

新モデル（ケース 2）による洪水流出計算の再現に関する報告

第 6 回分科会で提示された新たな流出計算モデル（ケース 2）について、国土交通省が計算に用いている流出計算モデルの動作を確認するために、(財) 国土センター流出解析システムを用いた再現計算を実施し、計算結果を比較した。比較した計算結果は以下の 2 つである。

- ① 国土交通省から提供された計算結果。この計算結果は、国土交通省がエクセルによって独自に構築した流出計算モデル（以降、エクセルモデルと略記）を用いて計算した結果である。
- ② 分科会委員が再現計算した結果。この計算結果は、(財) 国土センター流出解析システムを用い、同じモデル構造・同じ計算条件となるように設定された流出計算モデル（以降、国土センターモデルと略記）を用いて、分科会委員が再現計算した結果である。計算に必要な情報は国土交通省から提供を受けた。

実施した計算内容は以下である。

- ① 昭和 57 年 9 月洪水と平成 10 年 9 月洪水を対象とし、エクセルモデルの計算結果と国土センターモデルの計算結果とを比較した。
- ② 次に、上記 2 洪水を対象とし、国土センターモデルを用いて有効降雨パラメータ R_{sa} が計算流量に与える影響を分析した。

1. 新たな流出計算モデル（ケース 2）の構成

第 6 回分科会（平成 23 年 4 月 26 日）資料 6 の 2 ページに示された新たな流出計算モデル（ケース 2）（以降、新モデルと略記）を対象とする。新モデルの構成は以下のようである。

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= r_e(t - T_l) - q(t) \\ s(t) &= Kq(t)^p \\ q(t) &= \frac{3.6}{A}(Q(t) - Q_b(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで t は時間、 $s(t)$ は貯留高(mm)、 $r_e(t)$ は流域平均の有効降雨強度 (mm/hr)、 $q(t)$ は基底流量分離後の直接流出高 (mm/hr)、 $Q(t)$ は流出量 (m^3/s)、 $Q_b(t)$ は基底流量 (m^3/s)である。 A は流域面積(km^2)、 T_l は遅滞時間、 K 、 p はモデルパラメータであり、流域固有の値であると考え。 (1)式は、しばしば用いられる以下の表現と同等であり、解釈のしやすさから(1)式のように記述する。

$$\frac{ds_l}{dt} = r_e(t) - q(t + T_l), \quad s_l(t) = Kq(t + T_l)^p$$

流域平均の有効降雨強度 $r_e(t)$ は、ティーセン法から定まる流域平均降雨強度 $r(t)$ をもとに

$$r_e(t) = f(t)r(t) \quad (2)$$

とする。ここで $f(t)$ は降り始め（計算開始時刻 t_0 ）からの $r(t)$ の積算値が R_0 以下のとき、すなわち、

$$0 \leq \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau < R_0 \text{ のとき } f(t) = 0.0 \quad (2a)$$

降り始めからの $r(t)$ の積算値が R_0 を超えて R_0 と R_{sa} の和よりも小さいとき、すなわち

$$R_0 \leq \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau < R_0 + R_{sa} \text{ のとき } f(t) = f_1 \quad (2b)$$

降り始めからの $r(t)$ の積算値が R_0 と R_{sa} の和よりも大きくなるとき、すなわち

$$R_0 + R_{sa} < \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau \text{ のとき } f(t) = 1.0 \quad (2c)$$

とする。ここで f_1 は $0 < f_1 < 1$ とする有効降雨に関するパラメータであり、流域固有の値をとると考える。 R_0 と R_{sa} は流域ごとに、また降雨ごとに变化すると考える有効降雨に関するパラメータである。 R_0 は、洪水ハイドログラフが立ち上がる時刻までの降雨強度の積算値とする。 $R_0 + R_{sa}$ は、降雨すべてが直接流出に寄与する状態に遷移すると考えるまでの降雨強度の積算値とする。

降雨が終了した後、十分時間が経過したときの時刻を t_E とすると、その間の総降水量から総直接流出量を減じた値が降雨の損失分に等しいので

$$\int_{t_0}^{t_E} r(\tau) d\tau - \int_{t_0}^{t_E} q(\tau) d\tau = (1 - f_1)R_{sa} + R_0$$

という関係が成り立つ。これから、 R_{sa} は次式で定まる。

$$R_{sa} = \frac{\int_{t_0}^{t_E} r(\tau) d\tau - \int_{t_0}^{t_E} q(\tau) d\tau - R_0}{1 - f_1} \quad (3)$$

2. 新モデルの動作確認の方法

国土交通省ではエクセルのマクロ機能を用いて新モデルを構成している。これとは独立に、(財)国土センターが公開している流出解析システムを用い、新モデルと同じ構造を持つ流出モデルを構成してエクセルモデルの動作を確認した。この際、新モデルとまったく同じ構造の流出計算モデルは(財)国土センター流出解析システムには実装されていない。そこで、両モデルがまったく同じ構造のモデルの流出計算を実施することになるように、入力データとモデルパラメータを設定した。

具体的に記述すると、(財)国土センター流出解析システムに実装されている一価非線形貯留関数法による流出量は、

$$Q = \frac{1}{3.6} f_1 A q_1 + \frac{1}{3.6} (f_{sa} - f_1) A q_{sal} + Q_b \quad (4)$$

