

# 神奈川県茅ヶ崎市における二十四節気別の $\text{NO}_2$ 濃度

苗村 晶彦・渡邊 善之<sup>1</sup>

総合教養センター

## 1. はじめに

春季から夏季の大気汚染については、晴天時における強い日射の影響で窒素酸化物等の大気汚染物質の光化学反応が進行し、光化学スモッグが発生することがある。例えば、渡邊ら<sup>1)</sup>によると福島県における2000～2010年で光化学スモッグ注意報が発令された事例12日間は、いずれも5～9月に集中しており春季から夏季において主に首都圏からの大気汚染物質の輸送によって福島県の大気環境に影響を与えていることを指摘している。また、苗村・渡邊<sup>2)</sup>は、東京タワーにおける夜間高 $\text{NO}_2$ 濃度時を解析したところ、 $\text{NO}_2$ 濃度とポテンシャルオゾン（以下、PO）濃度について季節別に特徴があり、PO濃度について春季から夏季で高濃度が確認されるとしている。

一方、冬季の大気汚染については、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 $\text{NO}_2$ 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 $\text{NO}_2$ 濃度較差が夏季に比べて大きくなっているとしている<sup>3)</sup>。

$\text{NO}_2$ 濃度は、自動車 $\text{NO}_x$ ・PM法の施行等により改善傾向にある。しかし、光化学スモッグ注意報は特に都市圏やその周辺域において、依然として発令されており、その前駆物質となる $\text{NO}_2$ 濃度の動態解析は重要である。

従って、本研究では、神奈川県中央南部に位置する茅ヶ崎市における大気汚染物質の動態について、

季節別に $\text{NO}_2$ 濃度の状況を把握することを目的とした。季節では二十四節気別に分けて変動等を解析した。なお、二十四節気とは、月の運行をもとにした太陰暦の季節のずれを正すために、太陽の動きをもとに考案され、1年を24等分（太陽黄経15度毎）に区切ったものである<sup>4)</sup>。古代中国から伝えられてきた農業歴「二十四節気七十二候」の気と候から「気候」という言葉ができたとも言われているように、自然現象である大気と人間生活との関わり<sup>5)</sup>の観点から、季節別の解析として、この二十四節気を用いたものである。

## 2. 方法

解析の対象地は、神奈川県の茅ヶ崎市役所の測定局（北緯35.33度，東経139.41度）とした（図1）。茅ヶ崎市は2015年9月1日現在で人口238,629人の神奈川県において横浜市、川崎市、相模原市、横須賀市、藤沢市、平塚市に次ぐ神奈川県で7番目に人口の多い都市である。茅ヶ崎市は、東京から西に約50kmの神奈川県中央南部にあり、面積は35.76 $\text{km}^2$ である<sup>6)</sup>。茅ヶ崎市内における道路は、東海道本線に並行する国道1号と海岸沿いの国道134号、新湘南国道の3路線が広域幹線の役割を果たしているが、国道1号では慢性的な交通渋滞が発生している<sup>6)</sup>。解析した時期は、2010年3月21日から2012年3月20日までの2年間とし、二十四節気別に $\text{NO}_2$ 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。

