

<参考資料 11> 無降雨期間を含む出水への対応方法

1. 概説

タンクモデル（菅原，1972）のように，流域の雨水保留機能が内蔵されているモデルを除けば，洪水流出解析（イベント解析）に利用されている流出モデル，具体的に言えば，単位図法，貯留関数法，雨水流法などは，いずれも何らかの方法で有効降雨を求めた後，これを流出モデルに入力して，直接流出量を計算する．有効降雨の計算法には，一次流出率と飽和雨量による方法，雨水保留量曲線（累加雨量－累加保留量曲線）による方法，浸入能方程式による方法， ϕ インデックス法，カーブナンバー法など多くの選択肢があり，解析者の判断で選択される．

木村（1975）の貯留関数法では，一次流出率を用いてサブ流域を流出域と浸透域に分け，流出域では全降雨が有効降雨となり，浸透域では累加雨量が飽和雨量に達した後，それ以降の全降雨が有効降雨となるという独特な方法が常用されている．しかしながら，サブ流域を二分せず一括モデルとし，あらかじめ求めた有効降雨を入力するような適用法（角屋・永井，1980）ならば，有効降雨の計算法を前述の複数方法から選択することが可能である．実際，永井ら（1978，1981，1982），杉山ら（1988a，1988b）は，雨水保留量曲線による方法を常用している．

さて，有効雨量の計算において，一降雨期間内に無降雨期間ないし微降雨の時間が連続して含まれるときには，それに対する配慮が望まれる（角屋，1979）．無降雨期間が続くと，その間に浸入能や保留能の回復が生じるからである．これは貯留関数法に限ったことではなく，有効降雨を入力として直接流出量を計算する流出モデルであれば，どのモデルにも共通した課題である．無降雨期間を含む場合のハイドログラフは，二山（あるいは三山）になることが多い．本稿では，このような無降雨期間を含む出水への対応方法について述べる．

流出解析法には，貯留関数法の適用を考える．ただし，木村（1975）の貯留関数法によれば，流出域と浸透域への分割と有効降雨の扱いが一体となっており，有効降雨の計算法に変更・修正の余地は少ないことから，ここでは貯留関数法を広義に捉えて，角屋らの適用法を前提とする．

2. 無降雨期間を含む出水における有効降雨の計算法

一降雨期間内に無降雨期間ないし微降雨期間が続く，ハイドログラフが複峰になる場合において，浸入能ないし保留能の回復を考慮できる有効降雨の計算法としては，以下の方法が考えられる．

(1) 飽和・不飽和浸透流解析による方法

地表面から雨水が浸入して，水分が土壌中を降下ないし側方移動する現象は，一次元ないし二次元の飽和・不飽和浸透流によって説明できる．飽和・不飽和浸透流の解析では，連続方程式とダルシー式から導出される偏微分方程式（リチャーズ式）を数値計算によって解くのが一般的である．これは，土壌中の水分移動現象を厳密に扱った方法で，土壌物理学や水文学の分野で多くの研究事例がある．これによれば，無降雨期間や微降雨期間における浸入能の回復を物理的に説明することができる．

この方法の適用に際しては，当該土壌における吸引圧と体積含水率の関係（土壌水分特性曲線），透水係数と体積含水率の関係（不飽和透水係数）を把握する必要がある．これらの土壌物理特性は空間的に大きく変動することに留意しなければならない．

なお、先に述べたリチャーズ式について、特別な条件下での解析解を求めたものが、降雨開始後の時間と浸入能の関係を表した浸入能方程式であり、Horton 式や Philip 式がよく知られている。これらの式において、無降雨・微降雨期間における浸入能の回復を考慮した適用事例は多くはないが、前半の降雨と後半の降雨を別のイベントとして、それぞれに浸入能方程式を適用することは考えられる。

(2) 連続時間解析モデルを活用する方法

洪水時の有効降雨は、降雨直前の乾湿状態に左右されるが、無降雨時や小降雨時を含めた連続時間解析を実施すれば、流域の乾湿状態を常時把握して、有効降雨の計算に活用できる。欧米では、連続時間解析モデルとして、米国気象局河川予測システム (NWSRFS) が採用している Sacramento Model や飽和域の消長が考慮された TOPMODEL が多用されている。我が国で適用事例が比較的多いのは、長短期流出両用モデル (永井・角屋, 1983 ; 角屋・永井, 1988) と HYCYMODEL (福嶋・鈴木, 1986) である。菅原 (1972) のタンクモデルも連続時間解析モデルとして適用可能であるが、洪水解析用のタンクモデル (直列 2 段ないし 3 段) と長期解析用のタンクモデル (直列 4 段) を目的に応じて使い分けるのが一般的である。これらは集中型モデルであるが、空間解像度が高い地形情報や気象情報が利用しやすくなった近年は、分布型の連続時間解析モデルも数多く開発されている。

長短期流出両用モデルは、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があり、ダム管理のための実時間流出予測に利用されている (角屋・田中丸, 1995 ; 永井ら, 2003)。このモデルの構造は、直列 3 段タンクモデルに類似しているが、最上段タンクが上層と下層に分かれており、上層タンクから下層タンクへの浸入能は、下層タンクの空容量に比例するという仮定が設けられている。この仮定は、低水解析法の補給能モデル (角屋ら, 1967) と同一であり、上層タンクに十分な貯留量があれば、浸入能の時間的変化は Horton の浸入能方程式と一致する。

例えば、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モデルとすれば、無降雨・微降雨期間が続くときの、深部への浸透や蒸発散による浸入能の回復を表現することができる。この方法の適用に際しては、有効降雨モデルのパラメータと、この有効降雨モデルをイベント解析用として運用する場合は、降雨直前の水分量 (貯留水深) を決定する必要があるが、これらは、総直接流出高の観測値と計算値が合致するように、あるいは、観測ハイドログラフと計算ハイドログラフが合致するように、試行錯誤ないしは最適化手法で決定する。

(3) 雨水保留量曲線の改善法

一降雨の総雨量を R 、直接流出高を D とするとき、流域の保留量 F は $F = R - D$ で求められる。横軸を R 、縦軸を F としたグラフに、多数イベントのデータをプロットすると点群はかなりばらつくが、 F が大きい側の包絡線を引くと、流域が乾燥しているときの保留量を表す保留量標準曲線が得られる。

特定の降雨イベントに対する事後解析では、原点から当該降雨のプロット点に至る標準曲線類似の曲線を引き、この曲線に基づいて有効雨量の時系列を計算すればよい。ただし、図-1 に示すように、既知点は原点 0 と当該降雨のプロット点である c 点のみであって、その間の曲線の引き方にはあいまいさが残る。特に降雨期間内に無降雨時間帯を含むような複雑な降雨では、その曲線がスムーズな一本の曲線になるとは限らない。この問題点を改善する実用法として、角屋 (1980) は、洪水到達時間の概念を応用した以下の手法を推奨している。

まず、洪水到達時間の実用的定義は、**図-2**における $t_p = t_2 - t_1$ と表され、洪水到達時間内の平均有効降雨強度 (mm/h) は $r_E = 3.6Q_p / A$ と表される。ここに、 Q_p はピーク流出量 (m³/s)、 A は流域面積 (km²)

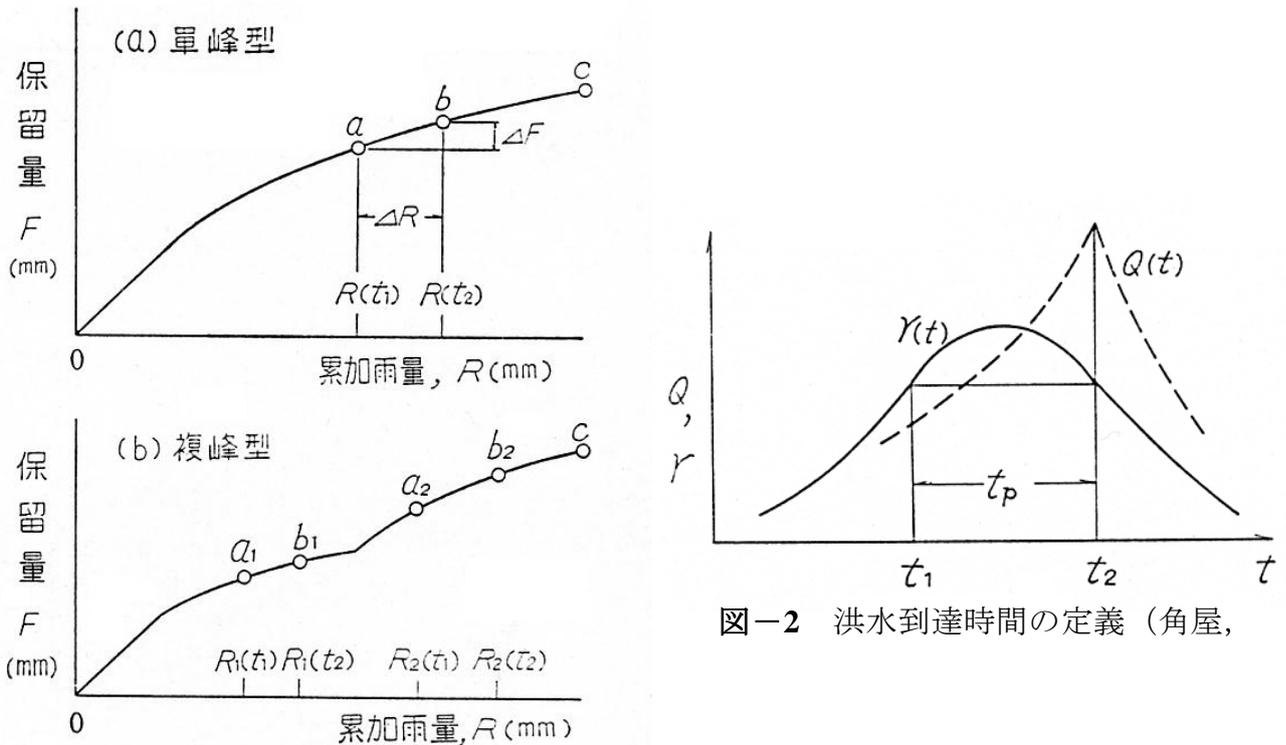


図-1 雨水保留量曲線の改善 (角屋, 1980)

