

II-8 流出特性に基づいた土石流発生予測のための実効雨量に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 15～平 17

担当チーム：火山・土石流チーム

研究担当者：栗原淳一，山越隆雄

【要旨】

土石流災害の防止には事前の警戒避難が重要であり、現状では降雨を指標として市町村を単位に土石流災害発生予測に関する警戒避難基準が設定されている。現場での運用にあたり、空振り率の減少が課題となっており、危険箇所毎の特性を反映したより高精度の土石流災害発生予測手法の開発が望まれる。本研究では、全国各地の水文観測データを収集・整理し、地質の異なる流域における降雨流出特性を明らかにした。そして、それぞれの事例についてタンクモデルを用いた流出解析を行い、モデルのパラメータを同定した。これらの結果を基に、土石流発生予測に適する地質別の実効雨量の設定手法を提案した。

キーワード：降雨流出，タンクモデル，半減期，実効雨量

1. はじめに

土石流災害の防止には事前の警戒避難が重要であり、現状では降雨を指標として市町村単位で土石流災害発生予測に関する警戒避難基準が設定されている。現場での運用にあたり、空振り率の減少が課題となっており、危険箇所毎の特性を反映した、より高精度の土石流災害発生予測手法の開発が望まれる。

土石流の発生原因の一つに斜面崩壊があり、崩壊発生には流域貯留量が深く関係していると考えられる。また、近年、気象庁ではタンクモデルによる貯留高を「土壌雨量指数」と称し、土石流災害発生の危険性を予測して発表している。このような土壌中の雨水の貯留量は地質や土質に大きく影響をうけ、地域によって異なってくるものと考えられる。これまでも、水山ら¹⁾や加藤ら²⁾により花崗岩と中生層流域における降雨流出の違いについて述べられている。

そこで、本研究では、国土交通省や各都道府県で実施している全国各地の山地小流域の水文観測データを収集し、地質毎の流出・貯留特性を検討した。そして、タンクモデルを用いた流出解析を実施し、各地質における最適なパラメータを検討した。その結果を基に、それぞれの地質におけるタンクモデル内の水位変化を求め、その変化に最も良く対応する半減期と実効雨量の関係を検討し、土石流発生予測に適する実効雨量を設定する手法を提案した。

2. 土石流発生予測のための実効雨量の考え方

土石流の発生要因は大きく素因と誘因に分けられる。

素因には地形や地質、土質など、誘因には雨量や流量などが挙げられる。素因である地形、地質、植生要因については、統計的手法等を用いて土石流発生現象との因果関係の研究がなされている³⁾。また、土石流の発生過程を力学的に検討し、数値解析により予測する研究も多くなされている⁴⁾。一方で、降雨指標による土石流警戒避難基準雨量設定の研究も長い間行われており、これまでに「土石流災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針(案)」⁵⁾によって示された手法(以下、指針案による手法と呼ぶ)や矢野⁶⁾による手法などがある。

一般に土石流発生危険基準線(CL)の設定の降雨指標として実効雨量が用いられる。実効雨量とは、土石流災害の発生に及ぼす前期(先行)雨量の影響を考慮した累加雨量のことで、土石流の発生は発生降雨だけではなく前期降雨の影響を受けており、この影響の度合いは、発生降雨との時間差が大きくなるほど減少するものと考えられ、土石流の発生予測には重要な要素となる。実効雨量の算定には半減期が用いられるが、前述の指針案による手法や矢野による手法では具体的に半減期を設定する方法を示していない。

平成5年に建設省(現国土交通省)が行った「総合土石流災害対策検討会」⁷⁾より基準雨量設定手法が提言されているが、この手法は以下のような実効雨量の演算方法を採用し、地表および地中の水分量を表す短期および長期の二種類の実効雨量によって基準雨量を示している。

$$R_w = \sum \alpha_{li} \times R_{li} \quad \dots (1)$$

$$\alpha_{ij} = 0.5^{i/T} \quad \dots (2)$$

R_w : 実効雨量, R_{ij} : i 時間前の 1 時間雨量,

α_{ij} : i 時間前の減少係数, T : 半減期(時間)

