

昭和 22 年 9 月洪水（複峰降雨）において浸入能・保留能の回復を考慮すべきか

1. まえがき

関 良基 専門家は、「カスリーン洪水は、一度降雨のピークが来た後に、小降りになり、二度目のピーク降雨が来るといふ二山型ピーク洪水である」と指摘した上で、貯留関数法は二山型洪水には適さないとの見解を述べている。この論点については、分科会でも取り上げられ、第 7 回分科会・資料 4「無降雨期間を含む出水への対応方法」が提示されている。

第 7 回分科会・資料 4「無降雨期間を含む出水への対応方法」では、無降雨期間を含む出水における有効降雨の計算法として、①飽和・不飽和浸透流解析による方法、②連続時間解析モデルを活用する方法、③雨水保留量曲線法の改善法、④総雨量－直接流出高関係の改善法を挙げた。

その上で、ハイドログラフやハイエトグラフが複峰となる出水全てにこうした配慮が必須という訳ではなく、これらの改善法が必要となるのは、「ハイエトグラフ及びハイドログラフから見て、降雨前半と降雨後半を別のイベントとしては扱い難く、かつ、無降雨期間ないし微降雨期間の継続時間から見て、浸入能ないし保留能の回復が無視できないケース」に限定されること、ハイエトグラフが二山であっても、一山目と二山目の間に弱雨が継続していて、流域表層への雨水供給が止まっていないと判断される場合は、浸入能ないし保留能の回復は見込めない、あるいは小さいと考えられるため、一山洪水と同様の扱いが適当であることを指摘した。

そこで、本稿では、昭和 22 年 9 月洪水が浸入能ないし保留能の回復を考慮すべき洪水に該当するか否かについて検討した。

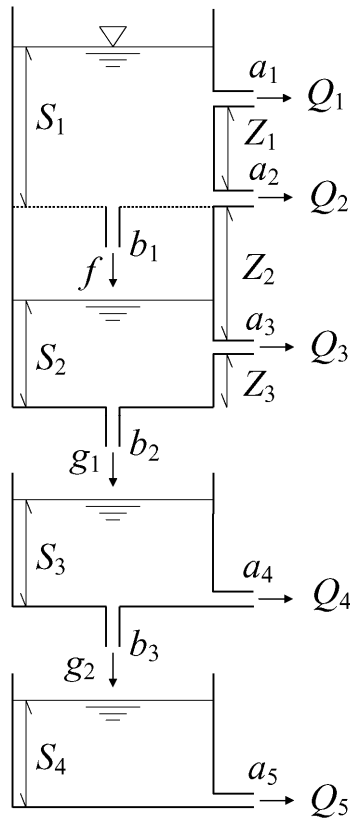
2. 長短期流出両用モデルの適用方法と適用結果

無降雨・微降雨に伴う浸入能ないし保留能の回復を考慮できる何らかの流出解析法を対象洪水に適用すれば、その洪水において浸入能ないし保留能の回復が生じているか否かを検討できる。浸入能ないし保留能の回復を考慮できる流出解析法は多数存在するが、ここでは、長短期流出両用モデル（角屋・永井，1988；永井ら，2003）を平成 10 年 9 月洪水，昭和 57 年 9 月洪水，昭和 22 年 9 月洪水にそれぞれ適用して、各サブ流域における浸入能の時間的な変動を示すことにした。

長短期流出両用モデルは、貯留法に分類される集中型モデルで、洪水時の有効降雨を自動的に推定でき、かつ洪水と低水を同時に連続して解析できるという特徴を有する。長期流出解析を行って表層の乾湿状態を常に把握しておき、これを有効降雨の推定に活用できることから、ダム管理のための実時間洪水予測に利用されている。このモデル（図-1）は、3 段のタンクで構成されており、第 1 段タンクは上層と下層に分かれている。基礎式は補遺 1 に示す通りであるが、菅原のタンクモデルとは異なり、第 1 段タンク上層から下層への浸入能は、下層の空容量に比例するという仮定が導入されている。上層に浸入能に見合うだけの十分な貯留量がある場合、浸入能の時間的な変化は、Horton の浸入能方程式に合致する。以下では、本稿におけるモデル適用法、上記 3 洪水に対する適用結果について説明する。

(1) モデル適用法

長短期流出両用モデルの適用に際しては、11 個のパラメータと 3 個の初期水深を決定する必要がある。通常モデル適用では、10 年程度の水文データ（流域平均降水量，蒸発散量，流量，積雪があるときは気温）を用意し、最初の 2 年間程度を同定期間，残りを検証期間とする。そして、同定期間の水文資料を用いてパラメータを最適化手法（基準化 Powell 法，SCE-UA 法など）で決定した後，検証期間の計算を行い，長期流出ハイドログラフ，洪水流出ハイドログラフの再現性を調べる。



