

山地における土砂生産に関する研究(Ⅱ)

——土砂災害発生に関する降雨の特性について——

日浦 啓全*¹・村上 公久*²・大手 桂二*¹

HIROMASA HIURA*¹, KIMIHISA MURAKAMI*² and KEIJI OHTE*¹

On the soil production on the mountain slope (II)

——Characteristics of rainfall in relation to the occurrence of landslide disaster——

要旨: 木津川上流青蓮寺川水源地域は昭和34年9月の伊勢湾台風による流出土砂のため多大の土砂災害をこうむった。この論文ではこの地域の土砂災害の発生と降雨の関連について論じた。すなわち、

- (1) 伊勢湾台風を中心とした降雨資料の解析をハイエトグラフによって行ない、そこに含まれる特性値が土砂災害に結びついた豪雨型パターンを示す降雨とどう関連するかを考察した。
- (2) 計画降雨を豪雨型降雨パターンで与え、それにより土砂災害に対する警戒、避難の基準となるべき雨量すなわち危険雨量を試算した。

その結果以下の知見を得た。

(1) ハイエトグラフに関する考察は

- ① 豪雨型パターンの降雨のハイエトグラフの r 値は木津川上流地域では $r=0.78$ が適当である。
- ② 1時間最大雨量は総降雨量の関数で表わされる。
- ③ 係数 a は総降雨量、降雨継続時間の増加に伴って増加する。

(2) 危険雨量の考え方については

木津川上流地域に対して再現期間が10年の計画降雨を与え土砂災害発生の目安累加雨量を200mmとした時に、過去の多くの災害発生例とよく合致する。

緒 言

本研究の第I報¹⁾では山腹斜面から生産される土砂量を推定するための基本となるべき表層土層厚さの算定式を導いた。さらに地形解析の結果から土砂生産にもっとも結びつきの深い地形要素を取り上げ、算定式と関連させて種々の考察を行なった。これらの成果は京都府立大学農学部林学科砂防研究室が昭和43年以来、建設省木津川上流工事事務所の協力を得て淀川水系木津川上流支川、青蓮寺川水源地域の山腹斜面において

継続して実施したサウンディング調査の結果にもとづいており、従来から実施されてきている崩壊調査法の方法論に対して何らかの示唆を与えるであろうことを期待するものである。

さて、山腹での土砂の生産の形態としては雨水流による土層表面の削剥から、崩壊、山くずれあるいは地すべり、さらには地震、火山活動によるものまで種々の形態がある。これらは等しく山地を解体しようとして働く地球の営力のなせる業であり、これを完全に阻止しようと試みる事は到底人間の力の及ぶ範囲ではな

*1 京都府立大学農学部砂防工学研究室

Laboratory of Sabo Engineering, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural Univ. Japan.

*2 農林水産省林業試験場防災部治山第一研究室

Forestry and Forest Products Research Institute, Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery, P. O. Box No. 2 Ushiku, Ibaraki 300-12, Japan.

昭和54年7月28日受理

い。しかし、このようにして生産される土砂が人間の生活に影響を及ぼすに至っては、これを極力抑止しようとするのが砂防の本来の目的である。この研究でいう土砂生産とは主として崩壊現象による土砂の生産過程を考えている。しかしながら崩壊の発生には降雨のほか地形、地質、土質などの多くの素因、誘因が複雑に交錯した状態で関与している。したがってその発生をむしろ確率的な現象として把握しようとする研究も多く崩壊現象に関する研究の内容は多岐にわたっている。さて、こういった崩壊や山くずれはその多くが豪雨に伴って発生することは幾多の研究者が意見を一致させる点である。しかもこれらの崩落土砂の引き起こす災害は砂防に課せられた急務である。なかでも土石流災害に備えるべき住民の警戒、避難体制の問題や豪雨時の山間部道路の通行規制の問題等土砂災害と降雨との関連はもっとも解明が急がれている。この論文では土砂災害に結びつく降雨について、研究の現状、その進むべき方向性を検討し、次に住民の生命や財産がどれだけの降雨がどのようなパターンでもたらされる時に危険にさらされるのか、そしてそれに対してどう行動すべきかという点にも言及する。なおこの調査研究に対して種々の便宜を計っていただいた建設省木津川上流工事事務所の各位に厚く御礼を申し上げるとともに快よく降雨資料を提供していただいた京都大学農学部林学科砂防研究室の福嶋義宏氏に感謝いたします。なお資料のとりまとめ、図面の作成につきましては現在、京都市建設局勤務の丸田隆氏の多大な協力を得たのでここに謝意を表します。

I 土砂災害発生の危険雨量

1. 基本的な考え方

この問題でもっとも重要な点は、どの程度の降雨量をもって危険雨量とし、それを警戒、避難のための基準値とするかである。従来は特定の地域について、ある土砂害をもたらした降雨の再現期間を統計的に求め、その生起確率を加味して砂防計画等の基準となるべき雨量、計画降雨量を決定している。しかし統計的手法を用いる場合も、災害に関連するであろうある降雨が終了してからでないとその生起確率を求めることはできないという矛盾がある。しかしながら確率雨量の考え方は降雨解析の基本であり、ある特定の地域について長年月にわたる降雨記録を集積し、災害の関連する確率雨量の精度を向上させていく必要がある。他方、避難基準となるべき降雨量を定めるためには降雨継続中にその後、どういうパターンを取り、ピーク時にどれだけの雨量が見込まれるかを知ることのできるこ

が必要である。すなわち、降雨開始後の経過時間と累加雨量を、あらかじめ設定した種々の計画降雨のパターンと対比させながら監視していく。そうすれば、その降雨が過去に災害を引き起こしたどの降雨に匹敵するものであるか、という当てはめも可能となり、同時に警戒、避難のための体制を整えていくことも可能となる。

2. 危険雨量に関する研究と本研究の関連について

土砂災害と降雨との関連について従来は、ある災害に結びついた降雨の総量を対象としていたが、最近ではその降り方を細かく検討することで災害の発生と関連づけようとする方向へ変遷してきている。これは雨量を計測するための観測網が完備されて来ており、雨量計測の精度が相対的に向上したことも一致するであろう。以下にこの論文をまとめていくにあたって基本となった危険雨量の考え方について最近の研究の動向をのべる。

網干²⁾ は日雨量あるいは降雨強度という表現では降雨の地域性に左右され易く、従ってその量だけによって一義的に議論することが困難であるとし、災害発生前の何日間かに降った雨量すなわち事前降雨なる概念を用いて災害の予測を試みている。すなわち事前降雨が先験的な効果を及ぼしており、その後降雨強度が直接、災害の引き金になるという考え方である。Fig. 1のように縦軸に前日までの2週間の総雨量、横軸に災害の当日の日雨量を強度ではなく総量で表わし、発生した個々の災害をプロットし災害の発生に関する限界雨量曲線を求めている。なお縦軸の総雨量は2週間に限る必要はないが5日または10日間の総量よりは高い相関を持つと述べている。次は瀬尾・船崎³⁾、そして後に池谷⁴⁾ がその考えを発展させた累加雨量曲線の考察である。累加雨量曲線は Fig. 2 に示すように縦軸に累加雨量、横軸に時間を取って得られる。図中の実線は災害の発生を見た、いわゆる豪雨型降雨に共

