

治水計画における計画降雨群決定モデル

Design Rainfall Setting Model in Flood Prevention Planning

㈸日水コン 正員 萩 原 良 巳

㈸日水コン 正員 蔵 重 俊 夫

㈸日水コン 正員 平 井 真砂郎

1. はじめに

山がちな中小河川や狭あい河川では、シャープな形状の洪水が短時間のうちに生起する傾向にあり、水防や避難活動といった対応が困難となる。特に、河川に沿って人家が密集しているような流域に対しては安全性をより一層強調した治水計画が望まれよう。こうした流域の治水は、上流に人為的操作を必要としない自然調節方式のダムを配置し、下流部は築堤河道としても、中流部に可能な限り遊水池などの洪水調節施設を設置することが基本的な考え方といえよう。

筆者らは、こうした流域の治水計画論を模策しているところであるが、¹⁾計画降雨の決定については、統計論的立場から不確実性下における意志決定問題として捉える考え方を提案した。²⁾この方法は、安全性を計画の第一義的評価基準と考え、過去の降雨の再現性を基本的には前提としないものである。すなわち、治水水準として定められた総降雨量とピーク降雨量を制約とし、計画区間への流出量が最大となる降雨波形を求めるもので、Dynamic Programming における関数方程式として計画降雨決定モデルを定式化した。こうして得られる計画降雨は、治水計画上最も基本となるもので、治水計画代替案を作成するための計画入力として位置付けることができよう。こうした意味において、これを「基本降雨」と呼ぶこととする。一方、得られる治水計画代替案は、前述のように種々の洪水調節施設を含むことが一般的であるため、種々の洪水、ひいては種々の計画降雨群を設定し、代替案の分析・評価を行なうことが重要となる。

以上の観点より、本稿では、代替案の内容に応じ、降雨規模別に降雨波形の生起確率を与える方法論を提案する。その基本的考えは、計画降雨の決定問題を基本降雨の場合と同様に不確実性下の意志決定問題として認識し、さらに、降雨のランダム性を考慮したものである。従って、降雨をある意志を持った対象として捉え、流域に及ぼす被害を最大化するように行動するが、実現する現象は極めてランダム性が高いものと考えた。そのため、エントロピー・モデルにおける多次元情報経路問題を援用することから計画降雨群決定モデルを提案する。

2. 計画降雨群決定モデル

2-1 基本的考え方

降雨波形は、降雨規模と流域の治水施設により、治水効果に与えるインパクトが異なるものと考えられる。一方、通常の流域については、比較的降雨資料は豊富であり、降雨の類型とその類型の生起確率は得られる場合が多い。⁴⁾ところが、降雨規模が大きくなるとデータ数が限られるため、計画上必要とされる降雨規模別の降雨波形の生起確率は統計的立場からの設定が困難となる。このため、本稿ではアンサンブル的に得られる降雨波形の生起確率は与件として、降雨規模別の分布を推定する方法を提示する。このとき、不確実性下における意志決定問題として認識することから、治水計画上安全側となる意志決定を行なっていくことを基本的考えとする。従って、計画降雨群は、対象とする治水計画により設定結果が異なるという立場をとる。

2-2 モデル

計画降雨群の設定にあたり、まず降雨をある意志を持った対象として捉える。すなわち、流域の治水効果を最小化するように行動を起こすと考え、その結果、ある波形が実現するものと仮定する。この仮定は、昨今の長崎水害などを経験するに及び、1で述べたような治水上非常に不利な流域については、一つの合理的発想と思われよう。一方、降雨は極めてランダム性が強いので、波形選択の際のあいまいさを表わすエントロピーは最大化されると考えてもよいであろう。

今、降雨波形を A_i ($i=1\sim m$)、計画降雨規模を R_i ($i=1\sim n$)とすると、降雨の行動パターンは図-1

のように一般的に表記されよう。すなわち、降雨には大きく、ある降雨規模の治水効果を考慮する固定層と特定の降雨規模の治水効果を特に意識することなく行動する非固定層との2者に分けられるとする。そのうち、前者については、特定の降雨規模に対する治水効果を最小化するように行動するものと考える。また、各波形の生起確率 $P(A_i)$ は与件とする。このとき、エントロピー・モデルにおける多次元情報経路問題として図-1の内部構造がされる。

