

3.2 生態影響モニタリング

3.2.1 土壌・植生モニタリング

(1) 平成 20～22 年度における土壌モニタリング結果

基礎データの収集及び大気沈着による影響評価を目的として、19 地域 25 地点 50 プロットでの土壌・植生モニタリングを平成 13 年度から実施している。

① 調査地点における土壌の化学的特性と酸緩衝能

現在までの土壌・植生モニタリング地点と、各地点における平成 13 年から平成 22 年度の pH、及び酸性沈着への緩衝能の指標として用いられる交換性塩基 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$) と交換性 Al^{3+} の当量比 (以下、 $(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) / \text{Al}$ 当量比¹⁾) の平均値を図 3-2-1 に示した。

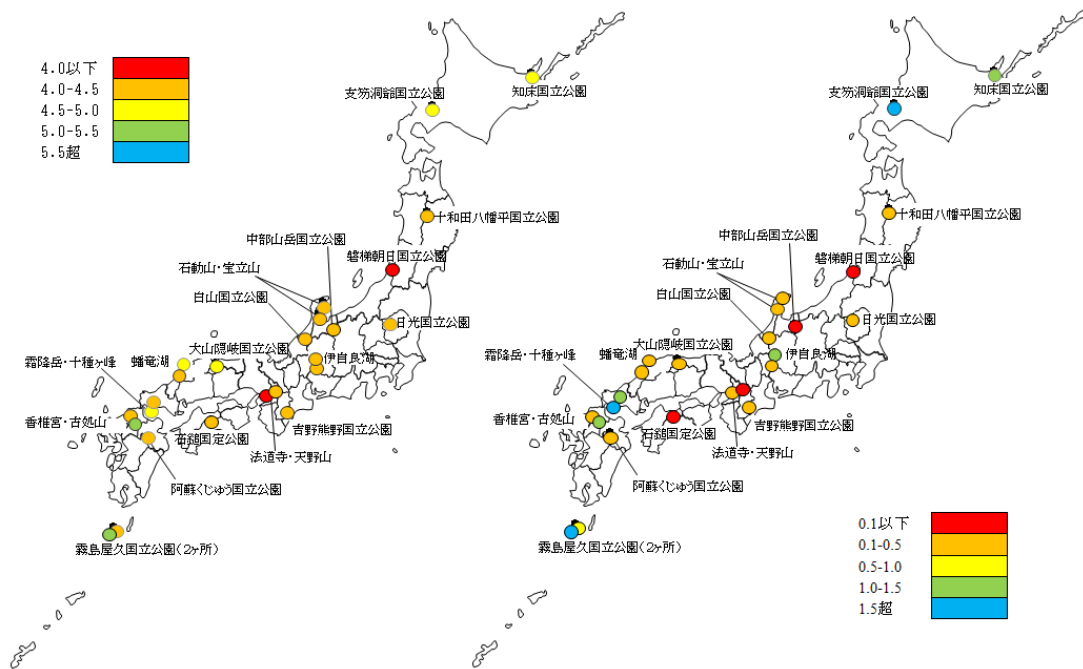


図 3-2-1 土壌・植生モニタリング地点における土壌表層 (0-10 cm) の pH (H_2O) (左) と交換性 ($\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}$) / Al 当量比 (右) (平成 22 年度までの最新値)

本モニタリングは森林植生を対象としており、調査地点の土壌は褐色森林土 (14 地点)、

¹ 1M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 溶液の NH_4^+ によりイオン交換されて抽出される塩基 (Ca、Mg、K など) と 1M KCl 溶液の K^+ により抽出される Al を当量比で表現したもの。土壌酸性化過程においては、塩基の溶脱と Al の活性化が生じ、この比が小さくなる。塩基交換による酸緩衝能の指標の 1 つ。

黒ぼく土 (4 点)、赤黄色土 (4 点)、ポドゾル性土 (3 点) の 4 つの大群 (土壌種)² に分類される¹⁾。

磐梯朝日国立公園 (褐色森林土) と法道寺 (赤黄色土) において、pH (H₂O) は 4.0 以下と強い酸性を示した。酸性沈着への緩衝能の指標として用いられる (Ca+Mg+K) /Al 当量比は、磐梯朝日国立公園 (褐色森林土)、中部山岳 (ポドゾル性土)、天野山 (褐色森林土)、石鎚 (褐色森林土) で 0.1 以下と他地点に比べ特に低かった。一方、支笏洞爺 (褐色森林土)、霜降岳 (赤黄色土)、屋久島 (褐色森林土) では比較的高い pH や (Ca+Mg+K) /Al 当量比が見られた。

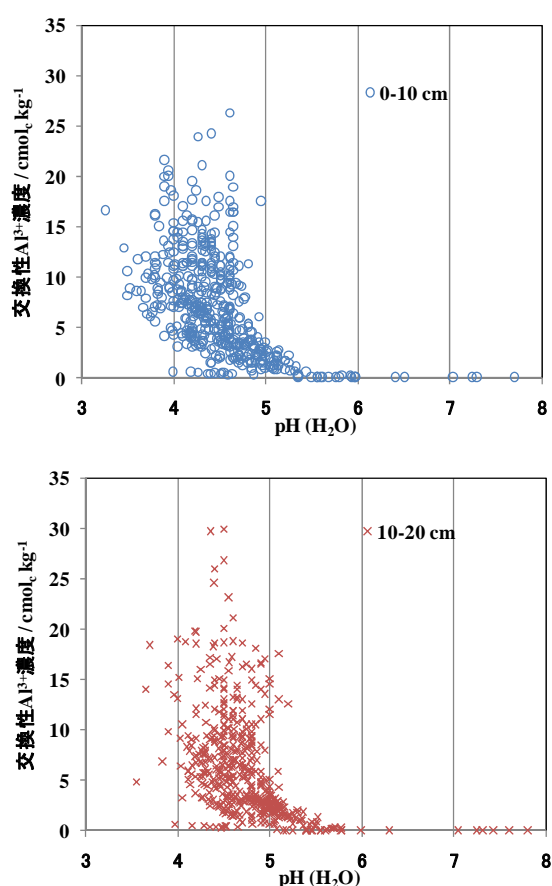


図 3-2-1-2 土壌・植生モニタリングにおける
土壌 pH と交換性 Al 濃度の変動 (平成 13 年
- 平成 22 年度における全サブプロットの値
(n=490))

上記モニタリング地点の土壌 pH と交換性 Al³⁺濃度の関係を図 3-2-2 に示した。土壌 pH が低いほど、交換性 Al³⁺濃度³が高くなる傾向がみられた。表層 (0-10 cm) の pH は次層 (10-20 cm) よりも低い pH 範囲に多く分布する傾向が見られた。土壌酸性化過程では、pH によって異なる酸緩衝作用が働くことが知られており、次ページのコラムに示したように、Al の緩衝作用の働く pH 4~5 の範囲では、酸の負荷量が大きくても土壌 pH は容易に低下しない。本モニタリング地点における土壌の多くは 5.5 以下の pH 範囲にあったため、外部から流入する酸は主に Al による緩衝作用を受けていると考えられる。有機物が少なく鉍物 (Al を含む) がより多く存在する次層ではこうした緩衝能が高いものの、表層では鉍物による緩衝能が低く、さらに有機物由来の有機酸の影響を受けて pH がより低下する傾向があったと考えられる。緩衝に伴い土壌溶液中に溶解する Al³⁺は植物

² 酸性沈着に対する緩衝能は土壌種によって異なる (次ページのコラムを参照)。

³ cmol_c kg⁻¹ (キログラム当たりのセンチモルチャージ) の単位で表示、mol_c は各イオンの電荷のモル数を示し、当量単位に等しい。本節では、mol_c 単位での表記をイオンの濃度、流入・流出量を表すのにも使用。

根にとって有害であり、pHのみならずAlの挙動についても注視する必要がある。

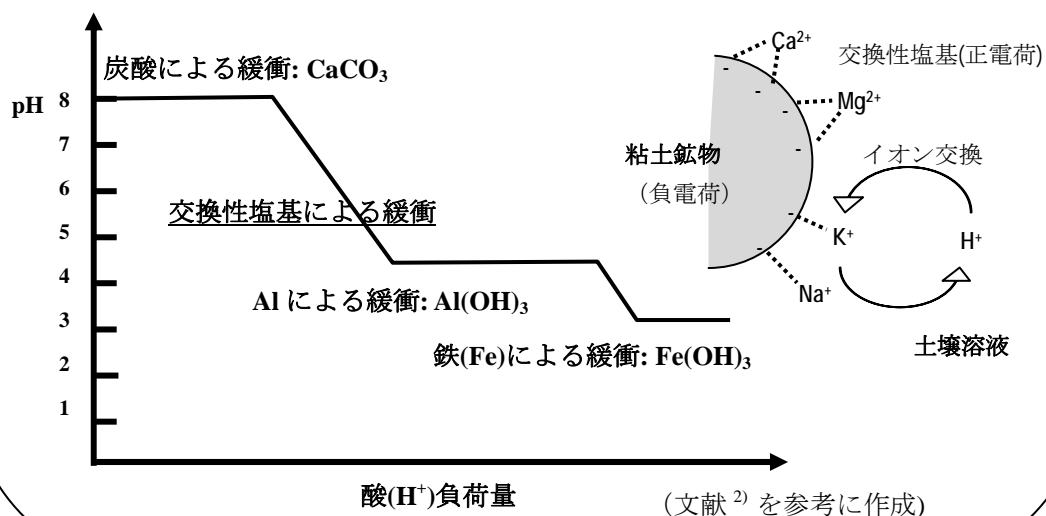
以上のように、土壌の化学的特性及び酸緩衝能はモニタリング地点や深度によって大きく変動していた。こうした変動の多くは地質学的な時間スケールでの土壌生成作用によって生じたものであるが、土壌・植生に対する人為影響を評価するためにはこうした自然条件下で形成された変動による土壌の化学的特性の違いを考慮する必要がある。

【参考】土壌の種類と酸性沈着への緩衝能

酸性沈着に対する緩衝能は、以下の土壌種の順に弱い。

- ① 赤黄色土: 化学的風化作用を強く受けた塩基が少ないAlに富む強酸性の土壌で、西南日本の丘陵地帯や洪積台地上に広く分布している。
- ② ボドゾル性土: 湿潤寒冷な亜寒帯針葉樹林下において生成された強酸性の土壌で、北海道北部及び本州、四国、九州の山岳地帯に分布している。
- ③ 褐色森林土: 我が国の代表的な森林土壌で全国に分布している。その多くは塩基飽和度が低い(50%未満)酸性の土壌である。
- ④ 黒ぼく土: 火山灰を母材とする有機物に富んだ土壌で、火山山麓に広く分布する。

土壌酸性化過程においては、pHによって異なる緩衝作用が働き、日本の森林土壌の多くが示すpH4から6の間では、主に交換性塩基による緩衝が生じる。土壌溶液中の H^+ は、粘土鉱物表面に保持されていた交換性塩基とイオン交換により土壌に吸着され、植物にとって有用な塩基が溶出する。



② 土壌の化学的的特性の経年変化

土壌調査は各地点で5年おきに実施されている。モニタリングが開始された平成13年度から平成22年度にかけ、ほぼ全ての地点で2回以上の土壌モニタリングが実施されており、本項ではその経年変化を評価する。ただし、平成18年度以降に新規設置された地点では土壌調査が1回しか実施されていないため、経年変化の評価から除いた。

