

# 気候変動で急増する 各国の森林火災と それに伴う斜面災害リスク

わか い あきひこ  
若井 明彦

群馬大学 大学院理工学府 教授



## 1. はじめに

地球温暖化による気候変動は、極端気象とともに土砂災害の頻発化を招くことが指摘されている。また、途上国を中心とした森林の急速な開発は、斜面の侵食や崩壊の防止に資する樹木根系の消失と土壌保水性能の低下をもたらし、斜面災害の増加に影響する。

一方、気候変動に伴う極度の干ばつによって、2018年の米国カリフォルニア州、2019年から2020年にかけてのオーストラリア南東部、2023年8月の米国ハワイ州マウイ島など、大規模な森林火災が各国で多発している。こうした火災被災地域に山地等が含まれる場合、火災による直接的な都市被害もさることながら、斜面災害のリスクをさらに高める可能性がある。

本稿では、森林火災を受けた傾斜地が斜面災害リスクを増大させる危険性を検討するために、大学院生らと取り組んできた最近の現地踏査事例として、オーストラリア南東部ビクトリア州における研究事例と、米国ハワイ州における研究事例を取り上げ、これらの知

見から推定できる森林火災と斜面災害との関連性について、地盤工学的な観点から簡単に考察したい。

## 2. 森林火災跡地の現地踏査および実験

### 2.1 オーストラリア南東部における研究事例

2015年にオーストラリア南東部ビクトリア州で発生した森林火災エリアから約5km離れた森林火災がこれまで発生していない非火災斜面において、縦20cm、横18cm、高さ20cmの不攪乱ブロックサンプル(図-1)を採取した。早坂(2010)により実際の森林火災の温度および継続時間がまとめられている。背の低い灌木類、草本類、林床のコケ類、落葉落枝などが燃えて生じる地表火では、最高温度が1000℃以下とされ、燃焼継続時間は数分程度である。地表火が発達し、樹木上方まで燃え広がる樹冠火では1000℃を上回り、数十分継続する。サンプリングした土の燃焼条件



図-1 ブロックサンプリング試料



図-2 実験に用いた加熱炉



(a) 採取直後



(b) 乾燥後



(c) 燃焼後

図-3 燃焼とともに変化するブロックサンプリング試料の様子

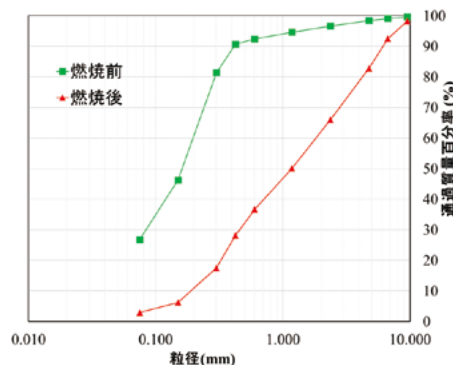
としては、安全のために110℃に維持した乾燥炉で試料を乾燥させてから、**図-2**の加熱炉を用いて1時間かけて800℃まで上昇させ、その後30分間温度を維持した。試料採取後、乾燥後、燃焼後の試料の様子を**図-3**に示す。燃焼させることにより試料内の鉱物が酸化し、赤みがかかる様子が観察された。

採取直後(**図-3(a)**)および燃焼後(**図-3(c)**)の試料を用いて一面せん断試験、粒度試験、METER社製携帯型ミニディスクインフィルトロメータを用いた変水位試験を実施した。一面せん断試験の結果を**表-1**に示す。なお、試験を行う際、供試体の含水比調整等をしておらず、得られたせん断強度定数はあくまで参考値であるが、燃焼後のせん断抵抗角には変化が小さく、粘着力が減少する傾向が確認できた。

