

大阪市内河川における降水量と大腸菌群数の関係

大島 詔¹⁾、北野 雅昭²⁾

Relationship between precipitation amounts and the number of coliform group bacteria in urban rivers in Osaka city

Akira OSHIMA¹⁾ and Masaaki KITANO²⁾

Abstract

The numbers of coliform group bacteria, which have been observed from April 2000 to March 2015 at 21 points in urban rivers of Osaka city, Japan, were analyzed with the multi regression model. Eleven independent variables, including daily precipitation from 0 to 7 days, were introduced to the model. It showed the numbers of the bacteria were affected strong by log-transformed precipitation of the previous day, and they increased by 1.4 to 3.0 and 2.0 to 10.3 times by 3 mm and 10 mm of precipitation respectively. According to linear prediction, numbers of points exceeding 1000 MPN/dL and 5000 MPN/dL of the bacteria will change from 12 to 10, and 3 to 3 from 2020 to 2027 in the conditions of no precipitation and in spring or autumn. The numbers of bacteria in these urban city rivers were expected to be decreased gradually although not rapidly.

Key words: number of coliform group bacteria, precipitation of the previous day, multi regression model, linear prediction

I 緒言

公共用水域の水質汚濁にかかる環境基準のうち、生活環境の保全に関する項目については、河川では AA から E までの類型指定が行われ、それぞれに水質基準が定められている。大腸菌群数では、AA、A、B の各類型に対し、日間平均値でそれぞれ 50、1000、5000 MPN/dL 以下とされている。全国的に生物学的酸素要求量をはじめとする多くの水質項目がほぼ水質基準値を達成しているのとは対照的に、大腸菌群数については、例えば 2015 年度の達成率が 35.2% のように達成状況は悪い[1]。これは、公共用水域における大腸菌群の定義が、ブリアントグリーン存在下で乳糖を分解しガスを産生することのできる細菌群とされていることに原因があり、測定の対象とすべき温血動物の腸管由来細菌に加え、土壌など自然界由来の細菌も網羅的に計測されてしまうためである[2]。測定対象を温血動物由来の細菌群のみとするために水質規準項目を大腸菌群から大腸菌へ切り替える動きが環境省内で見られるが[3]、その実施時期は未定である。当面は問題を抱えながらも大腸菌群数による評価が継続する。

一方、大阪市では、国内的には早くから下水道が整

備されてきた都市であるため、ごく一部の地域を除き合流式下水道である。合流式下水道は域内における雨水を含む排水の全量が流入するので、処理能力を超える降水があると一部の下水は処理が追いつかず公共用水域に越流するため、河川水における大腸菌群数を増加させることがある。ほかにも河川に対する人間活動の影響が大きい都市域では、指標の妥当性について問題を内含する大腸菌群数であっても人為的な汚染を評価する指標としては有効であると考えられる。

そこで本研究では、合流式下水道であることで影響を受けがちな大阪市内河川において大腸菌群数を重回帰モデルにより解析することで、水温や年変動の影響をなるべく除去したうえで、大腸菌群数に対する日ごとの降水量の影響について考察した。また、得られた重回帰モデルより線形予測により 3 年後の 2020 年と 10 年後の 2027 年における大腸菌群数の将来予測をし、今後の推移について検討を行った。

II 方法

1) 測定地点

大腸菌群数は、大阪市内にある公共用水域定点観測地点のうち、2000 年 4 月以降に D 類型以上であった

1) 大阪市立環境科学研究センター
〒543-0026 大阪市天王寺区東上町 8-34
Osaka City Research Center of Environmental Science, 8-34 Tojo-cho, Tennoji-ku, Osaka 543-0026, Japan

2) 千里金蘭大学
〒565-0873 吹田市藤白台 5-25-1
Senri Kinran University, 5-25-1 Fujishirodai, Suita City 565-0873, Japan

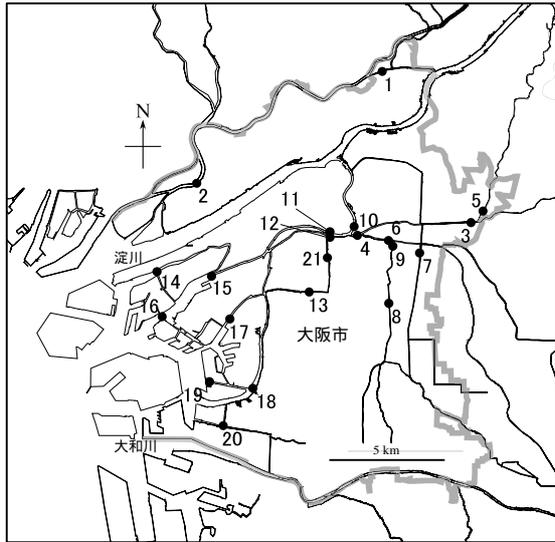


図1 調査地点図

淀川ならびに大和川を除く 21 地点を測定した。観測地点は図 1 中で黒点および地点番号で示し、地点番号と地点名、河川水系および河川名、2000 年 4 月から 2015 年 3 月までの各期間における類型指定状況、大腸菌群数の計測を開始した年月ならびに期間を通じた測定数は表 1 で示した。以降、各地点は地点番号で表すこととする。

