

土石流はどのようにして 発生するのか？

—現地観測による発生プロセスの解明—

静岡大学農学部

今泉 文寿

2021年7月3日 熱海土石流災害

他地域から搬入された土砂が土石流化



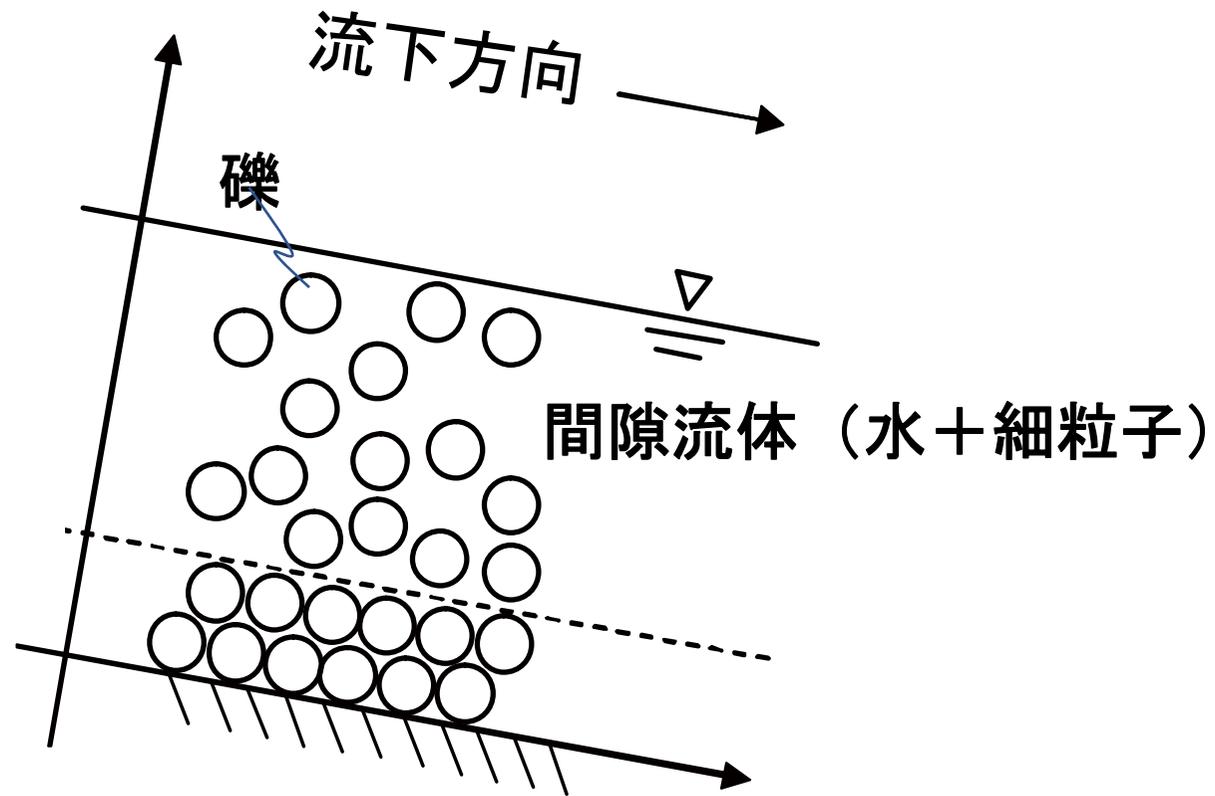
本日の内容

- ・ 土砂生産が土石流の発生に及ぼす影響
- ・ 土石流の発生・流下過程

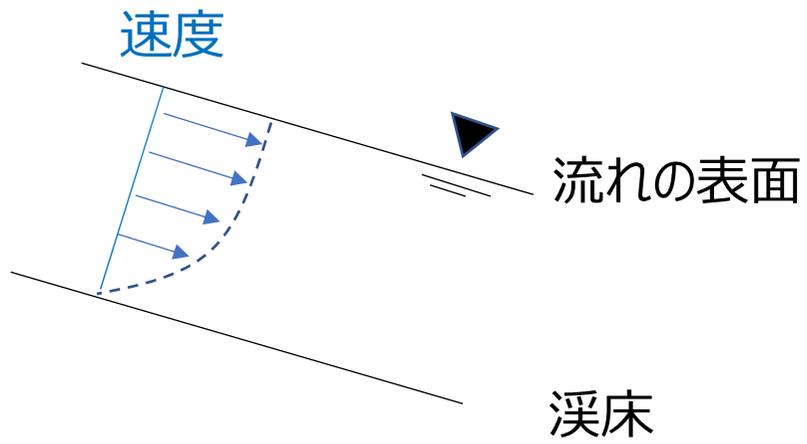
静岡県北部大谷崩での土石流観測によって
明らかになったことを中心に紹介する

土石流とは？

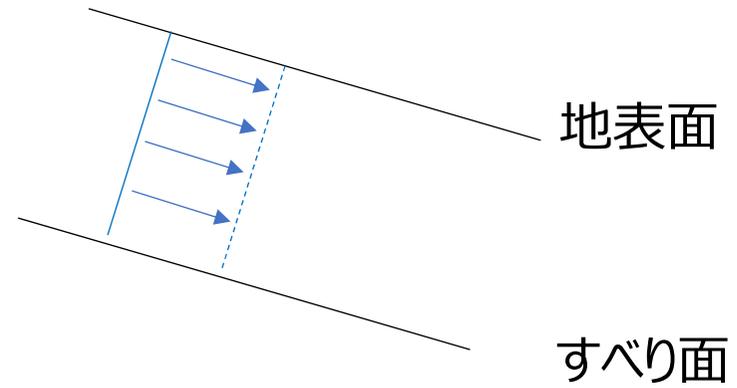
土砂（砂礫）と水が**一体**となって渓流を**流下**する現象。つまり土砂と水の混相流。