この手法における半減期は、鈴木ら⁸⁾によるタンクモデルの貯留高の推移特性と類似するように定められており、降雨指標として半減期 1.5 時間(タンクモデルの 1 段目タンクに相当)および半減期 72 時間(2・3 段目タンクに相当)を採用している⁹⁾。この手法は集中して発生するがけ崩れに対して示されたものであるが、背景とする鈴木らのタンクモデルが土石流に対しても有効性を示すことから、土石流に対しても適用可能な手法と評価できる。その一方で、恩田ら¹⁰⁾は比較的容易に計測のできる溪流からの流出高と半減期を変化させた実効雨量の通減特性を比較し、半減期を求めている。

このように、実効雨量の算定に用いられる半減期の設定には様々な方法がとられているが、本研究では土石流の発生には土壌内の貯留特性が大きく関わっていると考え、「総合土砂災害対策検討会」の手法に準じ、タンクモデル内の水位と半減期を変化させて求めた実効雨量を比較することで最適な半減期を設定するものとした。しかしながら、上記、鈴木らのタンクモデルは花崗岩地域において検討されたものである。牧原ら¹¹⁾により花崗岩地域におけるタンクモデルが他の地域においても有効性を示すとされてはいるが、近年の水山ら¹²⁾の研究により中・古生層や火山性堆積物を基盤とする地域において降雨停止後に発生する大規模な崩壊や土石流にはこのような手法では対応できないことも指摘されており、花崗岩類以外の地質における降雨指標を示す必要がある。本研究では、地質別の降雨流出特性を考慮した半減期を検討することで地質別の実効雨量の設定手法を提案する。

3. 検討方法

3.1 検討対象とした流域

全国各地のそれぞれ地質の異なる地域から、溪流における流量観測データを収集し、良好なデータが得られた全国の 17 地域、26 カ所を対象として地質別に分類した。降雨の流出や貯留には地質条件が深く関わると考えられるが、地質による流出・貯留特性は研究途上で不明な点も多いため、ここでは Ishihara ら¹²⁾に準じて「花崗岩類」「中・古生層」「第三紀～第四紀層」「火山岩類」に分類した。対象とした流域の位置を図-1 に、対象流域の諸元を表-1 に示す。花崗岩類に分類されるのが広島県の荒谷流域、滋賀県の川向・若女谷流域などの 6