特に経年変化が大きかった表層土(0-10cm)の土壌の化学的的特性について表3-2-1に示した。表層土のpH(H₂O)は2回以上調査された42プロット中8プロットで統計的に有意な低下が、3プロットで有意な上昇が見られた一方、その他のプロットでは有意な経年変化が見られなかった。pHの低下は宝立山、阿蘇くじゅうの全プロットと日光、吉野熊野及び屋久島の一部プロットで認められ、pHの上昇は十和田八幡平、石見臨空、石鎚の一部のプロットで認められた。土壌のpHは主に交換性Ca²⁺やK⁺等の塩基性陽イオン類の濃度に強く影響される。日光や吉野熊野ではpHの低下とともに塩基飽和度⁴の減少も見られたため、塩基性陽イオン類の減少が土壌の酸性化に関与したと考えられる。本調査でその要因を特定することは困難であるが、吉野熊野では次節で述べるように、平成21年度以降樹木衰退度が回復の方向に向かっていることから、植物のイオン吸収等の変化が土壌の化学的的特性に影響を与えた可能性も考えられる。一方で外部からの酸の流入は、前ページのコラムに示したように、土壌中の塩基性陽イオン等の流亡を伴いpHの低下を引き起こすことから、大気沈着由来の酸が塩基性陽イオンの減少に寄与した可能性は否定できない。

⁴ 交換性陽イオン全体における塩基性陽イオンの割合を百分率で示したもの。土壌の栄養性を示す代表的な指標。酸性化過程においては塩基性陽イオンの流亡により、この値が小さくなる。

表 3-2-1 深さ 0-10 cm における土壌化学的的特性の経年変化

自治体	調査地点	プロット No.	調査年	pH(H ₂ O)	pH(KCl)	塩基性陽イオン*1 酸性陽イオン*2		塩基飽和度*3	C/N*4			
						cmol _c kg ⁻¹						
						%						
北海道	知床	1	H.17	4.9 (0.2)	4.0 (0.1)	2.6 (0.6)	3.4 (1.3)	44.9 (13.6)	-			
			H.22	4.9 (0.2)	4.0 (0.3)	2.9 (0.7)	3.2 (1.1)	48.5 (13.6)				
	支笏洞爺	2	1	H.17	4.7 (0.4)	3.9 (0.4)	4.3 (2.0)	4.3 (2.1)	50.3 (21.6)	-		
				H.22	4.9 (0.3)	4.0 (0.3)	2.2 (1.1)	3.1 (1.5)	41.1 (11.2)			
		2	1	H.15	4.9 (0.2)	3.9 (0.1)	5.7 (1.0)	2.4 (0.8)	70.1 (9.6)	-		
				H.20	4.7 (0.1)	3.8 (0.1)	6.3 (1.2)	2.8 (0.8)	68.8 (9.2)			
岩手	十和田 八幡平	1	H.16	4.1 (0.1) b	3.5 (0.1)	1.7 (0.6)	8.1 (1.6)	17.9 (7.5)	-			
			H.21	4.3 (0.2) a	3.5 (0.1)	1.2 (0.4)	7.0 (1.2)	14.5 (2.6)				
	2	1	H.16	4.3 (0.1)	3.7 (0.1)	0.8 (0.2)	7.0 (1.2)	10.5 (1.1) b	-			
			H.21	4.4 (0.2)	3.6 (0.1)	1.0 (0.1)	7.1 (1.3)	12.1 (1.0) a				
		2	1	H.15	4.8 (0.1) a	4.1 (0.2) a	1.6 (0.9)	3.5 (1.0)	30.7 (9.2) a	-		
				H.20	4.3 (0.1) b	3.8 (0.1) b	1.0 (0.2)	4.7 (0.8)	17.8 (3.8) b			
新潟	磐梯朝日	1	H.19	3.8 (0.2)	3.3 (0.2)	1.4 (1.0)	13.2 (1.1)	9.2 (6.3)	-			
			H.20	4.1 (0.2)	3.5 (0.3)	0.7 (0.3)	12.4 (4.9)	5.4 (1.2)				
栃木	日光	1	H.15	4.6 (0.2)	4.0 (0.1)	1.1 (0.2)	3.6 (1.0)	24.2 (4.7)	-			
			H.20	4.4 (0.1)	3.9 (0.1)	1.1 (0.6)	3.9 (1.2)	21.5 (6.2)				
		2	1	H.15	4.8 (0.1) a	4.1 (0.2) a	1.6 (0.9)	3.5 (1.0)	30.7 (9.2) a	-		
				H.20	4.3 (0.1) b	3.8 (0.1) b	1.0 (0.2)	4.7 (0.8)	17.8 (3.8) b			
富山	中部山岳	1	H.17	4.0 (0.1)	3.3 (0.2)	0.5 (0.1)	15.2 (4.8)	3.6 (1.3)	16.5 (0.5) b			
			H.22	4.2 (0.3)	3.5 (0.3)	0.6 (0.2)	13.7 (6.1)	4.4 (1.4)	17.9 (1.1) a			
		2	1	H.17	4.0 (0.2)	3.2 (0.2)	1.7 (1.5)	13.8 (3.5)	11.7 (11.9)	17.0 (0.8)		
				H.22	4.0 (0.3)	3.2 (0.3)	1.5 (0.8)	13.8 (2.9)	10.0 (4.9)	17.7 (0.9)		
			2	1	H.13	4.4 (0.1)	3.7 (0.1) a	1.2 (0.2)	14.1 (2.7)	8.0 (2.2)	14.1 (0.4)	
					H.17	4.3 (0.1)	3.5 (0.1) b	1.6 (0.7)	13.2 (1.0)	10.8 (4.2)	14.2 (1.1)	
石川	石動山	1	H.22	4.3 (0.2)	3.6 (0.2) b	1.8 (0.5)	13.0 (2.1)	12.4 (4.3)	15.0 (0.7)			
			2	1	H.13	4.5 (0.1)	3.8 (0.1) a	1.5 (0.4)	11.7 (1.2)	11.2 (2.1) b	12.2 (1.6) ab	
					H.17	4.4 (0.1)	3.5 (0.1) b	1.7 (0.7)	11.8 (1.1)	12.4 (3.8) ab	11.6 (0.5) b	
		2	1	H.22	4.3 (0.2)	3.5 (0.1) b	2.3 (0.4)	11.4 (0.8)	17.0 (3.0) a	14.0 (2.0) a		
				2	1	H.13	4.6 (0.2) ab	3.8 (0.2) a	1.7 (0.5)	15.5 (4.5)	9.9 (2.4) b	18.7 (3.5)
						H.17	4.6 (0.2) a	3.6 (0.1) ab	1.5 (0.6)	15.7 (3.3)	8.5 (2.2) b	17.9 (2.7)
岐阜	伊自良	1	H.13	4.6 (0.1) a	3.8 (0.1) a	2.4 (0.5)	17.3 (4.1)	12.4 (3.1) ab	17.6 (1.2) ab			
			H.17	4.6 (0.0) a	3.6 (0.0) b	2.0 (0.6)	17.2 (2.9)	10.5 (3.5) b	16.0 (0.9) b			
		2	1	H.22	4.4 (0.2) b	3.3 (0.2) b	2.5 (0.7)	13.0 (1.8)	16.1 (4.6) a	19.8 (3.0)		
				2	1	H.13	4.6 (0.1) a	3.8 (0.1) a	2.4 (0.5)	17.3 (4.1)	12.4 (3.1) ab	17.6 (1.2) ab
			H.17			4.6 (0.0) a	3.6 (0.0) b	2.0 (0.6)	17.2 (2.9)	10.5 (3.5) b	16.0 (0.9) b	
			大阪	天野山	1	H.22	4.3 (0.2) b	3.4 (0.2) b	3.1 (0.9)	12.7 (1.9)	19.8 (5.8) a	20.2 (3.1) a
2	1	H.18				4.4 (0.2)	3.5 (0.1)	0.7 (0.3)	11.7 (3.0)	6.4 (3.7)	17.9 (1.1)	
		2			1	H.18	4.5 (0.2)	3.5 (0.1)	1.5 (1.6)	9.4 (3.4)	15.7 (19.2)	16.4 (0.5)
2	1					H.18	4.2 (0.2)	3.5 (0.2)	0.8 (0.1)	8.7 (1.8)	8.4 (1.2)	-
		2			1	H.18	4.3 (0.1)	3.5 (0.0)	0.8 (0.1)	8.2 (0.9)	9.2 (2.0)	-
	2					1	H.18	4.3 (0.2)	3.9 (0.2)	0.7 (0.3)	0.6 (0.1)	52.2 (8.2)
		2	1	H.18	4.5 (0.1)		4.0 (0.1)	0.6 (0.1)	0.6 (0.1)	51.4 (2.4)	-	
奈良	吉野熊野			1	H.13	4.2 (0.3)	3.4 (0.2)	0.9 (0.4)	8.3 (1.2)	9.1 (2.7) a	20.3 (1.7) a	
		H.19	4.1 (0.1)		3.4 (0.1)	0.5 (0.1)	8.6 (1.3)	5.2 (1.3) b	10.3 (2.7) b			
		2	1	H.13	3.8 (0.2)	3.1 (0.2)	0.7 (0.4)	10.4 (0.5)	6.5 (2.8)	20.1 (0.8) *		
				H.19	4.0 (0.1)	3.3 (0.2)	0.5 (0.3)	10.0 (1.2)	4.7 (2.5)	14.0 (5.3)		
			2	1	H.13	3.9 (0.1)	3.2 (0.1)	0.6 (0.1) b	10.7 (2.3)	5.2 (1.1) b	22.3 (0.9)	
					H.19	3.8 (0.1)	3.1 (0.1)	0.9 (0.2) a	9.6 (3.2)	9.1 (3.0) a	22.6 (7.6)	
鳥取	大山隠岐	1	H.13	4.0 (0.1)	3.3 (0.2)	0.6 (0.2)	7.7 (1.1)	7.4 (1.8)	21.1 (2.1)			
			H.19	3.9 (0.2)	3.2 (0.2)	0.7 (0.2)	8.4 (1.5)	8.1 (1.8)	21.5 (5.3)			
		2	1	H.16	4.4 (0.2) a	4.1 (0.1)	1.0 (0.3)	5.0 (0.7)	16.5 (4.1) a	12.9 (0.7) a		
				H.21	4.2 (0.1) b	4.1 (0.1)	0.7 (0.2)	5.1 (0.7)	11.7 (0.9) b	10.9 (0.6) b		
			2	1	H.16	4.2 (0.2)	4.0 (0.1)	1.3 (0.4)	5.5 (0.4)	18.9 (4.3)	13.1 (0.5) a	
					H.21	4.1 (0.1)	4.0 (0.1)	0.9 (0.2)	5.7 (0.3)	13.5 (2.5)	10.6 (0.6) b	
2	1	H.15	4.4 (0.2)	3.6 (0.2) b	3.7 (1.8) a	9.5 (1.5) a	27.4 (8.6) a	-				
		H.20	4.6 (0.1)	4.0 (0.1) a	0.8 (0.2) b	5.5 (0.4) b	12.1 (2.3) b	-				
	2	1	H.15	4.2 (0.1)	3.4 (0.1) b	4.0 (2.9)	11.2 (1.9) a	25.4 (16.7)	-			
			H.20	4.4 (0.3)	3.9 (0.3) a	0.9 (0.4)	8.1 (2.3) b	10.0 (1.2)	-			

表 3-2-1 (続き)

