

気象予測に基づく防災対策の決定モデル

DICISION MODEL OF DISASTER PREVENTION

中村 英夫*・小野俊行**・花龍秀輔***・稻村 肇****

By Hideo Nakamura, Toshiyuki Ono Hidesuke Hanakago
and Hajime Inamura

1. はしがき

暴風・豪雨などの異常気象が予測されるとき、われわれはそれに対しての何らかの防災対策を決めねばならない。しかし、その場合、異常気象はあくまでも予測されるのであって、その予測した現象が確実に起こるとは限らない。したがって、予測された異常気象が起らなかったとき、実施した防災対策はむだとなり、逆にそのむだを恐れるあまり、十分な対策を実施しておかなかった場合生じた異常気象による被害は膨大なものとなる。以下においては、このように気象予報に基づいてわれわれが防災対策を決める場合、その時点において最も適切と考えられる行動はどのようなものであるかを、統計的決定理論を用いて合理的に決定する方法を、交通の雪害対策と多目的ダムの予備放流を例にとり、試みるものである。

2. 統計的決定理論の考え方¹⁾

われわれが何らかの目的に向って行動をとるとき、そのとりうる行動はさまざまである。このとりうるさまざまな行動を選択可能な行動 available action と呼ぶ。たとえば、災害を未然に防ぐため、われわれが講ずる種々の措置の選択がこれである。実際に選択する行動はこれらの選択可能な行動のうちどれか 1 つであって、2 つまたはそれ以上の行動を同時にとることはできないとする。ある 1 つの行動を選択・実行した結果、その目的は何らかの程度で達成される。その行動を選択した適否は一般にその行動の結果、目的が達成された程度と、その

行動に際して費された損失を何らかの価値基準でもって評価することにより議論される。この適否の評価尺度を効用 utility とよぶ。

効用は、選択した行動はもちろん、その行動をとったときの自然の状態 state of nature に左右される。すなわち、ある防災対策を講じたとき生ずる災害の被害程度はそのとき実際に生じた降雨量などに依存する。しかし、これは行動を決定する時点では本当はどのような状態になるのか行動決定者にとっては不確定であり、この不確定な状態をある確率でもって推測した上で行動の選択はなされると考えられる。

自然の状態の予測の精度が高ければ高いほど、われわれの行動選択はあたりはずれの少ないものになり、その結果、より大きな効用が得られるはずである。気象予測が確実性の高いものであれば、それに基づいてわれわれのとった防災措置は適切なものであり得よう。逆に精度の低い予測情報に基づいてとった防災措置は、災害をもたらしたり、あるいはむだな対策を浪費することになる機会が多い。そこでこの予測の精度を高めるため、われわれは自然の状態についての新たな情報を得ようとし、いわゆる実験 experiment とよばれる情報収集や調査を行なう。気象台で行なう定時観測のほか、必要に応じて何らかの臨時の気象観測を行なうこともその 1 つである。実験に関しても種々の結果が起りうる。この結果は実験を行なう前ではもちろん未知であるが、その結果の実現する確率は、自然の実際の状態が何であるかに關係する。これが実験結果の精度とよばれるものであって、真の状態をどの程度正確に反映しているかを示すものである。実験を行なって予測の精度を高めることができれば、行動の結果得られた目的達成による利得は大きくなろう。しかし、実験には費用、時間などの何らかの損失が伴う。したがって、実験を行なうかどうかはそれにより期待される利得とそのための損失との関係により

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部社会工学科

** 気象庁総務部企画課

*** 正会員 建設省土木研究所ダム水理研究室長

**** 学生会員 工修 東京工業大学大学院学生

決められるべきものである。

このように考えてくるとき効用 u は、ある実験 e を行ない、その結果 z を観測し、ある行動 a を選択し、自然の状態が θ であるとしたときに決まってくるものであるといえる。すなわち、 $u(e, z, a, \theta)$ とかける。統計的決定理論ではこの u の期待値を最大とする行動を決定することを最適な決定とする。

このことを定式化すると次のようになる。

われわれが初期に入手する情報は、“ある自然の状態 $\{\theta_i\}$ が起こりそうだ”といったものであり、それは実現確率 $P'(\theta_i)$ という形で与えられる。この情報に対しわれわれの取り得る行動は次の 2つである。

- 1) すぐに何らかの防災対策 $\{a_j\}$ を行なう。
- 2) 新たな実験を行ない、追加情報を得てから考える。

ここでわれわれにとって既知の情報は次の 2つである。

1) 手元にある情報からのみ判断したときの実現確率 $P'(\theta_i)$ 。これを先駆確率とよぶ。

2) 実験を行なって (e_1) 、かつ実際の状態が $\{\theta_i\}$ であったときに実験結果が z_k であった確率、すなわち $P(z_k|\theta_i, e_1)$ で、これは過去のデータから求められる。

適切な追加情報を加えると、実際の状態の実現確率の分布はより分散の少ないものになるはずである。その改善された確率をわれわれは事後確率と呼ぶ。われわれはその事後確率 $P''(\theta_i|e_1, z_k)$ を前記の 2つの情報からベイズの定理により次のように計算することができる。

$$P''(\theta_i|e_1, z_k) = \frac{P'(\theta_i)(z_k|\theta_i, e_1)}{\sum_i P'(\theta_i) \cdot P(z_k|\theta_i, e_1)} \quad \dots(1)$$

われわれはさらに、追加情報の結果がどうであるかの確率 $P(z_k|e_1)$ を知らねばならない。ここで $P(z_k|e_1)$ は $P(z_k|\theta_i, e_1)$ の周辺確率として与えられるから

$$P(z_k|e_1) = \sum_i P'(\theta_i) P(z_k|\theta_i, e_1) \quad \dots(2)$$

効用 u は、実験 e 、実験の結果 z 、対策 a 、自然の状態 θ などによって定まる。したがって u は $u(e, z, a, \theta)$ と書ける。またさきに述べたように、効用は実験による費用 $u_1(e, z)$ と対策と実際の状態との相違による損失 $u_2(a, \theta)$ に分解できると考えられる。

次に期待効用の計算を考える。期待効用は効用と $P(\theta|e, z, a)$ の積で表わせる。すなわち、最大期待効用をもつ対策 $u^*(a)$ は

$$\begin{aligned} u^*(a|e, z) &= \max_j u(a_j|e, z) \\ &= \max_j \sum_i P(\theta_i|e, z_k, a_j) \times u(e, z_k, a_j, \theta_i) \end{aligned} \quad \dots(3)$$

で表わせる。また新たな追加情報を得る場合には、そのときの期待効用 $u^*(e_1)$ は、 $u^*(a)$ と $P(z|e)$ の積に

よって次のように求まる。

$$\begin{aligned} u^*(e_1) &= \sum_k P(z_k|e_1) \times u^*(a|e_1, z_k) \\ &= \sum_k P(z_k|e_1) \times \max_j (u a_j|e_1, z_k) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

また何もしない場合の期待効用はさきに述べた、最大期待効用を持つ行動で表わせる。

したがって、われわれの取るべき行動は、すぐに判断して a という防災対策を行なうときの期待効用 $u^*(e_0)$ と、新たな情報を得るという判断を選んだときの期待効用 $u^*(e_1)$ のうち大きなほう、すなわち

$$e^* : \max \{u^*(e_0), u^*(e_1)\} \quad \dots(5)$$

なる e^* を選べばよいことになる。このような選択を時々刻々変化する新しい情報を得た各時点で行ない、その時点における最適とされる行動を選択することができる。

各時点における以上の関係をディシジョンツリーで表わせば 図-1 のように表現される。以下においては、このような考え方方に立って防災対策を合理的に見出す試みを 2つの事例をとり上げて示すことにする。

