

平成 16 年度

自然公園等施設整備委託

治山流域総合調査報告書

平成 17 年 3 月

神 奈 川 県

東 京 農 工 大 学

平成16年度自然公園等施設整備委託
水と土再生調査（治山流域総合調査）報告書

水流出過程調査・水循環既存データ調査・・・・・・・・報告書1

溪流環境調査・・・・・・・・・・・・・・・・報告書2

土壌浸食量調査・・・・・・・・・・・・・・・・報告書3

付録（卒業論文）・・・・・・・・・・・・・・・・報告書4

水流出過程調査・水循環既存データ調査……報告書 1

I. はじめに

I-1. 調査の目的

国土の7割を占める日本の山地は、急峻で複雑な地型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、水中で沈むことなく下流域や海まで流下する。浮遊砂は山腹からの産出土砂の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、土砂が沈殿・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土砂について興味を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⁾。なお浮遊土砂の解析方法についての研究をI-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深刻化している。

流入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、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、流量及び浮遊砂濃度を計測した。そこから浮遊砂の流出量を推定すると共に、流量と浮遊砂量の相関関係を求めた。

I-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 I - 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)

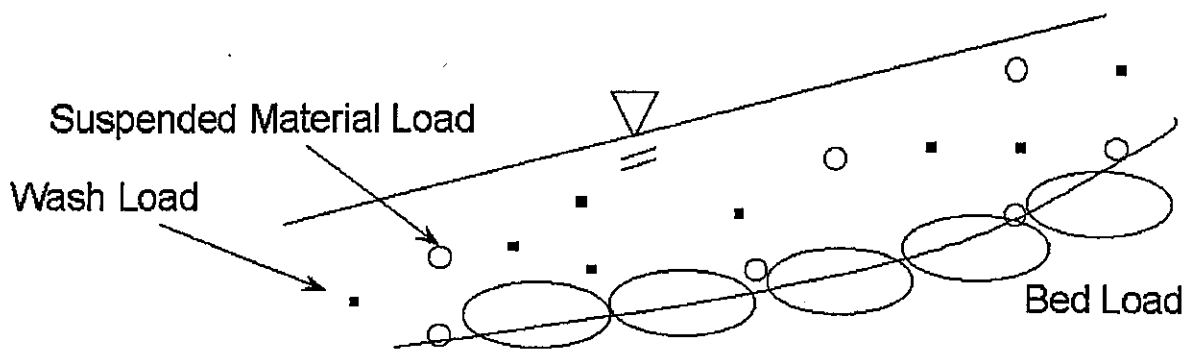
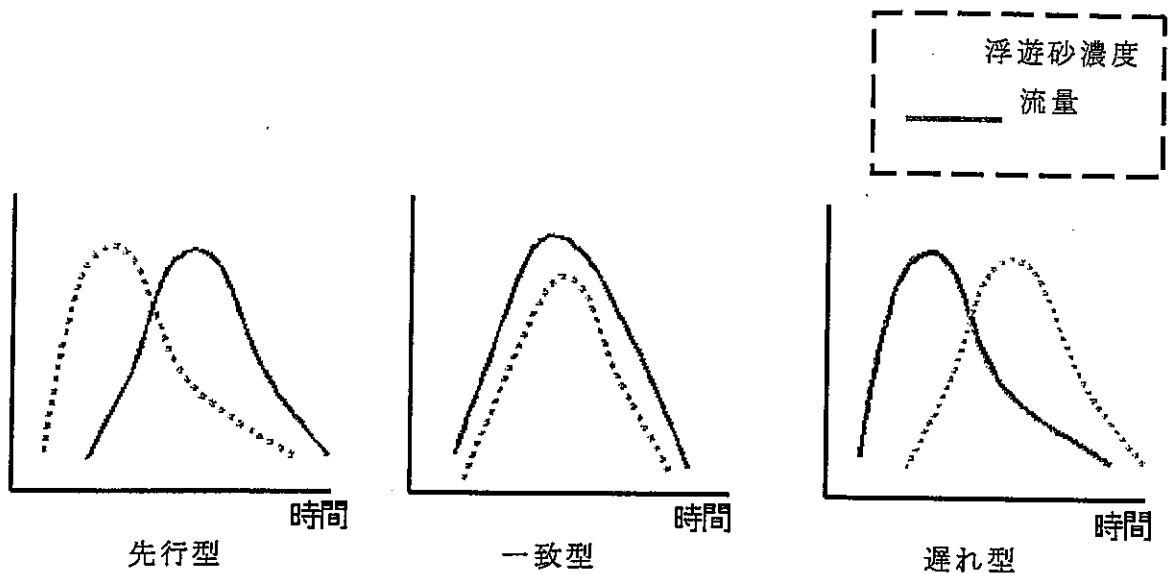


図 I - 2 掃流砂及び浮遊砂の概念図

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。

I - 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IV-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。山腹土壤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。

II. 調査地の概要

II-1. 調査地

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 II-1 に広域地図、図 II-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、表面流の形成が大きく、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。最下流部には大洞量水観測所が設置され、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 II-1 に流域概況を示す。

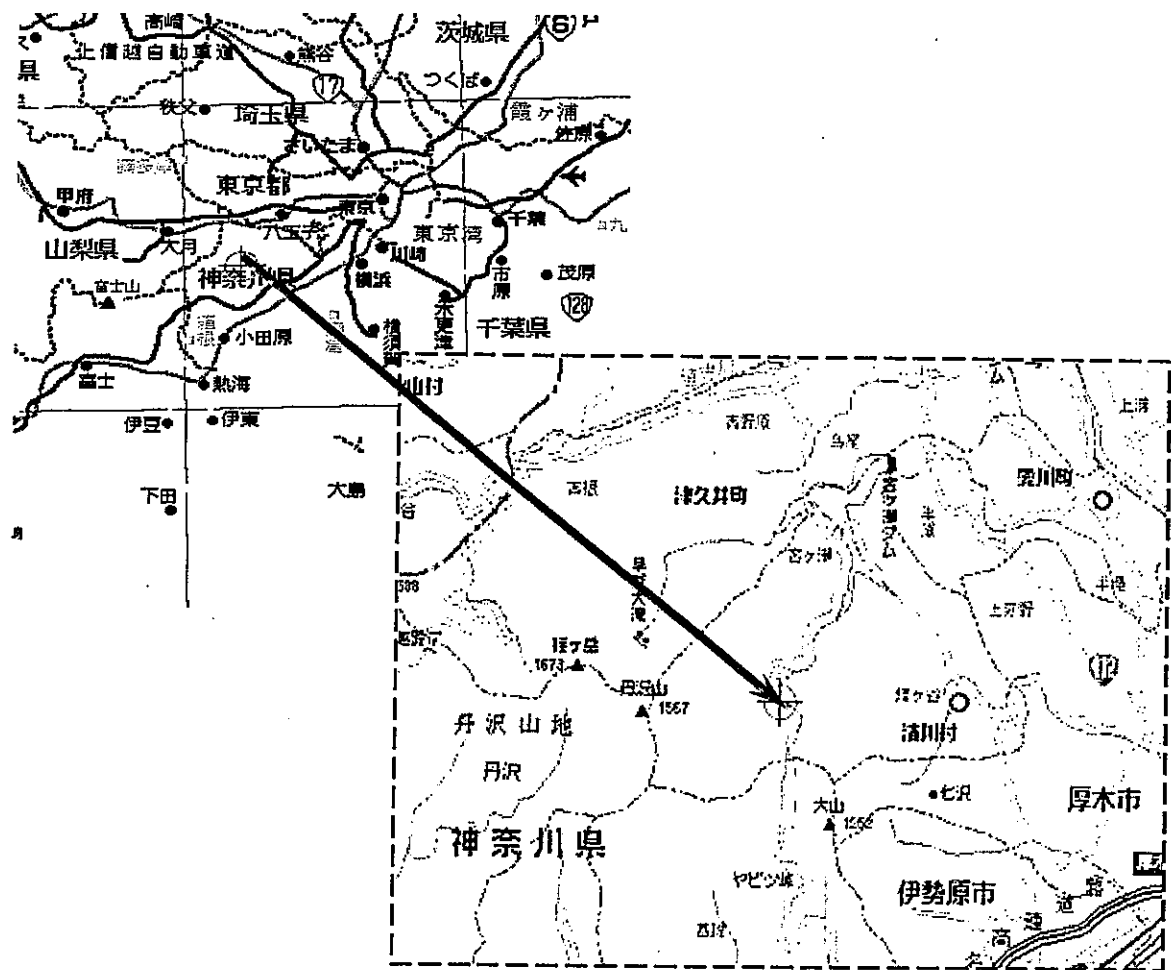


図 II-1 調査地(広域)

表 II-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	4.80km
		流域の平均傾斜	36.6° (等高線延長法) 36.1° (等高線面積法)
谷密度	$9.8(\text{km}^{-1})$		

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

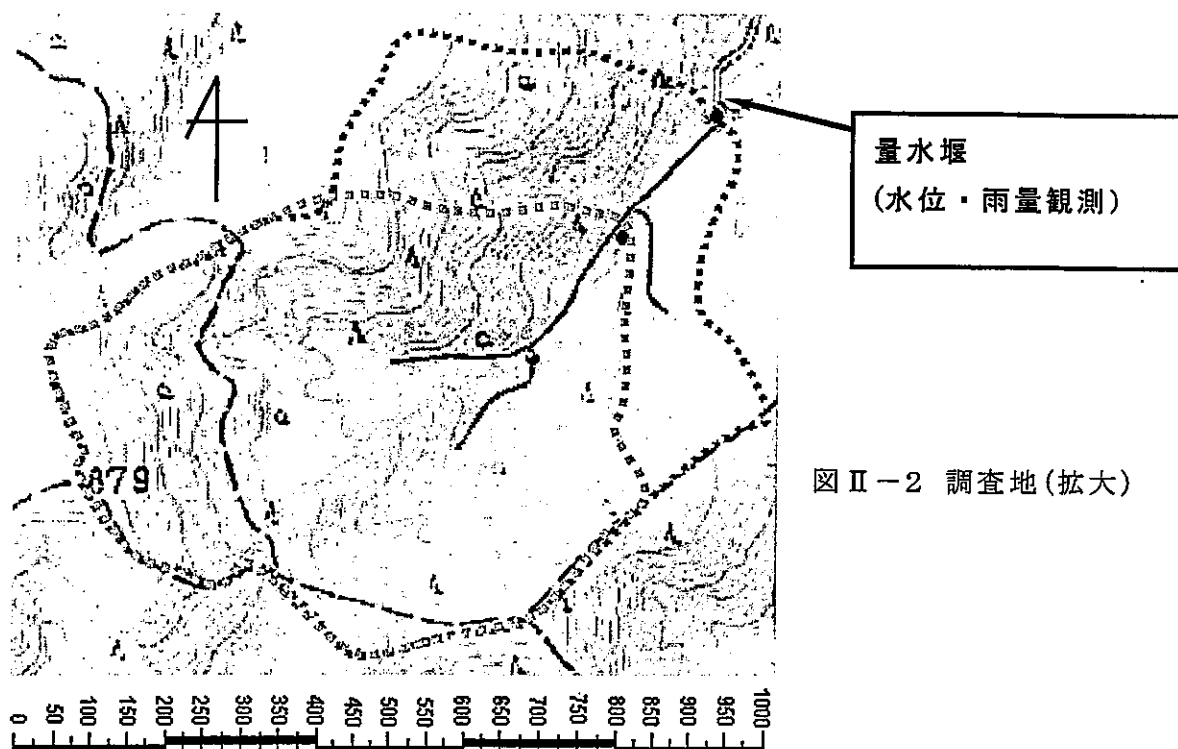


図 II-2 調査地(拡大)

表 II-2 流域形状

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

Ⅲ. 調査方法

Ⅲ-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Ⅲ-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Ⅲ-1
転倒マス式雨量計

Ⅲ-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Ⅲ-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。

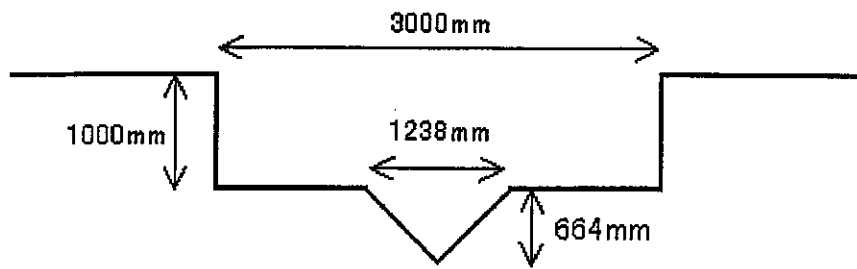


図 III - 2 量水堰構造図



図 III - 3
大洞沢量水堰

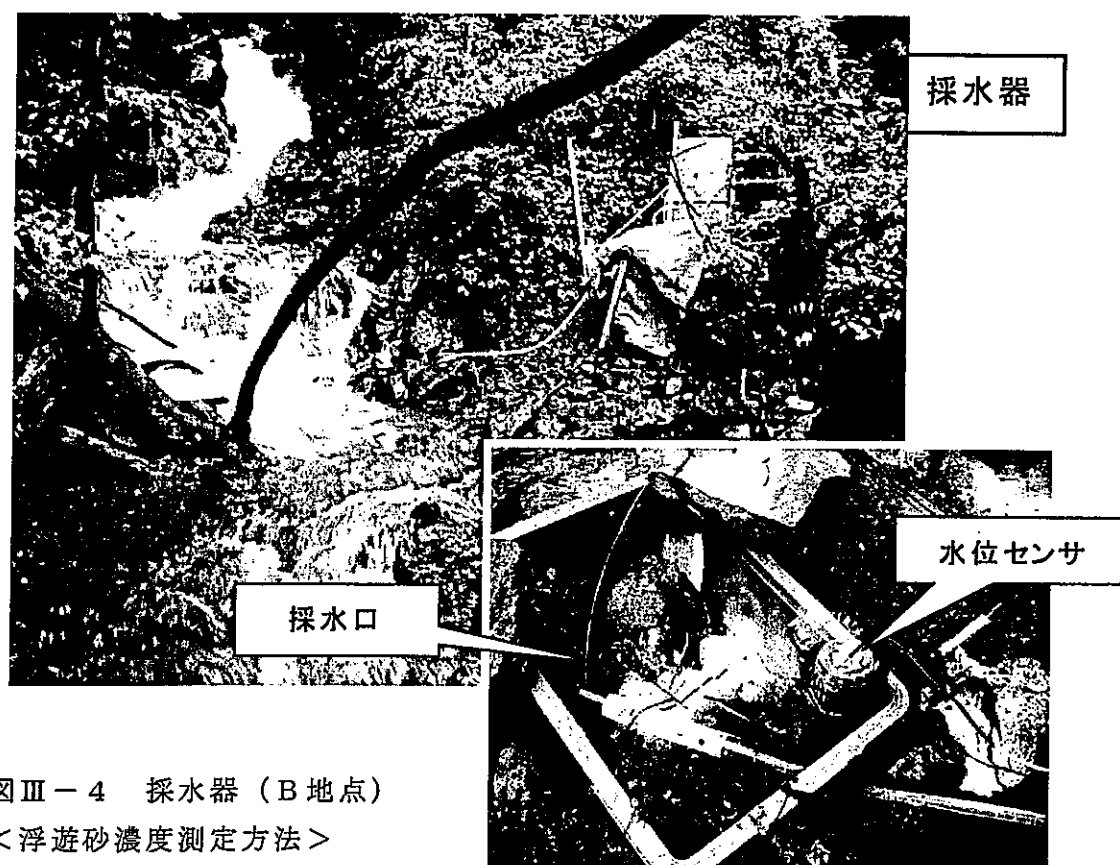
量水堰水位の算出方法は、自記水位計のチャート紙上に記録された点と、同時に測った実測水位を合わせ、時間と流量のズレを補正することで行う。水位は、実際の水位の昇降と連動したペンレコーダーがチャート紙上を動き、記録される。ペンがチャート紙の端まで来ると、反転して更に記録を続ける仕組みになっているが、機械の不調で反転が行われなかった箇所やインクの無い箇所があり、欠測が生じた。

Ⅲ－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Ⅲ－４)。採水器は2004年6月から設置した。

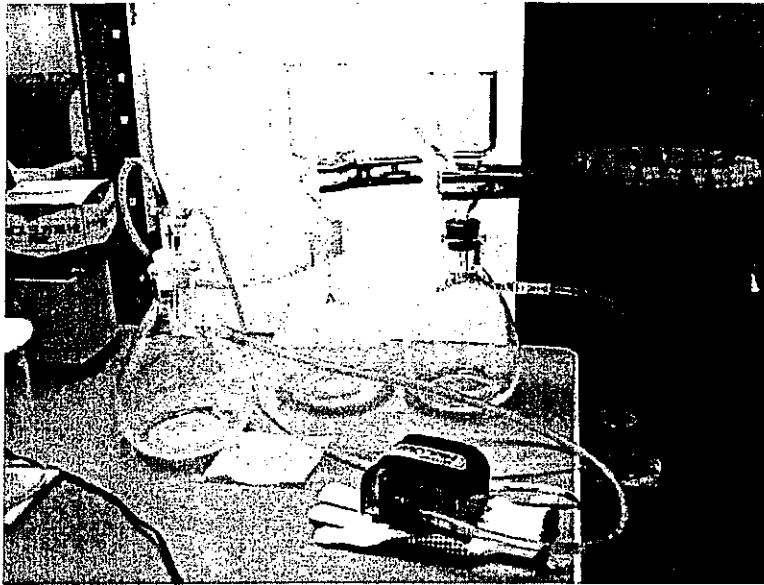
水位センサは平水時の水面付近に設置し、増水によりある値まで水位が上昇するとセンサが水を検知し、それをトリガーとして採水を始める。採水は30分間隔で12時間行われ、採水された試料は採水器に内蔵されたボトル(500ml×24本)に保存される。なお、10月20日の採水のみ1時間間隔で行った。

採水器はA地点(下流)、B地点(上流)の2箇所に設置した。A地点では採水器を下流側支流に設置(6月8日～7月18日)し、その後堰堤工事のため本流に移動し、再設置(8月10日～)した。採水は計11回行ったが、実際に分析可能な試料が取れたのは7/29(B)、8/18(A,B)、9/4,5(A,B)、10/20(B)の4イベントで合計6データだった。



図Ⅲ－４ 採水器(B地点)
<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℃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Ⅲ－５)。濾過後、再度濾紙を105℃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。



Ⅲ－５ 吸引濾過器

Ⅲ－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2004年6月18日～10月20日の期間で行った。図Ⅲ－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(自作)はLEDライトと、受光部にフォトセンサ1を備え、土砂流出による濁りを「光の透過率」の変化として感知する。また、周囲の観測環境の明るさを相対値として捉えるため、LEDライトと対にならないフォトセンサ2を備える。ライト及びセンサーは5分間隔で作動する。データロガーは下流側はCR10(Campbell Scientific社)を用い、上流側では9月4日までCR10、その後はデータマーク(白山工業株式会社)を用いた。

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。

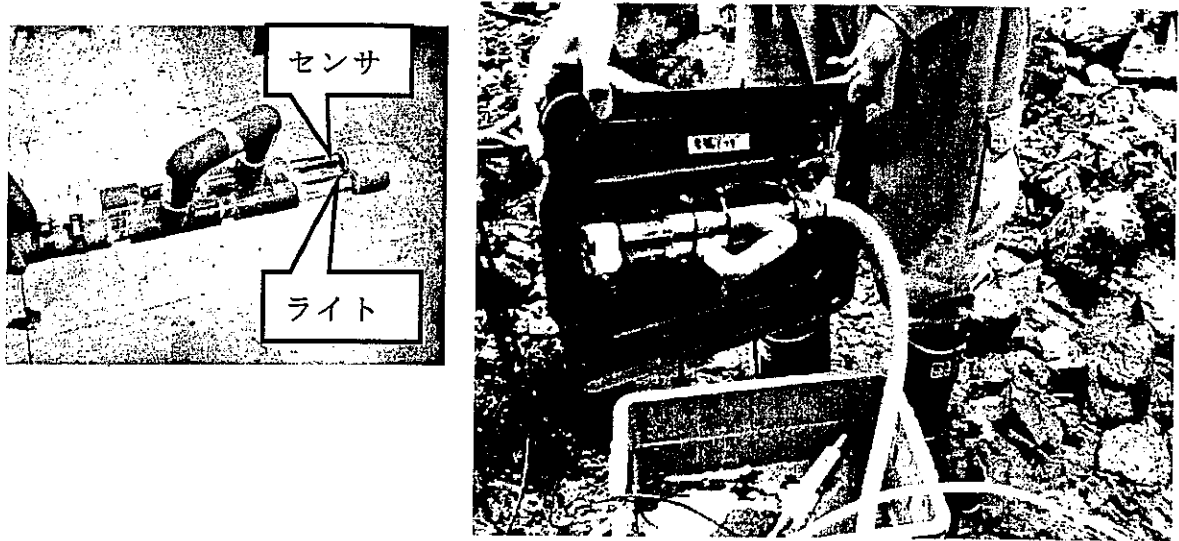


図 III - 6 濁度計

計測器の稼動状況を時系列でまとめた図 III - 7 を示す。

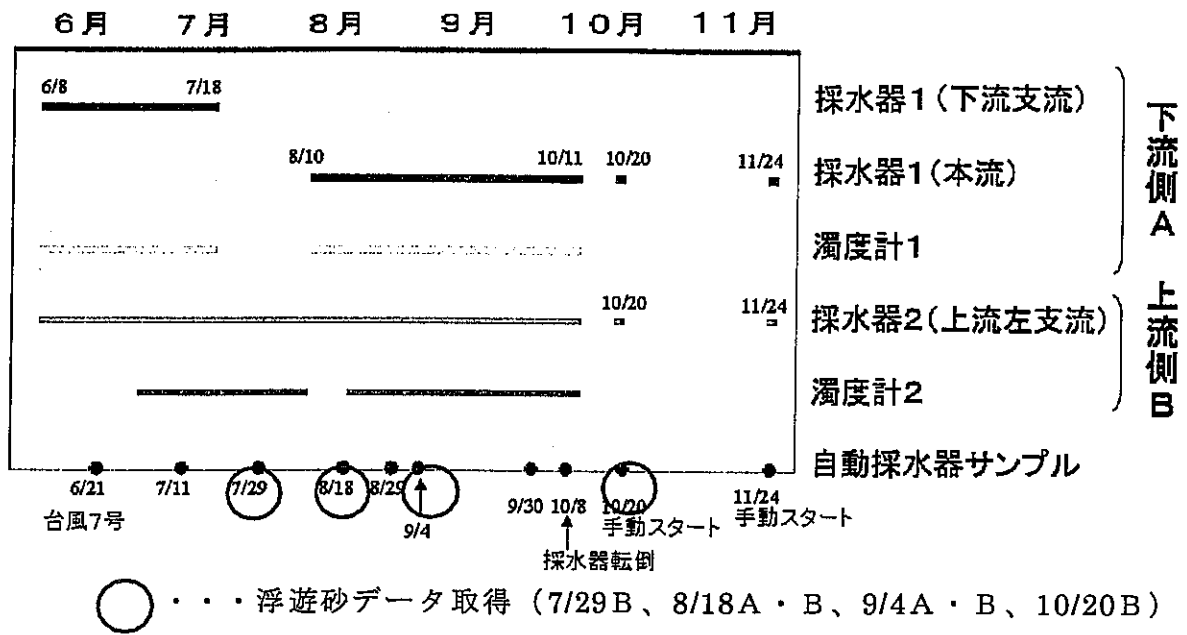


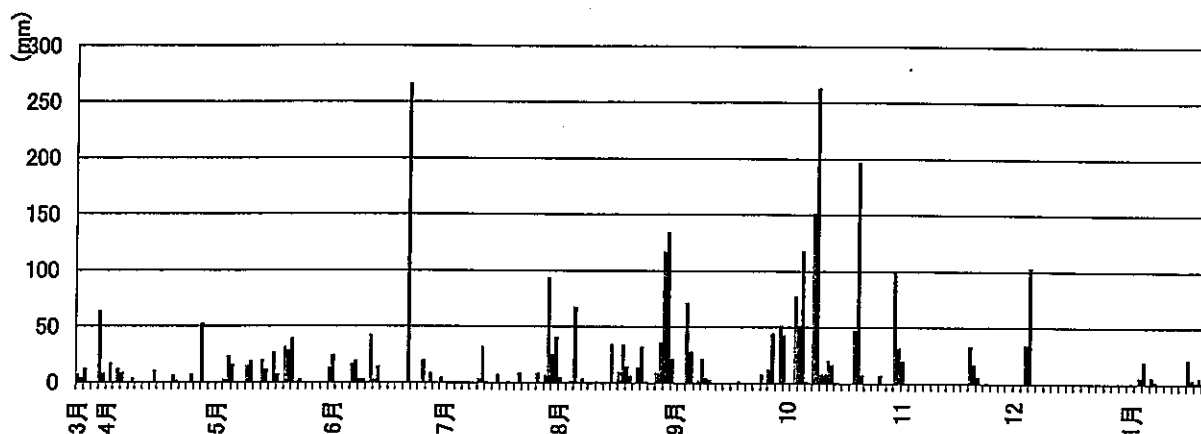
図 III - 7 計測器の稼動状況

IV. 結果および考察

IV-1. 降雨と流量

図IV-1-1に、2004年3月24日から2005年1月20日までの日雨量を示す。なお、量水堰の浚渫工事のため雨量計を一時撤去したため、7月5日～9日、11月8日～18日のデータは欠損している。観測期間の287日で、総計3286.5mmの雨量を計測した（欠損を含めない）。降雨が観測された126日中、日雨量が60mmを越えた日は15日あり、その雨量合計は1820mmで、観測期間総降雨量の55.3%を占める。日雨量が250mmを越えた日も2度観測された。

図IV-1には月別降水量、最大日雨量、最大10分間雨量を示す。

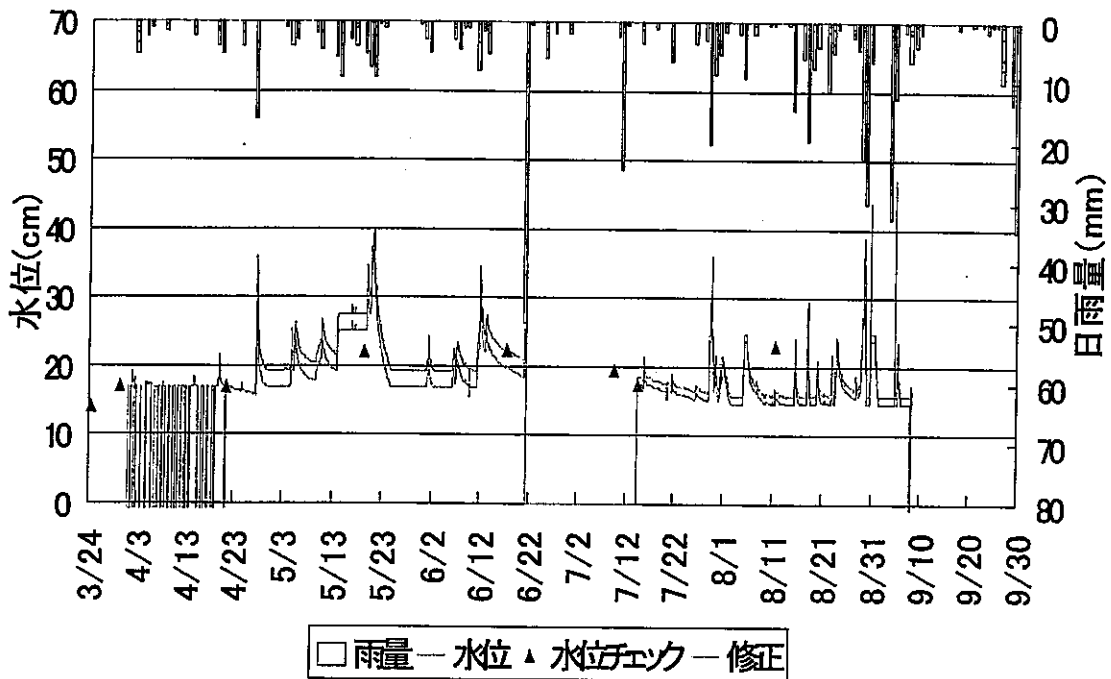


表IV-1 月別雨量及びピーク雨量

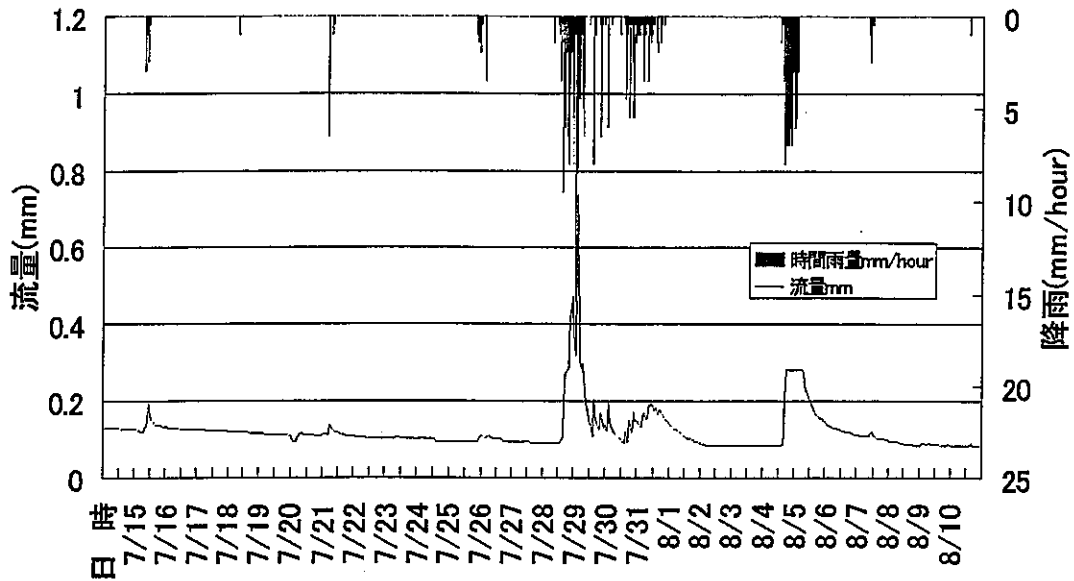
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
総雨量 (mm)	117.5	255.5	424.0	226.5	539.0	244.5	1105.5	76.0	138.5
最大日雨量 (mm)	52.2 (4/27)	39.0 (5/21)	266.0 (6/21)	93.5 (7/29)	134.0 (8/30)	71.0 (9/4)	262.5 (10/9)	19.5 (11/1)	102.5 (12/5)
最大10分間 雨量(mm)	3.5 (4/27)	3.5 (5/14)	10.5 (6/21)	11.0 (7/11)	13.0 (8/30)	11.5 (9/30)	11.0 (10/8)	1.5 (11/18)	5.0 (12/5)

図IV-1-2に全期間（2004年4月1日～9月8日）の補正前・補正後の水位一日雨量のグラフを示す。また、7月14日～8月11日及び8月11日～9月8日のハイドログラフを図IV-1-3，4に示す。

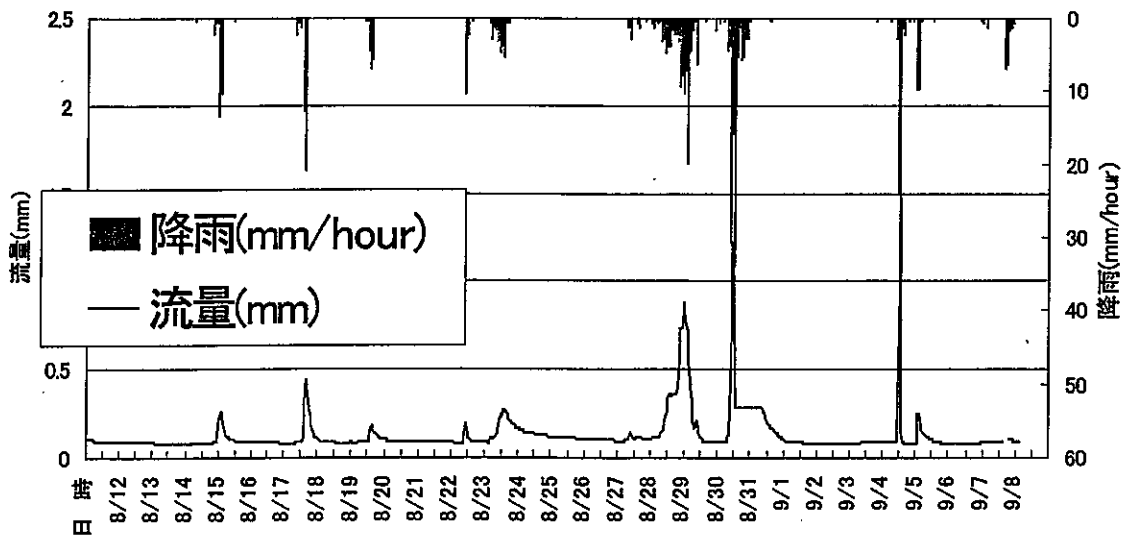
（6月21日～7月9日、10月4日は水位データなし。また、9月8日及び10月5日はデータに一部欠損がある。）



図IV-1-2 水位補正前・補正後 水位一日雨量グラフ



図IV-1-3 ハイドログラフ (2004年7月14日-8月11日)



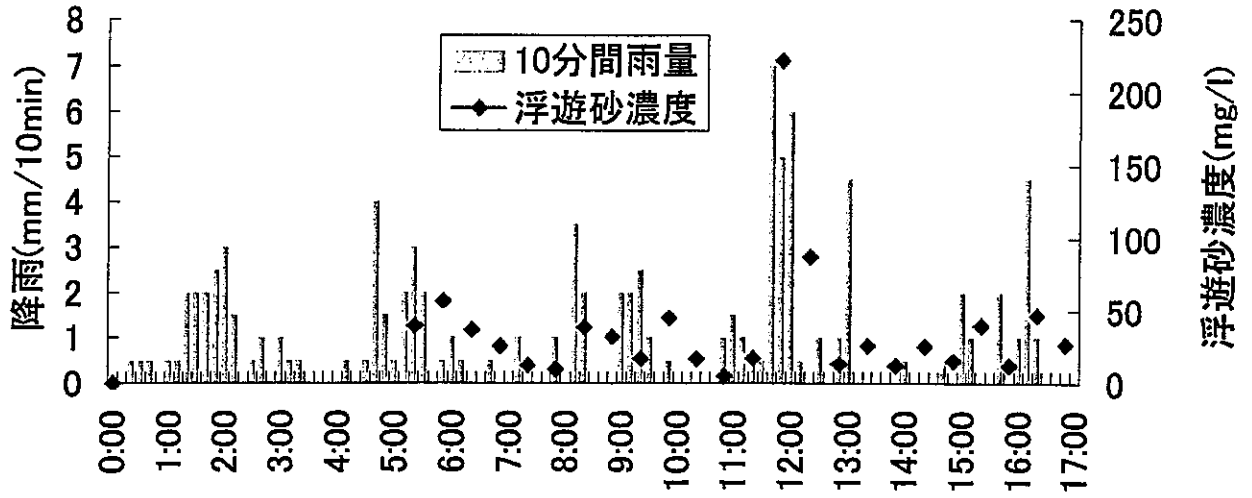
図IV-1-4 ハイドログラフ (2004年8月11日-9月8日)

IV-2. 降雨と浮遊砂濃度

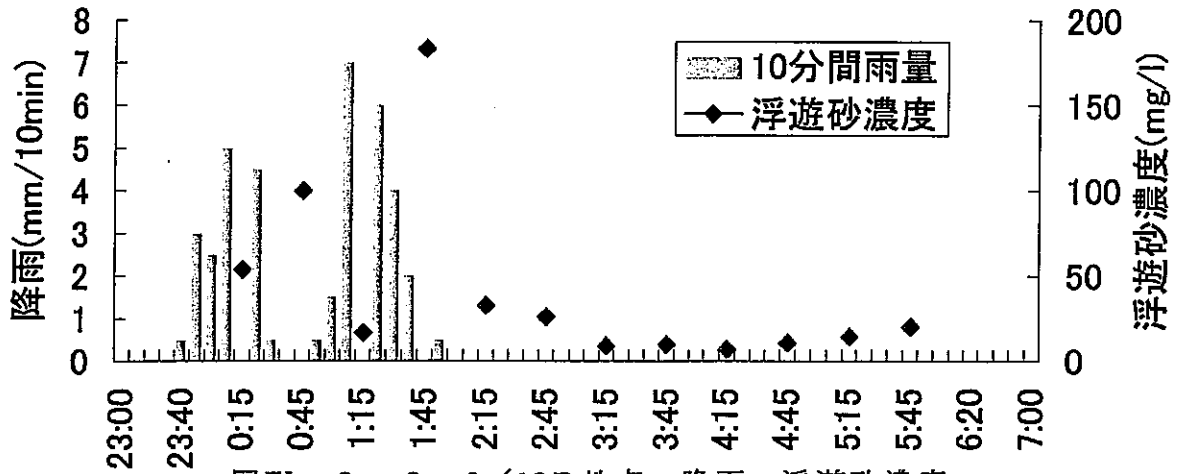
次に、降雨と浮遊砂濃度のグラフを示す（図IV-2-1～6）。浮遊砂濃度のピークは降雨のピークに対し、同時もしくはやや遅れて出現する。また、降雨量の増減に対応して増減する傾向を示した。

図IV-2-7～11では、浮遊砂濃度のピーク及び浮遊砂濃度のピークに達する迄の10分、30分、1時間、1.5時間、2時間合計雨量を示した。浮遊砂濃度のピークは、1時間前からの積算雨量との関係が高い相関を示した。またピーク浮遊砂濃度とそれに先立つピーク雨量には、高い相関関係が見られた（図IV-2-12）。

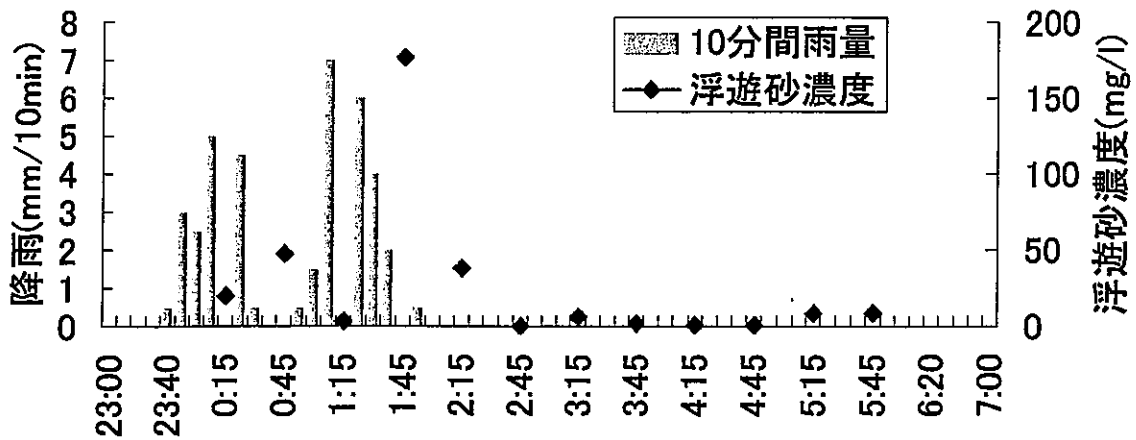
更に、5B濾紙に残った浮遊砂（粒径0.19mm以上）とミリポアに残った浮遊砂（粒径 $190\mu\text{m}$ ～ $0.45\mu\text{m}$ ）を別々に測定したグラフと雨量グラフを併せて示した（図IV-2-13～18）。5Bの濾紙のメッシュは通過するがミリポアのメッシュは通らない、極めて小さな粒径の浮遊砂の流出は、降雨パターンとより相関の高い動きを示した。粒径の小さな浮遊砂のほうが、降雨の変化により敏感に対応することから、この浮遊砂は降雨すなわち雨滴が堆積土砂や河岸、溪流の斜面を浸食し、流入したと推測した。なお、図では便宜的に5B濾紙に残った浮遊砂濃度を「5B」、ミリポアに残った浮遊砂濃度を「ミリポア」と表示した。



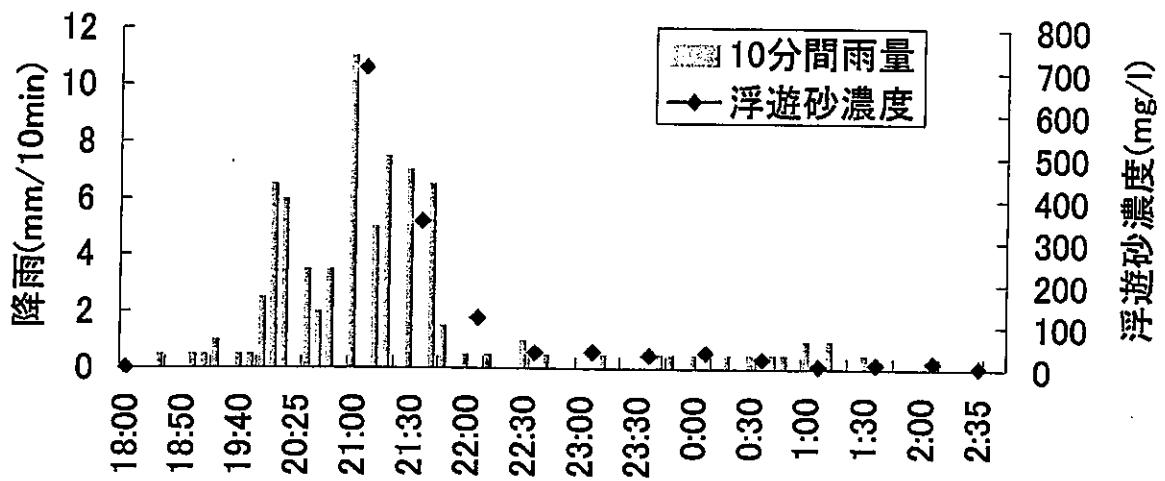
図IV-2-1 7/29B地点 降雨・浮遊砂濃度



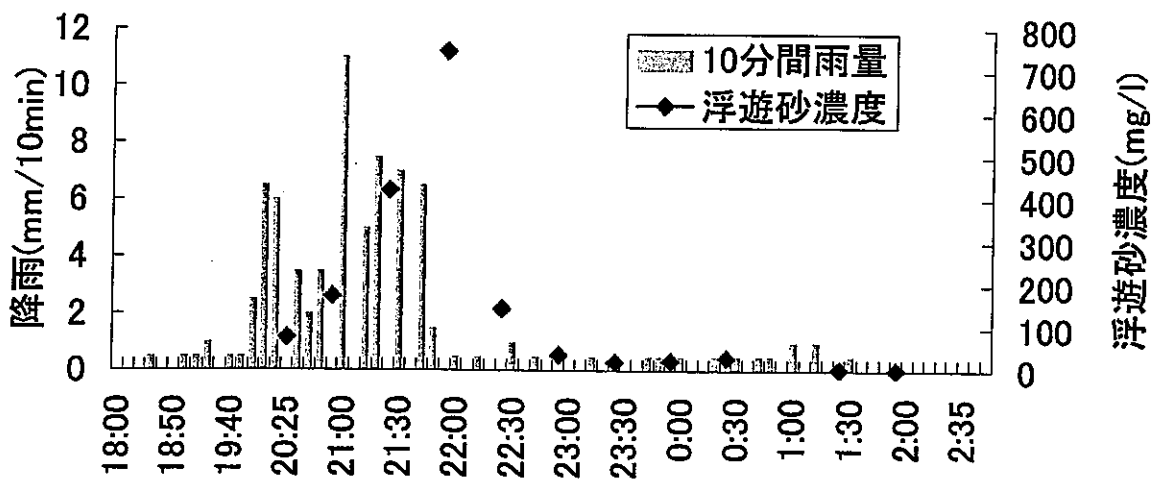
図IV-2-2 8/18B地点 降雨・浮遊砂濃度



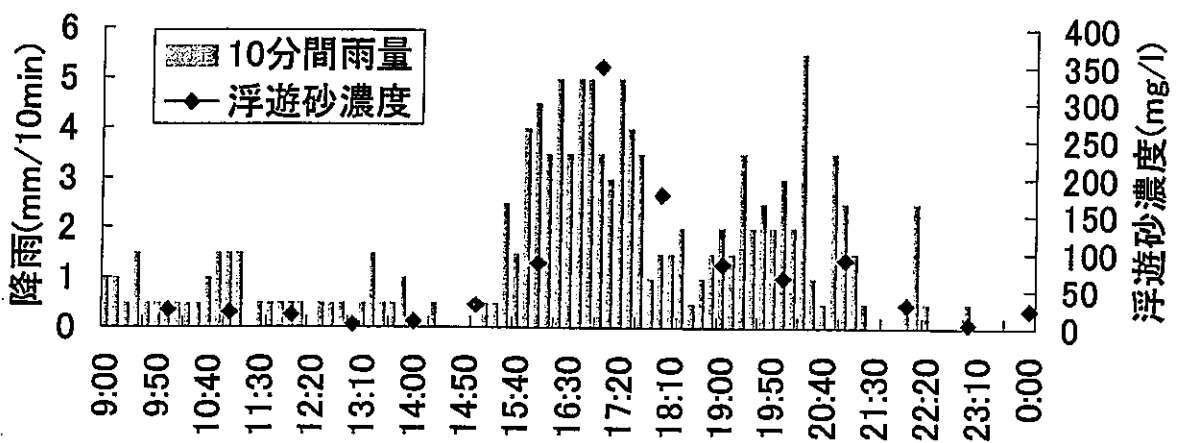
図IV-2-3 8/18A地点 降雨・浮遊砂濃度



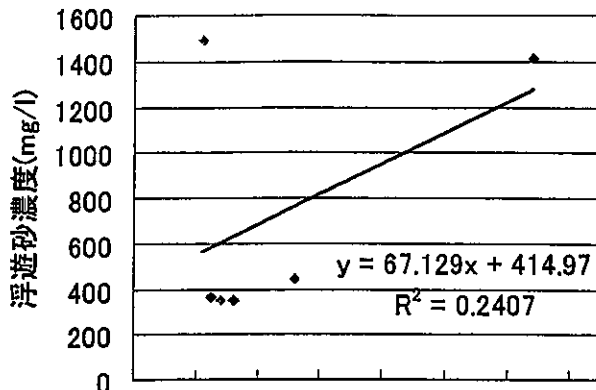
図IV-2-4 9/4,5 B地点



図IV-2-5 9/4,5 A地点

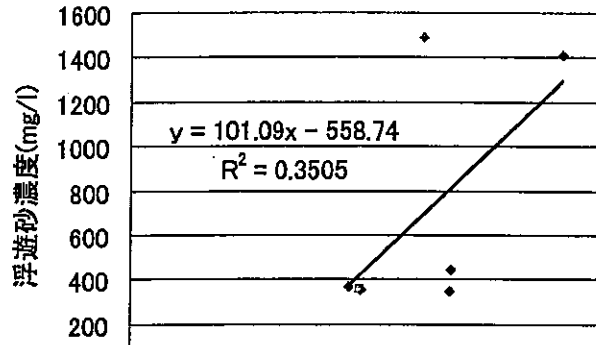


図IV-2-6 10/20 B地点



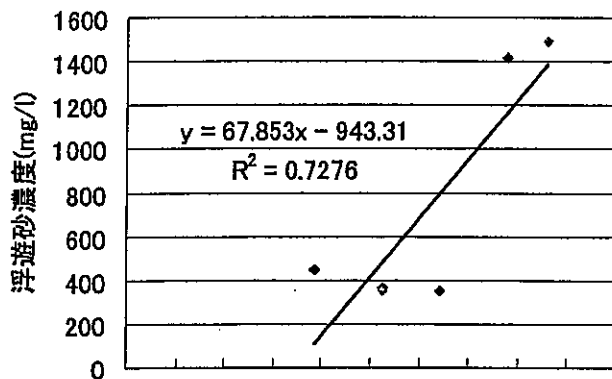
- A 地点
- B 地点

図IV-2-7
ピーク浮遊砂濃度と
10分合計雨量



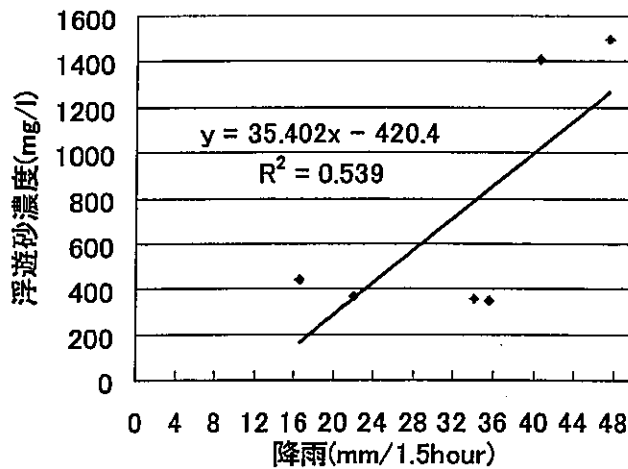
- A 地点
- B 地点

図IV-2-8
ピーク浮遊砂濃度と
30分合計雨量



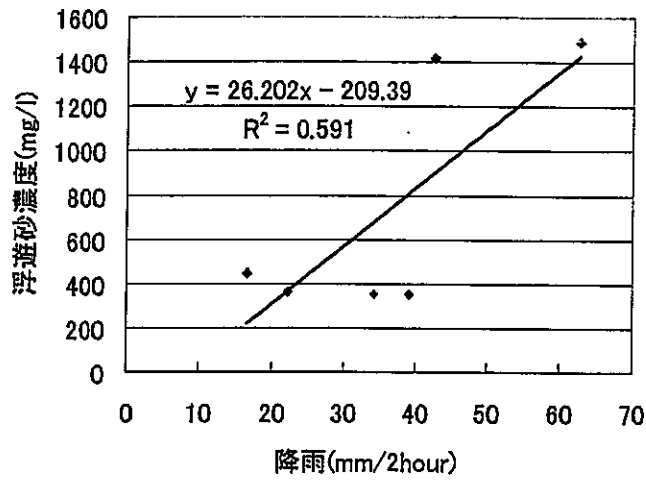
- A 地点
- B 地点

図IV-2-9
ピーク浮遊砂濃度と
1時間合計雨量



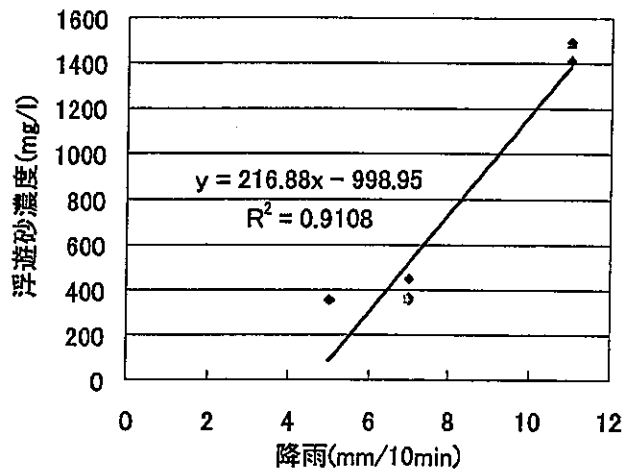
- A 地点
- B 地点

図IV-2-10
ピーク浮遊砂濃度と
1.5時間合計雨量



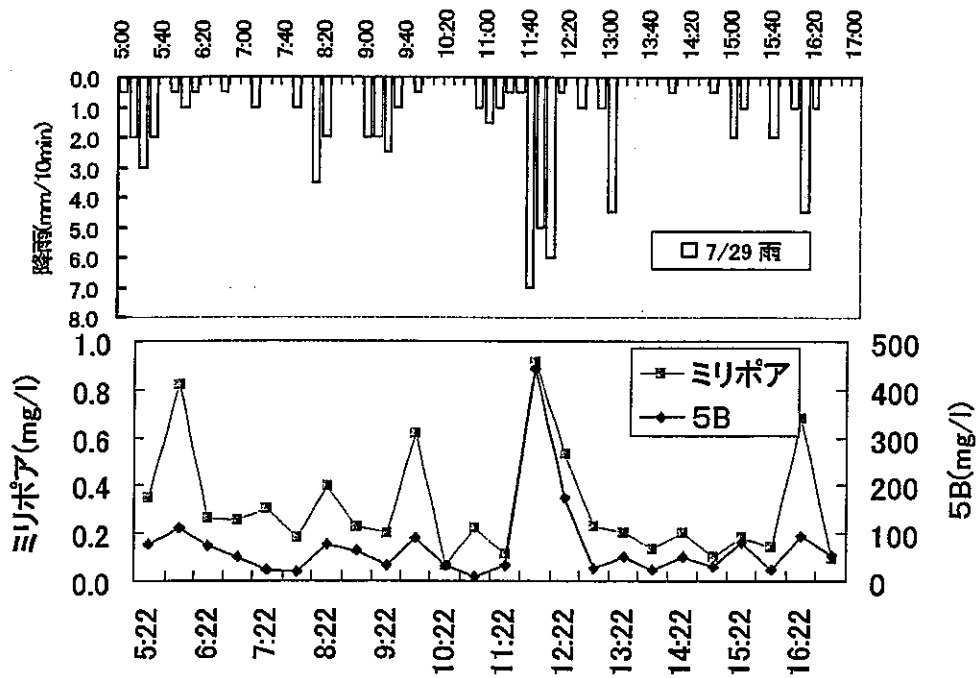
- A 地点
- B 地点

図IV-2-1-1
ピーク浮遊砂濃度と
1.5時間合計雨量

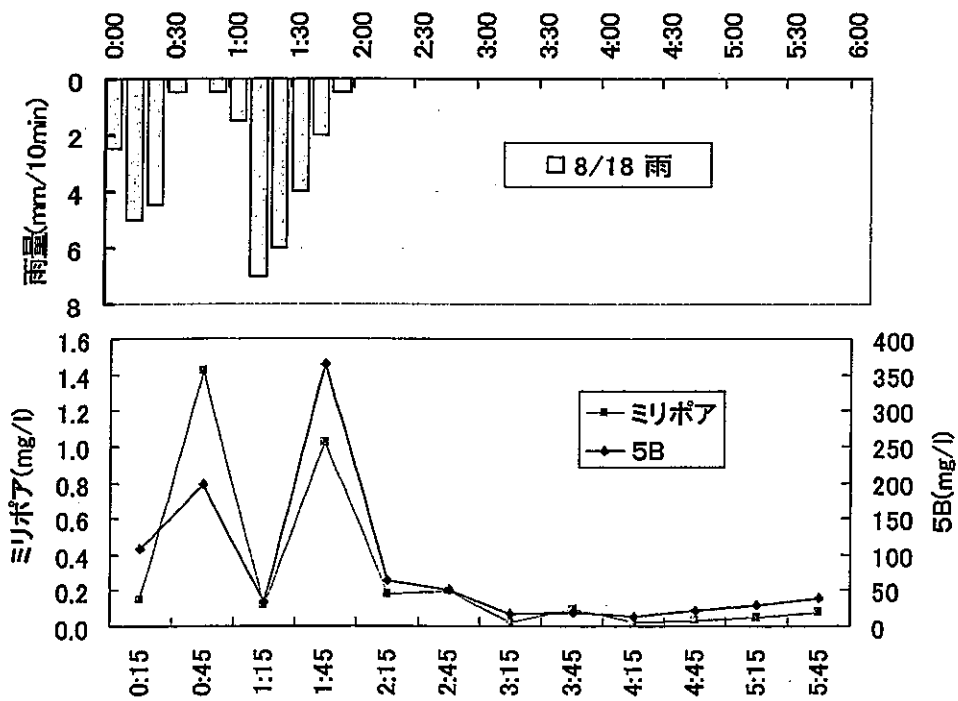


- A 地点
- B 地点

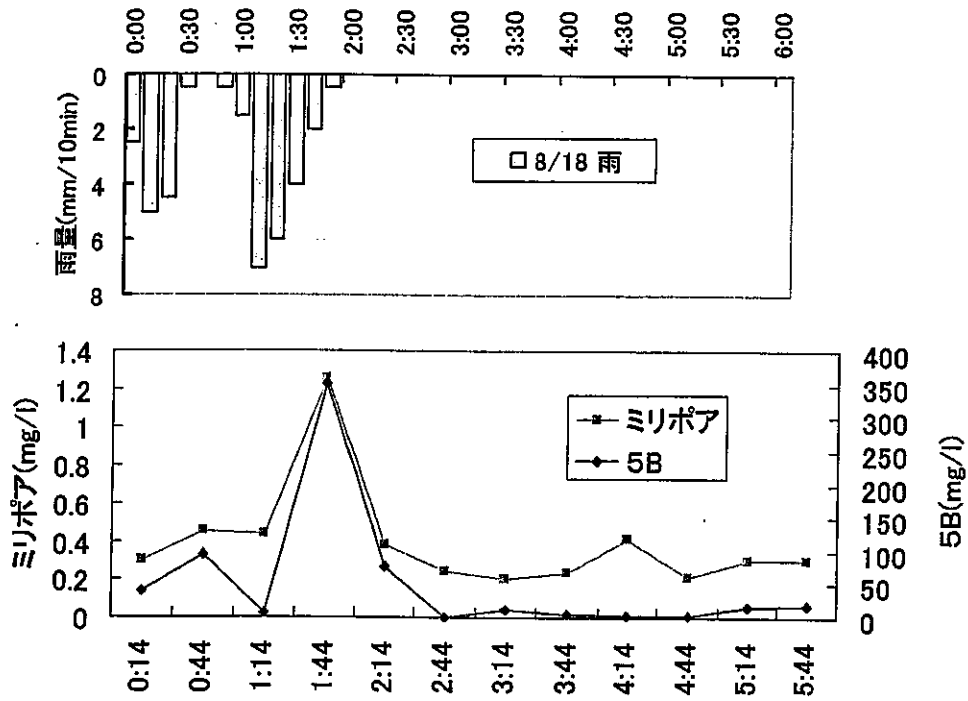
図IV-1-1-2
浮遊砂濃度と
直前のピーク雨量



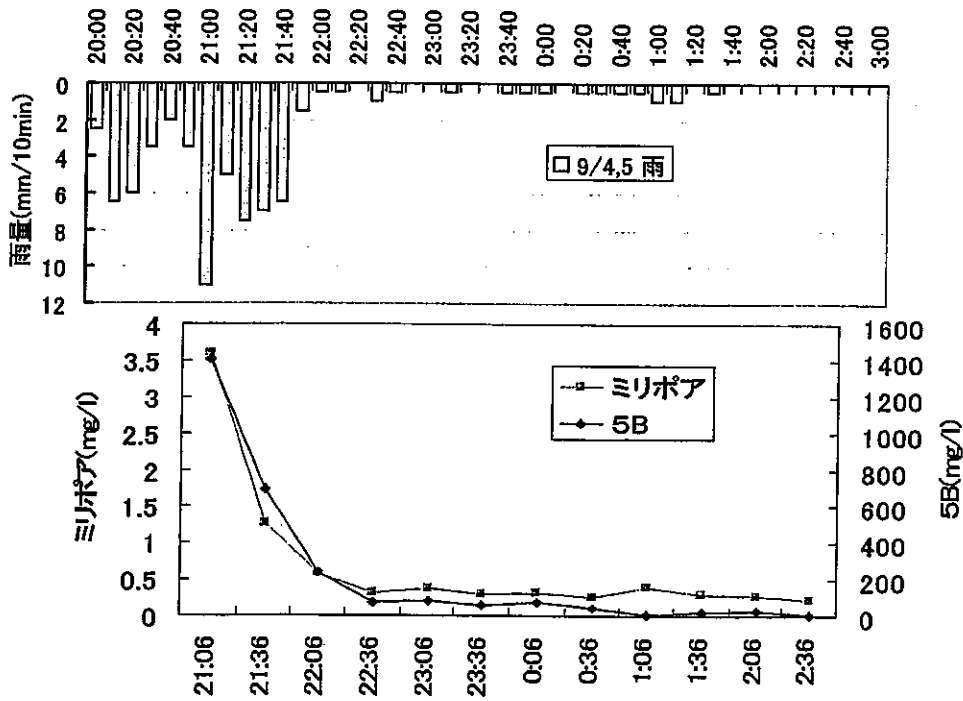
図IV-2-13 7/29 B 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



