

# 沖縄県うるま市における乾性沈着の特徴

前田美奈子・城間朝彰・野波秀行・田崎盛也・友寄喜貴

## Characteristics of Dry Deposition at Uruma, Okinawa

Minako MAEDA, Tomoaki SHIROMA, Hideyuki NOHA,  
Moriya TASAKI and Nobutaka TOMOYOSE

**要旨：**一般大気環境の酸性雨調査地点に位置づけられているうるま局における大気汚染状況を把握するため、5段フィルタパック法により、2019年度から2021年度まで乾性沈着のイオン成分濃度調査を行った。酸性成分の全硫黄成分（非海塩性  $\text{SO}_4^{2-}(\text{p})+\text{SO}_2(\text{g})$ ）は全国及び辺戸岬と同レベルであり、高濃度期は越境大気汚染の影響が示唆された。全硝酸成分（ $\text{NO}_3^-(\text{p})+\text{HNO}_3(\text{g})$ ）は全国と同レベルであったが、辺戸岬よりやや高い濃度を示し、自動車排出ガス等の地域的影響が示唆された。塩基性成分である全アンモニア成分（ $\text{NH}_4^+(\text{p})+\text{NH}_3(\text{g})$ ）及び非海塩性  $\text{Ca}^{2+}$  は全国及び辺戸岬と比較して高濃度であった。月別に風向きを確認したところ、全アンモニア成分は周辺の養豚場等由来、非海塩性  $\text{Ca}^{2+}$  は生コン製造工場由来の地域的な汚染の影響が示唆された。

**Key words：**乾性沈着、5段フィルタパック法、越境大気汚染、沖縄県

## I はじめに

大気汚染物質の二酸化硫黄（以下、「 $\text{SO}_2$ 」という。）や窒素酸化物（以下、「 $\text{NO}_x$ 」という。）等は、主に化石燃料の燃焼等により大気中に排出され、大気中で酸化され硫酸や硝酸となり、雨や土壌の酸性化の原因となる。このとき、雨や霧として地表に沈着することを湿性沈着と呼び、大気中からガス状成分や粒子状成分として直接地表に沈着することを乾性沈着と呼ぶ。降水というイベントとともに起こる湿性沈着とは異なり、乾性沈着は、降水の有無にかかわらず常に起こっている現象である。短期間の乾性沈着量は小さなものであるが、1年間の積算になると湿性沈着に匹敵する量になる<sup>1)</sup>。

今回、一般環境に位置づけられているうるま局における大気汚染状況を把握するため、2019年度から2021年度までの乾性沈着調査で得られた、イオン成分濃度を基に解析したので報告する。

## II 方法

### 1. 調査地点

沖縄県の酸性雨調査地点であるうるま局（沖縄県うるま市兼箇段。以下、「うるま」という。）にて調査を実施した（図1）。うるまは沖縄島中部に位置し、周辺は畑地が主であり養豚・養鶏場が点在し、生コン製造工場が1カ所存在している。大規模な  $\text{SO}_2$  及び  $\text{NO}_x$  発生源はなく、主要幹線道路からも離れており、

最も近い海岸から約3kmの距離がある。

また、比較対象として沖縄県内のバックグラウンド地点として位置づけられる辺戸岬局（沖縄県国頭村宜名真。以下、「辺戸岬」という。）のデータを用いた。辺戸岬は沖縄島最北端に位置し、周辺にはサトウキビ畑、原野が広がる。周辺に工場や養豚場等の大気汚染物質の発生源となる施設はない。海岸からの距離は約200mである。

### 2. 調査期間

2019年4月1日から2022年3月27日までのデータを使用した。月区切りについては全国環境研協議会第6次酸性雨全国調査（以下、「全環研調査」という。）に合わせて集計した。季節は気象庁に準じ、3～5月を春期、6～8月を夏期、9～11月を秋期、12～2月を冬期とした。

### 3. 調査対象物質及び測定方法

乾性沈着試料の採取は全環研調査の実施要領<sup>2)</sup>に基づき、原則2回/月（2週間連続採取）を行った。5段フィルタパック法の各ろ紙と捕集成分について表1に示す。ろ紙（I0, F0, F1及びF3）は純水を用いて抽出し、ろ紙（F2及びF2'）は0.05%（v/v） $\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液で抽出した。抽出後、イオンクロマトグラフ分析装置（Metrohm 850 Professional IC）を用いてイオン成分（ $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ 及び $\text{SO}_4^{2-}$ ）の濃度を測定した。



図 1. 調査地点.

表 1.ろ紙の種類と捕集成分.

