

**越境大気汚染・酸性雨  
長期モニタリング報告書  
(平成25～29年度)**

平成31年3月

環 境 省



## はじめに

酸性雨については、1960年代に欧米において湖沼の酸性化及び森林被害が国際問題となり、1970年代には我が国においても湿性大気汚染が問題となりました。このため、環境省（庁）では、我が国における酸性沈着の状況やその影響を把握し、悪影響の未然防止を目的として、昭和58年度に酸性雨対策調査を開始しました。さらに、広域的かつ長期的な酸性雨モニタリングを継続的に実施するため、平成14年3月に「酸性雨長期モニタリング計画」を策定し、平成15年度から同計画に基づき、湿性・乾性沈着モニタリング、陸水モニタリング及び土壌・植生モニタリングを地方公共団体の協力を得て実施しています。また、同計画は越境大気汚染問題への関心の高まりを受け、酸性沈着のみならずオゾンやエアロゾルも対象に越境大気汚染を監視することを明確にするとの観点から、平成21年3月に内容を一部改定するとともに、名称を「越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画」と改めました。

本報告書は、平成25年度から29年度に実施した越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの結果を中心に取りまとめたものです。取りまとめに当たっては、環境省に設置した越境大気汚染・酸性雨対策検討会並びに一般財団法人日本環境衛生センターアジア大気汚染研究センターに設置した2つのワーキンググループ（大気モニタリングデータ総合解析、オゾン・酸性沈着の生態系影響評価）において解析、評価、検討を行ってきました。

この場を借りて、本モニタリングの実施及び取りまとめにご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

平成31年3月  
環境省水・大気環境局

## 越境大気汚染・酸性雨対策検討会 名簿

|                        |   |
|------------------------|---|
| 座長 秋元 肇 <sup>*1</sup>  | (一財) 日本環境衛生センター<br>アジア大気汚染研究センター 所長                 |
| 座長 畠山 史郎 <sup>*2</sup> | 埼玉県環境科学国際センター 総長                                    |
| 伊豆田 猛                  | 東京農工大学 大学院農学研究院 教授                                  |
| 井上 隆信 <sup>*3</sup>    | 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 教授                                |
| 太田 誠一                  | (公財) 国際緑化推進センター 技術顧問 (京都大学 名誉教授)                    |
| 大原 利眞                  | 国立研究開発法人 国立環境研究所 企画部 フェロー                           |
| 金谷 有剛                  | 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野<br>分野長代理             |
| 工藤 真哉 <sup>*1</sup>    | 全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長<br>(青森県環境保健センター所長)        |
| 坂本 和彦 <sup>*4</sup>    | (一財) 日本環境衛生センター<br>アジア大気汚染研究センター 所長                 |
| 四宮 博人 <sup>*5</sup>    | 全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長<br>(愛媛県立衛生環境研究所 所長)       |
| 新藤 純子                  | 山梨大学 名誉教授   |
| 高橋 正通                  | (公財) 国際緑化推進センター 技術顧問                                |
| 永島 達也                  | 国立研究開発法人 国立環境研究所 地域環境研究センター<br>大気環境モデリング研究室 主任研究員   |
| 西川 雅高                  | 東京理科大学 環境安全センター 副センター長                              |
| 原 宏                    | 東京農工大学 名誉教授   |
| 藤井 幸三 <sup>*6</sup>    | 全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長<br>(熊本市環境総合センター所長)        |
| 松田 和秀                  | 東京農工大学 農学部附属 広域都市圏フィールドサイエンス<br>教育研究センター 教授         |
| 村野 健太郎                 | 京都大学 フィールド科学教育研究センター 研修員/<br>法政大学 イオンビーム工学研究所 客員研究員 |
| 山田 俊郎 <sup>*7</sup>    | 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 准教授                                |

\*1 平成26年度まで参画 \*2 平成27年度から座長 \*3 平成29年度まで参画  
\*4 平成27年度から参画 \*5 平成29年度から参画 \*6 平成27～28年度のみ参画  
\*7 平成30年度から参画 (肩書は参画当時のもの)

## 越境大気汚染・酸性雨対策検討会のもとに設置したワーキンググループ 名簿

### 1. 大気モニタリングデータ総合解析ワーキンググループ

|                     |   |
|---------------------|---|
| 座長 畠山 史郎            | 埼玉県環境科学国際センター 総長                                  |
| 藍川 昌秀               | 北九州市立大学国際環境工学部 エネルギー循環化学科 教授                      |
| 大泉 毅 <sup>*1</sup>  | 新潟県保健環境科学研究所 所長                                   |
| 木戸 瑞佳 <sup>*2</sup> | 富山県環境科学センター 大気課 副主幹研究員                            |
| 反町 篤行               | 福島県立医科大学 医学部 放射線物理化学講座 准教授                        |
| 高見 昭憲               | 国立研究開発法人 国立環境研究所 地域環境研究センター<br>センター長              |
| 松田 和秀               | 東京農工大学 農学部附属 広域都市圏フィールドサイエンス<br>教育研究センター 教授       |
| 松本 利恵               | 埼玉県環境科学国際センター 研究推進室 副室長                           |
| 森野 悠                | 国立研究開発法人 国立環境研究所 地域環境研究センター<br>大気環境モデリング研究室 主任研究員 |
| 山地 一代               | 神戸大学大学院 海事科学研究科 准教授                               |

### 2. オゾン・酸性沈着の生態影響評価ワーキンググループ

|                     |   |
|---------------------|---|
| 座長 太田 誠一            | (公財)国際緑化推進センター 技術顧問 (京都大学 名誉教授)                                       |
| 大泉 毅 <sup>*3</sup>  | 新潟県保健環境科学研究所 所長   |
| 金子 真司 <sup>*4</sup> | 国立研究開発法人 森林総合研究所 戦略研究部門<br>震災復興・放射性物質研究拠点長                            |
| 久米 篤                | 九州大学 大学院農学研究院 (大学院生物資源環境科学府)<br>環境農学部門サステイナブル資源科学講座<br>森林圏環境資源科学分野 教授 |
| 小池 孝良               | 北海道大学大学院 農学院・農学研究院 教授   |
| 小林 和彦               | 茨城大学 農学部 産学官連携研究員   |
| 小林 政広 <sup>*5</sup> | 国立研究開発法人 森林総合研究所 森林研究部門<br>立地環境研究領域 土壌特性研究室 室長                        |
| 清水 英幸               | 国立研究開発法人 国立環境研究所 地域環境研究センター<br>フェロー                                   |
| 高橋 正通 <sup>*2</sup> | (公財)国際緑化推進センター 技術顧問   |
| 中野 孝教               | 大学共同利用機関法人 人間文化研究機構<br>総合地球環境学研究所 名誉教授                                |
| 山田 俊郎               | 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 准教授  |
| 渡辺 誠                | 東京農工大学大学院 農学研究院 特任准教授   |

\*1 平成27～29年度まで参画 \*2 平成30年度から参画 \*3 平成28～29年度まで参画

\*4 平成28年度まで参画 \*5 平成29年度から参画 (肩書は参画当時のもの)

## アジア大気汚染研究センター 担当者

|         |   |
|---------|---|
| 副所長     | 草川 祐介 (平成 29 年 3 月まで)<br>藤田 宏志 (平成 29 年 7 月から)  |
| シニアフェロー | 佐藤 二郎   |
| 情報管理部   | 山下 研 (平成 27 年 4 月から平成 30 年 3 月まで)<br>大泉 毅 (平成 30 年 4 月から)<br>佐藤 啓市<br>中村 久美子<br>上ノ山 貴嗣 (平成 29 年 3 月まで)<br>高橋 良太 (平成 29 年 4 月から) |
| 大気圏研究部  | 箕浦 宏明 (平成 27 年 4 月から)<br>黒川 純一<br>弓場 彬江 (平成 27 年 6 月から)<br>桐山 悠祐 (平成 29 年 4 月から)  |
| 生態影響研究部 | 佐瀬 裕之<br>齋藤 辰善 (平成 29 年 3 月まで)<br>高橋 雅昭 (平成 29 年 4 月から)<br>山下 尚之 (平成 27 年 12 月まで)<br>浦川 梨恵子 (平成 28 年 1 月から)<br>諸橋 将雪            |

# 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書（平成25～29年度）

## 目次

### 報告書の概要

|   |    |
|---|----|
| 1. 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの経緯                                | 1  |
| 2. 調査の目的及び内容  | 5  |
| 2.1 目的  | 5  |
| 2.2 調査内容  | 5  |
| 2.2.1 湿性沈着モニタリング  | 5  |
| 2.2.2 大気汚染物質モニタリング（乾性沈着モニタリングを含む）                       | 7  |
| 2.2.3 土壌・植生モニタリング                                       | 9  |
| 2.2.4 陸水モニタリング  | 12 |
| 2.2.5 集水域モニタリング   | 12 |
| 2.2.6 オゾンによる植物影響モニタリング                                  | 13 |
| 2.2.7 データの確定と精度保証・精度管理                                  | 14 |
| 3. モニタリングの結果  | 17 |
| 3.1 大気モニタリング  | 17 |
| 3.1.1 湿性沈着（降水）  | 17 |
| (1) 湿性沈着の年平均値の傾向  | 17 |
| (2) 湿性沈着の季節変動   | 37 |
| (3) 湿性沈着の長期的傾向  | 43 |
| (4) 湿性沈着モニタリングの成果                                       | 45 |
| 3.1.2 大気汚染物質（ガス、エアロゾル）                                  | 46 |
| (1) 大気汚染物質濃度の季節変動                                       | 47 |
| (2) 大気汚染物質濃度の地域的及び長期的傾向                                 | 55 |
| (3) 大気汚染物質モニタリングにおける評価基準値                               | 63 |
| (4) ガス、エアロゾル濃度傾向のまとめ                                    | 65 |
| 3.1.3 越境大気汚染・酸性沈着に関する考察                                 | 67 |
| (1) 総沈着量（湿性＋乾性）の算出結果                                    | 67 |
| (2) 国設局のモニタリングデータ、国内センターが行っている調査研究結果を利用した大気沈着、越境大気汚染の解析 | 70 |
| (3) 日本の降水酸性度の海外との比較                                     | 72 |
| 3.2 生態影響モニタリング  | 80 |
| 3.2.1 土壌・植生モニタリング                                       | 80 |
| (1) 平成25～29年度における土壌モニタリング結果                             | 80 |
| (2) 平成25～29年度における植生モニタリング結果                             | 91 |
| (3) 土壌・植生モニタリングの成果                                      | 97 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.2.2 陸水モニタリング                             | 98         |
| (1) 平成25～29年度における陸水モニタリング結果                | 98         |
| (2) 陸水の長期的傾向                               | 99         |
| (3) 陸水モニタリングの成果                            | 104        |
| 3.2.3 集水域モニタリング                            | 105        |
| (1) 流入・流出収支                                | 105        |
| (2) 伊自良湖集水域の酸性化・窒素飽和からの回復                  | 108        |
| (3) 河川中の硫黄の起源                              | 110        |
| (4) 集水域モニタリングの成果                           | 113        |
| 3.2.4 オゾンによる植物影響の可能性                       | 115        |
| (1) オゾン濃度の日内変動                             | 115        |
| (2) 植物成長期におけるオゾン濃度の季節性                     | 116        |
| (3) オゾン濃度の概況と影響指標                          | 117        |
| (4) 樹木の現地観察の状況                             | 118        |
| (5) パイロット・モニタリングの成果                        | 119        |
| <b>4. 同位体比分析手法を用いた大気汚染物質の生態系内での挙動・動態解析</b> | <b>121</b> |
| 4.1 要監視地域における重点モニタリングの概要                   | 121        |
| 4.1.1 はじめに                                 | 121        |
| 4.1.2 モニタリング地点                             | 121        |
| 4.1.3 モニタリング項目                             | 121        |
| 4.2 生態系に流入する物質の起源に関する解析                    | 123        |
| 4.2.1 同位体比データに基づく越境大気汚染の評価                 | 123        |
| 4.2.2 後方流跡線解析との協働                          | 127        |
| 4.2.3 同位体比に基づく発生源寄与率の推計                    | 129        |
| 4.2.4 まとめ                                  | 131        |
| 4.3 森林集水域における大気由来物質の動態に関する解析               | 132        |
| 4.3.1 生態系内での硫黄の動態                          | 132        |
| 4.3.2 生態系内でのストロンチウムや塩基の動態                  | 134        |
| 4.3.3 生態系内での水の循環過程                         | 136        |
| 4.3.4 まとめ                                  | 137        |
| 4.4 同位体比分析手法の今後のモニタリングへの活用について             | 138        |
| <b>5. オゾン及び粒子状物質に係る解析</b>                  | <b>141</b> |
| 5.1 オゾン及び粒子状物質の長期的傾向及びトレンド解析               | 141        |
| 5.1.1 オゾン                                  | 141        |
| 5.1.2 PM <sub>10</sub> 及びPM <sub>2.5</sub> | 150        |
| 5.2 大気モデルを用いた我が国への越境大気汚染現象の解析              | 153        |
| 5.2.1 オゾンのソース・レセプター解析                      | 153        |
| 5.2.2 PM <sub>2.5</sub> のソース・レセプター解析       | 154        |

