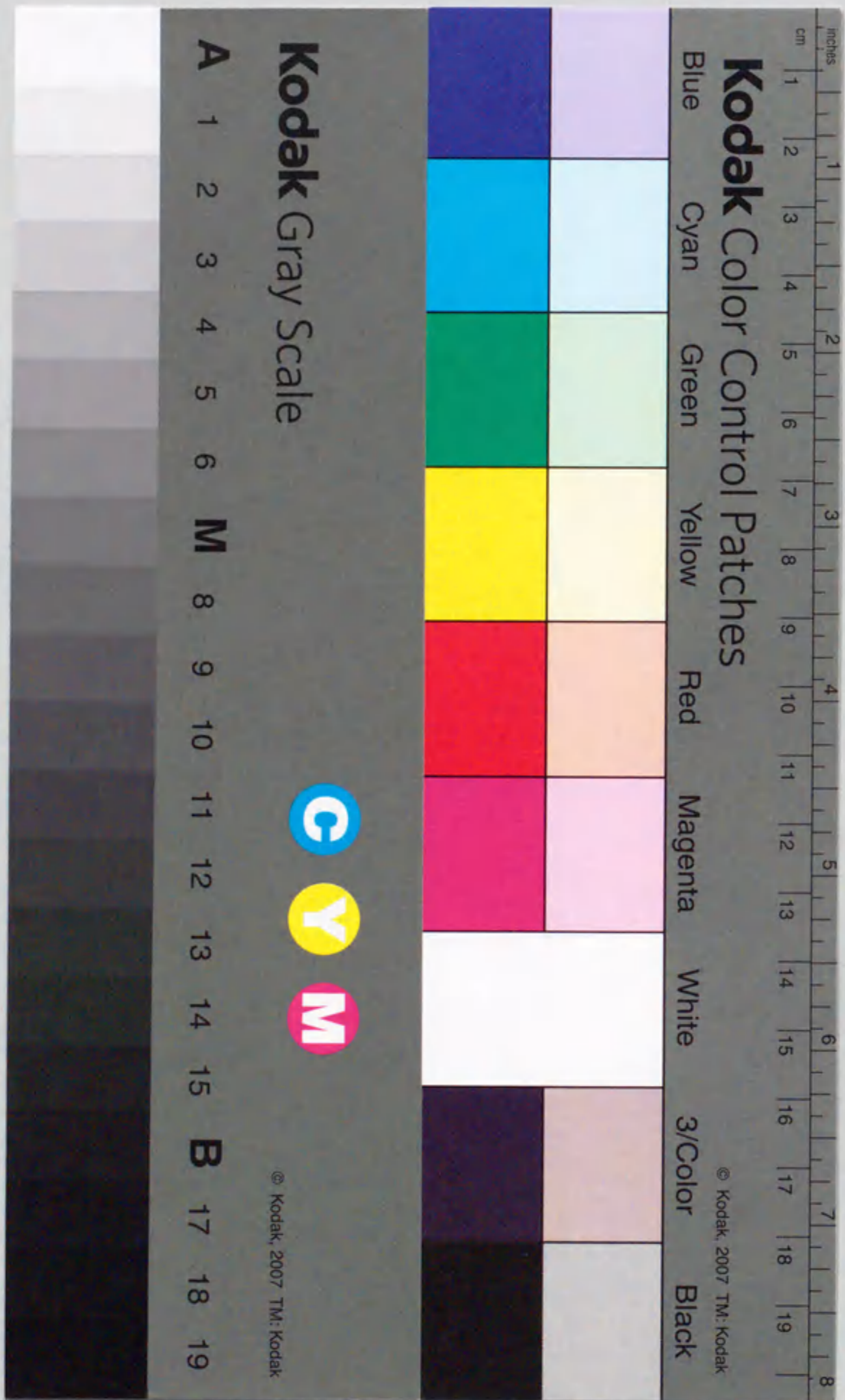


発電用ダム上流域における降雨から流量までの 一貫予測システムの開発に関する研究

—— 畑薙第一ダムを対象として ——

一 柳 勝 宏



報告番号 乙第 3981 号

①

発電用ダム上流域における降雨から流量までの
一貫予測システムの開発に関する研究

——畑薙第一ダムを対象として——

一 柳 勝 宏

本論文で使用した記号

A_i	降雨面積
AMeDAS	地域気象観測システム, Automated Meteorological Data Acquisition System の略
AVHRR	改良形高分解能放射計, Advanced Very High Resolution Radiometer の略
a_i, b_i	出水伝達関数を表すパラメータ
C	相関係数
f	流出率
$G(z)$	出水伝達関数
GMS	静止気象衛星, Geostationary Meteorological Satellite の略, 和名ひまわり
I	降雨域移動方向推定に用いる評価指標
J	流出率曲面の推定評価指標
J_q	出水伝達関数推定のための評価指標
k	離散的な時刻を表す整数 ($t = t_0 + k \Delta t$)
k_f	t_f を与える整数 ($t_f = t_0 + k_f \Delta t$)
K_0	流出率曲面を表すためのゴンペルツ近似曲線の飽和値を与える係数
α_0	流出率曲面を表すためのゴンペルツ近似曲線の始点係数

β_G	流出率曲面を表すためのゴンペルツ近似曲線の曲がり具合を与える係数
K_L	流出率曲面を表すためのロジスティック近似曲線の飽和値を与える係数
α_L, β_L	流出率曲面を表すためのロジスティック近似曲線の係数
K_E	流出率曲面を表すための指数関数近似曲線の飽和値を与える係数
α_E, β_E	流出率曲面を表すための指数関数近似曲線の係数
α_P, β_P	流出率曲面を表すための放物線近似の係数
n	出水伝達関数の次数
NOAA	米国の極軌道型気象衛星, National Oceanic and Atmospheric Administration の略
$q(k)$	ダム流入量 (離散値)
$Q(Z)$	ダム流入量 (Z変換)
$q_{real}(t)$	流量の実測値
$q_{fore}(t)$	流量のシミュレーション値, 予測値
q_b	基底流量
$R_{total}(t)$	時刻 t までの総降雨量
r_e	有効雨量
$Re(Z)$	有効雨量 (Z変換)

$r_{t_i, \theta}(x)$	降雨量の地上分布 (時刻 t_i において, 対象ダムを基点とした θ 方向の直線上における値)
$r_{t_i, \theta}(t)$	降雨量の時間分布 (上記 $r_{t_i, \theta}(x)$ の x を雨雲速度により時間に換算したもので降雨量の時間変動予測値)
θ	雨雲移動方向 (雨雲が対象ダムに接近してくる方向を緯線を基準として測った角度)
r_{fore}	降雨量時間変動予測値
r_{real}	同 実測値
\bar{r}_{fore}	降雨量時間変動予測値の時間平均
\bar{r}_{real}	同 実測値の時間平均
r_i	雨量計観測値
\hat{r}	降雨量の流域平均
R_{total}	総降雨量
$S_{t_i, \theta}$	雨雲移動方向を θ とした場合, 時刻 t_i 以後の総降雨量予測値
t_0	降雨開始時刻
t_f	降雨が止んだ後の流量が基底流量に近い値になる時刻
t_2	降雨が止んだ後の流量の実績値がそのピーク値の1/2の値になる時刻
t_i	降雨予測時点の時刻
t_{fore}	降雨終了予想時刻

T	予測時点から流入量ピークが発生するまでの時間
U	雨雲の移動速度
V_{fore}	ダム流入量総量の子測値
V_{real}	ダム流入量総量の実測値
x	対象ダム(畑薙第一ダム)からの西方距離
ε_f	流出率の推定曲面と実測値との誤差
ε_q	流量のシミュレーション誤差
ε_r	総降雨量誤差
Δt	離散値データのサンプリング間隔

発電用ダム上流域における降雨から流量までの一貫予測システムの開発に関する研究 - 畑薙第一ダムを対象として -

目 次

第1章	緒 論	1
1.1	水力エネルギー利用の意義	1
1.2	水力発電設備の現状と課題	2
1.3	給電指令における降雨および流量予測の必要性	6
1.4	流量予測手法の現状と問題点	9
1.5	降雨量の時間変動予測手法の現状と問題点	12
1.6	本研究の目的と内容	14
	第1章の文献	21
第2章	気象データおよび河川流量データ	25
2.1	まえがき	25
2.2	気象衛星GMSデータ	25
2.3	地域気象観測システムAMeDASデータ	30
2.4	対象流域の概要およびダム日誌データ	32
2.4.1	畑薙第一ダム上流域	32
2.4.2	ダム日誌データ	35
2.5	本研究で用いた降雨の一覧	35
2.6	あとがき	39
	第2章の文献	40
第3章	基底流量を考慮した河川流出率の推定	42
3.1	まえがき	42
3.2	ダム流域内の全降雨の算定	44
3.3	基底流量を考慮した流出率の推定法	47
3.3.1	流出率の変動原因	47
3.3.2	畑一ダム上流域における流出率曲面の推定	49
3.3.3	流出率近似曲面の検討	52

3・4	流出率に基づく有効雨量時間変動の推定	57
3・4・1	有効雨量の時間変動推定法	57
3・4・2	有効雨量時間変動の推定例	59
3・4・3	有効雨量時間変動推定結果の検討	63
3・5	あとがき	66
	第3章の文献	68
第4章	降雨パターンに対応した出水伝達関数による流量予測	70
4・1	まえがき	70
4・2	伝達関数による河川出水機構のモデル化	72
4・3	畑薙第一ダム上流域における出水伝達関数の推定	74
4・3・1	各降雨に対する出水伝達関数の算定	74
4・3・2	出水伝達関数のグループ分け	77
4・4	出水伝達関数の降雨パターン依存性に関する検討	79
4・4・1	伝達関数の降雨パターン依存性	79
4・4・2	降雨持続時間に対応した出水伝達関数	83
4・5	分類された伝達関数の有効性の検証	87
4・6	あとがき	96
	第4章の文献	99
第5章	AMeDAS観測値を活用した河川流域における 降雨量の時間変動予測手法	100
5・1	まえがき	100
5・2	気象衛星データおよびAMeDASデータを用いた 降雨量の時間変動予測手法	102
5・3	中部山岳地方における降雨量の時間変動予測例	106
5・3・1	雨雲移動方向および移動速度の推定	106
5・3・2	降雨量の時間変動予測	109
5・4	降雨域移動方向の定量的推定による予測精度向上	113
5・4・1	降雨域移動方向の定量的推定	113
5・4・2	降雨量の時間変動予測例	118
5・4・3	降雨予測結果の検討	119
5・5	あとがき	123
	第5章の文献	126

第6章	気象衛星データを活用した長期間降雨予測手法	127
6・1	まえがき	127
6・2	降雨の長期間予測手法	128
6・2・1	日本列島以西の雨雲下の降雨量推定	128
6・2・2	予測降雨に対する補正	129
6・3	畑一ダム上流域における降雨予測例	131
6・3・1	雨雲の移動速度および移動方向の推定	131
6・3・2	畑一ダム以西における降雨分布の推定	133
6・3・3	降雨量の時間変動予測	136
6・4	降雨量の時間変動予測の逐次修正	138
6・5	その他の降雨例による長期間降雨予測手法の検討	140
6・6	あとがき	150
	第6章の文献	154
第7章	予想降雨パターンに基づいた流量予測手法	155
7・1	まえがき	155
7・2	降雨から流量までの実用的一貫予測システム	156
7・3	実用的一貫予測システムの検討	157
7・3・1	一貫予測の具体例	157
7・3・2	その他の降雨例による一貫予測結果の検討	162
7・4	あとがき	170
	第7章の文献	172
第8章	総括	173
8・1	まえがき	173
8・2	河川流量予測手法	175
8・3	降雨量の時間変動予測手法	176
8・4	降雨から流量までの実用的一貫予測システム	177
8・5	あとがき	178
謝辞		182
本研究に関連して公表した論文		184

第 1 章 緒 論

1.1 水力エネルギー利用の意義

昭和48年および昭和54年の2度にわたる石油ショックを契機に、石油代替エネルギーの一つとして、自然エネルギーが見直されるようになった。その中において、水力エネルギーは太陽光や風力などの他の自然エネルギーと比較してエネルギー密度が高い上、貯水池という形で比較的容易に大容量のエネルギーを蓄えることができ、実用的価値が高いと思われる。この意味で、この水力エネルギーを開発・推進するとともに既設分について有効利用を図ることが我が国にとって重要となった⁽¹⁾。

ところが、昭和60年頃から以降、エネルギー多消費国における省エネルギーの推進や産油国間の政策などにより、石油の需給バランスに変化が見られるようになった。その結果、比較的安価な石油の入手が容易となり、再びその消費量が増加傾向をたどるようになってきた⁽²⁾。今後、石油を含む一次エネルギー消費量の増加傾向が再び続けば、地球温暖化や酸性雨などによる地球規模の環境破壊が懸念されると言われており、この面から、省エネルギー化や自然エネルギーの有効利用を重点

課題として再び取り上げる必要が生じてきている⁽³⁾。

自然エネルギーのうち、水力エネルギーは従来から水力発電として利用されている。水力発電の総合効率は80～90%であり、火力や原子力による発電効率30～40%に比べて非常に高い⁽⁴⁾。このように、水力エネルギーはクリーンで、かつ効率良く電気エネルギーに変換できるという特徴を持っている。

水力発電所は、起動停止および出力変化をきわめて短時間に行うことができ、通常、数分以内に起動することが可能で、2分程度で全負荷まで出力を上げることができる⁽⁵⁾。このため、水力発電は、主としてピーク供給力や周波数調整を含む短時間の需要変動に対応する電力供給力および緊急時の電力供給予備力として活用されている。他方、我が国においてベース供給力としての原子力の全発電電力量に占める比率が高くなっており、将来も地球温暖化防止という立場からその傾向が強くなるものと予想される。そのような場合においては、原子力発電と組合わさって、短時間の負荷変動に対応できる水力発電の価値はますます高まるものと考えられる。

1.2 水力発電設備の現状と課題

我が国における水力発電設備の現状について、昭和

63年3月現在の発電設備容量の内訳を表1.1に、また、昭和62年度の発電電力量の内訳を表1.2に示す⁽⁶⁾。水力発電所は1,646ヶ所あり、その最大出力の合計は3,639万kWで全発電設備最大出力の約20%を占めている。これに対し、水力によって実際に発電された電力量は全発電電力量の約11%を占め、水力発電設備は火力や原子力の発電設備とは使われ方を異にしている。

次に、水力発電として開発可能な地域が我が国にどの程度残されているかを調べるために、表1.3に通産省資源エネルギー庁が調査した我国の未開発包蔵水力を出力区分別に示す⁽⁷⁾。本調査によれば、未開発地点2,714地点のうち5,000kW未満の比較的小容量設備の地点は全体の3/4を占めており、50,000kW以上の比較的まとまった包蔵水力が未開発として残されている地点は全体の1%に満たない。したがって、現在の日本における水力発電として容易に利用可能な地点は、既にほとんどが開発されており、今後、大規模な水力発電設備を増強させることは困難であると言える。そこで、既設水力発電設備の運用ソフト面の開発を行って、天然資源である水力エネルギーをより有効に利用していくことが必要である。

表 1・1 我が国の発電設備
(昭和63年3月末現在)

	発電所数	最大出力	
		万 kW	%
水力	1,646	3,639	20.3
火力	1,197	11,468	64.0
原子力	16	2,805	15.7
合計	2,859	17,912	100.0

(資源エネルギー庁調査による⁽⁶⁾)

表 1・2 昭和62年度発電電力量

	発電電力量	
	億 kWh	%
水力	809	11.3
火力	4,505	62.6
原子力	1,878	26.1
合計	7,192	100.0

(資源エネルギー庁調査による⁽⁶⁾)

表 1・3 水力発電の出力区分別
未開発包蔵水力

出力区分 kW	地点数	
	数	%
100,000以上	4	0.1
50,000~100,000	12	0.4
30,000~50,000	26	1.0
10,000~30,000	245	9.0
5,000~10,000	349	12.9
1,000~5,000	1,712	63.1
1,000未満	366	13.5
合計	2,714	100.0

(資源エネルギー庁調査による⁽⁷⁾)

1.3 給電指令における降雨および流量予測の必要性

各電力会社の中央給電指令所においては、変動する電力需要に対し、供給力を調整して電力需給の均衡をとるために、需要の動向、出水状況、天気予報、社会的な事象などの具体的な情報に基づいて需給予想を行っている。翌日需給予想においては、翌日分の予想需要に対応した供給力を確保するために、各電源の翌日の発電計画を作成している。そこでは、水力・火力・原子力発電電力、他社発電電力および融通電力を、それぞれの特性に応じて1時間ごとの単位で配分している。水力に関しては、翌日の出水予測や貯水池の使用計画に他分野の利水状況も勘案して、水力発電計画を立案している⁽⁸⁾。

この水力資源の賦与は自然条件、特に気象条件に大きく左右されるので、それを考慮したダム運用が試みられている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、現在、まだ気象の変化に十分に追随しているとはいえず、特に降雨による河川の増水時には、貴重な水力エネルギーを利用しきれず無駄に放流してしまう機会も多い。もし可能であれば、降雨による河川の増水が予想されるときは、対象ダムにおいてできる限り早期に発電、放流を開始することが望ましい。そのためには、あらかじめ時間的余裕をもって降雨を予測し、その予測値に基づいて河川出水の総量および時間的変化の予測を行う必要がある。そうすることにより、ダ

ム運用が一層的確に、かつ計画的に実施でき、水力エネルギーを電力として有効利用を図ることができる。

さらに、給電指令所が翌日以降の各発電所の運転計画を立てるにあたり、次の日以降の降雨とこれに伴うダム流入量の予測があれば、水力発電所の運転を優先し、火力発電所の運転を抑制することができる。その予測が的確である程、正確な運転計画を立てることができる。短時間の降雨なら1日限り、長時間の降雨なら2～3日にわたる水力・火力発電の割り振りができる。例えば、あるダムにおいて、それが満水状態にあるとする。翌日以降の降雨が予測された場合、予め放流してダム水位を下げしておく必要がある。この放流される水資源をすべて電力に変換するためには、発電所の最大使用水量がその発電電力に応じて決まっているので、単位時間当たり一定量以上の放流はできず、下げるべき水位に対応して放水のための時間が決ってしまう。したがって、この所要時間を見込んで降雨ないしは河川流量を予測することが給電指令の立場から要望されている。

この放水のための時間は、個々のダムや発電所で大きく異なるので一概に言えないが、ここでは、本論文で取り上げた畑籾第一ダムについて概算しておく。本ダムおよびその貯水池の諸元を表1.4に示す。これによれば、最大使用水量 $160\text{ m}^3/\text{s}$ で1時間発電した場合、水位は約 0.36 m 下がることになる。ここで、 315.5 km^2

表1・4 畑薙第一ダムの諸元および降雨・出水に
要望されるリードタイムの検討

流域面積	315.5 km ²
有効貯水量	6.98 × 10 ⁷ m ³
有効水深	44 m
最大使用水量	160 m ³ /s
最大使用水量で 1時間発電した 場合の水位低下量	$\frac{160 \times 3,600}{6.98 \times 10^7 / 44} = 0.36 \text{ m}$
100mmの降雨の うち50mm分が 流出する場合の 水位上昇量	$\frac{50 \times 10^{-3} \times 315.5 \times 10^6}{(6.98 \times 10^7 / 44)} = 10 \text{ m}$
上記水位を下げる に要する時間	$\frac{10}{0.36} = 28 \text{ h}$

の流域全体に100mmの降雨があった場合を考える。このうち50%がダム貯水池に流入してくるとすると、水位は約10m上昇する。この分だけ水位をあらかじめ下げておくために要する時間は、約28時間と見積もられる。このようなことから、台風や前線による洪水は別として、通常の中程度の降雨に対しても30時間程度のリードタイムをもって降雨・出水を予測する必要がある。このような目的にかなう実用性の高い降雨および河川出水の予測手法を開発する必要がある。

1・4 流量予測手法の現状と問題点

前節で述べたような給電指令から要望される河川流量予測は、日常多頻度に発生する中規模の出水に対するものであり、洪水のような災害をもたらす大出水を対象としたものではない。これまでに行われている流量予測は主として洪水を対象としたものが多く、電力系統における需給運用の面からは、むしろ中程度の降雨がもたらす出水に適したシミュレーション手法を新たに開発することが要求されている。

降雨による流量増加の時間変動を予測するために、河川出水機構を数学的モデルで表す多くの手法がこれまで

に提案されている。それらの手法としては、降雨と河川流出量との間の関係について、ブラックボックスモデルで表す単位図法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、タンクへの流入・流出としてとらえるタンクモデル法⁽¹³⁾、貯留量と流出量との間の関係を非線形式で表した貯留関数法⁽¹⁴⁾、偏微分方程式系で与えるkinematic wave法⁽¹⁴⁾、常微分方程式系で与えるARMA（自己回帰移動平均過程型モデル）を用いる方法⁽¹⁵⁾などが挙げられる。これらの数学的モデルのうち、実際の給電運用における出水予測では単位図法、タンクモデル法、貯留関数法などが一般に用いられている⁽⁸⁾。

上述した出水予測のための数学的モデルが集中定数系、分布定数系、線形系、非線形系に分類されるものの、その解はすべて積分形で表現され、解析そのものの間に本質的な差異はないと言われている⁽¹⁶⁾。具体的な流量予測結果においても、方法による差は余り顕著に現れていないようである⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

広大な流域を単純に一つのモデルで表す従来までの考え方に対し、流域を小分割することにより地区毎の特徴を取入れた流出モデルについても検討されている。例えば、単一の一樣勾配で表される矩形斜面を単位流域と考え、実際の流域をそれぞれの到達時間や勾配の異なる単位流域の確率的集合として表すことにより、単位図の物理的意義について説明することに成功した報告があ

る⁽¹⁹⁾。同様の考え方を発展させることにより、小分割した個々の流域の地形・地層特性などの場所的な分布状況を考慮に入れた出水モデルを構成し、それらの結合として流域全体の出水量を予測する手法についても提案されている⁽¹⁶⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。したがって、これらの手法はモデルのもつ物理的特性をある程度保ちつつ、流出場である流域における斜面特性の空間分布を考慮したものといえる。さらに、レーダ雨量データを用いることにより、降雨の空間分布を考慮した流出モデルについても検討されている⁽²²⁾。

他方、出水モデルとして、降雨を入力、河川流出量を出力にとるような出水伝達関数で表す方法がある⁽²³⁾。これによれば、過去の降雨・流量の実測値および地図から得られるデータを用いることにより、入力である降雨と出力の流量とから簡単な線形計算で出水伝達関数を推定することができる。しかしながら、対象ダムを限定しても、その河川固有の出水伝達関数が一つだけ存在するとは考えられないので、実際の河川に適用する場合には種々の検討を要する。

流量予測の入力データに関して、河川流出率（降雨のうち河川に流出する割合）を用いて、降雨を有効雨量と損失雨量とに分離する考え方が古くからある⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。前者は降雨量のうち河川に実際に流出する量であり、後者は蒸発や地中での浸透によって失われる量である。こ

の考え方は、有効雨量の総量を入力として、これによる河川への直接的な出水総量を出力として与えるもので、流域の入出力対応のみに着目している。これは、特に、降雨による河川流出の増量予測のように、比較的短期間における流量変化を予測する場合には、地下水になる成分のように変化の緩やかなものの予測はあまり必要性がないので、上述の考え方が有効なこともある⁽²⁶⁾。

以上のような流域に入力された降雨量と河川流出量との相関関係は水文学における基本的な問題である。しかしながら、同じ降雨量でも流域の湿潤状況や植生条件の違いによって河川流量が全く異なってくるので、その影響に対する検討が不可欠であり、まだ充分解決されたとは言えない問題である⁽²⁷⁾。そこで、河川流出率を精度良く推定する手法を確立する必要がある。

1.5 降雨量の時間変動予測手法の現状と問題点

これまでに述べたように、給電指令の立場からは、洪水をもたらすような大規模で集中した降雨ではなく、日常頻発する中規模の降雨を定量的に精度良く予測する必要がある。近年、気象衛星、気象レーダなど広域的に気象状況を把握する技術が進歩しており、その情報を伝達するシステムも急速に整備されてきた。その一つとして、

A M e D A S (地域気象観測システム、第2章で詳述)が気象庁によって運用されている。本システムにおいて、全国約1,320ヶ所の地上観測点における雨量、風向、風速、気温および日照時間の各データが気象庁の気象観測センターでオンライン集信されている。今日においては、これらの気象情報は電力会社などにおいても容易に受信、利用できる⁽²⁸⁾。

日常の給電業務において、現在採用されている降雨予測手法に関するいくつかの報告がある。一例としては、降雨量の時間変動予測に関して、気象レーダ観測網⁽²⁹⁾とA M e D A Sとの両データによる雨量合成図から雨域を把握し、その広がりや雨量強度の時間変化から、運動学的に外挿し適当な補正を加えることにより、3~6時間先までの予測を行うものである⁽⁸⁾⁽³⁰⁾-(33)。また、高層気象データおよび気象学的に降雨と相関性の高い因子を選んで作成した回帰式により、3時間雨量として15時間分を予測する方法も実際の電力会社において用いられている⁽⁸⁾。降雨により与えられる水資源を無駄にすることなく電気エネルギーとして有効利用するためには、また、翌日以降の電力需給予測の確度を高めるためには、さらに長い時間的余裕のある降雨予測手法が望ましい。

最近では、数値予報により、6~24時間先の天候変化の予測や1日~3日先の気候変化の予測が行われてい

る。これは、スーパーコンピュータを利用し、大気の運動方程式を解くことにより天気を予想しようとするものである⁽³⁴⁾。しかし、現在のところ、このような数値予報の成果は予想天気図、すなわち気圧配置の予想図として得られているに留まっており、1日～3日程度先の降雨の有無やその確率が天気予報の形で提供されている。しかしながら、給電指令のためにはこれでは不十分で、降雨量の時間的な変動を予測する必要があるが、これに関して実用に供されるほどのものは開発されていないようである⁽³⁵⁾。したがって、日常の発電計画を立てるためには、実用性の高いある程度定量的見通しのある降雨量の予測手法が是非とも必要である。

1.6 本研究の目的と内容

本研究は、発電用ダム上流域の水資源を最大限活用して発電することを目的として、その流域の降雨から河川流量に至る実用的一貫予測システムの開発を試みたもので、大まかに分けて降雨予測と河川出水シミュレーションの二つからなる。これらは、洪水の制御を目的としたものではなく、発電燃料費の削減による電力系統の経済運用や電力需給運用における日常の発電計画の的確性を高めることを目指したものである。したがって、台風な

どによる集中的な洪水に至るような降雨ではなく、それ以下の中規模程度の降雨を検討対象としている。

検討対象地点としては大井川水系畑薙第一ダム（以下、畑一ダムと略記）を取り上げた。この畑一ダムは、巨大なダム（有効貯水量 $6.98 \times 10^7 \text{ m}^3$ ）で中規模以下の降雨に対する貯水能力を十分持っているもので、本論文で述べるような検討を必ずしも必要とするものではない。しかしながら、畑一ダムはそれ以上の上流にダムがなく、降雨データ、河川流量データを一事業体が記録しておられるという理由で検討対象として取り上げた（平成元年度には上流に赤石ダムが完成したが、本論文のデータはすべてそれ以前のものである）。

降雨予測に関して、気象衛星データとAMeDASデータとを有機的に活用することにより、2～3日程度にわたる1時間毎の降雨量の予測手法を提案している。ここでは、河川の流量をあまり変えない程度の小雨や南北に移動する前線あるいは台風に伴う大雨は対象としていない。この点で、本研究における降雨予測は、通常の天気予報とは異なる。ここでは、通常、東シナ海から東進する低気圧にともなう、すなわち「西からくずれる天気」にともなうある程度量的に集中し、水資源として利用し得る降雨のみを研究の対象としている。このような降雨は普段の水力エネルギー利用に多頻度で現れるもので、その予測は日常の給電業務に役立つものである。

河川流量に関して、有効雨量の時間変化を予測して、これを入力とし、河川流出量を出力と見なした出水伝達関数を用いるシミュレーション手法を開発している。ここでは、対象河川の降雨・出水の応答を一つの定まった伝達関数で表わそうとするのではなく、結果的には降雨の継続時間に応じて短時間伝達関数および長時間伝達関数の2種類に集約し、いずれかを選択することを提案している。従来から、洪水を対象とした河川出水機構を伝達関数で表す試みが行われているが、本論文は、その考え方を継承しているが、中規模の降雨に適するように改良したものである。この河川出水シミュレーション手法を実績降雨に対して適用し、その妥当性を検証している。最後に上述の両手法を総合的に組み合わせることにより、降雨から流量までの実用的一貫予測システムを提案している。

本論文の構成は、8章から成る。第1章は緒論であり、第2章では、本研究に利用した各種気象データおよびダム日誌データの内容や特徴について記述するとともに、検討対象降雨の一覧を示している。ここには、畑薙第一ダム上流域における降雨開始年月日、降雨継続時間、時間累積降雨量の流域平均値、基底流量(降雨開始直前の流量)およびピーク流量の各値を表の形で提示している。

第3章では、河川流出率およびそれを用いて算定できる有効雨量を従来よりは良い精度で推定するための一手

法を提案している。ここでは、過去の降雨および流量の実績データを用いて得られた河川流出率を基底流量と総降雨量とで分類し、これら三者の関係を近似的に表す一つの曲面を求めることによって、流出率推定精度の向上を図っている。これは、三者の関係を統計的に処理したもので、出水メカニズムの面から検討したものではないが、定量的に従来より精度の良い流出率の推定が可能になっていると言える。

この曲面を用いることによって、雨の降り始めからの累積降雨量に応じて流出率を変化させ、1時間毎の降雨量の観測値から有効雨量の時間変動の推定を行ってみた。その結果、かなりの精度でダム流入量総量のシミュレーションができることが分かった。

第4章では、ダム流入量の総量だけでなく、その時間変化をシミュレートしている。ここでは、降雨継続時間により出水伝達関数が2種類に分類できることを示している。本出水伝達関数は有効雨量を入力、河川流出量を出力としている。

出水伝達関数は、対象河川を限定しても、その河川固有の出水伝達関数が一つだけ存在するのではなく、個々の降雨毎に異なったものになる。実際に、畑薙第一ダム上流域の26例の降雨に対して、個々にその出水伝達関数を求めた。対象ダム上流域における検討では、出水伝達関数は個々の降雨で異なっており、固有の伝達関数を

定めることはできないことが確認できた。そこで、本論文では、そのインパルス応答波形の類似性を探り、最終的には単純に降雨継続時間の長短、すなわち畑薙第一ダムにおいては35時間未満および35時間以上の降雨に対して二つの伝達関数に分類できることを見いだした。予測という立場からは来るべき降雨の予想継続時間に応じて短時間伝達関数および長時間伝達関数のいずれかを選択し、これを用いることによる流量予測手法を提案している。14例の降雨による河川出水のためのシミュレーション結果は全体として良好であった。

第5章では、降雨量の時間変化を予測する簡便な手法を提案している。気象衛星データから得られる雲頂温度分布などは、早い時点で東シナ海から中国大陸にわたる広範囲の雨雲の移動状況を把握するのには有効であるが、これから実際の降雨域を推定することは困難である。他方、AMeDASによる地上の観測データからは、日本国土内における実際の降雨状況が直接把握できる。本研究では、大体において西から東へ移動する天候に着目し、気象衛星データと地上の気象観測データとを同時に活用することにより、時々刻々変化する降雨量の定量的予測手法を提案している。その手法の概略を述べれば、以下の通りである。

まず、気象衛星としてGMS（ひまわり）を利用し、1時間または3時間おきに得られる衛星データから雨雲

の移動方向および速度を推定する。対象ダム（大井川水系畑薙第一ダム）を基点として、雨雲の接近して来る方向に幅30kmの帯をとる。この西方にとった帯内において、AMeDASデータから得られる降雨量の地上分布を観察する。西日本における降雨量の地上の分布があまり変化しないで中部以東に移動し、対象ダム上流域を通過するものと仮定して、そこでの降雨量の時間変動を予測する。典型的に西から東へ移動する場合の降雨16例について、提案予測手法を適用している。全体のうち10例については、総降雨量および時間変動予測の両方とも良好な結果である。ただし、ここでの手法によれば、半日～1日程度前もって降雨予測ができるが、それ以上の長期にわたる降雨に対しては1回の予測では対応できない。

第6章では、さらに長いリードタイムをもって予測を可能にするために、気象衛星データから得られる日本列島以西の海洋上での雲頂温度分布データを活用する手法を開発した。具体的には日本列島におけるAMeDASデータからの降雨データとその上空での雲頂温度分布データとを対応付け、その対応にしたがって日本列島以西の海上における降雨分布を推定している。そして、ほぼその分布が対象ダム上流域を通過するものとして2日以上にわたる長期間先までの降雨を予測し、比較的良好的な結果を得た。

第7章では、まず降雨を予測しそれに基づいて河川流量を予測するという、降雨から流量に至る一貫した実用的定量的予測システムを提案している。第5章および第6章の降雨予測手法と第3章および第4章の河川流量シミュレーション手法とを有機的に結合することにより、2～3日先までの流量を予測することを試みた。具体的に、本予測システムを対象ダム上流域の降雨5例について適用し、その予想継続時間が35時間未満か以上かに基づいて伝達関数を選択することによりダム流入量の予測を行っている。その結果、流量がピークを示す時点から半日～1日以上前に降雨継続時間の長短に関係なく比較的良い流量予測ができることが判明した。長時間連続して降る雨についても、降雨予測を逐次繰り返すことにより、流量予測精度が順次改善できている。なお、本システムは、客観的データの計算機処理のみで予測が進行し、熟練者による人為的判断は全く導入されない。ただし、本降雨予測手法の特徴から、日本列島を西から東に移動する中程度の降雨に対して有効であり、台風などのような大規模で集中した降雨は対象としていない。

第8章では、本論文における各章の成果を総括し、結論を述べている。

第1章の文献

- (1)通産省水力課編：「水力発電のすすめ」，民主生活社発行（1983）
- (2)久保田，松田：「低迷する石油価格と代替エネルギー開発」，エネルギー・資源，10 [2]，111～115（1989）
- (3)鈴木：「都市と電力・ガス」，エネルギー・資源，10 [5]，422～428（1989）
- (4)日本工業新聞社編：「'89-'90 エネルギー総合便覧」，（1989）日本工業新聞社
- (5)電気学会編：「20編 電力系統」，電気工学ハンドブック，874（1988）電気学会
- (6)電気事業連合会統計委員会編：「電気事業便覧・昭和63年度版」，（1988）日本電気協会
- (7)通商産業省資源エネルギー庁公益事業部：「水力開発地点計画策定調査報告書（第5次発電水力調査）」（1986）
- (8)電力系統の受給制御技術調査専門委員会：「電力系統の受給制御技術」電気学会技術報告（Ⅱ部）第302号（1989）
- (9)豊田，深尾：「コンピューターサイエンスシリーズ・電力系統へのコンピューターの応用」，（1972）産業図書

- (10)成松, 小林:「水力発電所の集中制御と水系一貫運用計画の考え方」, 電気雑誌OHM, 56 [5], 17~22 (1969)
- (11)Sherman,L.K.: "Streamflow from rainfall by the unit-graph method", Eng. News Record, 108, 501~505 (1932)
- (12)中安:「雨量より洪水量の推定について」, 建設省直轄工事第4回技術研究報告, 159~194 (1951)
- (13)菅原:「水文学講座7・流出解析法」, (1972) 共立出版
- (14)室田:「河川工学」, (1986) 技報堂
- (15)日野, 長谷部:「流量時系列のみによる流出解析について」, 土木学会論文報告集, 第300号, 43 (1980)
- (16)山田:「時定数スペクトルを用いた山地小流域の洪水流出解析」 土木学会論文報告集, 第314号, 87~98 (1981)
- (17)西原 編:「全建技術シリーズ23・洪水予報」45~49 (1976) 全日本建設技術協会
- (18)長谷部, 日野:「フィルター分離AR法による流出予測と他の流出モデルとの比較評価について」, 土木学会論文集, 第405号, 195~204 (1989)

- (19)平野,伊藤:「到達時間の分布を考慮した流出解析」第22回水理講演会論文集, 197~202 (1978)
- (20)藤田:「斜面長の変動を考慮した貯留関数法に関する研究」土木学会論文報告集, 第314号, 75~86 (1981)
- (21)高木,松林:「流域内での流出特性の平均化過程と流出モデル」 土木学会論文報告集, 第312号, 73~81 (1981)
- (22)陸,小池,早川:「分布型水文情報に対応する流出モデルの開発」土木学会論文集, 第411号, 135~142 (1989)
- (23)Powell,S.M. & Cluckie,I.D.: "On the sampling interval of discrete transfer function models of the rainfall-runoff process", IFAC Identification and System Parameter Estimation 1985, 1119-1124 (1985)
- (24)岩佐:「最新土木工学シリーズ17・最新河川工学」40~44 (1982) 森北出版
- (25)日野,長谷部:「流出成分への降雨分離則および部分流出域と流域貯留の関係について」土木学会論文集, 第357号, 133~140 (1985)
- (26)和歌森,松本,大成:「河川出水予測モデル」計測と制御 19 [7], 729~732 (1980)

- (27)日野,長谷部:「流出率と湿潤指標としての洪水直前流量」 土木学会論文報告集, 第328号, 41~46 (1982)
- (28)小柴ほか:「最近の系統運用施設」 電気協同研究 39 [4] 45~80 (1983)
- (29)竹村:「雨の短時間予報」 天気 34 [4], 229~238 (1987)
- (30)竹村:「レーダとアメダスを用いた雨域の把握」 天気 32 [5], 229~231 (1985)
- (31)長友,四宮,岡本,宮原,遠山:「降雨・出水予測システムの開発」 電力技術研究会資料 PE-88-143 (1988)
- (32)下垣,室田,江藤:「雨量観測レーダによる降雨量分布の解析とオン・ライン予測」 第22回水理講演会論文集, 169~174 (1978)
- (33)上林:「レーダ雨量情報を用いて洪水調節を確率的に行うための基礎的検討」 土木学会論文集, 第411号, 169~175 (1982)
- (34)浅井:「研究展望・気象学における流体力学」 土木学会論文集, 第405号, 1~11 (1989)
- (35)齊藤:「気象の教室」 435~440 (1984)
東京堂出版

第2章 気象データおよび 河川流量データ

2.1 まえがき

本論文で提案する降雨量の時間変動予測手法では, 気象衛星データおよび地上の気象観測データとをその入力情報として用いている。また, 流量予測手法では, ダム日誌から得られる過去の降雨や流量の実測データを用いている。本章では, 本研究で利用したこれら各種データの主な特性などについて述べておく。

2.2 気象衛星GMSデータ

本論文では, 気象衛星データとしてGMS (Geostationary Meteorological Satelliteの略, 和名ひまわり) から得られるものを用いた。このGMSは我が国が所有している静止気象衛星である。後述の極軌道衛星に比べて高度が高く, 東経140度の赤道上空に見かけ上静止している。これにより, 日本をはじめ西太平洋, オーストラリア地域など, 広い範囲の気象状況の観測が

常時できる。昭和62年2月までは3時間毎、昭和62年3月以降は1時間毎に観測している。この衛星からのデータを画像処理することにより、雲形、雲量、雲からの太陽光の反射量(アルベド)、雲頂温度など雲に関する情報が得られる。さらに、これらの各時間の画像処理結果の比較により雲の動きを把握することができる⁽¹⁾⁽²⁾。

GMSにはVISIR(Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)と呼ばれる可視赤外回転走査放射計が搭載されている。これは、2チャンネルの放射計からなり、それぞれ可視光および赤外光の波長域内の放射エネルギーを観測している。可視光域は昼間しか観測できないのに対し、赤外光域は昼夜関係なく観測でき、雲頂、陸地および海面の温度を観測するのに適している。そこで、本研究では赤外光チャンネルの画像データを用いることにした。

赤外光チャンネルの距離分解能は衛星直下点において5kmであるが、日本付近では東西方向5.2km、南北方向7.0kmとなっている。本研究では気象衛星センターで磁気テープに格納されたデータを用いたが、オンライン受信システムを用いれば時々刻々のデータが入手できる。これはVISIRデータを累積保存したもので1本の磁気テープに1日10回分が記録されている。各データファイルは、パラメータ部とデータ部とから成る。パラメータ部には、

- (1)赤外画像データの輝度レベル(0~255レベル)から温度への変換用テーブル
- (2)衛星の軌道および姿勢情報
- (3)緯経度対ラインピクセル変換定数
- (4)簡易座標変換用データテーブル

など、各種の画像パラメータが格納されている。これらの画像パラメータの値を参照することにより、雲頂温度表示画面に地形線の書き込みなどが容易に行えるようになっている⁽³⁾。データ部には1画素8ビットで各画素の輝度値(255階調)が格納されており、本研究では、これを温度値に変換後、7階調のカラー表示して用いている。表2.1にGMSの主な特性をまとめた。

GMS以外にも我が国で利用できる気象衛星としてNOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)がある。これはアメリカ合衆国が所有する極軌道型の気象衛星である。本論文では、このNOAA衛星から得られるデータは使用していないが、本研究を始めた時期にはこれを用いていたので、その特徴を述べておく。

NOAA衛星は前述した静止気象衛星に比べて低い高度(830km; 静止気象衛星ひまわりの1/40の高度)で飛行しているため、距離分解能に優れているが、瞬間の観測範囲は狭い。軌道傾斜角99度、周期約101分

表 2・1 GMS の主な特性

高 度	35,800 km
周 期	常時観測可能
有効観測域	東経140°の赤道地点を中心 に半径約7,000kmの円
同一地点の 観測時間間隔	3時間 (昭和62年3月以降は1時間)
距 離	可 視 衛星直下: 1.25 km 日本付近: 東西方向 1.3 km 南北方向 1.8 km
	赤 外 衛星直下: 5.0 km 日本付近: 東西方向 5.2 km 南北方向 7.0 km
分解能	

で地球を一周し、ほぼ12時間毎に日本の上空を通過している⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

NOAAは、可視から遠赤外にわたる4種類の改良形高分解能放射計(AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer)を搭載し、衛星直下点の距離分解能1.1kmを有している。そのうち、Ch.4は波長10.5~11.5μmの遠赤外スペクトル領域を検出している。表2・2にNOAAの主な特性を示す。

表 2・2 NOAA の主な特性

高 度	830 km
周 期	101.58 分
有効観測域	軌道沿い約2,700 km の幅
同一地点の 観測時間間隔	12 時間
距離分解能 (可視, 赤外とも)	1.1 km

2・3 地域気象観測システム A M e D A S データ

地域気象観測システム A M e D A S (Automated Meteorological Data Acquisition System) は、気象庁が日本各地の地上気象データを集計するために構築したシステムである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。このシステムの観測点としては、平均 17 km 間隔で有線ロボット気象計が設置されており、全国で約 1,320ヶ所、そのうち約 840ヶ所では降雨量、風向、風速、気温、日照時間を、残りの約 480ヶ所では降雨量のみを 1 時間毎に観測している。そして、これらの観測データは、電話回線を利用して気象庁の気象観測センターへオンラインで集信され、電子計算機で処理されたのち、全国の気象官署や報道機関などに配信されている。その全観測地点を図 2・1 に示す。

過去の A M e D A S データは、気象庁において入手可能であり、1ヶ月分が磁気テープ1巻に格納されている。本研究ではこの磁気テープデータを用いることにした。A M e D A S の観測項目を表 2・3 に示す。これらの観測データから、1時間毎に日本の国土全体における降雨量の分布および降雨域の移動を知ることができる。このように、A M e D A S データは地上気象の情報源として十分に活用できるものである。



図 2・1 AMeDASの全観測点
(全観測点数:1,318ヶ所)
(平均観測点間隔:約17km)

表2・3 AMeDASの主な観測項目

観測項目	単位	観測間隔
降雨量(前1時間の合計)	[mm/h]	1時間
風向(16方位)		"
風速	[m/s]	"
日照時間(前1時間の合計)	[0.1h]	"
気温	[℃]	"
降雨量の日積算	[mm]	1日
降雨量の日間最大値	[mm/h]	"

2・4 対象流域の概要およびダム日誌データ

2・4・1 畑薙第一ダム上流域

中部日本地区の大井川流域には10個の大きなダムおよび9個の発電所(合計最大出力56万kW)がある。同河川の全流域を図2・2に示す。同図において、畑一ダムは水系の最上流に位置しており、他のダムの影響がないこと、降雨および流量の観測記録は一事業体で行われており、それらのデータが得られ易いことなどの理由

---:水系分界線

▲印:雨量計設置点

- a 南信濃 b 笹山
- c 松峯 d 日向山
- e 八町山 f 中富
- g 千枚嶽 h 赤石

●印:ダム

- 1 畑薙第一ダム
- 2 畑薙第二ダム
- 3 井川ダム
- 4 奥泉ダム
- 5 大井川ダム
- 6 千頭ダム
- 7 大間ダム
- 8 寸又川ダム
- 9 塩郷ダム
- 10 笹間川ダム



図2・2 大井川水系の概要

から、このダムを検討の対象としている。

表2・4に示すように、畑一ダムの流域面積は315.5 km²であり、大井川水系の中で最大である。同ダムは間ノ岳付近を北端として、西側は塩見岳、赤石岳、聖岳

表2・4 ダム毎の流域面積(大井川水系)

ダム	流域面積 km ²
畑一ダム	315.5
畑二ダム	11.0
井川ダム	128.3
奥泉ダム	5.4
大井川ダム	70.9
千頭ダム	130.8
大間ダム	69.3
寸又川ダム	38.5
塩郷ダム	180.4
笹間川ダム	69.4

など、東側は農鳥岳、笹ヶ岳など3,000m級の高い山々に囲まれた大きな谷の水を集めている。ダム上流域の形状は南北に細長く、流域全体は主に針葉樹林に覆われている。また、地質は四万十層群に属し、砂岩や泥質岩からできている⁽⁹⁾。同流域は年間平均降雨量が約2,800mmあり、我が国の多雨地帯に属する。

2・4・2 ダム日誌データ

畑一ダムにおける過去の降雨や流量の実測データはダム日誌から得られる。そのダム日誌には雨量、ダム水位、水位差、ダム放流量、発電使用水量、ダム流入量などの情報が1時間毎に記録されている。

ダム日誌データのうち雨量については、ダム上流域の松峯(海拔2,200m)、千枚嶽(同、2,900m)、赤石(同、2,600m)およびダム(同、950m)の各地点で観測された値である。また、ダム流入量(=河川流量)については、水位-流量曲線から間接的に推定された値である。本論文ではこれらの値を降雨量および流量の実測データとして用いている。

2・5 本研究で用いた降雨の一覧

本論文で提案する手法の有効性を調べるために、大井

川水系畑薙第一ダムを検討対象地点に取り上げた。電力系統における日常の需給運用の面から、台風や集中豪雨など、洪水に至るような降雨を除く中規模の降雨について検討を行った。具体的には、対象ダム上流域における昭和55年～昭和59年の降雨のうち、59例について検討を行った。検討対象降雨の一覧を表2・5および表2・6に示す。各降雨について、降雨開始年月日、降雨継続時間、時間累積降雨量の流域平均値、基底流量およびピーク流量の各値を示してある。

表2・5 本研究で用いた降雨例
(畑薙第一ダム上流域における昭和55年～昭和56年の降雨)

降雨開始 年月日	降雨 継続 時間 h	時間累積 降雨量の 流域平均値 mm	基底 流量 m ³ /s	ピーク 流量 m ³ /s
55.04.06	20	102	17	278
55.04.12	46	148	25	356
55.04.20	17	39	30	92
55.05.15	32	145	35	213
55.05.25	30	122	35	272
55.06.07	59	113	33	221
55.07.07	75	190	20	140
55.07.14	11	46	48	154
55.07.30	11	41	18	40
55.08.16	15	32	10	31
55.08.26	30	97	18	178
55.09.10	54	197	19	315
55.10.19	54	120	24	122
55.11.23	9	27	7	20
56.04.01	26	74	13	92
56.04.16	14	23	17	26
56.04.19	16	38	18	36
56.04.29	17	32	18	36
56.05.11	30	91	41	259
56.05.17	16	43	38	92
56.06.21	39	103	18	173
56.06.25	71	117	40	124
56.07.02	74	127	39	186
56.08.14	39	23	7	20
56.08.21	39	261	7	487
56.09.03	35	53	22	118
56.09.19	32	56	14	33
56.09.25	12	42	14	48
56.10.05	12	32	20	56
56.10.08	38	205	24	380
56.10.22	20	97	20	136
56.11.02	16	87	20	134

表 2・6 本研究で用いた降雨例
(畑薙第一ダム上流域における昭和57年～昭和59年の降雨)

降雨開始 年月日	降雨 継続 時間 h	時間累積 降雨量の 流域平均値 mm	基底 流量 m ³ /s	ピーク 流量 m ³ /s
57.04.03	20	45	7	65
57.04.15	16	47	12	35
57.05.02	46	84	19	141
57.05.06	14	38	30	91
57.05.14	18	71	32	148
57.05.31	77	250	16	311
57.07.19	16	39	24	63
57.08.01	65	439	15	891
57.08.26	34	123	21	238
57.09.10	68	418	26	801
57.09.19	38	83	44	91
57.09.24	29	52	41	107
57.10.19	21	38	13	36
57.11.09	46	80	13	95
57.11.22	16	63	13	104
57.11.29	13	70	15	134
58.04.15	63	230	27	179
58.04.22	14	49	94	178
58.05.06	24	109	37	311
58.05.15	38	207	24	503
58.06.20	28	160	12	437
58.07.05	16	59	25	129
58.07.20	68	163	65	215
58.08.14	93	440	13	643
58.09.26	68	347	20	149
58.10.08	70	154	32	91
59.06.25	54	157	23	273