2) 大腸菌群数の測定方法

各地点における大腸菌群数は BGLB による最確数法で測定した[4]。各希釈段階は 10 の整数乗倍とし、それぞれ BGLB 培地を分注した 5 本の試験管に希釈試料を接種し、 36.0 ± 1.0 で 48 ± 3 時間培養した後に

希釈段階ごとにガス産生の見られた陽性管数を記録し、最確数表と照合し最確数 (MPN/dL) を得た。

3) 各地点の水温の平年値と偏差の計算

水温は 1 年 1 サイクルの周期性を示すが、任意の日における水温は日光や降水など気象の影響を受け、平年値 (以下 WT とする) から上下する。すなわち、ある日に観測された水温は、その日における WT と、そこからの偏差 (以下 $diff$ とする) に分解することができる。このうち WT をサインカーブで近似されるとすると、大腸菌群を計測した日 θ における WT は式 1 で記述される。

$$WT = \beta + A \cdot \sin(\theta + \alpha) \quad (式 1)$$

ここで β は切片、 A は WT の振幅であり、 α は 1 月 1 日と水温の極小日との位相である。なお、 θ ならびに α は 1 月 1 日からの経過日数から 1 を引き、その年の日数で除し、360 を乗じた値、すなわち度 ($^\circ$) とする。

水温の実測値をもとに各係数を求めるために、式 1 を

$$WT = \beta + \alpha_1 \sin \theta + \alpha_2 \cos \theta \quad (式 2)$$

に変形し、最小二乗法により α_1 ならびに α_2 を求めてから式 1 中の A と α とに変換した。 $diff$ は水温の実測値と WT の差となる。以降の重回帰モデルの構築時には実測された水温を WT と $diff$ に分解して与えた。

4) 重回帰モデルの構築

降水量などの影響を評価するため、地点ごとに大腸菌群数を従属変数とする重回帰モデルの構築を試みた。独立変数の候補としたのは、大腸菌群数を計測した当日より 7 日前までの日ごとの降水量、水温の実測値を分解して得られた WT と $diff$ 、測定年の 11 変数とした。これらのうち、当日より 7 日前までの日ごとの降水量につ

表 1 調査を行った地点の番号、名称ならびに河川名、期間ごとの類型指定

地点番号	地点名	水系	河川名	類型指定			大腸菌群数	
				期間	2000.4~ 2002.3	2002.4~ 2009.3	2009.4~ 2015.3	測定開始 年月
1	小松橋	神崎川	神崎川	B	B	B	2000.4	60
2	千船橋	神崎川	神崎川	B	B	B	2000.4	172
3	今津橋	寝屋川	寝屋川	E	D	D	2002.4	60
4	京橋	寝屋川	寝屋川	E	D	D	2002.4	60
5	徳栄橋	寝屋川	古川	E	D	D	2002.4	63
6	城見橋	寝屋川	平野川	E	D	D	2002.4	63
7	天王田大橋	寝屋川	平野川分水路	E	D	D	2002.4	63
8	南弁天橋	寝屋川	平野川	E	D	D	2002.4	63
9	下城見橋	寝屋川	第二寝屋川	E	D	D	2002.4	63
10	桜宮橋	市内河川	大川	C	B	B	2000.4	159
11	天神橋(右)	市内河川	堂島川	C	B	B	2000.4	159
12	天神橋(左)	市内河川	土佐堀川	C	C	C	2000.4	63
13	大黒橋	市内河川	道頓堀川	C	B	B	2000.4	159
14	北港大橋下流700m	市内河川	正連寺川	C	C	B	2000.4	103
15	春日出橋	市内河川	六軒家川	C	B	B	2000.4	159
16	天保山渡	市内河川	安治川	C	B	B	2000.4	159
17	甚兵衛渡	市内河川	尻無川	C	C	B	2000.4	103
18	千本松渡	市内河川	木津川	C	C	B	2000.4	103
19	船町渡	市内河川	木津川運河	C	C	B	2000.4	103
20	住之江大橋下流1100m	市内河川	住吉川	C	C	B	2000.4	103
21	本町橋	市内河川	東横堀川	指定なし	B	B	2002.4	103

