

角屋・永井法の長短期流出両用モデルの適応性

福 島 辰*・田中礼次郎*

Adaptability of Storage Model for Analyzing Flood and Long
Term Runoff by KADOYA and NAGAI's Method
Akira FUKUSHIMA and Reijiro TANAKA

The parameters of the model proposed by Kadoya and Nagai are rewritten by means of a conversion coefficient and mean slope length of basin model, aiming at relation with the parameters of the kinematic wave runoff model. Runoff analysis by the model uses two calculation techniques. The one is to give the first upper tank the rainfall intensity as a state of pulse. And the other is to solve differential storage equations under the condition of uniform rainfall intensity in every time interval of calculation.

Simulated hydrographs are examined for the data observed at three basins. In River Hii, the optimum parameters of the model are identified for the daily and flood data of the period of 1971-1973. The results of flood analysis at the area of land reclamation in Masuda and Shimokari river basin show that maximum interception of rain water is over 5 mm and introducing the effect of depression storage on the land surface is necessary for the model. Simulated flood hydrographs by the second calculation technique, which is used the improved Euler method, agree well with observed one and prove usefulness of the model proposed by Kadoya and Nagai beyond the Sugawara's tank model.

1. ま え が き

中小河川の治水整備は、時間雨量 50mm に対する洪水疎通能の確保、を暫定整備目標として遂行されているが、その整備水準は低水準にとどまっている。一方、中小河川下流域の堤内地ではいわゆる都市化による流域環境条件の変化により洪水災害要因は危険側に増大している。さらに、地域農業の振興を図るために計画される自然丘陵地帯における大規模な農用地開発事業の遂行によっても、雨水流出場としての流域特性が変化し、高水および低水の流出形態の変化、ならびに経年的な雨水流過程の変遷がもたらされる。

こうした流域開発の進展、あるいは流域の土地利用形態の分布特性を加味した流出解析には雨水流の水理学的

挙動を記述する定数分布型流出モデルを用いるのが適当といえるが、その際、有効降雨をどのように推定するかが本流出モデルに付随する問題点としてあげられる。

筆者らはこのような問題に対処する一手法として、いわゆる有効降雨を算定する必要がないという菅原のタンクモデルの基本構造を生かしつつ、かつタンクモデル定数に雨水流モデルの定数を対応させたモデルによる洪水流出解析法を提示した¹⁾。そして、本解析法の適応性を吟味するとともに、本流出モデルに蒸発量を加味した項を導入することにより、洪水流出と同時に長期流出についても解析可能となることを指摘した。

一方、最近、角屋・永井によって洪水流出および低水流出を同時に解析できる長短期流出両用モデルが開発提

案されている^{2),3),4)}。この角屋・永井の長短期流出両用モデル

* 農業水工学研究室

は、短期流出、長期流出と現象、解析目的別に使い分けられてきた従来の流出解析手法を改良、統合した画期的な流出モデルとして位置づけられるものであり、筆者らが提示した流出解析法において低水流出に対して残された課題としていた事項も本流出モデルでは解決されている。

したがって、今後、河川流域における洪水・濁水流量の地域特性に関する分析、および前述のような流域開発の進展等の水文環境の変遷による雨水流出形態の変化特性を吟味するうえにおいて、本流出モデルによる解析が菅原のタンクモデルによる解析より有用な情報を提供するものと期待される。

そこで、ここでは2, 3の実流域における水文観測資料にもとづき、角屋・永井法の長短期流出両用モデルの最適同定を試み、その適応性について若干検討した結果を報告する。

2. 角屋・永井法の長短期流出両用モデルとモデル定数

角屋・永井は数多くの長短期流出両用モデルを検討し、1985年2月に「長短期流出両用モデルの開発研究」として研究成果を報告している。1985年2月に発表された研究成果の論文は主にダム流域の洪水予測の問題、および濁水流量の推定問題に文献3., 4.の長短期流出両用モデルを適用検討したものである。そこで、ここでは文献3., 4.にある長短期流出両用モデルにもとづく解析結果について述べることにする。

本流出モデルの構造は図1(a)に示すように4段のタンクで構成され、最上段タンクは樹木等による降雨遮断量を評価するためのものであり、その下の第1段目タンク

は上層と下層に分かれている。なお、文献4.では長短期流出両用モデルは3段のタンクで構成されると定義され、図1(a)の最上段タンクは図示されていない。これは最大降雨遮断量 z_0 、および初期貯留量 S_0 は同定対象外として取り扱うことによるものと思われる。しかし、以下では z_0 も同定対象とした検討も行うため、図1(a)のように形式的に第1段目タンク上部に降雨遮断タンクを付加しておく。

第1～3段目タンクの連続の式は次式で与えられる。

$$\frac{dS_1}{dt} = r_a - f - Q_1 - Q_2 \dots (1) \quad \frac{dS_2}{dt} = f - Q_3 - g_1 \dots (2)$$

$$\frac{dS_3}{dt} = g_1 - Q_4 - g_2 \dots (3) \quad \frac{dS_4}{dt} = g_2 - Q_5 \dots (4)$$

ここに、 $S_1 \sim S_4$: 貯留量 (mm), r_a : 降雨遮断効果を受けた後の降雨強度 (mm/h), f : 浸透強度 (mm/h), $g_1 \sim g_2$: 下段タンクへの供給量 (mm/h), $Q_1 \sim Q_6$: 各流出成分に対応する流出高 (mm/h) で Q_1 は表面流出, Q_2 は早い中間流出, Q_3 は遅い中間流出, Q_4, Q_5 は地下水流出を表わしている。