である。**図-2**の時刻 t_1 、 t_2 における累加雨量 $R(t_1)$ 、 $R(t_2)$ 、ないしその差 $\Delta R = R(t_2) - R(t_1)$ は容易に計算できるから、この時刻間の保留量増分 ΔF あるいはその勾配 $\Delta F / \Delta R$ が次式で計算できる。

$$\Delta F = \Delta R - r_E t_p$$

$$\Delta F / \Delta R = 1 - f_p$$

ここに、 f_p はピーク流出係数で $f_p = r_E / r$ の関係を持つ。 r は洪水到達時間内の平均降雨強度 (mm/h)。

したがって、対象降雨に対する保留量曲線は、原点0とc点に加えて、上式を満足する点a、bを通るように描けばよい。一降雨期間中に降雨休止時間帯が含まれていれば、ハイドログラフのピークは2個以上となって、点a、bも2組以上存在することになり、**図-1(b)**に示すように、保留量曲線は2本以上の曲線の集合体になる。ただし、角屋は「この方法は洪水到達時間の概念を根底にしたものであるから、この概念に結びつかない小ピーク群まで対象にしてはならない」としている。

図-3に愛知川流域 (山林) と下狩川流域 (竹林) の保留量曲線を、**図-4**に天神川流域 (市街地) の保留量曲線を例示する (永井・角屋, 1981)。下狩川流域の1971年9月降雨、天神川流域の1974年7月降雨では、無降雨時間帯を考慮した保留量曲線が適用されている。**図-5**は、下狩川流域の1971年9月降雨に対して、雨水流法 (表面流モデル) と貯留関数法による流出解析が実施された結果である (永井・角屋, 1981)。ハイトグラフ、ハイドログラフともに三山となっているが、両モデルともにハイドログラフの再現性は大変良好である。この結果は、有効降雨の与え方に配慮すれば、無降雨・微降雨期間を含む出水に対しても、貯留関数法は十分適用可能であることを示している。

(4) 総雨量一直接流出高関係の改善法

雨水保留量曲線，すなわち累加雨量一累加保留量の関係は，総雨量一直接流出高関係と表裏の関係にあるから，角屋が推奨する改善法の考え方は，総雨量一直接流出高関係に対しても適用可能であろう。

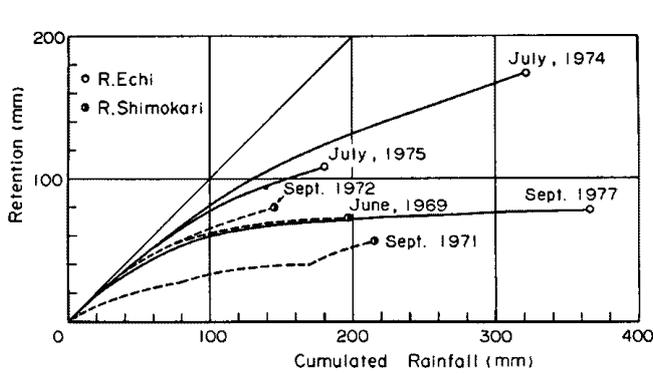


図-3 愛知川流域，下狩川流域の雨水保留量曲線
(永井・角屋，1981)

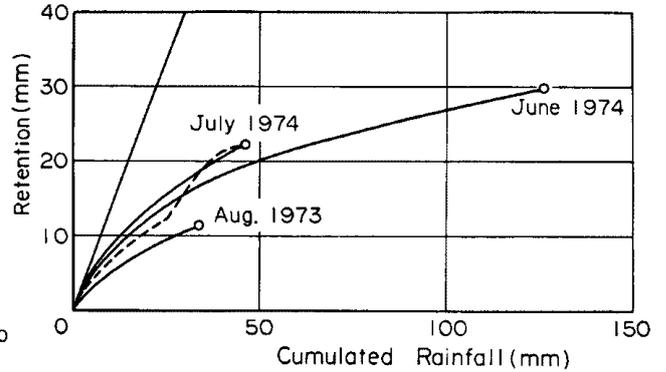


図-4 大神川流域の雨水保留量曲線
(永井・角屋，1981)

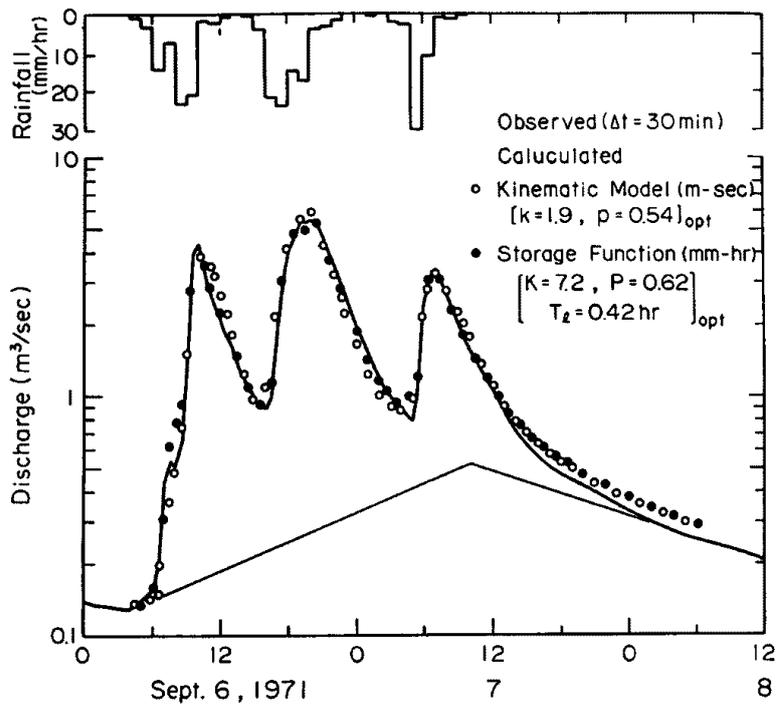


図-5 下狩川流域への雨水流法と貯留関数法の適用結果 (永井・角屋，1981)

総雨量一直接流出高関係を折線近似した「一次流出率と飽和雨量による方法」であれば，例えば，前半降雨に対する折線と後半降雨に対する折線を連結した階段状の折線群を適用すれば，無降雨・微降雨期間が続くことによる浸入能ないし保留能の回復を考慮することは一応可能である。

ただし，ハイドログラフやハイトグラフが複峰となる出水の全てにこうした配慮が必須という訳ではない。前述のような改善法が必要となるのは，「ハイ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」だけに限定されるものと思われる。例えば、ハイ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ので、一山洪水と同様の扱いが適当である。

3. まとめ

本稿では、一降雨期間内に無降雨期間ないし微降雨期間が連続し、浸入能ないし保留能の回復が見込まれる場合の有効降雨推定法として、現時点で考えられる方法を論じた。なお、既に述べた通り、無降雨・微降雨期間での浸入能ないし保留能の回復は、有効降雨を入力として直接流出量を計算する流出モデルであれば、どのモデルにも共通した課題であって、流出モデルの問題というよりは、有効降雨推定法の問題である点に注意されたい。さらに、対応方法についての議論では、流出域と浸透域への分割と有効降雨の扱いが一体となった木村オリジナルの貯留関数法（1975）に限定せず、貯留関数法を広義に捉えて、同法への入力となる有効降雨の推定法を論じている点にも注意されたい。

引用文献

- 福嶋義宏・鈴木雅一（1986）：山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10年連続日・時間記録への適用，京都大学農学部附属演習林報告，第57号，pp.162-185
- 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（1979）：流出解析手法（その1）－1. 雨水流出現象とその計測・解析－，農業土木学会誌，第47巻10号，pp.63-73
- 角屋 睦（1980）：流出解析手法（その8）－洪水到達時間と合理式－，農業土木学会誌，第48巻8号，pp.39-44
- 角屋 睦・永井明博（1980）：流出解析手法（その10）－4. 貯留法－貯留関数法による洪水流出解析－，農業土木学会誌，第48巻10号，pp.43-50
- 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
- 角屋 睦・田中丸治哉（1995）：長短期流出両用モデルによる実時間洪水予測，農業土木学会論文集，第177号，pp.31-41
- 木村俊晃（1975）：貯留関数法，河鍋書店
- 永井明博・角屋 睦（1978）：洪水流出モデルの適用比較－丘陵山地流域及び市街地流域を対象として－，京都大学防災研究所年報，第21号B-2，pp.235-249
- 永井明博・角屋 睦（1981）：洪水流出モデルの最適定数，京都大学防災研究所年報，第24号B-2，pp.183-196
- 永井明博・角屋 睦・杉山博信・鈴木克英（1982）：貯留関数法の総合化，京都大学防災研究所年報，第25号B-2，pp.207-220
- 永井明博・角屋 睦（1983）：長短期両用貯留型流出モデルとその最適同定，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，pp.261-272
- 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

