

## 第2章 個別の研究成果

### I. 次世代水管理技術に関する研究

#### 1. 予測降水量を活用した洪水予警報に関する技術開発

地球規模での水循環の変化により、我が国における降雨形態についても、これまでの傾向に変化の生じる可能性が多方面から指摘されている。特に、降雨量や豪雨の増加は、洪水に大きな影響を及ぼすと考えられているものの、全国同時にこれに対応したハード対策を施すには長期を要するため、さまざまなソフト対策が求められている。

現在、我が国における洪水予測には、過去数年から数十年にわたる河川・流域毎の降雨や洪水実績資料を基にした経験則に基づく洪水予測システムが数多く用いられている。このため、降雨形態の変化が従来からの経験や想定の域を超えた場合には、洪水予測システムが十分に機能・対応できなくなる恐れがある。

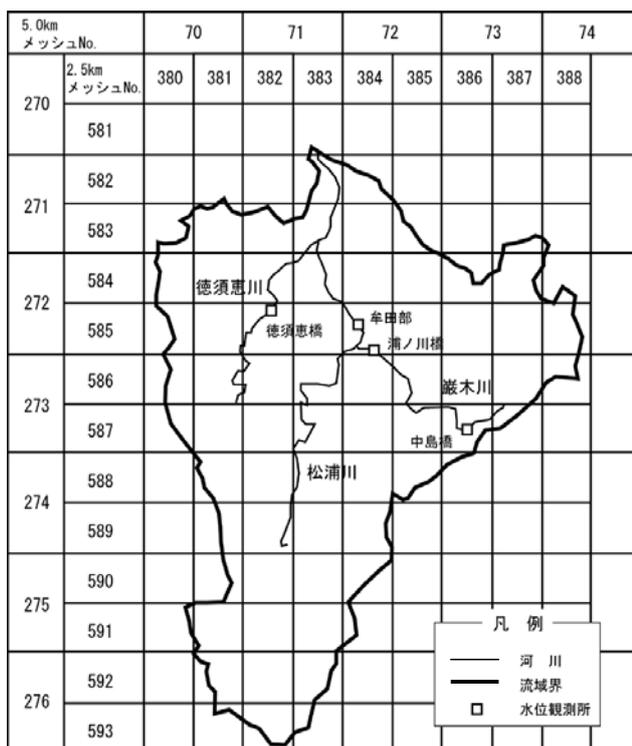
そこで、本研究では、想定外の外力にも対応できる柔軟な洪水予測システムを提案するため、不確定事象である予測雨量の変化に対して、確率的な表現を用い、予測に幅を持たせる柔軟な洪水予測手法について検討を行った。

#### 1-1 確率論的洪水予測手法の検討

##### 1-1.1 降雨予測の精度分析

現在、洪水予測には、気象庁、気象協会、民間気象会社等、様々な機関から発表される予測雨量が用いられており、情報源や予測根拠が多様である。また、単独使用、実測データとの複合使用等、様々な使用方法が用いられている。一般的に、これらの予測雨量は全て時間及び量に対して、ある確定的な一つの値で表現されるため、実際の降雨に対して何らかの誤差が生じていると考えられるが、その制度や信頼性は定量的・定性的ともに不明である。この原因としては、これまで、降雨の有無という空間、事象、総量的な精度が着目される傾向により、より詳細な時系列に着目した精度については十分追究されておらず、その検証についても不十分であったことが考えられる。

そこで、本研究では、過去の気象庁の降水短時間用法の予測雨量を用いて、図 1-1-1 に示す九州地方の松浦川水系を対象に、過去7年間の予測雨量データから 30 降雨を抽出し、予測雨量の定量的な分析を行った。



<松浦川の概要>

項目	数量及び記事
水源地	佐賀県杵島郡山内町 青螺山
標高	599.2m
流域面積	446km <sup>2</sup>
幹川流路延長	47km
直轄管理区間	60.5km
流域市町村 (H17.2 現在)	唐津市・伊万里市・山内 町・武雄市
流域内人口	212 千人 (H12.国調)

<松浦川流域と気象庁レーダー>

松浦川流域は、5km メッシュでは 5×6 メッシュの範囲に、2.5km メッシュでは 9×12 メッシュの範囲に収まる。また、図中のメッシュ No.は、レーダーアメダス解析雨量データの北西端メッシュを原点 (0,0) として経度方向：東→西、緯度方向：北→南を正として No.を付けた。

なお、気象庁降水短時間雨量 (5km メッシュ) のメッシュ位置はレーダーアメダス解析雨量の 5km メッシュと同じである。

図 1-1-1 松浦川流域とレーダーメッシュ位置

1-1.1.1 対象降雨の選定

松浦川流域を含む佐賀県の大雨および洪水警報の基準をもとに、降雨・流出規模、気象要因等を総合的に判断し、以下に示す条件で、分析対象降雨を選定した。これらの条件によって選定された降雨を表 1-1-1 に示す。

- 最大1時間雨量が30mm以上の降雨
- 最大1時間雨量が20mm以上で、24時間換算雨量または総雨量が80mm以上の降雨
- 最大1時間雨量が10mm以上で、次の条件を満たす降雨

24時間換算雨量が100mm以上

あるいは、

総雨量が100mm以上で24時間換算雨量が20mm以上（長期間の降雨を除くため）

- 24時間換算雨量から採用する降雨はひと雨期間が12時間以上の場合に限る。

また、表 1-1-1 に示す 30 降雨について、最大1時間雨量を記録した日の9時の地上天気図を図 1-1-2 に示す。

表 1-1-1 分析対象降雨

降雨番号	年	降雨期間		総雨量 mm	24時間 換算雨量 mm	最大時間雨量		降雨原因	
		開始 月日時	終了 年日時			雨量 mm	起時 月日時	主因	副因
1	1998	05/10/17	05/12/21	175.3	79.4	27.9	05/11/17	低気圧（日本海）	温暖寒冷前線
2	1998	06/19/01	06/19/18	102.2	136.3	22.0	06/19/08	停滞前線	低気圧（日本海沿岸）
3	1998	06/20/22	06/28/21	272.5	34.1	26.3	06/21/04	停滞前線	
4	1999	06/22/19	06/27/05	265.4	59.5	16.9	06/26/17	停滞前線	
5	1999	06/28/17	06/30/05	132.1	85.7	48.6	06/29/08	停滞前線	低気圧（日本海沿岸）
6	1999	07/01/16	07/04/02	101.4	41.3	30.9	07/02/14	低気圧（日本海）	寒冷・停滞前線
7	1999	07/20/09	07/24/12	127.6	30.6	15.3	07/23/03	停滞前線	熱帯低気圧
8	1999	07/26/05	07/30/07	187.1	45.3	24.9	07/29/12	台風	暖湿流
9	1999	08/20/08	08/24/06	103.3	26.1	16.7	08/23/10	停滞前線	低気圧（日本海沿岸）
10	1999	08/26/08	09/02/15	190.7	26.0	13.2	09/02/15	停滞前線	低気圧（日本海沿岸）
11	1999	09/10/08	09/11/08	71.5	68.6	23.7	09/10/19	低気圧（日本海）	暖湿流
12	2000	06/20/20	06/25/10	98.8	21.4	28.3	06/21/00	低気圧（本土）	停滞前線
13	2000	07/24/09	07/27/23	140.7	38.8	31.1	07/24/15	停滞前線	暖湿流
14	2000	08/16/06	08/21/11	119.5	22.8	15.8	08/21/01	低気圧（日本海）	暖湿流
15	2000	10/31/17	11/03/00	128.3	55.0	12.9	11/02/06	低気圧（本土）	停滞前線
16	2001	06/18/10	06/30/09	533.8	44.5	30.2	06/19/17	停滞前線	低気圧（日本海）
17	2001	07/05/11	07/07/10	150.6	75.3	27.7	07/06/05	停滞前線	暖湿流
18	2001	07/11/02	07/13/14	145.0	57.0	15.6	07/12/13	停滞前線	暖湿流
19	2002	04/06/10	04/07/02	81.0	114.4	18.8	04/06/19	低気圧（日本海）	温暖・寒冷前線
20	2002	04/30/20	05/01/09	60.3	103.3	16.2	05/01/02	停滞前線	低気圧（日本海）
21	2002	06/29/05	07/01/23	91.3	32.7	17.3	07/01/06	停滞前線	低気圧（日本海沿岸）
22	2002	09/16/08	09/17/10	242.1	215.2	54.2	09/16/17	低気圧（日本海沿岸）	
23	2003	06/17/17	06/20/02	114.2	47.2	10.8	06/19/10	台風	停滞前線
24	2003	07/17/20	07/21/07	219.7	62.8	36.7	07/19/05	停滞前線	低気圧（日本海）
25	2003	08/25/08	08/28/23	91.1	24.8	20.4	08/26/01	寒冷前線	低気圧（日本海）
26	2003	09/09/21	09/11/08	65.7	43.8	30.6	09/09/23	停滞前線	台風
27	2004	05/02/20	05/04/07	110.3	73.5	14.9	05/03/23	低気圧（日本海）	暖湿流
28	2004	06/24/07	06/27/11	262.2	81.7	22.2	06/27/07	停滞前線	低気圧（日本海沿岸）
29	2004	08/30/03	08/31/12	61.3	43.3	12.0	08/30/13	台風	
30	2004	09/06/13	09/07/17	76.5	63.3	14.3	09/07/10	台風	

