

## 降雨・地形要因の統計解析からみた宮崎県椎葉村の山地崩壊発生予測に関する一考察

谷口 義信

生物環境科学科森林科学講座

(2006年1月25日 受理)

### A study on the estimation of density of hillside collapses by the way of statistical analysis on rainfall and topography factors in Shiiba Village, Miyazaki Prefecture

Yoshinobu TANIGUCHI

Department of Forest Science

**Summary :** There are many steep slopes in Shiiba Village and typhoons hit often there. As the result of that, the numbers of 257 slope failures have occurred between 1966 and 2002 in Shiiba Village. It shows 2.7 times as much as the average of numbers of slope failures of Miyazaki Prefecture. There is a significant correlation between the density of hillside collapses and the factors of rainfall and topography for slope failures in Shiiba Village. The coefficient of determination of rainfall factors to slope failures is 99.9%. It means that the coefficient of determination has an affect on slope failure greatly. Estimating densities of hillside collapses with the equation which was derived from the statistical analysis of data of the rainfalls of Shiiba Village, the calculated values of districts of Matuo ad Iwayado in Shiiba Village became 0.185 spots per unit area (1 km<sup>2</sup>). On the other hand, both of observed values of these districts were 0.256, 0.137 spots per unit area (1 km<sup>2</sup>) respectively. The calculated values stated above correspond comparatively well to the observed values.

**Key words :** Prediction of hillside collapse, Density of hillside collapse, Hillside collapse, Slope gradient, Daily maximum rainfall

#### I 序 論

宮崎県は台風常襲地帯であり、また集中豪雨に見舞われることも非常に多い。さらに県南西部には現在も活動を続けている霧島火山があり、県北には仏像構造線や延岡衝上断層などがある。そのため宮崎県では極めて山地崩壊の危険性の高い市町村の比率が20~30%に達している(谷口, 1993)。特に椎葉村は地形の平均勾配が約30°に達し、急峻な地形を擁する部分の面積占有率がかなり高い。

宮崎県全体で1971年から2002年までの過去32年間に起こった大小合わせて4204箇所の山地崩壊の6.1%を椎葉村が占め、これは県下全市町村を平均した2.3%の2.7倍に相当する。このように椎葉村は宮崎県の中でも極めて山地崩壊の危険性の高い地域である。さらに椎葉村は宮崎県の中でも典型的な過疎村であり、特に2004年8月30日の台風16号により24箇所で大規模な崩壊が発生したのに続いて、2005年9月6日の台風14号ではこれを大

きく上回る60箇所で大規模な崩壊が発生し、一時村全体が完全に孤立状態になる甚大な被害を受けた。こうした山村地域では大規模な山地崩壊の発生はますます過疎化を促進させる要因となりかねない。そのため少しでも山地崩壊発生の危険性を事前に予測して、災害を防ぐことが椎葉村はもちろん、県土の保全にとっても、山村の過疎化の抑制にとっても極めて重要な課題である。そこで、以下に椎葉村の2002年以前の過去約30年間の山地

災害実績の簡単な統計解析から、山地斜面の崩壊発生密度を予測し、これから2005年9月6日の台風14号災害についても論述してみたいと思う。

## II 椎葉村の概況

椎葉村は図1に示すように、宮崎県の中央よりやや北の西端部の九州脊梁山脈のほぼ中央に位置し、北は五ヶ瀬町、東は諸塚村および西郷村、南は南郷村、西都市と西米良村に接し、西は熊本県との県境をなす。椎葉村の年間降水量は2,800 mm以上にも達し、宮崎県の海岸平野部、例えば宮崎市の約2,400 mmに比べるとかなり多い。総面積は537.29 km<sup>2</sup>で、市房山の1722 mを最高峰に標高約300~1700mのところに位置し、地形的に相当急峻である。また本村には宮崎県の6大河川のうち3河川、すなわち耳川（流域面積966 km<sup>2</sup>）、小丸川（同461 km<sup>2</sup>）、一ツ瀬川（同844 km<sup>2</sup>）がその源を発し、これら3河川により、地勢は大きく3流域に分かれている。椎葉村は起伏量600 m以上の山地が大部分を占め、全体の平均勾配は26.5°である。椎葉村の斜面勾配の分布状況を示したものが図2である。

椎葉村の地質は図3に示すように、村全体の約4分の1にあたる北西部が古生代二畳・三畳系の粘板岩、千枚岩、砂岩を主に石灰岩、チャートなどから成り、約10分の1に当たる南端部は第三紀の四万十累層群上部に属する剪断粘板岩を主に頁岩、玄武岩溶岩、および第三紀中期中新世の花崗岩などから成り、これらに挟まれる中央部は四万十累層群下部の砂岩・頁岩互層、砂岩、頁岩などから成っている。また上述のように、本村は中央

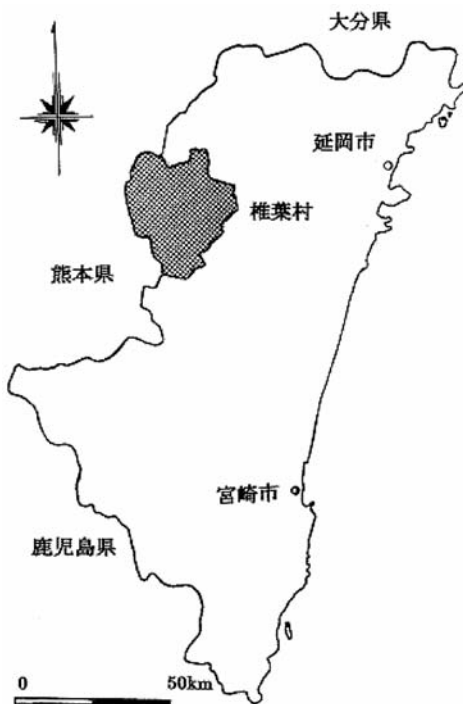


図1 椎葉村位置図

Fig. 1 A location map of Shiiba Village.

