

数値シミュレーションを用いた時代変化に伴う 土地利用変遷が災害リスクに与える影響の定量化

Quantification of the impact of historical land use changes on disaster risk using numerical simulations

森口周二¹⁾, 吉沢美香²⁾, Dolojan Nilo³⁾, 野村 恵佳³⁾, 菅原大介³⁾,
鈴木温⁴⁾, 寺田 賢二郎²⁾

Shuji Moriguchi, Mika Yoshizawa, Nilo Dolojan, Reika Nomura, Daisuke Sugawara,
Atsushi Suzuki and Kenjiro Terada

- 1) 東北大学災害科学国際研究所 (〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1, E-mail: shuji.moriguchi.d6@tohoku.ac.jp)
- 2) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
- 3) 東北大学災害科学国際研究所 (〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)
- 4) 名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

In disaster-affected areas, the impact of land use changes from the past to the present on disaster risk is often discussed, but most of these observations are qualitative. However, quantitative analysis could provide valuable information for disaster prevention and mitigation. This study aims to analyze the impact of land use changes through a series of heavy rainfall disaster simulations. Past and present models of a real region that experienced an extreme rainfall disaster were prepared, with flooding and landslides represented in the simulations. Results indicate that addressing exposure in large-scale heavy rainfall events remains a future challenge. The results quantitatively demonstrated that, to reduce flood damage effectively, it is essential not only to implement basin maintenance, but also to prioritize safety in residential area selection and to proceed with land development in a careful manner.

Key Words : Heavy rainfall disasters, numerical analysis, landform modifications

1. 序論

豪雨災害の被災地では、過去から現代までの地形変更や土地利用変遷が災害リスクに与えた影響について議論されることがしばしばある。しかし、こうした議論の多くは定性的なものであり、科学的な根拠に基づいて結論に達することは稀である。一方で、それらが災害リスクに与える影響を定量的に分析することができれば、その地域が将来に渡り目指すべきまちづくりの方向性を明確にするための重要な材料となる可能性がある。

本研究では、過去から現代までの地形変更や土地利用変遷が豪雨災害リスクに与える影響を科学的に分析することを目的として、実際に豪雨災害の被害に見舞われた地域を対象に、過去と現代の数値モデルを用意し、両モデルにおいて様々な降雨シミュレーションを実施するとともに、その結果を定量的に分析する。

2. 地形モデル構築と豪雨災害シミュレーション

本研究では、2019年台風第19号（令和元年東日本台風）で甚大な被害が発生した宮城県丸森町を対象とする。丸森町全域（約20km×20kmのサイズ）を対象に、過去と現代の地形モデル（以下、過去モデルと現代モデルと呼ぶ）を作成し、力学に基づく数値シミュレーション[1]を通じて、河川氾濫と斜面崩壊のリスクを評価する。なお、本研究における「過去」という表現は、明治時代（1900年代

初頭）を指すものとする。

(1) 過去モデルの構築

図-1に示すように、過去と現代では河川流路や堤防の有無などをはじめとする土地利用の変化により地形が変化している。現代モデルの地形データは、国土地理院が提供する数値標高モデル（10メッシュ）[2]を用いているが、過去の地形データは存在しないため、構築する必要がある。そのため、対象地域の古地図を現代の地形モデルに重ね合わせ、当時の河川流路や堤防などの位置を反映させながら現代の地形モデルを修正することで過去の地形を表現する方針とした。



図-1 地形の比較(左: 現代, 右:過去)

古地図については、スタンフォード大学が提供する古地図のデータベース[3]と今昔マップ on the web[4]の画像を利用した。古地図と現代の地形モデルを重ね合わせた

状況のイメージを図-2に示す。古地図は縮尺や方位が不完全な場合があるため、重ね合わせに際して過去と現代の不動点が一致するように画像の拡大・縮小や回転をさせた。なお、本研究では山間部の山頂を不動点と仮定した。

図-3は、地形修正（現代の地形モデルから過去の地形モデルを作成する作業）の具体的な流れを示したものである。まず、現代と過去で流路の異なる部分を平滑化する。次に、古地図に沿って過去の河川流路を表現する。さらに、河川深さや堤防を表現することで過去の地形モデルを作成した。河川の深さや堤防位置については情報が限定されているため、現代の地形を参考にしながら河川勾配などが不自然にならないように留意しながら作業を進めた。なお、山間部については、地形や河川流路のデータの精度がかなり低いため、現代の地形をそのまま過去の地形として利用した。そのため、本研究の分析対象は、主に山間部以外の河川流路の変化に関するものに限定される。