注) 選択条件からみれるが、降雨 29,30 は台風の事例が少ないため追加した。また、降雨 11,21 は松浦川流域で洪水が発生したため追加した。

表 1-1-2 分析対象降雨(検証用)

降雨番号	年	降雨期間		総雨量 mm	24時間 換算雨量 mm	最大時間雨量		降雨原因	
		開始 月日時	終了 年日時			雨量 mm	起時 月日時	主因	副因
31	1998	04/01/05	04/02/04	97.2	97.2	17.3	04/01/14	低気圧（本土）	
32	1999	06/06/13	06/07/18	95.4	76.4	17.7	06/06/21	停滞前線	
33	2000	06/26/22	06/29/09	92.8	37.1	15.8	06/28/06	停滞前線	暖湿流
34	2001	11/29/06	11/30/05	92.2	92.2	13.9	11/29/19	低気圧（日本海）	寒冷前線
35	2004	10/18/21	10/21/02	132.3	58.8	7.7	10/19/05	台風	

注) 選択条件からみれるが、降雨 3 5 は台風の事例がないため追加した。

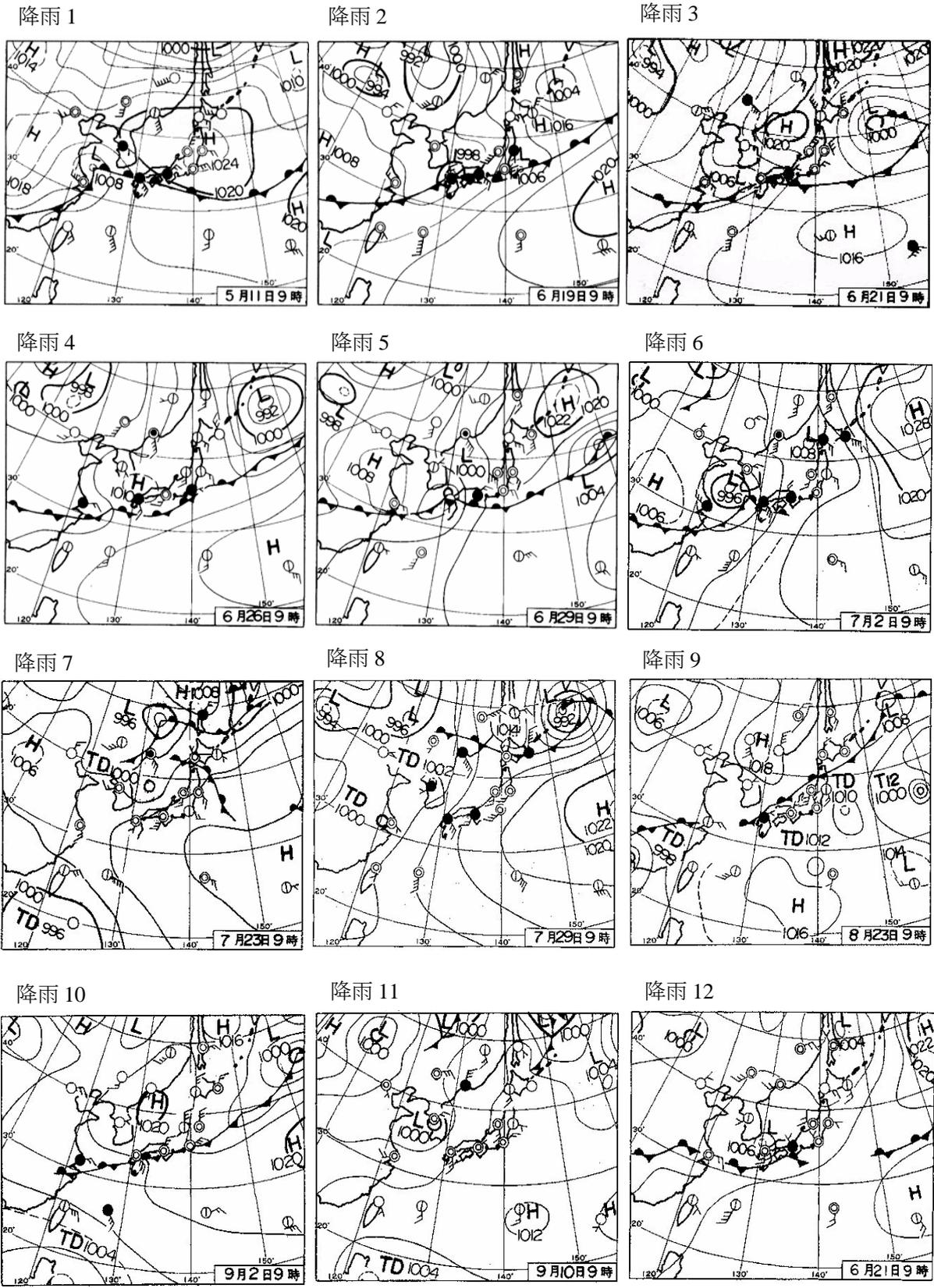


図 1-1-2 (1) 各対象降雨で最大1時間雨量を記録した日の地上天気図

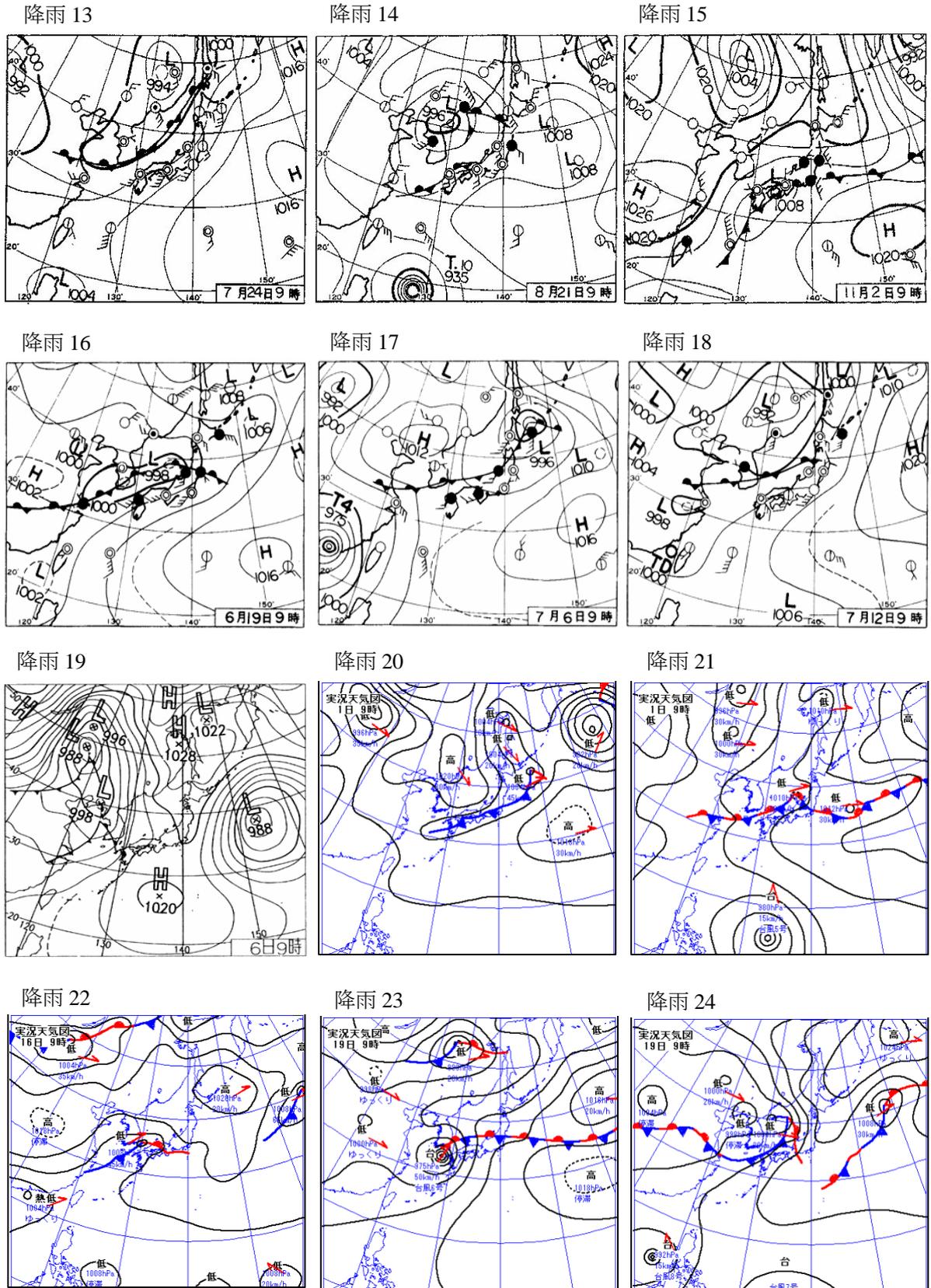


図 1-1-2 (2) 各対象降雨で最大1時間雨量を記録した日の地上天気図

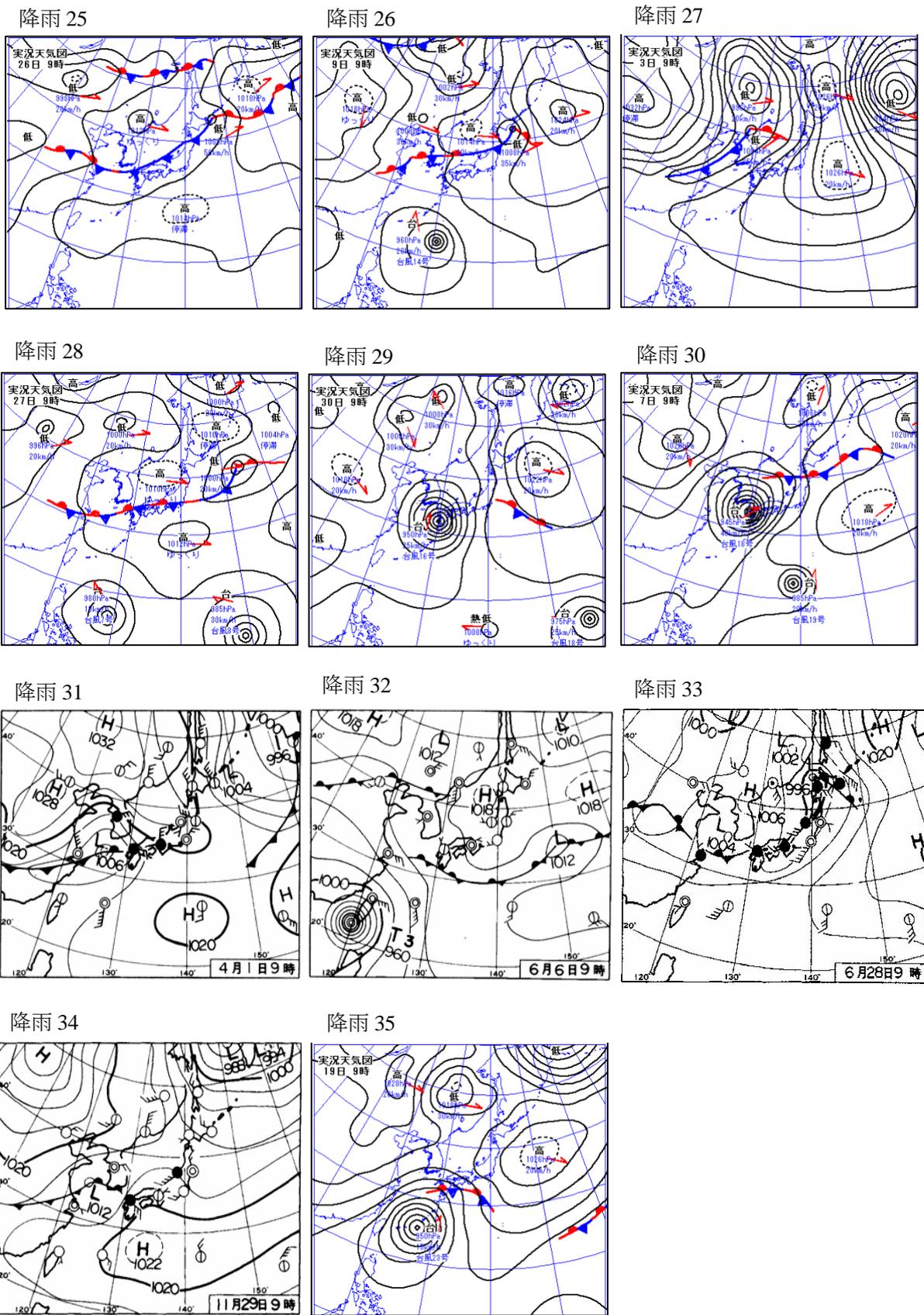


図 1-1-2 (3) 各対象降雨で最大 1 時間雨量を記録した日の地上天気図

### 1-1.1.2 精度評価

相関係数、絶対誤差、総雨量、最大1時間雨量を用いて、気象庁降水短時間予想について検討を行った。各指標の求め方は、以下の通りである。

- 雨量ボリューム (m<sup>3</sup>/s)

単位時間当たりの雨量ボリューム Qi (m<sup>3</sup>/s) は、

$$Q_i = R(i) \times \frac{S}{3.6}$$

R(i) : i 時の流域平均雨量 (mm/h)

S : 流域面積 (km<sup>2</sup>)

ひと雨の総雨量ボリューム Q (m<sup>3</sup>) は、

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n R(i) \times S$$

n : ひと雨時間数で表すことができる。

S は一定値であるため、雨量で評価しても定数を掛ければボリュームを算出することができる。したがって、単位時間当たりの雨量ボリュームについては、流域平均雨量の「1時間最大値」で、ひと雨の総雨量ボリュームについては、流域平均雨量の「総雨量」で評価する。

- 毎正時の雨量の絶対誤差の平均

$$Ea = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Rp(i) - Ro(i)|$$

