

＜参考資料 9＞ 分布型流出モデルを用いた連続計算による流出計算結果の報告

京都大学で開発された分布型流出モデルを用いて連続計算を行い、現行モデルで設定された R_{sa} と分布型流出モデルによって計算される流域平均貯留量との関係を分析した。また、昭和 22 年洪水の再現を試みた。実施した計算内容は以下である。

- ⑭ 分布型流出モデルを用い、同一のパラメータ値を用いて、昭和 33 年 6 月から 10 月、昭和 34 年 6 月から 10 月、昭和 57 年 6 月から 10 月、平成 10 年 6 月から 10 月の連続計算を行った。この計算結果をもとに、上記 4 洪水のピーク流量の再現性を確認した。
- ⑮ 上記 4 洪水を対象とし、現行モデルで用いられている貯留関数法のパラメータ R_{sa} と分布型流出モデルの状態量（流域平均貯留高）との関連を分析した。
- ⑯ 昭和 22 年洪水の再現計算を試みた。

1. 京都大学の分布型流出モデルの構成¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

国土数値情報の標高データ(空間分解能：250m)をもとに最急勾配方向に流下方向を決定し、約 3km に区分した河道区間に寄与する部分流域を設定する。部分流域は勾配、落水方向、面積の情報を持つ矩形斜面の集合であり、それぞれの矩形斜面に(1)式で表現するキネマティックウェーブモデルを適用する。このモデルでは、土壌中のマトリクス部を流れる飽和・不飽和地中流、土壌中の空隙部を重力水として流れる飽和中間流、そして地表面を流れる表面流の 3 種類を統合的に表現する流量流積関係式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - e$$

$$q(h) = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta, & (0 \leq h < d_c) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c), & (d_c \leq h < d_s) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m, & (d_s \leq h) \end{cases} \quad (1)$$

ここで t は時間、 x は距離である。 h は水深、 q は単位幅流量、 r は降雨強度、 e は蒸発散強度である。 d_s は土壌中の最大水分量に対応する土壌空隙高さ、 d_c はマトリクス中の最大水分量に対応する土壌空隙高さ、 k_c はマトリクス部の飽和透水係数、 k_a は空隙を重力水として流れる流れの飽和透水係数であり、 $v_c = k_c i$ 、 $v_a = k_a i$ である。 i は地形から定まる勾配である。また、 β はマトリクス部において含水率の減少に伴う透水係数の減少の大きさを表すパラメータであり、マトリクス部と大空隙部の流量流積関係の連続性から $\beta = k_a/k_c$ の関係が得られる。また、 $\alpha = i^{1/2} n^{-1}$ 、 $m = 5/3$ とする。分布型流出モデルの部分流域の設定方法、落水方向、矩形斜面における水深変化の概念図、個々の矩形斜面に適用する流量流積関係式を図 1 に表す。

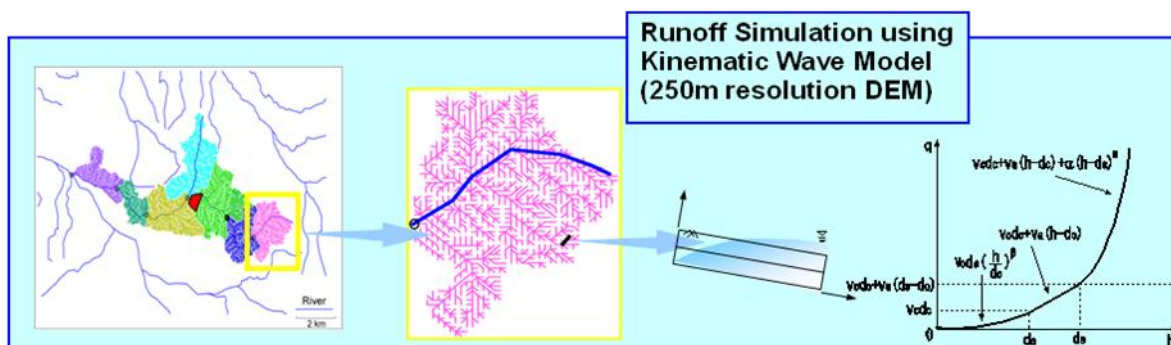


図 1：分布型流出モデルの部分流域、落水方向、矩形斜面における水深変化の概念図、
個々の斜面に適用する流量流積関係式

2. 既往 4 洪水を対象とした計算結果

現行モデルで対象とされている既往 4 洪水（昭和 33 年洪水、昭和 34 年洪水、昭和 57 年洪水、平成 10 年洪水）を含むそれぞれの年の 6 月 1 日から 10 月 30 日の連続計算を実施した。

