

**越境大気汚染・酸性雨
長期モニタリング報告書
(平成20～24年度)**

平成26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、越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング（平成20～22年度）中間報告（平成24年6月）の内容にさらに2年間のモニタリング結果を加えて、平成20年度から24年度に実施した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その分科会である大気分科会及び生態影響分科会、さら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（旧称：財団法人日本環境衛生センター酸性雨研究センター）に設置した3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、酸性沈着の生態系影響評価及びオゾン等の植物影響評価）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26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	(一財) 日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター 所長
岩間 千晃 ^{*1}	全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長 (名古屋市環境科学研究所長)
植田 洋匡	京都大学 名誉教授
鶴野 伊津志 ^{*2}	九州大学 応用力学研究所 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	(独) 国立環境研究所 地域環境研究センター長
小倉 紀雄	東京農工大学 名誉教授
加藤 久和 ^{*3}	帝京大学 法学部 教授
工藤 真哉 ^{*4}	全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長 (青森県環境保健センター所長)
佐竹 研一	立正大学 地球環境科学部 教授
戸塚 績	前 東京農工大学 教授
永島 達也 ^{*5}	(独) 国立環境研究所 地域環境研究センター 主任研究員
袴田 共之	浜松ホトニクス(株) 企画開発部 顧問
原 宏	東京農工大学 名誉教授
広瀬 健二 ^{*6}	全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長 (川崎市公害研究所長)
古谷 伸比固 ^{*7}	全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長 (名古屋市環境科学研究所長)
村野 健太郎	法政大学 生命科学部 教授
山田 健二郎 ^{*8}	全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査研究部会長 (川崎市公害研究所長)

*1 平成22年度のみ参画 *2 平成22年度まで参画 *3 平成24年度まで参画

*4 平成25年度のみ参画 *5 平成23年度から参画 *6 平成23年度のみ参画

*7 平成21年度のみ参画 *8 平成24年度のみ参画 (肩書は参画当時のもの)

越境大気汚染・酸性雨対策検討会 大気分科会 名簿

座長 原 宏	東京農工大学 名誉教授
植松 光夫	東京大学 大気海洋研究所附属 国際連携研究センター長・教授
鶴野 伊津志 ^{*1}	九州大学 応用力学研究所 教授
大泉 毅 ^{*2}	新潟県 県民生活・環境部 環境対策課 副参事
田中 茂	慶應義塾大学 理工学部 教授
土器屋由紀子	江戸川大学 名誉教授
永島 達也 ^{*3}	(独) 国立環境研究所 地域環境研究センター 主任研究員
西川 雅高	東京理科大学 環境安全センター長
野口 泉 ^{*4}	(地独) 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 環境科学研究センター 研究主幹
畠山 史郎	東京農工大学大学院 農学研究院 教授
藤田 慎一	(一財) 電力中央研究所 環境科学研究所 研究アドバイザー
松田 和秀	東京農工大学 農学部 准教授
三笠 元	(公社) 日本環境技術協会 常務委員・技術委員会大気部会長

*1 平成22年度まで参画 *2 平成21年度のみ参画 *3 平成23年度から参画

*4 平成24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 生態影響分科会 名簿

座長	小倉 紀雄	東京農工大学	名誉教授
	伊豆田 猛	東京農工大学大学院	農学研究院 教授
	井上 隆信	豊橋技術科学大学大学院	工学研究科 教授
	海老瀬 潜一	摂南大学	理工学部 都市環境工学科 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)
	河野 吉久	(一財)電力中央研究所	環境科学研究所 研究アドバイザー
	小林 和彦	東京大学大学院	農学生命科学研究科 教授
	新藤 純子	山梨大学大学院	医学工学総合研究部 教授
	高橋 正通	(独)森林総合研究所	研究コーディネータ
	高松 武次郎	元 茨城大学	広域水圏環境科学教育研究センター 教授
	袴田 共之	浜松ホトニクス(株)	企画開発部 顧問
	福原 晴夫	新潟大学	名誉教授

大気分科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	東京農工大学大学院 農学研究院 教授
大原 利眞	(独) 国立環境研究所 地域環境研究センター長
高見 昭憲	(独) 国立環境研究所 地域環境研究センター 広域大気環境研究室長
林 健太郎	(独) 農業環境技術研究所 物質循環研究領域 主任研究員
原 宏	東京農工大学 名誉教授
松田 和秀	東京農工大学 農学部 准教授
山地 一代	神戸大学大学院 海事科学研究科 講師

生態影響分科会のもとに設置したワーキンググループ 名簿

1. 酸性沈着の生態系影響評価ワーキンググループ

座長 袴田 共之	浜松ホトニクス (株) 企画開発部 顧問
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	(独) 国立環境研究所 地域環境研究センター長
金子 真司	(独) 森林総合研究所 立地環境研究領域長
林 健太郎	(独) 農業環境技術研究所 物質循環研究領域 主任研究員
福原 晴夫	新潟大学 名誉教授

2. オゾン等の植物影響評価ワーキンググループ

座長 伊豆田 猛	東京農工大学大学院 農学研究院 教授
大政 謙次	東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
河野 吉久	(一財) 電力中央研究所 環境科学研究所 研究アドバイザー
小林 和彦	東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
清水 英幸	(独) 国立環境研究所 地域環境研究センター 主席研究員
須田 隆一 ^{*1}	福岡県保健環境研究所 環境科学部 専門研究員
滝川 雅之	(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 大気物質循環研究チーム チームリーダー
野口 泉 ^{*1}	(地独) 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 環境科学研究センター 研究主幹
村野健太郎	法政大学 生命科学部 教授
家合 浩明 ^{*1}	新潟県保健環境科学研究所 大気科学科 専門研究員

*1 平成 23 年度から参画 (オゾン植物影響モニタリング手法検討会との統合による)

アジア大気汚染研究センター（平成22年6月まで旧称：酸性雨研究センター）担当者

副所長	新田 晃（平成21年6月まで）
	伊藤 隆晃（平成21年7月から平成23年6月まで）
	林 誠（平成23年7月から）
情報管理部	仲山 伸次（平成22年3月まで）
	塩崎 卓哉（平成22年4月から平成25年3月まで）
	佐藤 啓市
	白井 隆太（平成23年4月から）
大気圏研究部	家合 浩明（平成22年3月まで）
	大泉 毅（平成22年4月から）
	武 直子（平成24年4月から）
	佐瀬 裕之
生態影響研究部	小林 亮（平成23年3月まで）
	内山 重輝（平成23年4月から）
	山下 尚之
	齋藤 辰善（平成24年4月から）

越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書（平成20～24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	3
2.1 目的	3
2.2 調査内容	3
2.2.1 湿性沈着モニタリング	3
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）	4
2.2.3 土壌・植生モニタリング	5
2.2.4 陸水モニタリング	9
2.2.5 集水域モニタリング	10
2.2.6 データの確定と精度保証・精度管理	11
3. モニタリングの結果	13
3.1 大気モニタリング	13
3.1.1 湿性沈着（降水）	13
(1) 湿性沈着の年平均値の傾向	13
(2) 湿性沈着の季節変動	18
(3) 湿性沈着の長期的傾向	24
(4) 湿性沈着モニタリングにおける評価基準値	26
3.1.2 大気汚染物質（ガス、エアロゾル）	31
(1) 大気汚染物質濃度の季節変動	32
(2) 大気汚染物質濃度の地域的及び長期的傾向	39
(3) 大気汚染物質モニタリングにおける評価基準値	45
3.1.3 越境大気汚染・酸性沈着に関する考察	48
(1) 総沈着量（湿性＋乾性）の推計結果	48
(2) 統計的解析手法を用いたモニタリングデータの解析	53
(3) 九州・沖縄地区におけるガス・粒子状物質濃度変動の解析	57
3.2 生態影響モニタリング	64
3.2.1 土壌・植生モニタリング	64
(1) 平成20～24年度における土壌モニタリング結果	64
(2) 平成20～24年度における植生モニタリング結果	72
(3) 土壌・植生特性に対する大気沈着の影響	77
3.2.2 陸水モニタリング	82
(1) 平成20～24年度における陸水モニタリング結果	82
(2) 陸水の長期的傾向	84

3.2.3 集水域モニタリング	87
(1) 流入・流出収支	87
(2) 伊自良湖流入河川の水質の経年変化	91
3.2.4 生態系影響の要監視地域に関する抽出方法の検討	94
(1) 土壌・陸水酸性化の要監視地域	94
(2) 使用したデータとマッピングの方法	94
(3) 土壌・陸水酸性化の要監視地域とマップの妥当性	96
4. オゾン及び粒子状物質に係る解析	99
4.1 オゾン及び粒子状物質の長期的傾向及びトレンド解析	99
4.1.1 オゾン	99
4.1.2 PM ₁₀ 及びPM _{2.5}	103
4.1.3 モデルを用いた我が国への越境大気汚染現象の解析	106
(1) オゾンのソース・レセプター解析	106
(2) PM _{2.5} のソース・レセプター解析	109
(3) 酸性物質の大気モデル解析	111
4.2 オゾン等による植物影響の可能性	119
4.2.1 オゾンによる植物影響の要監視地域の抽出方法の検討	119
(1) オゾンによる植物影響の評価の方法	119
(2) 成長低下率の推定結果	121
(3) オゾンによる植物影響の要監視地域マップに関する留意点	123
4.2.2 オゾン植物影響に関するパイロット・モニタリング	123
(1) オゾン植物影響（パイロット）モニタリングの概要	124
(2) パイロット・モニタリングの進捗状況	125
4.2.3 PMの植物影響に関する研究の状況	129
(1) 植物に対するエアロゾルの影響に関する既存研究	129
(2) 樹木に対するサブミクロンサイズのブラックカーボン粒子の影響に関する研究	131
5. 越境大気汚染・酸性雨研究に関する国内外の主な取組	137
5.1 国内における取組	137
5.1.1 環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発領域S-7による研究活動	137
5.1.2 全国環境研協議会による酸性雨広域大気汚染全国調査	138
5.2 国際的な取組	138
5.2.1 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)の活動	138
(1) 東アジアにおける酸性雨の状況に関する第2次定期報告書(PRSAD2)の作成	138
(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)	139
5.2.2 欧米における大気モニタリングネットワークの活動	140
(1) 欧州における活動	140
(2) 北米における活動	141
5.2.3 大気汚染半球輸送タスクフォースの活動	142