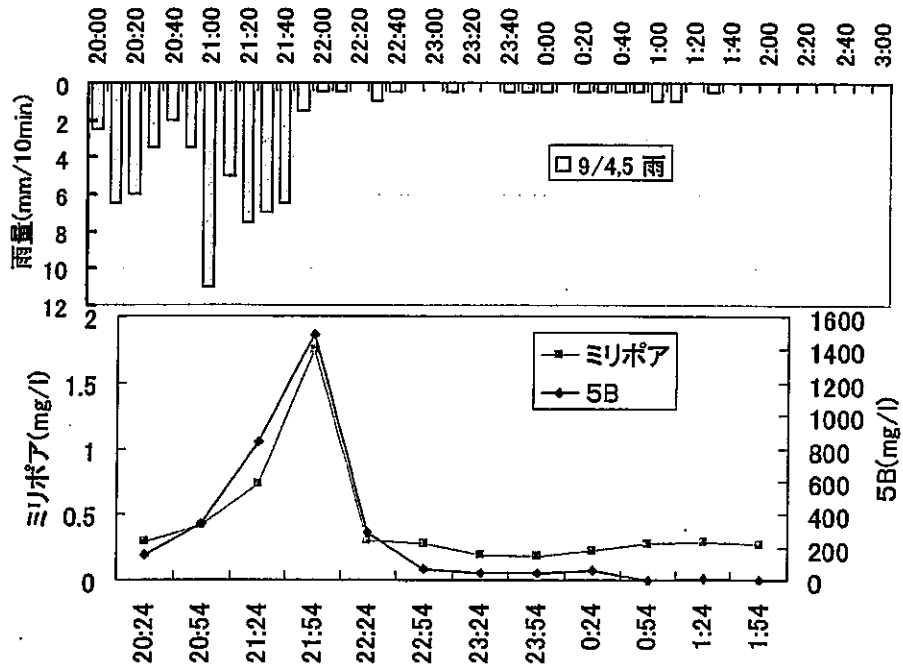
図IV-2-14 8/18 B 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



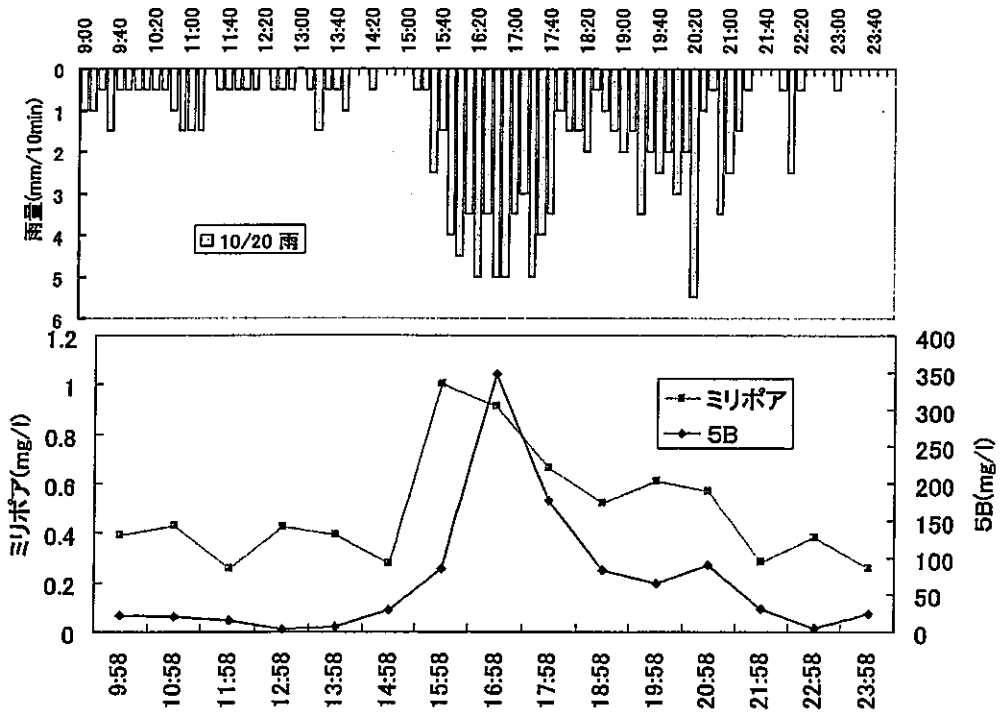
図IV-2-15 8/18 A 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



図IV-2-16 9/4, 5B 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



図IV-2-17 9/4, 5 A 5 B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



図IV-2-18 10/20 B 5 B及びミリポアに残った浮遊砂濃度

IV-3. 降雨、流量および浮遊砂濃度

図IV-3-1～5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値を大洞沢の面積（48.3ha）で割り、水高換算したもの（mm/hour）を使用し、浮遊砂濃度（mg/l）はA、B地点での観測値を用いた。

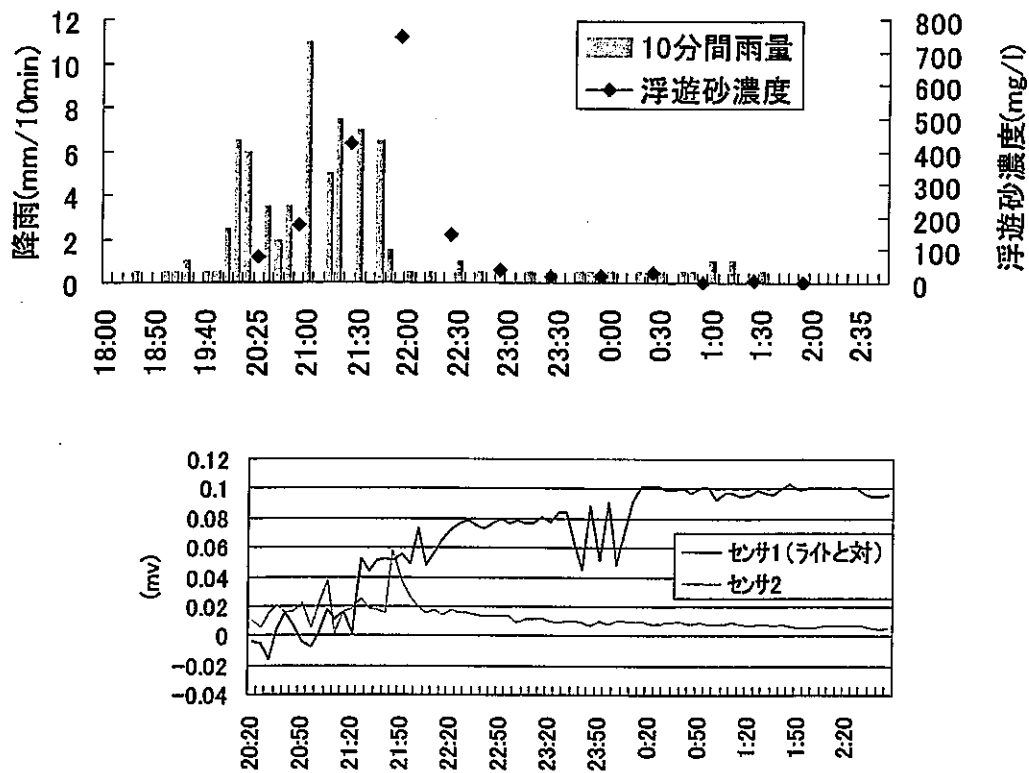
また、今回観測された浮遊砂濃度のピークと流量のピークの関係は、浮遊砂濃度ピークが流量のピークの±30分以内に出現したことから、全て浮遊砂発生タイプ中の「一致型」を示した。

7月29日Bでは、浮遊砂濃度のピークは流量のピークとほぼ同時に出現し、降雨との強い相関を示した。8月18日A、Bでは、浮遊砂濃度と流量は共に二つのピークを持つ。上流に位置するBは、最初の流量のピークで出た浮遊砂濃度がAに比べて濃い。このことから上流の土砂を発生源とした濁りが最初の流量のピーク時における浮遊砂濃度を高くした、と考える。9月4日Bは、流量のピークと浮遊土砂濃度のピークが一致するが、Aでは流量のピークに約30分遅れて浮遊土砂濃度のピークが出現した。

IV-4. 濁度計による浮遊砂濃度の補完

濁度計の観測結果と自動採水器から得た浮遊砂濃度を比較したところ、良好な関係は得られなかった。原因として、汚れがセンサとライトの間に付着したため正確な光の透過が計測できなかった、濁度計の浸水により出力値が安定しない、等が考えられる。

例として2004年9月4日の降雨イベントである図IV-4を挙げる。y軸は、値が大きい程ライトを遮る浮遊砂が少なく、小さいほど水の濁り（浮遊砂）が濃いことを表す。降雨-浮遊砂濃度グラフでは降雨ピークとそれに続く浮遊砂濃度ピークが判るが、濁度計のセンサ1（ライトと対する）は不規則に上下しながら出力値が上昇した。なお、センサ2は観測環境の明るさを相対的に捉えるために設置した。時折浮遊砂濃度の増減に相当する明確なピークは見られなかった。



図IV-4 2004年9月4日, 5日A 濁度計出力例

IV-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値を大洞沢の面積(48.3ha)で割り、水高換算したものの(mm/hour)を使用した。浮遊砂濃度(mg/l)は各地点での観測値を用いた。

また、表IV-5-1に期間降雨データを示した。

図IV-5-1~3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1km²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IV-5-1

7/29Bは、断続的に弱い雨が続いた時に観測された。なお、動きが見やすいように、「浮遊砂の流出ピーク以前」(B1-12)及び「ピークを含む後半」(B13-24)でグラフの色を変えた。「ピークを含む後半」のヒステリシスは、大きく時計回りの円を描く。

図IV-5-2

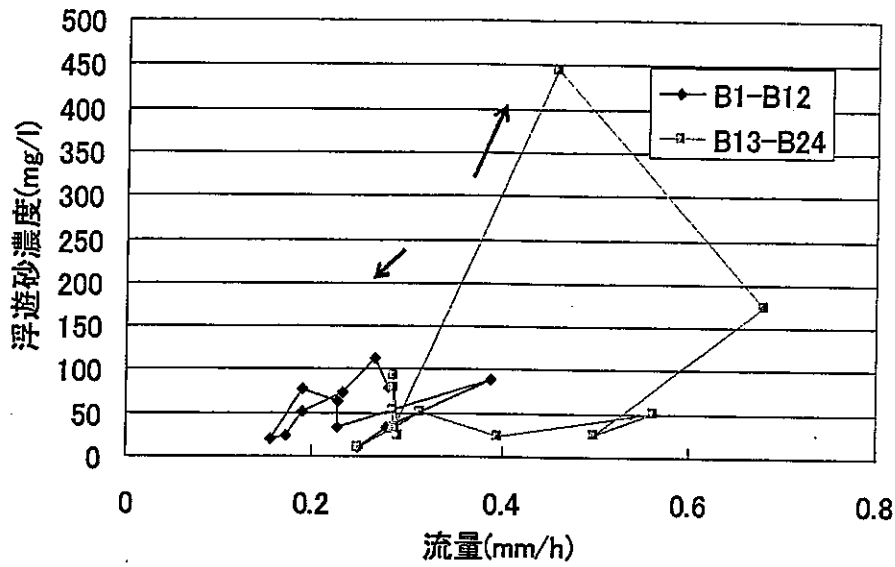
8/18では、採水期間中に2つのピーク雨量が見られた。浮遊砂濃度も、雨量の増減に対応した2つのピークを持つ。集水面積の異なる観測点(下流A:35.6ha、上流B:8.3ha)で同じような動きを示した。他の降雨時に見られたヒステリシスに比べて直線的な動きだが、詳しく見るといびつな時計回りを示している。Bは初めのピークに向かう立ち上がり時の浮遊砂濃度がAに比べて高いが、2度目のピークに向かう立ち上がりの濃度はAとほぼ一致する。しかし、下流に行くほど流量が増え、その分浮遊砂が希釈されることを考えると、Bでの浮遊砂流出量は多いと考えられる。

図IV-5-3

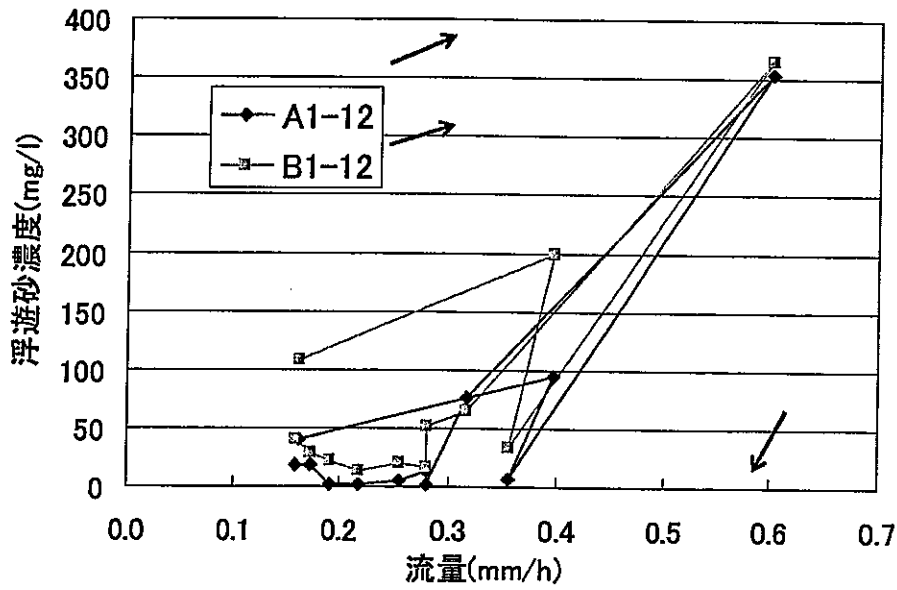
9/4,5でも、弱いピークと強いピークの2つの山を持つ降雨が観測された。初めにA地点で、弱い降雨ピークが減衰し始めた時に、水位の増加をトリガーとした自動採水器による採水が始まった。約20分後、上流のB地点で採水が始まった。A地点では反時計回りのヒステリシスが見られた。B地点では、浮遊砂濃度のピークを過ぎてからの採水と考えられ、そのためヒステリシスは見かけ上直線を示した。

表IV-5-1 期間降雨データ

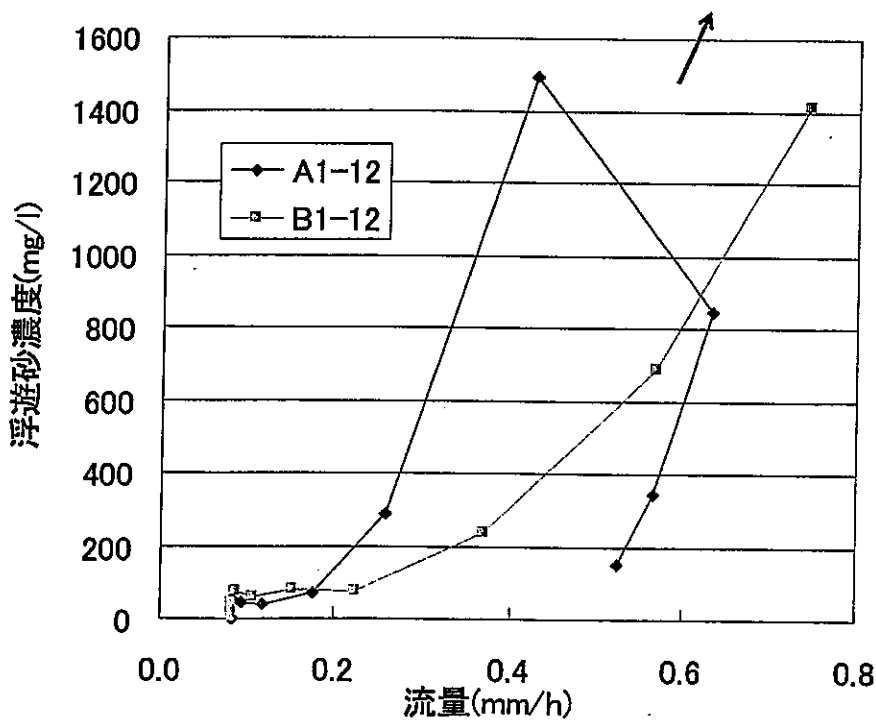
降雨期				期間雨量(mm) 時間 (hour)	
7月29日	7/28 18:10	~	8/1 5:00	170.5	82.5
8月18日	8/17 17:30	~	8/18 1:50	33.5	8.2
9月4,5日	9/4 4:10	~	9/5 21:30	98.5	41.2
10月20日	10/19 8:20	~	10/21 11:00	251	40.4



图IV-5-1
流量-浮遊砂濃度
(7/29 B)



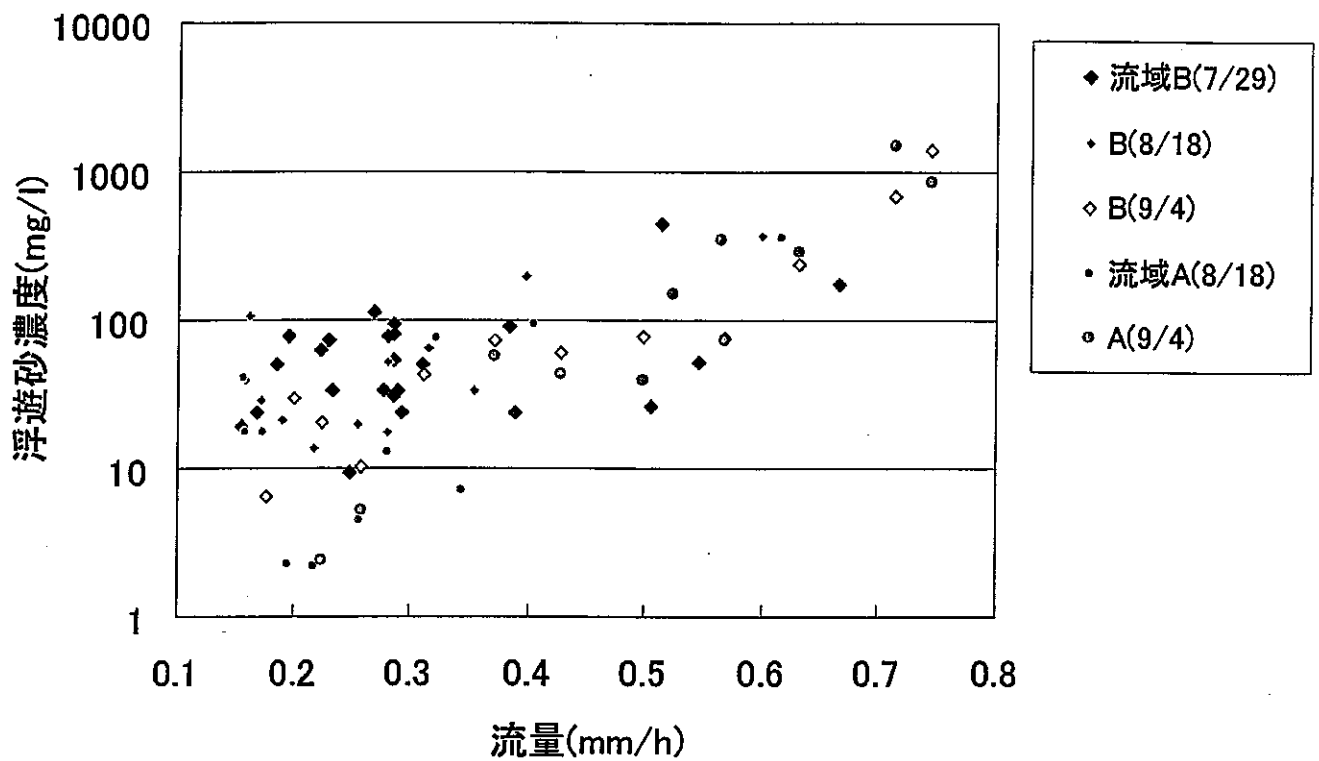
图IV-5-2
流量-浮遊砂濃度
(8/18 A, B)



图IV-5-3
流量-浮遊砂濃度
(9/4,5 A, B)

次に、降雨イベントに関わらず、観測された流量と浮遊砂濃度を一つにまとめた図（図IV-5-4）を示す。縦軸の浮遊砂濃度は対数軸となっている。

図中の青い点（3種類）はB地点で観測されたもの、赤い点（2種類）はA地点で観測されたものである。流量が少ないときは浮遊砂濃度はB地点で高濃度の傾向を示し、A地点では低濃度の傾向を示す。流量が増加するに従い、A、B地点とも浮遊砂濃度の差は小さくなるのがわかる。



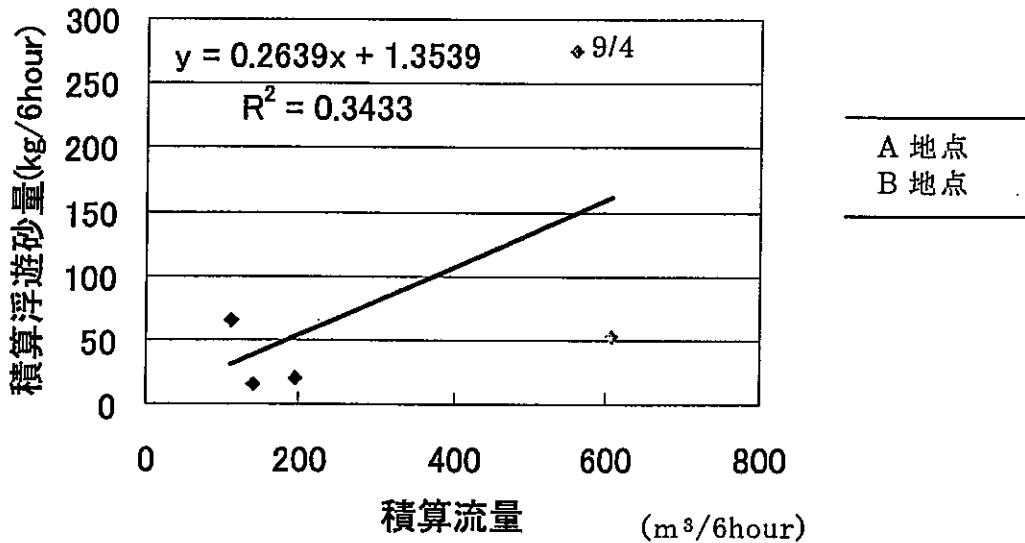
図IV-5-4 流量と浮遊砂濃度

IV-6. 流出浮遊砂量

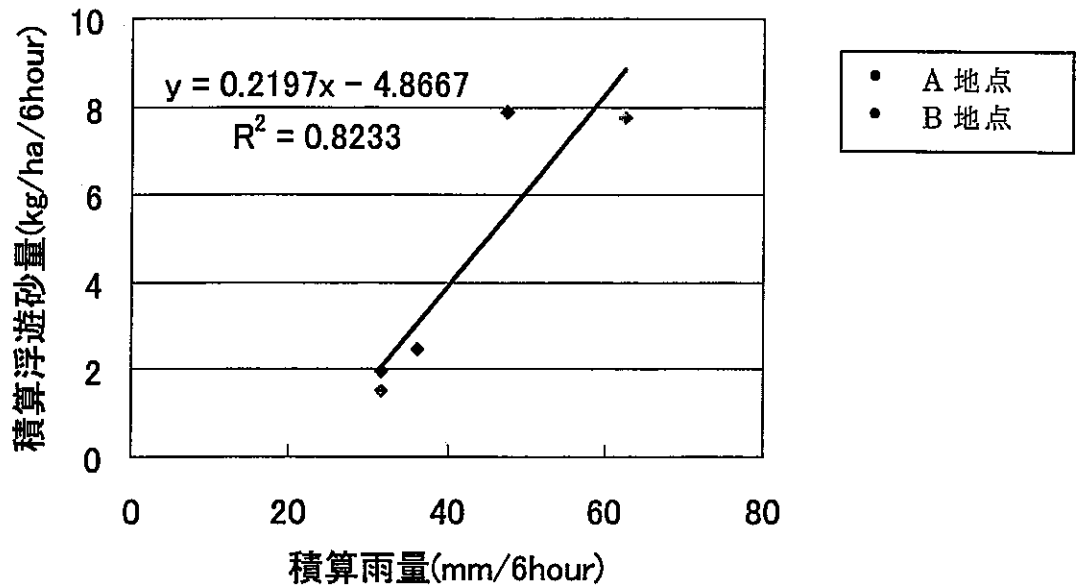
地点A, Bを出口とする各流域(集水域)のピーク流量を含む積算流量($m^3/6hour$)及び積算雨量($mm/6hour$)を示した。同時に流出浮遊砂量を、ピークを含む6時間で積算した値($kg/6hour$)を示し、ヘクタール当りの流出浮遊砂量を示した(表IV-6-1)。また、ピークを含む6時間で積算した流出浮遊砂量と流量の関係を図IV-6-1に、6時間の積算雨量とヘクタール当りの流出浮遊砂量を図IV-4-2に示す。

表IV-6-1 流量・流出浮遊砂量

	雨量			
	(mm)	流量($m^3/6hour$)	浮遊砂量($kg/6hour$)	ha 当り (kg/ha)
7/29B	36.0	195.82	20.74	2.49
8/18B	31.5	140.91	16.26	1.95
8/18A	31.5	606.65	53.55	1.50
9/4B	47.5	111.36	65.96	7.90
9/4A	62.5	557.94	275.84	7.74



図IV-6-1 流量・流出浮遊砂量の関係



図IV-6-2 積算雨量と ha 当り流出浮遊砂量の関係

A, B 両地点で採水した 8 月 18 日及び 9 月 4 日は、両日とも単位面積あたりの浮遊砂流出量が、A 地点よりも B 地点、すなわち源頭部に近いほうが多く測定された。またヘクタール当りの流出浮遊砂量は、1.5kg から 7.9kg と幅があり、そのため「ピークを含む積算浮遊砂量と流量」も関連が薄かったが、「積算雨量とヘクタール当りの流出浮遊砂量」には正の相関関係が見られた。

V. 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。

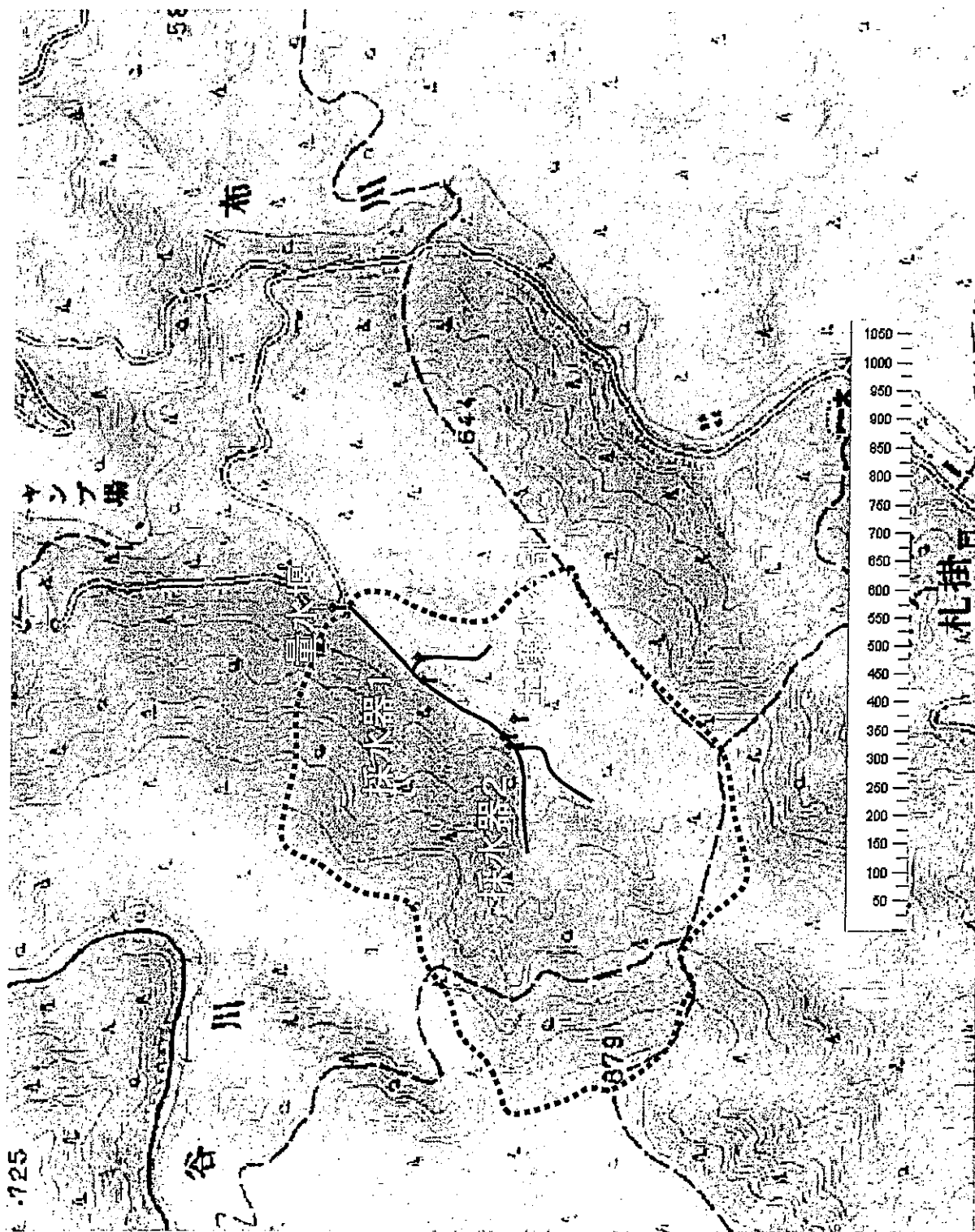
一降雨で流出する浮遊砂量はヘクタール当たり 1.50kg から 7.90kg と、大きな幅を示した。B地点での浮遊砂量が大きいことから、土砂供給源はB地点の更に上流と考えられる。また、積算浮遊砂量は積算雨量との正の相関が強く表れた。従って、大洞沢の年間流出浮遊砂量は、各イベント降雨を積算浮遊砂量と積算雨量の関係式に当てはめ、年間の総イベント降雨に対する積算浮遊砂量を合計して求められると考える。年間流出掃流砂量も同様に、既に矢部によって求められた積算流量と積算流出式を用い、大きな流出イベントに相当する積算掃流砂流出量を合計することで求められる。

少ないデータを通して大洞沢の浮遊砂流出の特徴を述べたが、観測を続けることで流域の特徴がより明白になると思われる。また、浮遊砂中に含まれる有機物の割合や粒度分析を行うことで、大洞沢の浮遊砂流出の動態がより詳しくわかるだろう。

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)

土壤水分計設置箇所

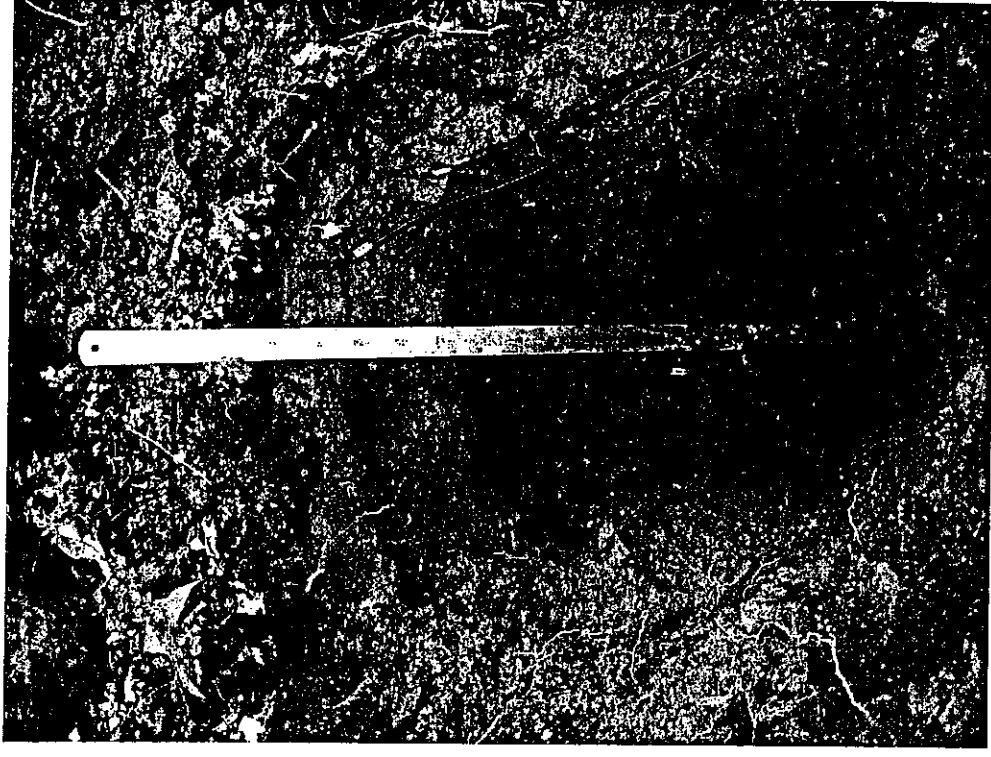


土壤水分計(斜面上)設置状況



2004年10月7日撮影
センサー (ECHOプローブ)設置深度
10, 20, 40, 60, 80cm

土壤水分計(斜面下)設置状況



2004年10月7日撮影
センサー (ECHOプローブ)設置深度
10, 20, 40, 60, 80cm

収集整理した資料

項目	データ期間		(詳細)
過去のチャート紙	1981～1996	2箱	チャート紙一覧表のとおり
過去の流量	1983～1996	データ	委託報告書の数値を入力したもの
過去の流量一部修正	1983～1984	データ	水位読みが1.5cm異なるなどの指摘があり修正したもの
近年のチャート紙	1997～2003	1箱	チャート紙一覧表のとおり
近年の読み値	1997～2004	データ	読み値または修正値
雨量データ	2003～	データ	
12/1設置以降の水圧式水位計データ		データ	
12/1設置以降の水温データ		データ	
関連する資料一式		印刷物	大洞沢水文観測資料、水運用年報(神奈川県企業庁)ほか

1981/6/18 ~ 1997/1/22

1	1	1981/6/18 ~	1981/7/16
	2	1981/7/16 ~	1981/8/26
	3	1981/8/26 ~	1981/9/23
	4	1981/9/23 ~	1981/10/20
	5	1981/10/20 ~	1981/11/19
	6	1981/11/19 ~	1981/12/19
	7	1981/12/19 ~	1982/1/22
2	1	1982/1/22 ~	1982/2/10
	2	1982/2/20 ~	1982/3/17
	3	1982/3/17 ~	1982/4/13
	4	1982/4/13 ~	1982/5/14
	5	1982/5/14 ~	1982/6/17
	6	1982/6/17 ~	1982/7/16
	7	1982/7/16 ~	1982/8/17
	8	1982/8/17 ~	1982/9/13
	9	1982/9/13 ~	1982/9/25
	10	1982/9/25 ~	1982/10/26
	11	1982/10/26 ~	1982/11/27
	12	1982/11/27 ~	1982/12/22
	13	1982/12/22 ~	1983/1/20
3	1	1983/1/20 ~	1983/2/9
	2	1983/2/9 ~	1983/3/9
	3	1983/3/9 ~	1983/4/8
	4	1983/4/8 ~	1983/5/2
	5	1983/5/2 ~	1983/6/3
	6	1983/6/3 ~	1983/7/2
	7	1983/7/2 ~	1983/8/5
	8	1983/8/5 ~	1983/9/7
	9	1983/9/7 ~	1983/10/8
	10	1983/10/8 ~	1983/11/25
	11	1983/11/25 ~	1984/1/9
4	1	1984/1/9 ~	1984/2/20
	2	1984/2/20 ~	1984/3/24
	3	1984/3/24 ~	1984/5/9
	4	1984/5/9 ~	1984/6/27
	5	1984/6/28 ~	1984/8/7
	6	1984/8/7 ~	1984/9/12
	7	1984/9/12 ~	1984/10/29
	8	1984/10/30 ~	1984/12/16
	9	1984/12/20 ~	1985/2/6
5	1	1985/2/9 ~	1985/3/25
	2	1985/3/25 ~	1985/4/22
	3	1985/4/22 ~	1985/5/30
	4	1985/5/30 ~	1985/7/16
	5	1985/7/17 ~	1985/8/28
	6	1985/8/28 ~	1985/10/8
	7	1985/10/8 ~	1985/11/4
	8	1985/11/14 ~	1985/12/28
	9	1985/12/28 ~	1986/2/13

6	1	1986/2/15 ~	1986/4/5
	2	1986/4/7 ~	1986/5/16
	3	1986/5/16 ~	1986/6/24
	4	1986/6/27 ~	1986/7/29
	5	1986/7/29 ~	1986/9/2
	6	1986/9/2 ~	1986/10/3
	7	1986/10/3 ~	1986/11/6
	8	1986/11/6 ~	1986/12/6
	9	1986/12/6 ~	1987/1/9
7	1	1987/1/9 ~	1987/2/17
	2	1987/2/17 ~	1987/3/26
	3	1987/3/26 ~	1987/5/4
	4	1987/5/9 ~	1987/6/17
	5	1987/6/18 ~	1987/7/25
	6	1987/7/30 ~	1987/9/5
	7	1987/9/5 ~	1987/10/8
	8	1987/10/8 ~	1987/11/9
	9	1987/11/9 ~	1987/12/12
	10	1987/12/12 ~	1988/1/6
8	1	1988/1/6 ~	1988/2/5
	2	1988/2/5 ~	1988/3/13
	3	1988/4/11 ~	1988/5/10
	4	1988/5/10 ~	1988/6/4
	5	1988/6/4 ~	1988/7/12
	6	1988/7/12 ~	1988/8/9
	7	1988/8/9 ~	1988/9/8
	8	1988/9/8 ~	1988/10/8
	9	1988/10/8 ~	1988/11/8
	10	1988/11/8 ~	1988/12/12
	11	1988/12/12 ~	1989/1/4
9	1	1989/1/4 ~	1989/2/15
	2	1989/2/15 ~	1989/3/31
	3	1989/3/31 ~	1989/4/7
	4	1989/4/7 ~	1989/5/18
	5	1989/5/26 ~	1989/7/12
	6	1989/7/12 ~	1989/8/23
	7	1989/8/23 ~	1989/10/2
	8	1989/10/2 ~	1989/11/7
	9	1989/11/7 ~	1989/12/2
	10	1989/12/2 ~	1989/12/27
	11	1989/12/27 ~	1990/1/30
10	1	1990/1/30 ~	1990/3/1
	2	1990/3/1 ~	1990/3/22
	3	1990/3/22 ~	1990/4/28
	4	1990/7/7 ~	1990/8/2
	5	1990/8/2 ~	1990/9/19
	6	1990/9/19 ~	1990/11/5
	7	1990/11/10 ~	1990/12/16
	8	1990/12/16 ~	1991/1/31

11	1	1991/2/1 ~	1991/3/20
	2	1991/3/20 ~	1991/4/21
	3	1991/4/21 ~	1991/5/14
	4	1991/5/14 ~	1991/6/29
	5	1991/6/29 ~	1991/8/12
	6	1991/8/12 ~	1991/9/7
	7	1991/9/7 ~	1991/10/5
	8	1991/10/5 ~	1991/11/18
	9	1991/11/18 ~	1992/1/3
12	1	1992/1/11 ~	1992/2/15
	2	1992/2/15 ~	1992/4/2
	3	1992/4/2 ~	1992/5/8
	4	1992/5/8 ~	1992/6/25
	5	1992/6/25 ~	1992/7/27
	6	1992/7/27 ~	1992/9/13
	7	1992/9/14 ~	1992/10/31
	8	1992/10/31 ~	1992/12/10
	9	1992/12/10 ~	1993/1/27
13	1	1993/1/31 ~	1993/3/18
	2	1993/3/18 ~	1993/4/12
	3	1993/4/12 ~	1993/5/26
	4	1993/5/26 ~	1993/7/4
	5	1993/7/4 ~	1993/8/12
	6	1993/8/12 ~	1993/9/29
	7	1993/9/29 ~	1993/11/9
	8	1993/11/9 ~	1993/12/22
	9	1993/12/22 ~	1994/2/4
14	1	1994/2/4 ~	1994/3/15
	2	1994/3/15 ~	1994/4/25
	3	1994/4/25 ~	1994/5/25
	4	1994/5/25 ~	1994/7/11
	5	1994/7/13 ~	1994/8/29
	6	1994/8/30 ~	1994/10/7
	7	1994/10/7 ~	1994/11/24
	8	1994/11/24 ~	1995/1/12
15	1	1995/1/12 ~	1995/3/2
	2	1995/3/5 ~	1995/4/18
	3	1995/4/18 ~	1995/6/1
	4	1995/6/1 ~	1995/7/17
	5	1995/7/17 ~	1995/8/30
	6	1995/8/30 ~	1995/10/17
	7	1995/10/18 ~	1995/11/28
	8	1995/11/28 ~	1996/1/10
16	1	1996/1/10 ~	1996/2/27
	2	1996/2/27 ~	1996/4/10
	3	1996/4/10 ~	1996/5/28
	4	1996/5/28 ~	1996/7/12
	5	1996/7/12 ~	1996/8/12
	6	1996/8/12 ~	1996/9/26
	7	1996/9/25 ~	1996/10/30
	8	1996/10/30 ~	1996/12/9
	9	1996/12/9 ~	1997/1/22

1997/6/4 ~ 2004/3/24

1	1997/6/4	~	1997/7/17
2	1997/7/17	~	1997/8/7
3	1997/9/9	~	1997/10/17
4	1997/10/17	~	1997/11/26
5	1997/11/26	~	1998/1/7
6	1998/1/7	~	1998/2/20
7	1998/2/20	~	1998/3/19
8	1998/3/19	~	1998/5/1
9	1998/5/1	~	1998/6/15
10	1998/6/15	~	1998/7/27
11	1998/7/27	~	1998/9/9
12	1998/9/9	~	1998/10/27
13	1998/11/2	~	1998/12/7
14	1998/12/7	~	1999/1/27
15	1999/1/27	~	1999/3/12
16	1999/3/12	~	1999/4/30
17	1999/4/30	~	1999/6/19
18	1999/6/19	~	1999/8/1
19	1999/8/1	~	1999/8/21
20	1999/8/21	~	1999/10/6
21	1999/10/6	~	1999/11/24
22	1999/11/24	~	2000/1/5
23	2001/1/5	~	2000/2/18
24	2000/2/18	~	2000/4/12
25	2000/4/12	~	2000/6/1
26	2000/6/1	~	2000/7/5
27	2000/7/5	~	2000/8/21
28	2000/8/21	~	2000/10/6
29	2000/10/6	~	2000/11/21
30	2000/11/21	~	2000/12/28
31	2000/12/28	~	2001/2/15
32	2001/2/15	~	2001/4/5
33	2001/4/5	~	2001/5/25
34	2001/10/22	~	2001/12/13
35	2001/12/13	~	2002/2/1
36	2002/2/1	~	2002/3/19
37	2002/3/19	~	2002/5/7
38	2002/5/7	~	2002/6/21
39	2002/6/21	~	2002/8/13
40	2002/8/16	~	2002/9/27
41	2002/9/27	~	2002/11/12
42	2002/11/12	~	2002/12/27
43	2002/12/27	~	2003/2/10
44	2003/2/10	~	2003/3/31
45	2003/3/31	~	2003/5/20
46	2003/5/20	~	2003/6/4
47	2003/6/4	~	2003/7/16
48	2003/7/16	~	2003/7/24
49	2003/7/24	~	2003/9/12
50	2003/9/12	~	2003/10/22
51	2003/10/30	~	2003/12/9
52	2003/12/9	~	2004/1/13
53	2004/1/14	~	2004/2/9
54	2004/2/9	~	2004/3/24

←2001/5/25 2001/10/22までデータ抜け

溪流環境調査……報告書2

森林・溪流環境調査 一 水流出過程調査（溪流水質）

1. 目的と実施内容

(1) 背景

森林はそれが創る土壌を通して、土壌から溪流にかけての水の流れと質に影響し、その結果として溪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溪流水質が反映しており、溪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。森林流域の溪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、溪流水の 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溪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、どのように溪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溪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溪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、溪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）。

(2) 目的

丹沢山地の森林流域から供給される溪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や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。

(3) 実施項目と期間

①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 37 地点より、定期的（平水時に平均で月 1 回程度）に採水・分析する。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）。なお、実施期間は下記のとおりである。

調査地選定：2004 年 6 月～7 月

採水調査：2004 年 8 月 9 日，8 月 27 日，11 月 10 日，12 月 22 日（継続中）

②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）を週 1 回採水・分析する。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（図 2）。なお、実施期間は下記のとおりである。

調査地選定・機器設置：2004 年 6 月 17 日

採水調査：2004 年 6 月 17 日より原則として 1 週間毎（継続中）

これらの年間の分析結果を流域情報に基づいた多変量解析にかけ、水質に影響を及ぼす要因を把握する。最終的には、大気降下物、ブナ衰退、シカ圧などの他チーム・他グループの調査結果とともに総合的に考察できる情報の提供をめざす。

(4) 実施体制

調査責任者は、東京農工大大学院共生科学技術研究部助教授の戸田浩人であり、戸田の指導の下、同大学農学部学生が調査・分析の補助を行う。

大洞沢における週 1 回の定期調査は、神奈川県自然環境保全センターの協力により採水・調査を実施し、試料を一旦冷蔵庫に保管してもらう。

試料水の化学分析は、東京農工大学農学部森林生態学研究室で実施し、当面、同大学において試料水は冷凍保存する。

流域情報（GIS データ）の収集は、神奈川県自然環境保全センターおよび情報チームの協力で行い、渓流水質との関係の統計的な解析は戸田浩人および学生の補助者が実施する。

(5) 実施フロー

①中津川上流域における渓流水質調査

2004年6・7月に中津川上流域の植生・地形等の地理情報、およびおおまかな現地踏査を実施し、採水点を選定する。

2004年8月以降、平水時に月1回程度の採水・分析を定期的に行い、少なくとも1年間継続する。なお、採水時にはpHとEC（電気伝導度）を測定する。

2005年3月の中間報告段階での水質分析結果に応じて、夏期の採水を月1回よりも多くする特徴的な流域の選定を検討する。また、必要に応じて選定流域の土壌調査も検討する。

2005年4月以降、各流域の地理情報（GISデータ）を精査し、流域情報と渓流水質の関係を解析する。

②大洞沢における降雨および渓流水質調査

2004年6月に大洞沢を踏査し採水点を決めるとともに、分析のための降水を採取する装置を設置する。

2004年6月以降、自然環境保全センターの協力によって、原則として週1回、採水点および降水から分析試料を採取する。なお、採水時にはpHとECを測定する。

2005年4月以降、平水時だけでなく洪水流出時の渓流水質変化を調べるため、台風などの大雨時に自動採水された試料の分析を行う。なお、大洞沢における自動採水装置は水・土調査チームの流出量調査によって、2004年6月に設置されている。

2005年10月以降これらの年間の分析結果を流域情報に基づいた多変量解析にかけ、水質に影響を及ぼす要因を把握する。

最終的には、大気降水、ブナ衰退、シカ圧などの他チーム・他グループの調査結果とともに総合的に考察できる情報とする。

2. 調査内容

(1) 中津川上流域における渓流水質調査

① 調査方法

宮ヶ瀬ダム上流に位置する中津川上流域において 2004 年 6 月～7 月にかけて、植生・地形等の地理情報、およびおおまかな現地踏査を実施し、採水点 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)。なお、採水点のうち、塩水 A、本谷 3、本谷 A、境沢 1、境沢 5 は水生生物の調査地点と重複するように設定した。

各採水点より、原則として平水時に平均で月 1 回程度、ただし水質・流量ともに安定する冬期(成長休止期)は間隔を長く、夏期(成長期)はできるだけ短い間隔で採水した。現在まで 2004 年 8 月 9 日、8 月 27 日、11 月 10 日、12 月 22 日の採水を実施した。以降は、少なくとも 1 年間以上をカバーするため、2005 年 10 月頃まで継続する。

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 回供洗いした。

採水時には同時に、渓流水の pH および EC をハンディタイプの pH メータおよび EC メータを用いて測定し、水温も記録した。

採水試料は、5℃以下で保存し、主要イオンである NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ の分析をイオンクロマト・グラフィーで行う。なお、本中間報告では、既採取の 12 月 22 日までの試料について、とりまとめの終了した陰イオンについて報告する。

② 調査結果と考察

a. 渓流水質の変化

採取した渓流水における採取地点ごとの EC、pH および陰イオン濃度の変化を図 3-1～3-13 に示す。青宇治と塩水川流域(図 3-1～3-3)は、EC、pH ともに採水点ごとで安定しており、採取日による違いは少なかった。EC は青宇治が $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 弱で、塩水川流域の $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 前後よりもやや高かった。一方、pH は青宇治、塩水川流域ともに 7.0～8.0 程度で中性よりややアルカリ性であった。陰イオン濃度は、 Cl^- が $1.2\text{mg}/\text{L}$ 前後、 SO_4^{2-} が $1.0\text{mg}/\text{L}$ 前後、 NO_3^- が $0.5\text{mg}/\text{L}$ 前後で安定していた。

本谷川流域(図 3-4～3-7)の EC は、本谷 8 の $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 前後を除くと、塩水川流域と同様に $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 前後であった。pH は 7.0～8.0 程度であった。陰イオン濃度は、 Cl^- で $1.4\text{mg}/\text{L}$ 前後、 NO_3^- で $0.5\text{mg}/\text{L}$ 前後と安定していたが、 SO_4^{2-} は採水点によって $0.8\sim 3.8\text{mg}/\text{L}$ と大きく異なった。特に、 SO_4^{2-} が $3.4\sim 3.8 \text{mg}/\text{L}$ で他の採水点と比べて著しく高かった本谷 8 は、前述のように EC も高かった。

大洞沢（図 3-7）では、EC が $100\mu\text{S/cm}$ 弱、pH は大部分が 7.0~8.0 程度であった。陰イオン濃度は、Cl⁻で 1.5mg/L 前後、SO₄²⁻で 1.1~1.5mg/L と比較的安定していたが、NO₃⁻では大洞左・右とも 8月に約 1.0mg/L であり、これまでの流域と比べて高かった。

境沢流域（図 3-8~3-10）では、EC は $60\sim 80\mu\text{S/cm}$ で安定していたが、pH は大部分が 7.0~8.0 であるものの境沢 6 と境沢 7 で 8月に 7.0 を下回り、やや酸性であった。陰イオン濃度は、Cl⁻で 1.6mg/L 前後、SO₄²⁻で 1.0mg/L 前後と比較的安定していたが、NO₃⁻では採水点によって 0.5~1.0mg/L と異なった。

地獄沢、地北 1 および地北 2（図 3-11）では、EC が地北 2 で $60\sim 100\mu\text{S/cm}$ 、pH は 8月に地北 1 で 8.0 以上、地北 2 で 7.0 未満となり、これまでの流域よりも採水日による変化が大きかった。陰イオン濃度は、Cl⁻で 1.7~2.0mg/L これまでの流域と比べて高く安定し、SO₄²⁻ は 1.0mg/L 前後であった。NO₃⁻は、これまでの流域と比べ、地獄沢と地北 1 で約 0.7mg/L と若干高く、地北 2 では 1.0mg/L 前後と高く安定していた。