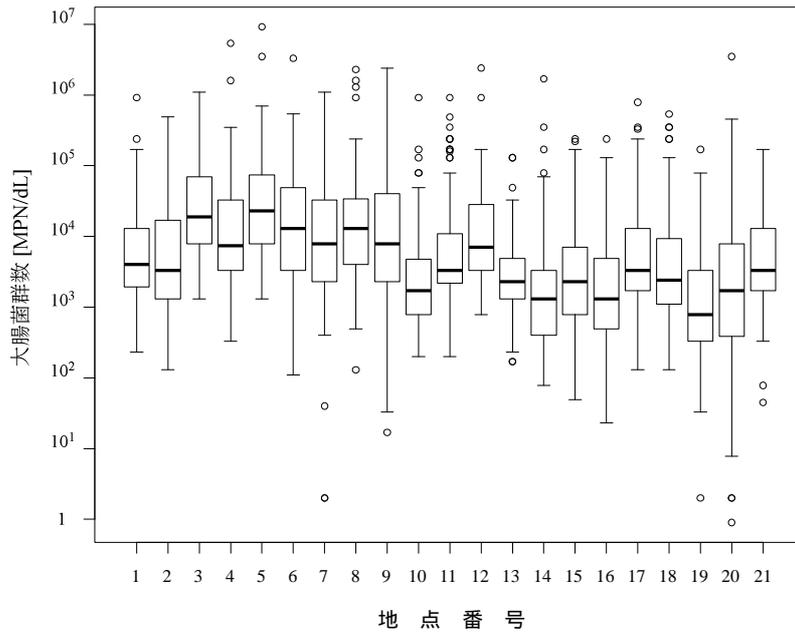


図2 各地点において観測された大腸菌群数

いては、気象庁大阪管区气象台が観測した、観測地:大阪の値[5]とし、各日の降水量は1を加えたうえで自然対数変換した(以下、各日の降水量は $day0, day1, day2, \dots, day7$ とする)。測定年は、重回帰モデルの切片が2000年1月1日における大腸菌群数の期待値となるように同日からの経過年数とし、月および日も反映したものとした。例えば、2005年7月1日は5.499となる。以下、測定日は YR とする。

大腸菌群数は右に裾を引く分布傾向にあったので、自然対数変換したうえで重回帰モデルの従属変数とした(以下、自然対数変換後の大腸菌群数を $coli$ とする)。ただし降水量の場合とは異なり、対数変換時に1は加えていない。この処理により各地点における大腸菌群数はおおむね正規分布に近い分布となった。

以上、11独立変数と1従属変数からなる重回帰モデル式は式3で示される。

$$\begin{aligned}
 coli = & \beta_0 + \beta_1 day0 + \beta_2 day1 + \beta_3 day2 + \beta_4 day3 \\
 & + \beta_5 day4 + \beta_6 day5 + \beta_7 day6 + \beta_8 day7 \\
 & + \beta_9 WT + \beta_{10} diff + \beta_{11} YR \quad (式3)
 \end{aligned}$$

最小二乗法により切片 β_0 ならびに β_1 から β_{11} までの各係数を地点ごとに決定した後、モデルの解釈を簡便なものとし、予測性を向上させるため、赤池情報基準(Akaike's Information Criteria, AIC)の値が最少となるようにステップワイズ変数減少法により独立変数を減数させ、各地点の最終的な重回帰モデルとした。

5) 重回帰モデルに基づく将来予測

得られた最終的な重回帰モデルをもとに、線形予測により2020年と2027年における各地点の大腸菌群数を求めた。計算は、水温が最低となる冬季、平均値とな

る春季および秋季、最高となる夏季とし、当日ならびに2日以上前には降水がなく、前日にそれぞれ0 mm、3 mm、10 mmの降水があった場合の全9パターンとした。なお、 YR は同年であっても季節により異なる値を取るため、各水温条件に対応するものとし、春季および秋季における大腸菌群数は個別の計算結果の平均とした。重回帰モデルの構築と将来予測に関する一連の計算には統計学的処理ソフトウェアであるR ver.3.2.3[6]を用いた。

III 結果

1) 測定された大腸菌群数

各地点において測定された大腸菌群数を箱ひげ図により図2で示す。箱の下端と上端は第1四分位数($1Q$)と第3四分位数($3Q$)であり、箱の中央線は中央値($2Q$)を示す。ひげの下端は $1Q - 1.5 \times (3Q - 1Q)$ 、ひげの上端は $3Q + 1.5 \times (3Q - 1Q)$ で計算される最小値および最大値であり、最小値、最大値からの外れ値は白丸で示した。

寝屋川水系に属する地点3から9、および同水系の影響を強く受ける地点12の中央値は $7.5 \times 10^3 \sim 2.3 \times 10^4$ MPN/dLの範囲にあり、それ以外の地点における中央値 $7.9 \times 10^2 \sim 4.1 \times 10^3$ MPN/dLと比べて値が大きく、これら地点では大腸菌群数が多かった。また、地点2、3を除くと外れ値が測定されているが、その多くは四分位数から予想される最大値の上方にプロットされた。