Q : サブ流域全体からの流出量(m^3/s)、 f_1 : 一次流出率、 f_{sa} : 飽和流出率 (通常 $f_{sa}=1.0$)、
 q_1 : 流出域からの流出高(mm/hr)、 q_{sal} : 浸透域からの流出高(mm/hr)、 A : 流域面積(km^2)、
 Q_b : 基底流量(m^3/s)

と表現される。いわゆる木村の貯留関数法であり、1. で示した新モデルとは構造が異なる。ここで、 $f_1=1.0$ 、 $f_{sa}=1.0$ として右辺第2項による流出量が発生しないようする。また、流出モデルへの入力データとなる有効降雨強度は、別のプログラムを用いて(2)式に従って計算し、それを流出

モデルの入力データとする。これによって新モデルと同じ構造の流出モデルを(財)国土センター流出解析システムで実施することが可能となる。

なお、同じ計算を行うためには、基底流量とモデルパラメータの値は、エクセルモデルと国土センターモデルとで同じ値を用いる必要がある。これらは国土交通省から提供された値を用いるものとする。

3. 既往2洪水を対象とした計算結果の比較

現行モデルで対象とされている既往4洪水(昭和33年9月洪水、昭和34年8月洪水、昭和57年9月洪水、平成10年9月洪水)のうち、基底流量、新モデルのモデルパラメータ値、およびエクセルモデルの計算結果が提供された昭和57年9月洪水、平成10年9月洪水について、(財)国土センター流出解析システムを用いた再現計算を実施し、計算した結果を、国土交通省から提供されたエクセルモデルの計算結果と比較した。

(1) 計算条件

①降水量

国土交通省から提供されたサブ流域ごとの流域平均雨量(時間単位)を用いた。

②有効降雨

表1にある f_1 、 R_0 、 R_{sa} を用いて提供された流域平均雨量から算定した。

③基底流量

国土交通省から提供された分離後の基底流量データを用いた。

④モデルパラメータ

新モデルのモデルパラメータ値は第6回分科会別添資料5に記載の値(表1)を用いた。この値は、国土交通省が近年の洪水(昭和56年8月洪水、昭和57年7月洪水、昭和57年9月洪水、平成10年9月洪水、平成11年8月洪水、平成13年9月洪水、平成14年7月洪水、平成19年9月洪水)を用いて図解法によって決定したものである。 K 、 p 、 T_1 、 f_1 は洪水によらずサブ流域ごとに同じ値を用いており、 R_0 と R_{sa} は洪水ごとに値が変化するパラメータである。

⑤ダム操作

事後解析であるため、国土交通省から提供されたダム地点での実績のダム放流量を与えた。

⑥差分計算時間間隔

10分とした。

表1：設定したモデルパラメータの値

中流域	流域番号	面積 A (km^2)	K	p	T_l (min)	f_l	昭和 57 年 9 月洪水		平成 10 年 9 月洪水	
							R_{sa} (mm)	R_0 (mm)	R_{sa} (mm)	R_0 (mm)
奥利根流域	1	165.48	7.587	0.528	30	0.4	110	24.0	130	16.0
	2	60.59	6.252	0.656	50	0.4	120	19.0	100	14.0
	3	165.77	9.480	0.592	50	0.4	120	19.0	140	11.0
	4	103.07	9.480	0.592	50	0.4	120	19.0	140	11.0
	5	81.80	9.480	0.592	50	0.4	120	19.0	140	11.0
	6	110.19	10.591	0.655	40	0.4	100	30.0	160	23.0
	7	79.19	9.480	0.592	50	0.4	120	19.0	140	11.0
	8	226.00	9.480	0.592	50	0.4	120	19.0	140	11.0
	9	252.05	13.487	0.530	90	0.4	140	18.0	180	7.0
	10	161.64	13.487	0.530	90	0.4	140	18.0	180	7.0
	11	78.78	13.487	0.530	90	0.4	140	18.0	180	7.0
	12	182.31	9.480	0.592	50	0.4	120	19.0	140	11.0
吾妻川流域	13	144.49	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	14	269.24	29.321	0.305	100	0.4	—	22.0	—	4.0
	15	289.00	29.321	0.305	100	0.4	—	22.0	—	4.0
	16	153.20	29.321	0.305	100	0.4	—	22.0	—	4.0
	17	38.30	29.321	0.305	100	0.4	—	22.0	—	4.0
	18	164.22	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	19	157.01	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	20	188.37	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	21	97.12	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	22	93.33	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	23	24.68	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	24	23.88	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
烏川流域	25	155.13	29.519	0.428	30	0.6	120	18.0	170	6.0
	26	110.02	18.623	0.572	40	0.6	120	18.0	150	5.0
	27	121.39	10.765	0.680	60	0.6	80	22.0	70	1.0
	28	165.39	18.623	0.572	40	0.6	120	18.0	150	5.0
	29	43.27	18.623	0.572	40	0.6	120	18.0	150	5.0
	30	190.64	18.623	0.572	40	0.6	150	12.0	210	10.0
	31	158.74	18.623	0.572	40	0.6	150	12.0	210	10.0
	32	201.63	18.623	0.572	40	0.6	150	12.0	210	10.0
	33	75.00	18.623	0.572	40	0.6	120	18.0	150	5.0
	34	94.85	35.239	0.300	50	0.4	—	22.0	—	4.0
	35	70.05	18.623	0.572	40	0.6	120	18.0	150	5.0
神流川流域	36	269.56	29.976	0.476	80	0.6	130	22.0	130	22.0
	37	53.25	29.976	0.476	80	0.6	130	22.0	130	22.0
	38	51.68	29.976	0.476	80	0.6	130	22.0	130	22.0
	39	37.50	29.976	0.476	80	0.6	130	22.0	130	22.0