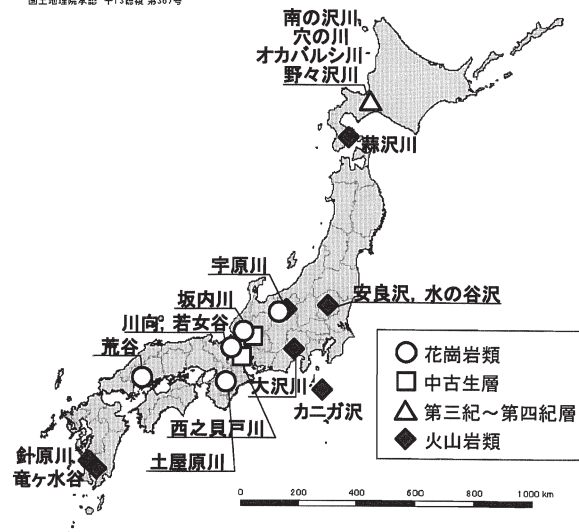


図-1 対象とした流域位置図

表-1 対象とした溪流の諸元

地質	地域	溪流名	流域面積 (km ²)	溪流長 (km)	主な地被
花崗岩類	岐阜	坂内川G1	0.09	0.8	広葉樹
	滋賀	若女谷	0.03	0.2	裸地
	滋賀	川向	0.03	0.07	裸地
	奈良	土屋原川	0.2	1.2	針葉樹
	長野	宇原川上入沢	3.1	2.5	針葉樹
	広島	荒谷	0.011	0.2	広葉樹
中・古生層	岐阜	坂内川P1	0.03	0.3	広葉樹
	岐阜	坂内川P2	0.035	0.3	広葉樹
	岐阜	坂内川P3	0.007	0.1	広葉樹
	岐阜	坂内川P4	0.07	0.4	広葉樹
	岐阜	坂内川P5	0.07	0.55	広葉樹
	三重	西之貝戸川	0.85		落葉樹
第三紀～第四紀層		野々沢	6.9	6.3	広葉樹
	北海道	オカバルシ川	9.5	5.1	広葉樹
		穴の川	8.9	9.4	広葉樹
火山岩類		南の川	6.5	3.5	広葉樹
	北海道	藤沢HQ-2	6.9	7.3	広葉樹
	北海道	藤沢HQ-8	3.9		広葉樹
	日光	安良沢	0.01	0.2	針葉樹・広葉樹
	日光	水の谷沢	0.5	0.25	針葉樹・広葉樹
	富士山	大沢川	5.0	6.0	針葉樹・広葉樹
	鹿児島	針原川HA-1	0.5		針葉樹・広葉樹
	鹿児島	針原川HA-2	0.5		針葉樹・広葉樹
	鹿児島	竜ヶ水谷	0.08	0.6	針葉樹
	長野	宇原川ロットの沢	0.8	1.5	針葉樹
	長野	宇原川左支流	1.6	2.0	針葉樹
三宅島	カニガ沢	0.9	3	裸地(火山灰)	

カ所、中・古生層は越美山系の坂内川流域など 6 カ所、第三紀～第四紀層は北海道の南の沢川など 4 カ所、火山岩類は日光の安良沢など 11 カ所である。

3.2 検討方法

収集した上記の流域における降雨流出観測結果のうち、比較的大きな降雨事例を抽出し、それぞれについてハイ

ドログラフを整理し、地質毎の降雨流出特性を検討した。

次に、それぞれの事例について、図-2のようなタンクモデルを用いた流出解析を行い、地質毎のパラメータを検討した。タンクモデルは流出解析手法の一つであり、斜面や流域における水の浸透量や流出量の変化を追跡することができる。モデルの流出孔の位置や大きさ及び浸透孔の大きさによって、浸透や流出の非線形特性が表現される。鈴木ら⁸⁾は六甲山系の花崗岩流域を対象にタンクモデルのパラメータを設定し、また Ishihara and Kobatake¹²⁾は地質別のタンクモデルパラメータを設定している。これを参考に、本研究では花崗岩類については鈴木らのモデルを用いるものとし、その他の地質においては Ishihara and Kobatake のモデルを用いた。パラメータの検討は菅原¹³⁾の方法に従って試行錯誤により同定作業を行った。以下に、パラメータの設定手順と方法を示す。

- ① 鈴木らの六甲モデル、Ishihara and Kobatake の地質毎のモデルで示される流出孔の高さ、流出孔の係数、浸透孔の係数を入力する。
- ② 元々のモデルの流出孔の高さ、流出孔の係数、浸透孔の係数に補正率を掛け合わせ、実測ハイドロの形にそえる。
- ③ 流出率が大きく異なる場合、浸透孔で全体の計算値を修整する。
- ④ ピーク部分等を流出孔の高さ、流出孔の係数を変え

て調整する。

- ⑤ ②～④により試行錯誤でパラメータを同定する。

そして次に、パラメータを同定したタンクモデルの1段目および2・3段目の水位変化を調べ、それぞれの変化に最も良く対応する半減期を有する実効雨量を求めた。最適な半減期の選定は、タンク内の水位と半減期を変化させた実効雨量の曲線のピーク時刻と逓減部曲線の推移特性が類似しているかどうかに着目して行った。

