

降雨予測情報の推定誤差に関する定量解析

A QUANTITATIVE ASSESSMENT OF PREDICATION ERRORS OF SHORT-TERM RAINFALL INFORMATION

東海林 勉¹・星 清²・藤田 暁³

Tsutomu TOHKAIRIN, Kiyoshi HOSHI and Akira FUJITA

¹正会員 (財)北海道河川防災研究センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目 伊藤110ビル)

²フェロー会員 工博 (財)北海道河川防災研究センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目 伊藤110ビル)

³正会員 (株)ニュージェック (〒542-0082 大阪市中央区島之内1丁目20-19)

The crucial problem involved in the real-time flood forecasting is the accuracy of predicted rainfalls in short lead times. There are a few approaches to predict the short-term rainfalls, using the information of radar and/or AMeDAS rain gauges (e.g. translation model). However, less works have been done to quantitatively evaluate prediction error structures of rainfalls and incorporate prediction errors into operational flood forecasts.

Based on a large number of past flood events in Hokkaido, the present study develops to model the prediction errors of rainfalls up to three hours ahead defined by the mean squares of differences between the observed and forecasted rainfalls. In this paper, forecasted rainfalls are computed by the moving averages of the past three-hour rainfalls under the assumption that new information of telemeter rainfalls is available every hour. It follows from statistical analyses that the standard errors of predicted rainfall up to three hours ahead are expressed by a function of lead time and mean of observed rainfalls around the predicted value. The resultant equation is in good accordance with an existing formula proposed by Etoh et al. who used rainfall data at Yaedake radar gauges.

The storage routing model coupled with the Kalman filtering technique is employed for on-line forecasts of flood flows and water levels where error structures of short-term rainfall prediction are explicitly incorporated into assessments of error variances for operational forecasts of flood runoff.

Record-breaking rainstorms by Typhoon 10 attacked a wide area of Hidaka districts in Hokkaido from August 9 to 10 in 2003. The peak inflow to Nibutani Dam located in the Saru River surpassed the design inflow rate by 700 m³/s. An application example is shown in the present study where the above-mentioned models are used for the real-time forecast of inflows to Nibutani Dam and the usefulness of the proposed approach in practical situations is clarified.

Key Words : Prediction error of rainfall, Real-time flood forecasting, Kalman filter, Storage routing model

1. はじめに

雨量レーダの観測等に基づいて算出される数時間先までの降雨予測情報¹⁾は、防災対策上有用な情報として広範に利用されてきている。特に、洪水時に河川水位や流量を実時間で計算する洪水予測システムでは、オンラインで降雨予測の数値データを取り込み、計算の入力データとして活用している。このため、降雨予測の精度をいかに向上させるかということが、河川の洪水予測システムにとっても、精度向上の最大の鍵となっている。

また、洪水予測システムにカルマン・フィルターの理論が用いられる場合、流量その他の変数は確率変数として取り扱われ、その最良推定値と誤差分散が伝達

方程式を介して逐次計算される。このため、出力となる流量や水位についても、その予測値だけでなく予測の精度(推定誤差分散)を定量的に算出することができる。すなわち、出力となる流量や水位の予測精度を適切に算出するためには、入力となる降雨予測情報の精度を正確に把握することが必要である。

しかしながら、降雨予測情報が持つ不確定性については、あまり定量的な認識が持たれずに利用されている場合が多い。

本報告では、降雨予測の推定誤差を定量的に算定するための方法論について検討し、さらに、その降雨予測の誤差分散が、洪水予測システムの精度に及ぼす影響を定量的に評価する適用例を示す。

降雨予測の推定誤差の評価手法については、江藤ら

のレーダ雨量の誤差評価法²⁾に準拠し、雨量予測値のまわりに実際に生起する雨量の分布がガンマ分布で表わされるものとする。北海道における近年の主要洪水時の降雨データについて、降雨予測の誤差の分布状況を調べ、雨量予測値とその誤差分散の関係を求める。

降雨予測の精度が洪水予測システムの精度に及ぼす影響については、現在、北海道開発局で実運用されている一般化貯留関数法にカルマン・フィルター理論を組み合わせた洪水予測システムを対象に考える。ただし、本報告では、このシステムに対し、入力である降雨量を状態変量に加え、システム方程式の拡大をはかることにより、予測雨量の誤差分散を適切に取り入れられるよう改良した流出予測手法³⁾により流出予測シミュレーションを行う。