すべりとの違い



流体

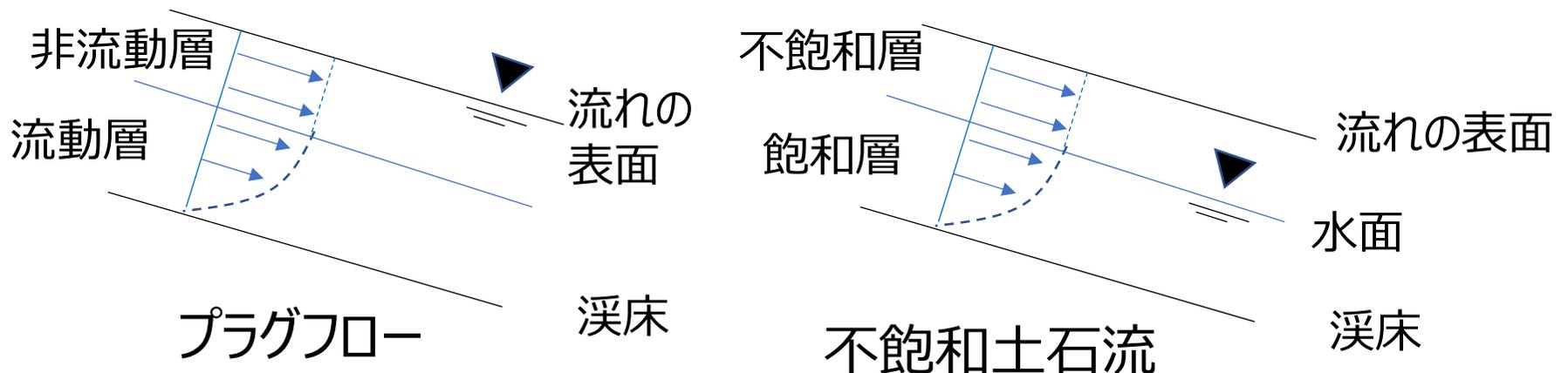


すべり

実際は区別が難しい

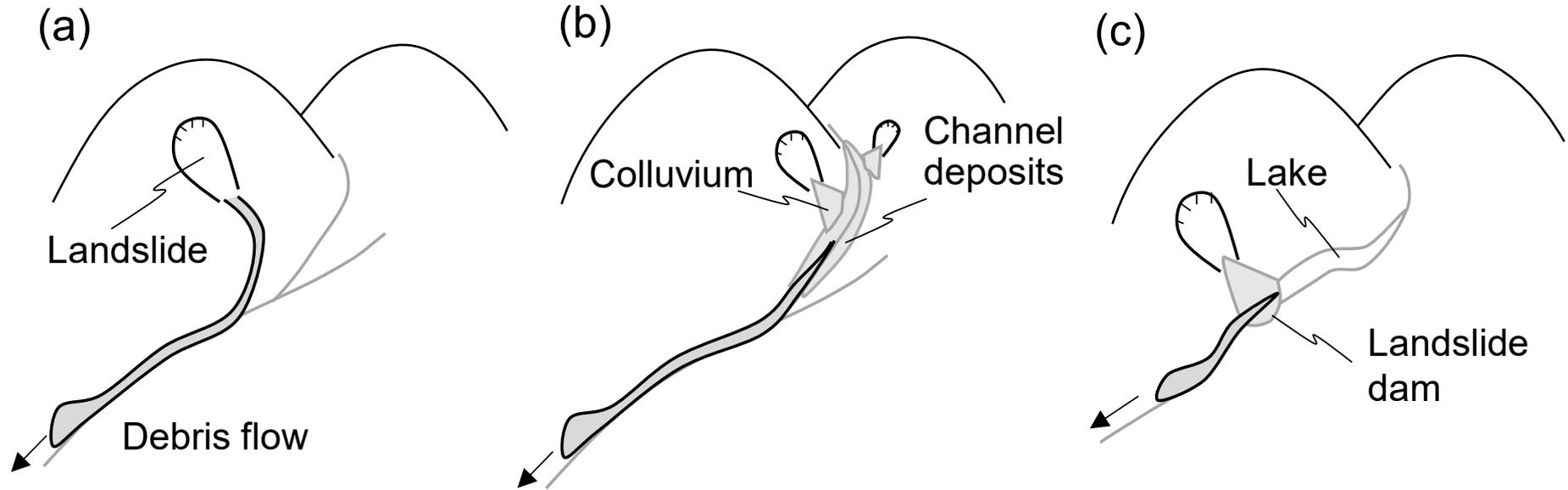
すべりにより移動を開始した崩土が構造を乱し土石流化することも多々ある

プラグフロー（移動土塊の上層が流動していない流れ）や**不飽和土石流**（移動土塊の上層が不飽和の土石流）といった、崩壊と土石流の中間的な土砂移動も存在



本発表ではあまり細かいところにはこだわらない

土石流の発生メカニズム



崩壊土砂の流動化

溪床堆積物の侵食・
流動化

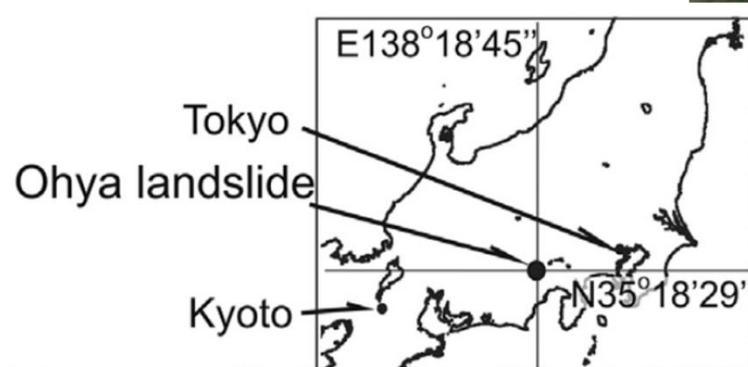
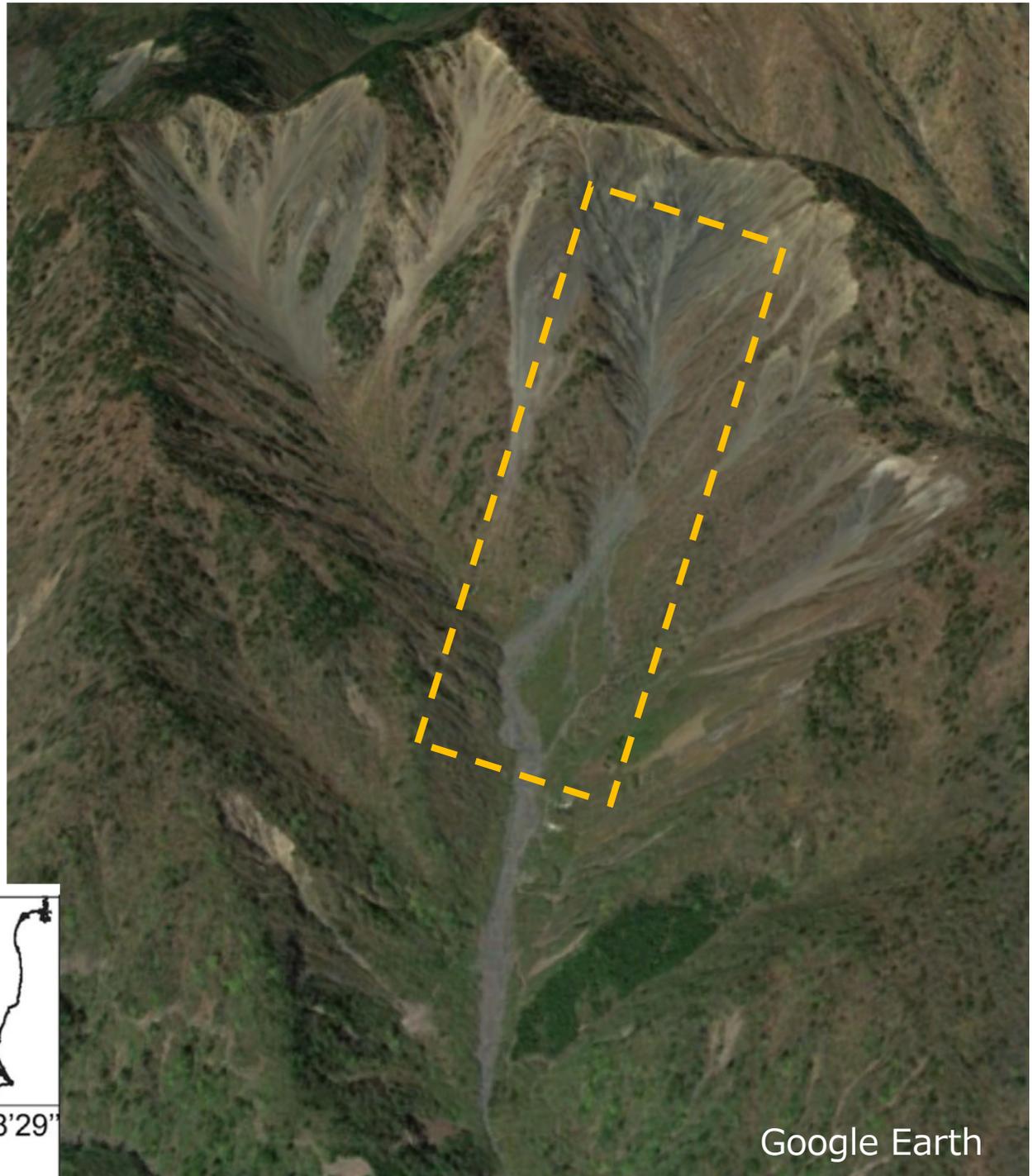
天然ダムの決壊