Ea : 絶対誤差の平均

Rp(i) : i 時の予測雨量

Ro(i) : i 時の実測雨量

絶対誤差だけでは、予測が過大か過小か判断できないため、適宜、「相対誤差」の平均も指標として使用した。

$$Ea = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Rp(i) - Ro(i))$$

Er : 絶対誤差の平均

Rp(i) : i 時の予測雨量

Ro(i) : i 時の実測雨量

- 毎正時の誤差平方和の平均

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Rp(i) - Ro(i)}{Rp(i)} \right)^2$$

E : 誤差 (洪水予測の場合は通常 0.03 以下を目標とするが、雨量の場合はその限りではない。以下、「誤差率」呼ぶ)

Rp(i) : i 時の予測雨量 (雨量の場合は 0mm が発生して計算不能となるため、1mm 以上の時間のみを対象とする。)

Ro(i) : i 時の実測雨量

n : 計算時間数

- 毎正時雨量の相関係数

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Rp(i) - \overline{Rp})(Ro(i) - \overline{Ro})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Rp(i) - \overline{Rp})^2 \sum_{i=1}^n (Ro(i) - \overline{Ro})^2}}$$

r : 相関係数

$\overline{Rp}$ ,  $\overline{Ro}$  : Rp, Ro の平均値

精度評価における精度の良否は、用いる精度評価指標によって異なる結果となった。結果を表 1-1-3、図 1-1-3 に示す。

横軸に初期値の各指標を、縦軸に予測の各指標をとると、図 1-1-4 のようになった（初期値の各指標とは、ある着眼時点における実測値と 0 時間先の予測値の関係を示す指標である）。初期値の絶対誤差（以降、初期誤差という。）と予測値の絶対誤差（以降、予測誤差という。）に高い相関があることがわかる。これは、ある着眼時点（初期）での誤差の程度と、予測の誤差の程度に何らかの関係があることを意味している。

表 1-1-3 30 降雨の平均予測精度

予測時間	相関係数	絶対誤差 (mm)	誤差率	総雨量		最大 1 時間雨量	
				予測 (mm)	実測 (mm)	予測 (mm)	実測 (mm)
0	0.969	0.60	0.17	176.3	147.3	26.3	22.7
1	0.830	1.42	1.31	173.8	146.8	23.8	22.7
2	0.591	2.02	2.45	168.3	145.0	22.6	22.6
3	0.432	2.43	10.31	153.2	142.4	20.6	21.8