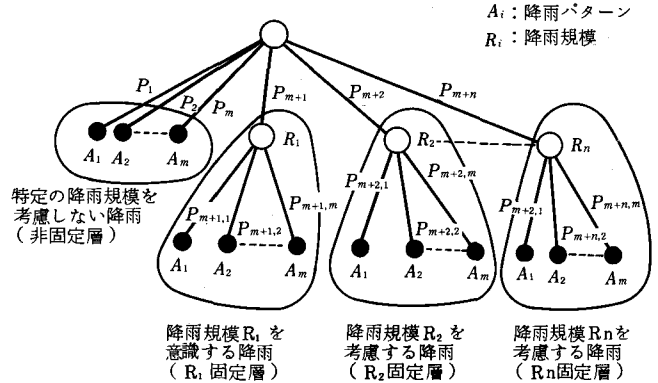


図-1 多因子情報経路による降雨の分類

以下、内部構造の推定から計画降雨群の作成に至る計画モデルを述べていく。

(Step 1) 降雨規模別の降雨波形の条件付生起確率の推定

この問題は、エントロピー最大、治水効果最小といった基準から一次元経路問題として次のように定式化される。

$$H_i / \sum l_{ij} \cdot P_{ij} \rightarrow \max. \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^m P_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad (3)$$

ここに、 P_{ij} : 降雨規模 i を選択する降雨の波形 j の条件付生起確率、 $H_i = -\sum_{j=1}^m P_{ij} \log P_{ij}$: 降雨規模 i を選択する降雨の波形選択に関する条件付エントロピー、 l_{ij} : 降雨規模 i について波形 j を選択したときの治水効果である。そしてこの解は、ラグランジェの未定乗数法により、次の通りに求められる。

$$P_{ij} = W_i^{-l_{ij}} \quad \text{for} \quad \sum_{j=1}^m W_i^{-l_{ij}} = 1 \quad (4)$$

ただし、 l_{ij} は互いに素な整数としておく必要がある。

(Step 2) 内部構造の同定

次に、残された降雨規模を選択しないグループの各波形別の生起確率と、降雨規模を選択するグループの各々についての生起確率を求めていく。この問題は降雨全体の挙動がランダム性が強いものと考えうるため、次のようなエントロピー最大化問題として定式化される。

$$H = -\sum_{i=1}^m P_i \log P_i + \sum_{j=n-1}^{m+n} P_i \cdot H_j \rightarrow \max. \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^m P_i = 1 \quad (6)$$

$$P_i + \sum_{j=m+1}^{m+n} P_i \cdot P_{ji} = P(A_i) \quad \text{for} \quad i=1\sim m \quad (7)$$

ここに、 $P_i(i=1\sim m)$ は降雨規模を選択しないグループの波形 i の生起確率で、 $P_i(i=m+1\sim m+n)$ は、降雨規模 $i-m$ を選択するグループの生起確率である。また条件付確率 P_{ij} 、条件付エントロピー H_i は既に Step 1 で既知である。この問題は、一般の非線形計画手法の適用から求解されるが、J. N. DarrochとD. Ratchiff らの反復尺度法の適用が便利である⁵⁾。

以上の手順により、降雨波形の降雨強度別の生起確率が推定されることになるが、評価基準としての治水効果は、治水計画案別に異なり、従って計画降雨群も計画案の数だけ設定されることになる。

(Step 3) 計画降雨群の設定

Step 2 までで、図-1 の内部構造が推定されるが、このうち、非固定層は安全側の計画論上、考える必要がないとみなせよう。従って、固定層全体に占める各降雨規模別の波形選択比率を求め、これを各降雨規模別の計画降雨波形の生起確率とすることが妥当と考えられる。

3. モデルの適用事例

本節では、典型的な狭あい河川である A 川 (計画高水流量 $4,700\text{ m}^3/\text{s}$) を対象としてモデルを適用した事例を示し、その適用性を議論する。A 川は、図-2 に示すように氾濫形態から 8 つの地区に分割され、上流 A 地区と中流の C、D 地区は遊水効果を持っている。

また、上流には治水ダムが建設されており、上流からの流量を一定率一定量カット方式により $1,500\text{ m}^3/\text{s}$ カットしている。また、当流域は地形的制約から改修が困難な状況にあり、現在のところ特に、支川Ⅲの合流点下流は殆んど無堤状態にある。

3-1 検討条件

検討条件は、表-1 に示す通りである。治水計画案としては、無堤状態と基準点流量 $4,000\text{ m}^3/\text{s}$ の築堤河道の 2 ケース、降雨規模として日降雨量の超過確率で $1/100$ (日降雨量 $270\text{ mm}/\text{日}$)、 $1/30$ (日降雨量 $230\text{ mm}/\text{日}$) の 2 ケース、及び波形としては前方集中型、中央集中型、後方集中型の 3 ケースとし、過去の資料が得られないため、表-2 に示すように等確率で出現するものとした。また、降雨の継続時間は 24 時間とし、表-3 の確率降雨強度曲線を適用することとした。波形の設定においては、継続時間に対するピーク出現時刻の比率を前方集中型 0.1、中央集中型 0.5、後方集中型 0.9 と設定した。