土石流の発生には多量の**土砂**と**水**の存在が必要

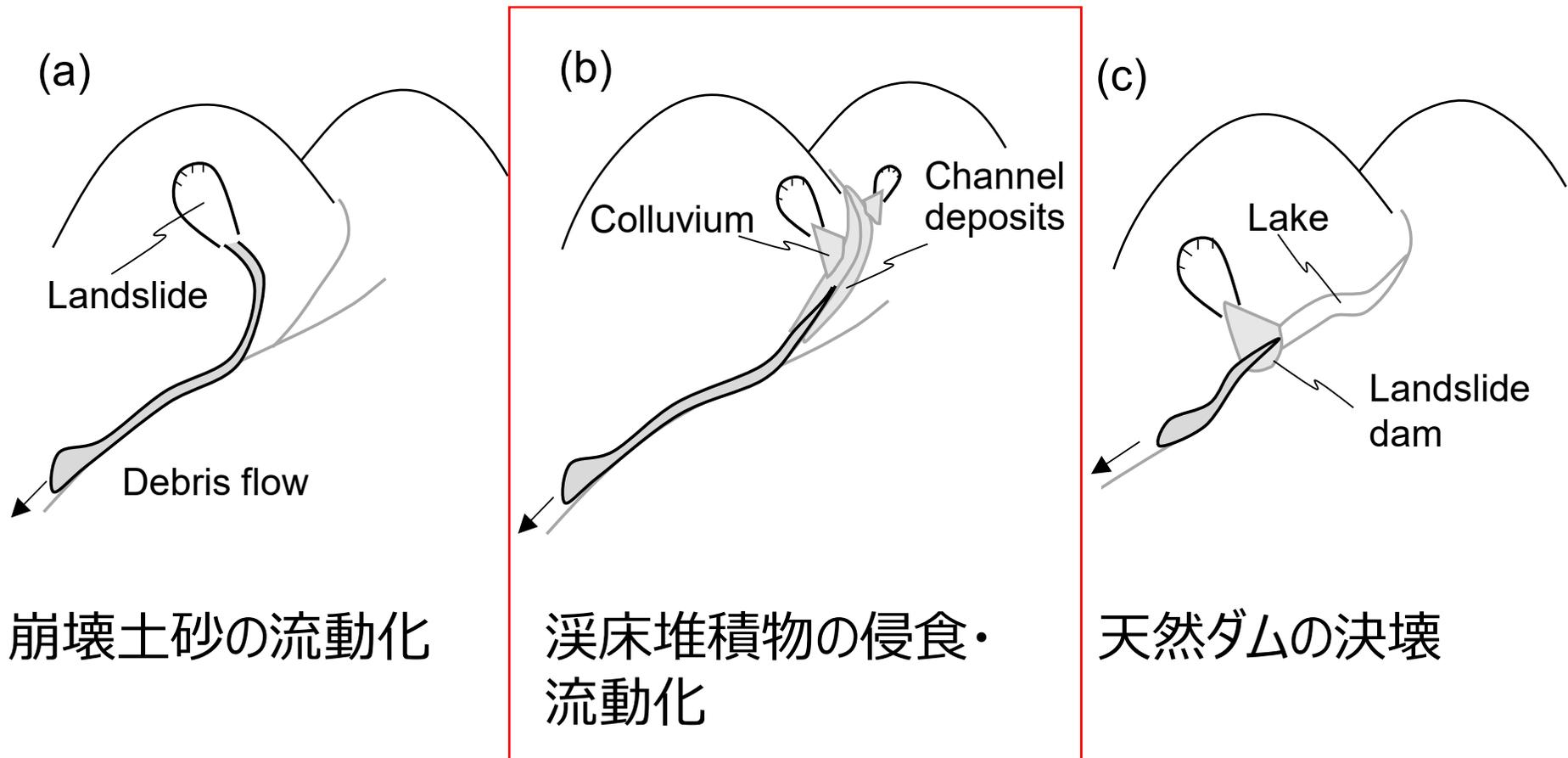
土砂生産が土石流の発生に 及ぼす影響

大谷崩

- 1707年の宝永地震によって形成
- 推定崩壊土砂量
120,000,000m³
- 地質: 第三紀四万十帯
瀬戸川層群
砂岩頁岩互層



土石流の発生メカニズム



土石流の発生には多量の**土砂**と**水**の存在が必要



2016/11/20



2017/5/19





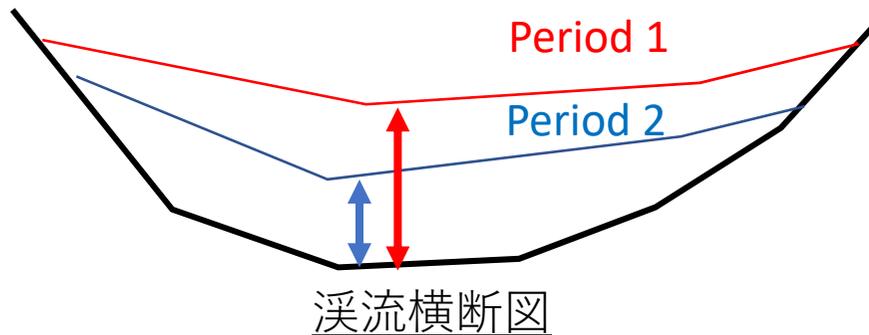
調査方法 UAV-SfM



<https://www.dji.com/jp/phantom-4-pro>

UAV(dji Phantom 3, 4, 4RTK)により定期的に溪流沿いを撮影

基岩面

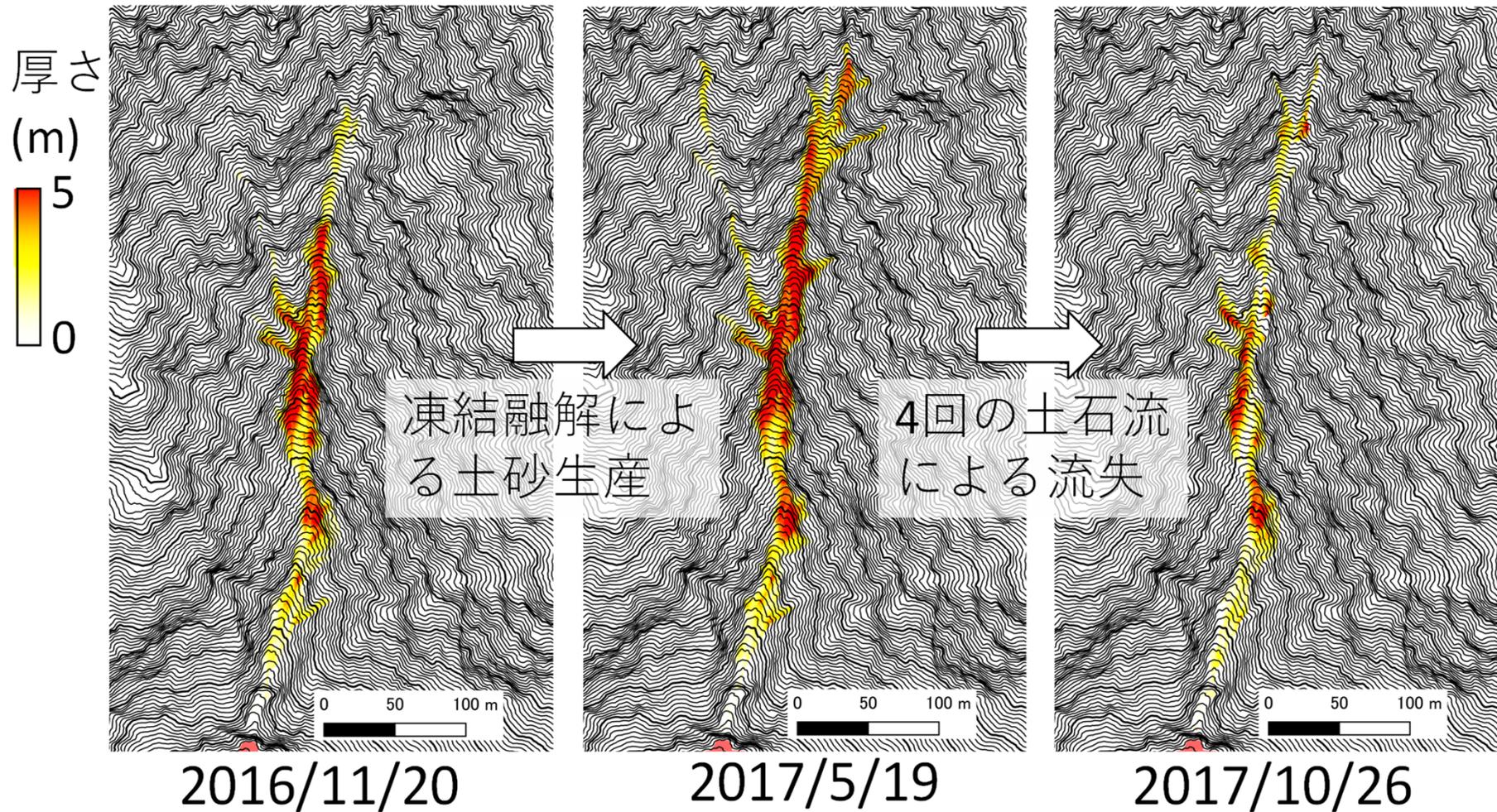


SfMソフト (Agisoft, Metashape) によって点群データを作成。TINにより0.1m DEMを構築

全時期間の最低標高値を基岩面と仮定し，堆積深を推定

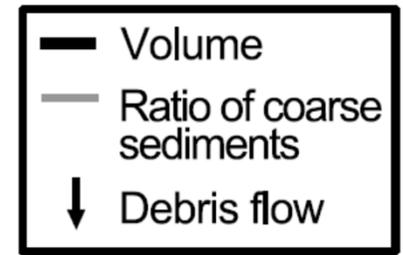
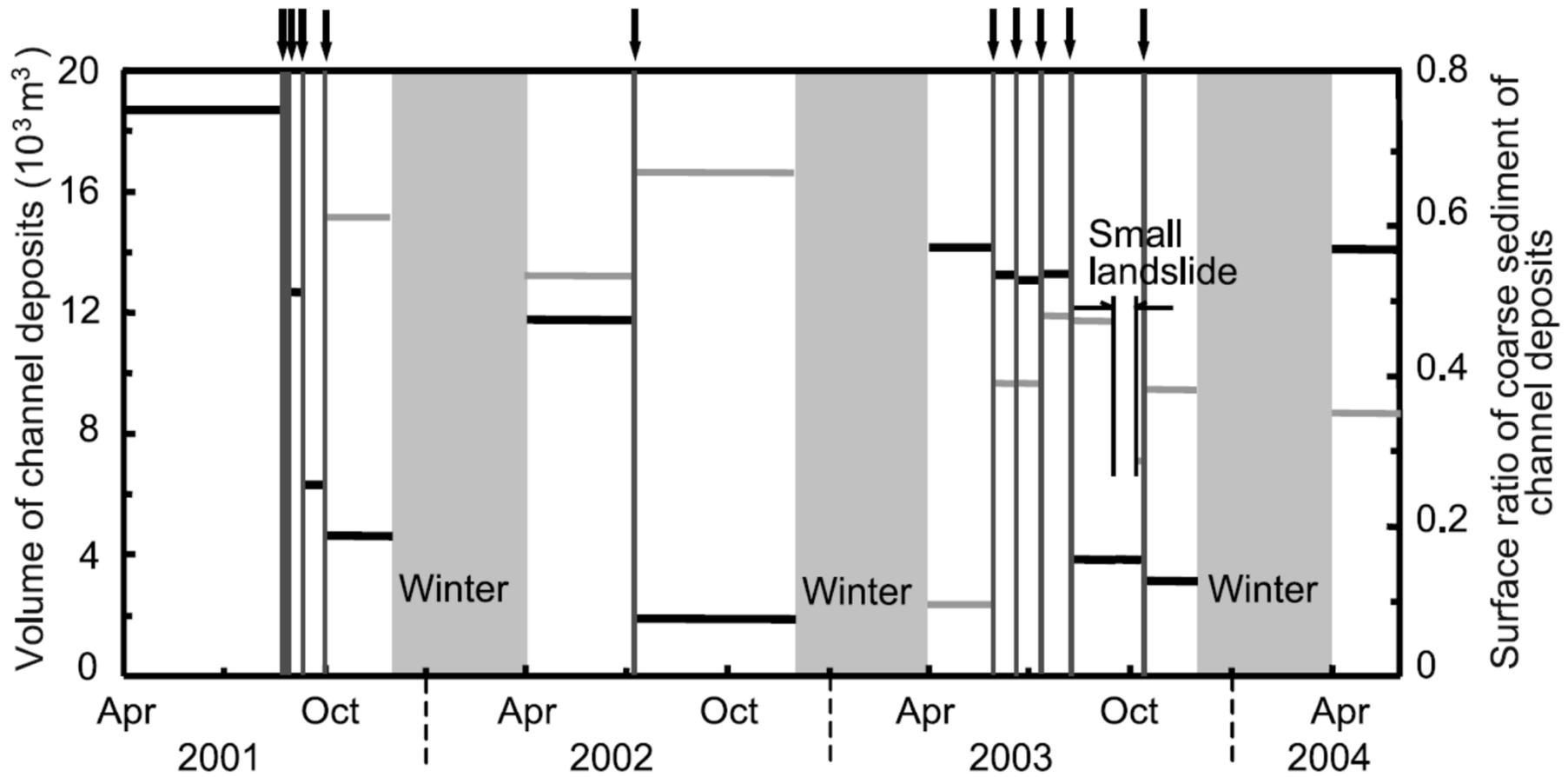
撮影タイミング：

- ・土石流の発生前
- ・土石流発生後
- ・冬の前



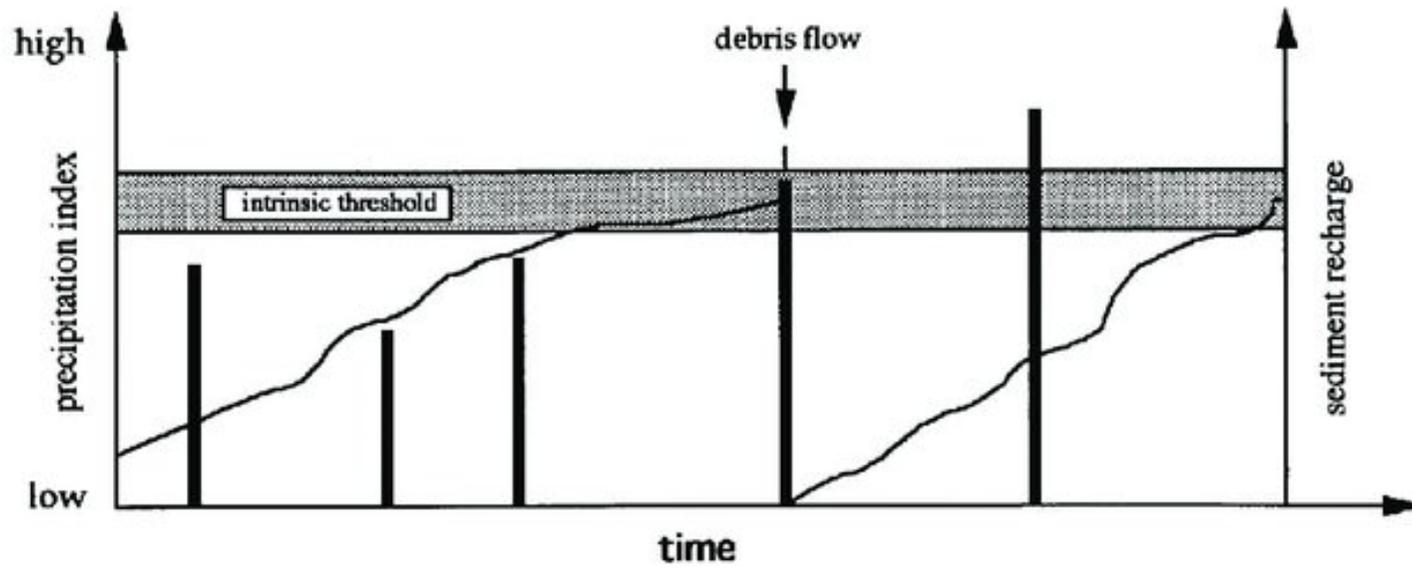
冬季から春先の凍結融解により土砂が生産され溪床堆積物が増加
土石流の発生による土砂の流出で溪床堆積物が減少

堆積土砂量の経時変化

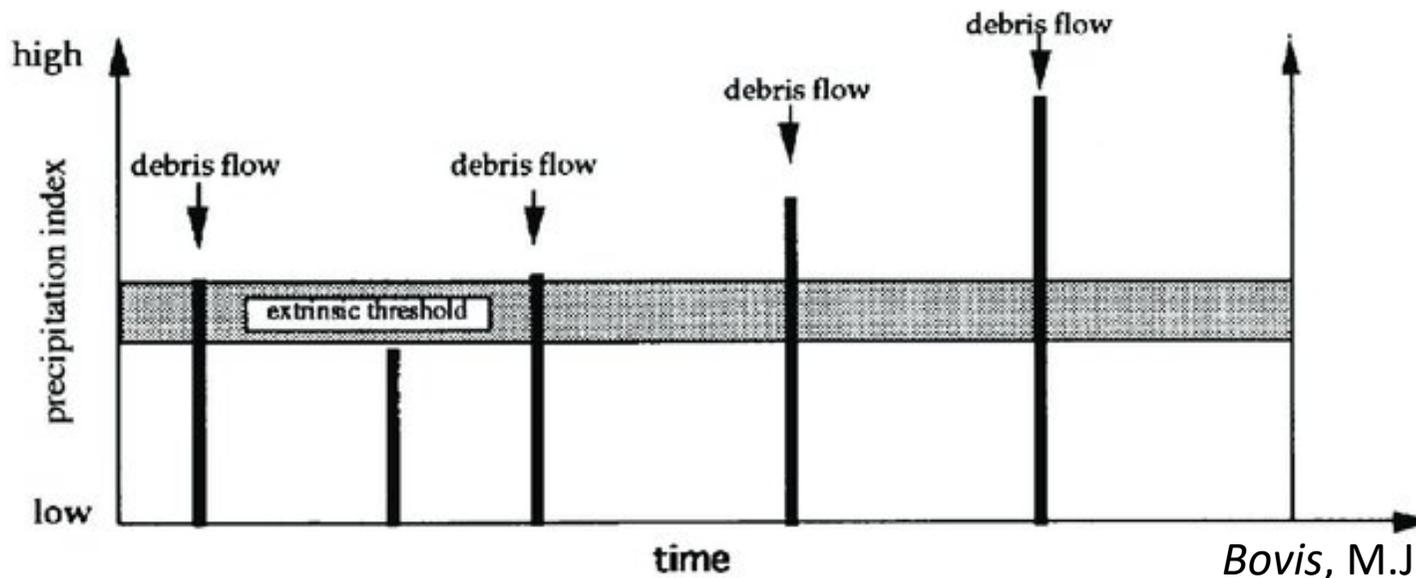


Imaizumi et al. (2006)

weathering-limited system (supply-limited)



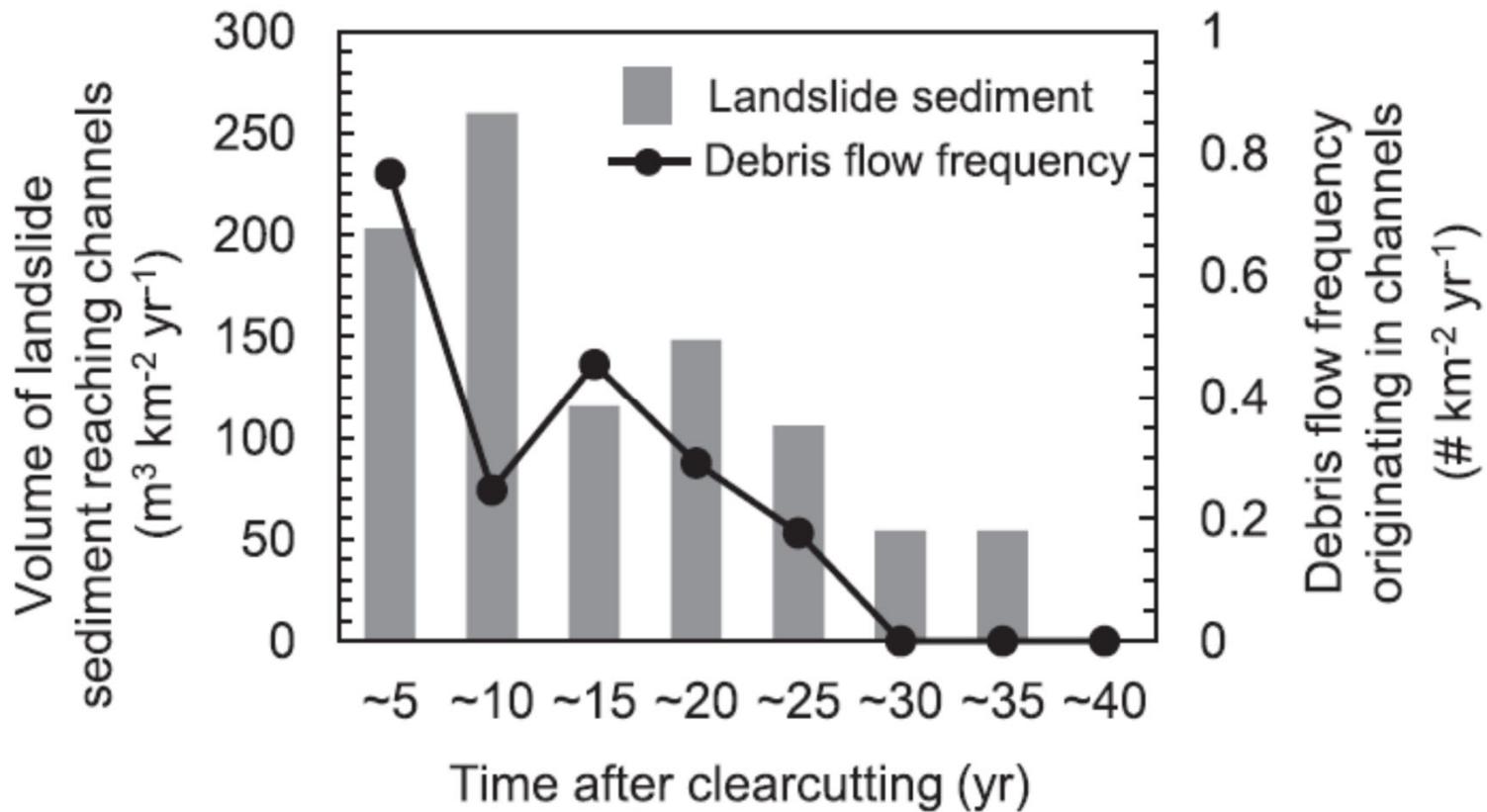
transport-limited system (supply-unlimited)



