

水門操作による大川由来河川水の東横堀川-道頓堀川への導水率の推定

大島 詔

Estimation of the Water Intake Rate from Okawa River into Higashi-Yokobori River-Dotonbori River Promoted by Aggressive Sluice Gate Operation

OSHIMA Akira

Abstract

Water pollution in Higashi-Yokobori River-Dotonbori River, which deteriorated during the economic high-growth period in Japan, has been gradually improved through various programs. One of them is to actively operate the sluice gates in order to take in more clean river water from Okawa River (former Yodo River), which stagnates upstream of both rivers at high tide, but the water intake rate has been evaluated only slightly so far. In this study, the ratio of Okawa River water among the water flowing into Higashi Yokobori River was estimated as the intake rate by the Monte Carlo method based on the concentration of coliform bacteria and *E. coli* measured using Chromagar ECC medium from May 2019 to March 2021. As a result, the average water intake rate from Okawa River was estimated to be 74.1%, indicating that the clean water was being withdrawn through the proactive sluice gate operations in many cases.

Key words: Higashi-Yokobori River; Okawa River; Sluice gates; Water intake rate, Bacterial concentration; the Monte Carlo method

I はじめに

東横堀川-道頓堀川(以後 2 河川をまとめて堀川と称す)は大阪市内の中心部を流れる河川であり、大阪の工業化に伴う経済発展とともに水質が悪化して戦後の高度経済成長期にそのピークを迎えた[1]。水質改善のために 1970 年代よりゴミ取りのためのマイクロストレーナーの設置や溶存酸素量増加のための噴水装置の設置が進んだ[1,2]。その後、付近の河川における水質改善や 2016 年の雨水貯留管の完工も相まって堀川の水質も大きく改善したが、やはり水質改善に大きく寄与したものである。この原理は入江ら[3]等が詳しいが、通常は堀川両端の水門を閉鎖して上流河川の左岸を流れる比較的汚濁が進んだ寝屋川由来の河川水が流入するのを阻止しつつ、右岸側を流れていた大川の河川水が堀川上流部の全面に滞留する上げ潮時に水門を開放して清浄な河川水を堀川へ導水するもので、原則として夜間に実施される。しかしながら大川由来河川水の堀川への導水については溶存酸素に基づく導水確率に関する研究が 1 例あるに過ぎず[4]、十分に評価されているとまでは言いがたい状態である。導水率に関する知見は水門操作の評価はもちろん、さらなる改善を検討する上でも必要な情報と考える。

そこで本研究では指数関数的な減衰特性を持つ大腸菌群および大腸菌について堀川内部での濃度差から流入時における濃度を推定し、この値を堀川上流部に位置する大川および寝屋川の濃度とモンテカルロ法で比較することにより大川からの河川水導水率を推定した。その結果、一定の結論を得たのでここで報告する。

II 方法

1) 採水地点と採水方法

採水は堀川内の本町橋(東横堀川)および大黒橋(道頓堀川)と、その上流にあたる桜宮橋(大川)、京橋(寝屋川)の 4 地点で行った(図 1)。大腸菌群および大腸菌濃度測定用の試料は 2019 年 5 月と同年 7 月から 2021 年 3 月にかけての毎月の計 22 回採水して得た。各月の採水日はおおむね正午から午後 4 時の時間帯に京橋において河川水の流向が順流と予測される大潮等の日とし、午後 3 時頃に河川の流向を確認した後にバンドーン採水器を用いて水深 50 cm で採水したものを細菌分析用の試料とした。

2) 大腸菌群数および大腸菌数の測定方法

大腸菌群数および大腸菌数は Chromagar ECC 培地による疎水格子メンブランフィルター法で同時測定した。1600 格子を有する疎水格子メンブランフィルター(ISO-

