

横浜市大岡川流域における NO_2 濃度の季節変動と その影響について

苗村 晶彦・渡邊 善之¹

総合教養センター

1. 多摩丘陵と大岡川、 NO_2 およびその化学変化

東京湾に注ぐ河川は60以上あり、流域面積は8千 km^2 に及ぶ。横浜市内を流れ東京湾に注ぐ主な河川は一級河川の鶴見川（全長42.5km、流域面積235 km^2 ）、二級河川の帷子川（全長19.3km、流域面積58.5 km^2 ）、同様に二級河川の大岡川（全長15km、流域面積35 km^2 ）等である¹⁾。鶴見川は多摩丘陵北西部の東京都町田市上山田町大沢峠に源流をもち、横浜市域では緑区、港北区、鶴見区を経て東京湾へ注ぐ。帷子川は多摩丘陵西部の旭区希望が丘南方に水源をもち東の方向に流れて、横浜市域では旭区、保土ヶ谷区、西区を経て横浜港に注ぐ。大岡川は横浜市磯子区の大岡川南端に位置する円海山（標高153m）を源流とし北の方向に流れる笹下川と、横浜市港南区日野町付近に源を発する日野川が、上大岡西2丁目付近で合流し、南区を経て中区の JR 桜木町駅付近で横浜港に注ぐ（図1²⁾）。

鶴見川や大岡川などの源流となる多摩丘陵周辺の大気環境については、1992年から2005年までの東京都内の沿岸地域（江東）、丘陵地域（多摩）および山間地域（檜原）における降水中の硝酸イオン (NO_3^-) の経年変化を解析した結果³⁾、江東よりも多摩で1.2倍高かった。また、降水中の N/S 比（硝酸イオンと非海塩由来の硫酸イオンの当量比）が江東よりも多摩や檜原で大きな値となり、沿岸地域周辺で発生した NO_3^- が、丘陵地域や山間地域へ輸送され降水にも反映していると推測された。多摩丘陵の森林域における調査では1970年代から1990年代にかけて湿性沈着の無機態窒素 ($\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ と $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$)

が増加し⁴⁾、2000年の調査では湿性沈着のみならず乾性沈着によっても無機態窒素が多いことも報告されている⁵⁾。

樹木への酸性沈着を図2に表す⁶⁾。化石燃料の燃焼により窒素酸化物 (NO_x) が生成し、 NO_x の燃焼過程により大気中に放出される大部分は一酸化窒素 (NO) である。その NO は大気中で酸化され二酸化窒素 (NO_2) となる。 NO_2 は図のように、化学変化によって、硝酸イオン (NO_3^-) やオキシダント (O_3) が生成される。



図1 横浜市内の河川

酸化された NO_3^- は、雨滴に溶け込んで雨を酸性化する。所謂「酸性雨」である。これが前述した東京都内の湿性沈着の NO_3^- に相当する。これとは別

¹ 平岡環境科学研究所

に直接地表の事象に付着すること（乾性沈着）がある。樹木への沈着は湿性沈着と乾性沈着に大別され、排出源近くでは後者が重要である⁷⁾。楊⁸⁾は、人為的な汚染のない河川上流域の森林渓流水に含まれる窒素濃度について、窒素は養分として最も欠乏しており、そこでの生物生産を規定する要因となっているので、森林渓流水中に窒素はふつうごくわずかしかな含まれないとして、近年、森林渓流水で硝酸態窒素が高濃度に含まれる例が見いだされる例をあげて窒素沈着フラックスとの関係を検討する必要があると述べている。

また、NO₂はオゾン（O₃）も生成させる。つまり、O₃はNO₂から光化学反応が進行することによって二次大気汚染物質として生成され、光化学スモッグ注意報発令の原因物質となる。近年は、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も指摘されている。しかしながら、秋元⁹⁾は今後とも我が国ではO₃等による大気汚染を踏まえた上で我が国の排出削減の更なる強化が求められるとしている。我が国では、依然として光化学スモッグ注意報の発令は多く、2007年および2009年については観測史上で最多の28都府県に及んでいる。関東周辺では、奥日光の森林衰退が報告される¹⁰⁾が、奥日光前白根山（標高2373m）頂上近くでO₃の最高瞬時値が109ppb（1995年8月19～20日）で高濃度が記録されている¹¹⁾。

