

世界自然遺産地域における水・土環境の実態評価に関する研究

防衛大学校理工学研究科前期課程

地球環境科学専攻・建設環境工学大講座

徳 田 淳

平成17年3月

目次

第1章 序論

| | | |
|------|-------|---|
| 1. 1 | 研究の背景 | 1 |
| 1. 2 | 研究の目的 | 3 |
| 1. 3 | 論文の構成 | 4 |

第2章 我が国の世界自然遺産地域と山岳域の環境問題

| | | |
|------|-------------------------------|----|
| 2. 1 | はじめに | 7 |
| 2. 2 | 「白神山地」と「屋久島」の自然遺産登録 | 8 |
| 2. 3 | 白神山地の地勢概要 | 11 |
| 2. 4 | 屋久島の地勢概要 | 14 |
| 2. 5 | 顕在化する山岳域の汚染問題 | 18 |
| 2. 6 | 「白神山地」と「屋久島」の年間入山者数とトイレ施設等の実態 | 21 |
| 2. 7 | むすび | 25 |

第3章 水・土の調査と実験方法

| | | |
|---------|--------------------|----|
| 3. 1 | 白神山地・屋久島の調査域へのアクセス | 26 |
| 3. 1. 1 | 白神山地域での調査 | 27 |
| 3. 1. 2 | 屋久島域での調査 | 28 |
| 3. 2 | 水・土の分析実験 | 29 |
| 3. 2. 1 | 水サンプルの分析項目と方法 | 30 |
| 3. 2. 2 | 土サンプルの分析項目と方法 | 33 |

第4章 白神山地の水・土環境の実態評価

| | | |
|---------|----------|----|
| 4. 1 | はじめに | 38 |
| 4. 2 | 降水の特性 | 38 |
| 4. 2. 1 | 年間降水量 | 38 |
| 4. 2. 2 | 化学組成 | 39 |
| 4. 3 | 自然水の化学組成 | 45 |
| 4. 3. 1 | 自然水の概要 | 45 |

| | | |
|---------|--------------------------|----|
| 4. 3. 2 | 水素イオン濃度 (pH) と電気伝導率 (EC) | 46 |
| 4. 3. 3 | 主要溶存化学成分 | 47 |
| 4. 3. 4 | 水質タイプ | 54 |
| 4. 4 | 土の化学組成 | 57 |
| 4. 4. 1 | 土サンプルの概要 | 57 |
| 4. 4. 2 | 酸性度 (pH) と電気伝導率 (EC) | 58 |
| 4. 4. 3 | 含有元素・酸化物組成 | 60 |
| 4. 4. 4 | 化学成分の溶出機能 | 64 |
| 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 | 71 |
| 4. 6 | むすび | 77 |

第5章 屋久島の水・土環境の実態評価

| | | |
|---------|--------------------------|-----|
| 5. 1 | はじめに | 78 |
| 5. 2 | 降水の特性 | 78 |
| 5. 2. 1 | 年間降水量 | 78 |
| 5. 2. 2 | 化学組成 | 80 |
| 5. 3 | 自然水の化学組成 | 85 |
| 5. 3. 1 | 自然水の概要 | 85 |
| 5. 3. 2 | 水素イオン濃度 (pH) と電気伝導率 (EC) | 86 |
| 5. 3. 3 | 主溶存化学成分 | 87 |
| 5. 3. 4 | 水質タイプ | 92 |
| 5. 4 | 土の化学組成 | 94 |
| 5. 4. 1 | 土サンプルの概要 | 94 |
| 5. 4. 2 | 酸性度 (pH) と電気伝導率 (EC) | 95 |
| 5. 4. 3 | 含有元素・酸化物組成 | 96 |
| 5. 4. 4 | 化学成分の溶出機能 | 99 |
| 5. 5 | 屋久島における硝酸性窒素とアンモニア性窒素濃度 | 103 |
| 5. 6 | むすび | 112 |

| | | |
|--------------|--------------------|-----|
| 第 6 章 | 枯死に伴う樹葉の化学成分組成の評価 | |
| 6. 1 | はじめに | 113 |
| 6. 2 | 対象樹葉の形態（寸法・質量・含水率） | 115 |
| 6. 3 | 樹葉の化学成分組成 | 119 |
| 6. 4 | 樹葉の腐植分解 | 125 |
| 6. 5 | むすび | 129 |
| 第 7 章 | 結論 | 130 |
| 謝辞 | | 133 |
| 参考文献 | | 134 |
| 学会などにおける研究発表 | | 136 |

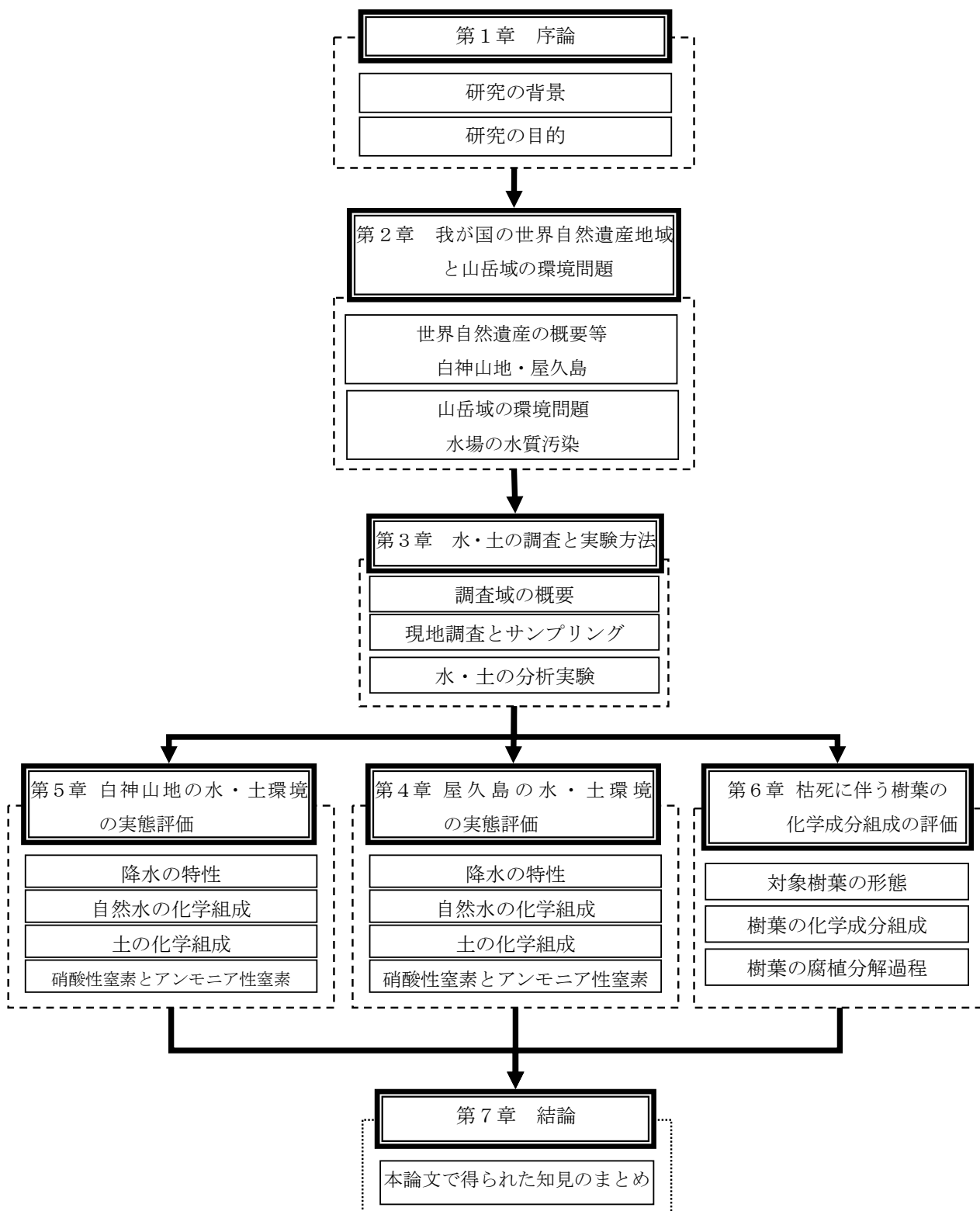


図 1-1 論文の内容と構成

第 1 章 序論

1. 1 研究の背景

我々が住む地球は 46 億年前に誕生したと言われている。およそ 36 億年前には地球上に生命が誕生し、人類が姿を現したのは約 440 万年前とされる。人類は様々な時代を経て、文明を発展させ、文化を営んできたが、そこには常に自然との関わりが存在していた。いつの時代も自然は人類の発展と営みに恵みを供与する必要不可欠な万象であったが、脅威でもあった。近代に入り産業革命が起こり、科学技術が飛躍的に進歩したことで人類の生活は一層向上した。しかし一方で、様々な環境問題が顕在化し、地球、自然、人を蝕み始め、地域から地球的規模で社会不安が拡大している。酸性雨による広域森林地帯の立ち枯れ破壊、二酸化炭素の増加に伴う地球温暖化、フロンガスによるオゾン層破壊、広大な緑地の砂漠化、土壌・重金属汚染、ダイオキシン汚染、海洋汚染、ゴミ汚染、水汚染・水不足など、またこれらの地球規模的な自然破壊の脅威から発生する膨大な数の環境難民や貧民など、数え上げれば枚挙にいとわない。我が国でも、足尾銅山鉱毒事件から始まり、水俣病、イタイイタイ病など様々な公害問題が起こったことは記憶に新しい。いつしか人類は、地球の自然環境に及ぼす危機を考慮することなく科学の進歩や経済の発展を優先させ、地球を蝕み続けてきた。そんな中レイチェル・カーソン女史の「沈黙の春」やローマクラブの「成長の限界」での報告が世界的な関心を惹きつけ、持続可能な開発・発展が様々な分野で追及されるようになり、今や環境を考慮することは世界の常識となっている。

近年、「地球の自然」はかけがえのない財産であることの大切さに気が付き始め、人類は地球上に残る貴重な自然を後世の子孫に引き継ぐために、1972 年 11 月パリの第 17 回ユネスコ総会で「世界遺産条約」を採択し、原生的な自然が残る地域や学術的に貴重な地域を登録し、人類共通の普遍的な財産を保護・保全することを地球に確約した。我が国では 1993 年 12 月 9 日に初めて、世界自然遺産として秋田・青森県境に広大な原生的ブナ林が密林する「白神山地」と、鹿児島県の太古の自然を残す樹齢数千年の屋久杉が群生する「屋久島」が登録された。しかし自然遺産登録以前には、白神山地では「春秋林道」と呼ばれた白神山地縦断道路の建設計画があった。貴重な原生的ブナ林の広域伐採による自然破壊行為に対して高まりをみせた反対運動で中止を余儀なくされたが、半ば敷設された道路建設で、白神山地の世界遺産地域寸前まで森林伐採が迫った秋田県側の二ッ森では、今も原生的なブナ森林を分断するはずだった道路がまるで鋭い刀剣のような形で、白神山地に突きつく深い爪痕を見ることができる¹⁾。同様に、屋

久島でも杉の乱伐採・皆伐採が長年に亘って行われてきた歴史がある。今残る樹齢数千年の大半の屋久杉は見てくれがよくなかったことや、ほこらなどがあり用途価値が低かったことから伐採を免れた大木とも言われている。屋久島の杉の原生森林はほとんど伐採されたが、世界遺産に登録されたことで今も僅かに残っているのが現状である²⁾。

二つの世界自然遺産地域の歴史的背景からも垣間見ることができるように、我々は豊か生活を営むために、貴重な自然に目を向けるよりも経済的な利便性の追求を優先してきた経緯がある。経済的な豊かさとは異なる次元で、人間の豊かさを高める「自然の偉大さ」に気付き、残された貴重な自然を世界自然遺産域として保護保全する「自然との共生」の道を選択していくことは、人類共通の普遍的財産を地球上に増蓄することに繋がり大きな意味をもっている。白神山地や屋久島が発する森霊の宿る自然美は、世界自然遺産に登録されたことや登山ブームと重なって多くの観光客や登山者を圧倒する迫力で魅了し、高度な文明科学でさえも享受できない自然の荘厳さや神秘さを教示してくれる。

しかし近年、山岳域の避難小屋・キャンプ場・水汲み場周辺などでは、ゴミの不法投棄やトイレ設備の不備・不足などによる水環境の汚染問題が深刻化しつつある。このような山岳域での環境汚染問題は全国的に進行しており、登山者にマナーの徹底を奨励し、トイレ設備等の改善・設置による防止対策が急がれている。「山の水場」の水質汚染問題は世界自然遺産に登録されている白神山地や屋久島でも例外ではない。白神山地では遺産登録後直ちに審査許可制による入山システムを採用して自然保護処置が図られているが、入山者は急増している。屋久島では特に入山に規制や制約を設けることなく多くの観光客や登山者を受け入れている。そのため激増する入山者で樹齢数千年の屋久杉の根元が踏まれ樹木が衰弱したり、登山道脇のコケ類が踏まれ死滅したりする自然破壊問題が多発したため、登山道を木道化することで自然環境の保護に努めている。しかしトイレの垂れ流しや投棄ゴミが周辺環境に及ぼす汚染問題をはじめ、急増する入山者の自然環境に与える人為的負荷に対する処置・対策は依然として遅れている。

このような状況を踏まえ、両世界自然遺産地域での「自然の魅力」や「自然の重要性」について、水・土環境の実態からみた自然環境として、科学的視点で評価し提示することは、未来永劫「自然と共存・共栄」していくための思考高揚に繋がるものと確信している。将来も増加する登山者や観光客に起因する入山負荷やその経年的蓄積による負荷が自然環境や生態系に与える懸念される人為的問題に関して、その影響評価を試みていくことは、自然環境や生態系を保全し自然と共生していく上でも、重要な意義を有していると言える。本研究の成果が自然環境の保護・保全対策の一助として役立つことを期待している。

1. 2 研究の目的

高峰山脈が列島中央部を背骨のように走る我が国においては、自然観溢れる森林山岳域や希少な動植物の棲息・自生する秘境的な山岳地域はまだ多く残されている。中でも我が国の原自然を代表する山岳域が「白神山地」と「屋久島」で、1993年12月9日に世界自然遺産に登録され、人類共通の地球的財産として認定されている。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は世界最大級規模で原生的ブナの極相林が繁茂し、昔から形成されてきた秘境的な山岳域には、豊かな水環境のもとに多種多様な森林生態系や生物生態系が育まれている。九州最南端佐多岬の南方沖合約70kmに浮ぶ鹿児島県の屋久島は海拔約2,000mの峰々が聳える小島である。花崗岩の岩盤が露頭し急峻な山岳域を流落する豊かな水環境は、樹齢7,200年の縄文杉をはじめ群生する樹齢数千年の屋久杉や密林する原生照葉樹林などを潤し、世界的にも稀な自然環境が形成されている。