Q, g は貯留量が孔の高さを越える場合にのみ流出があるものとするが、 f は下層の空容量に比例すると仮定し、それぞれ以下のような式で表示されている。

$$Q_1 = A_1(S_1 - z_1)^m, \quad m = 5/3 \quad \dots (5)$$

$$Q_2 = A_2 S_1 \quad \dots (6), \quad Q_3 = A_3(S_2 - z_3) \quad \dots (7)$$

$$Q_4 = A_4 S_3 \quad \dots (8), \quad Q_5 = A_5 S_4 \quad \dots (9)$$

$$f = B_1(z_2 + z_3 - S_2) \quad \dots (10)$$

$$g_1 = B_2 S_2 \quad \dots (11), \quad g_2 = B_3 S_3 \quad \dots (12)$$

ここに、 A_1 : 定数 ($\text{mm}^{-3/5} \cdot \text{h}^{-1}$), $A_2 \sim A_5$: 定数 (h^{-1}), $B_1 \sim B_3$: 定数 (h^{-1}), $z_1 \sim z_3$: 流出孔の高さ (mm) である。

なお、速い中間流に相当する(6)式は i) $S_1 > z_1$ にも適用し、中間流出量最大値は想定しない場合、ii) $S_1 > z_1$ では $Q_2 = A_2 z_1$ とし、中間流出量の上限を設定する場合の2つの計算法が考えられる。

計算の単位時間 Δt は洪水時と低水時とで適宜選択できるが、低水流出計算のときは通常 $\Delta t = 24$ 時間としている。計算値を日単位で表示するときは、当然のことながら式(1)～(12)中の降雨強度、流出高、浸透高等の単位は mm/day に、また定数 A_1 は $\text{mm}^{-3/5} \cdot \text{day}^{-1}$ 、定数 $A_2 \sim A_5, B_1 \sim B_3$ は day^{-1} に変わる。

また蒸発散に伴う貯留量の減少強度 E には次式が採用されている。

$$E = \alpha_0 E_{\text{pan}} = E_1 + E_2 + E_3 \quad \dots (13)$$

$$E_1 = \gamma \theta E, \quad E_2 = (1 - \gamma) E, \quad E_3 = \gamma(1 - \theta) E$$

$$\theta = 1; S_1 > 0 \text{ or } S_2 \geq z_3 \quad \dots (14-1)$$

$$= S_2/z_3; S_1 = 0 \text{ and } S_2 < z_3 \quad \dots (14-2)$$

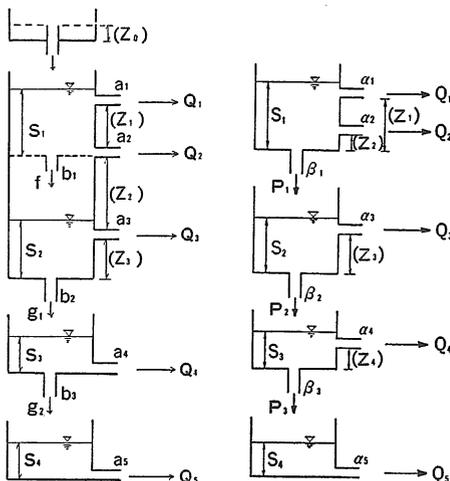


図1(a) 長短期流出両用モデル (角屋・永井法)

図1(b) 菅原のタンクモデル

ここに、 E_{pan} は計器総蒸発量を 各月の日数で割った月平均蒸発強度、 r ：蒸発散量の第1段目タンク上層部への振分け比で角屋らの京都市カマ谷流域での検討結果では $r=0.6$ が最良とされている。 α_0 は係数で通常 $\alpha_0=1$ として計算される。

さらに、次式により降雨遮断可能量を算定し、最上段タンクへの入力降雨より、降雨遮断量を差し引いたものを第1段目タンク上層部への入力降雨としている。

$$I = (z_0 - S_{00}) \{1 - \exp(-R/z_0)\} \quad \dots\dots(15)$$

ここに、 I ：降雨遮断可能量 (mm)、 R ：累加雨量 (mm)、 z_0 ：最大遮断量 (mm)、 S_{00} ：初期貯留量 (mm)。

このように本流出モデルは以下のような特徴をもつ。

i) 降雨遮断量、および Manning 型表面流、速い中間流、遅い中間流、地下水流の各流出成分が組み込まれている。ii) 式(10)のように浸透強度 f が第1段目タンク下層の空容量に比例するという仮定を導入することにより、上層に f に見合うだけの十分な貯留量がある場合、浸透能の時間的変化は Horton の浸透能式と同形式の表現となる。iii) 従来の洪水流出解析法で常に問題となる有効降雨が本流出モデルでは自動的に推定されるモデル構造となっている。

ところで、図2に示すような流域ブロックを考えると、定常流のもとでは次式が成立する。

$$Q = 2q_s L = q_* A / 3.6 \quad \dots\dots(16)$$

$$A = 2BL \times 10^{-6} \quad \dots\dots(17)$$

ここに、 Q ：ブロック末端流量 (m³/s)、 q_s ：単位幅横流入量 (m²/s)、 L ：河道長 (m)、 q_* ：流出高 (mm/h)、 A ：流域面積 (km²)、 B ：平均斜面長 (m) である。

したがって、流出高 q_* は次式で表現される。

$$q_* = (q_s / B) \times 3.6 \times 10^6 \quad \dots\dots(18)$$

そこで、角屋・永井法の長短期流出両用モデルのモデル定数を雨水流法に用いられているモデル定数と対応づけて理解できるように、上述の式(5)~(10)を以下のように書き改めモデルの最適同定を行うことにする。

$$Q_i = \frac{\alpha}{B} \frac{\sqrt{s}}{a_{1N}} (S_i - z_i)^m = \frac{\alpha}{B} \left(\frac{S_i - z_i}{a_{1k}} \right)^m \quad \dots\dots(19)$$