5.2.4 世界気象機関の活動	143
6. 越境大気汚染・酸性雨対策に関する今後の課題	145
6.1 国内における取組の推進	145
6.1.1 長期モニタリングの実施	145
(1) 長期モニタリングの継続的な実施	145
(2) 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画の改定	146
6.1.2 調査研究の推進	147
6.2 国際的な取組の推進	149
参考資料	152
1. モニタリング地点の情報	153
2. モニタリング結果の参考データ	163
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	230
略語等一覧	233

報告書の概要

1. この報告書について

環境省（庁）では昭和 58 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 21 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 20 年度～24 年度の 5 年間のモニタリング結果を中心に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

越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングは、酸性雨の原因物質やオゾン等の大気汚染物質の長距離越境輸送とそれらの影響の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と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、大気モニタリング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、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（表 1）。

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(1)]

降水は引き続き酸性化した状態にある。

- 各地点における降水 pH の 5 年間の加重平均値（降水量を考慮した平均値）は、pH4.60～5.21 の範囲にあり、小笠原（5.21）、辺戸岬（5.05）、八方尾根（4.99）で高く、越前岬（4.60）、蟠竜湖（4.60）、対馬（4.61）で低かった。全地点の 5 年間の加重平均値は 4.72 であり、降水は引き続き酸性化した状態にあった（図 1 及び図 2）。

＜ポイント②＞ 降水中に含まれる物質の季節変動 [本編 3.1.1(2)]

降水中に含まれる非海塩性硫酸イオン等の濃度は冬季と春季に高く、国内の酸性沈着における大陸からの影響が示唆される。

- 降水中の非海塩性硫酸イオン（ nss-SO_4^{2-} ）及び硝酸イオン（ NO_3^- ）の濃度はほぼ同じ季節変動を示し、全体的に冬季と春季に高かった。特に山陰等の地域で顕著な上昇が見られた一方で、太平洋側及び瀬戸内海沿岸では他地域と比較して季節的な変動は小さかった（図 3）。

＜ポイント③＞ 大気汚染物質の季節変動 [本編 3.1.2(1)]

大気汚染物質（ガス、エアロゾル）の季節変動の傾向は、物質によって異なる。

- 大気汚染物質（ガス、エアロゾル）濃度の季節変動は物質によって異なり、概ね次のような傾向にあった（図 4）。

二酸化硫黄（SO₂）：全体的に夏季に低く、冬季にかけて最大となる傾向にあり、一部の地点では火山の影響を受けたことが示唆された。

窒素酸化物（NO_x*）：伊自良湖で夏季に高い一方、構原等では冬季に高く、測定地点ごとに異なった傾向を示した。

オゾン（O₃）：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。多くの地点で秋季にもピークがみられた。

粒子状物質（PM₁₀）及び微小粒子状物質（PM_{2.5}）

：いずれもほぼ同じ季節変動を示し、春季に高い傾向が見られた。

* 「NO_x」は、測定法の原理から、都市地域以外の測定所において、一酸化窒素（NO）及び二酸化窒素（NO₂）だけでなくそれ以外の物質も測定している可能性があることを示している（本編 2.2.2 の脚注参照）。

＜ポイント④＞ 大気汚染物質の長期的傾向等 [本編 3.1.2(2), 3.1.3(3)]

二酸化硫黄及び粒子状非海塩性硫酸イオンは、大陸に近い地点ほど濃度が高く、大陸からの移流の寄与が大きいことが示唆された。また、特定の気象条件や黄砂の飛来現象に伴い、イオン成分等の上昇も確認された。

- 二酸化硫黄（SO₂）濃度及び粒子状非海塩性硫酸イオン（nss-SO₄²⁻）濃度について、日本海側の遠隔地域では、大陸に近い西側の隠岐が佐渡関岬よりも長期継続的に濃度が高い傾向が見られたことから、大陸からの移流の寄与が大きいことが示唆された（図 5）。
- 平成 15 年度から 24 年度までの 10 年間の長期的傾向を見ると、二酸化硫黄（SO₂）濃度は 13 地点中 6 地点で統計的に有意な減少傾向を示した。1 地点（えびの）では有意な増加傾向を示したが、火山活動の影響を受けたことが示唆された。粒子状非海塩性硫酸イオン（nss-SO₄²⁻）濃度は 12 地点中東京局で有意に減少し、有意な増加傾向を示した地点は無かった。また、窒素酸化物（NO_x）濃度は 11 地点中 7 地点で有意な減少傾向を示したが、有意な増加傾向を示した地点は無かった（図 5）。
- 九州・沖縄地区におけるガス・粒子状物質濃度の集中観測結果より、特定の気象条件や黄砂の飛来現象に伴い、粒子状 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、有機成分濃度の上昇が観測された。

(2) 生態影響モニタリングの結果

＜ポイント⑤＞ 生態系への影響の徴候 [本編 3.2.1, 3.2.2]

一部の地点で、土壌 pH の低下、湖沼や河川の pH の低下等、大気沈着との関連性が示唆される経年変化を確認した。また、樹勢の変化等が見られた地点（樹木）もあったが、これらの地点の中には、自然的要因による影響が考えられるものもあった。多くの場合は、樹木の成長量の観点から見た森林全体の衰退は確認されていない。

- 多くの地点で土壌の pH は 4.5 以下と強い酸性を示した。また、全国の 25 調査地点中 10 地点において、各地点で 2 プロットずつ設定されたうちの少なくとも 1 プロットで、土壌の pH が統計的に有意に低下し、3 地点では有意に上昇した (図 6)。
- 磐梯朝日、大山隠岐、十和田八幡平、吉野熊野では、樹木の枝の成長異常、落葉率、葉色の変化等、特に多くの項目で異常が観察されたが、これらの地点の中には、病虫害等自然的要因の影響が考えられるものもあった。多くの場合は、樹木の成長量の観点から見た森林全体の衰退は確認されていない。
- いくつかの湖沼では pH 及びアルカリ度が低く、酸感受性が高い湖沼と考えられた。10 年以上の観測データを統計的に解析したところ、特に夜叉ヶ池では pH 及びアルカリ度が有意に低下しており、酸性化が進行中であることが示唆された (図 7)。

<ポイント⑥> 伊自良湖集水域モニタリング [本編 3. 2. 3(2)]

土壌の酸性化や窒素飽和の状態が進んでいることが指摘されている伊自良湖集水域では、回復の兆候も一時は見られたもののいまだ明確ではない。

- 硫酸イオン (SO_4^{2-}) 濃度は伊自良湖への流入量以上に流出しており、過去に大気から伊自良湖集水域の土壌表層に蓄積したものが流出していることが示唆された。
- 硝酸イオン (NO_3^-) 濃度は、森林の窒素吸収が活発になると考えられる夏季においてもまだ高く、窒素飽和からの回復傾向はまだ明確ではない。今後も更に注意深く監視していくことが重要。

<ポイント⑦> 酸性化リスクの要監視地域 [本編 3. 2. 4]

酸性化リスクに対する土壌及び陸水の要監視地域を抽出した。

- 酸性化物質に対するリスクが高い可能性がある地域を、酸性化リスクに対する「要監視地域」として抽出した。抽出に当たっては、酸感受性の高い土壌・地質であり、かつ、過去の累積的な酸負荷量が多い森林地域では、土壌や陸水に対する酸性化リスクが高いという仮定に基づき、酸性化に対する「土壌の感受性」及び「地質の感受性」並びに「25 年間の酸累積負荷量」の 3 つのリスク要因を重み付けして、土壌と陸水それぞれについて要監視地域を抽出した (図 8)。
- この結果、西日本の日本海側、九州西部及び中部地方を中心に要監視地域が見られた。酸性化リスクが高い可能性がある要監視地域には、過去に陸水の酸性化が報告された伊自良湖集水域、沢の池、新潟県北部の河川、土壌の酸性化が報告された伊自良湖のほか、本モニタリングにおいて土壌の酸性化が確認された宝立山や石見臨空ファクトリーパーク (FP)、陸水の酸性化が報告された夜叉ヶ池も含まれていた。

(3) オゾン及び粒子状物質に係る解析

<ポイント⑧> オゾンの長期的傾向 [本編 4. 1. 1]

過去 10 年間でオゾン濃度は 3 地点で減少傾向を、1 地点で増加傾向を示した。

- 平成 15 年度から 24 年度までの 10 年間のオゾン濃度の長期的傾向を統計的に解析したところ、27 地点中 3 地点（八方尾根、利尻及び^{のだけ}篔岳）で有意な減少傾向を示し、1 地点（隠岐）で有意な増加傾向を示した（図 9）。

<ポイント⑨> 粒子状物質（PM₁₀ 及び PM_{2.5}）の長期的傾向 [本編 4.1.2]

過去 10 年間で PM₁₀ 濃度は 5 地点で減少傾向を示したが、増加傾向を示した地点は無かった。PM_{2.5} 濃度については、有意な傾向はみられなかった。

- 平成 15 年度から 24 年度までの 10 年間の PM₁₀ 濃度の長期的傾向を統計的に解析したところ、11 地点中 5 地点（辺戸岬、佐渡関岬、^{ぼんりゅうこ}蟠竜湖、構原及び伊自良湖）で有意な減少傾向を示したが、有意な増加傾向を示した地点は無かった。PM_{2.5} については、3 地点中に有意な傾向を示した地点は無かった（図 10）。
- PM₁₀ に占める PM_{2.5} の割合（PM_{2.5}/PM₁₀）は期間を通じてほぼ一定であり、概ね 0.4～0.6 の間で推移した。

<ポイント⑩> オゾンの暴露によるリスクの要監視地域 [本編 4.2.1]