本研究では「自然は地球の宝・財産であり、食い潰したり消滅させたりしてはならない」との観点から、「自然の魅力」や「貴重性」を科学的に探求し、その成果を表現・公表することで「自然環境を保護保全していくことが重要であると考える」意識の高揚に繋げることを第一の目的としている。魅力溢れる自然環境を形成している「白神山地」と「屋久島」を対象に、両遺産地域の自然環境を支配している主要な環境因子である降水、自然水(河川水、溪流水、瀑布水、湧水など)、土に着眼し、各環境因子の基本的な化学物性から元素レベルに至る化学組成の特徴を究明すると共に、環境因子相互の因果関係について横断的な論述を加えることで、両遺産地域独特の自然環境創世術の一端を解明することに力点を置いている。また広葉樹林や落葉樹林の森林山岳域を想定し、落葉した樹葉が生物的作用を受けて腐植物質に変質する過程で、有機物の化学成分組成にどのような変容が生じているのか、また、その変容が土や土中水の化学成分組成にどのように関与しているのか、これらを究明する目的の一助として、白神山地に繁茂していたブナを中心に8種類の樹木の樹葉を対象に化学組成の評価を試み考察を加えている。さらに世界遺産登録を契機に、両地域で入山者が急増し、トイレ、避難小屋(トイレ付)、キャンプ場、登山道沿い等での人為的要因による周辺環境に及ぼす影響が顕在化しつつある。特に「山の水場」汚染問題が懸案事項となっていることから、両地域一円での自然水と土に関する硝酸性窒素とアンモニア性窒素の濃度状況の評価し、環境汚染的視点からその実態や供給要因等について論じている。殊に屋久島については、1994年に実施した調査での両窒素態に関する分析データとの比較検証から、ほぼ10年経過後の入山的負荷による経年的蓄積効果についても考察を試みている。

以上、本研究で得られる成果を通して、特異な森林生態系と多種多様な生物生態系を育む白神山地と屋久島の自然の魅力が科学的に理解され、自然環境の保護保全の重要性に関する意識高揚の一助を担うことを願っている。

1. 3 論文の構成

本論文は7つの章から構成されている。各章の内容は以下に示すとおりである。

第1章では、本研究の背景と目的を論述するとともに内容構成について要約している。

第2章では、世界遺産の種類、意義、目的等について論じ、本研究で対象とした我が国の世界自然遺産である「白神山地」と「屋久島」の登録趣旨を述べるとともに、遺産登録地域の区域等について説明している。また遺産地域の地勢概要として、白神山地と屋久島の気象、地形・地質、植生などを通して自然的な特性を記述し、両世界遺産地域の自然環境が育まれている由縁について概説している。さらに遺産人気と登山ブームによる入山者の急増により、トイレ設備の不備等による「山岳の水場」の水質汚染問題について実態評価し、両自然遺産での急増する入山者受け入れのためのトイレ施設等の在り方等について考察している。

第3章では、両自然遺産地域での水・土環境の実態評価を試みるために実施した、現地調査での範囲や観察・測定項目並びに調査時の注意事項等について説明している。また分析対象とした降水、自然水、土のサンプリング時の形態やサンプリング時の留意事項等について記述している。さらに主要な環境因子となる各サンプルの化学的物性を詳細に評価するために実施した一連の分析実験に関する分析項目と分析方法について要約し、以降の考察に役立てるために、分析対象となる各種イオンや化学成分について、その性質、供給源、水質基準値等についてもまとめている。

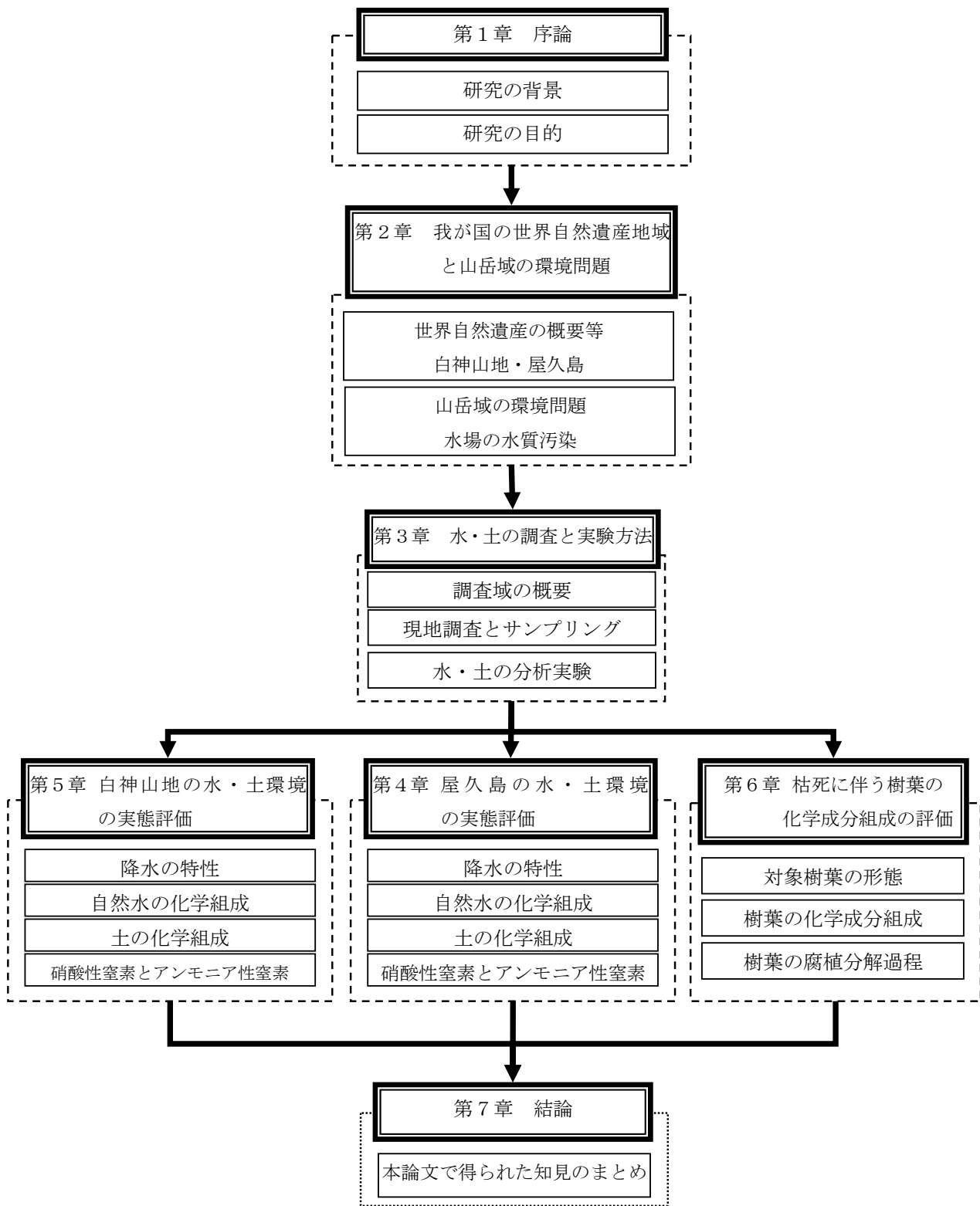
第4章では、白神山地の水・土環境の実態について、水・土の基本的な化学物性から詳細な化学組成の評価を試みている。特に原生的なブナ森林を潤す水環境の視点から、自然水の溶存化学成分や水質タイプについて論述し、供給源である降水の水質との因果関係を明らかにしている。また土は自然水の水質を支配する重要な環境因子という横断的観点から土の含有元素・酸化物組成や化学成分の溶出機能との関連性について議論し、白神山地の自然環境の実態を科学的に解明することに努めている。さらに自然水と土から溶出する硝酸性窒素とアンモニア性窒素の濃度実態から、白神山地一帯での両窒素態による水質の汚染度合を分析し、自然的起源か人為的起源かなどについての供給起源についても言及している。

第 5 章では、屋久島の独特な自然環境の魅力を水・土環境の実態評価を通して論述している。白神山地と同様の論旨を組み立て、降水、自然水、土を分析対象とし、自然環境を左右する重要な環境因子であるこれらの 3 因子について、基本的な化学物性から元素レベルに至る化学組成に関して議論するとともに、さらに 3 因子間での横断的な考察を加え、科学的組成の供給源や環境的要因などとの因果関係について論じている。また遺産登録以来、入山者が激増している屋久島ではトイレ、避難小屋、キャンプ場、登山道沿い等での人為的要因による「山岳の水場」汚染問題が深刻な懸案事項となっていることから、島内一円でのアンモニア性窒素と硝酸性窒素の濃度状況を分析し、ほぼ 10 年前の分析データとの比較検証から、人為的要因による可能性の高い水・土汚染の進行が懸念されることを指摘している。

第 6 章では、自然水と土の化学成分組成や土から溶出する化学成分の評価に役立てる目的から、白神山地のブナを中心に 8 種類の樹木の樹葉を対象に樹葉の化学成分組成の評価を試みている。「生葉」が枯死化し「枯葉」として落葉し、さらに生物的な分解作用を経ていずれは安定した土壌有機物となり、土壌形成に転化する一連の過程について考察している。特に「生葉」と「枯葉」との化学成分組成の変質に着目し、植物栄養学的視点と土壌科学的視点を交差することで、樹葉の腐植分解物は自然水や土の化学成分組成を支配する重要な因子になり得ることが指摘されている。

第 7 章では、本研究で得られた知見をまとめ結論としている。

図 1-1 に本論文の内容および構成について示す。



第1章 図1-1 論文の内容と構成 枯死に伴う樹葉の 化学成分組成の評価

第2章 我が国の世界自然遺産地域と山岳域の環境問題

2. 1 はじめに

人類共通の遺産とされるものを守ろうと、1972年11月16日パリの第17回ユネスコ総会で世界遺産条約が採択された。世界遺産条約は正式には「世界の文化遺産及び自然遺産の保護に関する条約」と言われ、「世界の全ての人に関係するような際だって普遍的な価値を持つ遺産を保護するため、その重要性を世界に呼びかけるとともに、国際的協力を推進すること」を目的としている。世界遺産には文化遺産、自然遺産、複合遺産の三部門があり、我が国は125番目の国として1992年6月に遺産条約に加盟している。2003年7月現在、条約締約国数は176ヶ国に及び、「世界遺産リスト」に登録されている総件数は754件にのぼる。そのうち、文化遺産が582件、自然遺産が149件、複合遺産が23件である。我が国では今まで12件の世界遺産への登録がなされている。1993年12月9日には世界自然遺産として初めて、世界的にも貴重なブナ原生林が広大に生茂る青森・秋田県境の「白神山地」と、樹齢千年を超える屋久杉が群生する鹿児島県の「屋久島」が登録されている。本研究で対象としている両世界自然遺産地域に加え、2004年7月1日には12番目の世界遺産として、和歌山県の「紀伊山地の霊場と参詣道」が自然文化複合遺産に登録されている。また2004年1月16日には、「白神山地」と「屋久島」に次ぐ我が国3番目の「世界自然遺産」の候補地として、北海道の「知床(知床半島と周辺海域)」の推薦が決定している。我が国ではさらに順次、東京都の「小笠原諸島」、鹿児島・沖縄県の「奄美・琉球列島」が自然遺産候補地の推薦に向けて検討が進められている。特に、奄美・琉球列島では、アマミノクロウサギなどが生息する奄美大島、ヤンバルクイナなどが生息する沖縄本島北部ヤンバルの森に加え、豊かな動植物の生態系を育む秘境西表島が自然遺産登録に向けた有力な候補地となっている。

地球上に残る広大な自然や手つかずの貴重な原自然の環境などは地球人共通の普遍的な価値を持つ遺産として保護保全していくことの意識が世界的な高まりをみせる中、我が国においても、登録自然遺産地域を含め、高所山岳域から河川や海岸などの水辺域に至るまで、身近に自然感を体験でき、自然景観溢れる地域を保護保全していくことの重要性が社会共通の意識として定着しつつある。一方、我が国では最初の世界自然遺産登録に向けて、「富士山」を推薦候補地とした経緯がある。しかし登山者によるゴミ不法投棄や排泄物の垂れ流し行為が長年続けられた結果、山のように堆積した投棄ゴミや拡散・浸透した排泄物による景観悪化や環境汚染などの自然破壊問題が広範囲にわたって発生したことで、自然遺産登録を見合わせられた背景が

ある。自然志向意識が社会的な高まりをみせる中、「白神山地」と「屋久島」の両自然遺産地域をはじめ、多くの山岳域などでは、入山する登山者や観光客の増加に伴い、富士山で起こった自然破壊問題と同様の環境問題の発生に直面している。

そこで本章ではまず、調査研究の対象とした「白神山地」と「屋久島」の両自然遺産地域の登録状況や地形・地質などの地勢を通して、自然環境の特徴などについて概説する。さらに近年、全国的に顕在化しつつある山岳域の水汲み場の水質汚染問題について提示し、汚染防止の面から両自然遺産地域での入山者の増加に伴うトイレ、山小屋、キャンプ場等の整備・設置やその周辺域の在り方などについて記述する。

2. 2 「白神山地」と「屋久島」の自然遺産登録

世界遺産については、文化遺産、自然遺産、自然文化複合遺産についてそれぞれカテゴリーが定められている。その中で自然遺産は、次のような基準に基づいて、「人類共通の普遍的な価値」が審査される³⁾。

- ① 生命進化の記録、地形形成において進行しつつある重要な地質学的過程、あるいは重要な地形学的、あるいは自然地理学的特徴を含む、地球の歴史の主要な段階を代表する顕著な例であること。
- ② 陸上、淡水域、沿岸・海洋生態系、動・植物群集の進化や発展において、進行しつつある重要な生態学的・生物学的過程を代表する顕著な例であること。
- ③ すばらしい自然現象や地形、あるいは比類なき自然美の地域を含んでいること。
- ④ 学術上、あるいは保全上の観点から見て、顕著で普遍的な価値をもつ、絶滅のおそれのある種を含む、野生状態における生物の多様性の保全にとって、最も重要な自然の生息・生育地を含むこと。

上述の審査基準のうち1つまたはそれ以上に合致し、かつその必要十分条件を満たした推薦候補地が、自然遺産としてはじめて「世界遺産リスト」への登録が認められる。

世界最大級の原生的なブナ林が分布する青森・秋田県境にまたがる「白神山地」は、(i)科学および環境保全の面からみても貴重な自然環境である。(ii)生態系は生物社会のモニタリングに貴重な地域である。(iii)イヌワシ、クマゲラなどの希少な鳥類の生息地である。ことが登録に至った「普遍的な価値」の主な理由となっている。多種多様な動植物が生息・自生し世界でも貴重な生態系が保全されている白神山地は広大なブナ原生林の広がる山岳地帯の総称で、その総面積は約 1,300km² に及んでいる(写真 2-1)。そのうち世界自然遺産に登録された面積は