<sup>1</sup> 平岡環境科学研究所

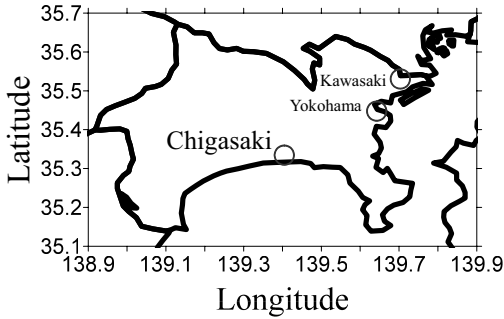


図1 調査地

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. NO<sub>2</sub>濃度の日最高濃度

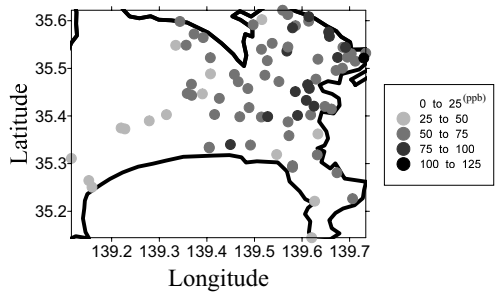
2010年3月21日から2011年3月20日まで（以下、2010年調査）のNO<sub>2</sub>濃度の日最高濃度の平均値は18.4ppbとなっている。また、2011年3月21日から2012年3月20日まで（以下、2011年調査）の平均値は17.6ppbとなっている。春分から白露までの期間（以下、春季～夏季）と、秋分から啓蟄までの期間（以下、秋季～冬季）に分けて、2010年調査および2011年調査の調査期間におけるNO<sub>2</sub>濃度（1日平均値）の上位5日を表1に示す。表には上位日の二十四節気も記載している。2010年調査で春季～夏季で最も高いのは3月31日の28.6ppb、秋季～冬季で最も高いのは2月4日の43.6ppbとなっている。2011年調査では春季～夏季で最も高いのは4月6日の29.6ppb、秋季～冬季で最も高いのは11月29日の42.0ppbとなっている。

調査期間における茅ヶ崎市役所の測定局で最も高い2011年2月4日の20時の神奈川県内におけるNO<sub>2</sub>濃度の分布を図2に示す。20時としたのは、この日に最も高い64ppbを記録しているからである。神奈川県内において、高濃度地域は茅ヶ崎から北東方向の横浜市にかけて高いことがわかる。横浜市磯子区滝頭および横浜市戸塚区矢沢交差点の測定局においては84ppbの結果が得られている。更に、川崎市の池上新田公園前測定局では、この時間で最も高い101ppbに達している。NO<sub>2</sub>の環境基準は1時間値の1日平均値が0.04ppmから0.06ppmまでのゾーン内またはそれ以下であるが、この日は茅ヶ崎市役所の測定局においては環境基準を満たしている。しかしな

がら、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等については環境基準を満たしていない。

表1 調査期間におけるNO<sub>2</sub>濃度（1日平均値）の上位5日

2010年調査			2011年調査		
春季～夏季			春季～夏季		
3月31日	春分	28.6 ppb	4月6日	清明	29.6 ppb
4月5日	清明	27.7 ppb	3月25日	春分	26.7 ppb
5月11日	立夏	26.6 ppb	4月5日	清明	26.3 ppb
4月27日	穀雨	25.8 ppb	4月14日	清明	25.1 ppb
3月23日	春分	25.3 ppb	6月2日	小満	24.5 ppb
秋季～冬季			秋季～冬季		
2月4日	立春	43.6 ppb	11月29日	小雪	42.0 ppb
10月25日	霜降	38.4 ppb	12月22日	冬至	37.9 ppb
12月1日	小雪	38.3 ppb	3月6日	啓蟄	37.5 ppb
1月15日	小寒	36.7 ppb	1月18日	小寒	37.3 ppb
12月20日	大雪	36.7 ppb	2月21日	雨水	37.0 ppb


図2 2011年2月4日20時の神奈川県内におけるNO<sub>2</sub>濃度分布

#### 3. 2. 二十四節気別のNO<sub>2</sub>濃度

二十四節気の調査期間と、二十四節気別の2010年調査および2011年調査におけるNO<sub>2</sub>濃度を表2に、調査期間の2年間平均の二十四節気別のNO<sub>2</sub>濃度を図3に示す。

2010年調査では、最高値は大寒の26.9ppb、最低値は立秋の10.2ppbとなっている。

大寒は、最も寒さが厳しい時期となる<sup>7)</sup>。

寒さが厳しく北国では大雪が降り

鶯が空高く飛び始める<sup>4)</sup>

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が<sup>8)</sup>、茅ヶ崎の2010年調査では大寒の季節に高濃度となった。

