

令和2年度中国地方建設技術開発交流会

セル分布型流出モデルを用いた 流木流出量予測モデルの開発

令和2年11月9日

鳥取大学 学術研究院 工学系部門

梶川 勇樹

発表内容

- ◎ はじめに
- ◎ セル分布型流出解析モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ 土砂崩壊発生予測モデル
土砂崩壊発生の判定手法, 土砂発生量予測
- ◎ 流木発生・流出量予測モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ おわりに

はじめに①

平成29年7月九州北部豪雨災害

土砂崩壊に伴い多量の流木が発生
➔ 橋脚などに集積して流木ダムを形成

洪水氾濫による被害の助長

- ◎ 短時間で局地的な豪雨
- ◎ 大規模な土砂災害

多量の流木発生につながる！

流木発生・流出量を
定量的に予測しておく必要がある

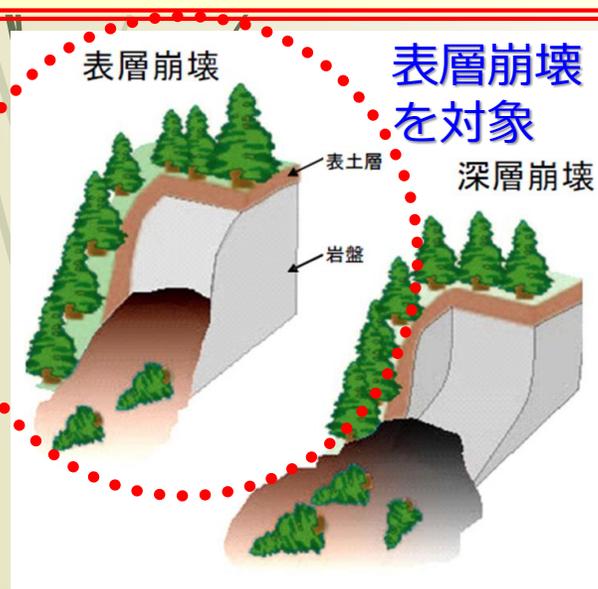


<https://mainichi.jp/articles/20160930/k00/00m/040/035000c>

はじめに②

本技術開発

洪水時における流木災害の防止に資するため、任意降雨に伴う流域における流木の発生地点と発生量を予測できる手法の開発を目指し、洪水予測で用いられる**セル（メッシュ）分布型流出モデル**を利用した**流木流出量予測モデルの開発**を目的とする



◎ 研究の流れ

- ①セル分布型流出解析モデル
- ②土砂崩壊発生予測モデル（土砂発生量）
- ③流木発生・流出量予測モデル

発表内容

- ◎ はじめに
- ◎ セル分布型流出解析モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ 土砂崩壊発生予測モデル
土砂崩壊発生の判定手法, 土砂発生量予測
- ◎ 流木発生・流出量予測モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ おわりに

セル分布型流出解析モデル①

対象流域（佐波川流域）と土砂災害

源流は山口・島根県境の三ツヶ峰（標高970m）

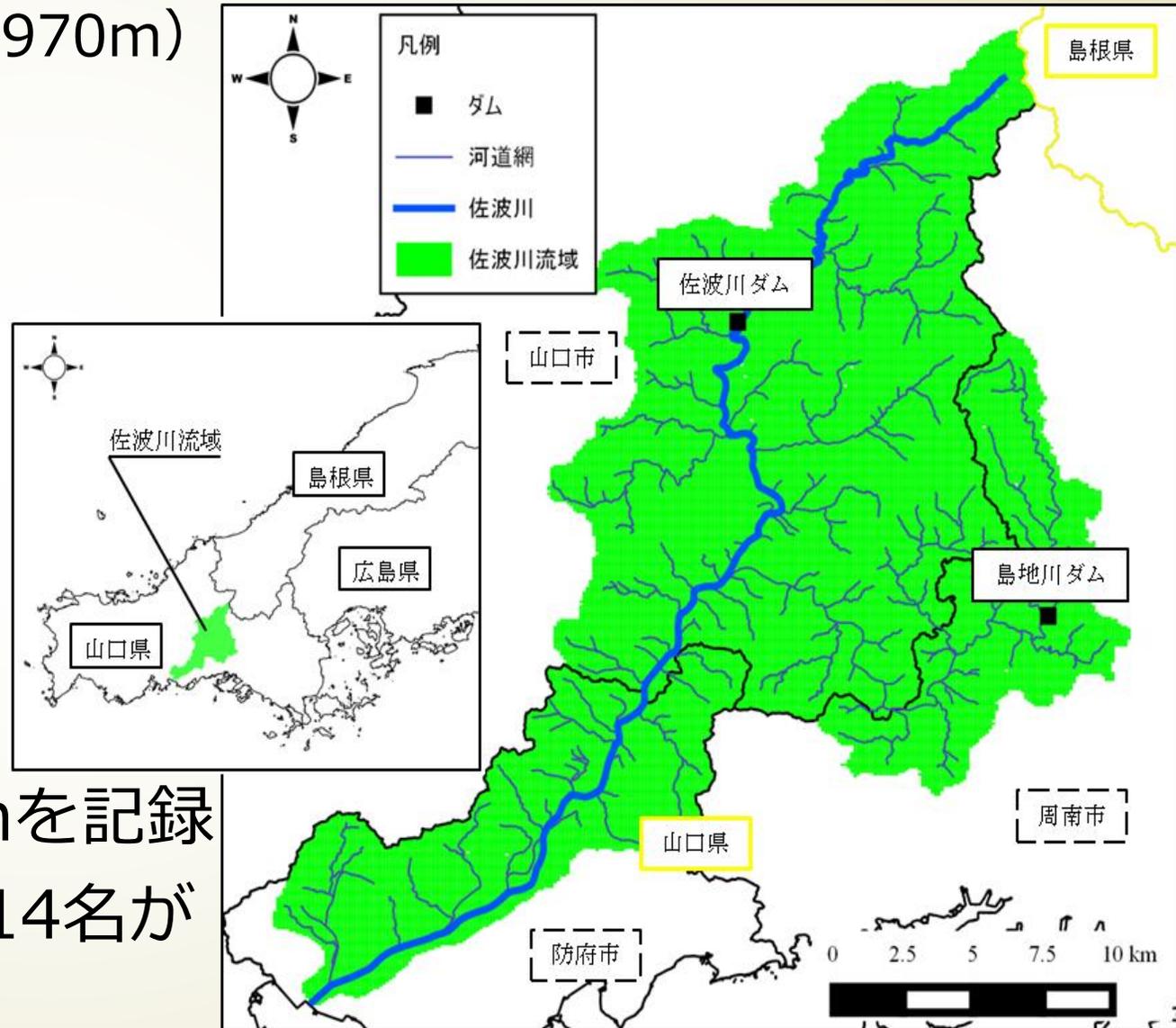
幹川流路延長：56 km

流域面積：460 km²

流域市町村：防府市，山口市，周南市

平成21年7月 中国・九州北部豪雨

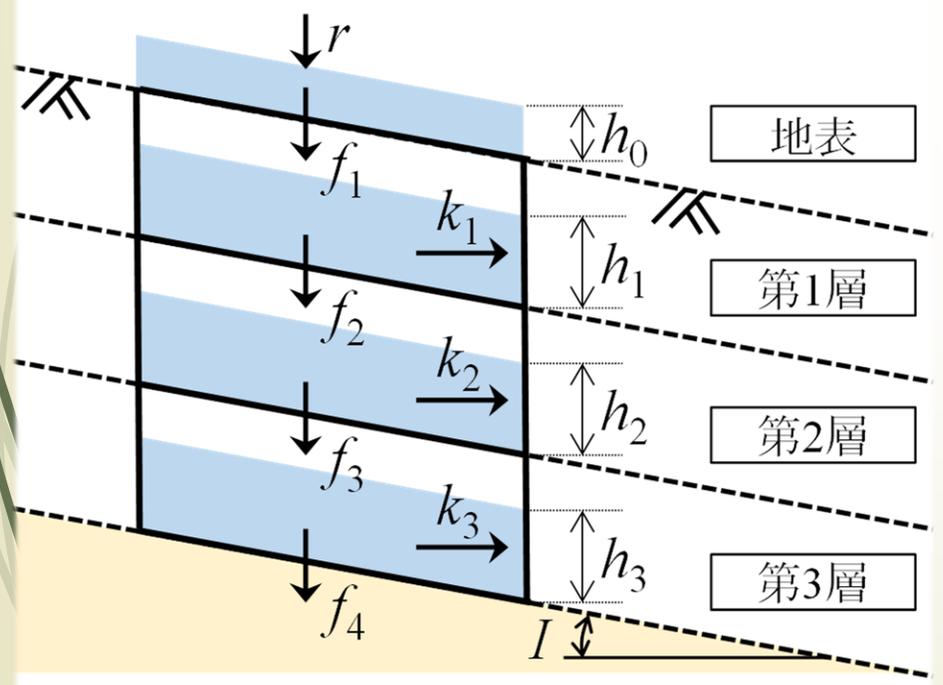
- ◎平成21年7月19日～21日にかけて梅雨前線が活発化
- ◎防府市では3日間総雨量332 mmを記録
- ◎山口県内の死者数は17名（うち14名が防府市）



