

自律タンクモデルによる 10分単位洪水流出解析

塩月 善晴(社会建設工学科)

10 Minutely Flood Analysis by the Self-Regulating Tank Model

Yoshiharu Shiotsuki (Dept. of Civil Eng.)

Simple two methods for runoff analysis were introduced in the preceding papers. One is based on the Normal Basin Hydro-cycle Rate (NBHR). The other is using the self-parameter regulating 1 Tank Model (SRTM) which automatically finds the water exit height and discharge rate according to the storage amount in the tank. These are far easier methods to carry out as compared with Tank Model (TM), performed by numerous try and error works to find its structure and parameters.

The analytical results of daily and hourly runoff analysis show the reliable adaptability of SRTM in most basins. This paper describes the usefulness of SRTM for 10 minutely flood analysis in urban river basin.

Key Words: Self-parameter regulating Tank Model, 10 minutely Flood analysis.

流出過程を表現するモデルの概念が判りやすく、且つ解析作業が楽な方法を呈示することことを目的として、水循環能に基づく解析法¹⁾、タンクモデルそのものの自動化^{2,3,4)}を検討した。

前者は流域によって貯留変化量からの流出成分を決めるパラメータを少し変えることと、最終的に基底流量を調整する 2 つの作業だけでよい。この方法ではタンクモデルでは表現できない流出の成分、すなわち有効降雨による流出、基底流、中間流出を評価することができる。

後者の自律タンクモデルは図 1 のように 1 段構造である。タンク内の貯留は $F = \text{降雨 } R + \text{貯留残存量 } V$ に相当する。刻々の F に応じて流出口の高さ h_0 や流出率 λ をタンク貯流量から自動的に決める。タンク底面の浸透口からの浸透率一定とする。この方法ではタンク貯流量が過大になったとき流域によって流出率を少し変えること、もっともらしい蒸発を与えること、もっともらしい浸透率を与えること、の 3 つの作業でよい。

結果は日単位の流出解析では 3 つの方法は同程度の精度を示し、時間単位では自律タンクモデルによるものが最も良い場合もあるが、全体としては常に 2 番目の精度を保った。このことは自律タンクモデルは安定性に富んでいること、運用の信頼性が高いといえることを示している。

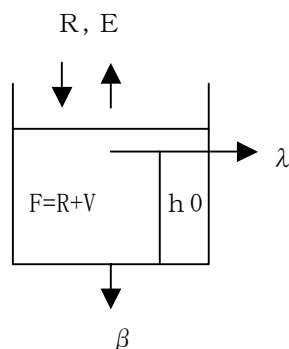


Figure 1 . Self-parameter regulating Tank Model

自律タンクモデルの有用性が日単位、時間単位流出解析において認められたので、本論では 10 分単位での洪水時の流出解析に適用できるか検討する。

1. 自律タンクモデル

1-1. 10 分流量の作成

宇部市での浸水タンクモデル 5、6) を作成した時、10 分単位での流量データがなかったのでこのモデルによる計算流量の検証は不可能であった。浸水タンクモデルのタンク内の貯留を流域内に貯まっている水分と関連付けて浸水の発生・非発生の判断に使った。その後宇部市の浸水タンクモデルは山口県の各都市、福岡市、新宿区、神戸市など大都市の浸水発生の判断にも使えることがわかった 7、8)。このように浸水タンクモデルのタンク内貯留がいろいろな都市流域の水分貯留を表現できることは、タンクから流出する水分は都市河川の流量を表現できていることをうかがわせる。本論では内水や都市河川の洪水を引き起こすような大雨を対象とするので、流量に関してはいつ都市河川の通水能を超え、氾濫が起こるかを判定できれば良い。従って厳密な検証を待たずに、ここでは浸水タンクモデルによる計算流量を都市河川の流量とみなして解析を進める。

10分流量再現に採用された浸水タンクモデルの構造とパラメータは以下のとおりである。

- a. 構造 ; 3 段直列
- b. 1 段目のタンクパラメータ ; ただし単位は流出口の底面からの高さ h (mm)、流出率 λ (1/10min)、浸透率 β (1/10min) である。

$$h_{1a}=60, \lambda_{1a}=0.2, \beta_a=0.1$$

$$h_{2a}=30, \lambda_{2a}=0.15$$

$$h_{3a}=0, \lambda_{3a}=0.1$$

- c. 2 段目のタンクパラメータ ;
 $h_{1b}=20, \lambda_{1b}=0.2, \beta_b=0.05$

- d. 3 段目のタンクパラメータ ;
 $h_{1c}=10, \lambda_{1c}=0.2, \beta_c=0.05$

1-2. 蒸発散の与え方

日単位、時間単位の解析では、気温だけで評価できるゾーンスウェイト法により蒸発散を与えたが、今回は一雨の継続時間が7時間以内で、しかもかなり強い雨を対象とするので、この間の蒸発散は少ないとし無視する。

1-3. 流出口の高さ h_0 (mm) の与え方

時間単位の自律タンクモデルを参考にして次のように与えた。

- (1) $F < 50\text{mm}$ のとき $h_0 = 0.25 \times F$
- (2) $F > 50\text{mm}$ で $F < 100\text{mm}$ のとき $h_0 = 0.175 \times F$
- (3) $F \geq 100\text{mm}$ のとき $h_0 = 0.075 \times F$
- (4) $h_0 < 0$ のとき $h_0 = 0$ とする。

1-4. 流出率 λ (1/hr) の与え方

λ も時間単位の自律タンクモデルを参考にして次のように与えた。

- (1) $F < 25\text{mm}$ のとき $\lambda = 0.025$ (1/10min)
- (2) $F \geq 25\text{mm}$ のとき

$$\lambda = 0.025 + \frac{(F - 30)}{500}$$

ただし λ の最大値は 0.2 とする。

1-5. 浸透率 β (1/hr) の与え方

浸透率は $\beta = 0.005$ (1/10min) で与える。ただし、10分雨量 R によって次のように変える。

$25\text{mm}/10\text{min} > R \geq 10\text{mm}/10\text{min}$ の時 β は 1.5 倍。

$R \geq 25\text{mm}/10\text{min}$ の時 β は 1.75 倍。

また設定された β は時間変動はしなく一定とする。

1-6. 単位流域面積の設定

流出解析は 10 分単位であるので、10 分間に降雨が流出となって流下する距離は短い。仮に流下速度を $v = 1\text{m}/\text{sec}$ とすると、10 分間での流域水の流下距離は 600m である。したがって流域下流端での河川流量を算定するには、まず流域内に設定した複数の単位小流域での河川流量を求め、各々の単位流域からの流出量の合計が下流端での流量となる。以下の解析では流下速度 $v = 1\text{m}/\text{sec}$ とし、単位流

域の面積を $S = 1\text{km}^2$ とし、流域を 1km メッシュに分割した。メッシュで囲まれた各単位流域からの流出の下流端までの到達時間は 1 メッシュを通過するのに 10 分かるとして与えた。

2. 長崎豪雨時の長崎市中島川下流端部の 10 分流量再現

中島川の流域面積は 17.5km^2 である。浸水タンクモデルによる 10 分流量の再現、自律タンクモデルによる評価、水循環能に基づく評価を検討するために、10 分単位での降雨→流出の解析を 1982 年 7 月 23 日の洪水時について行った。流域の特性の一覧は下記のとおりである。

2-1. 解析対象降雨

1982 年 7 月 23 日長崎豪雨時の長崎海洋気象台で 17 時から 24 時までに観測された継続時間 7 時間の一雨で、この間に最大 1 時間雨量 $R_1 = 128\text{mm}$ 、最大 3 時間雨量 $R_3 = 313\text{mm}$ を観測して、気象庁豪雨階級では最高ランクの A クラスである。