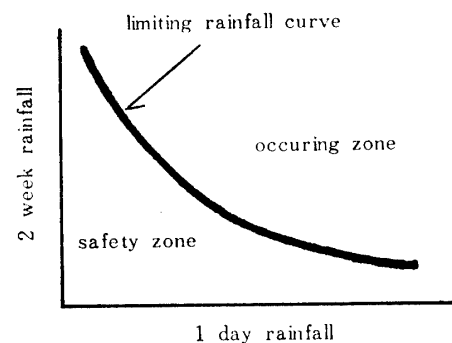


Fig. 1. Relation between disaster occurring and rainfall

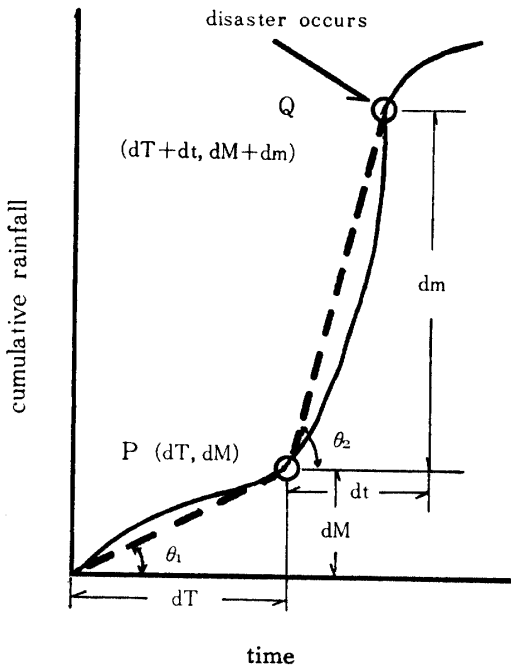


Fig. 2. Cumulative rainfall curve and effective rainfall

通した累加雨量の曲線形である。すなわち曲線は2ヶ所の変曲点が見られ、多くの場合、土砂災害は上部変曲点付近で発生している。下、上の変曲点をそれぞれP、Qとしそれに至る時間、累加雨量をそれぞれ座標で表せばP (dT, dM)、Q (dT+dt, dM+dm)となる。瀬尾らは dt を有効時間（災害発生に関連する降雨の継続時間）、dm を有効雨量（災害発生に関連する降雨量）とし、dm/dt : 有効雨量強度なるパラメーターを導いた。Fig. 3 には縦軸に有効雨量、横軸に有効雨量強度を取り、昭和46、47年に発生した災害をプロットし有効雨量が40mm 以下であるか有効雨量強度

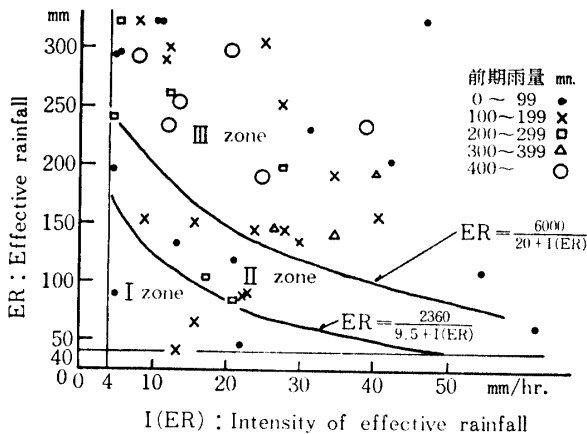


Fig. 3. Relation between effective rainfall and intensity of effective rainfall concerning disaster occurrence (Senoo, Funasaki, 1973)

が 4mm/hr 以下のいずれの場合にも土砂災害の発生しないことを示している。池谷も同様であるがこれを避難基準に関する雨量の考え方にまで発展させた。土砂災害についてこれを土石流災害に限定し、対象とする溪流の規模も流域面積が 5 km² 以下で、しかも工作物による防止対策の無い溪流で人命防護の為の警戒、避難体制を確立することを目的としている。土砂災害に關与する雨量としては奥田⁵⁾や瀬尾ら⁶⁾が 10分間継続雨量について論じている。水文学的な厳密な議論のためには短時間の雨量が意味をもってくるのは明らかである。池谷は10分間雨量の重要性は認めながらも、避難という面を重視し、そのために必要な時間として30分ないし1時間の余裕を見込んで、土砂災害を考える雨量の最小単位として1時間雨量を採用している。また同時に1時間雨量が10分間雨量とほぼニアの関係になるという裏付けも与えている。池谷は Fig. 2 中の点線で示した、原点、P、Q をそれぞれ結んで得られる直線の勾配 θ_1 、 θ_2 を用いて新たに降雨勾配比 σ なるパラメーターを導いた。すなわち、

$$\sigma = \tan \theta_1 / \tan \theta_2 = dm \cdot dT / dM \cdot dt$$

昭和47、48年の災害例について検討した結果、一般に σ と P までの継続雨量 : dM により土砂災害の危険性の判定が可能になるとのべている。ただし時間雨量が50mm を越えたり、総雨量が 200mm を越えたりする場合には σ とは無関係に土砂災害が発生し、 $\sigma > 10$ の場合には P 点から 2~3 時間以内に土砂災害が発生する危険があるとしている。最後に具体的な警戒、避難基準の試算を行なった例を示す。これは昭和50年8月の台風5号により高知県の仁淀川流域に発生した土石流災害について建設省四国地方建設局吉野川砂防工事事務所がその降雨資料をもとにして実施したものである⁹⁾。この方式では後節で詳述するが、災害をもたらした降雨が豪雨型パターンによりもたらされるとし、そのパターンに従った降り方をハイトグラフにより与え、さらにハイトグラフから時間雨量を算出しあらかじめ設定してあった土砂災害の限界雨量を対応させて災害発生時刻を想定する。このやり方は降雨の要素だけを取り上げて災害後に検証を行なったものである。従って個々の溪流のもつ地形や環境の条件が考慮されていないため災害の発生を見なかった溪流も当然存在した。しかしながら具体的な数値によって避難のための基準を打ち出したという点では十分評価すべきである。この論文でも仁淀川方式の手法による解析を行なうがそれに先立って、豪雨型パターンと深い相関をもつハイトグラフの特性値の性格を検討し、次にそれらに及ぼす地域性の影響についても考察を行なっ

が算出できる。すなわち Fig. 4 に破線で示す曲線は降雨強度曲線：I であるが、ハイレトグラフの考え方からは任意時間 t に対応する降雨強度曲線の値 I を用いて計算される連続降雨量 R がハイレトグラフ曲線： i を時間が 0 から t まで積分して得られる R と等しくなることが必要である。いま Fig. 4 において $t_{b2} > t_{b1}$, $t_{a2} > t_{a1}$ とし、 i_b , i_a のそれぞれのハイレトグラフについて積分するとその時間内の降雨強度が得られ、さらに降雨量も求められる。 i_b , i_a 曲線についてそれぞれ(10), (11)式を用いて算出される。

$$i_{t_{b2}}^{t_{b1}} = a \cdot b \cdot r^2 \left(\frac{1}{t_{b1} + b \cdot r} - \frac{1}{t_{b2} + b \cdot r} \right) \quad (10)$$

$$i_{t_{a1}}^{t_{a2}} = a \cdot b \cdot (1-r)^2 \left\{ \frac{1}{t_{a1} + b(1-r)} - \frac{1}{t_{a2} + b(1-r)} \right\} \quad (11)$$

3 豪雨時のハイレトグラフの特性値について
土砂災害に結びつくようないわゆる豪雨型降雨の特性を知るためにハイレトグラフを作成し、そこに含まれる特性値について考察を行なった。考察に用いた降雨資料は以下の4つのグループに分けられる。

(1) 木津川上流域に発生した土砂災害に関連をもつ降雨。

- ① 1959年9月26日の伊勢湾台風により被災した木津川上流域の降雨資料
- ② 木津川上流青蓮寺川支流地内、土屋原、桃俣、曾爾の3観測所の以下の降雨時の資料
 - i) 1965年9月、秋雨前線性豪雨
 - ii) 1971年7月、台風23号による豪雨
 - iii) 1972年7月、梅雨前線性豪雨、9月16～17日台風20号による豪雨

(2) 石黒による我が国の近年における著名災害について作成されたハイレトグラフ⁸⁾に含まれる特性値。

- ① 1966年9月24日 台風26号、山梨県足和田災害(船津)
 - ② 1966年8月15日 台風13号、大分県浅海井(国鉄)
 - ③ 1966年10月13日 八甲田山系北部集中豪雨(青森県大和山)
 - ④ 1959年9月26日 伊勢湾台風、揖斐川流域(建設省)
 - ⑤ 1966年10月12日 東三河地方集中豪雨(豊橋)
 - ⑥ 1967年7月9日 呉災害、梅雨前線性集中豪雨
 - ⑦ 1967年7月9日 佐世保水害、梅雨前線性集中豪雨
 - ⑧ 1939年10月16日 台風、宮崎市(既往最大降雨)
- (3) 著者らが収集した最近の土砂災害に関する降雨

