

## 3.2 生態影響モニタリングの結果

### 3.2.1 土壌・植生モニタリングの結果

#### (1) 平成 15～19 年度における土壌・植生モニタリング結果

本調査では、土壌や植生に関する基礎的データの収集とそれらを含む森林生態系に対する酸性沈着による影響の早期発見を目的として、主に樹木への影響に着目した国立公園特別地域等及び土壌への影響に着目した赤黄色系土壌<sup>1</sup>がみられる地域において、19 地域 25 地点（土壌 50 プロット）のモニタリング地点が設定され、土壌及び森林植生のモニタリングが行われた。

##### ① 調査地点における土壌の酸緩衝能及びその変動要因

我が国の森林土壌は全般的に酸性である。土壌化学性は各土壌の生成要因やその過程によって異なるものであり、人為的影響がない自然環境下においても、酸性土壌は生成され得る。したがって、土壌化学性を評価する上で、経年的な変化の有無とその度合いが重要な判断基準となるが、本節では各調査地点の土壌種を考慮しながら、主に酸性物質に対する緩衝能の評価を行った。土壌モニタリング地点における土壌表層の pH(H<sub>2</sub>O)及び交換性 (Ca+Mg+K)/Al 当量比の分析結果を図 3-2-1-1 に示す。

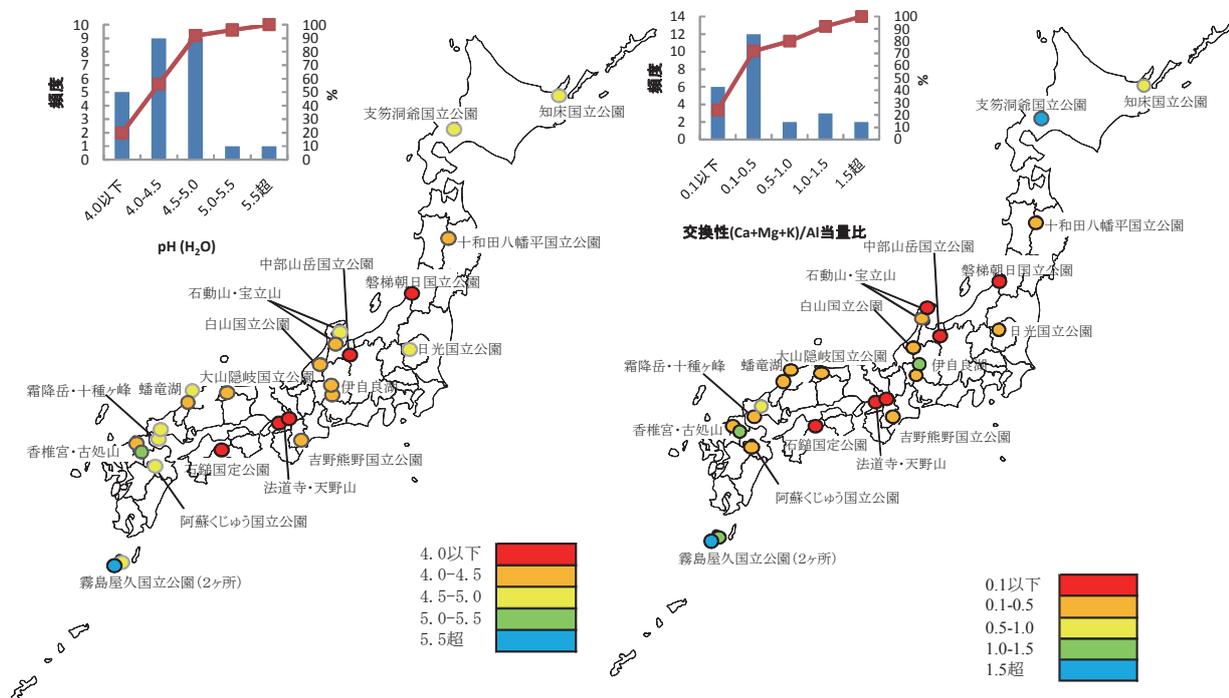


図 3-2-1-1 調査地点における土壌表層の pH(H<sub>2</sub>O) (左) と交換性 (Ca+Mg+K)/Al 当量比 (右)

