

P2f04 溪流流出発生域における流出形態の多様性と代表性に関する一考察

東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林 芝野博文・澤島薫・浅野友子・荒木田きよみ

はじめに

地質条件や森林生態系が同一条件下(浸透や遮断のプロセスが均一)では、溪流流出発生域(微小流域)からの流出は類似しており、合流後に下流の任意の地点での流出が形成されるプロセスは溪流水理学的なパラメータを用いて明示され、代表性のある微小流域だけの観測値から下流の任意の地点での流出予測ができると期待される。特定の微小流域(約1haと想定)が代表性をもつとして、そこでの人為による攪乱や環境変化による流出へのインパクトを観測することによって比較的大きな流域での流出への影響を自在に予測することが可能となる。本報告では微小流域からの流出が一様が多様か、多様であるとしたらどう代表性を設定できるかを探り、合流の数値計算を経て実測値との整合を検証した。

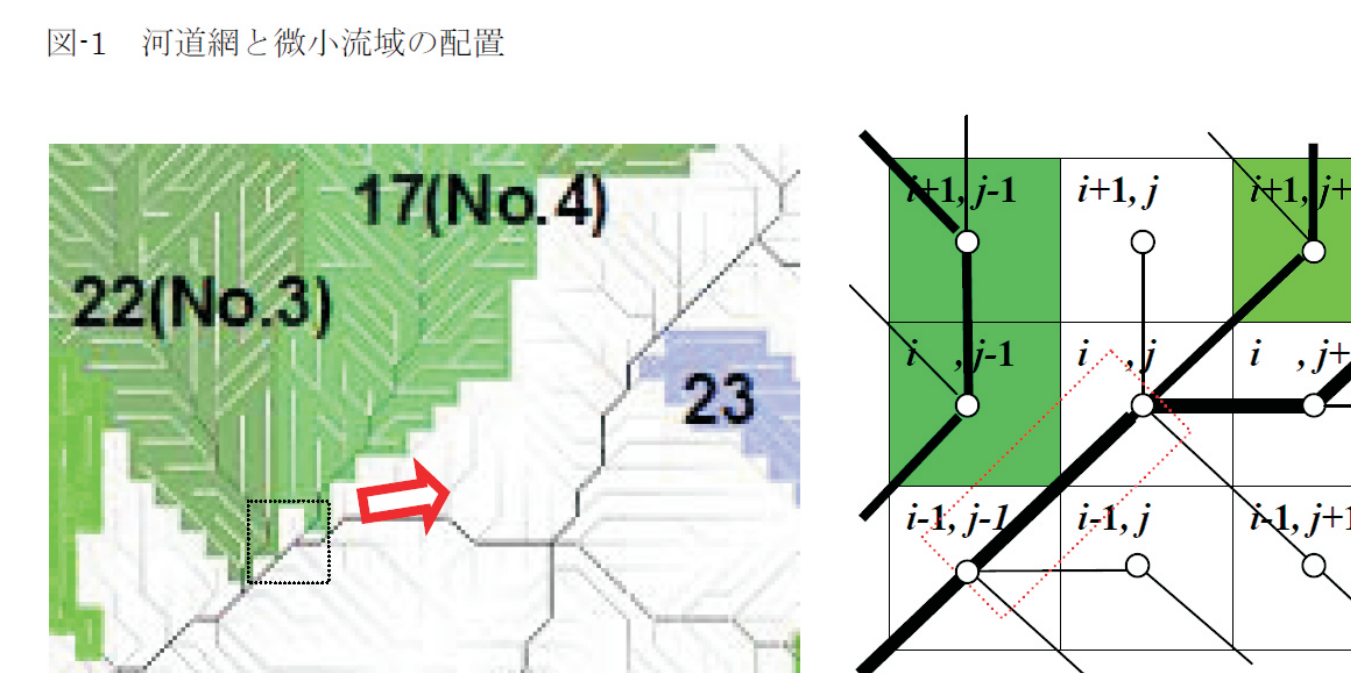
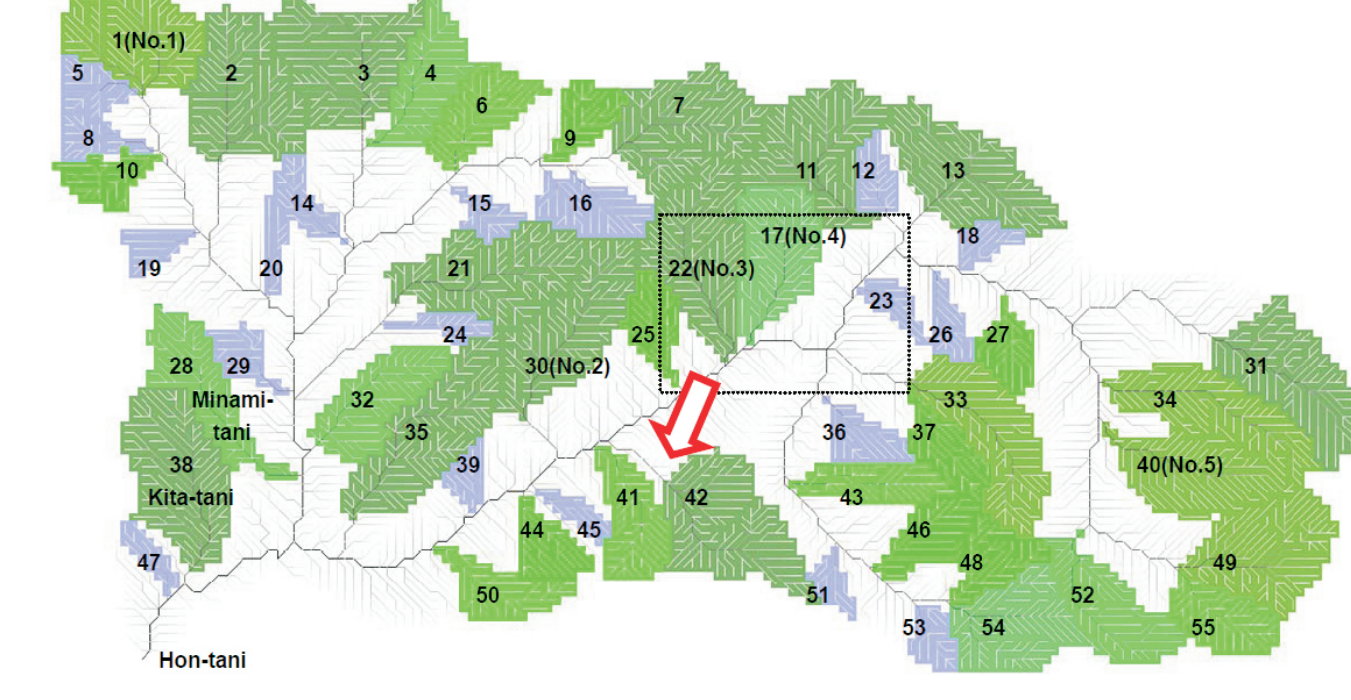
方法