番号	ろ紙種類	捕集成分
I0	石英	粗大粒子
F0	テフロン	PM <sub>2.5</sub> (微小粒子)
F1	ナイロン	SO <sub>2</sub> , HONO, HNO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub>
F2	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 含浸	SO <sub>2</sub> , HONO, HCl,
F2'	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 含浸	SO <sub>2</sub> , HCl, NO <sub>2</sub>
F3	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 含浸	NH <sub>3</sub>

### Ⅲ 結果と考察

#### 1. 粒子状及びガス状成分総計の全国との比較

以下、各粒子状成分名に付してある(p)は粒子状成分を、(g)はガス状成分を表す。

各成分について全環研調査<sup>3,4)</sup>に参加している全国の調査地点(2019年度:25地点,2020年度:24地点)及びバックグラウンド地点である辺戸岬と比較を行った。酸性成分の全硫黄成分(非海塩性 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(p)+SO<sub>2</sub>(g))及び全硝酸成分(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(p)+HNO<sub>3</sub>(g))、塩基性成分の全アンモニア成分(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(p)+NH<sub>3</sub>(g))及び非海塩性 Ca<sup>2+</sup>の年度毎の月別平均値を図2に示す。「非海塩性」はNa<sup>+</sup>をすべて海塩由来とし海塩組成比を算出後、海塩由来分を除外した人為的発生源由来の量を表す。

うるまの全硫黄成分の月平均値は6~8月の夏期に濃度が低下し、10月以降に高くなる傾向がみられた。うるまと全国の地点別月平均の中央値(以下、「全国中央値」という。)及び辺戸岬の平均値は同レベルであった。

うるまの全硝酸成分の月平均値は6~8月の夏期に濃度が低下し、秋~春期まではほぼ横ばいで推移する傾向であった。うるまは全国中央値と同レベルで推移していたが、辺戸岬の平均値よりやや高い傾向を示した。うるまは主要幹線道路から離れているが、県道沿いであり、辺戸岬より交通量が多いことから、地域的な自動車排出ガス等の影響を受けたと考えられる。

うるまの全アンモニア成分の月平均値は、2020年6月を除き、全国中央値及び辺戸岬の平均値より明らかな高濃度を示したことから、地域的発生源の影響を受けたことが示唆された。

うるまの非海塩性 Ca<sup>2+</sup>の月平均値は6月を除き、全国中央値及び辺戸岬の平均値より明らかに高濃度であった。非海塩性 Ca<sup>2+</sup>は黄砂や土壌由来のものが多く、全国及び辺戸岬では黄砂が到達する春期に高くなる傾向がみられたが、うるまでは年間を通して高濃度で推移しており、地域的発生源の影響が示唆された。

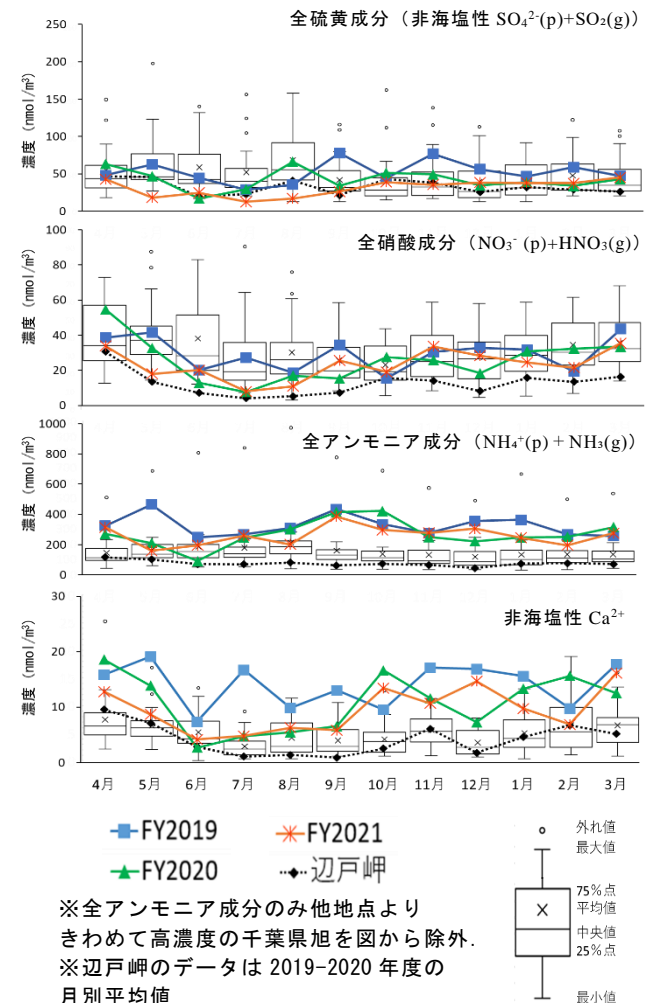


図 2. 各成分における月平均値の経月変化及び全国の地点別月平均値の分布。折れ線はうるま及び辺戸岬、箱ひげ図は全環研調査の分布を示す。

#### 2. 季節別の後方流跡線解析

季節ごとにどの地域由来の空気塊がうるまへ流入しているのか確認するため、NOAA(米国海洋気象局)<sup>5)</sup>のHYSPLITを用いて、2019~2021年度の3年分の後方流跡線を作成し、由来地域ごとに東アジア、日本、東南アジア、太平洋に区分した(図3)。解析の結果、夏期は太平