図一 長短期流出両用モデル (角屋・永井, 1988)

ここでは、上述のような長期間の水文データを入手していないことから、このモデルをイベント解析モデルとして適用することとして、次の手順で適用した。

- ① 過去の解析事例に基づいて提示されている標準的定数 (永井, 1995) を出発モデルとして、平成 10 年 9 月洪水を巧く再現できるように、必要最小限のパラメータを試行錯誤的に調整する。
- ② ①で得られたパラメータを用いて、昭和 57 年 9 月洪水の流出計算を行い、初期水深の調整のみで同洪水を再現できるかどうか確かめる。
- ③ 最後に、昭和 22 年 9 月洪水の流出計算を行う。観測流量が得られておらず、初期水深の調整ができないことから、とりあえず平成 10 年 9 月洪水と昭和 57 年 9 月洪水の初期水深の平均値を用いる。

貯留関数法 (新モデル) で採用されている 39 サブ流域の構成をそのまま利用して、各サブ流域に長短期流出両用モデルを当てはめ、サブ流域下流端のハイドログラフを計算する。次いで、貯留関数法による河道モデルをそのまま利用して、八斗島地点までの追跡計算を実施する。扱いを簡単にするため、各サブ流域のパラメータは同一であるとして、八斗島地点の計算流量を観測流量に合致させるようにパラメータを決定する。貯留関数法と同様、遅れ時間を導入するが、これも各サブ流域で同一とする。

計算に必要な水文データは、39 サブ流域の流域平均雨量であるが、貯留関数法 (新モデル) の適用時に使用されたものを用いる。洪水流出解析であるから、蒸発散量は無視できるものとする。有効雨量と基底流量は自動的に計算されるので用意する必要はない。計算時間刻みは 10 分間とする。

(2) 平成 10 年 9 月洪水への適用結果

出発モデルとした標準的定数 (標準的パラメータ) と、平成 10 年 9 月洪水を巧く再現できるように必要最小限のパラメータを試行錯誤的に調整した結果のパラメータを表一に示す。また、同洪水の計

算結果を図-2 に示す。同図には、観測流量、貯留関数法による計算流量、流域平均雨量（サブ流域の流域平均雨量を面積加重平均したもの）を併記している。なお、貯留関数法による計算流量は、流出解析レビューワーキンググループの独自プログラムで算定したものである（以下同様）。

表-1 各洪水に流出計算に用いたパラメータ値

パラメータ	標準的定数	平成 10 年 9 月洪水	昭和 57 年 9 月洪水	昭和 22 年 9 月洪水
a_1	0.006	0.006	0.006	0.006
a_2	0.05	0.05	0.05	0.05
a_3	0.01	0.01	0.01	0.01
a_4	0.002	0.002	0.002	0.002
a_5	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
b_1	0.06	0.08	0.08	0.08
b_2	0.008	0.008	0.008	0.008
b_3	0.002	0.002	0.002	0.002
Z_1	30	30	30	30
Z_2	80	100	100	100
Z_3	20	40	40	40
S_1	—	0	0	0
S_2	—	30	60	45
S_3	—	30	60	45
S_4	—	300	300	300
T_1	—	40	40	40

注 1) パラメータ $a_1 \sim a_5$, $b_1 \sim b_3$, $Z_1 \sim Z_3$, 初期水深 $S_1 \sim S_4$ の単位は (mm-h), T_1 の単位は (min)。