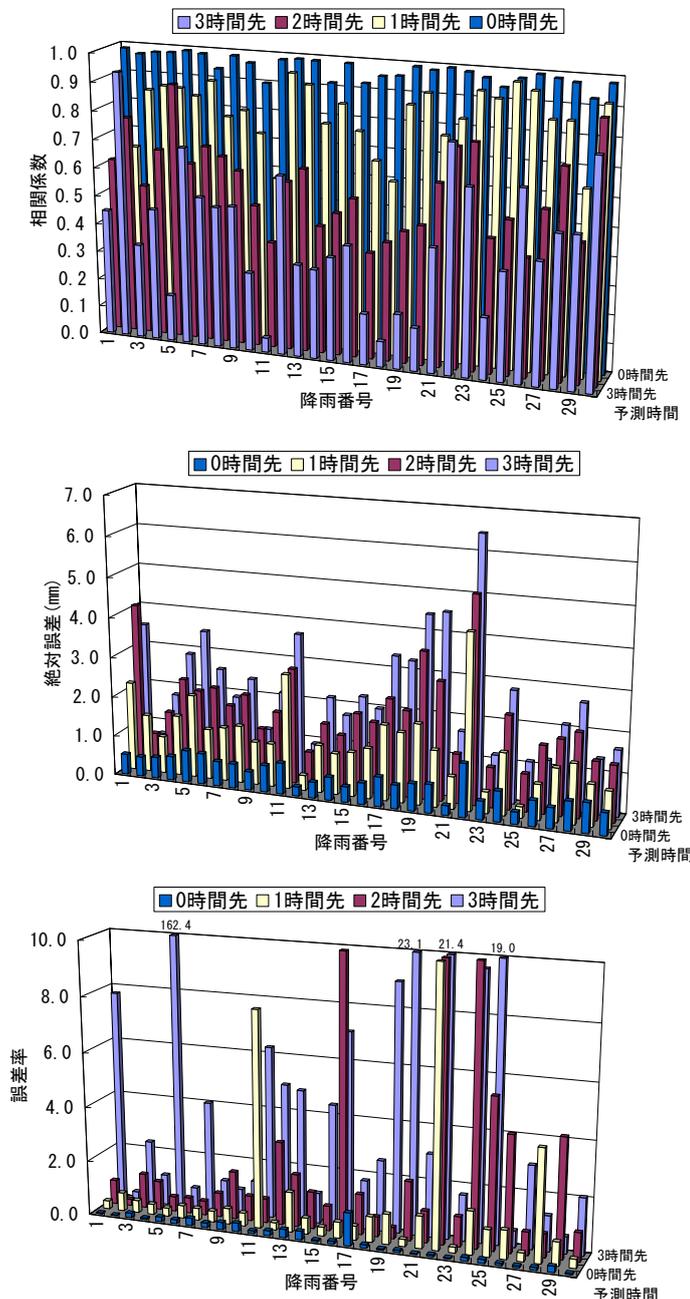


図 1-1-3 相関係数、絶対誤差、誤差率を用いた各降雨の予測精度

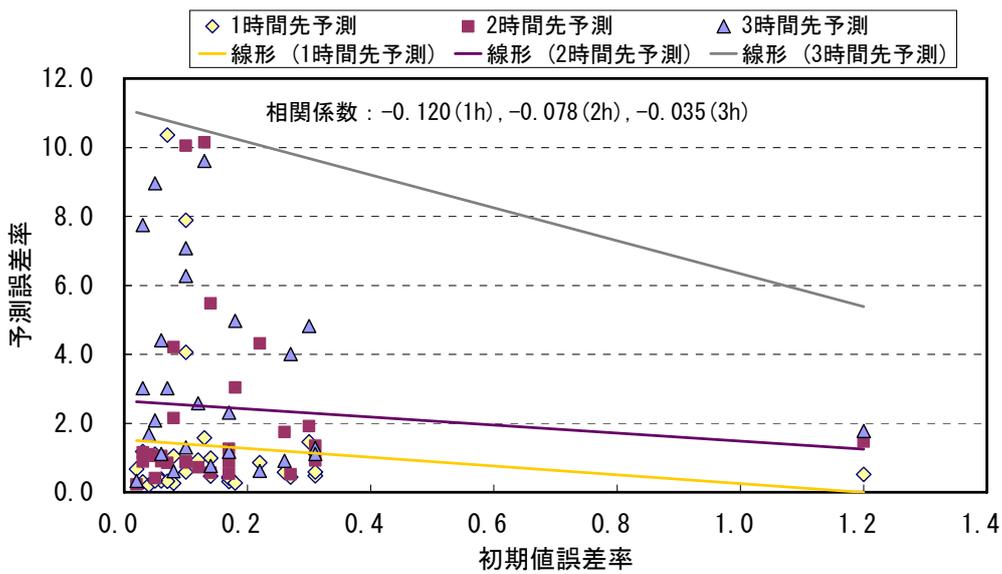
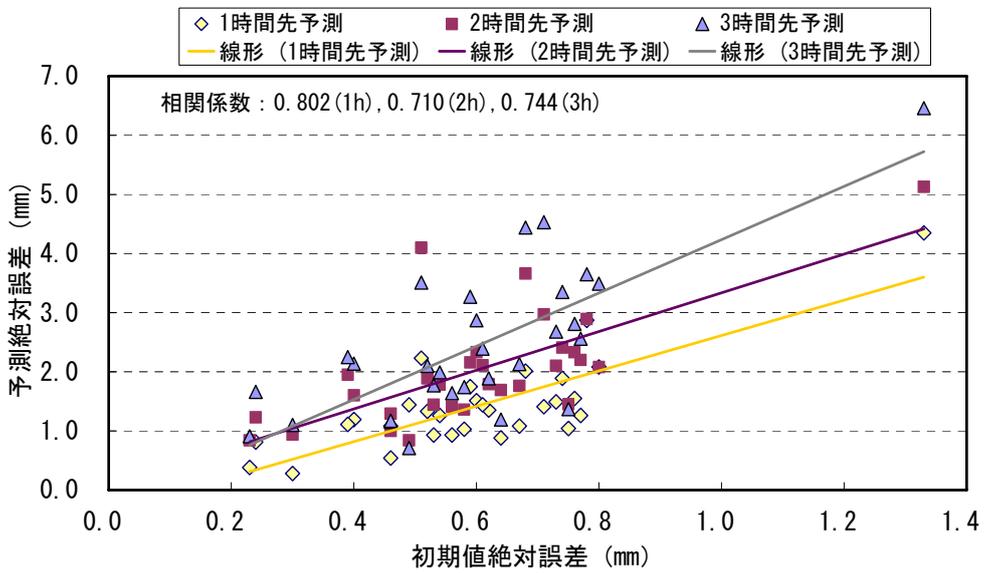
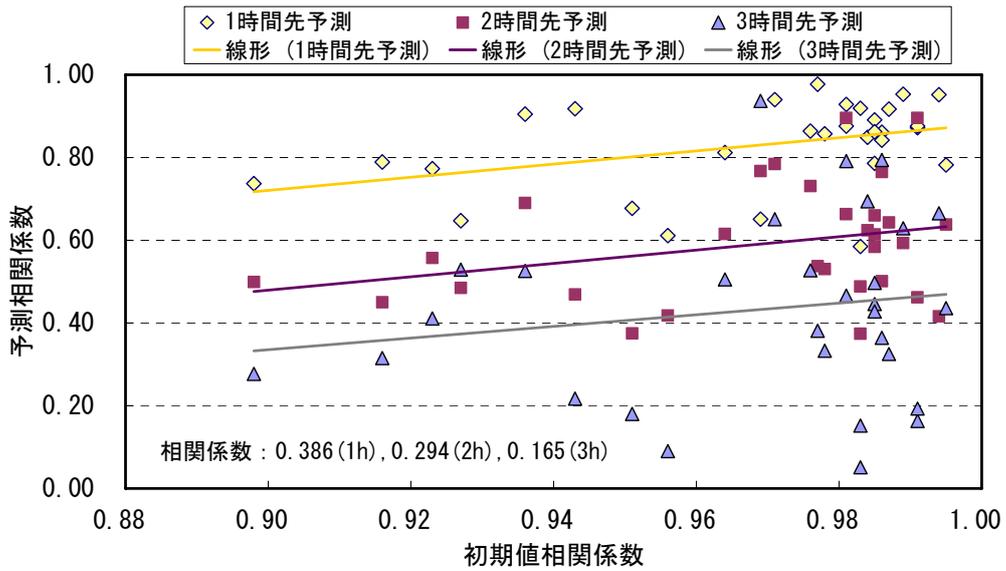


図 1-1-4 初期値の精度と予測精度との関係

### 1-1.1.3 予測精度に影響を与える降雨形態

初期誤差および予測誤差の小さい降雨形態については、既存の予測手法で十分な精度が確保できる。このため、今後予測手法の改善が必要となる可能性のある、初期誤差および予測誤差の大きな降雨形態について分析を行うこととした。

図 1-1-5、図 1-1-6 に 30 例の降雨形態のうち、予測誤差の小さいものと大きいものを示す。予測誤差の小さい降雨形態は、時間的に継続的、漸増減あり、かつ空間的に降雨強度が均質であった。逆に、予測誤差の大きい降雨形態は、時間的に不連続、急増減があり、かつ空間的に降雨強度が不均一であることが図から読み取れる。このことから、予測誤差と時間的降雨体系、および空間的な降雨強度分布との間に相関があることがわかる。このうち、時間的な指標はあくまで結果からのみ判然可能であり、実際の洪水予測を考えると、判断指標として非常に不適切であるため、予測誤差と空間的な降雨強度分布との関係から予測誤差を導き出す手法を検討した。