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| 5.2.3       | 酸性物質の大気モデル解析  | 154        |
| 5.2.4       | PM <sub>2.5</sub> のシミュレーションモデルの再現性及び精緻化に関する研究           | 154        |
| 5.2.5       | アジア域排出インベントリシステムの開発、排出量変化分析                             | 158        |
| 5.2.6       | 日本の大気汚染物質排出インベントリ (NEI)、MICS-Asia Phase III 排出インベントリの整備 | 160        |
| 5.3         | オゾン、粒子状物質の長期的傾向、トレンド解析のまとめ                              | 162        |
| <b>6.</b>   | <b>越境大気汚染・酸性雨研究に関する国内外の主な取組</b>                         | <b>167</b> |
| 6.1         | 国内における取組  | 167        |
| 6.1.1       | 環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発領域S-7、S-12 による研究活動                   | 167        |
| 6.1.2       | 全国環境研協議会による酸性雨広域大気汚染全国調査                                | 169        |
| 6.2         | 国際的な取組  | 170        |
| 6.2.1       | 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)の活動                           | 170        |
|             | (1) 東アジアにおける酸性雨の状況に関する第3次定期報告書(PRSAD3)の作成               | 170        |
|             | (2) 東アジアにおける長距離輸送モデルの比較研究プロジェクト (MICS-Asia)             | 171        |
| 6.2.2       | 欧米における大気モニタリングネットワークの活動                                 | 173        |
|             | (1) 欧州における活動  | 173        |
|             | (2) 北米における活動  | 174        |
| 6.2.3       | 大気汚染半球輸送タスクフォースの活動                                      | 175        |
| 6.2.4       | 世界気象機関全球大気監視計画の活動                                       | 176        |
| <b>7.</b>   | <b>越境大気汚染・酸性雨対策に関する今後の課題</b>                            | <b>179</b> |
| 7.1         | 国内における取組の推進   | 179        |
| 7.1.1       | 長期モニタリングの実施   | 180        |
|             | (1) モニタリングの継続的な実施                                       | 180        |
|             | (2) 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画の改訂                             | 180        |
| 7.1.2       | 調査研究の推進   | 181        |
|             | (1) 大気シミュレーションモデルの精緻化及び排出インベントリの高精度化                    | 181        |
|             | (2) 要監視地域における生態影響の実態解明                                  | 182        |
|             | (3) オゾン及び粒子状物質による植物影響評価に係る取組の推進                         | 182        |
|             | (4) 気候変動の緩和を考慮した大気汚染対策のための研究の推進                         | 183        |
|             | (5) 二酸化窒素濃度の測定法の適正化に関する検討                               | 183        |
| 7.2         | 国際的な取組の推進   | 184        |
| <b>参考資料</b> |   |            |
| 1.          | モニタリング地点の情報   | 188        |
| 2.          | モニタリング結果の参考データ  | 204        |
| 3.          | 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) について                        | 271        |
|             | 略語等一覧   | 275        |



## 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書(平成 25～29 年度)の概要

### 1. この報告書について

環境省(庁)では昭和 58 年度(1983 年度)から酸性雨モニタリングを実施している。オゾンやエアロゾルも対象に越境大気汚染を監視することを明確にする観点から、現在は「越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画(平成 26 年 3 月改訂)」に基づき、湿性沈着(降水)、大気汚染物質(ガス、エアロゾル)、土壌・植生、陸水及び集水域の各分野についてモニタリングを行っている。この報告書は、平成 25～29 年度(2013～2017 年度)の 5 年間のモニタリング結果を中心に取りまとめたものである。

### 2. 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの目的

酸性雨原因物質、オゾン、PM<sub>2.5</sub> 等の大気汚染物質の長距離越境輸送や長期トレンド等を把握すること、また、越境大気汚染や酸性沈着の影響の早期把握や将来の影響を予測することを目的として、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)と密接に連携しつつ、大気及び生態影響モニタリングを長期間実施する。

### 3. モニタリングの内容

酸性沈着の状況を把握するための大気モニタリングとして、湿性沈着モニタリング及び大気汚染物質モニタリングを、また、酸性沈着による生態系への影響を把握するための生態影響モニタリングとして、土壌・植生モニタリング、陸水モニタリング及び集水域モニタリングをそれぞれ実施した(表 1)。

表 1 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの内容(2013～2017 年度)

|            | 種類              | 内容   | 地点数                    |
|------------|-----------------|--|------------------------|
| 大気モニタリング   | (1)湿性沈着モニタリング   | 降水(雨や雪)の pH や溶存するイオン成分の濃度等のモニタリング。降水量との積により各成分の地表面への沈着量を計算することを含む。                 | 24 地点(2013 年度のみ 27 地点) |
|            | (2)大気汚染物質モニタリング | 大気中のガス状物質の濃度、粒子状物質の重量濃度やその中に含まれる成分の濃度等のモニタリング。風速等の気象条件からそれらの物質の地表面への沈着量を計算することを含む。 |                        |
| 生態影響モニタリング | (3)土壌・植生モニタリング  | 土壌の pH 等の状態やそれに含まれるイオン成分の濃度、樹木の衰退度や下層植生等のモニタリング。                                   | 25 地点                  |
|            | (4)陸水モニタリング     | 河川、湖沼等の pH やそれに含まれるイオン成分の濃度等のモニタリング。   | 11 地点                  |
|            | (5)集水域モニタリング    | 一定の流域(集水域)に着目して、大気や流出入する河川を通じた酸性物質等の物質収支とそれに伴う生態系への影響との関連を評価するためのモニタリング。           | 1 地点                   |

## 4. モニタリング結果

### (1) 大気モニタリングの結果

＜ポイント①＞ 降水の酸性度(pH) [本編 3.1.1] [本編 3.1.3]

日本の降水は引き続き酸性化した状態にあり、日本の降水 pH は、欧米及び EANET 各国と比べて低い。近年、中国の大気汚染物質排出量の減少とともに pH の上昇（酸の低下）の兆候がみられる。

- ▶ 国内の各地点における降水 pH の 5 年間(2013～2017 年度)の加重平均値(降水量を考慮した平均値)は、pH4.58～5.16 の範囲にあり、小笠原(5.16)、落石岬(5.10)、辺戸岬(5.07)で比較的高く、大分久住(4.58)、屋久島(4.65)、越前岬(4.67)で比較的低かった。全地点の 5 年間の加重平均値は 4.77 であり、降水は引き続き酸性化した状態にあるといえる(図 1)。
- ▶ 日本の降水 pH は、欧米及び日本を除く EANET 各国（カンボジア、中国、インドネシア、ラオス、マレーシア、モンゴル、ミャンマー、フィリピン、韓国、ロシア、タイ、ベトナム）の平均値と比べて低い(図 2-1)。降水を酸性化する酸の寄与と中和する塩基の寄与を各ネットワークの中央値を用いて地域間で比較してみると、欧米では両者がほぼ等しく、EANET 各国では塩基の寄与が酸より大きいのに対し、日本では酸と比べて塩基の寄与が小さく、酸の半分程度であることが一因と考えられる(図 2-2)。
- ▶ 近年、中国における硫黄や窒素の酸化物の排出量(本編 p.76～77 参照)の減少がみられることから、日本の降水への酸の寄与も低下傾向にあると考えられ、日本の降水 pH も近年は上昇の兆候がみられる(図 3)。



図1 pH分布図

2013年度/2014年度/2015年度/2016年度/2017年度 (5年間平均値)

--: 測定なし, \*\*: 当該年平均値が有効判定基準に適合せず、棄却されたことを示す。  
 平均値は降水量加重平均により求めた。八幡平、京都八幡、潮岬は2013年度末で測定を休止。  
 五島では湿性沈着モニタリングは実施されていない。

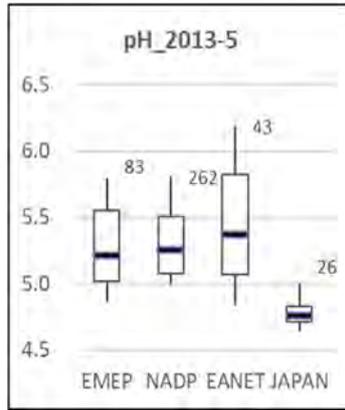


図 2-1 日本の降水 pH の国際ネットワーク (EMEP<sup>1</sup>: 欧州、NADP<sup>2</sup>: 北米、EANET: 日本以外の東アジア) との比較

構成地点の 2013～2015 年(日本は年度)の降水量加重平均値の分布。図中の数値は地点数、箱ひげ図は各ネットワークデータの 10, 25, 50, 75, 90 パーセンタイル値<sup>3</sup>をそれぞれ示す。

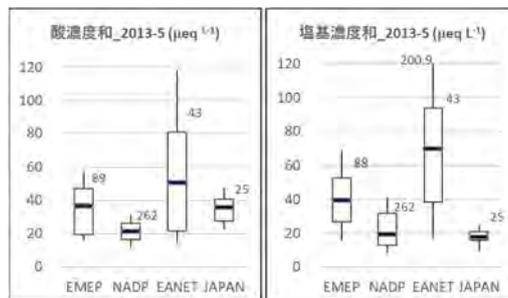


図 2-2 各ネットワークにおける酸（左）及び塩基（右）濃度和の比較

酸濃度和は  $\text{nss-SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ 、塩基濃度和は  $\text{NH}_4^+ + \text{nss-Ca}^{2+}$  (いずれも当量濃度)。

図中の数値及び箱ひげ図の説明は図 2-1 に同じ。

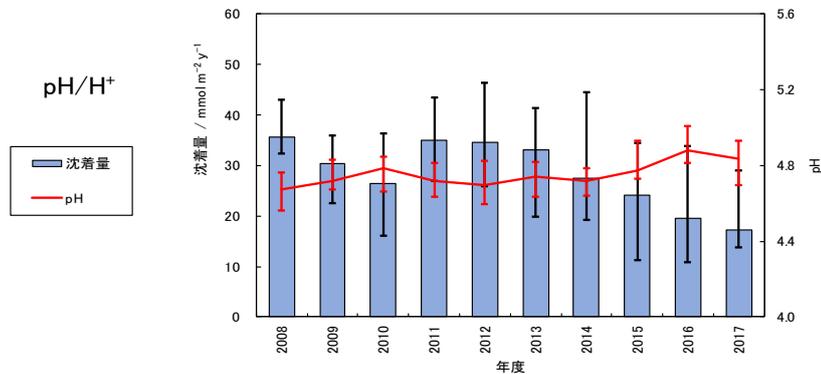


図 3 pH 及び水素イオン濃度・湿性沈着量(中央値)の経年変化(最近 10 年)

エラーバーは、pH と水素イオン沈着量について、各年度の 25~75 パーセンタイル値の範囲

<sup>1</sup> EMEP: 長距離移動大気汚染物質モニタリング・欧州共同プログラム (Co-operative Program for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe)

<sup>2</sup> NADP: 米国国家大気降下物測定プログラム (National Atmospheric Deposition Program)

<sup>3</sup> パーセンタイル値とは、対象とするデータ群を小さい方から並べたときに、指定された個数番目にある値を代表値とするもの。例えば、データが 100 個あったとすると、50 パーセンタイル値とは小さい方から数えて 50 番目の値であるということ。

を示す。データの完全度<sup>4</sup>が基準を満足しない年間値は含めずに計算した。

＜ポイント②＞ 降水に含まれる物質の季節変動 [本編 3.1.1]

酸性化した降水に含まれる非海塩性硫酸イオン等の濃度は、大陸に近い山陰等で冬季に顕著な上昇がみられることから、国内発生源に加えて大陸からの影響が示唆された。

- 降水中の非海塩性硫酸イオン( $\text{nss-SO}_4^{2-}$ )、硝酸イオン( $\text{NO}_3^-$ )及びアンモニウムイオン( $\text{NH}_4^+$ )の濃度を全国の地域別でみたところ、ほぼ同じ季節変動を示し、全体的に夏季に低く冬季に高くなる傾向がみられた(本編 p.37~42)。山陰及び本州中北部日本海側は大陸に近く影響を受けやすいが、他の地域に比べて冬季に顕著な上昇がみられることから、国内発生源に加えて大陸からの影響が示唆された(図 4)。

