

ISSN 1349-0605

森林総合研究所

交付金プロジェクト研究 成果集 24

森林流域の水質モニタリングと
フラックスの広域評価

(改訂版)

独立行政法人 森林総合研究所

2010. 3

序 文

森林は国民生活に不可欠な良質な水資源を供給する機能を有している。平成 18 年に閣議決定された森林・林業基本計画では、森林資源の充実をはかり木材供給力を確保しつつ、良質な水を供給するなどの多面的機能を発揮する森林づくりが進めることとしている。また、平成 20 年度に森林総合研究所が策定した研究開発ロードマップ「2050 年の森」でも、良質な水資源の保全と安定供給の実現を目標に設定している。

一方、大陸から飛来する越境大気汚染物質や黄砂の増加、都市域からの窒素酸化物の供給等により、森林生態系内における物質動態が変化している可能性が指摘されている。わが国の大気汚染や酸性沈着は欧米並であるものの、これまで森林生態系への影響は顕在化していないとされてきたが、大気汚染物質や酸性沈着物の流入によって物質動態に攪乱が起きることが危惧されている。岐阜県南部の伊自良湖では土壌や河川水が酸性化し、また首都圏周辺の流域では河川の硝酸態窒素濃度が上昇しており、大気汚染物質の沈着の影響が疑われている。

渓流水の水質は、良質な水を安定して供給するという水質保全機能そのものを反映しており、その変化は下流の都市域、農村域のみならず、水域へも強い影響を与える。現代の大きく変化する環境下において、森林の水質保全機能を高度に発揮させるためには、環境変動や森林施業に応答する水質の変化を監視するモニタリング体制を整備維持する必要がある、森林流域における物質動態のプロセスを明らかにして、その物質収支を定量的に評価することが求められている。

森林総合研究所では、森林生態系における物質収支について、降水に伴う流入量や渓流水による流出量を測定することにより、長年にわたってモニタリングしてきた。そして、我が国の多様な立地環境に成立する森林流域における水質データが得られている。本研究では、これまでに蓄積してきたモニタリングデータを「森林降水渓流水質データベース (FASC-DB)」として公開するとともに、全国の代表的森林流域における主要溶存成分の収支を明らかにすることができた。この研究成果は、良質な水資源を安定して供給する森林を育成していくうえで重要な知見であり、ここに本書を刊行し広く関係者の参考に供する次第である。

本研究の推進にあたり、京都大学農学研究科教授太田誠一氏には、外部評価委員としての確なご意見を賜るとともに、研究の方向性についてご指導いただいた。また、各森林管理局並びに森林管理署の関係各位には、モニタリングサイトの設定をはじめとして本研究の推進にご協力いただいた。深く感謝の意を表し御礼申し上げる。

平成 22 年 3 月

独立行政法人森林総合研究所
理事長 鈴木和夫

研究課題：森林流域の水質モニタリングとフラックスの広域評価

目 次

研究の要約 1

第1章 モニタリング・データベースの構築 9

第2章 森林流域における主要溶存成分のモニタリングによるフラックスの広域評価 . . 13

1. 北海道における水質モニタリングとフラックスの広域評価 17

2. 東北における水質モニタリングとフラックスの広域評価 28

3. 関東における水質モニタリングとフラックスの広域評価 37

4. 木曽における水質モニタリングとフラックスの広域評価 46

5. 関西における水質モニタリングとフラックスの広域評価 54

6. 四国における水質モニタリングとフラックスの広域評価 63

7. 九州における水質モニタリングとフラックスの広域評価 73

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成 17 年～平成 20 年（4 か年）

予算区分：運営交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主査： 立地環境研究領域長 高橋正通

副主査・とりまとめ責任者： 立地環境研究領域チーム長 池田重人

III 研究場所

森林総合研究所 本所、木曽試験地、北海道支所、東北支所、関西支所、四国支所、九州支所

IV 研究目的

森林総合研究所では、平成 2 年度に全国 8 箇所の酸性雨モニタリングセンターステーションを設定して以来、降雨等に含まれる溶存成分の観測を継続して行っており、各ステーションにおける調査は、水質変動の解明や長期にわたるデータの蓄積に重要な役割を果たしてきた。

これまでの観測調査では、センターステーションの大半が本支所・試験地の構内に位置していたため、得られた降雨等の水質の値は都市化の影響を強く受けた結果を示しており、森林生態系への影響をみるには問題があった。こうした森林生態系への酸性雨の影響や下流域への負荷実態を評価するためには、流入する降水の水質だけでなく森林流域からの流出水の水質を明らかにすることが不可欠であったため、平成 12 年度開始の第 3 期からは森林流域における水質観測を開始しデータを蓄積しているが、長期の水質変動を評価するには十分とはいえない。また、これらの調査は定性的な水質モニタリングにとどまっており、流入、流出を考慮した定量的な収支については未着手である。測定対象項目についても溶存無機イオンが主体であり、溶存炭素の動態などについては未解明である。これまで行ってきた 3 期にわたるモニタリング調査によって、それぞれのセンターステーションごとに降水や渓流水の水質などのデータが蓄積され、ほぼ同様の様式で記録されているが、これらのデータを横断的に利用できる状態ではなく、データが有効に活用されていないのが現状である。

これらの問題点をふまえて、モデル流域での溶存成分の詳細なフラックス解析とともに、全国の代表的な森林流域における主要溶存成分の広域的なモニタリングを行い、その結果をもとにして森林における溶存成分のフラックスを評価する。また、既存のモニタリングデータの有効活用を図るために、データベースを構築して広域での解析に利用できるよう整備する。

V 研究方法

第 1 章

全国のモニタリング地点におけるこれまでの調査で蓄積してきた水質モニタリングデータをデータベース化した。データベースシステムの作成にあたっては、既存データの精度管理、プロト

タイプの作成、全国のモニタリング調査地点の水質モニタリングデータと試験地の位置情報や発表文献等の付帯情報の集約等の作業を行い、まず暫定版のデータベースを作成した。これを内部で運用しながらデータの追加とシステムの修正作業を繰り返し行い、データベースを完成させた。

完成したデータベースはウェブサイトを通じて公開した。また、プレスリリースや学会での発表および機関誌への紹介記事等を通じて、データベースの周知に努めた。

第2章

北海道定山溪森林理水試験地（北海道支所）、岩手県姫神試験地・山形県釜淵森林理水試験地（東北支所）、長野県牧尾ダム流域（木曽試験地）、京都府山城試験地（関西支所）、高知県鷹取山試験地（四国支所）、熊本県鹿北流域試験地（九州支所）において、月2回以上の頻度で渓流水を採取し、主要溶存成分を測定した。流域内において林外雨を月1回以上の頻度で採取し、主要溶存成分を測定し、負荷量を算出した。また、モデル流域として茨城県桂試験地（本所）において、林外雨、林内雨、土壌水、地下水、渓流水を週1回の頻度で採取し、主要溶存成分を測定した。これらの結果から各試験流域における物質収支を算出し、北海道から九州に至る森林流域における物質収支の広域的評価を行った。

VI 研究結果

研 究 計 画 表

課 題 名	担 当	期 間
(1) モニタリング・データベースの構築	立地環境研究領域	17～19
(2) 森林流域における主要溶存成分のモニタリングによるフラックスの広域評価	立地環境研究領域、木曽試験地、北海道支所、東北支所、関西支所、四国支所、九州支所	17～20

第1章 モニタリング・データベースの構築

全国7地域のモニタリング地点における観測で蓄積してきたデータのうち、全国的にデータが整っている1995～2004年の降水および渓流水の水質データをデータベース化した。データベース作成に際しては、初めに一支所のデータによるプロトタイプを作成し、内部で運用して改良しながら、最終的に本支所の全調査定点にまで拡張したデータベースとして完成させた。データベースは、各調査地点の位置情報（地点名、経緯度、標高など）と、降水（林外雨、林内雨、樹幹流）および渓流水の水質分析値（pH、EC、主要陰・陽イオン）から成っている。平成20年5月からは、森林総合研究所のウェブサイトからデータベースにアクセス可能となり、利用申請すればデータのダウンロードできるようにして、広く一般に公開した。

第2章 森林流域における主要溶存成分モニタリングによるフラックスの広域評価

森林流域における主要溶存成分のフラックスを明らかにするために、各モニタリング調査流域において、月1回以上の頻度で降水を、月2回以上の頻度で渓流水を採取して、溶存成分を

測定するとともに、降水量および溪流水の流量データとの関係を解析した。また、各モニタリング調査流域周辺地域における溪流水質の地域的変異を明らかにするために、各調査流域周辺で梅雨期および夏期に溪流水質の多点調査を行い、立地環境要因との関係を解析した。

調査流域におけるフラックス測定結果について、ここでは 2007 年（一部地域は 2006 年）の降水量および無機態窒素収支の結果を中心に示す。各調査流域における降水量および無機態窒素の流入負荷量 ($\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$) は、定山溪：1488 mm、5.4、姫神：1686 mm、9.1、釜淵：2499mm、12.0（2006 年）、桂：1316 mm、7.7、木曾（滝越）：3076 mm、9.1、山城：1192 mm、4.1、鷹取山：2431 mm、8.0、鹿北：2666mm、10.4（2006 年）であった。2006 年は多くの地点で平年より降水量が多かったため、溶存成分負荷量が多い傾向にあったが、2007 年は降水量が減少し、負荷量は平年並みであった。その中で、無機態窒素の負荷量は定山溪、桂、鷹取山、鹿北では減少したものの、それ以外の地点ではやや増加していた。無機態窒素の負荷量では、とくに釜淵の多さと山城の少なさが顕著であった。一方、無機態窒素の流出負荷量 ($\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$) は定山溪：0.9、姫神 A：2.4、姫神 B：2.5、釜淵：3.9（2006 年）、桂：3.1、木曾（白川）：2.1、山城：4.8、鷹取：4.6、鹿北：2.9（2006 年）であった。山城を除く流域では窒素流入負荷量より窒素流出負荷量の方が少なく、流域内に窒素が蓄積している。

降水による窒素流入負荷量 ($\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$) は釜淵(2006 年)において 12.1 というやや大きな値を示した。鹿北（2006 年）でも 10 以上を示したが、これは当地でこの年にとくに降水量が多かった影響と考えられ、2007 年には 7.8 となっていた。環境省による酸性雨調査において、窒素流入負荷量の平均は約 8 とされていることから、釜淵と山城以外の地点では、概ねこの平均値に適合している。窒素の流出負荷量は定山溪が最も少なく、山城、鷹取で約 5 程度の値を示した。山城を除くと窒素に関しては流域としては吸収に働いており、水質浄化機能が発揮されていると考えられる。なお、山城では約 $4 \text{ kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ と窒素流入負荷量が著しく少ない。また、山城における窒素収支は流出負荷量が大きい。このことは、流域としての窒素の流入負荷量を算出する場合に、湿性沈着だけでは不十分で、乾性沈着の影響が大きい可能性を示唆している。山城は比較的都市域近郊に位置することから、大気からの窒素酸化物の乾性沈着の影響を考慮する必要がある。

梅雨期と夏期に広域一斉多点調査を実施し、立地環境との関係を解析した。その中で、地質の違いに着目して解析した結果を示す。木曾では、濃飛流紋岩流域、堆積岩類流域、花崗岩類流域、火山岩類流域における溪流水質を比較検討した。美濃帯堆積岩の流域では EC、pH が高く、Ca、Mg、 HCO_3 濃度が高い傾向を示した。これは基盤岩中の炭酸塩鉱物の含有量の違いによるものと考えられる。一方、火山岩流域では Si 濃度が高く、とくに御岳火山岩流域の溪流水に含まれる Si は 10 mg L^{-1} を越えていた。九州鹿北試験地周辺の黒色片岩流域では、流域毎に pH、EC および各種陽イオン・陰イオン濃度の変動が大きかったが、その中で鹿北流域試験地はいずれの値もやや低かった。一方、花崗岩流域では、鹿北流域試験地と同程度の pH、EC、溶存無機イオン濃度であったが、Si 濃度の平均値が高かった。安山岩流域では、pH、EC、溶存成分濃度 (NO_3 を除く) の平均値が低かった。はんれい岩流域では、pH、EC の平均値が高く、溶存成分では Ca と HCO_3 濃度の平均値が高い傾向を示した。このように、近接する流域でも基盤地質によって溪流水質が異なることを明らかにした。

VII 成果の利活用

これまでの水質観測データをデータベース化し、広域的あるいは経時的な解析を行うことが容易になった。また、データベースを公開し、ウェブサイトからデータをダウンロードできるようになったため、これまでに大学や水質保全に関連した公共機関を中心に幅広く利用の申し込みがあり、今後も利用の広がりが期待できる。

森林の水質保全機能については、これまで個々の流域で検討されてきた。本研究では、初めて物質収支を含めて流出負荷量を全国的に比較検討しており、物質の流出負荷量に対する地質条件や気象条件などの環境要因を抽出した。このことは、森林に対して期待されている安全で安心な水の供給に関するメカニズムの解明に大きく寄与するとともに、行政に対して水質保全機能の効果を提示できる。

VIII 今後の問題点

各調査流域における降水・溪流水のモニタリング観測を継続するとともに、新たな観測データを順次追加しながら、データベースを管理・更新する必要がある。一部の流域において溶存物質の流出負荷量が大きいことについては、その原因を明らかにするために、気象や地質等の環境要因の解析に加えて、周辺都市域や長距離輸送による系外からの負荷の影響を解明する必要がある。

IX 研究発表

第1章

池田重人・高橋正通・稲垣昌宏・金子真司・吉永秀一郎・相澤州平・志知幸治・岡本透・溝口岳男・鳥居厚志・大貫靖浩（2008）「森林降水溪流水質データベース（FASC-DB）」の公開、日本森林学会大会学術講演集，119, P3b03.

池田重人（2008）森林総合研究所の水質データベース「FASC-DB」の概要，水利科学，303, 42-46.

稲垣昌宏・池田重人・金子真司・高橋正通（2008）森林降水溪流水質データベース（FASC-DB）の構築，森林科学，54, 53-55.

第2章

Itoh, Y., Takahashi, M., Akama, A., Mizoguchi, T., Yoshinaga, S., Tsurita, T., Abe, T. (2005) Lead and cadmium cycling in a small forest catchment in Japan, *Phyton*, 45, 437-442.

志知幸治・橋本徹・三浦覚・相澤州平・池田重人（2005）東北地方内陸部の森林流域における年間および融雪期の溪流水質，日本森林学会誌，87, 340-350.

篠宮佳樹・山田毅（2005）降雨時に森林から流出する窒素量－大雨の場合－，四国の森を知る，4, 6-7.

釣田竜也・吉永秀一郎・阿部俊夫（2005）ポーラスプレート・テンションライシメーター法による土壌水の年移動量の測定，土壌の物理性，101, 51-56.

鳥居厚志・篠宮佳樹・稲垣善之・山田毅（2005）2004年の高知市における降水の化学特性－とくに台風の影響による海塩の負荷について－，日本林学会関西支部大会研究発表要旨集，56, 33.

相澤州平・吉永秀一郎（2006）現地窒素無機化量推定における土壌の攪乱による影響の評価，日本森林学会関東支部大会発表論文集，58, 129-130.

- 稲垣善之・篠宮佳樹・鳥居厚志・山田毅・吉永秀一郎 (2006) 四万十川流域における硝酸態窒素流亡の年変動と季節変動, 日本森林学会学術講演集, 117(CD-ROM), F04.
- Itoh, Y., Miura, S. and Yoshinaga, S. (2006) Atmospheric lead and cadmium deposition within forests in the Kanto district, Japan, *Journal of Forest Research*, 11, 137-142.
- 小林政広・釣田竜也・伊藤優子・加藤正樹 (2006) ヒノキ人工林および隣接する落葉広葉樹林における土壌の撥水性の空間分布, 日本森林学会誌, 88, 354-362.
- Nakano, T., Morohashi, S., Yasuda, H., Sakai, M., Aizawa, S., Shichi, K., Morisawa, T., Takahashi, M., Sanada, M., Matsuura, Y., Sakai, H., Akama, A., Okada, N. (2006) Determination of seasonal and regional variation in the provenance of dissolved cations in rain in Japan based on Sr and Pb isotopes, *Atmospheric Environment*, 40, 7409-7420.
- 岡本透 (2006) ふるさとを探る－龍泉洞の水の成分－, 広報いわいずみ, 756, 27.
- 篠宮佳樹・山田毅・稲垣善之・鳥居厚志 (2006) 四万十川源流部の森林における降雨時の硝酸態窒素流出特性, 水環境学会誌, 29, 723-729.
- 篠宮佳樹 (2006) 四万十川源流部の森林における降雨時の溪流水の硝酸態窒素の流出, 水利科学, 291, 1-16.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・鳥居厚志・山田毅 (2006) 四万十川源流部の森林流域における $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷の季節変動特性, 2006 年度水文・水資源学会研究発表講演集, 228-229.
- 篠宮佳樹 (2006) 鷹取山試験流域の懸濁物質(SS)濃度, 平成 17 年度森林総合研究所四国支所年報, 20-21.
- 篠宮佳樹・吉永秀一郎 (2006) 四万十川源流部の天然林斜面における雨水の排水・貯留機構, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集 (CD-ROM), Z236-P003.
- 篠宮佳樹・鳥居厚志・山田毅 (2006) 四万十川源流部の森林における $\text{NO}_3\text{-N}$ 累加比負荷量の変動について, 日本水環境学会年会講演集, 40, 604.
- 篠宮佳樹・山田毅・吉永秀一郎・鳥居厚志 (2006) 四万十川源流部の森林における大雨時の溪流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度変動, 水文・水資源学会誌, 19, 55-60.
- 釣田竜也・吉永秀一郎・小林政広 (2006) TDR 水分計を用いて森林土壌の体積含水率を計測する場合の誤差要因, 日本森林学会関東支部大会論文集, 58, 157-158.
- 鳥居厚志 (2006) 2005 年の高知市内の降水の化学的性質, 平成 17 年度森林総合研究所四国支所年報, 18-19.
- Itoh, Y., Noguchi, K., Takahashi, M., Okamoto, T. and Yoshinaga, S. (2007) Estimation of lead sources in a Japanese cedar ecosystem using stable isotope analysis, *Applied Geochemistry*, 22, 1223-1228.
- Kaneko, S., Akeida, N., Naito, F., Tamai, K., Hirano, Y. (2007) Nitrogen budget in a rehabilitation forest on degraded granitic hills, *Journal of Forest Research*, 12, 38-44.
- 篠宮佳樹 (2007) 鷹取山試験流域の土壌水分貯留量の変動, 平成 18 年度森林総合研究所四国支所年報, 24-25.
- 大貫靖浩 (2007) 鹿北流域試験地および周辺流域における溪流水質－基盤地質の違いに着目して－, 九州森林研究, 60, 135-136.
- 岡本透 (2007) 木曽川上流域の溪流水の水質特性, 日本森林学会大会学術講演集, 118, 705.

