

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）

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

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

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

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（ $nss-SO_4^{2-}$ ）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（ $nss-SO_4^{2-}$ ）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

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^{ぼんたい}、大山隠岐^{だいせんおき}、十和田八幡平^{はちまんたい}、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^{やしまがいけ}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

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

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^{ほうりゅうざん}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

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}籠岳）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

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、^{ばんりやうこ}蟠竜湖、禰原及び伊自良湖）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

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

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^{ひこさき}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。

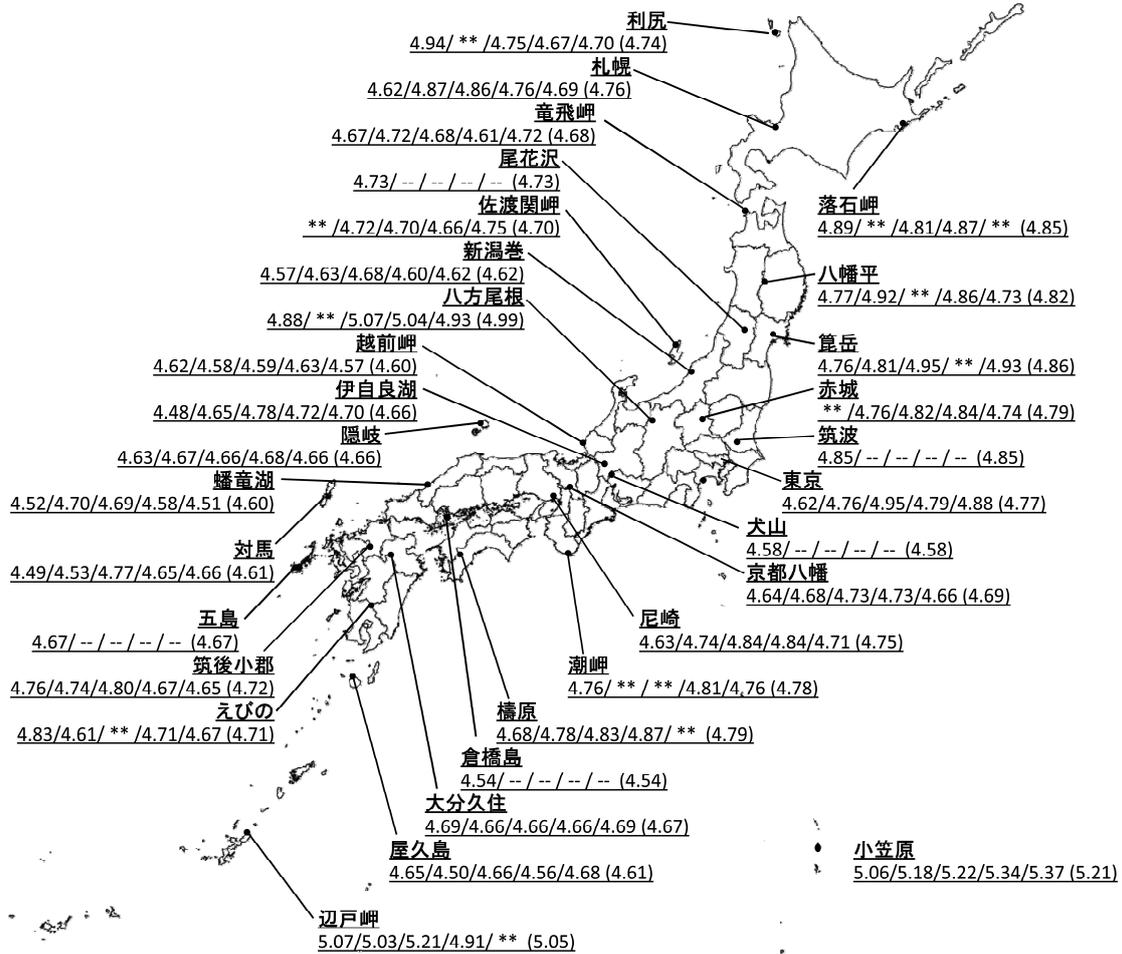
(2) 国際的な取組の推進

- 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

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)