（1）計算条件

①降水量

東京大学工学系研究科の小池研究室から提供された 500m 空間分解能のグリッド形式の降雨強度を 1km 空間分解能に平均化したデータを用いた。このデータは、国土交通省から提供された地点雨量を用い、ティーセン法（最近隣法）によって空間的な内挿計算が行われたものである。

②蒸発散量

小池研究室から提供された JP10 に含まれる蒸発散強度のデータを用いた。

③基底流量

流出モデルが基底流量を含めて計算する構造を持つため、外部から与える必要はない。

④モデルパラメータ

分布型流出モデルのモデルパラメータの値は、1994~1998 年の 6 月から 10 月までの洪水データを用い、利根川流域の代表的な部分流域に対して同定した。部分流域ごとに同定したパラメータの値を表 1 に示す。

⑤ダム操作

流域の状態量の連続的な変化を把握するため、ダム操作は考慮していない。

⑥差分計算時間間隔

10 分とした。

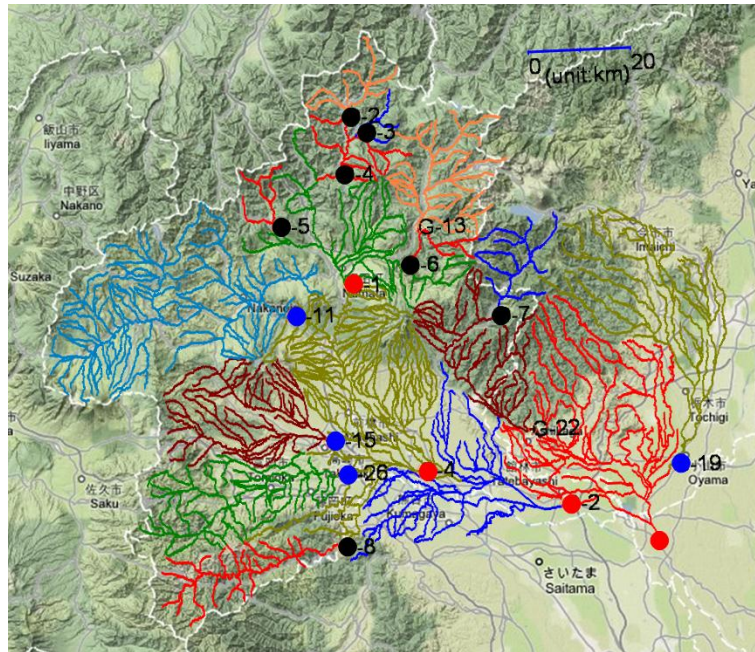
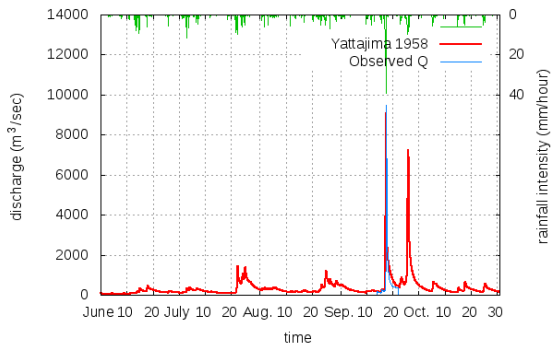