- 篠宮佳樹・山田毅・鳥居厚志 (2007) 四万十川源流部の森林流域における降雨イベント時の溪流水質変動と L・Q 法への適合度, 森林立地, 49, 133-144.
- 志知幸治・平井敬三・小野賢二・三浦覚・橋本徹 (2007) 東北地方の日本海側および内陸部における溪流水質の形成要因, 東北森林科学大会講演要旨集, 12, 32.
- 鳥居厚志 (2007) 台風時の降雨による陸域への海塩負荷量の評価, 環境情報科学論文集, 21, 567-572.
- 鳥居厚志・篠宮佳樹 (2007) モウソウチク林内雨の化学的性質, 平成 18 年度森林総合研究所四国支所年報, 15-16.
- 鳥居厚志 (2007) 2006 年の高知市内の降水の化学的性質, 平成 18 年度森林総合研究所四国支所年報 17-18.
- 稲垣善之・鳥居厚志・篠宮佳樹 (2007) 高知県の森林流域と河川本流における水質, 平成 18 年度森林総合研究所四国支所年報, 19-20.
- 吉永秀一郎・金子真司・志知幸治・篠宮佳樹・鳥居厚志・田中永晴・溝口岳男・大貫靖浩・阿部俊夫 (2007) 日本の森林流域における窒素収支, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 53, 4.
- 相澤州平・酒井寿夫・阪田匡司・北村兼三・山野井克己・田中永晴 (2008) 定山溪森林理水試験地における降雨出水時の溪流水中の溶存イオン濃度の変化, 日本森林学会北海道支部大会論文集, 56, 177-179.
- 大貫靖浩・釣田竜也 (2008) 森林の酸性雨中和機能—流出水モニタリングの結果から—, 九州の森と林業, 85, 1-3.
- 岡本透 (2008) 木曽川上流域における地質別の溪流水質特性, 日本森林学会大会学術講演集, 119, 472.
- 溝口岳男・谷川東子・平野恭弘 (2008) 山城試験地周辺森林における溪流水の水質, 森林総合研究所関西支所年報, 49, 53-54.
- 篠宮佳樹 (2008) 鷹取山試験流域の流域貯留量, 平成 19 年度森林総合研究所四国支所年報, 30-31.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・山田毅・鳥居厚志 (2008) 多雨地域の天然林流域における窒素流亡特性, 日本森林学会学術講演集, 119, (CD-ROM):D24.
- 篠宮佳樹・吉永秀一郎 (2008) 四万十川源流部の天然林斜面土層における大規模降雨イベント時の雨水の貯留・排水特性, 水文・水資源学会誌, 21, 126-139.
- 釣田竜也・大貫靖浩・清水貴範 (2009) 北部九州の森林小流域における窒素収支の年々変動, 九州森林研究, 62, 148-149.
- 鳥居厚志・篠宮佳樹・稲垣善之 (2008) 溪流水中の塩化物イオン濃度と年間収支, 平成 19 年度森林総合研究所四国支所年報, 32-34.
- 相澤州平・阪田匡司・田中永晴・酒井寿夫 (2009) 小樽内川および白井川の支流における流域間の溪流水質の差異, 日本森林学会北海道支部大会論文集, 57, 135-137.
- 岡本透・相澤州平・池田重人 (2009) 白神山地の溪流水の化学的特徴, 水利科学, 306, 64-79.
- 釣田竜也・吉永秀一郎・阿部俊夫 (2009) Buckingham・Darcy 式を適用した森林土壌下層部の鉛直水フラックス推定, 日本森林学会誌, 91, 151-158.
- 釣田竜也・大貫靖浩・清水貴範 (2009) 北部九州の森林小流域における窒素収支の年々変動, 九

州森林研究, 62, 148-149.

X 研究担当者

第1章 モニタリング・データベースの構築

池田重人、金子真司、稲垣昌宏、高橋正通

第2章 森林流域における主要溶存成分のモニタリングによるフラックスの広域評価

1. 北海道における水質モニタリングとフラックスの広域評価

相澤州平、阪田匡司、酒井寿夫、田中永晴、酒井佳美

2. 東北における水質モニタリングとフラックスの広域評価

志知幸治、平井敬三、小野賢二、野口正二、三浦 覚、橋本 徹、村上 亘

3. 関東における水質モニタリングとフラックスの広域評価

吉永秀一郎、伊藤優子、小林政広、釣田竜也、相澤州平、阿部俊夫、坪山良夫

4. 木曽における水質モニタリングとフラックスの広域評価

岡本 透、西山嘉彦

5. 関西における水質モニタリングとフラックスの広域評価

溝口岳男、谷川東子、平野恭弘、金子真司、古澤仁美、細田育広

6. 四国における水質モニタリングとフラックスの広域評価

篠宮佳樹、鳥居厚志、稲垣善之、酒井寿夫、野口享太郎

7. 九州における水質モニタリングとフラックスの広域評価

釣田竜也、大貫靖浩

第1章 モニタリング・データベースの構築

ア 研究目的

全国7地域に設定した酸性雨モニタリングセンターステーションにおけるこれまでの調査により、降雨や溪流水の水質をはじめとして、酸性雨が森林生態系に与える影響を解析するための各種データが蓄積されてきた。これらの成果の一部は論文や資料として公表されているが、解析に利用しやすい形とはいえない。また、それぞれのステーションではほぼ同じ様式でデータが記録されているものの、これらのデータを横断的に利用できる状態ではなく、データが有効に活用されていないのが現状である。これら既存のモニタリングデータの有効活用を図るためには、一定の様式でかつ精度管理を行ったデータベースを作成して解析に利用できるよう整備する必要がある。水質データベースを構築することにより、酸性雨が森林に与える影響を評価・解析するための環境が整い、長期的・広域的な変動を明らかにすることが可能となる。以上のことから、既存のモニタリングデータをデータベース化し、森林流域における溶存成分の動態を解析評価するための活用手法を開発する。

イ 研究方法

全国のモニタリング地点におけるこれまでの調査で蓄積してきた水質モニタリングデータをデータベース化した。データベースシステムの作成にあたっては、以下の工程により行った。

- ・既存データの精度管理を行い、1支所のデータを用いてプロトタイプのデータベースを作成する。
- ・プロトタイプを使用しながら、使用環境などの改良点を抽出する。
- ・全国のモニタリング調査地点の水質モニタリングデータおよび試験地の位置情報や発表文献等の付帯情報を集約する。
- ・リレーショナルデータベース用の言語を用いて作成し、ウェブ上から検索できるシステムとする。
- ・以上の作業で作成した暫定版のデータベースについて、内部で運用しながらデータの追加とシステムの修正作業を繰り返し行い、データベースを完成させる。

なお、実際のデータベースシステムの作成作業は株式会社インサイトに依頼して進めた。

ウ 結果

完成したデータベースはウェブサイトを通じて公開した(図1.1)。また、プレスリリースや学会での発表および機関誌への紹介記事等を通じて、データベースの周知に努めた。本データベースシステムの概略は以下のとおりである。

データベースの構成：全国7地域のモニタリング地点における観測で蓄積してきたデータのうち、全国的にデータが整っている降水および溪流水の水質観測データ（1995～1999年：第2期、2000～2004年：第3期）を収録した。本データベースは、各調査地点の位置情報（地点名、経緯度、標高など：図1.2）と、降水（林外雨、林内雨、樹幹流）および溪流水の水質分析値（pH、EC、主要陰・陽イオン）から成っている。また、これまでのモニタリング研究関連で発表された

業績の一覧を載せている。



図 1.1 データベーストップページ



図 1.2 調査地の情報を示すページ
(部分)

データベースの利用：各調査地の情報や発表文献などについては、森林総合研究所のウェブサイトからデータベースのページを開いて容易に閲覧することができる。また、データ利用の認証を得ればデータ本体にアクセスが可能となり、データをダウンロードすることができる。なお、データ利用は学術・教育目的を原則とし、ウェブ上からの利用申請を受けて認証する方式とした。

本データベースは、モニタリング第4期（2005～2008年）の水質データをはじめ、今後のデータ追加にも対応しているので、公開可能となった水質データから順次追加していく予定である。

エ 考察

日本における降水の水質に関する研究は、これまで都市域を中心に進められてきており、森林域のデータはこれらに比べると少ないのが現状である。また、森林流域における渓流水の水質については、近年各地の大学演習林を中心として研究が進みつつあるが、同じ流域で継続して調査しているところはごく一部に限られる。本データベースは、日本各地の代表的森林で採取した試料の分析値を中心とするものであり、日本の森林域における降水や渓流水の水質に関する基礎情報となるものである。

本データベースを利用すれば、日本各地に配置した調査地点の継続的なデータから任意のものを得ることができるため、図 1.3 の例に示すような長期間にわたる経時的解析や広域的解析を行うことが容易となった。今後もモニタリング調査を継続してデータベースを更新することにより、環境変化に伴う水質変化の予測をはじめとして、森林流域における水質の短期的な現象と長期的な傾向をとらえることが期待される。図 1.4 では、短期的な現象の例として、台風の影響について最近のデータを加えて解析したものを示した。

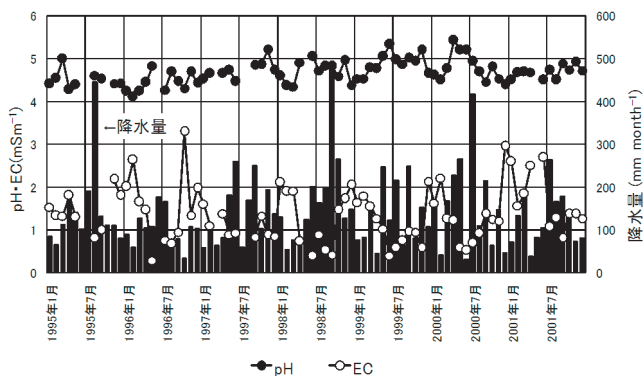


図 1.3 岩手県姫神における 1995～2001 年の降水量と降水の pH・EC（電気伝導度）の変動（相澤ほか 2003）

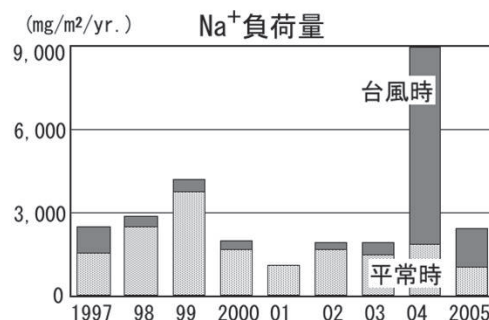


図 1.4 高知市における 1997～2005 年のナトリウム (Na) 負荷量への台風の寄与（鳥居 2007）

オ 今後の課題

各調査流域における降水・溪流水のモニタリング観測を継続するとともに、新たな観測データを順次追加しながら、データベースを管理・更新する必要がある。また、ウェブシステムについても、利用者の意見を聞きながら適宜修正する必要がある。

カ 要約

全国 7 地域におけるモニタリング調査によってこれまで蓄積してきた水質データを有効活用するために、データベースを作成した。本データベースは、各調査地点の位置情報と降水および溪流水の水質分析値から成り、モニタリング第 2 期と第 3 期の水質データを収録している。データベースは、森林総合研究所のウェブサイトから容易にアクセスでき、利用申請により CSV 形式でのデータダウンロードが可能である。本データベースが完成したことにより、全国の森林流域における水質データの経時的解析や広域的解析を行うことが容易となった。

（池田重人）

第2章 森林流域における主要溶存成分のモニタリングによる フラックスの広域評価

ア 研究目的

日本全国の森林生態系における酸性雨の影響予測や地球温暖化物質の動態予測、下流域への環境負荷物質の流出実態の評価のためには、森林流域における物質動態ならびに物質収支を解明する必要がある。しかし、流域試験に基づく物質収支の研究は、流域毎の局所的な評価にとどまることが多く、全国的な物質収支の評価ならびにその地域的な変異等は十分に明らかにされていない。このため、溶存炭素や硫黄酸化物を含む溶存成分の収支を、モデル流域における詳細なフラックス観測と全国各地に設定した森林流域におけるモニタリングによって明らかにし、その広域的な評価を行う。

森林流域におけるモニタリングについては、主として森林総合研究所が流量を測定している北海道定山溪森林理水試験地(北海道支所)、岩手県姫神試験地・山形県釜淵森林理水試験地(東北支所)、京都府山城試験地(関西支所)、高知県鷹取山試験地(四国支所)、熊本県鹿北流域試験地(九州支所)を対象とする。また、長野県木曾試験地においては該当する流量を測定している流域がないので、定期的な流量観測が実施されており、かつその入手が容易な牧尾ダム流域・味噌川ダム流域内に調査流域を設定した。また、モデル流域としては茨城県桂試験地(本所)を設定した。



図 2.1 モニタリング流域・モデル流域の位置

イ 研究方法

各モニタリング流域において、月2回以上の頻度で渓流水を採取し、主要溶存成分を測定した。流域内において林外雨を月1回以上の頻度で採取し、主要溶存成分を測定し、負荷量を算出した。モデル流域の桂試験地において、林外雨、林内雨、土壌水、地下水、渓流水を週1回の頻度で採取し、主要溶存成分を測定し、それぞれの水移動過程における溶存成分のフラックスを算出した。

ウ 結果

(1) モニタリング調査流域ならびに桂試験地における主要溶存成分の流入負荷量、流出負荷量
個々の流域における流入負荷量、流出負荷量については、各支所から提出された個々の個表に詳細を示した。木曽を除いて 2005 年から 2008 年までのデータを用い、木曽においては 2007 年、2008 年のデータを用い、物質収支、降水量と流入負荷量との関係、流出水量と流出負荷量との関係を解析した。

物質収支については、Na、K、Ca、Mg、Si は流入量より流出量が多く、風化によって流域から流出していた。これに対して、窒素は山城以外の流域では流入量より流出量が少なく、大気から負荷された窒素は流域内に保持されていた。山城では窒素流出量が流入量を上回り、窒素飽和現象が発現している可能性が示唆された。なお、土壌への吸脱着をほとんど無視できるために収支が取れているとされた Cl については、ほとんどの流域で流出量が流入量を上回る結果が認められた。これについては、乾性沈着の影響を考えなければならないことを示唆している。

降水量と流入負荷量の関係は、窒素については降水量が 2000mm 以下では降水量の増加に従って、流入負荷量が増加する傾向が認められた。しかし、2000mm を超すと増加傾向が緩やかになる傾向が認められた。Cl については降水量との関係は認められず、木曽で少なく、釜淵で非常に負荷量が多いことが明らかになった。S についての降水量と明瞭な関係は認められなかった。

流出水量と流出負荷量との関係は、Si については流出水量と流出負荷量との間に正の相関が認められた。このことは、Si の流出には土壌を通過する水の量が大きく影響していることを示している。ただし、冷涼な定山溪ならびに木曽で他の流域よりもやや少ない傾向を示すことから、気温条件も影響していることが示唆される。窒素を除く他の成分についても、流出水量の増加に従って流出負荷量が増加する傾向が認められた。しかし、これらの成分では釜淵だけ異様に高い流出負荷量を示しており、今後、釜淵における水質形成機構を詳細に検討する必要がある。窒素については、個々の流域では流出水量と流出負荷量との間に正の相関が認められるものの、全流域を統合して解析すると、明瞭な流出水量と流出負荷量との関係は認められなかった。このことは、窒素の流出は個々の流域における養分循環によって規定されていることを示している。