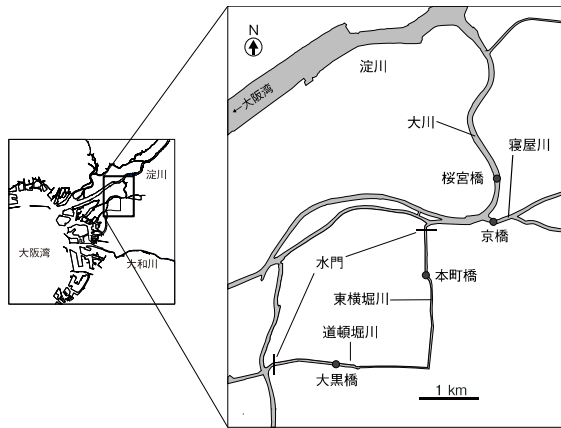


図 1 調査対象河川と採水地点

Grid、Neogen 社製) 上に適量の試料を通水濾過し、これを Chromagar ECC 培地 (Chromagar 社製) の寒天平板に貼付した。その後転置状態で $37.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ で 24 ± 2 時間培養し、格子内に形成されたコロニーを赤色と青色の色別に計数し、ろ水量 $V[\text{mL}]$ とコロニー数 $N[\text{個}]$ より、 $\ln\{N/(1600 - N)\} \times 100/V$ の式により最確数 [MPN/dL] を求めた。この時の N は、大腸菌群数を求める時は青色と赤色のコロニー数の和を、大腸菌数の場合は青色のコロニー数とした。

3) 流入時の細菌濃度の推定方法

本町橋で採水されたサンプルは前日夜間の水門操作で流入し、水門閉鎖後はその場で滞留しつづけた河川水と考えられる。したがって本町橋の細菌濃度は大川もしくは寝屋川の河川水中にあった細菌が 1 日経過する間に变化した値を観測していると解釈されるので、何らかの方法で水門開放時に流入した時点での河川水中の細菌濃度を推定する必要がある。ここで大島ら (2020) は本町橋から大黒橋までの流下に平均 4.0 日を要し、この間の大腸菌群数は指数関数的に減衰すると報告している [5]。よって大黒橋の細菌濃度は 5 日前に流入した河川水中の細菌が減衰した状態を観測し、本町橋と大黒橋間の細菌濃度差は 4 日間での指数関数的な減衰速度を観測していると見ることができるので、大黒橋の細菌濃度に 5 日間分の減衰速度を掛け戻すことで流入時の細菌濃度が推定できる。ここで $D_{\text{本町橋}}$ 、 $D_{\text{大黒橋}}$ はそれぞれ本町橋、大黒橋における細菌濃度とすると、流入時の細菌濃度 $D_{\text{流入水}}$ は以下となる。

$$D_{\text{流入水}} = D_{\text{大黒橋}} \times \exp\left(\frac{5}{4} \ln \frac{D_{\text{本町橋}}}{D_{\text{大黒橋}}}\right) \quad (\text{式 1})$$

さらに両辺の対数を取ると、

$$\ln D_{\text{流入水}} = \frac{5}{4} \ln D_{\text{本町}} - \frac{1}{4} \ln D_{\text{大黒橋}} \quad (\text{式 2})$$

となる。

4) モンテカルロ法による大川からの導水率の計算

堀川への大川由来河川水の導水率は式 2 で求めた $\ln D_{\text{流入水}}$ を桜宮橋および京橋の細菌濃度と比較すること

で求めた。 $D_{\text{桜宮橋}}$ 、 $D_{\text{京橋}}$ はそれぞれ桜宮橋、京橋における細菌濃度とすると、桜宮橋がある大川から堀川への導水率 x は、

$$x = \frac{D_{\text{流入水}} - D_{\text{京橋}}}{D_{\text{桜宮橋}} - D_{\text{京橋}}} \quad (\text{式 3})$$

となる。なお桜宮橋や京橋から水門までの到達時間は、順流時では 10 分単位、あるいは 1 時間単位の短時間と考えられるため、流下に伴う細菌濃度の減衰は考慮しないこととする。

