

淀川の水質拡散およびその水道水源に対する影響 Transverse Dispersion of Water Quality in the Yodo River and Its Effect to the Source of Water Supply

大阪大学大学院 学生員 李 適 宇
大阪大学工学部 正 員 八 木 俊 策
大阪大学工学部 正 員 末 石 富太郎

1. はじめに

繰返し利用型の流域の水道水源水質に対する監視と予測は、飲み水の安全性の確保および河川水質管理・計画にとって大きな意味を持っている。淀川は近畿地方 1 千万以上の人口の水源として日本全国においても、とくに高度に利用されている河川である。また淀川は水質・水文特性の違う木津川、宇治川、桂川三川の合流よりなる河川であり、合流後の水質は三川の流量、負荷量、横拡散などに支配されるという特徴をもっている。

そこで本研究では、淀川沿いの上水道取水口の原水水質に与える各合流河川の影響を調べるために、まず当該河川区間における水質水理調査を実施し、次に合流部を含む実河川の特徴を反映する二次元水質拡散モデルを作成し、実測結果による検証を行うとともに、取水口における木津川、宇治川、桂川三川の水量混合率および水質寄与率を推定した。さらに、従来のような年間平均水質値の予測方法と違って、合流三川の流量および流量比の確率統計的特徴を考慮して、取水口原水水質を予測する方法も示す。

2. 調査の内容と方法

三川合流後の水質拡散状況を把握するために、1985 年 11 月 19 日に、合流部を含む計 8 断面において水質水理調査を行った。調査区間と断面位置を図 1 に示す。各断面で 5 m 間隔に水深を、10 m 間隔に流速を測定し、10 m 間隔に採水を行った。調査日には、淀川の流量は安定し、木津川、宇治川、桂川の流量はそれぞれ $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。水質分析項目は、合流三河川で濃度の異なる塩素イオン Cl^- 、ケイ酸 SiO_2 とし、また、浄水処理の障害となるアンモニア性窒素 $\text{NH}_3\text{-N}$ の分解速度を調べるために、その濃度も分析した。なお、Station 4 断面の両岸で 1 時間間隔に採水し、その結果によって、水質濃度がほぼ定常状態であったことを確認している。

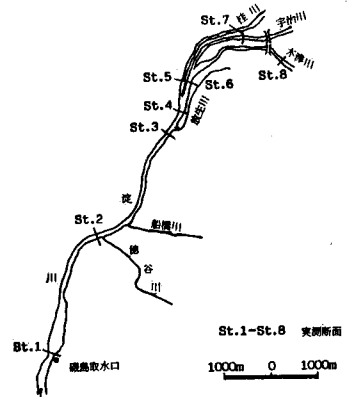


図 1 調査範囲と断面位置

3. 累積流量モデルによる水質横拡散の解析

3.1 基礎方程式および数値計算法

従来の河川二次元拡散モデルは流下方向と横断方向の距離を座標として表現されている。それに対して、Yotsukura ら¹⁾ は横拡散過程が河川の横断方向の距離ではなく、累積流量に関係していることを指摘し、この考えに基づいて、流れ、汚染源とも定常状態の場合、保存性物質の二次元拡散を表わす累積流量モデルを提案した。このモデルは実河川の特徴をよく表現しうる水質モデルといわれ、カナダやアメリカの河川の水質拡散解析にしばしば応用されている。^{2) 3) 4)} そこで本研究では、このモデルを基本とし、さらに汚濁物質の分解性を考慮した、次に示す累積流量モデルを用いることにした。

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial q_c} \left(m_x h^2 v_x E_z \frac{\partial C}{\partial q_c} \right) - k \frac{m_x}{v_x} C \quad (1)$$

$$q_c = \int_0^z m_z h v_x dz \quad (2)$$

ここに、 C ：濃度、 x 、 z ：流下方向、横断方向の距離、 v_x ：流下方向の流速、 h ：水深、 E_z ：横拡散係数、 q_c ：累積流量、 m_x 、 m_z ：流路の湾曲による x 、 z 方向の距離補正係数、 k ：一次分解係数である。また、式(1)は次式のように変形できる。

$$\frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial \eta} = D \frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} - KC \quad (3)$$