注 2) 無降雨日から解析を始めれば、初期水深 S_1 は 0 mm である。

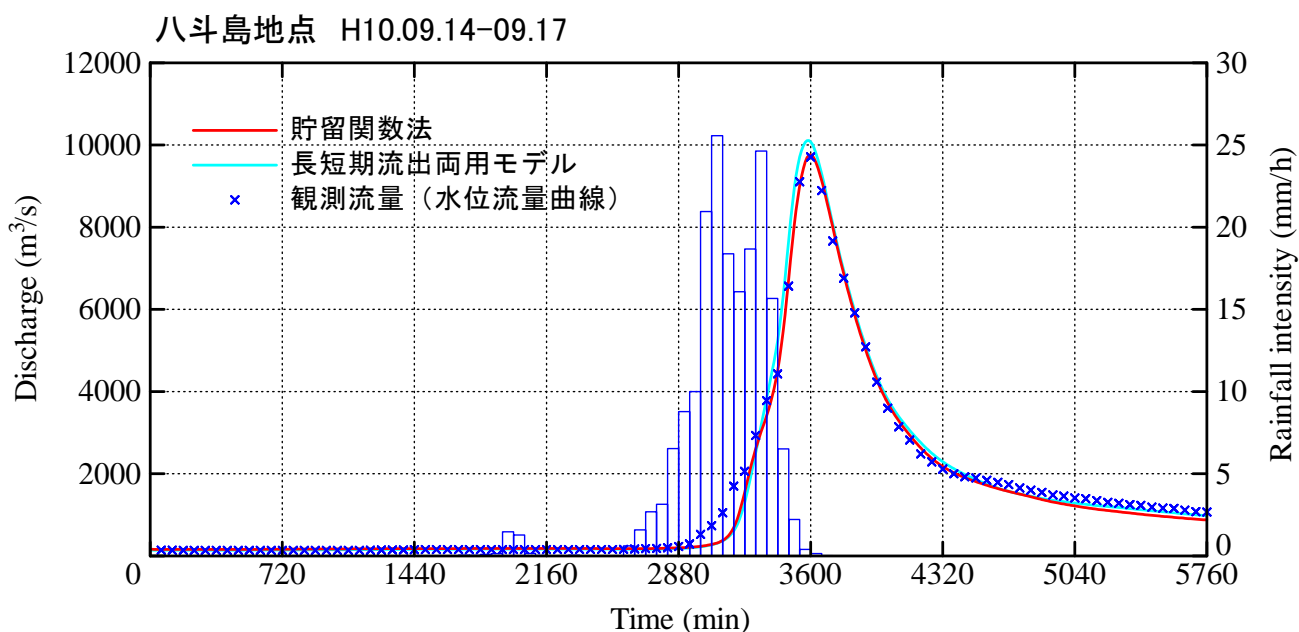


図-2 平成 10 年 9 月洪水の計算結果

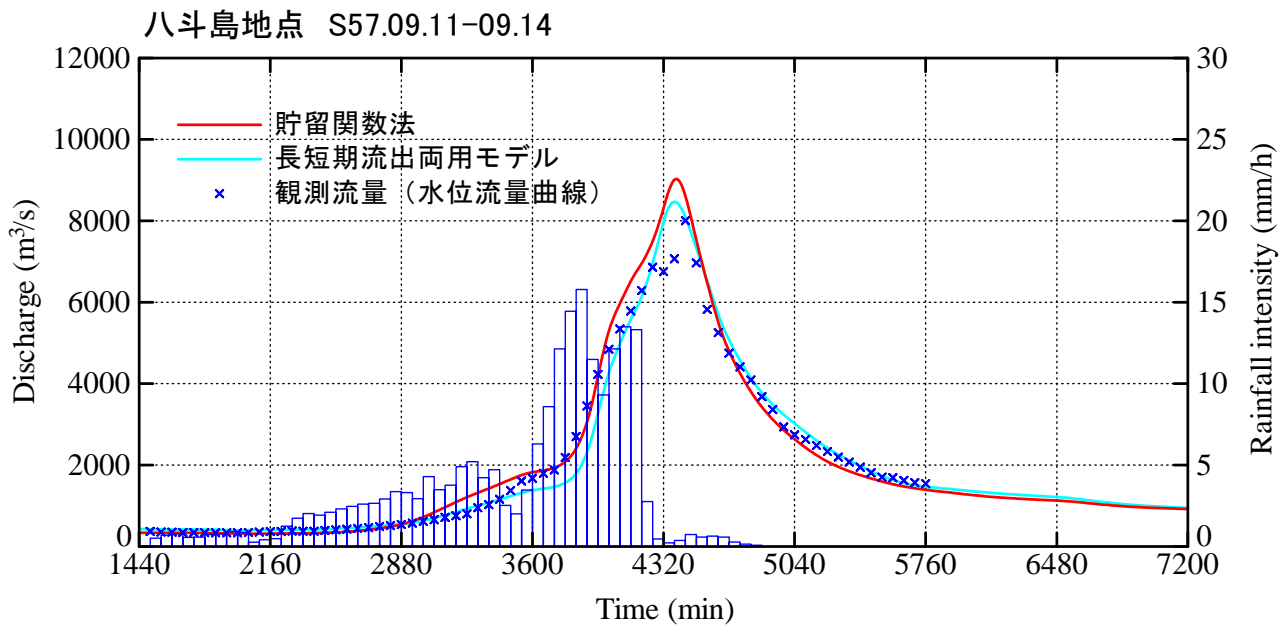


図-3 昭和 57 年 9 月洪水の計算結果

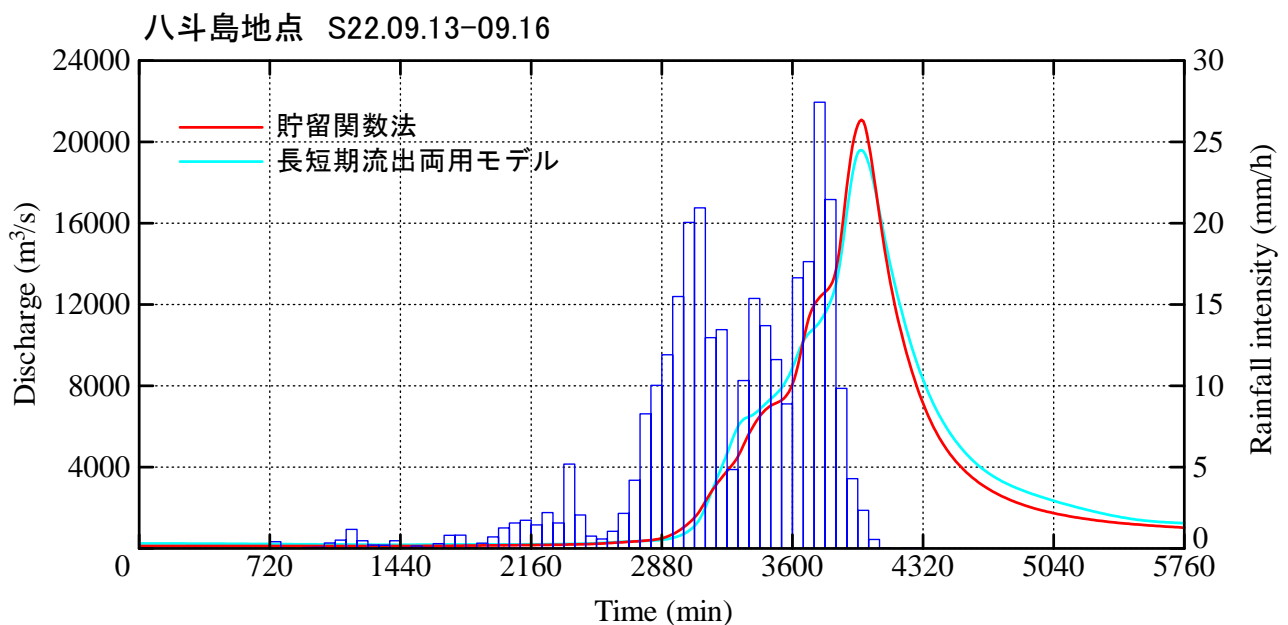


図-4 昭和 22 年 9 月洪水の計算結果

出発モデルをそのまま用いると、計算流量がかなり過大であったことから、第1段タンク下層の高さと浸透孔係数を大きくすることで、下層への浸入能が大きくなるように調整した。また、各サブ流域の遅れ時間は40分とした。その結果、図-2に示す通り、長短期流出両用モデルの計算流量は、観測流量とよく合致し、貯留関数法による計算流量ともほぼ合致した。

(3) 昭和 57 年 9 月洪水への適用結果

昭和 57 年 9 月洪水の計算に際しては、先に決定したパラメータのうち、初期水深 S_2 と S_3 のみを調整して、当該洪水を再現できるか否かを確かめた。平成 10 年 9 月洪水の初期水深 $S_2 = 30 \text{ mm}$ 、 $S_3 = 30 \text{ mm}$ をそのまま用いると計算流量が過小であったことから、 $S_2 = 60 \text{ mm}$ 、 $S_3 = 60 \text{ mm}$ とした。その結果、計