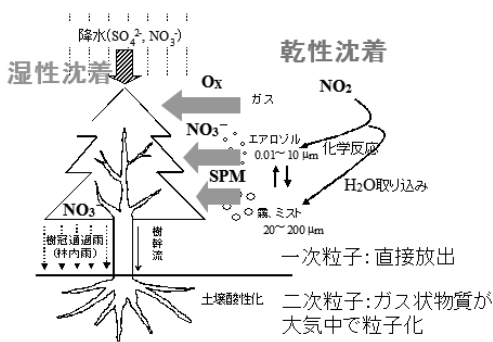


図2 樹木への酸性沈着

本報では、NO₃およびO₃への原因物質となるNO₂濃度の把握を第一の目的とし、横浜市大岡川流域の季節別のNO₂濃度変動を調べた。苗村・渡邊⁶⁾は神奈川県中央南部に位置する茅ヶ崎市においてNO₂濃

度の季節変動を解析したところ、季節別に細分化できる二十四節気は有用されると報告している。1年を24等分した二十四節気別の動態解析を行うことで大気汚染物質の詳細な変動が解明されることが期待される。そこで二十四節気別に分けてNO₂濃度の季節変動を解析した。更に、NO₂の酸化還元反応として生成するNO₃およびO₃の影響について記述した。

2. 大岡川流域のNO₂濃度の季節変動

解析の対象地は、横浜市内を流れる大岡川流域である横浜市南区の横浜商業高校測定局（北緯35.43度、東経139.61度）（以下、「南区」という）、横浜市港南区の港南中学校測定局（北緯35.40度、東経139.59度）（以下、「港南区」という）、横浜市磯子区の滝頭測定局（北緯35.42度、東経139.63度）（以下、「磯子区」という）とした（図3）。横浜市南区は2016年8月1日現在（以下、同様）で人口195,021人、横浜市港南区は人口215,030人、横浜市磯子区は人口166,824人となっている。解析した時期は、2010年3月21日（春分点；太陽黄経0度）から2012年3月20日までの2年間とし、二十四節気別にNO₂濃度の解析を中心に行った。解析に使用したデータは各自治体や国が設置している大気常時監視測定局の測定結果とした。またO_xとNO_xのデータについては横浜市南区の横浜商業高校でも測定されており、そのデータを使用した。尚、O_xの大部分はO₃であるため以降O₃として表記した。

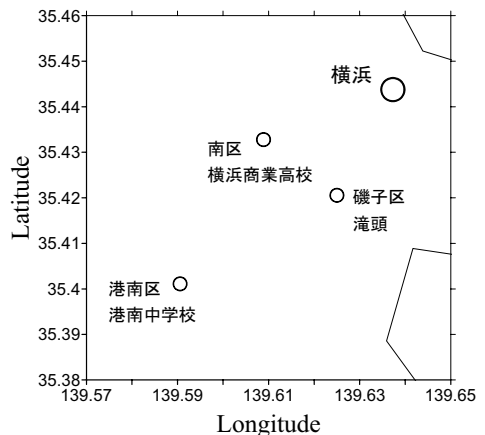


図3 調査地

2. 1. NO₂濃度の日最高濃度

南区の2010年3月21日から2012年3月20日までのNO₂濃度の平均値は19.9ppbとなっている。また、港南区について、同様の調査期間での平均値は22.4ppbとなっている。また、磯子区について、同様の調査期間での平均値は26.3ppbとなっている。調査期間におけるNO₂濃度（1日平均値）の上位5日を表1に示す。表には上位日の二十四節気も記載している。最も高かった日はいずれの調査地も2011年2月4日となった。これは、神奈川県茅ヶ崎市においても同様の調査期間で行った際⁶⁾に、同じ日となった。この日の20時には、磯子区においては84ppbの結果が得られていることが報告されているが、磯子区ではこの後更に23時に89ppbと上昇している。NO₂の環境基準は1時間値の1日平均値が0.04ppm（40ppb）から0.06ppm（60ppb）までのゾーン内またはそれ以下であるが、この日は神奈川県内の測定局で最も高かった川崎市池上新田公園前の平均74.8ppbを筆頭に、対象の調査地では港南区も磯子区も環境基準を満たしていない。

