

第4章 白神山地の水・土環境の実態評価

4.1 はじめに

本章では、前章で記述した白神山地を取り囲むように広範囲にわたって採取した降水(73 サンプル)、自然水(159 サンプル)、土(64 サンプル)の各種の水・土試料について一連の化学分析試験を実施し、水・土の基本的性質から元素組成レベルに至る化学成分組成の評価を試みている。特に、降水については、水素イオン濃度(pH)と電気伝導率(EC)に加え、硫酸や硝酸イオンの溶解に着目した主要溶存化学成分の分析を通し、降水の酸性雨化の実態や自然水(溪流水、河川水、瀑布、湧水等)の供給源との観点から水質評価を試みている。自然水については、豊かなブナの原生森林を潤す水環境の視点から、その実態を主要溶存化学成分や水質タイプの分析を通して科学的に考察している。また土は水環境を支えている自然水の水質を支配する重要な因子という観点から、表層部に堆積している土を対象として、その基本的な化学物性の評価に加え、含有元素・酸化物組成や土から溶出する主要化学成分について考察を試みている。さらに第2章2.5節で記述したように、山岳域の水場で問題となっている水質汚染物質である硝酸性窒素とアンモニア性窒素について、白神山地一帯で採水した自然水を対象に考察し、供給源となる降水の化学成分や土中からの溶出化学成分の評価を通し、汚染物質の自然的起源か人為的起源かなどについても検討を試みている。

4.2 降水の特性

4.2.1 年間降水量

青森県南西部から秋田県北西部にかけて広がる白神山地の遺産登録地域は、日本海沿岸に近く、日本海側の境界線は海岸まで5～15kmほどの距離に位置している。周知のように、冬季には海側からの偏西風が白神山地一帯の標高1,000m級の山岳域に深い積雪をもたらす。図4-1と図4-2は、1995年から1999年における白神山地周辺の代表的な3地点(深浦町、八森町、藤里

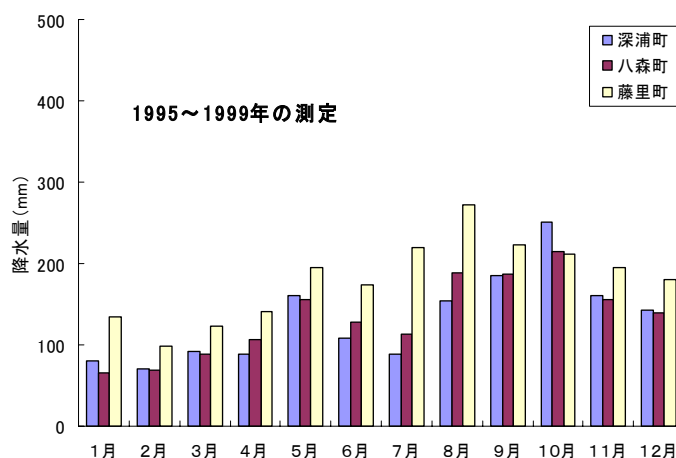


図4-1 白神山地周辺地域の平均月間降水量

町)で観測された5年間の平均月間降水量と平均年間累積降水量を示している¹⁸⁾。青森県側にある深浦町は遺産登録地域の北側、八森町は西側に、また秋田県側の藤里町は遺産地域の南側に位置している。測定値は遺産登録地域外の各町内の町役場で計測されたもので、高所山岳地帯に位置する遺産登録地域ではさらに高い値が観測されるものと推察されるが、参考の目安として記述している。図 4-1

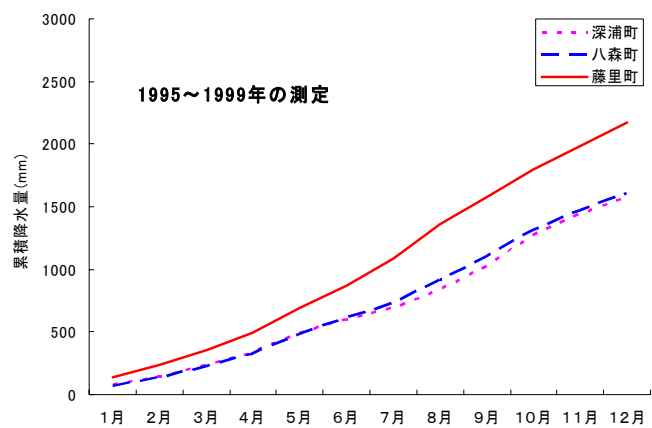


図 4-2 白神山地周辺地域の平均年間累積降水量

に示す月別の降水量をみると、3地点で毎月の降水量には多少差異はあるが、いずれの地点においても8、9、10月頃に200mmほどをピークとした降水状況が認められる。図 4-2 に示す各月毎に累積した降水量をみると、青森県側の深浦町と八森町では、累積降水量の曲線はほとんど一致し、年間降水量はほぼ1,600mmに達し、我が国の全国平均年間降水量1,600～1,700mmに近いことがわかる。これに対して南側にあたる秋田県藤里町では、年間降水量2167mmで全国平均より3～4割高い降水量が観測されている。藤里町は粕毛川と琴藤川の源流域となっている小岳や冷水岳などの標高1,000m級の高峰を北側背後にもつ谷のような地形に位置しているため日本海側から流れて来る気流が谷地形に沿って押し上げられ、多量の降水をもたらすと考えられる。特に1月と7月の月間降水量は、他の2地点でのおよそ2倍を記録している。ちなみに以上3地点の観測結果はあくまでも里の結果であるが、町役場の人の話では、測定値の入手は難しいが遺産登録地域内の山岳域では、少なくとも里の倍以上の降水量はあるとのことであった。

4. 2. 2 化学組成

白神山地の自然遺産登録地域を囲むように周辺一帯で2001年に43サンプル、2004年に30サンプル、総計73サンプルの降水の採水地点を図 4-3 に示している。対象とした73サンプルの降水のうち、64サンプルは調査時に採水した積雪で、9サンプルが調査中に直接採水した雨水である。雨水は2001年3月に5サンプル、2004年6月に4サンプル採水している。積雪は人為的攪乱等を受けていないと思われる山岳域で採水しており、2001年3月のサンプルには融雪水も5サンプルほど含まれている。このように分析対象とした降水は、経年的に定点観測したサンプルではないので、ここでは、積雪、雨水、融雪水として形態的に区分することはせず

に、一括して降水として扱うことにした。

まず図 4-4 と図 4-5 には、73 サンプルの降水の水素イオン濃度 (pH) と電気伝導率 (EC) をプロットしている。図 4-4 に示すように白神山地の周辺一帯で採水された降水の pH は、4.5～7.4 範囲にあり、6 前後を示す値が多く、平均値は 5.83 である。ちなみに酸性雨と定義される降水の pH 値は 5.6 以下と規定されている。ここでの結果では、73 サンプルのうち 20 サンプルが 5.6 以下の値を呈し、酸性雨の範疇に入る降水となっていた。しかし酸性雨が観測された地点はニッ森周辺、白神岳周辺、天狗岳付近、水沢ダム付近、十二湖キャンプ場周辺などに散在しており、特定の地域に集中するような傾向は認められなかった。非常に難儀ではあるが、遺産登録地域での長期的な定点観測に基づいた充実したデータの蓄積は必要ではあり、降水の pH の年間平均値が全国平均で 4 台である昨今の実情を鑑みると、本研究での分析結果からでは、白神山地一帯は降水の酸性雨化現象の進行度合が比較的低い地域であると判断できる。

次に図 4-5 に示す降水の電気伝導率 (EC) をみると、4～193 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 範囲にあり、平均値は 44.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ではあるが、測定値はかなり広範囲にわたっている。電気伝導率は降水中に溶解しているイオン量の多少の目安

となる指標であることから、その値がゼロに近いほど溶存イオン量の少ない純水に近い水であることを示唆している。降水は河川水、湧水、瀑布水などの地表水や地下浸透水などの水形態

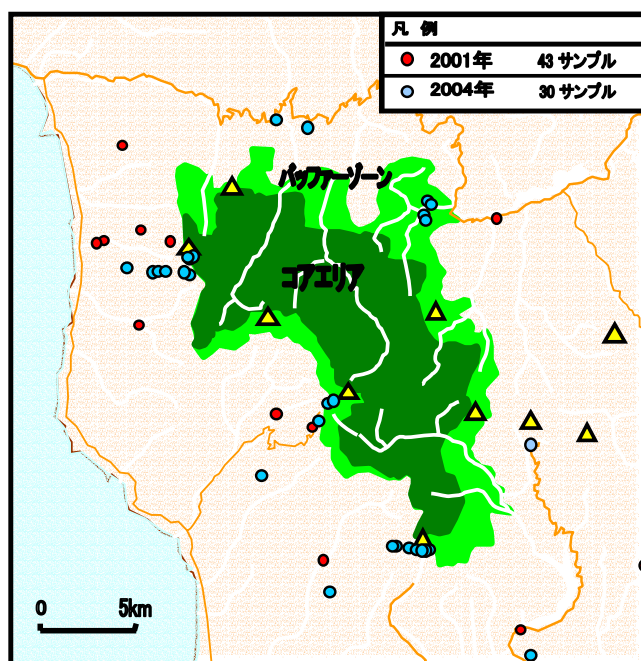


図 4-3 白神山地における降水の採取位置

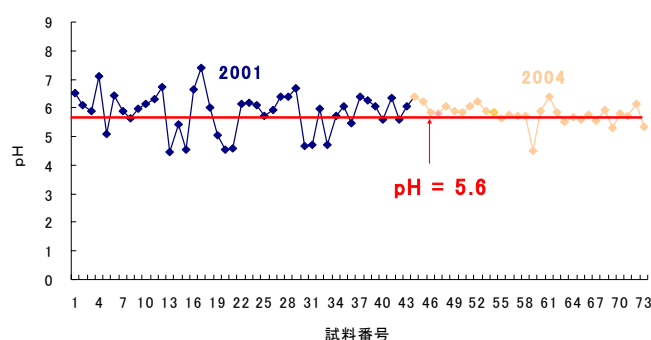


図 4-4 降水の水素イオン濃度 (pH)

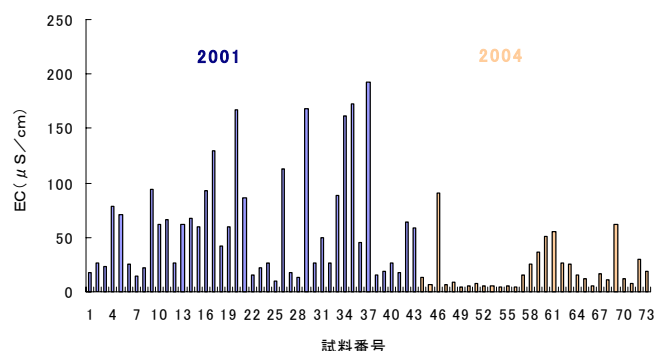
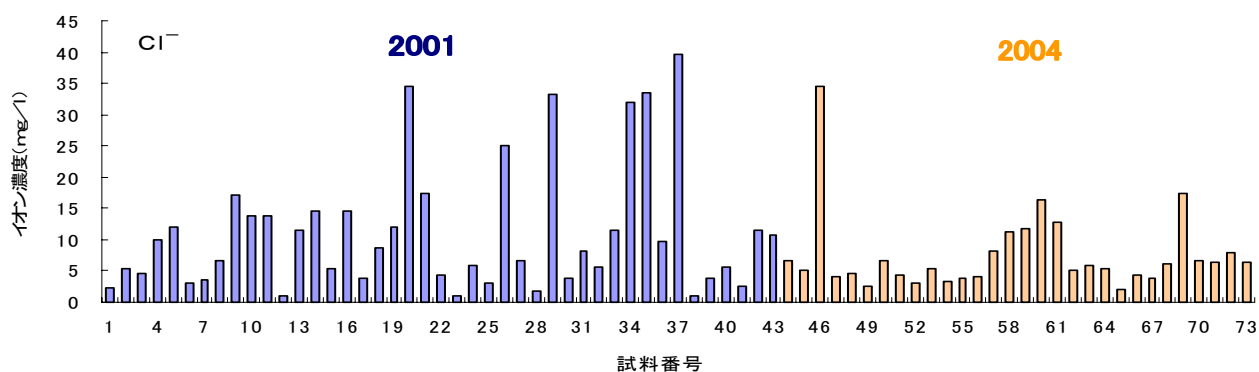
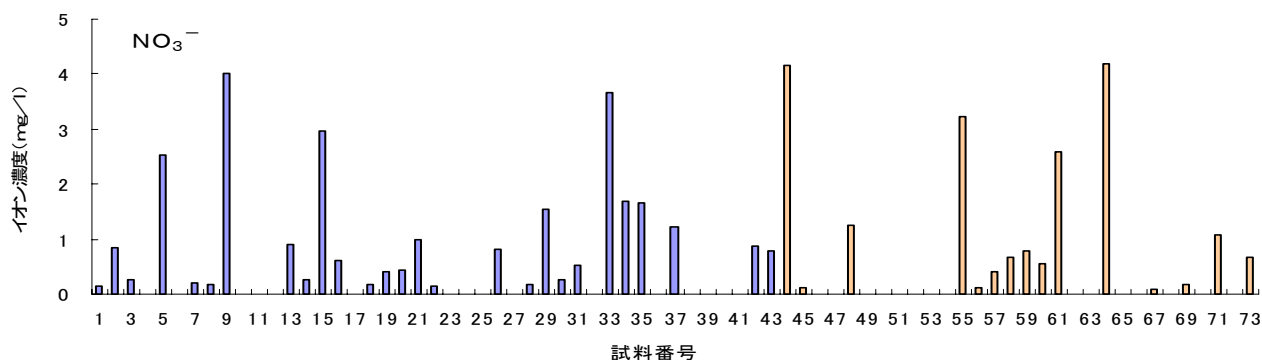


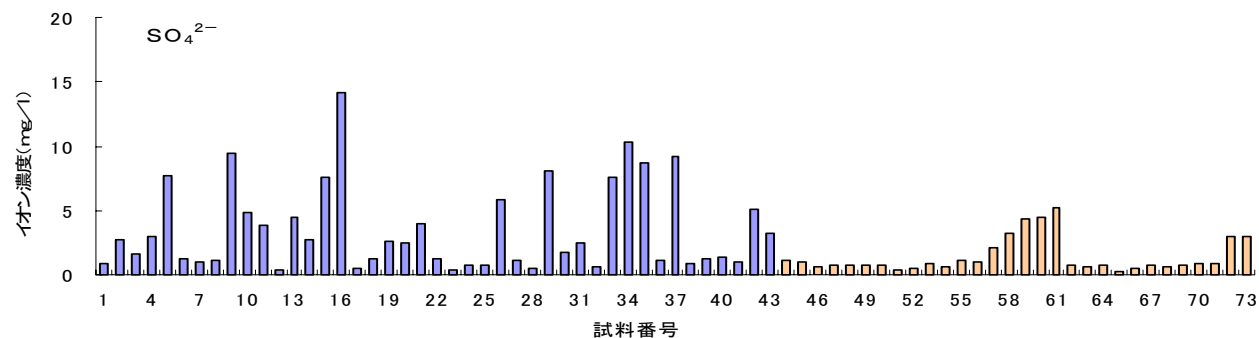
図 4-5 降水の電気伝導率 (EC)



(a) 塩素イオン



(b) 硝酸イオン

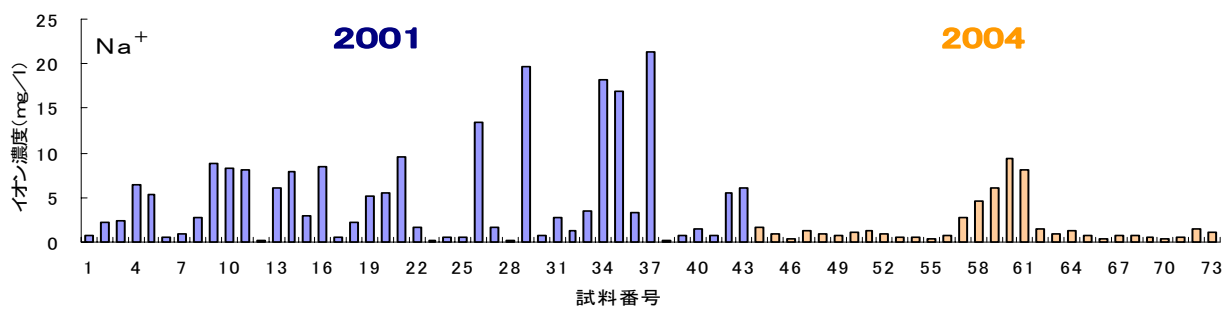


(c) 硫酸イオン

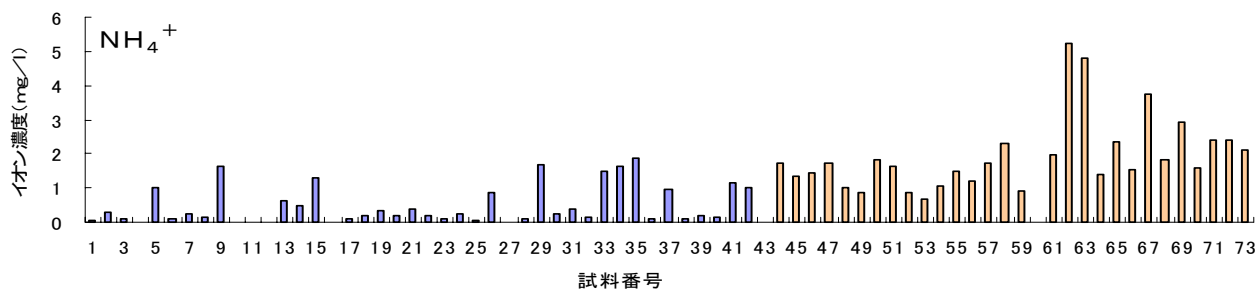
図 4-6 降水の溶存陰イオン

に比較して、土壌、岩石、植物等の固体物質などとの接触が少ないことから、一般に多くの水形態の中でも電気伝導率の低い範疇に分類される。しかし近年の大気汚染に伴う化学物質の溶解や沿岸域での海塩粒子飛沫の混入などによって、かなり高い電気伝導率を呈する降水も観測される。図 4-5 で、 $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の高い電気伝導率を示した降水は、後述するが、海塩粒子飛沫混入の影響が大きいと思われ、降水中から比較的高い濃度で、ナトリウムイオン (Na^+) や塩素イオン (Cl^-) が検出される。一方、電気伝導率が $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下のかなり低い、高所山岳域特有の純水に近い降水も検出される。

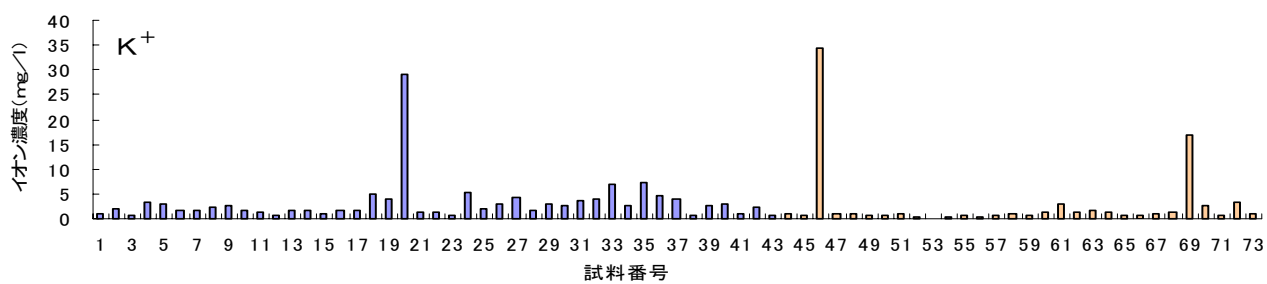
そこで、降水に溶解している主要なイオン濃度の状況を陰イオンと陽イオンに分けてそれぞれ