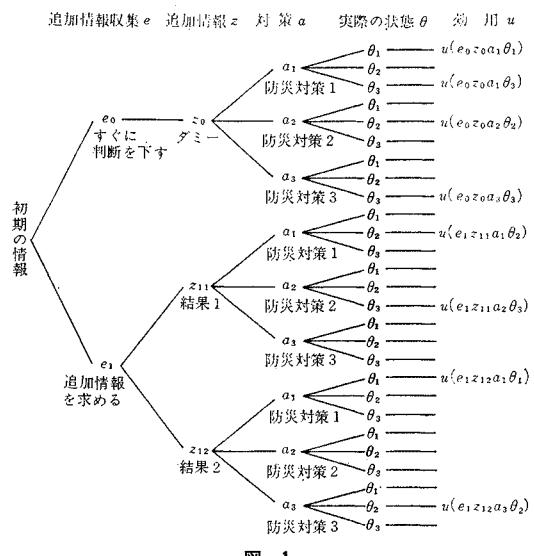


図-1

3. 関ケ原付近の交通機関への降雪予報に関する決定モデル

(1) 交通機関の雪害とその対策

滋賀県北部から岐阜県境付近にかけての地域は、冬期、日本海から日本列島を横断して太平洋に流れ出る寒冷な季節風の通路にあたり、しばしば強い降雪にみまわれる。一方この地域は、国鉄東海道線、同新幹線、名神高速道路、国道 21 号線などが走っているが、前記の地域気象特性のため、これらの交通の大動脈が冬期に交通

障害をしばしば引き起こす。以下にこの地域のおもな交通機関の雪害対策を降雪予報の利用に関連する部分に限って、簡単に述べておく。

国鉄東海道線では、おおむね 30 cm 以上の積雪が 1 ~ 2 時間以内に生じることはないので、積雪の実況を監視しておいてある程度の積雪量に達してから緊急に要員を呼び出して作業を開始しても対策として遅れはないが、要員の労働条件から考えると、あらかじめ予報によって待機しておくことが望ましい。

国鉄東海道新幹線では、特に夜間運転休止時の降雪が問題である。210 km/h というような高速走行に帰因する特殊な雪害として、走行中に線路上の雪が舞い上がって車両下部に付着し、積雪地帯をぬけて暖い地域に入つて脱落し、そのショックでバラスがとび付近の民家に飛び込んだり、施設を傷つけるという事故がある。これに対処するため、夜間の運転休止時に除雪を行なったり、タンク散水車による積雪粘結化作業を行なうため、あらかじめ予報により人員、機材を待機させておく必要がある。

名神高速道路では、5 cm 未満というような少量の積雪であっても、凍結現象と重なると事故発生の危険が生じる。このため降雪の可能性がある場合には、警戒体制に入って要員が待機し、降雪があればただちに除雪や凍結防止剤散布を行なう。緊急呼び出しから出動までの時間は、1 時間程度である。

国道、県道などにおいてもほぼ同様である。

(2) 降雪予報とその精度のモデル化

降雪の予測は実際の降雪現象が生ずるときより、時間的に先だつにつれ、その精度は落ちると考えられる。

この予報精度と時間の関係は過去の予報とそれに対応する実況とを示す資料より統計的に見出すべきであるが、ここでは入手し得た資料の関係もあり、次に述べるような、すでに予測精度が調査ずみの物理量を用いた簡単な予測精度モデルを設定した。

a) 総降雪量の予測とその精度のモデル

季節風時の降雪量は 700 MB 高度（約 3 000 m 上空）における気温と高い相関を持っている。そこで降りはじめから降り終わりまでの総降雪量は、期間中の 700 MB

表-1 700 MB 気温に対応する
降雪量の発生確率

降雪量	-	0~10 cm	10~30 cm	30 cm~
700 気温				
-9°C	0.968	0.032	0.000	0.000
-12°C	0.897	0.096	0.007	0.000
-15°C	0.796	0.163	0.041	0.000
-18°C	0.588	0.286	0.109	0.017
-21°C	0.262	0.337	0.276	0.125
-24°C	0.009	0.132	0.263	0.515

高度面での最低気温に対応して、表-1 のような確率分布をもつものとする³⁾。次に気温予測に対する気温実現値の確率分布は、予測値を中心

とする正規分布とし、標準偏差は 24 時間予測に対し 3.76°C とし³⁾、直線内挿により各予測時間ごとの標準偏差を求めた。以上のように総降雪量の予測値に対する実現値の確率分布は、気温予測に対する実現値のばらつきに気温値に対する降雪量のばらつきを重ねたものとした。

b) 降雪開始時刻の予測とその精度のモデル

この地域では季節風時の降雪開始は、850 MB 高度（約 1 500 m 上空）で、気圧の谷（トラフ）が通過して風向が北成分をもつようになった時期とほぼ一致する。そこで降雪開始時刻の予測精度は、気圧の谷の移動予測の精度をそのまま用いることとした。その精度は、予測値を中心とする正規分布として表わされると考え、その標準偏差は 24 時間予測に対して 9.3 時間とし⁴⁾、直線内挿により、各予測時間に対する標準偏差を求めた。

(3) 臨時観測

気象庁がルーチンに行なっている高層観測（気温判定を含むもの）は 9 時と 21 時の 1 日 2 回である。必要に応じて新たな情報を得るためにには臨時観測を行なうこと必要である。臨時観測には当然、臨時の経費を要するが、これを 24 500 円とし、この地域の予測のためには、2 地点の観測を行なうものとした。

(4) 交通機関の防災対策と効用のモデル化

交通機関は降雪予報に基づいて必要な要員の待機体制をとり、降雪開始と同時に活動開始し、もし降雪開始時点で待機していなければ、緊急に呼び出しを行ない 1 時間後に出動体制に入るものとする。この

表-2 降雪量に応じた必要な動員数、凍結防止剤使用金額

降雪量	昼間動員数 (人)	夜間動員数 (人)	凍結防止剤 (円)
0~10 cm	51	114	779 000
10~30 cm	104	387	2 246 000
30 cm~	675	1 127	3 296 000

雪の実現値 (state of nature) に対応した機会損失 (utility) の値として以下のようものを考え、ペイオフマトリックスを構成する。

(1) 降雪量を 3 つのレベルに分け、各レベルに応じた必要な動員数、凍結防止剤使用金額を表-2 のとおりとする^{5)~14)}。

(2) 機会損失費は以下の 4 要素の合計値とする。

a) 待機の費用

いわば待ちぼうけによる損失であり、降雪予報を発表したが、実際には降雪を生じなかったか、または量が少なかった場合および開始時刻がおそかった場合である。そのときの損失は

むだな待機時間×人員×労働賃金時間単価× $\frac{50}{100}$
と仮定する^{4), 7), 8), 9), 13)}。

b) 緊急呼び出しに対する不満の補償費

降雪発生の予報がなかったのに、降雪開始した場合および予想より早く降り始めた場合の緊急呼び出しの際の割増し賃金を次のように仮定した。

$$\text{出動人員} \times \text{労働賃金 (8時間分)} \times \frac{50}{100}$$

c) 人件費以外の対策費損失

予測	実況	表-3 凍結防止剤散布損失係数		
		0~10 cm	10~30 cm	30 cm~
なし	0.1	0.1	0.1	
0~10 cm	0	0.025	0.05	
10~30 cm	0.025	0	0.025	
30 cm~	0.05	0.025	0	