セル分布型流出解析モデル②

流出モデルの概要

- ◎ 地下3層型のセル分布型流出解析モデル (第3層は基底流量を表現)
- ◎ 計算セルを斜面部と河道部に分け、表面流と浸透流を計算
- ◎ 河道部では横断形状に矩形断面を仮定

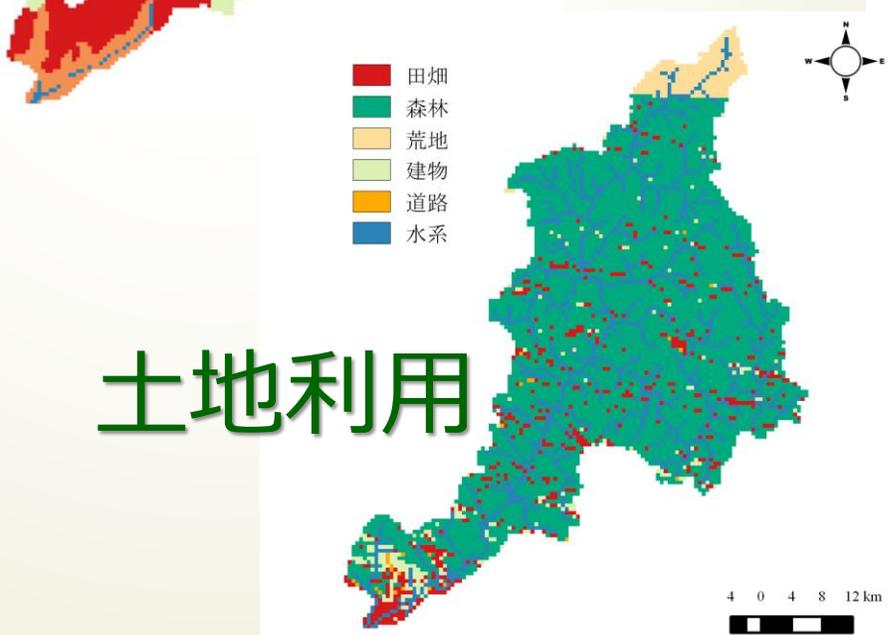
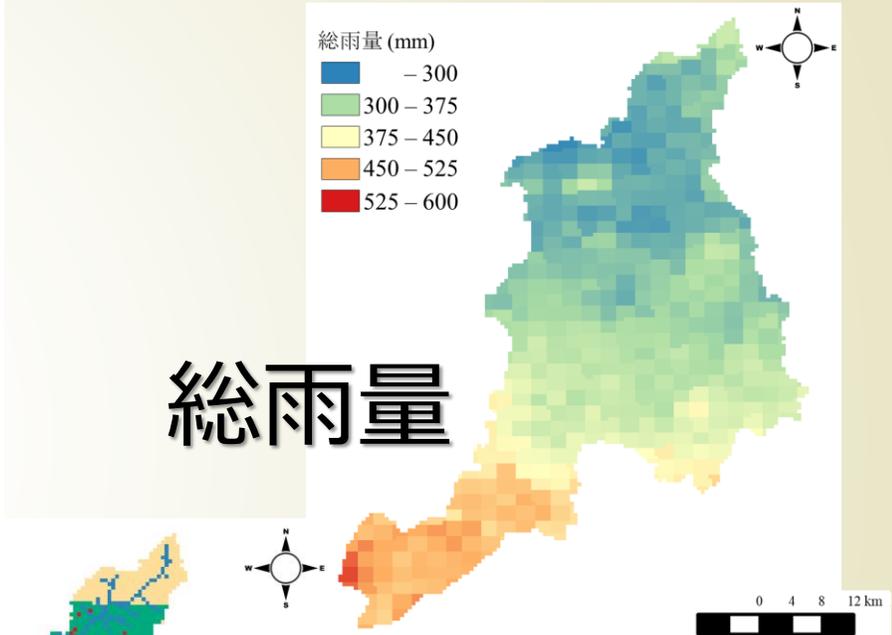
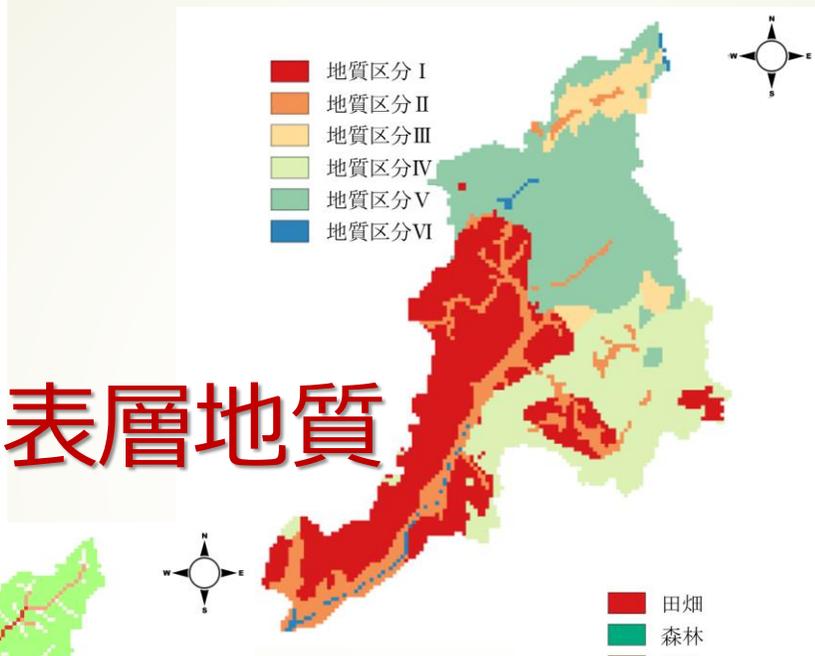
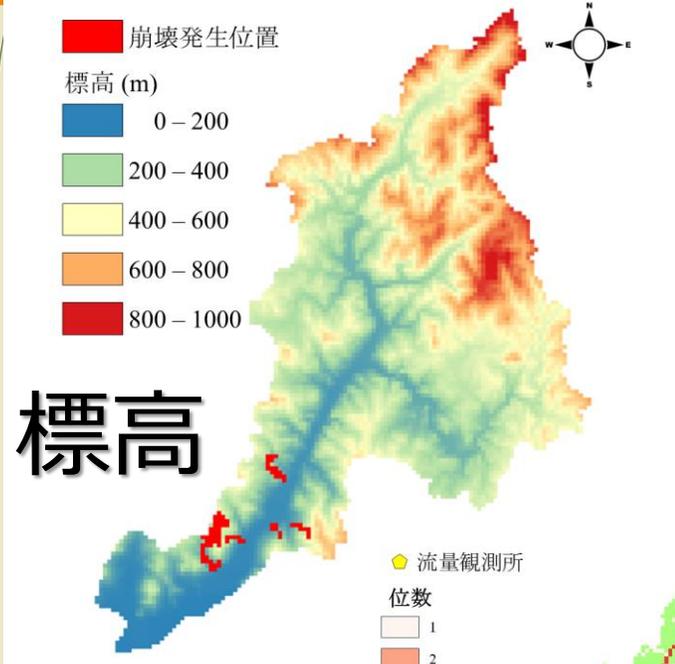


	表面流	浸透流
斜面部	[連続式] $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f_1$ [運動方程式] $q = \frac{1}{n} h R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	[連続式] $\lambda \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} = f_i - f_{i+1}$ [運動方程式] $\bar{q} = k I \bar{h}$
河道部	[連続式] $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q' + (r - f_1) \cdot b$ [運動方程式] $Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	[連続式] $\lambda \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} = \bar{q}' + f$ [運動方程式] $\bar{q} = k I \bar{h}$

h : 水面流の水深(m), q : 単位幅表面流量(m^2/s), r : 有効雨量(m/s), f_i : 浸透能(m/s), t : 時間(s), x : 流下方向の距離(m), n : マニングの粗度係数($s/m^{1/3}$), I : 斜面勾配, R : 径深(m), \bar{h} : 第1層目の浸透層の水深(m), \bar{q} : 単位幅浸透流量(m^2/s), λ : 浸透層内の有効間隙率, f_i : 第*i*層目浸透能(m/s), f_{i+1} : 第*i*層目から第*i+1*層目浸透能(m/s), k : 浸透層内の透水係数(m/s), Q : 河川流量(m^3/s), A : 流域断面積(m^2), q' : 斜面単位幅あたりの河道への表面流入量(m^2/s), \bar{q}' : 斜面単位幅あたりの河道への浸透流入量(m^2/s)