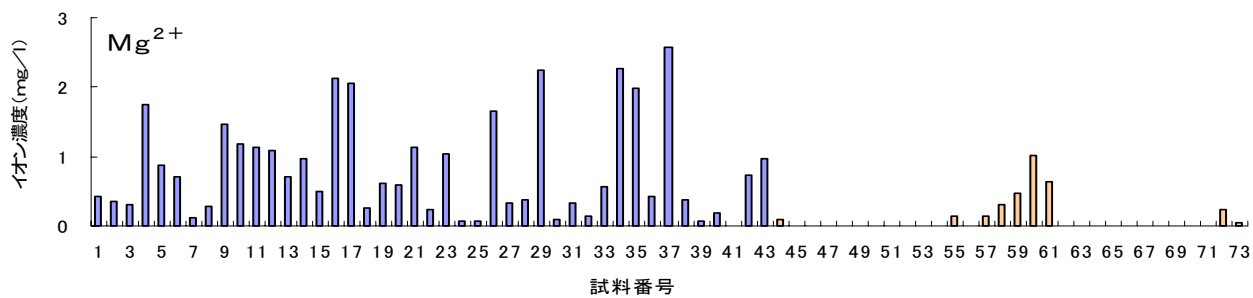
(a) ナトリウムイオン



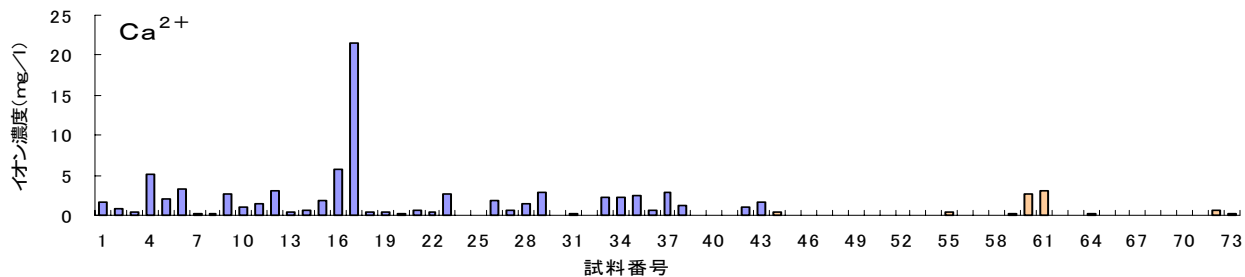
(b) アンモニウムイオン



(c) カリウムイオン



(d) マグネシウムイオン



(e) カルシウムイオン

図 4-7 降水の溶存陽イオン

れプロットしたのが図 4-6 と図 4-7 である。図 4-6 の陰イオンでは塩素イオン(Cl^-)、硝酸イオン(NO_3^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})を、図 4-7 の陽イオンでは一価のナトリウムイオン(Na^+)、アンモニウムイオン(NH_4^+)、カリウムイオン(K^+)と二価のマグネシウムイオン(Mg^{2+})、カルシウムイオン(Ca^{2+})である。白神山地における降水の溶存化学成分の特徴としては、まず地域が日本海側に近接した地理環境にあることから、陰イオンでは塩素イオン、陽イオンではナトリウムイオンが他のイオンに比較して 1 オーダ(約 10 倍)ほど高いことである。各サンプル間で濃度にはかなりの差異は認められるが、概ね塩素イオンは 20mg/l、ナトリウムイオンは 10mg/l 範囲内で検出される場合が多いが、中にはその値を超えて突出した値を示すサンプルもある。カリウムイオンは 5mg/l 範囲内で 2mg/l 以下の濃度が大半であるが、数サンプルでは 15mg/l を超える突出した値が検出されている。カリウムイオンは樹木の表面を流下した幹流水などで高い濃度を示すことから、積雪過程などで枝葉の細片などが混入し、その成分から溶出した可能性が考えられる。マグネシウムイオンは 3mg/l 範囲、カルシウムイオンは 1 サンプル突出した値を示しているが 5mg/l 範囲の濃度で、両イオンもまた降水の場合には、海塩粒子飛沫に起因しているところが多い。アンモニウムイオンは家畜の排泄物など畜産養牧場から発生する臭気などが大きな要因とみなされおり、降水後土中で酸化すると硝酸イオンに変態する際、水素イオン(H^+)を放出して地下水や土壌を酸性化することから、大気汚染観測ではモニタリングの必要なイオンとされている。大半のサンプルは濃度 2mg/l 範囲と低いが平均値は 1.04mg/l で、ほとんどのサンプルで検出される。特に試料番号 44 以降のサンプルで比較的高い値が検出されている。これらのサンプルはいずれも 2004 年 6 月の晩春季の調査で採取した積雪であり、比較的長く残雪状態で堆積していることから腐植や分解途上の植物細片や昆虫などの小生物の死骸効果によって高い値が検出された可能性もあるが、家畜養牧場などの位置調査を行っていないので、明確な理由は不明である。さらに酸性雨の観点から最も注目される降水中の溶存イオンは硝酸と硫酸イオンである。特に両イオンで、硝酸イオンは自然界に存在しない人為的活動(車両排気ガスや工場煤煙排煙などの化石燃料の燃焼)に起因して生成される汚染物質である。白神山地でも 73 サンプル中 43 サンプル(約 60%)で検出され、その濃度は 0.1~4.18mg/l 範囲で、その平均値は 0.66mg/l であるが、14 サンプルが 1mg/l を超えた濃度となっている。降水中に溶解している硫酸イオンについては、測定された濃度には硝酸イオンの生成起源と同様の人為的要因の他に、海塩粒子飛沫に起因する自然的要因が加味されている。測定濃度は概ね 10mg/l 範囲で、4mg/l 以下のサンプルが多いが、硝酸イオン濃度より高い傾向を示している。

ところで図 4-8 で降水中の硫酸イオン(SO_4^{2-})と硝酸イオン(NO_3^-)の濃度比率をみると、かな

りばらつきはあるが概ね 1:0.22 と近似され、硫酸イオン濃度の比率がかなり高いことがわかる。一般に硝酸イオンは車両排気ガス、硫酸イオンは工場・廃棄物処理場の煤煙排煙による影響が大きいといわれており、大都市圏などの交通網の発達した地域では硝酸系の降水が観測される。また海側に近接した地域では、ナトリウムや塩素イオン濃度が高くなるのと同様に、硫酸イオン濃度の比較的高い降水が観測される。そこで硫酸イオンには人為的要因に加え、海塩粒子飛沫からの供給や火山噴火による自然界からの供給起源も存在するので、通常、自然界から供給される海塩粒子起源の硫酸イオン濃度はナトリウムイオン (Na^+) 濃度の 0.251 倍の濃度として算定される。これは海水の化学成分組成において硫酸イオンとナトリウムイオン濃度の平均的な比率から定められている。図 4-9 に示すようにすべてのプロットは人為的起源との境界を示す関係直線の上方に位置し、白神山地の周辺一帯においてもやはり、ナトリウム濃度から試算した海塩起源の硫酸イオン ($\text{SO}_4^{2-} = 0.251\text{Na}^+$) に加え、非海塩起源(人為的起源)の硫酸イオン (nss-SO_4^{2-}) の溶存が確認される。非海塩起源の硫酸イオン濃度は 0.12~12.01mg/l 範囲で、平均値は 1.72mg/l ある。また図 4-10 で示すように、硫酸イオンと非海塩起源の硫酸イオンの比は 1 : 0.88 と近似され、測定された硫酸イオン濃度の約 9 割が人為的要因によって生成された硫酸イオンによる濃度であることがわかる。

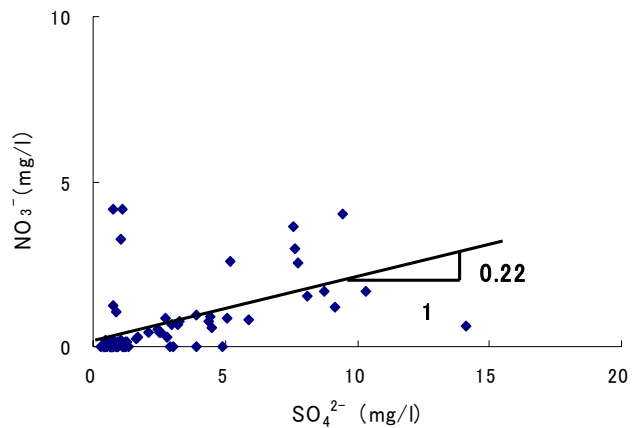


図 4-8 SO_4^{2-} 濃度と NO_3^- 濃度の関係

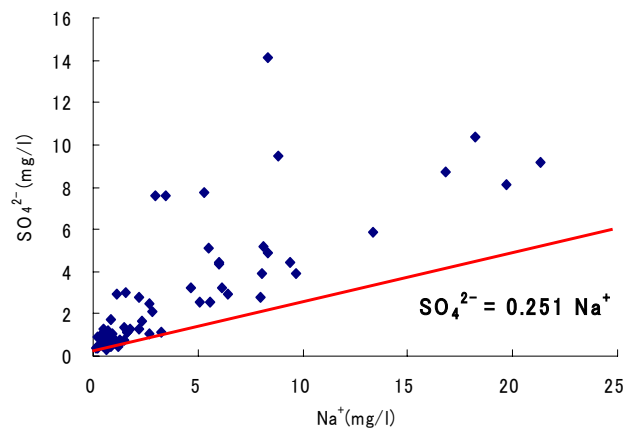


図 4-9 人為的要因に起因する SO_4^{2-} 濃度

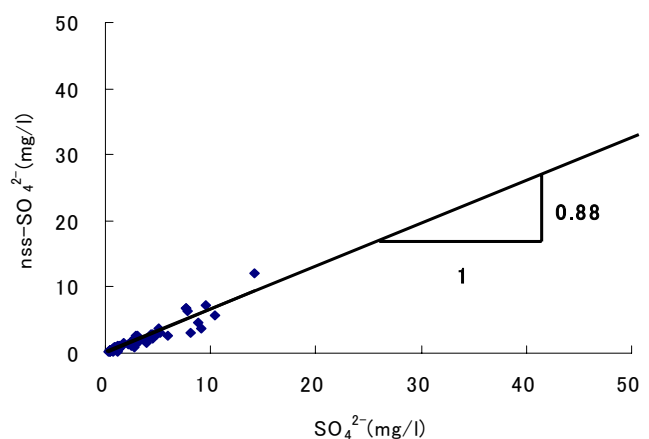


図 4-10 SO_4^{2-} 濃度と nss-SO_4^{2-} 濃度の関係

このような人為的要因に起因する硝酸、硫酸、アンモニウムイオンの溶存量の実態から判断すると、やはり、「原自然の宝庫」とされる白神山地にも、例外なく大気汚染に伴う降水の酸性雨化現象が徐々に進行しつつあることが科学的に窺える。また降水は河川水や湧水などの自然水の供給源であることから、次節での白神山地一帯における自然水の化学成分組成等を解釈する上で降水の水質を解明しておくことは重要な役割を果す。

4. 3 自然水の化学組成

4. 3. 1 自然水の概要

前節で白神山地の遺産登録地域を囲むように採水した降水の水質について、化学組成の観点からその特徴などについて論述した。水循環において降水は湖水、河川水、渓流水、瀑布水などの地表水をはじめ、地中へ浸透した地下水、再び地表に湧き出す伏流水や湧水などの自然水の供給水源となっている。降水が種々の水形態に変態したこれらの自然水は、白神山地においても昔から、多種多様な動植物や生態系を育み豊かなブナ原生森林を潤してきた。調査では降水と同様に、白神山地の自然遺産登録地域を取り囲むように、広範囲にわたって自

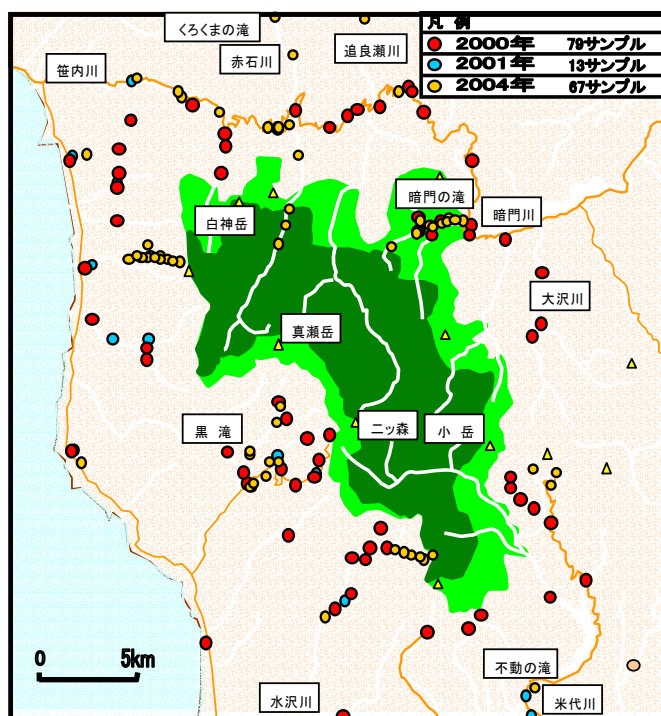


図 4-11 白神山地における自然水の採取位置

然水の採水を試みている(図 4-11)。2000 年 8 月には 79 サンプル、2001 年 3 月には 13 サンプル、2004 年 4、6、7 月の 3 度の調査では 67 サンプルを採水し、本節での考察対象とした自然水の総数は 159 サンプルである。自然水の採水は、主に白神岳、ニッ森、真瀬岳、小岳などの登山道沿いの溪流や溪谷など、また赤石川、追良瀬川、笹内川、暗門川、大沢川、米代川、水沢川などの河川沿いの河岸など、さらにくろくまの滝、暗門の滝、不動滝、黒滝などの大小様々な瀑布の滝壺などで実施し、自然水の水素イオン濃度(pH)、電気伝導率(EC)、水温(T)の現地計測に加え、採水地点の標高を記録した。採水地点の標高は 5~830m 範囲に及び、遺産登録地域の山岳域から山岳域を源流とした河川が日本海に注ぐ海岸沿いの河口付近にまで達している。なお自然環境保全の立場から「入山マナー」を徹底することが告示されていること、また原生

林に踏み入ることや急峻な溪流登りなどを強いられるかなり危険と判断される採水踏査は控えたことから、登山道や歩道のほとんど整備されていない核心地域(コアエリア)での採水は難しかった。採水した自然水の水形態は河川水と溪流水の流水が 133 サンプル、瀑布水が 13 サンプル、湧水が 11 サンプル、湖水が 1 サンプル、地下水が 1 サンプルで、地下水を除いたサンプルは基本的には地表水なので、本研究では一括して自然水として扱い、敢えて水形態に分類して水質評価は試みていない。

4. 3. 2 水素イオン濃度 (pH) と電気伝導率 (EC)

白神山地の自然遺産登録地域を取り囲む 159 箇所の採水地点で、現地計測した一連の自然水の水素イオン濃度 (pH) と電気伝導率 (EC) を採水地点の標高との関係で、図 4-12 と図 4-13 にそれぞれプロットしている。自然水の pH は採水地点の位置や標高にかかわらず、ほとんど 6.33~7.81 範囲の値をとり、サンプル数の 8 割以上の自然水が 6.8 ~7.2 範囲の弱酸性から弱アルカリ性を呈しており、その平均値は 7.04 とほとんど中性の水素イオン濃度になっていることがわかる。前節の図 4-4 で記述したように降水の場合、6 前後の pH が大半で、その平均値が 5.83 と自然水の 7.04 に比較して 1.2(水素イオン濃度に換算して約 16 倍)ほど酸性側にある。このことは、降水が河川水、溪流水、瀑布水、湧水などの自然水に水形

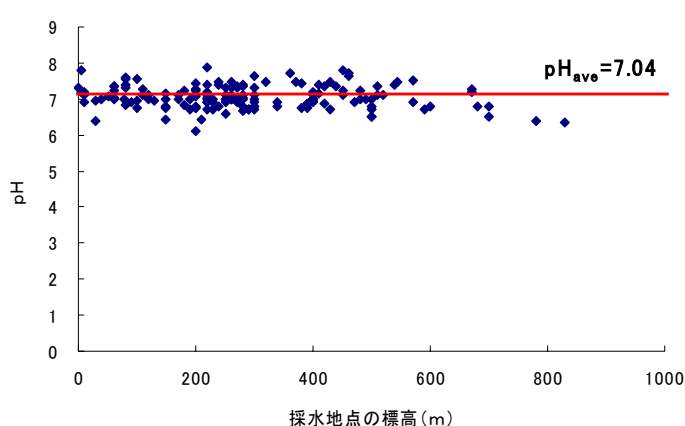


図 4-12 自然水の pH と標高の関係

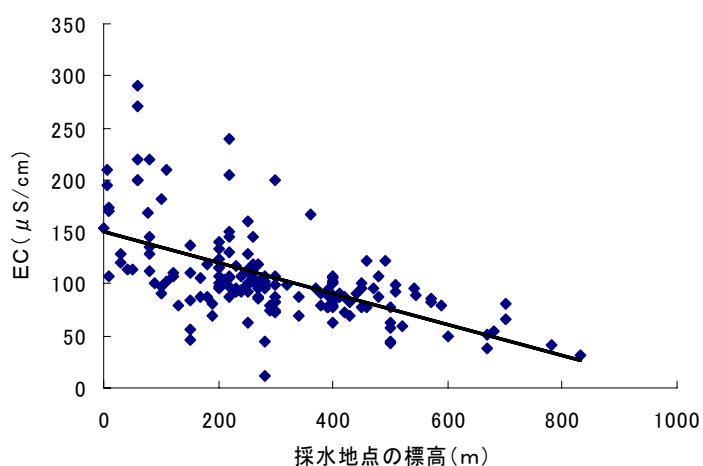


図 4-13 自然水の EC と標高の関係

態を変態し地表面や地中などを流下・浸透する過程で水質に変容が生じたことを意味している。そこで図 4-13 に示す自然水に溶解している化学成分の溶存量の簡易的な目安となる電気伝導率 (EC) をみると、測定値は 11~270 μ S/cm 範囲にあり、平均値は 106 μ S/cm で、大半の自然水

は $100 \mu\text{S/cm}$ 前後の値を呈している．しかし測定値にはかなりのばらつきはあるが、緩衝地域（バッファゾーン）や登録地域境界の標高 $600\sim 800\text{m}$ 付近の自然水では、 $50 \mu\text{S/cm}$ 前後のかなり低い電気伝導率を示し、採水地点の標高との間には相関的な傾向が認められる．それは一般に、高い標高に位置する自然水ほど降水に近い水質的な性質が潜在しているためと思われる．ちなみに標高 600m 以上で採水したニッ森登山道途中の渓流水 2 地点（標高 700m 、 780m ）、天狗峠付近の渓流水 2 地点（標高 680m と 700m ）、小岳登山道途中の渓流水 4 地点（標高 600m 、 670m 、 830m ）の電気伝導率は、 $31\sim 81 \mu\text{S/cm}$ 範囲にあった．しかし 159 サンプルの中で $11 \mu\text{S/cm}$ の最小値を示した自然水は、暗門の滝途中の渓流水で、標高は 280m とそれほど高所ではなかったが、採水時期が 4 月であり降水に近い雪解け水であったことも考えられる．電気伝導率は化学成分の溶存量の指標であることから、当然、採水地点の標高との関係よりもむしろ、溶存化学成分量との間に強い相関性の存在していることが予想できる．自然水に溶解している主要化学成分の定量的評価については後述するが、主要な溶存陰陽イオンの全イオン濃度を電気伝導率との関係で図 4-14 にプロットしている．数サンプルの自然水の結果はかなりかけ離れているが、大半の自然水において標高よりもむしろ、全イオン濃度との間に良好な直線的相関性の存在していることが確認できる．自然水の電気伝導率の計測（ポケット式小型もある）は、現地においても極めて簡便なので、全イオン濃度と電気伝導率との間の相関式を作成しておく、それを検量線のように利用することによって、急峻な現地を巡回しながら水質の急変の察知や水質変動の簡便的なモニタリングにも役立てることができる．