(2) 計算結果

①平成10年9月洪水

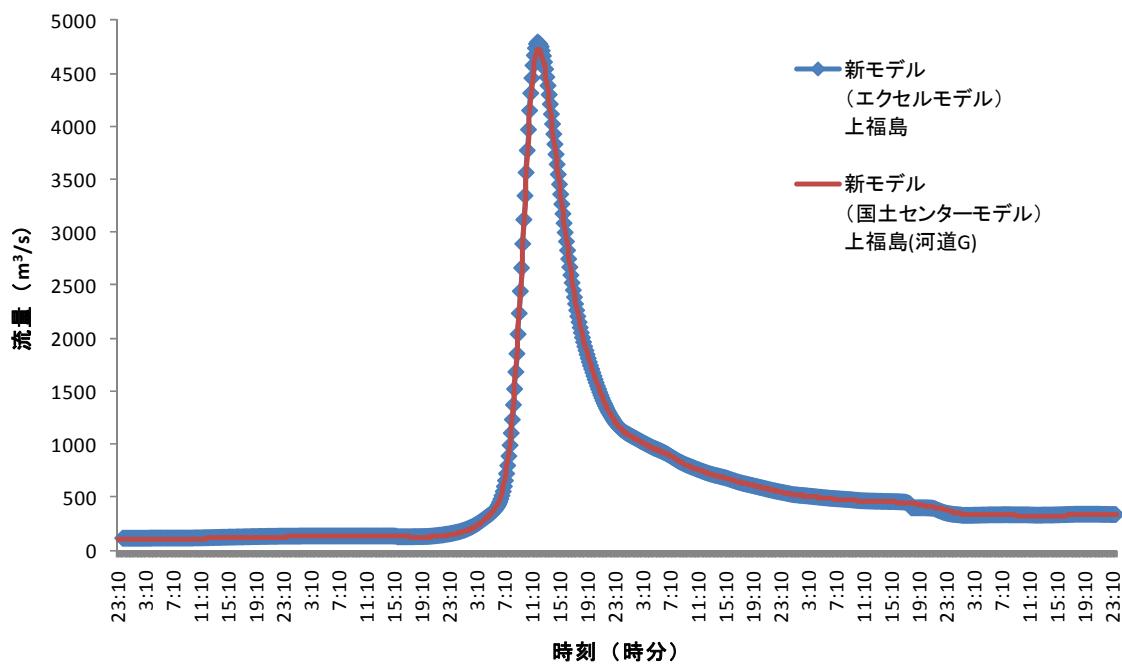


図1：上福島地点（吾妻川流域）

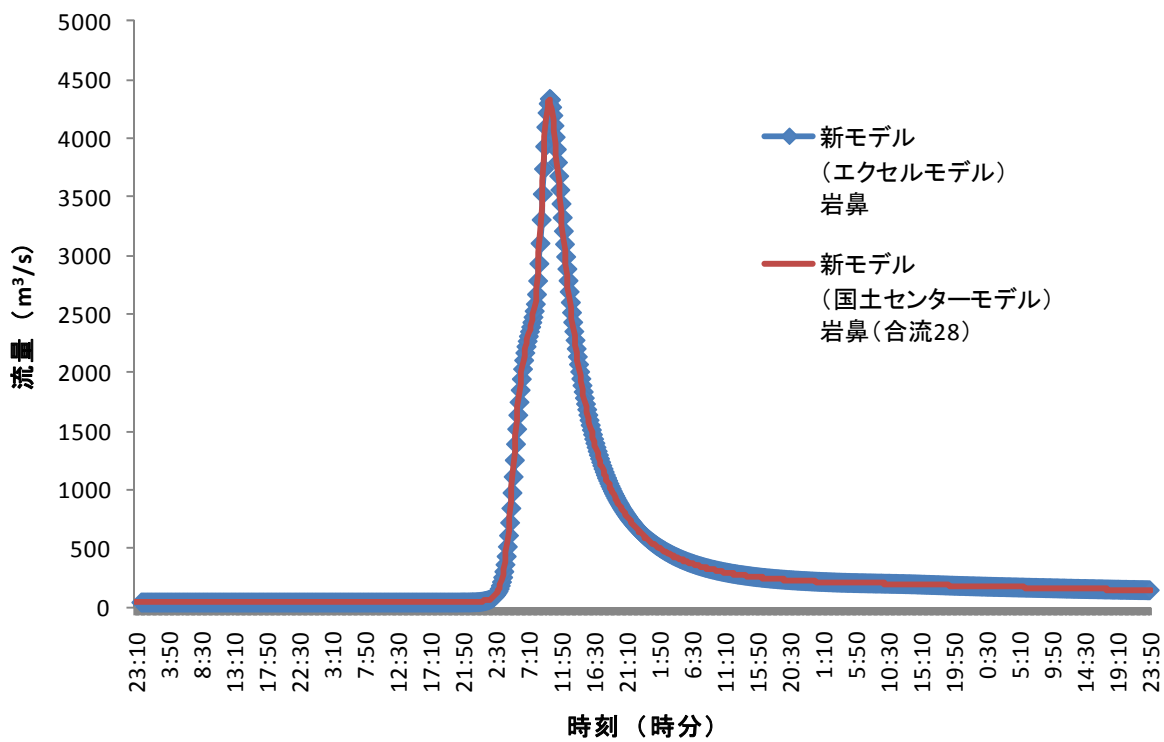


図2：岩鼻地点（烏川流域）