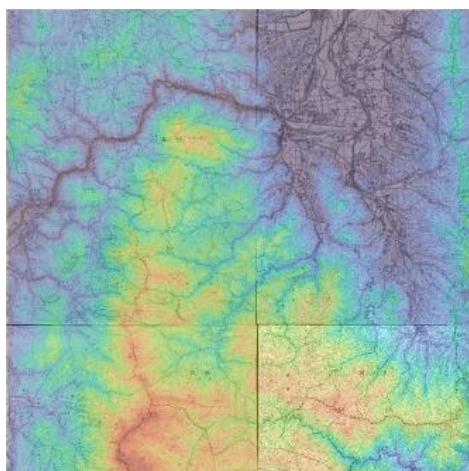


図-2 古地図と現代の地形モデルの重ね合わせ

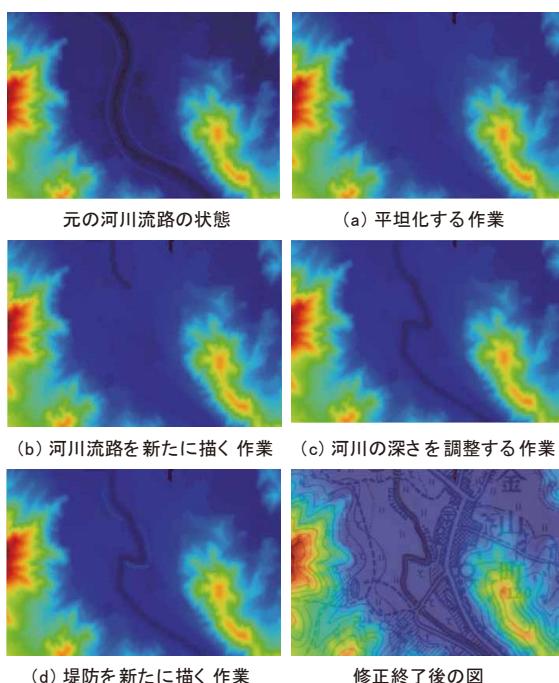


図-3 地形の修正

(2) 豪雨災害シミュレーション

力学に基づく数値シミュレーションによって、降雨に伴う河川氾濫と斜面崩壊の発生を表現する。このために、浸透解析、地表流解析、斜面安定解析の連成解析を実施する。以下では、用いた各解析手法について説明する。

a) Green-Amptモデルによる降雨浸透解析

雨水の地盤中への浸透は、不飽和地盤中の水の移動としてモデル化され、代表的なものとしては Richards' equation[5]がその挙動を表現可能なものである。ただし、本研究では、広域を対象としているため、計算コストを考慮して Green-Ampt モデル[6]を採用した。Green-Ampt モデルでは、浸潤面より下側で初期の体積含水率が保たれるという仮定のもと、タイムステップ毎に累積浸透量と浸透率を計算する。 $t = t_n$ における累積浸透量 F_n 、浸透率 f 、鉛直方向の浸透深さ z は以下の式より得られる。

$$F_n = F_0 + K_s \cos \alpha \Delta t + \frac{\Psi \Delta \theta}{\cos \alpha} \left[\ln \frac{F_n \cos \alpha + \Psi \Delta \theta}{F_0 \cos \alpha + \Psi \Delta \theta} \right] \quad (1)$$

$$f = K_s \left(\cos \alpha + \frac{\Psi \Delta \theta}{F_n} \right) \quad (2)$$

$$z = \frac{F}{\Delta \theta \cos \alpha} \quad (3)$$

ここで、 F_0 は $t = t_0$ における累積浸透量、 K_s は飽和透水係数、 Ψ は浸透前線サクション、 $\Delta \theta$ は体積含水率の変化、 α は地表面の傾斜角度である。