ここに、 $\eta = q_c / Q$ 、 Q ：河川流量、 $V = -\frac{1}{Q^2} \frac{\partial D_z}{\partial \eta}$ 、 $D = \frac{1}{Q^2} D_z$ 、 $D_z = m_x h^2 v_x E_z$ 、 $K = k \frac{m_x}{v_x}$ である。

本研究では式(3)の拡散方程式を解くために、Stone and Brain⁵⁾が提案した差分方法を用いた。図2に示す格子点にしたがって式(3)を陰形式で差分化すれば、次式となる。

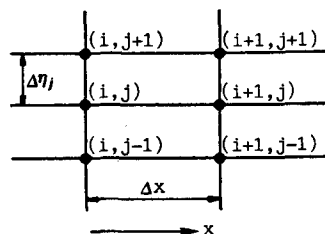


図2 差分格子

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x} [g(C_{i+1,j} - C_{i,j}) + \frac{\theta}{2}(C_{i+1,j-1} - C_{i,j-1}) + m(C_{i+1,j+1} - C_{i,j+1})] \\ & + V_{i,j} [\frac{a}{(\Delta \eta_{j+1} + \Delta \eta_j)/2} (C_{i,j+1} - C_{i,j}) + \frac{\epsilon/2}{(\Delta \eta_i + \Delta \eta_{j-1})/2} (C_{i,j} - C_{i,j-1})] \\ & + \frac{b}{(\Delta \eta_{i+1} + \Delta \eta_j)/2} (C_{i+1,j+1} - C_{i+1,j}) + \frac{d}{(\Delta \eta_i + \Delta \eta_{j-1})/2} (C_{i+1,j} - C_{i+1,j-1}) \\ & = \frac{D_{i,j}}{\Delta \eta_j} [\frac{C_{i,j+1} - C_{i,j}}{\Delta \eta_{j+1} + \Delta \eta_i} - \frac{C_{i,j} - C_{i,j-1}}{\Delta \eta_i + \Delta \eta_{j-1}}] + [\frac{C_{i+1,j+1} - C_{i+1,j}}{\Delta \eta_{j+1} + \Delta \eta_i} - \frac{C_{i+1,j} - C_{i+1,j-1}}{\Delta \eta_j + \Delta \eta_{j-1}}] \\ & - \frac{1}{2} (K_{i+1,j} C_{i+1,j} + K_{i,j} C_{i,j}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$a + \frac{\epsilon}{2} + b + d = 1 \quad (5)$$

$$g + \frac{\theta}{2} + m = 1 \quad (6)$$

Stone and Brainは重み係数(5)、(6)の取り方を次のようにすすめた。

$$g = \frac{2}{3}; \frac{\theta}{2} = m = \frac{1}{3}; a = b = d = \frac{\epsilon}{2} = \frac{1}{4} \quad (7)$$

河川境界条件と初期断面の濃度分布は次式のように与える。

$$\text{境界条件 } \left. \frac{\partial C}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = \left. \frac{\partial C}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} = 0 \quad (8) \quad \text{初期条件 } C(0, \eta) = f(\eta) \quad (9)$$

ただし、 $f(\eta)$ は濃度分布の実測値である。

3.2 実測結果による拡散解析

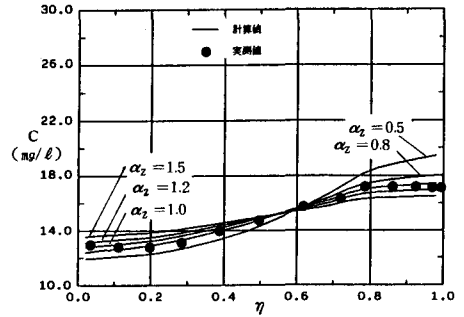
水質拡散をシミュレートするために、式(2)にしたがって淀川を表1に示すように20本のStream-tubeに分割した。ただし、淀川の水面勾配が区間によってかなり違うので、流れの計算を行うとき、まず不等流計算で水面勾配を求めておく。累積流量を計算するとき、各計算区間の流れをその区間の平均水面勾配を有す