2. 予測雨量の推定誤差

降雨予測値とその誤差分散の定量化は、降雨予測シミュレータの開発が緒となっている⁴⁾。現時刻 k から ℓ 時間後の降雨実現値を r_ℓ 、その予測値を $\hat{r}_\ell$ とする。

今、予測誤差の平均値を0、その予測誤差分散が S_ℓ^2 となるように、予測値 $\hat{r}_\ell$ を求めようとするとき、次式が成立する。

$$E[\hat{r}_\ell - r_\ell] = 0 \quad (1)$$

$$E[(\hat{r}_\ell - r_\ell)^2] = S_\ell^2 \quad (2)$$

ここに、 $E(\cdot)$ ：期待値演算子、 r_ℓ ：実現値、 $\hat{r}_\ell$ ：予測値、 S_ℓ^2 ：予測値と実現値の平均二乗誤差

一方、予測値 $\hat{r}_\ell$ の平均値 μ_ℓ と分散 σ_ℓ^2 は式(3)と式(4)で与えられるものとする。

$$\mu_\ell = E[\hat{r}_\ell] \quad (3)$$

$$\sigma_\ell^2 = E[(\hat{r}_\ell - \mu_\ell)^2] \quad (4)$$

ここに、 $E(\cdot)$ ：期待値、 μ_ℓ ：平均値、 σ_ℓ^2 ：誤差分散式(1)と式(3)より、次式が得られる。

$$E[\hat{r}_\ell] = \mu_\ell = r_\ell \quad (5)$$

式(5)は予測値の期待値が実現値に等しいことを意味している。式(4)を展開して、式(3)の関係式を用いると式(6)が得られる。

$$E[\hat{r}_\ell^2] = \sigma_\ell^2 + \mu_\ell^2 \quad (6)$$

式(2)に式(6)を代入して整理すると、 S_ℓ^2 は次式で与えられる。

$$S_\ell^2 = \sigma_\ell^2 \quad (7)$$

すなわち、平均二乗誤差 S_ℓ^2 は予測値 $\hat{r}_\ell$ の分散 σ_ℓ^2 に等しいことがわかる。

江藤ら²⁾は、八重岳レーダ（沖縄）の豪雨時のデータを対象に、移流モデルにより算出された予測雨量⁵⁾とそれに対する実測雨量を整理し、予測値の周りに実際に生起する実測雨量の分布は、ガンマ分布で良好に表現できることを報告している。また、予測雨量の誤差分散を算定する式として、式(8)を提案している。

$$S_\ell^2 = a_s^2 \ell r_\ell^{2b_s} \quad (8)$$

ここに、 a_s, b_s ：定数

なお、式(8)の係数として、 $a_s = 1.37$ 及び $b_s = 0.64$ の値が得られている。

式(8)は統計的にも重要な意味を持つ。予測値と実測値の平均二乗誤差 S_ℓ^2 は、リードタイム ℓ に比例していることになる。

3. 北海道における予測降雨の推定誤差

現在、北海道開発局では、洪水時に(財)日本気象協会から3時間おきに24時間分の予測雨量データの配信を受け、その予測雨量を入力として洪水予測を行っている。

日本気象協会から配信される予測雨量は、天気図や気象協会数値予報（アネモス）、気象衛星資料、レーダ資料、雨量資料等をもとに、気象予報士による総合解析を行って算定されているが、その予測降雨がどの程度の推定誤差を有しているかは不明である。

降雨予測のうち、1時間～3時間程度先の予測については、「移流モデル」⁶⁾に代表される運動学的手法が予測の基本となっている。運動学的手法では、レーダからのデータをもとに降雨分布の移動パターンをとらえて数時間先の降雨分布を予測する。しかし、その予測精度は実用上1時間先程度が限界である¹⁾とされる。

また、日本気象協会から北海道開発局に配信された予測雨量は、大降雨時の実績データの蓄積が現状では少ないため、本報告では、旧建設省の洪水予報業務においてよく用いられていた実測雨量の過去3時間移動平均雨量を予測雨量の代用とする方法を採用するものとする。以下では、同手法により、北海道における近年の主要洪水時の予測雨量を算出し、その予測雨量の誤差について解析する。