東京大学愛知演習林白坂本谷流域で、微小流域として既設の北谷と南谷小流域に加えてNo.1-No.5にパーシャルフリーダムと水位計を設置し、5min間隔の流量観測を実施した。2007年7月から9月までの10個の高水について分析を行い、キネマティックな運動則を用いた合流計算で代表微小流域の流出から下流の白坂本谷(88.6ha)の流出を再現した。55の微小流域(0.25haから2ha、セル総数5494個)ではその末端出口で流域面積倍の代表微小流域の流出を与えた。斜面系流域(面積0.25ha以下、帯状、粗度係数 $0.8m^{-1/3}sec$)では代表微小流域の流出を各セル(10m×10m)に入力し、河道系(上流面積2ha以上、粗度係数 $0.04m^{-1/3}sec$)の各セルでは降雨の10%と代表微小流域の流出の90%が河道に流入する(量水堰での貯留効果を含み斜面系・河道系のセル(3361個)で毎秒の前進差分による)。

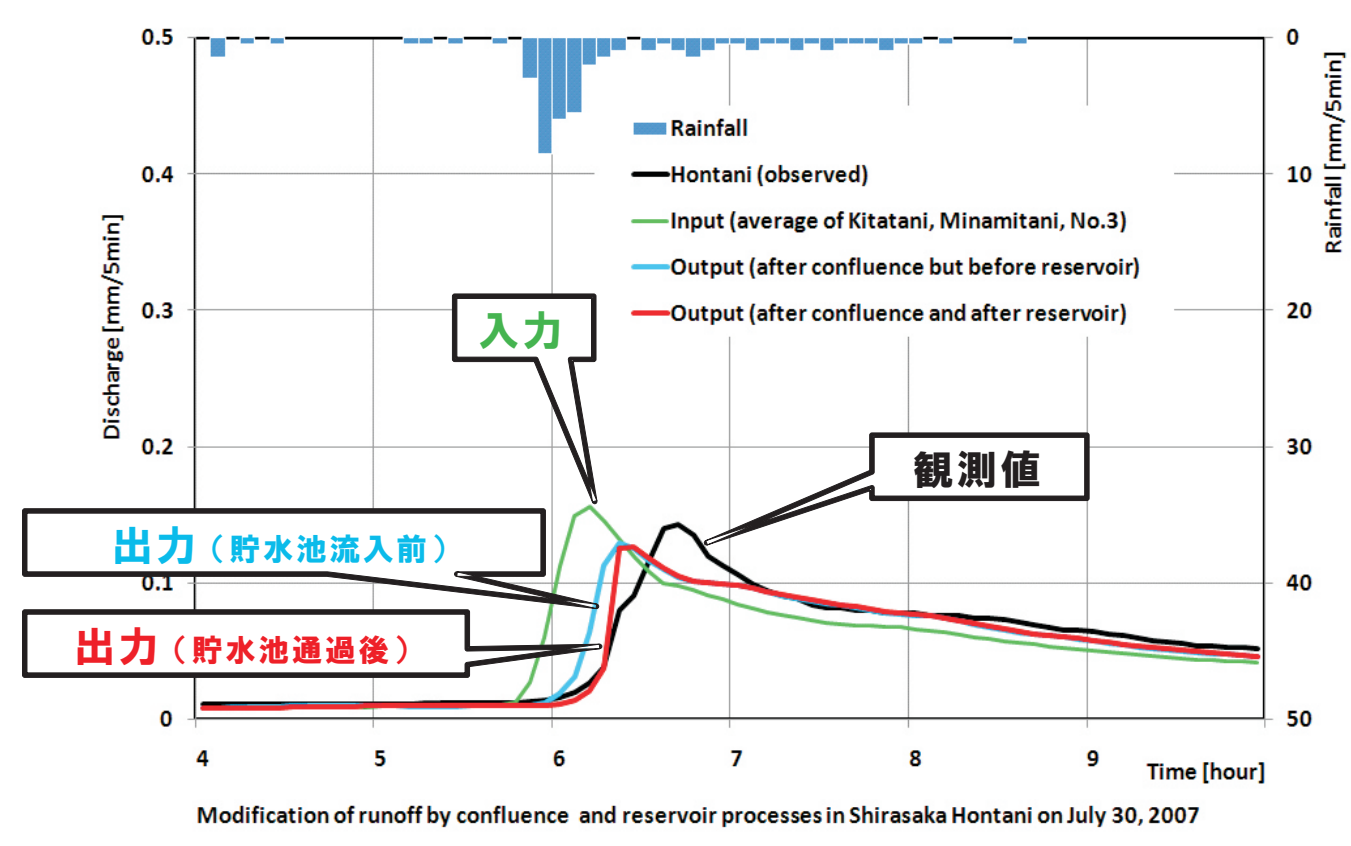


微小流域・斜面系流路・河道系流路

セルとセル内流路の配置



入力(代表性を持つ仮想微小流域と出力(合流と貯水池の貯留効果および観測値



境界条件・基本方程式・パラメータ

洪水追跡のための境界条件と差分スキーム

- 10m×10mのセル内の河道を単位に毎秒の数値計算
- 上流端は、最大7方向からの流入(合流プロセス)
- 下流端は、下流側のグリッドへの流出
- 流路系単一セルは、100m²の面積分の流量(入力ハイドログラフの90%)と雨量(入力ハイドログラフの10%)を供給
- 微小流域内部の計算は実行せず、その下流端で流量発生(入力ハイドログラフ)
- 斜面系セルは、すべてのセルで流量発生(入力ハイドログラフ)

