

猪名川におけるニューラルネットワークモデルを用いた水位上昇部の予測精度向上について

竹村 仁志¹・川村 一人¹

¹八千代エンジニアリング株式会社 大阪支店 河川水工部（〒540-0001 大阪市中央区城見1-4-70）

猪名川洪水予測システムでは分布型流出モデルの入力値に予測レーダ雨量を用いているが、実運用の検証では水位上昇部の降雨予測の誤差が大きい場合があり、水位上昇部やピーク生起時刻の予測結果に遅れが生じ、洪水予報として課題があった。そこで、予測雨量を用いずに観測した雨量や水位から水位を予測する手法としてニューラルネットワークモデルの適用を検討した。その結果、流出計算モデルにおいて予測雨量誤差の大きい水位上昇部で発生する誤差をニューラルネットワークモデルで補完するシステム構成とすることで、水位上昇部で安定した予測精度を確保でき、かつバックアップシステムとして機能することを示した。

キーワード：洪水予報、水位予測、ニューラルネットワークモデル

1. はじめに

兵庫県・大阪府の市街地を貫流する猪名川は、川西市や池田市、尼崎市など多くの都市域を擁する典型的な都市河川である。

流域面積は基準地点の小戸水位観測所で310km²であり、降雨から流出までの時間が短く、短時間の集中的な降雨により、河川水位が急激に上昇する特徴を有している。そのため、洪水予測においては警報や避難等の基準となる水位（氾濫注意水位、氾濫危険水位等）に対する到達時刻の予測の遅れが、地域の水防活動や避難行動等の初動体制確保に大きな影響を与える。

現在の洪水予測システムは、降雨から流量に変換する流出計算モデル（分布型流出モデル）により運用されている。実運用結果を検証すると、流出計算モデルの入力値に用いる予測レーダ雨量において水位上昇部の予測誤差が大きく、その結果、水位上昇部やピーク生起時刻の予測水位のズレが大きくなり、洪水予報として課題があった。

そこで、予測レーダ雨量の誤差から生じる水位上昇部の予測誤差拡大の解消の方策として、予測雨量を用いずに実績の降雨や水位により流出を再現する手法として、非線形的関係に適用性の高い相関解析の一つであるニューラルネットワークモデル（以下、NNモデル）の適用を検討した。本稿は、水位上昇速度が速い特性を有する河川を対象に、水位上昇部の予測精度向上に着目し、NNモデルと流出計算モデルの予測手法を併用し、相互補完するシステム構成の効果を検証したものである。

2. 猪名川洪水予報区間と基準地点

猪名川流域の概要を図-1に示す。猪名川は神崎川合流点から12.6km区間（藻川4.4km区間）を国土交通省が管理している。小戸水位観測所上流域（C. A. = 310km²）の上流に位置する一庫ダム（C. A. = 115km²）では洪水調節が行われ、基準地点流量はダム放流量に約40%が支配されている。一庫ダム運用開始は1983年（S58）4月であり、2000年（H12年）からは中小洪水に対して効果を発揮するために、150m³/sの一定量放流方式で運用を行っている。



図-1 猪名川洪水予報区間と基準地点

3. 猪名川洪水予測システムの課題と対応方針

(1) 洪水予測プロセスと誤差発生要因

洪水予測システムにおける予測誤差は、図-2に示すプロセスで発生すると推定できる。図-2の右側に示した誤差発生要因（変換誤差、計算誤差など）は、予測システムの改良で精度向上が図れる可能性が高い要因である。流出計算モデルを利用した洪水予測では、雨量データを変換してさらに水位に変換するため、雨量、流量変換誤差、水位変換誤差が生じる。予測誤差がどのプロセスで拡大する傾向にあるかを把握することで、モデル構築において重視すべき事項が明らかとなる。

図-3に実績レーダ雨量（レーダアメダス解析雨量）と実績ダム放流量をモデルに与えた場合の小戸水位観測所の計算結果について2013年（H25年）台風18号を一例として示す。流出計算モデルによる計算流量と実績流量の波形が概ね一致しているため、フィードバック後の予測水位の精度は良好となっており、実績レーダ雨量を用いる場合は予測精度を概ね確保できる結果であった。