十数%の 169.71km² ではあるが、秋田県北西部(藤里町、八森町、峰浜村)から青森県西南部(西目屋村、鰺ヶ沢町、深浦町、岩崎村)の 4 町 3 村にまたがる標高 1,000m 級の峰々が連なる山岳域である(図 2-1)。自然遺産登録地域(169.71km²)は、入山が厳しく規制され、自然環境を厳正に保護保全するコアエリアと称される核心地域(101.39km²)と、規制は緩いが核心地域に直接人為的影響が及ぶのを保護するために取り囲むように設定されたバッファゾーンと称される緩衝地域(68.32km²)とからなっている。ちなみに自然遺産地域で青森県側と秋田県側の登録面積は、それぞれ 126.27km² と 43.44km² で、前者が約 76% を占めている。そのうち両県での核心地域は 76.73km² と 24.66km²、緩衝地域は 49.54km² と 18.78km² で、青森県側は核心地域で約 3 倍、緩衝地域で約 2.6 倍の広さを有している。

白神山地は世界自然遺産登録を機に、入山規制を開始している。特に原生的な天然ブナ林を保全すること

によって、自然・生態系を維持、動植物を保護、遺伝資源を保存などの目的から、核心地域へは、既存の歩道と新に設定された 27 区間の指定ルートを利用した登山等により入山の許可がなされている(図 2-8 参照)。即ち核心地域への入山は既存の歩道と指定ルートに沿った許可制となっている。入山を希望する者は、関係森林管理署へ入山手続きを申請し、審査の上、入



写真 2-1 白神山地のコアエリア(白神岳山頂から)

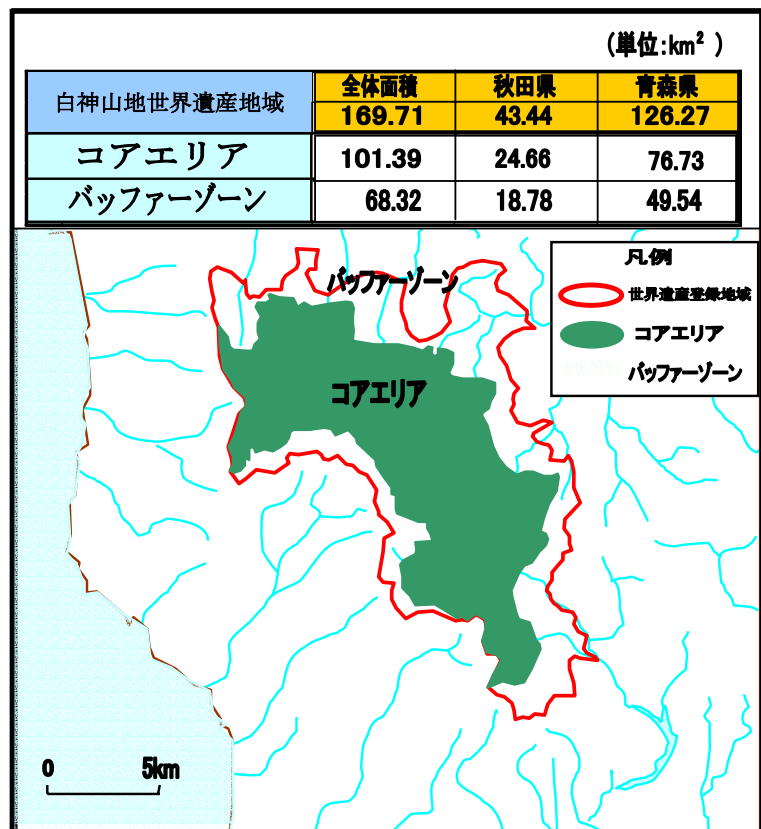


図 2-1 白神山地の世界自然遺産地域

林許可書が交付される制度となっている入山許可は、(i)該当入山が指定ルートを利用した登山であること、(ii)入山届書に必要な記載事項のもれがないこと、(iii)入山を希望するルート付近の自然環境に対して、当該入山が影響を与えるおそれがないこと、(iv)自然環境を守るために設けられた禁止行為を行わないこと、とする審査基準に基づいて判断されている。入山後においても、適当でないと判断される行為があった場合には、指定ルートの一時的な通行止めを行う措置などがとられる。

一方、1993年12月9日、白神山地と同時に世界自然遺産に登録された鹿児島県「屋久島」は、樹齢7,200年の縄文杉をはじめ、樹齢1,000年以上の屋久杉が群生繁茂する太古からの「^{いのち}生命の島」と呼ばれている(写真2-2)。我が国では海洋性亜熱帯気候の北限に位置する屋久島ではあるが、1,935mの宮之浦岳を中心に標高1,000m以上の高峰が34連座する洋上のアルプスともいえる島で、動植物などが垂直的に変遷分布する特異な生態系が確立されている。遺産登録に至った「普遍的な価値」に関する具体的な理由は、(i)標高による連続植生、植生遷移や温暖帯における生態系変遷などの研究の重要性をもつ、(ii)屋久杉を含む生態系の特異な景観をもつ、ことにあるとされている。

屋久島は鹿児島県の最南端佐多岬から南方の海上沖合約70kmに位置し、周囲約132km、面積約500.6km²の丸形の島である(図2-2)。島面積の大半は国有林地で占められているが、畑地や人



写真2-2 屋久島の風景（宮之浦岳にて）

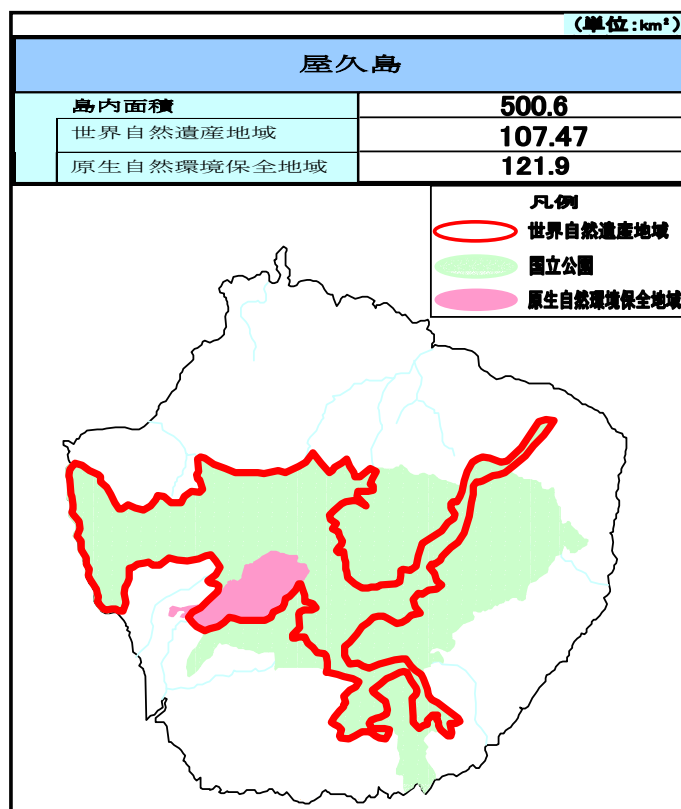


図2-2 屋久島の世界自然遺産地域

家などの私有地は海岸沿いに集中している。屋久島は既に霧島屋久国立公園区域に指定されており、ほぼ重複する形で世界自然遺産地域が登録されている。その登録面積は 107.47km² で、国立公園区域よりは多少狭く、島の中心部から西部域にかけての照葉樹林区域が中心となっており、島面積の約 21% を占めている。また屋久島では原生的な天然林を保存する目的で、保存地区(約 96km²)と保全利用地区(約 56km²)からなる森林生態系保護区域が世界自然遺産地域を完全に覆うように指定されている。特に、西部域に広がる手つかずの天然照葉樹林が密林している区域を原生自然環境保全地域(約 12km²)に指定し、遺産登録地域や生態保護区域などの指定と重複するように更に網をかけて環境保全に努めている。保存地区は地域内に生息する各種生物および地形、土壌などによって構成される森林生態系の厳正な維持、保全利用区域は保存区域の森林に外部の環境の変化が直接及ぼさないように、緩衝の役割を果たすことを目的として設定されている。

このような状況を垣間見ると、白神山地同様に屋久島においても、自然環境の保護保全に向けた行政的な法制措置などを幾重にもとり、動植物などの生態系保存に細心の注意が払われていることが窺われる。しかし両遺産地域で大きく異なることは、白神山地は遺産登録を契機に核心地域への入山規制を直ちに実施したことに対し、屋久島は遺産地域への自由な入山を認めてきたことにある。遺産登録から 10 年ほど経過した現在、増加する登山者や観光客に起因する入山負荷やその経年的に蓄積される負荷が自然環境や生態系に与える影響が懸念される。その影響評価を試みていくこともまた、自然環境や生態系を保全していく上で、重要な意義を有していると思われる。

2. 3 白神山地の地勢概要

白神山地は青森県南西部から秋田県北西部にかけて広がる山岳域の総称である。約 130km²にも及ぶ広大な面積には、標高 1,000m を超える高峰が連座し、深いブナの極相林が覆う原生の森林山岳地帯が形成されている。自然遺産には白神山地の中心域にあたる約 170 km² の面積が登録されているが、遺産登録地域だけが白神山地と思っている人が多い。遺産登録地域は北西から南東方向に長く広がり、登録地域のなかの核心地域は長手方向に約 25km、幅方向にほぼ 5～6km の広さを有している(図 2-3)。海岸までの距離は近いところで約 5km、遠いところでも約 15km と、地理的には日本海側はかなり近接している地域である。核心地域を取り囲むように標高 1,000～1,200m の峰々が連なっている。北西部の青森県側には白神山地の最高峰である向白神岳(1,243.0m)をはじめ、白神岳(1,231.9m)、天狗岳(957.8m)、櫛石山(764.4m)などが聳え、

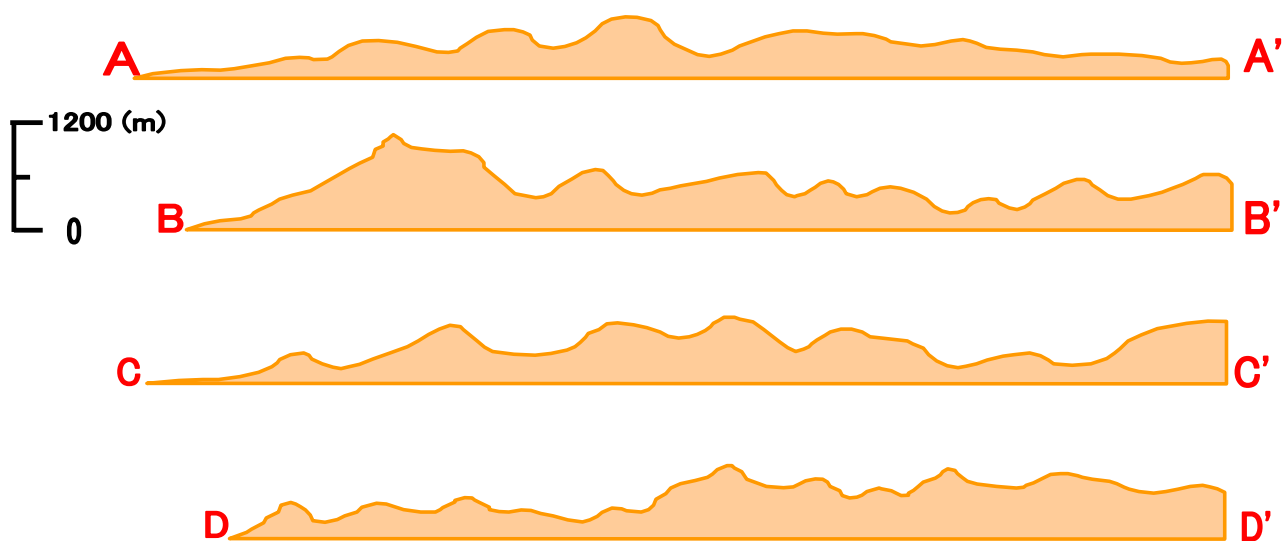
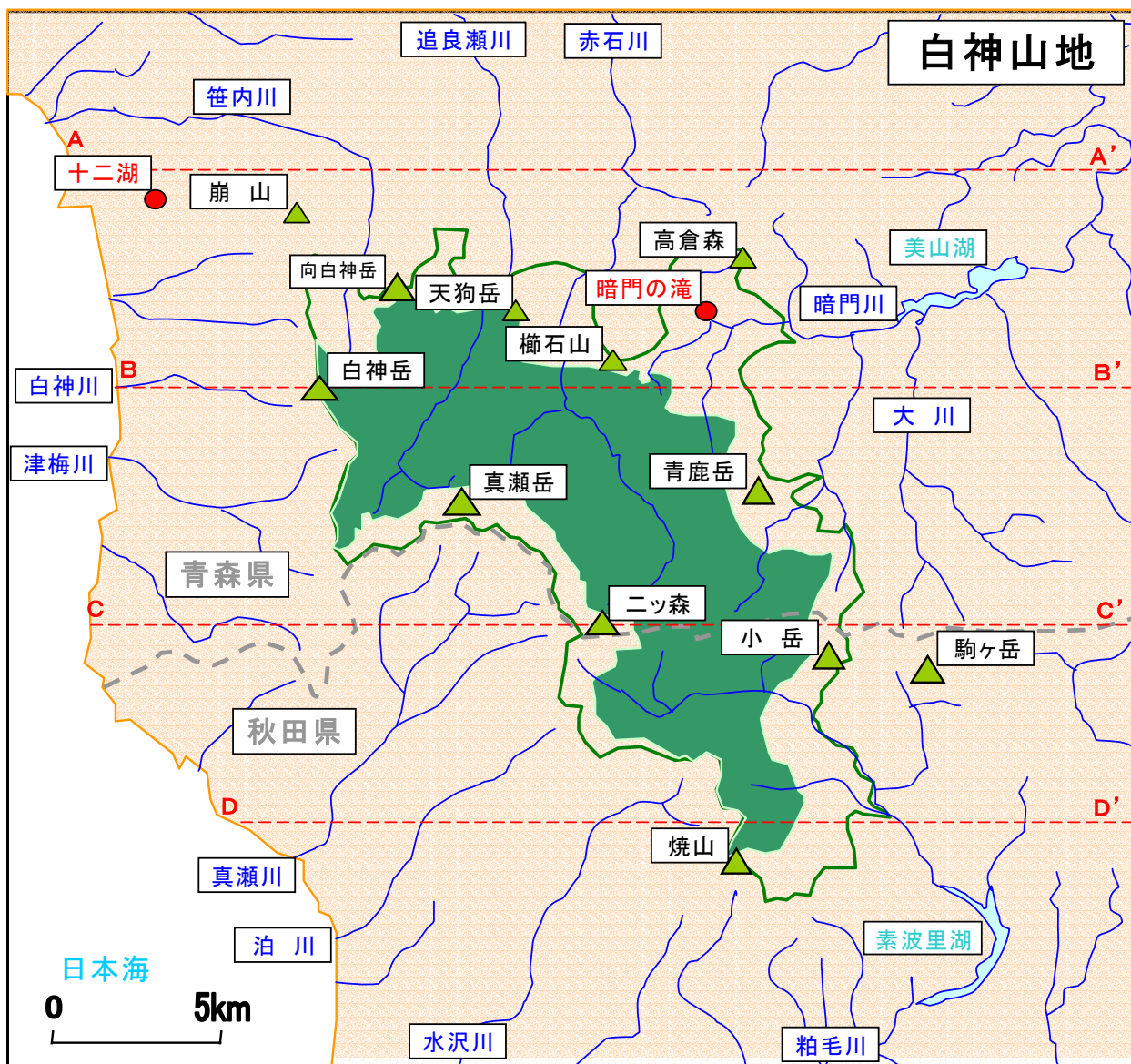