連続方程式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

運動方程式

$$A = KQ^P$$

連続方程式の差分化

$$S_{k+1} = S_k + q_{cell} \Delta x - Q_{out} + Q_{in}$$

$$\text{時刻 } k+1 \text{ セル } i \text{ の河道貯留量: } S_{k+1} (= A_{i,k+1} \Delta x)$$

$$\text{時刻 } k \text{ セル } i \text{ の河道上流端流量: } Q_{in} (= Q_i)$$

$$\text{時刻 } k \text{ セル } i \text{ の河道下流端流量: } Q_{out} (= Q_{i+1})$$

$$\text{時刻 } k \text{ セル } i \text{ から河道への流出量: } q_{cell} (= q \Delta x \Delta t)$$

パラメータ

運動方程式を支配する水理学的パラメータ K と P は、河床勾配・斜面勾配を i 、粗度係数を n [$m^{1/3}sec$]、径深を R [m]、流水断面積を A [m²] とすると、

$$K = (ni^{-1/2}C_c^{-2})^P, R = C_c A^{1/3}, P = 3/(2P_1 + 3)$$

ただし、斜面系と河道系の粗度係数をそれぞれ N_s, N_c と表現し、河道横断面形状を同一として(河道系パラメータは実測、斜面系は最適化)

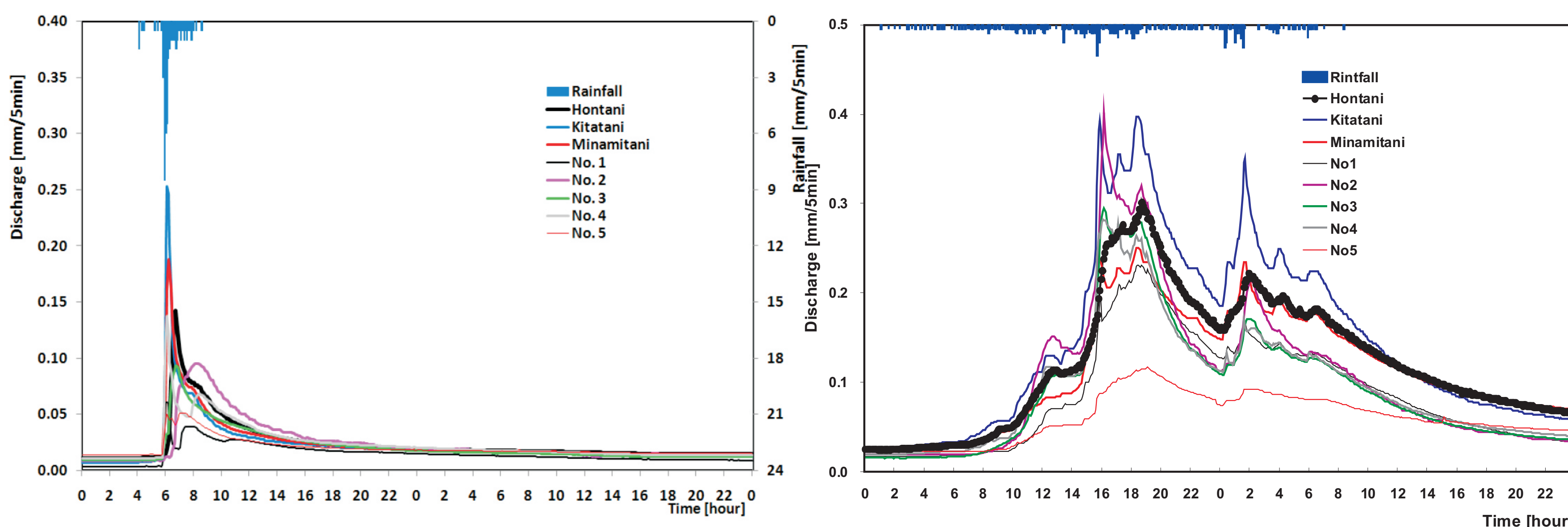
$$N_s = 0.8 [m^{1/3}sec], N_c = 0.04 [m^{1/3}sec]$$