立秋は、昔についていえば日が落ちると心地よい

風が吹き始める時期だったと考えられる<sup>7)</sup>。

され NO<sub>2</sub> となる<sup>10)</sup>。

表 2 調査期間における二十四節気別の NO<sub>2</sub> 濃度

期間	二十四節気	黄経	2010年調査	2011年調査
3月21日～4月4日	春分	0 度	17.2 ppb	16.1 ppb
4月5日～4月19日	清明	15 度	17.0 ppb	14.8 ppb
4月20日～5月4日	穀雨	30 度	17.3 ppb	12.5 ppb
5月5日～5月20日	立夏	45 度	15.4 ppb	15.8 ppb
5月21日～6月5日	小満	60 度	16.5 ppb	14.4 ppb
6月6日～6月20日	芒種	75 度	14.8 ppb	14.5 ppb
6月21日～7月6日	夏至	90 度	15.0 ppb	14.3 ppb
7月7日～7月22日	小暑	105 度	10.7 ppb	8.7 ppb
7月23日～8月6日	大暑	120 度	10.6 ppb	14.3 ppb
8月7日～8月22日	立秋	135 度	10.2 ppb	12.9 ppb
8月23日～9月7日	処暑	150 度	11.9 ppb	11.6 ppb
9月8日～9月22日	白露	165 度	16.9 ppb	11.7 ppb
9月23日～10月7日	秋分	180 度	18.2 ppb	17.5 ppb
10月8日～10月22日	寒露	195 度	20.1 ppb	17.8 ppb
10月23日～11月6日	霜降	210 度	21.4 ppb	22.6 ppb
11月7日～11月21日	立冬	225 度	25.6 ppb	20.7 ppb
11月22日～12月6日	小雪	240 度	25.5 ppb	23.8 ppb
12月7日～12月21日	大雪	255 度	24.9 ppb	27.1 ppb
12月22日～1月4日	冬至	270 度	21.3 ppb	22.1 ppb
1月5日～1月19日	小寒	285 度	24.2 ppb	24.7 ppb
1月20日～2月3日	大寒	300 度	26.9 ppb	20.2 ppb
2月4日～2月18日	立春	315 度	24.8 ppb	25.3 ppb
2月19日～3月5日	雨水	330 度	19.3 ppb	21.1 ppb
3月6日～3月20日	啓蟄	345 度	18.5 ppb	20.7 ppb

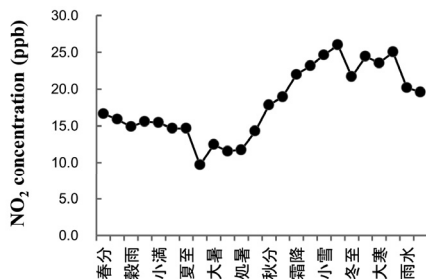
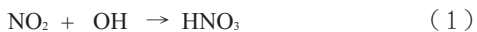


図 3 神奈川県茅ヶ崎市における二十四節気別の NO<sub>2</sub> 濃度（2 年間の平均）

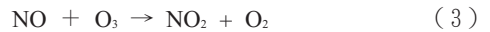
残暑がなお厳しいが

雲の色や風の音に秋の気配が立つ<sup>4)</sup>

2010年調査では小暑から立秋にかけて NO<sub>2</sub> 濃度が低かった。気相反応では OH ラジカルが NO<sub>2</sub> を直接酸化し、HNO<sub>3</sub>（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<sup>9)</sup>。



また NO<sub>2</sub> は、光化学スモッグの主因となる O<sub>3</sub> の生成にも関与する<sup>10)</sup>。また、NO は O<sub>3</sub> によって酸化



