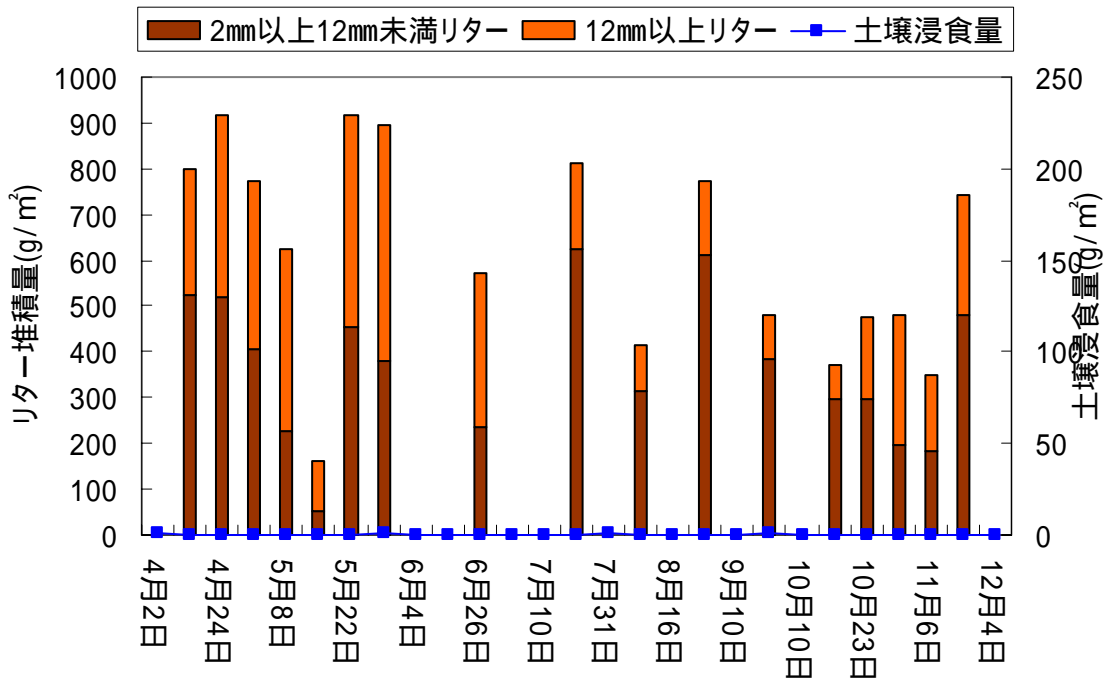


図 14 被度大におけるリター堆積量と土壌浸食量（2005 年）

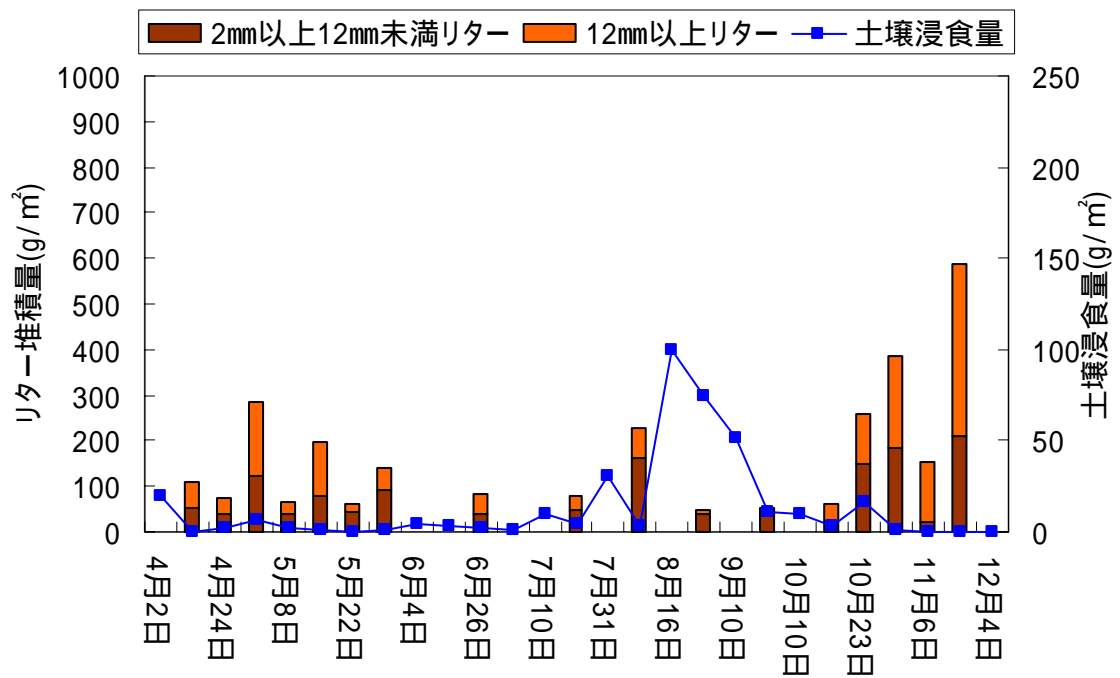


図 15 被度中におけるリター堆積量と土壌浸食量 (2005 年)

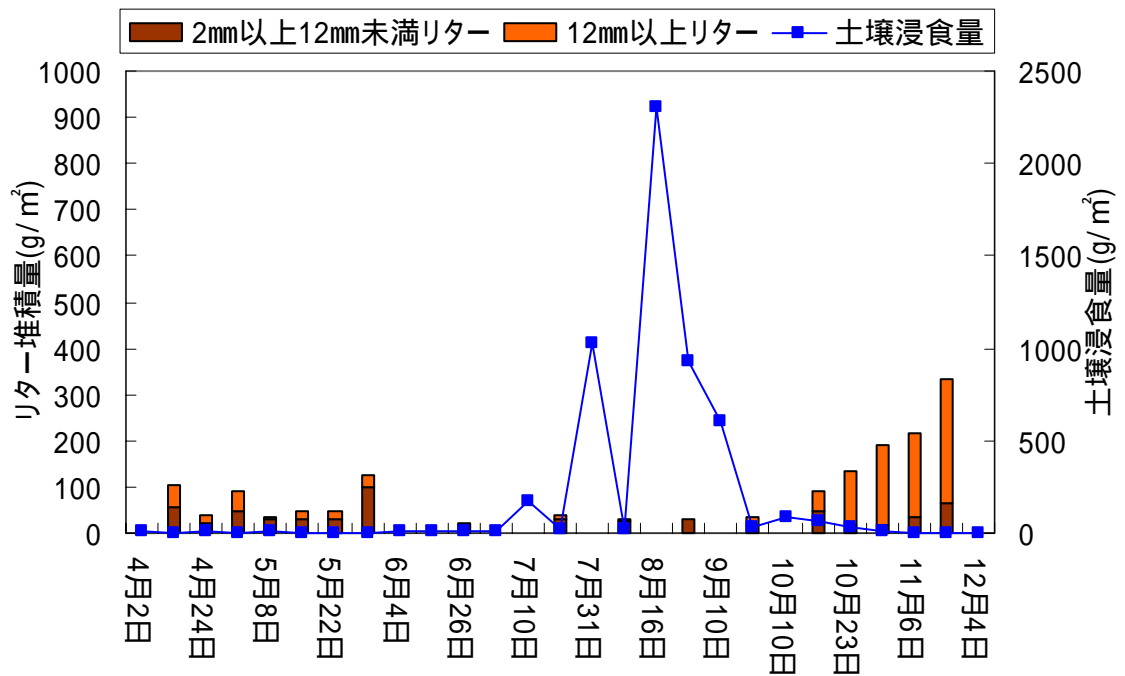


図 16 被度小におけるリター堆積量と土壌浸食量 (2005 年)

(3) リターの下方移動量と風・雨の関係および斜面でのリター移動量

斜面上部、中部、下部に設置したリター移動量測定柵において、2005年4月～11月の間に西風により西側に堆積したリター量から東風により東側に堆積したリター量を除して、測定時期毎に積算したリター堆積量の変化を図17に、西風と東風の積算風速を図18に示す。4月は西風が卓越していたため斜面下部では東側より西側に堆積したリター量が多かった。しかしながら斜面上部では4月でも西側に堆積した量と東側に堆積した量には大きな差はなく、斜面上部（斜面勾配約30度）では風により斜面横方向に移動する量は斜面下部（斜面勾配約5度）に比べて小さい。これは斜面勾配が急であると横方向の風を受けても斜面横方向に移動するよりも斜面下方に移動しやすいためと考えられる。

斜面上部、中部、下部に設置したリター移動量測定柵において、測定期間を2005年4～5月、6～9月、10～11月の三時期に分類し、斜面上部から下方へ移動したリター量（以下、リター下方移動量と呼ぶ）と斜面を上から下へ吹き降ろす風の測定期間毎の積算風速の関係を図19～26に示す。また、三時期のリター下方移動量と測定期間毎の積算樹冠通過雨量の関係を図27～34に示す。それぞれの回帰直線の決定係数（ R^2 ）を4段階評価した結果を表1に示す。表1よりリター下方移動量は、4～5月では斜面上部、中部で、期間積算風速と高い相関を示した。また、期間積算樹冠通過雨量とも相関を示した。6～9月においては、斜面下部で期間積算樹冠通過雨量と若干ながら相関を示した。10～11月では期間積算風速と相関を示したが、期間積算樹冠通過雨量とは相関を示さなかった。

斜面上部、中部、下部のリター移動量測定柵における、東西方向、斜面下方向、上方向の総リター移動量およびリタートラップによるリター供給量の測定結果を表2に示す。斜面上部、中部、下部において多量のリターが斜面下方向へ移動していることがわかる。勾配が急な斜面上部、中部では斜面横方向のリター移動量は斜面下方移動量に比べて小さいが、勾配の緩い斜面下部では斜面横方向のリター移動量は斜面下方移動量に匹敵するほど多いことがわかる。

