

## Nearest-Neighbor 法の洪水予測への適用

Application of Nearest-Neighbor Method for flood forecasting

苫小牧工業高等専門学校  
 苫小牧工業高等専門学校  
 苫小牧工業高等専門学校専攻科

正会員 八田茂実 (Shigemi HATTA)  
 正会員 秋野隆英 (Takahide AKINO)  
 学生員 舩屋繁和 (Shigekazu MASUYA)

## 1 はじめに

洪水対策において、洪水防御施設の整備は大変重要である。大規模河川では、これまで多くの洪水防御施設が整備されてきているが、中小河川では未整備の区間が多く豪雨によって大きな被害を受ける例も少なくない。このような中小河川に対して河川整備を行っていくことはきわめて重要ではあるが、多大な費用が必要であり、すべてを早急に整備することは難しい。このため、洪水予測システムを整備し、被害を最小限に留めるための努力が必要である。

これまでに提案されている洪水予測手法は、(1) 流出モデルに基づくものと、(2) 過去の洪水資料に基づくものに大別できる。(1)の手法は、実際に運用されて大きな成果を上げている。しかし、このような手法では、水位-流量曲線を用いて流量資料を得なければならないため、直ちに多数の河川に予測システムを構築することはできない。

Nearest-Neighbor 法は統計的パターン認識法の一つであり、洪水予測に適用する場合、過去の洪水資料に記録されている数値を出力値とするため、洪水資料に水位データが存在すれば、水位を予測することも可能である。そのため、水位-流量曲線が必要無く、オンライン予測のための施設を整備するだけで、予測システムの運用を開始することができる。また、従来の流出モデルに基づく洪水予測手法に比べ、理論や手順が極めて簡単であり、流域ごとの微調整を容易に行うことが可能である。しかし、適用事例が少なく、適用時の問題や予測精度などを検討する必要がある。

本研究では、Nearest-Neighbor 法を北海道内のいくつかの流域でのオンライン洪水予測へ適用し、過去の洪水資料に含まれないような大出水を予測することにより、その予測精度の確認を行った。

## 2 Nearest-Neighbor 法の洪水流出への適用

Karlsson and Yakowits(1987) は、Nearest-Neighbor 法(以下 NN 法)を実時間洪水予測に初めて応用した。我が国では、田中丸ら(1999)がダム流域での実時間洪水予測に適用し、河川流量の予測に有用であることを示している。また、近森・永井(2002)は、NN 法に線形予測を組み合わせた局所線形近似法(LL 法)が実時間洪水予測に有効であることを示している。

## 2.1 Nearest-Neighbor 法による時系列予測

NN 法を用いた時系列予測は以下の手順による。

- [1] 現在時刻  $n$  において、予測したい出力値を  $\hat{O}(n+1)$  とし、これに関わる入力値や状態量  $x_{nj}$  を要素とした特徴ベクトル  $X(n)$  を

$$X(n) = (x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, \dots, x_{nj}) \quad (1)$$

と定義する。

- [2] 蓄積された過去の資料中のすべての時刻  $i$  に対して、 $X(n)$  と同じ特徴ベクトル  $X(i)$  を設定する。

$$X(i) = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{ij}) \quad (2)$$

ここで、 $x_{ij}$  はそれぞれ時刻  $i$  における特徴ベクトル構成要素である。

- [3]  $X(n)$  とすべての  $X(i)$  とのユークリッド距離  $d_i$  を算出する。

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{nj} - x_{ij})^2} \quad (3)$$

- [4] ユークリッド距離が近いものから順に、 $k$  個の特徴ベクトル  $X(i)$  を抽出し、時刻  $i$  の 1 ステップ先の出力値  $O(i+1)$  を平均して現在時刻  $n$  の 1 ステップ先出力値  $\hat{O}(n+1)$  とする。

$$\hat{O}(n+1) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k O_m(i+1) \quad (4)$$

ここで、 $m$  は抽出した 1 ステップ先流量の番号である。

流出予測を行う場合には、 $O$  として水位  $H$  や流量  $q$  等を採用すればよい。

## 2.2 流出予測への適用

流出モデルを基にした流出予測では、水位-流量曲線を用いて流量資料を得なければならない。しかし、水位-流量曲線の作成には多大な労力が必要となるにもかかわらず、その適用範囲を超える出水の場合、精度が著しく低下する。そこで、本研究では、流量ではなく水位を予測することとする。

