

洪水位の短時間予測に関する研究

Short-term Forecasting for Water Level of a Flood

九州大学工学部 正 員 平野 宗夫

九州大学工学部 正 員 ○森山 聡之

九州大学大学院 学生員 山下 三平

建設技術研究所 正 員 中山比佐雄

1. まえがき

洪水のオンライン予測に関しては従来から多くの手法が提案されており、各地の河川で使用されている。これらの多くは、各測水所の水位（または水位と雨量）の相関を利用して予測する方法と、流出解析法を適用して降雨から流量を予測する手法とに大別できるように思われる。しかし、前者は、使用するデータの選択が適切であればかなりの精度が期待できるが、物理的意義が不明確であるため一般性に乏しく、後者については、流出解析法の進歩とともに、カルマンフィルターの導入^{1),2)}をはじめ興味ある研究が多いが、流出システムの予測精度に問題があるため、降雨のみからの予測には精度的に限界があり、その適用性については検討の余地が多い。

また、予・警報の面から言えば予測時間が長いほど有効な対応を取り易いが、予測時間が長くなると必然的に降雨予測に依存する度合が大きくなるから、降雨予測の精度が悪い現状では、予測精度は急激に低下する。従って、精度を余り落とさずに予測できる時間の範囲を明らかにすることが必要になってくる。また、精度向上のためには水位計や雨量計をどう配置したらよいか、などについても有用な情報がえられるような見通しのよいモデルが望ましい。本研究は、上記の目的に合致した物理性のあるモデルを作製すべく行われたものである。一般に、雨量データは水位データに比し測定精度が劣る。また、雨量は流量に換算しなければならないが、水位データはこの換算が済んだあとのデータであるから、この点からも雨量より精度がよい筈である。従って本研究では、水位データを優先し、雨量は補助的なものとして取り扱う。水位流量曲線もあまり精度のよいものではないので流量は使用せず、予測対象の水理量は流水断面積とし、予測した流積を水位に換算することとする。以上により作製した洪水位の予測手法を実河川に適用してモデルの検証を行う。

2. 予測式の誘導

河道における不定流の連続の式と運動の式は流量を Q 、断面積を A 、河道への流入量を q_* として、それぞれ次のように表わすことが出来る。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_* \quad (1) \quad Q = KA^P \quad (2)$$

ここに、 t は時刻、 x は流下方向に測った距離である。(1)、(2)式を変形して特性曲線法で解くと、次式がえられる。

$$A_2(t) - A_1(t - \tau_{21}) = \int_{t-\tau_{21}}^t q_* dt - \int_{t-\tau_{21}}^t KA^P \frac{\partial K}{\partial x} dt \quad (3)$$

ここに、添字1、2は、上流及び下流の流量観測点を示し、 τ_{21} は2地点間の洪水の到達時間である。式(3)右辺第2項は、次式のように近似できる。

$$\int_{t-\tau_{21}}^t KA^P \frac{\partial K}{\partial x} dt = \int_0^{L_{21}} \frac{A}{P} \frac{\partial K}{\partial x} dx \approx \frac{L_{21}}{2} \left\{ \frac{A_2}{P_2} \frac{\partial K_2}{\partial x} + \frac{A_1}{P_1} \frac{\partial K_1}{\partial x} \right\} = C_1 A_1(t - \tau_{21}) + C_2 A_2(t) \quad (4)$$

ここに、 L_{21} は流量観測点1、2の距離、 $C = (L/2P)(\partial K/\partial x)$ である。式(3)において予測時間 I を考慮して時刻 $t+I$ における下流側の断面積を表わすと、

$$A_2(t+I)-A_1(t+I-\tau_{21})=\int_{t+I-\tau_{21}}^{t+I} q_* dt - C_1 A_1(t+I-\tau_{21}) - C_2 A_2(t+I) \quad (5)$$

式(3)に式(4)を代入しさらに式(5)から引くと、

$$A_2(t+I)-A_2(t)=k\left\{A_1(t+I-\tau_{S2,1})-A_1(t-\tau_{S2,1})\right\}+m\left\{\int_{t+I-\tau_{S2,1}}^{t+I} q_* dt - \int_{t-\tau_{S2,1}}^t q_* dt\right\} \quad (6)$$