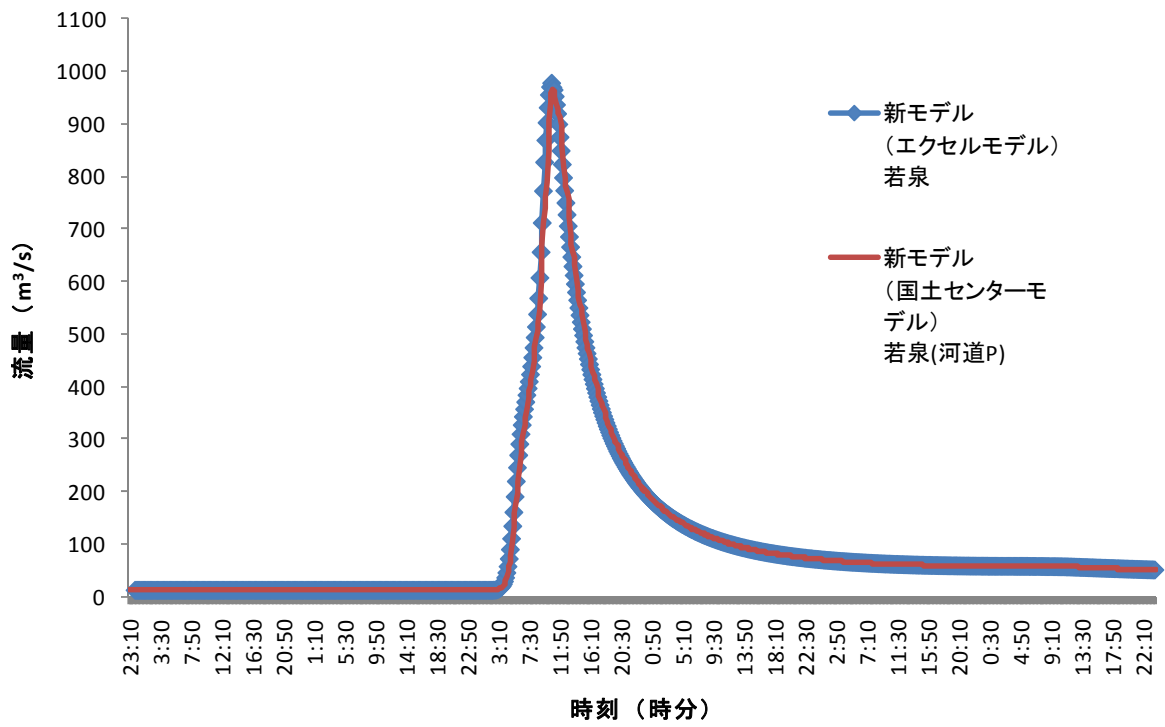


図 3 : 若泉地点 (神流川流域)

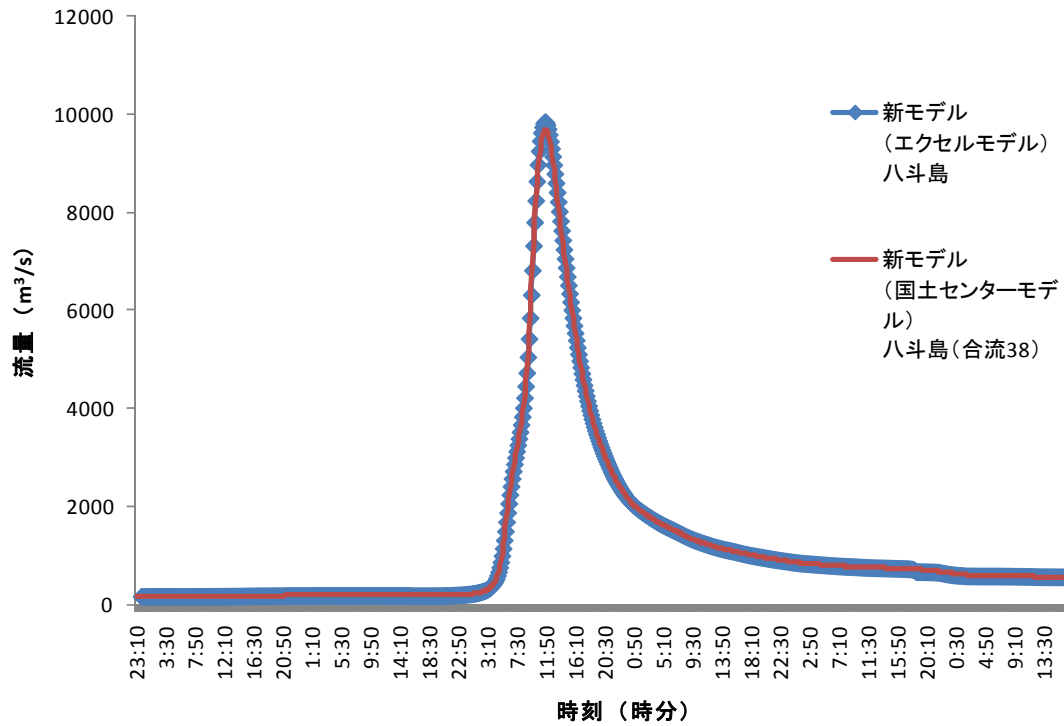


図 4 : 八斗島地点 (利根川流域)