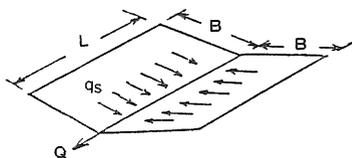


図2 流域ブロック

$$Q_2 = \frac{\alpha}{B} a_2 S_1 \dots\dots(20), \quad Q_3 = \frac{\alpha}{B} a_3 (S_2 - z_3) \dots\dots(21)$$

$$Q_4 = \frac{\alpha}{B} a_4 S_3 \dots\dots(22), \quad Q_5 = \frac{\alpha}{B} a_5 S_4 \quad \dots\dots(23)$$

$$f = \frac{\alpha}{B} b_1 (z_2 + z_3 - S_2) \quad \dots\dots(24)$$

$$g_1 = \frac{\alpha}{B} b_2 S_2 \quad \dots\dots(25) \quad g_2 = \frac{\alpha}{B} b_3 S_3 \quad \dots\dots(26)$$

ここに、 s ：平均斜面勾配、 B ：平均斜面長 (m)、 a_{1N} 、 a_{1k} ：それぞれ表面流モデルの等価粗度 N (m^{-1/3}・s)、斜面流定数 $k = (N/\sqrt{s})^{0.6}$ (m^{-1/3}・s^{3/2}) に相当する定数、 m ：定数 (=5/3)、 a_2, a_3 ：中間流モデルの定数 $k_I s / \lambda$ (k_I ：表層の透水係数、 λ ：表層の有効間隙率) に相当する定数 (cm/s)、 a_4, a_5 ：地下水流を規定する定数 (cm/s)、 $b_1 \sim b_3$ ：鉛直方向の浸透量を規定する定数 (cm/s)、また、 $Q_1 \sim Q_5, f, g_1 \sim g_2$ の定義は前述のとおりで、いずれも mm/h の単位をもつ。 α ：換算係数で、計算単位時間を Δt 秒としたとき、 $\alpha = \Delta t \times 10^{-2}$ であるが、各変量に上述のような単位を用いると $\alpha = 36$ となる。

なお、図1(a)の流出モデルは上述の式(19)~(26)に示すモデル定数を用いて表示してある。

3. 流出計算法

角屋・永井の長短期流出両用モデルは前述のように洪水流出と長期流出を同時に解析できるモデル構造となっており、実際に流出計算を進める際に、計算時間きざみ Δt は洪水流出時と低水流出時とで適宜選択できる。また、菅原のタンクモデルでは最上段タンクへの入力降雨をパルス状に与えるのに対し、本流出モデルでは計算単位時間 Δt 内で降雨強度は一定として、各段タンクの微分貯留方程式を連続的に解く手法が採用されている。その際、式(1)~(4)の解法には改良オイラー法を適用することにより、任意時刻 t の各段タンクの貯留量 $S_i(t)$ より計算単位時間 Δt 後の貯留量 $S_i(t + \Delta t)$ を精度よく推定するという配慮がなされている。

すなわち、図1(b)に示す菅原のタンクモデルでは、たとえば第1段タンクについて次式によりタンク貯留量、および流出高を算定する。

$$S_1(t + \Delta t) = S_1(t) + \Delta t \left\{ r(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^2 Q_i(t) - \beta S_1(t) \right\} \quad (27)$$

$$Q_i(t) = \begin{cases} 0 & , S_i(t) \leq z_i \\ \alpha_i \cdot (S_i(t) - z_i) & , S_i(t) > z_i \end{cases} \quad \dots\dots(28)$$

ここに、 $S_i(t)$ ：時刻 t における貯留高 (mm)、 $r(t)$ ：時刻 $t \sim (t + \Delta t)$ 間の降雨強度 (mm/h)、 $Q_i(t)$ ：時刻 t における i 番目の流出孔からの流出高 (mm/h)、 z_i ： i 番

目の流出孔の高さ (mm), α_i : i 番目の流出孔の係数 (h^{-1}), β : 下方への浸透を表わす浸透孔の係数 (h^{-1}), Δt : 計算時間間隔 (h).

一方, 改良オイラー法を適用した長短期流出両用モデルでは以下の手順で計算単位時間 Δt 後の各段タンク貯留量 $S_i(t+\Delta t)$ が算定される. 時刻 t の貯留量 $S_i(t)$ を既知とし,

- ①微分方程式(1)~(4)の右辺の値 $h\{S_i(t)\}$ を計算する.
- ② $t+\Delta t/2$ のときの貯留量 $S_i(t+\Delta t/2)$ を $S_i(t+\Delta t/2) = S_i(t) + h\{S_i(t)\} \cdot \Delta t/2$ より求める.
- ③ $S_i(t+\Delta t) = S_i(t) + h\{S_i(t+\Delta t/2)\} \cdot \Delta t$ を求める.

計算単位時間 Δt ごとの流出高は③で求まる貯留量にもとづいて, 式(9)~(10)から算定する.

以下, 角屋・永井法の長短期流出両用モデルによる流出解析は i) 式(9), (10)で示される菅原のタンクモデル法のように入力降雨をパルス状に与える計算手法 (以下, 計算 Case I とする) と, ii) 改良オイラー法を適用した角屋・永井法本来の流出計算手法 (以下, 計算 Case II とする) との2通りの計算手法を適用し, 比較検討することにする.

また, 長短期流出両用モデルの最適同定には SP 法を用いる. さらに最適モデル定数を求めるための評価基準として次式に示す χ^2 基準を採用する.

$$J_{\chi^2} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})^2}{Q_{oi}} \rightarrow \min \quad \dots\dots(29)$$

ここに, J_{χ^2} : 誤差評価基準 (mm/h), Q_{ci} : 計算流出高, Q_{oi} : 観測流出高, M : データ数.

また次式で表わされる相対基準値 (%) も計算し, 併示することにする.

$$J_{RE} = \frac{100}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|Q_{ci} - Q_{oi}|}{Q_{oi}} \quad \dots\dots(30)$$

計算効率を左右する変数の順序づけと基準化方式, および物理的に不都合なモデル定数が採択されないようにするペナルティ関数の設定は角屋・永井の解説⁶⁾を準用する.

4. 長短期流出両用モデルによる流出解析事例

4.1 模擬降雨による流出シミュレーション

ここでは, 長短期流出両用モデルによる流出計算において, 3. で述べた計算 Case I と II とで計算流量にどのような差異が生じるかを模擬降雨を用いて検討してみる.