2・6 あとがき

本論文において利用したGMSおよびAMeDASの両データは、磁気テープに記録されたものを気象庁や気象協会から入手あるいは購入したものである。それをコンピュータ処理し、第5章～第7章において、降雨量の時間変動予測を行っている。

流量予測に用いた降雨や流量の観測データは電力会社において、常時、ダム日誌データとして記録されている。本論文では、ダム日誌データは降雨や流量の実測データとして第3章～第7章の各章で利用している。

本論文では、上述の各種データはオフラインで利用した。しかし、現在ではGMSやAMeDASデータなどは、オンライン気象データとして、容易に電力会社などにおいて制約なく利用できる。また、ダム日誌データについても、今日ではコンピュータによりオンライン収集されるようになってきている。以上のことから、本論文で提案する一貫予測システムは容易に実運用面に適用できるものと考えている。

第2章の文献

- (1) 小平：「リモートセンシングシリーズ・気象」，
76 (1980) 朝倉書店
- (2) 高橋，山下，土屋，中村：「衛星でみる日本の気象」，
133 (1982) 岩波書店
- (3) Takahashi, T. & Kato, K. : " The Simplified
Mapping Equation of VISSR Image Data
from the Geostationary Meteorological
Satellite (GMS) " , 気象衛星センター技術報告，
第1号, 13 (1979)
- (4) 東京天文台編：「理科年表」，第54冊，天93
(1981) 丸善
- (5) Hussey, W.J. : "The TIROS-N Polar Orbiting
Environmental Satellite System", NESS (1977)
- (6) Lauriston, L., Nelson, G.J. & Porto, F.W. : "Data
Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA
Radiometers", NOAA Technical Memorandum,
NESS-107, 3 (1979)
- (7) 根本，島田，小林，荒川，山下，渡辺，関口：「図説・
気象学」，200 (1984) 朝倉書店
- (8) 和達 監修：「新版・気象の事典」，340 (1984)
東京堂出版

- (9) 貝塚，鎮西 編：「日本の山」，136～144
(1986) 岩波書店

第3章 基底流量を考慮した河川流出率の推定

3.1 まえがき

日常の給電業務における流量予測手法⁽¹⁾としては単位図法⁽²⁾、タンクモデル法⁽³⁾、貯留関数法⁽⁴⁾などが用いられている。しかし、ダム操作上からいえば、流量変化、特にその最大値と発生時刻が問題となるが、これらを予測するという面では必ずしも満足のいく精度ではない。この原因のうち主要なものの一つとしては、河川流出率（降雨量のうち河川に流出する割合）を正確に推定する手法が確立していないためであると考えられる。したがって、本章では河川流出率の推定精度を向上させるための一手法を提案する。

一般に流出率は流域の土地の状況あるいは降雨量などにより大きく影響されると考えられるが、特に総降雨量および土地の湿潤度によって大きく変化するとされている⁽⁵⁾。これまでにも、土地の湿潤状況を表す指標として基底流量（当該降雨に起因する増水直前の流量）をとると、統計的有意性が高いこと、また、平均降雨強度との関連も深いことが指摘されている⁽⁶⁾。総降雨量は

雨量計で比較的簡便に測定でき過去からの観測結果も十分蓄積しており、利用価値も高いので、本論文では流出率を総降雨量と基底流量とによって分類整理してみた。その結果、流出率を総降雨量のみに対して関係づけるよりはばらつきの度合がかなり少なくなることがわかってきた。

具体的に、畑薙第一ダム地点における過去の実測データを用いて、流出率をZ軸にとり基底流量と総降雨量とをそれぞれX軸、Y軸にとって整理し、3者の関係を統計的に処理することにより一つの曲面で近似的に表し、流出率を推定しやすくまとめた。その結果、総降雨量だけで分類した場合よりも同一条件における推定誤差が小さいことがわかった。また、曲面の形状は文献(6)に指摘されているように単なる指数関数的ではなく後述のように、原点に近い領域の曲線の立ち上がりと原点から離れた領域の飽和傾向を数値的によく表す曲面としてゴンペルツ曲線群で表した方が妥当であるといえる。

さらに、本章では、得られた流出率を用いて、1時間毎の降雨観測値から有効雨量成分の時間変動を推定するための手法を提案している。これによって、ダムにおける流量予測モデルの入力として降雨の時間変動値の代わりに有効雨量の時間変動値を用いることができるようになり、より一層直接的な入力を想定できることとなった。具体的に対象ダムにおける有効雨量の時間変化を推定し、

その結果について降雨によるダムへの流入量の総量を予測することにより検討を行ったところ流量が多いほど、良好な結果が得られた。

3.2 ダム流域内の全降雨の算定

河川流出率推定のための前処理として、ダム流域内の全降雨の算定については次のように行った。河川流域内に設置された雨量計で観測される降雨量は、当該地点での値である。しかし、一般に雨は相当広い地域にわたって降り、その降り方も一様ではない。したがって、各観測地点での降雨量から対象とする流域全体の平均雨量を推定する必要がある。この平均雨量の推定誤差は河川流出率推定のための直接的な誤差となって表れる。

この実質的な平均雨量を推定するために本章では、ティーセン法⁽⁷⁾を用いた。この方法は観測所の各観測値はそれぞれある広さをもつ地域の降雨を代表しているという考え方に基づくものである。例として、畑一ダム上流域をティーセン法により分割した結果を図3.1に示す。また、各分割した領域の面積を表3.1に示す。この方法では、例えば降雨領域X内では松峯の雨量計が示した降雨が、また降雨領域Y内では千枚嶽の雨量計が示した降雨が一様にあるものと想定している。したがって、

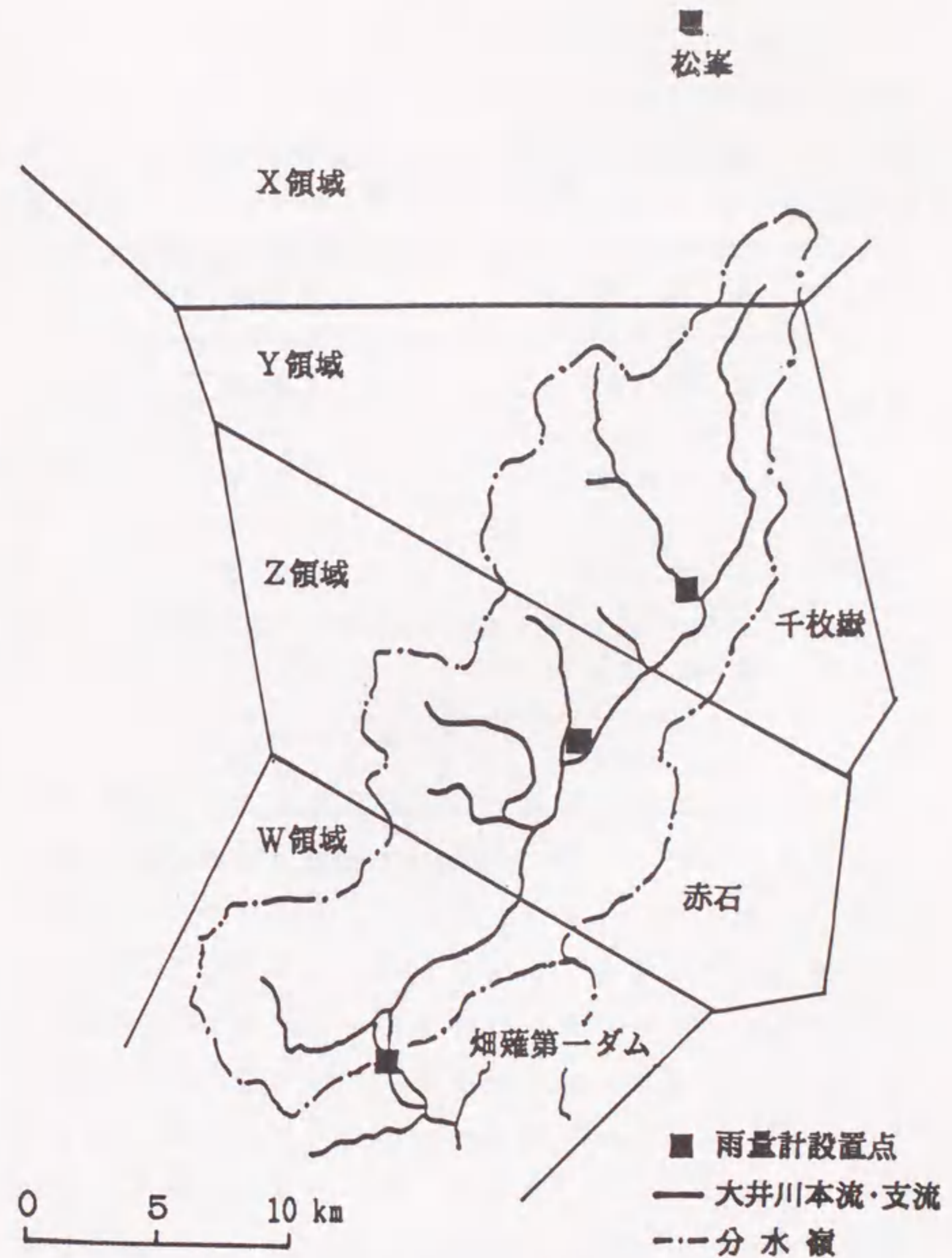


図3.1 ティーセン法による降雨域の分割(畑一ダム上流域)

表 3・1 畑薙第一ダム上流域における各降雨域の面積

降雨領域 ^{注)}	降雨面積 (km ²)
X (松 峯)	10.0
Y (千枚嶽)	121.0
Z (赤 石)	99.4
W (畑一ダム)	85.1
合 計	315.5

注) カッコ内は雨量計設置点名である。

X, Y, Z および W のうち大井川流域内の降雨面積をそれぞれ A_i ($i = 1 \sim 4$), 対応する観測所が測定した降雨量を各々 r_i ($i = 1 \sim 4$) とすると, 図 3・1 に示した全域の平均雨量 \hat{r} は次式で表される。

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^4 r_i A_i}{\sum_{i=1}^4 A_i} \dots\dots\dots (3.1)$$

3・3 基底流量を考慮した流出率の推定法

3・3・1 流出率の変動原因

河川流域に雨が降った場合, その降雨量がすべてダムへ流入するわけではない。ダムへ流入する成分の他に, 地面や樹木の葉面からの蒸発・蒸散あるいは地中への浸透などにより失われる成分もある。流域に降った降雨のうち河川に流出する成分を有効雨量, 河川へ流出しない成分を損失雨量という。総降雨量に対する有効雨量の割合を流出率という。厳密に言えば, 同一の河川において総降雨量が同じ場合でも, 季節による植生の状態, 土壌あるいは大気の状態などによって, 降雨の蒸発量や地下浸透量なども異なるので, 流出率の値も変化する。

畑一ダム上流域における昭和55年～同57年前半の降雨のうち水力発電に有効に利用できる程度の流量増分量として、そのピーク値が基底流量成分と同等かまたはそれ以上に達する雨量は36例であった。この36例について流出率を求めて単純に総降雨量に対してプロットしたものが図3・2である。同図において、総降雨量が多

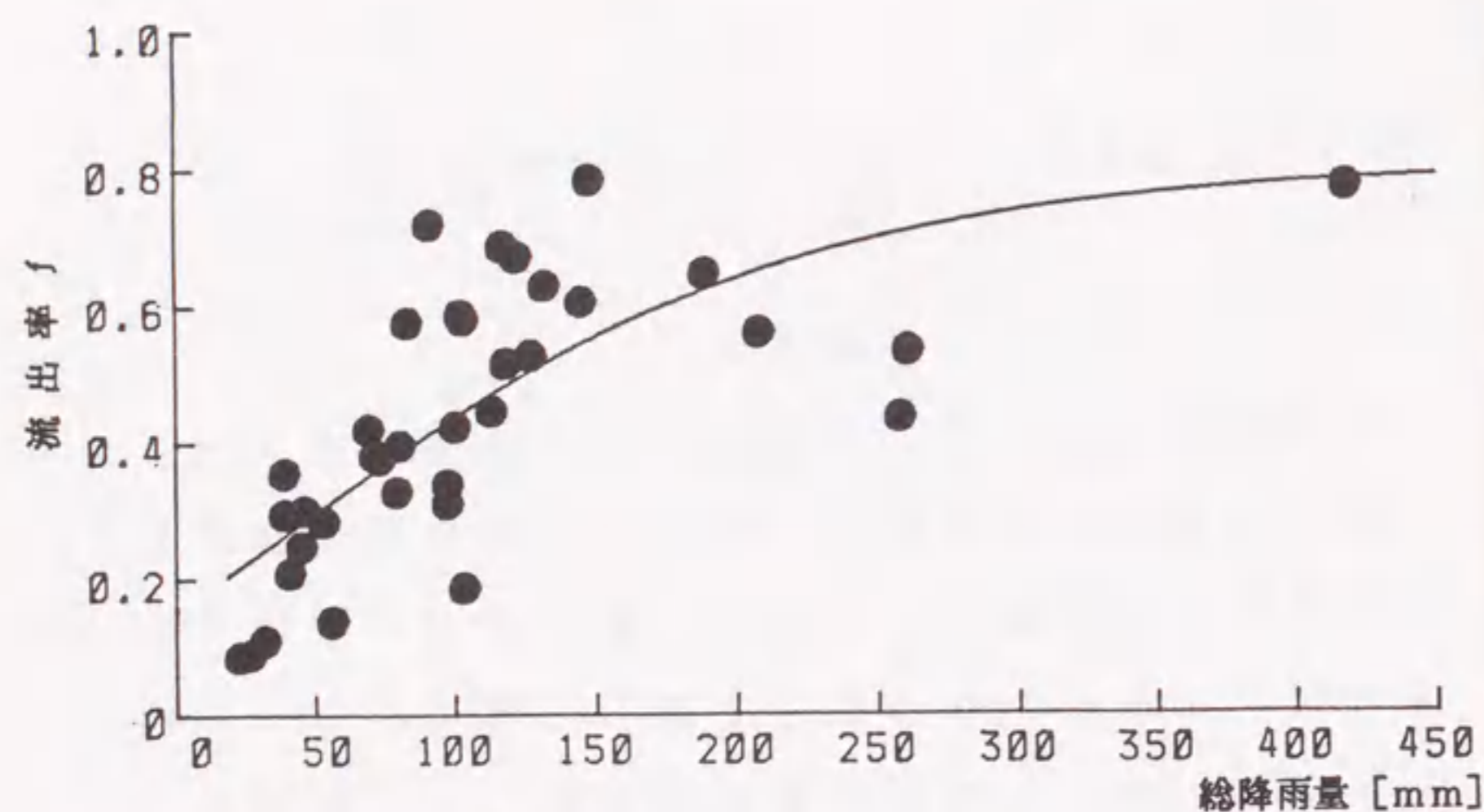


図3・2 畑一ダムにおける流出率(昭和55年4月～昭和57年8月)

いほど、流出率の値が大きくなる傾向が認められるが、同一降雨量に対するその変動幅は大きい。そこで、これらのデータをさらに基底流量を用いて分類してみた。これを実際に大井川上流の畑一ダムについて実施したところ、総降雨量のみ関数として流出率を表した場合よりは正確に整理できた。

3・3・2 畑一ダム上流域における流出率曲面の推定

図3・3は図3・2に示した総降雨量に対する流出率を更に基底流量に対する依存性を取り入れて三次元的に表したものである。黒丸や破線の丸印は図示の曲面の上にあるものと下にあるものとにそれぞれ対応している。この図から、同一の総降雨量についてみれば基底流量が多いほど流出率が大きく、また同一の基底流量についてみれば総降雨量が多いほど大きいという傾向がみられる。基底流量が大きいときには土地が湿潤しており、河川に流出する割合が大きいと考えられる。流出率 f と総降雨量 R_{total} [mm]および基底流量 Q_b [m^3/s]との関係を一つの曲面で表し、同図に太めの実線で描いてある。この曲面は次の式(3・2)に示すゴンペルツ曲線⁽⁸⁾で形成されており、最小二乗法を用いて、プロットした点と推定曲面との誤差が最も小さくなるような曲面を選び出した。これを畑一ダム上流域における流出率近似曲面と呼ぶ。

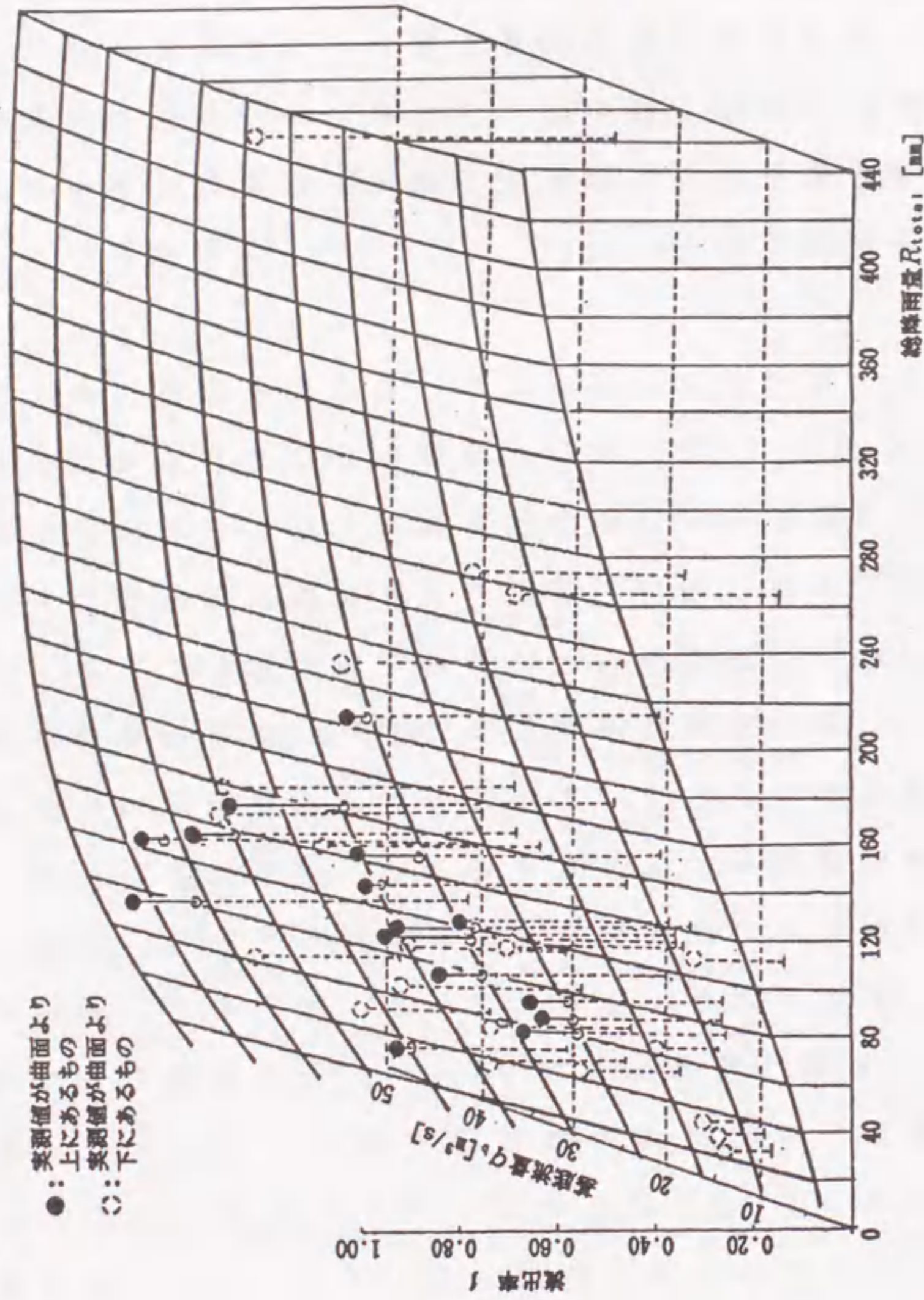


図3・3 総降雨量および基底流量に対する流出率の実測値から求めた流出率近似曲面
(畑一ダム上流域における昭和55年4月～昭和57年8月の降雨)

$$f(q_b, R_{total}) = K_G \alpha_G(q_b) \beta_G(q_b)^{R_{total}} \quad \dots (3.2)$$

ただし、 K_G は曲線の飽和値を与える係数であり、 $\alpha_G(q_b)$ および $\beta_G(q_b)$ はそれぞれ基底流量 q_b をパラメータとして表した係数であり、 $\alpha_G(q_b)$ は始点、 $\beta_G(q_b)$ は曲線の曲がり具合に直接対応している。この式は基底流量 q_b をパラメータとした $R_{total}-f$ の関係を示す実験式であり、その式の中に含まれる定数の値は畑一ダム上流域における今回のデータに関する限り、次の通りである。 K_G は 0.8 であり、 $\alpha_G(q_b)$ 、 $\beta_G(q_b)$ については図 3.4

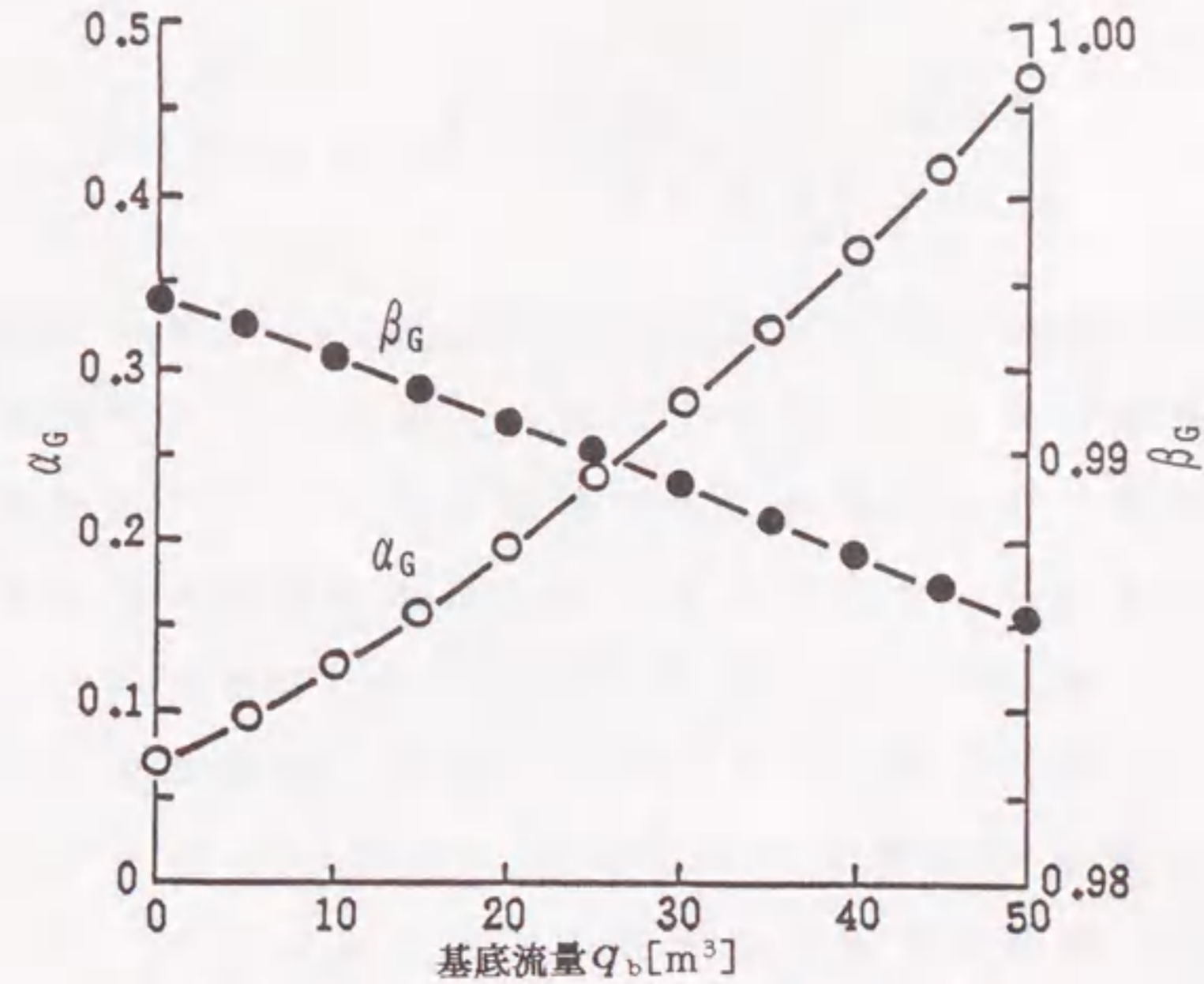


図3・4 ゴンペルツ近似式の係数変化 ($K_G=0.8$)

に示すように変化している。本ゴンペルツ曲線で流出率曲面を表したことの妥当性については次節で述べる。

3.3.3 流出率近似曲面の検討

図3.3の曲面は流出率の実測データに基づく経験則であって、実際の運用に当たってそのときの総降雨量および基底流量からこの曲面上の流出率を求めた場合には、これを推定流出率（あるいは単に推定値）ということになる。これと実測値との誤差 ε_f を次式を用いて検討する。

$$\varepsilon_f = \frac{\text{実測流出率} - \text{推定流出率}}{\text{推定流出率}} \times 100 \% \dots (3.3)$$

総降雨量レベルをパラメータにとり、上の誤差の値を基底流量に対してプロットしたものが図3.5である。同図から、36例中31例の誤差が $\pm 40\%$ の範囲内に収まっていることがわかる。 $\pm 40\%$ の範囲を越えるものもあるが、それらは総降雨量が100mm未満の場合（白い丸印）に限られている。これは、降雨量が少ない時には雨水の流出プロセスが土地状態のわずかなパラメータに影響され易いことが考えられる。また、河川やダム
の流量 $[m^3/s]$ の実測データは1時間毎に測定した水

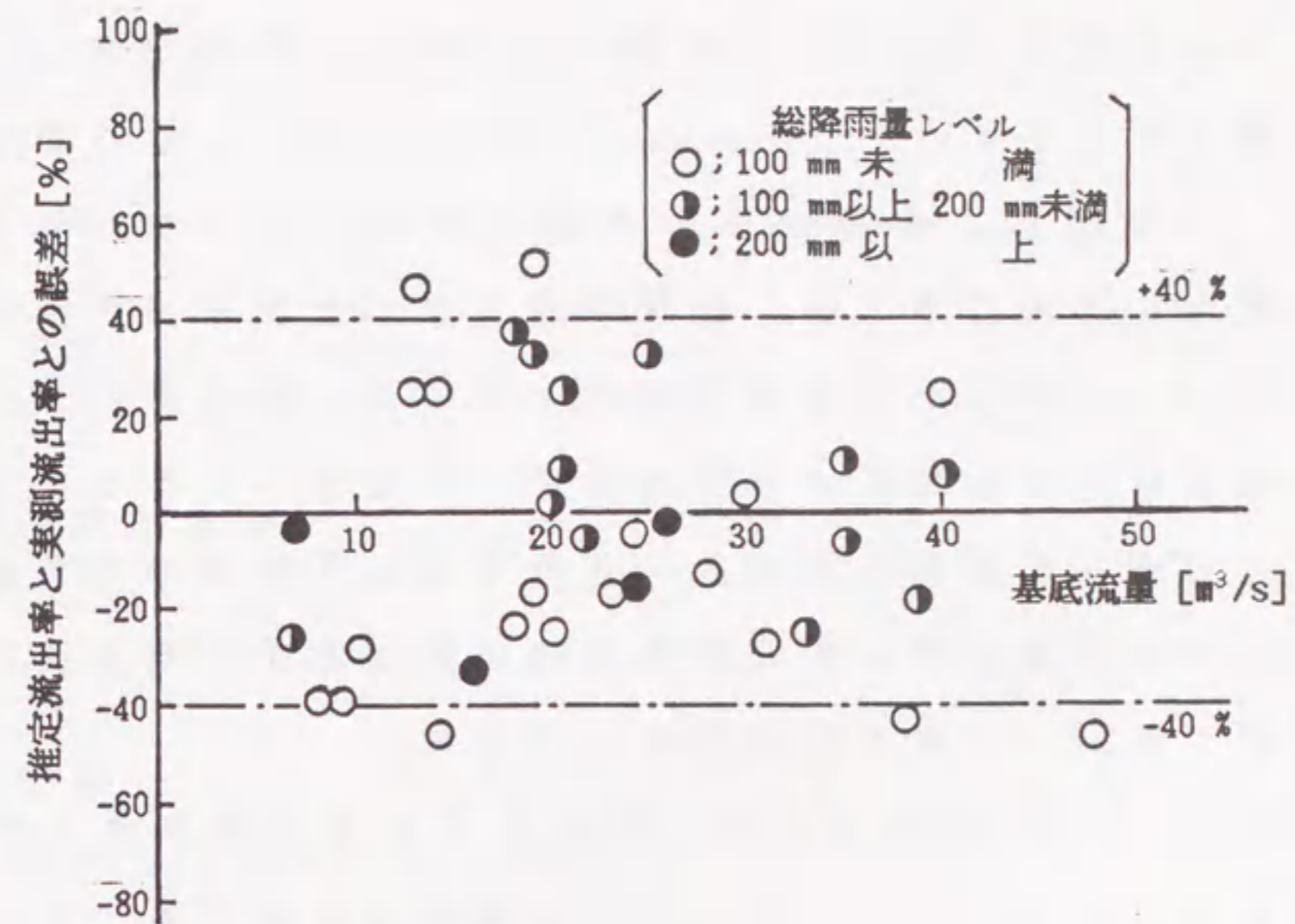


図3.5 基底流量からみた推定流出率と実測流出率との誤差

位 [m] の変化から求めており、特に降雨量が少ない時には水位変化が少ないことも誤差原因となっていると考えられる。また、我が国の山地では、一般に総降雨量が 20 mm 程度までは、降雨のすべてが地中に浸透し河川への流出を生じないともいわれている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。したがって、この図による流出率の推定は総降雨量 20 mm 以上の場合に限定して考え、総降雨量 20 mm 未満の場合には、 $f(q_b, R_{total}) = 0$ として取り扱う。このことは実際に 20 mm 程度以下の降雨について流量データを調べてみると、そのピークは基底流量の 2~3 割増加しているのみであり、流量予測に対してこの程度の雨量はあまり重要視しなくてもよいと考えられるからである。

次に、図 3・2 のように、実測された流出率を単に総降雨量のみに対してプロットした場合を検討する。ここでは、同図の各点に対して最も誤差が小さいゴンペルツ曲線を最小二乗法を用いて決定し、それを同図に実線で併記している。このゴンペルツ曲線は式(3・2)の α_G および β_G を定数とみなし、流出率 f と総降雨量 R_{total} との関係近似したものである。この曲線をこの場合の推定流出率曲線ということが出来る。同図について、推定流出率とその実測値との誤差 \mathcal{E}_f を再び式(3・3)により算出した。その結果、最大誤差が 75% 程度もあり、 $\pm 40\%$ の以内に収まっているものは 36 例中 26 例に過ぎない。

流出率曲面を表すのに、ここでは式(3・2)に示すようなゴンペルツ曲線を用いることにしたが、以下に示す 3 種類の近似曲線についても比較を行い、それらは実測値との誤差が大きいことを確認している。

ロジスティック曲線⁽⁸⁾：

$$f(x) = \frac{K_L}{1 + \alpha_L \cdot \exp(-\beta_L x)} \dots\dots\dots (3.4)$$

指数関数曲線：

$$f(x) = K_E \{1 - \alpha_E \cdot \exp(-\beta_E x)\} \dots\dots\dots (3.5)$$

放物線：

$$f(x) = \sqrt{\alpha_D + \beta_D x} \dots\dots\dots (3.6)$$

これらの近似曲線を用いた場合の推定誤差 \mathcal{E}_f を式(3・3)により求め、更に次式の評価指標により比較を行った。

$$J = \frac{1}{10,000} \sum_{i=1}^{36} \mathcal{E}_f^2 \dots\dots\dots (3.7)$$

その結果を表 3・2 に示す。これによれば、ゴンペルツ近似曲線の誤差は最小となった。この理由から本研究ではゴンペルツ曲線を用いて流出率の推定を行っている。

表3・2 各種近似曲線を用いた場合の
推定流出率と実測値との誤差の評価

近 似 曲 線	誤差の評価指標 J
ゴ ン ペ ル ツ 曲 線	2.75
指 数 関 数 曲 線	3.21
放 物 線	3.33
ロジスティック曲線	5.85

3・4 流出率に基づく有効雨量時間変動の推定

ダム上流において、各時刻に観測される降雨のうち河川に流出する成分が有効雨量である。給電業務に用いられている流量予測手法のうち単位図法は有効雨量の時系列データを入力データとして用いている⁽²⁾⁽¹¹⁾。このような有効雨量の時間的変動を精度良く推定することは、ダムへの流入量の増減を正確に予測するために重要なことである。

前節で得られた流出率を用いて有効雨量の時間変動を推定するための手法について、以下に述べる。

3・4・1 有効雨量の時間変動推定法

前節において、流出率が総降雨量と基底流量の関数として実験式を導いた。その関係を降雨全体としてマクロに理解するだけでなく、1時間毎の降雨のうち、すぐにはないにしろ最終的には流れ出すと予想される有効雨量の時間変動を次のようにして推定することができる。そのアルゴリズムを図3・6のフローチャートに従って以下に示す。

- (1) 時刻 t およびそのときまでの総降雨量 R_{total} を計算するために各々に初期値 (= 0) を代入する。

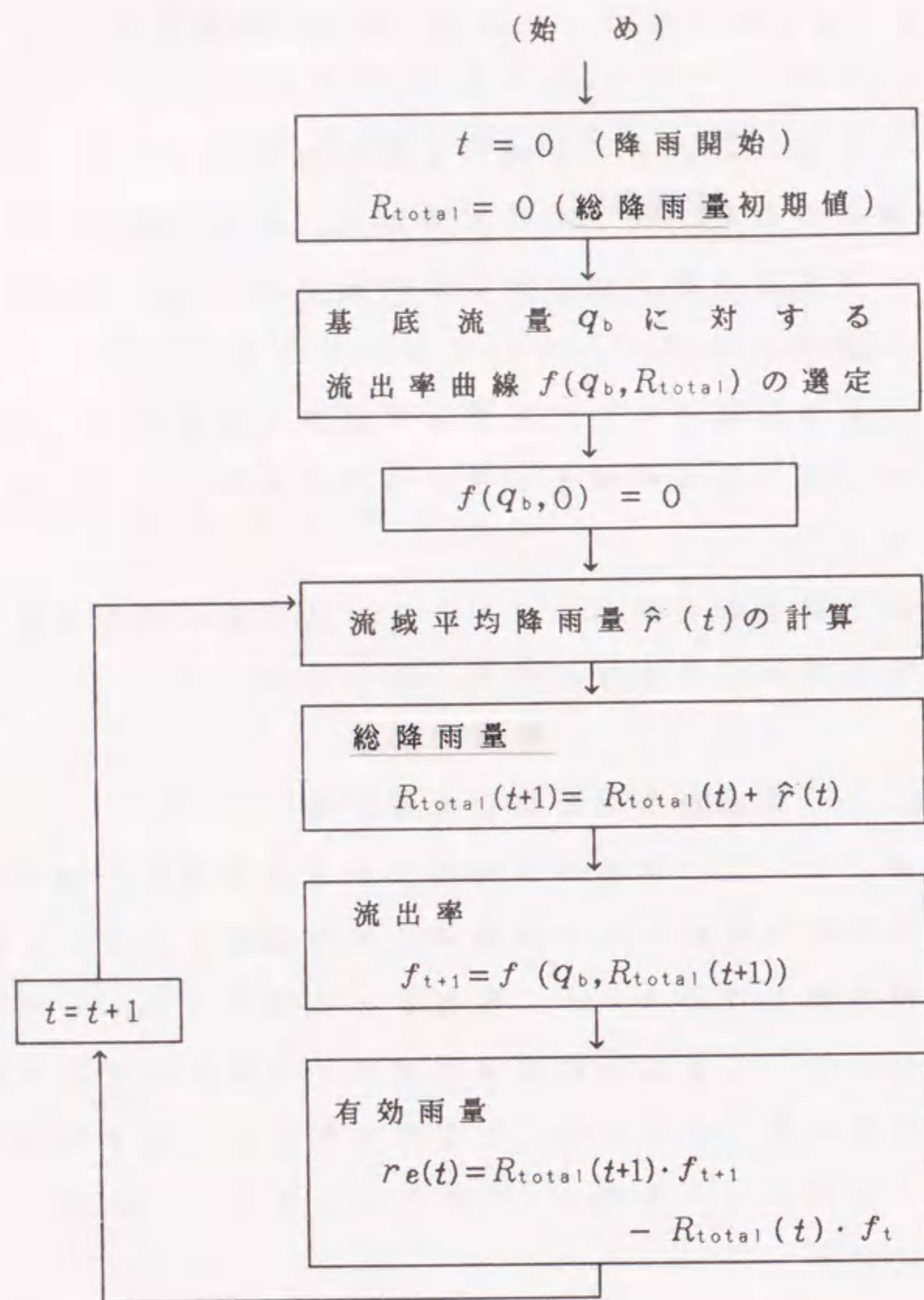


図 3・6 有効雨量時間変化の推定計算フローチャート

- (2) 降雨開始直前の河川流量を基底流量 q_b とし, この基底流量に対する流出率曲線 $f(q_b, R_{total})$ を図 3・3 から選定する.
- (3) 降雨開始直前 ($t=0$) における流出率の初期値 $f(q_b, 0) = 0$ とする.
- (4) 時刻 t から 1 時間における各雨量計観測データを用いて, ティーセン法に基づく平均雨量 $\hat{p}(t)$ [mm/h] を式 (3・1) より求める.
- (5) 時刻 ($t+1$) までの総降雨量 $R_{total}(t+1)$ を計算する.
 $R_{total}(t+1) = R_{total}(t) + \hat{p}(t)$
- (6) 時刻 ($t+1$) における流出率 f_{t+1} を $R_{total}(t+1)$ により求める.
- (7) $\hat{p}(t)$ のうち最終的に流出すると予想される有効雨量 $r_e(t)$ を次式より求める.
 $r_e(t) = R_{total}(t+1) \cdot f_{t+1} - R_{total}(t) \cdot f_t \dots (3.8)$
- (8) $t = t + 1$ とし, ステップ (4) にもどる.

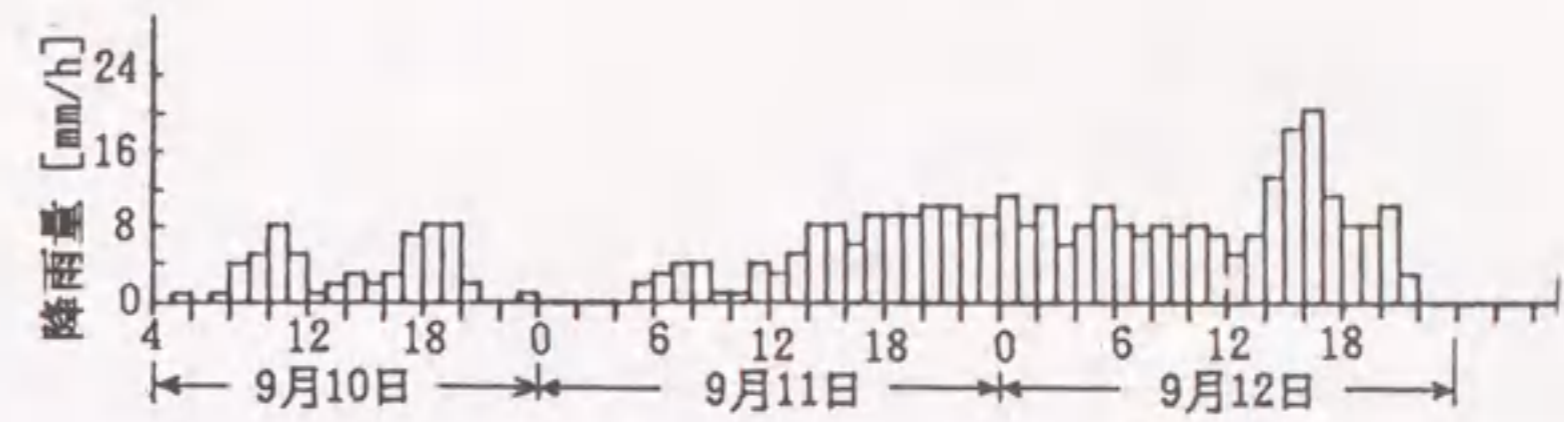
以上のステップを繰り返し, 各時間毎の流域平均降雨量に対する有効雨量を推定する.

3・4・2 有効雨量時間変動の推定例

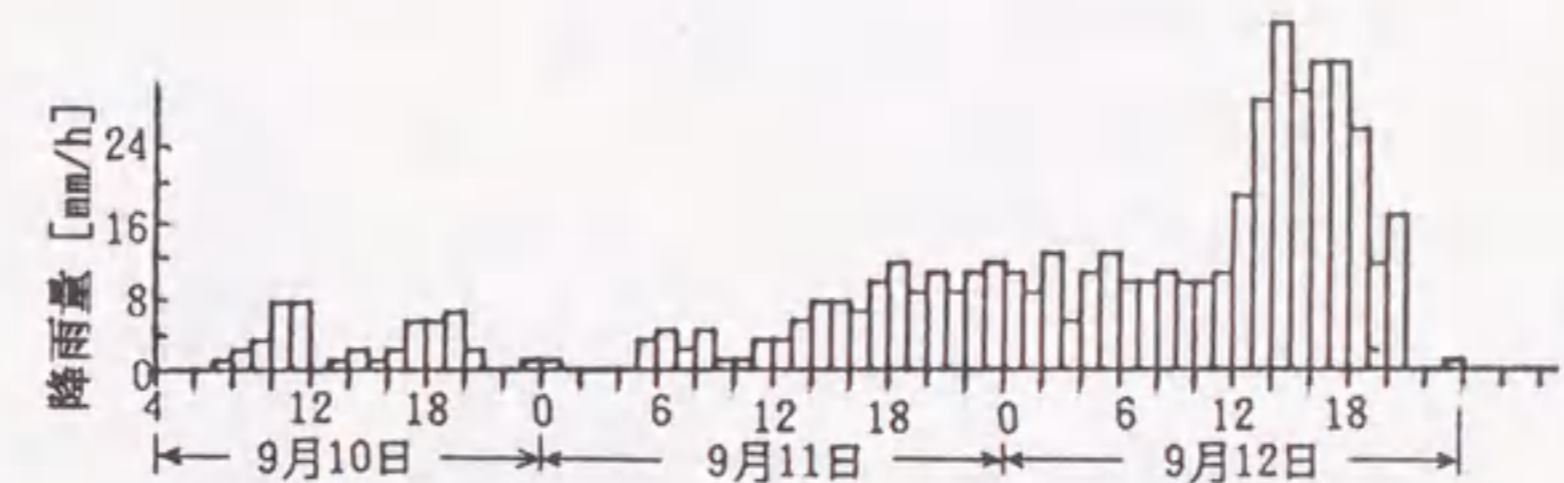
前節では, 図 3・3 に示した流出率近似曲面を用いることにより, 有効雨量の時間変動を推定する手法を示した. この近似曲面を導出するにあたっては昭和 55 年～

昭和57年前半までの降雨のデータを用いている。本節では、それ以降、すなわち昭和57年後半から昭和58年4月までの降雨に対して適用して、有効雨量の時間変動を推定した結果とその検討について述べる。

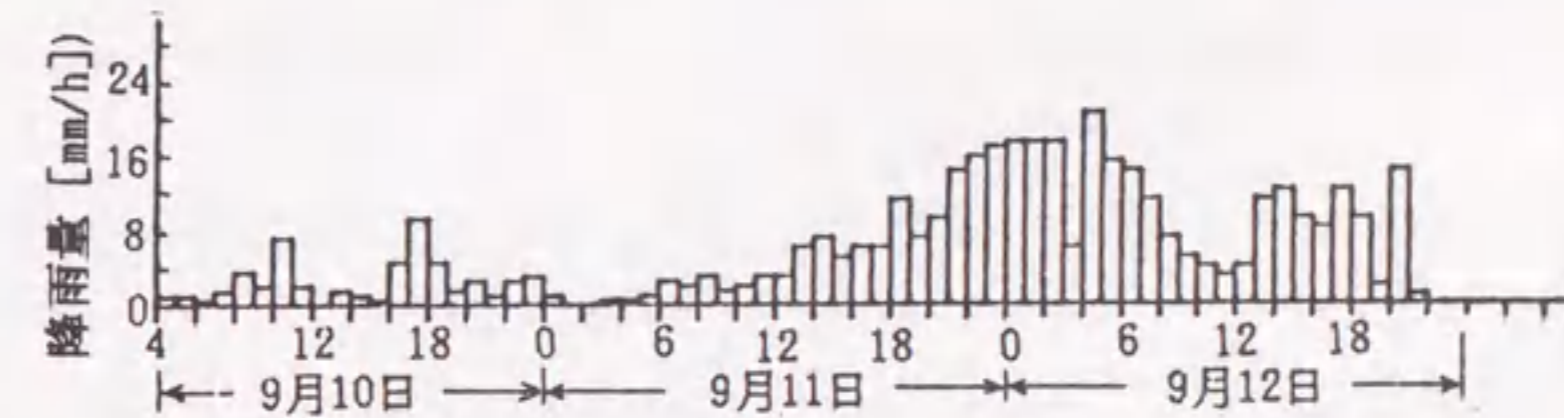
最初に、一例として昭和57年9月10日の畑一ダム上流域における降雨を取り上げる。図3・7(a)~(c)に畑一ダム上流域における4ヶ所の雨量計が観測した各時間の降雨量を示す。ただし、松峯雨量データが欠損のため得られず、これを千枚嶽雨量データに等しいものと仮定した。また、同図(d)はこれら4ヶ所の雨量データを用いることにより3・2節で述べたテイーセン法に基づいて式(3・1)から得られる平均雨量 $\hat{p}(t)$ である。降雨開始時刻($t=9月10日4時$)において河川流量 $26\text{ m}^3/\text{s}$ が実測されており、これを基底流量 Q_0 とする。図3・7の(d)に示されている1時間毎の平均雨量 $\hat{p}(t)$ を用い、図3・6のフローチャートに従って各時刻の有効雨量を推定する。その結果を図3・8に示す。図中に示す斜線部分は降雨の有効雨量成分、空白部分は損失雨量成分を表している。すなわち、毎時の降雨のうちこの斜線を施しただけの量のうち一部は溪谷の斜面を表面流となったり、他は土中を通過する中間流となったりして最終的には河川に集まってダムへ流入することになる。この意味で図3・8において斜線を施した有効雨量はこの溪谷の出水モデルに対する毎時の入力としての水量を



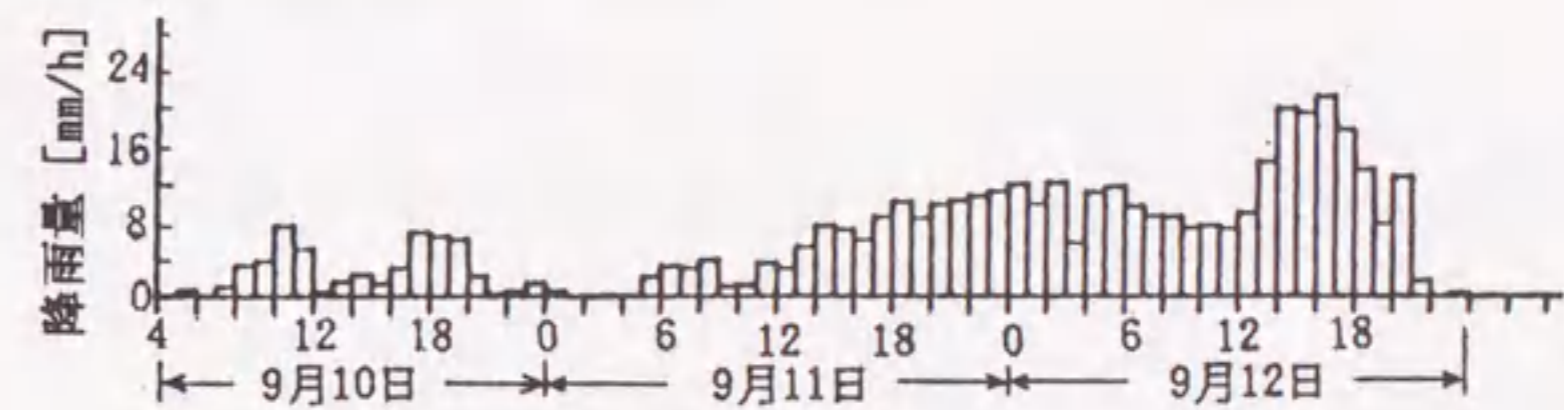
(a)松峯・千枚嶽



(b)赤石



(c)畑一ダム



(d)流域平均降雨量

図3・7 降雨観測値の時間変化(昭和57年9月10日~12日)