②昭和57年9月洪水

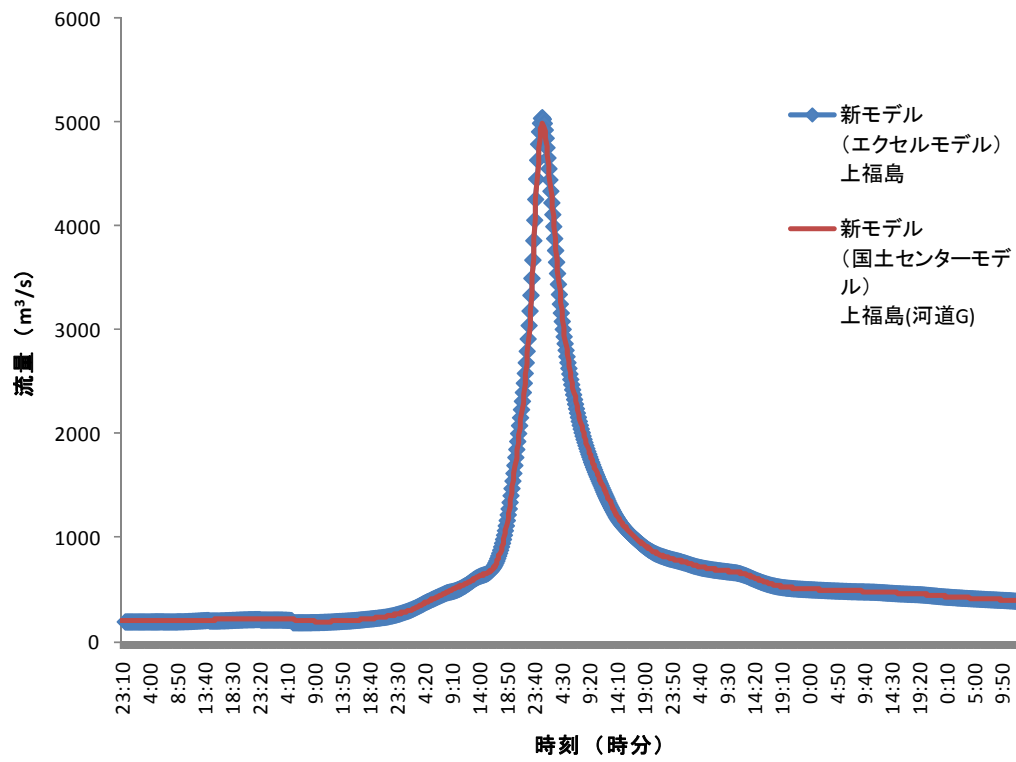


図5：上福島地点（吾妻川流域）

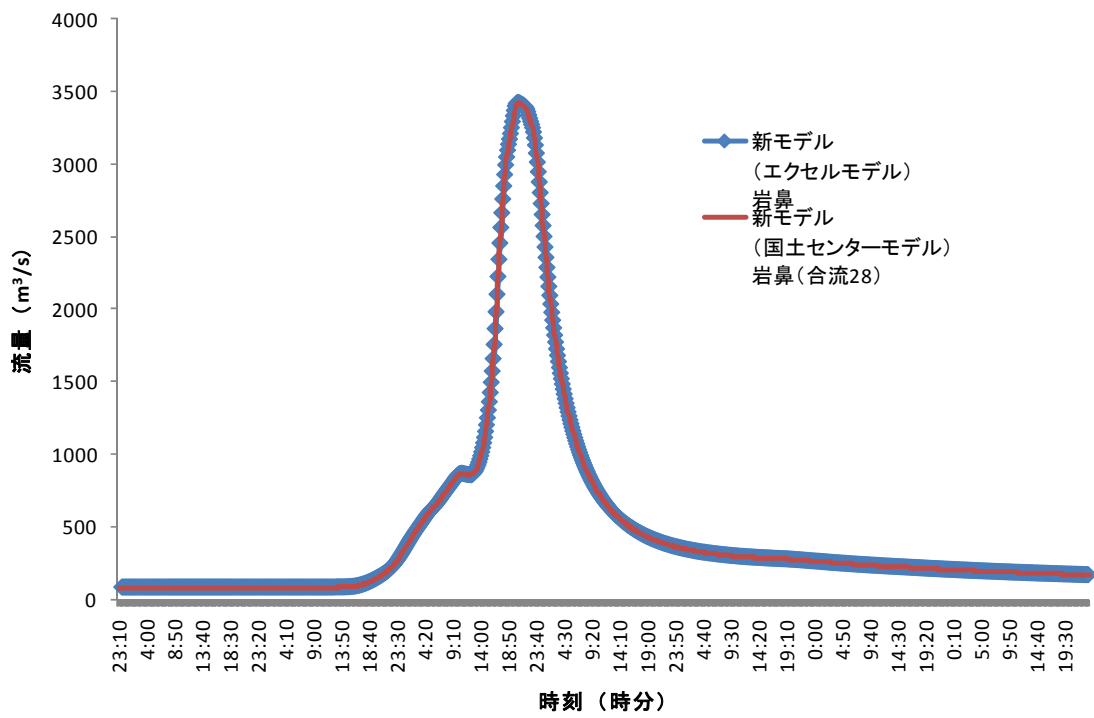