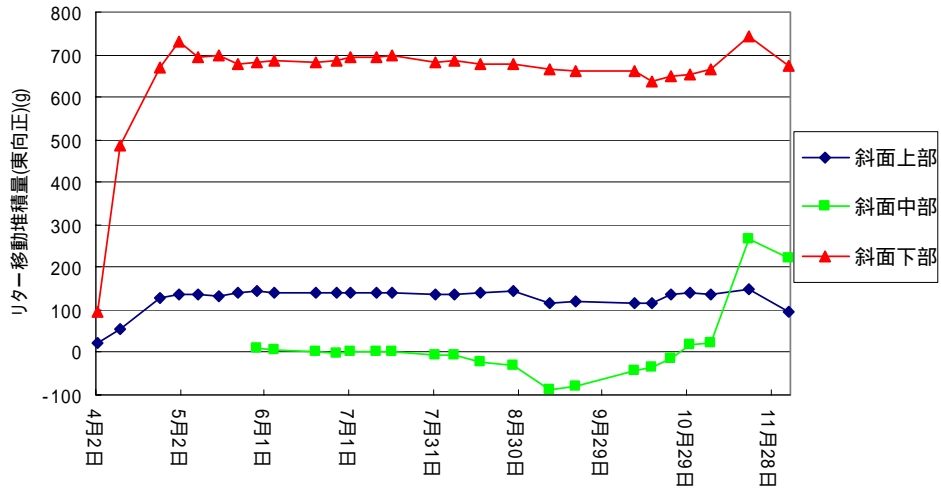


図 17 斜面横方向の積算リター移動量（西側堆積量 - 東側堆積量）

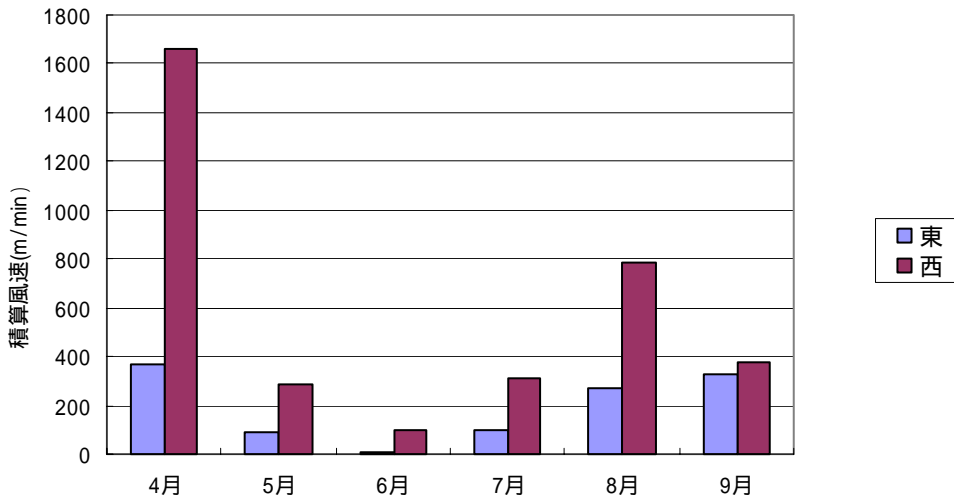


図 18 2005 年における東風、西風の積算風速

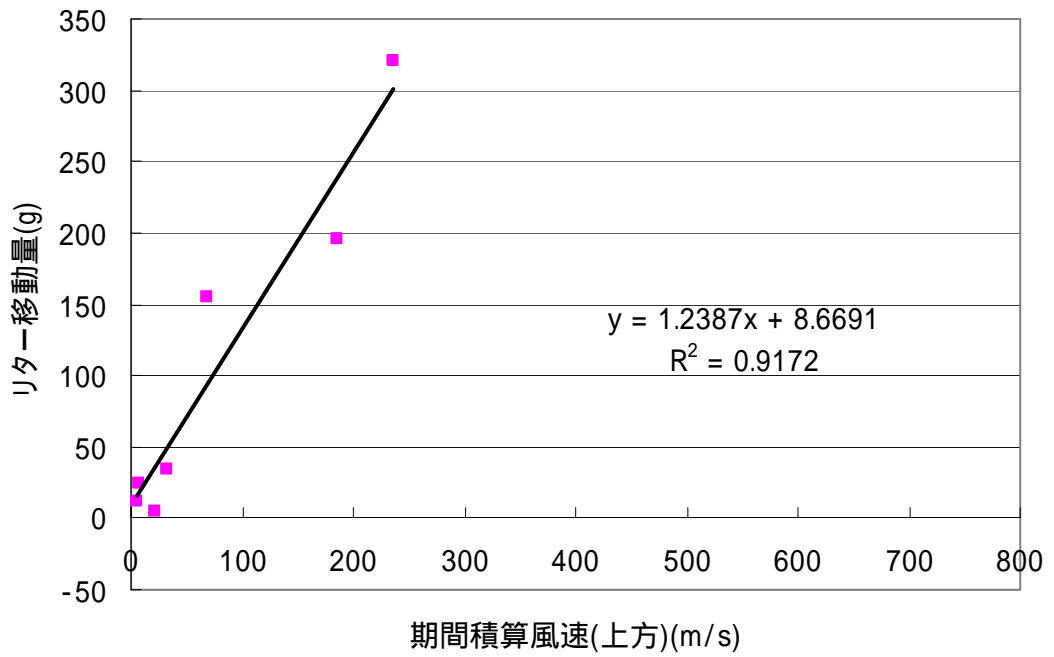


図 19 4~5月における期間積算風速と斜面上部リター下方移動量

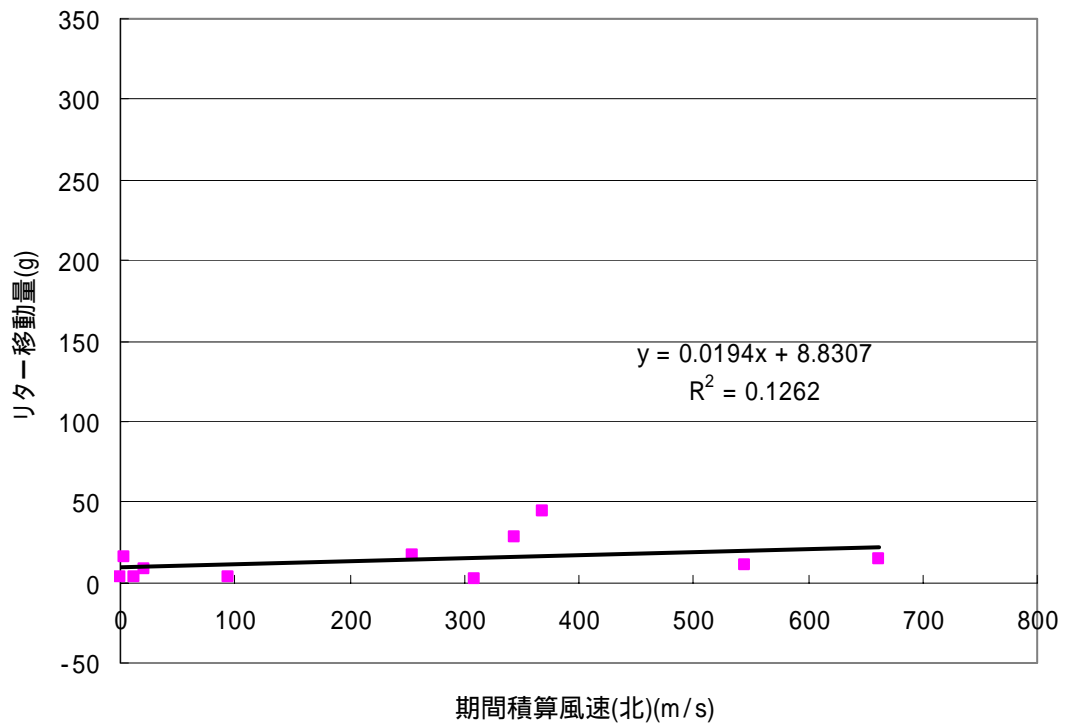


図 20 6~9月における期間積算風速と斜面上部リター下方移動量

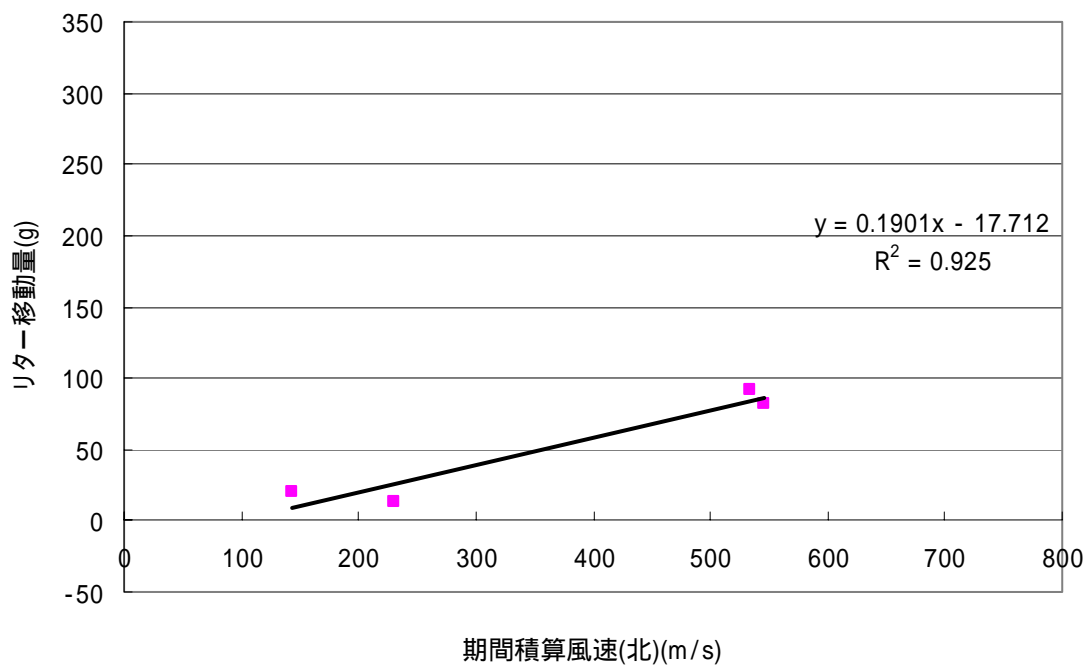


図 21 10月における期間積算風速と斜面上部リター下方移動

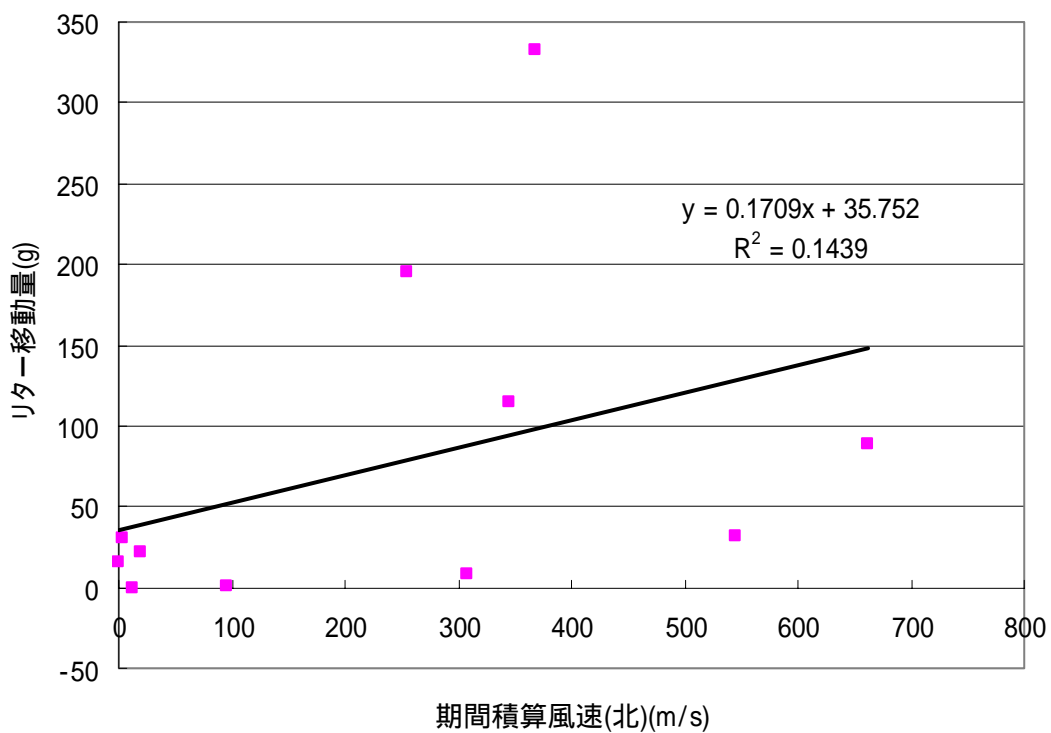


図 22 6~9月における期間積算風速と斜面中部リター下方移動量

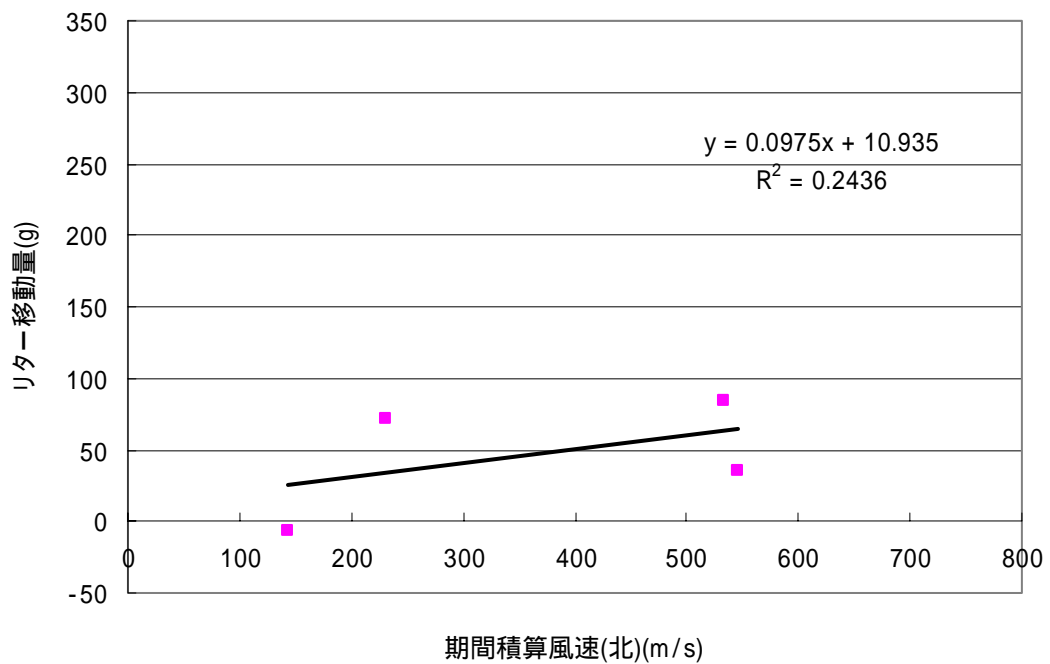


図 23 10月における期間積算風速と斜面中部リター下方移動

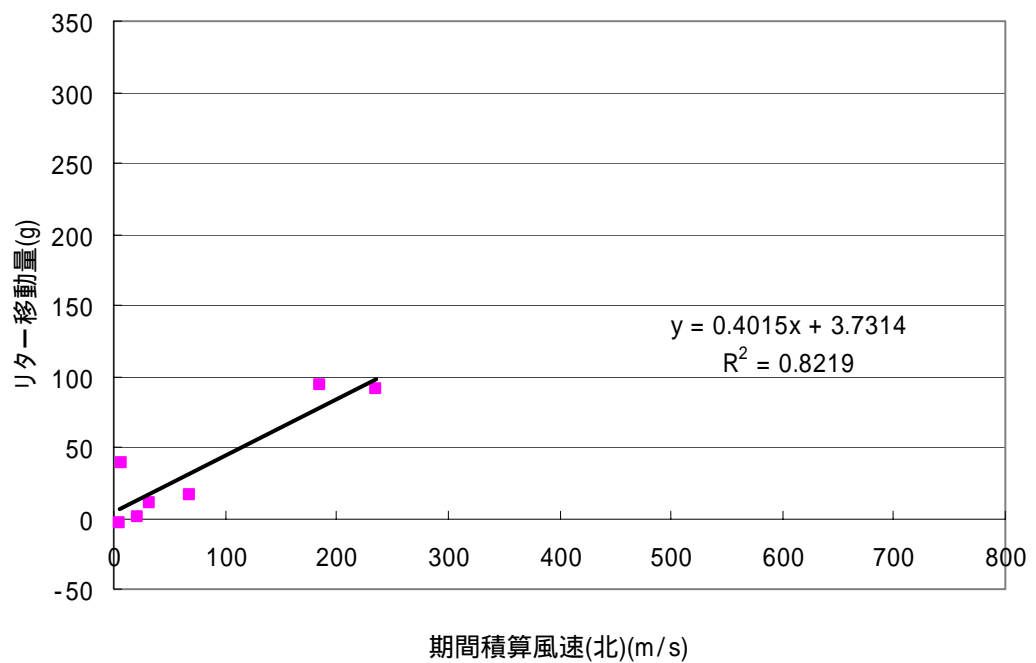


図 24 4~5月における期間積算風速と斜面下部リター下方移動量

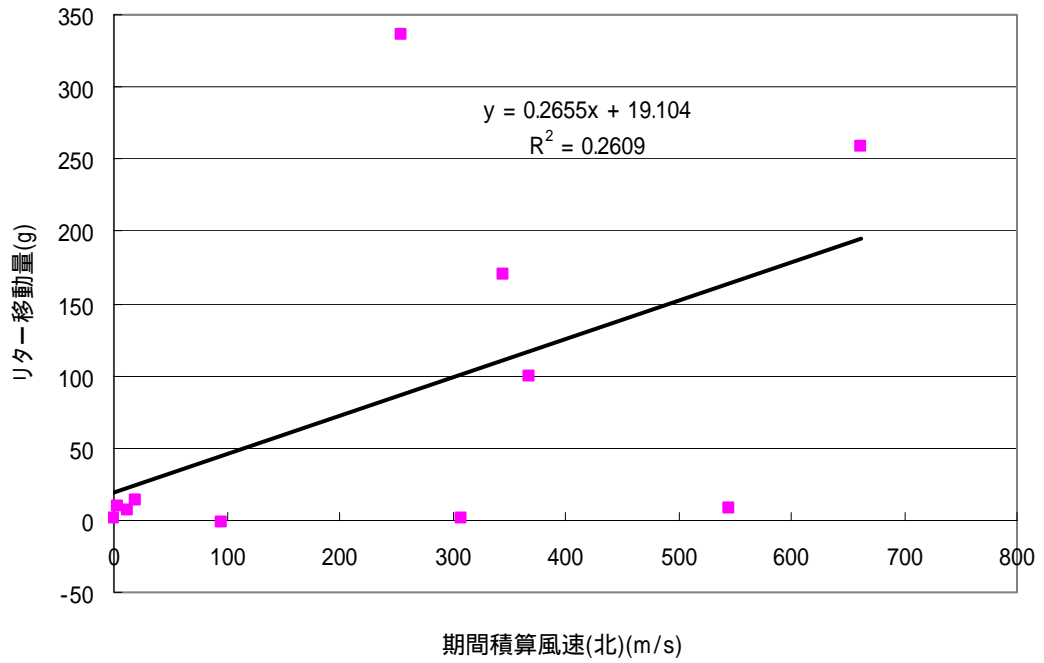


図 25 6~9月における期間積算風速と斜面下部リター下方移動量

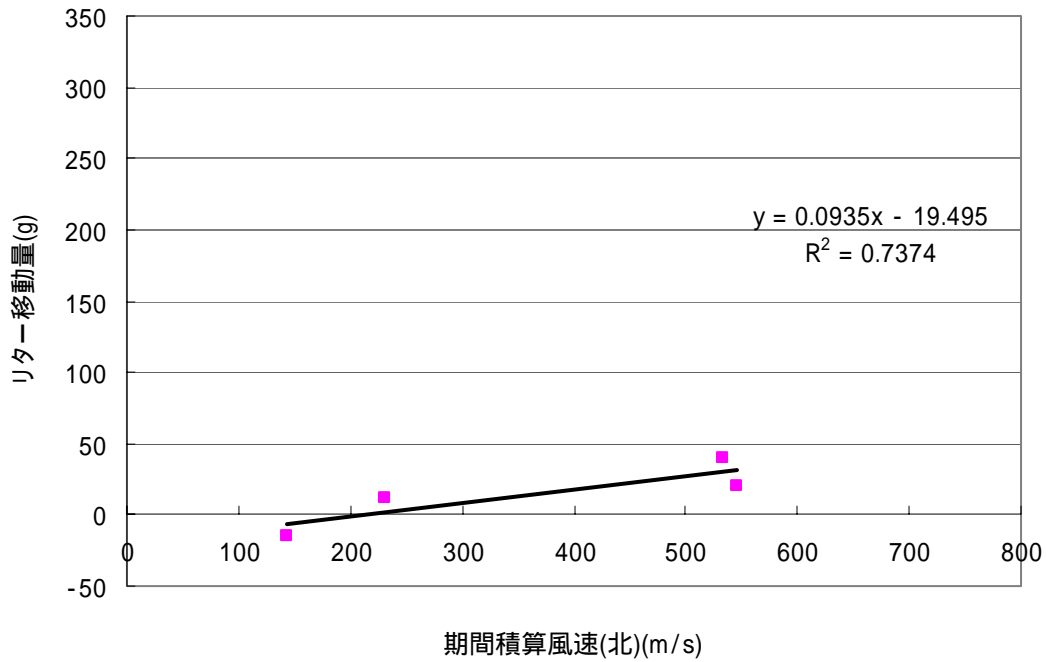


図 26 10月における期間積算風速と斜面下部リター下方移動量

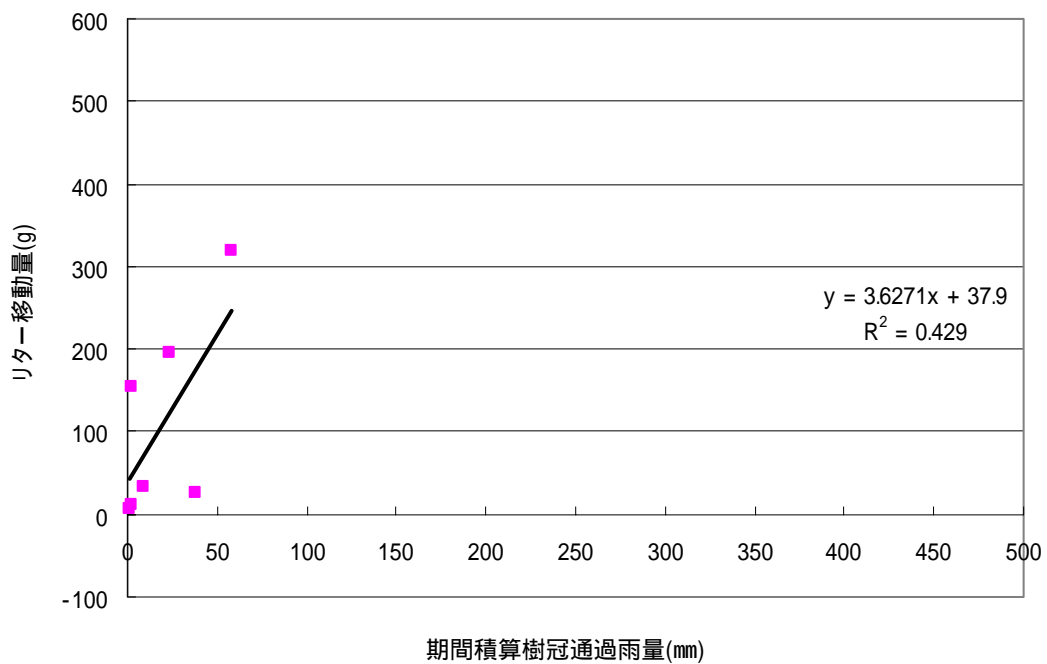


図 27 4~5月における期間積算樹冠通過雨量と斜面上部リター下方移動量

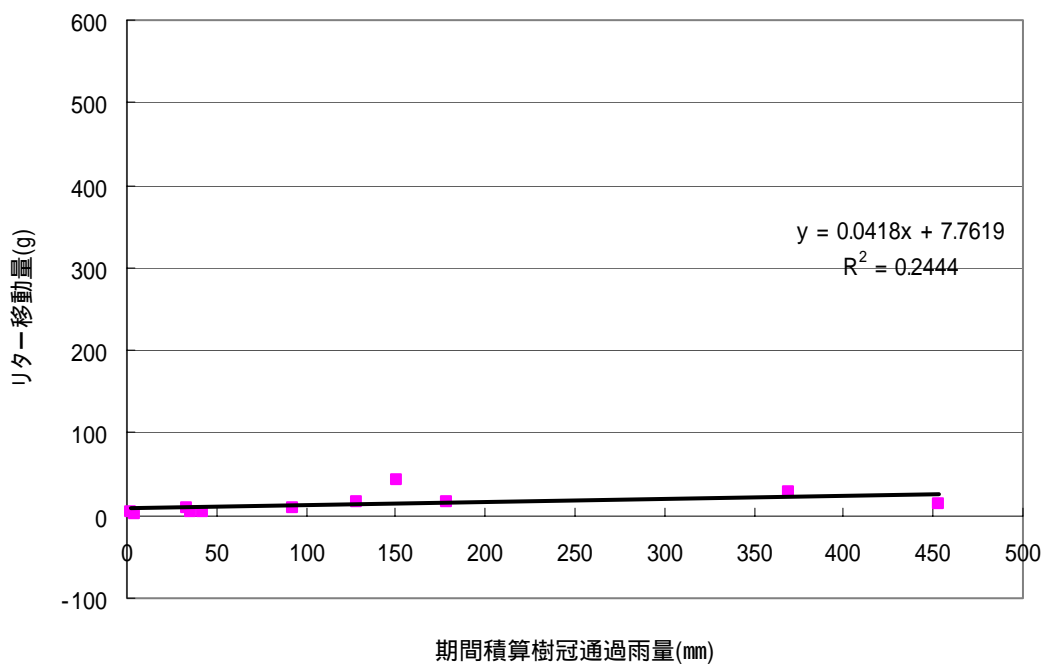


図 28 6~9月における期間積算樹冠通過雨量と斜面上部リター下方移動量

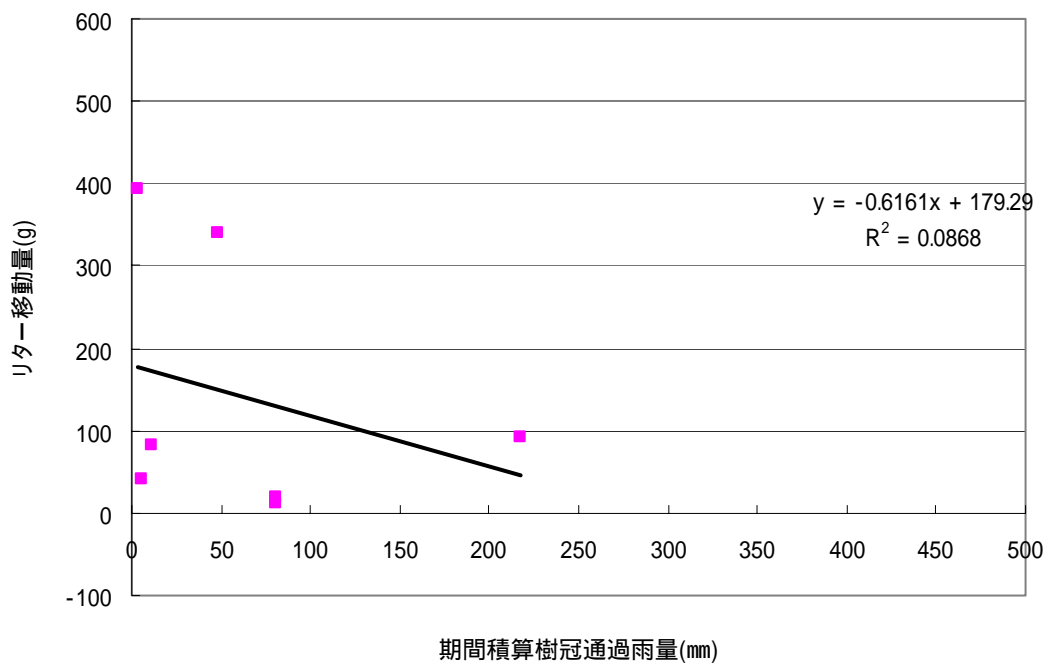


図 29 10~11 月における期間積算樹冠通過雨量と斜面上部リター下方移動量

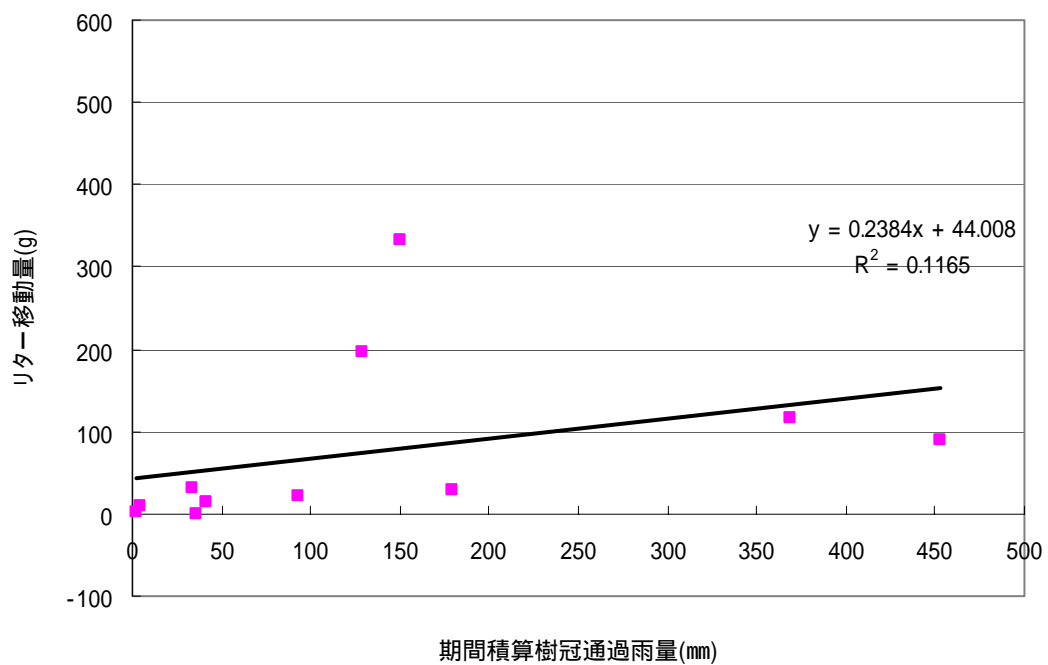


図 30 6~9 月における期間積算樹冠通過雨量と斜面中部リター下方移動量

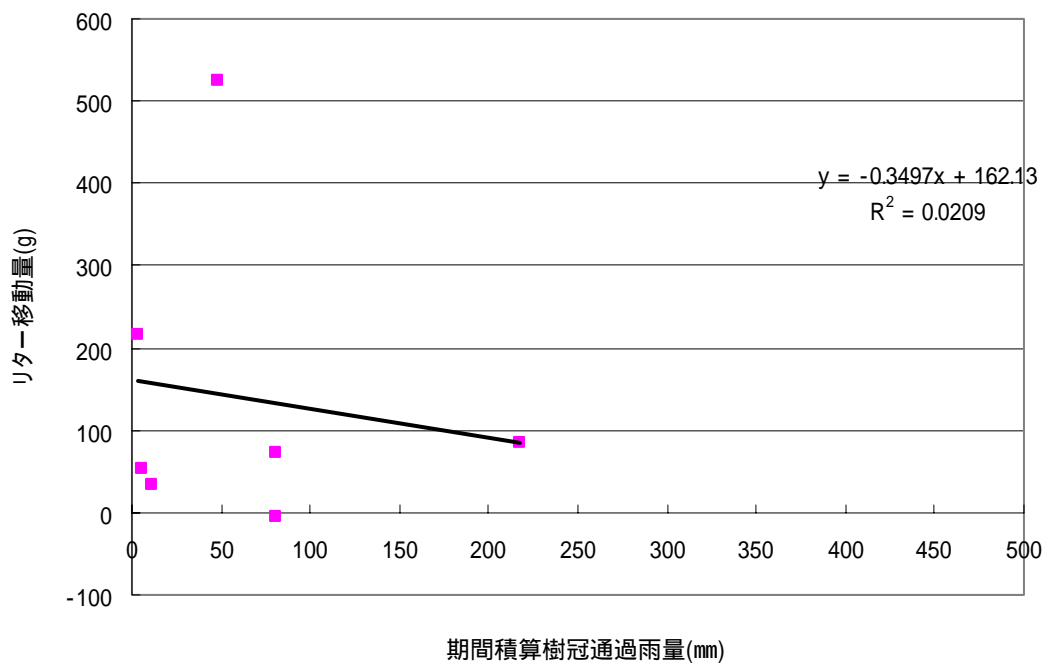


図 31 10~11月における期間積算樹冠通過雨量と斜面中部リター下方移動量

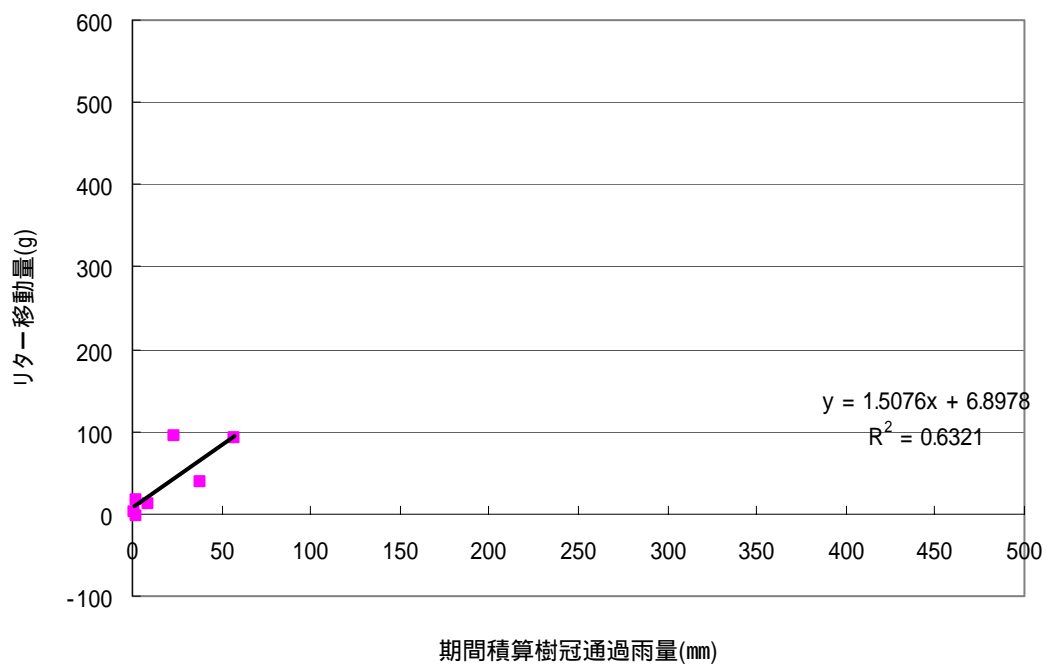


図 32 4~5月における期間積算樹冠通過雨量と斜面下部リター下方移動量

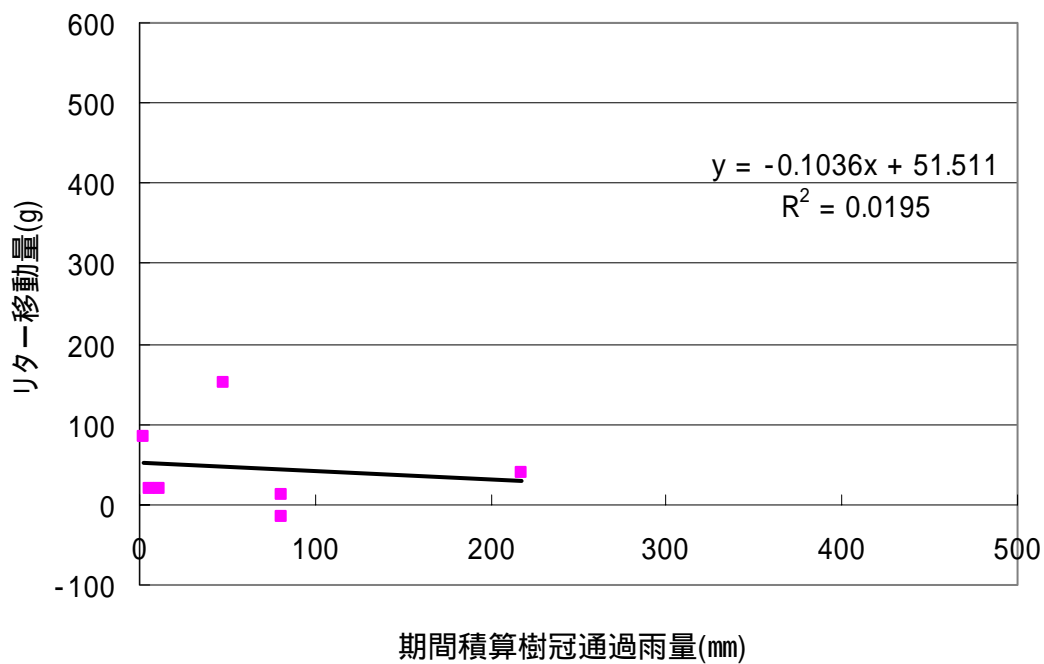


図 33 6~9月における期間積算樹冠通過雨量と斜面下部リター下方移動量

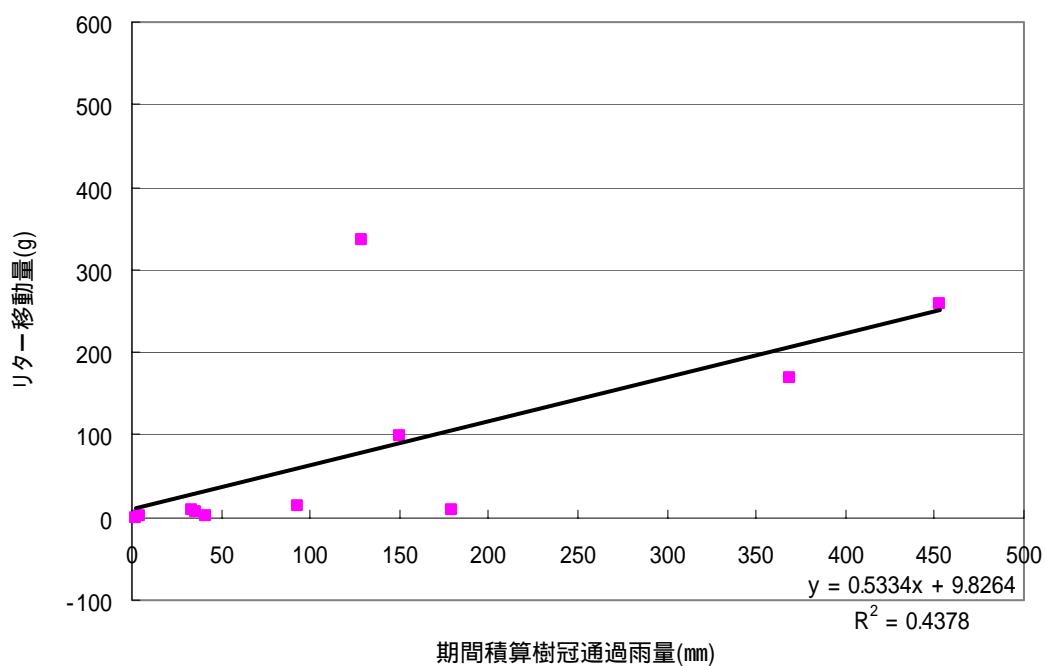


図 34 10~11月における期間積算樹冠通過雨量と斜面下部リター下方移動量

表 1 リター下方移動量と期間積算風速および期間積算樹冠通過雨量の
 相関関係解析結果 (R^2 は両者の関係の決定係数)

		4~5 月	6~9 月	10 月(11 月)
風	上		×	
	中	-	×	×
	下		×	
雨	上		×	×
	中	-	×	×
	下			×
関連度		風 > 雨		風 > 雨

	R^2 0.8
	$0.8 > R^2$ 0.6
	$0.6 > R^2$ 0.4、データ少
×	$0.4 > R^2$

表 2 斜面上部、中部、下部のリター移動量測定柵における総リター移動量

	斜面上部	斜面中部	斜面下部
西 東方向(g)	338	523.1	1248.4
東 西方向(g)	252.3	302.8	507.2
斜面下方向(g)	2349.6	1823.8	1592.6
斜面上方向(g)	-268.8	-125.2	232.9
リター供給量(g/m ²)	374.8	305.7	423.5
測定期間(2005 年)	4 月 2 日~12 月 4 日	5 月 22 日~12 月 4 日	4 月 2 日~12 月 4 日

(4) リターの供給量と腐朽速度

斜面上部、中部、下部に設置したリター移動量測定柵により測定した2005年4月2日～12月4日の間の測定期間毎のリター供給量平均値の変化を図35に示す。また、リターバッグによるリター質量の変化を図36に示す。リターの腐朽速度は4～12月でほぼ直線的に減少しており、この期間内では一日あたり平均約0.22%の重量が減少した。

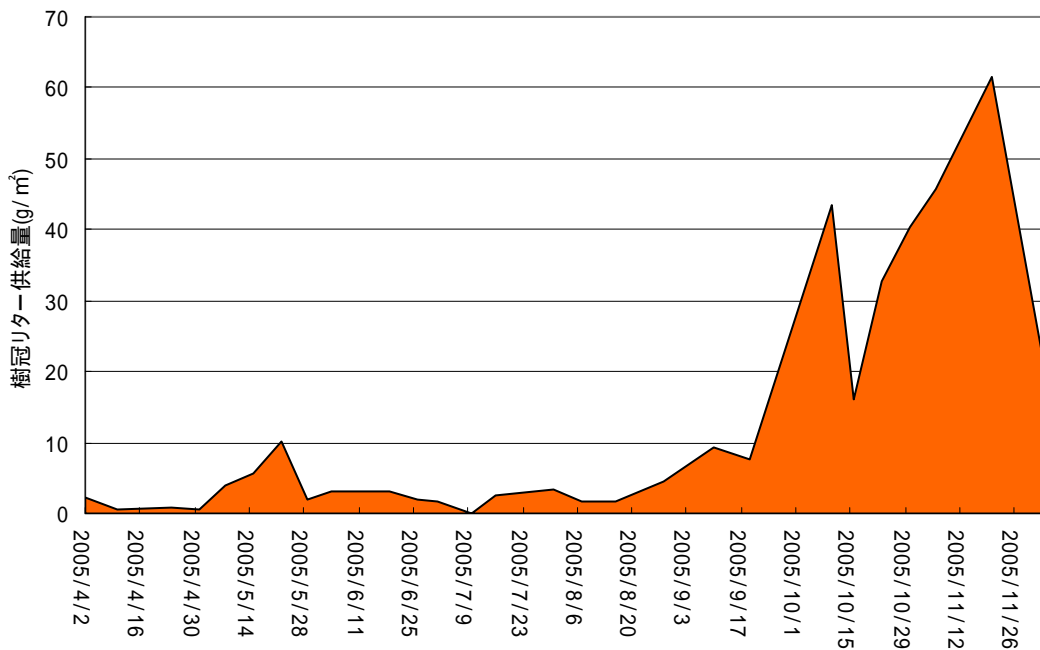


図35 樹冠からのリター供給量 (2005年)

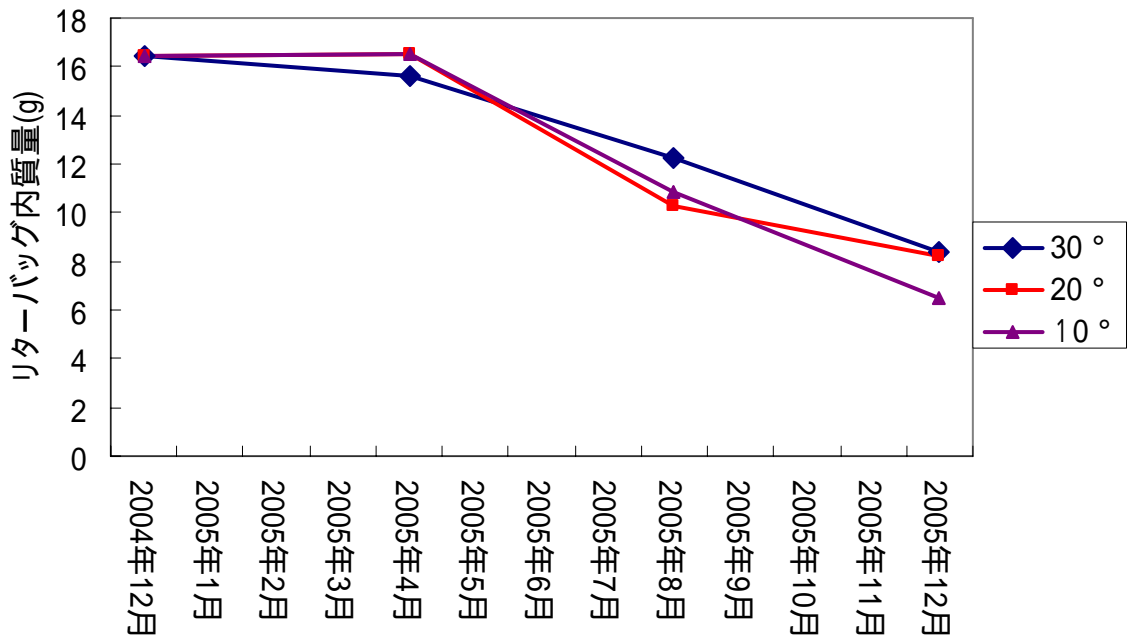


図36 リターバッグによるリター質量の変化

(5) リター堆積量変化の推定

式(1)を用いて被度大、被度中、被度小の斜面侵食測定枠におけるリター堆積量変化の推定を行い、リターの年間収支を求めた。リター堆積量の推定には、1) 基準として2005年4月2日のリター堆積量を用い、2) L_f として斜面上、中、下のリタートラップにより測定した樹冠からのリター供給量の平均値を用い、3) L_l として各試験斜面でのリター流出量の測定結果を用い、4) リターバッグより得られたリターの腐朽速度(一日当たりの質量減少率: 日腐朽率 $D_d=0.0022$)を用いた。被度大、被度中、被度小におけるリター堆積量の変化を推定した結果を図37、38、39に示す。図14、15、16に示した被度大、被度中、被度小における実測のリター堆積量変化とそれぞれ比較すると図35、36、37はほぼ妥当な値を示している。

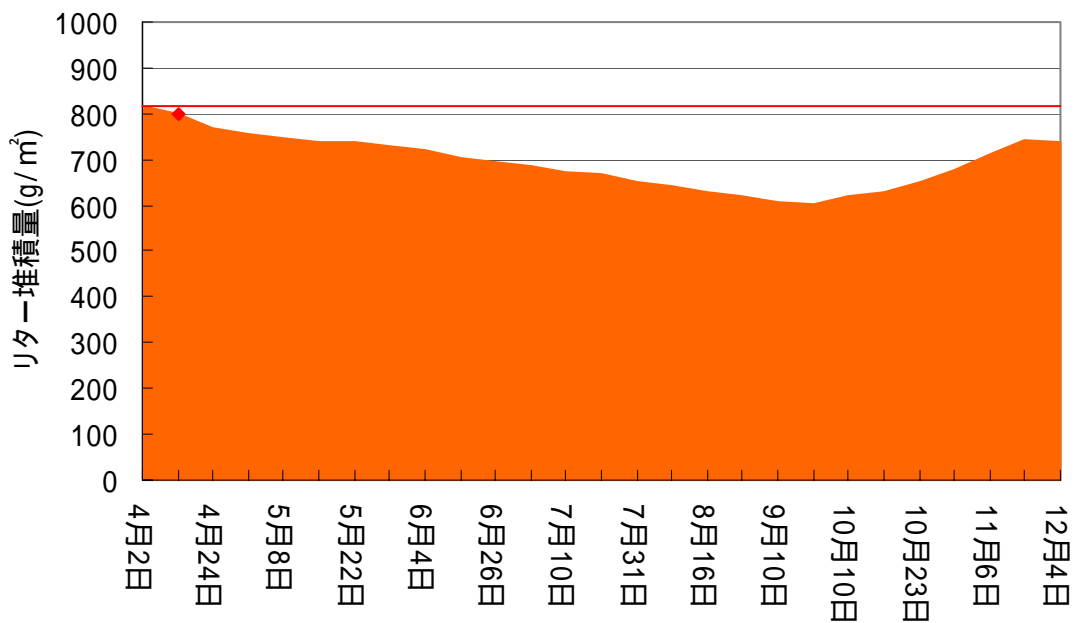


図37 被度大におけるリター堆積量の推定(2005年)

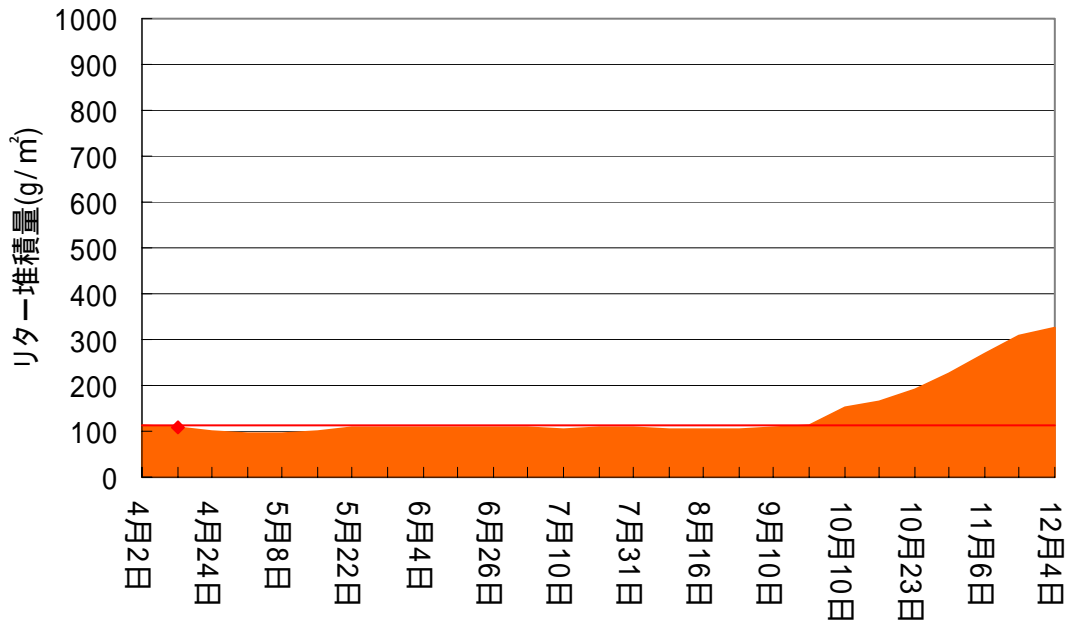


図 38 被度中におけるリター堆積量の推定 (2005 年)

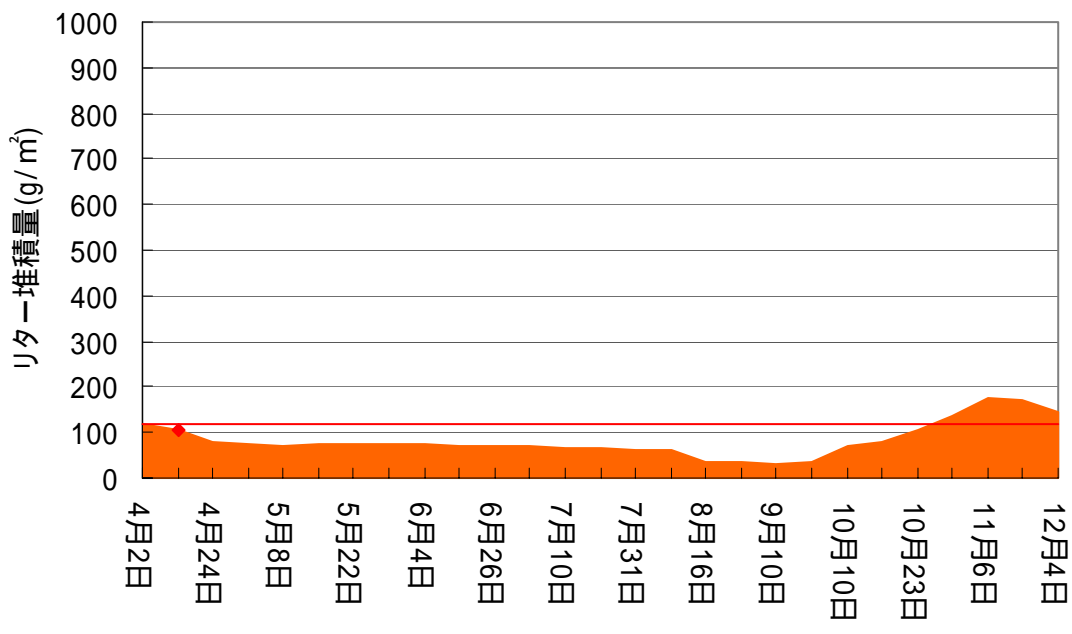


図 39 被度小におけるリター堆積量の推定 (2005 年)

(6) 浸透能に関する調査方法の比較

侵食測定枠による浸透量

植生被度大・中・小 (No.2・ No.1・ No.3)において、2004年7月～2005年12月(冬季に当たる2004年12月～2005年3月を除く)に発生した1雨毎(中断時間が3時間以上ある場合は別の降雨とする)について(3)式により1雨の総雨量当たりの浸透量を求めた。さらに最大1時間雨量当たりの浸透量を(4)式より、最大10分間雨量当たりの浸透量を1時間当たりに変換したものを(5)式により求めた。

$$\text{浸透量 } I = 1 \text{ 雨の総雨量} - \text{その時間内の地表流流出量} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{浸透量 } I_H = \text{最大1時間雨量} - \text{その時間内の地表流流出量} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{浸透量 } I_M = (\text{最大10分間雨量} - \text{その時間内の地表流流出量}) \times 6 \dots\dots\dots (5)$$

それぞれの降雨量と浸透量との関係を図40,41,42に示す。

土壌侵食測定枠による浸透量調査では、一雨の総雨量、最大1時間雨量が等しいとき図40,41より被度大が最も浸透量が大きく、次に被度中、被度小の順となった。最大10分間雨量の時は図42に示すように浸透量は被度中より被度小の方が若干大きくなった。全体として被度が大きに比べて被度中・小では浸透率は小さい。しかしながら降雨量が小さい時は被度による差はほとんどない。

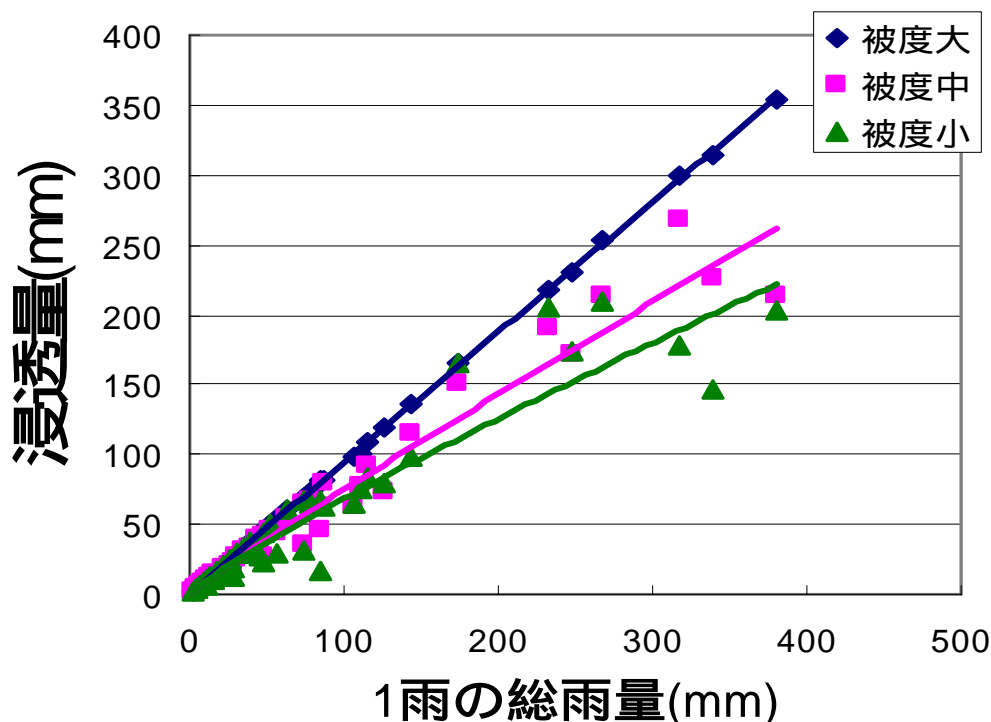


図40 1雨の総雨量と浸透量

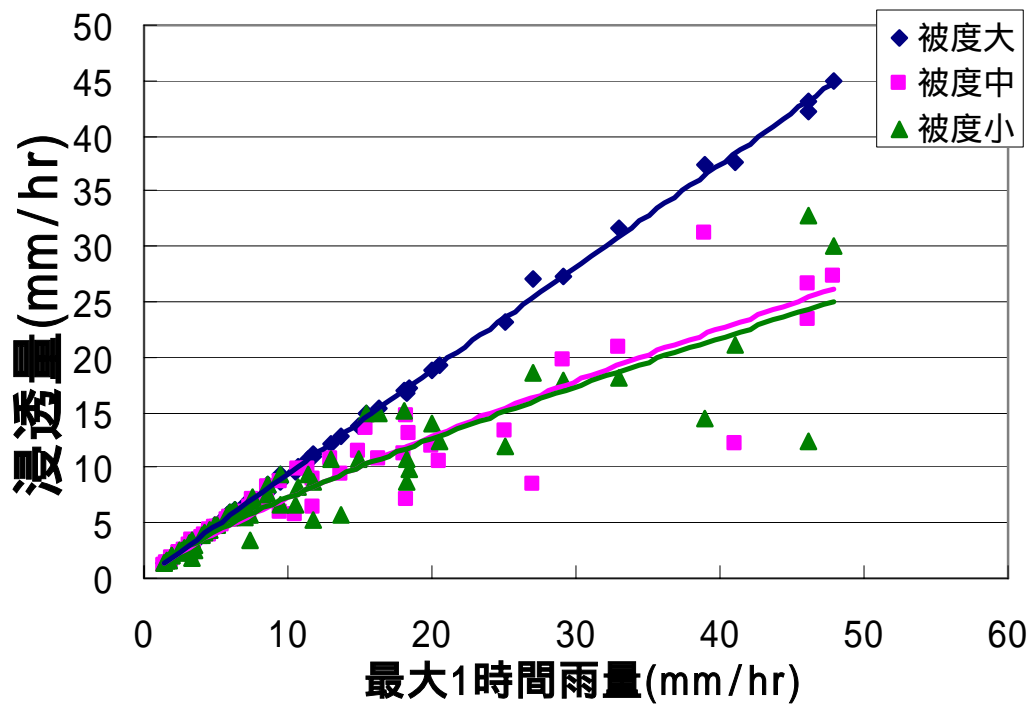


図 41 最大 1 時間雨量と浸透量

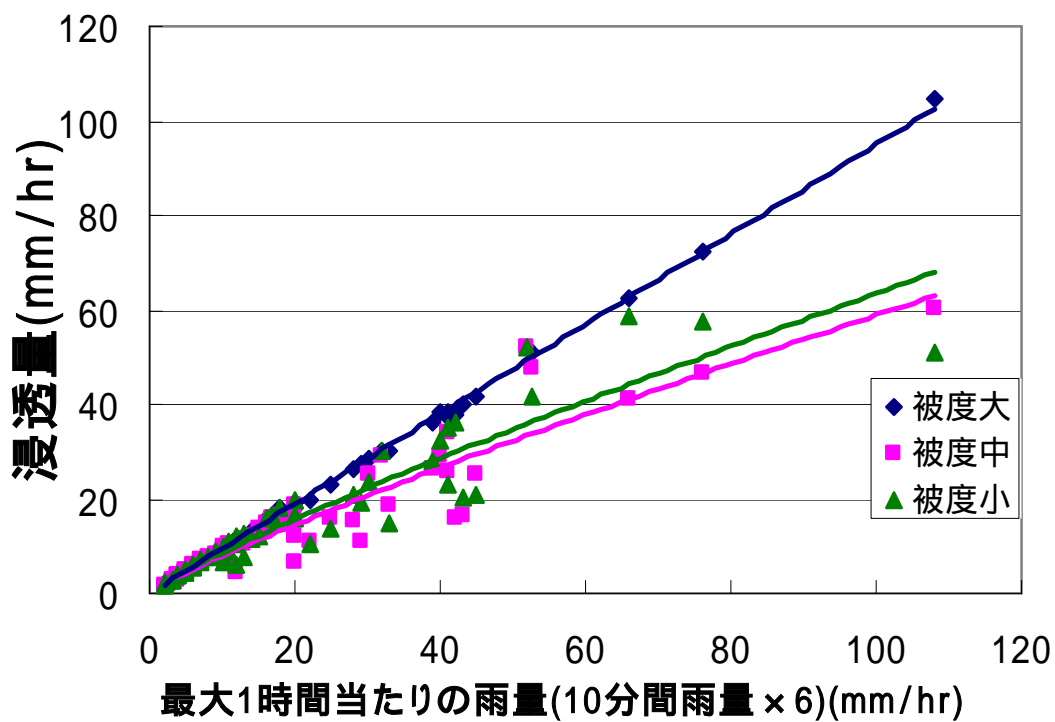


図 42 最大 10 分間雨量と浸透量

冠水型浸透計による浸透能

冠水型浸透計を用いて植生被度大・中・小 (No.2・No.1・No.3)の各土壤浸食測定枠付近で浸透能を測定した結果を図 43 に、勾配 12°・19°・33°、長さ 5m・5m・10m・20mの各簡易型土壤浸食測定枠付近で測定した結果を図 44,45 に示す。さらに、被度大・中・小 (No.2・No.1・No.3)、勾配 12°・19°・33°、長さ 5m・5m・10m・20mの各土壤浸食測定枠付近で測定した浸透能を比較したものを図 46 に示す。