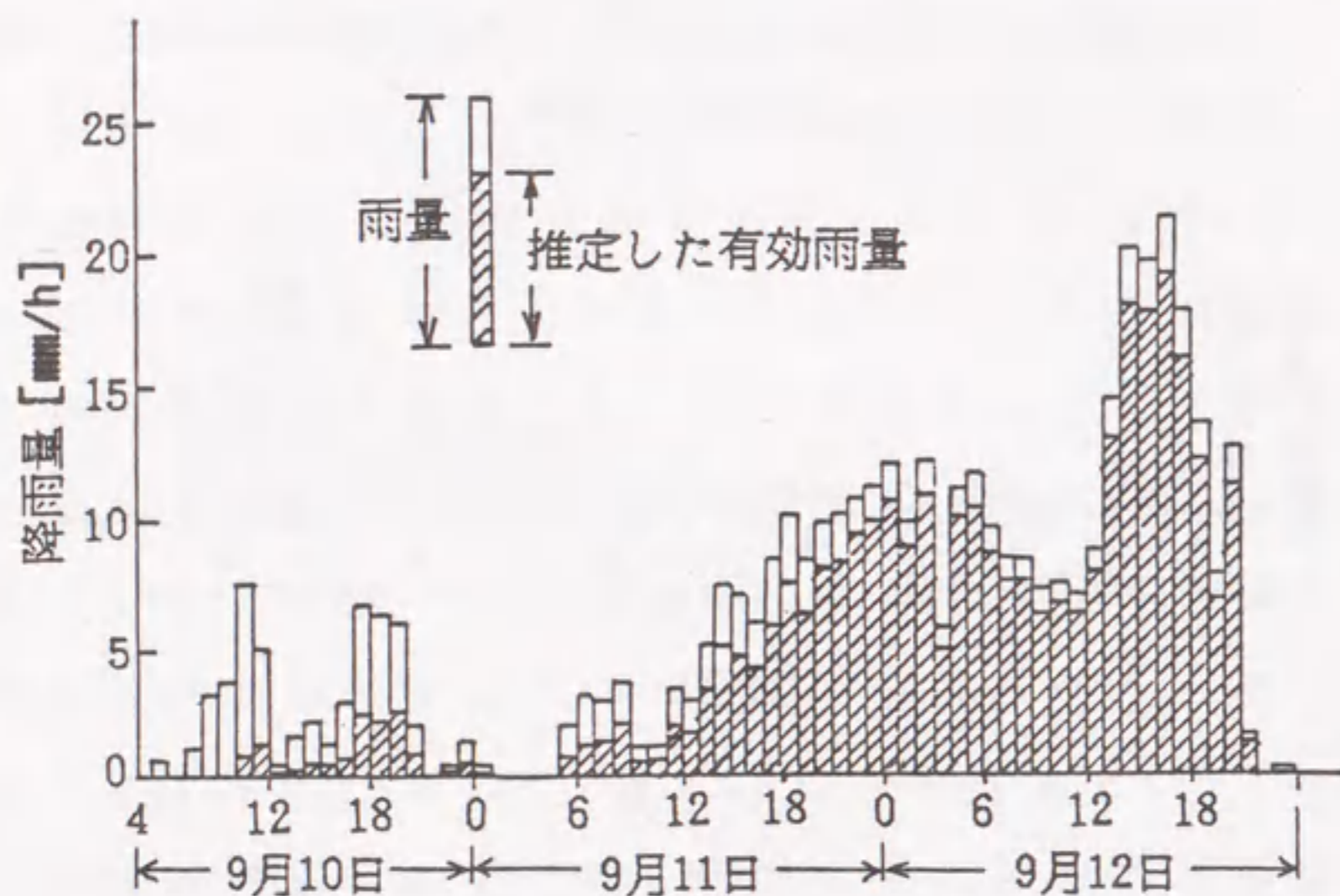


図3.8 有効雨量の時間変化の推定 (昭和57年9月10日~12日)

表しているといえる。

3.4.3 有効雨量時間変動推定結果の検討

ダム上流域の降雨のうち、実際にダムに流入する総水量の実績値は基底流量を基準としてダム流入量の増分を時間積分することにより求めることができる。そこで、図3.8のように推定された有効雨量は最終的にダムに流入するわけであるから、これを積分して求めた量を上述の実績値と比較してみた。

ダムへの流入量の実績値 $V_{real} [m^3]$ は、基底流量 $q_b [m^3/s]$ を一定値として、これより増加した流量成分の時間積分値の総和とし、次式を用いている。

$$V_{real} = \left[\int_{t_0}^{t_r} \{ q_{real}(t) - q_b \} dt \right] \times 3,600 \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

ここで、 $q_{real}(t)$ は各時刻におけるダムでの流量の観測値 $[m^3/s]$ 、 t_0 は降雨開始時刻 [時] であり、 t_r は降雨が止んだ後に $q_{real}(t)$ が q_b に近い値になる時刻 [時]、3,600 は秒を時間に換算する定数である。また、ダム流入量の予測値 $V_{fore} [m^3]$ は有効雨量 $re [mm/h]$ の時間に対する積分値と対象ダム上流域全体面積 $[km^2]$ とを用いて次式から得られる。

$$V_{fore} = \left(\int_{t_0}^{t_r} re dt \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^4 A_i \right) \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

ここで、 A_i は式(3・1)で用いたものと同じであり、 $[km^2]$ で表す。

昭和55年～昭和57年前半までの降雨において流出率を推定してある。これを用いて57年後半から58年4月までの降雨のうち流量のピークが $100 m^3/s$ 程度以上となる4例についてダムへの流入量の総量の予測を行った。予測値とその実績値とを比較した結果を表3・3に示す。これによると、ケースAおよびDで見られるように降雨量が多い場合にはその予測値は実績値に近く、ケースBやCのように降雨量が少なくダムへの流入量が少ない場合にはその予測結果は実績値からはずれている。このことは前述の推定流出率の誤差原因と同様に総降雨量が少ないときは、雨水の発散や地下水脈への浸透現象が複雑に影響しており、流出率が大きく変わるためであると考えられている。しかし、この予測結果のように河川流量の増分が多いほど、比較的正確に予測できることは水力電気を有効に利用する上で有益なことであり経済的なダム運用が実施できると考えられる。

なお、断続的な降雨の場合には降雨の休止期間中における地表や樹木の葉面からの蒸発、地中への浸透などの影響を考慮するために基底流量や総降雨量の取扱いに若干の修正が必要と思われる。しかし、本シミュレーション結果から、降雨の休止期間が10時間程度以内では本手法は特に修正することなく適用できることがわかった。

表3・3 畑窪第一ダム流入水量の総量予測値および実績値

対象降雨	基底流量 (m^3/s)	ダム流入量の総量 (m^3)		誤差 (%)
		予測値	実績値	
A 昭和57年 9月10日	26	$\times 10^6$ 100.0	$\times 10^6$ 96.0	4
B 11月22日	13	$\times 10^6$ 4.7	$\times 10^6$ 7.0	-33
C 11月29日	15	$\times 10^6$ 4.9	$\times 10^6$ 3.8	29
D 昭和58年 4月15日	28	$\times 10^6$ 51.0	$\times 10^6$ 55.0	-7

3・5 あとがき

水力エネルギーの有効利用を図るためには、発電用ダム上流域の降雨によるダムへの流入量を精度良く予測する必要がある。本章では、過去の降雨および流量データから得た流出率を総降雨量と基底流量とによって分類し、3者の関係を一つの曲面で近似的に表すことにより、流出率を推定しやすくした。具体的には大井川水系畑薙第一ダムを対象とし、流出率の推定を行うことにより、推定流出率と実測流出率との誤差を次のように小さくできた。すなわち、昭和55年～同57年前半における36例の降雨を対象として検討した。その結果、総降雨量のみ関数として流出率を表した場合の最大誤差が75%程度だったが50%程度に小さくできた。また36例のうち31例を誤差40%以内に抑えることができた。

さらに、本章では推定した流出率を用いて各時刻の降雨実測データから有効雨量成分の時間変化を明確にする手法も提案した。これにより流量の時間変動予測のモデルに対して、有効雨量をより一層直接的な入力として用いることができることとなった。具体例として示した有効雨量の時間変動の推定結果からダムへの流入量の総量を予測し、実測値との比較検討を行った。その結果、流量が多いほど、比較的正確に予測できることが確認できた。このことは水力エネルギーを有効に利用する上で有

意義なことであり、ダム運用面においても無駄な放流を防ぐことができることとなる。

第3章の文献

- (1) 電力系統の受給制御技術調査専門委員会：「電力系統の受給制御技術」電気学会技術報告 (Ⅱ部) 第302号 (1989)
- (2) 稲田, 細井, 橋本：「わかり易い土木講座16・河川」, 23 (1982) 彰国社
- (3) 岩佐：「最新土木工学シリーズ17・最新河川工学」, 49 (1979) 森北出版
- (4) 菅原：「水文学講座7・流出解析法」, (1972) 共立出版
- (5) 関根：「電力系統工学」, 203 (1966) 電気書院
- (6) 日野, 長谷部：「流出率と湿潤指標としての洪水直前流量」, 土木学会論文報告集, 第328号, 41~46 (1982)
- (7) 土木学会編：「第2編 水文編」, 昭和60年版 水理公式集 141~142 (1985) 土木学会
- (8) 岸根：「理論・応用統計学」, (1969) 養賢堂
- (9) 下垣, 磯部：「降雨流出解析手法について」, 電力と土木, No. 190, 7 (1984)
- (10) 高棹, 金丸：「水文学」, 201 (1975) 朝倉書店

- (11) 竹内, 松村, 鬼頭：「発電用ダム上流域の河川出水機構の電気回路モデル」, 昭和59年電気学会全国大会論文集, No. 895

第4章 降雨パターンに対応した出水伝達関数による流量予測

4.1 まえがき

発電用ダム上流域の水資源をできる限り無駄にすることなく、電気エネルギーに変換するためには、降雨によるダム流入量増加の総量ならびに時間的変動パターンを精度良く予測する必要がある。総量については、第3章で提案した方法で有効雨量を推定することにより、かなりの精度で予測できるようになったと考えている⁽¹⁾。

本章では、次の段階として、ダム流入量の時間変動まで含めて予測精度を向上させるために、有効雨量の時間的変化を入力とみなし、ダム流入量の時間変動を出力とみなした出水伝達関数を求めてみた。もとより一義的な伝達関数が得られる可能性は少ない⁽²⁾が、それらが個々の降雨によってどの程度異なっており、何らかの観点から平均的な伝達関数を設定できるかどうかを検討した。

大井川水系畑薙第一ダムを対象地点として、昭和55年～58年までの間の比較的総降雨量が多いもののう

ちから任意に総数26例の降雨を選び、出水伝達関数を個々の降雨毎に推定した。得られた26例の伝達関数はそれぞれ異なっているが、そのインパルス応答波形の類似性から2個のグループに分類した。

このように分類された伝達関数が降雨継続時間、総降雨量、降雨強度など降雨を特徴付けるパラメータとどのような相関関係にあるのかについて調べた。その結果、出水伝達関数のインパルス応答波形の類似性から分類した二つのグループは、継続時間と最もよく対応していることが判明した。すなわち、畑一ダム上流域では、降雨継続時間が35時間未満の場合か、あるいは35時間以上の場合かに基づいて2種類の出水伝達関数が設定できることを明らかにした。

以上の検討から、出水予測を行う場合に來るべき降雨の継続時間を予測し、それに応じて2種類の伝達関数のいずれかを選択して、出水シミュレーションを行えば、流量の時間変動パターンの予測精度の向上が図れると考えられる。この考え方に基づいて、実績降雨を出水シミュレーションの入力データとして用いることを試みた。具体的に、伝達関数の推定に用いなかった降雨14例（昭和55年～58年）に適用したところ、全体として良好な結果が得られ、本提案の有効性が示された。

4・2 伝達関数による河川出水機構のモデル化

雨量などは1時間毎の離散データとして与えられるので、ここではパルス伝達関数で出水機構を表すことにする。図4・1に示すように、各時刻 t ($= t_0 + k \cdot \Delta t$, $t_0 =$ 基準時刻, $\Delta t =$ サンプルング間隔, $k =$ 整数) において離散的に得られる有効雨量を $r_e(k)$, ダム流入量を $q(k)$, それぞれのZ変換を $Re(z)$ および $Q(z)$ で表し、次式で与えられる n 次の伝達関数 $G(z)$ を考える。

$$Q(z) = G(z)Re(z) \dots\dots\dots (4.1)$$

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots\dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots\dots + a_n z^{-n}} \dots\dots\dots (4.2)$$

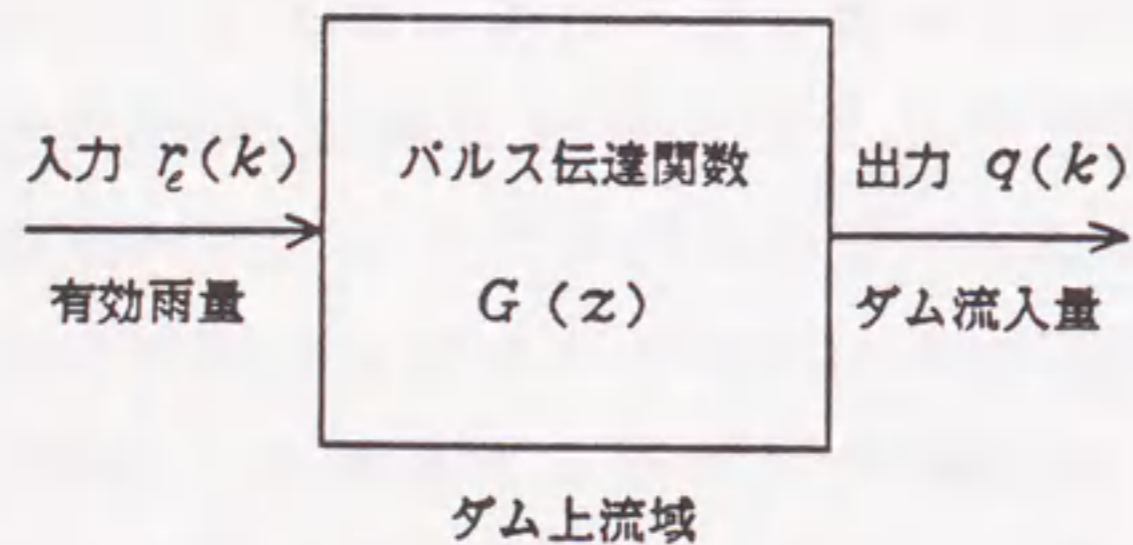


図4・1 伝達関数による河川出水機構のモデル化

式(4・2)を式(4・1)に代入し、差分方程式に変換すると、次式を得る。

$$q(k) = -a_1 q(k-1) - \dots - a_n q(k-n) + b_0 r_e(k) + b_1 r_e(k-1) + \dots + b_n r_e(k-n) \dots (4.3)$$

各時刻における降雨と流量との実測値の間に常に式(4・1)が成り立っているとは限らないので、式(4・3)も等号が必ずしも成り立っているとは言えない。そこで、検討している期間中で、式(4・3)の両辺の差が最小となるように係数パラメータ $a_1 \sim a_n$ および $b_0 \sim b_n$ を最小二乗法を用いて推定する⁽³⁾。すなわち、次に示す式(4・4)の評価関数 J_p を最小とするように、 $2n+1$ 個のパラメータを推定する。

$$J_p = \sum_{k=1}^{k_r} [q(k) - \{-a_1 q(k-1) - \dots - a_n q(k-n) + b_0 r_e(k) + b_1 r_e(k-1) + \dots + b_n r_e(k-n)\}]^2 \dots (4.4)$$

ただし、 Σ は降雨が止んだ後の流量が基底流量に近い値になる時刻 t_r まで行うものとする。すなわち、 $t_r = t_0 + k_r \cdot \Delta t$ なる関係がある。

以上の方法を、畑一ダム上流域における過去の降雨に

適用し、各降雨毎に伝達関数のパラメータを推定した。その推定結果について次節に述べる。

4.3 畑産第一ダム上流域における出水伝達関数の推定

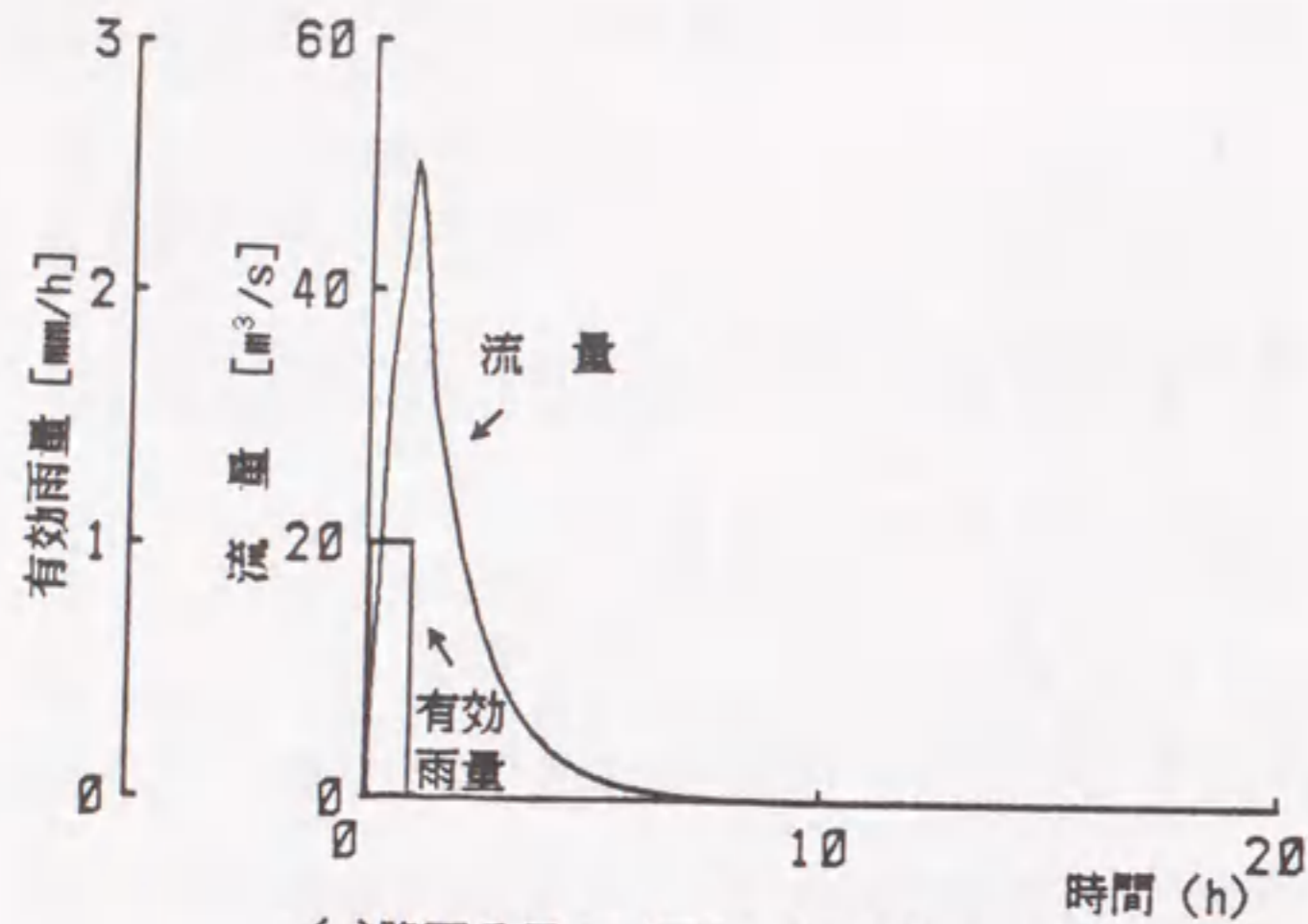
4.3.1 各降雨に対する出水伝達関数の算定

畑一ダム上流域における昭和55年～58年の降雨のうち、ここで対象とするような降雨40例の中から無作為に抽出した降雨26例（14例は後の検証に用いるため除外）について、降雨量およびダム流入量の両データを用いることにより、個々の降雨における出水伝達関数を推定した。ここでの伝達関数の次数を1次から8次まで変えてシミュレーションを行ったところ、5次以上に次数を多くしてもシミュレーション結果にはほとんど差異がないことがわかった。そこで、本論文では、伝達関数の次数を5次として検討を進める。

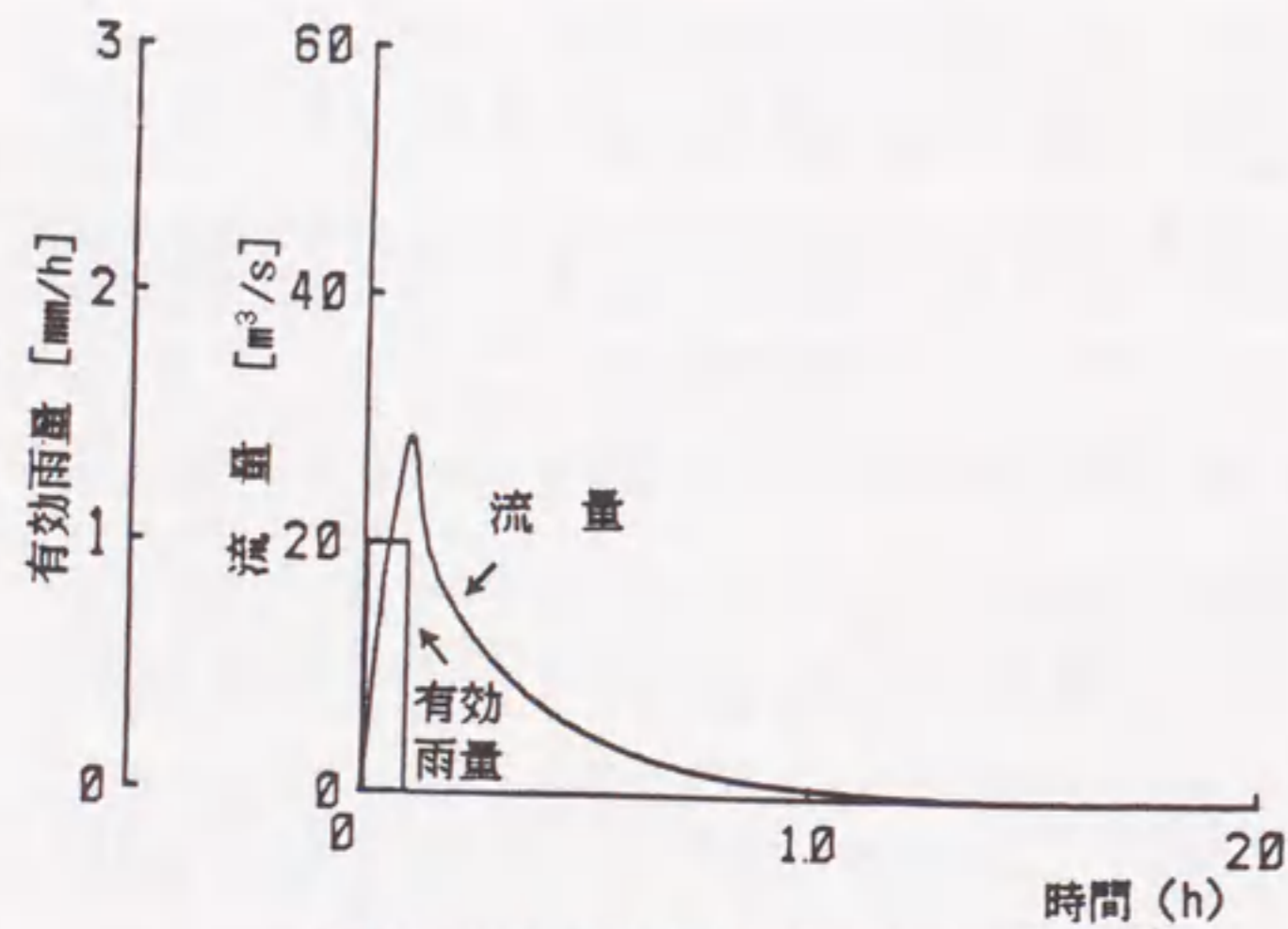
式(4.2)のような形をもつ伝達関数で、5次の場合に未知パラメータは、 $a_1 \sim a_5$ および $b_0 \sim b_5$ の11個である。抽出した26例の各降雨について求めたこれらのパラメータの値を表4.1に示す。これによると、個々の降雨に対して各パラメータ値のバラツキが大きく、符号までも異なるものがある。したがって、係数の類似

表4.1 各降雨に対する出水伝達関数のパラメータ推定値

降雨番号	降雨開始年月日	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1	55.04.06	1.20E+00	-4.69E-01	1.01E-01	1.15E-01	-2.61E-02	3.89E+00	1.91E+00	3.61E-01	3.81E+00	-2.63E+00	-5.11E-01
2	55.04.12	1.28E+00	-3.50E-01	1.38E-03	-9.52E-02	1.19E-01	1.76E+00	-1.40E+00	4.97E+00	-5.99E-01	2.94E+00	-3.63E+00
3	55.05.15	1.19E+00	5.34E-02	-3.55E-01	7.34E-02	7.39E-03	-1.55E+00	3.05E+00	2.79E+00	-1.53E+00	2.32E-01	-1.32E+00
4	55.05.25	1.02E+00	-4.06E-02	1.65E-01	-7.32E-03	1.33E-01	9.48E-01	4.03E+00	-1.82E+00	4.48E+00	-3.55E+00	8.79E-01
5	55.09.10	6.29E-01	3.90E-01	9.30E-02	-8.43E-02	-6.45E-02	1.77E+00	2.53E+00	2.11E+00	-1.04E+00	-1.27E+00	-1.19E+00
6	55.10.19	1.17E+00	-3.68E-01	2.13E-01	3.05E-02	-7.37E-02	3.27E-01	7.10E-01	1.81E-01	1.32E+00	5.75E-01	-1.15E+00
7	56.05.11	9.21E-01	5.11E-01	-8.30E-01	-1.22E-01	4.42E-01	8.57E+00	-2.29E+00	-1.12E+00	1.66E+00	2.01E+00	-8.34E-01
8	56.05.17	1.13E+00	-1.03E-01	4.11E-02	-3.68E-01	2.61E-01	1.61E+00	2.99E+00	-5.21E-01	5.52E-01	-7.61E-02	-1.45E+00
9	56.06.21	1.13E+00	-9.30E-02	-1.02E-01	-6.82E-02	9.21E-02	1.37E+00	-2.27E-01	4.04E-01	2.15E+00	1.59E+00	-2.28E+00
10	56.06.25	1.38E+00	-2.58E-01	-7.48E-02	-1.38E-01	6.85E-02	4.40E-01	2.41E-01	4.29E-01	7.32E-01	-5.36E-01	-1.70E-01
11	56.07.02	8.93E-01	3.41E-01	-1.41E-01	-2.71E-01	1.39E-01	5.41E-01	1.06E+00	6.75E-01	1.17E+00	-1.12E+00	-2.47E-01
12	56.09.03	7.50E-01	-4.10E-02	3.83E-01	-2.03E-01	3.02E-02	2.77E+00	8.99E+00	7.00E+00	-1.22E+00	-2.12E+00	-4.01E+00
13	56.10.08	8.16E-01	2.31E-01	-4.29E-02	-8.30E-02	2.95E-02	2.07E-01	3.50E+00	1.95E+00	1.09E+00	-3.14E+00	-4.51E-01
14	56.10.22	1.17E+00	-4.14E-02	4.63E-02	-2.32E-01	1.18E-01	1.54E+00	5.87E-01	1.71E+00	-1.18E+00	-1.66E+00	5.76E-01
15	57.11.02	1.05E+00	-1.53E-01	3.20E-02	2.50E-01	-1.80E-01	2.36E+00	-1.29E+00	2.42E+00	-2.87E-01	3.70E-01	-6.08E-01
16	57.05.02	1.09E+00	-4.35E-01	3.35E-01	-7.14E-02	1.67E-02	1.16E+00	1.33E+00	3.36E+00	3.46E+00	2.37E+00	1.44E+00
17	57.05.14	1.15E+00	-5.40E-02	-1.06E-02	-7.43E-01	5.67E-01	-4.20E-01	4.46E+00	4.52E+00	-3.89E+00	-1.03E-01	1.64E+00
18	57.08.26	5.80E-01	3.65E-01	1.19E-01	-1.31E-01	3.92E-02	4.22E+00	4.18E+00	5.27E+00	-5.76E+00	-4.36E+00	-1.22E+00
19	57.09.24	1.47E+00	-8.57E-01	3.97E-01	-5.96E-02	1.49E-02	4.76E-01	2.89E+00	7.28E-01	-5.60E-01	8.81E-01	-9.91E-01
20	58.04.15	9.54E-01	4.15E-01	-3.32E-01	-1.17E-01	4.39E-02	1.88E+00	2.09E+00	1.61E-01	8.21E-01	-2.15E+00	2.53E-01
21	58.05.06	5.89E-01	1.39E-01	1.50E-01	-1.41E-01	1.81E-01	1.93E+00	4.25E+00	4.49E+00	1.74E+00	-2.88E+00	-5.35E-01
22	58.05.15	9.41E-01	2.39E-01	-4.56E-01	9.70E-02	1.18E-01	2.49E+00	2.57E+00	1.57E+00	-5.04E-02	-4.07E-01	-1.21E+00
23	58.06.20	5.94E-01	3.83E-01	-5.94E-02	-6.99E-02	7.39E-02	1.84E+00	3.84E+00	7.57E+00	2.99E-01	-3.26E+00	-3.60E+00
24	58.07.20	9.49E-01	-1.73E-01	-3.53E-02	6.66E-02	1.10E-01	3.61E-01	1.06E+00	2.36E-01	1.19E+00	1.64E+00	-3.54E-01
25	58.09.26	1.09E+00	-4.93E-01	3.82E-01	-1.68E-01	6.53E-02	8.21E-02	-1.73E+00	-4.62E-01	2.08E+00	9.99E+00	-2.78E+00
26	58.10.08	8.89E-01	1.77E-01	-2.82E-01	1.35E-01	1.66E-02	6.48E-01	8.68E-01	1.64E+00	-1.10E+00	1.59E+00	-1.47E+00



(a)降雨番号1 (昭和55年4月6日の降雨)



(b)降雨番号5 (昭和55年9月10日の降雨)

図4・2 出水伝達関数のインパルス応答曲線

性から伝達関数を導くことができない。そこで、各降雨毎に求めた伝達関数のインパルス応答波形の類似性を調べてみた。インパルス応答曲線の典型例を図4・2に示す。ここでの表示は、すでに求めた伝達関数で表される応答であるから単位の、すなわち1mmの有効雨量が1時間続いたときの河川流量曲線を示している。図4・2(a)は表4・1の降雨番号1のもの、同図(b)は降雨番号5のものである。前者はピーク値が大きく比較的早期に流出が終るもの、後者はピーク値が小さく長期にわたり流出が続くものである。他のインパルス応答もこのような視点から分類することができた。すなわち、畑一ダム上流域における河川出水機構を単一の伝達関数でモデル化することは困難であると言える。

4・3・2 出水伝達関数のグループ分け

降雨26例に対して得られた河川出水伝達関数をそのインパルス応答波形の類似性から数個のグループに分類することを試みた。すなわち、クラスタ分析法⁽⁴⁾により、求めた26本のインパルス応答曲線相互の相関係数の値が1.0に近いもの、言い換えれば、曲線形状の似かよったグループに伝達関数を分けた。グループ数を2個とした場合の結果を表4・2に示す。クラスタグループ①には8例の降雨が、クラスタグループ②には18例の降雨が属している。クラスタ分析では、グループ数を

任意に与えることができる。しかし、グループの個数を3以上にすると、各グループの自然現象に対する大局的特徴を明確に知ることが難しく、次節で述べるような降雨を特徴付ける特性との依存性の有無についても判断が困難であった。本章では、そのような降雨特性との関連をとりながら、結局、分類個数を2個とした場合のクラスタ分類結果について検討を行う。

表4・2 出水伝達関数のクラスタ分類結果

分類 個数	クラス グループ	降雨のケース番号
2 個	①	1, 7, 8, 12, 17, 18, 22, 23
	②	2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 13 14, 15, 16, 19, 20, 21, 24, 25, 26

4・4 出水伝達関数の降雨パターン依存性に関する検討

4・4・1 伝達関数の降雨パターン依存性

出水機構は雨の降り方や土地の湿潤状況によって異なっており、その伝達関数もそれに応じて変化しているものと考えられる。しかしながら、土地の湿潤状況については第3章に示したように、有効雨量を求める段階ですでに考慮に入れている⁽¹⁾。前節で求めた伝達関数には、有効雨量を入力としているので、流域の湿潤状況などの影響は排除されていることになる。そこで、ここでは出水伝達関数と雨の降り方との関係を調べることにした。そのために、降雨継続時間、総降雨量、有効雨量の総量、降雨強度（総降雨量／降雨継続時間）および有効雨量強度（有効雨量の総量／降雨継続時間）という5種類の数値に着目した。これらの各数値に対して、クラスタグループ毎にそれぞれ属する降雨の累積度数分布を求めた。その結果を図4・3～図4・7に示す。なお、累積度数は次式で計算している。

累積度数 =

グループに属する降雨のうち横軸の値以上の降雨の数

グループに属する全降雨数

$$\times 100 \% \dots (4.5)$$

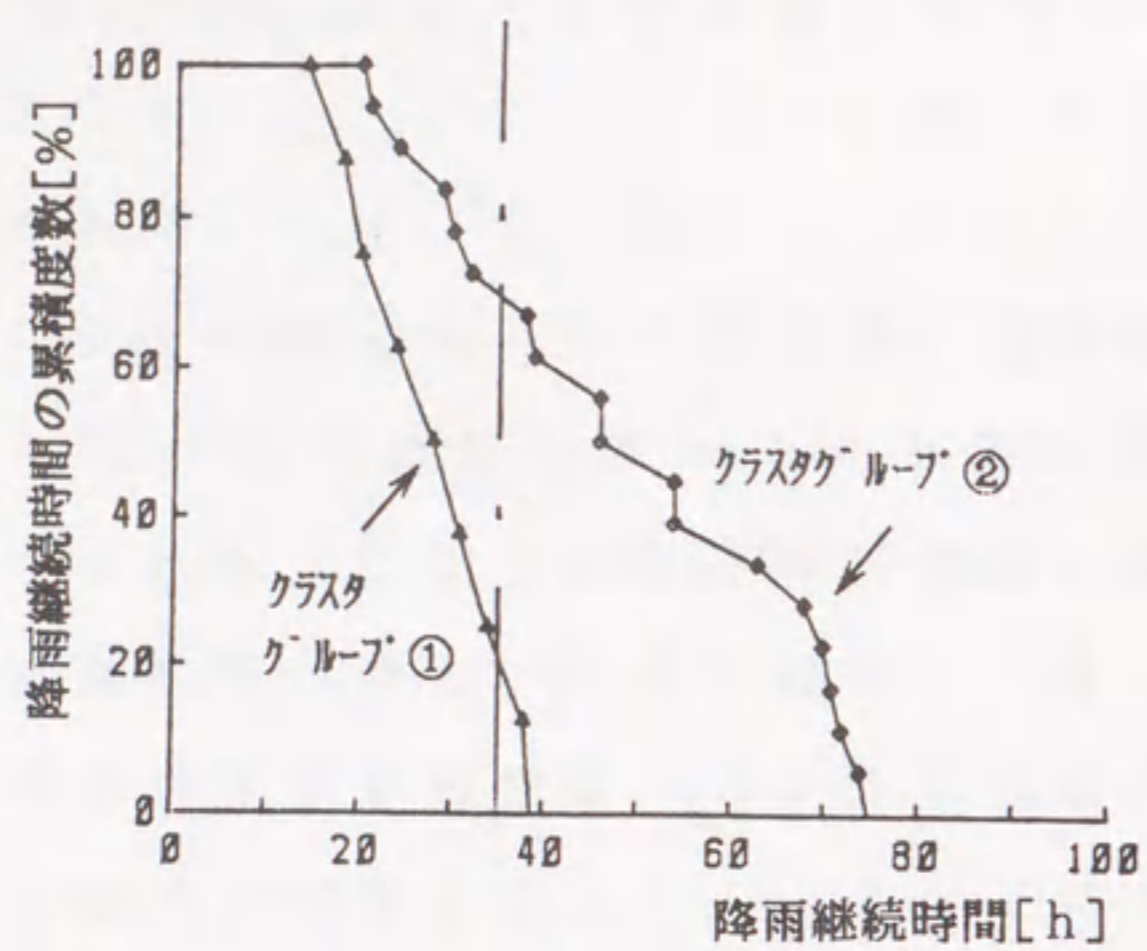


図4.3 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する降雨継続時間の累積度数分布

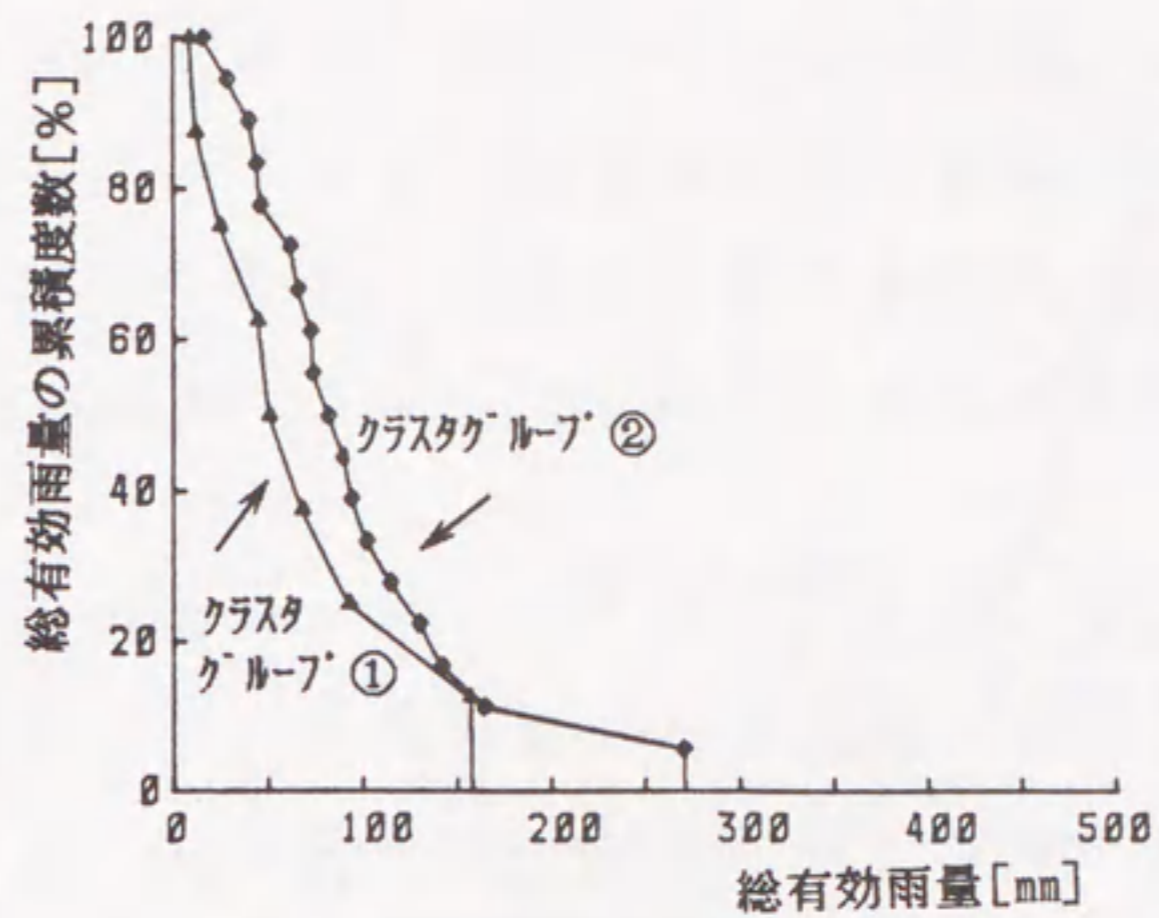


図4.5 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する総有効雨量の累積度数分布

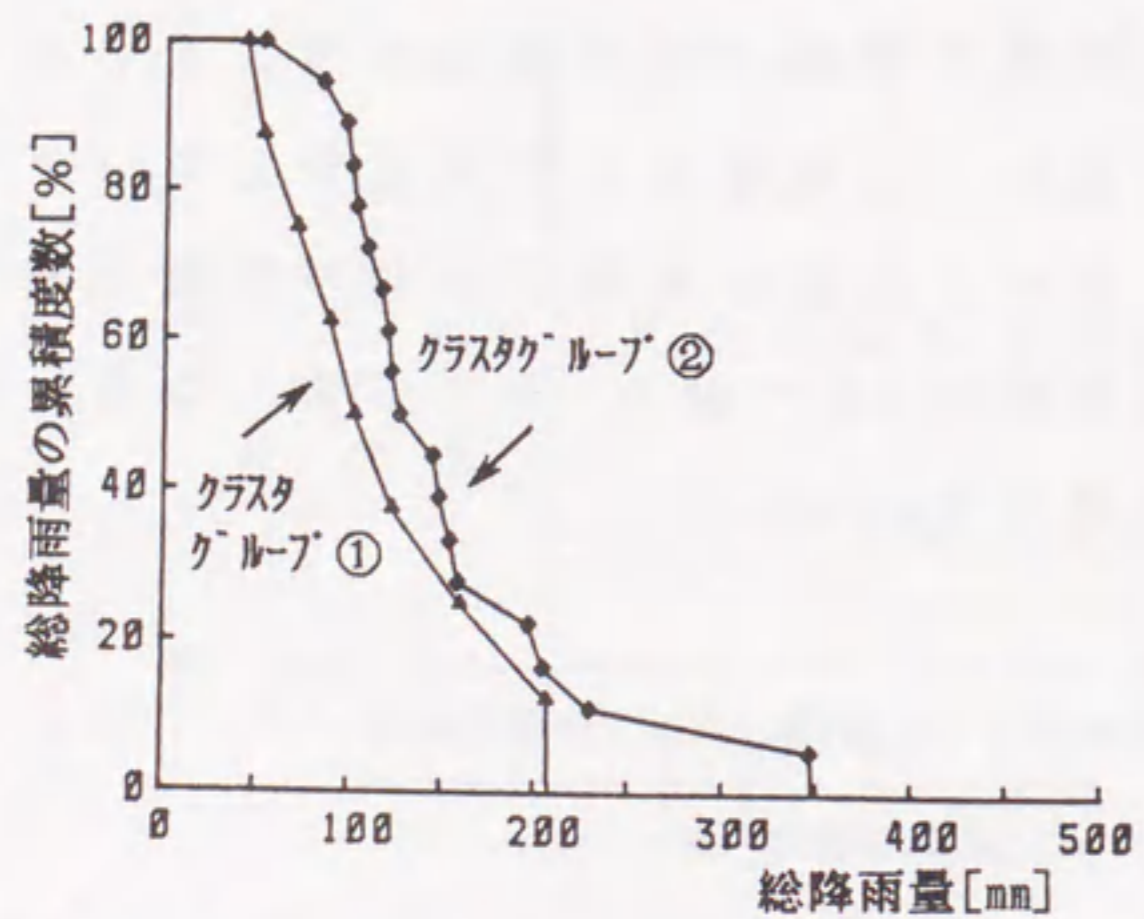


図4.4 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する総降雨量の累積度数分布

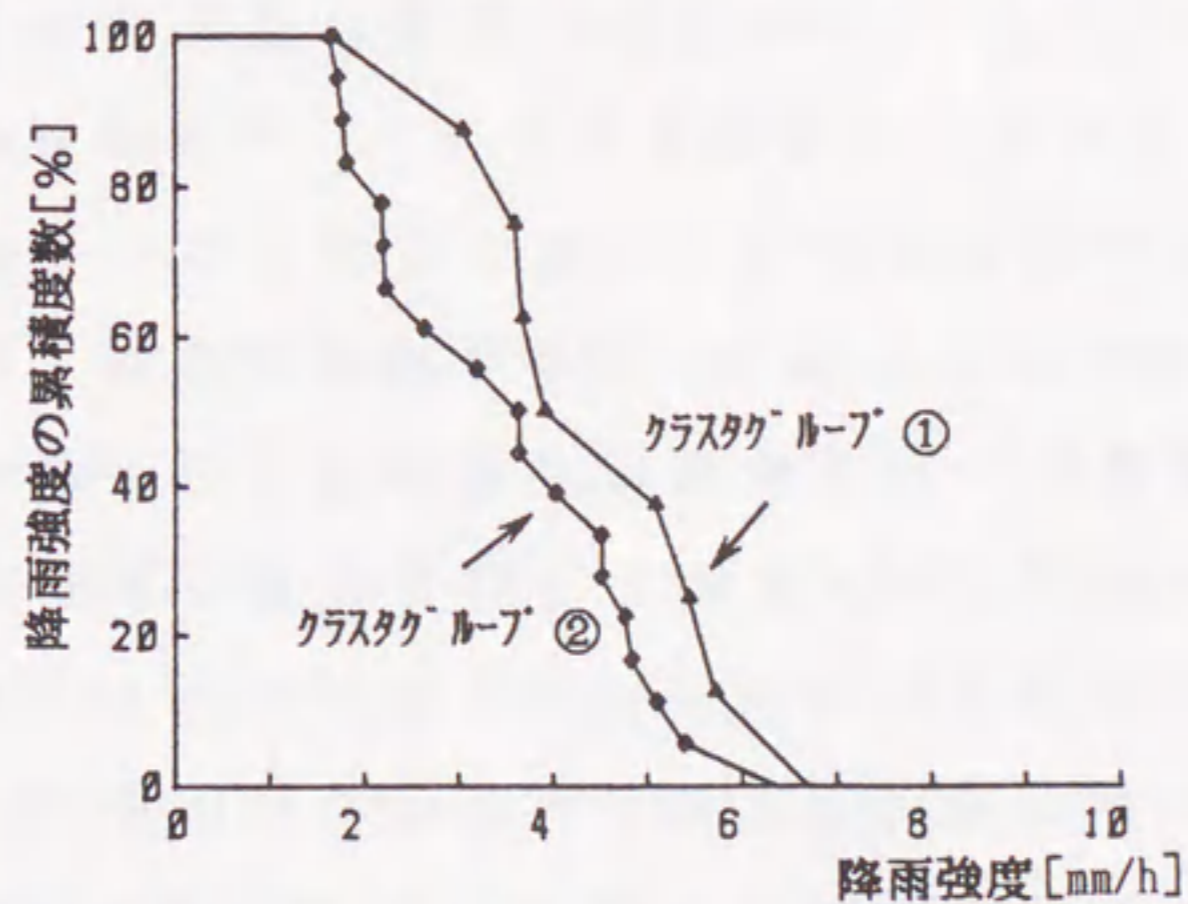


図4.6 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する降雨強度の累積度数分布

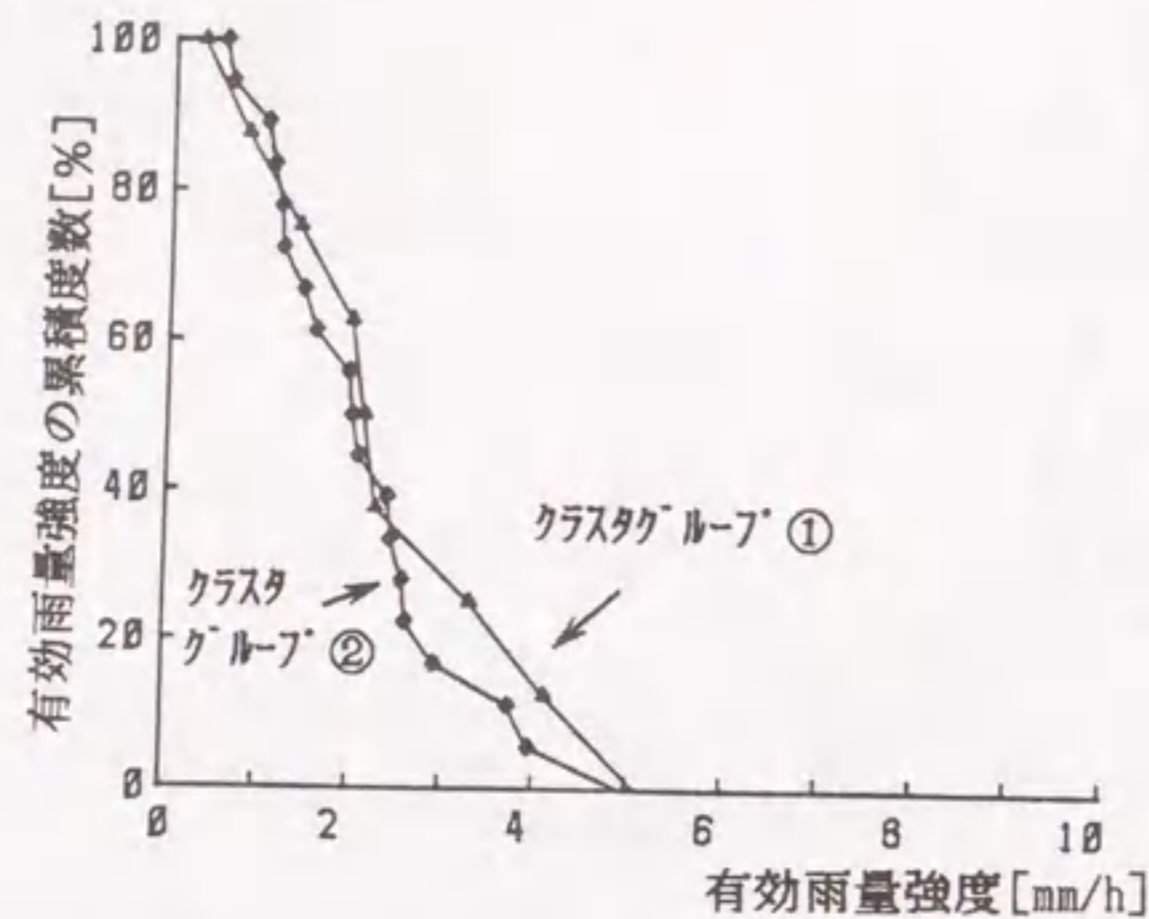


図4.7 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する有効雨量強度の累積度数分布

これらの図のうち、二つの曲線が明瞭に離れているのは図4.3のみである。この図において、二つの累積度数分布曲線間は降雨継続時間35時間の位置において最も大きく離れている。そこで、同図の降雨継続時間35時間（同図一点鎖線）に着目すれば、それ以上の継続時間の降雨はクラスターグループ①には20%程度しか属していないが、グループ②には70%程度属している。すなわち、クラスターグループ①は35時間未満の比較的短時間の降雨に対する伝達関数であり、グループ②は35時間以上の長時間降り続く降雨に対する伝達関数であると