一方で、実運用時と同様に流出計算モデルの入力値に予測レーダ雨量を用いた計算結果を図-4に示す。実績レーダ雨量による結果と比較して予測結果は誤差があり、特に、図-5に示すように水位上昇部（15日22時）に予測レーダ雨量が過小評価されることで水位上昇部やピーク生起時刻の予測結果の誤差が大きくなっている。図-5の予測レーダ雨量は降水ナウキャスト（～1h先）と降水短時間予報（1h～6h先）の組合せを示したが、移動解析（～3h先）も水位上昇部における予測レーダ雨量の過小評価は同様の傾向であった。

これより猪名川において、流出計算モデルでは、実績レーダ雨量を用いた場合は予測精度が概ね確保されているが、水位上昇部において予測レーダ雨量に誤差が発生すると予測水位の誤差が大きくなる課題が生じている。

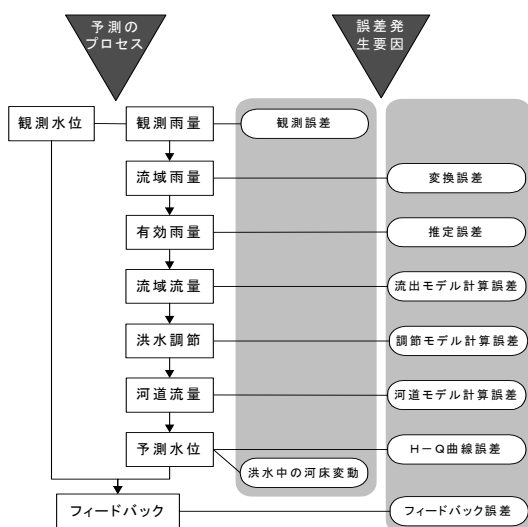


図-2 予測プロセスと誤差発生要因

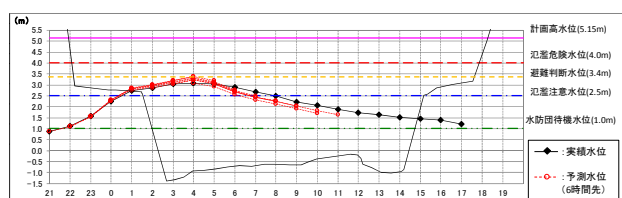


図-3 実績レーダ雨量による計算結果（小戸地点）

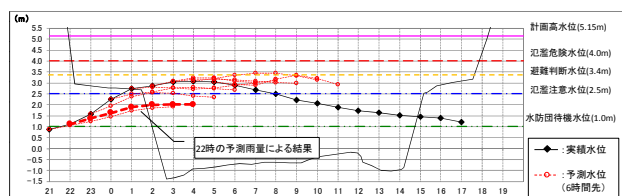


図-4 予測レーダ雨量による計算結果（小戸地点）

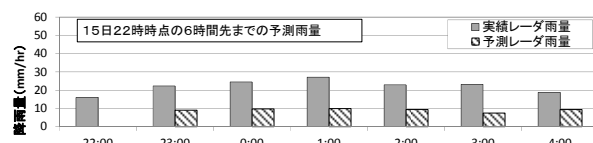


図-5 実績レーダ雨量と予測レーダ雨量の比較

(2) 水位上昇部の予測水位精度確保の対応方針

水位上昇部の予測雨量誤差によって予測水位のズレが大きくなる課題に対して、水位上昇部の予測精度向上を目的として、図-6に示す流出計算モデル（分布型：メインシステム）とNNモデル（サブシステム）を併用するシステム構成を提案した。NNモデルでは、過去の洪水の経験を学習させて、上流の雨量や水位の観測値より予測を行う。入力値に予測雨量を用いないことで、水位上昇部で予測雨量誤差が拡大する時間帯の予測精度向上が期待できる。また、実績値から予測値へのダイレクトな予測が可能であるため、流出計算モデルと比較し、より物理量の変換に伴う誤差が生じにくい。一方で、未経験洪水規模においては、予測精度が著しく低下する可能性が高く、流出計算モデルが不可欠である。特徴の異なる2手法併用による情報の2重化により、各々のモデルで発生する誤差への相互補完を目指した。