図 2-4 白神山地の全体図と断面図

東部には高倉森(829.4m)や青鹿岳(1,000.2m)などが連なっている。さらに県境の尾根沿いに聳える小岳(1,042.3m)、ニッ森(1,086.2m)、真瀬岳(987.7m)などは分水嶺を形成している。日本海に面してそそり立つ白神山地の高峰は恵まれた降雨と降雪をもたらし、核心地域を形成する急峻な山岳域に源を発する大小様々の河川が、網の目のように発達している。



(a) くろくまの滝



(b) 暗門の滝

写真 2-3 白神山地の滝

これらの河川は水系や流系を形成し動植物の多種多様な生態系を育んでいる。白神山地から流れる代表的な河川として、青森県側には大川、暗門川、赤石川、追良瀬川、笹内川などがあり、秋田県側では白神川、津梅川、真瀬川などが日本海に注いでいる。白神山地の奥地を源流とする河川の中で、最長を誇る河川が赤石川で、その距離は約 45km に及ぶ。冷たい清水が流れる赤石川には、全国でも数箇所では確認されていない、魚体の一部が黄金色に輝いている「金アユ」と呼ばれる「アユ」が生息していることで著名である。また急峻な山岳域を流落する河川は、地形や地層を深く切り裂き、深い峡谷や切り立った溪谷・溪流を造形している。赤石川渓流域に架かり「日本滝百選」の 1 つに数えられている落差 85m、幅 15m の「くろくまの滝」をはじめ、暗門川上流部に架かる第一から第三滝まである落差 26～42m の「暗門の滝」など、溪谷の断崖を流落する大瀑布の情景は、自然感溢れる迫力満点の光景である(写真 2-3)。

約 8,500 年前の昔からブナ原生林の森を育んできた白神山地の地層は、およそ 9,000 万年前の中生代白亜紀(6,400 万年～1 億 4,000 万年前)に形成された花崗岩類を基盤としている(図 2-4)⁴⁾。それに新生代新第三紀の中新世代(1,200 万年～2,000 万年前)に砂、泥土、火山灰などの海底での堆積で形成された堆積岩類(砂

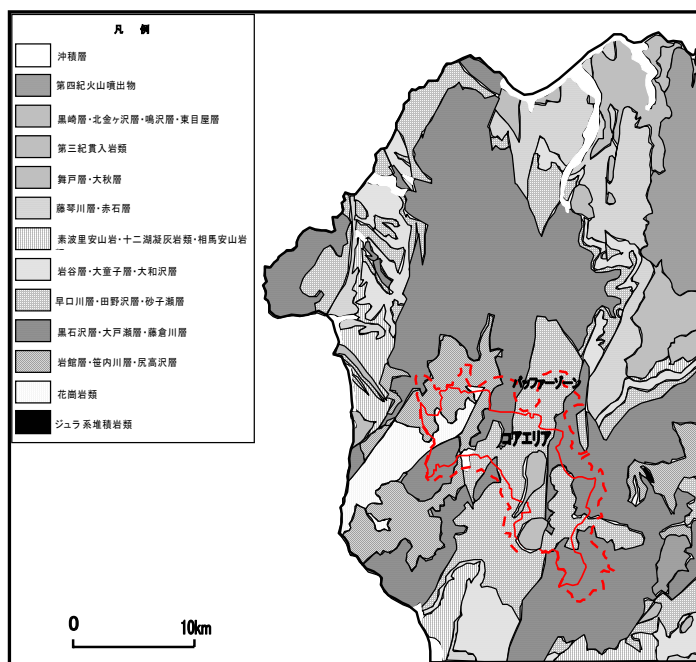


図 2-4 白神山地一帯の地質⁴⁾

岩、泥岩、凝灰岩など)と、その堆積岩層を貫く貫入岩類によって構成されている。流紋岩、ひん岩、石英閃緑岩等の貫入岩は堆積岩層が形成された後、マグマが地下深部から堆積岩層を貫き形成された岩石である。特に、山岳域を形成している地層の上層部は、砂、泥土、火山灰等が固結した軟い堆積岩を主体に構成されているので、長年の水流や降水の浸食作用によって、入組んだ深い峡谷や溪谷が発達して谷壁が急勾配となるため、落差の大きな瀑布などが形成されやすい地形的な特徴がある。

豊かな流況環境は多種多様な生態系を育む最適な生息・自生環境を産み出し、原生ブナの深い森を創世している。このブナの森は、ブナをはじめ、ミズナラ、サワグルミなどからなり、特産種であるアオモリマンテマやツガルミセバヤなどの貴重な植物も生育しており、遺伝子の貯蔵庫や豊穡の森と形容される。また、ツキノワグマやニホンザルおよび生きた化石ともいわれる特別天然記念物ニホンカモシカなどの大型哺乳類に加え、天然記念物クマゲラ、イヌワシなど多くの希少動物が生息しており、学術的にも貴重な地域とされている。

2. 4 屋久島の地勢概要

周囲約 132km の丸形の屋久島は、鹿児島県熊毛郡に所在し、島のほぼ中央から北半分が上屋久町、南半分が屋久町と呼ばれ、2 村からなる島である(図 2-5)。屋久島は九州最高峰で日本百名山の 1 つでもある宮之浦岳(1,936m)を中心に、永田岳(1,886m)、黒味岳(1,831m)などの 1,800m 級的高峰が聳え、しかも 1,000m を超える峰々が 34 連座する山の群乱する島である。そのため海岸部から山岳部へと一気に迫り上る急峻な地形が形成されている。気候的には海に囲まれた海洋性亜熱帯気候に属するが、標高差による垂直的気温の変化が大きく、標高 2,000m に近い高峰山頂付近では亜寒帯に近い気候である。海岸部の低地ではマングローブ、ガジュマル、ハイビスカスなどの亜熱帯花木が繁茂する一方、標高 1,000m を超える山岳域は冬季には降雪・積雪がみられる我が国の南限となっており、独特の気候環境が形成されている。この気候環境に呼応して、植生や昆虫などの生態系にも明瞭な垂直分布が確立されているとされている。高山地帯の山腹では、1,500 種におよぶ自生植物が存在し、約 50 種の固有種と約 30 種の固有変種をもつなど、多種多様で貴重な植物層が観察できる。植物の垂直分布を大きく三つの植生帯に区分すると、標高 500m 程までは照葉樹林帯、500~1,500m 間では針広混交樹林帯、1,500m 以上ではヤクシマダケ草原群の低木風衝林が形成されている。樹齢 7,200 年の縄文杉をはじめ、樹齢 1,000 年以上の屋久杉は、標高 500~1,500m 範囲の針広混交樹林帯に繁茂している。黒味岳山麓に広がる標高 1,600m の小花之江河と花之江河では、我が国最南端に位置する高層湿原が

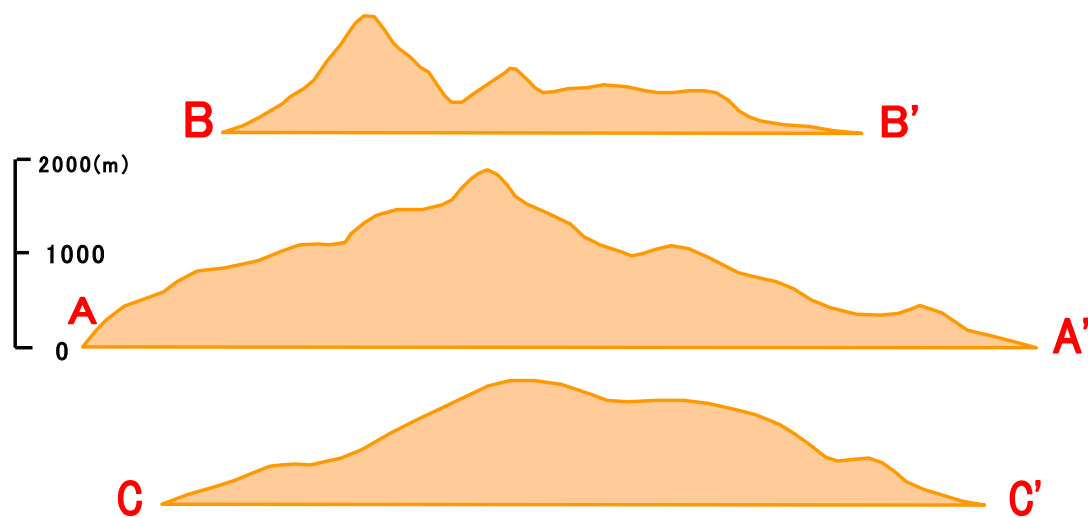
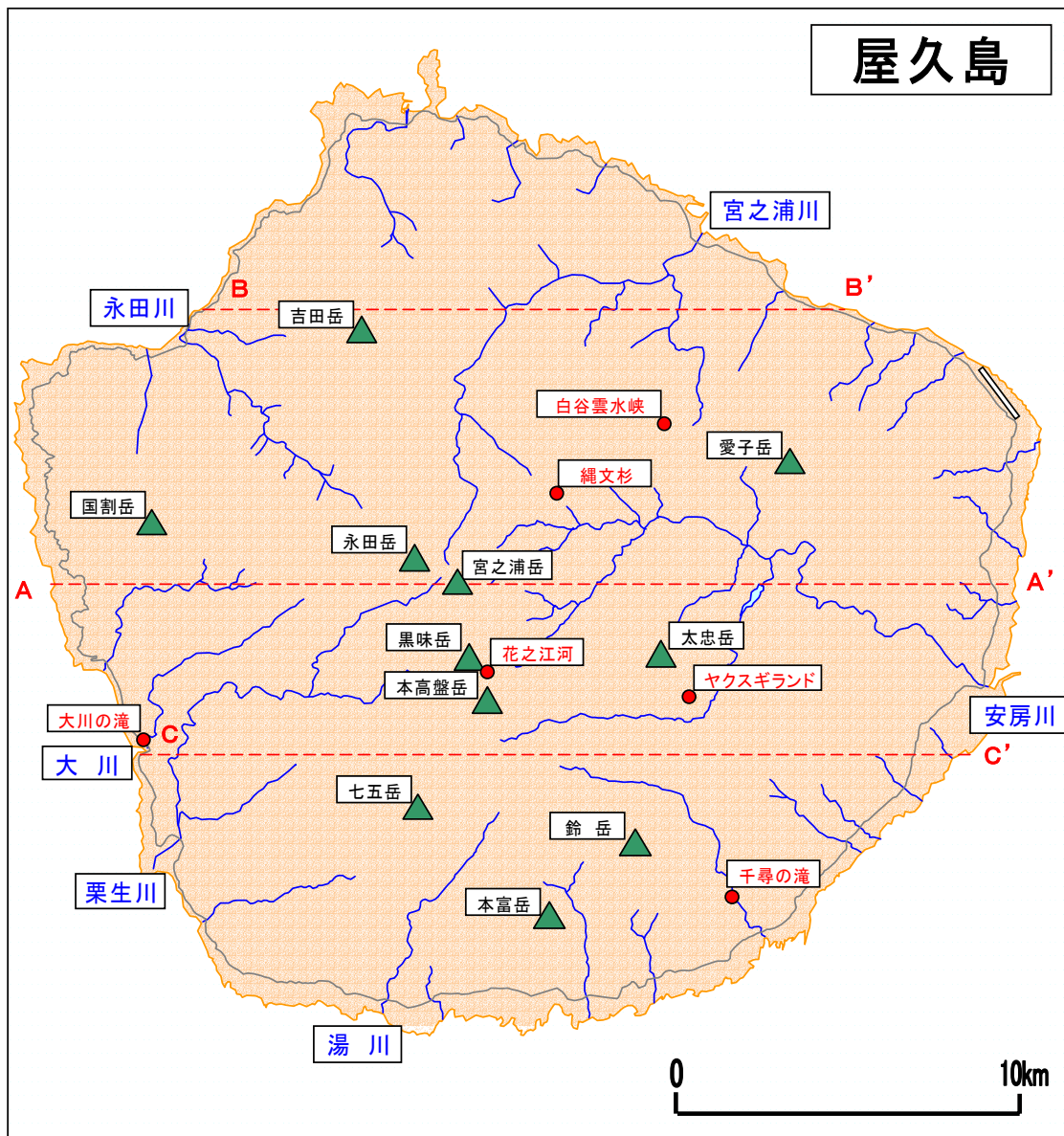


図 2-5 屋久島の全体図と断面図

広がっている。この湿原にはミズゴケ、モウセソゴケ、コケスミレ、コオトギリ、ヤクシマホシクサなどが育成している。特にミズゴケやモウセソゴケなどのコケ類の植物が団塊状に群生しているのが特徴である。

屋久島の地質は、中央部の花崗岩地層と周辺部の熊毛層群地層との二つの地層から主に構成されている(図 2-6)⁵⁾。熊毛層群は 6,300 万年から 3,600 万年前の古第三紀頃に土砂が海底で堆積して形成された頁岩である。花崗岩層は新第三紀後期の鮮新世に入る頃(約 1,400 万年前)に形成されたといわれている。地層の形成としては、熊毛層群に貫入した花崗岩のマグマが現在の屋久島の位置に隆起し、熊毛層群を押し上げて、地上または海上に姿を現したと推察されている。山岳域には、

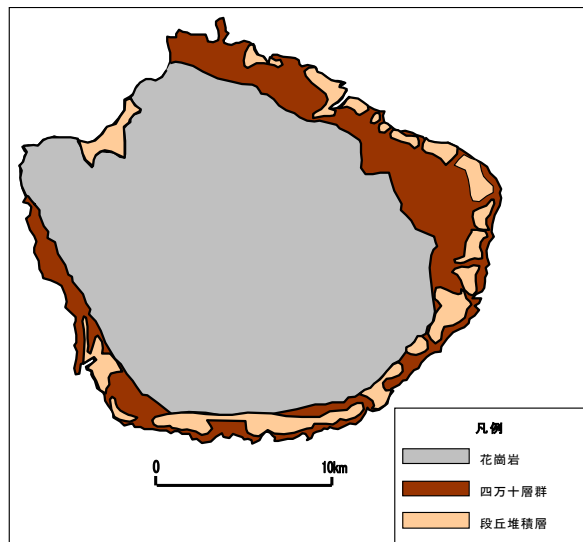


図 2-6 屋久島の地質⁵⁾

どうしてこのような高所にあるのか不思議に思える花崗岩の巨岩や奇岩が数多く点在しており、島の中央部山岳域がマグマ貫入後、隆起して形成された面影を残している。屋久島の地層は表層部に特徴がある。特に急峻な山岳地形では、長年の降雨で洗い流され、表層土は薄層で、花崗岩の岩盤が剥き出しになっている場合がほとんどである。そのため屋久杉などの樹木の根網が岩盤表面を這い回っている光景がよくみられる。