図 43 の冠水型浸透計による測定結果では被度中、被度大、被度小の順に浸透能が小さくなった。図 44 より斜面勾配が小さい箇所では浸透能が小さい傾向が見られる。これは勾配が小さな箇所では細粒の土粒子等が多く堆積していることにより孔隙が小さくなっているためと考えられる。被度小、勾配 33°、長さ 5m、10m、20m の箇所は勾配や植生の量もほぼ同じであるが、図 45,46 より測定する場所が少し変わるだけで浸透能が大きく変化しており浸透能の測定値にはバラツキが大きいことがわかる。

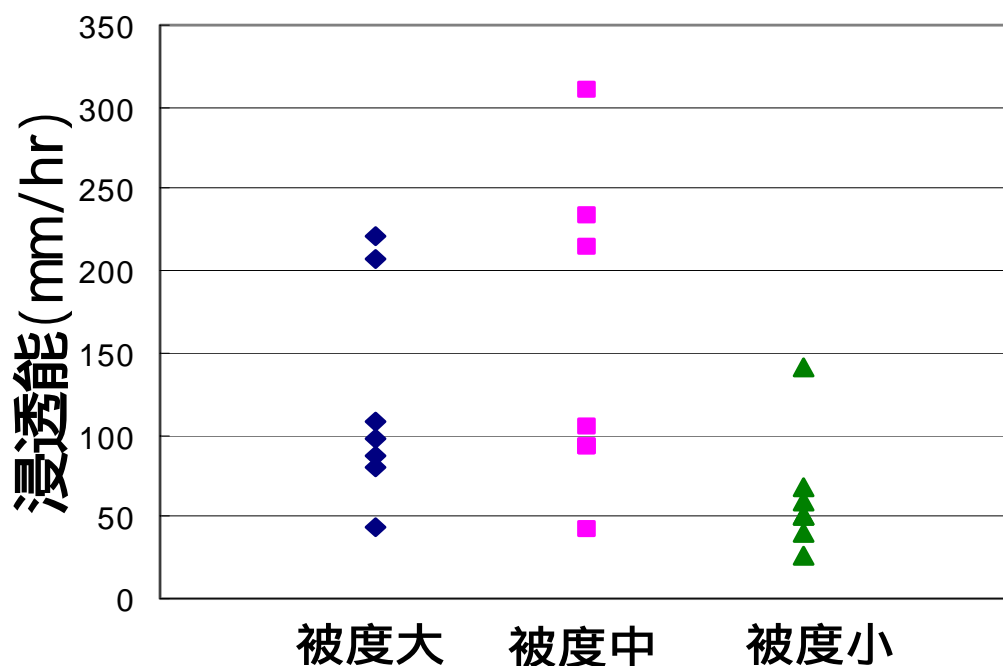


図 43 冠水型浸透計による浸透能(被度別)

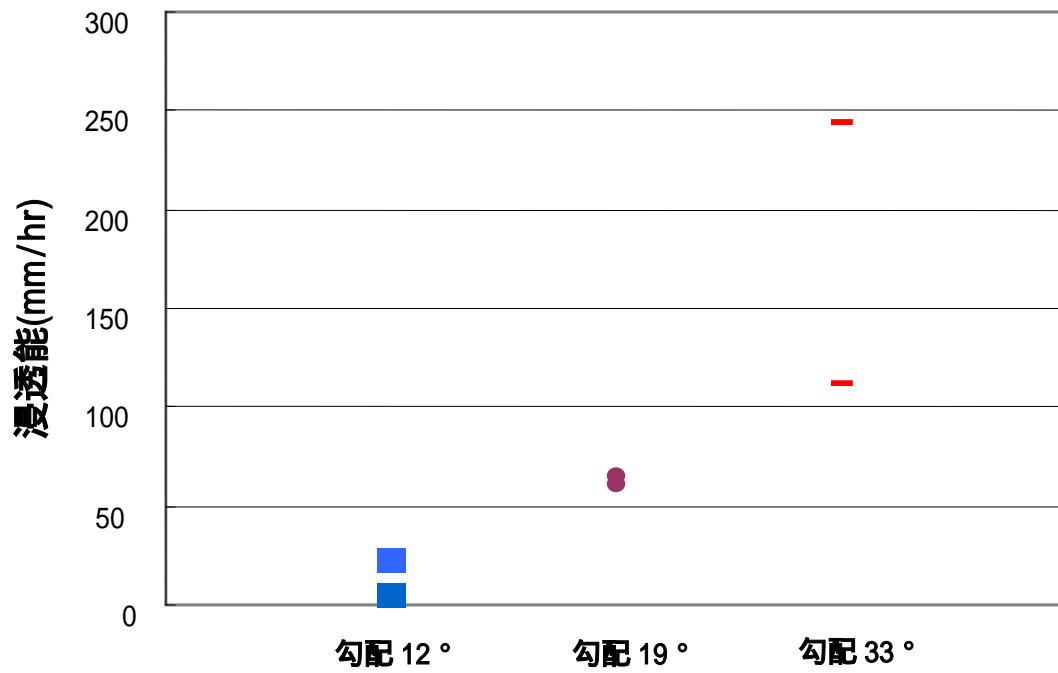


図 44 冠水型浸透計による浸透能(勾配別)

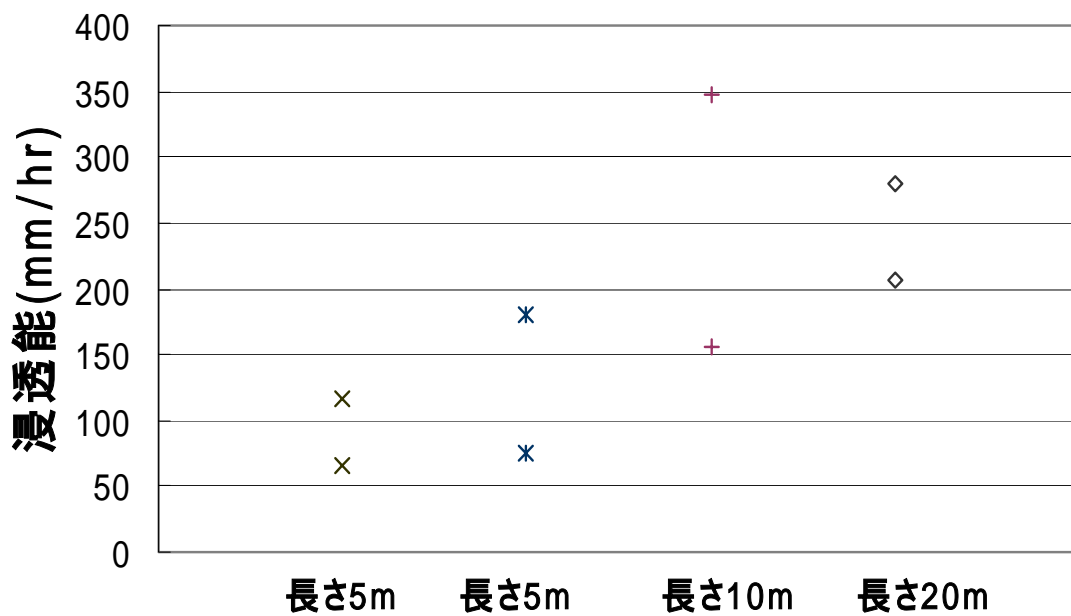


図 45 冠水型浸透計による浸透能(斜面長別)

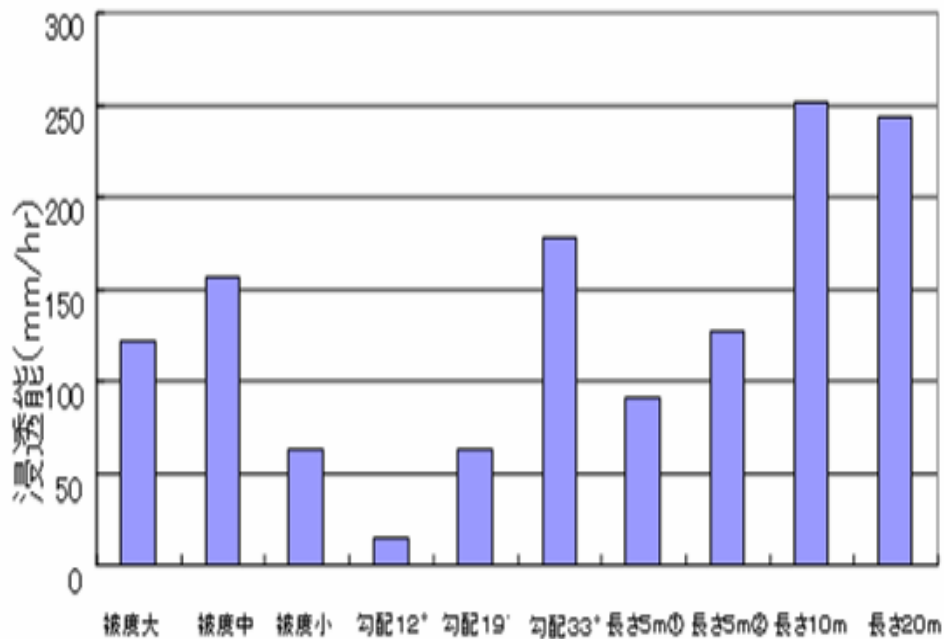


図 46 冠水型浸透計による浸透能

定水位飽和透水試験による飽和透水係数

定水位飽和透水試験によって求めた植生被度大・中・小 (No.2・No.1・No.3)、勾配 12°・19°・33° の各土壤浸食測定枠付近の表層土の飽和透水係数の結果を図 47,48 に示す。さらに、被度大・中・小 (No.2・No.1・No.3)、勾配 12°・19°・33° の各土壤浸食測定枠付近の表層土の飽和透水係数を比較したものを図 49 に示す。図 47 より定水位飽和透水試験による飽和透水係数は被度大、被度中、被度小の順に小さくなった。図 48 より斜面勾配が小さい箇所では飽和透水係数が小さい傾向が認められる。

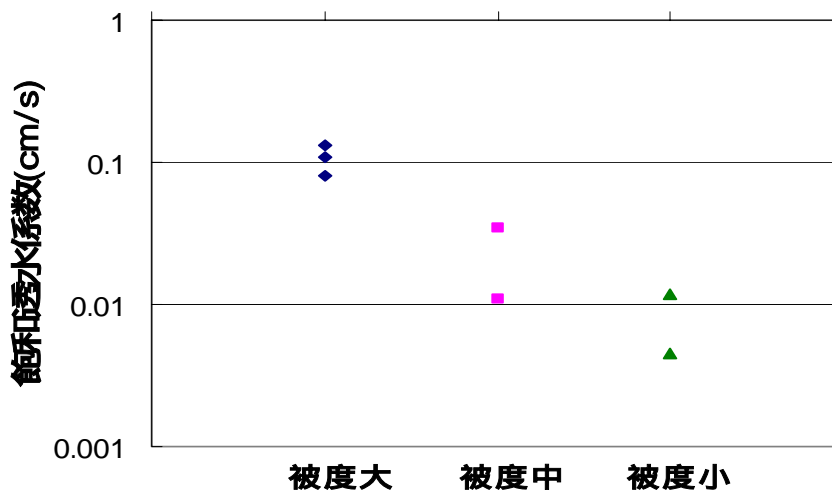


図 47 定水位飽和透水試験による飽和透水係数(被度別)

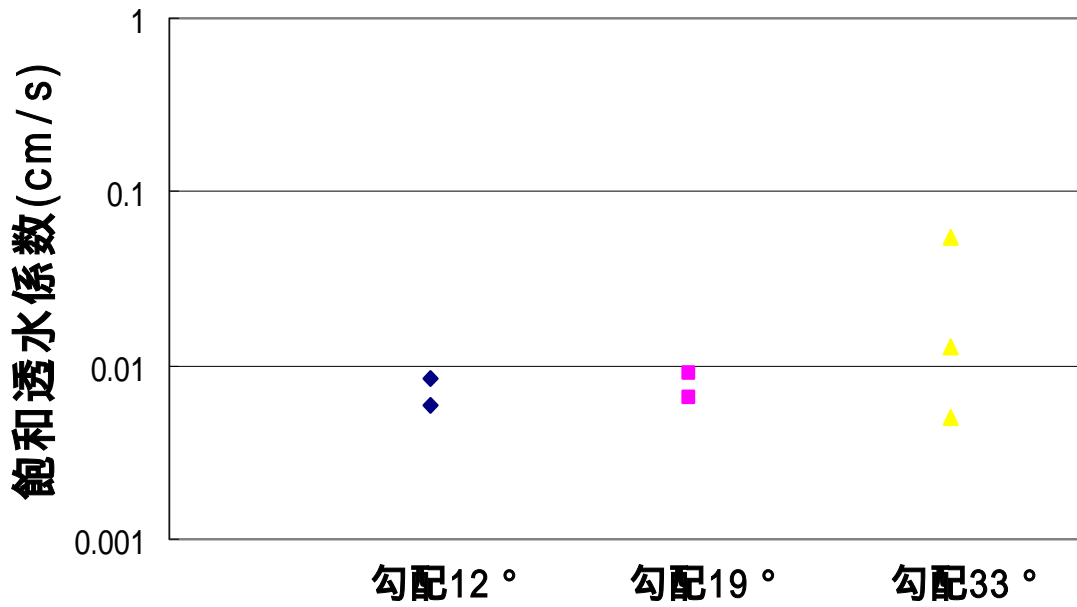


図 48 定水位飽和透水試験による飽和透水係数(勾配別)

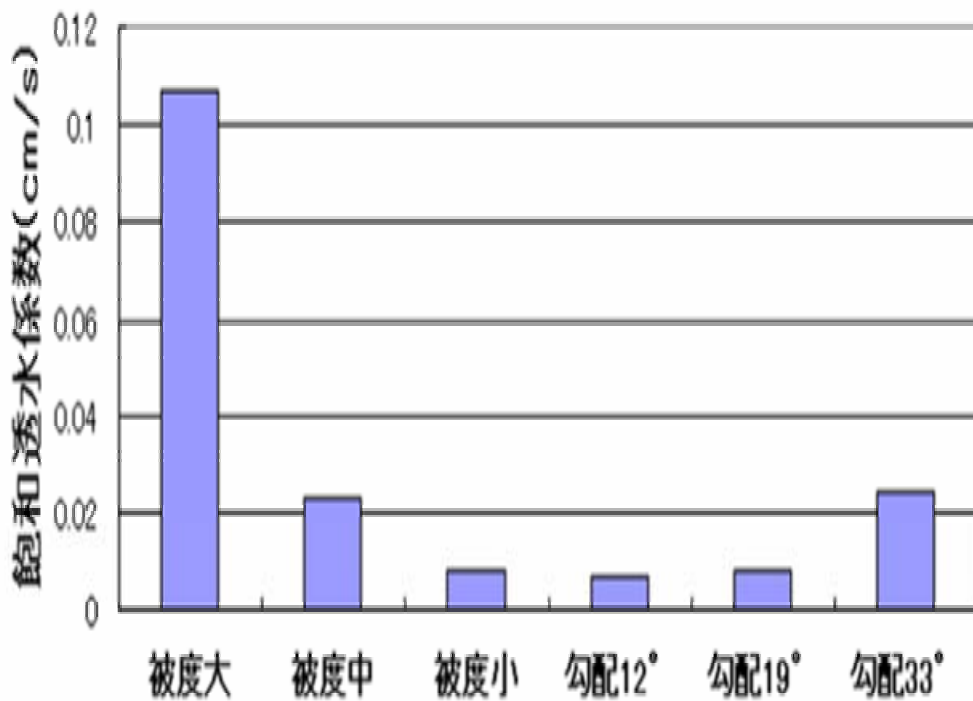


図 49 定水位飽和透水試験による飽和透水係数

各試験方法の比較

植生被度大・中・小 (No.2・ No.1・ No.3)における土壤浸食測定枠による浸透量と冠水型浸透計による浸透能と定水位飽和透水試験による飽和透水係数を比較した結果を図 50 に示す。さらに、勾配 12°・ 19°・ 33°における冠水型浸透計による浸透能と定水位飽和透水試験による飽和透水係数を比較した結果を図 51 に示す。

図 51 より勾配 12°・ 19°・ 33°の比較では飽和透水係数と冠水型浸透計による浸透能とは同様の傾向を示しており、勾配が小さな箇所では細粒の土粒子等が多く堆積していることにより飽和透水係数は小さくなっているためと考えられる。被度小と勾配 33°の箇所は勾配や植生の量もほぼ同じであるが、図 49 より飽和透水係数は異なる傾向が認められた。定水位飽和透水試験による飽和透水係数にも場所によるバラツキがあることが認められる。図 50 より被度大・中・ 小における土壤浸食測定枠による観測時最大浸透量と定水位飽和透水試験による飽和透水係数は同様の傾向が見られた。また、被度大と被度小では冠水型浸透計による浸透能と土壤浸食測定枠による浸透量はほぼ同一であるが被度中では冠水型浸透計による浸透能の方が大きい。一般に冠水型浸透計により測定された浸透能は湛水状態で測定しているために実際の浸透能よりも過大な値を得ることが指摘されている。土壤浸食測定枠の方は植生の被度大では遮断蒸発や雨滴衝撃の緩和、逆に小では表層クラストの形成などが影響し、冠水型浸透計で測定するような土壤の浸透能だけが影響しているわけではないことを考慮すると、必ずしも浸透能と浸透量が一致するとは言いきれない。冠水型浸透計による浸透能の測定結果と実際の浸透量の関係については今後さらに検討することが必要である。また、リターの影響等が考えられ、冠水型浸透計による計測方法を見直す必要がある。

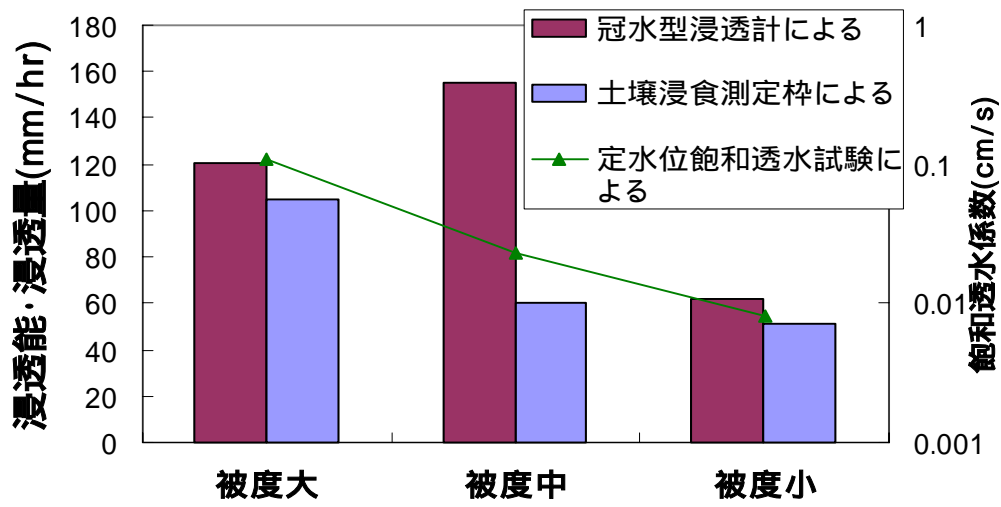


図 50 土壤浸食測定枠による浸透量と冠水型浸透計による浸透能と定水位飽和透水試験による飽和透水係数(被度別)

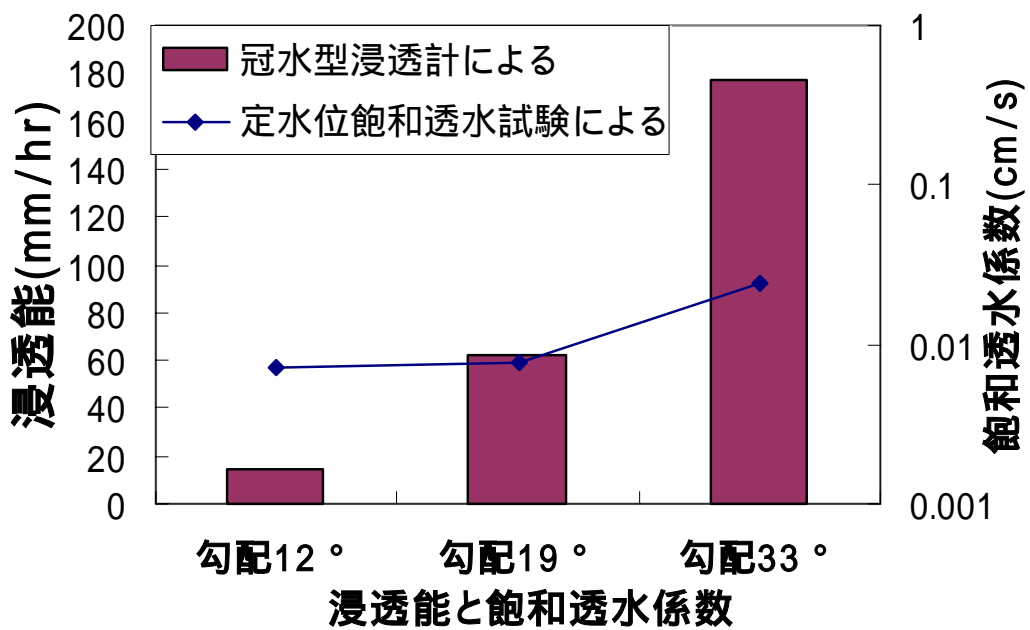


図 51 冠水型浸透計による浸透能と定水位飽和透水試験による飽和透水係数

(7) リター堆積量と浸透量

被度大・中・小 (No.2・ No.1・ No.3)の各土壌浸食測定枠において定期的に単位面積(1×1=1 m²)の枠を設置し 0.25 m²(0.5×0.5=0.25 m²)の枠を試験斜面付近の試験斜面内と同程度の植生被度、リター堆積量が存在する場所に設置し、その枠内のリターを採取して絶乾質量を計測した。また、調査期間内の10分間降雨で最も大きい浸透量が計測されたのは2005年の8月8日で、このときの浸透量を6倍して(60分間=)1時間あたりに換算した値を観測時最大浸透量と呼ぶ。計測したリター堆積量(2005年8月)と観測された最大浸透量との関係を図52に示す。

図52に示すようにリター堆積量が多いほど浸透量は大きくなる傾向が見られるため、リター堆積量が浸透量に影響していることが考えられる。すなわち、リター堆積量が大きいと雨滴衝撃が緩和されて、表層クラストの形成が阻害されるために浸透量が多くなると考えられる。

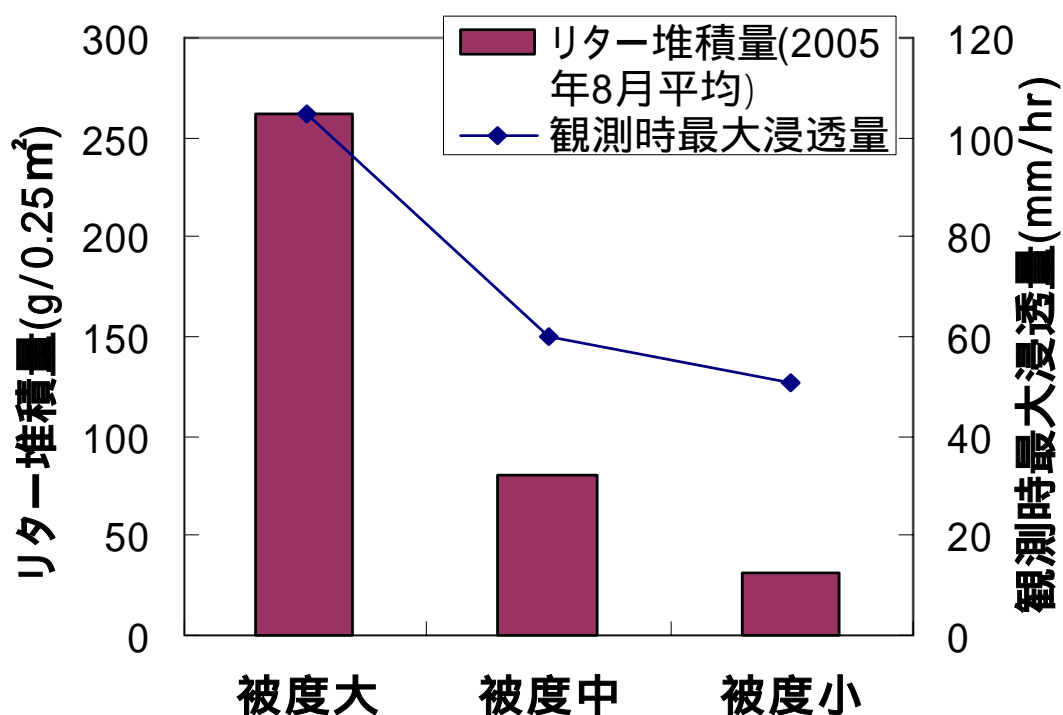


図52 リター堆積量と観測時最大浸透量

(8) 浸透率

植生被度大・中・小 (No.2・ No.1・ No.3) の各土壌浸食測定枠において、1 雨毎の雨量に対する浸透率を(6)式により求めた(図 53)。さらに最大 1 時間雨量当たりの浸透率を(7)式より、最大 10 分間雨量当たりの浸透率を 1 時間当たりに変換したものを(8)式により求めた(図 54,55)。

$$\text{浸透率 } i = (\text{1 雨の総雨量} - \text{1 雨の総流出量}) / \text{1 雨の総雨量} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{浸透率 } i_H = (\text{最大 1 時間雨量} - \text{その時間内の地表流流出量}) / \text{最大 1 時間雨量} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{浸透率 } i_M = (\text{最大 10 分間雨量} - \text{その時間内の地表流流出量}) \times 6 / \text{最大 10 分間雨量} \dots\dots\dots (8)$$

浸透能の定義より降雨が浸透能以下であった場合は全ての降雨は地中へ浸透するはずであるが、図 53,54,55 に示すとおり被度中と被度小の斜面では浸透能以下の降雨でも全ては浸透しないで降雨量の 30-40%に当たる地表流が現れた。被度が小さい時には明確な浸透能を示さないが、その機構については現状では不明である。図 53 に示すように 1 雨の総雨量が 50mm 程度でも浸透量が低下する傾向が見られる。

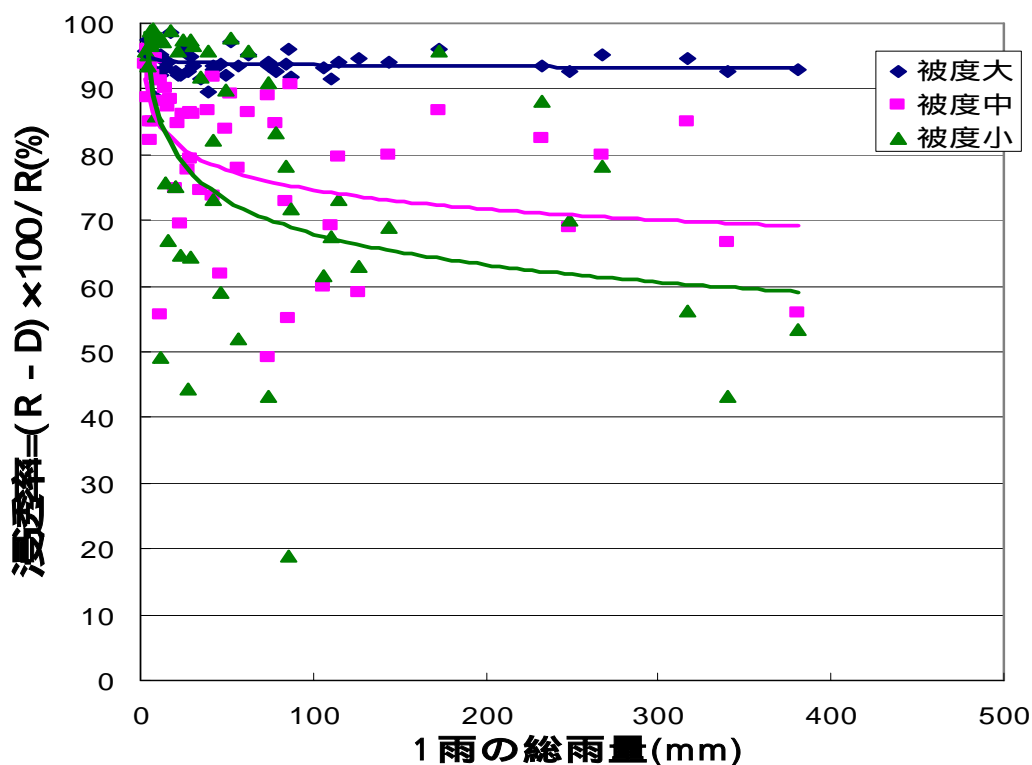


図 53 1 雨の総雨量と浸透率

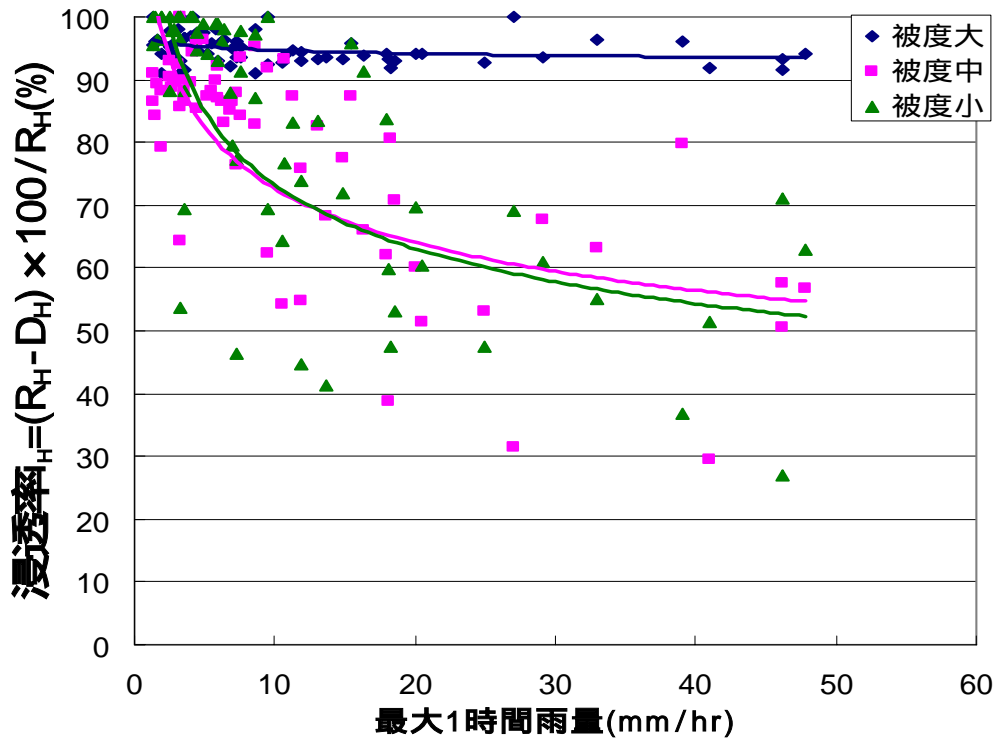


図 54 最大 1 時間雨量と浸透率

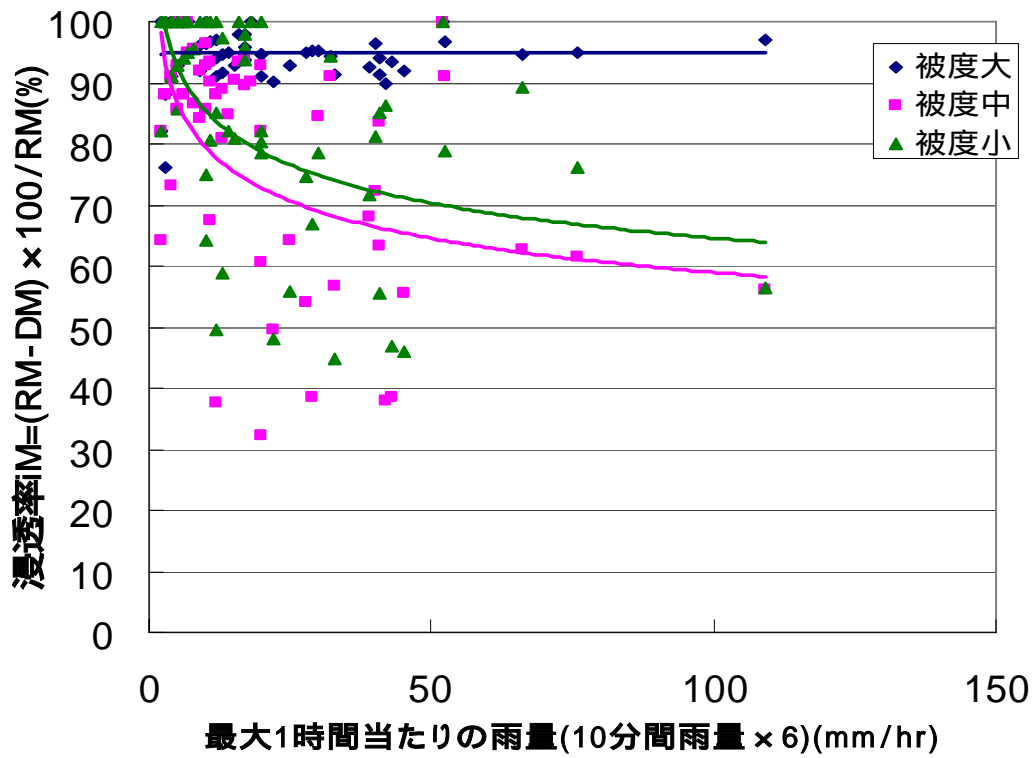


図 55 最大 10 分間雨量と浸透率

(9) 土壤浸食量と浸透率の季節による比較

植生被度大・中・小 (No.2・No.1・No.3) の各土壤浸食測定枠において、1雨毎の雨量に対する土壤浸食量と浸透率を季節(3~6月,7~9月,10~12月)により比較した結果を図56,57,58に示す。

被度大では一年を通して土壤浸食量や浸透率の変化はあまり見られなかった。しかし、被度中と被度小では、土壤浸食量が多いときに浸透率は低く、また土壤浸食量が少ないときに浸透率は高いという関係があり、季節変化が認められた。このことから7~9月に浸透率が低下して地表流が増加し、このため土壤浸食量が増加し、3~6月には浸透率が上昇して地表流が減少し、このため土壤浸食量が減少すると推察される。