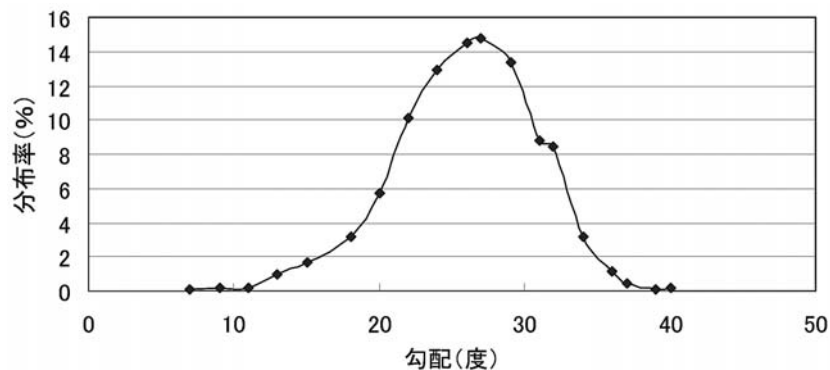
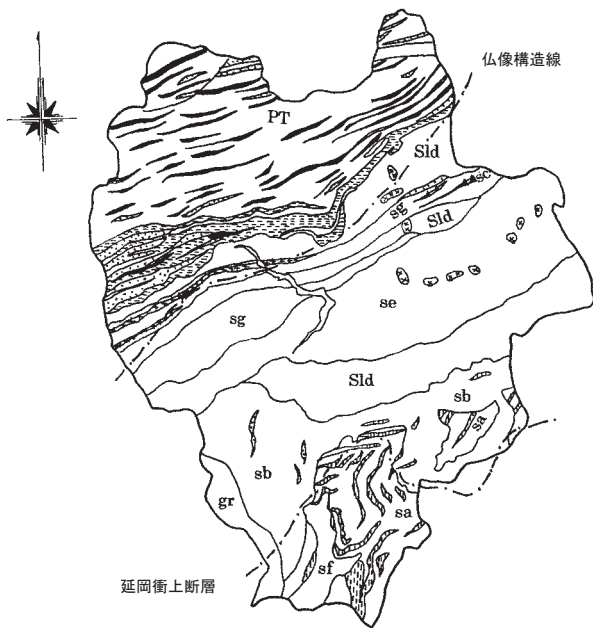


図2 椎葉村の斜面勾配分布曲線

Fig. 2 Distribution curve of slope gradient of Shiiba Village.



| 凡 例                         |             |  |
|-----------------------------|-------------|--|
| ○                           | 第四紀 沖積層     | 礫、シルト、粘土   |
| ○                           | 阿蘇火砕流       | 流紋岩—安全岩溶結凝灰岩 軽石凝灰岩                                 |
| gr<br>sf<br>sa              | 第三紀 四万十層群上部 | 黒雲母花崗岩・花崗閃緑岩<br>玄武岩溶岩・火砕岩<br>頁岩<br>剪断泥質岩           |
| sg<br>se<br>Sld<br>sc<br>sb | 四万十層群下部     | 玄武岩溶岩・火砕岩<br>粘板岩～頁岩<br>砂岩頁岩互層<br>砂岩<br>礫岩<br>砂質千枚岩 |
| J                           | 上部ジュラ系      | 頁岩・砂岩・礫岩   |
| ○                           | 二疊・三疊系      | チャート<br>石灰岩  |
| ○                           |             | 玄武岩溶岩・火砕岩<br>粘板岩・千枚岩・砂岩・礫岩                         |
| PT                          |             |  |

図3 椎葉村地質図

Fig. 3 A geological map of Shiiba Village.

北側には仏像構造線、南側には延岡衝上断層の2大構造線が県北から熊本県に向かって南西方向に走っており、地質的にも脆弱で、構造線周辺で大規模崩壊も起こっている(谷口, 1997)。このことは過去約40年間に起こった椎葉村の崩壊数実績にも現れている。

### III 椎葉村における災害の記録

宮崎県の災害資料については、これまで県により災害の記録が刊行されてきていたが、2004年、2005年には大きな災害があったにもかかわらず、2003年以降発刊されていないので、2002年以前37年間と同一精度のデータが得られない。したがって、ここでは最大日雨量の記録のはっきりしている1966年～2002年の37年間の椎葉村の山地災害を整理して表1に示す。なお最大時間雨量も併せて示したが、データが取られ始めたのが比較的新し

く、1966年以前についてはデータがないので空欄にしてある。なお、同表の末尾に参考資料として、特に大きな災害をもたらした2004年の台風16号、18号と2005年の台風14号についても併せて示した。

### IV 分析方法および分析結果

崩壊発生に関係するといわれている要因としては自然要因と社会要因がある。自然要因としては地形、地質、降雨の他に土層厚、植生相(松本ら, 1999)などが考えられる。一方社会要因としては伐採や施肥方法など(黒岩ら, 2004)が考えられる。こうした要因のうちここでは自然要因のみについて考える。自然要因の中で調査対象とする椎葉村の過去の崩壊地ごとの地質資料はほとんど得られなかったため、ここでは地形と降雨要因のみを取り上げる。