河川中の細菌濃度は常に変動するため、大川から堀川への河川水導水率もこの点について考慮する必要がある、本研究ではモンテカルロ法を用いて計算することで変動の影響を平均化させて導水率を推定した。まず堀川への流入水、桜宮橋、京橋に対応する独立した 3 つの標準正規分布に従う乱数 z_1, z_2, z_3 を 10^8 個ずつ発生させ、それらの乱数を本町橋、桜宮橋、京橋の細菌濃度間で実際に観測された相関係数に合うように調整して Z_1, Z_2, Z_3 を得た。調整後の乱数を堀川への流入時、桜宮橋、京橋における平均細菌濃度と標準偏差に合うように標本化し、それらの値を式 3 に逐次代入して導水率を求めた。導水率は細菌濃度が桜宮橋 $\leq$ 流入水 $\leq$ 京橋の関係にあるものの平均値で評価した。互いに相関する 3 組の標準正規分布に従う乱数の生成と標本化法は附録に記した。一連の計算には R (ver.3.6.2, Windows 版) を用いた。

III 結果と考察

1) 大腸菌群および大腸菌の観測値と相関について

2019 年 5 月から 2021 年 3 月までに観測された各地点の大腸菌群および大腸菌の試料数、最小・最大値、各四分位数、平均値と、各細菌濃度に 1 を加えた後に自然対数変換した値の平均と標準偏差を表 1 で示す。大腸菌群は京橋で最も高く平均 5.9×10^4 MPN/dL であった。次いで平均が高かったのは本町橋の 8.6×10^3 MPN/dL で、大黒橋の平均 2.6×10^3 MPN/dL が最低であった (表 1a)。大腸菌は京橋で平均 9.1×10^3 MPN/dL と最大であったが、最小を示したのは桜宮橋の平均 1.4×10^2 MPN/dL であった (表 1b)。大腸菌群濃度に基づく、大黒橋 $\leq$ 桜宮橋 $<$ 本町橋 $<$ 京橋の順で、大腸菌濃度では桜宮橋 $<$ 大黒橋 $<$ 本町橋 $<$ 京橋の順でそれぞれ汚濁が進んでいることが示される。測定指標により大黒橋と桜宮橋の順番が入れ替わるが、桜宮橋、本町橋、京橋間の序列は変わらない。

大阪市の下水道は合流式で整備されているため、時間あたりおおむね 3 mm 以上の降雨があると流入下水の一部を簡易な処理後に放流することがあり [5]、大腸菌群などの濃度が上昇することがある。また寝屋川の採水地点である京橋では潮汐との関係で河川水が逆流することがあるが、この時の河川水は必ずしも寝屋川を流下

表 1 観測された大腸菌群濃度と大腸菌濃度の記述統計量

a 大腸菌群濃度

地点	試料数	最小値*	第1 四分位数*	メディアン*	平均*	第3 四分位数*	最大値*	ln(N+1)変換値	
								平均	標準偏差
桜宮橋（大川）	22	220	570	730	2 900	1 600	21 000	6.99	1.25
京橋（寝屋川）	22	300	2 200	8 600	59 000	18 000	810 000	9.00	1.89
本町橋（東横堀川）	22	230	730	1 300	8 600	2 400	110 000	7.44	1.57
大黒橋（道頓堀川）	22	140	310	440	2 600	870	35 000	6.50	1.28

b 大腸菌濃度

地点	試料数	最小値*	第1 四分位数*	メディアン*	平均*	第3 四分位数*	最大値*	ln(N+1)変換値	
								平均	標準偏差
桜宮橋（大川）	22	2	11	28	140	78	1 900	3.55	1.50
京橋（寝屋川）	22	0	340	1 100	9 100	2 300	120 000	6.81	2.36
本町橋（東横堀川）	22	20	82	160	1 800	260	29 000	5.29	1.77
大黒橋（道頓堀川）	22	10	54	89	280	150	2 900	4.54	1.32