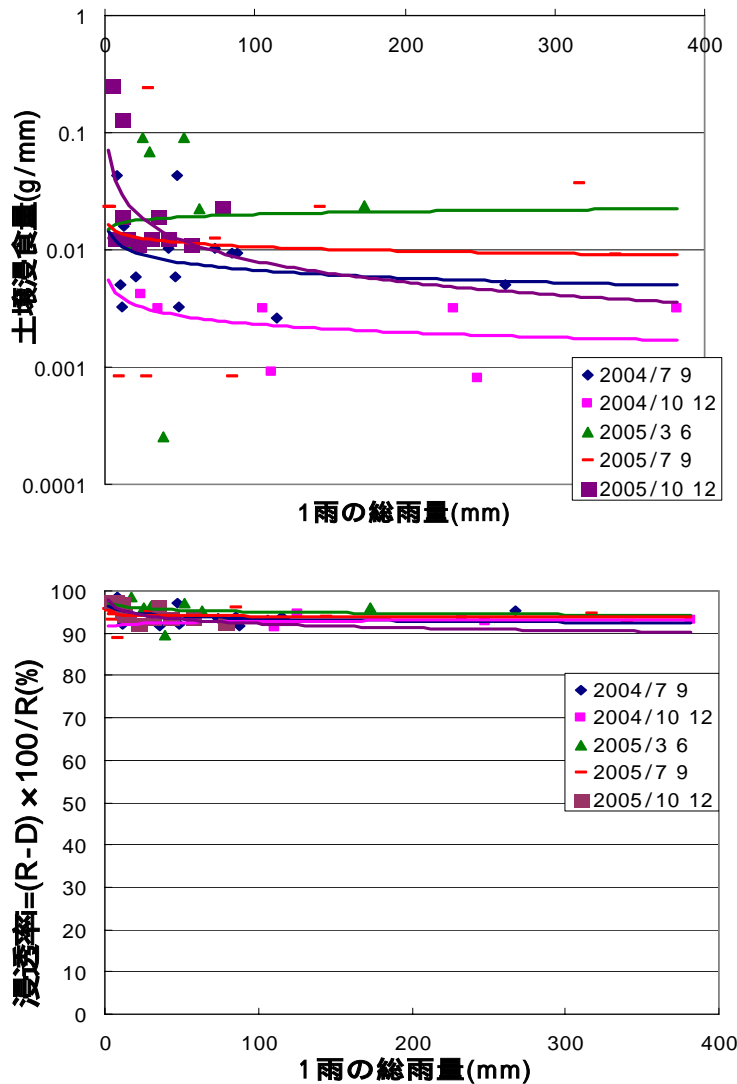


図 56 土壤浸食量と浸透率の季節変化(被度大)

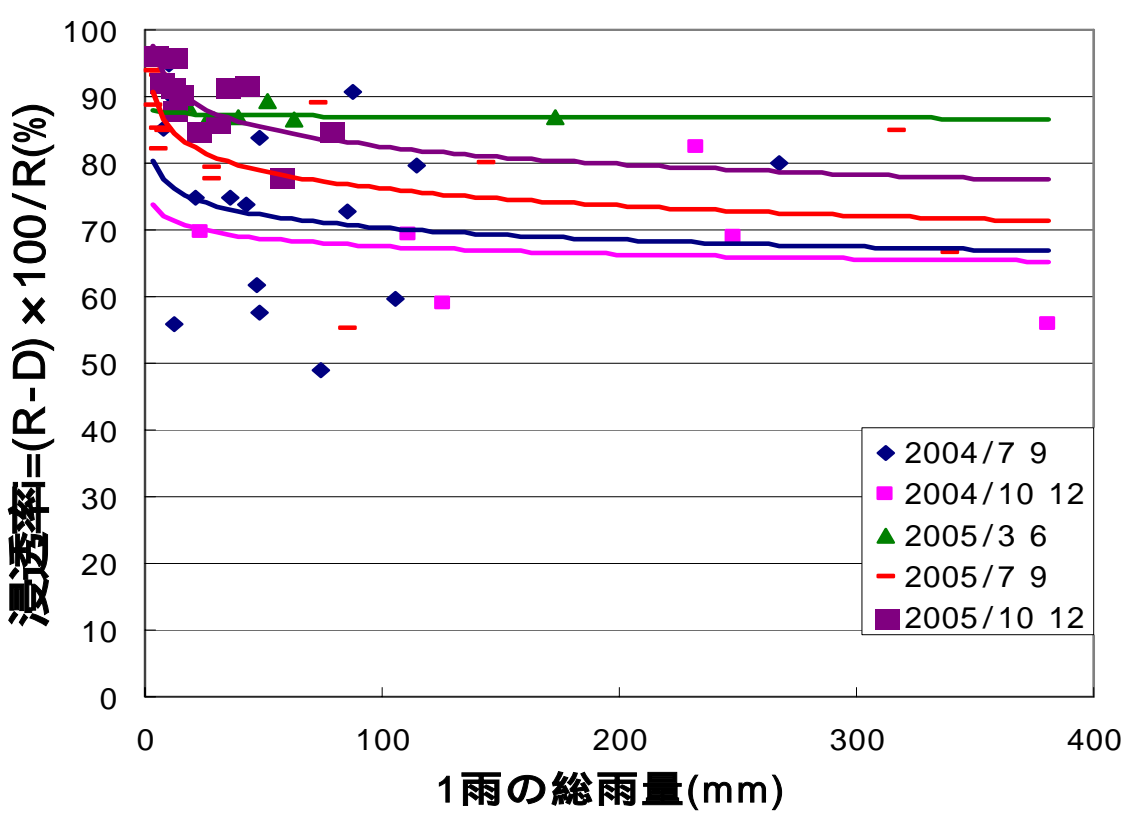
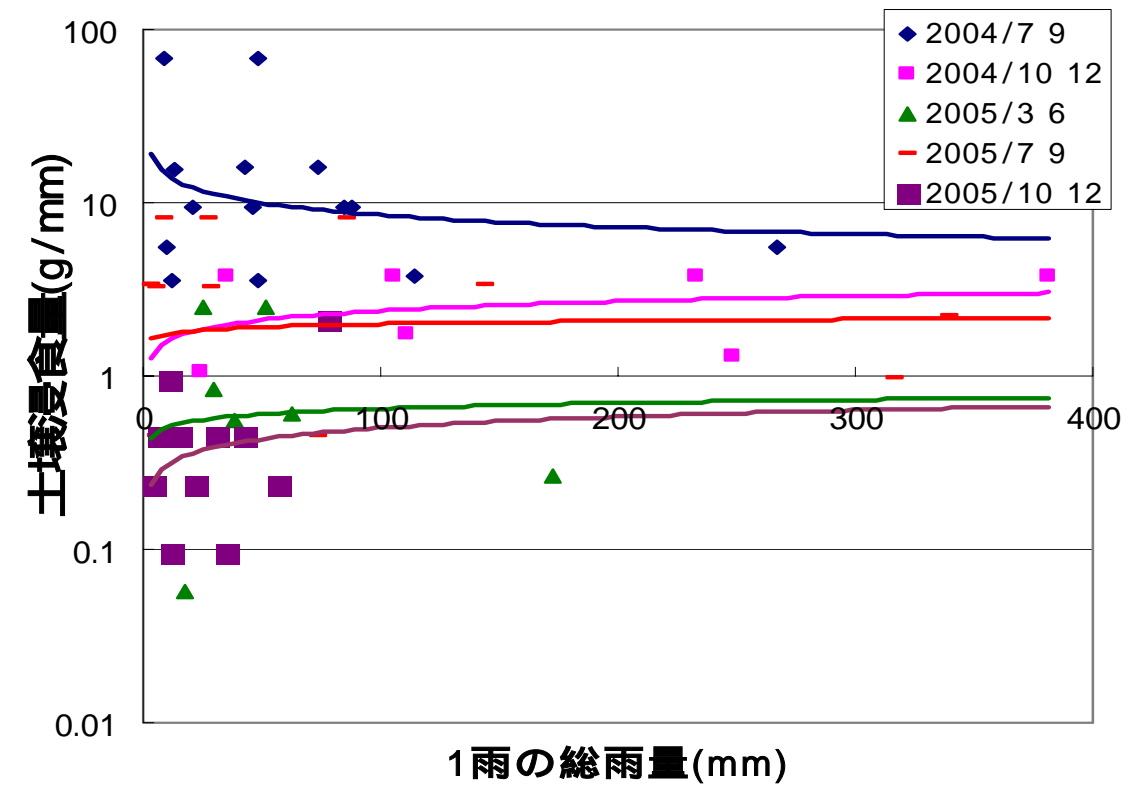


図 57 土壤浸食量と浸透率の季節変化(被度中)

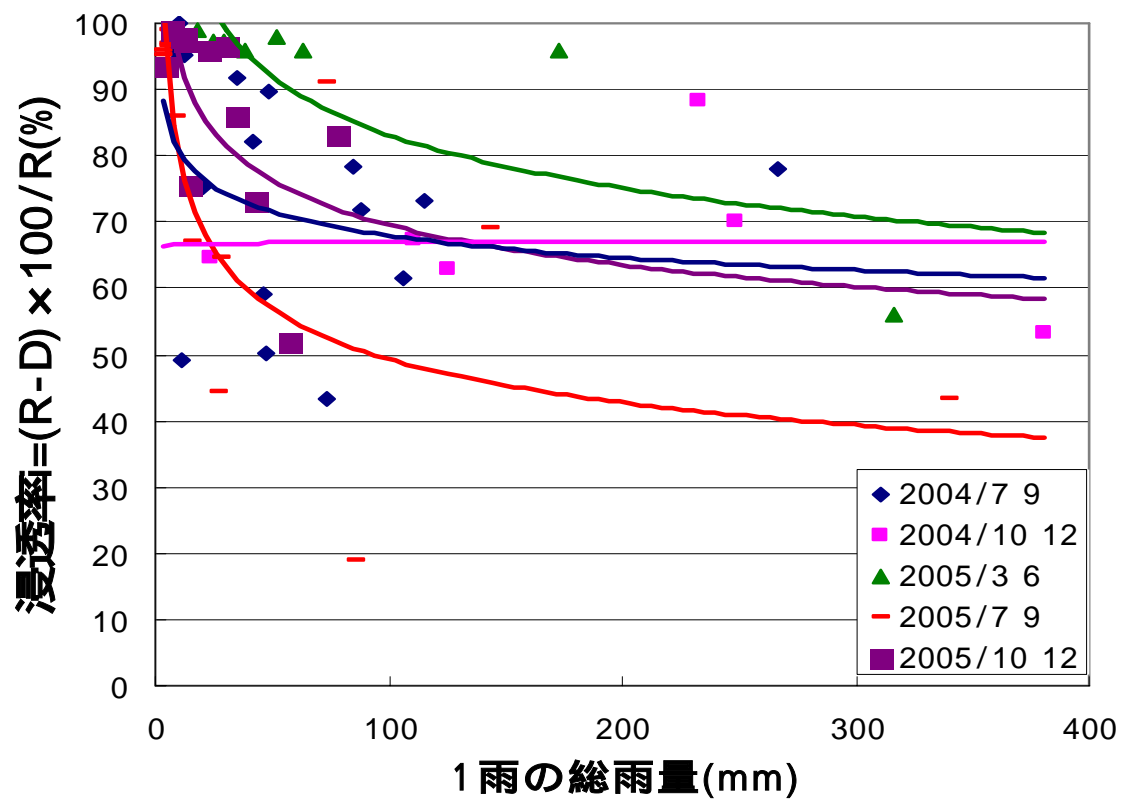
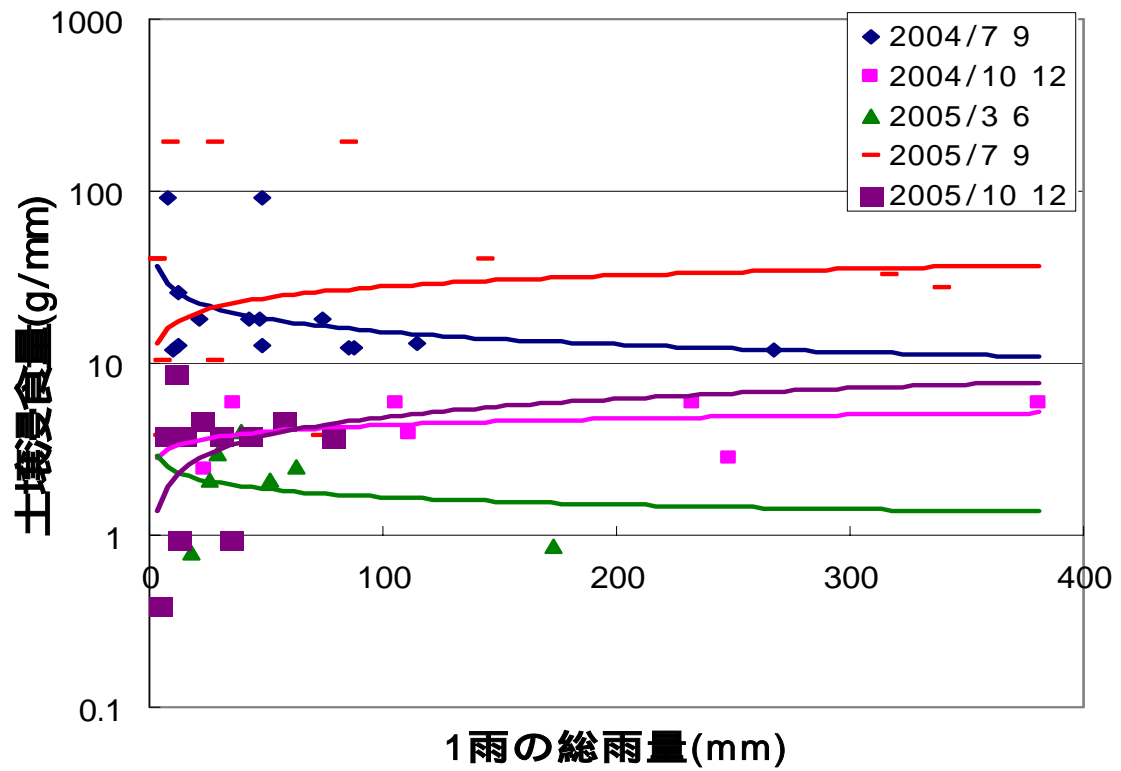


図 58 土壌浸食量と浸透率の季節変化(被度小)

(10) 降雨量と pF 値の関係

2005 年 7 月 1 日から 8 月 16 日までのテンシオメータによる pF 値観測期間中では、樹冠通過雨量として最大時間雨量は 49mm/hour (8 月 8 日)、最大 10 分間雨量は 20mm/10min (8 月 8 日) を観測した。また、期間内の総雨量は 1424mm (47 日間) であった。

7 月および 8 月の降雨と pF 値の変化を図 59, 61 に示す。降雨とほぼ同時に pF 値は低下するが、降雨前の土壤の乾燥状態、降雨量および被度により pF 値の変化の様相は異なる。比較のため、降雨と pF 値の関係について前後に降雨の無い 7 月 19 日の場合を図 60 に、8 月 2 日の場合を図 62 に示す。

7 月 19 日 (図 60) には、70 分間に計 5mm の降雨が観測された。被度小の深度 10cm では降雨とほぼ同時に pF 値は急速に下がり、その後すばやく上昇した。被度小は、被度大に比べて pF 値の上昇が早く、また降雨前には被度小のほうが被度大よりも高い pF 値すなわち乾燥した状態を示した。

8 月 2 日 (図 62) には、120 分間に計 4mm の降雨が観測された。降雨が比較的小さく、降雨前の土壤が乾燥しているとき、どの植生被度でも 10cm の pF 値の減少の大きさに比べて 20cm での変化は少ない。比較的小さな降雨時では、被度小は被度大より pF 値が小さい (図 60、図 62)。これは植生やリターがごくわずかな被度小では降雨を遮る障害物が無いため、降雨前の乾燥した土壤に、雨水が容易に浸透できるためと考える。また、比較的大きな降雨時では、被度小は被度大より pF 値が大きい (図 59、7 月 9 日、7 月 25 日、図 61、8 月 8 日)。被度小では大きな降雨で地表流が発生し、そのため土壤への浸透量そのものも減少するためと考えられる。

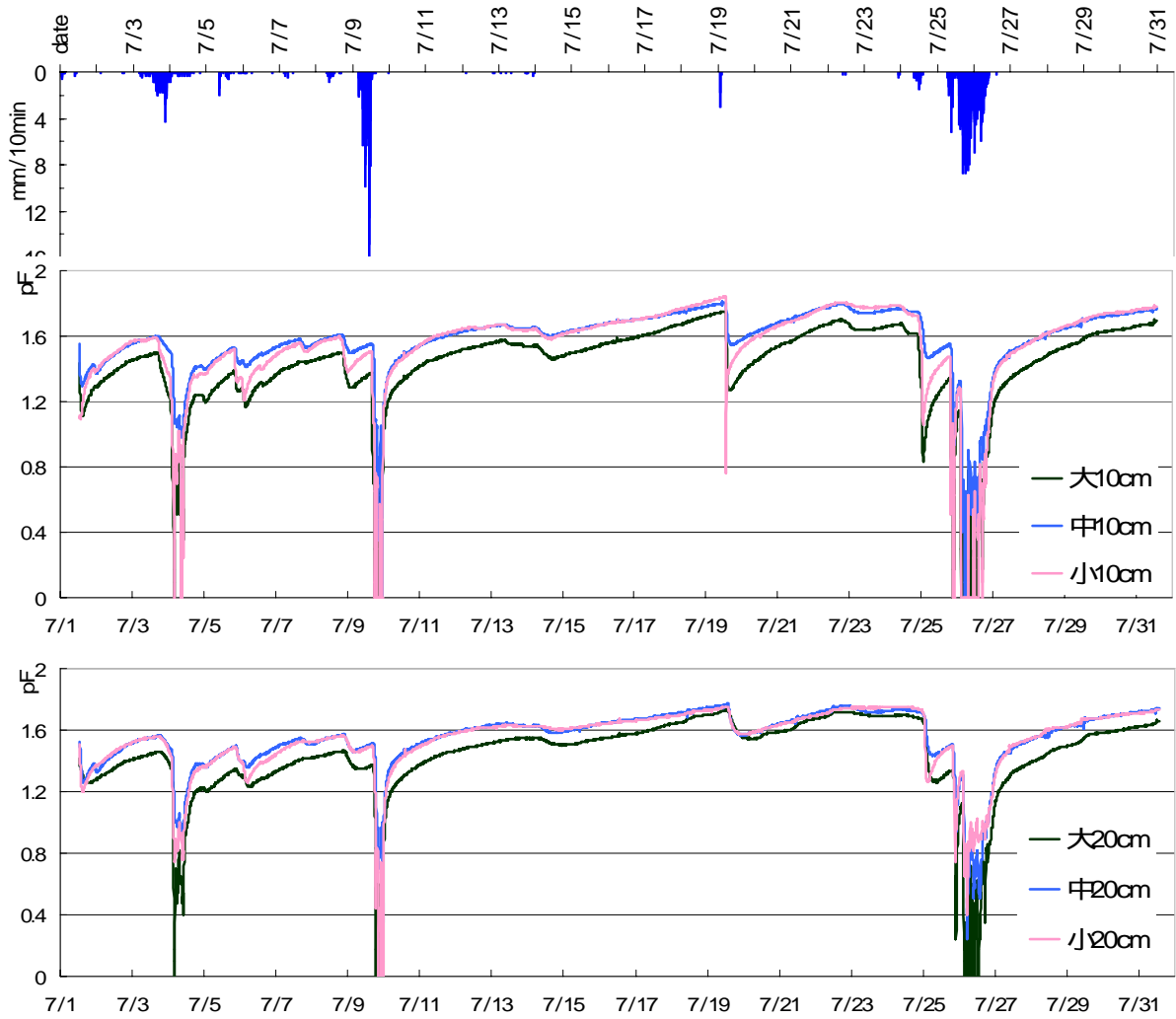


図 59 2005 年 7 月の降雨および pF 値

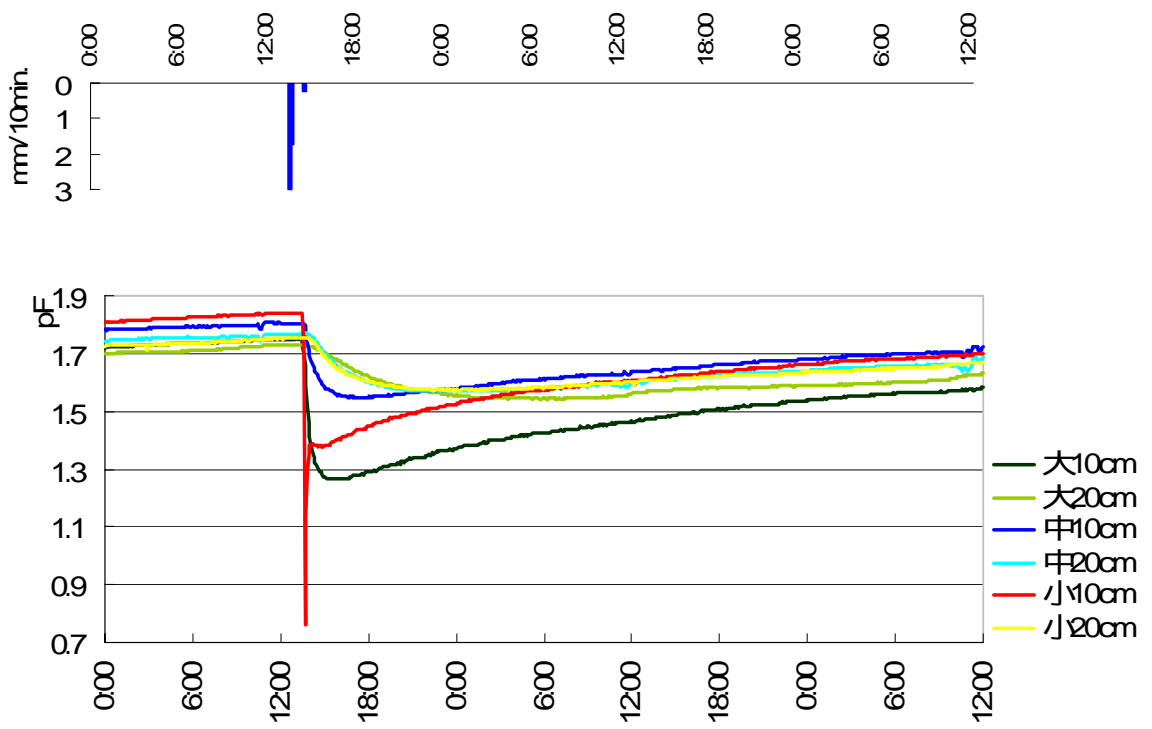


図 60 2005 年 7 月 1 9 日の降雨および pF 値

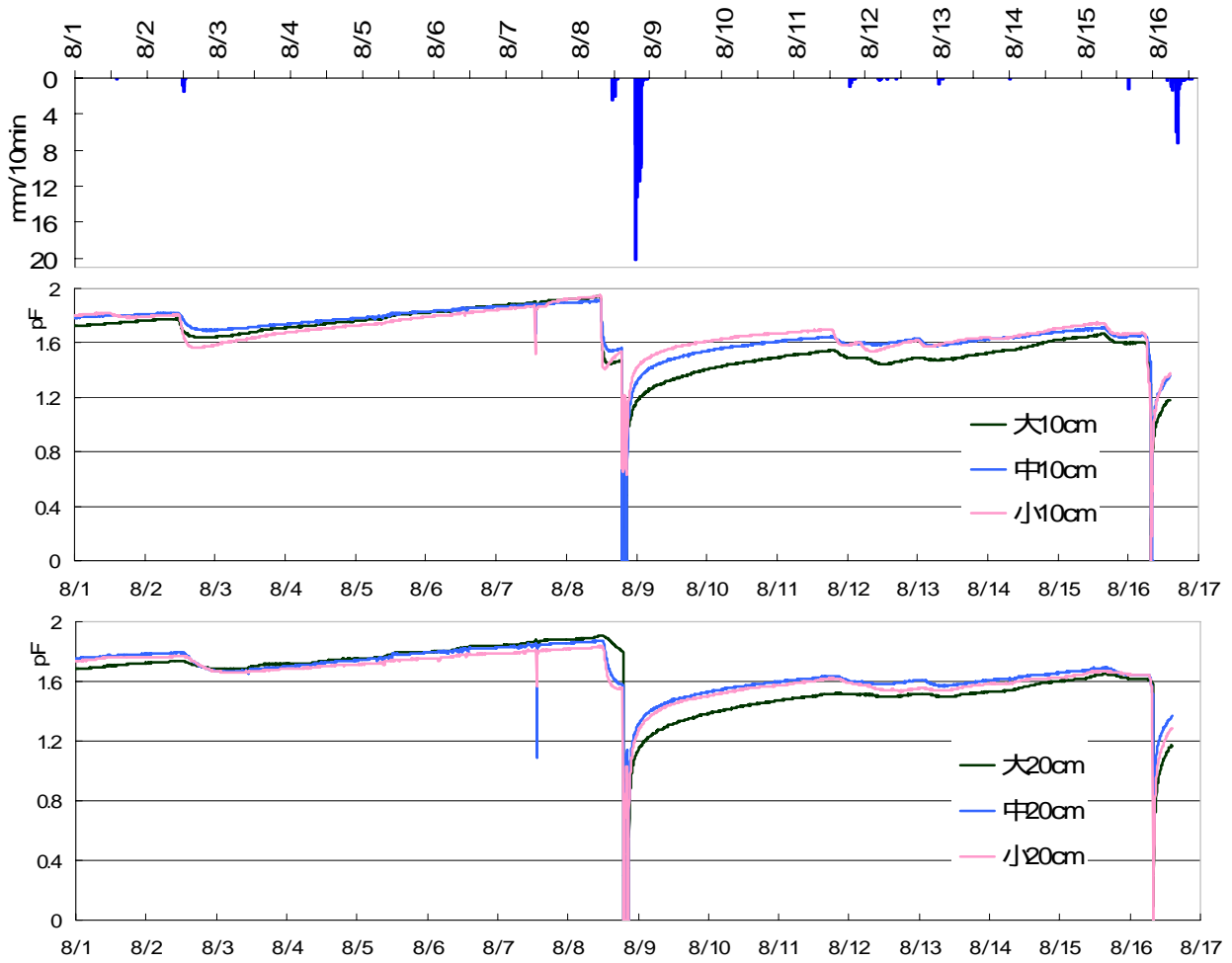


図 61 2005 年 8 月の降雨および pF 値

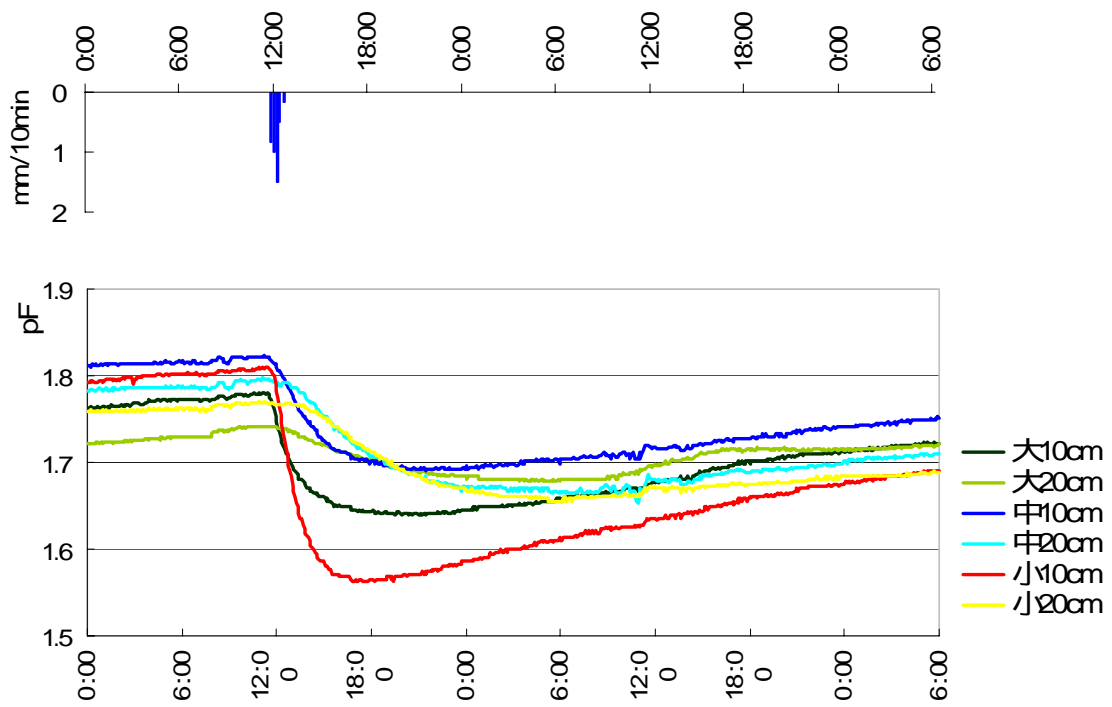


図 62 2005 年 8 月 2 日の降雨および pF 値

(11) 降雨後の pF 値の変化時間

降雨後の pF 値の回復（乾燥）の早さを調べた。降雨によって pF 値が 1 以下に下がり、また降雨後に一定時間降雨が無いサンプルを用いて、被度大と被度小の pF1.4 から 1.6 までの変化に要した時間の平均値を比較した結果を図 63 に示す。被度大は被度中・小より、10cm・20cm 共に pF 値の上昇が遅く、乾燥しにくいことがわかった。また被度大では、表層に近い深度 10cm より深度 20cm のほうが乾燥に時間がかかった。一方、被度中と被度小では、pF1.4 から 1.6 までの変化時間はほぼ等しく、また 10cm と 20cm の pF 値の変化時間にもあまり差は見られなかった。

下層植生の少ない被度小は、被度大に比べ、降雨直後の低い pF 値から短時間で急激に pF 値が上昇し、土壌の素早い湿潤化とそれに続く急な乾燥が見られた（図 63 及び図 59 7月9～11日、図 61 8月8～10日など）。被度小・被度大共に、降雨初期には深度 10cm より 20cm の pF 値が高い（図 60 7月15日 18:00、図 62 8月2日 18:00）。しかし無降雨期間が続く時、pF1.4 から 1.6 までの変化に要する時間は被度小のほうが短く、被度大ではより緩やかな乾燥が観測された（図 63）。pF 値の変化の幅も、被度大のほうが小さかった。

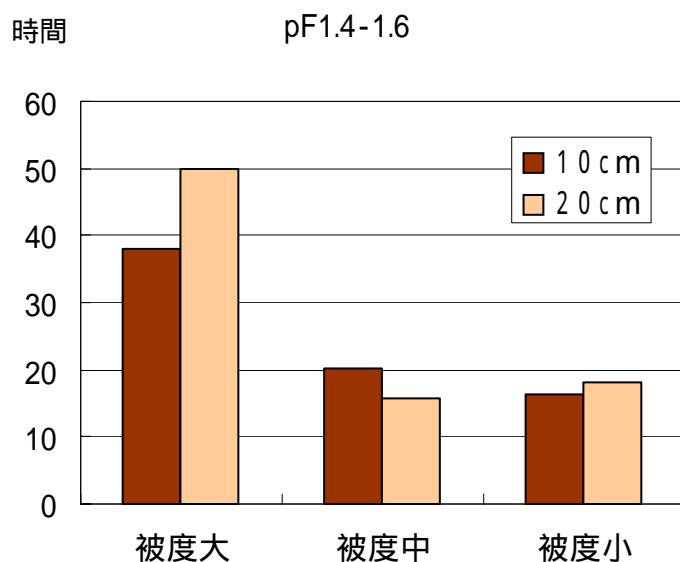


図 63 2005 年 pF 値の時間変化の比較

緊急土壌浸食対策の検討

1．植生衰退地における一般的な土壌浸食対策

植生が衰退した箇所において土壌浸食を防止する手法としては、第一には植生を回復することが優先される。しかしながら植生が回復するには時間を要する場合には次のような方法で緊急的に土壌浸食を防止・軽減する手法がとられる。

- (1) 斜面の表面を被覆する方法：(ア) リター堆積量を維持する（毎年供給されるリターを斜面上に留める）。(イ) ワラ、ネット等で表面を被覆する。
- (2) 斜面の勾配を緩くする方法：(ウ) 柵工等を設置して斜面の勾配を部分毎に緩くする。

堂平ではブナ林という上層木が存在するため、毎年多量のリターが 10～11 月に林床に供給されている。しかしながら、林床植生がないか少ない場合には、林床上に堆積したリターは風で吹き飛ばされたり、表面流により斜面外へ流されて減少してしまう。さらに、林床上に堆積したリターは時間の経過とともに腐朽により減少する。

2．堂平の特性に合った緊急土壌浸食対策

通常の崩壊跡地やとくしゃ地のような裸地と堂平の林床植生衰退地では種々の条件が異なるので、堂平の特性に適合した緊急土壌浸食対策手法を検討した。検討条件は次の通りである。上層木から毎年多量に供給されるリターを有効に土壌浸食対策に用いる。自然の土壌浸食抑制効果（自然治癒力）を最大限に利用する。天然の材料を用いる。廃棄物を出さない。丹沢の景観と調和した施設とする。自然公園の景観を維持する。維持管理が容易な構造とする。一部の破壊、破損が浸食の拡大を招かないようにする。これらの検討条件を総合的に考慮して、毎年供給されるリターを林床上に捕捉・定着させて土壌浸食を抑制するため天然素材を用いたリター捕捉法を提案した。具体的には図 18、19 に示すように天然素材（ヤシ、わら等）を用いたネットあるいはリターロールを格子状に斜面上に設置してリターを捕捉し、捕捉したリターにより土壌浸食を防止・軽減する手法である。長所としては施工が容易で経費が安くなることがあげられる。しかしながら、これらの手法は今まで現場で試みられたことがないので、急な斜面での施工難易度、土壌浸食防止効果、植生回復効果、維持管理の難易度等が不明である。このため、平成 17 年 12 月にこれらの手法を試験的に現地に設置して不明な点の解明を行うこととした。

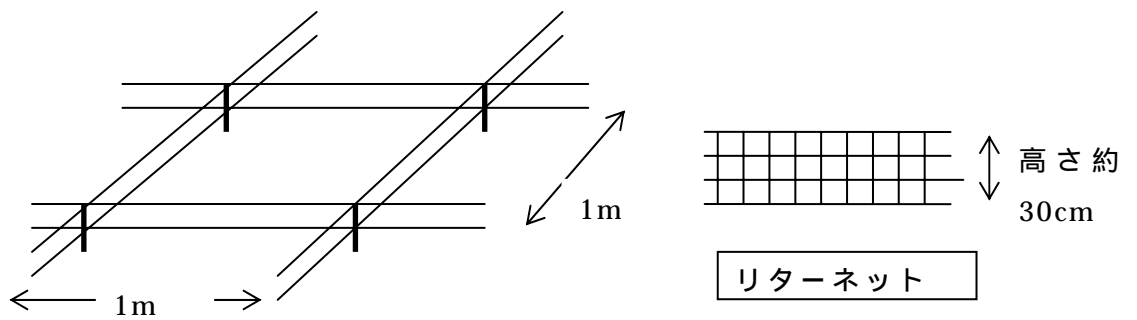


図 18 リターネットを用いたリターの捕捉による浸食防止手法

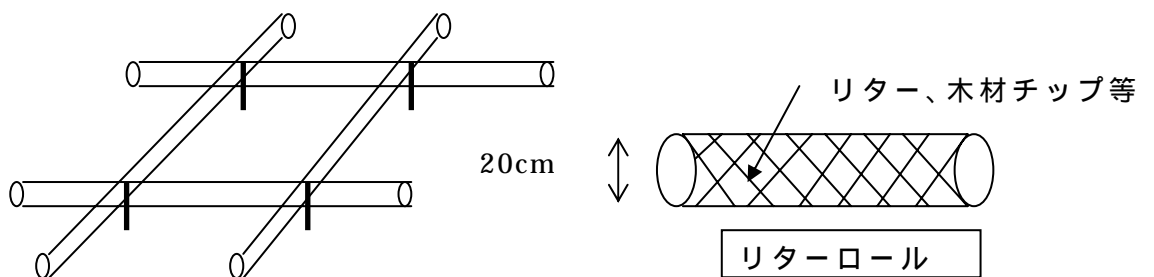


図 19 リターロールを用いたリターの捕捉による浸食防止手法

3 . 結論

丹沢山地堂平地区の林床植生衰退地において2004年7月～2005年12月に樹冠通過雨量、リター堆積量、土壌浸食量等を観測した。その結果、林床植生の被度が小さいほど土壌浸食量は大きく、被度小（林床植生被覆率約1%）では2005年1～12月の1年間で深さ約1cmの土壌が浸食されていることが分かった。さらに年間を通して見ると林床植生量が少ない箇所ほどリター堆積量も少なかった。季節的な変化で見ると7～9月に林床植生量が最も多くなるのに対してリター堆積量は最も少なくなった。被度中、小では降雨量を考慮しても土壌浸食量が最も多いのは7～9月であることから、土壌浸食量にはリター堆積量の変化が大きく影響しているものと考えられる。