表1 調査期間におけるNO₂濃度（1日平均値）の上位5日

南区横浜商業高校		港南区港南中学校		磯子区滝頭	
2011.2.4	立春 58.3 ppb	2011.2.4	立春 60.1 ppb	2011.2.4	立春 66.5 ppb
2011.2.5	立春 49.6 ppb	2011.11.29	小雪 55.6 ppb	2011.11.3	霜降 65.5 ppb
2011.11.29	小雪 49.3 ppb	2012.1.18	小寒 52.1 ppb	2011.2.5	立春 62.3 ppb
2011.11.5	小寒 47.9 ppb	2011.2.5	立春 51.3 ppb	2011.12.7	大雪 57.2 ppb
2010.12.1	小雪 46.8 ppb	2011.11.3	霜降 50.2 ppb	2011.11.5	霜降 53.6 ppb

2. 2. 二十四節気別のNO₂濃度

二十四節気の調査期間と、二十四節気別の2年間のNO₂平均濃度を表2に、調査期間の2年間平均の二十四節気別のNO₂濃度を図4に示す。最高値は南区、港南区および磯子区のいずれも大雪の季節に最も高くなり30.2ppb、32.5ppbおよび38.8ppbとなっている。窒素酸化物の濃度は12月を中心とした冬季に高濃度となる¹²⁾が、典型的な例となった。この時季は、1年間を14区分した吉野・甲斐¹³⁾の季節区分で言うと“初冬”に相当する。初冬の大气汚染については、接地逆転層の形成による鉛直拡散抑制で窒素酸化物が高濃度となる。例えば、森林衰退地域での調査例によると、係留気球による気温勾配の観測とNO₂濃度測定を併行して実施した結果、標高差に

よる濃度較差は、冬季に一層顕著となり、強い放射冷却の影響により、接地逆転層が形成され、夜間のNO₂濃度較差が夏季に比べて大きくなったことを明らかにしている¹⁴⁾。

表2 調査期間における二十四節気別のNO₂濃度

期間	二十四節気	黄経	南区	港南区	磯子区
3月21日~4月4日	春分	0度	19.3 ppb	20.6 ppb	27.0 ppb
4月5日~4月19日	清明	15度	17.9 ppb	20.1 ppb	24.7 ppb
4月20日~5月4日	穀雨	30度	16.5 ppb	18.5 ppb	22.0 ppb
5月5日~5月20日	立夏	45度	15.1 ppb	18.4 ppb	21.9 ppb
5月21日~6月5日	小満	60度	17.4 ppb	18.4 ppb	22.8 ppb
6月6日~6月20日	芒種	75度	16.6 ppb	19.7 ppb	23.4 ppb
6月21日~7月6日	夏至	90度	14.8 ppb	18.4 ppb	18.5 ppb
7月7日~7月22日	小暑	105度	8.6 ppb	12.0 ppb	10.8 ppb
7月23日~8月6日	大暑	120度	11.5 ppb	15.7 ppb	15.9 ppb
8月7日~8月22日	立秋	135度	11.4 ppb	15.4 ppb	15.4 ppb
8月23日~9月7日	処暑	150度	10.4 ppb	14.4 ppb	15.0 ppb
9月8日~9月22日	白露	165度	14.3 ppb	17.4 ppb	18.5 ppb
9月23日~10月7日	秋分	180度	21.3 ppb	21.8 ppb	27.6 ppb
10月8日~10月22日	寒露	195度	22.9 ppb	24.2 ppb	30.2 ppb
10月23日~11月6日	霜降	210度	26.4 ppb	27.9 ppb	34.6 ppb
11月7日~11月21日	立冬	225度	28.2 ppb	30.5 ppb	35.3 ppb
11月22日~12月6日	小雪	240度	27.9 ppb	30.2 ppb	36.4 ppb
12月7日~12月21日	大雪	255度	30.2 ppb	32.5 ppb	38.8 ppb
12月22日~1月4日	冬至	270度	22.9 ppb	26.1 ppb	27.7 ppb
1月5日~1月19日	小寒	285度	27.8 ppb	30.5 ppb	34.7 ppb
1月20日~2月3日	大寒	300度	26.1 ppb	28.7 ppb	33.8 ppb
2月4日~2月18日	立春	315度	27.7 ppb	30.3 ppb	36.6 ppb
2月19日~3月5日	雨水	330度	23.5 ppb	23.3 ppb	31.7 ppb
3月6日~3月20日	啓蟄	345度	23.9 ppb	25.3 ppb	31.4 ppb