→3 のとおりと仮定する。

$$\text{損失} = \text{総散布金額} \times \text{損失係数}$$

d) 交通機関利用者の損失

道路関係では、表-4 に示されるような交通量¹⁵⁾に対

表-4 通行車両数／時間

道路	時刻	15 時	21 時	03 時	09 時
名神高速道	1 200 台	1 800 台	400 台	2 000 台	
国道	900 台	1 200 台	150 台	1 400 台	

表-5 道路交通速度低下

道路	対象区間	速度低下（損失時間）		
		弱い降雪	並の降雪	強い降雪
名神高速道	50 km (八日市～関ヶ原)	100 k→62.5 k (0.375 hr)	100 k→50 k (0.500 hr)	100 k→37.5 k (0.625 hr)
国道8,21号	50 km (彦根～長浜) (米原～垂井)	60 k→37.5 k (0.625 hr)	60 k→30 k (0.833 hr)	60→22.5 k (1.041 hr)

し、待機していなかった場合は初動のおくれ1時間分（呼び出しに必要な時間）について、表-5 のような速度低下があるものとした^{5), 6)}。

国鉄東海道線では 30 cm 以上¹⁴⁾の積雪が1時間内に生ずることはないので利用者損失はないものとした。

国鉄東海道新幹線では、夜間すぎから明け方の間に降雪

表-6 新幹線の速度低下

降雪量	速度低下	対象区間
0~10 cm	200 k→160 k	
10~30 cm	200 k→110 k	147.6 k
30 cm~	200 k→70 k	

開始したのに待機していなかった場合のみ、始発以降1時間以内の列車（6本）につき、降雪量に応じて表-6 に示されるような速度低下が生ずるものとした^{10), 11)}。これらの速度低下に基づく時間損失は

通行車両数×乗車人数×損失時間×時間単価として計算する。

(5) ディシジョンツリー

降雪注意報を発令すれば、交通機関はそれに対応した対策を必ずとるとしたとき、降雪注意報発令のディシジョンツリーは図-2 のようにつくり上げることができる。

9時のルーチン高層観測データを入手した解析時点において、ただちに注意報を発令すべきか、15時の臨時高層観測を要請し追加データを得てから判断すべきか、21時のルーチン高層観測データを待って判断すべきか、がこのツリーにおける意志決定分岐点である。たとえば、15時の臨時観測を要請することを選択する場合は、15時から降雪開始するというアクションは選べない。このことは追加データを得ることによる予報精度向上の見返りとして注意報の出しあれの可能性の増大を意味していることになる。

(6) 計算結果と分析

午前9時の高層観測に基づいて、850 MB 高度面での気圧の谷の通過時刻、および気圧の谷の通過後の700 MB 高度面の気温がそれぞれ予測されたとき、降雪開始時間および降雪量がある値で実現する確率を計算してみる。その結果をたとえば気圧の谷の通過時間が21時と予測された場合について示すと表-7 のようになる。

新しいデータを加えた予測 注意報 実測値

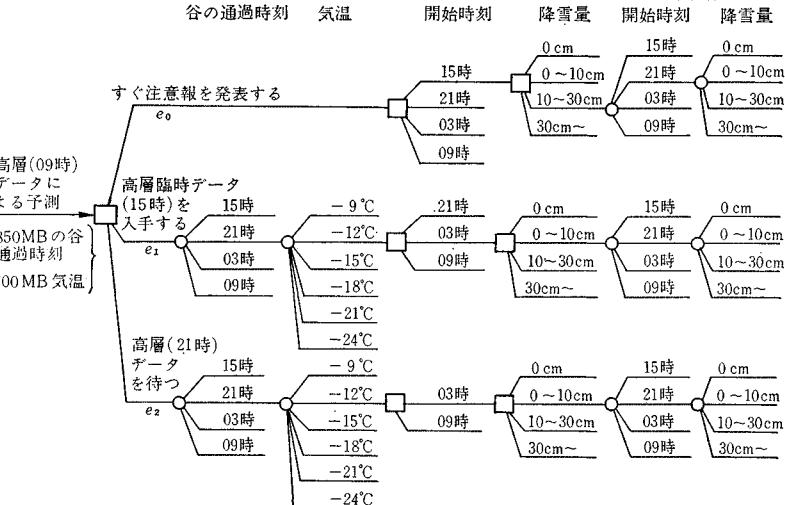


図-2 降雪予報の交通機関への提供に関するディシジョン・ツリー

表-7 850 MB のトラフ通過時刻を 21 時とした場合の実現確率

実現時刻 予測時刻 トラフ通過	15 時	21 時	03 時	09 時
21 時	0.259	0.482	0.233	0.026
実現降雪量 700 MB 高度の予測気温	—	0~10 cm	10~30 cm	30 cm~
-9°C	0.946	0.051	0.003	0.000
-12°C	0.883	0.100	0.016	0.001
-15°C	0.761	0.177	0.054	0.007
-18°C	0.555	0.259	0.134	0.052
-21°C	0.308	0.267	0.227	0.198
-24°C	0.144	0.184	0.262	0.410

この表の見方は、たとえば「9時の高層観測データを得た時点で 850 MB 高度場の谷の通過時刻 21 時、700 MB 気温 -15°C と予測した場合、実現確率は、降雪開始時刻 15 時 (18 時以前) の確率=0.259、21 時 (18 時~24 時) の確率=0.482, ……、降雪なしの確率=0.761、0~10 cm の確率=0.177, ……、ということである。

谷の通過時間 および 700 MB 気温の各予測値に対応してとりうる行動には 3 つの選択がある。すなわち、

(a) ただちに現時点として最適の注意報を発令する。 (e_0)

(b) 15 時の臨時高層観測を要請し、データを入手した時点での最適の注意報を発令する。 (e_1)

(c) 21 時のルーチン観測を待ってデータを入手し、その時点で最適の注意報を発令する。 (e_2)

各予測値ごとに、3 つの選択のおのおのについて機会

表-8 9 時高層観測に基づく予測値 (850 MB トラフ通過時刻、700 MB 気温) に対応して選択すべきエクスペリメント

09 時データによる予測	機会損失の期待値 (単位 100 万円)					
トラフ通過時刻、気温	e_0	e_1	e_2			
21 時、-9°C	0.10	0.10	0.10			
"、-12°C	0.20	0.20	0.20			
"、-15°C	0.35	0.30	0.50			
"、-18°C	0.40	0.50	1.00			
"、-21°C	0.60	0.80	1.70			
"、-24°C	0.85	1.00	2.30			
03 時、-9°C	0.10	0.10	0.10			
"、-12°C	0.20	0.20	0.20			
"、-15°C	0.30	0.25	0.25			
"、-18°C	0.40	0.40	0.60			
"、-21°C	0.70	0.60	1.00			
"、-24°C	0.80	0.75	1.30			
700 MB 気温 850 MB トラフ通過	-9°C	-12°C	-15°C	-18°C	-21°C	-24°C
15 時	(e_2)	(e_2)	$e_0 \sim e_1$	e_0	e_0	e_0
21 時	(e_2)	$e_1 \sim e_2$	e_1	e_0	e_0	e_0
03 時	(e_2)	$e_1 \sim e_2$	$e_1 \sim e_2$	e_1	e_1	e_1
09 時	(e_2)	e_2	e_2	$e_1 \sim e_2$	e_1	e_1

e_0 : いまだちに注意報を発表する。

e_1 : 15 時の臨時観測を要請し、データ入手の後判断する。

e_2 : 21 時のルーチン観測データ入手を待ってから判断する。

表-9 e_0 の場合発表する注意報の内容

700 MB 850 MB トラフ 通過予測時間	-9°C	-12°C	-15°C	-18°C	-21°C	-24°C
15 時	A1	A1	A1, A5	A5	A5	A5, A9
21 時	A1	A1, A6	A5, A6	A5, A6	A5	A5
3 時	A1	A7	A6, A7	A6	A6	A6
9 時	A1, A8	A8	A7, A8	A7	A7	A7

