

不浸透面積率を考慮した長短期流出両用モデルによる流出解析

福島 晨・武田育郎・森 也寸志

Runoff Analysis by the Long and Short Terms Runoff Model considered the Ratio of Impermeable Area

Akira FUKUSHIMA, Ikuo TAKEDA and Yasushi MORI

Abstract. This report describes the application of the long and short terms runoff model(LST-II), which is developed by Kadoya and Nagai (1988) for analyzing both flood and long term runoff successively, to consider the effects of the land use form in the runoff process. The three type models are considered to introduce the effects of non-uniformity in the infiltration phenomena at top layer zone of slope system. The first attempt is discussed by runoff model I, II, in which infiltration capacity at the ground surface is limited to a constant value or a same form of Horton curve induced by the change of subsurface condition. The third type of the modified LST-II model, runoff model III, is proposed to express the effects of distribution of permeable area and impermeable one in the basin. The impermeable area is developed by urbanization in a residential district and integrated rural improvement. In the runoff model III, the upper zone of first tank is divided two parts by the ratio of permeable area and impermeable one in the basin. The left part expresses the impermeable field to occur surface runoff easily. And the right one assigns the permeable field to arise both of surface runoff and subsurface one.

These three runoff model is adapted to the experimental basin at land reclamation area in Masuda City. The runoff model I, II results almostly the same reproducibility of the observed hydrograph comparing the LST-II model. While, it is shown that the analysis by runoff model III improves the reproducibility of the peak discharge in observed hydrograph about 9 % than the LST-II model.

Keywords : Runoff model; runoff analysis; flood runoff

ま え が き

自然丘陵山地の部分開発域あるいはスプロール的に混住化社会が進展する農村地帯等を含む地域を対象に流出特性を検討する際、その流域の地形・土地利用形態に応じた分布型の流域モデルを設定し、雨水流モデルに代表される、いわゆる分布定数型流出モデルによる解析が望まれる。一方、菅原タンクモデル、貯留関数法、長短期流出両用モデル等の貯留型流出モデルは、斜面流、河道流を区別することなく流出過程を極端に集中化したモデルであるから、雨水流モデルならば説明できるはずのい

くつかの現象が説明できなくなる欠点を持っているといえる。したがって、自然丘陵山地の部分開発域等を含む流域に貯留型流出モデルを適用する際、流域の都市化現象と類似のいくつかの地文条件及び水文条件の変化をどのように流出モデルに組入れるかが課題となる。

本報告では、開発地域にみられるような舗装道路面積や水路網の具備の効果、あるいは地表条件の面積的な分布の効果を貯留型流出モデルによる流出解析に取入れることを目的に、長短期流出両用モデルを活用した手法でこうした課題への試みを意図して行った若干の検討例について述べる。

1. 流出モデルの設定

角屋・永井によって小試験流域の資料に基づいて開発された長短期流出両用モデルLST-II¹⁾はいくつの特長を持っているが、特にHortonの浸透能式が組込まれている構造となっていることにより、補給能モデルと等価な低水流出解析を可能とした点は本流出モデルの最大の特長といえる。そして、一般河川流域での適用例、あるいはダム流域における洪水のオンライン予測への活用例からも、実用的には十分満足できる流出モデルであることが実証されている。しかしながら、あくまでも極度に集中化したモデルであるから、流域の内部構造をより考慮しようとしても限界がある。そこで、ここでは前述の課題に対処するため、本流出モデルの基本構造を活用しつつ、以下に示す3タイプの流出モデルI、II、IIIを設定し、その適用可能性を検討することとする。

流出モデルI:

降雨遮断量;

