

自律タンクモデルによる日単位流出解析

塩月善晴・深見樹里(社会建設工学科)

Daily Runoff Analysis by the Self-Regulating Tank Model

Yoshiharu Shiotsuki and Jury Fukami (Dept. of Civil Eng.)

The basin quickens the draining speed of storage water when the excess water brought in rain season, or slows down it to keep the base flow in drought. This shows that the main role in runoff process is performed not by the rainfall directly, but by the storage water change in the basin. The basin seems to have his own autonomous and non-linear work in controlling his water. The Normal Basin Hydro-cycle Rate (NBHR) was introduced as his own law in the preceding paper. This method is far easier as compared with Tank Model, performed by numerous try and error works to find its structure and parameters. But the concept NBHR may be incomprehensible and have not been easily accepted by the young students who are familiar to Tank Model analysis. This paper introduces the self-parameter regulating 1 Tank Model which automatically finds the water exit height and discharge rate according to the storage amount in the tank. Most of analytical results by the present method show better than those by Tank Model and the NBHR.

Key Words: Self-parameter regulating Tank Model, Daily Runoff analysis.

はじめに

流域は降雨が過大であるときは流域で保有できる水分量の余裕がなくなり流出を早める。また日照りが続く時、流域はできるだけ水を抱え込み流出を遅らせているように見える。このように流出過程は著しい非線形過程となる。

菅原博士¹⁾は非線形過程を表現するタンクモデルを世界に先がけ発明した。筆者の一人の担当する河川工学でもタンクモデルの紹介と演習に大きく時間を割いている。学生は判り易いと喜んでくれる。しかし卒論などで実際に流域を任せられ、解析を始めてもなかなかタンクモデルのパラメータを決めることができない。パラメータは試行錯誤で手探りによるしかない。菅原先生はこれを手回しのタイガー計算機でやられた。学生はハイスピードのパソコンを持っているのにである。先生ご自身も触れておられるようにパラメータの探し方を教えることは難しいのである。知識は伝えられても知恵は伝えられないことに相当する。

学生の奮闘振りを見ながら何とかタンクモデルの自動化できないかと模索した。そのうち前報²⁾のように、水循環能に基づく解析法が見つかった。この方法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。結果はタンクモデルより適合度は良く、しかも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。しかし水循環能の概念は判り難いようである。

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が本来の目的であるので、タンクモデルそのものの自動化を検討した³⁾。このための自律タンクモデルは1段構造である。パラメータはタンク底面からの流出口の高さ、流出口からの流出率、タンク底面の浸透口からの浸透率の3つである。このうち流出口の高さ、流出率はタンク貯流量から自動的に決まる。

浸透率は一定である。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。結果は従来のタンクモデルより適合度が良く、且つ水循環能に基づくモデルにも劣らない。本来の流出モデル探しの目的に適ったので報告する。

1. 自律タンクモデル

1-1. モデル

タンクモデルでも水循環能に基づくモデルでも流域に滞留する水分がある程度大きくなると流出は促進され、逆に小さくなると流出は抑制されることが確認されている。いわば流域は河川流量を安定させるために自己調節作用を行っているように見える。図1のタンクモデルではタンク内の貯留は $F=R+V$ に相当する。タンクモデルにおいて、刻々の F に応じて流出口の高さ h_0 や流出率 λ を変化させることにより流域の自己調節作用を表現することができそうである。

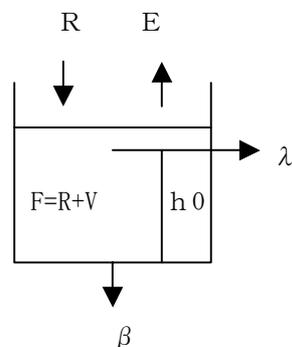


Figure 1. Self-parameter regulating Tank Model

これが可能であればタンクモデルは図のように一段のタンクだけによる自律モデルとなりうる。なお浸透率 β は一定値で与える。

1-2. 蒸発散の与え方

今回は山口県の2つの2級河川流域と西日本の代表的1級河川流域について、日単位での解析を行う。詳しい蒸発の見積もりを行う

でも必ずしも適合度が改善することにならないことを経験しているので、気温だけで評価できるソーンスウェイト法⁴⁾により蒸発散を与えることにした。気温は気候表から山口の30年月平均値を使い月蒸発散位を求める。これを日割りにしたものを日蒸発散位として西日本全域に適用する。各流域では気象環境が異なるので、当然流域独特の蒸発散値となる。個々の流域の蒸発散位として山口の蒸発散位に蒸発散率 er を乗じたもので表現した。どの流域についても降雨日でも日降雨量が 30mm 未満の日は日蒸発散位そのものを蒸発散値とし、日降雨量が 30mm を超えた日は日蒸発散位の $1/3$ を蒸発散値とした。

1-3. 流出口の高さ h_0 (mm) の与え方

- (1) $F < 200\text{mm}$ のとき $h_0 = 0.3 \times F$
- (2) $F \geq 200\text{mm}$ のとき $h_0 = 60 - 0.75 \times (F - 200)$
- (3) $h_0 < 0$ のとき $h_0 = 0$ とする。

1-4. 流出率 λ (1/day) の与え方

λ は流域面積 $S(\text{km}^2)$ の大きさによって次のように変えて与える。

① $S < 350 \text{ km}^2$ の流域の場合

- (1) $F < 100\text{mm}$ のとき $\lambda = 0.04$
- (2) $F \geq 100\text{mm}$ で $F < 200\text{mm}$ のとき

$$\lambda = 0.04 + \frac{(F - 100)}{475}$$
- (3) $F \geq 200\text{mm}$ のとき $\lambda = 0.25$

② $S \geq 350 \text{ km}^2$ の流域の場合

- (1) $F < 100\text{mm}$ のとき $\lambda = 0.02$
- (2) $F \geq 100\text{mm}$ で $F < 200\text{mm}$ のとき

$$\lambda = 0.02 + \frac{(F - 100)}{750}$$
- (3) $F \geq 200\text{mm}$ のとき $\lambda = 0.15$

なお大雨時には F は過大となり、流出も突発的に大きくなる。このとき λ を大きくする必要があるが、その値は流域ごとに設定する。

1-5. 浸透率 β (1/day) の与え方

β は流域環境によって変動するので、流域ごとに設定する。ただし設定された β は日変動はしなく一定とする。

2. 解析例

2-1. 厚東川ダムの日流入量解析

山口県二級河川厚東川水系は上流部はカルスト台地でしめられ下流は宇部市西部を通過して瀬戸内海に流れ込む。宇部市北部に湛水面積 2.49km^2 の多目的用厚東川ダムがある。ダムより上流側の流域面積は 324km^2 である。日単位での降雨量→ダム流入量雨量の解析を多雨年であった 1993 年について行った。流域の特性の一覧は下記のとおりである。

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；厚東川ダム流量観測所
- b. 雨量観測点；厚東川ダム雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S = 324 \text{ km}^2$

(2) 解析期間；1993 年の $n = 365$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；4 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/day)、浸透率 β (1/day) である。

$$h_{1a} = 120, \lambda_{1a} = 0.5, \beta_a = 0.05$$

$$h_{2a} = 60, \lambda_{2a} = 0.3$$

$$h_{3a} = 30, \lambda_{3a} = 0.075$$

$$h_{4a} = 0, \lambda_{4a} = 0.01$$
- c. 2 段目のタンクパラメータ；

$$h_{1b} = 10, \lambda_{1b} = 0.075, \beta_b = 0.04$$
- d. 3 段目のタンクパラメータ；

$$h_{1c} = 10, \lambda_{1c} = 0.05, \beta_c = 0.035$$
- e. 4 段目のタンクパラメータ；

$$h_{1d} = 15, \lambda_{1d} = 0.025, \beta_d = 0.025$$
- f. 蒸発散率 $er = 0.325$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta = 0.0067$ (1/day)
- b. 蒸発散率 $er = 0.3$
- c. 流出率 λ の付帯条件；当日のタンク内貯留が 250mm 以上のとき $\lambda = 0.35$ (1/day)

