山腹崩壊と地形特性に関して

――昭和50年5号台風による高知県下の山腹崩壊を対象として――

柏谷健二・平野昌繁・横山康二・奥田節夫

THE LANDSLIDE AND ITS GEOMORPHOLOGICAL ASPECT

――On the landslides in Kouchi pref. caused by heavy rain during the 5th typhooon in 1975――

By *Kenji* KASHIWAYA, *Masashige* HIRANO, *Kōji* YOKOYAMA and *Setsuo* OKUDA

Synopsis

The distribution of landslides in Kouchi pref. caused by the heavy rain on Aug. 17 in 1975 and the factors affecting them are discussed.

Survey work showed that the collapse density (the number of collapse points per 2 km × 2 km) is in proportion to the gradient of slope (average gradient in the same area) till a certain critical gradient in the A section where total rainfall is nearly constant, and in the B section where the gradient is nearly constant, the collapse density is proportional to total rainfall (average total rainfall in 2km × 2km).

From the results mentioned above, next equation is derived for estimating the number of collapse points;

$$N(i, r) = k_{ir}(i-i_0)^p (r-r_0)^q \quad \text{with} \quad i = \tan\alpha$$

where $N(i, r)$: number of collapse points per unit area, k_{ir}: coefficient, i_0: critical gradient for occurrence of collapse, r: total rainfall in mm, r_0: critical rainfall for occurrence of collapse in mm, α: average slope angle per unit area and p, q: constant to be determined from field data.

Assuming that p and q equal 1 respectively and i_0 equals 0 from the results obtained here, next approximate expression can be applied in practical use;

$$N(i, r) = k_{ir} i (r-r_0).$$

As to geomorphological aspect, the collapse density seems to be proportional to the density of valley heads in A section.

1. はじめに

昭和50年8月16日，17日にわたる台風5号の豪雨により高知県下の各所において，土石流，山腹崩壊，土砂流出，洪水により甚大な被害がもたらされた。ここで言う山腹崩壊とは外国文献では Landslide, Collapse, Debris avalanche 等と呼ばれるものである。災害そのものに関しては種々の角度から研究が進められている（例えば第8回砂防学会シンポジウム[1)]）。

本稿ではこの災害の資料を用いて，崩壊地の分布と崩

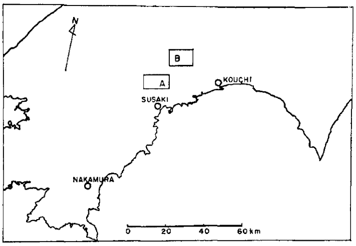


Fig. 1. Location of surveyed sections (rectangle A, B).

壊に関係すると思われる諸因子の比較検討を行い，更に地形発達における崩壊の地形学的意義について考察を加えた。

ここでは特に村野（1966）[2]が行った崩壊と傾斜の関係および打荻（1968, 1971）[3),4)]が行った降水量との関係をこの地域においても確かめ，更に両者を考慮した崩壊予測式を作ることを一つの目的とし，又崩壊と谷頭密度の関係を明らかにすることを第二の目的とした。

調査対象地域は崩壊の発生が顕著にみられた地域で，**Fig. 1** 中の線で囲まれた A, B の部分である。この地域の調査では主として空中写真（白黒，縮尺1万分の1，2万分の1）および2万5千分の1の地形図を拡大して1万分の1としたものを使用した。又，現地調査を行うことにより，資料の補足，確認を行った。

2.　調査対象地域に関する基礎資料

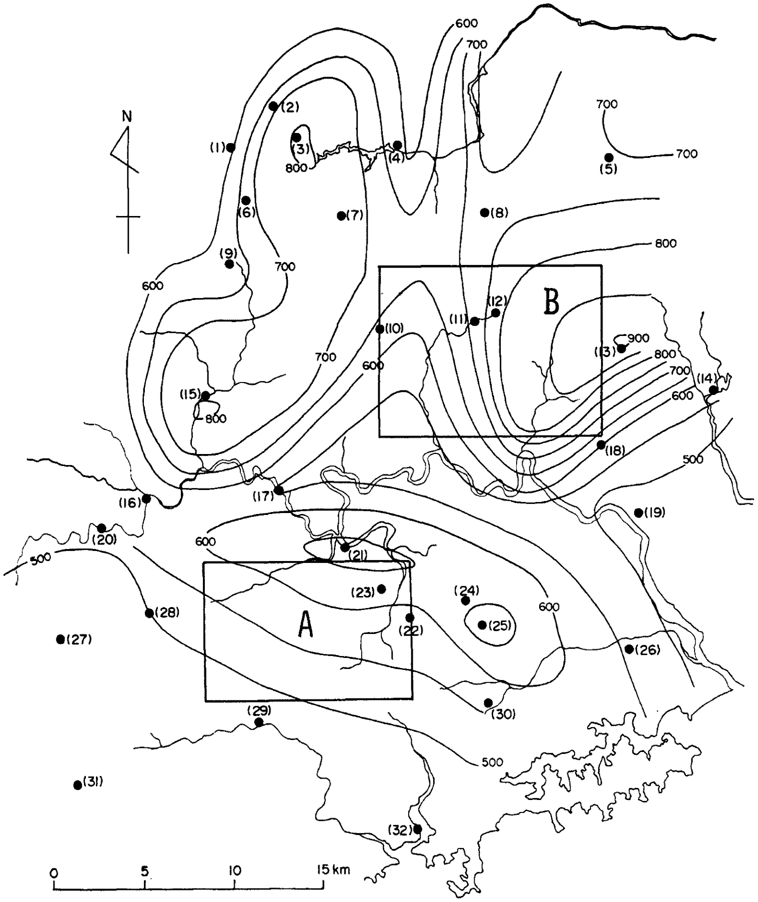


Fig. 2.　Distribution of daily rainfall (in mm) for Aug. 17, 1975,
●: observation station,　(figure): station number.

