

II-24 3次元水系モデルにおける洪水災害危険度の確率論的評価に関する研究

北海道大学工学部 正員 山岡 勲
 北海道大学工学部 正員 藤田 隆博
 北海道大学工学部 学生員 ○伊藤 英浩

1. はじめに

洪水災害危険度とは、加害側の河川の異常な洪水現象の生起し易さと、被害側の洪水氾濫による被害の受け易さの相乗に関するものと考え、ここでは大河川の各地区における洪水氾濫事象の生起確率に対する洪水被害額の期待値を探り、洪水災害の危険性についての一つの評価基準 (hazard intensities) とする。

具体的には、大河川におけるケース・スタディとして、石狩川 (図-1) の洪水災害危険度の評価方法に昨年用いた2次元水系モデルをさらに3地区 (図-2) に拡張した3次元水系モデルを採用し、a地区が堤防溢水によって受ける被害額の期待値 $E(x)$ を洪水災害危険度 I として算定した。このモデルは上流2地区での横流入、及び堤防溢水氾濫による影響 (危険度の低減) が考慮されている他、3地区の上流域、各残流域の自然条件の変化などによる流出状態の変化や流出水文資料の整備による補正、河川改修の進展に供う各地区河道の流下能力の増加、各地区における土地開発や、都市化による被害閾数の変化などに対応した危険度の変化を知ることができる。

石狩川の中下流の各地域の堤防は、昭和50年8月の洪水までに暫定断面とはいえば100年確率洪水に対応した堤防が完成していたが、この洪水では、僅かに堤防が低かった月形地点で溢水破堤した。その後の堤防補強により、昭和56年8月上旬の概ね120年確率洪水に際しても外水氾濫は江別地区 (石狩大橋地点 $11300\text{m}^3/\text{sec}$) 右岸堤防で数10cm溢水するに止まった。この洪水における実際の河道流下能力は公称の流下能力 (各地域の堤防高さに余裕高をとって等流計算をしている) をかなり上まわっている。本研究では、これら流下能力の相違に対する危険度の変化を検討して実際河川のいわば安全係数的なものを照査している。

なお、このモデルでは堤防自体の構造施工上の安全度は完全としており、洪水時の各流域雨量間の相関係数 ρ は0.5とし、本支流域洪水のピークの時間的ずれはないものとし3地区間内では、河道流下中の低減は考えないなど計算の便宜上簡略化している。

2. 3次元水系モデル (図-2) による 同時氾濫生起確率

防災地区a,b,cを考え、3地区内に溢水氾濫はc地区より上流における溢水氾濫とは独立事象であると仮定する。a,b,c各地区的流下能力を Q_a, Q_b, Q_c とする。ここに I はc地区より上流の流域、II, III はそれぞれc地区, b地区の残流域を表わしている。 Q_1, Q_{12}, Q_{123} はそれぞれc,b,a地区へ流入するピーク流量である。 Q_2, Q_3 は流域 II, III から本流へ合流するピーク流量であり、 Q_2, Q_3 の残流域内での氾濫は考慮しない。

この水系モデルでは、氾濫生起に関して表-1のような8事象が考えられる。今、 Q_2 の Q_1 に対する合流率を c_1 、 Q_3 の Q_{12} に対する合流率を c_2 として、c,b 地区を流下する際のピーク流量の低減率を λ_1, λ_2 とすると、b,a 地区に流入するピーク流量は $\lambda_1 Q_1, \lambda_2 Q_{12}$ と書くことができる。