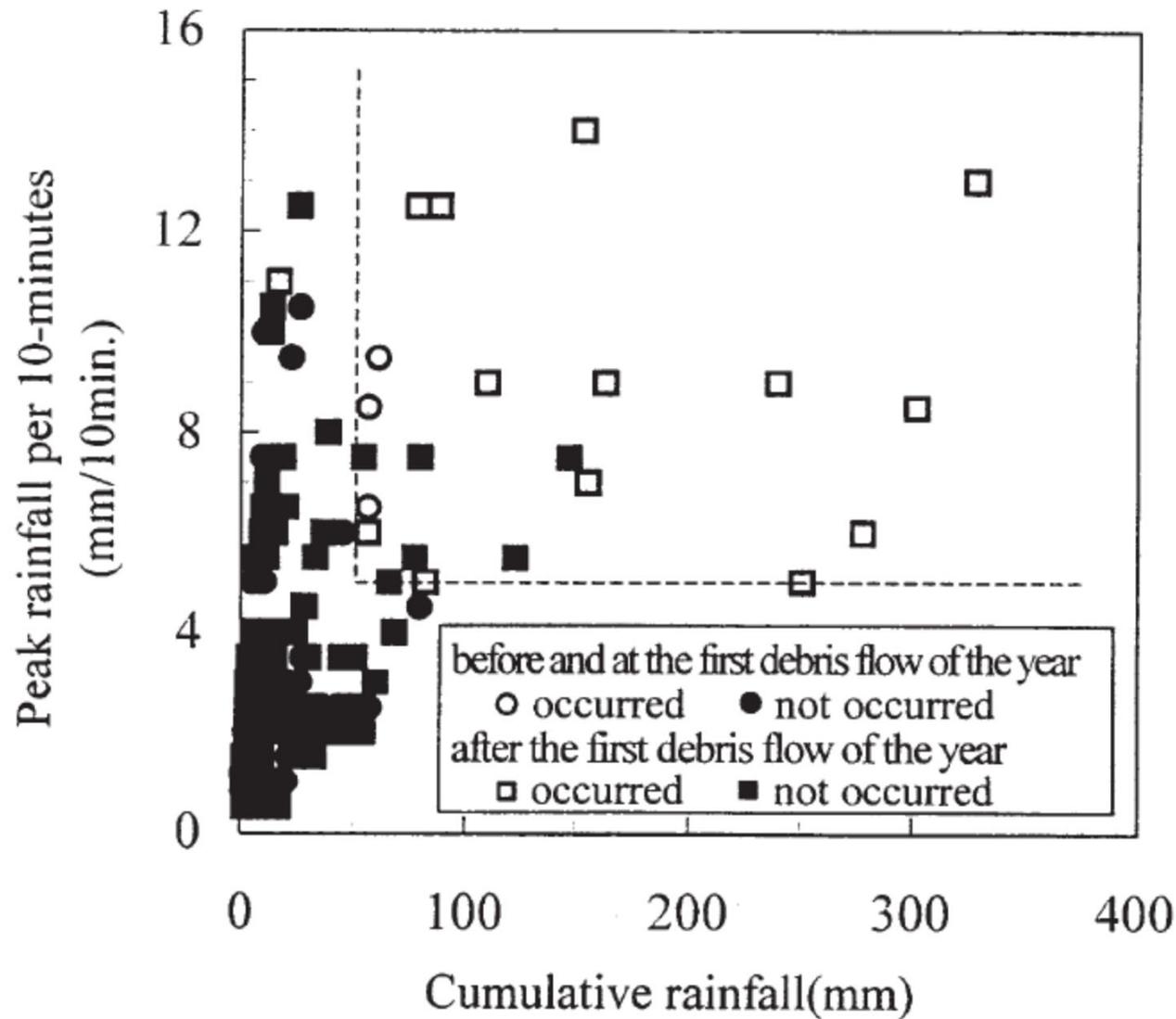
- 土砂の供給量が多い流域では土石流の頻度が高くなる (May, 2002; Jakob et al., 2005)
- ヨーロッパアルプスでは永久凍土が融解
→土砂生産が活発化して土石流の頻度が増加している(Stoffel et al., 2014)
- 森林の伐採や山火事は土砂生産量や流域内の水文過程を大きく変化させ、土石流の頻度を増加させる (Palucis et al., 2021; Imaizumi and Sidle, 2021)



Supply limited basinの溪流の特徴？

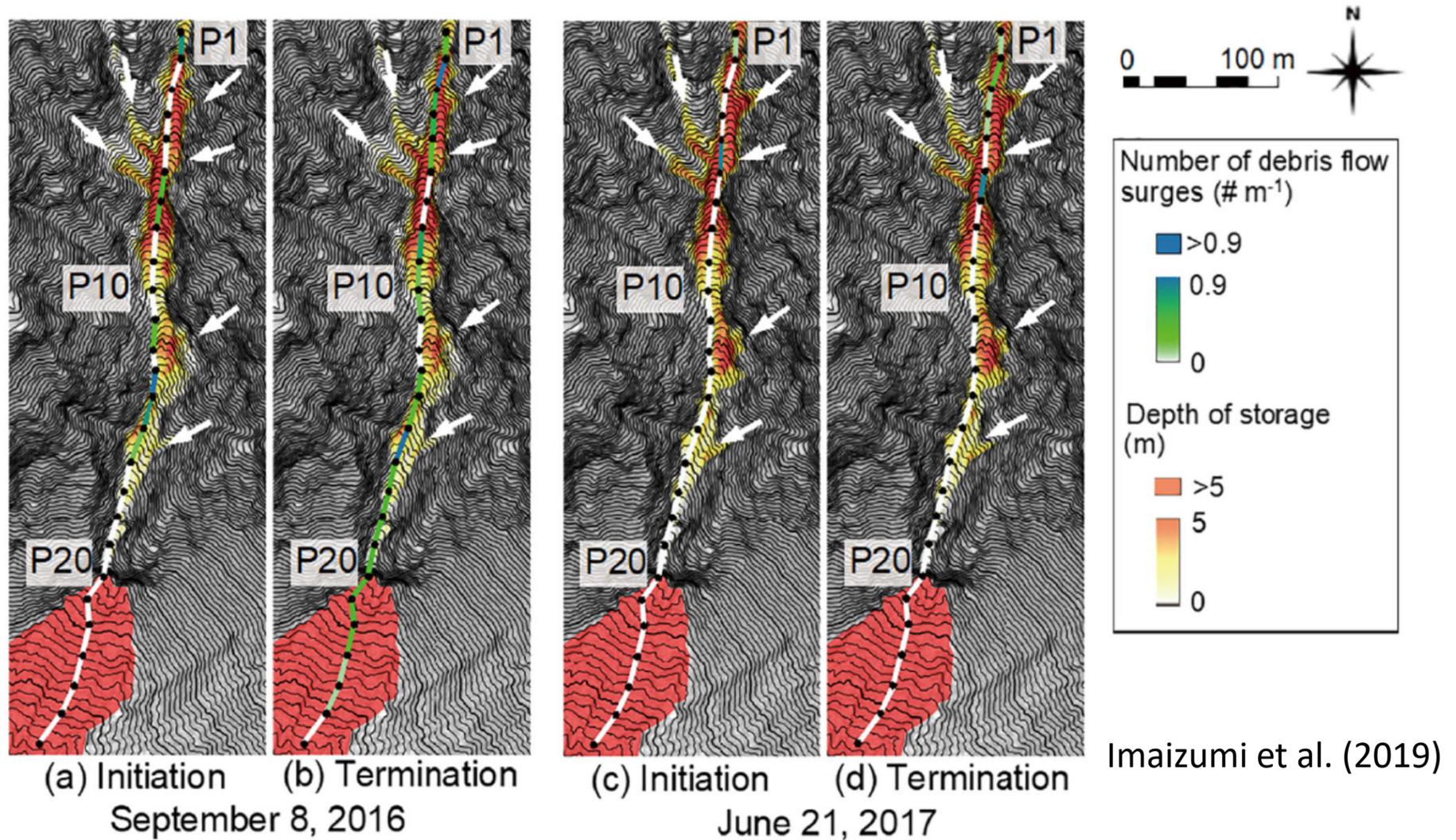


森林伐採後、溪流への土砂供給量が増えると、溪流周辺の土砂の流動化による土石流の発生数も増える

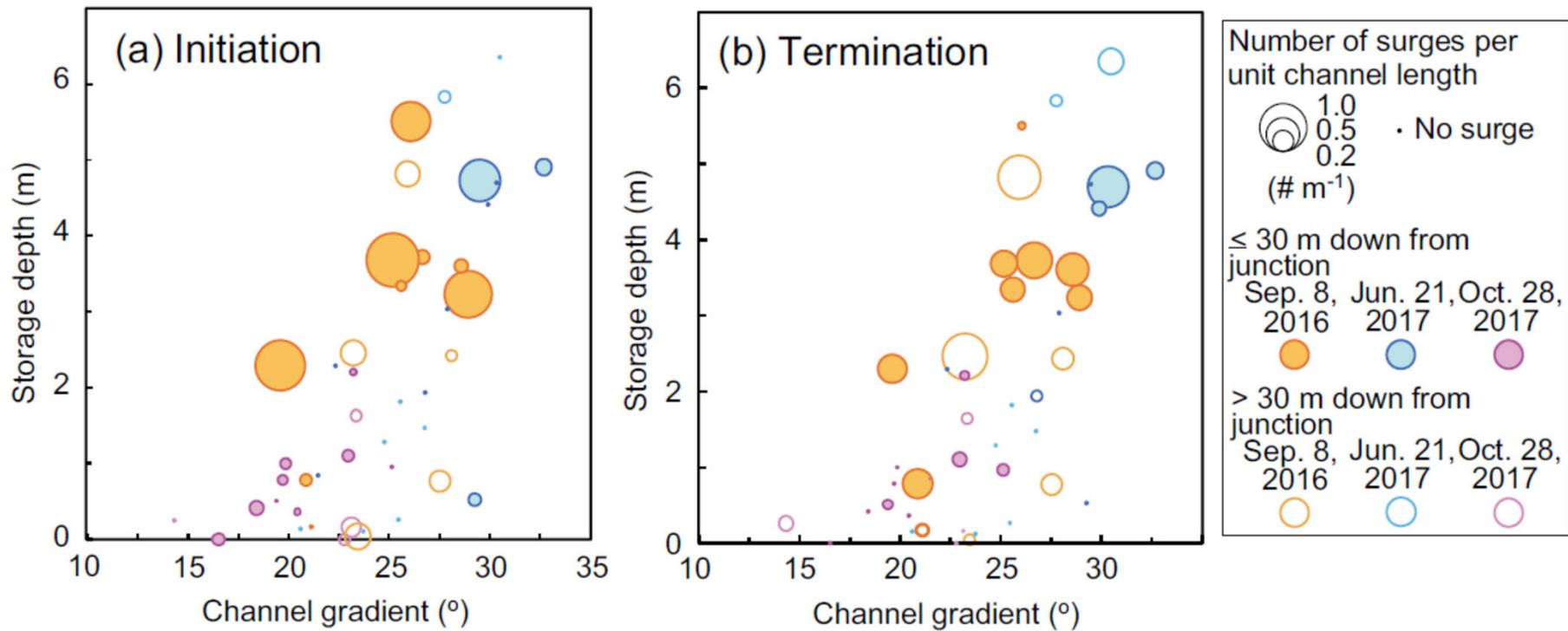


今泉ら (2004)