図6：岩鼻地点（烏川流域）

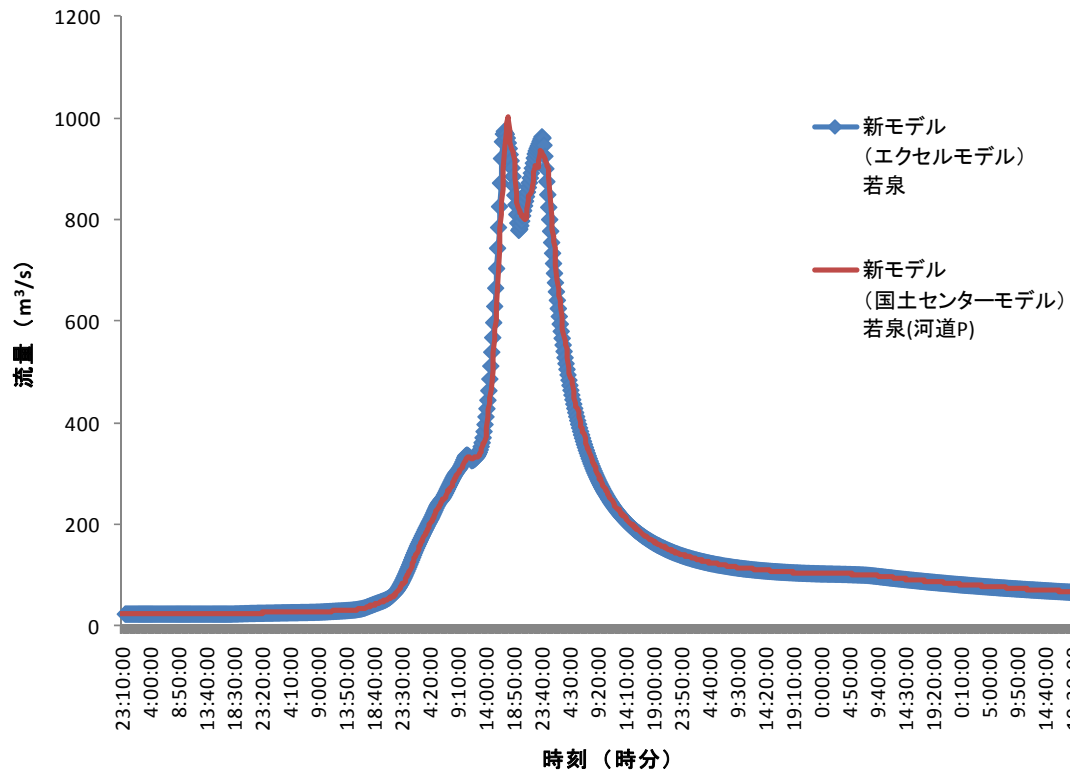


図 7 : 若泉地点 (神流川流域)