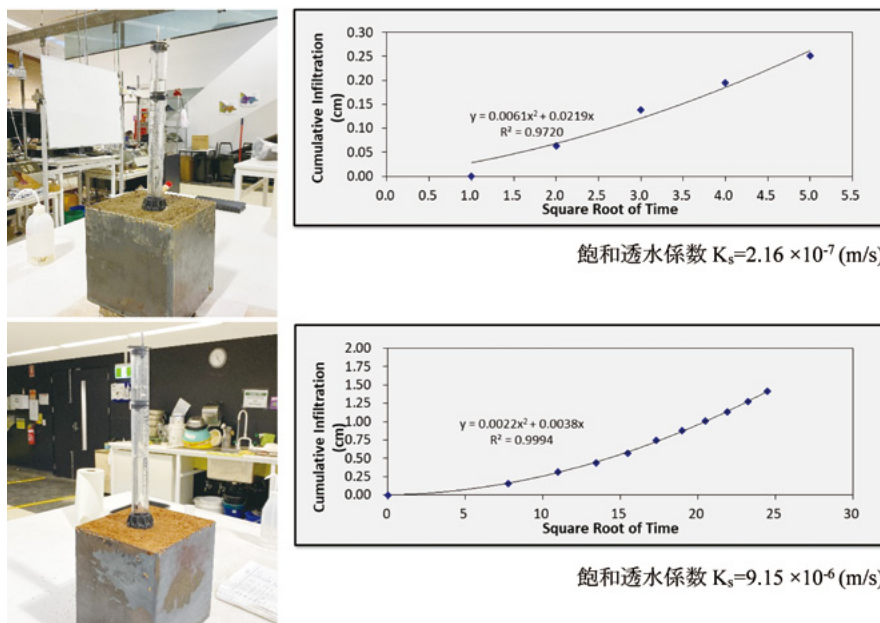
粒度試験結果を**図-4**に示す。燃焼後、細粒分が減少し、砂分が増加している。主要鉱物である石英や長石、

**表-1** 一面せん断試験結果

	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	せん断抵抗角 $\phi$ (deg)
燃焼前	6.41	39.3
燃焼後	0.44	40.2



**図-4** 粒度試験結果



**図-5** インフィルトロメータを用いた変水位試験結果

雲母などの融点は1000℃を超えるが、融点は水やケイ素を含む混合物は融点が下がることが知られており、火災の熱により溶けて各土粒子が結合した可能性がある。また、粘性土を加熱するとレンガのような硬い土となることが知られている。その他、熱に溶ける樹脂等の有機物が土中に存在し、固着剤の役割を果たすことで土粒子同士を結合させた可能性も考えられる。

ミニディスクインフィルトロメータを用いた変水位試験の様子と結果を**図-5**に示す。燃焼後には透水性が向上し、10倍以上の差がある結果となった。粒径が粗粒化すると土の空隙が増えるため、地盤の透水性が高くなることが考えられる。

以上のように、火災を受けた地盤においては、土の

せん断強度、特に粘着力が低下し、粗粒化することにより地盤の透水性が向上する可能性が示唆された。

## 2.2 米国ハワイ州における研究事例

2023年8月にオアフ島 Wahiawa で発生した森林火災(**図-6**)に着目して現地調査および土質試験を行った。**図-6**の赤く囲まれた範囲が現地踏査で痕跡を確認できた火災エリアである。この火災では火災エリアと非火災エリアが近接しているため、ほぼ同様の土質条件(Oxisolに分類される)において火災前後の土を採取した。調査を行ったのは森林火災発生後約3か月経過した11月2日である。火災エリアで撮影した写真