ここで、 $h\nu$  は波長 398nm 以下の光を表す。

小暑から立秋の時期に強い日射の影響から主に OH ラジカルによって NO<sub>2</sub> が消失されて NO<sub>2</sub> 濃度が低かったと推測される。

2011年調査では、最高値は大雪の 27.1ppb、最低値は小暑の 8.7ppb となっている。大雪は、日に日に寒さが増していき、現在の都会では慌たしさを増していく時期である<sup>7)</sup>。

南天の実が赤く色づき

北国は雪を纏って冬の姿となる<sup>4)</sup>

これは、前述の12月を中心とした冬季に窒素酸化物が高濃度となる現象<sup>8)</sup>と同様であり、接地逆転層の形成により NO<sub>2</sub> の鉛直拡散が抑制され高濃度になっているものと考えられる<sup>3)</sup>。

小暑は、本格的な暑さが到来する前の段階で、まだ大部分の地方で梅雨が明けていない時期となる<sup>7)</sup>。

梅雨明け近く

暑さは日増しに厳しく

蟬が鳴く<sup>4)</sup>

これは前述の通り、小暑の時期に強い日射の影響から主に OH ラジカルによって NO<sub>2</sub> が消失されて NO<sub>2</sub> 濃度が低かったと推測される。

また、二十四節気別の NO<sub>2</sub> 濃度は冬至に急激な低下が見られ、また小寒時に上昇し、年末年始の NO<sub>2</sub> 濃度の特異性と考えられる。

### 3. 3. 一次汚染物質 NO<sub>x</sub> から二次汚染物質の NO<sub>3</sub> および O<sub>3</sub> へ

わが国における過去120年間の NO<sub>x</sub> 排出量は、生産活動の消長を反映して複雑に変化してきた。1990年代の終わりまで緩やかに増加し、それ以降はやや減少してきた<sup>11)</sup>。

本研究では茅ヶ崎における  $\text{NO}_2$  濃度の動態を解析したが、 $\text{NO}_2$  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<sup>12)</sup>。土器屋・苗村<sup>13)</sup> は、エアロゾルなどの乾性沈着は樹葉へ直接影響を及ぼすだけでなく、降水による捕捉物質の洗浄流出を通して、樹冠下の土壌にも大きな影響を与えていることを指摘している（図4）。

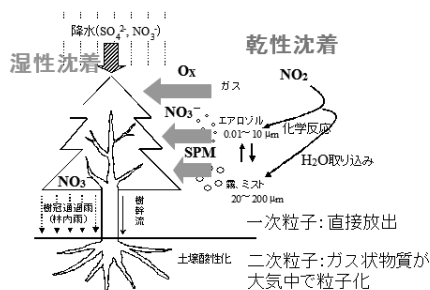


図4 樹木への酸性沈着（土器屋・苗村（2001）に加筆等）

前述の式（1）より、 $\text{NO}_2$  は大気中で  $\text{OH}$  ラジカルによって  $\text{NO}_3^-$  へと酸化される。 $\text{N}$ （窒素）は森林において制限要因であり大気からの微量の  $\text{NO}_3^-$  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  $\text{NO}_3^-$  として流出するなどの森林生態系における窒素飽和問題が生じる<sup>14)</sup>。Naemura *et al.*<sup>15)</sup> は、神奈川県 の鎌倉において、スギ林における林内雨等の調査で森林の窒素飽和について解析し、物質収支のシミュレーションの結果、 $\text{NO}_3^-$  の湿性沈着が  $18.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、乾性沈着が  $49.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  と算定し乾性沈着の重要性を指摘している。

また、 $\text{NO}_2$  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  $\text{O}_3$  へ化学変化し、 $\text{O}_3$  等光化学スモッグが発生する。苗村・渡邊<sup>2)</sup> は、東京圏の中心に位置する東京タワーにおいて夜間、 $\text{NO}_2$  高濃度事例を解析したところ、 $\text{PO}$  濃度について季節別に特徴があり、春季～夏季では時間帯によっては高濃度となり、夜間  $\text{PO}$  濃度が平均  $80 \text{ ppb}$  を越えた