(5) 解析結果

タンクモデル、水循環能モデル、自律タンクモデルの3方法による流出解析の結果を図2a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。

RS; 日降雨量の合計すなわち1年降水量、mm

QS; 観測流量の合計すなわち1年流出量、mm

mQ; 観測流量の日平均値、mm/day

f; 流出係数

er; 蒸発散率、タンクモデルのための有効な蒸発散値を決めるための係数

<tank anal>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; 計算流量の日平均値、mm/day

RMSE; 標準誤差

QtS; タンクモデルで計算された流出量Qt(○)、mmの合計値である。

es; erに基づく日蒸発散量の1年間の合計値、mm

tgs; 最後のタンクからの浸透量の1年間の合計値、mm

dvs; 毎日のすべてのタンクの貯留変化量の合計値であって、1水年ではその間の貯留変化に相当し0に近くなる。

<atm anal>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、Q0(■)の合計

e0s; 蒸発散量の合計、自律タンクモデルでは蒸発散値はタンクモデルの場合と同じ値で当てている。

g0s; 浸透量の合計

dv0s; 貯留変化量の合計

ga0; 浸透率 β

er0; 蒸発散率

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<ent anal>欄に示した。

S; 流域面積、324km²

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Qbf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、Qe(×)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; この方法による貯留変化量の年合計であるが、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日の貯留変化量に一定の調整値DRNを与えている。最後のDRNSはその年合計値である。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。

図2aのように相関係数、標準誤差ともにタンクモデルによる $rt = 0.8823$ 、 $RMSE = 5.30\text{mm/day}$ が最も良い。しかし自律タンクモデル、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は年合計で220mmとなり、基本の蒸発散、浸透による流域内の水損失では足りないことを示している。

3つの方法による蒸発散の数値はほぼ同じなのでDRNは浸透を多く見積もるのに当てられたことになる。カルスト地質による浸透性の影響が在ることがうかがえる。図2bは実測流量と計算流量の日変化を年初から150日と270日の雨季の間で示したものである。この流域では自律タンクモデルは流量のピークを

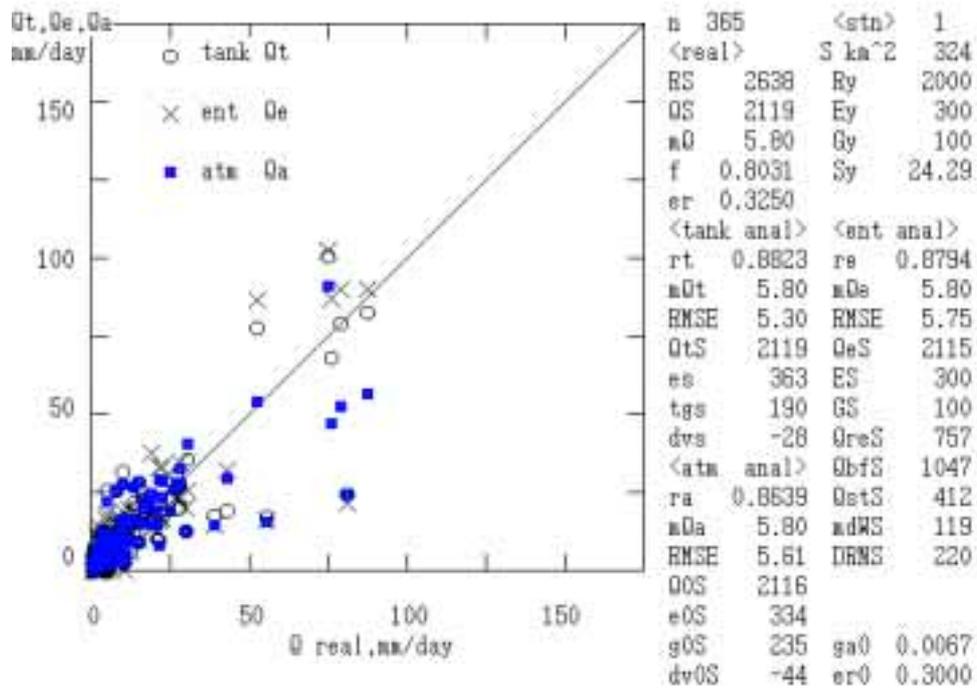


Figure 2a. Comparison of the calculated runoff, Q_a (by the present method), Q_t (by Tank Model), and Q_e (by NBHR) with the observed Q in case of Kotoh river basin.

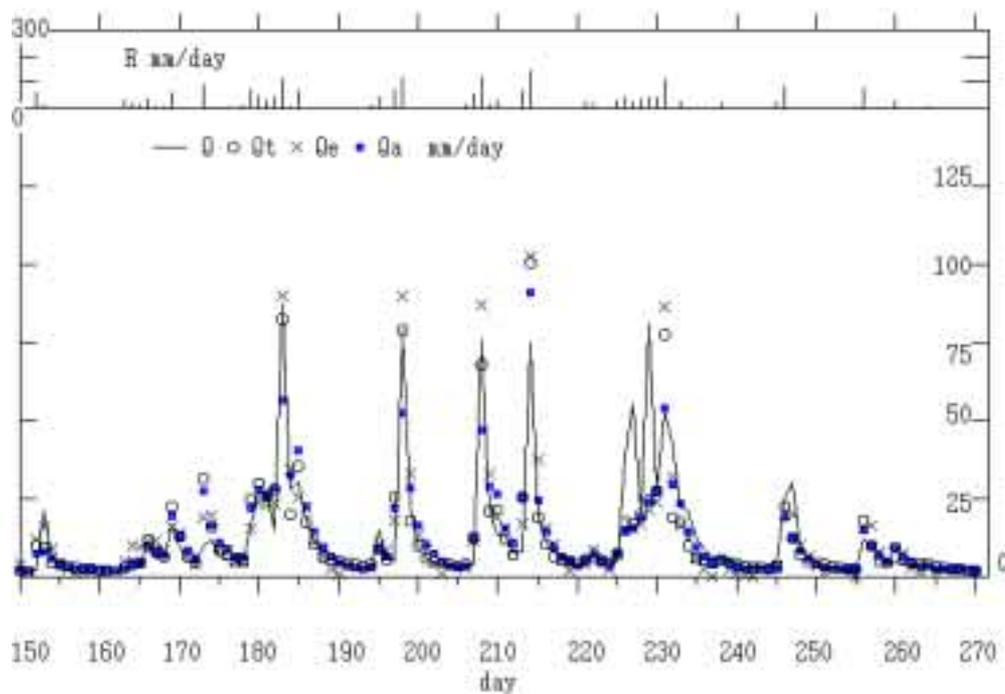


Figure 2b. Daily changes of the observed rainfall R , and the runoff, Q, Q_a, Q_t, Q_e in the rainy season, during 150th—270th day of the year, 1993, in case of Kotoh river basin.