入力降雨波形としては i) 前方主山型, ii) 中央主山型, iii) 後方主山型の3種を考える.

図3~5に図中の上段に示すような降雨波形を与えた

ときのそれぞれの流出量ハイドログラフが示されている. いずれの場合も, 総雨量は 290mm と等しく, また各図とも計算 Case I, II による流出量ハイドログラフを対比したものである. なお, これらの流出計算に用いた流出モデル定数は図中に示す. また入力降雨の単位時間 $\Delta t_r = 3600 \text{ sec}$, 平均斜面長 $B = 360 \text{ m}$, 平均斜面勾配 $s = 0.1$ とした計算例である.

表1にはこれらの流出量ハイドログラフのピーク流量およびその発生時刻を示す. いずれの場合も, 改良オ

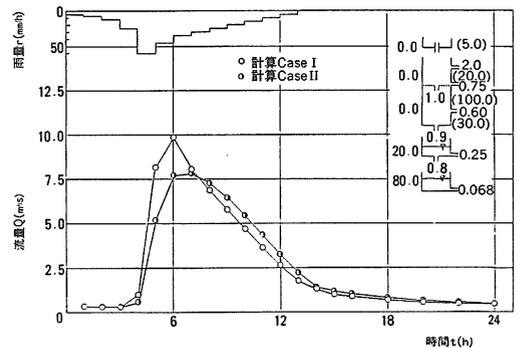


図3 模擬降雨による流出シミュレーション (前方主山型)

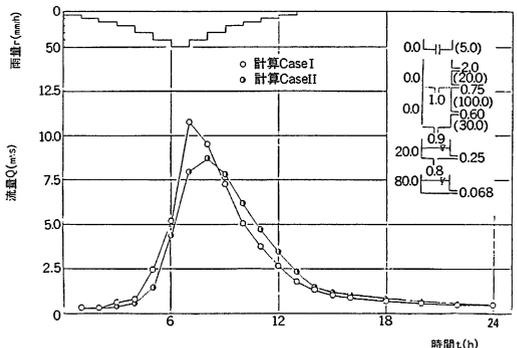


図4 模擬降雨による流出シミュレーション (中央主山型)

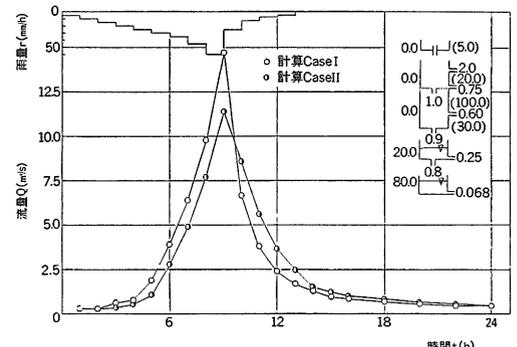


図5 模擬降雨による流出シミュレーション (後方主山型)

ラー法を適用した角屋・永井法の計算 Case II によるピーク流量が計算 Case I に比較し、約80%前後緩和されており、またピーク発生時刻も前方主山型、および中央主山型の降雨波形の場合、計算時間きざみ Δt_c だけ遅くなっている。また、ハイドログラフ立上り部、低減部とも計算 Case II の方が計算 Case I より、それぞれ緩やかな増加、および減少傾向にあることが指摘できる。

図6～8は入力降雨の単位時間 $\Delta t_r=3600 \text{ sec}$ は同一とし、計算単位時間 Δt_c を 3600 sec からその $\frac{1}{2}$ の 1800 sec

表1 降雨波形のパターンとピーク流量 Q_P およびその発生時刻 t_P

No.	計算 Case	降雨波形タイプ					
		前方主山型		中央主山型		後方主山型	
		t_P (h)	Q_P (m^3/s)	t_P (h)	Q_P (m^3/s)	t_P (h)	Q_P (m^3/s)
1	I	6:00	9.82	7:00	10.75	9:00	14.68
2	II	7:00	7.80	8:00	8.70	9:00	11.37
3	II	7:00	7.86	8:00	8.92	9:00	12.03

備考：No 1, 2... $\Delta t_r=\Delta t_c=3600 \text{ sec}$
No. 3... $\Delta t_r=3600 \text{ sec}, \Delta t_c=1800 \text{ sec}$

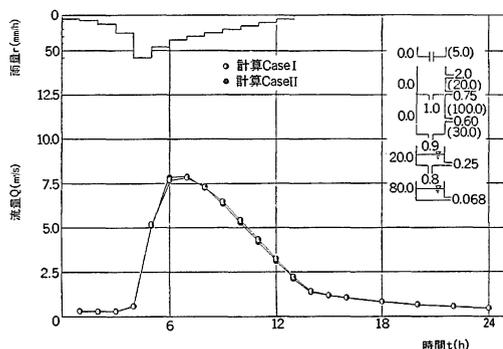


図6 模擬降雨による流出シミュレーション (前方主山型)

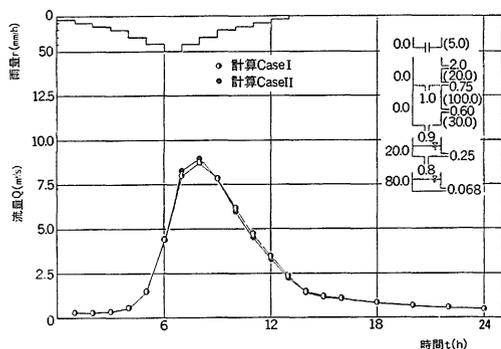


図7 模擬降雨による流出シミュレーション (中央主山型)

sec とした場合の流出量ハイドログラフを比較したものである。表1の最下欄に $\Delta t_r=3600 \text{ sec}, \Delta t_c=1800 \text{ sec}$ とした場合のピーク流量およびその発生時刻が示してある。本計算例では、ピーク流量発生時刻は変化しないが、 $\Delta t_c=1800 \text{ sec}$ とした計算値の方が、ハイドログラフピーク部が若干大きく評価され、ハイドログラフ低減は早くなる傾向となっている。

