

## 窒素酸化物種の連続計測 — SDGs との関連性 —

定 永 靖 宗

### 1 はじめに

筆者の専門分野は「大気化学」であるが、本特集号の趣旨から鑑みるに「大気科学」のほうがしっくりくるのではないかと感じた。と言うのは、「大気化学」とはいうものの、化学だけではなく、地球物理学・気象学・農学・生物学等の領域も含めた幅広い学際的な分野だからである。実際、筆者のメインで所属しているコミュニティでは、化学以外の分野の同業者も多く関わりがある（むしろ、人数としては化学以外の分野のほうが多いかもしれない）。

それはともかく、近年「大気科学」の分野で大きく取り上げられたトピックとしては、やはり微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）であろう。2013年初頭に中国でのPM<sub>2.5</sub>汚染がマスコミで大々的に取り上げられたことを皮切りに、世間一般でも中身の詳細はともかく、PM<sub>2.5</sub>という言葉自体は広く知れ渡ることとなった。一方で、2010年代前半以降、中国での大気汚染物質の排出量は減少している<sup>1)</sup>。それに伴い、一般環境大気測定局（一般局）でのPM<sub>2.5</sub>の環境基準達成率は2013年度で16.1%<sup>2)</sup>であったのに対し、2020年度では98.3%<sup>3)</sup>と急速に改善が進んでおり、ごく最近において世間一般ではPM<sub>2.5</sub>問題が下火となってきている。

近年は減少しているものの、いまだ東アジアは地球上でも大気汚染物質の排出量が多い地域であり、その中で特に近年では窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の排出の寄与が高まっている<sup>1)</sup>。このような排出動態の変化は、東アジア地域におけるPM<sub>2.5</sub>の「質」を変化させている。実際国内でも、観測と化学輸送モデル双方から、西日本におけ

るPM<sub>2.5</sub>中の硝酸アンモニウムの濃度が増加しているという報告がある<sup>4)</sup>。

排出されたNO<sub>x</sub>は大気中で複雑な（光）化学反応を起こす。図1に大気中での窒素酸化物種の主な反応動態を示す。大気中へ一次排出されるNO<sub>x</sub>は主にNOで、排出後NOはNO<sub>2</sub>と、太陽光による光化学定常状態（PSS）を形成する<sup>5)</sup>。PSSにおいてはNOとNO<sub>2</sub>が互いに素早く変換されるため、一般にNOとNO<sub>2</sub>を総称してNO<sub>x</sub>と呼ばれる。またPSSの過程で光化学オキシダントの主成分であるO<sub>3</sub>を生成する。それゆえ、NO<sub>x</sub>はO<sub>3</sub>の直接の前駆物質であることが知られている。また、一般局での光化学オキシダントの環境基準達成率は2020年度において0.2%と<sup>3)</sup>、例年ほぼ0%であり、いまだ解決が困難な大気環境問題である。

図1に示す通り、NO<sub>x</sub>は大気中でさらに酸化され、様々な形態の窒素酸化物種に変化する。NO<sub>x</sub>とその酸化生成物を総称して、総反応性窒素酸化物NO<sub>y</sub>と呼ばれる。NO<sub>y</sub>を構成する成分として例えば、有機過硝酸PNs（ROONO<sub>2</sub>；Rは有機骨格）はPAN（peroxyacetyl nitrate）に代表されるように、O<sub>3</sub>と同じ光化学オキシダントの成分である。また、有機硝酸ONs（RONO<sub>2</sub>）はNO<sub>x</sub>と比べて大気寿命が長く、NO<sub>x</sub>の貯留形態としてふるまう。NO<sub>3</sub>ラジカルは酸化剤であり、大気中の揮発性有機化合物を酸化する化学種の一つである。大気中での酸化反応を経た窒素酸化物種の最終形態はガス状硝酸（HNO<sub>3</sub>(g)）もしくは粒子状硝酸（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p)）である。これらは最終的に沈着により大気中から除去され、地球上での窒素循環の一部を担うことになる。