椎葉村に関する降雨と崩壊数については、表1に示すように災害の記録が残されているので(宮崎県, 1966～2002)、まずこれを用いて1966年～2002年の37年間に起こった山地崩壊と降雨量の関係を分析する。降雨要因としては日雨量と時間雨量があるが、ここでそのどちらの方が強く影響しているかを知るために、表1の崩壊ごとの最大日雨量、最大時間雨量と崩壊数について重回帰分析を行った。その結果ここでは次式のような相関関係が得られた。

$$n = 1.060 \times 10^{-2} x + 1.430 \times 10^{-1} x' - 2.580 \quad \dots(1)$$

ここにnは崩壊数、xは崩壊ごとの最大日雨量、x'は最大時間雨量である。式(1)の重相関係数は0.514である。また式(1)における最大日雨量と最大時間雨量の崩壊に関する寄与率は最大日雨量が99.2%、最大時間雨量が0.8%となり、最大日雨量が支配要因となっていることがわかる。

椎葉村では主な崩壊要因は最大日雨量であることが明らかとなったので、表1から崩壊数と最大日雨量の回帰直線を求めると次式のようになる。

$$n_r = 0.0527x - 4.670 \quad \dots(2)$$

ここにn<sub>r</sub>は崩壊数、xは最大日雨量である。このときの相関係数は0.662である。この関係を表したものが図4である。

以上のように表1のデータの分析結果から、降雨と崩壊数の関係を知ることはできたが、椎葉村の過去の崩壊地の勾配については資料がないので、崩壊数と崩壊勾配との直接の関係はわからない。

表 1 椎葉村で発生した降雨による山地斜面崩壊

Table 1 Hillside collapses caused by rainfalls in Shiiba Village (1966-2002)

| 年    | 月日        | 原因      | 最大時間<br>雨量(mm) | 最大日<br>雨量(mm) | 連続<br>雨量(mm) | 崩壊数<br>(箇所) | グループ |
|------|-----------|---------|----------------|---------------|--------------|-------------|------|
| 1966 | 5.19~5.20 | 梅雨前線    |                | 28            | 53           | 1           | A    |
| 1969 | 6月~7月     | 梅雨前線    |                | 153           | 691          | 1           | B    |
|      | 7月~8月     | 干害      |                | 0             | 0            | 3           |      |
| 1970 | 8.13~8.14 | 台風9号    |                | 275           | 346          | 2           |      |
| 1971 | 8.2~8.6   | 台風19号   |                | 547           | 1127         | 53          |      |
|      | 8.27~8.30 | 台風23号   |                | 318           | 527          | 23          |      |
| 1972 | 7.18~7.26 | 台風7・9号  |                | 238           | 832          | 2           |      |
| 1974 | 8.17~8.18 | 台風14号   |                | 116           | 199          | 7           | C    |
|      | 9.5~9.8   | 台風18号   |                | 209           | 227          | 1           |      |
| 1975 | 6.4~6.7   | 梅雨前線    |                | 66            | 100          | 3           | D    |
| 1976 | 6.22~6.26 | 梅雨前線    |                | 98            | 204          | 1           | E    |
|      | 9.7~9.13  | 台風17号   |                | 218           | 468          | 3           |      |
| 1977 | 6.15~6.18 | 梅雨前線    |                | 149           | 236          | 4           | F    |
|      | 8.24      | 台風7号    |                | 90            | 91           | 2           |      |
| 1980 | 9.10~9.11 | 台風13号   |                | 175           | 304          | 14          |      |
| 1982 | 7.10~7.20 | 梅雨前線    |                | 355           | 567          | 7           | G    |
|      | 7.23~7.25 | 梅雨前線    |                | 214           | 280          | 11          |      |
|      | 8.25~8.27 | 台風13号   |                | 339           | 420          | 5           |      |
| 1984 | 6.26~6.30 | 梅雨前線    |                | 182           | 277          | 1           | H    |
|      | 8.25~8.27 | 熱帯低気圧   |                | 274           | 291          | 5           |      |
| 1985 | 6.18~6.28 | 梅雨前線    |                | 112           | 426          | 1           | I    |
|      | 8.30~8.31 | 台風13号   |                | 126           | 144          | 1           |      |
| 1986 | 6.25~6.30 | 梅雨前線    |                | 88            | 165          | 1           | J    |
| 1987 | 7.15~7.20 | 台風5号・大雨 | 33             | 119           | 460          | 6           | K    |
| 1988 | 5.3~5.4   | 停滞前線    | 27             | 179           | 242          | 4           |      |
|      | 7.18~7.29 | 温暖前線    | 41             | 116           | 375          | 4           |      |
| 1989 | 7.27~7.28 | 台風11号   | 38             | 266           | 429          | 14          |      |
| 1990 | 6.28~7.2  | 梅雨前線    | 30             | 145           | 487          | 2           | L    |
|      | 9.16~9.19 | 台風19号   | 39             | 163           | 254          | 2           |      |
| 1991 | 8.5~8.6   | 低気圧     | 35             | 105           | 105          | 2           | M    |
|      | 8.19~8.23 | 台風12号   | 36             | 235           | 433          | 2           |      |
| 1992 | 8.7~8.8   | 台風10号   | 33             | 243           | 286          | 3           | N    |
| 1993 | 7.16~7.18 | 梅雨前線    | 21             | 149           | 225          | 2           | O    |
|      | 7.26~7.28 | 台風5号    | 48             | 189           | 331          | 2           |      |
|      | 8.9~8.10  | 台風7号    | 41             | 303           | 432          | 16          |      |
|      | 9.2~9.4   | 台風13号   | 60             | 320           | 385          | 11          |      |
| 1994 | 8.11~8.14 | 台風14号   | 20             | 102           | 205          | 2           | P    |
| 1995 | 9.22~9.24 | 台風14号   | 22             | 75            | 146          | 1           | Q    |
| 1996 | 4.30~5.1  | 温暖前線    | 7              | 52            | 52           | 1           |      |
|      | 6.11~6.13 | 梅雨前線    | 16             | 56            | 76           | 2           |      |
|      | 7.18~7.19 | 台風6号    | 36             | 271           | 310          | 4           |      |
| 1997 | 8.15~8.19 | 台風13号   | 25             | 125           | 179          | 4           | R    |
|      | 9.14~9.16 | 台風19号   | 36             | 318           | 587          | 15          |      |
|      | 8.5~8.7   | 台風8号    | 22             | 221           | 392          | 1           |      |
|      | 9.22~9.24 | 台風18号   | 31             | 150           | 277          | 1           |      |
| 2000 | 9.12~9.16 | 台風14号   | 34             | 212           | 440          | 1           | —    |
| 2001 | 6.19~6.20 | 梅雨前線    | 20             | 127           | 232          | 1           | —    |
|      | 9.13~9.14 | 台風16号   | 22             | 37            | 58           | 1           |      |
| 2002 | 8.28~8.31 | 台風15号   | 35             | 320           | 592          | 3           | —    |
| 合計   |           |         |                |               |              | 259         |      |
| 2004 | 8.30      | 台風16号   | 60             | 369           | 816          | 24          | —    |
|      | 9.7       | 台風18号   | 40             | 241           | 851          | 5           |      |
| 2005 | 9.4~9.6   | 台風14号   | 42             | 459           | 862          | 60          | —    |