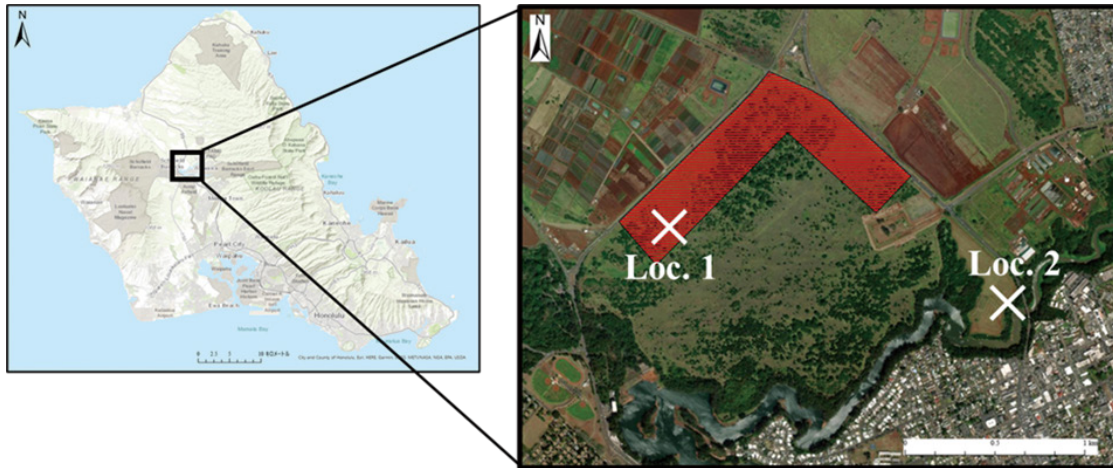


図-6 Wahiawaでの森林火災エリアと採土位置

を図-7に示す。葉が無くなり焦げている木(図-7(b))と、上端の葉が焦げ、下から新たに新芽が生えた植物(図-7(a))とが混在していた。また、地表面には厚さ約5mmの灰が堆積していた(図-7(c))。図-6のLoc.1とLoc.2において火災被害を受けた地盤と受けていない地盤で不攪乱試料と攪乱試料を採取した。土質試験結果を表-2に示す。火災前地盤において、湿潤密度が小さい結果となった。火山島であるハワイでは火山岩由来で多孔質のスコリアが豊富に含まれていると想定される。間隙比が火災により若干増加し、それと共に飽和度も減少傾向にあることが分かった。

次に、一面せん断試験の結果を表-3に示す。両ケースの試料の自然含水比と湿潤密度は、表-2の結果をもとに調整した。火災前試料では特に粘着力が大きくなる結果となったが、締め固める際スコリアに気孔が多く存在することから、粒子破碎し、粘着力がやや大きくなった可能性がある。火災前後で比較すると、火災を受けた地盤のせん断抵抗角はほとんど変わらず、粘着力のみが低下する結果となり、せん断強度が低下することが分かった。なお、通常想定されるよりもせん断抵抗角の値が大きい、原因は不明である。

粒度試験結果を図-8に示す。この試験中一般に行われる“団粒化した土粒子をときほぐす手順”は省略し

たことに注意されたい。これは燃焼による粒子溶融がもたらした粗粒化成分を消失させるのを防ぐためである。火災後試料を用いて実験した粒径加積曲線が右に移動し、粗粒化していることがわかる。その後、火災前地盤および火災後地盤にて携帯型ミニディスクインフィルトロメータを用いた現地変水位試験が行われたが、紙面の都合上、その記述は割愛する。試験結果によれば、オーストラリア南東部での燃焼実験の結果と同じく、飽和透水係数については、粒度試験より想定された通り、火事に晒された地盤の透水係数が一桁大きくなる結果となった。火災を受けた地盤の透水性が向上することが実際の森林火災においても生じうる可能性が示唆された。

### 3. 火災履歴を考慮した斜面リスク評価

#### 3.1 森林火災が地盤に与える影響の考察

以上の検討に基づいて、森林火災が地盤に与える影響を考察する。まず、せん断強度、特に粘着力が低下することであるが、Ice et al. (2004) や Caon et al.



(a) 新芽が見られる植物

(b) 焼けて枯れた木

(c) 地表面に堆積した灰

図-7 火災エリアでの写真

表-2 土質試験結果

区分	物性	火災前	火災後
一般	自然含水比: $w_n$	21.7%	20.3%
	湿潤密度: $\rho_t$	1.18 g/cm <sup>3</sup>	1.12 g/cm <sup>3</sup>
	乾燥密度: $\rho_d$	0.97 g/cm <sup>3</sup>	0.93 g/cm <sup>3</sup>
	土粒子密度: $\rho_s$	2.64 g/cm <sup>3</sup>	2.72 g/cm <sup>3</sup>
	間隙比: $e$	1.72	1.91
	間隙率: $n$	63.2%	65.6%
	飽和度: $S_r$	33.5%	28.9%
コンシステンシー	液性限界: $w_L$	60.7%	56.3%
	塑性限界: $w_p$	35.8%	32.4%
	塑性指数: $I_p$	25.0	23.9