資料。

- ① 1972年7月10～13日 西三河地区 梅雨前線性豪雨
- ② 1972年9月16～17日 台風20号 京都市左京区修学院地区
- ③ 1975年8月16～19日 台風5号 高知県仁淀川流域

(4) 荒廃水源地内に設置されたモデル流域で得られた降雨資料。なお()内は流域面積をあらわす。

- ① 木津川上流青蓮寺川支川土屋原川支溪タコラ谷の右支に土砂動態調査のために設けたモデル流域(21ha)。
- ② 滋賀県大津市田上地内の川向地区(2.66ha)および桐生地区(5.99ha)の水文資料観測用モデル地区。

これらの資料の考察に際して目的としたのは、まず降雨のもつ地域性とそして豪雨型降雨に共通した特性を導き出すことである。したがって(2), (3)の資料は(1)を補完すべきものであるが、(4)は相対的に小面積の流域に与えられた降雨がどのような地域性と普遍性を示すかは考察するためのものである。Tab. 1 (1)～(4)に計算結果を示す。Tab. 1 (4)は直接土砂災害に結びつくものではないが、Tab. 1 (1)～(3)はいずれも土砂災害を発生している。さて豪雨型降雨のハイレトグラフに含まれる特性値のうち、最も特徴的なものは r , a , b そして β^1 であってこれらに影響を持つと考えられるのは総降雨量： R^T 、降雨継続時間： T そして1時間最大降雨量： R^1 であろう。以下に各因子について考察する。

1) r の値について r はハイレトグラフを作成する場合に最初に求める値である。これは前述のように一連続降雨の開始から終了までの間に起こるピーク雨量の発生位置を示すものであり、他のどの特性値よりも降雨パターンの影響を受けやすい。したがって逆に降雨パターンの指標としては最適の因子であろう。 r 値はまた地域により、気象条件すなわち降雨パターンにより変動することは考えられる。石黒は Tab. 1 (2)で与えられた計算結果において $r = 0.8 \sim 0.9$ の範囲に集中していることに注目しこれを土砂災害に結びつく豪雨型降雨のパターンに対応させている⁸⁾。一方、Tab. 1 (1), (3)の r の値もともに(2)と同様の傾向を示している。さて(1)～(3)に示された豪雨の内容は、まず台風でありそしていわゆる集中豪雨である。気象学的にみると両方の降雨は大気の攪乱の時間、空間スケールが全く相異なる。にもかかわらずハイレトグラフの r 値がほぼ同様の値を取り、降雨の後半にピークの発

Table 1. Coefficients of HYETOGRAPH of heavy rain

(1) Upper stream region of R. Kizu: Typhoon Isewan

	T	R ^T	R ^I	I ^I	β^I	r	a	b	a·b
曾 爾	37hr	386.2mm	36mm	1332	3.45	0.86	19576.5	13.69	268002
太郎生	38	392.8	58	2204	5.61	0.87	17687.8	7.03	124345
名 張	38	331.8	43	1634	4.92	0.84	15408.8	8.44	130050
室 生	36	428.1	49	1764	4.12	0.92	19786.8	10.22	202221
柘 植	38	362.2	41	1558	4.30	0.87	17461.7	10.21	178284
榛 原	34	266.9	36.2	1230.8	4.61	0.79	11247.2	8.14	91552
阿 波	37	385.9	39	1443	3.74	0.86	18963.1	12.14	230212
阿 呆	37	300.2	33.5	1239.5	4.13	0.73	14259.5	10.50	149725

Upper stream region of R. Kizu: other heavy rain

土屋原川	S. 46 T. 23	28	298	30	840	2.82	0.93	12468.7	13.84	172562
	S. 47 T. 6	13	159	45	585	3.68	0.77	2374.7	3.48	9119
	S. 47 7月	25	199	26	650	3.27	0.44	6879.4	9.57	65836
	S. 47 T. 20	20	270	43	860	3.19	0.70	7473.6	7.68	57397
桃 俣 川	S. 46 T. 23	18	158	20	360	2.28	0.72	4784.2	12.28	58750
	S. 47 T. 6	13	59	12	156	2.64	0.46	1139.9	6.32	7204
	S. 47 7月	25	99	10	250	2.53	0.92	3929.3	14.69	57722
	S. 47 T. 20	22	254	44	968	3.81	0.73	7231.4	6.47	46787
曾 爾	S. 40 9月	18	300	46	828	2.76	0.78	7998.0	8.66	69263
	S. 47 T. 20	10	203	61	610	3.00	0.70	2740.6	3.50	9592

(2) Heavy rain that caused laddslide disaster

山梨県足和田災害	24	221.5	68.2	1636.8	7.39	0.9	5892.3	2.6	15320
大分県浅井	24	464	100	2400	5.17	0.8	13224.0	4.5	59580
八甲田山系北部集中豪雨	24	397	89	2136	5.38	0.8	11195.2	4.2	47020
揖斐川流域伊勢湾台風	24	270.4	56.2	1348.8	4.99	0.9	7787.9	4.8	37382
東三河地方集中豪雨	24	312	87	2088	6.99	0.9	2739.8	1.86	5096
呉災害集中豪雨	24	216.7	74.5	1788	8.25	0.9	5656.2	2.1	11878
佐世保集中豪雨	24	206.3	124.9	2997.6	14.5	0.9	5095.7	0.7	3567
宮崎市	24	587.9	131.1	3146.4	5.3	0.8	16593.0	4.3	71350

(3) Heavy rain that caused landslide disaster

Nishimikawa

豊 田 土 木	19	219	77	1463	6.68	0.84	4636.4	2.17	10061
猿 投 分 所	19	260.6	85.5	1624.5	6.23	0.84	5587.3	2.44	13633
藤 岡 分 所	18	247	68	1224	4.96	0.89	5258.7	3.29	17301
旭 分 所	19	165	42.5	807.5	4.89	0.84	3733.9	3.63	13554
小 原(大草)	19	276	77	1463	5.30	0.89	6124.5	3.19	19537

R. Otowa disaster (Kyoto)

京都土木工営所	18	184.5	40	720	3.90	0.89	4217.7	4.86	20498
京 都 気 象 台	22	164	39.5	869	5.30	0.77	4244.3	3.88	16468
乙訓土木工営所	18	129	33	594	4.60	0.83	2801.9	3.72	10423
宇 治	16	150	32.5	520	3.47	0.75	3160.6	5.07	16024
花 背	22	224.5	55	1210	5.39	0.77	5787.6	3.78	21877

R. Niyodo disaster

	T	R ^T	R ^I	I ^I	β^I	r	a	b	a·b
伊野	25	441	74	1850	4.20	0.88	13891.5	6.50	90295
戸波	20	489	96	1920	3.93	0.80	12459.7	5.43	68279
谷地	26	624.5	95	2496	4.00	0.81	20814.6	7.33	152571
上八川	30	822	133	3990	4.85	0.77	30027.7	6.53	196081
加茂	25	653.5	104	2600	3.98	0.76	20944.7	7.05	147660
鳥形山	41	246	25	1025	4.17	0.76	12944.5	11.62	150415
成山	26	606	93	2418	3.99	0.77	20216.2	7.36	148791
本川	31	792.5	135	4185	5.28	0.61	29330.4	6.01	176276
高知	29	329	33	957	2.91	0.90	14035.1	13.66	191720
鏡	25	545	90	2250	4.13	0.84	17260.1	6.67	115125
柿ノ又	26	927	119	3094	3.34	0.81	33075.3	9.68	320169
平石	26	479	47	1222	2.25	0.88	19701.3	15.13	298080
越知	26	684	116	3016	4.41	0.65	22113.7	6.33	139980
佐川	26	636	108	2808	4.42	0.65	20549.1	6.31	129665
須崎	24	422.5	94	2256	5.34	0.67	11956.7	4.30	51414
弘岡	12	200.5	50	600	2.99	0.83	3314.3	4.53	15014
池川	40	776	91	3640	4.69	0.55	38466.4	9.57	368123
川口	31	752	100	3100	4.12	0.58	29794.2	8.62	256826
川内	32	500	40	1280	2.56	0.69	25435.0	18.87	479958
市の野々	27	603.5	100	2700	4.47	0.78	20211.2	6.49	131171
面河	39	602	71	2769	4.60	0.56	29233.2	9.56	279469

