

大項目	3	持続可能な地域づくりと私たち			
中項目	3-1	日本および世界の災害と防災を考えるための自然地理			
小項目	3-1-2	島弧で起きている現象とその分布（土地の移動、火山、地震、隆起・沈降、侵食）			
細項目 （発問）	3-1-2-4 豪雨災害	豪雨と土砂災害（世界の中の日本、分布に重点）を理解する。			
作成者名	齋藤 仁	作成/修正年	2021/2022/2023	Ver.	1. 2
キーワード 5~10 個程度	斜面崩壊、土砂災害、発生密度、豪雨、雨量指標、基準雨量				

発問の意図と説明

(1) 日本における土砂災害の発生

日本列島では、毎年、土砂災害（斜面崩壊、土石流、地すべり等）が発生します。土砂災害は、豪雨、地震、融雪等が直接的な誘因となって発生します。また土砂災害は、山の斜面の地形、地質、土層や植生の状態、また人間生活に関する家屋や道路の分布等、様々な要因が絡み合って発生します。ここでは、日本列島で毎年発生する豪雨に伴う土砂災害の空間分布と日本の特徴、また雨量指標を用いた土砂災害警戒を説明します。

日本では、梅雨前線や台風に伴い、頻繁に豪雨が発生します。また日本の国土の約7割は山地のため、豪雨に起因する土砂災害が、毎年たくさん発生します。例えば国土交通省砂防部（2021）によれば、平均すると毎年1000件以上の土砂災害が発生しています（図1）。しかし、土砂災害の発生件数は、年による違いが大きいです。例えば2018年は、6月末から7月にかけての豪雨（2018年7月豪雨）により西日本を中心に多数の土砂災害が発生し、3500件ほどの土砂災害が発生しました。

図2(A)は日本の土砂災害の発生密度です。ここでは、2001年から2011年までの11年間に発生した土砂災害を精査し、豪雨に起因し、発生場所や日時等の詳細な情報が判明した4744件の事例から作成しました。図2(A)からは、日本における土砂災害の分布は一律ではなく、特に西南日本の太平洋側で土砂災害の密度が高くなっていることがわかります。

図2(B)は、気象庁の解析雨量から計算した、同期間の年平均降水量の分布です。解析雨量は、気象レーダー観測による空間的に連続した降水の分布と、地上降水量計（アメダス等）による観測値を組み合わせ、降水量を空間的に精度よく解析したものです（気象庁2021a）。日本列島で見ると、北海道では年降水量が1000mm以下の地域がある一方で、西南日本の太平洋側では年降水量が4000mmを超える地域もあります。西南日本では頻繁に豪雨が発生し、それに伴って土砂災害の発生密度も高くなっています（図2）。図3は月別の土砂災害発生件数を示しています。豪雨に伴う土砂災害は、主に6月～10月に集中的に発生しています。特に7月の発生件数は、1500件を超えています。つまり、梅雨前線や台風に伴う豪雨によって、土砂災害が発生していることを示しています。

過去の土砂災害がどのくらいの雨量で発生したのかを知ることは、土砂災害の発生予測・警戒のために重要です。土砂災害の発生と雨量との関係を調べる際には、主に、雨量指標を用いた統計的手法と、斜面安定に関する物理的モデルによる手法があります（例えば、地盤工学会2006）。ここで、統計的手法とは、過去に発生した土砂災害と雨量との関係を統計的に分析し、土砂災害が発生しうる基準となる雨量を求める方法です（次節参照）。また、物理的モデルでは、土層への降雨の浸透と土層の不安定化を力学的に解析して、土砂災害の発生を予測します。

一般に、土砂災害を引き起こす斜面崩壊は、直接的には、地下水位や土層の含水量等に関わります（飯田2012）。よって、物理的モデルを用いた斜面崩壊の発生予測はより合理的な方法です。しかし、そのためには土層特性や透水特性等のさまざまな情報が必要になります。これらの情報は、現時点ではリアルタイムかつ広域的に把握することが困難です。そこで間接的に、観測された雨量指標の統計分析に基づく土砂災害の発生予測が行われています。また、土砂災害と雨量との関係は、地域や流域全体での土砂災害の発生特性の理解のために最も基本的な情報と言えます。次頁では、雨量指標を用いた土砂災害の発生予測や、日本列島での土砂災害の発生の特徴を説明します。