A 1: 降雪なし
A 5: 降雪開始 15 時: 降雪量 0~10 cm
A 6: 降雪開始 21 時: 降雪量 0~10 cm
A 7: " 03 時: "
A 8: " 09 時: "
A 9: " 15 時: " 10~30 cm
A 10: " 21 時: "
A 11: " 03 時: "
A 12: " 09 時: "
A 13: " 15 時: " 30 cm~
A 14: " 21 時: "
A 15: " 03 時: "
A 16: " 09 時: "

損失の期待値を計算すると、たとえばトラフ通過時間が 21 時および 3 時と予測された場合は 表-8 のようになる。こうしてそれぞれの予測値について期待損失が最小値をとるものを見出し、それを 表-8 に示す。

また選択 e_0 すなわちいいますぐ注意報を発令するのが最適であるとされたとき、どのような内容の注意報を発令すべきかを計算した結果を示したのが 表-9 である。

この結果より、ある予測値が得られたとき、われわれは次の 2 例のようにして、どのような注意報を発令すべきかを知ることができる。

例 1

9 時のデータ入手解析の結果「850 MB 高度の谷の通過 21 時、700 MB 気温 -21°C に下降」と予測された場合は、表-8 より「ただちに注意報を発令し (e_0)」その内容は、表-9 より「降雨開始 15 時、降雪量 0~10 cm (A 5)」とする。機会損失の期待値は 0.60 百万円である (e_1, e_2 を選択した場合はそれぞれ 0.80 百万円、1.70 百万円)。

例 2

同じく「850 MB 高度の谷の通過 3 時、700 MB 気温 -21°C に下降」と予測された場合は、表-8 より「15 時の臨時高層観測を要請し、そのデータ入手後判断すること (e_1)」とする。機会損失の期待値は 0.60 百万円である (e_0, e_2 を選択した場合はそれぞれ 0.70 百万円、1.00 百万円)。

(7) まとめ

上記の計算で用いたモデルはさきに述べたようにきわめて単純化されたものであり、これよりはっきりした結論を導き出したり、ただちにこのまま実用に供すべきだということは危険である。しかし、この計算例から見る

限り、次の3点は指摘できよう。

(1) 昼間の降雪については30%程度、夜間の降雪については20%程度の低い降雪実現確率の予報でも情報価値はある。

(2) 臨時観測は10%程度の降雪実現確率があれば、実施する価値がある。

(3) 一般的にいって降雪開始時刻の予報発表値は純粹に自然現象面だけの分析によって行なう予報者の予測値(最大実現確率をもつ降雪開始時間)より早目にするほうがよい。

4. 多目的ダムの予備放流に関する決定モデル

(1) 予備放流操作

多目的ダムの予備放流は、出水が発生する直前に、その洪水調節に必要な空容量を得るために、それまで利水補給の目的で確保していた貯留水の一部を放流する操作であって、多目的ダムの貯水容積を有効に利用するために、本来貯水池利用上からは相反する利用のしかたをしている治水と利水の両目的に容量の一部を重複利用する場合に採られている。この操作では出水の相対的規模をあらかじめ予想して、その大きさに応じた予備放流総量を決める必要があるが、従来は気象予報の利用性ははなはだ低いものであったため、計画上やむを得ない場合にのみ、しかも数時間の放流時間相当の容量を限度として採用されてきた。また実際のダム操作にあたっては、降雨予測や流況予測の信頼度が明確に評価されていないことや、操作の信頼性に対する定量的基準も明確でないため、管理者個々の経験や判断に頼ることが多い現状である。

しかるに、近年の著しい水需要の増加と防災の安全性の向上に対する要求の高まりは、多目的ダムをより適確にまた効率的に管理していく必要性を増し、そのために予測操作の積極的採用と、同時にその信頼性の向上および客観的基準に基づく操作法の確立を必要としている。予備放流操作をはじめとする予測操作法は、近年数次で行なわれるようになった多目的ダム群の管理においては必然的なものであり、今後ますますその重要性は増し、また利用途も拡大していく方向にあるといえる。

以下においては気象情報に基づき、期待損失最小の原則のもとにこの予備放流操作を適切に判断することを目的としてつくられた決定モデルを示すこととする。

(2) 予備放流操作の決定モデル

本研究ではモデルの特性をとらえやすくするために、実際のダム操作の過程を基本的にはずれない範囲でできる

表-10 Yダムの諸元

直接集水面積	1700.7 km ²
計画洪水流量	1700 m ³ /s (35.9 mm/hr)
計画放流量	1100 m ³ /s (23.2 ")
予備放流量	600 m ³ /s (12.65 ")
補給水量 (水田)	1.39 m ³ /s
その他の第1PSと重複利用	
第1PS最大使用量	5.8 m ³ /s
最大出力	10,700 kW
第2PS最大使用量	5.8 m ³ /s
最大出力	2,600 kW
容量配分	
有効全容量	28,800 km ³
治水容量(計画)	7,600
サーチャージ容量	800
予備放流量	6,800
利水容量	28,000
うちかんがい必要量	2,000
サーチャージ	800,000 m ³ (4.7 mm)
HWL	
予備放流	6,800,000 (39.8 mm)
計画治水	7,600,000 (44.5 mm)
利水	28,000,000 (164.0 mm)

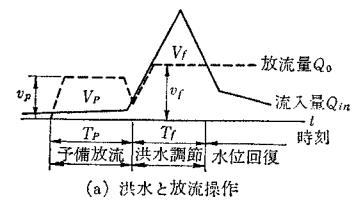
だけ単純化したモデルとした。モデルは台風時の雨量予測、降雨量から流況への変換、予備放流操作、損失費用計算のサブモデルとそれらの中心に位置する決定モデルからなるものである。計算には表-10にその諸元が示されているYダムを例にとっていた。このダムは水系内で独立に機能すると仮定する。以下にモデルの概要を述べる。

a) 予備放流操作モデル

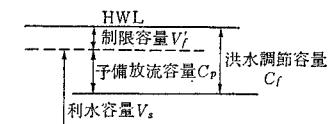
治水容量と利水容量の間にはTrade offの関係があって、この間の最適な予備放流操作量を、降雨、流出の予測情報をもとに決定することが本例の目標である。

これを具体的に説明すると、図-3(b)に示すように、全体の洪水調節容量 C_f は、あらかじめ確保されている制限容量 V_f (制限水位より上部の容量) と予備放流によって得られる空容量 C_p によって確保されるものであり、 V_f を一定にとれば C_p を大きくとるほど洪水調節に対する安全度は大き

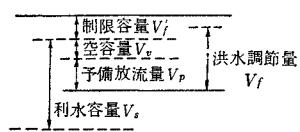
い。これを利水側からみれば、通常時利水のために貯留されている容量 V_s が予備放流によって C_p だけ減少することになり、それだけ一時的に水頭が低下するほか、予備放流後、出水が予想されたものより小規模のものであった場合には、予備放流以前の水位状態



(a) 洪水と放流操作



(b) 貯水池の容量配分



(c) 洪水と放流操作

図-3 ダム管理のモデル化

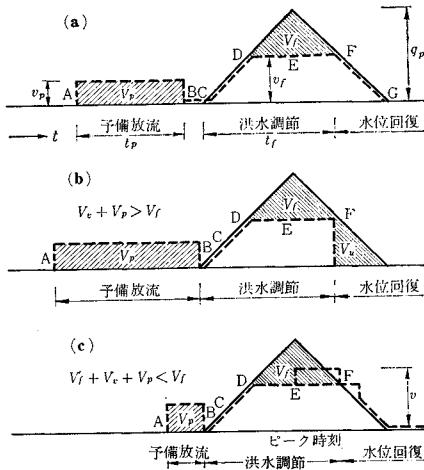


図-4 ダム操作のモデル化

水位が回復せず、その後利水補給の上で大きい損失が生ずるおそれがある。したがって、予備放流量 V_p は、予測される出水の規模とその出現確率に対応した治水、利水両面の期待損失額に基づいて決定されるものとなるだろう。

