

図 3-2-1-6 樹木衰退度（樹勢の衰退）の経年変化（値が大きいほど衰退現象が著しい）

樹木活性の総合的な指標として記録された樹木衰退度（樹勢）の経年変化を図 3-2-1-6 に示す。支笏洞爺、日光、大山隠岐の各国立公園、石鎚国立公園では平成 16 年から 17 年にかけて進んだ衰退の回復が記録されており、台風害からの回復を示しているものと考えられた。樹木の目視観察においては、台風等の気象イベント、冷夏、干ばつ等の気象条件による変化と、酸性沈着や大気汚染による変化を明確に区別することは困難であるが、従来 3~5 年に 1 回程度しか行っていなかった目視観察を、酸性雨長期モニタリング計画に基づき毎年 1 回行うことにより、気象の影響をより明確に区別できるようになった。伊自良湖では、18 年の調査直後にスギ人工林の間伐施業が行われ、19 年には回復がみられている。

一方で、知床、中部山岳、吉野熊野、白山の各国立公園と法道寺では、徐々に衰退が進んでいるように見受けられる。これらの地域では他の樹木からの被圧や風害などが、推定される主原因だと報告されているが、法道寺は土壌 pH も極めて低いため、今後さらに注意深く監視する必要がある。

なお、森林モニタリングについては、森林総合調査として、毎木調査による樹木の計測や、下層植生の構成に関する調査も実施されており、調査林分の基本的な情報が集積されつつある。現時点では、5 年に 1 回の調査が一巡したところであるが、今後は各地点における樹木の成長量等に関する評価が可能になると期待される。

(2) データの精度保証・精度管理 (QA/QC)

調査地点におけるプロットの設定や試料の採取方法、実験室の状況については、酸性雨長期モニタリング計画に基づき、酸性雨研究センターが定期的に現地の状況を確認することにより、データの精度が保証されている。土壌分析に関する分析機関間比較調査の結果、分析機関内の繰り返し精度や室内再現精度、機関間の再現精度とも高く、変動が小さいことから、信頼性のある分析値が得られていたと考えられる。

林野庁における土壌・植生・降水のモニタリング結果の概略

1. 林野庁の「酸性雨等森林衰退モニタリング事業」(1990～1999年の区画調査)

全国を約 20×20km のメッシュで区画して、その中の代表的森林において林分調査と降水・土壌の分析を行った。調査は5年間で全区画の林分を網羅するように行い、各林分において1990～1999年の期間に5年間隔で2回実施した。その結果、降水(6月下旬) pHの平均値は4.6～5.0の範囲で、5年間で大きな変化は認められなかった。また土壌の化学性は、樹種や地域により差がみられたが、平均 pH は5年間で5.1から5.0へと、わずかに低下した程度であった。林分調査では、樹冠の損傷や着葉の異常などの可視的な衰退の有無を調べた(図1)。健全林分は全体の約70%で、残りの30%程度に何らかの症状がみられた。その中で、「不明・記載なし」には酸性降下物に起因するものを含んでいる可能性があるが、5年間の変化は少なく衰退が進行しているとはいえなかった。そのほかには、過密や被圧など林分の手入れ不足が原因の衰退がみられた。

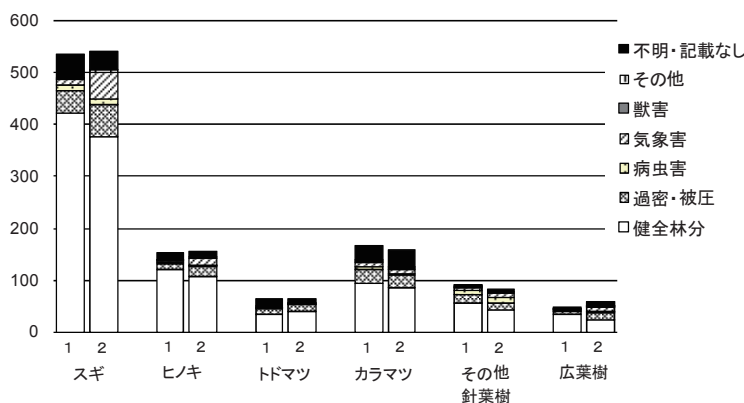


図1 各樹種の可視症状別の林分数

重複あり、1: 1990～1994年 2: 1995～1999年

2. 森林総合研究所の降水等モニタリング調査(1990年～現在)