2-2. 流域性状

- a. 流量推測点；中島川河口から 1.7km

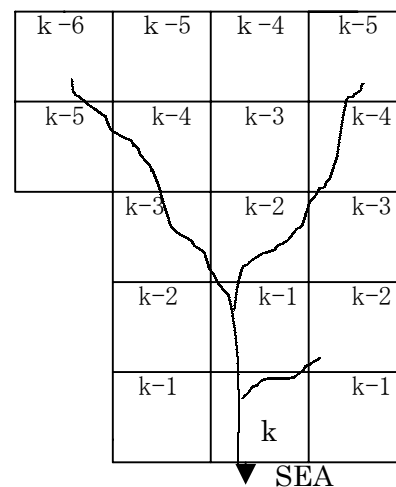


Figure 2. Nakashimagawa river basin mesh

上流地点

- b. 雨量観測点；長崎海洋気象台。

c. 流量推測点までの流域面積、流路延長；

$$S=17.5 \text{ km}^2, L=6.2 \text{ km}$$

d. 流域メッシュ；図2のとおり。メッシュ内の $k-6$ 、 $k-5$ 、 k は時刻 k における下流端の流量に寄与する流域内の単位流域からの流量の発生時刻である。 $k-6$ はこの単位流域の流量は60分前のものが下流端に寄与することを意味する。

2-3. 解析結果

①単位流域面積 $S=1 \text{ km}^2$ における流量再現

タンクモデル(TM)、水循環能モデル(NBHR)、自律タンクモデル(SRTM)の3方法による流出解析の結果を図3aに示す。図中の文字、記号についての説明は以下のとおりである。

右上の n 値は観測流量継続時間(10min)を示す。 $\langle cse=2 \rangle$ は長崎豪雨時に観測された一連の降雨を示す。計画降雨を使う場合は $\langle cse=1 \rangle$ となる。また $\langle stn \rangle$ は長さ記号での地点番号を示し、 $stn=5$ は長崎海洋気象台を示す。

RS；時間降雨量の合計、mm

QS；浸水タンクで推定された下流端での流量の合計、mm

mQ；流量の平均値、mm/10min

f；流出係数

$\langle tank \text{ anal} \rangle$ 欄；タンクモデルによる計算値の適合度を示す。

rt；相関係数

mQt；計算流量の時間平均値、mm/hr

RMSE；標準誤差

QtS；タンクモデルで計算された流出量 $Q_t(\bigcirc)$ 、mmの合計値である。

es；蒸発散量の合計値、mm

tgs；最後のタンクからの浸透量の合計値、mm

dvs；毎時間のすべてのタンクの貯留変化量の合計値。

$\langle atm \text{ anal} \rangle$ 欄；自律タンクモデルによる計算値の適合度を示す。

ra；相関係数

mQa；平均流量

Q0s；流出量、 $Q_0(\blacksquare)$ の合計

e0s；蒸発散量の合計

g0s；浸透量の合計

dv0s；貯留変化量の合計

ga0；浸透率 β

さらに右欄には水循環能に基づくモデルによって計算されたものを $\langle ent \text{ anal} \rangle$ 欄に示した。

S；流域面積、 84.1 km^2

Ry；基本の年雨量、mm

Ey；基本の蒸発散量、mm

Gy；基本の浸透量、mm。以上の3つは以下の西日本の各流域では変わらない。

Sy；流域固有の基準水循環能(mm/yr/m)である。

Ry, Ey と流域の平均高度、流量観測点の高度で決められる。これが大きいとき基底流出成分 Q_{bf} が大きくなる。水循環能に基づくモデルそのものの詳しい説明は前報を参照頂きたい。

re；相関係数

mQe；平均流量

QeS；流出量、 $Q_e(\times)$ の合計

ES；蒸発散量の合計

GS；浸透量の合計

QreS；この方法によって分離された有効降雨による流量成分

Qbfs；同じく基底流量成分

QstS；同じく中間流出成分。以上の3つの流出成分の合計からGSをさし引いたものがQeSとなっている。

mdWs；この方法による毎時の貯留変化量の合計であるが、上のdVs, dv0sとは少し性格が違う。この方法では基底流を調整するため毎時の貯留変化量に一定の調整値DRNを与えている。最後のDRNSはその合計値である。基本の蒸発散や浸透が過大であった時や、他流域からの流入があるときはDRNは負の値となり、逆に基本の蒸発散、浸透に較べ実際にはそれらが大きな値をとる場合や、あるいは他流域への流出があるときはは正の値をとる。したがってこれらの影響を受けてmdWsは損失成分の性格を帯び、 $es+gs \doteq e0s+g0s \doteq ES+GS+mdWS$ となっている。

なおDRNは

$20 \text{ mm}/10 \text{ min} > R > 15 \text{ mm}/10 \text{ min}$ のとき

$$DRN = -1 \text{ mm}/10 \text{ min}$$

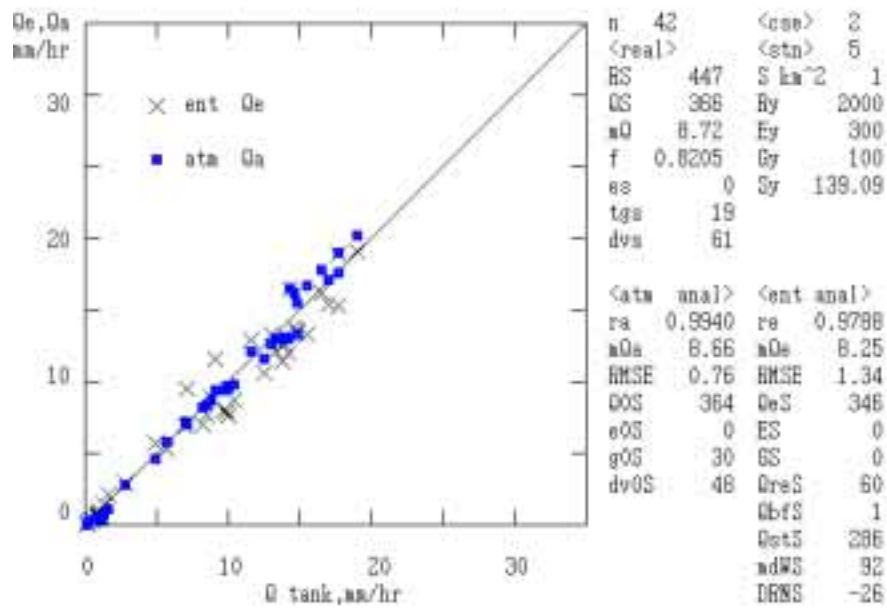


Figure 3a. Comparison of the calculated 10 minute base runoff, Q_a (by SRTM), and Q_e (by NBHR) with the supposed Q_t (estimated by T M) at the river mouth of Nakashimagawa in Nagasaki City during the rain observed at Nagasaki Marine Observatory on July 23, 1982, Nagasaki Torrential Rain Event.

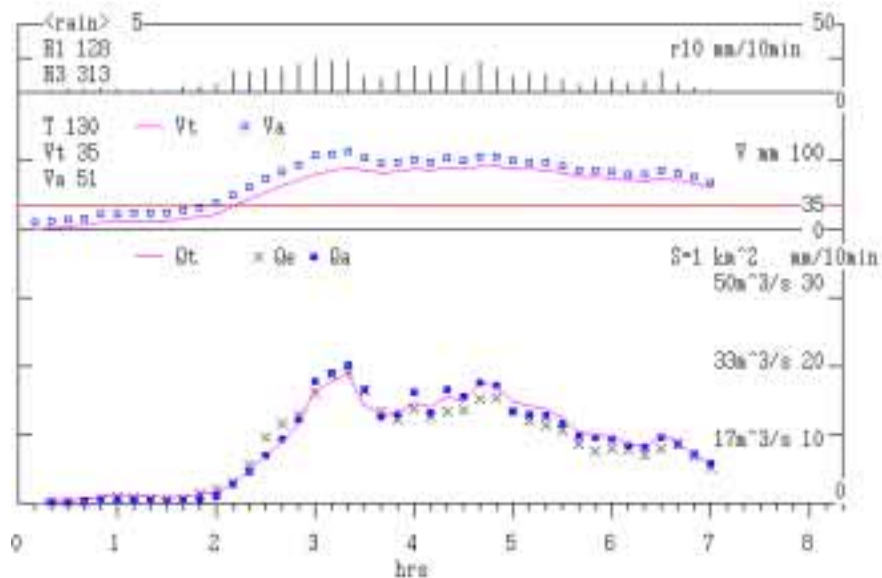


Figure 3b. 10 minute changes of the observed rainfall r_{10} and the runoff, Q_t , Q_a , Q_e during the rain observed at Nagasaki Marine Observatory. Horizontal scale shows the rain continuation time in 10 minutes from rain beginning. R in upper figure is the observed 10 minute rain, mm/10min, input to each model. V in middle figure shows the river basin storage water in mm estimated by two methods, V_t (by TM) and V_a (by SRTM). Urban inundation begins when V_t becomes over 35mm line.