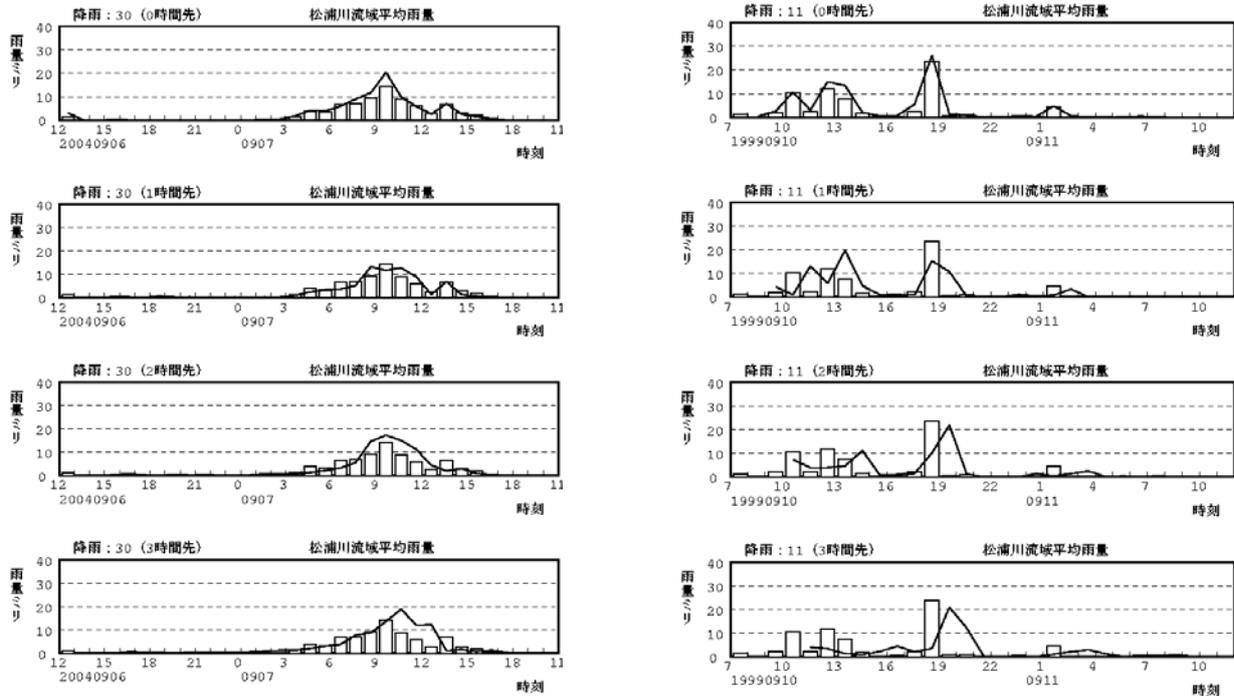


図 1-1-5 予測精度のよい事例 (左) とよくない事例 (右) の毎時雨量の比較

棒グラフ：実測値、折線グラフ：予測値

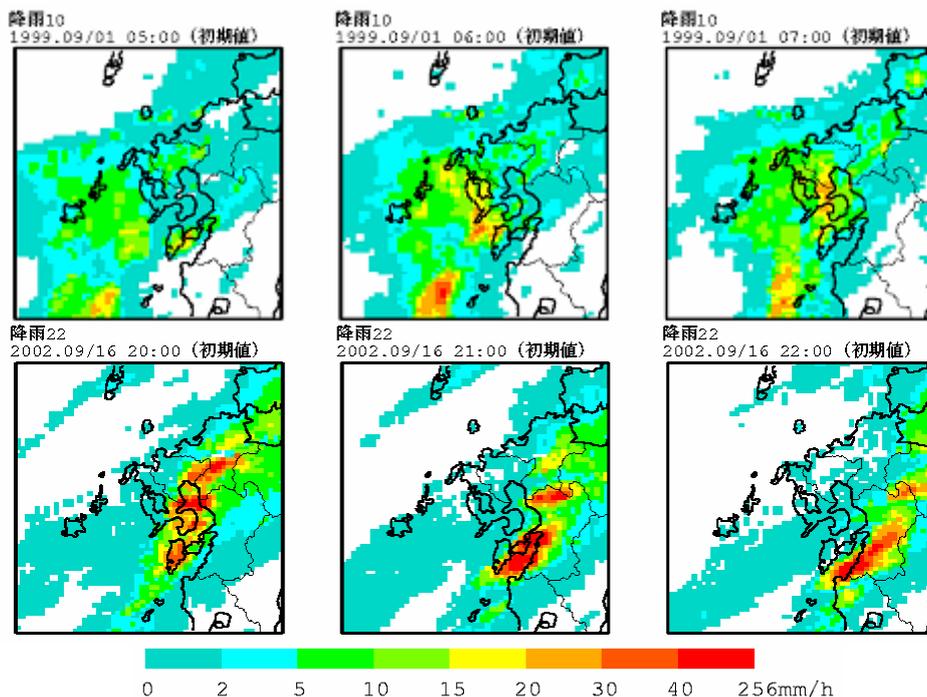


図 1-1-6 予測誤差の (上) 小さい降雨と下) 大きい降雨の降雨分布

1-1.1.4 降雨分布の標準偏差表現

予測誤差に影響を与える空間的な降雨強度分布とは降雨強度の均一さであるため、この均一さの表現として、降雨強度の分布に関する標準偏差を用いることとした。図 1-1-7 に、初期の降雨強度分布の標準偏差を用いて、0~3 予測値の降雨強度分布の標準偏差との絶対誤差との相関を比較する。この図からわかるように、3 時間先予測でも相関係数が 0.7 であり、高い相関を有している。このことから、初期の降雨強度分布が予測の降雨強度分布に一定の相関で影響しているということが考えられる。図 1-1-8 は、この誤差分布の様子を明らかにするために、降雨強度別に標準偏差を 7 段階に分けて示したものであるが、標準偏差が大きくなるほど誤差分布に広がりがあることがわかる。以上の検討により、降雨予測には、初期の降雨強度分布に大きな相関をもつ誤差を有するという示唆が得られた。

