

豪雨に対する森林の 防災・減災機能の閾値について

しゅういん やすひろ

執印 康裕

九州大学 農学研究院 教授
(一財)砂防・地すべり技術センター 理事

1. はじめに

閾値 (threshold) という言葉に最近少しばかり興味を惹かれているので、これについて思うところを簡単に述べてみたい。この言葉は様々な学術分野 (例えば理学、工学、医学、化学、社会学、心理学等) でも使われており、その定義を明確に述べるのは難しい。ここでは『何かを引き起こすのに必要な値または基準線、これを超えると時と場合によっては、何かだけでなく、それを包摂する周囲のシステム全体に不可逆的な大きな変化をもたらす。』と定義する。この定義による『何か』とはそれを対象とする主体により様々である。身近な例としては、主体が個人の場合、原稿 (あるいは仕事や納期) のメ切や試験等の合否ラインかもしれない。そして主体が個々の人々から構成される社会の場合、気候変動は当然のこととして、社会制度の構造改革そして戦争や病原菌によるパンデミック等の事象もある閾値を超えた結果として生じたものであり、全世界の社会・経済システム全体に極めて大きな変化を与えていることは周知のとおりである。このように閾値は我々に色々と考える契機を与えてくれる言葉であるが、これ以上述べるのは本稿の主旨からずれるので、この辺りに留めておきたい。ただ私がとくに興味深く思うところは、閾値そのものは値が固定されているわけではなく主に社会・経済状況および自然環境の変化に付随して人為の有無を含めて変化する性質を強く有している点にあり、かつ最初の変化自体は気づかない事が多いが、それが累積した結果、ある時点を境にいきなり個人そして個々人から構成される社会システム全体に重大な変化を与えているように見えることである。

そろそろ本題に戻るが、読者のほとんどの方が取り組まれている豪雨による土砂災害対策において、気候変動が閾値の変化に与える影響は当然ながら、社会・経済活動 (人々の生活) に応じた人間活動が閾値の変化に与える影響への視点が重要であることは述べるまでもない。そして森林は人間活動の影響を受けやすい要素の一つである。したがって森林の防災・減災機能

の閾値 (以降の文章中では単に「森林閾値」と称する) が人間活動によってどのように変化したかについて本稿で簡単に触れることも一定程度の意義があるのかもしれない。

2. 日本の森林と水害による死者・行方不明者数の変化に基づく森林閾値について

日本の森林は過去から現在まで大きく変貌している。これをベースに、太平洋戦争後の約 50 年から 70 年程度の時間スケールにおける日本の森林と水害による死者・行方不明者数の変化について述べる (図-1、2 参照)。図-1 (a1)、(b1) に治山事業による岡山県玉野市の 1950 年頃および 2012 年の森林状態を、図-1 (a2)、(b2) に 1983 年および 2017 年の豪雨により人工林内で発生した表層崩壊の状況を示す。図-1 (a1)、(b1) からは 1950 年頃の森林は植生に乏しい荒廃森林であったのに対し、その後の治山事業により 2012 年には成熟林へと変化していること、図-1 (a2)、(b2) からは 1983 年では皆伐地を中心に発生していた表層崩壊が 2017 年では人工林内を中心に発生していることがわかる。この 2017 年の表層崩壊の多くは林齢 50 年生以上の成熟したスギ・ヒノキ林で発生したことが報告されている (例えば、浅田ら、2020)。なお図-1 に示した事例は日本全国の森林状況を反映したものである。この点について、日本全国の森林蓄積と水害による死者・行方不明者数の推移および両者の関係を図-2 に示す。図-2 の死者・行方不明者数は国土交通省 (2023) による 1946 年から 2023 年までの 78 年間のデータを、森林蓄積の推移は林野庁 (2017) による 1966 年から 2017 年までの 52 年間のデータを基にしている。図-2 (a) より 1950 年代には水害による死者・行方不明者数は数千人規模であったのに対し、その後の森林蓄積の増大に従って 10 のべき乗スケールで減少傾向にあることが分かる。図-1 (a1)、(b1) に示した森林の変化の一事例が日本全体の状況を反映していることを示唆している。また図