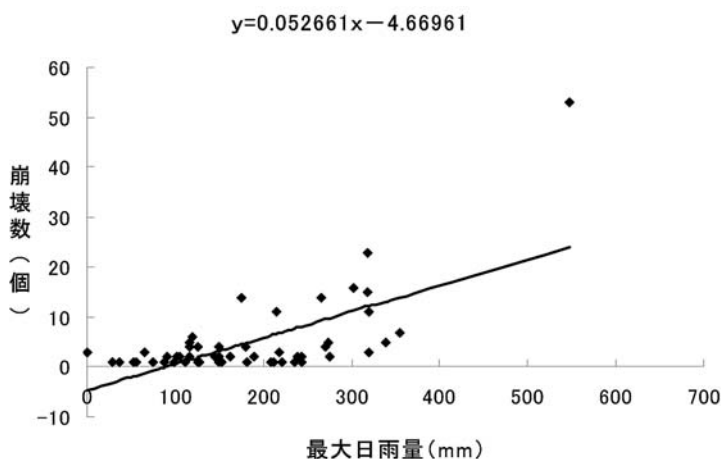


図4 椎葉村における崩壊数と最大日雨量の関係

Fig. 4 Relation between number of hillside collapses and daily maximum rainfalls.

しかし崩壊を検討する際に崩壊勾配は重要な要因である。そのためここでは一つの方法として、1966～1999年までの椎葉村における復旧治山工事記録の1/10000地形図を用いて、施工期間単位で施工対象域を表1のようにAからRまでの18にグループ分け、各グループにおいて100 mメッシュで読み取った全等高線数をそのメッシュ数で割って、平均勾配を求め、これをその崩壊勾配とした。例えば1969年～1972年の期間に工事が行われたのがグループBであるが、ここでは13箇所所の流域が該当する。この場合のそれぞれの対象域の位置を示した一例が図5である。なお1999年以降の資料は字名がはっきりしないので、グループ分けができないため空欄とした。各グループの流域面積、崩壊勾配、グループの最大日雨量、崩壊数、崩壊密度（崩壊数を流域面積で割ったもの）を一括して示したものが表2である。しかしここでの崩壊勾配は一降雨に対する崩壊勾配とはならないという問題が生ずる。なぜなら上述の崩壊勾配はあくまでグループの平均勾配で、一つであるのに対し、崩壊を発生させた最大日雨量が複数の場合、この崩壊勾配にいずれの最大日雨量を特定づけるかは統計解析を行う上で非常に大きな問題となるからである。例えば1971年であれば、台風19号の最大日雨量547 mmで53個、台風23号の最大日雨量318 mmで23個の崩壊が起こり（この時点では最大日雨量と崩壊数は一対一対応をしている）、これに対して行われた対策工事に該当すると思われる対象域は図5に示すように13箇所ある。しかしこの

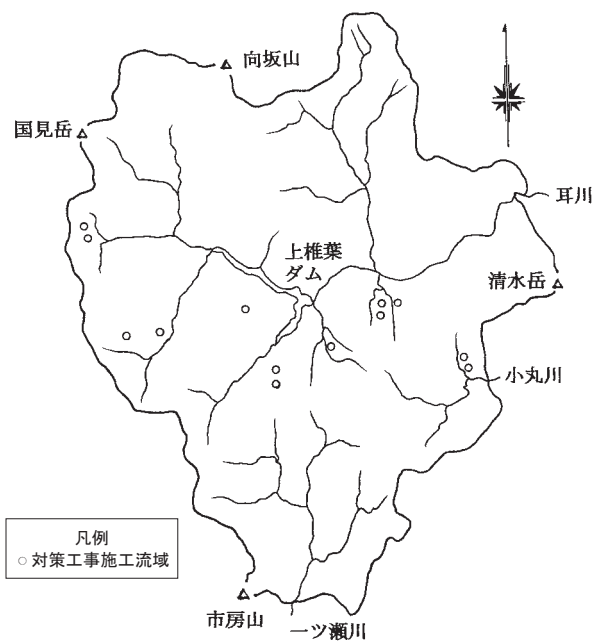


図5 グループBにおける対策工事施工流域位置図

Fig. 5 A location map of areas where disaster prevention works were done in the group B.