NN 法を用いる際、特徴ベクトルは予測精度に大きな影響を与える重要な要素であり、最初に行わなければならないのは特徴ベクトルの決定である。特徴ベクトルの構成要素には、対象とする流出現象に関連の深いものを用いれば良い。ここでは、水位  $H$  と雨量  $r$  に加えて、これらの増分である  $\Delta H$  と  $\Delta r$  を特徴ベクトル構成要素の候補とし、これらを組み合わせた中から、最も予測精度が高くなるものを特徴ベクトルとして選定した。

特徴ベクトルの決定は、以下の手順による。

- [1] 4 つの候補を用いた特徴ベクトル構成要素の組み合わせを、すべて (16 通り) 作成する。  
 [2] すべての特徴ベクトルで過去の洪水資料を予測し、その予測精度を算出する。  
 [3] 算出した予測精度を特徴ベクトルごとに平均し、最も予測精度が高いものを特徴ベクトルとする。

表- 1 洪水資料の概要

洪水番号	洪水期間	総雨量
No.1	2002年7月10日~2002年7月13日	94.8
No.2	1998年9月22日~1998年9月25日	97.9
No.3	1998年5月2日~1998年5月5日	107.4
No.4	1999年5月4日~1999年5月5日	113.8
No.5	1998年8月27日~1998年8月30日	115.1
No.6	2002年8月7日~2002年8月10日	126.5
No.7	2001年8月22日~2001年8月25日	133.2
No.8	2000年5月13日~2000年5月16日	173.5
No.9	2001年9月10日~2001年9月13日	246.8
No.10	2003年8月8日~2002年8月11日	327.7

ここで注意すべき点は、特徴ベクトル中の各要素が流出に及ぼす影響は、すべて等しいわけではないこと、各要素は、それぞれ単位のとり方によって、実際の数値に大きな差が生じることである。このため式-(3)では、ユークリッド距離算出時に、特徴ベクトル中の各要素の流出に対する影響を正しく表現することができない。

本研究では、ユークリッド距離算出時に特徴ベクトル中の各構成要素に対して重み付けを行うこととした。具体的には、次式を用いてユークリッド距離を算出する。

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N w_j (X_{nj} - X_{ij})^2} \quad (5)$$

ここで、 $w_j$  は要素  $j$  に対する重み係数である。重み係数の組み合わせは、特徴ベクトルの決定と同様に、過去の洪水資料すべてに対して予測計算を行い、平均の予測精度が最も高いものを採用する。

また、降雨流出データから、水位  $H$  や雨量  $r$  の他に、水位の1ステップ先増分  $\Delta H$  や雨量の1ステップ先増分  $\Delta r$  を特徴ベクトル構成要素として得ることができる。そこで、NN法で直接  $H$  を予測するのではなく、 $\Delta H$  を予測することが考えられる。この際、最終的な予測流量  $H$  は次式により得られる。

$$\Delta \hat{H}(n+1) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \Delta H_m(i+1) \quad (6)$$

$$\hat{H}(n+1) = H(n) + \Delta \hat{H}(n+1) \quad (7)$$

### 3 厚別川流域における洪水予測

#### 3.1 解析資料

本研究ではまず、日高地方の厚別川流域を対象に Nearest-Neighbor 法によるオンライン予測を試みた。用いた洪水資料の概要を表-1に示す。ここでは、平成15年8月台風10号による洪水(表-1中のNo.10洪水)を予測対象とし、同流域で得られている、1998年5月~2002年8月までの9洪水資料(表-1中のNo.1~No.9洪水)を過去の洪水資料として用いた。

特徴ベクトル決定の際の予測精度判定は、3時間先予測精度によって行うこととする。これは、永井ら(2003)がダム

表- 2 各特徴ベクトルの予測精度 (H 予測)

	特徴ベクトル構成要素				3時間先予測 平均相対誤差 (%)
	r	$\Delta r$	H	$\Delta H$	
					5.78
					5.12
					2.79
					2.14
					5.36
					5.41
					2.85
					3.35
					4.27
					5.70
					2.34
					3.05
					4.92
					6.09
					2.93
					3.35

管理所へ行ったアンケート調査で、下流への予警報のために必要な時間は3時間程度であるとの回答を得ていることから、災害発生直前の対策に必要な時間を3時間程度と考えたためである。また、予測精度の評価は、次式に示す相対誤差 (%) によって行うこととする。

$$re = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|H_{ci} - H_{oi}|}{H_{oi}} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 $H_{ci}$  は計算水位、 $H_{oi}$  は実測水位、 $N$  はデータ数である。さらに、洪水予測システムを災害発生直前の対策に活用することを想定し、予測精度の評価は、洪水ピークの前の時刻までで行うこととする。