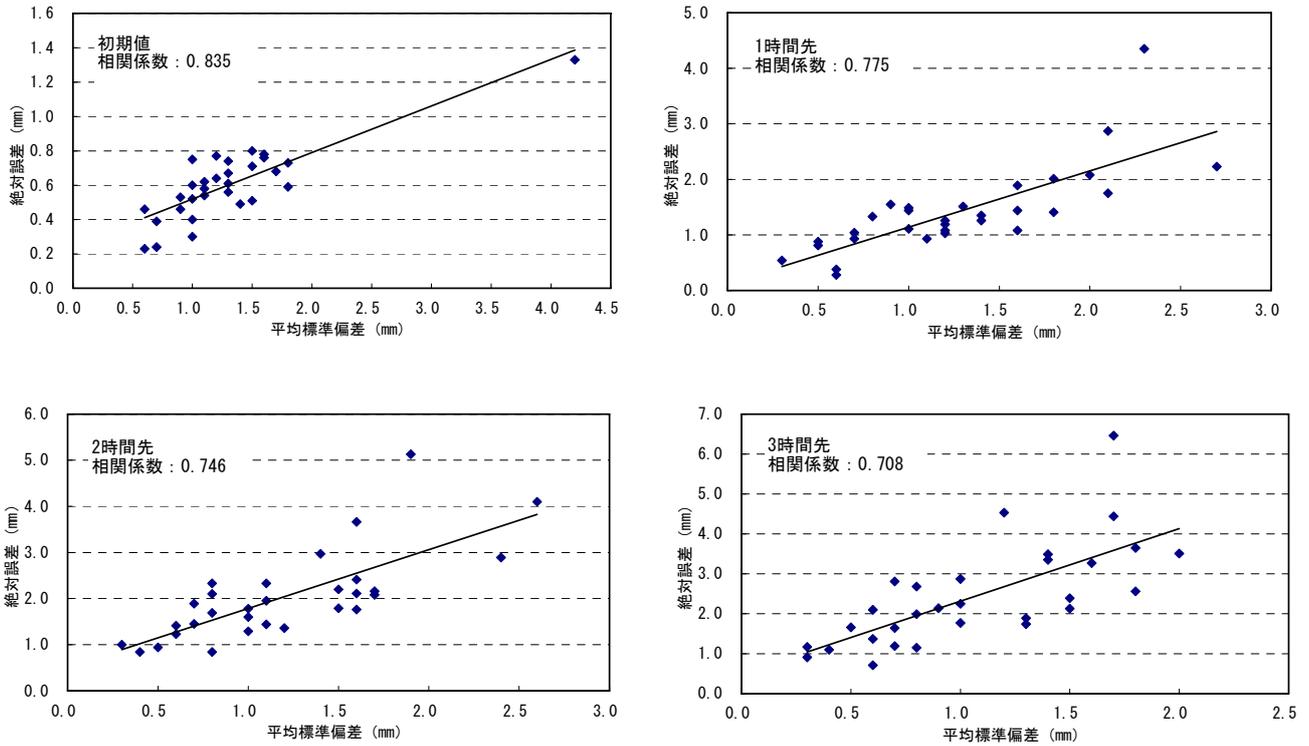


図 1-1-7 降雨分布標準偏差と絶対誤差の相関

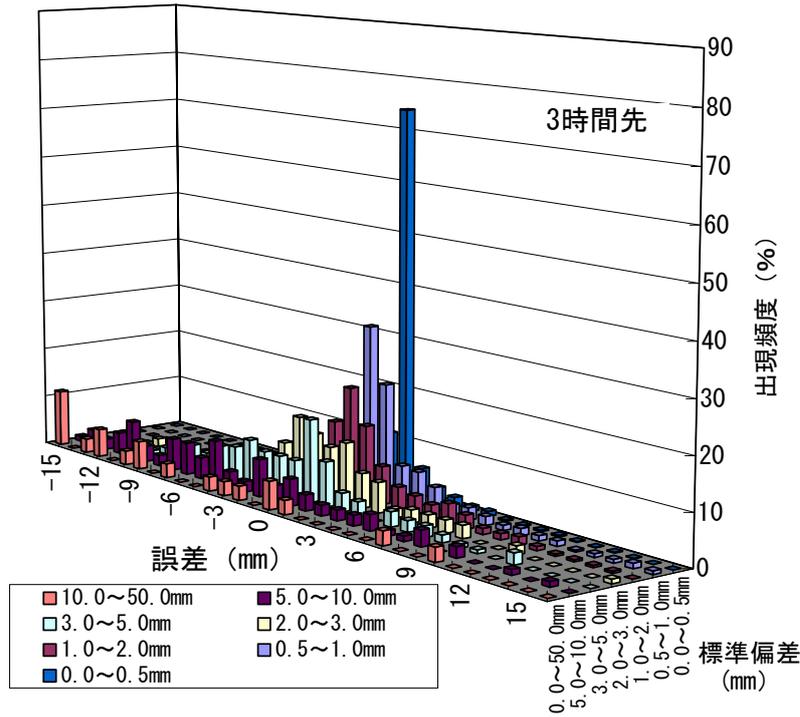


図 1-1-8 標準誤差段階別誤差分布

### 1-1.2 予測降雨の確率的範囲表現

図 1-1-8 から、誤差分布が正規分布か否かを検定したところ、一部正規分布では取り扱うことが難しい降雨条件があることから、図 1-1-9 のように、予測降雨強度分布の標準誤差と予測誤差の関係の中で、誤差曲線を引き、予測誤差範囲を設定した。

具体的な、予測誤差範囲の設定方法は以下のとおりである。

1. 雨量分布の標準誤差を 1mm ごとに区切る。
2. 誤差の平均値と誤差範囲を求めるために使用するデータを抽出する。すなわち、雨量分布の標準誤差が、
  - ・ 3mm 以下の時は前後 1mm
  - ・ 4～8mm の時は前後 3mm
  - ・ 9mm 以上の時は前後 6mm
3. 誤差データから平均値と誤差範囲を求める。平均値は抽出した誤差の単純平均とする。誤差範囲は、例えば 90%が含まれる誤差範囲を設定する場合には、上端と下端は、誤差の大きい方からと小さい方からそれぞれ 5%にあたる値とする。
4. データ数が少なく設定できなかった場合には、内挿、外挿によって、雨量分布の標準偏差が 1mm～50mm まで 1mm 単位で、誤差の平均値と誤差範囲を算出する。たさし、データ数が 20 個以上の場合でも、標準偏差が 10mm 以上（佐賀県周辺は 15mm）の場合は外挿によって求める。

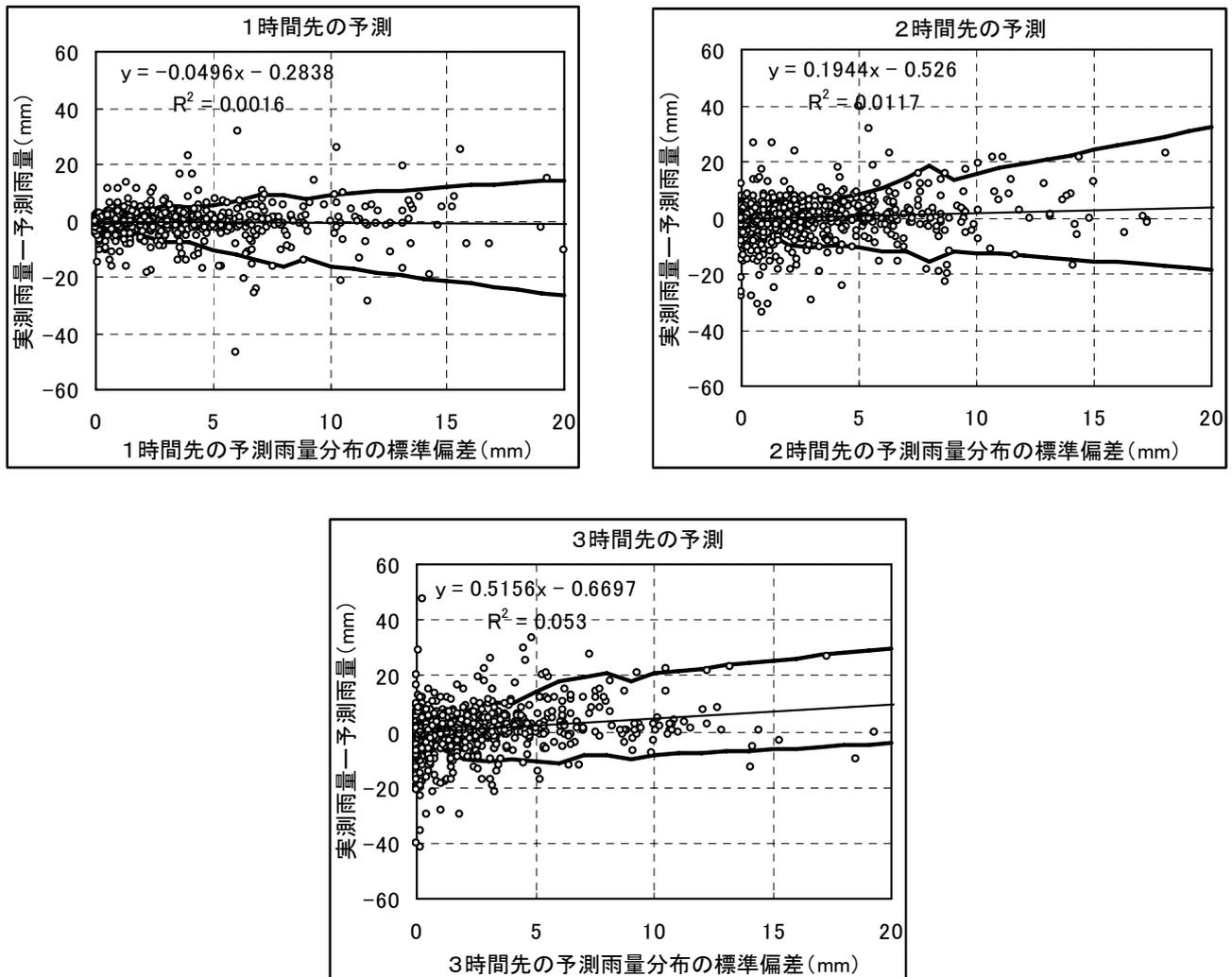


図 1-1-9 降雨分布の標準偏差と誤差曲線

### 1-1.3 確率的範囲表現手法の検証

確率的予測範囲を用いて算出した予測降雨を図 1-1-10 に示す。図 1-1-10 における実線がこれまでの降雨予測で用いられてきた確定的な予測値であり、灰色に塗られた箇所が 90% 確率の確率的予測範囲である。従来手法の確定値では、3 時間後の予測値が大幅にはずれていたものが、確率的予測範囲の表現を用いることで、概ね予測の範囲内に収まっていることがわかる。さらに、

初期の降雨強度分布の標準偏差が大きい場合は、予測誤差が大きくなることから、図 1-1-10 の確率的予測範囲も上下の幅のある予測範囲を示しており、また、このような箇所では実測値と予測値との差が大きくなる傾向であることがわかる。ただし、この確率的予測範囲の設定値に関しては、多くの降雨を検証することで、範囲を狭くすることが可能となるため、従来よりも降雨予測に関する信頼性の高い新たな表現手法として用いることも可能であると考えられる。