中のどの場所が台風19号による崩壊なのか、台風23号による崩壊なのかは不明である。さらにこの中には1969年、1970年、1972年の崩壊も含まれ、それぞれの降雨によって発生した崩壊84個が混在していると考えられる。そのため崩壊勾配としてはこれらを含んだ流域の平均勾配とせざるをえない。しかしこれをグループBという一つの対象域で括った場合、崩壊勾配は一つの値で表されるが、84個の崩壊を引き起こした最大日雨量の中には

表2 椎葉村の各グループにおける崩壊勾配, 最大日雨量, 崩壊数と崩壊密度

Table 2 Data of slope gradients, daily maximum rainfalls, number of hillside collapses.

| グループ | 流域面積<br>(km <sup>2</sup> ) | 崩壊勾配<br>(度) | 最大日雨量<br>(mm) | 崩壊数<br>(個) | 崩壊密度<br>(個/ha) |
|------|----------------------------|-------------|---------------|------------|----------------|
| A    | 0.34                       | 36          | 28            | 1          | 0.029          |
| B    | 8.87                       | 38          | 547           | 84         | 0.095          |
| C    | 1.08                       | 41          | 209           | 8          | 0.074          |
| D    | 0.57                       | 39          | 66            | 3          | 0.053          |
| E    | 1.88                       | 39          | 218           | 4          | 0.021          |
| F    | 11.71                      | 35          | 149           | 20         | 0.017          |
| G    | 2.11                       | 38          | 355           | 23         | 0.109          |
| H    | 5.95                       | 37          | 274           | 6          | 0.010          |
| I    | 1.27                       | 37          | 126           | 2          | 0.016          |
| J    | 3.09                       | 39          | 88            | 1          | 0.003          |
| K    | 6.9                        | 37          | 266           | 28         | 0.041          |
| L    | 0.56                       | 37          | 163           | 4          | 0.071          |
| M    | 3.96                       | 34          | 235           | 4          | 0.010          |
| N    | 5.15                       | 38          | 243           | 3          | 0.006          |
| O    | 0.83                       | 45          | 320           | 31         | 0.373          |
| P    | 1.67                       | 38          | 102           | 2          | 0.012          |
| Q    | 1.27                       | 38          | 271           | 8          | 0.063          |
| R    | 2.16                       | 40          | 318           | 19         | 0.088          |
| 全体   | 59.37                      |             |               | 251        | 0.042          |

153 mm, 547 mm, 318 mm, 275 mm, 238 mm の5種類があり, 降雨と崩壊数の一対一対応をつけようとした場合, 84個の崩壊を引き起こした最大日雨量は547 mmにはならないという問題が生ずる. このような問題点はあるが, ここでは統計解析を行うため, 上述のようにグループの平均勾配を崩壊勾配, 表1の各グループの中の最も大きい降雨をそのグループの最大日雨量(グループBでは547 mm)とし, これを各グループの崩壊数の積算値と対応させるものとする.

なお, 表2の崩壊数合計と表1の崩壊数合計に若干の相違があるのは, 前述のように字名がはっきりしないものを除いたためである. 因みにグループ全体の崩壊密度を求めると0.042個/haとなる.

## V 崩壊数の発生予測

村野は天竜川上流域の崩壊に対し, 統計解析の結果から, 崩壊面積率が連続雨量と地質要因に強く支配されること, 流域面積当たりの崩壊数は連続雨量に支配されることを明らかにしており(村

野, 1965), 大村は斜面の土質力学的抵抗力の逆数の確率分布を用いて崩壊率と連続雨量の関係を求めている(大村, 1976). 吉松はエネルギー論的観点から山腹崩壊の予測を試みている(吉松, 1977). また坂口らは曖昧性を含む種々の崩壊パターン事例にファジー理論を適用することにより崩壊要因の分析が可能であるとしている(坂口ら, 2001). ここでは現在ある宮崎県の資料を用いて, 簡単な統計解析によって崩壊要因分析を行ってみる.

降雨量と斜面勾配が崩壊密度に及ぼす影響について検討するため, 表2の降雨量および勾配要因と崩壊密度の重回帰分析を行うと, 次式のような関係が成り立つ.

$$Z = 1.233 \times 10^{-4}x + 2.602 \times 10^{-2}y - 0.9571 \dots (3)$$

ここにZは崩壊密度, xは最大日雨量, yは勾配である. 式(3)の重相関係数は0.793で, 強い相関があることがわかる. 前述と同様, ここで最大日雨量と勾配要因の崩壊に関する寄与率を求めると, 前者が99.9%で, 崩壊には最大日雨量の影響が大きいことがわかる.

降雨の考察対象範囲を検討するため, 崩壊と降雨の関係を表す式(2)より崩壊発生限界雨量を求めると89 mm/dとなる. ただ, 表1からも明らかのように, 実際には89 mm/d以下においても崩壊の起こっている数事例があることを考慮して, ここでは0~50 mm/dを50 mm/d, 以下 $i \times 50$  mm ( $i=1, 2, \dots$ ), 単位で表すとして, 最小値の50 mm/dを崩壊発生下限值と考える. 一方考察対象降雨の上限範囲を決めるため, 崩壊との対応がはっきりしている表1の1966年~2002年までの37年間の降雨に対する確率雨量から検討する. 確率雨量としてGumbel-Chowの式を用いれば椎葉村では次式のようになる.

$$x = 192.6 + 119.13k \dots (4)$$

ここに192.6 mm/dは1966年以降2002年までの37年間の椎葉村の年最大日雨量の平均値であり, 119.13 mm/dはその標準偏差, kは頻度係数である.