斜面の上、中、下部にリター移動量測定柵を設置して、斜面下方向、上方向、横方向のリター移動量を測定するとともに、上層木からのリター供給量を測定した。勾配が急な箇所では斜面横方向のリター移動量は斜面下方向の移動量よりもかなり少なかった。一方、勾配が緩い箇所では斜面横方向のリター移動量は斜面下方向に匹敵するほど多く生じた。斜面下方向および横方向のリター移動量は4～5月と10～11月に多く、これは主として風による

運搬により生じることが分かった。

リターバッグを用いて腐朽によるリター質量の変化を測定した。リターの腐朽速度は4~12月でほぼ直線的に減少しており、この期間内では一日あたり平均約0.22%の質量が減少した。

リター堆積量は4~5月および10~11月には主として風によって移動流出し、4~12月の期間には腐朽によってほぼ一定割合でリターは減少する。一方10~11月には、樹冠からの多量のリター供給によって、リター堆積量も増加する。結果として、7~9月においてリター堆積量は1年間を通して最も少なくなっている事が明らかとなった。リター堆積量変化のモデルを作成してリター堆積量の推定をおこなったが、ほぼ実測値に近い値を得た。

堂平ではブナ林という上層木が存在するため、毎年多量のリターが10~11月に林床に供給されている。この堂平の特性に適合した緊急土壌浸食対策手法として毎年供給されるリターを林床上に捕捉・定着させて土壌浸食を抑制するため天然素材を用いたリター捕捉手法を提案した。

土壌浸食測定枠による観測時最大の浸透量と定水位飽和透水試験による飽和透水係数とは同様の傾向が見られたが、冠水型浸透計による浸透能とは異なる傾向が見られた。冠水型浸透計による浸透能で傾向が異なったのはリターの影響等が考えられる。今後冠水型浸透計による計測方法の見直しが必要である。

浸透能の定義より浸透能以下の降雨があった場合は全ての降雨は浸透するはずであるが、被度中と被度小の斜面では浸透能以下の降雨でも全ては浸透しないでホートン型地表流が現れた。被度(リター堆積量)の違いが浸透量に影響を与えていると考えられる。これは、従来から指摘されていた林床の裸地化にもなって浸透能が低下することを支持する実測結果である。

被度大では一年を通して土壌浸食量や浸透率の変化はあまり見られなかったが、被度中と被度小では土壌浸食量と浸透率には密接な関係があり、季節変化が認められた。7~9月に浸透率が低下して地表流が増加し、このため土壌浸食量が増加し、3~6月には浸透率が上昇して地表流が減少し、このため土壌浸食量が減少すると推察される。

被度大、被度中、被度小の試験斜面の表土層部(深さ10cm、20cm)におけるpF値の測定結果から、下層植生が少ない土壌(被度小、中)は、降雨後から急速な乾燥が始まり、降雨時と無降雨時の乾湿の差が大きい。一方、豊富な下層植生およびリターが存在する場合(被度大)は、これらが土壌の急激な湿潤や乾燥を緩和するバッファとして機能するため、水分ストレスに弱いブナ林にも好影響を与えられとされる。

4．おわりに

丹沢堂平の林床植生衰退地における土壌浸食量について現地観測を行い、植生被度が土壌浸食量に与える影響を検討した。調査結果から、リター堆積量の季節変化が土壌浸食量の季節変化に大きな影響を与えていることがある程度明らかになった。このことから、毎年、上層木から供給されるリターを林床上に捕捉・定着させることにより土壌浸食を抑制することができるかと考え、リター捕捉手法を緊急土壌浸食対策手法として提案した。提案した手法は神奈川県により平成 17 年 12 月に現地に試験的に設置された。今後はこれらの対策手法について追跡調査を行いその効果を検証して行く予定である。

冠水型浸透計の計測方法の改善策として、リターを除いた上で計測することや下層植生の種類の違いも考慮して計測を行うことがあげられる。また、定水位飽和透水試験の回数を増やし、斜面長別にも計測することや、飽和透水試験の季節変化を調べることでシカの過食圧による林床植生の衰退が浸透能、土壌浸食および地表流の流出に与える影響がより詳しくわかると考えられる。

最後に、本調査は神奈川県が実施している丹沢大山総合調査の一部として行われたものであることを記すとともに、関係者各位から賜った多大なご支援、ご協力に対し深甚なる謝意を表する次第である。

5．引用文献

- 三原義秋(1951)：雨滴と土壌浸食、農業技術研究所報告 A、1、1-59
三浦覚(2000)：表層土壌における雨滴侵食保護の視点からみた林床被覆の定義とこれに基づく林床被覆率の実態評価、日本林学会誌 82：132-140
湯川典子、恩田裕一(1995)：ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響()散水型浸透計による野外実験、日本林学会誌 77：224-231

水流出過程調査

1. 調査の目的と概要

(1) 国土の 7 割を占める日本の山地は、急峻で複雑な地形と脆弱な地質を特徴とし、その大部分は森林に覆われる。健全な森林には樹木の根系群が発達し、斜面を覆い自然の土砂生産抑止力として働く。また林床の植生や落葉落枝層は、雨滴浸食による土壌の流出を防止する。その一方で、豪雨や多発する地震は、斜面崩壊や土石流などの土砂災害の原因となる。

山腹斜面の土層は、平常は安定しているが、大雨により崩落した土砂は溪流の谷底や源頭部に不安定に堆積し、流水の力で下流に運搬される。また、植生の被覆を失った山腹は、降雨による表面侵食を受けやすく、多量の土砂を溪流に供給するようになる。

流出した土砂の中でも粒径 0.1mm 以下の土砂(浮遊砂)は、湖や貯水池のような水の流れが静止する場所が無い限り、下流域や海まで流下する。浮遊砂は山腹からの生産土砂の 50% を占めるとも言われ、決して無視できる量ではない。ダム湖や貯水池などへ流入した浮遊砂は、沈殿・堆積し、ダムの耐用年数を縮める。また、水道水源部の利用や水域の生態系に影響を及ぼす点から、環境指標としても使われる。

そのため近年では、地形学や砂防学のみならず、生態学や環境科学の分野からも浮遊砂について興味もたれるようになった。しかし、浮遊砂の挙動が複雑であるため、浮遊砂の生産量や時系列変化に関する研究は多いが、統一的な結果が出ていない¹⁾。なお浮遊砂の解析方法についての研究を - 3 で引用しまとめた。

名水で知られる丹沢や、都民の水源地の奥多摩で、溪流への土砂流出が近年問題となっている。特に神奈川県丹沢山地では、1970年代からモミの立ち枯れが始まり、1980年代以降から大規模な自然環境の劣化が見られるようになった。1997年の丹沢大山自然環境総合調査を通じ、ブナの立ち枯れや林床植生の衰退、濁水による水道水源の汚濁や貯水ダムへの堆砂、シカ個体群の低質化、オーバーユース、移入種の侵入による生物多様性の攪乱などが確認された。現在でも自然環境の劣化は止まらず、生態系へ与える影響はこれまでになく深刻化している。

流出土砂量の研究例として、丹沢山地の大洞沢流域を対象とした流出土砂量の測定がなされている²⁾。これは1998年6月から9月にかけて量水堰に堆積した土砂の体積を測定し、流出土砂と理論式(Shields 掃流砂量式)とを比較したものである。ここでは掃流砂のみを扱っているが、流域における総合的な流出土砂量を求めるには、掃流砂量と浮遊砂量を併せて測定することが必要である。

本調査では、2004年から丹沢山地東部の大洞沢流域(流域面積約48ha)を対象とし、降雨、流量、浮遊砂濃度及び土壌水分を計測した。そこから流量と浮遊砂量の相関関係を求めた。

(2) 土砂礫の輸送

流水による土砂礫の輸送は、その移動形式から掃流砂と浮遊砂に大別される^{3,4,5)}。また、浮遊砂の中でも粒径の細かいものはウォッシュロードと呼ばれる。図 - 2 に概念図を示した。

- a. 掃流砂：流路床上を滑動、転動、または河床に沿って跳躍などして移動する、粒径の比較的大きな流砂。(bed load)
- b. 浮遊砂：流水中を浮遊運搬される細粒の流砂。鉛直方向の濃度分布を持ち、全水域に存在する。(suspended material load)
- c. ウォッシュロード：浮遊砂の中でも、特に粒径が 0.001～0.1mm 程度の粘土、シルト、極微粒砂で、流水中に入ると流れの状態に関わらず常に浮遊して、途中の溪床に堆積することなく流下する。(wash load)

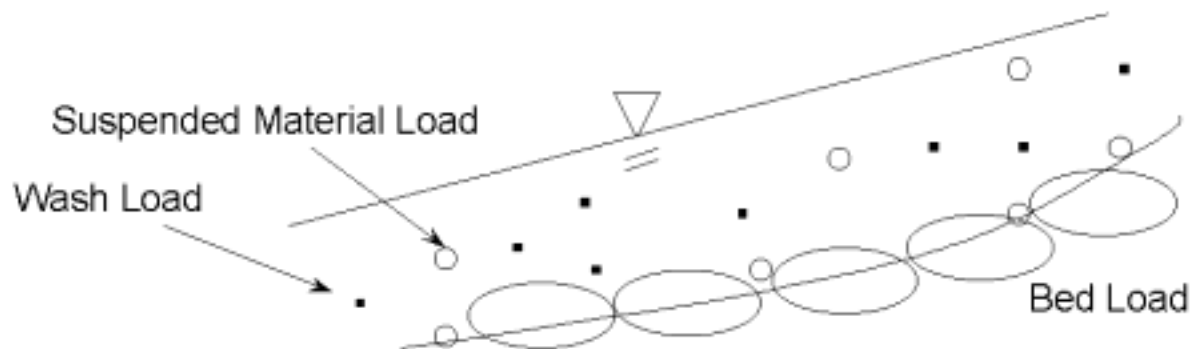


図 - 2 掃流砂及び浮遊砂の概念図

本報告では、suspended material load と wash load を併せたものを浮遊砂 (suspended sediment)として扱う。

(3) 浮遊砂濃度と流量間のヒステリシス

これまでの研究で、浮遊砂の発生源の違いは、河川の流量のピークと浮遊砂濃度のピークとの時間的なずれとなって表れることが判っている。流量のピークに対する浮遊砂濃度のピークの出現の仕方によって先行型、一致型(同時型)、遅れ型と呼ばれる¹⁾。

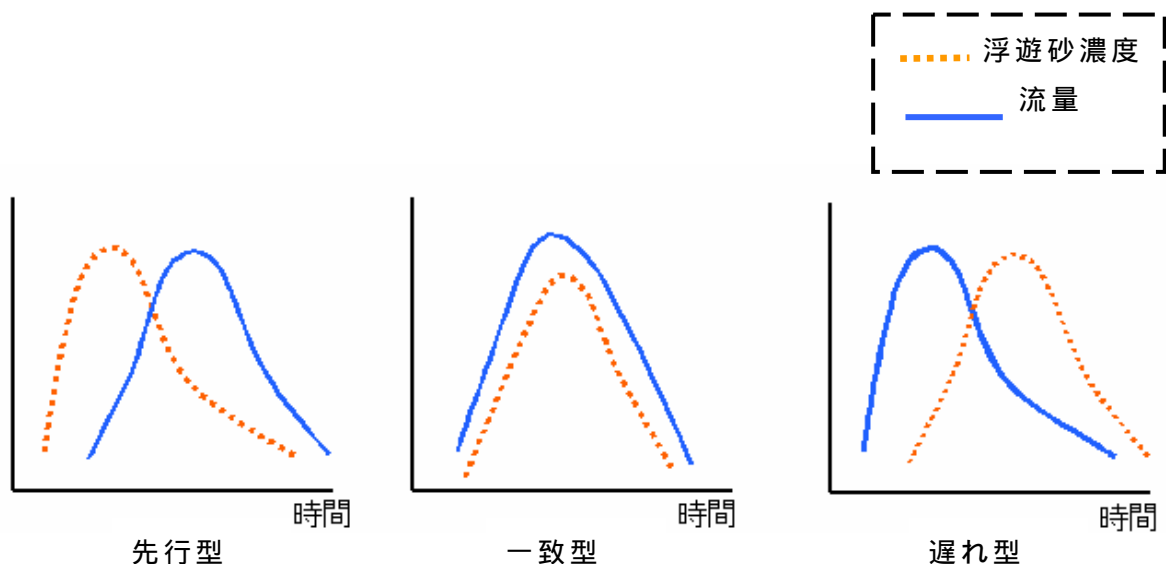


図 - 2 - 9 浮遊砂発生型の型

A：先行型

浮遊砂濃度のピークが流量のピークに30分から数時間先行する。原因として、河道内に堆積した浮遊砂が流量増加時に巻き上げられて先行的に流出するためと考えられる。平常時と降雨時の流量の差が大きい時にはピークのずれは大きくなる。これは、平常時に徐々に浮遊砂が河道に堆積し、これが降雨時に高い濃度で出水初期に流出するためである。逆に降雨が多く、頻繁に出水があると、河道内の浮遊砂の堆積が少なくなる。多くの河川では浮遊砂濃度のピークは先行型を示す。

B：一致型（同時型）

浮遊砂濃度のピークが流量のピークの±30分以内に出現する。山腹土壌中の微細粒物質が流域の全域から河川水中に洗い出されるときに見られる。断続的な降雨後に発生する二山形の場合、2回目の浮遊砂濃度のピークは、流量のピークとほぼ一致する。これは1回目の出水で河床に堆積していた浮遊砂が流出してしまい、2回目はより上流域からの土砂を発生源とするためである。

C：遅れ型

非常に高い浮遊砂濃度のピークが流量のピークの数時間後に出現する。また、先行型及び一致型は多くの河川で観測され、また両者が同一の河川で観測される例も多い。それに比べ、遅れ型の報告例は数が少ない。

(4) 調査地の概要

本調査は、神奈川県愛甲郡清川村煤ヶ谷・大洞沢流域で行った。図 - 1 に広域地図、図 - 2 に大洞沢地図を示す。

丹沢山地は伊豆半島の衝突による急激な褶曲を受けた褶曲山地であり、強い圧力による変成作用を受けた脆弱な地層が多く、崩壊が発生しやすい。地質は新第三紀層丹沢層群大山亜層群に属する。丹沢層群は比較的古い海成堆積層で、その見かけの厚さは10km に達する⁶⁾。

新第三紀層堆積岩は、礫・砂・シルトが酸化鉄又は石灰質で膠結され形成されている。これらの膠結剤は二酸化炭素と雨水の影響で風化・流亡しやすい。そのため、森林土壌の形成が不十分なところではこの風化は広範囲に及ぶ浅層崩壊を発生させる。また、新第三紀層の裸地は風化により表面浸食をも受けやすい。新第三紀層は地表面の浸透能が低いため、地表流の形成が大きく、浸食は表層部から次第に下層部に至る。このような地質特質から、地形が比較的急峻であり、複雑な深い谷を形成している⁷⁾。

大洞沢は、丹沢山地の東部、相模川水系中津川上流部に位置し、流域面積は48.3ha である。最下流部には大洞水量観測所が設置され、1981 年以來、神奈川県により降雨量と流量の観測が行われている。

土壌は、火山灰(関東ローム)の影響を強く受けており、粗孔隙の割合が比較的大きく、透水性は良好である。土壌型は殆どが BD で、一部に BE が見られる。土壌は全般的に構造発達が悪いが、樹木植被のある斜面の土壌は厚い。急傾斜地や尾根部分でも1m 以上の厚さを持ち、柔らかく透水性の良い土壌を形成する。

1997 年の調査では流域面積の約97% が森林で、林況は、スギ・ヒノキの人工林59.2%、その他針葉樹林0.8%、広葉樹林18.6%、針広混交林18.1%、その他3.2% である。その他には河川敷、崩壊地、歩道などが含まれる⁸⁾。

降水状況は、年平均降水量が2,600mm(積雪による欠損のため、冬季を除く)で、3,000mm を越える年もみられる。

表 - 1 に流域概況を示す。



図 - 1 調査地(広域)

表 - 1 流域概況

流域面積	$A = 0.483 \text{ km}^2$	流域内最高標高	$H_{\max} = 878 \text{ m}$
主流長	$L = 1.05 \text{ km}$	最低標高	$H_{\min} = 435 \text{ m}$
流域平均幅	$A / L = 0.46 \text{ km}$	標高差	$H = 443 \text{ m}$
流域周囲長	$M = 2.82 \text{ km}$	主流平均勾配	$H / L = 0.423$ ($\tan \theta = 0.423, \theta = 22.9^\circ$)
流域集中度	$K / M = 0.87$ (K : A と同面積の円の周囲長)		
形状比	$R / L = 0.75$ (R : A と同面積の円の直径)	本支流の総延長	4.80 km
谷密度	$9.8 (\text{km}^{-1})$	流域の平均傾斜	36.6° (等高線延長法) 36.1° (等高線面積法)

(神奈川県森林研究所研究部『大洞沢流域水文観測調査』より引用)

調査対象地の下流側をA地点、上流の右支川にB地点を設け、各々採水器を設置した。A地点を流域出口とする流域面積は 35.65ha、B地点を流域出口とする流域面積は 8.34ha である。また、2005 年 6 月 6 日より、採水器の設置場所を量水堰および下流の左支川 (C地点) に変更した。

なお、流域面積はデジタイザーで地形図から判断した。表 - 2 に流域形状を示す。

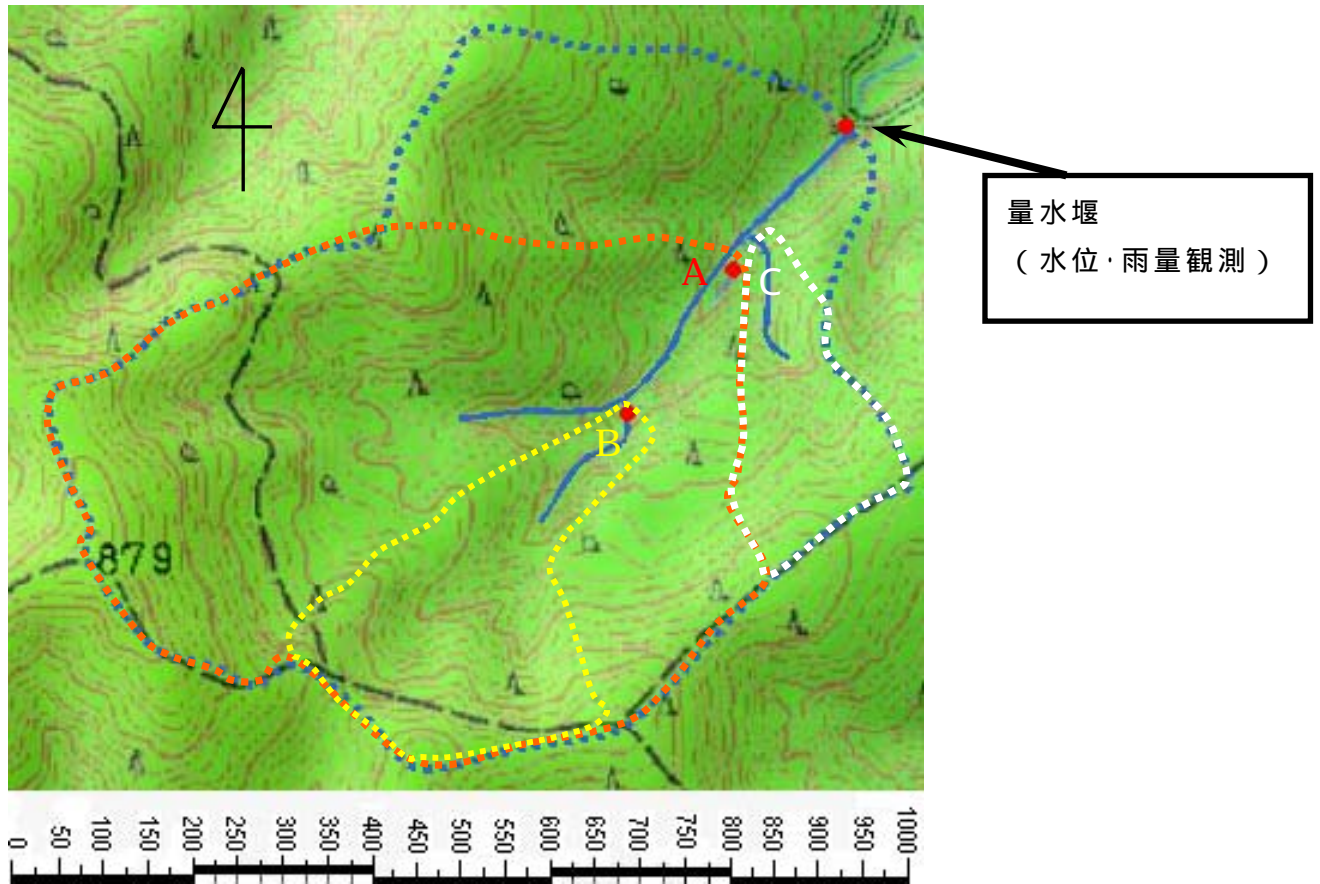


図 - 2 調査地 (拡大)

表 - 2 流域形状

	全体	流域 A (下流)	流域 B (上流)	流域 C (下流)
流域面積	$A = 0.483 \text{ km}^2$	$A_A = 0.356 \text{ km}^2$	$A_B = 0.083 \text{ km}^2$	$A_C = 0.048 \text{ km}^2$
流域内最高標高	$H_{\max} = 878 \text{ m}$	$H_{A\max} = 878 \text{ m}$	$H_{B\max} = 743 \text{ m}$	$H_{C\max} = 655 \text{ m}$
流域内最低標高	$H_{\min} = 435 \text{ m}$	$H_{A\min} = 468 \text{ m}$	$H_{B\min} = 515 \text{ m}$	$H_{C\min} = 470 \text{ m}$
標高差	$H = 443 \text{ m}$	$H_A = 410 \text{ m}$	$H_B = 228 \text{ m}$	$H_C = 185 \text{ m}$

2. 調査方法

(1) 雨量

流域最下流部の量水堰付近において、0.5mm用転倒マス式雨量計(池田計器製作所)を使用し、記録はデータロガーにより10分間隔で行った(図-1)。なお、量水堰浚渫作業に伴い、2004年7月5日10:20~7月9日9:50及び2004年11月8日10:20~11月18日9:50の期間、転倒マス式雨量計を一時撤去したため、その間のデータは欠損している。



図 - 1
転倒マス式雨量計

(2) 流量

流域最下流部において、量水堰による流量観測を行った(図-2, 3)。池田式水位計(池田計器製作所、紙送り速度12mm/hour)は、ペンレコーダーで水位変化をチャート紙に自記記録する。まずチャート紙上の数値を読み取り水位を算出した。次に堰の越流公式、実測値及び神奈川県森林研究所で作成した大洞沢での水位-流量換算式を用い流量を算出した。

刃型三角堰の理論式は次式で示される。

$$Q = \frac{8}{15} C \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} H^{2.5} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、Q:流量、H:水位、g:重力加速度、 θ :三角堰の開度、C:係数
この式にC=0.6、 $\theta=88^\circ$ を適用し、流量計算を行った。

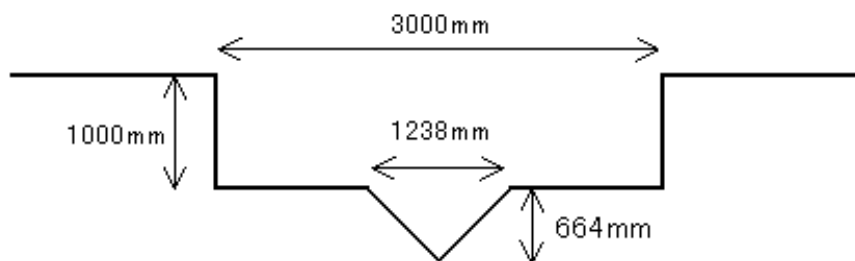


図 - 2 量水堰構造図



図 - 3
大洞沢量水堰

量水堰水位の算出方法は、自記水位計のチャート紙上に記録された点と、同時刻に測った実測水位を合わせ、時間と流量のズレを補正することで行う。水位は、実際の水位の昇降と連動したペンレコーダーがチャート紙上を動き、記録される。ペンがチャート紙の端まで来ると、反転して更に記録を続ける仕組みになっているが、機械の不調で反転が行われなかった箇所やインクの無い箇所があり、欠測が生じた。また、2005年4月から、圧力式水位計も併用している。

(3) 浮遊砂濃度

渓流水中の浮遊砂濃度の測定には、ISCO社の3700型ウォーターサンプラーに水位センサをつけた自動採水器を使用した(図 - 4)。採水器は2004年6月から設置した。

水位センサは平水時の水面付近に設置し、増水によりある値まで水位が上昇するとセンサが水を感じ、それをトリガーとして採水を始める。採水は30分間隔で12時間行われ、採水された試料は採水器に内蔵されたボトル(500ml×24本)に保存される。

採水器はA地点（下流）、B地点（上流）の2箇所に設置した。2005年6月からは採水器の場所を変更し、量水堰手前（A地点）および下流側右支川堰堤上（C地点）に設置した。採水は計5回行ったが、実際に分析可能な試料が取れたのは7/9(A)、7/26(A,C)、8/25(A,C)の3イベントで合計5データだった。

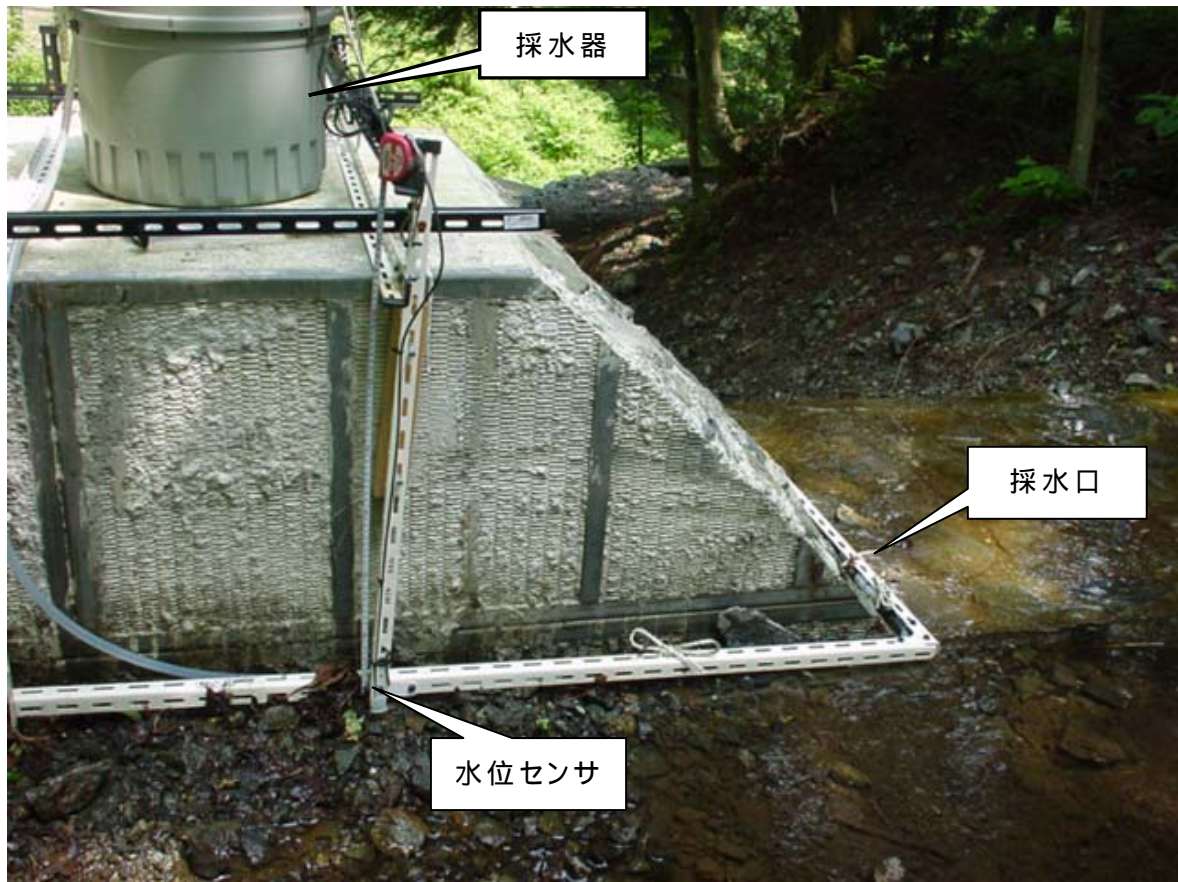


図 - 4 採水器（C地点、砂防堰堤上に設置）

< 浮遊砂濃度測定方法 >

試料水の浮遊土砂濃度を以下の方法で測定した。予め5B（0.19mmメッシュ）及びミリポア（0.45 μ mメッシュ）の2種類の濾紙を24時間、105 $^{\circ}$ Cで乾燥機で乾燥させた後、電子天秤で乾燥重量を量った。試料水を乾燥重量を量った5B濾紙に通し、更に乾燥重量を量ったミリポアを装着した吸引濾過器で濾過した（図 - 5）。濾過後、再度濾紙を105 $^{\circ}$ Cで24時間乾燥させ、電子天秤で秤量した。濾過前後の濾紙の乾燥重量の差を試料水量で除した値を浮遊土砂濃度（mg/l）とした。



図 - 5 吸引濾過器

(4) 濁度

採水器から得られる土砂データの隙間を補うため、濁度計を採水器の採水口近くに設置した。観測は量水堰で2005年8月23日～11月7日、C地点で2005年11月7日から現在まで行った。図 - 6 に濁度計の形状および河床への設置の様子を示す。

濁度計はオプテックス社製ワイパーつき濁度計 TC-100 を用い、データロガーは CR510 を使用した。

濁度計の出力から土砂濃度を算出するためには、出力値 - 土砂濃度のキャリブレーションを行う必要があるが、今回はキャリブレーションは行わず、土砂濃度のおおまかな変化を見るために使用した。



図 - 6 C地点における濁度計

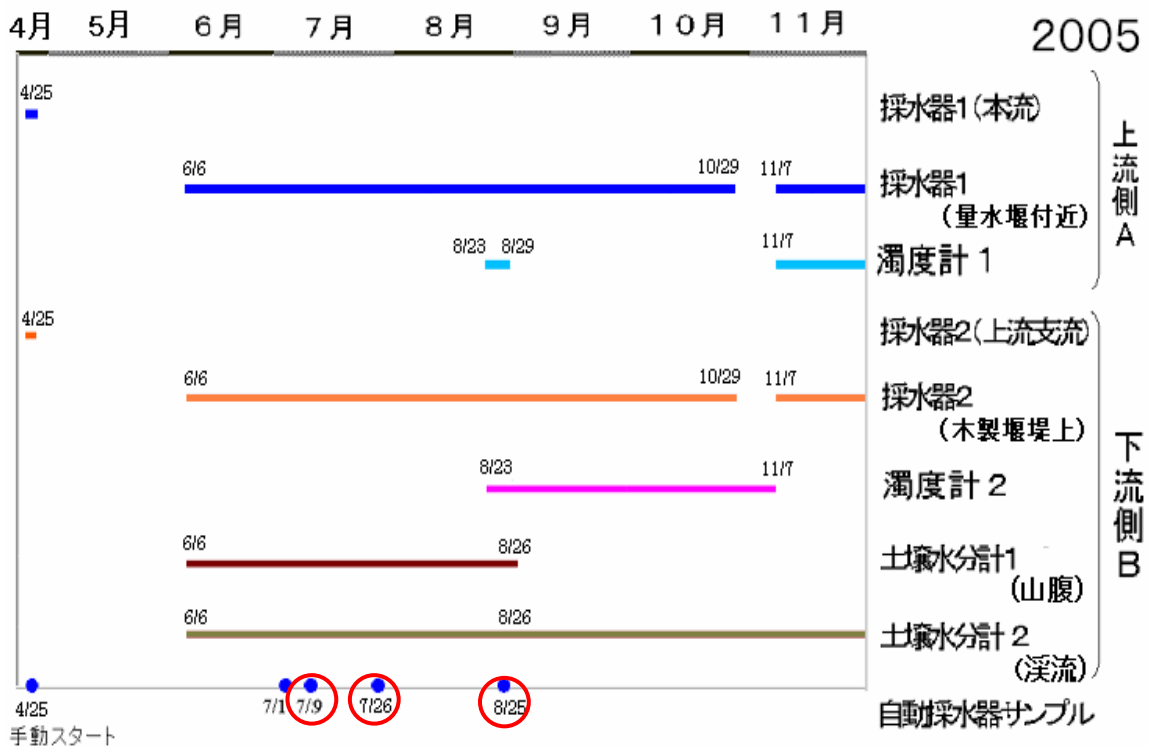
(5) 土壤水分計

B地点右岸斜面の溪流沿い及び山腹斜面に、土壤水分計（ECHOプローブ）を10cm、20cm、40cm、60cm、80cmの計5深度に各々設置した。記録はデータメーカー社のデータロガーにより10間隔で行った。なお溪流沿いに設置した土壤水分計は、8月26日の豪雨による表層崩壊により破壊された。



図 - 7
B地点斜面中腹における土壤水分計（設置直前）

計測器の稼動状況を時系列でまとめた図 - 8 を示す。



○ …… 浮遊砂データ取得 (7/9A、7/26 A・C、8/25 A・C)

図 - 8 計測器の稼動状況

3. 結果および考察

(1) 降雨と流量

図 - 1 - 1 に、2005 年 5 月 6 日から 2005 年 12 月 7 日までの日雨量を示す。なお、9 月 30 日～11 月 5 日のデータは欠損している。観測期間の 181 日で、総計 1756mm の雨量を計測した（欠損を含めない）。降雨が観測された 76 日中、日雨量が 60mm を越えた日は 5 日あり、その雨量合計は 900.5mm で、観測期間総降雨量の 51.3% を占める。日雨量が 300mm を越えた日も 2 度観測された。