以上の数値シミュレーション結果より、同一降雨波形、同一の流出モデルを用いても、計算 Case I, II とで、ピーク流量および流出量ハイドログラフの形状に差異が生じることが明らかになった。これらのことは、長短期流出両用モデルの最適同定に際し、計算 Case I と II とで異なったモデル定数が得られることを意味している。

4.2 河川流域における流出解析事例

まず、斐伊川水系の新伊萱地点 (集水面積 $A=732.4 \text{ km}^2$) における日流量データにもとづく長期流出解析を計算 Case I の手法を適用して検討してみる。

一般に水年は渇水期に始まり、渇水期に終る連続した12ヶ月と定義されている。そこで、斐伊川水系の流況特性より、水年を11月1日より翌年10月31日までとし、表2に示すように、昭和46年11月1日～昭和48年10月31日までの2年間の日流量データを解析対象とする。

昭和47年7月には梅雨末期の集中豪雨による異常大出水があり、また翌48年は松江市では134日にも及ぶ記録的な給水制限が行われた異常渇水の年であった。そこで解析対象とする上述2年間を便宜的にそれぞれ洪水年、渇水年と呼ぶことにする。表3に洪水年、渇水年の豊水量、平水量、低水量、渇水量を比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) で示す。()内の数値は日流出高 (mm/day) に換算した値である。

また、日雨量は流域内の鳥上、馬木、阿井、吉田の4地点での観測日雨量を算術平均し、流域平均日雨量とし

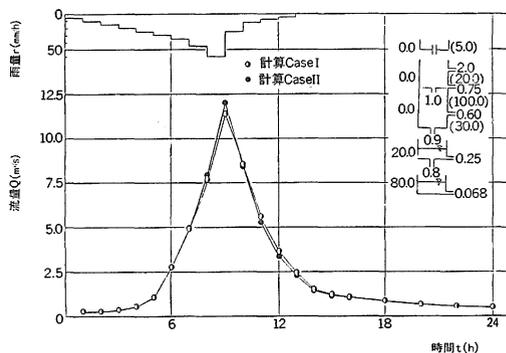


図8 模擬降雨による流出シミュレーション (後方主山型)

表2 解析対象出水

No.	流域	年月日	総雨量 R(mm)	ピーク流量 発生時刻	ピーク流量 Q _P (m ³ /s)	流量観測地点	流域面積 A(km ²)
1	斐伊川	S46.11.1~S47.10.31	2316	S47.7.12	1387	新伊萱地点	732.4
2	〃	S47.11.1~S48.10.31	1809	S48.4.17	185	〃	〃
3	〃	S47.7.9~7.16	595.7	7.11, 19:00	398	三刀屋	195.8
4	農地造成域	S58.7.22~7.23	394.5	7.23, 7:00	8.3	音長川防災ダムサイト	0.296
5	下狩川	S44.6.25~6.27	196.0	6.25, 22:30	9.4	流域最下流端	1.32

表3 洪水年、渇水年の豊水量、平水量、低水量、渇水量（新伊萱地点）

対象年	豊水量	平水量	低水量	渇水量
洪水年	0.0485 (4.19)	0.0355 (3.07)	0.0250 (2.16)	0.0124 (1.07)
渇水年	0.0561 (4.84)	0.0286 (2.47)	0.0089 (0.77)	0.0075 (0.65)

表4 蒸発量

月	1	2	3	4	5	6
日平均蒸発量 (mm/day)	0.84	1.30	1.86	2.90	3.84	4.25
月	7	8	9	10	11	12
日平均蒸発量 (mm/day)	4.60	4.53	3.18	2.11	1.22	0.82

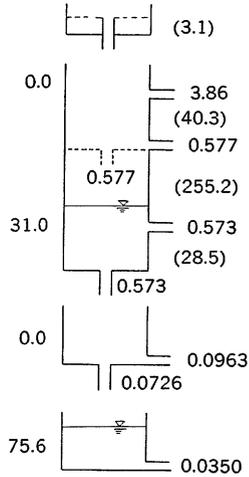


図9 最適モデル定数（斐伊川水系新伊萱地点, mm/day, B=2816m)

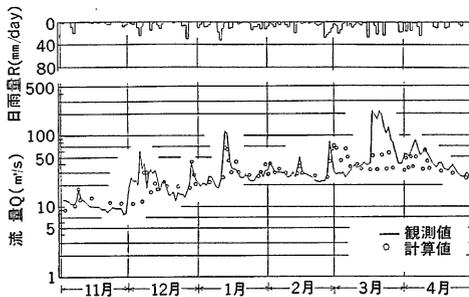


図10(a) 洪水年の解析例 (S46.11.1~47.4.30, Δt=1 day)

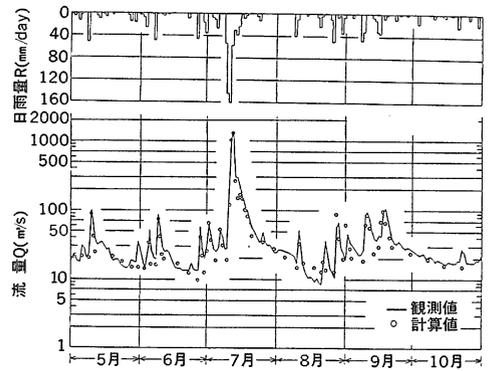


図10(b) 洪水年の解析例 (S47.5.1~47.10.31, Δt=1 day)

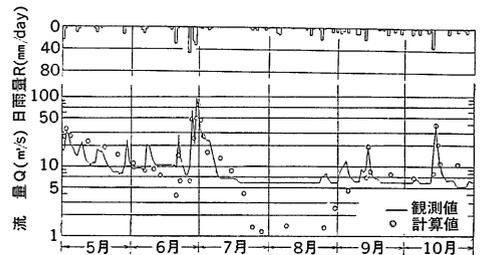


図10(c) 渇水年の解析例 (S48.5.1~48.10.31, Δt=1 day)