<sup>1</sup> 酸性沈着の影響を受けやすい (=緩衝能が低い) 土壌種。

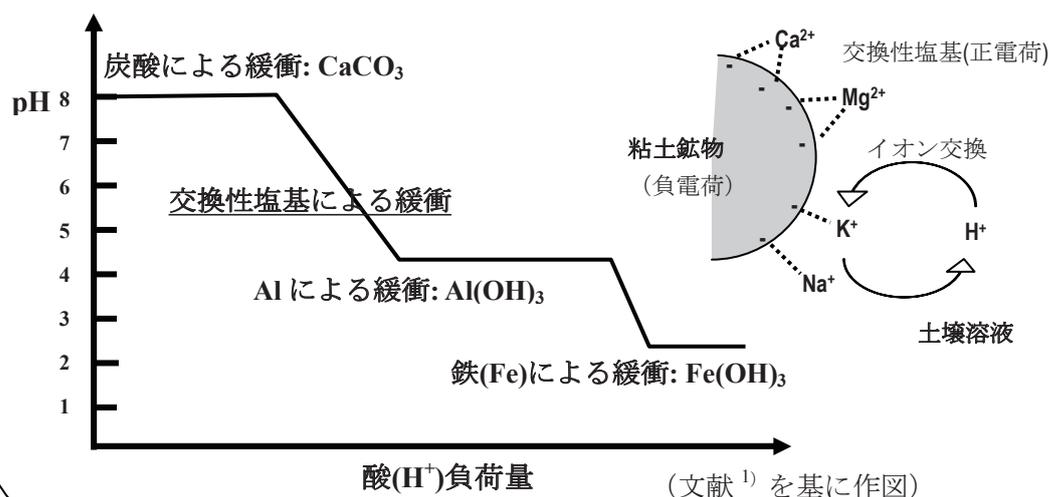
土壌 pH (H<sub>2</sub>O)は、屋久島の照葉樹林、古処山を除き、全ての地点で 5.0 以下であった。特に、磐梯朝日（褐色森林土）、中部山岳（ポドゾル性土）の各国立公園と、石鎚国立公園（褐色森林土）、法道寺（赤黄色土）及び天野山（褐色森林土）では、pH (H<sub>2</sub>O)は 4.0 以下であり、また、pH (KCl)<sup>2</sup>は屋久島の照葉樹林 (4.8)、古処山 (4.5)、日光 (4.1)、吉野熊野 (4.1) を除き 4.0 未満であった。中でも、石鎚国立公園、法道寺、磐梯朝日国立公園では pH (H<sub>2</sub>O) は 3.8、3.8、3.9、pH (KCl)は 3.1、3.2、3.4 という非常に低い pH をそれぞれ記録した。

### 【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 ポドゾル性土：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<sup>+</sup>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。