なお、田中丸は、 $k$  の値は50程度が良いとしているが<sup>1)</sup>、対象流域で得られている洪水資料が10資料と少ないことから、ここでは  $k=1$  とした。

また、特徴ベクトル及び重み係数の決定には、実測降雨を用いる。

#### 3.2 特徴ベクトルと重み係数の決定

厚別川において、水位  $H$  を予測する際の特徴ベクトルを選定した結果を表-2に示す。表に示すように、 $X(n) = (r, H)$  を特徴ベクトルとして選定した場合(表中の )が最も予測精度が高かった。また、同様に1ステップ先水位増分  $\Delta H$  の特徴ベクトルを検討した場合には、表-3に示すように、 $X(n) = (r, \Delta r, \Delta H, H)$  が最も予測精度が高かった。No.10洪水において、特徴ベクトル  $X(n) = (r, H)$  を用いて水位  $H$  を予測した結果を図-1に、 $X(n) = (r, \Delta r, \Delta H, H)$  を用いて  $\Delta H$  を予測した結果を図-2に示す。また、水位  $H$  を予測するための特徴ベクトルを決定する際に行ったNo.1洪水の予測結果を図-3に、水位増分  $\Delta H$  を予測する際の特徴ベクトルを決定する際に行ったNo.1予測結果を図-4にあわせて示す。

表- 3 各特徴ベクトルの予測精度 ( $\Delta H$  予測)

特徴ベクトル構成要素				3 時間先予測 平均相対誤差 (%)
r	$\Delta r$	H	$\Delta H$	
				1.89
				1.20
				2.54
				0.92
				1.68
				0.96
				1.54
				0.76
				1.74
				1.28
				1.79
				0.90
				1.44
				0.97
				1.48
				0.75