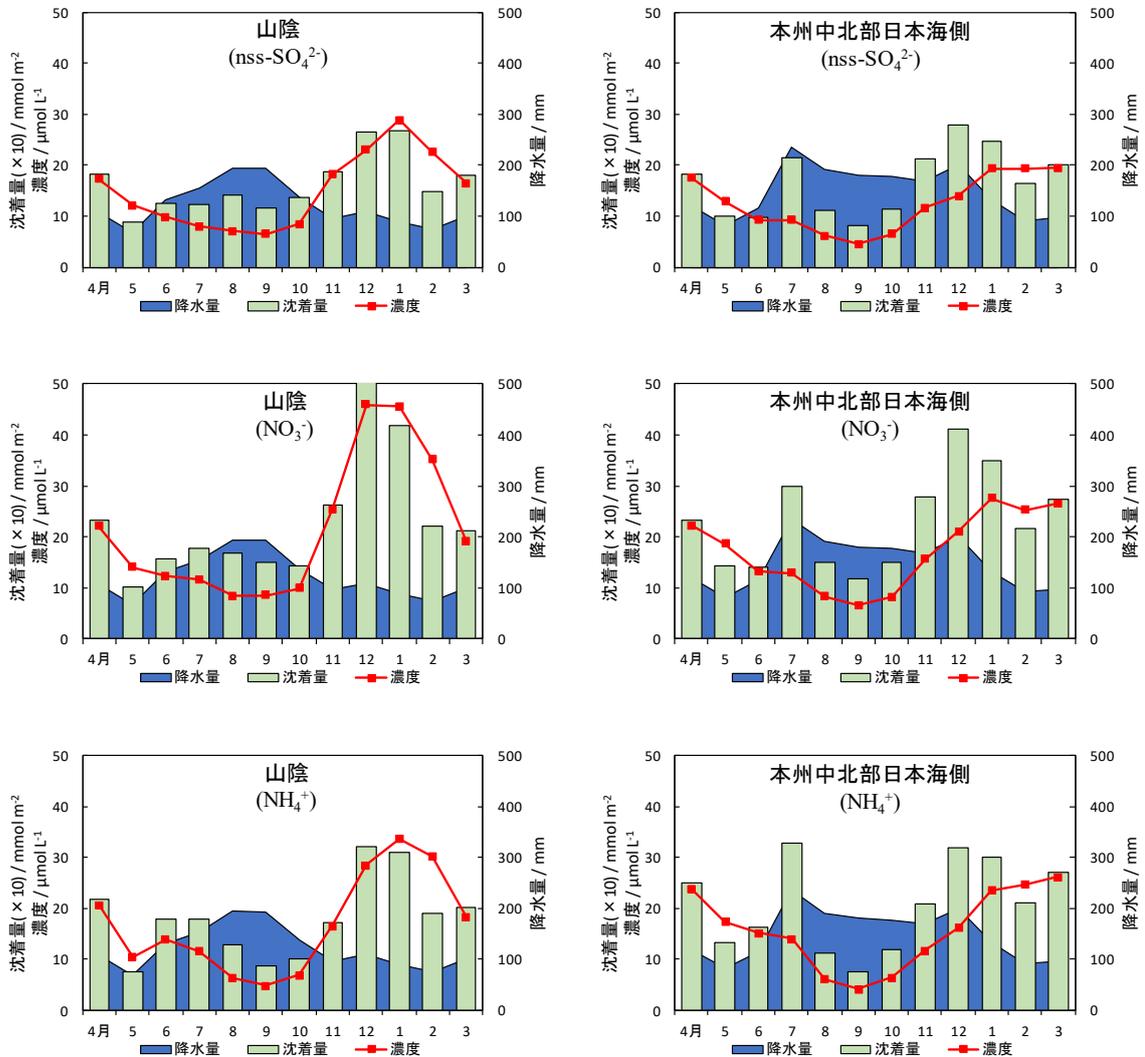


図 4 山陰及び本州中北部日本海側における降水中の非海塩硫酸イオン( $\text{nss-SO}_4^{2-}$ )、硝酸イオン( $\text{NO}_3^-$ )及びアンモニウムイオン( $\text{NH}_4^+$ )の濃度、沈着量及び降水量の季節変動(2013~2017年度平均値)

<sup>4</sup> 完全度とは、一定のモニタリング期間における有効なデータの比率をいう。

＜ポイント③＞ 大気汚染物質の季節変動 [本編 3. 1. 2]

大気汚染物質(ガス、エアロゾル)の季節変動の傾向は物質によって異なり、二酸化硫黄は冬季に高く北西季節風による大陸からの移流の影響が示唆された。オゾン及び粒子状物質は春季に高く、オゾンは大陸からの移流及び成層圏からの降下等、粒子状物質は黄砂飛来の影響が示唆された。

- ▶ 2013 年度～2017 年度 5 年間の月平均濃度を対象として、大気汚染物質(ガス、エアロゾル)の季節変動をみると、物質によって異なり、次のような傾向がみられた(本編 p. 47~50)。

二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>) : 全体的に夏季に低く、冬季に高い傾向がみられた。要因として、冬季に北西季節風が卓越する大陸からの移流の影響が示唆された。

窒素酸化物(NO<sub>x</sub>\*) : 全体的に一定の傾向はみられなかったが、例えば、伊自良湖で中京地域からの輸送で夏季に高い一方、橿原では冬季に高くなるなど、測定地点ごとに異なっていた。

オゾン(O<sub>3</sub>) : 全体的に春季に最大となり、夏季には低い傾向がみられた。要因として、春季における大陸からのオゾンの移流及び成層圏からのオゾンの降下等が考えられ、夏季においては海洋性大気の流れによる低下等が指摘されている。大気モデルを用いた発生源寄与解析等の結果からも、春季にはオゾン移流の寄与が大きくなるとの報告がある。

粒子状物質(PM<sub>10</sub>)及び微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)

: 全体的に春季に高い傾向がみられることから、黄砂飛来が影響していることが示唆された。

＜ポイント④＞ 大気汚染物質の長期的傾向等（オゾン及び粒子状物質以外） [本編 3.1.2]

大気中の二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)及び粒子状非海塩性硫酸イオン(nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)濃度は、大陸に近い西日本の測定地点で長期継続的に年平均濃度が高い傾向がみられ、それらの地点では大陸からの移流の寄与がより大きいことが示唆された。

- SO<sub>2</sub>濃度については、日本海側の遠隔地域(国内発生源から十分な距離にある地域)では、大陸により近い西側の<sup>おきき</sup>隠岐が<sup>きどせきみさき</sup>佐渡関岬と比べて長期継続的に濃度が高い傾向がみられたこと、粒子状非海塩性硫酸イオン(nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)濃度については、西日本の測定地点が東日本の地点より高い傾向がみられたことから、西日本では大陸からの移流の寄与がより大きいことが示唆された(図 5)。
- SO<sub>2</sub>濃度及び nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は、最近 5 年程度では低下の兆候がみられ、大陸における SO<sub>2</sub>排出量の減少傾向を反映しているものと考えられた。
- なお、遠隔地域のうち、橈原、えびの及び屋久島については、SO<sub>2</sub>濃度が比較的高いが、これは火山活動の影響が考えられた。

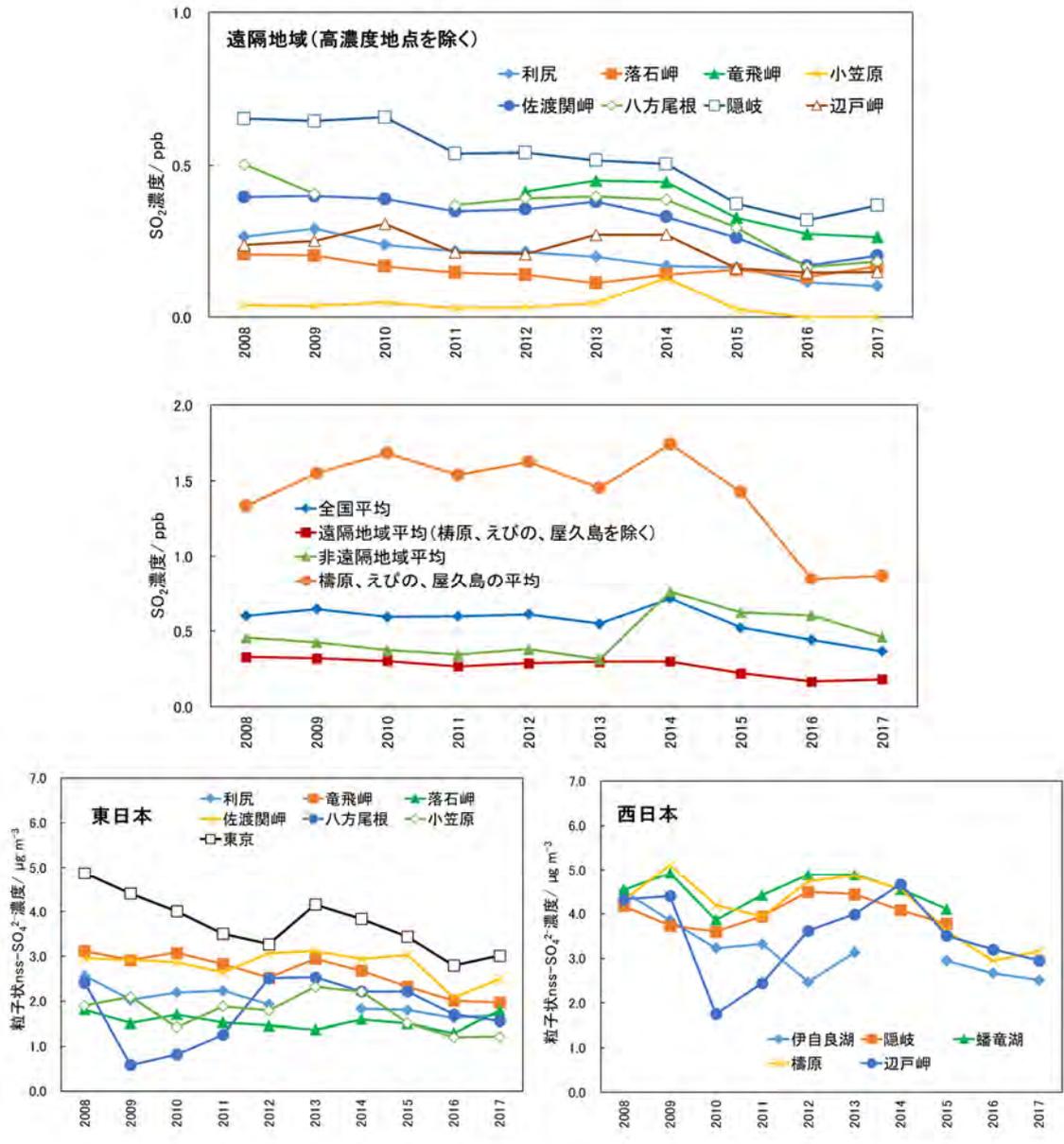


図5 二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) 濃度(上・中段)及び粒子状非海塩性硫酸イオン (nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 濃度(下段)の経年変化(最近10か年)

完全度が70%未満の年間値は表示しない。また、二酸化硫黄の非遠隔地域平均には、2013年度までの伊自良湖、蟠竜湖に、2014年度から札幌、箕岳、新潟巻、尼崎が加わっている。

## (2) 土壌・植生モニタリングの結果

＜ポイント⑤＞ 森林生態系における土壌の化学的特性値の経年変化 [本編 3.2.1]  
5年周期で地点ごとに実施している土壌モニタリングにおいて、多くの地点では土壌 pH の長期的な上昇あるいは低下といった傾向は認められなかった。

- 土壌 pH(H<sub>2</sub>O)は、一部の地点を除きおおむね 4.0～5.5 の間に分布した。多くの地点では、一貫した上昇あるいは低下のような経年変化は認められなかった。(本編 p. 82-86)
- 現時点では、土壌酸性化が顕著に進んでいる地点はみられなかったが、長期的な傾向を把握するため、土壌モニタリングを継続していく必要がある。

＜ポイント⑥＞ 森林生態系の現状 [本編 3.2.1]

ほとんどの地点で樹木の衰退は確認されなかった。一部、樹木の衰退が確認された地点があったが、気象害や病虫害などの自然要因によるものと考えられ、大気汚染等の人為影響が原因とみられる森林の衰退は確認されていない。

- 土壌・植生モニタリング調査は、森林地域を対象として主に樹木影響に着目した 13 地域と土壌影響に着目した 6 地域の計 19 地域（25 調査地点）で、5 年に一度のローリング方式で行っている。
- 毎木調査に基づく胸高断面積合計は、一部のモニタリング地点を除いて増加傾向であり、樹木成長の観点からは森林衰退は確認されていない。（本編 p.93）
- 樹木衰退度調査では、大山隠岐、十和田八幡平、吉野熊野および磐梯朝日で、衰退度が高く、継続的に衰退度の上昇がみられる地点もあった。多くは気象害、病虫害、及び獣害によるものと考えられ、大気汚染等の人為的影響が原因とみられる森林の衰退は確認されていない。（本編 p.91~93）
- 土壌・植生モニタリングの調査地には国立・国定公園地域が多く含まれ、遷移後期にある天然林も対象としている。わが国の貴重な自然の現状を把握し、その保護・保全に役立てていく上で、本調査で得られるデータは貴重である。
- 現時点では、大気汚染・酸性沈着による森林生態系への影響は十分把握できていない。今後も変動する東アジアの大気環境下において、我が国の森林生態系がどのように応答していくのかを把握するために、土壌・植生モニタリングを継続することが必要である。

### (3) 陸水モニタリングの結果

＜ポイント⑦＞ 酸性化からの回復の兆候 [本編 3.2.2]