表1 Stream Tubeの分割

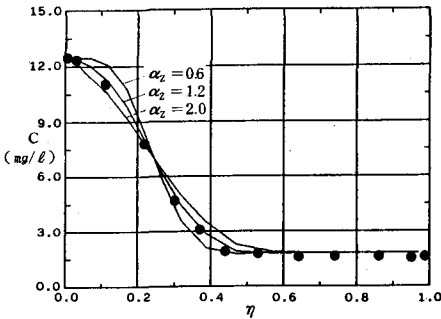
河川	木津川 (30m ³ /s)					宇治川 (90m ³ /s)										桂川 (30m ³ /s)				
tube 番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
tube 流量 (m ³ /s)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	9.0	12.0	12.0	12.0	12.0	9.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0

る等流とみなして、マンニングの式で流速 v_x を求める。河床粗度係数の値は低水路の場合の平均値 $0.02 \text{ s/m}^{1/6}$ を採用した。なお、水質水理調査の結果により、淀川本川の各断面の物質収支は 10% 前後の変動幅がある。それは観測誤差によるものと考えられる。拡散計算をする前に、各断面の保存性物質が合流三河川の物質量の和に合うように修正した。

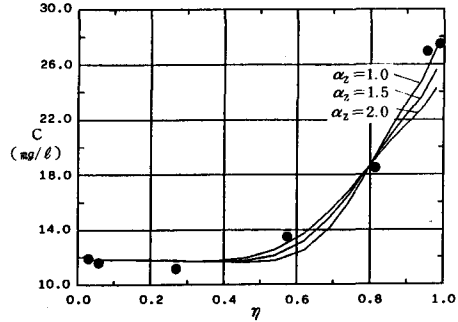
上流断面の実測濃度を初期入力条件として、式(4)で計算した下流断面での水質濃度分布と実測値との比較を図3(a)、(b)、(c)に示す。ただし、淀川は急激な湾曲がないので、計算のときに、 m_x と m_z の値を 1.0 と近似的に設定した。また、流入



(a) St.5 & St.6 — St. 1. (Cl^-)



(b) St.7 & St.8 — St. 6 (SiO_2)



(c) St.5 & St.6 — St.4 (Cl^-)

図3 実測結果による横拡散解析

小河川のご扱いについては、その流量と負荷量はそれぞれ淀川の 0.5% と 1% 程度であり、計算結果に対する影響は小さいと思われ、本研究ではそれを無視した。

横拡散係数 E_z は横拡散の強度を表わす因子であるが、鉛直拡散係数 E_y や縦分散係数 E_x と違って理論的に表現することが難しく、それゆえ、次のような経験式が用いられている。⁷⁾

$$E_z = \alpha_z H U_* \quad (10)$$

ここに、 α_z : 無次元横拡散係数、 H : 断面平均水深、 U_* : 摩擦速度である。

本研究では、 α_z の値を種々に変化させてモデルの計算結果と実測結果の適合度を調べた。その結果、三川合流部の Station 5 と Station 6 から下流約 6.4 km の Station 1 までの区間において、図 3(a) に示すように、 $\alpha_z = 1.0$ の場合に最もよく一致することがわかった。また、木津川と宇治川の合流部および桂川と宇治川の合流部だけに限れば、図 3(b)、(c) に示すように、前者は $\alpha_z = 1.2$ 、後者は $\alpha_z = 1.5$ であり、いずれも平均値 1.0 より大きい値を持っている。淀川中流部の各区間の α_z をまとめて表 2 に示す。

一方、Fischer⁸⁾ は従来の実河川での α_z の値をまとめて次式で表わしている。

$$\alpha_z = 0.6 \pm 50\% \quad (11)$$

ただし、湾曲部を有する河川では局所的にらせん流が発生して、横拡散を促進するので、そのような場合には式(11)の範囲を超えた α_z の値がありうることも指摘している。淀川での α_z は式(11)の上限値に近いとみられる。