言える。

他方、図4.4～図4.7においては、クラスターグループ①および②はともに似かよった累積度数分布を示している。すなわち、これらの図で横軸にとりあげた諸量値によっては、グループ①および②を特徴付けることはできない。

以上の検討から、畑一ダム上流域における出水伝達関数は主として降雨継続時間の長短によって分類できるといえる。したがって、降雨を35時間を境として、

短時間降雨パターン：35時間未満の比較的短時間で終る降雨

長時間降雨パターン：35時間以上の比較的長時間続く降雨

の長短二つに分類し、それに応じた出水伝達関数を用いることにより、精度の高い河川出水予測のシミュレーションを行うことができると考えられる。

4.4.2 降雨継続時間に対応した出水伝達関数

前節のような継続時間による降雨の分類と表4.2のクラスター分類との対応を表4.3に示す。同表をクラスター分類から見ると、クラスターグループ①には全体で8例の降雨が属し、そのうち短時間降雨パターンに対応するものが7例と多い。また、クラスターグループ②には全体で18例が属し、そのうち長時間降雨パターンに対応す

表4・3 出水伝達関数のクラスタ分類と
降雨パターン分類との対応

クラス グループ	降雨パターンに対応する降雨数	
	短時間降雨パターン (35時間未満の降雨)	長時間降雨パターン (35時間以上の降雨)
①	7例	1例
②	6例	12例

るものが12例と多い。

他方、同表をマトリックスと見なせば、対角要素については上述のように短時間降雨パターンにはクラスタグループ①の伝達関数を対応させ、長時間降雨パターンにはクラスタグループ②を対応させればよいことになる。問題は非対角要素のうち左下の6例の処理である。しかし、予測という立場に立つと、降雨パターンから伝達関数を選択できる方が望ましいので、第1列に属する全13例の平均伝達関数を求めて短時間降雨パターンに対応した伝達関数とし、これを短時間降雨伝達関数という

ことにする。次に、第2行第2列にあるクラスタグループ②の12例の平均伝達関数を求めて長時間降雨パターンに対応した伝達関数とし、これを長時間降雨伝達関数ということにする。降雨継続時間に対応して得られた出水伝達関数のパラメータ推定結果を表4・4に示す。伝達関数の形であらわに示したものが式(4・6)および式(4・7)で、本章ではこのような伝達関数を用いることにして、以下の検討を進めた。

短時間降雨伝達関数：

$$G(z) = \frac{2.17 + 2.90z^{-1} + 2.56z^{-2} - 0.136z^{-3} - 1.31z^{-4} - 0.919z^{-5}}{1 + 0.990z^{-1} - 0.0329z^{-2} - 0.0153z^{-3} - 0.132z^{-4} + 0.130z^{-5}} \dots\dots\dots (4.6)$$

長時間降雨伝達関数：

$$G(z) = \frac{0.878 + 0.863z^{-1} + 1.31z^{-2} + 0.364z^{-3} + 1.04z^{-4} - 1.00z^{-5}}{1 + 1.02z^{-1} - 0.0514z^{-2} + 0.00126z^{-3} - 0.0719z^{-4} + 0.0469z^{-5}} \dots\dots\dots (4.7)$$

表4.4 降雨継続時間に対応した出水
伝達関数のパラメータ推定値

伝達関数のパラメータ	短時間 伝達関数	長時間 伝達関数
Q_1	9.90E-01	1.02E+00
Q_2	-3.29E-02	-5.14E-02
Q_3	-1.53E-02	1.26E-03
Q_4	-1.32E-01	-7.19E-02
Q_5	1.30E-01	4.69E-02
b_0	2.17E+00	8.78E-01
b_1	2.90E+00	8.63E-01
b_2	2.56E+00	1.31E+00
b_3	-1.36E-01	3.64E-01
b_4	-1.31E+00	1.04E+00
b_5	-9.19E-01	-1.00E+00

4.5 分類された伝達関数の有効性の検証

前節で伝達関数の推定に用いなかった別の降雨14例について、表4.5に示すようにその継続時間が35時間未満のものと以上のものとに分類し、前者には短時間降雨伝達関数を、後者には長時間降雨伝達関数を適用して出水シミュレーションを行った。短時間降雨パターン例を図4.8～図4.14、長時間降雨パターン例を図4.15～図4.21にそれぞれ示す。

このような降雨パターンに対応する伝達関数を用いてシミュレーションを行うことが有効な方法であることを次のようにして検証した。すなわち、上述の14例の降雨について、故意に、降雨パターンに対応しない伝達関数（すなわち、継続時間が35時間未満の降雨に対して長時間降雨伝達関数、35時間以上の降雨に対して短時間降雨伝達関数を適用）および26例全体の平均伝達関数をも用いて出水シミュレーションを行い、上述の結果と比較した。具体的には、シミュレーション誤差 ϵ_0 を(4.8)式を用いて求め、その値がここで述べるような降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合に最小になっているかを検討した。

表4・5 出水シミュレーションに用いた降雨

降雨 番号	降雨開始 年月日	降雨時間 [h]	降雨 パターン
27	55.07.07	34	短 時 間 降 雨
28	55.07.14	11	
29	55.08.26	30	
30	57.11.22	13	
31	57.11.29	13	
32	58.04.22	13	
33	58.07.05	16	長 時 間 降 雨
34	55.06.07	59	
35	56.08.21	39	
36	57.05.31	77	
37	57.09.10	68	
38	57.09.19	38	
39	57.11.09	46	
40	58.08.14	93	

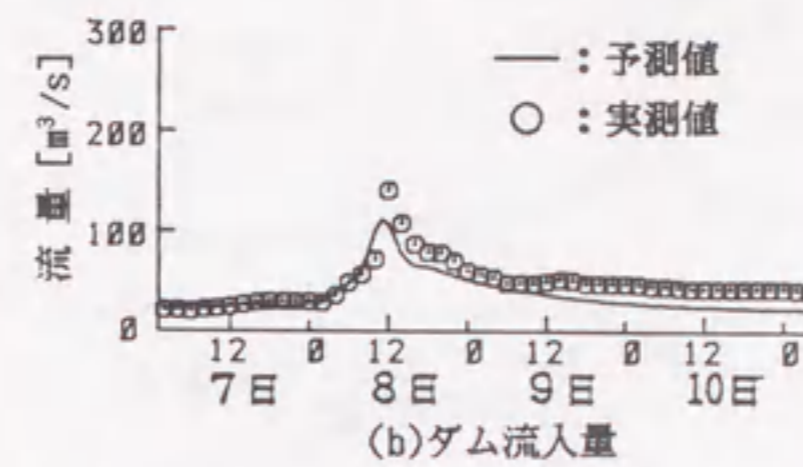
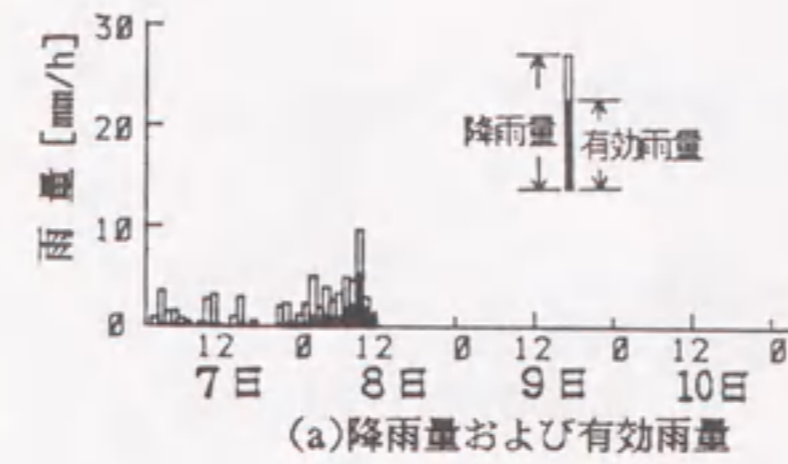


図4・8 短時間降雨による流量予測例
(降雨番号27, 昭和55年7月7日)

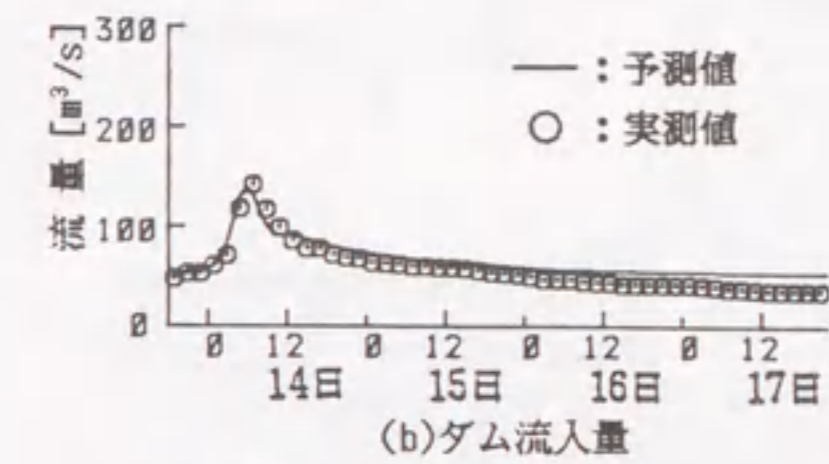
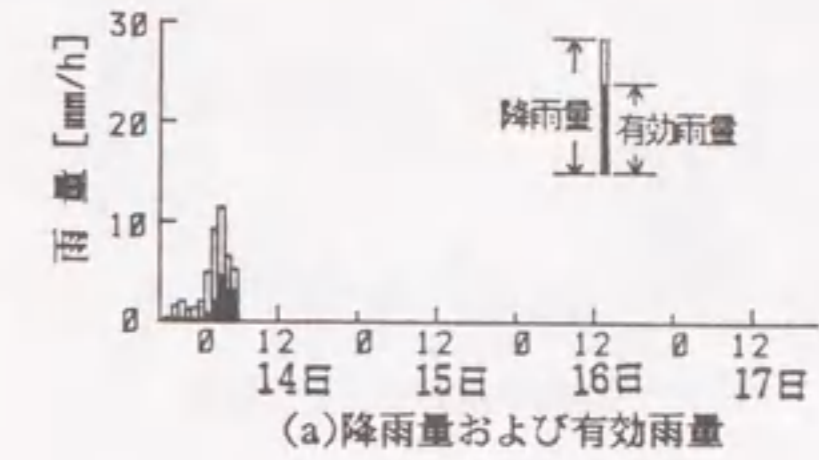


図4・9 短時間降雨による流量予測例
(降雨番号28, 昭和55年7月14日)

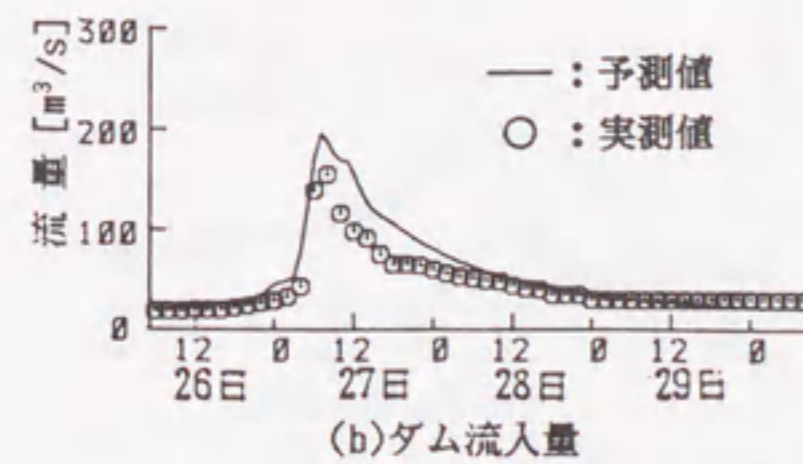
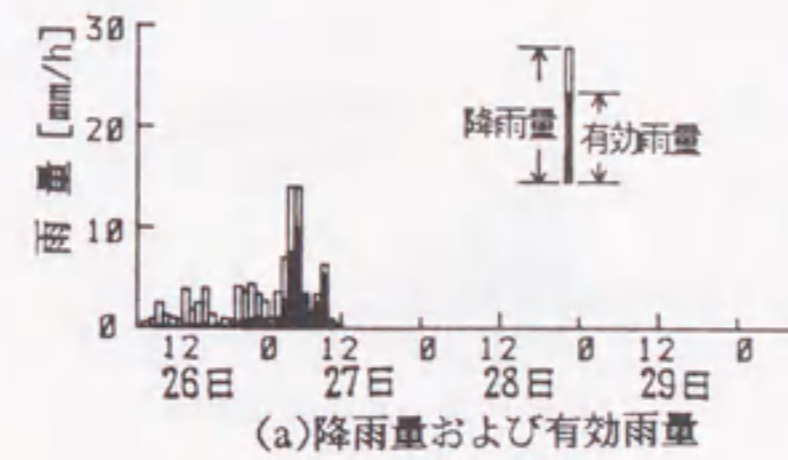


図4・10 短時間降雨による流量予測例
(降雨番号29, 昭和55年8月26日)

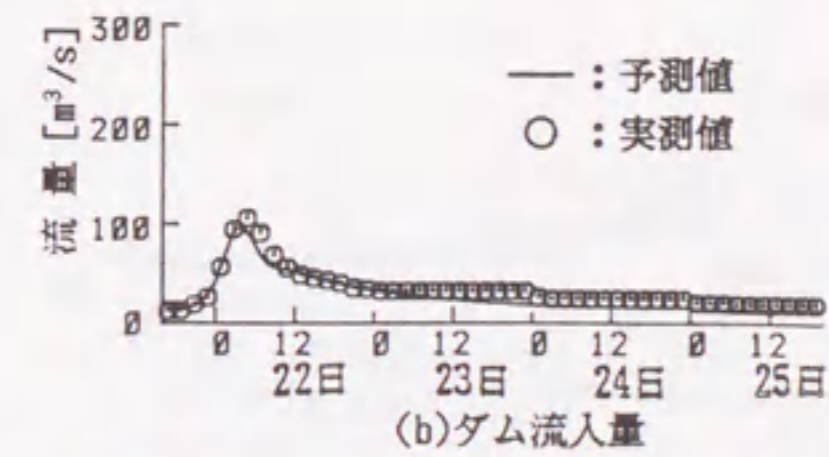
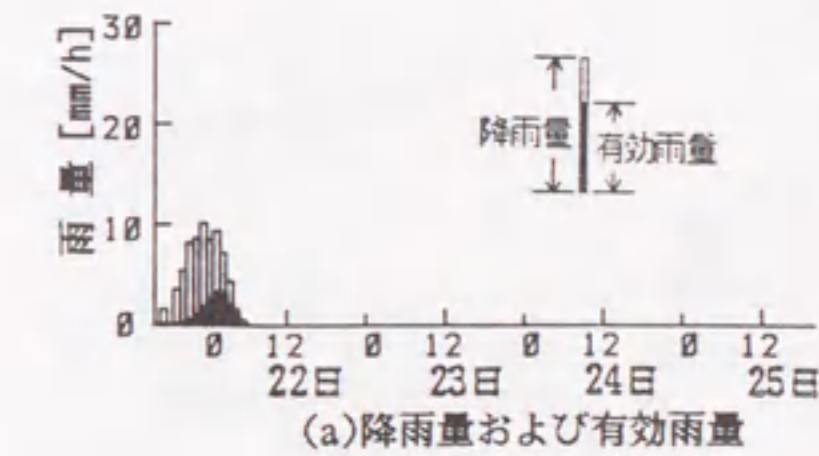


図4・11 短時間降雨による流量予測例
(降雨番号30, 昭和57年11月22日)

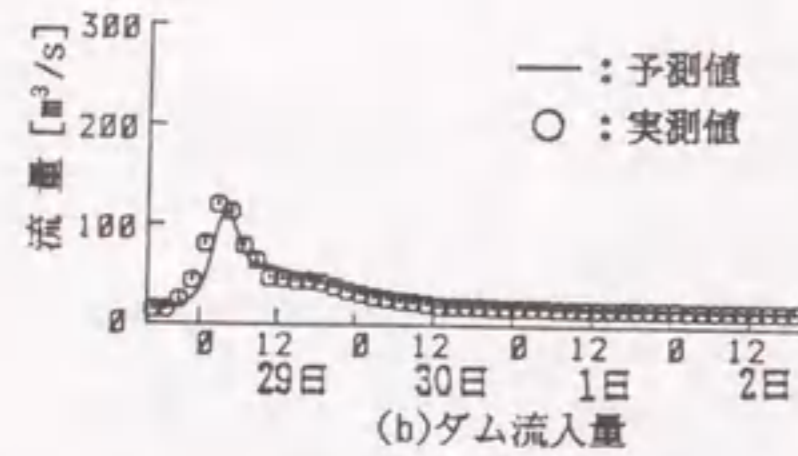
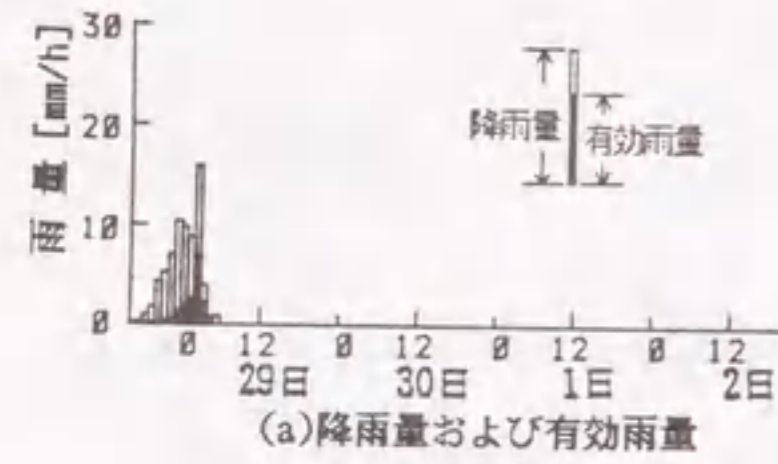


図4-12 短時間降雨による流量予測例
(降雨番号31, 昭和57年11月29日)

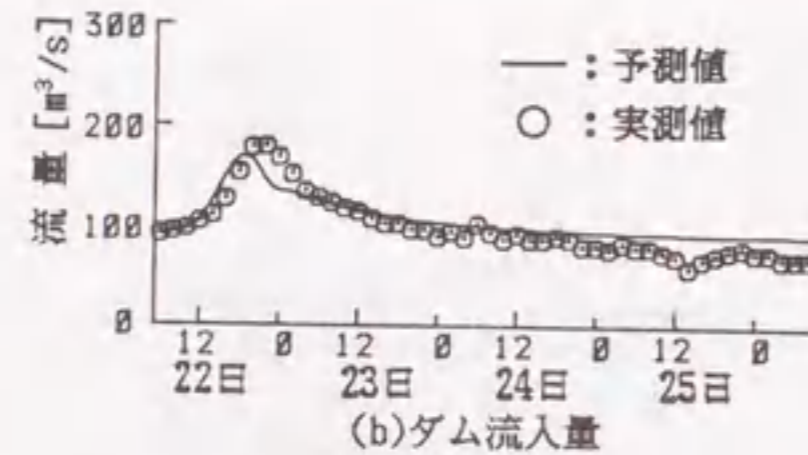
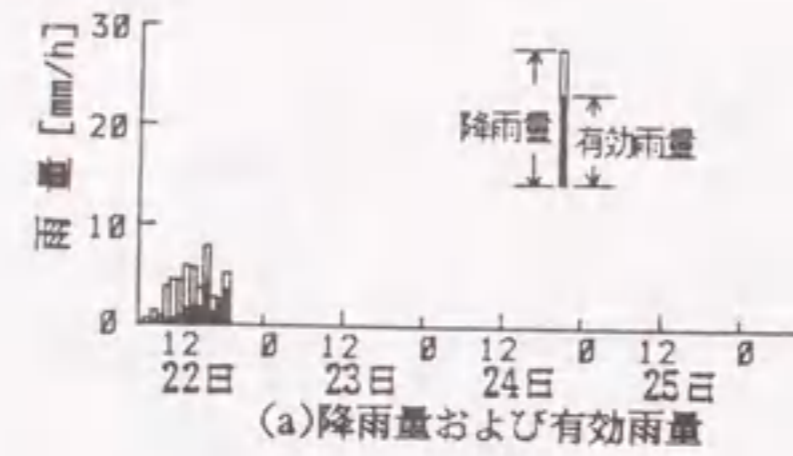


図4-13 短時間降雨による流量予測例
(降雨番号32, 昭和58年4月22日)

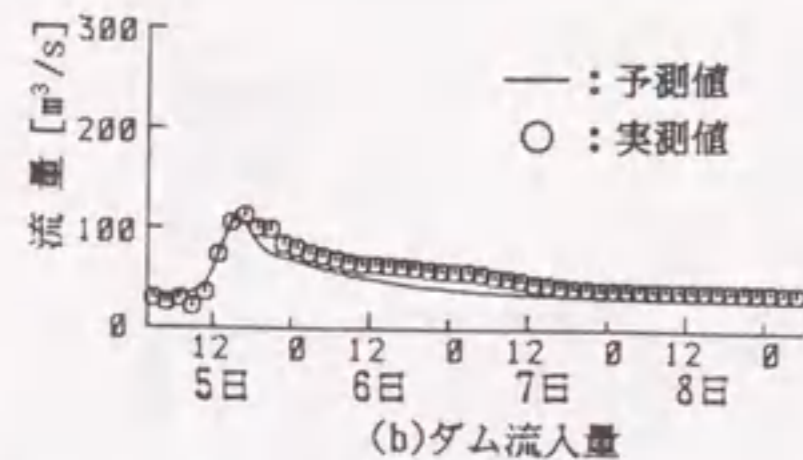
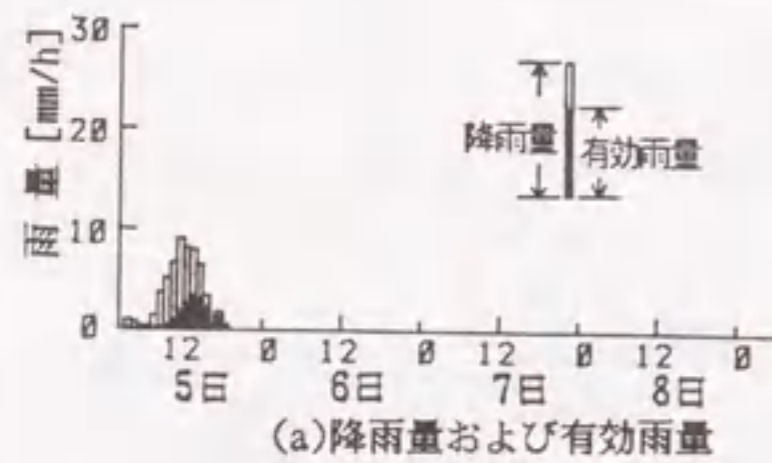


図4-14 短時間降雨による流量予測例
(降雨番号33, 昭和58年7月5日)

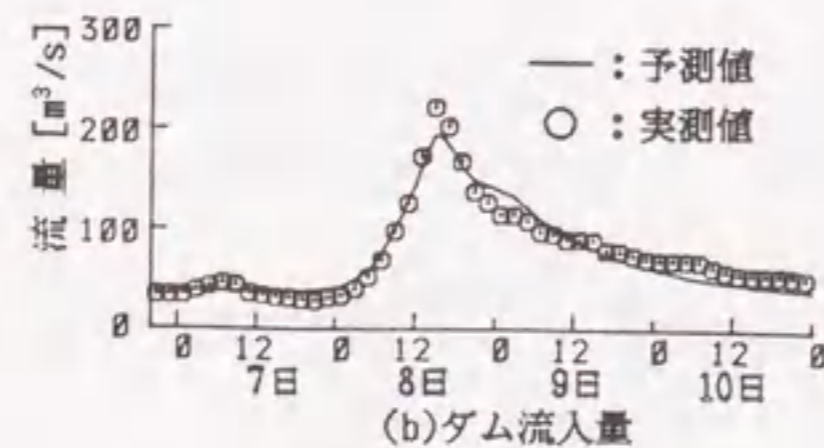
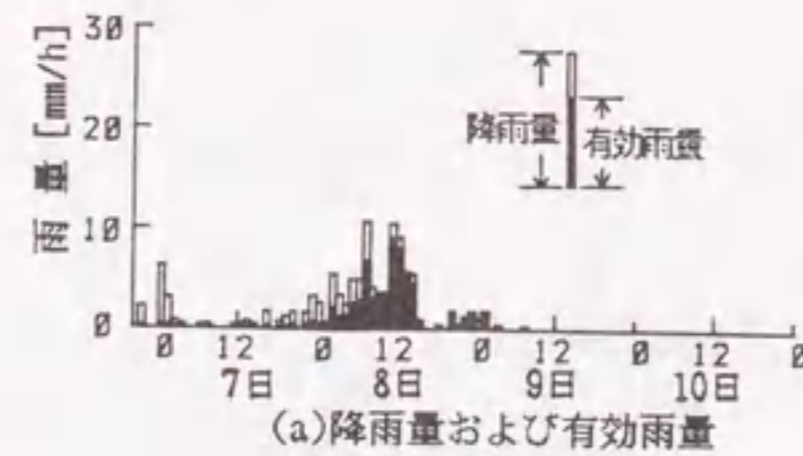


図4-15 長時間降雨による流量予測例
(降雨番号34, 昭和55年6月7日)

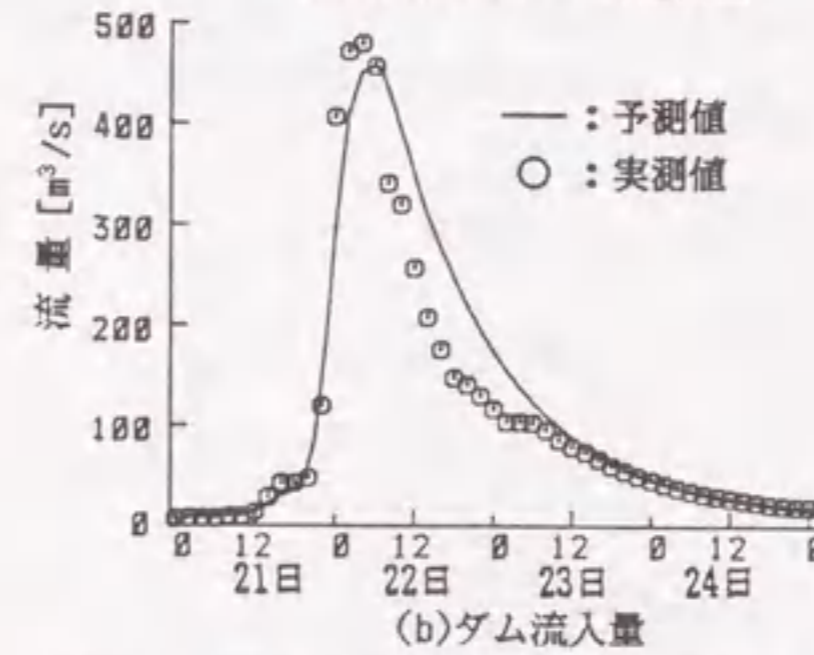
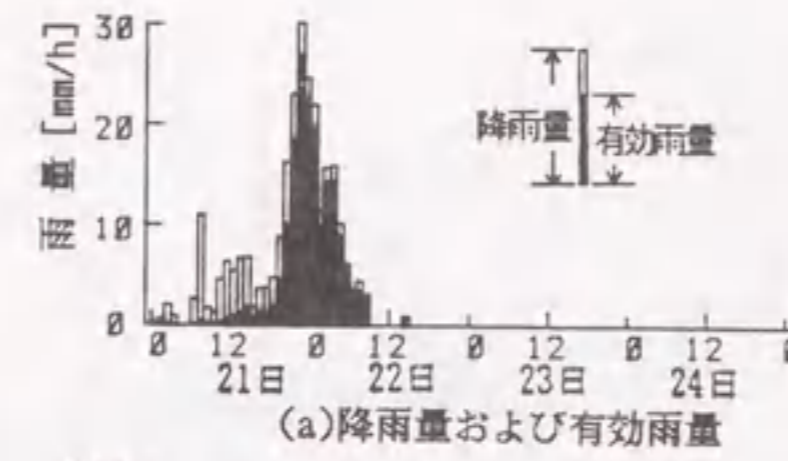


図4-16 長時間降雨による流量予測例
(降雨番号35, 昭和56年8月21日)

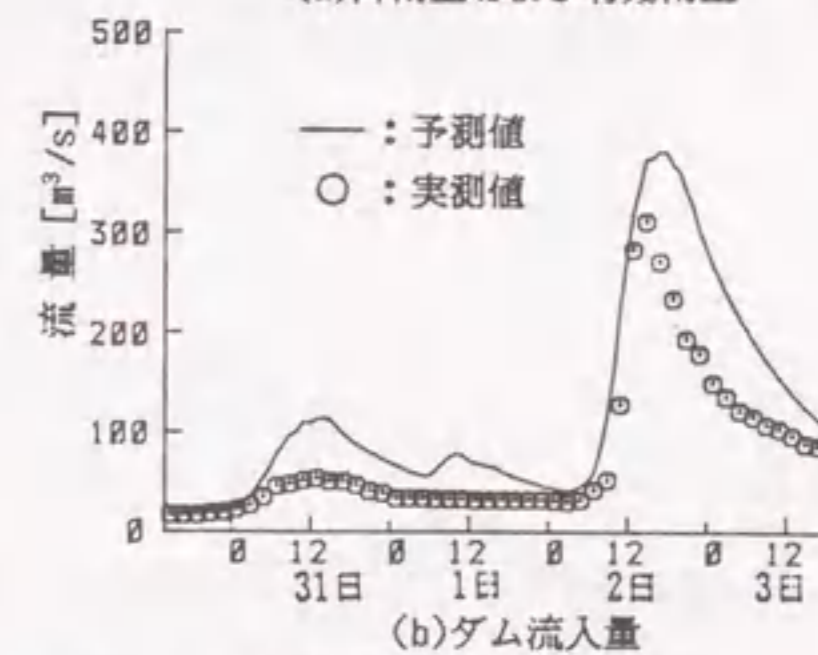
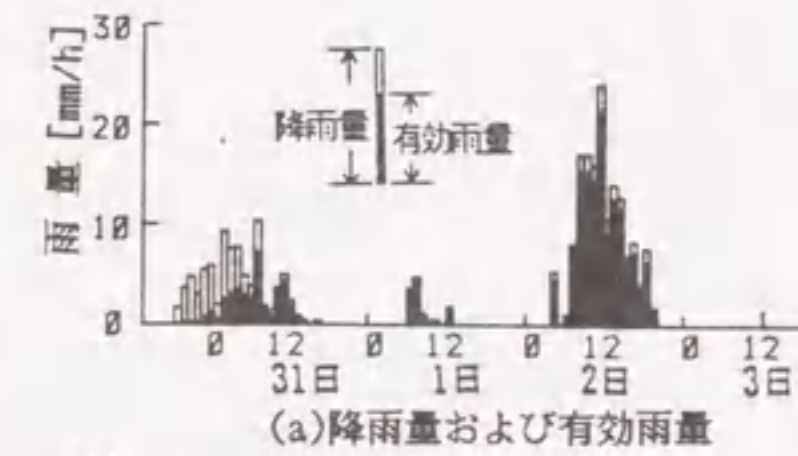


図4-17 長時間降雨による流量予測例
(降雨番号36, 昭和57年5月31日)

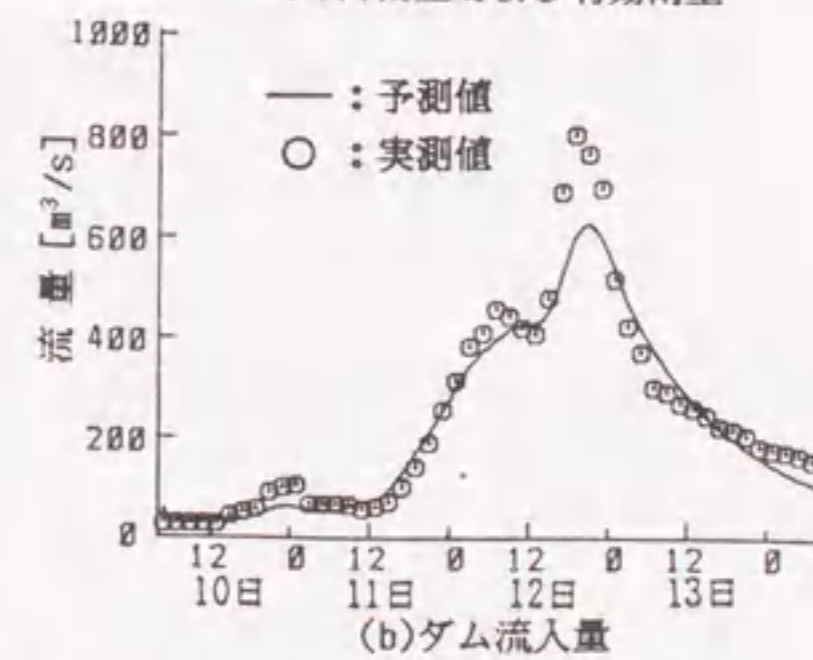
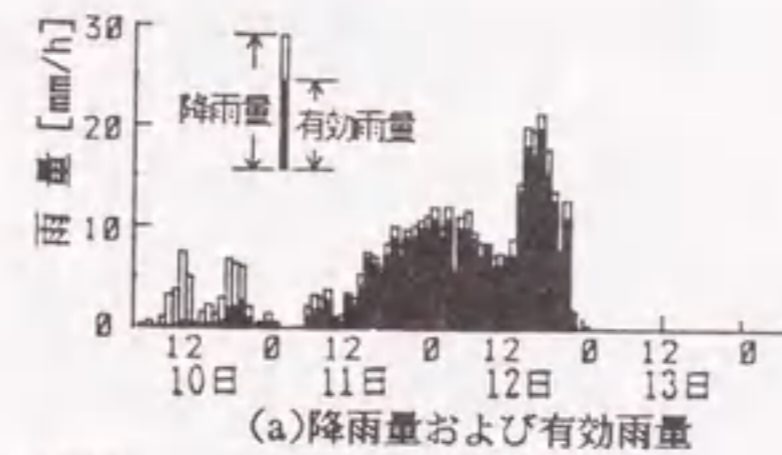


図4-18 長時間降雨による流量予測例
(降雨番号37, 昭和57年9月10日)

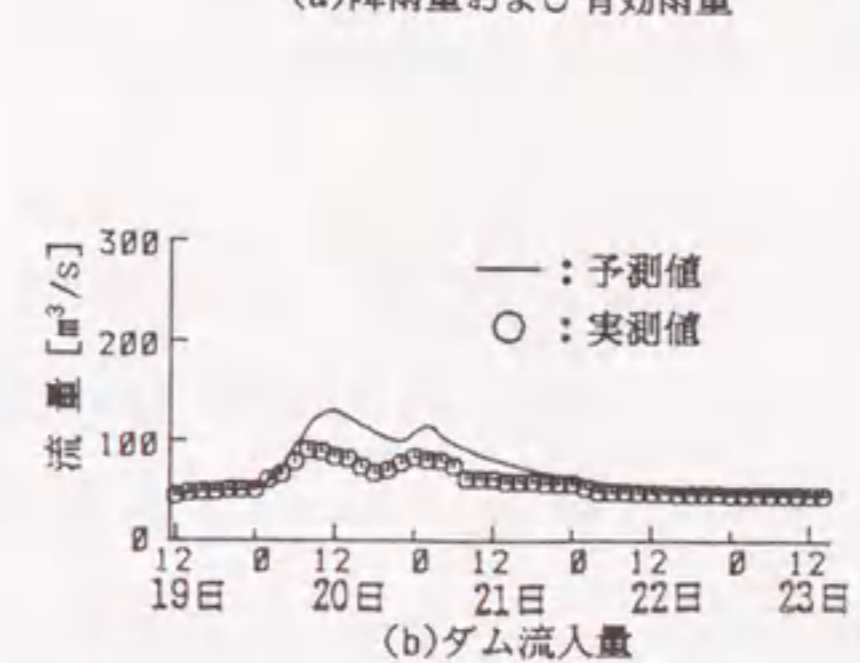
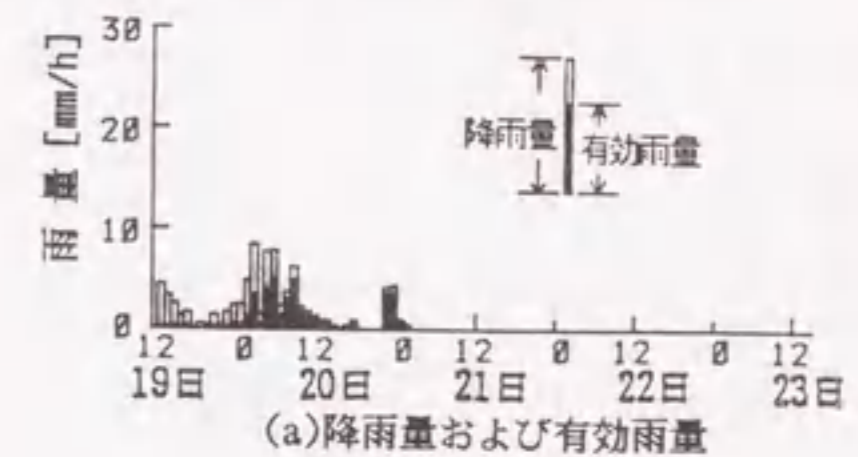


図4-19 長時間降雨による流量予測例
(降雨番号38, 昭和57年9月19日)

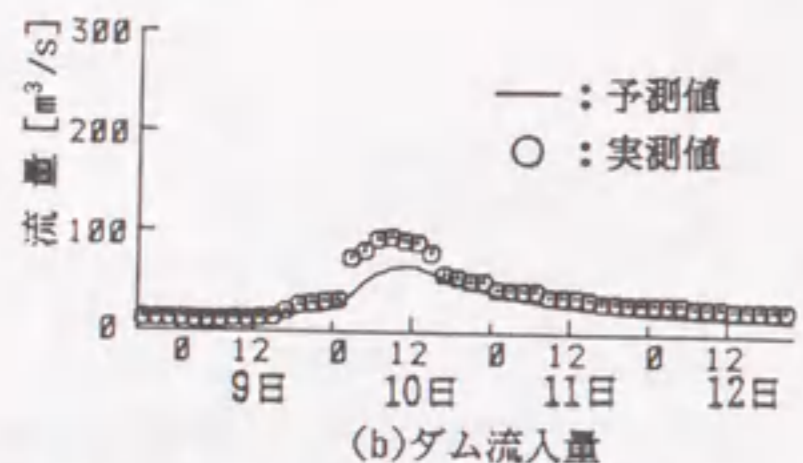
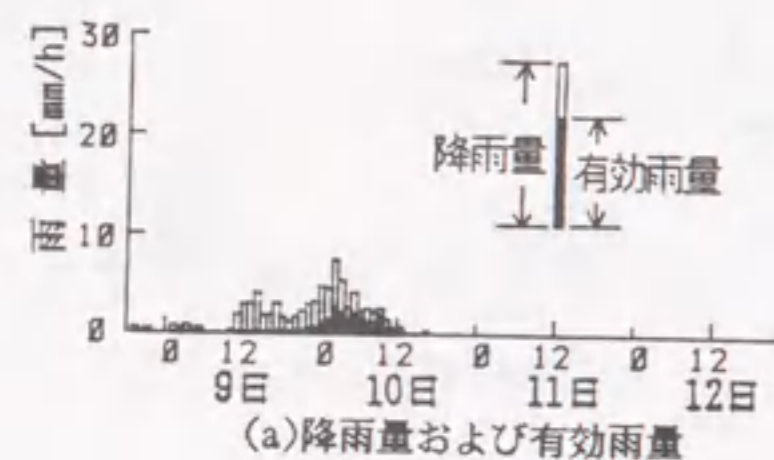


図4-20 長時間降雨による流量予測例
(降雨番号39, 昭和57年11月9日)

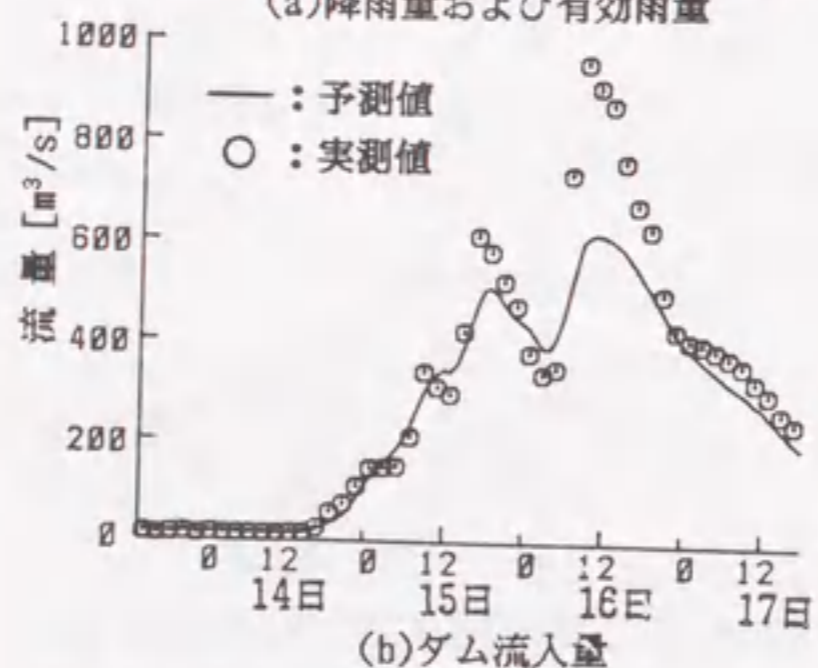
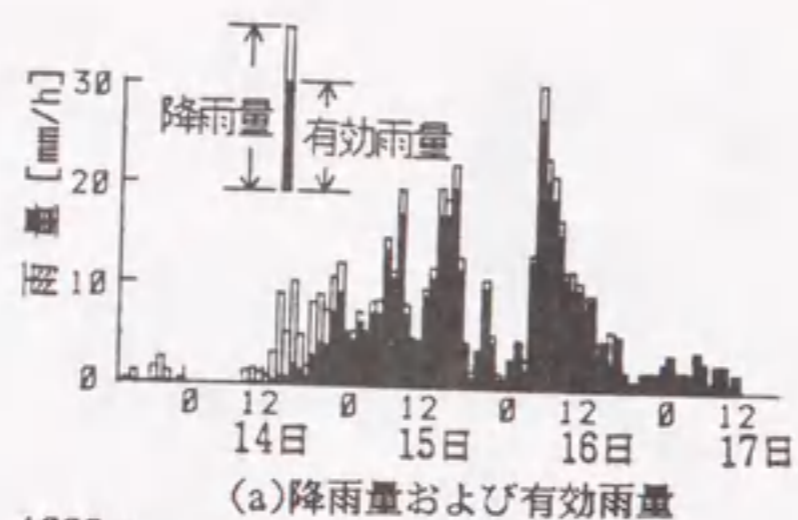


図4-21 長時間降雨による流量予測例
(降雨番号40, 昭和58年8月14日)

$$\varepsilon_q = \frac{\int_{t_0}^{t_2} |q_{fore}(t) - q_{real}(t)| dt}{\int_{t_0}^{t_2} q_{real}(t) dt} \times 100 [\%] \quad \dots\dots(4.8)$$

ここで、 $q_{fore}(t)$ および $q_{real}(t)$ は各時刻におけるダムでの流量のシミュレーション値および観測値、 t_0 は降雨開始時刻[時]、 t_2 は降雨が止んだ後の $q_{real}(t)$ がそのピーク値の $1/2$ の値になる時刻である。

短時間伝達関数、長時間伝達関数および平均伝達関数のシミュレーション誤差の算定を表4.6に示す。同表のアンダーラインを付したものは降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合である。短時間降雨の場合には、本伝達関数を用いた誤差の平均値は17%で、これは全平均伝達関数を用いた場合の誤差18%とほとんど変わらなかった。ところが、長時間降雨については、長時間降雨伝達関数を用いたときの平均誤差は25%で、これは全平均伝達関数を用いた場合の誤差35%よりかなり改善されている。結局、この手法は長時間降雨に対してかなり効果が現れている。

また、同表で*印を付したものは3種類の伝達関数を用いた場合のうちで、誤差が最小のものである。アンダーラインと*印が重なっているものは14例中10例(71%)である。すなわち、それらは降雨パターンに対

表4・6 畑産第一ダム上流域における出水シミュレーション手法の妥当性

降雨番号	降雨開始 年月日	降雨 パターン	流量減衰が t^{-1} 値の1/2になるまでの 流入量予測誤差の累積値 [%]			備考
			短時間降雨 伝達関数	長時間降雨 伝達関数	全平均 伝達関数	
27	55.07.07	短 時 間 降 雨	<u>16</u> *	28	19	OK
28	55.07.14		<u>14</u> *	19	14	OK
29	55.08.26		<u>38</u>	17*	28	×
30	57.11.22		<u>8</u> *	27	13	OK
31	57.11.29		<u>20</u> *	33	25	OK
32	58.04.22		<u>8</u>	10	7*	大差なし
33	58.07.05		<u>17</u> *	30	21	OK
			平均 17	平均 23	平均 18	
34	55.06.07	長 時 間 降 雨	31	<u>10</u> *	20	OK
35	56.08.21		59	<u>22</u> *	39	OK
36	57.05.31		117	<u>50</u> *	93	OK
37	57.09.10		30	<u>15</u> *	17	OK
38	57.09.19		52	<u>23</u> *	41	OK
39	57.11.09		14*	<u>33</u>	20	×
40	58.08.14		22	<u>23</u>	16*	×
			平均 46	平均 25	平均 35	

- 注1) 「短時間降雨伝達関数」は短時間降雨パターンに対する全伝達関数の平均
 注2) 「長時間降雨伝達関数」はクラスター②のうち長時間降雨パターンに対する全伝達関数の平均
 注3) 「全平均伝達関数」は推定に用いた全降雨に対する伝達関数の平均
 注4) アンダーラインを付したものは降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合の誤差
 注5) *印を付したものは3種類の伝達関数を用いた場合のうちで誤差最小のもの

応した伝達関数を用いた場合に、シミュレーション誤差が最小となっているものである(備考欄にOKと記した)。残りの4例のうち番号32の降雨はいずれの伝達関数を用いても誤差は小さく、似かよった値を示している。

表4・6の備考欄に×印を記した3例については、アンダーラインを付した誤差は比較的大きな値を示している。これらの降雨に対するシミュレーション結果を視覚により比較すれば、3例のうち降雨番号29および39(図4・10および図4・20)の2例については大体予測できていると言える。しかし、残りの1例(降雨番号40)については図4・21に見られるように、良い予測結果とは言えない。したがって、全体として14例の降雨のうち13例については良い予測ができたと言える。また、降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合、そのシミュレーション誤差が25%以下のものは14例中11例(78%)である。提案手法では流域の形状を考慮することなく伝達関数を推定しているが、畑一ダムにおける出水シミュレーション結果は比較的良好である。

他方、中安氏の単位図法⁽⁵⁾に基づいた筆者らのこれまでの出水シミュレーション結果⁽⁶⁾では、その誤差が25%以下のものは、全体の半分程度であった。そこでは、流域の形状を参考にして、単位降雨に対する流出曲線、いわゆるユニットヒドログラフを推定していたので、その流域形状の把握の不確かさがシミュレーション

結果に影響しているものと思われる。

4.6 あとがき

河川出水機構を有効雨量とダムへの流入量とを入出力とみなした場合の伝達関数について、具体的に、大井川水系畑薙第一ダム上流域の降雨26例を対象として検討した。5次の伝達関数を設定し、それに含まれる11個の係数をパラメータとして、それらが各降雨毎にどの程度異なっているのかを調べた。個々の降雨に対して各パラメータ値のバラツキが大きく、符号までも異なるものがある。すなわち、畑一ダム上流域における河川出水機構を単一の伝達関数でモデル化することは困難であると言える。このような事実は過去にも指摘されていることである⁽²⁾。そこで、畑一ダム上流域において、降雨毎に推定した出水伝達関数に関して、以下のような検討を行った。

