

<調査報告>

## 吉野川流域圏における NOx の二次物質について

苗村 晶彦\*, 奥田 知明\*\*, 大河内 博\*\*\*

Dynamics of NOx Secondary Substances in the Yoshino River basin area

Akihiko NAEMURA, Tomoaki OKUDA and Hiroshi OKOCHI

\* Department of General Studies and Liberal Arts, Toita Women's College, 2-21-17 Shiba, Minato-ku, Tokyo 105-0014, Japan

\*\* Faculty of Science and Technology, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

\*\*\* School of Creative Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0072, Japan

### Abstract

We analyzed O<sub>3</sub> concentrations in the middle reaches of the Yoshino River, class A river in Shikoku, and investigated river water quality data from the headwaters to the mouth of the river. The O<sub>3</sub> concentration in the atmosphere was 27.9 ppb, 0.85 times higher than that in Yonago, Tottori Prefecture, during the same period, and the highest value was assumed to be transboundary pollution from the Asian continent. The concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, which is linked to O<sub>3</sub> as a secondary substance, was not low at 18.4 μM in the headwaters. The headwaters were characterized by very low K<sup>+</sup> concentrations due to the presence of mafic schist, Sanbagawa metamorphic belt. Thus, it is important to accumulate data on the watershed area in relation to the atmospheric and aquatic environments.

**Key words:** Yoshino River basin, transboundary pollution, O<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Sanbagawa metamorphic belt

### 1.はじめに

近年、アジア大陸からの越境汚染の報告が散見される。わが国において高O<sub>3</sub>濃度の発生要因として、中国起源を中心とした東アジアからの越境大気汚染の寄与が指摘されている<sup>1)</sup>。2007年5月8~9日には、九州北部から関東にかけての20都府県で光化学オキシダント注意報が発令されたが、この時1974年の観測以来、新潟県および大分県において観測史上初めて注意報が発令された<sup>2)</sup>。これは中国大陆東岸で発生した

\* 戸板女子短期大学総合教養センター, 〒105-0014 東京都港区芝2-21-17

\*\* 慶應義塾大学理工学部, 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

\*\*\* 早稲田大学創造理工学部, 〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1

汚染物質が西風によって運ばれ、日本上空の広い範囲に飛来したことが原因と考えられている<sup>2)</sup>。2019年5月23日には島根県、鳥取県および宮崎県で観測史上初めて光化学オキシダント注意報が発令され、年間発令都府県数は最多の33都府県を更新した<sup>3)</sup>。鳥取県において観測されたオキシダントは移流により運ばれたものと推測され、大陸からの越境汚染の可能性が指摘されている<sup>4)</sup>。

越境汚染の陸水への影響として Miyazako *et al.*<sup>5)</sup>は、島根県内の斐伊川流域で中国からの越境窒素汚染があることを報告している。光化学オキシダント注意報の主因であるO<sub>3</sub>と窒素汚染の主因のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>は、NO<sub>x</sub>からの二次物質として連動することが報告されており<sup>6)</sup>、結果的に越境汚染の影響が光化学オキシダント注意報にも繋がっていると考えられる。大気環境や水環境のそれぞれの分野で研究が深められるが、それを結びつける研究が極めて稀であり、「山・川・海」を通じて広域に渡る環境把握の研究が重要である。山に降雨がもたらされ、それが河川の水源とされ、流域の支流を集め下流へと量を増して、海へと流出される。そこで、NO<sub>x</sub>からの二次物質の動態から「山」と「川」を繋げる探求を模索することには価値がある。

河川の化学成分の供給源を整理すると、①降水、②大気中からの降下物、③岩石・土壌などの地質的要因、④鉱泉・温泉、⑤人間活動による排出物、が挙げられる<sup>7)</sup>。河川の源流に相当する溪流水質については、特に①および②の影響が反映されやすい場合がある。その溪流水中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は平水時において時間代表性がある<sup>8),9)</sup>。また、溪流水中のCl<sup>-</sup>濃度についてはその変動が小さく特に時間代表性があることが報告されている<sup>10),11)</sup>。河口域については多岐にわたる要因で水質の濃度が変動するが、ある日時のデータを採取し、一例を考察することには意義がある。特に水量が豊富な河川においては変動も小さいことが予測される。

2021年3月30日、国土交通省は全国109の一級河川、12の二級河川で、遊水地や森林整備を組み合わせた「流域治水プロジェクト」を公表した。今後も、他の二級河川で公表されていくだろうが、肝心なのは河川流域の住民の参加であり、流域圏に係わる環境を粒さに知り、理解を深め、多様な視点を「流域治水」に反映させることが極めて重要である<sup>12)</sup>。