自治体	調査地点	プロット No.	調査年	pH(H ₂ O)	pH(KCl)	塩基性陽イオン ^{*1} 酸性陽イオン ^{*2}		塩基飽和度 ^{*3}	C/N ^{*4}	
						cmol. kg ⁻¹				%
島根	石見臨空	1	H.13	4.3 (0.1)	3.5 (0.1)	1.4 (0.5)	7.1 (0.7)	16.5 (3.8)	19.4 (0.6)	
			H.18	4.5 (0.2)	3.7 (0.2)	1.2 (0.5)	6.4 (1.1)	15.6 (5.7)	18.4 (1.5)	
	2	H.13	4.2 (0.1) b	3.3 (0.1) b	1.1 (0.3)	9.5 (1.4) a	10.7 (2.6)	21.8 (1.0) a		
		H.18	4.5 (0.1) a	3.7 (0.1) a	0.8 (0.3)	6.5 (0.7) b	11.3 (3.1)	19.6 (1.3) b		
	蟠竜湖	1	H.13	4.8 (0.2)	3.9 (0.1)	0.7 (0.4) b	3.6 (0.4)	17.1 (7.4) b	19.7 (1.0) b	
			H.18	4.9 (0.2)	3.8 (0.2)	1.5 (0.5) a	3.6 (0.7)	30.4 (9.6) a	22.1 (2.3) a	
2	H.13	4.7 (0.3)	3.7 (0.2)	1.3 (0.6)	3.5 (0.6)	27.1 (11.7)	24.4 (1.8) a			
	H.18	4.9 (0.2)	3.9 (0.2)	1.0 (0.2)	3.4 (0.6)	22.3 (5.4)	20.6 (1.6) b			
山口	十種ヶ峰	1	H.13	4.6 (0.2)	3.8 (0.1) a	1.2 (0.5)	10.7 (0.9) a	10.1 (3.9)	-	
			H.15	4.5 (0.1)	3.9 (0.1) a	1.5 (1.1)	10.0 (1.5) a	13.0 (10.5)		
			H.20	4.3 (0.3)	3.6 (0.1) b	1.3 (0.4)	8.0 (0.9) b	13.7 (4.9)		
	2	H.13	4.6 (0.2)	3.8 (0.1)	1.5 (1.6)	10.7 (2.2)	13.1 (14.0)	-		
		H.15	4.6 (0.2)	3.9 (0.1)	1.0 (0.4)	10.4 (2.9)	10.0 (5.3)			
		H.20	4.6 (0.3)	3.7 (0.2)	3.2 (4.5)	6.5 (2.6)	27.1 (32.0)			
	霜降岳	1	H.15	4.9 (0.2)	3.9 (0.1)	1.8 (1.0) b	3.0 (0.8) a	36.0 (16.3) b	-	
			H.20	4.8 (0.3)	3.8 (0.3)	3.6 (1.8) a	1.8 (0.9) b	63.4 (19.8) a		
			H.20	4.8 (0.2)	3.8 (0.1) b	1.7 (1.1)	2.3 (0.8)	40.0 (22.3)		
	2	H.15	5.0 (0.2)	4.0 (0.2) a	1.5 (0.9)	2.6 (0.7)	36.1 (18.1)	-		
		H.20	4.8 (0.2)	3.8 (0.1) b	1.7 (1.1)	2.3 (0.8)	40.0 (22.3)			
		H.20	4.8 (0.2)	3.8 (0.1) b	1.7 (1.1)	2.3 (0.8)	40.0 (22.3)			
高知	石鎚	1	H.16	3.6 (0.3) b	3.0 (0.2)	0.9 (0.3) b	14.8 (3.8)	6.5 (3.9)	16.4 (1.0)	
			H.21	4.1 (0.2) a	3.1 (0.2)	1.9 (0.7) a	18.7 (2.6)	9.3 (3.4)	-	
	2	H.16	4.0 (0.2)	3.2 (0.2)	0.7 (0.5) b	14.0 (2.3) b	4.8 (2.7)	14.6 (1.1)		
		H.21	4.1 (0.2)	3.1 (0.1)	1.5 (0.2) a	20.4 (3.1) a	7.1 (0.7)	-		
福岡	古処山	1	H.13	4.8 (0.4)	3.9 (0.4)	8.6 (8.5)	5.6 (3.3)	51.3 (30.4)	15.1 (0.9)	
			H.19	4.5 (0.4)	3.6 (0.2)	3.3 (1.4)	5.0 (2.0)	40.2 (15.9)	14.9 (1.4)	
			H.13	6.5 (1.1)	5.6 (1.1)	29.5 (16.2)	1.0 (1.8)	90.5 (19.2)	13.3 (0.8)	
	2	H.19	6.2 (1.1)	5.4 (1.2)	24.2 (19.9)	1.3 (1.6)	78.4 (31.1)	13.9 (1.6)		
		H.13	4.2 (0.3)	3.4 (0.1)	2.5 (0.9)	16.5 (2.0)	13.0 (4.8)	15.5 (1.6)		
		H.19	4.1 (0.2)	3.3 (0.1)	1.6 (0.4)	17.1 (1.9)	8.6 (2.7)	16.6 (1.0)		
	香椎宮	2	H.13	4.5 (0.2)	3.5 (0.1)	6.6 (2.4) a	21.2 (7.2)	25.0 (10.9)	15.6 (0.7)	
			H.19	4.4 (0.1)	3.4 (0.1)	3.5 (0.5) b	20.1 (3.1)	15.1 (3.0)	17.1 (1.7)	
	大分	阿蘇くじゅう	1	H.17	4.7 (0.1) a	4.0 (0.1) b	0.9 (0.2)	7.4 (1.7)	10.8 (0.9)	17.3 (0.9)
				H.22	4.4 (0.2) b	4.4 (0.2) a	0.7 (0.2)	5.4 (1.8)	12.4 (2.2)	16.6 (0.6)
2		H.17	4.4 (0.2) a	3.7 (0.2)	1.2 (0.3)	14.6 (2.7)	7.7 (0.4) b	19.5 (1.9) a		
		H.22	3.9 (0.3) b	3.8 (0.3)	1.6 (0.6)	11.9 (1.9)	11.5 (2.8) a	17.0 (0.4) b		
鹿児島	屋久島1	1	H.16	4.8 (0.3) a	4.1 (0.3)	3.0 (2.7)	3.7 (1.8)	41.5 (11.8)	-	
			H.21	4.2 (0.3) b	3.7 (0.2)	2.2 (0.6)	4.8 (1.0)	31.7 (6.9)	15.8 (0.6)	
	2	H.16	4.6 (0.4)	3.9 (0.3)	2.5 (1.5)	4.7 (2.2)	34.2 (5.3)	-		
		H.21	4.6 (0.4)	4.1 (0.3)	1.7 (0.9)	2.9 (1.5)	37.6 (6.0)	15.2 (0.8)		
	屋久島2	1	H.16	5.9 (0.1) a	4.8 (0.1) a	6.9 (3.1)	0.5 (0.2)	91.6 (4.7)	-	
			H.21	5.4 (0.2) b	4.6 (0.2) b	10.0 (5.4)	0.9 (0.5)	85.4 (17.6)	14.4 (0.3)	
	2	H.16	5.6 (0.3)	4.8 (0.2)	4.1 (2.5)	0.8 (0.5)	82.5 (11.4)	-		
		H.21	5.3 (0.3)	4.5 (0.4)	8.5 (5.2)	1.1 (0.7)	86.0 (8.1)	13.8 (1.1)		

注. 値はプロット内に設置された 5 つのサブプロット間の平均値を示し、括弧の値は標準偏差を示す (n=5)。異なる小文字のアルファベット (a, b) は調査年度間の差が統計的に有意であることを示す (対応のある一元配置分散分析の後 Tukey の多重比較によって検定 $p < 0.05$)。赤字は直近の調査と過去の調査を比較した場合の減少傾向を示し、青文字は直近の調査と過去の調査を比較した場合の増加傾向を示す。

*¹ 交換性 Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺+Na⁺, *² 交換性 Al³⁺+H⁺, *³ 塩基性陽イオン / (塩基性陽イオン+酸性陽イオン), *⁴ 全炭素濃度 / 全窒素濃度

(2) 平成 20～22 年度における植生モニタリング結果 (樹木衰退状況)

樹木衰退度調査は毎年一回、すべてのプロットで実施されている。各観察項目の評価に加え、落葉率と葉色の異常を総合的に判断するダメージクラスによる評価を行った (表 3-2-2)。表 3-2-3 にこれらの兆候が見られた樹木の割合が多かった地点を順位で示した。吉野熊野では梢端の枯損、落葉の異常、枝葉密度の異常が見られた割合が全調査地点中で最も高く、その他の項目においても高い順位であった。また、大山隠岐では樹勢変化、枝の異常成長、葉の障害、葉色の変化のいずれも全地点中で最も高い割合を示していた。

また、大山隠岐、吉野熊野、磐梯朝日、十和田八幡平の 4 地点では 1 以上のダメージクラスが認められた樹木が観測された。このダメージクラスは、平成 19 年度から改訂された EANET の様式³⁾に従って導入された、大気汚染影響との関連が特に指摘されている衰退度項目であり、これらの 4 地点では各衰退度項目が増加傾向にあった (図 3-2-3)。大山隠岐、十和田八幡平の衰退度は、平成 16 年度の台風被害の後、一度回復傾向を見せたものの、近年再び上昇を見せた。吉野熊野でも、同様の傾向が見られていたが、平成 21 年度、平成 22 年度と続けて衰退度項目が減少し、再び回復傾向が見られた。磐梯朝日では、平成 19 年度に新規設置された地点であり、平成 22 年度の異常な落葉率の高さに起因してダメージクラスが高くなっているが、長期的な傾向については今後更にデータの蓄積が必要である。

樹木衰退の要因としては、大気沈着のような人為的要因だけでなく、台風や積雪、病虫害といった自然的要因による影響が考えられる。また、吉野熊野国立公園内の大台ヶ原では近年になってシカ食害が多く報告されている⁴⁾。

表 3-2-2. 落葉率と葉色から判断されたダメージクラス

葉色 \ 落葉率	1	2	3
0	0	1	2
1	1	2	2
2	2	3	3
3	3	3	3

注.落葉率及び葉色は、それぞれ、5 段階 (0: 落葉なし～4: 枯死) 及び 4 段階 (0: 変色なし～3: 激しく (60%以上) 変色) で、示し、その組み合わせでダメージクラスを算出³⁾。

表 3-2-3 異常が観測された樹木の出現率*1が高かった地点

(平成 15 年度から平成 22 年度までの平均)

梢端の枯損			落葉の異常*2			樹勢変化			枝葉密度の異常		
順位	調査地点	出現率	順位	調査地点	出現率	順位	調査地点	出現率	順位	調査地点	出現率
1	吉野熊野	37%	1	吉野熊野	11%	1	大山隠岐	53%	1	吉野熊野	56%
2	香椎宮1	33%	2	磐梯朝日	9%	2	吉野熊野	43%	2	大山隠岐	32%
3	中部山岳	28%	3	法道寺	7%	3	中部山岳	29%	3	白山	24%
4	香椎宮2	23%	4	十和田八幡平	5%	4	十和田八幡平	20%	4	法道寺	21%
5	知床	20%	5	大山隠岐	5%	5	知床	19%	5	香椎宮1	21%
6	洞爺	20%	6	洞爺	4%	6	霜降	16%	6	中部山岳	20%
7	大山隠岐	18%	7	宝立山	3%	7	法道寺	15%	7	宝立山	18%
8	古処山1	18%	8	中部山岳	2%	8	香椎宮2	11%	8	霜降	13%
9	古処山2	17%	9	霜降	2%	9	白山	9%	9	香椎宮2	8%
10	日光	17%	10	白山	1%	10	洞爺	8%	10	洞爺	5%