全国7地域にある森林総合研究所本支所のモニタリング試験地を中心に調査を行っており、試験地の設定から始まり、内容を少しずつ変更しながら継続している。現在の主な調査内容は、森林流域における降水と渓流水の観測で、この結果から流域における溶存物質のフラックス収支を解明することを目指している。そのほかこれまで行った調査項目としては、林分及び土壌環境の調査、樹木衰退度調査、林内雨及び樹幹流の観測、などがある。結果の例として、東北における降水の pH・EC の変動を示した(図2)。これまでの調査からは、やや酸性度の強い降水が観測されることはあるものの、明白な森林衰退や渓流水の酸性化に結びつくような結果は得られていない。なお、調査結果のうち1995～2005年の水質データと関連情報をデータベース化し、一般に公開している(URL: <http://fasc.ffpri.affrc.go.jp/>)。

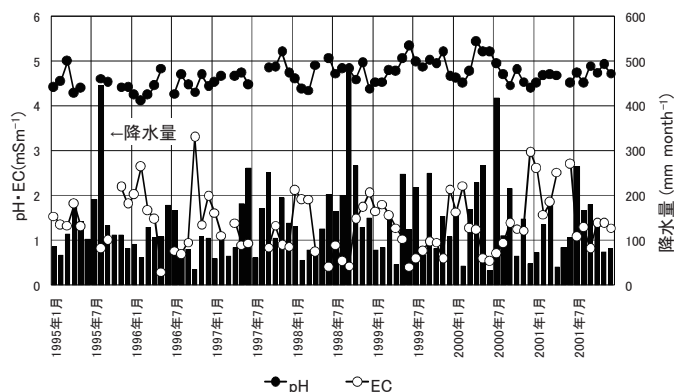


図2 岩手県姫神における1995～2001年の月降水量とpH・ECの変動(相澤ほか2003)

3.2.2 陸水モニタリングの結果

(1) 平成 15～19 年度における陸水モニタリング結果

本調査では、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⁴を対象に 11 地点が選定され、モニタリングが行われた。平成 15 年度から 19 年度にかけての調査地点の湖沼表層水及び流入河川水の水質調査結果を表 3-2-2-1 に示した。本調査対象地点の大部分は 0.200 mmol_c L⁻¹以下の低アルカリ度である。双子池（雌池）、夜叉ヶ池、沢の池はアルカリ度が 0.030 mmol_c L⁻¹以下、pH が 5.8 以下で特に酸感受性が高い湖沼であったが、これらを含む、すべての湖沼で酸性沈着の明確な影響は確認されなかった。一方、永富池は他の地点と比べアルカリ度、pH が高かった。山居池、蟠竜湖は海塩の影響を受け Cl⁻や Na⁺濃度が支配的な水質であった。伊自良湖の表層水及び流入河川水は NO₃⁻濃度が全地点中最も高かった。蟠竜湖は他に比べ DOC 濃度⁵が高かった。

