淀川における水の混合・拡散について

五百井正樹・串部宏之・北田忠義・建部 渉・前田礼造・人見宗男

The Mixing of River Water in River Yodo

Masaki Ioi, Hiroyuki KUSHIBE, Tadayoshi KITADA, Wataru TATEBE,
Reizo MAEDA and Munee HITOMI

Abstract

Using dissolved conservative constituents in river waters, the mixing of flowing waters was studied between 13 km downstream and the junction where the River Kizu from left side, the River Uji from the middle, and the River Katsura from the right side, converge to form the River Yodo.

The concentrations of ammonium, phosphate, sodium and potassium in river waters on the right side of the River Yodo were always higher than those found on the left side to about 13 km downstream. The amounts of silica, sodium and potassium calculated from their concentrations and flow volume in the River Yodo were in good agreement with the sum of their amounts from the three tributaries. Using each flow volume estimated from the concentrations of silica and sodium (or potassium) in tributaries, the contribution ratio of ammonium and phosphate loading to the River Yodo was calculated and found to be in good agreement with the measured loadings.

The present results suggested that the removal of ammonium and phosphate during flow downstream might not occur, and silica can be used as a conservative tracer of flowing water mixing as well as sodium and potassium.

Key words : River Yodo, water mixing, conservative tracer, silica.

1. 緒 言

近年水需要の増大に伴い、汚染負荷源の下流に上水取水口を開く事例が増えている。このことは中流に大都市を持つ淀川水系で著しく、下流部での取水水質への影響をできる限り小さくするためには、淀川での水の混合・拡散についての知識が不可欠と言える。

淀川における水の混合・拡散については南部（1960）の報告があるが、実際上への適用にはやや困難さがともなう。更に河川における水の混合・拡散は河川の流況、流量等による影響を受けるものであり、現在の淀川の流況は当時と同じではない。

南部はリシウムを淀川に流入する小河川に投入し、それを指標として追跡する手法によったが、そのような手法は今は、とりわけ水量の多い河川については、望むべくもない。それゆえ、水の混合についての検討はまず、河川水中に存在する物質あるいは物理量のうちから指標となりうる物質あるいは物理量を見出すことから始まる。もとよりそれらの量は保存量でなければならず、更に対象とする河川間の水質の相違をよく

表しうるものでなければならない。

われわれは、木津川、宇治川および桂川の三河川の混合について検討し、Na、KおよびSiがよい指標となりうることを見出したが、ここで用いたわれわれの手法は他の河川についても応用が可能であろう。

2. 測定方法

Figure 1に示す測点において、1984年8月、10月、1985年1月、4月、5月、7月および11月において採水、栄養塩類、NaおよびKについて分析を行なった。また、1985年5月、淀川における水質の時間変動を見るため4時間間隔で6回の採水を、枚方大橋左岸部（St. 16）で行なった。採取した試料は氷温で保存し、栄養塩類の分析に供する試料はガラス繊維ろ紙（ワットマン GF/C）により濾過、原則として採取後24時間以内に分析に供した。分析までにそれ以上の時間を置く場合は試料を -20°C で凍結保存した。分析は、テクニコン社製オートアナライザーによった。Na、Kの分析に供する試料は濾紙（東洋、No. 5c）による濾過後塩酸性とし、発光分光分析にかけた。

Fig. 1. The map of sampling sites at River Yodo.

採水は主としてボートにより、上流から下流にかけ行なった。下流部の一部測点においては、プラスチック製採取水器による橋からの採水による。採水は原則として水面下 50 cm で行なった。採水時間を水の流下時間に正確には合わせることはできなかったが、後に示すように水質の時間変動は採水時間の範囲内においてきわめて小さかった。

木津川、宇治川、桂川および淀川の水量は、八幡、淀、納所および枚方における水位をもとに、1983 年度の計算式を用いて算出した。流入小河川の水量は測定した流速をもとに算出した。

3. 結 果

3-1. 三川および淀川の水質

7 回の測定のうち、1985 年 1 月の結果の一部を Fig. 2 に示した。溶存態無機チッソ (DIN), PO_4 , Na および K の濃度は三川のうち桂川において高く宇治川および木津川において低かった。また SiO_2 は木津川および桂川で高く宇治川で低かった。この傾向はいずれの測定時においても共通に認められた。測定項目間の相関は Table 1 に例示する通り、 SiO_2 に関係するもの以外はきわめて高かった。

淀川における物質濃度の分布は、DIN, NH_3 , PO_4 , Na, K については右岸部で高く、 SiO_2 については左岸および右岸部で高かった。この河川の横断方向における濃度差は下流に向かうにつれ減少しいずれの調査時においても、合流後約 13 km 下流の淀川新橋 (St. 30~31) に至るとほとんど認められなくなった。Na および SiO_2 について、この関係を Fig. 3 に例示した。

Station 16 における水質の時間変動はいずれの測定項目についても小さく、とりわけ Na, K および SiO_2 については 3% 未満であった。COD, DO 等についても、時間変動の小さいことが報告されている (大阪工大・応用化学研, 1985)。

Fig. 2. Distributions of the concentrations of NH_3 and SiO_2 at River Yodo in January 1985.