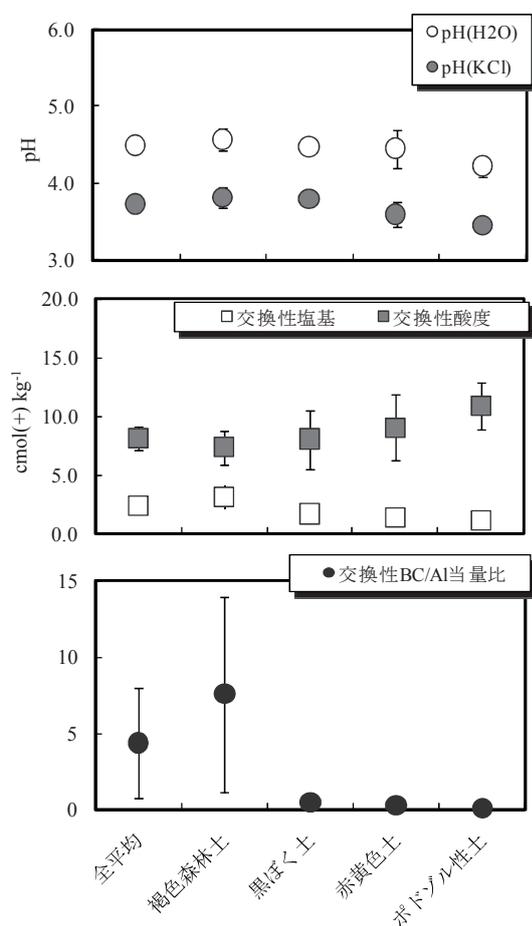


<sup>2</sup> pH (H<sub>2</sub>O)が 土壌:水=1:2.5 の重量割合で混合し測定した pH であるのに対し、pH (KCl)とは、土壌と 1M 塩化カリウム溶液を 1 : 2.5 の重量割合で混合し測定した pH (交換性 Al や交換性 H が浸出され、水の場合より低い値を示す。) であり、土壌の潜在的な酸性度を評価する指標のひとつ。

酸性沈着への緩衝能の指標として考えられる交換性塩基 (Ca+Mg+K) と交換性 Al の当量比 (交換性 BC/Al 当量比)<sup>3</sup>は、pH と同様の傾向を示し、土壌の pH が 4.0 以下と低い天野山、石鎚国定公園、磐梯朝日国立公園、法道寺で、それぞれ 0.06、0.07、0.09、0.09 であった。また、交換性 BC/Al 当量比は、土壌 pH (H<sub>2</sub>O) と pH (KCl) とそれぞれ比較的高い正の相関を示した (r: 0.611, 0.574)。

酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書 (平成 16 年 6 月) における解析では、土壌酸性化実験 (室内実験) の結果から交換性 BC/Al 比が 0.1 未満の土壌においては、pH4.0 程度の酸性雨でも土壌溶液組成が変化しうるということが指摘されている。このため、上述した pH、交換性 BC/Al 比が低い地点では、今後、土壌化学性の変化を監視していく必要がある。

調査地点の土壌は、統一的土壌分類体系 (日本ペドロジー学会, 2002) によると、褐色森林土 (14 地点)、黒ぼく土 (4 地点)、赤黄色土 (4 地点)、ポドゾル性土 (3 地点) の 4 つの大群 (土壌種) に分類された。



各土壌種における主要な土壌化学性の平均値及び標準誤差を図 3-2-1-2 に示した。pH (H<sub>2</sub>O) では、ポドゾル性土 < 赤黄色土 ≒ 黒ぼく土 ≒ 褐色森林土の順であったが、pH (KCl) では、ポドゾル性土 < 赤黄色土 < 黒ぼく土 ≒ 褐色森林土の順に低い値を示した。低い土壌 pH を反映し、交換性の酸度は、全ての土壌種において、交換性の塩基 (Ca、Mg、K、Na の和) より 3~10 倍程度の値を示し、特にその差は、ポドゾル性土、赤黄色土で大きく、塩基が少なく酸度が多いことを示していた。

交換性 BC/Al 比は、ポドゾル性土 (0.1) < 赤黄色土 (0.3) ≒ 黒ぼく土 (0.5) << 褐色森林土 (7.6) の順であった。褐色森林土の平均値が大きいのは、上述した屋久島の照葉樹林の土壌が塩基に富んでいるからであり、この地点を除くと、その平均は 1.2 になるなど、褐色森林土ではばらつきが大きく、上述した石鎚国定公園、磐梯朝日国立公園、天野山に代表されるような比較的高い酸性度が高い調査地点も見受けられた。

図 3-2-1-2 各土壌種における主要な化学性

<sup>3</sup> 1M CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 溶液の NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 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<sup>+</sup> 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ひとつ。

土壌モニタリングは、地域、土壌種（地点）、プロット、サブプロットと、最終的なデータの変動に影響する要因を考慮したサンプリング体系に基づき実施している。図 3-2-1-3 に各サンプリングレベルにおけるデータ変動の累積寄与率を示した。

酸度の指標である土壌 pH、交換性 Al においては、土壌種の違いが全体の変動に大きく影響しており、上述した土壌種による酸度の違いを反映していた。交換性 Ca については、サブプロットレベルと地域の変動の影響が大きく、前者は土壌表面における有機物層の厚さなどの不均一性を反映していると考えられ、後者は土壌種を超えた地質や気候等が大きく影響していると考えられた。