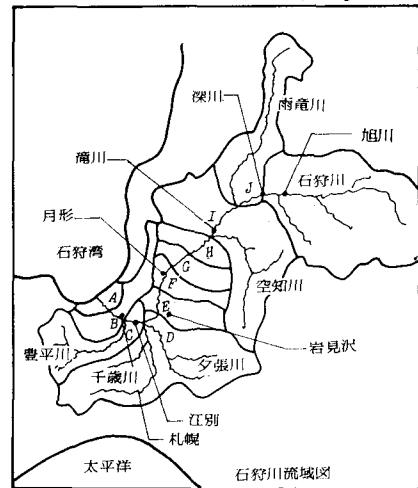


図-1

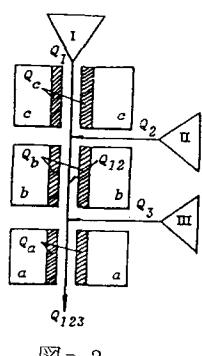


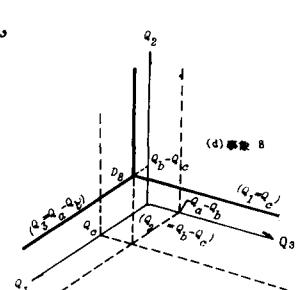
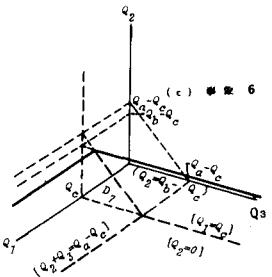
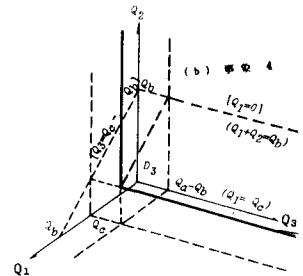
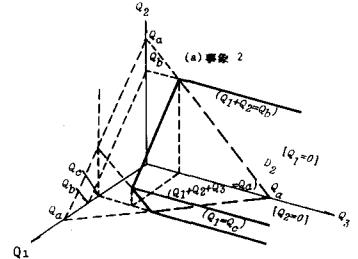
図-2

D_8 は表-1の(1)式で表わされる。 $c_1, c_2, \lambda_1, \lambda_2$ についても観測データに乏しく最も危険側の1と仮定した。従ってa地区で溢水する事象は D_2, D_4, D_6, D_8 であり、これを図示したものが図-3である。 Q_1, Q_2, Q_3 の同時生起確率密度関数を $P(Q_1, Q_2, Q_3)$ とすると、「a地区における溢水事象の生起確率」 P_a は次式のように表わせる。

$$P_a = \frac{1}{D_2 + D_4 + D_6 + D_8} \iiint P(Q_1, Q_2, Q_3) dQ_1 dQ_2 dQ_3 \quad \dots \dots \quad (2)$$

事象	c b a	氾濫領域を示す条件式 (1)	
		○: 河道浸透	×: 河道断水破壊
1)	○ ○ ○	$D_1: Q_1 \leq Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 \leq Q_b$	$\lambda_2 (\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2) + c_2 Q_3 \leq Q_a$
2)	○ ○ ×	$D_2: Q_1 \leq Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 \leq Q_b$	$\lambda_2 (\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2) + c_2 Q_3 > Q_a$
3)	○ × ○	$D_3: Q_1 \leq Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 > Q_b$	$\lambda_2 Q_b + c_2 Q_3 \leq Q_a$
4)	○ × ×	$D_4: Q_1 \leq Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 > Q_b$	$\lambda_2 Q_b + c_2 Q_3 > Q_a$
5)	× ○ ○	$D_5: Q_1 > Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 \leq Q_b$	$\lambda_2 (\lambda_1 Q_c + c_1 Q_2) + c_2 Q_3 \leq Q_a$
6)	× ○ ×	$D_6: Q_1 > Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 \leq Q_b$	$\lambda_2 (\lambda_1 Q_c + c_1 Q_2) + c_2 Q_3 > Q_a$
7)	× × ○	$D_7: Q_1 > Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 > Q_b$	$\lambda_2 Q_b + c_2 Q_3 \leq Q_a$
8)	× × ×	$D_8: Q_1 > Q_c$ $\lambda_1 Q_1 + c_1 Q_2 > Q_b$	$\lambda_2 Q_b + c_2 Q_3 > Q_a$