算流量は観測流量に概ね合致した。図-3に同洪水の計算結果を示す。

(4) 昭和22年9月洪水への適用結果

昭和22年9月洪水については、観測流量が得られていないので、計算流量が観測流量に合致するように初期水深を調整することができない。そこで、とりあえず平成10年9月洪水と昭和57年9月洪水の初期水深の平均値として $S_2 = 45\text{ mm}$ 、 $S_3 = 45\text{ mm}$ を採用した。同洪水の計算結果を図-4に示す。長短期流出両用モデルの計算流量は、貯留関数法のそれと概ね近いが、計算ピーク流量は $19,603\text{ m}^3/\text{s}$ であり、貯留関数法の計算ピーク流量 $21,092\text{ m}^3/\text{s}$ よりは7%小さい。

3. 浸入能の時間的変動

長短期流出両用モデルでは、時々刻々の浸入能 $f = b_1(Z_2 + Z_3 - S_2)$ が計算されている。そこで、39サブ流域のそれぞれに対して、洪水期間中の浸入能を求めた。図-5~図-7に平成10年9月洪水、昭和57年9月洪水、昭和22年9月洪水における浸入能の時間的変動を示す。これらの図では、各サブ流域の浸入能を39本の曲線で示している。各サブ流域のパラメータは同一であるが、入力となる流域平均雨量が異なるために、浸入能の変動状況もサブ流域によってかなり異なる。