合流部の α_z はやや大きい、それは河川の合流により横断方向の混合が強化されているためと推察できる。

なお、アンモニア性窒素の分解係数 k も検定してみたが、図

表2 淀川の無次元横拡散係数

区 間	St.7 & St.8 ~ St.6	St.5 & St.6 ~ St.4	St.4 ~ St.3	St.3 ~ St.2	St.2 ~ St.1	St.5 & St.6 ~ St.1
流下距離(m)	400	400	600	3,000	2,400	6,400
α_z	1.2	1.5	1.0	0.6	1.0	1.0

4に示すように、Station 5、6とStation 1の間は、 $\alpha_z = 1.0$ で数値計算の結果と実測結果との比較によって、 k の値はほぼ 0.3 1/日 であることがわかった。しかも k が大きくなっても、計算結果がそう変らない傾向がみられる。これは流下距離が短く、アンモニア性窒素が十分に分解していないためと思われる。なお、調査時の水温は 12°C であった。

3.3 モデルの計算結果と定期観測結果の比較

前節の α_z の検定結果は限られた流量ケースのもとで得られたものであり、異なった流量条件下でのモデルの適用性についても検討を加える必要がある。しかし、大流量の場合も含めて大規模な水質水理調査を実施することができなかったため、本研究では過去に行われた月1回の定点水質調査の結果⁹⁾の一部(14回分)を用い、塩素イオン、BODおよびアンモニア性窒素について、Station 1の左岸にある磯島取水口での実測値とモデルによる計算値との一致程度を比較した。その結果を図5(a)、(b)、(c)に示す。実測値に対応する淀川流量は $130 \sim 330 \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲内に变化する。合流前の三川で観測した水

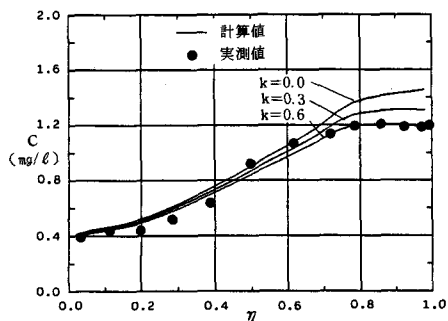


図4 アンモニア性窒素の分解速度

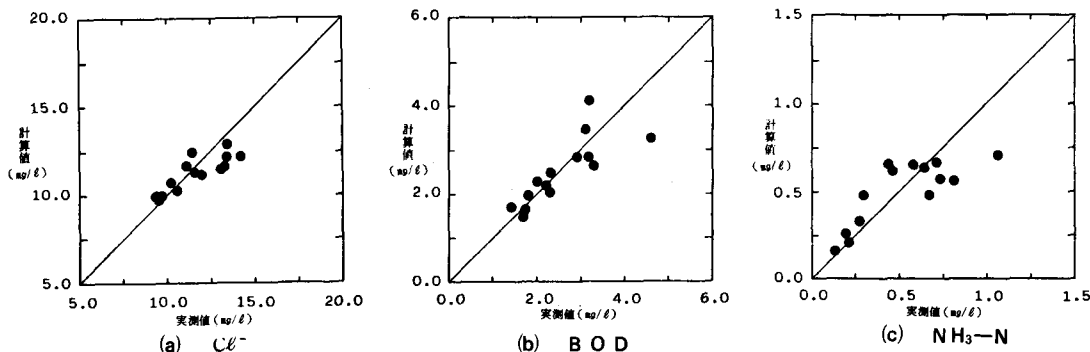


図5 定期観測結果と計算結果の比較

質濃度を初期断面濃度とした。ただし、三川の水質濃度は断面内で均一と仮定した。また、無次元横拡散係数 $\alpha_z = 1.0$ 、一次分解係数 k については次のように与えた。

$$k = k_{20} \theta^{T-20} \quad (12)$$

ここに、 T : 水温、 k_{20} : 水温 20°C のときの分解係数、 θ : 温度補正係数である。アンモニア性窒素の場合は $\theta = 1.09$ 、 $k_{20} = 0.6 \text{ 1/日}$ 、BODの場合は従来の研究結果¹⁰⁾を参照し、 $\theta = 1.04$ 、 $k_{20} = 0.3 \text{ 1/日}$ とした。