表-1



$P(Q_1, Q_2, Q_3)$ の評価方法としては、年最大日雨量の生起確率分布を求め、それと日雨量と洪水ピーク流量の平均的関係式 $Q = kR$ より決定する方法を探った。年最大日雨量 R (mm)の生起確率分布は(3)式の対数正規分布に従い、標準正規分布への変換量として(4)式の Z_n を用いる。

$$f(R) = \frac{1}{(R-a)\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(R-a)-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \dots \dots (3)$$

$$Z_n = \frac{1}{\sigma} \ln\left(\frac{R-a}{e^\mu}\right) \dots \dots (4) \quad a: \text{ロケーションパラメータ} \\ \mu: \text{平均} \quad \sigma^2: \text{分散}$$

石狩川のケーススタディでは、旭川、月形、岩見沢、幌加内、芦別、夕張、雁来の7地点における降雨記録による各地点の分布パラメータを探って得られた変換量 Z_n を用いた。また、ピーク流量 Q と日雨量 R の関係は、各雨量地点の近傍の流量観測所の過去の洪水記録から、図-4が得られ、流量観測所地点での降雨・流量係数 k を決めた。決定された k 値と集水面積 A_r との関係が、図-5に示される。この図によって3次元水系モデルで使用する各計算グループの集水域I、II、IIIに対応する k_1, k_2, k_3 を決めた。 Q_1, Q_2, Q_3 の規準化変量 x_1, x_2, x_3 の同時生起確率密度関数を $P(x_1, x_2, x_3)$ として次式で計算した。

$$P(x_1, x_2, x_3) = (2\pi)^{-\frac{3}{2}} \cdot (1 + 2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3 - \rho_1^2 - \rho_2^2 - \rho_3^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - 2(\rho_1 - \rho_2 \rho_3)x_1 x_2 - 2(\rho_2 - \rho_3 \rho_1)x_2 x_3 - 2(\rho_3 - \rho_1 \rho_2)x_3 x_1}{1 + 2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3 - \rho_1^2 - \rho_2^2 - \rho_3^2}\right) \dots \dots (5)$$

表-3

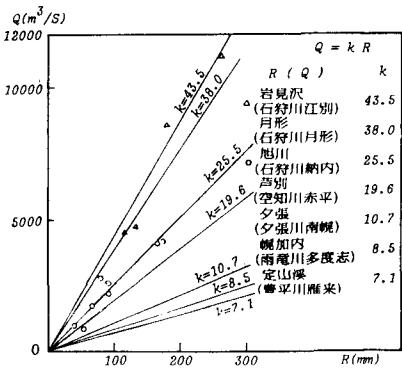


図-4

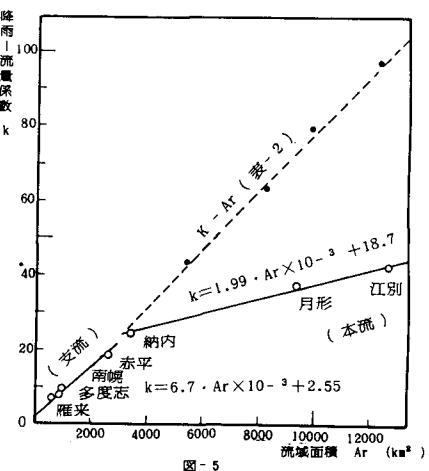


図-5

3. 多次元水系逐次モデル(図-6)による検討

石狩川中下流部 A～J(図-1)に対応する多次元水系モデルは図-6に示され J、I …… B、Aの連続した防災地区を対象として、上流地区より逐次計算が進められる。各地区の流下能力を $Q_j, Q_i \dots Q_b, Q_a$ とし、 $Q_{01}, Q_{02} \dots Q_{09}$ を各流域 I, II …… IX からのピーク流量とし、 $Q_{12}, Q_{23} \dots Q_{910}$ をそれぞれ I, H … A地区へ流入するピーク流量とする。 $c_1, c_2 \dots r_1, r_2 \dots$ などについては3次元水系モデルと同様に 1 と仮定する。J 地区を考え、 Q_{01} の生起確率密度関数を $f_1(Q_{01})$ とすれば、J 地区から流出する Q_{01}' は (6)式になる。

$$Q_{01}' = \begin{cases} Q_{01} & (Q_{01} \leq Q_j) \\ Q_j & (Q_{01} > Q_j) \end{cases} \dots (6)$$