まず、樹木等による降雨遮断、凹地貯留効果は、LST-IIモデルで採用されている次式の形で与えられるものとする。なお、後述の流出モデルII、IIIのいずれにおいても以下の(1)~(3)式を適用して降雨遮断量を算定することとする。

$$r_{a,i} = 3600 \{R_i - (I_i - I_{i-1})\} / t_r \quad \dots (1)$$

$$I_i = (Z_0 - S_{00}) \{1 - \exp(-R_i / Z_0)\} \quad \dots (2)$$

$$R_i = \sum r_i \cdot \Delta t_r / 3600 \quad \dots (3)$$

ここに、 R_i : 入力降雨の単位時間 Δt_r 秒としたとき、 $i \Delta t_r$ 時刻までの累加雨量 (mm) ($i=0,1,2,\dots$), I_i : $i \Delta t_r$ 時刻までの降雨遮断可能量 (mm), Z_0 : 最大遮断量(mm), S_{00} : 初期貯留量 (mm), r_i : 時刻 $(i-1) \Delta t_r \sim i \Delta t_r$ 間の降雨量 (強度) (mm/h), $r_{a,i}$: 時刻 $(i-1) \Delta t_r \sim i \Delta t_r$ 間の降雨遮断効果を受けた後の降雨量 (強度) (mm/h)。

次に、流域内の水路整備、道路整備あるいは舗装化等の地文条件の変化による浸透量の減少効果を流出モデルに簡便に組込むため、図1の流出モデルを考える。

すなわち、図1に示す流出モデルIにおける流出高、浸透能、浸透高及び各段タンクにおける連続の式は以下のように表されるものとする。

流出高;

$$Q_1 = a_1 (S_{11} - Z_{11})^m \quad (\text{for } S_{11} \geq Z_{11}) \quad \dots (4)$$

$$Q_2 = a_2 S_{12} \quad \dots (5)$$

$$Q_3 = a_3 (S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 \geq Z_3) \quad \dots (6)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 \quad \dots (7)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 \quad \dots (8)$$

浸透能, 浸透高;

$$f_0 = b_0 \quad \dots (9)$$

$$f_1 = b_1 (Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (10)$$

$$g_1 = b_2 S_2 \quad \dots (11)$$

$$g_2 = b_3 S_3 \quad \dots (12)$$

連続の式;

$$dS_{11}/dt = r_a - Q_1 - f_0 \quad \dots (13)$$

$$dS_{12}/dt = f_0 - Q_2 - f_1 \quad \dots (14)$$

$$dS_2/dt = f_1 - Q_3 - g_1 \quad \dots (15)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \quad \dots (16)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \quad \dots (17)$$

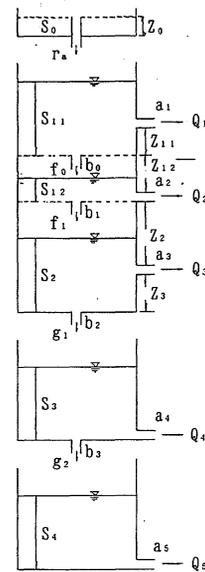


図1 流出モデルI, II

ここに、 $Q_1 \sim Q_5$: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 は地下水流出を表している。 $S_{11}, S_{12} \sim S_4$: 貯留量(mm), $a_1 \sim a_5$:定数, $b_0 \sim b_3$:定数, $Z_{11} \sim Z_3$: 流出孔の高さ(mm), $m=5/3$, f_0, f_1 :浸透能(mm/h), g_1, g_2 :浸透高(mm/h), t :時間(h), r_a :降雨遮断効果を受けた後の降雨強度(mm/h)。

ここで、降雨遮断量は、(1)~(3)式で算定されるが、図1の最上段タンクが降雨遮断量(最大遮断量: Z_0 mm)を規定し、降雨遮断効果を受けた後の降雨量 r_a (mm/h)を算定する機能を持つことになる。

そして、本流出モデルでは地表からの浸透能 f_0 (mm/h)が(9)式に示すように、一定値 b_0 (mm/h)以下に制限され、第1段タンクへの入力降雨 r_a (mm/h)が Q_1 (mm/h)及び f_0 (mm/h)の和を上回る場合は、その超過分が表面流出成分への貯留量 S_{11} を形成するモデル構造となっている。

