

## 都市貯留関数モデルを用いた石神井川の洪水流出予測

|                    |           |      |    |    |
|--------------------|-----------|------|----|----|
| 首都大学東京             | 都市環境科学研究科 | 学生会員 | 盛  | 耕平 |
| 東京都土木技術支援・人材育成センター |           | 正会員  | 高崎 | 忠勝 |
| 首都大学東京             | 都市基盤環境学域  | 正会員  | 河村 | 明  |
| 首都大学東京             | 都市基盤環境学域  | 正会員  | 天口 | 英雄 |

### 1. はじめに

東京都の都市域周辺を流れる中小河川では、近年、局地的な豪雨による洪水被害が頻発している。都市域では開発の進行に伴い、地下鉄や地下街そして家屋の半地下スペースなどの地下空間の利用が進んでおり、毎年のように発生している水害への対策が急務となっている。本研究で対象とする石神井川流域においても都市化に伴う市街化面積の拡大に伴い、浸透面積の減少および下水道整備などに起因する雨水の短時間流出により浸水被害が発生している。

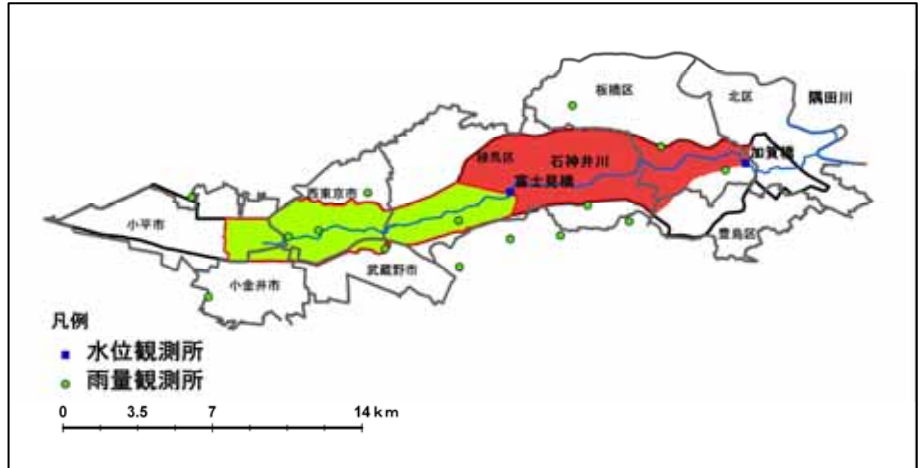


図-1 石神井川流域

石神井川流域の年平均浸水棟数は100棟以上で被害総額が5億円を超えるという報告がなされており、特に1時間に109mm(石神井川雨量観測所)の雨量を記録した2005年9月4日の降雨では900棟を超える浸水被害が発生している<sup>1)</sup>。都市域では既に建物が河川沿いに立ち並び河川改修には用地取得の問題から長期間を要するため、水害被害をより小さく抑えるために適切な水防活動や避難活動が重要であり、これらの活動に対する活動に対する支援を可能にする洪水流出予測計算の実用化が求められている。各種活動の支援を目的とした洪水流出予測計算においては高い精度の予測結果が求められ、さらに、都市中小河川の豪雨時における短時間の降雨流出に対応するため予測結果をきわめて短時間に出力することも必要である。洪水流出予測モデルとしての集中型概念モデルである貯留関数モデルは流出過程における非線形性を比較的単純な構造式で表現でき、計算量が少なく実時間の予測に適した特徴を備えている。そこで本研究では、都市中小河川である石神井川の豪雨イベントを対象に、合流式下水道による流域外への排水など都市特有の流出機構を考慮し、全流出成分を概念的に組み込むことで事前の有効雨量の算定や流出成分の分離作業が不要となる都市貯留関数モデル<sup>2)</sup>を適用し、同定されたパラメータの分布について検討すると共に、観測ハイドログラフに対する再現性を評価する。また、石神井川流域の特性についても検討を行っている。