$$P_1 = 0.667, C_c = 0.667, P = 0.692$$

結果

各微小流域からの流出は多様で相互に大きな相違があり、特定の微小流域に代表性を見出し得なかった。ただし、北谷、南谷、No.3の流出の平均は本谷流域の流出と形状が似ていることから、この平均が仮想的流域代表性をもつとして入力に使用した。10例中6例でほぼ完全な再現性を示したものの、対流性の集中豪雨では過大となった事例が3件あった。前線性の降雨と対流性の降雨とで微小流域の加重平均の与え方に工夫があればこの問題も解決するものと予想される。

微小流域からの流出応答の顕著な多様性 Jul 31-Aug 1, 2007



微小流域からの降雨-流出応答

対流性集中豪雨の場合

1. ピーク流量が北谷・南谷で鋭く、その発生時刻は早い
2. No.2の流域はピーク発生時刻が北谷・南谷より2時間以上遅れる
3. ピーク流量は流域間で大きく異なる

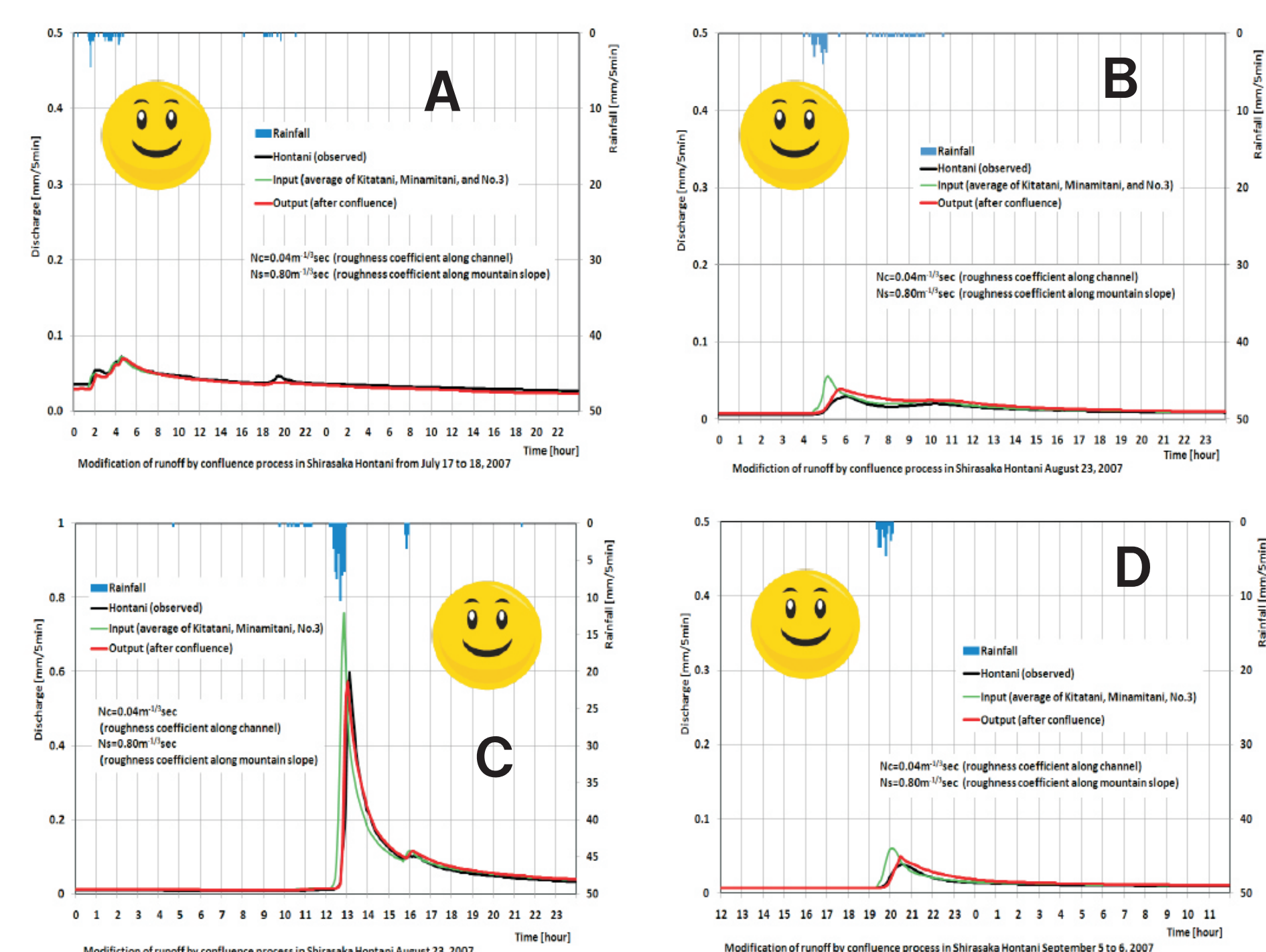