流出モデルII：

図1に示すように、モデル構造は流出モデルIと同じであるが、流出モデルIに示す浸透能 f_0 (mm/h)が次式のように第1段タンク上層の貯留量 S_{12} (mm)と中間流発生場の表層厚 Z_{12} (mm)に規定されるものとする。

$$f_0 = b_0(Z_{12} - S_{12}) \quad \dots (18)$$

ここで、 b_0 ：定数

その他の算定式は流出モデルIと同じである。

流出モデルIII：

流域の都市化の進行速度を表現する指標として、各種提案されているが、角屋はいくつかの新住宅地区における調査結果に基づき、次式のような地区不浸透面率の推定式を提案している²⁾

$$P = \alpha H + \beta R + \gamma S \quad \dots (19)$$

ここに、P:地区不浸透面率(%), H, R, S:それぞれ宅地、道路及びそれ以外の特殊用途地の面積比、 $\alpha \sim \gamma$:それぞれの不浸透面積率(%)。

そして、ごく粗い近似として、市街地完成状態で次値が想定できるとしている³⁾。

$$P = 60 \quad (50\% \text{住居専用地区})$$

$$P = 70 \quad (60\% \text{住居専用地区})$$

$$P = 80 \quad (60\% \text{住居地区})$$

このような都市化水文の研究成果を参考にして、ここでは、流域の開発に伴う水路網や舗装道路網の整備等に伴う不浸透域・浸透域の面積割合が流出に及ぼす効果を簡便的に表現する一手法として、図2に示すようにLST-IIモデルを若干修正したモデル構造を考える。すなわち、不浸透域・浸透域の面積比を β_* として、LST-IIモデルの第1段タンク上層部を $\beta_*:(1-\beta_*)$ の比で2分割する。

この β_* は、前述の(19)式で与えられる地区不浸透面率P(%)と同等の意味を持つ定数とする。

なお、農地造成地等での流出解析を想定し、図2に示すように、本流出モデルには凹地貯留 Z_s ないし Z_{11} を取入れる。すなわち、左側タンク部分からは $S_s > Z_s$ のときManning型の表面流出高 Q_s 、また右側タンクからは $S_{11} > Z_{11}$ のとき表面流出高 Q_1 、及び貯留量 S_{12} による早い中間流出高 Q_2 を算定する構造となっている。

本流出モデルによる流出計算基礎式は次のとおりである。

流出高；

$$Q_s = a_s(S_s - Z_s)^m \quad \dots (20)$$

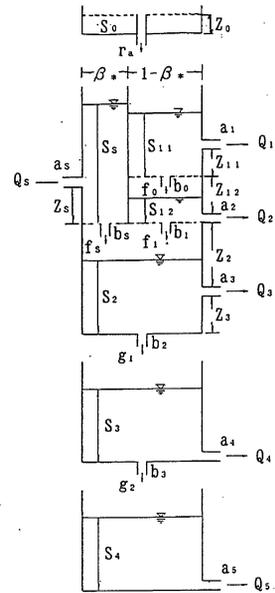


図2 流出モデルIII

$$Q_1 = a_1(S_{11} - Z_{11})^m \quad \dots (21)$$

$$Q_2 = a_2 S_{12} \quad \dots (22)$$

$$Q_3 = a_3(S_2 - Z_2) \quad \dots (23)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 \quad \dots (24)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 \quad \dots (25)$$

浸透能，浸透高；

$$f_s = b_s(Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (26)$$

$$f_0 = b_0(Z_{12} - S_{12}) \quad \dots (27)$$

$$f_1 = b_1(Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (28)$$

$$g_1 = b_2 S_2 \quad \dots (29)$$

$$g_2 = b_3 S_3 \quad \dots (30)$$

連続の式；

$$dS_s/dt = r_s - Q_s - f_s \quad \dots (31)$$

$$dS_{11}/dt = r_s - Q_1 - f_0 \quad \dots (32)$$

$$dS_{12}/dt = f_0 - Q_2 - f_1 \quad \dots (33)$$

$$dS_2/dt = \beta_* f_s + (1 - \beta_*) f_1 - Q_3 - g_1 \quad \dots (34)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \quad \dots (35)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \quad \dots (36)$$