図 2：分布型流出モデルのパラメータ設定で用いた流域区分

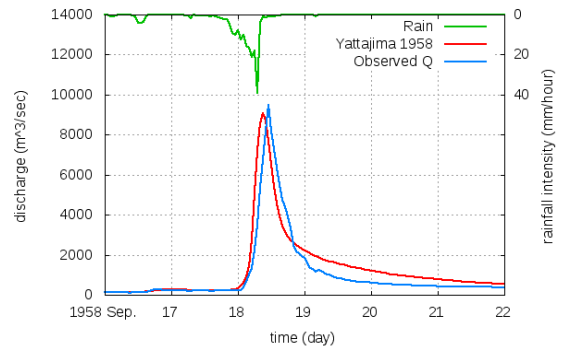
表 1：設定したモデルパラメータの値

| 流域 | 流域区分 | 流域面積 (km ²) | n (m ^{1/3} /s) | d_s (m) | d_c (m) | k_a (m/s) | β (-) |
|-----------|---------|----------------------------|------------------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| 奥利根流域 | 八木沢ダム上流 | 167.6 | 0.30 | 0.40 | 0.20 | 0.012 | 9 |
| | 奈良俣ダム上流 | 61.0 | 0.30 | 0.75 | 0.40 | 0.012 | 9 |
| | 藤原ダム上流 | 184.8 | 0.30 | 0.35 | 0.20 | 0.012 | 9 |
| | 藁原ダム上流 | 492.2 | 0.30 | 0.35 | 0.30 | 0.012 | 9 |
| | 相俣ダム上流 | 119.0 | 0.30 | 0.25 | 0.20 | 0.012 | 5 |
| | 屋形原上流 | 652.9 | 0.28 | 0.20 | 0.05 | 0.012 | 7 |
| 吾妻川及び烏川流域 | 村上上流 | 1249.2 | 0.30 | 0.25 | 0.15 | 0.012 | 7 |
| | 高松上流 | 557.4 | 0.30 | 0.20 | 0.15 | 0.012 | 7 |
| | 岩井上流 | 558.5 | 0.30 | 0.20 | 0.15 | 0.012 | 9 |
| | 下久保ダム上流 | 323.9 | 0.30 | 0.30 | 0.15 | 0.012 | 4 |
| 残流域 | 八斗島上流 | 767.1 | 0.28 | 0.35 | 0.20 | 0.012 | 5 |