ここに、 $k=(1-C_1)/(1+C_2)$ 、 $m=1/(1+C_2)$ である。

次に斜面からの流入量 q_* については次のように取り扱う。

$$\int_{t-\tau_{S2,1}}^t q_* dt = \tau_{S2,1} q_*(t-\tau_{S2,1}) \quad (7)$$

上式は中間値の定理に相当する。 q_* に単位図法を適用すると、

$$q_*(t-\tau_S)=\int_0^{t-\tau_S} l \cdot f \cdot u(\tau) r(t-\tau_S-\tau) d\tau \quad (8)$$

ここに、 l は斜面長、 f は流出係数、 $u(\tau)$ は瞬間単位図である。式(7)、(8)における τ_S の導入は、現象を忠実に表わすためというより、「このような仮定が許されると τ_S 時間の降雨予測が不必要となる」という理由によるものである。以下、本論文ではこの τ_S のことを斜面における遅れ時間と呼ぶことにする。式(8)を式(6)に適用して、

$$A_2(t+I)-A_2(t)=k\left\{A_1(t+I-\tau_{21})-A_1(t-\tau_{21})\right\} + \int_0^{t+I-\tau_S} U(\tau) r(t+I-\tau_S-\tau) d\tau - \int_0^{t-\tau_S} U(\tau) r(t-\tau_S-\tau) d\tau \quad (9)$$

ここに、 $U(\tau)=m\tau_{21} l f u(\tau)$ である。

上式は I 時間先の下流側断面積の予測値を与えるが、その際、時刻 $t+I-\tau_{21}$ までの上流側断面積 A_1 のデータと時刻 $t+I-\tau_S$ までの降雨データが必要である。従って、 $I \leq \tau_{21}$ の場合は A_1 の予測は不要であり、 $\tau_S=I$ とおくと降雨予測も不要となる。しかし、 $I > \tau_{21}$ の場合は $I-\tau_{21}$ 時間先までの A_1 の予測が、また、 $I > \tau_S$ の場合は $I-\tau_S$ 時間先までの降雨予測がそれぞれ必要となる。

次に、複数の水位観測所がある場合について考えてみよう。上流から下流へ順に流量観測点 $j=1, 2, \dots, n$ があるものとし、各観測点における断面積を A_j 、各地点間の流入量を $q_{j+1,j}$ 、各地点間の到達時間を上流から順に $\tau_{2,1}, \tau_{3,2}, \tau_{4,3}, \dots, \tau_{n,n-1}$ とする。それぞれの地点間に式(6)を適用すると、

$$A_n(t+I)=A_n(t)+k_{n-1}\left\{A_{n-1}(t+I-\tau_{n,n-1})-A_{n-1}(t-\tau_{n,n-1})\right\} + m_{n-1}\left\{\int_{t+I-\tau_{n,n-1}}^{t+I} q_{n,n-1} dt - \int_{t-\tau_{n,n-1}}^t q_{n,n-1} dt\right\} \quad (10-1)$$

$$A_n(t+I-\tau_{n,n-1})=A_{n-1}(t)+k_{n-2}\left\{A_{n-2}(t+I-\tau_{n,n-1}-\tau_{n-1,n-2})-A_{n-2}(t-\tau_{n-1,n-2})\right\} + m_{n-2}\left\{\int_{t+I-\tau_{n,n-1}-\tau_{n-1,n-2}}^{t+I-\tau_{n,n-1}} q_{n-1,n-2} dt - \int_{t-\tau_{n-1,n-2}}^t q_{n-1,n-2} dt\right\} \quad (10-2)$$

・
・
・

$$A_2(t+I-\tau_{n,2})= A_2(t)+ k_1\left\{A_1(t+I-\tau_{5,1})-A_1(t-\tau_{2,1})\right\} \\ + m_1\left\{\int_{t+I-\tau_{n,1}}^{t+I-\tau_{n,2}} q_{2,1}dt-\int_{t-\tau_{2,1}}^t q_{2,1}dt\right\} \quad (10-n)$$