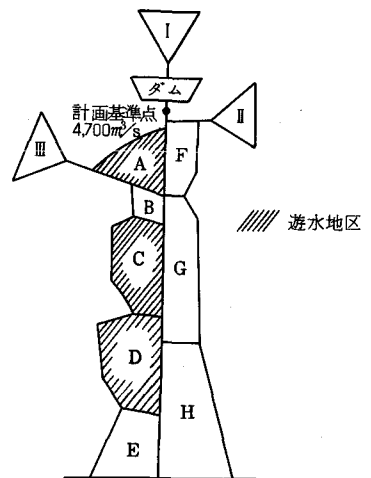


図-2 流域図

表-1 検討ケース

	ケース1	ケース2	ケース3
治水計画案	無堤	$4,000\text{ m}^3/\text{s}$	—
降雨規模	$1/100$	$1/30$	—
降雨波形	前方型	中央型	後方型

表-2 波形別生起確率

降雨波形	生起確率
前方集中型	0.333
中央集中型	0.333
後方集中型	0.333

3-2 氾濫解析

以上の条件のもと、氾濫解析により被害額（の逆数）として設定した治水効果を推定する。氾濫は、図-2 に示した A、C、D 地区以外は拡散型とし、本川水位と氾濫水位を等しいものと考え、A、C、D 地区は貯留型とし、エンゲルス公式による氾濫量をもとに湛水位を求めた。また、流出計算は総合貯留関数により求め、河道は貯留関数により、洪水波形の変形を考慮した。まず図-3 は、降雨波形別の流出解析結果についての一例であり、前方→中央→後方集中型の順でピーク流出量が大きくなっていることが理解される。また、図-4 は、最終的に得られた想定被害額を示したものである。

表-3 確率降雨強度曲線（クリーブランド型）

降雨規模	確率降雨強度曲線
1/100	$r = 1409 / (t^{0.6} + 2.99)$
1/30	$r = 1184 / (t^{0.6} + 2.64)$