(2) 計算結果

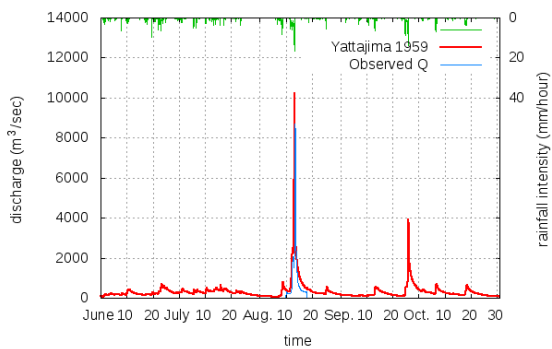


(a) 6月1日～10月30日

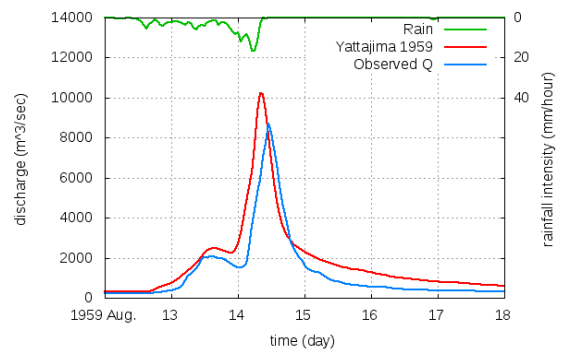


(b) 9月16日～9月22日

図3：昭和33年6月～10月の八斗島地点の河川流量（赤：計算流量、青：観測流量）

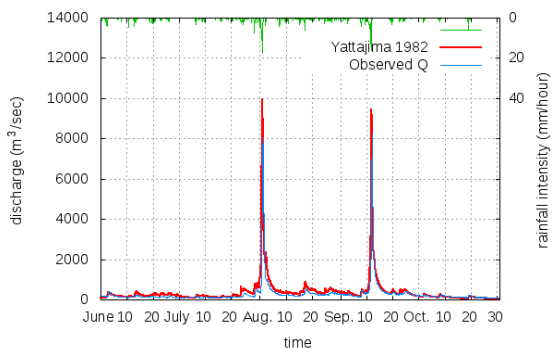


(a) 6月1日～10月30日

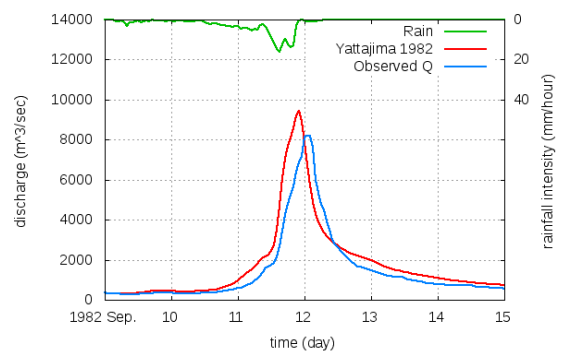


(b) 8月12日～8月18日

図4：昭和34年6月～10月の八斗島地点の河川流量（赤：計算流量、青：観測流量）

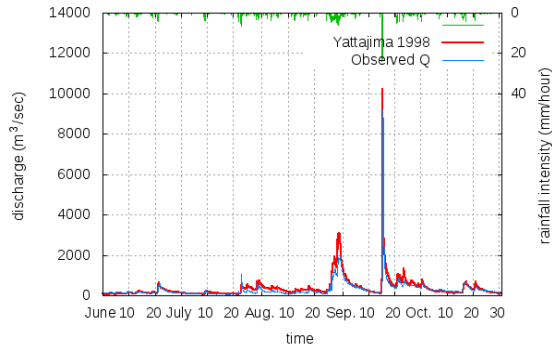


(a) 6月1日～10月30日

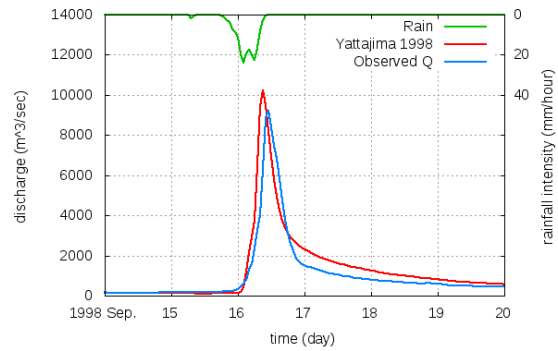


(b) 9月9日～9月15日

図5：昭和57年6月～10月の八斗島地点の河川流量（赤：計算流量、青：観測流量）



(a) 6月1日～10月30日



(b) 9月14日～9月20日

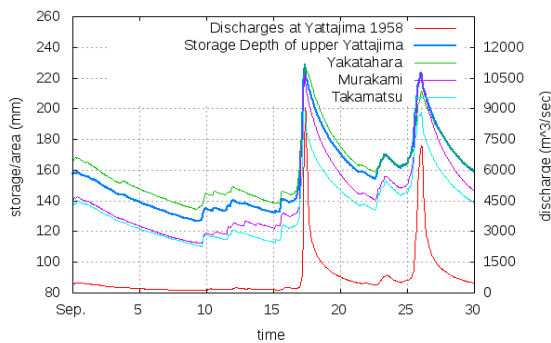
図6：平成10年6月～10月の八斗島地点の河川流量（赤：計算流量、青：観測流量）

(3) まとめ

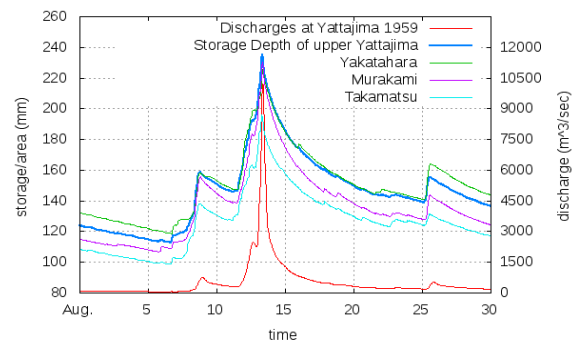
同一のパラメータでピーク流量を含めて、河川流量を再現することを確認した。

3. 流域平均貯留高の計算結果

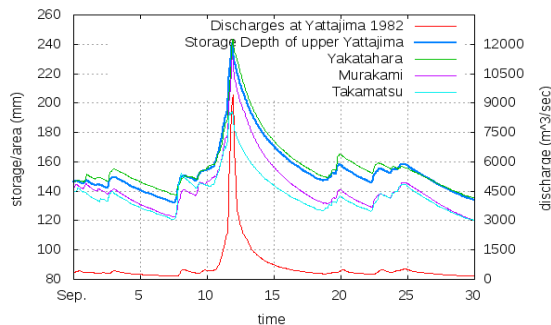
分布型流出モデルでは、計算格子点での計算水深を用いて任意の流域の貯留量を推定することができる。部分流域ごとの貯留量（部分流域に含まれる全斜面要素の計算格子の水深（(1)式で与えられる水深 h ）を空間的に積分した値）をその流域面積で割ると部分流域ごとの流域平均貯留高が得られる。図7はその時間変化を示したものである。八斗島地点での計算流量を合わせて示している。計算流量の変化と流域平均貯留高の変化とはよく対応する。