図表のページ

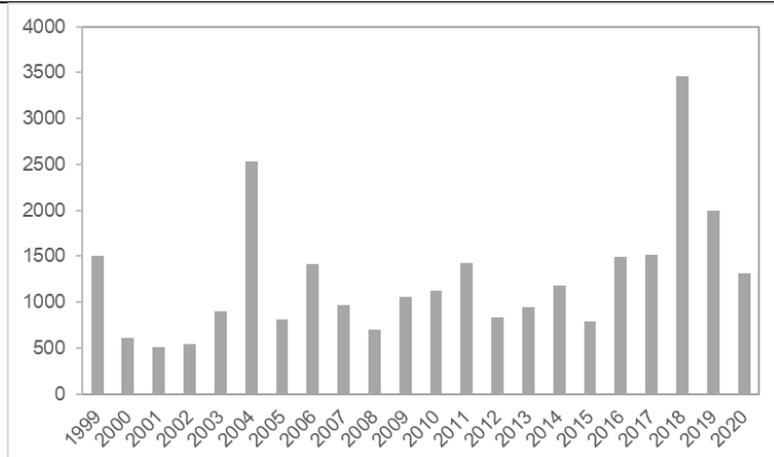


図1 日本で近年（1999～2020）発生した土砂災害件数。この期間を平均すると 1255 件/年 の土砂災害が発生している。2018 年は、6 月末から 7 月にかけての西日本を中心とした豪雨（2018 年 7 月豪雨）で土砂災害が頻発した。国土交通省砂防部（2021）のデータを基に齋藤作成。

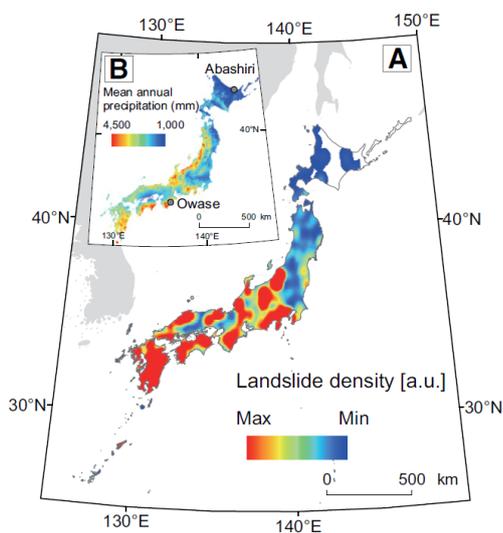


図2 (A) 2001 年～2011 年の豪雨に伴う土砂災害（4744 件）の発生密度と、(B) 解析雨量から計算した同期間の年平均降水量（Saito et al. 2014 より引用）。

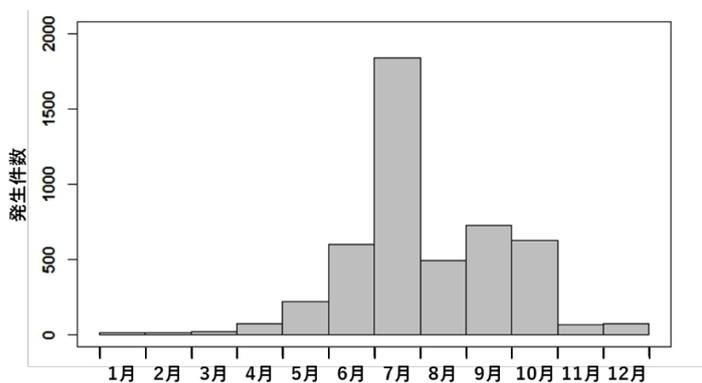


図3 2001 年～2011 年の豪雨に伴う土砂災害（4744 件）の月別発生件数（齋藤 2021 より引用）

(2) 雨量指標を用いた土砂災害警戒

雨量指標を用いて土砂災害の発生予測や警戒をする際に、過去に土砂災害が発生した際の雨量を統計的に分析し、土砂災害が発生しうる最小の雨量（以下、「基準雨量」）を調べます。観測された雨量は、分単位、時間単位、日単位、月単位、年単位と様々な期間で集計可能です。例えば 10 分間雨量は、一般に、毎正時から 10 分毎に、それまでの 10 分間の累積雨量を表します。同様に 1 時間雨量は、毎正時毎の、それまでの 1 時間の累積雨量です。24 時間雨量は任意の 24 時間の累積雨量であり、日雨量の場合は午前 0 時から 24 時までの 24 時間累積雨量になります。