なお、参考のために表 3-2-2-1 (b) に各調査地点の集水域の特徴を示す。

表 3-2-2-1 (a) 各調査定点の水質（平成 15～19 年度）

| 湖沼名 | 採水地点 | pH | EC mS m ⁻¹ | Alkalinity mmol _c L ⁻¹ | SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | NH ₄ ⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | |
|-----|-----------|------|--------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------|
| | | | | | μmol L ⁻¹ | | | | | | | | |
| 山形県 | 今神御池 | 湖心表層 | 6.37 | 3.90 | 0.071 | 80.7 | *1 | 175.3 | *1 | 226.1 | 11.1 | 26.0 | 43.3 |
| 栃木県 | 刈込湖 | 湖心表層 | 6.91 | 3.25 | 0.156 | 115.2 | 5.3 | 20.0 | 1.4 | 131.0 | 14.0 | 117.8 | 14.3 |
| 長野県 | 双子池(雄池) | 湖心表層 | 7.02 | 1.86 | 0.112 | 33.4 | 15.9 | 11.3 | 0.7 | 46.1 | 6.4 | 107.4 | 15.8 |
| | 双子池(雌池) | 湖心表層 | 5.73 | 0.73 | 0.020 | 29.3 | 4.1 | 10.0 | 0.7 | 13.7 | 4.1 | 22.1 | 7.5 |
| 新潟県 | 山居池 | 湖心表層 | 6.87 | 8.49 | 0.109 | 92.8 | 2.1 | 542.6 | 1.1 | 510.9 | 30.9 | 81.8 | 113.8 |
| 石川県 | 大畠池 | 湖心表層 | 6.53 | 4.29 | 0.134 | 33.5 | 8.6 | 186.5 | 2.5 | 197.1 | 25.8 | 65.0 | 70.1 |
| 福井県 | 夜叉ヶ池 | 湖心表層 | 5.36 | 1.64 | 0.017 | 42.7 | 7.5 | 61.3 | 4.9 | 59.7 | 8.5 | 20.3 | 18.2 |
| 岐阜県 | 伊自良湖 | 湖心表層 | 7.03 | 4.24 | 0.163 | 108.8 | 31.0 | 64.7 | 3.5 | 91.9 | 7.9 | 153.3 | 110.7 |
| | 釜ヶ谷川 | 流入河川 | 6.96 | 4.43 | 0.140 | 136.2 | 39.6 | 63.2 | *1 | 93.8 | 7.3 | 150.4 | 122.8 |
| | 孝洞川 | 流入河川 | 6.72 | 3.86 | 0.125 | 101.6 | 33.3 | 68.9 | *1 | 102.5 | 6.5 | 100.5 | 116.5 |
| 京都府 | 沢の池 | 湖心表層 | 5.70 | 1.73 | 0.021 | 32.2 | *1 | 83.4 | *1 | 65.7 | 6.4 | 30.1 | 30.6 |
| 島根県 | 蟠竜湖 | 湖心表層 | 7.06 | 10.65 | 0.166 | 88.1 | 1.7 | 634.3 | 1.8 | 605.5 | 47.6 | 66.1 | 141.0 |
| | 蟠竜湖 No. 3 | 湖心表層 | 7.05 | 10.60 | 0.173 | 89.9 | 2.1 | 624.5 | 1.4 | 604.4 | 47.9 | 72.2 | 142.5 |
| 山口県 | 山の口ダム | 湖心表層 | 6.64 | 6.02 | 0.107 | 97.8 | 9.7 | 285.8 | *1 | 332.4 | 25.1 | 65.6 | 72.2 |
| 香川県 | 永富池 | 湖心表層 | 7.34 | 9.53 | 0.512 | 169.5 | 25.4 | 155.2 | 5.2 | 339.3 | 25.4 | 416.4 | 104.8 |

*1：検出下限以下

注：長期モニタリング計画において定められた神浦ダム（長崎県）については近傍の汚染源（廃棄物処分場）の影響等を考慮し、平成 14 年度第 3 回生態影響分科会においてモニタリングを行わないこととされた。

⁴ EANET ではアルカリ度 0.200 mmol_c 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（酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書より）。