b) 浅水長波方程式による地表流解析

地盤に浸透しきらない雨水は地表流となって流下する。このモデル化には浅水長波方程式による地表流解析を採用した。深さ方向に静水圧近似を仮定する支配方程式に基づいて、時空間に差分法を適用することで時間発展計算を行う。浅水長波方程式の質量保存則と運動量保存則は、それぞれ以下の式のように表現される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i - f \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u q_x + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (v q_x) \\ = gh(S_{0x} - S_{fx}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u q_y) + \frac{\partial}{\partial y} (v q_y + \frac{1}{2} g h^2) \\ = gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 h は水深、 q_x と q_y はそれぞれ x 方向と y 方向における単位流量、 g は重力加速度、 n はマニングの粗度係数、 i は降雨強度、 S_{0x} と S_{0y} はそれぞれ x 方向と y 方向の水路勾配、 S_{fx} と S_{fy} はそれぞれ x 方向と y 方向の摩擦勾配である。

c) 無限斜面仮定に基づく斜面安定解析

斜面安定解析では、先述のGreen-Amptモデルで求めた湿潤面をすべり面と仮定し、無限斜面仮定に基づいて安全率 F_s を求める。土のせん断強度はモール・クーロンの破壊基準に基づいており、せん断応力は土塊の重量によってすべり面の接線方向に作用する応力として定義する。このとき、安全率は次式より計算される。

$$F_s = \frac{c' + [(\gamma_s z + \gamma_w h) \cos^2 \alpha + \gamma_w \Psi] \tan \varphi'}{(\gamma_s z + \gamma_w h) \cos \alpha \sin \alpha} \quad (7)$$

ここで、 c' は粘着力、 γ_s は土の単位体積重量、 γ_w は水の単位体積重量、 φ' は内部摩擦角である。

3. 数値計算結果

本研究では、小規模から大規模の降雨を網羅的に含む22の降雨シナリオについて分析を行った。これらのシナリオは、国土交通省が提供する水文水質データベース[7]に蓄積されている大内観測所のデータに基づいて設定したものである。具体的には、大内観測所における1時間雨量と24時間累積雨量のそれぞれのランキング5位以内に入る降雨イベントを選択するとともに、様々なレベルの降雨イベントを含めるために、ランキング外のシナリオも実際のデータに基づいて含めている。なお、阿武隈川の上流流入境界条件は、八幡水文水質観測所の観測データを用いて設定した。

各降雨シナリオの降雨特性（最大1時間雨量と24時間累積雨量の関係）を図-4に示す。図中右上に示されているものが2019年台風第19号による降雨イベントを示している。他のシナリオと大きく離れていることから、改めて2019年台風第19号が記録的な豪雨であったことが確認できる。この2019年台風第19号を記録的豪雨、他の降雨を一般的な降雨と大別し、過去と現代で浸水被害にどのような違いがあったのかを比較することで、土地利用の変化が災害リスクに及ぼす影響を分析していく。なお、一般的な降雨と定義した21の降雨の中には、台風による豪雨など一般的な降雨とは呼べないものも含まれているが、突出して大きい台風第19号と区別するために、本論文においては便宜上一般的な降雨と表現することとする。

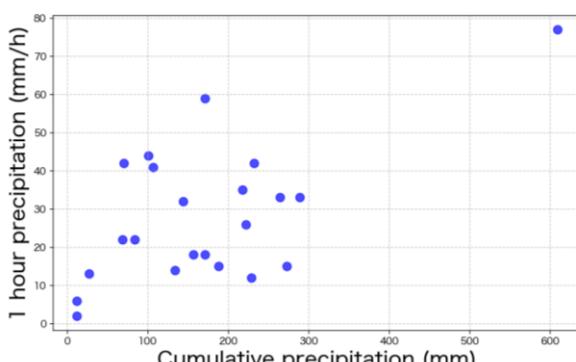


図-4: 各降雨シナリオの降雨特性

(1) 記録的豪雨の条件

ここでは、2019年台風第19号の降雨イベントに特化して計算結果とその分析結果を説明する。図-5に、過去および現代の両地形モデルから得られた最大浸水深分布を示す。この結果より、過去および現代のいずれのモデルにおいても大規模な浸水が発生していることが確認された。しかし、現代モデルの浸水範囲は過去モデルと比較してやや小さくなっている。また、図-6に、過去および現代の両地形モデルから得られた斜面崩壊の計算結果（安全率分布）を示す。この結果においては両モデル間で有意な差異は認められないことが確認された。これは、過去の地形モデル作成の際に、山間部については修正を加えなかったためであると推察できる。このことから、以降では河川氾濫の結果についてのみ議論を進める。