解析対象降雨として、表-1に示される48地点における42洪水例を選定した。

将来予測降雨（リードタイム $\ell = 1 \sim 3$ hrs）の算定方法を表-2に示す。すなわち、21時における1～3時間先の予測雨量は、19時から21時までの3時間平均値の値を用いる。テレメータ等による実測雨量は1時間毎に更新されるものとして、新しい雨量情報が入手されるたびに、順次過去3時間の移動平均値を将来3時間先までの予測雨量とする。

表-1 解析対象洪水

地 域	地点数	洪水数	解析対象洪水
石狩川流域	26	9	1975年8月～2001年9月
オホーツク海地域	20	20	1971年8月～2001年9月
日高地域	2	13	1962年8月～2003年8月

表-2 実測雨量と予測雨量の関係 (1例)

年月日時	地点: 納内 (石狩川流域)			
	実測値	予測値 (リードタイム)		
		1hr	2hr	3hr
1975/8/22 19:00	0.02			
1975/8/22 20:00	0.88			
1975/8/22 21:00	0.61			
1975/8/22 22:00	0.64	0.50		
1975/8/22 23:00	1.95	0.71	0.50	
1975/8/23 0:00	0.55	1.07	0.71	0.50
1975/8/23 1:00	0.56	1.05	1.07	0.71
1975/8/23 2:00	0.84	1.02	1.05	1.07

表-3 実測雨量と予測雨量の階級別統計量

1時間先予測 (リードタイム $\ell=1$)													
予測→	実測↓	0～	2～	4～	6～	8～	10～	15～	20～	30～			
		2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	15 mm	20 mm	30 mm				
0～	2 mm	15997	1392	380	147	65	58	18	7				
2～	4 mm	1217	1078	440	201	72	52	8	5				
4～	6 mm	282	502	525	265	83	75	8	4				
6～	8 mm	103	179	280	200	110	101	8	6				
8～	10 mm	40	86	110	109	91	85	17	5				
10～	15 mm	49	72	100	122	124	161	27	6				
15～	20 mm	16	25	14	18	33	62	23	10				
20～	30 mm	8	5	7	8	4	25	13	14				
30～	50 mm	3	0	3	2	2	7	4	7				
標本数		17715	3339	1859	1072	584	626	126	64				
実測平均値 ($\bar{r}_\ell$)		0.667	3.008	4.744	5.929	7.600	9.426	11.428	14.953				
RMSE (S_ℓ)		1.433	2.863	3.422	4.150	5.032	6.789	9.520	13.722				

2時間先予測 (リードタイム $\ell=2$)													
予測→	実測↓	0～	2～	4～	6～	8～	10～	15～	20～	30～			
		2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	15 mm	20 mm	30 mm				
0～	2 mm	15629	1588	513	230	99	105	24	17				
2～	4 mm	1278	863	429	194	87	89	13	5				
4～	6 mm	374	472	420	234	94	92	11	3				
6～	8 mm	158	196	235	164	95	101	16	4				
8～	10 mm	78	85	107	97	71	74	10	9				
10～	15 mm	91	102	116	115	100	101	15	9				
15～	20 mm	32	17	28	27	31	44	15	5				
20～	30 mm	12	8	9	9	4	16	16	5				
30～	50 mm	2	4	2	1	3	3	4	7				
標本数		17654	3335	1859	1071	584	625	124	64				
実測平均値 ($\bar{r}_\ell$)		0.770	2.946	4.536	5.553	6.867	7.367	9.940	11.200				
RMSE (S_ℓ)		1.746	3.265	3.826	4.543	5.574	7.500	10.883	16.419				

3時間先予測 (リードタイム $\ell=3$)													
予測→	実測↓	0～	2～	4～	6～	8～	10～	15～	20～	30～			
		2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	15 mm	20 mm	30 mm				
0～	2 mm	15386	1683	596	287	143	155	30	13				
2～	4 mm	1274	770	393	206	89	98	17	7				
4～	6 mm	439	434	369	206	100	100	15	5				
6～	8 mm	199	207	210	135	88	100	18	6				
8～	10 mm	100	90	99	93	71	55	9	8				
10～	15 mm	136	112	139	102	62	70	9	11				
15～	20 mm	36	25	37	35	23	28	12	3				
20～	30 mm	18	10	13	5	6	16	8	4				
30～	50 mm	7	4	3	1	2	3	5	5				
標本数		17595	3335	1859	1070	584	625	123	62				
実測平均値 ($\bar{r}_\ell$)		0.857	2.913	4.534	5.179	5.832	6.178	8.076	10.343				
RMSE (S_ℓ)		2.070	3.458	4.279	4.774	5.862	8.246	12.026	16.163				