時もいずれも春季～夏季であった。その際、翌日の日中  $\text{PO}$  濃度が平均  $80 \text{ ppb}$  を越え、その3例の内1例では山梨県で、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。また、2006年8月4日の首都圏において光化学スモッグ注意報発令が1都5県に渡り、更に福島県にも及んだが、この日の  $\text{O}_3$  の最高値は茨城県および埼玉県で  $157 \text{ ppb}$ （14時）であり、最高値を記録した時間は群馬県で17時と大気汚染物質の輸送の可能性を示唆した報告がある<sup>16)</sup>。その日は中部日本の典型的な夏季静穏日であり、その日の15時の海面補正気圧分布を解析した結果、長野県や福島県で熱的低気圧が形成されており、その中心部へ向かって大気汚染気塊が移流したことを報告している<sup>16)</sup>。これらの事例から茅ヶ崎市、藤沢市等を含めた湘南都市圏<sup>6)</sup>、横浜市および川崎市由来の  $\text{NO}_2$  が光化学反応を経て汚染気塊が海風によって移流し、隣接する東京都や山梨県に高  $\text{O}_3$  をもたらし、光化学スモッグ注意報が発令される可能性がある。また、季節変動を解析する際に二十四節気は、期間平均として捉えることで、日本の季節変化とも合致している検証もあり<sup>17)</sup>、季節別に細分化できる二十四節気は有用されると考えられる。今後は二十四節気別の  $\text{PO}$  濃度の動態解析等を行っていくことで更なる大気汚染物質の詳細な動態が解明されることが期待される。

## 参考文献

- 1) 渡邊善之・井手神志・佐藤真由・清野弘・苗村晶彦・渡邊明（2014）福島県における高濃度オゾン出現の特徴，第21回大気環境学会北海道東北支部学術集会講演要旨集：20-21。
- 2) 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  $\text{NO}_2$  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：印刷中。
- 3) Naemura, A., Tsuchiya, A., Fukuoka, Y., Nakane, K., Sakugawa, H. and Takahashi, H. (1996) Climatic inversion layer and atmospheric  $\text{NO}_x$  concentration on the slope of forest decline area in the Seto Inland Sea District, Japan, Japanese

- Journal of Biometeorology 33: 131-136.
- 4) 藤原千恵子 (2010) 図説浮世絵に見る日本の二十四節気127pp, 河出書房新社.
  - 5) 福岡義隆 (2010) 環境気候学論文集 (第3集) 159pp.
  - 6) 茅ヶ崎市都市部都市政策課都市政策 (2008) ちがさき都市マスタープラン163pp.
  - 7) 山下景子 (2015) 二十四節気と七十二候の季節手帖223pp, 成美堂出版.
  - 8) 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.
  - 9) 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.
  - 10) 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.
  - 11) 藤田慎一・速水洋・高橋章・光瀬彦哲・三浦和彦・出田智義 (2012) 東京都狛江市における降水組成の経年変化, 環境科学会誌25: 26-36.
  - 12) 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.
  - 13) 土器屋由紀子・苗村晶彦 (2001) 「酸性雨」問題の一側面: エアロゾルの森林生態系への影響, エアロゾル研究16: 30-32.
  - 14) Wright, R.F., Roelof, J.G.M., Bredemeier, M., Blanck, K., Boxman, A.W., Emmett, B.A., Gundersen, P., Hultberg, H., Kjønaas, O.J., Moldan, F., Tietema, A., van Breemen N., and van Dijk, H.F.G. (1995) NITREX: responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen. Forest Ecology and Management 71:163-169.
  - 15) 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.
  - 16) 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.
  - 17) 石原幸司 (2008) 二十四節気は本当に日本の季節変化とずれている?, 天気55: 929-933.