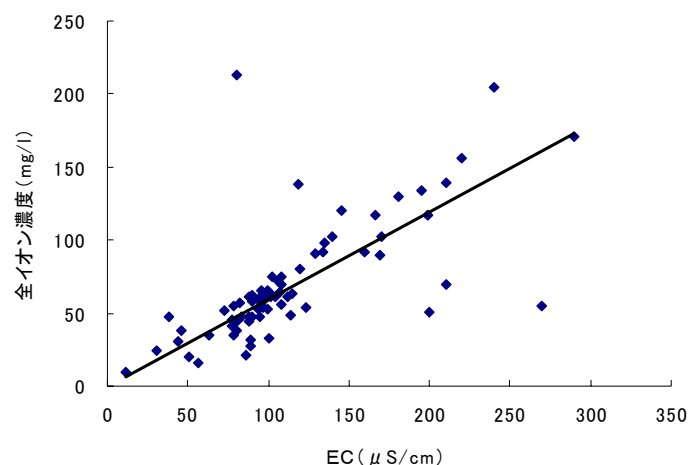
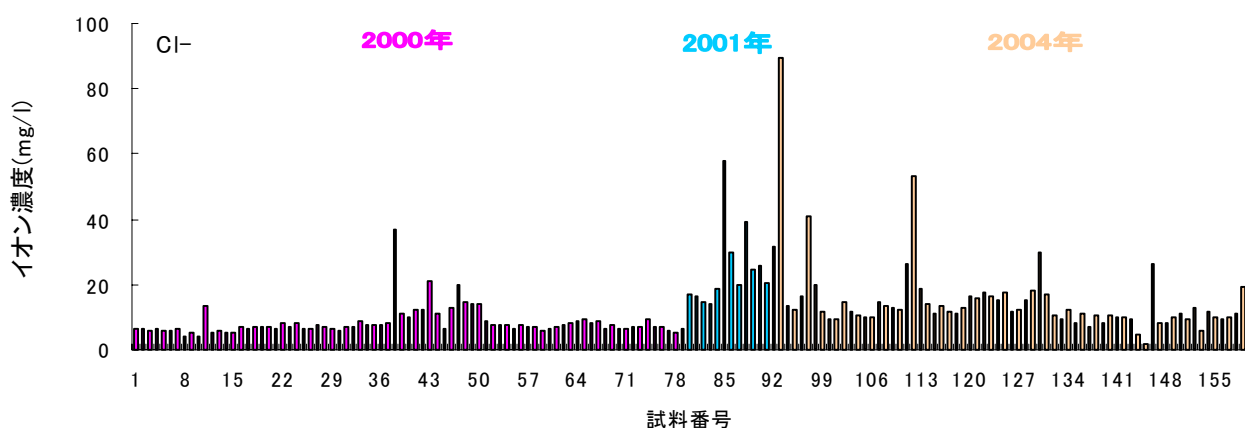


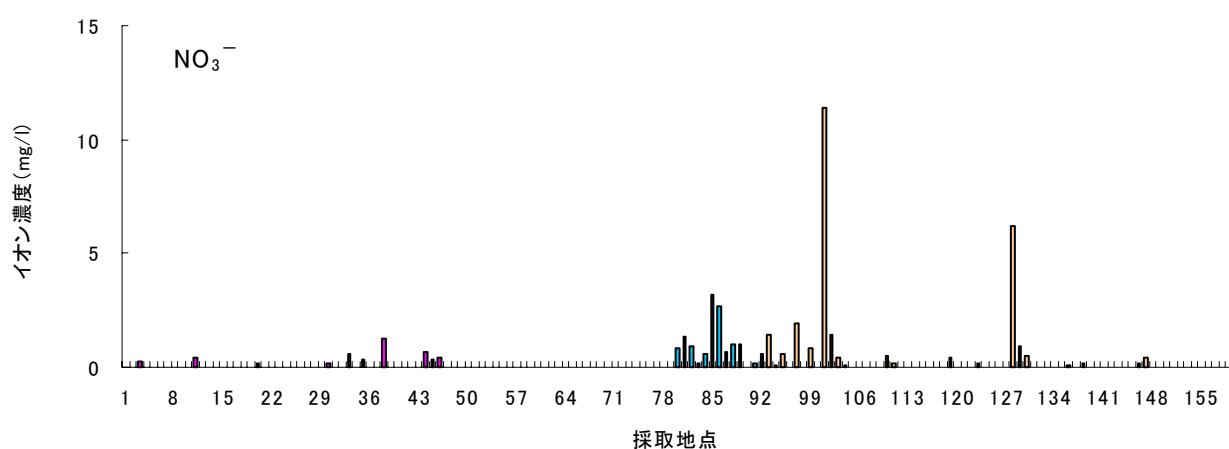
図 4-14 自然水の全イオン濃度と EC の関係

4. 3. 3 主要溶存化学成分

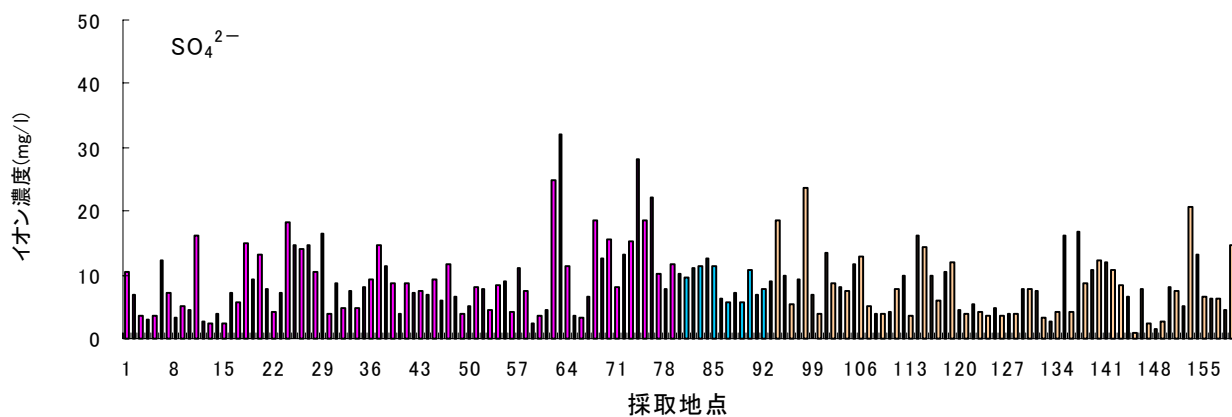
本節では、自然遺産登録地域の周辺一帯で採水した 159 サンプルの自然水の主要溶存化学成分の定量的評価を通して、白神山地での山岳森林地帯の水環境を支える自然水の水質的な特性について論述している．ここでは主要溶存化学成分としては、陰イオンでは塩素イオン (Cl^-)、硝酸イオン (NO_3^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-}) の 3 態、陽イオンではナトリウムイオン (Na^+)、カリウ



(a) 塩素イオン



(b) 硝酸イオン



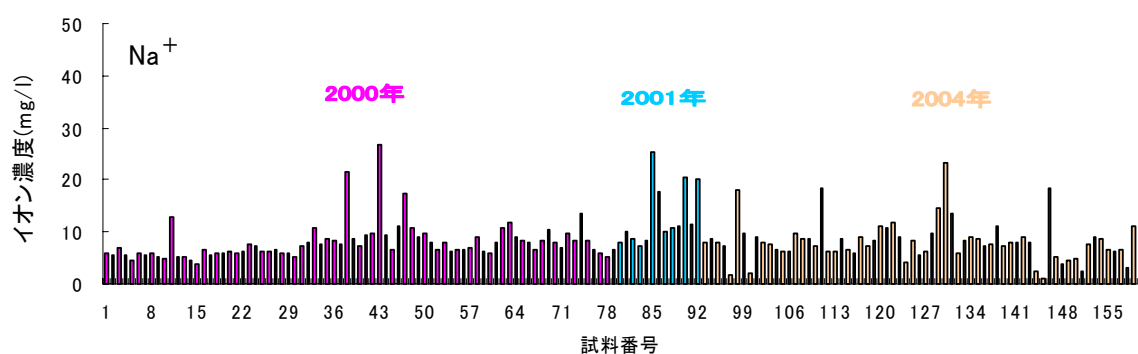
(c) 硫酸イオン

図 4-15 白神山地一帯での自然水の主要陰イオン濃度

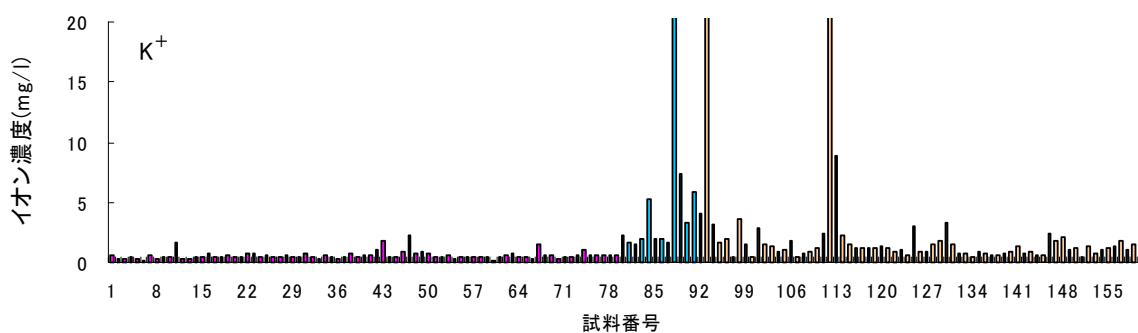
ムイオン(K^+)、マグネシウムイオン(Mg^{2+})、カルシウムイオン(Ca^{2+})の4態を対象としている。

図 4-15 と図 4-16 には、各自然水の陰・陽イオンの溶存濃度の状況を 2000 年、2001 年、2004 年の採水年に色分けして示している。

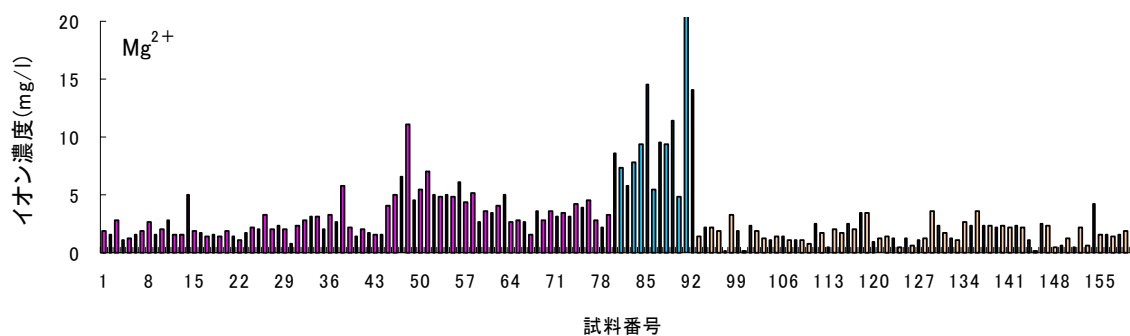
まず各陰イオン (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) の溶存濃度について着目する。塩素イオン (Cl^-) 濃



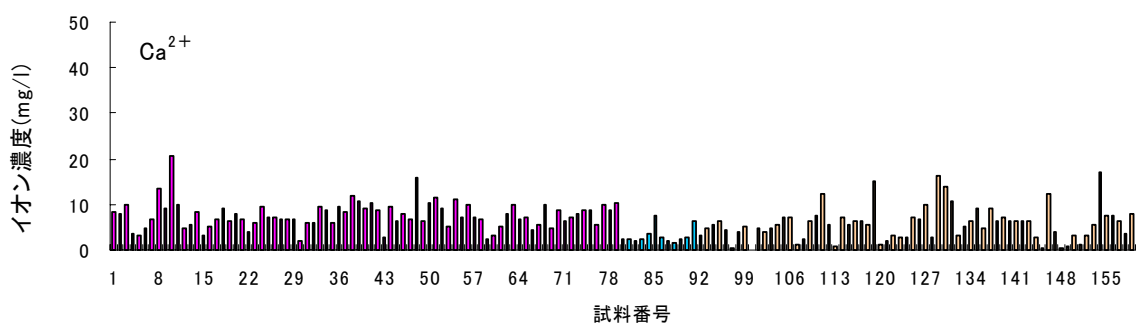
(a) ナトリウムイオン



(b) カリウムイオン



(c) マグネシウムイオン



(d) カルシウムイオン

図 4-16 白神山地一帯での自然水の主要陽イオン濃度

度は、4.11～89.37mg/l 範囲にあり、平均値は 12.46mg/l である．ほとんどの自然水は 20mg/l 範囲にあり 10mg/l 前後の濃度を示している．50mg/l を超える比較的高い濃度を示した地点の自然水は八森町お殿水(湧水)で 58.13mg/l、ニッ森登山道途中の真瀬川(河川水)で 53.32mg/l、水沢ダム途中の水沢川(河川水)で 89.37mg/l である．またキャンプ場のある十二湖周辺の河川水と湧水でも 30mg/l 前後の比較的高い濃度が検出されている．これらの採水地点はいずれも日本海側に位置している．住宅地や観光地など比較的人口の集中する地域では、生活排水や下水などの雑排水などの混入による人為的要因が塩素イオンの供給起源となる場合もあるが、恒常的な人為的活動のほとんどない山岳域と平野部でも海側に近い地点での自然水が大半であることから、人為的要因によるよりはむしろ、供給起源の主流は海塩起源と判断するのが妥当と思われる．海塩起源による自然水への主な供給は、大気中に飛散・拡散した海塩粒子を溶解した降水が、河川水や湖水などの地表水に直接降下することや、樹木や土壌表層部に付着・吸着した海塩粒子を降水が洗い流し自然水に流入することでなされるといわれている．

自然水の採水地点は主に遺産登録地域の山岳部から海側平野部に分布しており、採水地点の標高は海側から東方の山岳部に向かって概ね高くなる傾向にある．そこで自然水への海塩粒子の影響をみるため、海岸からの距離のかわりに標高との関係で塩素イオン濃度をプロットしたのが図 4-17 である．標高の高い採水地点は海から遠く離れた山岳部にあることから、海塩粒子効果は小さいと予想していたように、やはり自然水に溶存している塩素イオン濃度は少なく、標高の低い海側に近い自然水に比較して、海塩粒子効果が低減する傾向にあることがわかる．

硝酸イオン (NO_3^-) は 159 サンプル中 41 サンプル(約 26%)で検出され、その濃度のほとんどは 2mg/l 範囲の低い値を示した．比較的高い濃度を示した自然水は、秋田県藤里町にある県指

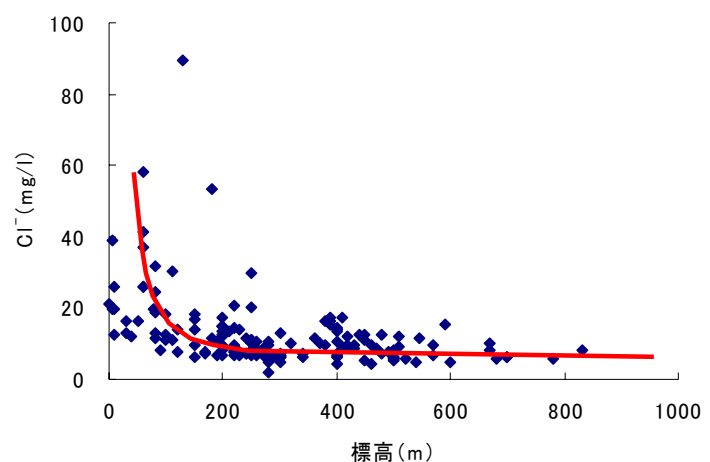


図 4-17 Cl^- 濃度と標高との関係

定の天然記念物「権現の大イチョウ」脇の河川水(大イチョウ脇を流下する小流)で 11.42mg/l、白神岳登山道マテ山コース最後の水場の湧水で 6.23mg/l であった．硝酸イオン(硝酸性窒素)は、自然的要因よりもむしろ人為的要因が供給起源となる場合が多いため水質汚染の指標ともなっている．権現の大イチョウ脇の河川水については、付近に田畑が広がっているため肥料や

農薬散布などの影響も考えられるが、その主因は不明である。白神岳登山道の最後の水場については、自然界からの供給も十分考えられるが、近年、人為的要因とされる山岳域の水場周辺の水質汚染が全国的問題になっていることから、モニタリングを継続して明確な原因を解明することが望まれる。基本的には、白神山地山岳域の自然水では硝酸イオンは非検出の場合が多く、検出された場合でも水質汚染的に問題になるケースはなく、その要因は自然起源によると考えている。後述する 4.5 節では、硝酸性窒素とアンモニア性窒素に関して再整理し、白神山地山岳域での汚染問題について考察している。

次に硫酸イオン (SO_4^{2-}) 濃度をみると、ほとんどの自然水は 20mg/l 範囲で検出され、平均値は 8.77mg/l である。硫酸イオンは海塩粒子起源もあるが、火山性地層が広く分布する我国では、温泉作用や岩石の風化作用で生成される硫化物や硫酸塩物質の溶解作用や加水分解作用などに起因する地層起源も主因をなしている。また塩素イオンや硝酸イオンと同様に生活排水など人為的要因による供給起源があり、汚染指標のバロメータともなっている。ここではそれらの供給起源を個別に分離して論じることにはできない。図 4-18 に示すように硫酸イオン濃度を、

図 4-17 で示した塩素イオンの場合と同様に、採水地点の標高との関係でプロットすると、塩素イオンの場合と異なりかなりのばらつきが認められ、ほとんど相関的傾向はみられない。このことは上述したように、自然水への硫酸イオンの供給は複雑で、地層や海塩粒子など種々の要因によっていることを裏付けているように思われる。

一方、図 4-16 に示す各陽イオン (Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) の溶存イオン量についてみる。ナトリウムイオン (Na^+) 濃度は、大半の自然水が 20mg/l 範囲を示し平均値は 8.45mg/l である。ナトリウムイオンはカルシウムイオンと同様、濃度的には陽イオンの中では水質を左右する主要なイオンとなっている。一般に陰イオンの塩素イオンと解離的に平衡状態に近い濃度を呈する

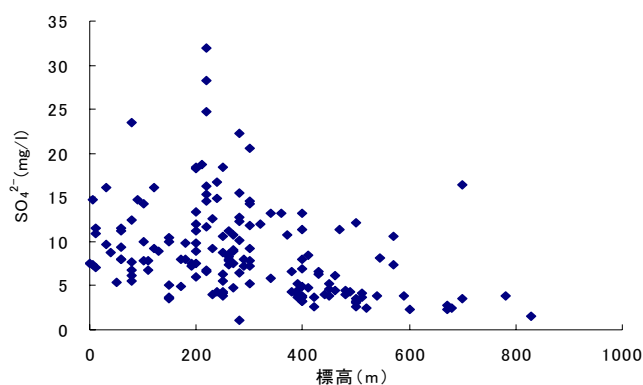


図 4-18 SO_4^{2-} 濃度と標高との関係

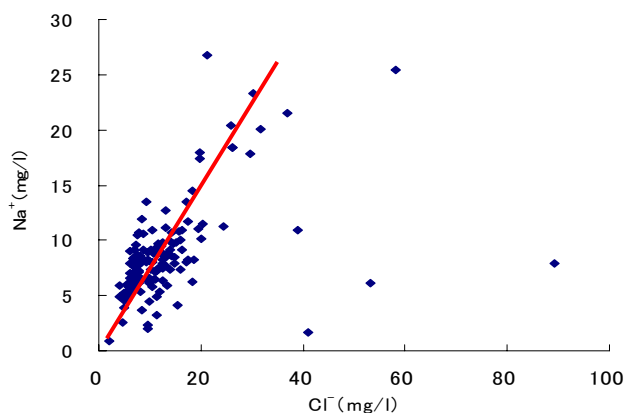


図 4-19 Na^+ 濃度と Cl^- 濃度の関係

場合が多く、海に囲まれた我が国の自然水では、その供給起源は海塩粒子の混入が主因となっている。本研究のように、特に人為的活動のほとんどない白神山地の山岳部を対象とした自然水では、図 4-19 に示すように、両イオン濃度間には線形的にかなり良好な相関性が認められる。このことはナトリウムと塩素イオンの両イオンが、濃度的に互いに平衡に近い状態で解離していることを示唆している。他の陽イオンにおいても塩素イオンや硫酸イオンのように、濃度の高い自然水は遺産登録地域の山岳側より海側に集中している傾向がある。カリウムイオン (K^+) 濃度は、2mg/l 範囲の自然水がほとんどであるが、ニッ森登山道途中の真瀬川の河川水で 48.18mg/l、水沢ダム途中の水沢川の河川水で 87.21mg/l と突出した高い値を示している。海塩粒子飛沫の影響なのか要因はよく分からないが、このような自然水では塩素イオンなども極端に高い濃度が検出されている。マグネシウムイオン (Mg^{2+}) 濃度は、ほとんどの自然水が 5mg/l 範囲でその平均値は 3.06mg/l である。カルシウムイオン (Ca^{2+}) 濃度は 10mg/l 範囲の自然水が大半でその平均値は 6.51mg/l である。