ここに、 Q_s :表面流出高(mm/h), f_s :浸透能(mm/h)
 S_s :貯留量(mm), Z_s :流出孔の高さ(mm), a_s, b_s :定数を表している。また、 β_* :第1段タンク上層部における表面流出 Q_s の発生場面積比である。その他の変数及びモデル定数の記号は流出モデルIIと同じである。

なお、流出モデルIIIによる流出計算においては、本流出モデルに面積比 β_* が導入されていることから、解析対象地点の計算単位時間毎の流出高 q (mm/h)及び流出量 Q (m^3/s)は次式から算定されることになる。

$$q = \beta \cdot Q_s + (1 - \beta) \cdot (Q_1 + Q_2) + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad \dots (37)$$

$$Q = q \cdot A / 3.6 \quad \dots (38)$$

ここに、A：流域面積(km²)

また、流出モデルの最適同定には、永井・角屋により開発された数学的最適化手法の一種である基準化パウエル法⁴⁾を適用することとする。またモデル定数の最適値探索に際しての評価基準として次式に示すχ²基準を採用する。

$$J_{XS} = \frac{1}{M_D} \sum \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})^2}{Q_{oi}} \quad \dots (39)$$

ここに、J_{XS}：評価誤差(mm/h)、Q_{ci}：計算流出高(mm/h)、Q_{oi}：観測流出高(mm/h)、M_D：データ数。

さらに、次式で表される相対誤差(%)も計算し、併示することにする。

$$J_{RE} = \frac{1}{M_D} \sum \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})}{Q_{oi}} \quad \dots (40)$$

2. 流出モデル I, II, IIIの適用例；

図3に示す益田開拓農地造成域(流域面積A=0.293km²)で観測された出水を対象に、上述の3タイプの流出モデルによる流出解析を行った。

解析対象出水は表1に示す出水A, B, Cの3出水とする。ここで、出水A, Bは、昭和58年山陰豪雨災害時の大出水であり、出水Bでは、出水A及びそれ以前の小出水を含む複峰型のハイドログラフが形成されている期間を解析対象としている。また出水Cは、小出水であるが、出水Bと同様に複峰型のハイドログラフが観測されている。なお、3出水の観測ピーク流量は同表に示すように出水A, Bが8.17(m³/s)、出水Cが4.37(m³/s)と記録されている。

入力降雨量及び流出計算の単位時間Δt、Δtはともに600秒とする。

出水Aを対象に流出モデルI, IIを用いた流出解析では、表2に示すように、計算ピーク流量がそれぞれ7.19, 7.15(m³/s)、また観測ハイドログラフの再現性は相対誤差でそれぞれ22, 21%の結果を得た。これらピーク流量及びハイドログラフの再現性の程度は、長短期流出両用モデルLST-IIによる解析結果と比較して、やや低下傾向ないしはほぼ同じレベルといえる。図4に、出水Aを対象に最適同定された流出モデルIIのモデル定数を示す。

また、流出モデルIIを出水B, Cに適用した結果も表3, 4に示すように、長短期流出両用モデルLST-IIによる解析結果とほぼ同じレベルの観測ハイドログラフの再現性となった。