25mm/10min > R > 20mm/10min のとき

$$DRN = -2.5 \text{ mm/10min}$$

R > 25mm/10min のとき DRN = -5mm/10min

で与えている。

図 3a のように相関係数、標準誤差は自律タンクモデルでは $ra=0.9940$ 、 $RMSE=0.76\text{mm/hr}$ となった。水循環能による結果はそれほど悪くはない。後者の最終調整 DRN は合計で -26mm となり、浸透 GS も 0 であることから、流域内では大雨時には大きな流出を表現するために水分補給が必要であることを示している。

図 3b は浸水タンクによる推定流量 (Q_t) と二つの方法 (Q_a, Q_e) による計算流量の時間変化を雨の降り始めから降り終わりまでの間で示したものである。横軸は降り始めからの経過時間を 10 分単位の数値で示している。上段には 10 分雨量の変化、得られた $R1=128\text{mm}$ 、 $R3=313\text{mm}$ を示している。

中段には浸水タンクと、自律タンクのタンク内貯流量の 10 分変化をそれぞれ V_t, V_a で示す。内水の発生は V_t が 35mm を超えると起こると報告してきたが、他の降雨例を見ても自律タンクでは $V_a=50\text{mm}$ が発生限界であるようである。 $T=130$ は降り始めから 130 分時、すなわち 2 時間 10 分目に V_t が 35mm ラインを超えたことを示す。長崎ではこの日 17 時に降雨が始まったので時刻では 19 時 10 分となる。長崎では実際にこのころ、タクシーや電車の交通障害が浸水のために始まっている。

下段は浸水タンクによる想定流量 Q_t と 2 つの方法による計算流量 Q_a (自律タンク)、 Q_e (水循環能)の時間変化を示している。 Q_a, Q_e はともに Q_t をよく再現している。右縦軸には流量のスケールを mm/10min 単位のもの、流域面積を単位の $S=1\text{km}^2$ とした時の m^3/sec 表示の二通りで示している。

②中島川下流端部における洪水解析

上のように、浸水タンクモデルによる浸水発生評価が好結果を示した。また自律タンクモデルによる計算流量は浸水タンクのものほぼ完全に再現し、且つ浸水発生条件は $V_a=50\text{mm}$ としてよい。流域貯留を 1 段タンク

内のものだけで表現できることはより簡単に流域水の動きを把握することにつながるので、洪水解析では貯留、流出とも自律タンクによる計算値を採用する。この仮定のもとに中島川での下流端部での洪水評価を試みる。

いま流域全体で降雨は一樣であったとし、海洋気象台の雨を流域メッシュ全体に適用する。各メッシュでの降雨からの流出はメッシュ内にかかれた遅れを持って下流端に到着する。下流端での流量を QQQ とし m^3/sec 単位で表示すれば図 3c のようになる。図の中段には表面貯留の積算値 YS の変化を付け加えた。丸印は QQQ の時間変化を右軸のスケールで示した。一雨の間の最大流量は下段左に示すように $\max QQQ=384\text{m}^3/\text{sec}$ であった。これに対し下流端での河川通水能は長崎大学調査団 8) によれば $\max Q=160\text{m}^3/\text{sec}$ である。下段右軸の 160 の値を通る氾濫限界ラインが描ける。左の $Tf1d$ はこのラインを超えた時刻が 180 分目、すなわち降雨開始から 3 時間目であることを示す。下流端ではすぐ海に開けているので、氾濫量の大半は直ちに海に流れ込むものとする。ただしここでは海の干満は考えない。海への流失率 drr は実際の現地での氾濫水位 $2-1\text{m}$ を勘案し、0.5 とした。なお氾濫水の移動速度は流域水の流下速度と同じく $v=1\text{m}/\text{sec}$ とした。現地の地形を考慮して氾濫期間中の最大氾濫面積 $\max S$ は左のように 0.8km^2 とした。この間に得られた最大浸水水位 $\max H$ は 2.16m となった。現地のそれは 2.6m である。

QQQ が氾濫限界ラインを始めて超えたのは現地時間では 20 時である。現地の記録では実際の氾濫もこの時刻に始まっている。図ではこの日の 24 時までしか示さなかったが、降り始めから 420 分目、7 時間目、すなわち現地時刻の 24 時では浸水水位は数 10cm であるものの、 QQQ は急速に氾濫限界ラインに向かって降下している。現地では翌日 2 時ごろに氾濫水は引いたとの話である。

このように自律タンクによる洪水表現は妥当性をもっていると考えてよい。

なお図の左 $fff=0.85$ は流域内の各メッシュの単位流域面積における実効流出係数である。

流域水の速度を $v = 1 \text{ m/sec}$ で与えているので、流域内のすべての水が単位時間 10 分内にメッシュの下流端に集まるとは考えにくい。

他地点の解析結果も見ながら、都市流域では $fff = 0.8$ 、森林や、農地の多い流域では fff

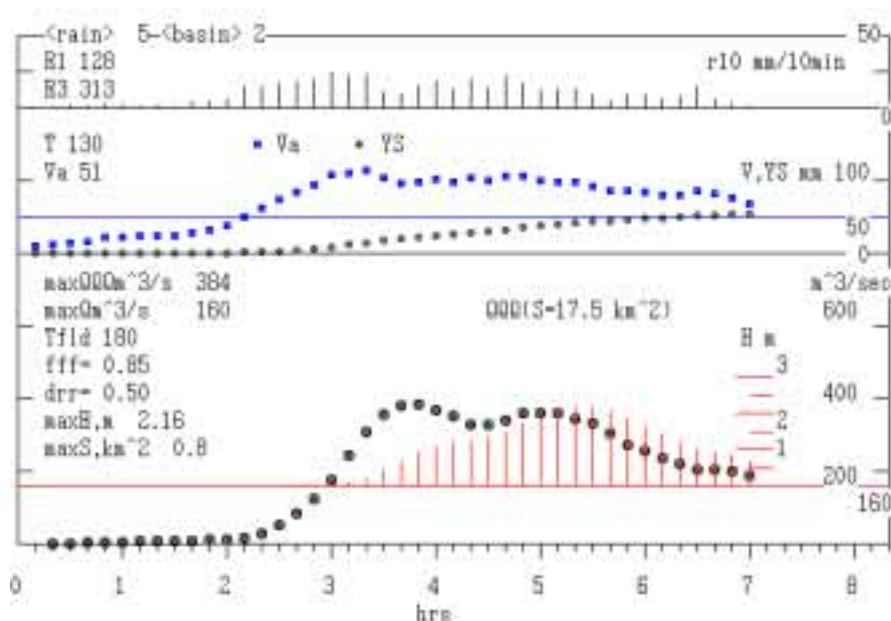


Figure 3c. 10 minute changes of the observed rainfall r_{10} , the SRTM storage V_a mm, the river discharge QQQ in m^3/sec , and the flood water depth H m at the river mouth area of Nakashima River during Nagasaki Torrential Rain. V_a , QQQ , and H are calculated by SRTM. Observed maximum 1hr rain R_1 and maximum 3hr rain R_3 are 128mm and 313mm, respectively. Inundation and Flood begin at $T = 130^{\text{th}}$ minute (V_a exceeds 50mm), and $T_{fld} = 180^{\text{th}}$ minute (QQQ exceeds the maximum river drainage $\text{max}Q = 160 \text{ m}^3/\text{sec}$) from rain starting time.