代表的な樹種について、オゾンによる植物影響の要監視地域を抽出した。

- 大気中のオゾンの暴露により植物が影響（被害）を受けやすいと考えられる地域を、オゾンによる植物影響の「要監視地域」として抽出した。抽出に当たっては、オゾン濃度が高く、かつ、オゾンに対する感受性の高い植生が分布する地域で影響を受ける可能性が高いという仮定のもと、オゾン暴露が無い場合の樹木の成長量を 100 とした場合におけるオゾン暴露による成長量の低下率（%）として示した。
- 評価は 6 つの樹種（スギ、アカマツ、カラマツ、ブナ、コナラ及びスダジイ）それぞれについて行い、オゾン濃度に関する指標値として AOT40^{*}をシミュレーションモデルにより計算し（図 11）、その計算結果を文献で報告されている成長量低下率の推定式に適用して計算した（図 12）。
- 北陸地方、新潟、関東北部及び西部のブナ、関東、中部、関西地方及び瀬戸内海の一部におけるアカマツ、関東甲信地方のカラマツ、九州北部のスダジイで高い成長量低下率（%）が推定された。

※ AOT40 (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb) : オゾンの暴露量を示す指標の一つであり、特定の時間帯を対象にオゾン濃度の 1 時間値が 40ppb を超えた部分（差分）を積分した値。単位は濃度と時間の積として [ppm・h] 等で示される。

<ポイント⑪> オゾン植物影響のパイロット・モニタリング [本編 4.2.2]

オゾン植物影響に関するパイロット・モニタリングの実施地点では、オゾン濃度が高く、樹木の枯死や衰退が報告されている地域もあり、既に樹木の成長が抑制されている可能性もある。

- 平成 23 年度から北海道、新潟県及び福岡県において、オゾンの植物影響に関するパイロット・モニタリングを実施している（図 13）。福岡県^{ひこさん}英彦山では、樹木の成長量の低下に影響を与える AOT40 の値が欧米や我が国で提言されている値（クリティカ

ルレベル) を超え (表 2)、樹木の枯死や衰退も報告されており、既に樹木の成長が抑制されている可能性が考えられた。

5. 越境大気汚染・酸性雨対策に関する今後の主な課題

(1) 国内における取組の推進

- モニタリングに比重を置くべき項目も変化しており、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。このため、PM_{2.5}モニタリングの強化等、随時モニタリングの内容について見直しを図っていくことが必要である。
- 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、シミュレーションモデルの開発、精緻化が不可欠である。特にPM_{2.5}については、現時点では必ずしも十分な精度を有するモデルが開発されているとは言えない状況であり、さらに調査研究を進める必要がある。
- 酸性化のリスクが高い可能性がある地域(酸性化リスクの要監視地域)を優先して生態影響メカニズムの解明を進めていくことが求められ、大気沈着の影響を含めた総合的な解析を継続していく必要がある。安定同位体比分析は、大気沈着と陸水の酸性化・窒素飽和との関連性の解明に資することから、このような手法を活用した調査研究を推進することが望まれる。
- 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、オゾンの植物影響を評価するための手法の確立とともに、吸収フラックス(実際に葉の気孔を通じて吸収されるオゾンの量)を用いた評価や、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の複合影響を解明するための取組も必要である。

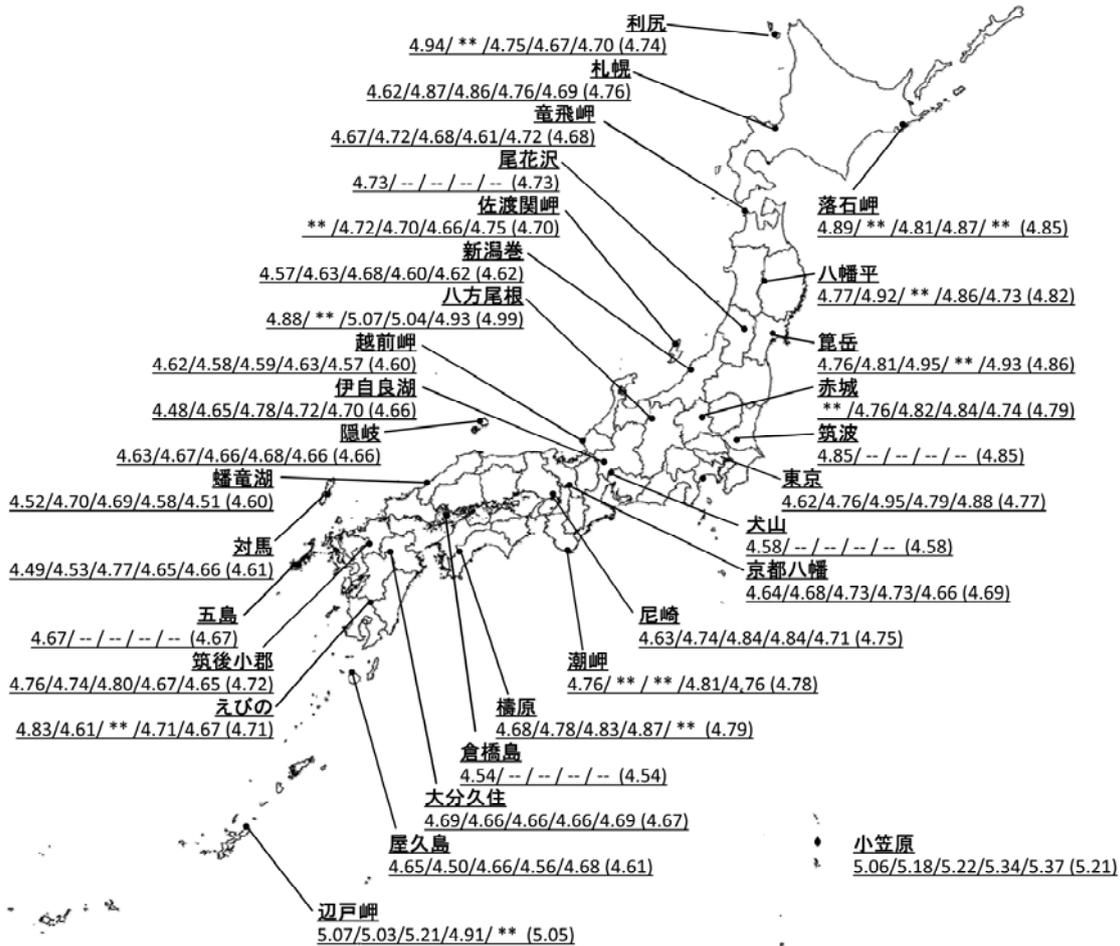
(2) 国際的な取組の推進

- これまで東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)においては、オゾンや粒子状物質のモニタリングが必ずしも十分に行われていないことから、EANET参加国への働きかけによりモニタリングを充実させていく必要がある。
- 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り、その際、この分野における活動に顕著な実績のある既存の国際的な組織、ネットワーク、プログラム等との連携により、各種の活動を検討、展開していくことも必要である。
- アジアにおける広域(越境)大気汚染問題を国際的に解決するに当たり、まず、アジアの科学者間で科学的な事実に対する認識を共有し、それに基づく適切な解決策を政策決定者等に提供する仕組みが有効に機能することが期待される。そのための方策として、科学者が議論し政策決定者に発信するための枠組みの構築等について検討する必要がある。

表 1 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの内容（平成 20～24 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 等の状態やそれに含まれるイオン成分の濃度等のモニタリング。	31 地点（平成 21 年度から 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、粒子状物質の濃度とそこ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

pH分布図(平成20年度～平成24年度)



平成 20 年度/平成 21 年度/平成 22 年度/平成 23 年度/平成 24 年度 (5 年間平均値)

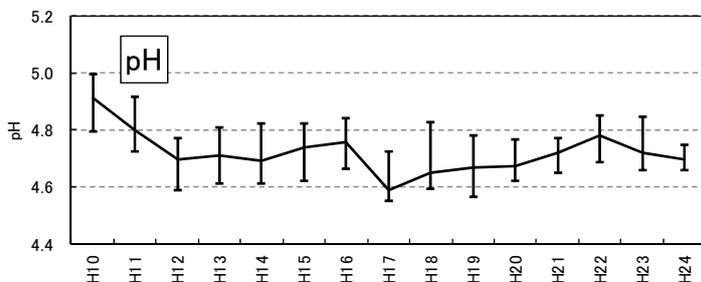
-- 測定せず

** 当該年平均値が有効判定基準に適合せず、棄却された

注 1 : 平均値は降水量加重平均により求めた

注 2 : 尾花沢、筑波、犬山、倉橋島及び五島は平成 20 年度末で測定を休止

図 1 降水の pH 分布図 (平成 20 年度～24 年度)

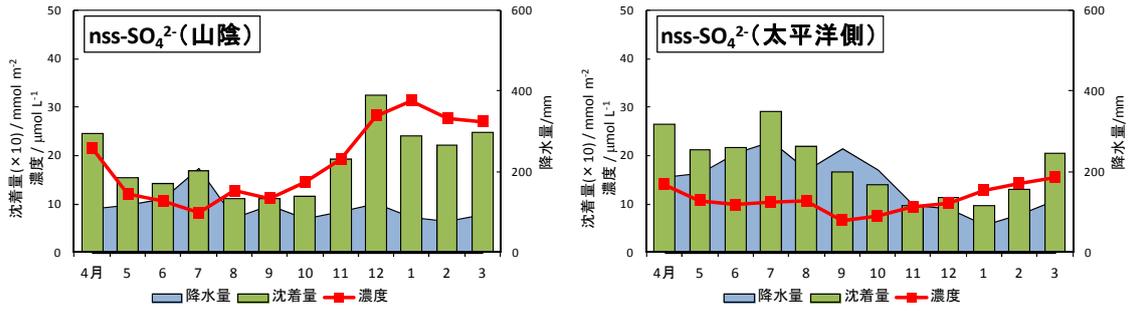


注 1 : 中央値 (値の低い方から数えて 50%目に相当する値)の経年変化を示したもの。

注 2 : エラーバーは、各年度の 25% 値～75%値の範囲を示す。

注 3 : 有効判定基準により無効な年間値は含めずに計算した。

図 2 降水の pH の経年変化 (全測定地点の中央値)