本研究では、「山・川・海」を流域圏と捉え、その指標としてNO<sub>x</sub>からの二次物質を軸に論じた。“四国三郎”の異名がある一級河川・吉野川は、その異名ともなる暴れ川の代表格でもあり、もともと水量が豊富な日本における大河ともいえる。徳島では、源流の土佐藩で降った雨による洪水を「土佐水」と呼び、藩内に降った雨による洪水を「お国水」と呼んだが、土佐水は不意の洪水でお国水に比べて被害が大きかったといわれる<sup>13)</sup>。そこで、アジア大陸から四国へ越境汚染の影響を考える判断材料として、高知県および徳島県に跨る一級河川・吉野川の源流域から上流を経て下流までの流域圏において調査を行った。大気環境として吉野川中流域におけるO<sub>3</sub>濃度の最高値や季節変動を解析し、源流から河口域にかけて4地点における吉野川本流のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度を中心とした水環境について考察した。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度以外にも他のイオンや酸化還元電位など水環境に係わるデータを公表し、さまざまな角度からの流域圏を考える指標を示した。

## 2.研究方法

調査を行ったのは徳島県および高知県に跨る一級河川・吉野川の流域圏である。吉野川は、幹川流路延長194km、流域面積3,750km<sup>2</sup>で、水源は瓶ヶ森(標高1,897m)となり、中・下流部は中央構造線に沿って流れ、わが国では13番目に長い河川となる。流域形状係数(流域面積を流路延長の2乗で除した値)<sup>14)</sup>では、日本一広い関東平野の利根川は0.162、吉野川は0.0996となり細長い流域の河川だと判断される。

$O_3$  濃度の解析の対象地は、吉野川流域の池田総合体育馆(北緯 34.0267 度, 東経 133.7983 度, 標高 120 m)とした。また、1 年という単位は太陽を中心として地球が公転する周期だが、濃度の季節変動も太陽を中心として考えることがよりよく解析しやすいと考えられ<sup>15),16)</sup>,  $O_3$  濃度の変動解析は太陽黄経 15 度毎による太陽暦の二十四節気別で行った。また二十四節気は毎年同じ時季に同じ節気が来ることや、節気の間隔が約 15 日と一定しており、半月毎の季節変化に対応できているので、農業や生活の目安として便利なものである<sup>15)</sup>。解析した時期は、2015 年 3 月 21 日(春分点)から 2018 年 3 月 20 日までの 3 年間とした。解析に使用したデータは各自治体が設置している大気常時監視測定局の 1 時間値の測定結果とし、欠損値は除外して解析を行い、 $Ox$  のほとんどは  $O_3$  であるので  $O_3$  と表記した。また、越境汚染が報告される鳥取県米子との同時期の解析結果<sup>4)</sup>との比較を行った。

河川については源流(白猪谷), 早明浦ダム下流, 四国中央橋および吉野川第十堰で、いずれも吉野川本流で採取した。源流(**Fig.1**)の地質は三波川帯に属し、苦鉄質片岩である。三波川帯の地質に特有の深いグリーンの渓流が反映していると考えられる。河口として、吉野川第十堰(**Fig.2**)を選定したが吉野川第十堰における可動堰を建設する計画に対して 2000 年 1 月 23 日に徳島市の住民投票を行うなど世間の関心も集まる場所となっている。



Fig.1 Headwater of Yoshino River (Photo credit: A. Naemura; 27 August 2019)

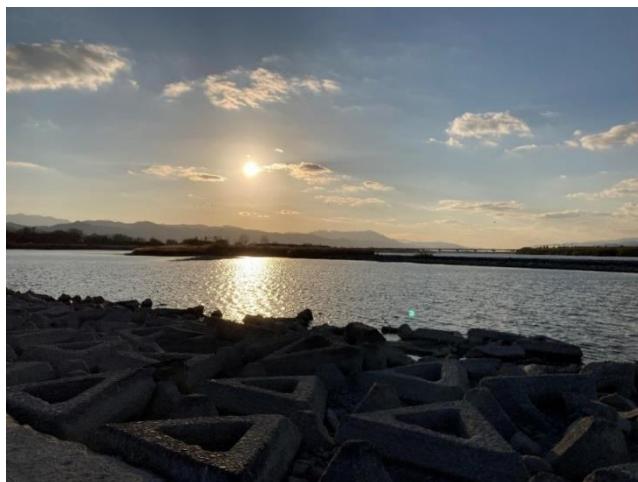


Fig.2 Yoshino River Tenth Weir (Photo credit: A. Naemura; 28 December 2021)

