

2026 年 8 月 26 日ネパール土石流の再現解析(第 1 報)

筑波大学システム情報系 松島亘志・Fazlul Habib Chowdhury

1. はじめに

2026 年 8 月 26 日朝(現地時間)、Nepal-China 国境付近の Langtang National Park 周辺で、氷河を含む急激な斜面崩壊に起因するとみられる大規模な土石流・洪水が発生した。USGS は、本イベントを“2026 Nepal Debris Avalanche and Flash Flood”として速報的に整理し、Lende Khola から Trishuli Khola 水系に沿って約 100 km 流下し、Rasuwagadhi 国境施設を含む下流の居住地・道路・橋梁に大きな影響を与えたとしている[1]。発災直後の Kathmandu Post の報道でも、Timure および Syabrubesi 周辺の市場、集落、水力発電施設が被災し、Trishuli 川沿いの下流地域に警戒が呼びかけられたことが報じられている[2]。本報告は、この大規模災害に対して深さ積分粒子法(Depth-Integrated Particle Method: DIPM)[3-8]を用いた初期的な再現解析を行い、到達時刻、到達距離、および主要地点周辺の粒子通過域を衛星画像・被害判読結果と比較した。その上で、流動土砂の物性パラメータを、過去の土石流と比較してその特徴を整理するとともに、将来起こりうる、同様の氷河崩落型土石流のリスク評価および被害軽減のための方策を提案するものである。

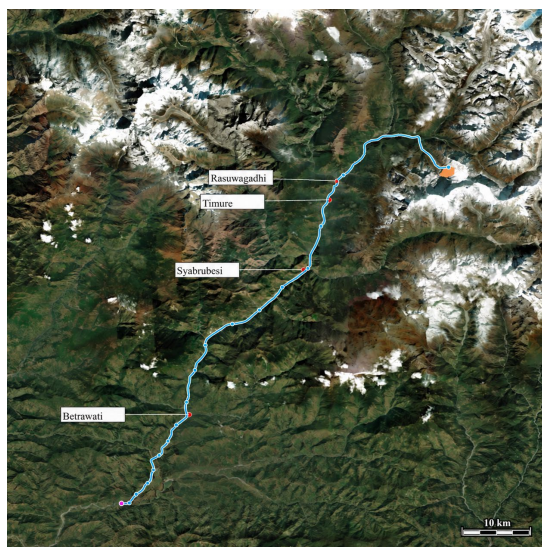
2. 用いたデータ

解析地形の標高データには、Copernicus DEM GLO-30 の GeoTIFF を用いた[9]。元データから、経度 84.949861111–85.649861111、緯度 27.800138889–28.500138889 の範囲(1 pixel サイズはおおよそ 27.3 m × 30.8 m)を切り出して、2521 × 2521 格子、格子間隔 29.0m として計算した。なお、標高範囲は 382.5–7352.6 m である。

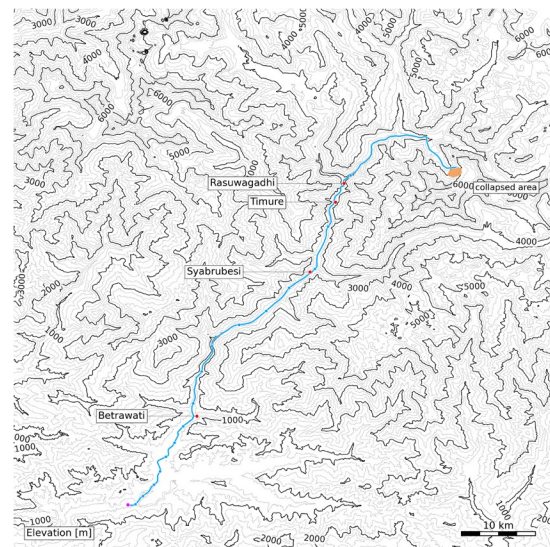
解析結果の描画等で用いた衛星画像は、全体画像に関しては Esri World Imagery の XYZ タイルを用いた[10]。崩壊領域の同定および町周辺の浸水領域と解析の詳細比較のための高解像度画像については、Sentinel-2 L2A および Landsat Collection 2 Level-2 の true color 画像を用いた[11, 12]。