セル分布型流出解析モデル③

対象流域のモデル化



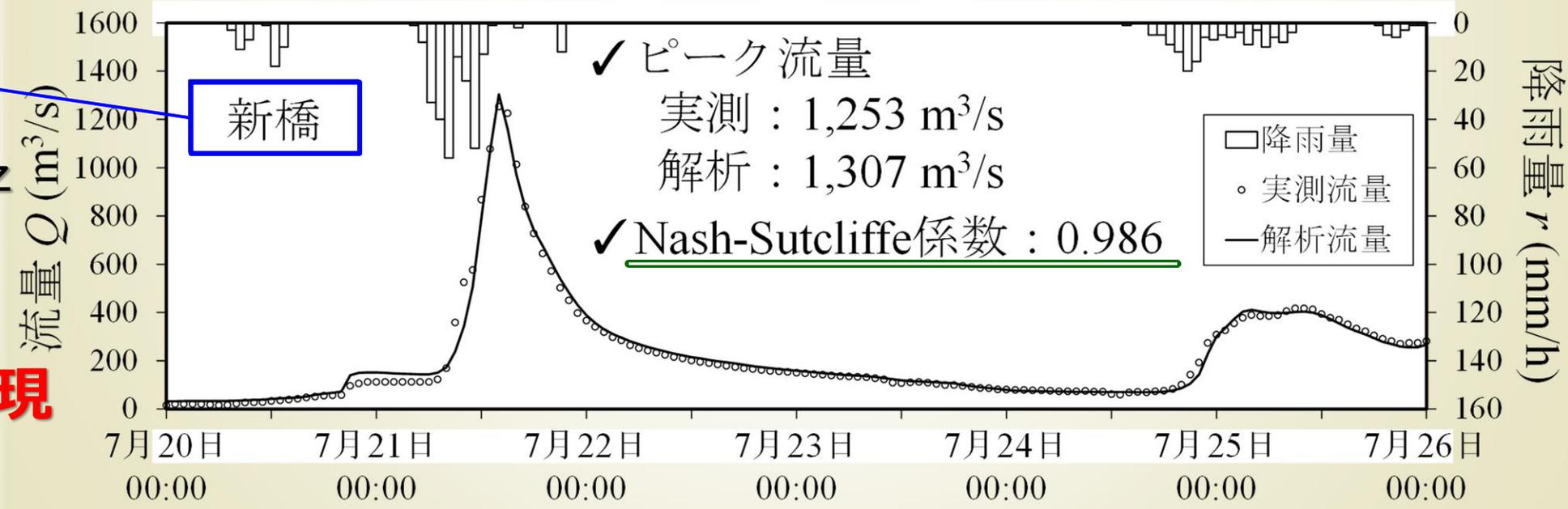
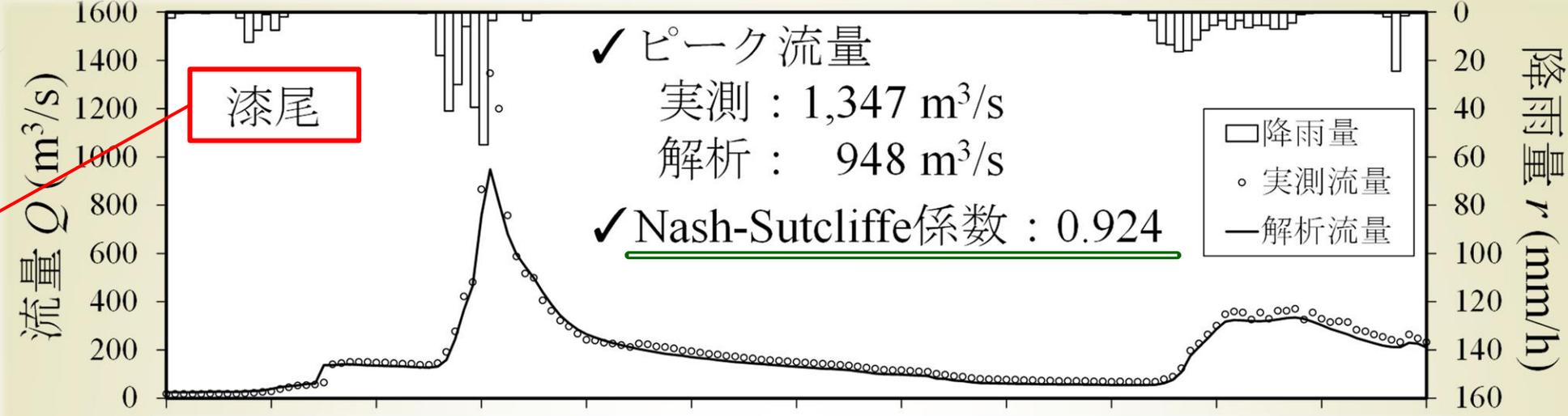
セル分布型流出解析モデル④

計算条件 (計算期間：2009年7月20日～26日，助走期間30日間)

		田畑	森林	荒地	建物	道路	水系
粗度係数 n		0.27	0.12	0.25	0.9	0.4	0.093
		地質区分I (深成岩類)	地質区分II (未固結堆積岩類)	地質区分III (固結堆積岩類)	地質区分IV (変成岩類)	地質区分V (火山岩類)	地質区分VI (その他)
透水係数 k_i (m/s)	第1層	2.6×10^{-2}	1.6×10^{-2}	1.2×10^{-2}	4.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	1.6×10^{-2}
	第2層	3.6×10^{-4}	3.4×10^{-4}	2.9×10^{-4}	3.4×10^{-4}	3.7×10^{-4}	3.3×10^{-4}
	第3層	3.8×10^{-5}	3.6×10^{-5}	3.4×10^{-5}	2.9×10^{-5}	3.4×10^{-5}	3.8×10^{-5}
浸透能 f_i (m/s)	第1層	4.0×10^{-5}					
	第2層	2.4×10^{-6}	1.3×10^{-6}	2.0×10^{-6}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-6}	2.0×10^{-6}
	第3層	1.9×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.3×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.1×10^{-7}
	第4層	5.4×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.2×10^{-8}	3.4×10^{-8}	2.9×10^{-8}	1.1×10^{-8}
層厚※ (m)	第1層	0.42	0.36	0.45	0.48	0.42	0.40
	第2層	1.50	0.80	0.30	1.80	1.20	1.30
	第3層	3.30	2.70	1.70	2.30	1.80	2.20
位数		1	2	3	4		
川幅 (m)		15	20	35	85		

セル分布型流出解析モデル⑤

計算結果



流出状況を良好に再現

地下水分布も再現できている

発表内容

- ◎ はじめに
- ◎ セル分布型流出解析モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ 土砂崩壊発生予測モデル
土砂崩壊発生の判定手法, 土砂発生量予測
- ◎ 流木発生・流出量予測モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ おわりに