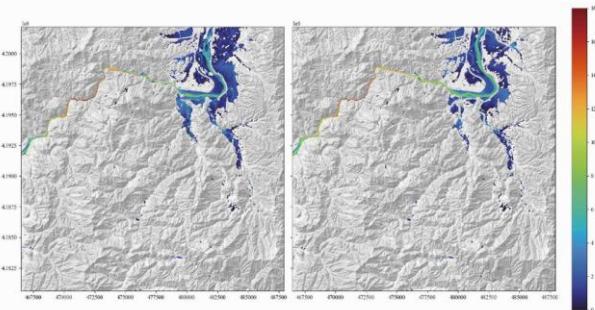


図-5: 河川氾濫の計算結果（最大浸水深分布）

（左: 過去, 右: 現代）

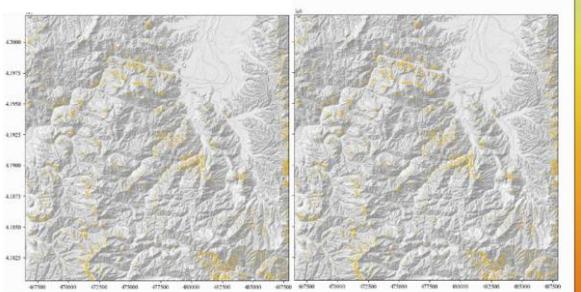


図-6: 斜面崩壊の計算結果

（左: 過去, 右: 現代）

先述の2019年台風第19号の降雨イベントの計算結果について、分析対象の領域を絞り、さらに議論を進める。図-7に五福谷川と内川の合流地点における最大浸水深を示す。同図より、現代の方が全体的に浸水範囲が縮小し、浸水深も浅くなっていることが確認できる。溢水体積を算出したところ、過去と比較して現代の溢水体積は46%減少していることが確認された。この変化は、過去から現代にかけて河川流路や堤防が整備されたことが主な要因と考えられる。すなわち、堤防の整備や河川流路の改修により、ハザードが低減した可能性が高いことが示された。

浸水による被災リスクは、ハザードおよび暴露性の2つの要素によって総合的に評価されるべきである。そのため、暴露性を考慮した分析を行った。浸水範囲に居住区域

の位置を重ねた結果を図-8に示す。同図に紫で示した部分が居住区域である。この図から、現代において低地の開発が進み、居住区域が拡大していることが確認できる。また、多くの家屋が浸水範囲内に含まれていることが分かる。浸水範囲内に含まれる居住区域面積を過去と現代で比較したところ、現代は過去に比べて2.7倍程度になっていることが確認された。また、溢水体積についても同様の比較を行ったところ、現代は過去に比べて3.3倍程度増加している結果となった。これらの結果より、現代の地形は過去と比較してハザードが低減した一方で、居住区域の拡大により暴露性が増大したことが示唆された。

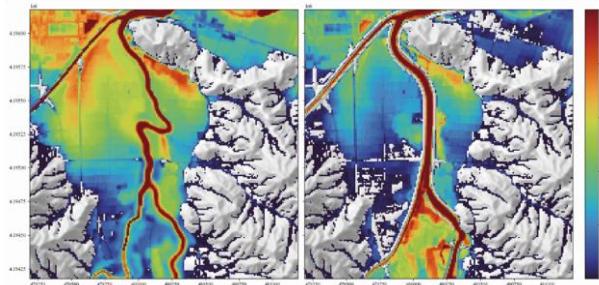


図-7 河川合流部における河川氾濫の
数値計算結果(左:過去, 右:現代)

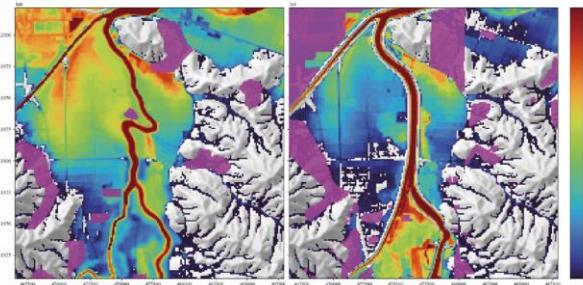


図-8 河川合流部における河川氾濫
と居住区域の関係(左:過去, 右:現代)