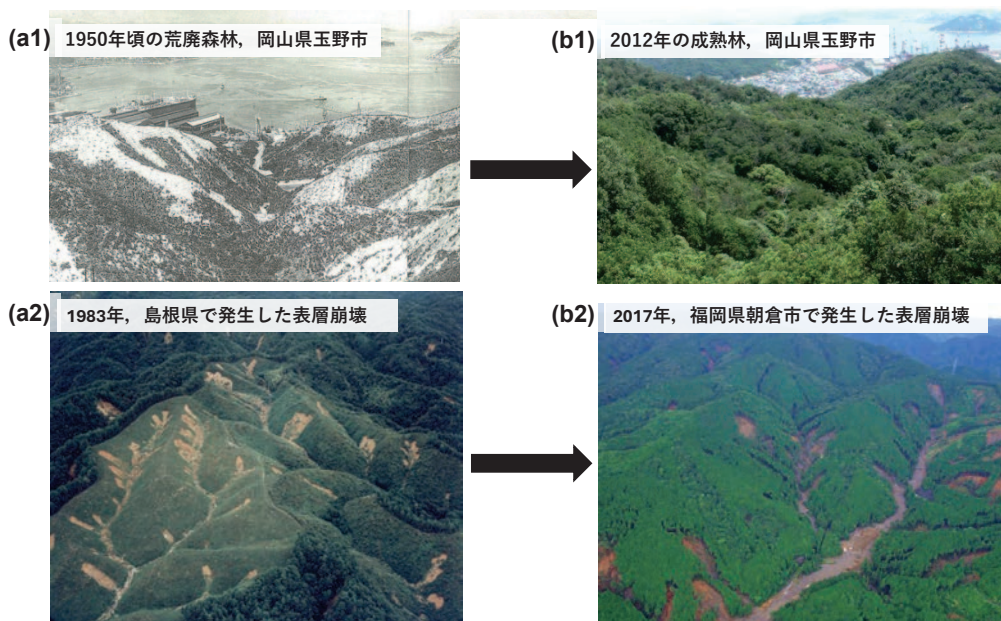


図-1 日本における森林植生および山腹崩壊の変化事例
 (a1 → b1) 治山事業による森林の変化。岡山県玉野市 (林野庁, 2013)。(a2 → b2) 山腹崩壊の変化。(a2) 1983年7月豪雨により人工林皆伐地を中心に発生した表層崩壊 (林野庁, 2023)。(b2) 2017年7月九州北部豪雨により林齢50年生以上の人工林で発生した表層崩壊 (黒川, 2019)。

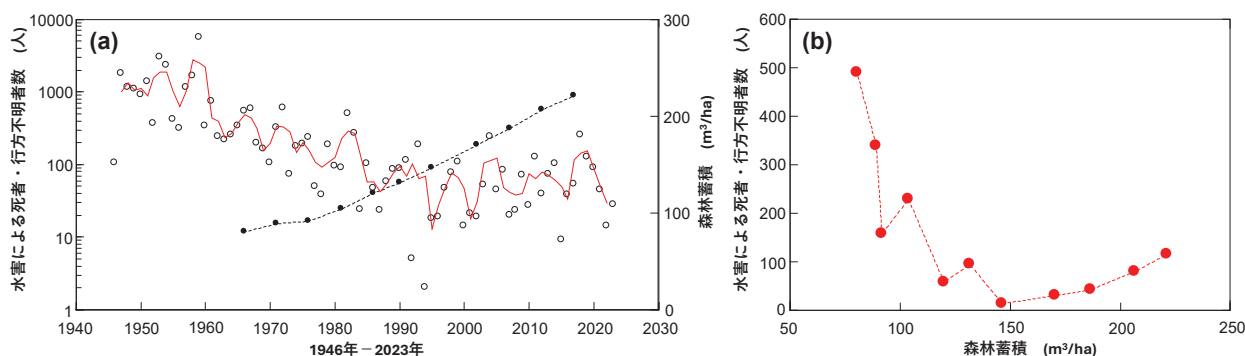


図-2 日本全国の森林蓄積と水害による死者・行方不明者数の推移および両者の関係
 (a) 森林蓄積と死者・行方不明者数の推移。白丸および赤実線は各年の死者・行方不明者数と3年移動平均を、黒丸は1966年から2017年までの森林蓄積を各々示す。(b) 森林蓄積と死者・行方不明者数の3年移動平均の関係。

-2 (b) より森林蓄積の増加とともに水害による死者・行方不明者数は減少するものの、森林蓄積が約120~150 (m³/ha) を境に定常に近い状態に推移していることがわかる。これはもちろん森林蓄積の変化だけでなく堤防や砂防えん堤等による基盤整備が進められてきたこと、そして警戒・避難等の防災対策が進められたことも当然ながら影響している。ただし図-2に示す結果は、森林関係者ならびに防災関係者は勿論、それ以外の多くの人々が直観的に認識している森林閾値が存在すること、そして森林閾値が森林状態の定量的指標の一つである森林蓄積に応じて変化している事を意味する。

次に図-1および図-2によって示された森林閾値の基本概念について述べる (図-3参照)。横軸に時間スケールを、左側縦軸および右側縦軸に水害を発生させた降雨外力ならびに森林の防災・減災機能をとった概念図を図-3に示す。なお図-3における横軸の時

間スケールは図-2 (a) の時間スケールに、右側縦軸に示す森林の防災・減災機能は同じく図-2 (a) の森林蓄積の変化にそれぞれ対応させて描いたつもりである。本図の意味は以下の3点に要約される。
 (1) 森林の防災・減災機能が低い場合は、容易に降雨外力が森林閾値を超えるため災害は頻発する傾向

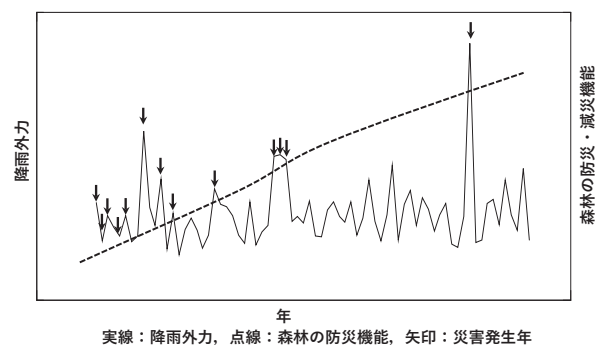


図-3 降雨外力と森林の防災・減災機能の関係に基づいた基本概念

を示すこと。

- (2) 森林閾値が増加するにつれて発生頻度は減少傾向を示すものの、森林閾値には限界が存在するため発生頻度は0にならないこと。
- (3) 災害規模は対象地域に作用する豪雨外力とその地域の森林閾値との関係によって規定される構造を有することが、本図を図-2 (a) と合わせてみると容易に理解できること。

すなわち、災害発生前後の時間帯のどこかに存在する降雨外力が森林閾値であり、言い方を変えれば森林状態の変化に対応した森林の防災・減災機能の限界値ということになる。この誰にでも容易に理解できる基本概念を用いて森林状態の変化に応じた森林閾値について簡単に検討した事例について次章以降で紹介する。