注：山陰は2地点、太平洋側は7地点の平均値

図3 山陰(左図)及び太平洋側(右図)における降水中の非海塩性硫酸イオン(nss-SO_4^{2-})濃度及び湿性沈着量並びに降水量の季節変動(平成20~24年度平均値)

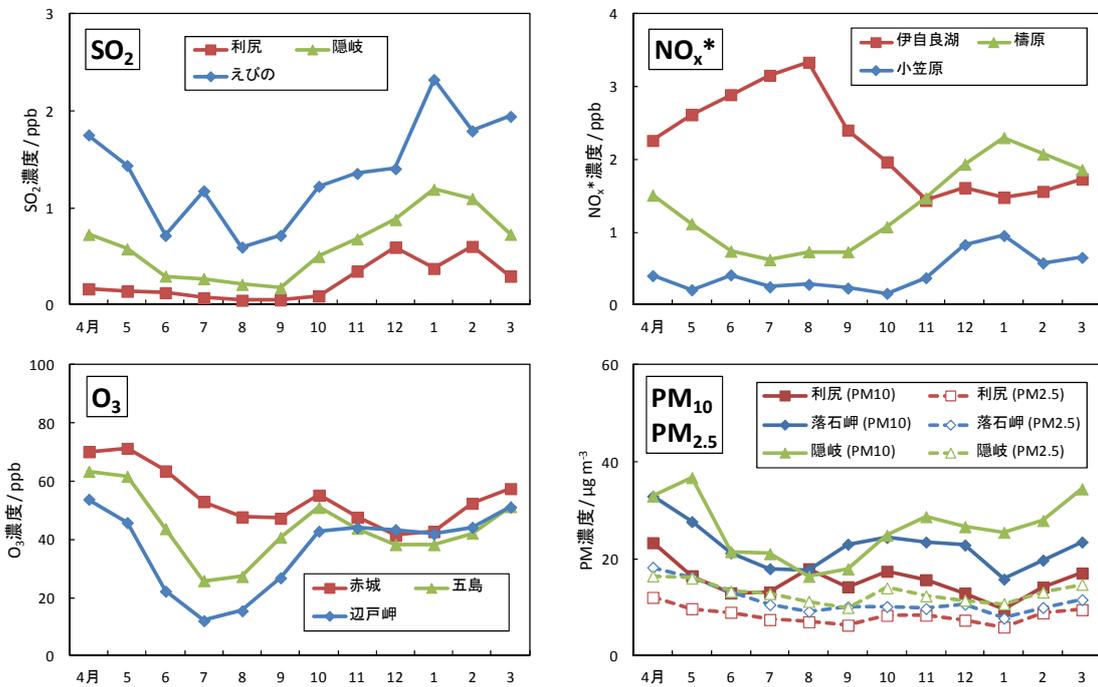
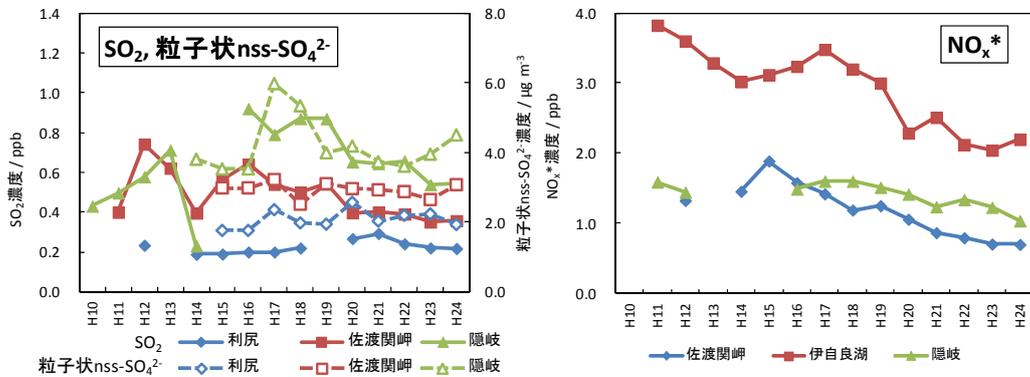
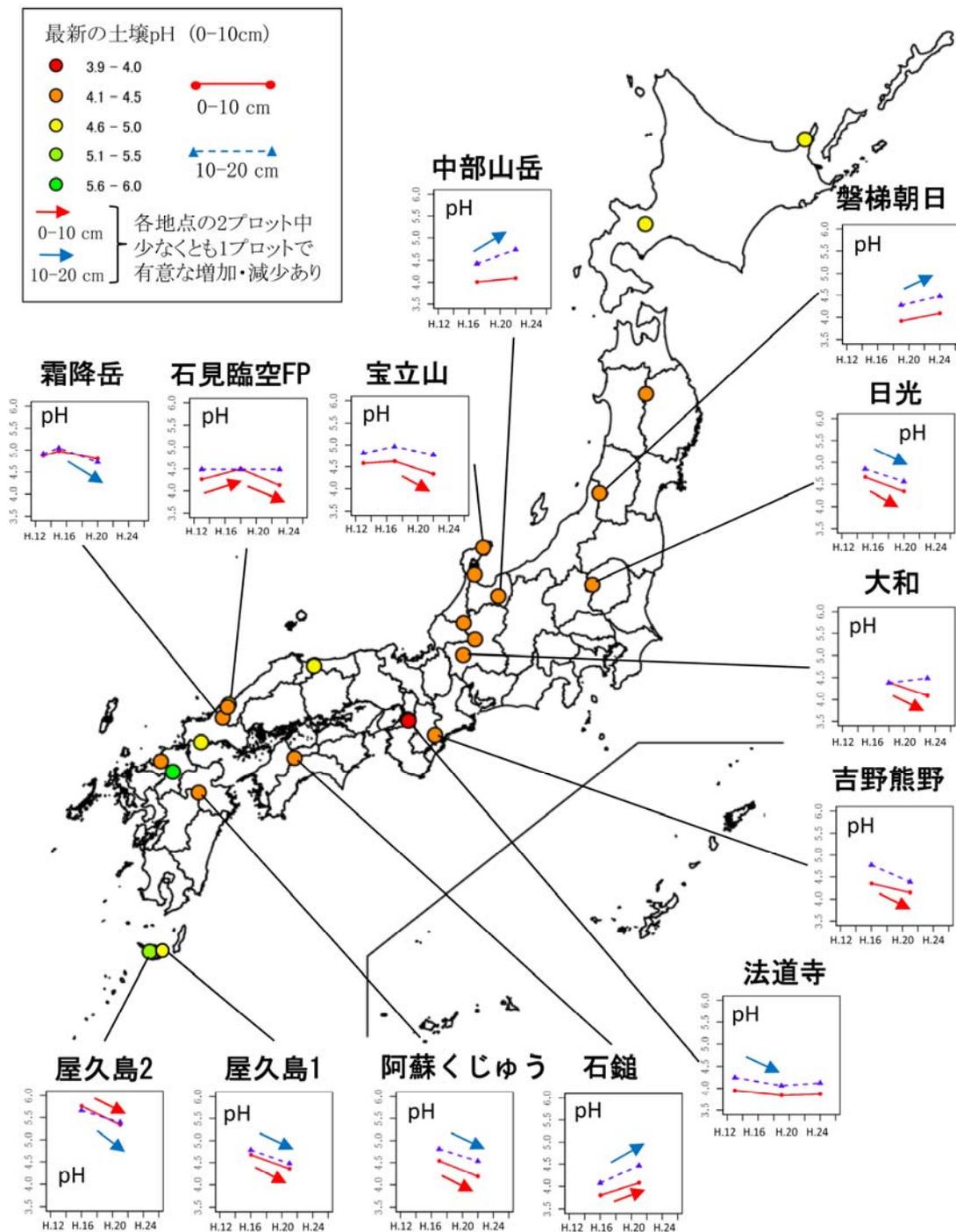


図4 ガス状物質及び粒子状物質濃度の季節変動(平成20~24年度平均値)



注：完全度が75%未満の年間値は表示しない。

図5 SO_2 濃度、粒子状 nss-SO_4^{2-} 濃度(左図)及び NO_x^* 濃度(右図)の経年変化(平成10~24年度)