$= 0.7$ で与えた。各单位流域からの流出は元の単位流出に有効流出係数 fff を乗じたもので表現されるのに対し、残量 $(1 - fff)$ は表面貯留となる。図 3c の中断には V_a とともに表面貯留の積算値 YS の時間変化が示されている。図のように YS は時間とともに増え、内水の終わりが V_a だけでは判断できないことを示唆している。

以上のように、自律タンクモデルによる流量再現は長崎豪雨時の中島川洪水解析により、また流域貯流水の再現は流域底部での内水解析により好結果を示した。一方、解析例は割愛するが、自律タンクモデル、水循環能に基づく方法による単位流域における流量再現は長崎豪雨時の他の 41 地点の降雨についても、

図 3a と同程度の精度で得られている。都市小流域の流出解析は 10 分雨量がありさえすれば可能であることを示唆している。長崎豪雨では他に長崎市の浦上川、八郎川についての氾濫、浸水記録がある。それぞれの流域の 10 分雨量を使って自律タンクモデルによる洪水解析を進める。

3. 長崎豪雨時の長崎市浦上川下流端部の 10 分流量再現

3-1. 解析対象降雨

1982 年 7 月 23 日長崎豪雨時のこの流域北側に隣接する長与駅で 17 時から 24 時まで観測された継続時間 7 時間の一雨で、この間
山口大学工学部研究報告

に最大1時間雨量 $R1 = 173\text{mm}$ 、最大3時間雨量 $R3 = 330\text{mm}$ を観測して、気象庁豪雨階級では最高ランクのAクラスである。

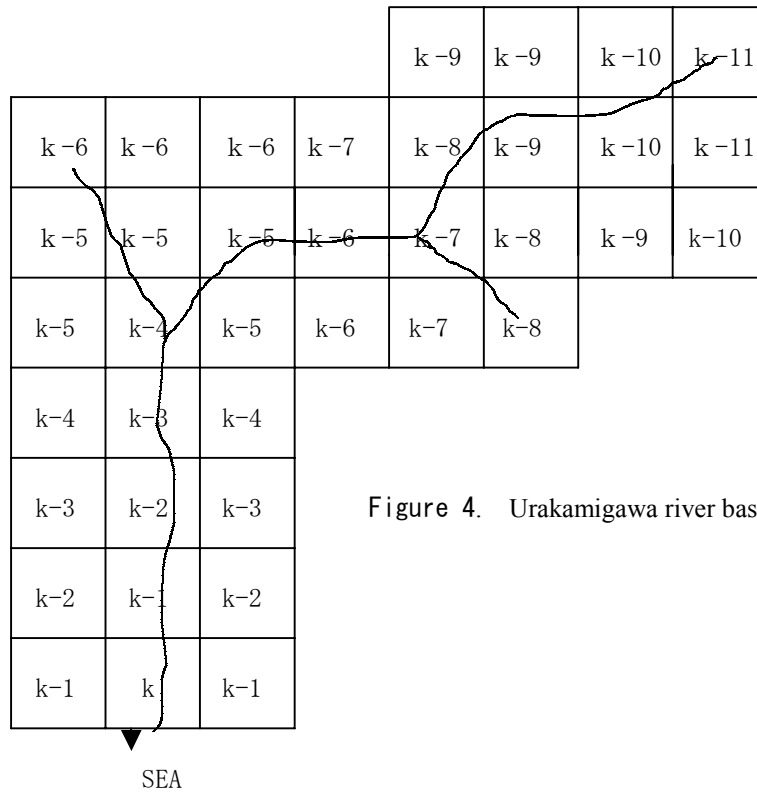


Figure 4. Urakamigawa river basin mesh

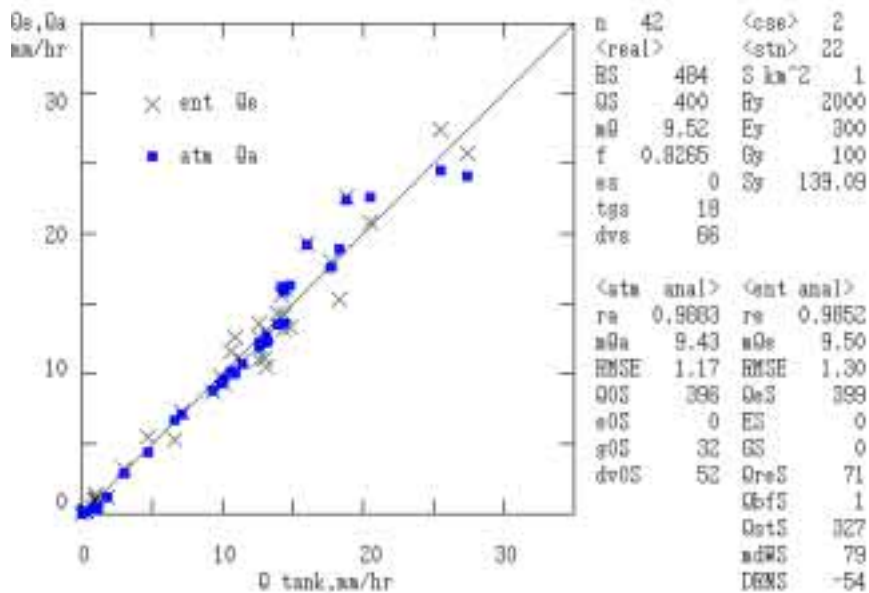


Figure 5a. Comparison of the calculated 10 minute base runoff, Q_a (by SRTM), and Q_e (by NBHR) with the supposed Q_t (estimated by T M) at the river mouth of Urakamigawa in Nagasaki City during the rain observed at Nagayo JR Station on July 23, 1982, Nagasaki Torrential Rain Event.

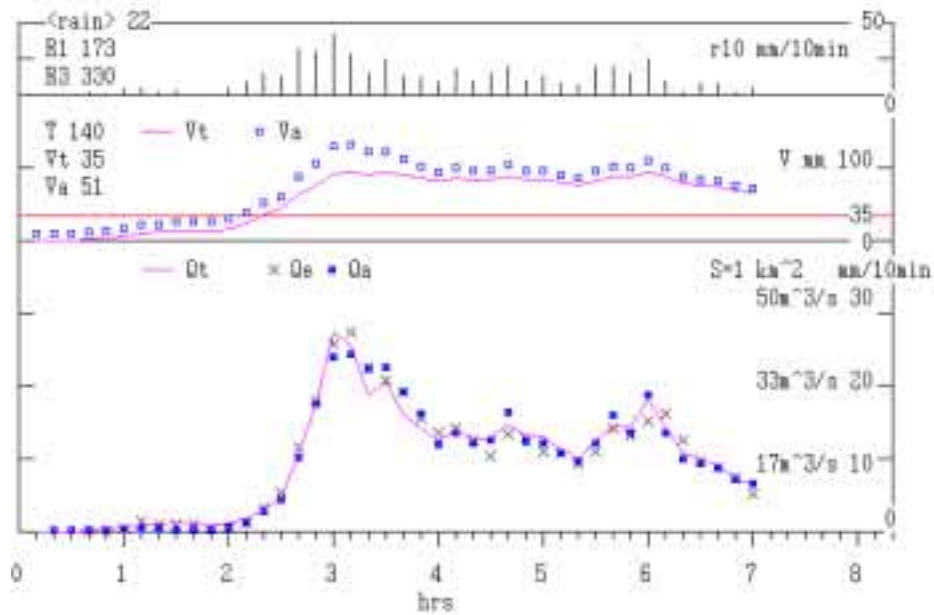


Figure 5b. 10 minute changes of the observed rainfall R , and the runoff, Q_t, Q_a, Q_e during the rain observed at Nagayo.