唐沢川流域（図 3-12~3-13）では、EC が $60\sim 100\mu\text{S/cm}$ 、pH が 5.5~7.7 と EC、pH ともに採水点および採水日で変動が大きかった。特に pH は 8月に低く、11・12月には 7.0 以上となる変化が一律にみられた。陰イオン濃度も、採水点および採水日で変動が大きく、Cl⁻が 1.4~1.9mg/L、SO₄²⁻ が 1.0~2.1mg/L、NO₃⁻が 0.3~2.1mg/L であった。特に NO₃⁻では、唐沢 1 で 8月に著しく高く、11・12月でも 1.0mg/L 以上と高く、唐沢 5 でも 1.3mg/L 前後と高かった。

b. 渓流水質の特徴

採取地点におけるみかけの流域（集水域）の詳細な地形等の情報は、現在、入手・取りまとめ中であるが、おおまかな植生状況として、広葉樹二次林が優占する地域（地点名：青宇治、塩水 1~7、本谷 1~9）、針広混交林の地域（地点名：大洞左・右、境沢 1~7）、針葉樹人工林の優占する地域（地点名：地獄沢、地北 1・2、唐沢 1~5）に区分し図 1 に示した。

各採水点における調査期間中で平均した EC、pH および陰イオン濃度を、図 4 に示す。EC は、おおむね $50\sim 100\mu\text{S/cm}$ で採水点ごとで安定しているが、広葉樹林が優占する地域よりも針広混交林、針葉樹人工林の地域になるにつれて、標準偏差が大きくなり変動しやすいことがわかる。pH も広葉樹林の地域では 7.0~8.0 で、採水点ごとに安定しており、採水点間も平均値の違いが小さかった。しかし、pH は針広混交林、針葉樹人工林の地域になるにつれて標準偏差が大きくなり、平均値が低くなった。

陰イオン当量濃度の合計は、広葉樹林の地域において、本谷 8 を除き、0.10~0.15mmol/L と低めであった。針広混交林、針葉樹人工林の地域になるにつれて、陰イオン当量濃度の合計が高くなり 0.15~0.25 mmol/L となった。広葉樹林、針広混交林、針葉樹人工林の地域で Cl⁻濃度に著しい違いはみら

れず、陰イオンの当量濃度合計が後の地域ほど高かったのは、 SO_4^{2-} および NO_3^- 濃度が高いためであった。また、広葉樹林の地域でも、本谷 8 のように SO_4^{2-} 濃度の著しく高い採水点がみられた。一方、 NO_3^- 濃度が高かった流域は、針葉樹人工林の地域の唐沢 1 と唐沢 5 につづき、大洞右、境沢 2、境沢 3、地北 2、唐沢 3 と針広混交林、針葉樹人工林の地域にみられた。

地図上でみた流域面積は、本谷 8、境沢 2、境沢 3、唐沢 1、唐沢 2、唐沢 A で小さく、 SO_4^{2-} や NO_3^- 濃度の高い流域と必ずしも全て対応していないが、重なる流域が多かった。流域面積が小さいということは、土壌水が溪流へ直接流入する面積に対して、基盤岩へ浸透し、土壌水がさらに浄化されて流出する面積割合が小さくなると考えられる。つまり、季節（気温）や土壌の肥沃度に左右される、樹木の吸収や微生物による土壌有機物の無機化の影響を、敏感に反映する確率が高いといえる。

これらの値と森林流域の渓流水質を広域で調査した報告（戸田ら、2000）と比較すると、EC および pH は報告の範囲内であり、陰イオン濃度のうち Cl⁻は低く、 SO_4^{2-} は同程度、 NO_3^- はやや高めであった。 NO_3^- 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（Ohruai and Mitchell, 1997 ; Ohte et al., 2000 ; 戸田, 2002）と同程度の濃度であった。

本調査地で渓流水の NO_3^- 濃度が高い流域は、針葉樹人工林化による原因か、そもそも人工造林を行うような土地条件のよい地域は土壌が肥沃で硝化が活発であるためか、流域面積が小さいためか、現段階では特定できない。このような流域情報を精査し、重複する要因を多変量解析によって分析することで、主な原因の解明や予測等に役立てることができる。また、上述のような特徴のある流域については、今後、溪流を踏査しておく必要がある。

（2）大洞沢における降雨および渓流水質調査

①調査方法

2004年6月17日に大洞沢を踏査し採水点を決めるとともに、分析のための降水を採取する装置を設置した（図2）。以降、自然環境保全センターの協力によって、原則として週1回、採水点および降水から分析試料を採取している。なお、大洞1での採水は、この支流域で溪間工事がはじまったため2004年7月14日までで、2004年8月18日からは本流側の大洞4で採水を継続している。上流の大洞2は当初から継続して採水しており、水・土チームによって出水時の自動採水装置が設置されている。また、大洞2は中津川上流域の採水点における大洞左と重複している。

降水採取装置は、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。

採水方法、pHとECの測定、主要イオンの分析は、「（1）中津川上流域

における渓流水質調査」と同様である。

②調査結果と考察

EC, pH および主要陰イオン濃度について、大洞沢の渓流水質を図 5, 大洞沢で採取した降水の水質を図 6 に示す。

大洞 1 は調査期間が短いですが、EC は $50\sim 100\ \mu\text{S}/\text{cm}$ と変動し、pH は $7.5\sim 8.0$ で安定していた。陰イオン濃度は、Cl⁻が $1.5\text{mg}/\text{L}$ について、NO₃⁻が $1.0\text{mg}/\text{L}$ 以上と SO₄²⁻よりも高かった。

大洞 4 は、EC が $70\sim 100\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 、pH が $6.5\sim 7.7$ であり、明瞭ではないものの、それぞれ夏期から冬期にかけて低下する傾向がみられた。陰イオン濃度の中では、NO₃⁻が同様に夏期から冬期にかけて 1.2 から $0.8\text{mg}/\text{L}$ 程度に低下した。Cl⁻は $1.5\sim 2.0\text{mg}/\text{L}$ で季節にかかわらず変動し、SO₄²⁻は $1.1\text{mg}/\text{L}$ 前後で安定していた。

大洞 2 の EC は、 $50\sim 120\ \mu\text{S}/\text{cm}$ と広範囲を変動したが、6~9 月より 10~2 月で変動範囲が小さくなった。pH は $7.9\sim 6.8$ であり、明瞭ではないものの、夏期から冬期にかけて低下する傾向がみられた。陰イオン濃度では、NO₃⁻が 7・8 月に $1.0\sim 1.6\text{mg}/\text{L}$ と高く、10~2 月では $0.7\sim 0.8\text{mg}/\text{L}$ に低下した。Cl⁻は、 $1.3\sim 2.0\text{mg}/\text{L}$ で季節にかかわらず変動した。SO₄²⁻は、7 月に $1.5\text{mg}/\text{L}$ と高い時期があるものの、その他は $1.0\sim 1.2\text{mg}/\text{L}$ であった。

降水の EC は、 $20\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 前後と低いことが多く、時折 $50\ \mu\text{S}/\text{cm}$ を超えることもあった。pH は、おおむね $5.5\sim 6.5$ で酸性雨とはいえない通常の降水であるが、 4.0 程度の強い酸性を示すこともあった。陰イオン濃度は、渓流水に比べて全体的に低かったが、変動が激しく高濃度を示すこともあった。

大洞沢における渓流水の NO₃⁻濃度は、全国の森林流域（戸田ら、2000）とくらべてやや高く、夏期の高い NO₃⁻濃度は、関東山地の窒素飽和が懸念されている流域（Ohrui and Mitchell, 1997 ; Ohte et al., 2000 ; 戸田, 2002）と同程度の濃度であった。また、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⁻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、大洞沢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。

今後、大洞沢で水・土チームによって観測されている流出水量および降水量とともに解析し、窒素など元素の流入-流出収支や流出パターンを把握する。また、大洞沢に設置された自動採水装置によって、平水時だけでなく洪水流出時の渓流水質変化を調べ、窒素など元素の流出に対する寄与を明らかにする必要がある。

3. まとめ

中津川上流域および大洞沢における調査は、まだ1年間を経過していない。週1回採水の大洞沢の調査で、水質の季節変動が認められたことから、少なくとも1年間分の水質調査から詳細な解析を行うべきであるが、現在までに明らかになった傾向として以下のことが挙げられる。

中津川上流域におけるECは50~100 μ S/cm、pHは6.0~8.0であった。広葉樹林が優占する地域では、ECおよびpHともに採水点ごとに安定していたが、針広混交林、針葉樹人工林の地域になるにしたがい、標準偏差が大きくなり変動しやすくなった。また、pHは広葉樹林の地域では7.0~8.0で採水点間も違いが小さかったが、針広混交林、針葉樹人工林の地域になるにつれて低くなった。陰イオン当量濃度の合計は、広葉樹林の地域において、0.10~0.15mmol/Lと低く、針広混交林、針葉樹人工林の地域になるにつれて、0.15~0.25mmol/Lと高くなった。広葉樹林、針広混交林、針葉樹人工林の地域でCl濃度に著しい違いはみられず、SO₄²⁻およびNO₃⁻濃度が前者ほど高い傾向であった。また、SO₄²⁻およびNO₃⁻濃度の特に高い流域は、流域面積が小さい場合が多かった。

大洞沢のECは夏期に変動が大きく冬期に小さくなり、pHは夏期に高く冬期に低くなる傾向があった。陰イオン濃度では、NO₃⁻濃度に夏期で高く冬期で低い傾向がみられたが、Clは季節にかかわらず変動し、SO₄²⁻は比較的安定していた。

これらの値は、既往の森林流域の渓流水質と比べ、EC、pH、SO₄²⁻で同程度、Clで低く、NO₃⁻でやや高めであった。NO₃⁻濃度の高い流域は、窒素飽和が懸念されている流域と同程度の濃度で、大洞沢の夏期にNO₃⁻濃度が高い現象は、冬雨型の気候下では窒素飽和の状態とされている。少なくとも大洞沢等のNO₃⁻濃度の高い流域は、森林生態系の浄化機能が衰えている可能性が指摘される。

このように中津川上流域では、全ての森林流域で浄化機能が高度に発揮され、一様にきれいな渓流水質を有しているわけではなく、様々な要因によって渓流水質が変動していることがわかった。したがって、最終目的である水質形成の影響要因の解析し、将来的に水質を低下させる要因として普遍的なものと丹沢特有のものを抽出することが、本調査の継続によって可能であるといえる。

今後、同様の調査を継続するとともに、流域情報(GISデータ)を精査し、例えばNO₃⁻濃度の高くする要因を多変量解析によって分析することで、渓流水質を決定する主な原因の解明や、将来予測等に役立てる基礎資料を提示する。また、大洞沢における流出水量の情報とともに解析し、丹沢山地の清冽な水供給機能の評価し、水質低下を抑制す政策決定のための基礎的情報を提供する。

4. 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
- Ohri, 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. Jhonson, 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
- 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渓流水質. *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

5. 本調査にかかわる活動記録

2004年4月19日:

水と土再生調査のグループ打合わせ (東京大学農学部会議室)

2004年11月13日:

丹沢大山水系の水質調査説明会 (神奈川県自然環境保全センター) における講演「森林の水質形成機能」

2005年1月7日:

平成16年度第1回研究推進支援研修会 (神奈川県自然環境保全センター) における講演「森林生態系の物質循環と水質形成」

2005年1月21日:

第6回丹沢大山保全・再生セミナー (かながわ県民活動サポートセンター) における報告「森林生態系の水質形成・浄化機能」

2005年1月24日:

水と土再生調査のグループ打合わせ (東京大学農学部会議室)

2005年3月2日:

丹沢再生への挑戦 No.27 (神奈川新聞) における記事の掲載
「水と森の恩恵を知る」

至 宮カ瀬ダム

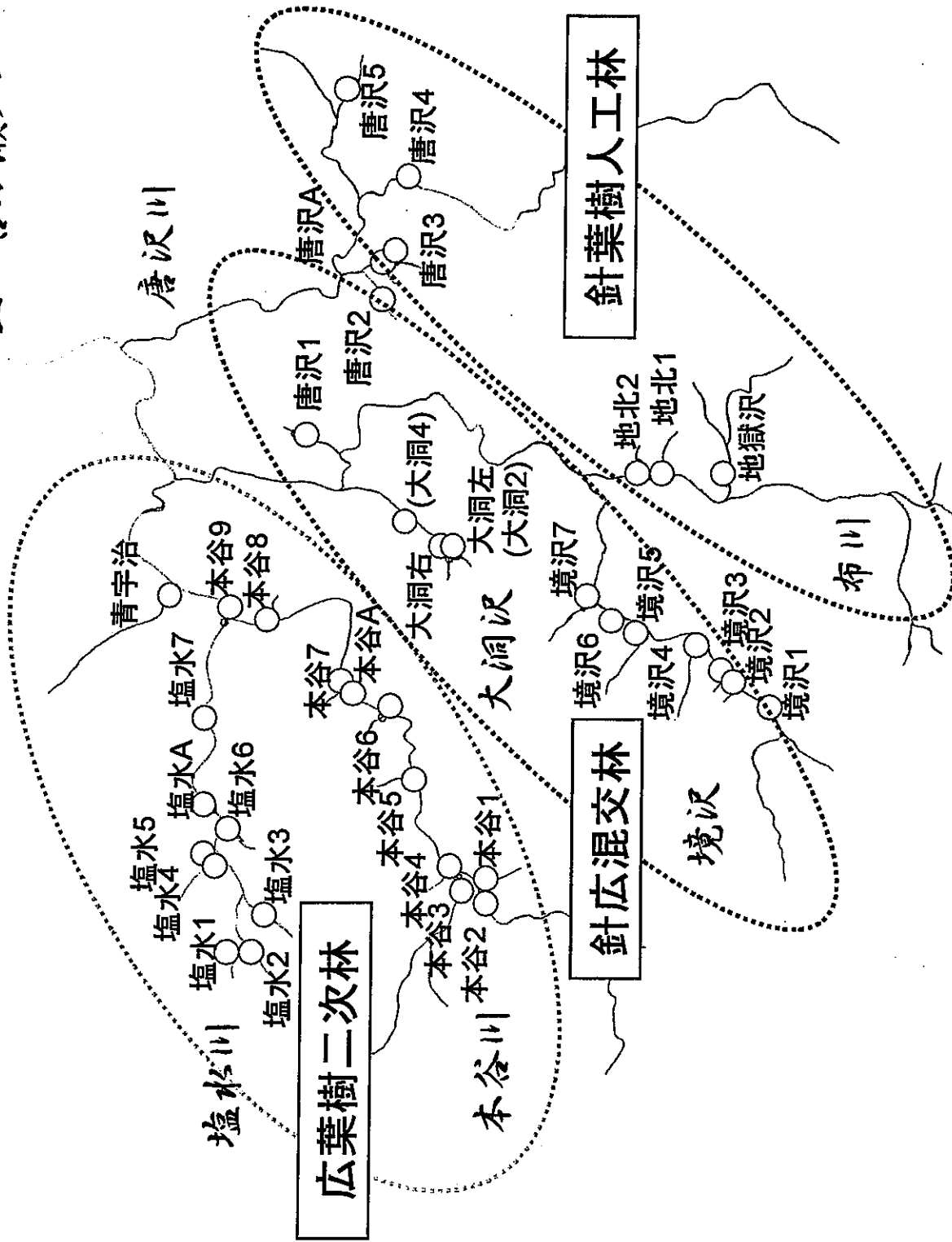
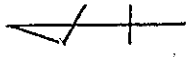


図1 中津川上流域の採水点

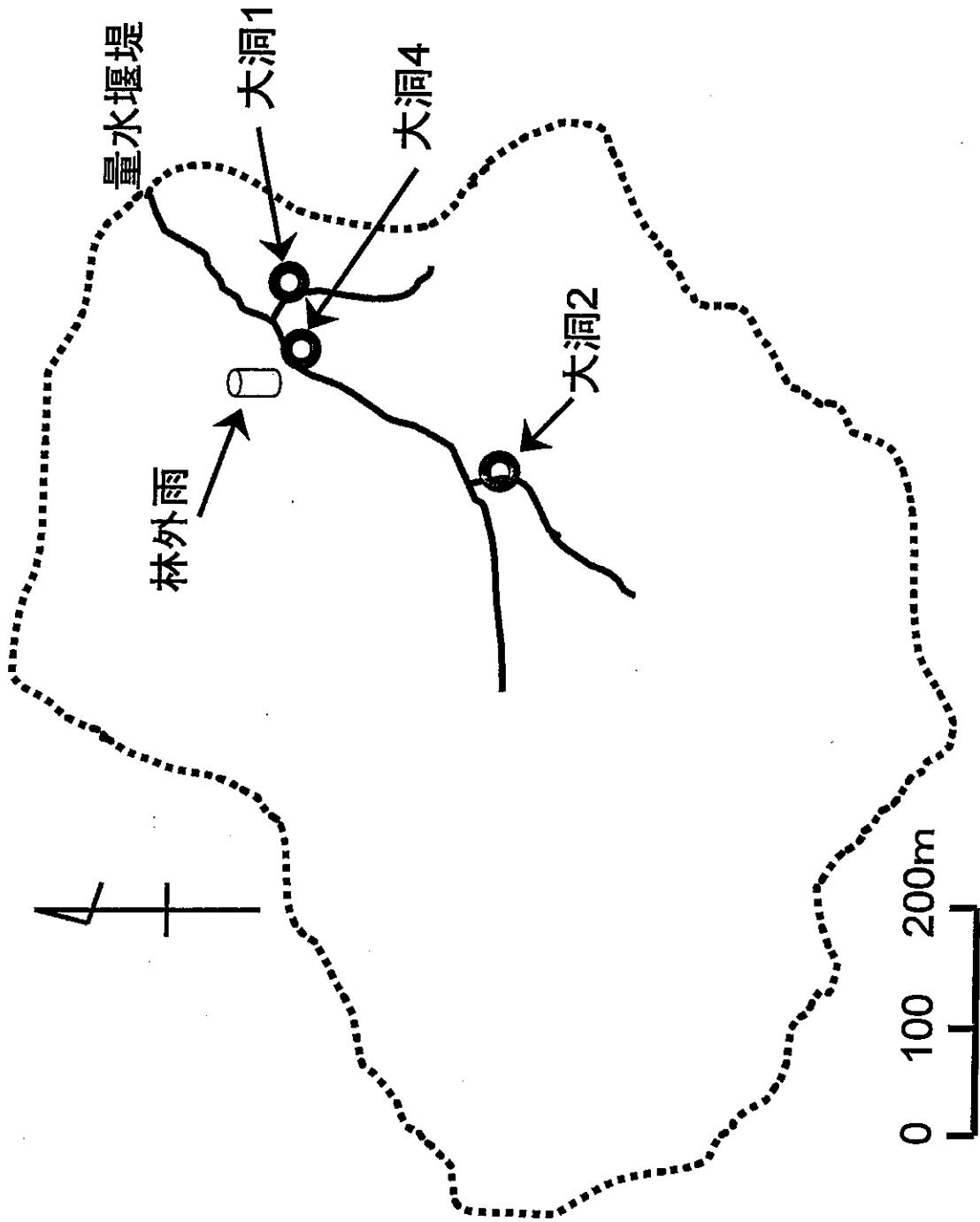


図2 大洞沢の採水点

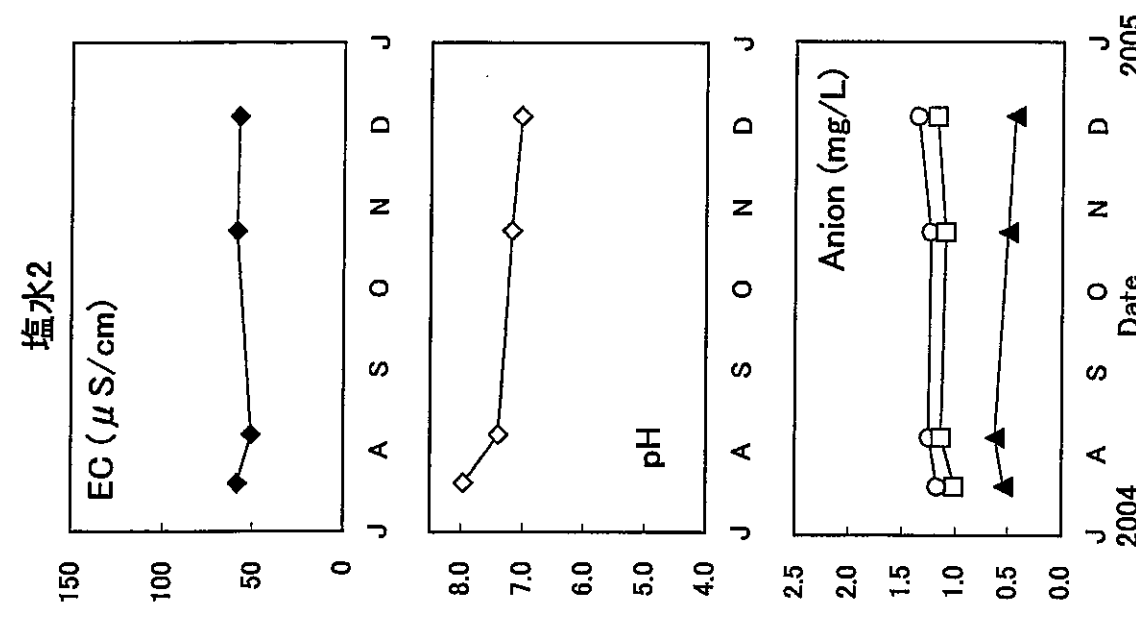
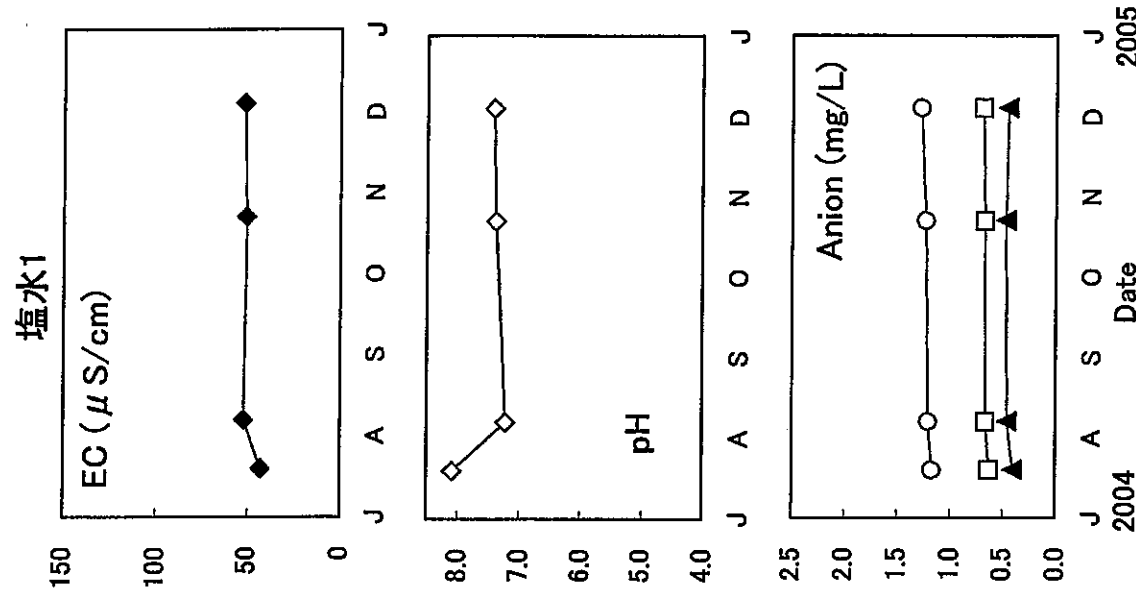
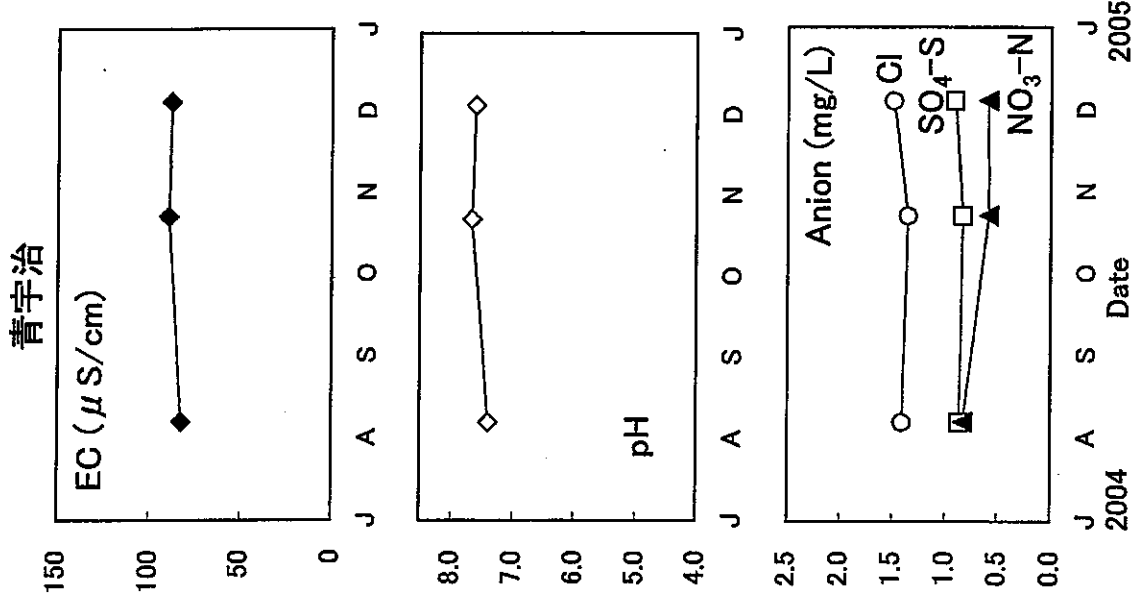


図3-1 中津川上流域の水質(その1)

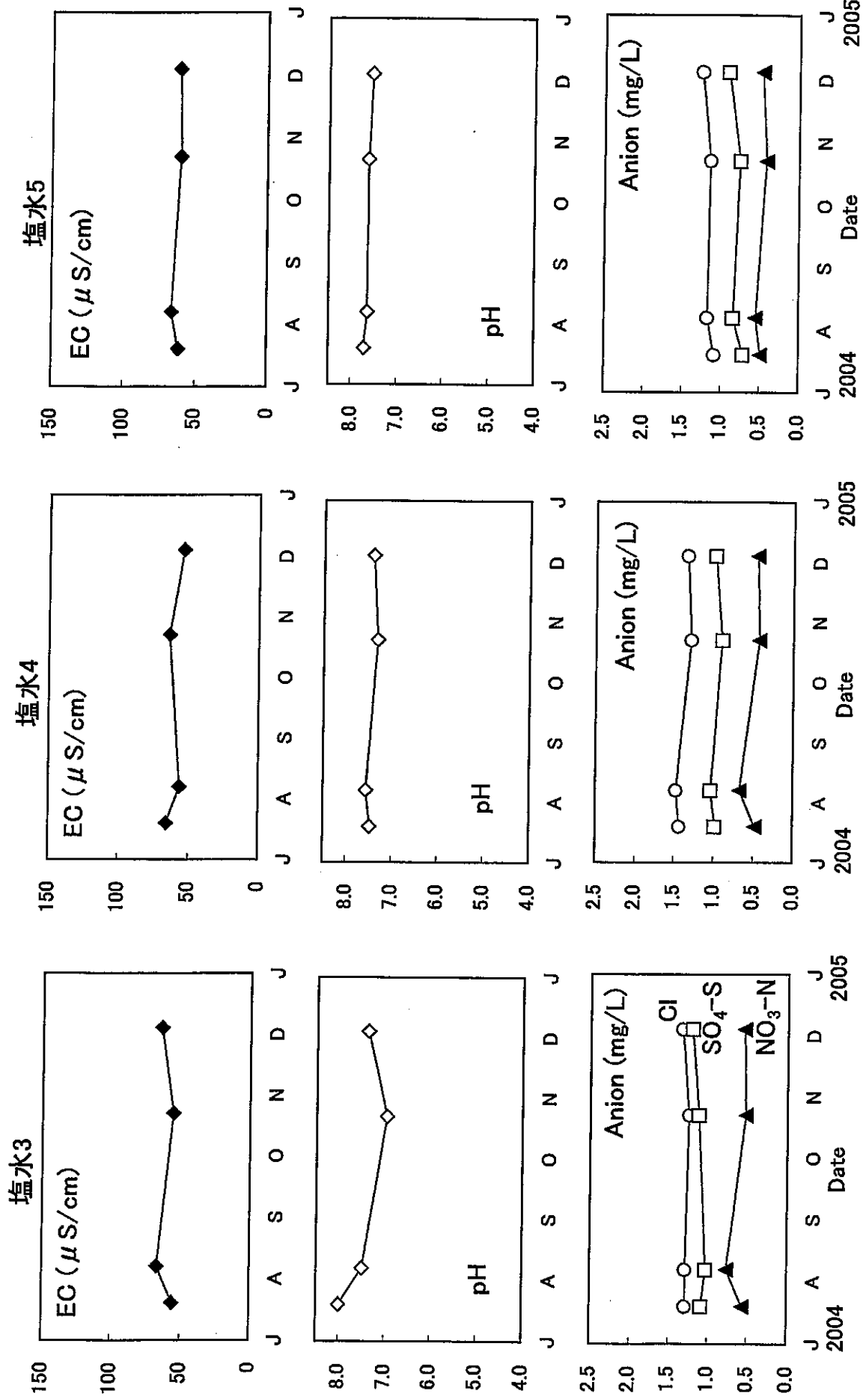


図3-2 中津川上流域の水質(その2)

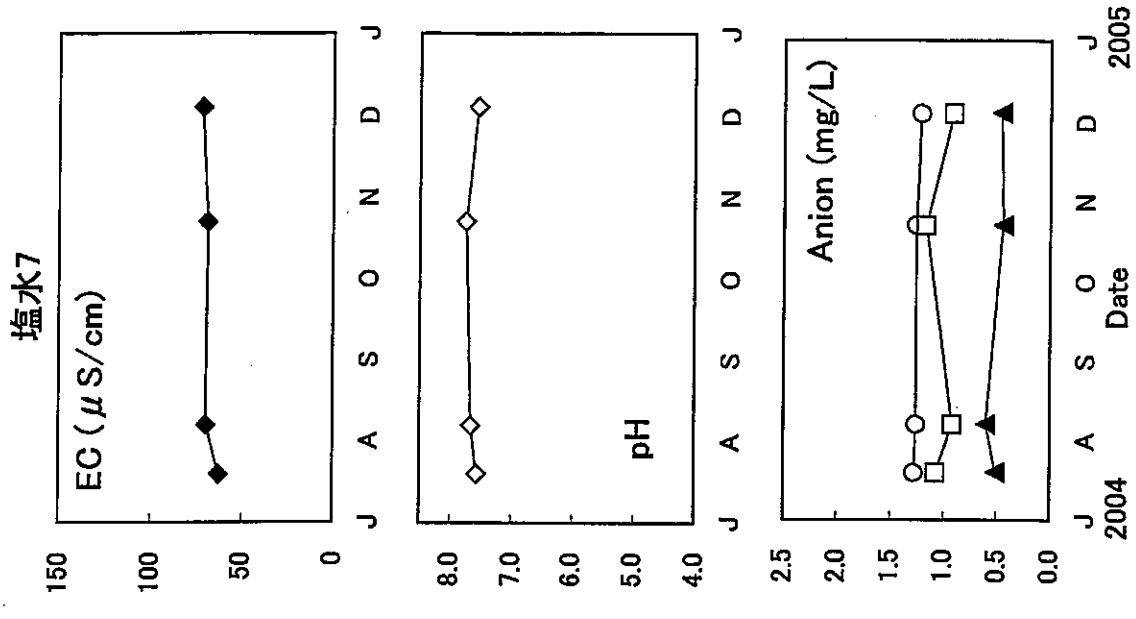
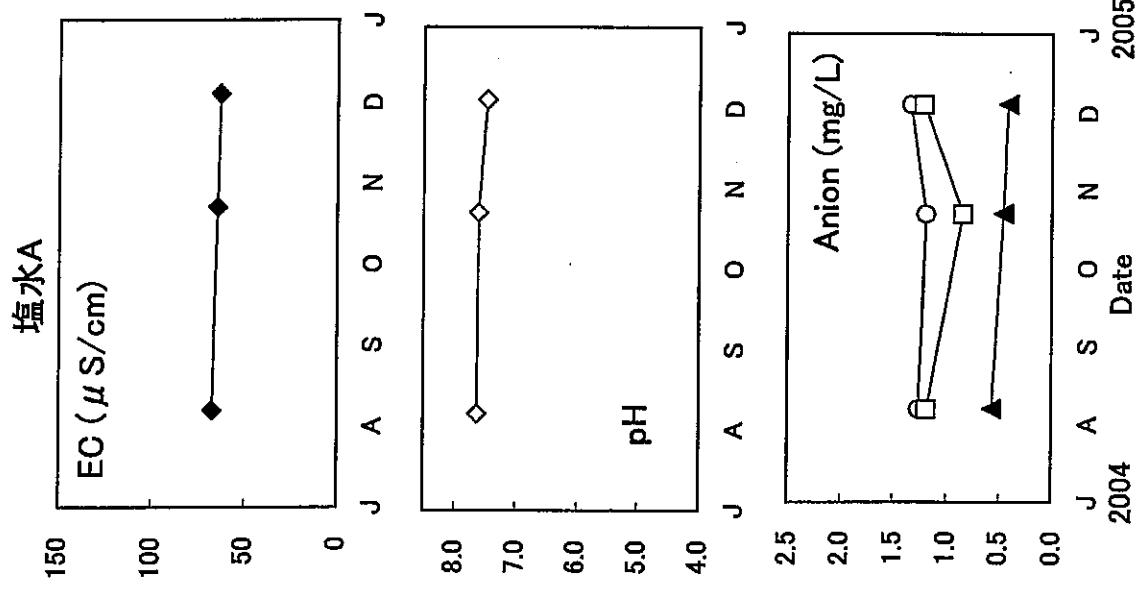
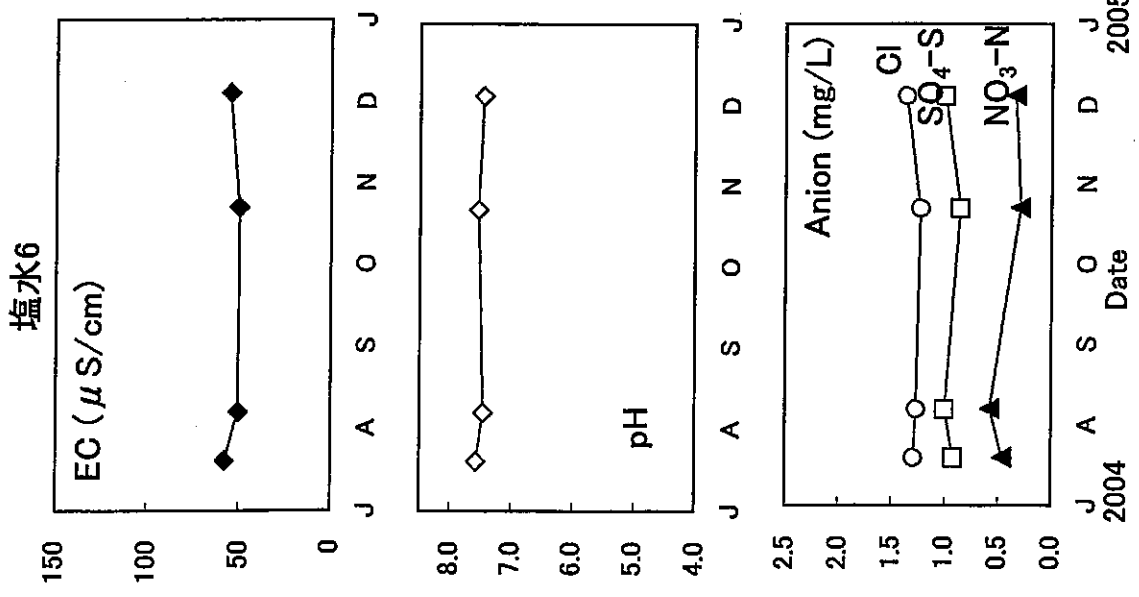


図3-3 中津川上流域の水質(その3)

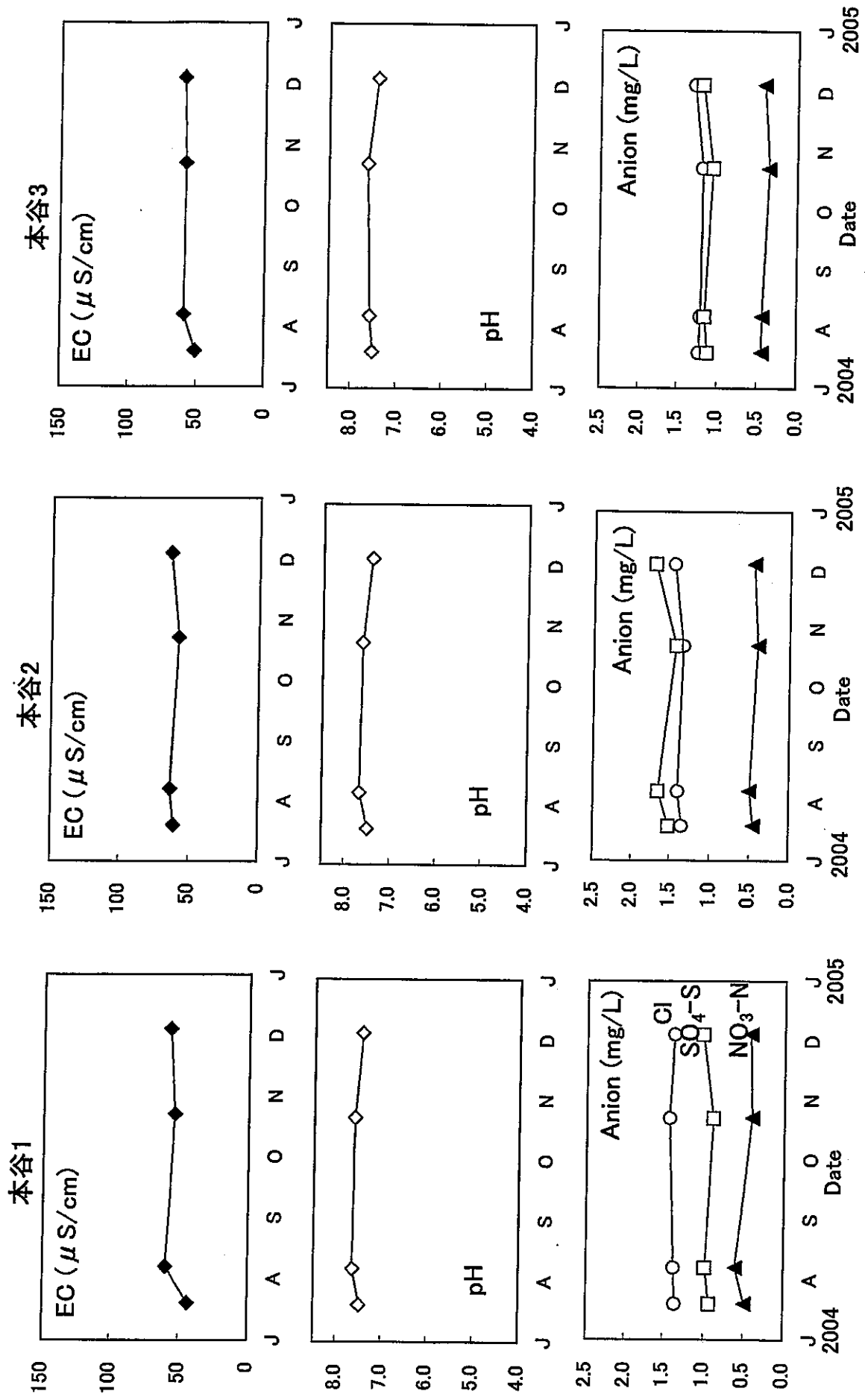


図3-4 中津川上流域の水質(その4)

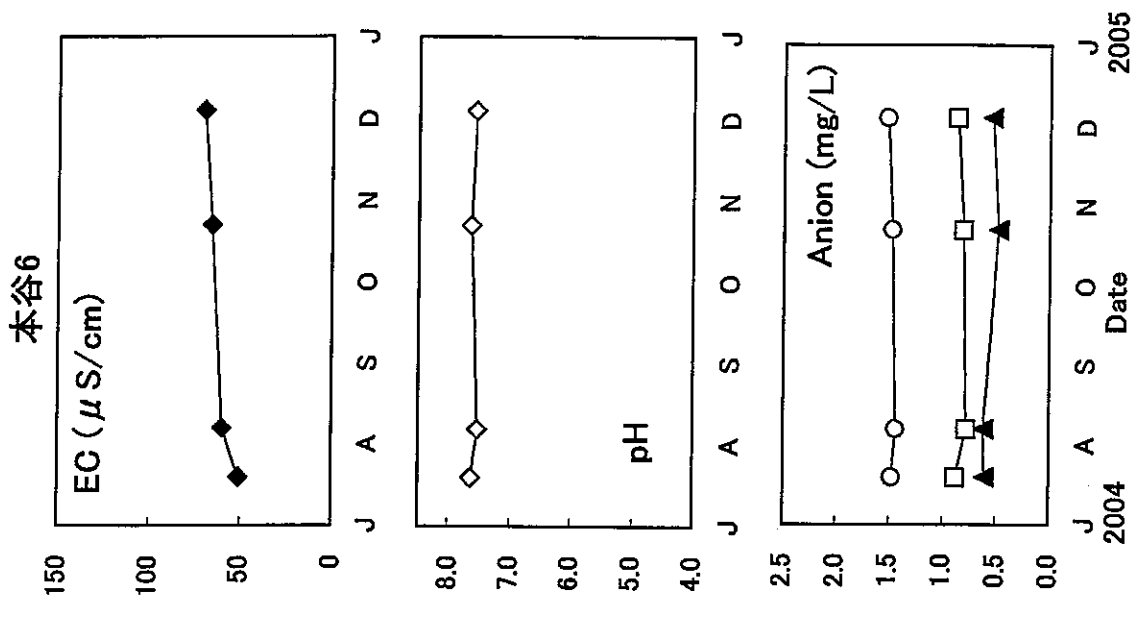
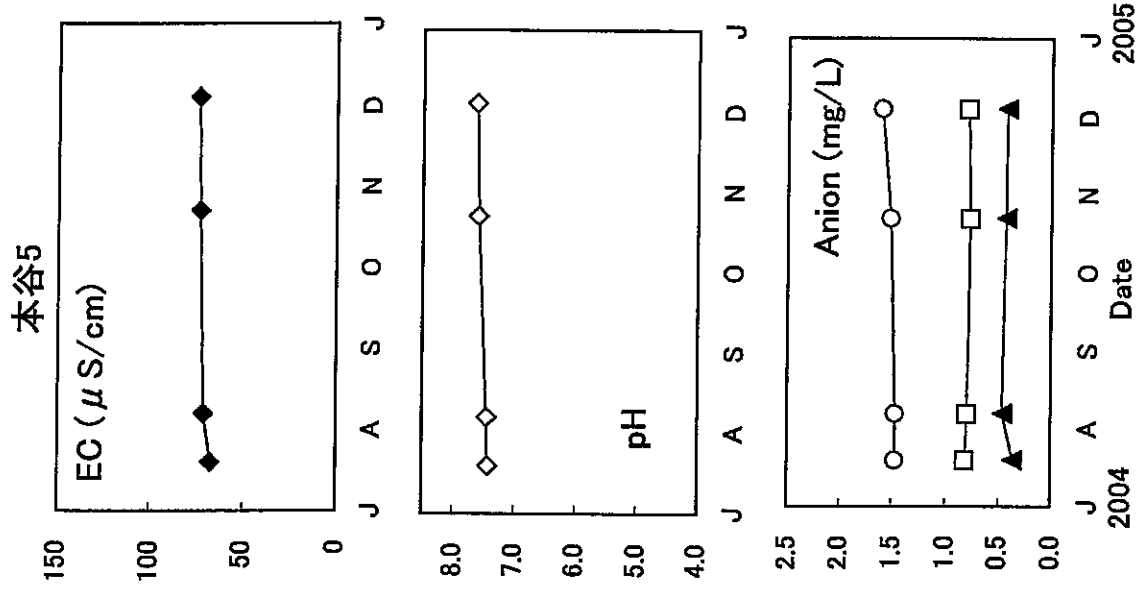
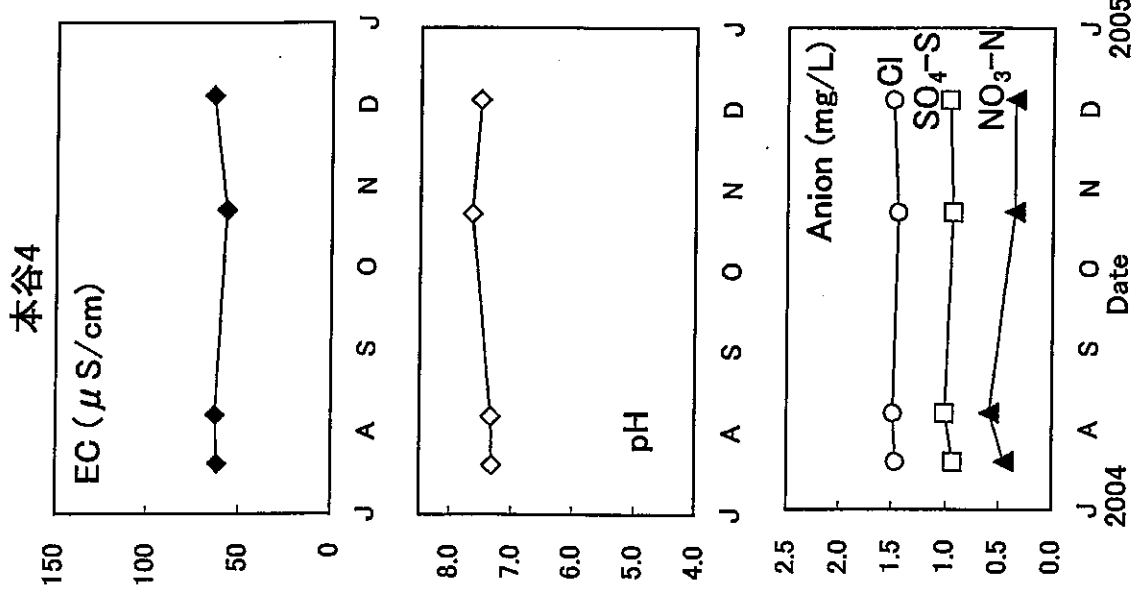


図3-5 中津川上流域の水質(その5)

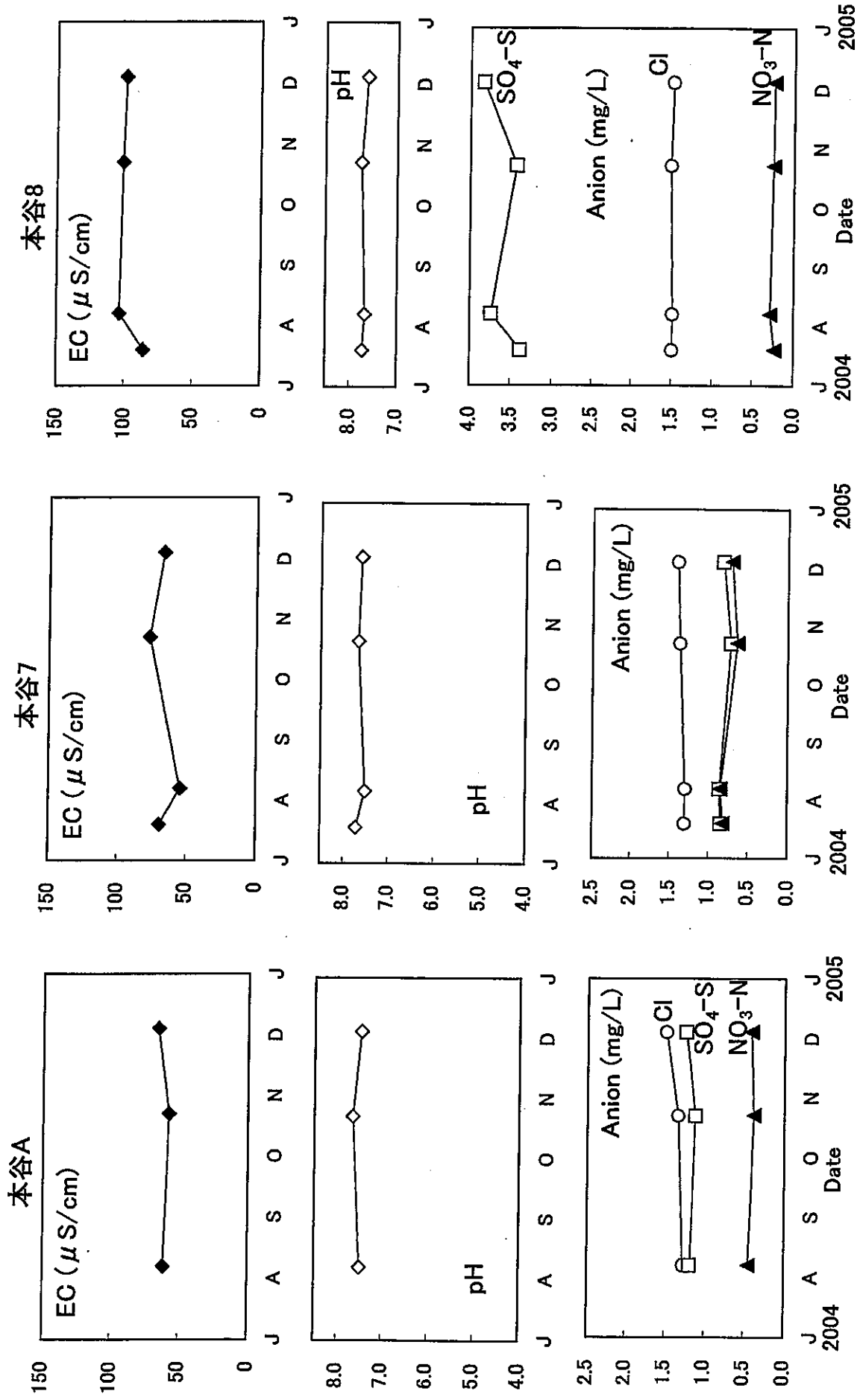


図3-6 中津川上流域の水質(その6)

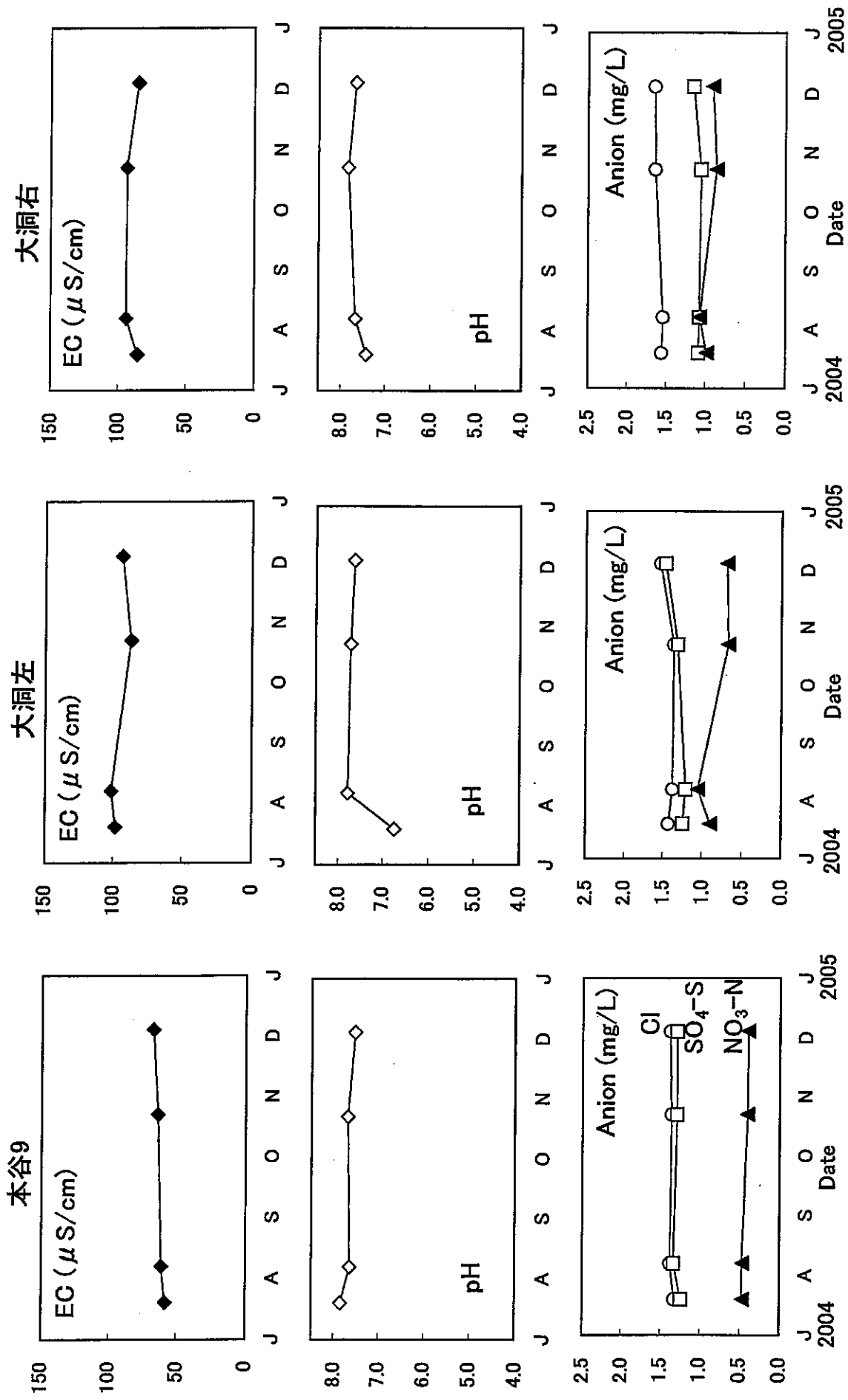


図3-7 中津川上流域の水質(その7)