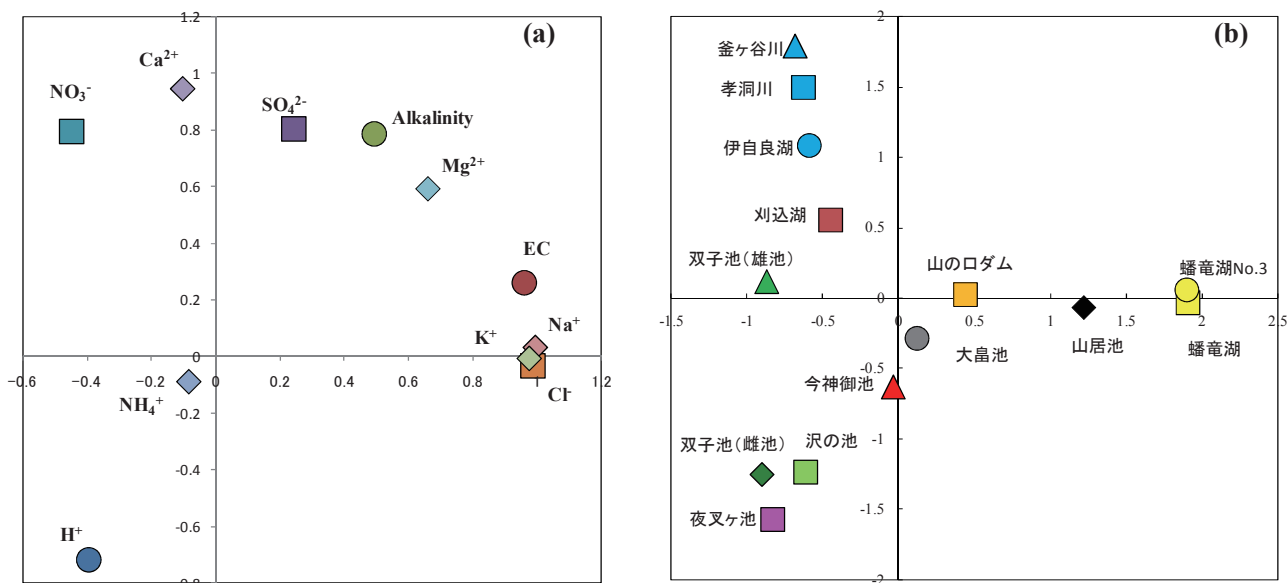
⁵ DOC (dissolved organic carbon: 溶存有機態炭素) 濃度は、集水域内からの流入負荷等の有機物及び湖内生産・供給の有機物の指標のひとつ。

表 3-2-2-1 (b) 各調査地点の集水域の特徴

| | 湖沼名 | 表層地層 | 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 | 乾性ボトゾル化土壌等 | ブナ・チシマザサ群落等 |
| 栃木県 | 刈込湖 | 流紋岩・安山岩 | 乾性及び湿性ボトゾル等 | オシロヒノ・シロヒノ・コマツ等 |
| 長野県 | 双子池 | 溶岩（横岳溶岩群・双子峰溶岩） | 湿性腐食型弱ボトゾル土 | ミドリキササグ・カンバ群落等 |
| 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・ササ植林 |
| 福井県 | 夜叉ヶ池 | 砂岩・頁岩、チャート | 褐色森林土壌 | ブナ、オハナモミ |
| 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・ハツバツツジ、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 |

上記の5年間の全平均値を用いて主成分分析⁶を行い、各水質項目の主成分負荷量(a)、及び各調査地点の主成分得点(b)の結果を図3-2-2-1に示した。第一主成分(X軸)の寄与率は45.0%、第二主成分(Y軸)の寄与率は33.9%であり、この2軸で75%以上が説明された。なお、永富池は他と比べてアルカリ度やCa²⁺濃度が非常に高く、主成分得点(b)の図に配置すると他の地点の傾向が分かりにくくなるため、ここでは分析に加えていない。今回は、アルカリ度が0.200mmol・L⁻¹の酸感受性湖沼だけで解析したため、各湖沼・集水域の特徴が詳細に確認された。

図 3-2-2-1 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)



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。

まず、各水質項目の主成分負荷量(a)については、X軸方向の第一成分は、正の値に EC 及び主なイオン成分が分布しているため湖水中の溶存物質質量を示していると考えられる。また、Y軸方向の第二成分は、Ca²⁺、アルカリ度が正の値であるのに対しH⁺は負の値をとるため、水質の酸性度を示しているが、同時にSO₄²⁻やNO₃⁻が大きな正の値を取り、これらのイオンの寄与も示していると考えられる。