3. 森林状態の変化に応じた森林閾値の検討事例（東京都伊豆大島を対象として）

対象地の概況

対象地の概況について述べる（図-4、5 参照）。伊豆大島は東京の南西約 120km、伊豆半島の東、北西



図-4 2013年10月台風 Wipha により伊豆大島で発生した山地災害（2013年10月16日撮影アジア航測株式会社）

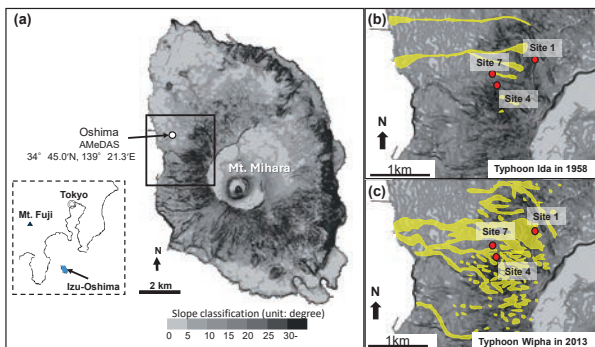


図-5 伊豆大島の概略ならびに1958年、2013年の台風により生じた表層崩壊、土石流による土砂移動範囲（黄色網掛け部分）(a)位置、地形の概略。(b)1958年土砂移動範囲（気象庁、1964）。(c)2013年土砂移動範囲（国土地理院、2013）。(b,c)赤丸：2013年崩壊地周辺の樹木バイオマス量調査地点（伊藤ら、2016）。

太平洋に位置し、頂上カルデラ内に活火山である中央峰（三原山）を持つ玄武岩質の成層火山である。本島の元町地区において2013年10月台風26号（Typhoon Wipha）の豪雨を誘因として発生した表層崩壊・土石流により甚大な土砂災害が発生した（伊豆大島土砂災害対策検討委員会、2014）。図-4に災害発生直後の空中斜め写真を示す。一般に降雨を誘因とする山地における表層崩壊は谷筋の集水地形が明瞭な箇所を中心に発生することが知られているが、図-4からは集水地形が明瞭でない箇所においても、山腹斜面上部の広範囲にわたって崩壊が発生していることがわかる。同地区は2013年10月以外にも1958年9月狩野川台風（Typhoon Ida）の豪雨による土砂災害が発生している（気象庁、1964）。図-5に伊豆大島の概略ならびに1958年、2013年の台風により生じた表層崩壊・土石流の土砂移動範囲を示す。図-5 (b)、(c)は図-5 (a)に示した矩形範囲に対応する両台風による土砂移動範囲を示したものである。本図より1958年の土砂移動範囲は2013年のものと比較して小規模であり、かつ谷筋の集水地形が明瞭な箇所で開催していることがわかる。

1958年から2013年までの森林植生の変化

1958年から2013年までの森林植生の変化について述べる（図-6 参照）。1976年から2013年までの森林植生の変化については3か所の崩壊地周辺における樹木バイオマス量調査から推定されている（伊藤ら、2016：大丸、2016）。なお調査地点の位置概略については図-5 (b)、(c)を参照されたい。これを基に推定した1958年から2013年までの森林植生の変化を図-6に示す。本図において1976年、2013年の樹木バイオマス量（樹木の地上部と地下部の根系の合計生重量）は3調査地点の幾何平均から算出し、1958年の値は両年の外挿により推定している。図-6から1958年から2013年にかけて単位面積あたりの樹木バイオマス量

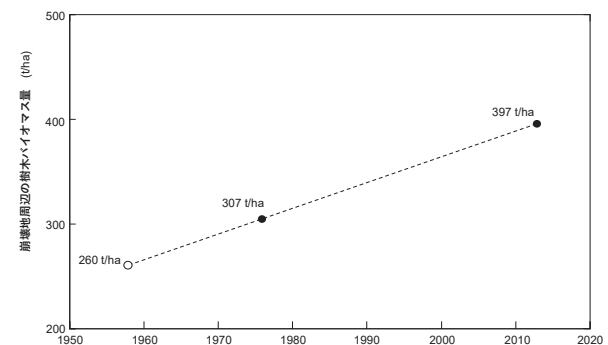


図-6 1958年、1976年および2013年の推定値による崩壊地周辺の樹木バイオマス量の1958年から2013年までの経年変化。2013年および1976年の値は伊藤ら（2016）による3調査地点（図-5 参照）の幾何平均値。1958年の値は1976年および2013年の外挿により推定。