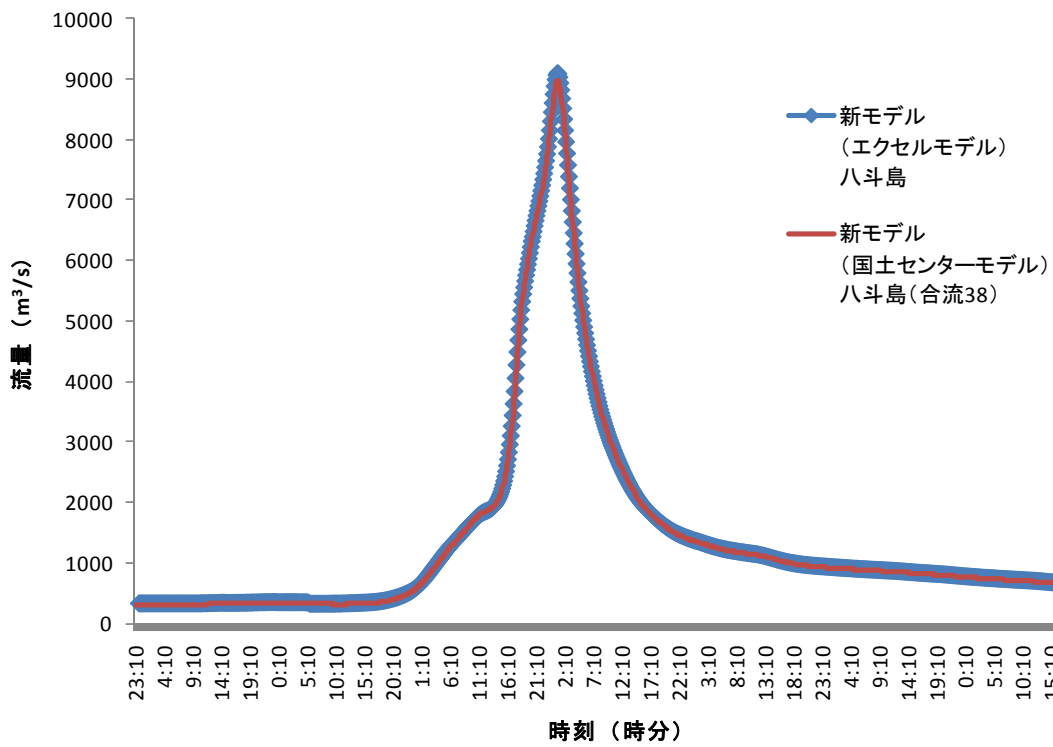


図 8 : 八斗島地点 (利根川流域)

(3) まとめ

計算結果を表2、表3にまとめる。既往2洪水について、国土センターモデルとエクセルモデルの相対的な差異は3%以下であった。

表2：平成10年9月洪水のピーク流量

対象地点	上福島地点 (m ³ /s)	岩鼻地点 (m ³ /s)	若泉地点 (m ³ /s)	八斗島地点 (m ³ /s)
エクセルモデル	4792	4335	977	9839
国土センターモデル	4732	4332	964	9697
国土センターモデルと エクセルモデルの相対 的なピーク流量の差異	-1.2 %	-0.1 %	-1.3 %	-1.5 %

表3：昭和57年9月洪水のピーク流量

対象地点	上福島地点 (m ³ /s)	岩鼻地点 (m ³ /s)	若泉地点 (m ³ /s)	八斗島地点 (m ³ /s)
エクセルモデル	4930	3421	973	9089
国土センターモデル	4982	3419	1001	8985
国土センターモデルと エクセルモデルの相対 的なピーク流量の差異	+1.0 %	0.0 %	2.8 %	+1.2 %

4. 新モデルを用いた洪水再現計算における飽和雨量 R_{sa} の感度分析

流出モデルへの入力となる有効降雨強度を変化させて、流量計算結果への影響を分析した。

(1) 計算条件

R_{sa} を変化させて異なる有効降雨データを作成し、作成した有効降雨データを国土センターモデルへの入力として流出量を計算した。 R_{sa} 以外のモデルパラメータの値と基底流量は、3. での確認計算で用いた値とまったく同じ値を用いる。

- Case 0: 同定されたパラメータを用いて計算される有効降雨強度
- Case 1: R_{sa} を 75mm 増やした場合の有効降雨強度
- Case 2: R_{sa} を 50mm 増やした場合の有効降雨強度
- Case 3: R_{sa} を 25mm 増やした場合の有効降雨強度
- Case 4: R_{sa} を 25mm 減じた場合の有効降雨強度
- Case 5: R_{sa} を 50mm 減じた場合の有効降雨強度
- Case 6: R_{sa} を 75mm 減じた場合の有効降雨強度
- Case 7: R_{sa} を 100mm 減じた場合の有効降雨強度
- Case 8: R_{sa} を 125mm 減じた場合の有効降雨強度