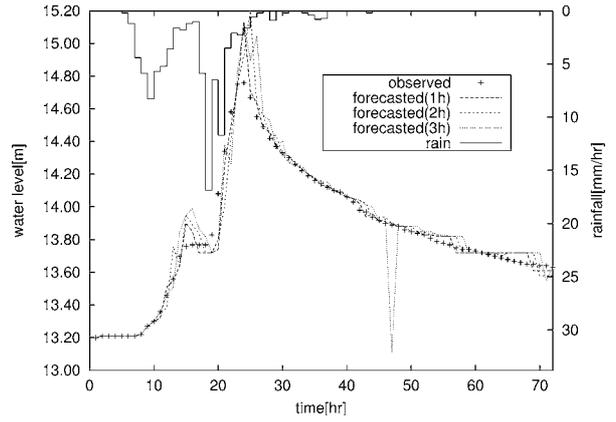


図- 3 No.1 洪水予測結果 (H 予測)  $\times = (r, H)$

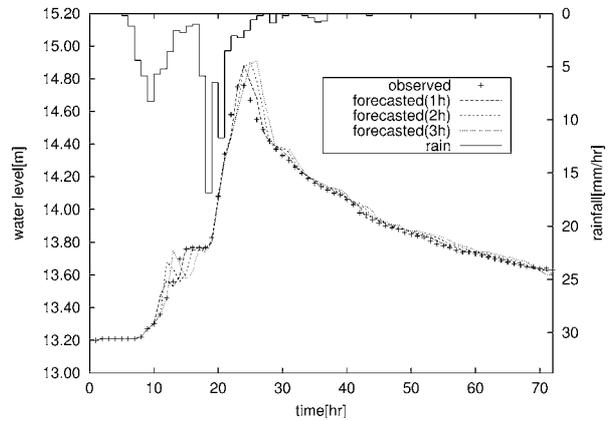


図- 4 No.1 洪水予測結果 ( $\Delta H$  予測)  $\times = (r, \Delta r, H, \Delta H)$

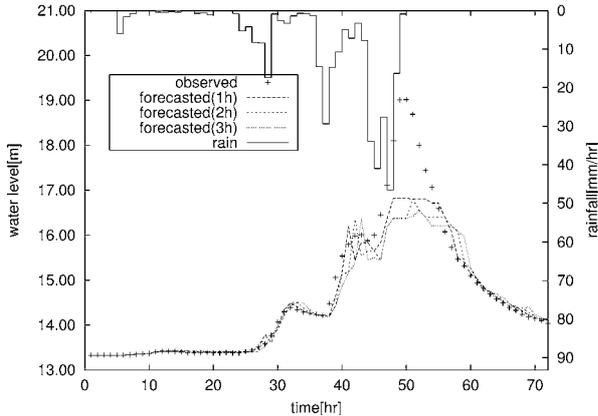


図- 1 No.10 洪水予測結果 (H 予測)  $\times = (r, H)$

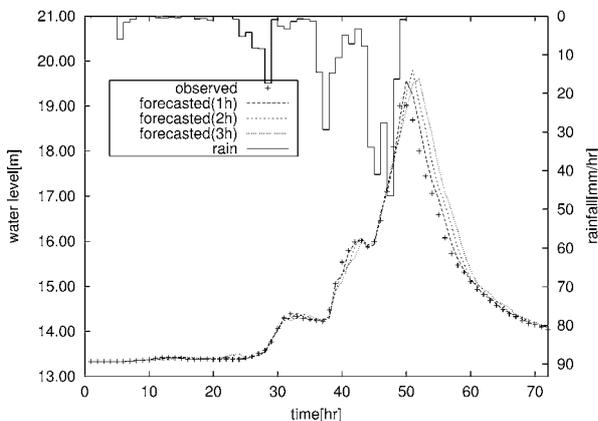


図- 2 No.10 洪水予測結果 ( $\Delta H$  予測)  $\times = (r, \Delta r, H, \Delta H)$

水位 H を予測した結果 (図-1), 厚別川では過去に 17m 以上の水位が記録されていなかったため, それ以上の水位を予測することができなかったが, 特徴ベクトル決定時に行った予測計算 (図-3) では, ピーク付近の水位を再現することができた. 一方, 1 ステップ先水位増分  $\Delta H$  を予測した結果, 図-1 では全く再現することができなかったピーク付近の水位が再現されているが, 洪水のピークは過大に予測されている. また, 特徴ベクトル決定時に得られた No.1 洪水の予測結果 (図-4) をみると, 図-3 のような局所的な過小値がなくなっている. これは, 現在時刻 n のベクトル構成要素の値と類似した値が過去の資料の中に存在しなかったため, 水位 H を直接予測した場合には大きな誤差として表れたためである. 以上の結果から, 水位 H を予測するよりも, 1 ステップ先の水位増分  $\Delta H$  を予測した方が, 予測精度が高いと言える.

また,  $\Delta H$  を予測する場合の重み係数の最適な組み合わせは,  $w_r = 1, w_{\Delta r} = 1, w_H = 1, w_{\Delta H} = 1$  となり, 厚別川で洪水予測を行う際には, 重み付けを行わない方が予測精度が高いという結果となった.

### 3.3 予測降雨が得られない場合の結果

洪水予測を行う際には, その原因となる降雨の予測精度が洪水の予測精度に大きな影響を与える. しかし, 実際には, 正確な予測降雨をリアルタイムに得ることは難しい. そのため, 現場で予測降雨が得られない場合には, 「現時点雨量強度が予測先行時刻では継続する」という雨量データを

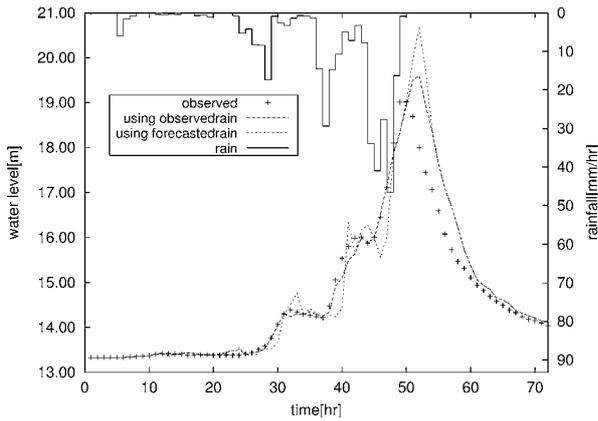


図-5 降雨データの違いによる予測結果の比較

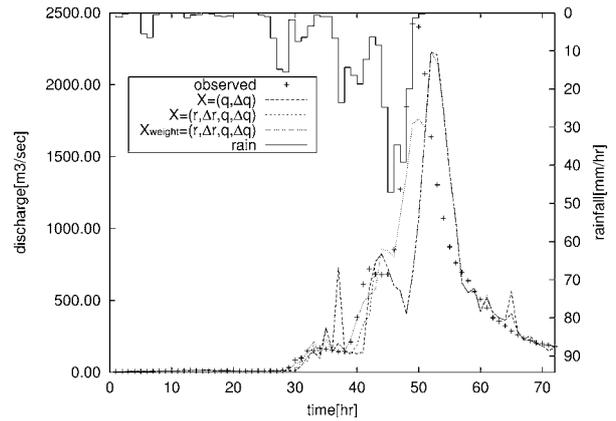


図-6 額平川洪水3時間先予測結果(重み係数は  $W_r = 20$ )