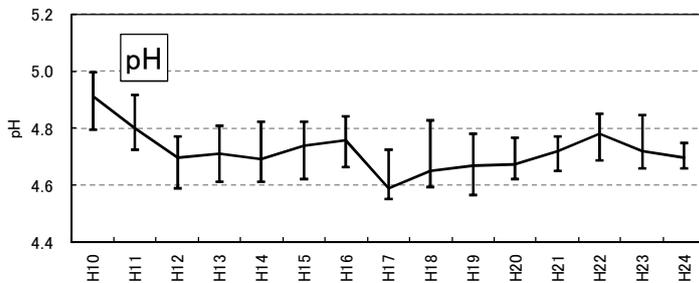
-- 測定せず

** 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)

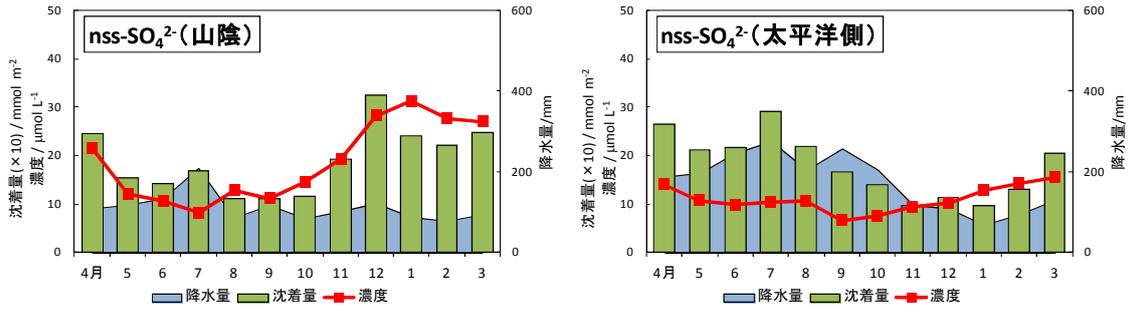


注 1 : 中央値 (値の低い方から数えて 50%目に相当する値)の経年変化を示したもの。

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)