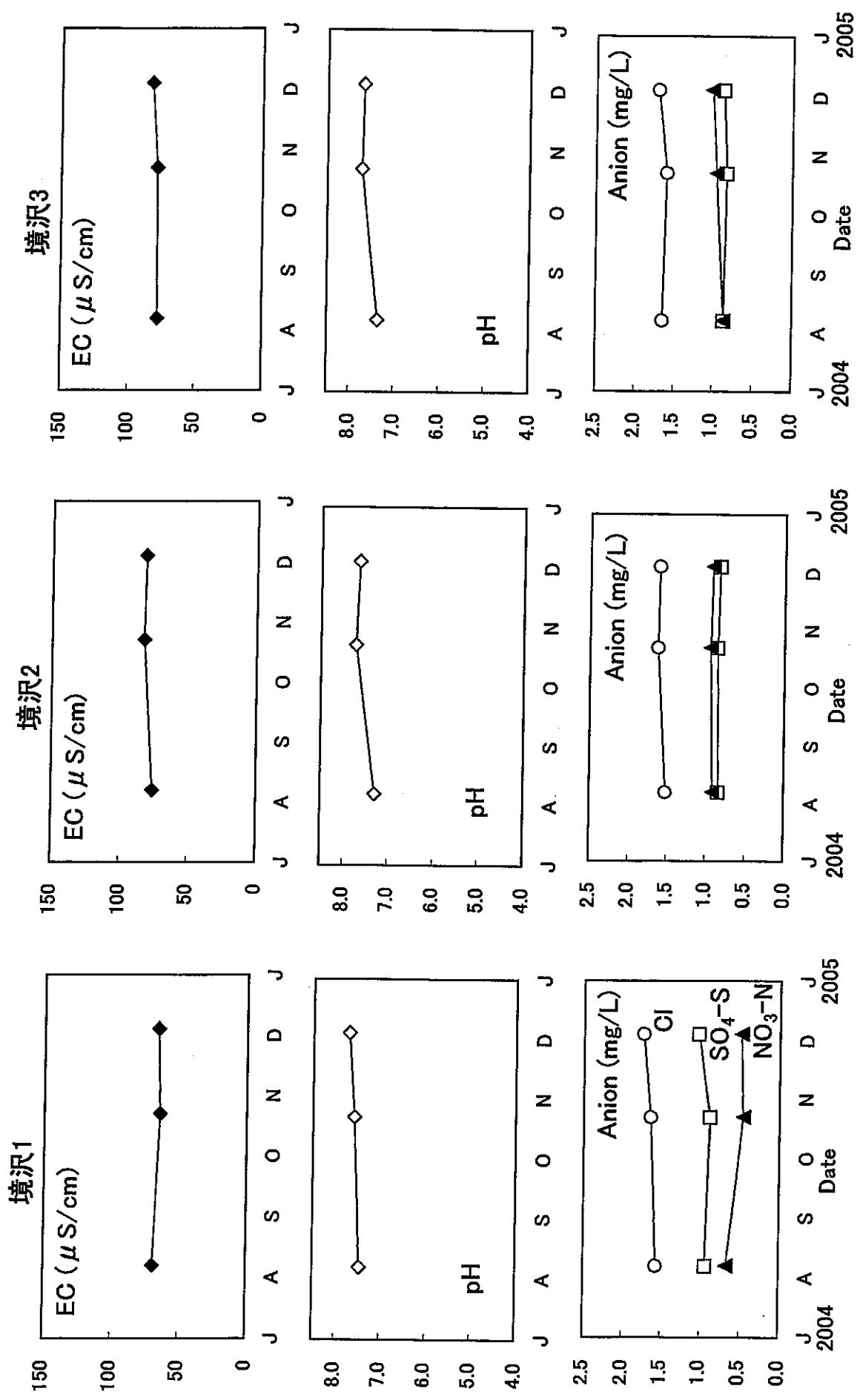


図3-8 中津川上流域の水質(その8)

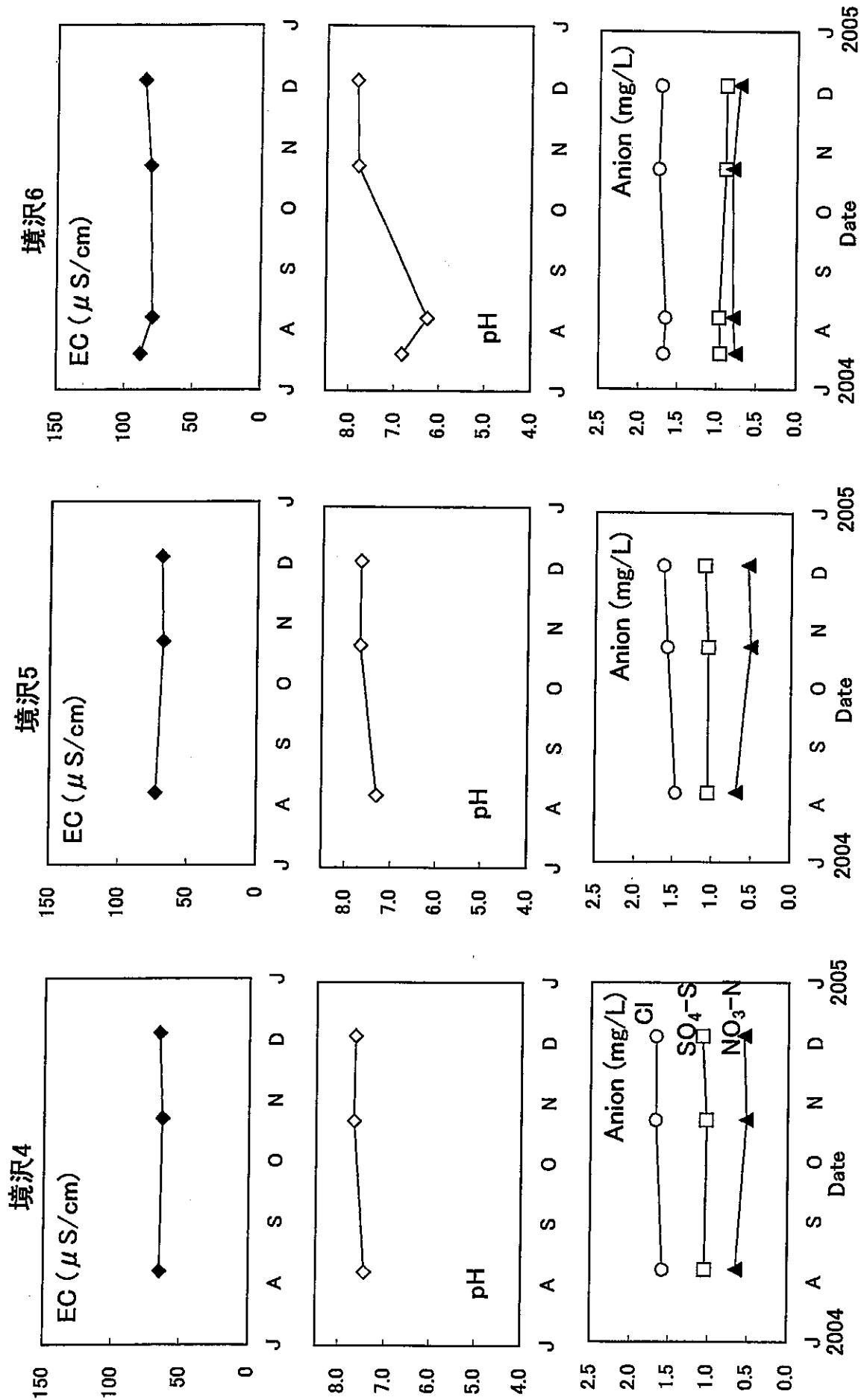


図3-9 中津川上流域の水質(その9)

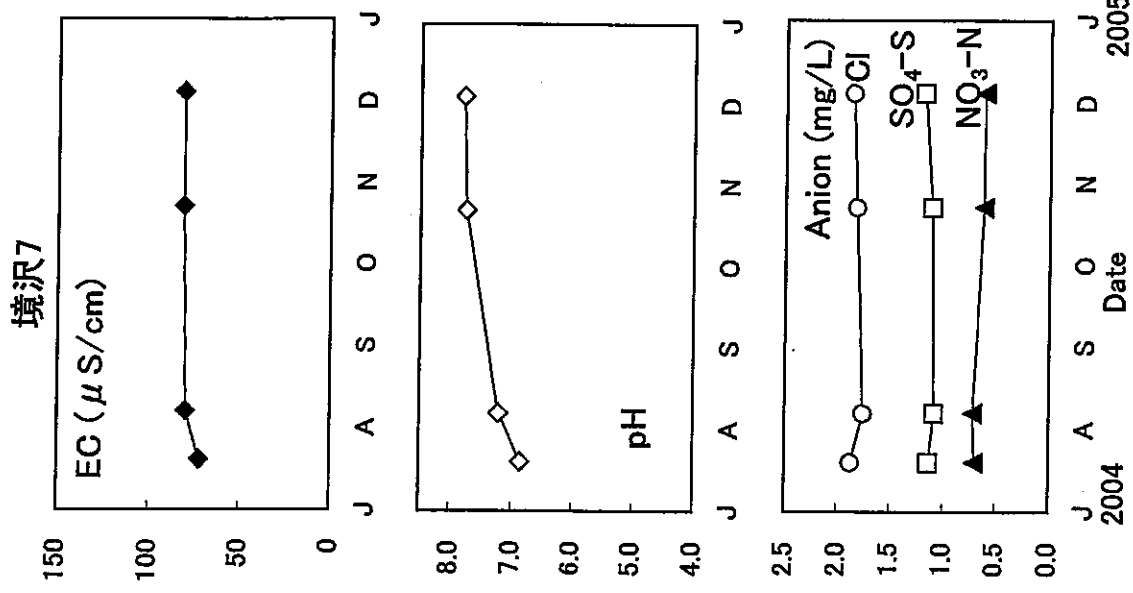


図3-10 中津川上流域の水質(その10)

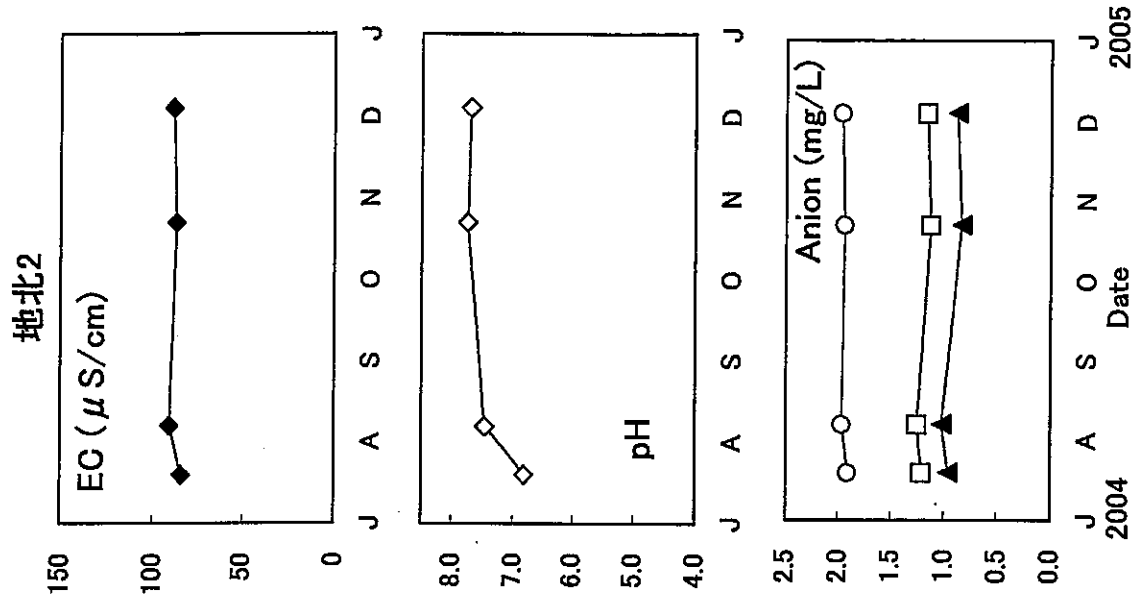
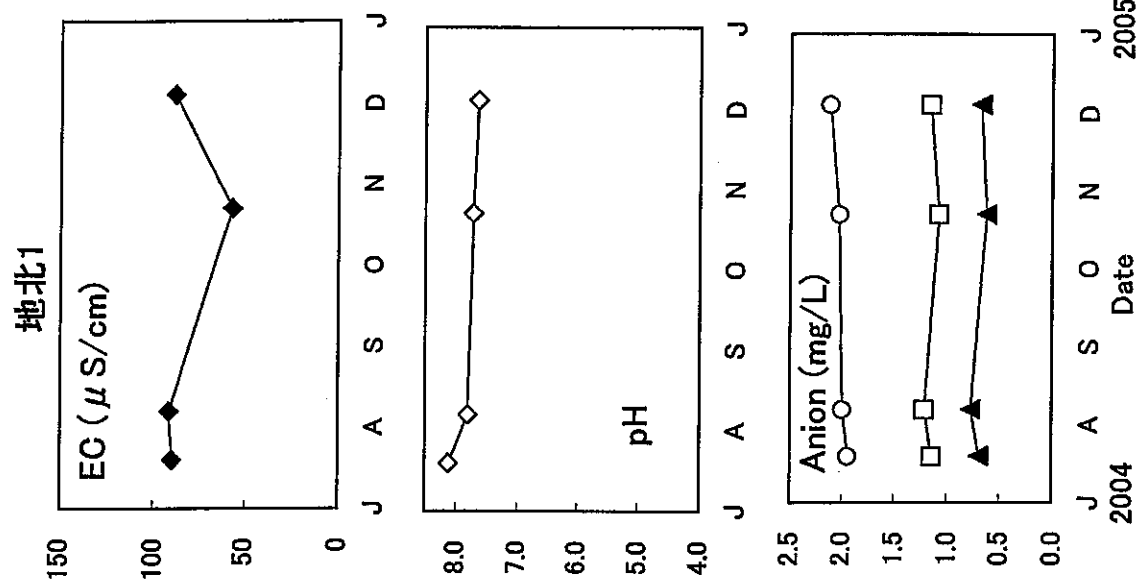
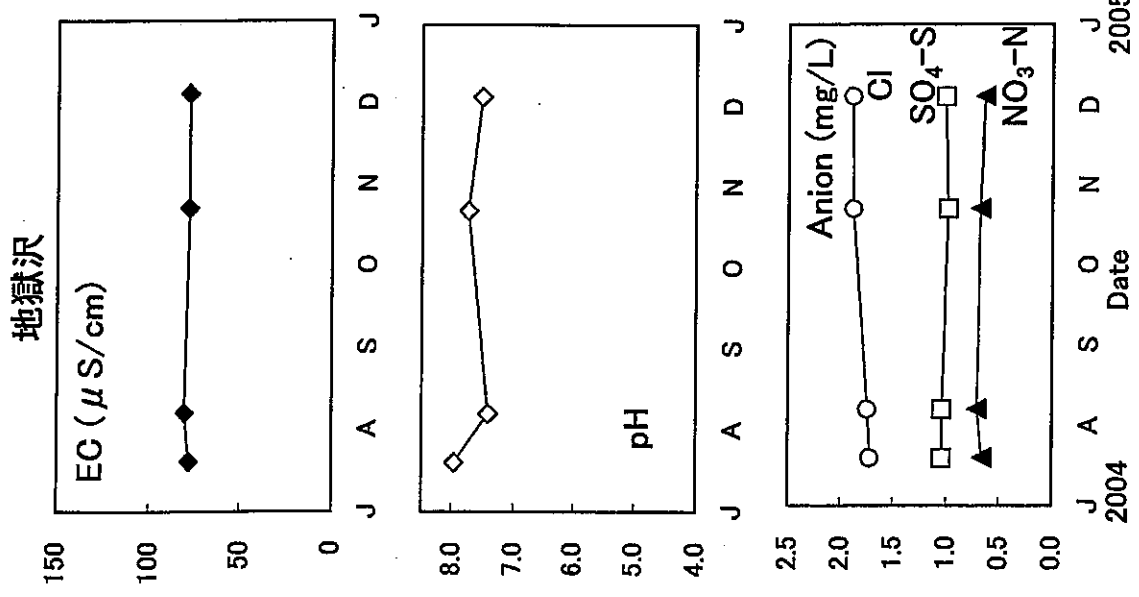


図3-11 中津川上流域の水質(その11)

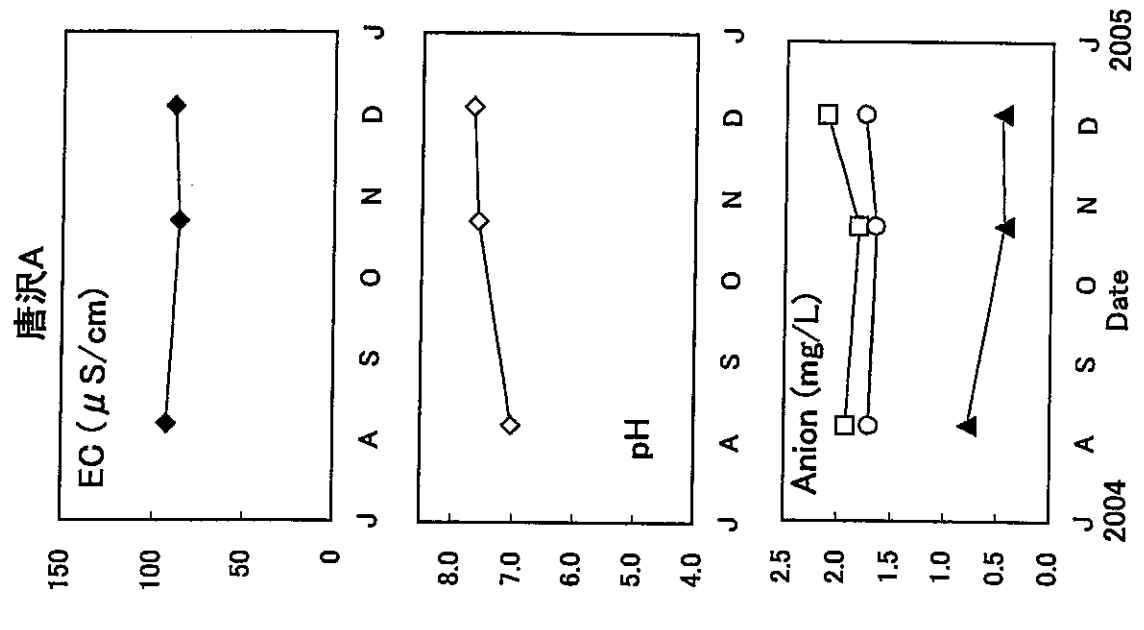
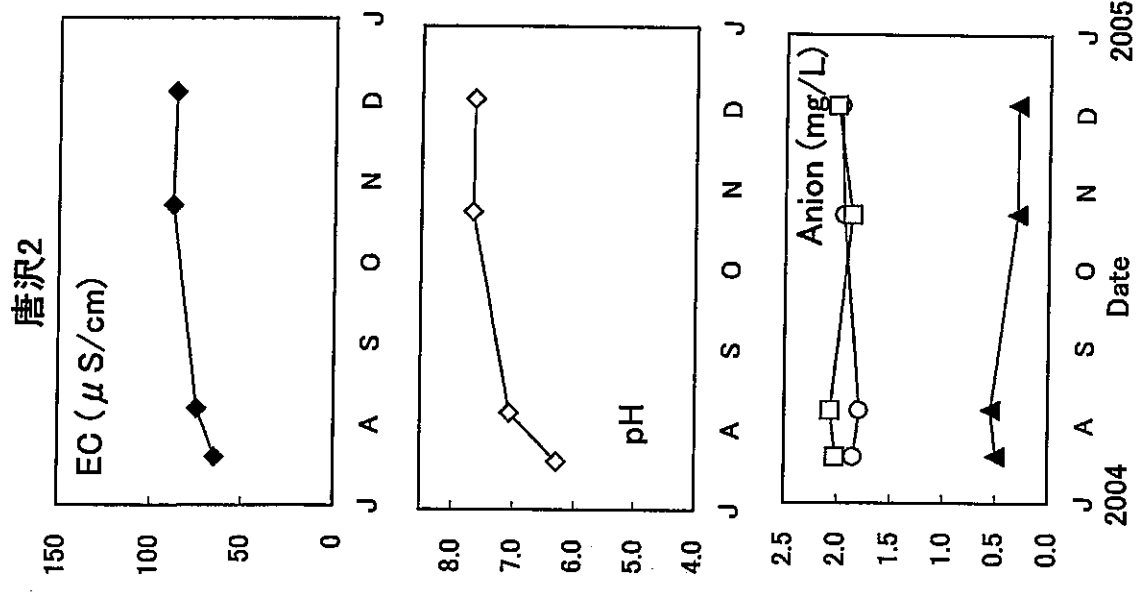
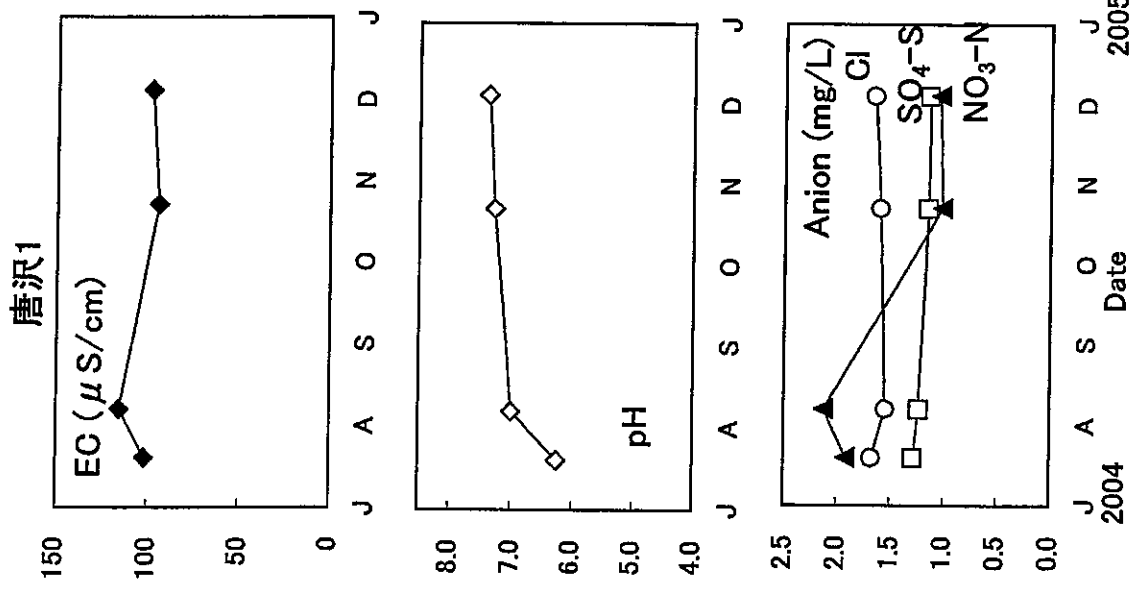


図3-12 中津川上流域の水質(その12)

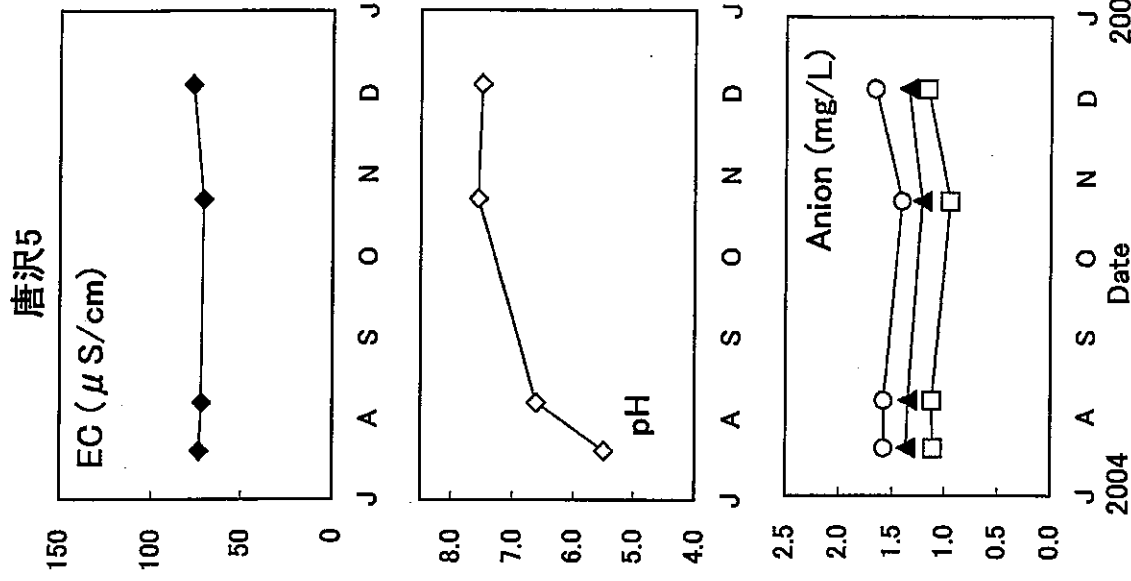
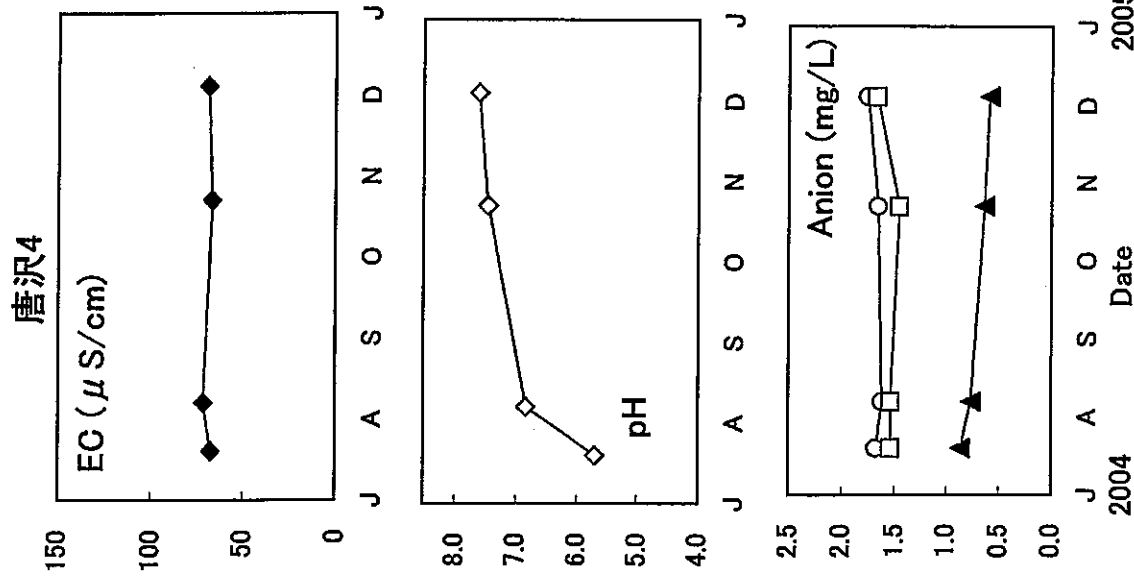
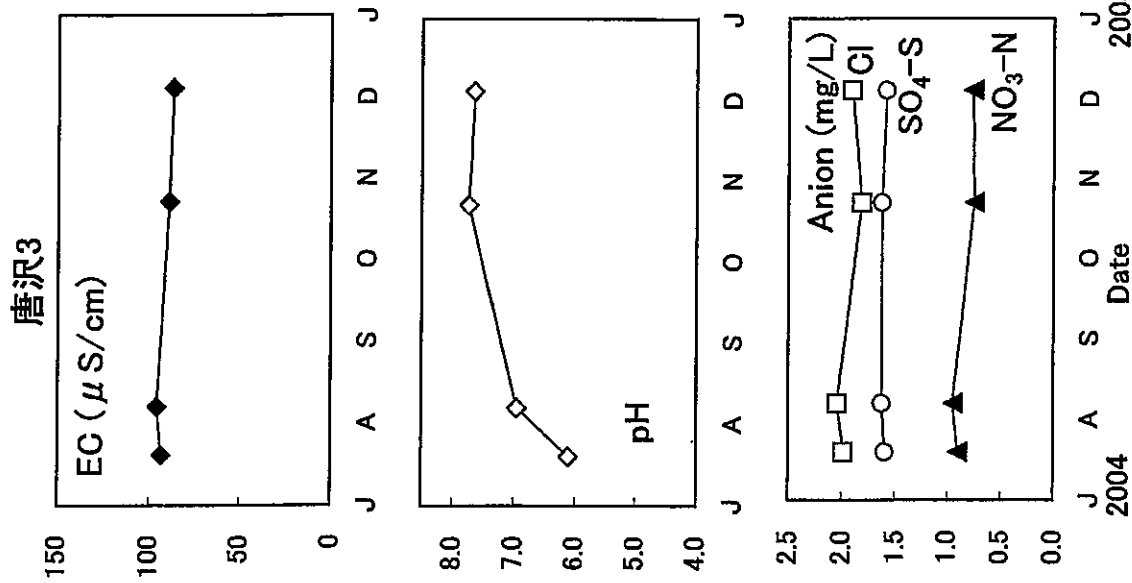


図3-13 中津川上流域の水質(その13)

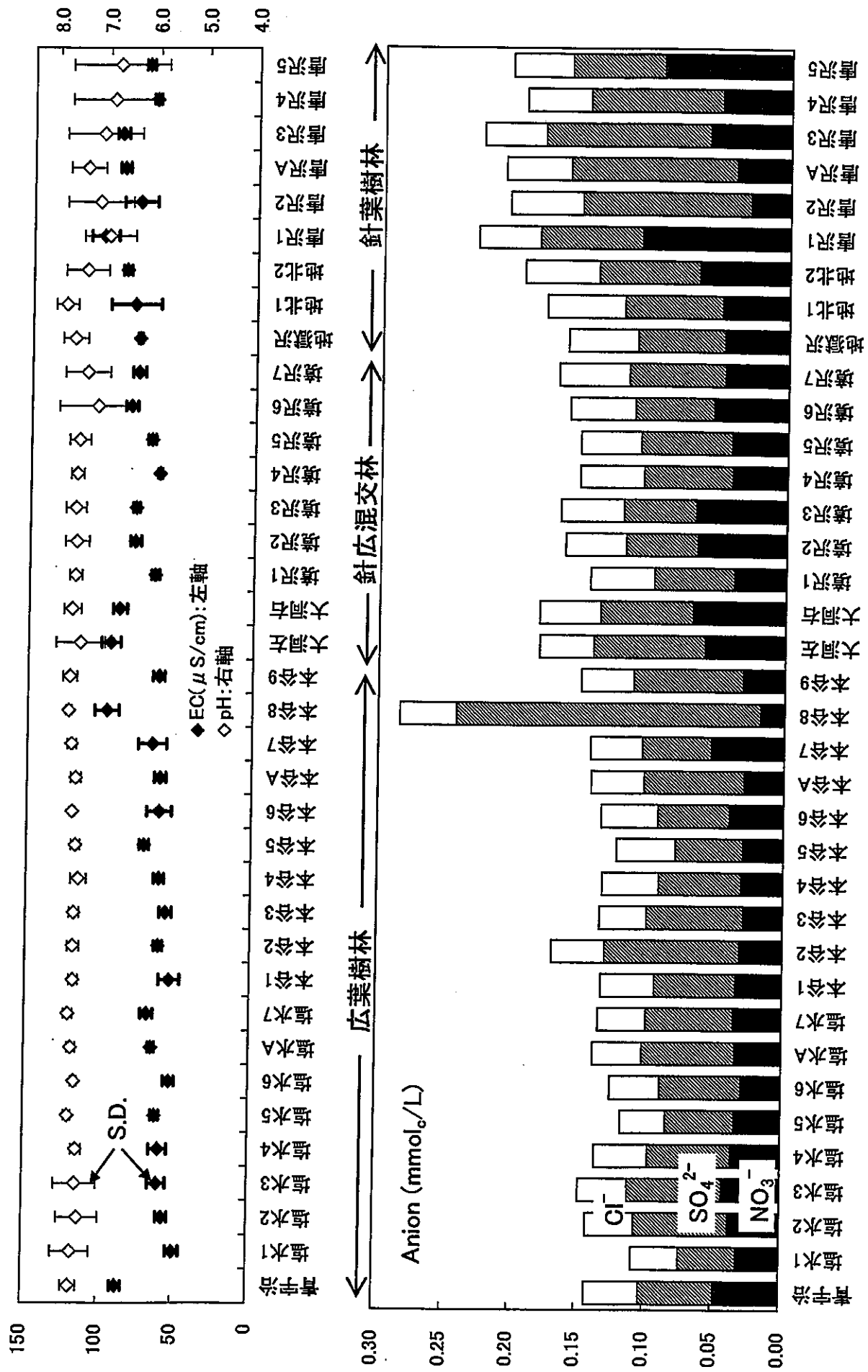


図4 中津川上流域における水質の平均値(8-12月)

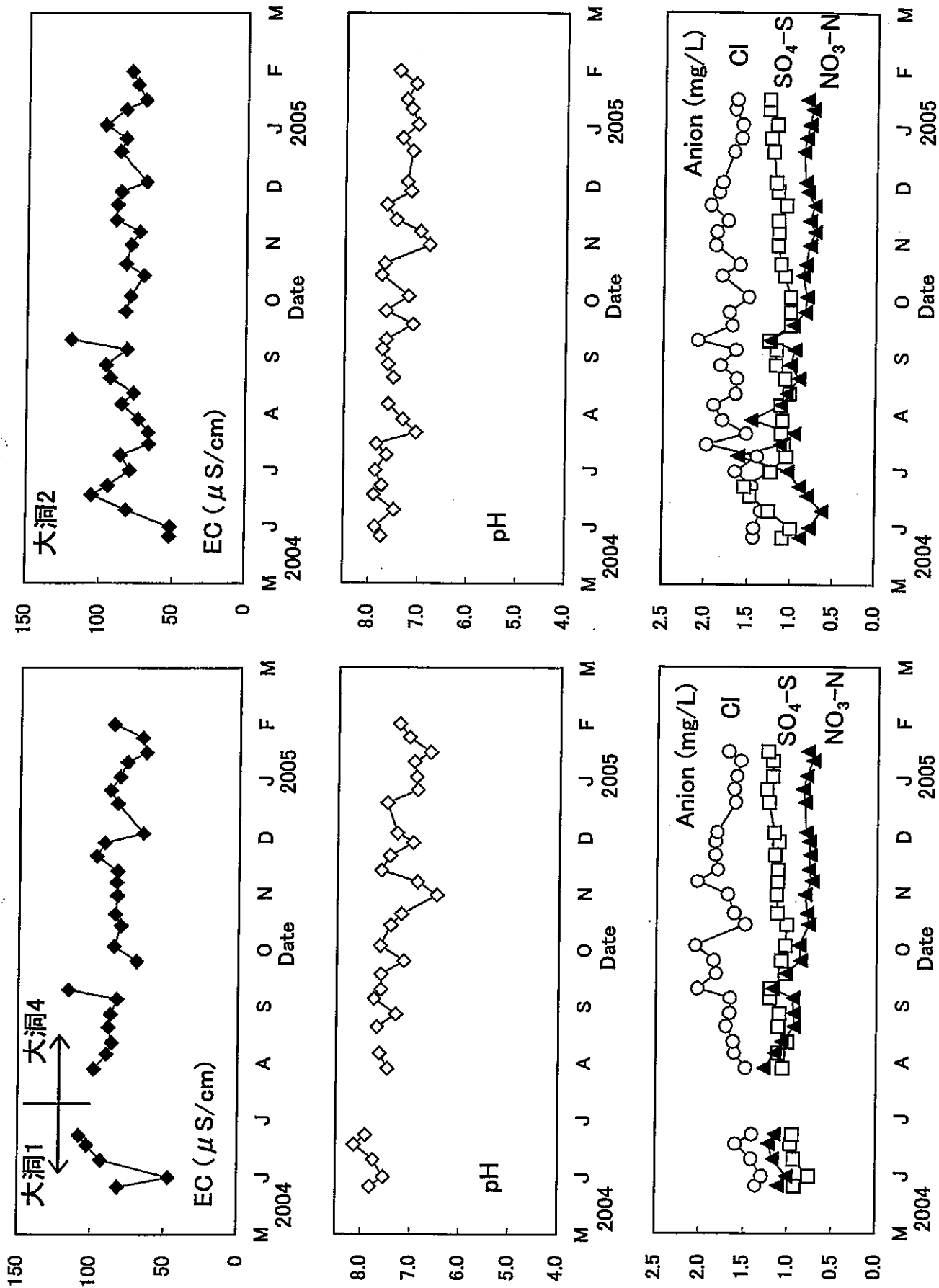


図5 大洞沢の渓流水質(左:大洞1と4、右:大洞2)

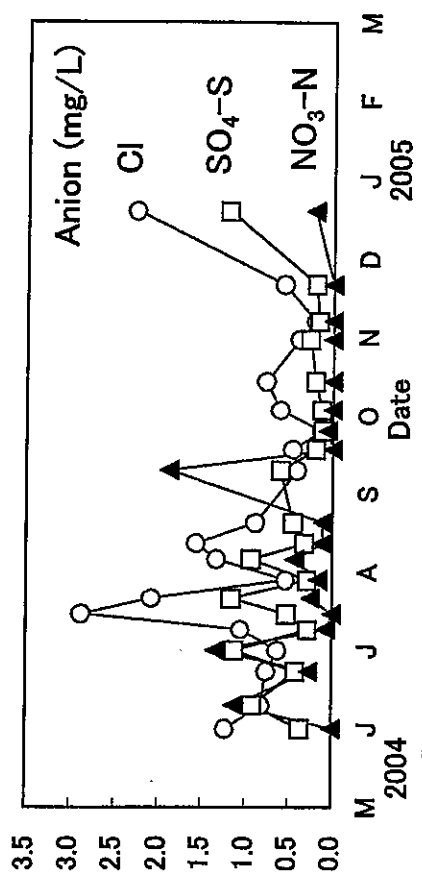
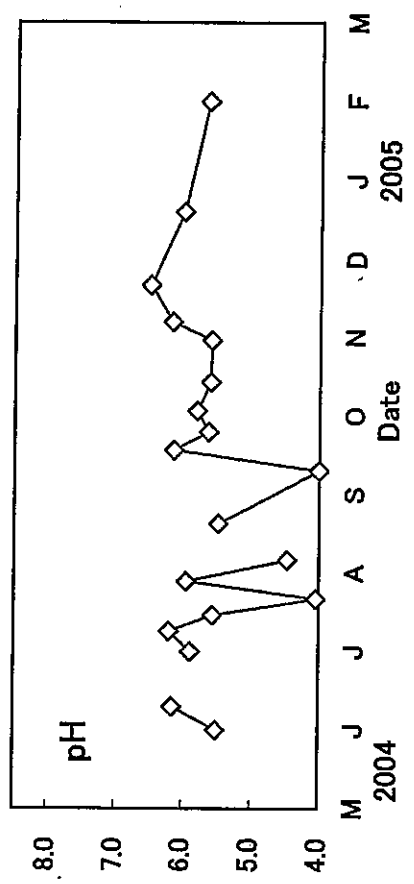
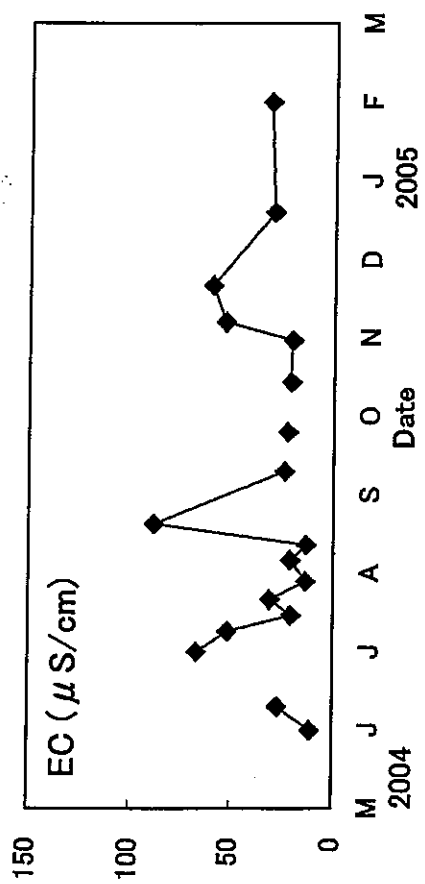


図6 大洞沢で採取した降水の水質

土壤浸食量調査……報告書3

平成 16 年度自然公園等施設整備委託（治山流域総合調査）報告書

1. はじめに

神奈川県丹沢山地では近年シカが増加しており、シカによる過度の採食のために林床植生が衰退する箇所が広い範囲にわたって現れてきている。林床植生が衰退することにより地表面が露出して土壌浸食が進み、樹木に対して悪影響を与えるとともに、降雨時には土壌浸食による濁水が溪流や河川を通して下流に流出して河川やダム湖の水質汚濁を発生させるとともに、溪流や河川の生物に悪影響を与えることが懸念されている。

本研究はシカによる林床植生の衰退が顕著に生じている東丹沢の堂平地区（神奈川県清川村）において林床植生の衰退が土壌浸食の増加および地表流の流出係数の増加に与える影響の実態を把握することを目的としている。この結果を基に、次年度には丹沢山地の林床植生衰退地における土壌浸食の予測マップを作成することを目的とする。なお、堂平における現地観測は2004年7月5日～11月23日の間行われた。

2. 山地における土壌浸食現象の概要

2.1 概説

一般に森林土壌（表層土）は有機物を多く含み、孔隙も多いために、浸透能が高く、水の貯留能力が高く、水資源の涵養および洪水ピーク流量の減少等に大きく寄与していると考えられる。すなわち、土壌（表層土）が発達している流域では水資源の涵養および洪水のピーク流量の減少機能も高いと考えられる。したがって、土壌の水資源の涵養および洪水のピーク流量の減少機能を維持・増進するためには土壌を発達させるとともに土壌の浸食を軽減する必要がある。

森林は落葉・落枝等を供給し、根系を伸長させ、小動物や微生物のすみかを提供することで土壌を発達させるとともに、土壌を降雨・表面流や風に対して覆うことにより土壌の浸食を軽減する機能も有している。以下では、主として降雨による土壌の浸食機構を検討するとともに、森林による土壌の保全機能（浸食軽減機能）について検討する。

2.2 水による土壌浸食の形態と機構

2.2.1 概説

降雨や融雪により供給される水による表層土（土壌）からの土粒子の移動現象（浸食）は水食（water erosion）と呼ばれる。水食は一般に、雨滴浸食（raindrop erosion）、層状浸食（布状浸食、表面浸食）（sheet erosion）、リル浸食（細流浸食）（rill erosion）、ガリ浸食（雨裂浸食）（gully erosion）そして流路浸食（河道浸食）（stream channel erosion）に分類される。

2.2.2 水食に影響する因子

斜面等において発生する土壌浸食には主として、気候、土壌、植生（地被物）、地形の因子が大きな影響を与える。これらのうち、人間がコントロールできるのは植生（地被物）と場合によっては土壌である。気候や地形（斜面長を除く）に関しては人間がコントロー

ルすることは困難である。

(1) 気候：浸食に影響する気候要素としては降雨、気温、風、湿度、日射等がある。気温や風は蒸発散に大きな影響を与える要素である。さらに風は雨滴の速度や落下角度に大きな影響を与える。湿度や日射の影響は比較的少ない。

降雨特性と表面流出水および土壌浸食の関係は非常に複雑である。Wischmeier (1958) は多くの観測結果から、土壌浸食に最も影響を与えるパラメータとして「降雨エネルギー × 30 分間雨量強度」を発見した。ここで降雨エネルギーとは直前の 24 時間降雨量のエネルギーのことである。

(2) 土壌：土壌の物理特性は浸透能や土壌内の水の移動（浸透）に影響を与える。土壌の物理特性としては土壌の構造、材質、有機物の量、水分量、密度、締め固め度がある。また、その他に土壌の化学的特性や生物学的特性がある。しかしながら、いまだ、土壌の浸食に強く関連するパラメータは発見されていない。

(3) 植生（地被物）：植生の土壌浸食軽減機能としては次のようなものがある。①雨滴の土壌表面への衝突エネルギーを軽減して浸食を軽減する。②表流水の流速を減少させて浸食を軽減する。③土粒子を固定して移動を防止する。④根系や植物の残渣により土壌の団粒構造を改善する。⑤土壌中の生物活動を促進する。⑥蒸散を促進して土壌水分を減少させ水の貯留能力を高める。これらの植生の機能は季節、植生の種類、植生の生育年数（月数）、土壌、気候、および植物の根系、地上部、残渣等により異なる。

(4) 地形：土壌浸食に影響する地形要素としては斜面の勾配、斜面の長さ、集水面積の広さ、流域の形状がある。斜面勾配が急な場合には特に激しい土壌浸食と土粒子の流出が起こる。

2.2.3 雨滴浸食 (raindrop erosion)

雨滴浸食とは、土壌表面の土粒子や薄い水膜で覆われている土粒子に対して雨滴が衝突することによる土粒子の飛びはね（離脱）現象である。このような土粒子の大気中への飛びはねは何回も起こり、その量も多い。

裸地では豪雨の時には、1 acre（エーカー、約 4047m²）当たり 10tf の土粒子の雨滴浸食が起こる場合がある。

(1) 雨滴浸食の特徴

降雨のエネルギーと雨滴浸食の関係は雨滴の質量、直径、粒径分布、形状、速さ、方向により異なる。これらの関係する要素の選択と測定には細心の注意を要する。雨滴の形状は雨滴の最終の速度に影響するため土壌の浸食にとっては極めて重要である。

Wischmeier と Smith (1958) は降雨エネルギー E と降雨強度 i の関係を次式および図-2.1 のように示した。

係

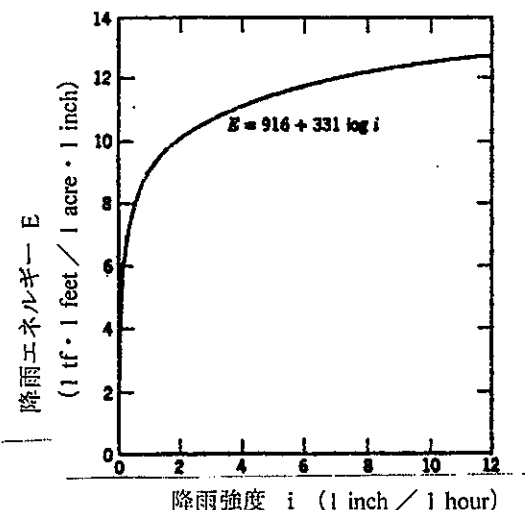


図-2.1 降雨強度 i と降雨エネルギー E の関係

$$E = 916 + 331 \log i \quad (2.1) \quad (\text{Wischmeier と Smith, 1958})$$

ここで、E：降雨のもつ運動エネルギー (1tf・1feet/acre・linch)、i：降雨強度 (linch/hour)である。

(2) 土粒子の離脱と輸送

土壌浸食の過程は、土壌からの土粒子の離脱（剥離）と水による輸送（流下）に分けられる。これらの過程の容易さの程度は離脱性(soil detachability)と輸送性(transportability)と呼ばれる。一般的に、土粒子の粒径が大きくなると離脱性は大きくなり、一方、輸送性は小さくなる。すなわち、粘土粒子は砂粒子に比べて離脱し難いが輸送されやすい。

平地においては雨滴浸食はそれほど重要ではない。しかしながら斜面では多量の土粒子が雨滴浸食により斜面の下方や上方に飛びはねさせられる。特に、斜面長が短く勾配が急な斜面では雨滴浸食が重要である。リル浸食は長い斜面長をもつ斜面の下部で主として発生し、一方雨滴浸食は斜面全体にわたって発生する。斜面および雨滴の衝突方向の傾斜による影響を図-2.2 に示す。地表面への雨滴の衝突時の高速度撮影の様子を図-2.3 に示す。

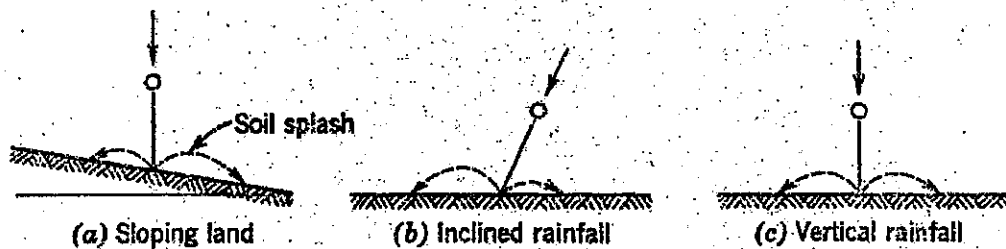


図-2.2 雨滴の衝突による土粒子の飛びはねの模式図 (Kohnke & Bertrand 1959)

雨滴の衝突により、土粒子および水滴は高さ方向に約 2feet、水平方向に約 5feet 移動する。

土粒子の離脱が土壌の浸食に与える影響は次のとおりである。①土粒子が土壌（表土）から離脱すると輸送されやすくなる。②細粒の土粒子および土壌の養分が移動する。③土壌の中の種子が移動し流亡する。細粒の土粒子が流亡した跡は粗粒分のみが残るので浸食舗装 (erosion pavement) と呼ばれる。土粒子の離脱は植生の高さが高いほど大きくなり、また植生の密度が大きいほど小さくなる。

土粒子の飛びはねの方向と距離に影響する要素としては斜面の勾配、風、土壌表面の状態があり、土壌表面が植生やマルチで覆われていると浸食量は少なくなる。斜面上では雨滴の衝突角度が異なるため、土粒子の飛びはね距離は斜面上方よりも下方の方が大きくなる。

2.2.4 層状浸食（布状浸食、表面浸食）(sheet erosion)

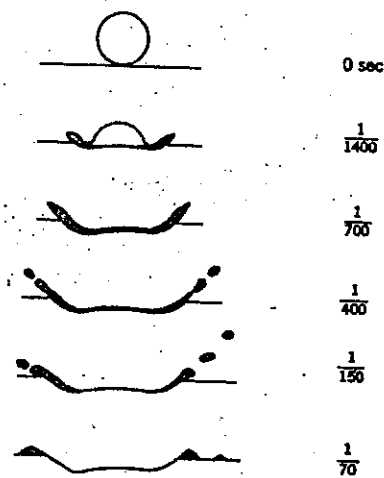


図-2.3 地表面への雨滴の衝突状況 (高速度撮影による模式図)

斜面の表面に薄い表面流が流れている場合には、斜面の表面に均一な浸食が発生することが考えられ、このような浸食形態は層状浸食（布状浸食、表面浸食）（sheet erosion）と呼ばれる。しかし、実際の斜面における浸食形態の観察、測定結果から、そのような層状浸食はめったに起こらない現象であることがわかっている。実際には斜面表面からの最初の土粒子の離脱により小さなリル浸食が起こることが観察される。しかし、このような小さなリル浸食の流路は変動するためあまり明確ではない。表面流に雨滴の衝突が加わるとリル浸食が起こり易くなる。エネルギー量から考えると雨滴浸食の方が層状浸食よりも重要である。なぜなら雨滴の衝突速度は6～9m/sであるのに対して、表面流の流速は約0.3～0.6m/sに過ぎないからである。雨滴浸食により土粒子が離脱して堆積することにより地表面の孔隙はふさがれて、浸透能が低下する場合がある。また、密な土壌の上に粗で薄い土壌層が堆積している場合には浸食が起こり易い。層状浸食の土粒子の離脱および輸送性に影響する要素としては土粒子の粒径、形状、密度に対する表面流の水深と流速である。

2.2.5 リル浸食（細流浸食）（rill erosion）

表面流が集まり小さなしかし明確な流路に沿って流れる水流により生じる土壌の浸食はリル浸食（細流浸食）（rill erosion）と呼ばれる。一般的には小さな流路が眼ではっきりと見えるぐらいの大きさになった場合にリル浸食と呼ばれる。リル浸食は大部分の土壌浸食で発生するためしばしば見過ごされる。リル内の流速は大きいために、離脱性と運搬性は非常に大きい。流出係数が高く、締め固めが不十分で薄い表層土に豪雨が作用するとリル浸食は非常に激しくなる。

14.2.6 ガリ浸食（雨裂浸食）（gully erosion）

リル浸食が発達して流路がある程度大きくなったものがガリ浸食である。一般にガリ（雨裂）内では降雨中および降雨直後にのみ流水が見られる。

ガリ浸食の発達速度は主に、流域の流出特性、流域面積、土壌の特性、法線形（流路の平面形）、大きさ、ガリの横断形状、ガリの流路勾配等により影響される。

ガリ浸食は次のような形態により発達（拡大）する。①谷頭における滝状の浸食、②流水あるいは裸地における雨滴の衝突による雨裂内浸食、③裸地斜面の凍結融解の繰り返し、④ガリ流路内での地すべりの発生あるいは土石流の流下。

一般的なガリ浸食の発達過程は次のようである。

第1段階：表土の洗掘による流路内の浸食。表土の浸食抵抗が比較的大きい場合にはこの段階では浸食速度はゆっくりである。

第2段階：ガリの上流への発達とガリの幅および深さの拡大。ガリはC層（基盤層）にまで達する場合がある。基盤層の耐浸食性が弱いと急速な浸食が生じる。上流区間から下流のすでに浸食された流路へ移る地点でしばしば滝が生じる。

第3段階：ガリ内に植生が生育し始める回復期

第4段階：ガリの安定期。流路は安定な勾配になる。またガリの岸（谷壁）斜面の勾配も安定な勾配になる。そして植生も生長して表土を固定し新しい土壌を形成できるほど繁茂してくる。第3段階の回復期は安定期に移行する期間として必要である。

第3、4段階ではガリの谷頭は流域の最上流部近くまで達し、そのことにより谷頭での集水面積が減少して谷頭の浸食は停止する。残りの集水面積からの表流水は流路沿いの多

くの地点から流路内に流入するようになる。

ガリ浸食に影響する因子が十分にはわかっておらず、またガリ発達の現地観測記録は未だ不十分であることからガリ浸食の発達の評価および予測は現状では困難である。しかしながら一般にガリ浸食は流域内に平坦な土地が多いほど少なくなる。

ガリの大きさの分類法はいくつか提案されているが、表-2.1 に一例を示す。

表-2.1 ガリと集水面積（流域面積）の規模の区分

規模	ガリの深さ	集水面積（流域面積）
小	0.9 m未満	2ha 未満
中	0.9 ～ 4.5m	2 ～ 20ha
大	4.5m 以上	20ha 以上

ガリを横断面形状から区分する方法もある。横断形状が U 字型か V 字型かは土壌の性質、気候、浸食のタイプにより異なる。U 字型のガリは土壌が浸食されやすいレス地帯や沖積層地帯で多い。このような地域では谷壁の下部が流水により浸食されて垂直に近い谷壁が形成される。流水の集中により溪床部が深く浸食されていくと V 字谷が形成される。一般的にガリ浸食は上流方向へ進むので、浸食が激しいのは上流端であり、逆に下流では安定化してくる。浸食が激しい箇所では拡大が続いているので、新しい地表面が露出している。

2.2.7 流路浸食（河道浸食）（stream channel erosion）

流路浸食（河道浸食）は流路に沿って河床や河岸が浸食される現象である。流路浸食とガリ浸食の区別は源頭部に起きるものがガリ浸食で、その下流部で起こるものが流路浸食である。通常でも水が流れている緩勾配の区間は流路と判断され、通常は水が流れていない源頭部の急勾配の区間はガリと判断される。

流路の岸部の浸食および岸の下部の浸食により河岸浸食が発生する。河岸浸食は一般に河床浸食（洗掘）に比べて重要ではないが、しばしば植生の除去等により起こる。河床浸食（洗掘）は流水の方向や速度、流路の深さや幅および土層の構成等に影響される。流路の法線形が悪い場合や砂堆などの障害物の存在が蛇行を促進して河岸の浸食を増大させる場合がある。

流路内における土砂の移動形態には掃流砂、浮遊砂、wash load の 3 種がある。これらの土砂流送の特徴は以下のとおりである。

- ①掃流砂：流水の直接の作用を受けて流路床上を転動、滑動、または河床面に沿って跳躍しながら移動する流砂をいう。
- ②浮遊砂：流水の乱れによる拡散現象のために、流路断面を浮遊しながら移動する流砂である。
- ③ wash load：河床を構成する土砂よりも細粒の流砂であり、流水と混合して流下する。

これらのうち①掃流砂と②浮遊砂は河床構成材料と常に交換しながら移動流下するものであり、bed material load と呼ばれる。これに対して③ wash load は河床構成材料と無関係に上流より浮遊流下してくるものであり、bed material load とは区別される。