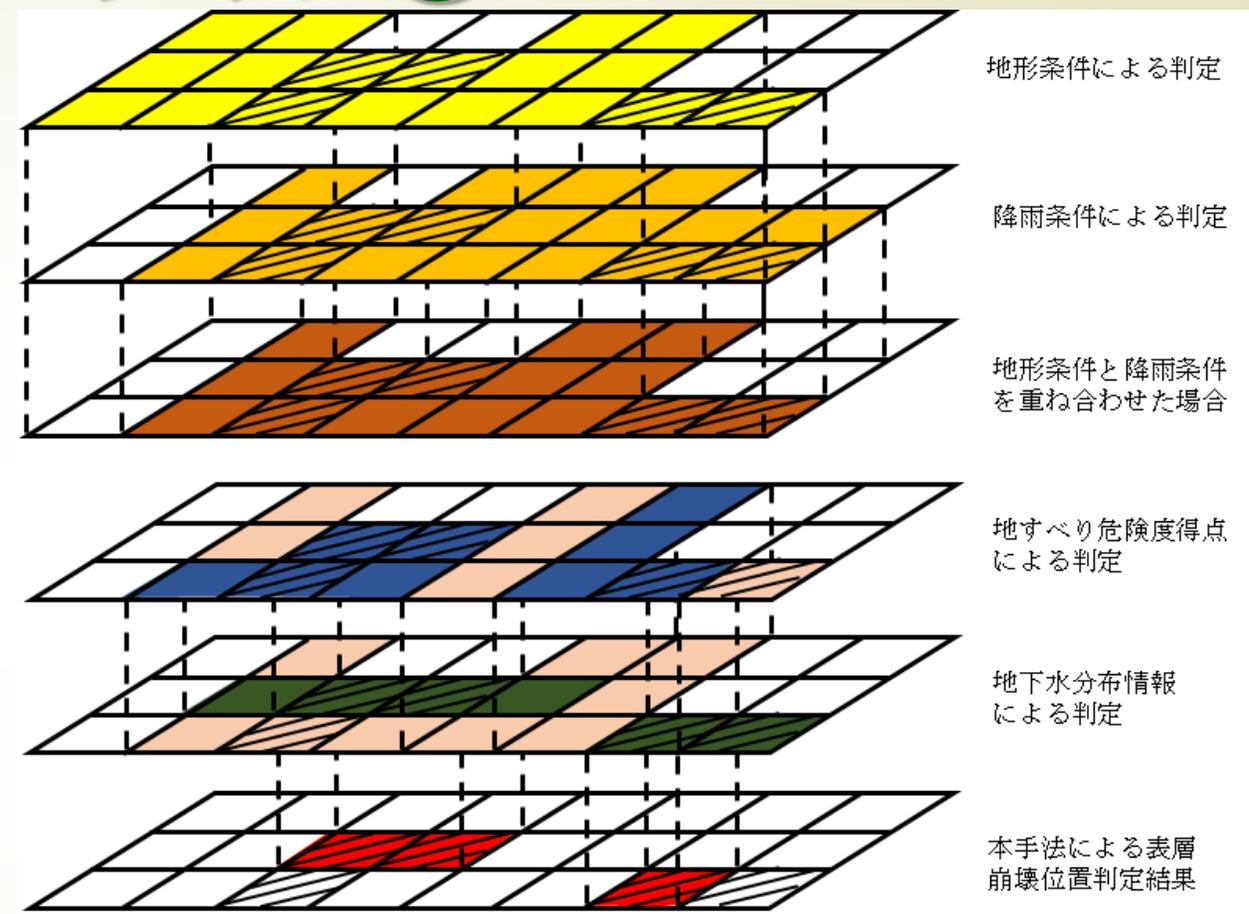
土砂崩壊発生予測モデル①

モデルの概要

地形条件と降雨条件より，崩壊が発生する可能性のあるセルを限定する（永谷ら）

限定したセルにおける地すべり危険度得点と流出解析による地下水分布情報

設定した基準値を超えたセルについて崩壊が発生したと判定



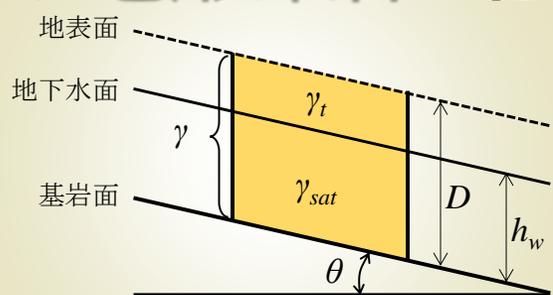
-  : 実際に表層崩壊が発生したセル
-  : 降雨条件による崩壊発生セル
-  : 地すべり危険度得点および地下水分布情報から除外されたセル
-  : 地下水分布情報による崩壊発生セル
-  : 地形条件による崩壊発生セル
-  : 地形条件と降雨条件を重ね合わせた場合の崩壊発生セル
-  : 地すべり危険度得点による崩壊発生セル
-  : 本手法により表層崩壊が発生すると予測したセル

永谷言，水野直弥，石田裕哉，小澤和也，寶馨：分布型流出モデルの斜面崩壊予測への応用，土木学会論文集F5(土木技術者実践)，Vol. 68，No. 1，pp.16-26，2012.

土砂崩壊発生予測モデル②

モデルの概要

◎ 地形条件（斜面の安定性）



- ◆ 無限長斜面を仮定
- ◆ 安全率 F_s が判断基準値 F_{sc} を下回った段階で崩壊が発生すると判断

$$F_s = \frac{\alpha_c D}{\gamma D \sin \theta \cos \theta} + \left[1 - \left(\frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \left(\frac{h_w}{D} \right) \right] \frac{\tan \phi}{\tan \theta}$$

$$\gamma = \gamma_{sat} \left(\frac{h_w}{D} \right) + \gamma_t \left(1 - \frac{h_w}{D} \right)$$

$$\gamma_{sat} = (1 - n_s) G_s \gamma_w + n_s \gamma_w$$

ここに, α_c : 土層厚から想定すべり面の粘着力への変換係数, D : 崩壊土層厚, θ : 斜面傾斜角 (= $\arcsin D$), γ_w : 水の単位体積重量, γ : 崩壊土層の単位体積重量, γ_{sat} : 飽和単位体積重量, γ_t : 湿潤単位体積重量, ϕ : 想定すべり面の内部摩擦角, h_w : 流出解析により算出される中間流の水深, G_s : 土粒子の比重 (= 2.65), n_s : 崩壊土層の空隙率である

◎ 降雨条件

- ◆ 実効降雨の考え方を使用
- ◆ 先行降雨の影響を時間経過に応じて低減可能な指標とする雨量指数 R' を用いた
- ◆ 雨量指数 R' が斜面崩壊の判断基準 R'_c を上回った段階で崩壊が発生すると判断

$$R' = R_{fw0} - R_{fw}$$

$$R_{fw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2 (r_1 - r_w)^2}$$

$$R_w = \sum 0.5^{t/T_1} R$$

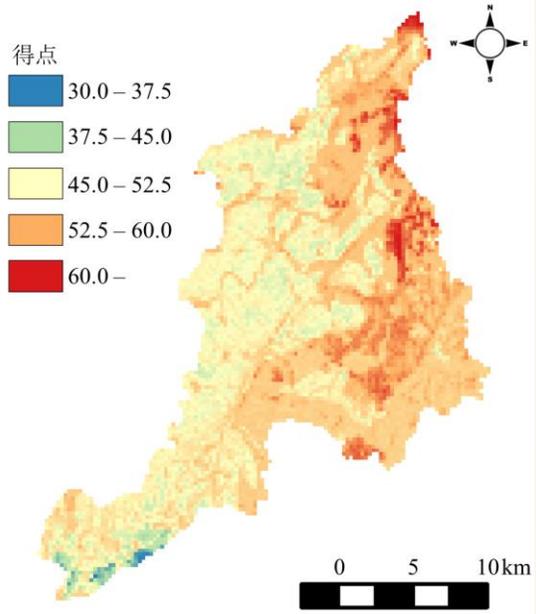
$$r_w = \sum 0.5^{t/T_2} r$$

ここに, R_w : 長期実効雨量, r_w : 短期実効雨量, R_1 : 長期雨量指数, r_1 : 短期雨量指数, a : 重み係数, R_{fw0} : 原点 ($R_w = r_w = 0$ の時の R_{fw}), R : 計算開始からの累加雨量, r : 当該時刻における時間雨量, t : 発生降雨前の時間数, T_1 : 長期実効降雨の半減期, T_2 : 短期実効降雨の半減期である

土砂崩壊発生予測モデル③

モデルの概要

◎ 地すべり危険度得点の条件



AHP (Analytic Hierarchy Process) 法

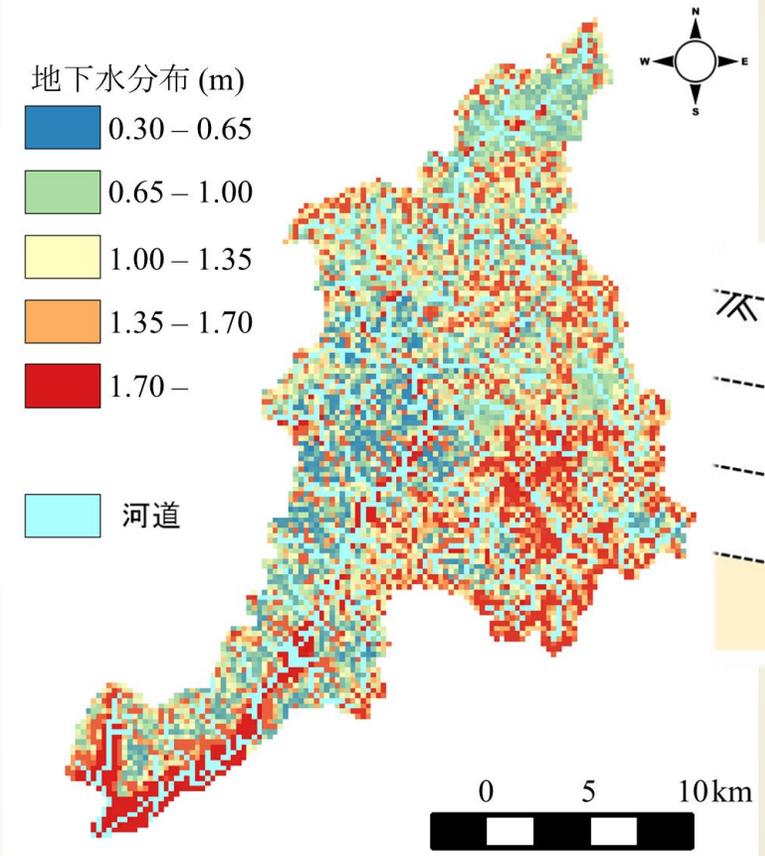
「標高」, 「斜面傾斜角」,
「斜面型」, 「集水度」,
「地質」, 「植生」

各評価項目の**重要度**
を**点数化**

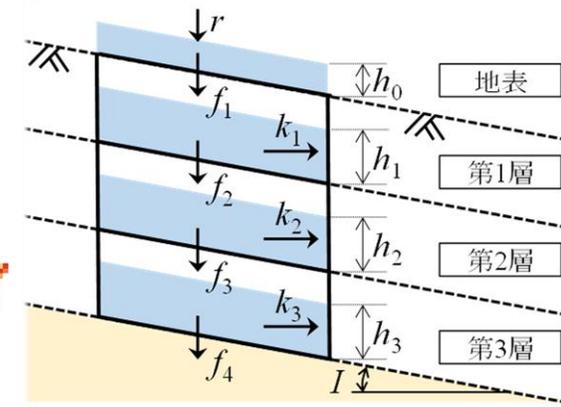
合計点を100点満点で表し、**地すべり危険度得点**として表示
得点が高いほど地すべりの**発生可能性が高い**

河野勝宣, 野口竜也, 西村強: AHP法およびGISを用いた中国地方における地すべりハザードマッピングの試み, 日本地すべり学会誌, Vol. 57, No. 1, pp.3-11, 2020.