再現できていない。底流量については3つの方法とも良く追隨している。

2-2. 一の坂川ダムの日流入量解析

一の坂川は山口市の北部山間部に発し、樫野川に流れ込む。一の坂ダムは洪水調節と利水を目的とするもので、湛水面積は 0.18km^2 と小さい。集水域の面積は 6.7km^2 で、解析年は図2と同じく1993年である。

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；一の坂川ダム流量観測所
- b. 雨量観測点；一の坂川ダム雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=6.7\text{km}^2$

(2) 解析期間；1993年の $n=365$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；4段直列
- b. 1段目のタンクパラメータ；
 $h1a=150, \lambda 1a=0.7, \beta a=0.025$
 $h2a=50, \lambda 2a=0.1$
 $h3a=15, \lambda 3a=0.05$
 $h4a=0, \lambda 4a=0.025$
- c. 2段目のタンクパラメータ；
 $h1b=10, \lambda 1b=0.1, \beta b=0.02$
- d. 3段目のタンクパラメータ；
 $h1c=10, \lambda 1c=0.05, \beta c=0.005$
- e. 4段目のタンクパラメータ；
 $h1d=10, \lambda 1d=0.01, \beta d=0.0025$
- f. 蒸発散率 $er=0.22$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta = 0.0005(1/\text{day})$
- b. 蒸発散率 $er_0 = 0.21$
- c. 流出率 λ の付帯条件；当日のタンク内貯留が 225mm 以上のとき $\lambda = 0.35(1/\text{day})$

(5) 解析結果

図3は一の坂ダム流域の解析結果である。図3aのように自律タンクモデルで $ra = 0.9468$, $RMSE = 4.01$ となり、このモデルの適合度が最も良い。図3bのように雨量ピーク時でもよく追隨している。

2-3. 大淀川上流部の日流量解析

大淀川は都城市、宮崎市を経て日向灘に流れ込む1級河川である。都城市岳下流量観測点までの上流域についての解析を行う。集水域の面積は 160km^2 で、解析年は1997年である。

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；岳下流量観測所
- b. 雨量観測点；岳下雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=160\text{km}^2$

(2) 解析期間；1997年の $n=365$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；4段直列
- b. 1段目のタンクパラメータ；
 $h1a=50, \lambda 1a=0.5, \beta a=0.2$
 $h2a=25, \lambda 2a=0.1$
 $h3a=10, \lambda 3a=0.05$
- c. 2段目のタンクパラメータ；
 $h1b=10, \lambda 1b=0.045, \beta b=0.2$
- d. 3段目のタンクパラメータ；
 $h1c=10, \lambda 1c=0.045, \beta c=0.05$
- e. 4段目のタンクパラメータ；
 $h1d=10, \lambda 1d=0.035, \beta d=0.005$
- f. 蒸発散率 $er=0.25$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta = 0.00036(1/\text{day})$
- b. 蒸発散率 $er_0 = 0.14$
- c. 流出率 λ の付帯条件；当日のタンク内貯留が 250mm 以上で且つ当日の雨が $150\text{mm}/\text{day}$ 以上のとき $\lambda = 0.45(1/\text{day})$

(5) 解析結果

図4aのようにここではタンクモデルの適合度が最も良い。水循環能に基づく解析では、最終調整の $DRN = -180\text{mm}$ となって、年間 180mm の水分補給となった。シラス台地特有の基底流の影響があるのかもしれない。図4bの日変化では三つの方法ともよく追隨している。上の3流域での一水年での試験解析で自律タンクモデルの有用性が判明したので、西日本の1級河川流域について10年間の解析を行った。したがって以下の解析結果に表示される水文諸量の合計値は3652日分のものである。

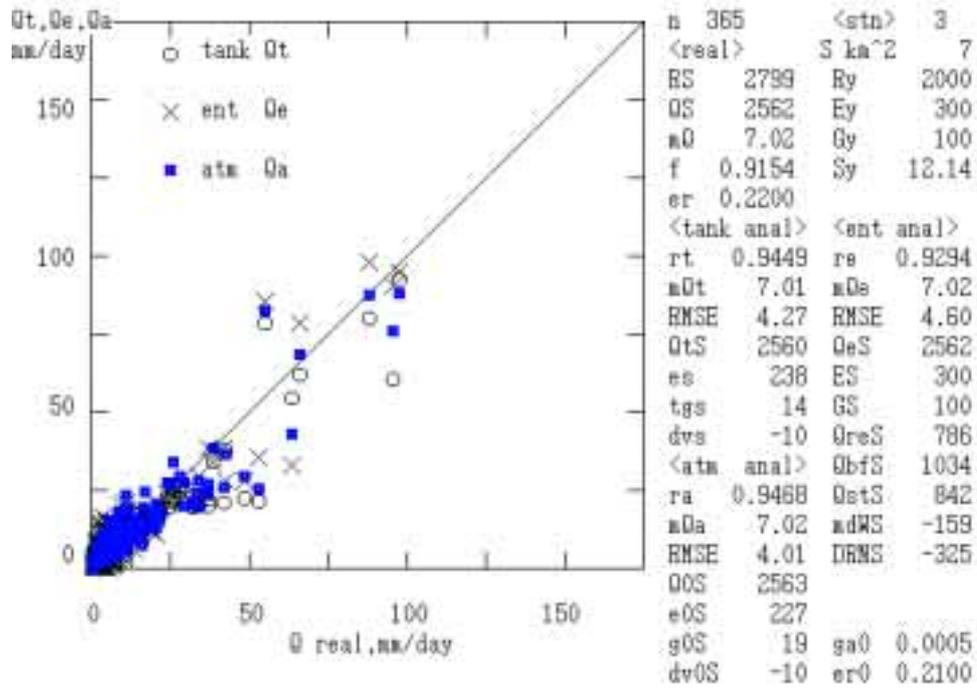


Figure 3a. Comparison of the calculated runoff, Q_a (by the present method), Q_t (by Tank Model), and Q_e (by NBHR) with the observed Q in case of Ichinosaka river basin.

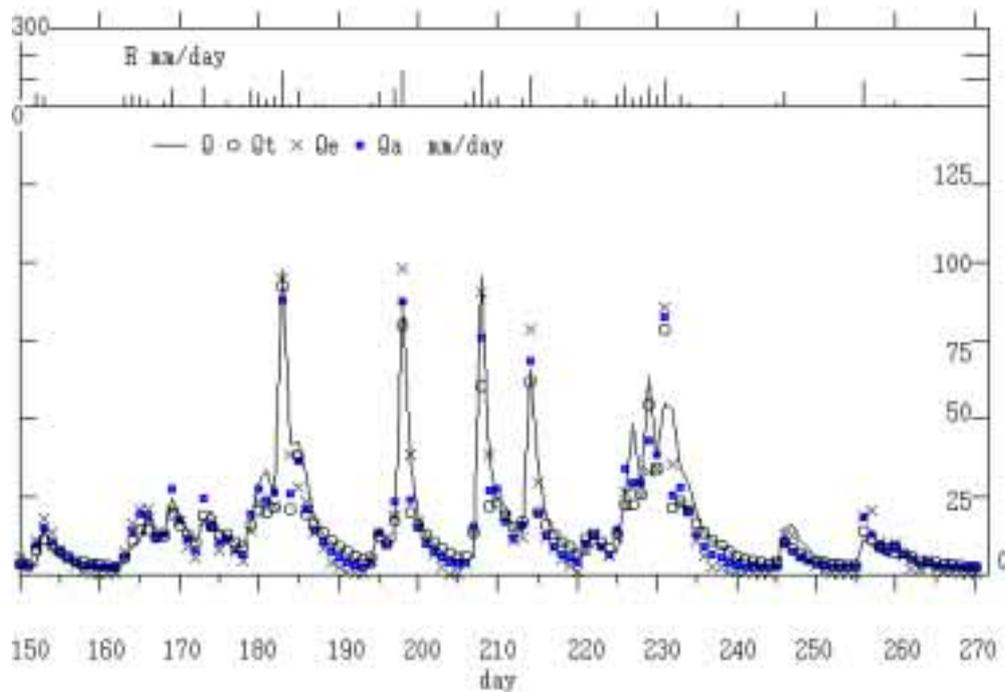


Figure 3b. Daily changes of the observed rainfall R , and the runoff Q, Q_a, Q_t, Q_e in the rainy season, during 150th–270th day of the year, 1993, in case of Ichinosaka river basin.