(4) Takora model basin

1977 08/16	33	113	29	957	8.47	0.88	4099.7	3.28	13447
1977 09/07	57	304	33	1881	6.19	0.67	20304.2	9.79	198778
1977 11/16	21	97	17	294	3.03	0.95	2895.5	8.85	25625

Kawamukai model basin

1962 08/21	13	91	19.0	247	2.71	0.62	1729.1	6.00	10375
1963 06/21	6	62	26.5	159	2.56	0.67	508.7	2.21	1124
1965 07/06	14	73	20.5	287	3.93	0.71	1273.1	3.44	4380
1966 07/01	11	91	23.0	253	2.78	0.82	1421.4	4.62	6567
1967 07/09	15	92.5	44.0	660	7.14	0.87	1505.9	1.28	1928
1968 07/02	21	144.5	30.0	630	4.36	0.52	3749.8	4.95	18561
1970 09/18	23	129.5	32.0	736	5.68	0.78	3457.7	3.70	12793
1970 09/23	18	65.5	24.0	432	6.60	0.72	1312.6	1.04	2678
1971 09/26	9	109.5	48.5	436.5	3.99	0.78	1168.4	1.67	1951
1972 07/10	19	112.0	24.0	456	4.07	0.58	2672.3	4.86	12987
1972 07/15	15	88.0	17.0	255	2.90	0.67	1880.6	6.37	11979
1975 09/16	20	150.5	24.0	480	3.19	0.75	4165.8	7.68	31994
1975 08/22	13	108.5	33.5	435.5	4.01	0.69	1734.9	2.99	5187

Kiryu model basin

1972 07/15	16	90.5	19.5	312	3.45	0.56	1911.4	5.12	9786
1974 06/02	14	65.5	22.0	308	4.70	0.71	1081.4	2.51	2714
1975 08/22	18	116.5	38.0	684	5.87	0.67	2387.1	2.49	5944
1976 06/09	14	86.5	36.0	504	5.83	0.86	1357.2	1.69	2294

生ずるパターンを示していることは豪雨型降雨のパターンに共通した性質とも考えられる。後に詳しく議論するようにいわゆる危険雨量の考え方を発展させるためにはハイトグラフが有効性を持って来る。したがって木津川上流地域について土砂災害に結びつく豪雨パターンを規定する r 値としては Tab. 1 (1)~(3)で代表される値の平均値を採用することにする。すなわち $r = 0.78$ である。なおハイトグラフを用いて厳密な議論をするためには今後解決していかなければならない技術的な問題がある。すなわち

- (1) 降雨の開始と終了の時間の区切り方に一定の基準が示されていないこと。したがって逆に任意の r 値になるように時間を区切ってしまふ事があり得る。
- (2) (1)と関連するが降雨の継続時間に関する問題、例えば Tab. 1 (2)では全資料が24時間雨量であるが、Tab. 1 の他の資料については必ずしもそうではない。降雨継続時間が気象条件により大きく左右されることは当然である。
- (3) 同様に土砂災害に結びついた豪雨の中でも明確

なピークの存在しない降雨やピークが2つ以上もある降雨があるがそれをどう取扱うか。例えば1976年9月の台風17号により香川県小豆島や兵庫県宍粟郡一宮町に土砂災害を発生させた降雨がそれである。これらのうち他の特性値の考察の処で解決されたものもあるが今後の資料の収集にまつべきものもある。

次に Tab. 1 (4)はそれぞれのモデル流域で得られた降雨の記録である。田上山地の資料はいずれも年間の最多雨記録である。これらはいずれも相対的に総降雨量が小さい。したがってもちろん土砂災害に結びついたものではない。しかしながら r の平均値は $r = 0.72$ で同様に後部ピーク型であって、もしも総降雨量が十分に大きければ豪雨型降雨として土砂災害に結びついたとも考えられる。田上山地の場合、後部ピーク型以外の降雨はごく例外的であったし、タコラ谷支の資料についても3回の降雨とも同じ木津川上流域の土屋原、桃俣、曾爾のいずれの観測所でも記録されておらず、これらの降雨がごく地域性を帯びたものであること、そしてもし気象条件が満たされていれば土砂災害

