

桜島の土砂流出の特性 (現地観測)

Character of mudflow in Sakurajima

九州地方建設局 正員 田原正清

1. まえがき

桜島は鹿児島湾の中央に浮ぶ面積約 80 km^2 、周囲約 5.2 km のほぼ円形の火山半島であり、大小多数の河川が存在するが、通常は水無し川である。(図-1) 近年、火山活動の激化に伴い、降灰の異常堆積が表面浸食を促進させ、これらが、トリガーとなって土石流が頻発する現況にある。ちなみに桜島を代表する二級河川・野尻川における土石流発生回数を示すと、昭和48年12回、以降毎年毎に16回、20回、24回、22回と増大の一途をたどり、発生頻度とともに、年平均比流出土砂量も全国有数となっている。

建設省は、昭和49年から直轄による調査を開始するとともに、51年から対策工事を継続実施しているが、桜島における主要なテーマは土石流対策であり、その動態を追跡するなかで水理量として特性を把握する必要にせまられている。火山活動が活発であり、山腹崩壊と噴石の危険などもあって、土石流の発生地附近に立入ることが出来ないで、主に下流部の流路工を流下する土石流を対象に、VTRを主体とした観測を行っている。本文はこれらの資料にもとづいて、野尻川における土石流の発生条件、土石流の流量と降雨の関係、流体材料の特性、火山活動との関係などについて、現地観測で判明してきた実体について述べるものである。

2. 土石流の発生機構

土石流の発生要因として、桜島においては、気象、火山活動、地形が大きな役割を果たしている。特に、気象については降雨が土石流発生の引きがねと言われ、さらに、火山活動は爆発、噴煙、地震、降灰等により不安定堆積物の増大をもたらす、地形は裸地化により急速な浸食が進んでいるが、これらが、適度に組合わさって、ある一定の限度を超えると土石流が発生しているようである。

2.1 土石流発生降雨の特徴

土石流の発生・不発生を支配する降雨は、その降雨の降り初めから降り終りまでの降雨特性に影響されると考えられる。有効雨量の取扱いは、図-2に示すとおりとし、一降雨の降り初めは、その前に約3時間以上降雨が中断することで定義した。

つぎに、桜島では、小量の降雨でも土石流が発生していることから、雨量の取扱いは10分を単位として累加するものとし、野尻川の流域に比較的近く、また10分間雨量のピーク R_{10} が、土石流発生時刻によく対応する春田山雨量観測所の資料を用いて、図-3に示すように扱った。

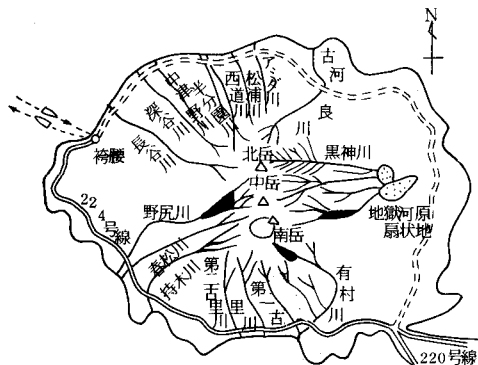


図-1 河川現況と山腹崩壊

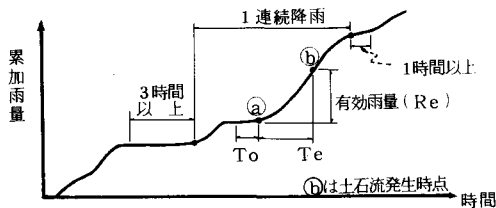


図-2 有効雨量

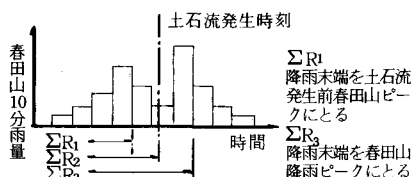


図-3 累加雨量の求め方

これらの定義をもとに、昭和49年9月26日以降土石流の発生が、検知線、VTR、地震計等により確認された資料60個、全く不発生に終わったもの23個とに大別し各種雨量相関を求めたものが図-4である。この結果に現地的な判断を加えて考察すると、