* 単位はMPN/dL

表 2 晴天時における大腸菌群濃度と大腸菌濃度の記述統計量

a 大腸菌群濃度

地点	試料数	最小値*	第1 四分位数*	メディアン*	平均*	第3 四分位数*	最大値*	ln(N+1)変換値	
								平均	標準偏差
桜宮橋（大川）	17	220	460	650	2 000	870	21 000	6.65	1.05
京橋（寝屋川）	9	1 600	4 500	12 000	14 000	14 000	50 000	9.06	1.12
本町橋（東横堀川）	17	230	730	1 100	2 700	2 100	22 000	7.13	1.14
大黒橋（道頓堀川）	17	140	300	390	1 100	570	11 000	6.23	0.97

b 大腸菌濃度

地点	試料数	最小値*	第1 四分位数*	メディアン*	平均*	第3 四分位数*	最大値*	ln(N+1)変換値	
								平均	標準偏差
桜宮橋（大川）	17	2	10	20	31	40	180	2.98	0.99
京橋（寝屋川）	9	120	400	1 100	2 000	1 500	12 000	6.78	1.30
本町橋（東横堀川）	17	20	60	120	330	200	2 900	4.81	1.30
大黒橋（道頓堀川）	17	10	40	67	160	97	1 400	4.23	1.16

* 単位はMPN/dL

した河川水とは限らない。降雨と逆流の影響を除去するため、採水の 2 日前以降に大阪管区気象台の地点:大阪において時間雨量 3 mm/h 以上の降水を観測せず（以後晴天時とする）、かつ京橋については採水時に逆流でなかった場合に限定して大腸菌群および大腸菌濃度の記述統計量を得た(表 2)。大腸菌群濃度が最大であるのは京橋の平均 1.4×10^4 MPN/dL であり、次いで高かったのは本町橋の平均 2.7×10^3 MPN/dL、最小は大黒橋の平均 1.1×10^3 MPN/dL であった(表 2a)。いずれの地点も雨天時データを含む全 22 観測値の集計結果との比較では低い値となっているが、採水地点間の汚濁の序列は同一であった。大腸菌濃度は京橋で平均 2.0×10^3 MPN/dL と最大で、最小は桜宮橋の平均 3.1×10^1 MPN/dL であった。大腸菌群と同様、汚濁の序列は全観測値の場合と変わらず、桜宮橋<大黒橋<本町橋<京橋であった。

全 22 観測値と晴天時の観測値の両方に共通するが、桜宮橋と京橋間の比較では寝屋川に架かる京橋で大腸菌群濃度、大腸菌濃度共に高く、大川に架かる桜宮橋のある大川は相対的に清浄である。本町橋と大黒橋の比較では本町橋で細菌濃度が高く、河川水が堀川を流下する間に細菌濃度が減少することが反映されている。

なお、表 1 および表 2 からは全ての地点においてメディアンよりも平均が大きく最大値も大きく突出していることから、細菌濃度は右に裾を引く対数正規分布型であることが示唆される。

2) 地点間の細菌濃度の相関

大腸菌群濃度と大腸菌濃度に関し、全観測値と晴天時のそれぞれの場合について各地点間の相関係数と、相関分析で得られた有意確率を表 3 で示す。ただし細菌濃度は右に裾を引く対数分布型であることが示唆されているので、相関係数は観測値に 1 を加えた後に対数変換した値で比較している。桜宮橋と京橋間の比較では、全データでは大腸菌群濃度、大腸菌濃度の相関係数はそれぞれ 0.531、0.493 であり、いずれも危険率 5% 水準で有意であったが(表 3a、3c)、晴天時に限定するとそれぞれ 0.277、0.119 となり、晴天時は独立していることが示された(表 3b、3d)。堀川内の本町橋と大黒橋間の比較では晴天時の大腸菌を除き有意な相関が見られ、相関係数も 0.484 から 0.581 と相対的に高い値であった(表 3a-d)。これは流下に伴い細菌濃度が減少する堀川の特性を反映したものと考えられた(表 3a-d)。ただし晴天時における大腸菌濃度の相関係数は 0.344 と低く、危険率 5% で有意な相関ではなかった。流下に伴う減衰特