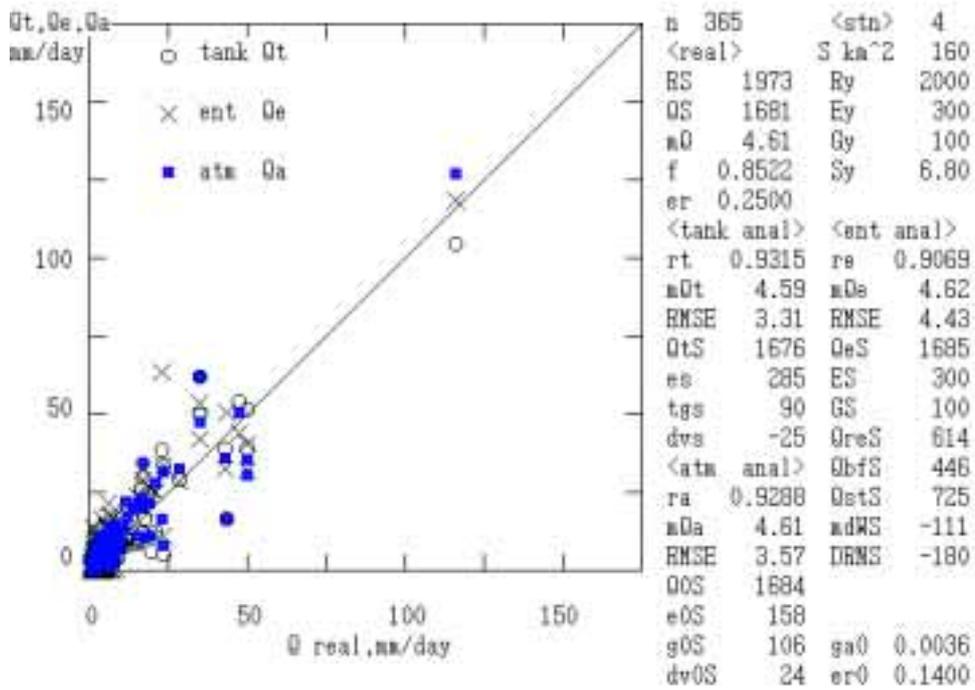


Figure 4a. Comparison of the calculated runoff, Qa (by the present method), Qt (by Tank Model), and Qe (by NBHR) with the observed Q in case of Ohyodogawa river basin.

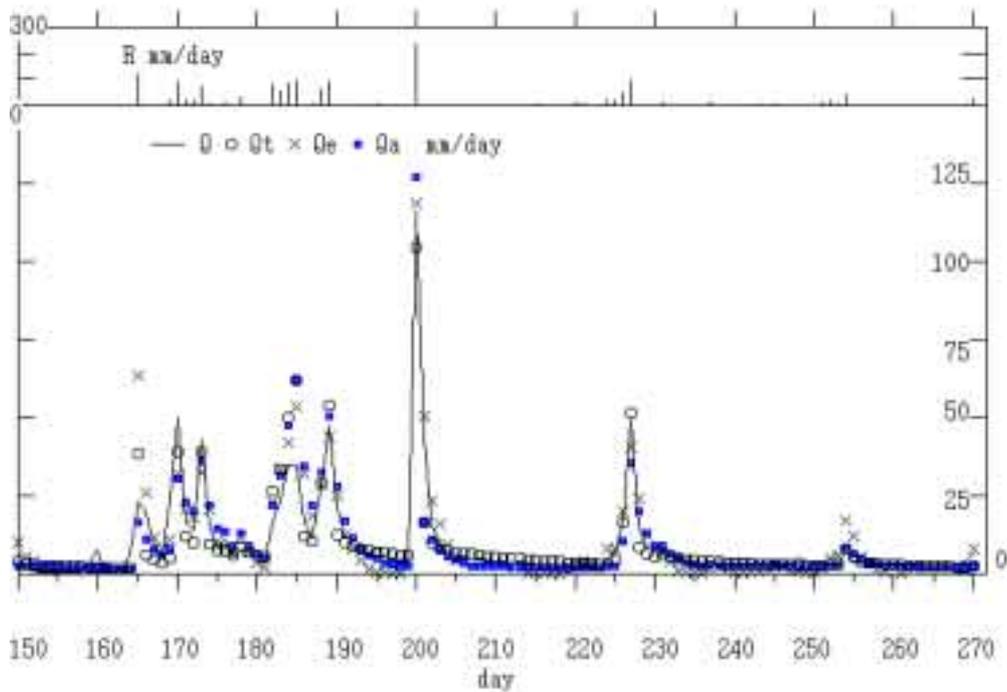


Figure 4b. Daily changes of the observed rainfall R, and the runoff, Q, Qa, Qt, Qe in the rainy season, during 150th–270th day of the year, 1993, in case of Ohyodogawa river basin.

2-4. 佐波川流域の日単位流出解析

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；新橋流量観測所
- b. 雨量観測点；堀雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=428 \text{ km}^2$

(2) 解析期間；1985年－1994年の $n=3652$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；5段直列
- b. 1段目のタンクパラメータ；
 $h_{1a}=10\text{mm}$, $\lambda_{1a}=0.01(1/\text{day})$, $\beta_a=0.35(1/\text{day})$
- c. 2段目のタンクパラメータ；
 $h_{1b}=60$, $\lambda_{1b}=0.7$, $\beta_b=0.15$
 $h_{2b}=35$, $\lambda_{2b}=0.1$
 $h_{3b}=5$, $\lambda_{3b}=0.05$
- d. 3段目のタンクパラメータ；
 $h_{1c}=60$, $\lambda_{1c}=0.7$, $\beta_c=0.07$
 $h_{2c}=35$, $\lambda_{2c}=0.1$
 $h_{3c}=5$, $\lambda_{3c}=0.035$
- e. 4段目のタンクパラメータ；
 $h_{1d}=60$, $\lambda_{1d}=0.7$, $\beta_d=0.05$
 $h_{2d}=35$, $\lambda_{2d}=0.1$
 $h_{3d}=5$, $\lambda_{3d}=0.035$
- f. 5段目のタンクパラメータ；
 $h_{1e}=10$, $\lambda_{1e}=0.015$, $\beta_e=0.029$
- g. 蒸発散率 $er=0.275$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta=0.0065(1/\text{day})$
- b. 蒸発散率 $er_0=0.295$
- c. 流出率 λ の付帯条件；前日の降雨が $150\text{mm}/\text{day}$ 以上のとき $\lambda=0.4(1/\text{day})$

(5) 解析結果

図5の佐波川での結果に見るごとく、関係係数、標準誤差ともにベストとなった自律タンクモデルの適合度が最も良いことがわかる。参考として、水循環能に基づく方法では10年間でDRNの合計 $DRNS=1601\text{mm}$ 、つまり1年間で 160mm の水分損失がある。ダムから流域外の新南陽市へ上水分配している効果が現れているか、あるいは、基本の蒸発散、浸透の水分損失は少なすぎることを示している。

2-5. 筑後川流域の日単位流出解析

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；瀬の下流量観測所
- b. 雨量観測点；杖立、森雨量観測所。降雨は平均値。
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=2315 \text{ km}^2$