菅原正巳 (1972) : 流出解析法 (水文学講座 7), 共立出版

杉山博信・角屋 睦 (1988a) : 貯留関数モデル定数に関する一考察, 農業土木学会論文集, 第 133 号,
pp.11-18

杉山博信・角屋 睦・永井明博 (1988b) : 総合貯留関数モデルに関する研究, 農業土木学会論文集, 第
134 号, pp.69-75

＜参考資料 12＞ 昭和 22 年洪水（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. はじめに

本分科会専門家ヒアリングでは、「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う二山型ピーク洪水であり、貯留関数法は二山型洪水には適さない。」との指摘があった。分科会では、まず、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。

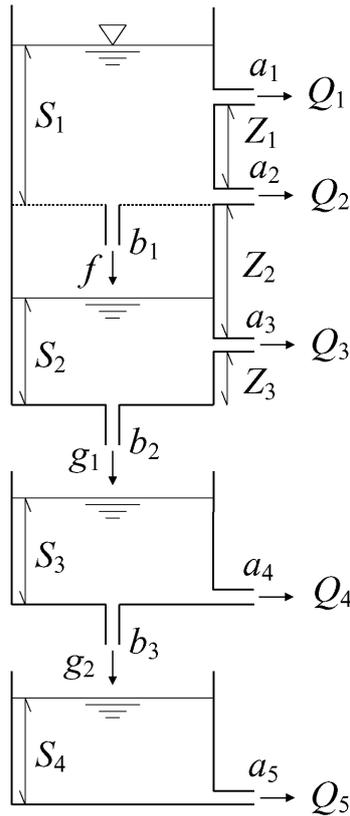
2. 長短期流出両用モデルの適用方法と適用結果

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 年洪水, 昭和 57 年洪水, 昭和 22 年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 年洪水と昭和 57 年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-1 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 年洪水	昭和 57 年洪水	昭和 22 年洪水
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_l	—	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_l 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。