掃流砂の移動量は、流水の掃流力、粒径等により決まり、移動量を算定するための幾つかの式（掃流砂量式）が提案されている。Brown による式を次に示す。

$$q_B = 10 \cdot \left[\frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) g d} \right]^2 \cdot u_* d \quad (2.2)$$

ここで、 q_B : 単位幅、単位時間当たりの掃流砂量

u_* : 摩擦速度

σ 、 ρ : 砂礫、水の比重

d : 砂礫の代表粒径

g : 重力加速度 である。

浮遊砂量を算定する式には Lane-Kalinske 式等がある。

2.3 斜面からの浸食土量の予測法

2.3.1 概説

森林を主体とする植生の降雨による浸食軽減機能としては、①林冠や下層植生とリター層による雨滴エネルギーの減殺、②土壌物理性の改善など浸透能向上による地表流量の

表-2.2 地被別の年浸食土量（浸食深：mm）の概数（川口 1951）

地被別	荒廃地	裸地	農耕地	草地・林地
年浸食土量	$10^2 \sim 10^1$	$10^1 \sim 10^0$	$10^0 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-2}$

る減少、③リター層による地表流速の減殺、④根系による土粒子の緊縛があり、さらに⑤リター層による地温の安定化に伴う凍結融解浸食の減少が考えられる。これら5つの効果が総合的に働くため、森林などの植生で覆われた斜面からの浸食量は裸地の1/100以下となることがこれまでの多数の測定結果から明らかとなってきた。表-2.2には川口(1951)が日本における傾斜15度以上の斜面での平均年浸食土量（浸食深：mm）の測定結果をまとめたものを示す。林地や草地では浸食土量が少ないことが明らかに認められる。

図-2.4は村井ら(1973)が落葉地被物の浸食軽減効果を検討するため、人工降雨装置と可変傾斜式小型ライシメーターを用いて降雨強度毎の浸食土砂量を測定した結果である。落葉の被覆量 (kg/m^2) が気乾量 $0.1\text{kg}/\text{m}^2$ （厚さで約 0.5cm ）の場合には、裸地に

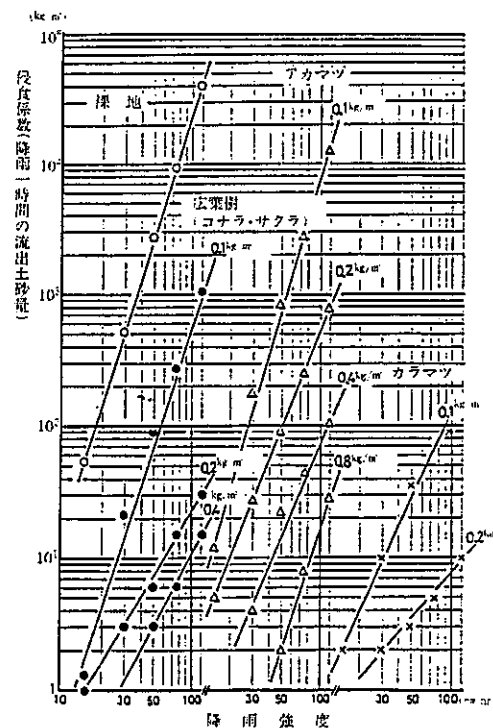


図-2.4 落葉地被物の量と流出土砂量の関係（村井ら 1973）

比べて少ないもののかかなりの浸食土砂量が観測された。しかし、地被量が $0.2\text{kg/m}^2, 0.4\text{kg/m}^2$ になると、各樹種とも流出土砂量は激減している。これより、森林における落葉落枝の堆積層のもつ浸食軽減効果、土壌保全効果は高いことがわかる。

斜面からの浸食土量は、地被物のみならず降雨量（強度）、斜面勾配、土壌の構造等により異なることはこれまでも述べた。

これらの多様な影響因子を的確に評価して斜面からの浸食土砂量を精度良く予測することは斜面の浸食対策を行うためにも重要である。以下では、米国の農地における土壌浸食の予測や対策法の評価に多用されている USLE (Universal Soil Loss Equation) を用いて山地流域における浸食土砂量を推定する手法を述べる。

2.3.2 USLE の概要

浸食土砂量を推定するために、これまで種々の経験式、理論式が提案されてきている。それらの中で、米国農務省土地保全局が全国約 3000 箇所の農地における浸食土砂量の観測結果を統計処理して開発された USLE は世界的にも評価されて使用されてきている。この式は本来、農地における浸食土砂量の推定に用いられるものであるが、最近 USLE を山地斜面や崩壊地にも適用しようとする試みがなされてきている。以下では、主として北原ら (2000) による山地斜面への適用検討例を示す。

USLE は次に示す式である。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.3)$$

ここで、A：年浸食土砂量 (tf/ha)、R：降雨係数、K：土壌係数、L：斜面長係数、S：傾斜係数、C：作物（植被）係数、P：保全（保全施設）係数 である。

以下では各係数について説明する。

(1) 降雨係数 R：降雨係数は降雨のもつ運動エネルギーを表す係数である。具体的には、一連続降雨ごとの降雨エネルギー E とその降雨の最大 1 時間降雨強度 $I_{60\text{max}}$ の積である $E \cdot I_{60\text{max}}$ の年間合計値を指す。計算式は次のとおりである。

$$E_{1\text{mm}} = 12.1 + 8.9 \log_{10} I_{60} \quad (2.4)$$

$E_{1\text{mm}}$ ：1mm 当たりの降雨の運動エネルギー ($\text{m} \cdot \text{tonf/ha/mm}$)

(図-1 参照)

I_{60} ：降雨強度 (mm/hr)

$$E = \sum E_{1\text{mm}} \cdot I_{60} \quad (\text{一連続降雨エネルギー}) \quad (2.5)$$

$$R = E \cdot I_{60\text{max}} \quad \text{の年間合計値} \quad (2.6)$$

時間雨量が 1mm 以下の降雨あるいは無降雨が 1 時間以上続く場合、いったん連続降雨が途切れるものとする。得られた一連続降雨のうち 13mm 以上の降雨のみを対象とし、13mm 未満の降雨は除外する。

この計算を実施するためには、年間をとおして時間雨量のデータが必要である。しかしながら山地においては雨量観測所の設置密度が低いために時間雨量データを得られない場合もある。

以下では、簡易法による降雨係数 R の計算手法を示す。

- ①最寄りの観測所の月降水量資料（10 年間以上）から各年の年降水量を求める。
- ②積雪地では各年の年降水量から各年の 1～3 月および 12 月の降水量を差し引いて無積雪期の降水量を求める。各年の無積雪期の降水量を平均する。

③流域内の標高差が 1000m を超えるような場合は、降水量観測点の標高と別途求めた流域平均標高との差を求め、標高の違いによる降水量の違いを求める。補正式は次のとおりである。

$$P = P_b (1 + h/1000) \quad (2.7)$$

ここで、P：流域平均標高における年降水量（補正值）（mm）、P_b：降水量観測点での年降水量（mm）、h：標高差（m）である。

④ ②または③から得られた年降水量 P を用いて、次式により降雨係数 R を算出する。

$$R = 0.32 (P / 100)^{2.5} \quad (2.8)$$

図-2.5 に式(2.8)の関係を示す。

(2) 土壌係数 K：森林土壌は農地土壌とは異なるが、土壌母材などで分けた農地と同じ係数を用いる。具体的な K 値は次のとおりである。

黒ボク土：0.244

ローム：0.387

森林褐色土：0.277

粘土：0.284

赤色土：0.283

砂質ローム：0.168

黄色土：0.322

シルト：0.413

ポドソル：0.498

未熟土：0.186

花崗岩風化土（マサ）：0.300

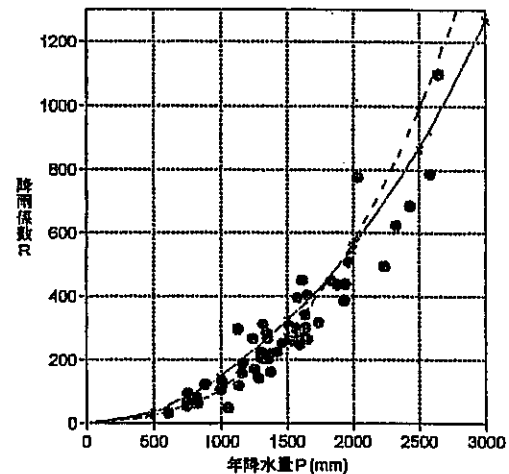


図-2.5 年降水量 P と降雨係数 R の関係
(Pには積雪期を除く) (北原ら 2000)

なお、崩壊地の浸食量（生産土砂量）としては以上の K を使用するが、浸食量の一部は崩壊地脚部の崖錘となったり流路に堆積したりするため、流出土砂量として推定する場合には上記 K に流達率 0.1 ～ 0.2 を乗じる。

(3) 斜面長係数 L：斜面の長さが浸食に及ぼす影響度を表している。標準の斜面長は 73feet (22.1m) であるから、次式で表される。

$$L = (d / 22.1)^m \quad (2.9)$$

ここで、d：斜面長（m）で崩壊地の長さまたは各斜面の最大斜面長（地形図から測定）、m：傾斜により定まる定数で、一般に傾斜が 5% 以上では m = 0.5 を用いる。

図-2.6 には我が国の森林において測定された斜面長と浸食量の関係を示す。図中の実線は USLE による計算結果である。

(4) 傾斜係数 S：傾斜係数 S は、斜面の傾斜角 θ （度）を用いて次式により算定する。

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (2.10)$$

この式は傾斜 9%（約 5 度）で S = 1.0 となる。図-7 に我が国で測定された傾斜 θ と浸食量の関係を示す。図中の実線は USLE による計算結果である。

(5) 作物係数（植被係数）C：植生（地被物）による被覆により浸食土量は異なるが、それらの効果を表す係数である。裸地（植生が無い状態）における値を 1.0 としているため

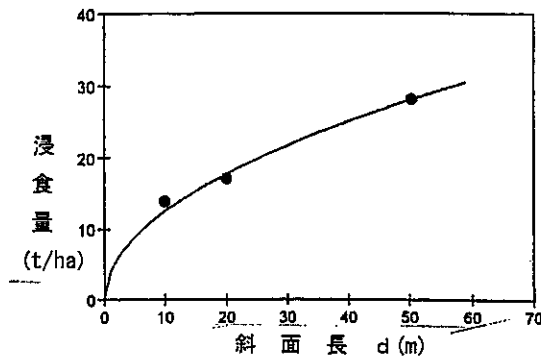


図-2.6 斜面長 d と浸食量の関係
(石川ほか、1962 の資料より)

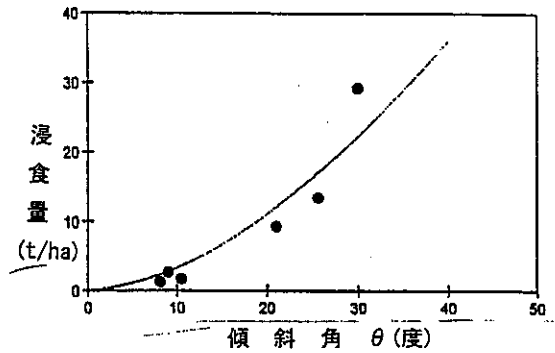


図-2.7 傾斜角 θ と浸食量の関係
(大倉ほか、1996 の資料より)

、作物係数 (植被係数) C は R, K, L, S などの他の条件が全く同じ場合の裸地に対する浸食土量の比を表している。およそその C は次のとおりである。

- 人工林 スギ : 0.0060
 ヒノキ : 0.010 (ただし、うっ閉して林床植生がない場合は 0.036)
 アカマツ : 0.0065 カラマツ : 0.0084
 その他の針葉樹林 : 0.0086
 針広混交林 : 0.0030
 天然林、二次林、落葉広葉樹林 : 0.0077
 皆伐 (林床攪乱) : 0.129
 山火事 (中程度) : 0.30 山火事 (軽度) : 0.023
 裸地 (崩壊地) : 1.0

(6) 保全係数 (保全施設) P : 林地やのり面においてこの係数に該当するものは、山腹工やのり面保護工の効果を表す。なお、山腹基礎工は腐朽などにより保全効果が経年的に低下する一方、植生工は経年的に増加するので、時系列で変化する。植生工は、保全係数でありながら植被係数としても見なせるので、一応、便宜的に、林冠がうっ閉するまでを保全係数として扱い、それ以後は植被係数として扱うとよい。山腹工の工種ごとの P を示す。

基礎工

- 階段工 : 0.76 編柵工 : 0.42 むしろ伏工 : 0.017
 粗朶伏工 (1年目) : 0.16 同 (2年目) : 0.48

基礎工+植生工

- 階段工+草本緑化 (1年目) : 0.052 同 (38年目) : 0.013
 階段工+木本緑化 (43年目) : 0.0024
 木本吹付け工 (1年目) : 0.046 同 (2年目) : 0.060 同 (3年目) : 0.051
 草本吹付け工 (1年目) : 0.0045 同 (2年目) : 0.0028 同 (3年目) : 0.070
 同 (4年目) : 0.17

- 積苗工+植栽工 (3年目) : 0.0053 同 (4年目以降) : 0.0030

- 治山施工地 : 0.0061 崩壊地 (未施工地) : 1.0

以上より、保全係数（保全施設）P は、基礎工ではむしろ伏せ工を除いて 0.5 前後、すなわち浸食量を半分に減少させる効果があることがわかる。基礎工に加えて植生工を施工することにより P は 0.05 以下になると考えられる。

基礎工単独では経年により腐朽し、P が徐々に大きくなる。逆に木本による植生工が基礎工に加わった通常山腹工では、経年により徐々に P が森林と同じ 0.01 ~ 0.005 程度まで下がる。

なお、草本吹付工を行うと数年後には P が増大してしまうが、木本では 0.05 程度で推移し長期的には有効であることを示している。

これらのことから、基礎工単独では浸食軽減は不十分で、基礎工と木本を主体とした植生工を組み合わせはじめて浸食の軽減を効果的に行うことができることを示している。

(7) 浸食量 A (tf/ha) : 式(2.3)に以上の R, K, L, S, C, P の値を代入することにより、浸食量 A (tf/ha) を算出する。崩壊地からの土砂浸食量を求めるためには崩壊地面積 S_i (ha) を測定して、この崩壊地面積 S_i に浸食量 A を乗ずることにより年浸食量 A_i (tf) を求める。

$$A_i = A \cdot S_i \quad (2.11)$$

なお、土砂の単位体積重量を γ (tf/m³) を考慮すれば、土砂の空隙を含む体積は A_i/γ (m³/ha) となる。流域全体の山腹斜面からの浸食量は各崩壊地および山腹斜面からの浸食量を合計すれば求まる。 A_i/γ (m³/ha) は崩壊地や林地での浸食量(生産土砂量)であり、下流にあるダム等への堆砂量を推定する場合には A_i/γ (m³/ha) に、さらに流達率(0.1 ~ 0.2)を乗じる。

14.3.3 USLE の適用例

北原 (2002) は天竜川上流右支川の松川にある松川ダムの上流域 (流域面積 60km²) を対象として、USLE を用いて浸食土砂量を算定し、これと松川ダムにおける堆積土砂実測値との関係を検討した。

松川ダム上流域は中央アルプスの南に位置し、土壌は花崗岩が風化したマサ土で、上流には 2000m 級の山々が存在する。このため荒廃面積率は 6.1%で崩壊地は 2900 箇所余り存在する。松川ダムの降雨観測記録によれば、1975 年度から 2000 年度までの 26 年間の年平均降水量は 1990mm である。

流域にある崩壊地 (面積 247.55m²、斜面長 42.49m、幅 11.4m、傾斜 40.74 度) を対象にして浸食量を測定した。この実測浸食土砂量から $R=87.4$ (4月~11月)、 $C=1$ 、 $P=1$ として土壌係数 K を逆算した。その結果、冬期の凍結融解の影響を考慮した場合には土壌係数 K は 0.300 となり、一方、冬期の浸食量を考慮にせずに河川への流出土砂を基に K (流達率を考慮) 値を算出すると 0.0450 となった。

以上のようにして得られた諸係数を USLE に代入して松川ダム上流域の各年毎の総浸食土砂量を推定した (北原 2002)。これらと、松川ダムにおける堆砂量の測定結果と比較したものを図-2.8 に示す。計算値と実測値はほぼ同じように推移しているが、豪雨の発生年では新規の崩壊が発生したため当該年と翌年においてはダム堆砂量の方が大きくなっている。図-2.9 には各年の流出土砂量推定値とダム堆砂量の関係を示す。豪雨による崩壊などのマスマーブメントが影響している年は除外してある。図-2.9 より各年の流出土砂量推定値と実測のダム堆砂量の相関は高く、USLE を用いた浸食土砂量の推定値はこの流域にお

いては適用できると考えられる。

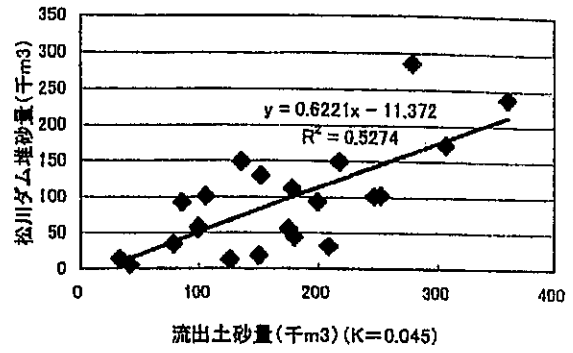
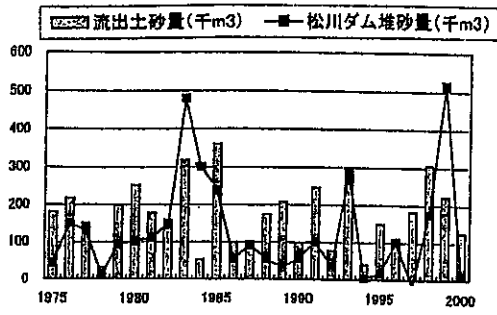


図-2.8 流出土砂量の計算値と実測値の比較
(北原 2002)

図-2.9 流出土砂量の計算値と実測値の関係
(北原 2002)

3. 調査対象地および調査方法

3.1 調査対象地

調査対象地は相模川水系の宮ヶ瀬ダム上流の中津川左支川塩水川上流の堂平地区8(神奈川県清川村)であり標高は約 1,180m である。表層は厚さ 2 ~ 3m のローム層で覆われており、基盤は凝灰質の砂岩・泥岩である。調査箇所の植生は高さ十数 m のブナが卓越しており、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等が一部で見られる。

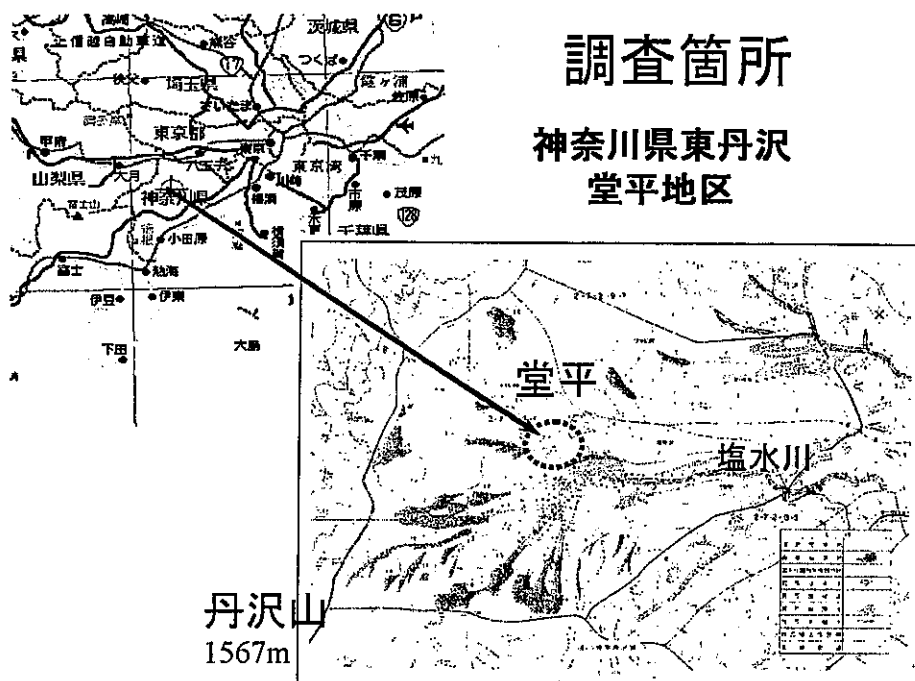


図-3.1 調査位置図 (丹沢堂平地区、神奈川県清川村)

3.2 調査全体計画

堂平地区における土壤浸食量調査の全体計画を図-3.2に示す。本調査においては植生被度、斜面長、斜面勾配が異なる9個の試験斜面を設置して、土壤浸食量および地表流による流出量を測定する。これと平行して試験斜面直近で、植生調査、降雨量観測（樹冠通過雨量観測）等を実施する。土壤浸食量の測定結果と樹冠通過雨量および試験斜面の植生被度、斜面長、斜面勾配の関係をUSLE ($A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$) を用いて分析することにより、堂平に適したUSLEに必要なパラメータ (R, L, S, C, P) を得ることができる。なお、パラメータK（土壤係数）については堂平は関東ロームであるので関東ロームの値がわかる。他の土壤については既往の調査結果を用いる。USLEおよび本調査から得られたパラメータを用いることによりシカの食害により林床植生が衰退した地区における土壤浸食量を予測することが可能となる。従って最終的には丹沢山地におけるシカの食害による林床植生の衰退の調査結果を基に、USLEを用いて丹沢山地におけるシカの食害により林床植生が衰退した地区の土壤浸食量分布の予測図を作成する。さらに、本調査において、土壤浸食を軽減するための対策手法についても検討を行い、シカの食害により林床植生が衰退した地区の土壤浸食の対策手法の提案を行う。

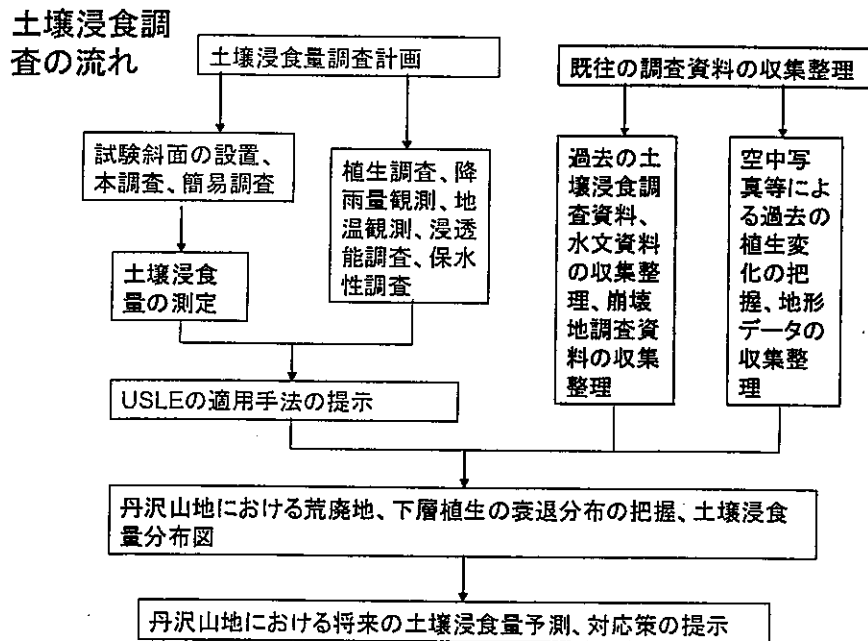


図-3.2 調査全体計画

3.3 調査方法

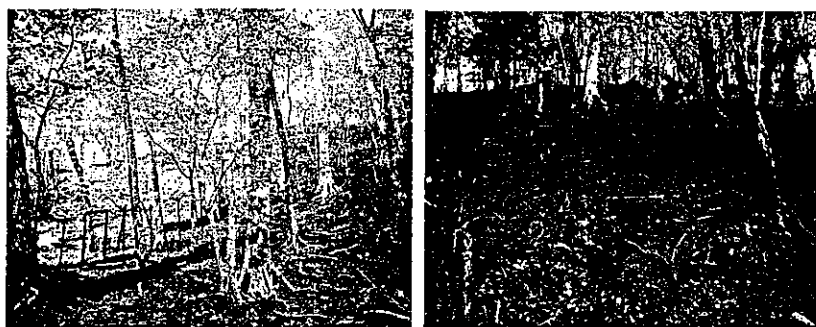
(1) 植生被度による土壌浸食量および地表流流出量

堂平地区のブナ林の林床植生はシカの食害により衰退しているが、シカによる食害を防止するためにシカ柵が設置されている。写真-3.1に示すシカ柵は平成9年度に設置されたシカ柵であり植生はかなり回復している。

林床植生の被度の違いによる土壌浸食量および地表流の流出量の違いを検討するために、写真-3.2に示す試験斜面（Aタイプ）（ $2\text{m} \times 5\text{m} = 10\text{m}^2$ ）を3個設置した。林床植生の被度が大（植被率約80%）、被度中（植被率約40%）の試験斜面は写真3.1に示す平成9年度に設置したシカ柵内に、被度小（植被率約1%）の試験斜面はシカ柵外に設置した。斜面勾配は同一で33度である。また各試験斜面は同一の斜面上にあり近接している。各試験斜面（A）には図-3.3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、これにより泥水を濾過して土砂を捕捉し、排水した水の量を転倒弁式の量水計（1転倒500ml）で測定した。図-3.4に試験斜面（A）の堂平における配置図を示す。また図-3.5には試験斜面（A）の配置模式図を示す。

樹冠通過雨量と地表流の流出量は1～2分間毎に計測した。また、浸食土砂量の測定は図-2に示すように7月5日～11月21日の139日間に15回行った。各回毎に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て後に、乾燥機で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。その結果、表層土の乾燥密度は $0.56\text{g}/\text{cm}^3$ であった。

堂平のブナ林の林床植生



左側:シカ柵内

シカ柵外

右側:シカ柵外

(標高;約1180m)

写真3.1 堂平のブナ林における林床植生（シカ柵内と外の比較）

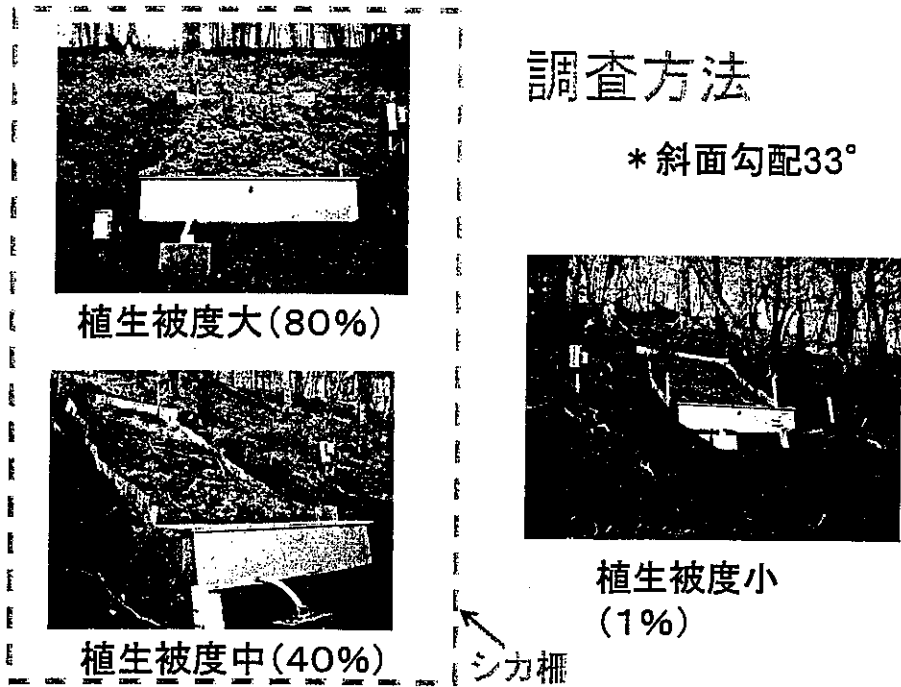


写真-3.2 試験斜面 (A) の設置状況

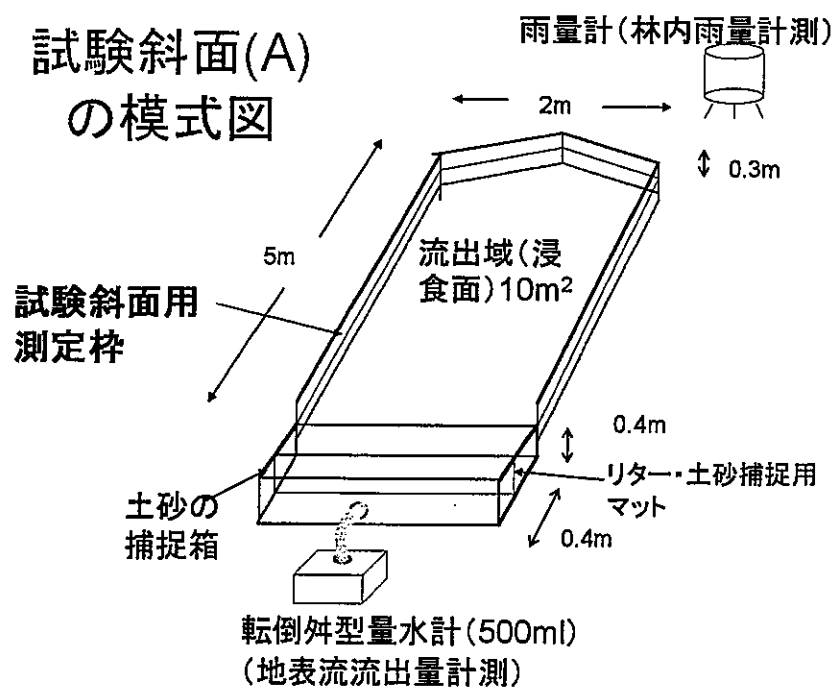


図-3.3 試験斜面 (A) の模式図

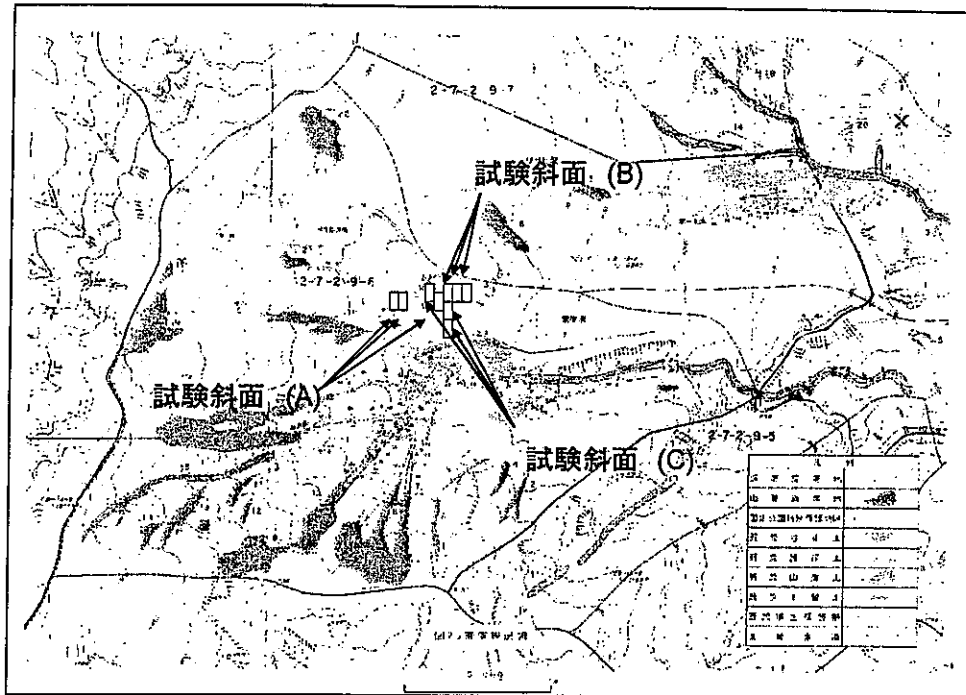


図-3.4 堂平地区における試験斜面配置図

試験斜面(A)の配置図【本調査】

林床植生被度の影響 植生・リター量は50cm×50cm内

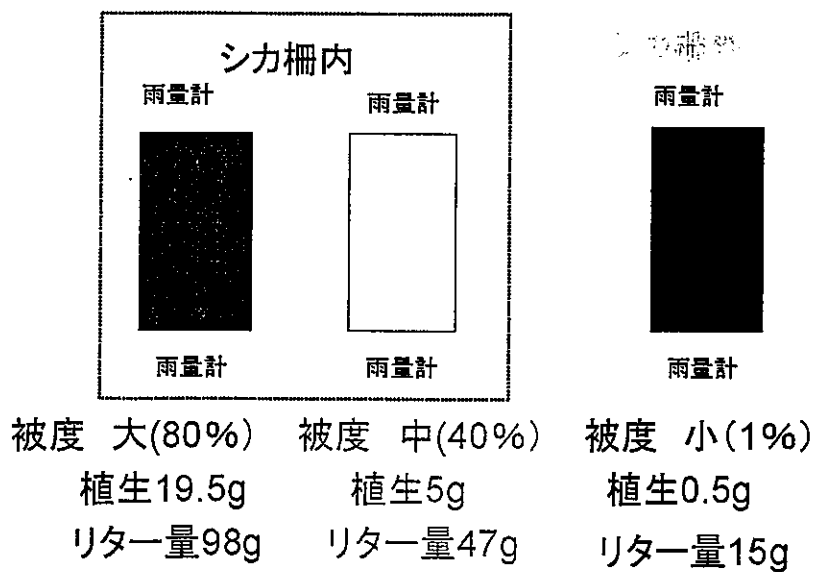


図-3.5 試験斜面 (A) の配置模式図

(2) 斜面長、斜面勾配による土壌浸食量

土壌浸食量を USLE 式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 30° 、植生被度約 1% の斜面に設置した (図-3.6、-3.7、写真-3.3)。また、斜面勾配が 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-3.6、-3.8、写真-3.4)。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-3.6)。

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)

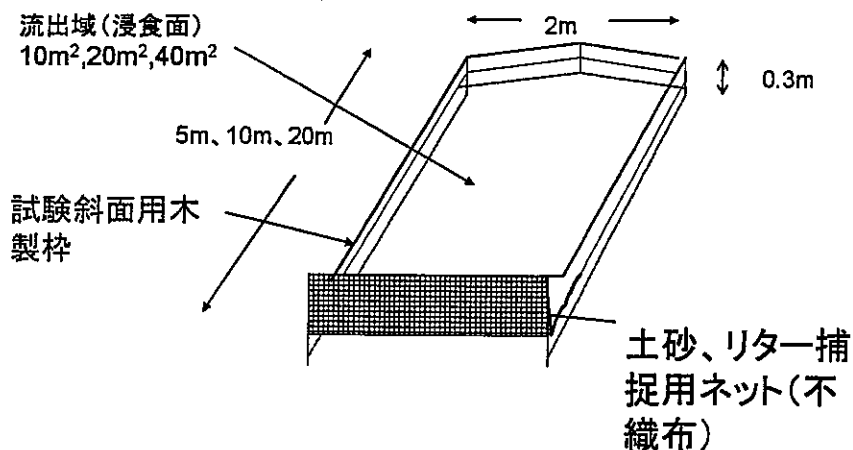


図-3.6 試験斜面 (B)、(C) の模式図

試験斜面(B)の設置(8月)

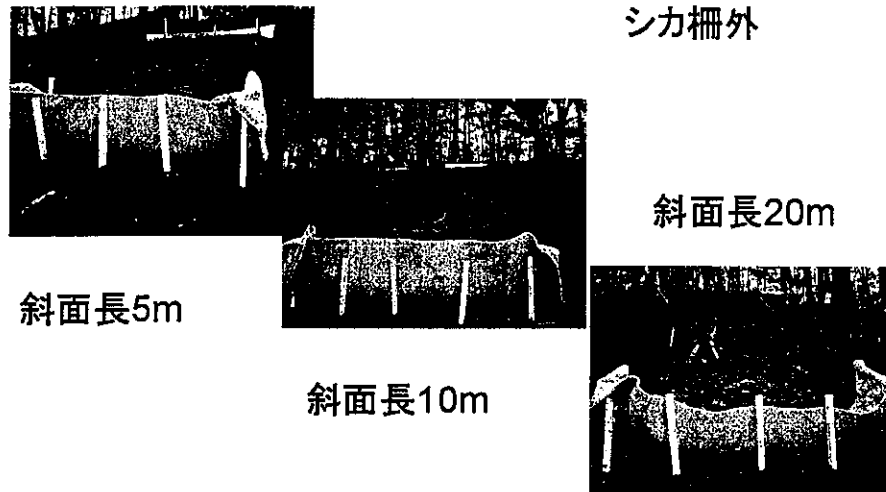


写真-3.3 試験斜面(B)の設置状況

試験斜面(C)の設置(7月)

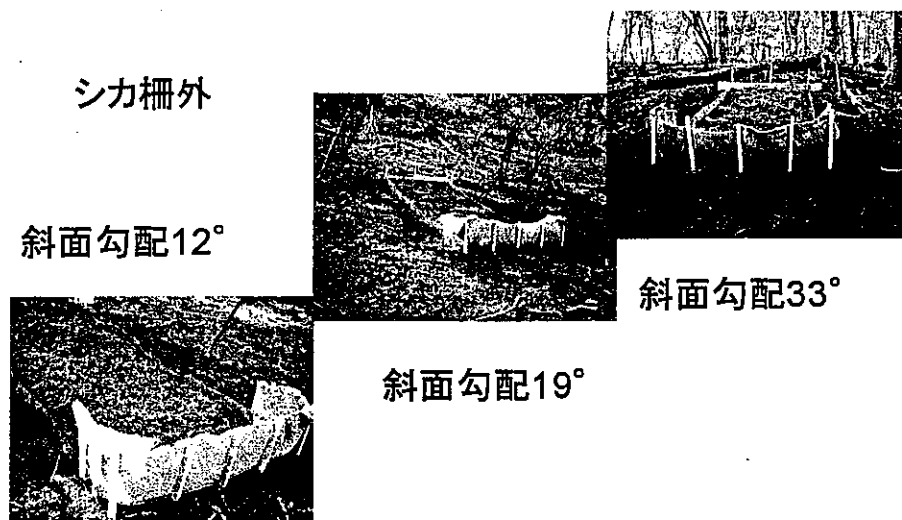


写真-3.4 試験斜面(C)の設置状況

試験斜面(B)の配置図【簡易調査】

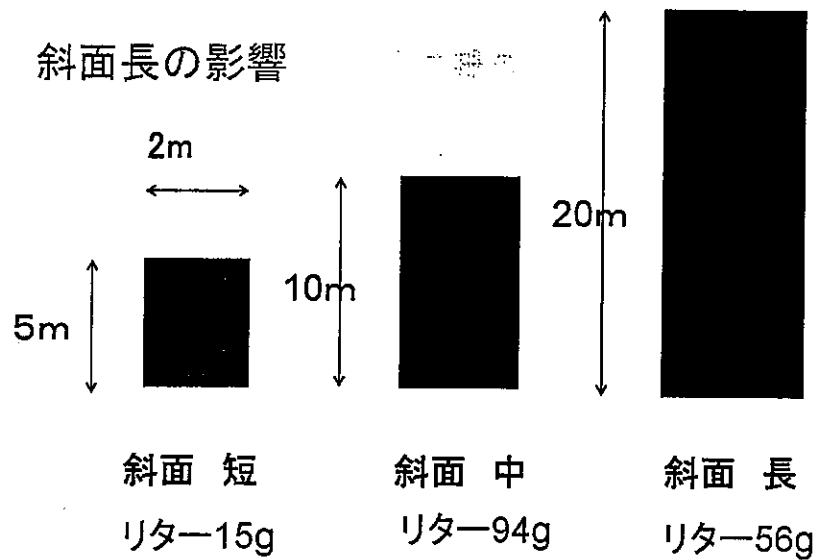


図-3.7 試験斜面 (B) の配置模式図

試験斜面(C)の配置図【簡易調査】

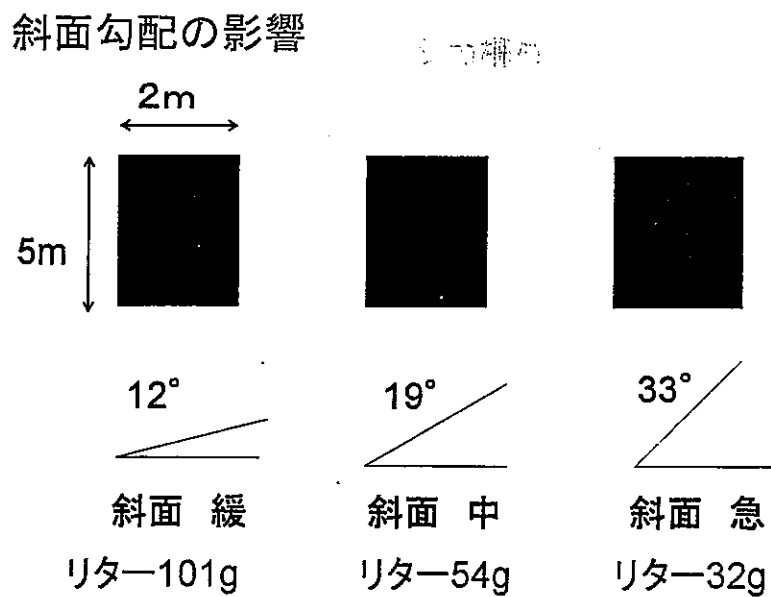


図-3.8 試験斜面 (C) の配置模式図

(3) リターの生産、供給、移動量および分解

地表面におけるリターの堆積量が土壌浸食量に大きな影響を与えることは村井ら、1973 による研究において明らかにされている。堂平においては上層木としてブナ林が存在しているため、毎年多量の落葉が生産されて地表面に供給され、地表流や風により運搬・移動している。さらに、供給されたリターの一部はシカにより採食されたり、月日の経過とともに分解して減少していく。

リターの生産、供給、移動量を調べるために写真-3.5、図-3.9 に示すようなリター測定柵を堂平のシカ柵外の斜面上部と下部に 2004 年 12 月 7 日に設置した。このリター測定柵は写真-3.5、図-3.9 に示すように高さが約 0.9m で斜面の最大傾斜方向とこれに直角な方向の計 4 方向に幅 1.0m の開口部を持っており、これら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落下したリターを捕捉する 1.0m × 1.0m の網が設置されている。設置後、定期的にこれらのリター測定柵内に堆積しているリターを採取して絶乾重量を測定する。

地表面に供給され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割合を調査するために、合成樹脂製の大きさ 25 × 30cm、メッシュ幅約 2mm のリターバッグを用いて、このリターバッグの中にリターを風乾重量で 18 g 入れた。2004 年 12 月 5 日に写真 3.6 に示すようにこれらのリターバッグを、斜面勾配 12°、19°、33° の各試験斜面 (C) の脇に各 8 個、計 24 個設置した。これらについては設置後段階的に採取してそれらの中にあるリター重量の変化を測定する予定である。

リター(落葉・落枝)の発生量と移動量、 風によるリターの移動量調査



写真-3.5 リター測定柵

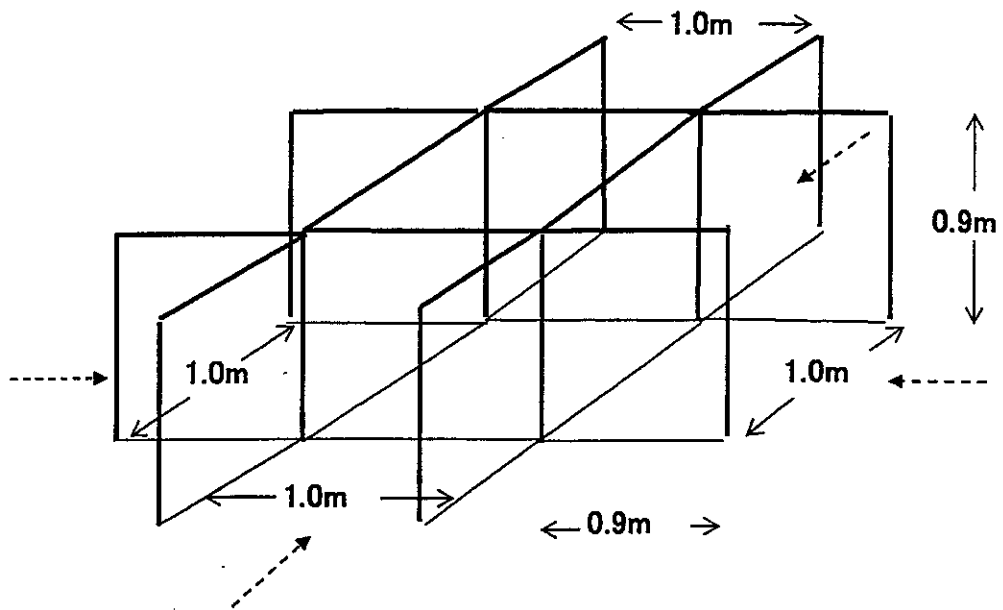


図-3.9 リター測定柵の模式図



写真-3.6 リターバッグの設置状況

4. 調査結果と考察

4.1 観測期間中の樹冠通過雨量（日雨量）

観測期間中（2004年7月5日～11月21日、139日間）の樹冠通過雨量（日雨量）および浸食土砂量の測定期間区分を図-4.1 に示す。最大24時間雨量は台風22号による10月9日の257.8mmであり、最大の10分間雨量は雷雨による7月11日の24.3mmであった。また、全観測期間内の総雨量は2,344mmであった。全観測期間中には計6個の台風の影響による降雨が記録された。図-4.1に示すように浸食土砂およびリターの回収はほぼ1～2週間毎に計15回おこなった。

堂平地区における樹冠通過雨量 (7月5日～11月21日、日雨量, 総雨量2344mm)

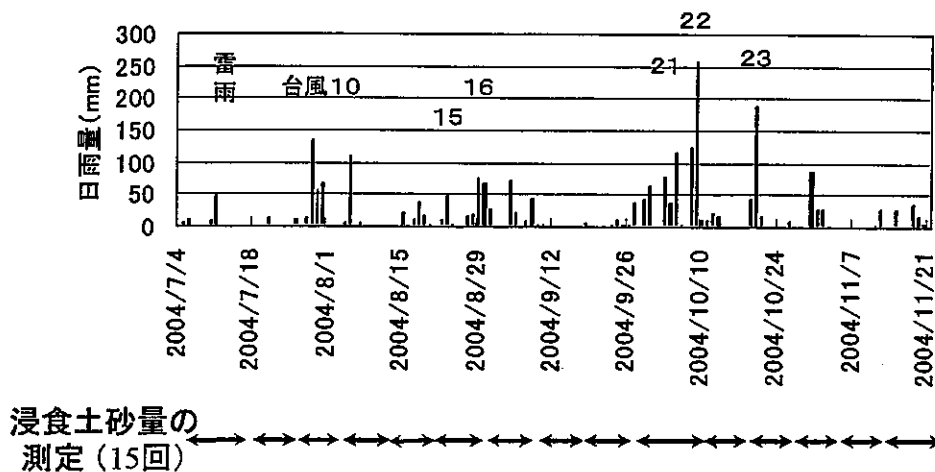


図-4.1 樹冠通過（林内）日雨量および測定期間

4.2 林床植生被度別の樹冠通過雨量と土壤浸食量の関係

林床植生被度別の各測定期間毎の樹冠通過雨量の積算雨量と土壤浸食量（乾燥質量）の関係を図-4.2に、また、各測定期間内の最大10分間雨量と土壤浸食量の関係を図-4.3に示す。これらの図から土壤浸食量は最大10分間雨量と強い正の相関があることがわかる。これは雨滴衝突による土粒子の剥離作用の大きさが土壤浸食量に大きな影響を与えているためと考えられる。また、林床植生被度が小さくなると土壤浸食量が増大する傾向がある。

図-4.4には地表流流出量×最大10分間雨量と土壤浸食量の関係を示す。地表流流出量は剥離した土粒子の輸送に重要な要因と考えられる。土壤浸食量は地表流流出量×最大10分間雨量と強い正の相関があることがわかる。

結果(1): 期間毎積算雨量と土壤浸食量
(7月5日～11月21日)

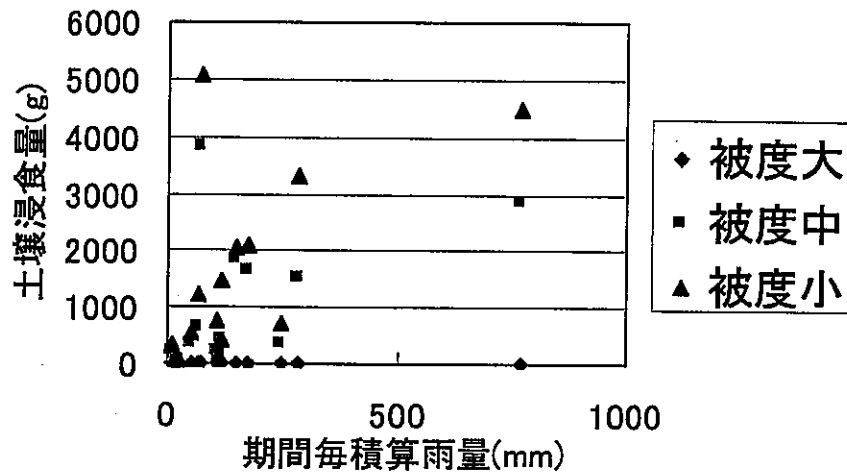


図-4.2 期間毎積算雨量と土壤浸食量 (林床植生被度別)

結果(2): 10分間雨量と土壤浸食量

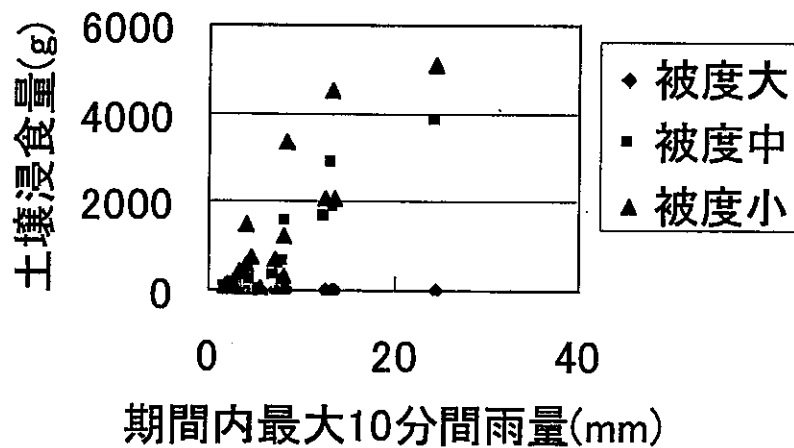


図-4.3 10分間雨量と土壤浸食量 (林床植生被度別)

結果(3): 地表流流出量 × 最大10分間雨量 と土壤浸食量

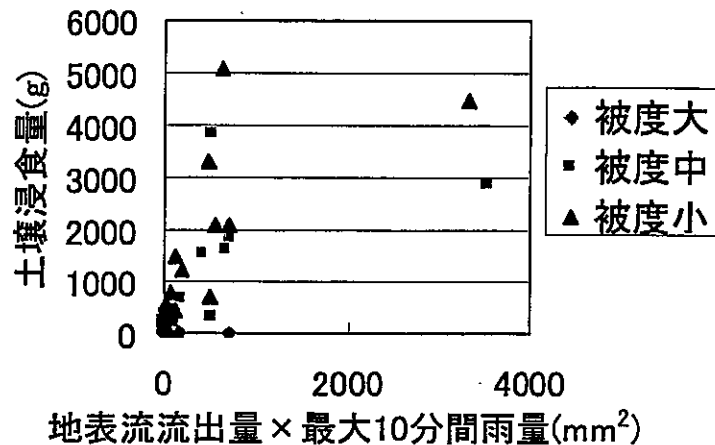


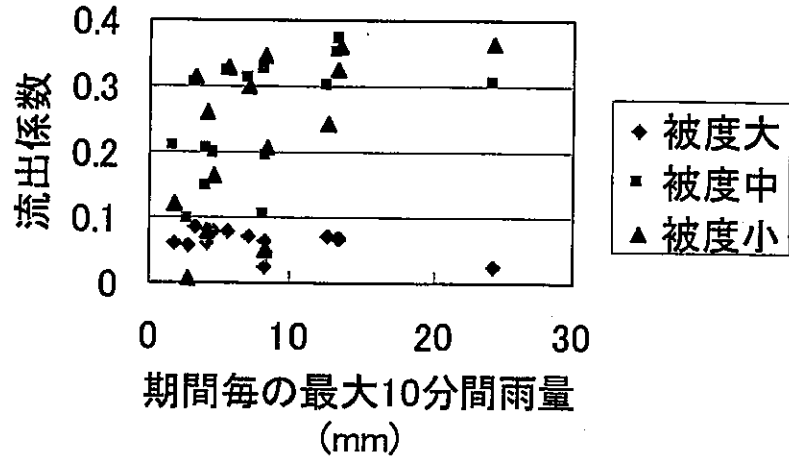
図-4.4 地表流流出量 × 最大 10 分間雨量と土壤浸食量 (林床植生被度別)

4.3 林床植生被度別の樹冠通過雨量と流出係数の関係

各測定期間内の地表流の流出量を樹冠通過雨量 (試験斜面内に降った雨水の量) で除した値を流出係数と定義した。

図-4.5 には期間内毎の最大 10 分間雨量と地表流の流出係数の関係を示す。被度が小および中では大に比べて流出係数が大きく、林床植生の被度は土壤浸食量ばかりでなく、地表流の流出量にも大きな影響を与えていることがわかる。なお、全測定期間内における林床植生被度と流出係数の関係を図-4.6に示す。流出係数は被度大、中、小の順にそれぞれ、0.066、0.290、0.275 であり、被度が小さくなると流出係数は増大することが明らかとなった。林床植生被度が中・小では被度が大の約4~5倍の流出係数になった。

結果(4):最大10分間雨量と流出係数



$$\text{流出係数} = \text{表面流量} \div \text{林内雨量}$$

図-4.5 最大10分間雨量と流出係数(林床植生被度別)(7月5日~11月21日)

結果(5):被度別

7月5日~11月21日における流出係数
(総降雨量2344mm)

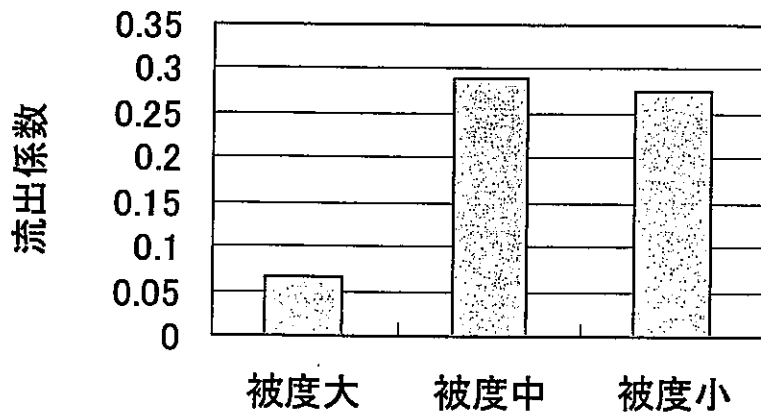


図-4.6 林床植生被度と流出係数(7月5日~11月21日)

4.4 林床植生被度別の土壤浸食量

全観測期間内（7月5日～11月21日）における林床植生被度と土壤浸食量の関係を図-4.7に示す。林床植生被度大、中、小の順に土壤浸食量は11、10,275、16,350gであり、被度が小さくなると土壤浸食量は増加する。