r : mm/hr, t : min

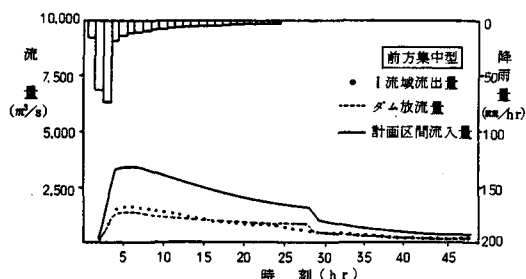


図-3.1 流出解析結果（1/30 前方集中型）

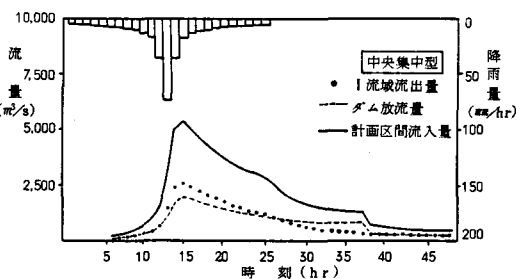


図-3.2 流出解析結果（1/30 中央集中型）

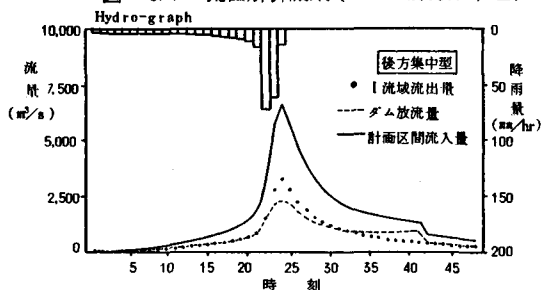


図-3.3 流出解析結果（1/30 後方集中型）

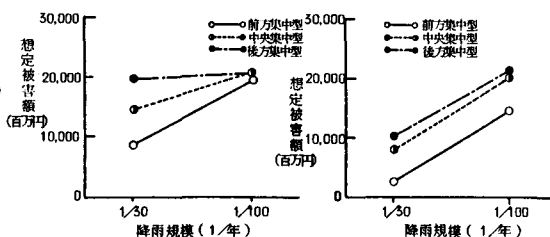


図-4 被害額推定結果

3-4 降雨波形生起に関する内部構造の推定

まず、氾濫解析により得られた想定被害額の逆数を治水効果とし、一次元情報経路モデルにより、降雨規模別の各波形の条件付生起確率を求めたものを表-3 に示す。

この結果、(8)~(14)式より次式で示されるエントロピー最大化問題として図-5 に示す降雨波形生起分布の内部構造の推定が行なえる。

表-3 降雨波形の条件付生起確率推定結果

No	河道条件	降雨規模	降雨波形	想定被害額 百円	治水効果	生起確率
1	無堤	1/100	前	20,105	1	0.333
2			方	21,272	1	0.333
3			後	20,760	1	0.334
4		1/30	前	8,510	7	0.170
5			方	14,784	4	0.363
6			後	19,878	3	0.468
7	4000m³/s 河道	1/100	前	15,333	3	0.236
8			方	21,066	2	0.382
9			後	22,115	2	0.382
10		1/30	前	2,705	27	0.074
11			方	8,009	9	0.419
12			後	10,515	7	0.507

$$D = - \sum_{i=1}^5 P_i \log \frac{P_i}{q_i} \rightarrow \max. \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^5 a_{si} P_i = h_s \quad (s=1-3) \quad (9)$$

ここに、 $q = |q_i|$ 、 $a = |a_{si}|$ 、 $h = |h_s|$ は次の通りである。

$$q = \begin{cases} (0.1138, 0.1138, 0.1138, 0.3413, 0.3173)' \text{ (無堤)} \\ (0.1191, 0.1191, 0.1191, 0.3495, 0.2932)' \text{ (4,000m}^3/\text{s 河道)} \end{cases}$$

$$a = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.333 & 0.170 \\ 0 & 1 & 0 & 0.333 & 0.363 \\ 0 & 0 & 1 & 0.334 & 0.468 \end{pmatrix} \text{ (無堤)} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.236 & 0.074 \\ 0 & 1 & 0 & 0.382 & 0.419 \\ 0 & 0 & 1 & 0.382 & 0.507 \end{pmatrix} \text{ (4,000m}^3/\text{s 河道)} \end{cases} \quad (10)$$

$$h = (0.333, 0.333, 0.333)'$$

ただし、' は転置することを示す。上記の問題を反復尺度法により解き、内部構造を推定した結果を図-6に示す。

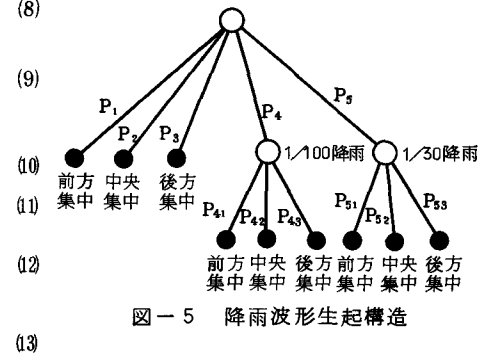


図-5 降雨波形成起構造

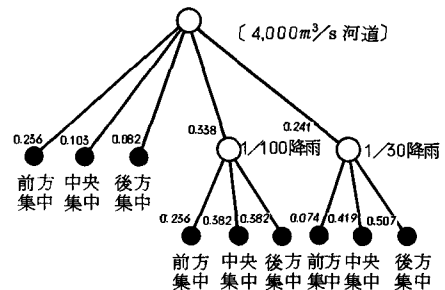
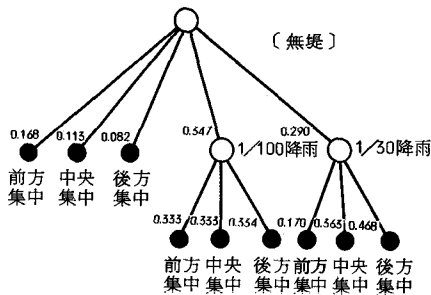


図-6 内部構造推定結果

図-6より、最終的には表-4のように、降雨の波形選択行動が整理される。

表-4 降雨の波形選択行動

河道条件	無堤				4000m³/s河道(1/24)			
	前方型	中央型	後方型	計	前方型	中央型	後方型	計
非固定層	0.168 (0.46)	0.113 (0.31)	0.082 (0.23)	0.363	0.236 (0.56)	0.103 (0.24)	0.082 (0.20)	0.421
1/100降雨規模固定層	0.115 (0.33)	0.115 (0.33)	0.115 (0.33)	0.345	0.080 (0.24)	0.129 (0.38)	0.129 (0.38)	0.338
1/30降雨規模固定層	0.05 (0.17)	0.105 (0.36)	0.136 (0.47)	0.292	0.018 (0.07)	0.101 (0.42)	0.122 (0.51)	0.241
計	0.333	0.333	0.333	1.0	0.333	0.333	0.333	1.0