次に、各調査地点の主成分得点(b)については、山居池、蟠竜湖は水質の酸性度は高くないが、ECやNa⁺、Cl⁻が高くX軸上の正方向に分布しており、海塩の影響を強く受けている。第3象限は水の酸性度が高くかつ溶存イオン濃度が低い酸感受性の高い水質の区分である。第3象限に分布する夜叉ヶ池、双子池(雌池)、沢の池は前述のとおり非常に酸感受性が高く、特に酸性化に関し注意を要する湖沼である。また今神御池も第3象限に位置し、比較的酸感受性が高い湖沼といえる。一方で、伊自良湖集水域は第2象限に位置しており、夜叉ヶ池等と比較すると酸性度は低いが、SO₄²⁻やNO₃⁻の濃度が高く、3.3節で詳述するように、窒素飽和に伴うNO₃⁻の流出や高濃度のSO₄²⁻流出の影響を受けているものと考えられており、第3象限の地点とは異なる酸性化傾向に留意する必要があると考えられた。また、刈込湖は比較的高濃度のSO₄²⁻やCa²⁺の影響が強い。

(2) 陸水の長期的傾向

表3-2-2-2にseasonal Mann-Kendall tests (Hirsch et al, 1982)を用いた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。なお、当該解析は調査期間が長期の地点のみ実施した。

表 3-2-2-2 長期モニタリング定点の湖沼表層水及び流入河川水の陸水化学性長期トレンド解析結果

| 湖沼名 | 調査期間 | N | Z-score | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|----|---------|---------|------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| | | | pH | EC | Alkalinity | SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | NH ₄ ⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ |
| 双子池(雄池) | 1998-2007 | 30 | 1.56 | 1.83 | 1.35 | 4.94*** | 0.52 | -0.31 | -0.29 | 2.35** | -1.74 | 2.18* | 1.26 |
| 双子池(雌池) | 1998-2007 | 30 | -0.98 | -1.77 | 0.73 | 3.53*** | -1.66 | -0.73 | -1.83 | 2.94** | -1.84 | 0.05 | -0.64 |
| 山居池 | 2001-2007 | 27 | -1.52 | 0.95 | 0.96 | 0.00 | 0.24 | 0.87 | -0.78 | 0.16 | -0.48 | 0.39 | 0.00 |
| 夜叉ヶ池 | 2000-2007 | 41 | -1.81 | -1.10 | -2.27* | -1.23 | 1.55 | -2.58** | -0.66 | -2.00* | 0.97 | -1.17 | -0.91 |
| 伊自良湖 | 1988-2007 | 76 | -0.74 | 5.68*** | 5.45*** | 0.87 | 5.43*** | 2.3* | 1.89 | 0.89 | -0.56 | 3.60*** | 2.55* |
| 釜ヶ谷川 | 1988-2007 | 77 | -2.07* | 3.28** | 1.19 | 1.03 | 6.00*** | 2.49* | -0.11 | 0.96 | -0.05 | 1.49 | 1.68 |
| 孝洞川 | 1988-2007 | 57 | -1.00 | 5.43*** | 1.66 | 2.20* | 5.36*** | 2.28* | -0.41 | 2.87** | 1.82 | 2.20* | 3.16** |
| 蟠竜湖 | 1989-2007 | 76 | 2.49* | 5.14*** | 5.63*** | -0.47 | 0.84 | 4.96*** | -1.98* | 6.00*** | 1.16 | -0.97 | 3.61*** |
| 蟠竜湖 No.3. | 1989-2007 | 76 | 2.40* | 5.71*** | 4.60*** | 0.00 | -0.11 | 4.28*** | -1.61 | 5.61*** | 0.83 | 0.13 | 3.11** |

注.*、**、***は、年3～4回の季節毎のデータを用いてseasonal Mann-Kendall testsを用いてトレンド検定を行った結果、それぞれ危険率5%、1%、0.1%で有意差があることを示す。

解析対象地点の中では、釜ヶ谷川(伊自良湖流入河川)でpHの有意な低下傾向(p<0.05)が確認された。釜ヶ谷川では酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書で示されたように、96年(平成8年)以降、顕著なpHの低下傾向がみられたが、2004年(16年)以降は横ばい

傾向にある（図 3-2-2-2(a)）。一方、蟠竜湖では pH の有意な上昇傾向が確認された（図 3-2-2-2(d)）。表層水のアルカリ度で有意な低下傾向を示した地点は夜叉ヶ池であり、伊自良湖、蟠竜湖（図 3-2-2-2(e)）で有意な上昇傾向が確認された。