表 3 細菌濃度の相関係数と相関分析における有意確率

a. 大腸菌群濃度 (全データ, $n=22$)

	桜宮橋	京橋	本町橋	大黒橋
	有意確率			
桜宮橋		0.012	0.390	0.337
京橋	0.531		0.070	0.137
本町橋	0.030	0.390		0.005
大黒橋	0.121	0.309	0.581	

b. 大腸菌群濃度 (晴天時, $n=17$ ただし京橋とペアのものは $n=9$)

	桜宮橋	京橋	本町橋	大黒橋
	有意確率			
桜宮橋		0.280	0.332	0.359
京橋	0.277		0.370	0.358
本町橋	0.143	0.099		0.040
大黒橋	-0.105	-0.134	0.499	

c. 大腸菌濃度 (全データ, $n=22$)

	桜宮橋	京橋	本町橋	大黒橋
	有意確率			
桜宮橋		0.041	0.122	0.225
京橋	0.493		0.127	0.311
本町橋	0.369	0.363		0.045
大黒橋	0.261	0.171	0.484	

d. 大腸菌濃度 (晴天時, $n=17$ ただし京橋とペアのものは $n=9$)

	桜宮橋	京橋	本町橋	大黒橋
	有意確率			
桜宮橋		0.364	0.100	0.389
京橋	0.119		0.385	0.368
本町橋	0.396	-0.011		0.143
大黒橋	-0.034	0.107	0.344	

性が大腸菌群と大腸菌で異なる可能性があり、検討が必要である。

3) 堀川へ流入した河川水中の細菌濃度

本町橋および大黒橋の晴天時における自然対数変換後の大腸菌群濃度の平均±標準偏差はそれぞれ 7.13 ± 1.14 、 6.23 ± 0.97 であった(表 2a)。これらを式 2 に代入し、堀川へ流入した時点での細菌濃度を推定すると 7.35 ± 2.10 となった。これは真数に直すと 1560 (101-12700) MPN/dL である。同様に本町橋および大黒橋の自然対数変換後の大腸菌濃度はそれぞれ 4.81 ± 1.30 、 4.23 ± 1.16 であり(表 2b)、流入時点の細菌濃度は 4.95 ± 2.46 、真数では 141 (12.1-1650) MPN/dL と推定された。