ほとんどのモニタリング対象湖沼で、硫酸イオン濃度や硝酸イオン濃度の低下がみられた。

- 2006年以降の解析結果では、pHの有意な低下を示す地点がなくなる等、酸性化からの回復傾向がみられた。アルカリ度や陽イオン濃度の経年変化は地点によって差があるものの、ほとんどのモニタリング湖沼で硫酸イオン、硝酸イオン濃度は低下傾向にあった(表2)。
- 前回の報告書(平成20～24年度)では、2000年から2012年までの評価でpHやアルカリ度が有意に低下し酸性化が進行中であると示唆された夜叉ヶ池(福井県)においても、2006年以降2017年までの評価では、pHやアルカリ度の有意な低下傾向はみられなくなり、硫酸イオン濃度も低下していた(表2)。近年の東アジア地域の酸性物質の排出量の減少傾向を反映した、大気沈着量の減少に伴う陸水の酸性化からの回復の兆候と考えられる。
- 陸水の水質は大気沈着と森林生態系内での物質循環の結果を反映したものであることから、今後さらに変動する東アジアの大気環境下において、我が国の森林生態系がどのように応答し、回復していくかを見る上で、モニタリングを継続することが必要である。

表2 陸水モニタリング地点における水質の経年変化

| 湖沼名  | 解析開始年 | 試料数 | Z-スコア <sup>*2</sup> |       |       |       |       |        |           |          |         |          |           |
|------|-------|-----|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------|----------|---------|----------|-----------|
|      |       |     | pH                  | 電気伝導率 | アルカリ度 | 硫酸イオン | 硝酸イオン | 塩化物イオン | アンモニウムイオン | ナトリウムイオン | カリウムイオン | カルシウムイオン | マグネシウムイオン |
| 今神御池 | 2001  | 66  | 1.46                | 0.02  | 0.64  | -0.11 | -0.07 | 0.60   | 0.83      | 1.99     | 2.90    | 2.27     | 3.48      |
|      | 2006  | 48  | 1.61                | -0.24 | -0.17 | -2.57 | -0.66 | 0.24   | -1.27     | -1.03    | 1.82    | 3.60     | 3.16      |
| 刈込湖  | 2003  | 60  | 1.66                | 3.19  | 5.07  | 1.81  | -3.06 | 2.23   | -0.11     | 3.39     | 4.61    | 3.81     | 4.24      |
|      | 2006  | 48  | 2.09                | 2.26  | 3.67  | 3.12  | -3.86 | 2.40   | -1.07     | 3.81     | 4.40    | 3.33     | 3.44      |
| 大島池  | 2003  | 59  | 4.23                | 2.53  | 2.74  | -3.98 | -0.08 | -2.08  | -0.11     | 0.30     | 4.23    | 1.57     | 1.87      |
|      | 2006  | 47  | 2.75                | 0.21  | 2.75  | -5.01 | -2.31 | -1.98  | -0.60     | 0.32     | 3.11    | 1.80     | 0.21      |
| 夜叉ヶ池 | 2000  | 69  | -2.34               | -2.88 | -2.97 | -3.85 | 1.55  | -3.24  | -2.27     | -3.10    | -2.99   | -5.57    | -4.61     |
|      | 2006  | 46  | 0.69                | -1.82 | 0.81  | -2.95 | 1.64  | -1.13  | -0.98     | -1.13    | -3.14   | -4.70    | -3.01     |
| 雄池   | 1998  | 60  | 2.60                | 2.66  | 5.44  | 0.54  | -3.07 | -3.66  | -1.66     | 4.94     | 0.45    | 3.10     | 1.49      |
|      | 2006  | 35  | 0.21                | 2.27  | 5.47  | -6.54 | -5.93 | -1.48  | 0.14      | 1.96     | -0.16   | 0.51     | -2.01     |
| 雌池   | 1998  | 60  | 0.75                | -5.26 | -0.77 | -2.77 | -5.80 | -3.58  | -3.13     | 0.38     | -3.57   | -4.94    | -6.30     |
|      | 2006  | 35  | 1.03                | -5.84 | -0.05 | -7.33 | -5.65 | -2.90  | 0.07      | -3.93    | -4.20   | -6.99    | -7.07     |
| 伊自良湖 | 1989  | 112 | -0.61               | 1.09  | 4.89  | -0.99 | 0.30  | -4.71  | -4.15     | -3.11    | -5.38   | -1.07    | -2.27     |
|      | 2006  | 44  | 0.69                | -3.79 | -3.22 | -1.15 | -2.83 | -4.98  | -2.97     | -3.22    | -2.49   | -4.36    | -3.18     |
| 釜ヶ谷川 | 1989  | 116 | -2.23               | -0.64 | 2.13  | -1.78 | 0.10  | -4.01  | -4.21     | -2.16    | -3.80   | -3.37    | -3.46     |
|      | 2006  | 48  | 0.93                | -3.74 | -2.09 | -2.16 | -5.79 | -5.69  | 1.12      | -4.08    | -1.96   | -3.67    | -3.74     |
| 孝洞川  | 1989  | 92  | 4.62                | 2.14  | 2.93  | 2.22  | -0.69 | -4.41  | -4.35     | -0.34    | -0.58   | -2.61    | -1.79     |
|      | 2006  | 41  | 4.07                | -2.02 | -0.55 | -0.76 | -3.40 | -4.87  | *1        | -2.48    | 0.17    | -2.81    | -2.31     |
| 沢の池  | 2003  | 60  | 3.34                | -3.76 | 2.97  | -2.82 | -0.50 | -4.92  | 1.91      | 1.71     | -0.30   | -1.76    | 0.00      |
|      | 2006  | 48  | 2.57                | -3.16 | 1.47  | -3.02 | 1.41  | -4.77  | 1.63      | 1.47     | -1.85   | -5.38    | -1.06     |
| 蟠竜湖  | 1989  | 116 | 1.22                | 5.43  | 5.30  | -2.60 | -1.53 | 6.87   | 3.91      | 6.43     | 0.61    | 3.58     | 6.32      |
|      | 2006  | 48  | -1.47               | -1.72 | -1.37 | -1.99 | -2.94 | 0.75   | 0.46      | -1.20    | -2.78   | 1.54     | 0.62      |

|   |   |               |
|---|---|---------------|
| - | + | 5%未満の危険率で有意   |
| - | + | 1%未満の危険率で有意   |
| - | + | 0.1%未満の危険率で有意 |

\*1. 定量限界未満。

\*2. 単調な上昇又は低下傾向の程度を示す統計量。正の値は上昇傾向、負の値は減少傾向を示し、0から離れるほどより単調に上昇又は低下する傾向にあることを示す。

#### (4) 集水域モニタリングの結果

##### <ポイント⑧> 伊自良湖集水域モニタリング [本編 3.2.3]

酸性沈着による影響を継続監視している伊自良湖集水域では、降水や河川水において溶存態無機窒素濃度の低下や pH の上昇傾向がみられており、窒素飽和や酸性化からの回復が示唆された。

- 伊自良湖集水域（岐阜県）では、降水由来の硫黄や窒素の流入量が低下傾向にあり、特に溶存態無機窒素濃度についてはそれに応答し流出量も低下傾向にあることが示された。また降水濃度や河川水濃度も同様の傾向であった(図 6)。河川水の年加重平均 pH も 2006 年から 2017 年までに 6.8 から 7.0 まで上昇して 1990 年代前半のレベルに戻りつつあることから、伊自良湖集水域は、大気からの汚染物質の流入量の低下により、窒素飽和、酸性化から回復しつつあることが示唆された（本編 p.108～109 参照）。
- 引き続き、伊自良湖集水域の窒素飽和、酸性化の傾向を把握するため、現状のモニタリングを継続する必要がある。

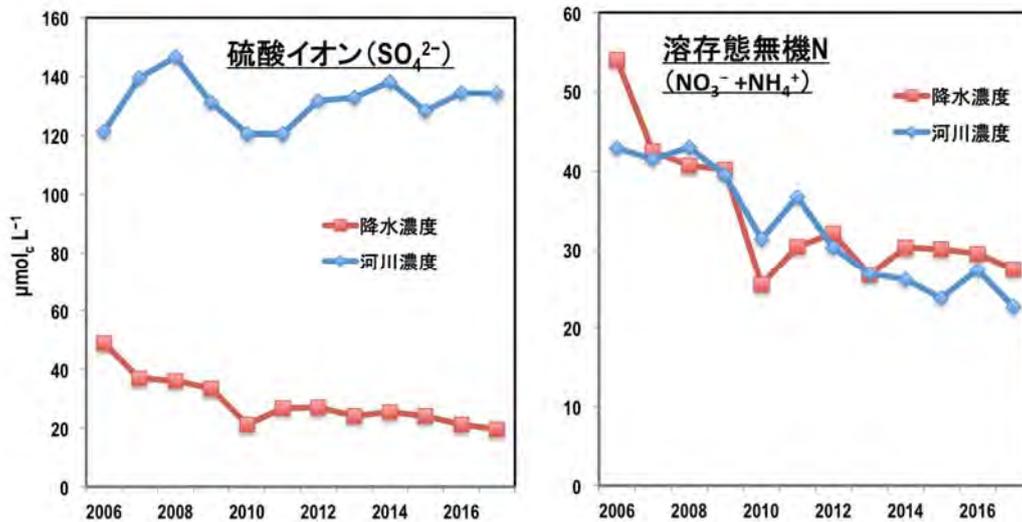


図 6 伊自良湖集水域における硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)及び溶存態無機窒素(N)の加重平均濃度の経年変化

## (5) その他

### ＜ポイント⑨＞ オゾンによる植物影響の可能性 [本編 3.2.4]

これまで明らかになっていなかった森林・山岳地域の植物成長時期におけるオゾン濃度の調査により、八海山や英彦山での現状のオゾン濃度は、樹木の成長量低下を引き起こす可能性があるレベルであることが示唆された。

- 山岳地域においては、都市部と比べて日内変動があまり大きくないことから、一旦高濃度になった場合には、その曝露時間や曝露量が大きくなることによって、植物への影響がより顕著になることが懸念される。
- 八海山（新潟県）や英彦山（福岡県）<sup>ひこさん</sup>では、現時点において、オゾンによる樹木への影響は確認されていない。一方で、樹木成長への影響指標である「40 ppb を超えたオゾン濃度の積算値(AOT40<sup>5</sup>)」をみると、これまでの苗木を用いた2年程度の曝露実験データに基づくと、一成長期（6ヶ月）におけるブナの成長量を10%低下させるとの報告があるレベル（8～15ppm・h）にあった(表3)。
- 今後も、これらの地域において、オゾン濃度のモニタリングや樹木の状況について観測していくことは必要である。

<sup>5</sup> AOT40 (Accumulated exposure Over a Threshold of 40ppb) は 40 ppb を超えたオゾン濃度の積算値。ここでは5～10月の樹木成長期に合わせて6時から18時まで積算した。

表3 摩周湖外輪山(上段)、八海山(中段)、及び英彦山(下段)における樹木成長期(5~10月)のオゾン濃度の概況と影響指標

| 摩周湖外輪山       |                    |             |                    |                    |                    |
|--------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 年            | 2013               | 2014        | 2015 <sup>*1</sup> | 2016 <sup>*2</sup> | 2017 <sup>*3</sup> |
| 95パーセンタイル値   | 40                 | 35          | 32                 | 30                 | 54                 |
| 中央値          | 22                 | 20          | 20                 | 18                 | 30                 |
| 5パーセンタイル値    | 9.3                | 11          | 10                 | 7.7                | 14                 |
| AOT40(ppm・h) | 0.39               | 0.23        | 0.01               | -                  | 2.4                |
| 八海山          |                    |             |                    |                    |                    |
| 年            | 2013 <sup>*4</sup> | 2014        | 2015               | 2016               | 2017 <sup>*5</sup> |
| 95パーセンタイル値   | 52                 | 78          | 77                 | 69                 | 80                 |
| 中央値          | 35                 | 46          | 46                 | 43                 | 47                 |
| 5パーセンタイル値    | 12                 | 27          | 25                 | 24                 | 26                 |
| AOT40(ppm・h) | 2.3                | <u>19.5</u> | <u>19.4</u>        | <u>13.8</u>        | <u>15.9</u>        |
| 英彦山          |                    |             |                    |                    |                    |
| 年            | 2013               | 2014        | 2015               | 2016 <sup>*6</sup> | 2017 <sup>*6</sup> |
| 95パーセンタイル値   | 73                 | 72          | 69                 | 69                 | 74                 |
| 中央値          | 42                 | 41          | 42                 | 38                 | 40                 |
| 5パーセンタイル値    | 17.5               | 13          | 13                 | 13                 | 15                 |
| AOT40(ppm・h) | <u>16.8</u>        | <u>15.7</u> | <u>15.4</u>        | <u>11.8</u>        | <u>15.4</u>        |

\*1. 測定期間：6~10月。\*2.測定期間：7~10月。\*3. 測定期間：5~8月。\*4. 測定期間：5月下旬から。\*5. 測定期間：5~9月。\*6. 測定期間：5月初旬欠測。

＜ポイント⑩＞ 生態系に流入する越境大気汚染由来の物質 [本編 4.2]