2.1 降水量

ここで考察する崩壊の誘因としては台風5号に伴う集中豪雨であり，8月16日夜半から17日にかけて仁淀川中流部を中心に多くの降雨をもたらしたものである。

16日の降水量は17日のそれの5％にも満たないものであることを考慮し，この時の継続雨量を17日の日雨量で代表させ，その分布図を求めると **Fig. 2** のようになる。

この図からも明らかなように，A 地域では 500mm～600mm の雨量であり，比較的一様であるのに対し，B 地域では 500mm～900mm 近くの雨量となっており，場所的変化が著しい。

つぎにこの豪雨における時間最大雨量を図示すると **Fig. 3** のようになる。A 地域では約 60mm/h.～130mm/h. の雨量であり，B 地域の約 90mm/h.～130mm/h. のそれに比べて変化がやや大きく，日雨量と逆の傾向を示している。しかしながらここでとりあげる山腹崩壊に対する先行性降雨という観点からみれば時

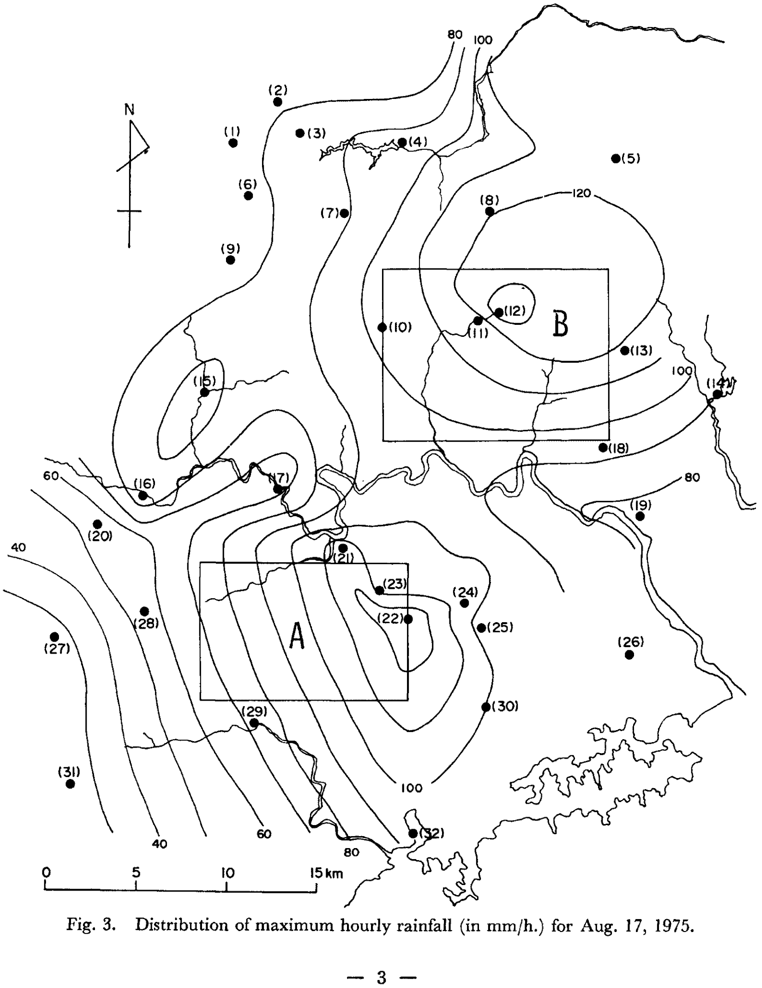


Fig. 3. Distribution of maximum hourly rainfall (in mm/h.) for Aug. 17, 1975.

Table 1. Daily rainfall and maximum rainfall for Aug. 17, 1975.