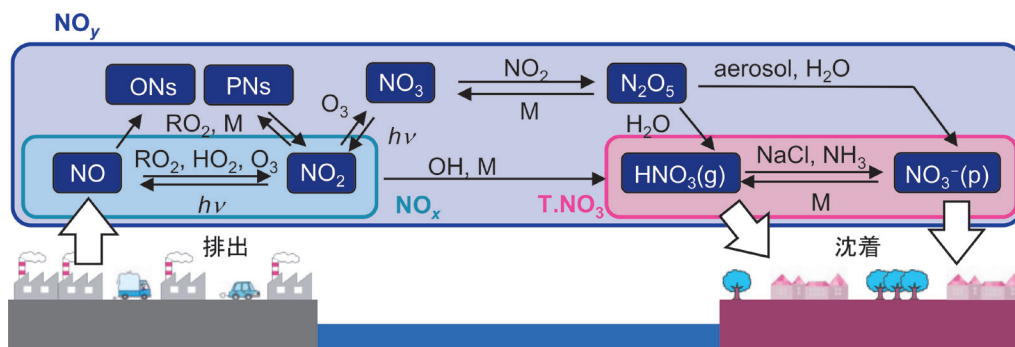


図1 大気中の窒素酸化物種の主な反応動態

ここで、T.NO<sub>3</sub>は全硝酸（HNO<sub>3</sub>(g)とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p)の和）を示す。また、Mは反応の第三体を示し、大気中では主にN<sub>2</sub>やO<sub>2</sub>である。

窒素循環も大きく関係するものとして、プラネタリー・バウンダリーと呼ばれる概念がある。これは現在のいくつかの地球環境問題について「持続可能な限界」を示したものである<sup>6)7)</sup>。その中で、窒素循環が大きくかわる「窒素による環境負荷」は2番目にリスクが大きい極めて深刻な問題とされている（なお、1番目は「生物多様性の損失」とされている）。その中で、大気由来の反応性窒素の沈着による水圏へのインプットについても有意な寄与があると見積もられている<sup>8)</sup>。

プラネタリー・バウンダリーの概念は本特集のテーマであるSDGsにも大きな影響を与えている。窒素負荷の増大は直接的に「14海の豊かさを守ろう」「15陸の豊かさを守ろう」に影響を与えうる。また、土壌への窒素負荷の増大は、土壌中からの亜酸化窒素 $N_2O$ の放出増大につながる。 $N_2O$ は主要な温室効果ガスの一つである。一方、大気中でも $NO_x$ は $O_3$ の前駆物質であることは先にも述べたが、 $O_3$ も主要な温室効果ガスの一つである。すなわち、大気中の窒素酸化物や窒素循環は「13気候変動に具体的な対策を」にも影響している。

図1にも示した通り、窒素酸化物種の反応動態は複雑であり、また、大気圏からの除去プロセス、すなわち大気圏から水圏への沈着プロセスも不明な点が多い。プラネタリー・バウンダリーやSDGsの観点からも、地球上における反応性窒素の動態解明は必須であり、その一つである大気中での窒素酸化物種の動態解明も必要である。そのため、大気中の窒素酸化物種の分析・観測が重要な要素の一つである。また、大気圏は速いタイムスケールで変遷することから、高時間分解能での連続観測ができることが望ましい。

筆者らはこれまで、大気中の窒素酸化物種を高確度だけでなく、連続観測が可能な装置を開発し、様々な地点で観測を行ってきた。本稿では、開発した装置の一部と、それらを用いた観測事例について紹介する。

## 2 大気中窒素酸化物種の分析

### 2.1 窒素酸化物 $NO_x$

$NO_x$ のうち $NO_2$ は有害大気汚染物質に指定されており、環境基準が設けられている。そのため、全国の様々な地点で $NO_x$ 濃度の常時監視が実施されており、湿式法であるザルツマン法と乾式法であるオゾン化学発光法が $NO_x$ 測定のための公定法として定められている<sup>9)</sup>。近年ではオゾン化学発光法が主に採用されており、2019年度では $NO_x$ 濃度を測定している常時監視測定局の96.0%において使用されている<sup>10)</sup>。オゾン化学発光法で直接測定しているのは $NO$ 濃度である。 $NO_2$ 濃度については“コンバータ”と呼ばれる還元触媒を用いて $NO_2$ を $NO$ に還元した後、オゾン化学発光法で $NO$ 濃度を定量することにより測定している。しかしながら、オゾン化学発光法で通常使用されているコンバータは、 $NO_2$ 以

外の $NO_y$ の成分も $NO$ に還元し、 $NO_x$ 濃度を過大評価することが知られている。すなわち、常時監視測定局で測定されている $NO_2$ 、 $NO_x$ 濃度は正確な濃度を反映されていない場合が多い。