### 2. 都市貯留関数モデル

本研究で用いる都市貯留関数モデルは直接流出成分ではなく、観測雨量と観測流量を直接使い、有効雨量の算定や流出成分の分離を必要としないモデルである<sup>2)</sup>。また、都市流域の流出機構を考慮することで都市流域に普及している下水道による流域外への降雨の流出を流出成分として組み込んだモデルとなっている。都市貯留関数モデルは以下の式(1)~(4)で表される。

$$s = k_1(Q + q_R)^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} \left\{ (Q + q_R)^{p_2} \right\} \quad (1) \qquad \frac{ds}{dt} = R + I - E - O - Q - q_R - q_l \quad (2)$$

$$q_l = \begin{cases} k_3(s - z) & (s \geq z) \\ 0 & (s < z) \end{cases} \quad (3) \qquad q_R = \begin{cases} \alpha(Q + q_R - Q_0) & (\alpha(Q + q_R - Q_0) < q_{Rmax}) \\ q_{Rmax} & (\alpha(Q + q_R - Q_0) \geq q_{Rmax}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $s$ ：総貯留量(mm/min)、 $R$ ：降水量(mm/min)、 $I$ ：降水量以外の流入成分(mm/min) (都市特有の流入量・キーワード 都市貯留関数モデル、石神井川、洪水流出、豪雨、下水道)

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 E-mail: mori-kouhei@ed.tmu.ac.jp

流域外からの地下水流量),  $Q$  : 河川流出量(mm/min),  $q_R$  : 合流式下水道による流域外への排水量(mm/min),  $E$  : 蒸発散量(mm/min),  $O$  : 取水量(mm/min),  $q_l$  : 地下水関連損失量(mm/min)(伏流水, 流域外への地下水流出, 深層への浸透等),  $z$  : 地下水関連損失量の浸透孔高(mm/min),  $t$  : 時間(min),  $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$  : モデルパラメータ

### 3. 対象流域およびデータ

石神井川は, 流域面積 61.6km<sup>2</sup>, 河川延長 25.2km の荒川水系の支川で, 東京都中北部の小平市を源流とし東京都の北部を東に流れ, 隅田川へと流れ込む東京都の中小河川としては比較的規模の大きい河川である. 石神井川流域の市街化面積率は平成 5 年時点で 87.0%, 下水道整備状況はほぼ 100%となっている. 図-1 に示すように対象とした水位観測所は石神井川流域内の加賀橋水位観測所と富士見橋水位観測所の 2 地点で, 雨量観測所は石神井川周辺の 15 地点である. 図-1 の黒線は石神井川流域を示しており, 赤線で囲まれている部分が加賀橋流域, 緑で示されている部分が富士見橋流域である. 対象とする水位データと降雨データは東京都水防災総合情報システムデータの 1 分値データ(1999 年 4 月 1 日 ~ 2006 年 12 月 31 日)である. 水位データは各橋での流量観測時のデータを用いて水位流量曲線(H-Q 曲線)を算定することにより流量データに変換した. また降雨データに関しては各雨量観測所の値を用いてティーセン法により流域平均雨量データに換算した. これらのデータより加賀橋流域において流域平均雨量 30mm/h を超え, データに異常がないものを対象として豪雨イベントを選定した結果, 今回は 7 イベントが選定されたが, このうち 2005 年 9 月 4 日の豪雨イベント 0 については, 河川溢水が発生しているため正確な流量が得られなかったためパラメータ同定には用いず参考イベントとした. また解析期間は降雨開始から降雨終了後 360 分経過後とした. 表-1 に今回の解析に用いた豪雨イベントの時間最大雨量, 総降雨量, 降雨継続時間を示す.

### 4. パラメータ同定と考察

解析には 2. で述べたモデルを用いた. このうち  $I, O$  は今回の対象流域では影響が少ないため考慮せず,  $E$  も対象イベントが豪雨であることから影響が少ないと判断して考慮しないものとする.  $q_{Rmax}$  は合流式下水道による流域外への最大雨水排水量を表し, 流域外に接続する流域下水道管の流下能力から, 家庭からの汚水量を差し引いたもので, 加賀橋流域で 0.026mm/min, 富士見橋流域で 0.01mm/min と算定した. またパラメータ同定には SCE-UA(Shuffled complex Evolution University of Arizona)を用いた. SCE-UA 法はシンプレックス法, ランダム探索, 競争進化, 集団混合の概念を組み合わせたアルゴリズムを持つ大域的探索法であり精度良く同定が行われていることが報告されている<sup>2)</sup>. 本研究では誤差評価関数として RMSE(Root Mean Square Error: 平方根平均二乗誤差)を用いたが, RMSE は通常よく使用される誤差評価関数である. 同定されたパラメータは表-2 に示す通りである. イベント 1 からイベント 6 までは対象となるイベントデータのみによる同定パラメータ値であり, 全イベントは参考イベントを除く全イベントデータを対象にした同定パラメータを示している. 同定パラメータ値は流域面積

