地すべりの誘因——水と振動*

Inducement to Landslide——Water and Tremor

中山 康**

Yasushi NAKAYAMA

Abstract

Inducement to landslide consists of water, tremor and topographic change. Troubles of water and tremor take various forms of pore pressure or moisture content increasing caused by rainfall and thawing, and maximum acceleration or seismic energy of an earthquake.

As to inducement, time-prediction is more difficult than locality-prediction. So, through the historical data on meteorology and seismology, this report deals with the problem where the hazard will take place. That is the relationship between the direction of slope and seasonal heavy rainfall or thawing, and long-term seismic energy accumulation or earthquake hazard potential.

キーワード: 応力ひずみ曲線, 間隙圧, 含水量, 降雨, 地震

1. はじめに

地すべりは、素因と誘因が重なり合った地点で発生する斜面の変動であると説明されている。素因は、地形・岩質(土質)・地質構造等位置を指定すれば一義的に定まり、時間的要素を含まない。誘因は、位置を指定しても時間により変化するもので、水、振動及び自然的・人工的地形改変に分けられる。ここでは、水と振動に絞って検討した。

水に関しては、降雨、融雪、ダムの湛水等が地すべりの引き金となる。これらのうち降雨・融雪について地形及び気象状況を検討してみた。

振動すなわち地震について、被災程度はその地点の最大加速度(震度)をもって評価する考え方が採られてきた。地震災害が尾根部に集中することからこの考え方は是認されるが³⁾、土砂斜面の災害については地震エネルギーも指標となるものと考えられ、気象庁でも1983年頃から周期補正した加速度をもって震度を定める試みが行われている⁷⁾。これは地震エネルギーを考慮しようとする方針に変わったことを意味する。

2. 水——間隙水圧と含水量

地すべり現象は、水の挙動によって支配される。また、

滑動とこれに伴う変形が地下水の動きを規制することになる。ここでは単純に降雨・融雪で間隙水圧や含水量が上昇するものとする。

間隙水圧と土の剪断強さは、有効応力表示で簡明に表されている。

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$$

含水量で土のレオロジー的性格が大きく変わることもよく知られている(液性限界・塑性限界)。

2.1 降雨量

降雨量(雪も水深に換算)は、気象に関するデータのうちでも最も豊かな蓄積を持つものの一つである。従来は9時あるいは10時を日界とした日雨量、3時間雨量、1時間雨量の観測が人手で行われ、情報の伝達にも時間がかかり、防災に直接役立つことが少なかった。その点アメダス(地域気象観測システム, Automated Meteorological Data Acquisition System)の整備で全国約1,300箇所の10分毎の観測値が即時に求められ、面積合計雨量も計算できる。これらは避難勧告を適正に行うために不可欠の情報となるであろう。ただし、17 km間隔に設置されているため、幅5 kmの湿舌を検知するには気象レーダの併用が必要とされている⁴⁾。

別の面すなわち長期的防災データとしては、国土数値情報の地形・地質と重ね合わせることができる。その一はメッシュ降水量気候値である。全国約38万メッシュの月降水量の平年経過を知ることができる。降水量の観測所は平野部に多いので、これを標高で補正してから補間を行い、集成したものが昭和62年の気象記念日(6月1

* この報告は、平成2年11月21~22日の「地すべり災害発生危険箇所の把握に関する諸問題」シンポジウム(沖縄)における発表に、その後の検討を加えたものである。

** 農林水産省農業工学研究所造構部

表-1 日本の日降水量 (地点別, 気象現象別) 文献5)

順位	地名	降水量 mm	年月日
1	日 早(徳 島)	1114	1976 (昭 51) 9.11
2	西 郷(長 崎)	1109.2	1957 (昭 32) 7.25
3	大台ヶ原山(奈 良)	1011.0	1923 (大 12) 9.14
4	前 鬼(奈 良)	976.2	1954 (昭 29) 9.13
5	小見野々(徳 島)	953.0	1974 (昭 49) 7. 6
6	柿 の 又(高 知)	903	1975 (昭 50) 8.17
7	田 辺(和歌山)	901.7	1889 (明 22) 8.19
8	紀伊長島(三 重)	891	1971 (昭 46) 9.10
9	本 戸(福 井)	844	1965 (昭 40) 9.14
10	田 口 原(宮 崎)	839	1971 (昭 46) 8.29