注1：有意な経年変化が見られた地点のみを抜粋しグラフで示した。いずれの図におけるデータも、2つのプロットにおける平均値を示している。

注2：石見臨空ファクトリーパーク (FP) では、1プロットは一貫してpHが低下したが、もう1プロットでは一旦上昇した後、低下した。

図6 土壌・植生モニタリング地点における土壌pH(H₂O)の分布と経年変化

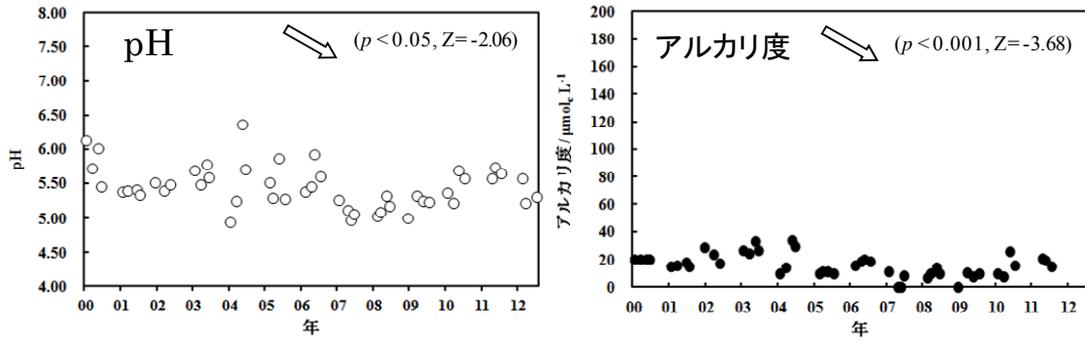


図7 夜叉ヶ池の表層水のpH（左図）及びアルカリ度（右図）の経年変化

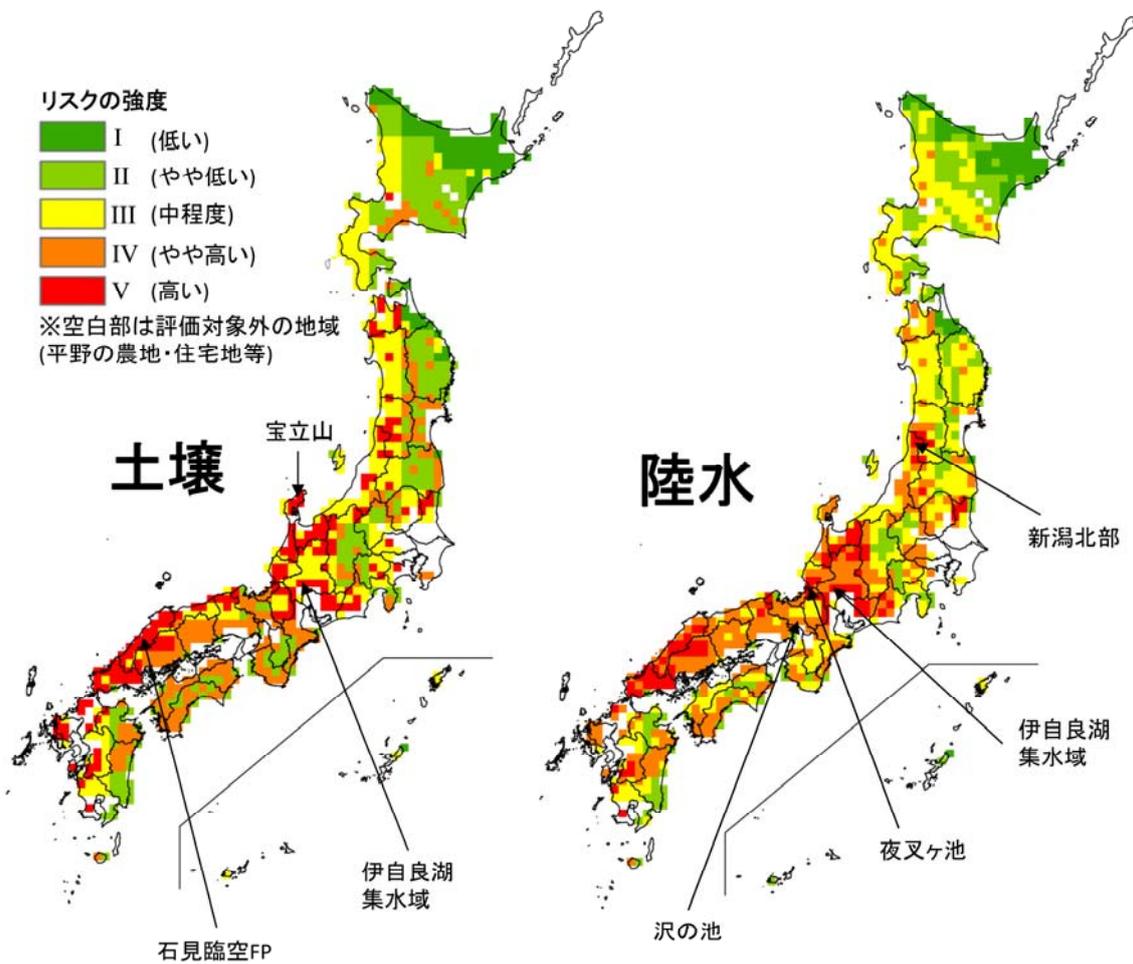


図8 土壌・陸水の酸性化リスクマップ

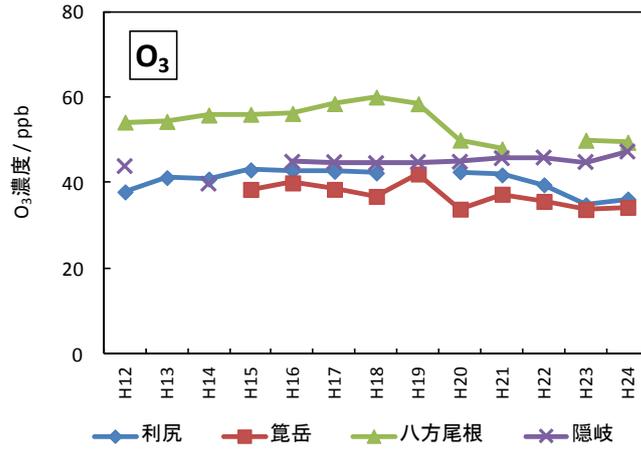


図9 オゾン濃度の経年変化（平成12～24年度）

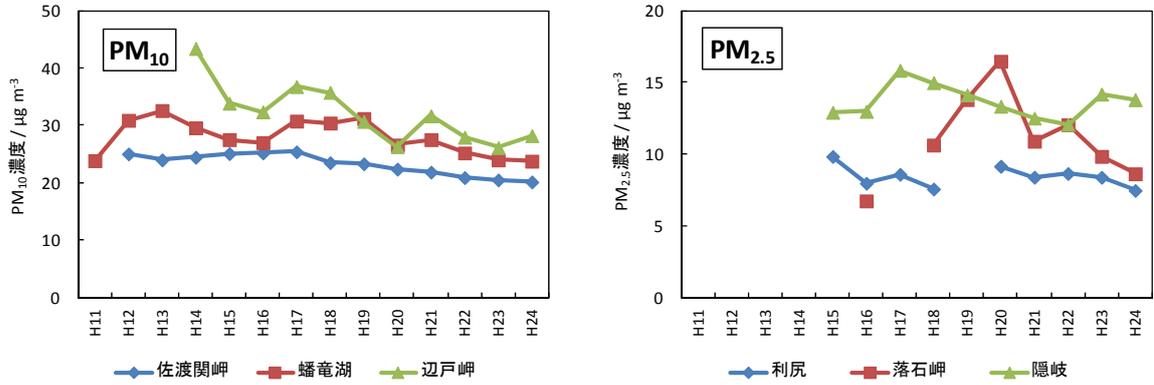
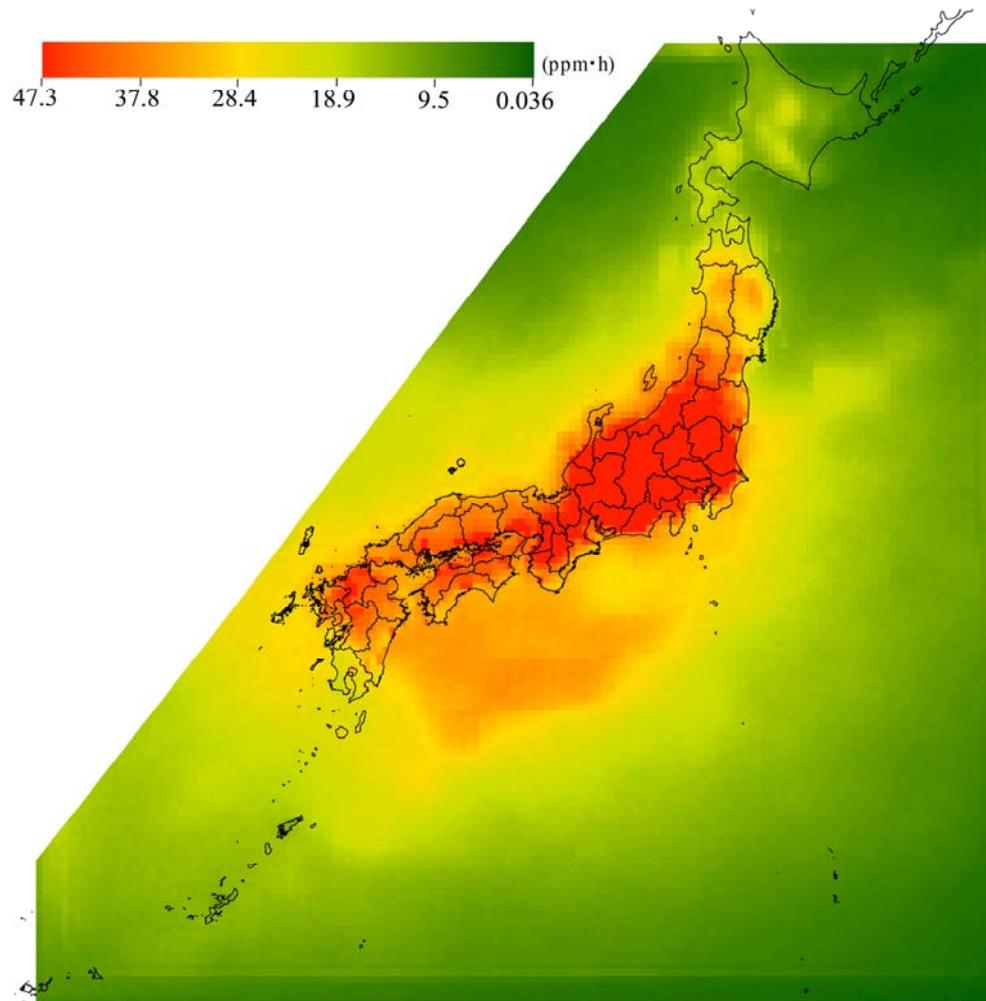
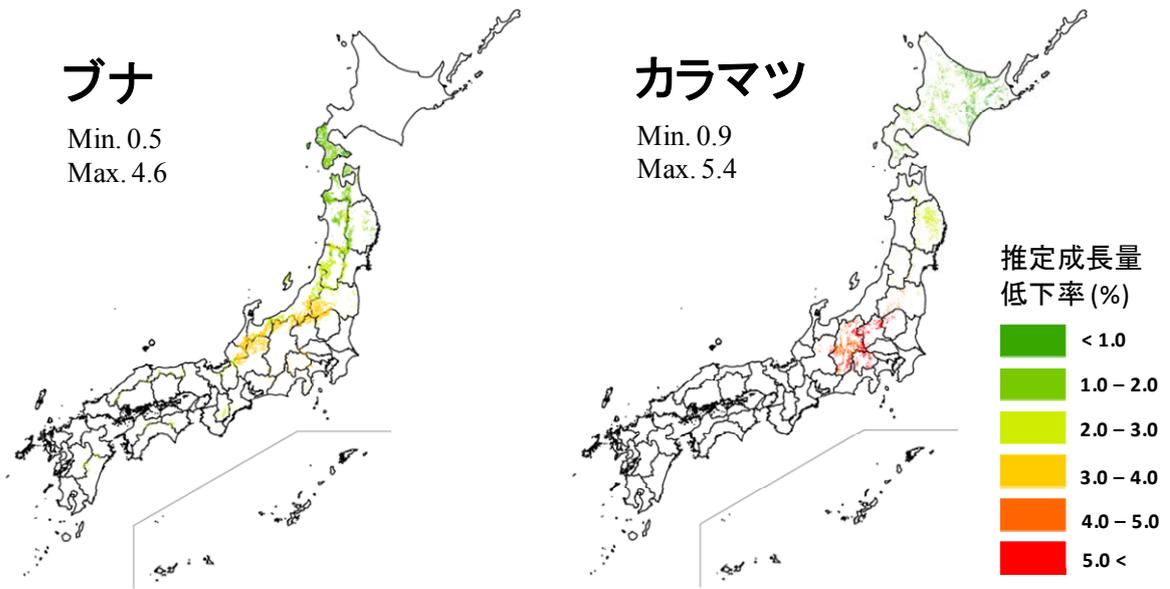