それぞれのリードタイム ($\ell=1\sim3$ hrs) 毎に、その実測値と予測値を同じ階級幅で分類し、その範囲内のデータ数 (標本数) に基づき、標本統計量を算定した結果を表-3に示す。表中には、採用標本数、予測値のまわりの実測平均値 $\bar{r}_\ell$ および平均二乗誤差の平方根 (RMSE: Root Mean Squares Error) S_ℓ の値がリードタイム別に計算されている。各階級の予測降雨に対応する実測雨量の平均値 $\bar{r}_\ell$ と平均二乗誤差 S_ℓ^2 は、それ

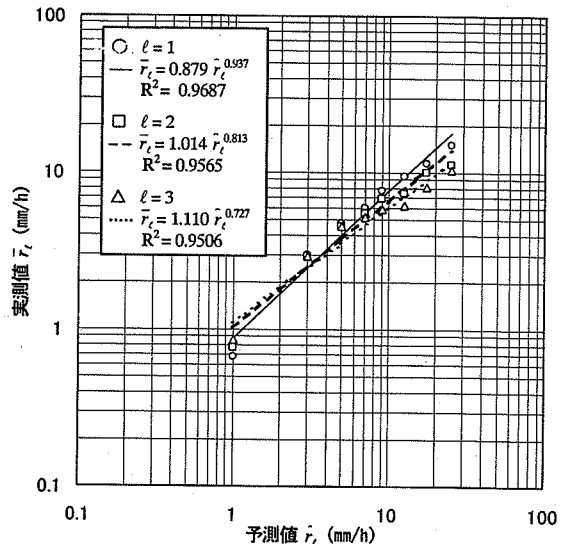


図-1 予測値階級中央値と実測雨量平均値の関係

表-4 リードタイム毎の実測値と予測値の関係式

リードタイム	回帰式		
	$\overline{r}_\ell = a_m \hat{r}_\ell^{b_m}$		決定係数
ℓ (h)	a_m	b_m	R^2
1	0.879	0.937	0.9687
2	1.014	0.813	0.9565
3	1.110	0.727	0.9506

ぞれ式(9)と式(10)で求められる。

$$\bar{r}_\ell = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{\ell,i} \quad (9)$$

$$S_\ell^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{r}_{\ell,i} - r_{\ell,i})^2 \quad (10)$$

ここに、 $\bar{r}_\ell$: 実測平均値、 S_ℓ^2 : 予測値と実測値の平均二乗誤差、 $\hat{r}_{\ell,i}$: 階級内予測値、 $r_{\ell,i}$: 階級内実測値、 N : 標本数である。

表-3を見ると、小降雨時の実測雨量の平均値 $\bar{r}_\ell$ は予測雨量の階級区分範囲内にほぼ収まっている。すなわち、統計的には、予測降雨の期待値は実現値に等しいと言える。しかしながら、雨量が大きくなるほど、予測値の階級区分範囲より小さくなる傾向にあるため、予測値を実測値に近づけるための方策が必要となる。

ここで、リードタイム毎の予測値階級中央値 $\hat{r}_\ell$ と実測平均値 $\bar{r}_\ell$ の関係を図-1に示す。その結果、リードタイム毎に予測値を実測値に補正するための近似式が算定でき、その回帰式及びその係数を表-4に示す。リードタイム毎の回帰式の決定係数 R^2 は 0.95 以上であることから、この近似式の適合度は高いことがわかる。