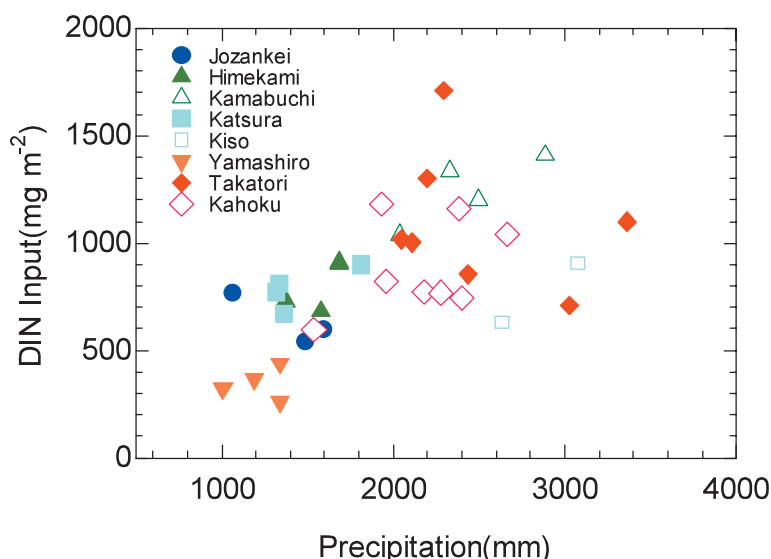


図 2.2 モニタリング流域・モデル流域における年降水量と年窒素流入負荷量

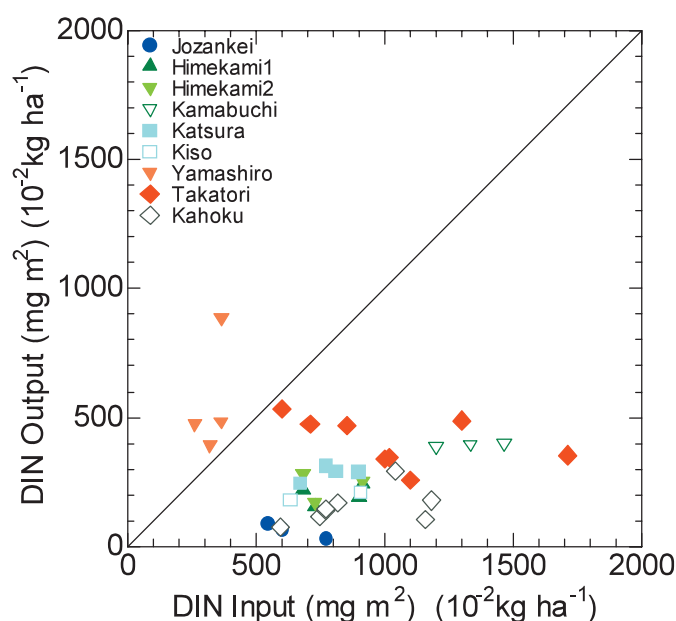


図 2.3 モニタリング流域・モデル流域における無機態窒素の収支

(2) モニタリング調査流域周辺地域における溪流水質の地域的変異

姫神、釜淵周辺流域における溪流水質は、日本海までの距離と EC、Na および Cl の間に高い負の相関がみられた。Na と Cl については、海塩による影響と推定される。また、平均標高と Cl および Si の間にも高い負の相関がみられた。Si については、平均気温の違いによる風化速度の大小を反映しているものと考えられる。

木曽では、地質の違いに着目し、濃飛流紋岩流域、堆積岩類流域、花崗岩類流域、火山岩類流域における溪流水質を比較検討した。美濃帯堆積岩の流域では EC、pH が高く、Ca、Mg、HCO₃ 濃度が高い傾向を示した。これは基盤岩中の炭酸塩鉱物の含有量の違いによるものと考えられた。一方、火山岩流域では Si 濃度が高く、とくに御岳火山岩流域の溪流水に含まれる Si は 10 mg L⁻¹ を越えていた。全体としてみれば、pH の低い流域では溶存成分濃度が低く、陰イオンの中で NO₃ の占める割合の高い流域が認められた。これらの流域では pH と NO₃ 濃度との間に負の関係が認められ、低 pH 時の NO₃ 濃度の影響が考えられた。

鹿北試験地周辺流域においても地質の違いに着目した解析を実施した。黒色片岩は流域毎に pH、EC、溶存成分濃度の変動が大きく、その中で鹿北流域試験地は pH、EC、溶存成分濃度が比較的低い流域である。花崗岩は鹿北流域試験地と同程度の pH、EC、溶存無機イオン濃度であるが、Si 濃度の平均値は 4 つの基盤地質の中で最も高い。安山岩は、pH、EC、溶存成分濃度 (NO₃ を除く) の平均値が 4 つの基盤地質の中で最も低い。はんれい岩は pH、EC の平均値が 4 つの基盤地質の中で最も高く、溶存成分では、Ca と HCO₃ 濃度の平均値が最も高い傾向を示した。

エ 考察

降水による年窒素流入負荷量は釜淵において 1000 mg m⁻² (=10 kg ha⁻¹) 以上の高い値を示した。一方、山城では窒素流入負荷量が約 400 mg m⁻² と著しく少ない。それ以外の流域では 600

～800mg m⁻² (=6～8 kg ha⁻¹) 程度の値であった。環境省による酸性雨調査において、窒素流入負荷量の平均は約 8 kg ha⁻¹ y⁻¹ (800mg m⁻²) とされていることから、多くの流域では概ねこの平均値に適合している。窒素の流出負荷量は定山溪で最も低く、これに対して、山城で約 500 mg m⁻² 程度の値を示した。山城を除くと窒素に関しては流域としては吸収に働いており、水質浄化機能が発揮されていると考えられる。一方、山城における窒素収支は流出負荷量の方が大きい。この原因については不明であるが、山城が近畿圏の都市近郊に位置すること、流域が西方に開いており大阪などの都市域から発生した環境負荷物質の影響を受けやすいことが推定される。また、CI の収支について定山溪と木曽を除くと流出負荷量が流入負荷量よりも大きい。モデル流域の桂における林外雨と林内雨の観測から、林内雨による CI の負荷が林外雨を上回り、海塩粒子を主とする乾性沈着の影響を受けていることが指摘されている。これらことから、海塩起源の物質を始めとして、乾性沈着の影響が現れていると考えられる。

オ 今後の課題

モデル流域において、林内雨による負荷量と林外雨による負荷量に差が認められる成分があることが明らかになった。このため、海塩起源の物質や窒素、硫黄についての乾性沈着量の評価や林冠における水質変化機構を解明する必要がある。このためには、各モニタリング調査流域において、林内雨による負荷量の計測が必要である。また、土壤中における水質形成機構をモデル流域において検討した。ポーラスプレートテンションライシメータを用いる手法そのものは確立できたが、調査地点数が少なく斜面の位置の違いによる変動を今後明らかにする必要がある。流域としての物質収支については年間値としての解析を行ったが、より時間分解能を高めて、溶存成分の生成における季節毎の変化について解析する必要がある。

カ 要約

8 地域、10 流域において、水収支ならびに物質収支を測定した。降水量の多寡にかかわらず、窒素の流入負荷量は山城を除くと、600～1000mg m⁻² (=6～10 kg ha⁻¹) 程度の値であり、環境省による酸性雨調査の結果と整合的であった。流域としての窒素収支については山城を除く調査流域では、年流入負荷量よりも年流出負荷量が少ない値を示し、森林の浄化機能が発揮されていることを明らかにした。しかし、山城において流入負荷量が他の流域に比べて著しく少なく、また、流出負荷量が流入負荷量を上回っていた。原因については今後詳細に検討する必要がある。

(吉永秀一郎)

1. 北海道における水質モニタリングとフラックスの広域評価

ア 研究目的

日本全国の森林生態系における酸性雨の影響予測や地球温暖化物質の動態予測、下流域への環境負荷物質の流出実態の評価のために行う全国規模での森林流域における水質モニタリングの一環として、北海道札幌市南区に位置する定山溪森林理水試験地において、降水と溪流水の水質モニタリングを行う。また、溪流水の広域的な評価を行うために、モニタリングを行っている周辺地域の溪流水の水質と比較し、モニタリング溪流水水質のその地域での位置づけを確認する。

イ 研究方法

(1) 降水、溪流水のモニタリング

札幌市南区定山溪に位置する定山溪森林理水試験地(石狩森林管理署定山溪事業区 2441 林班)(図 2.1.1)において、林外雨、林内雨、溪流水の水質を観測し、溶存成分の流域単位の流入、流出負荷量を計算した。林外雨、林内雨、溪流水(時雨一の沢)の試料採取位置は 2004 年以前から観測を継続している地点と同様で、林外雨は一の沢量水堰下流側の開空地、林内雨は量水堰左岸の尾根上(林内雨 1)、同右岸の尾根上(林内雨 2)、一の沢上流の谷底(林内雨 3)の 3 箇所、溪流水は一の沢量水堰上流とした。一の沢に隣接する二の沢の量水堰上流において 2005 年 4 月から新たに溪流水の観測を開始した。林外雨は採取地点周囲の樹木が成長して開空度が維持できなくなったため、開空度がより大きくなるよう 2008 年に採取位置を移動した。

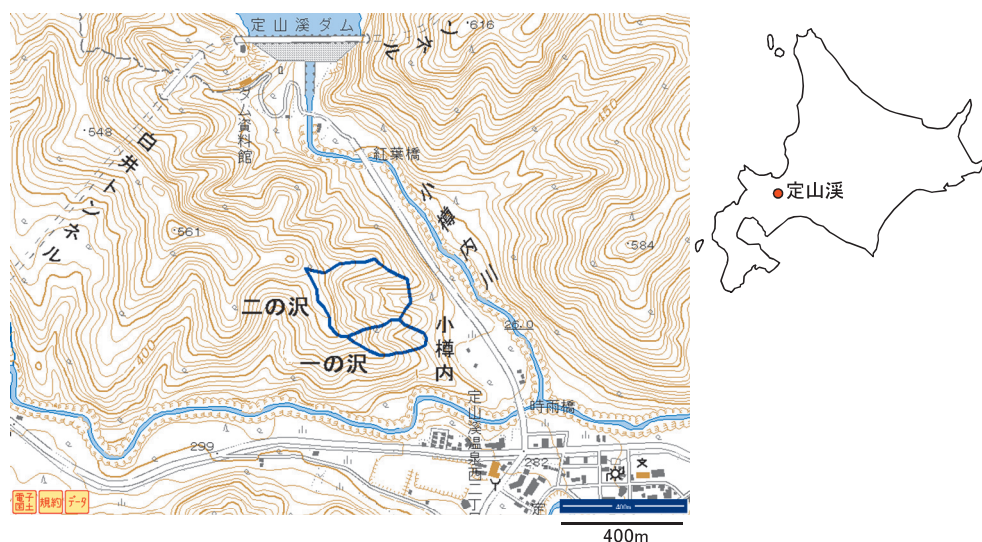


図 2.1.1 定山溪森林理水試験地一の沢および二の沢の位置

試料採取は原則として週に 1 回の間隔で行った。ただし林内雨 3 は 2005 年 12 月～2006 年 4 月上旬および 2006 年 12 月～2007 年 5 月中旬は欠測した。林外雨の採取には、降雨期間はナイロンネットフィルター(メッシュサイズ $11\mu\text{m}$)を取り付けたポリエチレン製ロート(口径 21cm)を使用し、降雪期間はポリプロピレン製コンテナ(大きさ $46\times 30.6\text{cm}$)を用いた。林内雨は林外雨

と同様の装置を用いたが、ナイロンネットフィルターの代わりに目の粗い化繊の網を用いた。

林外雨、林内雨の試料は採取量を測定後、一部を分析試料とした。原則として採取当日に pH をガラス電極法で、EC を電気伝導度計で、EC、pH の順に測定した。降雪期間については、雪の試料を全量回収し、室温で完全に融解してから分析用試料の採取を行ったため、採取翌日以降に pH と EC を測定する場合もあった。pH と EC の測定用試料とは別に、孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターで濾過した試料を各分析に供した。降水、渓流水ともに、濾過した試料は陰イオン・陽イオンをイオンクロマト法で分析し、クロスチェックのため、原子吸光法で陽イオンの分析を行った。2007 年 4 月以降は Na、Mg、Mg、Ca の分析には ICP 発光分光分析装置を用いた。HCO₃ と溶存有機態炭素(DOC)については TOC 分析装置(島津 TOC-5000A)を用いて測定した。HCO₃、2007 年 6 月以降は未濾過試料の滴定により求めた pH4.8 アルカリ度から換算した。ケイ素は ICP 発光分光分析装置を、全窒素はアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム分解・紫外線吸光光度法をそれぞれ用いた。

林外雨と渓流水の分析結果については、Technical Documentations for Wet Deposition Monitoring in East Asia の Quality Assurance / Quality Control Program (QA/QC) に従いチェックを行った。

定山溪理水試験地渓流水の流出負荷量については、北海道支所寒地環境保全研究グループから時間流出量データの提供を受け、採取時の時間流量と、溶存成分濃度と流量の積である負荷量との関係式 (LQ 式) を求め、その式を用いて時間流量から算出した。ただし 2005 年は欠測が多かったため流出負荷量は計算しなかった。また、2006 年 4 月 20～27 日は一の沢、二の沢ともに流量の観測が欠測となったため、この期間については流出負荷量を算出できなかった。LQ 式の作成のためには流量をなるべく広いレンジで取る必要があり、平水時に比べて流量が非常に多い降雨出水時の水質データが不可欠である。通常の定期採取では採取が困難な出水時の水質データを得るため、2007 年と 2008 年に自動採水装置を用いて出水時の連続観測を行った。

(2) 渓流水質の地域内広域多点調査

2005 年および 2006 年にモニタリング地点周辺地域の渓流水の広域多点調査を行った。2005 年は、定山溪森林理水試験地の含まれる小樽内川流域およびそれに隣接した白井川流域、さらに近隣の簾舞川流域の渓流において 8 月 10、16、17 日に試料採取を行った。小樽内川、白井川、簾舞川はともに豊平川の支流である。小樽内川流域では 14 地点、白井川流域では 11 地点、簾舞川流域では 4 地点で試料を採取した。2006 年は、小樽内川流域と白井川流域の他、豊平川上流部に位置する東定山溪事業区内の豊平川流域の渓流において試料を採取した。2006 年の多点調査は本州が梅雨期の 7 月 3～5 日と夏季の 8 月 21、23 日に行った。調査地点数は、2005 年と同じ採取地点を含めて、小樽内川流域では 15 地点、白井川流域では 4 地点、豊平川流域では 8 地点である。7 月と 8 月の調査は一部を除き原則として同じ地点で試料を採取。採取地点の林相はほぼ全域が落葉樹林または針広混交林の天然林で、一部に択伐林やトドマツ人工林が分布する。対象流域の表層地質は主に安山岩または流紋岩で、一部に凝灰岩が分布する。白井川流域には礫岩、砂岩、頁岩等の堆積岩が分布し、小樽内川の谷沿いを中心に石英斑岩が分布する。採取した試料は、翌日または翌々日にモニタリングの試料と同様の手順で pH、EC の測定と分析用試料のための濾過を行った。

ウ 結果

(1) 降水、渓流水のモニタリング

i) 降水、渓流水の水質

降水量は、2005～2007 年が 1500～1600 mm、2008 年は 1063 mm であった (図 2.1.2)。林外雨の pH は、概ね 4.0～6.5 の範囲で変動し、加重平均は 4.8 であった。(図 2.1.3、2.1.2)。EC は概ね 0.3～15 mS m⁻¹ の範囲で変動し、加重平均は 2.6 mS m⁻¹ であった (図 2.1.4、2.1.2)。2008 年の EC は 4.3 mS m⁻¹ と高く、2008 年を除いた EC の加重平均は 2.2 mS m⁻¹ であった。EC は概ね 5 mS m⁻¹ 以下のことが多く、10 mS m⁻¹ 前後以上の高い値は、夏季の降水量の少ない場合と、10、11 月の落葉期に観測された (図 2.1.4)。各溶存成分濃度の変動傾向は成分により異なっていた。Na、Cl、Mg は降雪期間を中心に 11～3 月に濃度が高く、夏季に低い明瞭な季節変動を示した (図 2.1.5a)。Ca、SO₄ は 4～5 月に濃度が高く、10 月頃にもやや高い傾向が認められ、NH₄、NO₃ も弱いながら同様の傾向が見られた (図 2.1.5b)。Mg は 10～11 月に濃度が高かった (図 2.1.5c)。2008 年は他の年より溶存成分濃度が高かった。林外雨による流入負荷量は Na、Cl、SO₄、NO₃ が多かった (図 2.1.6)。林外雨の EC および溶存成分濃度は 2008 年が他の年より高かった (図 2.1.5、2.1.2)。2008 年は 2007 年以前と比較して降水量が非常に少なかったが、溶存成分濃度が高かったため流入負荷量は 2007 年以前に比べて大きな差がなかった (図 2.1.6)。林外雨による流入負荷量の 2005～2008 年の平均値は、NH₄-N が 2.5 kg ha⁻¹ y⁻¹、NO₃-N が 3.0 kg ha⁻¹ y⁻¹、SO₄-S が 8.1 kg ha⁻¹ y⁻¹ であった。