STATION No.	STATION NAME	DAILY RAINFALL (mm)	MAXIMUM HOURLY RAINFALL (mm/h.)	STATION No.	STATION NAME	DAILY RAINFALL (mm)	MAXIMUM HOURLY RAINFALL (mm/h.)
(1)	TEBAKOYAMA	603	77	(17)	NIYODO no. 3	545	61
(2)	TERAKAWA	690	78	(18)	NARUYAMA	586	93
(3)	ERIMON	822	87	(19)	INO	453	76
(4)	NAGASAWA	618	93	(20)	MORIYAMA	514	51
(5)	KUROMARU	701	116	(21)	OCHI	670	116
(6)	TONOGOYA	—	77	(22)	SAGAWA HIGASHIMACHI	575	108
(7)	OOMORI	766	89	(23)	SAGAWA	623	129
(8)	BUNSUI no. 1	734	120	(24)	KAMO	632	104
(9)	KASHIYAMA	630	75	(25)	YAJI	682	95
(10)	TOCHINOKIYAMA	648	104	(26)	TOSA-HABA	525	117
(11)	BUNSUI no. 4	709	115	(27)	TORIGATAYAMA	232	25
(12)	OMOIJI	793	133	(28)	CHOJA	500	56
(13)	KAKINOMATA	903	119	(29)	HAYAMA	465	73
(14)	KAGAMI DAM	520	90	(30)	ICHINONO	554	100
(15)	IKEGAWA	715	95	(31)	FUNATO	617	74
(16)	TAKEYASHIKI	535	87	(32)	SUSAKI	418	93

間最大雨量が重要な因子となり得るかどうかは問題であり，後に示すように（**Fig. 11** 参照），これと崩壊との関係は明確ではない。これまで山腹崩壊の統計的研究においては継続雨量（ここでは日雨量）が重視されており，本稿においてもその妥当性を検討しながら議論をすすめる。

なお，**Fig. 2, Fig. 3** 中の括弧中の数字が示す観測点の時間最大雨量，日雨量は **Table 1** で示される。

2.2 崩壊地の分布

この豪雨によりもたらされた崩壊地の分布図は，災害直後に撮影された1万分の1および2万分の1の空中写真から判読し，それを2万5千分の1の地形図を1万分の1に拡大したものの上に記入することにより作成した。

更に空中写真では雲の蔭や尾根の蔭で判読しにくいものがあるので，それらに関しては現地調査でできるだけ補正した。こうして作成したものが **Fig. 4 (a), (b)** である。

ここでA地域中における空白部は空中写真が欠落していた部分である。

山腹崩壊や渓岸浸食等は区別してとりあげられる場合もあるが，実際にはその区別が困難な場合が多いので，ここでは地表面の剝離している部分をすべて崩壊地として取り扱っている。

崩壊分布図からも明らかなようにB地域においては，その西部では極めて崩壊が少いという著しい特徴が認められる。又，A地域の崩壊はB地域のそれに比較的小規模なものが多いことがわかる。

なお現地調査で見られた崩壊地の一例は **Photo. 1** で示す。

2.3 地質的特徴

今回対象とした2つの地域はいずれもほぼ東西の走向をもつ秩父帯の古生層（ペルム系）が主として分布しているが詳細にみればA地域は古生層が一部分布し，佐川造山で知られる鳥の巣石灰岩の上に古生層がスラストしている仏象構造線を南側に持ち，北部はいわゆる黒瀬川構造帯で占められる地域である。このような地質を反映して全体はモザイク状に断層で切られており，一部には火成岩類も分布する。これに対してB地域は秩父累帯北帯の中央部にあたり断層も比較的少いところである[5]。このようなA,B両地域の地質

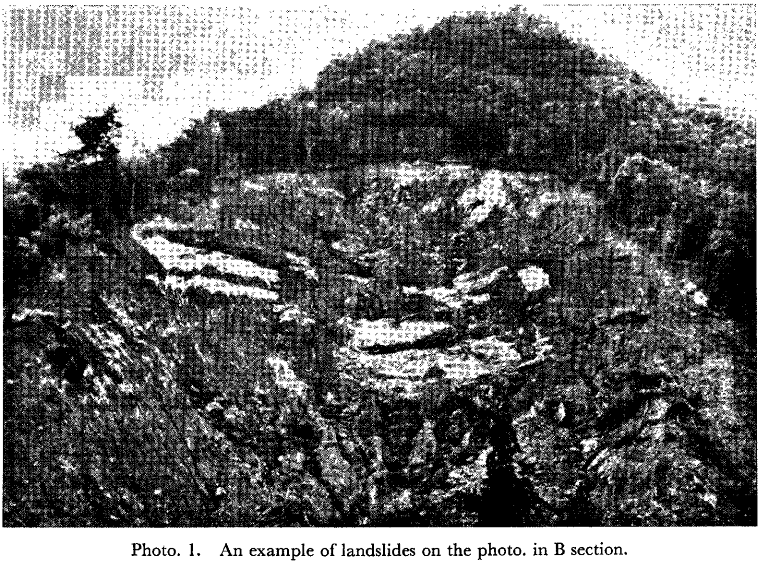


Photo. 1.　An example of landslides on the photo. in B section.