た。なお、日流量、および日雨量はそれぞれ建設省の「日流量年表」、「日雨量年表」より得たものである。

また、長期流出解析を行う場合、蒸発量のデータは不可欠な入力情報となるが、ここでは米子測候所で観測された14年間の月平均蒸発量を日蒸発量に換算して用いることにした。用いた値を表4に示す。

図9は洪水年の観測データを用いて最適同定した流出モデルである。同図に示すモデル定数を用いて流出解析した結果を図10(a), (b), (c)に示す。

図9の流出モデルによる観測流出量ハイドログラフの再現性は洪水年、渇水年それぞれ相対誤差で23.7%、35.8%であった。図10(a)に示すように、冬期、および春先にかけての中小出水時の再現性は良好とはいえない。積雪、融雪の影響を流出モデルに考慮していないことから、特に3月の再現性は著しく悪くなっている。昭和47年5～9月にかけての出水ピーク部の再現性は図10(b)に示すようになりに良好と思われる。しかし、図10(c)に示すように、渇水年の昭和48年7～8月は観測値と著しい差異が生じている。

図11, 12には出水ピーク流量についての計算値と観測値とを対比して示す。これらの図より、やはり出水ピーク部の流量が過少評価されている傾向が指摘できるが、以前検討した菅原タンクモデルによる解析結果より、観測流量の再現性は向上したといえる。

今後、他の出水期間も加えて、さらに観測流量の再現

性を検討する場合、やはり角屋・永井法本来の計算手法のように、洪水時、低水時と計算単位時間を調節して解析する必要があると思われる。

次に表2の第3欄に示す昭和47年7月豪雨時の斐伊川水系三刀屋地点での観測出水について解析した結果を述べる。

表5に計算 Case I, II により同定された最適モデル定数を示す。計算 Case I では最大降雨遮断量 z_0 を一定の3mmとした場合と z_0 も変数として最適同定の対象とした場合との結果が示してある。表5に示すように z_0 も最適同定の変数とした方が、若干観測値の再現性が良くなる傾向がみられたので、計算 Case II では z_0 も最適同定の変数に加えて、モデル定数を求めた。

図13は最適モデル定数を用いたときの解析結果を観測値と比較したものである。洪水時のみを同定対象期間としたが、本出水のような複峰型出水に対し、出水ピーク部およびハイドログラフ立上り部、低減部とも再現性はほぼ十分と判断される解析例といえよう。

図14は益田市の農地造成域において観測された出水を対象に解析した例である。

本流域は国営総合農地開発事業により、自然丘陵地帯を改良山成工により施工された農地造成域の一部で、集水面積は0.296 km²である。集水域内では現在、主に

表5 最適モデル定数 (斐伊川水系, 三刀屋地点)

モデル定数	計算 Case I		計算 Case II
	$z_0=3\text{mm}$ (一定)	z_0 を最適化	
a_{1k}	2.794	2.764	2.667
a_2	1.143	1.315	2.544
a_3	1.143	1.315	2.030
a_4	0.425	0.390	0.633
a_5	—	—	0.177
b_1	0.792	0.746	0.680
b_2	0.268	0.335	0.465
b_3	—	—	0.243
z_0	3.0	15.8	15.8
z_1	5.7	7.6	12.1
z_2	397.0	434.4	506.6
z_3	212.4	200.9	204.3
S_0	0.0	0.0	0.0
S_1	0.0	0.0	0.0
S_2	0.0	0.0	0.0
S_3	29.2	38.4	18.1
S_4	—	—	13.7
$J_{\gamma S}$	0.0684	0.0640	0.0602
$J_{RE}(\%)$	17.66	16.55	15.89
$Q_P(\text{m}^3/\text{s})$	350	351	357

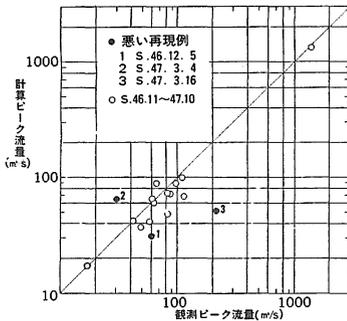


図11 ピーク流量の比較 (洪水年)

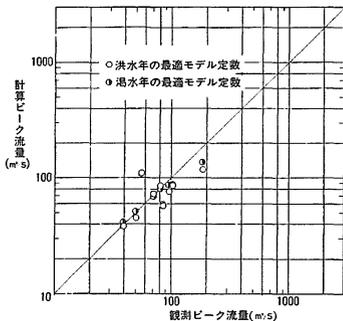


図12 ピーク流量の比較 (渇水年)

飼料作物、ブドウが栽培され、部分的に野菜、タバコが作付されている。また丘陵地の表層地質は都野津層とよばれる洪積層が主体をなしている。

図14には入力降雨をパルス状に与える計算 Case I, および角屋・永井法本来の計算手順による計算 Case II についての解析結果が併示してある。相対誤差は計算 Case I, IIそれぞれ 25.6%, 23.3%と大差ないが、出水ピーク部の再現性は計算 Case II の方が良好である。このように、菅原タンクモデルで解析した結果より、角屋・永井法の長短期流出両用モデルによる解析値の方が観測流量の再現性に優れていることが実証された。

また図14には計算 Case II についての計算流量 Q_c と観測流量 Q_0 との差 ($Q_c - Q_0$) の経時変化も併示して

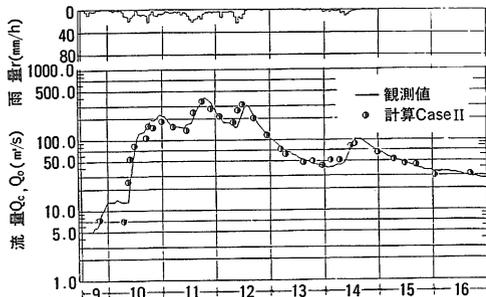


図13 斐伊川水系 (三刀屋地点) での解析例 ($\Delta t=1$ h, $B=3583$ m)