前線性豪雨の場合

1. ピーク流量発生時刻は流域間で相違が少ない
2. ピーク流量は流域間で大きく異なる

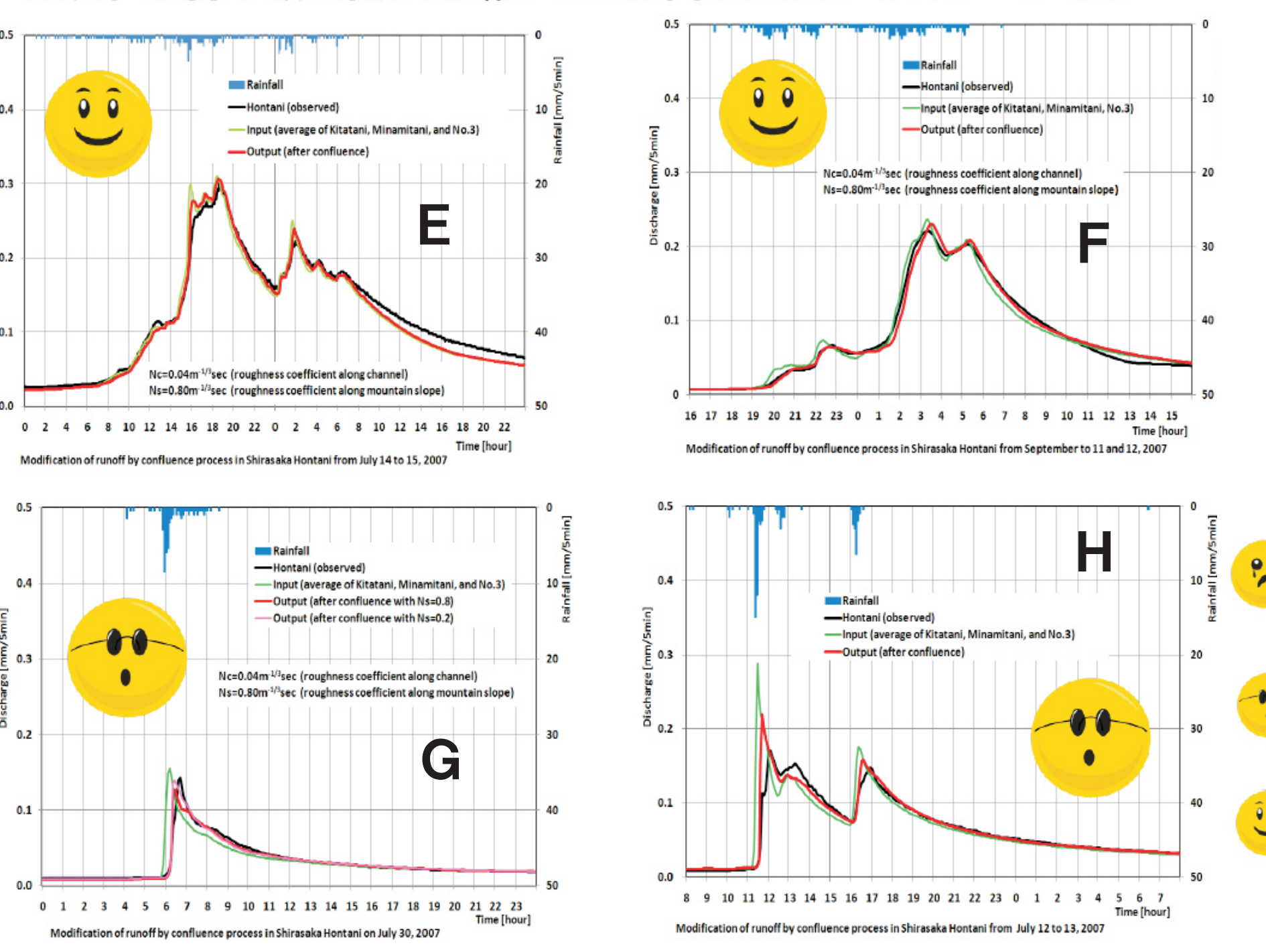
微小流域間で降雨-流出応答は極めて多様である。

55個の微小流域や多くの斜面系流域の合流後の流出形態である白坂本谷流域はどの微小流域の流出形態とも異なり、**流域代表性をもつ微小流域は存在しない**

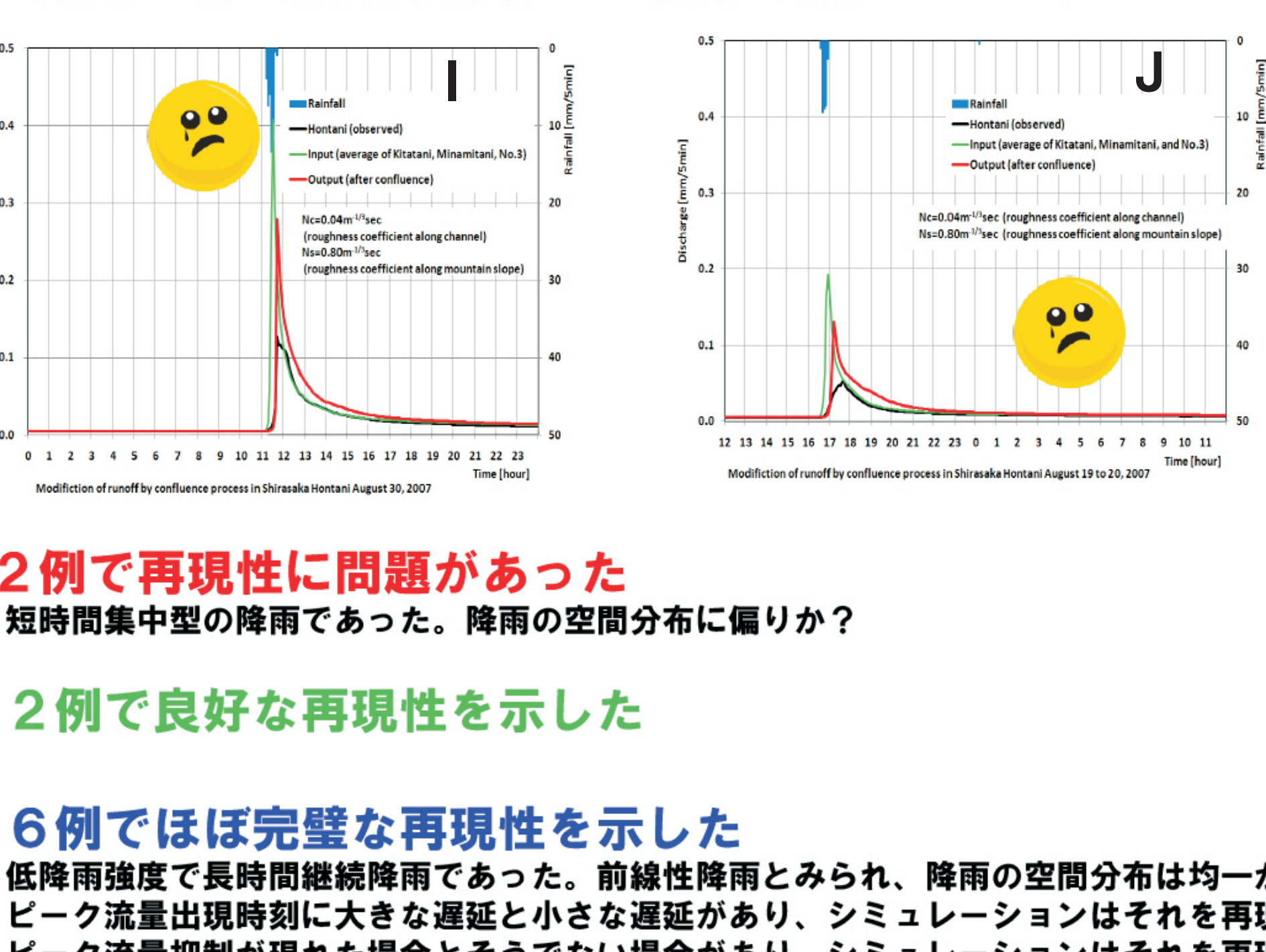
代表性を持つ仮想微小流域からの流出の合流シミュレーション



代表性を持つ仮想微小流域からの流出の合流シミュレーション



代表性を持つ仮想微小流域からの流出の合流シミュレーション



2例で再現性に問題があった
短時間集中型の降雨であった。降雨の空間分布に偏りか?

2例で良好な再現性を示した

6例でほぼ完全な再現性を示した