表-1 豪雨イベント

| イベント番号 | 豪雨日        | 時間最大雨量(mm) |      | 総降雨量(mm) |       | 降雨継続時間  |         | 気象要因 |
|--------|------------|------------|------|----------|-------|---------|---------|------|
|        |            | 加賀橋        | 富士見橋 | 加賀橋      | 富士見橋  | 加賀橋     | 富士見橋    |      |
| 0      | 2005/9/4   | 76.9       | 69.2 | 189.1    | 172.7 | 58h 42m | 58h 42m | 集中豪雨 |
| 1      | 2005/8/15  | 44.7       | 35.3 | 49.8     | 36.1  | 7h 53m  | 7h 53m  | 集中豪雨 |
| 2      | 2003/6/24  | 42.7       | 41.1 | 61.8     | 63.4  | 26h 22m | 25h 58m | 集中豪雨 |
| 3      | 2003/10/13 | 36.9       | 29.4 | 44.5     | 36.1  | 3h 40m  | 3h 40m  | 集中豪雨 |
| 4      | 1999/8/24  | 35.7       | 26.5 | 44.4     | 35.3  | 6h 34m  | 6h 34m  | 集中豪雨 |
| 5      | 1999/8/29  | 33.4       | 13.3 | 40.7     | 13.5  | 3h 23m  | 1h 55m  | 集中豪雨 |
| 6      | 1999/8/13  | 31.3       | 36   | 200.9    | 231.5 | 35h 45m | 35h 45m | 集中豪雨 |

表-2 同定パラメータ

| パラメータ | 探索範囲       | イベント 1 |       | イベント 2 |       | イベント 3 |       | イベント 4 |       | イベント 5 |       | イベント 6 |       | 全イベント |       |
|-------|------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
|       |            | 加賀橋    | 富士見橋  | 加賀橋    | 富士見橋  | 加賀橋    | 富士見橋  | 加賀橋    | 富士見橋  | 加賀橋    | 富士見橋  | 加賀橋    | 富士見橋  | 加賀橋   | 富士見橋  |
| $k_1$ | 10 ~ 500   | 58.5   | 41.0  | 56.3   | 73.1  | 49.2   | 59.1  | 103.3  | 43.1  | 35.5   | 22.4  | 72.3   | 94.6  | 43.3  | 83.1  |
| $k_2$ | 100 ~ 5000 | 5000   | 755   | 5000   | 5000  | 1349   | 1295  | 4994   | 1919  | 1154   | 195   | 1569   | 4989  | 1537  | 1235  |
| $k_3$ | 0 ~ 0.05   | 0.003  | 0.003 | 0.001  | 0.001 | 0.006  | 0.007 | 0.000  | 0.006 | 0.004  | 0.003 | 0.004  | 0.003 | 0.009 | 0.006 |
| $p_1$ | 0 ~ 1      | 0.16   | 0.45  | 0.20   | 0.26  | 0.58   | 0.57  | 0.08   | 0.19  | 0.65   | 0.26  | 0.54   | 0.53  | 0.64  | 0.79  |
| $p_2$ | 0 ~ 1      | 0.04   | 0.34  | 0.03   | 0.03  | 0.22   | 0.36  | 0.02   | 0.36  | 0.94   | 0.34  | 1.00   | 0.05  | 0.27  | 0.50  |
| $z$   | 0 ~ 50     | 50.00  | 14.17 | 7.03   | 16.86 | 11.21  | 17.33 | 38.30  | 26.66 | 4.82   | 25.87 | 9.13   | 18.79 | 0.13  | 0.97  |
|       | 0.1 ~ 1    | 0.74   | 0.51  | 0.27   | 0.44  | 0.47   | 0.61  | 0.81   | 0.11  | 0.15   | 0.56  | 0.42   | 1.00  | 0.32  | 0.10  |
| RMSE  |            | 0.005  | 0.005 | 0.003  | 0.003 | 0.005  | 0.003 | 0.008  | 0.007 | 0.020  | 0.003 | 0.007  | 0.009 | 0.020 | 0.017 |