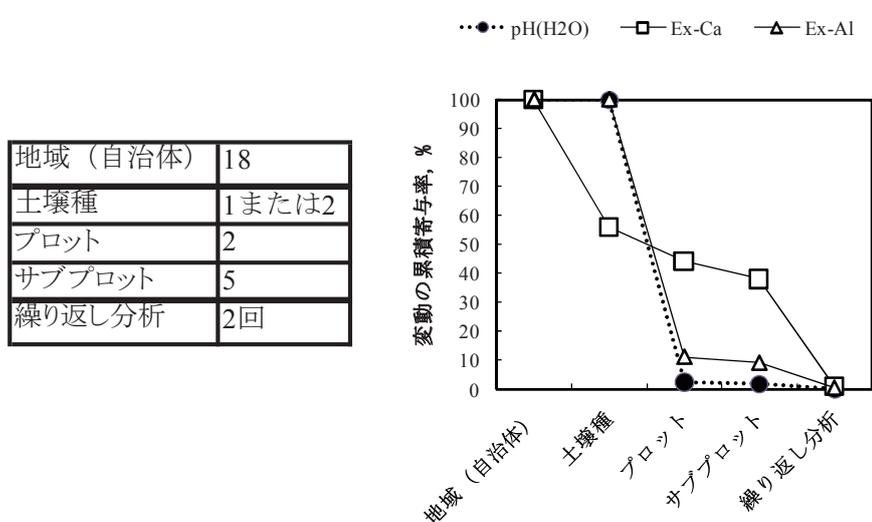


図 3-2-1-3 土壌サンプリング体系(左)と表層土壌の化学性データの分散に対する各サンプリングレベルの累積寄与率 (右)

注) 累積寄与率の解析においては、サブプロット・プロットレベルで著しく変動が大きい古処山のデータを除いた。

## ② 土壌酸性化傾向の評価

土壌の調査地点は、ほとんどが平成 13 年度（2001 年度）に設定された地点であり、酸性沈着に対する感受性が高い赤黄色系の土壌が対比される土壌とともに選定されている。長期モニタリング計画に基づく 5 年に 1 度のローリング調査方式により、19 年度（2007 年度）までに、2～6 年の間隔をおいて 2 回目の調査が実施された。表 3-2-1-1 に各プロットの平均値（5つのサブプロットの平均）を比較した結果を示す。ほとんどの地点において明確な酸性化傾向はみられなかったが、石川県の 2 地点において、pH(KCl)の有意な低下がみられた。pH(KCl)は土壌中の潜在的な酸度を反映していることから、何らかの原因により土壌中の酸度が上昇していることが示唆された。また、天野山（大阪府）のプロット 1 では、pH はほぼ同じレベルだが、塩基飽和度や交換性 BC/Al 比で有意な低下がみられた。これらの地点は、交換性 BC/Al 当量比が 0.1 前後と低いことから、上述したように酸性沈着に対する感受性が高いと考えられるため、今後さらに継続してモニタリングすることが重要であ

る。一方で蟠竜湖（島根県）では塩基飽和度や pH(KCl)の上昇、十種ヶ峰（山口県）では pH(KCl)の上昇、法道寺（大阪府）では塩基飽和度や交換性 BC/Al 比の上昇など、逆の傾向もみられた。特に蟠竜湖の周辺においては、近年マツ枯れに関連した施業もあり、周辺状況の変化による影響も考えられた。