ここに、 $\tau_{n,j} = \tau_{n,n-1} + \tau_{n-1,n-2} + \dots + \tau_{j+1,j}$ である。これらの式より次式がえられる。

$$A_n(t+I) = A_n(t) + \sum_{j=1}^{n-1} K_j \left\{ A_j(t) - A_j(t-\tau_{j+1,j}) \right\} + K_1 \left\{ A_1(t+I-\tau_{5,1}) - A_1(t-\tau_{2,1}) \right\} \\ + \sum_{j=1}^{n-1} \left[M_j \left\{ \int_{t+I-\tau_{n,j}}^{t+I-\tau_{n,j+1}} q_{j+1,j} dt - \int_{t-\tau_{j+1,j}}^t q_{j+1,j} dt \right\} \right] \quad (11)$$

ここに、 $K_j = k_n k_{n-1} \dots K_j, M_j = k_{j+1} m_j$ である。よって式(11)の右辺第3項は、式(9)と同様に

$$\sum_{j=1}^{n-1} \int_0^{t+I-\tau_{n,j+1}-\tau_{s,j+1,j}} U_j(s) r_j(t+I-\tau_{n,j+1}-\tau_{s,j+1,j}-s) ds \\ - \sum_{j=1}^{n-1} \int_0^{t-\tau_{s,j+1,j}} U_j(s) r_j(t-\tau_{s,j+1,j}-s) ds$$

と書くことができる。上式の第一項は、 $\tau_{Sn,n-1}=I$, $\tau_{Sn-1,n-2}=I-\tau_{n,n-1}, \dots, \tau_{S2,1}=I-\tau_{n,2}$ とおくと、

$$\sum_{j=1}^{n-1} \int_0^t U_j(s) r_j(t-s) ds$$

となる。

3. 予測モデルの適用とその検討

上述の予測モデルの実用性を検証するために、川内川下流部に適用する。川内川は図1に示すように、中・下流部に5ヶ所の測水所があり、最上流の湯田から最下流の川内までの到達時間は3時間程度と見積もられている。³⁾ そこで、これらの量水所における水位データおよび周辺の雨量観測所10ヶ所の時間雨量記録を用いて3時間洪水位予測を行って検討することにする。

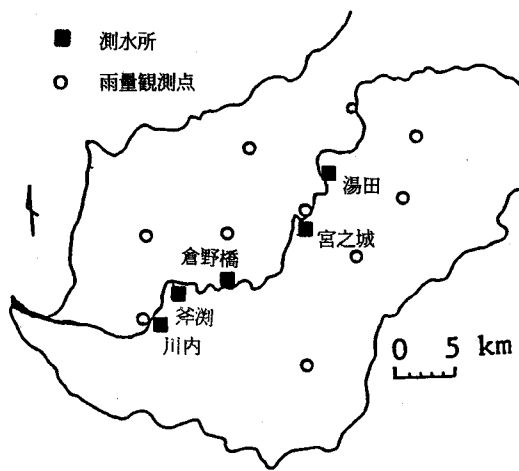


図1. 川内川流域概要図

まず式(6)を湯田と川内間に適用し、川内における水位の予測値を求め、実測値と比較した例を図2-5に示す。なお、モデルのパラメタは k および $u(\tau)$ で、カルマンフィルタにより同定し、到達時間は3時間とした。図2は斜面における遅れ時間 τ_S を0とした場合で、3時間先までの降雨の実測データを使用しており、降雨予測が完璧に行われた場合に相当する。図-3は $\tau_S=2$ 時間の場合で1時間先までの降雨データを使用したもの、図-4は $\tau_S=3$ 時間とし、現時点までのデータのみを使用した場合、さらに、図-5は降雨を無視し、水位データのみから予測を行った場合である。図-5の場合は他の場合に比し明らかに精度が悪く、残流域からの流入量の影響を降雨によって補正することにより予測精度が向上することを示している。しかし降雨予測を行った場合(図-2, 3)は、予測降雨として実績降雨を用いたにもかかわらず降雨の予測値を用いなかった場合(図-4)より精度が良いとは言えない。この傾向は川内川の他の洪水に適用した場合も同様であった。これは残流域からの流入量を見積もる際に式(7)の仮定を用いたことによるものと思われる。図-6にそれぞれ $\tau_S=0, 2, 3$ 時間として同定した単位図が示されているが、単位図のピークの発生する位置が $\tau_S=0$ の場合は3時間、 $\tau_S=2$ では1時間 $\tau_S=3$ のときには0付近となっており、予測降雨の影響が小さいことがわかる。