表-3 一面せん断試験結果

	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	せん断抵抗角 $\phi$ (deg)
火災前	16.6	46.8
火災後	0.92	47.3

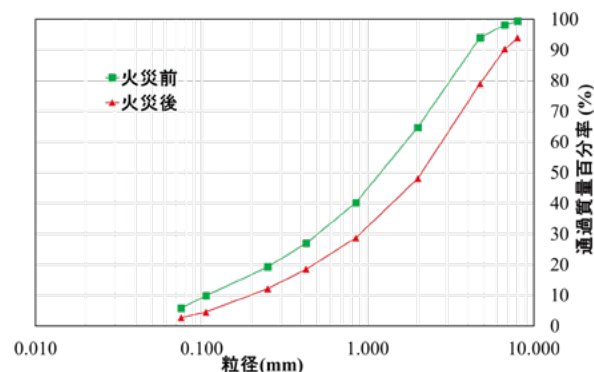


図-8 粒度試験結果

(2014) より火災の影響深さは5cmほどとされているため、この傾向は深さ5cm以浅で起こる。さらに、ハワイ州 Maui 島 Kula の住民の情報によると、火災履歴を受けた樹木がある場所においては、地中内でも根が長期間ゆっくと炭化し続けていたことが分かった。地中内で樹木根が燃えると、根が持つ見かけの粘着力が失われるため、少なくとも地中の根入れ深さまでは見かけの土の粘着力が低下すると考えられる。

次に、火災履歴を受けた地盤の透水性についてである。粒度試験の結果によれば、火災の熱により土が粗粒化して透水性が増加する。こちらも地表面約5cm以浅で見られる特徴であるが、地中内の根が燃えた場合は、時間が経過すると根の根入れ深さまで透水性が増加する可能性がある。これは根が灰となることで、地盤内に空隙が生まれ、透水性が向上するためである。この現象は樹木が密に存在する森で起こりうるが、草地では燃焼時間も短く、根も浅いためあまり影

響がないと考えられる。一方で透水性が減少する場合も考えられる。火災により植物（今回の研究対象地域に広く分布するユーカリ等は油分が多い）が燃え、植物の油分や灰が地盤内に入り込み、疎水性の層を地中の一定深さに生成することが指摘されている。ミニディスクインフィルトロメータを用いた原位置変水位試験結果では、火災後の地盤の方が飽和透水係数は大きくなったが、この場合も、水は深い位置までは浸透せずに、水が浅い位置で広がっていることによって、見かけの浸透能が上昇した可能性がある。

### 3.2 森林火災と斜面崩壊との関係

以上の考察を踏まえると、斜面崩壊には2つの典型的なパターンが想定できる。1つ目は、火災直後の侵食による崩壊である(図-9)。火災で樹木が燃えると、その油分や灰が地盤内に浸透し、地盤内に疎水性のある層が生成される。一方で、地表面約5cmは火災の熱により粒径が粗粒化し、透水性が上昇する。地表面からは地盤内に水が入り込むのに対し、入り込んだ水は疎水性の層まで水が達し、帯水層を形成することになる。そうすると透水性が異なる境界面に水圧が生じて斜面崩壊リスクが増加する。

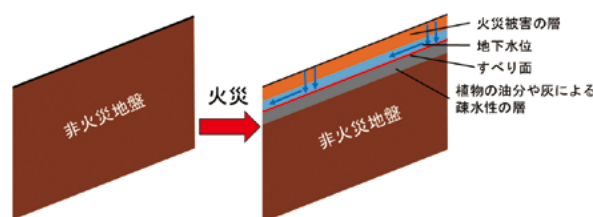


図-9 火災後の表層土壌の侵食を主体とする斜面崩壊

2つ目は、地盤内の根が燃えることで、根が持つ見かけの粘着力を失い、地盤の強度が低下すること、根がなくなり生まれる空隙により透水性が向上することにより生じる崩壊である(図-10)。この崩壊は1つ目のものよりも時間が経過したときに発生し、崩壊の規模もやや大きくなる。崩壊の深さは火災被害を受けた樹木根の根入れ深さである。