枝の成長異常			葉の障害			葉色の変化			1以上のダメージクラス*2		
順位	調査地点	出現率	順位	調査地点	出現率	順位	調査地点	出現率	順位	調査地点	出現率
1	大山隠岐	52%	1	大山隠岐	15%	1	大山隠岐	14%	1	磐梯朝日	9%
2	白山	29%	2	石鎚	8%	2	吉野熊野	14%	2	大山隠岐	5%
3	宝立山	25%	3	霜降	4%	3	知床	11%	3	十和田八幡平	4%
4	吉野熊野	23%	4	洞爺	4%	4	十和田八幡平	5%	4	吉野熊野	3%
5	中部山岳	18%	5	吉野熊野	3%	5	日光	3%			
6	十和田八幡平	16%	6	日光	2%	6	洞爺	2%			
7	石鎚	7%	7	中部山岳	1%	7	中部山岳	1%			
8	法道寺	4%	8	白山	1%						
9	知床	3%									
10	磐梯朝日	2%									

*1 出現率 = 異常が観測された樹木数 / 全観測木数, *2 落葉の異常及びダメージクラスについては平成 19 年度から平成 22 年度の平均 (平成 19 年度以降に導入されたため)

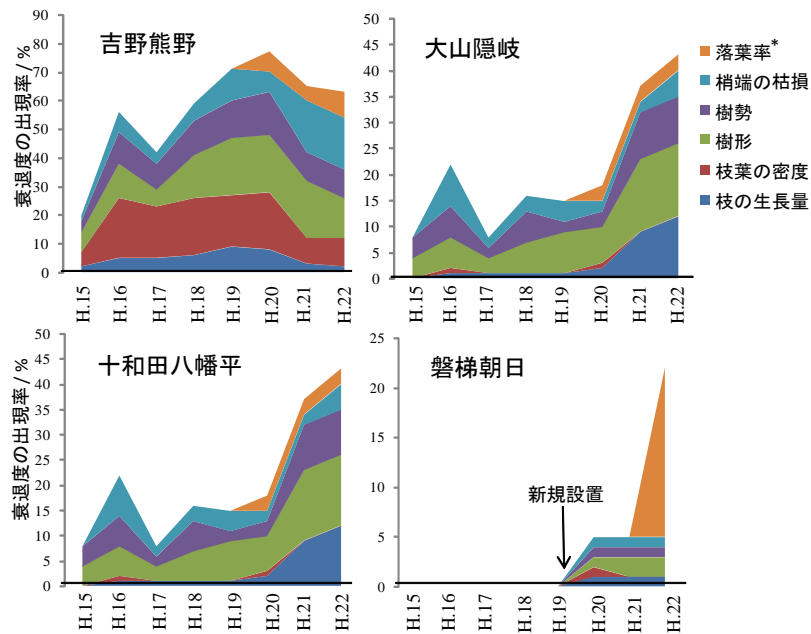


図 3-2-3 全観察木に占める各衰退度項目の出現率の積算値とその経年変化 (吉野熊野、大山隠岐、磐梯朝日、十和田八幡平) *落葉率は平成 19 年度から調査開始、磐梯朝日の落葉率は平成 22 年度のみに顕著な現象が見られたため変化が大きい。

3.2.2 陸水モニタリング

(1) 平成 20～22 年度における陸水モニタリング結果

陸水モニタリングでは、酸性化に対する感受性の高いと考えられる湖沼及び河川⁵を対象に 11 地点を選定し、年 4 回のモニタリングを実施した。

各調査地点の集水域の特徴を表 3-2-4 に示した。流紋岩やチャート等の比較的酸に対する緩衝能が低いと考えられる地質にある湖沼が多い。また今神御池、刈込湖、双子池等のように、ポドゾル性土壌が分布する比較的高地に分布する湖沼もある。

表 3-2-4 各調査地点の集水域の特徴

	湖沼名	表層地質	土壌の種類	植生
山形県	今神御池	半固結堆積物（地すべり層）等	乾性ポドゾル化土壌等	ブナ・チシマザサ群落等
栃木県	刈込湖	流紋岩・安山岩	乾性及び湿性ポドゾル等	オシロヒノ・シラヒノ・コムカサ等
長野県	双子池	溶岩（横岳溶岩群・双子峰溶岩）	湿性腐食型弱ポドゾル土	ミドリキササグサ群落等
新潟県	山居池	新第三紀中新世真更川層	褐色森林土壌	ミズナラ、コナラ、クリ等
石川県	大島池	流紋岩及び安山岩質火砕岩石類	乾性褐色森林土壌	クヌギナラ群落とスギ・ヒノキ・ササ植物
福井県	夜叉ヶ池	砂岩・頁岩、チャート	褐色森林土壌	ブナ、オオバクロモジ
岐阜県	伊自良湖	チャート	褐色森林土壌	針葉樹（アカマツ、ヒノキ、スギ）等
京都府	沢の池	チャート	乾性褐色森林土	アカマツ、コナラ、ツツジ類
島根県	蟠竜湖	第 4 紀更新世堆積物 礫、砂、粘	残積性未熟土壌	アカマツ、クロマツ
山口県	山のロダム	流紋岩質岩石	褐色森林土壌	コハ・ミツバツツジ、アカマツ群集
香川県	永富池	閃緑岩	乾性褐色森林土壌	クスギ、コナラ、アカマツ等

上記調査地点の湖沼表層水及び流入河川水の水質について、平成 20～22 年度の 3 年間の平均値を表 3-2-5 に示した。本調査対象地点の大部分は $0.200 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ 以下の低アルカリ度であった。特に、双子池（雌池）、夜叉ヶ池及び沢の池はアルカリ度が $0.030 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ 以下、pH が 5.8 以下であり、酸感受性が高い湖沼として確認された。一方、永富池は他の地点に比べて比較的高いアルカリ度及び pH を示していた。NO₃ 濃度では、伊自良湖の流入河川である釜ヶ谷川（伊自良湖への主要流入河川、過去の報告書では伊自良川とも記述された）が最も高い値を示し、同じく流入河川の孝洞川、及び伊自良湖も比較的高い値を示した。さらに、山居池及び蟠竜湖では比較的高濃度の Cl⁻ や Na⁺ が認められ、これらの湖沼が海塩の影響を受けていることが推測された。

⁵ EANET ではアルカリ度 $0.200 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ 以下、EC 10 mS m^{-1} 以下の湖沼や河川が酸性化に対して感受性が高いとされているが、我が国においては、より感受性の高い湖沼・河川を特定するために EC は 5 mS m^{-1} 以下を基準とすべきであると提言されている⁵⁾。

表 3-2-5 各調査定点の水質 (平成 20～22 年度)

湖沼名	採水地点	pH	EC (mS m ⁻¹)	アルカリ度 (mmol _c L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
					(μmol _c L ⁻¹)								
山形県	今神御池	湖心表層	6.07	4.28	0.071	82.9	0.6	198	2.9	262	12.1	26.9	48.3
栃木県	刈込湖	湖心表層	6.84	3.35	0.168	114	4.0	20.1	1.6	133	14.9	132	16.8
長野県	双子池(雄池)	湖心表層	7.04	1.86	0.116	35.0	15.9	10.2	0.5	50.0	7.0	106	16.8
	双子池(雌池)	湖心表層	5.76	0.66	0.021	27.8	3.1	9.0	0.5	13.7	4.2	20.6	7.0
新潟県	山居池	湖心表層	6.89	9.55	0.110	93.2	0.5	579	0.8	538	33.2	83.3	118
石川県	大島池	湖心表層	6.71	4.50	0.138	37.3	10.4	187	3.8	198	27.8	61.4	77.6
福井県	夜叉ヶ池	湖心表層	5.24	1.73	0.011	41.3	7.9	62.7	2.8	60.7	8.5	20.0	18.6
岐阜県	伊自良湖	湖心表層	7.07	4.12	0.172	105	23.4	58.8	0.9	87.8	6.8	148	109
	釜ヶ谷川	流入河川	7.01	4.34	0.151	132	32.1	59.7	*1	91.3	6.6	147	120
	孝洞川	流入河川	6.85	3.73	0.135	99.2	24.9	63.2	*1	100	5.6	95.9	111
京都府	沢の池	湖心表層	5.69	1.76	0.028	37.7	0.2	80.8	*1	62.7	7.4	36.2	30.6
島根県	蟠竜湖	湖心表層	7.04	10.3	0.163	85.9	2.2	628	1.9	602	46.3	75.8	146
	蟠竜湖 No.3	湖心表層	7.01	10.1	0.169	88.6	2.3	613	1.9	593	46.5	81.4	147
山口県	山の口ダム	湖心表層	6.55	6.13	0.101	103	8.0	289	0.2	339	25.5	68.6	74.0
香川県	永富池	湖心表層	7.34	9.24	0.464	168	27.6	139	2.7	327	25.1	400	101

*1：定量下限値又は検出下限値を超えて検出されたことのないもの。

注：測定値が下限値未満の場合は 0 とみなし平均値を計算した。なお、pH の平均値は水素イオン濃度の算術平均とした。

上記 3 年間の平均値 (pH は H⁺ に換算) を用いて主成分分析⁶を行い、各分析項目の主成分負荷量(a)及び各調査地点の主成分得点(b)を求めた (図 3-2-4)。なお、永富池は、他湖沼と比べてアルカリ度や Ca²⁺濃度が比較的高く、他の地点の傾向を分かりにくくするために分析から除外した。

分析の結果、第一主成分 (X 軸) の寄与率は 49.5%、第二主成分 (Y 軸) の寄与率は 30.3% であり、この 2 軸で約 80% を説明できることが確認された。

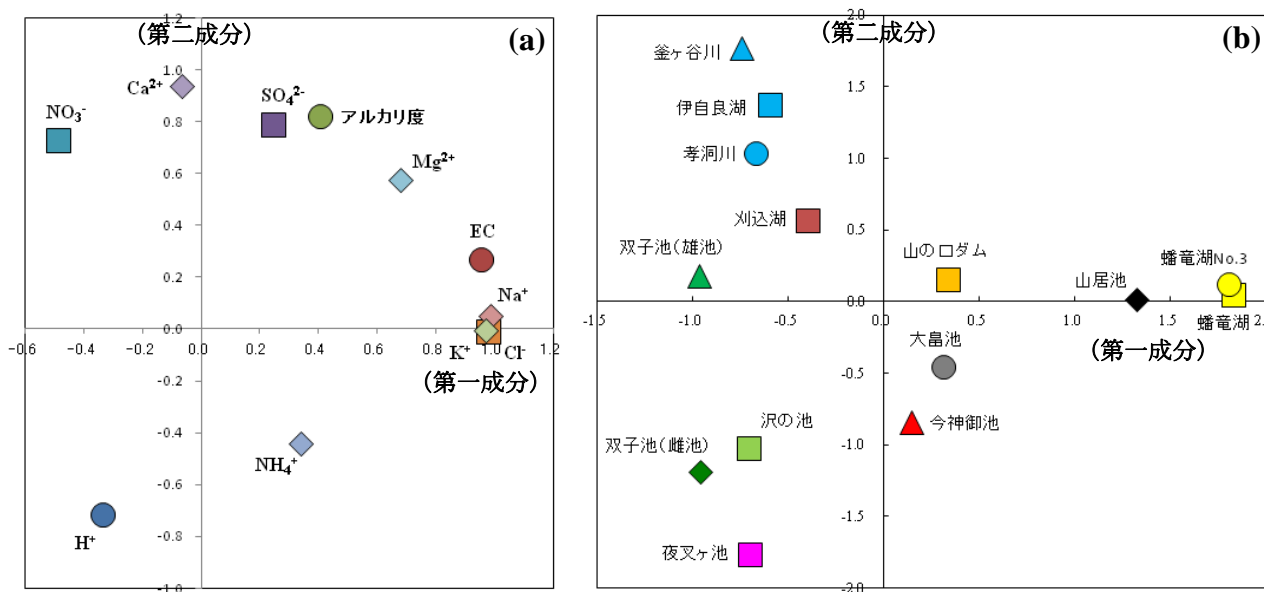
各項目の主成分負荷量(a)の結果より、EC 及び主要なイオンが同じく正方向に分布していることから、X 軸方向の第一成分は、湖沼水又は河川水の溶存物質質量を示している可能性が考えられた。一方、Y 軸方向の第二成分は、水質の酸性度を示している可能性が考えられた。このことは、Ca²⁺やアルカリ度の分布に対し、H⁺が反対方向に分布していることから推測された。以上の結果より、図の第 3 象限は、酸性度が高かつ溶存イオン濃度が低い水質を示しており、酸性化に注意を要するものと考えられる。