Q_{01}, Q_{02} の生起確率密度関数を $f_1(Q_{01}), h_2(Q_{02})$ とすれば、I 地区へ流入する Q_{12} 、及び $f_1(Q_{01})$ は、

$$Q_{12} = Q_{01}' + Q_{02} \dots (7) \quad f_1(Q_{01}') = f_1(Q_{12} - Q_{02}) \dots (8)$$

Q_{01} と Q_{02} が独立であると仮定して、 Q_{12} の生起確率密度関数 $F_2(Q_{12})$ は、

$$F_2(Q_{12}) = \int_0^{Q_{12}-Q_{01}'} f_1(Q_{12}-Q_{02}) \cdot h_2(Q_{02}) dQ_{02} \dots (9)$$

従って、I 地区での氾濫生起確率 P_i は、

$$P_i = \int_{Q_i}^{\infty} F_2(Q_{12}) dQ_{12} \dots (10)$$

I 地区から流出する Q_{12}' の生起確率密度関数 $f_2(Q_{12}')$ は

$$f_2(Q_{12}') = \frac{1}{1-P_i} F_2(Q_{12}) \quad (0 \leq Q_{12}' \leq Q_i) \dots (11)$$

と表わされ、この $f_2(Q_{12}')$ を用いて H 地区の氾濫生起確率が求められ、以下順次、各地区の氾濫生起確率を求めることができる。

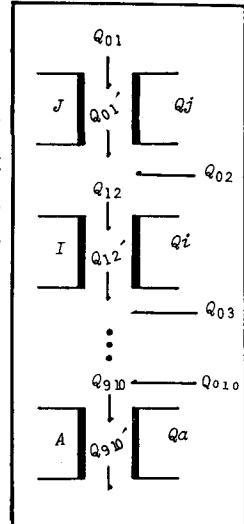


図-6

	多次元水系		3次元水系	
	Qn	k'	Q1	k1
J	1450	25.7	1420	25.7
I	2750	44.2	1640	29.7
H	4000	64.2	1940	35.1
G	4250	68.2	1990	36.0
F	4600	72.9	2570	36.8
E	4800	77.9	2610	37.4
D	5150	82.7	2670	38.3
C	6100	98.0	2870	43.2
B	6500	104.4	3030	45.6
A	6550	105.2	3100	46.7

表-2

このモデルを使って深川地点から 河口までの 125km区間を10区分した石狩川の各地区に流入するピーク流量の生起確率密度分布を求め、その分布形の平均値を表- 2に示す。 k' 値は各分布形の平均値から、3次元水系モデルで用いた各地区的ピーク流量 Q_1 の平均値と k 値の関係に準じて推定した。この k' 値を図- 5に図示すると、 $k' - Ar$ 線は支流の $k - Ar$ 線上に重なり、 Ar が大きくなる(下流に進む)に従って、 k と k' の差が大きくなる。これは主として本流における流下に伴なう洪水ピーク流量の低減の無視によるものと推測される。例えば下流の江別地区における k' 値は、同地点における水文観測資料から、得られた k 値の約 2倍となっていて、3次元水系モデルを越える多次元水系モデルを用いることは適当ではないと思われる。

4. 被害関数

溢水破堤に伴なう堤内地の被害は直接的にはその浸水域の土地利用状態などによって影響を受ける。ここでは、直接的被害のみを探り上げ、被害推定額の経済調査資料を用いて 被害関数((12)式)の係数 α, β を決めた。この式は氾濫地域の被害は溢水流量の増大と共に大きくなり、溢水流量が極めて大きくなると、被害額は一定の額に漸近するとして採られたものである。

$$g(Q) = \alpha \cdot \{1 - \exp(-\beta \cdot Q)\} \dots \dots (12)$$

α, β : 各地区毎に 被害額資料で決められる係数
 Q : 溢水流量 (洪水ピーク流量と流下能力の差)

