

降雨・土砂・流木生産流出モデル(RSR モデル):流域規模の降雨に起因する複合災害と土砂管理に対するプロセスベースのモデリング

近年、極端降雨に起因して、洪水、土砂崩れ、土石流、流木輸送が複雑に相互作用した結果、「複合災害」が発生するようになり、世界各地で大量の土砂や流木を伴う深刻な水災害が頻発しています。山地で発生する大規模な地すべりや土石流は、膨大な量の土砂や流木を河道へ供給し、その結果、下流平野部で急速な土砂堆積や流木集積が発生、氾濫リスクが大幅に高まることになります。また、豪雨や地震後の崩壊斜面から流出する細粒土砂による長期的な濁水、流域の裸地化による侵食など、長期的な問題も世界的な懸念となっています。これらの現象に対処するには、個別の現象を切り離して評価するのではなく、総合的・体系的な科学的アプローチが不可欠となります。こうしたニーズに応えるため、ICHARM では降雨・土砂・流木生産流出モデル(RSR モデル)の開発を進めています。

RSR モデルの最大の強みは、分布型降雨流出枠組みの中に複合災害過程を統合している点です。図 1 に示すように、RSR モデルは、分布型降雨流出モデル(RRI)と、河道網における河床高変化および土砂輸送過程を扱う単位河道モデル(図 2 (1))を結合した構成となっています。斜面域では、安定解析に基づく地すべり発生、質点系で表現される土石流の流下過程(図 2 (2) -①)、表面流による斜面侵食(図 2 (2) -②)といったプロセスが組み込まれています。これらの要素を組み合わせることで、流域全体における短期・長期の土砂生産および土砂輸送過程を一貫して再現できるようになっています。

さらに、土砂・流木・洪水複合災害を評価するために流木モデルも開発しています。流木の発生量は、山地斜面における立木密度に基づいて推定され、立木は地すべりや土石流の侵食過程によって流域へ取り込まれるよう設定しています。土石流が単位河道に到達すると、流木は土砂とともに河道網へと供給されます。洪水時に多数の流木がどのように移動するかを再現するため、流木は中立浮力をもつ粒子として扱い、移流方程式と貯留方程式を用いてその挙動を捉えています。さらに土砂の侵食・堆積との相互作用も考慮しています。

RSR モデルは、世界各地の多様な河川流域において、さまざまな空間・時間スケールの土砂輸送現象に適用されてきました。ここでは、これらの応用例の中から日本の河川流域におけるケーススタディ 3 例を取り上げ、モデルの再現性能と、物理過程に基づく解析の重要性を示します。

1. 安平川流域(北海道)¹⁾: 図 3 は、シミュレーションを 39 日間実施した後の斜面侵食深および土砂が直接供給された単位河道を示しています。モデルは、観測された浮遊砂流出量を良好に再現しています(図 4 上段)。また、斜面侵食を考慮しないケースとの比較により、上流斜面から供給される細粒土砂が下流区間の土砂流動特性に大きく影響することが確認されました(図 4 下段)。
2. 内川流域(宮城県)²⁾: 2019 年の台風第 19 号(ハギビス)による災害について、RSR モデルを用いて、地すべりおよび土石流の影響を再現しました(図 5)。上流側の境界条件を 2 次元の水・土砂移動モデルに与えることで、平野部における氾濫土砂の堆積深を精度良く再現できました。解析の結果、山地からの大量の土砂供給により、支川では急速な河床上昇と網状流路の形成が生じていたことが明らかとなりました。
3. 赤谷川流域(福岡県)³⁾: 2017 年の北部九州豪雨により赤谷川で発生した災害について、

前節のケーススタディと同様に RSR モデルを 2 次元モデルと結合して解析を実施しました。図 6 は、流木輸送を考慮することが、実際の浸水範囲を精度よく再現するうえで不可欠なことを明確に示しています。解析の結果、流木集積による橋梁閉塞に伴い発生する背水現象が氾濫に大きく影響していたことが確認されました。

RSR モデルは、基本的な物理原理に基づいて構築されており、さまざまな空間・時間スケールを統合するのに必要な卓越した柔軟性を備えています。こうした適応性は、鉄砲水のような短期的・突発的な事象と、流域規模の土砂輸送や地形変化に関わる長期的・連続的なプロセスの双方に対応するうえで極めて重要です。RSR モデルは iRIC ソフトウェアを通じて無償で利用できます (<https://i-ric.org/solvers/rri-on-iric/>)。

<Reference>

- 1) Menglu QIN, Daisuke HARADA and Shinji EGASHIRA: Prediction of Sediment Transport Process in River Basin Focusing on the Effect of Hillslope Erosion, Japanese Journal of JSCE, Volume 80 (2024) Issue 16, Article ID: 23-16088. DOI: <https://doi.org/10.2208/jscej.23-16088>
- 2) Qin, M., Harada, D., and Egashira S.: Modeling of Water-Sediment Inundation Process Incorporating with a Rainfall-Sediment Runoff model, Proceedings of the 24th IAHR-APD Congress 14-17 October 2024, Wuhan, China
- 3) HARADA D. and EGASHIRA S.: Method to evaluate large wood behavior in terms of convection equation associated with sediment erosion and deposition, Earth Surface Dynamics 11 (6), 1183-1197, 2022.