(2) 解析期間；1985年－1994年の $n=3652$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；5段直列
- b. 1段目のタンクパラメータ；
 $h_{1a}=10\text{mm}$, $\lambda_{1a}=0.01$, $\beta_a=0.4$
- c. 2段目のタンクパラメータ；
 $h_{1b}=50$, $\lambda_{1b}=0.3$, $\beta_b=0.2$
 $h_{2b}=30$, $\lambda_{2b}=0.15$
 $h_{3b}=10$, $\lambda_{3b}=0.01$
- d. 3段目のタンクパラメータ；
 $h_{1c}=50$, $\lambda_{1c}=0.3$, $\beta_c=0.1$
 $h_{2c}=30$, $\lambda_{2c}=0.15$
 $h_{3c}=10$, $\lambda_{3c}=0.01$
- e. 4段目のタンクパラメータ；
 $h_{1d}=50$, $\lambda_{1d}=0.3$, $\beta_d=0.035$
 $h_{2d}=30$, $\lambda_{2d}=0.15$
 $h_{3d}=10$, $\lambda_{3d}=0.01$
- f. 5段目のタンクパラメータ；
 $h_{1e}=10$, $\lambda_{1e}=0.015$, $\beta_e=0.025$
- g. 蒸発散率 $er=0.31$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta=0.007$
- b. 蒸発散率 $er_0=0.3$
- c. 流出率 λ の付帯条件； $F>=200$ で前日の降雨が $125\text{mm}/\text{day}$ 以上のとき $\lambda=0.3$

(5) 解析結果

図6の筑後川の結果においても自律タンクモデルの適合度がベストである。水循環能に基づく解析では $DRNS=1201\text{mm}$ となっており、この流域でも年間 120mm 程度の水分損失となっている。流域面積が佐波川の5.4倍と大きく、有効降雨による流出成分は $Q_{reS}=17\text{mm}$ 、つまり1年間で 1.7mm と佐波川の 58.1mm に比べ極端に小さくなった。流域面積が大きくなると降雨の効果は下流地点にはすぐ現れず、基底流

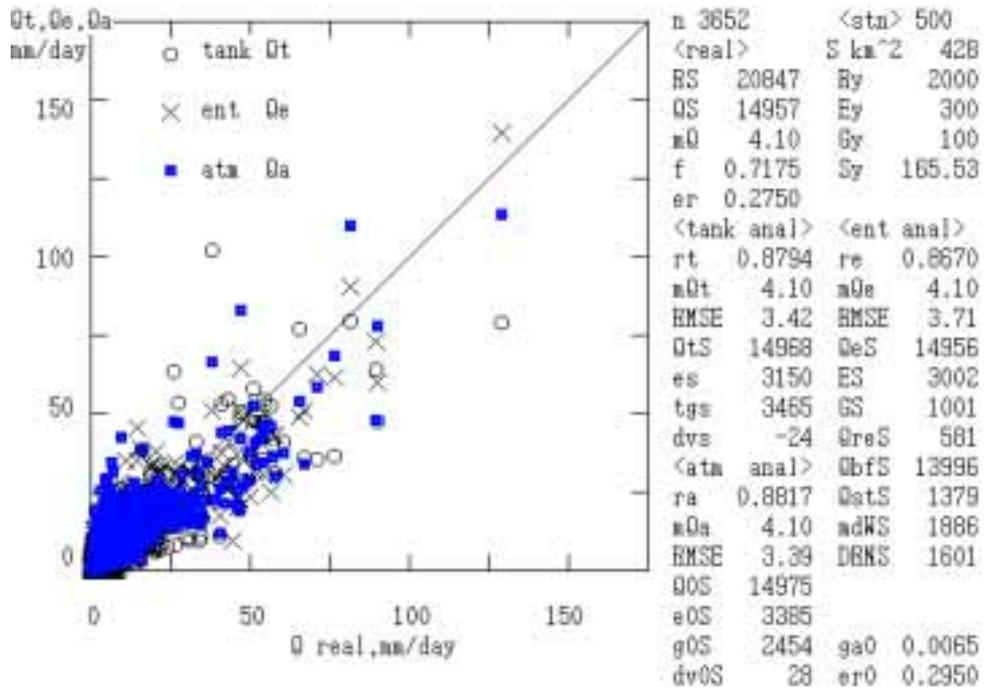


Figure 5. Comparison of the calculated runoff, Qa (by the present method), Qt (by Tank Model), and Qe (by NBHR) with the observed Q in case of Sabagawa river basin.

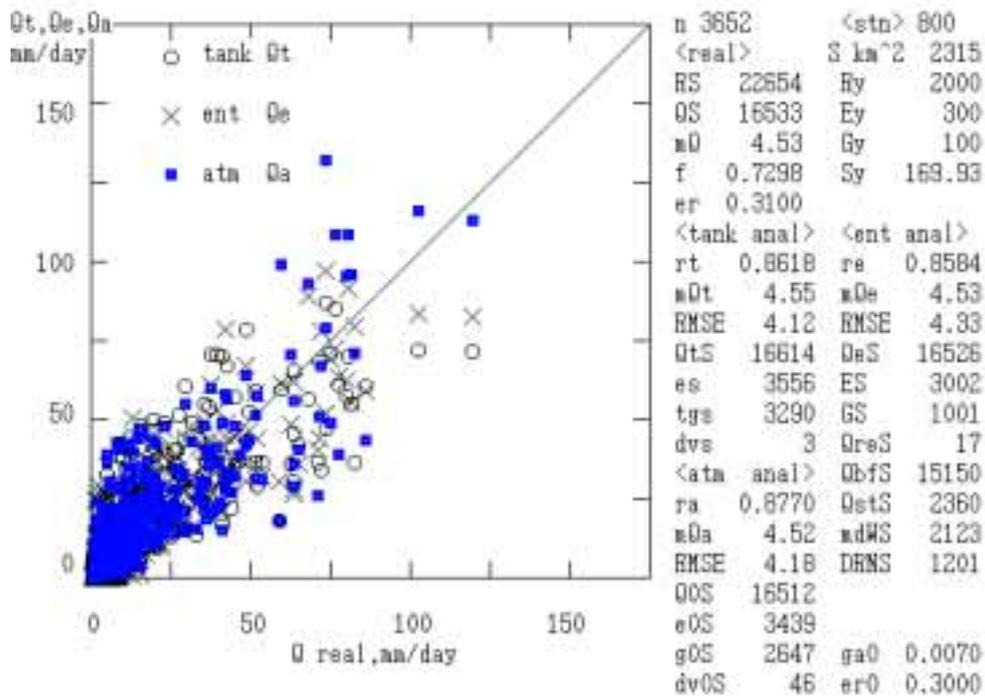


Figure 6. Comparison of the calculated runoff, Qa (by the present method), Qt (by Tank Model), and Qe (by NBHR) with the observed Q in case of Chikugogawa river basin

出 Q_{bfS} , 中間流出 Q_{stS} の成分が大きくなることを示している。

2-6. 大山川流域の日単位流出解析

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；小平流量観測所
- b. 雨量観測点；杖立雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=533 \text{ km}^2$

(2) 解析期間；1985年－1994年の $n=3652$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；5 段直列
- b. 1 段目のタンクパラメータ；
 $h_{1a}=0\text{mm}, \lambda_{1a}=0, \beta_a=0.7$
- c. 2 段目のタンクパラメータ；
 $h_{1b}=50, \lambda_{1b}=0.15, \beta_b=0.5$
 $h_{2b}=25, \lambda_{2b}=0.05$
- d. 3 段目のタンクパラメータ；
 $h_{1c}=50, \lambda_{1c}=0.25, \beta_c=0.25$
 $h_{2c}=50, \lambda_{2c}=0.15$
 $h_{3c}=0, \lambda_{3c}=0.01$
- e. 4 段目のタンクパラメータ；
 $h_{1d}=50, \lambda_{1d}=0.15, \beta_d=0.2$
 $h_{2d}=25, \lambda_{2d}=0.1$
 $h_{3d}=0, \lambda_{3d}=0.001$
- f. 5 段目のタンクパラメータ；
 $h_{1e}=50, \lambda_{1e}=0.005, \beta_e=0.2$
- g. 蒸発散率 $er=0.34$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta=0.0565$
- b. 蒸発散率 $er_0=0.44$
- c. 流出率 λ の付帯条件；前日の降雨が 150mm/day 以上のとき $\lambda=0.35$