オゾン化学発光法による $NO_2$ 、 $NO_x$ 測定を高確度化するために、近紫外光を用いて $NO_2$ を $NO$ に光分解する装置である、光分離変換器(PLC)が研究レベルでは用いられている。紫外光の波長域を適切に選択することで、他物質の干渉を受けることなく、選択的に $NO_2$ を $NO$ へ光分解することができる。PLC自体は20世紀から存在しているが、かつては光源にキセノンランプ等が用いられており、連続観測は不向きであった。近年では光源として近紫外発光ダイオードを用いることで(LED-PLC)、 $NO_2$ から $NO$ への変換効率を安定化させることができ、連続観測が可能となっている<sup>11)</sup>。

筆者らは以前、大阪府立大学(現:大阪公立大学)中百舌鳥キャンパスにおいて、公定法とLED-PLCを用いた方法とで、 $NO_x$ 濃度の相互比較観測を通年で実施した<sup>12)</sup>。その結果を図2に示す。なお、本節ではLED-PLCで測定した窒素酸化物濃度を $NO_x^*$ とし、公定法で測定した濃度については $NO_x$ と定義する。

$NO_x$ 、 $NO_x^*$ の観測期間全体における平均濃度はそれぞれ14.8、18.2 ppbv (parts per billion by volume)であった。また、 $NO_x$ 、 $NO_x^*$ の濃度変動はおおむね一致していた一方、濃度レベルは $NO_x^*$ が $NO_x$ より全体的に高い結果となり、公定法が時間帯や季節を問わず、窒素酸化物濃度を過大評価する傾向にあることが明らかとなった。 $NO_x^*$ と $NO_x$ の濃度差の最大値は14.4 ppbv、平均値は3.4 ppbvであった。 $NO_x$ に対する $NO_x^*$ の濃度比については、最大値が4.8、平均値が1.3であり、公定法が平均して3割程度窒素酸化物濃度を過大評価していた。

過大評価の要因については既報<sup>12)</sup>にあるため割愛するが、現行の常時監視測定局で測定されている窒素酸化物濃度については、実際より高い値が提供されていることは確かである。環境基準達成率の視点で見れば、現行の公定法はより厳しい値を出すことになるため、問題は少ないのかもしれない。しかしながら、「1.はじめに」でも述べた通り $NO_x$ は大気中から窒素循環に影響を及

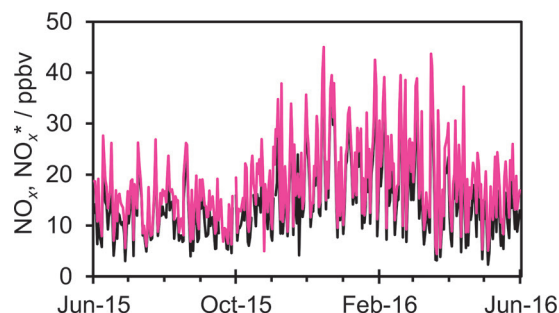


図2 大阪府立大学(現:大阪公立大学)中百舌鳥キャンパスで測定された $NO_x$ (黒線)、 $NO_x^*$ (赤線)の濃度変動

ばすトリガーとなる物質であり、また、光化学オキシダントの主要な前駆物質でもある。これらの環境問題の解明・対策のためにも、現状の公定法を抜本的に見直し、正確な窒素酸化物濃度を提供することが重要であると考えられる。

## 2.2 総反応性窒素酸化物 NO<sub>y</sub>, 硝酸

2.1 節で述べたコンバータでは NO<sub>2</sub> 以外の NO<sub>y</sub> の成分も NO に還元される。この性質を利用してコンバータを NO<sub>y</sub> の測定に用いることができる。すなわち、コンバータで NO<sub>y</sub> を NO に還元し、その後オゾン化学発光法で NO を定量することにより、NO<sub>y</sub> 濃度を求めることができる。ただし、大気導入口からコンバータまでの配管内で、HNO<sub>3</sub>(g) の吸脱着や、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) の損失があるため、コンバータを屋外に設置するなど、大気導入口からコンバータまでの配管の長さを最小限にする必要がある。