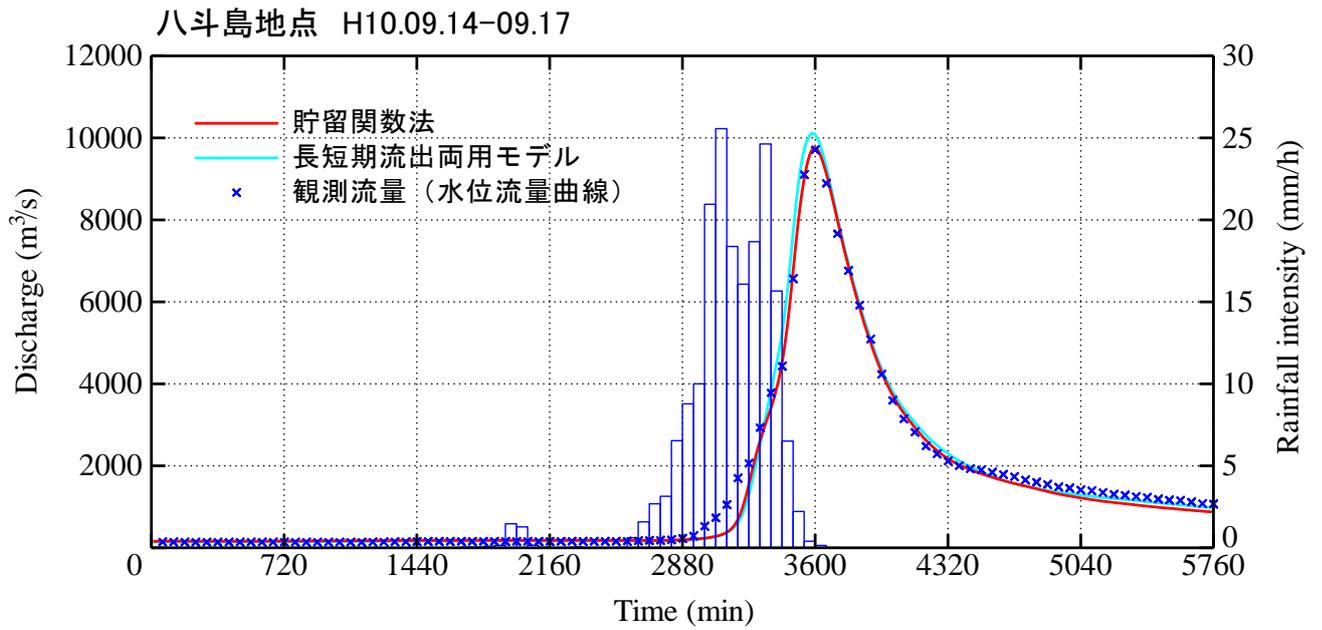


図-2 平成 10 年洪水の計算結果

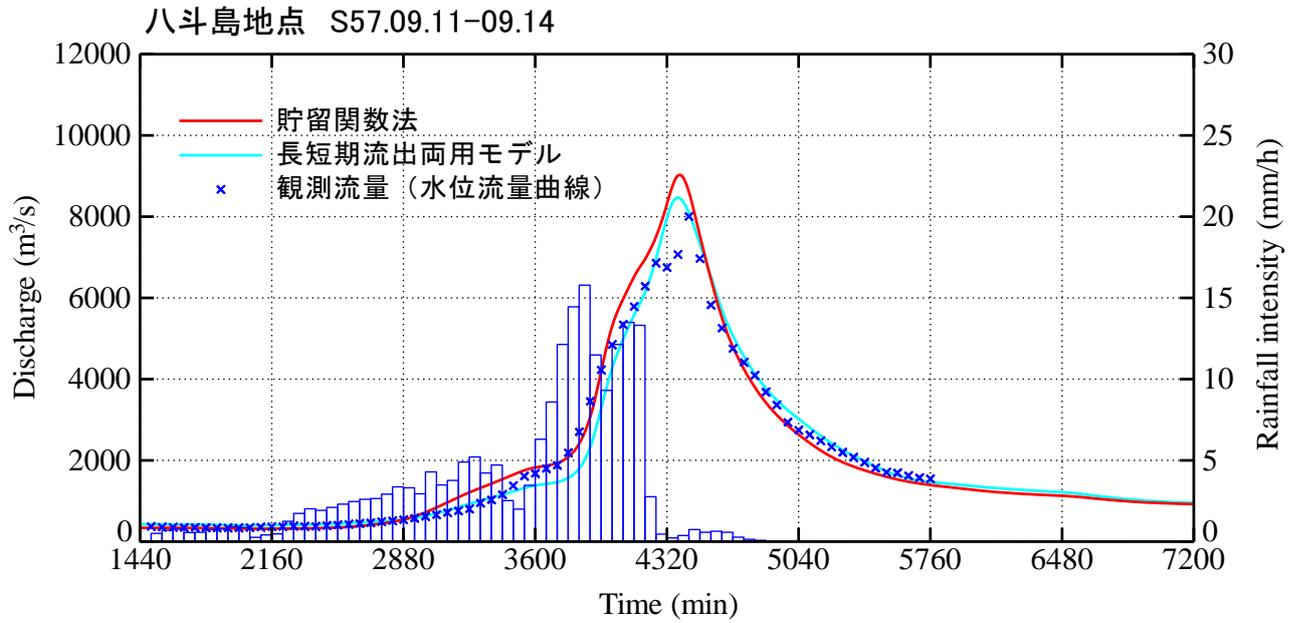


図-3 昭和 57 年洪水の計算結果

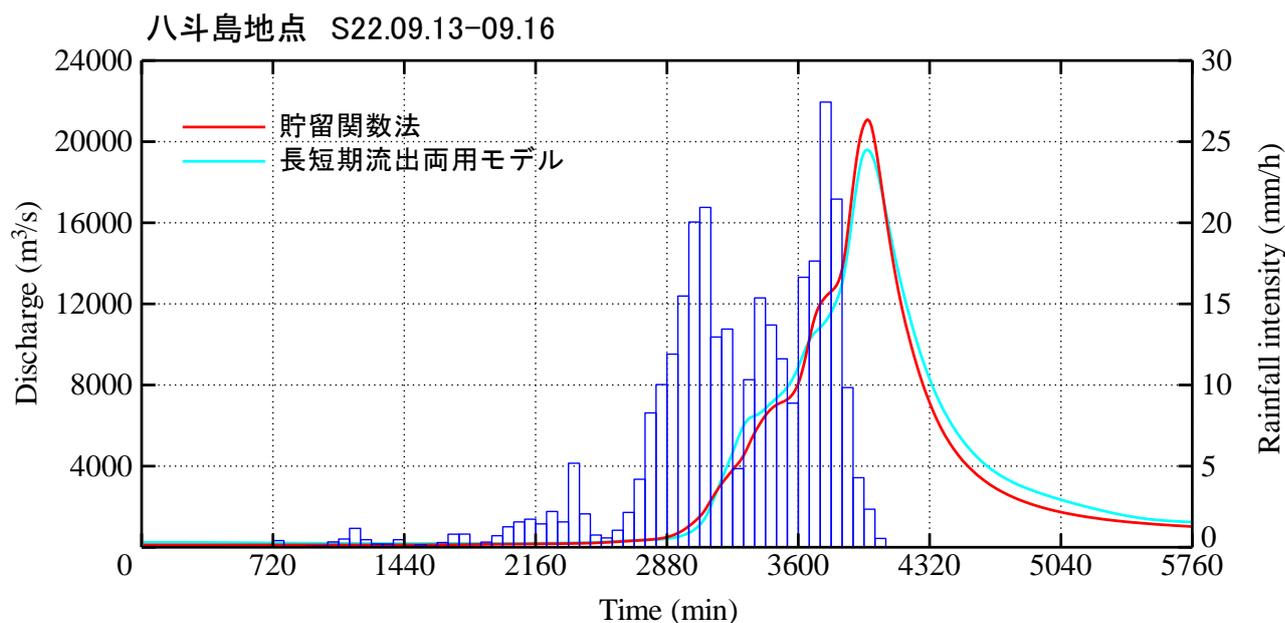


図-4 昭和 22 年洪水の計算結果

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 年洪水への適用結果

昭和 57 年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 年洪水への適用結果

昭和 22 年洪水については、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 年洪水と昭和 57 年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 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 年洪水、昭和 57 年洪水、昭和 22 年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。

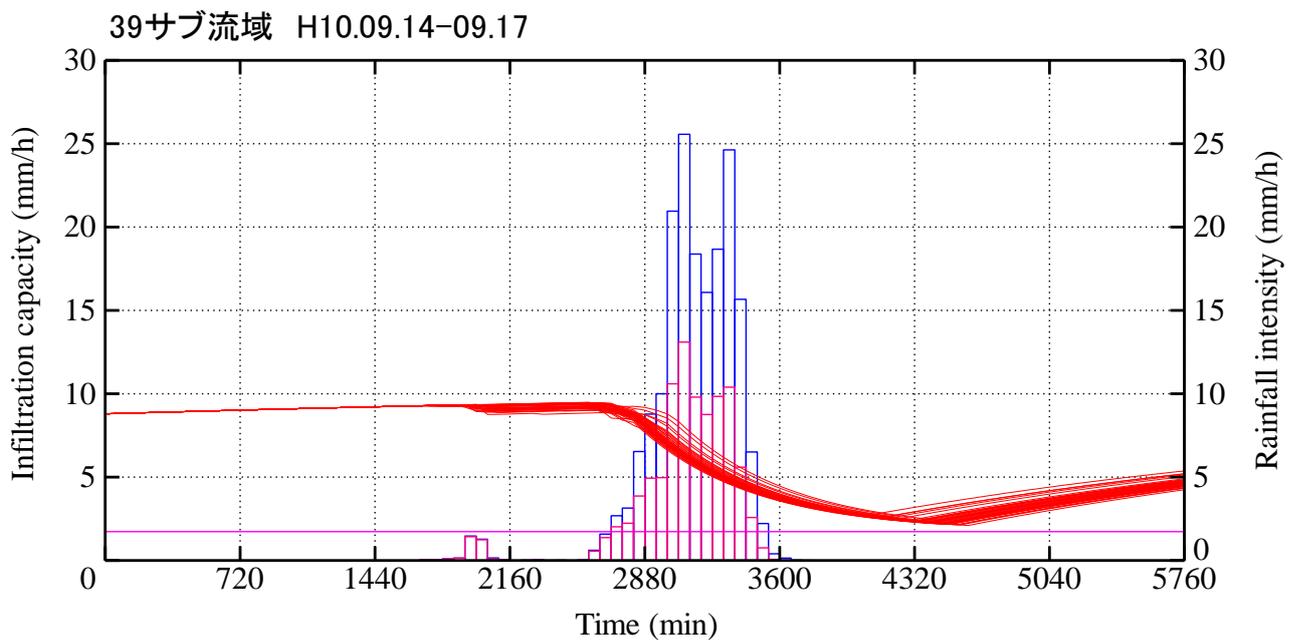


図-5 平成10年洪水における浸入能の時間的变化

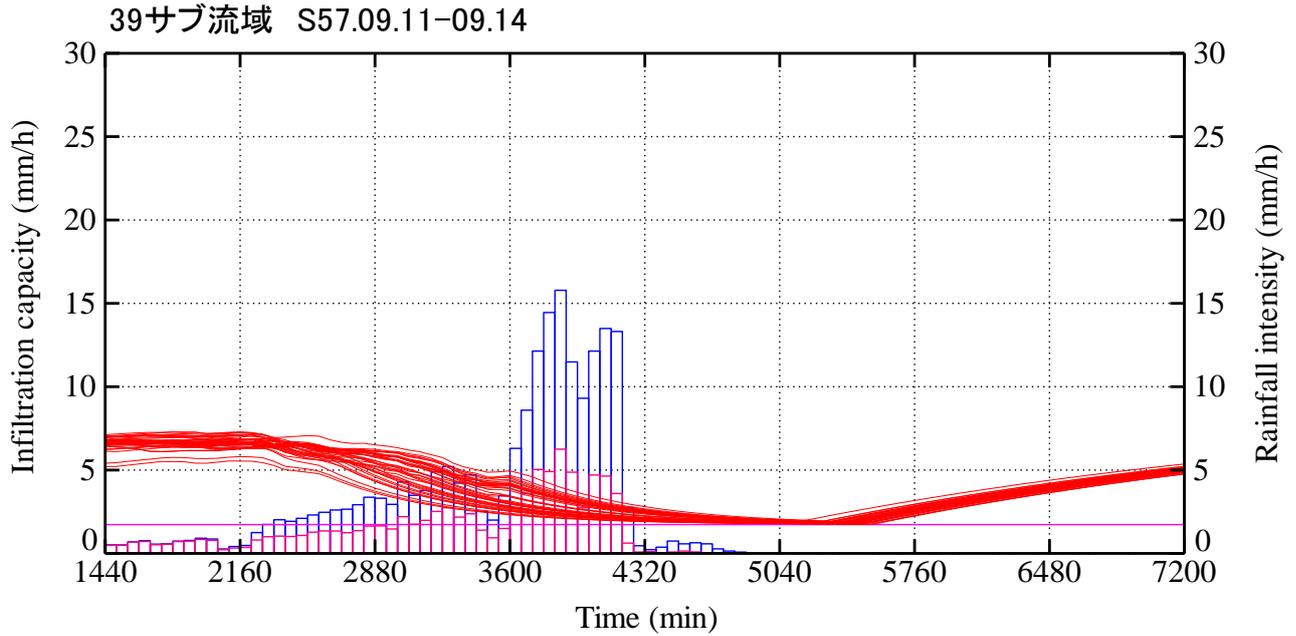


図-6 昭和 57 年洪水における浸入能の時間的变化

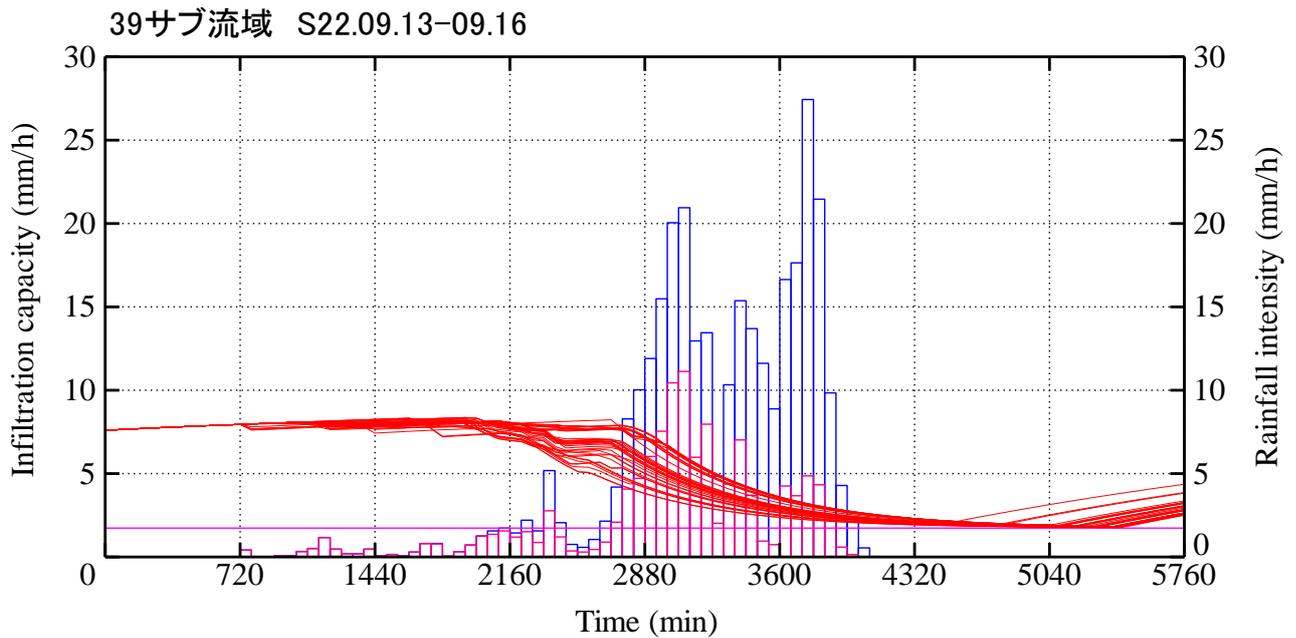


図-7 昭和 22 年洪水における浸入能の時間的变化

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. おわりに

本稿では、昭和 22 年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 年洪水については、流域平均雨量で見ると降雨前半の第一ピークと降雨後半の第二ピークの間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と判断された。このため、昭和 22 年洪水において、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。