(1) 降雨毎に、出水伝達関数を求めることができる。

そうして求めた各伝達関数のインパルス応答について、その波形の類似性を調べることにより、大まかに2個のグループに分類した。

(2) このように分類した伝達関数と降雨状況を表す下

記のような定量的な指標との関係を調べた。すなわち、降雨継続時間、総降雨量、有効雨量の総量、降雨強度(総降雨量/降雨継続時間)、および有効雨量強度(有効雨量の総量/降雨継続時間)の5種類をとりあげた。このうち、降雨継続時間の長短が前述のグループ分けに比較的良く対応していることが明らかになった。すなわち、出水伝達関数は降雨継続時間依存性を有しており、それは降雨が短期間で終るか、長く続くかに関係している。

(3) そこで、降雨をその継続時間に基づいて「35時間未満の比較的短時間で終る降雨」および「35時間以上長期間続く降雨」との二つのパターンに分類し、各降雨パターンに対応する出水伝達関数を推定した。

(4) 降雨パターンに対応する出水伝達関数を用いて、河川出水予測のためのシミュレーションを行った。ここで対象とした短時間降雨、長時間降雨各7例について、平均の誤差はそれぞれ17%および25%であった。単純な平均伝達関数による予測平均誤差と比較すると、短時間降雨では大差なかったが、長時間降雨については誤差は約2/3となった。

気象衛星やAMeDASのデータを活用することにより、到来する降雨が短時間で終るか、長く続くかのいず

れかを予測することは第6章で示すように容易なことである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これと本手法とを組み合わせることにより、発電用ダムへの流入量予測の早期化および精度の向上が期待できる。このことについて第7章で検討を行っている。

なお、本手法を適用するにあたり必要なデータは、過去の降雨・流量の実測データおよび地図から得たものであり、なんら特別な情報を必要としない。このことから、本章で提案した手順は他の河川へも容易に適用できるものである。ただし、伝達関数のグループ分けと降雨パターンとの対応は、大井川上流域で得られた関係と常に同じであるとは限らない。

第4章の文献

- (1)一柳,小林,竹内,松村,鬼頭:「基底流量を考慮した発電用ダム上流域における流出率の推定」,電気学会論文誌, 105-B [8], 691~697 (1985)
- (2)和歌森,松本,大成:「河川出水予測モデル」,計測と制御 19 [7], 113 (1980)
- (3)成田:「デジタルシステム制御・理論と応用」, 153 (1980) 昭晃堂
- (4)富士通:「FACOM OS IV CLUSTER 解説書」
- (5)稲田,細井,橋本:「河川」,56 (1982) 彰国社
- (6)竹内,松村,鬼頭:「発電用ダム上流域の河川出水機構の電気回路モデル」,昭和59年電気学会全国大会, No. 895 (1984)
- (7)一柳,松村,鬼頭,山田,鈴木:「気象衛星データを活用した発電用ダム上流域における降雨予測手法の提案」,電気学会論文誌, 104-B [7], 441~448 (1984)
- (8)一柳,小林,篠田,松村,鬼頭:「AMeDAS観測値を活用した発電用ダム上流域における降雨量の時間変動予測手法」,電気学会論文誌, 106-B [9], 809~816 (1986)

第5章 A M e D A S 観測 値を活用した河川流域に おける降雨量の時間変動 予測手法

5.1 まえがき

発電用ダム上流域における時々刻々の降雨量を予測するために、静止気象衛星GMS(ひまわり)データと地域気象観測システムA M e D A Sデータとを複合利用することが有用である。気象衛星データは、例えば雲頂温度分布などを早い時点で海洋面を含む広範囲で検知したり、雨雲の動き(移動方向、平均速度)を把握するのに有効であるが、実際の降雨域の広がりまでを直接把握することはできない。これに対し、地上での観測データからは実際の降雨状況が直接把握できる⁽¹⁾⁽²⁾。本章で提案する手法は、このような西日本において得られた2種類の観測データの特徴を生かすことにより、降雨の総量だけでなく、その時間的変動までも精度良く予測しようとするものである。ここでは、日常の給電運用の立場から、洪水を招くような台風や集中豪雨の予測は対象外とし、西から東へ移動する低気圧に伴うような降雨を対象

とする。その手法のあらましと特徴は以下のとおりである。

まず、気象衛星として「ひまわり」を利用し、雲の赤外面像データから雨雲の移動方向と速度とを検出する。この場合、後述の評価指標を用いることにより、雨雲移動方向の推定精度を高めることができる。他方、このようにして求めた雨雲の移動方向に基づいて、対象ダムを基点として、雨雲が接近してくる方向に向けて幅30kmの帯をとる。これは、大体において西から南西の方向の範囲にある。その方向の帯内において、A M e D A Sデータから得られる降雨量の地上分布を観測する。その西日本における降雨量の地上分布が多少の発達減衰はあっても、ほぼ変わらず中部以東に移動し対象ダム上流域を通過するという仮説のもとに当該流域の降雨量の時間的変動を予測する。

本予測手法の有効性を検証するために、昭和56～昭和57年において、台風や集中豪雨を除き、西から東へと移動する降雨のうちから任意に16例を選んだ。これらの降雨について、畑一ダム上流域を対象として本手法を適用してみたところ、比較的良好な予測結果が得られた。

5.2 気象衛星データおよびAMeDASデータを用いた降雨量の時間変動予測手法

本章では、「西日本における降雨量の地上分布は多少の発達減衰はあっても、ほぼ変わらず西から東へと移動し対象ダム上流域を通過する」という仮説を立てる。この仮説に基づいて降雨量の時間変化を予測することを提案する。本予測手法は具体的に次のようなステップから成っている。

- (1) 降り始めからの合計雨量が30mm~50mm以上に達すると、河川の流量が急増し、ダムの放流が考慮されるようになってくる。そこで、本研究では連続総降雨量が30mm以上に達し、水資源として役立つような量的に集中した降雨を検討の対象とする。ここでは、降雨が少なくとも10時間程度は続くとして、3mm/h以上の降雨に注目する。
- (2) 日本付近では、天候が西から東へ移り変わることが多いことに着目し気象衛星によって、西日本以西の雲の分布を常時観測する。
- (3) 同時に、AMeDASの観測データにより九州、中国西部、四国西部などの西日本における降雨の開始と分布に注目する。
- (4) 西日本において、雲頂温度分布と地上の降雨分布

とを比較対照し、実際に降雨をもたらしている雨雲の雲頂温度の範囲を検出する。雲頂温度分布は気象衛星データから、降雨分布はAMeDASデータから得られる。

- (5) ステップ(4)のデータ処理過程で、時刻を異にする2回のデータから、雨雲の動き、すなわち移動方向および平均速度を推定する。この移動方向の推定精度を後述の手法で高めることができた。
- (6) 図5.1に示すように、畑一ダムを基点として、幅30kmの細い帯を雨雲が接近してくる方向 θ に延長する。この帯の幅30kmは畑一ダム上流域の南北方向の広がりに対応する。
- (7) この帯内に含まれるAMeDAS観測点で記録された降雨量を畑一ダムまでの距離に対してプロットする。
- (8) 降雨量の地上分布があまり変化しないで西から東へ移動するものと仮定する。ステップ(7)における分布曲線の距離軸は衛星データから得られた雨雲速度で距離を割ることにより時間軸に変換できる。すなわち、帯内の各地点で記録した降雨量は畑一ダムの各時刻に到達すると考えられる降雨量に変換される。ここで得られる曲線が降雨量の時間変化の予測値である。

A Me D A S データが1時間毎に得られることから、ステップ(6)~(8)を繰り返すことにより、降雨量の時間変化の予測値を毎時得ることができる。予測手順の流れを図5・2に示しておく。



図5・1 帯のとり方概念図

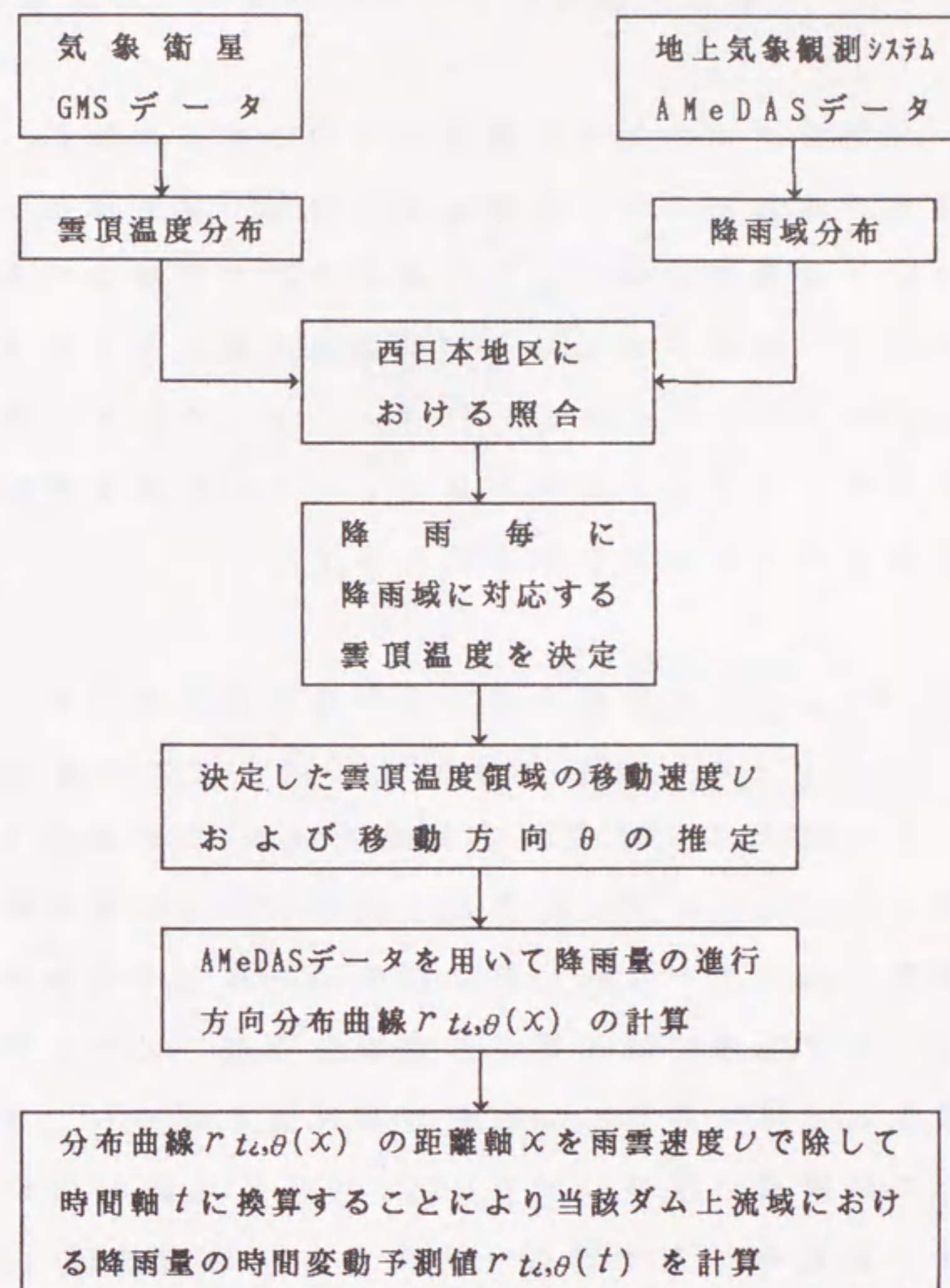


図5・2 降雨量の時間変動予測のための計算フローチャート

5・3 中部山岳地方における降雨量の時間変動予測例

発電用ダムの効率的運用を目的とするために、ここでは総降雨量が30mm程度以上に達し、水資源として役立つような量的に集中した降雨を予測の対象とする。したがって、降雨がおよそ10時間程度続くとして3mm/h以上の降雨に注目し検討を行う。以下において、昭和56年4月19日および同年9月25日の降雨を例にとって、予測方法と結果とを具体的に示す。

5・3・1 雨雲移動方向および移動速度の推定

4月19日6時に気象衛星GMSにより観測された -40°C 以下の雲頂温度領域を図5・3に網目で示す。また、図5・4に同じ時刻におけるAMeDASによって観測された1~3mm/hおよび3mm/h以上の降雨域を示す（これは正確には5時~6時の間の値、以下いずれも観測された時刻直前の1時間の降雨量である）。3mm/h以上の降雨域に注目し図5・4において九州の北東部や四国の佐田岬半島で降雨をもたらしている雲は、図5・3において -40°C 以下の雲頂領域のうち黒く塗りつぶした部分と考えられる。

図5・5に3時間後の4月19日9時にGMSから見た -40°C 以下の雲頂温度領域を網目で示す。また、図5・6に同時刻にAMeDASによって観測された1~



図5・3 GMS-1からみた雲頂温度分布(昭和56年4月19日6時)

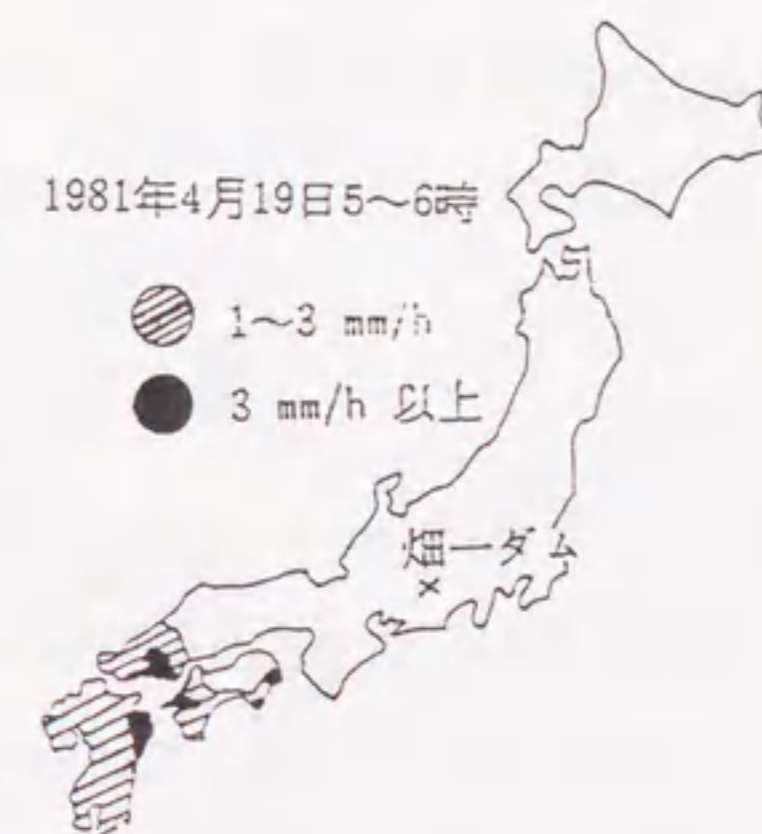


図5・4 AMeDASからみた降雨域分布(昭和56年4月19日5時~6時)



図5・5 GMS-1からみた雲頂温度分布(昭和56年4月19日9時)

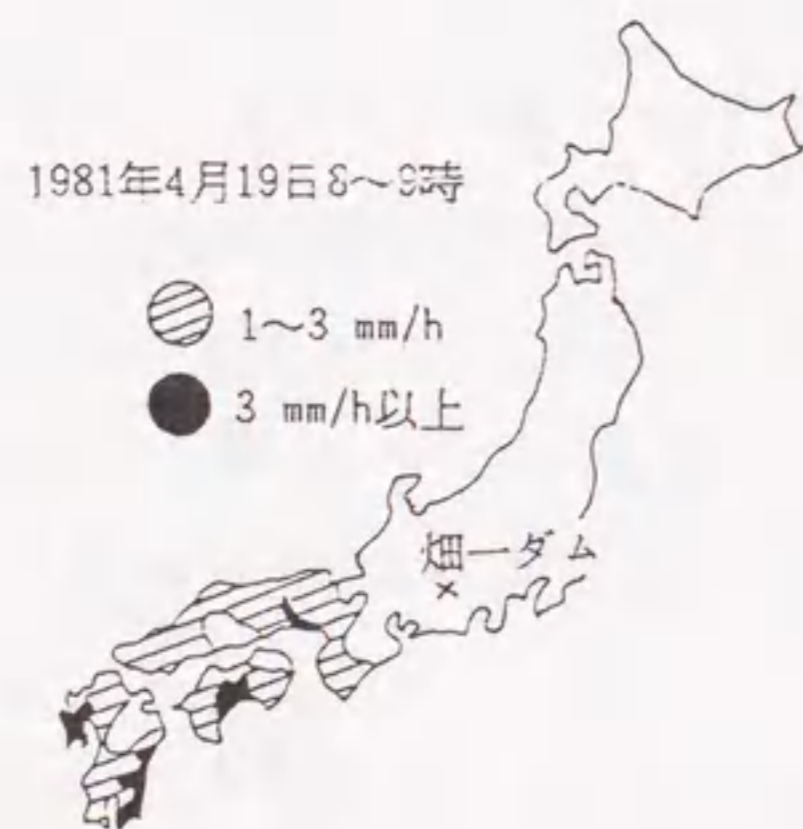


図5・6 AMeDASからみた降雨域分布
(昭和56年4月19日8時~9時)

3 mm/hおよび3 mm/h以上の降雨域を示す。図5・5において同じ -40°C 以下の雲領域といっても北方の雨をもたらさない領域と南方の降雨量3 mm/h以上の雨をもたらしている領域とにはつきりと分かれていることがわかる。そこで、南方の -40°C 以下の雲頂域の動きに注目すると、四国の高知に3 mm/h以上の降雨をもたらしている雨雲(図5・5で黒く塗りつぶした領域)は、3時間前(図5・3参照)に九州北東部に位置していたものと考えられる。

また図5・3および図5・5に、巨視的な雲全体の動きをみるために -10°C 以下の温度領域を破線で囲み、その重心を Δ 印で示してある。両図から、この Δ 印と黒く塗りつぶした部分(実際に雨をもたらしている領域)とはともに移動速度45 km/h程度で、東北東に進んでいることが把握できる。すなわち、この日の雨雲は畑一ダムへ向かって、真西から $\theta = 25^{\circ}$ だけ南寄りの方向から45 km/h程度の速度で進んでいると推定できる。

5・3・2 降雨量の時間変動予測

畑一ダムを基点とし南北に30 kmの幅をもった西方向に長い帯を考える。この帯の方向を雨雲移動方向 $\theta = 25^{\circ}$ にとり、そのなかに位置するAMeDAS観測所の降雨量を調べる。以下において、角度は真西方向を基準として南寄りの方向に測った値で表示するものとする。

4月19日10時における降雨量の地上分布を畑一ダムからの距離 x を横軸にとってプロットし、その結果を図5・7(a)に示す。この降雨分布があまり変わることなく $\theta = 25$ 度の線上を東北東に雨雲移動速度 $V = 45$ km/hと等しい速度で移動してくるとして、横軸をその降雨が畑一ダムに到達する時刻に換算した。その結果を同図(b)に示す。これをもって、畑一ダムにおける降雨量の時間変化の予測値としようとするのが本提案の主旨である。この例のように、AMeDASデータに基づいて降雨量の時間変動予測を行う時期が早すぎると、降雨域は九州西方海洋上にまで達しており、この例では約20時間以降、すなわち4月20日3時から先の予測値が得られない。次に、3時間後の4月19日15時において同様の予測を行った結果を同図(c)に示す。この図には、後で得られた降雨の実測値も●印でプロットしてある。この時点で予測曲線と実測曲線とは類似した形を保っており、総降雨量の予測値は実績値より13%小さい。このように、ある程度降雨域が対象ダムに近づいた時点で比較的良い予測ができています。

次に、昭和56年9月25日の降雨量について同様の予測を行った例を示す。同日6時および9時におけるGMSから見た雲頂温度分布およびAMeDASから見た3mm/h以上の降雨域との比較対照から、その日の雨雲は速度45km/hで $\theta = 25$ 度方向から進行していること

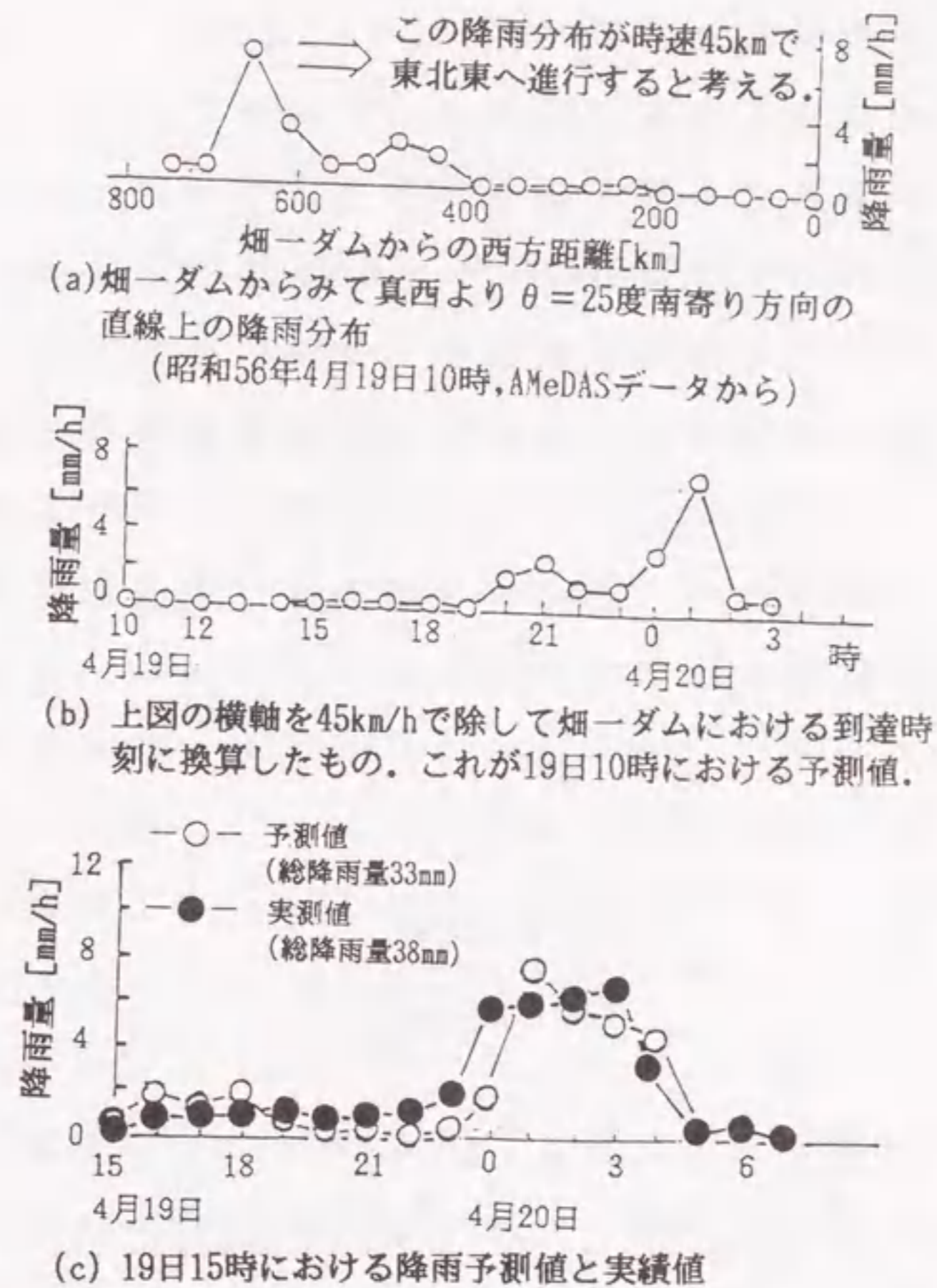


図5・7 降雨量の時間変動予測 (昭和56年4月19日)

が推定できる。これらの値を用いて降雨量の時間変動予測を行った結果を図5・8に示す。同図によると、総降雨量の予測値はその実績値の2/3程度と小さい。さらに、同図のpで示した単独ピークの発生は予測できているものの、実測のqで示したピークが予測できていない。その原因の一つとして、衛星データを用いて視覚的に推定した雨雲移動方向と、実際の降雨域移動方向とが一致していないことが考えられる。そこで、以下において降雨域移動方向の定量的推定法を提案し、予測精度の向上を図ることを試みた。

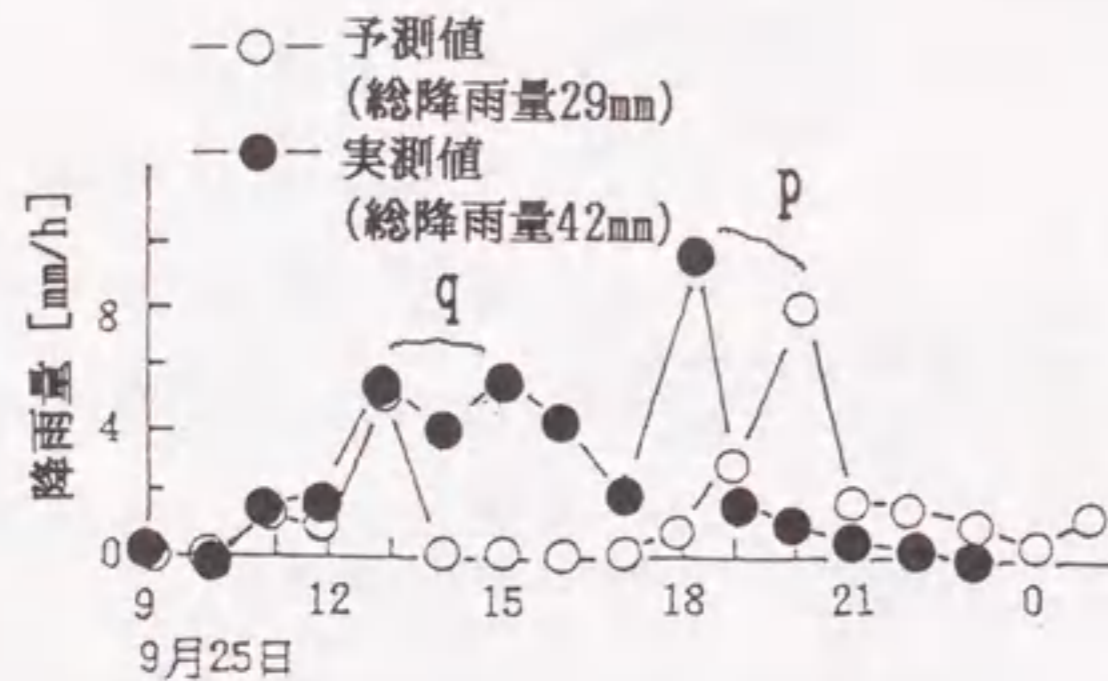


図5・8 降雨量の時間変動予測 (昭和56年9月25日)

5・4 降雨域移動方向の定量的推定による予測精度向上

5・4・1 降雨域移動方向の定量的推定

対象ダム上流域における降雨量の時間変動を予測するためには、西日本通過中の降雨域の移動方向を的確に把握する必要がある。雨域移動方向の推定方法として、レーダエコー図から雨域の重心の移動を追跡する方法が考えられているが⁽³⁾、本論文ではA Me D A Sデータを用いることにより降雨域の移動方向を定量的に推定することを試みた。A Me D A Sでは地上の降雨データしか得られないので、海上をも含めた雨域全体の重心を求めるのは困難である。そこで、次のようにして降雨域移動方向を推定することを提案する。

時刻 t_i において、図5・1で示したように畑一ダムを基点とし、真西方向を基準線として南寄りに測った角度 θ (探査方向)で幅30kmの領域をとる。降雨域移動方向がこの探査方向と一致しておれば、その領域内に分布するA Me D A Sデータから得られる1時間毎の降雨量の地上分布パターンは類似していると考えられる。これを具体的に検証するために、昭和56年9月25日の降雨を例(5・3節で時間変動予測に失敗した例)にとり、 $\theta = 0$ 度, 15度, 25度のそれぞれについて、時刻 $t_i = 9$ 時, 10時および11時において、畑一ダムを原点とし

て距離 x に対して降雨量の地上分布を $r_{t,\theta}(x)$ とする。これをプロットした結果を図 5・9 に示す。この降雨域は GMS からの観測では、45 km/h の速度で刻々と進行していると推定される。そこで、分布パターンの類似性の比較を容易にするため、図 5・9 の 9 時、10 時の分布曲線は、それぞれ $x = 90$ km, $x = 45$ km だけ畑一ダム方向に移動させて 11 時の分布曲線に重ねてプロットしてある。視察によれば、 $\theta = 0$ 度（真西）の降雨分布パターンに類似性がみられ、この方向から降雨域が移動してくるとみなされる。この降雨域移動方向を定量的に推定するために、次式の評価指標 I を考え、これを最小とする θ を降雨域移動方向とみなす。

$$I(t_i, \theta) = \frac{\int_{t_i}^{t_{\text{ore}}} |r_{t,\theta}(t) - r_{t-1,\theta}(t)| dt}{S_{t,\theta} + S_{t-1,\theta}} \quad \dots (5.1)$$

ここで、 t_i は予測時刻、 t_{ore} は降雨終了予想時刻である。また、 $r_{t,\theta}(t)$ は $r_{t,\theta}(x)$ の距離 x を雨雲速度 v を用いて畑一ダムへの降雨到達時刻 t に換算したものであり、時刻 t_i に θ 方向から到来するものとした降雨量の時間変動予測値を表す。また、 $S_{t,\theta}$ は θ 方向をみた時刻 t_i 以後の総降雨量予測値であり次式で与えられる。

$$S_{t,\theta} = \int_{t_i}^{t_{\text{ore}}} r_{t,\theta}(t) \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

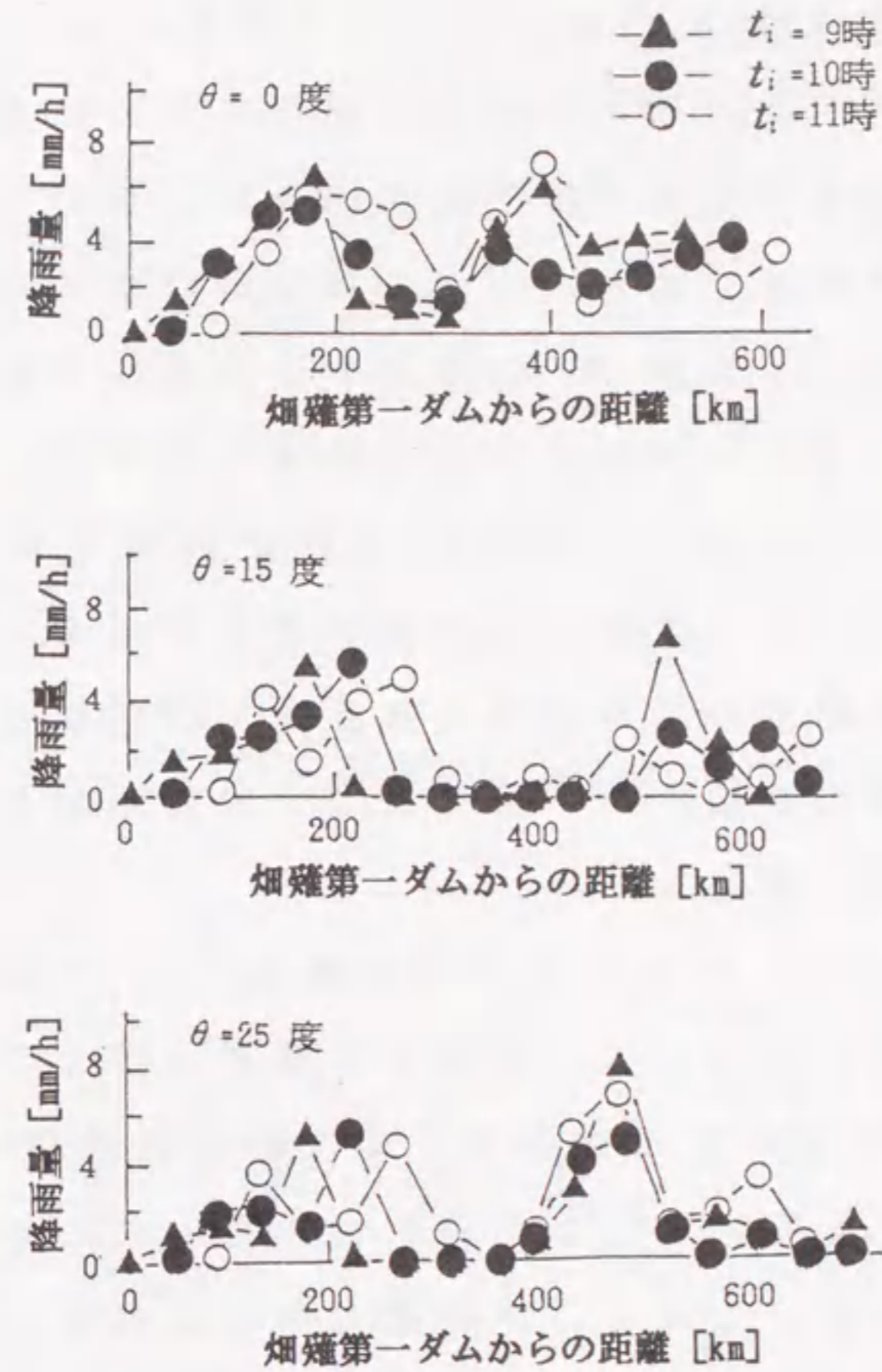


図 5・9 探査方向 θ と降雨分布パターン

図5・9から $t_i = 10$ 時および11時における I の値を探查方向に対して求めた。その結果を図5・10に示す。 I は $t_i = 10$ 時および11時のいずれの曲線においても、共に $\theta = 0 \sim 5$ 度で最小値を示しており、評価指標 I からみれば、この方向から降雨域が移動してくると考えられる。これは、図5・9における視察の結果とほぼ一致している。しかし、GMSからみた雨雲の移動方向とは異なっている。これが5・3節において降雨量の時間変動予測が良くなかった原因と考えられる。このように雨雲の移動方向と降雨域の移動方向が異なるのは、雨雲が単に平行移動するだけでなく、回転移動なども伴っているためと思われる。

次に昭和56年4月19日の降雨（5・3節で予測に成功した例）について、同日14時および15時について評価指標 I の値を求めた。その結果を図5・11に示す。 $t_i = 14$ 時および15時において、共に $\theta = 25$ 度で最小値を示しており、評価指標 I から見ると、この方向から降雨域が移動してくると考えられる。この移動方向は、5・3節の雲頂温度分布（図5・3および図5・5）から推定した値と一致している。

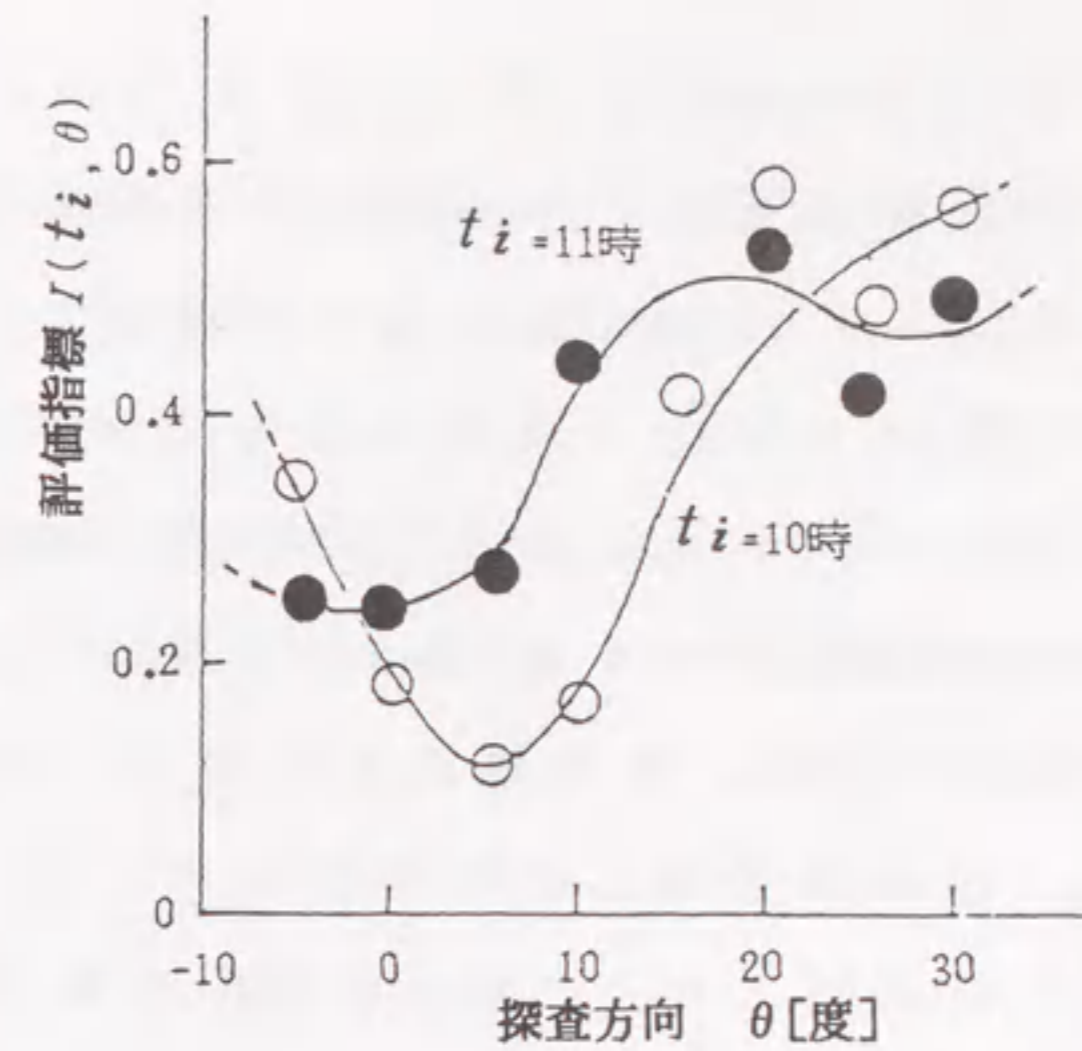


図5・10 評価指標（昭和56年9月25日の降雨）

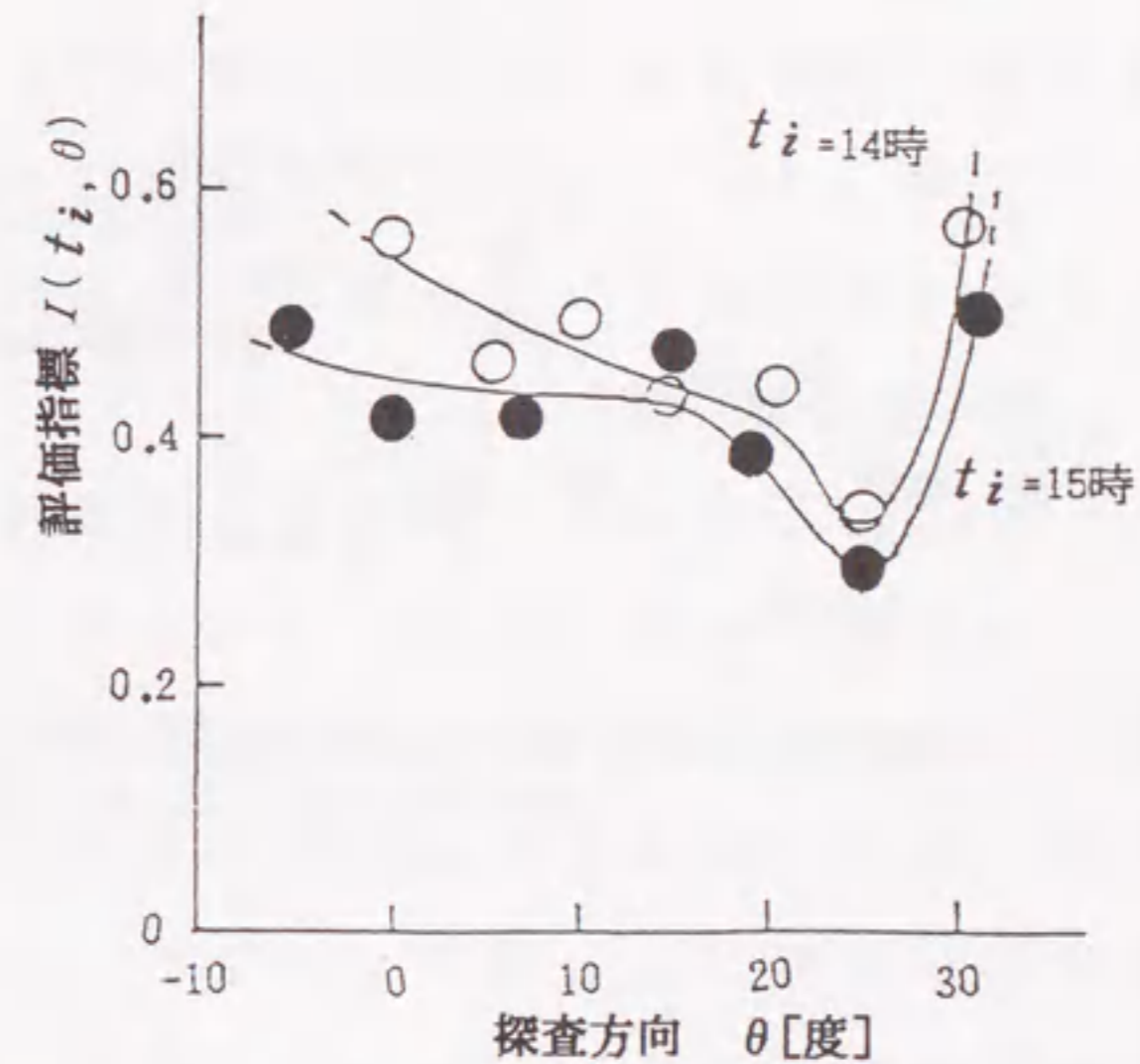


図5・11 評価指標（昭和56年4月19日の降雨）

5.4.2 降雨量の時間変動予測例

前項で述べた評価指標 I から得られる降雨域移動方向の推定値 θ を用い、改めて降雨量の時間変動予測を行う。昭和56年9月25日について、 I を用いて得られる降雨域移動方向は $\theta = 0$ 度である。この値と衛星データから得られる雨雲速度 $V = 45 \text{ km/h}$ とを用いて、降雨量の時間変動曲線を予測し、その結果を図5.12に示す。これによると、総降雨量および時間変化のパターンの予測はその実績にほぼ近くなっており、5.3節の予測(図5.8)と比較して大きく改善されている。

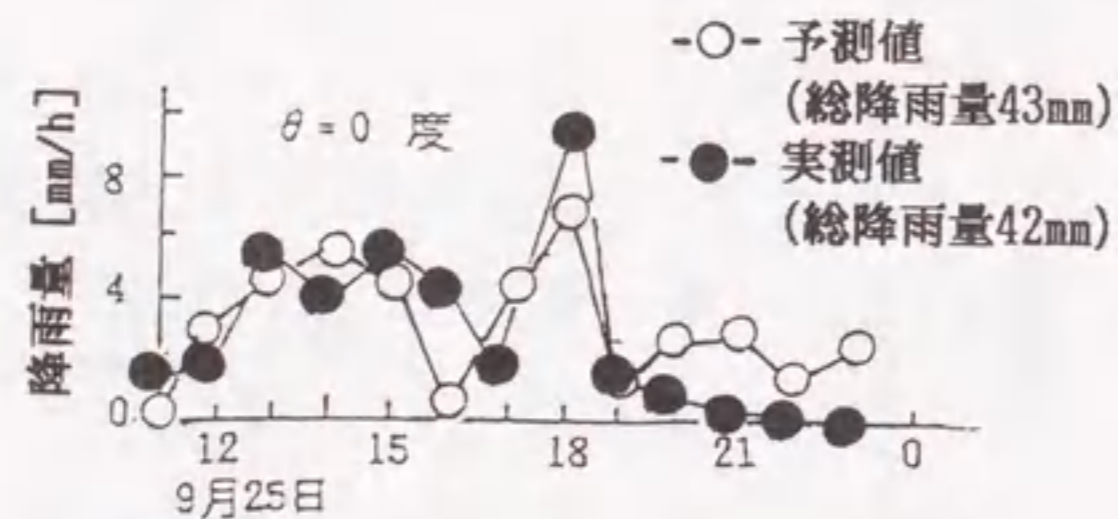


図5.12 降雨量の時間変動予測曲線と実測曲線の比較
(昭和56年9月25日, $\theta = 0$ 度)

昭和56年4月19日の降雨については、GMSデータから推定した雨雲移動方向と I を用いて得られた降雨移動方向 θ とが相等しい。したがって、この場合の降雨量の時間変化の予測曲線は図5.7(c)になる。このように、雨域の移動方向については、評価指標 I を用いて定量的に推定することにより、予測精度向上が図られる見通しを得た。他の降雨例についても以下で検討する。

5.4.3 降雨予測結果の検討

昭和56～昭和57年の全降雨(67件)のうち台風や集中豪雨を除き、西から東へと降雨が移動した例は全体の約50%であった。そのうち任意に16例の降雨を選び、それらに前述の降雨域移動方向の定量的推定法を適用し、降雨の時間変動予測を行った。各降雨について得られた評価指標 I の最小値、予測期間および予測総降雨量を表5.1にまとめた。ほとんどの降雨について、平均15時間程度先まで予測できている。

さらに、予測曲線の妥当性を検証するために、実測曲線との類似性を大きさおよびパターンの両面から比較検討を行う。大きさの誤差に関する評価指標として総降雨量誤差 ε_r を、パターンの類似性に関する評価指標として相関係数 C を取り上げ⁽⁴⁾、それぞれ次式を用いて計算する。その結果を表5.1に併記する。

表5・1 畑薙第一ダム上流域における降雨量の時間変動予測結果

ケ	降雨日 昭和 年月日	評価指 標Iの 最小値	予測 期間* h	実測総 降雨量 mm	予測総 降雨量 mm	総降雨量 予測誤差 %	相 関 係 数
①	56.04.16	0.15	14	23	25	8.7	0.61
②	56.04.19	0.29	16	38	33	-13.2	0.81
③	56.04.29	0.18	17	32	27	-15.6	-0.16
④	56.05.17	0.14	16	43	40	-7.0	0.89
⑤	56.09.25	0.25	12	42	43	2.4	0.66
⑥	56.10.05	0.17	12	32	25	-21.9	0.74
⑦	56.11.02	0.16	16	87	56	-35.6	0.60
⑧	57.04.03	0.25	20(12)**	41	30	-26.8	0.37
⑨	57.04.05	0.33	20	45	40	-11.1	0.62
⑩	57.05.06	0.24	14	38	34	-10.5	0.68
⑪	57.05.31	0.23	17	46	36	-21.7	0.28
⑫	57.09.19	0.18	12	53	47	-11.3	0.60
⑬	57.10.19	0.35	21	38	28	-26.3	0.76
⑭	57.11.10	0.18	28(16)**	74	60	-18.9	0.80
⑮	57.11.22	0.26	16	63	21	-66.7	0.73
⑯	57.11.29	0.17	10	70	32	-54.3	0.88

* : 降雨量予測時点から何時間先まで予測できているかを示す。
 ** : 長時間の雨であるので2回に分けて予測し、その合計の予測期間を示した。()内は第1回目の予測期間である。第2回目の予測時点は第1予測時点から9時間後(ケース8)および13時間後(ケース14)に行った。

$$\varepsilon_r = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_{fore}} r_{fore}(t) - \sum_{t=t_i}^{t_{fore}} r_{real}(t)}{\sum_{t=t_i}^{t_{fore}} r_{real}(t)} \times 100 \% \dots (5.3)$$

$$C = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_{fore}} (r_{fore}(t) - \bar{r}_{fore})(r_{real}(t) - \bar{r}_{real})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_{fore}} (r_{fore}(t) - \bar{r}_{fore})^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_{fore}} (r_{real}(t) - \bar{r}_{real})^2}} \dots (5.4)$$

上式において、 $r_{fore}(t)$ および $r_{real}(t)$ はそれぞれ時刻 t における降雨の予測値および実測値である。また、 \bar{r}_{fore} および \bar{r}_{real} はそれぞれ予測値および実績値の時間平均降雨量であり、次式で表される。

$$\bar{r}_{fore} = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_{fore}} r_{fore}(t)}{t_{fore} - t_i} \dots (5.5)$$

$$\bar{r}_{real} = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_{fore}} r_{real}(t)}{t_{fore} - t_i} \dots (5.6)$$

なお大きさは別として、予測曲線と実測曲線とのパターンが完全に一致している場合、相関係数 C は 1 を示す。したがって、 C が 1 に近いほど両者の時間変動パターンに類似性があると言える。降雨量の時間変動予測という観点から言えば、 ε_r は 0 に近く、かつ C は 1 に

近いほど好ましい。しかしながら、どの程度0あるいは1に近いと好ましいかという基準は、自然現象を対象としているから必ずしも決まらない。たとえ決まったとしても、その基準は対象とする現象によって異なってくる。

ここで対象としている降雨予測では、図5・7および図5・12で示した降雨の場合（表5・1のケース2およびケース5）のように、視覚的には降雨量ならびにその時間変動傾向が極めて良く予測されている。ところが数値化してみると、総降雨量誤差 ε_r は各々-10.5%および2.4%であり、相関係数の値は各々0.87および0.63となっており、必ずしも ε_r が0に近いとか C が1に近いとか言えない。そこで、この程度のものならば良い予測ができているとみなして、ここでは $|\varepsilon_r| < 30\%$ で、しかも $C > 0.5$ の場合を良好な予測として分類してみた。