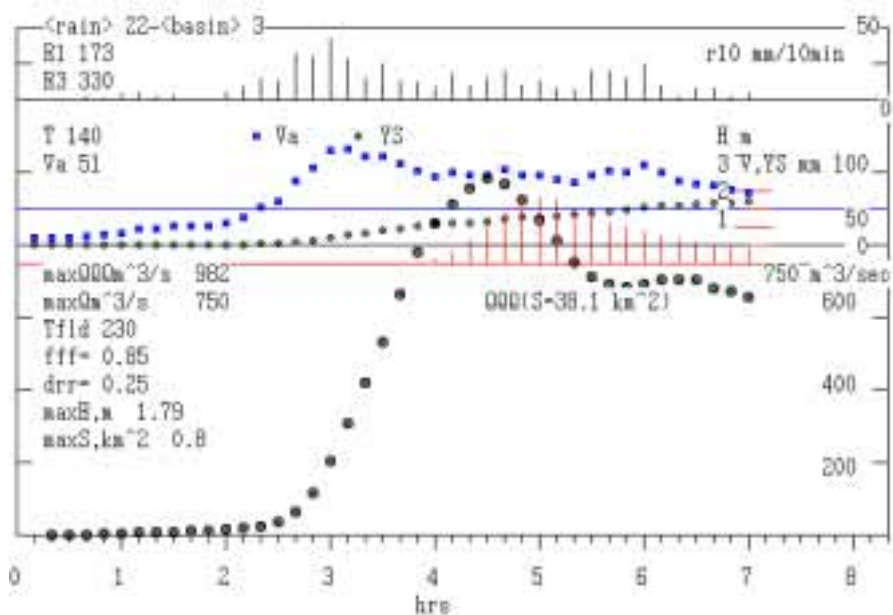


Figure 5c. 10 minute changes of the observed rainfall r_{10} , the SRTM storage V_a , the river discharge QQ in m³/sec, and the flood water depth H at the river mouth area of Urakamigawa River during Nagasaki Torrential Rain. $V_a, QQ,$ and H are calculated by SRTM. Observed maximum 1hr rain $R1$ and maximum 3hr rain $R3$ are 173mm and 330mm, respectively. Inundation and Flood begin at $T = 140^{\text{th}}$ minute (V_a exceeds 50mm), and $T_{fld}=230^{\text{th}}$ minute (QQ exceeds the maximum river drainage $\max Q=750\text{m}^3/\text{sec}$) from rain starting time.

3-2. 流域性状

- a. 流量推測点；浦上川河口から 0.5km 上流地点
- b. 雨量観測点；JR 長与駅。
- c. 流量推測点までの流域面積、流路延長；
 $S=38.1 \text{ km}^2$ 、 $L=13.3 \text{ km}$
- d. 流域メッシュ；図 4 のとおり。

3-3. 解析結果

①単位流域面積 $S=1 \text{ km}^2$ における流量再現

流域内に 10 分雨量観測データがなかったの
ので、流域北側にすぐ隣接する JR 長与駅のデ
ータを当てる。図 5a、図 5b のように他の 2
つの方法による流量再現は浸水タンクで推定
したものに近い。

②浦上川下流端部における洪水解析

一雨の間の最大流量は $\max Q_{QQ} = 982 \text{ m}^3/\text{sec}$
であった。これに対し下流端での河川
通水能は長崎大学調査団 8) によれば $\max Q =$
 $750 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。図 5c のように内水は
 $T=140$ 分目、氾濫は $T_{f1d}=230$ 分目に起こつて
いる。海への流失率 drr は、現地では下流端
では最大浸水位は川から少し離れた低地部で
生じているので、海に直接向かう氾濫水は少
ないと見て 0.25 とした。氾濫期間中の最大氾
濫面積 $\max S$ は 0.8 km^2 とした。この間に得ら
れた最大浸水水位 $\max H$ は 1.79m となり、実際

の 1.7m に近い。

QQQ が氾濫限界ラインを始めて超えたのは
現地時間では 20 時 50 分である。現地の記録
では浸水は 19 時—20 時に起こったとされて
いる。これはおそらく低地部の内水を表現し
たものであろう。 $T=140$ 分は現地の時刻では
19 時 20 分であり、現地記述に合っている。
最大浸水は 22 時—22 時 30 分に生じたとなっ
ている。図では降り始めから 5 時間目、すな
わち 22 時に最大水位 1.79m となっているので
これも合っている。浸水が退いたのは 01 時—
02 時の間となっている。図では 7 時間目では、
すなわち現地時刻 0 時には V_a, h ともに急速に
限界ラインに向かっている。これも合ってい
ることになる。

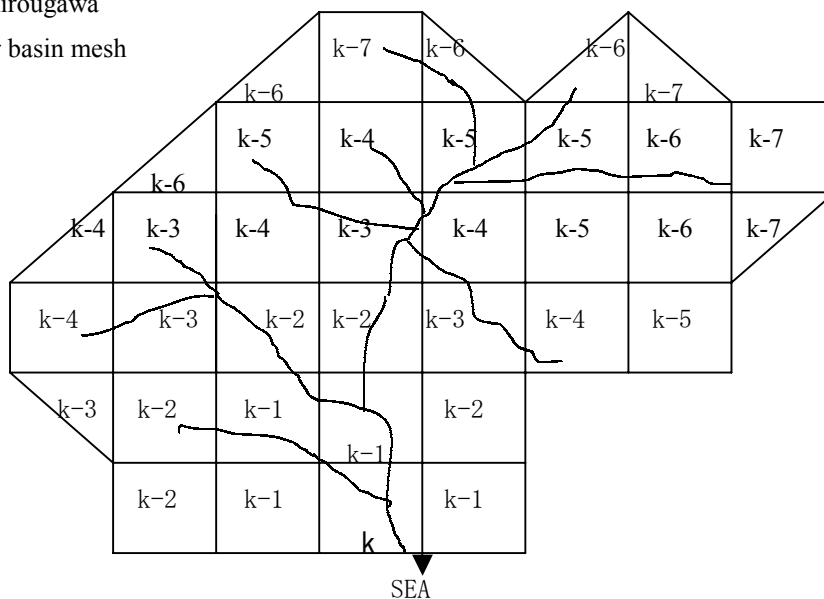
このように自律タンクモデルによる洪水解析
では浦上川でもほぼ満足できる結果を得た。

4. 長崎豪雨時の長崎市八郎川下流端部の 10 分流量再現

4-1. 解析対象降雨

1982 年 7 月 23 日長崎豪雨時の多良見消防
署で 17 時から 24 時まで観測された継続時
間 7 時間の一雨で、この間に最大 1 時間雨量
 $R1=150 \text{ mm}$ 、最大 3 時間雨量 $R3=325 \text{ mm}$ を観測し
て、気象庁豪雨階級では最高ランクの A クラ
スである。

Figure 6. Hachirougawa river basin mesh



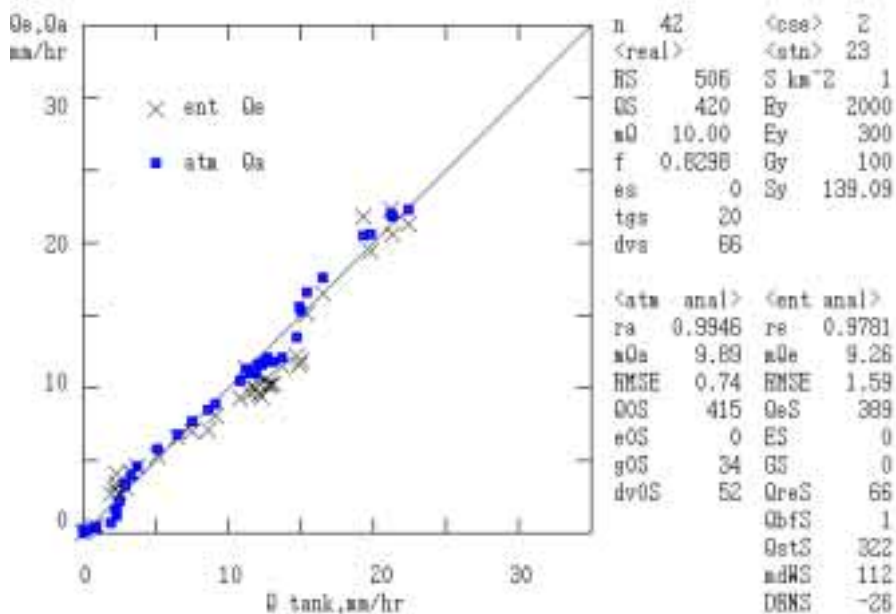


Figure 7a. Comparison of the calculated 10 minute base runoff, Q_a (by SRTM), and Q_e (by NBHR) with the supposed Q_t (estimated by T M) at the river mouth of Hchirougawa in Nagasaki City during the rain observed at Tarami Fire Station on July 23, 1982, Nagasaki Torrential Rain Event.