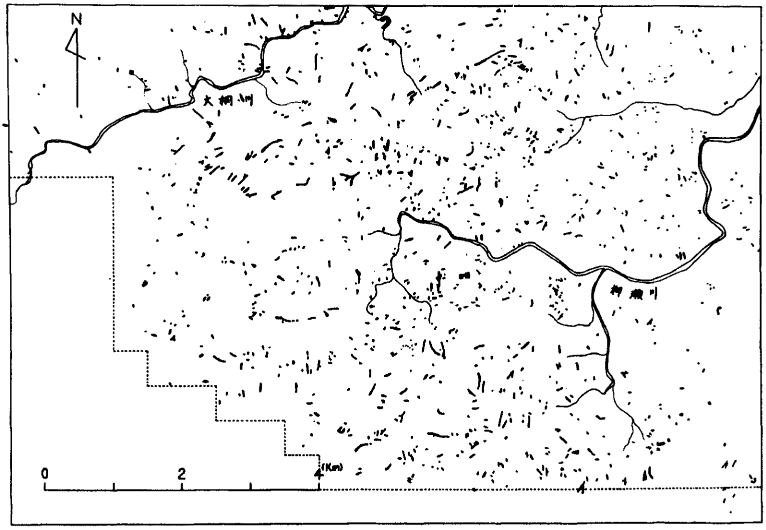
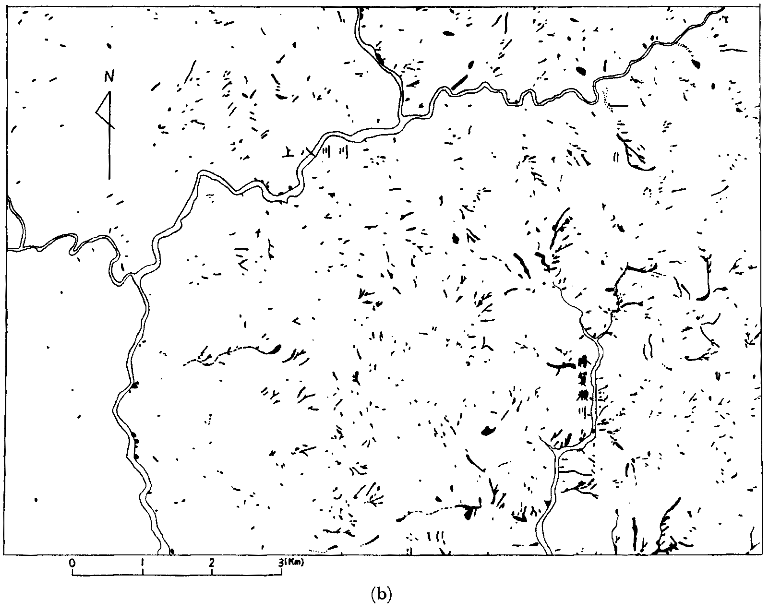


Fig. 4 (a)



(b)

Fig. 4. Distribution of landslides.
(a): A section (except blank space) (b): B section.

状況の相違は次に述べる地形的特徴に反映しているし，又後に述べるように崩壊発生状況をもある程度規定しているように思われる。

2.4 地形的特徴

地形的特徴を表現する因子としては種々のものが考えられるが，ここでは山腹崩壊に密接に関係すると従来から指摘されている傾斜をまずとりあげた。

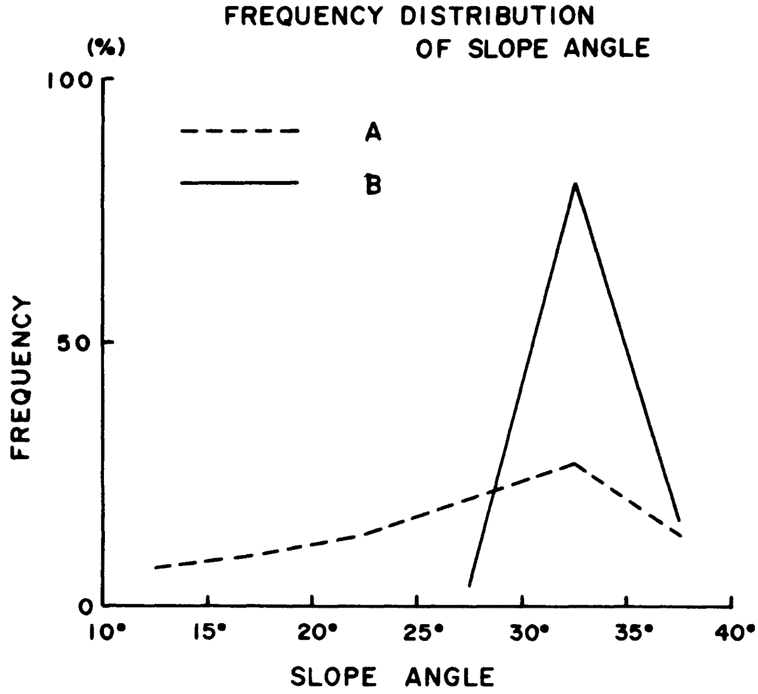


Fig. 5. Frequency distribution of slope angle.

傾斜に関しては2万5千分の1の地形図を用い，2km×2kmの方眼内の平均傾斜角をホートン法により求め，移動平均をとった。これらの地域における傾斜角頻度分布は **Fig. 5** で示されるが，A地域では分布の巾が広く，平均傾斜角は約28°であるのに対し，B地域では分布巾が狭く，傾斜がかなり一様で平均傾斜角は約33°とやや大きいことがわかる。但し，最頻値はいずれにおいても約33°であって差がない。

この分布の違いは前述の地質状況を反映した結果ではないかと考えられ，断裂系の発達度やそこに分布する岩石の多様性に対応するものと推定される。

なお，従来の研究では，傾斜を求めるのが煩雑であるこ

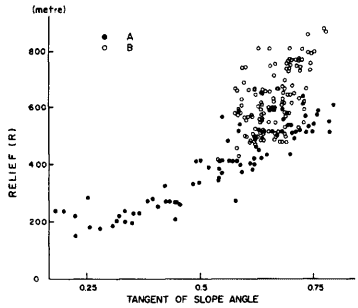


Fig. 6. Relation between relief (m) and gradient (tangent of slope angle).