図 1(a) は標高データから描いた等高線画像、図 1(b) は同領域の衛星画像と設定した崩落領域を示している。図 2 は図 1 に示した谷筋に沿った距離と標高の関係を示す。

図 3 は崩落領域の 3 次元標高データに衛星画像をマッピングした画像、および画像から同定して設定した崩壊域を示している。この領域の面積はおおよそ $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ であり、平均崩壊深さを 30m, 50m, 100m としたときの崩壊土量(氷河含む)は、それぞれ $60.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $100.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $200.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ となる。なお、崩壊体積については現時点で推定値に大きな幅がある。Park (2026) [13]は地震時刻、CCTV、河川観測記録を拘束条件とした流動解析において $35.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ の初期崩壊体積を用いている。一方、CLaSH/EarthScope による長周期地震波の逆解析[14]では、約 $197\text{--}492 \times 10^6 \text{ m}^3$ というかなり大きな崩壊体積が推定されている。したがって、現時点では崩壊体積は十分に確定していない。



(a) 衛星画像と谷筋



(b) 等高線図

図1 対象領域図(土石流が流下した Trishuli 川流域)

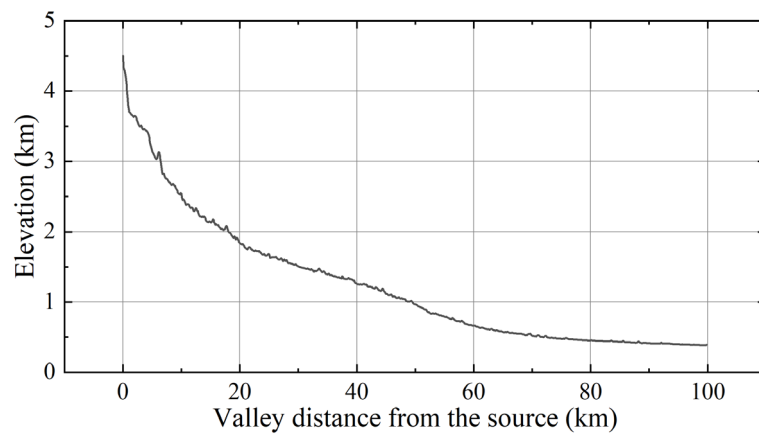


図2 谷筋に沿った標高

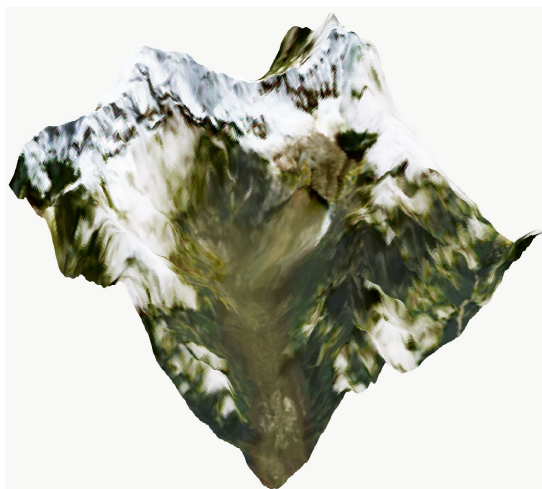


図3 崩落領域の3次元標高データに衛星画像をマッピングした画像(左)、および画像から同定して設定した崩壊域(右)