表-2 日本の1時間降水量 (地点別, 気象現象別) 文献5)

順位	地名	降水量 mm	年月日
1	長 与(長 崎)	187	1982 (昭 57) 7.23
2	福 井(徳 島)	167.2	1952 (昭 27) 3.22
3	富 士 宮(静 岡)	153.0	1972 (昭 47) 8.24
4	足 摺 岬(高 知)	150.0	1944 (昭 19) 10.17
5	山 口(徳 島)	147.0	1972 (昭 47) 7. 5
6	潮 岬(和歌山)	145.0	1972 (昭 47) 11.14
7	西 郷(長 崎)	144.0	1957 (昭 32) 7.25
8	日 和 佐(徳 島)	141.0	1972 (昭 47) 9.14
9	木 宮(長 崎)	141	1967 (昭 42) 7. 9
10	銚 子(千 葉)	140.0	1947 (昭 22) 8.28

10 日(金)“大雨台風”17 号

17 号けき奄美通過、夜 30 度線で停留。先ぶれ強雨が東から愛知以西に移り兵庫・大分などに豪雨禍。雨天予想の東京は夏空 31.6° 不快 80、けき高円寺などミンミン鳴き、夕西空に入道雲。

11 日(土)意外、台風動かず

秋台風が上陸寸前に異例の長逗留。小豆島に山津波、巡視船で住民脱出。赤穂市 1 万戸浸水“陸の孤島”2 日め。大しけ豊後水道でタンカー真つ二つ。雨空予想の東京は夏空つづき 30.1°。

12 日(日)長良川が決壊

意外の長滞留 48 時間。5 日で 1000 ミリこす未曾有の豪雨を振らせた台風もやっと動き始めたが、長良川が決壊“輪中”地帯が水没。羽島変電所浸水新幹線運休。小豆島に山崩れ犠牲 8。

13 日(月)兵庫一宮に山津波

17 号は未明 0140 ころ長崎付近に上陸福岡へて玄海へ。けき兵庫の一宮で大規模な山津波が 50 戸を呑み犠牲 3。高知市は半数世帯浸水、床上 21000 戸長良川やっとな減水、東京は雨天続き。

図-1 地上天気図 [1976 年 9 月, 文献 1)]

図-2 台風 17 号の全国総雨量分布図 [1976 年 9 月 8 日~14 日, 文献 1)]

表-3 香川県小豆島の斜面方向・勾配(%)分布³⁾
(上段: 全島, 下段: 1976 被害斜面)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
17																	5
16		1															2
15	1								3					1			8
14	4								1	2							25
13	3	4	2	2		1	2	5	3	3	1	3		4	2	2	37
12	3					3	5	4	6	3	2			3	4	4	43
11	3	6	3	3	3	7	4	9	3	6	2	4	1	4	6	8	72
10	6	7	7	6	5	4	8	11	7	5	7	7	2	5	11	14	112
9	7	10	5	9	9	10	11	17	10	7	8	8		10	17	16	154
8	15	10	18	5	7	7	12	11	12	11	9	7	11	7	18	18	178
7	19	11	19	8	13	17	9	10	16	17	12	8	8	14	10	13	204
6	20	24	13	11	13	8	22	14	14	17	9	10	11	15	10	21	232
5	13	21	16	12	12	14	15	19	17	15	13	15	12	15	20	11	240
4	12	8	14	6	5	13	29	17	13	15	19	10	7	14	31	13	226
3	11	13	7	10	8	8	11	16	16	8	18	10	10	8	16	18	188
2	6	12	8	9	1	5	12	13	6	9	8	7	8	17	8	8	137
1	7	6	6	5	7	4	8	6	10	6	8	8	10	6	6	1	103
0	7	2	4	2	4	2	2	4	12	8	6	4	1	6	2	1	67
	137	135	125	89	87	107	152	163	150	132	124	104	85	130	163	150	2033
																	2038