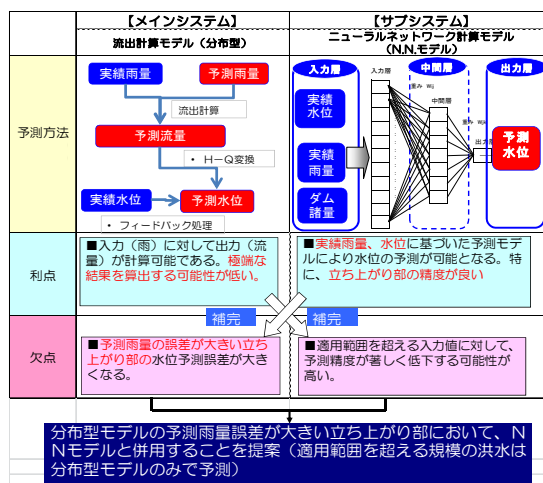


図-6 2手法併用のイメージ

4. 水位上昇部の予測精度向上に着目したNNモデルの定数設定

(1) 評価方法の設定

流出計算モデルでは、水位上昇部の予測レーダ雨量が過小評価されることで水位上昇部やピーク生起時刻の遅れが生じている。洪水予測は通常の解析と異なり、絶対的な水位の予測精度と同等以上に水位生起時刻の遅れが大きな意味を持つ。特に、猪名川のように水位上昇速度が速い河川では、警報や避難等の基準となる水位（氾濫注意水位、氾濫危険水位）に対する到達時刻の予測の遅れが、地域の水防活動や避難行動に大きな影響を与える。

到達時間の観点では、例えば、水位上昇部を前倒して（早めに）予測できれば、任意時刻の水位誤差が生じて、基準水位に到達する時刻に余裕ができると考えることができる（図-7）。洪水予測においては、発生時刻の予測に遅れが生じると防災の見地からは、致命的となる可能性を有していることから、洪水予測の本来の目的である「いつ行動を起こすべきか」に寄与する情報を精度良く提供することに主眼をおき評価する方針とした。

具体的なモデルの妥当性の判断基準は、図-8に示すように、基準水位への到達を初めて予測した時刻（予測実施時刻）から実際に基準水位に到達した時刻（実水位到達時刻）までの差を予測余裕時間と定義し、予測余裕時間が確保できれば、モデルの妥当性が高いと判断した。

(2) NNモデルの構築

a) NNモデルの定数設定方針

NNモデルでは、過去の洪水の「雨量、水位（入力）」、「1～3時間後水位（出力）」の関係を学習させ、重みやしきい値を計算し、複雑な流出特性を再現する。

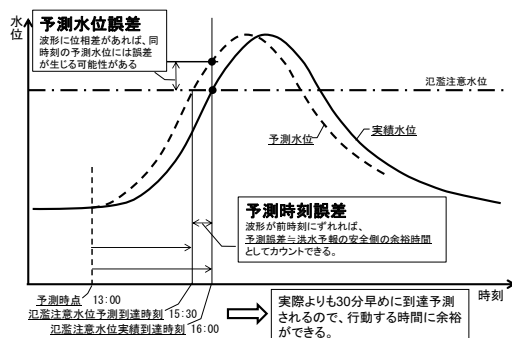


図-7 予測誤差の概念

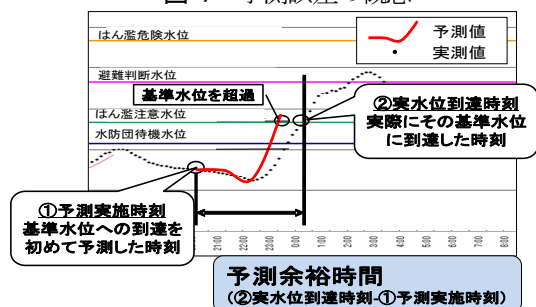


図-8 水位上昇部に着目した予測精度の評価

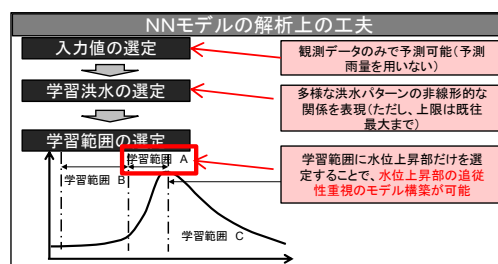


図-9 NNモデル定数の設定手順

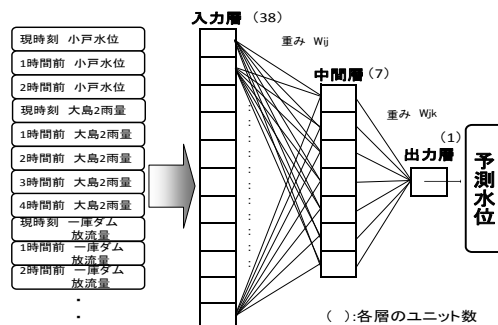


図-10 ネットワークの構造イメージ

NNモデルの構築は、図-9に示すように、入力値の選定、学習洪水の選定、学習範囲の選定により設定を行う。

猪名川のNNモデル構築では、予測の精度評価基準に示したように水位上昇部において、基準水位への到達予測が遅れないモデル設定を行うために、①観測データのみを用いて予測する（予測雨量を用いない）、②学習対象期間は水位上昇部のみを選んで学習させる、ことで水位上昇部の予測精度を高めるように設定を行った。