Table 1. Correlation coefficients between concentrations of some substances at River Yodo.

	NH_3	NO_3	PO_4	SiO_2	Na	K
NH_3						
NO_3	0.798					
PO_4	0.947	0.814				
SiO_2	0.367	0.792	0.394			
Na	0.930	0.876	0.973	0.473		
K	0.925	0.899	0.931	0.561	0.963	

January 1985 $n=47$

3-2. 流入小河川の水質

淀川に流入する河川はいずれも水量 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ 前後の小河川であり、右岸に流入する芥川 (St. 25) を除き、家庭排水、工業排水等の影響による汚染の進行が認められた。小河川からの負荷を Table 2 に例示した。

4. 検 討

4-1. 物質収支

淀川における物質収支について検討した。流入負荷は、木津川、宇治川、桂川および流入小河川について算出した。ただし、流入小河川のうちほとんど水量のない桧尾川からの負荷は無視した。流出負荷は取水水量に取水口近傍の物質濃度を乗じることで算出した。取水水量は調査日の実取水水量によったが、当日の取水水量

Fig. 3. Change in Na concentration from junction point toward downstream, ▼ denotes the junction point of three rivers.

○: right side, ▲: left side, ■: center in the stream.

についてのデータが入手できない場合は、取水量には日ごとの変動がほとんどないため平均の取水量を用いた。淀川における流下負荷量は淀川新橋 (St. 30~31) において算出した。淀川新橋における水量は、枚方における水量に芥川の水量を加え、木屋における取水量を差し引くことで求めた。結果のうち、低水時 (1月) と増水時 (4月) のものを Table 2 に示した。

Table 中の A は、流入小河川による負荷の流入負荷総量に対する比率であり、B は算出した負荷量 (流入負荷量 - 流出負荷量) と淀川新橋において実測した負荷量との差の、算出した負荷量に対する比率である。いずれの場合も水収支について良い一致が得られた。流入小河川による負荷の総流入負荷量に対する比率は、 NH_3 、 PO_4 を除いては小さく Na、K および SiO_2 については 10% 未満となった。正味負荷量と流下負荷量との差は、 NH_3 についてはやや大きかったが、Na、K および SiO_2 については、1月の Na の結果を除くと、水収支の差と同程度であった。このことはこれら物質の淀川における保存性の高さを示すものといえよう。

Na および K は一般に不活性物質とされており上記の結果とよく整合するが、 SiO_2 は一般に不活性物質と

は言えない。すなわち SiO_2 は、生態系において生化学的・物理化学的物質循環系に組み込まれている。しかし、ある物質が生態系において保存性と見なせるかどうかは無前提的に決まるものではなく、注目する生態系におけるその物質の存在量と循環速度との関係によって決まることになる。すなわちこの場合、淀川における流下量に比べて循環速度が十分に小さければ、その物質は保存性が高いと見なすことができる。

SiO_2 について、その循環速度を決める最大の要因は有殻藻類、とりわけケイ藻により取込みとその分解ともなう放出と考えられる。淀川における付着藻類の生体量の測定値は見当たらないものの、多くの時期においては生体量は平衡にあるものと考えられ、生体量が平衡にあるなら藻類による物質の正味の取込みは生じえない。生体量が平衡にないと仮定するときの SiO_2 の取込み速度について検討した。

富栄養化の進んだ多摩川の河川水を用いた実験によれば、付着生体量は新しい付着面において約 2 週間で最大に達し、この間の付着速度は炭素としておよそ $0.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ となっている (AIZAKI, 1985)。付着生物が全てケイ藻であると仮定しても、この間のケイ藻の取込み速度は $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 程度とみつめることができる。[ただし、ケイ藻中の C/ SiO_2 を重量比で 0.7 とした (ANTIA *et al.*, 1963)]。淀川を流下する SiO_2 量は河床 1 m^2 あたり 10 g day^{-1} のオーダーであり、先に見積もった取込み速度にくらべ十分に大きい値となる。更には、 SiO_2 の保存性が高ければ Na と SiO_2 濃度との間には直線関係の成立が期待されるゆえ、琵琶湖から瀬田川にかけ、また宇治川において各々数地点を選び、Na および SiO_2 濃度を測定し両者の関係を見た (Fig. 4)。琵琶湖から瀬田川および宇治川において Na と SiO_2 との間には直線関係が成立した。これらのことは淀川において SiO_2 の保存性物質として取扱いうることを示すものといえよう。