4. 検討結果

4.1 各地質における降雨流出特性

それぞれの事例について、縦軸に降水量と流出量を流域面積で除した流出高をとったハイトーハイドログラフを整理した。図-3～図-7に各地質における代表的な事例を示した。そして、表-2に降雨との応答特性、降雨ピークから半減するまでの減衰について整理した。花崗岩類グループでは全般的に降雨に対する応答が非常に早く、降雨ピークとほぼ同時に流出のピークがみられた。また、第三紀～第四紀層のグループではおよそ1時間程度の遅れを示す事例が多かった。それに対し、中・古生層グループでは全ての事例ではないが降雨ピークに3～5時間程度遅れて流出のピークが現れるという事例も多くみられた。また、火山岩類グループでは中・古生層と同様に降雨ピークから概ね3～5時間遅れて流出ピークが認められる事例が多いものの、降雨に対する応答が早い事例もみられた。減衰期をみると、花崗岩や第三紀～第四紀の堆積岩のグループでは全般に流量の逓減が速やかであるのに対し、中・古生層や火山岩類グループでは、流量の逓減がゆっくりである事例がある一方で、逓減が速やかな事例もみられ、等質性が認められなかった。また、火山灰が堆積して間もない三宅島の事例では、降雨に対する流出の応答が非常によく、表面流出量も非常に多くなっている。また、減衰も非常に早いことから、降雨のほとんどが表面流として流出していることが考えられる。これは、火山灰が堆積したことで浸透能が著しく低下し

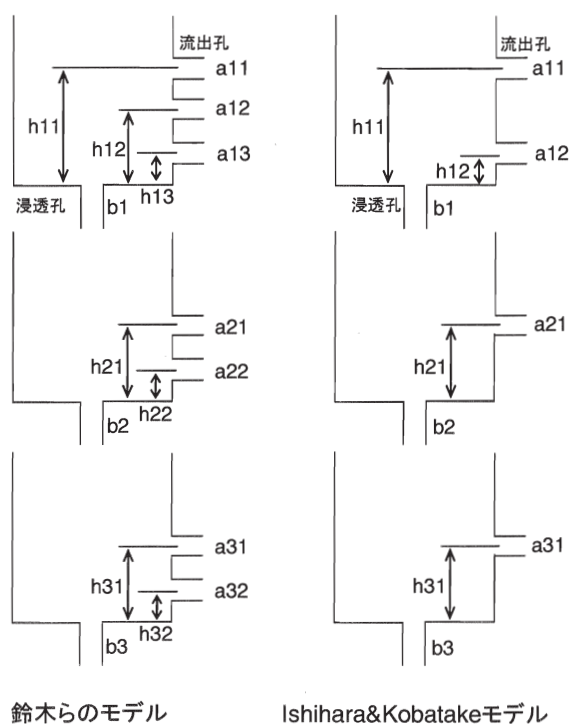


図-2 タンクモデル概要

表-2 地質毎の降雨流出特性

	応答特性	ピークからの減衰
花崗岩類	遅れなし	速やか
中・古生層	3～5時間程度の遅れ	ゆっくり～速やか (等質性なし)
第三紀～第四紀層	1時間程度の遅れ	速やか
火山岩類	3～5時間程度の遅れ	ゆっくり～速やか (等質性なし)
裸地	遅れなし	速やか