- ① 土石流の発生・不発生は交互に存在し短期間に連続発生すると、しばらく休止するといった周期性を有している
- ② 有効雨量が20mmで発生する確率は55%である。
- ③ 有効雨量が20mmを超える降雨で直前10分間雨量が4mmを超えると確実に発生域に入るが、それ以外では発生・不発生が混合する領域が広く明確に分離することが出来ない。

以上のことがらが観察されるが、総括的に、土石流の発生要因として、有効雨量と並んで直前10分間雨量が土石流発生の時刻と対応することから、支配的要素を有していると考えられる。

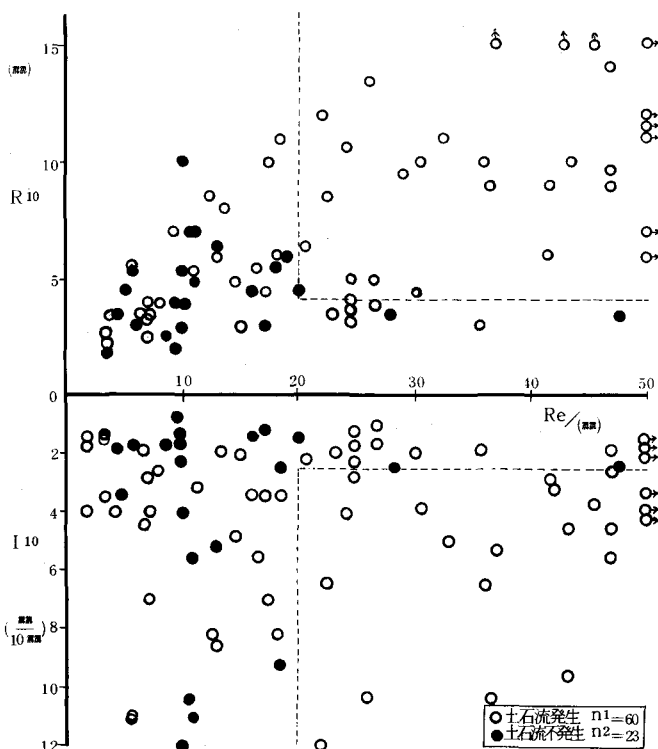


図-4 土石流発生・不発生降雨の各種雨量相関

2.2 有効雨量と土石流ピーク流量

野尻川において発生した土石流の流量が観測されているものを対象に、そのピーク流量 Q_{TP} と、それぞれ対応する有効雨量 ΣR_2 、10分間ピーク雨量 R_{10} 、との間に、図-5に示す相関が得られる。

この図によると、 ΣR_2 、 R_{10} ともかなりのバラツキはあるが、一連の降雨規模が大きくなると、 ΣR_2 、 R_{10} とも関連して大きくなり、 Q_{TP} と相乗してくるが、なかでも有効雨量の相関が良く、 Q_{TP} が、100 m^3/s を超えるとさらに整合性が良くなる。

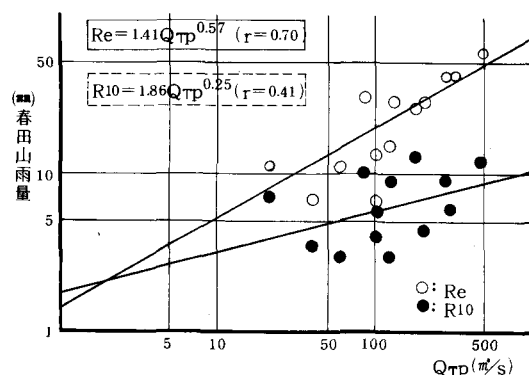


図-5 有効雨量と土石流ピーク流量

2.3 降灰と土石流

桜島の火山活動の活発化に伴い、火山灰の堆積が著しく進行し、これが山腹斜面に目詰り現象を促進させ表面流を発生しやすくしているため、小量の降雨でも土石流が発生するようになっている。

降灰と土石流の発生がどのように関係しているかを調べるために、野尻川において土石流の発生から、次の発生までの降灰量と、ピーク10分間雨量 R_{10} 、有効雨量 ΣR_2 の関係をプロットしたものが図-6である。