3. DIPM 解析の概要と用いたパラメータ

本解析で用いた DIPM(Depth-Integrated Particle Method)では、流動の深さ方向に積分平均を取った支配方程式（浅水流方程式とも呼ばれる）を粒子法で離散化して解析を行なう。すなわち、各計算粒子は一定の体積を持つ土柱として扱われ、地形勾配、重力、底面抵抗、および粒子間の水圧勾配に由来する相互作用によって運動する。本手法では特に、計算粒子同士の相互作用の計算を近傍粒子との2体間相互作用の重ね合わせで表現することにより、少ない粒子数で安定して解析を行なうことができるのが特徴である。これにより、今回のような100kmにも及ぶ大規模流動解析を、設定する粒子数にもよるが、1回につきPCで30分程度で実施することができ、計算条件を変更して多数の解析を短期間に実施することが可能となる。また、本解析では、設定する流動物性値として、Manning(マニング)の粗度係数 n (主に流路底面の状況によって決められる物性値) と、流動が停止する斜面角度 i_{cr} (流動しているのが水の場合は0度、土砂と水の混合物の場合は、土砂の性質と含水比によって変化)、の2つのみに限定し、詳細な土砂の材料物性値なしに解析を実施することができる点が特徴である。ただし、逆に言えば、本手法は精度を追い求めた解析手法ではなく、後述するように、土砂災害危険区域の危険性を、統計的に評価するための手法となる。

既往研究では、DIPM は Wenchuan 地震後の土石流、熱海土石流、北海道胆振東部地震での厚真町における広域斜面崩壊起源土石流などに適用され、実地形 DEM、衛星画像、現地調査結果との比較によって再現性が検討されている[3-8]。

本第1報では、表1に示す解析ケースについて検討した。メッシュサイズは29m、 2521×2521 メッシュ(約73.1km $\times$ 73.1km)の領域について計算を行った。初期崩壊土粒粒子は千鳥格子に配置し、粒子数は1157個、一つの土柱の初期高さ H_0 は60mとしたため、全流動土砂体積は58.4 million m³となる。なお、この土柱の高さ H_0 は、設定した土柱の個数と流動土砂の体積から換算したものである。したがって、初期土柱高さを小さく設定することは、総流動土砂量を比例的に減少させることに対応し、その後の流下過程における土柱高さの変化にも影響する。流動が始まると周りの粒子との相互作用によって水平方向に広がることで、高さは減少し、およそ10(m)程度になる。

Case No.	Manning coefficient, n	Critical deposition angle, i_{cr} (deg)	Initial mass height H_0 (m)
01	0.02	0	60
02	0.03	0	60
03	0.04	0	60
04	0.03	0	30
05	0.03	0	15
06	0.03	0.5	60
07	0.03	1	60

表1 解析ケース

4. 解析結果

4.1 土石流の到達時刻と流動速度

表 1 に示された解析ケースについて、流動先端 10 粒子の平均位置の時刻歴を図 4 に示す。すなわち、これは土石流先端の谷筋に沿った到達距離を表している。図によれば、限界堆積角度 i_{cr} が 0 度以外の時は、土石流が途中で停止するが、0 度の時は、通常の水の流れのように流動し続けることがわかる。またマニング係数 n が大きいほど、土石流の流動速度が遅くなることもわかる。

これまでに、多くの調査報道により、主要な地点での土石流到達時間が調べられている[15-17]。表 3 および図 4 にその結果を示している。なお、この時間は、USGS が地震波より推定した氷河斜面崩落時刻[18]を基準とした流動時間である。この観測結果との比較によれば、DIPM 解析での Case1 または Case2 ($n=0.02\sim0.03, i_{cr}=0(\text{deg.})$)のケースが、観測結果と比較的合致する結果が得られた。なお、到達時刻には報道・観測記録間で不確実性があり、今後の再評価が必要である。

$i_{cr}=0(\text{deg.})$ は、本イベントの流動体が非常に高い流動性を示し、DIPM 上ではほとんど降伏応力を持たない状態として再現されることを意味する。これは後述するように、高い含水率や氷・融解水の混入、河川水との混合などの影響を反映している可能性がある。

また、前述のように $H_0=60(\text{m})$ は崩壊土砂量が 58.4 million m^3 に相当するが、これを半分あるいは 1/4 にしたとき($H_0=30(\text{m}), 15(\text{m})$)は、土石流フロントの速度が低下していることがわかる。