表 - 1 には月別降水量、最大日雨量、最大 10 分間雨量を示す。

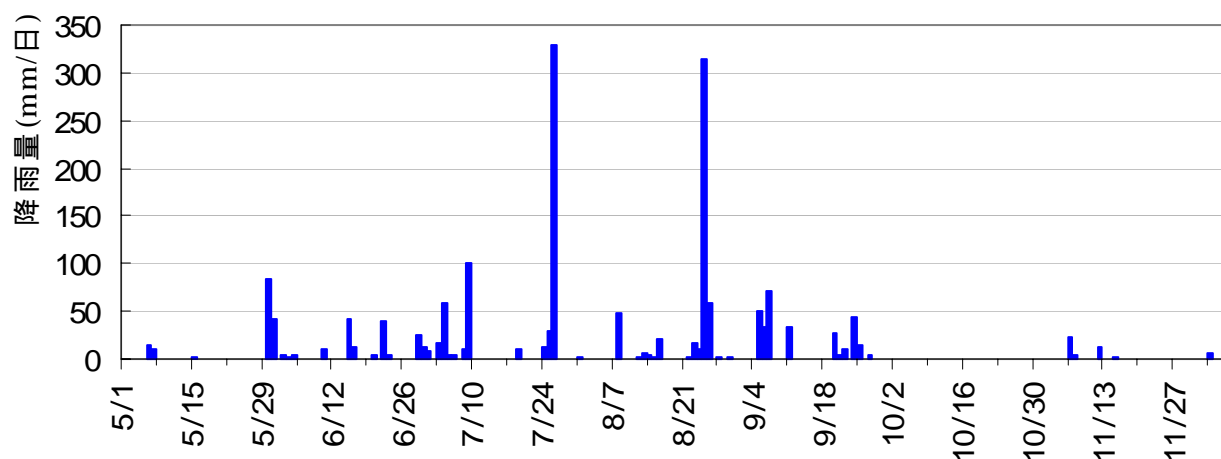


図 - 1 - 1 日雨量 (2005 年 5 月 6 日 ~ 2005 年 12 月 7 日)

表 - 1 月別雨量及びピーク雨量

	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月*
総雨量 (mm)	欠損	158	166	594	495	296	欠損	40.5	6.5
最大日雨量 (mm)		84.5 (5/30)	41.5 (6/15)	328.5 (7/26)	315.0 (8/25)	71.5 (9/7)		22.5 (11/6)	6.0 (12/4)
最大 10 分間 雨量 (mm)		2.0 (5/30, 31)	2.5 (6/4, 2, 29)	8.0 (7/26)	10.5 (8/8, 2, 5)	10.0 (9/20)		2.0 (11/6)	0.5 (12/4)

(*12 月 7 日までのデータを用いた)

(2) 降雨と浮遊砂濃度

次に、降雨と浮遊砂濃度のグラフを示す(図 - 2 - 1 ~ 2)。浮遊砂濃度のピークは降雨のピークに対し、同時もしくはやや遅れて出現する。また、降雨量の増減に対応して増減する傾向を示した。

5 B 濾紙に残った浮遊砂(粒径 0.19mm 以上)とミリポアに残った浮遊砂(粒径 190 μ m ~ 0.45 μ m)を別々に測定したグラフと雨量グラフを併せて示した(図 - 2 - 3 ~ 4)。5 B の濾紙のメッシュは通過するがミリポアのメッシュは通らない、極めて小さな粒径の浮遊砂の流出は、降雨パターンとより相関の高い動きを示した。粒径の小さな浮遊砂のほうが、降雨の変化により敏感に対応することから、この浮遊砂は降雨すなわち雨滴が堆積土砂や河岸、溪流の斜面を浸食し、流入したと推測した。なお、図では便宜的に 5 B 濾紙に残った浮遊砂濃度を「5 B」、ミリポアに残った浮遊砂濃度を「ミリポア」と表示した。

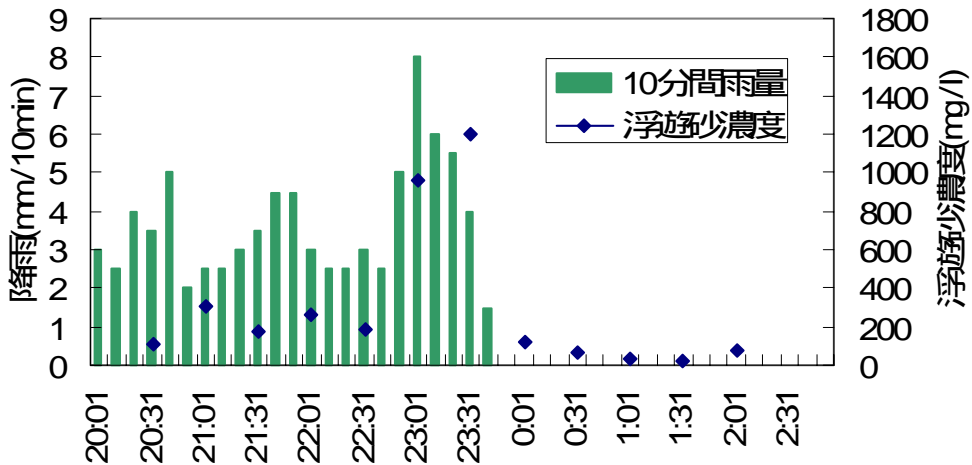


図 - 2 - 1 2005年7月9日 量水堰付近 降雨・浮遊砂濃度

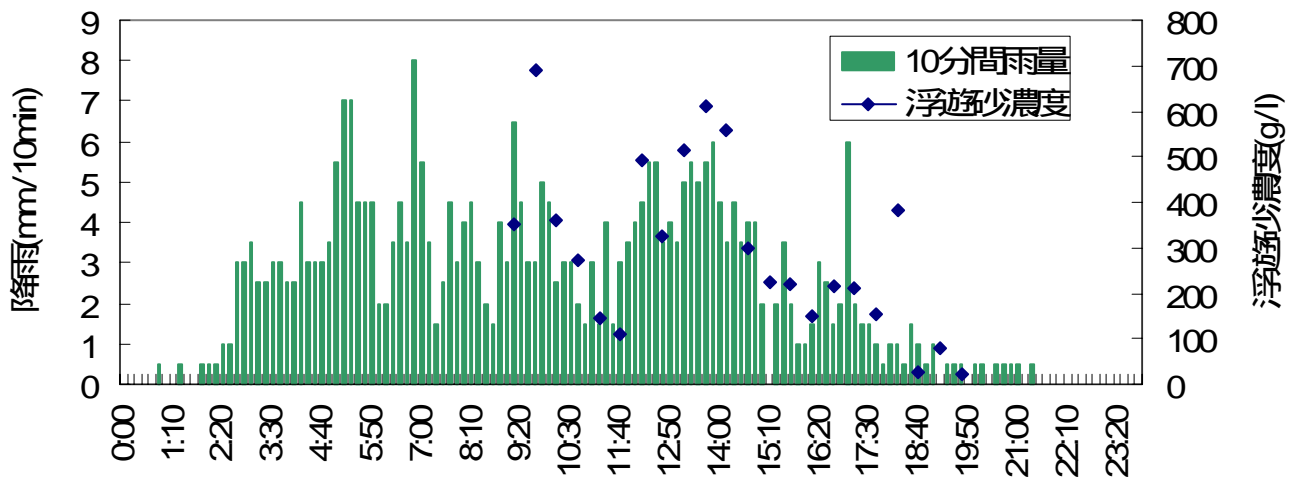


図 - 2 - 2 2005年7月26日 C地点 降雨・浮遊砂濃度

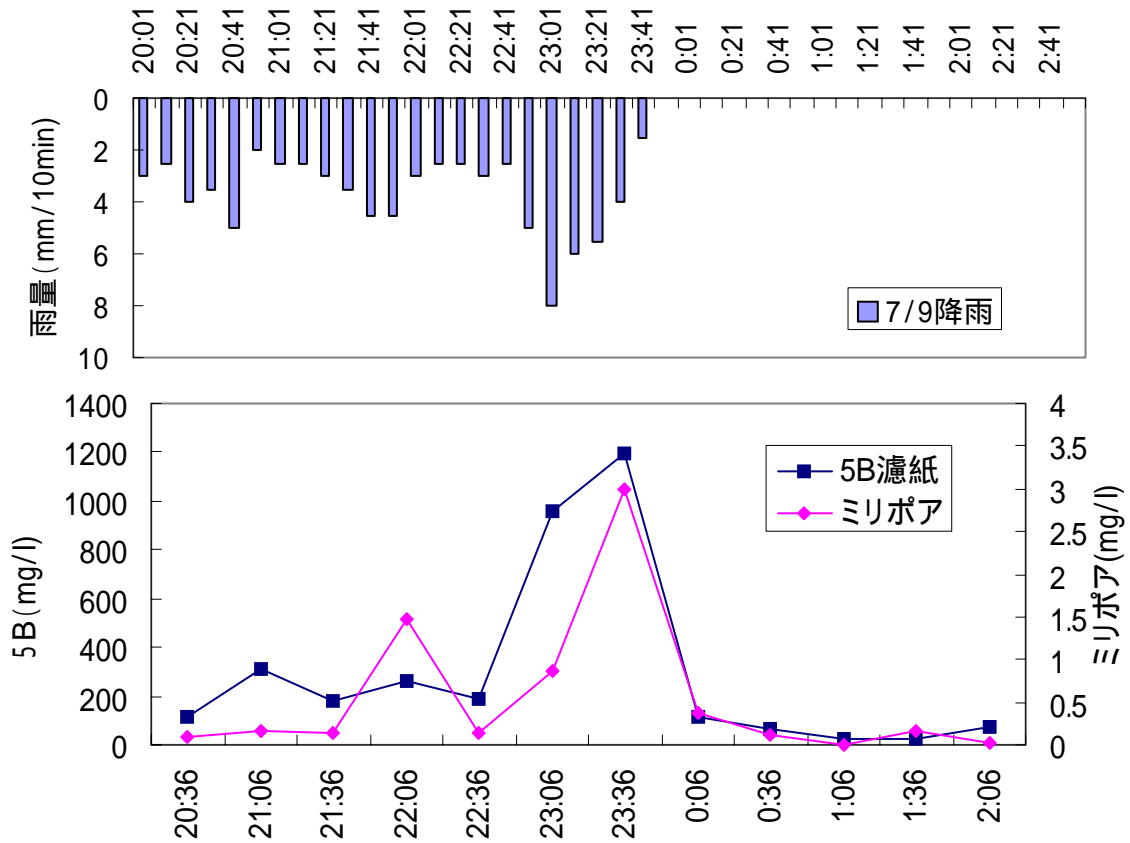


図 - 2 - 3 7月9日量水堰 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度

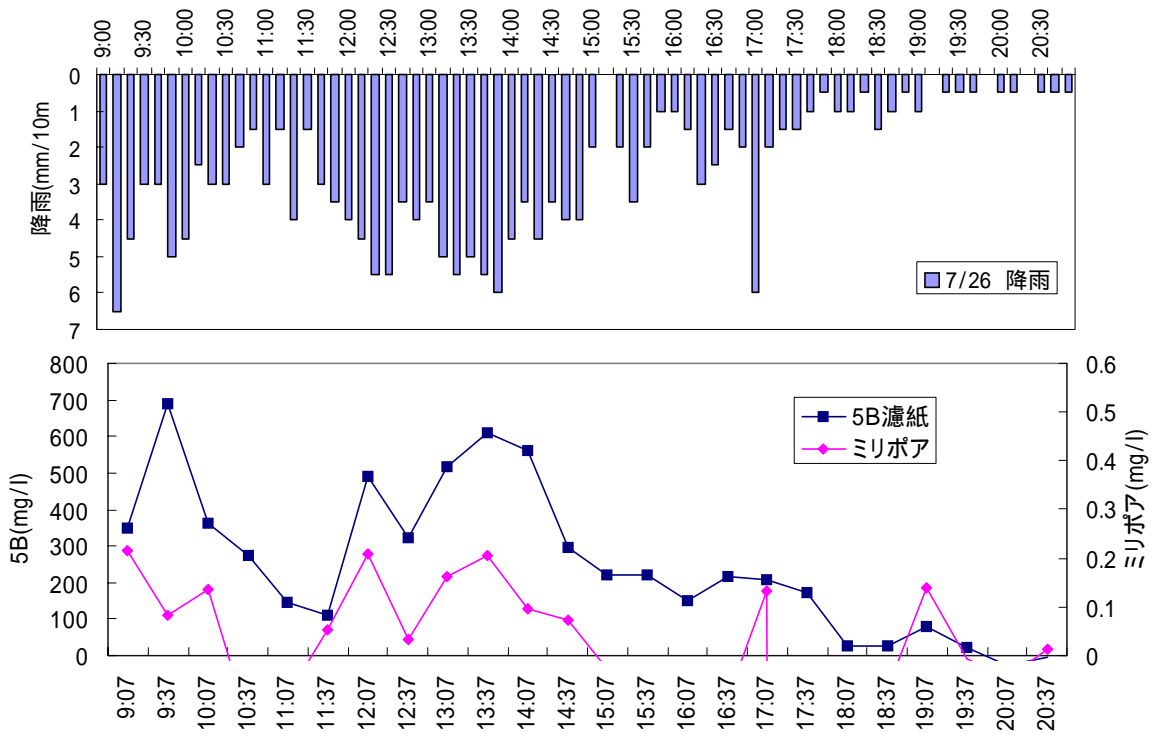


図 - 2 - 4 7月26日C地点 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度

(3) 降雨、流量および浮遊砂濃度

図 - 3 - 1 ~ 2 に、降雨・流量・浮遊砂濃度を同時に示した。流量は量水堰で観測された圧力式水位計出力値(V)を用い、おおまかな増減を示した(出力値が大きいほど高い水位となる)。浮遊砂濃度(mg/l)は各地点での観測値を用いた。

また、今回観測された浮遊砂濃度のピークと流量のピークの関係は、浮遊砂濃度ピークが流量のピークの±30分以内に出現したことから、全て浮遊砂発生タイプ中の「一致型」を示した。

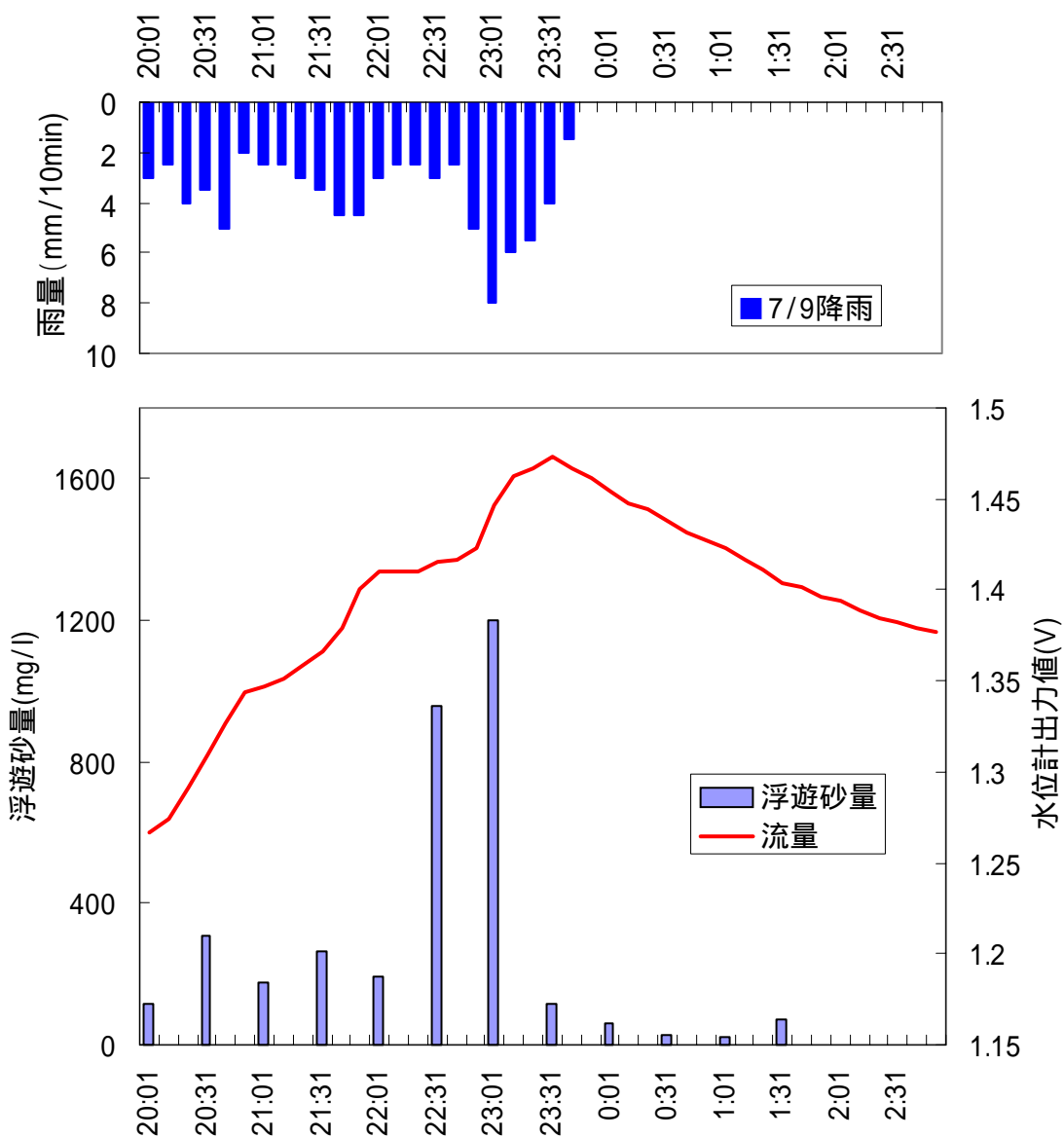


図 - 3 - 1 量水堰
2005年7月9日 降雨・流量・浮遊砂濃度

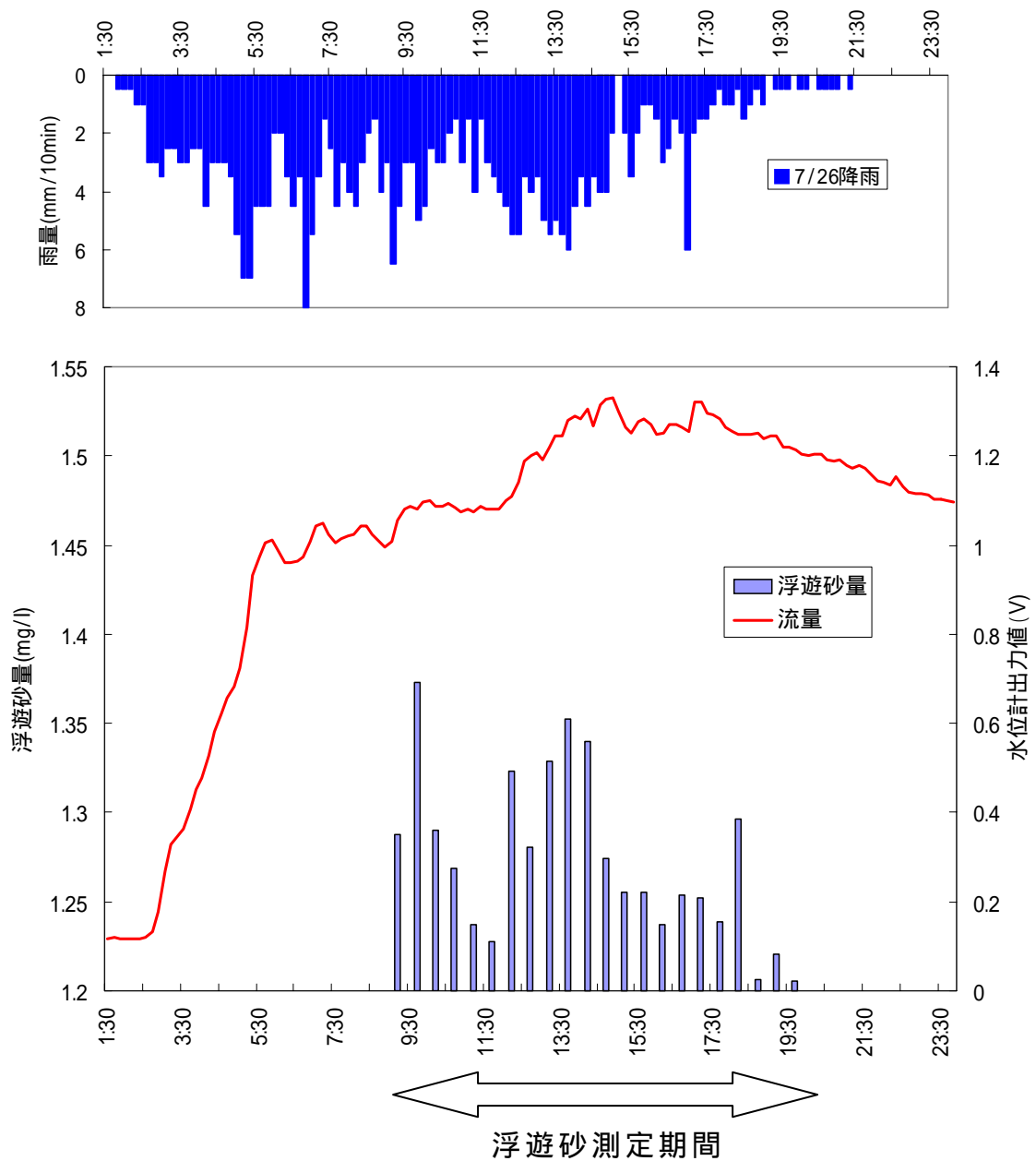


圖 - 3 - 2 C地点(上流)
 2005年7月26日 降雨·流量·浮遊砂濃度

(4) 濁度計による浮遊砂濃度の補完

例として2005年8月25日-26日の降雨における濁度を図-4で示した。右側y軸は、値が大きい程浮遊砂濃度が濃いことを表す。浮遊砂濃度グラフでは降雨ピークに対応した浮遊砂濃度ピークが現れた。なお、量水堰に設置した濁度計は、豪雨に伴う土砂流出により破損したため、途中でデータが途切れている。

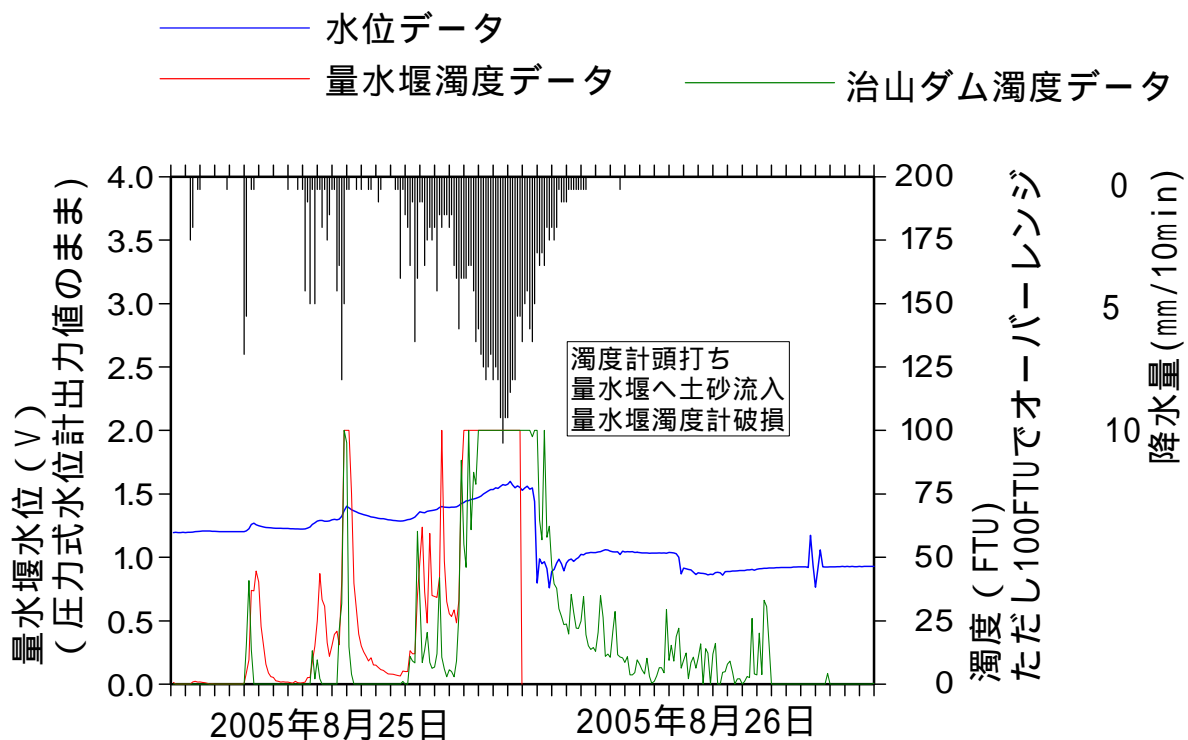


図 - 4 2005年8月25日, 26日 濁度計出力例

(5) 流量と浮遊砂濃度

初めに各降雨イベントごとに観測された流量と浮遊砂濃度の関係を示す。流量は量水堰で観測された圧力式水位計出力地(V)を用いた。浮遊砂濃度(mg/l)は各地点での観測値を用いた。

また、表 - 5 - 1 に期間降雨データを示した。

図 - 5 - 1 ~ 2 に示す浮遊砂 - 流量ダイアグラムに見られるヒステリシス形状は、大きく円を描くもの、ほぼ直線を示すものなど様々なパターンを示す。このように様々な浮遊砂 - 流量ヒステリシスの出現原因について、大流域では洪水波の伝搬や流域内の降水の分布、あるいは流域内に分布する堆積物の受食性の違いなどが挙げられる。

しかし、流域面積が 1 km² 程度、あるいはそれ以下の小流域でも様々なヒステリシスが出現することが知られている。小流域では浮遊土砂供給メカニズムそれ自体がヒステリシスを引き起こす役割を持っていることが示唆されている¹⁾。大洞沢流域は源頭部に近く、また脆弱な地層が多いため崩壊が発生しやすい。その地形的な不安定さが様々なヒステリシスを描く原因だと推測される。

図 - 5 - 1

7/9(量水堰)は、降雨・流量ピーク時に遅れて浮遊砂濃度のピークが現れた。そのため、ヒステリシスは時計回りの円形となった。

図 - 5 - 2

7/26(C地点)では、連続した降雨中に何度かピーク雨量が見られた。浮遊砂濃度も、雨量の増減に対応し3つのピークを持つ。動きが見やすいように、前半12点(C1-12)を青い点、後半12点(C13-24)をピンクの点で示した。全体的には不規則な時計回りを示すが、降雨ピークに伴った浮遊砂濃度の増加が見られた。

表 - 5 - 1 期間降雨データ

		降雨期		期間雨量(mm) 時間(hour)	
7月9日	7/9	16:29	~ 7/9 23:39	100.0	7.3
7月26日	7/26	1:50	~ 7/26 21:20	328.5	19.5

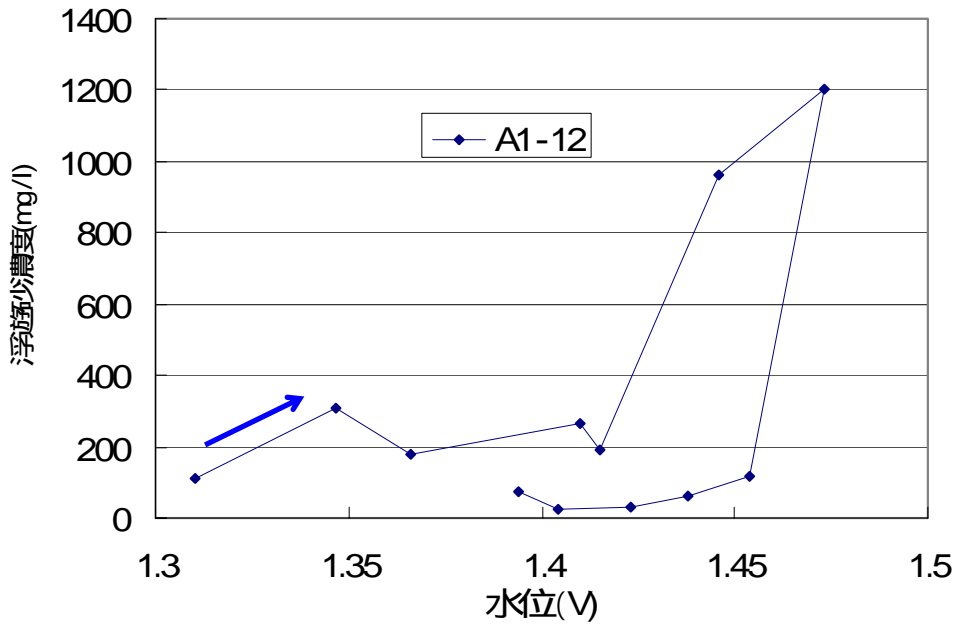


圖 - 5 - 1 水位 浮遊砂濃度 (7/9 ' 05 量水堰)

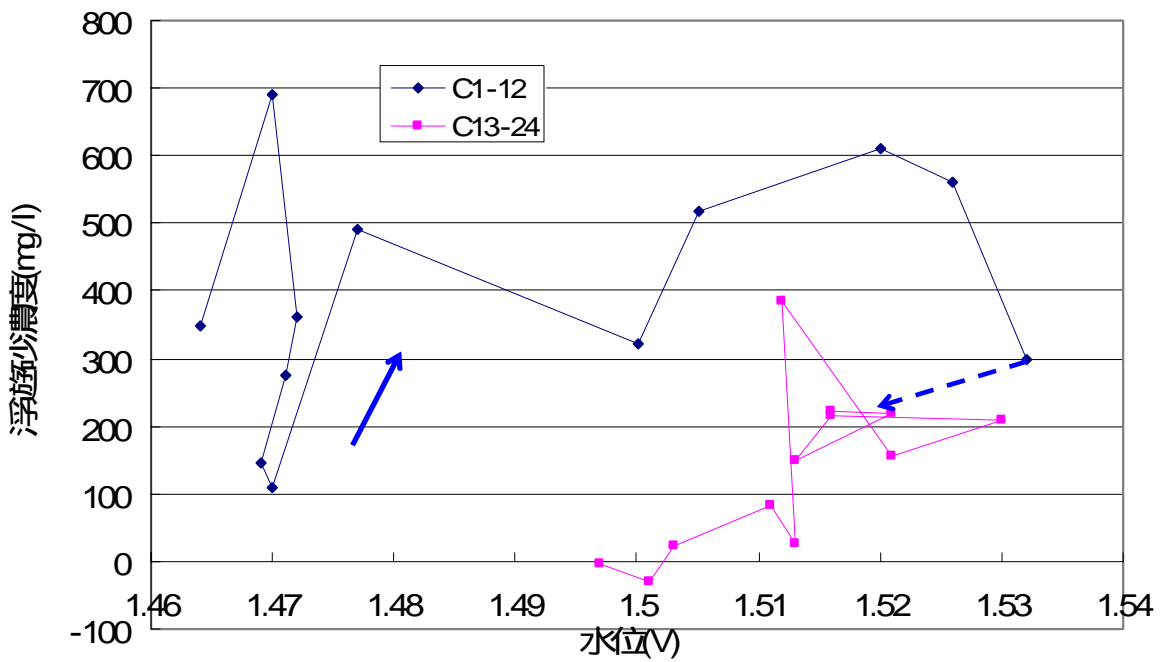


圖 - 5 - 2 水位 浮遊砂濃度 (7/26 ' 05 C 地点)

次に、観測された流量と浮遊砂濃度を一つにまとめた図(図 - 5 - 3)を示す。

図中の点はそれぞれC地点で観測されたもの(青)、量水堰で観測されたもの(ピンク)を示す。なお、水位は量水堰での観測値を用いた。

今回の計測では、C地点での浮遊砂は流域出口である量水堰で計測された浮遊砂と比較して、低い値を示した

C地点での浮遊砂濃度は、0から700mg/lを示し、流域出口での水位との関連は少なかった。また量水堰では低水位では浮遊砂濃度は低かったが、高い水位では浮遊砂濃度のばらつきがみられた。

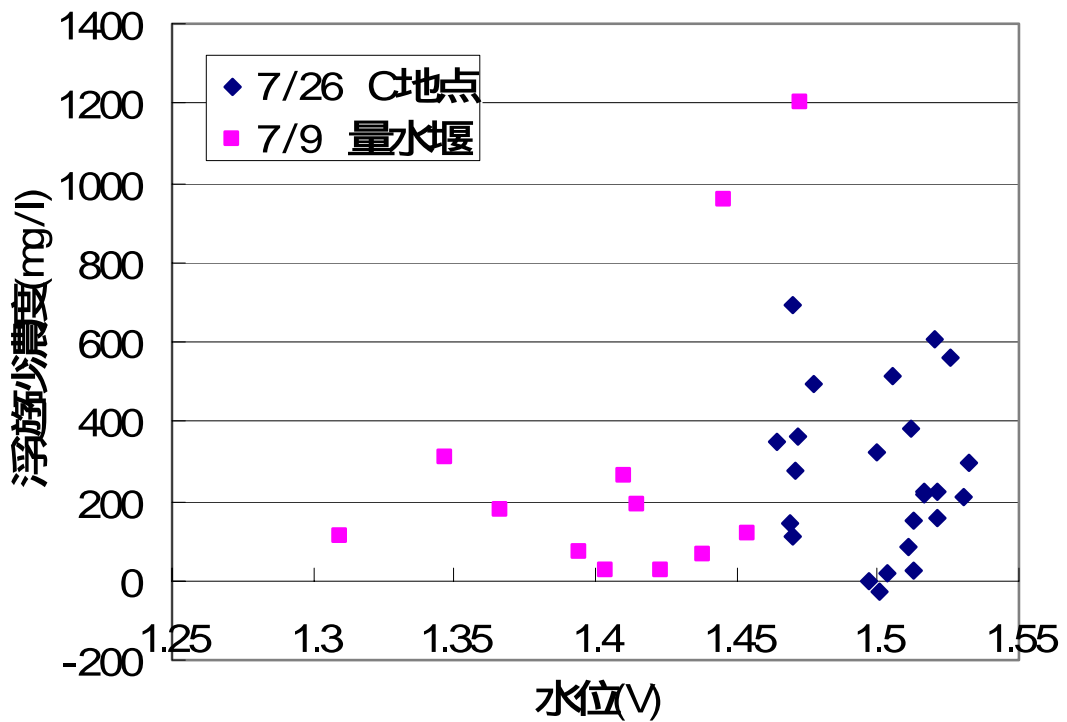


図 - 5 - 3 流量と浮遊砂濃度

(6) 土壤水分変化

図 - 6 に、2005年6月6日から8月23日までの土壤水分変化を示す。山腹斜面に比較して溪流沿いは全体的に土壤水分が多い。また、山腹斜面では降雨に対し比較的すみやかに水分の上昇が見られる。