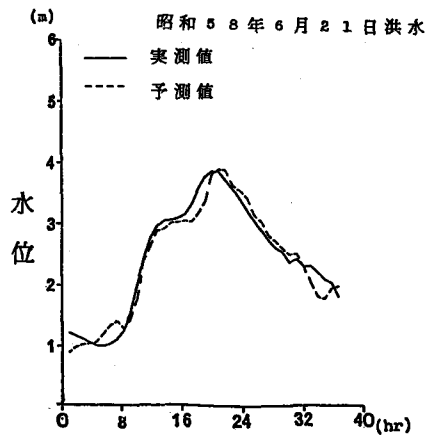
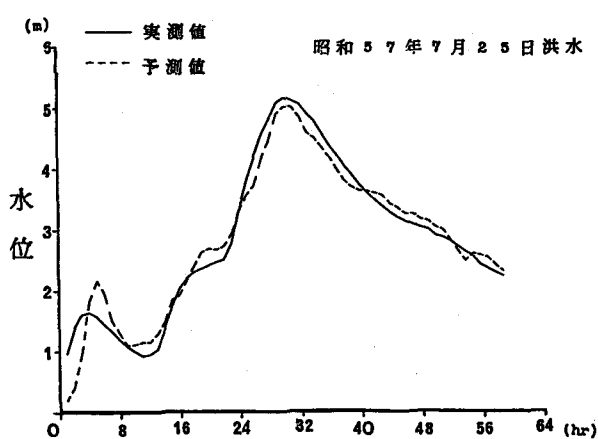


図2. 予測値と実測値の比較 ($\tau_S=0, 2$ 地点)

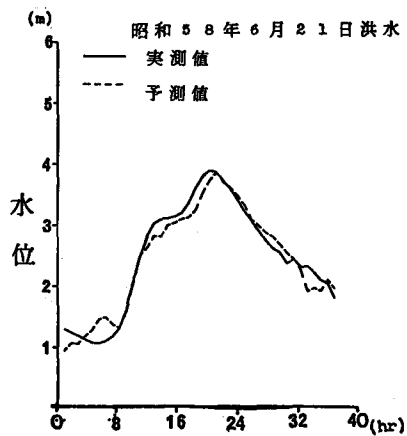
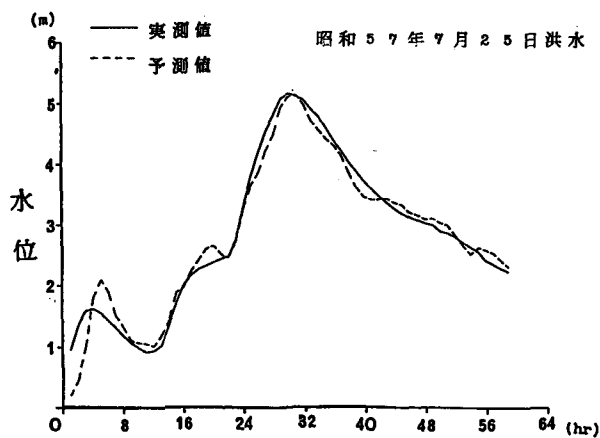


図3. 予測値と実測値の比較 ($\tau_S=2$ 時間, 2地点)