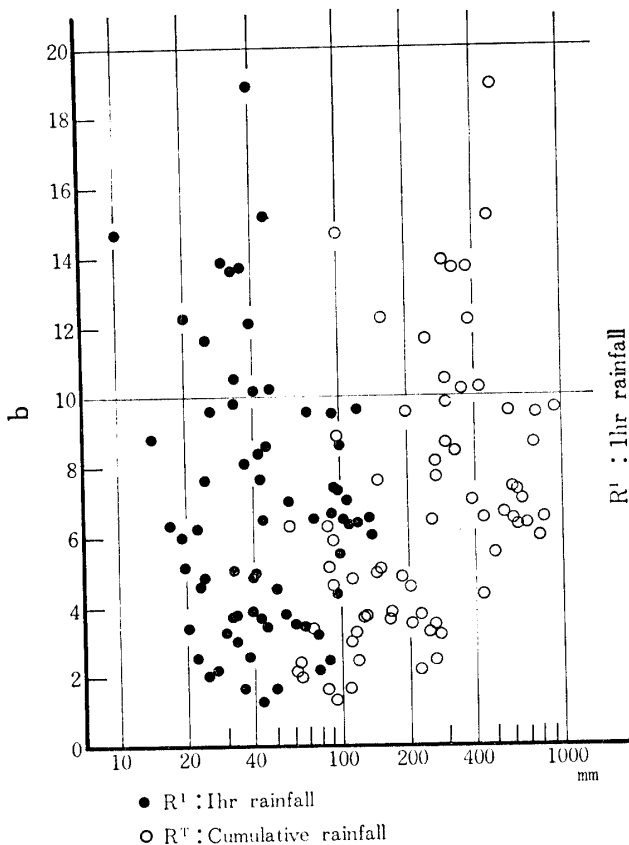


Fig. 5. Relation between 'b' and R^1 , R^T

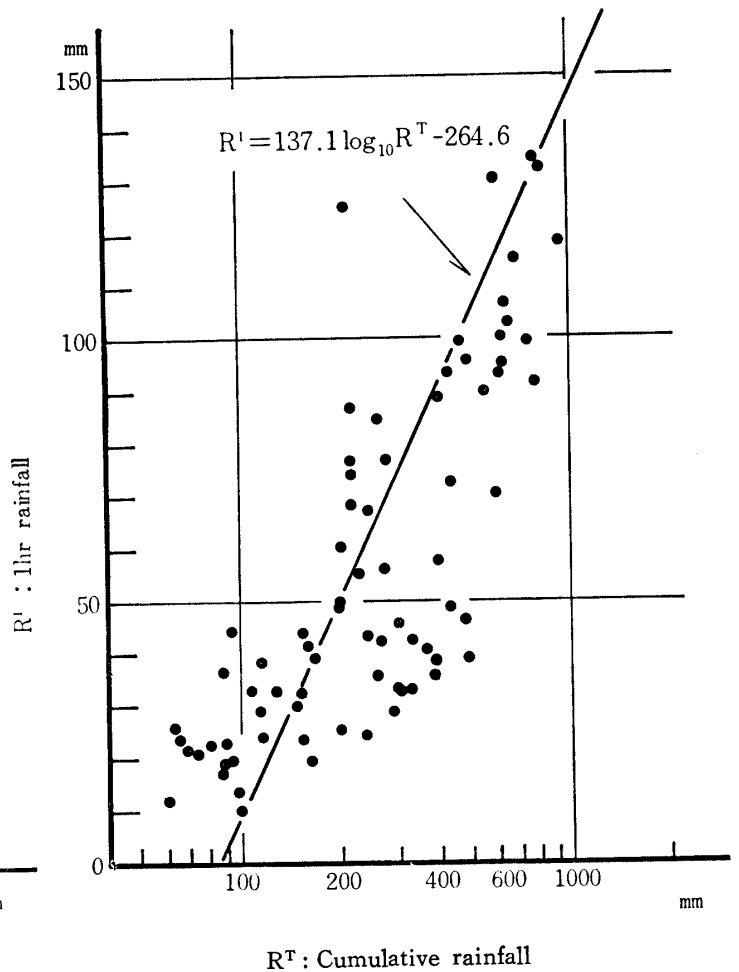


Fig. 6. Relation between 1 hr. rainfall and cumulative rainfall

に結びつく可能性のあったことが考えられる。このように、ある意味では豪雨型パターンの降雨の地域性が示されたという事も考えられる。

2) 定数 a, b および特性値 β^1 と R^T , R^1 との関連について

総降雨量： R^T と 1時間最大降雨量： R^1 がそれぞれの定数におよぼす影響を考察するまえに R^T , R^1 の関連についてまず考察する。Fig. 5 は縦軸に R^1 , 横軸に R^T を取り各降雨をプロットしたものである。図から明らかなように R^1 と R^T との間にはかなり良い相関が見られる。関数形は(12)式であらわされる。

$$R^1 = 137.1 \log_{10} R^T - 264.6 \quad (\text{単位: mm}) \quad (12)$$

なお相関係数は $r=0.73$ であり、これから本研究で解析に用いた資料の範囲内では 1 時間最大雨量が総降雨量の関係となり得ることが期待できる。他方降雨資料も相対的に広範囲にわたって網羅されているため、この関数形の持つ意味の普遍性もある程度認めることができると考える。次に先にのべた(7)式を(8)式によって変形すると(13)式を得る。

$$b = (R^T - R^1) / (R^1 - R^T / T) \quad (13)$$

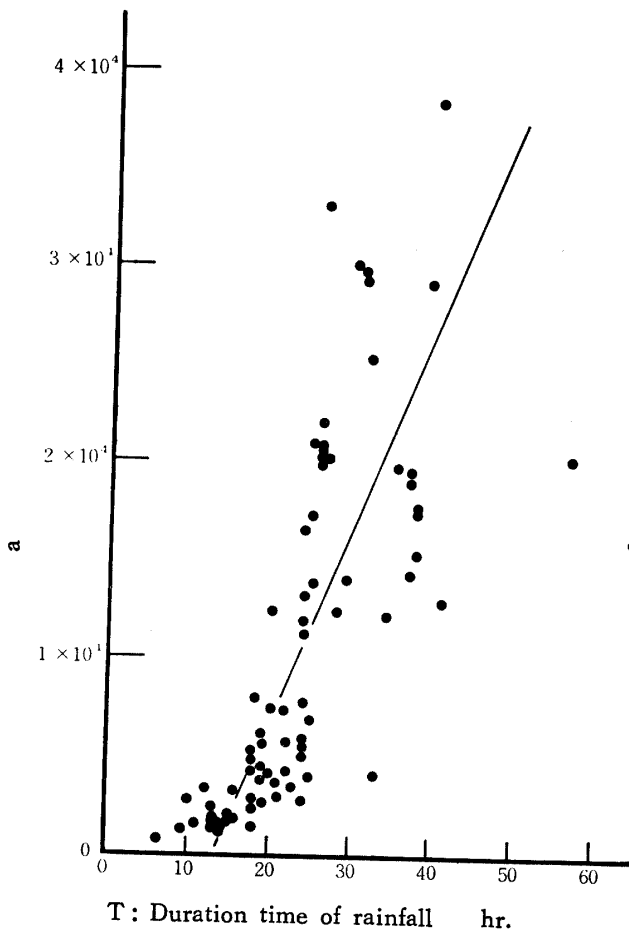


Fig. 7. Relation between 'a' and T

この関係と(12)式から係数 b も R^T と何らかの関係になることが期待できる。しかし(13)式の右辺の分母、分子ともに R^1 , R^T を含むこともあり、Fig. 6 の関係図に示すように b の値に一定の傾向は見られない。従って渡辺⁶⁾ が豪雨型降雨に対するハイエトグラフの b の値に平均値を採用したことは、この点で妥当性をもってくると思われる。次に(5), (6)式より a は(14)式で与えられる。すなわち

$$a = (b + T) \times R^T \quad (14)$$

Fig. 7, 8 には a と T, a と R^T の関係を図示する。降雨継続時間： T が長くなれば総降雨量： R^T も増加するであろうことは常識的に考えられる事である。事実、Fig. 7, 8 においても、 T , R^T の増加とほぼ比例して a が増加する傾向が示されている。次に解析に用いた全降雨資料のハイエトグラフの中から各降雨を代表するものを選んで Fig. 9 (1)~(4)を示す。ここでグラフの右縦軸の縮尺が降雨継続時間 T の大小によって相異しているのが認められる。これはハイエトグラフの考え方より曲線上の任意の時間における降雨（左縦軸に 1 時間強度で示す）が T 時間継続して与えられた