この図から言えることは、総体に大きくバラツキしており、1000 $g/0.25m^2$ を超える降灰量の大きな部分の資料数が少いので判然としないが、それ以下の部分については、 R_{10} 、 ΣR_2 それぞれの最小雨量と降灰量の間に、弱いけれども負の相関があり土石流の発生限界は、降灰量の増加にともない必要最小雨量は、減少

つぎに火山活動は直接噴煙降灰と結びついているが、冬期には火山活動が停滞すること、また冬期には降雨が少ないことから土石流の発生が低下することなどに着目して、これらの間に何んらかの関係がないかと云うことを表現したものが図-7である。この図によると、不発生期は、雨量、降灰量の最少期に対応し、季別の土石流発生回数は、雨量ならびに降灰量に伴って増減している。

さらに雨量と降灰量はほぼ同じ傾向を示し、土石流の発生は、マクロ的にはこの2つの相乗作用によるものと推測される。

従来、土石流の発生を規定するものとして、降灰量と雨量が注目されていたが、図-7によりこれらの関係が立証されると云ってよい。

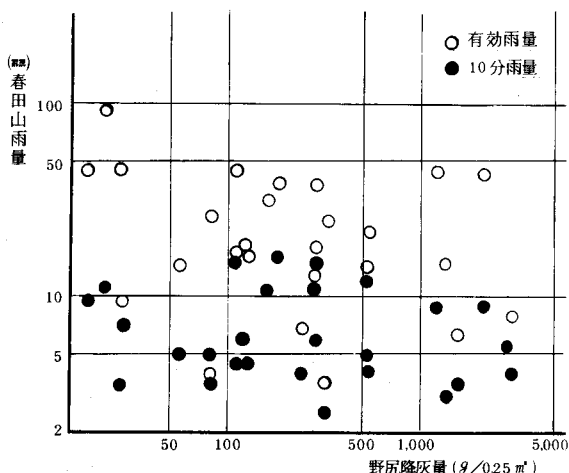


図-6 降灰量と雨量の関係

2.4 山腹崩壊量と流出土砂量

火山活動の活発化にともない、山腹の崩壊と降灰の堆積が増加しているが、これらが土石流の発生頻度に関係していると考えられる。

野尻川における近年の土砂の収支状況を示したものが表-8である。

この表にみられるように、山腹で崩壊した土砂は、すべて扇状地へ運搬され、そのうちの約6割は直接海まで流出している。また土石流材料のうち降灰が約3割を補給していることがわかる。

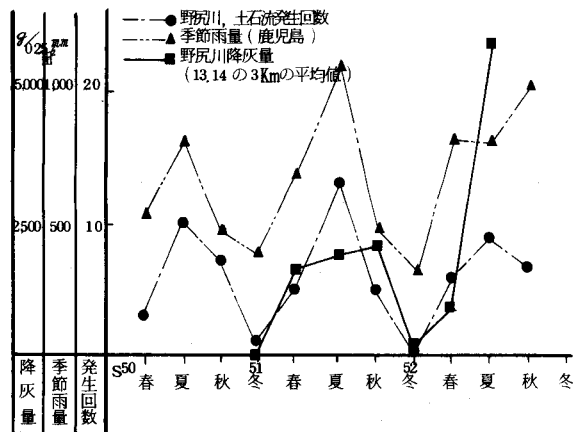


図-7 野尻川の土石流発生回数と降灰量、雨量の関係

表-8 野尻川の降灰量と崩壊量(土砂収支)

流域面積 (km ²)		降灰量 (×10 ⁴ m ³)		崩壊量 (×10 ⁴ m ³)		扇状地への 流入土砂量 10 ⁴ m ³ /km ² ・年	海への流出 土砂量 10 ⁴ m ³ /km ² ・年	降灰量厚(cm)		崩壊量厚(cm)	
上流部	中流部	上流部	中流部	上流部	中流部			上流	中流	上流	中流
1.49	0.99	6.39	2.06	28.20	3.10	22.70	14.31	4.3	2.1	18.9	3.1
		8.25	2.81	—	—	—	—	5.5	2.8	—	—