どちらの評価指標からみても良好な結果が得られているものは、ここで取り上げた降雨16例中10例であった（表5・1においてケース番号を○印で囲んである）。良い予測ができていると判定しなかった残り6例について詳細にみれば、総降雨量誤差 ε_r および相関係数 C が同時に評価の基準から逸脱しているものはない。すなわち、 ε_r または C のどちらかが判定基準内に収まっていないので、厳密な意味で良い予測結果と判断しなかったのである。表5・1のケース3, 8および11の3例につ

いては、総降雨量誤差は比較的小さく、量的な予測には成功している。しかしながら、相関係数の値は1より離れており、降雨量の時間変動パターンへの予測に失敗した例である。

他方、表5・1のケース7, 15および16の3例については、相関係数 C が0.5以上で、降雨時間変動パターンは比較的予測できている。しかし、総降雨量については大きなマイナス誤差となっている。また、全ケース16例の総降雨量誤差についてみると、ほとんどがマイナスを示しており、畑一ダム上流域では20~30%少な目に予測される傾向があると言える。これは雨雲が全体的に発達しながら畑一ダムに接近し、通過したことを示唆している。

5・5 あとがき

発電用ダムを効果的に運用し、水力エネルギーを電気エネルギーとして有効に利用するためには、時間的余裕を持ってダム上流域の降雨を予測する必要がある。ここで取り上げた降雨予測手法は、台風や集中豪雨を除く中規模の降雨で西から東へ移行するもののみを対象としており、気象衛星データと地上気象観測データとを活用するものである。本章では、主として地域気象観測システ

ム A M e D A S データを用いることにより、1 時間毎の降雨量を予測するための一手法を提案した。その手法を大井川水系畑一ダム上流域に適用したところ以下の結論を得た。

- (1) 対象地点における全降雨のうち約半数は東進する低気圧や前線によるものである。本手法はこのような降雨を予測する場合に有効である。
- (2) 地上の降雨域(A M e D A S データ)に対応した雲頂温度域(気象衛星データ)の規模、移動状況(速度、方向)と降雨量の地上分布から、比較的早い時点において大まかな予測が行える。
- (3) 降雨域移動方向を定量的に推定するための評価指標を提案した。これを用いることにより、降雨域移動方向の推定精度の向上を図ることができる。
- (4) 本手法を昭和56～昭和57年の降雨16例に適用したところ、10例について総降雨量および時間変動パターンの両方において良好な予測結果が得られた。また、残り6例においても完全に予測に失敗したとは言えず、総降雨量か時間変動パターンかのどちらかからみれば、ある程度予測できていると言える。したがって、このことから本手法の有効性が示されたと考えられる。

以上のように典型的に西から東へ移動する天候推移に

については、本章で提案した予測手法が適用でき、効率的ダム運用に役立つものと考えられる。すなわち、この予測を1時間ごとに繰り返し逐次新しい予測値に基づいて水系運用を修正することにより、発電用ダム上流域の水資源を有効に電気エネルギーに変換することが可能と考える。

第5章の文献

- (1) 鬼頭, 松村, 山田, 鈴木: 「効率的ダム運用への気象衛星データの活用手法」, 電気学会論文誌, 102-B [12], 847 (1982)
- (2) 一柳, 松村, 鬼頭, 山田, 鈴木: 「気象衛星データを活用した発電用ダム上流域における降雨予測手法の提案」, 電気学会論文誌, 104-B [7], 441~448 (1984)
- (3) 二宮, 秋山: 「豪雨監視のためのレーダおよび雨量計観測網に基づく雨量分布と雨域移動の客観解析」, 天気, 26 [1], 19~26 (1980)
- (4) 淡中, 小松: 「数学ハンドブック」, 437~441 (1961) 朝倉書店

第6章 気象衛星データを 活用した長期間降雨予測 手法

6.1 まえがき

降雨量の時間変動予測手法を提案し, その有効性について前章で確認した。そこでは, AMeDASデータを主として用いることにより, 1回の予測で約1日程度先までの降雨量変化を知ることができた。しかし, この方法によって, 1日以上長い期間降り続く雨の場合に, 1回目の予測の時点で一連の降雨量の時間変化のすべてを知ることが困難なことである。本手法の他には, 降雨量の時間変化に関して気象レーダによる観測データを用いる予測手法が既に発表されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし, このような手法を用いた場合でも, 降雨の予測期間(何時間先までを予測できるかに関する期間)は6時間程度にとどまっている。

1回の予測で1日以上長い期間にわたる降雨の全体像が把握できれば, より適切なダム操作によって賦与されようとしている水力エネルギーの全てを有効に電気エネルギーとして変換利用できると考えられる。しかし,

1日～3日程度先までの降雨時間変動を予測するための一般的な方法はまだ公表されていないようである⁽⁴⁾。そこで、本章では第5章の手法に日本列島以西における雲頂温度分布データを導入することによって、2日以上 of 長期間降雨を予測できるようにした。

他方において、前章の検討結果によれば、提案手法により予測した総降雨量は実際の降雨量より20～30% 少な目である傾向が分かっている。そこで、雨雲の発達を見越して降雨時間変動の増加補正を導入することにした。具体的に畑一ダム上流域を対象として、そこでの降雨を例にとり、本改良手法の有効性を検討したので以下に示す。

6・2 降雨の長期間予測手法

6・2・1 日本列島以西の雨雲下の降雨量推定

2日以上にわたって降雨が継続する場合には、九州以西の海上や中国大陸まで雨雲が存在し、これが逐次日本列島を通過していく。このような場合には、例として取り上げている畑一ダムから九州西端までに存在するA M e D A Sの降雨データのみを用いて、前章の手法で降雨を予測することは不可能である。

他方、G M Sデータは本州から中国大陸に至る広範囲

の領域にわたって雲頂温度の観測値を提供する。ただし、これまでの研究結果によれば、雲頂温度とその雲の基底部からもたらされる降雨量について一意的な関係はないとされている。すなわち、ある雲頂温度を境としてそれより高い雲が小雨をもたらす、低い雲が大量の降雨をもたらすという関係はない。しかし、まったく無関係でもなく個々の降雨においては雲頂温度の高低と降雨量の大小との間にある程度の相関が認められる⁽⁵⁾。そこで、各降雨について西日本におけるA M e D A Sのデータから降雨量と雲頂温度との対応をとり、九州以西の雨雲にも適用できるものとして、日本列島以西における降雨分布を推定することとした。したがって、その対応は降雨毎に異なったものとなる。

このようにして推定した降雨量の分布が、前章と同様、雨雲の東進につれてあまり変化しないで対象ダムを通過するとして、そこでの降雨量の時間変動の予測を行ってみた。これにより、1～2日という長時間の未来における降雨の概略の予測を試みた。

6・2・2 予測降雨に対する補正

第5章における表5・1を参照すれば、畑一ダム以西における降雨量の分布がそのまま畑一ダムを通過するとして予測した総降雨量は、実際より20%～30% 少な目になる傾向があると言える。これは、大体において雨

雲の発達によるものとみなされるが、この傾向は日本列島以西まで予測領域を拡大した本章の場合には益々顕著に現れるものと予想される。そこで、ここでは前章のような手法で予測された畑一ダム上流域における時々刻々の降雨量を一律に1.25倍し、それをダム上流域での降雨量時間変動の補正予測値とする。

なお、上記補正係数の値は、畑一ダムにおける過去のデータによるシミュレーションから経験的に導出したものである。したがって、この補正值は東進した雨雲が地理的に畑一ダム程度の距離にまで到達した場合にのみ設定したもので、本補正係数の大きさ自体には一般的な有用性はなく、例えば東北地方のダム地点にもそのまま適用できるものではない。ただ、考えの及ばない諸要因を一括して補正係数により予測値を修正するということは、通常よく行われている手法であり、ここでもそれを採用することにした。

以上の新しい長期間降雨の予測手法の妥当性を検証するために、まず昭和58年7月20日～23日の4日間断続的に降り続いた降雨を取り上げた。その降雨を例にとって具体的な予測手順と予測結果とを次節で述べることにする。

6.3 畑一ダム上流域における降雨予測例

6.3.1 雨雲の移動速度および移動方向の推定

まず、5.3.1項で示した手法を用いて雨雲の移動速度と移動方向とを推定する。図6.1に20日9時の時点における気象衛星GMSからみた -20°C 以下の雲頂温度分布を示す。各雲塊の重心にはそれぞれ Δ 印が記してある。同図によると、西日本地区から東シナ海、中国大陸に至る上空にはいくつかの帯状の雲が長く横たわっていることが分かる。それから3時間後の20日12時における -20°C 以下の雲頂温度分布を図6.2に示す。ここにもそれぞれ重心の位置が Δ 印で示してある。これらの重心の移動状況から、全体として雨雲は約 45 km/h の速度で東北東に移動していることが推定できる。

他方、降雨域の移動方向に関して、第5章ではAMeDASデータを用いることにより、降雨域移動方向を定量的に推定する方法を提案している⁽⁶⁾。この方法は、式(5.1)の評価指標 I を最小とする θ を降雨域の移動方向とみなすものである。そこで、20日12時の時点において、 I を求めてみた。その結果を図6.3に示す。同図では $\theta = 5$ 度の付近で I が最小となっている。したがって、この時点において、降雨域は真西から $\theta = 5$ 度だけ南寄りの方向から移動して来ていると推定できる。この推定値は雲頂温度 -20°C 以下の領域の重心の移動

方向とほぼ一致している。

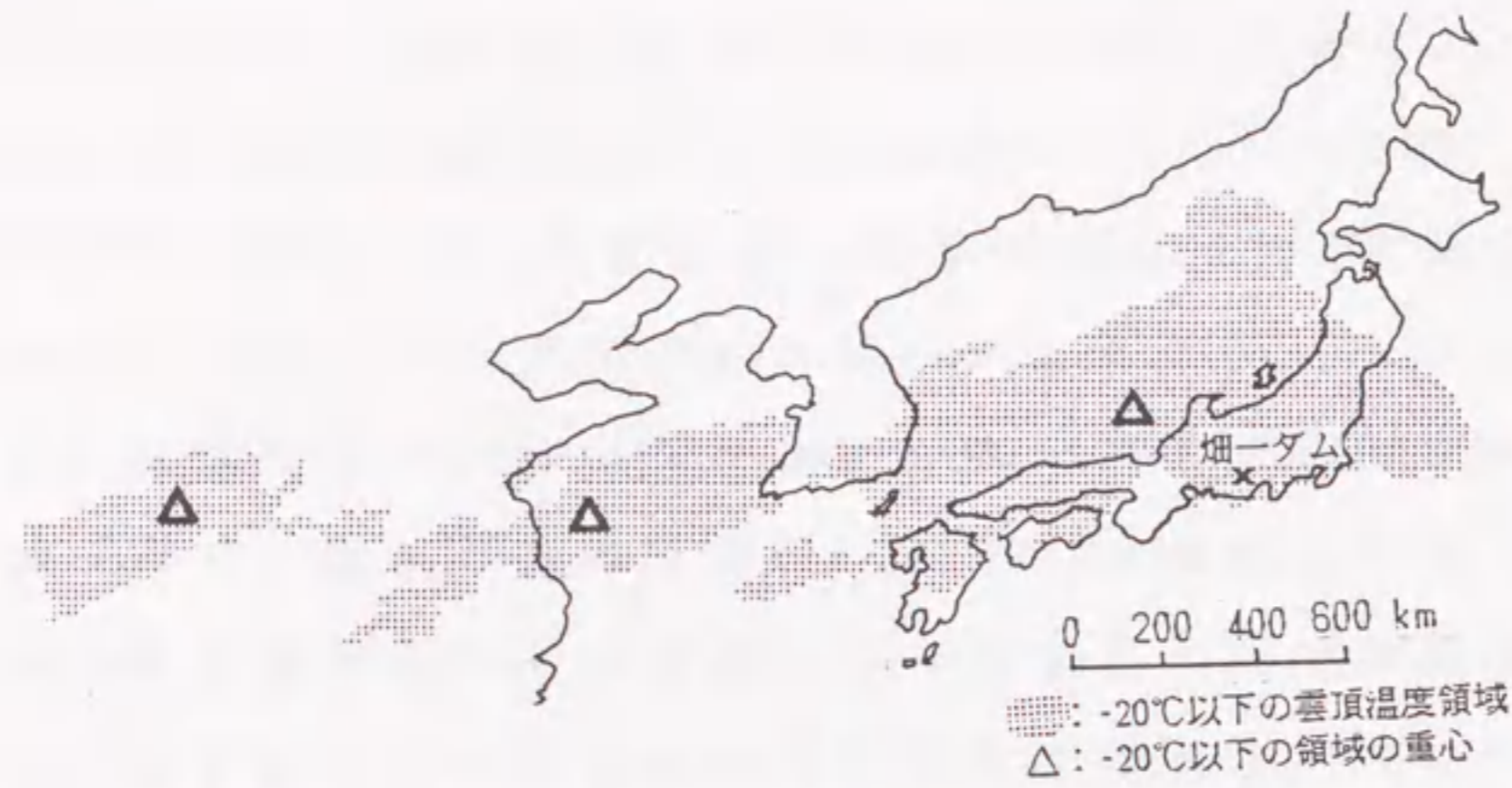


図6・1 GMS-2からみた -20°C 以下の雲頂温度分布
(昭和58年7月20日9時)

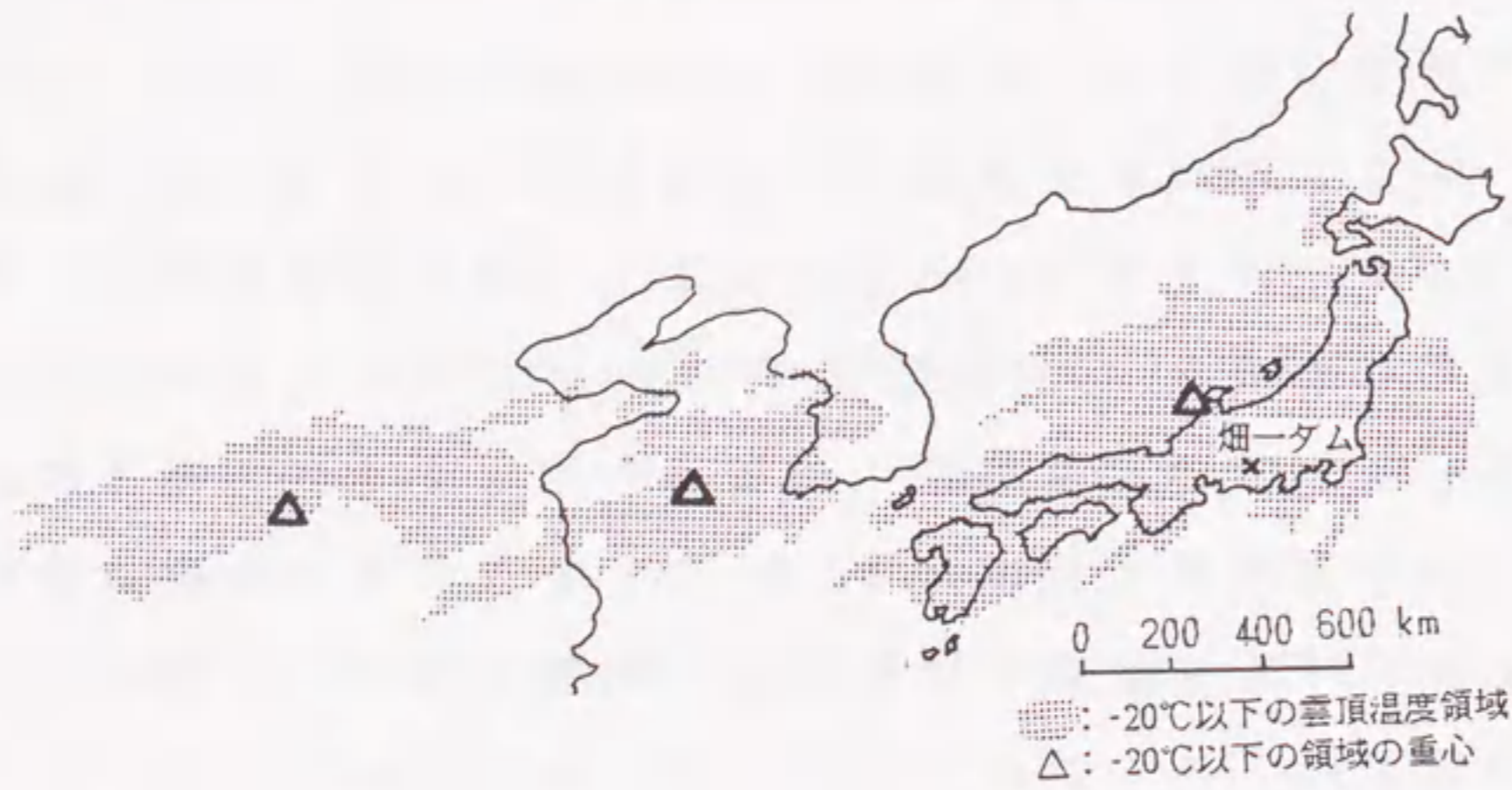


図6・2 GMS-2からみた -20°C 以下の雲頂温度分布
(昭和58年7月20日12時)

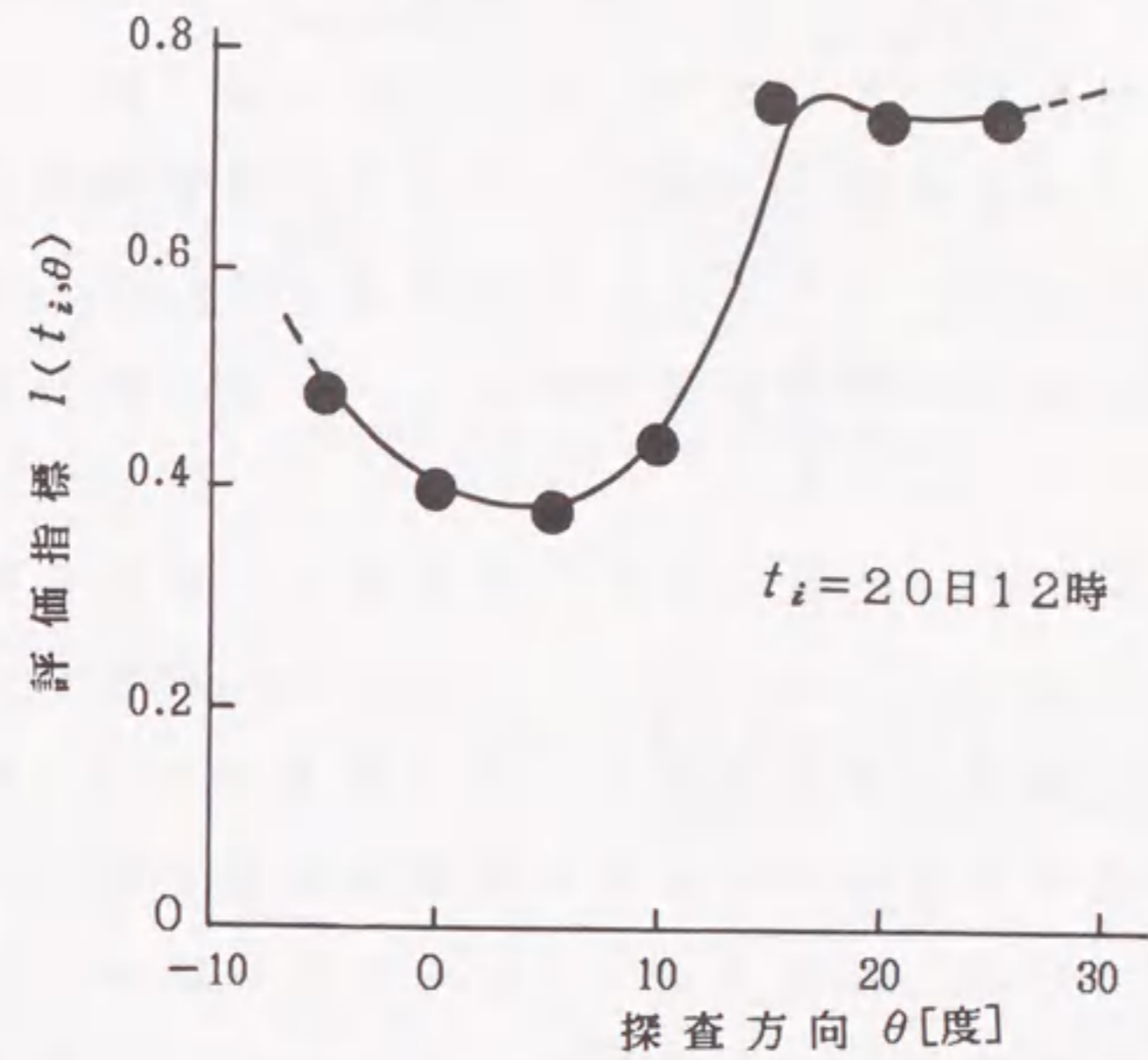


図6・3 降雨域移動方向の推定に用いた評価指標
(昭和58年7月20日～23日の降雨, 予測1回目)

6・3・2 畑一ダム以西における降雨分布の推定

20日12時におけるAMeDASデータを用いて、畑一ダムから西方 $\theta = 5$ 度方向(降雨域移動方向)に幅30kmの直線状の帯をとり、九州の端(西方550kmの地点)までの降雨分布を調べ、その結果を図6・4に◇印およびそれを結んだ細かい実線で示す(同図の太い実線

については後述する)。第5章で述べた手法のみによれば、約12時間先(550 km/45 km/h)までの降雨予測しかできないことになる。同図によれば、約550 km以遠は九州西方海洋上であり、そこでの観測雨量データは得られていない。そこで、つぎのようにして、九州以西における海上の降雨分布を推定し、一連の降雨全体を予測できるようにした。

図6・2に示した20日12時の時点における気象衛星データを用いて、畑一ダムを原点として西方 $\theta = 5$ 度方向の雲頂温度分布を求めた。その結果を図6・5に示す。同図における縦軸の正方向は雲頂温度の低くなる方向にとっている。同図を図6・4の◇印を結んだ細い実線と比較対照すれば、大体において、 -30°C 以下の温度領域で降雨が観測されている。また、雲頂温度 -40°C 付近では降雨量2 mm/h、 -50°C 付近では降雨量4 mm/hが大体において対応している。この関係は、後出する表6・1「AMeDASおよびGMS両データの対応」欄の最上段に示した図のように直線で近似できる。そこで、このような対応が成り立つものと仮定して、九州以遠における降雨分布を推定してみた。その結果を図6・4のAMeDASデータに太い実線で追加記入した。なお、雲頂温度と降雨量との対応付けは、時間の経過とともに変化する可能性があるので、予測時点毎に繰り返すことは前述した通りである。

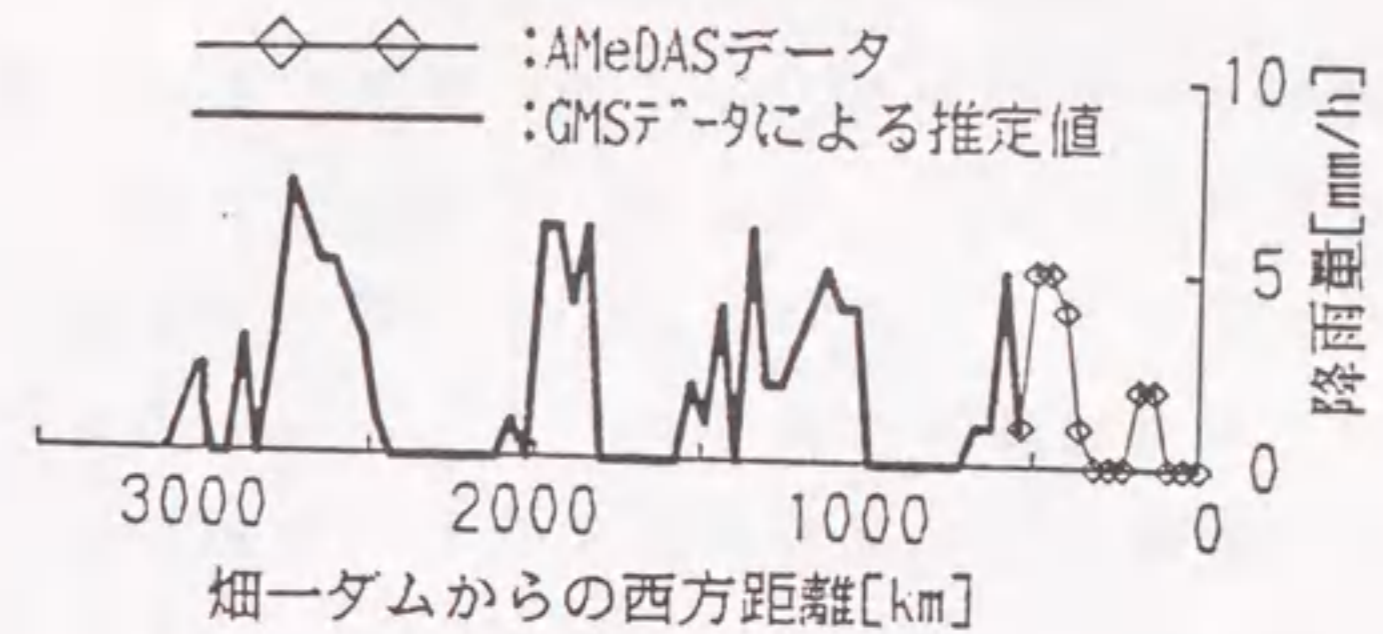


図6・4 AMeDASからみた降雨量の地上分布とGMS-2データを用いた九州以西における降雨の推定(昭和58年7月20日12時現在)

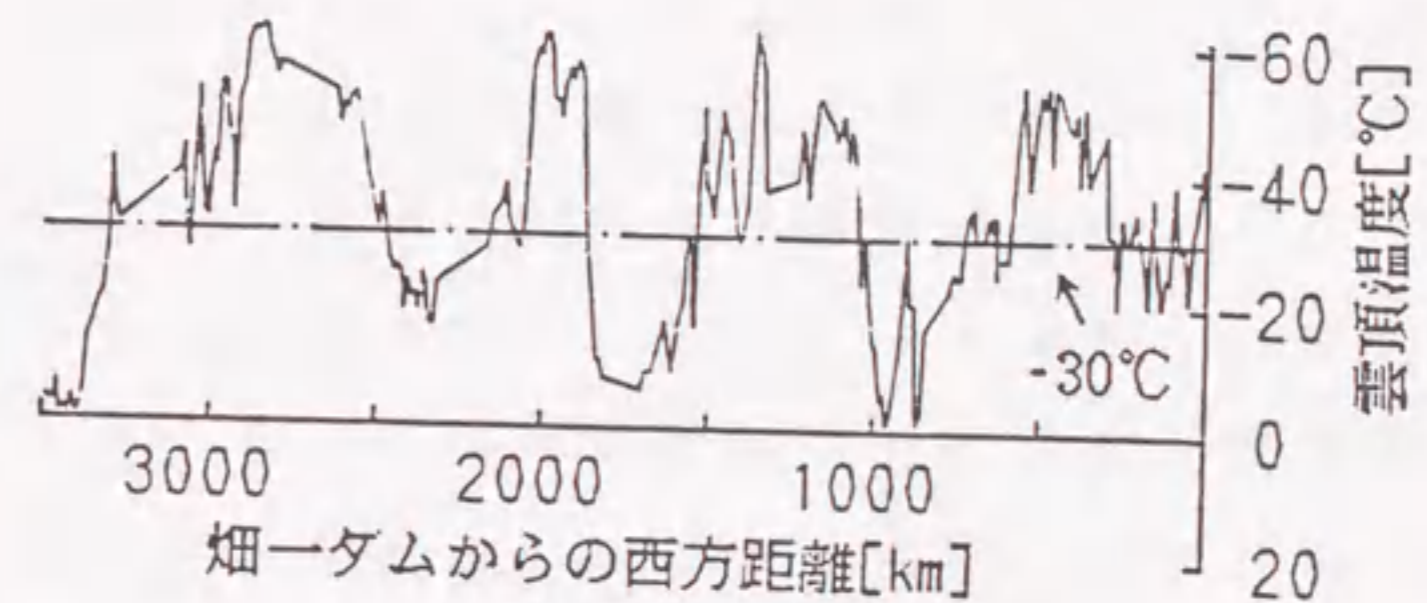
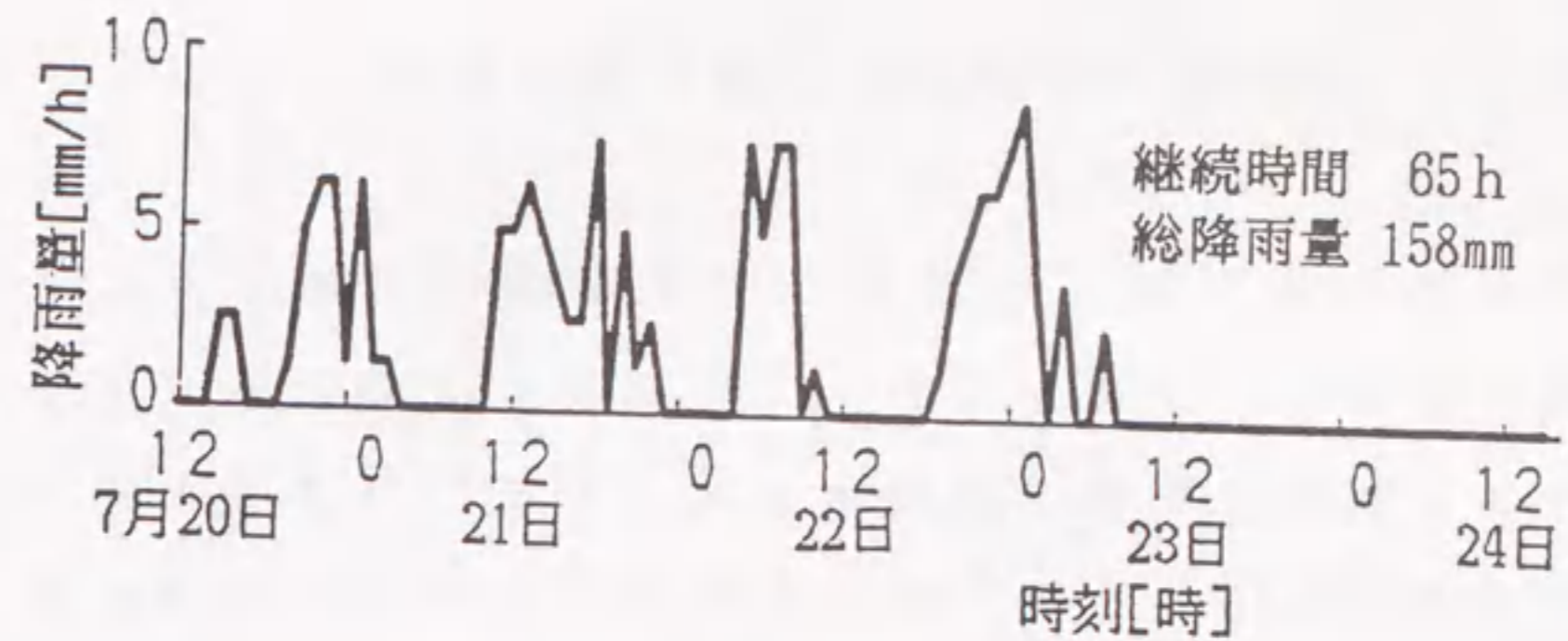


図6・5 雲頂温度の進行方向分布(昭和58年7月20日12時現在)

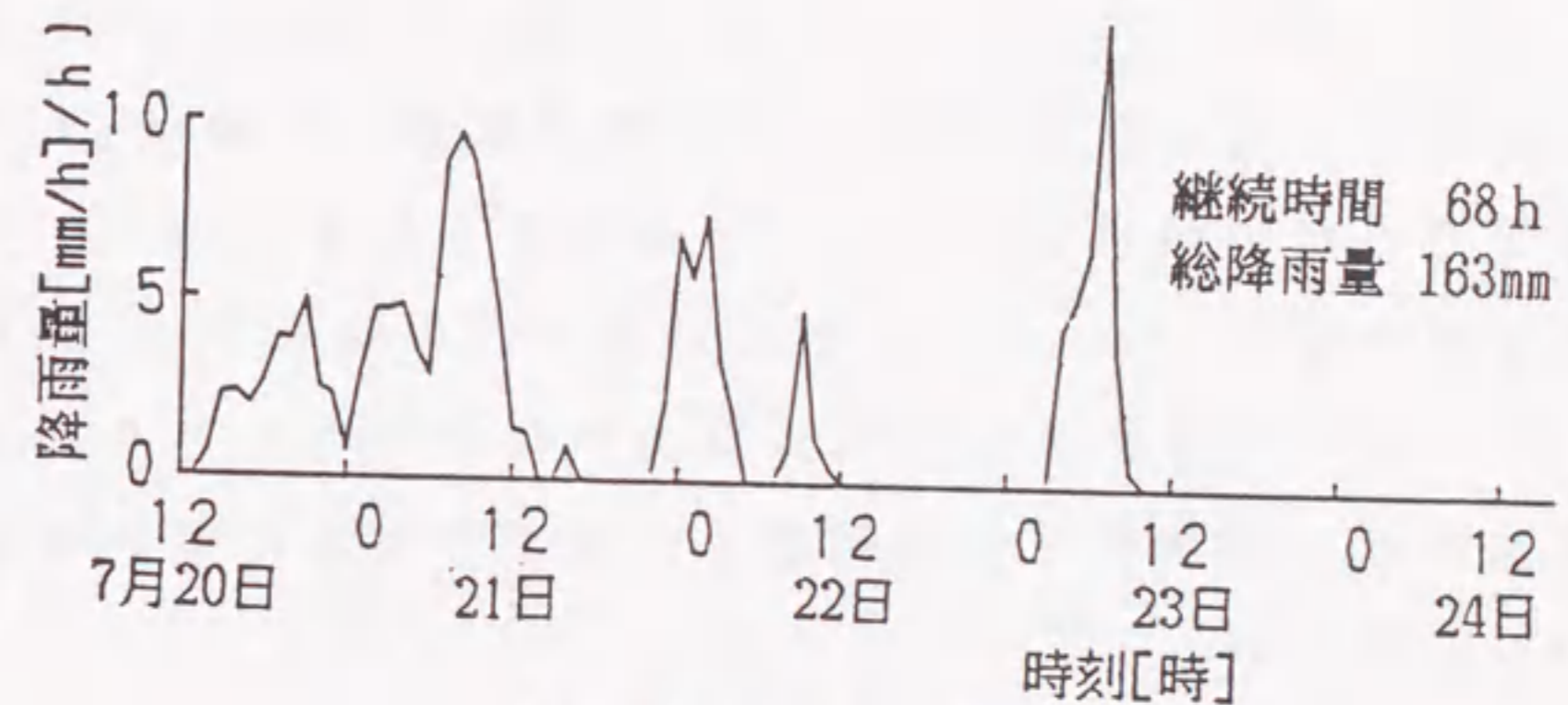
6・3・3 降雨量の時間変動予測

図6・4の◇印を結んだ細い実線と太い実線とを合わせた降雨分布が、1.25倍（この数値は6・2・2節で想定した値である）に発達して畑一ダムを通過するとし、そこでの降雨量を予測する。すなわち、同図の横軸において、距離を雨雲移動速度45 km/hで除して畑一ダムにおける到達時刻に換算し、降雨量を1.25倍したものを図6・6(a)に示す。これが補正済みの畑一ダム上流域における降雨量の時間変動予測値であり、65時間（約3日間）程度先まで降雨が続くと予測されている。

この予測がどの程度良いものかを見るために、後で得られた畑一ダム上流域における降雨量時間変動の実測値を同図(b)に示しておく。図6・6(a)および(b)を比較すると、降雨の開始および終了時刻、すなわち降雨継続時間は大体において一致しているほか、その期間、降雨が断続するという傾向も類似している。また、総降雨量に関しては予測値158mm、実測値163mmであり、両者良い一致を示している。このように、本章で提案した長期間降雨予測手法の有効性が示されている。



(a)降雨量時間変動予測結果



(b)降雨量時間変動実測結果

図6・6 降雨予測結果(昭和58年7月20日12時現在における予測)

6.4 降雨量の時間変動予測の逐次修正

前述のように，降雨量の時間変動を予測することは気象衛星およびAMeDASの両データが更新される毎（3時間毎または1時間毎）に繰り返し行うことができる。そうすることにより，降雨量の時間変動予測値を逐次修正していくことができる。ここでは，予測結果の逐次修正の効果をおおまかに見るため，予測計算のステップ間隔を9～15時間程度とした。

図6.6(a)に示したように，1回目の予測時点（7月20日12時の時点）から15時間が経過した時点（7月21日3時の時点）において，再度降雨予測を行った。その結果を図6.7に太い実線で示す。この時点では，すでに畑一ダムにおいても実際に降雨が観測されているので，同図には，それまでの実測値を原点より左側に細い実線で示しておいた。

さらに，9時間後（7月21日12時）において，同様の予測計算を行った。その結果を図6.8に示す。

上述の3回の逐次予測結果を，降雨継続時間および総降雨量について，その実測値と比較するために表6.1にケースIとしてまとめた。同表には，降雨継続時間および総降雨量の実績値および予測値とともに予測に用いたデータ（雨雲移動方向，速度およびAMeDAS・GMS両データの対応関係）も併記している。なお，前述した

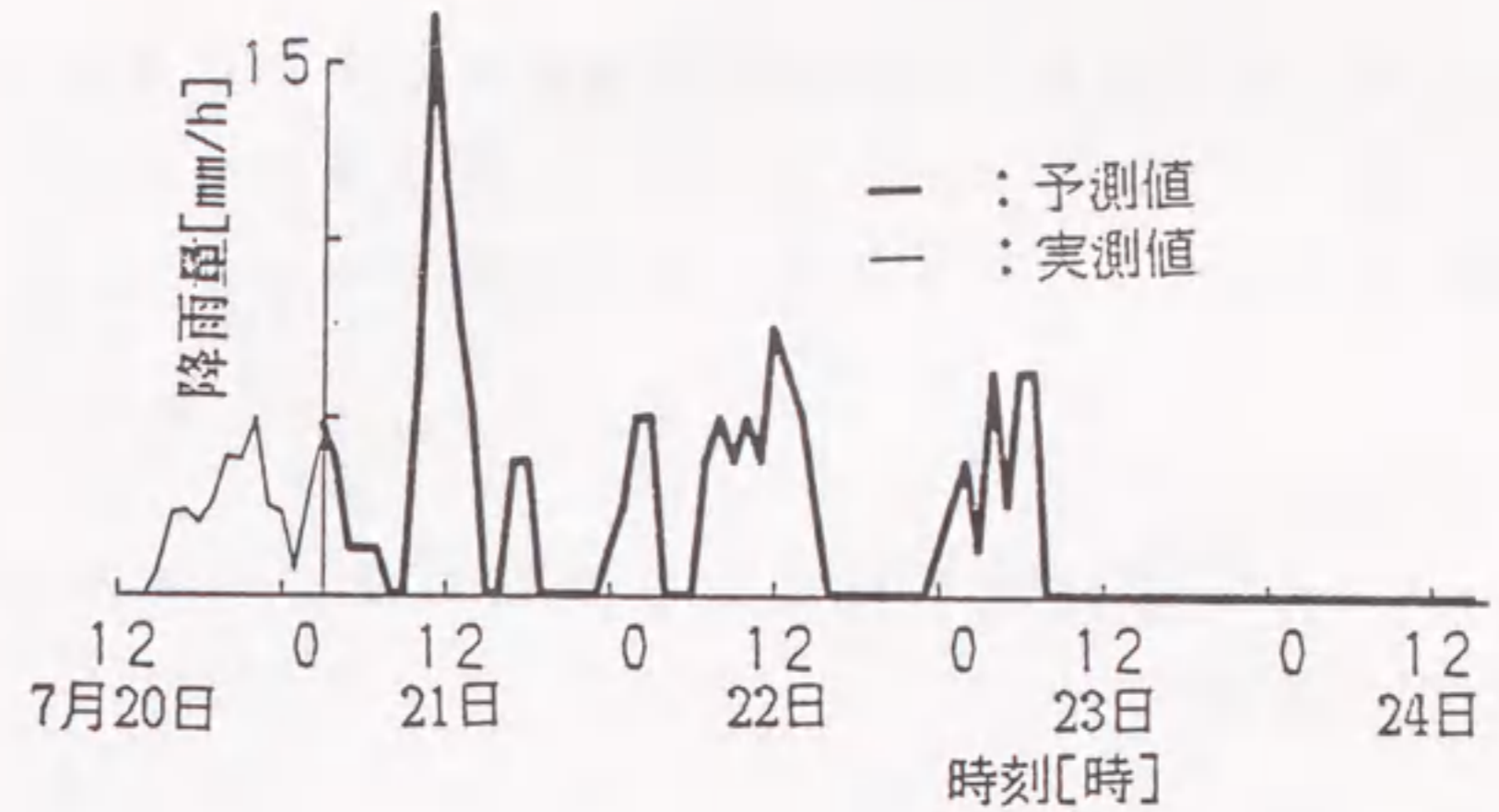


図6.7 降雨予測結果(昭和58年7月21日3時現在における予測)

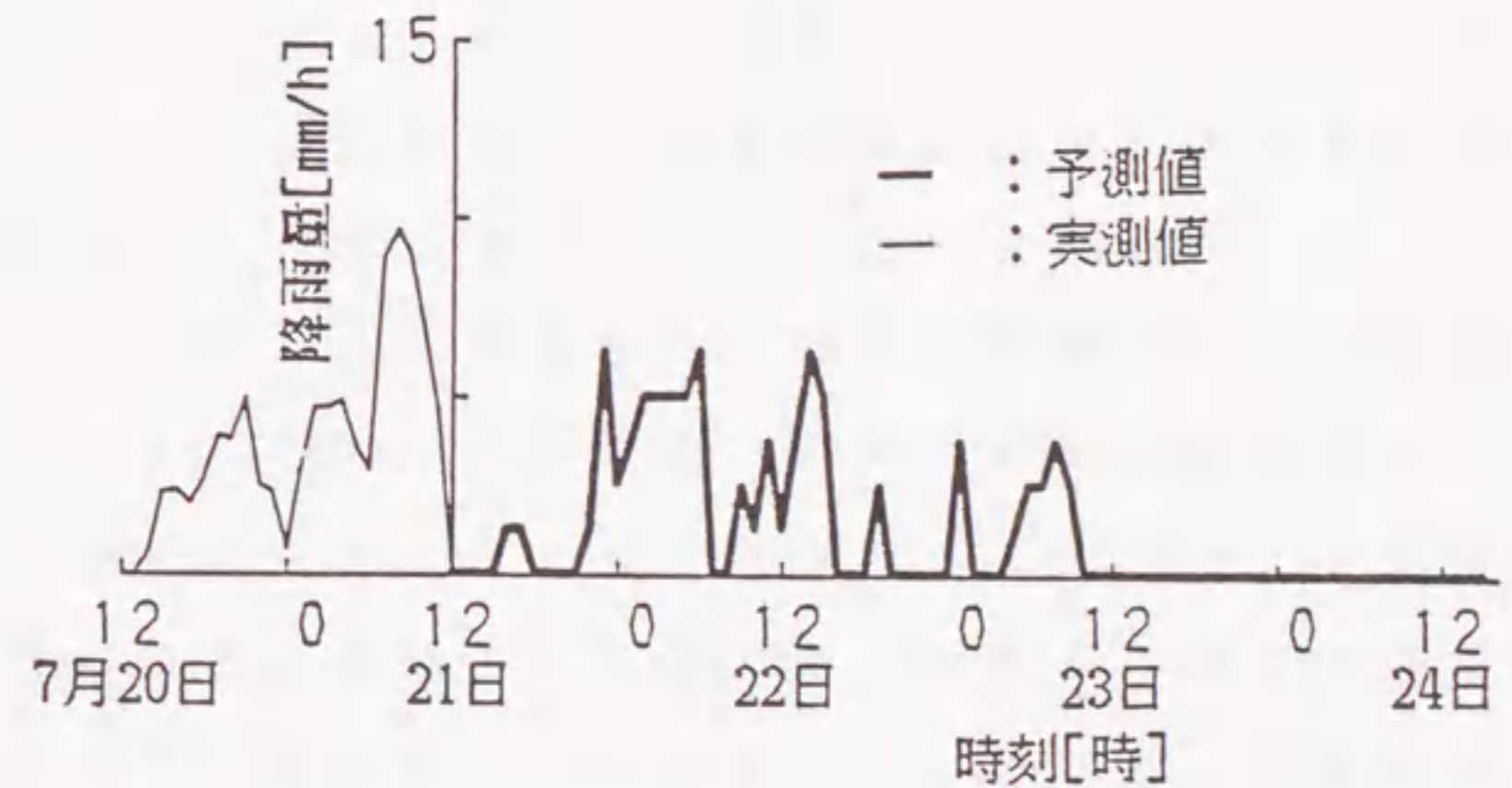
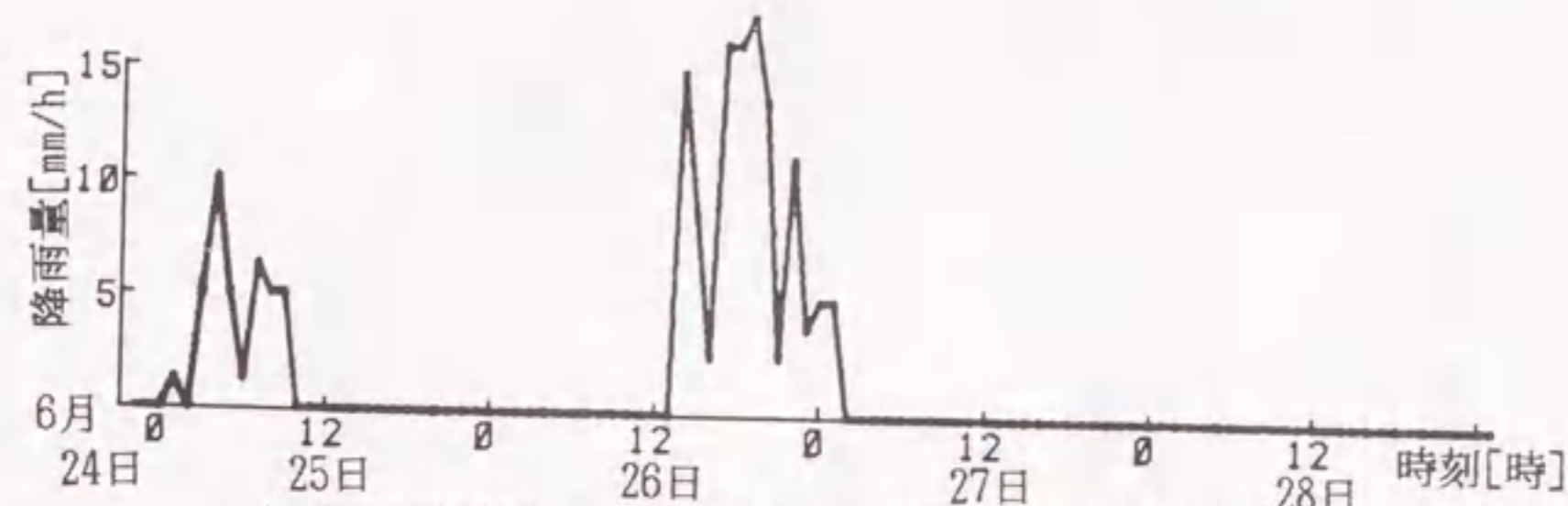


図6.8 降雨予測結果(昭和58年7月21日12時現在における予測)

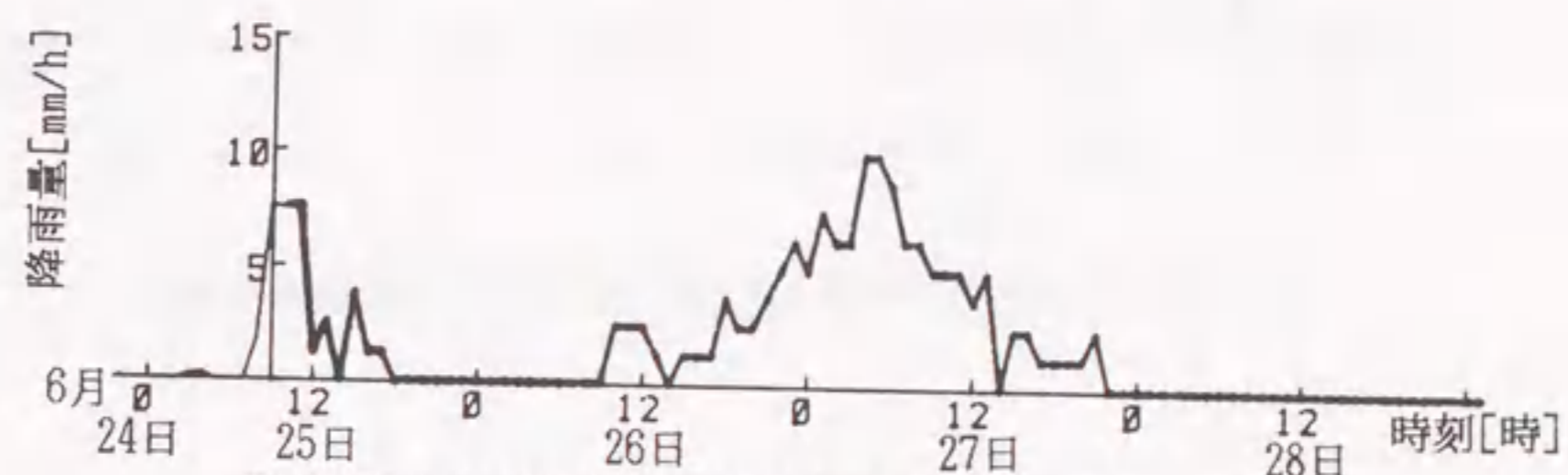
ように、各予測毎に雲頂温度と降雨量との対応関係が異なっている。ここに示したように、降雨継続時間および総降雨量は常に良い予測ができているといえる。