図-4 に示すように洪水時のダム操作過程は(1)予備放流、(2)洪水調節、(3)水位回復の3段階に分けて考えることができる。操作手順は次のようになる。

(1) 予備放流操作を行なう(A→B)。図-3(a)に示すように、予備放流は予想される出水 Q_{in} の以前に行なわれるもので、予備放流量 V_p は単位時間放流量 v_p の時間積分量(放流時間 T_p)におきかえることができる。これに対しモデルにおける操作では放流量 v_p を一定量とし、放流時間 T_p だけを可変の決定要素とすることにして単純化をはかった。すなわち、 $V_p = v_p \times t_p$

ここで V_p は予備放流総量、 v_p は無害放流量、

t_p は予備放流時間

(2) 洪水の流入に伴い洪水調節に入る(C→D→E→F)。このモデルでは一定量放流方式をとり、C→Dでは流入カーブに沿った放流を行ない、D→E→Fはあらかじめ定められた一定量 v_f を放流する。

(3) 流入量のピークが過ぎ、流入量が計画最大放流量 v_f に等しくなった時点 F から水位回復段階に入る(F→G)。F の時点において水位が制限水位より上にあれば、なお放流を継続して制限水位まで下げる。また制限水位より下にあれば、放流をやめて制限水位まで上げるようにする。

この場合、図-3(c)にしたがって、制限容量を $V_{f'}$ 、予備放流開始前に制限水位下に空容量がある場合、それを V_v 、予備放流量を V_p 、全体の洪水調節量を V_f とすると、 $V_v + V_p > V_f$ の場合には、図-4(b)のよう

に F 時点から放流を止めて水位を制限水位まで上げる操作を行なうが、実際の洪水で、 $V_v + V_p > V_f + V_v$ となると利水上の損失を生ずることになる。

また、 $V_f' + V_v + V_p < V_f$ の場合には D→F 間のある時点で満水し、オーバーフローを生ずる。オーバーフローの流出流量はその始点 E 点から F 点まで $V_f - (V_f' + V_v + V_p)$ の総量分を一定の強度で上へせした v_A とする。このとき v_A の大きさに応じて治水上の損失が生ずる(図-4(c)参照)。

b) 損失費用関数

ダムの操作に伴う効用は、前節に述べたように予備放流後の水位回復が不能であった場合の利水上の損失と、計画を上まわる放流を余儀なくされた場合の治水上の損失によって評価するとする。また、これらの損失量の評価方法やその含めるべき範囲については、水資源管理の技術、行政分野においても論が多い反面、その波及範囲は広範多岐にわたるため、実際に評価要素の選定およびその測定がきわめて困難である。

したがって、ここでは、従来水資源開発の計画において慣用されている方法を採用し、モデルダムにおける実際の管理資料を調査して具体的な数値を求めた。すなわち治水では放流操作を行なう場合にその操作量に従って発生する期待損失を、また利水補給の場合には予定されていた補給量から不足が生じた場合の期待損失をそれぞれ金額で単純に評価するものとする。このような取扱いのおもな問題点としては、治水・利水とも間接的および波及的損失が見積られていないこと、経済以外の社会的・行政的要素や人命や精神面の損失が含まれていないことなど重大なことがらがあげられるであろう。これらの要素を含む定量的評価は、本論の決定問題を実用的なものとするキーポイントを握っているともいえる。

以下モデルダムで推定された数値の概要を述べる。

① 利水補給の効用：利水補給の不足による損失は、補給水の単位効用額をもとにして見積ることとし、発電とかんがいについて次のように求めた。

発電は第1、第2発電所があり、それぞれ単独で取水しているので、その平均的な使用水量の割合を考慮して水量 1 m³ 当り平均発生電力を求めると約 0.335 kWh/m³ となる。その価値額 Y_p は、

$$Y_p = 0.335 \text{ kWh/m}^3 \times 0.958 \times 2.05 \text{ 円/kWh} \\ (\text{有効率})(\text{単価}) \\ \times (1 - 0.015) \div 0.56 \text{ 円/m}^3 \\ (1 - \text{管理費率})$$

なお、発電出力は一定で変化しないものと考え、効用見積から除いた。また補給水の価値は補給増の場合と減の場合で異なる場合も考えられるが、発電では一般に代替系が確立しているので、その単位効用は変わらないとした。したがって、補給増の場合の Y_p は補給減の場合

の単位損失額に等しいことになる。

かんがい補給水の減少による損失は、傾向的には補給水の減少量に対して2次曲線的関係にあると考えられる。またその損失程度は、対象作物の種類や成育時期によって大きく異なることが考えられる。しかし、ここではそれらを単純化し、平均的な線形関係で近似した。

モデルダムにおけるかんがい補給は、大部分が水田補給である。当ダムでの渇水年補給の実態から補給水 1 m³当たり平均增收効果額 Y_a を推算すると、水田面積 370 ha, 渇水年における補給水量 840 000 m³/年、単位面積当たり增收量 0.15 ton/ha、純益率 0.76、生産量 ton 当たりの粗収入 150 000 円/ton として、

$$Y_a = \left(\frac{\text{単位面積当たり}}{\text{増 収 量}} \right) \times \left(\frac{\text{生産量 ton 当たり}}{\text{粗 収 入}} \right) \times \frac{\text{純益率} \times \text{水田面積}}{\text{年間補給水量}} \div 7.5 \text{ 円/m}^3$$

ただし、施設管理費は年間一定額を必要とするものと見なし、この中には含めない。

各用途が比例的に節水すると考え、さらにかんがい補給水量は発電使用水量の 15% 程度に当たり、また重複利用していることを考えると、利用補給全体における単位水量当たりの損失額 L_s は、

$$L_s = Y_p + 2 \times 0.15 \times Y_a \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$= 2.81 \text{ 円/m}^3$$

と見積られる。

② 治水上の効用：治水効用は、治水計画では普通洪水氾濫からの被害軽減額で評価されることが多い。ここでも同じ方法を用い、直接被害の測定は河道被害、公共土木被害、一般資産被害（家屋、農林地、動産などの）、営業停止損失、農産物減収被害に分けて見積り、それを河川の最大流下量の関数として表わす。ここではモデルダム下流において過去の水害時に実際に調査された資料をもとにして被害額を集計し、図-5 に示されるような次式を設定した。

$$L_f = 2.453 \times 10^{-3} \times (v_A - 600)^{3.533} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ただし $v_A \leq 600 \text{ m}^3/\text{sec}$ のとき $L_f = 0$

ここで L_f は洪水による損失額（円）、 v_A はダム放流量（m³/sec）である。

c) 台風時の雨量予測モデル

この決定問題の重要なポイントの1つ

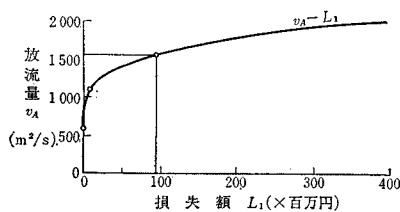


図-5 モデルダムの Y 治水効用

は、降雨予測とその適中精度の評価である。従来の予測に基づくダム操作法の諸研究がほとんど実用化されていないのは、予測手段自体が仮定のものであったり、実用化の困難な研究的手法が用いられたものであることなどが大きな原因であることを考えれば、ここで用いる予測モデルはできるだけ実用的なものであり、また予測精度の評価ができるものであることが望ましい。そこでここでは、現在台風時の降雨予報手段の一方法として実用もされている降雨量予測モデルを利用し、これによって推定される予想雨量値と、実際に観測された実現値より予測精度に関するモデルを作成した。