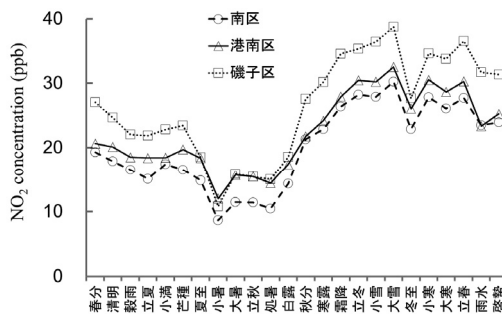


図4 横浜市大岡川流域における二十四節気別のNO₂濃度（2年間の平均）

一方、最低値は南区、港南区および磯子区のいずれも小暑の季節で最も低くなり8.6ppb、12.0ppbおよび10.8ppbとなっている。この時季は、14区分された吉野・甲斐の季節区分¹³⁾で言うと、“梅雨”および“夏”となる。

大気中ではOH（ヒドロキシ）ラジカルがNO₂を直接酸化し、HNO₃（硝酸）が生成する。これは光化学反応でOHラジカルが生成する日中に起こる反応である¹⁵⁾。



また NO_2 は、光化学スモッグの主因となる O_3 の生成にも関与する¹⁶⁾。また、 NO は O_3 によって酸化され NO_2 となる¹⁶⁾。



ここで、 $h\nu$ は波長398nm以下の光を表す。

小暑から立秋の季節における強い日射の影響から主に OH ラジカルによって NO_2 が消失されて NO_2 濃度が低かったと推測される。また、二十四節気別の NO_2 濃度は冬至に急激な低下が見られ、また小寒時に上昇するという年末年始の NO_2 濃度の特異性が認められた。これは神奈川県茅ヶ崎市の解析⁶⁾でも同様な傾向が見られ、二十四節気別の解析ならではの結果と考えられる。

3. 一次汚染物質 NO_2 から二次汚染物質 NO_3^- へ

本報では横浜市内を流れる大岡川流域の NO_2 濃度の季節変動を調べたが、 NO_2 を含めた大気汚染物質の森林等への沈着は、主に雨・霧による湿性沈着と、エアロゾル、ガス状・粒子状汚染物による乾性沈着に分けられ、原因物質の排出源近くでは、乾性沈着による森林への影響が懸念される⁷⁾。

前述の式(1)より、 NO_2 は大気中で OH ラジカルによって NO_3^- へと酸化される。窒素は森林において制限要因であり大気からの微量の NO_3^- は樹木の栄養塩として利用されている。しかしながら、人間活動によって大気から窒素が過剰に供給されると、森林から窒素が森林溪流水の NO_3^- として流出するなどの森林生態系における窒素飽和问题が生じる¹⁷⁾。

多摩丘陵の森林生態系においては、大都市の影響を受け、この丘陵地帯は森林が窒素飽和の状態にある¹⁸⁾。本来、森林において窒素は制限要因にもかかわらず、多摩丘陵南端に位置する大岡川源流域の森林溪流水では、 NO_3^- 濃度が平均 $104 \mu\text{M}$ となり、奥秩父との比較上3.1倍となり高い状態にあった¹⁹⁾。また、秩父甲斐多摩山岳域における広域な調査のデータ²⁰⁾と比較しても最も高かった八王子城址の $94.3 \mu\text{M}$

と同程度の高い濃度となった。かつて大岡川沿いではスカーフ等の繊維製品の捺染工場が立ち並び、絹の輸出港・横浜に近く、(この場合は中流域の)大岡川の水も澄んでいたが、水質汚濁などで川の水が利用できなくなるにつれ工場は県外へ移転していったという記述もあり²¹⁾、高度経済成長と共に上流域の人口集中によって水質が悪化した。