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 の時間的変化はHortonの浸入能方程式に従う。同式の最終浸入能 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総雨量ー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ー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) - 補給能モデルによる地下水流出解析 -, 農業土木学会誌, 第 48 卷, 第 9 号, pp.53-59

＜参考資料 13＞ 氾濫に伴う河道域の拡大がハイドログラフに及ぼす影響の検討—河道 K（烏川・碓氷川合流点～烏川・鍬川合流点）の事例—

1. 概説

資料 7、資料 8 によれば、昭和 22 年 9 月洪水における八斗島地点のピーク流量は、 $21,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度と見積もられているが、その一方、流量観測の結果から八斗島地点の実際のピーク流量は $17,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度と推定されている。両者の差は、八斗島地点の上流で生じた氾濫によるものとされているが、その詳細は明らかになっていない。

国土交通省によれば、昭和 33 年洪水、昭和 34 年洪水、昭和 57 年洪水、平成 10 年洪水の計算について「河道条件は、実際の堤防等の整備の状況とし、それを考慮して計算を行う」との記載がある一方、昭和 22 年洪水の計算については「河道条件は、将来的に堤防等の整備が進んだ状況を想定し、それを用いて計算を行う」との記載があり、複数の河道区間において、現況堤防高を嵩上げた計画堤防高が設定されている。

特に、現行モデルの河道 La（烏川・碓氷川合流点～烏川・鍬川合流点の区間）については、現況堤防高 82.1m に対して、計画堤防高が 87.1m となっており、かなり大きな嵩上げとなっている。こうした扱いについては、昭和 22 年洪水に対して通水能が不足している河道区間において、とにかく上流からの流量を通過させる河道断面を計算上想定しているものと解釈される。このような扱いは、新モデルでの河道計算についても同様であろう。

そこで、ここでは、新モデルの河道 K（烏川・碓氷川合流点～烏川・鍬川合流点の区間）を事例として、現況堤防高のままで昭和 22 年洪水を流下させ、本来の河道域に加えて、河道域に隣接した氾濫域が河道の一部としてふるまうと仮定した流出計算を実施して、氾濫に伴う河道域の拡大と河道貯留量の増大がハイドログラフに及ぼす影響を試算した。ただし、以下に示す解析結果は、これまで開発した貯留関数法を適用した概略計算であり、現地における氾濫現象を精緻にモデル化したものではないことに留意する必要がある。

2. 検討方法

(1) 河道諸元の設定

烏川・碓氷川合流点～烏川・鍬川合流点の区間は、現行モデルでは河道 La、新モデルでは河道 K に相当する。現時点では、同区間の長さや勾配を把握していないが、地図上で大雑把に見積もると、この区間の長さはおよそ 8.4km であった。河道勾配はとりあえず 1/500 を仮定する。

国土交通省による La 河道の横断図を、同区間の代表断面と仮定する。右岸の現況堤防高は 82.1m であるが、簡単に扱うためこれを 82m とし、河床の細かい起伏は無視して、図-1 に示す単純な断面を想定した。なお、「利根川水系烏川・神流川・鍬川・碓氷川浸水想定区域図」（年超過確率 1/100 の降雨を想定して国土交通省が作成）によれば、当該区間では、烏川右岸に沿って幅 500m 程度の浸水域が切れ目なく連なっており、浸水深さはほとんどの区間で 1.0m 以上、半分以上の区間で 2.0m 以上である。そこで、右岸側に幅 500m の平坦な氾濫域を設定した。

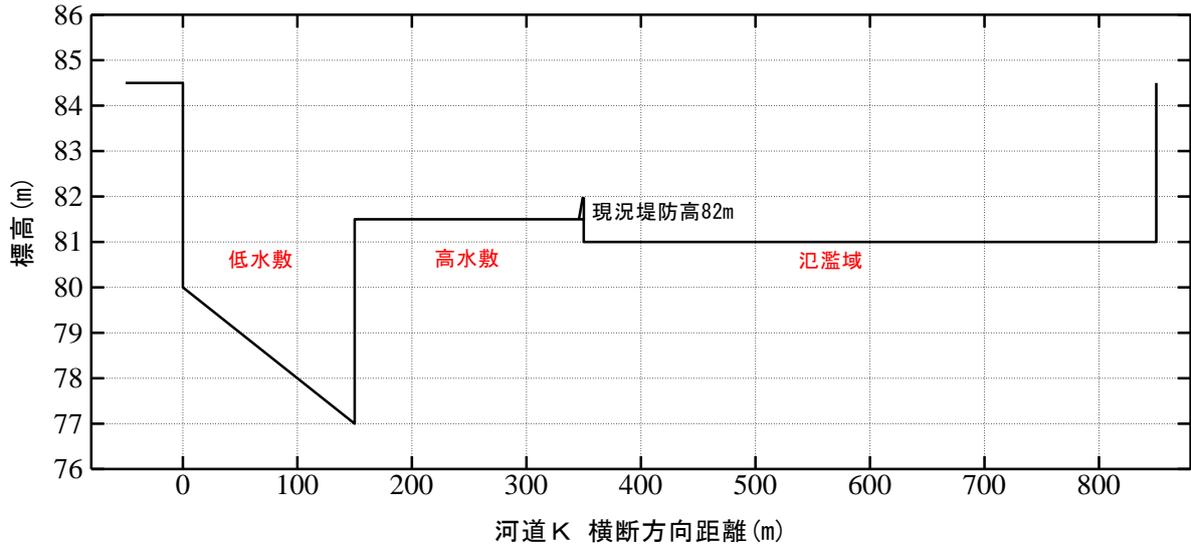


図-1 河道断面の設定 (河道 K)

(2) 流量-貯留量関係図に基づく河道パラメータの設定

ここでは、河道の貯留関数に基づいて、河道流の計算を行うことから、まず流量-貯留量関係図を作成して、河道パラメータを設定した。流量-貯留量関係図の作成に際しては、いくつかの水深を仮定して、河道貯留量を求めるとともに、Manning 式で流量を計算する。粗度係数は、低水敷が 0.035、高水敷が 0.045、氾濫域が 0.070 と仮定した。

新モデルにおける河道の貯留関数は、次式である。

$$S_l = KQ_l^P - T_l Q_l \quad (1)$$

ここに、 S_l : みかけの貯留量 (m^3)、 Q_l : 遅れ時間 T_l を考慮した流出量 (m^3/s)、 K, P : 河道パラメータ、 T_l : 河道の遅れ時間 (s)。ただし、 T_l を秒単位ではなく時間単位とするときは、貯留量 S_l とパラメータ K は、それぞれ 3600 で除したものになる。

上式を適用する場合、流量-貯留量関係図の横軸に流量 Q_l を、縦軸に $S_l + T_l Q_l$ をプロットする。このため、遅れ時間 T_l については、新モデルのパラメータとして決定されている値 (河道 K では 0.281h) をそのまま用いることとして、流量-貯留量関係図からパラメータ K, P を設定する。

図-2 に増水期における水位と流水断面の関係を、図-3 に減水期における水位と流水断面の関係を示す。増水期においては、水位が現況堤防高 (82m) に達するまでは、河道域 (低水敷、高水敷) だけが河道となるが、その後、氾濫域が河道の一部となり、氾濫域の水位が現況堤防高に達した後は、河道域と氾濫域が一体となって河道を形成するものとした。一方、減水期においては、水位が現況堤防高に達した後、低水敷と氾濫域が河道となり、次いで低水敷のみが河道となるものとした。

このような条件設定の下、0.5m ないし 1m 刻みで水位を仮定し、増水期と減水期のそれぞれについて流量-貯留量関係図を作成した。図-4 に増水期の関係図を、図-5 に減水期の関係図を示す。水位が低く低水敷しか流れないときと、水位が高く河道域と氾濫域が一体となって河道を形成するときの流量-貯留量関係は、増水期と減水期で同じとなるが、二つの状態の移行期については、増水期と減水期で

流量－貯留量関係が異なっている．そこで，増水期と減水期のそれぞれについて，三つの直線から成る折線で流量－貯留量関係を近似することにした．

図－4 及び図－5 から求めた貯留関数（流量－貯留量関係式）は，以下の通りである．なお，先に述べた通り $T_l = 0.281(\text{h})$ で， S_l の単位は $(\text{m}^3/\text{s}) \cdot \text{h}$ ， Q_l の単位は (m^3/s) である．