ていることが影響していると考えられる。

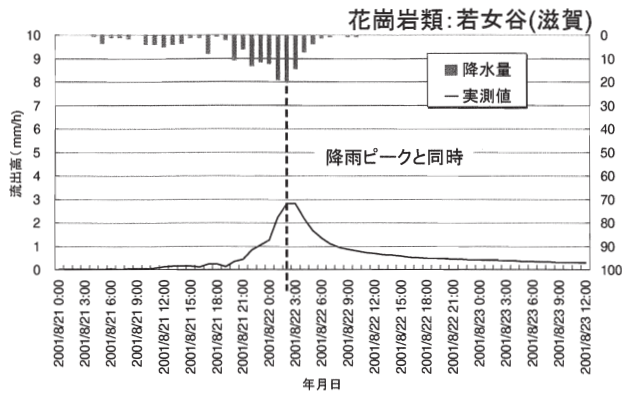


図-3 花崗岩流域の降雨流出事例

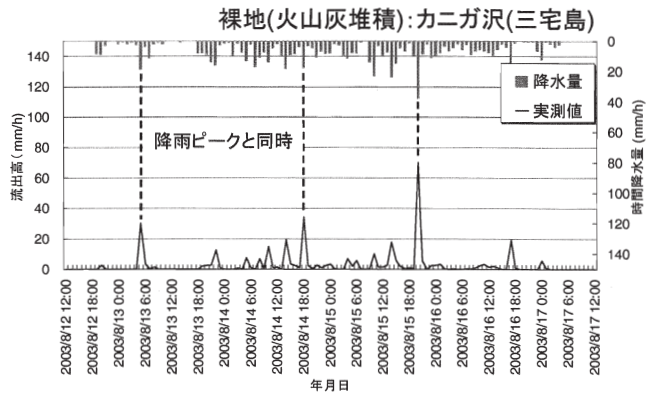


図-7 火山灰堆積流域の降雨流出事例

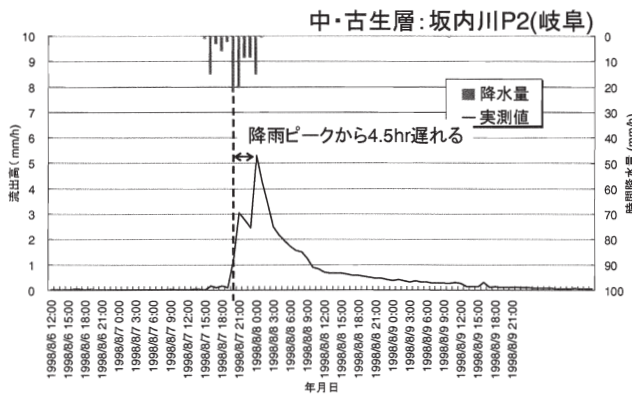


図-4 中・古生層流域の降雨流出事例

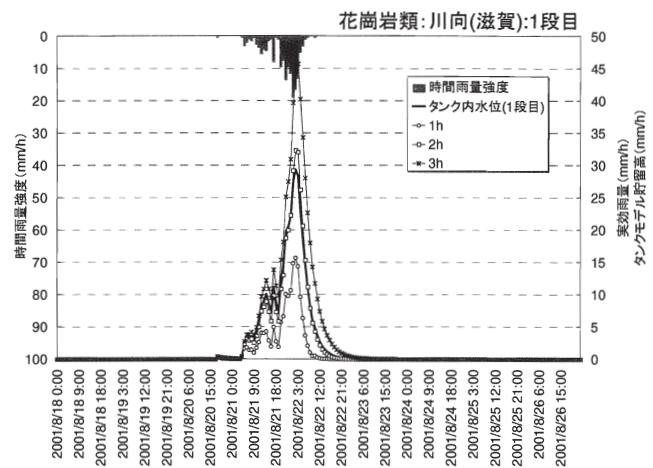


図-8 半減期と実効雨量の検討結果(花崗岩) : 1 段目

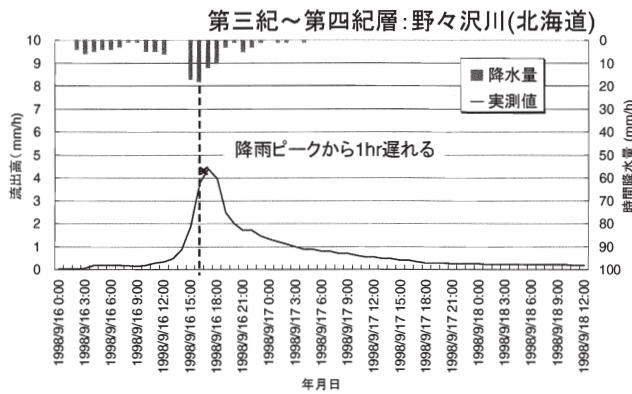


図-5 第三紀堆積岩流域の降雨流出事例

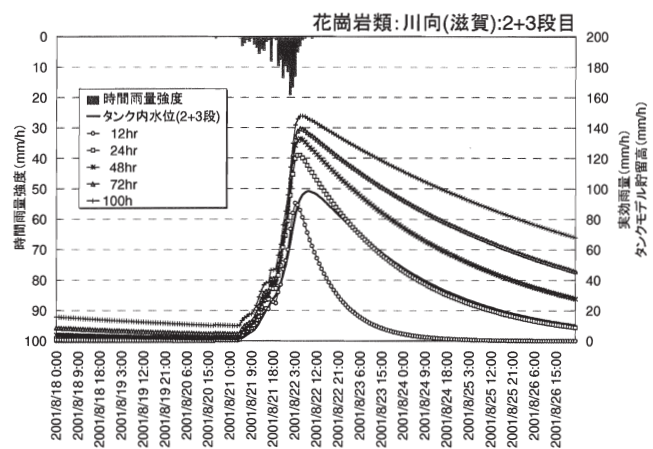


図-9 半減期と実効雨量の検討結果(花崗岩) : 2+3 段目

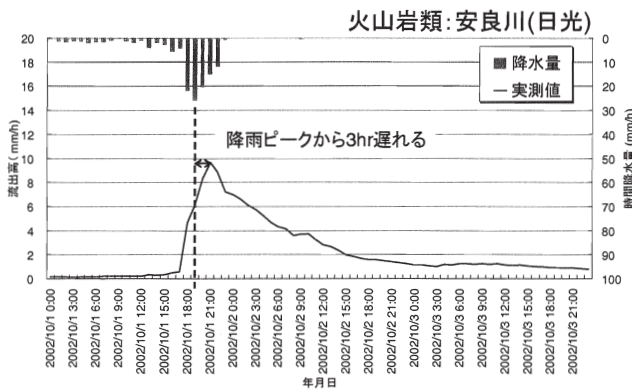


図-6 火山岩流域の降雨流出事例

4.2 最適な半減期の検討

花崗岩類，中・古生層，第三紀～第四紀層，火山岩類について，求められたタンクモデルの1段目の水位および2・3段目の水位変化を調べ，それぞれの変化に最もよく対応する半減期を求めた。

図-8～図-9 に半減期を有する実効雨量とタンクモデルのタンク内の水位について検討した結果を花崗岩類の流域を例に示す。半減期の選定は，タンク内水位と半減期別の実効雨量の曲線において，ピーク時刻や逓減部の曲線の傾きが類似するかどうかに着目した。表-3 に各事例における半減期の検討結果一覧を示すが，花崗岩類および第三紀～第四紀層では，1段目のタンク内水位とは1～2時間の半減期を有する実効雨量が適し，2・3段目のタンク内水位とは概ね24～48時間の半減期が適合した。なお，この地質グループ内での半減期のばらつきは少なかった。一方で，中・古生層では1段目のタンク内水位とは1～2時間の半減期を有する実効雨量が適合し，2・3段目のタンク内水位とは12時間～72時間が適し，半減期の幅が大きくなった。火山岩類では1段目のタンク内水位と1時間以下～5時間の半減期を有する実効雨量が，2・3段目のタンク内水位と10時間以下～100時間以上