大谷崩は「おおよそ」transport limited
 (溪床堆積物がすべて流下してなくなったことがないから)

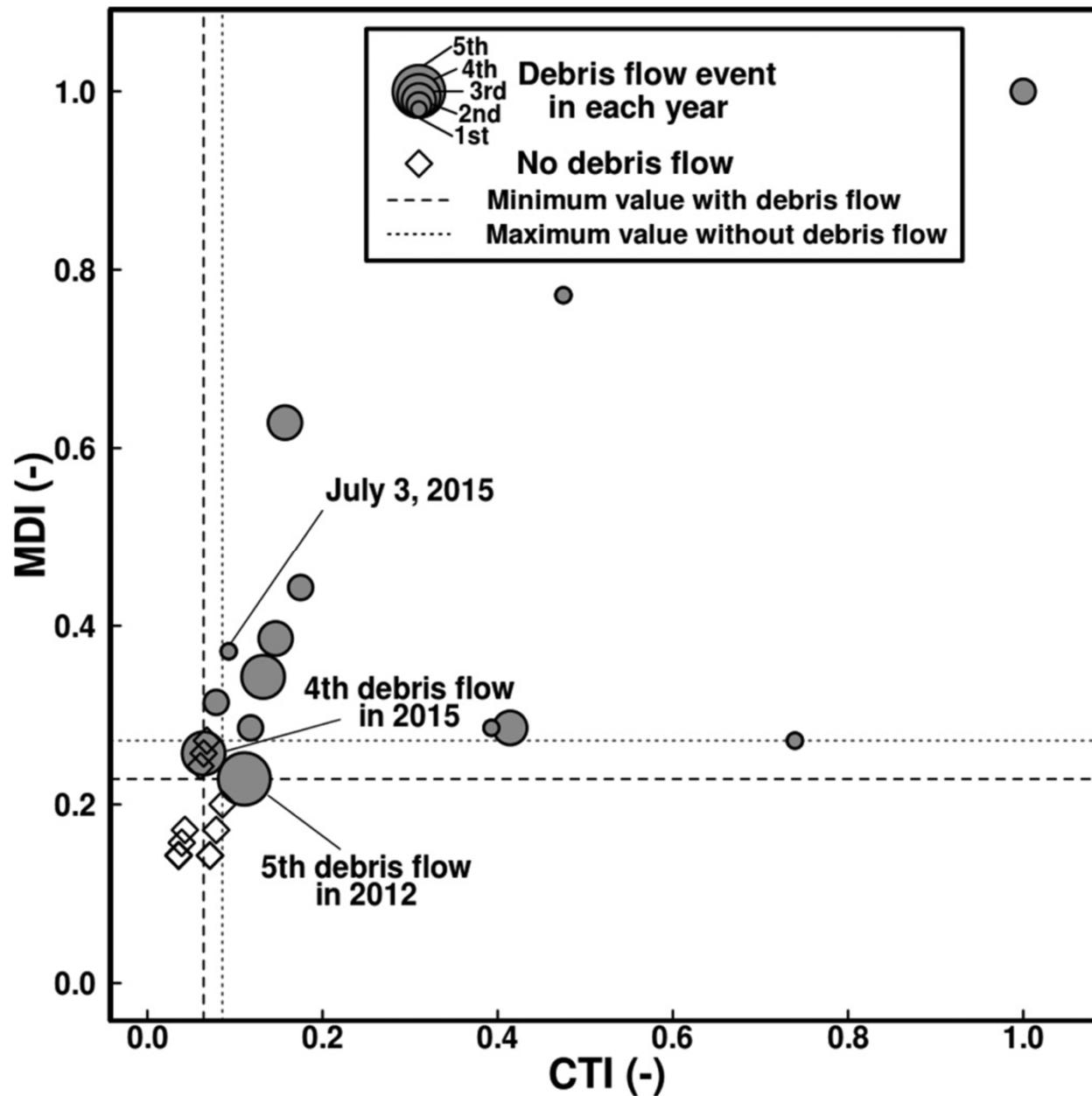


局所的にみていくと，堆積物が厚く貯まるところで土石流段波が発生
 (Transport limitedであっても土砂生産，堆積が発生に影響)



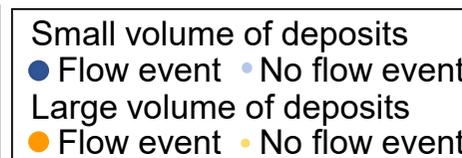
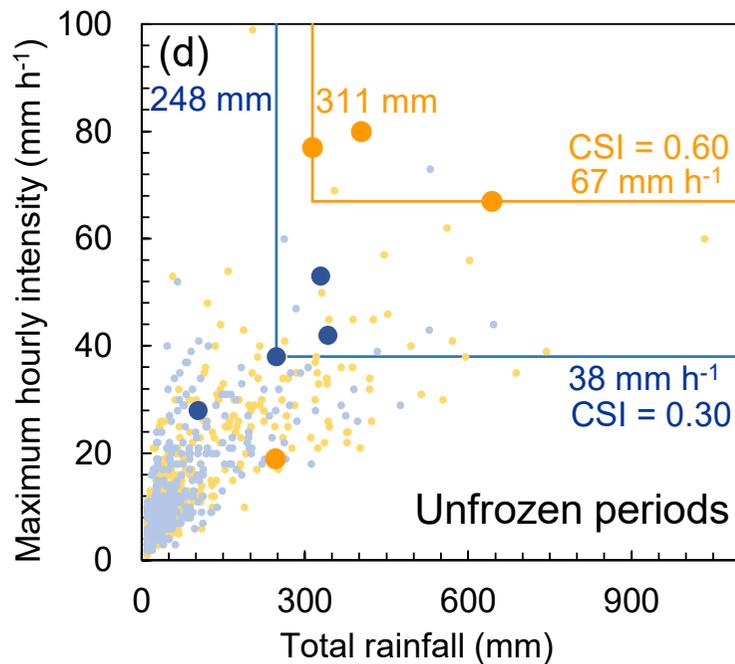
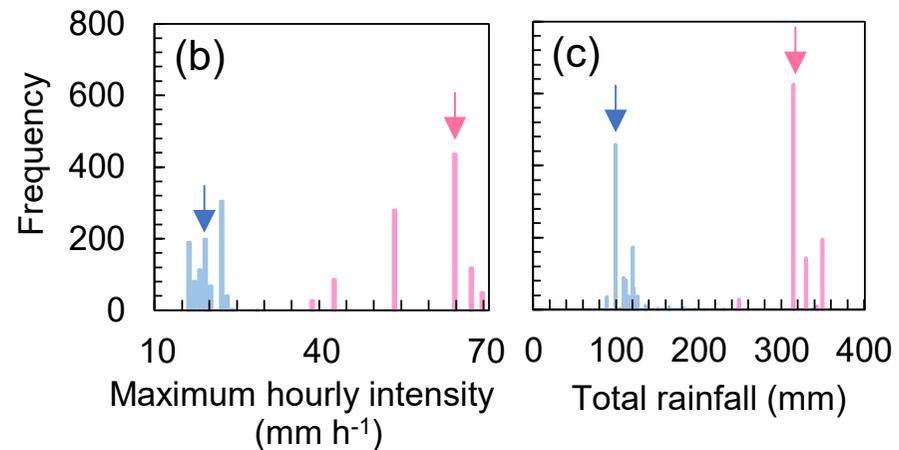
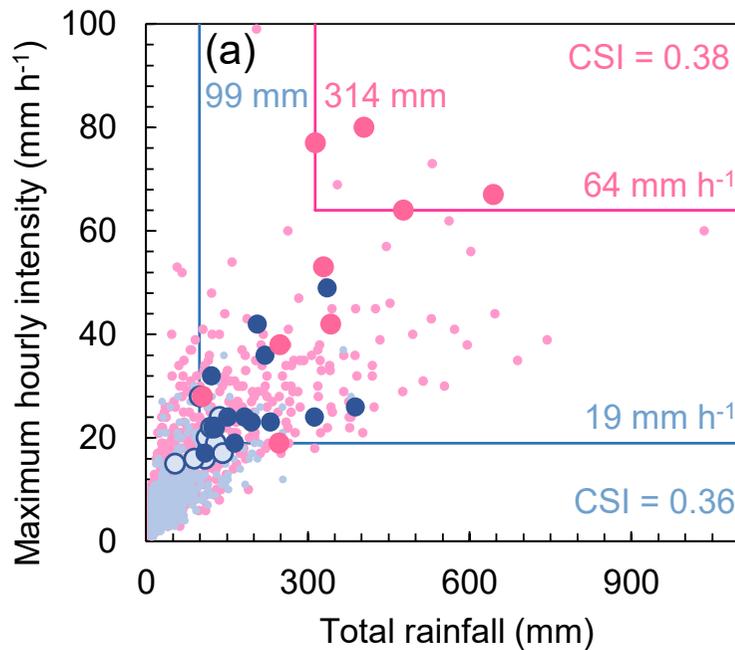
段波の発生個所

- 堆積物が厚い（最大粒径の数倍以上）
- 急勾配区間
- 支流の合流地点の近く



Tsunetaka et al. (2021)

初夏は秋と比較して土石流の発生に若干多くの雨が必要



富士山大沢崩れでは

- ・凍結期のほうが非凍結期よりも少ない雨量で土石流が発生する
- ・非凍結期は堆積物が多い時期のほうが、土石流発生に大きな雨が必要

土砂生産が土石流の発生に重要（共通認識）

土砂生産量が多いと土石流が発生しやすくなる
（集合的な土砂移動がおきやすくなるから？）

堆積土砂の局所的な分布が発生個所に影響

土石流頻発溪流では堆積物量が大きい時のほうが、土石流の発生に大きな降雨を必要とする場合もある
（堆積土砂がなかなか飽和しないから？）

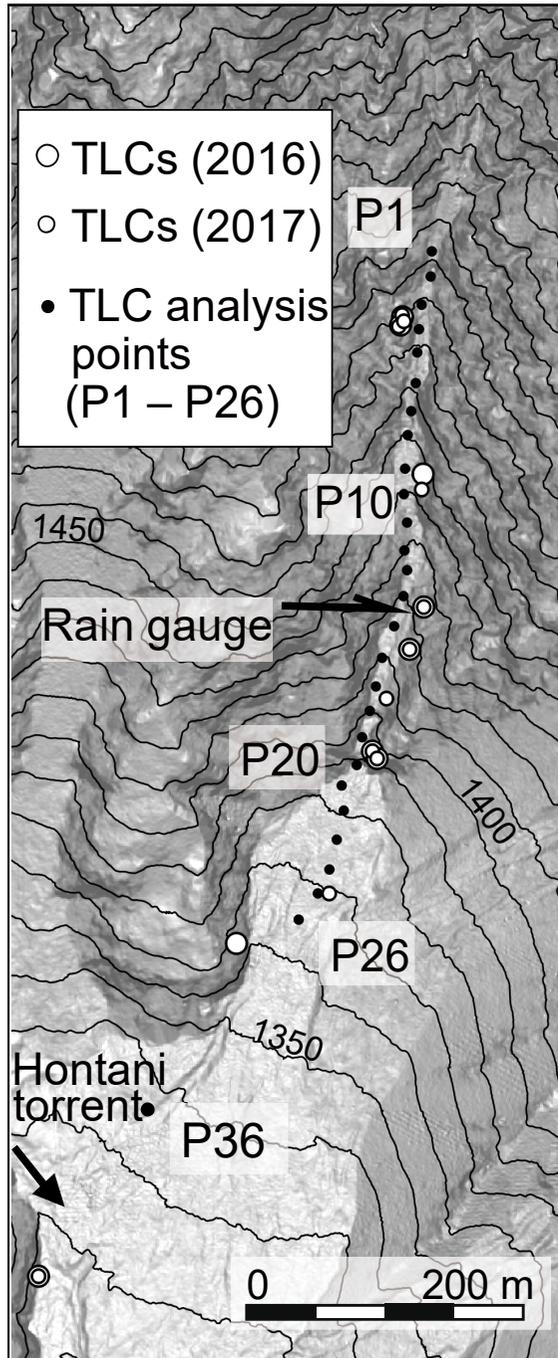
土石流の発生・流下過程





調査方法 TLC

Time lapse cameras (TLCs)