また屋久島の豊かな自然環境を育んでいる大きな要因の 1 つに、我が国では類例を見ない降水量にある。海岸部の平地では年間降水量は 4,000～5,000mm(全国平均量は約 1,700mm)であるが、標高 1,000m 付近での屋久杉の巨木が群生する山岳域では、10,000mm 以上ものとてもない降水量とされている。豊かに降り注ぐ雨は豊かな水環境を生み、島内には網目の様に河川、溪谷、瀑布などが発達し、至る所から清冽な自然水が噴き出し湧き出している。森林地帯に少し踏み込むと、どこでも流水は直接飲料することができ、宮之浦岳流水群は旧環境庁が名水百選に指定した自然水でもある。宮之浦岳などの高峰が聳える島中心部の最奥の沢を源流として、島最長の宮之浦川をはじめ、安房川、栗生川、永田川などが放射状に海に向かって流下している。急峻な峡谷や溪谷が発達し、千尋の滝や大川の滝など、花崗岩の断崖絶壁を流落する巨大な瀑布は豪快である。

気象、地形・地質、風土などの独特の自然環境が、世界に類例のない「原生の巨樹島」として屋久島を創世してきた。屋久島を象徴する「屋久杉」は樹齢 1,000 年以上の巨木の杉をいう(写

真 2-4). 屋久島の杉に関わる資料⁶⁾によると、古い時代には何千年にも達する老齢の屋久杉は神木として崇められ、信仰の対象となっていた。西暦 1600 年以前までは伐採されることはなかったが、ただ一度だけ 1586 年(天正 14 年)島津義久の命で大杉を伐採したという記録が残されている。これは豊臣秀吉が京都に方広寺(焼失して当時のものは現存せず)を建立するために献上させたもので、その巨大な切株が現在のウィ



(a) 縄文杉



(b) 大王杉

写真 2-4 屋久島の巨木

ルソン株と言われている。江戸時代(1642~1867 年)薩摩藩の支配下に置かれると、屋久杉は経済的資源として大量に伐採が始まり、板木や平木に加工され、藩への年貢として納められるようになった。巨大な切株の周辺には、今でも不要とされた輪切り状の丸太がコケに覆われて散在し、当時の面影を残している。1885 年(明治 18 年)屋久島の森林の大部分は国有林となり、1923 年(大正 10 年)には小杉谷を拠点として、森林伐採が国家的政策として本格的に開始された。伐採した屋久杉を運搬するためのトロッコ用森林軌道は、今は縄文杉への登山道の一部となっている。屋久杉の伐採量は昭和 30 年代の高度経済成長期に急激に加速された。昭和 60 年ごろ伐採の前進基地小杉谷周辺では、密集地がほとんど伐り尽くされ、小杉谷も 1970 年(昭和 45 年)廃村に至った。

このような皆伐採・乱伐採の反省が、自然環境保護運動と相まって、現在は国立公園や世界自然遺産に指定され、森林生態系保護の立場から、新しい森づくりの方法が試みられていると共に、自然環境保護保全の面で多くの分野から世界的に注目されている。過去の皆伐採・乱伐採を免れた希少な屋久杉は、現在主に標高 1,000m 付近に繁茂している。特に標高 1,300m の針広混交樹林帯に繁茂している縄文杉は樹齢 7,200 年と推定されており、現地球上の生物での最長寿命記録と言われている。しかし、2,200 年以上の数本の若齢杉が合体した合体木であるとか、また屋久島の北西約 50km に位置する竹島・硫黄島での大噴火(6,300 年前)により、鬼界カルデラができた際の火砕流によって島の植生が壊滅的に破壊されたとすれば、樹齢 6,300 年より若いことになるなど、縄文杉の樹齢推定には幾つかの異説もある⁷⁾。

ところで樹齢 1,000 年以上の屋久杉が群生する標高 500~1,500m の山岳地帯では、表層土が非常に薄層で、屋久杉の根網は露呈した花こう岩の亀裂や岩面を這い回っている。また、ほぼ 10 年前の 1994 年 4 月に実施した当研究室の屋久島調査による自然水の水質分析結果によると、

カリウム、カルシウム、マグネシウムなどのミネラルイオン濃度が非常に低く、全硬度がほぼ 6ppm 以下の超軟水であることがわかっている⁸⁾。このようなことから、樹齢 7,200 年の縄文杉をはじめとする屋久杉の原生巨樹林は、花こう岩を基盤として非常に少ないミネラル養分の水を「生命の水^{いのち}」として、太古から吸い上げていたことが考えられると報告されている⁸⁾。

2. 5 顕在化する山岳域の汚染問題

我が国には、百名山をはじめ素晴らしい山々が存在している。山は多くの人達に感動を与え、自然の奥深さや尊さなどを教えてくれる。国内では年間 880 万人(2002 年調べ)が登山を楽しんでいるとされている。近年の登山ブームによって、「日本百名山」などで知られる山々には登山者が集中し、登山道が貴重な高山植物の自生する地域まで拡張されるなどの、新たな自然破壊問題に至るケースなどが報告されている。特に現在、山岳域で顕在化しつつある重要な環境汚染問題は、無秩序な排泄やゴミの不法投棄などの行為による沢水などの水汲み場の水質汚染問題である。即ち、山岳域のトイレの不整備、山小屋などからのし尿の垂れ流し、長年にわたる登山者によって投棄されてきた山岳域(特に登山道沿い、山小屋周辺、キャンプ場、山頂周辺)にみる「ゴミの山」などによって、山腹の水汲み場や山麓周辺の湧水地などでは、アンモニア性窒素、硝酸性窒素、大腸菌などの汚染物質が検出され、飲料として安全性が心配される不適切な自然水の拡大しつつあることが指摘されている。

山岳の環境保全に取り組んでいる「山のトイレさわやか運動本部」(代表田部井淳子)が 2000 年に初めて山岳域の「山の水場」の水質調査を実施している。北海道の羅臼岳から鹿児島県屋久島の宮之浦岳まで 93 山 160 箇所を対象に、登山者の水飲み場となっている箇所ごとに、入山者数のピーク前(6 月)、ピーク時(7 と 8 月)、ピーク後(10 月)の三回にわたって行っている。現地でのパックテストによる簡易分析が主体であるが、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、大腸菌など 11 項目について調べている⁹⁾。その結果、アンモニア性窒素は 50 箇所、亜硝酸性窒素が 31 箇所、硝酸性窒素が 39 箇所検出されている。また大腸菌も 70 箇所検出されている。亜硝酸・硝酸性窒素の合濃度が水道水の水質基準で規定されている 10mg/l を上回る調査箇所は今回検出されなかったが、「検出されないこと」と規定されている大腸菌が全体の 43%の箇所で検出されたことから、大腸菌が検出された箇所の水は安全性を第一に考えれば、「飲料不適」とみなした方がよいと指摘されている。「山の水場」調査は毎年継続されており、2003 年には全国 234 箇所水場の水質に加え、付近のトイレ位置などの周辺環境についても調査が実施されている。その結果によると、93 箇所(約 40%)で大腸菌が検出され、大腸菌が多く

検出されたワースト 16 箇所のうち、11 箇所で、付近にトイレがあり、汚物による水質汚染を受けた可能性の高いことが報告されている¹⁰⁾。このような調査結果から、「山の水場」は都市部に近い方が検出される汚染物質の数値が高くなる傾向にあり汚染が進行しており、し尿による影響が大きいとみなされている。

図 2-7 には、2003 年の調査データを引用し¹⁰⁾、代表的な箇所の「山の水場」の水質について、大腸菌検出、アンモニア性窒素と硝酸性窒素濃度の状況をマップ表示している。アンモニア性窒素や硝酸性窒素の場合には、検出されても大半は 1mg/l 以下の濃度であるが、なかには 5mg/l を超える山の水場もみられる。ちなみに硝酸性窒素は体内に摂取されると、亜硝酸性窒素に還元され酸素を運ぶ赤血球のヘモグロビンと結合し、特に乳幼児に酸素欠乏症を誘引し、また、硝酸、亜硝酸は発がん性物質であるニトロソアミン類の生成に関与するといわれている。硝酸性窒素、アンモニア性窒素、大腸菌群数の汚染物質の測定値に対する水質汚染度の目安が表 2-1 のようにまとめられている¹¹⁾。特殊な土地利用を除いては、恒常的にほとんど人為的活動の及ばない山岳域の高所では、水場の水質が人為的要因に起因して悪化したのか否かを科学的に判断することは必ずしも容易ではない。特に硝酸性窒素やアンモニア性窒素濃度が 1mg/l 以下の場合には、土中表層部に生息する微小生物の活動作用、動植物の遺骸や枯木の分解作用、落葉などの腐植作用などの自然起源に由来する要因も考慮して判断する必要がある。また近年では、化石燃料の燃焼に起因して発生する排気ガスで降水が酸性雨化する現象が深刻化している。硝酸や硫酸が高い濃度で溶存した雨や雪が富士山や北アルプスなどでも観測されている¹²⁾。これは人為的要因による汚染ではあるが、山の水場の供給源である降水(雨、雪、雲霧など)が酸性雨化することによって、水場での水質の硝酸性窒素濃度が高くなることも当然考えられる。そのため、水場に近接するトイレ、山小屋、キャンプ場など的人為的要因の有無やその設備状況およびゴミ処理状況など、周辺環境を十分に考慮して測定結果を解釈することが重要である。

人為的要因による「山の水場」の水質汚染に対する防止対策としては、トイレの整備・完備が最も効果的とされている。しかしトイレが整備されている場合でも、山岳域の現状では、地中に汚物を埋める「地下浸透型トイレ」がほとんどなため、トイレ付近の水場の水質汚染を防止する役割を果たしておらず、逆に汚染要因となっているケースの多いことが指摘されている。そのため改善策として、山岳域のトイレは「地中浸透型トイレ」を廃止し、浄化槽で汚水を浄化する「生物・化学循環方式トイレ」、汚物を微生物分解する「コンポスト方式トイレ」、携帯トイレのように汚物を自前で処理する「自己処理型トイレ」などのトイレの設置が検討されつつある。

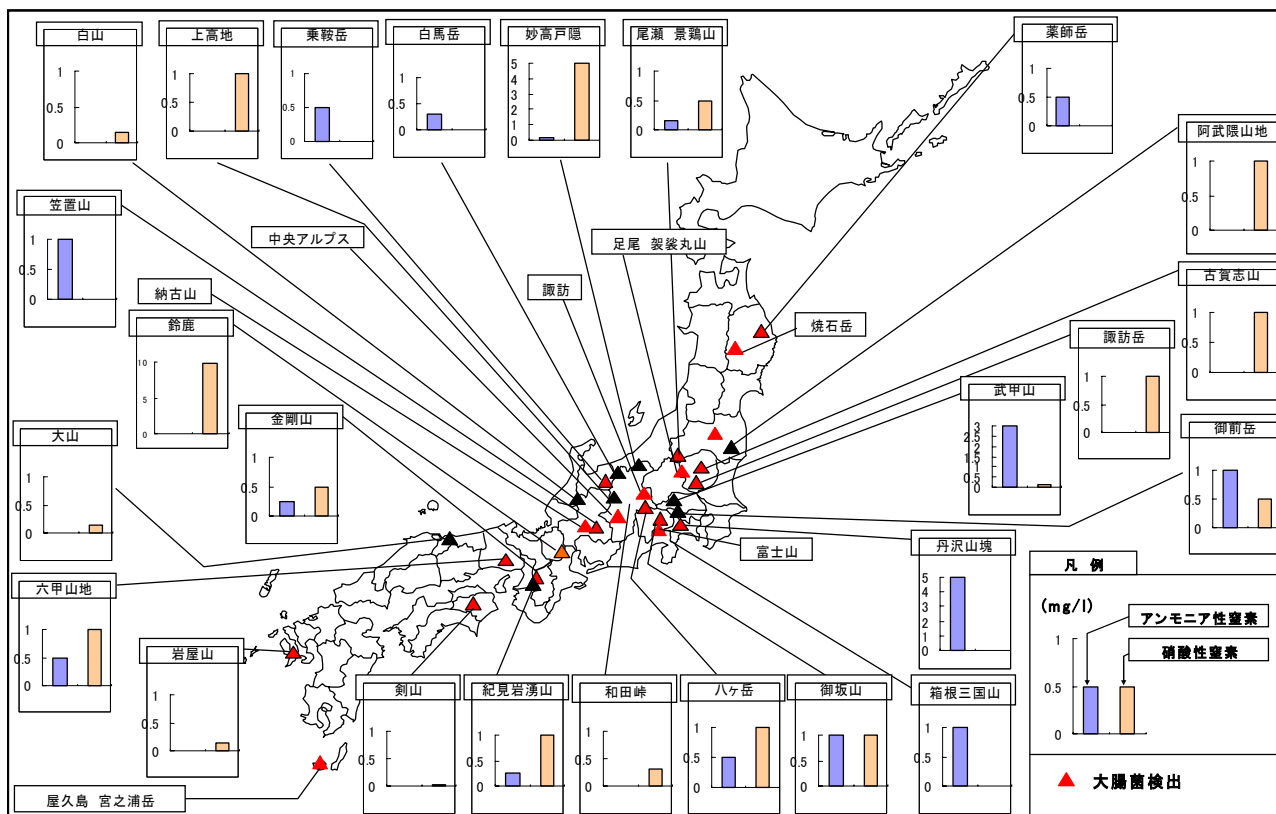


図 2-7 日本全国の山岳域の汚染状況¹⁰⁾

表 2-1 測定値に対する水質汚染度の目安¹¹⁾

| 硝酸性窒素 (mg／l) | | | |
|---|-----------------------------------|----------|---------|
| 調査項目の意味 | 測定値の解釈 | 水の汚れの目安 | |
| 硝酸性窒素は亜硝酸性窒素が酸化することによって生じ、尿尿汚染が進んでいる可能性があることを示している。 | 検出されないことが望ましい。 | 0.2～0.4 | 雨水 |
| | | 0.2～1.0 | 河川の上流の水 |
| | | 2.0～6.0 | 河川の下流の水 |
| アンモニア性窒素 (mg／l) | | | |
| 調査項目の意味 | 測定値の解釈 | 水の汚れの目安 | |
| 水中に溶けているアンモニウム窒素のことで、尿尿の有機物の分解などに起因し、有機汚濁の程度が大きいので水中の酸素が欠乏していると言うことを表す。 | 測定値が高いほど尿尿などによる汚れの度合いが高い。 | 0 (mg/l) | 清潔な水 |
| | | 0.05以下 | 河川の上流の水 |
| | | 0.1～0.4 | 雨水 |
| | | 0.5～5.0 | 河川の下流の水 |
| | | 5.0以上 | 下水、汚水 |
| 大腸菌群数 (個／ml) | | | |
| 調査項目の意味 | 測定値の解釈 | 上流の綺麗な水 | |
| 人や動物の糞便中には大腸菌が多く存在するため、これを測定することにより糞便による汚染の程度を知ることが出来る。 | 試験紙で斑点が出たら、赤痢菌、チフス菌等の病原菌の存在が疑われる。 | 0 (個／ml) | |