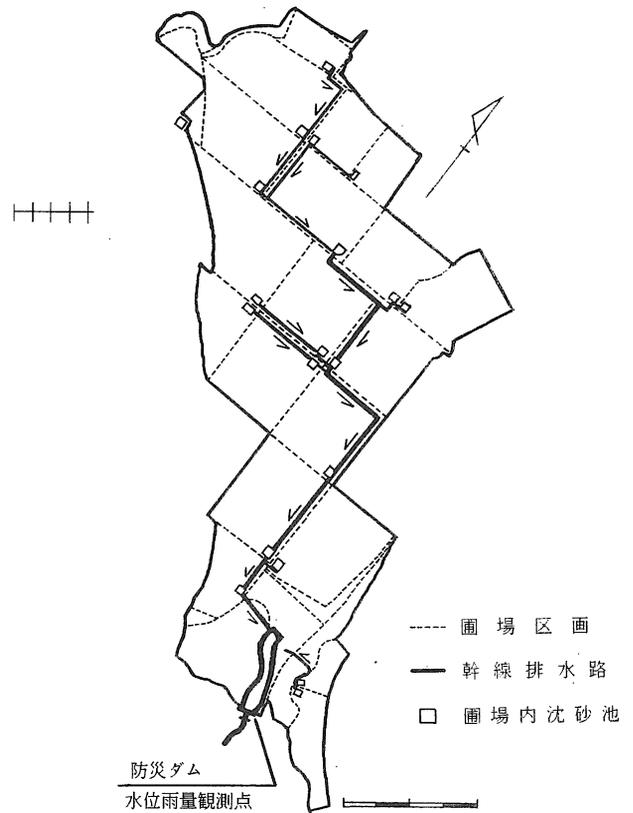


図3 益田開拓農地造成域の概要

表1 解析対象出水

出水名	出水期間	ピーク流量 Q _{po} (m ³ /s)	ピーク発生時刻 t _{po}
A	1983.7.22 ~ 7.23	8.17	7.23 (7:00)
B	1983.7.20 ~ 7.23	8.17	7.23 (7:00)
C	1993.6.23 ~ 7.1	4.37	6.28 (23:50)

したがって、流出モデルI, IIに導入した浸透能f₀の項には顕著な効果は本流域で解析対象とした出水では認められなかったといえる。

次に、出水Aに対し流出モデルIIIを適用した結果、図5に示すモデル定数が同定された。図5に示すモデル定数による計算ハイドログラフを図6の下段部に示す。同図には観測ハイドログラフも併示してあり、また同図の中段には計算流量Q_cと観測流量Q_oとの差(Q_c-Q_o)の経時変化が示されている。

本適用例では表2にも示すように、計算ピーク流量が7.91(m³/s)となり、観測ハイドログラフの再現性は相対誤差で23%となっている。したがって、LST-IIモデル及び流出モデルI, IIと比較し、相対誤差評価による観測ハイドログラフ形状全体の再現性は改善がみられなかったものの、ピーク流量の再現性が約9%向上する結果と

表2 出水Aの流出解析結果

項目	流出モデル	LST-II	モデルI	モデルII	モデルIII
ピーク流量 Q_{pc} (m ³ /s)		7.25	7.19	7.15	7.91
ピーク発生時刻 t_{pc}		6:50	6:50	6:50	6:50
評価関数 J_{xs} (mm/h)		0.67	0.69	0.69	0.65
相対誤差 J_{RE} (%)		18.6	21.5	20.7	23.0

表3 出水Bの流出解析結果

項目	流出モデル	LST-II	モデルI	モデルII	モデルIII
ピーク流量 Q_{pc} (m ³ /s)		7.16	7.10	7.10	7.95
ピーク発生時刻 t_{pc}		6:50	6:50	6:50	6:50
評価関数 J_{xs} (mm/h)		0.65	0.66	0.66	0.62
相対誤差 J_{RE} (%)		33.8	31.5	32.0	32.0

表4 出水Cの流出解析結果

項目	流出モデル	LST-II	モデルI	モデルII	モデルIII
ピーク流量 Q_{pc} (m ³ /s)		4.47	4.42	4.32	4.42
ピーク発生時刻 t_{pc}		23:40	23:40	23:40	23:40
評価関数 J_{xs} (mm/h)		0.17	0.17	0.18	0.16
相対誤差 J_{RE} (%)		28.4	26.6	33.8	31.4

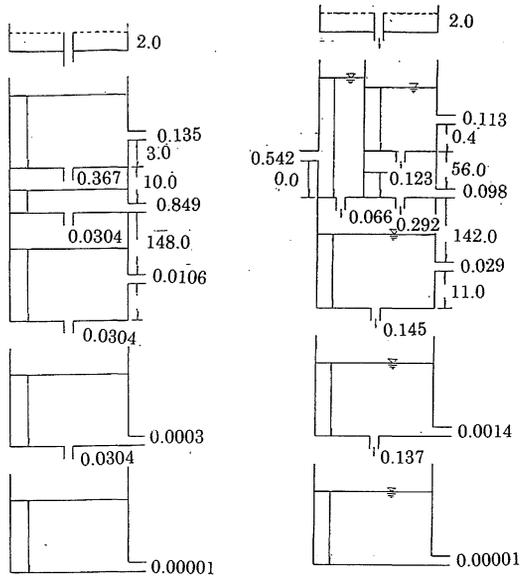


図4 流出モデルIIのモデル定数

図5 流出モデルIIIのモデル定数
(面積比 $\beta^* = 0.07$)