各林床植生被度の試験斜面（A）付近において、林床植生被度が試験斜面（A）と同じような箇所の面積 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} = 0.25\text{m}^2$ 内のAo層内のリター堆積量を2004年9月11日に測定した。図-4.7には林床植生被度別のリターの堆積量を示す。リター堆積量は被度大、中、小の順にそれぞれ、987、369、75gであり、これまでの研究（村井ら1973）においても指摘されているように被度が小さくなるとリター堆積量は減少する傾向がある。

対象斜面の表層土のサンプルの（絶対）乾燥密度（ $=0.56\text{g}/\text{cm}^3$ ）を測定し、図-4.8に示す方法で試験斜面内の平均土壤浸食深（斜面に垂直方向）を求めた。林床植生被度と試験斜面内の平均浸食深（斜面に直角方向）の関係を図-4.9に示す。林床植生被度大、中、小の順に土壤浸食深は0、2.54、4.08mmであり、被度が小さくなると土壤浸食深は増加する。

結果(6):被度別 7月5日～11月21日における総土壤浸食量 (総降雨量2344mm)

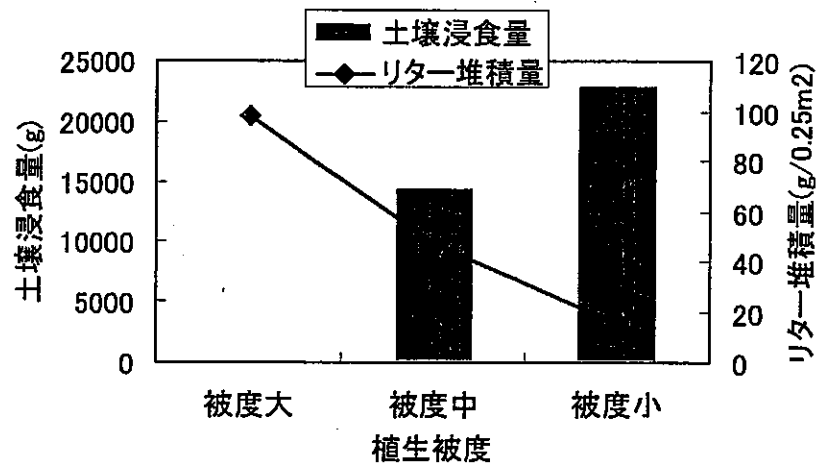


図-4.7 林床植生被度と土壤浸食量およびリター堆積量（7月5日～11月21日）

土壤浸食深の推定

土壤質量と浸食深の推定方法

$V=5,600\text{g}$ が浸食深 $D=1\text{mm}$ に相当する。

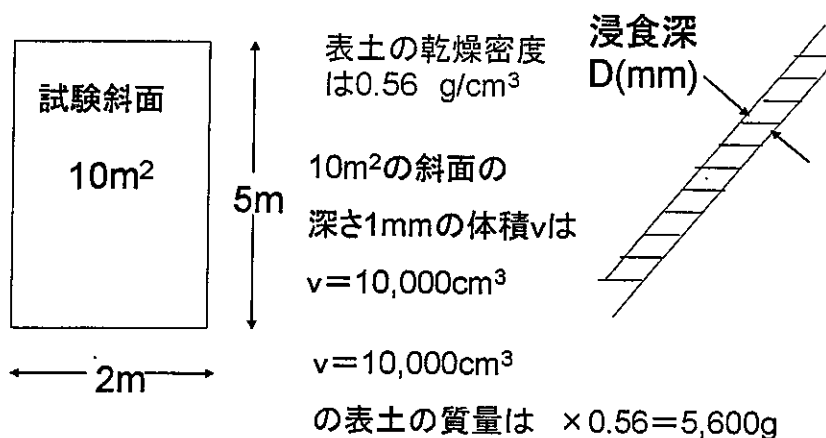


図-4.8 土壤浸食深の算定手法

結果(7):被度別 7月5日～11月21日における土壤浸食深 (総降雨量2344mm)

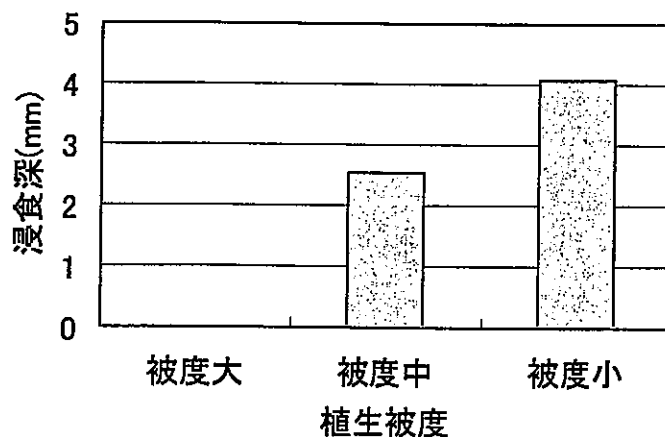


図-4.9 林床植生被度と土壤浸食深 (7月5日～11月21日)

4.4 林床植生被度別のリター流出量

全観測期間内（7月5日～11月21日）における林床植生被度とリター流出量の関係を図-4.10に示す。林床植生被度大、中、小の順にリター流出量は173、732、1948gであり、被度が小さくなるとリター流出量は増加する。なお、リター堆積量はリター流出量と負の相関を示す。

4.5 林床植生被覆率と土壌浸食深および流出係数

全観測期間内（7月5日～11月21日）における林床植生被覆率と土壌浸食深および流出係数の関係を図-4.11に示す。林床植生被覆率が大きくなると土壌浸食深および流出係数は小さくなる傾向を示す。

結果(8)被度別 7月5日～11月21日におけるリターの流出量 (総降雨量2344mm)

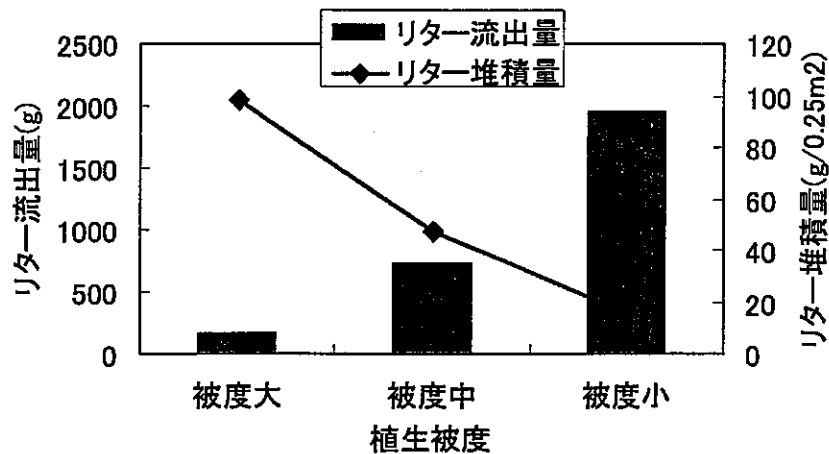


図-4.10 林床植生被度とリター流出量 (7月5日～11月21日)

結果(9): 植生被覆率と土壤浸食深、流出係数、
(7月5日～11月21日、総降雨量2344mm)

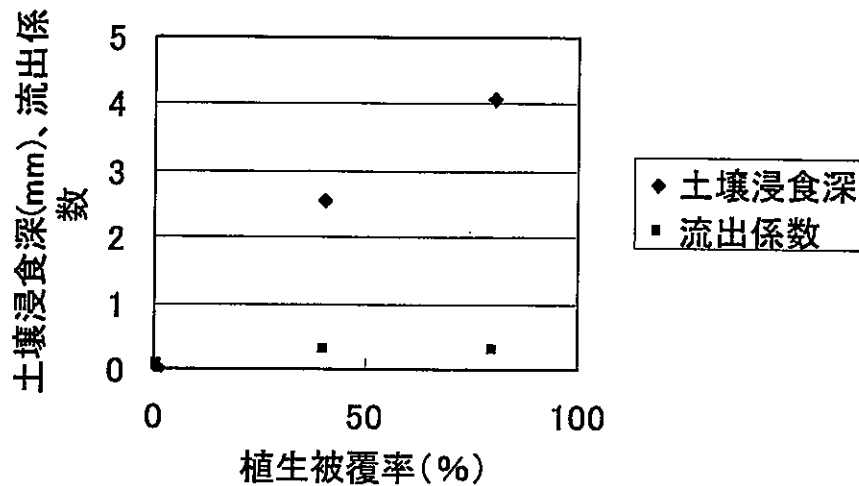


図-4.11 林床植生被覆率と土壤浸食深および流出係数

4.6 地表流流出量のハイドログラフ

2004年7月11日の降雨における樹冠通過雨量と林床植生被度別の地表流流出量のハイドログラフを図-4.12に示す。また、地表流の累積流出量を図-4.13に示す。2004年7月11日の降雨は12:30～15:00の間に雷雨により起こり、樹冠通過雨量の連続雨量は47.7mm(3雨量計の平均値)であり、最大10分間雨量は24.3mmである。この降雨における地表流の流出係数は被度大、中、小の順に0.03,0.4,0.5である。図-4.12において地表流のハイドログラフの増減は降雨のハイトグラフの増減とほぼ一致しているが、被度小については時間遅れが認められる。これは地表流の濾過用に設置した不織布が目詰まりしていたために流出が遅れたものと考えられる。

結果(10):被度別地表流ハイドログラフ (2004年7月11日の例)

被度が大きいとピーク流出量が小さくなる。

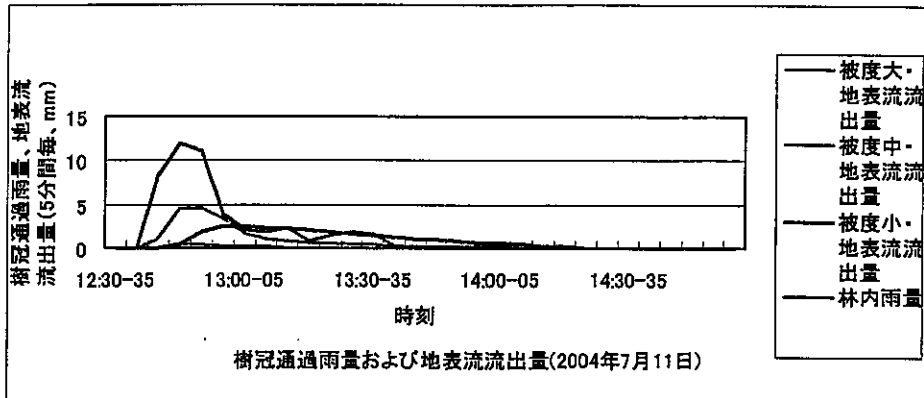


図-4.12 被度別地表流ハイドログラフ (2004年7月11日)

結果(11):被別地表流流出量 (2004年7月11日)

被度が大きいと流出量が小さくなる。

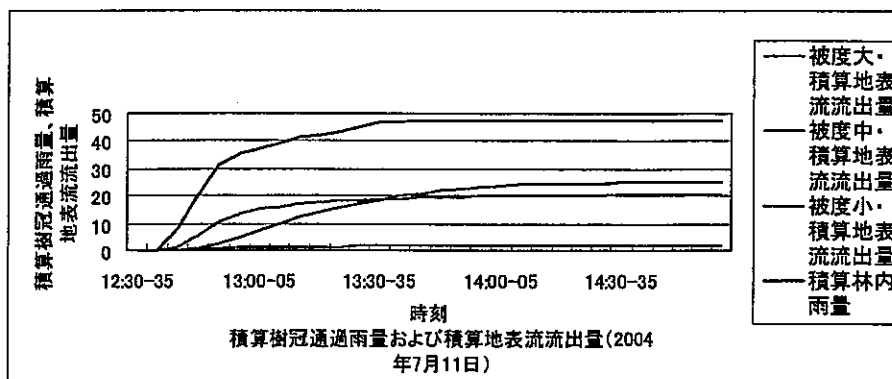


図-4.13 被度別地表流流出量 (2004年7月11日)

4.7 斜面長別の土壌浸食量とリター流出量の関係

試験斜面（B）では、斜面長を5m, 10m, 20mと変化させて2004年8月20日～11月21日の間、1～2週間毎に土壌浸食量とリター流出量を測定した。各観測期間毎の積算雨量と斜面長別の土壌浸食量（乾燥質量）の関係を図-4.14 に、また、各観測期間毎の積算雨量と斜面長別のリター流出量（乾燥質量）の関係を図-4.15 に示す。全観測期間（8月20日～11月21日）における斜面長別の土壌浸食量とリター流出量を図-4.16 に示す。

一般的には斜面長が増加するにつれて土壌浸食量とリター流出量は増加するのであるが、今回の観測結果ではこれに反して斜面長が増加するにつれて土壌浸食量とリター流出量は減少している。斜面長5mと10mのリター堆積量の比較（図-4.16）から分かるように、5mの方が10mよりもリター堆積量が少ないために5mの方が10mよりも土壌浸食量とリター流出量が多くなったと考えられる。一方、斜面長20mの試験斜面の中には1本の立木が入ってしまったために、この立木の根部の傾斜の緩い箇所では浸食・流下した土砂が堆積したためにそれよりも下方への土壌流出量が減少したものと考えられる。

結果(12): 斜面長別

8月20日～11月21日における浸食土砂量 (総降雨量1785mm)

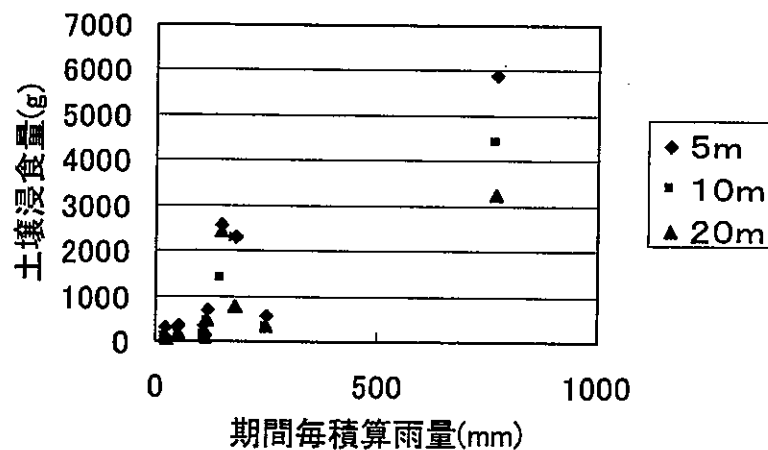


図-4.14 斜面長別の土壌浸食量

結果(13) : 斜面長別
8月20日～11月21日におけるリター流出量
(総降雨量1785mm)

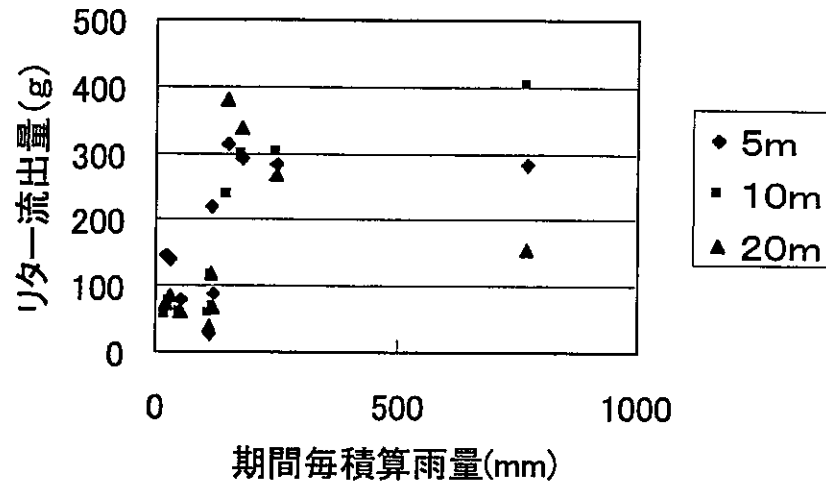


図-4.15 斜面長別のリター流出量

結果(14) : 斜面長別
8月20日～11月21日における土壌浸食量、リター流出量
(総降雨量1785mm)

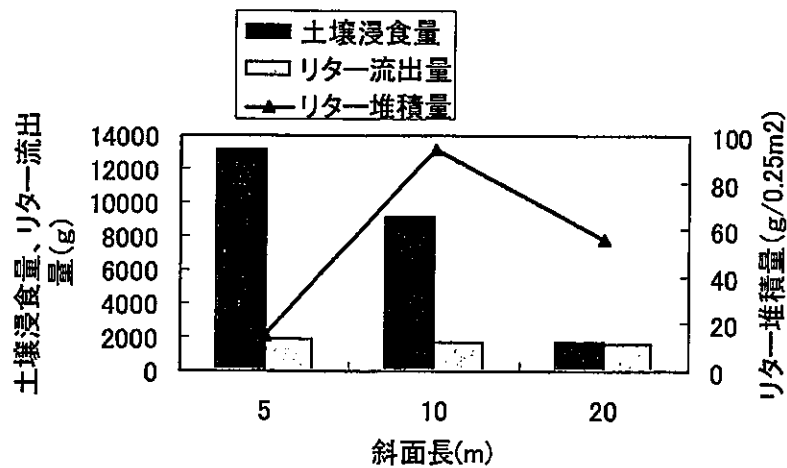


図-4.16 斜面長別の土壌浸食量、リター流出量
 およびリター堆積量 (8月20日～11月21日)

4.8 斜面勾配別の土壤浸食量とリター流出量の関係

試験斜面（C）では、斜面勾配が 12° 、 19° 、 33° と異なる地点に試験斜面を設置した。2004年7月26日～11月21日の間、1～2週間毎に土壤浸食量とリター流出量を測定した。各観測期間毎の積算雨量と斜面勾配別の土壤浸食量（乾燥質量）の関係を図-4.17に、また、各観測期間毎の積算雨量と斜面勾配別のリター流出量（乾燥質量）の関係を図-4.18に示す。全観測期間（7月26日～11月21日）における斜面勾配別の土壤浸食量とリター流出量を図-4.19に示す。

図-4.17～4.19から分かるように斜面勾配の増大とともに土壤浸食量とリター流出量は増加することが分かる。この結果はこれまでの観測・研究結果と一致している。土壤浸食量が増加するのは斜面勾配の影響もあるが、リター堆積量の影響もあると考えられる。なお、斜面勾配が 33° では、斜面勾配が 12° に比べて、土壤浸食量では約3.3倍に、リター流出量では約1.7倍に増大している。

結果(15) : 斜面勾配別 7月26日～11月21日における浸食土砂量 (総降雨量2256mm)

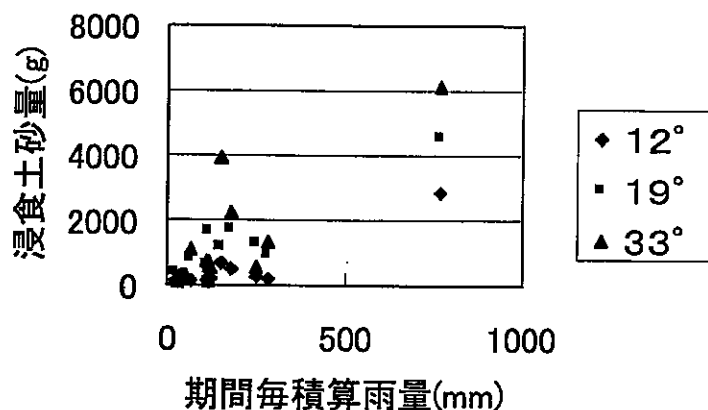


図-4.17 斜面勾配別の土壤浸食量

結果(16): 斜面勾配別
7月26日～11月21日におけるリター流出量
(総降雨量2256mm)

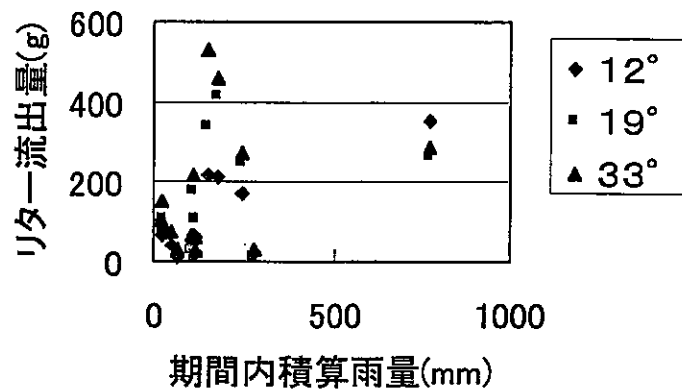


図-4.18 斜面勾配別のリター流出量

結果(17): 斜面勾配別
7月26日～11月21日における土壌浸食量、リ
ター流出量(総降雨量2256mm)

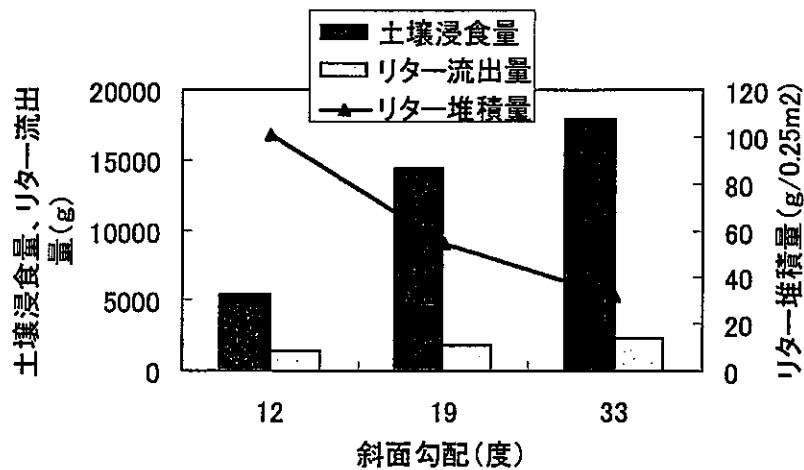


図-4.19 斜面勾配別の土壌浸食量およびリター流出量 (7月26日～11月21日)

4.9 リター堆積量の変化と土壤浸食量

土壤浸食量はリターの堆積量（落葉地被物の量）により大きく影響されることはこれまでの多くの研究（例えば村井ら 1973）により指摘されている。

通常の崩壊地や裸地においては樹林がないため、一旦リターが流亡してしまうと回復することはない。しかしながら、堂平ではブナという上層木が存在するため、毎年多量のリターが夏～秋には生産・供給される。地表に堆積しているリターは地表流や風で流亡するとともに、堂平ではシカにより食べられていることが報告されている。さらに夏～秋に堆積したリターは時間の経過とともに微生物等の影響を受けて腐朽・分解して減少していく。また、地表流や風による運搬・移動に伴い、リターの堆積量は場所により大きく変化していると考えられる。このため、堂平ではリター堆積量は季節および場所により大きく変化しており、これが土壤浸食量や流出係数に大きな影響を与えていると考えられる。

リターの生産、地表面への補給、リターの流出、およびシカの採食によるリター量の変化の模式図を図4.20に示す。リターの移動は植生の被度によっても影響されるので、今後はリターの移動のメカニズムとリターと植生の土壤浸食に与える影響をさらに詳細に検討する必要がある。

土壤浸食量とリター流出量の月別変化を図4.21に示す。7～9月に比べて10～11月では土壤浸食量に対するリターの流出量の割合が高いことが分かる。これは10～11月には上層木であるブナによりリターが供給されているためと考えられる。

月別の単位雨量当たりの土壤浸食量およびリター流出量を図4.22に示す。図中、棒グラフが単位雨量あたりの土壤浸食量であり、折れ線グラフが単位雨量当たりのリター流出量である。7月から11月へと月日が経過するにつれて土壤浸食量は減少する傾向にある。これは植生の被度の変化による影響もあるが、リター堆積量の変化による影響も大きいものと考えられる。さらにリター流出量が9月で特に多いのは、台風に伴う強風によりまだ緑の葉が落ちて地表に供給されたためと考えられる。

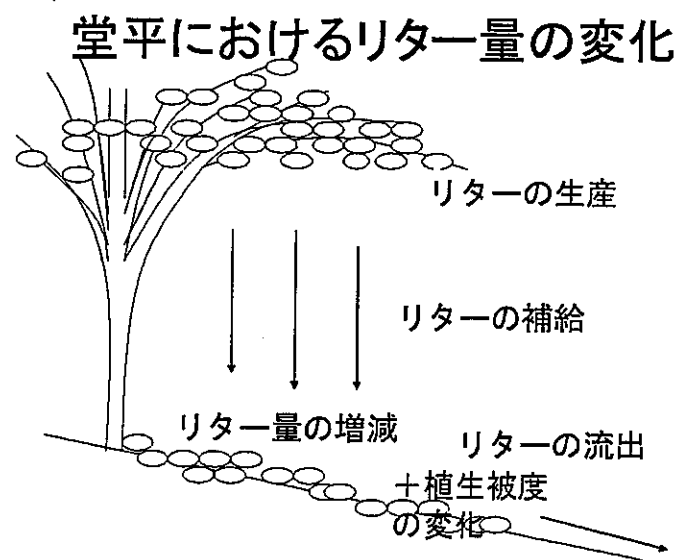


図4.20 堂平におけるリター量の変化模式図

結果(18): 月別の土壤浸食量と リター流出量

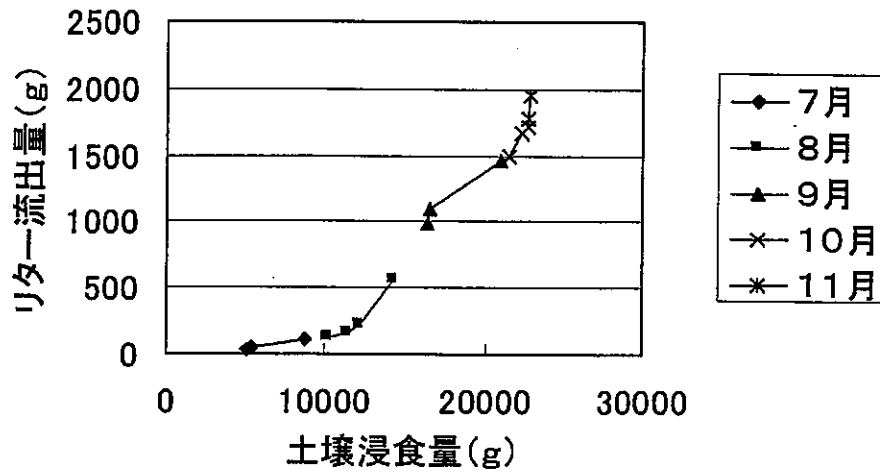


図-4.21 土壤浸食量とリター流出量の月別変化

結果(19): 月別の単位雨量当たり 土壤浸食量およびリター流出量

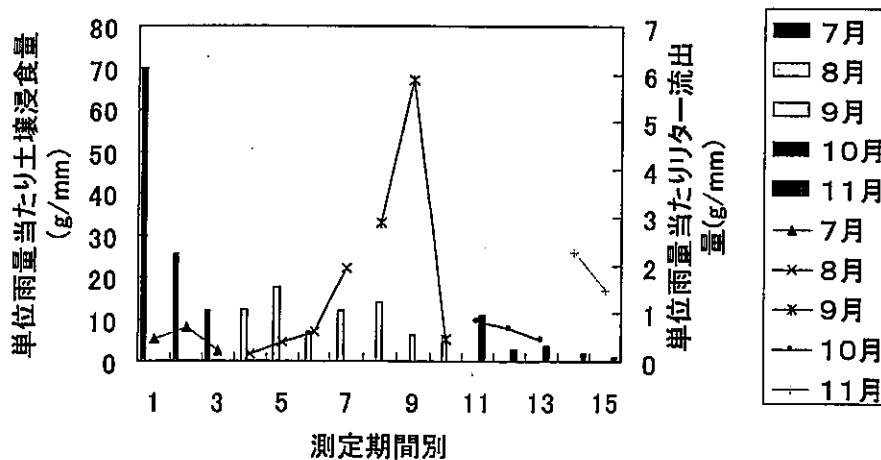


図-4.22 月別の単位雨量当たりの土壤浸食量およびリター流出量

4.10 林床植生量とリター堆積量およびリター流出量

試験斜面 (A) における、2004 年 9 月 11 日に測定した林床植生の絶乾重量とリター堆積量および全観測期間 (7 月 5 日～11 月 21 日) の林床植生被度別のリター流出量の関係を図-4.23 に示す。図-4.23 において林床植生絶乾重量とリター堆積量には正の相関が認められ、さらにこれらとリターの流出量には負の相関が認められる。これらから林床植生量、リター堆積量およびリター流出量は相互に影響しているものと思われる。

結果(20): 林床植生、リター堆積量およびリター流出量

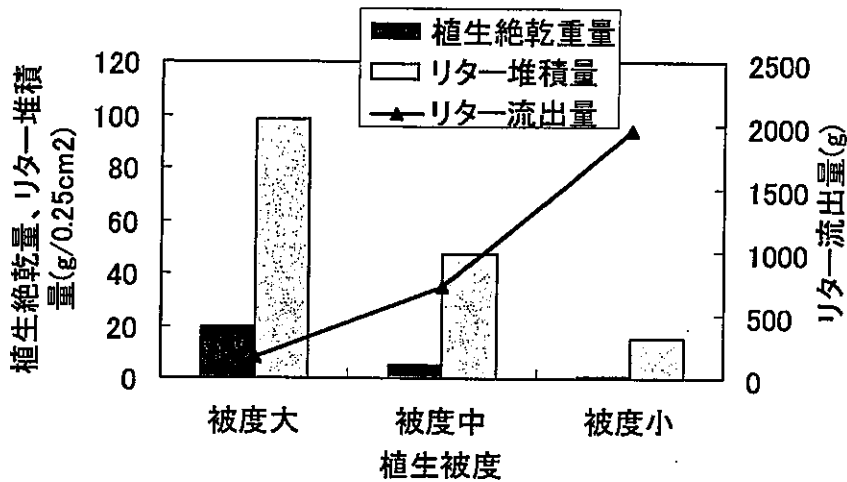


図-4.23 被度別の林床植生、リター堆積量 (9 月 11 日測定)、リター流出量 (7 月 5 日～11 月 21 日) の関係

4.11 リターの供給量と移動量

斜面上部および下部に設置したリター測定柵内に 2004 年 11 月 7 日～11 月 21 日および 11 月 21 日～12 月 5 日の間に堆積したリターを採取して絶乾重量を測定した結果を図-4.24 に示す。斜面上部から下部に向かって多量のリターが移動しているが、これは主に地表流と風の作用によるものと考えられる。また斜面傾斜方向と直角方向にも多くのリターが移動しているが、これは主として風により運搬されているものと考えられる。

結果(21):リターの発生量と移動量(単位:g)

11月7日～11月21日			11月21日～12月5日		
斜面上	231		斜面上	821	
27	5	68	139	4	241
	0			5	
斜面下	134		斜面下	357	
27	21	201	559	6	577
	31			121	

図-4.24 リター測定柵内に堆積してリターの絶乾質量 (g)
(2004年11月7日～11月21日および11月21日～12月5日)

5. まとめ

5.1 林床植生被度と土壤浸食量等との相互関係

林床植生被度は土壤浸食量、リター堆積量、リター流出量、浸透能、流出係数と強い相関があり、それらは表-5.1 に示すように相互に関連している。

表 5.1 土壤浸食量と関連する要因

要因	変化
林床植生被度 (植生の量)	大 → 小
土壤浸食量	小 → 大
流出係数	小 → 大
リター堆積量	大 → 小
リター流出量	小 → 大
浸透能	大 → 小

土壤浸食量には林床植生被度が大きな影響を与えているが、それとともにリターの堆積量も大きな影響を与えていると考えられる。したがって、今後はリター堆積量の時間的、空間的变化を調査し、それらと土壤浸食量の関係を調査する必要がある。このことにより近い将来の丹沢における土壤浸食量を精度高く推定することが可能となるとともに、効果的な対策工の立案にも寄与できると考えられる。

5.2 林床植生の衰退が土壤浸食量、流出係数に与える影響

7月5日～11月21日の139日間における、斜面勾配33°の箇所における林床植生被度別の土壤浸食量調査および流出係数調査から、林床植生の被度が大（被覆率約80%）から小（被覆率約1%）になると土壤浸食深は約0mmから約4mmに増大し、流出係数は約4倍に、リターの流出量は約11倍になった。

5.3 斜面勾配および斜面長が土壤浸食量に与える影響

斜面勾配12°、19°、33°と増大すると土壤浸食量、リター流出量も増大する結果が得られた。一方、斜面長が5m、10m、20mと増大しても、土壤浸食量およびリター流出量は増大しない結果が得られたが、これにはリター堆積量の違いの影響および試験斜面内の立木の存在が大きく影響していたためと考えられる。

5.4 土壤浸食量とリター流出量の季節変化

単位雨量当たりの土壤浸食量は7月から11月に向かって減少する傾向が認められる。一方、単位雨量当たりのリター流出量は7月から11月に向かって増加する傾向が認められる。これには林床植生の影響よりも、リターの供給、堆積量の変化の影響が大きいと考えられる。

6. 今後の検討課題

丹沢における土壤浸食量の分布の推定を行うためにはUSLEの各パラメータの値を算定する必要がある。このためには土壤浸食量の観測を継続して行い年間を通したデータを得る必要がある。このことにより凍結融解やリター堆積量、林床植生被度の季節変化の影響を知ることができる。

さらに、土壤浸食量の推定精度を向上させるためには、土壤浸食量に大きな影響を与えていると考えられるリター堆積量、林床植生被度の季節変化および空間分布を調査し、これと土壤浸食量の相互関係を明らかにする必要がある。

リターの時間的・空間的分布の変化を把握するためにはリターの発生量、移動量の変化を測定するとともに、リターの移動および堆積量の変化の機構を解明する必要がある。

また、土壤の浸透能と流出係数の季節変化および林床植生被度およびリター堆積量との関係を明らかにする必要がある。

効果的で、環境に対する負荷が少ない土壤浸食対策手法を検討し、試験的に施工してその効果を検証する必要がある。

7. 参考文献

- 村井 宏ら (1973) : 落葉地被物浸食防止効果についての実験、第 84 回日林講、377-379
北原 曜(2002) : 森林の土砂流出防止機能の評価手法、第 40 回治山シンポジウム、3-12
北原 曜(2002) : 植生の表面浸食防止機能、砂防学会誌、54(5)、92-101
三浦 覚(2000) : 表層土壌における雨滴浸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、日林誌、82(2)、132-140

8. 付録

付録(卒業論文)……報告書4

神奈川県東丹沢大洞沢における
浮遊土砂の流出

森林科学コース
森林保全学研究室
若原 妙子

目次

I. 序論	1
I-1. 研究の目的	1
I-2. 土砂礫の輸送	3
I-3. 浮遊砂濃度と流量間のヒステリシス	4
II. 調査地の概要	6
II-1. 調査地	6
III. 調査方法	9
III-1. 雨量	9
III-2. 流量	9
III-3. 浮遊砂濃度	11
III-4. 濁度	12
IV. 結果および考察	14
IV-1. 降雨と流量	14
IV-2. 降雨と浮遊砂濃度	19
IV-3. 降雨、流量および浮遊砂濃度	27
IV-4. 濁度計による浮遊砂濃度の補完	33
IV-5. 流量と浮遊砂濃度	34
IV-6. 流出浮遊砂量	38
V. 結論	40
謝辞	41
参考文献	42
付録	43

I. 序論

I-1. 研究の目的

国土の7割を占める日本の山地は、急峻で複雑な地型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、水中で沈むことなく下流域や海まで流下する。浮遊砂は山腹からの産出土砂の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、土砂が沈殿・堆積し、ダムの耐用年数を縮める。(宮ヶ瀬ダムに流入する浮遊砂を図I-1に示した。)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土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⁾。なお浮遊土砂の解析方法についての研究をI-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。特に神奈川県の日沢山地では、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年の日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深く深刻化している。

流入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。

本研究では、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、流量及び浮遊砂濃度を計測した。そこから浮遊砂の流出量を推定すると共に、流量と浮遊砂量の相関関係を求めた。



図 I - 1 濁水の流入する宮ヶ瀬湖 (2004年12月5日撮影)

I - 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 I - 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)

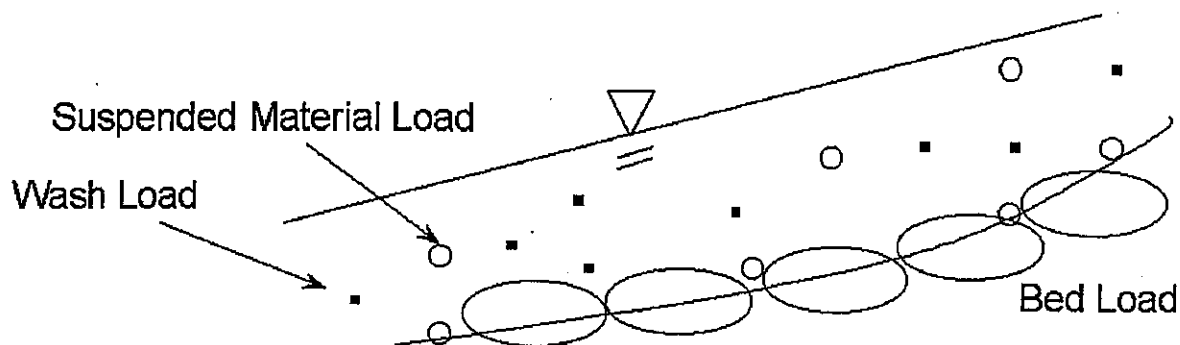
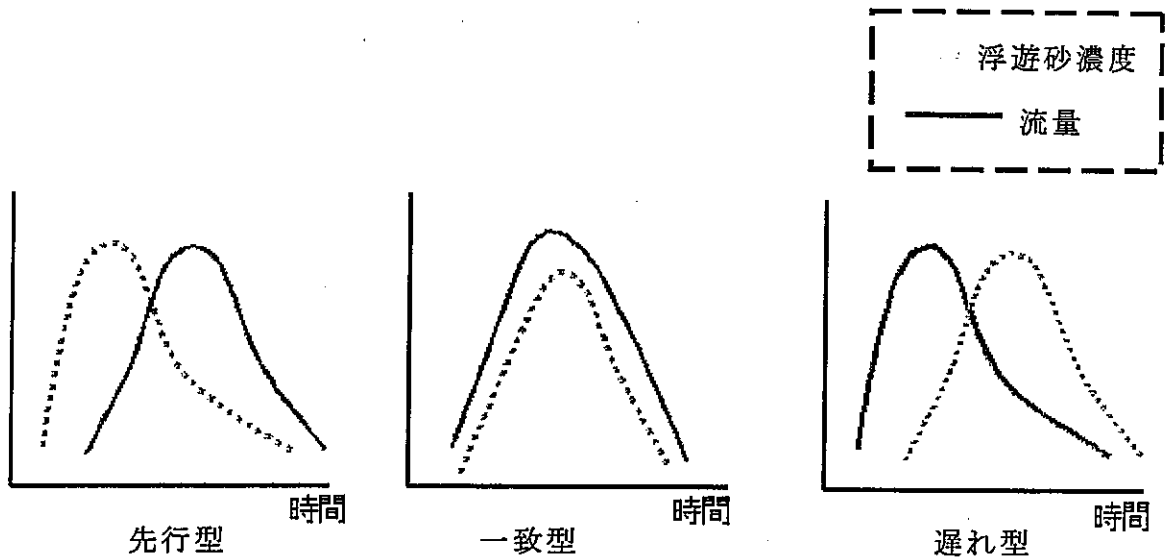


図 I - 2 掃流砂及び浮遊砂の概念図

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

1-3. 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IV-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。山腹土壤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。

Ⅱ. 調査地の概要

Ⅱ-1. 調査地

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Ⅱ-1に広域地図、図Ⅱ-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垂層群に属する。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、表面流の形成が大きく、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。最下流部には大洞量水観測所が設置され、1981年以来、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Ⅱ-1に流域概況を示す。

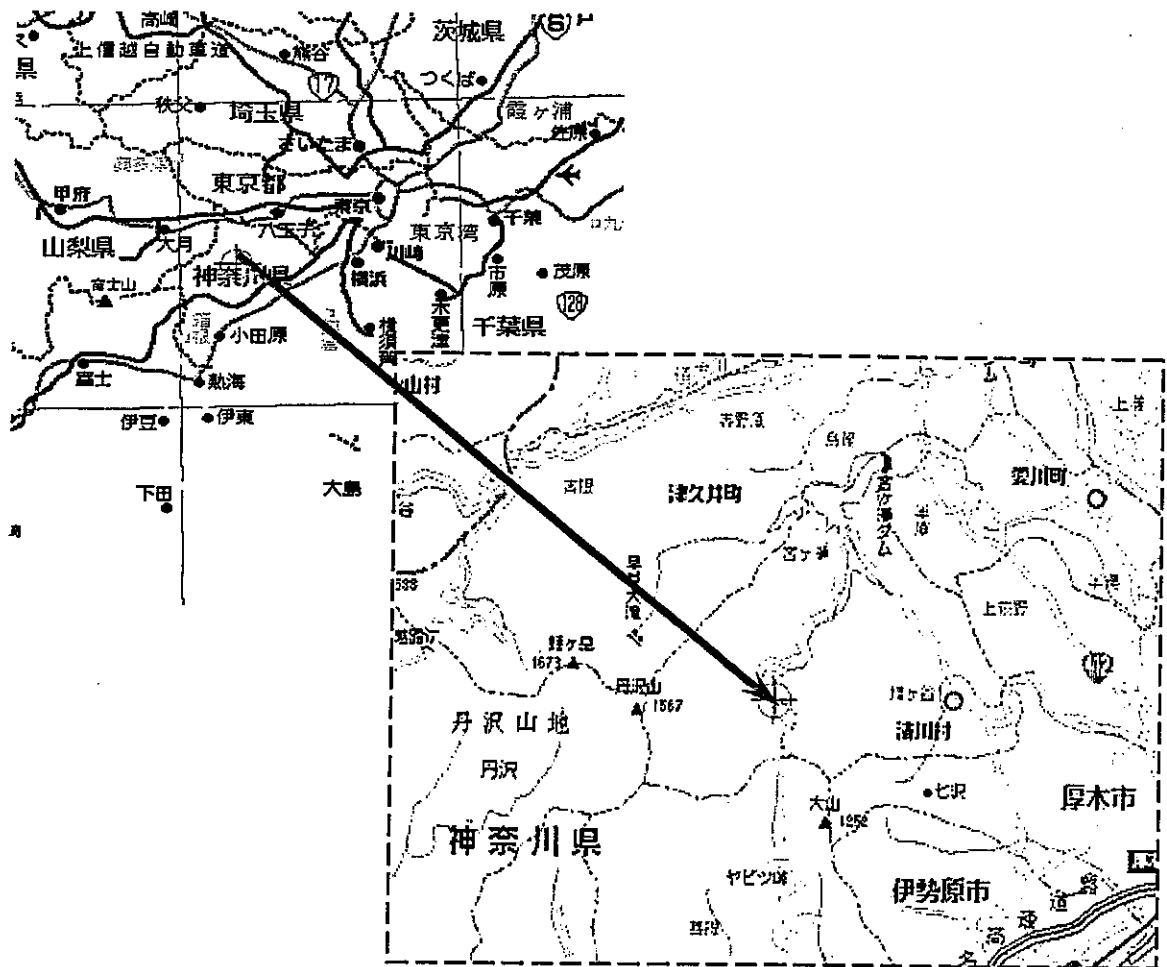


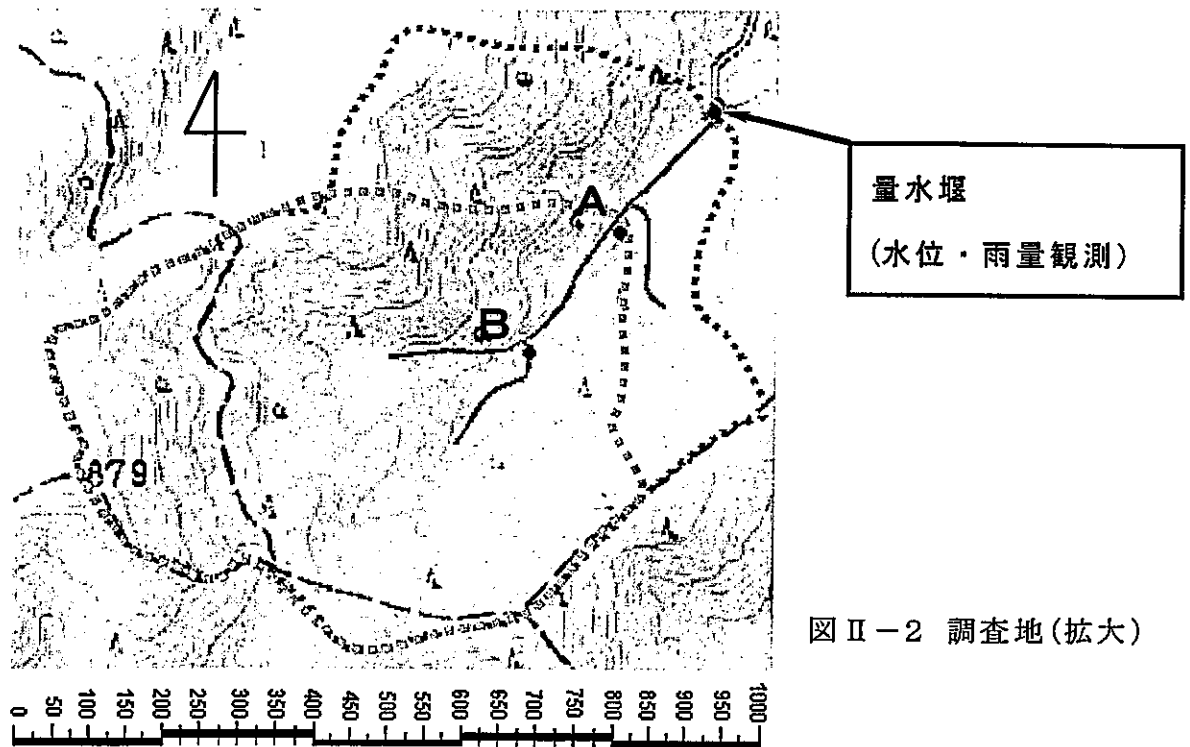
図 II - 1 調査地 (広域)

表 II - 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)	到達距離集中度	0.139(階級幅100m)
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	4.80km
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。なお、流域面積はデジタイザーで地形図から判断した。表Ⅱ-2に流域形状を示す。



図Ⅱ-2 調査地(拡大)

表Ⅱ-2 流域形状

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

Ⅲ．調査方法

Ⅲ－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Ⅲ－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Ⅲ－１
転倒マス式雨量計

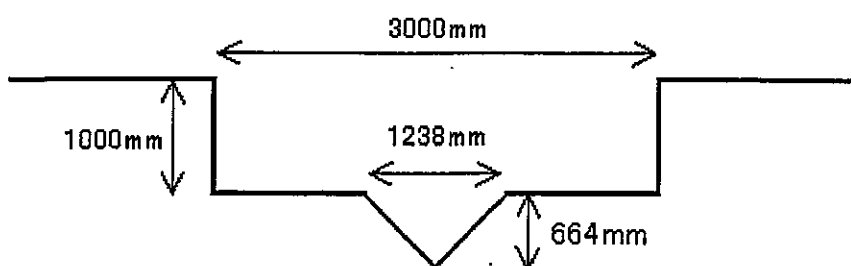
Ⅲ－２．流量

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Ⅲ－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。

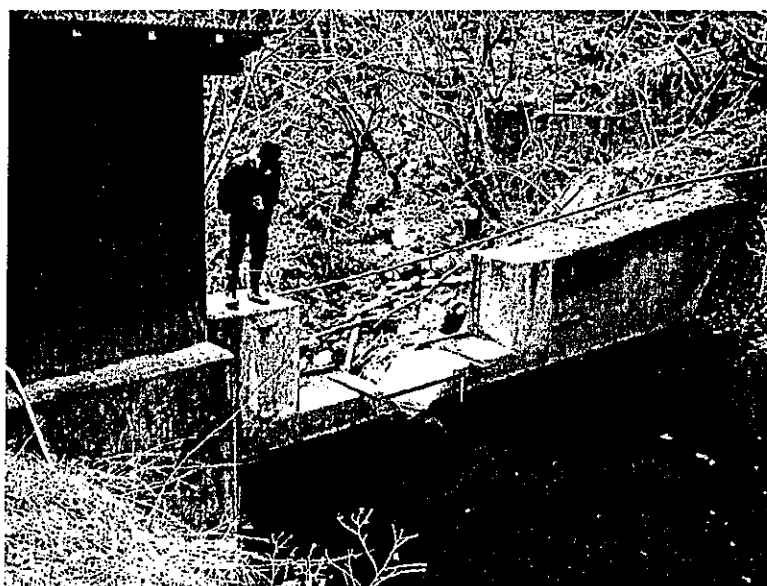
刃型三角堰の理論式は次式で示される。

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

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、θ=88°を適用し、流量計算を行った。



図Ⅲ－２ 量水堰構造図



図Ⅲ－３
大洞沢量水堰

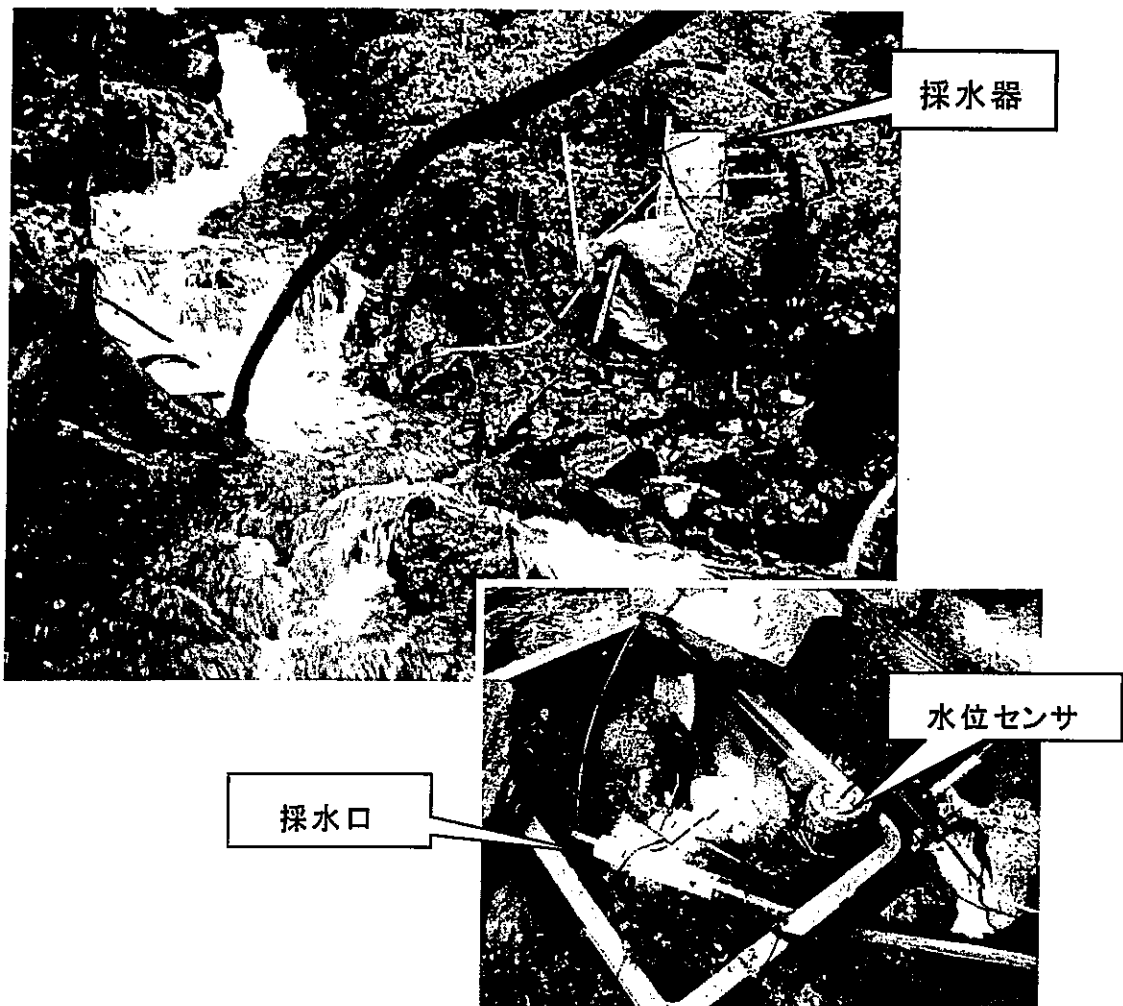
量水堰水位の算出方法は、自記水位計のチャート紙上に記録された点と、同時刻に測った実測水位を合わせ、時間と流量のズレを補正することで行う。水位は、実際の水位の昇降と連動したペンレコーダーがチャート紙上を動き、記録される。ペンがチャート紙の端まで来ると、反転して更に記録を続ける仕組みになっているが、機械の不調で反転が行われなかった箇所やインクの無い箇所があり、欠測が生じた。

Ⅲ－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Ⅲ－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検知し、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。なお、10月20日の採水のみ1時間間隔で行った。

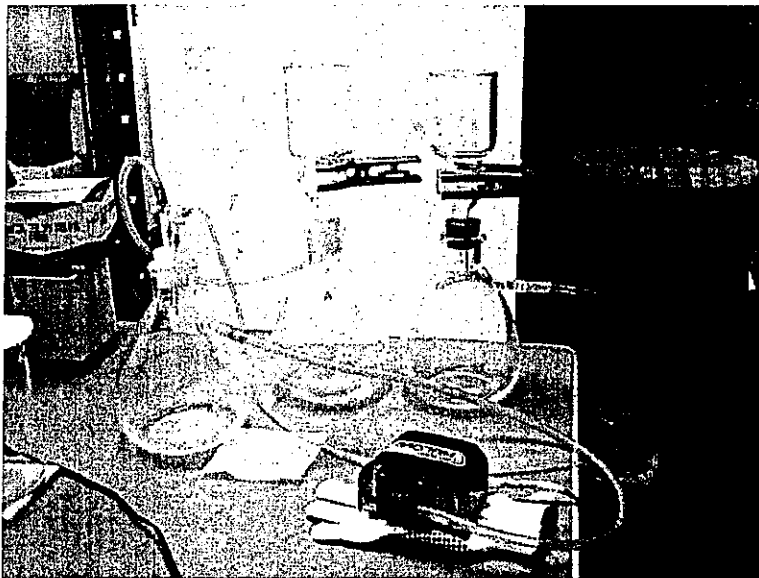
採水器はA地点（下流）、B地点（上流）の2箇所を設置した。A地点では採水器を下流側支流に設置（6月8日～7月18日）し、その後堰堤工事のため本流に移動し、再設置（8月10日～）した。採水は計11回行ったが、実際に分析可能な試料が取れたのは7/29(B)、8/18(A,B)、9/4,5(A,B)、10/20(B)の4イベントで合計6データだった。



図Ⅲ－４ 採水器（B地点）

<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℃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III-5)。濾過後、再度濾紙を105℃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。