2. 6 「白神山地」と「屋久島」の年間入山者数とトイレ施設等の実態

白神山地と屋久島は、1993 年 12 月に世界自然遺産に登録されて以来、毎年多くの観光客が訪れるようになった。遺産登録からほぼ 10 年経過するが、2. 2 節で述べたように、両遺産地域への登山者や観光客の入山は基本的には自由であるが、自由意志での入山が可能な屋久島に対して、白神山地では申請による審査許可制による入山方式をとってきた。図 2-8 は白神山地と屋久島の主な登山道を、また図 2-9 には白神山地と屋久島の近年の入山者数をそれぞれ示している。入山者数データは環境省の調査結果で、白神山地については、環境省の東北地区自然保護事務所がまとめたデータである¹³⁾。

白神山地では 27 区間の指定ルートを利用した登山によって、自然遺産地域への入山が許可されている。図 2-8 には比較的多くの登山者が入山する 11 ルートを示しており、遺産地域内へ向かう登山道の入口 11 カ所に、入山者数を記録するカウンターが設置されている。青森県側には、暗門の滝、津軽峠、天狗峠、一ッ森、十二湖、白神岳、櫛石山、高倉森入口の 8 カ所、秋田県

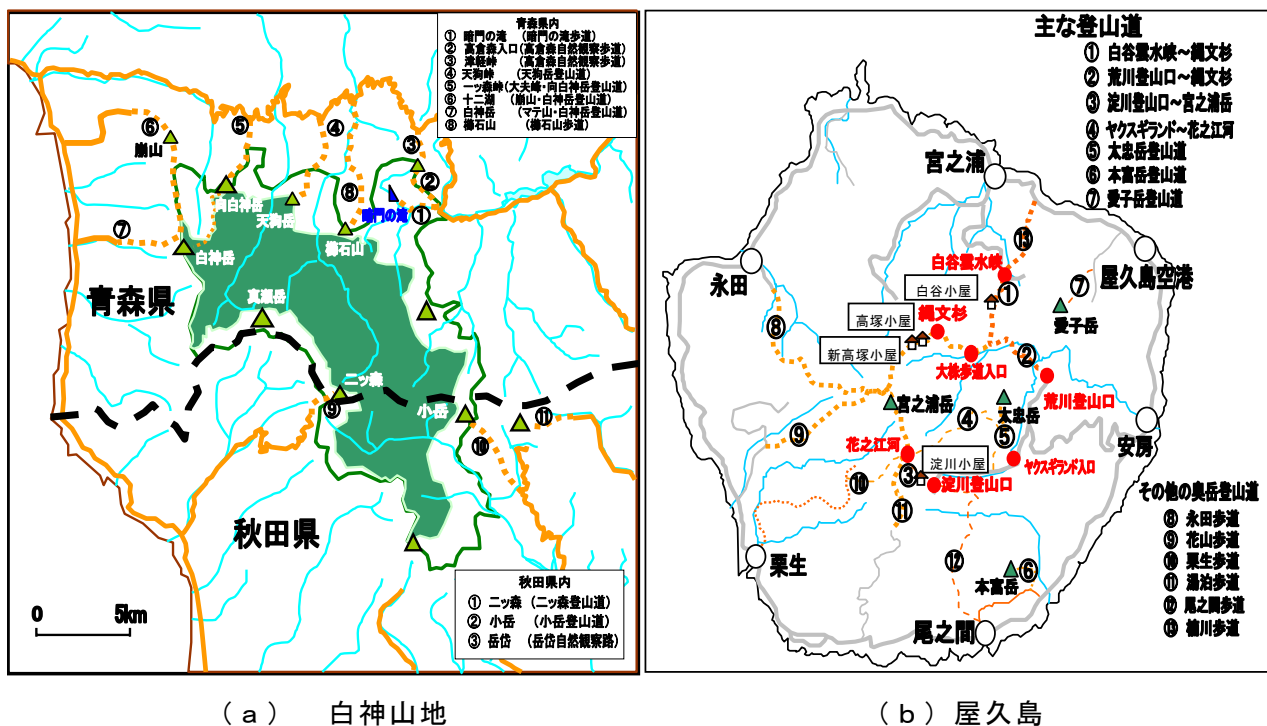


図 2-8 各地域の主な登山道

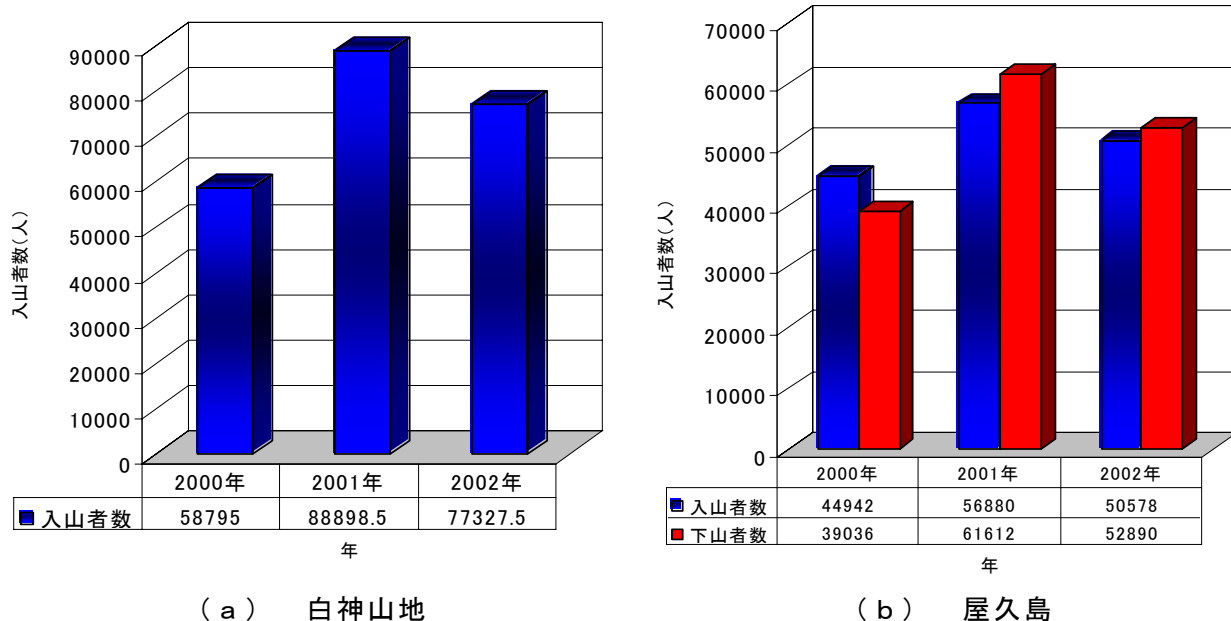


図 2-9 各地域の入山者数 (2000 年～2002 年)

側には、ニッ森、小岳、岳岱の3カ所に設置されている。入山者がカウンターの横を通過すると赤外線センサーが反応し、入山者数をカウントする仕組みになっている。カウンターの性質上、一回の入山で数回カウントすることや装置の故障などもあり、正確な入山者数をカウントすることは困難であるが大まかな入山者数を把握することはできる。1999年度に試験的に設置

され、2000 年度から本格的に調査を開始している。青森県側での暗門の滝の登山道は、バスで近くまで行くことが可能で容易に世界遺産地域に踏み入ることができるため人気が高く、2002 年 8 月には入山者数は 20,120 人を数え、年間入山者数(77,328 人)の 26%を記録している。図 2-9(a)で約 3 年間の入山者数の推移をみると、2000 年には約 59,000 人であるが、2001 年には約 89,000 人、2002 年には約 77,000 人と、約 1.5 倍と 1.3 倍に増加している。また図 2-9(a)に示すほぼ 5 万人台の屋久島の年間入山者数と比較すると、25,000～30,000 人ほど年間入山者の多いことがわかる。白神山地の入山者数は、今後も増加することが予想される。

白神山地では代表的な山施設として、鯉ヶ沢町の赤石溪流沿いに休憩避難小屋「白神さん家」、深浦町の白神ライン追良瀬川大橋付近に「白神山地公衆トイレ」、岩崎村の白神岳山頂に避難小屋とトイレがある。「白神さん家」は遺産地域の多少外側にあるが、他の 2 箇所は遺産地域内に設置されている。2 箇所の避難小屋にはトイレが設置されており、これらを含め遺産地域周辺一帯にはトイレは全部で 7 箇所に設置されている(後述する図 4-41 あるいは図 4-42 を参照)。白神岳山頂避難小屋のトイレは「汲み取り方式」であるが、他の 6 箇所のトイレは最新式の「微生物分解型トイレ」である(写真 2-5)。白神山地のトイレはいずれも排泄物を垂れ流す「地中浸透型トイレ」ではなく、周辺環境へ与える影響に配慮したトイレが設置されている。さらに入山者に対しては、許可時に入山マナーとして、(i)ゴミは捨てないこと(ゴミは出さない、持ち帰る)。(ii)自炊後の食器類は洗剤を使わず、トイレットペーパーで拭き、紙は回収すること。(iii)トイレ紙などは持ち帰ること。などを徹底指導して、自然環境の保全に協力してもらうことにしている。しかし増加する登山者や観光客による自然環境に与える入山的負荷やその経年的蓄積効果が懸念されている。ちなみに 2003 年 7 月の「山の水場」調査による結果では¹⁰⁾、実施した 4 箇所、二ッ森真瀬川流域の春秋林道途中の水場と一の又沢右岸の水場、藤里駒ヶ岳藤琴川流域の登山道最後の水場、真瀬岳真瀬川流域の中の又沢の水場では、アンモニア性窒素、硝酸性窒素、亜硝酸性窒素、COD、大腸菌群数はいずれもゼロと報告されている。

一方、鹿児島県の屋久島では、1993 年 12 月の世界自然遺産登録効果や縄文杉ブームによって、年間入島者数は、1993 年の約 20 万人から 2002 年には約 30 万人と 1.5 倍に急増している。入島者のうち、登山や屋久杉見学などで山岳奥に入山する数は、1993 年には 1 万人程度であったが、図 2-9(b)に示すように、2000 年には約 45,000 人、2001 年



写真 2-5 白神山地公衆トイレ

には約 57,000 人、2002 年には約 51,000 人と、5 万人前後と約 5 倍に増加している¹⁴⁾。屋久島でも白神山地同様に、主な登山道入口にはカウンターが設置されている。図 2-8 に示すように、入山者は、(i) 縄文杉へのコースである荒川登山口(荒川登山口～縄文杉ルート:②)、(ii) 白谷雲水峡の入口(白谷雲水峡～縄文杉ルート:①)、(iii) 宮之浦岳へのコースである淀川登山口(淀川登山口～宮之浦岳ルート:③、ヤクスギランド～淀川登山口～花之江河コース:④)に集中している。特に縄文杉に向かう「荒川登山口～縄文杉ルート(②ルート)」では、年間約 4 万人に達し、2002 年のゴールデンウィーク(4 月 29 日～5 月 5 日)での縄文杉周辺のカウンターでは、一日平均 331 人を記録している(屋久島山岳部利用対策協議会資料より¹⁵⁾)。また淀川登山口から花之江河、黒味岳、宮之浦岳方面への登山ルート(③と④)も人気が高く、入山者数は年間約 1 万 5 千人に達している。これに対して太忠岳登山道(⑤)、永田歩道(⑧)、栗生歩道(⑩)、楠川歩道(⑬)などの奥岳登山ルートは比較的少なく、年間 10～300 人程度とされている。

屋久島には標高 1,000m 以上の高所に淀川小屋、新高塚小屋、高塚小屋、白谷小屋などの避難小屋が設置されている(図 2-8 参照)。山岳域のトイレは 6 箇所の避難小屋等(淀川、新高塚、高塚、白谷、鹿之沢、石塚)に加え、大株歩道入口とヤクスギランド、白谷、荒川、淀川の登山道入口 5 箇所に設置されている。遺産地域に 11 箇所設置されていることになるが、そのうち 10 箇所は、「汲み取り方式トイレ」もあるが整備が不十分で、実質的には、すべて垂れ流しの現状となっている。現在、2003 年に設置された大株歩道入口のトイレだけが、周辺環境に配慮した「微生物分解型トイレ」である(写真 2-6)。大株歩道は縄文杉への最も人気の高い登山ルートであることから、2000 年に初めてトイレが設置されたが、当初は、「汲み取り仮設トイレ」であった。年間入山者数が 4 万人に達し、ゴールデンウィークや連休などには、特に入山者が集中する荒川登山口～大株歩道～縄文杉ルートには、大株歩道入口に 1 箇所、2003 年に「最新式トイレ」が新設されているが、そのコースには、他に出発地点の荒川登山口と遠く離れた白谷小屋の 2 箇所に設置されている程度である。片道 5～6 時間要する縄文杉への登山コースとしては、トイレの不設備が生態系や水質などの自然環境に深刻な影響を与えることが懸念されている。このように屋久島では、増



写真 2-6 屋久島のトイレ(大株歩道入口)

加する入山者への対応として、山岳域でのトイレの処理方式も含めたトイレの改善と整備が貴重な自然環境を保全する上からも、重要な懸案事項となっている。ちなみに安房川流域の大株歩道入口、ウィルソン株～大王杉間、ウィルソン株、縄文杉付近 2 地点の 5 箇所で実施された 2003 年 7 月の「山の水場」調査結果によれば、大株歩道入口の水場で大腸菌が検出されている¹⁰⁾。他の 4 箇所の水場では各種の汚染物質の測定値はいずれもゼロとなっている。

2. 7 むすび

我が国では、特に標高 1,000m 以上の山岳域の自然水は、特殊な周辺環境を除いては、ほとんど人為的影響を受けることは少ないと考えられる。しかし、大気汚染に起因する慢性的な降水の酸性雨化現象による降水への硝酸・硫酸の溶解や山小屋・登山道などからの人為的汚染物質の排出・流出などにより、山岳域の湧水・溪流水などの自然水では、その水質悪化が進行しつつあることも指摘されている。殊に山岳の水資源域を形成している自然水の水質が何らかの要因によって変質した場合には、当然、人を始め生態系などに深刻な影響を及ぼす広域的な水環境問題に発展することが懸念される。山岳域での湧水・溪流水等の自然水に加え、その供給源である降水も対象とした水環境の広域モニタリングは、水資源や生態系保全などの立場から極めて重要である。

このような観点から本研究では後述の章で、白神山地と屋久島の両自然遺産地域での水・土環境の実態評価を通し、登山道沿いやトイレ周辺域の水質汚染状況について分析を試みている。さらに屋久島の水環境評価においては、ほぼ 10 年前に実施した調査結果との比較を試み、水質環境に与える入山的負荷の経年的蓄積効果についても考察している。

第3章 水・土の調査と実験方法

3. 1 白神山地・屋久島の調査域へのアクセス

本研究での調査対象とした、現在、我が国に存在する2箇所の世界自然遺産登録地域である白神山地と屋久島の位置を図3-1に示している。周知のように両地域は、1993年12月9日に我が国で初めて世界自然遺産に登録された地域である。

白神山地は青森県南西部から秋田県北西部に広がる標高約1,000m級の峰々が連なる山岳地帯の総称で、遺産登録面積は169.71km²に及び、原生性ブナ林の森林山岳域として知られている。白神山地の遺産登録地域に踏み入る主要なルートとしては、まず日本海側からはJR五能線あるいは国道8号線を利用して十二湖、白神山、ニッ森の登山道に向かうルー