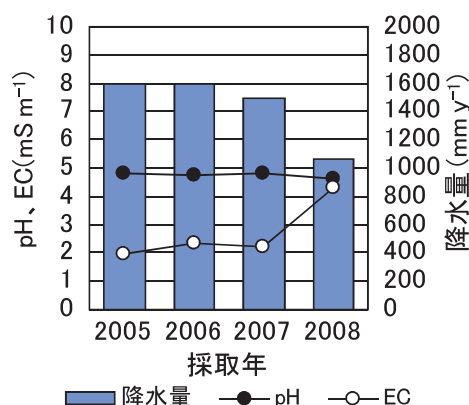


図 2.1.2 定山溪森林理水試験地における年降水量、林外雨の年平均 pH、年平均 EC の変動

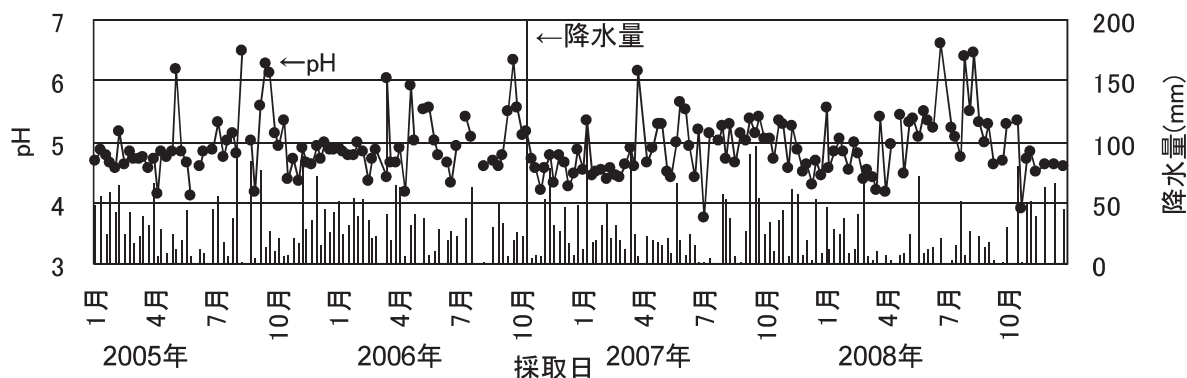


図 2.1.3 定山溪森林理水試験地における林外雨の降水量、pH

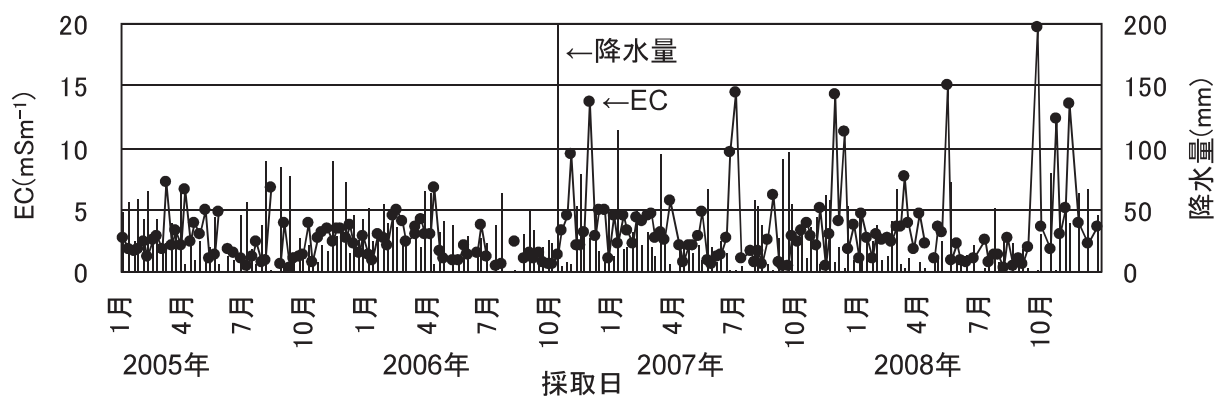


図 2.1.4 定山溪森林理水試験地における林外雨の降水量、EC

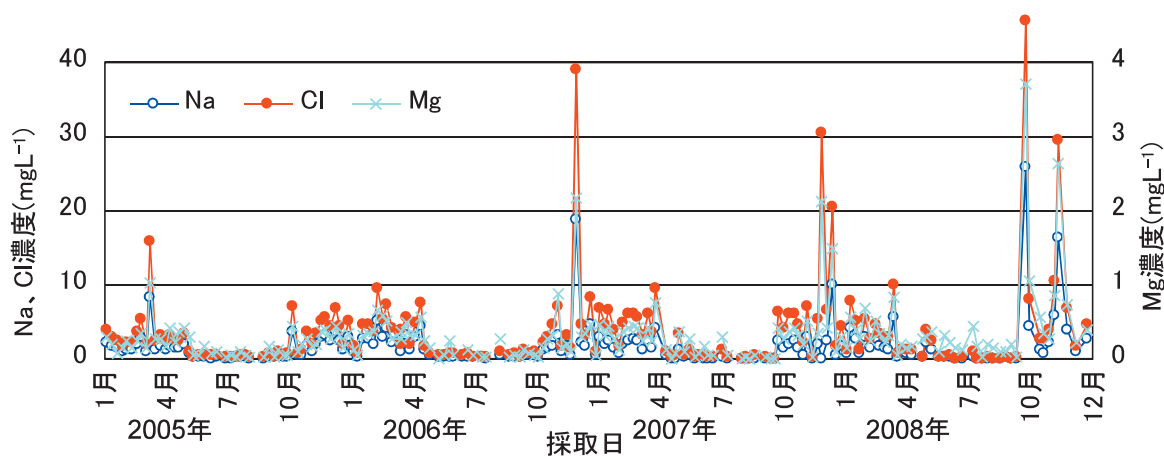


図 2.1.5a 定山溪森林理水試験地における林外雨の Na、Cl、Mg 濃度

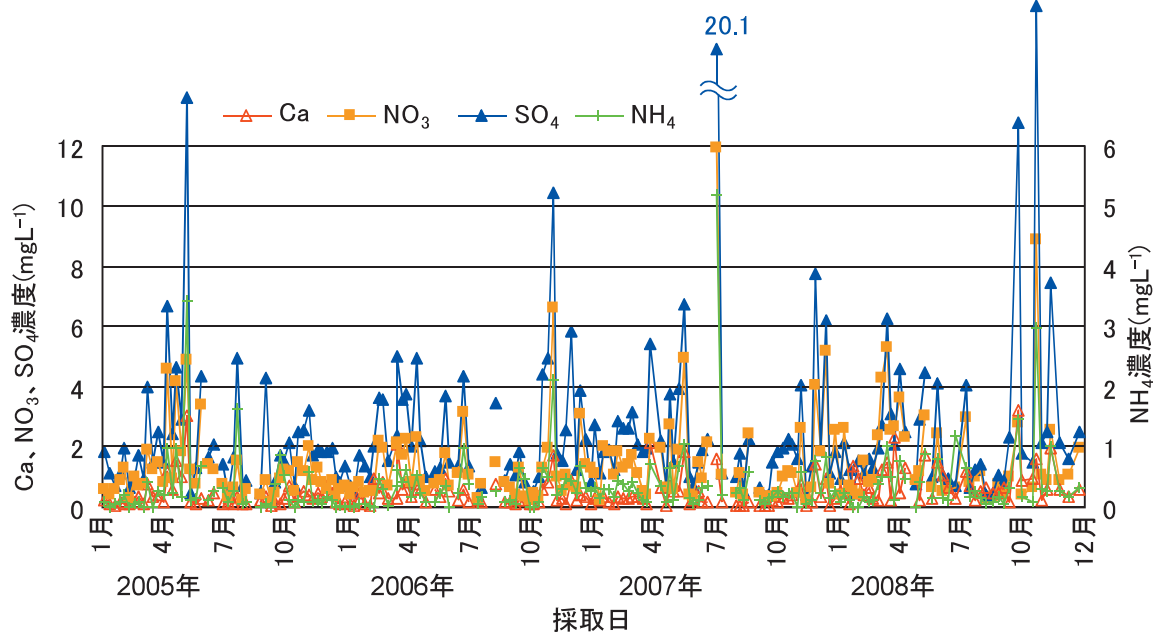


図 2.1.5b 定山溪森林理水試験地における林外雨の Ca、NH₄、NO₃、SO₄ 濃度

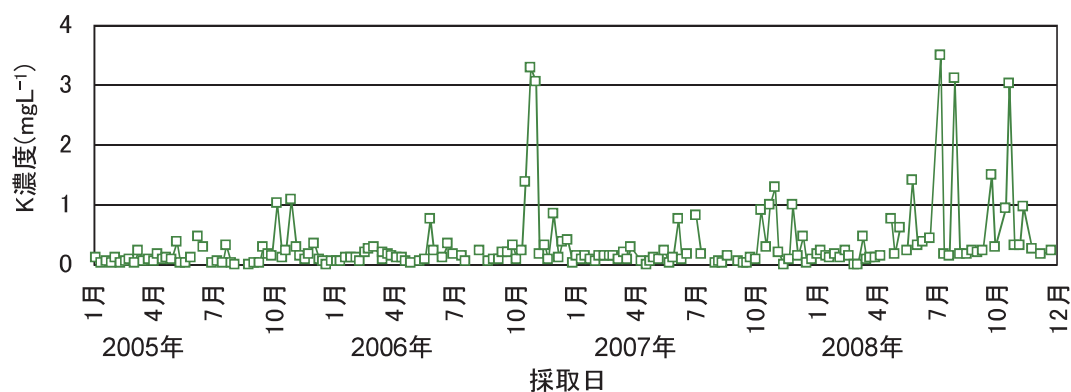


図 2.1.5c 定山溪森林理水試験地における林外雨の K 濃度

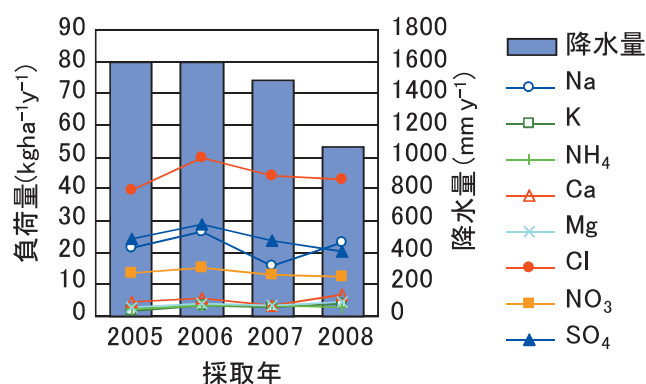


図 2.1.6 定山溪森林理水試験地における年降水量、林外雨による流入負荷量の変動

林内雨採取地点の林相は、林内雨 1 はトドマツを主とする混交林、林内雨 2 は広葉樹の多い混交林、林内雨 3 は広葉樹林であった。採取量は林内雨 3 > 林内雨 2 > 林内雨 1 の順であり、夏季は林内雨 3 の採取量が林外雨より多いことがあった。林内雨の濃度は林内雨 1 > 林内雨 2 > 林内雨 3 の順であり、年間負荷量も同様であったが差は小さかった。林内雨の負荷量は H^+ と NH_4 を除いて林外雨よりも多くなり、特に Mg は林外雨の約 6~9 倍の負荷量となった (図 2.1.7)。それ以外の溶存成分は 1.2~2.5 倍程度林内雨の方が多かった。林内雨 3 は他の 2 地点より濃度が低く、落葉後から展葉前は林外雨とほぼ同様の濃度であった。

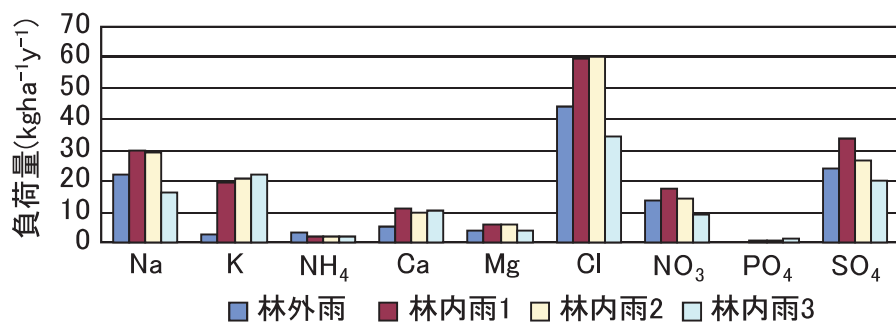


図 2.1.7 定山溪森林理水試験地における林外雨、林内雨による年間流入負荷量 (2005~2008 年の平均値 林内雨 3 は 2005 と 2008 年の平均値)

一の沢の溪流水の pH は 6.5～7.6 の範囲で変動し、単純平均は 7.0、二の沢の溪流水の pH は 6.5～7.7 の範囲で変動し、単純平均は 7.2 であった（図 2.1.8）。pH は 4 月の融雪期に明瞭に低下し、流量の減少とともに徐々に上昇して 7～9 月に最も高くなり、やや低下した後、積雪期はほぼ一定の値を示した。二の沢の pH は常に一の沢よりも高めの値で推移していた（図 2.1.8）。一の沢の EC は 3.4～11.7 mS m^{-1} の範囲で変動し、単純平均で 7.0 mS m^{-1} 、二の沢の EC は 3.7～10.5 mS m^{-1} の範囲で変動し、単純平均で 7.4 mS m^{-1} であった（図 2.1.9）。EC の季節変動は pH と同様の傾向を示した。一の沢は二の沢より EC の変動幅が大きく、冬季は二の沢より低く、夏季は二の沢より高い値を示した。一の沢、二の沢とも 2008 年の EC は 2007 年以前よりやや高かった（図 2.1.9）。溶存成分濃度の季節変動は成分によって異なり、Na、Si は変動幅が小さく、Mg、Mg、Ca、 NO_3 、 SO_4 、 HCO_3 は融雪期の濃度低下と夏季の濃度上昇が明瞭であった。 NO_3 は特に変動幅が大きく、11 月頃の濃度低下と夏季の濃度上昇が顕著であった。ただし二の沢では夏季の NO_3 濃度の上昇は一の沢ほど顕著ではなかった。Cl は冬季の濃度が夏季よりも高かった（図 2.1.10a～c）。