ともあって起伏量が用いられていることが多い[6]。今回の対象地域についても方眼の大きさが適当であるためか傾斜と比例関係にあって (**Fig. 6**), 簡便法として起伏量を用いることはこの場合にも妥当であろう。なおここで起伏量は傾斜の場合と同じ方眼内の最高点と最低点の差を用いた。

次に谷密度に関しては，崩壊と関係することが示されてきている（例えば塚本，1973)[7] が，その点を検討するためここでは谷頭密度をとりあげてみた。これについては2万5千分の1の地形図を使用し，谷の定義は高山 (1972)[8] に従って谷系図を作成して上述の同様な方眼内における谷頭数を求めた。この頻度分布図は **Fig. 7 (a)** で示されるが，A, B 両地域において，特に顕著な差異は認められなかった。

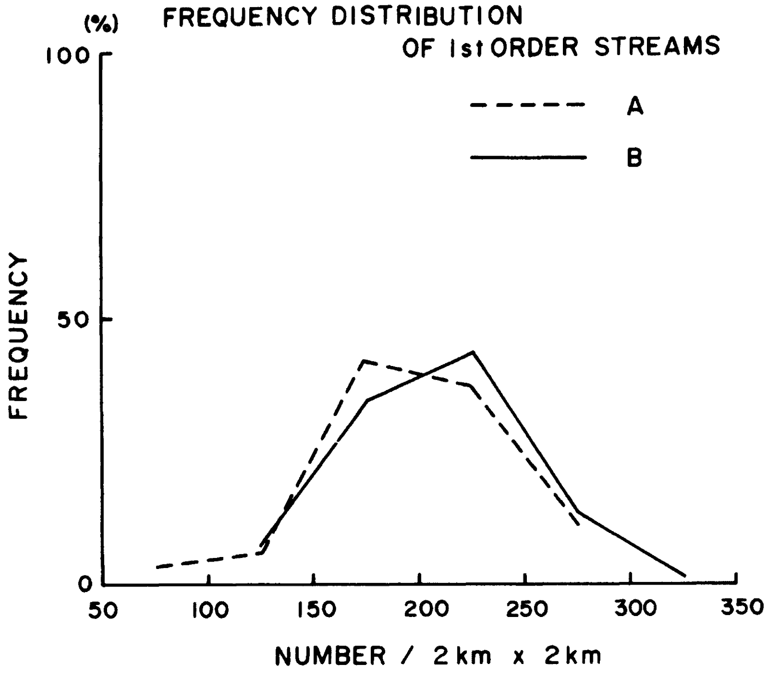


Fig. 7. Frequency distribution of the number of 1st order streams (per square of 2 km × 2 km).

3. 諸特性の検討

3.1 傾斜と崩壊

地形因子のなかでは特に傾斜と崩壊が関係することは従来から述べられていることであり，又重力の斜面方向の分力が傾斜角の sine に比例することからも明らかである。

ここでは対象地域において，前記と同様の方眼内における平均傾斜角と崩壊数を求め，移動平均して，両者の関係を求めた (**Fig. 8 (a), (b)**).

A 地域 (**Fig. 8(a)**) では傾斜角の α が約31°までは傾斜に比例して崩壊数が増加するが，それを超えれば反対に減少していく傾向が認められる。これは例えば村野 (1966)[9] が天竜川の 支流四徳川において計測した結果と臨界傾斜角が小さいという点を除けば同様な傾向を示している。このような傾向は31° までの領域

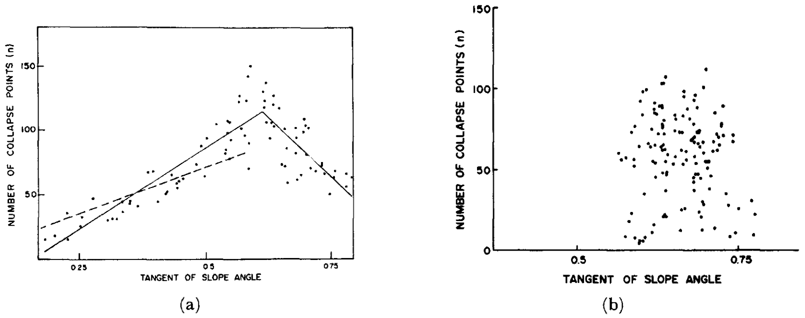


Fig. 8. Relation between number of collapse points per 2 km×2 km and tangent of slope angle (average gradient in the same square).
(a): A section, (b): B section.