HNO<sub>3</sub>(g) や NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) の測定については、デニューダー法やフィルター法が一般に広く用いられている。これらはデニューダーやフィルターに対象物質を捕集し、その後イオンクロマトグラフィーなどの分析装置で計測する方法である。これらの方法は簡便ではあるが、捕集・分析に手間がかかるのと、感度を担保するためには長い捕集時間が必要であり、時間分解能の高い観測はできない。一方、化学イオン化質量分析法<sup>13)</sup>などのオンライン測定法も存在し、秒単位など高い時間分解能での測定も可能であるが、オペレーションが煩雑なのと、非常に高価であることが難点である。

筆者らは、NO<sub>y</sub> の測定を応用して HNO<sub>3</sub>(g) や NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) の連続測定装置を開発した<sup>14)~16)</sup>。装置の概要を図3に示す。本装置では Ch.1~3 の三つのチャンネルが設けられている。Ch.1 では Mo 還元触媒（本装置では、コンバータとして Mo 還元触媒を用いている）が設置されており、大気中の NO<sub>y</sub> 濃度が測定される。Ch.2 では Mo 還元触媒とその前段に HNO<sub>3</sub>(g) スクラバーが設置されており、NO<sub>y</sub>-HNO<sub>3</sub>(g) 濃度が測定される。HNO<sub>3</sub>(g) スクラバーとしては、内壁に NaCl を塗布した環状デニューダーを用いている。Ch.3 では Mo 還元触媒と

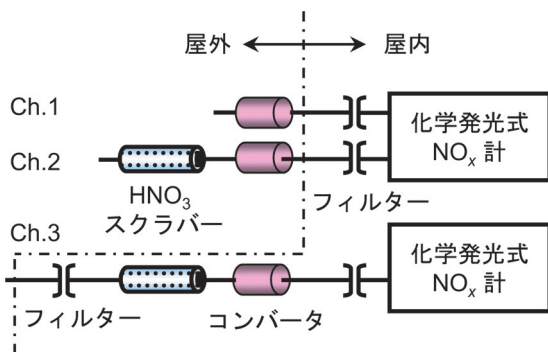


図3 NO<sub>y</sub>, 硝酸濃度測定装置の概略図

その前段に HNO<sub>3</sub>(g) スクラバーと、さらにその前段に粒子を取り除くテフロンフィルターが設けられおり、NO<sub>y</sub>-HNO<sub>3</sub>(g)-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) 濃度が測定される。それぞれのチャンネルで測定された濃度を C<sub>Ch.1</sub>~C<sub>Ch.3</sub> とすると、HNO<sub>3</sub>(g), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) 濃度は以下の式 (1), (2) により求めることができる。

$$[\text{HNO}_3(\text{g})] = C_{\text{Ch.1}} - C_{\text{Ch.2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$[\text{NO}_3^-(\text{p})] = C_{\text{Ch.2}} - C_{\text{Ch.3}} \dots\dots\dots (2)$$

なお、Ch.1 と Ch.2 においては配管内での HNO<sub>3</sub>(g) の吸脱着や、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) の損失があるため、HNO<sub>3</sub>(g) スクラバーやコンバータは屋外の大気導入口直後に設置する必要がある。一方、Ch.3 では HNO<sub>3</sub>(g) や、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) を除去してからコンバータに導入するため、HNO<sub>3</sub>(g) スクラバーやコンバータを屋外に設置する必要はない。

一般に、オゾン化学発光式 NO<sub>x</sub> 計が持つチャンネル数は二つであり、実際にこの方法で硝酸をガス・粒子別で測定するには、NO<sub>x</sub> 計が 2 台必要である。筆者らはこれまで予算的事情 (?) 等から、硝酸については HNO<sub>3</sub>(g) と NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) の和である全硝酸 (T.NO<sub>3</sub>) の観測<sup>17)</sup>や、HNO<sub>3</sub>(g) のみの観測<sup>18)</sup>を行ってきた。例として、鳥取砂丘で観測された NO<sub>y</sub> と HNO<sub>3</sub>(g) 濃度の観測結果の一例を図4に示す。詳細は既報<sup>18)</sup>にあるためごく簡単に述べるが、観測結果から、大陸から越境輸送される硝酸アンモニウムが貯留形態としてふるまい、大陸から離れた地域での HNO<sub>3</sub>(g) の発生源になる可能性が考えられた。一般に HNO<sub>3</sub>(g) は沈着速度が大きく、大陸から直接 HNO<sub>3</sub>(g) が越境輸送されづらいが、このように硝酸アンモニウムを介することで、より広い範囲で HNO<sub>3</sub>(g) が越境輸送されうる。このような観測を行っていくことで、硝酸の輸送過程などの動態に関する知見が積み重なっていくことが期待される。