$O_3$  濃度の解析の対象地は、吉野川流域の池田総合体育馆(北緯 34.0267 度, 東経 133.7983 度, 標高 120 m)とした。また、1 年という単位は太陽を中心として地球が公転する周期だが、濃度の季節変動も太陽を中心として考えることがよりよく解析しやすいと考えられ<sup>15),16)</sup>,  $O_3$  濃度の変動解析は太陽黄経 15 度毎による太陽暦の二十四節気別で行った。また二十四節気は毎年同じ時季に同じ節気が来ることや、節気の間隔が約 15 日と一定しており、半月毎の季節変化に対応できているので、農業や生活の目安として便利なものである<sup>15)</sup>。解析した時期は、2015 年 3 月 21 日(春分点)から 2018 年 3 月 20 日までの 3 年間とした。解析に使用したデータは各自治体が設置している大気常時監視測定局の 1 時間値の測定結果とし、欠損値は除外して解析を行い、 $Ox$  のほとんどは  $O_3$  であるので  $O_3$  と表記した。また、越境汚染が報告される鳥取県米子との同時期の解析結果<sup>4)</sup>との比較を行った。

源流(北緯 33.7693 度, 東経 133.2046 度, 標高 871 m)は 2019 年 8 月 27 日 16 時 10 分、早明浦ダム下流(北緯 33.7532 度, 東経 133.5562 度, 標高 250 m)は 2021 年 12 月 27 日 15 時 45 分、四国中央橋(北緯 34.0296 度, 東経 133.8292 度, 標高 76 m)は 2021 年 12 月 28 日 9 時 00 分および吉野川第十堰(北緯 34.1114 度, 東経 134.4573 度, 標高 1 m)は 2021 年 12 月 28 日 16 時 10 分に採取した。また、源流と同じ三波川帯の苦鉄質片岩の里川谷川(吉野川水系源流, 北緯 34.0250 度, 東経 133.8453 度, 標高 139 m)は 2021 年 12 月 28 日 10 時 15 分に採取した。現地にて源流を除いて東亜 DKK 社の酸化還元電位(MM-42DP)で 5 回測り、その平均値を算出した。採取した試料については、ADVANTEC 社のメンブランフィルター(ポアサイズ 0.45  $\mu\text{m}$ )で濾過した後、溶存成分については Dionex 社のイオンクロマトグラフィー(ICS-2100/1100)を用いて測定した。EC(電気伝導度)については HORIBA 社の LAQUAtwin を用いて測定した。また、硬度については、

$$\text{硬度} = \text{Ca}^{2+}\text{濃度} \times 2.5 + \text{Mg}^{2+}\text{濃度} \times 4.1 \quad (1)$$

として算出した<sup>17)</sup>。

### 3.結果および考察

### 3.1. 徳島県池田における $O_3$ 濃度

吉野川の中流域に位置する徳島県池田におけるO<sub>3</sub>濃度については、3年間の1時間値の全平均値は27.9 ppbとなっている。対照として、鳥取県米子の全平均値は32.9 ppbとなり<sup>4)</sup>、池田は米子と較べて0.85倍となっている。池田における1時間値の最高値としては、111 ppb(2015年5月28日15時および2017年5月30日16時)となっている。O<sub>x</sub>の環境基準は1時間値が60 ppb以下であるが、調査した期間において池田の1時間値は環境基準を越えているケースが多くある。また、その最高値は光化学オキシダント注意報レヴェル近くにまで達していることになる。

そこで、上記の最高値を NOAA HYSPLIT Model<sup>18)</sup>により作成した後方流跡線を示した(**Fig.3** および **Fig.4**)。2015年5月28日15時(協定世界時6時)の高度120mおよび200mについては、120時間前に中国と北朝鮮の上空約3,000mの気塊が日本海上を漂い、5月26日昼頃に、高度1000m以下となっている。この3年間の調査期間においては、米子における同時期のO<sub>3</sub>解析においても、最も高かった1時間値は2015年5月27日20時の110ppbであり<sup>4)</sup>、この時に越境汚染の影響が広く日本へ影響を及ぼした可能性が高い。2017年