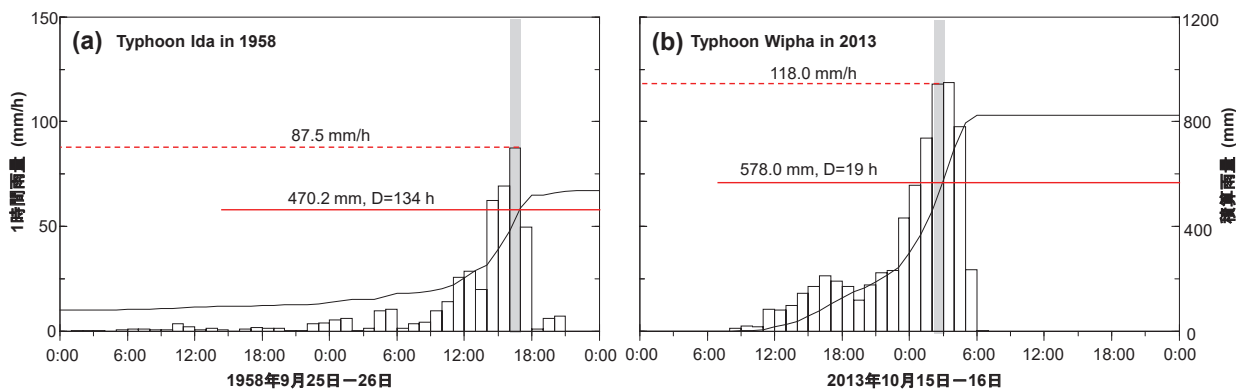


図-7 1958年、2013年の台風による1時間単位の降雨時系列変化 (a)台風 Ida。(b)台風 Wipha。灰色網掛け部分は災害発生時間帯を、赤点線および赤実線は災害発生時間帯における1時間雨量、災害発生終了時の積算イベント雨量を、数値は積算雨量およびその時点までの降雨継続時間(D)を各々示す。なお降雨イベントは24時間無降雨により区分。

(t/ha) が260から397と約50%増加していることがわかる。

両台風における災害発生時間帯ならびに降雨特性

両台風における災害発生時間帯と降雨特性について述べる(図-7, 8参照)。使用した降水データは1950年から2023年までの気象庁所管の大島特別地域気象観測所の前1時間降水量である。図-7に1958年、2013年の台風による2日間の災害発生時間帯を含む1時間単位の降雨時系列変化を示す。本図における灰色網掛け部分は、災害発生時間帯を1時間の範囲で示している。この図で示す災害発生時間帯は1958年が日本経済新聞2013年11月2日のオンライン版に記載された記事を、2013年がOgiso and Yomogida (2015)による島内に複数設置されている地震計の解析結果を基にしている。その結果1958年が9月26日の16時から17時、2013年が10月16日の2時から3時であることを確認している。またその時間帯における1時間雨量を水平赤点線で、災害発生時間帯最終時刻の積算雨量を水平赤実線で各々示している。水平赤実線の上に記載されているDは降雨イベント開始時刻から災害発生時間帯最終時刻までの降雨継続時間を示す。なお積算雨量の算出には降雨イベントで区分する必要があるが、ここでは一般的に使用されることの多い24時間連続無降雨期間によって区分している。本図から災害発生時間帯の1時間雨量および最終時刻までの積算雨量が、1958年が87.5mm/h、470.2mm、2013年が118.0mm/h、578.0mmとなっていることがわかる。伊豆大島における1991年から2020年までの9月および10月の月雨量の平年値はそれぞれ341.3mm、405.2mmであり(気象庁、2025)、両年とも災害発生時刻までの積算雨量が月平年値を超える記録破りの豪雨であったことが分かる。

次に両台風の降雨特性について述べる(図-8参照)。降雨特性については世界で広く使われている降雨継続

時間D(h)と平均降雨強度I(mm/h)もしくは積算降水量Eの関係による経験的手法により示す。降雨継続時間と平均降雨強度の関係(以降は「I-D」と称する)については古くから研究されてきているが、Caine(1980)は世界中の73の地域で報告されたデータをもとに表層崩壊・土石流を発生させる降雨閾値の世界基準の下限值が以下の式(1)で経験的に示されることを世界で初めて提示した。

$$I = 14.82 \times D^{-0.39} \quad (0.167 < D < 240) \dots (1)$$

ただしDは降雨イベントの継続時間(h)、Iは平均降雨強度(mm/h)である。

Caine(1980)が示したこの先駆的な研究以来、これをベースとする様々な評価法が世界中で提案されてきており、本稿でもこれを使用することとする。図-8に図-7に示す両台風におけるI-Dによる降雨継続時間と平均降雨強度のプロットをCaine(1980)が提示した(1)式および73のプロットと合わせて示す。本図から、2013年の降雨特性(D=19h、I=27.3mm/h)が下限ラインを大きく超える位置にプロットされているのに対して、1958年の降雨特性(D=134h、I=3.2mm/h)は2013年と比較すると下限ラインに近い位置にプロットされていることが分かる。Caine(1980)はこの

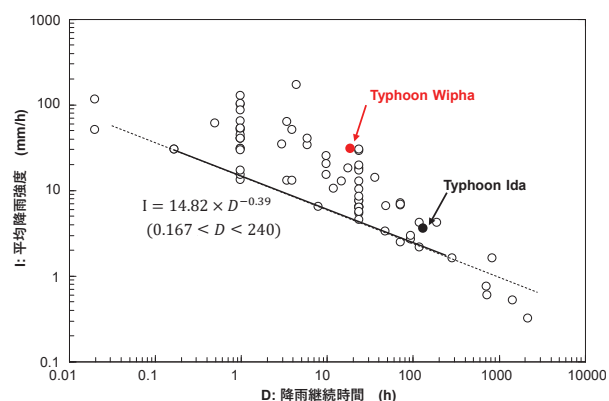


図-8 1958年、2013年の台風における降雨継続時間-平均降雨強度関係および表層崩壊・土石流の世界基準閾値(Caine,1980)白丸、黒丸および赤丸はCaine(1980)の73の降雨イベント、台風 Ida、台風 Wipha を各々示す。

点について、降雨継続時間が短くなりすぎても、長くなりすぎても下限ラインとの適合が悪くなることを指摘している。実際に Caine (1980) が解析に使用した 73 事例の D の範囲は 0.02 時間から 2208 時間までの範囲であり、そのうち 0.17 時間 (10 分) から 240 時間 (10 日間) の範囲では比較的適合度が高いことを踏まえた上で (1) 式を提示している。1958 年と 2013 年の降雨特性の違いの一つにはこの点に関与していると推察されるものの、両台風とも下限ラインを超えており世界中で幅広く使用されている I-D を用いた降雨特性の経験的評価法の信頼性を大きく損なうものではないであろう。