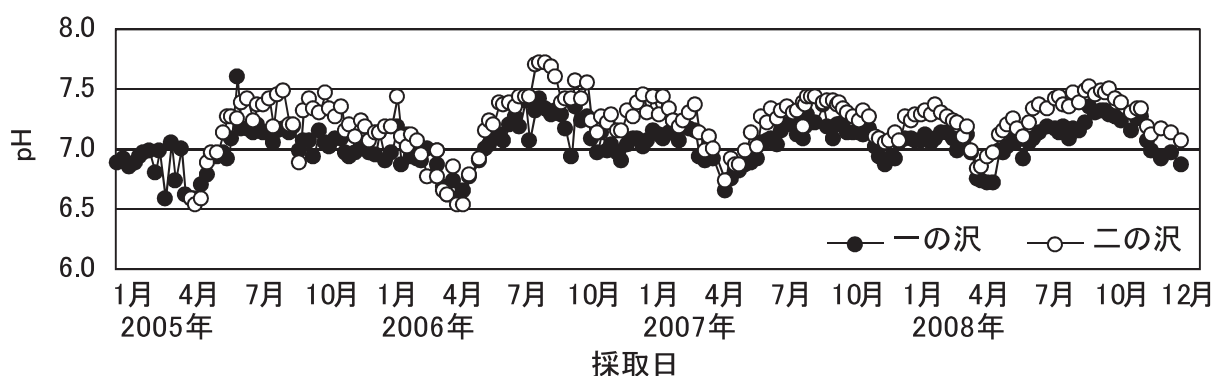


図 2.1.8 定山溪森林理水試験地における溪流水の pH の変動

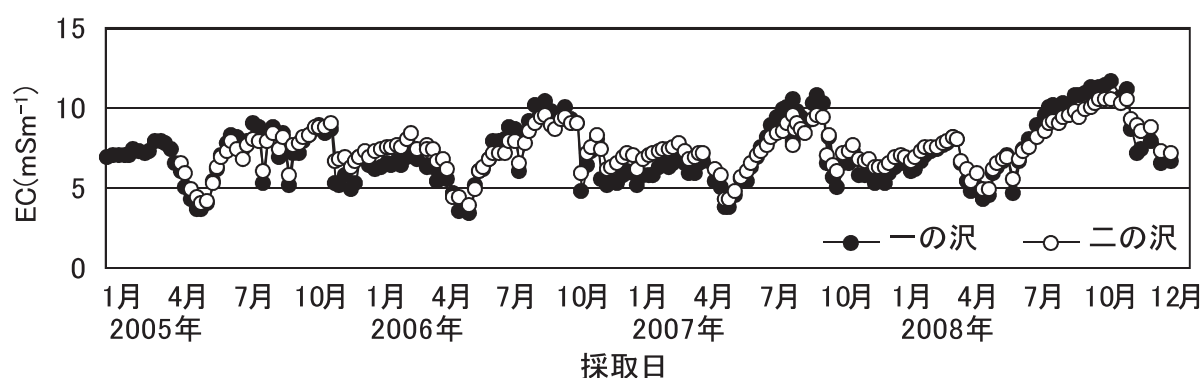


図 2.1.9 定山溪森林理水試験地における溪流水の EC の変動

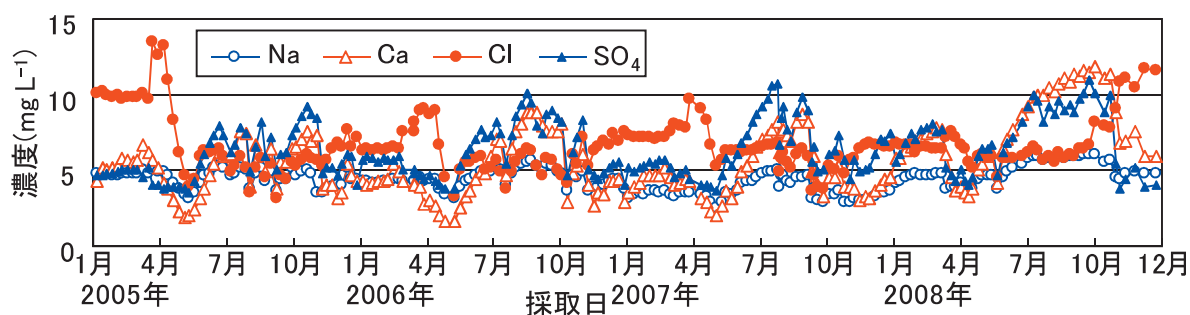


図 2.1.10a 定山溪森林理水試験地一の沢における渓流水の Na、Ca、Cl、SO₄ 濃度の変動

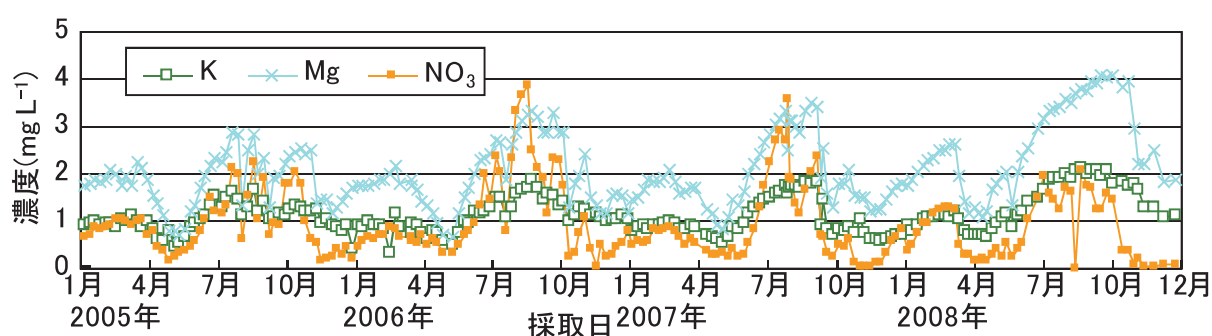


図 2.1.10b 定山溪森林理水試験地一の沢における渓流水の K、Mg、NO₃ 濃度の変動

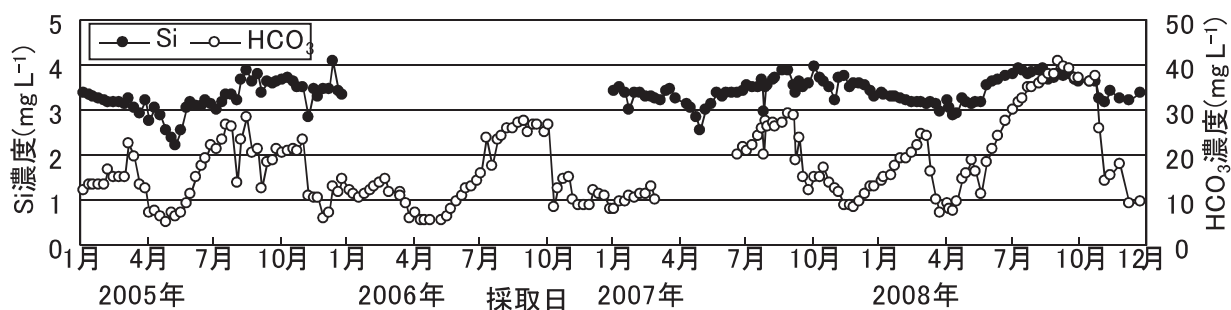


図 2.1.10c 定山溪森林理水試験地一の沢における渓流水の Si、HCO₃ 濃度の変動

2008 年は 4 月から 11 月まで一の沢に自動採水装置を設置し、出水時の溶存成分濃度を観測した。定山溪森林理水試験地は多雪地域に位置するため、冬季の積雪と春季の融雪の影響を強く受ける。1 年間を流量の変動が小さい積雪期、流量が増大する融雪期、降水量に応じて流量が変動する夏季の 3 期間に区分し、期間毎に LQ 式を求めて流出量を推定した。LQ 式の係数の期間による変動は溶存成分によって異なり、Si のように季節変化の見られないもの、Cl のように冬季の濃度が高く夏季の濃度が低いもの、HCO₃ や Mg のように夏季に濃度が高いもの等の特徴が認められた。2007 年以前は定期採水時のデータのみを用いて通年の LQ 式を計算したが、2008 年は季節区分毎に定期採水と自動採取装置による連続採取時のデータを用いて LQ 式を計算し、季節毎の流出負荷量を計算した。年間の流出負荷量は、2006～2007 年の平均値では NH₄-N、NO₃-N

以外は流出負荷量の方が多かった（図 2.1.11）。特に Ca、Mg の流出負荷量は流入負荷量の 3～5 倍に達した。一の沢の渓流水による流出負荷量の 2006～2008 年の平均値は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が $0.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が $0.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $\text{SO}_4\text{-S}$ が $10.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。

ii) 降雨出水時の溶存成分濃度の変化

渓流水の連続採取は 2007 年 9 月に、少雨期後の大雨（ただし直前に降雨あり）による出水と流量の減少過程、その後の降雨に伴う小規模な出水後の流量減少過程、および、降雨が繰り返された後の複数の降雨を含む比較的流量が多い期間の 3 回行った。大雨による出水時には全ての溶存成分濃度が低下し、ほとんどの成分濃度は流出量の減少に伴って再び上昇した。 NO_3 濃度は流量の減少に伴いわずかに低下した。その後の降雨では NO_3 も含む全てのイオンで流量の増減と逆の濃度変動を示し、降雨の連続により濃度が低下した。 NO_3 の濃度低下は特に顕著であった。

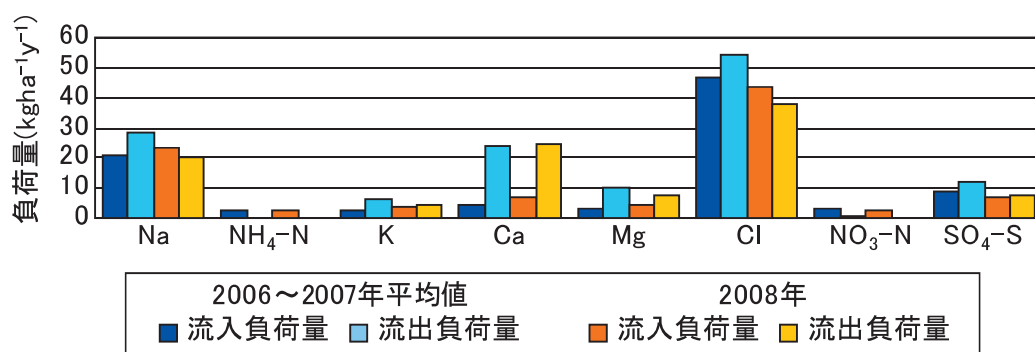


図 2.1.11 定山溪森林理水試験地一の沢における流入、流出負荷量
(2006～2007 年の平均値と 2008 年の比較)

(2) 渓流水質の地域内広域多点調査

2005 年の渓流水の多点調査の結果では、 pH は 6.5～7.7、 EC は $5.1\sim 22.7 \text{ mS m}^{-1}$ と流域により大きな違いが見られた。 EC の高い渓流水は、 SO_4 と Ca の濃度が他のイオンに比較して高い傾向を示した。同じ時期の理水試験地の pH は一の沢が 7.2、二の沢が 7.5、 EC はそれぞれ 8.7、8.4 で、他の流域と大きな違いはなかった。ただし、小樽内川流域内で比較すると、 pH はほぼ平均的な値であるが、 EC は高めの値になった（図 2.1.12）。一の沢の NO_3 濃度は二の沢に比較して高い値となっていたが、他の渓流と比較しても高い値であった（図 2.1.12）。また Mg は一の沢、二の沢共に他の渓流に比較して高い値であった。 Ca 濃度は白井川流域の渓流に高いものが多かった（図 2.1.12）。2006 年の渓流水の多点調査の結果では、7 月の pH は 6.2～7.8、 EC は $4.4\sim 12.2 \text{ mS m}^{-1}$ の範囲でばらつき、2005 年と同様に流域により大きな違いが見られた。8 月も 7 月とほぼ同じような範囲となり、 pH は 6.2～7.8、 EC が $4.7\sim 16.6 \text{ mS m}^{-1}$ であった。ただし、8 月の EC と Ca 、 Mg 、硫酸の各イオン濃度が 7 月の時に比べ極端に高い渓流が一流域存在した。 EC が高い渓流水は、 Ca 濃度も高い傾向を示した（相関係数 $R^2=0.84$ ）。同じ時期の理水試験地の分析結果と比較すると、 Na 、 Mg 、 Ca 、 Mg 、 NO_3 、 DOC 濃度は理水試験地の値が他の渓流よりも高い傾向であった。また、 NO_3 濃度は 2005 年と同様、一の沢の値が他の渓流に比較して非常に高かった。

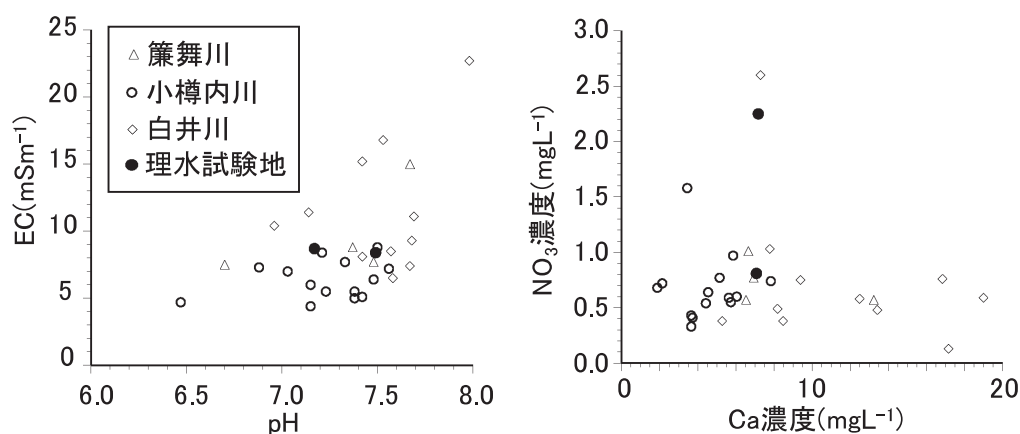


図 2.1.12 2005 年に各流域において採取した渓流水の pH、EC、Ca および NO₃ 濃度

安山岩、流紋岩を主とする流域および凝灰岩を主とする流域に比べ、堆積岩を主とする流域は Ca 濃度が高い傾向が認められた (図 2.1.13)。標高と Ca 濃度は有意な負の相関が認められたが特異的に濃度が高く他とは地質が異なる地点を除外すると、有意な相関は認められなかった。流域面積と Ca 濃度には相関が認められなかった。

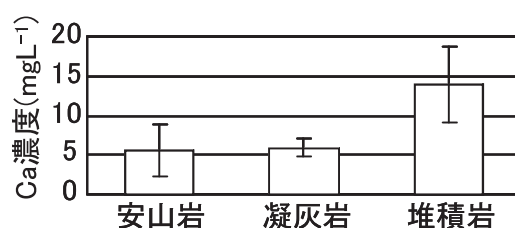


図 2.1.13 小樽内川および白井川流域における渓流の地質毎の Ca 濃度

エ 考察

(1) 降水、渓流水のモニタリング

i) 降水、渓流水の水質

林外雨による物質の流入負荷量は Na と Cl が多かった。これは降水量の多い積雪期に濃度が高いことが理由であると考えられ、当試験地が気候的には冬季の季節風の影響を受ける日本海側に位置することを表している。4～5 月には Ca 濃度が高いことがあり、黄砂が観測される時期と一致していることから、黄砂の影響を受けていると考えられる。SO₄、NH₄、NO₃ が Ca と同様の濃度上昇を示すことは、4～5 月に濃度が上昇するこれらのイオンが黄砂と同様に長距離を移動する広域汚染物質起源である可能性を示唆している。10～11 月には濃度が高くなるイオンが多く、特に Mg はこの期間の濃度が高かった。10～11 月は落葉期に当たり、林外雨採取装置のロートに落葉が混入していることが多かった。Na 及び Cl の濃度が 11 月以降高くなるのは季節風による海塩の影響のためと考えられるが、Mg 等の林内雨中に高濃度に存在する成分が 10～11 月に高濃度となるのは、採取装置に混入した多量の落葉からの溶出成分のためと考えられる。

林内雨 3 は降水量が少ない時でも林内雨 1、2 に比べて樹冠遮断が少なく、降水量が多い時の採取量は林外雨とほぼ同量であり、林外雨量を上回る場合もあった。林内雨 3 は広葉樹林のため、

針葉樹が混交する林内雨 1、2 に比べて葉面での水滴の捕捉が少ないと考えられる。ただし、林内雨 3 は林外雨採取地点から離れた上流部の谷頭凹地に位置しているため、地形等の影響で降水量自体が林外雨採取地点より多い可能性もある。

渓流水による無機態窒素の流出負荷量は、一の沢、二の沢とも約 $0.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、日本の他の地域に比べてきわめて低い値であった。NO₃ の単純平均濃度は 0.8 mg L^{-1} と特に低くはないが、年流出量の 6 割が流出する 3 月中旬から 5 月下旬にかけての融雪期の NO₃ 濃度が $0.2 \sim 0.5 \text{ mg L}^{-1}$ と非常に低いため、年間の無機態窒素流出負荷量が低くなっていると考えられる。一の沢、二の沢とも 2008 年の EC は 2007 年以前よりやや高かった。一の沢の流量は年間流出水高で 2007 年以前は 800~900 mm 程度であるのに対し、2008 年は 500 mm 以下と非常に少なかった。2008 年は降水量が少なかったためにそれに対応して流出量が少なく、流出する成分の濃縮が起こっていたと考えられる。

融雪期の流量が多い時期と夏季の出水時では流量と流出負荷量の関係が異なるため、2008 年は積雪期、融雪期、夏季に分け、出水時の連続採水データを加えて LQ 式を求め、流出負荷量を計算した。定期採水時のデータのみを用いた 2007 年以前の計算値と比較すると、2008 年は流入負荷量に対して流出負荷量が少ない傾向があり、Na、Cl では流出負荷量が少なかった。2008 年の降水量は 2006 年と 2007 年の平均の約 7 割であったのに対して流出量は 6 割以下であったため、相対的に流出量が少なかったことが影響していると考えられる。

ii) 降雨出水時の溶存成分濃度の変化

2007 年の連続採取の結果、1 回目の流量減少時にのみ NO₃ 濃度が若干低下する傾向が見られ、他の流域で報告されているような流量ピーク時の NO₃ 濃度の顕著な上昇は認められなかった。1 回目は土壌の浅い層を経由した直接流出の成分によって高濃度の NO₃ が供給されるが、その後短期間に繰り返し降雨があったため、土壌中の NO₃-N が洗脱され、2 回目、3 回目には直接流出による供給が減少したと考えられる。流量ピーク時に NO₃ 濃度が上昇しなかったのは、直接流出の経路が他の流域と異なり、NO₃ 濃度の高い土壌表層付近を経由する水の割合が少ないこと、あるいは、供給源となる土壌中の NO₃-N 量が少ないこと等が影響していると考えられる。

(2) 渓流水質の地域内広域多点調査

定山溪森林理水試験地における渓流水の水質を周辺地域の他の溪流のレンジ内に入るが、小樽内川流域内のみで比較すると、EC は高めの値であった。溶存成分濃度は一の沢、二の沢ともに Mg が高く、一の沢は NO₃ 濃度が高い値であった。一の沢の流域面積は多点調査の対象とした他の溪流に比べて小さく、夏季には流量が非常に少なくなる。流量が極端に減少することが NO₃ をはじめとする溶存成分濃度の上昇と関係していると考えられるが、メカニズムは不明である。