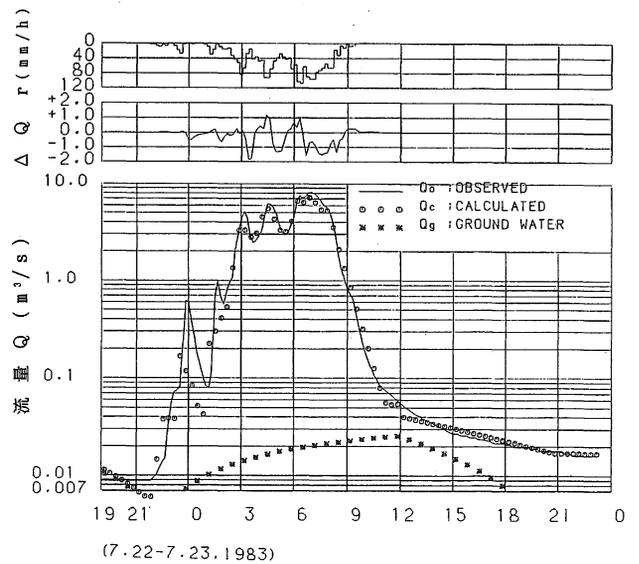


図6 流出モデルIIIの出水Aへの適用例

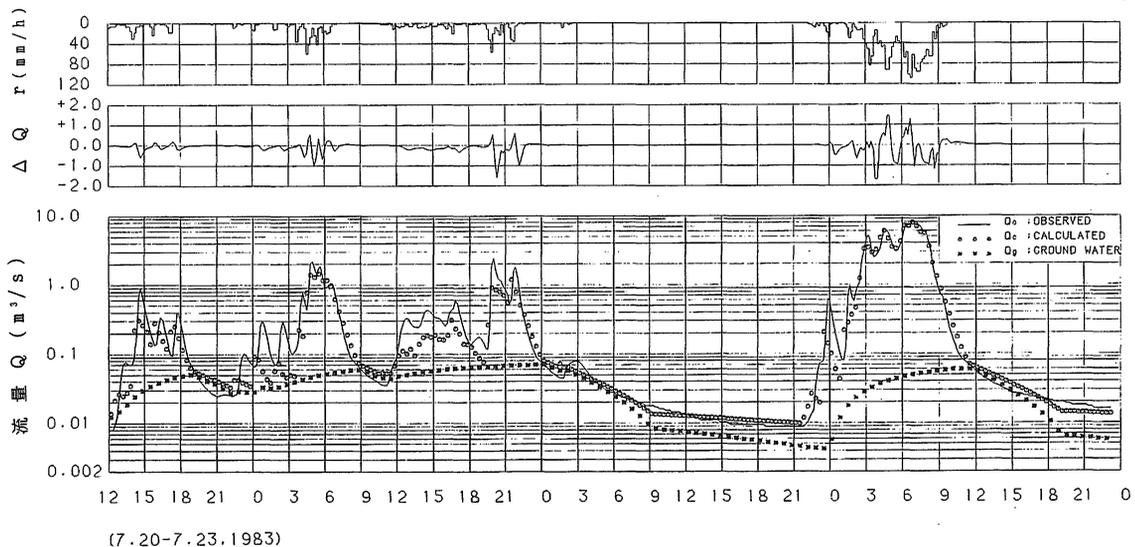


図7 流出モデルIIIの出水Bへの適用例

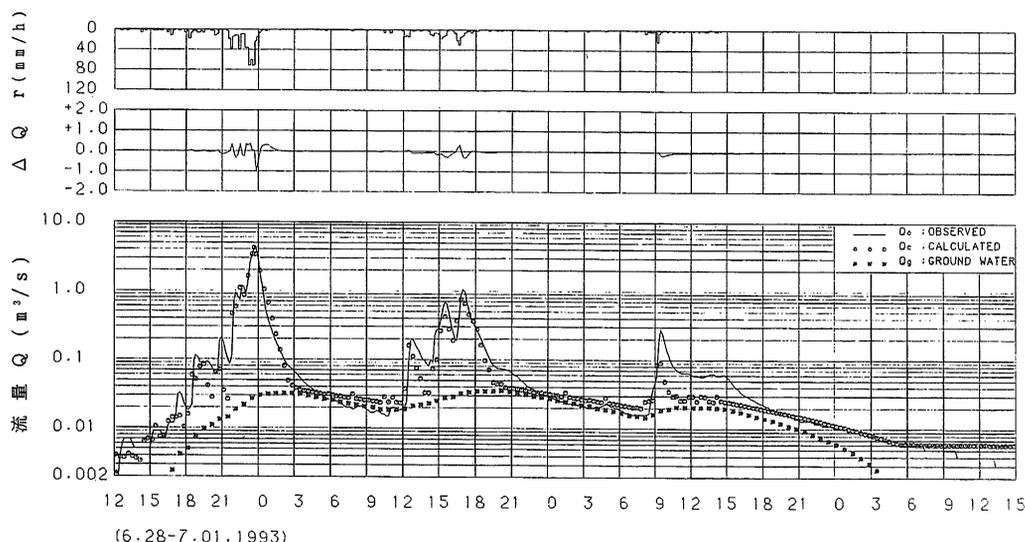


図8 流出モデルⅢの出水Cへの適用例

なっている。ただし、ピーク流量発生時刻はLST-IIモデル及び流出モデルI、IIと同様、観測時刻より、計算単位時間の10分だけ早い結果となっている。このように計算ピーク流量発生時刻が観測時刻より早まる傾向は、雨水伝播時間等を考慮した遅延効果を本流出モデルに導入すべきことを示唆しているものと判断される。

なお、流出モデルⅢで導入した面積比 β は0.07と算定された。

図7にモデルⅢを出水Bに適用した例を示す。本適用例では表3にも示すように、計算ピーク流量が $7.95(\text{m}^3/\text{s})$ 、観測ハイドログラフの再現性は相対誤差で32%となっている。また、モデルⅢを出水Cに適用した例を図8に示す。本解析例では、計算ピーク流量が $4.42(\text{m}^3/\text{s})$ 、観測ハイドログラフの再現性は相対誤差で31%の結果が得られた。