土砂災害の防止を目的とした計画の場合, 一般に100年確率雨量を用いることが多い. 式(4)によれば100年確率最大日雨量は566 mmになる. 実績最大日雨量として547 mmがあることから考え, ほぼ100年確率最大日雨量に近い550 mm/d (84

年確率) までを考察の対象範囲とする。

崩壊勾配についても検討対象範囲を定める必要がある。表2から明らかなようにここでの崩壊勾配はほとんどが土砂の内部摩擦角以上であり、崩壊発生下限値としては大きすぎると考えられるので、表2から直接下限範囲を決めるのではなく、これについては土質力学的に長大斜面の安定解析からその数値を決めるのが妥当と考えられる。

水山は算出崩壊限界深と実績崩壊深との比較から崩壊発生勾配を定めているが(水山ら, 1990), ここでは斜面の土砂層が降雨で完全に飽和され、土砂に粘着力がないとした状態で想定される次式(5)のようなつり合い式を考える。これは土質力学的安定条件からみれば、最も緩い崩壊発生勾配となる。

$$\tan\theta = (\sigma - \rho)C^* \tan\phi / \{(\sigma - \rho)C^* + \rho\} \quad \dots(5)$$

ここに $\theta$ は崩壊発生限界勾配、 $\sigma$ は土砂粒子の密度、 $\rho$ は水の密度、 $C^*$ は堆積土砂濃度、 $\phi$ は土砂の内部摩擦角である。いまこれら物質常数に標準的な値として $\sigma = 2.6 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ ,  $\phi = 35^\circ$ ,  $C^* = 0.6$ を代入すれば、 $\theta = 19^\circ$ となる。実際には土砂の粘着力や根系の緊縛力などがあり、また山腹斜面で土層が完全に水で飽和されることは少ないであろうから、崩壊発生限界勾配は $19^\circ$ より大きくなるのが一般である。したがってここでは斜面崩壊発生限界勾配としては $20^\circ$ を用い、崩壊の検討対象勾配としてはこれ以上について考える。一方表2では崩壊勾配の最大値は $45^\circ$ であるが、これは100mメッシュ単位で考えたときのグループの平均勾配で、実際には勾配 $55^\circ$ ( $51^\circ \sim 55^\circ$ )の斜面も1%以下ではあるが存在するので、ここでは最大値 $55^\circ$ までを勾配の検討対象範囲とする。

考察対象の降雨の上限範囲を約100年確率最大日雨量の550mmとして、50mm単位とすれば $i = 1 \sim 11$ となり、一方斜面勾配の考察対象範囲は $20^\circ$ から $55^\circ$ までで、 $5^\circ$ 刻みとすれば $j = 1 \sim 8$ となる。式(3)の $x, y$ に $50i, 8j$ を代入したときの崩壊密度は次式のようにになる。

$$z_{i,j} = 1.233 \times 10^{-4} \times 50i + 2.602 \times 10^{-2} \times (15 + 5j) - 0.9571 \quad \dots(6)$$

式(6)を用いて椎葉村における崩壊密度と降雨の関係について考えてみる。なお式(6)はすべての勾配に対する回帰式であり、それぞれの勾配の斜

面、例えば $j = 1$ (勾配 $0^\circ \sim 20^\circ$ の範囲とした $20^\circ$ )の斜面に対しても、 $j = 8$ (勾配 $55^\circ$ )の斜面に対しても普遍的に同式が適用できるかどうかはわからないが、ここでは式(6)の $j$ に、例えば1または8を代入すれば、これがそのままそれぞれの斜面勾配部分の崩壊密度を表すものとする。したがって斜面勾配が $20^\circ$ 、または $55^\circ$ の場合、最大日雨量が $i \times 50 \text{ mm}$ ( $i = 1, 2, \dots, 11$ )であれば、このときの推定崩壊密度は次式のようにになる。

$$z_{i,1} = 1.233 \times 10^{-4} \times 50i + 2.602 \times 10^{-2} \times (15 + 5) - 0.9571 = 1.233 \times 10^{-4} \times 50i - 0.4367 \quad \dots(7)$$

$$z_{i,8} = 1.233 \times 10^{-4} \times 50i + 2.602 \times 10^{-2} \times (15 + 5 \times 8) - 0.9571 = 1.233 \times 10^{-4} \times 50i + 0.4740 \quad \dots(8)$$

ここに $z_{i,1}$ ,  $z_{i,8}$ は斜面勾配が $20^\circ$ および $55^\circ$ における降雨量階位 $i$ , すなわち降雨量 $x = i \times 50 \text{ mm/d}$ の場合の崩壊密度を表す。

式(6)によって崩壊密度を推定する場合、誘因である降雨量はさまざまに変化するので、これは実質的な変数であるが、素因といわれる勾配は地域が決まれば必然的に決まってくる値であり、降雨量変数とは性質が異なる。したがってここでは $j$ については地形図から求めた $20^\circ, 25^\circ, \dots, 55^\circ$ の各斜面勾配の面積率を用い、降雨要因のみを変数とする。このときの階位 $i$ の降雨量に対する崩壊密度は次式のようにになる。

$$Z_i = (n_i/s) = \sum \{z_{i,j} \times (s_j/s)\} \\ = z_{i,1} \times (s_1/s) + z_{i,2} \times (s_2/s) + \dots + z_{i,8} \times (s_8/s) = z_{i,1} \times e_1 + z_{i,2} \times e_2 + \dots + z_{i,8} \times e_8 \quad \dots(9)$$

ここに $Z_i$ は最大日雨量 $i \times 50 \text{ mm}$ に対するその地域の推定崩壊密度( $i = 1, 2, \dots$ )、 $n_i$ は推定崩壊数を示し、 $z_{i,1}$ は前述の式(7)から求めた崩壊密度、 $s_1$ は勾配 $20^\circ$ の斜面の占有面積、 $s$ は全面積、 $e_1$ はその占有率で、 $(s_1/s)$ を表す。 $z_{i,2}, s_2, e_2$ 以下 $z_{i,8}$ (前述の式(8)による推定崩壊密度)、 $s_8, e_8$ も上述と同様、勾配 $25^\circ$ から $55^\circ$ までの推定崩壊密度、斜面の占有面積および占有率を表す。