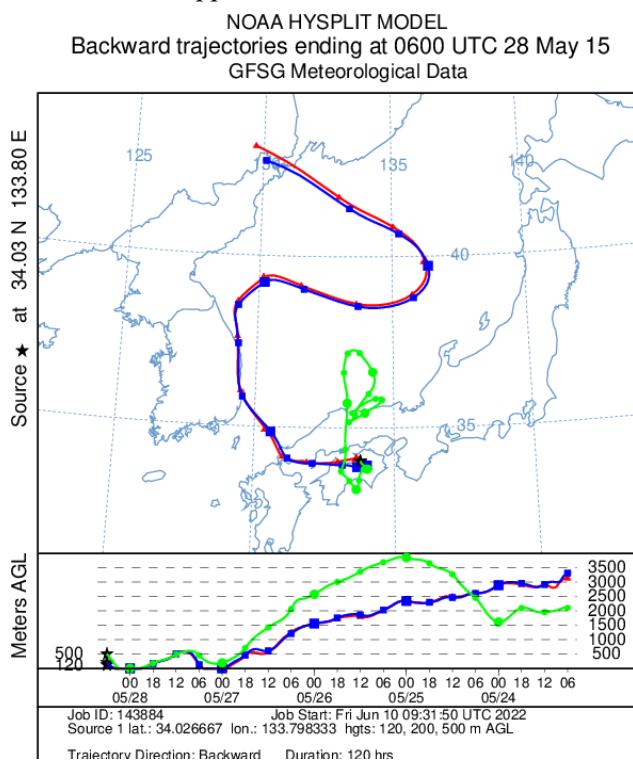


Fig.3 Backward trajectories analysis by NOAA HYSPLIT Model at Ikeda at 15:00 on May 28, 2015 (red: altitude 120 m, blue: altitude 200 m, green: altitude 500 m)

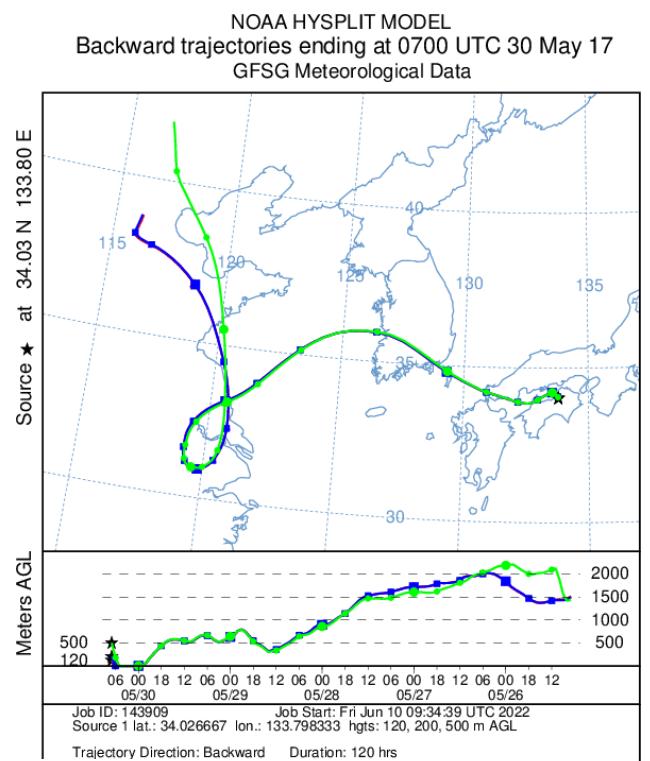


Fig.4 Backward trajectories analysis by NOAA HYSPLIT Model at Ikeda at 15:00 on May 30, 2017 (red: altitude 120 m, blue: altitude 200 m, green: altitude 500 m)

5月30日16時(協定世界時7時)については、いずれの高度においても、中国・南京から韓国を経て対馬から山口県を通過し、徳島県池田に到達している。

両日ともにアジア大陸の影響を受けて、瀬戸内海上を通過し、池田に到達していることがわかるが、近年ホットスポット的に岡山県で光化学オキシダント注意報が相対的に多く発令され<sup>19)</sup>、山陰側と合わせ、瀬戸内海沿岸等も注視すべきである。

池田における二十四節気の調査期間と、二十四節気別のO<sub>3</sub>濃度をTable 1に示し、池田および米子における二十四節気別の季節変動(3年間の平均)をFig.5に示した。池田においては、最高値は立夏の41.2 ppb、最低値は立冬の17.5 ppbとなっている。O<sub>3</sub>濃度は春季に高くなり、特に立夏の時季

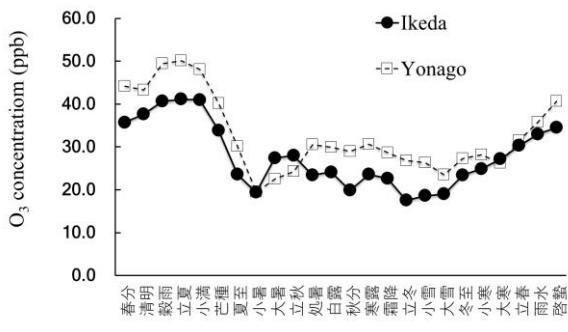


Fig.5 Seasonal variation of O<sub>3</sub> concentrations by the solar term at Ikeda and Yonago between 21 March 2015 and 20 March 2018.