この降雨量予測モデルは以下に示すように台風の進路予報情報を入力とするものであるから、進路予報自体の予測精度も降雨予測に影響をおよぼすことになるが、ここでは進路予測とそれに基づく降雨量予測の両方を含んだもので現実の資料によって分析を行なった。

まず、台風に伴う雨量を地形性降雨と渦性降雨の合計量としてだけ表わし、時刻 i 、地域 j における単位時間当たりの地形性降雨量 R_{ij} は

$$R_{ij} = V_{ij} \times C_{kj} \times 0.08 \quad \dots \dots \dots (8)$$

とする。ここで V は風速 (m/sec), C は予測区域の気圧の平均上昇速度 (10 mb/hr), 0.08 は経験定数, k は風向方位 (16 方位の番号) を表わす。

また渦性降雨（台風中心付近の雨）の量 $R_{ij'}$ は

$$R_{ij'} = 0.8 \times V_{sti} \times \exp \left\{ - \frac{50}{V_{sti}} \times \left(\frac{r_{ij'}}{100} \right)^2 \right\} \quad \dots \dots \dots (9)$$

とする。ここで $R_{ij'}$ は単位時間当たりの渦性降雨量 (mm), V_{st} は台風中心の最大風速 (m/s), r は台風中心からの距離 (km), 0.8 は比例定数である。式 (8), (9) で用いる風速は今回のモデルでは中心の最大風速と 30 knot (風速 10 m/s) 暴風半径を与える、任意地点の風速は近似的に直線外挿によって求めることとした。

上記 (8), (9) の計算式によって、関東地方の小雨量予報区を対象として過去 35 例の台風について、その当時の台風予報情報を用い、3 時間ごとの 24 時間毎時予測計算を行ない、その中から地域として 3 地域を抽出し、その地域についての推算降雨量と実測記録降雨量との対

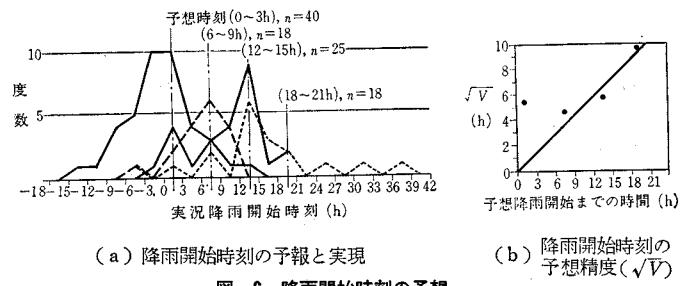


図-6 降雨開始時刻の予想

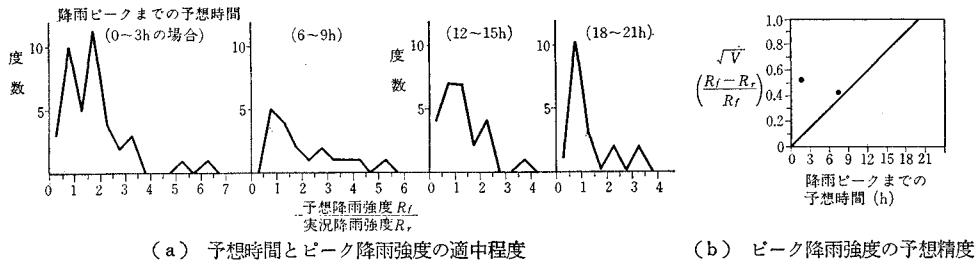


図-7 ピーク降雨強度の予想

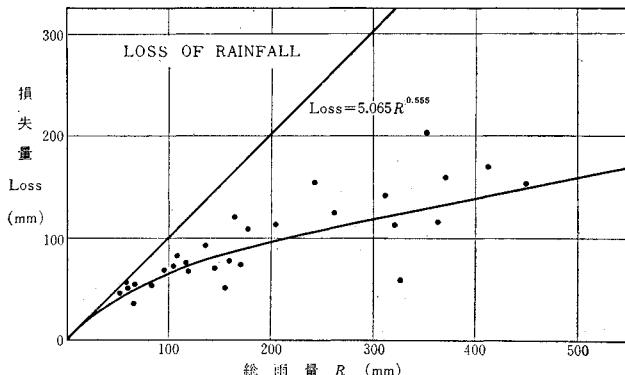


図-8 降雨量-損失量図

比を行なって予測の適中度を実現確率分布の形で求め、それを補正してモデルとして用いた。対比要素としては降雨の時間分布パターンができるだけよく表現できるよう、予測時点から降雨開始（10 mm/3 hr の降雨強度のある時点を開始時刻とした）までの時間、降雨ピーク時刻までの時間、降雨継続時間、ピーク降雨強度および総雨量の5要素を選んだ。

予測値に対する実現値の確率分布は、図-6(a), 図-7(a)の例示する3通りであり、この分散値を図-6(b), 図-7(b)に示した。これより降雨予測精度を表わすモデルは正規分布を仮定し、また分散値は予想降雨ピーク時刻までの時間に比例した値を採用した。すなわち

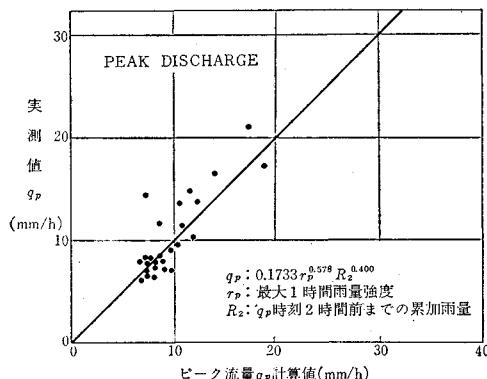


図-9 ピーク流出量（モデルダム）

ち、予想時刻が早いほど推定精度が低い（分散値が大）ものとしたが、これは 図-7 (b)などの例によってもそのような扱い方はほぼ妥当なものと考えられる。

d) 雨量一流況変換モデル

降雨量から流況への変換方法には種々のものがあるが、ここでは全体的な精度上の齊合性から判断して、下記の方法によって流況への変換を行なった。

図-8 は総雨量 (R) と流出量 (Loss) の関係を指数回帰によって求めたものである。

この図より総雨量と流出流量（有効流出量）との関係がわかる。

大流量 q_p は最大降雨強度 r_p と最大流量時刻 間前までの累加雨量 R_2 との相関が高いことが いる。その関係をモデルダムにおいて重回帰分 て求めたのが次式である。

ただし、ここで R_2 は最大流量時刻 2 時間前までの累加降雨量とした。

上式で計算した q_p の値を実測値と比較したのが図-9である。これらの流出要素から、三角形型流況図に直したのが図-10である。ただし、モデルダムにおいては最大降雨強度時刻と最大流量時刻との時間差は平均