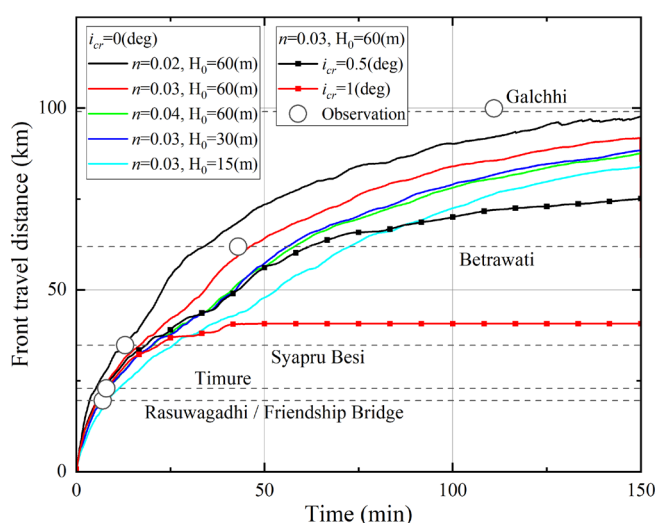


図 4 谷筋に沿った土石流の到達距離の時刻歴

Location	distance from the failure site (km)	Estimated front arrival time t_a (min)	Source of t_a
Rasuwagadhi	19.6	7	[15]
Timure *1	22.9	8	[16]
Syapru Besi	34.8	13	[17]
Betrawati	61.9	43	[17]
Galchhi	99.9	111	[17]

表 3 観測記録・映像・調査報告から推定された土石流・洪水フロントの到達時刻(崩落地からの距離は本解析から算出)

¹ なお、文献[14]では約 16 分との推定も報告されている。

図 5 は、土石流先端の位置と流動速度の関係を示している。到達時刻の観測記録がもっとも合致する($n=0.02\sim0.03, i_{cr}=0(\text{deg.})$)のケースでは、土石流フロントの初期速度は $100(\text{m/s})$ にもなり、その後低下するものの、Rasuwagadhi で $30(\text{m/s})$ 程度、Timure で $25(\text{m/s})$ 程度となっている。

なお、いずれの場合も、似たような位置に局所的な速度の peak が来ているのは、地形勾配の影響であると考えられる。

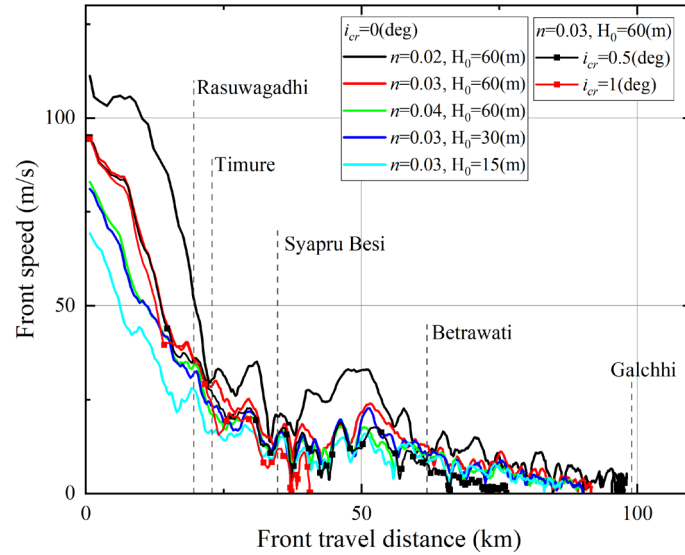
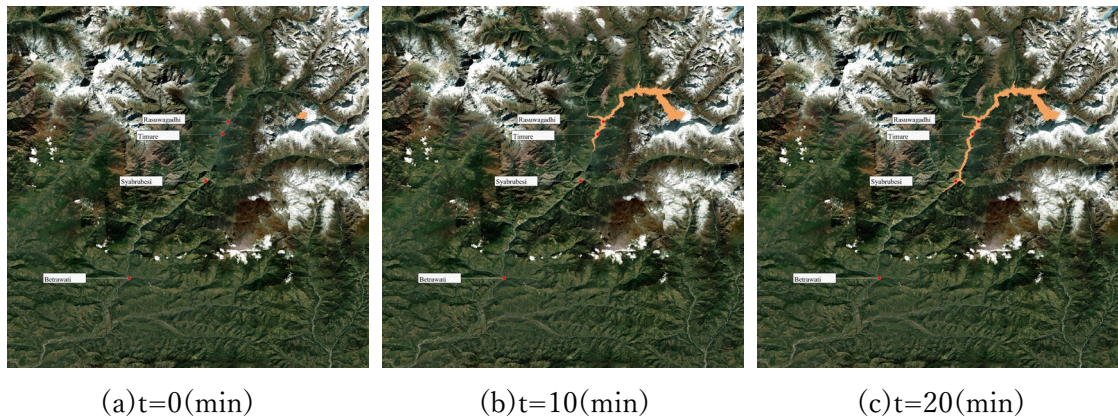