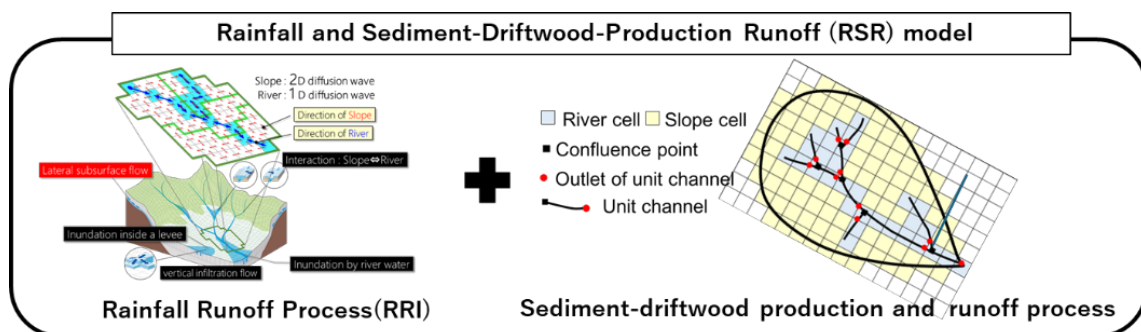
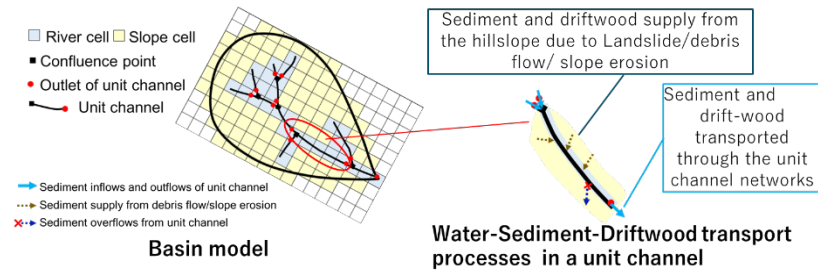


図 1 降雨・土砂流木生産流出モデル(RSR モデル)の構造

(1) Sediment(drift woods) transport processes in channel networks (Unit channel model)



(2) Sediment and drift wood productions in mountain slope area

- ①Landslide and debris flow model (with drift wood production) ②Hillslope erosion model