2) 水温の平年値に関する式

各地点において水温の平年値 WT を求める式のパラメータを表2で示す。最小二乗法による回帰係数は最小でも地点4の0.872であることからすべての地点で高

表 2 水温の平年値を与える式のパラメータ

	地点番号																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
回帰分析の結果																					
β	18.9	19.3	20.4	19.5	19.7	21.1	21.9	20.2	20.7	18.0	18.5	18.9	18.1	19.2	18.9	18.7	19.1	19.5	19.6	21.0	18.2
$\sin\theta$ の係数 α_1	-5.2	-5.1	-4.5	-4.6	-4.9	-4.5	-4.1	-4.7	-5.2	-5.5	-5.4	-5.4	-5.5	-6.2	-5.7	-6.1	-5.8	-5.7	-5.9	-5.1	-5.5
$\cos\theta$ の係数 α_2	-9.0	-7.7	-7.4	-8.2	-7.8	-7.2	-6.8	-8.1	-7.5	-9.0	-8.7	-8.7	-8.5	-6.4	-8.2	-7.2	-7.6	-7.4	-7.6	-6.7	-8.6
r^2	0.946	0.946	0.944	0.872	0.941	0.947	0.914	0.932	0.912	0.962	0.957	0.956	0.965	0.944	0.949	0.952	0.958	0.948	0.939	0.929	0.968
変換後の係数																					
A	10.4	9.2	8.6	9.4	9.2	8.5	7.9	9.4	9.2	10.5	10.2	10.2	10.1	8.9	10.0	9.4	9.6	9.3	9.6	8.4	10.2
α [°]	-59.8	-56.4	-58.5	-60.6	-57.9	-58.0	-59.0	-59.7	-55.2	-58.7	-57.9	-58.0	-57.2	-46.3	-55.3	-50.0	-53.0	-52.4	-52.3	-52.4	-57.5
極小となる日 [月/日]	3/2	2/27	3/1	3/3	2/28	2/28	3/1	3/2	2/25	3/1	2/28	2/28	2/27	2/16	2/26	2/20	2/23	2/23	2/23	2/23	2/28
極小時の水温 [°C]	8.5	10.0	11.8	10.1	10.5	12.6	14.1	10.8	11.6	7.5	8.2	8.6	7.9	10.2	8.9	9.2	9.5	10.2	10.0	12.6	8.0
極大となる日 [月/日]	9/1	8/28	8/30	9/1	8/30	8/30	8/31	9/1	8/27	8/31	8/30	8/30	8/29	8/18	8/27	8/22	8/25	8/24	8/24	8/24	8/29
極大時の水温 [°C]	29.3	28.5	29.0	28.9	29.0	29.6	29.8	29.5	29.9	28.6	28.7	29.1	28.2	28.1	28.9	28.1	28.7	28.8	29.2	29.4	28.4

い相関を示した。以降に続く重回帰モデルには大腸菌群数を計測した日における水温を、*WT* と *diff* に分離して投入した。

3) 重回帰モデルに投入予定の独立変数と大腸菌群数との相関

表 3 は *day0* から *day7*、*WT*、*diff* ならびに *YR* と *coli* 間における相関係数を地点ごとに示したものであり、太字のものは相関分析により危険率 5%水準で有意であったことを意味する。比較のため、対数変換をしていない当日から 7 日前の降水量と水温の実測値についても *coli* との相関係数を求めた。*day1* について、大腸菌群数との間で有意な相関関係を示したのは地点 20 を除く全地点であり、相関係数を対数変換しなかった場合と比較しても *day1* でより大きくなった。*day2* は、対数変換することで有意な相関を示した地点数は、しなかった場合の 8 から 10 へと増加し、地点 21 以外は対数変換することで相関係数も大きくなった。ただし *day0* は、有意な相関を示す地点数は、しなかった場合の 5 から対数変換後の 3 へと減少し、地点 14 以外は相関係数も小さくなった。3 日前から 7 日前の降水量については対数変換の有無に関わらず有意な相関関係を示す地点は少なかった。

水温は、実測値では全 21 地点のうち 2 地点で有意な相関が見られたが、*WT* ならびに *diff* へ分離することで、いずれか、あるいは両方が有意な相関を示す地点数は 7 地点まで増加した。*YR* は、21 地点中 8 地点で大腸菌群数と有意な負の相関が見られた。

重回帰モデルの構築に先立ち、共線性をもつ独立変数を排除するために投入予定の全 11 独立変数間の相関係数を比較した。最小は地点 9 の *day2* と *diff* 間で見られた-0.371、最大は地点 20 の *diff* と *YR* 間における 0.368 であり、重回帰モデルに投入しようとした独立変数間の相関は強くはなく、重回帰モデルには全 11 変数を独立変数として投入することとした。

4) 重回帰モデルとステップワイズ減少法による最適化

地点毎に全独立変数を投入した重回帰モデルを作成し、そこから AIC に基づくステップワイズ減少法により

独立変数の削減を行った。各地点におけるステップワイズ減少法適用後の重回帰モデルについて、採用された独立変数の回帰係数、自由度調整済み回帰係数 (*adj.r²*)、第 1、第 2 自由度 (*df1*、*df2*)、*F* 値と回帰モデルの有意確率について表 4 で示す。表中、回帰係数にアンダーラインのあるものは偏回帰係数の検定によって危険率 5%水準で有意であるとされたことを意味し、空白欄はステップワイズ減少法により脱落した独立変数であることを示す。

各地点の重回帰モデルは、すべて有意なモデルとされたが、地点 3、4、6、7、10 では *adj.r²* が 0.250 以下であり、妥当性に乏しいモデルとなった。降水に関しては全地点で *day1* が独立変数として採用され、さらに地点 3 と 9 以外では *day0*、*day2*、*day3* のうち 1 つ以上が独立変数として採用された。各地点において採用された独立変数間の回帰係数の大きさを比較すると、ほとんどの地点で *day1* にかかる係数が最大となり、0.303 ~ 1.011 の範囲にあった。これは前日に 3 mm の降水を観測した場合、大腸菌群数は 1.4 ~ 3.0 倍に増加し、10 mm の降水であれば 2.0 ~ 10.4 倍となることを意味する。一方、地点 5 および 20 では *day0* の係数が最大となり、地点 10 では *day2* の係数が最大となった。これらの地点では、同じ量であっても、測定当日や 2 日前の降水量が、前日の降水量よりも大腸菌群数の数に強く影響することが示された。