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
17																	
16																	
15									1								1
14										1							1
13																	
12																	
11																	
10	1		1			1		1									5
9	1			1		3	2	1	1	1	2						12
8	1	2				1	2	1	1	1	2		1				12
7	1	1		1		2	1	1	1	1	1		1				10
6		1			1	1	1			2				2			8
5			2	1	1	1	2		2		1	1		1	1		13
4						2	2		1	1	2	1		1	1	1	13
3				2				3	1		1	1	1				9
2			1					1		1	1	1					6
1						1						2					3
0				1					1								2
	4	4	4	8	2	6	13	10	10	7	8	6	5	4	2	2	95

日, 112 周年) のポスターに採用されている。

その二は, 季節あるいは斜面方向と重ね合わせてきめ細かい防災図が得られるのではないかということである。これまでに, 日降水量では 1976 年に 1,114 mm (徳島県日早), 1 時間降水量では 1982 年に 187 mm (長崎県長与) の観測レコードがあり⁵⁾, ともに著明な斜面災害を起こしている。

1976 年 9 月 3 日に発生した熱帯低気圧¹⁾ が 4 日 15 時にトラック島の北西約 450 km の海上で台風 17 号となった。奄美大島から日本海までの速度が低下したため, 徳島県日早で総雨量 2,781 mm, 日雨量 1,114 mm の記録更新となった。短時間 (1 時間, 3 時間) 雨量の記録的なものはない。兵庫県一宮地すべり, 香川県小豆島の崩壊, 岐阜県羽島の新幹線変電所の水没など多種類の災害が遠くに発生した (台風の outer band)。一宮地すべりは, 1980 年版の Landslides in Japan に紹介されている。

小豆島では, 南東斜面に降雨が集中し, 土石流・土砂流被害を大きくした。北半球では台風 (低気圧) の風は反時計廻りに流れ込み, 台風の進行前面の強風域で南東斜面に雨が強く吹きつけるためと思われる。小豆島を経線線上を 7.5 秒 (約 250 m), 緯度線上を経度 11.25 秒 (約 285 m) で区切ってメッシュ (標準メッシュの各辺を 4 等分したもの) を斜面・勾配を全島及び災害斜面のメッシュで算え比較すると, このことを読み取ることができる

写真-1 台風 17 号 (1976) の爪跡 (香川県小豆島)

写真-2 台風 17 号による土石流 (小豆島)

写真-3 台風 17 号土石流による被災家屋

(表-3 参照)³⁾。

1 時間雨量の第 1 位は, 1982 年の長崎県長与で作られた (187 mm)。長崎豪雨災害である。梅雨末期に南の太平洋高気圧 (北半球なので時計廻りに風を吹き出す) から高温多湿の気流 (湿舌) が南西から梅雨前線に流れ込み, 南西斜面に災害が発生することになる。

2.2 雪と地すべり

雪と地すべりの関係については, 必ずしも簡単な結果

23 日(金)長崎大水害

ゆっくり接近のL, Fに湿舌入り九州西・北部で100~200, 豪雨の中心は夜に入ってから長崎で3時間に315日量448mm, 翌未明にかけ大被害発生。長浦岳1時間に153mm。

図-3 地上天気図〔1982年7月23日, 文献2〕

11 日(金)富山で春一番

移動H時速85キロで東海上へ。①のち②の傾向で午後九州で●。1430 剣山36.8 m/sの南の突風。夜日本海西部にFを伴ったL進み, 東海~中部に●域広がる。金沢でウグイス初音。