けて濃度低下が見られた。

### 3.2. 吉野川本流における源流から吉野川第十堰の河川水質データ

吉野川における源流、早明浦ダム下流、四国中央橋および吉野川第十堰における電気伝導度および陰イオン濃度の結果をTable 2に、陽イオン、Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>比およびCa<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>比をTable 3に示した。源流の電気伝導度は56 μS/cmであり、同じ四国の大河川・四万十川源流の29 μS/cm(吉野川源流採取日の翌日に調査)<sup>20)</sup>と較べて約2倍となった。ちなみに、1999年夏の四万十川源流については28.3 μS/cmとの報告がある<sup>21)</sup>。源流のCl<sup>-</sup>濃度は、阿武隈川水系源流域の西白河の夏季調査では44.4 μMであり<sup>10)</sup>、その値よりも1.5倍低く、四国の大河川

Table 1 O<sub>3</sub> concentrations by the solar term at Ikeda between 21 March 2015 and 20 March 2018.

期間	二十四節気	2015年	2016年	2017年
3月21日～4月4日	春分	33.3 ppb	36.0 ppb	37.9 ppb
4月5日～4月19日	清明	34.8 ppb	37.5 ppb	40.6 ppb
4月20日～5月4日	穀雨	39.2 ppb	38.8 ppb	43.9 ppb
5月5日～5月20日	立夏	39.3 ppb	41.5 ppb	42.7 ppb
5月21日～6月5日	小滿	39.2 ppb	39.4 ppb	44.3 ppb
6月6日～6月20日	芒種	31.8 ppb	26.6 ppb	43.2 ppb
6月21日～7月6日	夏至	28.2 ppb	19.7 ppb	22.9 ppb
7月7日～7月22日	小暑	13.8 ppb	23.2 ppb	21.1 ppb
7月23日～8月6日	大暑	25.2 ppb	30.0 ppb	27.2 ppb
8月7日～8月22日	立秋	24.4 ppb	30.6 ppb	28.9 ppb
8月23日～9月7日	處暑	22.2 ppb	21.8 ppb	26.2 ppb
9月8日～9月22日	白露	23.4 ppb	20.7 ppb	28.2 ppb
9月23日～10月7日	秋分	23.8 ppb	15.5 ppb	20.4 ppb
10月8日～10月22日	寒露	26.1 ppb	20.8 ppb	23.9 ppb
10月23日～11月6日	霜降	23.3 ppb	22.4 ppb	22.2 ppb
11月7日～11月21日	立冬	15.5 ppb	17.7 ppb	19.3 ppb
11月22日～12月6日	小雪	19.8 ppb	18.9 ppb	17.2 ppb
12月7日～12月21日	大雪	18.1 ppb	17.2 ppb	21.7 ppb
12月22日～1月4日	冬至	20.9 ppb	23.3 ppb	26.1 ppb
1月5日～1月19日	小寒	25.7 ppb	28.2 ppb	20.8 ppb
1月20日～2月3日	大寒	23.2 ppb	30.1 ppb	28.2 ppb
2月4日～2月18日	立春	29.1 ppb	31.4 ppb	30.5 ppb
2月19日～3月5日	雨水	33.4 ppb	34.8 ppb	30.8 ppb
3月6日～3月20日	啓蟄	30.7 ppb	39.5 ppb	33.4 ppb

に高くなつた。これは、米子においても同様の結果であった。立夏を過ぎると濃度低下が見られ、特に立冬にかけ濃度低下が見られた。

Table 2 EC and concentration of anions in the

採取場所	EC (μS/cm)	Cl <sup>-</sup> (μM)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μM)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (μM)
源流	56	29.6	18.4	31.3
早明浦ダム下流	43	43.6	21.2	39.7
四国中央橋	77	91.7	21.1	68.8
吉野川第十堰	108	212.0	55.9	125.6

い内陸としての値を反映していると考えられた。流域間の  $\text{Cl}^-$  濃度においては、河口付近の吉野川第十堰では源流と較べて 7.2 倍となった。 $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  比は、源流については、日本の平均河川水質<sup>22)</sup>の値(1.78)と同様な傾向を示し、下流へいくと低下がみられた。