一方、*WT* と *diff* に分割された水温に関しては 14 地点で、*YR* については 16 地点でそれぞれ有意な独立変数として採用されたに過ぎず、また、同地点のもので比較しても、それらの回帰係数が *day0* から *day7* にかかる回帰係数よりも絶対値が大きくなるものはほとんど見られなかった。

5) 重回帰モデルの線形予測に基づく将来予測

重回帰モデルの線形予測に基づき、将来の 2020 年と 2027 年における各地点の大腸菌群数を計算し、結果については各類型の基準値にならない、 ≤ 50 MPN/dL、 ≤ 1000 MPN/dL、 ≤ 5000 MPN/dL、 >5000 MPN/dL をそれぞれ AA、A、B、C に分類して表 5 に示した。中には

表 3 大腸菌群数と独立変数との相関係数

項目	地点番号																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
day0	0.018	0.228	0.137	0.159	0.204	0.014	-0.065	0.039	-0.045	0.069	0.144	0.255	0.036	0.357	0.225	0.122	0.063	0.016	-0.007	0.259	0.072
day1	0.276	0.429	0.292	0.360	0.293	0.356	0.354	0.509	0.381	0.253	0.458	0.339	0.286	0.516	0.507	0.576	0.496	0.399	0.460	0.460	0.342
day2	-0.033	0.315	0.160	0.195	0.160	0.246	0.237	0.169	0.120	0.302	0.268	0.280	0.226	0.065	0.273	0.341	0.428	0.486	0.504	-0.004	0.411
day3	-0.191	0.144	-0.054	-0.029	0.009	-0.048	0.013	-0.049	-0.029	0.205	0.220	0.018	0.164	0.068	0.005	0.145	0.252	0.241	0.223	-0.030	0.305
day4	-0.055	0.132	-0.060	-0.040	-0.073	0.051	-0.033	0.041	0.117	0.103	0.112	-0.079	0.029	-0.091	-0.002	0.089	0.071	0.028	0.081	0.231	0.043
day5	0.158	0.025	0.036	0.150	-0.016	0.119	0.087	0.099	0.133	0.073	0.108	0.247	0.129	-0.132	-0.001	0.016	0.040	0.040	-0.003	0.147	0.089
day6	0.157	-0.034	-0.018	0.171	0.070	0.072	-0.026	0.028	0.196	0.175	0.093	0.262	0.145	0.038	0.092	0.072	0.021	0.046	-0.038	0.021	0.148
day7	0.226	-0.067	-0.080	-0.051	-0.089	0.109	-0.073	0.135	-0.032	0.078	0.048	-0.022	0.022	0.054	-0.039	0.015	-0.112	-0.097	-0.206	-0.020	-0.080
WT	0.352	0.245	0.233	0.029	0.266	0.225	0.127	0.128	0.075	0.231	0.245	0.055	0.340	-0.017	0.158	0.146	0.116	0.251	0.006	0.292	0.051
diff	-0.037	-0.022	-0.123	0.094	-0.142	-0.112	-0.200	-0.304	-0.376	-0.134	0.037	-0.033	0.106	0.087	0.010	-0.034	-0.023	-0.088	-0.025	-0.140	-0.099
YR	-0.600	-0.203	-0.165	-0.095	-0.303	-0.154	-0.005	-0.335	-0.337	-0.217	-0.212	-0.215	-0.263	0.205	-0.282	-0.217	-0.269	-0.141	-0.117	0.009	-0.272
当日の降水量	-0.010	0.193	0.186	0.296	0.282	0.153	0.042	0.155	-0.012	0.095	0.138	0.372	-0.044	0.330	0.179	0.106	0.097	0.072	0.034	0.277	0.120
1日前の降水量	0.213	0.410	0.167	0.310	0.207	0.283	0.255	0.347	0.311	0.231	0.365	0.200	0.264	0.456	0.445	0.532	0.392	0.348	0.427	0.162	0.240
2日前の降水量	-0.027	0.253	0.126	0.064	0.104	0.255	0.181	0.145	0.062	0.240	0.212	0.221	0.205	0.078	0.252	0.293	0.311	0.406	0.463	0.004	0.411
3日前の降水量	-0.146	0.109	-0.064	-0.032	0.025	-0.098	0.036	-0.035	-0.018	0.217	0.201	-0.018	0.206	0.058	0.015	0.127	0.194	0.170	0.206	-0.024	0.215
4日前の降水量	-0.049	0.100	-0.052	0.002	-0.024	0.070	-0.059	0.016	0.157	0.126	0.056	-0.042	-0.048	-0.064	0.035	0.060	0.058	0.034	0.035	0.210	-0.006
5日前の降水量	0.272	0.063	0.018	0.142	0.003	0.154	0.111	0.132	0.163	0.150	0.150	0.312	0.204	-0.062	0.047	0.078	0.084	0.107	0.048	0.107	0.136
6日前の降水量	0.270	0.009	0.024	0.244	0.105	0.111	0.023	0.079	0.282	0.185	0.095	0.363	0.158	0.031	0.110	0.096	0.036	0.086	0.004	0.017	0.177
7日前の降水量	0.136	-0.034	-0.108	-0.068	-0.080	0.056	0.000	0.126	-0.036	0.103	0.060	-0.032	-0.001	0.031	-0.047	0.039	-0.088	-0.079	-0.169	0.009	-0.073
水温	0.334	0.233	0.197	0.061	0.223	0.193	0.063	0.045	-0.039	0.201	0.247	0.047	0.354	0.004	0.157	0.135	0.109	0.224	0.000	0.243	0.033