森林閾値に対応した降雨外力の評価

森林閾値に対応した降雨外力の評価について述べる。最初に降雨外力の評価法について説明する。使用した評価法は以下に示す 2 つの手法を使用した (図-9 参照)。

(手法 1) I-D による経験的手法

(手法 2) 日本の土砂災害警戒情報で適用されている土壌雨量指数の一部を使用した手法

である。(手法 1) については、すでに記述済であるので説明は割愛し、ここでは (手法 2) について記述する。土壌雨量指数 (以降は「SWI」と称す) は本誌読者の多くの方にとって馴染み深いものではあるが、SWI が示す中身の再確認の意味も含めて記述する。SWI の原型は Sugawara (1961) によって提案された直列タンクモデルを用いた降雨流出解析モデルであり、現在 SWI として使用されているのは Ishihara and Kobatake (1979) により提示されたものである。タンクモデルは一般に概念モデル (あるいは応答モデル) と最近では認識されることも多いが、降雨の土層への浸透 - 河川への流出における各プロセスを考慮に入れており、概念モデルよりも寧ろ Process-based hydrological model と認識するのが相応しい。

図-9 にタンクモデルによる降雨 - 流出過程の基本フレームと現在 SWI として使用されている Ishihara and Kobatake (1979) によるモデル化ならびに計算結果の概念図を示す。なお図-9 (a) に示す各流出過程の基本フレームの概念はあくまでイメージでありそこで使われている流出のタームが必ずしも文字通りの意味でないことは断っておく。しかしながら図-9 には表層から深くなるほど各層の貯留高 (地下水位に相当) が降雨に対して遅れて反応することが示されている (図-9(c) 参照)。このことは降雨の土層への浸透プロセスにおける各層の地下水位変化が反映されていることを明確に示す。これはタンクモデルの直列構造によるものである。SWI 自体は各層のタンクにおける貯留高の合計値を土層中に浸透した降雨量と見做して使用されているが、表層崩壊を対象にしていること、1 段目タンク貯留高が森林植生の違いが表層崩壊の発生タイミングに与える影響を評価する上で一定程度の妥当性を有することが Sato, et al. (2023) によって提示されていることから 1 段目のタンク貯留高 (以降は「 S_1 」と称する) の値を使用する。なお S_1 の値は 1950 年 1 月 1 日 0 時を起点に 2023 年 12 月 31 日 24 時までの期間を気象庁所管の大島特別地域気象観測所の前 1 時間降水量データを使用して計算した。なお計算の際には、I-D と異なり各降雨イベントに区分することなく連続して計算している。

森林閾値に対応する降雨外力の定義について述べる。『災害発生前後の時間帯のどこかに存在する降雨外力が森林閾値であり、言い方を変えれば森林状態の変化に対応した森林の防災・減災機能の限界値ということになる。』と前述したが、両台風の災害発生時間帯が 1 時間の幅で特定されていることから、最初の時刻と 1 時間後の時刻における降雨外力の平均を森林閾値に対応する降雨外力として定義した。例えば 2013 年の場合は 10 月 16 日 2 時から 3 時の間で崩壊・土石流が発生していることから、10 月 16 日 2 時と 3 時の S_1 もしくは継続時間 D に対応した各値の平均値が森林閾

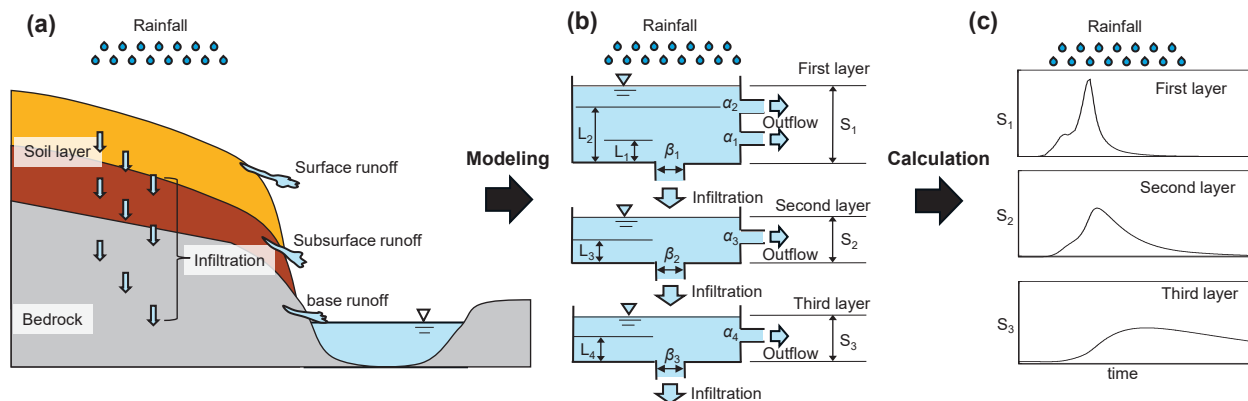


図-9 降雨 - 流出過程の基本フレームとモデル化ならびに計算結果の概念図
(a) 基本フレームの概念図。(b) 3 段直列タンクによるモデル化 (Ishihara and Kobatake, 1979)。(c) 各タンクにおける貯留高の計算結果概念図。