b) ネットワーク基本構造

NNモデルの構造は、一般的に用いられている入力層、中間層、出力層からなる階層型ネットワークを用いた。洪水予測では、図-10に示すように入力層に水位、雨量、ダム放流量を与え、出力層が予測水位となる。中間層は1層とし、そのユニット数は7に設定した。重み w_{ij} を求める学習には、実績値と予測値の差の総和を最小化するバックプロパゲーション（逆伝播）法を用いた。学習時の収束条件は、学習回数100,000回の制約の下で、平均2乗誤差 $E < 0.001$ とした。

(3) NNモデル定数設定時の工夫

a) 入力値の選定

入力値として選定した観測所位置を図-11に示す。入力値に用いるデータは、小戸水位観測所より上流の観測所の中で、データ蓄積が長く、欠測の少ない地点とし、水位観測所は6地点、雨量観測所は3地点、及び一庫ダム放流量を選定した。各観測所の入力値は、小戸水位観測所との相関関係から図-10に示すように、水位は現時刻～2時間前、雨量は現時刻～4時間前、一庫ダム放流量は現時刻～2時間前とした。一庫ダムより上流の雨量・水位観測所は、小戸への影響が、一庫ダム放流量で代表され则认为、対象地点から除外した。また、小戸水位観

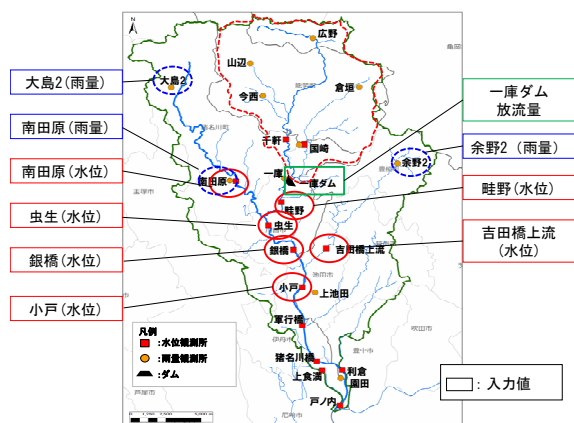


図-11 NNモデルの入力値設定

測所において学習洪水の観測当時と最新(2014年)のHQ式を比較して、両者に大きな差がないことを確認した。今後、大きな河道変化が生じた場合には、学習時には当時の水位と断面変化後の水位との関係で変換を行う必要がある。

b) 学習期間の選定

洪水波形は、時間経過毎に大まかに①平常時、②水位上昇時、③水位低減時に分けることができる。猪名川では、水位上昇部の予測精度向上に着目してモデル構築を行うことから、学習期間は、②水位上昇時の立ち上がり～ピークを越えるまでの時間帯のみを選んで学習させた。

c) 学習洪水の選定

洪水予測を行う上では、様々な洪水（ピーク大、ダラダラ型、二山型など）に対応する必要がある。

従って、学習洪水は、予測地点である小戸水位観測所の現位置での観測開始(1983年(S58)10月)以降の洪水を対象に、ピーク水位・1時間・3時間・6時間水位上昇量のそれぞれの上位3位に該当する洪水、かつ欠測の少ない洪水を対象に選定した。

図-12に学習洪水を示すが水防団待機水位～氾濫注意水位の間の中小規模の洪水が繰り返し発生しているため、これらの洪水を学習させることで、洪水時の初動体制の時間確保のための予測精度向上を図ることが期待できる。