図5(a)、(b)、(c)に示すように、大きな流量変化があるにもかかわらず、前節で検定した累積流量モデルによる数値計算結果と実測結果はかなり一致していることがわかった。この結果により、様々な流量の場合に対し、本モデルを用いて取水口水質を計算することが可能といえる。

4. 上水道取水口に対する合流三川の影響

淀川沿岸には多くの上水道取水口がある。木津川、宇治川、桂川が合流してから、下流にある取水口に対して、それぞれどのような影響を与えているかを明らかにすることは、水道水源を保全するための今後の施策や浄水方法を考えるうえに重要である。そこで本研究では、累積流量モデルにより、磯島取水口における合流三川の水質混合率と水質寄与率を計算した。

4.1 水量混合率と水質寄与率

ある河川が N 本の流入支川をもつとし、その下流にある採水地点で取った1単位の水のうち、 i 番目の支

川から流下した水の占める比率をその支川の水量混合率 β_i と定義する。 β_i は支川 i の位置、無次元横拡散係数 α_2 、本川の全流量 Q および Q に対する支川 i の流量 q_i の比率 q_i/Q の関数と考えられる。したがって、保存性物質の収支については次式が得られる。

$$C = \beta_1 C_1 + \dots + \beta_i C_i + \dots + \beta_N C_N = \sum_{i=1}^N \beta_i C_i \quad (0 \leq \beta_i \leq 1) \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^N \beta_i = 1 \tag{14}$$

ここに、 C ：採水地点の濃度、 C_i ： i 番目の支川の濃度である。すなわち、本川に位置する採水地点の濃度は混合率を用いて各流入支川の濃度の線形結合で表現される。また、分解性物質の場合には、式(13)は次式となる。

$$C = \beta_1 \delta_1 C_1 + \dots + \beta_i \delta_i C_i + \dots + \beta_N \delta_N C_N = \sum_{i=1}^N \beta_i \delta_i C_i \tag{15}$$

ここに、 δ_i は支川 i から流入した水質の採水地点までの保存率である。

一方、採水地点の水質に対する各支川の貢献の大きさを水質寄与率と定義すると、式(15)から次のように表現できる。

$$\frac{\beta_1 \delta_1 C_1}{C} + \dots + \frac{\beta_i \delta_i C_i}{C} + \dots + \frac{\beta_N \delta_N C_N}{C} = r_1 + \dots + r_i + \dots + r_N = 1 \quad (0 \leq r_i \leq 1) \tag{16}$$

ここに、 r_i は支川 i の水質寄与率である。

β_i と r_i は次のようにして求めることができる。各流入支川に対して $C_i = 1$ 、 $C_j = 0$ ($j \neq i$)と仮定すれば、式(15)は $\beta_i = \frac{C}{\delta_i C_i}$ となる。この場合の C を累積流量モデルで求めると、 β_i が決定される。さらに、各支川が実際の水質濃度 C_i をもつ場合、採水点の濃度 C を求めると、 r_i も決定される。

4.2 取水口における三川の混合率と寄与率

過去の水質調査結果⁹⁾を用い、磯島取水口における木津川、宇治川、桂川の水量混合率と水質寄与率に関して26ケースを計算した。混合率の結果を表3に示す。計算ケースが限られているが、全流量 Q の変化範囲は130 $m^3/s \sim 330 m^3/s$ であり、これに対し、木津川、宇治川、桂川の流量比 q/Q の変化範囲はそれぞれ5.9～30.0%、49.4～80.7%、11.1～30.4%である。三川の混合率はその河川の流入位置、流量比および全流量によって大きく違うが、平均値をみると、全流量の67%を占める宇治川の混合率は65%と大きい割合を占め、取水口と同じ左岸から流入する木津川は28%であり、残る6%が右岸から流入する桂川の水である。混合率と流量比および全流量との関係を図6に示す。この図から、流量比が増え、三川とも混合率は増加することがわかる。ただし、この増加の傾向は流入河川が取水口から離れるほど弱くなる。また、全流量が増え、木津川の混合率は増加するが、桂川の混合率は減少する。これは、全流量が増え、右岸から左岸までの拡散距離が長くなるためと考えられる。