(5) 解析結果

図 7 は筑後川上流の大山川流域の小平流量観測点での解析結果である。上流域には松原・下釜の本邦有数の規模を持つ二つのダムがあり、発電用水は小平から下流の地点で放流されている。他流域への流出があることから各方法とも水分損失が大きくなることが予想される。タンクモデルでの最後の 5 番目

のタンクの浸透率 $\beta_e=0.2$ は佐波川、筑後川のそれより一桁大きい。また自律タンクモデルの浸透率 $\beta=0.0565$ も一桁大きい。そのため浸透量の合計も $tgs=14655\text{mm}, g0S=11859\text{mm}$ と大きくなった。ダムなどによる他流域流出をタンクモデルで評価するときは降雨をカットする方式より浸透で表現するほうが無理がなかった。水循環能に基づく方法では $DRNS=36520\text{mm}$ と大きな水分流失となった。降雨の総計 25309mm より大きくなるのは DRN は降雨から差し引いているわけではなく、流域滞留水分(水収支の残差)から引いているためである。日によって DRN が過大で流量が負となるときは流量を 0 とおいているので実効の DRN は少なくなっているはずである。

図 6 の結果によると筑後川全域での水分損失はタンクモデルで $es + tgs = 3556+3290 = 6846\text{mm}$ 、自律タンクモデルで $e0s + g0S = 3439+2647 = 6086\text{mm}$ 、水循環能に基づくもので $ES+GS+mdWS = 3002+1001+2123 = 6126\text{mm}$ である。これらの平均約 6350mm が 10 年間での自然の水分損失であるとして、上流の大山川の自然損失もこの数値とする。図 7 の大山川では損失はそれぞれ $es + tgs = 18537\text{mm}$ 、 $e0s + g0S = 16926\text{mm}$ 、 $ES+GS+mdWS = 16742\text{mm}$ で平均 17400mm の損失となった。これはダムによる損失が含まれているので、この値から上述の自然損失を差し引くと、 $17400 - 6350 = 11050\text{mm}$ がダムによる他流域配水となる。10 年間での平均雨量が約 2530mm/yr に対しダムによる配分は約 1100mm となる。また水循環能に基づく方法で、 $DRN=0$ すなわち流量補正をしないときの結果では $QeS=19611\text{mm}$ が得られている。実際の観測流量合計は $QS=8525\text{mm}$ なので、これからもダム配水は 10 年間で $19611-8525 = 11086\text{mm}$ 、つまり年間約 1100mm/yr と判断できる。このように水循環能に基づく方法は、単独でも、またタンクモデル、自律タンクモデルの結果を参照しながら、流域の水の動きを把握できる。図 7 のとおり大山川でも自律タンクモデルによる適合度がベストであった。

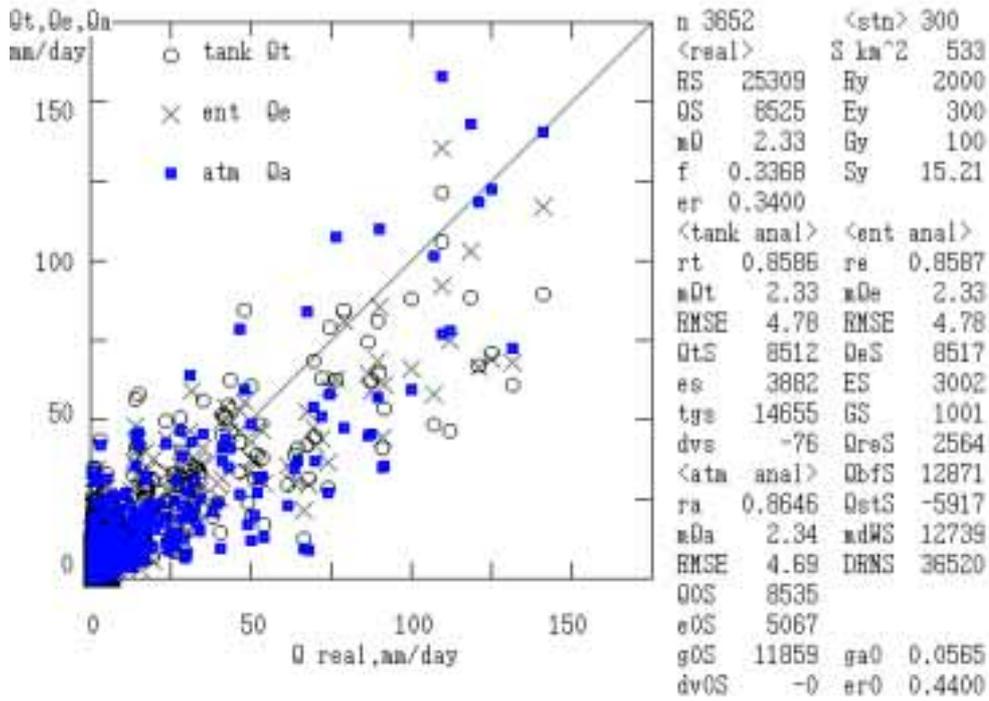


Figure 7. Comparison of the calculated runoff, Qa (by the present method), Qt (by Tank Model), and Qe (by NBHR) with the observed Q in case of Ohyamagawa river basin.

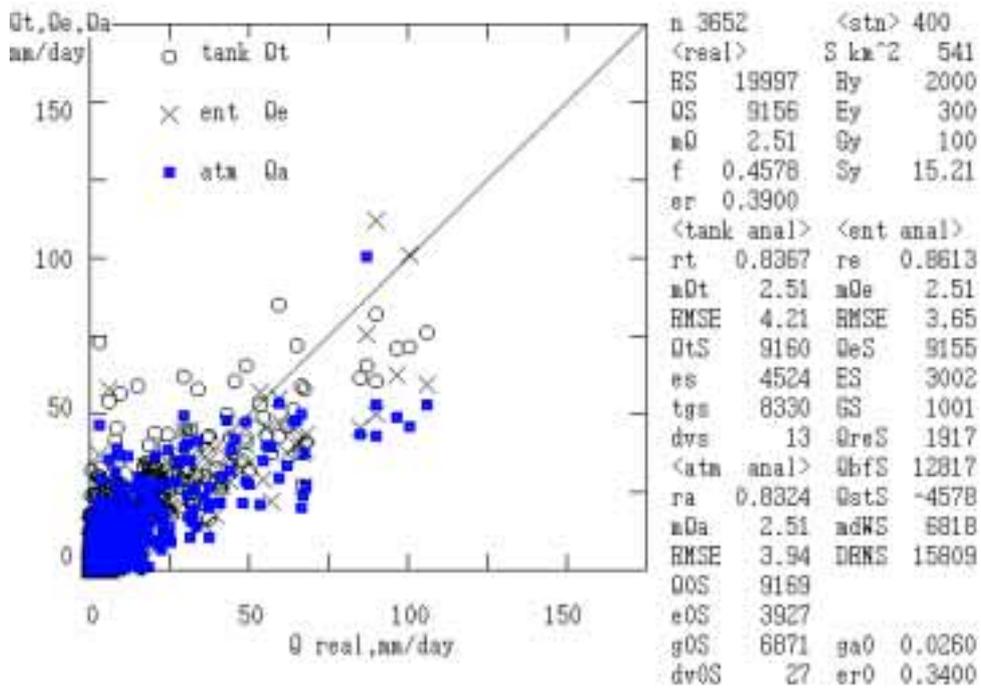


Figure 8. Comparison of the calculated runoff, Qa (by the present method), Qt (by Tank Model), and Qe (by NBHR) with the observed Q in case of Kusugawa river basin.