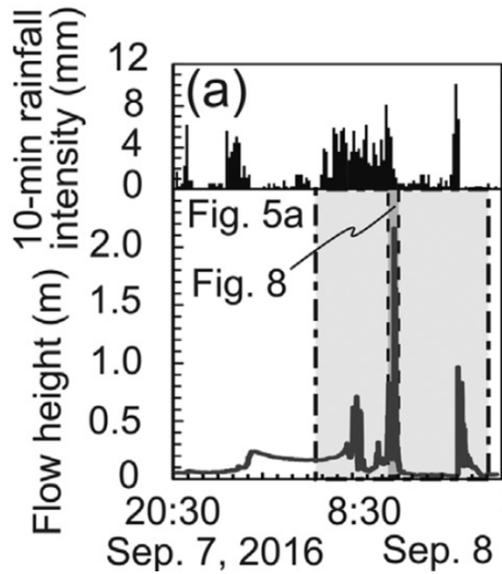
TLC200 Pro, Brino

<http://brinno.com/jp/time-lapse-camera/TLC200Pro>

- 8 ~ 24台のカメラを40~80m間隔で設置し15秒間隔で撮影
- 溪流沿いに20m間隔で26ポイント (P1からP36)の判読地点を設け, そこでの土石流の流下の様子を記録

溪床堆積物移動型の土石流発生メカニズム

1. 地表流に溪床の土砂が取り込まれることにより流れが発達して土石流化
2. 溪床の土砂が飽和してすべることにより土砂が集合的に移動を開始して土石流化（急勾配溪流）
3. 溪岸の崩落，支流からの土砂の流入などをきっかけに土石流が発生

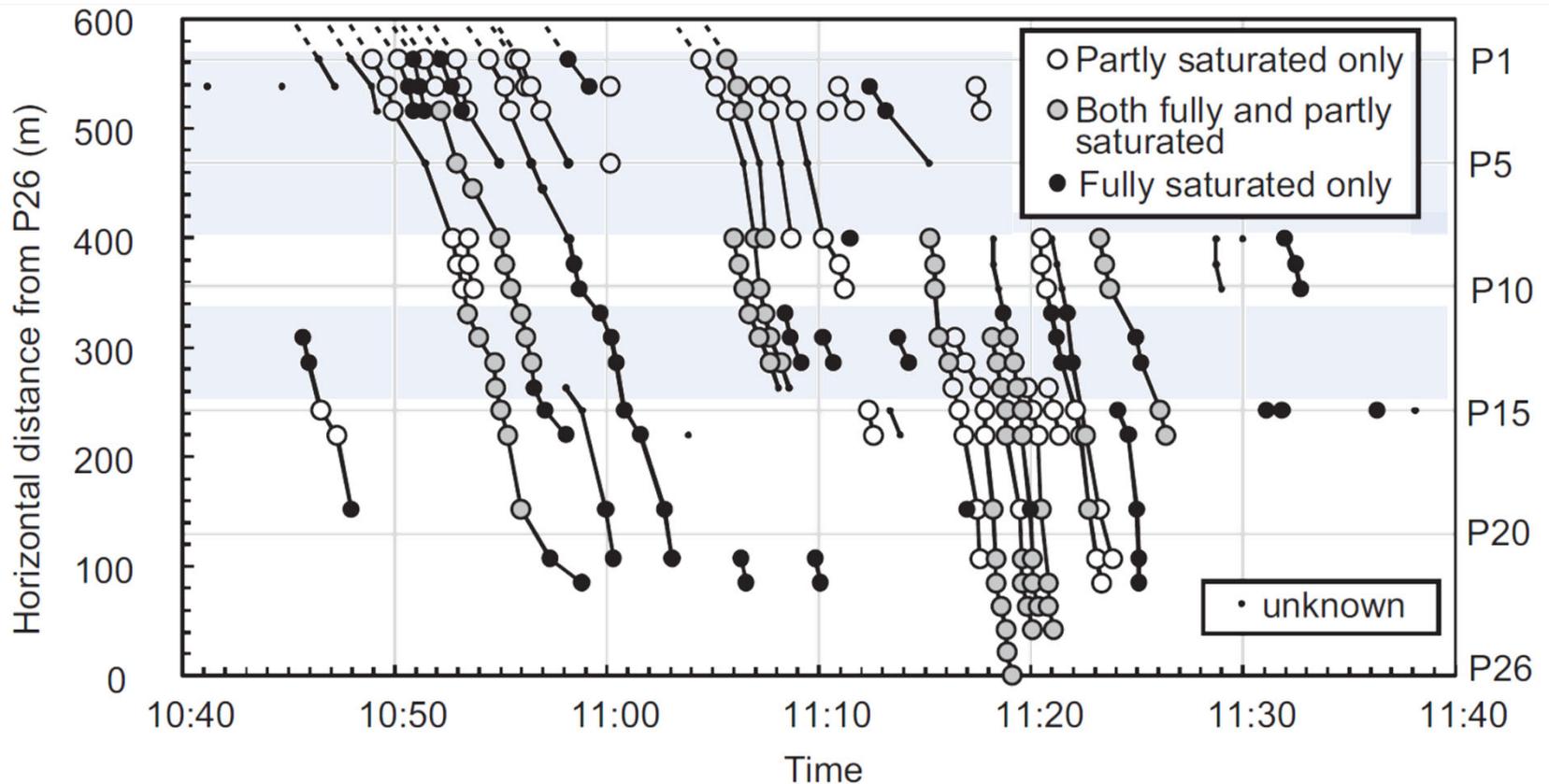


発生域では無数の段波が発生と停止を繰り返す

堆積物が堆積する区間で段波が多く発生

そのうちの一部の段波が下流側へ到達

Imaizumi et al. (2019)

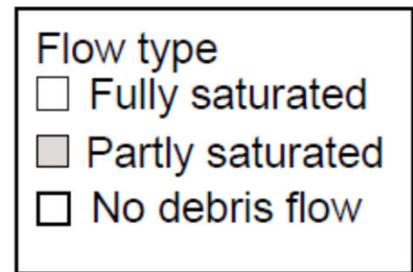
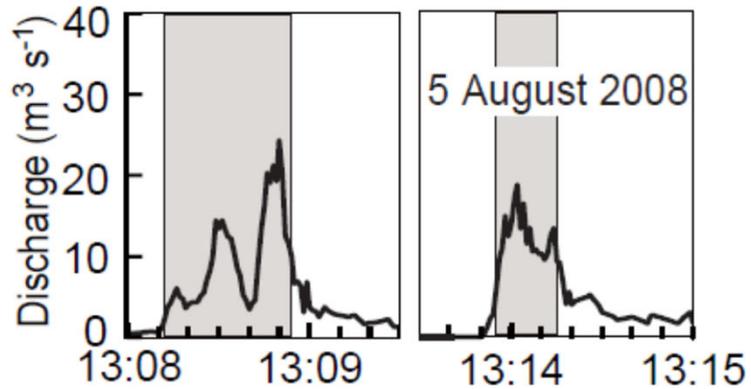
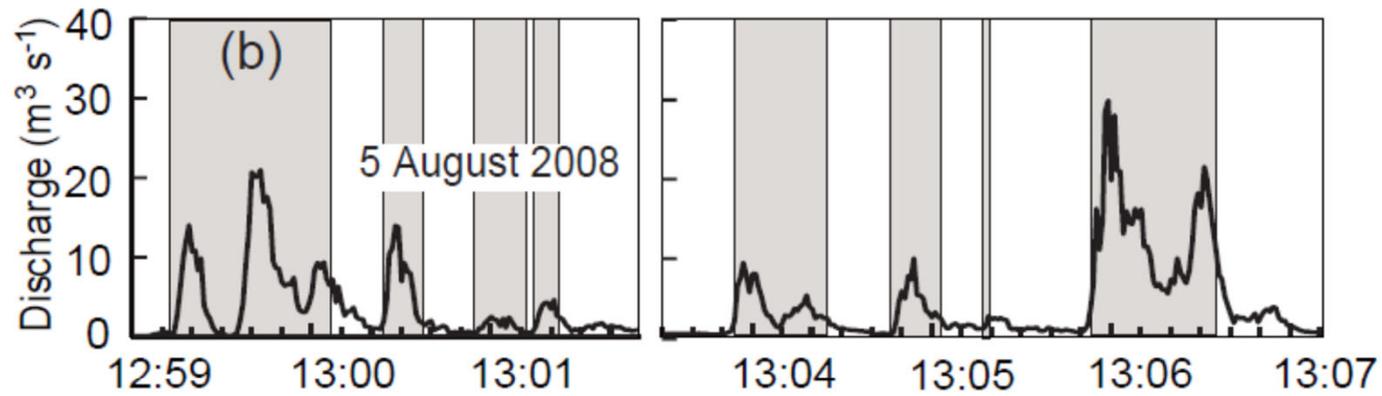
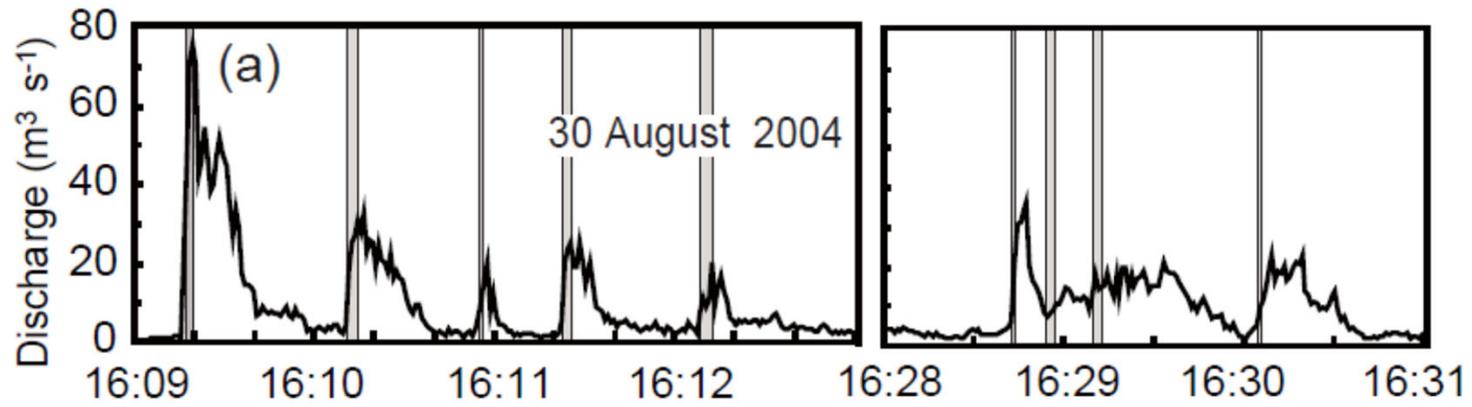


土石流

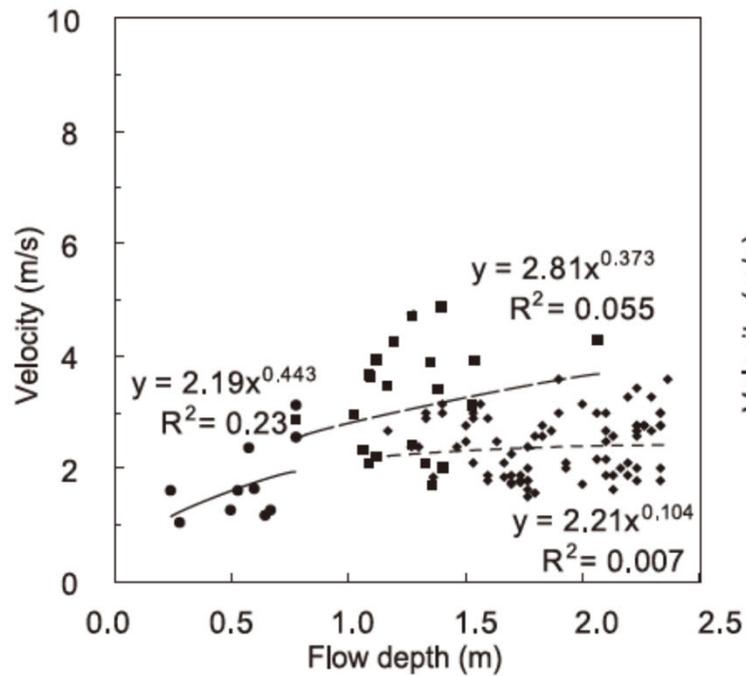


不飽和土石流

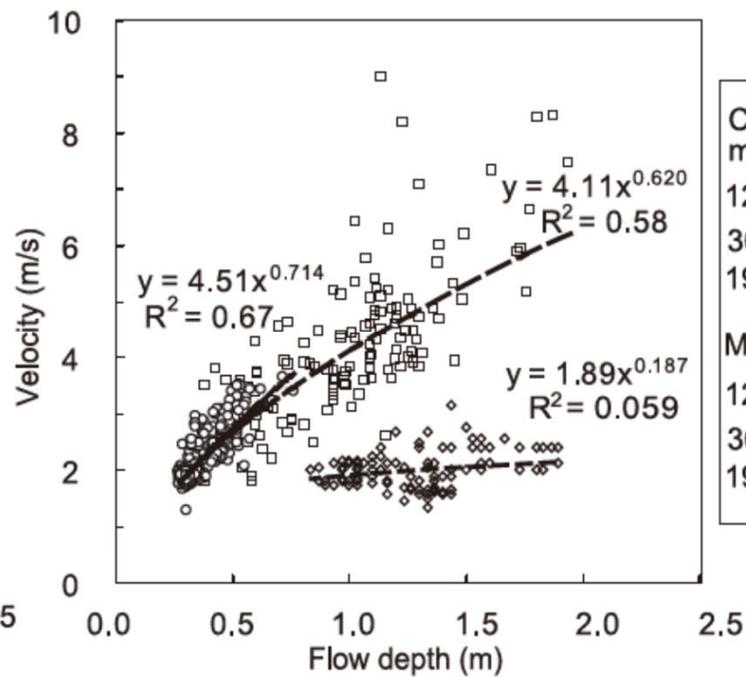




Imaizumi et al. (2017)