低降雨強度で長時間継続降雨であった。前線性降雨とみられ、降雨の空間分布は均一か? ピーク流量出現時刻に大きな遅延と小さな遅延があり、シミュレーションはそれを再現、ピーク流量抑制が現れた場合とそうでない場合があり、シミュレーションはそれを再現

合流シミュレーションから明らかになったこと

1. 北谷・南谷・No.3の平均の流出は白坂本谷の流出と類似しており、これを代表性をもつ**仮想微小流域**として合流のインプットに使用し高い再現性がえられた。
2. 合流流下と貯水池の調節効果を考慮した**完全なシミュレーション**からその効果が明示された。 **ABCDEF**
3. 対流性の短時間集中型豪雨の場合、合流・流下・貯水池の**調節効果は顕著**に現れ、ピーク流量抑制とピーク流量発生時刻の遅れを再現した。 **BCD G**
4. 前線性の長期継続型豪雨の場合は、合流・流下・貯水池の**調節効果はネグリジブル**であった。 **A E F**

白坂水堰の貯留空間



河道の貯留空間



貯水池の貯留効果

鋭いピークをもつ洪水の立ち上がりを遅らせるものの、流量が大きい場合は相対的にその効果が小さい。越流部のデザインに支配され貯水池では圧力伝播で水位変化が早く伝わる。

河道の貯留効果

河道の横断面形状は、様々な条件で場所別に変化に富んだ実際のフィールドでは一意に決定することが難しいもののシミュレーション結果に及ぼす感度は低い。粗度係数は感度が高い。

合流・流下による調節効果とは

1. 対流性の短時間集中型豪雨では、急激な流量の変化が発生し河道区間での貯留が効果を発揮する(河道の上流端と下流端で流速が異なり河道に貯留されやすいため)。
2. 前線性の長期継続型豪雨によるハイドログラフでは流量の時間変化が小さく河道の貯留効果は現れない(河道の上流端と下流端で流速があまり変わらないので河道貯留が生じるもののその効果は長時間に分散されるため)。
3. 上記の二つの発見は、仮想微小流域の存在とシミュレーションのそれぞれから説明され、かつその妥当性を立証していると考えられる。