図10 PM₁₀濃度（左図）及びPM_{2.5}濃度（右図）の経年変化（平成11～24年度）



注：4月～9月のAM6:00～PM6:00におけるオゾン濃度積算値

図11 2011年の気象場を用いたAOT40のモデル推定結果



注1：オゾン暴露がない場合の成長量を100%とした場合の低下率
 注2：3次メッシュ（1 km×1 km）植生データに基づく表示
 注3：空白の地域は植生が分布していないことを示す

図 12 2011 年の気象場を用いて推定されたオゾンによる推定成長量低下率
 （ブナ（左図）及びカラマツ（右図））

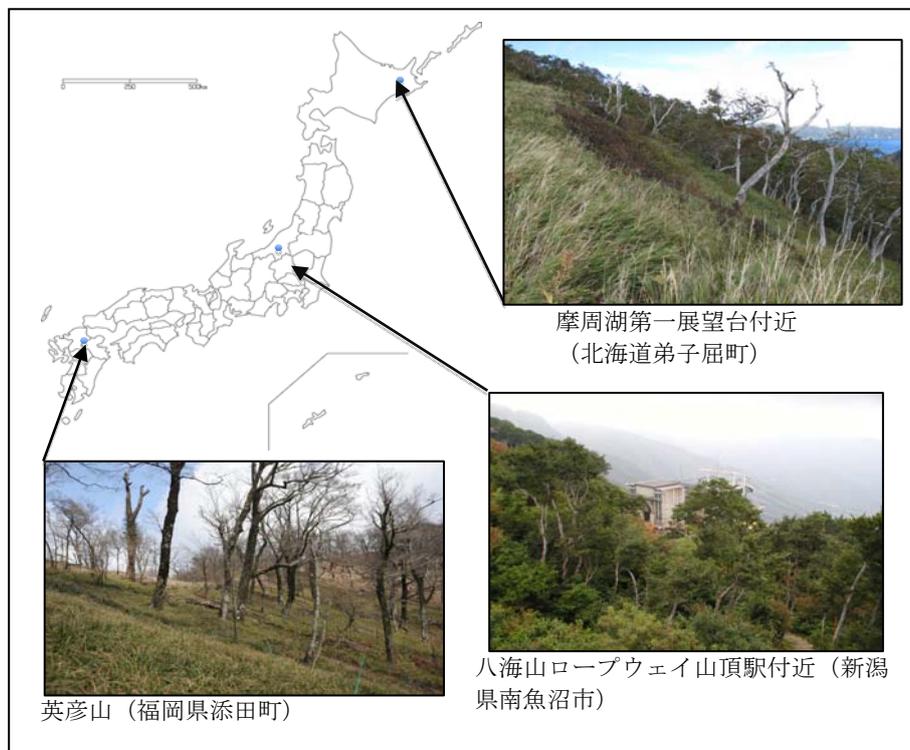


図 13 オゾンによる植物影響評価のためのパイロット・モニタリング実施地点

表 2 平成 24 年度の植物成長期におけるオゾン濃度の概要

	摩周湖外輪山*1	八海山	英彦山
モニタリング期間	5月1日～10月31日	6月21日～11月9日	5月1日～10月31日
平均値 (ppb) *2	27 (29)	41	45
中央値 (ppb) *2	27 (29)	40	46
95 パーセンタイル値 (ppb) *2	45 (47)	60	77
5 パーセンタイル値 (ppb) *2	11 (13)	25	17
AOT40 (ppm・h)*3	1.2 (1.9)	4.7	21.8

*1 ポテンシャル・オゾン (PO) の結果も併せてカッコ内に示した。

*2 平均値等の算出は、夜間も含めた全時間値を対象とした。

*3 AM6:00-PM6:00 (12時間) の40ppb を超えたオゾン濃度の時間積算値。各地点の積算期間はモニタリング期間に示したとおり。

1. 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの経緯

東アジア地域では、大気汚染等の深刻な環境問題を抱えつつ経済が急速に発展しており、広域な環境影響が懸念されている。

環境省（庁）は、昭和 58 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。平成 14 年度までの計 20 年間の調査結果は平成 16 年 6 月に「酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書」として取りまとめられ、欧米並の酸性雨が見られること、冬季に日本海側で酸性成分が増加する傾向にあることなどが確認されている。また、平成 15 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」を策定して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（平成 21 年 3 月）、伊自良湖集水域における酸性化、酸性沈着のみならず、オゾンやエアロゾル等を統合した越境大気汚染モニタリングの実施の必要性等が指摘されている。

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、平成 10 年 4 月から「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）」が試行稼働し、平成 13 年 1 月から本格稼働を開始した（現在、13 カ国が参加）。EANET では、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各国で継続的に実施されるとともに、平成 22 年の第 12 回政府間会合において「EANET の強化のための文書」が採択され設立基盤の強化が図られ、さらに、平成 23 年の第 13 回政府間会合では「東アジア地域における酸性雨の状況に関する第 2 次定期報告書」（PR SAD2）が取りまとめられた。EANET では酸性沈着とその影響を対象として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、議論が重ねられているところである。

上記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、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観点から、平成 21 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、平成 21 年度からそれに基づくモニタリングが開始されている。越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングは、酸性雨原因物質やオゾン等大気汚染物質の長距離越境輸送やそれらの影響の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、大気モニタリング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。昭和 58 年度から平成 24 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。平成 20 年度からは、伊自良湖における集水域モニタリングも新たに追加されている。

本報告書は、平成 20～24 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

	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	
年度	昭和58年 ～62年度	昭和63年～ 平成4年度	平成5年～ 9年度	平成10年～ 12年度	平成13年～ 14年度	平成15年～ 20年度	平成21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
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
陸水	133地点 (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
集水域						1地点 (平成20年 度～)	1地点
その他		酸性雪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(SO₂)、窒素酸化物(NO_x)等のガス状の汚染物質は、様々な化学的、物理的過程を経て最終的に地上に沈着する。

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、SO₂やNO_xは硫酸や硝酸という強酸に変換される。一方、大気中にはアンモニアや炭酸カルシウムなどの塩基性物質も存在し、これらの物質は硫酸や硝酸を中和し、硫酸アンモニウムや硝酸アンモニウムなどの弱酸性の塩、硫酸カルシウムや硝酸カルシウムなどの中性の塩を生成し、地上へ沈着する。

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、地上へは水に溶け込んだ形で沈着する過程が湿性沈着であり、ガスや粒子状物質が風で輸送されるときにそのままの形で森林表面等に沈着する過程が乾性沈着である。「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、両者の合計である総沈着量の評価が最近の課題になっている。

酸性雨による影響としては、土壌の酸性化による森林の衰退、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が指摘されている。この影響は、酸性沈着の量によって決まるため、例えば雨の場合、酸性度を示すpHだけではなく、そのときの降水量も考慮した沈着量に着目する必要がある。

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」は種々の物質に関わる総合的な大気汚染として捉えることが大切であり、降水だけではなく、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_{2.5}に代表されるような粒子状物質等を観測する必要がある。

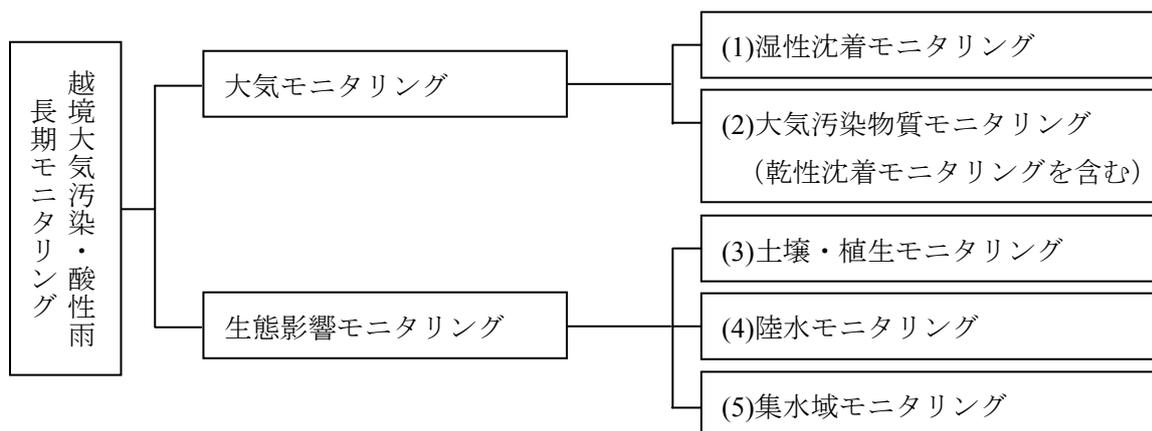
2. 調査の目的及び内容

2.1 目的

越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングは、酸性雨原因物質やオゾン等大気汚染物質の長距離越境輸送や、それらの影響の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に、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、大気モニタリング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。