以上の解析結果はいずれも各出水に対する流出モデルの最適同定に基づくものであり、出水ごとに異なったモデル定数が評価されていることには問題が残る。出水規模の大小を問わず本流域固有のモデル定数の評価にはさらに検討が必要であるといえる。

あとがき

長短期流出両用モデルを活用した流出モデルを用い、水路網や舗装道路網の整備の効果を流出解析に反映させることを試みた。そして、益田開拓農地造成域における出水を解析対象とし、特にモデルⅢによりその適用性を確かめることができた。今後は流域特性、出水規模、出水形態を考慮したより詳細な検討が必要であるが、流域条件の改変・整備に伴う出水への影響を簡便的に貯留型流出モデルに組み込める一手法が示されたと思う。

引用文献

- 1) 角屋 睦・永井明博：長短期流出両用モデルの開発改良研究，農土学会論文集，136，pp. 31-38 (1988)
- 2) 角屋 睦：新住宅地の不透水面率，京大防災研究所年報，26，B-2，pp.225-230(1983)
- 3) 角尾 睦：都市化に伴う流出の変化，土木学会論文集，363/II-4，pp. 23-34 (1985)
- 4) 角屋 睦・永井明博：流出解析法(その12)ータンクモデルとSP法による最適同定，農土学会誌，48(12)，pp. 51-59 (1980)