自然水に溶存するカリウム、マグネシウム、カルシウムイオンは、海側に近接した自然水の場合には海塩粒子起源によるものもあるが、山岳側の自然水の場合には岩石の風化作用に起因する地層起源が主流となる。特に白神山地の山岳域は、2.3 節で記述したように、花崗岩類を基盤として砂、泥土、火山灰土などの堆積岩によって構成されている。地層基盤である花崗岩類は、雲母、長石(正長石、斜長石)、石英の一次鉱物を主体とした岩石類である。雲母はカリウム(K)とマグネシウム(Mg)、斜長石はカルシウム(Ca)の元素成分を含有している鉱物である。また地層には通常カルシウムの炭酸化物である石灰石($CaCO_3$)が含まれている。地中から二酸化炭素(CO_2)が発生し、これが地表や地中を流下・浸透する自然水に溶解すると炭酸が生成され、水は酸性化する。即ち二酸化炭素は炭酸(H_2CO_3)となり水中で解離して重炭酸イオン(HCO_3^-)に変容する。自然水に溶存したこの重炭酸イオンは岩石を溶解する化学的風化作用の機能を有している。そのため花崗岩分布地域では、重炭酸イオンの溶解作用によって、岩石を構成する雲母や長石の主要鉱物、石灰石($CaCO_3$)などから溶け出し、カリウム、マグネシウム、カルシウムのイオンが自然水に溶存することになる。一次鉱物である斜長石がさらに風化すると、モンモリロナイトやカオリンの粘土鉱物(二次鉱物)に変質する。岩石の風化度合の進展とともに、各イオンの溶解量は増加することになる。そのような岩石の風化作用のメカニズムから判断すると、当然、風化度合の進展に伴い、自然水に溶解している重炭酸イオン(HCO_3^-)濃度が高くなり、これに呼応してカルシウム(Ca^{2+})やマグネシウムイオン(Mg^{2+})濃度も高くなることが推察できる。そこで白神山地一帯で採水した 159 サンプルの自然水について、カルシウム(Ca^{2+})とマグネシ

ウムイオン (Mg^{2+}) 濃度の合濃度を重炭酸イオン (HCO_3^-) 濃度との関係で整理し、上述の検証を試みたのが図 4-20 である。両者間にはかなり良好な線形的相関性が確認でき、花崗岩類を基盤とした白神山地一帯の自然水におけるカルシウム (Ca^{2+}) やマグネシウムイオン (Mg^{2+}) の供給源は岩石風化に起因する地層起源が主流であることが裏付けられる。兵庫県六甲山の

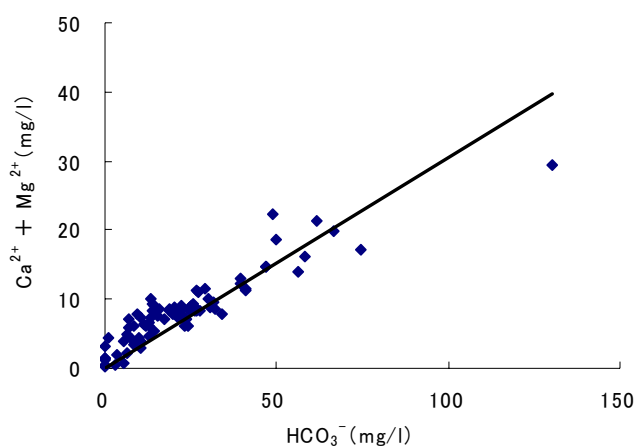


図 4-20 HCO_3^- 濃度と ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) 濃度の関係

花崗岩地帯での調査結果においても同様の指摘がなされており、自然水に溶解しているカルシウム (Ca^{2+}) とマグネシウムイオン (Mg^{2+}) の合濃度～重炭酸イオン (HCO_3^-) 濃度関係図は岩石の風化度合を判定するのに利用され、岩石崩壊発生の危険予知に役立てられている¹⁹⁾。

さらにカルシウム (Ca^{2+}) とマグネシウムイオン (Mg^{2+}) の合濃度で表示し、「水の硬さ」の指標となる全硬度 ($\text{mg/l} \approx 2.5\text{Ca}^{2+} + 4.1\text{Mg}^{2+}$) を示したのが図 4-21 である。水の硬度については、一般に、100mg/l 以下が軟水、100～200mg/l 範囲が中庸水（弱軟水）、200mg/l 以上が硬水として区分される。海に囲まれた列島中央部に山脈の走る細長い地形の我が国では、山脈

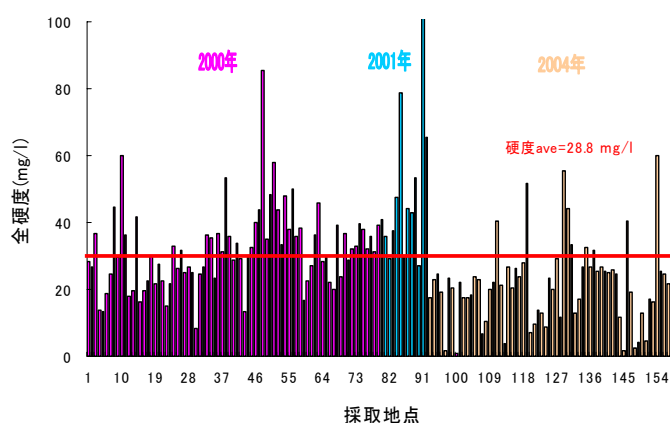


図 4-21 自然水的全硬度

に源を発する地表水や地下浸透水などが海に至るまでの流路距離や流出期間が水循環的に短いことから、石灰岩層 (CaCO_3) などが堆積する特異な地層を流下浸透しない限り、通常、我が国の自然水は軟水に分類される場合がほとんどである。白神山地一帯の自然水も 0.97～110.1mg/l 範囲で平均値は 28.8mg/l と、山岳域特有のミネラルイオン濃度のかなり低い軟水となっている。

以上のことから、自然遺産登録地域の山岳森林域に源を発して、深いブナ原生林や多種多様な動植物を育み潤す山岳側の自然水は、地層起源のミネラルイオン成分が主体で、溶存化学成分のかなり低い軟水の水質に分類されることがわかった。また海側に面しより近い地点の自然水ほど海塩粒子起源の影響を強く受けた水質を呈する傾向にあることがわかった。

4. 3. 4 水質タイプ

前節では、白神山地の山岳域を潤す自然水の水質の特徴について、pH と電気伝導率の基本的性質および主要な溶存化学成分の定量的評価を通して、各種陰・陽イオンの供給起源やその要因等について論述した。本節では白神山地一帯での自然水を水質的に分類することによって、水質の特徴をより明確に評価し解釈することを試みる。自然水の水質タイプの分類には、地下水などを扱う水環境科学分野などでよく用いられるヘキサダイアグラムとトリリニアダイアグラムを利用して考察を加える。

ヘキサダイアグラムは自然水の水質を支配している主要な溶存化学成分、即ち陰イオンは硫酸イオン(SO_4^{2-})、重炭酸イオン(HCO_3^-)、塩素イオン(Cl^-)、硝酸イオン(NO_3^-)の4態、陽イオンはマグネシウムイオン(Mg^{2+})、カルシウムイオン(Ca^{2+})、ナトリウムイオン(Na^+)、カリウムイオン(K^+)の4態を用いて、ミリ当量濃度(meq/l)で表示することによって描かれる六角図形のことである(図 4-22 参照)。鉛直な座標軸を中心にとり、左右に各陰イオンと各陽イオンをそれぞれ対比させて濃度表示し、描かれる図形の形状と面積の大きさから直観的に水質タイプが判断でき非常に有益である。図形の面積、即ち大きさは陰陽イオンの合濃度を意味しており、図 4-14 で示した電気伝導率との関係図とも対応している。電離している陰イオンと陽イオンのそれぞれの合量は、濃度的には平衡状態にあることから、両イオン域で描かれる面積は互いにほぼ等しくなる。

前節で考察した白神山地での 159 サンプルの自然水について作成したヘキサダイアグラムを図 4-22 に示している。描かれる図形の大きさが異なっても互いに相似的な形状を示す自然水は、溶存化学成分量に違いはあるが、溶解している各陰陽イオン量の比率が相対的に近似していることを意味しており、水質的には等質とみなすことができる。互いに正確に同形状や相似形状のヘキサダイアグラムを示す自然水はみられないが、概ね二つの形状に大別される。一つは、陰イオンでは重炭酸イオン(HCO_3^-)、陽イオンではカルシウムイオン(Ca^{2+})の溶存量が比較的高く、菱形やそれに類似した形状を示すグループ(例えば図 4-22 中の No.1、No.10、No.21 など)である。このような自然水は概ね Ca-HCO_3 型の水質タイプに分類できる。もう一つは、塩素イオン(Cl^-)とナトリウムイオン(Na^+)がそれぞれ重炭酸イオン(HCO_3^-)とカルシウムイオン(Ca^{2+})の溶存量に近いあるいはそれより高く台形や逆盃形などに近い形状のヘキサダイアグラムを示すグループ(例えば No.85、No.93、No.111 など)である。これらの自然水は概ね Na-Cl 型の水質タイプに分類できる。

そこでヘキサダイアグラムからの知見に基づき、自然水の水質結果をトリリニアダイアグラ

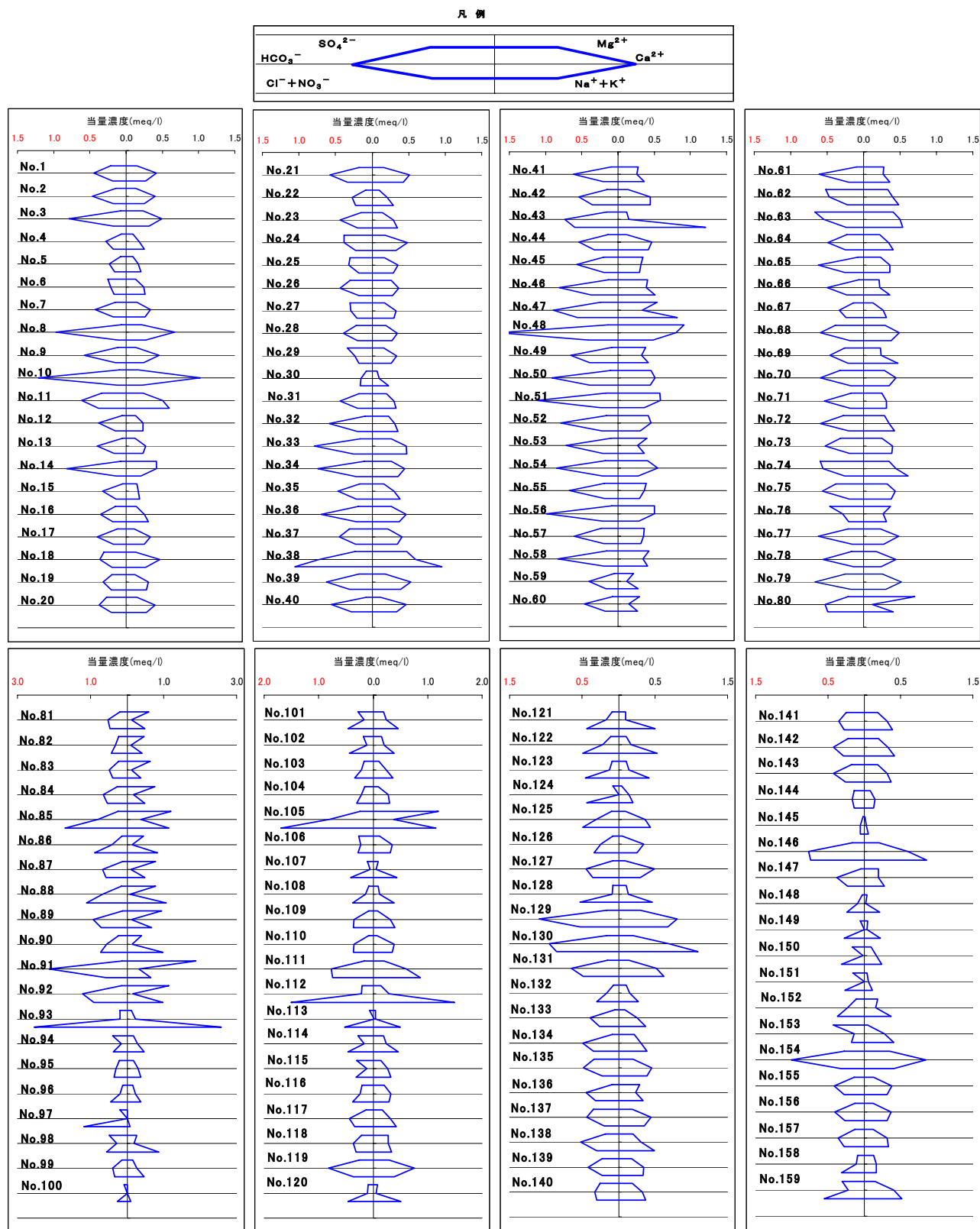


図 4-22 自然水のヘキサダイアグラム

ム上にプロットして、採水地点の標高や位置関係との関連から、水質タイプの特徴について整理したのが図 4-23 である。トリリニアダイアグラムでの成分量は各成分量を全成分量で除した

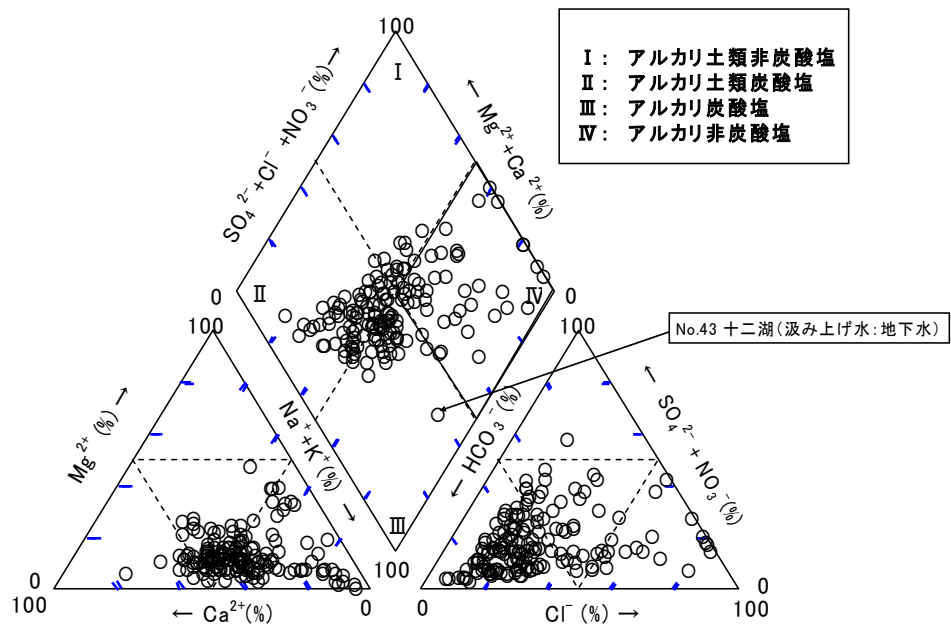
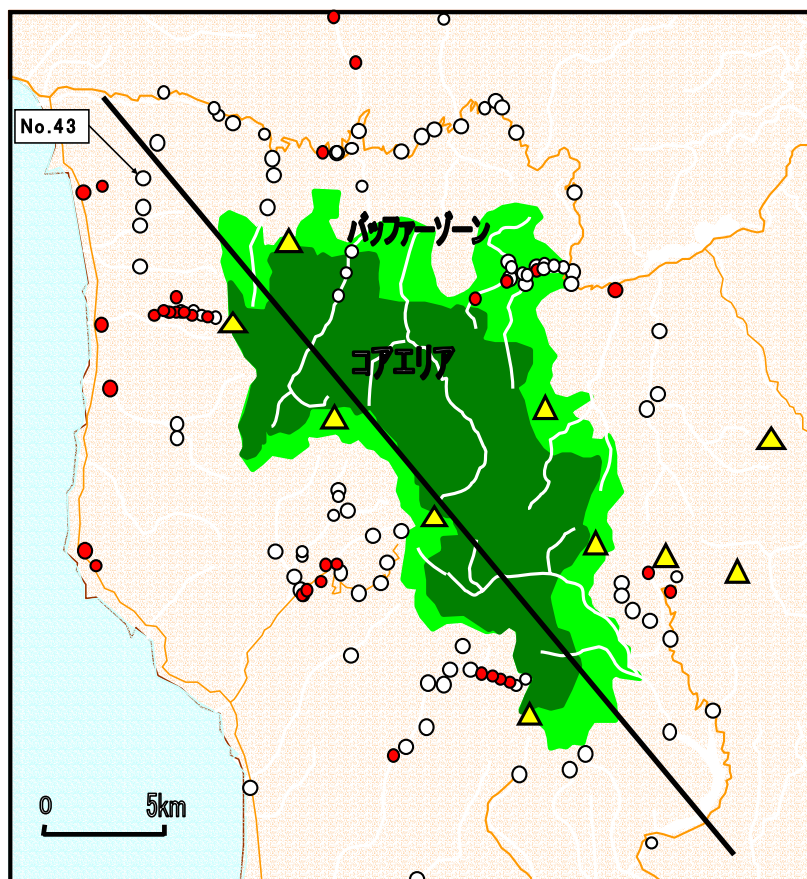


図 4-23 自然水のトリリニアダイアグラム

百分率(%)として表示している。水質を4タイプに分類するキーマイアグラムと呼ばれる菱形座標図と陰・陽イオンの成分量比率をそれぞれ表示した二つの三角座標図から構成されている。4タイプの水質はキーマイアグラム上でアルカリ土類非炭酸塩(I型)、アルカリ土類炭酸塩(II型)、アルカリ炭酸塩(III型)、アルカリ非炭酸塩(IV型)に区分され、さらに溶解している陰イオンと陽イオンの量的比率が読み取れる仕組みとなっている。通常、I型には熱水や化石水、II型には地下水、湧水、河川水、III型には停滞地下水、IV型には塩水と海水などとして、自然水の水質タイプは区分される。白神山地周辺一帯での159サンプルの自然水の水質タイプをキーマイアグラム上でみると、自然水の水質は、図4-22で記述したように、概ねII型のアルカリ土類炭酸塩とIV型のアルカリ非炭酸塩として、二つの範疇に区分されることがわかる。アルカリ非炭酸塩(IV型)の水質タイプを示した自然水の採水地点(図4-23の上段図で赤丸印)をみると、自然遺産登録地域の西方海側に多く分布しており、これらの自然水は海塩粒子の影響を強く受けてNa-Cl型の水質タイプになっていることが推察できる。一方、遺産登録地域の高所周辺や山岳東方側の大半の自然水(図4-23の上段図で白丸印)では、IIとIV型の境界付近のIとIII型もみられるが、基本的にはII型のアルカリ土類炭酸塩で、通常、山岳域の自然水(渓流水、瀑布水、湧水など)の多くが示すCa-HCO₃型となっていることがわかる。一箇所、他の水質とはかなり異なり明瞭にIII型のアルカリ炭酸塩に分類される自然水(Na.43)がある。これは十二湖付近の深井戸で汲み上げられた地下水である。停滞地下水と思われ、図4-22で示したヘキサダイアグラムの形状の特異性からも明らかなように、Na-HCO₃型の水質タイプとなっていることがわかる。