4-2. 流域性状

- 流量推測点；八郎川河口から 0.5km 上流地点
- 雨量観測点；多良見消防署。
- 流量推測点までの流域面積、流路延長；
 $S=32.2 \text{ km}^2$ 、 $L=8.8 \text{ km}$
- 流域メッシュ；図 6 のとおり。

4-3. 解析結果

①単位流域面積 $S=1 \text{ km}^2$ における流量再現

流域内に 10 分雨量観測データがなかったので、流域北側にすぐ隣接する諫早市多良見消防署のデータを当てる。図 7a、図 8b のように他の 2 つの方法による流量再現は浸水タンクで推定したものに近い。

②八郎川下流端部における洪水解析

一雨の間の最大流量は $\max Q_{QQ}=771 \text{ m}^3/\text{sec}$ であった。これに対し下流端での河川通水能は長崎大学調査団 8) によれば $\max Q=250 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。図 7c のように内水は $T=110$ 分目、氾濫は $T_{f1d}=250$ 分目に起こっている。

海への流失率 drr は、現地では下流端は端はすぐ海に開けているので 0.5 とした。流域には森林や農地の占める部分が多いので、 $fff=0.7$ とした。下流端部の氾濫期間中の最大氾濫面積 $\max S$ は 0.8 km^2 とした。この間に得られた最大浸水水位 $\max H$ は 2.68m となり、実際の 2.3–3.2m を表現している。

現地では最大浸水が発生したのは 20 時 30 分–21 時の間であると記録されている。計算では図 7c のとおり、 QQQ は降り始めから 3 時間 50 分、すなわち現地時刻の 20 時 50 分と次の 21 時に最大値に達している。浸水位は 4 時間目の 21 時以降 2m を超えている。このように自律タンクモデルによる洪水解析は八郎川でも妥当な結果を得た。

図 7c の中段の表面貯留の積算値 YS に時間変化は前の二つの流域に較べ大きな値となっている。ここでは fff を小さくとしているためであるが、下流端部の市街地では浸水が 3m を超えているところが散見されることに寄与しているかもしれない。 V_a と SY の内水に対する定量評価は今後の課題となる。

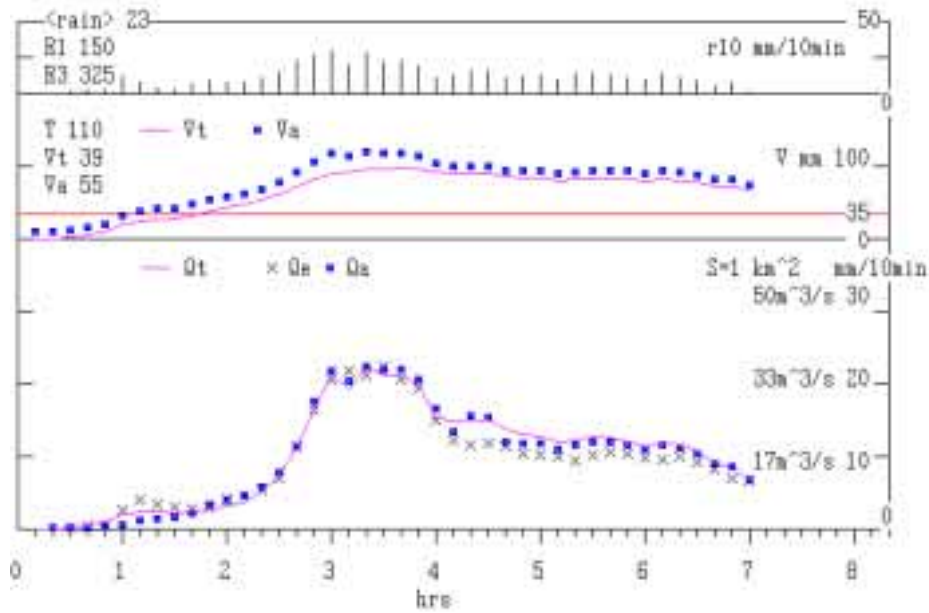


Figure 7b. 10 minute changes of the observed rainfall R, and the runoff,Qt,Qa,,Qe during the rain observed at Tarami.

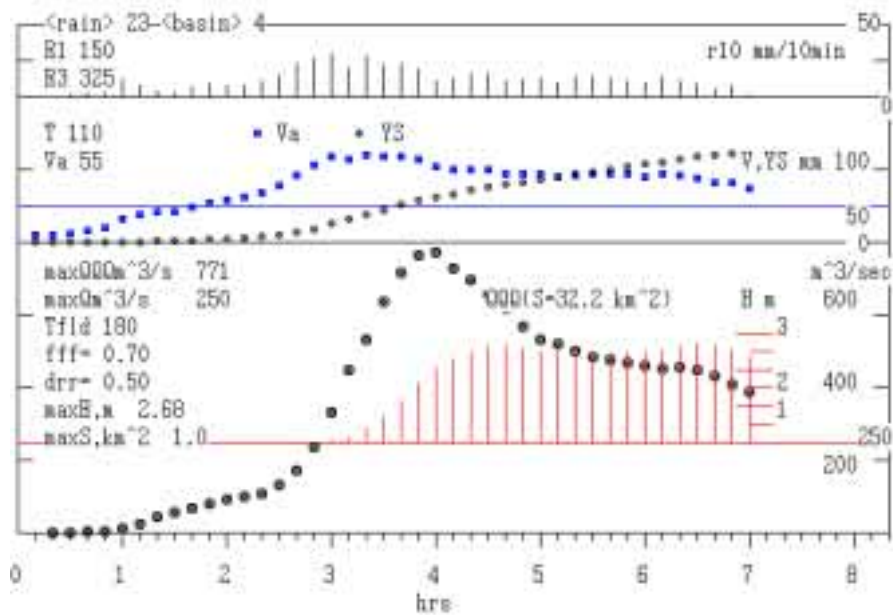


Figure 7c. 10 minute changes of the observed rainfall r10, the SRTM storage Va mm, the river discharge QQ in m³/sec, and the flood water depth H m at the river mouth area of Hachirougawa River during Nagasaki Torrential Rain. Va,QQ, and H are calculated by SRTM. Observed maximum 1hr rain R1 and maximum 3hr rain R3 are 150mm and 325mm, respectively. Inundation and Flood begin at T = 110th minute (Va exceeds 50mm), and Tfld=180th minute (QQQ exceeds the maximum river drainage maxQ=250m³/sec) from rain starting time.

5. 宇部市真締川下流端部の10分流量再現

以上長崎豪雨下の長崎市の3つの小河川流域について浸水タンクモデル、自律タンクモデルの10分単位流出解析への適用の可能性を模索した。河川の10分流量の実測値は無いが、内水の発生時刻、河川氾濫の発生、終焉の時刻、氾濫浸水の面積、および浸水水位など貴重な記録が残されているのでこれらを検証対象として洪水解析を行った。結果はほぼ満足できるものといってよい。

検証例が長崎豪雨時での3例しかないものの、都市小流域の洪水時の流出解析は10分雨量がありさえすれば可能であると言える。都市小流域では10分雨量データがあっても、河川流量のデータはほとんどない。温暖化や人アイランド効果によって都市では強い短時間降雨が頻繁に発生し、この結果都市浸水は地下空間利用の発達とあいまって大きな問題となってきた。

解析対象都市流域として宇部市の真締川流域を取り上げる。この町も都市化が進み、ちょっとした雨でも浸水がたびたび起こるようになった。それでこれを何とか軽減するために5年前から流域上流端に洪水調節ダムを計画している。以下にはその効果判定もかねて計画降雨10分雨量を与えた時の流出解析例を示す。

流域の特性の一覧は下記のとおりである。

5-1. 流域性状

- a. 流量推測点；真締川河口
- b. 流量推測点までの流域面積、流路延長；
 $S=20.4 \text{ km}^2$ 、 $L=8.3 \text{ km}$
- c. 流域メッシュ；図8のとおり。
- d. ダム予定地点；メッシュ左最上流端
- e. ダム集水域； 2.4 km^2
- f. ダム洪水調節流量； $30 \text{ m}^3/\text{sec}$