用いることが推奨されている<sup>4)</sup>。そこで、降雨の予測精度が、NN法での洪水予測結果へ与える影響を確認するために、No.10洪水を対象に、予測雨量が得られず、「現時点の雨量強度が予測期間中は継続する」ものとして予測計算を行った。図-5はその計算結果を示している。

図-5によると、予測雨量がない場合の洪水予測結果は、観測雨量を用いた場合よりも洪水のピークが大きく予測される結果となったが、観測雨量を用いた場合と予測された洪水ピークに時刻は一致している。

#### 4 他流域への適用

他の流域でも同様の結果を得ることができるか確認するため、厚別川への適用と同様の手順で、額平川への適用を試みた。額平川では、1971年から2003年までの88洪水資料が得られている。この内、2003年8月8日洪水を予測対象洪水とし、特徴ベクトル及び重み係数の組み合わせを選定した。なお、額平川では流量を予測することとし、出力値  $\hat{O}$  は  $\Delta q$  とした。

額平川への適用を検討した結果、特徴ベクトルは  $X(n) = (r, q, \Delta q)$  となり、重み係数の最適な組み合わせは  $w_r = 20$ ,  $w_q = 1$ ,  $w_{\Delta q} = 1$  となった。これらを用いて予測を行ったところ、図-6の結果が得られ、重み付けによって洪水立ち上がり部分の予測精度が改善されていることがわかる。しかし、ピーク付近の予測精度についてはあまり改善されなかった。

前述のとおり、厚別川では水位を、額平川では流量を特徴ベクトルの要素に用いている。図-2を見ると、水位の最大値が約19mであるのに対し、雨量の最大値が50mm/hr程度である。そのため、重み付けを行わずとも、雨量の影響が流出予測に対して反映できていたと考えられる。しかし、額平川では、最大2500m<sup>3</sup>/sec程度の流量を特徴ベクトルの構成要素としたため、重み付けを行う前は、予測結果に対して雨量の影響がほとんど反映されない状態であった。このため、重み付けによって予測結果に対して雨量の影響が反映され、予測精度が改善されたと考えられる。実際に、構成要素に雨量データを用いない特徴ベクトル  $X = (q, \Delta q)$  を用いて額平川で予測を行うと(図-6)、特徴ベクトル  $X = (r, q, \Delta q)$  を用いた場合と大差がなく、雨量データが予測結果に反映されていないことが分かる。

以上のことから、特徴ベクトル中の各構成要素の値に大

きな差が生じている場合、予測精度向上に対して、特徴ベクトル中の各構成要素への重み付けが有効であるといえる。

#### 5 まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- [1] 水位や流量を直接予測せずに、1ステップ先の増分を予測することによって、NN法の弱点が改善され、予測精度が向上する。
- [2] 特徴ベクトルの各要素に重み付けを行うと、各特徴ベクトル構成要素の数値に大きな差があった場合、予測精度が改善される。
- [3] 予測降雨を用いて流出予測を行うと、流出量の過大評価と洪水立ち上がりの遅れが発生する。

今後の課題として、大出水を予測する際のピーク付近の予測精度改善や、予測降雨を用いた際の予測精度の改善等が挙げられる。

#### 参考文献

- 1) 田中丸治哉・藤原洋一・畑 武志・多田明夫(1999): Nearest-Neighbor法による実時間洪水予測, 応用水文, 12, pp.110-117
- 2) Karlsson, M. and Yakowits, S. (1987): Nearest-Neighbor Methods for Nonparametric Rainfall-Runoff Forecasting, Water Resour. Res., 23(7), pp.1300-1308.
- 3) 近森秀高・永井明博(2002): 局所線形近似法を用いた洪水実時間予測, 水文・水資源学会誌, 15(2), pp.164-175.
- 4) 永井明博・田中丸治哉・角屋陸, 森北出版(2003): ダム管理の水文学