これらの図には、流域平均雨量(サブ流域の流域平均雨量を面積加重平均したもの)を併記している。さらに、パラメータから定まる最終浸入能(1.73 mm/h)を表す直線も記入している。降雨の継続に伴って浸入能は徐々に低下して、最終浸入能に漸近する。降雨終了後も浸入能の低下が続くのは、これは第1段タンク上層に貯留量がある間は、上層から下層への浸入が継続するためである。

さて、無降雨や微降雨による浸入能の回復に注目すると、一部のサブ流域で、弱雨のときに若干の浸入能回復が見られる程度で、明確な浸入能の回復は降雨終了後である。特に注目されている昭和22年9月洪水については、降雨前半の第一ピークと降雨後半の第二ピークの間(3600分頃)には、流域平均雨量では無降雨や微降雨の継続は認められず、どのサブ流域においても浸入能の回復は生じていない。この結果を見る限り、同洪水で降雨ピーク間の浸入能の回復に対する特別な対処が必要とは言い難い。

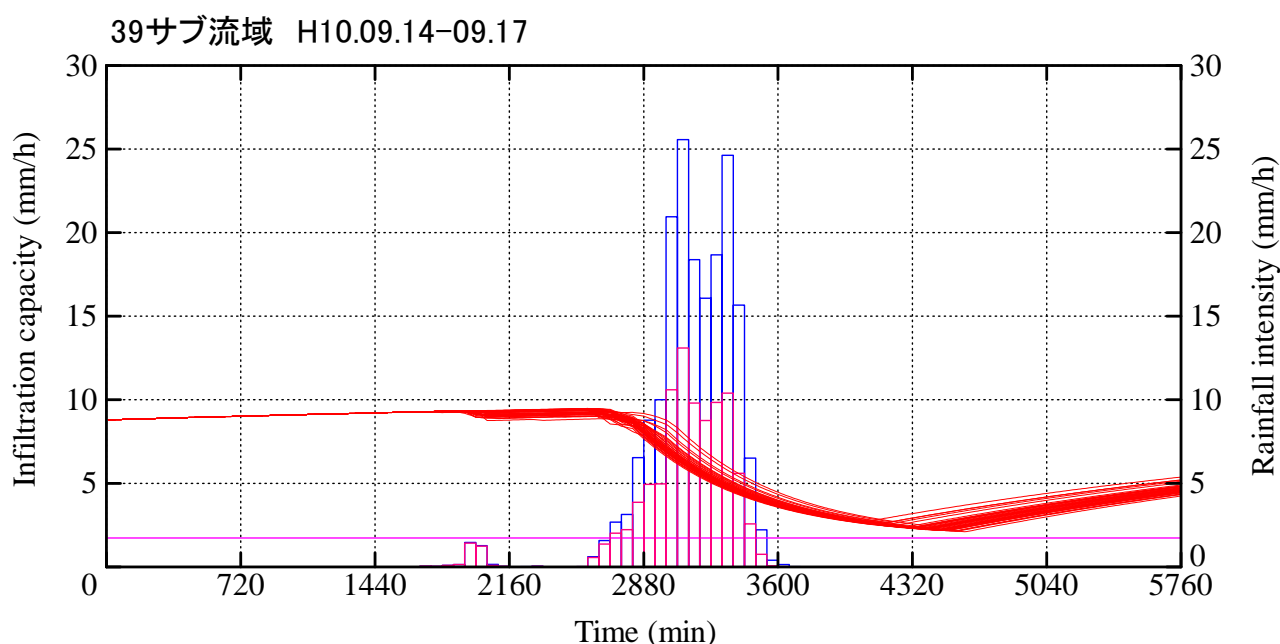


図-5 平成10年9月洪水における浸入能の時間的変化