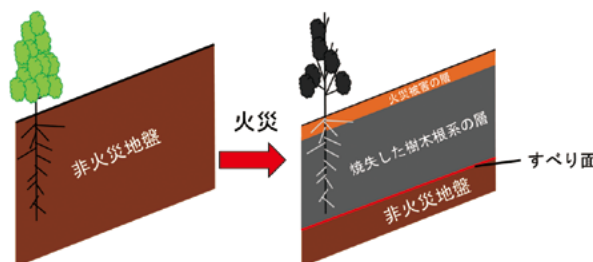


図-10 火災後の樹木の根入れ深さ程度までの土の見かけの強度低下に伴う斜面崩壊

### 3.3 数値シミュレーション (TAG\_FLOW) に基づく斜面災害リスク評価

これまでに述べた結果を踏まえ、森林火災による地盤物性の変化を考慮した斜面崩壊リスク評価のケーススタディを実施した。解析に用いたのは、群馬大学地盤工学研究室で開発した豪雨時のリアルタイム斜面災害リスク評価システム TAG\_FLOW (Nguyen et al, 2022) である。図-11 に TAG\_FLOW の概念図を示す。本手法は降雨浸透量の算定、地下水の変動量の予測、半無限斜面仮定の簡易的な安定計算、表流水のモデリングの4要素で成り立っている。本手法では、土質毎に異なった典型的な透水特性をそれぞれモデル化している。今回の再現解析においては、火災による影響を考慮し、既述の粒度試験結果等を踏まえて火災前では透水性が小さい“細砂モデル”を、火災後には透水性が大きくなった場合の“中砂モデル”を用いた。紙面の都合上、解析に用いた材料パラメータについては省略する。

図-12 に火災前、図-13 に火災後の表流水の結果を再現解析で想定された実時刻毎に示す。火災前の結果では表流水が急傾斜部分から現れている。これは浸潤前線が基盤面まで達し、地下水位が地表面まで上昇したためである。地下水位が地表面まで達している場合は、雨が地下に浸透することなく、表流水となる。急斜面から生じた表流水は緩斜面に流れていく様子が確認された。火災後斜面においては図-13 の地下水位が解析範囲全てで地表面まで達したことから、19:53 頃に全解析範囲に表流水が生じ、火災前斜面結果と比較すると、表流水の水位が高い結果となった。尾根と斜面の表流水が谷部分に流れ込み、溜まっていくことが分かる。表流水が斜面を侵食し、土砂が流出することで、土石流化する恐れがあることが示唆された。

図-14、図-15 に火災前後における斜面の局所的な安全率の計算結果を示す。火災前斜面においてはせん断強度が大きいいため、安全率が1を下回る場所はなかつ

た。それに対して、火災後斜面では累積雨量 50mm を超えた 15:53 頃から急激に安全率が下がる結果となった。また、解析範囲の大部分で安全率が1を下回る結果となり、多くの表層崩壊が生じる恐れがある。このことから、表層崩壊により大量の土砂が流出し、土石流化しやすくなると考えられる。

## 4. おわりに

本研究は限られた箇所の現地踏査と土質試験等に基づいた成果であり、これらの知見が一般性を有するかどうかについては、より多様な森林条件・斜面条件の対象地域に対しての検討を進める必要がある。

一つの将来の方向性として、森林火災箇所を NASA FIRMS (2024) などのツールを利用することにより把握し、火災を受けた場所にはその影響を土砂災害リスク評価システムへ反映することで、豪雨時の早期警戒避難の精度を高められるであろう。