図-5 地上天気図〔1988年3月11日, 文献6〕

図-4 雨量分布図〔1982年7月23日, 文献2〕

になっていない。春一番の北斜面ではフェーン現象で気温が上昇するので、融雪を促進する。1988年3月11日、新潟県狼供養寺地すべりの近くで、春一番によって泥流化した地すべりが発生した。しかし、通常は狼供養寺で融雪と地すべり滑動の連動は認められず、積雪期にその量が大きくなると地すべりが活発化する。地すべり機構の多様性で一律に論じられない例である。

3. 地震——最大加速度とエネルギー

地震による斜面崩壊は、特に稀なことではない。関東大地震(1923)の根府川山津波や秦野震生湖、伊豆大島近海地震(1978)の河津町見高入谷七廻の斜面崩壊、長野県西部地震(1984)の御岳崩壊などである。

3.1 加速度とエネルギー

加速度のディメンションは $[L][T]^{-2}$, 単位は cm/sec^2 が用いられる。これに質量 $[M]$ を乗じると力となり、

写真-4 秦野震生湖の現況

図-6 応力ひずみ曲線説明図

単位はdyneである。エネルギー変化量すなわち仕事は、力と作用距離の積である。 $[M][L][T]^{-2}[L]$ はまた $[M][L][T]^{-1}]^2 (=質量 \cdot 速度^2)$ とも書き変えられ、単位はergである。

地震による破壊は材質によってそのメカニズムが異なると考えられ、コンクリートでは最大加速度が、土では地震エネルギーがそれぞれ主たる要素になると思われる。このことは、応力ひずみ曲線の差異ならびに耐震モデル

図-7 建築分野の耐震モデル実験装置

図-8 土質分野の耐震モデル実験装置（振動台）

の実験施設の仕様の違いとして現れる。応力ひずみ曲線において、ピークの高さがコンクリートの強さであり、曲線下方の面積の大きいことが土の強さを示すことになる。

建築の分野では、ジャッキと反力壁で模型に力（＝質量×加速度）を加える（図-7 参照）。土質の分野では、振動台を用い、加速度・周期・くり返し回数という条件で制御する。これは仕事すなわちエネルギー変化量に換算される。図-8 の装置では手前の3組の駆動部が伸縮し水平1方向の振動を与える。

3.2 震度階から計測震度へ⁷⁾

地震後直ちに各地の気象台・測候所の震度が発表される。これは0、Ⅰ～Ⅶの8階層で「説明」及び「参考事項」に記述された揺れの程度に基づいて予報官の体感で分級する。これはおおむね最大加速度に対応している。

昭和60年3月、気象庁に「震度観測検討委員会」が設置され、計測器採用と周期を加味した新しい震度階の策定が行われた（因みにこれは単位時間のエネルギーを表し継続時間を乗ずると総エネルギーになる）。

従来の震度階には、次のような長所(1)～(3)と短所(4)～(7)があるとされている。

- (1) 瞬時に揺れの感じかたや周囲の状況を総合的に判断し、結果を出すことができる。
- (2) 地震計のない所でも地震動の観測ができる。

(a)河角式による震度と加速度との関係。太実線は、各震度の境界（縦軸上に付した0.8、2.5、……250）を示す。この場合、特に地震波の周期による制限はされていない。

(b)周期により震度の補正量を一律に変化させた場合の様式図。一点鎖線は河角式に対応。

図-9 震度階分級図〔(a)は従来のもの、文献7〕〕

- (3) 判断基準が簡便で理解しやすいことから、誰でもある程度は震度の判定が可能である。
- (4) 地震動の強さは地盤の影響を大きく受けるため、気象庁（気象台や測候所）の震度が必ずしも地域の代表値とは限らない。
- (5) 例えば、高層ビルと木造家屋では同じ場所にあったとしても揺れかたに大きな相違が生ずるように、同一地域、同一地盤上であっても構造物の種類などによって震度は異なることがある。
- (6) 震度が体感による観測である限り、個人差が生ずることは避けられない。
- (7) 体感による観測であるため、人間のいない（無人）所で観測することは不可能である。