大気汚染の輸送については、首都圏の光化学スモッグが、夏季に埼玉県、群馬県の利根川筋を南東地上風(海風)にのって飛来し、碓氷川筋から碓氷峠(県境で最も低い場所)を経由し軽井沢に達する²²⁾。光化学スモッグに関する近年の研究例では、関東からの汚染の輸送で福島県浜通りにおいて光化学スモッグ注意報が発令される報告がある²³⁾。また自動車などの移動発生源の多い首都圏は硝酸塩由来の物質が、海風によって内陸に長距離輸送される²²⁾。群馬県西部における降水の水質および量から窒素降下量を算出した結果、年間窒素降下量は、川崎市や横浜市よりも多く $20 \sim 30 \text{kg ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ に達することなどから、群馬県内の利根川上流域では西部および北部で広範囲に窒素飽和現象が出現していると推測している²⁴⁾。文献から具体的な場所で算出すると、利根川水系の碓氷川水系源流域 ($n=18$) の渓流水中の NO_3^- 濃度の加重平均値は $121 \mu\text{M}$ である。ただ、この窒素降下量は湿性沈着である。森林における現地調査¹⁸⁾では、神奈川県鎌倉・十二所果樹園のスギ林における林内雨等の調査で物質収支のシミュレーションの結果、 NO_3^- の湿性沈着が $18.5 \text{kg ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ 、乾性沈着が $49.5 \text{kg ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ と算定し、多摩丘陵においては乾性沈着が重要視される。鎌倉・十二所果樹園の北4kmの大岡川源流 ($n=7$) の NO_3^- 濃度の最高値は $193 \mu\text{M}$ (2000年9月8日) となっている¹⁹⁾。今後も大岡川源流の森林生態系の物質循環においてアウトプットとなる渓流水中の NO_3^- 濃度は注視すべきである。

4. 一次汚染物質 NO_2 から二次汚染物質 O_3 へ

NO_2 は光化学反応によって前述の式(2)のように、二次汚染物質 O_3 を生成させ、 O_3 等の光化学スモッグが発生する。調査期間の横浜地域における光化学スモッグ注意報が発令されたのは表3のように2010

年は6日、2011年は4日の計10日となっている。

表3 調査期間の横浜地域における光化学スモッグ注意報が発令された日と NO₂濃度（1日平均値）

		南区	港南区	磯子区
2010.7.21	小暑	21.0 ppb	26.2 ppb	23.5 ppb
2010.7.23	大暑	19.5 ppb	22.1 ppb	30.3 ppb
2010.7.24	大暑	12.9 ppb	19.8 ppb	22.7 ppb
2010.8.16	立秋	13.1 ppb	17.6 ppb	16.2 ppb
2010.8.30	立秋	19.6 ppb	24.4 ppb	25.4 ppb
2010.9.12	白露	18.6 ppb	18.1 ppb	18.8 ppb
2011.6.29	夏至	20.6 ppb	29.0 ppb	29.9 ppb
2011.8.7	立秋	16.7 ppb	22.0 ppb	22.3 ppb
2011.8.12	立秋	19.8 ppb	26.8 ppb	30.2 ppb
2011.8.13	立秋	11.4 ppb	18.6 ppb	18.2 ppb

O₃はNOにより容易に還元されるため、その濃度変動が生成によるものか、NOによる分解なのかを判断することが困難である。そこで、O₃のNOによる分解を補正したPO（ポテンシャルオゾン）を指標として用いることでO₃汚染のより一層の解明を行える²⁵⁾。PO濃度の算出は、

$$[PO] = [O_3] + [NO_2] - \alpha [NO_x] \quad (4)$$

となる。ここで α は、発生源におけるNO_x濃度に対するNO₂濃度の比率で、日本の場合、 α を0.1として算出されるケースが多く、ここでも0.1として算出した。

図5には、計10日中で2010年7月21日の小暑（以下、小暑スモッグ）、2010年7月24日の大暑（以下、大暑スモッグ）、2011年6月29日の夏至（以下、夏至スモッグ）の1日の濃度変動例を示した。小暑スモッグのPOについては午前中の夜間は低い値となり、7時から濃度が上昇し始め、午後の13時に最高値175ppbを記録した。この値は光化学スモッグ注意報が発令された計10日間中最も高い値となった。小暑スモッグのPOとO₃の比較では1日平均値でO₃の1.37倍となり、O₃は11時に低下するもののPOは7時から13時まで一貫して上昇しPOによる解析が重要だと考えられた。