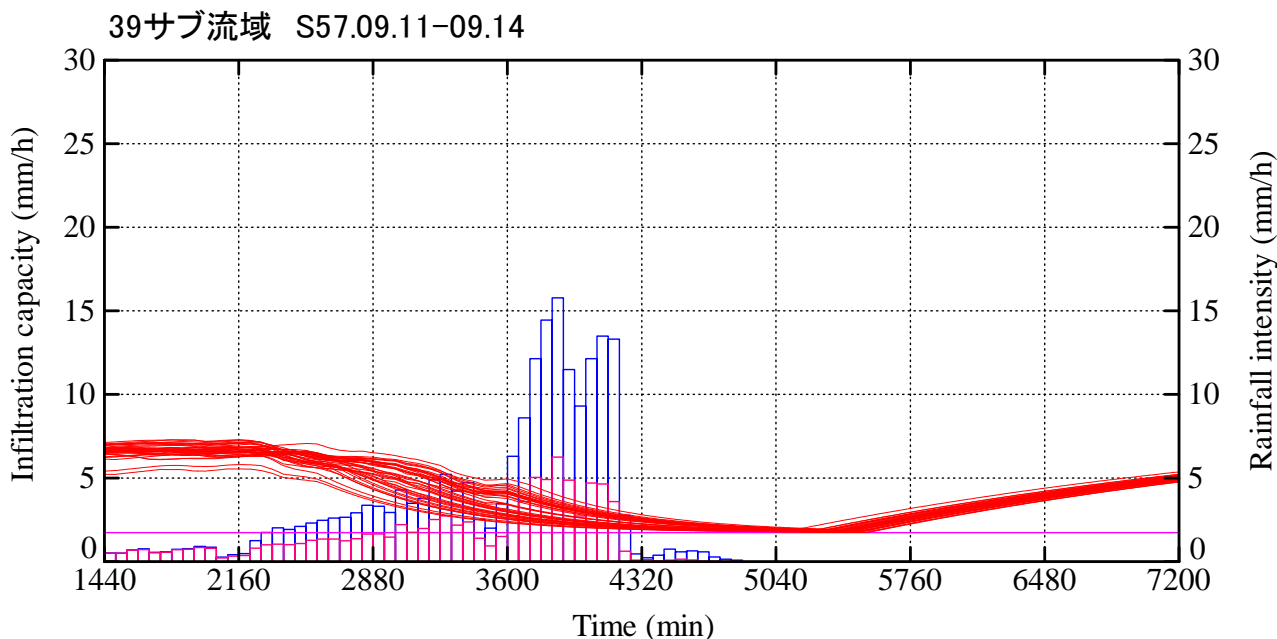


図-6 昭和 57 年 9 月洪水における浸入能の時間的変化

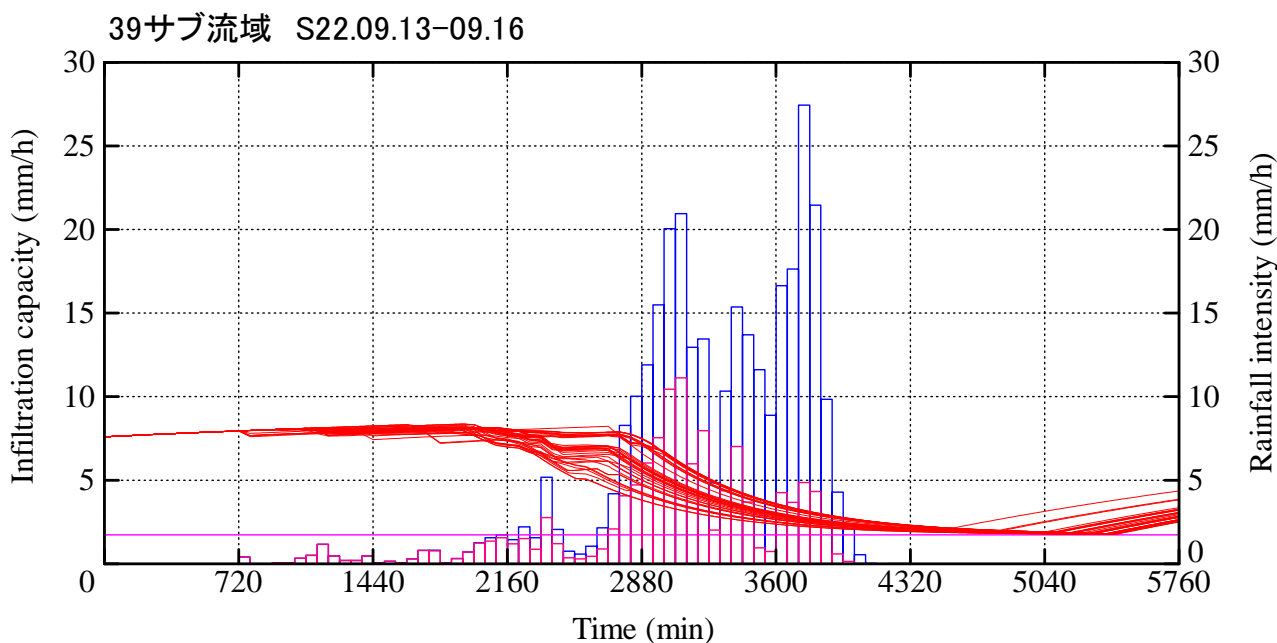


図-7 昭和 22 年 9 月洪水における浸入能の時間的変化

なお、長短期流出両用モデルでは、降雨期間内に浸入は途切れることなく継続している。一方、貯留関数法では、累加雨量が飽和雨量に達した後は流出率が 1 になり、それ以降は雨水の保留が生じないことから、これが二山降雨の後半でのピーク流量が過大になるとの指摘がある。そこで、図-5～図-7 のハイトグラフには、貯留関数法（新モデル）の有効降雨モデルによって算定された各時間の雨水保留量（サブ流域の雨水保留量を面積加重平均したもの）をピンク色で併記した。それを見ると、貯留関数法（新モデル）による雨水保留は、降雨後半も継続している。これは、第四紀火山岩のサブ流域群で流出率が 0.4 に固定されているためである。結果的に、長短期流出両用モデルによる浸入量と、貯留関数法（新モデル）による雨水保留量には、それほど大きな差は生じていないと判断される。