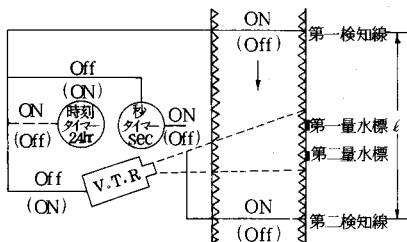
註) 上段: S 5 0 年 1 0 月 ~ 5 1 年 9 月

下段：S 5 1 年 1 0 月 ~ 5 2 年 9 月

3. 土石流の水理特性

桜島においては他の地域に較べて、土石流の発生規模、頻度ともに全国有数であるとは云うものの、実態を把握することは極めて困難である。

これまで野尻川において、VTR等を用いて動態の撮影に成功したものの総数23例のうち、水理量として読みとり解析が可能なものについて流速・流量等につき特性を検



圖一-9 土石流監視施設概要図

討する。さらに野尻橋において、鋼製のピンを用いて採水した土石流のマトリックス部分の密度など、流体の特性について検討する。

3.1 土石流の流速

野尻川流路工を流下する土石流は、図－9、図－10に示す検知線を設けてVTRにより撮影する方式を採っている。野尻川の土石流について椿教授¹⁾他は、勾配Ⅰの広長方形の水路を考え、水深 h 、流速 v 、流速係数 φ 、単位巾当りの土石流流量を q_T として、簡単なモデルから

$$v=\varphi^{\frac{2}{3}}(\rho q_T I)^{\frac{1}{3}}$$

の関係が設立すると指摘されているが、図－11に示すように、観測結果による相関式は

$$v_p=2.00 Q_p^{0.33} \quad (r=0.92)$$

ときわめて良く適合している。また図－12は、ピーク時の流速 v_p と水深 h の関係を示したものであるが、理論式 $v=\alpha\sqrt{h}$ にほぼ整合し、

$$v_p=7.76 h^{0.53} \quad (r=0.76)$$

となっている。ちなみに実測資料から求めた流速係数 φ は、8～16の範囲に分布しており、通常の粗面水路や河川における値、8～25の中間位にある。

さらにマンニング式を用いて粗度係数を求めると、およそ0.02～0.04の範囲にあり、一般の河川またはコンクリート水路の状況と变りなく、巨礫、巨塊を大量に含んだ高濃度の流れであるにも拘らず流れ易いことを示し、土石流が火山灰の微粒子を含むことにより流動性を高めるためと考えられる。

3.2 土石流の流出率

野尻川における山地面積は、2.5 km^2 程度のきわめて小流域であるため合理式が適合される条件にあるものとして、土砂を伴なわないとしたときの降雨のみによるピーク流量を Q_{wp} とすると、