次に、表-3に示されるヒストグラムにガンマ分布を

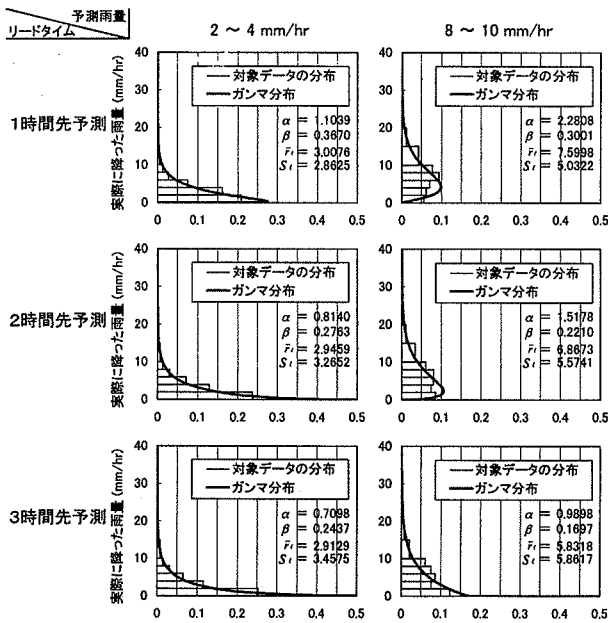


図-2 ガンマ分布のヒストグラムへのあてはめ

あてはめて、その適合度を評価する。水文統計学では、負値の発生を防ぐために、2母数ガンマ分布が確率モデルとしてしばしば用いられる。ガンマ分布は形状母数 α 、尺度母数 β の2つの母数をもつ確率分布モデルであり、形状母数 α の値により、非負の逆J字型分布、指数分布、正のひずみ係数を持つ単峰分布、正規分布と幅広い分布形に適用できる特徴を持っている。

本報告では、予測値のまわりの実測値が式(9)と式(10)に示される平均値 $\bar{r}_\ell$ 及び誤差分散 S_ℓ^2 をもつガンマ分布に従うと仮定する。ガンマ分布の確率密度関数 $f(x)$ 及び理論積率($\bar{r}_\ell$ と S_ℓ^2)と母数の関係式は、それぞれ式(11)と式(12)で与えられる。

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\beta x} \quad (11)$$

$$\alpha = \bar{r}_\ell^2 / S_\ell^2, \quad \beta = \bar{r}_\ell / S_\ell^2 \quad (12)$$

ここに、 x : 予測値の周りの実測値 ($x = r_\ell$)、 $f(\cdot)$: 密度関数、 $\Gamma(\cdot)$: ガンマ関数、 α : 形状母数、 β : 尺度母数、 $\bar{r}_\ell$: 理論平均値、 S_ℓ^2 : 理論分散

式(11)のガンマ分布をヒストグラムにあてはめた結果を図-2に示す。図中には母数推定値も示されている。

その結果、小降雨の場合は指数形分布で近似でき、また、大きな降雨の場合は非対称単峰分布ないし指数分布で表現されている。ガンマ分布のヒストグラムへの適合度は形状及びピーク値ともに良好であることが分かる。

一般的に平均二乗誤差の平方根 S_ℓ はリードタイムが長くなるほど、大きくなることが推測される。表-3に示される S_ℓ 値は、リードタイムが長くなるに伴って、その誤差が大きくなる傾向にあることが分かる。

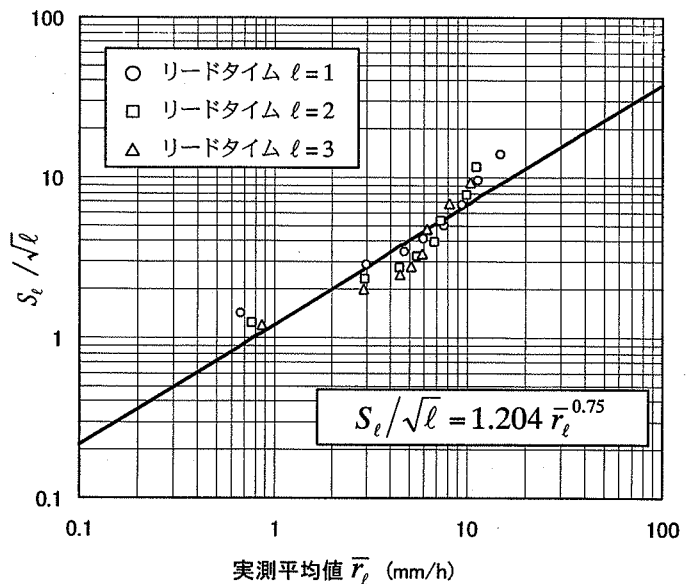


図-3 $S_\ell / \sqrt{\ell}$ と $\bar{r}_\ell$ の関係

そこで、江藤らと同様、 $S_\ell / \sqrt{\ell}$ と平均値 $\bar{r}_\ell$ の関係を図-3に示す。石狩川流域、日高地域及びオホーツク海地域における降雨資料を総合化した回帰式は式(13)で表される。

$$S_\ell / \sqrt{\ell} = 1.204 \bar{r}_\ell^{0.75} \quad (13)$$

式(13)の回帰係数1.204と指数0.75の値は、江藤らがレーダ雨量情報を用いた式の回帰係数 $a_s = 1.37$ 、指数 $b_s = 0.64$ に近い値をとっていることに着目すべきである。