①増水期の貯留関数

$$\begin{aligned} S_l &= 7Q_l^{0.750} - T_l Q_l & Q_l < 1541 \\ S_l &= 1.306 \times 10^{-6} Q_l^{2.861} - T_l Q_l & 1541 \leq Q_l < 1961 \\ S_l &= 7Q_l^{0.811} - T_l Q_l & Q_l \geq 1961 \end{aligned}$$

②減水期の貯留関数

$$\begin{aligned} S_l &= 7Q_l^{0.750} - T_l Q_l & Q_l < 869 \\ S_l &= 1.175 \times 10^{-1} Q_l^{1.354} - T_l Q_l & 869 \leq Q_l < 1858 \\ S_l &= 7Q_l^{0.811} - T_l Q_l & Q_l \geq 1858 \end{aligned}$$

このように，流量に応じて河道流の貯留関数を変化させることで，氾濫に伴う河道域の拡大と河道貯留量の増大を表現することにした．

(3) 流出計算

流出計算には，流出解析レビューワーキンググループが独自に開発した「サブ流域解析用プログラム」（第7回分科会資料9）と「河道解析用プログラム」（第8回分科会資料4及び資料5）を使用する．流域平均雨量の扱い，有効降雨の扱い，基底流量の扱いは，これまでと同じであり，違いは河道 K に上述の貯留関数が導入されている点のみである．なお，河道域の拡大がない場合については，第8回分科会資料5における計算結果をそのまま用いる．

3. 検討結果

昭和22年9月洪水を対象として，八斗島地点上流域の流出計算を実施した．39サブ流域の流域平均雨量は，平成23年5月27日に国土交通省から提示されたもの（日雨量を利用したもの），基底流量には，平成11年8月洪水における基底流量を流用した．

図－6に河道 K 下流端のハイドログラフを示す．氾濫に伴う河道域の拡大がない場合とそれがある場合のハイドログラフを示しているが，河道域拡大に伴って，ピーク流量が小さくなるとともに，ハイドログラフの立ち上がりとピーク流量の発生時刻が遅くなっていることが分かる．また，図－7に岩鼻地点のハイドログラフを示す．岩鼻地点は，河道 K の流れと河道 M（鏑川）の流れが合流した直後の点である．同地点においても，河道域の拡大に伴ってピーク流量が減少している．

表－1に各地点の計算ピーク流量を示す．河道 K 下流端では，河道域の拡大に伴ってピーク流量が 356 (m^3/s) 減少しているが，岩鼻地点では，ピーク流量の減少が 840 (m^3/s) と大きくなっている点が興味深い．図－6に河道 M 下流端のハイドログラフも併記しているが，河道域の拡大がある場合は，河道 K 下流端のハイドログラフがかなり遅れており，河道 K と河道 M が合流した後の岩鼻地点では，ピーク流量の減少がより大きくなったものと解釈できる．結果的に，八斗島地点でのピーク流量の減少も，河

道 K 下流端における減少より大きくなっている。

表-1 各地点の計算ピーク流量

河道の扱い	河道 K 下流端 (m ³ /s)	岩鼻地点 (m ³ /s)	八斗島地点 (m ³ /s)
河道域の拡大なし	3549	7442	21092
河道域の拡大あり	3193	6602	20494
ピーク流量の変化	-356	-840	-598

以上の検討結果を考えれば、八斗島地点の実際のピーク流量が 17,000 (m³/s) となった原因の一つとして、本稿で想定した氾濫に伴う河道域の拡大と河道貯留量の増大が挙げられよう。

なお、参考までに、岩鼻地点の計算ハイドログラフ (図-7) には、流量観測値 (浮子による、第 8 回分科会資料 11) も併記している。本稿の計算は、河道の長さ、勾配、河道断面を正しく与えておらず、あくまで氾濫に伴う河道域の拡大がハイドログラフに与える影響を見るための感度分析を実施したに過ぎないが、河道域の拡大を想定した場合の計算ハイドログラフは、流量観測値に概ね合致している。ただし、烏川の上流や鏑川においても氾濫が生じていた可能性があり、それらを考慮した計算を行えば、岩鼻地点の計算ピーク流量は、流量観測値よりも小さくなる可能性も考えられる。

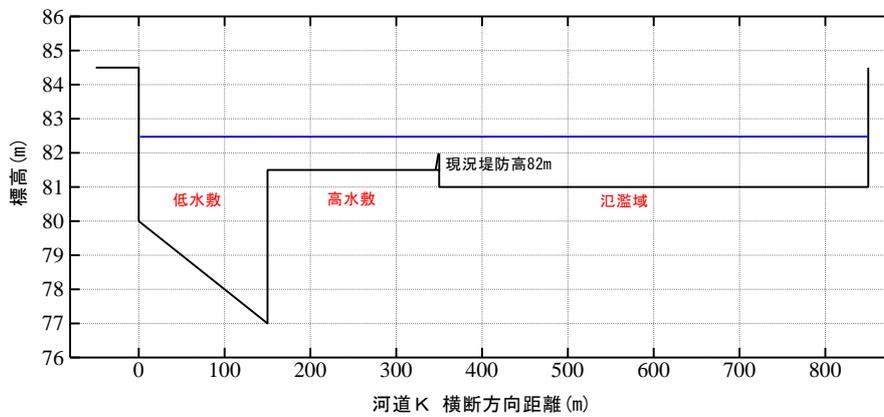
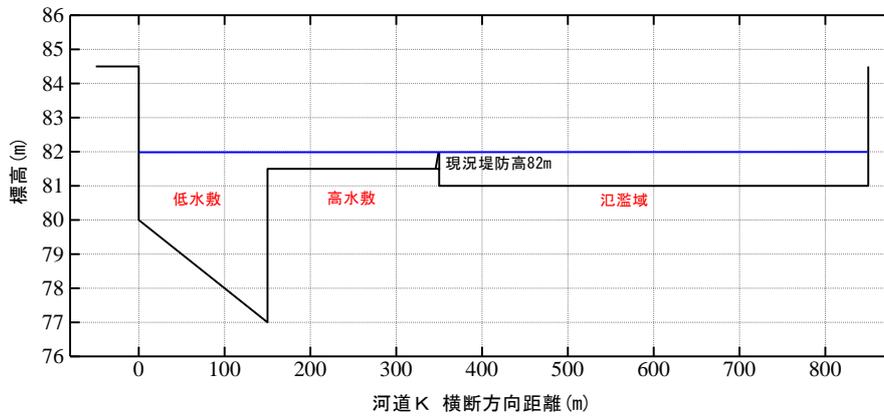
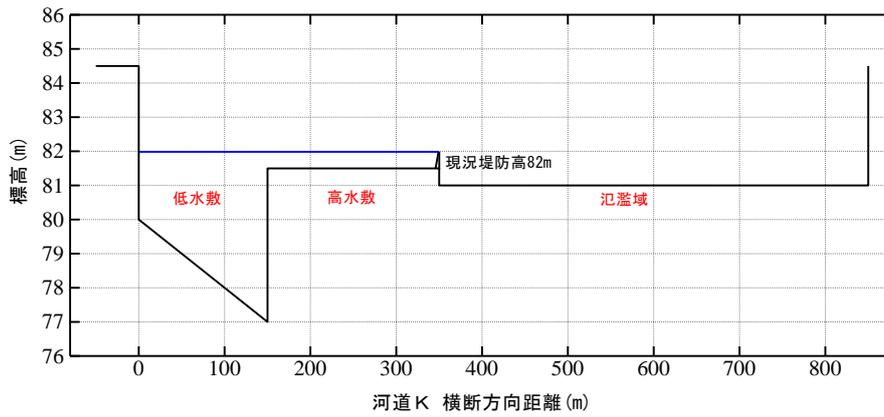
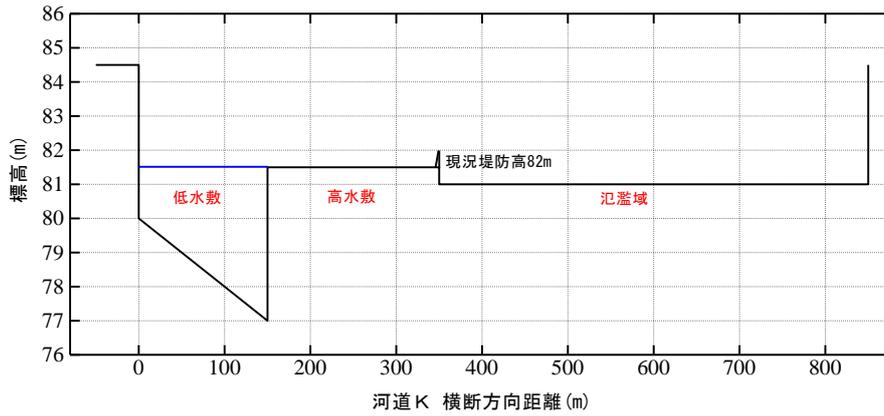


図-2 増水期における水位と流水断面の関係 (増水期 I ~ IV)