2-7. 玖珠川流域の日単位流出解析

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；小ヶ瀬流量観測所
- b. 雨量観測点；森雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=541 \text{ km}^2$

(2) 解析期間；1985年－1994年の $n=3652$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；5 段直列
- b. 1 段目のタンクパラメータ；
 $h1a=0\text{mm}, \lambda 1a=0, \beta a=0.7$
- c. 2 段目のタンクパラメータ；
 $h1b=0, \lambda 1b=0, \beta b=0.6$
- d. 3 段目のタンクパラメータ；
 $h1c=20, \lambda 1c=0.7, \beta c=0.2$
 $h2c=10, \lambda 3c=0.025$
 $h3c=5, \lambda 3c=0.01$
- e. 4 段目のタンクパラメータ；
 $h1d=20, \lambda 1d=0.7, \beta d=0.2$
 $h2d=10, \lambda 2d=0.025$
 $h3d=5, \lambda 3c=0.001$
- f. 5 段目のタンクパラメータ；
 $h1e=75, \lambda 1e=0.005, \beta e=0.045$
- g. 蒸発散率 $er=0.35$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta=0.026$
- b. 蒸発散率 $er_0=0.34$
- c. 流出率 λ の付帯条件； $F>=250$ で前日の降雨が 200mm/day 以上のとき $\lambda=0.4$

(5) 解析結果

図8は筑後川上流で大山川流域の東に隣接する玖珠川流域の結果である。目立った大きなダムがないにもかかわらず、水循環能に基づく流量調整DRNは年間で1580mmの水分流失となった。したがってタンクモデル、自律タンクモデルの浸透も大きくなり10年間の合計でそれぞれ $tgs=8330\text{mm}$, $g0s=6871\text{mm}$ となっている。適合度は $re=0.8613$, $RMSE=3.65$ となって、水循環能による場合が最も良い。

2-8. 遠賀川流域の日単位流出解析

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；日の出橋流量観測所
- b. 雨量観測点；大隈雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=695\text{km}^2$

(2) 解析期間；1985年－1994年の $n=3652$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；5 段直列
- b. 1 段目のタンクパラメータ；
 $h1a=10\text{mm}, \lambda 1a=0.01, \beta a=0.35$
- c. 2 段目のタンクパラメータ；
 $h1b=40, \lambda 1b=0.7, \beta b=0.05$
 $h2b=35, \lambda 2b=0.05$
 $h3b=5, \lambda 3b=0.025$
- d. 3 段目のタンクパラメータ；
 $h1c=50, \lambda 1c=0.7, \beta c=0.025$
 $h2c=35, \lambda 3c=0.05$
 $h3c=5, \lambda 3c=0.025$
- e. 4 段目のタンクパラメータ；
 $h1d=50, \lambda 1d=0.7, \beta d=0.01$
 $h2d=35, \lambda 2d=0.05$
 $h3d=5, \lambda 3c=0.015$
- f. 5 段目のタンクパラメータ；
 $h1e=25, \lambda 1e=0.001, \beta e=0.0035$
- g. 蒸発散率 $er=0.31$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta=0.001$
- b. 蒸発散率 $er_0=0.2815$
- c. 流出率 λ の付帯条件； $F>=100$ で前日の降雨が 150mm/day 以上のとき $\lambda=0.45$

(5) 解析結果

図9は遠賀川流域の解析結果である。適合度は $re=0.8638$, $RMSE=4.19$ となって水循環能に基づくものが最も良い。ここでは年間の $DRN=-30\text{mm}$ となり、基準の蒸発散や浸透では少し多すぎたことを物語っている。

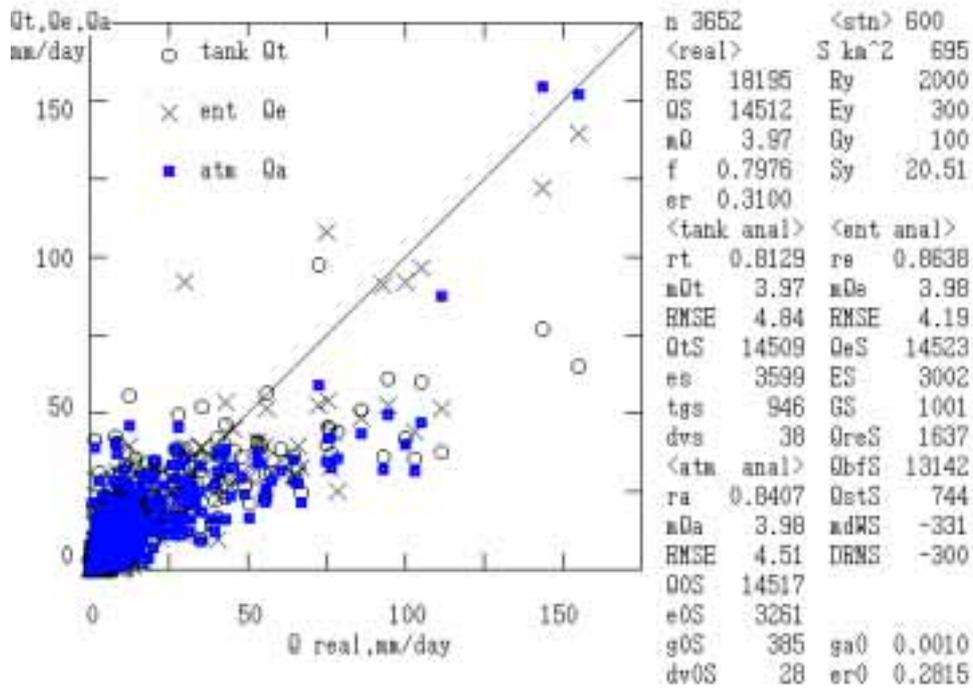


Figure 9. Comparison of the calculated runoff, Qa (by the present method), Qt (by Tank Model), and Qe (by NBHR) with the observed Q in case of Ongagawa river basin.

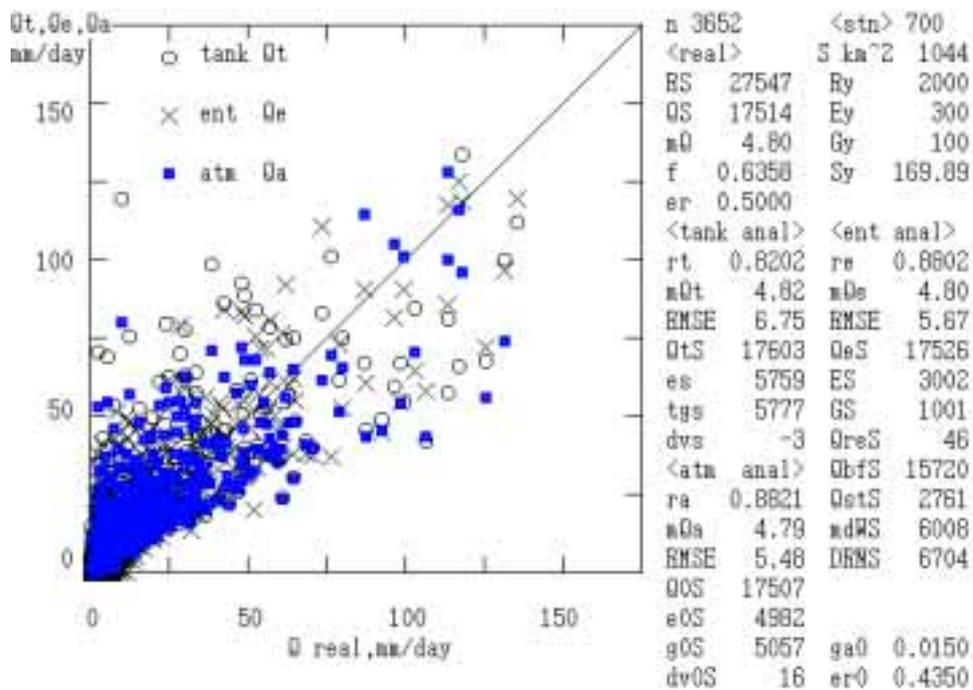


Figure 10. Comparison of the calculated runoff, Qa (by the present method), Qt (by Tank Model), and Qe (by NBHR) with the observed Q in case of Gokasekawa river basin.