式(9)に式(6)を代入して $i$ 階位の降雨量に対する椎葉村における崩壊密度を推定すると次式のようにになる。

表3 各グループの斜面勾配の面積占有率

Table 3 Areal percentage of each slope gradient group.

| グループ | 勾配占有率      |            |            |            |            |            |            |            |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|      | 20度<br>(%) | 25度<br>(%) | 30度<br>(%) | 35度<br>(%) | 40度<br>(%) | 45度<br>(%) | 50度<br>(%) | 55度<br>(%) |
| A    | 0          | 9          | 38         | 20         | 11         | 19         | 2.7        | 0.3        |
| B    | 4          | 11         | 20         | 38         | 16         | 9.5        | 1.3        | 0.2        |
| C    | 0          | 3          | 6.5        | 20.5       | 28         | 30         | 11         | 1          |
| D    | 0          | 1          | 8          | 31         | 32         | 23         | 4.7        | 0.3        |
| E    | 2          | 5          | 15         | 26         | 24         | 20         | 7.1        | 0.9        |
| F    | 6          | 12         | 15         | 32         | 16.5       | 14.7       | 3.8        | 0          |
| G    | 1.5        | 4.5        | 12         | 27         | 24.5       | 22.5       | 7.8        | 0.2        |
| H    | 2.7        | 8.3        | 5          | 38         | 25         | 17         | 3.8        | 0.2        |
| I    | 2.7        | 16.3       | 12         | 31.5       | 19.5       | 14         | 3.2        | 0.8        |
| J    | 1          | 4.7        | 11.3       | 22.5       | 27.5       | 24         | 9          | 0          |
| K    | 2.8        | 6.9        | 14.8       | 33.5       | 22.5       | 15.2       | 4.2        | 0.1        |
| L    | 0.8        | 4.4        | 7.5        | 36.3       | 29.5       | 18.2       | 3.3        | 0          |
| M    | 6          | 12.3       | 20.2       | 35         | 21         | 5.2        | 0.1        | 0.2        |
| N    | 2          | 4.5        | 10         | 28.5       | 23         | 24.5       | 7.1        | 0.4        |
| O    | 2.5        | 6          | 11.5       | 31         | 24.8       | 20.3       | 3.1        | 0.8        |
| P    | 3          | 7.5        | 9.2        | 20         | 25.6       | 24.8       | 9.7        | 0.2        |
| Q    | 0.6        | 6.4        | 15.5       | 27.5       | 20.8       | 24.2       | 5          | 0          |
| R    | 0.6        | 2.4        | 6.5        | 21.5       | 31         | 25         | 12.1       | 0.9        |

$$Z_i = \{1.233 \times 10^{-4} \times 50i + 2.602 \times 10^{-2} \times (15+5) - 0.9571\} \times e_1 + \{1.233 \times 10^{-4} \times 50i + 2.602 \times 10^{-2} \times (15+5 \times 2) - 0.9571\} \times e_2 + \dots + \{1.233 \times 10^{-4} \times 50i + 2.602 \times 10^{-2} \times (15+5 \times 8) - 0.9571\} \times e_8 \dots (10)$$

ここに右辺の勾配の面積占有率 $e_1, e_2, \dots, e_8$ は地域によって定まる数である。1/10000の地形図を用いて椎葉村におけるグループA~Rの勾配ごとの面積占有率を求めたものが表3である。

前述のようにここでは最大日雨量については50 mm単位で考えることにするので、表1の各グループの最大日雨量を50 mm単位で分けた降雨量に対応させるものとする。例えばグループBの最大日雨量は547 mmであるので550 mmを用いる。以下同様に50 mm単位で表した各グループの最大日雨量を用いて $z_{i,j}$ の値を求め、これに表3に示す各グループの斜面勾配の面積占有率を掛けてその崩壊密度を求める。なおこの場合式(10)の算出値が負となる場合はこれを0とする。例えばグループBの場合、最大日雨量は550 mm ( $i=11$ )を用いても、勾配が30°以下は算出値が負となるのでこれを0としてつぎのようになる。

表4 各グループの推定崩壊密度

Table 4 The estimated density of hillside collapses of each group by the statistical analysis.

| グループ | 勾配別崩壊<br>密度(個/ha) | 斜面勾配(度) |    |    |        |        |        |        |        | $\sum z_{ij} * e_i$<br>(個/ha) | 最大日雨量<br>(mm) |
|------|-------------------|---------|----|----|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|---------------|
|      |                   | 20      | 25 | 30 | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     |                               |               |
| A    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0098 | 0.0417 | 0.0094 | 0.0014 | 0.062                         | 50            |
| B    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | 0.0058 | 0.0232 | 0.0262 | 0.0053 | 0.0011 | 0.062                         | 550           |
| C    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0312 | 0.0725 | 0.0409 | 0.005  | 0.15                          | 250           |
| D    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0303 | 0.0517 | 0.0167 | 0.0014 | 0.1                           | 100           |
| E    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0268 | 0.0483 | 0.0264 | 0.0045 | 0.106                         | 250           |
| F    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0166 | 0.0339 | 0.0137 | 0      | 0.064                         | 150           |
| G    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0260 | 0.0531 | 0.0286 | 0.001  | 0.109                         | 200           |
| H    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0321 | 0.044  | 0.0148 | 0.001  | 0.092                         | 400           |
| I    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0196 | 0.0323 | 0.0115 | 0.0039 | 0.0673                        | 150           |
| J    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0261 | 0.054  | 0.0319 | 0      | 0.122                         | 100           |
| K    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0264 | 0.0376 | 0.0158 | 0.0005 | 0.0803                        | 300           |
| L    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0313 | 0.043  | 0.0121 | 0      | 0.0864                        | 200           |
| M    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0234 | 0.0126 | 0.0004 | 0.001  | 0.0374                        | 250           |
| N    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0257 | 0.0592 | 0.0264 | 0.002  | 0.113                         | 250           |
| O    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0305 | 0.0513 | 0.0119 | 0.0041 | 0.0978                        | 350           |
| P    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0257 | 0.0572 | 0.035  | 0.001  | 0.117                         | 150           |
| Q    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0244 | 0.0598 | 0.0189 | 0      | 0.103                         | 300           |
| R    | $z_{ij} * e_i$    | —       | —  | —  | —      | 0.0381 | 0.0632 | 0.0463 | 0.0046 | 0.152                         | 350           |