◎ 地下水分布情報による条件



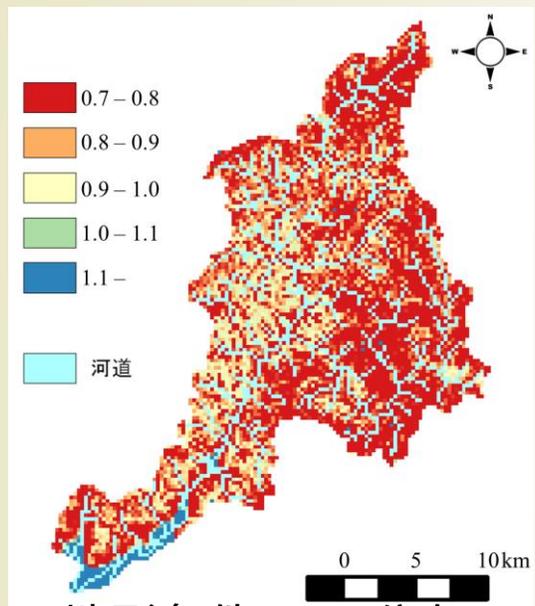
土壤雨量指数の
考え方を援用



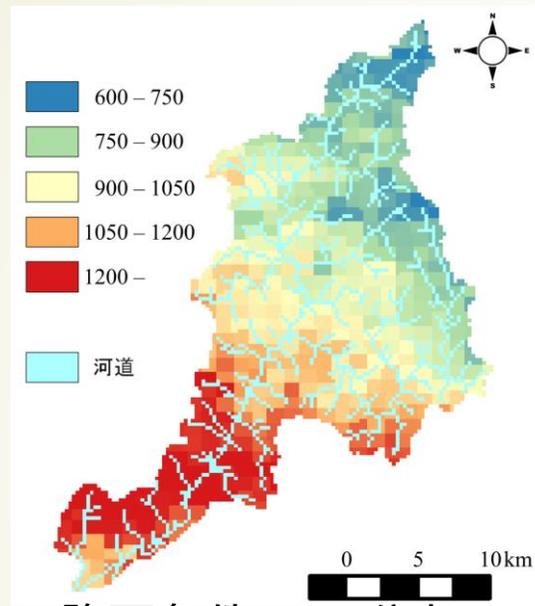
流出解析で得られた地下第1層および第2層の水深の合計を**地下水分布情報**として利用

土砂崩壊発生予測モデル④

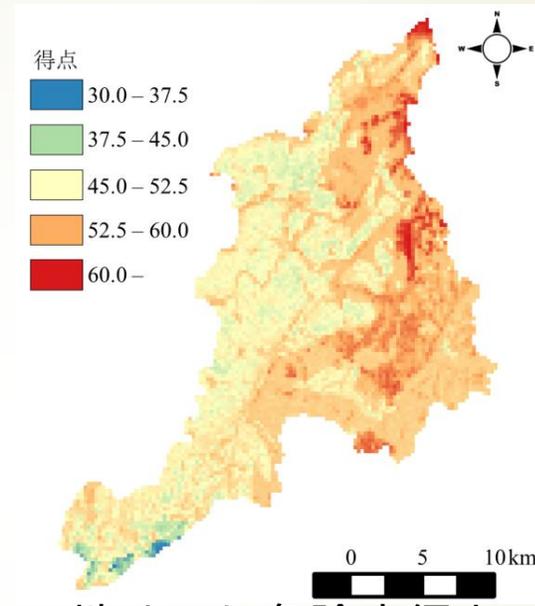
計算条件



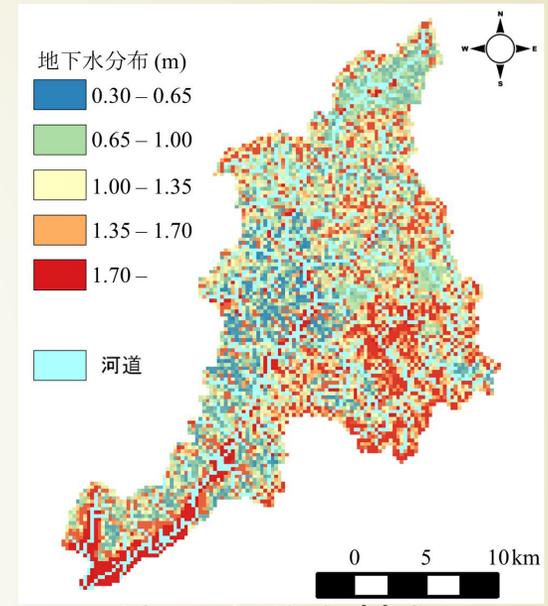
地形条件 F_s の分布



降雨条件 R' の分布



地すべり危険度得点



地下水分布情報

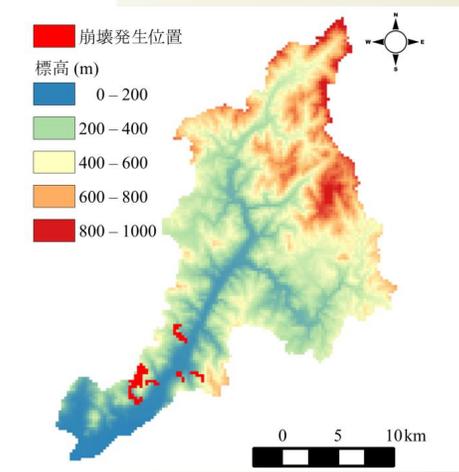
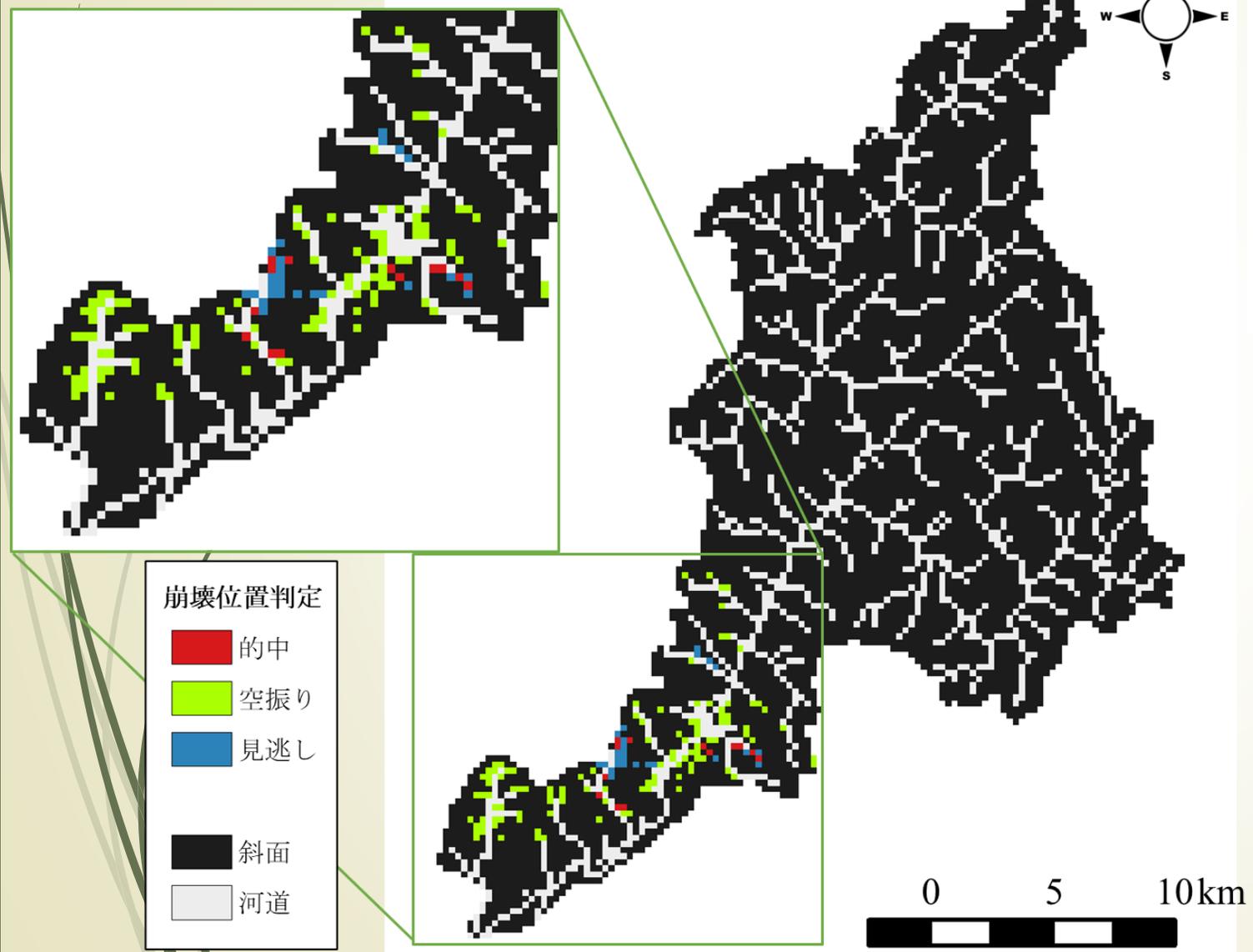
7月21日12:00の流出解析の結果を使用