表 4 各地点におけるステップワイズ減少法適用後の重回帰モデルの係数および各種統計量

	地点番号																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
独立変数																					
β	8.805	7.158	8.832	8.445	8.668	7.805	8.247	9.643	9.423	7.056	7.485	8.811	7.129	5.999	7.268	6.785	8.280	5.881	6.121	3.013	8.164
day0		0.617			0.577						0.341	0.480			0.414	0.218	0.286	0.305		1.201	0.269
day1	0.433	0.719	0.476	0.804	0.415	0.711	0.934	1.009	0.933	0.331	0.714	0.498	0.303	0.997	0.824	1.011	0.966	0.845	0.982	0.584	0.486
day2	0.292	0.640		0.294	0.350	0.436	0.402	0.312		0.337	0.336	0.450	0.236		0.405	0.467	0.511	0.650	0.745		0.426
day3	-0.259									0.169	0.255			0.120	0.191			0.307	0.275		0.333
day4		0.275																		0.216	0.526
day5												0.206		0.153	-0.176					0.381	0.141
day6	0.224			0.418					0.377	0.180		0.374									0.150
day7		-0.169					0.332														
WT	0.060	0.046	0.051		0.081	0.076				0.032	0.039		0.053		0.026	0.022		0.067		0.129	
diff	0.209	0.121		0.150						-0.344	0.119		0.111						-0.138		-0.252
YR	-0.244	-0.075			-0.120	-0.083			-0.131	-0.138	-0.071	-0.068	-0.074	-0.078	0.088	-0.086	-0.057	-0.077		0.075	-0.078
各種統計量																					
r^2	0.594	0.401	0.133	0.233	0.334	0.244	0.160	0.390	0.359	0.250	0.391	0.370	0.305	0.402	0.402	0.447	0.450	0.433	0.411	0.311	0.403
adj r^2	0.540	0.372	0.103	0.177	0.276	0.192	0.132	0.348	0.314	0.221	0.359	0.314	0.273	0.372	0.382	0.429	0.422	0.398	0.393	0.260	0.359
F-value	10.88	13.64	4.38	4.18	5.72	4.68	5.71	9.27	8.11	8.45	12.04	6.69	9.48	13.07	20.57	24.73	15.89	12.24	22.99	6.12	9.17
degree of freedom (df1,df2)	(7,52)	(8,163)	(2,57)	(4,55)	(5,57)	(4,58)	(2,60)	(4,58)	(4,58)	(6,152)	(8,150)	(5,57)	(7,151)	(5,97)	(5,153)	(5,153)	(5,97)	(6,96)	(3,99)	(7,95)	(7,95)
	***	***	*	**	***	**	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

地点 3 などのように 2020 年、2027 年ともに C とされた所や地点 7 などのように 2020 年と 2027 年で予測が共通した所も見られたが、半数以上の地点では前日降水量の増加、あるいは冬季から夏季にかけて水温が上昇することで大腸菌群数は増加し、A から B、B から C への変化が見られるとされた。水温を 1 年のうちで最も平均的な春・秋季、前日に降水がないとした場合、1000 MPN/dL、5000 MPN/dL を超える地点数は、2020 年では 21 地点中それぞれ 12 地点、3 地点となった。同様に 2027 年では 10 地点、3 地点となり、大阪市内河川において大腸菌群数は緩い低下傾向にあるものと予測された。なお、参考として 2007 年における実測値とモデル計算値について比較した。実測値の平均値は各月の大腸菌群数を対数変換したうえで求め、前述の AA から C の基準に当てはめて表示したが、地点 9、17、21 の 3 地点以外は実測値とモデル計算値は同じカテゴリーに分類される結果と、ほぼ良好な当てはまりとなった。