においてはおそらく崩壊可能な物質が十分あり，斜面に作用する剪断力の大きさが崩壊数を規定することを示すと思われ，31° 以上の領域では崩落可能な物質が傾斜に比例して減少し，いわば崩落可能な物質の存在が崩壊数を規定することを示していると思われる。

崩壊可能な物質の形成が風化作用によるものとすれば前者および後者はそれぞれ Kirkby (1971)[10] のいう transport-limited condition と weathering-limited condition に対応するものと言えよう。

A 地域のそれぞれの領域における回帰式（**Fig. 8 (a)** 中実線で示されるもの）は

$$n = 255\tan\alpha - 42 \qquad \alpha \leqq 31^\circ \qquad \cdots\cdots(1)$$

$$n = -388\tan\alpha + 48 \qquad \alpha \geqq 31^\circ \qquad \cdots\cdots(2)$$

ここで n: 2km×2km の方眼内の崩壊数，α: 2km×2km の方眼内の平均傾斜角である。

なお，この場合に原点を通る直線を用いると（図中破線で示されるもの）相関係数は少し悪くなるが，その式は

$$n = 140\tan\alpha \qquad \cdots\cdots(1)'$$

となる。いずれがよりよい近似であるかについては粘性モデルと塑性モデルの当否に関係するので，厳密な検討は今後の課題であろう。

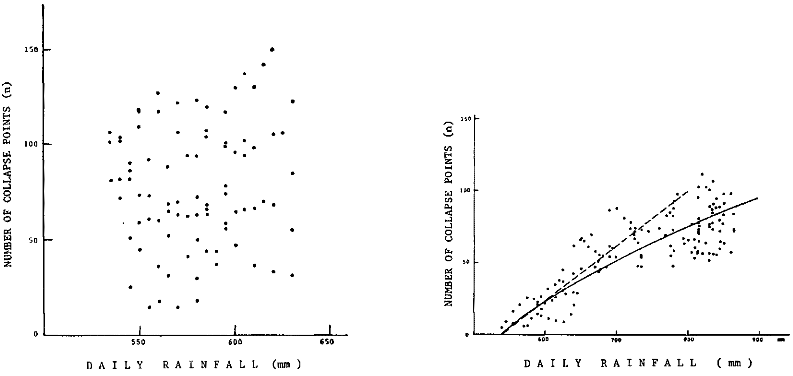
B 地域 (**Fig. 8 (b)**) ではA地域と異なり，このような明確な関係を見いだすことはできない。この理由の一つとして，この地域の傾斜がかなり一様で，かつ上記の条件のうつり変わる部分に相当する領域が大部分であるということが考えられる（**Fig. 5** 参照）。又，この地域内の西部にはほとんど崩壊の発生していない場所があり，それが相関を悪くしているとも考えられる。しかしながら更に重要と思われる点は，**Fig. 2** からも認められるように A 地域が約 500mm〜600mmの比較的一定な雨量であるのに対して，B 地域ではそれの場所的変化が著しいということである。すなわち B 地域においては傾斜よりも日雨量が崩壊数を規定しているのではないかということが考えられる。

3.2 雨量と崩壊

雨量と崩壊の関係に関しては例えば打荻（1968, 1971）[11),12)] によって議論されているが，ここでは上記と同様の方眼内における崩壊数と方眼内における平均日雨量の関係を求めてみた (**Fig. 9 (a), (b)**)。この図からも明らかなように，傾斜との関係の場合とは逆に A 地域 (**Fig. 9 (a)**) では相関が悪くなるのに対し，B 地域 (**Fig. 9 (b)**) では日雨量と崩壊数は比較的明確な相関を示す。

B 地域における両対数曲線の回帰式（図中実線で示されるもの）は

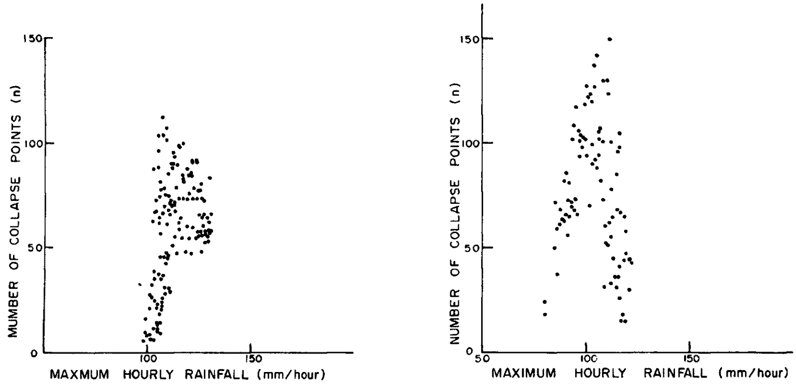
$$n = 0.95\times(r-540)^{0.78} \qquad \cdots\cdots(3)$$



(a)　　(b)

Fig. 9. Relation between number of collapse points per 2 km × 2 km and daily rainfall (areal mean rainfall in the same square).
(a): A section (b): B section.