(1) 一般的な降雨の条件

ここでは、先述の2019年台風第19号の降雨イベントを除いた21シナリオの結果について説明する。なお、シナリオ間の違いを定量的に議論するために、各シナリオについて浸水面積と溢水体積を分析した。図-9に、シミュレーションから得られた各シナリオの浸水面積と溢水体積の結果を示す。これらの結果は、図-4に示した最大1時間雨量と24時間累積雨量の関係に、水面積または溢水体積の軸を加えたものである。また、図中の赤点と青点がそれぞれ過去と現代の結果を示しており、図中のメッシュ状の曲面は、RBF補完によってシナリオ間を補間した応答曲面である。なお、浸水面積と溢水体積の算出には、図-10に緑で示した市街地を含む範囲を対象範囲とした。

図-9より、浸水面積および溢水体積のいずれにおいても、現代より過去の応答曲面の方が上部に位置していることが確認できる。これにより、市街地全体における浸水面積および溢水体積は、過去の方が大きいことが確認できる。21シナリオの全てについての平均値では、現代は過去と

比較して、浸水面積が約8%減少し、溢水体積は約16%減少していることが示された。この結果は、先述の記録的豪雨の条件と比べてれば大きな変化ではないが、現代は過去と比較してハザードが低下しており、現代までに行われてきた流域整備は、特に市街地を含む平野部の浸水被害を縮小させたと考えることができる。

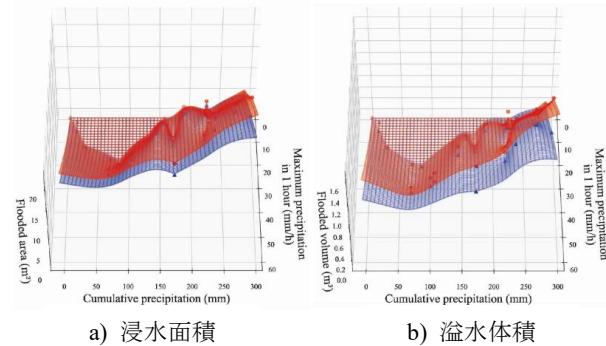


図-9 市街地付近の浸水状況(赤: 過去, 青: 現代)

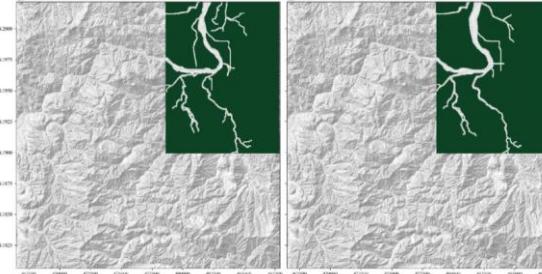


図-10: 各地形モデルにおける市街地
(左: 過去, 右: 現代)

続いて、記録的豪雨の条件の際の議論と同様に、暴露性を考慮して議論を進める。図-11に、過去および現代における居住区域に限定した浸水面積および溢水体積の結果を示す。居住区域は図-12において緑で示されている領域である。浸水面積の結果(図-11左)に着目すると、現代の応答曲面の方が過去モデルの曲面よりも上部に位置していることが確認できる。これは、図-9の結果とは逆転する結果となっている。また、溢水体積の結果(図-11右)についても、特に累積雨量が多い条件では、同様の逆転傾向が確認できる。21シナリオ全ての平均値では、現代の方が浸水面積は約43%、溢水体積は約8%増加していることを確認した。これは、記録的豪雨の条件の際の議論と同様に、過去から現代にかけて居住区域が低地へと拡大したためであると推察できる。一方、累積雨量が低い条件では溢水体積が過去の方が高い傾向を示している。これは、現代の居住区域は、過去に比べて浸水面積が拡大しているものの、最大浸水深さは低減していることを意味する。実際に最大浸水深さの平均値を算出したところ、現代は過去に比べて約28%程度低下していることが確認された。

したがって、現代における居住区域では、累積雨量が高い条件に関しては居住区域の拡大に伴う暴露性の増加により浸水リスクが増加しているのに対し、累積雨量が低い条件では、リスクが低減されていると結論付けられる。