IV 考察

時系列データの解析は、例えば季節変動を除去したうえで大気中に排出される二酸化炭素濃度の長期

的なトレンドを解析するといった場合に、自己回帰和分移動平均モデル (ARIMA; AutoRegressive Integrated Moving Average model) などを用い、季節変動成分、トレンド成分、ノイズ成分の 3 成分に分離させた上で検討されることがある[7]。同様に大腸菌群数の変動も時系列データとして 3 成分に分解し、このうちノイズ成分を取りだして降水量との関係を考察すれば十分と思われるが、ARIMA では 1 季節サイクル(1 年)における測定数は常に固定であることが条件であるので、今回のように年によって測定回数異なるケースへの適用は不可である。本研究では重回帰モデルを用いた解析を行ったが、今回は ARIMA モデルの考え方にない、季節変動成分を WT で、長期的なトレンド成分を YR で取り除いたうえで大腸菌群数と降水量 (day0, day1, ..., day7) との関係の解明を試みた。この方法については、特にトレンド成分に相当する YR が直線で近似されてしまうために必ずしも最適なものとはいえない。しかしながらモデル適用条件を満たした地点 2 において ARIMA による解析を平行して実施し、降水量とノイズ成分との対応関係について回帰分析を行ったが、有意な相関関係は見られず、仮に全地点で ARIMA による解析が可能であったとして

表 5 大腸菌群数の将来予測結果

年	季節	前日降水量 [mm/日]	地点番号																				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2020	冬季	0	A	A	C	C	B	B	B	B	B	A	A	B	C	B	A	A	A	A	A	A	A
		3	A	A	C	C	B	B	B	B	A	A	B	B	C	B	A	A	A	A	B	A	A
		10	A	B	C	C	C	B	B	B	A	A	B	B	C	B	A	A	B	B	A	C	A
	春・秋季	0	A	B	C	C	B	B	C	B	B	A	B	B	C	C	A	B	B	B	B	B	B
		3	A	B	C	C	B	C	C	B	B	A	B	B	C	C	B	B	B	B	B	C	B
		10	A	B	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	C	C	B	B	B	C	B	C	B
	夏季	0	A	B	C	C	B	C	C	C	C	A	B	C	C	C	B	B	C	B	C	B	B
		3	A	B	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	B	B	C	C	C	C	B
		10	A	C	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	B
2027	冬季	0	AA	A	C	C	A	A	B	A	A	A	A	B	C	B	A	A	A	A	A	B	A
		3	AA	A	C	C	B	B	B	A	A	A	A	B	C	B	A	A	A	B	A	B	A
		10	AA	A	C	C	B	B	B	A	A	A	B	B	C	B	A	A	A	B	A	C	A
	春・秋季	0	AA	A	C	C	A	B	C	B	B	A	B	B	C	C	A	A	B	B	B	B	A
		3	AA	B	C	C	B	B	C	B	A	A	B	B	C	C	A	A	B	B	B	C	A
		10	AA	B	C	C	B	C	C	B	A	A	B	B	C	C	A	B	B	C	B	C	A
	夏季	0	AA	B	C	C	B	B	C	B	B	A	B	B	C	C	B	B	B	B	C	C	B
		3	AA	B	C	C	B	C	C	B	B	A	B	B	C	C	B	B	B	C	C	C	B
		10	A	B	C	C	C	C	C	B	B	B	C	B	C	C	B	B	C	C	C	C	B
参考	2007年計算値の平均	C	C	C	C	C	C	C	C	A	B	C	C	B	B	B	B	B	B	B	A	B	
	2007年実測値の平均	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	B	B	B	B	C	B	B	A	C	

* AA:≤50 MPN/dL、A:≤1000MPN/dL、B:≤5000MPN/dL、C:>5000MPN/dL

も降水との関係を解析できなかつた可能性もあり、一定の結果が得られた重回帰モデルによる今回の解析は有用であるものと思われる。

重回帰モデルに投入した降水量は対数変換した値とした。予備的に *coli* と降水量との相関について検討したところ、対数変換しなかつた場合よりも対数変換した場合で相関係数が高かつたためである(表 3)。このことは降水量と大腸菌群数との関係は直線的ではなく、むしろ降水量の増大とともに大腸菌群数の増加率は減速するといった対数関数的な増加特性を反映するものであろう。こうした増加特性は、降水による下水処理場からの越流や地面からのフラッシュアウトによる河川水中の大腸菌群数増加と、降水量増大に伴う希釈効果のバランスに関係するものと考えられ、降水と大腸菌群の排出パターンについては古川ら(2015)も同様の指摘をしている[8]。

ステップワイズ減少法適用後の重回帰モデルでは、 $adj.r^2$ は多くの地点で 0.25 より大であったが、この値が 0.25、すなわち相関係数の絶対値が 0.5 を下回る地点が寝屋川水系を中心に見られた。もともと寝屋川水系に属する地点 3~9、およびこの水系の影響を強く受ける下流側の地点 12 は他の水系と比較して大腸菌群数が高く検出される傾向にあり、最大値も極めて高い(図 2)。これは流域人口に対して河川水量が少なく、人為的な影響が強く及ぶためである。従って、寝屋川水系は大腸菌群数と降水量との間に明瞭な関係があり、しかも重回帰モデルにおいても高い相関関係が見られると予想していたが、結果は異なつた。寝屋川水系は大阪市の上流地域の影響も強く受け、河川の流路を横切るように運河もあることから水の流れが複雑であり、大腸菌群数は様々な要因に左右されると思われ、今回用いたのとは異なるアプローチでの解析が必要とされるであろう。