## 謝辞

本研究テーマを群馬大学修士論文(理工学専攻、環境創生理工学教育プログラム)として、精力的に研究に取り組んだ須藤皓介氏(2024年3月修了)、ならびに同研究を支援した李媛穎氏(群馬大学博士課程学生)に、記して深く謝意を表します。

また、オーストラリア南東部ビクトリア州における研究では、Deakin 大学(同国 Geelong 市) Senior Lecturer の Susanga Costa 博士に、米国ハワイ州における研究では、Hawaii 大学 Manoa 校の Phillip S. K. Ooi 教授に、それぞれ貴重なご指導をいただきました。これらの現地踏査等を含めた共同研究の実施には、群馬大学グローバルイニシアチブセンターの越智貴子准教授にお世話になりました。心より御礼を申し上げます。

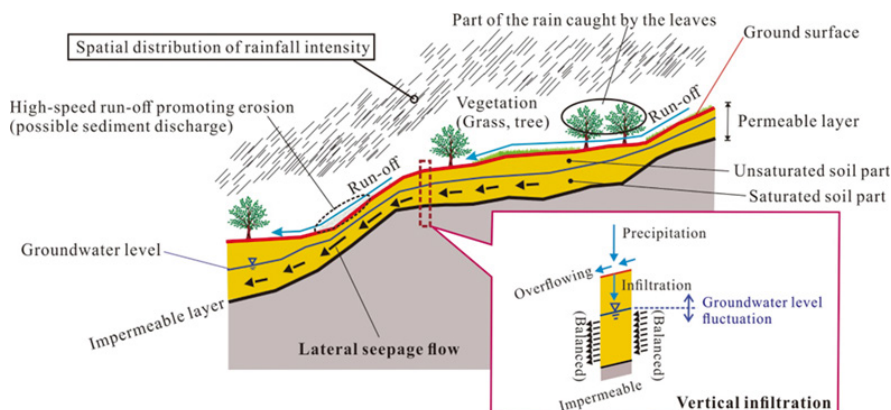


図-11 TAG\_FLOW モデルの全体概念図

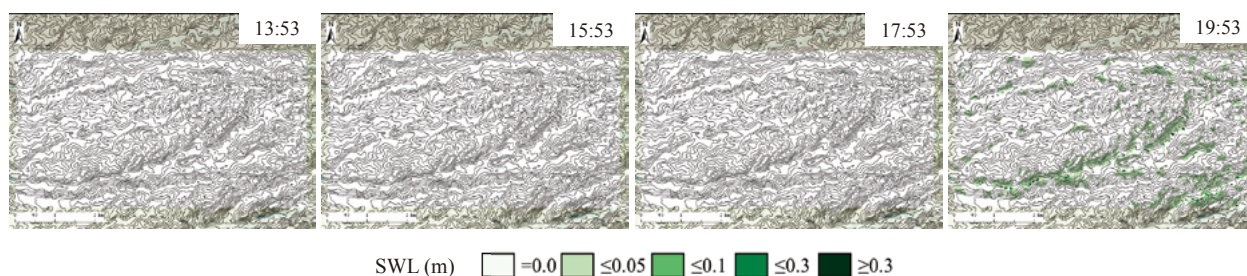


図-12 火災前斜面における表流水深の時間変化 (図中時刻は対象災害時の実時刻に対応)

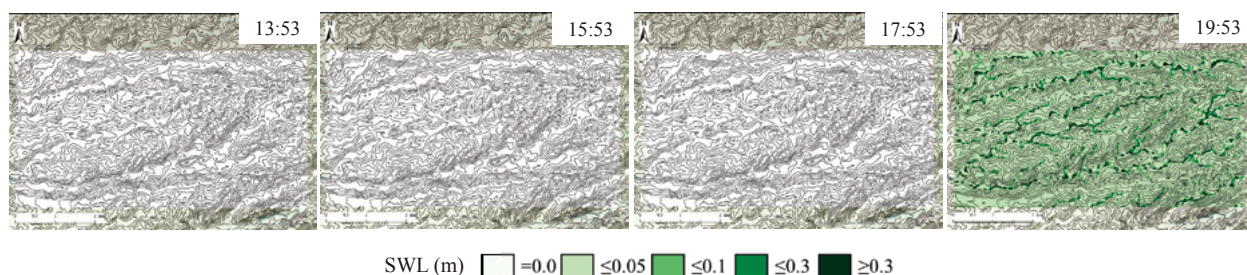


図-13 火災後斜面における表流水深の時間変化 (図中時刻は対象災害時の実時刻に対応)