次に、各調査地点の主成分得点(b)の結果より、各地点の特徴を確認したところ、沢の池、双子池 (雌池) 及び夜叉ヶ池がそれぞれ第 3 象限に分布した。上述したように、これらの湖

⁶ 複数の変数間の相関を少数の合成変数 (主成分) で説明する統計手法。ここでは、分析結果は、バリマックス法回転により算出したものを用いた。

沼は酸感受性が高いと考えられ、今後の酸性化傾向に留意する必要がある。一方、伊自良湖集水域では、酸性度は高くないものの SO_4^{2-} や NO_3^- の濃度に影響を受けている可能性が考えられた。さらに、山居池と蟠竜湖では、 Na^+ や Cl^- のほか主要なイオンの影響下にあることが確認された。

図 3-2-4 主成分分析における主成分負荷量 (a) 及び各地点の主成分得点 (b)



(2) 陸水の長期的傾向

表 3-2-6 に長期モニタリング定点における主要成分の長期トレンド解析結果を示した⁷。なお、当該解析は、調査期間が長期にわたる地点のみを対象に実施した。解析対象とした地点のうち、夜叉ヶ池及び釜ヶ谷川において、pH の有意な低下傾向 ($p < 0.01$) が確認された。また、夜叉ヶ池では、アルカリ度の有意な低下傾向 ($p < 0.001$)、双子池 (雄池) では SO_4^{2-} の、伊自良湖集水域では NO_3^- のそれぞれ有意な上昇傾向 ($p < 0.001$) が確認された。なお、蟠竜湖では、EC やアルカリ度をはじめ多くのイオン種について、濃度の有意な上昇傾向が確認された。

前述の主成分分析における分析結果と併せ考えると、夜叉ヶ池は、他の湖沼に比べ酸感受性が高く、酸性化が進行中であることが示唆された。また、伊自良湖集水域でも、 NO_3^- 濃度の上昇は、主成分分析の結果とも一致していることから、今後はこれらの濃度変化についても留意する必要があると考えられる。

⁷ 解析には年 4 回サンプリングの季節性を考慮した seasonal Mann-Kendall tests⁶⁾を用いた。

表 3-2-6 長期モニタリング定点の湖沼表層水及び流入河川水の水質長期トレンド解析結果

湖沼名	調査期間	N	Z-score										
			pH	EC	アルカリ度	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
双子池 (雄池)	1998-2010	40	2.55*	2.52*	2.38*	5.49***	0.07	-2.45*	-0.54	4.04***	-0.22	3.43***	2.44*
双子池 (雌池)	1998-2010	40	-0.42	-1.81	-1.8	2.26*	-3.1**	-2.34*	-2.56*	3**	-2.29*	-0.92	-2.63**
山居池	2001-2010	39	-1.16	3.57***	0.98	0.42	-0.77	3.1**	-1.33	2.74**	1.12	1.07	1.02
夜叉ヶ池	2000-2010	43	-3.14**	-1.25	-3.49***	-0.97	0.76	-2.89**	-2.42*	-2.37*	0.08	-1.05	-1.41
伊自良湖	1989-2010	87	-0.84	4.59***	5.94***	0.07	3.87***	-0.09	0.11	-0.14	-2.85**	1.96*	1.36
釜ヶ谷川	1989-2010	88	-2.98**	2.52*	2.47*	0.03	4.72***	0.82	-4.96***	0.66	-1.63	-0.18	0.38
孝洞川	1989-2010	67	0.25	4.79***	2.47*	2.67**	3.6***	0.1	-4.43***	2.2*	-0.21	0.1	1.32
蟠竜湖	1989-2010	88	2.37*	5.88***	5.01***	-1.71	0.39	5.82***	-0.21	6.35***	1.46	0.32	4.77***
蟠竜湖 No3.	1989-2010	88	2.5*	4.79***	5.7***	-0.82	0.42	5.14***	-0.72	6.33***	1.05	1.84	3.68***

注：Z-score は変化傾向を検定するための統計量を表し、正の値が増加傾向、負の値が減少傾向をそれぞれ意味する。なお、表中の*/**/**を付した値は、トレンド検定を行った結果、それぞれ、危険率 5%、1%、0.1% で有意差が認められたことを示す。

特に、酸性化と関連すると考えられる顕著な長期トレンドが見られた地点について、図 3-2-5 にその経年変化を示した。夜叉ヶ池では pH、アルカリ度とも 2004 年前半に見られる比較的低い値を除き、同年後半まではやや上昇傾向であったが、それ以降は低下傾向に転じている (図 3-2-5 (a) 及び(b))。釜ヶ谷川の pH は、1990 年代半ばまでは上昇傾向、その後、2003 年付近までは低下し、その後再び上昇傾向にある (同(c))。また、釜ヶ谷川の NO₃ 濃度は 2005 年頃まで上昇を続け、その後低下に転じるとともに季節による振幅も小さくなる傾向にある (同(d))。一方で、伊自良湖の表層湖水の NO₃ 濃度は 2000 年までは上昇傾向が明らかであったが、それをピークに低下傾向にある (同(e))。なお、双子池 (雄池) の SO₄²⁻ 濃度は、上昇傾向にある (同(f))。

夜叉ヶ池や伊自良湖集水域での水質の経年変化の傾向は、ある時期を境に、大きく変化している。伊自良湖集水域で見られた 1990 年代半ばからの酸性化傾向については、気象イベントや集水域内の樹木の成長などがきっかけとなって、大気沈着の影響が顕在化したことが示唆されている⁷⁾。近年の pH 上昇や NO₃ 濃度の低下は酸性化からの回復傾向とも考えられるが、これが一時的なものか、このまま回復していくのか、長期のトレンドだけでなく、一定期間ごとの変化も同時に注意深く監視していく必要がある。

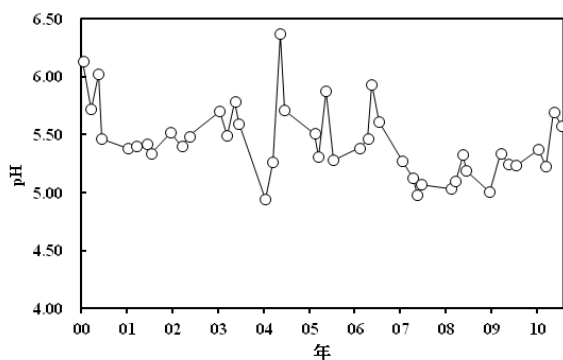


図 3-2-5(a)

夜叉ヶ池における表層水の pH 経年変化

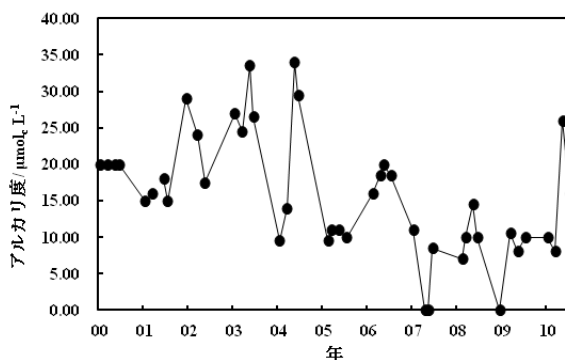


図 3-2-5(b)

夜叉ヶ池における表層水のアルカリ度経年変化
(2007年及び2009年は定量限界未満)

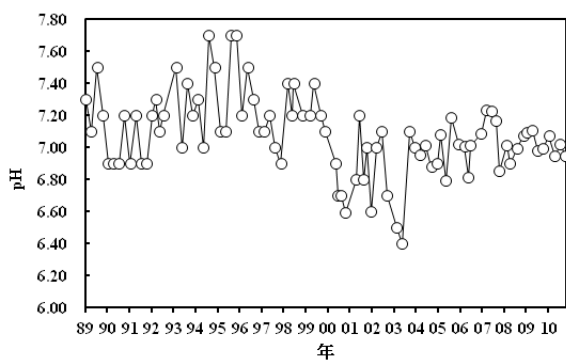


図 3-2-5(c)

釜ヶ谷川における pH 経年変化

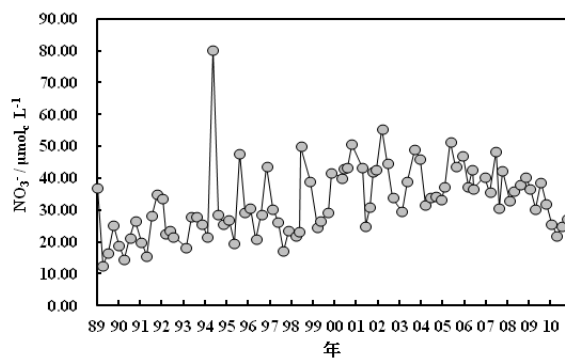


図 3-2-5(d)

釜ヶ谷川における NO₃ 経年変化

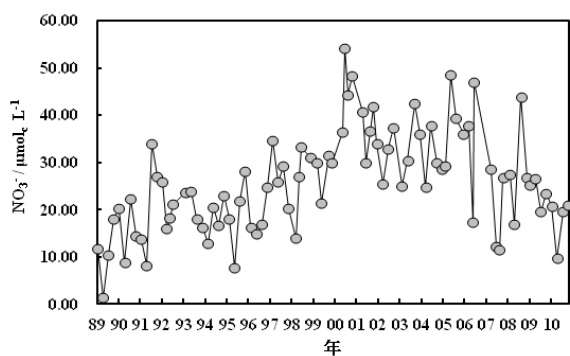


図 3-2-5(e)

伊自良湖における表層水の NO₃ 経年変化

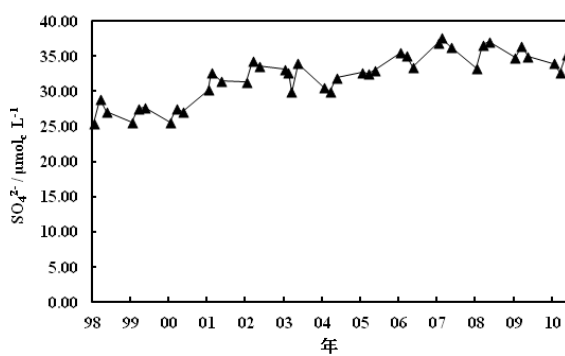


図 3-2-5(f)