硫黄同位体比分析の結果から、冬季の北西季節風により、アジア大陸由来の硫黄酸化物も飛来していることが示唆された。日本海側でより顕著であるが、太平洋側においても、国内発生源の影響に加えての越境大気汚染の影響が示唆された。

- 太平洋側内陸に位置する伊自良湖集水域は、従来、中京工業地域で汚染物質が移流される国内発生源の影響が大きいとされ、降水による硫酸イオン( $\text{SO}_4^{2-}$ )沈着量は、夏季(7-9月)に沈着量が多いことが知られてきた。しかしながら、降水中の非海塩性硫黄(nss-S)の同位体比は、日本海側にある加治川集水域と同様、冬季に上昇し、アジア大陸から吹き付ける北西季節風により、国内発生源からの影響に加えての硫黄酸化物も飛来していることが示唆された(図7)。
- 降水の水素・酸素同位体比(d-excess 値)<sup>6</sup>は、伊自良湖集水域と加治川集水域で同様に、冬季に高くなる明瞭な季節性を示した(図8)。冬季にアジア大陸から吹き出す冷たい乾いた大気に日本海から急激に水蒸気が供給される際、水蒸気同位体分別が生じるからであり、太平洋側内陸に位置する伊自良湖集水域も冬季には大陸から日本海を輸送される気団の影響を受けていることが示唆された。
- いずれの結果も日本海側の加治川集水域だけでなく太平洋側の伊自良湖集水域においても、越境大気汚染の影響を受けていることが示唆された。

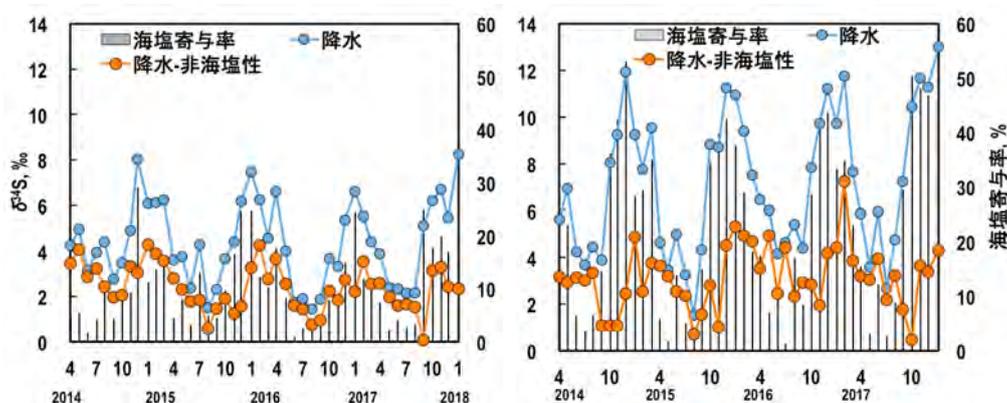


図7 伊自良湖集水域(左)と加治川集水域(右)における降水の硫黄同位体比( $\delta^{34}\text{S}$ )

<sup>6</sup> 水の水素及び酸素の同位体比から計算される指標値で、水蒸気の起源を反映する： $\delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$

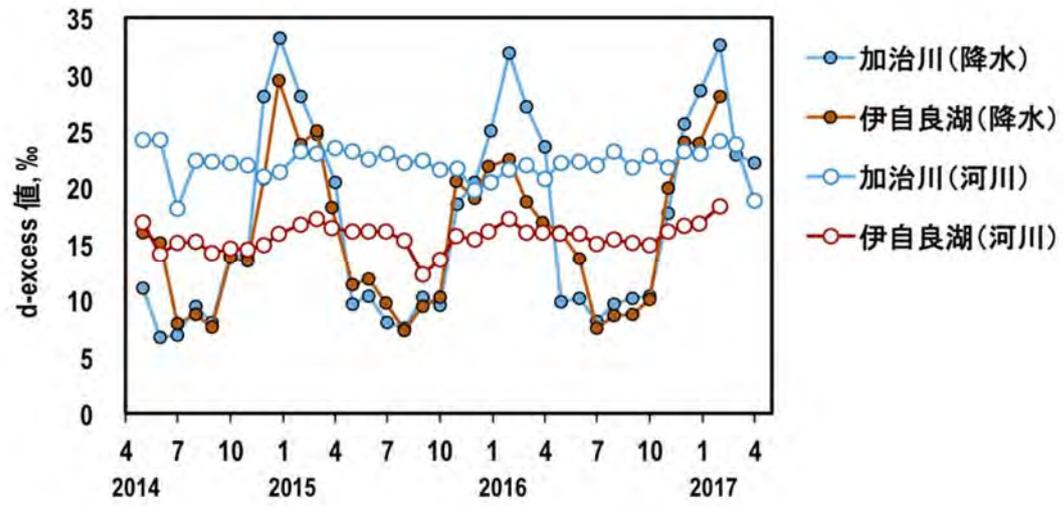


図8 伊自良湖集水域と加治川集水域における降水及び河川水の酸素・水素同位体比  
(d-excess 値 :  $\delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ )

＜ポイント⑪＞ 森林集水域における大気由来物質の動態 [本編 4.3]

降水中の硫黄は土壌における吸着や植物による吸収等、生態系内で保持・循環されてから、河川に流出していることが同位体比分析で示唆された。

- 降水中の硫黄同位体比が明確な季節性を示すのに対し、土壌溶液及び河川水の硫黄同位体比は年間を通じて安定していた(図 9)。降水の硫黄同位体比の年間の加重平均値は河川水のそれに近い値をとることから、降水に含まれる大気由来の硫黄がそのまま河川に流出するのではなく、土壌における吸着や植物による吸収等、生態系内で保持・循環し均質化されてから、河川流出していることを示唆していた。
- 河川水の水素・酸素同位体比(d-excess 値)は、降水のそれとは異なり年間を通じてほぼ一定であった(図 8)。森林集水域に流入した降水は、循環・滞留、均質化されてから陸水に流出していることが示唆される。

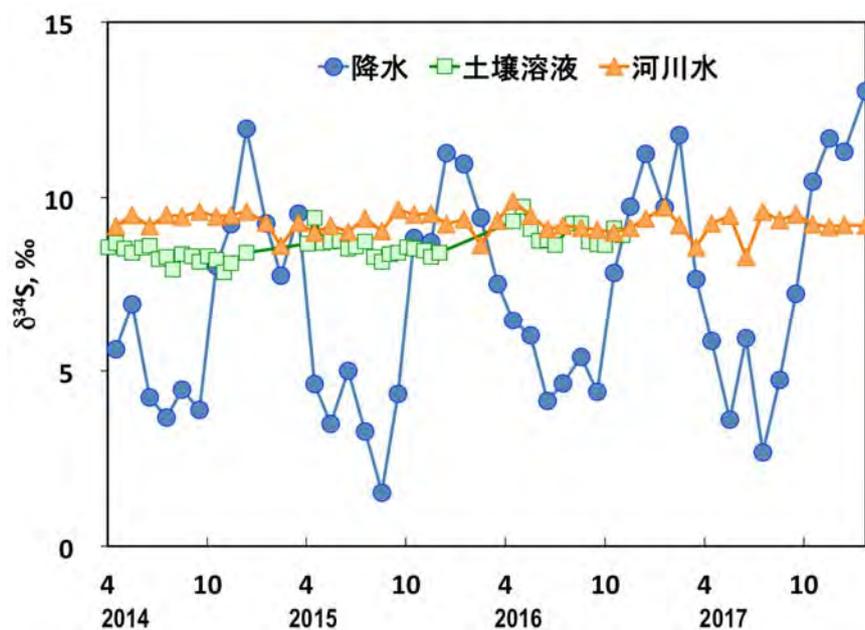


図 9 加治川集水域における降水、土壌溶液、河川水中の硫黄同位体比 ( $\delta^{34}\text{S}$ )

土壌溶液は全地点の平均

＜ポイント⑫＞ オゾンの長期的傾向 [本編 5.1]

オゾン濃度の日最高 8 時間平均値の年間 99 パーセンタイル値<sup>7</sup>の 3 年移動平均値の推移を調べたところ、国内 23 地点中 9 地点で有意な低下傾向がみられた。

- 長期的傾向をみるため、2005 年度から 2017 年度における国内 23 地点でのオゾン濃度の日最高 8 時間平均値の年間 99 パーセンタイル値の 3 年移動平均値を用いて解析したところ、利尻(-1.3 ppb y<sup>-1</sup>)、竜飛岬(-2.4 ppb y<sup>-1</sup>)、佐渡関岬(-0.8 ppb y<sup>-1</sup>)、八方尾根(-2.1 ppb y<sup>-1</sup>)、辺戸岬(-0.8 ppb y<sup>-1</sup>)、赤城(-3.1 ppb y<sup>-1</sup>)、新潟巻(-1.3 ppb y<sup>-1</sup>)、えびの(-3.3 ppb y<sup>-1</sup>)、屋久島(-1.1 ppb y<sup>-1</sup>)の以上 9 地点で有意な減少傾向( $p < 0.05$ )がみられた。一方、対馬(+1.1 ppb y<sup>-1</sup>)では有意な増加傾向( $p < 0.05$ )がみられた。その他 13 地点では、有意な増減傾向はみられなかった。(本編 p.145 参照)

---

<sup>7</sup> 光化学オキシダントの大部分を占めるオゾンについて、自動連続測定されている 1 時間値から日最高 8 時間平均値を算出し、それらの 1 年分を小さい方から順に並べたときに 99% (362 番目) の位置にある値。高濃度イベントを反映しつつ、気象状況や年々変動の影響を受けにくく、オゾンの生態影響に関する研究成果とも整合性のある評価指標であり、主に長期変動の評価に利用されている。

## 5. 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングに関する今後の主な課題

### (1) 国内における取組の推進

- 酸性雨による影響は長期継続的なモニタリング結果によらなければ把握しにくく、また、湖沼や土壌の緩衝能力が低い場合には一定量以上の酸性物質の負荷の蓄積により急激に酸性化による影響が発現する可能性があることから、今後も長期モニタリングを着実に実施していく必要がある。
- PM<sub>2.5</sub> や対流圏オゾン等による健康影響についての国民の関心が高く、モニタリングに比重をおくべき項目も変化していることから、このことにも対応しつつ総合的、長期継続的なモニタリングを実施していく必要がある。また、測定現場の技術水準を維持するためには、モニタリングに関わっている地方公共団体と環境省の一層緊密な連携・協力が重要である。
- 一方で、今後も機器更新を含む測定所の維持管理を限られた予算で適切に行いつつ、高品質のモニタリングデータの取得を継続していくためには、これまでのモニタリング結果等を踏まえて、測定所の集約化を念頭に置いたモニタリング計画の見直しが必要である。
- 酸性沈着やオゾン等による越境大気汚染の状況を総合的かつ正確に解析評価するためには、分析機関間比較調査等の分析向上に向けた取り組みを充実させるなどして、さらにモニタリングを進める必要がある。土壌や地質の酸緩衝能が小さく硫黄酸化物や窒素酸化物による酸性沈着量の多い地域等、酸性化のリスクが高い可能性がある地域を優先して大気由来の物質の生態影響の解明を進めていくため、集水域モニタリングのような大気沈着の影響を含めた総合的な判断を継続していく必要がある。さらに、大気由来の物質の生態系内での挙動・動態を明らかにしていくために、同位体モニタリングを必要に応じて実施する。
- オゾンの植物影響に関するパイロット・モニタリングを継続し、高濃度オゾンが観測される山岳・森林地域における汚染の実態とオゾンによる影響の兆候を監視するとともに、大気汚染とそれ以外の要因(病虫害等)による複合影響の実態に関する情報収集に努める必要がある。さらに、粒子状物質とオゾンが森林樹木に及ぼす複合影響を解明するための取組も必要である。
- 長期モニタリングデータを解析・評価し、現状を正確に把握することによって、PM<sub>2.5</sub> 排出抑制策や光化学オキシダント濃度の改善等につなげていくため、排出インベントリや数値モデル、衛星観測等との取組の連携を積極的に進める必要がある。また、長期モニタリングデータは、越境大気汚染の移流・拡散を計算する数値モデルの検証データとして大変重要であり、将来予測に重要なモデルの精緻化にも大きく貢献することが期待される。

## (2) 国際的な取組の推進

- 東アジア全体の汚染状況を把握するために、今後も東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)参加国へ働きかけ、従来の狭義の酸性雨の枠に捉われず、PM<sub>2.5</sub>やオゾン等の今日的な大気汚染について、最新の科学的知見をこれらの国々とも共有することにより、モニタリングを充実させていく必要がある。
- 我が国の経験と技術を活用し、アジア各国が清浄な大気を共有できるよう、地域協力の強化に取り組むことが必要である。日中韓三ヵ国環境大臣会合(TEMM)に基づく日中韓による取り組み、中国や韓国との二国間連携の強化、アジア太平洋クリーン・エア・パートナーシップ(APCAP)等の大気汚染に関する既存の国際的な組織等との連携により、我が国への越境大気汚染の緩和に繋がる国際協力を推進していくことが必要である。
- 酸性雨とその影響に関する科学者会合である第10回酸性雨国際会議が、2020年に新潟市で開催される予定である。従来の狭義の酸性雨の枠に捉われず、PM<sub>2.5</sub>やオゾン等の今日的な大気汚染とその影響を含む会合として開催されることが有意義と考えられるところであり、最新の科学的知見をアジア諸国とも共有するとともに、我が国が主導したEANETの20年間の成果を広くアピールすることが望まれる。また、これにより、今後、EANETの発展の方向性について議論が深まる契機となることも期待される。