不飽和土石流



飽和土石流

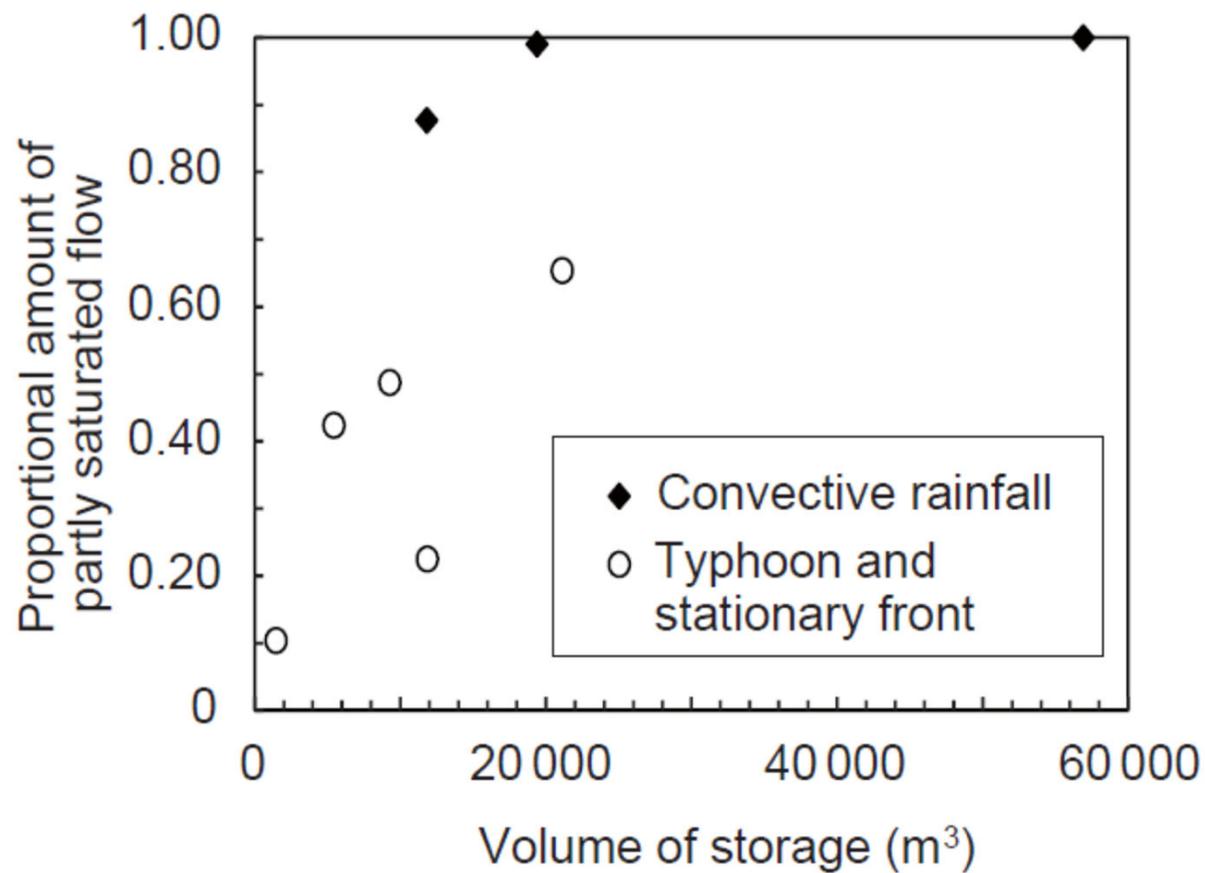
Cobbles and boulders mainly

- 12 July 2003 ● ———
- 30 August 2004 ■ - - -
- 19 July 2006 ◆ - - -

Muddy water mainly

- 12 July 2003 ○ ———
- 30 August 2004 □ ———
- 19 July 2006 ◇ - - -

不飽和土石流のほうが流動性が乏しい



堆積物の量が多いほど，連続雨量が少ない雨ほど，不飽和土石流の割合が高い

どうして土石流は流れやすいのか？

過剰間隙水圧の発生→有効応力の減少

粗粒子の骨格構造が乱される→間隙流体が収縮
流れの乱れによるレイノルズ応力

細粒子が間隙流体に取り込まれることによる間隙流体の単位体積重量の上昇（液相化）

平衡濃度式（与えられた溪床勾配に対して平衡状態にある土石流の濃度）

$$c_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)}$$

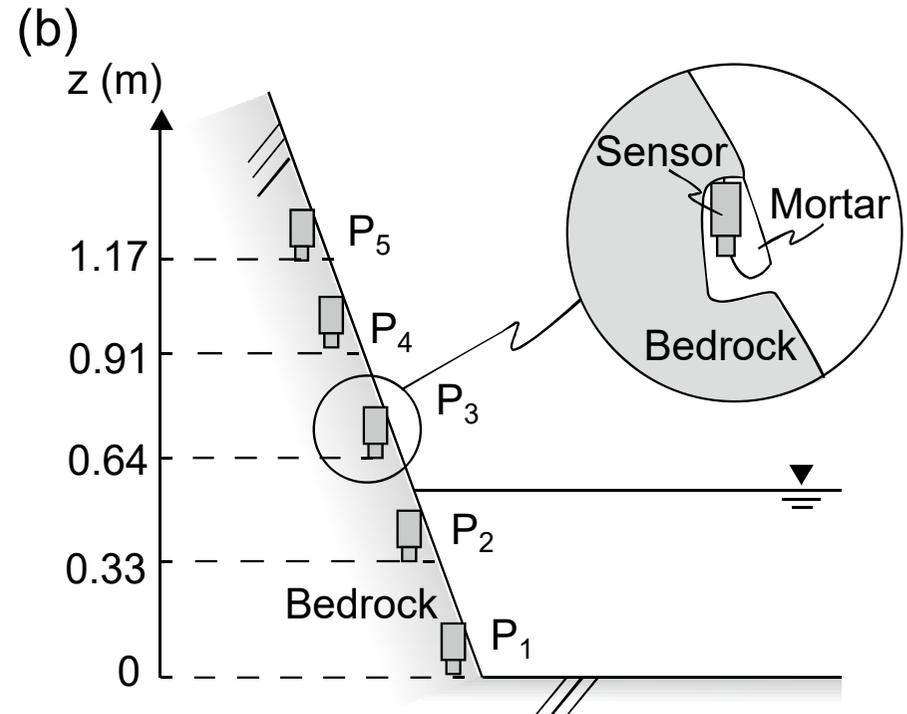
c_d : 平衡濃度 ρ : 間隙流体の単位体積重量

σ : 砂礫の単位体積重量 (=2650 kg m⁻³)

ϕ : 内部摩擦角（土砂の特性ごとに一定値）

θ : 河床勾配

間隙水圧の測定

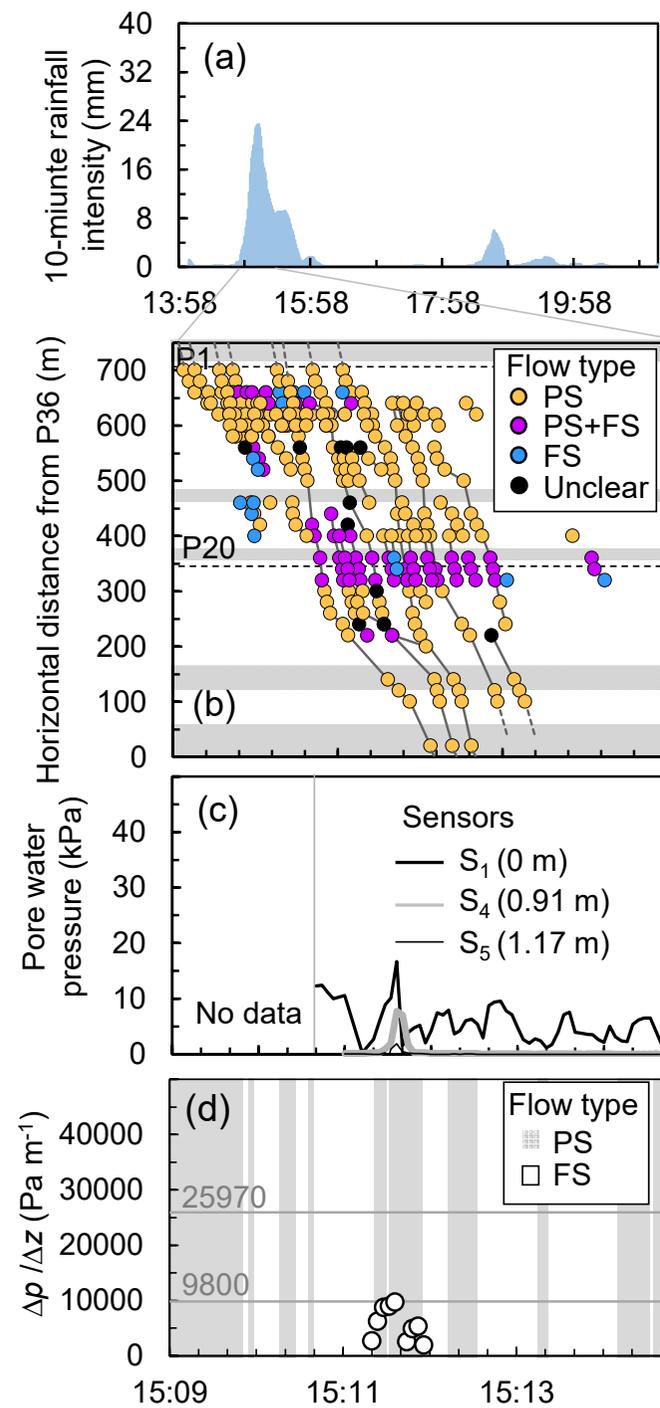
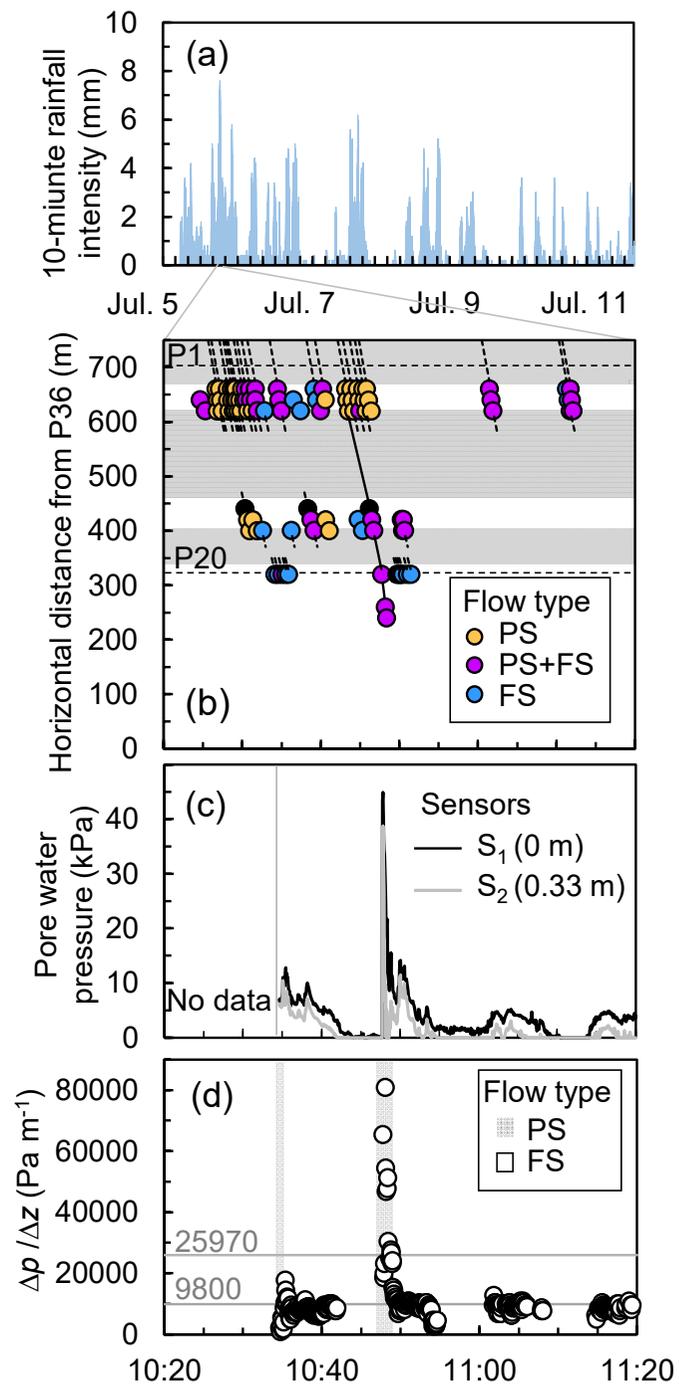