洋からの清浄な空気塊の流入が9割以上を占めていた。東アジア地域由来の空気塊の流入が秋期から増え始め、冬期は7割程度、春期も4~6割を占めていた(図4)。全硫黄成分、全硝酸成分及び非海塩性Ca<sup>2+</sup>は夏期に低濃度で推移し、秋~春期にかけて高濃度となる傾向は、東アジアからの越境大気汚染による影響であることが示唆された。

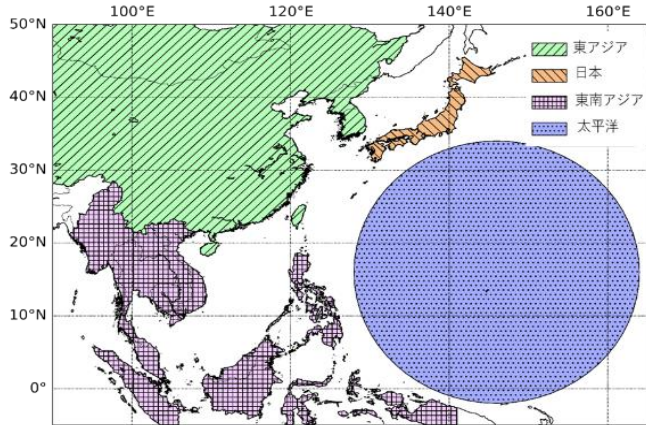


図3. 後方流跡線解析地域区分。

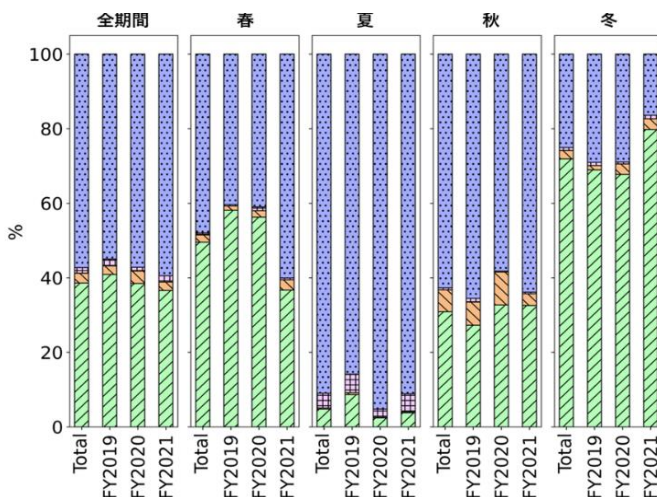


図4. 後方流跡線の由来地域別割合。流跡線がどの地域を通過したかによって分類した。東アジアと日本を通過した場合は両方にカウントされる(凡例は図3を参照)。

### 3. アンモニア成分濃度変動と風向の関係

全国では大気中アンモニア年平均濃度(ppb)は半径約20 km 円内の周辺発生量(t km<sup>-2</sup>)で1:1の直線付近に分布するが、うるまでは3:1程度と高くなっていたことが報告されている<sup>4)</sup>。これはうるまの約1 km 以内に養豚場が7カ所<sup>6)</sup>存在しており、発生源と距離が近いためと考えられる。養豚場は北、北東及び南東の方角に点在しているため、風向きとアンモニア成分濃度の関係を調査した。アンモニア成分濃度の低い月の代表として2020年

6月、2021年5月、6月及び8月を、濃度が高い月の代表として2019年5月、2020年10月、2021年9月及び12月を選択した(図5)。風向はうるまに最も近い観測所であるうるま市宮城島のデータ<sup>7)</sup>を使用した。低濃度時は養豚場のない南西~南側からの風が多く、高濃度時は養豚場がある北東及び南東からの風が多い。図示していないが、他の月でも濃度と風向の関係は同様な傾向であった。よって、全アンモニア成分濃度は近隣の養豚場等由来の地域的な汚染の影響であることが示唆された。