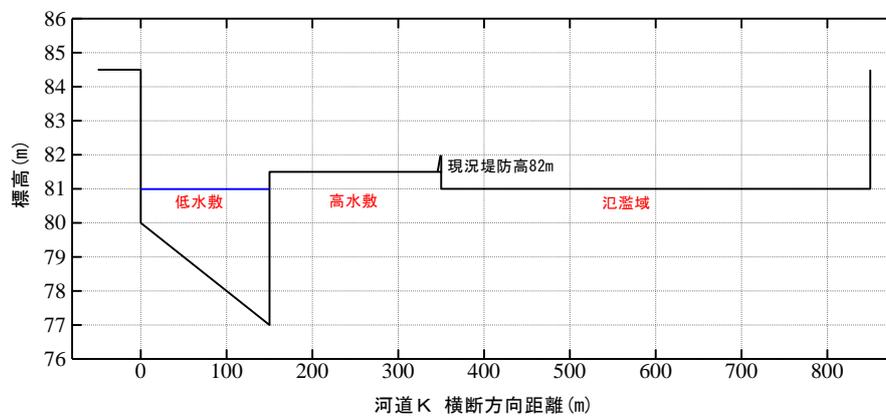
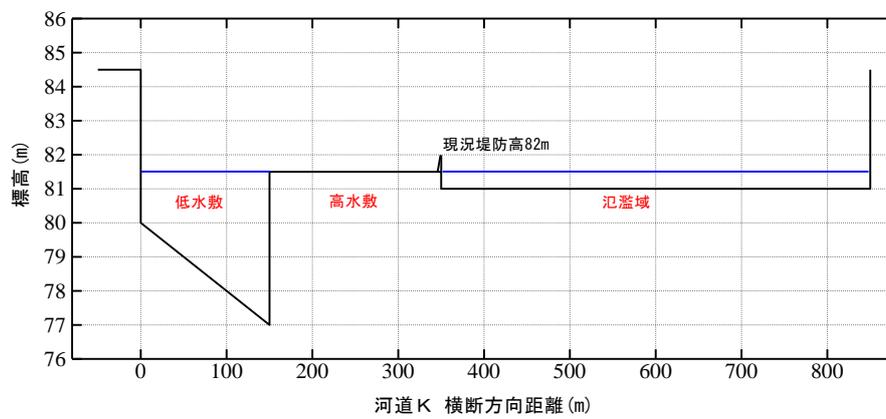
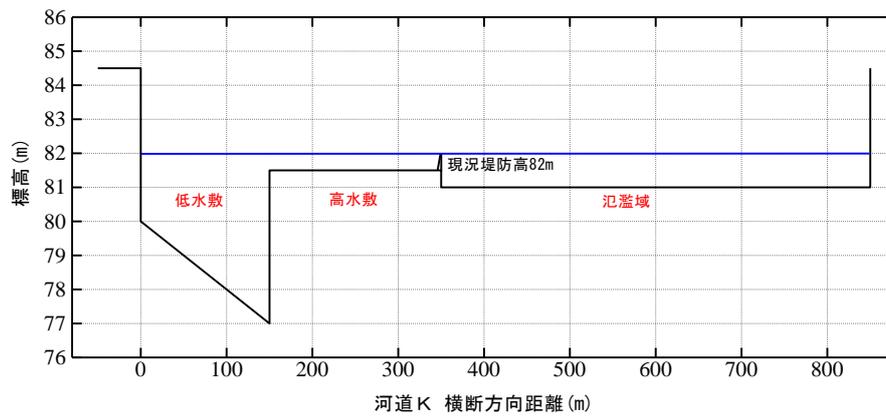
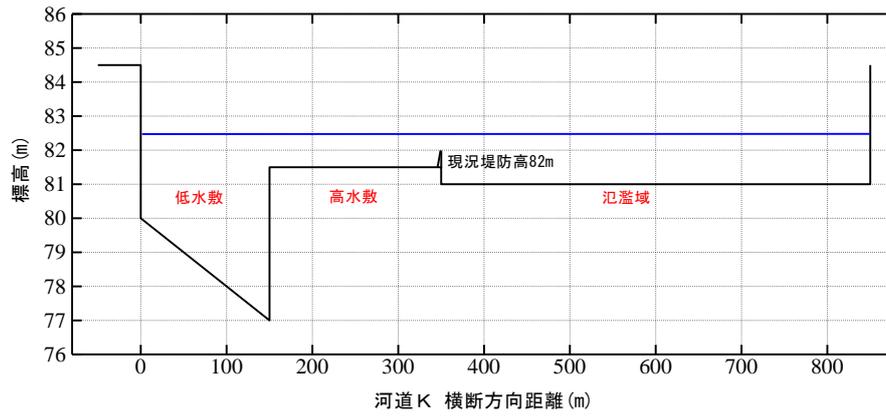