以上、自然水の水質タイプを分類し解釈することによって、白神山地一帯の水環境の実態を一層鮮明に把握するのに役立つものと確信する。

4. 4 土の化学組成

4. 4. 1 土サンプルの概要

前節では白神山地一帯での自然水について、主要溶存化学成分の定量的評価や水質タイプの分析を通して、化学組成的な特徴について考察した。自然水の水質を左右する溶存化学成分は、種々の水形態をとって自然水が浸透・流下する際、土壌や岩石などとの接触によって供給される場合がほとんどである。即ち地層を形成する土壌や岩石から溶け出した化学成分が自然水の水質を支配する重要な因子の一つとなっている。そこで本節では、自然水の水質との関連を考察する上で必須事項となる土の化学組成の評価を試みている。土の酸性度(pH)と電気伝導率(EC)の基本的な化学物性に加え、土を構成する主要元素・酸化物組成、さらに土から溶解する

イオン成分と重金属類の元素成分を分析し、土が有する化学成分の溶出能力等について考察している。

図 4-24 に示すように土サンプルの採取地点は、図 4-3 で示した自然水の地点と重複するように、白神山地の自然遺産登録地域を取り囲むように分布している。主に渓流水や瀑布などの山岳部の地表水との関連性で土の化学組成を考察することに主眼を置いているので、本研究での土サンプルは主に表層土(深さ 10～20cm 程度)を対象としている。分析対象とした土サンプルは 64 サンプルで、2000 年 8 月に 25 サンプル、2004 年 4、6、7 月に 39 サンプルを採取している。

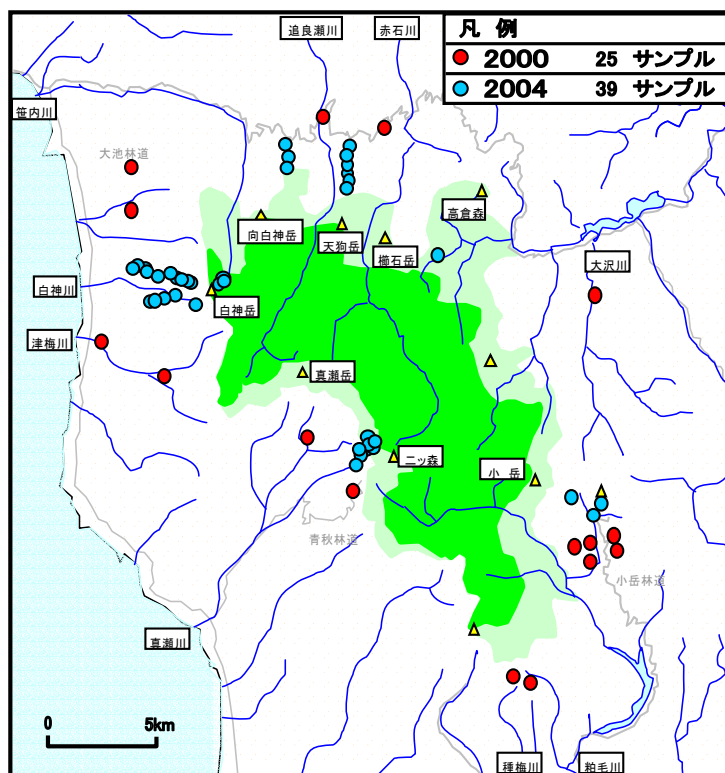


図 4-24 白神山地における土の採取位置

主に表層土は自然遺産地域に聳える白神岳、向白神岳、ニッ森、天狗岳、小岳などに向かう登山道沿いで採取している。2000 年 8 月には青秋林道沿い河川、種梅川、津梅川、濁川、追良瀬川、大沢川での自然水の採水と同時に、河岸沿いで河岸土を、また小岳林道や大池林道沿いなどのグリーンタフ地域では風化凝灰岩などを採取している。目視観察によるが 64 個の土サンプルは、表土が 51 サンプル、河岸土が 10 サンプル、風化凝灰岩などの火山性土が 3 サンプルである。表土は黒ぼく的な土やローム的な土も含まれているが、すべて厳密に土の種類を分類することはできなかった。ただ表土も含め土の採取では、後章で記述する落葉や枯葉から土壌へ供給される化学的成分を分析評価するために、表層に堆積している未分解の落葉やはできる限り除去するように努めている。

4. 4. 2 酸性度(pH)と電気伝導率(EC)

白神山地一帯で採取した一連の土サンプルについて、その水素イオン濃度(pH)と電気伝導率(EC)を図 4-25 と図 4-26 にそれぞれ示している。土の酸性度を表す pH は 3.3～7.8 範囲を呈しており、酸性土から弱アルカリ性土に至る土が表層部に堆積分布している。しかし pH が 7 台の弱アルカリ性土が 3 サンプルで、他のサンプルはいずれも 7 未満の酸性土となっている。pH が 3 台の土が 7 サンプル、4 台が 28 サンプルあり、5 未満の強酸性土に分類される土が

35 サンプルで約 55%を占めている。このような白神山地での酸性土壌の傾向は、一帯にグリーンタフ地域が広がっており、表層部に堆積している火山性土に起因しているものと思われる。ちなみに土壌の酸性化が進行すると土壌中からカルシウム、マグネシウム、ナトリウムなどの金属イオンが溶脱し、植物の栄養成分となるミネラルが奪われ成長が阻害されるといわれている。またさらに酸性化が進むと、今度はアルミニウムやマンガンなど植物にとって有害な金属の溶出を招き樹木の立ち枯れなどに発展するおそれが生じるとされており、土壌の酸性化現象は、動植物の生態系にとっては好ましい現象ではない。

図 4-26 には各土サンプルの電気伝導率(EC)の状況を表示している。土の場合、pH の計測と同様、電気伝導率の値は規定に基づいて調製した土

懸濁液を用いて測定することから、土粒子から水液に溶解した化学成分量の目安となる。即ち土の化学成分溶出能力の程度を判定する指標ともなる。図をみると電気伝導率が $100 \mu\text{S/cm}$ を超えるかなり高い溶出能力を有する土サンプルもあるが、総じて $50 \mu\text{S/cm}$ 範囲のサンプルがほ

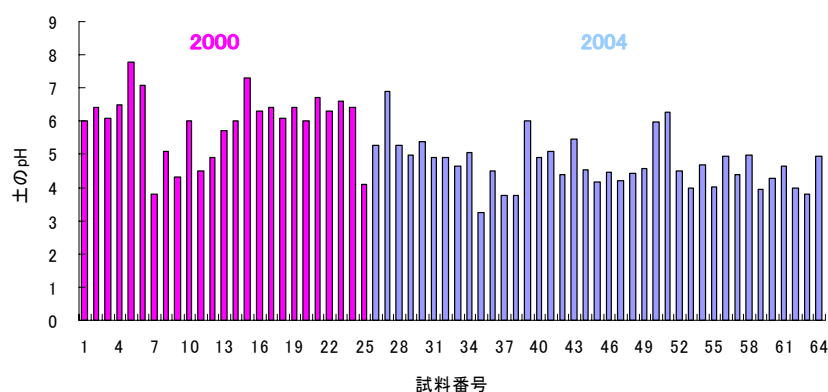


図 4-25 土の pH

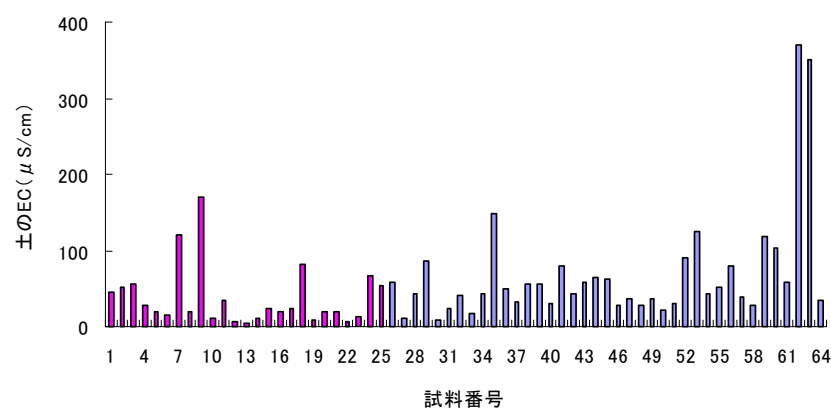


図 4-26 土の EC

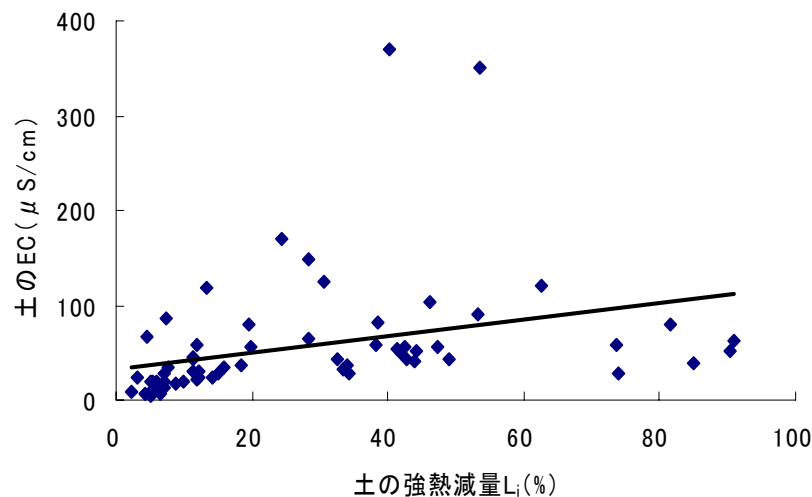


図 4-27 土の EC と強熱減量の関係

とんどである．水流付近の河岸堆積土や粒径の粗い砂質系の土などでは、溶出能力が低く電気伝導率は $10\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下の非常に低い値を示した．また土サンプルが表層土なので腐植分解途上の植物などが混在し、化学成分の溶出能力が高くなる可能性も考えられる．そこで土に含有されている腐植有機物の指標である強熱減量(L_i)との関係でプロットしたのが図 4-27 である．かなりばらつきもあるが、 L_i 値が高い土ほど EC 値も高く、腐植有機物の存在も化学成分の溶出性に影響を及ぼすことが予想される．また前節の図 4-13 で示した自然水の EC 値と比較すると、特に標高 400m 以上の山岳域での自然水では $50\sim 100\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 範囲にあるが、土サンプル(標高 500m 以上のサンプルが主体)ではそれより多少低い $50\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 前後あるいはそれ以下の値となっている．なお土の化学成分の溶出能力については、土溶出試験より得られたミネラル成分や重金属類の元素成分の分析結果に基づいて、後節で詳述している．

4. 4. 3 含有元素・酸化物組成

自然水の水質を左右する土壌からの化学成分の溶出機能に関する考察をさらに深めるために、土を構成している主要な元素組成を解明し把握することが有益と考えられる．そこでここでは、土の溶出化学成分の分析と並行して実施した蛍光 X 線回折の分析結果に基づいて、土の含有元素組成について考察を試みる．なお、土中ではほとんどの主要元素は酸素と結合した化合物(鉱物)の形態で存在するため、元素組成の評価に加え、酸化物組成としても検討を加えている．分析では簡便的定量分析(ファンダメンタルパラメータ法：FP 法)を実施している．FP 法では元素周期律表で元素番号 6 番の炭素(C)から 92 番のウラン(U)までの含有元素が定量分析され、各主要元素の含有量は質量百分率(%)で算定し表示される．

白神山地一帯で採取した 64 個の土サンプルについての主要な含有元素と酸化物組成を図 4-28 と図 4-29 にそれぞれ整理している．各土サンプルにおいて、酸素(O)の含有量が概ね 40% 前後と最も高い場合がほとんどで、さらに主要元素としてはケイ素(Si)と炭素(C)で、この三者の元素でほぼ 70~80% の含有量を占め、90% 以上に達する土サンプルもみられる．このように三者の元素が土を構成する主要元素となっていることは、白神山地の表層部に堆積している土に特有の事象ではなく、特殊な元素鉱物からなる地層が堆積している場合を除き、むしろ多くの地層の土や岩石で分析される一般的な結果であるといえる．なお炭素成分は土や岩石を構成している各種鉱物中にも含有されているが、表層土などでは腐植分解途上の有機物の遺骸組織をも構成している成分元素でもあることから、その起源を検証するために図 4-30 には、炭素含有量(C)を有機物含有量の指標である強熱減量(L_i)との関係でプロットし

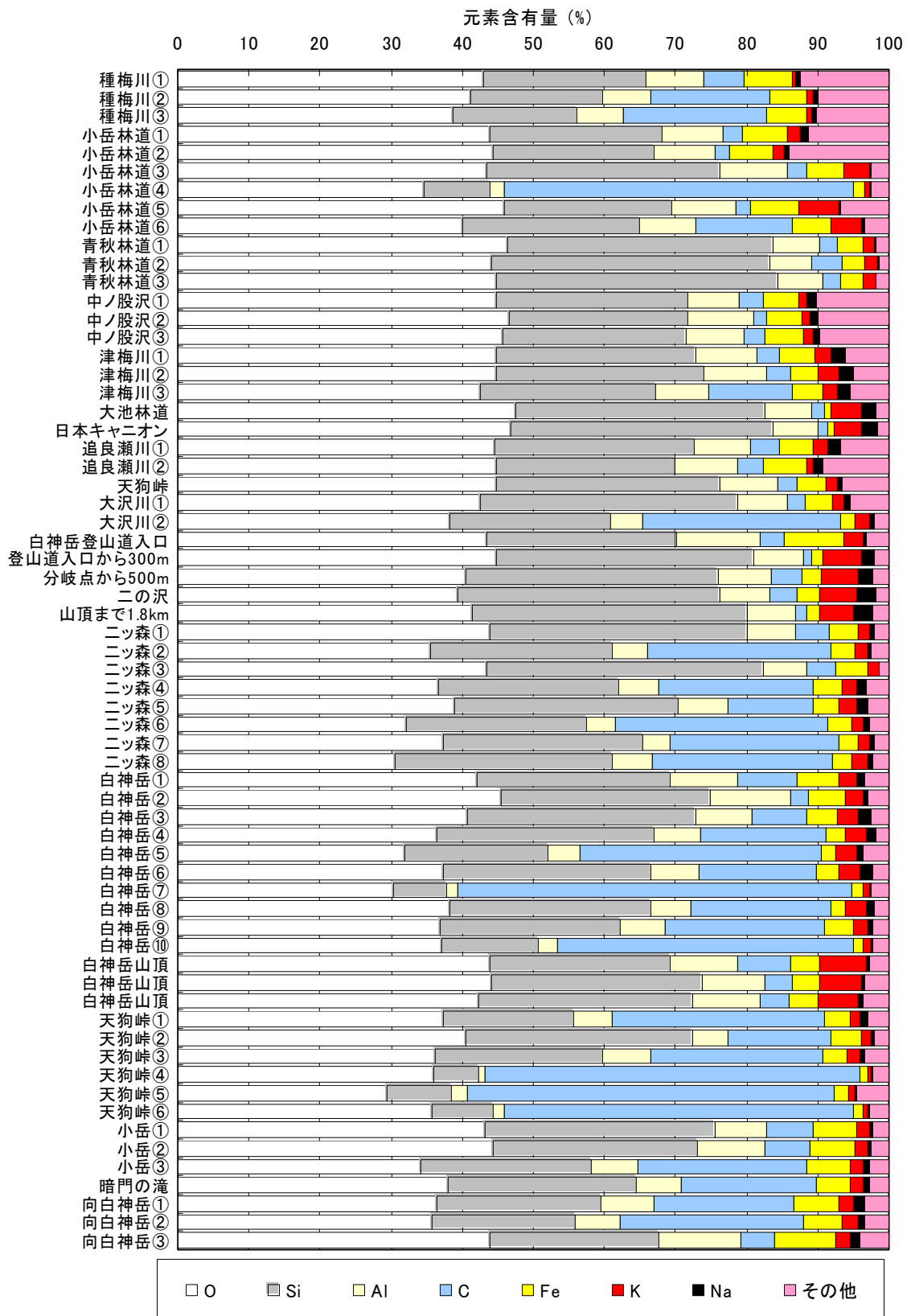
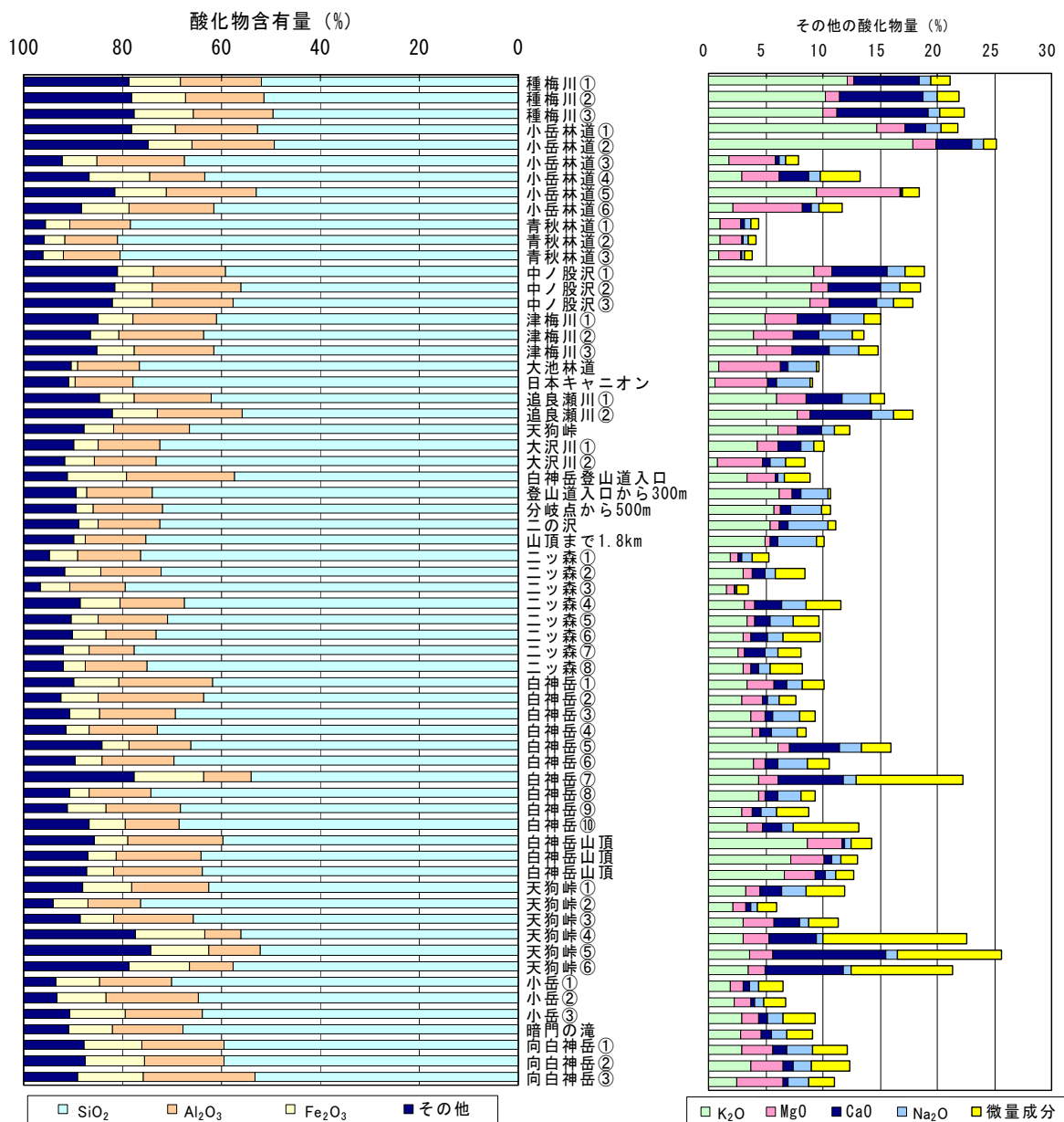