値として定義される。

以上の定義による森林閾値の評価は次の2つによって行った(図-10、11および表-1参照)。

(評価1) 1958年と2013年の両台風における台風期間を対象とした短期間における評価

(評価2) 1950年から2023年までの74年間を対象とした長期間における評価

の2つである。

また(評価2)においてはLモーメント法による

一般化極値分布を適用して確率年による評価も実施した。はじめに(評価1)による結果を図-10に示す。本図が示す短期間(1958年9月25日-26日と2013年10月15日-16日の2日間)における森林閾値は1958年から2013年にかけてI-Dによる平均降雨強度が3.2mm/h(D=134h)から27.3mm/h(D=19h)へ、 S_1 が157.9mmから205.7mmへと増加していると評価される。なおD=134hと2日間の対応および森林閾値の算出の具体については末尾に補足を付したので必要

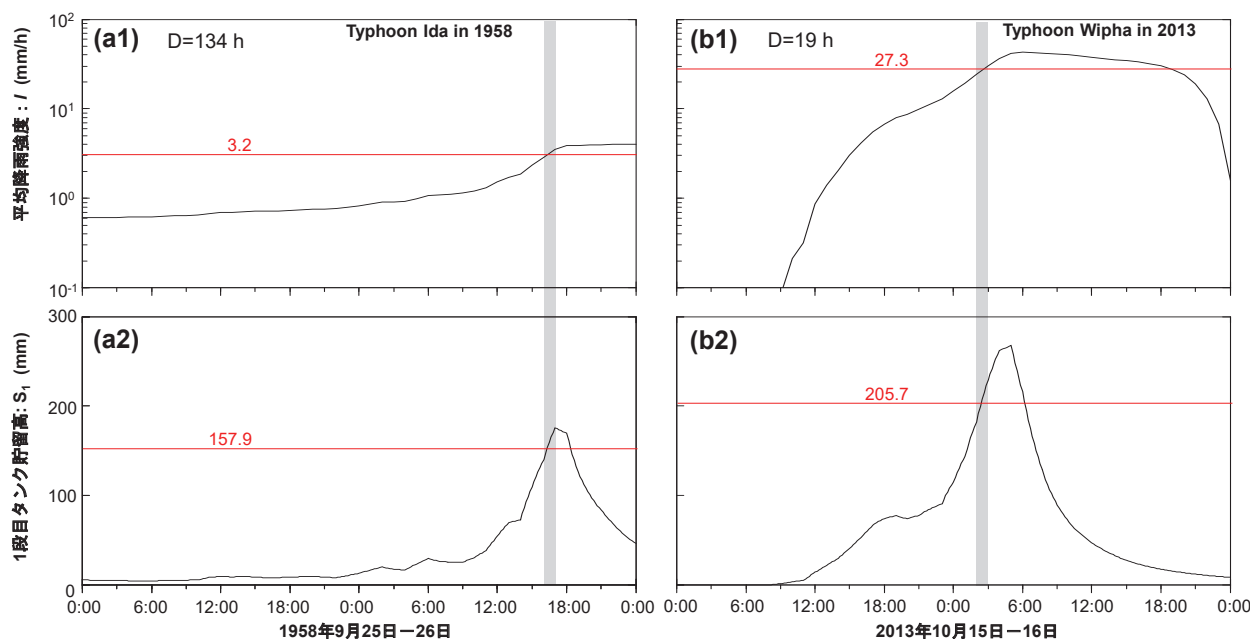


図-10 1958年、2013年の台風期間におけるI-Dと S_1 の時間変化および森林閾値
(a1, b1) 継続時間134時間および19時間の平均降雨強度の時間変化。(a2, b2) 1段目タンク貯留高 S_1 の時間変化。図中の灰色網掛け部分は災害発生時間帯を、赤実線および赤数字は森林閾値ラインおよびその値を各々示す。