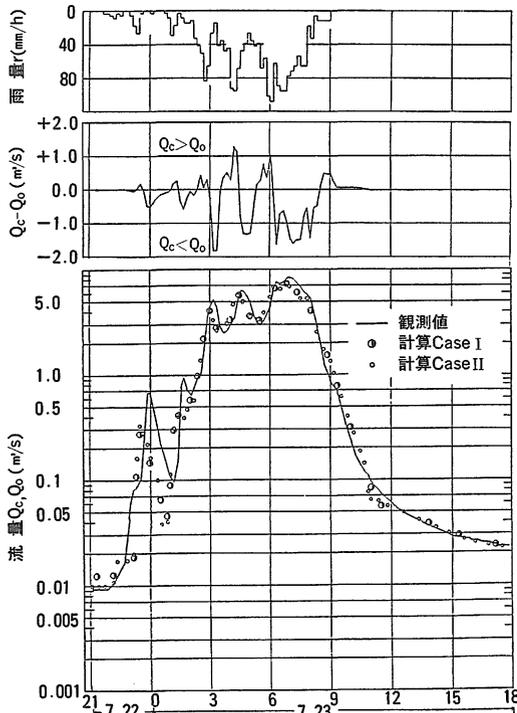


図14 農地造成域での解析例 ($\Delta t=600$ sec, $B=138$ m)

ある。この ($Q_c - Q_0$) の変化状況から、やはり出水ピーク部の計算値が観測値に比較し、過少評価される傾向にあることが指摘できる。たとえば、観測ピーク流量 $8.32\text{m}^3/\text{s}$ に対し、計算値は $7.23\text{m}^3/\text{s}$ でその発生時刻は観測値より10分早くなっている。

表6には計算 Case I, II のそれぞれについて最適同定されたモデル定数を示す。ここで、評価関数 $J_{\chi S}$ の値が計算 Case I, II とで大きく異なっている。これは計算 Case I では流出高を $\text{mm}/10\text{min}$ の単位で計算し、この値をそのまま式(2)に代入して評価関数 $J_{\chi S}$ を求めたのに対し、計算 Case II では計算単位時間10分毎の流出高を mm/h に換算し、評価関数 $J_{\chi S}$ を算定したことの差異にもとづくものである。

表6の計算 Case I に示すように最大降雨遮断可能量 z_0 も同定の対象に加えた方が観測値の再現性が向上し、評価関数の値が小さくなる傾向が認められた。そこで、計算 Case II では z_0 も同定対象の変数として、最適モデル定数を求めた。計算 Case II で最適同定された z_2 の値が非常に小さく評価されているが、これは異常大出水時のみを解析対象としたことに起因していることも考えられる。したがって、低水流出成分を規定するパラメータについては、今後、さらに他の中小出水、および低水流出を含めた検討が必要と思われる。

表6 最適モデル定数 (農地造成域)

モデル定数	計算 Case I		計算 Case II
	$z_0=2\text{mm}$ (一定)	z_0 を最適化	
a_{1k}	1.974	1.968	1.543
a_2	2.244	2.244	2.244
a_3	2.244	2.244	2.244
a_4	0.425	0.299	0.393
a_5	0.0132	0.0159	0.0109
b_1	2.238	2.238	2.238
b_2	2.236	2.237	2.238
b_3	2.233	2.221	2.237
z_0	2.0	3.4	3.4
z_1	5.4	5.6	5.0
z_2	6.4	3.4	0.003
z_3	5.6	5.7	10.5
S_0	0.0	0.0	0.0
S_1	0.0	0.0	0.0
S_2	0.0	0.0	0.0
S_3	0.013	0.0008	0.0008
S_4	34.8	82.7	51.4
$J_{\chi S}$	0.1851	0.1807	2.048
$J_{RE}(\%)$	24.07	25.61	23.28
$Q_P(\text{m}^3/\text{s})$	7.25	7.30	7.23

表7 種々の最大降雨遮断量 z_0 に対する最適モデル定数 (計算 Case II)

z_0	5.0	10.0	15.0	20.0	24.0
a_{1k}	2.156	2.154	2.138	2.126	2.103
a_2	0.672	0.650	0.749	0.831	0.882
a_3	0.672	0.659	0.469	0.469	0.670
a_4	0.286	0.282	0.233	0.238	0.248
a_5	0.064	0.057	0.060	0.063	0.063
b_1	0.217	0.240	0.241	0.254	0.240
b_2	0.217	0.240	0.241	0.254	0.240
b_3	0.217	0.240	0.241	0.244	0.168
z_1	36.6	32.4	28.4	25.3	23.4
z_2	43.4	40.2	32.3	23.1	17.4
z_3	19.8	19.8	30.7	29.3	29.5
S_0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S_1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S_2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S_3	60.9	65.3	68.7	65.4	65.2
S_4	0.4	21.1	60.9	68.7	58.9
$J_{\chi S}$	0.016	0.015	0.015	0.014	0.014
J_{RE} (%)	7.2	6.8	7.0	6.7	6.7
Q_P (m ³ /s)	8.50	8.53	8.58	8.63	8.68

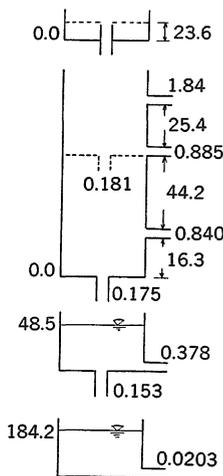


図15 最適モデル定数 (計算 Case II, $\Delta t=1800$ sec, $B=546$ m)