図 4-28 白神山地一帯での土の元素含有量



素が含まれている場合もある。

図 4-29 には、図 4-28 で示した成分元素を酸化物成分として再整理している。酸化物で表示すると、例えば炭素(C)の場合のように、酸素(O)との化合物としては二酸化炭素(CO_2)のようにガス態になるため、固体として土を構成する酸化物組成に関与できなくなる元素も存在する。

そこで図 4-29 に示す結果は、各元素

においてガス態の化合物を生成するものは除いて構成された酸化物組成である。同図における左図はケイ素、アルミニウム、鉄の酸化物であるケイ酸(SiO_2)、酸化アルミ(Al_2O_3)、酸化鉄(Fe_2O_3)の主要酸化物とそれ以外の酸化物(その他)としてその含有比率を示している。右図には、左図中でのその他の酸化物成分の内訳で、自然水に溶解しているミネラル成分とも関連深いカリウム(K)、ナトリウム(Na)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)の酸化物(K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO)とそれ以外の微量酸化物の含有比率を示している。酸化物成分で土の化学組成を表示すると、主要酸化物となっているケイ酸、酸化アルミ、酸化鉄が総計で 80~90%を占めている。これらの酸化物は他の酸化物に比較して極めて高い含有量を有しているが、一般に難溶解性のために自然水などの水に溶解しづらい性質を有している。そのため特殊な地質の堆積状況を除いては、河川水や地下水などの自然水の水質を左右する主要な溶存化学成分となる酸化物ではない。一方、右図に示す酸化カリウム(K_2O)は概ね 2~10%、酸化ナトリウム(Na_2O)と酸化マグネシウム(MgO)は 1~4%範囲、酸化カルシウム(CaO)はほとんど 1%未満(5~10%含まれていたサンプルも僅かにあった)で、含有量的には少量となっている。しかしこれらの酸化物は、ケイ酸、酸化アルミ、酸化鉄の主要酸化物に比較して、加水分解性が高く水合物を生成して自然水などの水にミネラル成分を溶解し易い化学的性質を有していることがわかる。

以上本節では、白神山地での土サンプルの主要含有元素・酸化物組成の状況について考察した。自然水の水質を地層から供給される化学成分との関連で追求するためには、さらに土を構成する主要元素成分の溶出機能を解明し把握することが必要となる。次節では、微量な重金属類の元素成分の分析結果も加味して、土に含まれている成分元素のタイプによってそ

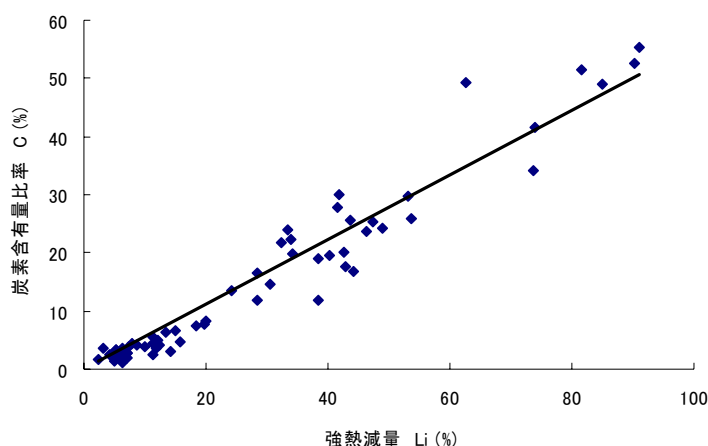


図 4-30 土の炭素含有量比率と強熱減量の関係

の溶出機能を含有量との関連性から定量的に評価を試みる。

4. 4. 4 化学成分の溶出機能

前節では、白神山地一帯での土サンプルに含有されている主要元素・酸化物成分について定量的に論じた。土を構成する土粒子鉱物の化学的構造には、結合力の強い元素成分も含まれているので、風化・浸食作用や流水との溶解作用などによっても、含有元素のすべてが土から溶出することはありえない。当然、地層の風化・浸食作用の進行度合や流水の酸性の度合などによって、土から溶解する元素などの化学成分の種類やその溶解量に関する土の溶出機能は異なってくる。ここでは一連の土サンプルを対象として、土から溶出する各種元素等の成分分析を通し、化学成分による溶出性の相違や含有量との関連から土の化学的溶出機能について考察している。土の溶出機能を評価する手法は、実験方法に関する章で詳述しているが、規定にも基づいて調製した土懸濁溶液から吸引ろ過して抽出した水溶液(ここでは土溶出水と呼ぶ)を作製し、その水溶液中に溶解している化学成分を定量分析することによって、土の溶出機能が評価できる。

まず白神山地一帯で採取した64個の土サンプルについて、土溶出水の水素イオン濃度(pH)と電気伝導率(EC)の状況を図4-31と図4-32にそれぞれ示している。土溶出水は過酷な条件下で土から化学成分を溶解させた水溶液であることから、当然、当初の土懸濁液の濃度は異なるが、4.4.2節で考察した土懸濁液を用いて得られた土のpHとECの場合と類似した傾向を示すことは予想できる。土溶出水のpHは図4-25で示した土のそれとほとんど類似した結果となっており、pHは概ね5台から7

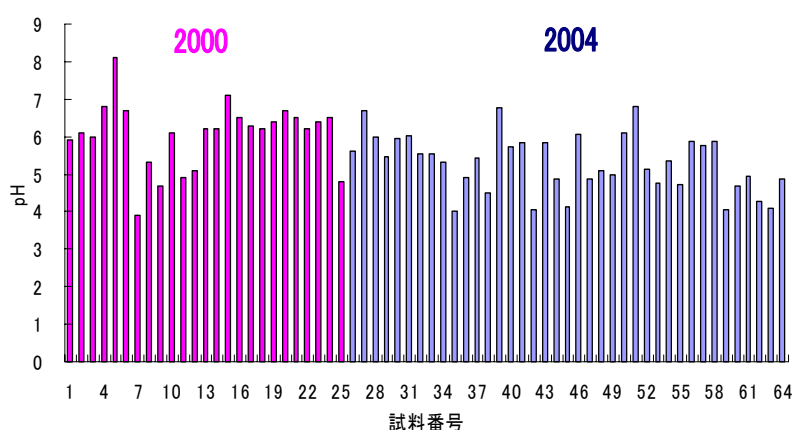


図 4-31 土溶出水の pH

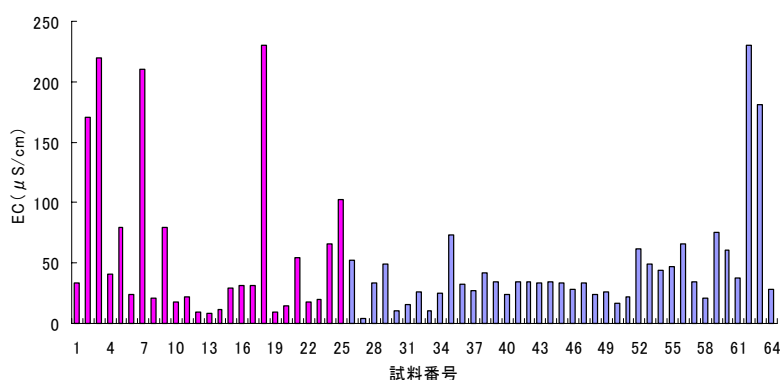


図 4-32 土溶出水の EC

未満で、特に、6～7 台の弱酸性を呈している場合が多い．やはり電気伝導率(EC)についても、**図 4-26** で示した土の結果と類似した傾向が認められ、大半の土溶出水において、EC 値は $50 \mu\text{S/cm}$ 範囲を示している．そこで土溶出水と **図 4-26** で示した土の EC との対応性をみたのが **図 4-33** である．EC 値が高いサンプルの場合には土粒子の無機鉱物の他に腐植有機物からの溶存化学成分が含まれているため、その解離性によってばらつきが大きく現れたものと判断している．EC の水質的な意義については、既に詳述しているように、いずれにしても白神山地、特に、高所山岳側の自然水が弱酸性でしかも溶存化学成分の少ない水質を示していた要因には(前述した 4.3 節参照)、このような土溶出水の基本的な化学物性からも窺われる．

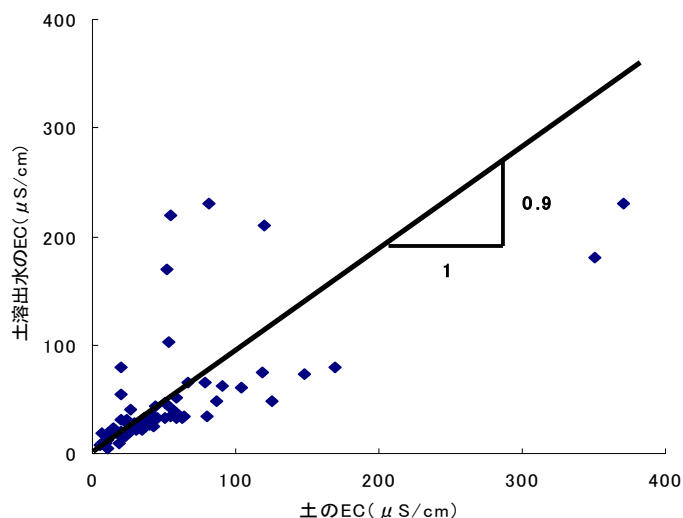


図 4-33 土の EC と土溶出水の EC との関係

そこでさらにこの土溶出水に溶解している化学成分について、提示したのが **図 4-34**～**図 4-36** である．土溶出水に溶解している化学成分は、自然水の場合と同様に、イオンクロマトグラフィーで分析した陽イオンの 5 成分 (Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}) と陰イオンの 4 成分 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-) で、それぞれ **図 4-34** と **図 4-35** に示している．さらに **図 4-36** には、高周波プラズマ発光回折装置(ICP)による分析で、重金属類等の 10 成分 (Al、Si、Fe、Cr、Mn、Cu、Zn、As、Cd、Pb) の溶出量の評価を試みている．土サンプルからの各化学成分の溶出量は、いずれの場合も、土の乾燥質量 1g 当りからの溶出成分の質量に換算(陽陰イオンの溶出量は mg/g、重金属類は $\mu\text{g/g}$)して表示している．まず **図 4-34** に示す陽イオン成分に着目すると、ほとんどの陽イオン成分は概ね 0.05mg/g 範囲の溶出量である．この中で土からの溶出量の比較的高い陽イオン成分はナトリウムイオン(Na^+)とカリウムイオン(K^+)で、突出した値が検出されたサンプルも数例あるがマグネシウムイオン(Mg^{2+})とカルシウムイオン(Ca^{2+})の $0.01\sim 0.03\text{mg/g}$ 以下の溶出量に比較して、総じて多少高い．溶出量の状況には土サンプルによって多少の相違はあるが、 Na^+ と K^+ はいずれのサンプルでも検出されるが、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} の場合には非検出のサンプルが 20 サンプル(約 30%)ほど認められる． Na^+ には海塩粒子による供給成分があり、土粒子表面付近に弱い結合状態で吸着・付着している成分が溶出している可能性が高いことから、

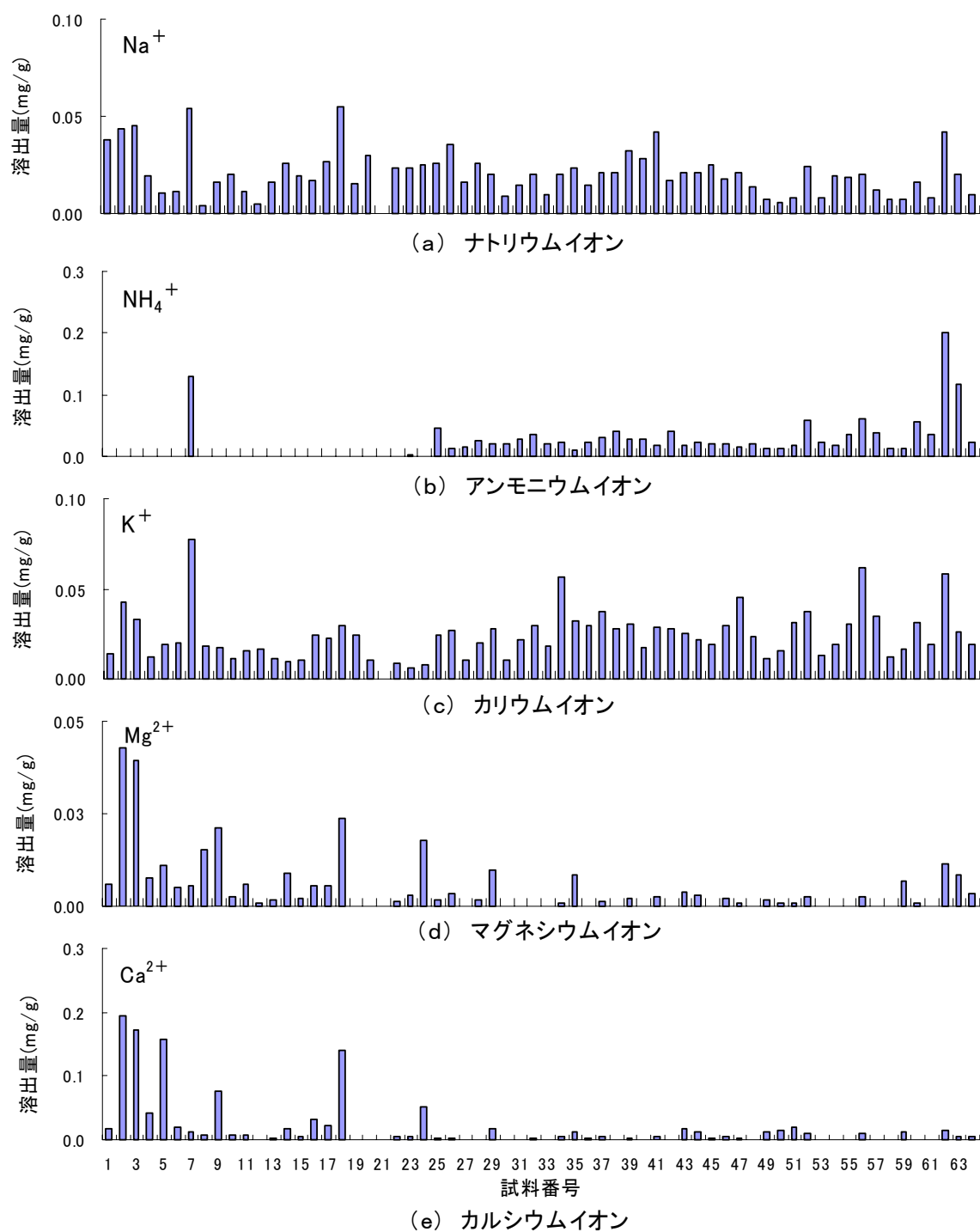


図 4-34 主要陽イオンの溶出量

その混在状況によって非検出されるサンプルもあると考えられる． NH_4^+ は土に混在している植物や微生物の腐植分解物からの生成の可能性が高い．また K^+ も植物細片などの混入物や岩石の風化作用による土粒子からの要因も考えられるが詳細については不明である． Mg^{2+} と Ca^{2+} の場合には土粒子からの溶脱が主因と思われ、鉱物組織でも比較的結合力の弱い成分が溶出してい

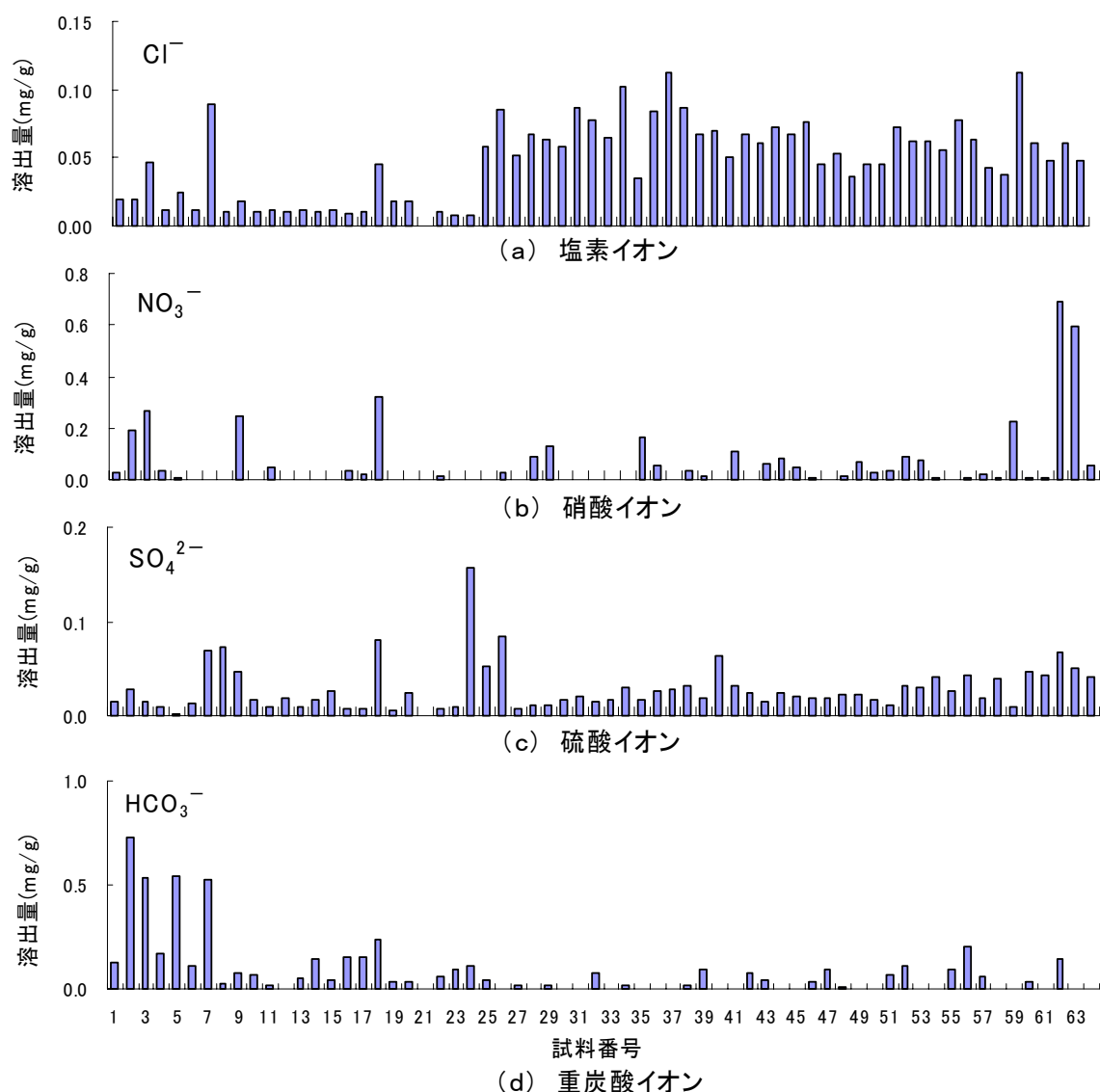


図 4-35 主要陰イオンの溶出量

るものと考えられる。

一方、図 4-35 に示す陰イオン成分をみると、溶出量的には陽イオンの場合と同程度である。塩素イオン (Cl^-) の場合は、やはり Na^+ の場合と同様に、土粒子に吸着した海塩粒子による供給が主流と思われる。硝酸イオン (NO_3^-) については、アンモニウムイオン (NH_4^+) が土中で酸化作用を受け変態することや土粒子表面に吸着している間隙水(酸性雨化し硝酸が溶解した降水などによる供給)などが供給源と考えられるが、主に腐植植物や微生物分解作用で生成される NH_4^+ の酸化作用による供給が主因と判断している。そのため硝酸イオンの検出状況にはアンモニウムイオンの場合と同様にサンプル間でばらつきが認められる。なお硝酸とアンモニウムの両イオンの土からの溶出性については、自然水の水質との関連から再度次節で詳述している。