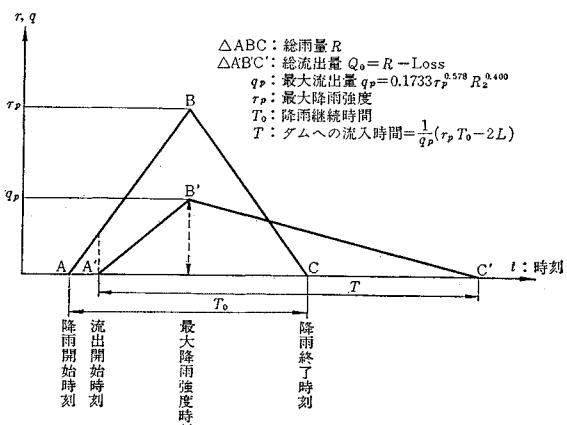


図-10 降雨一流況変換図

30分程度であるため、図では一致させて書いてある。

e) 決定モデルの構成
気象観測情報より以上に述べたモデルにより降雨予測とその実現確率が計算されると、それに基づき、現在ただちに予備放流を行なうべきか、あるいは次の気象情報が入手するまで待機すべきかの決定を求める計算を図-11に示されるディシジョンツリーにしたがって行なう。

台風接近時にはダム管理のために、式(8),(9)をもとにした降雨量予報が毎時間ごとに与えられるものとし、そのときの予報要素はさきにあげたもののうち、降雨開始時刻(並雨以上の)降雨継続時間(同左)最大時間雨量強度、総雨量の4要素とする。しかし、今回のモデルでは、降雨ピーク時刻は降雨継続時間のほぼ中央時に近いことが一般であること、総雨量は最大雨量強度と降雨継続時間の関数として近似できることから総雨量は独立要素としては省略した。これらの降雨要素に基づき流況を計算する。

雨量予報入手時点においてただちに予備放流を開始すべき(e_0)か、あるいは次の3時間後の予報情報(Z_1, Z_2, Z_3)をまって判断すべき(e_1)かが意志決定の分岐点である。また放流開始するとすれば何時間放流を目標とすべきかが行動(a)として選択されることになる。 e_1 を選ぶ場合には、次の情報入手まで3時間待つことになるが、それによって予報精度がよくなることが期待できる代わりに必要な予備放流時間を確保できなくなる可能性が増す。

2. 述べた方法によりこのディシジョンツリーにしたがって各行動をとったときの期待損失を求め、期待損失最少の行動を見出す。

(3) 適用例

試算のケースは図-11のディシジョンツリーに示されるごとく、次のように選んだ。

① 予測情報

i) 降雨開始までの

余裕時間: 3, 6, 9, 12, 15, 18時間

ii) 継続時間: 3, 6, 9, 12, 15, 18時間

iii) 最大降雨強度: 20, 40, 60 mm/hr

なお、最大ピーク時刻は継続時間から、総雨量は最大

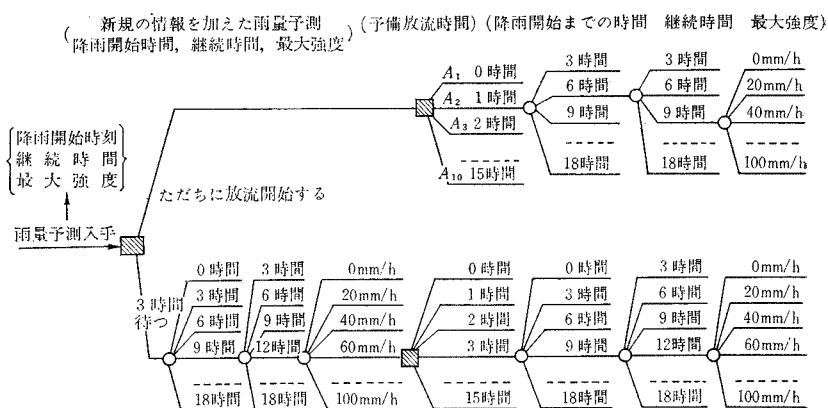


図-11 多目的ダム予備放流操作のディシジョンツリー

雨量強度と継続時間から推定

② 行動決定の種類

i) 次の気象情報まで3時間待つ(e_0)

ii) 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15時間の目標放流をただちに行なう(e_0, a_i)

①の予報情報3要素の各数値の組合せに対して、②のとるべき行動のうちのいずれが最適になるかを見出すため、すべての組合せについて試算した。計算作業は、①の予測要素の組合せの値とダム現況(今回は貯水位だけ)を与えるれば、その後の作業である予測値に対応する各実現確率、流況の変換、ダム操作の過程、操作の結果としての利水と治水の状態とその効用についてすべてが計算されて、最終的に各行動に対する期待効用がタイプ

表-11 降雨の実現確率

(a) [予測] 降水ピーク強度 40 mm/hr
降水開始までの時間 6 hr の場合
降水継続時間 12 hr

ビーグル 雨量強度	0 mm	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100~ mm
実現確率	0.030	0.235	0.468	0.235	0.029	0.001
降雨開始までの時間	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr
実現確率	0.226	0.546	0.214	0.012	0.000	0.000
降雨継続時間	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr
実現確率	0.006	0.060	0.241	0.383	0.241	0.066

(b) [予測] 降水ピーク強度 20 mm/hr
降水開始までの時間 12 hr の場合
降水継続時間 12 hr

ビーグル 雨量強度	0 mm	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100~ mm
実現確率	0.202	0.595	0.196	0.006	0.000	0.000
降雨開始までの時間	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr
実現確率	0.030	0.100	0.223	0.292	0.223	0.130
降雨継続時間	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr
実現確率	0.106	0.121	0.174	0.197	0.174	0.227

表-12 降雨開始までの余裕時間、降雨継続時間、
ピーク雨量強度の各予測値に対応する最適
決定とその期待効用

(a) (ピーク雨量強度 40 mm) (100 万円)

降雨開始時刻	降雨継続時間	3時間	6時間	7時間	12時間	15時間	18時間
3 時間 後	A1 1.1	A1 0.9	A4 -4.8	A6 -23.9	A6 -61.1	A6 -65.1	
6 時間 後	A1 -0.3	A3 -6.8	A6 -15.1	A7 -29.7	A8 -42.3	A8 -45.0	
9 時間 後	A3 -8.5	A6 -15.9	A7 -22.5	A8 -29.7	A8 -33.6	A8 -35.6	
12 時間 後	A6 -16.8	A7 -22.2	A8 -26.9	A9 -30.5	A9 -31.2	A9 -32.0	
15 時間 後	A7 -22.6	A8 -26.7	A9 -29.8	A9 -31.0	A9 -31.0	A9 -31.2	
18 時間 後	A8 -27.0	A8 -29.8	A9 -31.2	A9 -31.9	A9 -32.0	A9 -32.3	

(b) (降水ピーク強度 20 mm) (100 万円)

DURATION BEGIN	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr
3 hr	A1 0.3	A1 0.9	A1 2.0	A1 3.3	A2 3.8	A3 1.7
6 hr	A1 0.5	A1 1.2	A1 2.2	A1 2.9	A2 1.9	A3 0.8
9 hr	A1 0.8	A1 1.4	A1 2.0	A1 1.5	A3 -0.6	A3 -1.0
12 hr	A1 0.9	A1 1.2	A1 0.6	A1 -1.6	A3 -2.7	A3 -4.3
15 hr	A1 0.6	A1 -0	A1 -2.3	A3 -3.9	A3 -5.8	A5 -7.6
18 hr	A1 -0.6	A1 -2.8	A3 -5.0	A3 -6.9	A5 -8.8	A5 -10.1

- A 1 : 次の情報を入手して決定
- A 2 : 直ちに放流開始、予定放流時間 1 時間
- A 3 : —————— “—————”————— 2 時間
- A 4 : —————— “—————”————— 3 時間
- A 5 : —————— “—————”————— 4 時間
- A 6 : —————— “—————”————— 6 時間
- A 7 : —————— “—————”————— 8 時間
- A 8 : —————— “—————”————— 10 時間
- A 9 : —————— “—————”————— 12 時間
- A 10 : —————— “—————”————— 15 時間