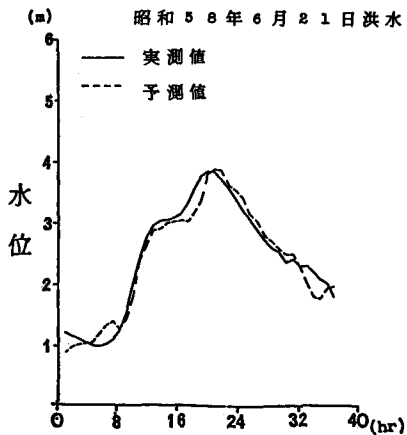
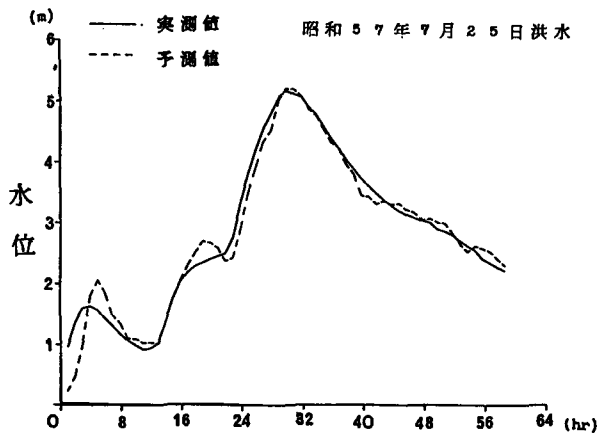


図4. 予測値と実測値の比較 ($\tau_S=3$ 時間, 2地点)

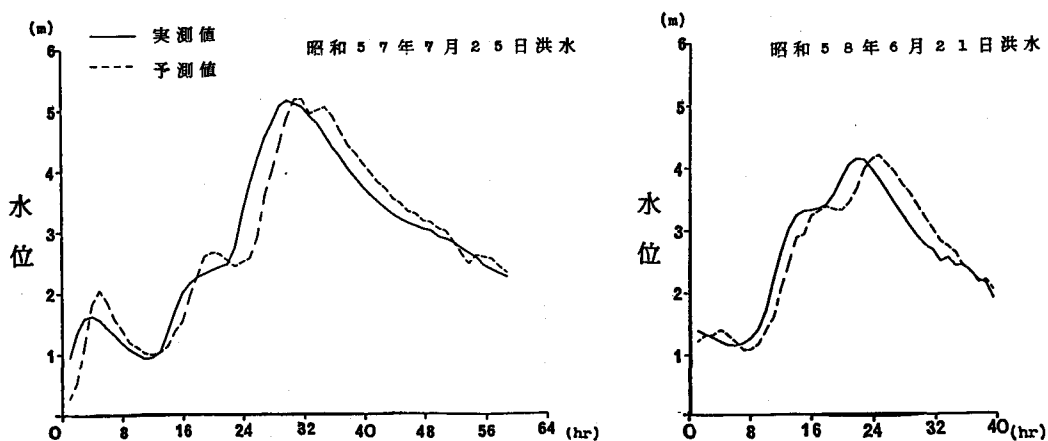


図5. 予測値と実測値の比較 (降雨無視, 2地点)

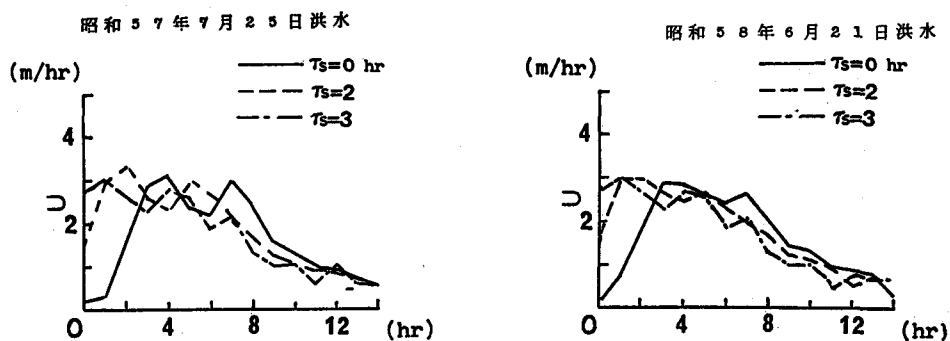


図6. 同定単位図

次に、式(11)を川内川の5測水所に適用して最下流の川内測水所の水位を3時間予測を行う。川内、斧刈、倉野橋、宮之城及び湯田間の到達時間をそれぞれ0.5, 0.5, 1.5及び0.5時間として計算した結果を図7および8に示す。図8は降雨を無視した場合であるが、2地点の水位のみから予測した図5に比し、かなり精度が良くなっている。これは下流の水位データに残流域からの流入量に関する情報が反映されることによるものと考えられる。しかし、図7は図8に比し余り精度は改善されておらず、パラメタのとり方に検討の余地があると思われる。