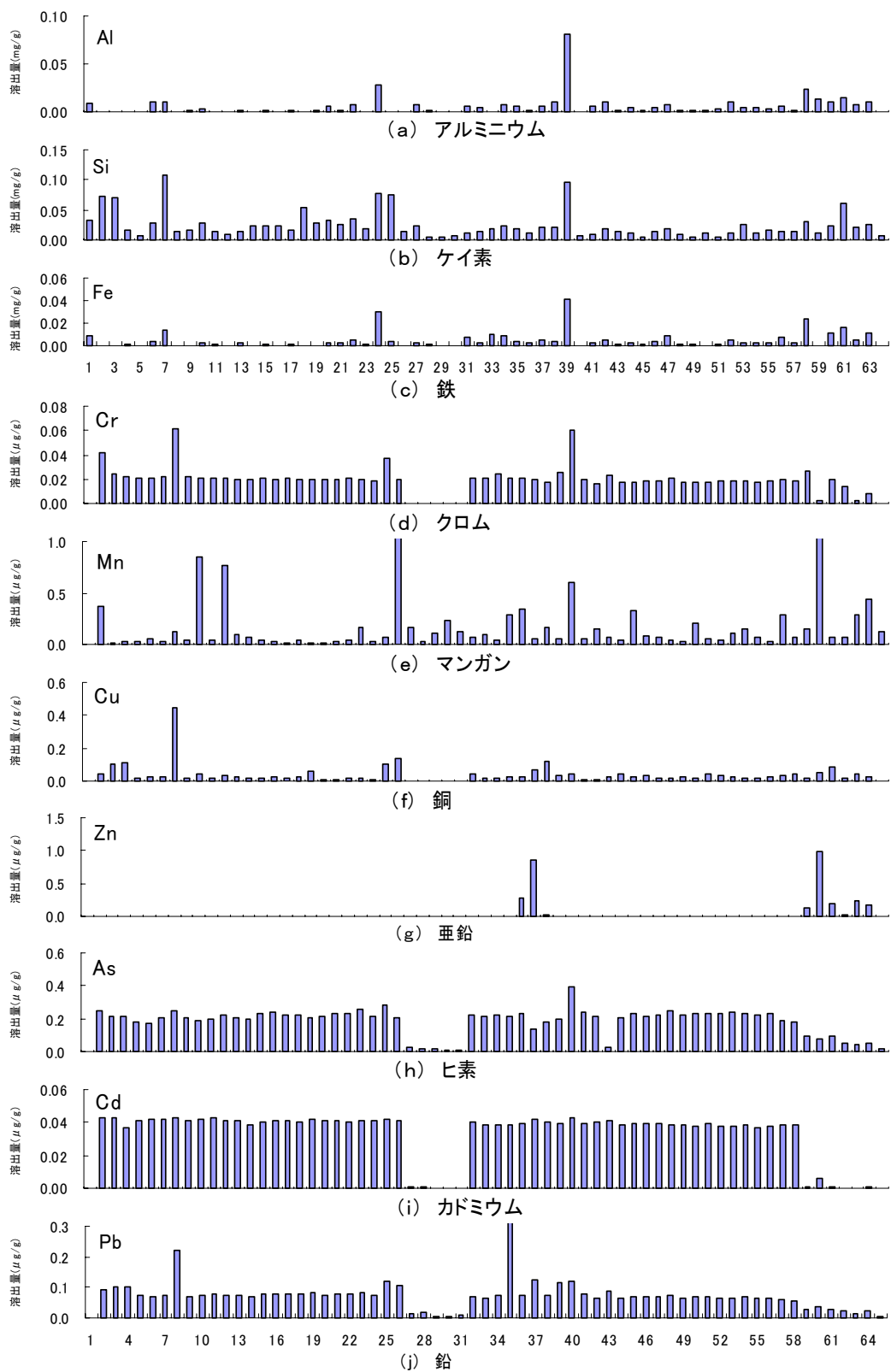


図 4-36 主な重金属類元素の溶出量

重炭酸イオン(HCO_3^-)の場合には、土中の二酸化炭素(CO_2)が土中水に溶解して炭酸(H_2CO_3)となって自然水に流入することが多いが、土から溶出する重炭酸イオンは石灰石(CaCO_3)などの炭酸塩鉱物からの溶解も考えられる。以上のようなイオン成分の溶出状況から判断しても、対象土の化学成分の溶出機能は総じて低く、このような結果からも 4.3 節で記述したように、白神山地山岳部で育まれる自然水もまた、総じて溶存イオン量の低い水質となっていることがうなずける。

次に図 4-36 に示す土溶出水の ICP 分析より得られた重金属類等の化学成分の溶出状況について着目する。ここでは、土の主要酸化物(Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3)を構成するアルミニウム(Al)、ケイ素(Si)、鉄(Fe)に加え、土壌・水質基準等の指標となっているクロム(Cr)、ヒ素(As)、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)などの重金属類の溶出性についても提示している。ちなみに 10 元素成分の土からの溶出性を示しているが、Al、Si、Fe 以外の金属元素(Cr、Mn、Cu、Zn、As、Cd、Pb)については、土に極微量に含有されているため、FP 法での蛍光 X 線回折分析では、含有元素成分の定量としては測定精度上、非検出となる場合がほとんどであった。まず各成分元素の溶出性に注目すると、概ね Al、Si、Fe の 3 元素は mg/g オーダ、他の 7 元素は $\mu\text{g/g}$ オーダでの検出で、両者の元素グループ間で溶出機能が極端(約 1000 倍)に異なっていることがわかる。土サンプル間で多少相違は認められるが、Al、Si、Fe 間での溶出性では、総じて $\text{Si} > \text{Fe} > \text{Al}$ の傾向が強い。概ね Si は 0.1mg/g 範囲内、Fe と Al は 0.01mg/g 範囲内のサンプルが多く認められる。また Fe に比較して Al の場合には、溶出量が非検出のサンプルが多く認められた。重金属類の元素をみると、いずれも $\mu\text{g/g}$ オーダの検出量ではあるが、概ね Mn と Zn は $1\mu\text{g/g}$ オーダ、Cu、As、Pb は $0.1\mu\text{g/g}$ オーダ、Cr と Cd は $0.01\mu\text{g/g}$ オーダでの溶出量に大別でき、これらの元素間においても溶出機能に微妙に差異のあることが窺われる。なお Zn 以外の 6 元素は、溶出量に差異はあるが、ほとんどのサンプルで一様に $\mu\text{g/g}$ オーダで検出されている。含有鉱物の相違に起因しているのか否か不明であるが、Zn の溶出状況に関する理由についてはここでは論述できない。ちなみに土壌・水質基準等で規定されている重金属類の溶出量に関しては、環境汚染的観点からはまったく問題はない。いずれもこれらの成分元素の起源は、白神山地においては地層に由来している。

そこで図 4-34 と図 4-35 で示した代表的なミネラル元素等(Cl、Na、K、Mg、Ca)と図 4-36 での重金属類についての溶出量を含有量との関係で整理したのが図 4-37 と図 4-38 である。両図は土から溶解する主要成分元素の溶出機能と自然水の水質にかかわる成分元素を解釈する上で有益となる。図 4-37 でのミネラル元素等の結果をみると、かなりばらつきはあるが、塩素(Cl)

が他の 4 元素 (Na、K、Mg、Ca) に比較して高い溶出性を有しており、概ね 0.1~1mg/g オーダの含有量に対して溶出量は 0.01~0.1mg/g オーダで、両者間の比率は 10 倍程度である。これに対して他の 4 元素は含有量と溶出量の関係はほとんど類似した傾向を示しており、1~100mg/g オーダの含有量に対して溶出量は 0.001~0.1mg/g オーダで、両者間での比率は 1000 倍程度異なっている。この中でもナトリウム (Na)、カリウム (K)、カルシウム (Ca) の溶出性の比較的高いことがわかる。このような土を構成する主要化学成分の溶出機能が、白神山地一帯での自然水が呈する Na-Cl 型や Ca-HCO₃ 型などの水質タイプを育む要因ともなっている。

一方、図 4-38 に示す主な重金属類等の元素の中で、ケイ素 (Si)、アルミニウム (Al)、鉄 (Fe) は含有量においては Na、K、Ca、Mg などのミネラル元素に比較して圧倒的に多く、土の主要構成元素となっている (図 4-28 と図 4-29 参照)。しかしその溶出量は図 4-37 で示したミネラル元素より総じて低いことがわかる。三者の元素で、概ね Si は含有量 100~1000mg/g オーダに対して溶出量は 0.1~0.01mg/g オーダで 10⁻³ 倍程、Al と Fe はサンプル間ではばらつきは大きいが含有量 10~100mg/g オーダに対して 10⁻⁵~0.1mg/g オーダと、溶出量が極めて低いサンプルもある。また Cu、Zn、Cr ではさらに溶出量と含有量が低く、含有量 0.1~1mg/g オーダに対して溶出量も 10⁻⁵~10⁻⁴mg/g オーダで 10⁻⁴ 倍程になっている。なお Cu、Zn、Cr 元素のプロットが少ないことと他の重金属類 (As、Cd、Pb など) の結果が明示されていないのは、ppb (μg/l) オーダの精度で計測した溶出量のデータはあるが、FP 法による mg 程度の精度

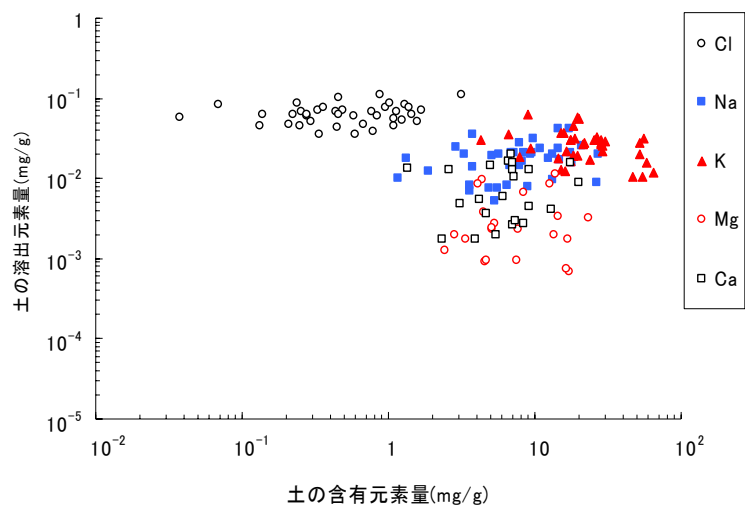


図 4-37 代表的なミネラル成分元素の溶出量と含有量の関係

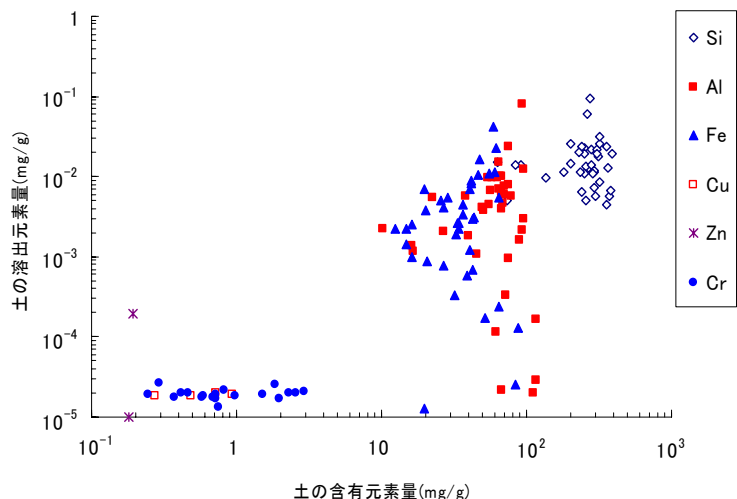


図 4-38 主な重金属類元素の溶出量と含有量の関係

で検出する含有量データが欠損するため、含有量が検出できない極微量の成分元素についてはプロットできない。

以上のように、土を構成する主要化学成分の溶出機能は大きく異なり、主要化学成分の含有量よりもむしろ溶出機能によって、一帯を流下・浸透する自然水の化学組成が大きく左右されることが理解される。白神山地の自然遺産登録地域周辺一帯での多くの自然水が Ca-HCO_3 型や Na-Cl 型の水質タイプを示した大きな理由も、土に含有されている Si、Fe、Al の主要元素と比較して少量であるミネラル元素 (Na、K、Ca、Mg、Cl、 HCO_3 など) の高い溶出機能によっていることが一連の考察から推察される。

4. 5 白神山地における硝酸性窒素とアンモニア性窒素濃度

前節では降水をはじめ白神山地奥深くに源を発する河川水、渓流水、瀑布水、湧水などの自然水と山岳部に堆積分布する表層土の化学成分組成の特徴などについて考察し、自然感溢れる原生ブナ林が育む森林山岳域の自然環境を水・土の実態評価から科学的に解明することに努めた。本節ではこれらの分析結果から硝酸性窒素とアンモニア性窒素データを引用し、最近問題となっている「山の水場」の水質汚染問題の観点から、白神山地の水環境の実態について再度論述する。

第2章で記述したように、近年の自然遺産人気や登山ブームによって、高所山岳域への増加する入山者や、それを受け入れるトイレ設備の不備や不足、キャンプ場・山小屋・登山道周辺でのゴミの不法投棄などの人為的要因によって、山岳域の水汲み場の水質汚染問題が全国的に深刻化しつつある。多くの山の水場では、人為的要因と思われる大腸菌はじめ硝酸性窒素やアンモニア性窒素などの汚染物質の検出が報告されている¹⁰⁾。白神山地は1993年12月9日に世界自然遺産に登録されて以来、遺産地域への入山は27区間の指定ルートを利用する審査許可制を採用しているが、遺産登録以降入山者は急増し、近年の年間入山者数は7~8万人台に達している。このほぼ10年間にわたって毎年多くの入山者が各種の登山ルートから遺産登録地域に踏み入ってきたが、幸いにも2003年7月の「山の水場」全国調査の結果によれば、実施した4箇所の水場ではいずれも硝酸性窒素、アンモニア性窒素、大腸菌などの水質汚染物質は検出されていない¹⁰⁾。

本研究では、4.3節で論述したように、白神山地の自然遺産登録地域を取り囲むように2000年8月に79サンプル、2001年3月に13サンプル、2004年4月~7月に67サンプル、総計159サンプルの自然水を分析し、その溶存化学成分などの実態評価を試みている。ここでは、水質

の汚染指標として硝酸性窒素(NO_3^- -N)とアンモニア性窒素(NH_4^+ -N)を対象として、硝酸イオン(NO_3^-)とアンモニウムイオン(NH_4^+)濃度を両窒素態の窒素濃度に換算し、採水地点の標高との関係で表示したのが図 4-39 と図 4-40 である。さらに両窒素態の検出結果を濃度区分して、地形図上でマップ表示したのが図 4-41 と図 4-42 である。なお両図中には最近までに白神山地域に設置されているトイレとトイレ付き避難小屋全 7 箇所の位置も併記している。

まず硝酸性窒素(NO_3^- -N)に着目すると、図 4-39 に示すように、159 地点の自然水のうち 42 地点(約 26%)の自然水

で硝酸性窒素が検出されている。検出濃度は 0.5mg/l 未満が大半であるが、2 地点で 0.6~0.7mg/l、さらに 1.41mg/l と 2.58mg/l を検出した地点がそれぞれ 1 地点ある。検出された地点の大半は遺産登録地域の東側よりはむしろ、標高 300m より低い平野部にかけて西方海岸側に集中して分布しており、登録地域からかなりかけ離れている地点が多い(図 4-41 参照)。また 2.58mg/l の最も高い濃度が検出された、101 地点の自然水も登録地域から離れた南東部に位置する名勝地「権現の大銀杏」脇の渓流水である。これらの地域で検出される硝酸性窒素は、もしも人為的要因によるものであるとすれば、入山者による負荷的要因よりもむしろ農耕地や人家等からの要因の可能性が高いと判断される。しかし 1.41mg/l の濃度が検出された No.128 地点(標高 590m)の自然水は、白神岳山道マテ山コース最後の水場での湧水である。遺産登録地域付近の山岳域にあり入山者数も比較的多い。入山による人為的要因の影響も考えられるが、アン

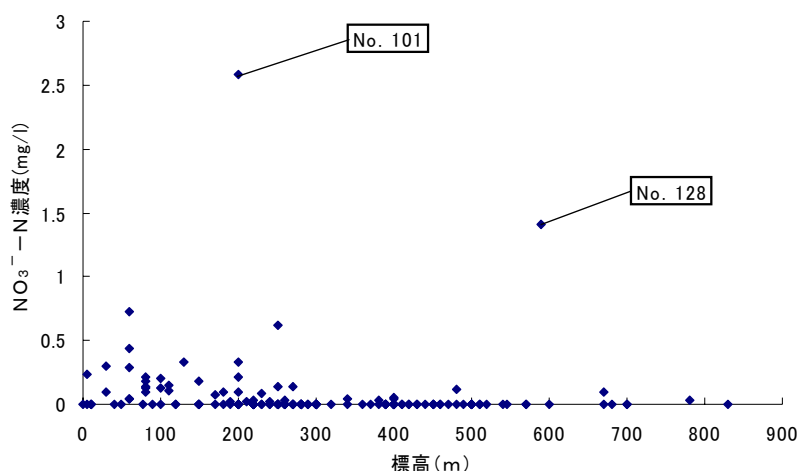


図 4-39 NO_3^- -N 濃度と標高との関係

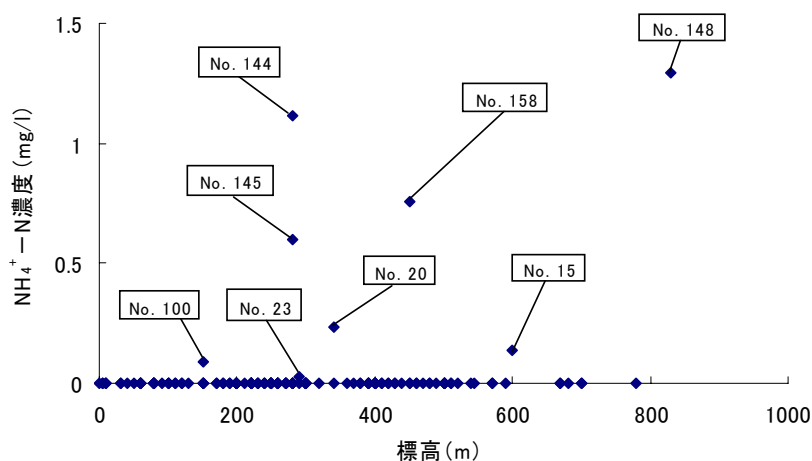


図 4-40 NH_4^+ -N 濃度と標高との関係

モニア性窒素の検出状況や後述する土壌から供給される分析結果も考慮してその要因については判断することにする．ちなみに水道水の水質基準では硝酸性窒素濃度（亜硝酸濃度を含むが）は 10mg/l 以下と規定されていることから、一連の自然水で検出された濃度は水質汚染的観点からは、まったく問題とならない低い数値ではある．

そこでアンモニア性窒素濃度を標高との関係でプロットし、その検出状況を調べたをみると、検出が確認されたサンプル数は 159 サンプル中 8 サンプル（約 5%）で、硝酸性窒素の 42 サンプル（約 26%）に比較して、その検出数は 1/5 程度である．アンモニア性窒素濃度が 0.3mg/l 未満の自然水は、No.15（標高 600m）の小岳林道沿い溪流水の 0.14mg/l、No.20（標高 340m）と No.23（標高 290m）の水沢川沿い溪流水の 0.23mg/l と 0.03mg/l、No.100（標高 150m）の不動の滝瀑布水の 0.09mg/l の 4 地点である．0.5mg/l を超える自然水は、No.144（標高 280m）と No.145（標高 280m）の暗門の滝雪解水の 1.12mg/l と 0.60mg/l、No.148（標高 830m）の小岳登山道沿い溪流水の