2.2 調査内容

環境省では、酸性雨長期モニタリング計画（平成 14 年 3 月）及び平成 21 年 3 月に改訂された「越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画」に基づき、平成 20～24 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。伊自良湖集水域における集水域モニタリングは、平成 17～19 年度に実施された重点調査結果を踏まえ、平成 20 年度から定期観測項目として新たに加えられた。



2.2.1 湿性沈着モニタリング

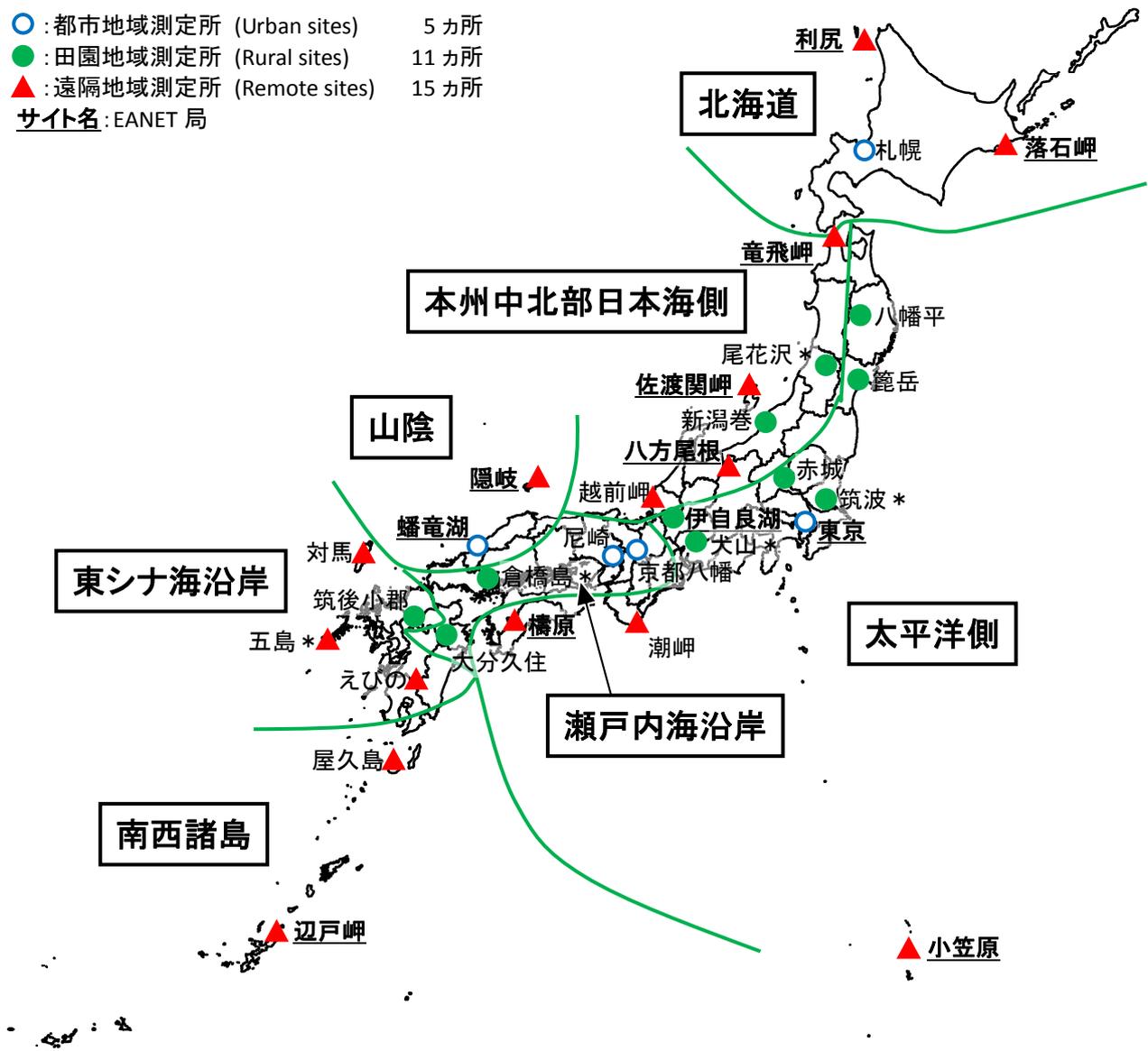
湿性沈着モニタリングは、気候区分や測定局の特性、地域的なバランス等を考慮し、モニタリングを効果的・効率的に実施できるように、大気モニタリング地点として選定された 31 地点（うち 5 地点は平成 20 年度末で測定を休止）において実施された。なお、測定地点は、「Technical Manual for Wet Deposition Monitoring in East Asia -2010」[1] に従い、遠隔地域、田園地域及び都市地域モニタリング地点に分類される（図 2-1 参照）。また、31 地点を地域別に分析する際には、図 2-1 のとおり、北海道、本州中北部日本海側、太平洋側、瀬戸内海沿岸、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）¹、電気伝導率（EC）、イオン濃度（硫酸イオン（SO₄²⁻）、硝酸イオン（NO₃⁻）、塩化物イオン（Cl⁻）、アンモニウムイオン（NH₄⁺）、カルシウムイオン（Ca²⁺）、カリウムイオ

¹ 水素イオン（H⁺）濃度の逆数の常用対数が水素イオン指数（pH）

ン (K^+)、マグネシウムイオン (Mg^{2+})、ナトリウムイオン (Na^+) 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) 11 カ所
 - ▲ : 遠隔地域測定所 (Remote sites) 15 カ所
- サイト名: EANET 局



*尾花沢、筑波、犬山、倉橋島及び五島（湿性沈着）は平成 20 年度末に測定を休止

図 2-1 大気モニタリング地点

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）

乾性沈着モニタリングは、本来、乾性沈着量を把握するためのものであるが、乾性沈着の過程が極めて複雑であり、沈着量の測定法が標準化されていないことから、乾性沈着量の推定に資するよう、大気汚染物質の大気中濃度の測定を実施した。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 地点においては、自動測定機による二酸化硫黄（SO₂）、二酸化窒素（NO₂）、窒素酸化物（NO_x、NO_x*）²、オゾン（O₃）³及び粒径 10 μm 以下の粒子状物質（PM₁₀）⁴の各濃度の連続測定を実施した。また、利尻、落石岬及び隠岐では微小粒子状物質（PM_{2.5}）⁵も測定したが、これら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[3][4]以外の機種によって実施された。EANET 局では、フィルターパック法⁶により、大気試料を 1 又は 2 週間吸引した試料を分析し、二酸化硫黄（SO₂）、硝酸（HNO₃）、塩化水素（HCl）、アンモニア（NH₃）、粒子成分濃度（SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺及び Na⁺）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 5 版（平成 19 年 3 月）[5] 及び第 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 Document for Filter Pack Method in East Asia」[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。

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。

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（0–10cm）及び次層（10–20cm）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。

² 一般的に、NO_xは NO と NO₂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て測定される NO_xには NO 及び NO₂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_xデータは「NO_x*」と表記する。一方、都市地域では NO_xの主要成分は NO 及び NO₂と考えられるため、「NO_x」と表記する。

³ 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、平成 22 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、平成 23 年度には完全移行している。

⁴ 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。

⁵ 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。

⁶ 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 _x	SO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	フイバーパック	風向風速	雨量	温湿度	日射量	EANET局
1 利尻		遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2 札幌	北海道	都市	○	週毎											
3 落石岬*1		遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4 竜飛岬	青森県	遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5 八幡平	岩手県	田園	○	週毎											
6 寛岳	宮城県	田園	○	週毎											
7 尾花沢*2	山形県	田園	○	週毎											
8 筑波*2	茨城県	田園	○	日毎											
9 赤城	群馬県	田園	○	週毎											
10 小笠原		遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11 東京	東京都	都市	○	日毎											
12 佐渡関岬		遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13 新潟春	新潟県	田園	○	日毎											
14 越前岬	福井県	遠隔	○	日毎											
15 人方尾根	長野県	遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16 伊自良湖	岐阜県	田園	○	週毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17 犬山*2	愛知県	田園	○	日毎											
18 京都八幡	京都府	都市	○	週毎											
19 尼崎	兵庫県	都市	○	週毎											
20 潮岬	和歌山県	遠隔	○	週毎											
21 隠岐		遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
22 蟠竜湖	島根県	都市	○	週毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
23 倉橋島*2	広島県	田園	○	日毎											
24 樽原	高知県	遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25 鏡後小郡	福岡県	田園	○	週毎											
26 対馬		遠隔	○	日毎											
27 五島*2	長崎県	遠隔	○	日毎											
28 大分久住	大分県	田園	○	週毎											
29 えびの	宮崎県	遠隔	○	日毎											
30 屋久島	鹿児島県	遠隔	○	週毎											
31 辺戸岬	沖縄県	遠隔	○	日毎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

*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 尾花沢、筑波、犬山、倉橋島及び五島（湿性沈着）は平成20年度末に測定を休止