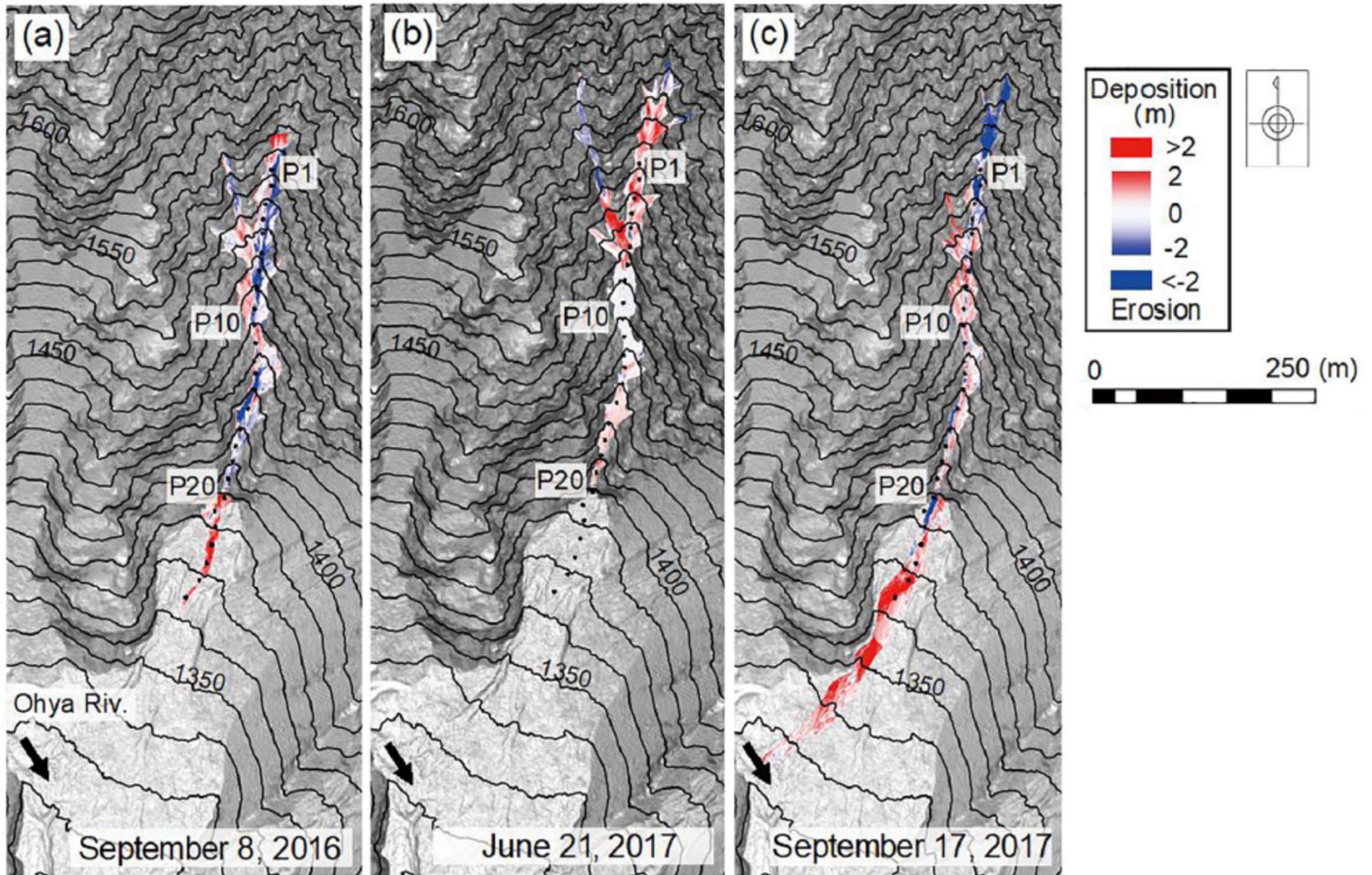
$$p = p_h + p_e = p_w + p_s + p_e$$

p_h : 静水圧, p_e : 過剰間隙水圧, p_w : 清水の静水圧, p_s : 細粒土砂の液相化に伴い発生する静水圧.

$\partial p / \partial z = 9800 \text{ (Pa m}^{-1}\text{)} \rightarrow$ 清水の静水圧

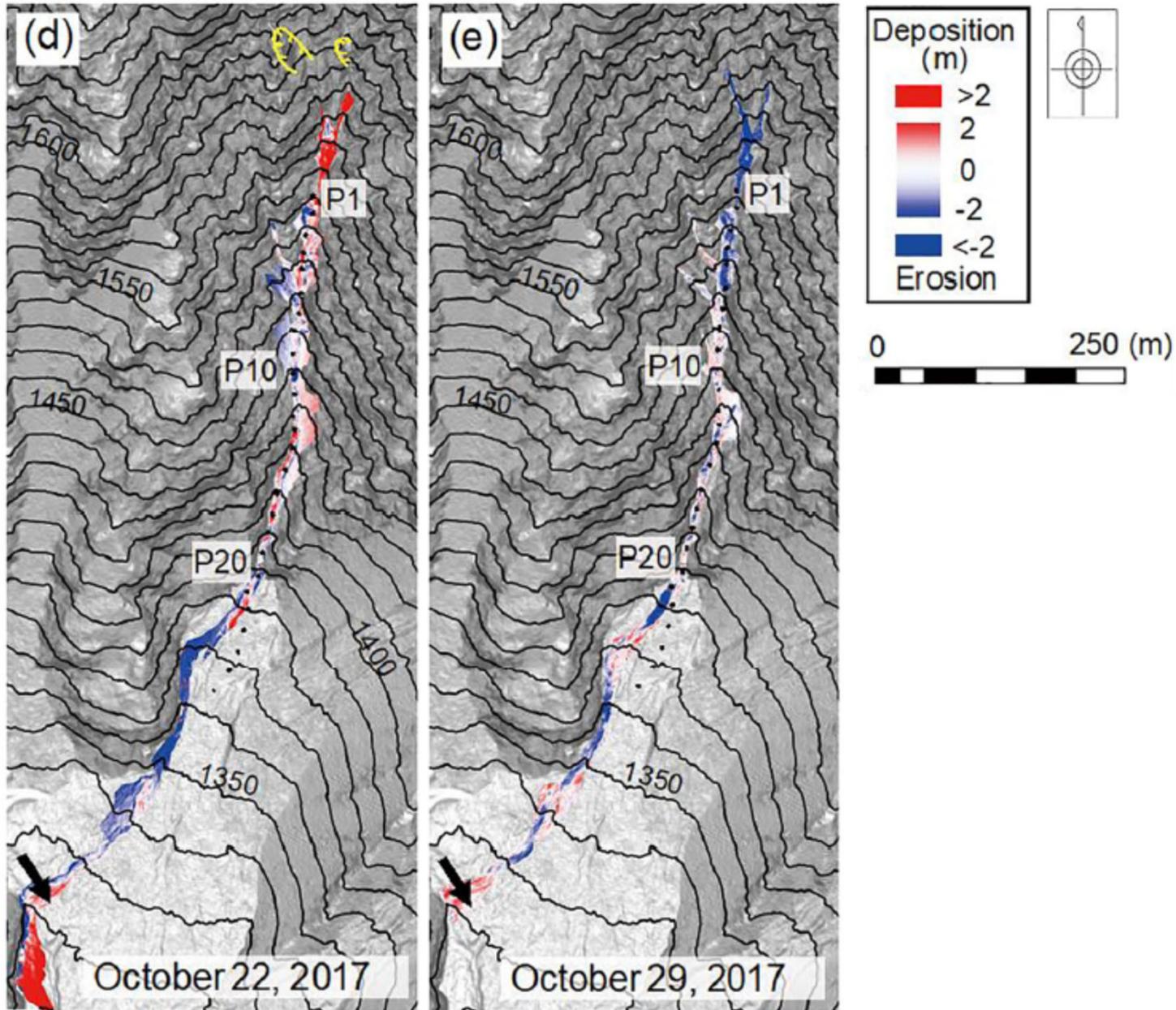
$\partial p / \partial z > 25,970 \text{ (Pa m}^{-1}\text{)} \rightarrow$ 少なくとも過剰間隙水圧は発生している





降雨や堆積物量によって段波の形態（飽和・不飽和），濃度が異なる
 →侵食堆積特性も異なる

Imaizumi et al. (2019)



降雨や堆積物量によって段波の形態（飽和・不飽和），濃度が異なる
 →侵食堆積特性も異なる

Imaizumi et al. (2019)

まとめ

- 土砂生産やそれに伴う溪流周辺での不安定土砂の堆積は土石流の発生降雨条件，発生個所，流下特性に影響を及ぼす
- 土石流段波は侵食，すべり，支流からの土砂・水の供給などにより集合的な土砂移動が間欠的におきることで発生する
- 土石流発生域では飽和土石流とともに不飽和土石流も流下する。降雨条件や堆積物量によって卓越した流れのタイプが変化
- 過剰間隙水圧の発生が土石流の流動性を向上

- 今泉ら(2022)令和3年7月静岡県熱海市で発生した土石流災害, 砂防学会誌 74/5 34-42
- Imaizumi, F., Ikeda, A., Yamamoto, K., Ohsaka, O. (2021) Temporal changes in the debris flow threshold under the effects of ground freezing and sediment storage on Mt. Fuji. *Earth Surface Dynamics*, 9, 1381-1398.
- Imaizumi, F., Sidle, R. C. (2021) Effects of terrain on the occurrence of debris flows after forest harvesting, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 103, 1-14.
- Tsunetaka, H., Hotta, N., Imaizumi, F., Hayakawa, Y. S., Masui, T. (2021) Variation in rainfall patterns triggering debris flow in the initiation zone of the Ichino-sawa torrent, Ohya landslide, Japan. *Geomorphology*, 375, 107529
- Imaizumi, F., Masui, T., Yokota, Y., Tsunetaka, H., Hayakawa, Y.S., Hotta, N. (2019) Initiation and runout characteristics of debris flow surges in Ohya landslide scar, Japan, *Geomorphology*, 339, 58-69
- Imaizumi, F., Hayakawa, Y. S., Hotta, N., Tsunetaka, H., Ohsaka, O., Tsuchiya, S. (2017) Relationship between the accumulation of sediment storage and debris-flow characteristics in a debris-flow initiation zone, Ohya landslide body, Japan, *Natural Hazards and Earth Science Systems*, 17, 1923-1938
- Imaizumi, F., Tsuchiya, S., Ohsaka, O. (2016) Behavior of boulders within a debris flow initiation zone, *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9, 91-100
- 土屋 智・今泉文寿・逢坂興宏(2009)：荒廃溪流源頭部における土石流の流動形態と石礫の流下状況, 砂防学会誌, Vol. 61, No.6, p.4-10
- Imaizumi, F., Sidle, R.C., Tsuchiya, S., Ohsaka, O.(2006) Hydrogeomorphic processes in a steep debris flow initiation zone, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L10404