4. 実時間洪水予測手法

前節までに述べた予測雨量 $\hat{r}_\ell$ とその平均二乗誤差 S_ℓ^2 を取り入れ、カルマン・フィルター理論を用いた実用的洪水予測法を検討する。カルマン・フィルター理論は、1960年にKalmanによって開発された最適制御理論である。1970年代初期から実時間洪水流出予測に威力を発揮する一手法として広く用いられてきた。

「システム誤差」や「観測誤差」を始めとして、種々の不確定性をモデル構築に反映することができ、予測精度を定量的に把握できる点が最大の特徴である。その理論解説と計算プログラムの詳細については、参考文献⁹⁾を参照されたい。

まず、流出モデルとして次式に示す損失項を含む貯留関数法(1段タンク型貯留関数モデル)を採用する(図-4参照)⁷⁾。このモデルには、損失機構が組み込まれ、入力に実績雨量を直接用いるため、有効雨量の推定を必要としない。また、総流出量を出力に用いているので、直接流出量の分離作業を必要としない特徴をもち、逐次洪水予測に適した手法であると言える。

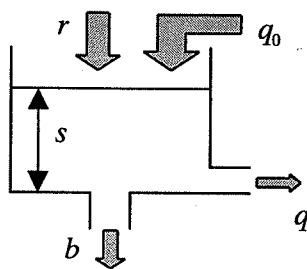


図-4 1段タンク型貯留関数モデル

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = r - q - b + q_0, & s = k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ b = k_{13}q, & q_0 = q_B \exp(-\lambda t) \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 s ：貯留高（mm）， r ：観測雨量（mm/h）， q ：観測流出高（mm/h）， b ：損失高（mm/h）， q_0 ：基底流出高（mm/h）， q_B ：初期流出高（mm/h）， k_{11} 、 k_{12} ：貯留係数， k_{13} ：損失係数， p_1 、 p_2 ：貯留指数， λ ：減衰係数

モデル定数は次の関係式で表わされることが知られている⁷⁾。

$$\begin{cases} k_{11} = c_{11}A^{0.24}, & k_{12} = c_{12}k_{11}^2(\bar{r})^{-0.2648} \\ c_{13} = k_{13} + 1 \end{cases} \quad (15)$$

ここに、 A ：流域面積（km²）、 $\bar{r}$ ：平均雨量強度（mm/h）、 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} ：未知定数

式(14)を解くために、次の変数を「状態変量」に選定する。

$$x_1 = q^{p_2}, \quad x_2 = \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \quad (16)$$

モデル定数 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} および予測雨量 $\hat{r}_\ell$ は、洪水毎に変化することが予想される。したがって、 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} および予測雨量 $\hat{r}_\ell$ も「状態変量」に加えて、式(14)を拡大システム方程式に変換する。カルマン・フィルターで用いられる状態変量は式(17)に要約される。

$$\begin{cases} X_1 = [x_1 \ x_2]^T, & X_1 = [c_{11} \ c_{12} \ c_{13}]^T \\ X_3 = \hat{r}_\ell \end{cases} \quad (17)$$

5. 実測データへの適用

沙流川二風谷ダム地点（流域面積 1214.8km²）における平成 15 年 8 月 9 日 1 時～8 月 11 日 24 時洪水を対象に前述した予測モデルを用いて 1 時間～3 時間先までの洪水予測シミュレーションを行う。