図 5 土石流先端の位置と流動速度の関係

4.2 代表事例の流動図

図 6 に、case 2($n=0.03, i_{cr}=0(\text{deg.})$)の流動図を示す。複雑な谷筋に沿って、土石流が流下している様子がわかる。なお、今回の解析では、土石流時に Trishuli 川を流れていた水や、土石流流下時の河床侵食による土砂増加などは考慮していない。



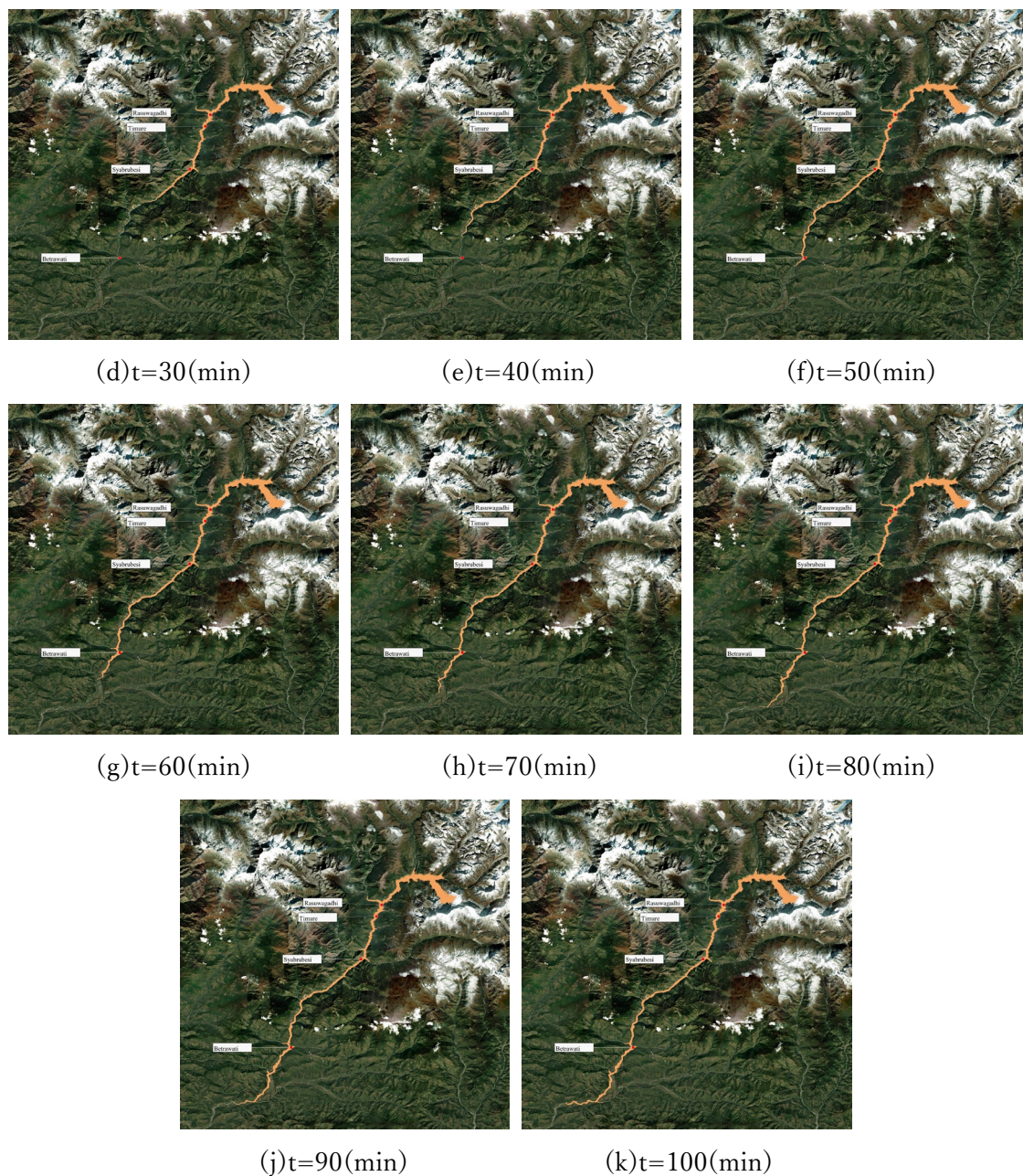
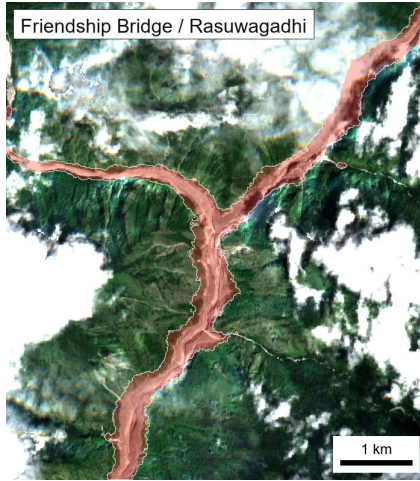