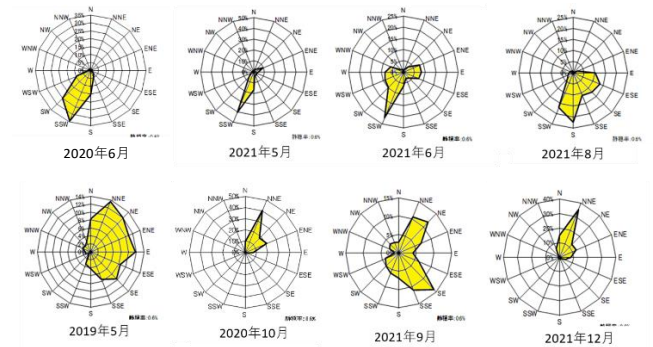


図5. 全アンモニア成分濃度が低濃度時(上段)及び高濃度時(下段)における風向の出現頻度。

### 4. 非海塩性Ca<sup>2+</sup>濃度変動と風向の関係

非海塩性Ca<sup>2+</sup>の高濃度は、当研究所北東350 mに位置する生コン製造工場由来のコンクリート原料となる石灰(炭酸カルシウム:CaCO<sub>3</sub>)の影響が考えられる。そこで風向きと非海塩性Ca<sup>2+</sup>濃度の関係を調査した。非海塩性Ca<sup>2+</sup>濃度の低い月の代表として、2021年度の6~9月を、濃度が高い月の代表として2021年度の10月~1月を選択した(図6)。低濃度時は南東からの風が多く、生コン製造工場のある北東からの風は少ない。高濃度時は、北東~北北東からの風が多い。よって、非海塩性Ca<sup>2+</sup>は生コン製造工場由来の地域的な汚染の影響であることが示唆された。

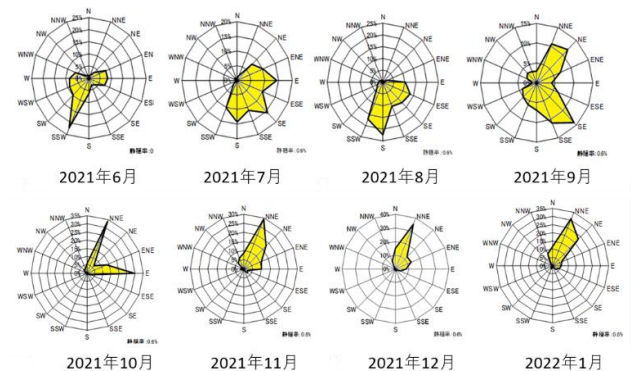


図6. 非海塩性Ca<sup>2+</sup>濃度の低濃度時(上段)及び高濃度時(下段)における風向の出現頻度。

#### IV まとめ

一般大気環境に位置づけられているうるまにおいて乾性沈着調査を実施したところ、全硫黄成分濃度は全国及び辺戸岬と同レベルであった。全硝酸成分濃度は全国と同レベルであるが辺戸岬より高いことから、自動車排出ガス等の地域的汚染の影響が示唆された。全硫黄成分、全硝酸成分及び非海塩性  $\text{Ca}^{2+}$  は、夏期に低くなり秋～春期に高くなる傾向がみられた。この要因として、後方流跡線の由来地域別割合から、東アジアからの越境大気汚染の影響が示唆された。また、全アンモニア成分及び非海塩性  $\text{Ca}^{2+}$  濃度は全国及び辺戸岬より高く、近隣の養豚場等及び生コン製造工場の地域的汚染の影響が示唆された。

うるまでは東アジアからの季節的な越境大気汚染に加え、特に塩基性成分において近隣施設等からの地域的な影響を大きく受ける特徴がみられた。今後は、うるまの乾性沈着量の把握及び乾性沈着と湿性沈着を合わせた総沈着量の経年変化調査も行う予定である。

#### V 参考文献

- 1) 藤田慎一・三浦和彦・大河内博・速水洋・松田和秀・櫻井達也 (2021) 越境大気汚染の物理と化学 2 訂版, (株) 成山堂書店, 東京, pp181
- 2) 全国環境研協議会酸性雨広域大気汚染調査研究部会, 第 6 次酸性雨全国調査実施要領.
- 3) 全国環境研協議会酸性雨広域大気汚染調査研究部会, 第 6 次酸性雨全国調査報告書 2019 年度
- 4) 全国環境研協議会酸性雨広域大気汚染調査研究部会, 第 6 次酸性雨全国調査報告書 2020 年度
- 5) NOAA (2020) HYSPLIT-WEB. 〈[https://www. ready. noaa.gov/HYSPLIT.php](https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php)〉. 2023 年 9 月アクセス.
- 6) 沖縄県地図情報システム, 水質汚濁防止法特定施設. 〈<http://gis.pref.okinawa.jp/pref-okinawa/Portal>〉. 2023 年 9 月アクセス
- 7) 気象庁 (2019~2022) 過去のデータ検索. 〈[https:// www. data. jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php)〉. 2023 年 9 月アクセス.