伊自良湖集水域では湖沼表層水及び2つの流入河川水いずれでも、 NO_3^- 濃度の有意な上昇（ $p < 0.001$ ）がみられた（図 3-2-2-2(b)）。釜ヶ谷川では pH が低下傾向にあるのに対し伊自良湖表層水のアルカリ度は顕著な上昇傾向にあり、また伊自良湖表層水及び孝洞川では Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度といった塩基成分も上昇傾向にあった（図 3-2-2-2(c)）。表層水 SO_4^{2-} 濃度の有意な上昇は、双子池の雄池及び雌池で確認された。雄池では Na^+ 、 Ca^{2+} 濃度も有意な上昇傾向がみられた。アルカリ度が顕著な上昇傾向にある蟠竜湖表層水では、 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} がともに顕著な上昇傾向にあった（図 3-2-2-2(f)）。 Ca^{2+} は明確な長期トレンドを示していないが、海塩もしくは周辺における人間活動に由来すると考えられる成分が顕著な上昇傾向にあると考えられた。図 3-2-2-1 で特に酸感受性が高いと分類された夜叉ヶ池では、 Na^+ 、 Cl^- の濃度が有意な低下傾向にあった。

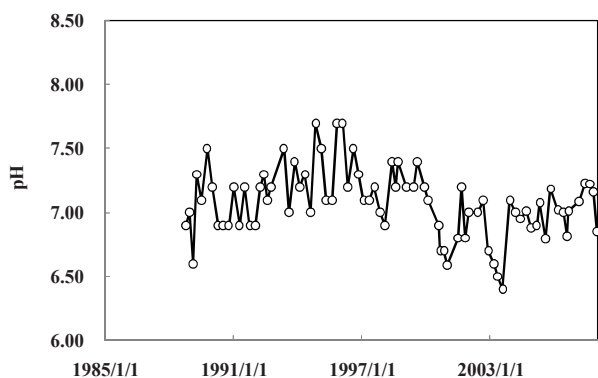


図 3-2-2-2(a)
釜ヶ谷川における pH 経年変化

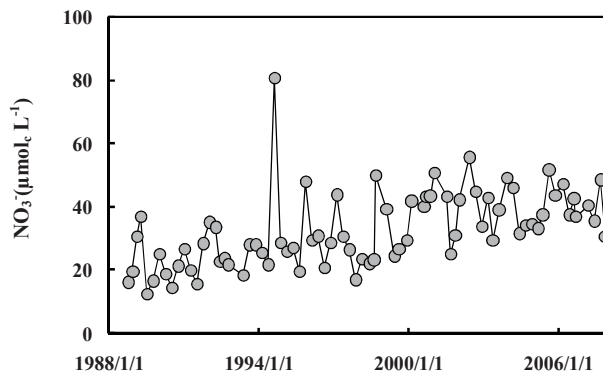


図 3-2-2-2(b)
釜ヶ谷川における NO_3^- 経年変化