表3-2-1-1 赤黄色系土壌における表層土壌(0-10cm)の経年変化

地域・自治体	地点名 ふりがな	土壌種	プロット	調査年	pH		ECEC	塩基飽和度		交換性(Ca+Mg+K)/Al当量比
					H <sub>2</sub> O	KCl	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	%		
石川県	石動山 せきどうざん	適潤性褐色森林土	1	2001	4.4	3.7	15.29	8.02	0.08	
				2005	4.3	3.5**	14.82	10.83	0.12	
			2	2001	4.5	3.8	13.16	11.19	0.13	
				2005	4.4	3.5**	13.50	12.38	0.15	
	宝立山 ほうりゅうざん	弱乾性赤色土	1	2001	4.6	3.8	17.17	9.87	0.10	
				2005	4.6	3.6	17.20	8.50	0.09	
大阪府	天野山 あまのさん	赤色系褐色森林土	1	2001	4.2	3.4	9.16	9.07	0.11	
				2007	4.1	3.4	9.03	5.22*	0.06*	
			2	2001	3.8	3.1	11.10	6.55	0.08	
				2007	4.0	3.3	10.47	4.72	0.05	
	法道寺 ほうどうじ	黄色土	1	2001	3.9	3.2	11.29	5.24	0.06	
				2007	3.8	3.1	10.51	9.12*	0.10*	
			2	2001	4.0	3.3	8.31	7.40	0.09	
				2007	3.9	3.2	9.13	8.14	0.09	
	島根県	蟠竜湖 ばんりゅうこ	褐色森林土	1	2001	4.8	3.9	4.30	17.07	0.21
					2006	4.9	3.8	5.13	30.39*	0.53
				2	2001	4.7	3.7	4.86	27.10	0.44
					2006	4.8	3.9*	4.83	21.97	0.33
石見臨空FP いわみりんくうファクトリーパーク		赤色土	1	2001	4.3	3.5	8.56	16.51	0.22	
				2006	4.5	3.7	7.58	15.65	0.21	
山口県	十種ヶ峰 とくさがみね	黒ぼく土	1	2001	4.6	3.8	11.87	10.08	0.12	
				2003	4.5	3.9*	11.43	13.03	0.20	
			2	2001	4.6	3.8	12.22	13.09	0.20	
				2003	4.6	3.9	11.39	10.01	0.13	
	霜降岳男山 しもふりだけおとこやま	黄色土	1	2001	4.9	3.9	5.18	31.14	0.77	
				2003	4.9	3.9	4.87	36.01	0.84	
2	2001	4.8	3.9	4.45	25.95	0.47				
	2003	5.0	4.0	4.05	36.11	0.97				
福岡県	香椎宮 かしいぐう	赤色系褐色森林土	1	2001	4.2	3.4	19.00	13.04	0.17	
				2007	4.1	3.3	18.71	8.57	0.09	
			2	2001	4.5	3.5	27.90	25.03	0.42	
				2007	4.4	3.4	23.62	15.13	0.18	
	古処山 こしょさん	湿性褐色森林土	1	2001	4.8	3.9	14.23	51.29	>1.0	
				2007	4.5	3.6	8.35	40.22	0.84	
2	2001	6.5	5.6	30.54	90.49	>1.5				
	2007	6.1	5.4	25.50	78.40	>1.5				

注. 数値の肩文字、「\*」及び「\*\*」は、サブプロットの平均値について行った t 検定において、それぞれ危険率 5%、1%で有意差があることを示す。

伊自良湖集水域内で、10 年以上土壌調査が継続されているプロットについて、表層土壌（深さ 3-5cm 程度）及び次層土壌（深さ 10-15cm 程度）の pH 変化を図 3-2-1-4 に示した。伊自良湖集水域内においては、平成 2 年（1990 年）に設定された 5 つのプロット全てにおいて、途中変動はあるものの、16 年（2004 年）までの 14 年間に、表層及び次層において pH (H<sub>2</sub>O) が低下した。なお、18 年（2006 年）に調査した土壌（深さ 0-10cm）の pH については、2 プロットの平均が 4.3 (3.9~4.4) であり、継続調査地点と同程度に酸性化していることが確認された。酸度の指標である交換性 Al は表層では多くのプロットで上昇傾向がみられ、次層でも上昇傾向がみられるプロットもあった。