小樽内川流域と白井川流域の水質を比較すると、白井川流域の方が Ca 濃度が高く EC が高い傾向が認められた。2005 年の調査結果からは、安山岩、流紋岩を主とする流域および凝灰岩を主とする流域に比べ、堆積岩を主とする流域は Ca 濃度が高い傾向が認められた。堆積岩を主とする流域は白井川流域のみに存在したことから、流域内の地質の違いが、小樽内川流域と白井川流域の Ca 濃度平均値の差をもたらしていると考えられる。

オ 今後の課題

降水量が少ない年は林外雨の濃度が高く、流入負荷量と降水量の関係は不明瞭であった。林外

雨試料には降雨前にロートに付着した乾性沈着が含まれているため、乾性沈着の影響が大きければ降水量と流入負荷量の関係は不明瞭になる。流入負荷量に対する乾性沈着の寄与を明らかにする必要がある。測定手法上の問題として、イオンバランスによる測定精度検証時に低濃度試料が棄却される確率が高いことが挙げられる。機械的に QA/QC を適用することにより、加重平均値に対する高濃度試料の影響が大きくなるおそれがある。分析精度の向上に務める必要があるが、基準外のデータの扱いについて検討する必要があると考えられる。また、採取装置に混入する落葉からの溶出成分のため、林外雨の溶存成分濃度を過大評価している可能性がある。系外からの流入負荷量を求めるためには落葉の影響を除外する必要があり、採取方法の改善が必要と考えられる。

2008 年の Na、Cl の流出負荷量は流入負荷量より少なかった。この結果が小雨に起因する 2008 年の特異的なものなのか、流出負荷量の過小評価あるいは流入負荷量の過大評価によるものなのかを明らかにするため、降水量が多い年に同様の計算をして検証する必要がある。

カ 要約

全国規模での森林流域における水質モニタリングの一環として、北海道札幌市南区定山溪の森林理水試験地において、降水と溪流水の水質モニタリングを行い、溶存成分の流域単位の流入、流出負荷量を計算した。林外雨の溶存成分は冬季の海塩起源の成分と黄砂等の長距離を移動する物質の影響を受けていると考えられる。溪流水の溶存成分濃度は夏季の渇水時に高くなるものが多く、一の沢では特に NO_3 濃度が高くなった。林外雨による年間流入負荷量の 2005～2008 年の平均値は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が $2.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が $3.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $\text{SO}_4\text{-S}$ が $8.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、一の沢の溪流水による年間流出負荷量の 2006～2008 年の平均値は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が $0.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が $0.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $\text{SO}_4\text{-S}$ が $10.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。濃度の低い融雪期の流出量が多いため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の年間流出負荷量は非常に低かった。広域多点調査の結果、一の沢は小樽内川流域の他の溪流より EC、 NO_3 、Mg 濃度が高かった。小樽内川流域と白井川流域を比較すると白井川流域に EC および Ca 濃度が高い溪流が多く、流域内の表層地質が堆積岩であることが影響していた。

(相澤州平)

2. 東北における水質モニタリングとフラックスの広域評価

ア 研究目的

日本の積雪地域においては、これまでのところ、融雪水からの酸性物質の流出による陸水生態系への顕著な影響は報告されていない。しかし、アジア地域の経済発展に伴って窒素酸化物などの酸性降下物の負荷量が増加することが懸念されており、今後、融雪による酸性物質の流出が顕在化することが危惧される。このため、東北地方の内陸部および日本海側に位置する積雪地域の森林流域において、継続して降水および溪流水の水質モニタリングを行い、両流域における主要溶存成分の流入および流出負荷量を評価する。

イ 研究方法

(1) 試験地流域における水質モニタリング

水質のモニタリングは東北支所酸性雨モニタリングセンター第1ステーション（相澤ら 2004）を含む流域（以下、姫神試験地、（図 2.2.1））と、釜淵森林理水試験地（細田・村上 2006）（以下、釜淵試験地、（図 2.2.2））で行った。両試験地の基本情報を表 2.(2).1 に示す。姫神試験地の開空地および釜淵試験地の気象観測露場において降水を、姫神 A および B 流域と釜淵 1 号沢において溪流水を、それぞれ隔週で採取した。採取試料は pH と EC を測定後、Na、NH₄、Mg、Cl、NO₂、NO₃、PO₄ および SO₄ 濃度はイオンクロマトグラフ（メトローム CompactIC761）で、Ca、Mg、Si、Fe および Al 濃度は本所の ICP 発光分析装置（パーキンエルマー Optima4300DV）で測定した。全有機および全無機炭素は島津・全有機炭素分析計を用い、2005 年は北海道支所の TOC-5000A で、2006 年は TOC-VCPH で測定し、2007 年からは装置に TNM-1 を付加することで全窒素濃度をあわせて測定した。Technical Documents for Wet Deposition Monitoring in East Asia の Quality Assurance / Quality Control Program（酸性雨研究センター 2000）に従って測定結果の品質管理を行い、基準を満たさなかった試料については流入および流出負荷量の算出に用いなかった。降水による流入負荷量は、基準を満たした降水試料から求めた加重平均値濃度に年降水量を乗じて算出した。溪流水による流出負荷量は、採水時の流量 Q と各溶存成分濃度との積である負荷量 L についての累乗式を作成し、量水堰により観測した日流量をそれぞれの式に代入して算出した。

(2) 溪流水の広域多点調査

国土地理院の 1/25000 地形図で、姫神および釜淵試験地の流域を含む図幅を中心とした計 9 葉（3×3）の範囲から人為的影響が少ないと考えられる 22 流域ずつを選定し（表 2.2.2、2.2.3）、2006 年の 7 月上旬（梅雨期）および 8 月下旬（夏期）に溪流水を採取した。前述の方法で採取試料の測定および品質管理を行い、主要溶存成分濃度と立地環境要因（流域面積、地質、土壌群、植生タイプ、平均標高、平均傾斜、海からの距離）との関係を解析した。

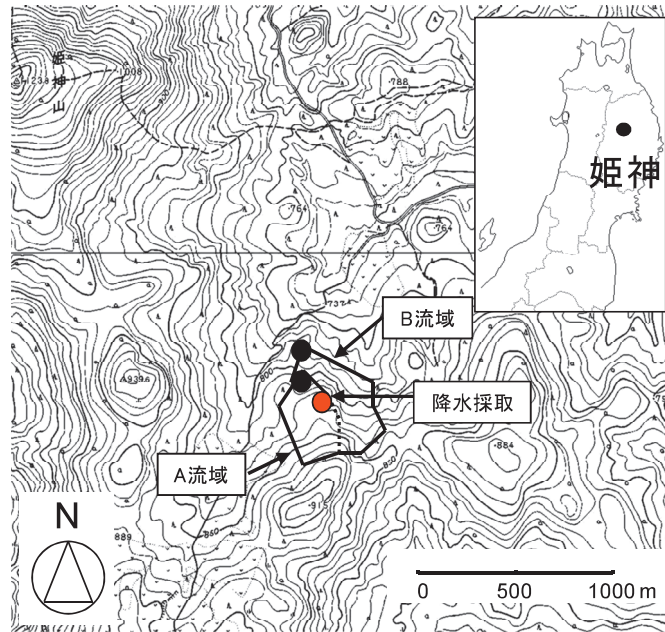


図 2.2.1 姫神試験地の流域位置図および降水、溪流水の観測地点

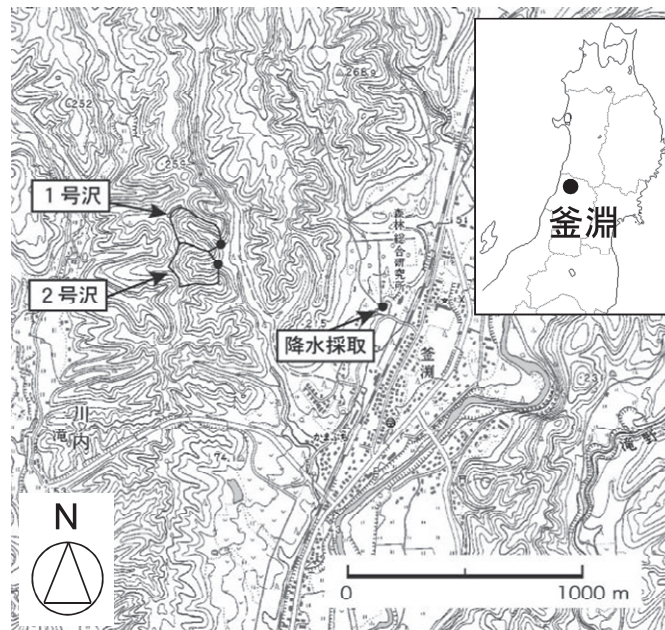


図 2.2.2 釜淵試験地の流域位置図および降水、溪流水の観測地点

表 2.2.1 姫神および釜淵試験地の流域情報

試験地名	面積 (ha)	位置	標高 (m)	土壌型	地質	樹種
姫神試験地	16.0 (A流域) 25.8 (B流域)	N39° 49' 52" E141° 16' 02"	770	BD, BD(d)	花崗岩	カラマツ人工林
釜淵試験地	3.06 (釜淵1号沢)	N38° 56' 25" E140° 15' 28"	162	BD, BD(d)	第三紀凝灰岩	広葉樹天然生林

表 2.2.2 姫神試験地周辺の多点調査流域

採取流域	1/25000 図幅名	面積 (ha)	地質	土壌群	植生 タイプ	平均標高 (m)	平均傾斜 (°)	日本海まで の距離 (km)
H7-1	藪川	19.1	堆積岩	黒色土	針広混交	747	18.2	119.5
H7-2	藪川	68.4	堆積岩	黒色土	針広混交	867	11.0	122.3
H7-3	藪川	36.4	堆積岩	褐色森林土	広葉樹	682	10.0	114.6
H8-1	岩洞	41.4	堆積岩	黒色土	針葉樹	856	10.8	116.7
H8-2	岩洞	51.1	堆積岩	ポドゾル	広葉樹	1084	11.5	116.2
H9-1	青松葉山	30.1	堆積岩	褐色森林土	広葉樹	1009	12.3	119.5
H9-2	青松葉山	25.9	堆積岩	ポドゾル	広葉樹	1058	14.4	115.4
H9-3	青松葉山	79.4	堆積岩	ポドゾル	針広混交	994	13.8	119.9
H12-1	陸中南山形	19.5	堆積岩	黒色土	針広混交	587	12.8	110.2
H12-2	陸中南山形	13.7	堆積岩	黒色土	針広混交	526	10.0	105.8
H13-1	外山	55.4	堆積岩	黒色土	広葉樹	830	10.3	108.3
H13-2	外山	23.6	堆積岩	黒色土	針広混交	778	13.1	113.2
H14-1	大志田	24.2	堆積岩	褐色森林土	広葉樹	566	17.2	107.1
H14-2	大志田	12.1	堆積岩	褐色森林土	針広混交	458	10.8	103.3
H14-3	大志田	55.0	堆積岩	黒色土	針葉樹	725	10.5	110.4
H17-1	渋民	16.8	花崗岩	黒色土	針広混交	320	6.7	100.8
H17-2	渋民	18.6	流紋岩	褐色森林土	針葉樹	353	9.1	103.0
H18-1	鷹高	83.1	堆積岩	黒色土	広葉樹	270	6.7	96.7
H18-2	鷹高	9.9	堆積岩	褐色森林土	針広混交	260	10.3	97.8
H19-1	盛岡	31.8	堆積岩	褐色森林土	針広混交	241	9.2	97.0
H19-2	盛岡	9.3	堆積岩	褐色森林土	広葉樹	282	11.6	99.8
H19-3	盛岡	27.5	堆積岩	褐色森林土	針広混交	387	11.9	99.9
姫神B	外山	25.8	花崗岩	黒色土	針葉樹	821	10.5	106.7

表 2.2.3 釜淵試験地周辺の多点調査流域

採取流域	1/25000 図幅名	面積 (ha)	地質	土壌群	植生 タイプ	平均標高 (m)	平均傾斜 (°)	日本海まで の距離 (km)
K8-1	羽後川井	254.4	安山岩	褐色森林土	広葉樹	729	18.7	49.8
K8-2	羽後川井	2.6	堆積岩	褐色森林土	広葉樹	367	31.0	43.7
K9-1	神室山	87.0	堆積岩	褐色森林土	針広混交	575	18.2	50.6
K9-2	神室山	43.9	堆積岩	褐色森林土	針広混交	425	9.2	51.1
K9-3	神室山	15.8	花崗岩	褐色森林土	広葉樹	627	30.9	52.5
K10-1	瀬見	54.8	堆積岩	褐色森林土	針広混交	427	14.0	57.8
K10-2	瀬見	12.0	安山岩	褐色森林土	広葉樹	435	26.4	57.7
K10-3	瀬見	29.8	安山岩	褐色森林土	広葉樹	426	27.5	49.9
K13-1	及位	23.5	堆積岩	褐色森林土	針広混交	285	11.3	38.9
K14-1	羽前金山	55.1	安山岩	黒色土	針広混交	228	5.2	41.6
K14-2	羽前金山	44.2	安山岩	褐色森林土	針葉樹	314	11.2	45.1
K15-1	新庄	25.2	堆積岩	黒色土	広葉樹	203	5.6	48.1
K15-2	新庄	6.1	堆積岩	黒色土	針葉樹	180	8.7	48.3
K15-3	新庄	15.2	堆積岩	黒色土	広葉樹	141	6.7	41.2
K18-1	差首鍋	24.4	安山岩	褐色森林土	針広混交	263	10.5	29.3
K18-2	差首鍋	13.1	安山岩	褐色森林土	広葉樹	378	22.7	26.0
K18-3	差首鍋	3.3	安山岩	褐色森林土	針葉樹	338	24.9	33.1
K19-1	大沢	11.4	堆積岩	褐色森林土	針広混交	232	9.5	31.5
K19-2	大沢	5.9	堆積岩	黒色土	広葉樹	218	17.8	30.1
K19-3	大沢	4.0	堆積岩	褐色森林土	針葉樹	161	8.0	35.2
K20-1	羽根沢温泉	13.0	堆積岩	褐色森林土	針葉樹	150	8.4	33.4
K20-2	羽根沢温泉	5.3	堆積岩	黒色土	針葉樹	104	11.6	35.2
釜淵1号沢	及位	2.5	堆積岩	褐色森林土	針広混交	208	15.0	36.0

ウ 結果

(1) 試験地流域における水質モニタリング

i) 姫神試験地

期間中の pH、EC および流入負荷量の年変動を図 2.2.3 に示す。なお、2008 年の夏期 6～8 月に採取した試料のすべてが品質管理の基準を満たさなかったため、pH、EC および溶存成分の加重平均値の算出結果には夏期のデータが反映されていない。そのため、2008 年における加重平均値と流入負荷量の算出結果は参考値として示し、以後の検討には 2008 年の結果を加えないこととする。夏期に採取した試料がすべて棄却された原因は特定できていないが、溶存有機炭素 (DOC) 濃度が 10 mg L^{-1} 以上と極端に高く、また Ca 濃度も高いことから、カラマツ枝葉などによる林内雨成分の混入が疑われる。

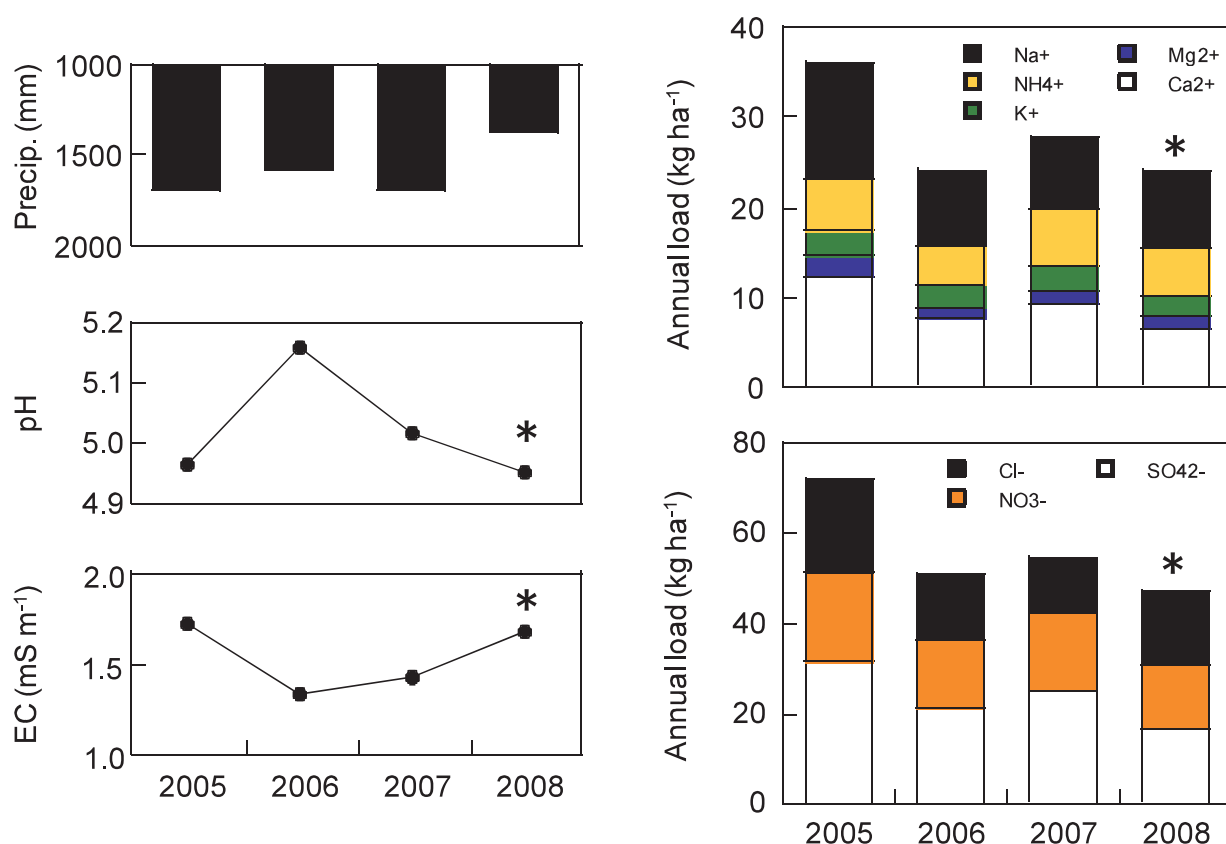


図 2.2.3 姫神試験地における降水中の pH、EC および流入負荷量の年変動
(*は、夏期のデータが含まれていないため、参考値として示す)