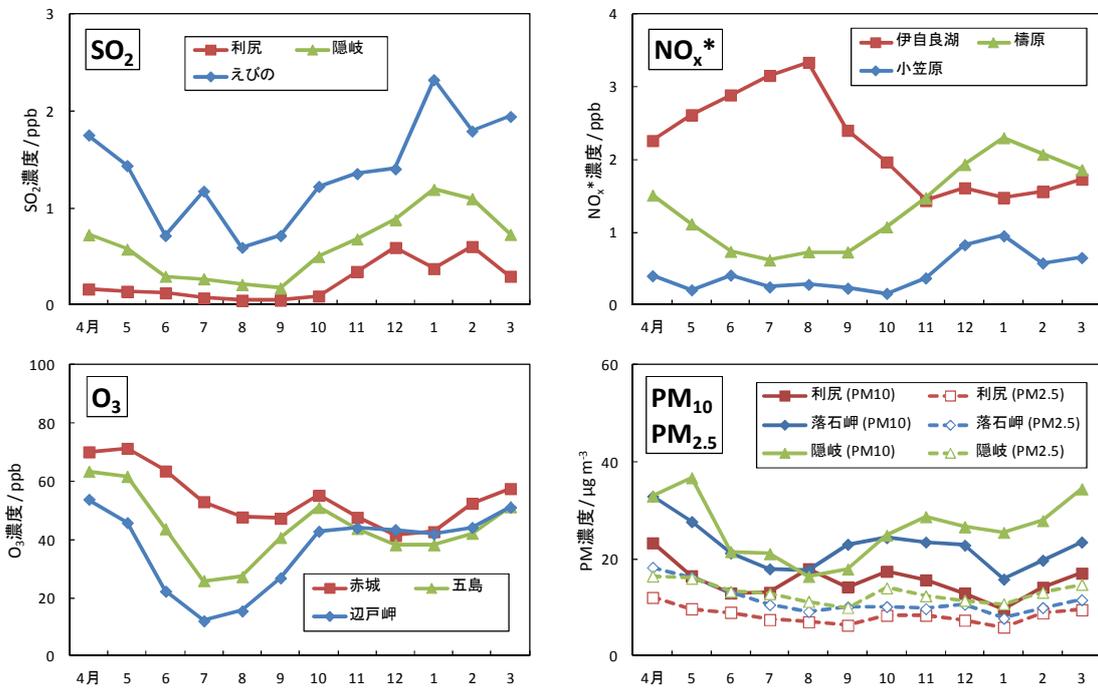
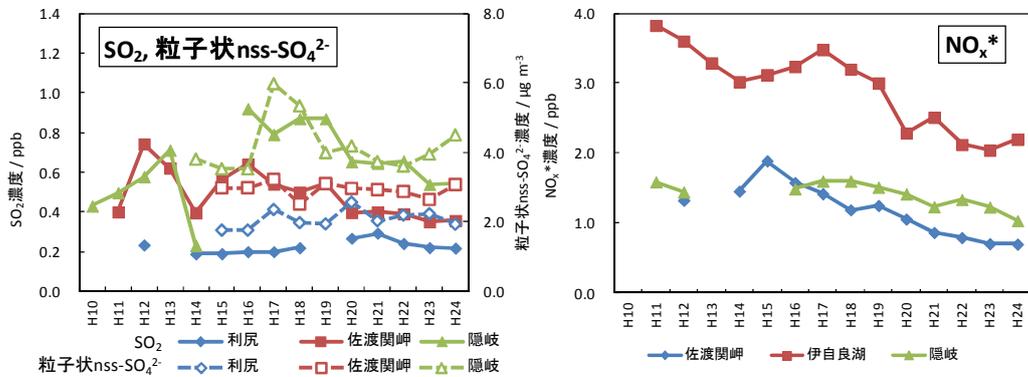
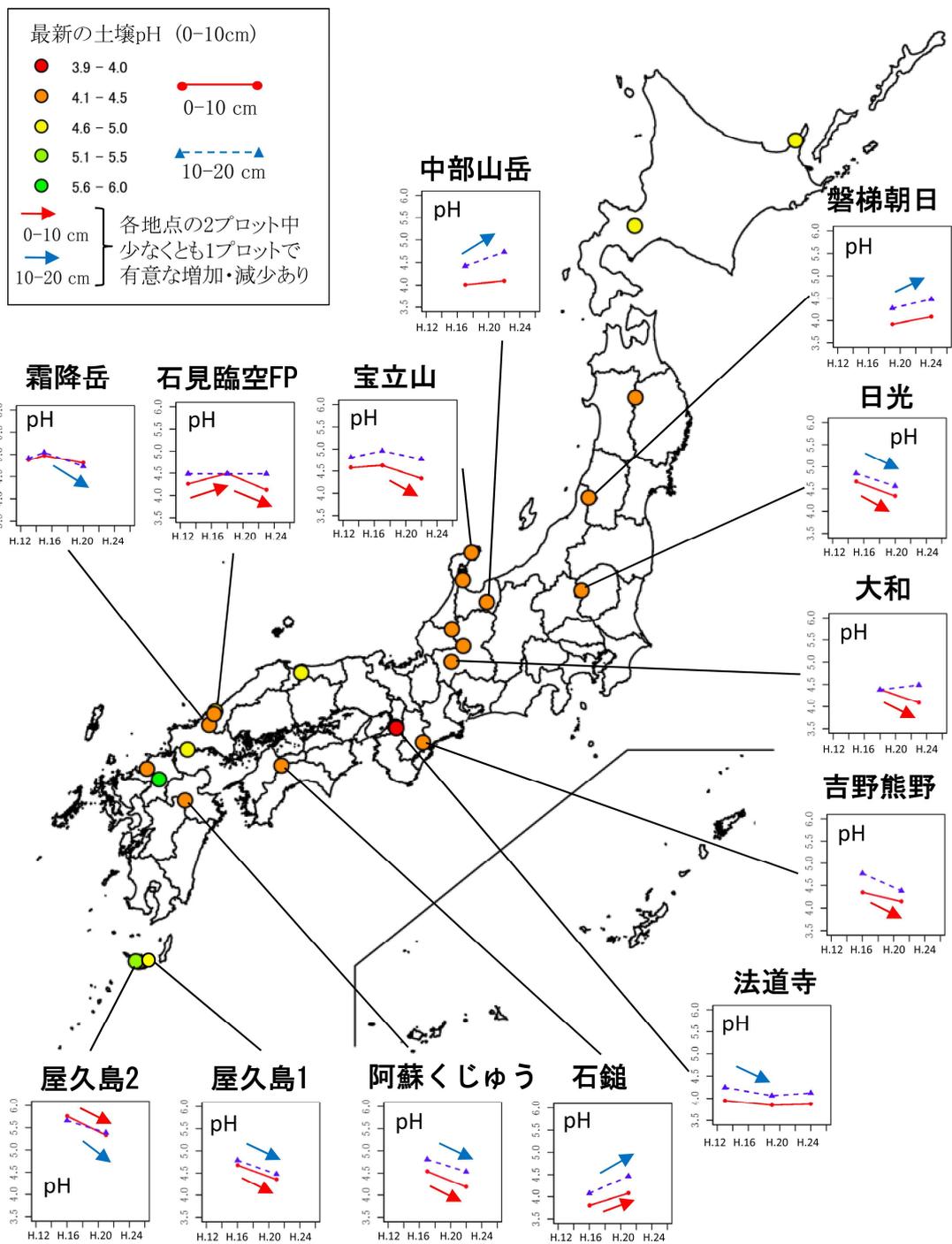