2-9. 五ヶ瀬川流域の日単位流出解析

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；三輪流量観測所
- b. 雨量観測点；日之影雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=1044\text{km}^2$

(2) 解析期間；1985年－1994年の $n=3652$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；5段直列
- b. 1段目のタンクパラメータ；
 $h_{1a}=30\text{mm}$, $\lambda_{1a}=0.2$, $\beta_a=0.35$
 $h_{2a}=15$, $\lambda_{2a}=0.005$
- c. 2段目のタンクパラメータ；
 $h_{1b}=30$, $\lambda_{1b}=0.2$, $\beta_b=0.15$
 $h_{2b}=15$, $\lambda_{2b}=0.005$
- d. 3段目のタンクパラメータ；
 $h_{1c}=30$, $\lambda_{1c}=0.2$, $\beta_c=0.1$
 $h_{2c}=15$, $\lambda_{3c}=0.005$
- e. 4段目のタンクパラメータ；
 $h_{1d}=30$, $\lambda_{1d}=0.2$, $\beta_d=0.05$
 $h_{2d}=15$, $\lambda_{2d}=0.001$
- f. 5段目のタンクパラメータ；
 $h_{1e}=15$, $\lambda_{1e}=0.001$, $\beta_e=0.05$
- g. 蒸発散率 $er=0.5$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta=0.015$
- b. 蒸発散率 $er_0=0.435$
- c. 流出率 λ の付帯条件； $F>=200$ で前日の降雨が 200mm/day 以上のとき $\lambda=0.3$

(5) 解析結果

結果は図 10 のとおりである。上流部のダムの効果によってここでは年間の DRN は 670mm となった。適合度は $ra=0.8821$, $RMS E=5.48$ となって、自律タンクモデルによるものが最も良い。

2-10. 江の川流域の日単位流出解析

(1) 流域性状

- a. 流量観測点；川平流量観測所
- b. 雨量観測点；市木雨量観測所
- c. 流量観測点までの流域面積； $S=3870\text{km}^2$

(2) 解析期間；1985年－1994年の $n=3652$ 日

(3) 採用されたタンクモデルの構造とパラメータ

- a. 構造；5段直列
- b. 1段目のタンクパラメータ；
 $h_{1a}=10\text{mm}$, $\lambda_{1a}=0.025$, $\beta_a=0.4$
- c. 2段目のタンクパラメータ；
 $h_{1b}=30$, $\lambda_{1b}=0.4$, $\beta_b=0.2$
 $h_{2b}=15$, $\lambda_{2b}=0.15$
 $h_{3b}=5$, $\lambda_{3b}=0.015$
- d. 3段目のタンクパラメータ；
 $h_{1c}=30$, $\lambda_{1c}=0.4$, $\beta_c=0.15$
 $h_{2c}=15$, $\lambda_{3c}=0.15$
 $h_{3c}=5$, $\lambda_{3c}=0.01$
- e. 4段目のタンクパラメータ；
 $h_{1d}=30$, $\lambda_{1d}=0.4$, $\beta_d=0.1$
 $h_{2d}=15$, $\lambda_{2d}=0.015$
 $h_{3d}=5$, $\lambda_{3c}=0.01$
- f. 5段目のタンクパラメータ；
 $h_{1e}=10$, $\lambda_{1e}=0.015$, $\beta_e=0.015$
- g. 蒸発散率 $er=0.3$

(4) 採用された自律タンクモデルのパラメータ

- a. 浸透率 $\beta=0.0047$
- b. 蒸発散率 $er_0=0.35$
- c. 流出率 λ の付帯条件； $F>=125$ で前日の降雨が 100mm/day 以上のとき $\lambda=0.25$

(5) 解析結果

結果は図 11 のとおりである。今回対象とした流域ではもっとも大きな集水面積を持つ。大きな流域にもかかわらず、雨量データは1地点のものしか使用していないので3つの方法とも相関係数は良くない。このなかでタンクモデル、自律タンクモデルによる結果が良く、適合度はほぼ同じである。水循環能に基づく有効雨量による流量成分 Q_{reS} は10年間の合計値でわずか 5mm である。大雨のときは

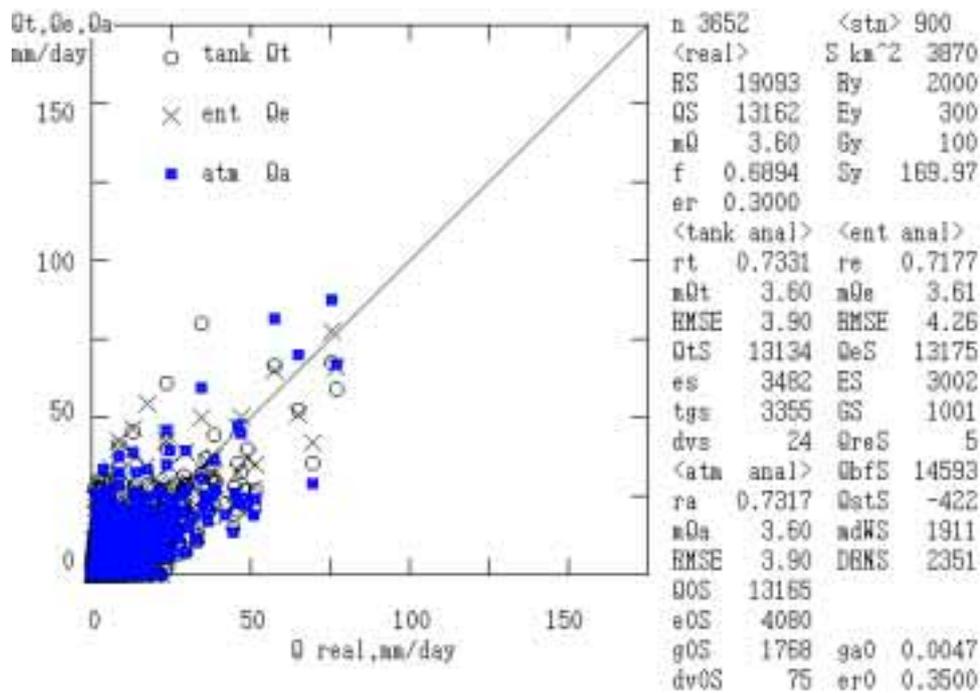


Figure 11. Comparison of the calculated runoff, Q_a (by the present method), Q_t (by Tank Model), and Q_e (by NBHR) with the observed Q in case of Gounokawa river basin.

それに応じて大きな値を示すが、無降雨日や弱い雨の日が多いため蒸発散が相対的に大きくこのような値となった。これを反映し年間のDRN=235mmとなった。

(平成 13年 12月 17日受理)

おわりに

以上の解析のごとく自律タンクモデルによる適合度は優秀である。流量予測などで流量のより正確な表現だけが目的の場合は従来のタンクモデルよりはるかに簡便な自律タンクモデルで十分対応できそうである。

参考文献

- 1) 菅原正巳：流出解析法、共立出版、1972.
- 2) 塩月善晴：流域水論序説、山口大学工学部研究報告, 52, 1, 2001.
- 3) 塩月善晴：自律タンクモデル、ダム技術、(財)ダム技術センター、No. 183, 2001.
- 4) Thornthwaite, C. W. and Mather, J. R.: The water balance. Laboratory of Climatology, Publication No. 8, Centerton, NJ, 1955.