6.5 その他の降雨例による長期間降雨予測手法の検討

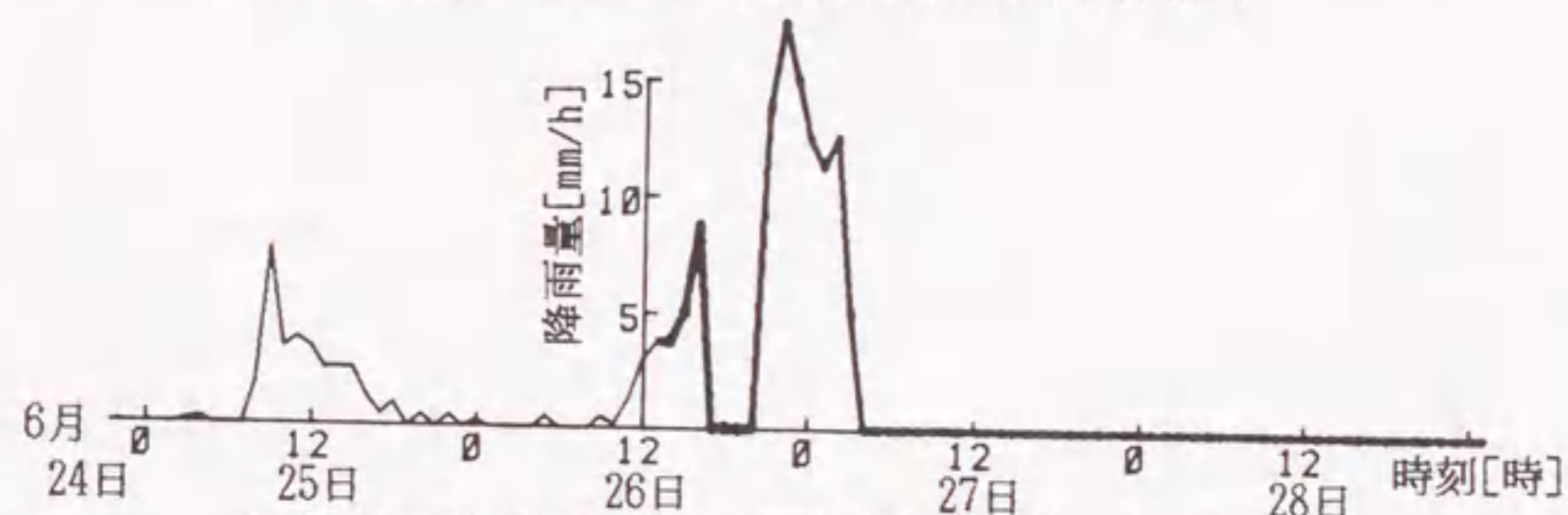
前述で検討した降雨例の他に、気象衛星、AMeDASおよびダム日誌の各データがすべて筆者らの手元にあるもの4例について、本章で述べた長期間降雨予測手法を適用してみた。その結果を図6.9～図6.12に示し、表6.2～表6.5のケースII～ケースVとしてまとめた。図には比較のために実測降雨データも併記している。図6.9および表6.2に示したケースIIはケースIの場合と同様に、比較的長時間続く例であり、ここでも3回の修正予測結果を示している。図6.10～図6.12および表6.3～表6.5に示したケースIII～ケースVは比較的短時間で終わる降雨の例であり、予測は1回のみ行った結果を示している。これらの降雨予測結果の良否を表す指標として、総降雨量の予測誤差および降雨量の時間変動パターンの予測曲線と実測曲線との相関係数を取り上げ表6.6にまとめた。相関係数はその値が1に近い程、予測曲線と実測曲線の形状は似ていると言える。



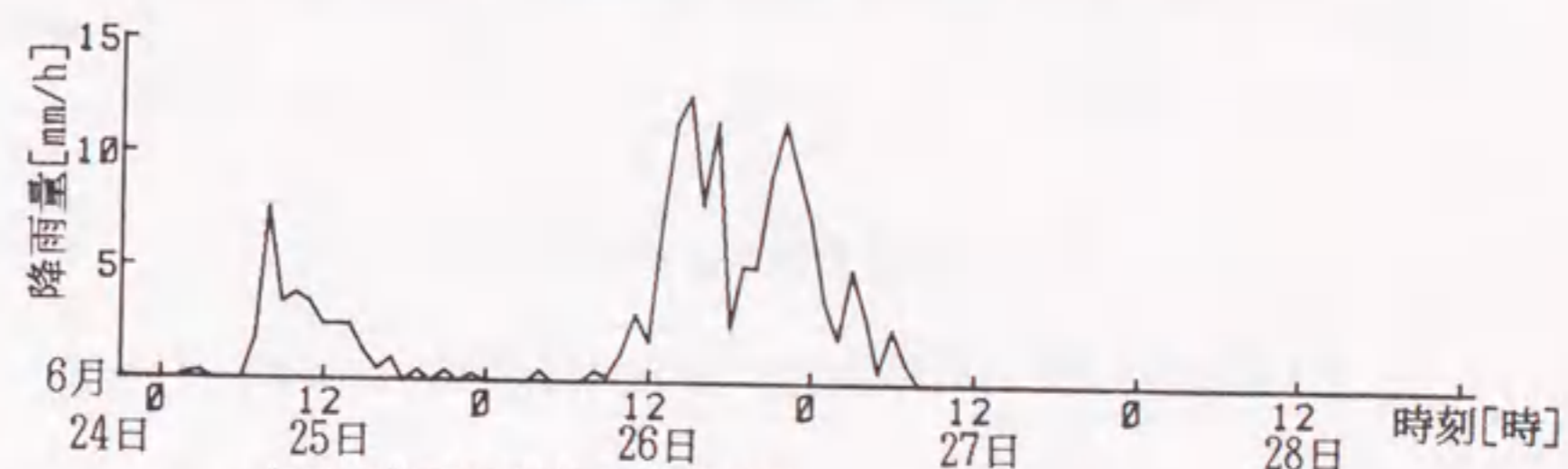
(a) 24日21時現在における降雨時間変動予測結果



(b) 25日9時現在における降雨時間変動予測結果

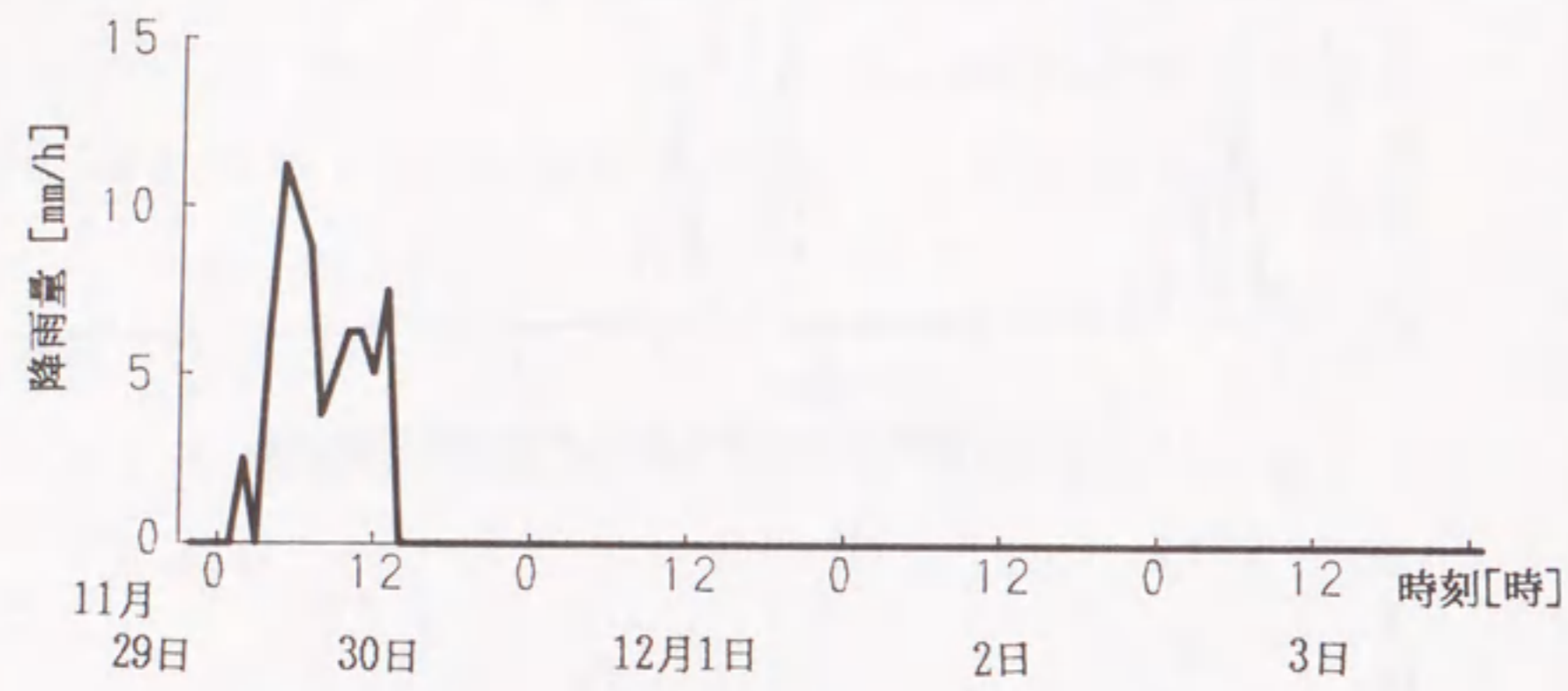


(c) 26日12時現在における降雨時間変動予測結果

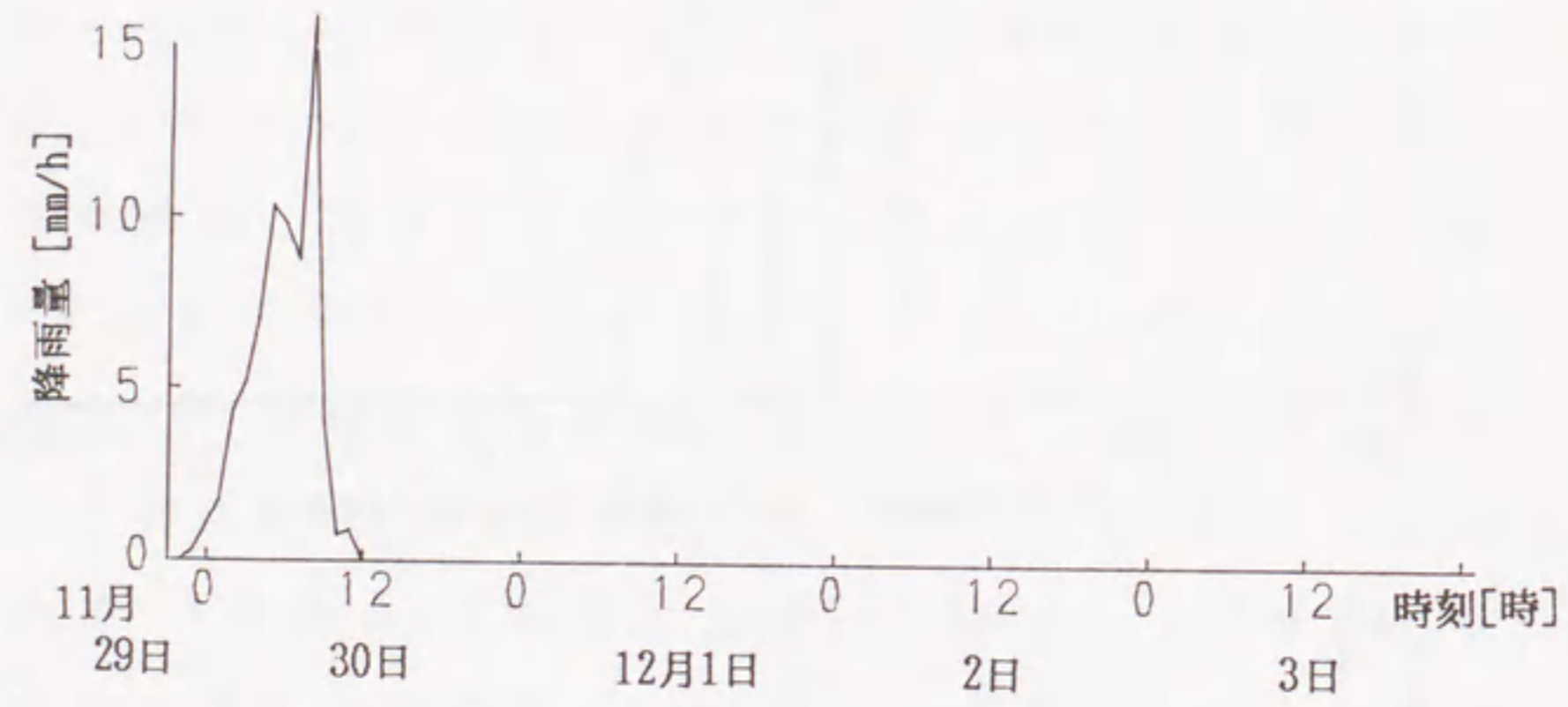


(d) 降雨時間変動実測結果

図6.9 降雨予測結果 (昭和59年6月25～27日の降雨; ケースII
図(a)～(c)において縦軸の時刻が予測時点)

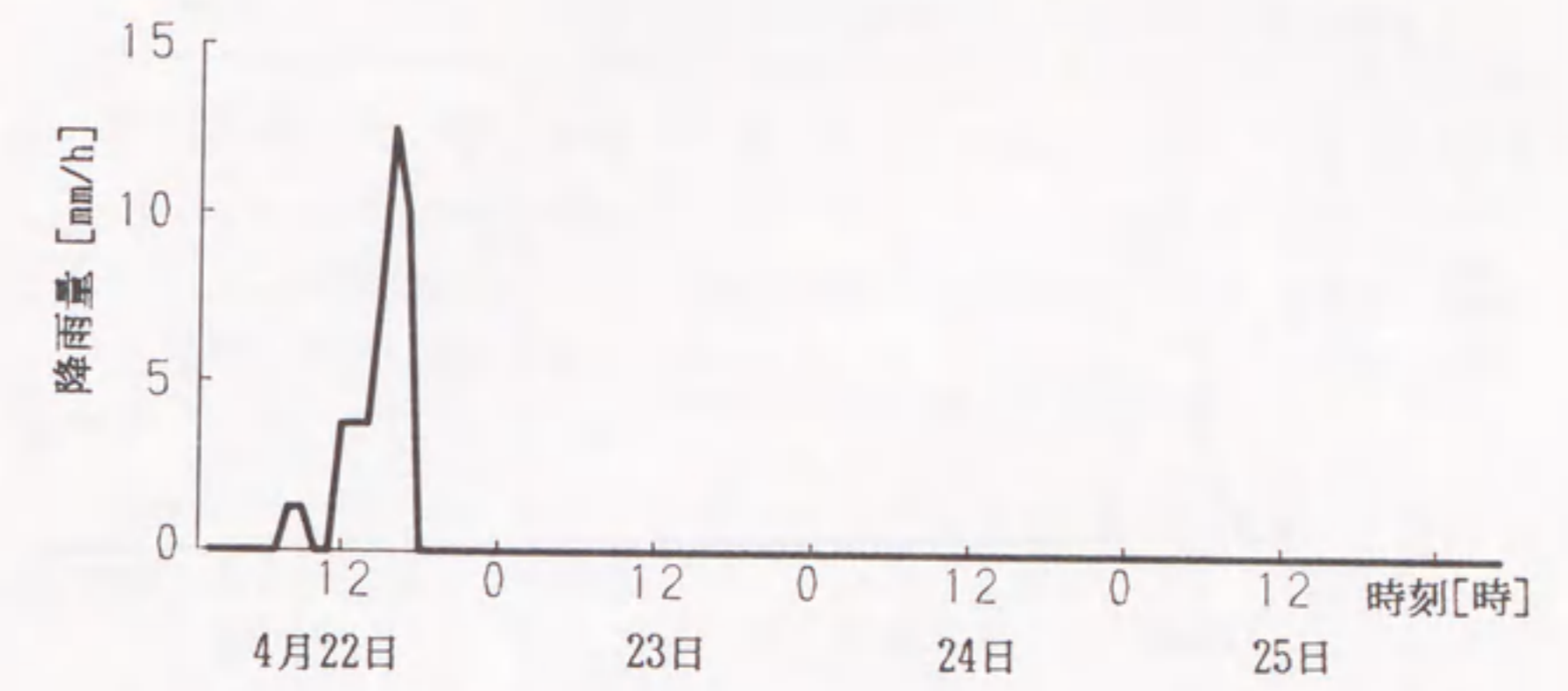


(a) 29日21時現在における降雨時間変動予測結果

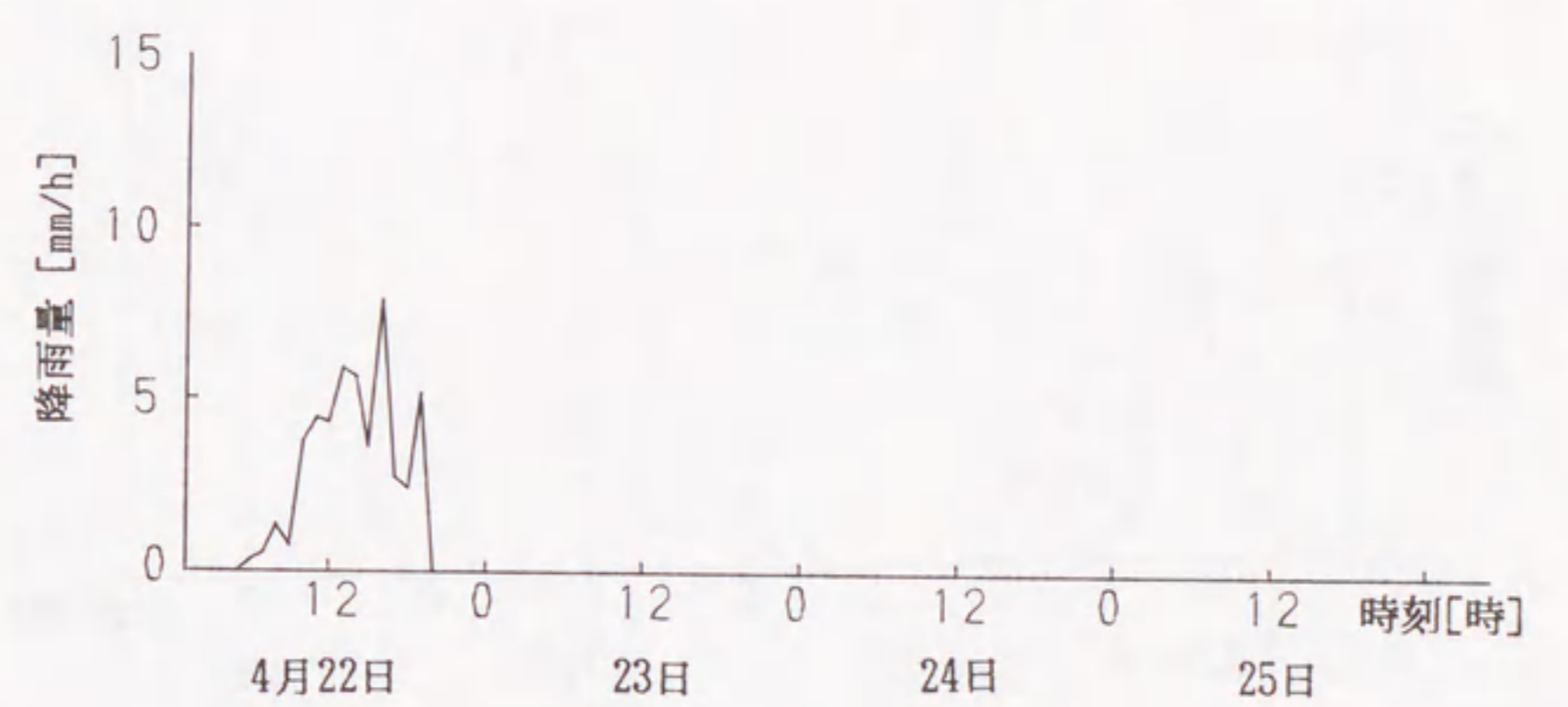


(b) 降雨時間変動実測結果

図6・10 降雨予測結果(昭和57年11月29~30日の降雨;ケースⅢ)

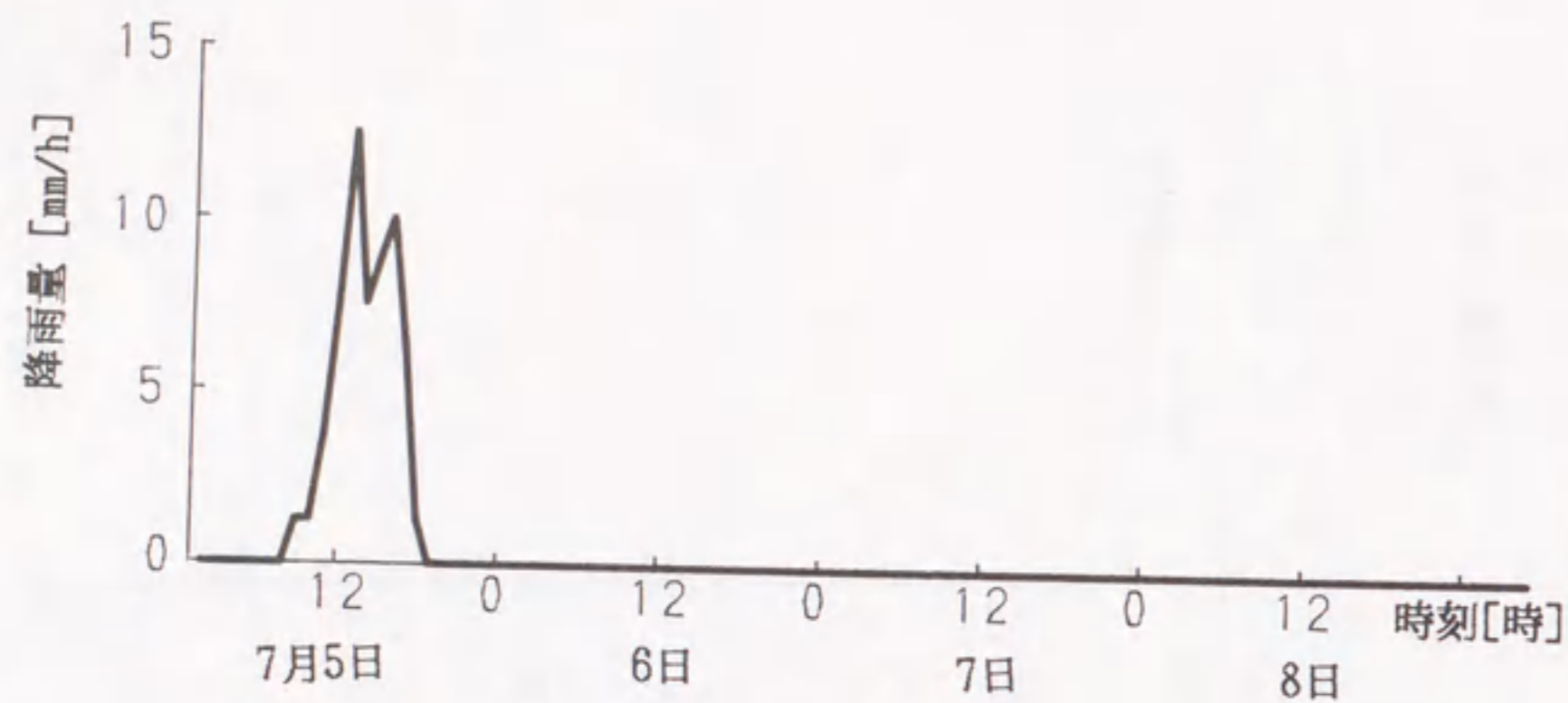


(a) 22日1時現在における降雨時間変動予測結果

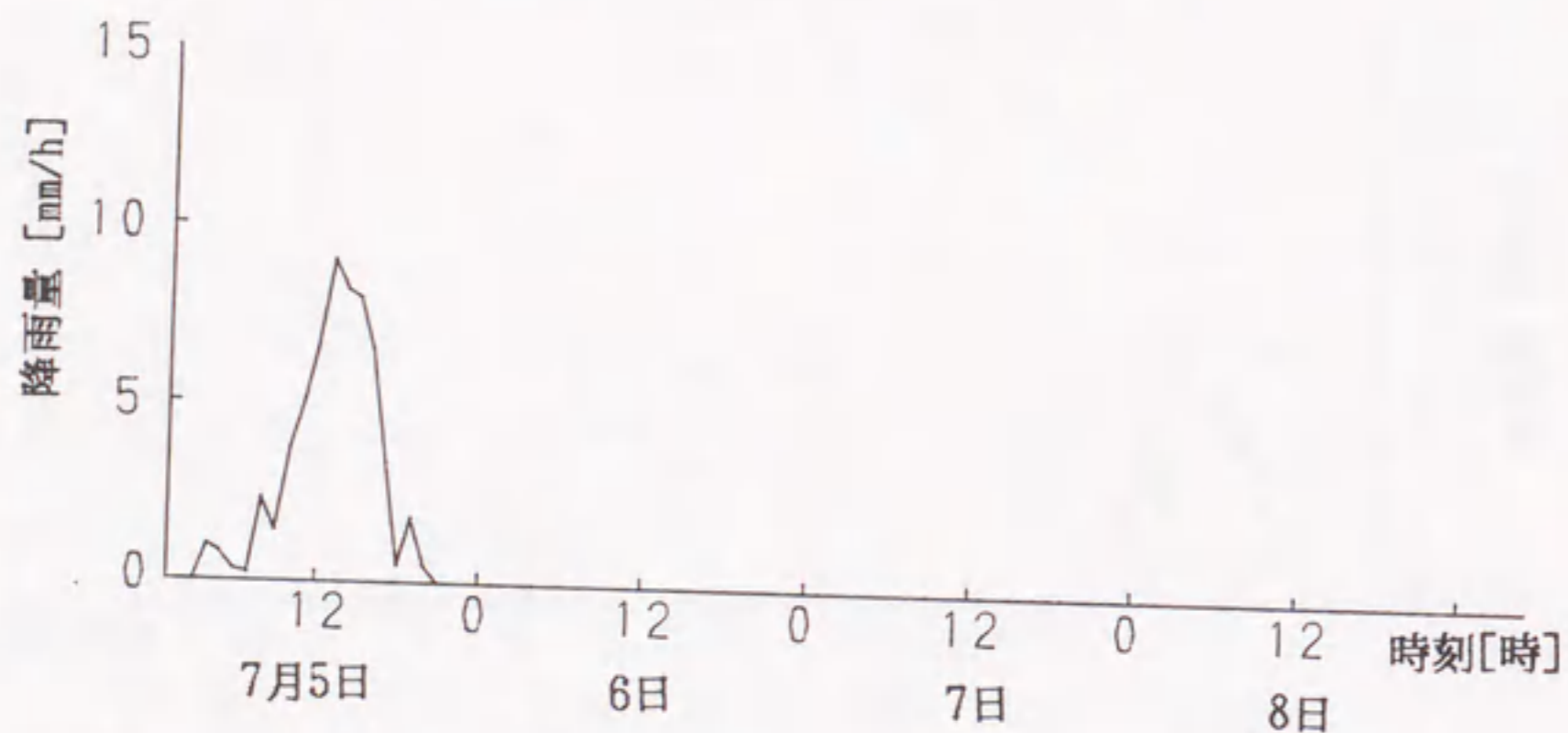


(b) 降雨時間変動実測結果

図6・11 降雨予測結果(昭和58年4月22日の降雨;ケースⅣ)



(a) 5日1時現在における降雨時間変動予測結果



(b) 降雨時間変動実測結果

図6・12 降雨予測結果(昭和58年7月5日の降雨; ケースV)

表6・1 降雨予測結果(昭和58年7月20日~23日の降雨; ケースI)

ケース ステイ 番号	対象降雨		予測 時点 ・ 修正 回数	用いたデータ		予測結果			
	期間	継続 時間 h		総降 雨量 mm	雨雲の移動		継続 時間 h	総降 雨量 mm	
					方向 度	速度 km/h			AMeDASおよびGMS 両データの対応
I-1	昭和 58年 7月			20日 12時	5	45		65	158
				1 回 目					
I-2	20日 12時 ~	68	163	21日 3時	0	45		65	183
				2 回 目					
I-3	23日 18時			21日 12時	10	45		68	176
				21日 12時					
				3 回 目					

表6・2 降雨予測結果 (昭和59年6月25日～27日の降雨; ケースII)

ケース ステージ 番号	対象降雨		予測 時点 ・ 修正 回数	用いたデータ		予測結果				
	期間	継続 時間 h		総降 雨量 mm	雨雲の移動		継続 時間 h	総降 雨量 mm		
					方向 度	速度 km/h				
II-1	昭和 59年 6月 25日 8時 ～ 27日 8時	54	157	24日 21時 ・ 1 回 目	25	70		49	156	
				25日 9時 ・ 2 回 目	5	70				
				26日 12時 ・ 4 回 目	0	70				

表6・3 降雨予測結果 (昭和57年11月29日～30日の降雨; ケースIII)

ケース ステージ 番号	対象降雨		予測 時点 ・ 修正 回数	用いたデータ		予測結果			
	期間	継続 時間 h		総降 雨量 mm	雨雲の移動		継続 時間 h	総降 雨量 mm	
					方向 度	速度 km/h			
III	昭和 57年 11月 29日 22時 ～ 30日 12時	13	70	29日 21時 ・ 1 回 目	5	60		12	73
				22日 19時 ・ 1 回 目					

表6・4 降雨予測結果 (昭和58年4月22日の降雨; ケースIV)

ケース ステージ 番号	対象降雨		予測 時点 ・ 修正 回数	用いたデータ		予測結果			
	期間	継続 時間 h		総降 雨量 mm	雨雲の移動		継続 時間 h	総降 雨量 mm	
					方向 度	速度 km/h			
IV	昭和 58年 4月 22日 5時 ～ 22日 19時	14	49	22日 1時 ・ 1 回 目	30	60		10	45
				22日 19時 ・ 1 回 目					

表6・5 降雨予測結果 (昭和58年7月5日の降雨; ケースV)

ケース スタディ 番号	対象降雨		予測 時点 ・ 修正 回数	用いたデータ		予測結果		
	期間	継続 時間 h		雨雲の移動		継続 時間 h	総降 雨量 mm	
				方向 度	速度 km/h			
V	昭和 58年 7月 5日 3時 ~ 5日 17時	16	59	5日 1時 ・ 1 回 目	10	50	10	40

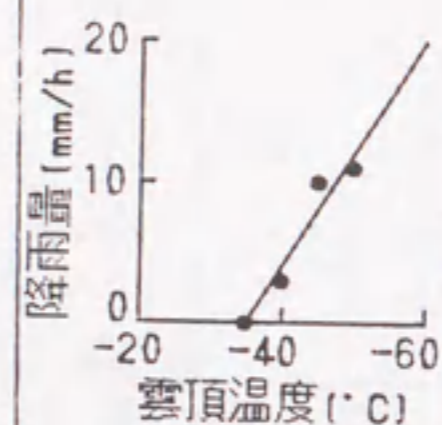


表6・6 降雨予測結果の評価

ケース スタディ 番号	予測 修正 回数	総降雨量 誤差 [%]	相関係数
長 時 間 降 雨	I	1回目	0.219
		2回目	0.552
		3回目	0.775
	II	1回目	0.675
		2回目	0.642
		4回目	0.768
短 時 間 降 雨	III 1回目	0.792	
	IV 1回目	0.738	
	V 1回目	0.951	
平均		絶対値 の平均 } 6.3	0.679

(注1) :

$$\text{総降雨量誤差} = \frac{(\text{予測総降雨量} - \text{実測総降雨量})}{\text{実測総降雨量}} \times 100 [\%]$$

第4章において出水伝達関数を選定するにあたり、予想継続時間が35時間以上か否かを知ることが重要であるが、表6・1～表6・5において、各降雨の予測継続時間はいずれも実績と完全に一致している。また、総降雨量はいずれの場合についてもその予測値は実績値に比較的近い値を示している。表6・6から、予測誤差の絶対値は9例平均6.3%、最大13%程度であることがわかる。また、相関係数の値は9例中8例が0.5以上である。同表において、長時間降雨ケースIの第1回目の予測時点では、総降雨量の予測誤差は-3%程度と比較的小さいが予測降雨曲線の相関係数は0.2程度であり良くない。図6・6に示しているように、22日の午後には実際に降雨は休止しているが、予測ではその時間帯で降雨があるとしている。そのため、相関係数としては低い値を示している。しかしながら、同図(a)および(b)を降雨の断続状況という面からみると、大体において予測できている。しかも長時間降雨ケースIおよびケースIIのいずれの場合にも、逐次予測を繰り返す毎に、降雨曲線の相関係数は1に近づく傾向にある。

6・6 あとがき

ここでは大井川上流畑一ダムを例にとっている。第5

章で述べたように、AMeDASデータのみによる降雨予測では、九州の西端まで含めても550km、大体の雨雲速度を50km/hとして、約12時間先までの降雨量変化しか知ることができなかった。そこで、数日間降り続くような長期間降雨の予測にも対処できるように、予測手法に改良を加えた。具体的に、その手法を畑一ダム上流域の降雨5例に適用することにより、以下のような結論が得られた。なお、本長期間降雨予測手法は西から東に移動する降雨に有効である。

- (1) 西日本におけるAMeDASデータからの降雨量とGMSデータから得られる雲頂温度との対応をとり、その関係を九州以西の雨雲にも適用できるものとして日本列島以西における降雨分布を推定する。このように推定した降雨量の分布が雨雲の東進につれてあまり変化しないで対象ダムを通過するものとして、そこでの降雨量の時間変動を予測する。これにより、数日間降り続く長期間降雨に対処できるような降雨予測手法を提案できた。
- (2) 個々の降雨において、雲頂温度の高低と降雨量の大小関係との間にある程度の相関関係が認められる。しかしながら、その相関関係は全降雨に共通するわけではないので、降雨予測時点毎に両者の対応関係を求めなおしているところに本予測手法の特徴があ

る。

(3) 降雨予測に対して、対象河川の地形の影響などに関連して、なんらかの補正をすることがよく行われている。本総合システムにおいても、過去のデータからその補正係数を予め求めておき、その係数を用いて予測降雨量を補正することにした。具体的に畑一ダム上流域においては、予測された時々刻々の降雨量を一律1.25倍することにより、予測精度の向上が図られた。本システムを他の河川に適用する場合には、過去のデータによるシミュレーションを多数繰り返すことにより、この補正係数を予め求めておく必要がある。

(3) 第4章で提案した流量予測手法によれば、出水伝達関数選定に際して、降雨継続時間が単純に35時間よりも長いか、短いかの予測が必要である。このような降雨継続時間の長短に関する予測結果は完全にその実績値と一致していた。

(4) 長時間連続して降る雨も、降雨予測を逐次繰り返すことにより、予測精度が順次改善できる。

(5) 本手法による総降雨量予測の誤差は平均で6.3%であった。第4章で提案した実測降雨を入力とする流量予測の誤差は平均で、短時間降雨では約17%、長時間降雨では約25%であったから、降雨から流量までを一貫して予測した場合、23~31%

の誤差と予想される。

本降雨予測手法と流量予測手法とを組み合わせることにより、発電用ダムへの流入量予測の早期化が可能となる。そこで、降雨から流量までの実用的一貫予測システムについて次章で検討を行ってみた。

第6章の文献

- (1) 小柴ほか：「最近の系統運用施設」，電気協同研究，39 [4]，45～80 (1983)
- (2) 長友，四宮，岡本，宮原，遠山：「降雨・出水予測システムの開発」，電力技術研究会資料，PE-88-143 (1988)
- (3) 下垣，室田，江藤：「雨量観測レーダによる降雨量分布の解析とオン・ライン予測」，第22回水理講演会論文集，169～174 (1978)
- (4) 斉藤：「気象の教室」，435～440 (1984) 東京堂出版
- (5) 加藤，中島，猪川：「GMS画像データとAMeDAS降雨データの比較」，気象衛星センター技術報告，[2] (1980)
- (6) 一柳，小林，篠田，松村，鬼頭：「AMeDAS観測値を活用した発電用ダム上流域における降雨量の時間変動予測手法」，電気学会論文誌，106-B [9]，809～816 (1986)

第7章 予想降雨パターンに基づいた流量予測手法

7.1 まえがき

ダムにおいて雨量を観測してから，その実測雨量を入力データとして用いて運用を行っていたのでは，水資源の有効な利用はほとんど不可能である。それに対し，降雨予測を降雨開始時刻に先だって早期に精度良く行うことができれば，かなり先までの流量変化が推定でき，これにより時間的余裕のあるダム運用が可能となると考えられる。しかし，このような降雨の予測から河川流量推定までを一つのシステムとして実用に供している例は少ない。

筆者らは，前章までに，大井川水系畑薙第一ダムを降雨および流量の予測対象地点として取り上げ，個々に検討を加えてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。降雨に関しては，静止気象衛星(GMS，ひまわり)および地上気象観測システム(AMeDAS)の両データを用いた降雨量の時間変動予測手法を提案し，第5章および第6章で述べている⁽³⁾⁽⁴⁾。流量に関しては，河川流出率を推定するための一手法を提案し，総量予測の精度向上について検討を

行い、その結果について第3章で述べている⁽¹⁾。さらに、降雨による流量増加の時間変動までも含めた予測に関しては、降雨継続時間により分類した出水伝達関数を用いる手法を提案し、第4章で述べている⁽²⁾。そこで、本章では、これらを組み合わせ、入力としての降雨から結果としての河川流量までを一貫して予測するという新しい一つのシステムを構築し、発電用ダム流入量予測の早期化に対する一つの指針を示す。

具体的には、第6章で予測した5例の降雨について、畑一ダムを対象地点として、降雨から流量に至るまで一連の予測を行ってみた。その結果、降雨予測値を用いることにより2～3日先までの流量を推定することの可能性が確認できた。さらに降雨の実測値を用いて流量シミュレーションを行った場合と比較して、その精度は若干低下するのみにとどまることが分かったので以下に述べる。

7.2 降雨から流量までの実用的一貫予測システム

降雨予測手法と流量予測手法とを組み合わせた一貫予測システムの概要は次の通りである。

第4章における筆者らの検討によれば、畑一ダムにおいては、有効雨量を入力とし、河川流出量を出力とする

出水伝達関数は降雨継続時間（35時間未満および35時間以上）に対応して単純に2種類に分類できている。すなわち、予想降雨継続時間35時間未満か、あるいは35時間以上かに対応して短時間出水伝達関数および長時間出水伝達関数を設定した。

まず、ダム流入量予測に用いる伝達関数を選択するために降雨継続時間の長短、特に継続時間が35時間未満か、以上かに重点を置いて降雨予測を行う。次に、第6章で提案した手法に基づいてGMSおよびAMeDASの両データを併用することにより、降雨量の時間変動を予測する。その予測結果に基づいて、第3章で推定した流出率近似曲面を用いることにより有効雨量の時間変動を算定し、それを選択した出水伝達関数の入力データとして用いることによりダム流入量を推定する。降雨から流量までを一貫して予測するための計算フローチャートを図7.1に示す。

7.3 実用的一貫予測システムの検討

7.3.1 一貫予測の具体例

ここでは、本章で提案する降雨から流量に至る一貫予測システムについて、その具体的な手順を示す。具体例として、第6章でケースIとして取り上げた昭和58年

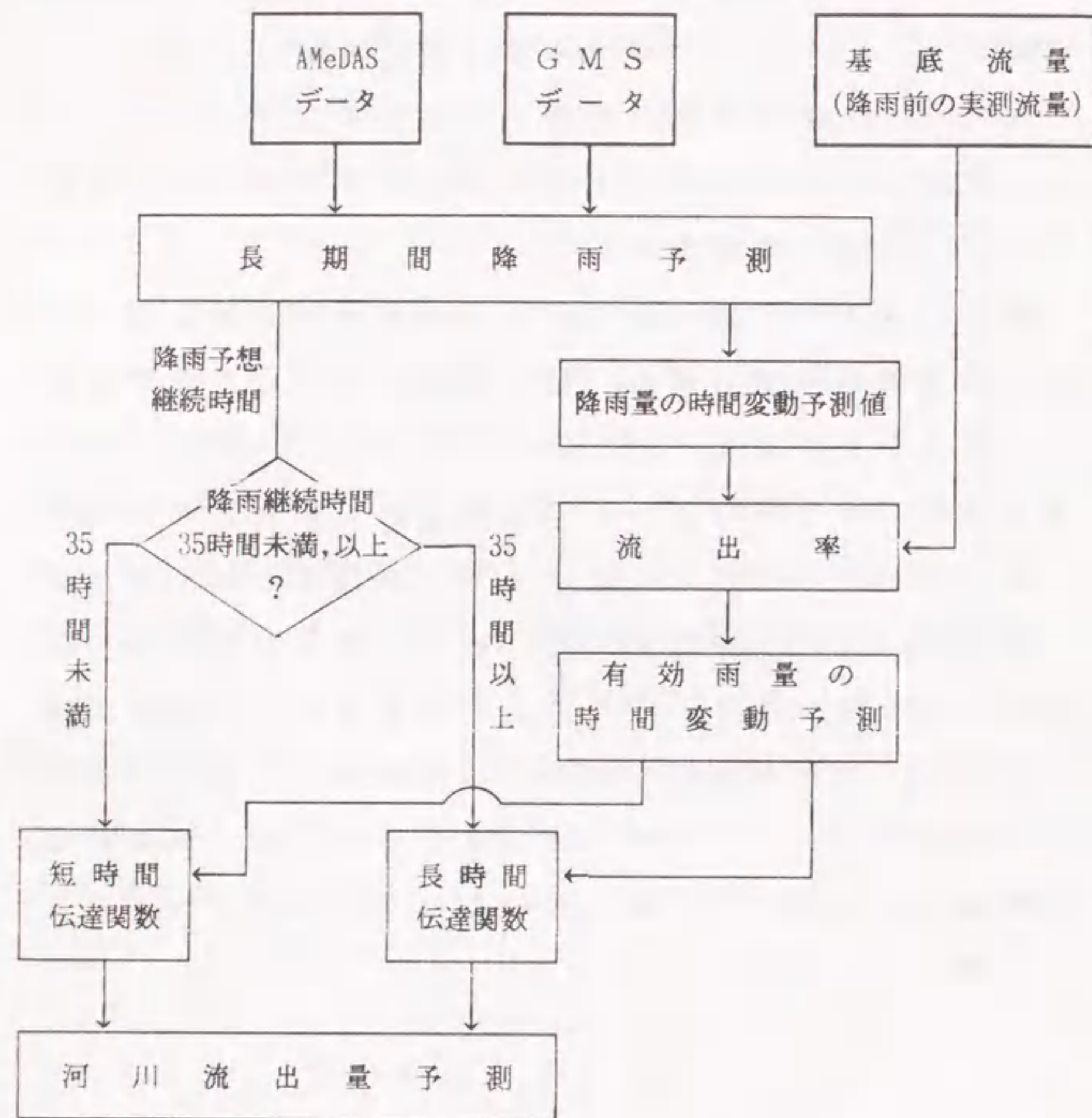


図7・1 降雨から流量までの実用的ー貫予測システム

7月20日～23日について述べる。

図6・6(a)で示した1回目の予測時点(7月20日12時)における降雨予測結果によれば, 降雨継続時間の予想値は65時間で, 長時間降雨に分類できる。したがって, この場合, 長時間出水伝達関数を用いてダム流入量予測を行うことになる。そこで, 図6・6(a)の降雨量の時間変動予測値から有効雨量の時間変動値を推定し, これを長時間出水伝達関数の入力として用い, 得られる出力量をダム流入量の予測値とした。その結果を図7・2に実線で示す。後になって実測して得られたダム流入量を図中の○印で示す。これが1回目の予測結果である。同図によれば, 3日先までの流量予測について総体として比較的良好な結果が得られている。

1回目の予測時点(7月20日12時の時点)から15時間が経過した時点(7月21日3時の時点)において, 再度降雨予測を行った結果は図6・7に太い実線で示されている。この時点では, すでに畑一ダムにおいても実際に降雨が観測されているので, 同図には, それまでの実測値が細い実線で示されている。この時点でのダム流入量の再予測には, この実測降雨と予測降雨とを総合したデータを用いることになる。その結果を2回目の予測結果として図7・3に実線で示した。1回目(図7・2)と2回目(図7・3)の流量予測結果を互いに比較すると, 最初の流入量ピークが現れる時刻およびその大きさに関

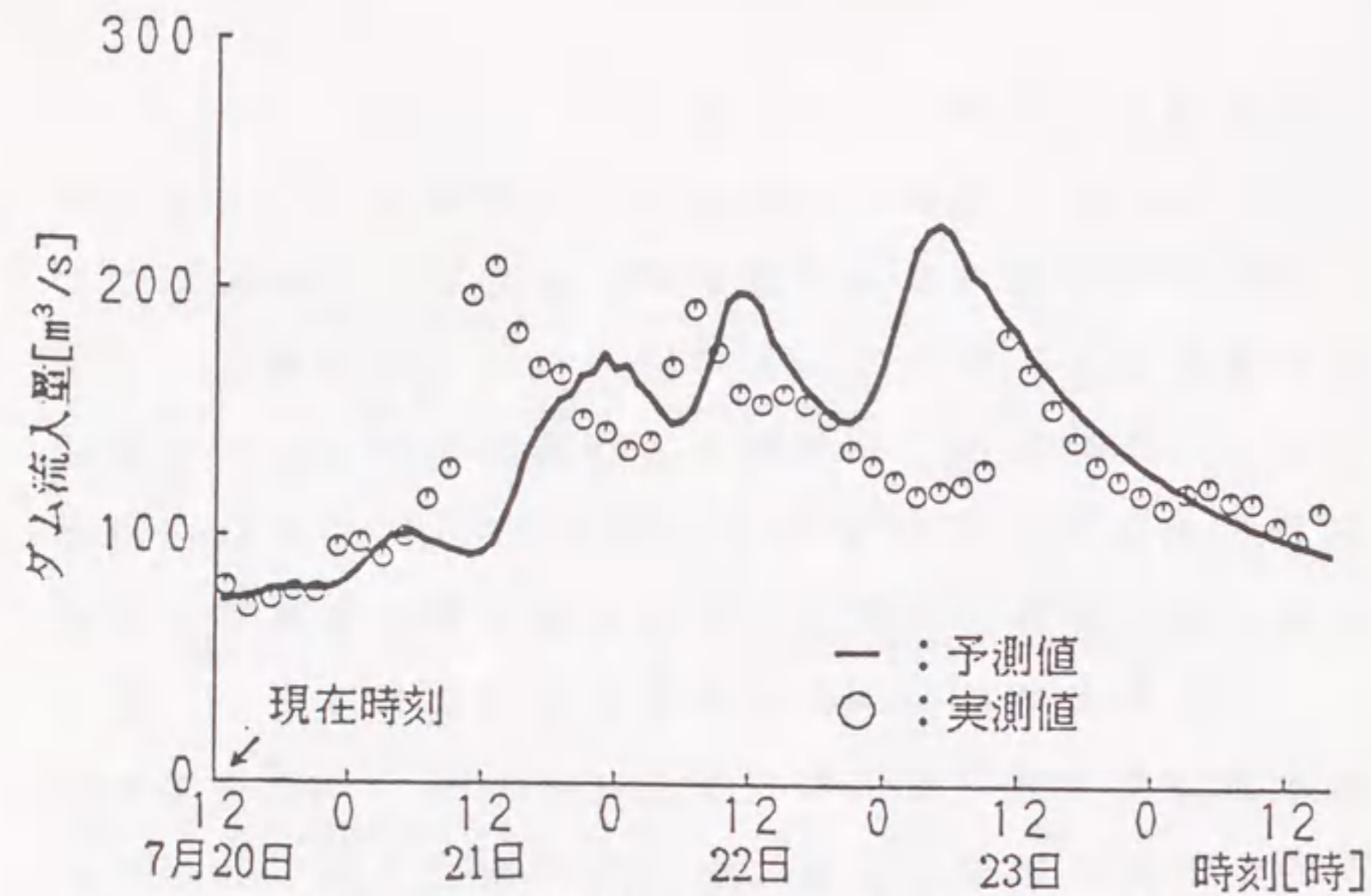


図7.2 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
 (昭和58年7月20~23日の予測降雨; ケース1)
 (同年7月20日12時現在における予測)