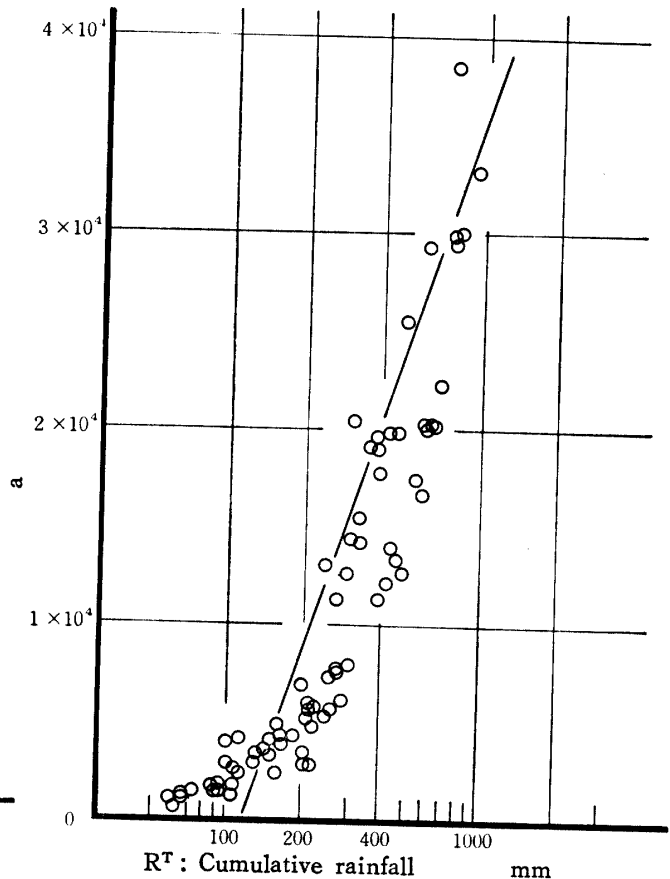


Fig. 8. Relation between 'a' and R^T

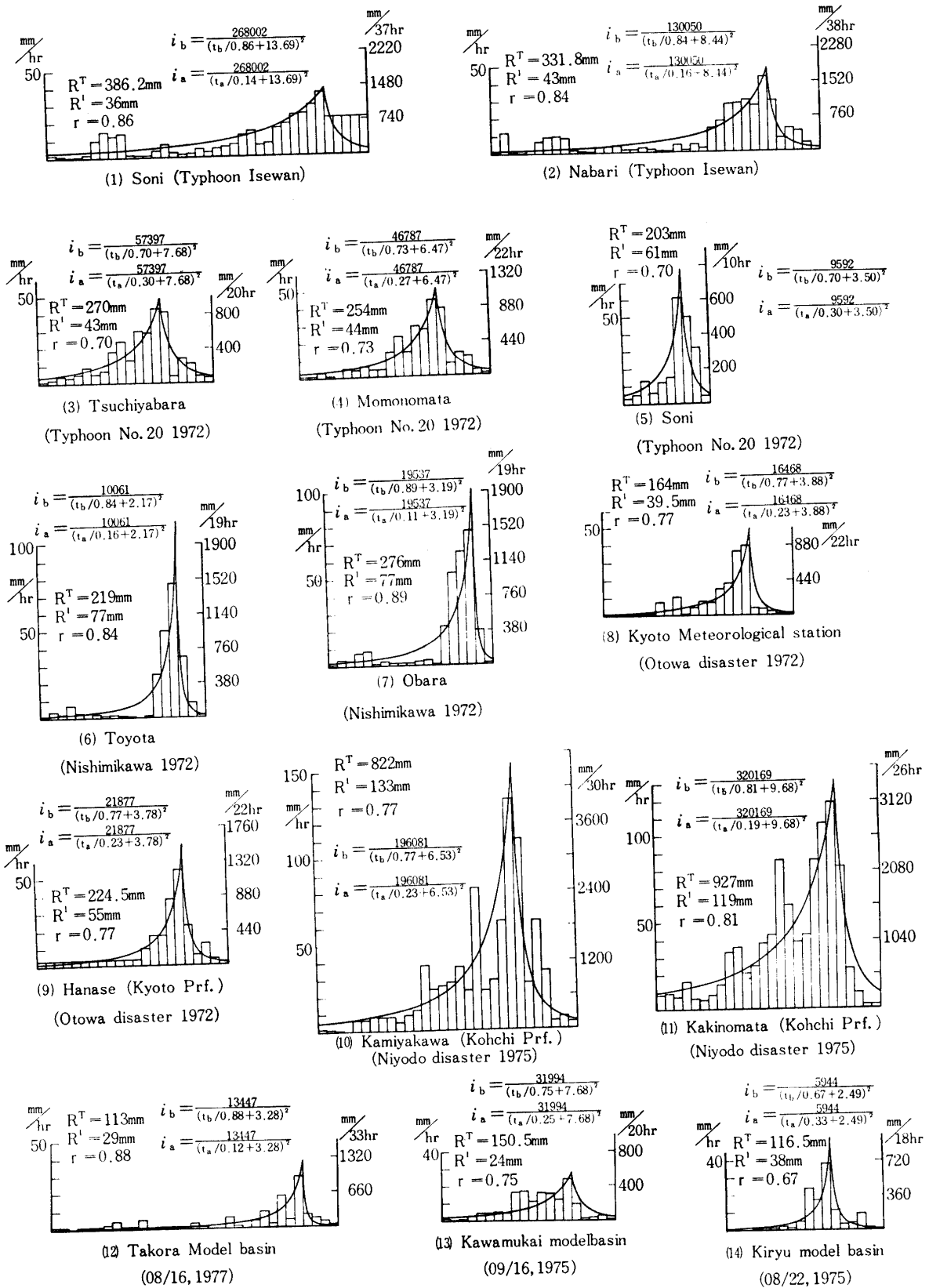


Fig. 9. Hyetograph of heavy rain

場合の降雨量を表わしていると理解できる。したがってTが大きくなると右縦軸の値は大きくなる。また曲線を相互に比較するとTが大きく、曲線と時間軸との距離が大きくそしてa・b値の大きいものは大きな降雨を表現している。例えば(10), (11)は全資料中もっとも大きな雨でTも曲線の縦距もa・b値も大きく曲線は鋭く弯曲している。このように見ていくと同様なr値を持つ降雨であってもその内容が台風であるのか集中豪雨であるのかにより曲線型は変化する。したがって降雨資料をもっと多く収集すれば降雨タイプの分類も可能になると思われる。最後に1時間特性係数β¹であるが(8)式を変形すると次式を得る。

$$\beta^1 = I^1 / I^T = R^1 \cdot T / R^T$$

これは総降雨量と連続降雨量との比である。Tab. 1の計算結果からもI¹やR^Tの変化の幅にはよらずβ¹はあまり変化をしていないように思われる。したがって、β¹は降雨パターンにはよらずほぼ同一の値を取り得ると考えて良いように思われる。

4. 土砂災害発生の危険雨量の試算

この節では、この調査研究の対象とする木津川上流地域に豪雨型パターンで降雨がもたらされたときに、

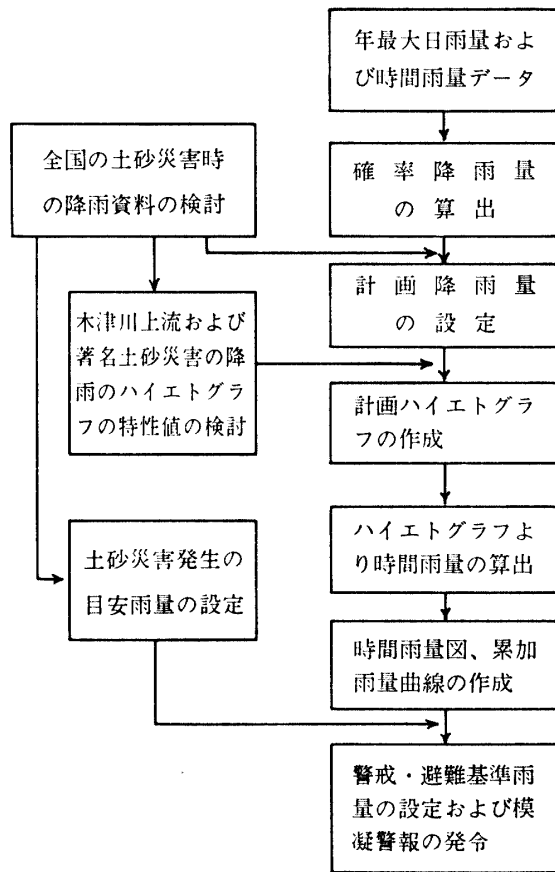


Fig. 10. Flow chart for estimating the danger rainfall

それに対して警戒および避難する基準となるべき雨量すなわち危険雨量を実際に試算した。この作業の内容は Fig. 10 に流れ図で示す。流れ図に沿ってその過程結果を述べていく。

(1) 降雨資料は建設省木津川上流工事事務所提供の資料によったが、中でももっとも観測数の多い曾爾観測所の記録を用いた。Tab. 2 にそれらを示すが年最

Table 2. Datas of maximum rainfall of the year

Year	date	rainfall of a day	date	rainfall of 1hr.
1942 (S. 17)	09/20	104.0mm	.....	.....mm
1943 (S. 18)	07/19	128.2	.....	.....
1944 (S. 19)	10/07	210.0	.....	.....
1945 (S. 20)	09/17	126.0	.....	.....
1946 (S. 21)	07/29	170.0	.....	.....
1947 (S. 22)	09/14	130.0	.....	.....
1948 (S. 23)	09/15	106.5	.....	.....
1949 (S. 24)	07/28	210.6	.....	.....
1950 (S. 25)	09/03	85.0	.....	.....
1951 (S. 26)	07/14	73.2	.....	.....
1952 (S. 27)	06/23	107.6	.....	.....
1953 (S. 28)	09/25	262.2	09/25	47.6
1954 (S. 29)	09/18	119.0	06/30	26.9
1955 (S. 30)	07/23	74.0	10/21	17.6
1956 (S. 31)	09/26	195.0	09/27	39.3
1957 (S. 32)	09/09	98.0	.....	.....
1958 (S. 33)	08/25	207.9	08/03	38.7
1959 (S. 34)	09/26	282.7	.....	.....
1960 (S. 35)	06/21	125.0	07/29	24.4
1961 (S. 36)	10/27	229.0	05/17	52.5
1962 (S. 37)	07/27	236.0	07/27	24.0
1963 (S. 38)	05/28	98.0	06/27	66.0
1964 (S. 39)	09/24	111.4	08/29	24.0
1965 (S. 40)	09/17	337.6	09/17	46.0
1966 (S. 41)	09/24	157.8	09/08	41.0
1967 (S. 42)	10/27	153.5	09/12	39.0
1968 (S. 43)	08/26	187.4	07/15, 08/01	36.0
1969 (S. 44)	08/22	103.7	07/13	22.0
1970 (S. 45)	19/18	137.2	09/18	37.0
1971 (S. 46)	08/30	166.3	08/30	33.0
1972 (S. 47)	09/16	203.0	09/26	61.0
1973 (S. 48)	06/21	133.1	08/04	23.0
1974 (S. 49)	17/24	144.0	07/02	34.0
1975 (S. 50)	08/22	157.5	08/05	33.0
1976 (S. 51)	09/08	240.0	08/08	34.0
1977 (S. 52)	06/24	98.2	06/24	29.0
1978 (S. 53)	06/23	82.0	08/07	35.0