が大きい加賀橋流域ではばらつきが大きくなっている。しかし、全イベントデータに対する同定パラメータ値は2流域ともほぼ同様の値となっている。また、表-2 から各イベントに対する RMSE は加賀橋流域で 0.003 ~ 0.020(mm/min)，富士見橋流域で 0.003 ~ 0.009(mm/min)となっており、RMSE はかなり小さな値となっている。全イベントデータに対する同定パラメータ値による RMSE は各イベントデータに対する同定値よりも当然大きくなっている。

### 5. ハイドログラフの再現性

図-2、図-3にそれぞれイベント1およびイベント6に対する観測ハイドログラフとその計算流出量を示している。同図には、合流式下水道による流域外への排水量も併記している。図-2より、イベント1は1つのピークを持ったハイドログラフとなっており、計算流出量はピーク流出量を的確に捉えており、立ち上がり部分や逓減部分を非常に良く再現できている。合流式下水道による流域外への排水量  $q_R$  は加賀橋流域で30分程度、富士見橋流域では15分程度で  $q_{Rmax}$  に達しており、その値がハイドログラフの逓減部分となるまで持続している。また  $q_R$  の総量は加賀橋流域で8.0mm、富士見橋流域で3.2mmとなっており、これは総流出量  $Q+q_R$  のそれぞれ24.4%、10.8%を占めている。次に、図-3よりイベント6は複数のピークを持ったハイドログラフで、ピーク流出量は図-2のピーク1つのイベント1に比べ過小評価されている。また、流域面積の小さい富士見橋流域で特にハイドログラフの再現性が劣化している。 $q_R$  に関しては、図-2と同様に短時間で  $q_{Rmax}$  に達しており、加賀橋流域では  $q_{Rmax}$  を下回る時間帯もみられる。 $q_R$  の総量は加賀橋流域で26.4mm、富士見橋流域で18.6mmとなっており、これは総流出量  $Q+q_R$  のそれぞれ23.4%、13.1%を占めている。この  $q_R$  の総流出量に対する割合はイベント毎にかなり異なっており、加賀橋流域では10.1% ~ 31.1%あり、富士見橋流域では8.3% ~ 17.1%の比率となっていた。次に、都市貯留関数モデルの再現性を式(5)のピーク流出量比  $R_p$  および式(6)に示した総流出量比  $R_T$  を用いて検討してみよう。

$$R_p = Q_{calpeak} / Q_{obspeak} \quad (5)$$

$$R_T = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{cal,i}}{\sum_{i=1}^N Q_{obs,i}} \quad (6)$$