4-2. 淀川における三川の混合

Figures 2, 3 に見られる関係は、淀川の水質が桂川、宇治川および木津川の三川からの水の淀川における混合の割合によって決まること、またこの混合は淀川新橋付近ではほぼ均一化することを示している。

ここで三川からの河川水の混合について検討した。流入水量および取水量が既知の場合、ひとつの物質あるいは物理量を指標として水の混合・拡散について検討することができる。しかし流入水量を知ることは必ずしも容易ではない。しかし指標として 2 つの量を用いることが可能であれば、三川の流量等を用いることなく水の混合・拡散について検討しうる。淀川においては先に見た通り、Na、K および SiO_2 濃度は保存量と見なすことができ、さらに濃度の時間変動は小さく、かつ三川以外からの流入量は小さい。ただ、淀川水系においては Na と K との相関は極めて高く各々を独立量として扱うことが困難となっている。また増水時に

Table 2. Mass balanses at River Yodo.

		January							April						
	Site	Flow	NH ₃	DIN	PO ₄	Na	K	SiO ₂	Flow	NH ₃	DIN	PO ₄	Na	K	SiO ₂
Influx	3	65	32.3	68.5	2.85	800	154	123	340	39.2	172.2	4.0	2,380	598	540
	4	17	4.2	28.0	0.34	218	51	89.6	97	7.0	145.6	2.7	620	205	540
	5	21	119.7	165.2	7.10	716	130	79.5	98	50.4	159.6	8.2	870	212	434
	18	0.34	0.84	1.4	0.09	16	2	5.0	2.4	2.0	5.6	0.2	40	11	17
	19	0.01	0	0	0	0	0	0	2.0	3.6	7.0	0.5	40	10	8
	20	0.12	1.26	1.4	0.16	7	1	0.8	0.4	4.9	5.6	0.7	20	4	3
	21	0.98	26.3	26.6	1.40	66	14	6.7	1.2	2.8	5.6	0.5	30	8	8
	22	0.37	3.22	4.2	0.31	20	4	3.4	0.8	3.6	4.2	0.4	30	7	6
	23	0.65	8.26	14.0	0.68	25	6	7.8	1.6	5.5	7.0	0.4	40	7	17
	24	0.16	1.12	1.4	0.25	34	2	3.1	0.3	1.5	1.4	0.3	50	3	6
	25	0.52	1.96	2.8	0.22	22	3	3.4	2.5	0.6	2.8	0.1	20	4	17
	Total	106	198.1	313.6	13.40	1,924	367	329	546	121.1	516.6	18.2	4,140	1,069	1,596
	A(%)	2.8	21.1	16.5	23.1	9.9	8.7	9.2	2.0	20.2	7.6	17.7	6.5	5.1	5.1
Outflux	6	3.21	1.45	4.3	0.13	40	8	10.7	3.2	0.3	4.2	0.1	20	7	3
	11	12.36	11.0	21.9	0.94	197	36	30.4	12.4	1.3	11.8	0.2	83	25	46
	13	1.00	2.37	3.3	0.17	19	4	3.0	1.0	0.2	1.0	0.0	7	2	4
	31	0.15	0.31	0.5	0.03	3	1	0.5	0.1	0.0	0.1	0.0	1	0	0
	Total	16.72	15.13	30.0	1.27	259	48	44.6	16.7	1.9	17.1	0.3	112	34	53
Flux	Calculated	89	183	284	12.1	1,665	319	284.8	529	119.3	499.8	17.8	4,030	1,035	1,543
	Observed	82	162	265	13.7	1,800	291	257.1	543	101.9	463.4	18.0	4,080	1,010	1,565
	B(%)	-7.9	-11.5	-6.9	12.8	7.8	-8.8	-9.7	2.6	-14.6	-7.3	1.0	1.2	-2.4	1.5

"Flow" represents in $\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$ and others in g sec^{-1} .

"A" represents $\{\text{influx (18+19+20+21+22+23+24+25)}/\text{Total influx}\} \times 100$.

"B" represents $(\text{observed flux} - \text{calculated flux})/\text{calculated flux} \times 100$.

Fig. 4. Relationship between SiO₂ and Na in January 1985, ●: at Lake Biwa; ○: at River Uji.