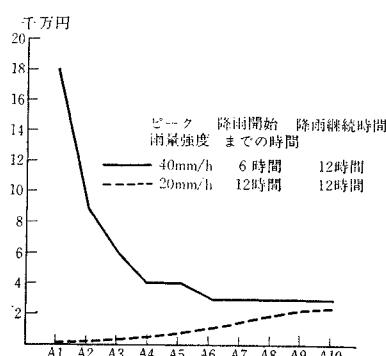


図-12 降雨予測値に対して選択したアクション
による期待損失

アウトされるようなプログラムにより行なわれる。予測要素の組合せに対する実現確率の例を表-11 に示す。

表-12 では各予測情報（3要素の組合せ）に対してと

るべき最適の行動（表中の上段）とそれに対する期待効用（下段）が示されている。マイナス値は損失である。また 1 つの予測に対処する行動を選択した場合の期待効用の違いを 図-12 に例示した。

表-12 からわることは、効用関数からも想像されるように治水に非常にウェイトのかかった行動（予備放流を多く行なう傾向）が選択されていることである。そして別途検討した同じ予測規模の降雨をそのまま目標として行なう実際の操作に対比すると予測時刻が早いほど目標操作量の開きが大きい。これらは予測精度がよくないために余計上記のことが誇張されているものとみられる。

以上の結果より、ある予測が得られたとき、次の例のようにしてどのような予備放流操作を行なうべきかを知ることができる。

例 1

ある時刻の台風の位置、最大風速半径およびそれらの予想進路に基づいて雨量予報が出され、その内容は「降雨開始時刻（基準降雨量以上）は 6 時間後、継続時間は 12 時間、最大時間降雨量は 40 mm/hour」であったとする。ダム管理者側としては 表-12 より「ただちに予備放流を開始し (e_0)、予備放流時間は 8 時間程度放流することを目標とする (A_7)」のが、最適の判断である。この場合の期待損失は 29.7 百万円であり、一方 3 時間待って、新たな予測を入手し、その時点での最適のアクションを選択する場合 (e_1) の期待損失は、42.6 百万円である。

例 2

雨量予報の内容が「降雨開始時刻（基準降雨量以上）は 12 時間後、継続時間は 12 時間、最大時間降雨量 20 mm/hour」であったとする。このときは、表-12 より 3 時間待って、次の台風予測に基づく雨量予報を入手して判断するほうがよい。

3 時間待った結果、「降雨開始時刻」は 6 時間後、継続時間 12 時間、最大降雨強度 40 mm という予報が出たとすると例 1 の場合と同様 その時点で放流を開始し、予備放流時間は、8 時間程度を目標値とするのがよい。

(4) まとめ

これまで述べてきたような方法によりるべき予備放流操作を見出すことは、これのみで決定することはできないにしても、ダム管理者が下す判断の手掛りを与えており、あるいはその判断の妥当性を再確認する上で有効であると考えられる。しかし、このダムの予備放流操作決定モデルをただちに実際に適用するには、なお次のようないくつかの問題が残る。

まず、このモデルにおいて用いられるような方法で効用が評価しうるかという疑問である。しかし、これに対しては、現在の研究段階では答えようはないし、また安易な答えも許されない。したがって、ここで述べた最適な決定とは、われわれが採用した効用関数において最適なものであることを明確にしておくべきである。

気象予測の精度を高めることが必要なことであるのはいうまでもないが、同時に気象予測とその実況についてのきめこまかいデータ収集を行なうことも予測精度の評価のため、きわめて重要である。

モデルについては、今回の研究では、現在水位、流入量、降雨実況を単に現状を表わすデータとして用いているだけであるが、これらの情報も1つのエクスペリメントの結果として取り扱い、以後の流入量の実現確率をこの結果を用いた事後確率として修正することも必要であると考えられる。

そのほか、ここで仮定したように一水系で単独に機能するダムは少ないのであるが、互いに関連する複数個のダムをもつ系についてのモデルの開発が必要である。今後以上のような問題の解決の方向へ研究を進めたいと考える。

5. む す び

以上において決定モデルの防災対策への適用例として、気象情報提供者側の最適行動を求める雪害対策の例、気象情報受け取り側の最適行動を見出す予備放流の例を示した。

われわれの周囲には、このように自然現象の予測情報に基づき、しかも単なる物理現象としてだけでなく、その社会的効用を基準にして、対策を決めねばならない問題が多く存在する。この研究は、その種の問題に対するアプローチの一つである。

なお、本報告は大蔵省のPPBS研究費によって気象庁内で行なわれた「異状気象時における気象情報の提供に関するシステム的研究」をとりまとめたものである。本研究において、研究全体の構想およびまとめを、中村および小野が担当し、花籠が主としてダムの管理に関する部分の研究を受け持った。また稻村および運輸省システム分析室の常陸壮介、東工大大学院の鹿島茂がモデルの組立ておよび計算を担当した。したがって、本論文の

事実上の著者は上記の6名であるといえる。本報告は、上記の著者のほか、運輸省情報管理部 山田幸正氏、下出敏幸氏、気象庁予報部 百足虎治氏、観測部 三定賛氏をはじめとする研究会の委員諸氏から貴重な示唆が与えられた。また資料調査にあたっては建設省、日本道路公団、日本国有鉄道、気象庁、水資源開発公団の関係各位に多大の協力および助言を頂いたことを付記したい。

参 考 文 献

- 1) Au-Shan-Hoel : Fundamentals of Systems Engineering, Probabilistic Models; Addison-Wesley Publishing Co.
- 2) 日本鉄道技術協会：新幹線除雪予報方式に関する研究報告書、その2、昭和45年3月
- 3) 保科正男：気温の数値予報の検討、研究時報25巻第2号
- 4) 仙台管区気象台：電算資料に関する調査、昭和46年、気象庁全国予報検討会資料
仙台管区気象台：渦度の数値予報精度の調査、昭和46年、未完
- 5) 日本道路公団高速道路名古屋管理局技術部：昭和45年度雪氷対策報告資料、昭和46年5月
- 6) 近畿地方建設局滋賀国道工事事務所：昭和46年度雪寒対策要領、昭和46年
- 7) 近畿地方建設局滋賀国道工事事務所：昭和45年度作業日誌、昭和45年
- 8) 近畿地方建設局滋賀国道工事事務所：昭和45年度雪寒費用使用状況と実績、昭和45年
- 9) 滋賀県彦根土木事務所：昭和45年度除雪路線別明細表実績、昭和46年
- 10) 東海道新幹線総局施設部：昭和46年度新幹線の除雪対策、昭和46年
- 11) 東海道新幹線総局施設部：昭和44年度雪、昭和45年、昭和45年度雪、昭和46年
- 12) 名古屋鉄道管理局：昭和46年度鉄道路線の除雪対策、昭和46年
- 13) 労働省・運輸省：鉄道除雪実施要綱、昭和23年10月
- 14) 名古屋鉄道管理局米原保線区：昭和25年度除線動員計画、昭和46年
- 15) 滋賀県警察本部：滋賀の交通 1969、昭和45年
滋賀の交通 1970、昭和46年
- 16) 建設省：第25回建設省技術研究会報告、昭和46年；(昭和48年3月発行予定；土木研究会)
- 17) 建設省河川局監修、全国総合開発促進期成同盟会編：日本の多目的ダム、昭和38年5月、山海堂
- 18) 同、昭和47年4月、山海堂
- 19) 建設省河川局監修、建設省建設大学校編：多目的ダムの建設、(研修テキスト下巻)昭和44年11月、全国建設研修センター
- 20) 杉浦 茂・普世泰吉：台風に伴う雨量予想の計算プログラムについて、研究時報23巻第1号

(1973.1.17・受付)