図3-1 両世界自然遺産地域の位置

トがある。南側からはJR奥羽本線を利用するかあるいは国道7号線から県道322号線に入り素波里湖を経由して小岳登山道口へ向かうルートがある。一方東側からは青森県弘前市から西目屋村に向かう県道28号線を西進すると暗門の滝登山道口に至る。また北側からは岩崎村と西目屋村を結ぶ白神スカイラインを通り向白神岳、天狗岳、追良瀬川溪流、赤石川溪流、櫛石山、高倉森などに入山することができる。遺産登録地域には、自然環境の厳正な保護保全を目的とした核心地域(コアエリア)と、その核心地域への直接的負荷を軽減するために囲むように緩衝地域(バッファゾーン)が設定されている。各ルートからの入山者は、遺産登録地域内に設けられた27区間の指定経路を利用して森林山岳域に踏み入ることになる。本研究の調査では、この27指定経路のほとんどを利用して、白神山地一帯での自然環境の実体験を通し、降水、自然水(河川水、溪流水、瀑布水、湧水、地下水など)、土の採水・採取を試みている。

一方、鹿児島県熊毛郡の上屋久町と屋久町からなる屋久島は九州最南端の南方沖合約70kmに浮ぶ洋上のアルプスと呼ばれ、標高2,000m級の高峰が連座する周囲約136kmの丸い小島である。自然遺産登録地域は500.6km²の広さに及び、島中央部から西部域に繁茂する原生照葉樹林区域が中心となっている。樹齢7,200年の縄文杉を初め、樹齢1,000年を超える屋久杉が群生していることで人気が高い。屋久島には鹿児島空港から空路で小瀬田、あるいは鹿児島港から

海路で宮之浦か安房に入島する方法が一般的である。遺産登録地域の山岳域に入山するルートは種々あるが、起点は宮之浦か安房が主流となっている。通常、宮之浦からは白谷林道を経て白谷雲水峡に向かい、そこから山岳奥に踏み入るルートと、安房から荒川林道奥の荒川別れに向かい、そこから荒川登山口(縄文杉コース)あるいはヤクスギランドや淀川登山口(宮之浦岳コース)を経て山岳奥に入山するルートがあり、両ルートは特に人気が高い。本調査では、この主要な登山ルートの他に、各種のルートから山岳奥に踏み入り、巨樹・巨木等の自然観察調査を実施し、島一円での降水、自然水、土サンプルの採水・採取に努めている。

調査の主目的は、遺産登録地域での原生的自然の魅力を体験し、山岳森林域に育まれている動植物の生態系に学び、その自然環境を支えている主要な因子の一つである降水、自然水、土サンプルを採水・採取することである。なお調査では安全第一としているので、危険な溪流・峡谷や登山ルートのない踏査は極力控えていることから、サンプリングは万遍無く試みようとする努めたつもりではあるが、偏りが生じていることもある。降水と自然水のサンプルについては水温、水素イオン濃度(pH)、電気伝導率(EC)を現地計測している。

3. 1. 1 白神山地域での調査

白神山地については、2004年4、6、7月に3度の現地調査を実施し、表3-1に示すように降水、自然水、土サンプルの採水・採取を試みている。なお2000年8月と2001年3月に2度の調査を当研究室では実施しており、既に入手・保管しているサンプルも併せて分析し、実態評価の充実のために解析データとして利用している。そこでこのサンプルも含め白神山地においては、降水73サンプル、自然水159サンプル、土サンプル64サンプルの分析データに基づいて水・土環境に関する考察を加えている。図3-2に示すように、各サンプルの採水・採取地点は、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。核心地域(コアエリア)でのサンプルが欠落している

表 3-1 両自然遺産地域における水・土のサンプリング

のは、密林のように森林が深くしかもルートがなくほとんど踏み入ることができなかつたためである。各サンプルの状況については第4章でそれぞれ詳述しているが、降水のサンプルは調

| 遺産地域 | サンプルの種類 | 採取年月 | 地点数 | 総サンプル数 |
|------|---------|----------|-----|--------|
| 白神山地 | 降水 | 2001.3 | 43 | 73 |
| | | 2004.4~6 | 30 | |
| | 自然水 | 2000.8 | 79 | 159 |
| | | 2001.3 | 13 | |
| | | 2004.4~7 | 67 | |
| | 土 | 2000.8 | 25 | 64 |
| | | 2004.4~7 | 39 | |
| 屋久島 | 降水 | 2003.7 | 19 | 32 |
| | | 2004.8 | 13 | |
| | 自然水 | 2003.7 | 76 | 91 |
| | | 2004.8 | 15 | |
| | 土 | 2003.7 | 75 | 88 |
| | | 2004.8 | 13 | |

査中に直接採水した雨水もあるが、春季の調査であったことからほとんどは人為的攪乱の影響を受けていないと思われる山岳域で採取した積雪である。ここでの自然水は河川水、溪流水、瀑布水、湧水、地下水などの各種の形態の地上水を総称している。採水した自然水の水形態は、河川水・溪流水が 133 サンプル、瀑布水が 13 サンプル、湧水が 11 サンプル、湖水と地下水がそれぞれ 1 サンプルである。土サンプルは分解途上の腐植有機物等から溶解する化学成分の土中や地表水への供給についても考察することを目的としているので、総じて地表面下 10～20cm 程度の表層土を対象としている。表層土なので土サンプルの判別は正確

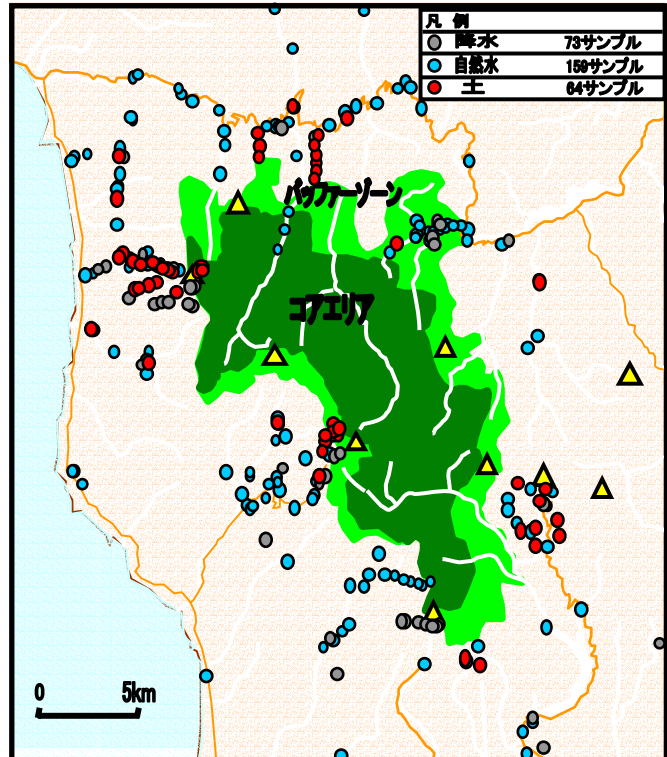


図 3-2 白神山地一帯での水・土のサンプリング地点

には難しいが、主にローム的粘性土、黒ぼく的有機質土、火山灰性土、細粒砂的河岸土などである。なお 2004 年 4～7 月に採取した 39 個の土サンプルは、落葉・枯葉等の腐植有機物を多量に含有している有機質土が主体である。水・土のサンプリングに際しては、「山の水場」汚染問題を検討することにも配慮し、トイレや避難小屋の設置場所にも留意して行っている。図 3-2 に示したように白神山地での降水・自然水・土サンプルの採取地点範囲は南北に約 35km、東西に約 32km にわたり、標高約 1,000m の高峰域に及んでいる。

3. 1. 2 屋久島域での調査

屋久島では 2003 年 7 月と 2004 年 8 月の 2 度にわたって現地調査を実施し、降水 32 サンプル、自然水 91 サンプル、土 88 サンプルの採水・採取を試みている(表 3-1 参照)。調査域と水・土の採水・採取地点を図 3-3 に示すように、サンプリング方針は白神山地の場合と同様に、遺産登録地域を主体に島一円からのサンプリングに努めることであるが、地形が複雑でしかも深い森林域のため踏査不能な領域もある。降水は、宮之浦岳や永田岳山頂の高峰域、山岳登山道沿い、平野部の海岸沿い集落などで、現地での調査時に直接採水した雨水である。自然水は、島中央部高峰域に源を発する主要な河川沿いでの河川水を初め、屋久島を代表する巨大瀑布であ

る大川の滝や千尋の滝などの瀑布水、登山道沿いの溪流水や島内至る所から湧き出す湧水が対象となっている。土はやはり表層土を対象としてサンプリングしている。中央部山岳域は大半が花崗岩地帯なので花崗岩の岩片をはじめ、それが風化したまさ土的な細粒土、海岸部周辺に露頭する頁岩の風化した泥土、過去に近隣の島での火山噴火で降下したとされる火山性噴出堆積土などである。やはり屋久島は入山者の急増により、トイレ・避難小屋等の設置や位置との関連で、深刻化する水場の汚染問題が重要な懸案事項となっていることから、特に

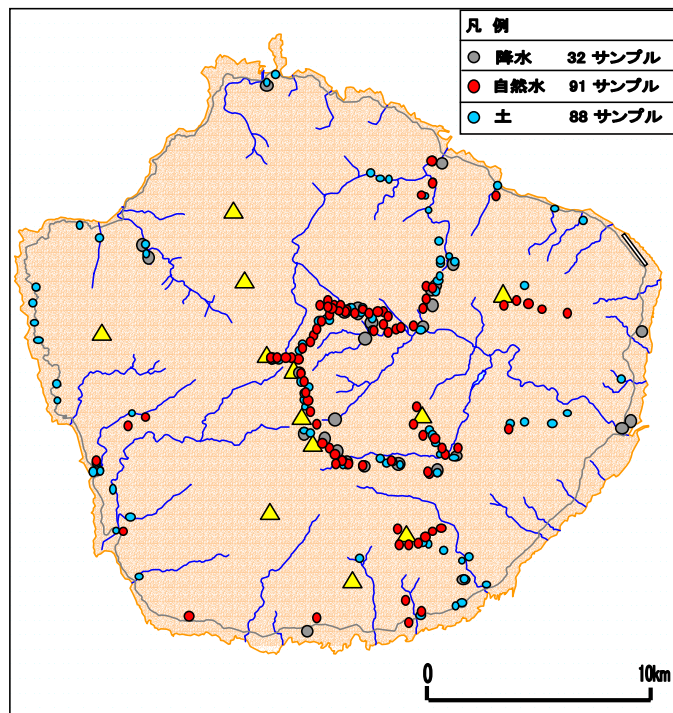


図 3-3 屋久島での水・土サンプリング地点

人気の高い荒川登山口～大株歩道～縄文杉ルート、白谷雲水峡～縄文杉ルート、淀川登山道～宮之浦岳ルートでは入念なサンプリングに努めている。

また屋久島については 10 年程前の 1994 年 4 月と 7 月に、本調査と同様のサンプリングを兼ねた現地調査を既に実施し一連の分析データを保有しているので、今回の調査での分析データとの比較から、ほぼ 10 年経過後の水・土環境の経年変化の状況を把握し評価することを試みている。主に先に述べた「水場の汚染問題」と関連して、トイレ・避難小屋等の設置・配置や約 10 年にわたる入山的蓄積負荷が、周辺の水環境に与える影響を考察するために、人気の高い登山ルート沿いでの自然水を中心に、硝酸性窒素とアンモニア性窒素の溶存状況についても考察している。

3. 2 水・土の分析実験

白神山地と屋久島から採水・採取した一連の水と土サンプルについて、主に化学成分組成を把握するために、各種の分析実験を実施している。実施した各実験の分析項目と分析方法を表 3-2 に示している。水サンプル(降水と自然水)のうち、自然水の水素イオン濃度 (pH) と電気伝導率 (EC) については、現地で直接測定を試みている。また土サンプルでの水素イオン濃度 (pH)、電気伝導率 (EC)、水溶性成分、強熱減量等の化学的物性を評価するために行った一連の分析実験は、地盤工学会基準 (JGS) の化学試験法¹⁶⁾に基づいて実施している。

表 3-2 水・土サンプルについて実施した分析項目と分析方法

| サンプル | 分析項目 | 分析方法 |
|-------|------------------|------------------------------|
| 水サンプル | 水素イオン濃度 (pH) | ガラス電極メーターによる測定 |
| | 電気伝導率 (EC) | 電気伝導率計による測定 |
| | 主要陽・陰イオン量 | イオンクロマトグラフィーによる測定 |
| 土サンプル | 土の水素イオン濃度 (pH) | 土懸濁液を用いたガラス電極メーターによる測定 |
| | 土の電気伝導率 (EC) | 土懸濁液を用いた電気伝導率計による測定 |
| | 土から溶出する主要陽・陰イオン量 | 土からの溶出水を用いたイオンクロマトグラフィーによる測定 |
| | 土から溶出する微量成分元素量 | 土からの溶出水を用いた高周波発光分析装置による測定 |
| | 土の含有元素・酸化物組成 | 蛍光 X 線回折装置による測定 |

3. 2. 1 水サンプルの分析項目と方法

(1) 水素イオン濃度 (pH)

水溶液中の水素イオン $[H^+]$ の濃度を示す指標であり、その逆数の対数が pH である。pH=7 が中性であり、pH>7 ならばアルカリ性、pH<7 ならば酸性を示す。

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]} = -\log[H^+]$$

$[H^+]$: 水溶液中の水素イオンのモル濃度 (mol/l)

pH の測定法には、指示薬の変色を利用する比色法とガラス電極 pH メーターによる方法があり、本測定ではガラス電極 pH メーターを用いている。ガラス電極メーターは、内部に pH=7.0 の溶液を入れたガラス電極と塩化カリウム溶液を入れた比較電極からなり、pH 値の異なった溶液の間にガラス薄膜を置いた際の pH の差により生じる二層間の電位差を利用して水素イオン濃度を測定する装置である。測定に関しては試料にガラス電極メーターの電極を浸漬させて行う。pH は酸性雨や水質を判断するのに重要な測定値となる。

(2) 電気伝導率 (EC)

電気伝導率は、伝導度 (Electric Conductivity) とも表記され、水中に溶存しているイオン量と各イオンの電気を運ぶ速さによって支配される値で、単位は ($\mu S/cm$) などが用いられる。この値は水温によって変動するため、標準温度に補正・換算して表される。通常 18℃、20℃または 25℃が使用される。ある任意の温度 (t) で測定された値 (λ_t) を 25℃の標準温度の値に換算する場合の式は以下のように表示される。

$$\lambda_{25^\circ C} = \lambda_t / \{1 + \alpha(t - 25)\}$$

α : 温度係数 (範囲 0.020~0.025、通常 0.022)