においては、淀川におけるKの濃度変化は小さく水の混合・拡散を検討する際の指標として用いるとき誤差が大きくなる。それゆえ、Na(あるいはK)およびSiO₂を指標として用いることにした。

淀川の任意の地点における木津川、宇治川および桂川の混合比を各々 $E1$, $E2$, $E3$ ($E1+E2+E3=1$)とし、保存性物質 x , y の濃度を X , Y とする。また木津川、宇治川および桂川における合流点直前の x , y の濃度を X_i , Y_i ($i=1, 2, 3$)とすると、下の関係が成立する。

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X1 & X2 & X3 \\ Y1 & Y2 & Y3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ X \\ Y \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1)より

$$\begin{pmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X1 & X2 & X3 \\ Y1 & Y2 & Y3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ X \\ Y \end{pmatrix} \quad (2)$$

Equation (2)はまた (X, Y) 座標中の任意の点の座標を、 $(X1, Y1)$ $(X2, Y2)$ $(X3, Y3)$ で構成される

三角形の面積座標に変換するための式に他ならない。このとき、淀川内の任意の地点におけるある河川水の混合比は、その地点と他の二川の作る三角形の面積の、三角形全体の面積に対する比となる。

求めた混合比を1985年1月を例としてFig. 5に示す。なお、いずれの測定時においてもほぼ同様の結果が得られた。また淀川左岸部における木津川水の混合比の上流から下流にかけての変動をFig. 6に示した。混合比は枚方大橋(St. 16)から淀川新橋(St. 31)にかけてほぼ一定値に収束した。混合比が正しく求められている場合、この収束値は木津川の流量比となる。Station 16あるいはStation 31における木津川の混合比はその流量比をよく反映している。増水時である4

月の混合比の流下にもなう減少が他の測定時に比べて小さい、言い換えれば混合の進行が遅いのは、増水時は流速が早いため水の混合にかかわる時間が短いことによると考えられる(この点についての詳細な検討は本報の域を越えるゆえ、別報で行なう)。

また、求めた三川の混合比と合流点直前の三川中の物質濃度を用いることによって、淀川における物質濃度を計算することができる。得られた計算値と実測値との間には良い一致が見られた。この計算値と実測値との間の相関係数をTable 3に示した。下流部および支川河口近くの測点において実測値が計算値をやや上まわる傾向が見られたが、これは支川からの負荷の影

Fig. 5. Distribution of mixing ratio of the waters of R.Katura and R.Kizu at River Yodo in January 1985.

Fig. 6. The change in the mixing ratio of R.Kizu at the left side along the stream. The flow ratio of R.Kizu was as follow, August: 0.11; October: 0.17; January: 0.17; April: 0.18; November: 0.11.

Table 3. Correlation coefficient between the calculated concentration and observed one.

	Correlation coefficient					
	84.8	84.10	85.1	85.4	85.7	85.11
NH ₃	0.957	0.898	0.798	0.849	0.526	0.880
NO ₃	0.300	-0.262	0.823	0.946	0.907	0.664
DIN	0.953	0.905	0.848	0.830	0.905	0.871
PO ₄	0.833	0.848	0.956	0.800	0.421	0.723

響と考えられる。実際、最下流部および支川河口近傍の測点を除いた場合、計算値と実測値との間の相関係数は Table 3 中の値に比べより大きな値が得られた。

謝 辞

採水等にご協力いただいた多くの方々および流量を計算いただいた木藤耕一氏に厚くお礼申し上げます。

摘 要

淀川において水質調査を行ない、水の混合・拡散について検討した。淀川においては三川（木津川、宇治川、桂川）合流後、合流点から約 13 km 下流まで河川横断方向に明瞭な濃度分布が認められた。この濃度分布を支配する淀川における河川水の混合・拡散について検討した。

物質の保存性および三川以外からの流入負荷の小さいことを確認し、Na（あるいは K）および SiO_2 濃度を混合の指標として用いることを確かめた。これら二つの指標を用いることによって、淀川における河川水の混合について容易に知ることができた。求めた混合比の妥当性を河川流量比によって確かめることができた。また、求めた混合比は淀川における NH_3 および PO_4 等の濃度分布をよく再現した。

文 献

- AIZAKI, (1985) Removal and excretion of dissolved organic matter by periphyton community grown in eutrophic river water, *Jpn. J. Limnol.*, **46**: 159-168.
- 南部祥一（1960）：河川水中の自浄作用と汚染度分布に関する研究，京都大学学位論文。
- 大阪工業大学 応用化学研究部（1985）桜花，**26**: 15, 24.
- ANTIA, N. J., C. D. McALLISTER, T. R. PARSONS, K. STEPHENS and J. D. H. STRICKLAND. (1963) Further measurements of primary production using a large-volume plastic sphere. *Limnol. Oceanogr.* **8**, 166-183.
- （著者：五百井正樹・串部宏之・北田忠義・建部渉・前田礼造・人見宗男，大阪市立大学工学部，〒558 大阪市住吉区杉本 3-3；Masaki Ioi, Hiroyuki KUSHIBE, Tadayoshi KITADA, Wataru TATEBE, Reizo MAEDA and Muneo HITOMI, Faculty of Engineering, Osaka City University, Sugimoto 3-3, Sumiyoshi-ku, Osaka 558）

1986 年 5 月 16 日 受付

1986 年 9 月 9 日 受理