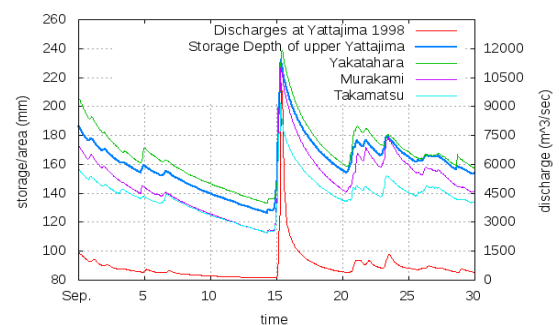
(a)1958年6月～10月



(b)1959年6月～10月



(c)1982年6月～10月



(d)1998年6月～10月

図7：各対象地点より上流の流域平均貯留量の時間変化と八斗島地点の計算流量

3. 分布型流出モデルによる流域平均貯留高と現行モデルの R_{sa} との対応関係の分析

既往4洪水について、現行モデル（貯留関数法）による計算期間の中でピーク流量生起時刻より前の時間において、分布型流出モデルが示す流域平均貯留高の最小値を取り出した。その値と現行モデルの R_{sa} との関係を図8に示す。流域平均貯留高が大きくなり流域が湿った状態と考えられるときに、 R_{sa} が小さいという明瞭な関係は見られなかった。特に、昭和57年9月洪水については、洪水前の初期流量が他の3洪水よりも大きく、それに対応して分布型モデルが出す流域平均貯留高は4洪水の中でもっとも大きな値を示す。一方で、この洪水について設定されていた R_{sa} は2番目に大きな値となっていた。

この4洪水の結果を用いた場合、京大分布型流出モデルで得られる流域平均貯留高との対応でみた場合には、 R_{sa} を流域の水分状態のみを反映する物理的な状態を表現するパラメータとして考えるのは難しく、様々な影響を含む洪水ピーク流量を再現するために必要となるパラメータと考えることが適切であると考えられる。

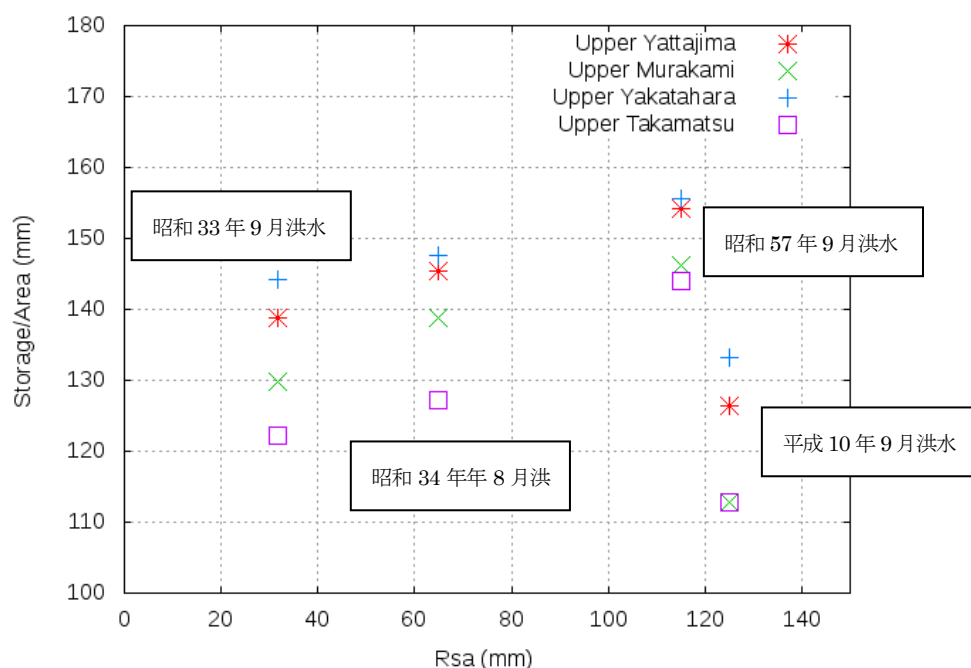


図8：分布型流出モデルが得られる流域平均貯留高（八斗島上流域）と
現行モデルでの R_{sa} との対応関係

4. 昭和 22 年洪水の再現計算

上記の分布型流出モデルを用いて昭和 22 年洪水の再現計算を実施した。

(1) 計算条件

2. の連続計算で用いたそれぞれ 4 期間の 5 ヶ月間の降雨データにおいて、昭和 22 年 13 日午前 10 時からの 72 時間分の降雨データを、それぞれの期間の 72 時間分の降雨データと置き換え、分布型流出モデルによる連続計算によって昭和 22 年洪水の再現を試みた。降雨データを置き換える期間は、各年で実際に発生した降雨と連続して設定することにより過大な評価とならないように期間を設定した。設定した期間は以下の 6 通りを考えた。