図-3 減水期における水位と流水断面の関係（減水期 I ~ IV）

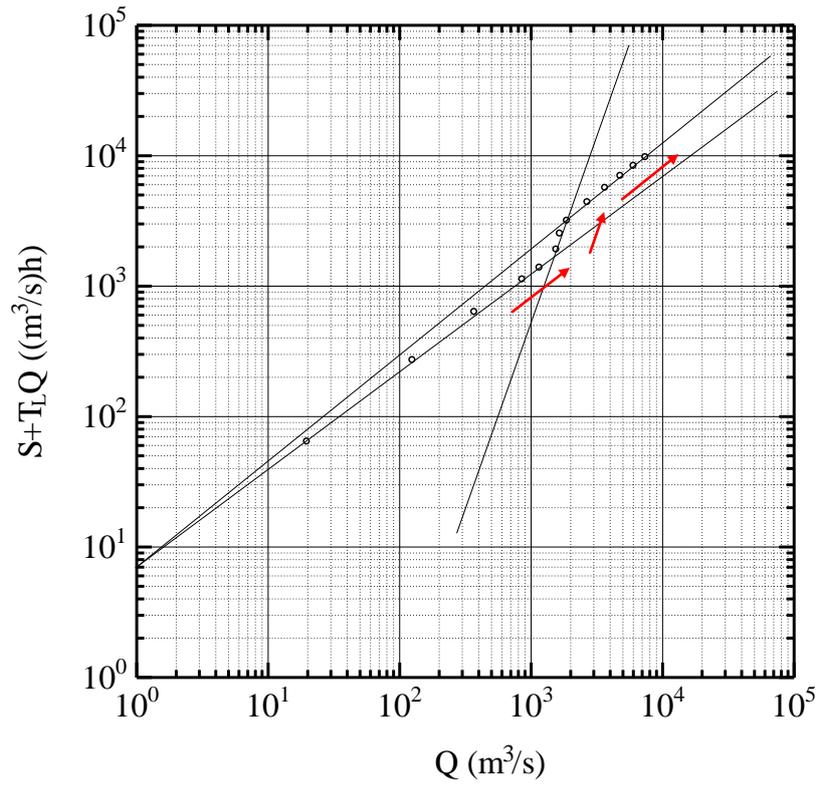


図-4 増水期における流量-貯留量関係

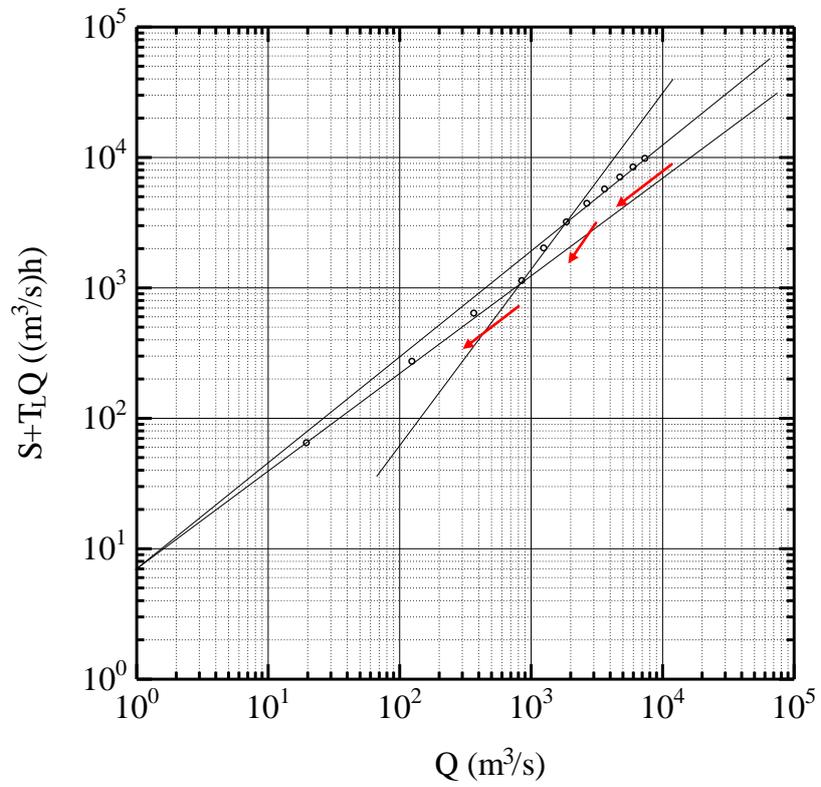


図-5 減水期における流量-貯留量関係

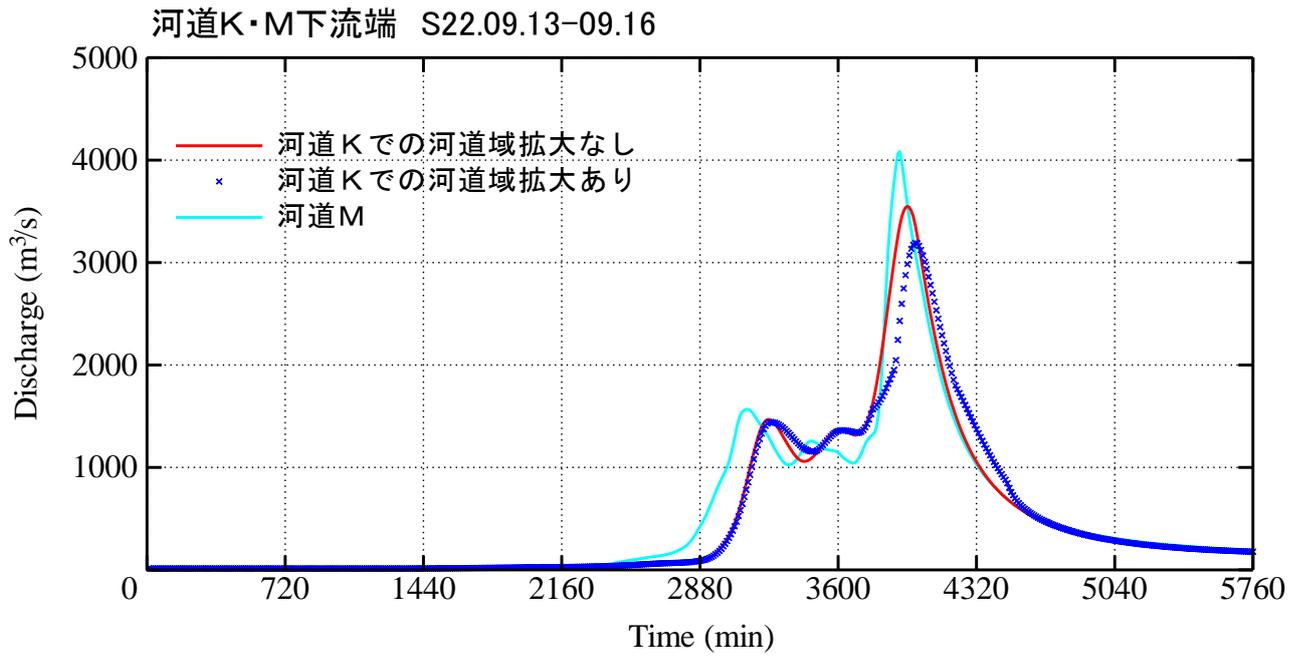


図-6 河道Kの下流端流量に対する河道域拡大の影響

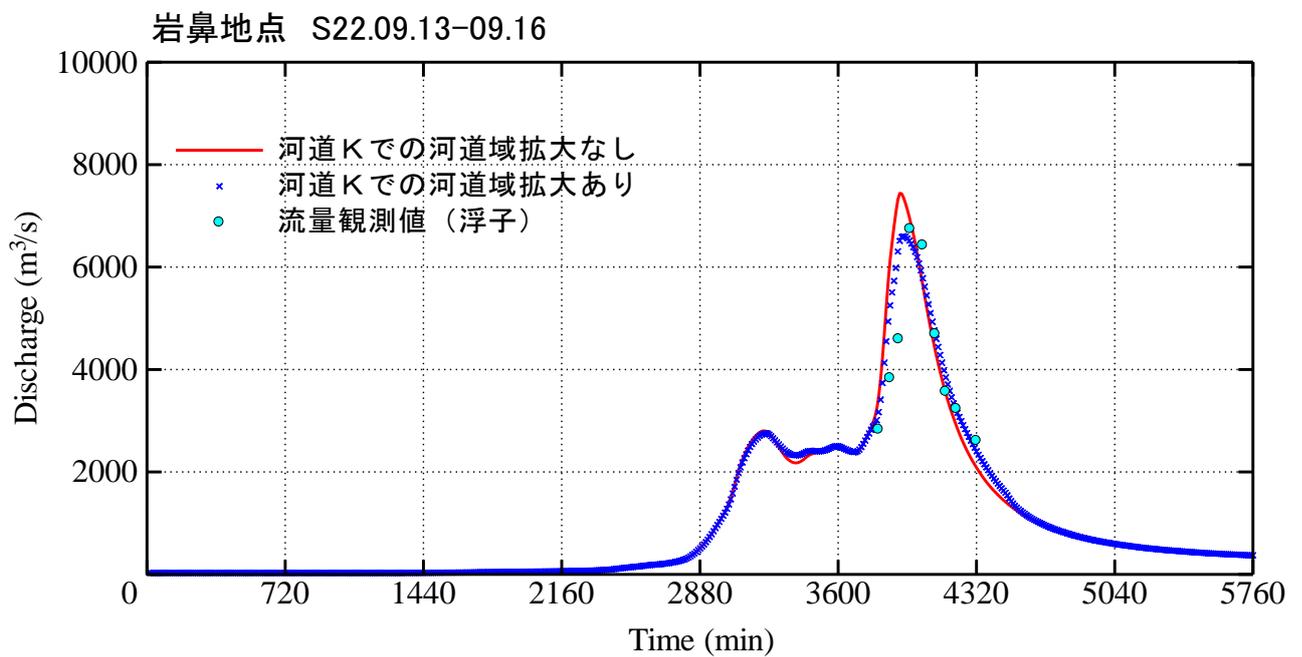


図-7 岩鼻地点の流量に対する河道域拡大の影響

<参考資料 14> 有効降雨パラメータの違いによる昭和 22 年洪水ピーク流量の推定幅について

昭和 22 年洪水のピーク流量の推定幅を考えるために、既往 4 洪水（昭和 33 年洪水、昭和 34 年洪水、昭和 57 年洪水と平成 10 年洪水）で同定された有効降雨パラメータ R_0 と R_{sa} の値（参考資料 6「新モデルによる洪水流出計算の再現に関する報告」120 ページ表 1 参照）を設定して、昭和 22 年洪水の流出計算を実施した。表 1 は得られたピーク流量である。

表 1：既往 4 洪水の有効降雨パラメータを設定したときの、昭和 22 年洪水の推定ピーク流量

既往 4 洪水	昭和 33 年	昭和 34 年	昭和 57 年	平成 10 年
ピーク流量 (m^3/s)	21,199	21,238	20,946	20,551
平均的な R_{sa} を設定して得られるピーク流量(20619 m^3/s)からの相対的差異	+2.8%	+3.0%	+1.6%	-0.3%

これらの値を、昭和 22 年 9 月洪水に対する R_{sa} の感度分析によって得られたピーク流量（参考資料 6）に重ねて示した結果を図 1 に示す。既往 4 洪水の有効降雨パラメータを設定して得られる洪水ピーク流量は、黄色の帯の範囲内にある。洪水ピーク流量に対する R_{sa} の感度が小さな領域にあるため、この推定幅の範囲は狭い。平均的な R_{sa} を設定して得られるピーク流量(20,619 m^3/s)からの相対的差異を考えた場合に-0.3%~+2.8%の範囲にあることが分かる。

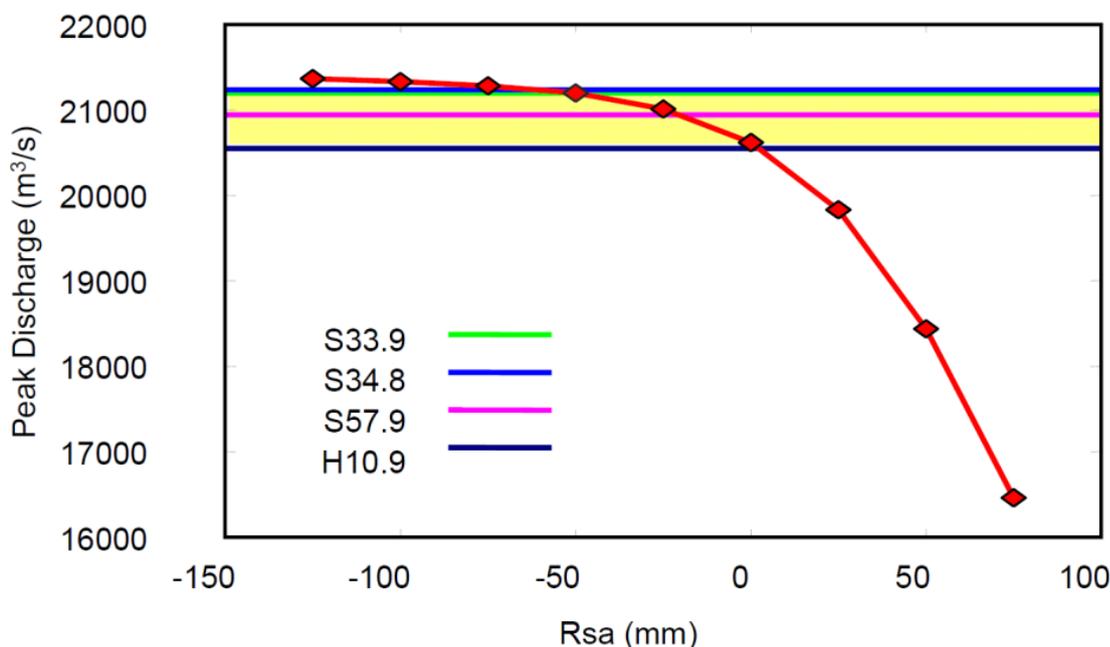


図 1： R_{sa} の違いによる昭和 22 年洪水の推定幅