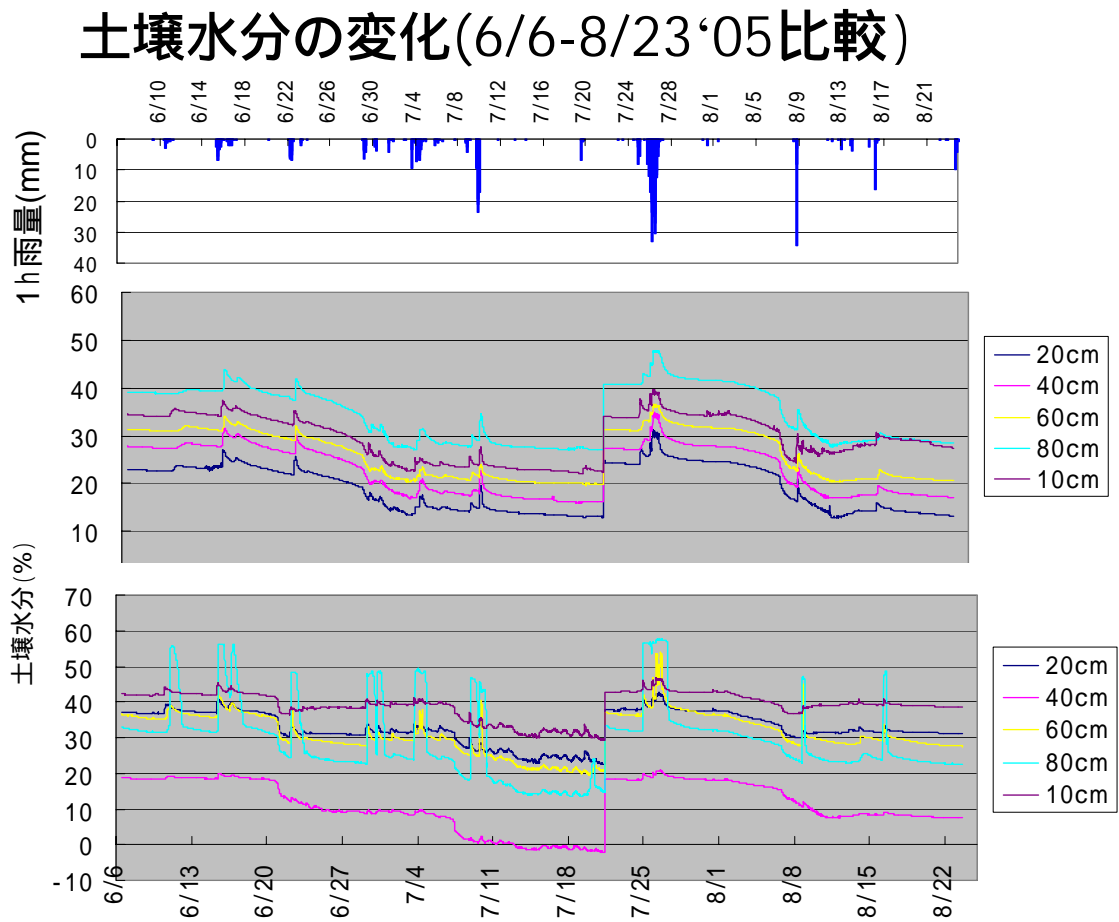


図 - 6 土壤水分変化例

4 . 結論

降雨、流量及び浮遊砂濃度の計測から、大洞沢流域における浮遊砂の流出量を推定し、また流量と浮遊砂の関係を求めることを目的とした調査を行った。以下、その結論を述べる。

大洞沢での浮遊砂の流出は降雨時に多く発生し、降雨による流量の増加と正の相関を持つ。浮遊砂濃度ピークは流量ピークの±30分以内に出現し、発生型は一致型を示した。

流量増加初期(低流量)では、より源頭部に近いB地点での浮遊砂濃度が高まるが、流量の増加に従いその差は小さくなる傾向が見られた。また、同じ観測点でも様々な浮遊砂濃度ヒステリシスが表れたことから、降雨ごとに浮遊砂の供給場所やタイミングが異なると思われる。

2004年の調査より、一降雨で流出する浮遊砂量はヘクタール当たり1.50kgから7.90kgと、大きな幅を示すという結果が得られている。その際、B地点での浮遊砂量が大きかったことから、土砂供給源はB地点の更に上流と考えられる。C地点では比較的流出浮遊砂が少なかったことから、流域上部の地形・地質も併せて調査する必要がある。また、積算浮遊砂量は積算雨量との正の相関が強く表れた。

5 . 引用文献

- 1) 恩田裕一ほか、水文地形学 古今書院(1996)
- 2) 矢部和弘ほか、東丹沢大洞沢における流出土砂量推算式の検討．東農大農学集報 45 (3) (2000)
- 3) 砂防学会(監修):砂防学講座第4巻・溪流の土砂移動現象 山海堂(1991)
- 4) 寺嶋智巳:水の濁りをはかる 森林科学 34号(2002)
- 5) 小橋澄治編:山地保全学 文永堂出版(1993)
- 6) 神奈川県立博物館編:南の海からきた丹沢 有隣堂(1991)
- 7) 神奈川県 丹沢大山自然環境総合調査報告書(1997)
- 8) 神奈川県森林研究所研究部:平成9年度研究人材活性化対策事業研究推進支援研修 大洞沢流域水文観測調査(1997)

溪流水質調查

1. 調査の目的

森林はそれが創る土壌を通して、土壌から渓流にかけての水の流れと質に影響し、その結果として渓流水の形成に大きく関与している。逆に、森林生態系外への物質の流出状態は渓流水質が反映しており、渓流水の特性を明らかにすることは、森林における物質循環や地力維持を考える上で重要である。森林流域の渓流水質に関する研究は、古くは Likens ら (1970) によって、皆伐および除草剤施用による植生の除去が、とくに NO_3^- 濃度の顕著な上昇を引き起こし、水質への著しい影響を与えたことが報告されている。その後、渓流水の NO_3^- 濃度に及ぼす森林伐採の影響について多くの研究がなされており (例えば、Vitousek and Melillo, 1979)、植生や林齢の影響なども調べられている (例えば、Vitousek, 1977)。

しかし、森林流域のもつ固有の要因、すなわち地形や土壌などの立地環境が、人為的インパクトと比較してどの程度の影響を渓流水質に及ぼしているかという検討は十分ではない。立地環境要因が、どのように渓流水質に影響を及ぼすか把握することは、森林流域の持つ水質浄化機能を評価し、将来的に人為的インパクトの影響の大きさを予測するための重要な情報となる。丹沢山地特有の森林流域へのインパクトとして、崩壊地、シカ圧による下層植生の消失、大都市圏からの大気汚染物質の長期に渡る流入などは、現在および将来に森林流域の水質浄化機能と渓流水質へ影響を及ぼすと考えられる。

例えば、工場排水や農地での施肥などによる河川の窒素汚染が、農作物(とくに水田)被害や湖沼の富栄養化をもたらしている。このような河川への排水は工業的な浄化だけでなく、山地から供給される清浄な渓流水によって希釈されている。我が国では窒素含有量の少ない、清浄な水が森林流域から当たり前のように供給され、過剰窒素による汚染の顕在化を防いできたといえる。しかし、巨大都市圏からの大気汚染物質 NO_x が森林流域にも影響を及ぼし、国内林業の不振による人工林の手入れ不足、長伐期化もあって、本来、森林生態系に取り込まれて循環利用される窒素が飽和し、渓流水へ流出している可能性が指摘されている (Aber et al., 1989; Ohri and Mitchell, 1997; Ohte et al., 2000; 戸田, 2002)。

丹沢山地の森林流域から供給される渓流水質の現状を把握し、水質を形成している影響要因を解析する。同時に流域の水量を推定し、供給可能な水の質と量を明らかにすることで、森林からの清冽な水供給機能を評価する。流域管理という観点から、将来的に水質を低下させる要因を、森林流域として普遍的なものと丹沢特有のものを抽出し、継続または定期的な調査・モニタリングが必要な項目を整理するとともに、水質低下を抑制する政策決定のための基礎的情報を提供する。

2. 調査方法

(1) 渓流水の採取

中津川上流域における渓流水質調査

中津川上流域（宮ヶ瀬ダム上流）の森林流域より，定期的（平水時に平均で月1回程度）に採水・分析する。予備調査を2004年6月～7月に実施し，採水場所37地点を選定した。採水地点の選定にあたっては，中津川上流域で植生，流域規模，地形等に著しい偏りがなく，かつ丹沢特有の問題も抽出できるように留意した（図1）。その後，2004年8月～2005年10月（厳冬期を除く）原則として月1回の間隔で採水し，分析に供した。なお，採水調査は東京農工大学農学部森林生態学研究室が実施した。



図1 中津川上流域の採水点

大洞沢における降雨および渓流水質調査

水量観測を行っている大洞沢では，渓流水と降雨（バルク）を採水・分析する（図2）。これは，流出水量調査と同時に行うことで，中津川上流域全体の水質・水量を解析する上での基本情報とするためである。調査地選定・機器設置を2004年6月17日に実施し，2004年6月17日より原則として1週間毎に採水し，分析に供した。なお，採水調査は神奈川県自然環境保全センターの協力によって実施した。

降雨の採取装置は，直径30cmのポリエチレン製の大型ロートにビニール・ホースをつなぎ，大型のポリ瓶に導いて集水した。ロートには2mmメッシュの金網を置き，落葉や虫など大きな雑物が試料へ混入しないようになっているが，ロートの表面に付着する乾性沈着物質は降水で洗われるため，本調査における降水とは，湿性沈着と乾性沈着の混

ざったバルク試料である。

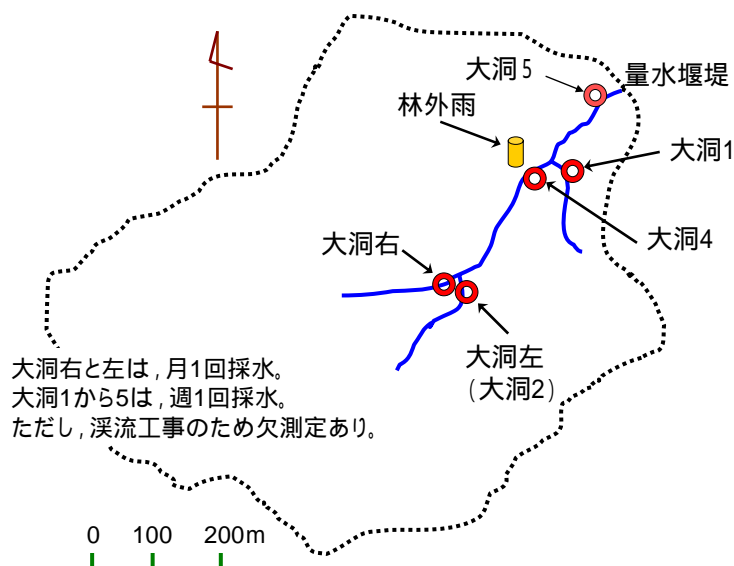


図2 大洞沢の採水点

西丹沢流域における渓流水質調査

丹沢山地のより広域的な渓流水質を明らかにするために、西丹沢流域の世附川、中川および玄倉川流域の計 63 地点において 2005 年 7 月 30 日と 11 月 26 日の 2 回、市民ボランティアによる採水を実施し、分析に供した（図 3）。なお、ボランティアによる採水調査の企画・実行は、神奈川県自然環境保全センターの協力によって実施した。

(2) 分析方法

中津川および 大洞沢の調査では、採水時に pH、EC（電気伝導度）および水温を携帯式の機器を用いて測定した。西丹沢については、採水後に実験室で pH と EC を測定した。採水方法は、洗浄した 250mL 容のポリ瓶に渓流水を、ポリ瓶内に気相が残らないよう口いっぱい採取した。なお、採水する前にポリ瓶を、採取する渓流水で少なくとも 3 回供洗した。採水した試料水は、冷蔵庫に保管し、以下の化学分析を行った。

渓流水における主要な溶存イオンとして、陰イオン 3 種類（ NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- ）と陽イオン 5 種類（ NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ）の測定を、イオンクロマト法によって行った。また、モリブデン比色法により SiO_2 濃度を測定した。渓流水の水質は、鉱物土壌層での滞留時間および深層への浸透の程度によって大きく影響される。母岩鉱物に含まれ主に風化によって流出する SiO_2 を測定することで、渓流水に至る地下水への浸透や母岩の風化に関する基礎情報を得ることができる。

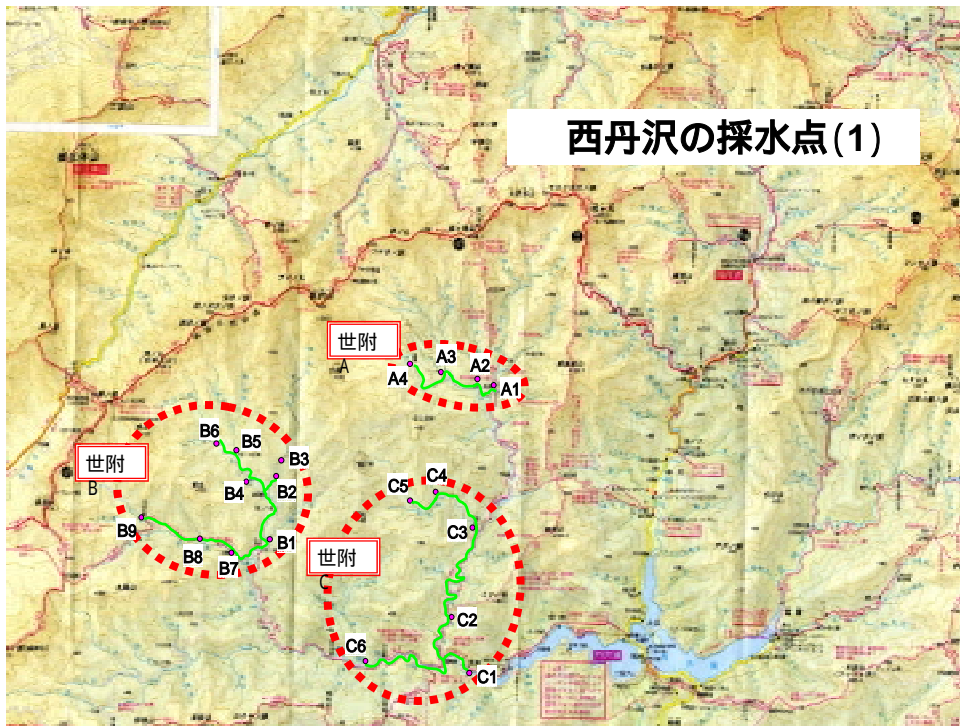


図3 西丹沢の採水点位置図

(3) 流域の地形と植生

中津川上流域の調査において、流域の地形と植生が渓流水質におよぼす影響を調べるため、GISを用いて情報収集を行った。地形情報として流域面積、流域の平均傾斜、主流長、採水点の標高の4項目を収集した。植生調査では、流域内の植生を針葉樹林と広

葉樹林に分類し、それぞれの流域に占める面積率を求めた。また、採水点付近の植生を目視で確認し、おおまかに針葉樹林、広葉樹林、針広混交林の3種に分類した。なお、GISデータの収集は、神奈川県自然環境保全センターの協力によって実施した。

3. 結果と考察

(1) 水質の季節変動

大洞沢では、降雨（バルク）と渓流水の週1回の間隔で採取し、分析に供している。降雨は採水ごとに変動するが、季節的に一定した傾向はみられず、渓流水に比べてpH、ECおよびイオン濃度ともに低かった（図4）。大洞沢の渓流水のpHは7~8の弱アルカリ性を示し、ECは100 μ S/cm前後で降雨に比べて変動がなく安定していた（図5）。変動の少なさは、イオン濃度全般にあてはまり、陽イオンでは、Ca、Mg、Na、NH₄-N、K、陰イオンでは、SO₄-S、NO₃-N、Clの順に濃度が高かった。また、SiO₂濃度も安定しており、水温の季節変動に影響を受けなかった。

大洞沢以外の流域は、月1回の採水であるが、同様に季節による水質の顕著な変動は認められなかった。したがって、渓流水質の調査では、平水時であれば季節変化を考慮する必要はないといえる。今後、大洞沢など水量観測を行っている流域で、出水時の濃度変化を調査していく必要がある。

(2) 採水点ごとの水質

中津川上流域における採水点ごとの水質を、年平均値として図6から図9に示す。図中の縦棒は、それぞれの標準偏差を示すが、pH、EC、SiO₂濃度（図6）、陽イオンのCa、Mg、Na濃度（図7）、陰イオンのSO₄-S、NO₃-N、Cl濃度（図8）は、標準偏差が小さく、採水点ごとの差異が年間の水質の変動を上回っていた。しかし、年間を通して低濃度であったNH₄-NおよびK濃度（図9）は、標準偏差が大きかった。

採水点ごとの差異は、pHと低濃度のNH₄-NおよびKを除いて著しく、特にCa、SO₄-S、NO₃-Nでは、濃度が著しく高い採水点が1つから数点みうけられた。Ca濃度が高い本谷8はSO₄-S濃度も高く、pHは安定していることから、SO₄-Sの流出による酸性化を塩基であるCaが中和していることがわかる。NO₃-N濃度の高い唐沢1と唐沢5は、CaだけでなくMgやNaといった塩基性イオンによって中和されている。中津川上流の森林流域は、降雨の弱酸性を十分に緩衝する能力があるといえる。図6から図9では、採水点付近の溪畔林で記号を分けて描いているが、上述の3点は広葉樹であった。同じ広葉樹の溪畔林をもつ採水点でSO₄-SやNO₃-Nの濃度が、必ずしも高くはなかった。また、後述するが、GIS情報による地形や植生の状況などからも、これらの採水点でなぜSO₄-SやNO₃-Nの濃度が常に高いのか原因は特定できなかった。このような特徴的な水質を示す採水点は、その流域を踏査するなど詳細な調査とモニタリングの継続が必要である。

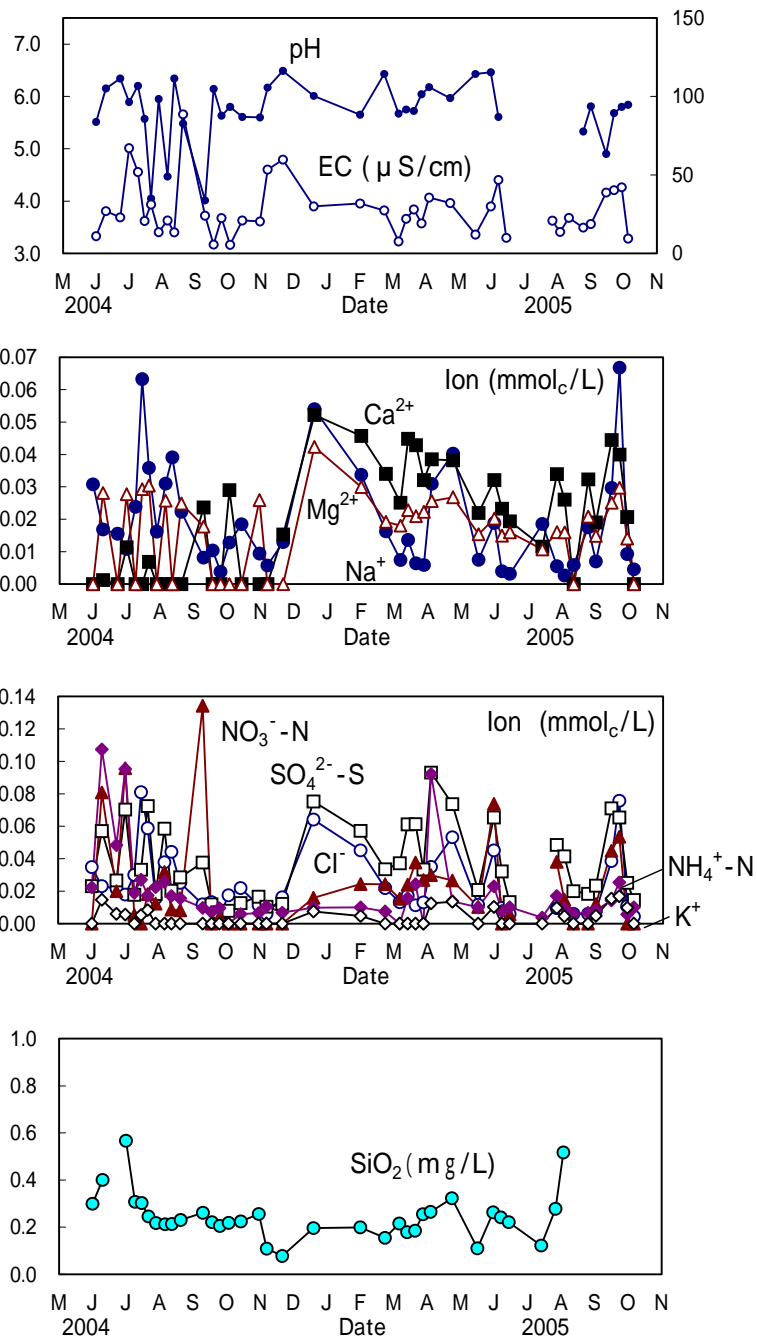


図4 降雨(大洞沢露場)の水質

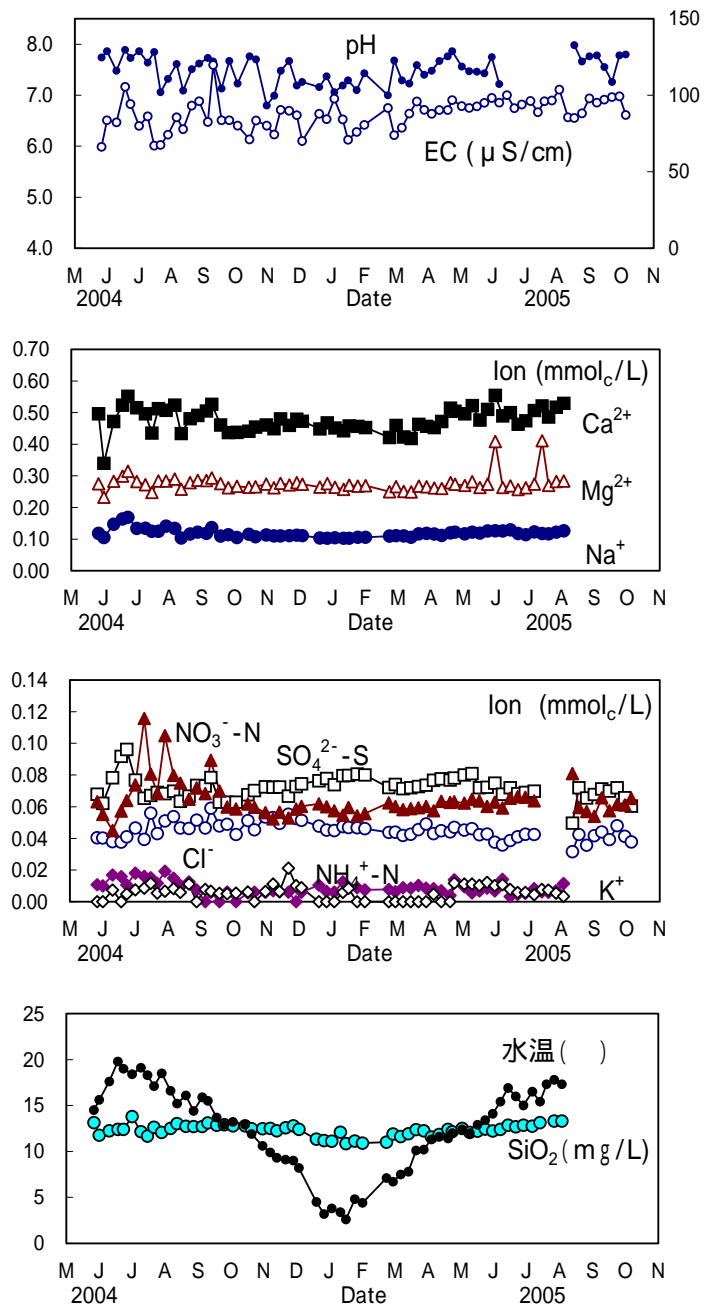


図5 大洞2の水質と水温

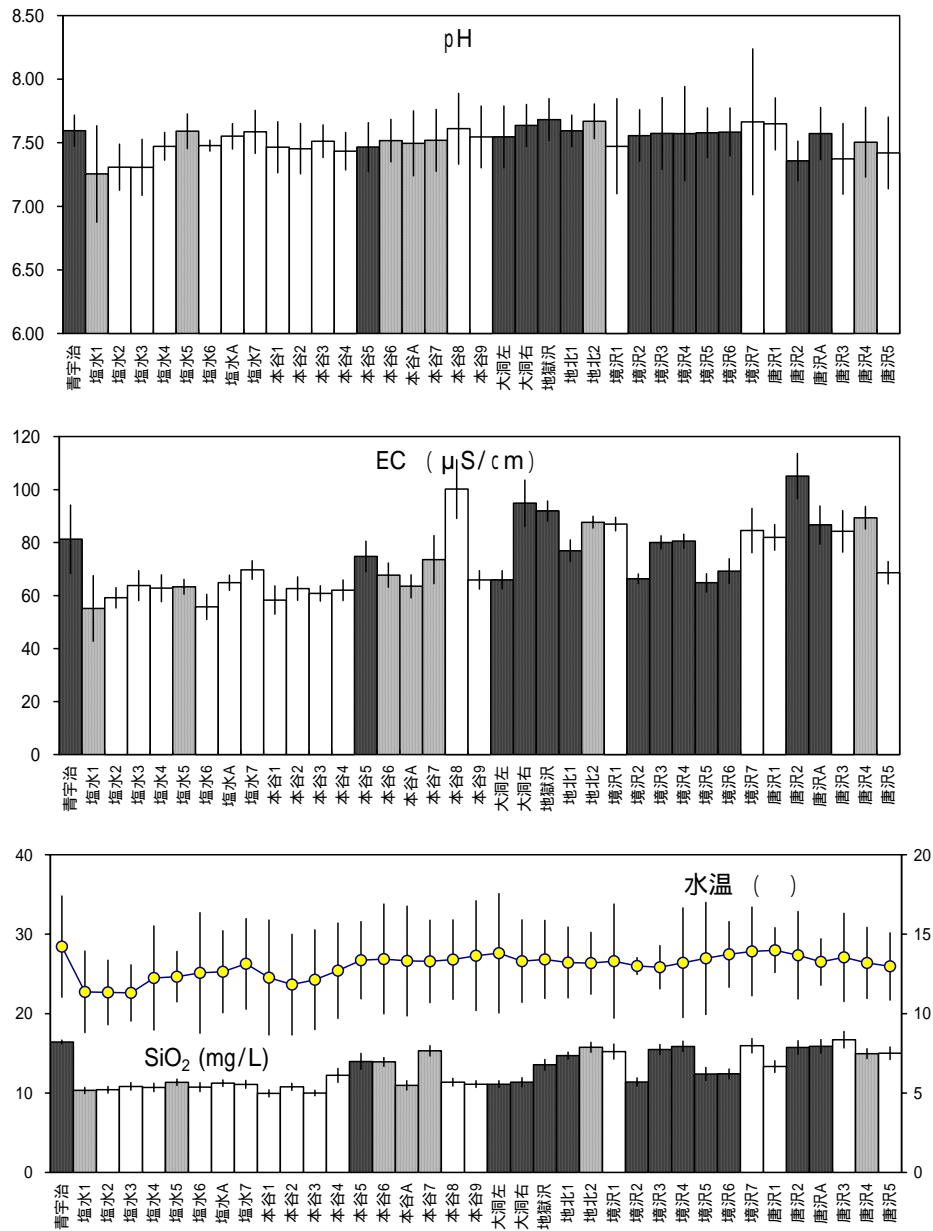


図6 中津川上流域の水質(pH, EC, SiO_2 濃度)と水温

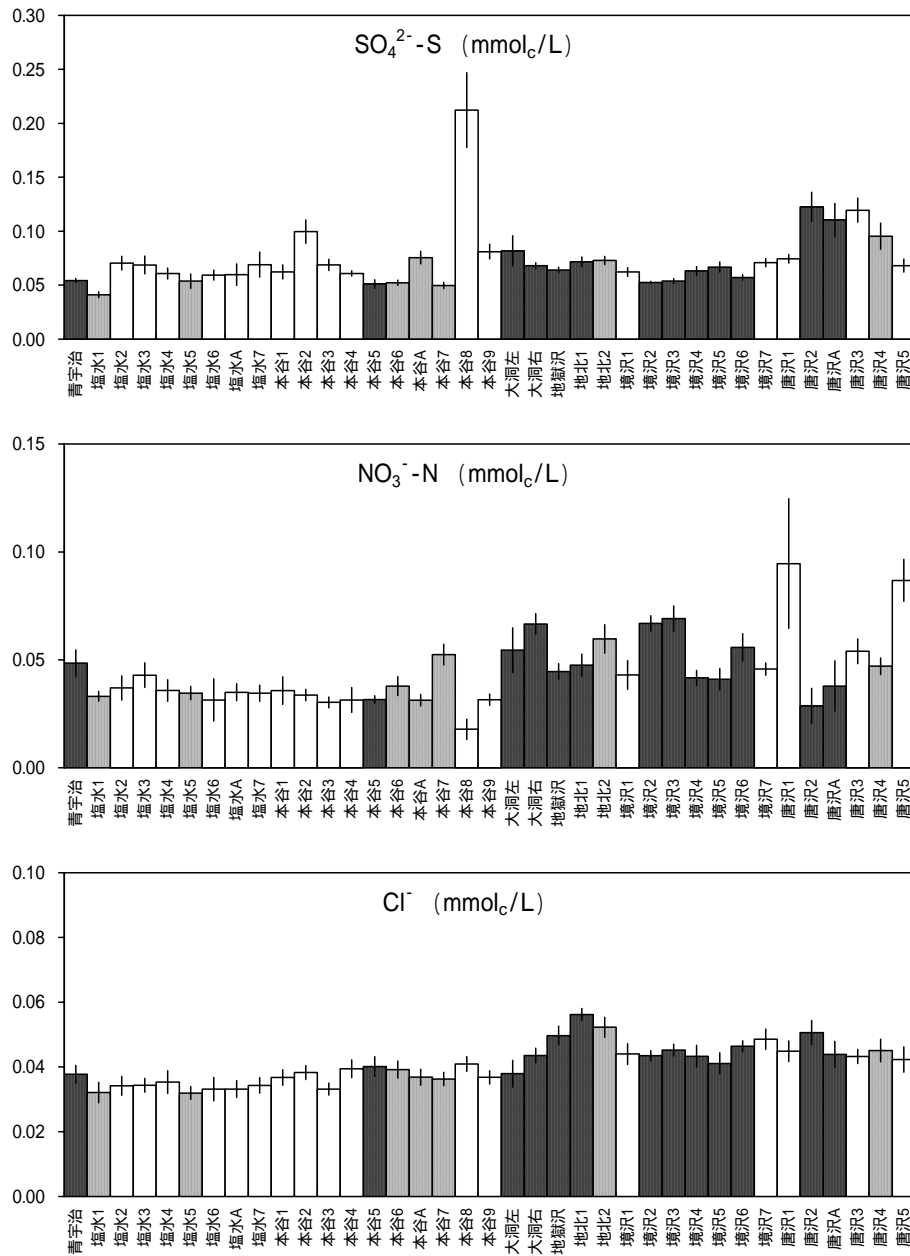


図7 中津川上流域の水質 (SO₄²⁻-S, NO₃⁻-N, Cl⁻濃度)

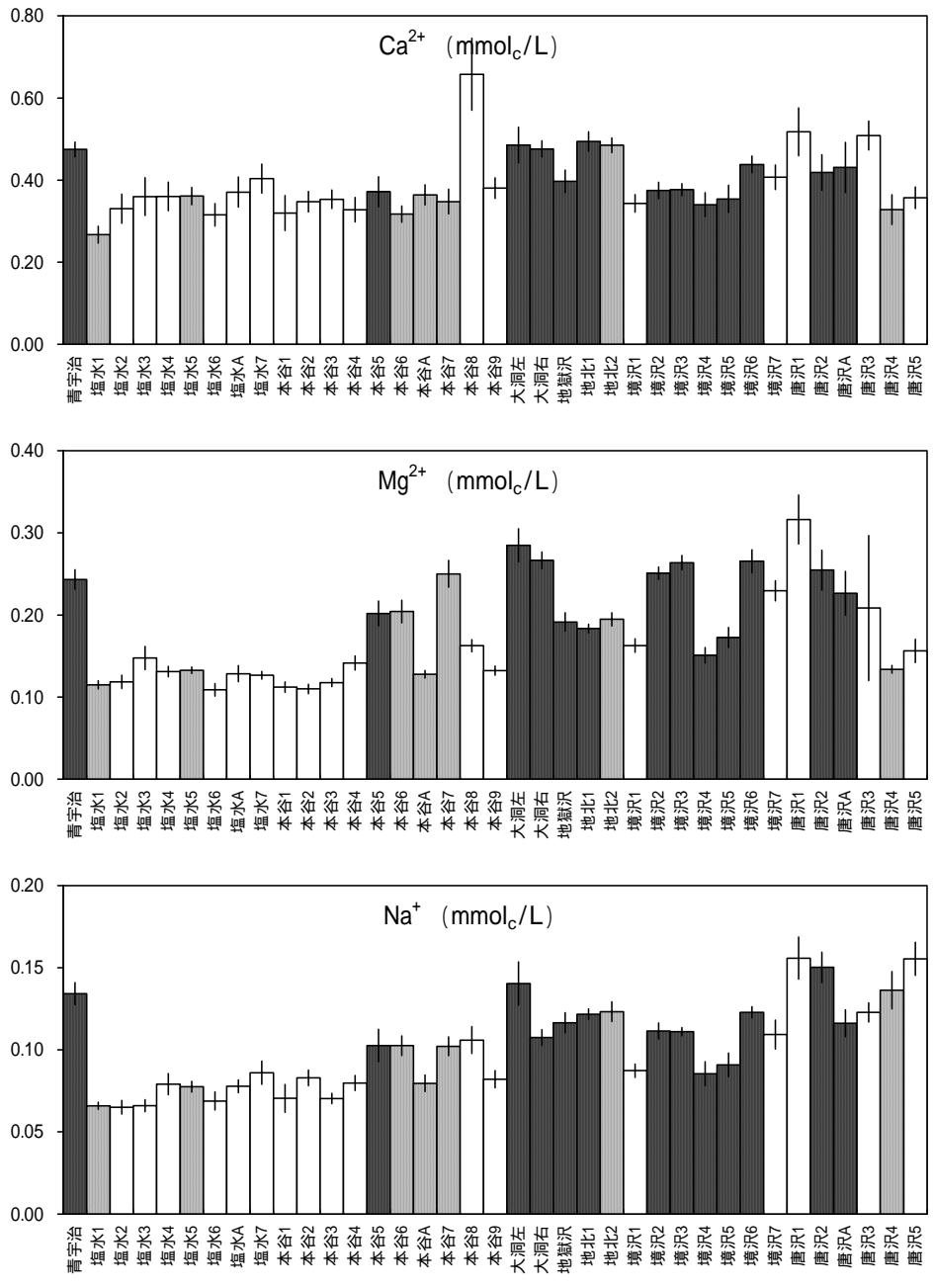


図8 中津川上流域の水質 (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺濃度)

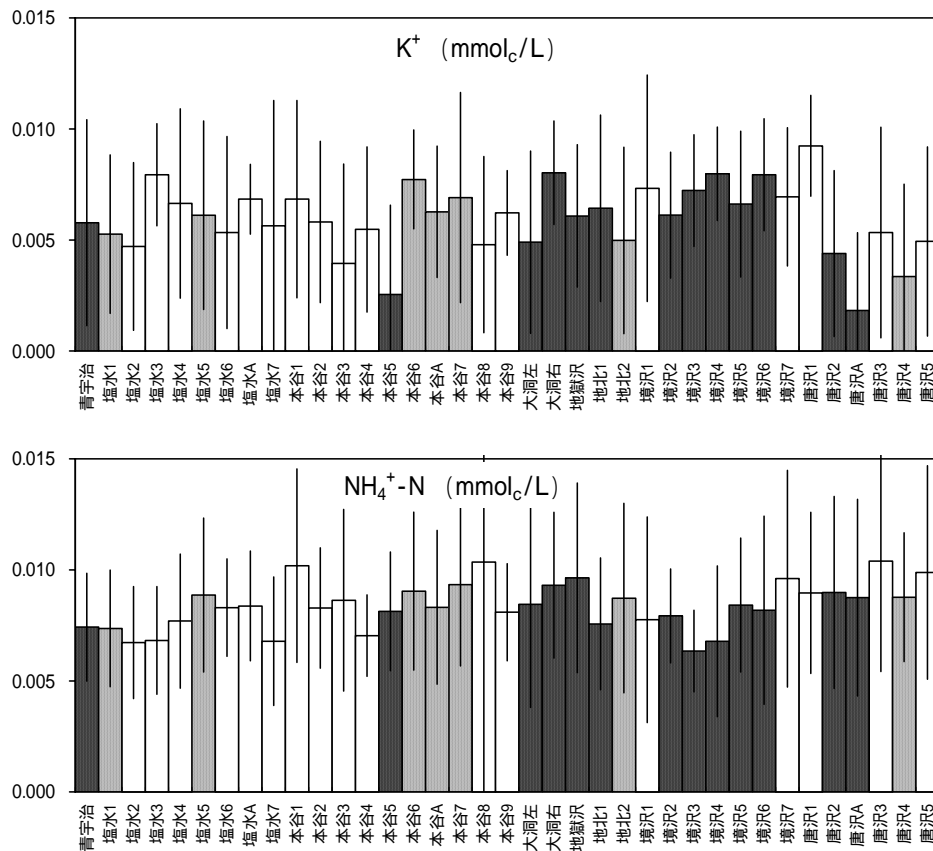


図9 中津川上流域の水質(K⁺, NH₄⁺-N濃度)