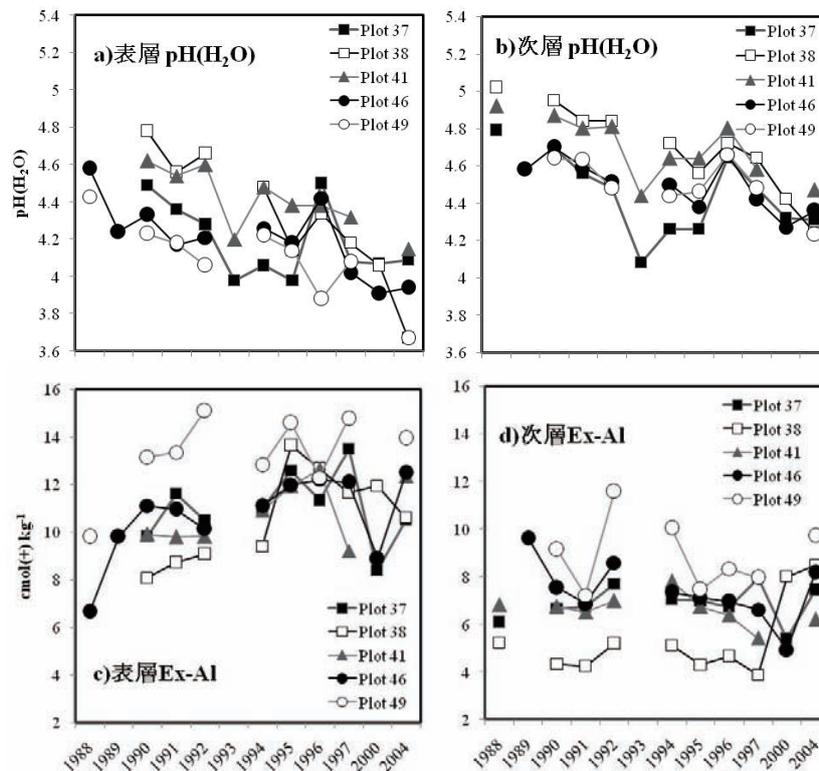


図 3-2-1-4 伊自良湖集水域長期モニタリング地点における土壌化学性の経年変化  
 表層は深さ 3-5cm ぐらいまで、次層は 10-15cm ぐらいまでの層位。pH(H<sub>2</sub>O)測定においては、土壌と水の比率を、  
 1992 年（平成 4 年）までは 1:5、1993 年（平成 5 年）以降は 1:2.5 として分析した。

伊自良湖集水域内では、3.3 節でも述べるように、H<sup>+</sup>の湿性沈着量が我が国でも最大レベルであり、河川水質にも一時的な SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>流出と pH の低下、継続的な NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の増大傾向など、集水域全体の酸性化徴候がみられることから、土壌化学性の変化もその酸性化プロセスの一部として認識できる。土壌 pH は植物の成長期における急激な栄養塩吸収でも低下する可能性があるため、生態系内における H<sup>+</sup>生成と大気由来の H<sup>+</sup>流入のそれぞれの寄与率について詳細に評価する必要はあるが、3.3 節に示されるように、土壌が調査された期間の樹木成長量はむしろ低下傾向にあり、急激な土壌 pH 低下を植物吸収だけで説明することは困難である。本集水域では近年まで間伐がほとんど行われていなかったため、森林管理条件等についても考慮する必要はあるが、湿性沈着量の影響が土壌化学性に発現した可能性が考えられた。表層土壌の pH (H<sub>2</sub>O)は、平均で 3.9 と低いレベルまで低下しており、土壌の緩衝過程においては Al の酸化物や水和酸化物などによる緩衝過程にあり、植物の生長に影響を与える Al<sup>3+</sup>が土壌水中に溶出し得る段階に来ているとも考えられることから、この土壌の酸性化が樹木生理に与える影響についても、今後さらに監視が必要である。

③ 樹木衰退状況の評価

樹木衰退度指標として、目視観察によって、それぞれ5段階（枝葉の密度は4段階）で記録された「梢端の枯損」、及び「枝葉の密度」の各調査地点内の平均値を図 3-2-1-5 に示した。衰退度指標は、0（異常なし）から5（枯死）または4（枯死）の段階で記録され、数字が大きい場合に衰退徴候が明確であることを示している。