5-2. 解析対象降雨

ダム計画では5年に1度の日単位計画降雨を想定しているようである。ここではタルボット型降雨曲線を適用して、10分雨量のハイ

エトグラフを適用する。宇部では一雨250mmの降雨は年に1度は可能性があるので、降雨継続時間を7時間とし、ピークは中央にとったもので与える。 $R1=70\text{mm}$ 、 $R3=155\text{mm}$ となって気象庁豪雨階級ではCクラスの豪雨となる。

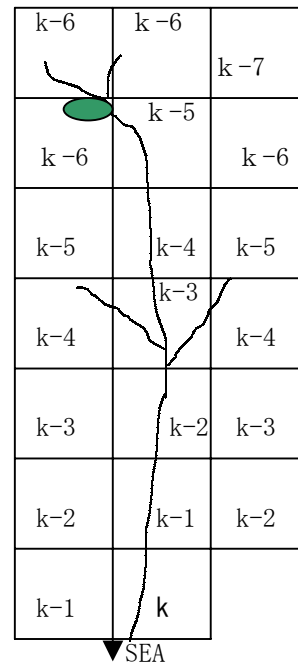


Figure 8. Majimegawa river basin mesh

5-3. 解析結果

①単位流域面積 $S=1 \text{ km}^2$ における流量再現

図9a、図9bのように他の2つの方法による流量再現は浸水タンクで推定したものに近い。

②真締川下流端部における洪水解析

一雨の間の最大流量は $\max Q_{QQ}=240 \text{ m}^3/\text{sec}$ となった。これに対し下流端での河川通水能は山口県河川開発課によれば $\max Q=230 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。図9cのように内水は $T=140$ 分目、氾濫は $T_{f1d}=260$ 分目に起こっている。海への流失率 d_{rr} は、現地では下流端はすぐ海に開けているので0.5とした。流域には森林や農地の占める部分があり、中程度に発達した都市として、 $f_{ff}=0.8$ とした。下流端部の氾濫期間中の最大氾濫面積 $\max S$ は 1 km^2 とした。この間に得られた最大浸水水位 $\max H$ は0.01mとなり、僅かであるが実際には低地部
山口大学工学部研究報告

では床下浸水となる。

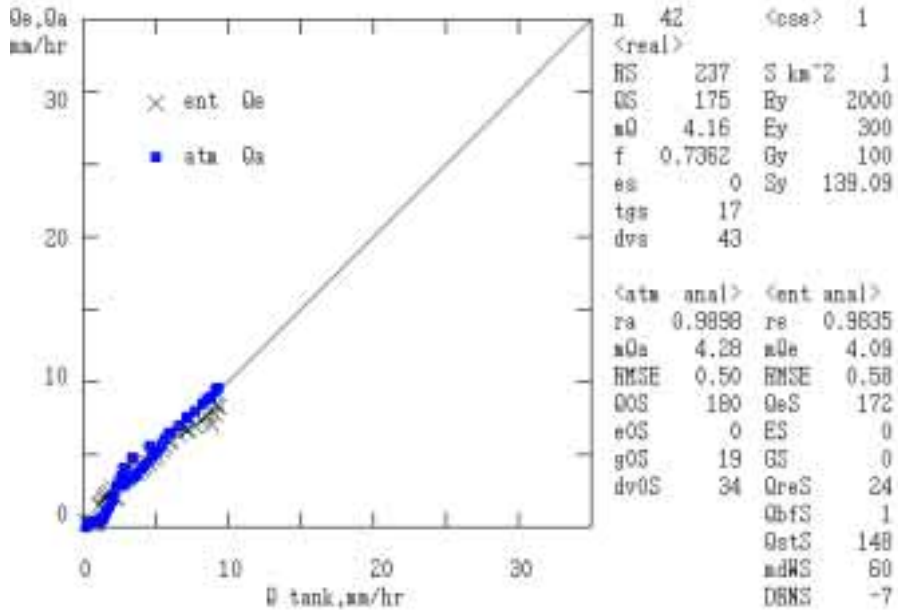


Figure 9a. Comparison of the calculated 10 minute base runoff, Qa (by SRTM), and Qe (by NBHR) with the supposed Qt (estimated by T M) at the river mouth of Majimegawa in Ube City for the planned hyetograph given by Talbot Eq. with the maximum 7hr rainfall, R7=250mm, and the peak 10 minute rain at the 210th minute from rain beginning.

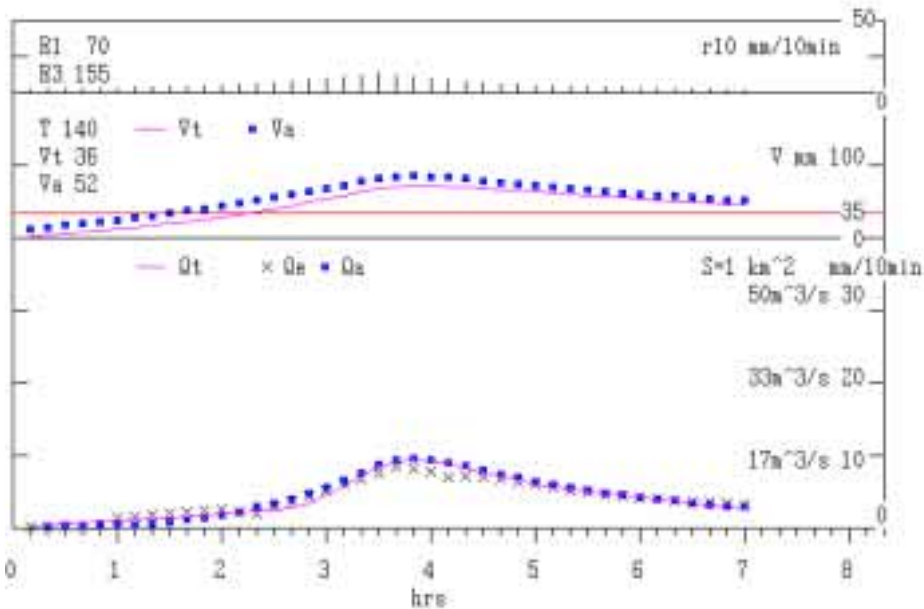


Figure 9b. 10 minute changes of the planned rainfall R, and the expected runoff, Qt, Qa, Qe at the river mouth during the rain.

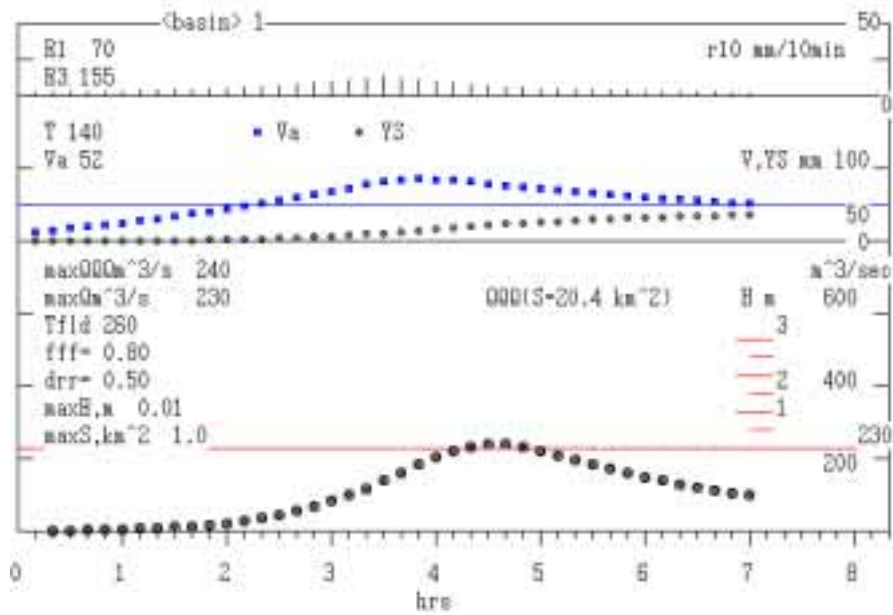


Figure 9c. 10 minute changes of the planned rainfall r_{10} , the SRTM storage V_a mm, the river discharge QQQ in m^3/sec , and the flood water depth H m at the river mouth area of Majimegawa River. V_a , QQQ , and H are calculated by SRTM. Planned maximum 1hr rain R_1 and maximum 3hr rain R_3 are 70mm and 155mm, respectively. Inundation and Flood begin at $T = 140^{th}$ minute (V_a exceeds 50mm), and $T_{fld} = 260^{th}$ minute (QQQ exceeds the maximum river drainage $maxQ = 230m^3/sec$) from rain starting time.