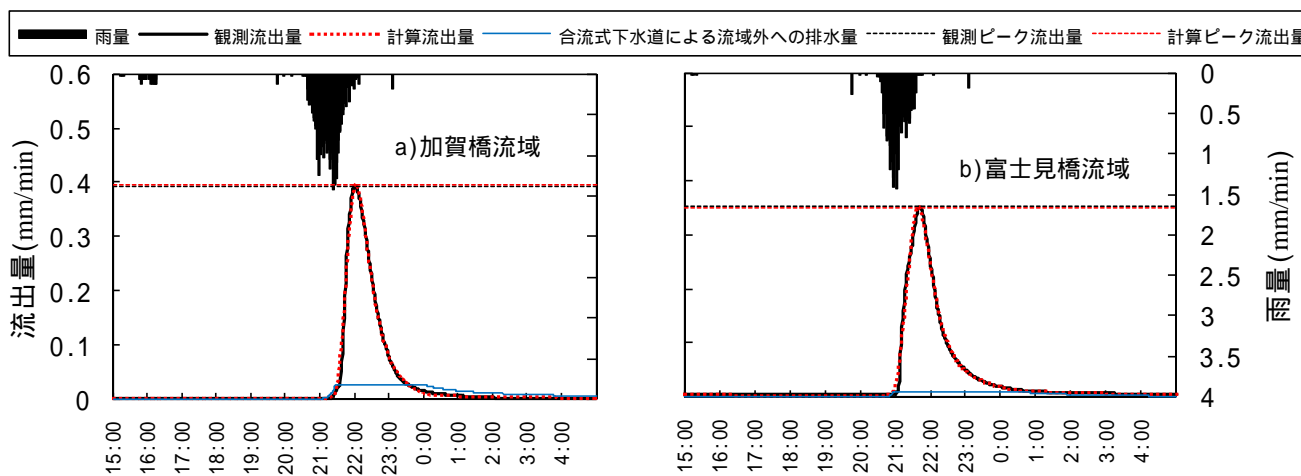


図-2 イベント1の観測ハイドログラフおよび計算流出量

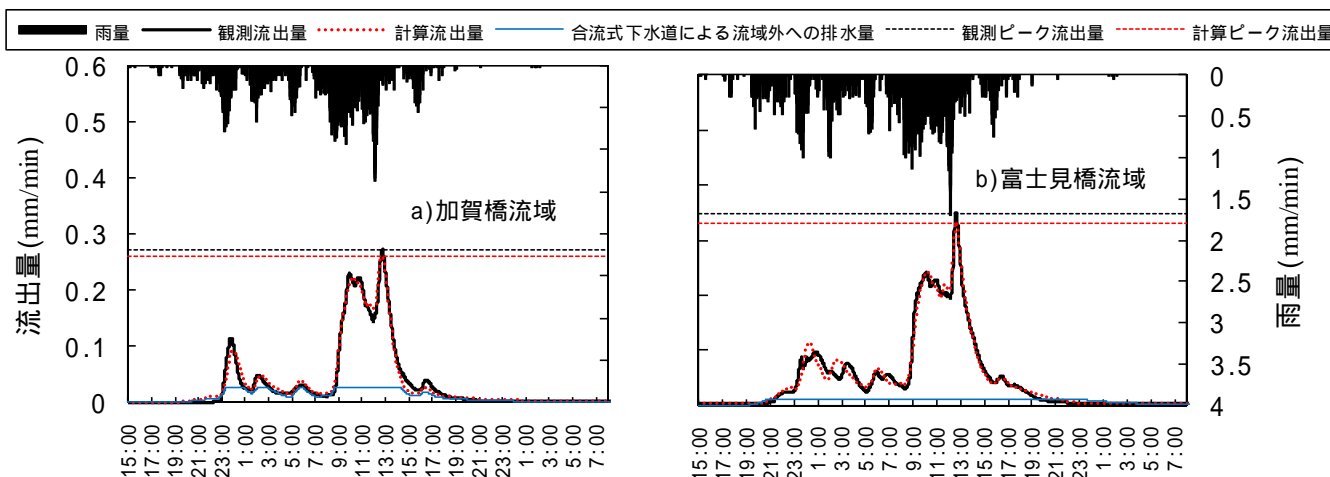


図-3 イベント6の観測ハイドログラフおよび計算流出量

ここに、 $Q_{obspeak}$  : 観測ピーク流出量(mm/min),  $Q_{calpeak}$  : 計算ピーク流出量(mm/min),  $Q_{obs}$  : 観測河川流出量(mm/min),  $Q_{cal}$  : 計算河川流出量(mm/min),  $N$  : データ数.

図-4 に各イベント毎に同定されたパラメータ値により計算されたハイドログラフに対する  $R_p$  と  $R_T$  をプロットしている. また, 図-5 には全イベントに対して同定された場合の  $R_p$  と  $R_T$  を示す. これらの図において  $R_p, R_T$  が 1 に近いほど, それぞれのピーク流出量, 総流出量をより正確に再現していることになる. 図-4 より, 2 流域とも全てのイベントに対して,  $R_p, R_T$  は 1 に近い値を示しており, ばらつきも非常に小さく, 流域の大きさにかかわらずピーク流量と総流出量の双方を良好に再現できている. 一方図-5 より, 全イベントに対して同定されたパラメータ値を用いた場合は, 降雨分布が流域の一部に偏り且つ一部の雨量観測所で欠測が生じているイベント 5 に対し両流域で  $R_p, R_T$  をかなり過小評価しているものの,  $R_p, R_T$  はともに特に加賀橋流域において概ね 1 に近い値となっている. これより, 全イベントに対して同定されたパラメータをその流域の標準的パラメータ値と考え, 流域パラメータ値の適応性が評価されたと考えられる. 次に, 河川溢水を生じたイベント 0 を対象に都市貯留関数モデルを用い加賀橋が流出量を算定した. このイベントは対象流域内で河川溢水が生じているため正確な流出量を把握することはできず, 計算ピーク流出量は観測ピーク流出量をかなり上回ることが予想される. 図-6 にイベント 0 に対する観測ハイドログラフとその計算流出量を示す. この図より, 加賀橋流域および富士見橋流域における観測ピーク流量 0.61mm/min, 0.50mm/min に対し, 計算ピーク流量はそれぞれ 0.94mm/min, 0.56mm/min となっており, その差が河川溢水量と推定されるが, その量は特に加賀橋流域で大きく, 加賀橋地点において河川溢水が顕著であったと推察される.