一方、寄与率は水質項目によって違う。ここでは塩素イオン、BOD、アンモニア性窒素の3項目について計算した26ケースの寄与率の平均値を図7に示す。これに対応する平均水質濃度を表4に示す。この結果によると、

表3 磯島取水口における三川の混合率

ケース	Q (m ³ /s)	q/Q (%)			β (%)		
		木津川	宇治川	桂川	木津川	宇治川	桂川
1	222.81	14.3	70.7	15.0	30.97	65.53	3.50
2	330.77	21.7	51.5	26.9	48.58	46.20	5.22
3	170.26	16.2	62.6	21.3	29.98	62.10	7.92
4	187.46	16.9	58.3	24.8	32.91	58.54	8.56
5	235.19	8.3	80.7	11.1	20.01	77.83	2.16
6	201.19	12.0	69.7	18.4	25.03	69.57	5.40
7	178.84	18.8	66.6	14.6	35.14	60.45	4.41
8	159.38	18.0	56.2	25.9	30.48	58.34	11.18
9	139.26	15.1	63.4	21.6	26.52	63.96	9.52
10	165.23	15.9	64.5	19.6	28.95	63.67	7.38
11	200.08	24.7	56.9	18.4	44.44	50.42	5.14
12	242.49	19.1	62.0	18.9	40.08	55.74	4.18
13	148.22	8.1	71.7	20.2	15.97	75.37	8.66
14	150.54	8.4	72.7	18.9	18.23	74.01	7.76
15	195.83	10.7	71.9	17.4	23.06	71.98	4.96
16	186.33	8.9	79.6	11.5	18.63	78.38	2.99
17	168.86	16.3	66.6	17.1	30.02	64.17	5.81
18	167.00	10.5	59.1	30.4	20.09	66.65	13.26
19	195.90	10.8	73.8	15.4	22.94	72.81	4.25
20	237.72	9.9	74.3	15.8	23.02	73.71	3.27
21	171.79	9.6	63.4	27.0	19.30	69.95	10.75
22	148.02	16.8	63.7	19.5	29.76	62.55	7.69
23	130.44	12.2	71.5	16.3	21.82	71.37	6.81
24	309.83	30.1	49.4	20.5	60.98	35.73	3.29
25	171.97	12.1	71.2	16.7	24.64	69.88	5.48
26	210.64	5.9	79.4	14.7	14.33	81.97	3.70
平均	193.31	14.3	66.6	19.1	28.30	65.42	6.28

取水口の3項目の水質とも宇治川の寄与率が一番大きいことがわかる。また、三川のうち水質汚濁が最も進んでいる桂川の混合率は小さいけれども、取水口のアンモニア性窒素に対する水質寄与率は30%を超えている。これに対して、汚染度の低い木津川の寄与率は比較的小さい。ただし、将来をみると、上流地域の開発の進行に伴い、三川の汚濁負荷量が変わり、下流の取水口に対する影響も変わると予想される。

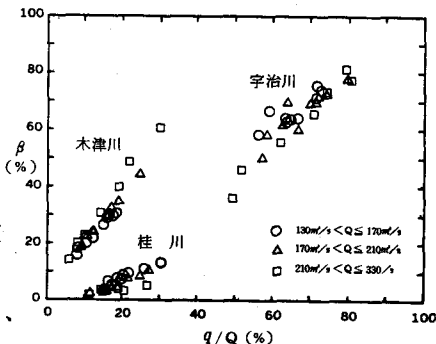


図6 混合率と全流量、流量比の関係

表4 三川と磯島地点の平均水質濃度

水質	木津川	宇治川	桂川	磯島
Cl ⁻	9.7	10.3	20.3	11.5
BOD	1.42	1.96	6.23	2.35
NH ₃ -N	0.15	0.30	2.60	0.47