図4 ガス状物質及び粒子状物質濃度の季節変動(平成20~24年度平均値)



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

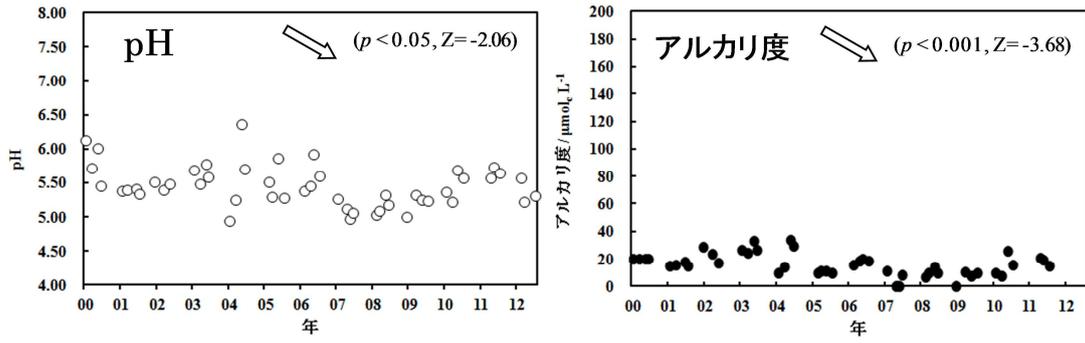