図 6 Case2 ($n=0.03$, $i_{cr}=0$ (deg.), $H_0=60$ (m)) での流動図

4.3 解析での浸水域と観測被害域の比較

図 7 に、いくつかの地点における土石流堆積物の衛星写真と DIPM 解析の case 2 による流動範囲の比較図を示す。DIPM の流動幅は、全体として実際の土砂堆積領域に比べてやや広がっていることがわかる。これは解析において用いた DEM の pixel サイズ (29m) および崩壊土砂のモデル化サイズ (29m×29m×60m の土柱が 1157 個) の粗さが考えられるが、単一材料パラメータの使用や横方向相互作用モデルの影響についても今後検討が必要である。



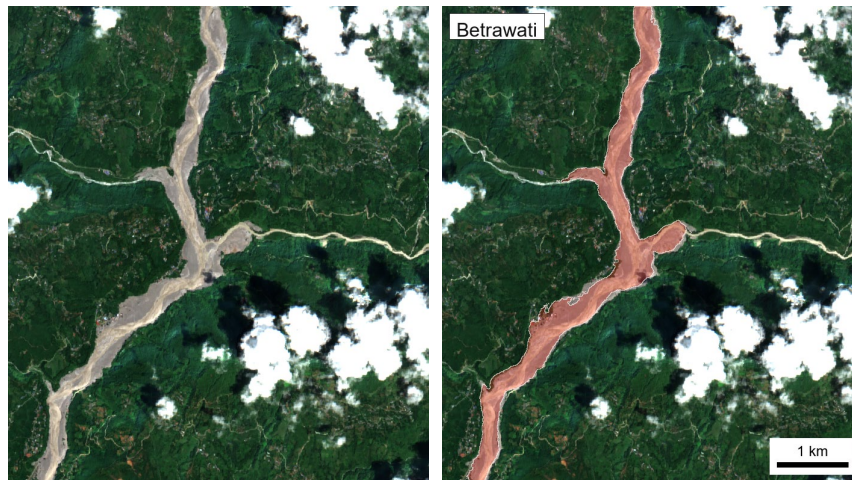


図7 各地点の浸水域と DIPM 解析結果の比較

5. 既往研究とのパラメータ比較

DIPM では、Manning 係数 n が速度依存の底面抵抗を、限界堆積角 i_{cr} が流動状態から堆積・停止へ移るための有効なしきい値を主として支配する。したがって、 n は河床粗度だけでなく流動体と底面の速度依存抵抗をまとめた有効パラメータであり、 i_{cr} も含水状態や流動化の影響を含む有効な堆積・降伏パラメータとして解釈すべきものである。