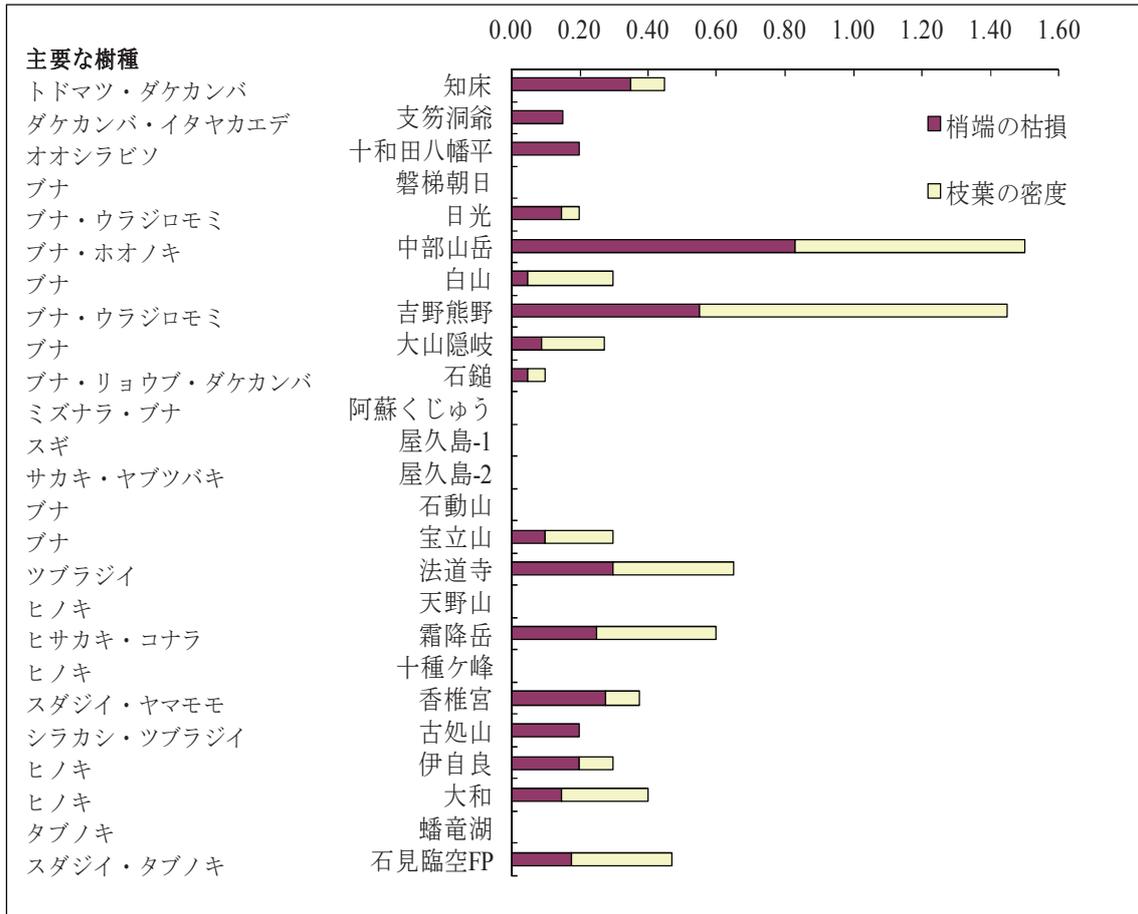


図 3-2-1-5 調査地点における主要な樹種と樹木衰退度（梢端の枯損及び枝葉の密度）の現況（平成 19 年）  
注）グラフは各指標の地点平均の積み上げ値を示す（値が高いほど衰退が著しい）。

全 25 地点の内、17 点で何らかの衰退の徴候がみられた（石動山、天野山については、樹形の変化が記録されているだけであり、図には含まれていない）。2つの指標の積み上げ値が最も高かった吉野熊野国立公園と中部山岳国立公園については、半数以上の樹木に何らかの徴候がみられた。吉野熊野国立公園については、台風が主原因として考えられ、ブナ、ウラジロモミなどに衰退がみられた。中部山岳国立公園においては、ブナ、ホオノキに衰退がみられ、原因不明とされているが、平成 19 年の成長期に降水量が少なかったことが指摘されている。また、他の地点においても、酸性沈着や土壌酸性化が主要因として断定される衰退木は確認されなかった。