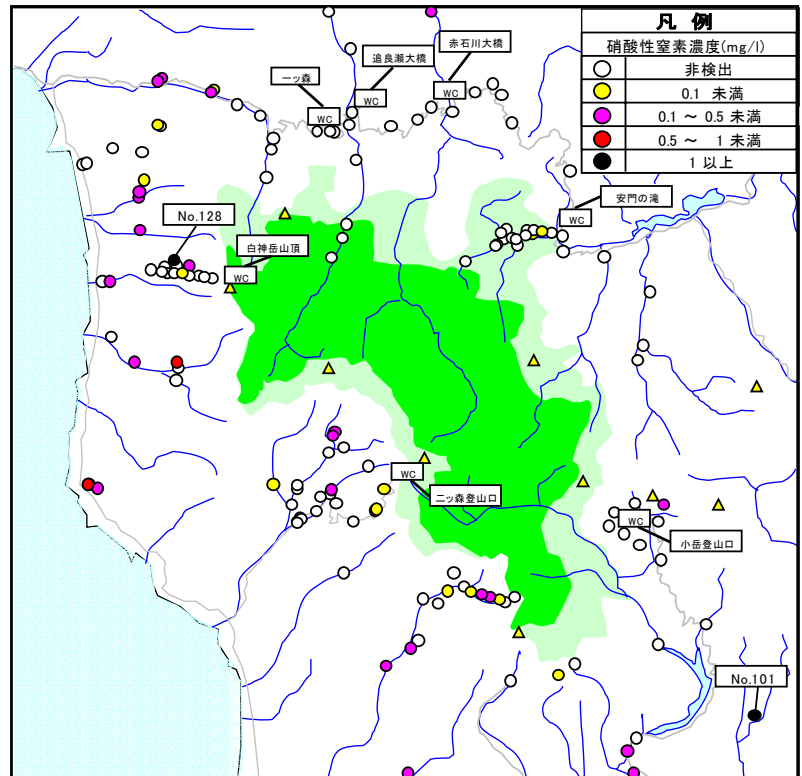


図 4-41 白神山地における自然水の $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度検出地点

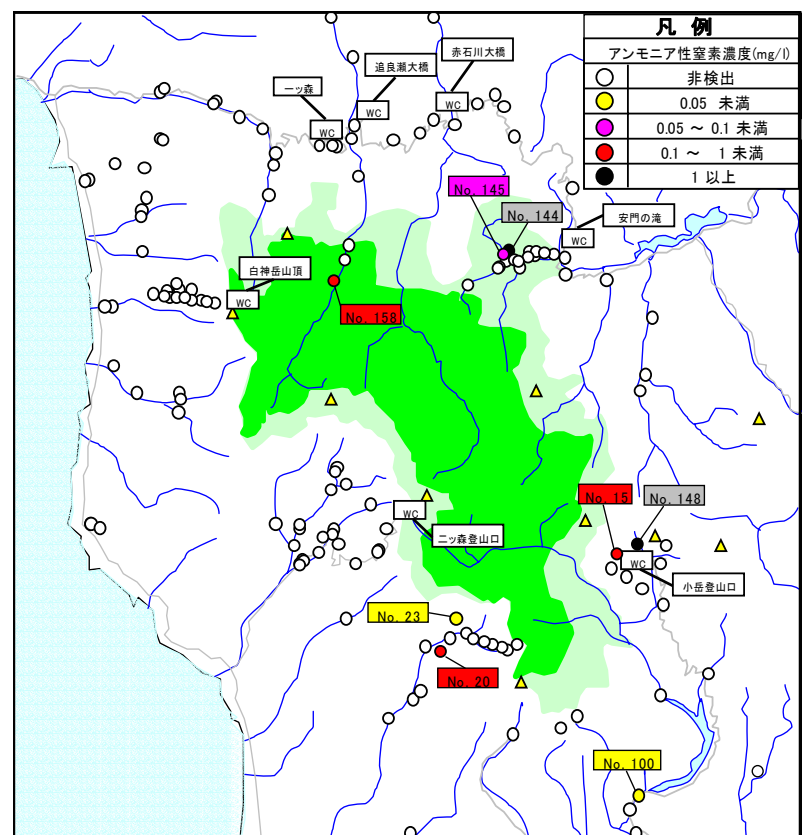


図 4-42 白神山地における自然水の $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度検出地点

1. 29mg/1、No.158(450m)の追良瀬川沿い河川水の 0.76mg/1 の 4 地点である．これらの 8 箇所の採水地点を含め濃度区分して地形図上にマップ表示した図 4-42 をみると、次のようなことが窺われる．

①山岳域での人為的要因に起因するアンモニア性窒素の供給は排泄物の不適切な処理によるころが大きいと考えられることから、まず白神山地一帯に設置されている 7 箇所のトイレ位置との関連でみると、アンモニア性窒素の検出地点はトイレ位置とほとんど無関係であることがわかる．即ち白神山地では人為的要因による排泄物が周辺環境に影響を与えていることは考え難い．ただNo.15 とNo.148 の検出地点はトイレの位置と接近しているようだが、検出地点の自然水はトイレの上流部に位置していることから、トイレからの排泄物の要因とは判断できない．このことは、白神山地一帯に設置されている 7 箇所のトイレが、白神岳山頂の汲み取り型トイレを除いてすべて浄化方式の最新型トイレで、垂れ流し式の地下浸透型トイレとは異なり、排泄物が周辺環境に与える影響のないことによっている．

②検出された地点のアンモニア性窒素が、もしも排泄物に起因する人為的要因によるものであれば、当然、図 4-41 に示したアンモニア性窒素の酸化態である硝酸性窒素の検出地点や濃度とも概ね対応していることが想定される．しかし両図を比較しても、両窒素態の検出地点や濃度状況には対応性はまったく認められない．このことからしても、アンモニア性窒素同様、特に山岳域での硝酸性窒素もまた、トイレに関連する排泄物による人為的要因の可能性はないと判断できる．

次にその供給要因を究明するために、両窒素態の地層からの溶出性について考察を加える．自然水と同様、白神山地の山岳域で主に採取した 64 地点での土サンプルを対象に、既に 4.4 節で土からの主要化学成分の溶出機能等については詳述している．特にここでは、土から溶出する硝酸イオンとアンモニウムイオンが自然水の両窒素態の供給源になり得ているのか、その可能性について着眼している．対象土は登山道や河岸沿いなどで採取した表層部に堆積分布している表土で、ローム的な粘性土、細粒砂等を含む河岸土、火山灰性土などの土と、黒ぼく的な粘性土や分解途上の落葉などの植物性有機物を含んだ腐植土である．表土なので厳密に土の種類を分類することは難しいが、大別すると土粒子鉱物を主体とした無機質土と腐植物を多量に含む有機質土からなっている．

まず図 4-43 と図 4-44 には、64 個の土サンプルに関する硝酸性窒素(NO_3^- -N)とアンモニア性窒素(NH_4^+ -N)の溶出状況をそれぞれ示している．溶出量は土の乾燥質量 1g 当りからの溶出量(mg)として表示している．硝酸性窒素は 64 サンプル中 46 サンプル(72%)、アンモニア性窒素

は 43 サンプル(67%)で検出され検出率はほど等しい。溶出量においてもまた、両窒素態で 0.06mg/g 範囲内のサンプルが大半を占め、最大値も約 0.16mg/g と類似した結果となっている。このように大半の土サンプルから両窒素態が溶出することから、地層から溶解した窒素態が河川、渓流水、瀑布、湧水などの地表水に溶存することは科学的にも十分予想できることである。興味深いことは、特にアンモニア性窒素が、2004 年 4～7 月に採取した試料番号 25 番以降のサンプルで顕著に検出されていることである(図 4-44 参照)。これらのサンプルはいずれも腐植物による化学成分の溶出効果を調べる目的で採取した、落葉・枯葉などの分解途上の腐植物を含んだ有機質土である。このような腐植物を含んだ有機質土は明らかに土粒子鉱物主体の無機質土に比較して、アンモニア性窒素の溶出性に富んでいることがわかる。この主な理由としては、落葉・枯葉等の有機物の腐植・分解過程での生成や腐植・分解に携わる土中微生物の活動(排泄物や遺骸の分解など)による生成などによっていると思われる。そこで図 4-45 と図 4-46 には、腐植有機物量の効果をみるために、

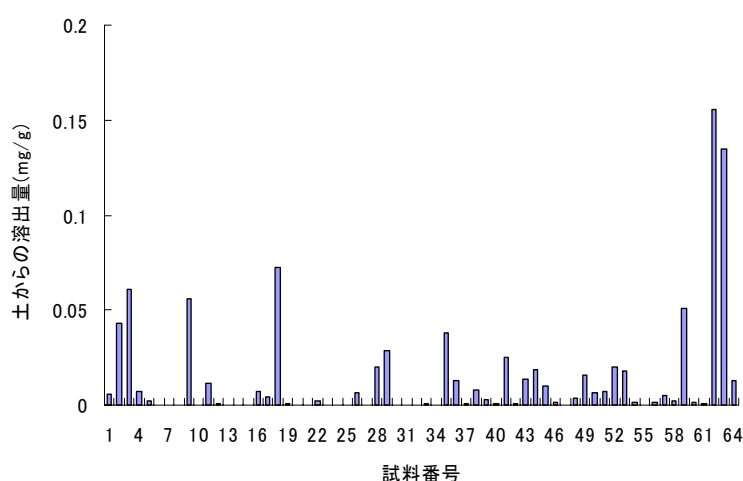


図 4-43 土から溶出する $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度

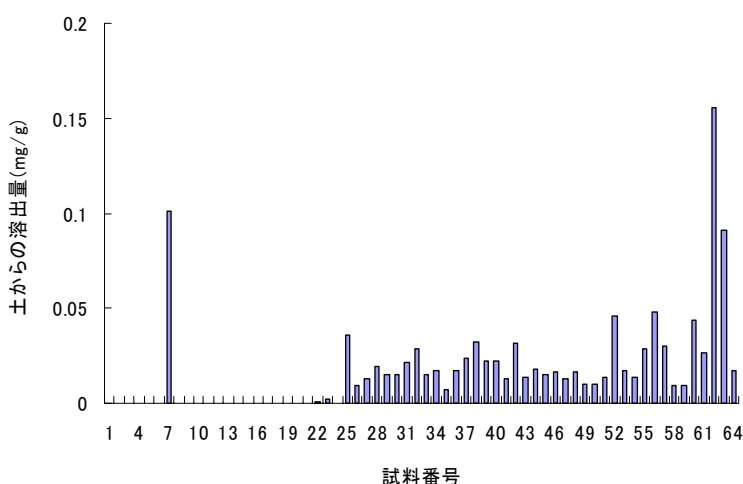


図 4-44 土から溶出する $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 濃度

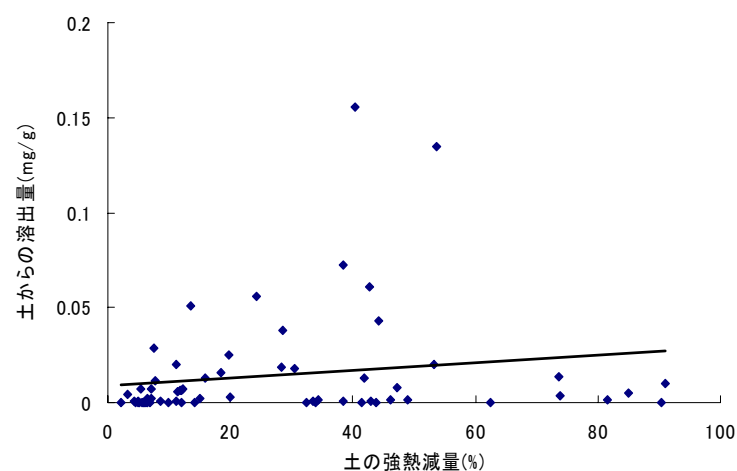


図 4-45 土から溶出する $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 濃度と強熱減量の関係

有機物量の指標である強熱減量(L_i)との関係で両窒素態の濃度をプロットしている。ばらつきは認められるが、相関性はアンモニア性窒素の場合に比較的良好である。このような結果から、両窒素態の自然水への供給には、地中表層部で分解される腐植有機物の存在が重要な要因となっていることが理解できる。硝酸性窒素と強熱減量との間の相関性は良好とは言えないが、生成

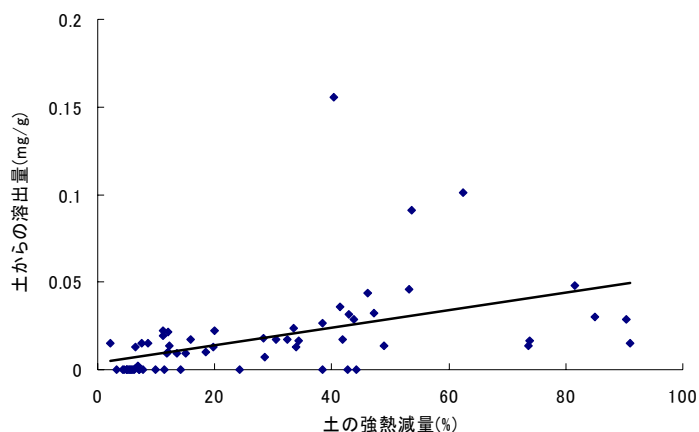


図 4-46 土から溶出する NH_4^+ -N 濃度と強熱減量の関係

されるアンモニア態が土中で酸化作用を受けることでいずれは硝酸態に変態することを考えれば、やはり腐植有機物の存在が硝酸態窒素の主要な供給源になっていると言える。

これらの結果を地形図上に濃度区分してマップ表示したのが図 4-47 と図 4-48 である。この

結果は、両窒素態が現地の地層から恒常的に溶出している量を意味しているのではない。土サンプルを用いた過酷な条件下での溶出試験から得られた結果をプロットしていることから、両窒素態の地層(土 1g 当り)からの溶出可能な目安量を示している。このようなことを考慮して、地層からの溶出量マップを先に示した自然水に関する図 4-41 と図 4-42 と対比させると、特に遺産登録周辺部の山岳域では、自然水への両窒素態の供給源は人為的要因によるよりもむしろ、表層部に堆積している腐植有機物を含む地層に起因していることが明白と言える。

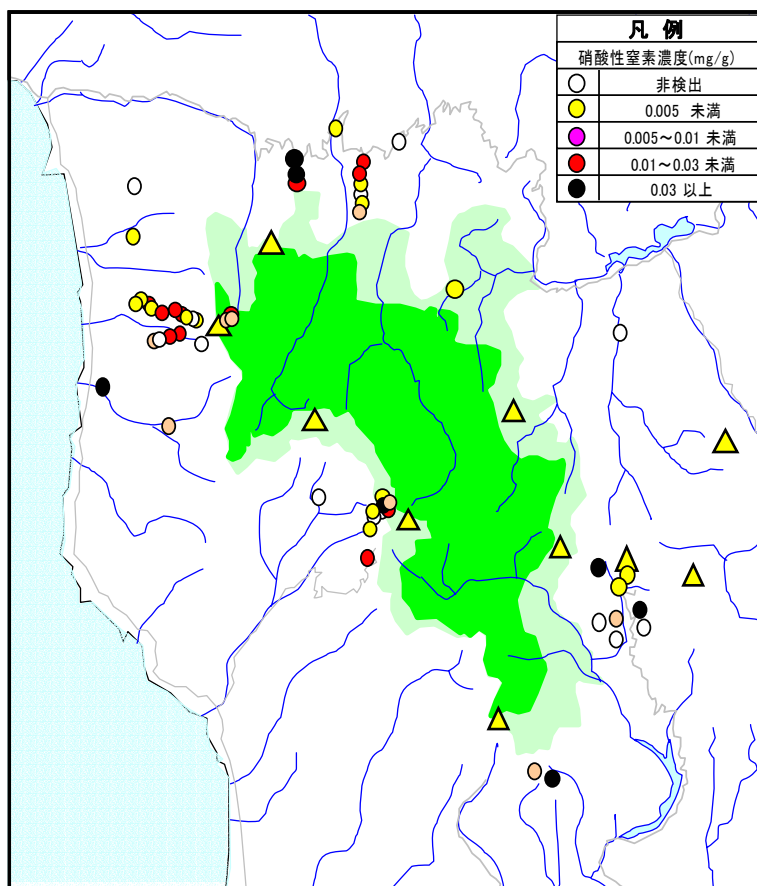


図 4-47 白神山地における土溶出水の NO_3^- -N 濃度検出地点

4. 6 むすび

世界的にみても類例がないといわれている原生的ブナの極相林が広大な地域にわたって繁茂し、昔から深い森林山岳地帯を形成してきた白神山地は、豊かな水環境のもとに多種多様な動植物や生態系を育んできた。この貴重な原自然的な生態系を支えている要因の一つには、海沿いの恵まれた降水環境、森林山岳域に源を発し網の目の様に流下浸透する自然水環境、その自然水の水質を支配する地質環境が互いに有機的に交錯する自然のメカニズムにあり、その形態を降水・自然水・土を構成する化学成分組成の実態評価を通して垣間

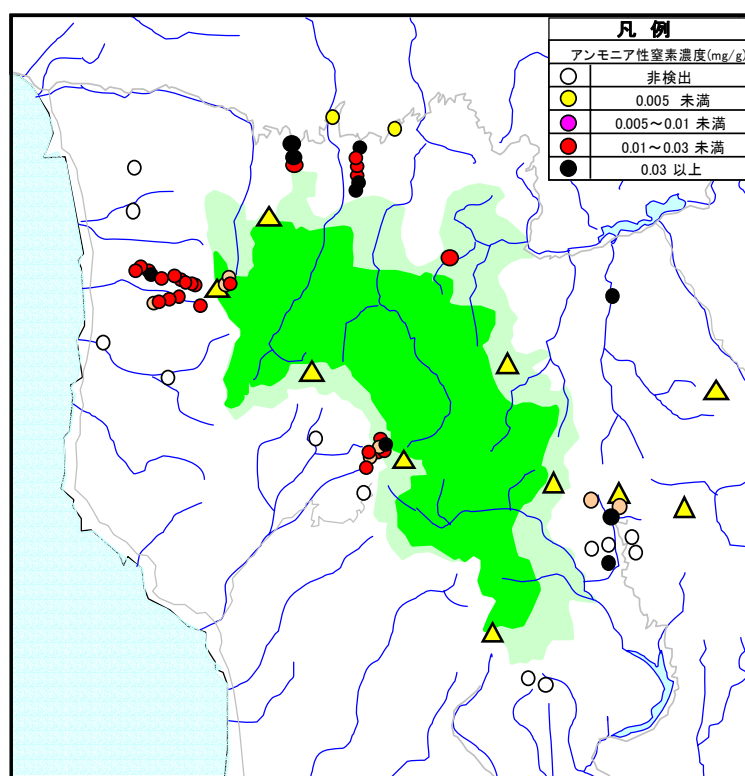


図 4-48 白神山地における土溶出水の NH_4^+-N 濃度検出地点

見ることができた。海塩粒子飛沫の影響を強く受けた降水の水質は、自然水の水質にも遺伝子的に明瞭に受け継がれ、白神山地の森林山岳地帯を潤す自然水の水質タイプを二分する要因にもなっていることが明らかとなった。主に山岳地層から適度なミネラル成分を取り込んだ自然水は、軟らかい Ca-HCO_3 型の水質タイプとなって瀑布・溪谷・溪流などの自然感溢れる水景観を創世し、また水場や湧水池などの親水的憩いの場を提供し、白神山地の自然環境形成の根幹をなしていることが理解された。また最新のトイレ設備が完備された白神山地一帯では、重金属類の溶出性を含め硝酸性・アンモニア性窒素に関する汚染物質の人為的要因については、現状ではまったく問題ではないことが明らかとなった。しかし自然遺産人気や登山ブームで年々増加する入山者が今後も想定されることから、遺産登録地域一帯を取り囲むように主要な水場を設定し、観測地点として定期的に水質のモニタリング調査を実施し、自然環境の監視と保全に努めることが肝要と思われる。