但し，r: 日雨量÷継続雨量 (mm) である。ここで回帰曲線が打荻[13),14)]の示したものとは逆に，上に凸となることが注目される。上の(3)式で，いわゆる崩壊無効雨量は約 540mm であるが，この値は打荻(1971)[15)]が示した，主として秩父古生層の分布する有田川流域の 500mm に近いものである。B 地域においても秩父古生層が主として分布していることを考えれば，上記の値は極めて妥当な結果とも言えよう。なお，相関係数がかなり悪くなるが直線近似も可能である。又，雨量が約 800mm 以上の領域では崩壊数が前者に関係しないようにも見うけられるが，これは雨量が崩壊を引き起こすのに必要な雨量を大巾に超えたために，この値に達する前にすでに崩壊が発生していたという意味にもとれ，今後に問題を残す。800mm 以下の部分に



(a)　　(b)

Fig. 10. Relation between number of collapse points per 2 km × 2 km and maximum hourly rainfall (areal mean rainfall in the same square).
(a): A section (b): B section.

ついて直線近似すると（図中破線で示されるもの）

$$n=0.38(r-540) \qquad (3)'$$

となり，相関係数はかなり改善される。

このようなことから，B 地域の西部に見られる崩壊の少い部分については，雨量が崩壊無効雨量よりも小さいために，傾斜が大きいにもかかわらず崩壊が少かったとも推定される。

A 地域では，B 地域について求めた崩壊無効雨量よりも小さな雨量で，かつ B 地域の平均傾斜よりもゆるやかなところで，崩壊が多数発生しているところから，この地域における崩壊無効雨量は B 地域のそれよりも小さいことが期待され，地質条件の差異が反映しているものと推定される。

又，時間最大雨量と崩壊の関係も調べてみたが（**Fig. 10**）A, B 両地域とも明確な関係が認められず，雨量と崩壊の関係では，従来から指摘されている継続雨量（ここでは日雨量）がより重要な因子であろうということが今回の調査においても確認された。

3.3 崩壊の総合予測式

以上のように A 地域では地形（傾斜）に規定され，B 地域では継続雨量（ここでは日雨量）に規定されているということが導かれるが，この二つを結びつければ雨量と傾斜を同時に考慮した崩壊予測式の推定が可能となろう。この場合，気候条件等がほぼ一定と考えられる比較的狭い範囲では地質系統ごとに傾斜が異なる例があるので（藤田ほか，1976）[16]，地質は地形（傾斜）に反映すると考えられる。又，同時にそれは崩壊無効雨量にも影響をもたらすと判断される。

ここではまず崩壊可能な物質が十分存在する場合について議論を進める。この場合に二つの要素を結合した一般式は様々の型のものが考えられるが，従来のダム堆砂式について述べられていることに加えて，上述の崩壊無効雨量の概念と，ある程度傾斜がなければ少くとも空中写真で判読できる程度の崩壊は発生し得ないであろうということを考慮すれば(1)，(3)より次式が推定できる。

すなわち，

$$N(i, r)=k_{ir}(i-i_0)^p(r-r_0)^q \qquad (4)$$

但し　$i=\tan\alpha$

ここで，$N(i, r)$: 単元面積当りの崩壊数，k_{ir}: 係数，i_0: 崩壊を引き起こす限界傾斜角の正接，r: 継続雨量 (mm), r_0: 崩壊無効雨量 (mm), α: 対象とする単位地域内の平均傾斜角である。

ここで前述の回帰式(1)′，(3)′を考慮して，$p=1, q=1$ とすれば(4)式は

$$N(i, r)=k_{ir}\cdot i\cdot(r-r_0) \qquad (5)$$

となる。

今，地理的に大きな隔たりのない両地域で k_{ir} が同一の値をとるものとすれば，B 地域においては

$$\frac{\partial N}{\partial r}=k_{ir}\cdot i=C_1 \qquad (6)$$

が成立する。C_1 は(3)′式より 0.38 となる定数である。更に B 地域における平均傾斜角が 33°，すなわち $i \fallingdotseq 0.65$ であることから，$k_{ir} \fallingdotseq 0.59$ となる。

又，A 地域では(5)式は

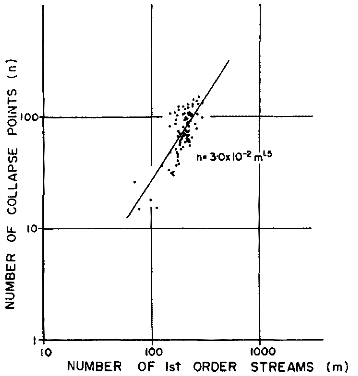
$$\frac{\partial N}{\partial i}=k_{ir}(r-r_0)=C_2 \qquad (7)$$

となる。ここで C_2 は(1)′式より 140 となる定数であるから，$k_{ir} \fallingdotseq 0.59$ と A 地域における平均雨量 $r=$ 490mm を(7)式に代入すれば　$r_0 \fallingdotseq 250$ を得る。

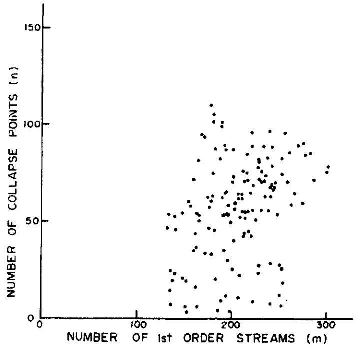
従って A 地域の崩壊無効雨量は 250mm となり，又 B 地域のそれは前述のように 540mm であり，この差が地質条件の反映ということになる。A 地域のこの値は打荻（1971）[17] が釜無川流域で求めたそれとほぼ等しく，花崗岩を主とした地域と類似した値を与えており，A 地域の複雑な断裂系と地質系統の混在に対応しているものとも思われる。ただし，回帰式の選択について，既に述べた粘性モデルと塑性モデルの問題や雨量域の評価の問題もあり，これも今後の課題である。