大暑スモッグのPOについては、午前中の夜間に47ppb未満とならないPO滞留の傾向が確かめられた。13時に最高値168ppbを記録し、24時までの夜間にPOが64ppb未満とならず計10日間中の解析の結果、夜間のPO滞留が最も顕著であった。苗村・

渡邊²⁶⁾は、東京圏（1都3県）の中心に位置する東京タワーにおいて夜間のNO₂高濃度事例を解析したところ、夜間PO濃度が平均80ppbを越えた時はいずれも、翌日の日中PO濃度が平均80ppbを越え、その3例の内1例では山梨県にて光化学スモッグ注意報が発令される事例があり、東京圏からの大気汚染物質の輸送が原因であると推測している。今回の光化学スモッグ注意報発令時の解析では、いずれも21時以降にPOが80ppb以上になったケースは1度もなく夜間時にはPO濃度が低下した。

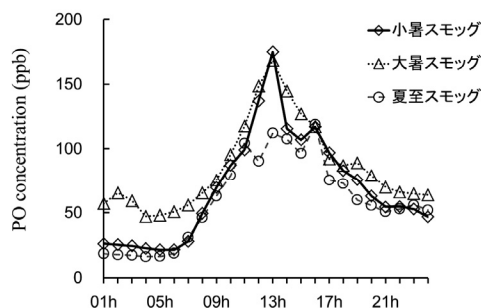


図5 光化学スモッグ注意報が発令された日の横浜南区横浜商業高校におけるPO濃度の時間変動の例

夏至スモッグのPOについては午前中の夜間は低い値となり、6時から値が上がり始め、11時に104ppbを記録したが12時に90ppbと下がり再び上昇と下降を繰り返し16時に最高値119ppbを記録した。夏至スモッグのPOとO₃の比較では1日平均値でPOがO₃の1.40倍となり、O₃は10時から13時まで上昇していくのに対しPOはこの時間帯は横ばいの状態でありPOとして算出して解析するとより一層大気汚染の動態が詳しくわかった。苗村・渡邊²⁷⁾は、2006年8月4日の光化学スモッグ注意報発令が首都圏において1都6県に渡り、更に福島県にも及んだが、この日のO₃の最高値は茨城県および埼玉県で157ppb（14時）であり、最高値を記録した時間は群馬県で17時とタイムラグがあり大気汚染物質の輸送の可能性を示唆している。

このように、光化学スモッグ注意報発令時にも、日時や場所によって異なる動態があり、尚一層の大気汚染の詳細な解析が必要であると考えられる。特

に、汚染気塊の輸送中における NO_x の酸化は O_x の生成とほぼ同時に進行し、 HNO_3 等は O_x 濃度がほぼ最大となる付近でほとんどが生成し、 NO_3^- と O_3 の生成は二次汚染物質の中でも関連性が高い報告²⁸⁾があり、森林渓流水中の NO_3^- と大気中の O_3 濃度との関係を NO_2 や PO の濃度の動態を解析することで更に詳細に探っていくことが重要である。