河川中の溶存陽イオンで特筆すべきは源流における  $\text{K}^+$  濃度の非常に低濃度の結果である。吉野川水系源流の里川谷川においても、 $\text{K}^+$  濃度は 5.56  $\mu\text{M}$  となった。従って、吉野川水系源流の三波川帶において  $\text{K}^+$  の低濃度は、苦鉄質片岩の特色と考えられる。ちなみに第四紀であるブナ林が優占する大山滝の  $\text{K}^+$  濃度が 20.4  $\mu\text{M}$  であり<sup>4)</sup>、吉野川源流の値はその 7 分の 1 である。一方で、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度が高く  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比は、日本の平均河川<sup>22)</sup>の値(2.81)と比べると非常に高かった。越境窒素汚染の指標となる  $\text{NO}_3^-$  濃度は 18.4  $\mu\text{M}$  であり、これは瀬戸内沿岸の広島県極楽寺山周辺の溪流水中の  $\text{NO}_3^-$  濃度<sup>16)</sup>と同程度であった。

吉野川源流の硬度を計算すると 42.6 mg/L となった。早明浦ダム下流では 16.8 mg/L と激減し、河口付近ではまた源流並みの 44.1 mg/L となつた。この原因は源流における  $\text{Ca}^{2+}$  濃度の高さにある。海への硬度の流出は、日本海側の鳥取県加勢蛇川の事例<sup>4)</sup>である 37 mg/L と較べると若干高かった。また、酸化還元電位については、早明浦ダム下流で 552 mV、四国中央橋で

545 mV および吉野川第十堰で 540 mV となり、下流へいくほど微減した結果となつた。河川水のように電位緩衝作用を持つ溶存物質濃度が低い場合、酸化還元電位の精度は低いと考えられるが、酸化的な水環境というのを確かめられた。

**Table 3** Concentration of cations,  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  ratio and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  ratio in the Yoshino River waters from headwater to mouth.

採取場所	$\text{Na}^+$ ( $\mu\text{M}$ )	$\text{K}^+$ ( $\mu\text{M}$ )	$\text{Mg}^{2+}$ ( $\mu\text{M}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{M}$ )	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ 比	$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比
源流	51.7	2.9	40.0	385.7	1.75	9.65
早明浦ダム下流	49.8	3.1	26.8	140.7	1.14	5.25
四国中央橋	123.8	11.7	60.8	243.0	1.35	4.00
吉野川第十堰	248.4	22.6	105.7	334.7	1.17	3.17

### 3.3. 「山・川・海」の流域圈として

第 6 次酸性雨全国調査における 2017 年度の調査<sup>23)</sup>において、四国で唯一の測定場所の徳島における  $\text{NO}_3^-$  濃度の加重平均濃度は 11.1  $\mu\text{M}$  であり、松江の 24.3  $\mu\text{M}$  や広島安佐南の 22.8  $\mu\text{M}$  に較べて半分以下となっている。しかしながら、「山」に付着する吉野川水源は高知県の瓶ヶ森であり、地理的には徳島の測定場所と同様に、広島安佐南の値も重要な要素となる。アジア大陸からの越境汚染は、四国に及ぶことは稀とはいえ、湿性沈着に加えて乾性沈着も把握していくことが肝要である。

$\text{NO}_3^-$  は窒素の形態が最も酸化された状態であり、「山」に沈着する形態は湿性沈着ならびに乾性沈着の  $\text{NO}_3^-$  として負荷される。森林生態系の物質循環において窒素は酸化還元を経て、脱窒や  $\text{NH}_4^+$  として形態が変化することもあるが、険しい山間部では  $\text{NO}_3^-$  として表流水として現われる可能性が高い。今後は、吉野川の下流から上流域のみならず源流域においても、酸化還元電位の調査等を行い、水質を広域的に評価することが重要であろう。清流の判断指標はさまざまではあるが、人間活動の影響で  $\text{NO}_x$  が生じた場合に、その二次物質として  $\text{NO}_3^-$  を基に考えると、上流から中流域の  $\text{NO}_3^-$  のデータとして、世界文化遺産の構成資産である富士宮市内の白糸ノ滝および湧玉池では、それぞれ 163  $\mu\text{M}$  および 155  $\mu\text{M}$  と報告され<sup>24)</sup>、それと比較すると吉野川の中流域は相対的に清流であることがわかる。河口については、中流域の 2.6 倍ほどとなって海へ流出される。

わが国においては、首都圏の影響による森林生態系の窒素飽和問題として、群馬県渡良瀬川流域の小流域での  $\text{NO}_3^-$  濃度が平均  $114 \mu\text{M}$ <sup>25)</sup> を示す事例、また横浜市南部の大岡川源流域のそれで平均  $104 \mu\text{M}$ <sup>26)</sup> を示す事例などが報告される。その一方で、紀伊半島南部の四万十帯の源流域の平均値は  $4.27 \mu\text{M}$  と非常に低く<sup>3)</sup>、 $\text{NO}_3^-$  の負荷を地質の影響や森林生態系の物質循環を踏まえた源流域から流域圏全体を考えしていくことが肝要である。