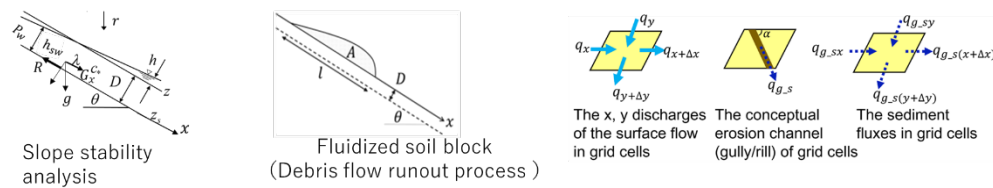


図 2 RSR モデルのサブモデル

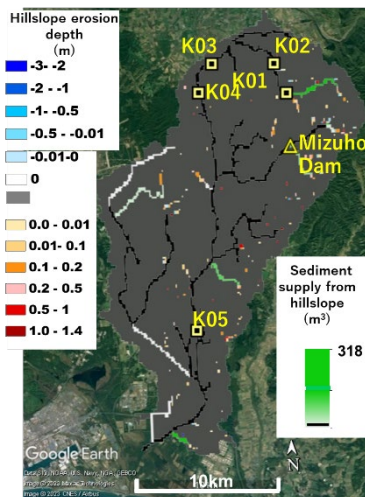


図 3 斜面侵食深および単位河道への直接土砂供給分布のシミュレーション結果

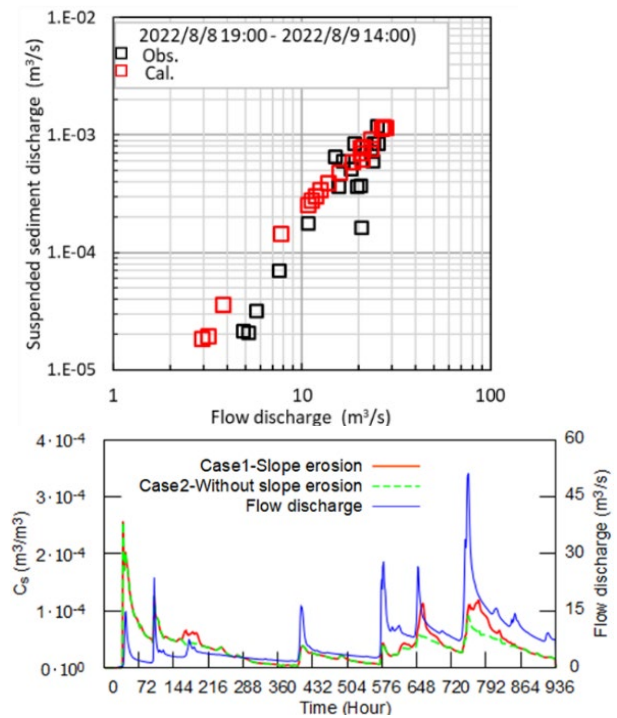
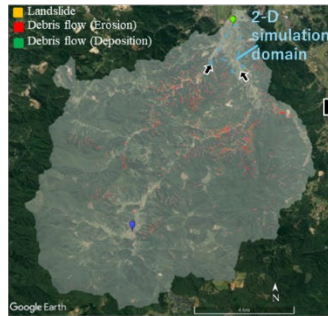
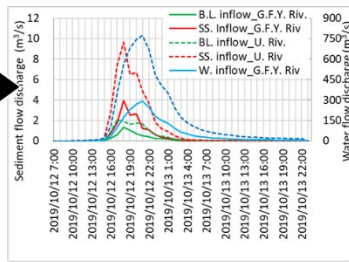


図 4 K05 における懸濁土砂流量および河川流量の計算値と観測値の比較(上)および斜面侵食由来の細粒土砂供給が K05 の土砂濃度に与える影響(下)

(a) Simulated landslides and debris flows area (RSR-model)



(b) Hydrographs of the flood and sediment inflows into the plain area predicted by RSR model



(c) 2-D Flood and sediment inundation simulation results
Water & sediment deposition depths Deposition depth cal. vs obs.

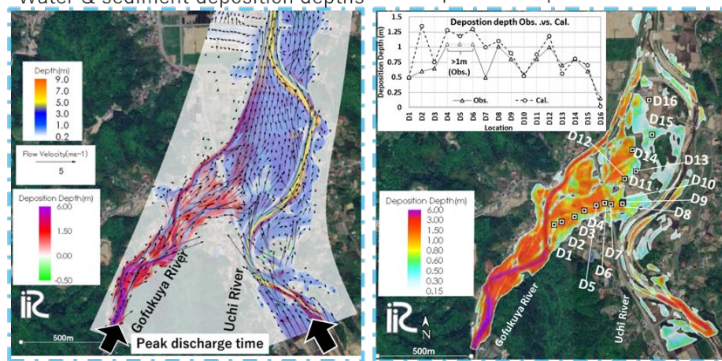
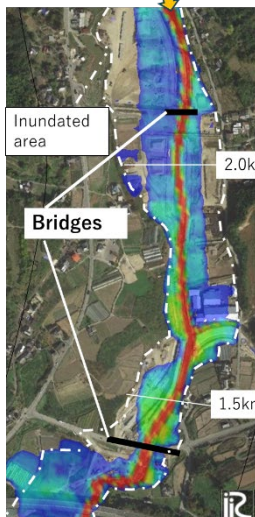


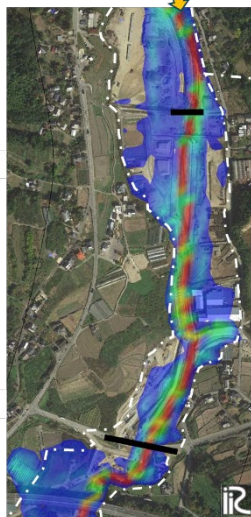
図 5 降雨起因の複合災害(斜面崩壊・土石流から洪水・土砂氾濫)への RSR モデル適用結果

(2019 年台風 19 号、宮城県丸森町・内川流域)

Case1 Water only



Case2 Water + Sediment



Case3 Water+ Sediment + driftwood

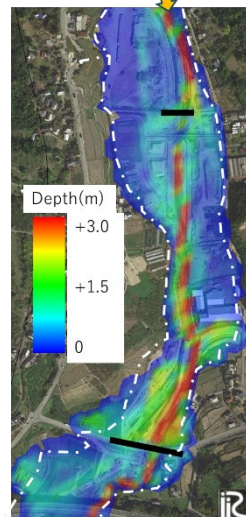


図 6 降雨起因の複合災害(土砂・流木洪水)への RSR モデル適用結果

(2017 年九州北部豪雨、赤谷川)