また一連の降雨（通常は、任意の無降水期間で区切られるひとまとまりの降雨）を定義し、その期間中の累積雨量、最大 1 時間雨量、降雨継続時間、平均雨量強度（累積雨量を降雨継続時間で除したもの）や、先行降雨（一連の降雨よりも前の累積雨量、前期雨量とも言う）といった指標が用いられます（図 4）。一連の降雨は、通常、24 時間の無降水継続期間を用いて定義されることが多いです（気象庁統計課 1960）。累積雨量や先行降雨について、過去の雨量の影響が時間とともに減少することを考慮し、任意の半減期を設けた実効雨量も用いられてきました。さらに、斜面崩壊は土層中の水分量がある値に達した時に発生すると考えて、その水分量に着目する方法も多数提案されてきました。代表的なものに、概念的に土壌中の水分量を指数化した土壌雨量指数（岡田ほか 2001；気象庁 2021b）があります。

土砂災害の発生には、それまでに降った雨の総量と、その時点で降っている雨の強さの両者が関係します。1 時間雨量のような時間単位の雨量指標は、雨の強さを評価できても、それまでの雨の総量を評価できません。逆に、累積雨量のような雨量指標では、雨の強さを評価できません。よって、短時間と長時間の雨量に関する指標や、降雨継続時間と雨量強度のような 2 つ以上の指標を組み合わせ、土砂災害の基準雨量が調べられてきました。

基準雨量を調べる際には、2 つの雨量指標からなる座標平面上に、過去に土砂災害が発生した雨と非発生の雨をプロットします（図 5）。そして、その境界を基準雨量とします。しかし、非発生の雨は、本当にその雨によって土砂災害が発生していないかを調べるのが困難な場合があります。そのような場合は、土砂災害が発生した雨のみをプロットして、その下限を基準雨量とします。

基準雨量に関する研究は多数あり、例えば Onodera et al. (1974) は、神奈川県と千葉県で発生した斜面崩壊を対象に、累積雨量と最大 1 時間雨量を用いて、基準雨量を検討した先駆的な研究です。その後、Caine (1980) や Guzzetti et al. (2008) 等において、世界各国から土砂災害事例を収集し、平均雨量強度と降雨継続時間を用いた基準雨量が調べられました。

現在の日本では、降雨に伴う土砂災害警戒のために、大雨警報（土砂災害）や土砂災害警戒情報等が運用されています。その際には、長時間の雨量指標として土壌雨量指数、短時間の雨量指標として 60 分間積算雨量を組み合わせた基準雨量が使われています（気象庁 2021c）。基準雨量は、全国 5 km グリッド（2019 年より順次 1 km グリッドに変更）単位に設定されています。解析雨量と、降水短時間予報を用いた数時間先までの降雨の予測値を用いて、これらが基準雨量を超える時に、大雨警報（土砂災害）や土砂災害警戒情報が発表されます。これらの情報は、気象庁（2019c）の Web サイトで閲覧可能であり、日ごろから情報を確認することが、災害への備えとして重要と言えます。

図表のページ

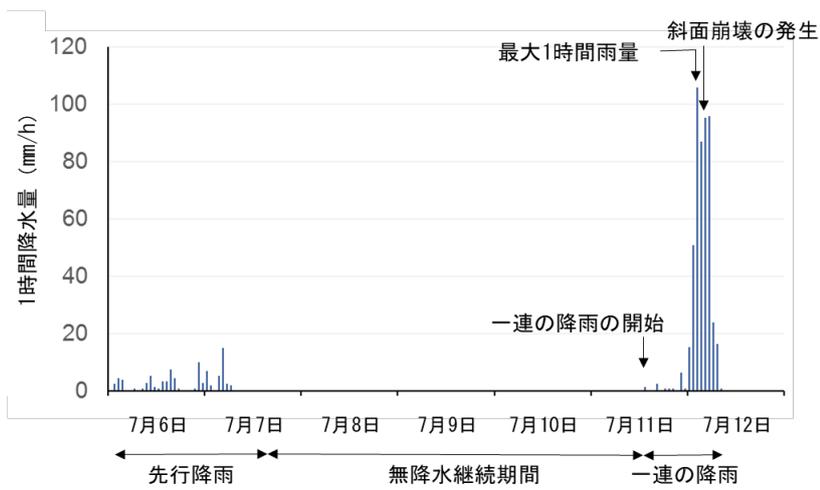


図4 雨量指標の集計の例 (齋藤 2021 より引用)