既往の DIPM 解析で同定された代表値と今回の値を表4において比較してみると、今回の Nepal 土石流においては n も i_{cr} も非常に小さい値となっている。特に i_{cr} に関しては、含水量の影響を顕著に受けることがわかっており、今回の崩壊が土砂のみでなく氷河氷・氷河性堆積物を含む崩壊物質であったこと、Trishuli 川がモンスーン期で流量が多かったことなどが影響し、土石流が 100km 以上も流下し、大きな被害をもたらした可能性がある。

Location	Manning n	Critical deposition angle i_{cr} (deg)	Source
Zhouqu	0.10	26 (dry loose deposit)	[4]
Kumamoto	0.05-0.10	5-7	[6]
Atami	0.10	8.5	[7]
USGS experiment	0.075	5	[8]
Hokkaido	0.05-0.15	6-9	[8]
Nepal (this study)	0.02-0.03	0	

表4 既往の DIPM 解析における n と i_{cr} の比較

6. おわりに：本解析の限界と今後の課題

本報告では、2026 年 8 月 26 日に Nepal-China 国境付近で発生した氷河を含む大規模斜面崩壊に起因する土石流・洪水について、Copernicus DEM を用いた広域地形モデルを構築し、深さ積分粒子法 (DIPM) による初期的な再現解析を行った。約 100 km に及ぶ流下現象を一つの解析領域内で計算し、主要地点への到達時刻、土石流・洪水フロントの流動速度、および衛星画像から判読された被災域との比較を行った。

現時点で得られた観測・報道情報との比較では、Manning 係数 n が比較的小さく ($n=0.02\sim 0.03$)、限界堆積角 i_{cr} が 0(deg)に近い条件において、長距離にわたる高速な流下挙動が比

較的よく再現された。既往の DIPM 解析で得られている代表的な値と比較しても、本イベントで必要となる流動抵抗および有効降伏抵抗は小さい傾向を示した。このことは、今回の流動体が通常の土砂主体の土石流とは異なり、氷河氷・融解水を含む崩壊物質が大量の河川水と混合しながら流下した、極めて高い流動性を有する現象であった可能性を示唆している。ただし、到達時刻データの再評価に伴い、この適合パラメータ範囲についても今後再検討の必要性が出てくる可能性がある。

一方、本解析は速報的な第 1 報であり、いくつかの重要な不確実性が残されている。まず、主要地点への到達時刻については、CCTV 映像、河川水位計、目撃証言および報道記録によって推定値が異なり、特に上流域では今後さらに精査する必要がある。次に、本解析では初期崩壊体を一定高さの土柱群として簡略化しており、実際の崩壊厚さ分布、氷と土砂の割合、および流動中の相変化は考慮していない。第三に、Trishuli 川を流れていた既存の河川水、河床侵食による流動量の増加、支流との合流、および流下に伴う材料組成の変化についても現モデルでは明示的に考慮していない。これらの簡略化は、特に下流域における流下速度、到達距離および浸水域の再現結果に影響を及ぼす可能性がある。さらに、29 m メッシュの DEM では、建物、構造物、植生などの局所的な地形・地表条件は明示的には表現されていない。これらに加えて粒子離散化の影響も、流路および浸水幅の再現精度に影響する可能性があり、今後さらに検討する必要がある。

今回の解析は、発災直後に入手可能な全球 DEM、衛星画像および限定的な観測情報のみを用いても、DIPM によって 100 km 規模の土石流・洪水の流下過程を短時間で解析できることを示した。今後、観測情報の更新に応じて解析条件を逐次修正することで、同様の高山域における氷河崩壊型土石流・洪水に対する迅速な広域リスク評価手法として発展させ、今回のような災害による将来の被害軽減に貢献することを目指している。

本災害により被災されたすべての方々に心よりお見舞い申し上げます。被災地域の日も早い復旧と、被災された方々が一日も早く平穏な生活を取り戻されることを心より願っております。