姫神試験地の年降水量は 1372～1686 mm、A 流域における年流出水量は 793～1146 mm であり、年間の損失量は 450～580 mm であった。2005～2007 年における降水の pH の加重平均値は 4.97～5.16 の範囲にあり、いずれも 1995 年以降の平均値 (4.86) よりやや高かった。EC は積雪期から融雪期にかけて高く、夏期に低い傾向であった。EC の加重平均値は 1.33～1.73 mS m^{-1} の範囲にあり、過去の平均値 (1.32 mS m^{-1}) よりも高い傾向にあった。降水中の溶存成分濃度

の季節変化は Na や Cl は積雪期に高く、NO₃および SO₄は積雪期から融雪期に高かった。2005 年の 3～4 月において、黄砂の影響による EC および溶存成分濃度の顕著な上昇が認められた。

姫神 A 流域における無機態窒素 (DIN) の流入負荷量は 6.8～9.1 kg ha⁻¹y⁻¹、流出負荷量は 1.5～2.4 kg ha⁻¹y⁻¹であった (図 2.2.4)。また、S の流入負荷量は 7.2～10.6 kg ha⁻¹y⁻¹、流出負荷量は 2.5～4.1 kg ha⁻¹y⁻¹であった。いずれの年も DIN および S は流入負荷量が流出負荷量を上回っていた。K の流入負荷量は 2.5 kg ha⁻¹y⁻¹程度であるのに対して、流出負荷量は 2.0 kg ha⁻¹y⁻¹ほどであり、いずれの年も K もやや流入負荷量が上回っていた。一方、Na、Ca および Mg の流出負荷量は、流入負荷量の 2～6 倍多く、流域からの損失となっていた。土壌への吸脱着をほとんど無視できるとされる Cl は、2005～2007 年の平均で流出負荷量が流入負荷量の約 1.7 倍となっていた。

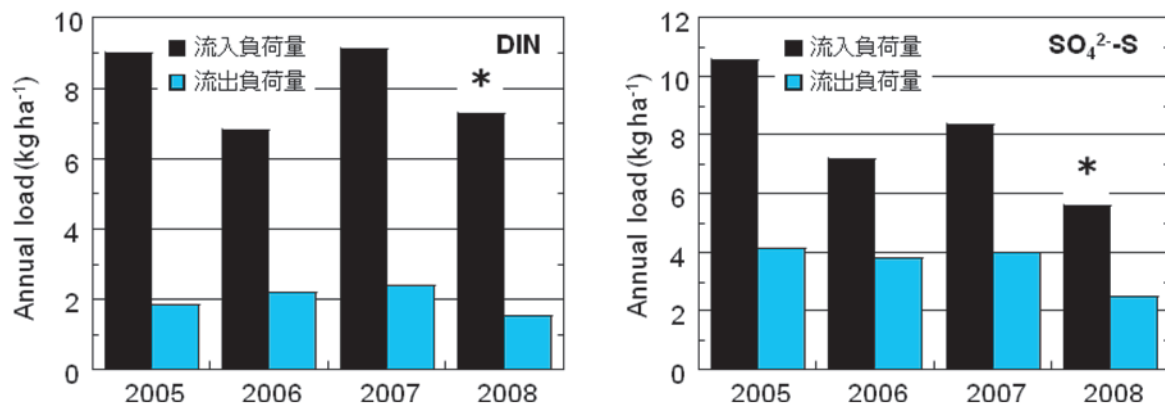


図 2.2.4 姫神試験地 A 流域における無機態窒素 (DIN) と硫酸態硫黄 (SO₄-S) の流入および流出負荷量の年変動 (* は、夏期のデータが含まれていないため、参考値として示す)

ii) 釜淵試験地

釜淵試験地の気象観測露場における年降水量は 2041～2884 mm、釜淵 1 号沢流域における年流出水量は 1631～2057 mm であった。降水の pH の加重平均値は 4.54～4.62 の範囲にあり (図 2.2.5)、2001 年以降の平均値 (4.63) より低かった。EC の加重平均値は 3.44～3.87 mS m⁻¹ の範囲にあり、過去の平均値 (3.34mS m⁻¹) よりも高い傾向にあった。Na や Cl などほとんどの溶存成分濃度は、積雪期から融雪期において高く、夏期には低くなった。

釜淵 1 号沢流域における DIN の流入負荷量は 10.4～14.1 kg ha⁻¹y⁻¹、流出負荷量は 2.7～4.0 kg ha⁻¹y⁻¹であり、DIN は常に流域内に蓄積していた (図 2.2.6)。一方、S の流入負荷量は 13.5～25.0 kg ha⁻¹y⁻¹、流出負荷量は 32.1～41.0 kg ha⁻¹y⁻¹であり、姫神試験地とは逆に流域からの損失となっていた。Na、Mg および Ca の流出負荷量は、流入負荷量のそれぞれ 1.2～1.7、1.3～1.9、3.7～6.0 倍であった。K の流入負荷量は 2.6～3.8 kg ha⁻¹y⁻¹であるのに対して、流出負荷量は 17.8～23.5 kg ha⁻¹y⁻¹であり、K の流域からの損失は流入負荷量の 6～7 倍に達した。Cl の流出負荷量は流入負荷量の平均 1.3 倍であった。

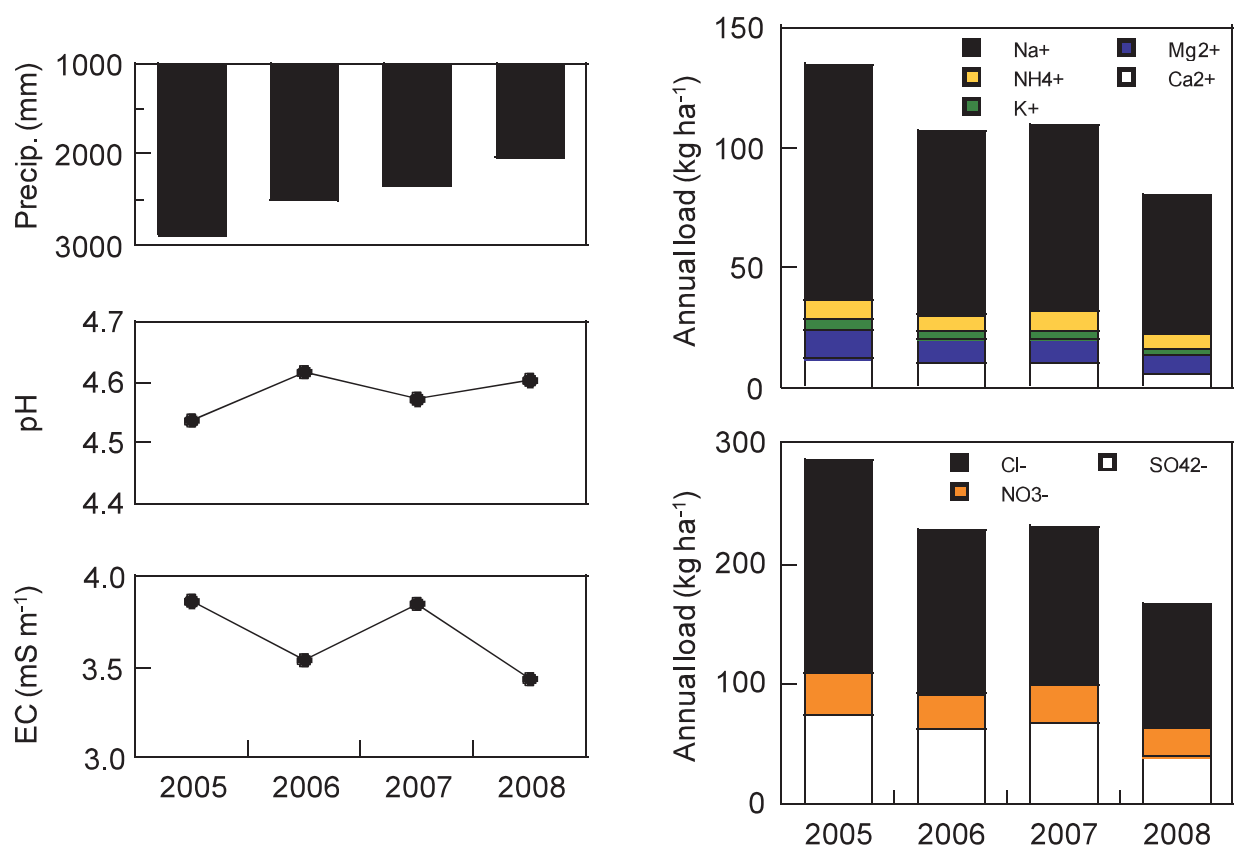


図 2.2.5 釜淵試験地における降水中の pH、EC および流入負荷量の年変動

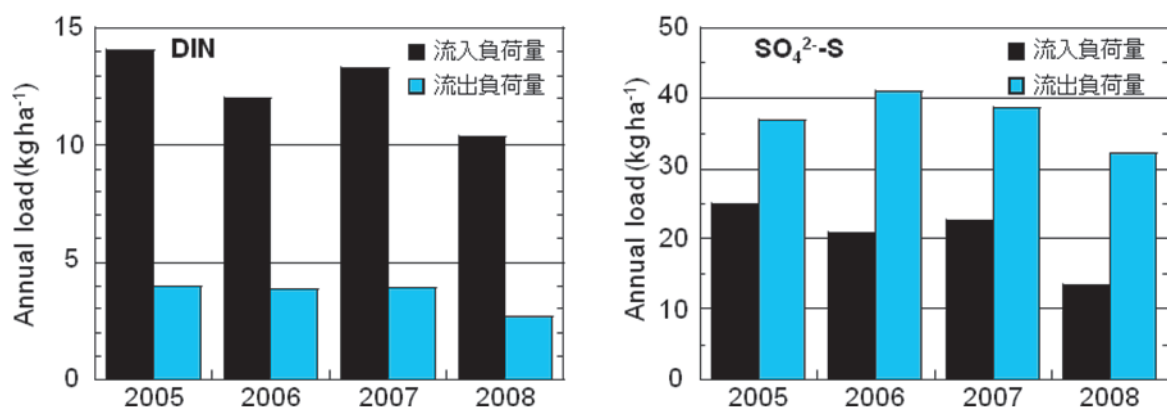


図 2.2.6 釜淵試験地における無機態窒素 (DIN) と硫酸態硫黄 (SO₄²⁻-S) の流入および流出負荷量の年変動

(2) 渓流水の広域多点調査

姫神、釜淵周辺流域ともに、NO₃濃度は梅雨期で高く、それ以外の溶存成分は夏期に高かつ

た。地点間での溶存成分濃度の変動は、姫神周辺では比較的小さく、逆に釜淵周辺では変動が大きい傾向にあった。姫神試験地の溶存成分濃度は、周辺流域と比較して相対的に低い値を示した。一方、釜淵 1 号沢の溶存成分濃度は周辺流域の平均とほぼ同じであったが、Mg と DOC 濃度は約 2 倍の値を示していた。

夏期に採水した渓流水の主要溶存成分濃度と立地環境要因の単回帰分析を行ったところ、姫神および釜淵の両周辺流域ともに、EC、Na および Cl については日本海までの距離との間に負の相関が認められた。Cl および Si については平均標高との間にも高い負の相関がみられた。両流域のデータをあわせて回帰分析を行った場合も、Si と平均標高の間に負の相関がみられ、Na および Cl と日本海までの距離の間に高い負の相関がみられた（図 2.2.7）。溶存成分濃度を従属変数とし、流域面積、平均傾斜、平均標高、日本海からの距離、地質、土壌群、植生タイプを独立変数として、重回帰分析を行った。その結果、姫神周辺流域では、ほとんどの成分で標高の影響が最も強く（ $P<0.05$ ）、釜淵周辺流域では、日本海までの距離の影響が強かった（表 2.2.4）。

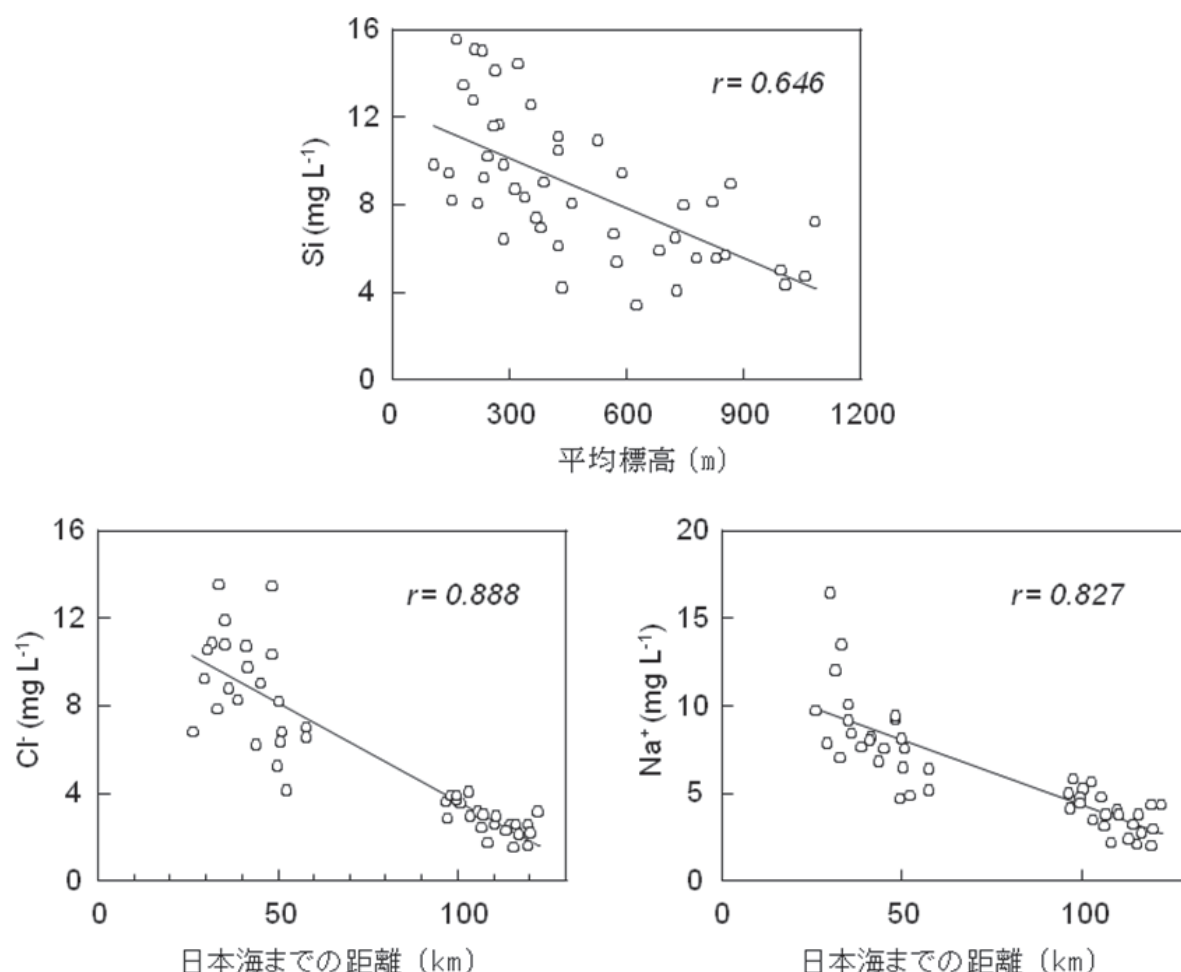


図 2.2.7 姫神および釜淵周辺流域における溶存成分濃度と立地環境要因の関係

表 2.2.4 姫神および釜淵周辺流域の夏期における主要溶存成分濃度と
立地環境要因の重回帰分析結果（ P -値が 0.05 以下の要因）

姫神			釜淵		
溶存成分	影響の強い要因	P -値	溶存成分	影響の強い要因	P -値
EC	平均標高	0.0005	EC	日本海までの距離	0.002
EC	日本海までの距離	0.020	Na ⁺	日本海までの距離	0.020
Na ⁺	平均標高	0.006	K ⁺	平均標高	0.030
Ca ²⁺	平均標高	0.0006	Ca ²⁺	日本海までの距離	0.038
Ca ²⁺	日本海までの距離	0.008	SO ₄ ²⁻	日本海までの距離	0.027
Cl ⁻	平均標高	0.023	HCO ₃ ⁻	日本海までの距離	0.006
SO ₄ ²⁻	平均標高	0.001	HCO ₃ ⁻	平均標高	0.015
SO ₄ ²⁻	日本海までの距離	0.012			
Si	平均標高	0.004			
HCO ₃ ⁻	平均標高	0.012			
DOC	平均標高	0.026			