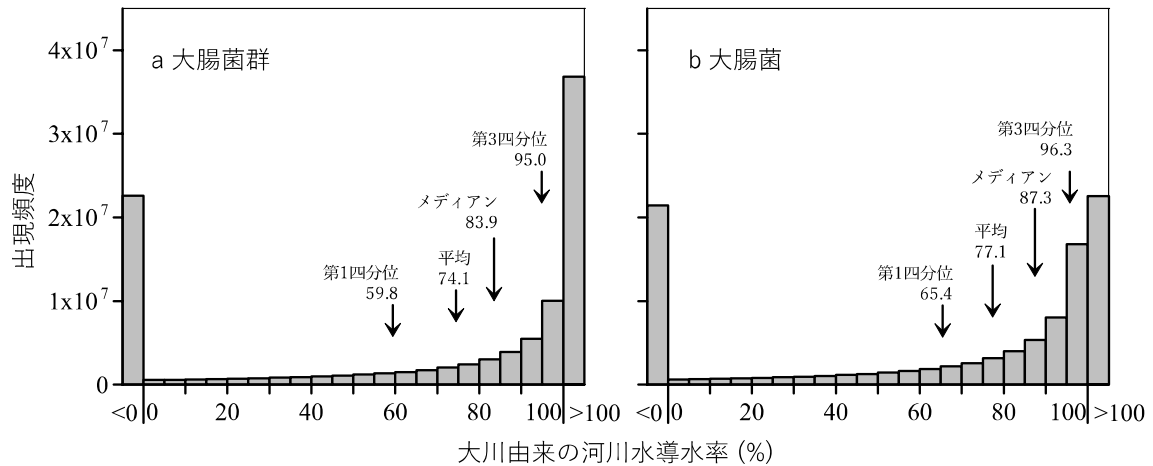
4) モンテカルロ法によるシミュレーション結果

大腸菌群濃度について、表 2a の桜宮橋と京橋の細菌濃度、表 3b の相関係数および上で求めた堀川への流入時における細菌濃度推定値を元に 10^8 回のモンテカルロ法によるシミュレーションを試行し、式 3 より導水率を逐次計算した。ここで流入時の細菌濃度と桜宮橋あるいは京橋との相関係数は、流入から本町橋までの経過時間が一定であると仮定すると減衰量も一定と考えられるので、本町橋と桜宮橋もしくは京橋との相関係数で代用

した。発生させた乱数 z_1 、 z_2 、 z_3 から附録に示した方法で相互に相関する正規分布に従う乱数 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 を得るのに使用した係数は $b_1=0.2772$ 、 $b_2=0.9608$ 、 $c_1=0.1434$ 、 $c_2=0.0617$ 、 $c_3=0.9877$ とした。シミュレーションで得られた導水率ごとの出現頻度を図 2a で示す。桜宮橋のある大川の河川水導水率が 0% から 100% の間の値を示したケースは全体の 40.6% であった。京橋よりも流入水が高大腸菌群濃度となったことを意味する導水率 0% 未満のケースが 22.6%、逆に導水率が 100% を超過し、桜宮橋よりも流入水が低大腸菌群濃度となったケースが 36.8% あり、計算結果は全体として低大腸菌群濃度の河川水が堀川へ流入する傾向を示した。理論上、現場データとの整合性が得られる $D_{\text{桜宮橋}} \leq D_{\text{流入水}} \leq D_{\text{京橋}}$ の関係にあるデータのみに着目すると、導水率が高くなるにつれて出現頻度は大きくなり、平均 74.1%、メディアン 83.9% で、第 1 四分位は 59.8%、第 3 四分位数は 95.0% であった。

大腸菌濃度についても表 2b、表 3d および流入時の細菌濃度推定値を元にモンテカルロ法でのシミュレーションを行った。乱数生成時に使用した係数は $b_1=0.1192$ 、 $b_2=0.9929$ 、 $c_1=0.3958$ 、 $c_2=-0.0583$ 、 $c_3=0.9165$ とした。導水率が 0% 以上 100% 以下を示したケースは全体の 56.4% であり、この範囲を下回ったのが 21.5%、上回ったのが 22.6% であり、大腸菌群同様に低大腸菌濃度のものが堀川へ流入する傾向を示した。(図 2b)。 $D_{\text{桜宮橋}} \leq D_{\text{流入水}} \leq D_{\text{京橋}}$ の関係にあるケースに限ると大腸菌群同様に導水率が高いものほど出現頻度が大きく、平均とメディアンはそれぞれ 77.1% と 87.3% で、第 1 四分位と第 3 四分位はそれぞれ 65.4% と 96.3% となった。

以上のシミュレーション結果は、大腸菌群、大腸菌のいずれで計算した場合において大川由来河川水の導水率が 70% 台の値となった(図 2)。ただし晴天時の本町橋—大黒橋間における大腸菌濃度の相関係数は有意ではなかったため(表 3d)、今回は大腸菌濃度に基づく導水率の推定値は参考にとどめ、大腸菌群濃度に基づくシミュレーションで得られた平均値を採用して 74.1% とする。中谷ら(2016)は溶存酸素に着目して水門操作により大川の河川水が堀川へ導水される確率を計算し、約 77% と報告している[4]。今回の細菌濃度に基づく推定値と中谷ら(2016)の溶存酸素とでは調査対象物質の違い、または導水率と導水確率という評価の視点が異なるものの、結果は類似していると言えよう。ただ、大腸菌群濃度に基づくシミュレートでは $D_{\text{桜宮橋}} \leq D_{\text{流入水}} \leq D_{\text{京橋}}$ となったケースは全体の 40.6% に過ぎず、精度が不足していると思われる。流入時における細菌濃度の推定精度を上昇させる、細菌濃度に対して対数正規分布以外の分布型の当てはめを検討する等改良して精度を高める必要がある。さて、再び大腸菌群の計算結果に着目すると、時には大川からの導水率が低下することも示している。 $D_{\text{桜宮橋}} \leq D_{\text{流入水}} \leq D_{\text{京橋}}$ となったケースに限ると、導水率