#### 4.おわりに

吉野川中流域の池田において、 $\text{O}_3$  濃度の解析結果から、アジア大陸からの越境汚染も影響がみられ、源流域においては、紀伊半島南部の古座川水系源流域の  $4.27 \mu\text{M}$ <sup>3)</sup> と較べて決して低くはない  $\text{NO}_3^-$  濃度が確かめられた。近年になって、注目される局地的な豪雨は、連続的に線状に形成されているため、この範囲は線状降水帯<sup>27)</sup>と呼ばれる。こうした豪雨を大気環境からの観点で都市型豪雨の生成機構を研究する例もある。例えば、Uchiyama *et al.*<sup>28)</sup> は、2012～2016 年において、降水中の加重平均値は通常降雨の  $\text{NO}_3^-$  濃度で  $29.4 \mu\text{M}$  となつたが、都市型豪雨の場合のそれは  $41.0 \mu\text{M}$  であった。1992～2005 年までの 14 年間の東京都内における降水中の  $\text{NO}_3^-$  濃度<sup>29)</sup> を加重平均値で算出すると、江東で  $20.5 \mu\text{M}$ 、多摩で  $22.5 \mu\text{M}$  なので、都市型豪雨で高いことが分かる。その都市型豪雨直前には  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  およびポテンシャルオゾン濃度が増加することが分かった<sup>28)</sup>。 $\text{NOx}$  の二次物質からも、ゲリラ豪雨を予測できることが可能であり、大気環境と水環境は密接に絡み合う例である。

吉野川流域の森林面積のうち、約 65% がスギ・ヒノキの人工林である<sup>30)</sup>。「流域治水」は河川を流域圏と捉え、その源流から河口まで粒々に調査を行っていくことが重要である。源流における自然林の治水機能の重要性に加え、大気環境と水環境が密接に繋がっていることから、フィールド調査あまり議論されていない酸化還元電位等の基礎データを蓄積していく、水量だけでなく水質の観点からも流域圏の環境に係わるデータを積み上げていくことが重要である。大陸からの越境汚染の影響として  $\text{NOx}$  からの二次物質を軸に考察したが、源流域における溪流水の同位体比も合わせて調査することで、その影響も考えていくべきであろう。

#### 謝辞

吉野川・川塾の塩崎健太氏には、吉野川第十堰の調査に際には大変お世話になりました。記して感謝申し上げます。

#### 参考・引用文献

- 1) 板橋秀一・弓本桂也・鵜野伊津志・大原利眞・黒川純一・清水厚・山本重一・大石興弘・岩本眞二(2009) : 2007 年春季に発生した東アジア域スケールの広域的越境汚染の化学輸送モデル CMAQ による解析. 大気環境学会誌, **44**, pp.175-185.
- 2) 大原利眞・鵜野伊津志・黒川純一・早崎将光・清水厚(2008) : 2007 年 5 月 8, 9 日に発生した広域的な光化学オゾン汚染—オーバービュー. 大気環境学会誌, **43**, pp.198-208.
- 3) 苗村晶彦・初山守・奥田知明(2021) : 降水中の  $\text{NO}_3^-$  濃度が低い四万十帯における溪流水質. 環境科学会誌, **34**, pp.40-45.
- 4) 苗村晶彦・齋藤圭・奥田知明・小寺浩二(2021) : 源流と河口の環境—鳥取県加勢蛇川を事例として. 流域圏学会誌, **34**, pp.40-45.