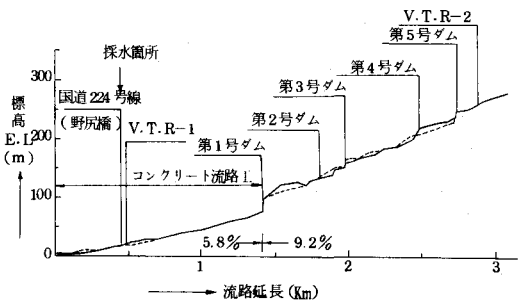
$$Q_{wp}=\frac{1}{3.6}frA$$

ここで、流出係数 $f=0.8$

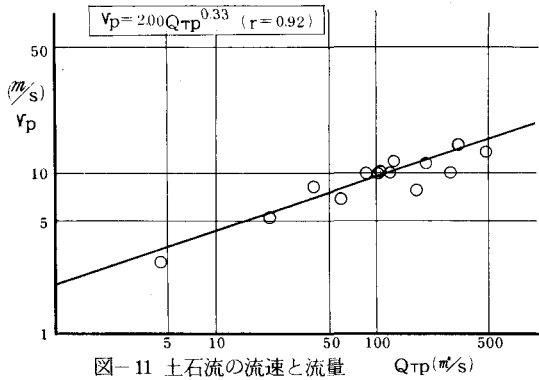
時間雨量強度 $r=6\times R_{10} \quad (mm/h)$

流域面積 $A=2.48 \quad (km^2)$

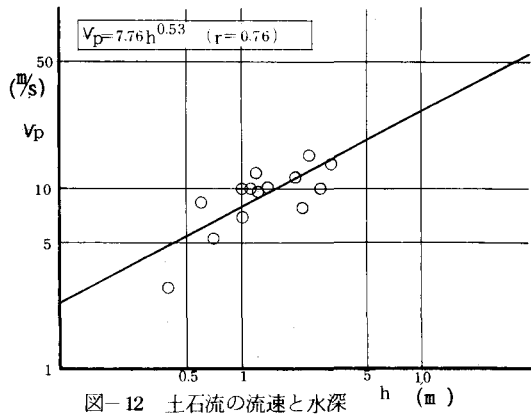
として与え、実測による土石流ピーク流量 Q_{TP} と上式によるピーク流量 Q_{wp} との比をEとすると、Eは、ピーク時における降雨量に対する土石の混入割合を示すものであるが、このEと Q_{TP} を対応させた



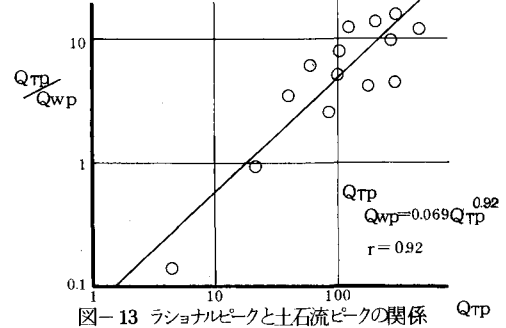
図－10 土石流監視施設設置箇所縦断面図(野尻川)



図－11 土石流の流速と流量 $Q_{TP}(m^3/s)$



図－12 土石流の流速と水深 $h(m)$



図－13 ラショナルピークと土石流ピークの関係 Q_{TP}

ものが図-13である。この図によれば土石流ピーク流量 Q_{TP} が大きい程、土石混合比 E の値は大きくなる傾向を持ち、 Q_{TP} が $100\text{ m}^3/\text{s}$ を超えるようになると Q_{TP} は Q_{wp} のおよそ10倍の値を示すようになることがわかる。

つぎに、土石流の総流出量 $\Sigma Q_T(\text{m}^3)$ と一連降雨の総量 $\Sigma R_s \cdot A \times (\text{m}^3)$ との比を流出率 F として与えそれぞれ土石流ピーク流量と対応させたものを図-14に示す。この場合も土石流ピーク流量の規模が大きいほど、総降雨量に対する流出の割合は増大しており、 Q_{TP} が $100\text{ m}^3/\text{s}$ を超えるような規模に対しては、総降雨量を超える土石流総量の流出がある。また Q_{TP} が小さい場合の流出率はきわめて小さく、流域の大部分が浸透域となって表面流出の領域が狭められる結果と考えられる。

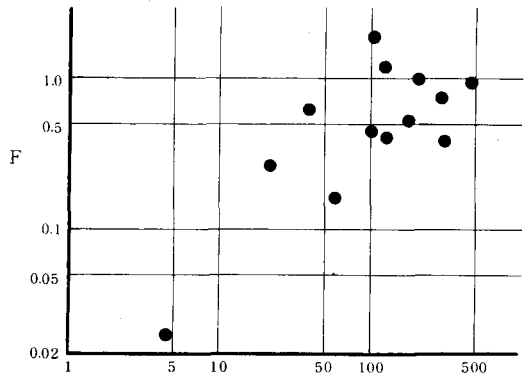


図-14 流出率と土石流ピーク $Q_{TP}(\text{m}^3/\text{s})$

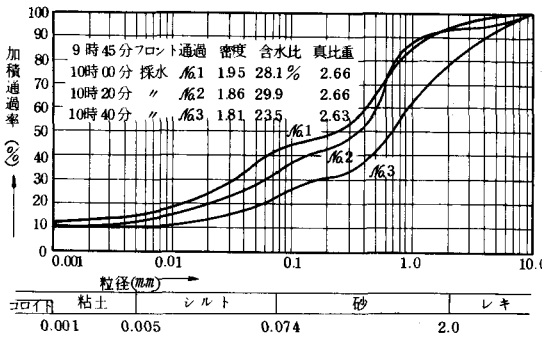


図-15 土石流採水の粒度組成 (s50.4.17.野尻川)