鳥取では NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) の観測は行わなかったが、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) も含めた動態についての知見も総合的に得るために、ごく最近では大陸からほど近い、長崎県五島列島福江島において、硝酸のガス・粒子別での観測を実施している。

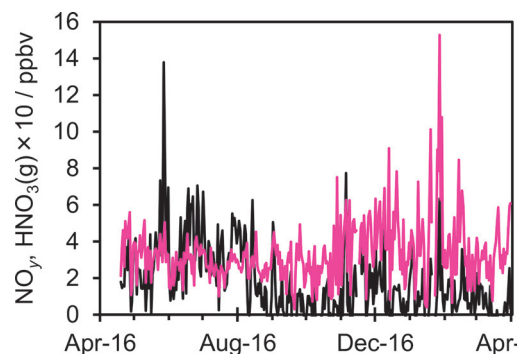


図4 鳥取で測定された NO<sub>y</sub> (赤線), HNO<sub>3</sub>(g) (黒線) の濃度変動

### 2・3 有機過硝酸 PN<sub>s</sub>, 有機硝酸 ON<sub>s</sub>

大気中における PN<sub>s</sub> や ON<sub>s</sub> の観測事例は NO<sub>x</sub> や硝酸と比べると少なく、特に国内での事例は非常に限られている<sup>19)20)</sup>。その理由の一つとして、測定法が挙げられる。PN<sub>s</sub> や ON<sub>s</sub> の測定として広く用いられている方法は、ガスクロマトグラフ/電子捕獲型検出器である。この方法では放射性同位体である <sup>63</sup>Ni を用いるため、国内での法規制の問題から、野外での使用を非常に困難にしている。

筆者らは、PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> が熱により NO<sub>2</sub> に分解する特性を利用して、熱分解装置とキャピティ減衰位相シフト分光法 (CAPS 法) による NO<sub>2</sub> 測定装置<sup>21)</sup> を組み合わせた PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> 濃度測定装置 (TD-CAPS 法) を開発した。本方法では、ガスクロマトグラフを用いた測定とは異なり、PN<sub>s</sub> や ON<sub>s</sub> の種類別測定はできないが、NO<sub>2</sub> 検出器の時間分解能が高ければ、高時間分解能で PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> の総量の連続測定が可能である。PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> を熱分解して生成した NO<sub>2</sub> を測定する手法としては、21 世紀初頭に熱分解/レーザー誘起蛍光法 (TD-LIF 法) による測定装置が先に開発されているが<sup>22)</sup>、NO<sub>2</sub> の検出装置として LIF 法の代わりに操作が簡便な CAPS 法を用いることで、野外での連続観測が容易に行えるようになった<sup>23)</sup>。

TD-CAPS 法の装置の概要を図 5 に示す。本装置では室温および 160 °C、360 °C に加熱された、計 3 本の石英管を設置し、それぞれを NO<sub>2</sub> ライン、PN<sub>s</sub> ライン、ON<sub>s</sub> ラインとした。三つのラインを通った試料大気は、電磁弁によって切り替えられ CAPS-NO<sub>2</sub> 計に送られる。NO<sub>2</sub> ラインを通った試料大気からは大気中の NO<sub>2</sub> 濃度のみが測定される。PN<sub>s</sub> ラインでは PN<sub>s</sub> が熱分解され NO<sub>2</sub> へと変換されるため、大気中の NO<sub>2</sub> と PN<sub>s</sub> 濃度の和に相当する NO<sub>2</sub> 濃度が測定される。ON<sub>s</sub> ラインでは PN<sub>s</sub> に加え ON<sub>s</sub> も熱分解され、大気中の NO<sub>2</sub>, PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> 濃度の和に相当する NO<sub>2</sub> 濃度が測定される。各ラインで観測された NO<sub>2</sub> 濃度の差分をとることで、PN<sub>s</sub> と ON<sub>s</sub> の濃度を定量する。具体的には、以下の式 (3)、(4) により PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> 濃度を求める。