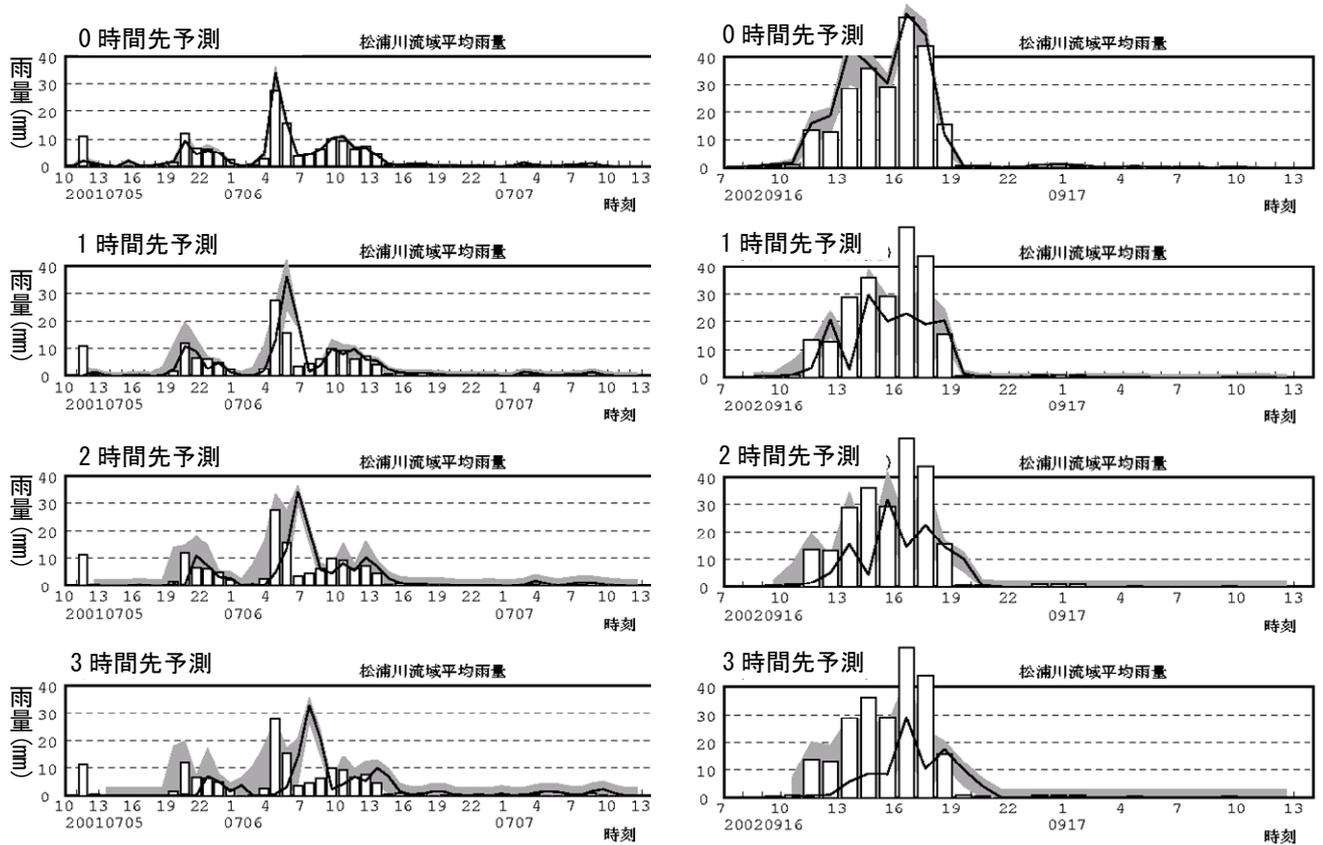


図 1-1-10 予測雨量への確率的範囲 (90 確率：灰色部分) を用いた表現例  
棒グラフ：実測雨量 折線グラフ：予測雨量

### 1-1.4 洪水予測の確率的表現方法

図 1-1-9 の上下限値の誤差曲線を利用して、洪水予測結果に確率的な精度の情報を加えた、確率論的洪水予測の計算手順を図 1-1-11 に示す。この図に示すとおり、洪水予測計算を実施する前に対象流域の予測雨量の上下限値の誤差曲線を予め検討し、予測時間毎の予測雨量の降雨分布の標準偏差と合わせて、予測雨量の誤差の上下限値を設定する。次に予測雨量及び予測雨量の誤差の上下限値を流出計算モデルの入力データとして、それぞれの流出量を計算し、H-Q 曲線を介在させて、確率論的な表現の予測水位（信頼区間 90%）を算出する。

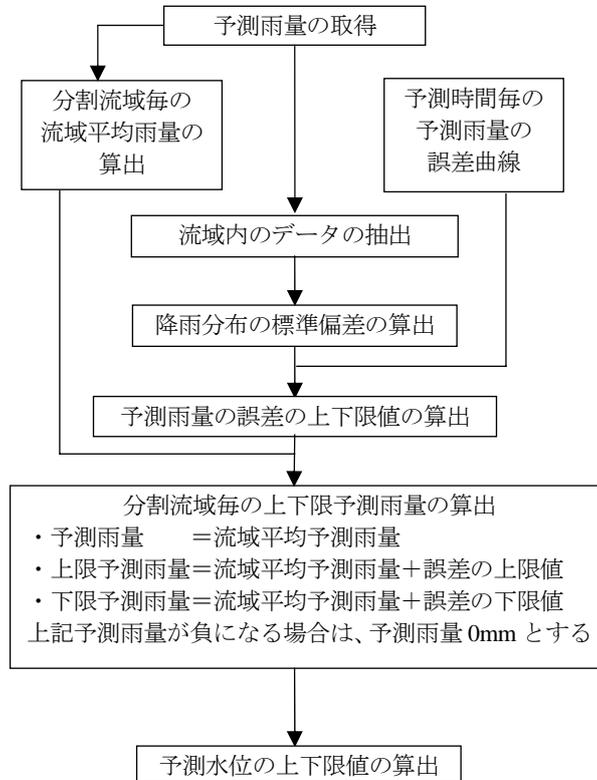


図 1-1-11 確率論的洪水予測の検討フロー

### 1-1.5 洪水予測モデル

松浦川における予測基準点は、次の 4 地点である（表 1-1-4）。

洪水予測は、流域を 1 2 流域 4 河道（図 1-1-12、図 1-1-13）でモデル化した貯留関数法による流出モデルを用い、予測流量を算定し、実測の H-Q 式により予測水位へ変換している。なお、フィードバック手法は「定数変動現時刻合わせ（流出率 f 合わせ）」を用いた。

表 1-1-4 予測基準点

河川名	観測所名	観測所所在地	流域面積 (km <sup>2</sup> )	指定水位 (m)	警戒水位 (m)	危険水位 (m)	計画高水位 (m)
松浦川	川西橋	佐賀県伊万里市大川町大字大川野	120	2.9	4.5	7.4	7.579
	牟田部	佐賀県東松浦郡相知町大字牟田部	275	5.5	6.5	7.4	8.59
巖木川	中島橋	佐賀県東松浦郡巖木町大字中島	38.5	1.6	1.9	2.5	3.224
徳須恵川	徳須恵橋	佐賀県東松浦郡北波多村大字徳須恵	71	2.9	3.7	4.7	6.58