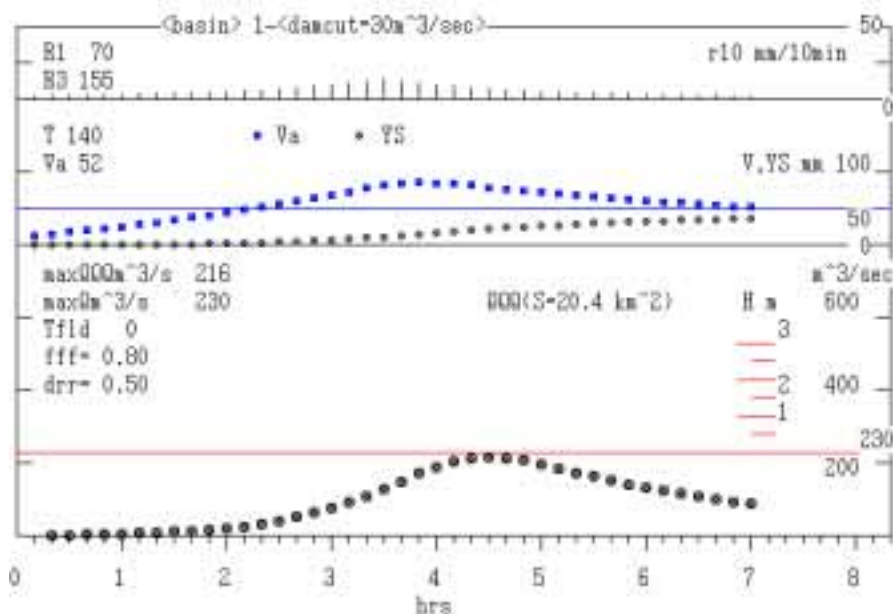


Figure 9d. Results of flood analysis at the river mouth area of Majimegawa River in under Dam control. Dam is planned to be constructed at the left upper most of Fig.8. Planned rain is as same as Fig.9c. The estimated maximum river flow $maxQQQ = 216m^3/sec$ would not cause flood, while inundation begins at $T = 140^{th}$ minute (V_a exceeds 50mm).

③ダムによる洪水調節があったときの真締川下流端部における洪水解析

図 9c の計画降雨を使って、現在進められているダムの洪水制御効果を調べてみる。図 8 の左最上流端の 2 つのメッシュからの流出のうち、ダムによって $30 \text{ m}^3/\text{sec}$ がカットされたとする。図 9d はこの結果を示す。カットにより最大流量は $\max Q = 216 \text{ m}^3/\text{sec}$ におさえられ、通水能 $\max Q = 230 \text{ m}^3/\text{sec}$ を下回り、氾濫は生じない。中段の V_a は変わらないので、依然内水は図 9c と変わらず発生するが、河川の溢水、氾濫についてはダム効果があると判定できる。

まとめ

自律タンクモデルの 10 分単位での流出解析への適用を試みた。10 分単位の流量データが無いので降雨→流量の本来の流出解析はできなかった。長崎豪雨では内水、河川溢水、氾濫の発生時刻、浸水区域、浸水位の貴重な記録が残されているので、これを使って浸水タンクモデル、水循環能に基づく方法と併せて検証した。

得られた知見は以下のものである。

(1) 浸水タンクモデルによる内水発生検知は長崎豪雨時下の長崎市でも適用できる。浸水タンクモデルでは 3 つのタンク貯留の合計 $V_t = 35 \text{ mm}$ は浸水発生限界であったが、自律タンクでは貯留 $V_a = 50 \text{ mm}$ が発生限界であることがわかった。

(2) 10 分単位であるので流域水の移動距離は小さい。降雨→流量の変換は先ず単位流域(流域面積 $S = 1 \text{ km}^2$)について行う。浸水タンクモデルが計算する河川流量を推定流量として、自律タンクモデル、水循環能に基づく他の 2 つの解析方法で流量再現を行った。ともに成績は良く、これら 2 つの方法も 10 分単位での流出解析に適用が期待できる。

(3) 時間単位での解析では、自律タンクモデルは 3 つの方法のなかで常に中間の精度を持っていたので、10 分単位の解析でも自律タンクモデルの安定性に期待し、流域全体からの流出計算には自律タンクモデルを採用した。

(4) 流域全体からの流出は、流域内を $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ のメッシュの単位流域で区切り、それぞれの単位流域からの流出に遅れを与えて合計したものを下流端の流量とした。遅れは流域水の移動速度を $v = 1 \text{ m/sec}$ とし、河川沿いに上流へ 1 メッシュごとに 10 分とした。この移動速度では 1 メッシュの中でも流域水は 10 分内で完全排出されないで、有効流出係数 fff を導入した。 fff は洪水現象に合うように流域ごとに設定されたが、都市化の度合いに依存しているようで、従来の流出係数の概念とあまり変わらないようである。流出に寄与しない残りの流域水は表面貯留として取り扱った。

(5) 河川氾濫は得られた流量が河川通水能を超えたとき発生するとする。氾濫域は氾濫水の動きも $v = 1 \text{ m/sec}$ とし計算し、現地の既往の記録から最大浸水面積を限度とした。下流端では海に近いので、氾濫水の海への流失率 ddr を設定した。現地の浸水状況から drr は $0.5 - 0.25$ で与えた。潮の干満を考えれば drr は複雑に変動するであろうが今回は考えない。

(6) 長崎豪雨下の長崎市の 3 つの河川下流端における解析では、内水発生時刻、氾濫発生時刻、氾濫浸水位について現地報告にほぼ符合する結果を得た。このことは上の洪水記録と 10 分雨量があれば自律タンクモデルによる解析が可能であることを示している。また 10 分雨量の予測値があれば当該流域の洪水予測も可能である。筆者はすでに 10 分雨量だけに基づく地点 10 分雨量予測ハイトグラフの作成法を提示した (10)。予測作業については別に報告する。

7) 宇部市では洪水抑制のために市内を流れる真締川上流端にダムを計画している。計画降雨に近い 10 分ハイトグラフを作成し、自律タンクモデルによりダムによる抑制効果を検証した。結果は計画降雨については抑制可能である。今後温暖化に伴い短時間豪雨は頻繁に発生することが考えられる。また内水はダムにより解決できない。宇部市のみならず、他の都市流域の水災害に対処するのに 10 分単位自律タンクモデルによる流域水の動向把握は一つの情報提供になると期待できる。

参考文献

- 1) 塩月善晴：流域斉水論序説, 山口大学工学部研究報告, 52, 1, 2001.
- 2) 塩月善晴：自律タンクモデルについて、ダム技術、No. 180, 2001
- 3) 塩月善晴、深見樹里：自律タンクモデルによる日単位流出解析, 山口大学工学部研究報告, 52, 2, 2001.
- 4) 塩月善晴、木多教太、深見樹里：自律タンクモデルによる時間単位流出解析, 山口大学工学部研究報告, 52, 2, 2001.
- 5) 塩月善晴、芝崎一也、阿部清明：宇部市の浸水予測実験、山口大学工学部研究報告, 47, 1, 17-23, 1996.
- 6) 阿部清明、芝崎一也、塩月善晴：タンクモデルによる都市浸水発生予測、土木学会論文集、No. 600、II-44, 1-10, 1998.
- 7) 阿部清明、塩月善晴：山口県の都市浸水発生予測に関する研究、土木学会論文集、No. 628、II-48, 55-64, 1999.
- 8) 東泊さやか：大都市の都市浸水発生予測に関する研究、山口大学大学院理工学研究科社会建設工学専攻修士論文、2001.
- 9) 長崎大学学術調査団：昭和 57 年 7 月長崎豪雨による災害の調査報告書、pp145、1982.
- 10) 塩月善晴：ハイトグラフを利用した短時間雨量予測の試み、天気、36, 449-459, 1989.

(平成13年 12月 17日受理)