## 1 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの経緯

1970年代に湿性大気汚染として初めて認知された我が国の酸性雨問題は、東アジア地域の急速な経済発展に伴う大気汚染物質の排出量増加と、それらがアジア大陸の風下に位置する我が国へ輸送されることへの懸念から、より広域的な環境問題へと変遷してきた。

環境省(庁)は、酸性雨が欧米において湖沼や森林等の生態系に深刻な影響を与えていることを踏まえ、我が国における酸性雨の実態を把握するため、昭和58年度(1983年度)に第1次酸性雨対策調査を開始し、大気、土壌・植生、陸水の各分野で酸性雨モニタリングを実施した。2002年度までの計20年間の調査結果を2004年6月に「酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書」として取りまとめ、全国的に欧米並の酸性雨が観測されること、日本海側の地域では大陸に由来した汚染物質の流入が示唆されること、伊自良湖への流入河川や周辺土壌において酸性雨の影響が疑われる理化学性の変化が認められることなどを明らかにしてきた。また、2003年度からは、広域的かつ長期的な酸性雨モニタリングを継続的に実施していくため、「酸性雨長期モニタリング計画」を策定し、これに基づくモニタリングを実施してきた。この結果は「酸性雨長期モニタリング報告書(平成15～19年度)」として取りまとめられ、伊自良湖集水域における酸性化プロセスの解明とともに、オゾンや粒子状物質等を統合した越境大気汚染モニタリングの必要性等が指摘された。

一方、東アジア地域においては、国際協調に基づく酸性雨対策を推進していくため、我が国が主導した「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)」が2001年1月に本格稼働を開始した(現在、13カ国が参加)。EANETでは、現在、東アジア地域の100を超える地点において統一された手法により湿性沈着、乾性沈着、土壌・植生、陸水及び集水域のモニタリングが参加各国によって継続的に実施されている。モニタリングの精度管理やデータ集計は我が国に設置されたネットワークセンターが担い、データレポート及び分析機関間の精度比較調査報告書が毎年刊行されている。また、5年間隔で「東アジア地域における酸性雨の状況に関する報告書」(PR SAD)が刊行されている。EANETでは、酸性沈着とその影響を対象としたモニタリングが進められているが、酸性沈着のみならず広く大気汚染問題を対象に加える可能性についても議論が重ねられている。

このような国内外における越境大気汚染問題への関心の高まりを受け、我が国では酸性沈着のみならず、オゾンや粒子状物質も対象に越境大気汚染を監視することを明確にする観点から、2009年3月に「越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画」を策定し、2009年度からそれに基づくモニタリングが実施されている。同計画は、酸性雨原因物質やオゾン、PM<sub>2.5</sub>等の大気汚染物質の長距離越境輸送や長期トレンド等を把握し、また、越境大気汚染や酸性沈着の影響の早期把握や将来の影響を予測することを目的として、EANETと密接に連携しつつ、大気及び生態影響モニタリングを長期間実施するものである。2008～2012年度に実施された同調査の報告書(2014年3月)においては、我が国の降水酸性度は依然として高い傾向にあり、ガス状や粒子状物質濃度の地域差や季節変動からも依然として

大陸からの越境汚染の影響が示唆されている。また、一部の地点では土壌や河川水の pH 低下などの大気沈着との関連性が示唆される経年変化も観測され、オゾンによる植物影響の要監視地域も抽出された。

1983 年度から 2017 年度までの調査地点数の推移は、表 1-1 に示したとおりである。

本報告書は、2013～2017 年度に実施したモニタリングの結果を中心に取りまとめたものである。

表 1-1 調査地点数の推移

| 年度    | 第 1 次調査               | 第 2 次調査      | 第 3 次調査      | 第 4 次調査      | —     | 長期モニタリング     |              |                            |
|-------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|----------------------------|
|       | 1983～1987 年度          | 1988～1992 年度 | 1993～1997 年度 | 1998～2000 年度 |       | 2001～2002 年度 | 2003～2007 年度 | 2008～2012 年度               |
| 大気    | 14～34 地点              | 29 地点        | 48 地点        | 55 地点        | 48 地点 | 31 地点        | 27 地点        | 24 地点<br>(2013 年度のみ 27 地点) |
| 土壌・植生 | 12 地点                 | 43 地点        | 88 地点        | 20 地点        | 18 地点 | 25 地点        | 25 地点        | 25 地点                      |
| 陸水    | 133 地点<br>(スクリーニング調査) | 5 地点         | 33 地点        | 17 地点        | 12 地点 | 11 地点        | 11 地点        | 11 地点                      |
| 集水域   |                       |              |              |              |       | 1 地点         | 1 地点         | 1 地点                       |
| その他   |                       | 酸性雪<br>2 地域  |              |              |       |              |              |                            |

## 酸性雨と測定物質との関係

工場や自動車から排出された二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)等のガス状の汚染物質は、光化学反応によって大気中に生成された水酸化ラジカル(OH)等の酸化性物質により、硫酸や硝酸という強酸に変換される。また、硫酸粒子として人為発生源から直接排出される酸も存在する。一方、大気中にはアンモニアガスや炭酸カルシウム粒子などの塩基性物質も存在し、これらの物質は大気中あるいは降水中で硫酸や硝酸の一部を中和する。大気中での中和過程では、弱酸性のアンモニウム塩や中性のカルシウム塩が生成され、大気中の粒子状物質濃度の上昇に寄与する。

大気中の汚染物質の地上への沈着には乾性沈着と湿性沈着の2つの過程がある。ガスや粒子状物質が雨や雪などに取り込まれ地上に沈着する過程が湿性沈着であり、降水の酸性度は溶け込んだ酸と塩基のバランスによってきまり、湿性沈着量は降水中の成分濃度と降水量の積によって求められる。一方、ガスや粒子状物質が風で輸送され、そのまま森林表面等に沈着する過程が乾性沈着であり、その沈着量は大気中のガスや粒子状物質の濃度と風速や温湿度等の気象データから推計することが出来る。

「酸性雨」という環境問題は、湿性沈着及び乾性沈着を併せたものとして捉えられており、土壌の酸性化による森林衰退、湖沼の酸性化による陸水生態系の被害、銅像等の文化財や建造物の損傷等については、降水酸性度、ガス状や粒子状の酸性物質濃度に加え、酸性物質の湿性及び乾性沈着量で評価することが重要である。

オゾンは、人の健康や植物への悪影響が知られる大気汚染物質であるが、二酸化硫黄や窒素酸化物を硫酸や硝酸に酸化する反応性の高い酸化性物質でもあり、酸性雨の生成メカニズムは、オゾンの生成とも密接なつながりがある。

このように、「酸性雨」は様々な物質が関わる総合的な大気汚染として捉えることができ、降水中の成分だけではなく、大気中の二酸化硫黄、窒素酸化物、オゾン、アンモニア等のガス状物質及びそれらから大気中で二次的に生成するPM<sub>2.5</sub>に代表されるような粒子状物質等を観測することで、相互の関係から大気汚染の状況をよりの確に把握することが可能となる。



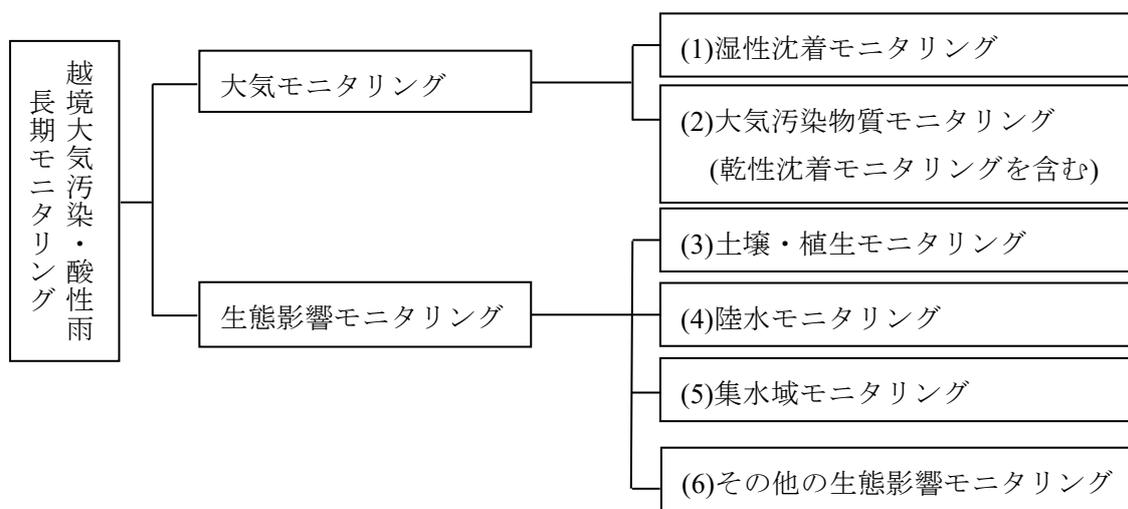
## 2 調査の目的及び内容

### 2.1 目的

酸性雨原因物質、オゾン、PM<sub>2.5</sub>等の大気汚染物質の長距離越境輸送や長期トレンド等を把握すること。また、越境大気汚染や酸性沈着の影響の早期把握や将来の影響を予測することを目的として、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)と密接に連携しつつ、大気及び生態影響モニタリングを長期間実施する。

### 2.2 調査内容

環境省では、越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画(平成 21 年(2009 年)3 月)及び 2014 年 3 月に改訂された同計画に基づき、2013～2017 年度において、酸性沈着の状況を把握するため湿性沈着モニタリング及び大気汚染物質モニタリングを、また、酸性沈着による生態系への影響を把握するため土壌・植生モニタリング、陸水モニタリング及び集水域モニタリングをそれぞれ実施した。また、その他の生態影響モニタリングとして、オゾンによる植物影響モニタリング及び要監視地域における重点モニタリングを実施した。なお、要監視地域における重点モニタリングについては方法も含めて、4 章に詳述した。



#### 2.2.1 湿性沈着モニタリング

湿性沈着モニタリングは、気候区分や測定局の特性、地域的なバランス等を考慮し、モニタリングを効果的・効率的に実施できるよう、大気モニタリング地点として選定された 27 地点(うち 3 地点は 2013 年度末で測定を休止)のうち、五島を除く 26 地点において実施された。なお、測定地点は、「Technical Manual for Wet Deposition Monitoring in East Asia-2010」[1]に従い、遠隔地域、田園地域及び都市地域モニタリング地点に分類される(図 2-1 参照)。また、27 地点を地域別に分析する際には、年降水量や降水量の季節変化などを参考に、図 2-1 のとおり、北海道、本州中北部日本海側、太平洋側、瀬戸内海沿岸、山陰、

東シナ海沿岸及び南西諸島に区分した。

降水試料(降雪を含む。以下同じ。)の捕集には降水時開放型捕集装置(降水時のみ蓋が開き、降水を捕集する装置)を使用し、試料は、「湿性沈着モニタリング手引き書(第2版(平成13年3月))」[2]に従って、水素イオン指数(pH)<sup>1</sup>、電気伝導率(EC)、イオン濃度(硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、硝酸イオン(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)、アンモニウムイオン(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、カルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)、カリウムイオン(K<sup>+</sup>)、マグネシウムイオン(Mg<sup>2+</sup>)、ナトリウムイオン(Na<sup>+</sup>))の10項目について測定・分析を実施した。また、気象項目として降水量、風向及び風速等を測定した。

- : 都市地域測定所 (Urban sites) 5カ所
- : 田園地域測定所 (Rural sites) 7カ所
- ▲ : 遠隔地域測定所 (Remote sites) 15カ所
- サイト名: EANET 局



図 2-1 大気モニタリング地点  
八幡平、京都八幡、及び潮岬は2013年度末に測定を休止。

<sup>1</sup> 水素イオン(H<sup>+</sup>)濃度の逆数の常用対数が水素イオン指数(pH)

## 2.2.2 大気汚染物質モニタリング(乾性沈着モニタリングを含む)

大気汚染物質モニタリングは、気候区分や測定局の特性、地域的なバランス等を考慮し、モニタリングを効果的・効率的に実施できるよう、大気モニタリング地点として選定された 27 地点(うち 3 地点は 2013 年度末で測定を休止)のうち、八幡平、潮岬を除く 25 地点において実施された。なお、大気汚染物質濃度から乾性沈着量の推計は、EANET マニュアル[3]に従った。各地点ごとの測定項目を表 2-1 に示す。