計測化の方法について次のような具体的な換算式が得られている。

$$I = 2 \log a + 0.7 + \log (k \cdot t)$$

ここに、 I (0～6): 計測震度（仮称）（4捨5入して整数値とする。但し、0.5未満のときは $I=0$ 、0.5以上のときは $I=6$ とする）

a : 加速度 (gal=cm/sec²)

t : 周期 (sec)（暫定的に0.1～1秒の範囲）

k : 係数（暫定的に $k=3$ ）

一応、最大加速度を基礎としているので、建築物の被害や墓石の転倒、さらに岩石斜面の亀裂・トップリングに適合することになるであろう（ただし、今後の検討を要する）。

地震計は加速度・速度・変位を測るものがあるが、加速度用のものが多い。これには機械式で錘りの動きを梃子で紙やフィルム上に針あとの波形を書かせるもの（写真-5）または電氣的に記録するもの（写真-6及び7）がある。

写真-5 SMAC-E₂ 強震計

写真-6 電気式強震計 センサー部

写真-7 電気式強震計記録部

3.3 土と地震エネルギー

地震エネルギーが土の斜面安定にとって有力な物理量であるかについては、応力ひずみ曲線のほか、地震時の土の挙動として平野部未固結砂地盤の液状化とも共通の問題がある。

種々のマグニチュードに対して液状化の限界距離が次式で示されている(栗林ほか)⁸⁾。

$$\log R = 0.77M - 3.6$$

図-10 日本の周辺における年間地震エネルギーとその累計

図-11 地震エネルギー密度説明図

ここに、M: マグニチュード

R: 限界震央距離 (km)

この式の M と R の組み合わせ上では、一回の地震エネルギー密度(後述)がほぼ $8 \times 10^7 \text{ erg/cm}^2$ という一定の値となる。

3.4 地震エネルギーの時間的・空間的広がり

加速度が地表の条件で大きく左右されるので、災害の大小を考えるときにはむしろ地震エネルギーを指標にすべきであろう。ただし、そこに災害が発生するか否かは、最大加速度が因子となりうる。

ある地点に立って地震を感じたとする。マグニチュードが 0.2 大きければ、エネルギーは 2 倍となる。震央距離の 2 乗に反比例するので、エネルギーは震央を中心とし震央距離を半径とする地下半球の表面に様に分布するモデルを考える。

3.4.1 時間的広がり

1886 年から 1987 年までの 102 年間に、日本付近のおもな被害地震が 160 回算えられている⁹⁾。グーテンベルグ・リヒター式

$$\log E = 11.8 + 1.5M$$

ここに、E: 地震波として出されたエネルギー (erg)

M: マグニチュード

で E を求め、102 年間のエネルギーの増加を計算してみた。

70 年程度の周期を見出すことはできるが、それは海岸を遠く離れた日本海溝の M8.1~8.5 の地震に支配され

Kanto GT Earthquake, 1-9-'23, M7.9
 4.47×10^{23} ergs; 35.1°N , 139.5°E

図-12 関東大地震の震央距離 (km)

Kanto GT Earthquake, 1-9-'23, M7.9
 4.47×10^{23} ergs; 35.1°N , 139.5°E

図-13 関東大地震によるエネルギー密度 (百万エルグ/cm²)

ており、濃尾地震 (M 8.0, 1891), 関東大地震 (M 7.9, 1923), 南海地震 (M 7.9, 1944) など陸上の震災を起こした地震のエネルギーは隠されている。過去の記録から次の地震が「いつ」発生するかを予測することはできない。

3.4.2 空間的広がり

ある地点に到達 (通過) したエネルギー, すなわち地

図-14 地震エネルギー集計密度図

下半球面上のエネルギー密度は、下式から計算できる。

$$E_d = \frac{E}{2\pi r^2} \times 10^{-10}$$

ここに, E_d : エネルギー密度 (erg/cm²)

E : 震源のエネルギー (erg)

r : 震央距離 (km)