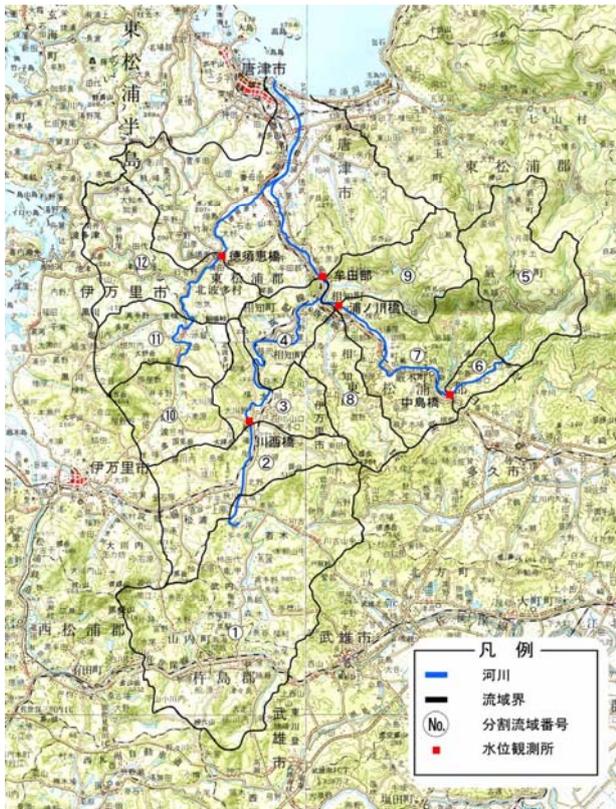


図 1-1-12 松浦川流域分割図

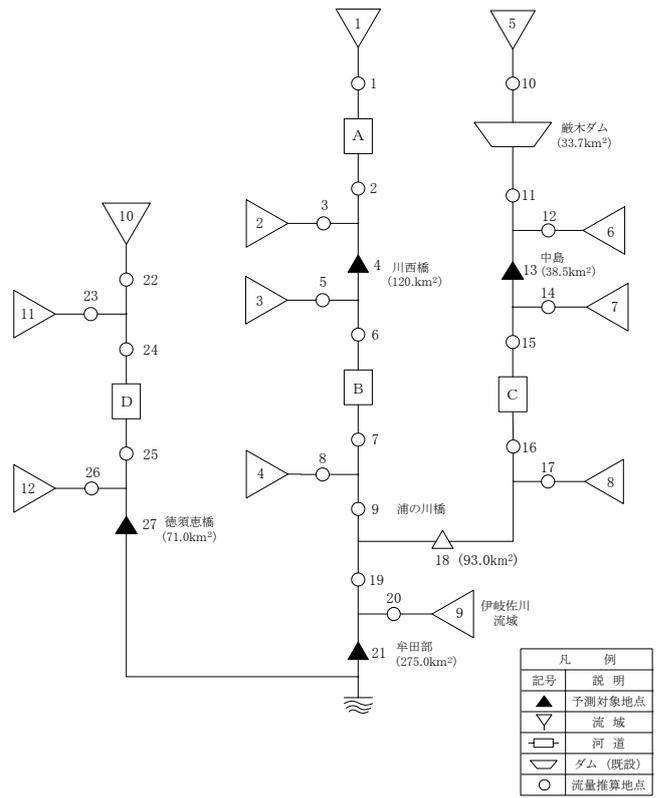
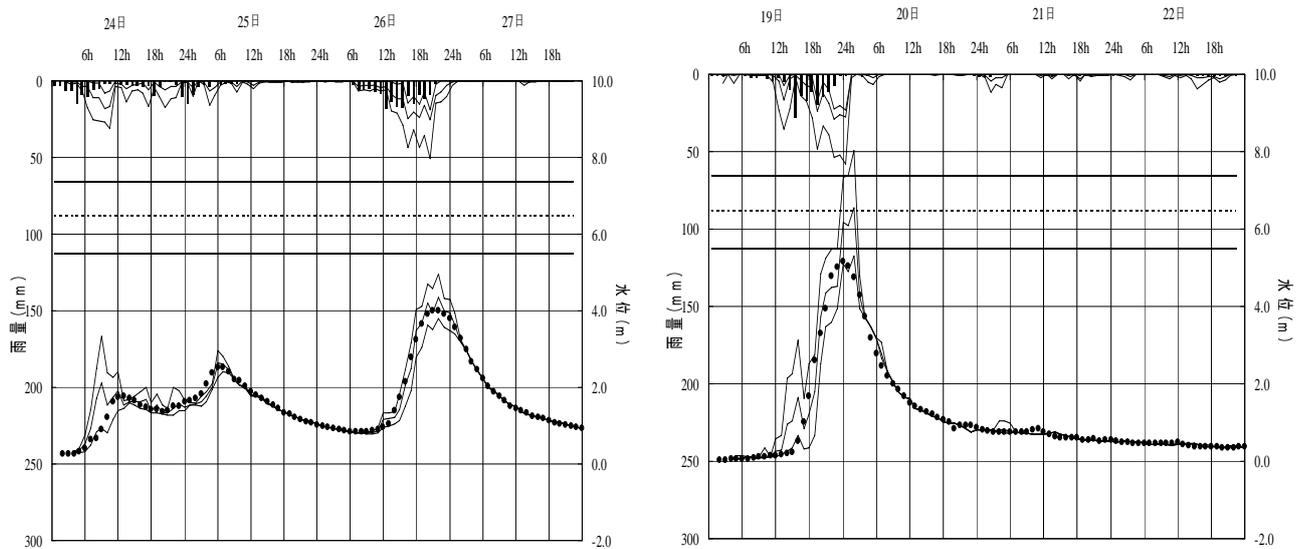


図 1-1-13 松浦川流出モデル図

### 1-1.6 確率論的予測範囲を用いた洪水予測

確率論的予測範囲をもった予測降雨を用いて洪水予測を行った一例を図 1-1-14 に示す。計算水位に対して、定数変動現時時刻合わせ（流出率 f 合わせ）」によるフィードバック計算を行っているため、上下限の予測雨量で洪水予測計算を行っても、予測水位は実測水位と大きく異なることはなく、予測水位の上下限の範囲内に実測水位が含まれる結果となった。ただし、予測雨量の波形が実際の雨量と大きく異なることとはなく、予測水位の上下限の範囲内に実測水位が含まれない場合もあった。

従来の洪水予測手法では、数年～数十年にわたる降雨形態をもとに確定的な値として算出していたが、確率論的予測範囲を用いることにより、少ない降雨事例でも、想定される水位の程度が大まかに把握することができ、さらに予測値の幅の大きい箇所については、結果的に何らかの不確定現象（例えば、予測値に大幅な誤差が生じる可能性）が生じることを知らせることが可能となっている。すなわち、将来、現在とは異なる気象状況になった場合でも柔軟に対応し、これにともなう洪水の不確実さを表現できると考えられる。



上グラフ：雨量 棒グラフ：実測雨量 折線グラフ：予測雨量（上位・中位・下位）  
 下グラフ：水位 丸点線：実測水位 折線グラフ：予測水位（上位・中位・下位）

図 1-1-14 確率的範囲表現の洪水予測への展開（3 時間先予測の 2 例）

### 1-2 洪水予測システムの開発

洪水予測システムには、予測精度の確かさ、予測計算の迅速性及びあらゆる降雨状況や流域状況のシナリオに対応できる柔軟性等が求められる。そこで、流出モデルの選択、実績水位に基づき予測水位を補正するフィードバック計算方法の選択、実績雨量と予測雨量及び実績水位等のデータの容易な取得、洪水予測モデルのモデル定数等の容易な変更等が可能であり、さらに確率論的洪水予測が実行可能な洪水予測システムのプロトタイプを開発した（図 1-2-1、図 1-2-2）。

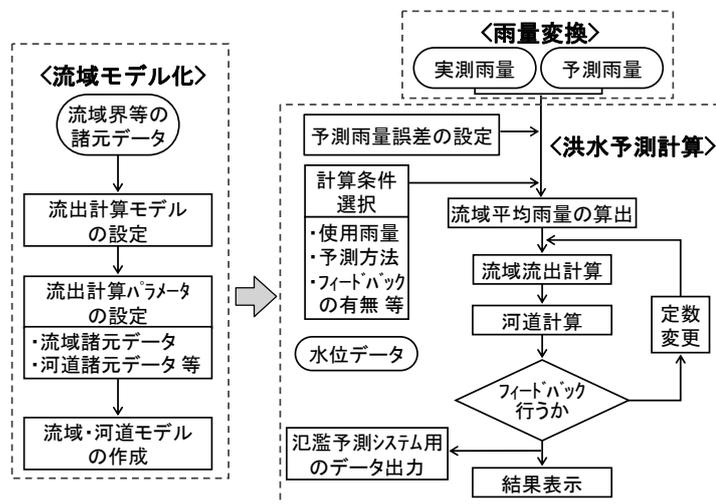
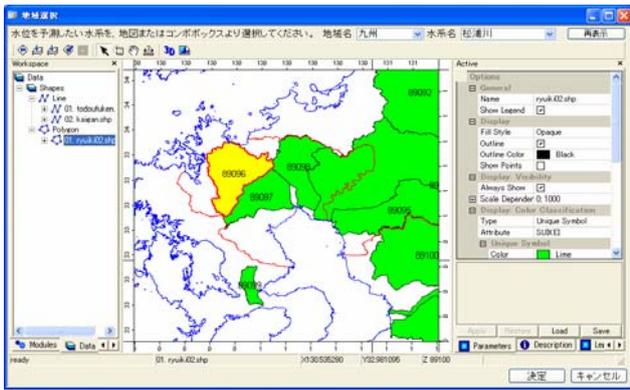
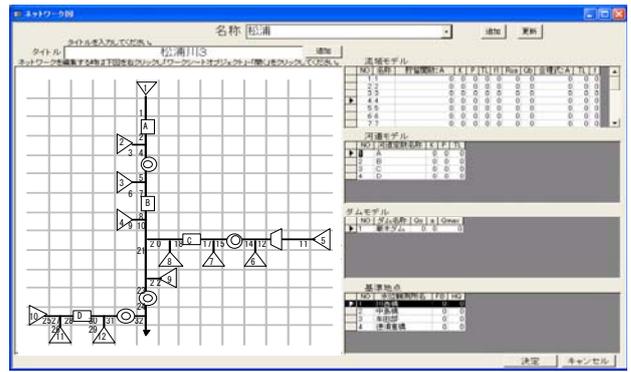


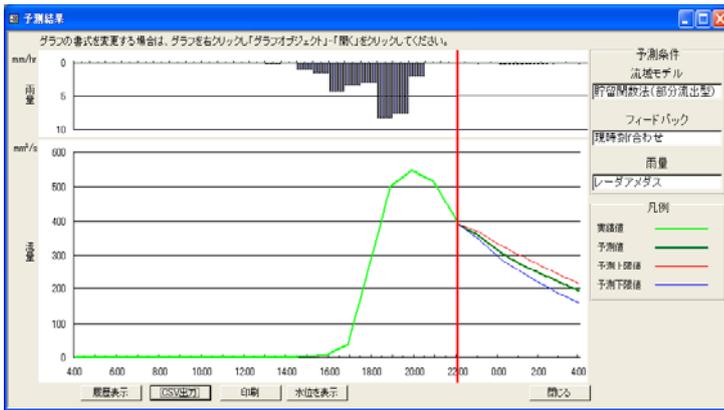
図 1-2-1 洪水予測システムの構成



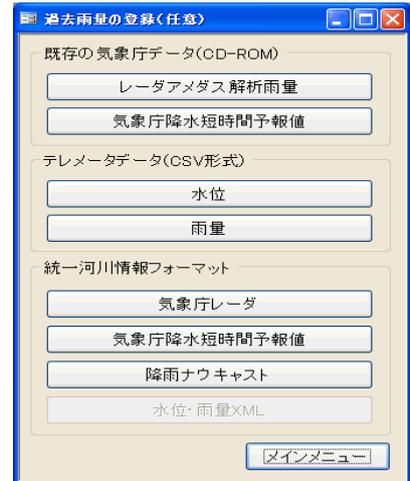
流域モデル作成画面①



流域モデル作成画面②



洪水予測結果表示画面



雨量データ入力画面

図 1-2-2 洪水予測入出力画面例