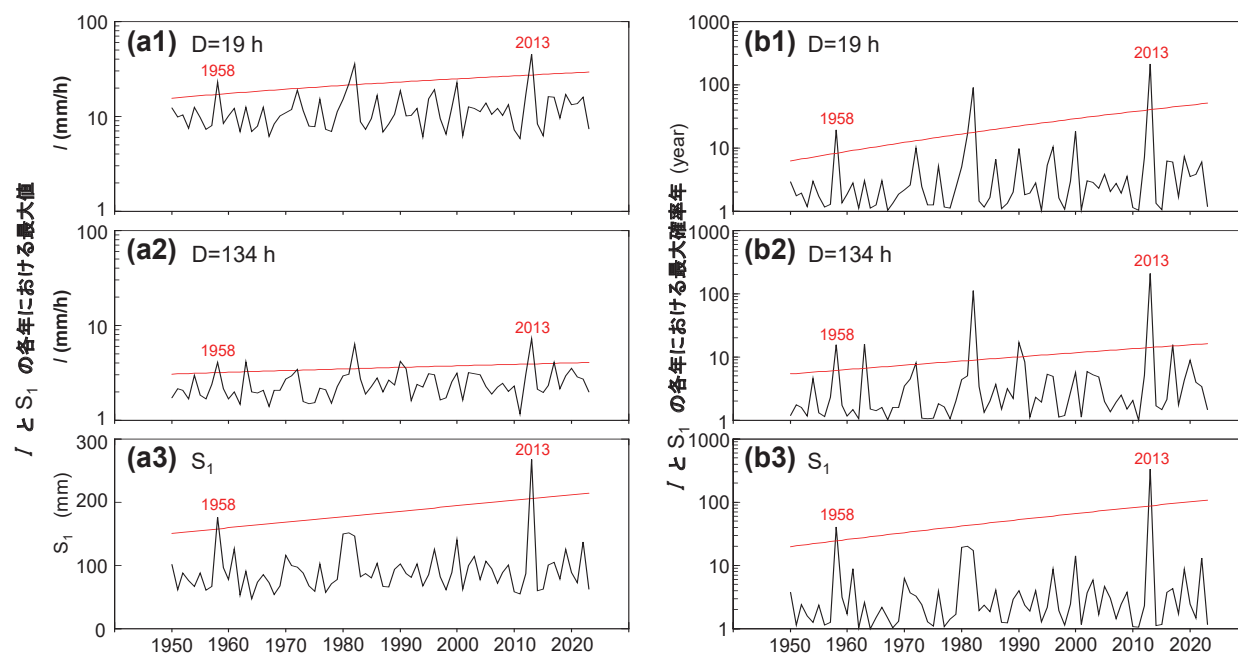


図-11 1950年から2023年までの平均降雨強度、1段目タンクの貯留高の各年最大値と森林閾値の変化
図の上段から順に、D=19時間の平均降雨強度、D=134時間の平均降雨強度、1段目タンクの貯留高の変化を示している。a1-3およびb1-3の黒実線は年最大の値および確率年を、そしてa1-3、b1-3の赤実線は森林閾値の候補を各々示す。なお図中の赤数字は災害発生年を示す。

表-1 1958年と2013年の崩壊地周辺の樹木バイオマス量に対応した森林閾値の変化

降雨外力	森林閾値 (Threshold)			
	降雨強度 (mm/h)および1段目タンク貯留高(mm)		確率年 (years)	
	1958年	2013年	1958年	2013年
降雨強度 (D=19h)	17.9	27.3	8.3	40.4
降雨強度 (D=134h)	3.2	3.9	6.2	14.1
1段目タンク貯留高(S ₁)	157.9	205.7	24.4	87.5
樹木バイオマス量(t/ha)	260	397	260	397

に応じて参照されたい。この森林閾値の変化は、[図-6](#)に示した1958年から2013年にかけての樹木バイオマス量の増加に対応していると考えられる。次に(評価2)による1950年から2023年までの結果を[図-11](#)に示す。なお(評価2)においては森林閾値と樹木バイオマス量は線形関係を示すとの仮定を置いている。本図からI-Dによる評価の場合、樹木バイオマス量による森林閾値の増加を考慮したとしても、降雨外力が閾値を大きく上回る年が存在することがわかる([図-11 \(a1\)、\(a2\)、\(b1\)、\(b2\)](#))。ちなみに降雨外力が閾値を大きく上回った年は1982年であるが、同年に1958年および2013年規模の土砂災害は発生していない。その一方で1段目タンク貯留高のS₁による森林閾値を降雨外力が超えた年は災害発生の1958年と2013年の2か年のみであることがわかる([図-11 \(a3\)、\(b3\)](#))。つまり2つの評価法を比較するとS₁による評価の方がI-Dと比べて整合性のある結果を示している。ただしI-Dによる評価では各降雨イベントにおける初期水分条件の違いを把握することの重要性が従来から指摘されているにも関わらず(例えばSidle and Ochiai, 2006)、本稿における検討では、これを考慮に入れずに行っていることに原因があるのかもしれない。S₁の場合は1950年から2023年まで74年間連続して計算したことにより、初期水分条件の違いを特に意識することなく考慮にいられたことでI-Dと比較して整合性のある説明が可能になったのかもしれない。検討事例の最後としてまとめたものを[表-1](#)に示す。本表は崩壊地周辺の樹木バイオマス量に対応した森林閾値を示したものである。矛盾なく全期間をとおして整合性のある解釈が可能なS₁においては1958年から2013年までの樹木バイオマス量の変化に対応して、貯留高および確率年による森林閾値が157.9mmから205.7mm、24.4年から87.5年とそれぞれ増加していることがわかる。以上のことは樹木バイオマス量の増大に伴い崩壊を引き起こすのに必要な雨量が増加していることを示す。このことは森林閾値を大きく超える豪雨外力によって崩壊が発生すると樹木バイオマス量が低い状態と比較して多量の水分および流木を含んだ土砂流出等によって被害が拡大することも意味して

いる。近年では土砂・洪水氾濫、あるいは流木災害という現象が顕在化しているように感覚として認識しているが、ここで示した結果(特に[図-11 \(a3\)、\(b3\)](#))は、[図-2 \(b\)](#)で示した『森林蓄積と水害による死者・行方不明者数の関係』と対応しているのかもしれない。

4. おわりに

閾値に関連して思いついたことを記述してきたわけであるが、やはり自分の中では興味深い言葉であると再度確認した次第である。特に防災に関わる多くの読者にとって災害リスクを評価することは極めて重要な事である。だからこそ、閾値という視点から災害リスクについて考えてみることは意義があると信じたい。そして『評価』という言葉であるが、どんな対象であっても(特に「定量的評価」の場合は)、共通の物差しが必須であろう。その意味において、対象場の植生・地形・地質・気象特性等の多くの要素を考慮した丁寧な評価も大事ではあるが、その一方でどこにでも使用できる一般的かつできるだけ簡便な物差しが必要であると信じている。本稿で示した手法がこれに該当するかは読者の判断に委ねるが、複雑で込み入った操作は全く行っていないし、最先端(State of the Art)とされる生成AI等の道具もここでは使用していない。なお文章中に『誰にとっても理解しやすい云々』等の表現が散見されるが、これは敢えてそのようにしている。なぜならば、防災は専門家だけの問題ではなく、災害リスクがある地域に暮らす全ての人々にとって切実な問題であるからである。つまり多くの人にとって理解するのが困難な手法等によって災害リスクを説明するのは避けるべき事であると信じている。もちろん私の文章が理解しづらいかもかもしれないが、できる限り簡単に記述したつもりである。加えて学術論文として特に大事なことは、誰もがもともとなるデータにアクセスでき、それによる再検証が誰でも簡単に実施できるということである。本稿は学術論文という性質のものではないが、この点も意識して記述している。本稿で使用したデータは全て公開されている。