重回帰モデルに採用された独立変数に着目すると、地点 20 を除く全地点で前日の降水量 $day1$ が有意な独

立変数として採用され、さらに多くの地点で $day0$ や $day2$ も有意な説明変数とされた。採用された独立変数の回帰係数を比較すると、 $day1$ では全地点の平均が 0.707 であるのに対し、 $day0$ および $day2$ ではそれぞれ 0.444、0.417 であり、同量の降水であっても当日あるいは 2 日前の降水よりも前日の降水が大腸菌群数に対しより強く影響することが示唆された。前日降水量である $day1$ が最も強い影響を及ぼすのは、当日に降水があつたとしても降水が下水処理施設などを経て河川に到達するまでのタイムラグがあることや、河川に流入した大腸菌群が河川全体に拡散するまでに一定の時間を要するためと考えられる。鯉淵ら(2005)は東京のお台場における大腸菌数について、当日降水量よりも約 3 日前までの降水量の影響を強く受ける特徴について報告しており、やはり採水地点まで細菌が到達するのに時間を要するためとしている[9]。ただし、地点 5 ならびに地点 20 では $day1$ よりも $day0$ の回帰係数が大きかつた。地点 5 は河川水量が非常に少なく、その上流における集水域の面積も少なく、地点 20 では下水放流口の直下であり、かつ潮流の速い大阪湾に面していることから水の交換が早く、翌日まで大腸菌群数が維持されないため、それぞれ当日降水量の影響がより強く反映される理由であろう。一方、地点 10 では $day1$ よりも $day2$ の回帰係数が大きいが、この地点は広大な集水域を抱える淀川からの河川水が流れるため、上流部より排出される大腸菌群の影響がより長時間にわたり影響し続けるためと考えられる。比較的広い集水域を有する点で同等の条件にある地点 2 においても $day2$ の回帰係数が 0.597 であり、 $day1$ の 0.769 に近接しているのも、上流部の影響が長時間にわたる特徴を反映したものであると思われる。

線形予測による 2020 年と 2027 年の大腸菌群数の計算値に関し、重回帰モデルに YR が説明変数として採用されなかつた、あるいは回帰係数が正となつた地点 3、4、

7、13、14、18、19を除くと、水温ならびに降水条件に関わらず2020年と比較して2027年では大腸菌群数の予測値は多くの地点で減少が期待される結果となった。また、地点1では2027年に<50 MPN/dLとなる可能性も示された。一方で地点3、4、13では水温や降水の条件に関わらず2027年においても5000 MPN/dLを下回ることはないとされた。地点13では大腸菌群数増加の原因は下水道処理施設へ行かずに直接河川に混入する雨水であることがわかっており、越流水対策は2015年に完了している[10]。今回の重回帰モデルにはその越流水対策の効果が反映されていないため、将来の大腸菌群数は予測結果とは異なると予想される。また、その上流である地点21もこの越流水対策の恩恵を受ける地点であるために、今後は予測値よりも大腸菌群数が減少すると考えられる。なお、地点3と4は重回帰モデルの $adj.r^2$ が低く、そもそもモデルの妥当性に問題があった地点であり、前述の通り寝屋川水系の大腸菌群数として別のアプローチで解析したほうが望ましいとされる地点である。

以上をまとめると、結論は以下の3点に要約される

- ・大阪市内河川では降水量が大腸菌群数を決定する主たる要因であった。
- ・おおむね2日前までの降水量が大腸菌群数を増加させる要因とされたが、とりわけ前日の降水量に最も影響される地点が多かった。
- ・一部の地点を除き10年後の2027年には大腸菌群数はある程度減少しているものと予想される。

参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局. 平成27年度公共用水域水質測定結果. <http://www.env.go.jp/water/suiiki/>

- 2) 芦立德厚: 水質環境基準項目としての大腸菌群の評価. 用水と廃水 1988; **30**(3): 229-238.
- 3) 環境省: 中央環境審議会水環境部会(第20回)議事録. <http://www.env.go.jp/council/09water/y090-20a.html>, 2009
- 4) 社団法人日本工業用水協会, 財団法人日本規格協会: JIS K0350-20-10:2001 用水・排水中の大腸菌群試験方法., 2001
- 5) 気象庁. 過去の気象データ検索. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=62&block_no=47772&year=&month=&day=&view=
- 6) R Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2015
- 7) Sun, Lynyan, Wang, Muhong: Global warming and global dioxide emission: An empirical study. *Journal of Environmental Management* 1996; **46**(4): 327-343.
- 8) 古川隼士, 野中尋史, 平岡透, 高見徹, 亀野辰三: 大分川におけるふん便性汚染に関する細菌学的調査. 水環境学会誌 2015; **38**(6): 173-180.
- 9) 鯉淵幸生, 小野澤恵一, 中村格之, 原本英二, 片山浩之, 古米弘明, 佐藤慎司, 岡安章夫, 磯部雅彦: 東京湾お台場海浜公園における雨天時合流式下水道越流水の影響調査. 海岸工学論文集 2005; **52**: 886-890.
- 10) 谷口正典: 大阪市下水道事業について. 水坤 2017; **53**: 38-41.

(WEB サイトの内容は2017年7月21日に確認した)