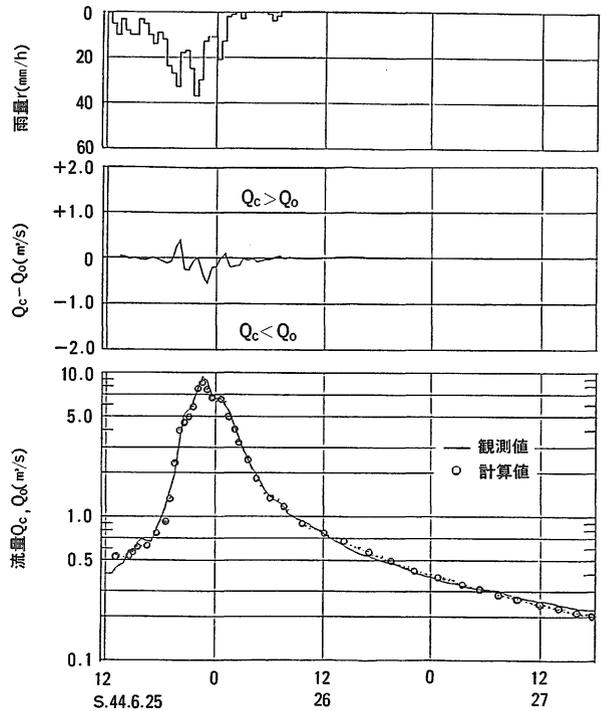


図16 下狩川流域における解析例 ($U_* = 6$, $\Delta t=1800$ sec, $B=546$ m)

上述の斐伊川水系三刀屋地点、および農地造成域での洪水時を対象にした解析過程で、長短期流出両用モデルの最大降雨遮断量 z_0 も最適同定の対象とした方が観測値の再現性が向上する傾向が指摘された。そこで、表2の第5欄に示す流域面積 $A=1.32 \text{ km}^2$ の下狩川流域における観測出水を対象に降雨遮断効果についてさらに検討してみることにする。

表7に $z_0=5, 10, 15, 20, 24 \text{ mm}$ とした場合、ピーク流量、評価関数値、モデル定数がどのように評価されるかについての算定結果を示す。同表より、 z_0 の値が大きい程、ピーク流量が大きく算定され、同時に評価関数、相対誤差も小さくなる傾向が指摘される。

z_0 も最適同定の対象変数として解析した結果、計算 Case I, II それぞれ z_0 の値は、22.7mm, 23.6mm と評価された。また、ピーク流量もそれぞれ 8.691, 8.622 m^3/s と $z_0=5 \text{ mm}$ と固定して最適同定した場合よりも僅かながら、大きい値が得られた。計算 Case II による最適モデル定数を図15に示す。また図16は計算 Case II による流出量ハイドログラフの再現例である。観測ピーク流量 9.355 m^3/s に対し、計算値は 8.622 m^3/s と約 7.8% 過少評価されているが、観測流出量ハイドログラフの再現性は十分といえよう。

5. あとがき

ここでは、最近、角屋・永井によって開発提案された洪水流出および低水流出を同時に解析できる長短期流出両用モデルの適応性を、斐伊川流域、益田市の農地造成域、および下狩川流域の水文観測資料にもとづいて検討した。このモデルには Manning 型表面流、速い中間流、遅い中間流、地下水流の各流出成分が組み込まれている。そこで、本流出モデル定数を雨水流法に用いられているモデル定数と対応づけて理解できるように、基礎式中のモデル定数の表示を流域平均斜面長、および換算係数を用いて書き改めて、モデルの最適同定を行った。その際、菅原のタンクモデルの計算手法に用いられているようにタンクへの入力降雨をパルス状に与える計算手法と、計算の時間きざみ Δt 内で降雨強度は一定とし、

各タンクの微分貯留方程式を改良オイラー法で解くという角屋・永井法本来の計算法とを比較検討した。

模擬降雨を用いた検討例から、同一モデル定数を用いた場合、角屋・永井法による計算値の方が計算ピーク流量が小さくなり、計算ハイドログラフ立上り部、低減部ともそれぞれ緩やかな増加、および減少傾向を示すなど、両計算手法による計算流出量ハイドログラフの特性を明らかにすることができた。

また、実流域での解析結果より、最大降雨遮断量を最適同定の対象変数に加えた場合、その値は3~5mmより大きくなり、かつ若干ながら観測値の再現性は向上することが指摘された。このことは樹木等による降雨遮断量のほかに流域地表面における凹地貯留、その他の要因による貯留効果を組み入れたモデル構造も検討する余地があることを示唆しているように思える。また、モデルの最適同定結果より、菅原のタンクモデル流にパルス状の雨を与える計算手法より、角屋・永井法本来の計算手法による計算値の方が観測流出量ハイドログラフの再現性に優れていることが指摘された。唯、本流出モデルは流出モデルの分類としては貯留法に分類されるため、従来指摘されているように出水ピーク部については計算値が若干過小評価の傾向にあることが認められた。

なお、本報告では本流出モデルで意図されている洪水と低水を同時に解析するという特長を十分生かした解析はできなかったが、以前に菅原のタンクモデルで解析した結果より、観測流量の再現性は十分向上することが実証できた。

最後に、本研究をすすめるにあたり、下狩川流域の水文資料を提供して頂き、かつ御指導を賜った京都大学防災研究所角屋睦教授、および計算・資料整理に協力を賜った本学の門城祐司事務官、ならびに農業水工学専攻生坂本智君（現、島根県農林水産部）に深甚なる感謝の意を表する次第である。

なお、本報告は昭和59、60年度文部省科学研究費による研究成果の一部であり、また数値解析には島根大学電子計算センター FACOM 140-F システムを用いたことを付記する。

参 考 文 献

1. 福島 晟・田中礼次郎：島大農研報，17：92-99，1983。
2. 永井明博・角屋 睦：京大防災研年報，26(B-2)：261-272，1983。
3. 角屋 睦・永井明博：昭和58年度日本農土総研報，27-42，1984。
4. 角屋 睦・永井明博・塚本浩二：昭和59年度農土講要旨集，190-191，1984。
5. 永井明博・角屋 睦：京大防災研年報，23(B-2)：239-247，1980。
6. 角屋睦・永井明博：農土学会誌，48(12)：51-59，1980。