関東大地震 (1923) を例にとる。M 7.9 なので

$$\log E = 11.8 + 1.5 \times 7.9 = 23.65 = \log (4.47 \times 10^{23})$$

すなわち 4.47×10^{23} erg となる。

毎1度の経緯線の交点における震央距離 (震央: 35.1°N , 139.5°E) 及びエネルギー密度を計算する。これを 160 回の地震について行い、各交点で重ね合わせ、地震エネルギー集計密度図を作成した (図-14)。震央が経緯線交点に一致するとき、すなわち震央距離が 0 の場合は、除外した。

102 年間の集計は 70 年 (地震活動の粗大な周期) を越えているので、一応地震による土砂斜面災害の危険度を示すものと考えられる。

4. あとがき

誘因からみた地すべりの危険性は、次のような結論が得られる。

(1) 水を原因とするもの

ア 6月～7月 梅雨末期に危険性が大きくなる。湿舌によるもので、南西斜面の災害が起こりやすい。

イ 8月～10月 台風によるもので、とくに速度が遅

くなると、outer band の位置も固定し、危険性が増加する。中心の東～北東方の地域にあたる南東斜面に集中する。

ウ 1月～4月 積雪または融雪によるもので北斜面、とくに雪の深さが1m程度残っているときのフェーン現象は危険である。

(2) 振動に関するもの

土砂斜面について、岩手・秋田・千葉・東京・神奈川県・長野（西部）・静岡・愛知・岐阜・三重・福井・和歌山・宮崎の各都県で災害規模が大きくなりやすい。岩石斜面の亀裂やトップリングは微地形（凸型）に支配され、地域的限定は困難である。

また、発生時期を絞ることも一般的には不可能である。

主要参考文献

- 1) 宮沢清治 (1976): 大雨台風17号をかえりみて, 気象 235, 2～7
- 2) 山形英雄 (1982): 昭和57年7月豪雨梅雨前線による長崎県の大雨, 気象 305, 16～17
- 3) 中山康 (1982): 台風7617 災害の地形要因 —— 香川県小豆島, 第21回地すべり学会研究発表論文集 (鳥取), 36～37
- 4) 高橋博ほか (1986): 斜面災害の予知と防災, 白亜書房
- 5) 池田一智 (1987): 気象要素の極値, 順位からみた日本の気象, 気象 360, 3
- 6) 日本気象協会 (1988): 天気図日記 373, 24
- 7) 鉢嶺猛 (1988): 震度の計測化に向けて, 気象 374, 4～8
- 8) 安田進・陶野郁雄 (1988): 液状化 —— 大地が溶けるときの, 科学朝日 572, 14～20
- 9) 国立天文台 (1989): 理科年表 1990 (地震), 丸善
(原稿受理日 平成3年8月23日)

地すべり学会九州支部発足

九州（沖縄県を含む）地内における地すべりに関する技術の向上、会員相互の交流などを目的とする地すべり学会九州支部設立の気運が熟したため、平成3年頭初より設立委員会を結成、準備・検討を進めてきたが、平成3年8月23日、長崎県諫早市宇都町、諫早文化会館において、九州支部設立総会を開催、引続いて記念講演会・懇親会を行い、地すべり学会九州支部を発足させた。

1. 設立総会

渡 地すべり学会会長、栃木 同副会長が来賓として出席され、会員110名にて総会を開始し、議事

- (1) 地すべり学会九州支部規約承認
- (2) 平成3年度収支予算案承認
- (3) 役員選任

を可決した。役員は、支部長: 玉田文吾（西日本工大）、副支部長: 後藤恵之輔（長崎大学）、副支部長: 前田重人

（長崎県北振興局）、幹事34名、監事2名とした。

2. 記念講演会

下記の講演が行われた。

- (1) 口之津地すべりについて

長崎県林務課課長補佐 早稲田 正

- (2) 地下水排除による地すべり防止効果

西日本工業大学 玉田 文吾

なお、九州支部事務局を当面下記に開設する。

〒852

長崎市文教町1-14

長崎大学工学部社会開発工学科

後藤研究室

TEL 0958-47-1111

FAX 0958-48-3624

（文責 玉田文吾）