地形条件			
判定基準： F_{sc}	0.895	変換係数： α_c	0.15
降雨条件			
判定基準： R'_c	1,185	重み係数： a	17.0
長期雨量指数： R_1	190	短期雨量指数： r_1	80
長期実効降雨の半減期： T_1	162	短期実効降雨の半減期： T_2	2
地すべり危険度得点と地下水分布情報の判定基準			
地すべり危険度得点	44.3	地下水分布情報	1.496

← その他の計算条件と判定基準

土砂崩壊発生予測モデル⑤

計算結果



判定セルの詳細を見ると

見逃し, 空振り
が多い

崩壊箇所付近を判定できている

土砂崩壊地点の分布を概ね再現することは出来ていると考えられる

崩壊位置判定

- 的中
- 空振り
- 見逃し
- 斜面
- 河道

土砂崩壊の判定数

	的中	見逃し	空振り
判定数	13	25	109
確率 (%)	10.7	65.8	

土砂崩壊発生予測モデル⑥

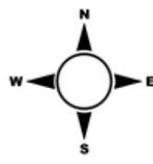
土砂発生量の予測

土砂発生量 (m³)

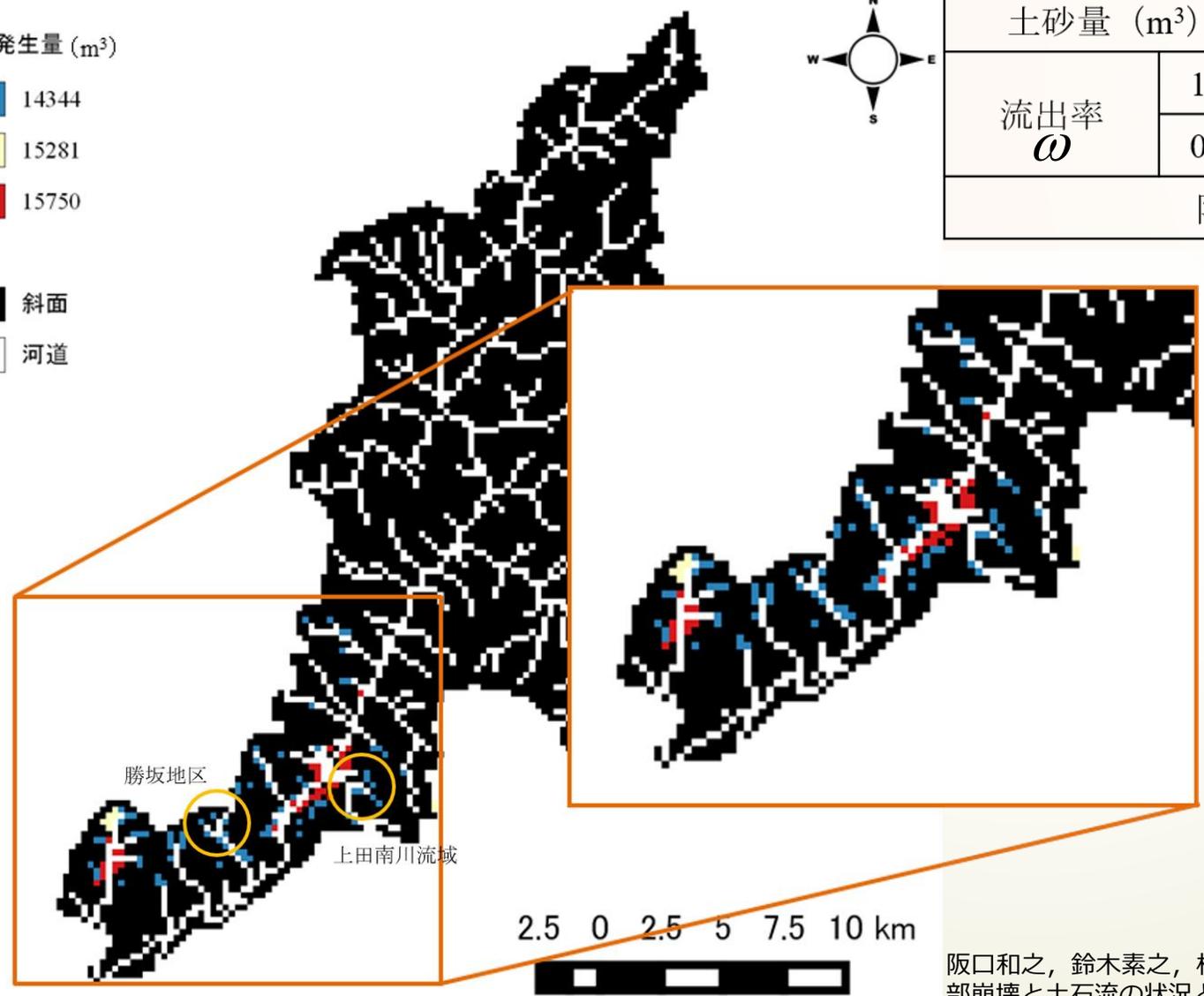
- 14344
- 15281
- 15750

地形

- 斜面
- 河道

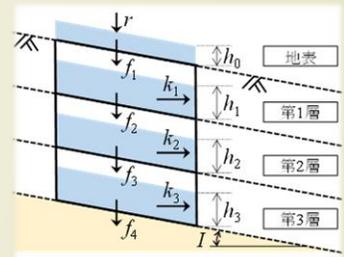


土砂量 (m ³)		流域全体	上田南川流域	勝坂地区
流出率 ω	1.00	1,261,875	382,500	669,375
	0.15	189,281	57,375	100,406
阪口ら ³⁾			57,000	91,000



本研究では表層崩壊を対象

崩壊が発生するとされたセルの面積に土層厚 D をかけたもので算出



$$V_y = \omega \times A \times D$$

ここに, V_y : 発生土砂量 (m³), A : セルの面積 (m²) D : セルの土層厚 (m) (本研究では, 土層圧は1層目と2層目の層厚の合計) である

阪口和之, 鈴木素之, 松原輝明, 高山陶子: 平成21年7月に山口県防府市で発生した土砂災害における源頭部崩壊と土石流の状況とその地形的特徴, 地盤工学ジャーナル, Vol. 10, No. 3, pp.403-414, 2015.