なお、参考のために $K_1=K_2=\dots=1$ とし、5地点の水位のみを用いて計算して結果を示すと図9のようになり、図8とほぼ同様の精度がえられる。この場合はパラメタの同定が不要なので計算は非常に簡単である。

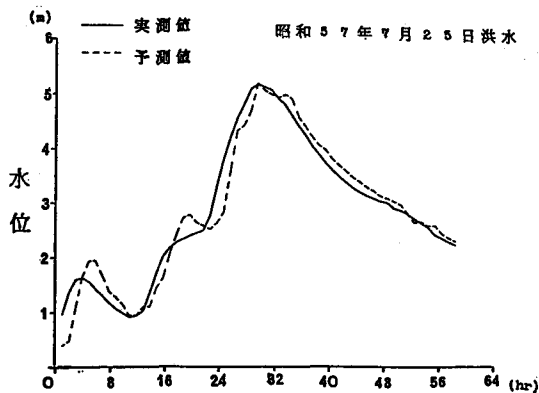


図7. 予測値と実測値の比較 ($\tau_s=3$ 時間, 5地点)

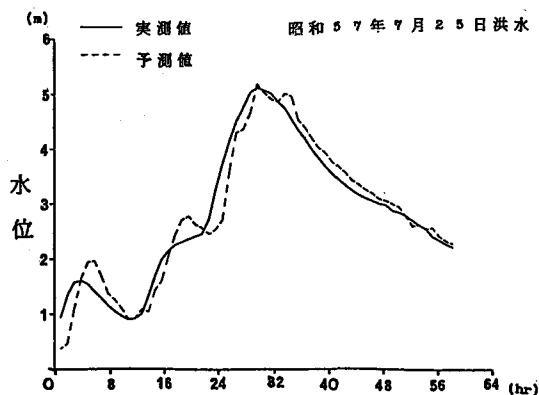


図8. 予測値と実測値の比較 (降雨無視, 5地点)

4. 結論

河道に特性曲線法を、残流域斜面に単位図法をそれぞれ適用してモデルを作成した。またモデルパラメタをカルマンフィルターで同定して川内川の洪水予測計算を行い、モデルを検証した。

本モデルの特徴は予測時間と斜面における遅れ時間を河道の到達時間との関係で適当に選べば、降雨予測を行わず水位を予測することができるという点にある。従って、精度良く予測できる時間は、流域の大きさや水位計の配置によって変わってくるが、数100Km²程度の河川で3時間程度は可能であるように思われる。

計算には九州大学大型計算機センターのFACOM M-382を使用した。16ビットのパソコンでも1時間ステップ程度なら3時間予測を実用上十分に行える。またパラメタを固定するとプログラミングは非常に簡単になり、精度もそれほど低下しないので、洪水予測の試用に適していると思われる。

なお、到達時間や遅れ時間のとり方、カルマンフィルターの適用法などは検討の余地が多く研究を継続する予定である。

謝辞

貴重な資料を提供して下さい建設省川内川工事事務所および、カルマンフィルターの使用にあたって適切なアドバイスを頂いた九州大学工学部水工土木学系水文学研究室の河村明氏に厚くお礼を申し述べる次第である。また、この研究は文部省自然災害研究(1)「レーダ情報とリモートセンシングを利用した豪雨災害のオンライン予測システム」(代表者 九大 平野宗夫)の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 日野幹雄; 水文学流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用, 土木学会論文報告集, No221, 1974
- 2) 西村・室田・江藤; 貯留関数とカルマン・フィルターを組み合わせた流出予測法の特性解析, 土木学会年講概要集(II)第32回, 昭. 52. 10
- 3) 平野・森山・河原田・山下; 洪水位のオンライン予測に関する研究, 土木学会年講概要集, 第41回, 昭61. 11