- 5) Miyazako, T., H. Kamiya, T. Godo, Y. Koyama, Y. Nakashima, S. Sato, M. Kishi, A. Fujihara, Y. Tabayashi and M. Yamamuro (2015) : Long-term trends in nitrogen and phosphorus concentrations in the Hii River as influenced by atmospheric deposition from East Asia. *Limnology and Oceanography*, **60**, pp.629-640.
- 6) 佐々木一敏・栗田秀實・村野健太郎・水落元之・植田洋匡(1986) : 大気汚染物質の長距離輸送時における硫酸塩硝酸塩等の挙動. *大気汚染学会誌*, **21**, pp.216-225.
- 7) 沖野外輝夫(2002) : 新・生態学への招待 河川の生態学, 共立出版, p.132.
- 8) 楊 宗興(2000) : 陸水学の視野を広げる: 陸域研究との相互作用. *陸水学雑誌*, **61**, pp.166-167.
- 9) 伊藤優子・三浦覚・加藤正樹・吉永秀一郎(2004) : 関東・中部地方の森林流域における溪流水中の  $\text{NO}_3^-$  濃度の分布, *日本林学会誌*, **86**, pp.275-278.
- 10) 苗村晶彦・渡邊善之・小柳信宏・楊 宗興・渡辺幸一(2017) : 福島県中通りにおける阿武隈川水系源流域の溪流水質. *土木学会論文集 G(環境)*, **73**, pp.172-176.
- 11) 苗村晶彦(2018) : 神奈川県三浦半島北部における溪流水質の特徴. *自然環境科学研究*, **29**, pp.5-9.
- 12) 現代公益学会(監) (2022) : 公益叢書第七輯 SDGs とパンデミックに対応した公益の実現, 文眞堂, p.280.
- 13) 吉村伸一(2010) : 吉野川一川の恵みと災いを運ぶ大河, 四国三郎, 小倉紀雄・島谷幸宏・谷田一三(編) : 図説 日本の河川, 朝倉書店, pp.120-123.
- 14) 小寺浩二(2020) : 自然地理学概論(1), 法政大学通信教育部, p.346.
- 15) 苗村晶彦, 福岡義隆(2017) : 太陽黄経による季節区分と大気環境の問題. *戸板女子短期大学研究年報*, **60**, pp.55-64.
- 16) 苗村晶彦・奥田知明・渡辺幸一・福岡義隆(2019) : 広島県極楽寺山周辺におけるオゾン濃度の季節変動と溪流水質. *日本生気象学会雑誌*, **56**, 101-107.
- 17) 千賀裕太郎(監) (2013) : ゼロから理解する水の基本, 誠文堂新光社, p.159.
- 18) NOAA, Air Resources Laboratory, Advancing Atmospheric Science and Technology through Research  
<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (2021年6月11日参照)
- 19) 苗村晶彦(2021) : 岡山市における二十四節気および七十二候別のオゾン濃度の季節変動. *地域環境科学研究*, **1**, pp.7-14.
- 20) 森本洋一・猪狩彬寛・齋藤圭・山形えり奈・竹本統夫・苗村晶彦・小寺浩二(2022) : 多様な河川における水質特性の把握—EC(電気伝導度)の変動係数に着目して. *人間生活文化研究*, **32**, pp.46-61.
- 21) 吉永秀一郎・山田 肇・稻垣善之・三浦 覚・篠宮佳樹(2021) : 四万十川源流域の溪流水質の特徴—1999年から2000年にかけて実施した調査結果. *森林総合研究所研究報告*, **458**, pp.101-120.
- 22) 日本地球化学会(監) (2005) : 地球化学講座 6 大気・水圏の地球化学, 培風館, p.319.
- 23) 岩崎 綾・久垣邦裕・宮野高光・北岡宏道・木戸瑞佳・濱村研吾・三田村徳子・佐久間隆・山口高志・横山新紀・池田有里・松本利恵・家合浩明・難波江芳子・宇野克之・紺田明宏(2019) : 第6次酸性雨全国調査報告書2017(平成29)年度. *全国環境研会誌*, **44**, pp.74-115.
- 24) 苗村晶彦・齋藤圭・奥田知明・小寺浩二(2022) : 世界文化遺産のフィールド—「富士山」に係わる  $\text{NO}_x$  の二次物質の動態(1)静岡県富士宮市の流域圏について. *世界遺産学研究*, **9**, 印刷中.
- 25) 大類清和・相場芳憲・生原喜久雄(1995) : 森林小集水域での水質変化の過程. *水文・水資源学会誌*, **8**, pp.367-381.

- 26) 苗村晶彦・楊 宗興(2016) : 横浜市大岡川源流域における森林渓流水質. 環境科学会誌, **29**, 201-205.
- 27) 津口裕茂(2016) : 線状降水帯. 天気, **63**, pp.727-729.
- 28) Uchiyama, R., Okochi, H., Katsumi, N. and Ogata, H. (2017) : The impact of air pollutants on rainwater chemistry during “urban-induced heavy rainfall” in downtown Tokyo, Japan. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, DOI 10.1002/2017JD026803.
- 29) 苗村晶彦・渡邊善之(2012) : 東京都内における降水中の酸性沈着の経年変化. 戸板女子短期大学研究年報, **55**, pp.65-68.
- 30) 中根周歩・姫野雅義(2003) : 吉野川第十堰問題から「緑のダム」へ, 依光良三(編) : 破壊から再生へ アジアの森から, 日本経済評論社, pp.211-246.

(原稿受付 2022 年 6 月 23 日 原稿受理 2022 年 12 月 14 日)