一方で、ピーク水位は、避難判断水位程度であり、氾濫危険水位に到達するような洪水は未経験であるため、経験以上の洪水では予測精度に課題が生じる。

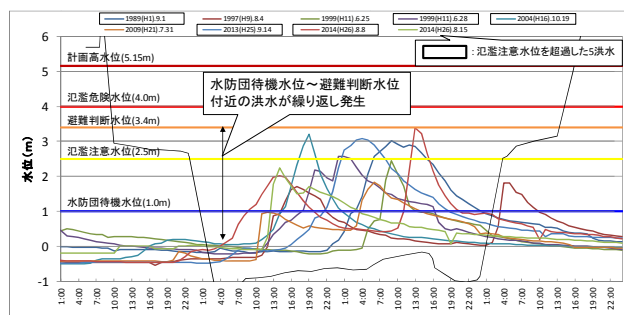


図-12 学習洪水のハイドログラフ

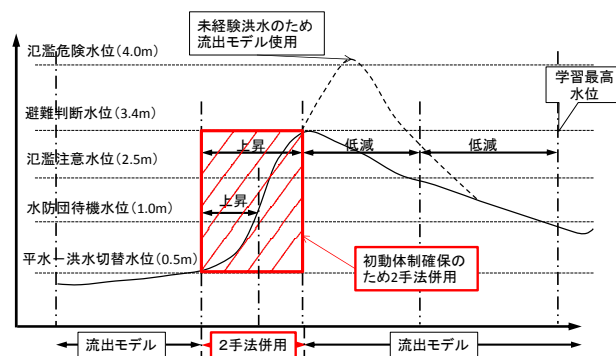


図-13 2手法併用の適用範囲(案)

5. 2手法併用時における予測精度の検証

ここでは、実運用時を想定して流出計算モデルとNNモデルの2手法を併用した場合の予測計算結果を検証する。

(1) 2手法の併用方法

2手法併用の適用範囲(案)を図-13に示す。流出計算において、水位上昇部で発生する予測雨量誤差の大きい時間帯でNNモデルを併用する方針とした。具体的には、平水から洪水への切替水位(0.5m)から学習最高水位の避難判断水位(3.4m)までの間を併用区間とし、2手法の予測値のうち安全側となる予測値を採用した。ただし、これは水位上昇部の予測雨量精度が向上するまでの暫定的な対応であり、予測雨量の精度向上を踏まえ併用方法等の見直しが必要である。また、NNモデルは、大規模洪水での予測に課題があるため、避難判断水位(3.4m)を超えた場合は流出計算モデルのみとした。また、NNモデルは3時間先までの予測が限界であり、3～6時間先までは流出計算モデルのみを使用した。

(2) 水位予測精度の検証結果

2手法併用時の検証結果の一例として、2013年(H25年)台風18号の3時間先までの予測結果を図-14に示す。

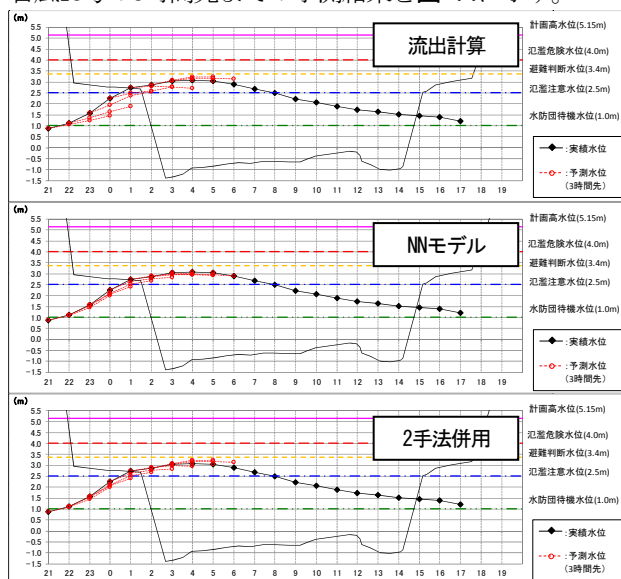


図-14 水位上昇部の2手法併用結果(2013年台風18号)

流出計算モデルでは水位上昇部で予測雨量誤差の発生により波形にズレが発生しているが、予測雨量を用いないNNモデルでは立ち上がりの波形の精度がよい結果となった。これは、NNモデル構築時に水位上昇部の波形評価（基準水位到達予測時刻と実際に到達した時刻の差）を取り入れ、意図的にモデル定数を設定した効果といえる。

その結果、2手法併用によって、実績水位と予測水位で全体的な波形やピーク付近の水位の上昇傾向が概ね一致している。特に、水防や避難行動判断で重要となる水位上昇部での精度は改善されている。なお、予測雨量は降水ナウキャスト（～1h先）と降水短時間予報（1h～3h先）を利用した。予測手法別による予測余裕時間の評価結果を表-1に示す。2手法を併用することで、基準水位までの予測余裕時間も概ね2～3時間程度を確保できる結果となった。また、氾濫注意水位を超過した5洪水を対象にNNモデルによって予測余裕時間を評価した結果を図-15に示す。水防団待機水位、氾濫注意水位ともに2～6時間の予測余裕時間を確保できており、NNモデルで初動体制の余裕時間確保の可能性を示した。