4. あとがき

本稿では、昭和 22 年 9 月洪水が浸入能ないし保留能の回復を考慮すべき洪水に該当するか否かについて検討するため、連続時間解析モデルである長短期流出両用モデルを利根川上流域に適用した後、洪水期間中の浸入能の時間的変動を算定した。その結果、昭和 22 年 9 月洪水については、流域平均雨量で見る限り降雨前半の第一ピークと降雨後半の第二ピークの間に無降雨や微降雨の継続は認められず、どのサブ流域においても浸入能の回復は生じていないと判断された。このため、昭和 22 年 9 月洪水において、降雨ピーク間の浸入能の回復に対する特別な対処が必要とは言い難い。

なお、本稿の主たる目的とは異なるが、**補遺 2**において、無降雨や微降雨に伴う浸入能ないし保留能の回復を考慮するための有効降雨モデルについて若干論じた。

(流出解析レビューワーキンググループ 田中丸治哉)

引用文献

角屋 睦・永井明博 (1988) : 長短期流出両用モデルの開発改良研究, 農業土木学会論文集, 第 136 号, pp.31-38

永井明博 (1995) : 長短期流出両用モデルの標準的定数について, 農業土木学会論文集, 第 180 号, pp.59-64

永井明博・田中丸治哉・角屋 睦 (2003) : ダム管理の水文学—河川流域の洪水予測を中心として—, 森北出版

補遺1 長短期流出両用モデルの基礎式

長短期流出両用モデルは、図-1に示すように3段4層のタンクで構成されており、第1段タンクは上層と下層に分かれている。各タンクの連続式は次式である。

$$dS_1/dt = r - E_1 - f - Q_1 - Q_2$$

$$dS_2/dt = f - Q_3 - g_1$$

$$dS_3/dt = g_1 - E_2 - Q_4 - g_2$$

$$dS_4/dt = g_2 - E_3 - Q_5$$

ここに、 $S_1 \sim S_4$ ：貯留量、 t ：時間、 r ：流域平均雨量、 f ：浸入強度、 g_1, g_2 ：下段タンクへの浸透強度、 $Q_1 \sim Q_5$ ：流出量で、 Q_1 は表面流出、 Q_2 は速い中間流出、 Q_3 は遅い中間流出、 Q_4 と Q_5 は地下水流出、 $E_1 \sim E_3$ ：各タンクからの蒸発散強度。

Q, g は、貯留量が孔の高さを超えるときに流出があるものとして、次式から求める。

$$Q_1 = a_1(S_1 - Z_1)^m, \quad m = 5/3$$

$$Q_2 = a_2 S_1$$

$$Q_3 = a_3(S_2 - Z_3), \quad g_1 = b_2 S_2$$

$$Q_4 = a_4 S_3, \quad g_2 = b_3 S_3$$

$$Q_5 = a_5 S_4$$

ここに、 $a_1 \sim a_5$ 及び b_2, b_3 ：定数、 $Z_1 \sim Z_3$ ：流出孔の高さ。

河川流量 Q は、流出成分 $Q_1 \sim Q_5$ の和として次式で表す。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

浸入能は、第1段タンク下層の空容量に比例するとの仮定に基づいて、次式から求める。

$$f = b_1(Z_2 + Z_3 - S_2)$$

ここに、 b_1 ：定数。

この仮定は、低水解析法の一つである補給能モデルの扱いと同一である。第1段タンク上層に浸入能に見合うだけの十分な貯留量がある場合、浸入能 f の時間的变化はHortonの浸入能方程式に従う。同式の見最終浸入能 f_c は、次式で求められる。

$$f_c = (f_u b_2 + a_3 Z_2 b_1) / c, \quad f_u = b_1(Z_2 + Z_3), \quad c = a_3 + b_1 + b_2$$

ここに、 f_c ：最終浸入能、 f_u ：上限浸入能。

なお、各タンクからの蒸発散強度については、蒸発散位に係数を乗じて求められる実蒸発散量を $E_1 \sim E_3$ に振り分けるが、ここでは、振り分けの基礎式については割愛する。詳細については、文献(永井ら, 2003)を参照されたい。