$$\begin{aligned}
 [\text{PN}_s] &= [\text{PN}_s + \text{NO}_2] - [\text{NO}_2] \\
 &= [\text{NO}_2]_{\text{PN}_s \text{ ライン}} - [\text{NO}_2]_{\text{NO}_2 \text{ ライン}} \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{ON}_s] &= [\text{ON}_s + \text{PN}_s + \text{NO}_2] - [\text{PN}_s + \text{NO}_2] \\
 &= [\text{NO}_2]_{\text{ON}_s \text{ ライン}} - [\text{NO}_2]_{\text{PN}_s \text{ ライン}} \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> に関しては、硝酸と同様に、大陸からの越境輸送の寄与を調べるため、石川県能登半島珠洲市において連続観測を実施した。その観測結果の一例を図 6 に示す。こちらも詳細は既報<sup>24)</sup>にあるためごく簡単に述べるが、観測期間中における PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> の NO<sub>y</sub> に対する割合は平均でそれぞれ約 15, 11 % であった。PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> はこれまで観測事例が少ないこともあり、あまり注目されていないが、NO<sub>y</sub> に対する割合を考えると、決して無視できない存在であることがわかる。また、大陸からの越境輸送に関しては、PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> の季節変動、日内変動や後方流跡線解析から、寒候期においては PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> の濃度変動は越境輸送に支配されている一方、暖候期においては越境輸送ではなく、比較的近傍での光化学生成に支配されていることが明らかとなった。

PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> についても、ごく最近長崎県五島列島福江島において連続観測を開始している。HNO<sub>3</sub>(g) や NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p) とも同時観測を行うことで、無機・有機硝酸の動態に関する知見を深めることができると考えている。

### 3 おわりに

本稿で紹介した窒素酸化物種測定装置の時間分解能は、精度や実際の濃度レベルにもよるが、最短で分単位での測定が可能である。また、本稿では紙面の都合上、窒素酸化物種の測定装置について、筆者らがこれまでに開発してきたものに限定して述べてきたが、近年これら以外の様々な窒素酸化物種の測定装置が開発されている。

窒素酸化物種の動態は不明な点が多く、国内外での精力的な観測が望まれる。また、化学輸送モデリング研究との連携も、窒素酸化物種については、現状で十分とは言えず、今後の観測の積み重ねや、モデリング研究との有機的な連携が、窒素酸化物種の詳細な動態解明につながり、ひいては SDGs 達成の一部に貢献できることも