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	直近の調査実施年度*2	選定の際考慮した樹種、土壌種、集水域	調査プロット数		
					林分の数	土壌プロット数	植生プロット数
1	知床国立公園（北海道）	樹木	平成22年度	トドマツ	1	2	1
2	支笏洞爺国立公園（北海道）	樹木	平成20年度	ダケカンバ	1	2	1
3	十和田八幡平国立公園（岩手県）	樹木	平成21年度	オオシラビソ	1	2	1
4	磐梯朝日国立公園三面山（新潟県）	樹木	平成24年度	ブナ	1	2	1
5	日光国立公園（栃木県）	樹木	平成20年度	ブナ	1	2	1
6	中部山岳国立公園（富山県）	樹木	平成22年度	ブナ	1	2	1
7	白山国立公園（石川県）	樹木	平成23年度	ブナ	1	2	1
8	吉野熊野国立公園（奈良県）	樹木	平成21年度	ブナ	1	2	1
9	大山隠岐国立公園（鳥取県）	樹木	平成20年度	ブナ	1	2	1
10	石鎚国定公園（高知県）	樹木	平成21年度	ブナ	1	2	1
11	阿蘇くじゅう国立公園（大分県）	樹木	平成22年度	ブナ	1	2	1
12	屋久島国立公園（鹿児島県）*3	樹木	平成21年度	スギ	1	2	1
13		樹木	平成21年度	照葉樹林	1	2	1
14	石動山・宝立山（石川県）	土壌	平成22年度	赤色土（宝立山）	1	2	1
				褐色森林土（石動山）	1	2	1
15	法道寺・天野山（大阪府）	土壌	平成24年度	黄色土（法道寺）	1	2	1
				黄色系褐色森林土（天野山）	1	2	1
16	霜降岳・十種ヶ峰（山口県）	土壌	平成20年度	黄色土（霜降岳）	1	2	1
				黒ぼく土（十種ヶ峰）	1	2	1
17	香椎宮・古処山（福岡県）	土壌	平成24年度	赤色系褐色森林土（香椎宮）	1	2	1
				褐色森林土（古処山）	1	2	1
18	伊自良湖周辺（岐阜県）（伊自良・大和）*4	陸水土壌	平成23年度	褐色森林土（伊自良）	1	2	1
				黒ぼく土（大和）	1	2	1
19	蟠竜湖周辺（島根県）（蟠竜湖・石見臨空ファクトリーパーク（FP））*4	陸水土壌	平成23年度	褐色森林土（蟠竜湖）	1	2	1
				赤色土（石見臨空 FP）	1	2	1

*1 地点 No.14（石動山・宝立山）～19（蟠竜湖周辺）の6箇所については調査地点が2地点あるため、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 平成24年3月16日に霧島屋久国立公園から分離して一つの国立公園として指定された。*4 EANETモニタリング地点。

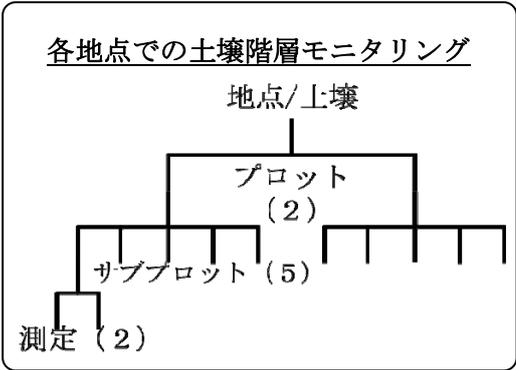
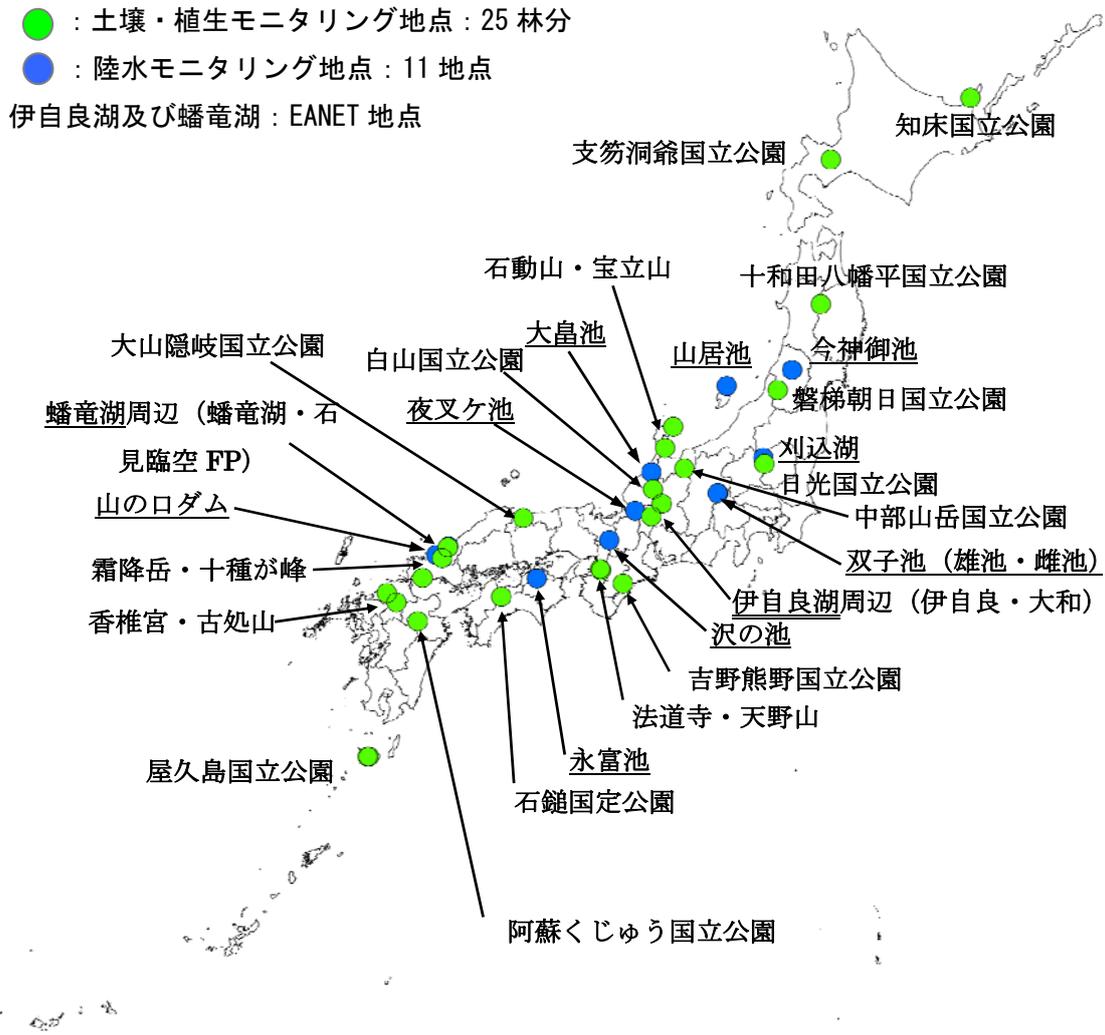


図 2-2 土壌・植生及び陸水モニタリング地点

注 1 : 陸水モニタリング地点は下線で示した。注 2 : 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。

必須項目：水分含量、pH(H₂O)、pH(KCl)⁷、交換性塩基 (Ca、Mg、Na、K)⁸、交換性 Al 及び H、交換酸度⁹、有効陽イオン交換容量 (ECEC)¹⁰、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

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、NH₄⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、クロロフィル a (Chl-a)、溶存酸素 (DO)

年 1 回以上測定：NO₂⁻、PO₄³⁻、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)：SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺

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 実施年度 (5 年に 1 回)
1	いまがみおいけ 今神御池	山形県	平成 22 年度
2	かりこみこ 刈込湖	栃木県	平成 23 年度
3	さんきよいけ 山居池	新潟県	平成 20 年度
4	おおはたいけ 大畠池	石川県	平成 24 年度
5	やしやがいけ 夜叉ヶ池	福井県	平成 23 年度
6	ふたごいけ おいけ・めいけ 双子池 (雄池・雌池)	長野県	平成 21 年度
7	いじらこ 伊自良湖* ¹ (流入河川：釜ヶ谷川・孝洞川)	岐阜県	平成 22 年度
8	さわのいけ 沢の池	京都府	平成 20 年度
9	ぼんりゅうこ 蟠竜湖* ¹	島根県	平成 24 年度
10	やまのくちだむ 山の口ダム	山口県	平成 21 年度
11	ながとみいけ 永富池	香川県	平成 24 年度

*1 EANET モニタリング地点

⁷ 土壌の水 (H₂O) もしくは 1M KCl による抽出液の pH。

⁸ 土壌表面に吸着している各種のイオン濃度。

⁹ 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)。

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

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）、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、TOC、溶存態全 Al、 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

注 1：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。注 2：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平成 23 年 4 月に伊自良湖左岸に移設。

2.2.6 データの確定と精度保証・精度管理

2.2.1～2.2.5 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、平成 22 年 6 月まで旧称酸性雨研究センター（ADORC））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分科会・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平成 20～24 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が 90%以上と、良好であった。

表 2-4 平成 20～24 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 (上段：参加機関数 下段：基準 ^{*1} を満たした結果の割合)				
		H20 年度	H21 年度	H22 年度	H23 年度	H24 年度
湿性沈着	模擬降水試料 (100 倍濃縮)	24	20	20	20	21
		96.5%	98.3%	98.8%	98.8%	98.1%
乾性沈着 (フィルターパック法)	模擬フィルター パック試料	7	7	7	8	8
		97.6%	95.2%	100%	97.9%	93.8%
土壌	風乾後滅菌した 土壌試料	4	4	6	4	6
		-- ^{*2}	--	--	--	--
陸水	模擬陸水試料	11	11	11	11	11
		92.6%	91.7%	98.3%	98.3%	96.7%

*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。平成 20～24 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 平成 20～24 年度における現地調査の実施地点数

	H20 年度	H21 年度	H22 年度	H23 年度	H24 年度
大気モニタリング地点	11	10	12	11	11
土壌・植生モニタリング地点	5	5	6	8	5
陸水モニタリング地点	4	4	4	4	4
集水域モニタリング地点	--	--	1	1	--

--: 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] 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
- [4] 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
- [5] 環境省, 環境大気常時監視マニュアル (第 5 版), 環境省水大気環境局, 2007.
- [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 Filter Pack Method in East Asia, Acid Deposition and Oxidant Research Center (ADORC), 2003.
- [8] 環境省, 土壌・植生モニタリング手引き書, 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.