図7 夜叉ヶ池の表層水の pH (左図) 及びアルカリ度 (右図) の経年変化

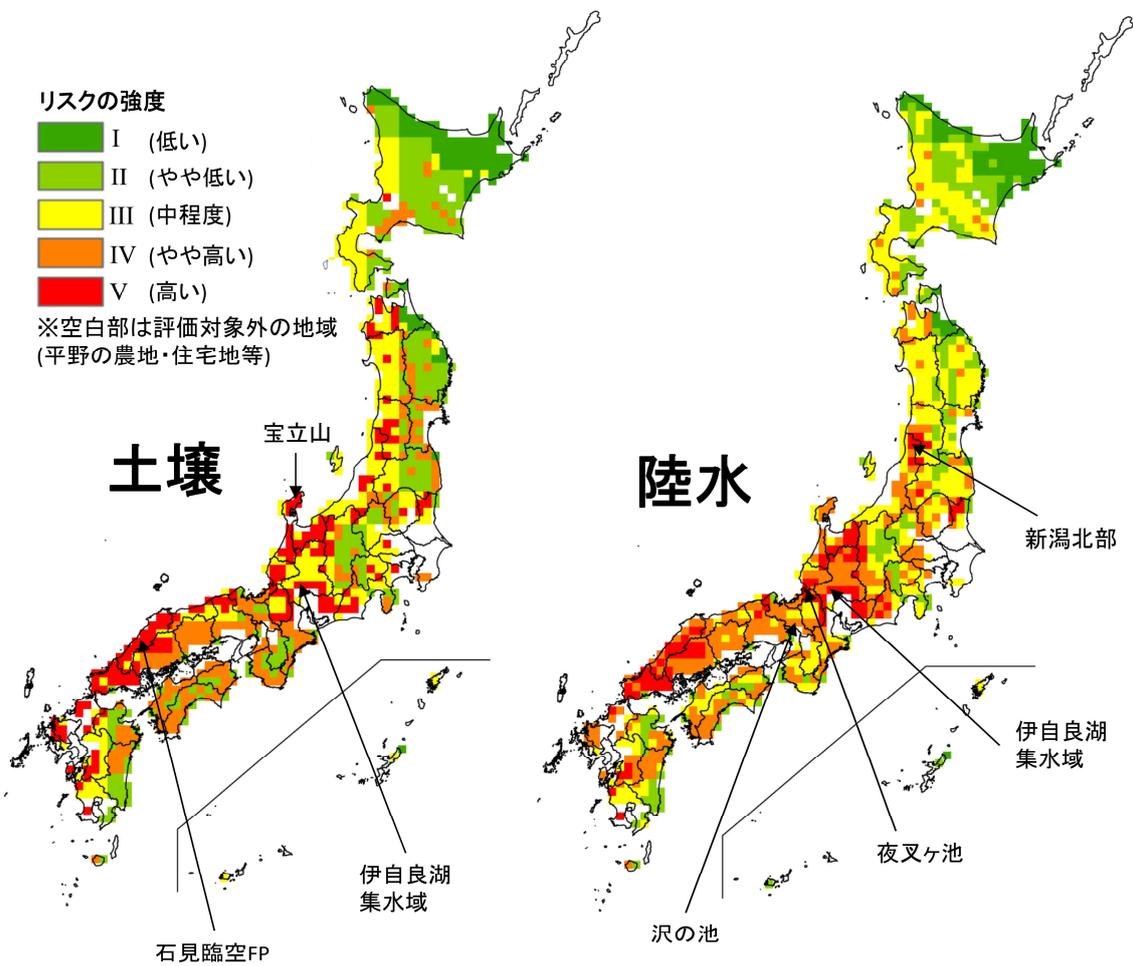


図8 土壌・陸水の酸性化リスクマップ

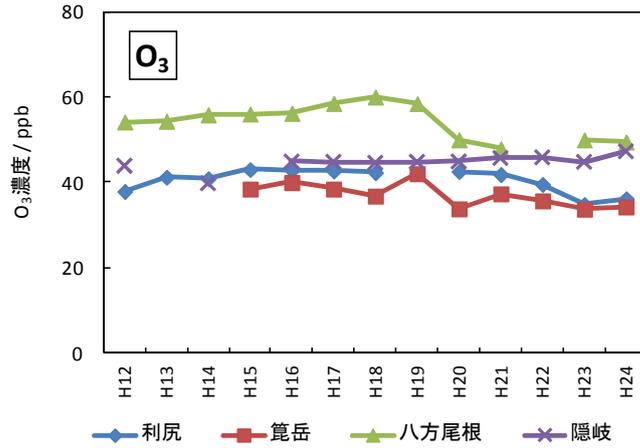