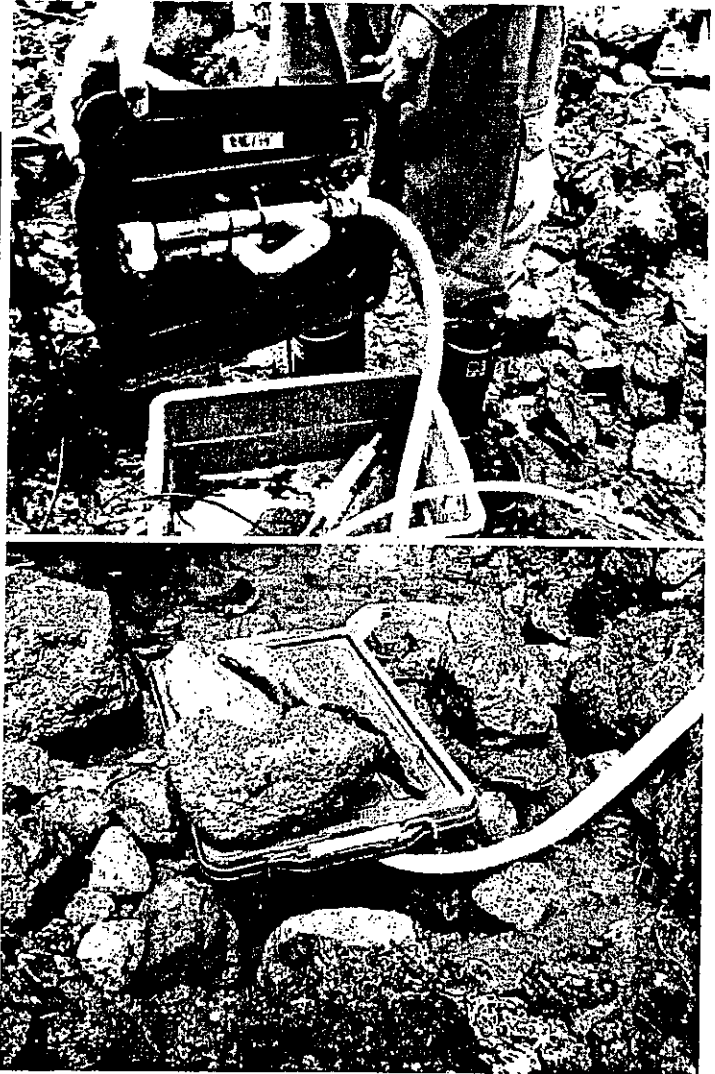
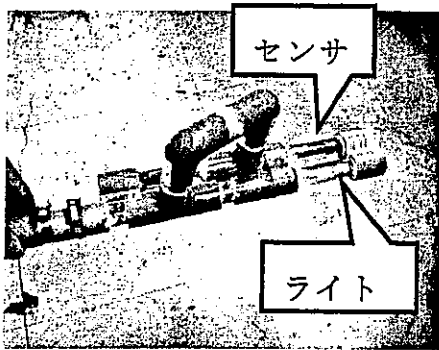
図III-5 吸引濾過器

III-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2004年6月18日～10月20日の期間で行った。図III-6に濁度計の形状および河床への設置の様子を示す。

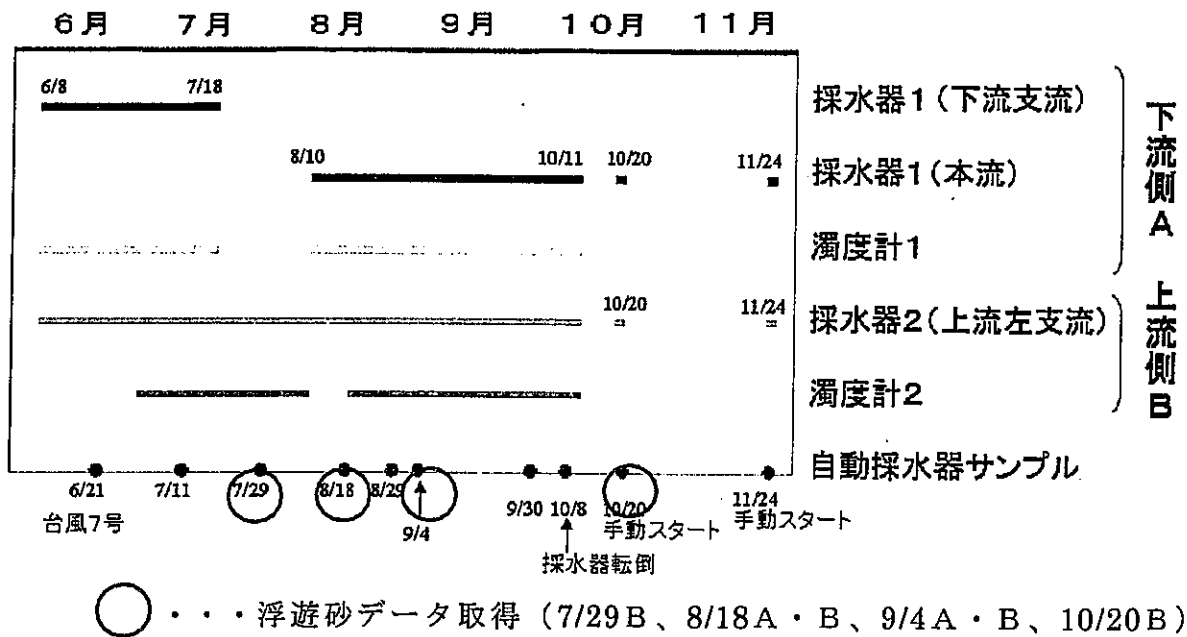
濁度計(自作)はLEDライトと、受光部にフォトセンサ1を備え、土砂流出による濁りを「光の透過率」の変化として感知する。また、周囲の観測環境の明るさを相対値として捉えるため、LEDライトと対にならないフォトセンサ2を備える。ライト及びセンサーは5分間隔で作動する。データロガーは下流側はCR10(Campbell Scientific社)を用い、上流側では9月4日までCR10、その後はデータマーク(白山工業株式会社)を用いた。

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Ⅲ-6 濁度計

計測器の稼動状況を時系列でまとめた図Ⅲ-7を示す。



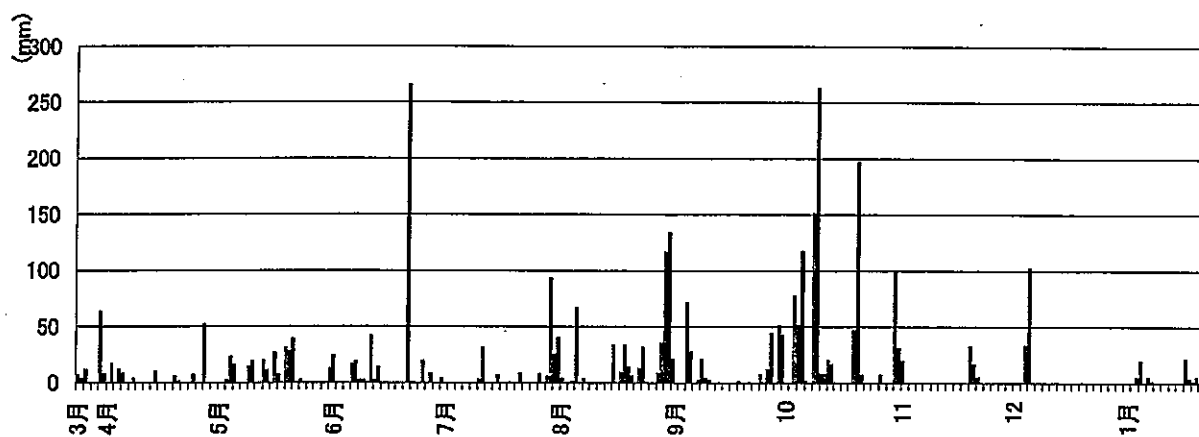
図Ⅲ-7 計測器の稼動状況

IV. 結果および考察

IV-1. 降雨と流量

図IV-1-1に、2004年3月24日から2005年1月20日までの日雨量を示す。なお、量水堰の浚渫工事のため雨量計を一時撤去したため、7月5日～9日、11月8日～18日のデータは欠損している。観測期間の287日で、総計3286.5mmの雨量を計測した（欠損を含めない）。降雨が観測された126日中、日雨量が60mmを越えた日は15日あり、その雨量合計は1820mmで、観測期間総降雨量の55.3%を占める。日雨量が250mmを越えた日も2度観測された。

図IV-1には月別降水量、最大日雨量、最大10分間雨量を示す。



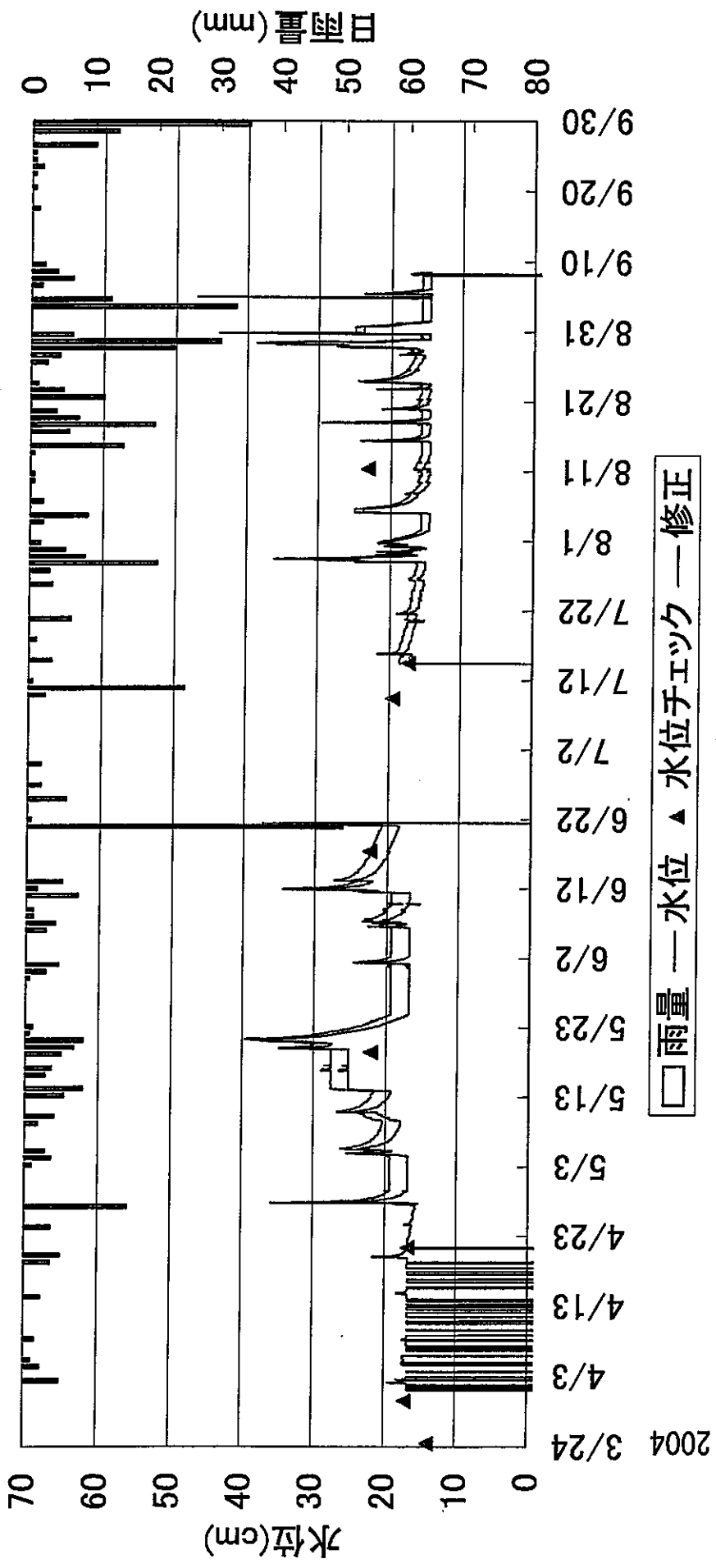
図IV-1-1 日雨量 (2004年3月24日～2005年1月20日)

表IV-1 月別雨量及びピーク雨量

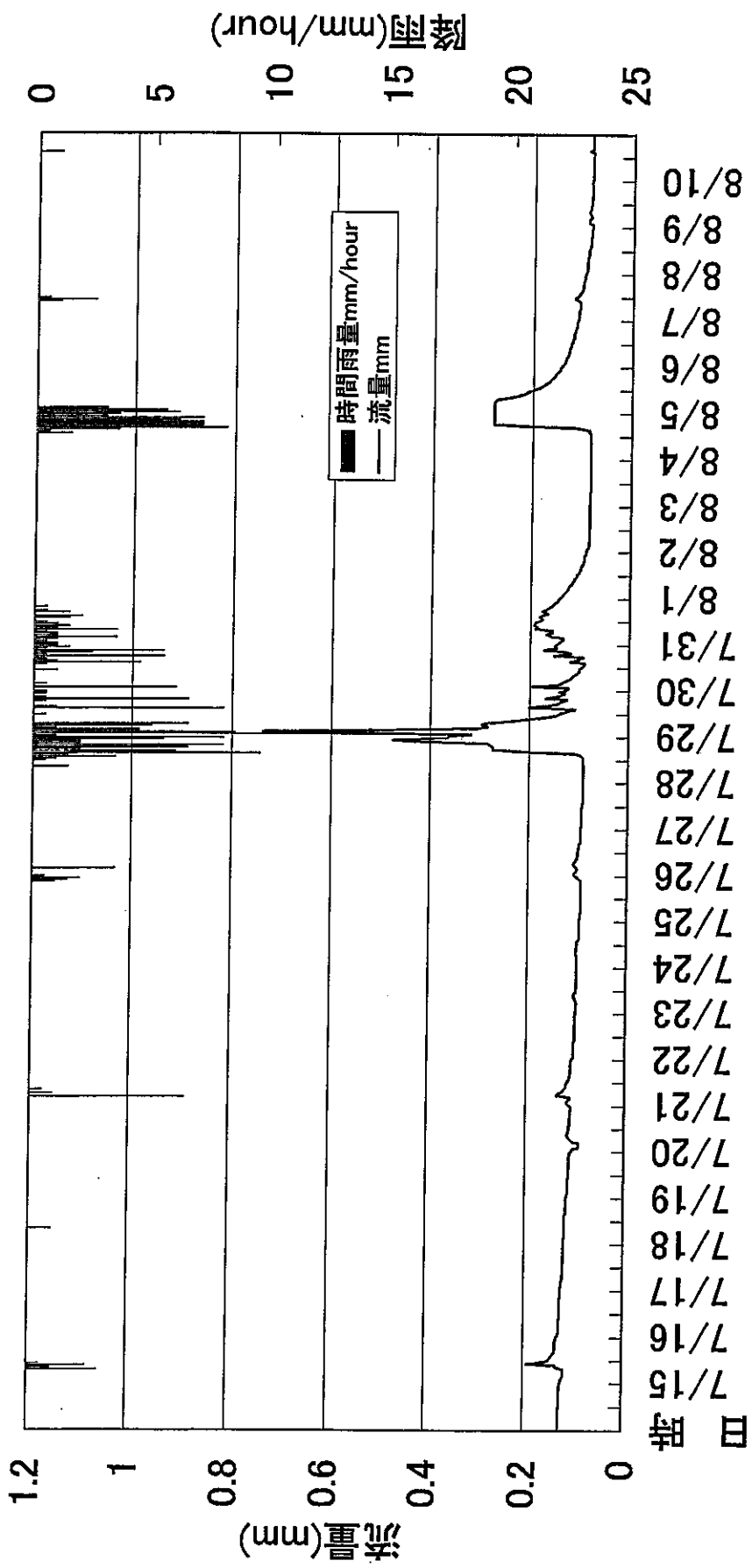
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
総雨量(mm)	117.5	255.5	424.0	226.5	539.0	244.5	1105.5	76.0	138.5
最大日雨量 (mm)	52.2 (4/27)	39.0 (5/21)	266.0 (6/21)	93.5 (7/29)	134.0 (8/30)	71.0 (9/4)	262.5 (10/9)	19.5 (11/1)	102.5 (12/5)
最大10分間 雨量(mm)	3.5 (4/27)	3.5 (5/14)	10.5 (6/21)	11.0 (7/11)	13.0 (8/30)	11.5 (9/30)	11.0 (10/8)	1.5 (11/18)	5.0 (12/5)

図IV-1-2に全期間（2004年4月1日～9月8日）の補正前・補正後の水位一日雨量のグラフを示す。また、7月14日～8月11日及び8月11日～9月8日のハイドログラフを図IV-1-3, 4に示す。

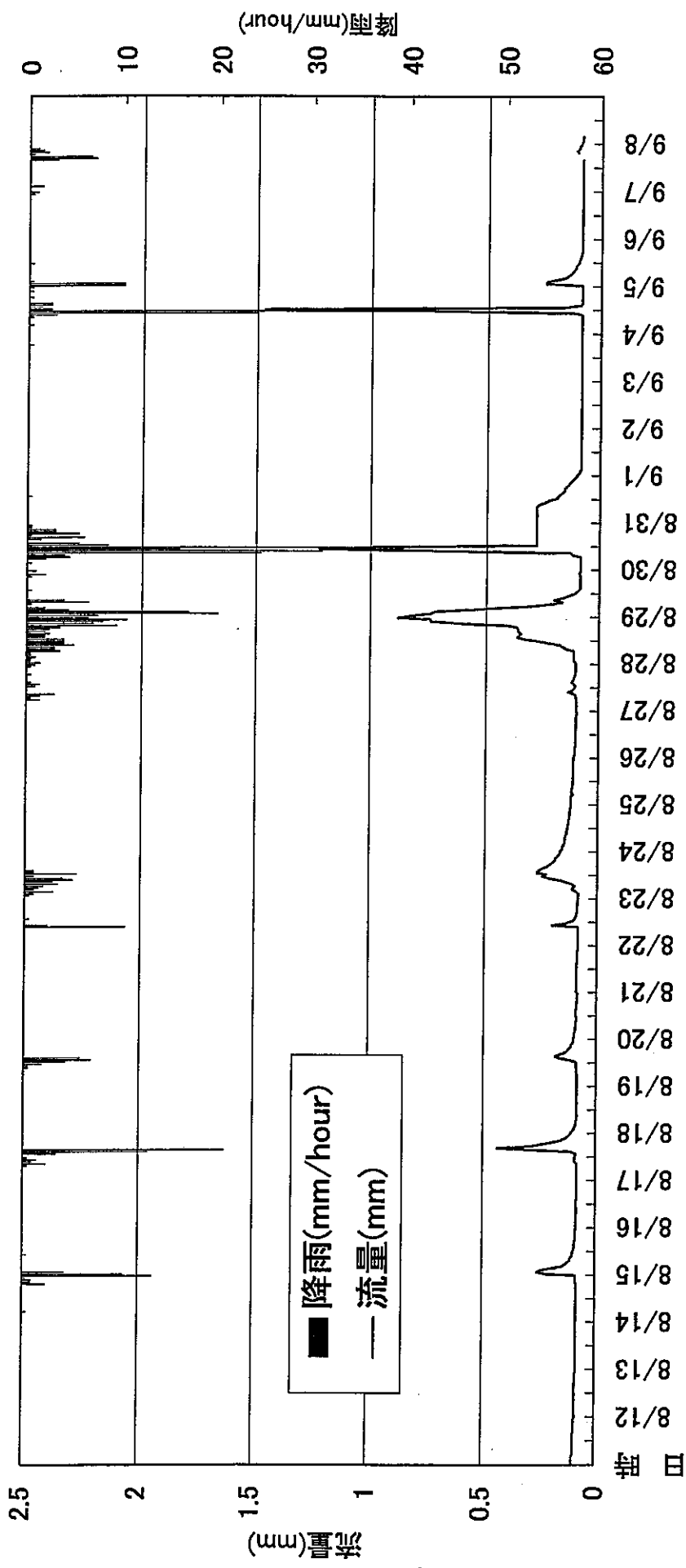
（6月21日～7月9日、10月4日は水位データなし。また、9月8日及び10月5日はデータに一部欠損がある。）



図IV-1-2 水位補正前・補正後 水位-雨量グラフ



図IV-1-3 ハイドログラフ (2004年7月14日-8月11日)



図IV-1-4 ハイドログラフ (2004年8月11日-9月8日)

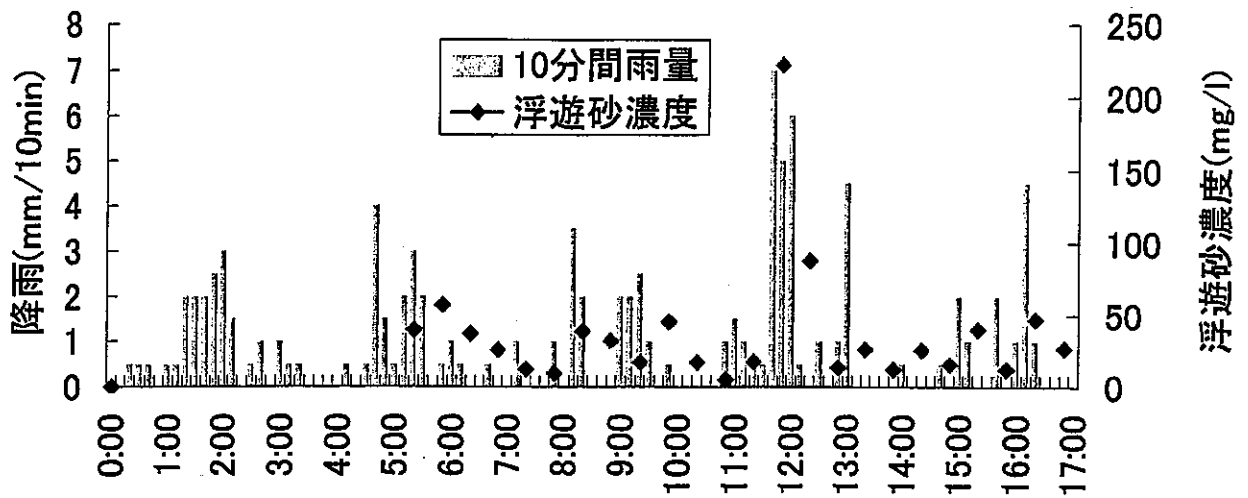
2004

IV-2. 降雨と浮遊砂濃度

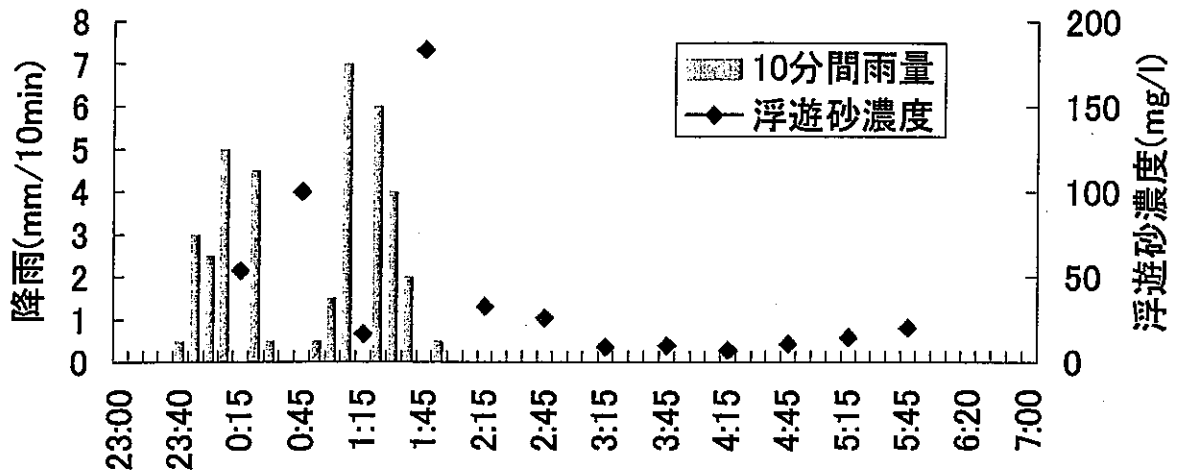
次に、降雨と浮遊砂濃度のグラフを示す(図IV-2-1~6)。浮遊砂濃度のピークは降雨のピークに対し、同時もしくはやや遅れて出現する。また、降雨量の増減に対応して増減する傾向を示した。

図IV-2-7~11では、浮遊砂濃度のピーク及び浮遊砂濃度のピークに達する迄の10分、30分、1時間、1.5時間、2時間合計雨量を示した。浮遊砂濃度のピークは、1時間前からの積算雨量との関係が高い相関を示した。またピーク浮遊砂濃度とそれに先立つピーク雨量には、高い相関関係が見られた(図IV-2-12)。

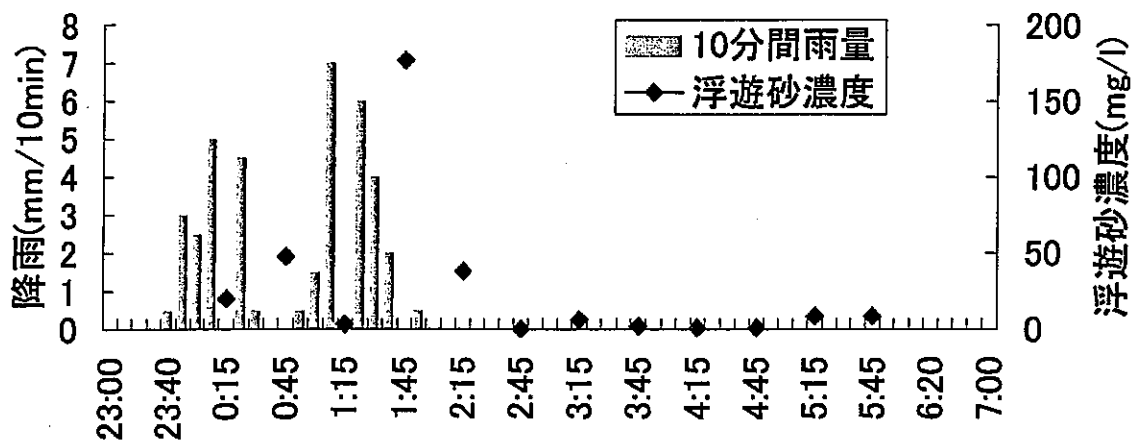
更に、5B濾紙に残った浮遊砂(粒径0.19mm以上)とミリポアに残った浮遊砂(粒径 $190\mu\text{m}\sim 0.45\mu\text{m}$)を別々に測定したグラフと雨量グラフを併せて示した(図IV-2-13~18)。5Bの濾紙のメッシュは通過するがミリポアのメッシュは通らない、極めて小さな粒径の浮遊砂の流出は、降雨パターンとより相関の高い動きを示した。粒径の小さな浮遊砂のほうが、降雨の変化により敏感に対応することから、この浮遊砂は降雨すなわち雨滴が堆積土砂や河岸、溪流の斜面を浸食し、流入したと推測した。なお、図では便宜的に5B濾紙に残った浮遊砂濃度を「5.B」、ミリポアに残った浮遊砂濃度を「ミリポア」と表示した。



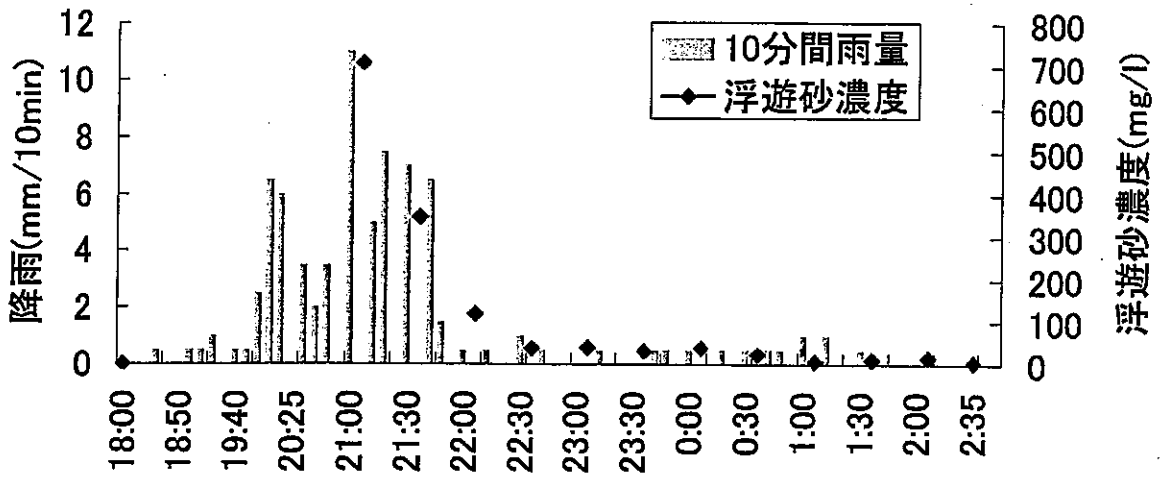
図IV-2-1 7/29B地点 降雨・浮遊砂濃度



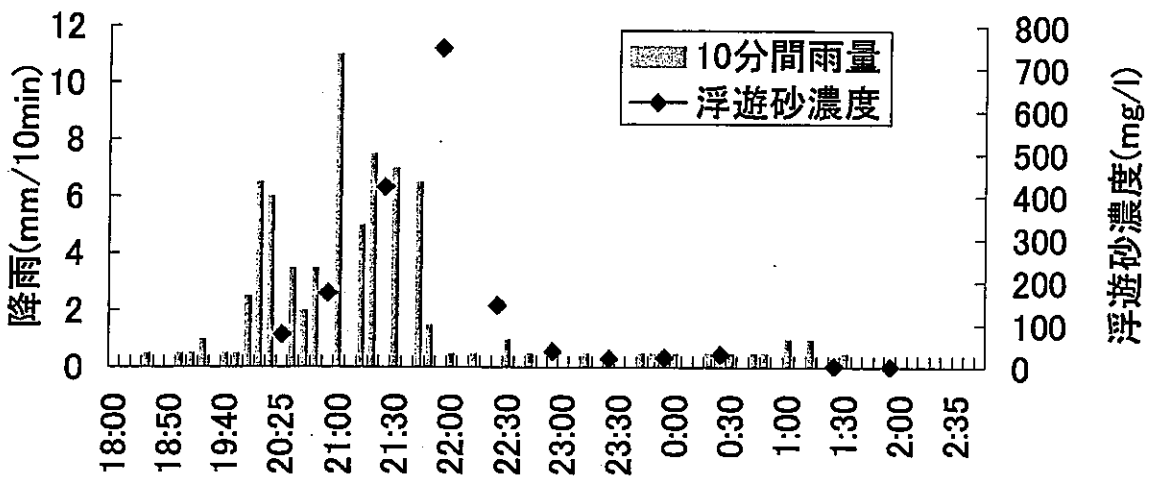
図IV-2-2 8/18B地点 降雨・浮遊砂濃度



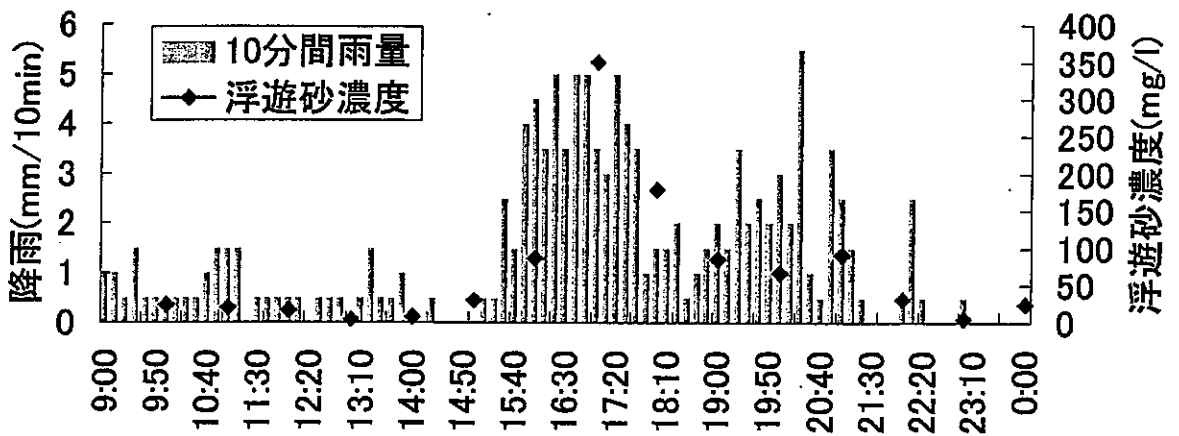
図IV-2-3 8/18A地点 降雨・浮遊砂濃度



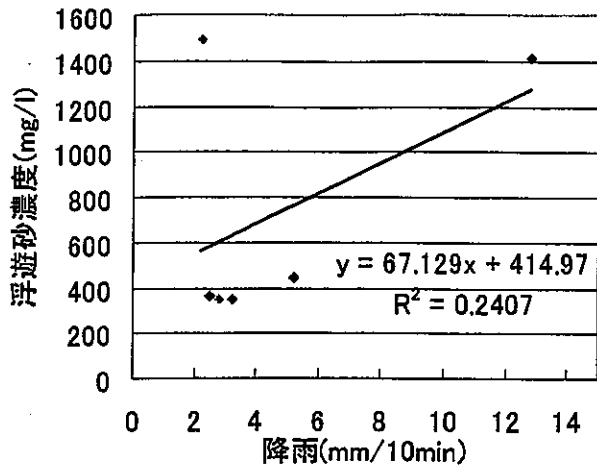
图IV-2-4 9/4,5 B地点



图IV-2-5 9/4,5 A地点



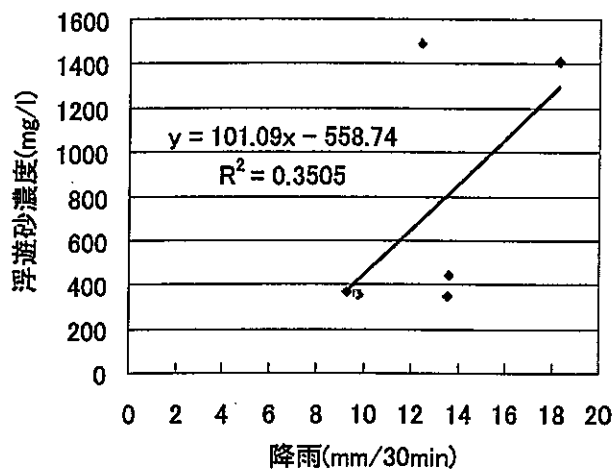
图IV-2-6 10/20 B地点



- A地点
- ◆ B地点

図IV-2-7

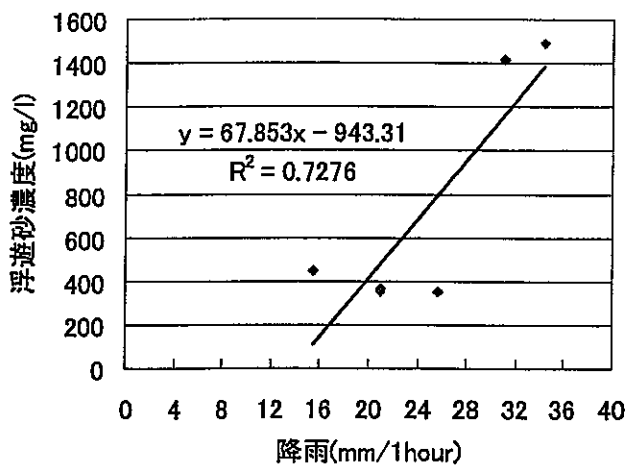
ピーク浮遊砂濃度と
10分合計雨量



- A地点
- ◆ B地点

図IV-2-8

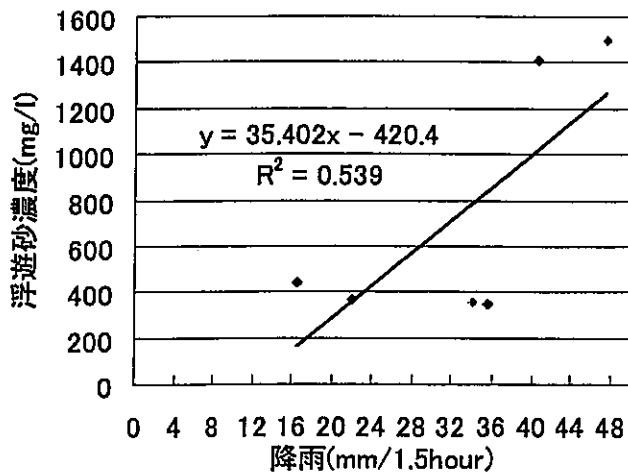
ピーク浮遊砂濃度と
30分合計雨量



- A地点
- ◆ B地点

図IV-2-9

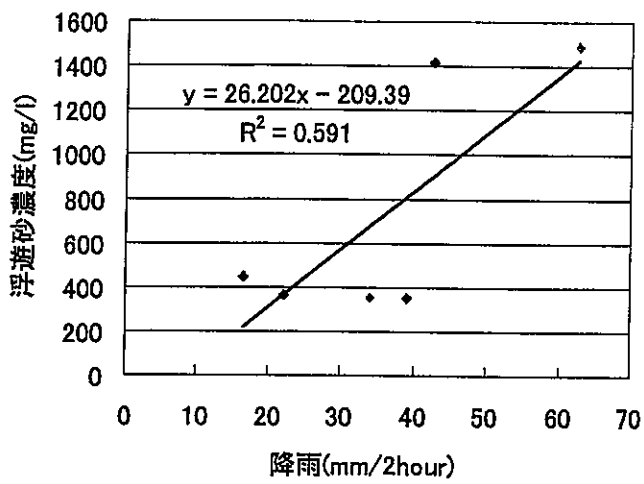
ピーク浮遊砂濃度と
1時間合計雨量



- A地点
- ◆ B地点

図IV-2-10

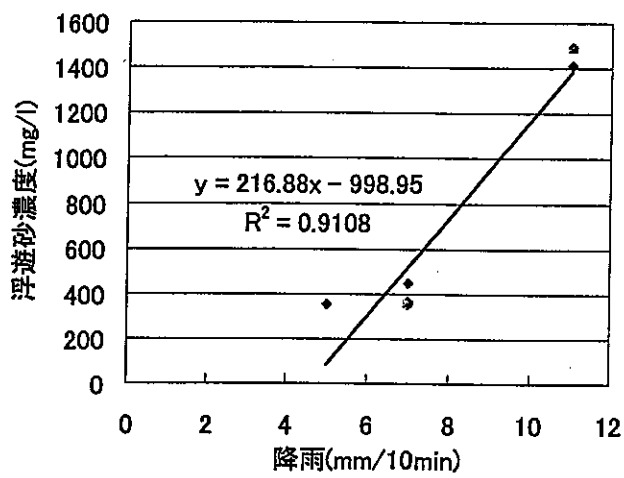
ピーク浮遊砂濃度と
1.5時間合計雨量



- A 地点
- B 地点

図IV-2-11

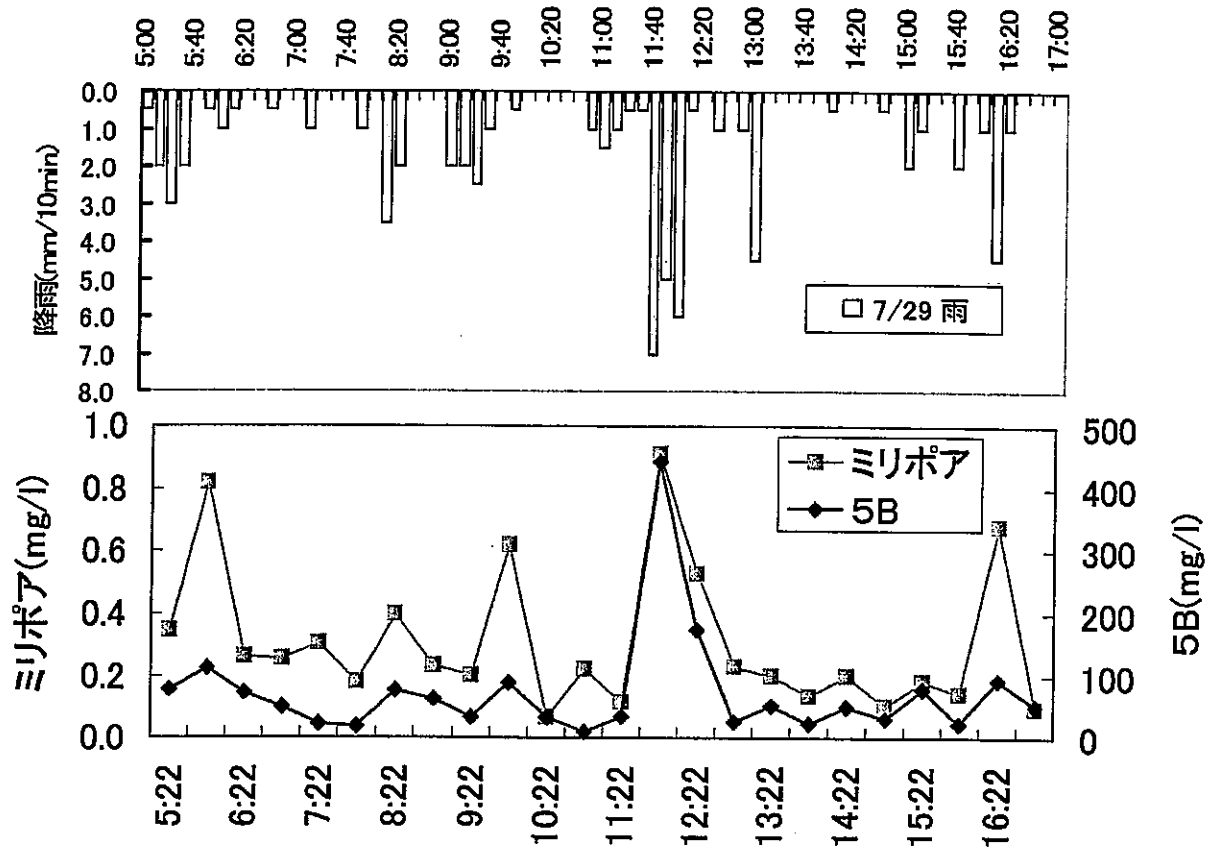
ピーク浮遊砂濃度と
1.5 時間合計雨量



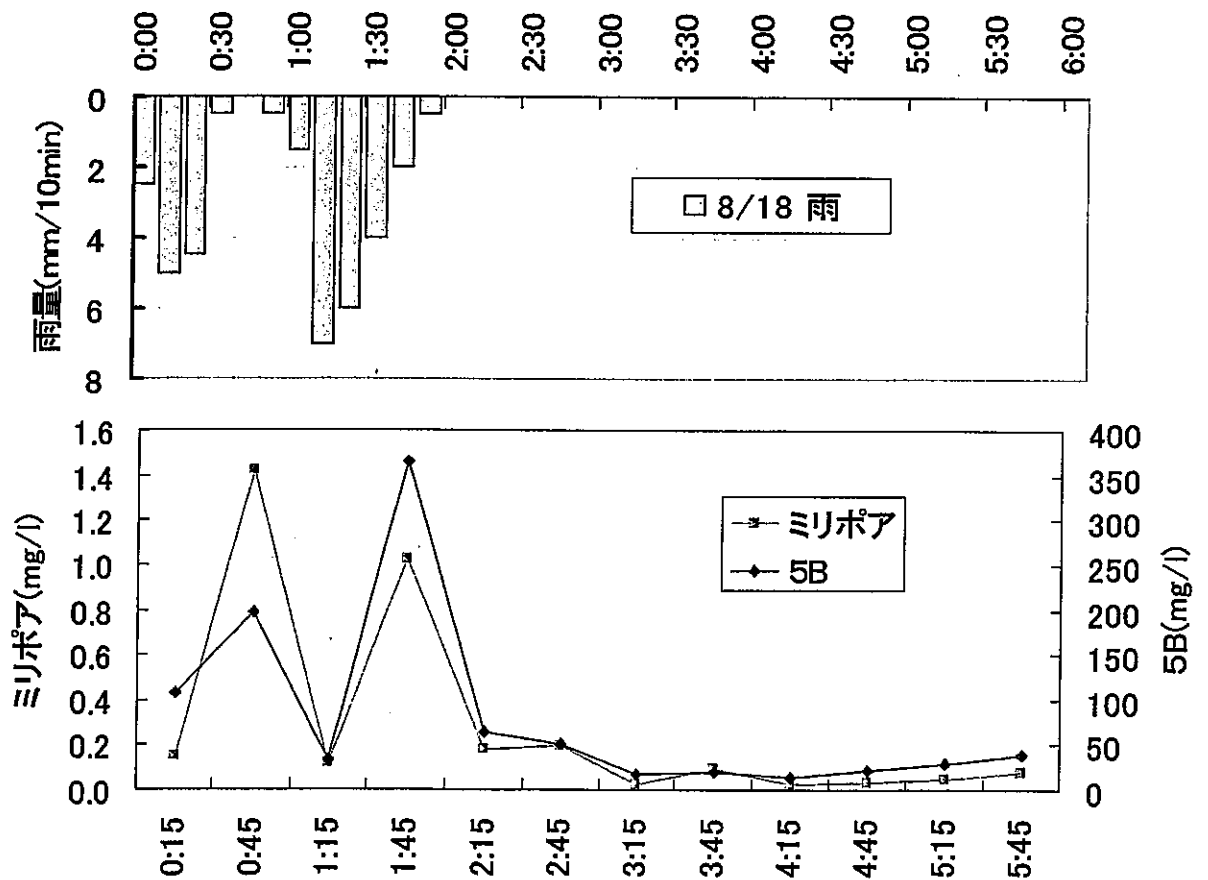
- A 地点
- B 地点

図IV-1-12

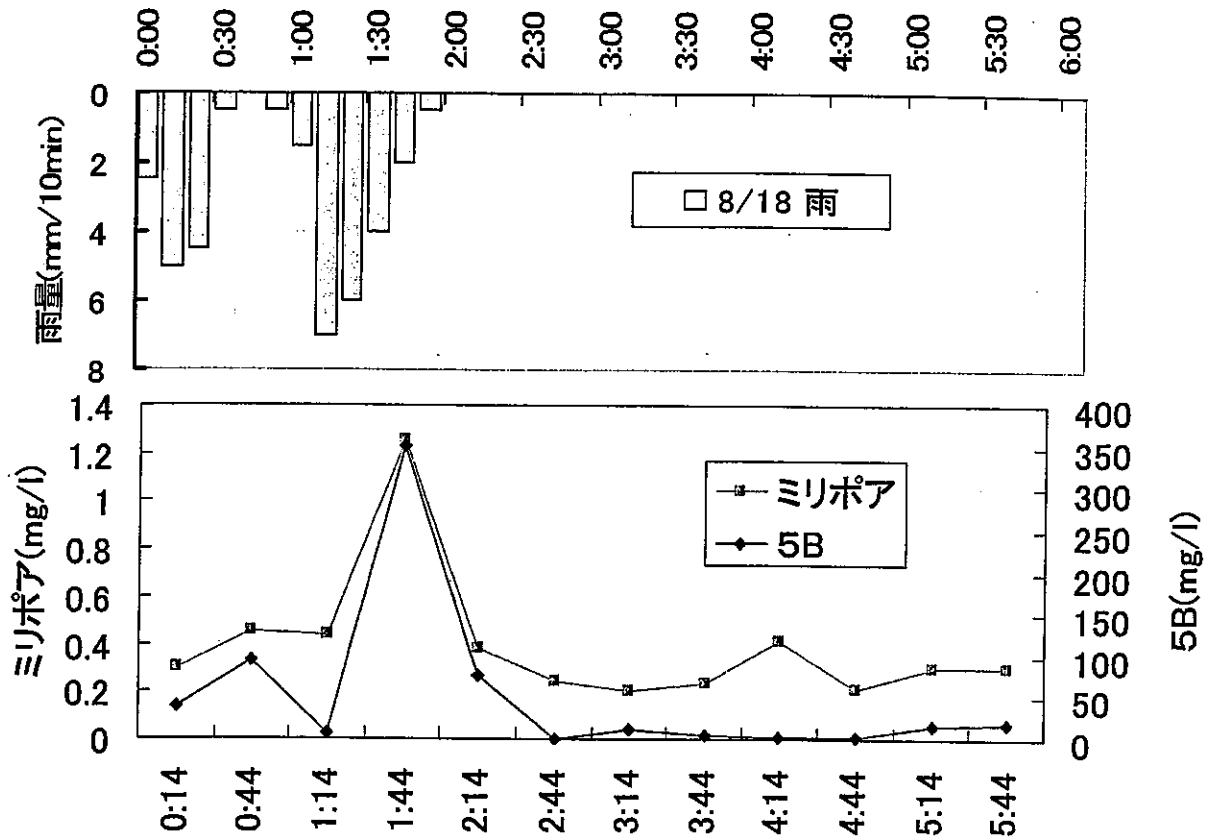
浮遊砂濃度と
直前のピーク雨量



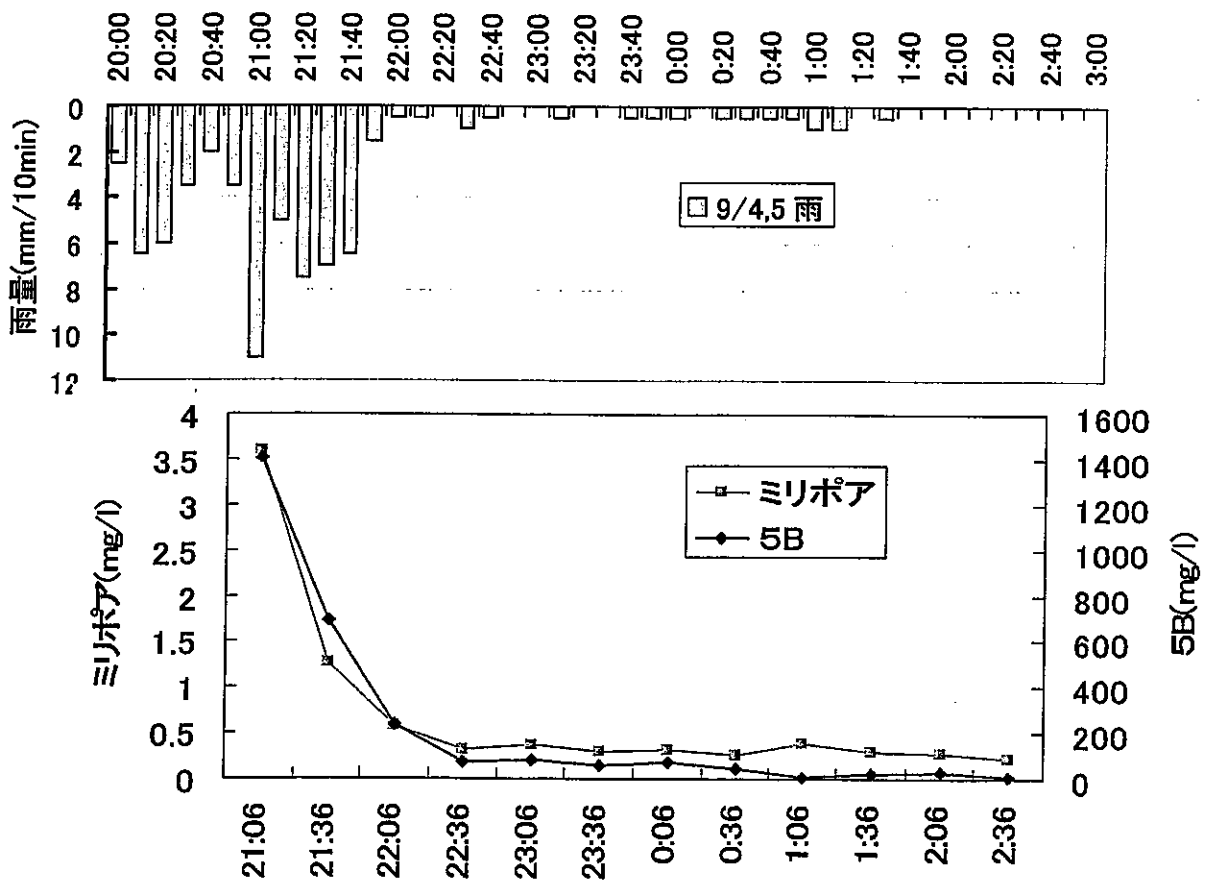
図IV-2-13 7/29 B 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



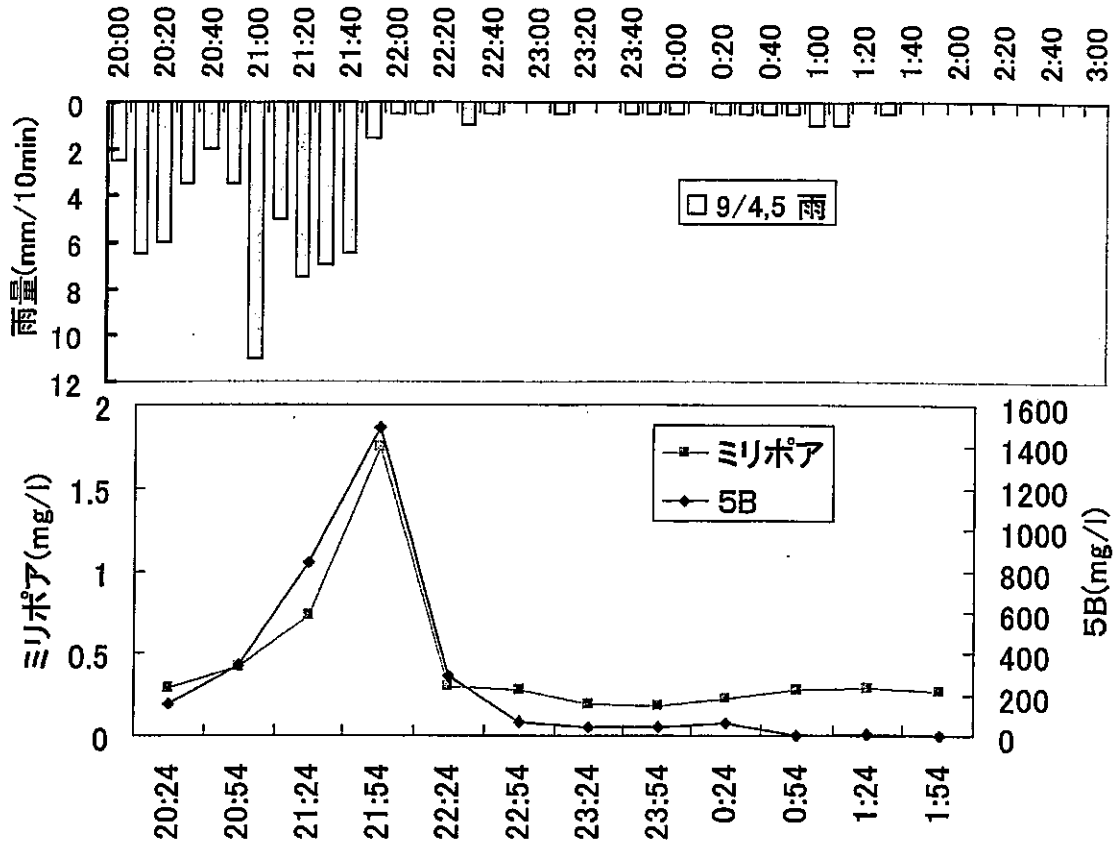
図IV-2-14 8/18 B 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