参考文献

- 1) 横浜市教育委員会 (2009) わかるヨコハマ 自然・歴史・社会309pp, 神奈川新聞社.
- 2) 横浜市：水防災情報のページ. http://mizubousaiyokohama.jp/camera_map.html
- 3) 苗村晶彦・渡邊善之・吉川尚志 (2014) 東京都内における湿性沈着の経年変化, 自然環境科学研究27: 23-30.
- 4) 吉川哲生・苗村晶彦・土器屋由紀子 (2001) 波丘地の降水の化学成分. *In* 土器屋由紀子・小倉紀雄・安富六郎・内川武 (編) 多摩丘陵の自然と研究—フィールドサイエンスへの招待134pp, けやき出版. 58-68.
- 5) 苗村晶彦・吉川哲生・佐藤敬一・土器屋由紀子 (2003) 奥秩父および多摩丘陵におけるスギの林内雨、樹幹流の測定, 日本生気象学会雑誌 39: 121-125.
- 6) 苗村晶彦・渡邊善之 (2015) 神奈川県茅ヶ崎市における二十四節気別の NO_2 濃度, 戸板女子短期大学研究年報58: 33-37.
- 7) 苗村晶彦・中根周歩・佐久川弘・福岡義隆 (1997) 広島県極楽寺山におけるガス状汚染物質の動態とマツ・広葉樹の樹木活力度との相関関係, 環境科学会誌10: 1-10.
- 8) 楊宗興 (2004) 森林集水域の生物地球化学—水質形成と流出—, 水環境学会誌27: 568-574.
- 9) 秋元肇 (2014) 越境大気汚染・酸性雨への先行的取り組みとオゾン・ $\text{PM}_{2.5}$ などへの最近の展開, 環境情報科学42: 22-27.
- 10) 谷川東子・高橋正通・野口享太郎・重永英年・長倉淳子・酒井寿夫・石塚和裕・赤間亮夫 (2009) 奥日光の森林衰退地域の樹木生葉と土壌の養分特性—他の亜高山地域との比較から—, 環境科学会誌22: 401-414.
- 11) 畠山史郎・村野健太郎 (1996) 奥日光前白根山における高濃度オゾンの観測, 大気環境学会誌 31: 106-110.
- 12) 若松伸司 (2001) 都市・広域大気汚染の生成機構解明に関する研究, 大気環境学会誌36: 125-136.
- 13) 吉野正敏・甲斐啓子 (1977) 日本の季節区分と各季節の特徴, 地理学評論 50: 635-651.
- 14) Naemura, A., Tsuchiya, A., Fukuoka, Y., Nakane, K., Sakugawa, H. and Takahashi, H. (1996) Climatic inversion layer and atmospheric NO_x concentration on the slope of forest decline area in the Seto Inland Sea District, Japanese Journal of Biometeorology 33: 131-136.
- 15) 原 宏 (2002) 酸性雨とフィールドサイエンス (I) 湿性沈着の現状と科学としての発展, フィールドサイエンス1: 1-13.
- 16) 中西準子・篠崎裕哉・井上和也 (2009) オゾン—光化学オキシダント289pp, 丸善株式会社.
- 17) Aber J.D., K.J. Nadelhoffer, P. Steudler and J. M. Mellio (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystem, Bioscience 39: 378-386.
- 18) Naemura, A., Yoshikawa, T., Yoh, M., Ogura, N. and Dokiya, Y. (2007) Acidic deposition on Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in mountain and on suburban hill, Natural Environmental Science Research 20: 13-17.
- 19) 苗村晶彦・楊宗興 (2016) 横浜市大岡川源流の森林渓流水質, 環境科学会誌 29: 201-205.
- 20) 苗村晶彦・藤田俊忠・倉田斉・土器屋由紀子・楊宗興 (2003) 秩父多摩甲斐山岳域における森林渓流水質の標高別分布, 自然環境科学研究16: 1-6.
- 21) 佐野久子 (1989) ほのかに染料の香り. *In* 神奈川県高校地理部会 (編) かながわの川 (上巻) 333pp, 神奈川新聞社. 106-107.
- 22) 栗田秀實・植田洋匡 (1986) 沿岸地域から内陸の山岳地域への大気汚染物質の輸送および変質過程, 大気汚染学会誌21: 428-439.
- 23) 渡邊善之・渡邊 明 (2012) 福島県海岸域にお

- ける高濃度オゾンの出現, 大気環境学会誌47 : 145-154.
- 24) 青井透 (2010) 人為的な汚濁源のない利根川上流域における窒素汚染, 地球環境15 : 145-152.
- 25) Itano, Y., Bandow, H., Takenaka, N., Saitoh, Y., Asayama, A. and Fukuyama, J. (2007) Impact of NO_x reduction on long-term ozone trends in an urban atmosphere, Science of the Total Environment 379 : 46-55.
- 26) 苗村晶彦・渡邊善之 (2016) 東京タワーにおける季節別の夜間高 NO₂濃度とポテンシャルオゾン濃度との関係, 日本生気象学会雑誌53 : 39-44.
- 27) 苗村晶彦・渡邊善之 (2015) 2006年8月4日の首都圏周辺の高濃度オゾンの出現, 自然環境科学研究28 : 5-9.
- 28) 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 : 216-225.