()内の数値は、各層内で占める割合を示す。

以上、図-6、表-4より次のような知見を得る。まず固定層のうち、1/100降雨規模固定層は、1/100降雨量のもとでは全川にわたり氾濫するため、波形の治水効果に対する影響が少なくなり、4,000m³/s河道の前方型を除き、ほぼ等確率で波形選択を行う傾向にある。一方、1/30降雨規模固定層については、流出量が大きく、治水効果に与える影響の大きい後方型を選択する傾向にあり、前方型は選択の割合が小さい。そしてその傾向は、ある程度改修の進んだ4,000m³/s河道で顕著である。これは、破堤氾濫という大きな被害を誘発する可能性が後方型の場合に高いため、降雨にとって都合が良いと考えられるためである。

次に、これらの結果により治水計画における計画降雨群決定を行なうには、非固定層はその性格上考える必要性が小さいため、固着層に着目すれば良いことになる。すなわち、固定層の各波形の生起確率を固定層全体の生起確率で割ることにより降雨規模別の各降雨波形生起確率が設定される。こうして計画降雨群が確率分布を考えた形で定まることになり、治水計画代替案の分析・評価に対する計画入力が作成される。図-7に計画降雨群の設定結果を示した。

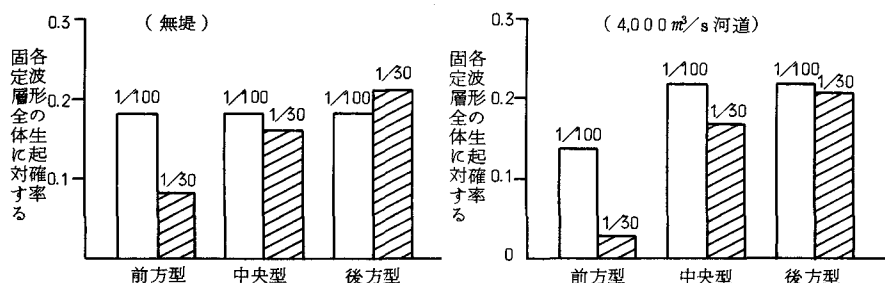


図-7 計画降雨群設定結果

4. おわりに

治水上非常に不利な、山がちな中小河川や狭い河川でしかも都市化が進んだ流域では、安全性を重視した治水計画が望まれる。本稿はそういった流域を対象とした計画降雨群の決定を行なうための方法論を提案したものである。その基本的考え方は、降雨が治水効果を最小化するように行動する意志を持った対象として捉え、不確実性下の意志決定問題として降雨規模別の各降雨波形の生起確率を決定するものである。このとき、降雨波形は主成分分析などにより既にいくつかの類型として得られているものとし、その生起確率は与件とした。このような前提にもとづき、計画降雨群の決定をエントロピーモデルの一つである多次元情報経路問題として提案した。このモデルを実際にA川に適用したところ、降雨規模が大きい程各降雨波形の生起確率は均等化し、降雨規模が小さい場合は、中央ないしは後方集中型にウェイトを置いた生起確率の設定が妥当であるという結果を得た。同モデル自体の有効性は全てその理念の是非によっているといえるが、少なくとも前述したような性格を有するいくつかの流域については適用性を議論する余地があるものと考ええる。また、モデルの問題点もいくつか存在している。一つは暗黙のうちに仮定した降雨波形と降雨規模別被害額の独立性であり、今一つは今回示した事例にみるように、降雨の時間分布に関する資料が入手できなかった場合の対応である。前者については主成分分析などにより独立した因子を設定することなどから対処できると考えられ、後者は筆者らの提案している基本降雨決定モデルの援用などが考えられるが、これらの問題については今後の課題としたい。

なお、本稿の作成にあたり、憐日水コン中川芳一氏には貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 萩原良巳・中川芳一・蔵重俊夫：下流への影響を考慮した河道改修規模決定モデル分析、土木学会第28回水理講演会論文集、pp.369～374、1984
- 2) 萩原良巳・中川芳一・蔵重俊夫：治水計画における計画降雨の決定に関する一考察、土木学会第29回水理講演会論文集、pp.317～322、1985
- 3) 国沢清典：エントロピーモデル、ORライブラリー14、日科技連
- 4) 中川芳一・渡辺晴彦：豪雨の地域・時間分布特性分析、NSC研究年報、Vol.7、№1、pp.1～12、1979
- 5) Darroch, J.N. and D. Rachiff: Generalized iterative scaling for log-linear models, Annals of Math. Stat., Vol. 43, pp.1470～1480, 1972