3.4 一次谷と崩壊

一般に谷密度と崩壊の関係をみると，崩壊発生地点は村野（1966）[18]のいうように全く確率的なものとは考えられないようである。例えば崩壊と一次谷密度の関係は従来からも指摘されており（例えば塚本ほか，1973）[19]，ここで調査対象としたA地域においても **Fig. 11 (a)** から明らかなように崩壊数と谷頭密度の間には比例関係が存在している。B地域 **Fig. 11 (b)** においてはこの関係は明瞭ではないが，これは一部に崩壊無効雨量を超えていない地域があるということと雨量の場所的変化が著しいということが相関を悪くしているとも思われる。しかしながらB地域においても十分雨量がもたらされた地域においては上述の傾向が存在するようでもあり，一般に崩壊による谷の成長，もしくはいわゆる0次谷の発生という考え方は妥当性を有するとも言えよう。



(a)



(b)

Fig. 11. Relation between number of collapse points per 2 km × 2 km and number of 1st order streams in the same square.
(a): A section (b): B section.

4. まとめと問題点

以上のように，昭和50年の台風5号による高知県下の崩壊について，傾斜，雨量および谷頭密度との関係を調べてきたが，次のことが明らかになった。

1. 日雨量（≒継続雨量）がほぼ一定のときは，崩壊数はある限界傾斜角までは勾配に比例する（A地域の場合）。

2. 傾斜が比較的一様なときは，崩壊数は日雨量（≒継続雨量）から崩壊無効雨量を減じたものに比例する（B地域の場合）。

3. 雨量と傾斜を考慮した崩壊予測式としては

$N(i, r)=k_{ir}(i-i_0)^p(r-r_0)^q$，もしくはその近似式として少くとも今回対象とした地域では

$N(i, r)=k_{ir}\cdot i(r-r_0)$ の表現が可能である。

4. 谷頭密度と崩壊数はこの対象地域のうちA地域において正の相関がみいだされる。

なお，問題点としては，まず第一に雨量分布図の精度である。対象としたような比較的狭い地域では観測網が完備していないのが一般的であって，ここでも雨量分布図は近似的なものとしてしか取り扱うことができなかった。

又，崩壊地点に関しては断層やいわゆるリニアメントの有無，多少の問題も関係してくるが，時間的制約もあり，ここではそれに触れることができなかった。更に，係数 k_{ir} の値を両地域とも等しいとして議論を進めたが，地質的条件の相違はその値にも当然影響を及ぼしてくると思われる。これは対象地域が二つであることを含めて方法的にはやむを得ないとはいえ，今後検討の余地を残している。

以上の問題点に加え，谷密度に関しては地形図の精度という問題もあるので，リニアメントの問題も含めて，現在更に空中写真で判読を進めており，詳しくは別報にゆずるつもりである。

最後に資料の収集に御協力いただいた，高知県土木部，四国電力高知支店および佐川電力所の各位に謝意を表したい。又，本研究を進めるにあたり，有益な助言をいただいた，当研究所の枝川尚資氏ならびに地形土壌災害部門の諸氏に感謝したい。なお，現地調査の一部に文部省科学研究費（昭和50年８月豪雨災害の調査研究）の補助を受けたことを付記する。

参　考　文　献

1） 砂防学会：破砕帯における土砂災害について，第８回砂防学会シンポジウム，1975.
2） 村野義郎：山地崩壊に関する２，３の考察，土研報告，(130)，1966，pp. 77–107.
3） 打荻珠男：ひと雨による山腹崩壊土量の実用計算法試案，新砂防，(69)，1968，pp. 30–35.
4） 打荻珠男：ひと雨による山腹崩壊について，新砂防，(79)，1971，pp. 21–34.
5） 高知県商工部：高知県地質鉱産図，1968.
6） 例えば　石外　宏：貯水地の堆積土砂量について，応用地質，(7)，1966，pp. 173–190.
7） 塚本義則：侵食谷の発達様式に関する研究 (I)，新砂防，(87)，1973，pp. 4–13.
8） 高山茂美：地図の縮尺が水流の次数区分に及ぼす影響について，地理評，(45)，1972，pp. 112–119.
9） 前出　2)
10) Kirkby, M. J.: Hillslope process-response models based on the continuity equation, Inst. Brit. Geogr., Spe. Pub. No. 3, (Slopes; form and process), 1971, pp. 15–30.
11), 12), 13), 14)　前出　3), 4)
15) 前出　4)
16) 藤田　崇・平野昌繁・波田重熙：徳島県川井近傍の地すべりの地質構造規制，地すべり，(13)，1976，pp. 25–36.
17) 前出　4)
18) 前出　2)
19) 塚本良則・平松伸二・篠原斉四郎：侵食谷の発達様式に関する研究 (III)，新砂防，(89)，1973，pp. 14–20.