表-4 地質別の半減期

地質区分	半減期(時間)	
花崗岩	1～2	24～48
中・古生層	1～2	12～72
第三紀～第四紀堆積岩	1～2	24～48
火山岩類	1～5 (一部, 1時間以下の事例あり)	24～48 (一部, 12時間以下や96時間以上の事例あり)
(火山灰)	1以下	12以下

の半減期を有する実効雨量が適合した。この地質区分における半減期の幅は中・古生層のケースよりもさらに大きくなった。また，やや特殊な事例と考えられる火山灰の堆積した三宅島のような流域では降雨に対する流出が非常に早いことから，タンク内の水位に合う半減期も1時間以下，10時間以下と非常に短くなる結果が得られた。

第三紀～第四紀層では近接の流域におけるデータを用いているため，今後はさらに他地域のデータを集める必要があるものの，花崗岩類や第三紀～第四紀層ではそれぞれの地質区分で等質性が認められた一方，中・古生層および火山岩類については，同じ地質区分であっても半減期に幅広い違いがみられた。個々の流域において，同

じ地質区分であっても斜面における雨水貯留特性に大きな違いがあるものと考えられる。特に，火山岩類ではそれぞれの地域や流域単位で異なった特性を持つことが考えられる。

また，中・古生層や火山岩類では，花崗岩類や第三紀～第四紀層と比べて，より長い半減期を有する流域があるという特徴をもつ。中・古生層や火山岩類の流域では降雨ピークから遅れて発生する深層崩壊の事例が数多く報告されており，この現象とも関連があることが考えられる。

5. 土石流発生予測のための実効雨量の提案

本研究では，地質の異なる流域についてタンクモデルによる流出解析を行い，タンク内の貯留高と半減期を変化させた実効雨量を比較検討することで，地質毎に適合する半減期を求めた。その結果一覧を表-4 に示すが，花崗岩類では半減期1～2時間と24～48時間，中・古生層では半減期1～2時間と24～72時間，第三紀～第四紀層では半減期1～2時間と半減期24～48時間，火山岩類では半減期1～5時間(一部，1時間以下の事例あり)と24～48時間(12時間以下や96時間以上の事例あり)となった。

表-3 最も適合した半減期一覧

地質区分	溪流名	半減期(短期):hr	半減期(長期):hr
花崗岩類	坂内川G1	2	48
	若女谷	1	24
	川向	2	48
	宇原川上入沢	1	24
	荒谷	1	24
中・古生層	坂内川P1	1	12
	坂内川P2	2	72
	坂内川P3	2	48
	坂内川P4	2	48
	西之貝戸川	2	12
第三紀～第四紀層	野々沢	2	48
	オカバルシ川	2	24
	穴の川	2	48
	南の川	1	24
火山岩類	蒜沢HQ-2	5	48
	宇原川左支流	1	24
	宇原川ロットの沢	1	24
	針原川HA-2	2	24
	竜ヶ水谷	2	96<
	水の谷沢	<1	<12
(火山灰)	カニガ沢	<1	<12

ここでは、地質別にタンク内の水位と合う半減期を有する実効雨量を求めたが、今後は得られた半減期を有する実効雨量を用い、土石流の発生降雨、非発生降雨と合わせて検討することで土石流発生危険基準線の検討を行い、警戒避難基準雨量や避難基準雨量を設定していくことが望まれる。