5. 洪水災害危険度の評価式

3次元水系モデルにおける、洪水ピーク流量の生起確率密度関数と被害関数を用いて、「a地区での洪水災害危険度 I_a 」を次式で算定する。

$$I_a = \frac{\iiint g(Q_{123}-Q_a) \cdot P(Q_1, Q_2, Q_3) dQ_1 dQ_2 dQ_3}{D_2 + D_4 + D_6 + D_8} \dots \dots (13)$$

6. 石狩川各地区における氾濫生起確率の算定と考察

石狩川中下流の約 125km区間を10区分した各地区的平均流下能力を表- 3に示す。これを用いて試算した結果が図- 7である。図- 7の注における3次元モデル、2次元モデル、1次元モデルは、それぞれ対象地区から直上流2地区までの溢水を考慮する場合、1地区までの溢水を考慮する場合、及び上流地区の溢水を考慮しない場合の氾濫生起確率を示したものである。概ね、3次元水系モデルが最も大きな P 値を示すが、オーダー的に問題はない。

また、図- 8に示されるとおり、直上流 2地区以内に大きな支流の流入する A、B、C、H 地区では、3次元モデル、2次元モデルによる計算値の差、あるいは 2次元モデル、1次元モデルによる差が比較的大きい。大きな支流のない D、E、F、G 地区では、それらの差が比較的小さい。従って直上流に大きな支流の流入のある対象地区的氾濫生起を評価するには、3次元水系モデルを用いる方が安全であるといえる。しかし、大きな支流の合流がない地区では、1次元水系モデルで十分といえる。なお、 P 値の差が大きくなる原因には支流の合流率 c 、あるいは地区内流下低減率 λ の値を危険側に 1 とした影響と考えられる。本流における k 値で流下に伴なう洪水ピーク流量の低減を考慮していることと、上流 2地区での溢水を考慮しているこ

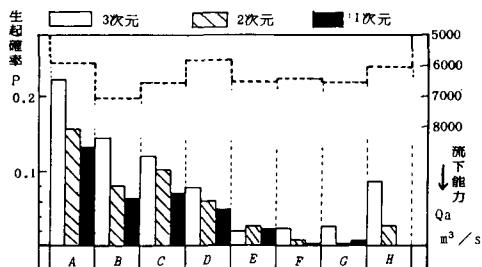


図- 7

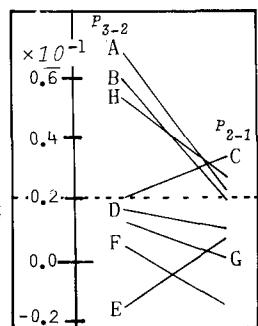


図- 8

とを考えれば、オーダー的にも変わらないので危険度の評価は危険側を探るという意味でも3次元水系モデルの採用は妥当であろう。

7. 石狩川各地区における洪水災害危険度の評価と考察

(公称流下能力と実績流下能力(昭和56・8)の比較)

石狩川各地区における溢水氾濫の生起確率 P と危険度 I の計算結果を図-9,10に示す。図-9では各5km区間毎に河川横断区から堤防の余裕高を考慮して、等流計算で算定した公称能力を用いている。図-10は昭和56年8月3~6日洪水時の実測流量(橋本,月形,岩見沢大橋,石狩大橋)³⁾から推定した実績流下能力を用いた。 β はそれぞれの流下能力を入れて計算された(表-3,4)。

図-9と図-10を比較すると洪水流下能が大きくなると P , I 値両者共、小さい値となるのは当然のことだが、昭和56年8月洪水で溢水破堤したC地区(江別)では、流下能力が $6550 \text{ m}^3/\text{s}$ から $11300 \text{ m}^3/\text{s}$ に向上して、危険度 I_{c} は、約 $1/15$ 、氾濫生起確率 P_{c} は、約 $1/60$ に減少している。Iの減少率の小さい地区でも約 $1/2$ となっている。