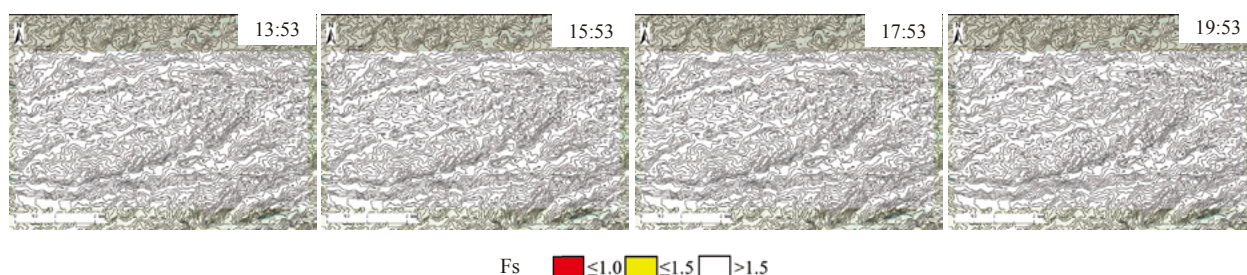


図-14 火災前斜面における局所的な斜面崩壊リスク (半無限斜面仮定の安全率) の時間変化

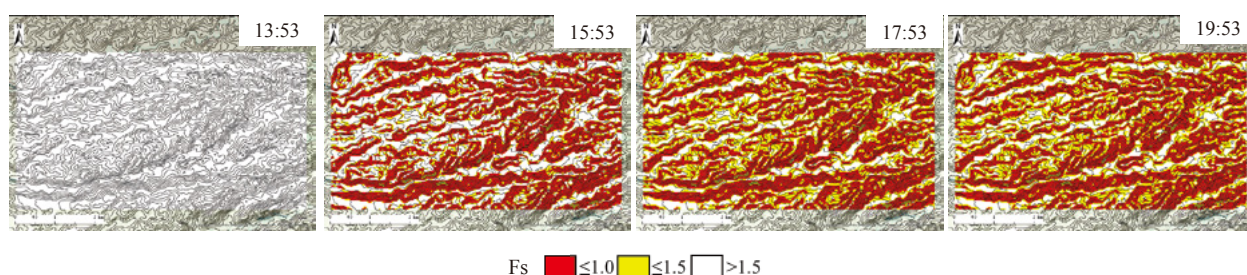


図-15 火災後斜面における局所的な斜面崩壊リスク (半無限斜面仮定の安全率) の時間変化

参考文献

Caon, L., Vallejo, R., Ritsema, C., Geissen, V. (2014), Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems, *Earth-Science Reviews* 139, 47-58, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001>  
 早坂洋史 (2010) : 世界各地の森林と泥岩火災と防災技術, *日本燃焼学会誌*, 第 52 巻, 第 160 号, pp.113-120.  
 Ice., G., Neary, D. and Adams, P. (2004): Effects of Wildfire on Soils and Watershed Processes, *Journal of Forestry*, Volume 102, Issue 6, September 2004, Pages 16-20, <https://doi.org/10.1093/jof/102.6.16>

NASA FIRMS (2024), Fire Information for Resource Management System, <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>, [accessed January 31, 2024].  
 Nguyen, V. T., Wakai, A., Sato, G., Viet, T.T., Kitamura, N. (2022): Simple Method for Shallow Landslide Prediction Based on Wide-Area Terrain Analysis Incorporated with Surface and Subsurface Flows, *Nat. Hazards Rev.*, 2022, 23(4): 04022028. doi:10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000578.