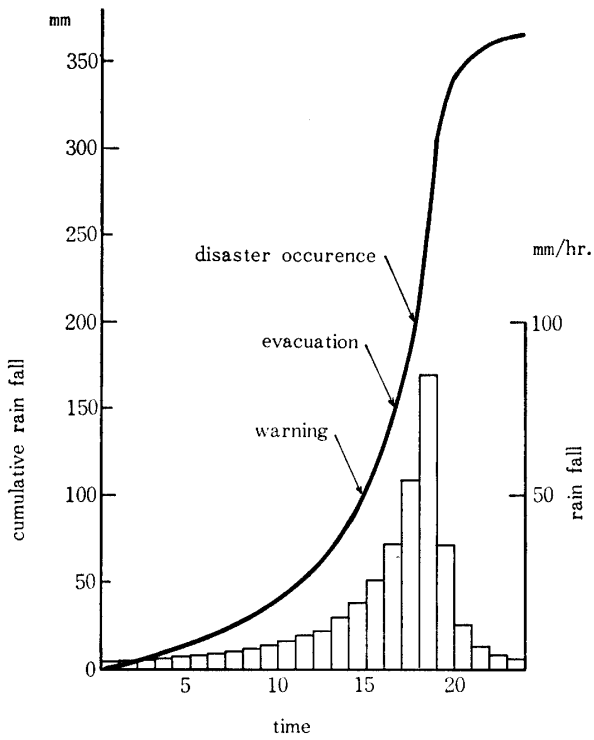


Fig. 11 (1). Cumulative rainfall curve of design rainfall of 100 years return period

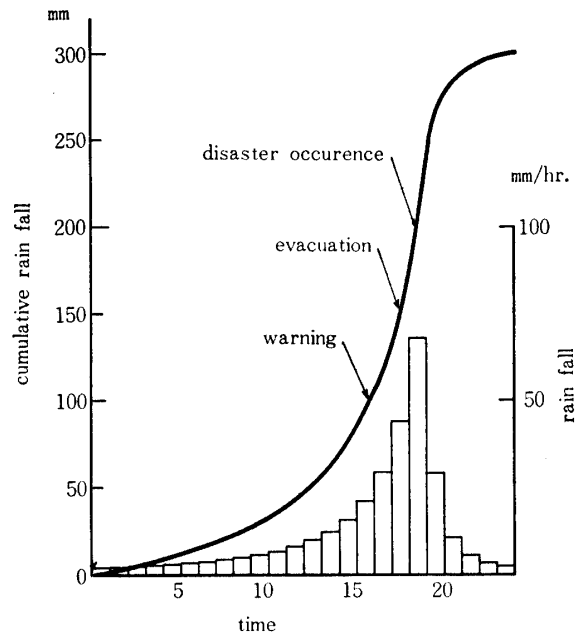


Fig. 11 (3). Cumulative rainfall curve of design rainfall of 30 years return period

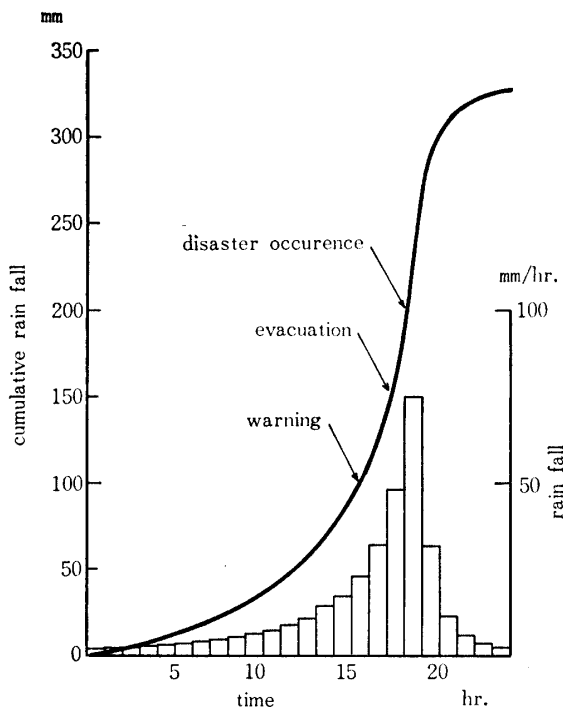


Fig. 11 (2). Cumulative rainfall curve of design rainfall of 50 years return period

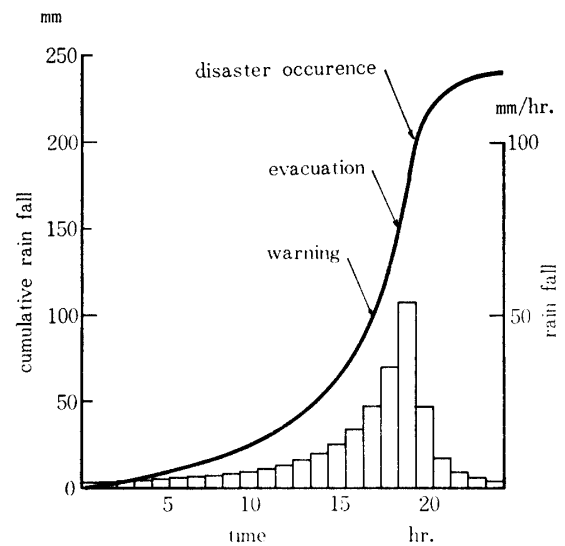


Fig. 11 (4). Cumulative rainfall curve of design rainfall of 10 years return period

大日雨量は昭和17年から53年まで、1時間最大雨量は昭和28年から53年まで（一部欠測値を含む）である。

(2) 超過確率降雨量の計算は岩井法により、日雨量、1時間雨量のそれぞれについて求めた。計算結果は Tab. 3 を示す。これにより伊勢湾台風時の最大日雨量の再現期間はほぼ23年であることが明らかとなった。

(3) 計画降雨量は計算ハイエトグラフを作成するために必要であるが伊勢湾台風程度を含み、さらに大きな降雨についても考えるため、再現期間を10, 30, 50そして100年と定めた。これによって計算された計画ハイエトグラフの特性値を Tab. 4 に示す。

(4) Tab. 4 の結果から(1), (2)式によってハイエトグラフ式が導かれ、同様に(10), (11)式によって時間雨量と累加雨量が計算される。Tab. 5 にはその結果を示す。また Fig. 11 (1)~(4)には各再現期間ごとに Tab. 5 の結果をハイエトグラフそのものではなく時間雨量を棒グラフで、そして累加雨量はS字曲線で示される。