発表内容

- ◎ はじめに
- ◎ セル分布型流出解析モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ 土砂崩壊発生予測モデル
土砂崩壊発生の判定手法, 土砂発生量予測
- ◎ 流木発生・流出量予測モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ おわりに

流木発生・流出量予測モデル①

対象流域（赤波川流域）の概要



流域面積：約2.7 km²
 流路延長：2.5 km



➡ 砂防堰堤での流木補足量から流木流出率を算定

対象時期	流木流出率 ϵ
平成 23 年 9 月台風第 12 号	2.33×10^{-7}
平成 25 年 7 月豪雨	1.91×10^{-6}
平成 26 年 8 月流木撤去時の出水	1.45×10^{-2}

} バラつき

流木発生・流出量予測モデル②

モデルの概要

- ◎ **流木発生量**は、**生産土砂量**のおおよそ**2%以内**

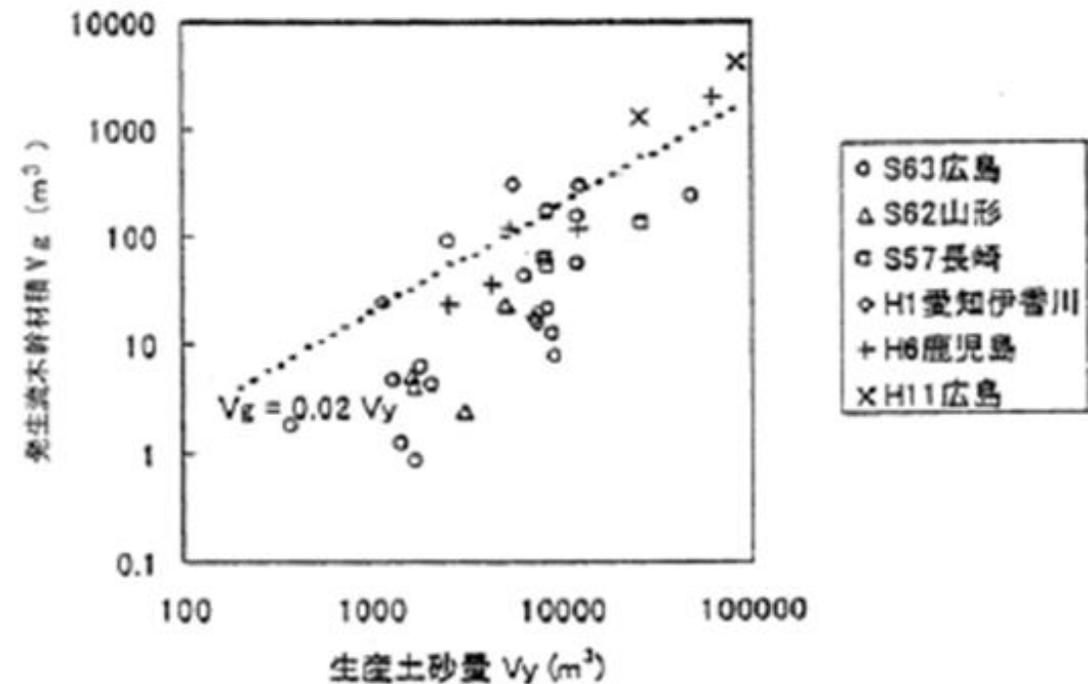
$$V_g = 0.02V_y$$

ここに、 V_g ：流木量 (m^3)， V_y ：土砂量 (m^3) である

- ◎ **流木流出量**は、**流木発生量**に**流木流出率**をかけたもので算出する

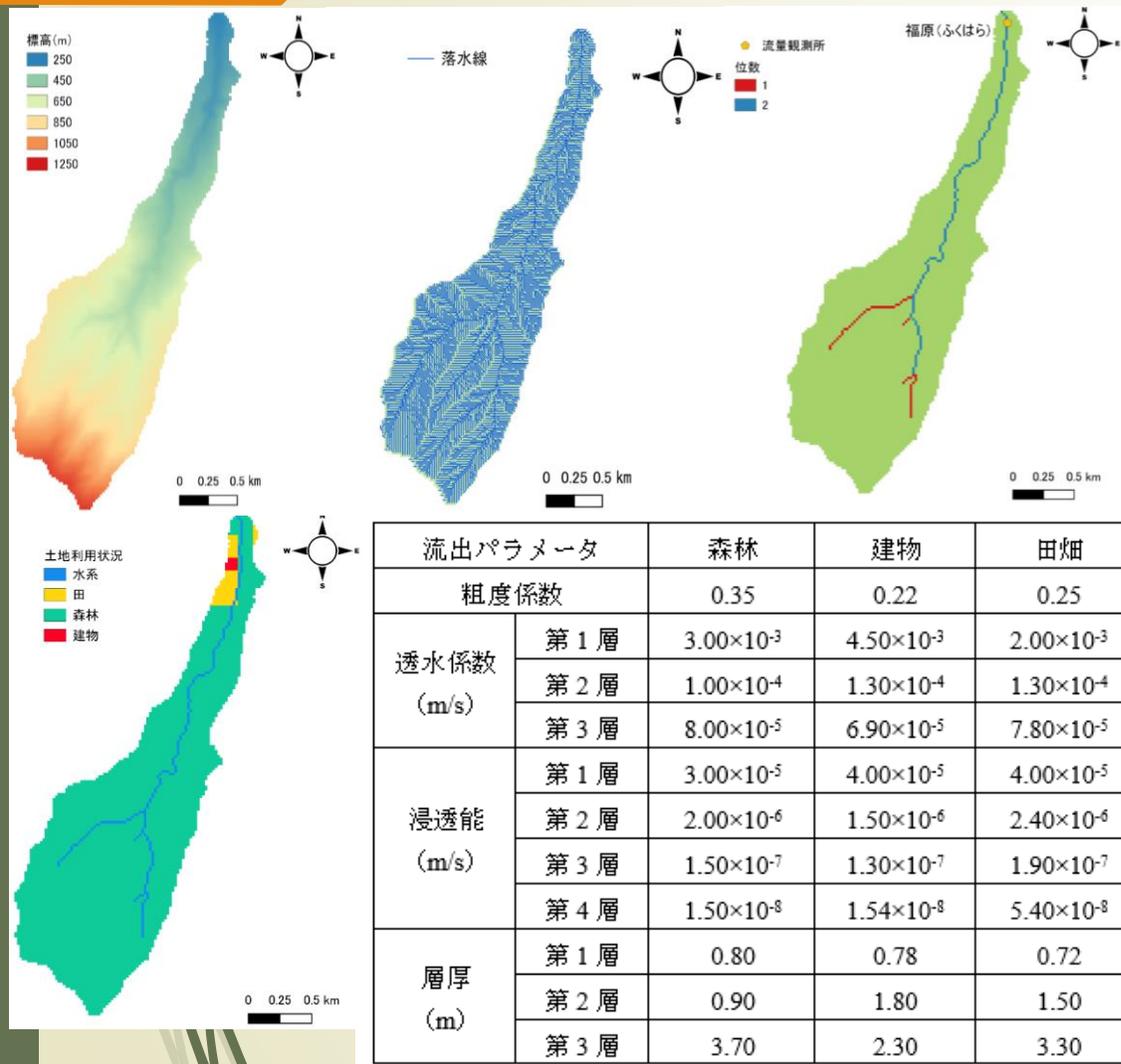
$$V_d = \varepsilon \times V_g$$

ここに、 V_d ：流木流出量 (m^3)， ε ：流木流出率である



流木発生・流出量予測モデル③

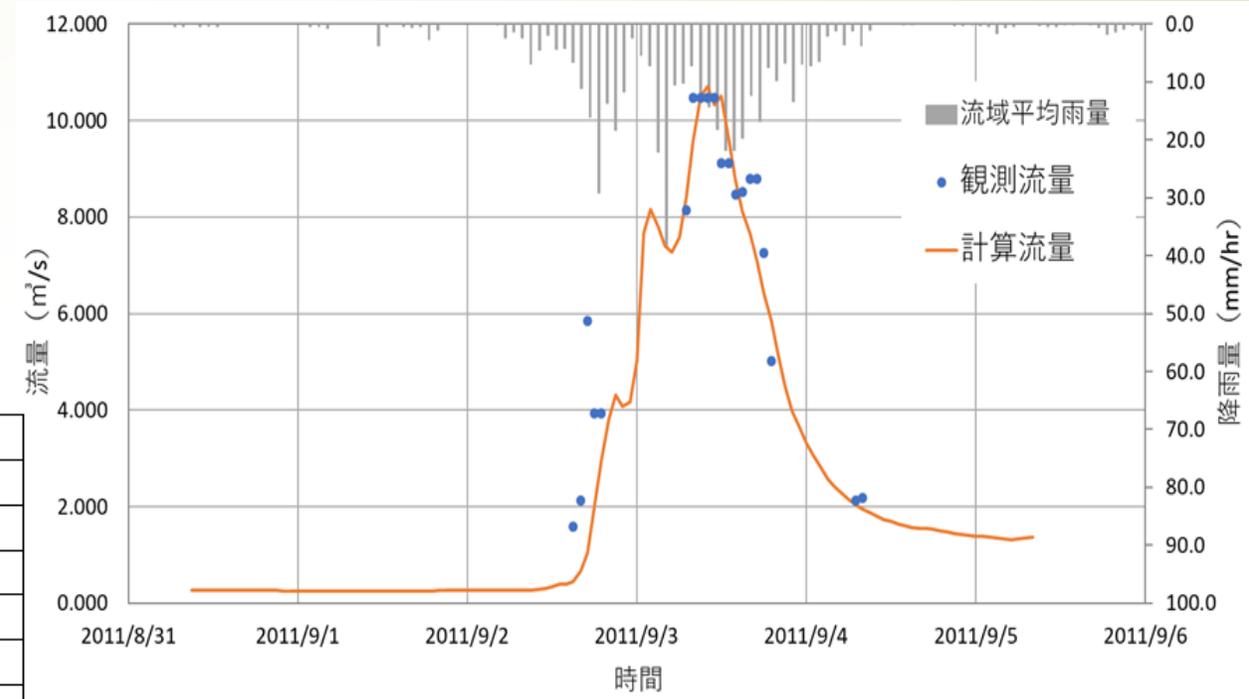
流出解析結果



流出パラメータ		森林	建物	田畑	水系
粗度係数		0.35	0.22	0.25	1.0
透水係数 (m/s)	第1層	3.00×10^{-3}	4.50×10^{-3}	2.00×10^{-3}	2.00×10^{-3}
	第2層	1.00×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.30×10^{-4}
	第3層	8.00×10^{-5}	6.90×10^{-5}	7.80×10^{-5}	7.80×10^{-5}
浸透能 (m/s)	第1層	3.00×10^{-5}	4.00×10^{-5}	4.00×10^{-5}	4.00×10^{-5}
	第2層	2.00×10^{-6}	1.50×10^{-6}	2.40×10^{-6}	2.00×10^{-6}
	第3層	1.50×10^{-7}	1.30×10^{-7}	1.90×10^{-7}	1.10×10^{-7}
	第4層	1.50×10^{-8}	1.54×10^{-8}	5.40×10^{-8}	1.10×10^{-8}
層厚 (m)	第1層	0.80	0.78	0.72	0.70
	第2層	0.90	1.80	1.50	1.30
	第3層	3.70	2.30	3.30	2.20

位数	1	2
川幅 (m)	3.5	7.0

平成23年(2011)9月台風12号時を対象



降雨-流出過程を良好に再現

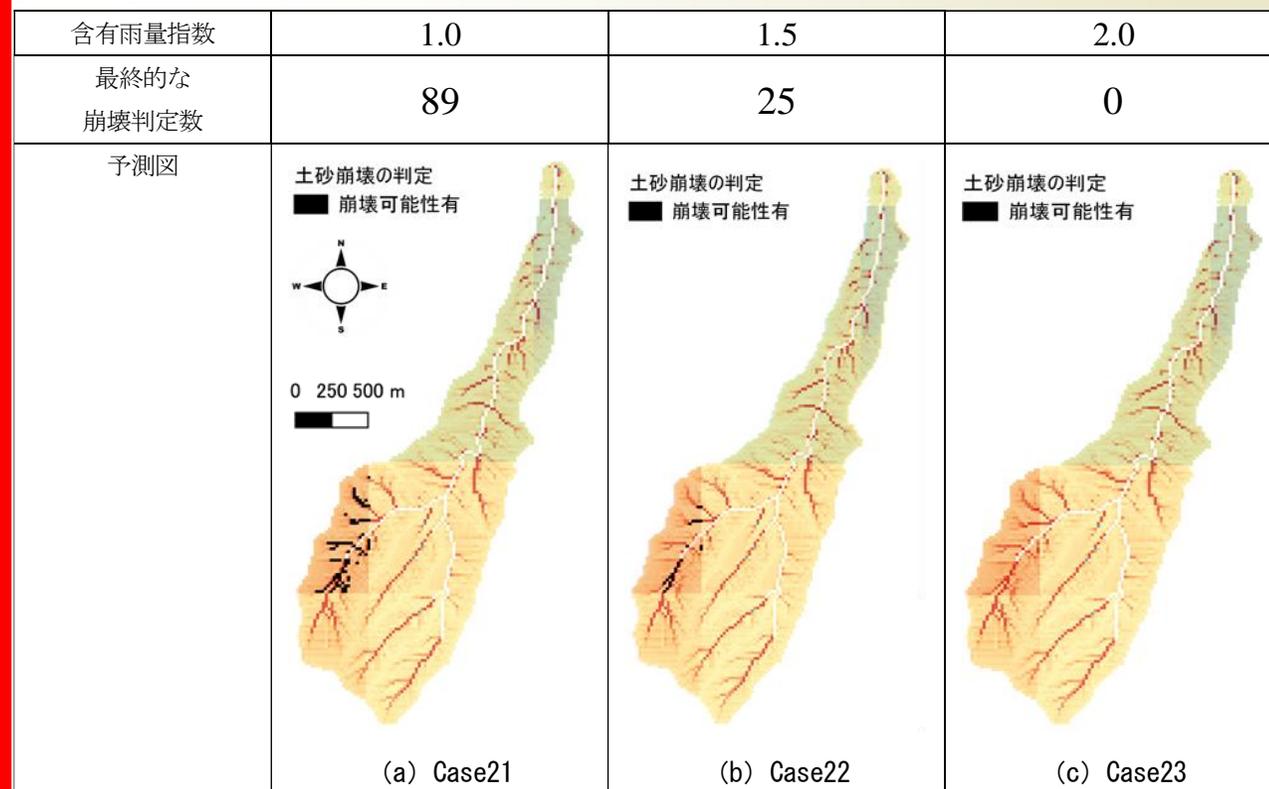
流木発生・流出量予測モデル④

崩壊判定について

Case	変更したパラメータ	各パラメータの値	斜面条件のみによる判定数	降雨条件のみによる判定数	最終崩壊判定数
1	変換係数	0.1	758	666	25
2	α_c (kN/m ³)	1.0	559	666	24
3		3.0	148	666	12
4		100	758	0	0
5	長期雨量指数 R_l	200	758	666	25
6		400	758	1360	47
7		600	758	666	25
8	短期雨量指数 r_l	10	758	0	0