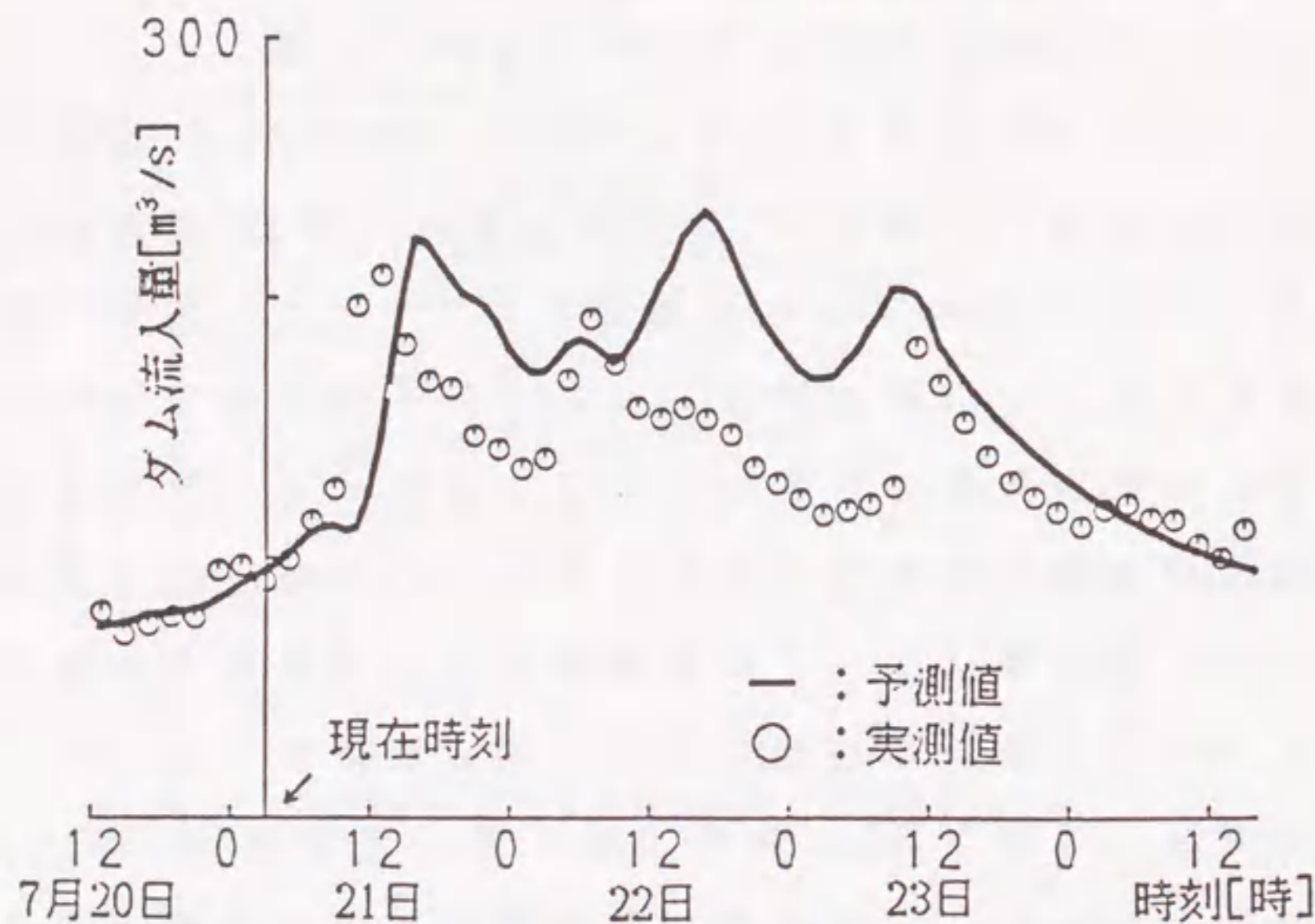


図7.3 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
 (昭和58年7月20~23日の予測降雨; ケース1)
 (同年7月21日3時現在における予測)

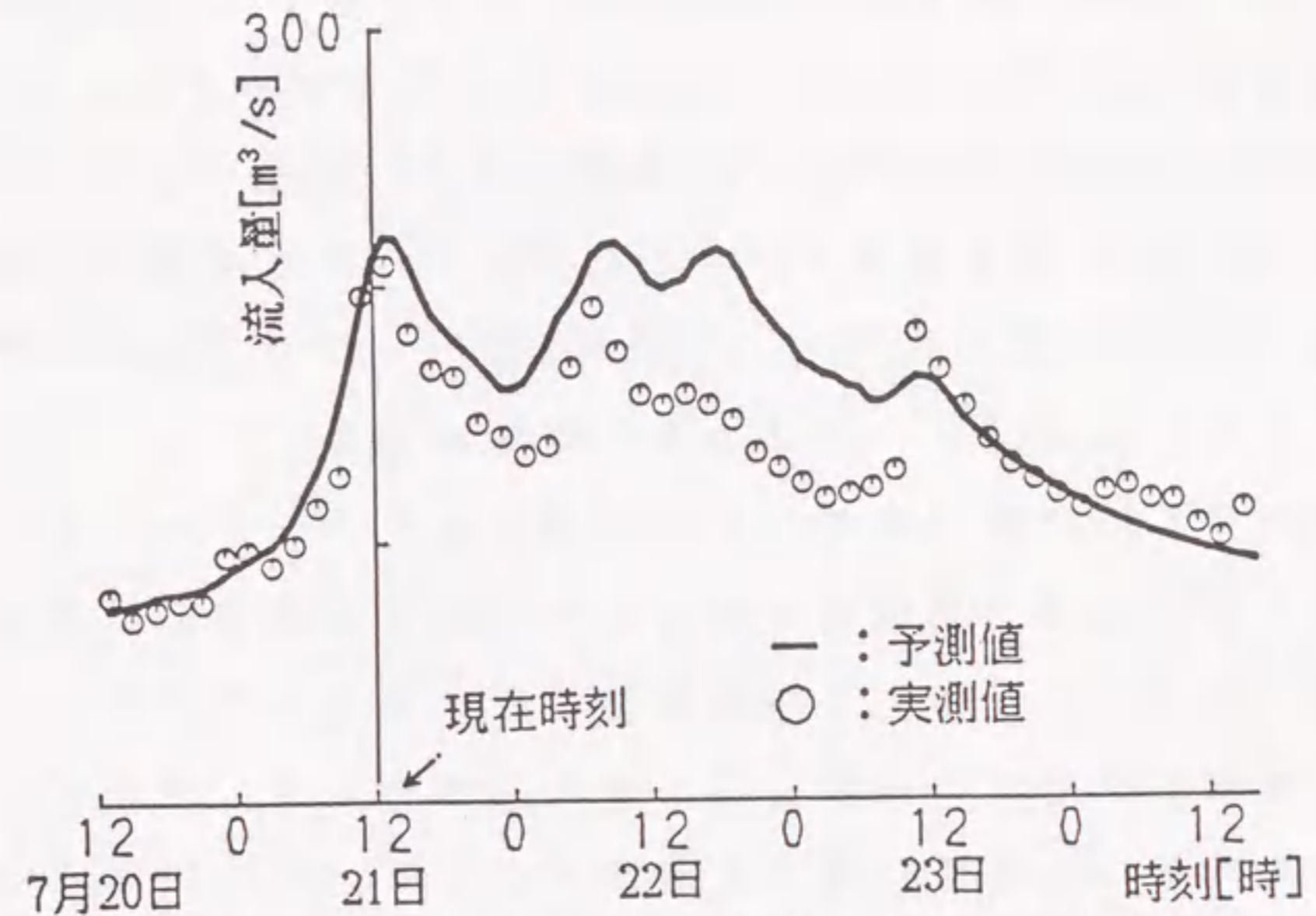


図7.4 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
 (昭和58年7月20~23日の予測降雨; ケース1)
 (同年7月21日12時現在における予測)

しては、2回目の方が良く予想されている。

さらに、9時間後(7月21日12時)において、3回目の降雨予測結果(図6.8)を用いて同様の流量予測を行った。その結果を図7.4に示す。今回の予測でピーク流入量に関しても比較的良い予測ができていると言える。

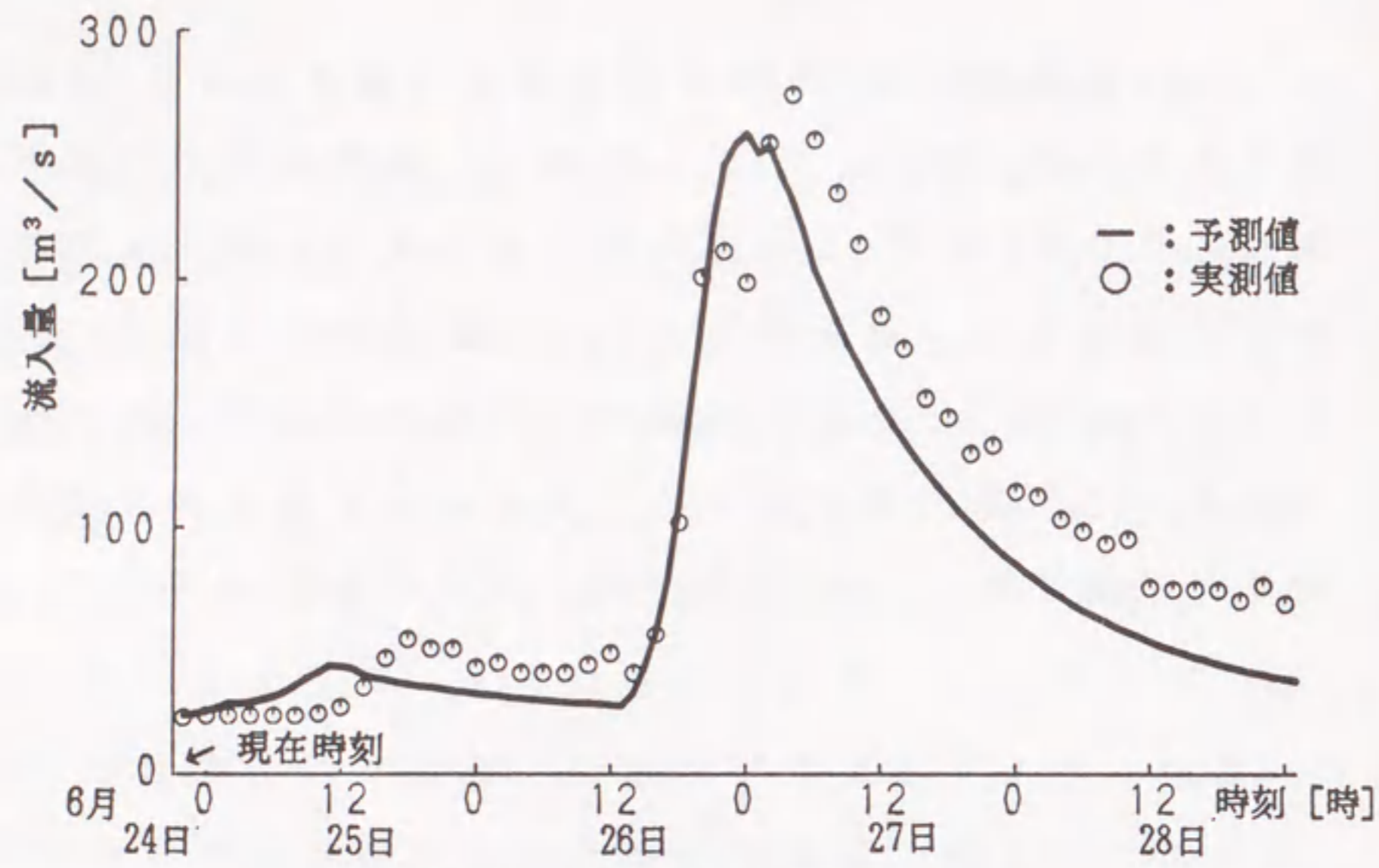
7・3・2 その他の降雨例による一貫予測結果の検討

前項で述べた降雨例（ケースⅠ）の他に第6章で取り上げた他の4例（ケースⅡ～ケースⅤ）についても降雨予測結果（表6・2～表6・5におけるケースⅡ～ケースⅤ）を用いて同様のダム流入量予測を行ってみた。それらの結果を図7・5～図7・8に示す。また、その流入量予測誤差を調べ、表7・1に示す。同表のケースⅠ（前節で述べた例）およびケースⅡは長時間降雨、ケースⅢ～Ⅴは短時間降雨の例である。5例の誤差は17～34%で、第6章の降雨予測誤差と第4章の流量予測誤差との単純和（23～31%）の誤差範囲にほぼ収まっている。

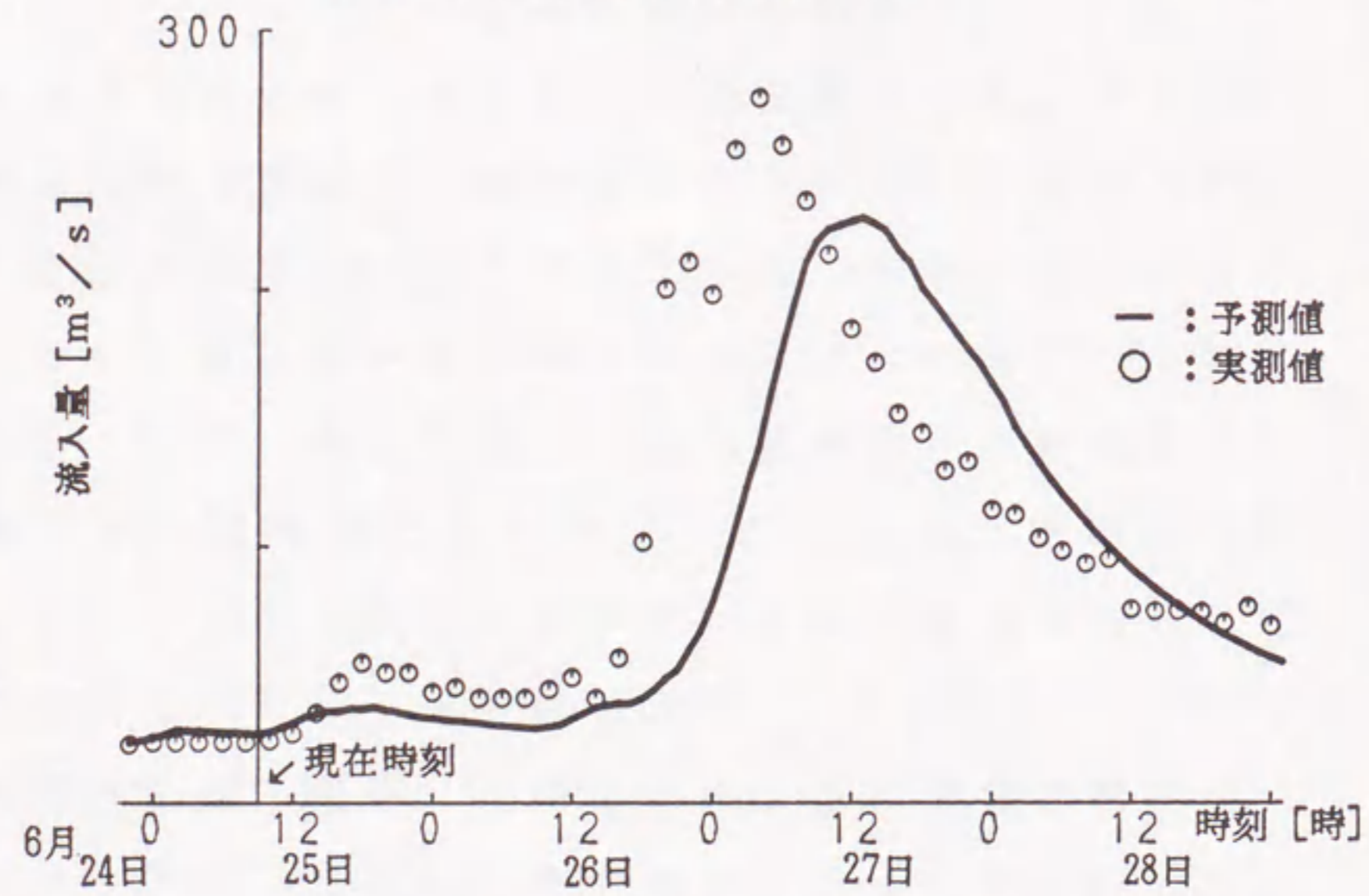
流量予測結果の良否を表す他の指標として、予測ピーク流入量の実測値に対する誤差およびピーク発生時刻のずれを取り上げ、表7・1に併記した。同表には予測時点からピーク流入量が発生する時点までの時間 T についても示してある。長時間降雨、短時間降雨にかかわらず第1回目の予測時点においてピーク流入量の予測誤差は20%以内に収まっている。ピーク流入量発生時刻のずれについてみれば、短時間降雨（ケースⅢ～ケースⅤ）では2時間程度と短い。長時間降雨予測の初期段階では、ケースⅠでは10時間、ケースⅡでは4～8時間のずれがある。これらの値は逐次予測を繰り返す毎に改善がみられている。

なお、表6・6によれば、長時間降雨ケースⅠの第1

回目の予測時点では、予測降雨曲線の相関係数は0.2程度でありあまり良くない。しかしながら、総降雨量の予測誤差は約20%、表7・1の流入量の予測誤差も21%でそれほど悪くない。以上のように、合計5例の降雨についてではあるが、これらは例題として無作意に選んだものである。本一貫予測システムによって数日先までの流量を予測することの可能性が示されたものと考えられる。

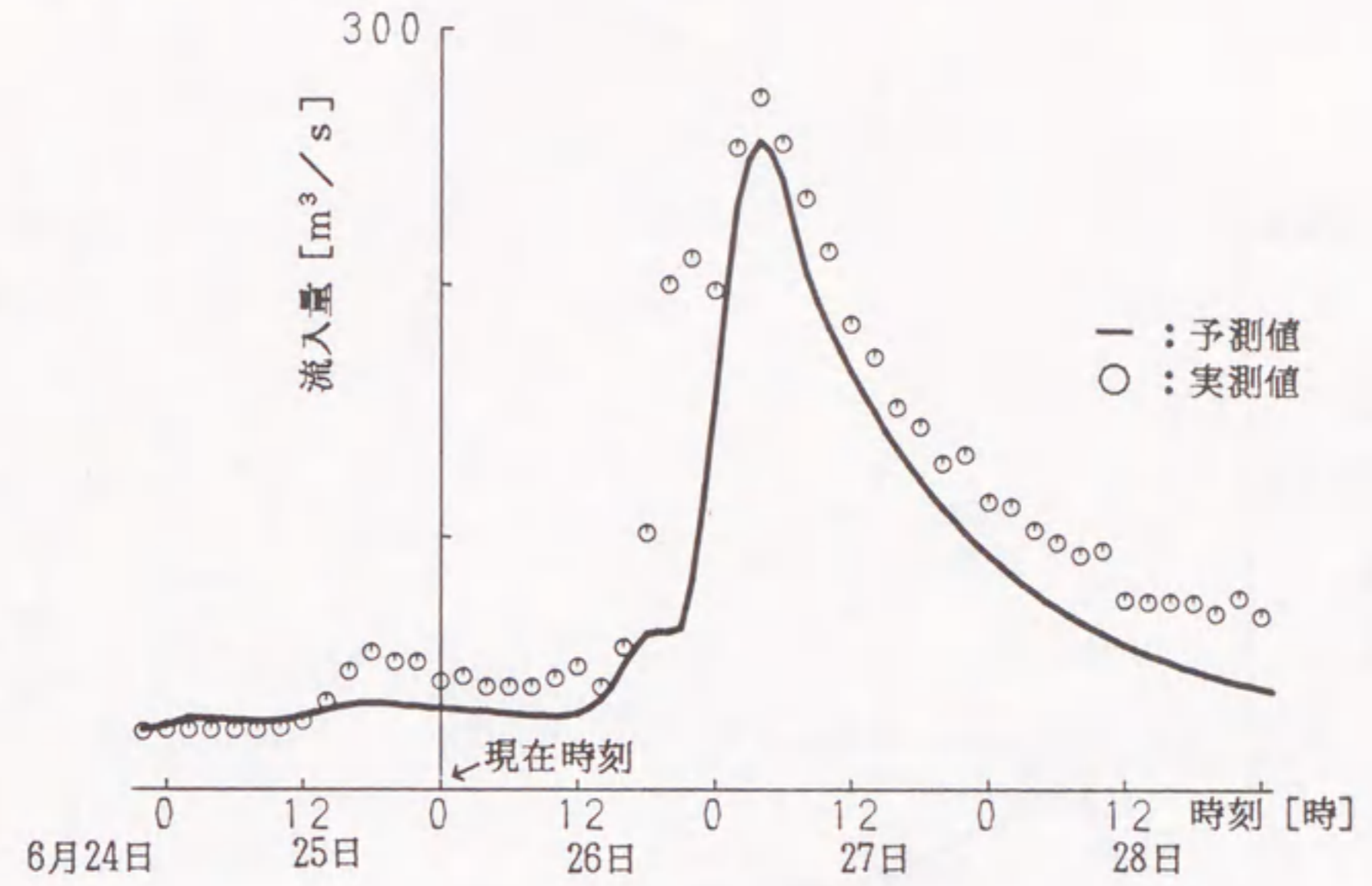


(a) 24日21時現在における予測



(b) 25日9時現在における再予測

図7・5 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
(昭和59年6月25~27日の予測降雨; ケースII)



(c) 26日12時現在における再予測

図7・5 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
(つづき) (昭和59年6月25~27日の予測降雨; ケースII)

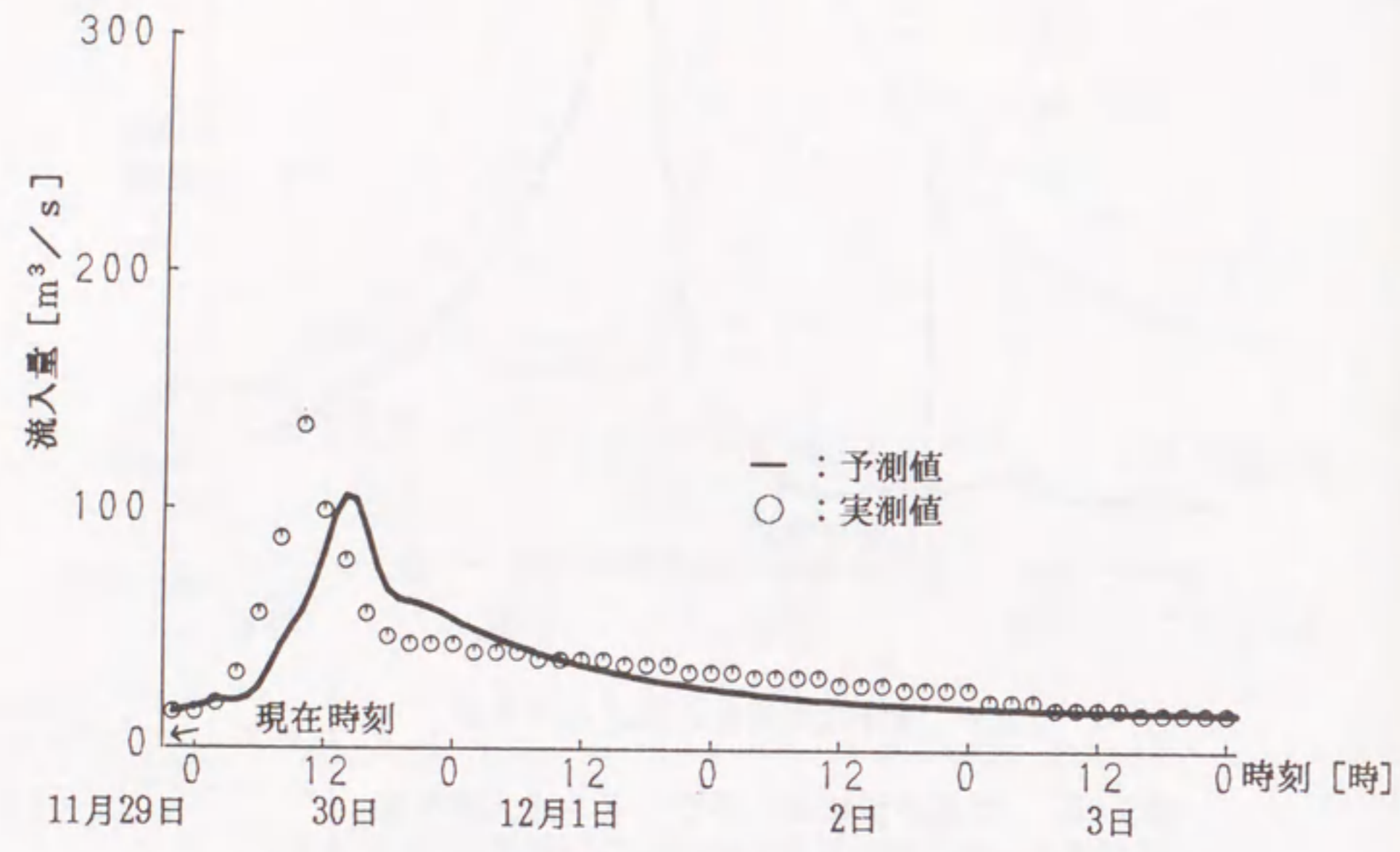


図7.6 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
 (昭和57年11月29~30日の予測降雨; ケースⅢ)
 (同 年11月29日21時現在における予測)

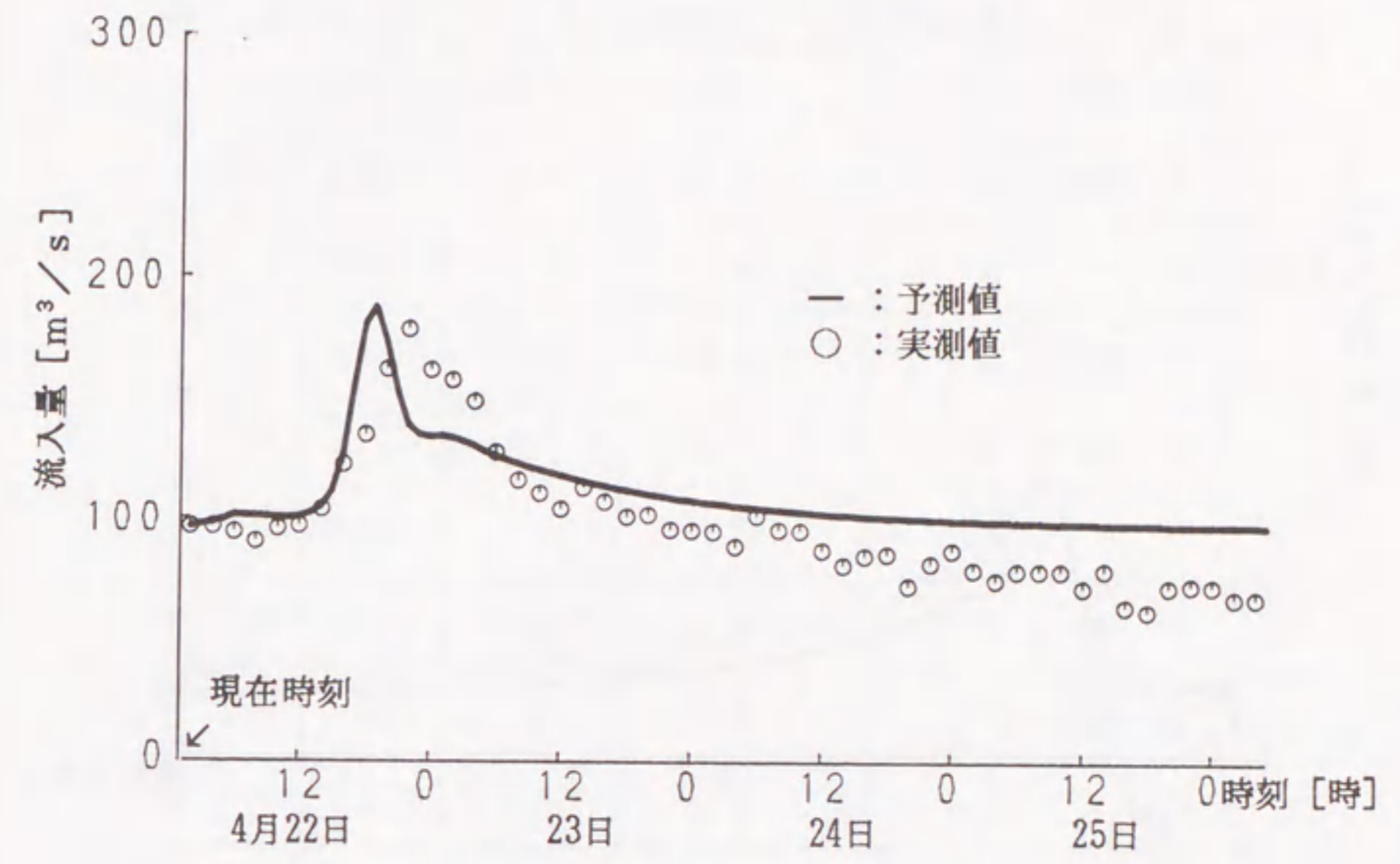


図7.7 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
 (昭和58年4月22日の予測降雨; ケースⅣ)
 (同 年4月22日1時現在における予測)

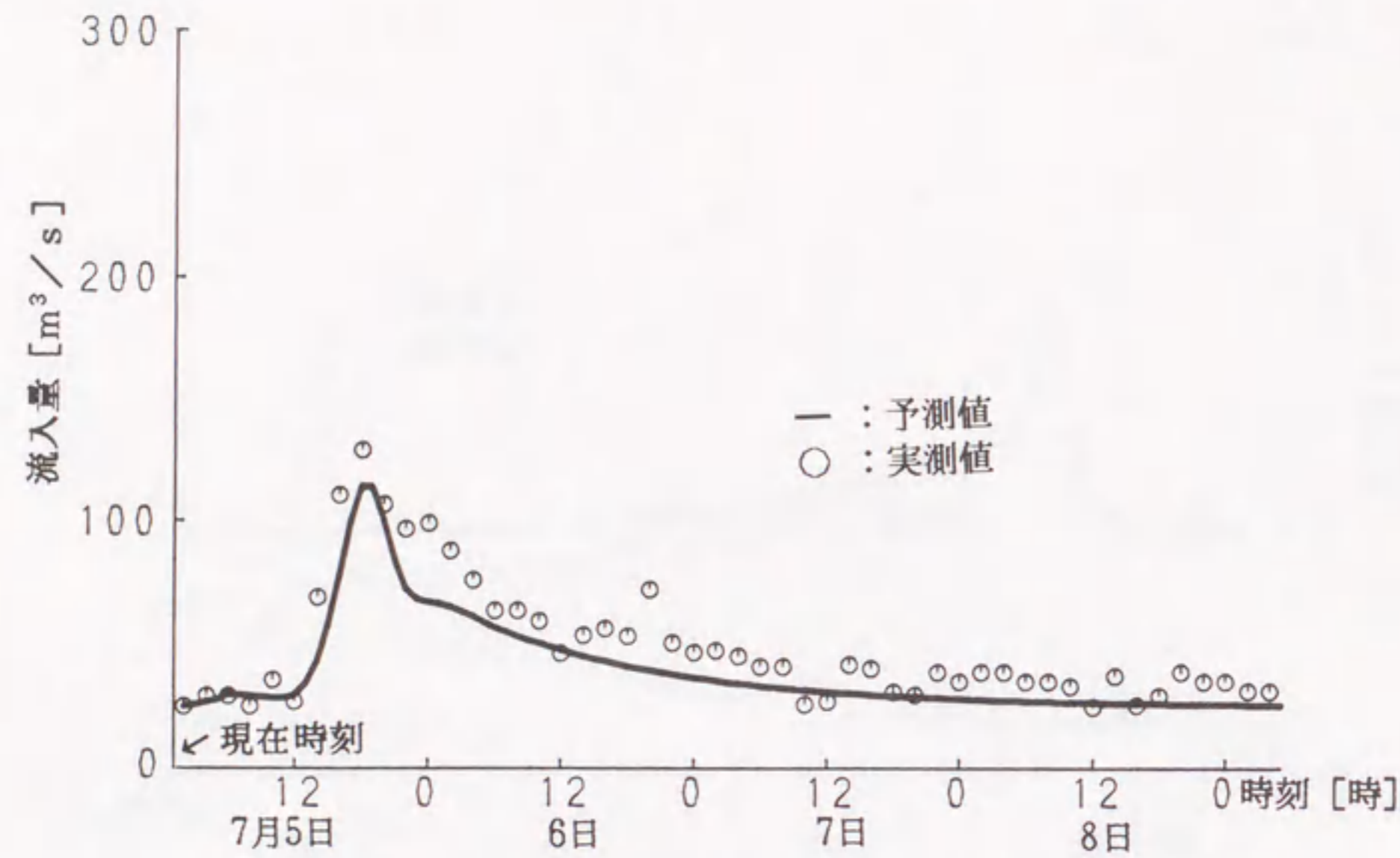


図7.8 降雨予測結果に基づくダム流入量予測
 (昭和58年7月5日の予測降雨; ケースV)
 (同年7月5日1時現在における予測)

表7.1 畑薙第一ダム上流域における流入量予測結果の評価

ケース スタディ 番号	予測 修正 回数	流入量 予測誤差 [%]	予測時点から 流入量ピークが 発生するまで の時間T[h]	ピーク 流入量 誤差[%]	ピーク発生 時刻のずれ [h]
長 時 間 降 雨	I 1回目	21	28	-19	(遅) 10
	I 2回目	23	13	3	(遅) 4
	I 3回目	17	4	1	0
短 時 間 降 雨	II 1回目	20	54	-5	(早) 4
	II 2回目	33	42	-16	(遅) 8
	II 4回目	21	15	-8	0
短 時 間 降 雨	III 1回目	34	13	-20	(遅) 2
	IV 1回目	10	21	6	(早) 2
	V 1回目	17	16	-14	0

流入量
予測誤差 = 式(4.6)

$$= \frac{\int_{t_0}^{t_2} |q_{\text{fore}}(t) - q_{\text{real}}(t)| dt}{\int_{t_0}^{t_2} q_{\text{real}}(t) dt} \times 100 [\%]$$

$$\text{ピーク流入量誤差} = \frac{\text{ピーク流入量の予測値} - \text{ピーク流入量の実測値}}{\text{ピーク流入量の実測値}} \times 100 [\%]$$

(遅)および(早): ピーク時刻の予測値が実際よりも早めか遅めかを表す

静止気象衛星GMSおよび地上気象観測システムAMeDASの両データを併用した降雨予測手法と降雨継続時間で分類した出水伝達関数を用いた河川流量予測手法とを組み合わせることにより、降雨から流量までを一貫して予測する一つのシステムを構築できることを示した。本システムを畑薙第一ダム上流域の降雨5例について適用し、ダム流入量予測を行った。その結果、流量がピークを示す時点から半日～1日以上前に比較的良い流量予測ができることが判明した。畑薙第一ダムを対象とした検討結果から、本一貫予測システムの特徴をまとめれば以下の通りである。

- (1) 気象衛星データを用いて、畑薙第一ダムに到来しようとする降雨を短期間の降雨か長期間の降雨かに重点をおいて予測する。
- (2) その予測結果に基づいて、予測降雨の継続時間に対応した出水伝達関数を選定する。
- (3) 長期間における降雨量の時間変動予測結果に基づいて、流出率近似曲面を用いることにより有効雨量の時間変動を算定する。これを選定した伝達関数の入力とすることにより、出力として2～3日先までのダム流入量の予測値が得られる。

- (4) 長時間連続して降る雨の場合、流入量ピークが発生するまで、数時間おきに降雨予測を繰り返すことにより流量予測精度が順次改善できる。

本論文では、以上の本一貫予測システムの有効性を畑薙第一ダム上流域におけるシミュレーションによって示した。本システムを他の河川に適用する場合には、基底流量、総降雨量と流出率との関係、流量予測に関する出水伝達関数などを予め求めておく必要がある。降雨予測手法の性格上、本一貫予測システムは西から東に移動する降雨を対象としている。

本システムを実運用面において適用する際、気象衛星、AMeDASおよびダム日誌の各データは、それぞれの受信装置を介して常時得られていなければならない。今日では情報収集システムが発達し、常時データを受信していることから、本手法を適用するにあたり、これらのデータ欠損に関してほとんど考慮しなくてもよいと考える。

- (1) 一柳, 小林, 竹内, 松村, 鬼頭: 「基底流量を考慮した発電用ダム上流域における流出率の推定」, 電気学会論文誌, 105-B [8], 691~697 (1985)
- (2) 一柳, 小林, 水野, 松村, 鬼頭: 「降雨パターンに対応した出水伝達関数による発電用ダム流入量予測手法」, 電気学会論文誌, 108-B [1], 32~38 (1988)
- (3) 一柳, 松村, 鬼頭, 山田, 鈴木: 「気象衛星データを活用した発電用ダム上流域における降雨予測手法の提案」, 電気学会論文誌, 104-B [7], 441~448 (1984)
- (4) 一柳, 小林, 篠田, 松村, 鬼頭: 「AMeDAS観測値を活用した発電用ダム上流域における降雨量の時間変動予測手法」, 電気学会論文誌, 106-B [9], 809~816 (1986)

8.1 まえがき

地球温暖化や酸性雨などの地球規模の環境破壊が懸念されるようになるにつれて炭酸ガス排出を伴う化石燃料の使用を抑える必要性が生じ, そのための省エネルギー化やそれに代わるエネルギー源としての自然エネルギー有効利用の重要性が高まってきている。水力エネルギーは貯水池という形で比較的容易に大容量のエネルギーを高い密度で蓄えることができ, 風力や太陽光などの他の自然エネルギー資源と比較して優れており, 従来から水力発電として利用されている。

水力エネルギーの賦与は気象条件に大きく左右されるので, それに対応したダム運用が試みられているが, 現在, まだ気象変化に充分追随しているとは言えない。降雨による河川増水が始まった時点で, 発電のための放流指令が出されても, 貴重な水力エネルギーを利用しきれず, 無駄に放水してしまうことが多い。このような無駄を避け, 水力エネルギーを有効利用するために, 十分な時間的余裕をもって降雨を予測し, その予測値に基づいて河川出水量の時間的変化の予測を行う必要がある。し

たがって、日常の発電機運転計画を立てる上で、翌日以降の降雨および河川出水量の予測が重要となってくる。

本論文は水力エネルギーの有効利用を図ることを目的として、発電用ダム上流域の降雨から河川流量に至る実用的一貫予測システムの構築に関するものである。日本では、降雨は大体において西から東に移動する場合が多い。本論文で提案する手法はこのような降雨を対象とし、台風、集中豪雨および南北に移動する前線などは予測の対象から除いている。すなわち、洪水をもたらすような大規模な降雨ではなく、翌日以降の給電計画に重要な日常多頻度に発生する中規模の降雨を検討の対象としている。そこで、昭和56～昭和57年の畑一ダムにおけるすべての降雨について、その原因を調べてみた。全降雨67例のうちここで対象としているような移動性低気圧によるもの51%、台風によるもの25%、梅雨18%、その他6%である。移動性低気圧は、大体において日本付近では西から東へ移動していることから、降雨のうち約半数に本手法が適用できるものと考えられる。ここでは、すべてデータからシミュレーションまで大井川水系畑一ダム上流域を例にとり検討を行っている。本論文の成果を要約すれば、以下の通りである。

8・2 河川流量予測手法

降雨による河川流量増加の総量予測に関して、流出率を精度良く推定するための一手法を提案した。本論文では、流出率を推定するにあたり、土地の湿潤状況を表す指標として、降雨による増水直前の河川流量、すなわち基底流量を用いた。具体的に、対象ダムにおける過去の降雨・流量の実測データを用いて算出した流出率を基底流量および総降雨量とで分類し、これら三者の関係を統計的に一つの曲面で近似することにより、流出率の定量的推定精度の向上を図った。これにより、降雨のうち河川にどれだけ流出してくるかという量、すなわち有効雨量は流出率を用いて推定することができ、その時間的総和がダム流入量の総量予測値である。本手法による総量予測のシミュレーション結果は比較的良好であった。

他方、河川流量の時間変動を精度良く予測するための手法を提案した。上述の近似流出率曲面から推定した有効雨量の時間的変化を入力とみなし、河川流出量の時間変動を出力とみなした出水伝達関数を設定し、対象ダム上流域の降雨26例について、その出水伝達関数の係数を推定してみた。その結果、対象ダムにおいて出水伝達関数は個々の降雨毎に異なっているものの、そのインパルス応答の類似性から、単純に2種類の降雨継続時間(35時間未満および35時間以上)で分類できること

が分かった。それにより、降雨の継続時間に基づいて、短時間降雨伝達関数および長時間伝達関数が推定できた。そこで、降雨継続時間の長短に対応して出水伝達関数を選定し、その入力として、降雨量時間変動の実測値を与えることにより、出水シミュレーションを行ってみたところ、結果は全体として良好であった。

8・3 降雨量の時間変動予測手法

24時間以上未来の降雨量の時間変動予測に関して、静止気象衛星およびAMeDASの両データを用いることによる手法を提案している。これは、西日本地区の雨雲の移動状況と降雨量の地上分布とから、降雨量の時間変動を予測しようとするものである。降雨が大体において西から東へ移行している場合には本手法は有効である。さらに、降雨域の移動方向を定量的に推定する手法を提案している。その推定した移動方向線上においてAMeDASが観測している降雨量分布が、そのまま対象ダム上流域を通過するとして、降雨量の時間変化を精度良く予測することを試みた。具体的に、対象ダム上流域における過去の降雨16例について、本手法を適用してみた。その結果、総降雨量および時間変動のパターンの両者について比較的良好的な予測結果が得られ、手法の有効性が

確認できた。総降雨量の予測結果を詳細にみれば、全体として20～30%程度少なめに予測される傾向があることが分かった。ここでは経験上、本手法で得た予測値に1.25という係数を掛けることにより予測精度の向上を図った。この数値に関して、例えば気圧配置、前線位置やその移動方向などが関係すると思われるが、その内容については、今後の課題として残されている。

降雨が1日～2日以上長く続く場合についても適応できるように、その時間変動の予測手法を改良している。西日本におけるAMeDASデータとGMS雲頂温度データとの対応関係を九州以西に外挿し、海上を含む広範囲の降雨量分布を推定することにより、数日間降り続く長時間降雨にも対処できるようにした。ただし、GMS雲頂温度と実際の降雨量との対応は一義的に決まっているものではないので予測時点毎にその対応関係を調べることを提案している。

8・4 降雨から流量までの実用的一貫予測システム

本論文で提案した降雨予測手法と河川流量予測手法とを有機的に結合することにより、降雨から流量までを一貫して予測するための新しいシステムを構築した。本システムでは、まず、GMSおよびAMeDASの両デー

タを用いることにより、降雨継続時間に重点をおいて降雨予測を行う。次に、その結果に基づいてダム流入量予測に用いる出水伝達関数を選定する。さらに、降雨量の時間変動を予測し、それを選定した出水伝達関数の入力データとして用いることによりダム流入量を予測する。

対象ダム上流域の降雨5例について降雨から流量に至るまで一連の予測を行ってみた。その結果、予測時点から流量ピークまでの余裕時間についてみれば、長時間降雨の場合28～54時間（予測1回目）、短時間降雨の場合13時間～21時間となっている。また、長時間降雨および短時間降雨のいずれの場合についても、1回目の予測時点において流量ピークの予測誤差は20%以内に収まっている。さらに、長時間降る雨については気象情報が更新される数時間毎に、降雨予測を繰り返すことにより、流量予測精度が順次改善できることがわかった。

8.5 あとがき

本論文の前半では河川出水予測手法を、後半ではその入力となる降雨の予測手法を個々に述べ、さらに最後に、両予測手法を有機的に組み合わせることにより発電用ダム流入量予測の早期化に対する検討を行った。具体的に本予測システムを畑一ダム上流域に適用してみたところ、

全体として比較的良好な結果が得られた。

本論文で取り上げた大井川水系においては、最上流ダムから最下流ダムに至るまでの流下時間は10～20時間である。このことは、最上流ダムで発電に用いた水を下流側のダムでも無駄にすることなく、本河川一連のダム操作を確実にするためには10～20時間以上未来の流量変化を予測する必要がある。本一貫予測システムでは、2～3日以上先の未来の流量変化を知ることができ、最適ダム操作に対する一つの有効な手段になり、水力エネルギーを有効に利用するための電力系統運用に貢献できるものと確信する。

以上のように、本論文は、自然現象を予測するという大きな問題に対して、一つの可能性を提示できたが、さらに次のような検討を加えることにより、より良い予測手法に発展していくものと考えられる。

- (1) ここで取り扱った西から東へ移動する降雨以外にも、台風や南北に移動する前線にともなう降雨、雨雲の一部が極端に発達あるいは衰退しながら移動する場合などに対しても、降雨からダム流入量までを予測できるようにすることは重要である。今後、このような降雨にも適用できるように、気圧配置や前線の位置など考慮に入れた予測手法を検討する必要がある。
- (2) ここでは上流にダムがなく、溪谷内に降雨の観測点が設けてある畑一ダムを対象として一つの可能性

を示唆したにとどまるが、今後、提案手法を実際に他の河川に適用してみる必要がある。なお、降雨予測に必要な気象衛星やAMeDASなどの気象データは、今日では、容易に電力会社などにおいて制約なく利用できるようになってきている。また、流量予測に必要なデータは、過去の降雨・流量の実測データおよび地図から得たものであることから、本予測手法は他の河川に容易に適用可能であると考えている。

- (3) 降雨や流量の予測においては、何時間後に何ミリの雨が降るといような定量的な予測ではなく、ある時間帯にある範囲の量の雨が降るといような予測の仕方也被考えられる。また、本論文のダム流入量予測では降雨継続時間35時間を境にして、用いる伝達関数を変更していた。しかし、厳密にこのような境目を限定するのではなく、境界に曖昧さを残しておいた方が自然であるとも考えられる。以上のような曖昧な情報をも活用するためには、いわゆるファジー理論などの適用に関する検討が考えられる。
- (4) 気象などの自然現象に関しては、過去の事例を数多く参照することにより、ある程度の予測が可能である。このような過去の事例を学習し、今後の流量予測などに反映させていくことが必要となってくる。そのためには、最近注目されているニューロコンピュータの導入の検討も考えられる。

日本列島全体は急峻な山岳になっており、降雨でもたらされた水資源が高速度で海にまで流出するという一般的な特性を持っている。河川の水の動きを予測追究することによって、自然エネルギーの利用のみならず農業用水、工業用水、生活用水としての水資源を総合的に有効利用することが重要である。

謝 辞

本研究は名古屋大学工学部電気工学教室，工学博士 鬼頭幸生教授のご懇篤なるご指導のもとで行ったものであります。さらに，本論文をまとめるにあたって，終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜り，同教授に心から感謝致します。

本論文の作成に当り，名古屋大学工学部土木工学教室，工学博士 高木不折教授には土木工学の立場から数々の有益なご助言を頂戴しました。また，名古屋大学工学部電気工学教室，工学博士 水谷照吉教授には適切なご教示を賜りました。ここに，深甚の謝意を表します。

本研究の遂行にあたり，全面的にご教示を頂きました京都大学工学部電気工学教室（前名古屋大学工学部電気工学教室講師），工学博士 松村年郎講師に深く感謝致します。また，本研究を進める過程でご支援とご協力を頂いた日本IBMサイエンス・インスティテュート鈴木政勝殿に心よりお礼申し上げます。

本研究がこの段階に達するについては，愛知工業大学学長 後藤 淳 教授ならびに同副学長 竹松英夫教授の絶えざるご鞭撻とご支援の賜であり，ここに感謝致します。

さらに，愛知工業大学でご指導頂きました，愛知工業

大学電気工学教室，工学博士 小林英夫教授ならびに同，工学博士 宮地 巖 教授に感謝申し上げるとともに電気工学教室の諸先生方の暖かいご支援に対し，心よりお礼申し上げます。

なお，名古屋大学工学部電気工学教室，工学博士 早川直樹助手，工学博士 横水康伸助手ならびに名古屋大学鬼頭研究室で大学院博士課程前期課程を修了された山田良彦氏（三菱電機（株）勤務），竹内大二氏（科学技術庁 勤務），篠田明男氏（（株）東芝 勤務），水野慎也氏（新日本製鐵（株）勤務）の方々には，本研究遂行にあたり多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝致します。

終わりに，本研究に利用した降雨・流量データは中部電力（株），A M e D A S データは気象庁統計課，N O A A データは気象庁気象衛星センターからそれぞれ提供して頂いたこと，G M S データは日本気象協会から購入したこと，また，それらのデータ処理を愛知工業大学計算センターおよび名古屋大学大型計算機センターで行ったことを付記し，感謝の意を表します。

本研究に関連して公表した論文

題 目	掲 載 誌	共著者	関連する章
<u>流量関係</u>			
基底流量を考慮した発電用ダム上流域における流出率の推定	電気学会論文誌 B105-8 pp.691~697 (昭和60年)	小林 竹内 松村 鬼頭	第3章
降雨パターンに対応した出水伝達関数による発電用ダム流入量予測手法	電気学会論文誌 B108-1 pp.32~38 (昭和63年)	小林 水野 松村 鬼頭	第4章
<u>降雨関係</u>			
気象衛星データを活用した発電用ダム上流域における降雨予測手法の提案	電気学会論文誌 B104-7 pp.441~448 (昭和59年)	松村 鬼頭 山田 鈴木	第2章 第5章
AMeDAS観測値を活用した発電用ダム上流域における降雨量の時間変動予測手法	電気学会論文誌 B106-9 pp.809~816 (昭和61年)	小林 篠田 松村 鬼頭	第5章
<u>降雨および流量の総合</u>			
予想降雨パターンに基づいた発電用ダム流入量予測システム	電気学会論文誌 B109-6 pp.243~250 (平成元年)	小林 松村 鬼頭	第6章 第7章