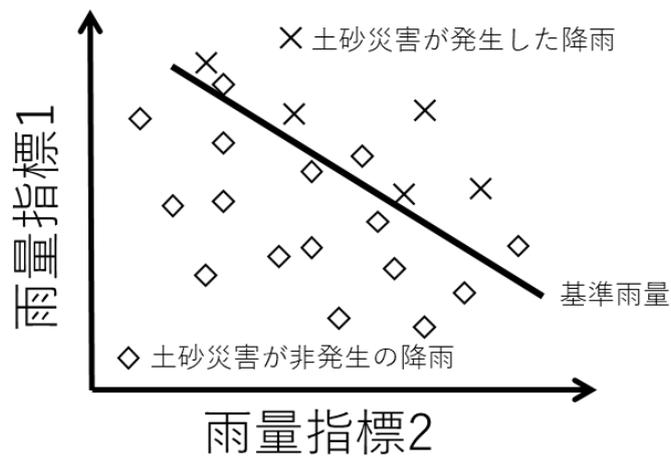


図5 2つの雨量指標を用いた土砂災害の基準雨量の例 (齋藤 2021 を編集)

(3) 日本における土砂災害の発生の特徴

日本では、どの程度の雨が降った時に土砂災害が発生しているのでしょうか？また世界と比較した時に、日本では土砂災害が発生しやすいのでしょうか？

これまで、世界各地で平均雨量強度と降雨継続時間を用いた基準雨量が調べられ、地域間の比較や、基準雨量の地域特性が検討されてきました。日本においても、個別の事例については、土砂災害の発生と雨量との関係が調べられてきました。しかし、日本全域で土砂災害の発生と雨量との関係を比較し、世界と比較したものはありませんでした。そこで、日本での土砂災害の基準雨量を調べました。

ここでは、2006年～2008年の3年間に降雨により発生した1174件の土砂災害事例から、その降雨の特徴を調べました。それぞれの事例について、一連の降雨の開始から土砂災害が発生した時刻までの平均雨量強度 (I , mm/h) と降雨継続時間 (D , h) を計算しました。

図6では、1174件の土砂災害事例における平均雨量強度 (I , mm/h) と降雨継続時間 (D , h) との関係を、両対数グラフで示しています。土砂災害が発生する雨には、短時間の強い雨から長時間継続する雨まであります。また右下がりの傾向は、長時間継続する降雨では平均雨量強度が小さい雨でも斜面崩壊が発生しうること示しています。図6は土砂災害が発生した雨のみをプロットしていますので、この分布の下限が土砂災害の基準雨量となります。そこで、分位点回帰分析と呼ばれ手法を用いて、下限2%分位点における回帰線を基準雨量としました(図6)。その結果、下記の基準線が得られました(式1)。

$$I = 2.18 D^{-0.26} \quad (3 < D < 537 \text{ h}) \quad (\text{式1})$$

同様な基準雨量が、これまで世界各地で調べられています。そこで、日本の基準雨量の特徴を知るために、世界各地での基準雨量と比較しました。その結果が、図7と表1です。これらから、日本の基準雨量は世界の中でも小さく、比較的小さい雨量で土砂災害が発生しうることがわかりました。日本の国土は山地や丘陵が多くを占めます。また特に風化の進んだ花崗岩山地や火山地域は、小さい雨量でも土砂災害が発生しやすい場所です。このような日本の地形と地質的な条件も反映して、日本は世界の中でも、降雨に伴う土砂災害が発生しやすい地域と言えます。

引用文献 (url に関しては2023年2月参照確認)

飯田智之 2012. 『技術者に必要な斜面崩壊の知識』 鹿島出版会.

岡田憲治・牧原康隆・新保明彦・永田和彦・国次雅司・斉藤 清 2001. 土壌雨量指数. 天気 48 : 349-356.

気象庁 (2021a) 解析雨量. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kaiseki.html> (2022年3月22日アクセス)

気象庁 (2021b) 土壌雨量指数. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/dojoshisu.html> (2022年3月22日アクセス)

気象庁 (2021c) 土砂災害警戒情報. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/doshakeikai.html> (2022年3月22日アクセス)

気象庁統計課 1960. 「ひと雨」のとり方について. 測候時報 27:116-124.

齋藤 仁 2021. 第13章 豪雨に伴う土砂災害. 松山 洋・増田耕一編『大気と水の循環のはなし』, 朝倉書店.

地盤工学会 2006. 『豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度評価』 地盤工学会.

Caine, N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography 62: 23-27.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. and Stark, C. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. Landslides 5: 3-17.

Onodera, T., Yoshinaka, R. and Kazama, H. 1974. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan. Journal of the Japan Society of Engineering Geology 15: 191-200.

Saito, H., Nakayama, D. and Matsuyama, H. 2010. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration threshold in Japan. Geomorphology 118: 167-175.