図9 オゾン濃度の経年変化（平成12～24年度）

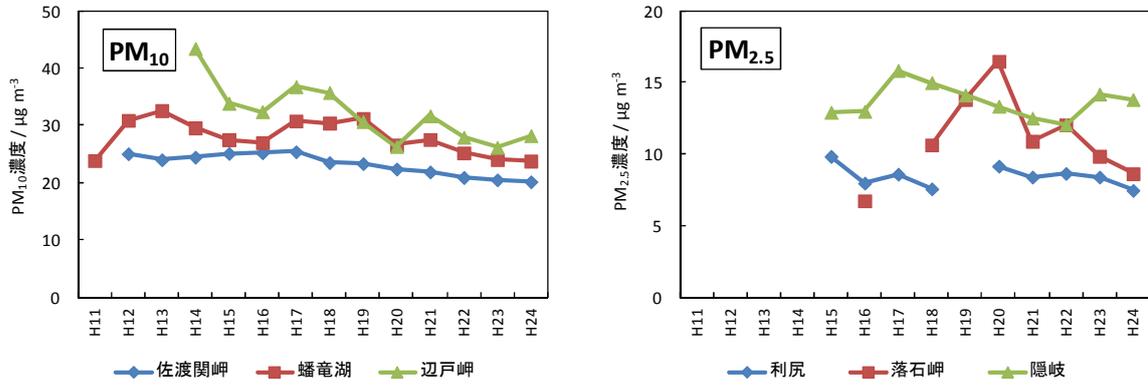
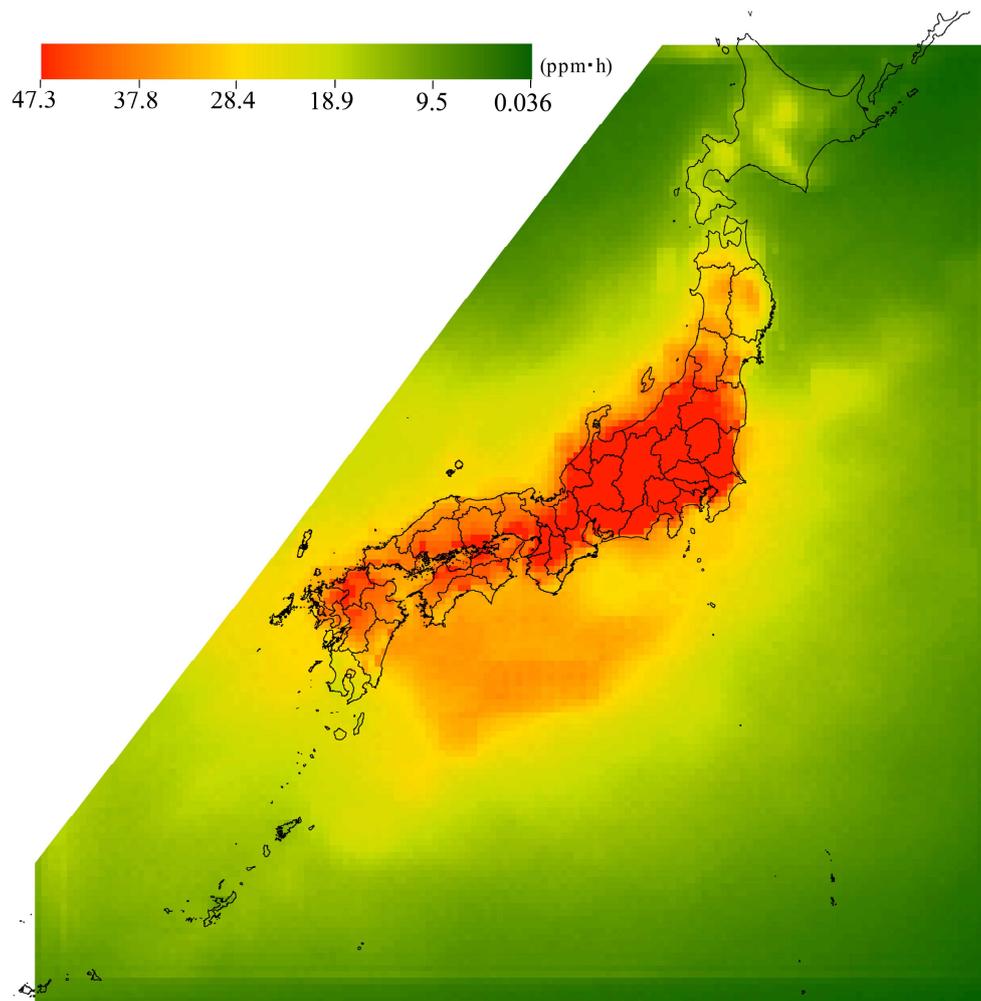
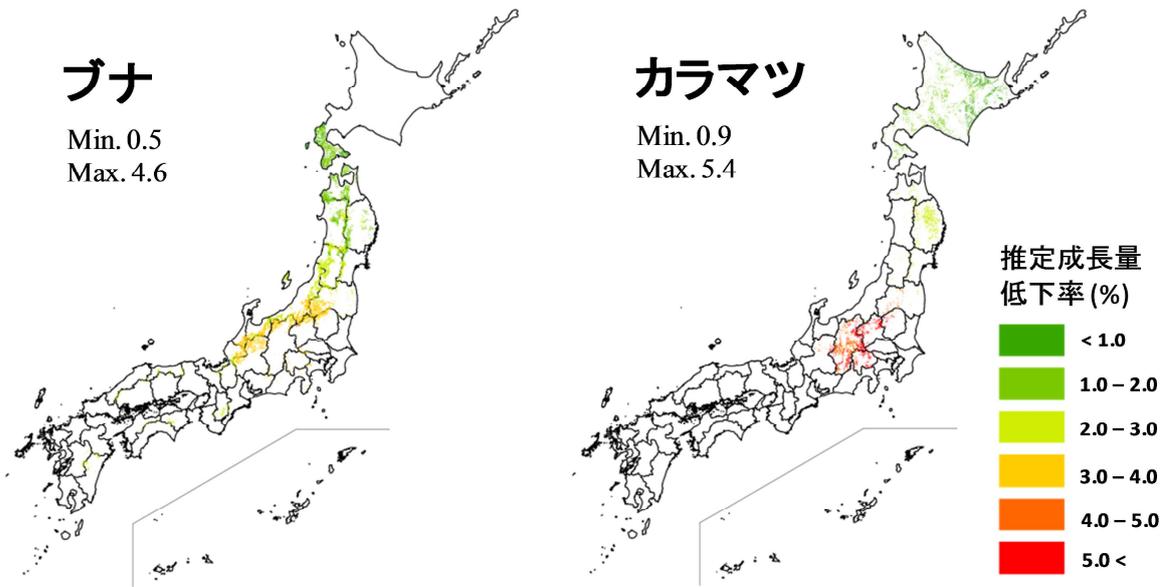