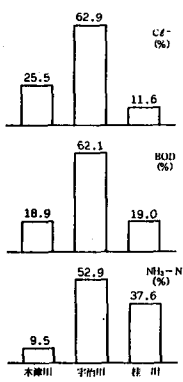


図7 磯島地点の水質寄与率

5. 水源水質の確率統計的予測方法

前に示したように、各合流支川からの流入負荷量が与えられれば、取水口の水質濃度は混合率によって決まる。したがって、もし取水口での混合率の確率分布が明らかになっておれば、その水質濃度の確率分布が推定できる。しかし、混合率を支配する各支川の流量と流量比が確率現象であり、すべてのケースについての混合率を計算するとすると、混合率の計算量が膨大になる。そこで、1979～1983年の過去5年間、木津川、宇治川、桂川の日平均流量データ(1826組)を、クラスタ分析によっていくつかのパターンに分類した。すなわち、三川の流量の組合わせケースのうち、性質の近いものを同じクラスターに納め、合計50個のクラスターに分けた。そして、各クラスターごとの平均値を代表値として、磯島取水口での混合率を計算し、その非超過確率を求めた。その結果を図8に示す。もし上流三支川の将来の汚濁負荷量が予測できれば、この混合率の確率分布によって、将来の取水口水質濃度の非超過確率および各支川の水質寄与率の非超過確率も求められる。

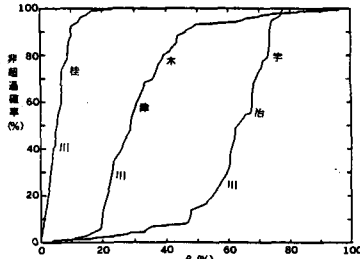


図8 混合率の非超過確率

6. 結論

本研究は淀川における水質水理調査結果に基づいて、河川の二次元水質拡散現象に対する累積流量モデルの適用性をを検討し、合流三川の水源水質への影響を評価した。得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 合流部を含む淀川中流部に累積流量モデルを適用し、横拡散現象が良好に表現できることがわかった。
- (2) 合流部の無次元横拡散係数 α_z はやや大きい値をもつ。
- (3) 取水口原水に対する合流河川の影響を水量混合率と水質寄与率で評価した。
- (4) 過去の水文資料に基づいて、取水口での混合率を確率統計的に予測する方法を示した。

謝辞：本研究は大阪府水道部水質試験所の調査の一環として行ったものである。基礎データの提供および淀川における現地調査と水質分析に御協力いただいた大阪府水道部水質試験所および右田順一氏をはじめとする建設技術研究所大阪支社の関係各位に対し、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献 1) Yotsukura, N., and Sayre, W. W., Water Resour. Res., Vol. 12, 1976, PP. 695-704. 2) Beltaos, S., J. HY. Div., ASCE, Vol. 106, 1980, PP. 1607-1625. 3) Lau, Y. L., and Krishnappan, B. G., J. HY. Div., ASCE, Vol. 107, 1981, PP. 209-226. 4) Holly, F. M., Jr., and Nerat, G., J. HY. Eng., ASCE, Vol. 109, 1983, PP. 1455-1470. 5) Stone, H. L., and Brain, P. L. T., AIChE Jour., Vol. 9, 1963, PP. 681-688. 6) 近畿地方建設局編, “淀川百年史”, 1974年. 7) Elder, J. W., JFM, Vol. 5, 1959, PP. 544-560. 8) Fischer, H. B., et al., “Mixing in Inland and Coastal Waters”, Academic Press, New York, 1979, PP. 109-112. 9) 大阪府水道部水質試験所, “水質試験成績並びに調査報告”, 昭和56～58年度. 10) 淀川水質汚濁防止連絡協議会, “淀川水質機構調査について”第Ⅲ報, 昭和52年度.