流出計算は、計算時間刻みの間は降雨強度が一定として、連続式を連続的に解いて求める。計算時間刻みは、自由に変えられるが、降雨日と第1段タンク上層に貯留量があるときは1時間とし、無降雨日は24時間とすることが多い。連続式の解法には、修正オイラー法などが適用される。

無降雨日から計算を開始すれば、初期水深 S_1 は0としてよいので、解析者が決定すべきパラメータは $a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_3, Z_1 \sim Z_3$ の11個と初期水深 $S_2 \sim S_4$ の3個、合計14個である。これらは、計算流量と観測流量の食い違いを表す誤差評価関数を非線形最適化手法で最小化して決定するのが普通である。

補遺2 浸入能ないし保留能の回復を考慮するための有効降雨モデル

第7回分科会・資料4「無降雨期間を含む出水への対応方法」では、無降雨期間を含む出水における有効降雨の計算法として、①飽和・不飽和浸透流解析による方法、②連続時間解析モデルを活用する方

法, ③雨水保留量曲線法の改善法, ④総雨量一直接流出高関係の改善法を挙げた. ③④は事後解析だけに適用できる方法であり, 予測計算では①②を適用すべきである. ①②ともに状態変量(大抵は土壌水分量)の変動を追跡しながら有効降雨を計算するものである.

飽和・不飽和浸透流解析による方法では, 土壌水分特性曲線や不飽和透水係数を体積含水量の関数としてモデル化した上で, ハイドログラフの再現性を見ながら土壌物理パラメータを決定するのが現実的である. しかしながら, この方法は降雨流出過程をできるだけ物理的に説明しようとするもので, これを概念的な集中型モデルの一つである貯留関数法の有効降雨モデルとするのは, 「鶏を割くに牛刀を用ふ」ことになる. このため, 貯留関数法との組み合わせとしては, 概念的な連続時間解析モデルを活用する方法が妥当であろう. ただし, 概念的な連続時間解析モデルを活用すると言っても, 同モデルをそのまま適用するのではなく, 有効降雨を計算するパーツだけを抽出して, 貯留関数法に入力する有効降雨を算定するという意味である. 流出計算や河道流の追跡には貯留関数法を用いる.

少なくとも研究分野では, こうした工夫は珍しくない. 第7回分科会・資料4では, 一例として長短期流出両用モデルの第1段タンク下層の構造を抽出して有効降雨を計算する方法を紹介したが, これは有効降雨を補給能モデル(角屋ら, 1967; 角屋, 1980)で計算する考え方と同じで, 特に新しい方法ではない. 星らは, 簡単な損失機構を組み合わせた貯留関数モデル(馬場ら, 1999)を提案した後, 蒸発散及び浸透を組み合わせた二段貯留関数型流出モデル(馬場ら, 2001)に発展させている.

有効降雨の計算に上述のような工夫を施した上で, 流出計算や河道流の追跡に貯留関数法を適用すれば, 有効降雨をあらかじめ計算することなく, 流域平均雨量を直接入力することができ, 無降雨・微降雨に伴う浸入能ないし保留能の回復が表現できるというメリットが生ずる. しかしながら, パラメータ数が増えることや, 流域平均雨量を入力して実際に計算してみないと総有効雨量が決まらず, 特に事後解析においては, 各出水の観測総流出高と計算総流出高が合致する保証がない, といったデメリットにも留意しなければならない.

雨水保留量曲線や総雨量一直接流出高関係に基づいて有効降雨を計算する方法は, 予測計算に際して浸入能ないし保留能の回復が表現できないというデメリットがあるが, 手法が単純で分かりやすく, 事後解析(特にパラメータ決定時)に際して, ハイドログラフの分離によって得られた直接流出高と有効雨量を確実に合致させることができるというメリットがある. このため, プリミティブな方法だからといって一概に劣っているとも言い難い.

結局, 無降雨期間を含む出水における有効降雨の計算法で, 予測計算にも使える方法があるかと問われれば, 貯留関数法との組み合わせならば②の方法が推奨されるが, 導入の可否については, 各手法のメリット, デメリットを十分考えて判断しなければならない.

引用文献

- 馬場仁志・星 清・橋本識秀(1999): 損失機構を組み合わせた貯留関数モデルの総合化, 水工学論文集, 第43巻, pp.1085-1090
- 馬場仁志・星 清・藤田睦博(2001): 蒸発散および浸透を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, Vol.14, No.5, pp.364-375
- 角屋 睦・豊國永次・丈達俊夫(1967): 山地小流域河川の低水解析(2), 京都大学防災研究所年報, 第10号B, pp.147-154
- 角屋 睦(1980): 流出解析手法(その9)ー補給能モデルによる地下水流出解析ー, 農業土木学会誌, 第48巻, 第9号, pp.53-59