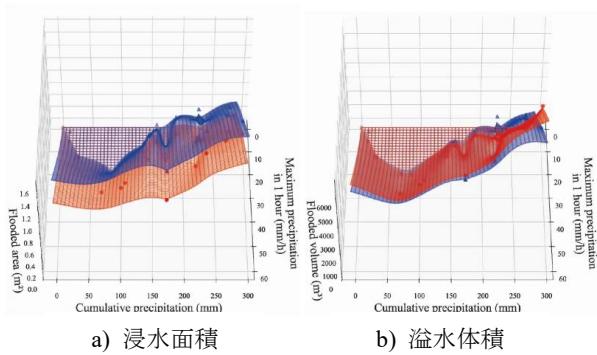
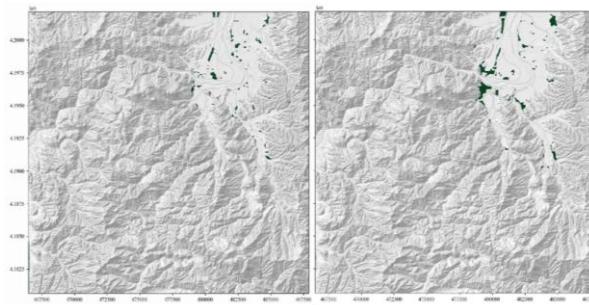


図-11 居住区域の浸水状況(赤: 過去, 青: 現代)

図-12 各地形モデルにおける居住区域
(左: 過去, 右: 現代)

4. 結論

土地利用の変化が災害リスクに与える影響を科学的に検討することを目的として、実際の豪雨災害によって被害を受けた地域を対象として異なる時代における災害リスクを数値シミュレーションによって可視化し、その結果を定量的に分析した。具体的には、2019年台風第19号によって甚大な被害を受けた宮城県丸森町を対象に、過去および現代の地形モデルを用意し、両地形モデルにおいて様々な降雨シナリオについて降雨被害の再現シミュレーションを実施し、特に河川氾濫のリスクを分析した。

本研究で得られた結果は、過去から現代までの土地改変や土地利用の変化に伴う災害リスクの変化の傾向を定量的に説明するものであった。特に、降雨特性とリスクの変化の関係は重要なものである。すなわち、中小規模の降雨に対しては、現代は過去に比べてリスクが低減しているものの、記録的豪雨の条件においては、居住区域の拡大に伴う暴露性の増加によって、現代の方がリスクが増加している可能性がある。そのため、様々な規模の降雨に対して町全体の浸水被害を低減するためには、流域整備のみに依存するのではなく、居住区域の選定において安全性を考慮し、慎重に土地開発や土地利用の計画を行うことが重要であることが示された。

ここに示した結論は、防災・減災に従事する者に対しては、感覚としては認識している事項であり、これまでにも同様の見解が示されている部分も多いと思われる。ただし、序論で示したように、これまでの議論の多くは定性的

なものであり、定量的なデータに基づいて議論が展開されることは少なかった。本研究のように、数値シミュレーションを用いて定量的に分析を行うことで、現代の防災対策の効果や、防災・減災に寄与する情報のための議論を進める材料になると考えられる。ただし、本研究で実施した研究の範囲においては、特に過去のモデル構築に大きな仮定を設けており、過去のシミュレーション結果の妥当性については十分な検証ができていない。今後、過去の歴史資料なども含めて議論を進める予定である。

参考文献

- [1] N. L. J. Dolojan, S. Moriguchi, M. Hashimoto, T. H. Tinh, H. Tanaka, K. Terada: Hydrologic-geotechnical modelling of shallow landslide and flood hazards caused by heavy rainfall, 2023.
- [2] 国土地理院：基盤地図情報、数値標高モデル、<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>.
- [3] Stanford University, Map collections and resources, <https://stanford.maps.arcgis.com/apps/SimpleViewer/index.html?appid=733446cc5a314ddf85c59ecc10321b41>
- [4] 谷謙二, 埼玉大学教育学部: 今昔マップ on the web, <https://ktgis.net/kjmapw/>
- [5] Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, Vol. 1, No. 5, pp. 318–333, 1931.
- [6] Green, W. H. and Ampt, G.: Studies on soil physics., The Journal of Agricultural Science, Vol. 4, No. 1, pp. 1–24, 1911.
- [7] 国土交通省：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>