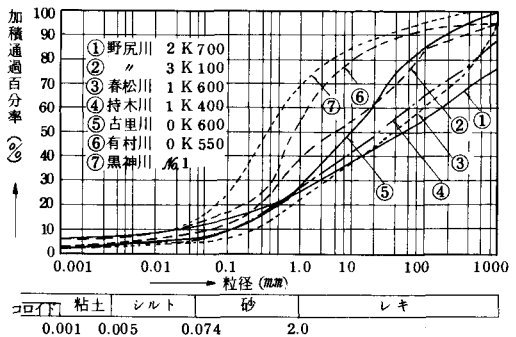


図-16 河床堆積物の粒度組成

3.3 土石流々体材料の特性

流体のマトリックス部分を対象に、 15 cm 角深さ 30 cm の鋼製ピンを用いて、土石流を直接採水し、粒度組成、含水比、密度、濃度等を分析したものを表-17に示した。また、図-15にその代表的な一例を、さらに、流動しているものとは異なるが、土石流が河床に残っていた堆積物の粒度組成を図-16にそれぞれ示しているが、以下に一般的な性状について述べる。

- ① 粒度組成は、ピークの前後でかなりの変動巾を有し、 D_{85} は主に $0.2 \sim 0.6\text{ mm}$ の範囲にある。
- ② 含水比は変動巾が少く、かなり均質な値を持っており、およそ 30% 程度以下である。
- ③ 流体の見掛けの密度は全体を通して $1.74 \sim 2.09$ の値をとりきわめて高密度である。

表-17 土石流材料(マトリックス部)の水理資料

起生年月日	ピーク時刻	採取時刻	D_{85}	w	ρ_t	e	C
50.4.8	629'	620'	0.42	27.5	1.75	0.92	0.45
6.9	1027	827	0.90	28.9	1.92	0.75	0.56
(平均)			0.66	28.2	1.83	0.84	0.51
50.4.8	630	630	0.40	27.5	2.00	0.69	0.60
50.4.17	945	1000	0.30	28.1	1.96	0.74	0.58
"	"	1020	0.42	29.9	1.86	0.83	0.52
"	"	1040	1.20	23.5	1.81	0.70	0.49
6.20	1447	1450	0.22	25.0	1.77	0.85	0.46
"	"	1510	0.22	31.7	1.91	0.80	0.55
"	"	755	0.60	27.2	1.94	0.69	0.57
"	"	830	0.40	26.9	1.84	0.83	0.51
"	"	840	0.50	30.7	1.86	0.82	0.52
"	"	1122	0.45	31.8	2.09	0.69	0.66
(平均)	—	—	0.48	28.3	1.89	0.77	0.54

- ④ 土石流の濃度はピークの前後の変動は少く、容積濃度 C は $0.45 \sim 0.66$ と高濃度になっている。

土石流の流下形状は、先端に巨礫（岩塊）を含み、高濃度で立上り角が直角に近い段波（写真参照）で流下してくるが、後流においても高濃度を維持しているのが特徴である。これは後流域の輸送能力が低下している場合でも、灰などの細粒が多量に存在するために濃度が低下しないためと考えられる。

4. むすび

桜島を代表する野尻川の土石流を対象に、現地観測の結果にもとづく、雨量、降灰量、水位、流速、流量密度第一次資料を中心に土石流の発生条件、土石流の規模、その相関の程度等について検討を行った。その結果単に、土石流の発生、流出の規模が一義的に降雨によってのみ支配されることなく、火山活動（降灰等）の影響などが相乗的に作用し合っていることが立証された。また土石流の流れの状態については、測定の精度に若干問題はあっても、土石流が高濃度で、かつ大量の岩塊を含む流れでありながら、流速係数、粗度係数など水だけが流れる状態とほとんど変りないものであることが判明した。今後の問題としては、種々の測定精度を上げることは勿論であるが、対策事業の根幹をなす流出規模の検討を、水収支、土砂収支の側面から詰めて行くことが残されている。