表-5 沙流川におけるモデル定数統計量⁷⁾

	c_{11}	c_{12}	c_{13}
平均値 (m)	10.893	0.130	1.307
標準偏差 (σ)	2.470	0.077	0.357

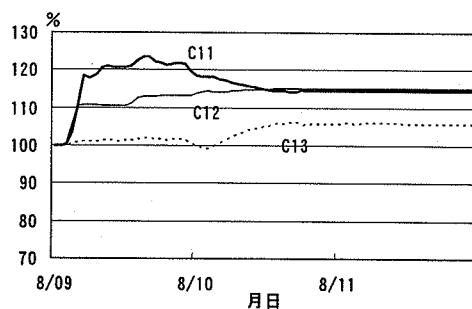


図-5 パラメータ変化率

予測雨量とその誤差分散をカルマン・フィルターに組み込む際の計算手順を以下に要約して示す。

- (a) 旧建設省の洪水予報業務においてよく用いられた式(18)による過去 3 時間の移動平均雨量を将来 1～3 時間先の予測降雨として用いた。

$$\hat{r}_\ell = (r_{k-2} + r_{k-1} + r_k) / 3, \quad (18)$$

ここに、 $\hat{r}_\ell$ ：現時刻 k における ℓ 時間後の予測雨量， r_k ：時刻 k の実測雨量

- (b) 表-3 と図-1 に示されるように、予測雨量は実測値より大きく見積もられる傾向にある。そこで、表-4 に示されるリードタイム毎の回帰式を用いて、予測降雨をより実測に近い値に補正する。

- (c) 補正した値を $\bar{r}_\ell$ として、式(13)の予測雨量誤差分散をリードタイム毎に計算する。その値をカルマン・フィルターの状態変量に関する推定誤差分散の伝達方程式に組み込む。

沙流川流域における 60 洪水例に関して 3 個のモデル定数 c_{11} 、 c_{12} 及び $c_{13}(=k_{13}+1)$ の最適同定が行われている⁷⁾。その結果によるモデル定数の平均値 (m) と標準偏差 (σ) が表-5 に示されている。

モデルパラメータ (c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13}) の初期値は、安全側の予測となるように選択する。 c_{11} が小さい時はハイドログラフが尖鋭化し、 c_{12} が小さくなるとピークの生起時刻が早まる。 c_{13} が小さくなると総流出量が大きくなる。したがって、モデル定数 c_{11} は $m-\sigma$ 、 c_{12} は $m-\sigma$ 、 c_{13} は $m-\sigma$ ($c_{13} \geq 1$) の値を用いた。すなわち、 $c_{11}=8.423$ 、 $c_{12}=0.053$ 、 $c_{13}=1.000$ を初期値に設定した。

図-5 は、モデル定数 (c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13}) の初期値を 100% として、オンライン同定された値を 1 時間ごとに変化率で表したものである。 c_{11} 、 c_{12} 及び c_{13} の最大変化率はそれぞれ 23%、15%、6% であり、時間変動が小さいことがわかる。