2.2.1 で述べた大気モニタリング地点で、EANET に登録されている 12 の測定局(以下、「EANET 局」という。)のうち、東京を除いた 11 測定局においては、自動測定機による二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>\*)<sup>2</sup>、オゾン(O<sub>3</sub>)<sup>3</sup>、粒径 10 μm 以下の粒子状物質(PM<sub>10</sub>)<sup>4</sup>及び微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)<sup>5</sup>も測定した。なお、PM<sub>2.5</sub> の測定は環境省が標準測定法と等価性を有すると評価した機種[4][5]によって実施された。EANET 局では、フィルターパック法<sup>6</sup>により、大気を 2 週間吸引した試料を分析し、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、硝酸(HNO<sub>3</sub>)、塩化水素(HCl)、アンモニア(NH<sub>3</sub>)、粒子成分濃度(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>及び Na<sup>+</sup>)を測定した。自動測定機による測定は「環境大気常時監視マニュアル(第 6 版(平成 22 年 3 月))[6]」、フィルターパック法による測定は EANET の「Technical Manual for Air Concentration Monitoring Manual」[7]に従って実施した。また、乾性沈着量の推定に必要な気象要素(風向風速、降水量、温湿度及び日射量)も測定した。

さらに、EANET 局以外の一部測定局においても、大気汚染物質の大気中濃度(主にオゾン。えびの及び屋久島では二酸化硫黄も対象)のモニタリングを実施した。

<sup>2</sup> 一般的に、NO<sub>x</sub>は NO と NO<sub>2</sub> の和として評価されている。しかし、モリブデン変換器付き化学発光法を用いた測定法では、NO<sub>x</sub>には NO 及び NO<sub>2</sub> 以外の硝酸、亜硝酸及びペルオキシアセチルナイトレート等の有機窒素化合物も測定される。遠隔地域及び田園地域ではこのアーティファクトの影響が無視できないことから、これらの地域の NO<sub>x</sub> データは「NO<sub>x</sub>＊」と表記する。一方、都市地域では NO<sub>x</sub> の主要成分は NO 及び NO<sub>2</sub> と考えられるため、「NO<sub>x</sub>」と表記する。

<sup>3</sup> オゾン計の校正方法については、従来はヨウ化カリウムを用いた吸収法等が用いられていたが、2010 年度から国際的なトレーサビリティが保証された基準器による方法に順次切り替え、2011 年度には完全移行している。

<sup>4</sup> 一般的には「大気中に浮遊している粒径 10 μm 以下の粒子」のことをさす。実際には、「粒径(空気力学径)10 μm の粒子に対する捕集効率が 50%の分粒装置を用いて捕集した粒子状物質」として測定されている。

<sup>5</sup> 一般的には「大気中に浮遊している粒径 2.5 μm 以下の粒子」のことをさす。実際には、「粒径(空気力学径)2.5 μm の粒子に対する捕集効率が 50%の分粒装置を用いて捕集した粒子状物質」として測定されている。

<sup>6</sup> 乾性沈着を評価するための測定方法のひとつ。大気中のガス・粒子状物質の測定に用いられている。取扱いが簡便であるため長期間の測定に適しており、EANET 参加国において採用されている。

表 2-1 大気モニタリング地点ごとの測定項目一覧

|    | 測定所名  | 都道府県 | 分類 | 湿性沈着 | 分析単位 | NO <sub>x</sub> | SO <sub>2</sub> | O <sub>3</sub> | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | フイルターパック | 風向風速 | 雨量 | 温湿度 | 日射量 | EANET局 |   |
|----|-------|------|----|------|------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|-------------------|----------|------|----|-----|-----|--------|---|
| 1  | 利尻    | 北海道  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 2  | 札幌    |      | 都市 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 3  | 落石岬*1 | 青森県  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 4  | 竜飛岬   |      | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 5  | 八幡立*2 | 岩手県  | 田園 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 6  | 箕岳    | 宮城県  | 田園 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 7  | 赤城    | 群馬県  | 田園 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 8  | 小笠原   | 東京都  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 9  | 東京    |      | 都市 | ○    | 日    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 10 | 佐渡関岬  | 新潟県  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 11 | 新潟巻   |      | 田園 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 12 | 越前岬   | 福井県  | 遠隔 | ○    | 日    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 13 | 八方尾根  | 長野県  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 14 | 伊豆長湖  | 岐阜県  | 田園 | ○    | 週    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 15 | 京都八幡  |      | 都市 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 16 | 尼崎    | 兵庫県  | 都市 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 17 | 潮岬*2  | 和歌山県 | 遠隔 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 18 | 隠岐    | 島根県  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 19 | 蟠竜湖   |      | 都市 | ○    | 週    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 20 | 構原    | 高知県  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |
| 21 | 筑後小郡  | 福岡県  | 田園 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 22 | 対馬    | 長崎県  | 遠隔 | ○    | 日    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 23 | 五島    |      | 遠隔 |      |      |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 24 | 大分久住  | 大分県  | 田園 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 25 | えびの   | 宮崎県  | 遠隔 | ○    | 日    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 26 | 屋久島   | 鹿児島県 | 遠隔 | ○    | 週    |                 |                 |                |                  |                   |          |      |    |     |     |        |   |
| 27 | 辺戸岬   | 沖縄県  | 遠隔 | ○    | 日    | ○               | ○               | ○              | ○                | ○                 | ○        | ○    | ○  | ○   | ○   | ○      | ○ |

\*1 落石岬の自動測定機による大気濃度及び気象項目は独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターによる測定。

\*2 八幡平、京都八幡、及び潮岬は2013年度未測定を休止。

### 2.2.3 土壌・植生モニタリング

土壌・植生モニタリングは、外部負荷の影響を受けやすいと考えられる山岳地域の天然林を中心に選定された「主に樹木への影響に着目した地点」、酸性沈着に対する感受性の高い土壌を中心に選定された「主に土壌への影響に着目した地点」、陸水への影響をみる上で重要となる「陸水への影響に着目した地点」の計 19 地域 25 地点(地点一覧は表 2-2、地点分布は図 2-2 参照)において、「土壌・植生モニタリング手引書(平成 15 年 3 月)[8]及び「Technical Manual for Soil and Vegetation Monitoring」[9]に基づき、以下のとおり実施した。なお、「主に土壌への影響に着目した地点」においては、酸に対する感受性が異なる 2 種類の土壌を選定し、それぞれモニタリング地点を設定した(表 2-2 における 14-19)。

#### ①森林モニタリング

森林総合調査(毎木調査(樹種名、胸高直径、樹高)及び下層植生調査)を 5 年に 1 回、樹木衰退度調査(衰退度観察、写真による記録及び衰退原因の推定)を 1 年に 1 回実施した。

#### ②土壌モニタリング

図 2-2 に示した土壌階層モニタリングの設計に従い、各地点(土壌に着目した地点の場合は土壌種)において 2 つのプロット(表 2-2 参照)を設定し、そのプロット内に設定した 5 つのサブプロットにおいて、表層(0~10 cm)及び次層(10~20 cm)の土壌を採取し、以下の項目を分析した。また、水分含量以外の必須項目については、表層及び次層、それぞれについて 2 回繰り返し分析を行った。なお、頻度は 5 年に 1 回である。

必須項目：水分含量、pH(H<sub>2</sub>O)、pH(KCl)<sup>7</sup>、交換性塩基(Ca、Mg、Na、K)<sup>8</sup>、交換性 Al 及び H、交換酸度<sup>9</sup>、有効陽イオン交換容量(ECEC)<sup>10</sup>、炭酸塩含有量(石灰岩土壌のみ)

選択項目：全窒素含有量、全炭素含有量、有効態リン酸イオン、硫酸イオン、土壌密度、土壌硬度

<sup>7</sup> 土壌の水(H<sub>2</sub>O)もしくは 1M KCl による抽出液の pH。

<sup>8</sup> 土壌表面に吸着している各種のイオン濃度。

<sup>9</sup> 土壌の 1MKCl による抽出液をアルカリで滴定して得られる酸度(本調査の測定方法においては交換性 Al と交換性 H の和に等しい)。

<sup>10</sup> 交換性陽イオン(Ca, Mg, Na, K, Al, H)の和として算出。

表 2-2 土壌・植生モニタリング地点一覧

| *1 | 地点名(所在道府県)  | 区分       | 直近の調査<br>実施年度*2 | 選定の際考慮した<br>樹種*3、土壌種*3、集<br>水域 | 調査プロット数  |             |             |
|----|---|----------|-----------------|--------------------------------|----------|-------------|-------------|
|    |   |          |                 |                                | 林分<br>の数 | 土壌<br>プロット数 | 植生<br>プロット数 |
| 1  | 知床国立公園(北海道)   | 樹木       | 2015年度          | アカトドマツ                         | 1        | 2           | 1           |
| 2  | 支笏洞爺国立公園<br>(北海道)                                     | 樹木       | 2013年度          | ダケカンバ                          | 1        | 2           | 1           |
| 3  | 十和田八幡平国立公園<br>(岩手県)                                   | 樹木       | 2014年度          | オオシラビソ                         | 1        | 2           | 1           |
| 4  | 磐梯朝日国立公園三面<br>山(新潟県)                                  | 樹木       | 2017年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 5  | 日光国立公園(栃木県)   | 樹木       | 2013年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 6  | 中部山岳国立公園<br>(富山県)                                     | 樹木       | 2015年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 7  | 白山国立公園(石川県)   | 樹木       | 2016年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 8  | 吉野熊野国立公園<br>(奈良県)                                     | 樹木       | 2014年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 9  | 大山隠岐国立公園<br>(鳥取県)                                     | 樹木       | 2013年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 10 | 石鎚国立公園(高知県)   | 樹木       | 2014年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 11 | 阿蘇くじゅう国立公園<br>(大分県)                                   | 樹木       | 2015年度          | ブナ                             | 1        | 2           | 1           |
| 12 | 屋久島国立公園(鹿児島<br>島)                                     | 樹木       | 2014年度          | スギ                             | 1        | 2           | 1           |
| 13 |   | 樹木       | 2014年度          | 照葉樹林                           | 1        | 2           | 1           |
| 14 | せきどうさん・ほうりゅうざん<br>石動山・宝立山<br>(石川県)                    | 土壌       | 2015年度          | 赤色土(宝立山)                       | 1        | 2           | 1           |
|    |   |          |                 | 褐色森林土(石動山)                     | 1        | 2           | 1           |
| 15 | ほうどうじ・あまのさん<br>法道寺・天野山<br>(大阪府)                       | 土壌       | 2014年度          | 黄色土(法道寺)                       | 1        | 2           | 1           |
|    |   |          |                 | 黄色系褐色森林土<br>(天野山)              | 1        | 2           | 1           |
| 16 | しもふりだけ・とくさのみね<br>霜降岳・十種ヶ峰<br>(山口県)                    | 土壌       | 2013年度          | 黄色土(霜降岳)                       | 1        | 2           | 1           |
|    |   |          |                 | 黒色土(十種ヶ峰)                      | 1        | 2           | 1           |
| 17 | かしいぐう・こしよさん<br>香椎宮・古処山<br>(福岡県)                       | 土壌       | 2017年度          | 赤色系褐色森林土<br>(香椎宮)              | 1        | 2           | 1           |
|    |   |          |                 | 褐色森林土(古処山)                     | 1        | 2           | 1           |
| 18 | いじらこ<br>伊自良湖周辺(岐阜県)<br>(伊自良・大和)*4                     | 陸水<br>土壌 | 2016年度          | 褐色森林土(伊自良)                     | 1        | 2           | 1           |
|    |   |          |                 | 黒色土(大和)                        | 1        | 2           | 1           |
| 19 | ぼんりゅうこ<br>蟠竜湖周辺(島根県)<br>(蟠竜湖・石見臨空フア<br>クトリーパーク(FP))*4 | 陸水<br>土壌 | 2016年度          | 褐色森林土(蟠竜湖)                     | 1        | 2           | 1           |
|    |   |          |                 | 赤色土(石見臨空<br>FP)                | 1        | 2           | 1           |

\*1 地点 No.14(石動山・宝立山)～19(蟠竜湖周辺)の6箇所については2つの土壌種でそれぞれモニタリング地点を設定したため、全体の調査地点数は25地点となる。

\*2 森林総合調査及び土壌モニタリング実施年度。

\*3 樹種は環境省植物目録、土壌種は林野土壌分類にそれぞれ準拠した。

\*4 EANET モニタリング地点。

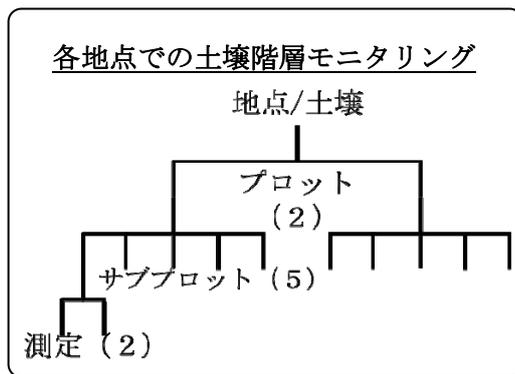


図 2-2 土壌・植生及び陸水モニタリング地点

陸水モニタリング地点は下線で示した。山居池、永富池、山のロダムのモニタリングは、2013 年度で終了した。二重線で示した伊自良湖(岐阜県)では土壌・植生、陸水に加え集水域モニタリングが実施されている。