(3) 地形と水質

採水点から上流の集水域を対象として, GIS によって地形および植生状況を把握した(表1)。地形情報として, 流域面積, 流域内の傾斜(最大, 最小, 平均), 採水点の標高, 主流長を得た。これらの地形情報と年平均イオン濃度など水質との相関を求めたところ, 多くの水質と負の相関が認められた要因は, 採水点の標高であった(表2)。特に, EC や Na 濃度, SiO₂ 濃度との相関係数が高く(図10), 母岩の化学的風化の影響が示唆された。採水点の標高は水質とともに採水時の水温とも負の相関がみられ(表2, 図10), 水温の高低が母岩の化学的風化に影響を及ぼしていると推察された。しかし, 大洞沢の水温変化と各種イオン濃度の変化は連動していない(図5)ことから, 短期的な渓流水の水温が直接化学的風化を促しているわけではなく, 平均的に高い水温が土壌水や地下水のイオン濃度を高くさせていると考えられる。

表1 中津川上流域における調査流域の地形と植生

名称	流域面積 (km ²)	流域内の傾斜(°)				標高 (m)	主流長 (m)	方位	針葉樹割合 (%)	河畔林 の状況
		最大	最小	平均	SD					
青宇治	135.26	57	1	37.8	7.8	397	2336	E	20.4	針葉樹
塩水1	84.65	53	1	26.9	9.5	872	1409	E	6.1	混交林
塩水2	13.59	54	6	37.2	7.1	868	526	E	2.1	広葉樹
塩水3	22.64	53	6	37.0	6.5	833	483	N	10.6	広葉樹
塩水4	139.29	56	5	33.6	10.9	679	2217	E	8.7	広葉樹
塩水5	89.39	57	1	31.7	10.3	685	1400	E	11.9	混交林
塩水6	5.86	53	8	37.4	8.1	664	596	N	8.7	広葉樹
塩水A	260.44	57	1	31.6	10.0	618	2555	E	11.9	広葉樹
塩水7	411.20	60	2	37.6	8.1	498	3288	E	12.3	広葉樹
本谷1	28.98	54	3	36.7	7.6	705	743	S	99.7	広葉樹
本谷2	247.99	59	1	35.9	8.1	705	2756	N	12.3	広葉樹
本谷3	189.85	58	0	34.8	8.4	678	2365	E	23.5	広葉樹
本谷4	29.27	55	5	35.2	8.2	677	839	S	80.6	広葉樹
本谷5	18.26	51	3	36.0	7.3	623	541	S	60.3	針葉樹
本谷6	13.41	50	4	34.3	7.8	581	550	S	68.9	混交林
本谷A	663.47	60	0	36.9	8.9	549	4578	E	38.1	混交林
本谷7	15.51	51	1	35.1	8.0	566	490	E	73.3	混交林
本谷8	3.00	48	3	35.8	8.8	465	136	W	45.0	混交林
本谷9	753.58	60	0	36.9	8.9	425	6240	N	37.0	広葉樹
大洞左	4.76	48	12	34.7	6.7	537	312	N	80.8	広葉樹
大洞右	17.63	51	3	34.1	8.6	551	432	E	99.8	針葉樹
地獄沢	154.32	58	1	34.9	8.1	535	1994	W	51.0	針葉樹
地北1	16.76	50	4	34.4	8.2	492	519	W	55.7	針葉樹
地北2	12.30	51	9	35.7	7.7	487	760	W	63.4	針葉樹
境沢1	218.98	55	1	34.3	7.5	660	2039	E	21.7	混交林
境沢2	3.24	44	16	34.1	5.0	643	120	E	79.7	広葉樹
境沢3	2.56	44	16	33.4	6.0	645	2433	E	95.7	針葉樹
境沢4	51.19	55	2	35.3	7.5	619	1359	E	28.5	針葉樹
境沢5	48.11	53	4	36.0	7.4	580	955	E	35.1	針葉樹
境沢6	70.02	48	12	34.6	7.2	546	271	E	100.0	針葉樹
境沢7	38.29	53	1	35.2	8.2	556	687	S	98.7	針葉樹
唐沢1	6.35	48	1	31.5	7.9	466	214	S	0.2	広葉樹
唐沢2	3.49	47	4	32.1	9.6	468	138	E	10.8	広葉樹
唐沢A	1.98	46	8	31.0	6.9	415	1136	N	99.9	針葉樹
唐沢3	38.83	49	3	34.2	8.5	426	975	N	41.9	針葉樹
唐沢4	424.13	57	1	34.9	8.7	430	4208	N	2.6	広葉樹
唐沢5	55.09	52	1	32.5	9.3	506	1081	W	23.1	混交林

表2 中津川上流域における調査流域の地形・植生と溶存元素・水温との相関係数

	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ -N	SO ₄ ²⁻ -S	NO ₃ ⁻ -N	Cl ⁻	SiO ₂	水温
流域面積	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
最大傾斜	ns	-0.338	-0.396	-0.713	-0.508	ns	ns	ns	-0.445	-0.451	-0.341	-0.255
最小傾斜	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
平均傾斜	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
標高	-0.564	-0.632	-0.625	-0.460	-0.731	ns	-0.431	-0.419	ns	-0.522	-0.565	-0.857
主流長	ns	ns	ns	-0.446	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
針葉樹割合	0.393	ns	ns	0.500	ns	ns	ns	ns	ns	0.379	ns	0.352

nsは95%確率で相関なし。相関係数が記載されているものは95%以上の確率で相関あり。

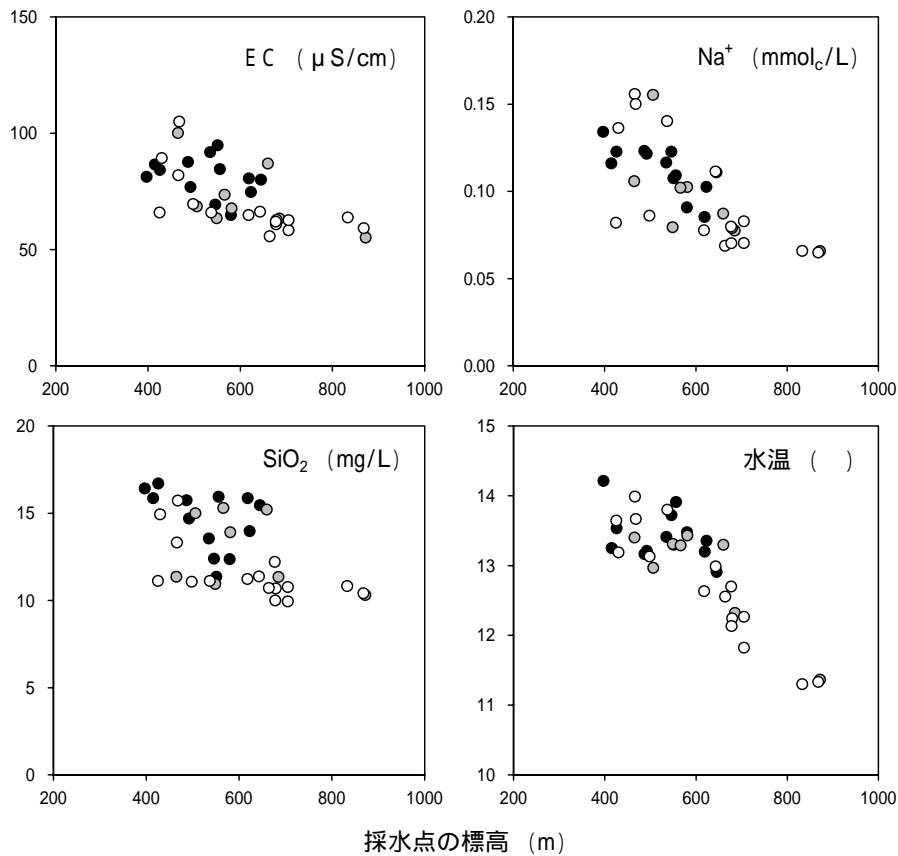


図10 採水点の標高と水質(EC, Na⁺, SiO₄濃度)・水温
 溪畔林; 黒: 針葉樹, 灰: 混交林, 白: 広葉樹

(4) 水温と水質

母岩風化にかかわるイオン濃度の高低を説明できる水温は, 季節に関係するかどうか明らかにするため, 採水時ごとの水温および年平均水温で, 最も渓流水のイオン濃度など水質との相関を調べた(表3)。おおまかにみると, 秋季の終わりから春先にかけての水温は, pH, EC および多くのイオン濃度と正の相関が認められたが, 梅雨から夏季の間は, 相関がみられないことが多かった(表3, 図11)。これは, 梅雨から夏季の間は, 降雨量が多く, 直接流出の割合が高まり, 平水時とはいえ水温・イオン濃度ともに乱の影響を受けているためと考えられる。したがって, 降雨量, 流出水量ともに安定した秋季の終わりの水温を用いると, 水質や採水流域の特性を把握できる可能性が高いといえる。

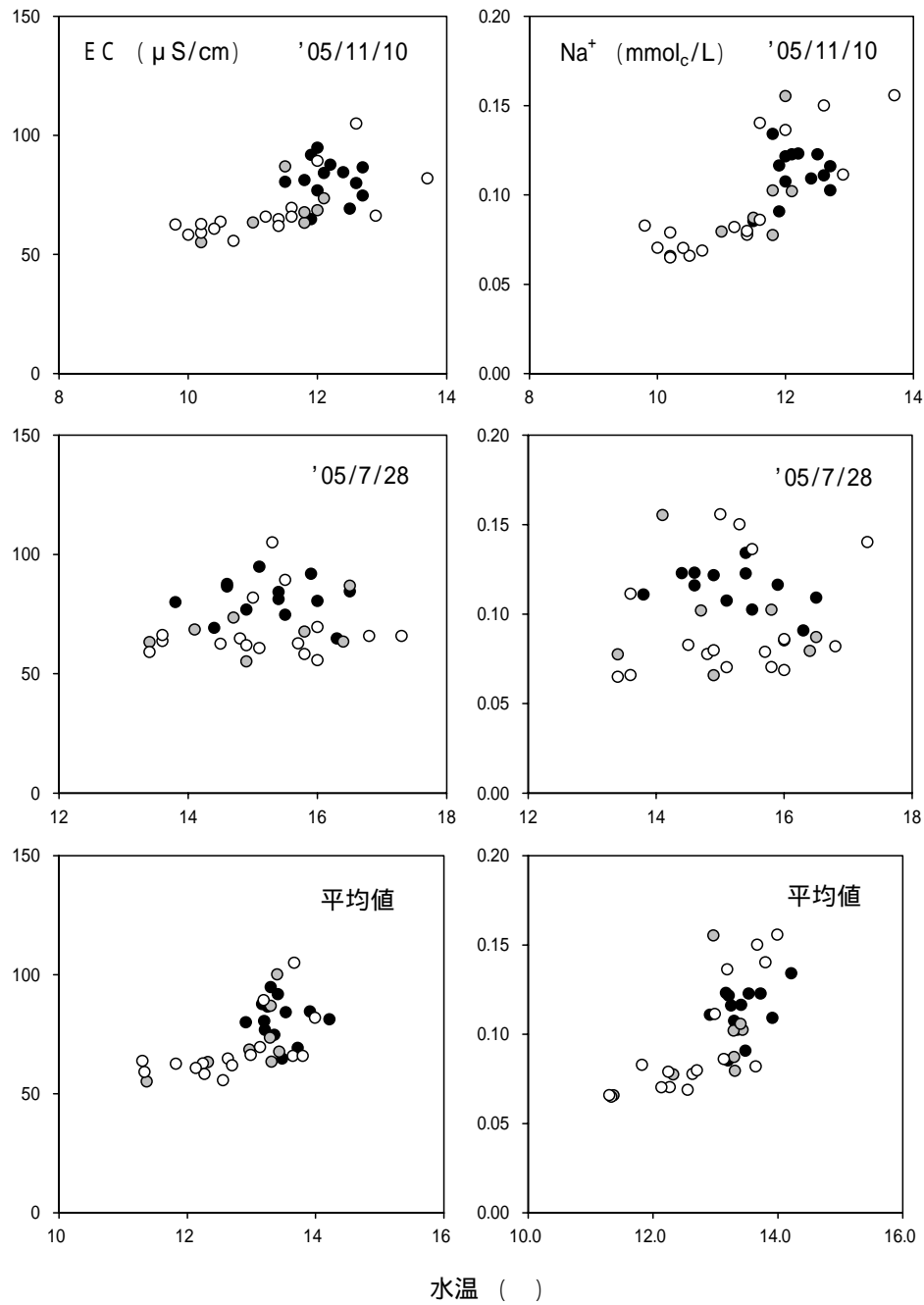


図11 採水時の水温と水質(EC, Na⁺濃度)
 溪畔林; 黒: 針葉樹, 灰: 混交林, 白: 広葉樹

表3 中津川上流域における調査流域の採取時水温と溶存元素との相関係数

D/M/Y	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ -N	SO ₄ ²⁻ -S	NO ₃ ⁻ -N	Cl ⁻	SiO ₂
8/27/04	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0.331	ns	ns	ns	ns
11/10/04	0.527	0.640	0.570	0.795	0.756	ns	ns	ns	0.583	0.630	0.643
12/22/04	ns	0.426	0.477	0.636	0.586	ns	ns	ns	0.640	0.438	0.399
4/22/05	0.651	0.521	0.550	0.645	0.649	ns	ns	ns	0.507	0.639	0.490
5/25/05	0.610	0.557	0.619	0.598	0.641	ns	ns	ns	0.400	0.677	0.502
6/29/05	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
7/28/05	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
8/31/05	ns	0.390	ns	0.339	0.375	ns	0.356	ns	ns	ns	0.395
10/25/05	0.619	0.629	0.620	0.814	0.807	ns	ns	ns	0.529	0.570	0.574
平均水温	0.628	0.593	0.541	0.663	0.704	ns	0.340	ns	ns	0.548	0.588

nsは95%確率で相関なし。相関係数が記載されているものは95%以上の確率で相関あり。

(5) 流域の植生と水質

採水点から上流の集水域における植生の状況を、針葉樹林割合として表した(表1)。その針葉樹林割合と水質とは、あまり強い相関が認められず、pH、Mg および Cl 濃度との間に弱い相関がみられた(表2, 図12)。また、NO₃-N 濃度では全体としては相関がみられないが、便宜的に突出した2点(唐沢1および5)を除くと、相関が認められた($r = 0.505$, $p < 0.01$)(図12)。NO₃-N は、肥沃な土壌において有機態窒素が無機化され NH₄-N となり、その NH₄-N が硝化細菌によって硝化されることで生成する。これらの無機態窒素は、植物や微生物にとって容易に吸収可能な重要な養分である。流域内の針葉樹林割合が高いと、森林生態系内において循環利用されるべき無機態窒素が高濃度で流出していることになる。この現象が、針葉樹を人工造林したために生じたのか、人工造林が可能な肥沃な土地が多いために生じているかは、現段階では特定できない。また、硝化の過程では H⁺を生成するため酸性となるが、渓流水が酸性化していることはなく、前述のように、Ca、Mg などの塩基で十分に緩衝しているといえる。

(6) 採水点の渓畔林と水質

渓流水質には、集水域全体の植生よりも渓畔林が強く影響することが予測される。採水時に目視で確認した渓畔の植生を、おおまかに針葉樹林、針広混交林、広葉樹林と分類し、それぞれ渓流水質を平均して比較した(図13)。針葉樹林の渓畔林を持つ渓流は、広葉樹林や混交林と比べて、有意とはいえないが、全般的にイオン濃度が高く、物質の流出が盛んであるといえる。一方、広葉樹林と混交林のイオン濃度に差はなく、針葉樹林に広葉樹をうまく混交させることによって、物質の流出を抑えられる可能性がある。渓畔の樹木の取り扱いが、渓流水質に及ぼす影響が大であるという報告もあり(浦川ら, 2005)、生産性の高い立地であっても、渓流に対するバッファゾーンとして渓流沿いは広葉樹林が混交林として管理することが望ましい。

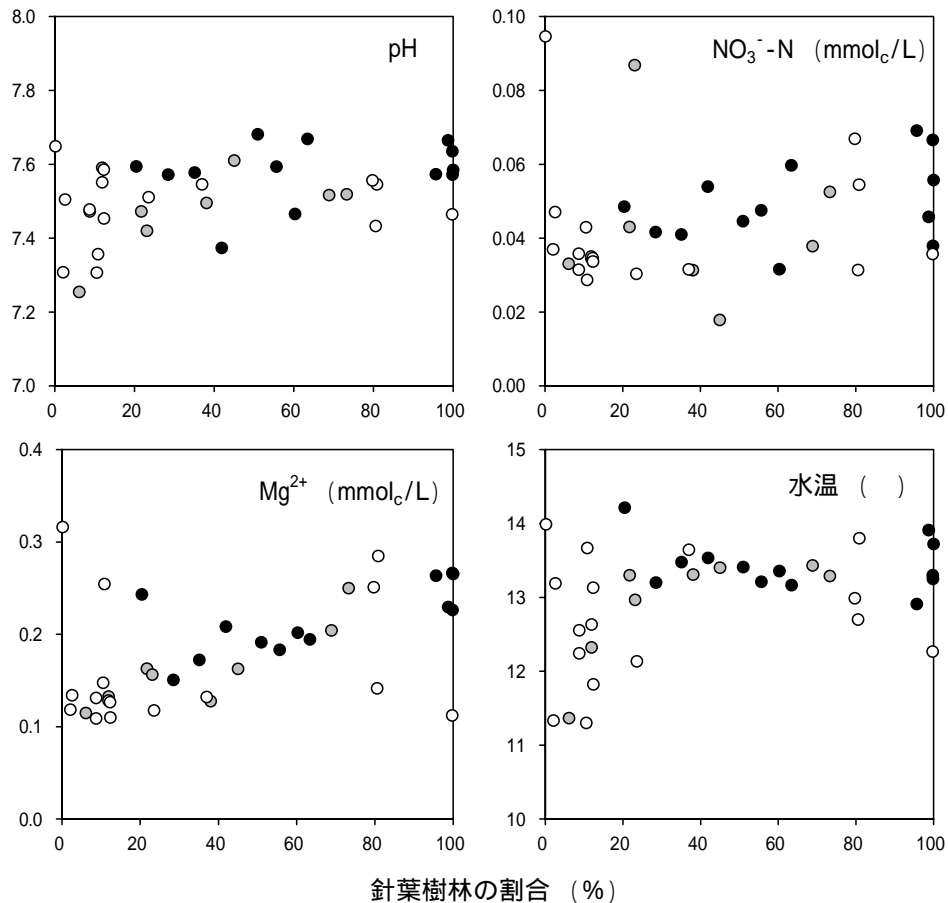


図12 針葉樹林割合と水質(pH, NO₃⁻-N, Mg²⁺濃度)・水温
 渓畔林; 黒: 針葉樹, 灰: 混交林, 白: 広葉樹

(7) 中津川上流域の平均物質濃度

本調査で実施した37流域の渓流水の年平均溶存物質濃度を、流域面積で加重平均することで、中津川上流域の渓流から流出する年平均物質濃度を推定した(表4)。渓流水は降雨の年平均溶存物質濃度に比べ、NH₄-Nを除き、すべて高濃度であった。NH₄-NはNO₃-Nへ形態変化することもあり、NH₄-NとNO₃-Nの合計で無機態窒素(inorg.-N)とすると、やはり渓流水で降雨より高濃度となる。宮が瀬ダムで調査している中津川から流入する総窒素濃度は、平成12~16年で平均0.68mg/Lであり、本調査の平均窒素濃度は0.64mg/Lとほぼ一致した。この年平均濃度に、降雨や渓流の水量を乗ずることで、物質収支を概算することができる。例えば、東丹沢の約2000mmの

降雨の半分が蒸発散で失われ、残り 1000mm が渓流水になると仮定すると、中津川上流域へは無機態窒素が降雨で 9.8kg/ha 流入し、渓流から 6.4kg/ha 流出する計算となる。

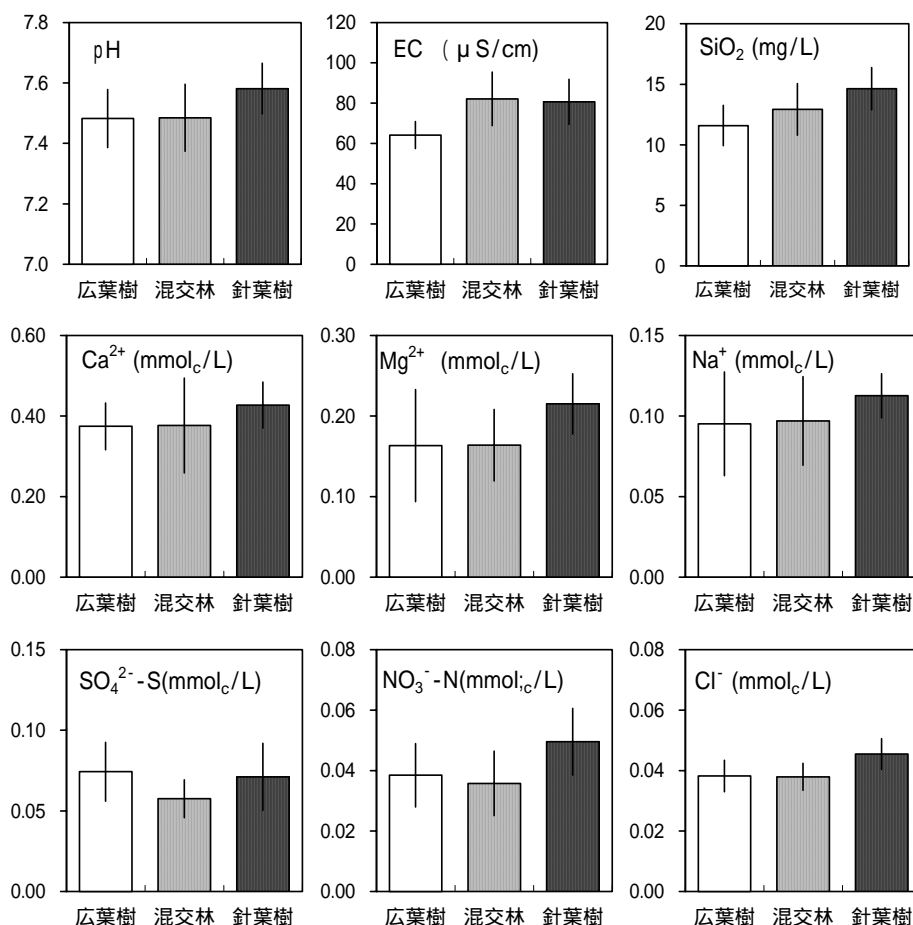


図13 採水点の溪畔林と水質

関東地方の 11 河川の平均物質濃度（表 4）と比べ、窒素を除く物質で濃度が低かった。窒素は NH₄-N および NO₃-N とともに、本調査で濃度が高く、結果として無機態窒素濃度が高かった。また、前述の唐沢 1 および 5 のように、突出した高い窒素濃度の流域もみられた。これら窒素濃度の高かった流域は、関東山地の窒素飽和が懸念されている流域（Ohroi and Mitchell, 1997；Ohte et al., 2000；戸田，2002）と同程度の濃度であった。関東山地では、首都圏からの大気汚染物質の流入による、森林生態系の窒素飽和現象が懸念されており（戸田，2000），中津川上流域も例外ではないと考えられる。

表4 中津川上流域の降雨および渓流水の年平均物質濃度

	Ca	Mg	Na	K	NH ₄ -N	SO ₄ -S	NO ₃ -N	Cl	Inorg-N ^{*3}
	(mg/L)								
降 雨	0.30	0.12	0.28	0.17	0.20	0.32	0.29	0.56	0.49
渓流水 ^{*1}	7.44	1.74	2.12	0.23	0.11	1.19	0.53	1.36	0.64
関東河川 [*]	12.70	2.90	7.30	1.43	0.08	5.30	0.29	6.10	0.37

*1: 流域面積で加重平均, *2: 関東11河川の平均(日本分析化学会北海道支部, 1990)

*3: NH₄-NとNO₃-Nの合計

なお, Aberら(1989)によれば, 地上部の植生が養水分を盛んに吸収する成長期である夏期に, 渓流水のNO₃-N濃度が高くなる現象は, 窒素飽和のステージ2(窒素が飽和した状態)に相当する。これは, 欧米の冬雨型の気候下における窒素飽和の基準であり, 我が国をはじめとする夏雨型の気候で, 同様の基準で窒素が飽和した状態と判断するのは早計であるが, これらの流域では浄化機能が高度に発揮されている状態とはいえない。渓流水の窒素が, 年平均濃度で1.0mg/L(0.07mmol/L)前後と高い流域は, その原因を究明するとともにモニタリングによる監視が必要である。

(8) 丹沢山地の渓流水質

これまで, 東丹沢(中津川)の渓流水質の調査について解析してきたが, 丹沢山地のより広域的な渓流水質を把握するため, 西丹沢の渓流水質を調査した。東丹沢に比べて西丹沢の流域では, イオン濃度が高い場所が多く, 採水点間の変動も激しかった(図14)。イオン濃度の高さの順序は東丹沢と同様であったが, 西丹沢では東丹沢で非常に低濃度のKがやや高く, SO₄-S濃度も著しく高い採水点が多くみられた。東丹沢の中津川上流域は, 表層地質が輝緑凝灰岩でほぼ一致しているのに対して, 西丹沢では流域ごとに地質が異なり, 水質形成に影響している可能性がある。

陽イオンと陰イオンの当量合計のバランスでは, 陰イオンの不足分が多く, 多量のHCO₃⁻イオンの存在が示唆された(図15)。HCO₃⁻は母岩の炭酸風化によって生じるため, Ca, Mg, Naといった母岩由来の陽イオンと相関性が高い(Ca:r = 0.768, Mg:r = 0.773, Na:r = 0.480)ことから, その存在が裏付けられる。

ただし, 西丹沢の調査は春と秋の2回であり, 平水時ならばイオン濃度の変動が小さいと考えられるものの, 詳細な解析には, さらにデータを蓄積する必要がある。また, 地形, 水温, 植生などの情報も収集し, 水質形成機構を明らかにしていくことが重要である。

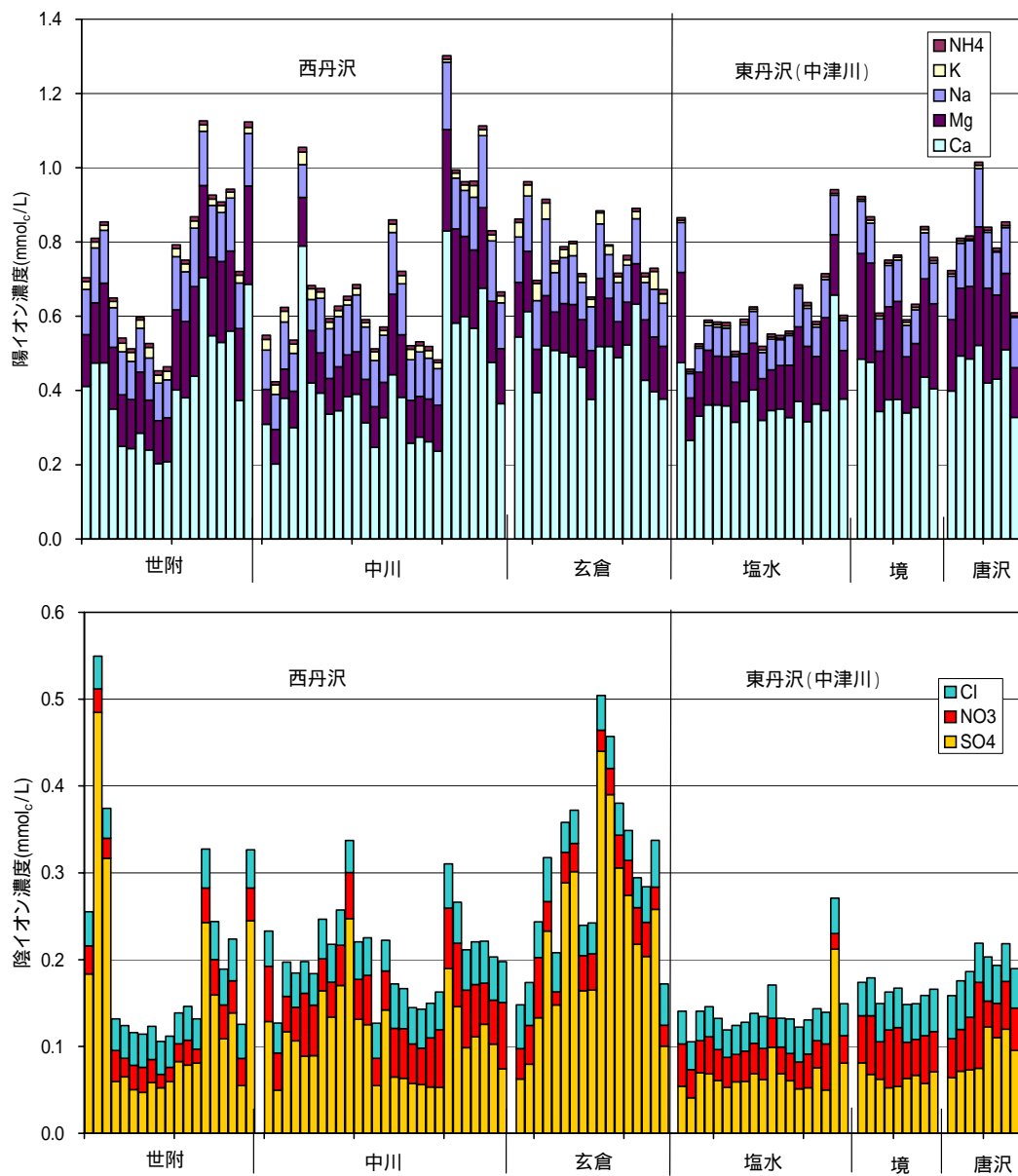


図14 西丹沢と東丹沢(中津川)の渓流水質
(採水点ごと)

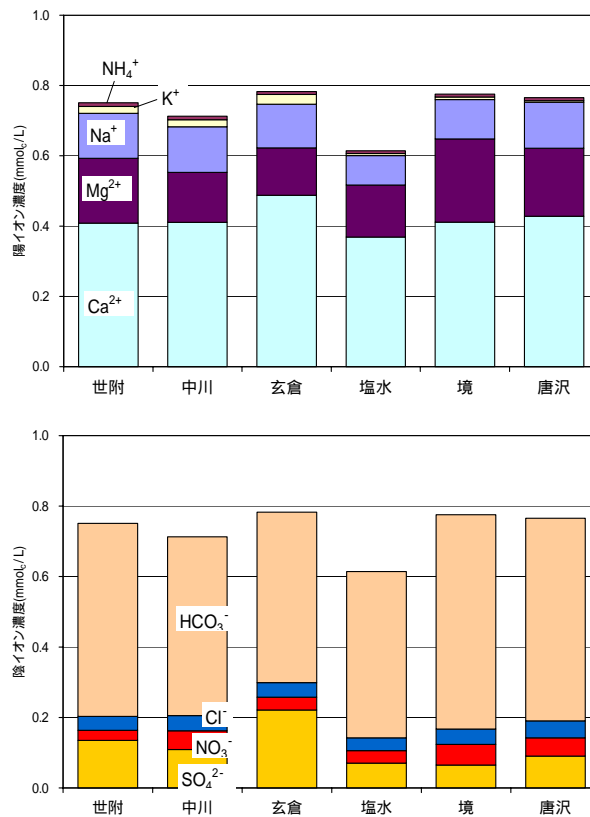


図15 西丹沢と東丹沢(中津川)の渓流水質
(流域ごと)

4. まとめ

中津川上流域の渓流水質と地形および植生を調査し、以下のような知見を得た。渓流水質の調査では、平水時であれば季節変化を考慮する必要はない。pH, EC, SiO₂, Ca, Mg, Na, SO₄-S, NO₃-N, Cl 濃度は、標準偏差が小さく、採水点ごとの差異が年間の水質の変動を上回っていた。流域面積、流域内の傾斜、採水点の標高、主流長のうち、採水点の標高で多くの物質濃度と負の相関が認められた。特に、EC, Na, SiO₂ 濃度など母岩由来の物質との相関係数が高かった。また、水温と物質濃度に正の相関が認められ、温度の高低による母岩風化が水質形成に影響を及ぼしていることが示唆された。流域内の針葉樹林割合と pH, Mg, Cl, NO₃-N 濃度との間に弱い正の相関がみられた。これは、針葉樹を造林したためなのか、肥沃な土地が多いからなのかは特定できなかった。針葉樹林の渓畔林では、広葉樹林や混交林より全般的に渓流の物質濃度が高く、広葉樹林と混交林には差がなかった。渓畔針葉樹林の混交林化は、渓流に対するバッファ

ーゾーンとして有効であると考えられた。中津川上流域の溪流から流出する年平均物質濃度を推定し、降雨や溪流の水量を乗ずれば物質収支の概算を可能にした。中津川上流域の溪流の窒素濃度は0.68mg/Lと高めであった。さらに、丹沢山地の広域的な溪流水質把握のため、西丹沢の溪流水質を調査し、東丹沢より物質濃度が高い場所が多く、採水点間の変動も激しことがわかった。陽イオンと陰イオンのバランスから、母岩の炭酸風化によって生じる多量のHCO₃⁻イオンの存在が示唆された。

今後の課題として、大洞沢など水量観測流域の充実と出水時の水質変化を明らかにすること、SO₄-SやNO₃-Nの濃度が常に著しく高い採水点について、流域の踏査など詳細な調査とモニタリング継続の必要性があげられる。さらに、溪流水質調査を西丹沢のみならず丹沢山地の全域で実施し、地形、植生などの流域特性を多くの流域で把握し、水質形成について多重要因の寄与を解析するとともに、各流域におけるモニタリング・サイトを決定していくことに意義がある。

5. 文献リスト

- Aber, J. D., K. J. Nadelhoffer, P. Steudler, and M. Melillo (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystem. *BioScience* 39: 378-386
- Ohruai, K. and M. J. Mitchell (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Application* 7: 391-401
- Ohte, N., M. J. Mitchell, H. Shibata, N. Tokuchi, H. Toda and G. Iwatsubo (2000) Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and Northeastern United States. *Water Air and Soil Pollution* 130: 649-654
- Likens, G. E., F. H. Bormann, N. M. Johnson, D. W. Fisher and R. S. Pierce (1970) Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecological Monograph* 40: 23-47
- 日本分析化学会北海道支部編 (1990) 水の分析-第3版-.pp.504, 化学同人, 京都.
- 戸田 浩人 (2002) 陸上生態系の物質循環からみた窒素飽和による汚染の構図. *資源環境対策* 38: 1067-1072
- 戸田 浩人・笹 賀一郎ほか (2000) 全国大学演習林における溪流水質. *日本林学会誌* 82: 308-312.
- Vitousek, P. M. (1977) The regulation of element concentrations in mountain streams in the northeastern United States. *Ecological Monograph* 47: 66-87
- Vitousek, P. M. and J. M. Melillo (1979) Nitrate losses from disturbed forest: patterns and mechanisms. *Forest Science* 25: 605-619