* 平均と各四分位数は導水率が0%以上100%以下のもののみが対象である。

図2 モンテカルロシミュレーションの結果

が 50%以下で寝屋川からの河川水の割合が多くなる例が 19.1%あり、さらに 2.9%は寝屋川からの河川水の割合が 90%を超えることも示した。今回の結果はシミュレーション結果であり、精度的な改良の余地があるために解釈は慎重であるべきだが、この傾向は水門操作に改善の余地を示唆するものかもしれない。

謝辞 本調査は水質汚濁防止法第 15 条(常時監視)および同法第 16 条の規定により大阪府が作成した公共用水域水質測定計画に基づき大阪市が行う公共用水域水質調査業務の採水日に合わせて試料を得た。関係の各位に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 福永勲, 大阪市の水質汚濁対策の歴史と現状, 生活衛生 1993; **37**:103-119.
- 2) 土永恒彌, 道頓堀川の水辺環境の再生と水質浄化, 環境技術 1996; **25**(8):466-472.
- 3) 入江政安, 西田修三, 道頓堀川の水質変動特性と水質管理についての調査解析, 水工学論文集 2007; **51**:1129-1134.
- 4) 中谷祐介, 今福大智, 根井大輝, 岡田浩明, 西田修三, 東横堀川における貧酸素化抑制に向けた水質浄化運転の評価検討, 土木学会論文集 B1(水工学) 2016; **72**(4):I_973-I_978.
- 5) 大島詔, 北野雅昭, 雨水貯留管(平成の太閤下水)の供用にも関わらず東横堀川-道頓堀川で大腸菌群数が減少しなかった理由についての考察, 水環境学会誌 2020; **43**(12):189-195.

附録

相互に相関する 3 つの乱数の発生方法

3 つの独立な標準正規分布を z_1, z_2, z_3 とすると、5 つの係数 b_1, b_2, c_1, c_2, c_3 を用いることで以下の式により相互に相関する標準正規分布 Z_1, Z_2, Z_3 へ変換される。

$$Z_1 = z_1$$

$$Z_2 = b_1 z_1 + b_2 z_2$$

$$Z_3 = c_1 z_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3$$

ここで Z_1 と Z_2 , Z_1 と Z_3 , Z_2 と Z_3 の相関係数をそれぞれ r_1, r_2, r_3 とすると、相関係数の定義より

$$b_1 = r_1, c_1 = r_2$$

さらに Z_2 と Z_3 の相関係数 r_3 は $b_1 c_1 + b_2 c_2$ なので、

$$b_2 c_2 = r_3 - r_1 r_2$$

Z_1, Z_2, Z_3 は標準正規分布でありいずれも標準偏差が 1 であるので、

$$b_1^2 + b_2^2 = 1, c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1$$

より、

$$b_2 = \sqrt{1 - b_1^2} = \sqrt{1 - r_1^2}$$

$$c_2 = \frac{r_3 - r_1 \cdot r_2}{\sqrt{1 - r_1^2}}$$

$$c_3 = \sqrt{1 - (c_1^2 + c_2^2)} = \sqrt{1 - \left(r_2 + \frac{r_3 - r_1 \cdot r_2}{\sqrt{1 - r_1^2}} \right)^2}$$

なお、ある河川 k の細菌濃度の平均と標準偏差がそれぞれ m_k, s_k の時、 Z_k を用いて以下の式で標準化される。

$$D_k = m_k + s_k Z_k$$