図10 PM₁₀濃度（左図）及びPM_{2.5}濃度（右図）の経年変化（平成11～24年度）



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（1km×1km）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））

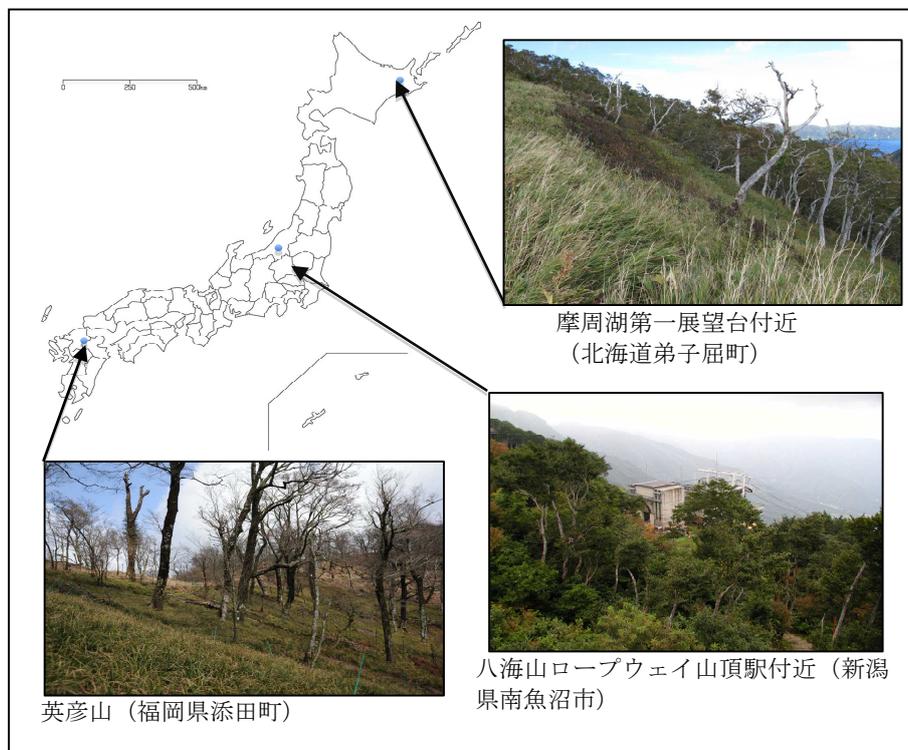


図13 オゾンによる植物影響評価のためのパイロット・モニタリング実施地点

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。