なお本稿のページ数は2-3頁程度ということであっ

たが、結果としてその閾値を大幅に超えてしまったことは申し訳なく考えている。言い訳には全くならないが閾値を知る（あるいは知った）ものが閾値に適応し、それを超えることができるのであろうとも思う（私が全然適応できていないことは本稿のページ数を超えていることから明らかである）。もっとも自分の意思に関係なく自然に超えてしまう閾値も存在するのと同時に超えてはいけない閾値も存在するのは多くの方が経験的に知るところである。それはさておき、本稿の内容が本誌読者にとって多少なりとも何らかの考えるキッカケにでもなれば幸いである。

【補足：1958年9月25日-26日の2日間と継続時間D=134hの対応関係ならびに森林閾値の算出について】1958年の台風期間にI-Dを適用すると降雨開始時刻（9月21日3時）から133時間-134時間後（9月26日16時-17時）の1時間の間に崩壊が発生している。これにより継続時間Dは134時間となる。9月26日16時における134時間前からの積算雨量は382.7 mm、9月26日17時の134時間前からの積算雨量は470.2 mmであり、両時刻の平均積算雨量は426.5 mmとなる。森林閾値の平均降雨強度はこの平均積算雨量を継続時間Dの134時間で除することにより、3.2 mm/hとして算出される。

参考文献

浅田寛喜、皆川朋子、小山彰彦、一柳英隆 (2020)、平成29年7月九州北部豪雨による斜面における表層崩壊の要因分析、応用生態工学、23 (1)、p.185-196、<https://doi.org/10.3825/ece.23.185>

Caine, N. (1980) . The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62 (1-2), 23-27, <https://doi.org/10.1080/04353676.1980.11879996>

大丸裕武 (2016)、写真測量による伊豆大島三原山北西斜面における近年の植生高変化の復元、森林総合研究所研究報告、15巻1-2号、p.49-57、https://doi.org/10.20756/ffpri.15.1-2_49

Ishihara, Y., and Kobatake, S. (1979) , Runoff Model for Flood Forecasting, *Bull. Disas. Prey. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 29, Part 1. No. 260, July, 1979, <http://hdl.handle.net/2433/124881>

伊東宏樹、松井哲哉、飛田博順、五十嵐哲也、小川明穂、松本陽次郎 (2016)、伊豆大島2013年10月16日斜面崩壊発生地点周辺の樹木の現存量、森林総合研究所研究報告、15巻1-2号、p.21-30、https://doi.org/10.20756/ffpri.15.1-2_21

伊豆大島土砂災害対策検討委員会 (2014)、伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書、<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/kensetsu/000006697>、2025年7月10日アクセス

気象庁 (1964)、狩野川台風調査報告、気象庁技術報告第37号、pp.168、<https://dl.ndl.go.jp/pid/3204702>

気象庁 (2025)、過去の気象データ検索、https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php?prec_no=44&block_no=47675&year=&month=&day=&view=、2023年8月1日アクセス

国土地理院 (2013)、平成25年(2013年)台風26号および台風27号による大雨に関する情報、<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h25-taihu26-index.html>、2018年7月4日アクセス

国土交通省 (2023)、明治以降の水害被害額等の推移、https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=daset&data=1&metadata=1&toukei=00600590&query=%E6%98%8E%E6%B2%BB%E4%BB%A5%E9%99%8D%E3%81%AE&stat_infid=000040302510、2025年9月13日アクセス

黒川 潮 (2019)、平成29年7月九州北部豪雨による林地被害状況、九州森林研究、No.72、p.137-140、<https://jfs-q.jp/kfr/72/p137-140.pdf>

日本経済新聞 (2013)、伊豆大島「将来の憂いなきよう」55年前、土石流を記録、https://www.nikkei.com/article/DGXNASDG0200W_S3A101C1CR0000/、2013年12月4日アクセス

Ogiso, M., and Yomogida, K. (2015)、Estimation of locations and migration of debris flows on Izu-Oshima Island, Japan, on 16 October 2013 by the distribution of high frequency seismic amplitudes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 298, p.15-26, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.015>

林野庁 (2013)、岡山県玉野市における「はげ山」森林復旧、<https://www.rinya.maff.go.jp/form/pdf/k46.pdf>

林野庁 (2017)、森林資源の現況、<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/attach/pdf/2-1.pdf>

林野庁 (2023)、森林の根系による表層崩壊防止機能について、<https://www.rinya.maff.go.jp/j/suigen/suigen/attach/pdf/index-24.pdf>

Sato, T., Katsuki, Y. & Shuin, Y. (2023) , Evaluation of influences of forest cover change on landslides by comparing rainfall-induced landslides in Japanese artificial forests with different ages. *Sci Rep* 13, 14258 (2023) , <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41539-x>

Sidle, R.C. and Ochiai, H. (2006) , Landslides Processes, Prediction, and Land Use, *Water Resources Monograph* 18, pp.312, American Geophysical Union, DOI:10.1029/WM018

Sugawara, M. (1961) , On the Analysis of Runoff Structures about Several Japanese Rivers, *Japanese Journal of Geophysics*, Vol. 2, No. 4, <https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I000000119210-i11864>