9		50	758	666	25
10		100	758	666	25
11	500	758	0	0	
12	重み係数 a	5	758	0	0
13		10	758	666	25
14		20	758	6591	223
15	長期実効降雨の 半減期 T_l	50	758	666	25
16		100	758	666	25
17		200	758	666	25
18	短期実効降雨の 半減期 t_l	1.5	758	0	25
19		2.0	758	666	25
20		3.0	758	6131	210
21	含有雨量指数	1.0	758	666	89
22		1.5	758	666	25
23		2.0	758	666	0

◎ 土砂崩壊発生についてデータが無い
ため比較できない

➡ パラメータを種々変更して予測誤差（バラつき）を確認



流木発生・流出量予測モデル⑤

崩壊判定について

推定された流木流出量

土砂崩壊 判定数	土砂発生量 V_y (m ³)	流木発生量 V_g (m ³)	流木流出量 V_d (m ³)		
			$\varepsilon=2.33\times 10^{-7}$	$\varepsilon=1.91\times 10^{-6}$	$\varepsilon=1.45\times 10^{-2}$
12	8,160	163	3.80×10^{-5}	3.12×10^{-4}	2.37
24	16,320	326	7.61×10^{-5}	6.23×10^{-4}	4.73
25	17,000	340	7.92×10^{-5}	6.49×10^{-4}	4.93
47	31,960	639	1.49×10^{-4}	1.22×10^{-3}	9.27
89	60,520	1,210	2.82×10^{-4}	2.31×10^{-3}	17.55
210	142,800	2,856	6.65×10^{-4}	5.46×10^{-3}	41.41
223	151,640	3,033	7.07×10^{-4}	5.79×10^{-3}	43.98

流木捕捉量から求められた流木流出量 …… **18.75 m³**

- ➡ 流木流出量は0 m³～約44 m³と**実測と概ね一致**
- ➡ 入力条件としては降雨のみであるにもかかわらず、**上記精度で流木流出量を推定できた**

発表内容

- ◎ はじめに
- ◎ セル分布型流出解析モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ 土砂崩壊発生予測モデル
土砂崩壊発生の判定手法, 土砂発生量予測
- ◎ 流木発生・流出量予測モデル
対象流域, 解析手法, モデルの適用結果
- ◎ おわりに

おわりに

本技術開発では、流木災害の被害軽減に資することを目的とし、**任意降雨による土砂崩壊から流木の発生・流出量までを予測できる解析モデル**の開発を試みた。流出解析にはセル分布型のモデルを採用し、**土砂崩壊発生予測**には**地形・降雨条件**に加え、**地すべり危険度得点**および**流出解析による地下水分布情報**を用いた予測手法を提案した

流出解析モデルを平成21年7月の中国・九州北部豪雨時における佐波川流域に適用し、観測値との比較を行った。その結果、**実測値をかなり良好に再現**することが出来た

佐波川流域での土砂災害を対象に提案モデルの検証を行った。その結果、詳細なセル位置では空振りや見逃しが目立つものの、**実際に崩壊した地点付近の土砂崩壊を予測**できた。また、**土砂流出率を考慮**することで、**推定された土砂量は実測による土砂量と概ね一致した**

平成23年9月台風12号時における**赤岩川流域での流木流出を対象**に提案モデルの妥当性を検証した。その結果、土砂崩壊予測における各パラメータの影響等があるにも関わらず、**推定された流木流出量は観測値と概ね一致した**



ご清聴ありがとうございました