参考文献

1) 桜島の土石流について（文部省自然災害特別研究・昭和51年度）	椿、平野、芦田、沢田
2) 桜島防災対策技術委員会資料（第4回、第5回）	肝属川工事々務所
3) 桜島砂防土石流解析業務報告書	大隅工事々務所
4) 水理公式集	土木学会編

付表-1 桜島・野尻川における土石流の水理諸量

No	起生年月日	流 速	流 量	流速係数	粗度係数	フルート数	土石流総量	10分間雨量	有効雨量	連続雨量	流出率
		$V_P(\frac{m}{s})$	$Q_P(\frac{m^3}{s})$	ϕ	n	F_r	$\Sigma Q_T \times 10^8 (\frac{m^3}{s})$	$R_{10}(mm)$	$\Sigma Re(mm)$	$\Sigma R_s(mm)$	F
1	50. 4. 8	11.5	207.0	13.2	0.026	2.6	94.0	4.5	28.0	39.5	0.959
2	4. 17	13.6	476.0	12.3	0.030	2.4	194.1	12.0	59.5	84.0	0.932
3	4. 29	7.8	181.0	8.1	0.043	1.6	64.2	13.0	26.0	49.0	0.528
4	6. 4	10.0	287.0	9.7	0.037	1.9	121.2	9.0	42.0	65.5	0.746
5	6. 20	2.8	4.5	6.9	0.039	1.4	2.0	10.0	36.0	38.5	0.020
6	10. 3	5.3	21.7	9.1	0.032	2.0	7.1	7.0	11.0	11.0	0.259
7	10. 7	7.0	60.0	9.8	0.032	2.2	4.3	3.0	9.5	11.0	0.159
8	51. 4. 30	9.7	102.0	12.4	0.026	2.8	14.4	6.0	13.0	13.0	0.447
9	5. 16	15.1	313.0	15.3	0.023	3.1	56.0	6.0	41.5	59.5	0.380
10	6. 9	10.0	124.0	12.0	0.027	2.7	86.0	3.0	15.0	29.0	1.196
11	6. 24	12.0	130.0	15.2	0.021	3.5	48.5	9.0	28.5	48.0	0.408
12	52. 3. 17	10.0	86.0	15.2	0.020	3.2	42.0	10.0	30.5	—	—
13	9. 11	10.0	104.0	14.1	0.023	2.9	35.7	4.0	6.5	7.5	1.92
14	9. 15	8.3	40.0	16.2	0.018	3.4	10.7	3.5	7.0	7.0	0.618

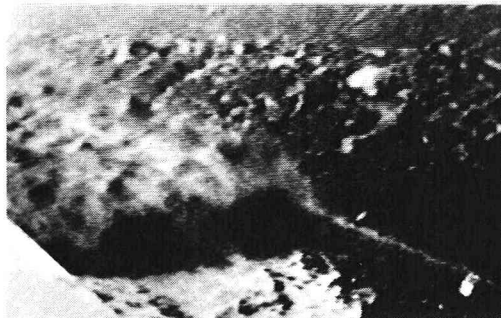


写真-1. 第2量水標通過直前（野尻川）

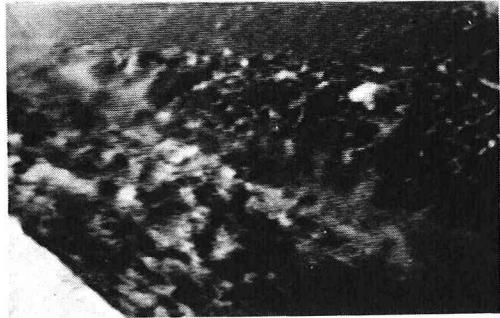


写真-2. 第2量水標を通過直後（S50.4.17）