双子池 (雄池) における表層水の SO₄²⁻ 経年変化

3.2.3 集水域モニタリング

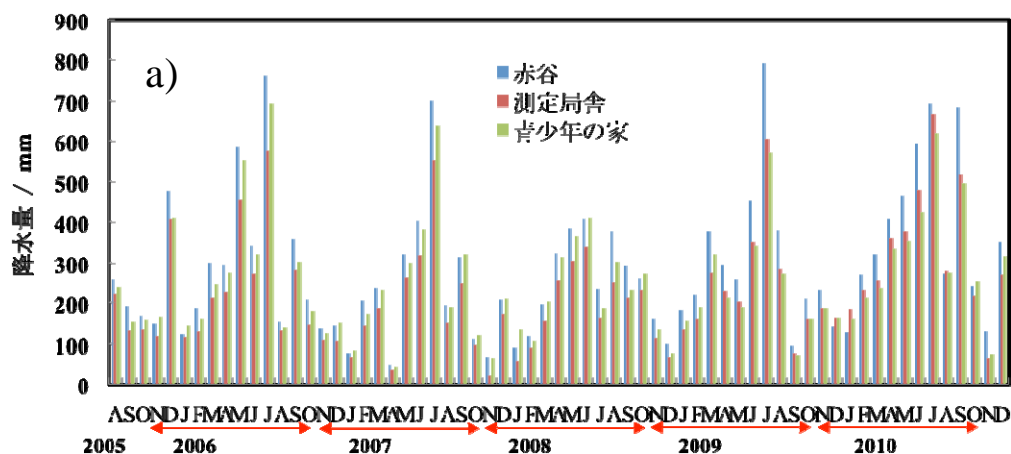
(1) 流入・流出収支

集水域モニタリングでは、集水域という一定面積における、大気沈着から河川水までの流入・流出過程をモニタリングすることにより、大気沈着と河川水質をより関連づけて考察するとともに、大気沈着による生態系影響を定量的に評価することが期待されている。岐阜県伊自良湖集水域では、平成17年度から19年度まで行われた集中調査を基礎として、平成20年度から集水域モニタリングが定期モニタリングとして開始された。ここでは、集中調査以降の3水年（水の循環を考慮した年度：2007-2008、2008-2009、2009-2010水年、いずれも11月から翌年10月まで）における流入・流出収支の結果について述べる。

① 水収支

伊自良湖集水域における降水量及び流出量の季節性を図3-2-6に示す。降水及び河川流出の季節性を考慮して、伊自良湖集水域では、比較的降水量も河川からの流出量も低い11月初旬から翌年の同時期までを1水年とした。また後述するように、斜面中部に位置する伊自良湖酸性雨測定所（測定局舎）の降水量は、斜面上部や下部に比べ低い傾向が認められた。

各水年における降水量、河川流出量、及び流出率を表3-2-7に示した。2009-2010水年は、前の2水年に比べ、著しく降水量が多かったが、流出量も多かった。流出率は、前の2水年は低めであったが、2009-2010水年は66%であり、日本の森林集水域における流出率の既報値（降水量3000mmで60-70%程度⁸⁾）に近い値であった。



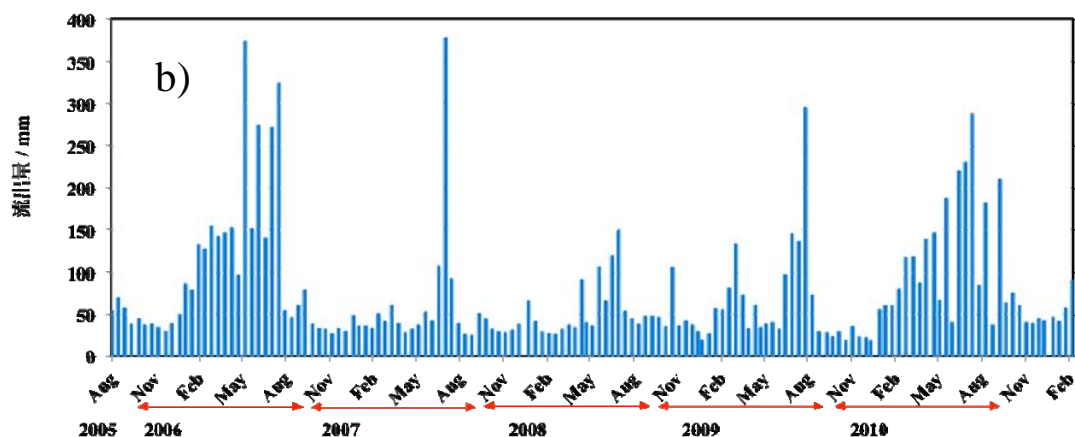


図 3-2-6 伊自良湖集水域における降水量 (a) 及び河川流出量 (b) の季節性。降水量は、斜面上部 (赤谷)、中部の谷間 (測定局舎)、下部 (青少年の家) の 3 地点で測定した月降水量で、横軸のアルファベットは各月のイニシャルを示す。河川流出量は伊自良湖への主要流入河川である釜ヶ谷川における 2 週に 1 回実施される採水間隔に合わせた流出量。図中の矢印は、水年の目安。

表 3-2-7 各水年における降水量、河川流出量、及び流出率

水年		2007-2008	2008-2009	2009-2010
降水量 (mm)	赤谷	2956	3547	4522
	測定局舎	2253	2678	3920
	青少年の家	2793	2712	3717
	平均	2667	2979	4053
河川流出量 (mm)		1397	1677	2687
流出率 (%) ¹		52	56	66

注. ¹.河川流出量を降水量の平均で除して算出。

② 主な物質の流入量・流出量

集水域への大気からの物質流入量は、国内 EANET 局でもある伊自良湖酸性雨測定所の湿性沈着及び乾性沈着モニタリングのデータを基に、湿性沈着量及び乾性沈着量の和として 1 年間の総沈着量を推計した。その際、湿性沈着量は、上述した斜面における降水量分布も考慮し、3 地点の平均値を用いて補正を行った。乾性沈着量は、EANET 乾性沈着量推定マニュアル⁹⁾に従い、3.1.3 節で用いられた推定 (Inferential) 法により算出した。河川からの

1年間の物質流出量は、2週間に1回分析された釜ヶ谷川の河川水濃度と河川流出量を基に算出した。

物質流入量は、降水量が著しく異なっていたにも関わらず、水年による変化はほとんどなかった(表3-2-8-a)。ここで得られた推計結果は、前回のとりまとめにおける2006-2007水年のそれと同じレベルであった¹⁰⁾。窒素の総沈着量は、これまでの推計結果同様、河川へのNO₃⁻流出の閾値と言われる1年当たり10 kg N ha⁻¹を大きく上回った。一方、流出量は、流量を反映して、2009-2010水年は、物質流出量も前の2水年より多く推計された(表3-2-8-b)。

表3-2-8-a. 各水年の主な物質の年間流入量(大気沈着量)

水年		SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	N
		(kmol _c ha ⁻¹)					(kg ha ⁻¹)
2007	2008	1.0	0.7	0.5	0.5	0.1	17.1
2008	2009	1.0	0.6	0.5	0.6	0.2	17.3
2009	2010	0.9	0.6	0.6	0.5	0.2	15.7

表3-2-8-b. 各水年の主な物質の年間河川流出量

水年		アルカリ度	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺
		(kmol _c ha ⁻¹)					
2007	2008	2.2	2.1	0.6	0.9	0	2.1
2008	2009	2.4	2.2	0.7	1.0	0	2.0
2009	2010	3.6	3.2	0.8	1.5	0.1	3.0

注. アルカリ度はpH4.8法による。

物質流入量と物質流出量を比較すると、SO₄²⁻、Cl⁻及びCa²⁺では、流出量が流入量を大きく上回っていた。前回のとりまとめにおける推計¹⁰⁾と同様に、SO₄²⁻の流出量は、流入量の2倍以上、2009-2010水年には、3倍以上にもなった。また、窒素については、溶存無機態窒素(NO₃⁻ + NH₄⁺)の流入量(1.1 kmol_c ha⁻¹)の80%程度(0.9 kmol_c ha⁻¹)が、NO₃⁻またはNH₄⁺として流出していた。

土壌中に多く吸着・蓄積されているCa²⁺はそれが流出したと考えられるが、Cl⁻は生態系内でほとんど利用されないと考えられており、流入量と流出量が同程度になることが多いとされている。これを考慮して、仮にCl⁻の流入量が流出量と同程度あったとして、SO₄²⁻

の流入量を Cl^- との組成比に合わせて増やしたとしても、各水年の SO_4^{2-} 流入量は、2.0、1.9、及び 2.3 $\text{kmol}_e/\text{ha} \cdot \text{年}$ 程度であり、いずれの水年も流出量が流入量を上回っていると考えられる。近年、過去に硫黄沈着量が多かった北米の集水域において、流入量以上に SO_4^{2-} が流出していることが報告されており、蓄積していた SO_4^{2-} が流出している可能性が示唆されている¹¹⁾。伊自良湖でも同様の現象が生じている可能性がある。窒素飽和していると考えられる本集水域では、多くの窒素が生態系内で利用されず流出していることが示唆されたが、まだその流出量は流入量よりは少なく、流入した窒素の一定量は生態系内で消費・蓄積されており、生態系が窒素の放出源になるような段階 (Stage 3)¹²⁾¹³⁾には至っていないと考えられた。

(2) 増水時の河川水質の変化

河川水の水質は、集水域内の土壌、植生、地質等を含む生物地球化学的過程の影響を受けるが、豪雨や融雪時期等の増水時には、流出過程が変化することにより、水質も大きく変化することが知られている。釜ヶ谷川における河川流量の変化に伴う濃度変化を図 3-2-7 に示した。

生態系内でほとんど利用されない Cl^- や岩石の風化を起源とする SiO_2 は、平水時の基底流を構成する主要な成分として知られている。イベントによって若干異なるパターンを示すものの、これらの成分は河川流量の増大に伴い濃度が低下する傾向を示した。一方で、土壌表層に多く分布し、硝化や有機物の無機化によって生じる NO_3^- は、河川流量増大によって濃度の上昇が見られた。 SO_4^{2-} は、河川流量増大に伴い濃度が低下するものの、一定以上河川流量が増大すると濃度も上昇に転じた。ここで SO_4^{2-} 濃度が上昇に転じた、流量が $2 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ を超えるようなデータに注目すると、平水時には SO_4^{2-} と負の相関を示した NO_3^- は増水時に正の相関を示し、反対に平水時に SO_4^{2-} と正の相関を示した SiO_2 は増水時に負の相関を示した。

河川水中の SO_4^{2-} 濃度は、多くの場合、河川流量の増大とともに Cl^- 等と同様に希釈され、濃度が低下することが報告されているが¹⁴⁾、上述した北米で SO_4^{2-} が流出している集水域では、正味の流出量 (及びそれを濃度に換算した値) が河川流出量に伴い増大していることが報告され、表層に蓄積した有機態硫黄を起源とするものと考えられている¹¹⁾。伊自良湖集水域においても、 NO_3^- と同様に、土壌表層付近に硫黄 (S) が何らかの形で蓄積されている可能性が考えられ、これまで物質収支から示唆された集水域内における硫黄の蓄積を支持していた。