6. まとめ

猪名川洪水予測システムでは流出計算モデル（分布型流出モデル）の入力値に予測レーダ雨量を用いているが、実運用結果の検証では水位上昇部の予測雨量の誤差が大きく、その結果、水位予測において水位上昇部やピーク生起時刻の遅れが大きくなり、洪水予報としては課題があった。そこで、洪水予測の本来の目的である「いつ行動を起こすべきか」に寄与する情報を精度良く提供することに主眼をおき検討を進めた。このため、あえて流出計算モデルのみに頼らず、ニューラルネットワークモデルを適用し、予測雨量を用いずに観測雨量・水位のみから水位を予測する手法を検討した。その結果、得られた知見は次の通りである。

①ニューラルネットワークモデルの利用について、入力層・中間層・出力層の設計、水位上昇部の再現といった予測目的を踏まえた学習プロセス設計や入力データ選択が精度確保に効果的であることを示した。

②ニューラルネットワークモデルの適用により、上流域の雨量・水位・ダム諸量の実績値のみを利用して概ね2～3時間先まで予測できる可能性を示した。

③流出計算モデルにおいて予測雨量誤差の大きい水位上昇部で発生する誤差をニューラルネットワークモデルで補完するシステム構成とすることで、水位上昇部で安定した予測精度を確保でき、かつバックアップシステムとして機能することを示した。

7. 今後の展望

(1)2手法選択ルールの改善

水位上昇部の予測では、特徴の異なる2手法併用による情報の2重化により、各々のモデルで発生する誤差への相互補完を目指した。現時点では、2手法の予測値のうち安全側となる予測値を採用した。

今後は、実運用により2手法の予測誤差傾向を分析する事によって適材適所の手法利用を検討して更なる予測精度の向上を図ることが期待できる。また、NNモデルは、適切な時期に学習データの追加を行い、新しい洪水波形にも対応させるための定数の更新が必要である。

(2)NNモデル定数の評価・改善

流出計算モデルで水位上昇部の予測雨量・水位が過小評価されることに対して、NNモデルでは水位上昇部の予測精度に着目した定数を設定した。これは、予測雨量精度が向上するまでの暫定的な対応であり、今後、予測雨量の精度検証を行い、NNモデルも評価・改善が必要となる。

(3)未経験洪水への対応

水位上昇部の予測精度向上を目的に構築したモデルのため、NNモデルでは、大規模洪水での予測に課題が残る。図-16に示すような洪水規模に応じてモデルを構築し、水位や水位上昇量等を判定基準としたモデル切り替えによる運用によって精度向上も期待できる。

謝辞：本論文の作成にあたり技術的な支援と発表する機会を与えて頂きました、国土交通省近畿地方整備局猪名川河川事務所の方々に厚く御礼申し上げます。

表-1 予測余裕時間の評価

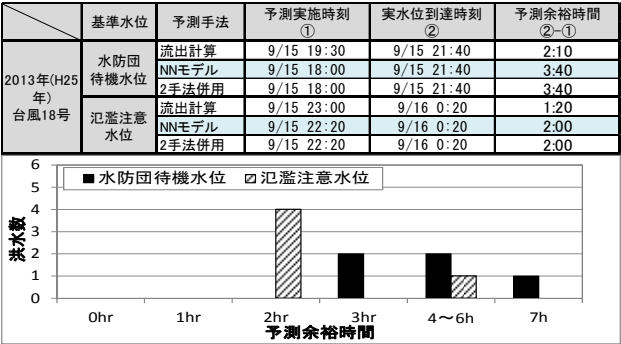


図-15 NNモデルによる予測余裕時間(1時間単位の評価)

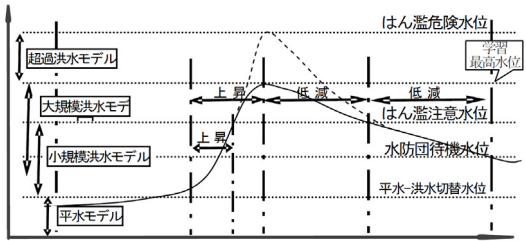


図-16 洪水規模別に切り替えるモデルイメージ