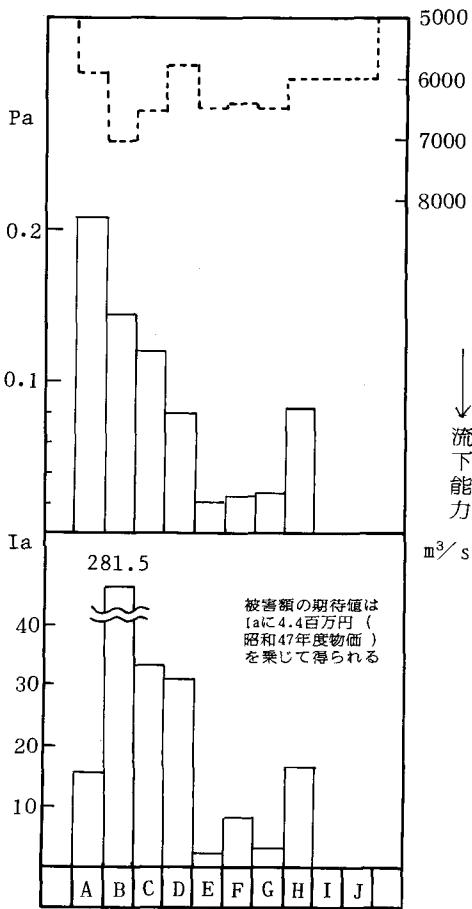


図-9

	公称			実績(昭和56・8)		
	α	β	流下能力	α	β	流下能力
A	$\times 10^2$	$\times 10^{-2}$	5900	$\times 10^2$	$\times 10^{-2}$	9000
B	2	0.35	7050	2	1.00	10000
C	100	0.35	6550	100	1.00	11300
D	20	0.20	5800	20	1.00	10100
E	15	0.40	6500	15	1.00	9600
F	10	0.45	6400	10	0.65	8800
G	25	0.60	6500	25	0.75	8500
H	12	0.80	6000	12	0.90	8000
I	8	0.30	6000	8	0.50	6000
J	9	0.25	6000	9	0.25	6000
			6000			6000

表-3

	α	β	流下能力
A	$\times 10^2$	$\times 10^{-2}$	9000
B	2	1.00	10000
C	100	1.00	11300
D	20	1.00	10100
E	15	1.00	9600
F	10	0.65	8800
G	25	0.75	8500
H	12	0.90	8000
I	8	0.50	6000
J	9	0.25	6000
			6000