$$\begin{aligned}
 Z_{11} &= z_{11,4} \times e_4 + z_{11,5} \times e_5 + \dots + z_{11,8} \times e_8 \\
 &= \{1.233 \times 10^{-4} \times 50 \times 11 + 2.602 \times 10^{-2} \\
 &\quad \times (15 + 5 \times 4) - 0.9571\} \times e_4 + \dots \\
 &\quad + \{1.233 \times 10^{-4} \times 50 \times 11 + 2.602 \times 10^{-2} \\
 &\quad \times (15 + 5 \times 8) - 0.9571\} \times e_8 = 0.0740
 \end{aligned}$$

このようにして各グループの崩壊密度を求めたものが表4である。なお同表の空欄は $z_{i,j}$ が負となるものである。式(10)による崩壊密度の推定値は、あくまで表2のように処理した過去37年間の崩壊数に対する各グループの中の最大日雨量および勾配の統計解析に基づくものであり、当然これからはずれる危険性を含んでいる。

式(10)から2005年9月6日の台風14号によって発生した上松尾、岩屋戸地域の崩壊密度について検討してみる。台風14号の最大日雨量は459 mmであり、これは式(10)で $i=9$ に相当する。 $i=9$ の場合、勾配が $30^\circ$ 以下では $z_{i,j}$ は負となるので、 $35^\circ$ 以上の勾配の斜面が有効面積となる。面積占有率は上松尾が $e_4=2\%$ 、 $e_5=1\%$ 、 $e_6=0.5\%$ 、 $e_7=0.1\%$ 、 $e_8=0\%$ であるから、このときの推定崩壊密度 $Z_9=0.305$ 個/ $\text{km}^2$ となり、岩屋戸が $e_4=2\%$ 、 $e_5=0.5\%$ 、 $e_6=0.3\%$ 、 $e_7=0.1\%$ 、 $e_8=0\%$ であるから推定崩壊密度 $Z_9=0.185$ 個/ $\text{km}^2$ となる。今回の台風14号によるそれぞれの実際の崩壊密度は上松尾が $0.256$ 個/ $\text{km}^2$ 、岩屋戸が $0.137$ 個/ $\text{km}^2$ で、両者とも比較的良好な対応がみられる。このことは椎葉村では降雨からほぼ崩壊数の発生が予測されることを示している。ただ、表4からわかるように、全般的に推定崩壊密度の方が実際の崩壊密度よりも大きくなっている。その原因としては崩壊密度の推定が式(3)を前提条件としていること、一降雨に対応した崩壊数ではなく、グループの中の最大日降雨量に対する積算崩壊数を用いていること、崩壊勾配が崩壊地そのものの値でないことなどが考えられる。

**要 約**

椎葉村は急峻な地形が多く、台風にも見舞われるため、山地崩壊の危険性が極めて高い。1966年から2002年までの過去37年間で大小合わせて実に257個の山地崩壊が起こっている。これは宮崎県全体の平均の2.7倍である。統計解析の結果によれば、椎葉村では崩壊密度と降雨・地形要因の間には正の相関関係が成立する。降雨要因の崩壊に

対する寄与率は99.9%で、山地崩壊には降雨の影響が非常に大きい。崩壊密度予測式を用いて2005年9月6日の台風14号による上松尾、岩屋戸地域の推定崩壊密度を算出した結果 $0.185$ 個/ $\text{km}^2$ となり、上松尾、岩屋戸の実際の崩壊密度 $0.256$ 個/ $\text{km}^2$ 、 $0.137$ 個/ $\text{km}^2$ と比較的良好な対応がみられた。

**キーワード**：崩壊予測，崩壊密度，斜面崩壊，斜面勾配，最大日雨量

**引用文献**

黒岩知恵・平松晋也（2004）森林伐採や植栽を指標とした崩壊面積予測手法に関する研究. 砂防学会誌. vol. 57(2). 19-25

松本舞恵・下川悦郎・地頭 隆・黒木健二（1999）しらす急斜面の表層崩壊跡地における植生回復と表層土の発達. 砂防学会誌. vol. 52(4). 11-12

水山高久・阿部宗平・矢島重美・清水 宏・小菅尉多（1990）土砂生産の予測に関する研究. 砂防学会誌. vol. 42(6). 30-32

村野義郎（1965）豪雨型山崩れの研究. 砂防学会誌. vol. 17(4). 7-8

宮崎県（1966～2002）宮崎県災異誌. 2号～38号

大村 寛・高橋敏男（1976）地形解析による山崩れの研究. 砂防学会誌. vol. 29(1). 25-29

坂口哲夫・吉松弘行（2001）資料解析による表層崩壊の地形特徴. 砂防学会誌, vol. 54(1). 24-28

谷口義信・丸谷知己・下川悦郎・地頭 隆（1993）九州地域における砂防計画の基本土砂量に関する研究. 砂防学会砂防計画の基本土砂量に関する研究平成4年度報告書. 砂防学会. 102-105

谷口義信（1997）地形・地質からみた宮崎県の災害特質. 調査月報 47(3). 宮崎経済研究所. 4-5

吉松弘行（1977）山腹崩壊の予測式について. 砂防学会誌. vol. 29(3). 4-9