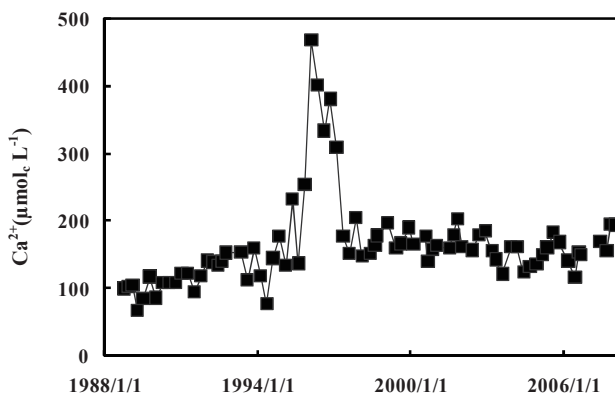


図 3-2-2-2(c)
伊自良湖における表層水の Ca^{2+} 経年変化
1997年（平成9年）頃のピークについては原因不明

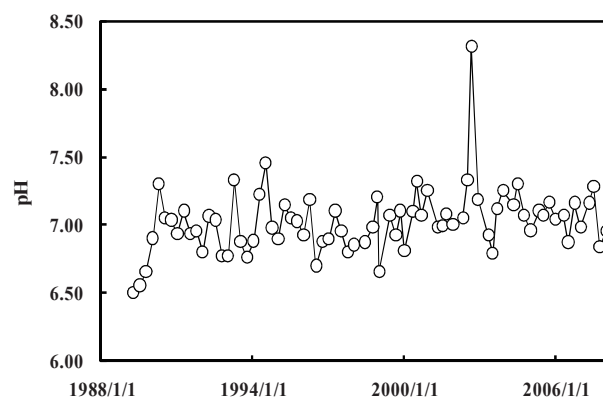


図 3-2-2-2(d)
蟠竜湖における表層水の pH 経年変化

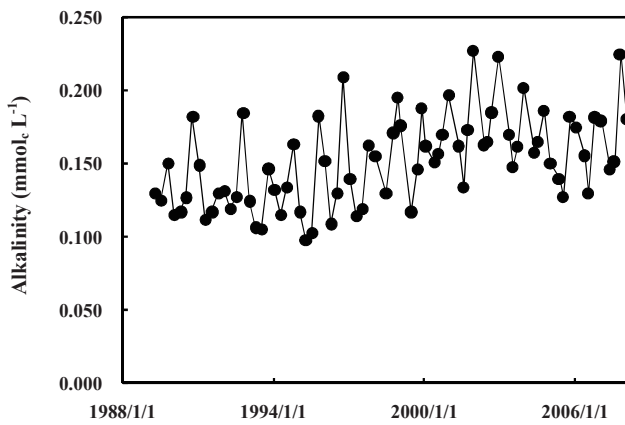


図 3-2-2-2(e)

蟠竜湖における表層水のアルカリ度経年変化

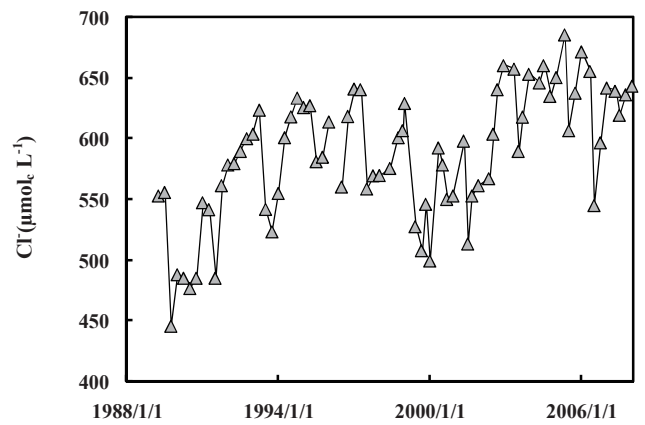


図 3-2-2-2(f)

蟠竜湖における表層水の CI 経年変化

(3) データの精度保証・精度管理 (QA/QC)

調査地点における試料の採取方法、実験室の状況については、酸性雨長期モニタリング計画に基づき、酸性雨研究センターが定期的に現地の状況を確認することにより、データの精度が保証されている。平成 15 年度から 19 年度までの分析機関間比較調査の比較を、図 3-2-2-3 に示した。いずれの調査でも精度管理目標値を満たすデータが 90%以上であり、全機関において長期にわたり比較的高い分析精度が確保され続けていた。ただし、成分別にみると、陽イオン成分（濃度が低い、あるいは 2 価の陽イオン成分）が、pH、電気伝導率 (EC)、陰イオンより比較的フラグ⁷が発生しやすく、また実験室間のばらつきも大きい傾向が例年みられた。陽イオン成分の分析精度については今後も注意が必要である。