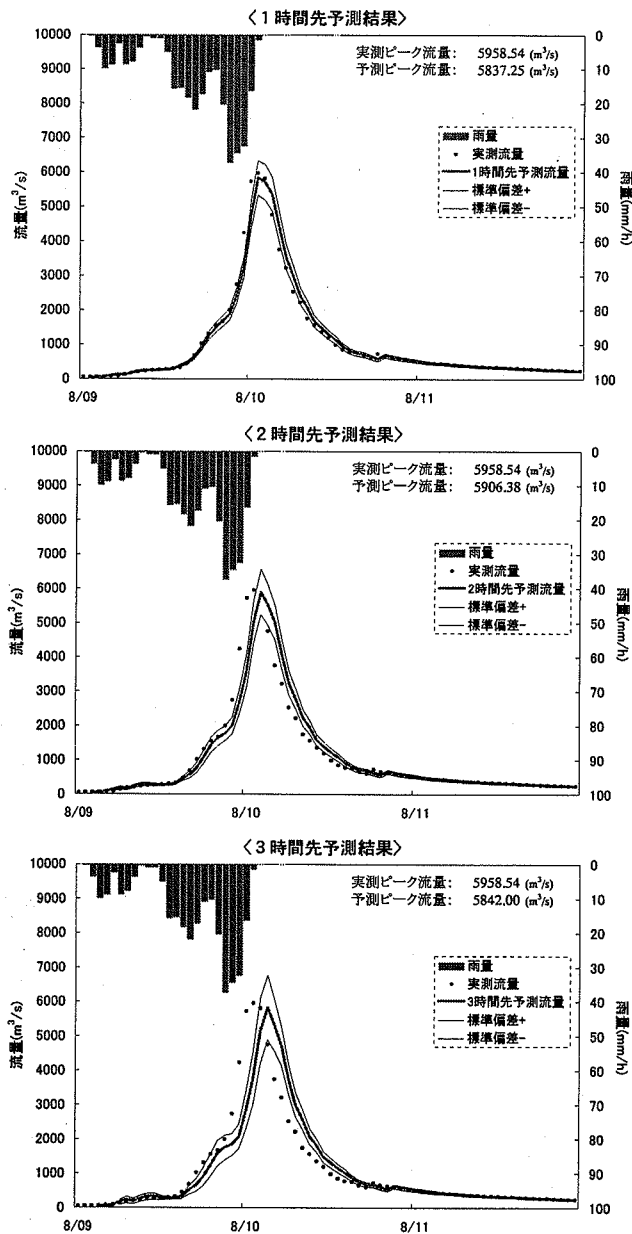


図-6 1～3時間先予測結果

1～3時間先予測流入量の計算結果を図-6に示す。ハイドログラフの8/9～8/10における立ち上がり部にかけての適合度は、リードタイムが短いほど良好であることがわかる。

ピーク近傍におけるハイドログラフの適合度については、実際の雨量は急激に減衰しているために、予測ピーク値は実測値を幾分下回っている。

評価基準として、ハイドログラフ全体の誤差を表す指標の平均二乗誤差の平方根 ($RMSE$: Root Mean Squares Error)、 J_{PE} (ピーク流量相対誤差)、 J_{RE} (ハイドログラフの相対誤差) を用いる。安全側の予測を行うという観点から、(予測値+標準偏差)と実測値との誤差比較を表-6に示す。

過去3時間の平均雨量を予測雨量として用いるという手法の性質上、予測は若干遅れる傾向が見られ、リ

表-6 (予測流量+標準偏差)と実績流量の誤差評価

	1時間先	2時間先	3時間先
$RMSE/Q_{op}$	0.0487	0.0800	0.1171
J_{PE}	0.0635	0.1018	0.1371
J_{RE}	0.1457	0.1937	0.2490

※ Q_{op} : 観測ピーク流量

ードタイムが長くなるほど、各相対誤差は大きくなる傾向にある。しかしながら、リードタイム3時間の場合でも J_{RE} は最大で25%程度なので、再現結果は良好であると考えられる。

6. まとめ

北海道における多数の既往洪水資料をもとに、過去3時間移動平均雨量を将来3時間先予測雨量とする場合の平均二乗誤差算定式を提案した。その結果、江藤らによるレーダ雨量情報を用いた回帰式とほぼ同等の係数が得られた。

1段タンク型貯留関数法と予測雨量の誤差分散を考慮したカルマン・フィルター理論を組み合わせた実時間洪水予測手法を開発した。その提案モデルを2003年8月洪水時の沙流川・二風谷ダムにおける流入量予測に適用して、予測精度(信頼区間)を定量的に評価することができた。

参考文献

- 1) 吉野文雄：レーダ水文学，森北出版，175p.，2002.
- 2) Etoh, T., Kamibayashi, Y., Nakanishi, M. and Yoshida, M. : A study on prediction error in rainfall forecasting and its application to on-line operation of detention storage, Proc. of International Conference on Water Resources & Environment Research : Towards the 21st Century, Vol. I, pp.531-538, 1996.
- 3) 片山直樹・星清・橋本織秀：予測雨量の誤差を考慮した実用的洪水予測モデルの開発，土木学会北海道支部論文報告集，第60号，2004.
- 4) 高埴琢馬・椎葉充晴・宝馨：集中型流出モデルの構成と流出予測手法，京大防災研究所年報，第25号B-2，1982.
- 5) 上林好之：レーダ雨量情報を利用した洪水流出予測に関する研究，学位論文，早稲田大学，215p.，1990.
- 6) 椎葉充晴・高埴琢馬・中北英一：移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討，第28回水理講演会論文集，第28巻，pp.423-428，1984.
- 7) (財)北海道河川防災研究センター・研究所 編集・発行：単一流域を対象とした貯留関数法の精度比較，189p.，2002.
- 8) (財)北海道河川防災研究センター・研究所 編集・発行：「実時間洪水予測システム理論」解説書，396p.，2004. (5月発行)

(2004. 4. 7受付)