(5) 土砂災害に対する警戒、避難の警報を発令するには Fig. 11 で得た累加雨量の曲線上に土砂災害の発

生の目安となる雨量をプロットし、その時刻が降雨開始からどのくらいの時間になるかを想定する必要がある。この目安雨量に対して緊急砂防事業要求資料では継続雨量100~150mmを示唆し、また池谷は200mmを提案している⁴⁾。なお木津川上流地域については伊勢湾台風時の災害発生についてその時刻等明確な記録は得られていない。そこで、ここでは土砂災害発生の目安となるべき雨量として上記した3種類の雨量、100, 150そして200mmを取り上げ Fig. 11 (1)~(4)の累加雨量曲線上にそれぞれプロットし、これらの結果とIで述べた危険雨量に関する議論を考えあわせて考察した。その結果再現期間が10年である降雨の累加曲線上に目安雨量を200mmとしてプロットした場合、瀬尾ら³⁾が既往の土砂災害の発生例について考察している例によく適合した。ただし再現期間を長くしていくと累加雨量曲線の上部の変曲点は目安雨量の時刻から遠ざかり、また目安雨量を100ないし150mmとした場合をこれまでの土砂災害発生例に照らしてみると相対的に累加雨量も少なく、いずれの場合も経験的に得られている土砂災害発生時刻との関連が少なくなっていくように思われた。したがって木津川上流地域の場合、これまでの降雨記録をもとにして考えるならば10~30年程度の再現期間をもった計画降雨を見込んでおき、累加雨量が200mm程度になる時刻をハイエトグラフによって先取りして想定し、その時刻を基準とし警戒あるいは避難の体制づくりをすべき事が望ましいと思われる。渡辺ら⁶⁾はこの基準時刻から1時間および2時間さかのぼった時刻をそれぞれ避難および警戒警報の発令時と定めている。これは避難のための具体的な作業ならびに心の準備等の時間を考慮したためである。Tab. 6 には再現期間が10年と50年に対し、目安雨量を200mmと想定した場合の警戒、避難警報の発令の時刻と土砂災害発生の時刻をそれぞれ降雨の降り出しの時刻から起算した結果を示す。

以上、降雨資料をもとにハイエトグラフによる解析を行ない、土砂災害の発生に対する警戒、避難に関した議論まで行なった。雨が降り始めてから出来るだけ

Table 3. Calculated design rainfall

return period	rainfall of 1hr	rainfall of a day
500Year	109.1 mm	456.6 mm
250	98.2	416.8
200	94.9	404.2
150	90.6	380.0
100	84.7	365.5
75	80.6	349.7
50	74.9	327.5
30	68.1	299.8
25	65.7	290.0
20	62.7	277.9
10	53.9	240.4
7	49.4	220.7
5	45.2	201.7
3	38.7	171.4
2	33.2	144.7

Table 4. Coefficients of HYETOGRAPH of design rainfall

return period	T	R	R ¹	I ¹	β^1	r	a	b	a·b
100Year	24hr	365.5mm	84.7mm	2032.8	5.56	0.78	10250.0	4.04	41410
50	24	327.5	74.9	1797.6	5.49	0.78	9210.1	4.12	37946
30	24	299.8	68.1	1634.4	5.54	0.78	8444.9	4.17	35215
10	24	240.4	53.9	1293.6	5.38	0.78	6791.6	4.25	28864

Table 5. One hour rainfall and cumulative rainfall calculated by means of HYETOGRAPH

return period rainfall time	100year		50year		30year		10year	
	1hr.	cumulative	1hr.	cumulative	1hr.	cumulative	1hr.	cumulative
1hr.	2.3mm	2.3mm	2.1mm	2.1mm	1.9mm	1.9mm	1.6mm	1.6mm
2	2.5	4.8	2.3	4.4	2.1	4.0	1.7	3.3
3	2.8	7.6	2.5	6.9	2.3	6.3	1.9	5.2
4	3.1	10.7	2.8	9.7	2.6	8.9	2.1	7.3
5	3.5	14.2	3.1	12.8	2.9	11.8	2.4	9.7
6	3.9	18.1	3.5	16.3	3.3	15.1	2.7	12.4
7	4.4	22.5	4.0	20.3	3.7	18.8	3.0	15.4
8	5.0	27.5	4.6	24.9	4.2	23.0	3.4	18.8
9	5.8	33.3	5.3	30.2	4.9	27.9	4.0	22.8
10	6.8	40.1	6.2	36.4	5.7	33.6	4.6	27.4
11	8.1	48.2	7.3	43.7	6.7	40.3	5.5	32.9
12	9.7	57.9	8.8	52.5	8.1	48.4	6.5	39.4
13	11.8	69.7	10.7	63.2	9.9	58.3	8.0	47.4
14	14.8	84.5	13.4	76.6	12.3	70.6	9.9	57.3
15	19.1	103.6	17.2	93.8	15.8	86.4	12.7	70.0
16	25.5	129.1	22.9	116.7	21.0	107.4	16.9	86.9
17	35.9	165.0	32.1	148.8	29.4	136.8	23.6	110.5
18	54.2	219.2	48.2	197.0	44.0	180.8	35.1	145.6
19	84.7	303.9	75.0	272.0	64.1	248.9	53.9	199.5
20	35.7	339.6	31.9	303.9	29.2	278.1	23.4	222.9
21	12.7	352.3	11.5	315.4	10.6	288.7	8.6	231.5
22	6.5	358.8	5.9	321.3	5.5	294.2	4.4	235.9
23	4.0	362.8	3.6	324.9	3.3	297.5	2.7	238.6
24	2.7	365.5	2.4	327.3	2.3	299.8	1.8	240.4

Table 6. Time of disaster occurrence, evacuation and warning of disaster from the beginning of rain

	時刻 (降り出しより)
警戒警報	17時間目
避難警報	18時間目
土砂災害発生	19時間目

早い時期にその降雨のパターンを先取りすることが種々の警報の発令を有効に行なうためにもっとも重要なことである。ハイエトグラフがこの目的に有効な手段を提供することが以上で確認された。しかしながら解決すべき多くの問題点を残していることも事実である。今後は第一に降雨関係の資料の整備、蓄積そして観測網の完備、拡充がなされねばならない。さらに土砂の生産という立場からみると木津川上流地域では伊勢湾台風以後すでに20年が経過しようとしている。しかもその間に目立った土砂の動きはない。しかしながら山

腹斜面において次の土砂流出に備えるべく営々として不安定土砂が生産されその蓄積が進行していることは明らかである。したがって土砂災害の記憶を新たにしつつ来たるべき不測の事態に備えて万全の体制を整えておくことが必要となる。こういった体制の実現のためにこの論文が若干でも資するところがあれば筆者らの大いに喜びとするところである。

引用文献

- 1) 日浦啓全・大手桂二・日置象一郎・村上公久 (1978) : 山地における土砂生産に関する研究(I), 京都府立大学農学部演習林報告, No. 22, 36-53
- 2) 網干寿夫 (1972) : 集中豪雨とマサ斜面の崩壊, 施工技術, 5 (11), 39-46
- 3) 瀬尾克美・船崎昌継 (1973) : 土砂害 (主に土石流的被害) と降雨量について, 新砂防89, 26 (2) 22-28
- 4) 池谷浩 (1974) : 降雨強度比による土砂害からの

- 避難基準に関する一私案，新砂防94，**27** (3)，7-11
- 5) 建設省松本砂防工事事務所・京都大学防災研究所 (1973) 土石流調査成果報告書 (第1回)
- 6) 渡辺 敏・徳山久仁夫・中山政一・二宮寿夫・大八木俊治 (1979)：土石流警戒・避難基準順設定の一手法——高知県仁淀川流域を対象として——新砂防110，**31** (3)，22-30
- 7) 石黒政儀 (1968)：ハイエトグラフとその特性に関する研究，土木学会論文集，No. 155
- 8) 岩井重久・石黒政儀 (1970)：応用水文統計学，p. 256-275 森北出版

Summary

The purpose of this research is to investigate the actual conditions of the soil production on the mountain slope and to control it. It is the purpose of Sabo engineering also.

The research area, the typhoon attacked (Isewan typhoon, Sept. 1959) upper stream of the Shorendge river which is a branch of the Kizu river, seems to have been produced unstable soil that may cause landslide disaster in case of heavy rain for about twenty years after the typhoon.

Through the analyses of rainfall data of Isewan typhoon by means of HYETOGRAPH and the estimation of danger rainfall, the writers got the results as follows.

On hyetograph

- 1) in the research area, the value of 'r' as in the hyetograph of heavy rainfall pattern as found to be: $r=0.78$
- 2) maximum one hour rainfall can be defined as the function of total rainfall.
- 3) coefficient 'a' increases with total rainfall and rainfall duration time.

On danger rainfall

in the research area the design rainfall of 10 years return period and the accumulated rainfall 200 mm, as the index of landslide disaster occurrence, correspond to examples of many disasters occurrence in the past.