なお、この設定により R_{sa} が負となるケースが現れる場合は R_{sa} の値を 0 とした。

(2) 計算結果

①平成10年9月洪水

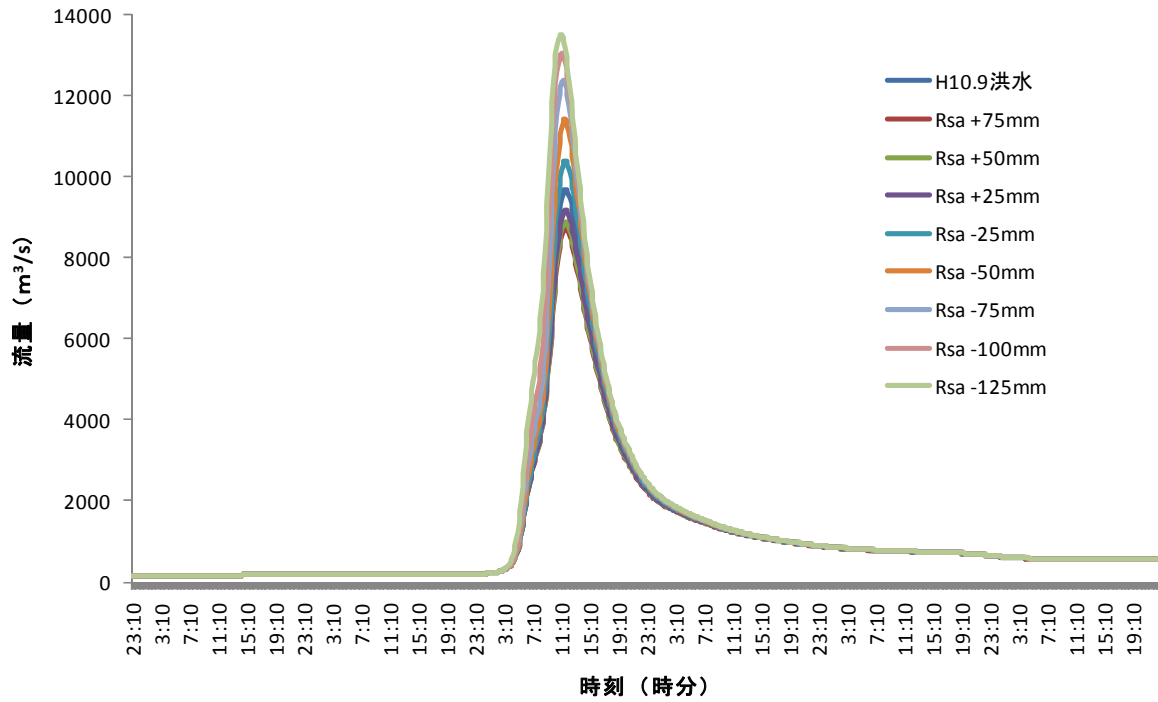


図9：平成10年9月洪水の再現結果への R_{sa} の影響

表4： R_{sa} との違いと平成10年9月洪水のピーク流量の違い

R_{sa} (mm)	ピーク流量 (m³/s)	基準ピーク流量との違い
基準値	9697	—
+75mm	8757	-9.7%
+50mm	8899	-8.2%
+25mm	9179	-5.3%
-25mm	10407	+7.3%
-50mm	11435	+17.9%
-75mm	12391	+27.8%
-100mm	13060	+34.7%
-125mm	13509	+39.3%

R_{sa} を小さくすると有効降雨が増加し、それによって洪水ピーク流量が増加する様子を見ることができる。

②昭和57年9月洪水

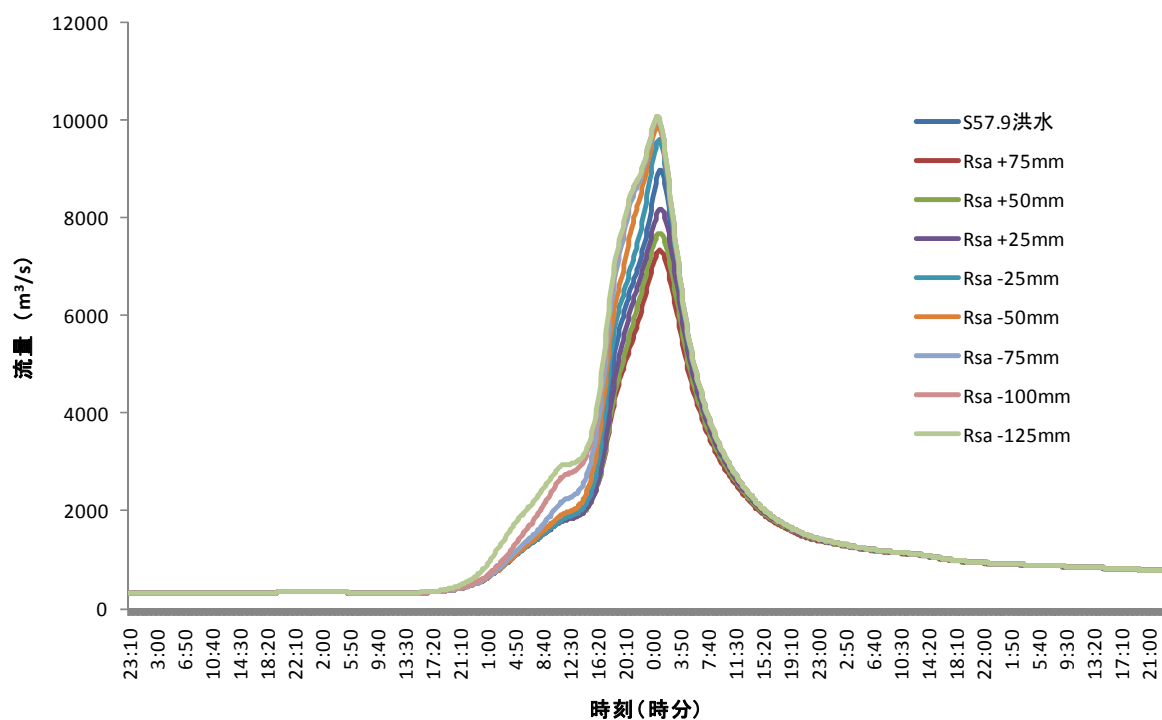


図101：昭和57年9月洪水の再現結果へのRsaの影響

表5：Rsaとの違いと昭和57年9月洪水のピーク流量の違い

Rsa (mm)	ピーク流量 (m³/s)	基準ピーク流量との違い
基準値	8985	—
+75mm	7339	-18.3%
+50mm	7692	-14.4%
+25mm	8191	-8.8%
-25mm	9597	+6.8%
-50mm	9918	+10.4%
-75mm	10047	+11.8%
-100mm	10078	+12.2%
-125mm	10087	+12.3%

R_{sa} を小さくすると有効降雨強度が増加し、洪水ピーク流量が増加する様子を見ることができ。ただし、平成10年9月洪水ほどのピーク流量の増加は見られない。 R_{sa} の減少による有効降雨強度の増分は、洪水ピーク前の流量増加に大きく寄与している。これは、昭和57年9月洪水の降雨期間が長く、 R_{sa} が降雨前期の有効降雨強度に影響するためである。