Saito, H., Korup, O., Uchida, T., Hayashi, S. and Oguchi, T. 2014. Rainfall conditions, typhoon frequency, and contemporary landslide erosion in Japan. Geology 42: 999-1002.

図表のページ

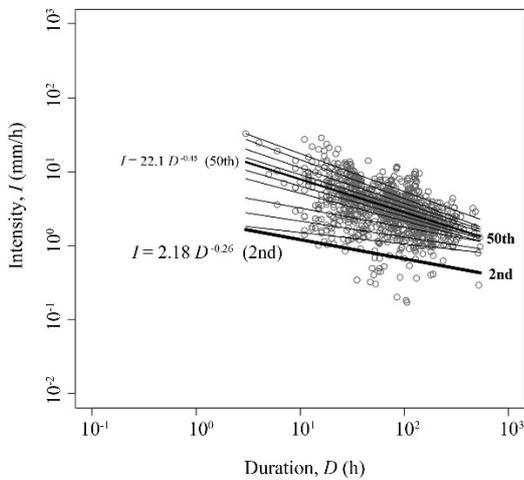


図6 日本全国で2006年～2008年の間に発生した1174件土砂災害事例から計算した平均雨量強度(I , mm/h)－降雨継続時間(D , h)との関係。実線は分位点回帰と呼ばれる分析による、下から2%、5%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%分位点における回帰直線。グラフは両対数で示している (Saito et al. 2010 より引用)。

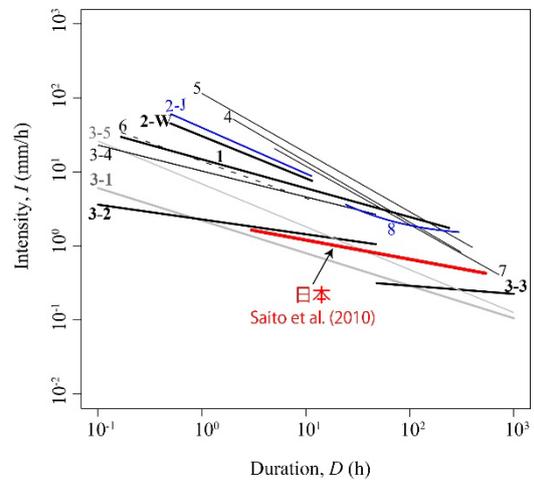


図7 日本と世界での土砂災害の基準雨量の比較。日本の基準線は、図6の2%回帰直線である。各実線の番号は表1と対応する。グラフは図6と同様で、両対数グラフで示している (Saito et al. 2010 を編集)。

表1 平均雨量強度 (mm/h)－降雨継続時間 (h) を用いた基準雨量に関する研究の比較 (Saito et al. 2010; 齋藤 2021 を編集)。

文献	地域	回帰直線	降雨継続時間 (h)	図7中の番号
Caine (1980)	世界	$I = 14.82 D^{-0.39}$	$0.167 < D < 240$	1
Jibson (1989)	世界	$I = 30.53 D^{-0.57}$	$0.5 < D < 12$	2-W
Guzzetti et al. (2008)	世界	$I = 2.20 D^{-0.44}$	$0.1 < D < 1000$	3-1
	世界	$I = 2.28 D^{-0.20}$	$0.1 < D < 48$	3-2
	世界	$I = 0.48 D^{-0.11}$	$48 \leq D < 1000$	3-3
Guzzetti et al. (2008)	Cfa	$I = 10.30 D^{-0.35}$	$0.1 < D < 48$	3-4
	Cfa	$I = 6.90 D^{-0.58}$	$0.1 < D < 1000$	3-5
Larsen and Simon (1993)	プエルトリコ	$I = 91.46 D^{-0.82}$	$2 < D < 312$	4
Chien-Yuan et al. (2005)	台湾	$I = 115.47 D^{-0.80}$	$1 < D < 400$	5
Cannon et al. (2008)	南カリフォルニア	$I = 14.0 D^{-0.5}$	$0.167 < D < 12$	6
Dahal and Hasegawa (2008)	ネパール ヒマラヤ	$I = 73.90 D^{-0.79}$	$5 < D < 720$	7
Jibson (1989)	日本 (一部事例)	$I = 39.71 D^{-0.62}$	$0.5 < D < 12$	2-J
Hong et al. (2005)	四国 (日本)	$I = 1.35 + 55 D^{-1.00}$	$24 < D < 300$	8
本研究	日本	$I = 2.18 D^{-0.26}$	$3 < D < 537$	

Cfa はケッペンの気候区分の温暖湿潤気候である。