- (1) 昭和 33 年 9 月 14 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合
- (2) 昭和 34 年 8 月 4 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合
- (3) 昭和 34 年 8 月 9 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合
- (4) 昭和 57 年 9 月 4 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合
- (5) 昭和 57 年 9 月 9 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合
- (6) 平成 10 年 9 月 9 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合

昭和 22 年洪水の降雨データは、東京大学工学系研究科の小池研究室から提供された 500m 空間分解能のグリッド形式の降雨強度データである。このデータは、国土交通省から提供された地点雨量を用い、ティーセン法（最近隣法）によって空間的な内挿計算が行われたものである。降雨データ以外の計算条件は 2. と同じである。

(2) 計算結果

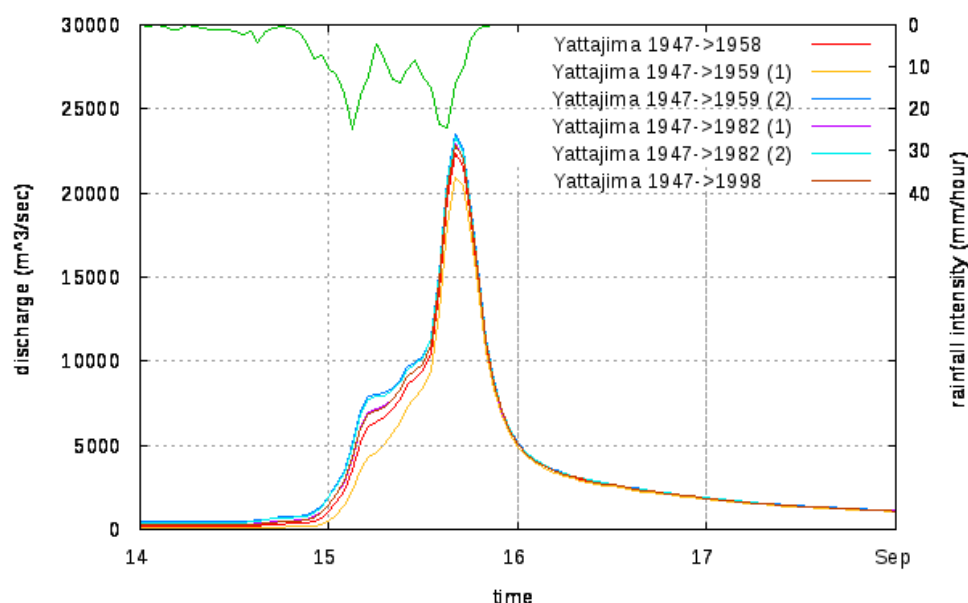


図 9：分布型流出モデルによる昭和 22 年洪水の再現計算

計算されたピーク流量は以下のものであった。

- (1) 昭和 33 年 9 月 14 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合 : 22,318.5 m³/s
- (2) 昭和 34 年 8 月 4 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合 : 20,907.6 m³/s
- (3) 昭和 34 年 8 月 9 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合 : 23,462.2 m³/s
- (4) 昭和 57 年 9 月 4 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合 : 22,934.0 m³/s
- (5) 昭和 57 年 9 月 9 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合 : 23,333.8 m³/s
- (6) 平成 10 年 9 月 9 日 11 時からの 72 時間を昭和 22 年降雨と置き換えた場合 : 22,872.1 m³/s

設定した期間によりピーク流量に違いが見られる。これは昭和 22 年降雨を設定した期間の初期の状態の違いが現れている。

参考文献

- 1) 市川温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴 : 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系 シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, no. 691/II-57, pp. 43-52, 2001.
- 2) 立川康人, 永谷 言, 寶 馨 : 飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, pp. 7-12, vol. 48, 2004.
- 3) 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨, 市川温 : 広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集, No. 803/II-73, pp. 13-27, 2005.
- 4) S. KIM, Y. TACHIKAWA, E. NAKAKITA, K. YOROZU and M. SHIIBA : Climate change impact on river flow of the tone river basin, Japan, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 55, pp. S_85-S_90, 2011.