## 2.2.4 陸水モニタリング

陸水モニタリングは、酸性沈着に対する応答が敏感なこと、人為的汚染が少ないこと、及び地域的バランス等を考慮して選定した 11 地点において、「陸水モニタリング手引き書(平成 17 年 2 月)」[10]に基づき実施した(地点一覧は表 2-3、調査地点の分布は図 2-2 参照)。測定項目は以下のとおりである。

### ①水質調査の測定項目

年 4 回測定：水温、pH、電気伝導率、アルカリ度、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、Cl<sup>-</sup>、クロロフィル a(Chl-a)、溶存酸素(DO)

年 1 回以上測定： $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、DOC、透明度、水色

### ②底質調査(間隙水)の測定項目(5 年に 1 回測定)： $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$

表 2-3 陸水モニタリング対象湖沼一覧

|    | 湖沼名                               | 都道府県 | 直近の底質調査<br>実施年度(5年に1回) |
|----|-----------------------------------|------|------------------------|
| 1  | いまがみおいけ<br>今神御池                   | 山形県  | 2015 年度                |
| 2  | かりこみこ<br>刈込湖                      | 栃木県  | 2016 年度                |
| 3  | さんきよいけ<br>山居池(2013 年度終了)          | 新潟県  | -                      |
| 4  | おおほたいけ<br>大畠池                     | 石川県  | 2017 年度                |
| 5  | やしやがいけ<br>夜叉ヶ池                    | 福井県  | 2016 年度                |
| 6  | ふたごいけ おいけ・めいけ<br>双子池(雄池・雌池)       | 長野県  | 2014 年度                |
| 7  | いじらこ<br>伊自良湖*1<br>(流入河川：釜ヶ谷川・孝洞川) | 岐阜県  | 2015 年度                |
| 8  | さわのいけ<br>沢の池                      | 京都府  | 2013 年度                |
| 9  | ばんりゅうこ<br>蟠竜湖*1                   | 島根県  | 2017 年度                |
| 10 | やまのくちだむ<br>山の口ダム(2013 年度終了)       | 山口県  | -                      |
| 11 | ながとみいけ<br>永富池(2013 年度終了)          | 香川県  | -                      |

\*1 EANET モニタリング地点

## 2.2.5 集水域モニタリング

酸性雨長期モニタリング報告書(平成 15～19 年度)[11]において酸性化が指摘された伊自良湖集水域(図 2-3 参照)において、酸性沈着による影響を継続的に監視していくため、伊自良湖流入河川(釜ヶ谷川・孝洞川)におけるモニタリングを補強し、酸性物質の流入量(湿性+乾性による総沈着量)及び流出量の物質収支から、当該集水域における酸性物質の負荷量を検討、評価した。RW1 を基点とする集水域面積(図 2-3 の太枠部分)は約 298 ha である(RW2 を基点とした場合は約 363 ha)。主な測定、評価項目は以下のとおりである。

### ① 流入量(総沈着量)の推定

降水量分布：標高の異なる 3 地点(赤谷、青少年の家、及び伊自良湖酸性雨測定所)。

湿性・乾性沈着量：伊自良湖酸性雨測定所における湿性沈着量及び大気汚染物質モニタリングデータを基に推計した乾性沈着量。

## ② 流出量の推定

流量：釜ヶ谷川の水位を RW1 で連続測定し、水位・流量曲線を基に流量を推計。

河川水質：2 週間毎に釜ヶ谷川及び孝洞川で採取した。水温、pH、電気伝導率、アルカリ度(pH4.8、グランプロット法)、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、TOC、溶存態全 Al、 $\text{SiO}_2$

流出量：上記の流量と河川水質を基に、2 週間毎の期間流出量を推計する。



図 2-3 伊自良湖集水域モニタリング装置配置図

図中の太枠は、物質収支の評価を行った釜ヶ谷川集水域を示す。図中の RW1、RW2、RW3 は、それぞれ釜ヶ谷川の上流、流入口、孝洞川の河川サンプリング地点を示す。釜ヶ谷川流入口の「青少年の家」に設置されていた雨量計は 2011 年 4 月に伊自良湖左岸に移設。釜ヶ谷川集水域内はヒノキ(49%：樹齢 31-35 年が最多)及び広葉樹(29%)、孝洞川集水域はアカマツ(46%：樹齢 66-70 年が最多)及び広葉樹(30%)が主体の森林(2005 年森林資源構成表による、樹齢は当時のもの)。

### 2.2.6 オゾンによる植物影響モニタリング

高濃度オゾンや樹木衰退が報告されている、摩周湖外輪山(北海道)、八海山(新潟県)、英彦山(福岡県)の周辺地域を対象とした(図 2-4)。定期観測に向けたパイロットモニタリングとして、対象地域内で、オゾン自動測定装置が設置・稼働可能な(電源が供給されている)地点を各 1 地点設定し、樹木成長期(5-10 月を目処)における当該地域のオゾン濃度を測定した。また、森林・山岳地域におけるオゾン濃度の実測及び周辺樹木の状況に関する情報収集を実施した。

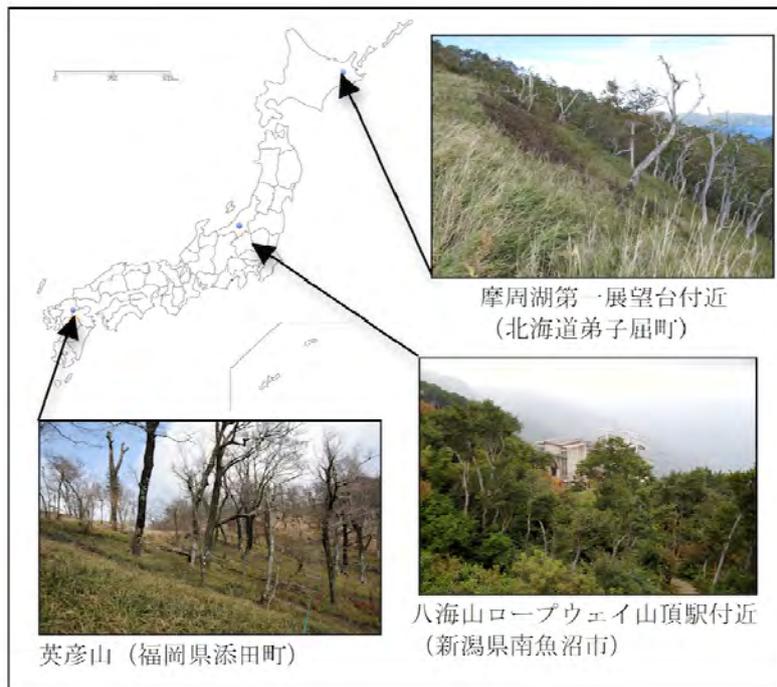


図 2-4 オゾン植物影響に関するパイロットモニタリング地点

それぞれ、森林地域に近い電源供給の可能な、摩周第一展望台、八海山展望台、福岡県立英彦山青年の家にオゾン計を設置した。地域の周辺樹木は、ダケカンパ(摩周湖外輪山)、ブナ・ミズナラ(八海山)、ブナ(英彦山)であった。

### 2.2.7 データの確定と精度保証・精度管理

2.2.1～2.2.6 の調査に当たっては、試料の捕集及び分析は原則として関係地方公共団体が行った。提出された結果はアジア大気汚染研究センター(ACAP)で集計し、データの検証作業が行われた。その後、専門家からなるデータ検証グループによる検証を経て、越境大気汚染・酸性雨対策検討会の下に設置した大気モニタリングデータ総合解析ワーキンググループ及びオゾン・酸性沈着の生態影響評価ワーキンググループ(2013年度は大気分科会及び生態影響分科会)の承認を得てデータを確定した。

また、国際的な比較にも耐えうる、信頼できるデータを得るため、次の精度保証・精度管理(QA/QC)活動に係る調査を行った。

#### ① 分析機関間比較調査

本調査は、モニタリングにおける測定分析の正確さ及び精度の確認・保証を目的として実施したものである。それぞれの測定分析担当機関に濃度を伏せた共通試料を配付し、その分析結果を集約・解析し、測定分析技能の向上を図る契機とした。項目毎の調査に用いた試料の概要及び 2013～2017 年度の結果を表 2-4 に示す。すべての項目・年度において基準を満たした結果の割合はほぼ 90%以上であり、良好であった。

表 2-4 2013～2017 年度における分析機関間比較調査の実施状況

| 項目                  | 配付試料               | 結果<br>(上段：参加機関数 下段：基準*1を満した結果の割合) |        |        |        |        |
|---------------------|--------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                     |                    | 2013年度                            | 2014年度 | 2015年度 | 2016年度 | 2017年度 |
| 湿性沈着                | 模擬降水試料<br>(100倍濃縮) | 21                                | 18     | 18     | 18     | 18     |
|                     |                    | 98.3%                             | 97.2%  | 99.4%  | 98.9%  | 97.7%  |
| 乾性沈着<br>(フィルターパック法) | 模擬フィルター<br>パック試料   | 8                                 | 7      | 7      | 8      | 8      |
|                     |                    | 89.6%                             | 97.9%  | 97.9%  | 91.6%  | 97.9%  |
| 土壌                  | 風乾後滅菌した<br>土壌試料    | 4                                 | 4      | 4      | 3      | 3      |
|                     |                    | --*2                              | --     | --     | --     | --     |
| 陸水                  | 模擬陸水試料             | 11                                | 8      | 8      | 8      | 8      |
|                     |                    | 95.9%                             | 98.9%  | 100%   | 94.3%  | 98.9%  |

\*1 結果については、設定値(模擬試料濃度の理論値)からの偏差が、EANET の精度管理目標値(DQO: Data Quality Objective、分析の正確さ：±15%)[12][13]の範囲内であることを基準として評価した。

\*2 土壌の調査には実際に採取された土壌試料を用いたことから、設定値等を用いた評価を行わなかった。

## ② 現地調査

モニタリング精度の把握を目的として地点毎に現地調査を行い、周辺状況、試料採取・運搬状況及び、試験室での分析の状況等について確認した。また、調査に併せて、標準的モニタリング手法の実施に関する指導、助言及び担当者との情報交換を行った。2013～2017年度における現地調査の実施状況を表 2-5 に示す。

表 2-5 2013～2017 年度における現地調査の実施地点数

|               | 2013年度 | 2014年度 | 2015年度 | 2016年度 | 2017年度 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 大気モニタリング地点    | 11     | 7      | 7      | 8      | 7      |
| 土壌・植生モニタリング地点 | 4      | 4      | 4      | 3      | 5      |
| 陸水モニタリング地点    | 4      | 2      | 3      | 3      | 2      |
| 集水域モニタリング地点   | --     | --     | --     | --     | --     |

--: 実施地点なし

## (引用文献)

- [1] Network Center for EANET, Technical Manual for Wet Deposition Monitoring in East Asia -2010, Asia Center for Air Pollution Reserch (ACAP), 2010.
- [2] 環境省, 湿性沈着モニタリング手引き書(第 2 版), 環境省地球環境局・財団法人日本環境衛生センター酸性雨研究センター, 2001.
- [3] Network Center for EANET, Technical Manual on Dry Deposition Flux Estimation in East Asia, Asia Center for Air Pollution Reserch (ACAP), 2010.
- [4] 環境省, 平成 21 年度冬期～平成 22 年度夏期の等価性評価の結果, 環境省水・大気環境

局大気環境課, 平成 22 年 10 月 15 日

- [5] 環境省,平成 22 年度夏期～平成 22 年度冬期の等価性評価の結果, 環境省水・大気環境局大気環境課, 平成 23 年 7 月 4 日
- [6] 環境省, 環境大気常時監視マニュアル(第 6 版), 環境省水大気環境局, 2010.
- [7] Network Center for EANET, Technical Document for Air Concentration Monitoring in East Asia, Asia Center for Air Pollution Research Center (ACAP), 2013.
- [8] 環境省, 土壌・植生モニタリング手引書, 環境省地球環境局・財団法人日本環境衛生センター酸性雨研究センター, 2003.
- [9] Network Center for EANET, Technical Manual for Soil and Vegetation Monitoring in East Asia, Acid Deposition and Oxidant Research Center (ADORC), 2000.
- [10] 環境省, 陸水モニタリング手引き書(初版), 環境省地球環境局・財団法人日本環境衛生センター酸性雨研究センター, 2005.
- [11] 環境省, 酸性雨長期モニタリング報告書(平成 15～19 年度), 環境省地球環境局, 2009.
- [12] Network Center for EANET, QA/QC Program for Wet Deposition Monitoring in East Asia, Acid Deposition and Oxidant Research Center (ADORC), 2000.
- [13] Network Center for EANET, QA/QC Program for Monitoring on Inland Aquatic Environment in East Asia, Acid Deposition and Oxidant Research Center (ADORC), 2000.