参考文献

- [1] U.S. Geological Survey, “2026 Nepal Debris Avalanche and Flash Flood”, Landslide Hazards Program, 2026.
<https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards/science/2026-nepal-debris-avalanche-and-flash-flood>
- [2] The Kathmandu Post, “Flash flood hits Rasuwa, damages hydropower projects and markets”, 26 August 2026.
<https://kathmandupost.com/national/2026/08/26/major-flood-damages-syabrubesi-hydropower-projects-in-rasuwa>
- [3] Zhang, N. and Matsushima, T.: “Simulation of rainfall-induced debris flow considering material entrainment,” Engineering Geology, Vol. 214, pp. 107–115, 2016. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.10.005.

- [4] Zhang, N. and Matsushima, T.: “Numerical investigation of debris materials prior to debris flow hazards using satellite images,” *Geomorphology*, Vol. 308, pp. 54–63, 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.02.008.
- [5] Zhang, N., Matsushima, T. and Peng, N.: “Numerical investigation of post-seismic debris flows in the epicentral area of the Wenchuan earthquake,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, No. 5, pp. 3253–3268, 2019. DOI: 10.1007/s10064-018-1359-6.
- [6] Ahmed, M. E. and Matsushima, T.: “Evaluation of soil properties of natural slopes from case histories and GIS,” *Proceedings of the International Conference on Computational Science (ICCS 2019)*, 12p, Singapore, 2019.
- [7] Chowdhury, F. H. and Matsushima, T.: “Modeling the Atami debris flow using the depth-integrated particle method and GIS: Flow characteristics and future risk assessment,” *Natural Hazards Research*, Vol. 5, pp. 705–718, 2025. DOI: 10.1016/j.nhres.2025.03.008.
- [8] Chowdhury, F. H. and Matsushima, T.: “Quantitative evaluation and wide-area simulation of post-failure debris flows using the depth-integrated particle method,” *Geoenvironmental Disasters*, Vol. 13, Article 17, 19p, 2026. DOI: 10.1186/s40677-025-00357-1.
- [9] Copernicus Data Space Ecosystem, “Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model”.
<https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM>
- [10] Esri, “World Imagery MapServer”.
https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer
- [11] European Space Agency (ESA) / European Commission, “Sentinel-2 Level-2A,” Copernicus Data Space Ecosystem, 2026.
<https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2>
- [12] Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, “Landsat 8–9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2,” U.S. Geological Survey, 2020. DOI: 10.5066/P9OGBGM6.
<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
- [13] Park, H.: “A rock-ice avalanche and the 2026 Bhote Koshi-Trishuli flood, Nepal,” *EarthArXiv*, preprint, 2026. DOI: 10.31223/X5250R.
- [14] Center for Land Surface Hazards (CLaSH): “August 2026 Nepal Trishuli Flood,” StoryMap, updated 2 September 2026. Seismic volume estimates by Christopher Calvelage, EarthScope.
<https://storymaps.arcgis.com/stories/f2b2425eac544929a7d18f4c90b41d66>
- [15] HiRISK, “A cascading high-mountain disaster: Rasuwa Flood, 26 August 2026,” Rapid Hazard Assessment, 2026. (<https://rasuwaflood.org/event.html>)

- [16] OnlineKhabar, “‘Nothing is left of Timure Bazaar’,” 26 Aug. 2026.
(<https://english.onlinekhabar.com/nothing-is-left-of-timure-bazaar.html>)
- [17] Ram Kumar DC, “How the Bhotekoshi flood unfolded over 10 hours,” *The Kathmandu Post*, 27 August 2026; based on the initial technical report of the Flood Forecasting Division, Centre of Hydrology and Water Resources Research.
(<https://kathmandupost.com/national/2026/08/27/how-the-bhotekoshi-flood-unfolded-over-10-hours>)
- [18] U.S. Geological Survey (USGS), “M 5.2 Landslide – 55 km NW of Kodārī, Nepal,” USGS Earthquake Hazards Program, Earthquake Event Page, Event ID: us7000tbwb, 26 August 2026.