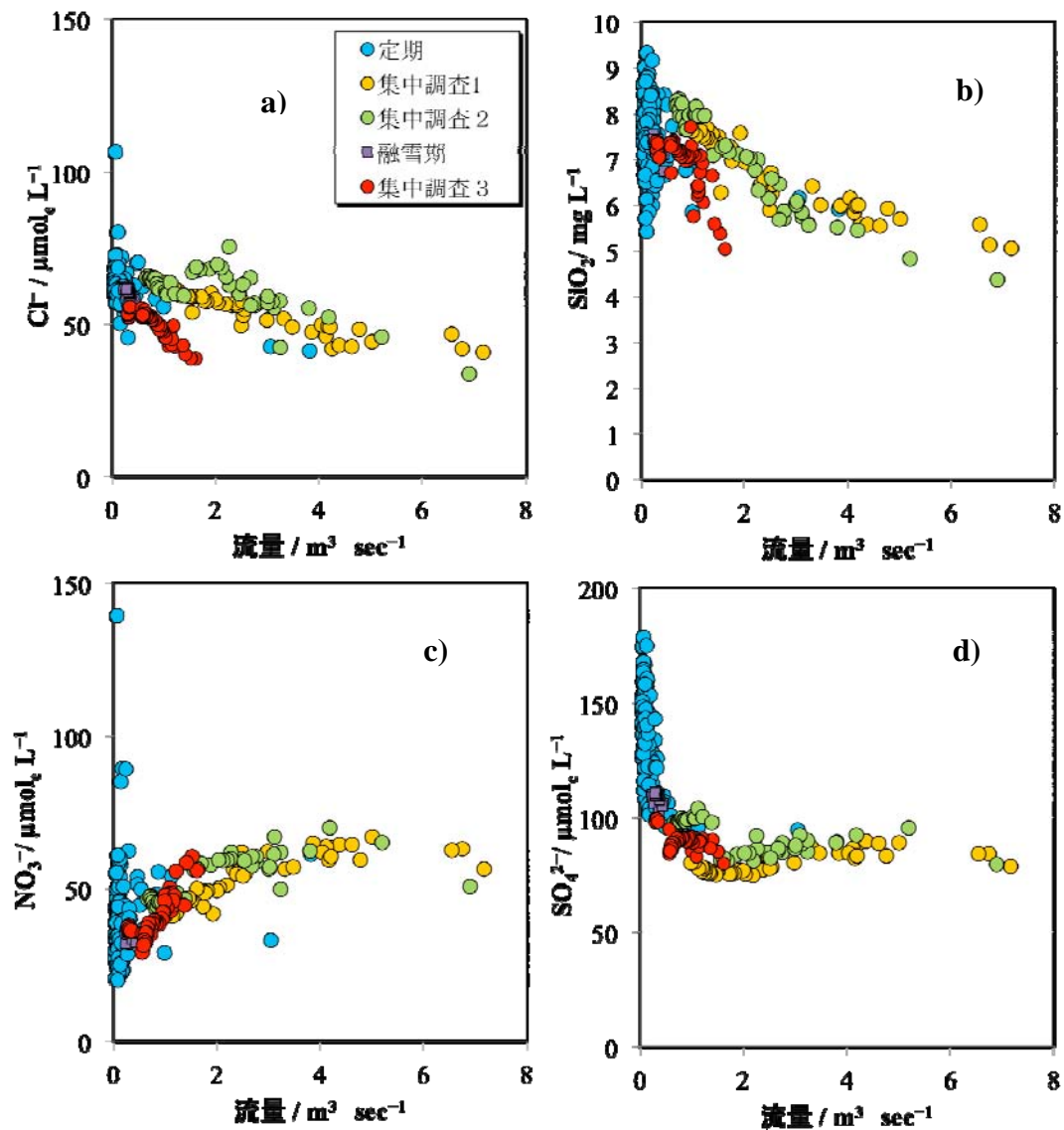


図 3-2-7. 釜ヶ谷川における河川流出量による河川中の Cl^- (a)、 SiO_2 (b)、 NO_3^- (c)及び SO_4^{2-} (d)の濃度変化

凡例の「定期」は2週間毎の定期モニタリング、「集中調査1、2、3」は2006年、2007年、2010年の豪雨時の集中モニタリング、「融雪期」は2010年の融雪時の集中モニタリングのデータを示す。

(3) 伊自良湖流入河川の水質の経年変化

湿性沈着量が全国のモニタリング地点で最も多い伊自良湖集水域では、1990年代から河川水の pH やアルカリ度の低下傾向¹⁵⁾や NO_3^- 濃度の上昇傾向、更に土壌の酸性化傾向も見られ、窒素飽和が進んでいることが示唆されている⁷⁾。また、今回も確認されたように、 SO_4^{2-} の大気からの流入量に比べ河川からの流出量が著しく多く、過去に蓄積した硫黄が流出し

ている可能性が指摘されている¹⁰⁾。一方で、近年は酸性化からの回復傾向を示す兆候も見られている(前節を参照)。

釜ヶ谷川の主な水質について、河川流出量を加味した各水年の加重平均濃度を表 3-2-9 に示した。pH は横ばいかやや上昇気味であり、 SO_4^{2-} 濃度は 2005-2006 水年から 2007-2008 水年まで上昇したものの 2009-2010 水年には再び同じレベルに戻り、 NO_3^- 濃度は 2007-2008 水年まで変化せずその後 2 水年続けて低下が見られた。アルカリ度は SO_4^{2-} 濃度同様に一度上昇したものの同じレベルまで低下していた。

NO_3^- 濃度の低下は流出していた窒素が再び生態系内で健全に循環しつつある兆候であり、 NO_3^- 濃度が高かった 2008-2009 水年に比べ pH が高いのもそれを反映している可能性があった。生態系内での窒素の循環には樹木による吸収が大きな役割を占め、伊自良湖集水域内の窒素飽和が進行したきっかけは、酷暑・干ばつの気象イベント後の無機窒素の放出と樹木成長量の低下に伴う窒素吸収の低下と考えられた⁷⁾。集水域全体の詳細な施業記録は明らかではないが、人工林が多くを占める伊自良湖集水域内では、2002-2004 年、また 2006-2007 年に間伐が林班毎に段階的に実施されたことが記録されており、河川中の NO_3^- 濃度が 2005 年をピークに低下を始めていることから、これらの施業により、森林の健全性が高まり窒素吸収が増大したことが影響している可能性も考えられた。一方で、上述したように、 SO_4^{2-} は流入量以上に流出しているため、今後更に注意深く監視していく必要性が示唆された。

窒素飽和が進行した 1990 年代半ば以降、夏季においても高い NO_3^- 濃度が河川水で記録されるようになった。夏季には生態系内において植生等による吸収・消費が旺盛となるため、河川水中の NO_3^- 濃度は低下するのが一般的である。そのため、冬季に低く夏季に高くなる水温と NO_3^- 濃度との間には、通常負の相関関係が見られるが、伊自良湖集水域においては、1990 年代半ば以降、その関係が失われ、水温が高くなる夏季においても生態系内で窒素が十分に使われず流出していることを示していた⁷⁾。2005 年以降の 3 水年の間も水温との関係は見られなかったが、夏季における高濃度の頻度は 2007 年以降減少傾向にあり、釜ヶ谷川流域の 2 地点では 2008-2009 水年以降、水温と NO_3^- 濃度との間に負の相関が見られるようになった(図 3-2-8)。これも、植物成長期において樹木吸収による窒素循環の制御が回復しつつあることを示唆していた。孝洞川では水温との関係は明確ではなかったが、 NO_3^- 濃度は同様に低下しつつある。今後、これらの回復傾向がこのまま続くかどうか、 SO_4^{2-} の流出に加え、窒素循環も注意深く監視していく必要がある。

表 3-2-9 伊自良湖集水域釜ヶ谷川における河川水質の各水年の加重平均濃度

水年		pH	アルカリ度	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
		(μmol _e L ⁻¹)			
2005	2006	6.8	127	121	42.9
2006	2007	6.9	137	139	41.3
2007	2008	6.8	156	147	43.0
2008	2009	7.0	142	131	39.3
2009	2010	7.0	135	121	29.4

注. 各水年の RW1 における年間流出量を基に算出。

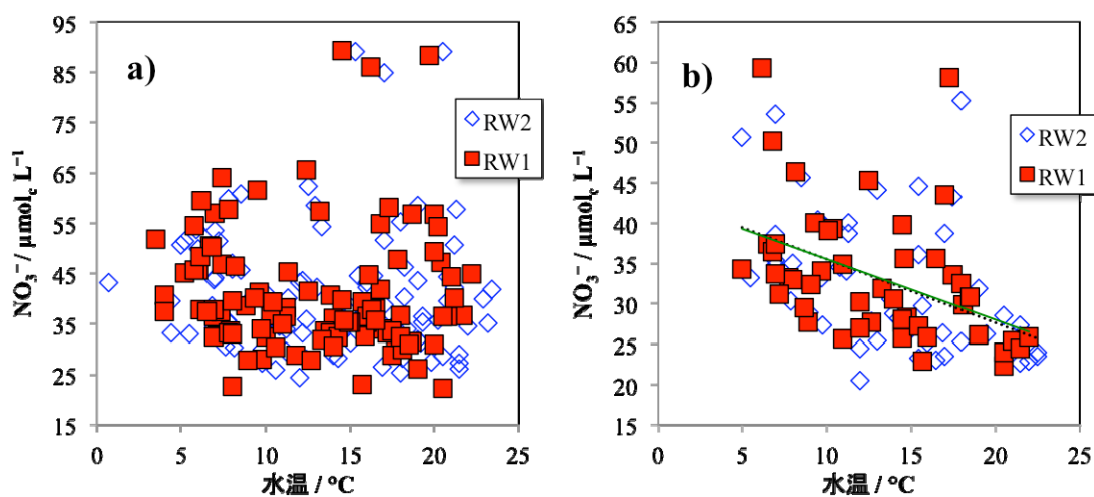


図 3-2-8 釜ヶ谷川における 2005-2008 年の 3 水年 (a) と 2008-2010 年の 2 水年 (b) における水温と NO₃⁻ 濃度との関係 NO₃⁻ 濃度は流量の影響を大きく受けるため、流量が 0.5 m³ sec⁻¹ を超えるような高流量時のデータは除いた。相関を示す緑色の実線及び黒色の破線の近似直線は、それぞれ RW1 (R²=0.188, *p* < 0.01) 及び RW2 (R²=0.212, *p* < 0.01) のデータによるものを示す。

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

(1) 土壌影響の要監視地域

酸性沈着の土壌への影響は、酸に対して化学的特性が変化しやすい土壌 (=感受性が高い土壌) と、酸に対して化学的特性が変化しにくい土壌 (=感受性が低い土壌) によって異なる。酸性沈着の土壌への影響は土壌の感受性が高く沈着量の多い地域で顕在化する可能性があり、そのような地域を要監視地域として抽出することが求められる。

①土壌の感受性マップ

土壌図及び地質図⁸を用いて、感受性の高い土壌を以下の2種類に分類した。

- ・ Type 1: 未熟土及び赤黄色土
- ・ Type 2: 表層地質が酸性岩 (花崗岩類、流紋岩類等) である褐色森林土

未熟土、赤黄色土、乾性褐色森林土は「酸性雨の土壌への影響予察図」によって感受性が高いとされている¹⁶⁾。一方、我が国の森林地帯に広く分布する褐色森林土の感受性は、地域によって大きく異なるため、母材となる表層地質が酸性岩である褐色森林土を特に酸に対する感受性が高い土壌とした。

②沈着量との比較

要監視地域の抽出のためには、上記の酸感受性地域の分布状況と大気沈着量の分布を比較する必要があるが、現時点では、湿性沈着量と乾性沈着量を合わせた大気からの総沈着量の分布状況を示す全国的な実測データは得られていない。将来的には、大気シミュレーションモデル等の活用が期待されているが、比較に用いるべき積算期間、時間・空間解像度等、議論すべき点も多い。ここでは全国的な分布が一定以上評価可能な、全国環境研協議会 (全環研) 及び環境省のモニタリングサイト (120 地点) において観測された年間の湿性沈着量 (平成 10 年度から平成 16 年度の平均: NO_3^- 及び非海塩性の SO_4^{2-}) の分布を土壌の感受性マップと重ね合わせて比較した。

⁸ 国土交通省「1/20,000 土地分類基本調査 (土壌図)」及び国土交通省「1/20,000 土地分類基本調査 (表層地質図)」

③結果

感受性の高い土壌は、火山性未熟土の多い北海道の一部、酸性岩が多い福島県と新潟北部、赤色系土壌と酸性岩が多い中部・西日本・北九州の広い範囲に出現していた(図 3-2-9)。特に、中部山岳地域では酸性沈着が多く、かつ感受性の高い土壌が多く分布していたため、土壌影響に対する要監視地域として考慮する必要があると考えられる。