6. まとめ

本研究では、全国の降雨流出データを収集し、地質ごとの流出特性を検討し、タンクモデルによる流出解析によりタンク内水位と半減期の比較検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 花崗岩類では降雨ピークとはほぼ同時に流出のピークが現れるのに対し、第三紀～第四紀層ではおよそ1時間程度遅れてピークが現れる。一方、中・古生層や火山岩類では降雨ピークに対し、3～5時間程度遅れる事例もみられた。
- 2) 減衰期は、花崗岩類および第三紀～第四紀層で速やかに逓減するのに対し、中・古生層や火山岩類ではゆっくりと逓減する事例や速やかに逓減する事例がみられた。
- 3) 花崗岩類及び第三紀～第四紀層では、1段目のタンク内水位と1～2時間半減期を有する実効雨量が適し、2・3段目のタンク内水位とは概ね24～48時間の半減期が適合する。一方、中・古生層では1段目タンク内水位と1～2時間の半減期が、2・3段目タンク内水位と概ね12～72時間の半減期が適し、その幅は広がった。火山岩類では1段目タンク内水位と1時間以下～5時間の半減期が、2・3段目タンク内水位と10時間以下～100時間以上と中・古生層以上に幅広い半減期となった。
- 4) 花崗岩類や第三紀～第四紀層のグループでは降雨流出特性や半減期に等質性がみられたものの、中・古生層や火山岩類のグループでは等質性が認められなかった。

土石流の発生には、地形や地質のみならず植生や土質の強度等の素因に加え、降水量や流量等の誘因が複雑に影響を及ぼしている。本研究では、地質を花崗岩類、中・古生層、第三紀～第四紀層、火山岩類に分類し、それぞれの地質における降雨流出特性を明らかにするとともに、各流域で検討したタンクモデルにおけるタンク内の水位と半減期を変化させた実効雨量とを比較することで、それぞれの流域に適した半減期を求めた。そして、これらの結果を基に、それぞれの地質別の土石流発生予測に最

適な実効雨量の設定の提案をおこなった。土石流発生危険基準線の設定に用いる実効雨量の半減期の設定法については、様々な研究がなされており、定まった方法が示されているわけではない。本研究による検討結果は、地域の特性を考慮した土石流発生予測の一助となるものと考えられる。

今後は、さらにより多くの降雨流出データを用いた検討を進め、地域に適した土石流発生予測手法を確立していくことが望ましい。

参考文献

- 1) 水山高久・恩田裕一・加藤祐子・田井中治・岡本正男：流出特性による土石流発生危険度の判定調査，砂防学会誌，Vol.54, No.5, pp.46-49, 2002
- 2) 加藤祐子・恩田裕一・水山高久・小杉賢一朗・吉川愛・辻村真貴・秦耕二・岡本正男：揖斐川上流の地質の異なる流域における流出の遅れ時間の違い，砂防学会誌，Vol.53, No.4, pp.38-43, 2000
- 3) 例えば，建設省河川局砂防部砂防課：流域の危険度判定に関する研究，1977
- 4) 例えば，高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号，B-2，pp.405-435, 1973
- 5) 建設省河川局砂防部：土石流災害に関する警報の発令と避難指示のための降雨量設定指針(案)，1984
- 6) 矢野勝太郎：前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究，新砂防(砂防学会誌)，Vol.43, No.4, pp.3-13, 1990
- 7) 建設省河川局砂防部：総合土砂災害対策検討会における提言および検討結果，1993
- 8) 鈴木雅一・福嶋義宏・武居有恒・小橋澄治：土砂災害発生の危険雨量，新砂防，110, pp.1-7, 1979
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，Vol.5, 2001
- 10) 恩田裕一・辻村真貴・田中高志・笹木浩二・水山高久・内田太郎・田井中治・田中秀夫：降雨流出特性を用いた土石流警戒避難基準の策定法の検討，砂防学会誌，Vol.58, No.5, pp.13-17, 2006
- 11) 牧原康隆・平沢正信：斜面崩壊危険度予測におけるタンクモデルの精度，気象庁研究時報，vol.45, No.2, 1993
- 12) Ishihara, Y., Kobatake, S.: Runoff model for flood forecasting. Bull. D.P.R.I., Kyoto Univ. Vol.29, No.260, pp.27-43
- 13) 菅原正巳：流出解析法 水文学講座7, 共立出版, p.121-187, 1972