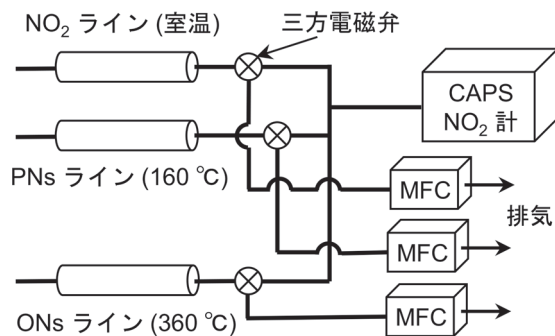


図 5 PN<sub>s</sub>, ON<sub>s</sub> 濃度測定装置の概略図  
MFC はマスフローコントローラーを示す

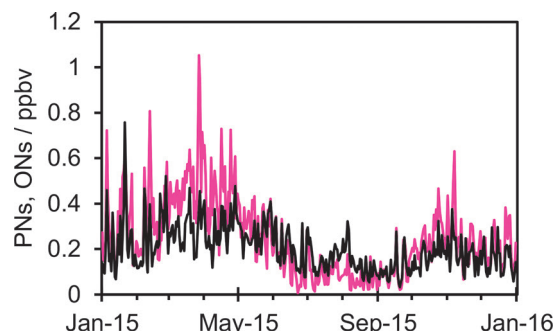


図 6 珠洲で測定された PN<sub>s</sub> (赤線)、ON<sub>s</sub> (黒線) の濃度変動

期待される。

## 文 献

- 1) B. Zheng, D. Tong, M. Li, F. Liu, C. Hong, G. Geng, H. Li, X. Li, L. Peng, J. Qi, L. Yan, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Zheng, K. He, Q. Zhang : *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 14095 (2018).
- 2) 環境省：“平成 25 年度大気汚染状況”，〈[https://www.env.go.jp/air/osen/jokyo\\_h25/index.html](https://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h25/index.html)〉, (accessed 2022. 7. 13).
- 3) 環境省：“令和 2 年度 大気汚染状況について”，〈[https://www.env.go.jp/air/osen/jokyo\\_r1\\_1/post\\_97.html](https://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_r1_1/post_97.html)〉, (accessed 2022. 7. 13).
- 4) I. Uno, Z. Wang, S. Itahashi, K. Yumimoto, Y. Yamamura, A. Yoshino, A. Takami, M. Hayasaki, B.-G. Kim : *Sci. Rep.*, **10**, 6450 (2020).
- 5) J. Matsumoto, N. Kosugi, A. Nishiyama, R. Isozaki, Y. Sadanaga, S. Kato, H. Bandow, Y. Kajii : *Atmos. Environ.*, **40**, 3230 (2006).
- 6) W. Steffen, K. Richardson, J. Rockström, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, R. Biggs, S. R. Carpenter, W. de Vries, C. A. de Wit, C. Folke, D. Gerten, J. Heinke, G. M. Mace, L. M. Persson, V. Ramanathan, B. Reyers, S. Sörlin : *Science*, **347**, 1259855 (2015).
- 7) L. Persson, B. M. C. Almqvist, C. D. Collins, S. Cornell, C. A. de Wit, M. L. Diamond, P. Fantke, M. Hasselöv, M. MacLeod, M. W. Ryberg, P. S. Jørgensen, P. Villarrubia-Gómez, Z. Wang, M. Z. Hauschild : *Environ. Sci. Technol.*, **56**, 1510 (2022).
- 8) A. Ito, K. Nishina, K. Ishijima, S. Hashimoto, M. Inatomi : *Prog. Earth Planet. Sci.*, **5**, 55 (2018).
- 9) 環境省：“環境大気常時監視マニュアル 第 6 版”，(2010).
- 10) 国立環境研究所：“大気汚染常時監視データ”，〈<https://tenbou.nies.go.jp/download/>〉, (accessed 2022. 7. 21).
- 11) Y. Sadanaga, Y. Fukumori, T. Kobashi, M. Nagata, N. Takenaka, H. Bandow : *Anal. Chem.*, **82**, 9234 (2010).
- 12) 定永靖宗, 上野友之, 佐藤啓市 : 大気環境学会誌, **52**, 81 (2017).
- 13) R. Dörich, P. Eger, J. Lelieveld, J. N. Crowley : *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 5319 (2021).
- 14) Y. Sadanaga, A. Yuba, J. Kawakami, N. Takenaka, M. Yamamoto, H. Bandow : *Anal. Sci.*, **24**, 967 (2008).
- 15) Y. Sadanaga, H. Imabayashi, T. Suzue, H. Kimoto, T. Kimoto, N. Takenaka, H. Bandow : *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L21810 (2008).
- 16) A. Yuba, Y. Sadanaga, A. Takami, S. Hatakeyama, N. Takenaka, H. Bandow : *Anal. Chem.*, **82**, 8916 (2010).
- 17) Y. Sadanaga, R. Takaji, A. Takami, H. Bandow : *Aerosol Air Qual. Res.*, **17**, 2981 (2017).
- 18) R. Nojiri, K. Osada, Y. Kurosaki, M. Matsuoka, Y. Sadanaga : *Atmos. Environ.*, **274**, 118988 (2022).
- 19) 前田淳, 坂東 博, 渡辺征夫, 駒崎雄一, 村野健太郎, 畠山史郎 : 大気環境学会誌, **36**, 22 (2001).
- 20) H. Tanimoto, H. Furutani, S. Kato, J., Hirokawa, Y. Makide, H. Akimoto : *J. Geophys. Res.*, **107**, 4747 (2002).
- 21) P. L. Kezian, S. C. Herndon, A. Freedman : *Anal. Chem.*, **77**, 724 (2005).
- 22) D. A. Day, P. J. Wooldridge, M. B. Dillon, J. A. Thornton, R. C. Cohen : *J. Geophys. Res.*, **107**, 4046 (2002).
- 23) Y. Sadanaga, R. Takaji, A. Ishiyama, K. Nakajima, A. Matsuki, H. Bandow : *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 074102 (2016).
- 24) Y. Sadanaga, A. Ishiyama, R. Takaji, A. Matsuki, S. Kato, K. Sato, K. Osada, H. Bandow : *Atmos. Environ.*, **196**, 20 (2019).



定永靖宗 (Yasuhiro SADANAGA)

大阪公立大学大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1)。東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了。博士 (理学)。《現在の研究テーマ》大気中窒素酸化物種および光化学オキシダントの動態解明。《主な著書》“大気環境の事典”，(分担執筆)，(朝倉書店)。E-mail : sadanaga@omu.ac.jp