(2) 陸水影響の要監視地域

陸水水質は流域内の地質に大きく影響を受け、酸性岩が多くを占める流域では塩基性岩が多くを占める流域よりも河川の酸性化が生じやすい(=陸水の感受性が高い)可能性がある¹⁷⁾。陸水の感受性の高い流域が多く分布し、かつ沈着量が多い地域では、酸性沈着の陸水影響が顕在化する可能性があり、このような地域を陸水影響の要監視地域として抽出することが求められる。農地や都市部では大気影響以外の要因によって水質が変化する可能性があるため、本報告では特に森林植生が大部分を占める流域を調査対象とした。

①森林集水域の抽出

地理情報ソフトウェア⁹⁾を用いて標高データ¹⁰⁾から全国の集水域を区分した(上流域 3,600 ha 以上)。さらに、植生図¹¹⁾を用いて森林植生の面積が 70%以上である集水域を抽出し、これを「森林集水域」として感受性の評価対象地域とした。

②森林集水域内における陸水の感受性

抽出された森林集水域内の表層地質¹²⁾に占める非塩基性岩(花崗岩類、流紋岩類等の酸性岩及び砂岩・泥岩・礫岩)の割合を算出し、その割合が 50%以上である流域を陸水の感受性が高い地域として地図上に示した。

③沈着量との比較

前述の土壌影響の要監視地域と同様に、全環研及び環境省のモニタリングサイト(120 地点)において観測された年間の湿性沈着量(1998-2004 年の平均: NO_3^- 及び非海塩性の SO_4^{2-})の分布を重ね合わせて比較した。

④結果

⁹⁾ ArcGIS10.0(ESRI)

¹⁰⁾ 国土交通省「数値地図 50m メッシュ(標高)」

¹¹⁾ 環境省生物多様センター運営の生物多様情報システムの 3 次メッシュデータ(http://www.biodic.go.jp/dload/mesh_vg.html)

¹²⁾ 国土交通省「1/20,000 土地分類基本調査(表層地質図)」

陸水の感受性が高い流域は、福島東部・新潟北部・北陸・中部・中国地方に幅広く分布していた(図3-2-10)。特に、新潟北部・北陸の一部と中部山岳地帯では酸沈着量が多く、かつ感受性も高いため、陸水に対する要監視地域として考慮する必要があると考えられた。

(3) 要監視地域の更なる特定に向けて

これまでの解析によって、土壌・植生や陸水の酸性化に関する要監視地域として、上述したように幾つかの地域が特定されつつある。しかしながら、現時点では、大まかな地域(エリア)を示したにすぎず、全国レベルの地図では、地域内の細かい状況を十分に評価することは困難である。今後、要監視地域として監視すべき地点を特定していくためには、地域レベル(例えば、伊自良湖を含む中部山岳地域など)での土壌・地質条件や大気沈着量等を含めた更なる評価が必要になると考えられる。また、現行の環境省モニタリング地点や伊自良湖等、これまで比較的多くの流域情報や土壌、陸水のデータが集められた地域の情報と併せて評価することにより、土壌化学的特性や陸水化学的特性を説明する上で有用な指標を見出すことができる可能性もある。

上記の試みにおいては、大気沈着としてデータが全国規模で整っている湿性沈着量だけを考慮しており、地域によっては総沈着量の半分以上を占める乾性沈着量は考慮されていない。さらに、感受性が高いと思われるような山岳地域には、現時点ではモニタリング地点がないように見受けられる。今後、大気シミュレーションモデルの計算結果等も参考にしながら、大気沈着と生態系の感受性を比較していく必要があると考えられる。

将来必要な酸性雨対策の検討を考慮すると、要監視地域の特定は今後のモニタリング計画の策定において不可欠であり、更に検討を進める必要がある。

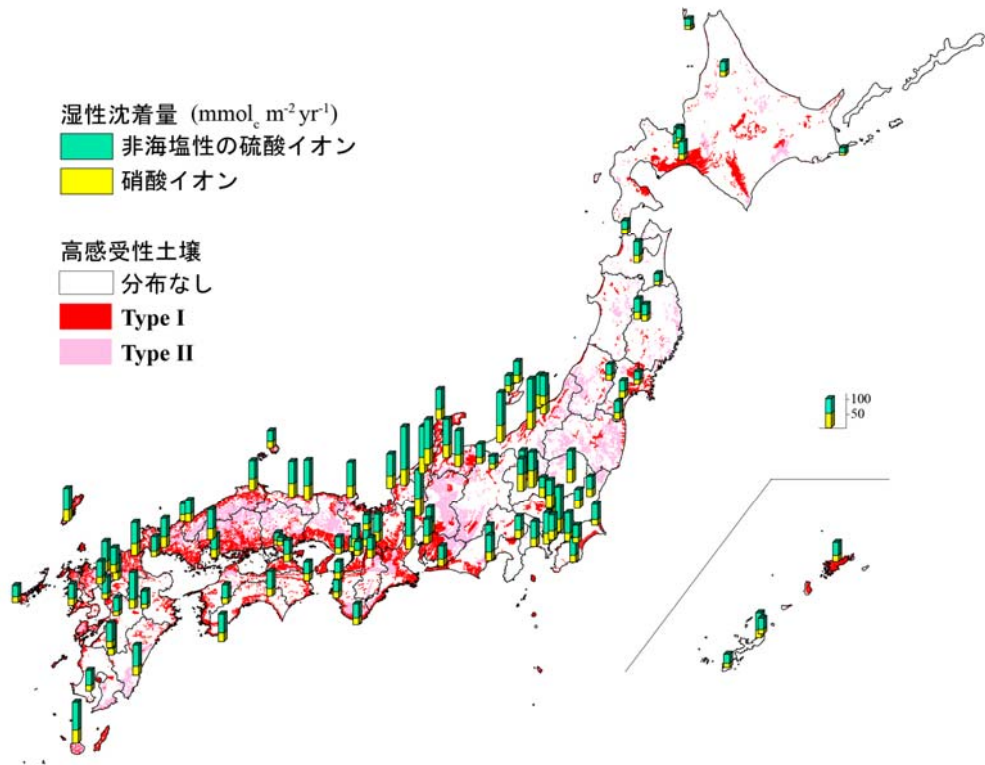


図 3-2-9 酸性沈着の土壌への影響が生じやすい地域の分布

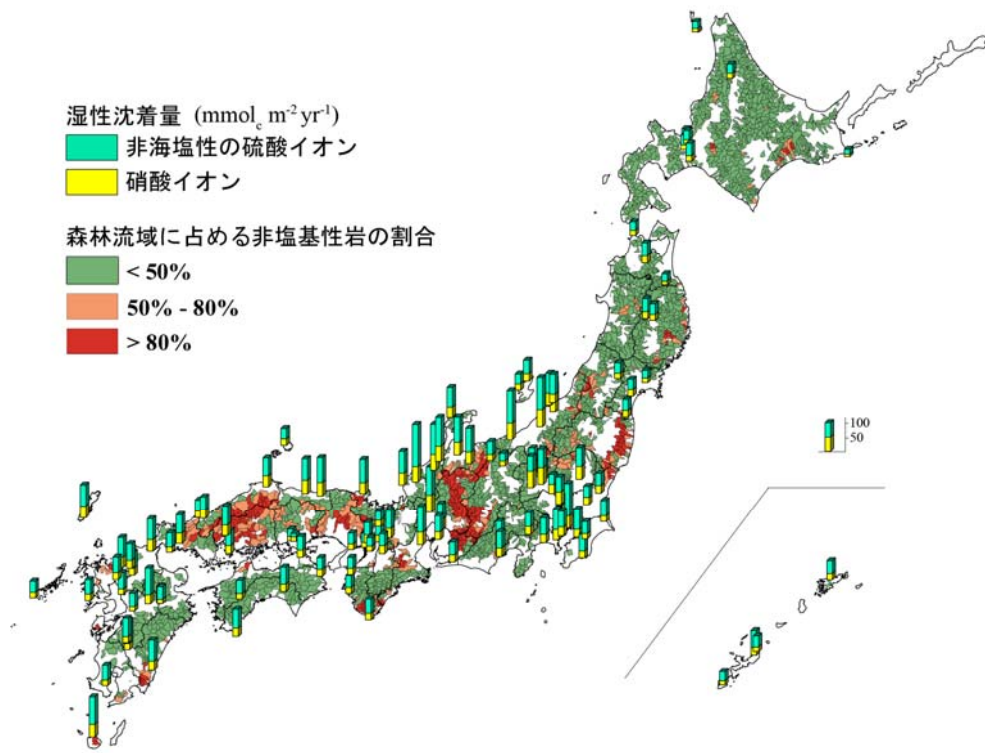


図 3-2-10 酸性沈着の陸水への影響が生じやすい森林流域の分布

(引用文献)

- 1) 日本ペドロジー学会第四次土壌分類・命名委員会 (2002) 日本の統一的土壌分類体系—第二次案—. 博友社.
- 2) B. Ulrich (1991) An ecosystem approach to soil acidification. *In*: B. Ulrich, M. E. Summer (Eds.), *Soil Acidity*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- 3) EANET (2006) Sub-manual on forest vegetation monitoring in EANET. Network Center for EANET, Acid Deposition and Oxidant Research Center (ADORC), Niigata, Japan.
- 4) 横田岳人 (2011) ニホンジカが森林生態系に与える負の影響. *森林科学* 61: 4-10.
- 5) 環境省酸性雨対策検討会 (2004) 酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書. 環境省.
- 6) R. M. Hirsch, J. R. Slack, R. A. Smith (1982) Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resour. Res.*, 18(1): 107–121.
- 7) O. Nakahara, M. Takahashi, H. Sase, T. Yamada, K. Matsuda, T. Ohizumi, H. Fukuhara, T. Inoue, A. Takahashi, H. Kobayashi, R. Hatano, T. Hakamata (2010) Soil and stream water acidification in a forested catchment in central Japan. *Biogeochemistry* 97: 141-158.
- 8) 小川滋 (2003) 森林と水資源(第3章), 水文大循環と地域水代謝 (丹保・丸山編), 技報堂出版, 45-71.
- 9) EANET (2010) Technical Manual for Dry Deposition Flux Estimation. Network Center for EANET, Asia Center for Air Pollution Research (ACAP), Niigata, Japan.
- 10) 環境省酸性雨対策検討会 (2008) 酸性雨長期モニタリング報告書(平成15～19年度). 環境省.
- 11) M. J. Mitchell, G. E. Likens (2011) Watershed Sulfur Biogeochemistry: Shift from Atmospheric Deposition Dominance to Climatic Regulation. *Environ. Sci. Technol.* 45: 5267–5271.
- 12) G. M. Lovett, K. C. Weathers, W. V. Sobczak (2000) Nitrogen saturation and retention in forested watersheds of the Catskill Mountains, New York. *Ecological Applications*, 10(1): 73-84.
- 13) J. L. Stoddard (1994) Long-term changes in watershed retention of nitrogen. *In*: L. A. Baker (Ed), *Environmental chemistry of lakes and reservoirs. Advances in Chemistry Series 237*, American Chemical Society, Washington, D.C., USA, 223–284.
- 14) M. Kamisako, H. Sase, T. Matsui, H. Suzuki, A. Takahashi, T. Oida (2008) Seasonal and annual fluxes of inorganic constituents in a small catchment of a Japanese cedar forest near the Sea of Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 195, 51-61
- 15) T. Yamada, T. Inoue, H. Fukuhara, O. Nakahara, T. Izuta, R. Suda, M. Takahashi, H. Sase, A. Takahashi, H. Kobayashi, T. Ohizumi, T. Hakamata (2007) Long-term Trends in Surface Water Quality of Five Lakes in Japan, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 7: 259-266.

- 16) 環境庁水質保全局・日本土壌肥料学会 (1983) 酸性雨の土壌への影響予察図 (1/200 万).
環境庁.
- 17) H. Matsubara, S. Morimoto (2009) Long-term declining trends in river water pH in Central Japan. *Water air and soil pollution* 253-265.