本測定では携帯可能なコンパクト型伝導率計を用いている。一般に電気伝導率計は、同一形状の2個の平板白金電極を試料水に浸漬させたときに測定される電極平板間の電気抵抗値により電気伝導率を求め、標準温度 25℃の値に補正・換算して表示される。使用した計測器における測定では、試料を直接電気伝導率の計測部であるセル内に滴下して伝導率を測定している。電気伝導率は、電気伝導性のあるイオン種成分を多量に含むか、少量に含むかを表しており、イオンの種類によっては簡易的な汚染度の目安にもなる便利な指標である。

(3) 主要溶存化学成分

一般的に水質の評価や解釈において、主要溶存化学成分であるナトリウムイオン (Na^+)、カリウムイオン (K^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})、マグネシウムイオン (Mg^{2+})、重炭酸イオン (HCO_3^-)、塩素イオン (Cl^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-})、硝酸イオン (NO_3^-)、シリカ (SiO_2) の基本的な化学成分の分析が行われる。化学成分量の表示には、濃度として質量単位 (mg/l あるいは $\mu\text{g/l}$) を使用している。また必要に応じミリ当量単位 (me/l) に変換して表示している。

本測定では液体イオンクロマトグラフィー (写真 3-1) を使用し、主要陽・陰イオン成分を分析している。液体イオンクロマトグラフィーとは液体の固定相と液体の移動相の2相間における物質の分配係数(イオン物質の電離定数に相当)の差を利用して溶液中の混合物を分離し同定する装置である。この装置による試料中の成分の定量は、クロマトグラムの検出部で測定された各成分のピーク高さや面積を計測し、各成分の標準液で作成した検量線を用いて算出される。検出対象とした主要溶存化学成分の性状について下記に要約する。



写真 3-1 イオンクロマトグラフィーの全景

a) ナトリウムイオン (Na^+)

主として塩化ナトリウム (NaCl) に由来し、我が国は四方を海に囲まれているために降水や自然水などではこの濃度は高い。海塩起源の濃度を知る上で重要な成分である。また人間活動からの排出や、雨水、岩石、土壌などからも供給される。

b) カリウムイオン (K^+)

一般に降水や自然水での濃度は低い。植物体に多く含まれている成分であり、植物を燃焼させたときの粒子状物質や木の葉などにより供給される。林内雨や樹幹流に多く含まれている。また岩石や土壌の風化にともなっても溶出する。

c) カルシウムイオン (Ca^{2+})

淡水においてもっとも重要な成分であるが、わが国での含有量は一般的に少量である。主として地質が起源であり、沖縄などの石灰岩を多く含む地域や鍾乳洞などが形成されている地域では溶存量は高い。これに対し火成岩地域における溶存量は比較的少ない。土壌やコンクリートに多く含まれているため、道路粉塵が大きな発生源となることもある。春には黄砂として大陸からも飛来してくる。

d) マグネシウムイオン (Mg^{2+})

主に岩石、土壌の風化に起因する。しかし海側に近接する自然水などの場合には海塩粒子飛沫による供給効果が大きい場合もある。

e) アンモニウムイオン (NH_4^+)

アンモニアガス (NH_3) が水に溶け込んで生成される。タンパク質窒素の腐敗過程に由来し、人間活動による部分と肥料または家畜等の排泄物による供給効果が大きい。そのため農業地帯や牧畜の盛んな地域では局所的に濃度が高くなる場合が多い。他に泥炭地質に由来するものや深層地下水における硝酸性窒素の還元由来する場合もあり多様な供給起源がある。アンモニウムイオン (NH_4^+) は、土中で酸化され硝酸態 (NO_3^-) に変態する際、 H^+ を放出し土壌や地下水を酸性化させるため潜在的な酸ともいわれている。

d) 塩素イオン (Cl^-)

塩素イオンは岩石の風化や降水により自然水に供給されるが、これらの寄与はそれほど高くない。海水や温鉱泉の混入により濃度は増加する。 Cl^- は土粒子に吸着されることもほとんどなく地下水や河川水に溶解・循環し、しかも測定が容易であるため生活排水などの人為的活動に起因する影響を表す目安の指標ともなる。

f) 硫酸イオン (SO_4^{2-})

硫酸イオンは Cl^- と同様に岩石の風化により供給されるが、海水や温鉱泉水の混入によりその濃度は増加する。また石油や石炭などの化石燃料の燃焼から生じる二酸化硫黄 (SO_2) が水に溶解しても生成されるため、人為的活動に起因する大気汚染物質の指標にもなっている。 SO_2 の増加で生成される硫酸の溶解で降水が酸性化した「酸性雨」は世界的にも深刻な環境汚染問題となっている。

g) 硝酸イオン (NO_3^-)

水中で不安定な亜硝酸イオンが酸化されて主に生成される。窒素化合物の最終生成物が硝酸性窒素とされているが、湖沼、貯水池などの低層や深井戸などの溶存酸素が少なく還元的な環

境では硝酸性窒素は還元され、亜硝酸性窒素となる場合が多い。また硫酸イオンと同様に近年は、化石燃料の燃焼により生成される二酸化窒素(NO_2)の光化学反応により発生するものが多い。このため人為的な汚染が生じている場合には高い濃度を示すことから、降水や地下水などの汚染指標の一つにもなっている。特に昨今は、肥料や農薬散布などが主因となって生じる地下水や河川水の硝酸性化が、全国的に深刻な水質汚染問題となっている。

3. 2. 2 土サンプルの分析項目と方法

(1) 水素イオン濃度 (pH)

土の水素イオン濃度は、土粒子、間隙水および空気からなる集合体としての土の界面化学的な性質を評価するのに役立つ指標の1つであり、土の基本的化学物性を理解する上で重要な指標となっている。pH測定は地盤工学会の土質試験法(JGS0211-2000)「土懸濁液のpH試験」¹⁶⁾に基づき実施している。

(2) 電気伝導率 (EC)

土の電気伝導率は、土中の電解質を浸出させた溶液の電気抵抗値を測定したもので、溶存化学成分を知る上で目安となる重要な指標である。ECの測定は地盤工学会の土質試験法(JGS0212-2000)「土懸濁液の電気伝導率試験」¹⁶⁾に基づき実施している。

(3) 水溶性成分

土の水溶性成分を評価する試験では、土の間隙水中に溶解している成分と水で比較的簡単に溶解する土粒子中の化学成分を一括して評価することを目的としている。ここでの測定成分はナトリウムイオン(Na^+)、カリウムイオン(K^+)、カルシウムイオン(Ca^{2+})、マグネシウムイオン(Mg^{2+})、アンモニウムイオン(NH_4^+)、塩素イオン(Cl^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})、硝酸イオン(NO_3^-)、亜硝酸イオン(NO_2^-)の9成分である。測定方法を要約すると、①10 mm未満の土粒子を使用し、土の乾燥質量約50 gに相当する湿潤質量 $m(\text{g})$ を量り、振とう瓶に入れる。②その瓶に水 500 ml を加え振とう機により常圧で6時間連続振とうする。振とう後20~30分静置し、遠心分離した後に吸引ろ過する。③このろ液を溶出液(以後、土溶出水と呼ぶ)とし、溶解している成分の分析を行う。土の水溶性成分試験は地盤工学会の土質試験法(JGS0241-2000)「土の水溶性成分試験方法」¹⁶⁾に基づき実施している。なお土溶出水の化学成分分析には液体イオンクロマトグラフィーを使用している。

(4) 強熱減量

土の強熱減量は、 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ で一定量になるまで炉乾燥をした土を、 $750 \pm 50^\circ\text{C}$ に強熱したとき

の減少質量を炉乾燥土の質量に対する百分率で表したものである。質量の減少量から土に含まれている有機物量や結合水量および結晶水量の目安を得ることができる。土の強熱減量試験は地盤工学会の土質試験法（JGS0221-2000）「土の強熱減量試験方法」¹⁶⁾に基づき実施している。

（５）微量成分元素

微量成分元素を測定するには、通常、高周波プラズマ発光分析法（ICP：Inductively Coupled Plasma）や原子吸光光度法などが用いられる。土から溶出する重金属類等の微量成分元素に関する本測定では、土溶出水について高周波プラズマ発光分析装置（写真 3-2）を用いた ICP 法によっている。ICP 法は ppb ($\mu\text{g/l}$) レベルの高い検出精度、広い濃度範囲、多元素一斉測定が可能などの特徴を有し、多くの分野での微量元素分析に適用されている。なお測定を実施した微量成分元素は Al、Si、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd、Pb の 10 種類である。これらの元素の特性と環境に与える影響を中心に概説する¹⁷⁾。



写真 3-2 高周波プラズマ発光分析装置の全景

a) アルミニウム (Al)

アルミニウムは地殻中に酸素、ケイ素に次いで豊富に存在し、金属元素としては最も多く、鉄のおよそ 2 倍存在している。酸性化した土壌では、Al が Al^{3+} となって溶け出し植物の根の細胞膜において Ca^{2+} とイオン交換反応を起し、成長障害を引き起こすとも言われている。また、人体においても過剰に体内に入ると、鉄の代謝経路を通して骨や筋肉にとりこまれ、そこで沈着し骨の脆弱化、筋肉の萎縮硬化を引き起こすとされている。

b) ケイ素 (Si)

ケイ素は非金属元素でありシリコンとも呼ぶ。天然には遊離状態で存在する場合が多い。岩石中に多く産し地殻中の主要成分でもあり酸素に次いで豊富に存在する。

c) クロム (Cr)

クロムは比較的多く世界に分布存在する元素であり、O、Si、Al、Fe、Ca、Na、Mg、K、Ti などに並んで 22 番目に多い元素である。Si ほどではないが、Ni、Zn、Cu、Pt、Au などよりも多量に存在している。しかしながらその存在はかなり偏在し、クロム鉱石として利用できる濃度の鉱石は限られた地域でしか産出しない。よく知られているクロムメッキは自動車の装飾部や

家庭器具などに利用されている。クロムとニッケルの合金は強度が高く高温にも強いので、電子レンジなどの家電製品に利用されている。六価クロムが人体に及ぼす影響はよく知られているが、皮革工場排水からの汚染や、最近では、クロム鉱滓の地中埋め立てによる被害が問題になっている。水道法に基づく水質汚染基準（健康に関する項目）では、六価クロム濃度は 0.05mg/l 以下と定められている。

d) マンガン (Mn)

マンガンは地殻に 0.01% 程度存在しているとされ、鉄に次いで広く分布している。主鉱石は軟マンガン鉱などであり、合金添加剤や銅の脱酸剤などに利用されている。動植物体にも微量に含まれ、発育、代謝に不可欠である。しかしマンガンの過剰摂取は神経症状をおこしやすくなり、血中コレステロール値を高め抵抗力が弱くなるといった病状を引き起こすことがある。毒性は少ないとされているが、マンガン鉱山労働者には神経障害をおこす慢性中毒例がある。水道法に基づく水質基準（水道水が有すべき性状に関する項目）では、マンガン濃度は 0.05mg/l 以下と定められている。

e) 鉄 (Fe)

地殻中では酸素、ケイ素、アルミニウムについて豊富に存在する元素であるが、自然の状態で金属鉄が見つかることは極めて稀である。鉄は建築、運送、電気などあらゆる分野の機械器具をつくるために利用され、日常生活に最も密接に関係する元素である。また、体内には血液のヘモグロビンをはじめ無数の鉄を含むタンパク質や酵素類が存在し、生命とも深い関係を持つ。水道法に基づく水質基準（水道水が有すべき性状に関する項目）では、鉄濃度は 0.3mg/l 以下と定められている。

f) 銅 (Cu)

天然には自然銅として稀に産出するが、主として黄銅鉱、輝銅鉱、赤銅鉱などとして、硫化物、酸化物、炭酸塩の形態で産出することが多い。精錬が比較的簡単であるので、最も古くから用いられている金属の 1 つである。建築材料、合金材料、電線など用途はきわめて広い元素である。硝酸および熱濃硫酸には良く溶け、塩酸にも徐々に溶ける性質を有している。アンモニア水とは錯塩を作って溶け、酢酸などの有機酸にも容易に溶ける。銅の可溶性塩は有毒である。水道水に基づく水質基準（水道水が有すべき性状に関する項目）では、銅濃度は 1.0mg/l 以下と定められている。

g) 亜鉛 (Zn)

セン亜鉛鉱 (ZnS) が主要鉱物である。生産量の半分は耐食用のメッキに用いられ、黄銅やダ

イカスト用金属など合金としての用途も多い．トタン板や電池の製造の他、顔料(ZnO)、TVースクリーンの蛍光剤などの用途もある．亜鉛は動植物には微量なら必須元素であるが、多量になれば有害である．しばしばカドミウムを伴って検出される．水道法に基づく水質基準（水道水が有すべき性状に関する項目）では、亜鉛濃度は 1.0mg/l 以下と定められている．

h) ヒ素 (As)

天然には主としてヒ素鉄鉱・鶏冠石として産出するが、時に遊離の状態で産出することもある．また金属硫化鉱物に伴って産出する．銅、鉛、亜鉛、スズ、金などの精錬の副産物として分離される．単体のヒ素は無毒であると考えられているが、ヒ素の化合物は有毒である．以前は農薬として広く用いられたが、毒性を考慮して現在の使用量は減少している．水道法に基づく水質基準（健康に関する項目）では、ヒ素濃度は 0.01mg/l 以下と定められている．

i) カドミウム (Cd)

天然には硫化カドミウム鉱もあるが、多くは亜鉛などの硫化鉱とともに産出する．鉄のメッキ、ハンダ、低融点合金、電池、原子炉制御などに用いられ、硫化カドミウム(CdS)は、カドミウムイエロー・カドミウムレッドなどの顔料となる．カドミウムは人体に有害で、腎臓をおかし、亜鉛酵素の働きを阻害する内分泌攪乱作用があるとされている．水道法に基づく水質基準（健康に関する項目）では、カドミウム濃度は 0.01mg/l 以下と定められている．

j) 鉛 (Pb)

天然には多く硫化鉱として存在し、方鉛鉱が最も多い．鉛蓄電池に多量に用いられ、合金材料としては易融合金に用いられる．密度が高いため放射線遮蔽用材として多く用いられている．鉛イオンは有毒であり、貧血、神経痛、脳疾患などを引き起こす．最近では、射撃場や狩猟場による鉛弾による水質や土壌汚染問題がクローズアップしている．水道法に基づく水質基準（健康に関する項目）では、鉛濃度は 0.05mg/l 以下と定められている．

(6) 含有元素・酸化物組成

土の含有元素酸化物組成の測定は、蛍光X線回折装置（写真3-3）を用いた蛍光X線法で実施している．物質を構成する原子は固有の殻電子順位を持っているため、物質の原子にX線を照射すると、内殻電子が励起され、殻外に飛び出し空位が生じる．その空位に外殻からの電子が落ち込む．このとき外殻電子



写真 3-3 蛍光X線回折装置の全景

の持つエネルギーと内殻電子の持つエネルギーの差が電磁波として照射される。すなわち、その物質中の原子からそれぞれ固有の波長と強度を持つX線（蛍光X線）が発生する。蛍光X線回折ではこの蛍光X線の波長と強度を測定し、物質中に存在する原子の種類や含有量を分析することができる。本測定では、土の含有元素組成と酸化物組成を求め質量百分率で表示している。