表-4

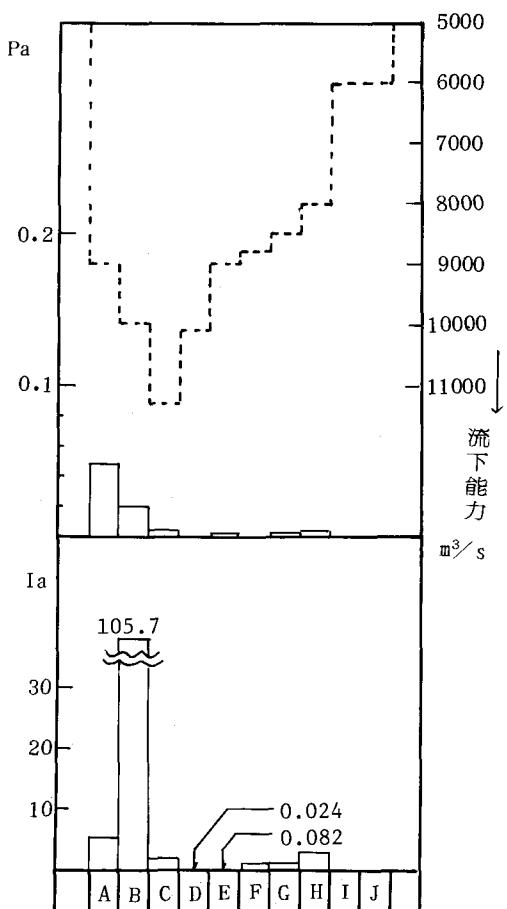


図-10

これは、実際の河川の流積(治水施設)の計画上の安全率が、かなり高いことを示している。なお、A 地区の氾濫生起確率が他の地区と比較してかなり大きく出ているが、これは流下能力が比較的小さいためであろう。また、豊平川の合流は本流のピーク時より早い場合が多く、また、支流の内水氾濫も多いので、実際の外水氾濫の生起確率は、本計算値より低いであろう。B 地区で危険度が大きいのは、経済指標である α が非常に大きい(札幌)都市区域の一部であるからである。都市地区が、農村地区に比較して大きな危険度を持つことも図-9,10より明らかである。

流域 I, II, III 間の相関係数 ρ_{12} , ρ_{23} , ρ_{31} の効果も重要であるが、この流域は充分広いので $\rho = 1$ ということではなく、また、 ρ が小さくなるほど I, P は小さくなるので、本論文ではすべて $\rho_{12} = \rho_{23} = \rho_{31} = 0.5$ として計算している。

8. むすび

石狩川中、下流の各地区における洪水氾濫災害の危険度評価の一方法として、3次元水系モデルによる被害額の期待値を探ったが、この方法は直上流 2 地区の氾濫を考慮しており、既に暫定断面ではあっても信頼される堤防が連続している氾濫箇所の少ない河川では有用な方法であると考えられる。

石狩川の場合、深川地点から連続的に多次元水系逐次モデルで計算した各地区的洪水ピーク流量が対応する各地区における水文観測資料によるピーク流量よりもかなり大なる値を示し、流下に伴うピーク流量の低減なしに計算することが無理なことが判った。一方 現存の石狩川の治水施設では連続 3 地区以上の溢水はないものと考えても妥当なので、3 次元水系モデルで十分だったと考える。

また、直上流 2 地区で大きな支流が合流する地点では 3 次元水系モデルが必要であり、大きな支流が合流しない地区では 1 次元、または 2 次元水系モデルでもよいことが判った。

大きな支流の流入する地域で 合流はピーク時刻を同一とするなど 危険側の計算をしたため、3 次元水系モデルが 2 次元水系、1 次元水系モデルより大きな危険度を示している。

都市化された地域の方がより危険度が高く、また地域の開発が進むと、それに伴なって危険度が大きくなるが、これは主として α 係数によって影響される。また、流下能力が大きくなると危険度が大幅に減少することは Q^β によるもので、ケース・スタディでは '81年8月の既往最大洪水による実績流下能力を探った場合、危険度の減少には流下能力の増加率の数倍の効果があることが判る。公称流下能力ではまだ危険度が高く十分な治水施設とは言えないが、実績の流下能力では一部を除いては、適切な治水効果を挙げているものと評価される。

この危険度評価法についての今後の問題点としては、各流域降雨間の相関係数を $\rho = 0.5$ とし、 c 、 λ などの係数をすべて危険側に 1 としているが、これらの観測資料による補正是非常に困難なことだが、必要と考えられる。

なお、本研究は昭和56年度文部省科研費（自然災害特別研究 (1) 402006 研究代表者：東大、高橋 裕教授）の分担研究の一部である。

参考文献

- 1) 山岡 勲・藤田 瞳博・嵯峨 浩： 大河川に関する危険度評価法(石狩川, 2 次元水系モデル), 洪水灾害危険度の評価法に関する研究(高橋 裕編) — 中間報告 — (上巻), 昭和 56 年 3 月.
- 2) 北海道開発局石狩川開発建設部： 石狩川治水経済調査報告書(その 1, その 2), 昭和 48 年.
- 3) 北海道開発局： 北海道における昭和 56 年夏期出水の概要, 昭和 56 年 10 月.