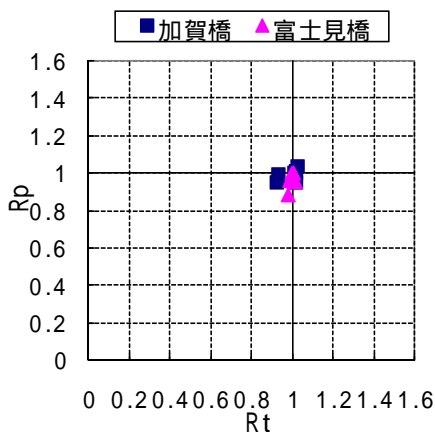


図-4 各イベントに対するピーク流出量比と総流出量比

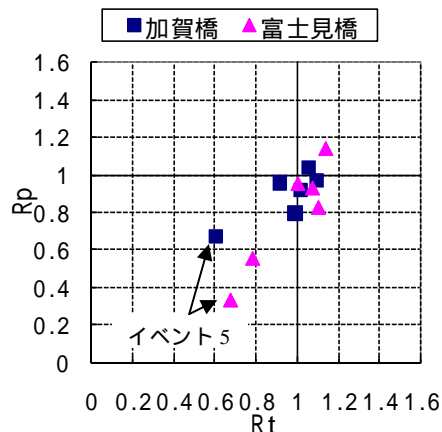


図-5 全イベントに対して同定されたパラメータを用いた場合の各イベントに対するピーク流出量比と総流出量比

### 6. むすび

本研究では, 都市中小河川である石神井川流域の豪雨イベントを対象に都市貯留関数モデルを適用し, 同定されたパラメータの分布について検討すると共に, 観測ハイドログラフに対する再現性を評価した. その結果, 各イベントに対する同定パラメータ値によるハイドログラフの再現性は非常に良好であり, また, 各流域の標準的パラメータ値によるハイドログラフでも概ね良好な再現性が得られた.

### 参考文献

- 1) 東京都総合治水対策協議会: 石神井川流域豪雨対策計画, pp.3-9, 2009.
- 2) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博: 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.3, pp.217-230, 2009.

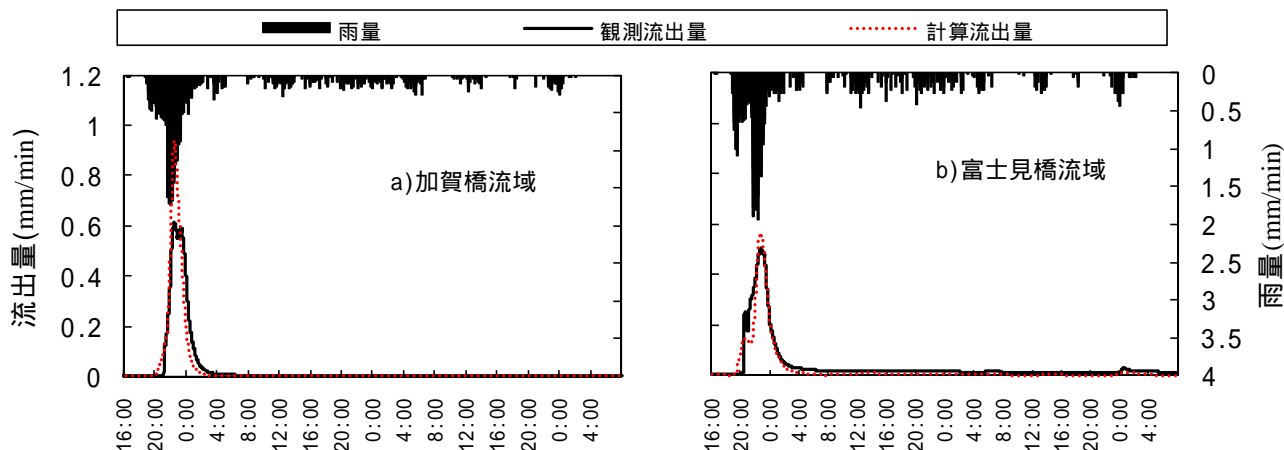


図-6 イベント7の観測ハイドログラフおよび計算流出量