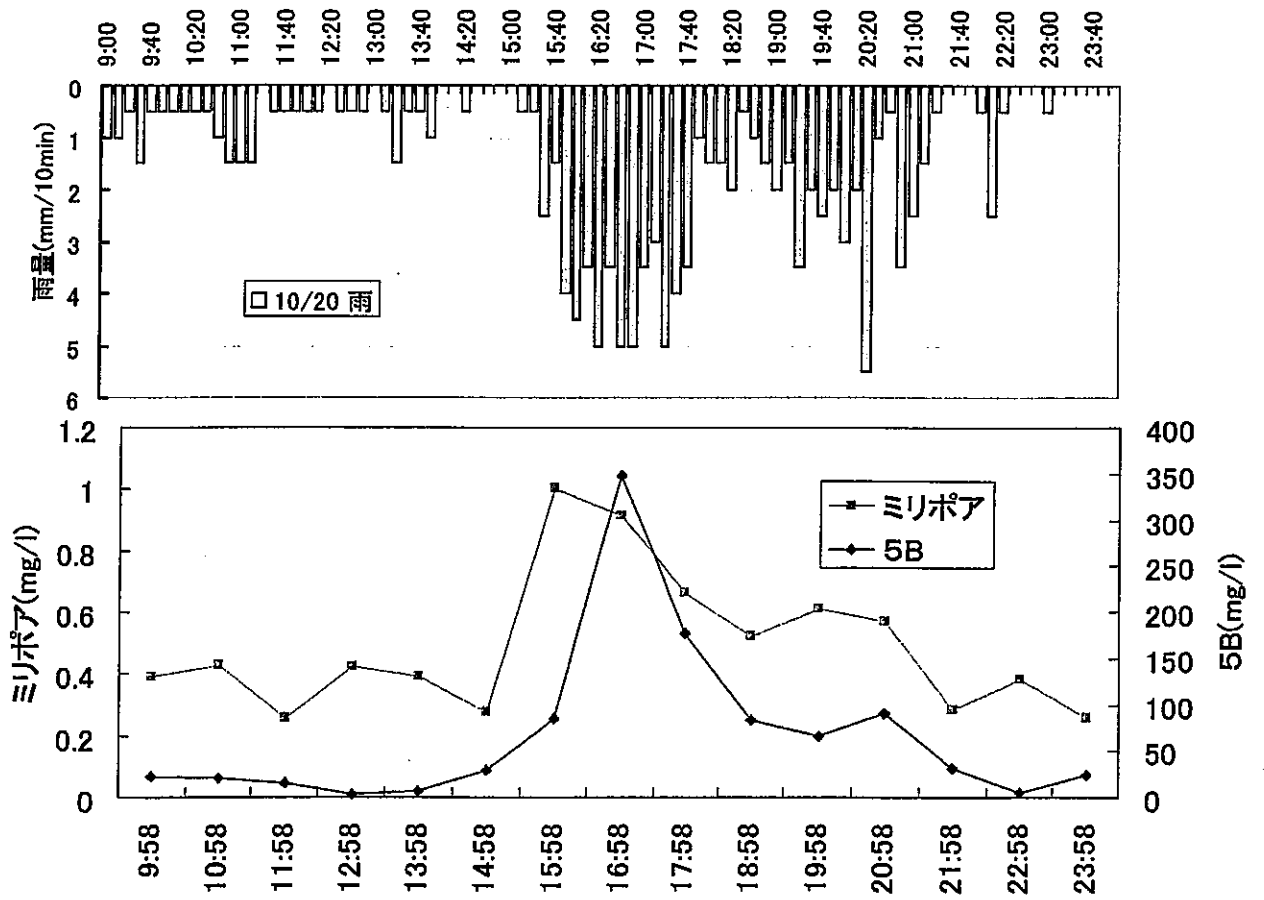
図IV-2-15 8/18 A 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



図IV-2-16 9/4, 5B 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



図IV-2-17 9/4, 5A 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度



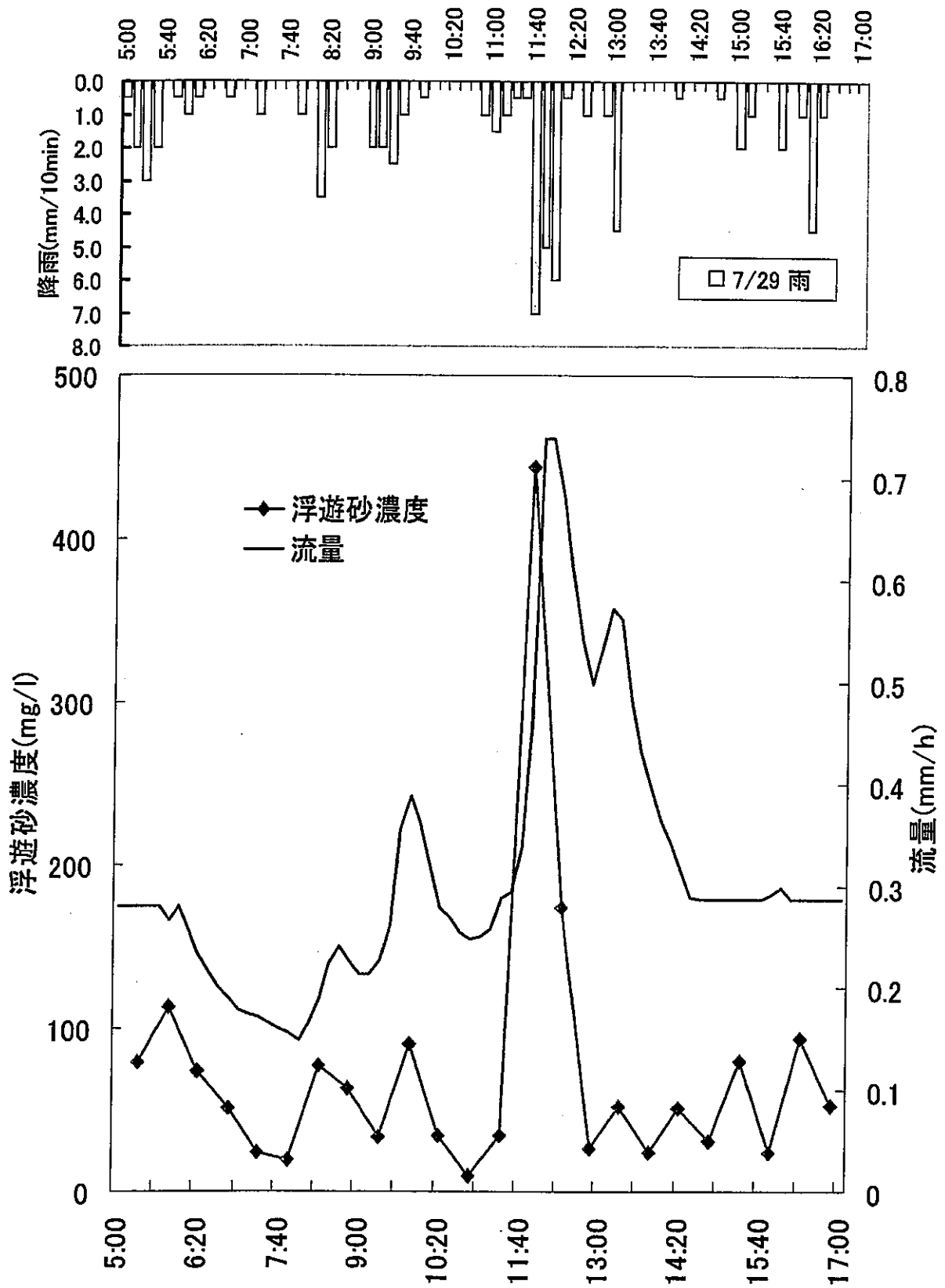
図IV-2-18 10/20B 5B及びミリポアに残った浮遊砂濃度

IV-3. 降雨、流量および浮遊砂濃度

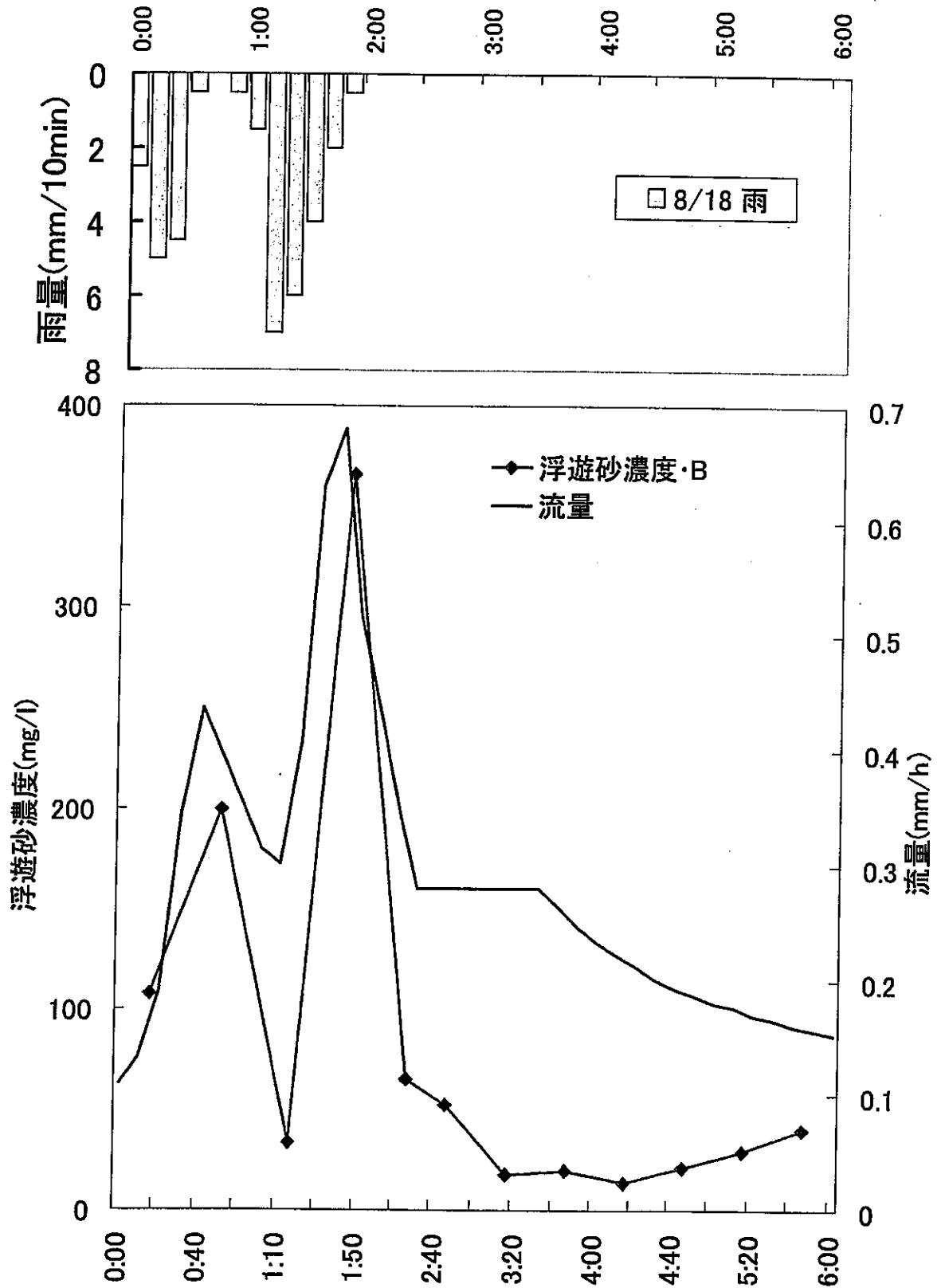
図IV-3-1～5に、降雨・流量・浮遊砂濃度を同時に示した。流量は量水堰で観測された値を大洞沢の面積(48.3ha)で割り、水高換算したもの(mm/hour)を使用し、浮遊砂濃度(mg/l)はA、B地点での観測値を用いた。

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。

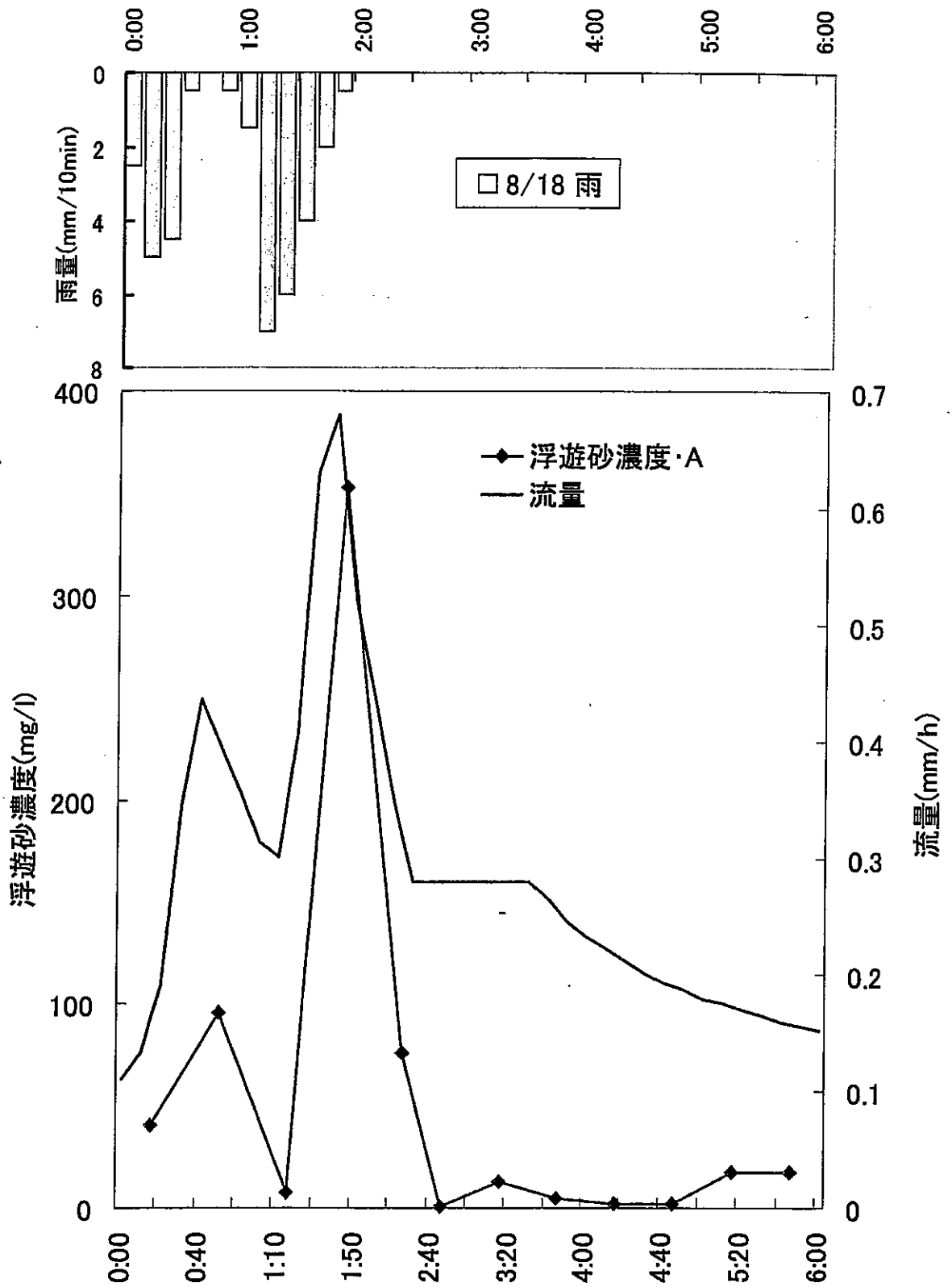
7月29日Bでは、浮遊砂濃度のピークは流量のピークとほぼ同時に出現し、降雨との強い相関を示した。8月18日A、Bでは、浮遊砂濃度と流量は共に二つのピークを持つ。上流に位置するBは、最初の流量のピークで出た浮遊砂濃度がAに比べて濃い。このことから上流の土砂を発生源とした濁りが最初の流量のピーク時における浮遊砂濃度を高くした、と考える。9月4日Bは、流量のピークと浮遊土砂濃度のピークが一致するが、Aでは流量のピークに約30分遅れて浮遊土砂濃度のピークが出現した。



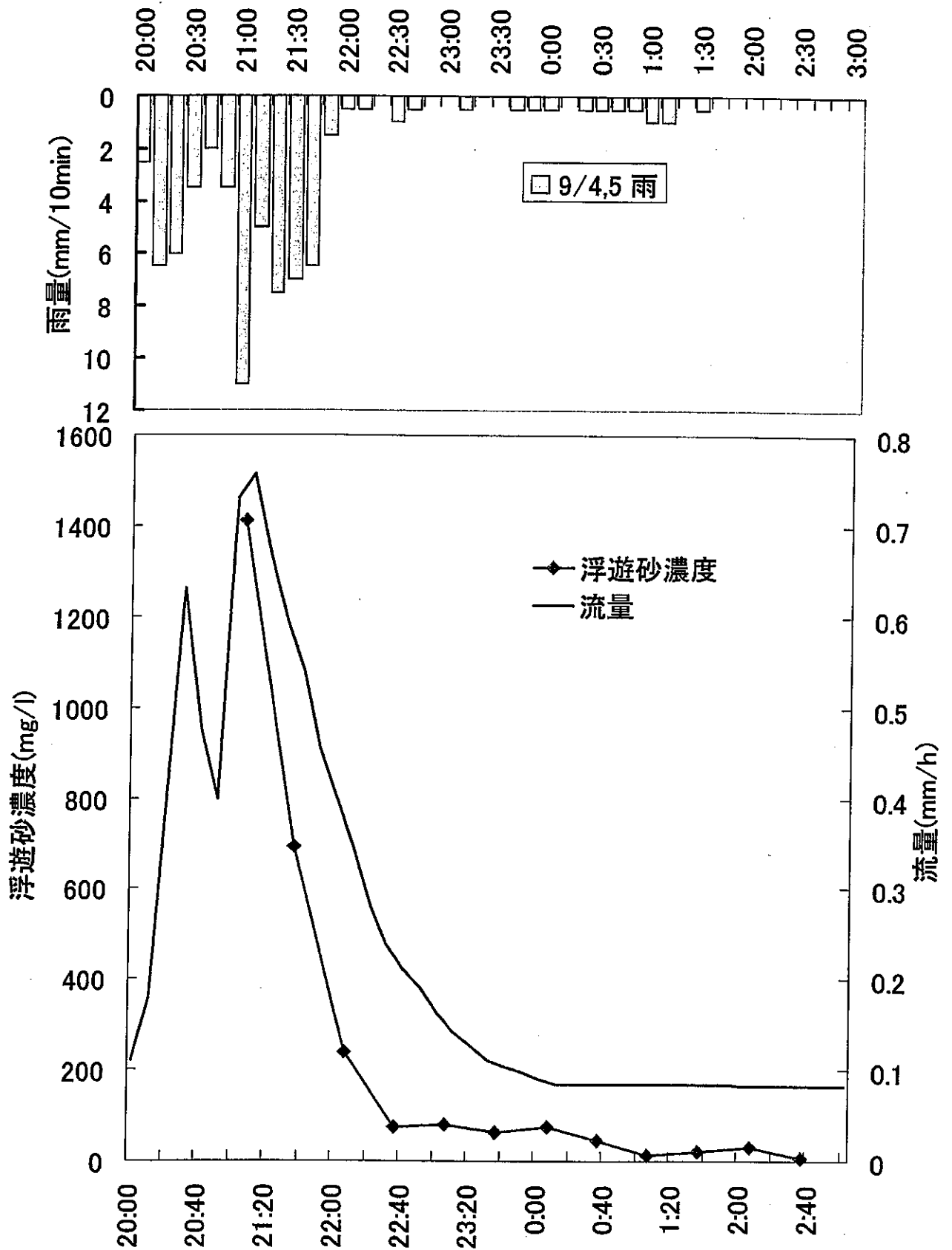
图IV-3-1 B地点 (上流)
 2004年7月29日 降雨·流量·浮遊砂濃度



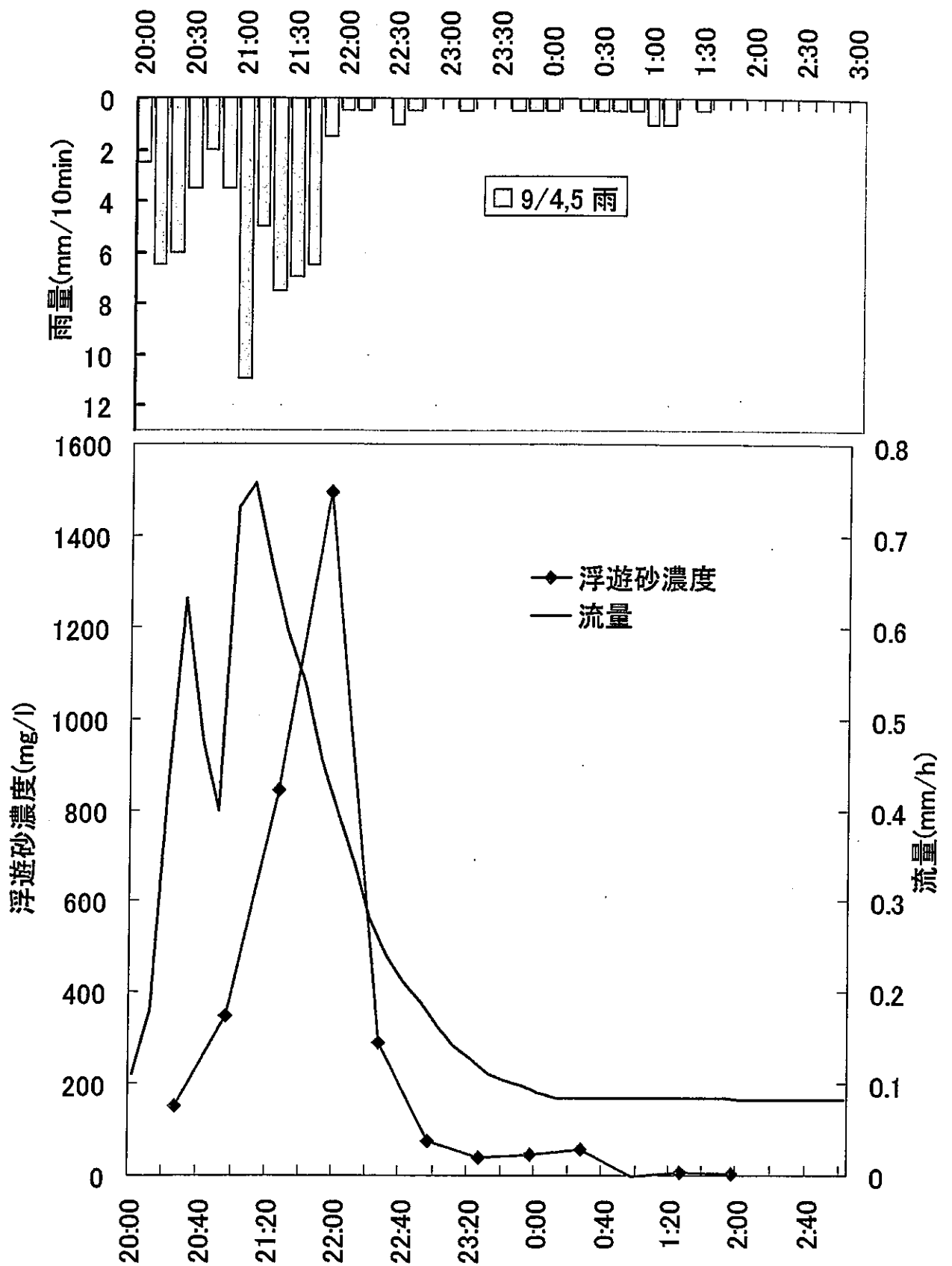
図IV-3-2 B地点 (上流)
 2004年8月18日 降雨・流量・浮遊砂濃度



図IV-3-3 A地点 (下流)
 2004年8月18日 降雨・流量・浮遊砂濃度



图IV-3-4 B地点(上流)
2004年9月4日,5日 降雨·流量·浮遊砂濃度

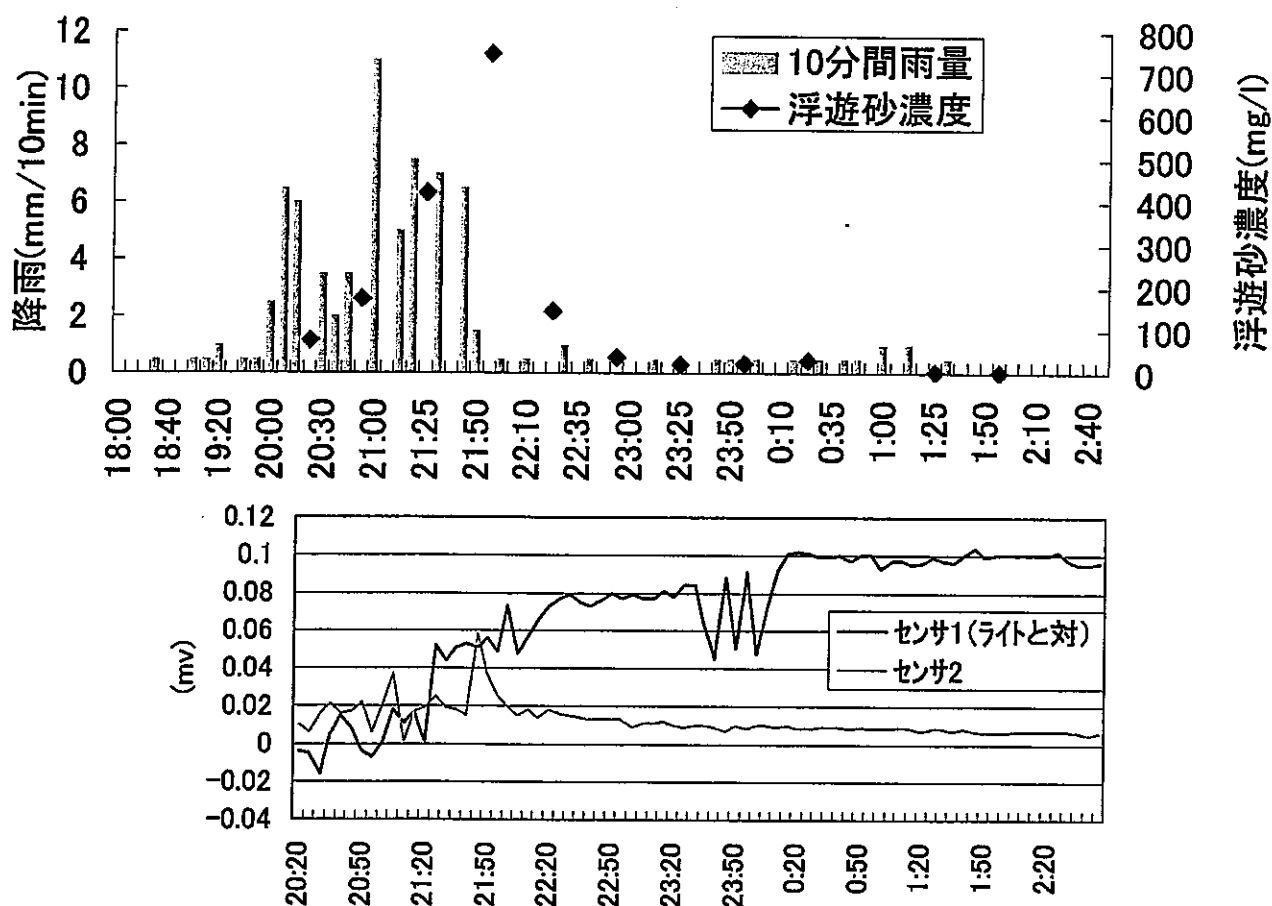


图IV-3-5 A地点(下流)
 2004年9月4日,5日 降雨·流量·浮遊砂濃度

IV-4. 濁度計による浮遊砂濃度の補完

濁度計の観測結果と自動採水器から得た浮遊砂濃度を比較したところ、良好な関係は得られなかった。原因として、汚れがセンサとライトの間に付着したため正確な光の透過が計測できなかった、濁度計の浸水により出力値が安定しない、等が考えられる。

例として2004年9月4日の降雨イベントである図IV-4を挙げる。y軸は、値が大きい程ライトを遮る浮遊砂が少なく、小さいほど水の濁り（浮遊砂）が濃いことを表す。降雨-浮遊砂濃度グラフでは降雨ピークとそれに続く浮遊砂濃度ピークが判るが、濁度計のセンサ1（ライトと対する）は不規則に上下しながら出力値が上昇した。なお、センサ2は観測環境の明るさを相対的に捉えるために設置した。時折浮遊砂濃度の増減に相当する明確なピークは見られなかった。



図IV-4 2004年9月4日, 5日A 濁度計出力例

IV-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値を大洞沢の面積(48.3ha)で割り、水高換算したもの(mm/hour)を使用した。浮遊砂濃度(mg/l)は各地点での観測値を用いた。

また、表IV-5-1に期間降雨データを示した。

図IV-5-1～3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1km²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IV-5-1

7/29Bは、断続的に弱い雨が続いた時に観測された。なお、動きが見やすいように、「浮遊砂の流出ピーク以前」(B1-12)及び「ピークを含む後半」(B13-24)でグラフの色を変えた。「ピークを含む後半」のヒステリシスは、大きく時計回りの円を描く。

図IV-5-2

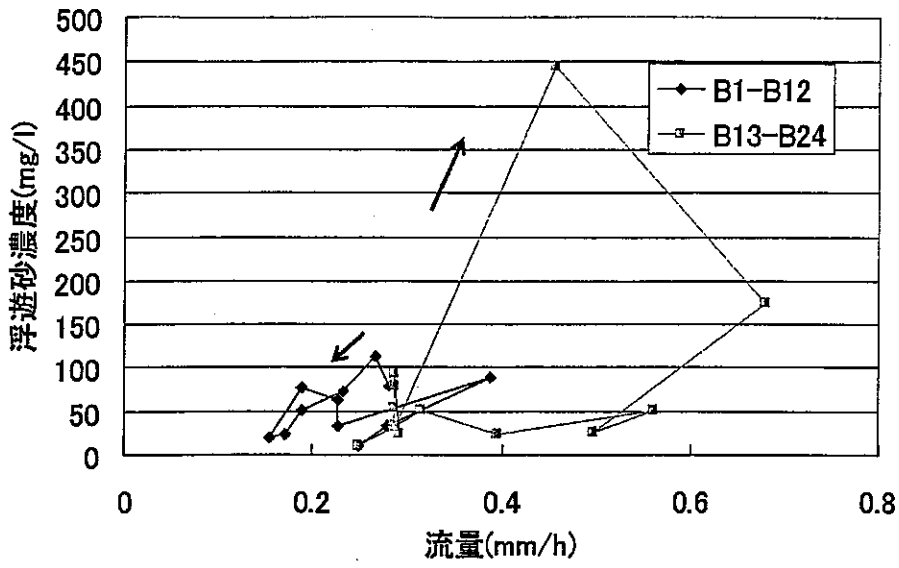
8/18では、採水期間中に2つのピーク雨量が見られた。浮遊砂濃度も、雨量の増減に対応した2つのピークを持つ。集水面積の異なる観測点(下流A:35.6ha、上流B:8.3ha)で同じような動きを示した。他の降雨時に見られたヒステリシスに比べて直線的な動きだが、詳しく見るといびつな時計回りを示している。Bは初めのピークに向かう立ち上がり時の浮遊砂濃度がAに比べて高いが、2度目のピークに向かう立ち上がりの濃度はAとほぼ一致する。しかし、下流に行くほど流量が増え、その分浮遊砂が希釈されることを考えると、Bでの浮遊砂流出量が多いと考えられる。

図IV-5-3

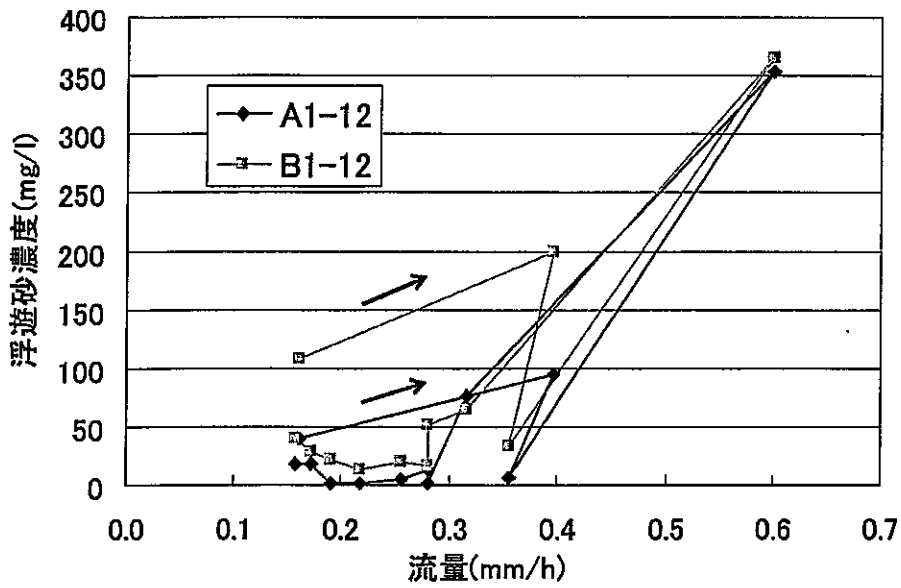
9/4,5でも、弱いピークと強いピークの2つの山を持つ降雨が観測された。初めにA地点で、弱い降雨ピークが減衰し始めた時に、水位の増加をトリガーとした自動採水器による採水が始まった。約20分後、上流のB地点で採水が始まった。A地点では反時計回りのヒステリシスが見られた。B地点では、浮遊砂濃度のピークを過ぎてからの採水と考えられ、そのためヒステリシスは見かけ上直線を示した。

表IV-5-1 期間降雨データ

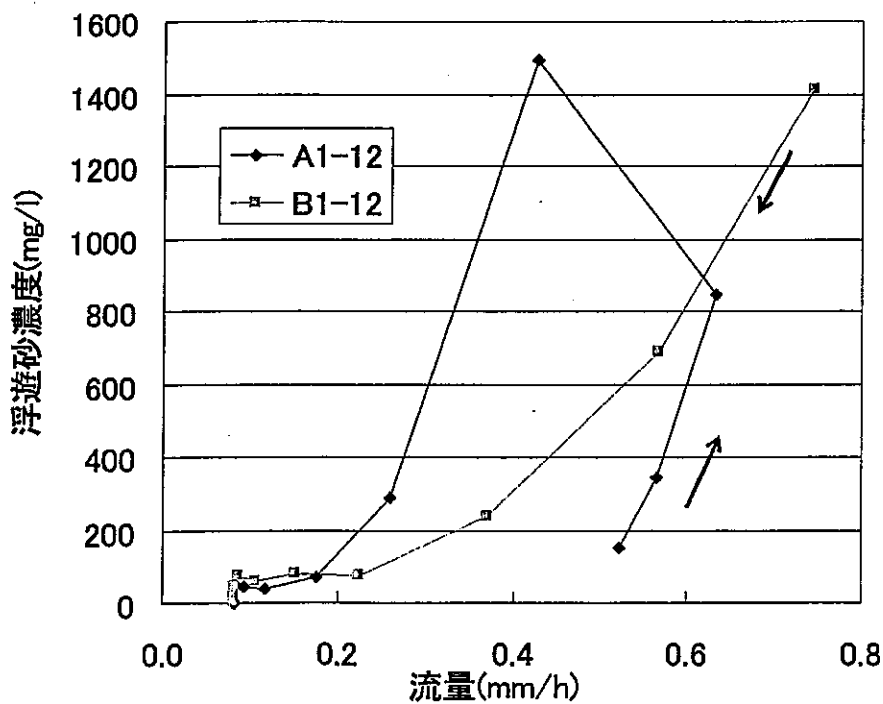
降雨期				期間雨量(mm)		時間 (hour)	
7月29日	7/28	18:10	~	8/1	5:00	170.5	82.5
8月18日	8/17	17:30	~	8/18	1:50	33.5	8.2
9月4,5日	9/4	4:10	~	9/5	21:30	98.5	41.2
10月20日	10/19	8:20	~	10/21	11:00	251	40.4



図IV-5-1
流量-浮遊砂濃度
(7/29 B)



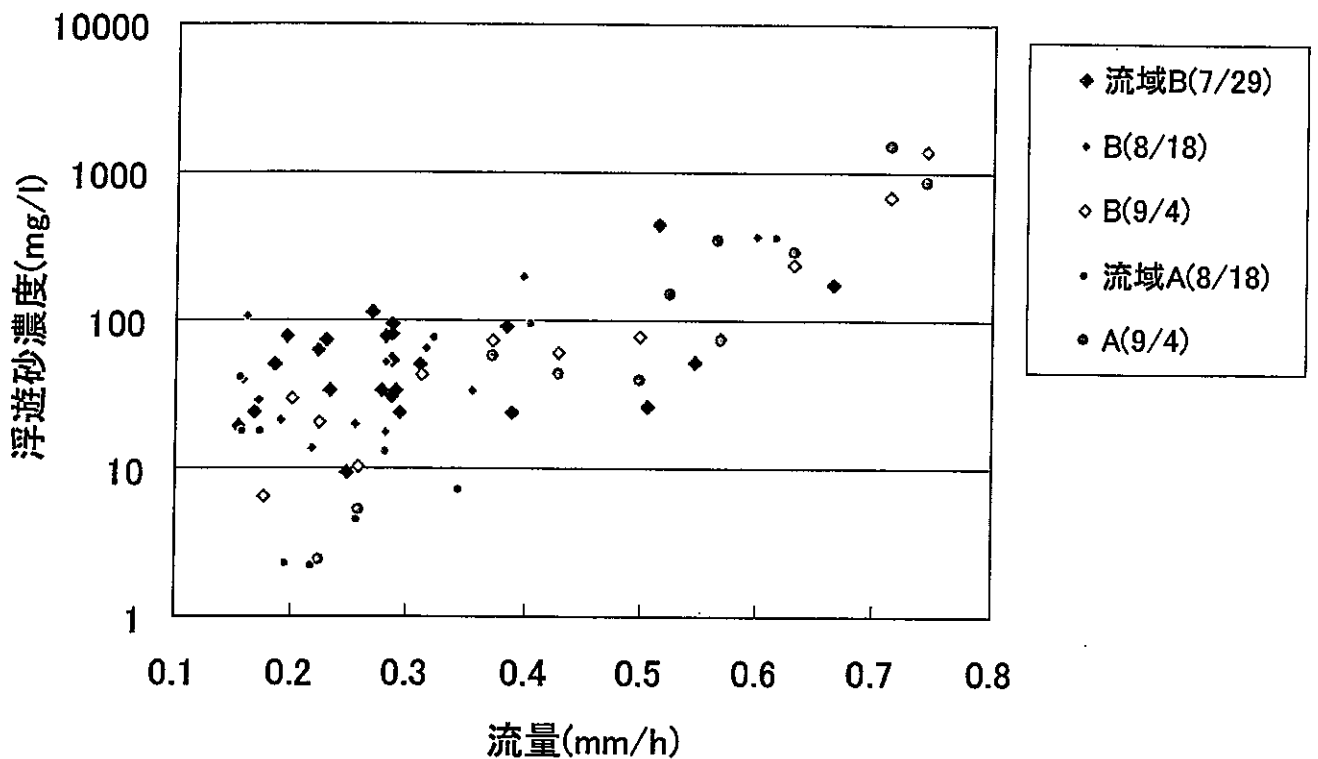
図IV-5-2
流量-浮遊砂濃度
(8/18 A, B)



図IV-5-3
流量-浮遊砂濃度
(9/4,5 A, B)

次に、降雨イベントに関わらず、観測された流量と浮遊砂濃度を一つにまとめた図（図IV-5-4）を示す。縦軸の浮遊砂濃度は対数軸となっている。

図中の青い点（3種類）はB地点で観測されたもの、赤い点（2種類）はA地点で観測されたものである。流量が少ないときは浮遊砂濃度はB地点で高濃度の傾向を示し、A地点では低濃度の傾向を示す。流量が増加するに従い、A、B地点とも浮遊砂濃度の差は小さくなるのがわかる。



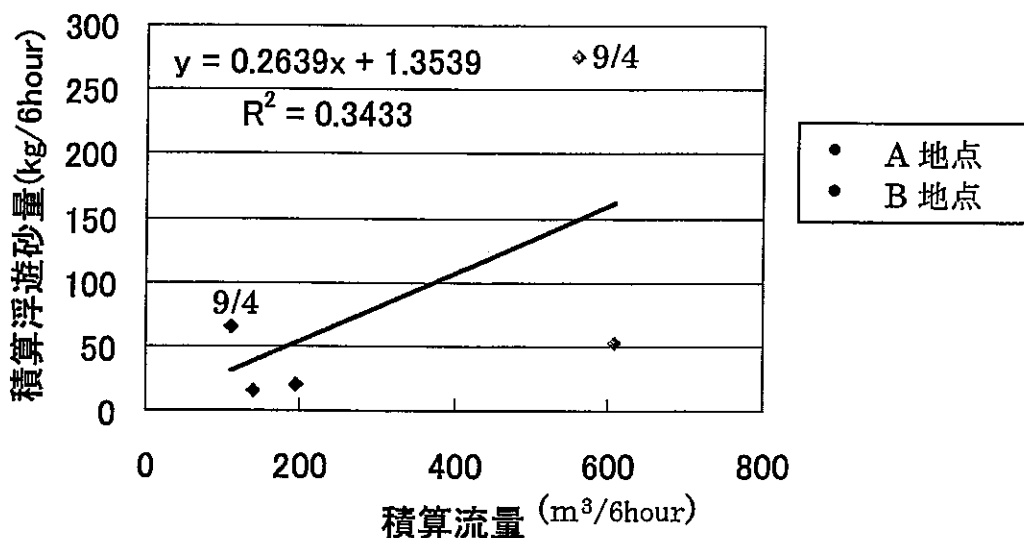
図IV-5-4 流量と浮遊砂濃度

IV-6. 流出浮遊砂量

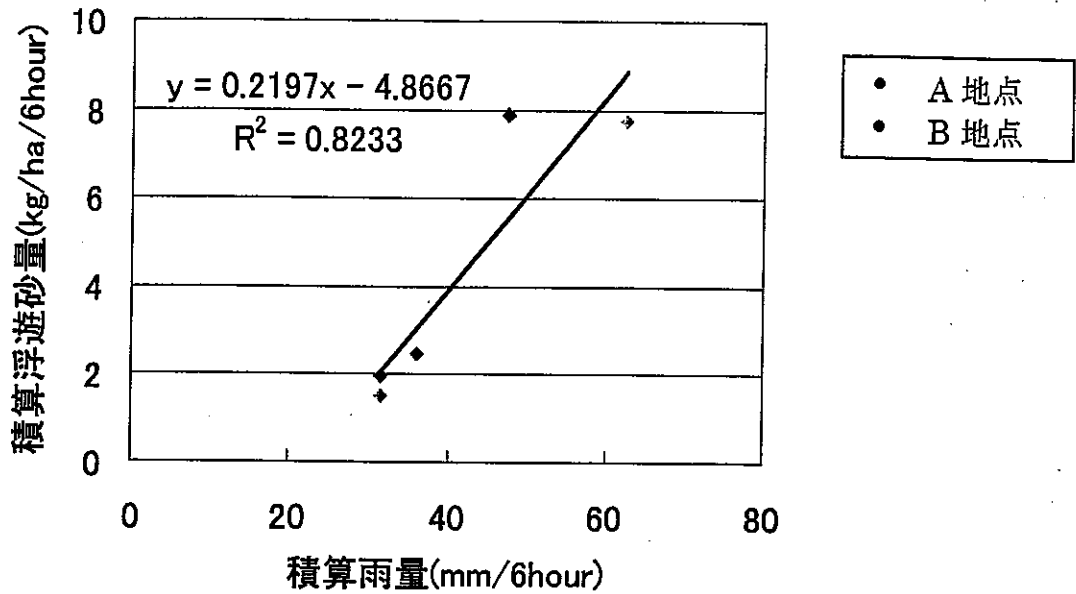
地点A, Bを出口とする各流域(集水域)のピーク流量を含む積算流量($m^3/6hour$)及び積算雨量($mm/6hour$)を示した。同時に流出浮遊砂量を、ピークを含む6時間で積算した値($kg/6hour$)を示し、ヘクタール当りの流出浮遊砂量を示した(表IV-6-1)。また、ピークを含む6時間で積算した流出浮遊砂量と流量の関係を図IV-6-1に、6時間の積算雨量とヘクタール当りの流出浮遊砂量を図IV-4-2に示す。

表IV-6-1 流量・流出浮遊砂量

	雨量(mm)	流量($m^3/6hour$)	浮遊砂量($kg/6hour$)	ha 当り (kg/ha)
7/29 B	36.0	195.82	20.74	2.49
8/18 B	31.5	140.91	16.26	1.95
8/18 A	31.5	606.65	53.55	1.50
9/4 B	47.5	111.36	65.96	7.90
9/4 A	62.5	557.94	275.84	7.74



図IV-6-1 流量・流出浮遊砂量の関係



図IV-6-2 積算雨量と ha 当り流出浮遊砂量の関係

A, B両地点で採水した8月18日及び9月4日は、両日とも単位面積あたりの浮遊砂流出量が、A地点よりもB地点、すなわち源頭部に近いほうが多く測定された。またヘクタール当りの流出浮遊砂量は、1.5kg から 7.9kg と幅があり、そのため「ピークを含む積算浮遊砂量と流量」も関連が薄かったが、「積算雨量とヘクタール当りの流出浮遊砂量」には正の相関関係が見られた。

V. 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、発生の際は一致型を示した。

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。

一降雨で流出する浮遊砂量はヘクタール当り1.50kgから7.90kgと、大きな幅を示した。B地点での浮遊砂量が大きいことから、土砂供給源はB地点の更に上流と考えられる。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。従って、大洞沢の年間流出浮遊砂量は、各イベント降雨を積算浮遊砂量と積算雨量の関係式に当てはめ、年間の総イベント降雨に対する積算浮遊砂量を合計して求められると考える。年間流出掃流砂量も同様に、既に矢部によって求められた積算流量と積算流出式を用い、大きな流出イベントに相当する積算掃流砂流出量を合計することで求められる。

少ないデータを通して大洞沢の浮遊砂流出の特徴を述べたが、観測を続けることで流域の特徴がより明白になると思われる。また、浮遊砂中に含まれる有機物の割合や粒度分析を行うことで、大洞沢の浮遊砂流出の動態がより詳しくわかるだろう。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

本研究は、丹沢大山総合調査プロジェクト(神奈川県)の一部として行われました。大洞沢での観測にあたり、神奈川県自然環境保全センター研究部の内山佳美さん、三橋正敏さんには、まだかすかに雪の残る3月の丹沢訪問を初めとし、測器の保存、資料の閲覧、質問への回答、加えて遺失物の回収まで、本当にお世話になりました。

森林保全学研究室の中村浩之教授、石川芳治教授、白木克繁助手には始終御指導、御教示、御助言を頂きました。特に石川先生、白木先生はご多忙の中、調査・実験・研究方法のイロハ、現地調査の同行や測定装置の作成など、様々な面でお世話になりました。

森林生態学研究室の戸田浩人助教授には、実験についての御助言と濾紙をいただきました。また、博士課程の浦川梨恵子さんを始め、森林生態学研究室の皆様には実験のヒントやテクニック、励ましをいただきました。

森林保全学研究室の修士の皆様とは、とりわけ楽しい時間を過ごしました。調査の手伝いのみならず、408号・409号室で営まれる賑やかな日常生活を通して、研究に対する態度に触れました。

4年生の川満尚樹君は、研究室内唯一の同学年として何度も調査に同行し、ヒルにも負けず測器の設置や水運びなど手伝ってくれました。

また卒業生の吉田信さん、調査に同行してくれた3年生、堰堤工事作業員の方々、林科内外の友人たち、菅谷有三さん、若原幸子さん、ほかにも多くの人の協力によって、この卒論は拙いながら形を成しました。

皆様に心から感謝いたします。

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)

神奈川県東丹沢大洞沢における浮遊土砂の流出

東京農工大学 森林保全学研究室 若原 妙子

I. 研究の目的

濁水、すなわち水の「にごり」は、植生の衰退に伴う問題として近年注目を集めており、環境に対する指標として利用される。健全な日本の山地では、発達した樹木根系群が斜面を覆い、自然の土砂流出抑止力として働くと同時に、林床植生や落葉・落枝が雨滴浸食による土壌の流出を防止する。しかし環境の劣化等で林床植生が衰退すると、裸地化した斜面から溪流へ土砂が流出しやすくなる。

濁水は水道の水源を汚濁し、飲料水供給の妨げとなる。また、河川や溪流の生態系に対しての影響も大きい。貯水池やダム湖などへ流入した濁水は、沈殿・堆積しダムの耐用年数を縮める原因となる。

神奈川県の水源地である丹沢山地でも、水質汚濁や貯水ダムへの堆砂問題を初めとする自然環境の劣化が、これまでになく深刻化している。本研究では神奈川県丹沢山系大洞沢流域の水・土砂収支を明らかにするために、流域からの浮遊砂流出量を測定し、降雨・流量データ及び過去の降雨・流量データ（1983年～）とあわせて流域の特性を明らかにする。なお、本研究は「丹沢・大山総合調査」の一環として行われた。

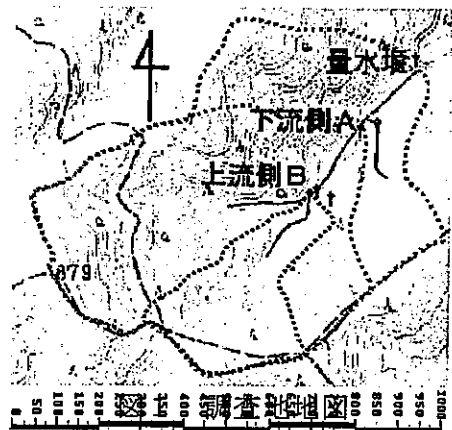
II. 大洞沢試験地における既往の研究

土砂流出は、その移動形式から掃流砂と浮遊砂に大別される。掃流砂は流路床上を移動する、粒径の比較的大きな流砂である。一方、浮遊砂は流水中を浮遊運搬される細粒の流砂であり、水の濁りに大きく関係すると共に、一旦流水中に入ると、貯水池・湖・河口まで到達する場合が多い²⁾。

大洞沢流域を対象とした既往の流出土砂量の測定として、掃流砂量の解析結果が矢部（2000）にとりまとめられている¹⁾。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。その結果、Shields 式と実測データから得られた回帰式の係数がほぼ一致し、平地河川に適応されている掃流砂式が山地溪流においても適用できる可能性がある、という結論を得た。ここでは掃流砂のみを扱っているが、大洞沢流域における総合的な流出土砂量を求めるには、浮遊砂流出特性を明らかにすることが必要である。

III. 調査対象地

神奈川県愛甲郡清川村煤ヶ谷・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（図1）。最下流部に量水堰が設置され、通年で流量観測及び雨量観測を実施している。また下流側にA地点（35.6ha）、上流側にB地点（8.3ha）を設け、採水を行った。



IV. 調査方法

観測期間：2004年6月21日～11月20日

- i) 雨量の観測：流域最下流の量水堰付近にて、転倒マス式雨量計を使用。記録はデータロガー（10分間隔）で行った。
- ii) 流量の観測：流域最下流の量水堰で、池田式自記水位計にて水位を記録した。堰の越流公式及び神奈川県森林研究所で作成した水位－流量換算式を用い流量を求めた。
- iii) 浮遊砂濃度の観測：ISCO社の3700型ウォーターサンプラー（自動採水器）を、A地点およびB地点に設置した。採取した試料は5B濾紙（0.19mmメッシュ）で濾過し、次いでミリポア（0.45

μmメッシュ)を装着させた吸引濾過器で濾過し、乾燥重量から浮遊土砂濃度を求めた。

V. 調査結果

観測期間中、自動採水器による試料採取により、4回の降雨イベントに対応した6データを得た。ここに2004年8月18日の結果を示す(図2)。総降水量は33.5mm、降雨時間は約8時間であった。

1. 降雨と流量

降雨ピークに対する流量ピークの遅れ時間は20~30分前後を示した。

2. 降雨と流量、SS(浮遊砂)濃度

SS濃度の大きなピークは降雨のピークにやや遅れて出現し、降雨量の増減に対応して増減する傾向を示した。

3. 流量とSS

流量-浮遊砂濃度は、流域面積の異なる観測点(下流A:35.6ha、上流B:8.3ha)で同じような動きを示した(図3)。また、ピーク流量を含む6時間で流出した総浮遊砂量と総流量には、正の相関があった。流量に浮遊砂濃度を乗じて浮遊砂の流出量を産出したところ、8月18日には流域Aで53.55kg、流域Bで16.26kgの浮遊砂が流出した計算となった。

VI. 考察

2004年8月18日の降雨とSS観測結果から、SSの流出ピークは降雨ピークに遅れて発生した。流量とSSは比例し、流量は雨に対して時間遅れがある。

また、8月18日の観測で、B地点は源頭部に近い右側支川であるが、下流のA地点でのSSと同様の増減を示した。A地点では1.50kg/ha、B地点では1.96kg/haの土砂が生産され、B地点支流のほうが浮遊土砂量流出量が若干大きいという結果を得た。場所による土砂生産の差があると考えられる。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 高橋裕、河田恵昭(編):岩波講座地球環境学7・水循環と流域環境 岩波書店(1998)
- 3) 砂防学会(監修):砂防学講座2・土砂の生成・水の流出と森林の影響 山海堂(1993)
- 4) 小橋澄治(編):山地保全学、文永堂出版(1993)

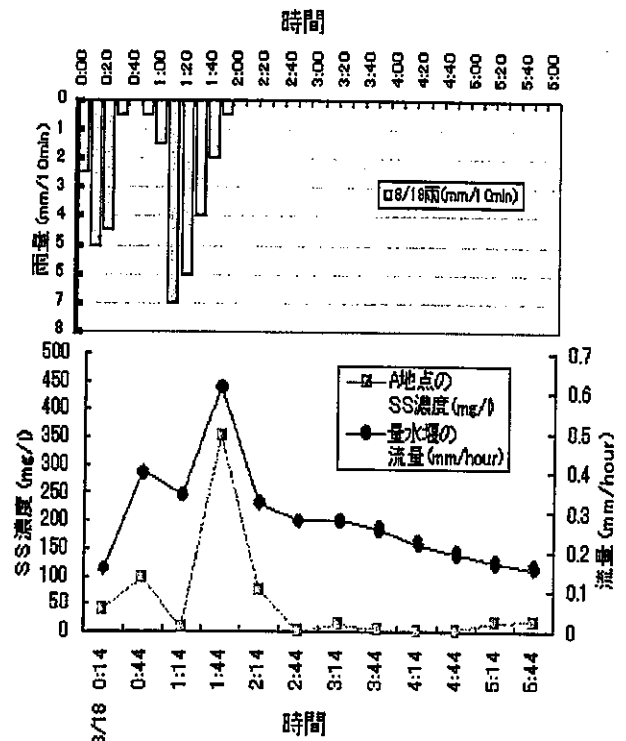


図2 雨量・流量・浮遊砂濃度の測定結果

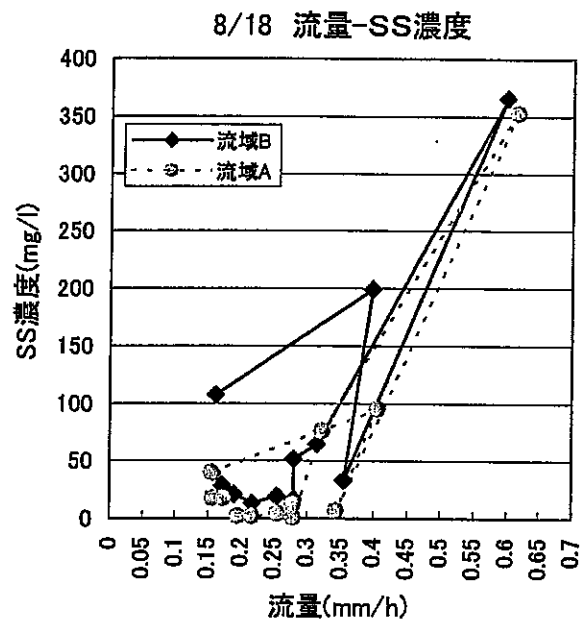


図3 流量と浮遊砂濃度(8月18日'04)