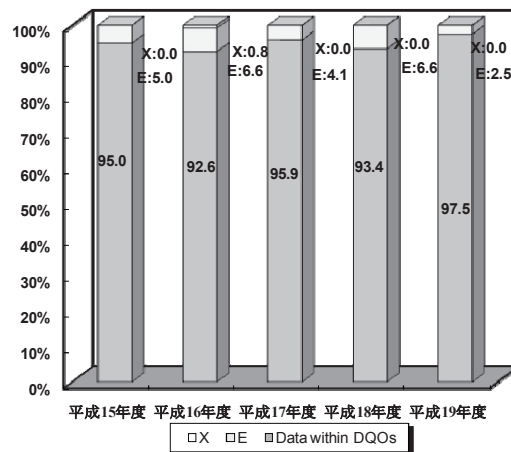


図 3-2-2-3 分析機関間比較調査におけるフラグ数の経年変化

3.2.3 酸性沈着の生態影響に対する総合的考察

上述したように、本期間中においては、明確な酸性化傾向や関連する樹木衰退はみられないものの、伊自良湖集水域では、土壌酸性化傾向がみられた。また、pH が 4.0 未満の土壌もみられたことから、今後、さらに土壌酸性化とその影響に関して、注意深く監視、評

⁷ DQOs (EANET の精度管理目標値) の 2 倍まで (±15%~±30%) の分析値にはフラグ E を、DQOs の 2 倍 (±30%) 以上を超える分析値にはフラグ X を付けて表した。

価していく必要があると考えられた。3.3節でも取り上げるように、近年、伊自良湖集水域で酸性沈着の影響を示唆する酸性化徴候がみられるなど、土壌や地質の緩衝能が小さいと考えられる地域においては、河川の酸性化傾向も報告されつつある。本項においては、これまでの感受性に関する研究事例を参考とするとともに、全国における土壌や地質の状況を概観しながら、さらに沈着量との関係から、今後酸性化のリスクが高いと考えられる、ホットスポットとなる地域の抽出を試みた。

(1) 酸感受性地域の抽出

酸性沈着に対する感受性の空間的分布に関しては、環境庁水質保全局・日本土壌肥料学会が、昭和58年に「酸性雨の土壌への影響予察図(1/200万)」を作成した(図3-2-3-1)。これは、酸に対する緩衝能によって土壌を6区分に分けて、その分布を土壌図上で示したものである(緩衝能の区分は、平成6年度の第2次酸性雨対策調査取りまとめ時に、強、中、弱の3区分に改められた)。これによると、酸性沈着に対する緩衝能が弱いとされる、未熟土、赤黄色土、乾性褐色森林土などの土壌は、主に西南日本に分布している。この図による評価は、土壌の緩衝能を基礎としているが、実際には土壌の母材となる岩石・鉱物の化学成分や風化による鉱物の溶解や、生態系(植生)の耐性も、各地域の感受性に大きく関わると考えられる²⁾。

この点を考慮し、吉永ら²⁾は、ストックホルム環境研究所(SEI)法³⁾により、国土数値情報を用いて、酸性沈着に対する日本列島の感受性分布図を作成した。SEI法では、環境要因として地質、土壌、土地利用、降水量の4項目を考慮し、1から5までの5段階で評価しており、年降水量が1200mm以上の針葉樹林で、ケイ酸質の風化速度の遅い岩石を母材とした緩衝能の低い土壌が分布する地点では感受性が高くなる。この方法で得られた感受性が最も高い5を示す点が集中しているのは、花崗岩類の分布地域で、多くは西南日本に分布するなど、上記影響予察図と類似する点も多い。感受性が4を示す地点がまとまって分布しているのも、花崗岩類の分布地域か、北海道道央の針葉樹林帯であった。高い感受性を示す地域には、西南日本以外の花崗岩等酸性岩の分布地域として、紀伊半島、岐阜県を含む中部山地や新潟県北部の朝日山地なども含まれていた。SEI法では、降水量1200mmを閾値としているが、日本ではほとんどの地域で降水量がそれ以上あるため、降水量の増減では地域差は明瞭にはならないことが、問題点のひとつとして指摘されている²⁾。

これらの取組から、感受性の高い生態系として、ケイ酸質に富む花崗岩等酸性岩が多く分布する地域で、未熟土、赤黄色土、乾性褐色森林土等に覆われた森林地域が指摘される。吉永ら²⁾の分布図の範囲には含まれていないが、九州南部の屋久島も花崗岩の島として有名である。植生も考慮されるべきであるが、我が国に多く分布する植林地はほとんどがスギ、ヒノキが植えられているため、植生分布による区分には留意が必要であると考えられる。