エ 考察

（１）姫神および釜淵試験地の物質収支に及ぼす立地環境要因

両試験地の物質収支を比較すると、N を除くほとんどの溶存成分において、釜淵試験地で流入および流出負荷量とも著しく多くなっている。これは、両試験地の地質に加え、海との位置関係による海塩の影響の多寡によると考えられる。

姫神試験地では N の他に、S および K も流入負荷量が流出負荷量を上回っていたが、釜淵試験地では N 以外の溶存成分は流域からの損失となっていた。姫神試験地では S の吸着能が高いとされる火山灰を含む黒色土が厚く分布するが、釜淵試験地に分布する褐色森林土は土層が薄い。また、姫神試験地の地質は花崗岩であり、釜淵試験地の凝灰岩よりも花崗岩の方が流出する S が少ないと考えられる。このように、土壌や地質の違いが S の流出に大きな影響を与えていると推察される。

釜淵試験地の流域は急峻であるために枝葉などが斜面下部に移動・流亡し、流路付近には倒木とともに枝葉が堆積している。K の流出負荷量が著しく多かった要因として、地質の影響に加え、渓流水が通過する過程で堆積した倒木や枝葉から K が溶脱・負荷されたことが考えられる。同様に、DOC の流出負荷量が多いことについても、流路付近に存在する倒木や枝条の影響が考えられる。

両試験地ともに、林外雨による Cl の流出負荷量が流入負荷量を上回っていることから、林外雨ではなく、林内雨による流入負荷量と渓流水による流出量が釣り合うことが推察される。姫神試験地と比較して釜淵試験地では Cl の流出／流入負荷量の割合がやや小さいが、年降水量に占める落葉期の降水量の割合が大きい釜淵試験地では、葉などによって吸着される Cl の割合が相対的に小さくなっていることが考えられる。

２）姫神および釜淵周辺流域における水質形成要因

姫神試験地の溶存成分濃度は周辺流域と比較して相対的に低い値を示したが、これは姫神試験地の基岩が花崗岩であるのに対し、姫神試験地以外では中古生層が広く分布するためであると考えられる。一方、釜淵 1 号沢の Mg と DOC 濃度が顕著に高かったことについては、流路沿い

に堆積する枝葉や倒木の影響によると考えられる。

標高が高い流域ほど CI が低かった要因としては、気温の低下に伴う蒸発散量の減少と流出率の増加、および山地の降水量が多いことによる降雨中の CI 濃度の希釈効果（金子 1998）が考えられる。また、同様の傾向にあった Si については、前述の希釈効果に加え、気温の低下に伴う風化速度の減少を反映していると考えられる。水質形成に最も寄与している要因は、日本海に比較的近い位置にある釜淵周辺流域では海からの距離であり、日本海、太平洋の両方から遠く離れている姫神周辺流域では平均標高であったことが重回帰分析の結果から示された。従来、水質形成に強い影響を与えるとされる地質については、姫神、釜淵周辺流域ともに多くが堆積岩であったため、その影響は明らかではなかった。

オ 今後の問題点

姫神および釜淵試験地における溶存成分の流入および流出特性は明らかになったが、両流域の水質形成過程については十分に解明できなかった。林内雨や樹幹流、土壌水等を調査し、森林から土壌中における溶存成分の挙動を明らかにする必要がある。近年、積雪量の減少や融雪期間の短縮傾向が認められ、こうした現象が溶存成分の流出に及ぼす影響を評価するために、今後も森林流域の水質モニタリングを継続していく必要がある。

カ 要約

姫神試験地における年間の DIN の流入負荷量は $7\sim 9\text{ kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 、流出負荷量は約 $2\text{ kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ であった。一方、釜淵試験地における DIN の流入負荷量は $10\sim 14\text{ kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 、流出負荷量は $3\sim 4\text{ kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ であった。姫神試験地では DIN の他に、S も流入負荷量が流出負荷量を上回っていたが、釜淵試験地では DIN 以外の溶存成分は流域からの損失となっていた。S の流出特性の違いは、両試験地における土壌および地質の違いによってもたらされていると考えられる。両試験地周辺において水質形成に最も寄与している要因は、釜淵周辺流域では海からの距離であり、姫神周辺流域では平均標高であったことが重回帰分析の結果から示された。

キ 引用文献

相澤州平・池田重人・岡本透・佐々朋幸・後藤和秋・長谷川浩一・森茂太・鈴木和次郎・大住克博・金指達郎・中村松三・小野寺弘道・大原偉樹・松岡廣雄・齋藤武史・庄司次男・窪野高德・佐橋憲生・楨原寛・山家敏雄・鈴木祥悟（2004）酸性雨等の森林生態系への影響モニタリング ―東北地方における降水と森林の調査―，森林総合研究所研究報告，3, 439-476.

細田育広・村上亘（2006）釜淵森林理水試験地観測報告 ―1・2・3号沢試験流域―（2001年1月～2005年12月），森林総合研究所研究報告，5, 99-118.

金子真司（1998）近畿地方における渓流水質の広域調査，水利科学，239, 35-55.

酸性雨研究センター（2000）Technical documents for wet deposition monitoring in East Asia, Quality assurance / Quality control (QA/QC) program for wet deposition monitoring in East Asia, Adopted at: The second interim scientific advisory group meeting of acid deposition monitoring network in East Asia, 29p.

（志知幸治）

3. 関東における水質モニタリングとフラックスの広域評価

ア 研究目的

日本全国の森林生態系における酸性雨の影響予測や地球温暖化物質の動態予測、下流域への環境負荷物質の流出実態の評価のためには、森林流域における物質動態ならびに物質収支を解明する必要がある。しかし、流域試験に基づく物質収支の研究は、各流域毎の局所的な評価にとどまることが多く、全国的な物質収支の評価ならびにその地域的な変異等は十分に明らかにされていない。このため、溶存炭素や硫酸化物を含む溶存成分の収支を、モデル流域における詳細なフラックス観測と全国各地に設定した森林流域におけるモニタリングによって明らかにし、その広域的な評価を行う。

本所土壌特性研究室はその中で関東地区を担当しており、北関東低山帯に位置する桂不動谷津流域（茨城県城里町、茨城森林管理署管内北山国有林）をモデル流域として位置づけ、各水文過程における水・溶存成分の移動量を明らかにするため、林外雨、林内雨、土壌水、地下水、溪流水を週 1 回の頻度で採取し、主要溶存成分を測定し、流入負荷量、流出負荷量を算出する。また、年流出負荷量の変動を規定する要因を解析する。

イ 研究方法

北山国有林内に設置した桂試験地（2.3 ha）を源流部の一つとして含む桂不動谷津流域（59.9 ha）（図 2.3.1）において、林外雨、溪流水を週 1 回の頻度で採取し、主要溶存成分を測定する。また、桂試験地内において林内雨を 2 週に 1 回、土壌水と浅層地下水を週 1 回の頻度で採取し、主要溶存成分を測定する。流出負荷量と降水量、流出水量との関係を解析し、流出負荷量の年変動を規定する要因を解析する。また、梅雨期の 7 月と夏期の比較的乾燥した 8 月中旬に桂試験地周辺地域で溪流水の一斉多点調査を実施し、主要溶存成分濃度の地域的な変異を解析し、桂試験地で得られる結果の広域的な代表性を検証する。

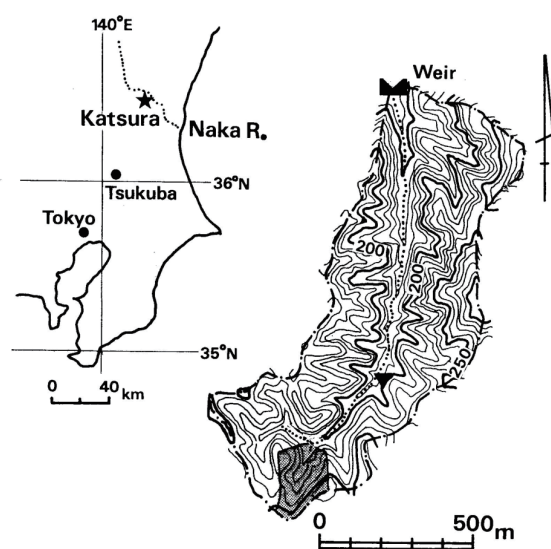


図 2.3.1 桂不動谷津流域及び桂試験地位置図

ウ 結果

(1) 桂不動谷津流域における主要溶存成分の流入負荷量、流出負荷量

降水による流入負荷量は各週の降水量に採取した試料の溶存成分濃度を乗じて求めた。流出負荷量は、試料採取時の流量(Q)とその時の溶存成分濃度と流量の積である負荷量(L)との関係式を求め、その式を用いて日流量から算出した。2005年から2008年までの桂不動谷津流域における降水量は2006年に1809mmと多かったが、それ以外の3年間は1316~1359mmと安定していた。流出水量も2006年に899mmと多かったが、それ以外の3年間は510~599mmであった。両者の差である損失量は蒸発散量を示しているとされるが、2006年に910mmと高い値を示したが、それ以外の3年間は717~848mmであった(図2.3.2、図2.3.3)。2001年以降の平均値は812mmで、関東地域の他の流域の損失量と調和的であった。

2005年から2008年までの無機態窒素の年流入負荷量は $672\sim 898\text{ mg m}^{-2}$ ($=10^{-2}\text{ kg ha}^{-1}$)であり、2001年以降大きな変動は認められなかった。無機態窒素の年流出負荷量は年降水量の多かった2006年に 655 mg m^{-2} と高い値を示したが、2008年は 235 mg m^{-2} と2001年以降最低の値を示した。無機態窒素の収支は2001年以降毎年、流出負荷量が流入負荷量より少なく、流域として無機態窒素を吸収していると見なすことが可能である。無機態窒素の年流入負荷量と年流出負荷量の差を流域としての無機態窒素吸収量と定義すると、無機態窒素吸収量は、2005年以降は流出負荷量の多かった2006年で 244 mg m^{-2} と低い値を示したが、それ以外の3年間は $429\sim 479\text{ mg m}^{-2}$ と安定して高い値を示した。一方、Sは2001年以降流入負荷量が $636\sim 989\text{ mg m}^{-2}$ 、流出負荷量が $823\sim 1372\text{ mg m}^{-2}$ の範囲で変動した。各年毎に見ると、2005年はほぼ収支が取れていたが、降水量、流出水量の多かった2006年には流出負荷量が流入負荷量よりも 517 mg m^{-2} 上回った。それ以外の年は、流出負荷量が概ね 200 mg m^{-2} 程度上回っていた(図2.3.4)。土壌への吸脱着をほとんど無視できるために収支が取れているとされたClは、2001年以降2002年に流入負荷量が流出負荷量を上回ったが、それ以外の7年間は流入負荷量の1.5倍から2.5倍の量が流出していた。

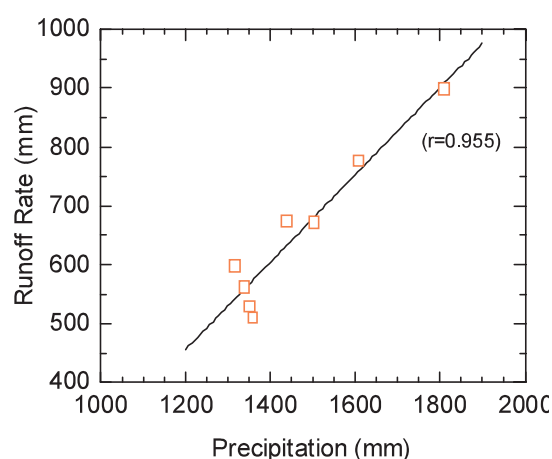


図 2.3.2 桂不動谷津流域における年降水量と年流出水量との関係

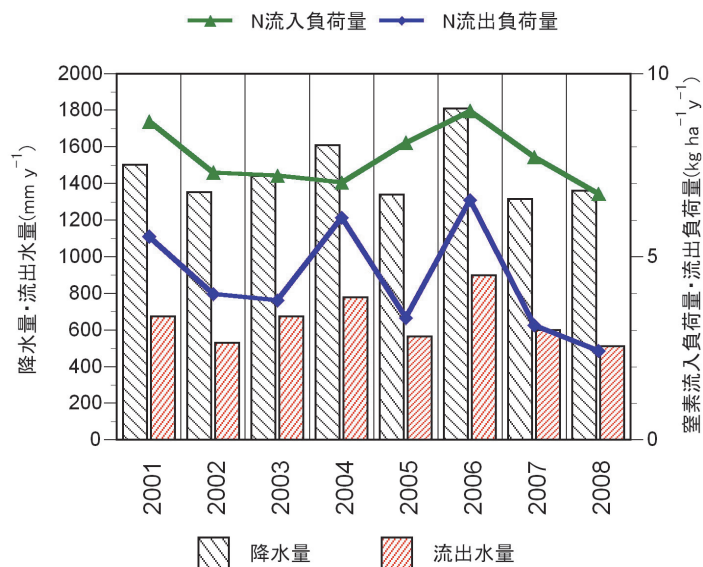


図 2.3.3 桂不動谷津流域における年降水量、年流出水量、年窒素流入負荷量、年窒素流出負荷量の変化

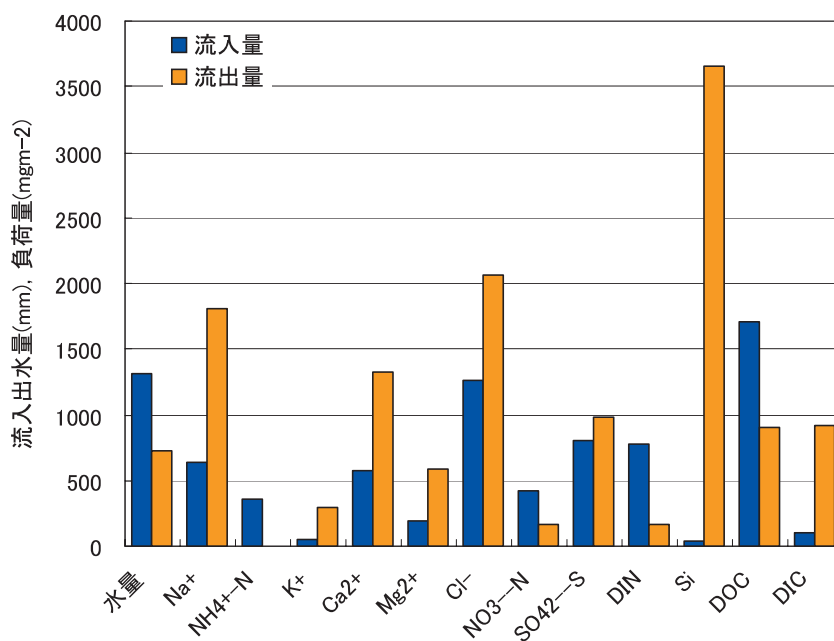


図 2.3.4 桂不動谷津流域における 2007 年の水・物質収支

(2) 桂不動谷津流域における林外雨と林内雨による主要溶存成分の負荷量の違い

樹冠通過過程における降水の水質変化を検討するため、2006 年より桂試験地の斜面上部の広葉樹林に 1 地点、斜面下部のスギ林に 2 地点のプロットを設け、林内雨を採取し溶存成分濃度を測定した。林内雨の採取はスギ林 1 プロットについては 2 連であるが、それ以外の 2 プロットでは 3 連で実施した。ただし、2008 年はスギ林のプロットのうち、2 連で採取していたプロットは中

止した。採取量ならびに負荷量はそれぞれのプロットについて平均として算出した。林内雨量は林外雨量に比べて、斜面上部の広葉樹林で 60～70%程度、斜面下部のスギ林で 70～80%程度であった。Na、K、Ca、Mg、Cl、DOC は林外雨よりも林内雨による負荷量の方が大きい値を示した。特に、K の増加が著しく、その傾向はスギ林と比べて広葉樹林で一層顕著であった。一方、 $\text{SO}_4\text{-S}$ はほぼ林外雨と同等の負荷量が観測された。無機態窒素については林外雨と林内雨とでは、ほぼ同等の負荷量であったが、林外雨による $\text{NH}_4\text{-N}$ の負荷量に比べて、林内雨では負荷量が減少していた。なお、Cl の負荷量は、3 年間とも林外雨に対して林内雨の負荷量が 1.5～2 倍程度に増加していた。このことは海塩などの乾性沈着による Cl の負荷量が相当な量に達することを示している（図 2.3.5）。

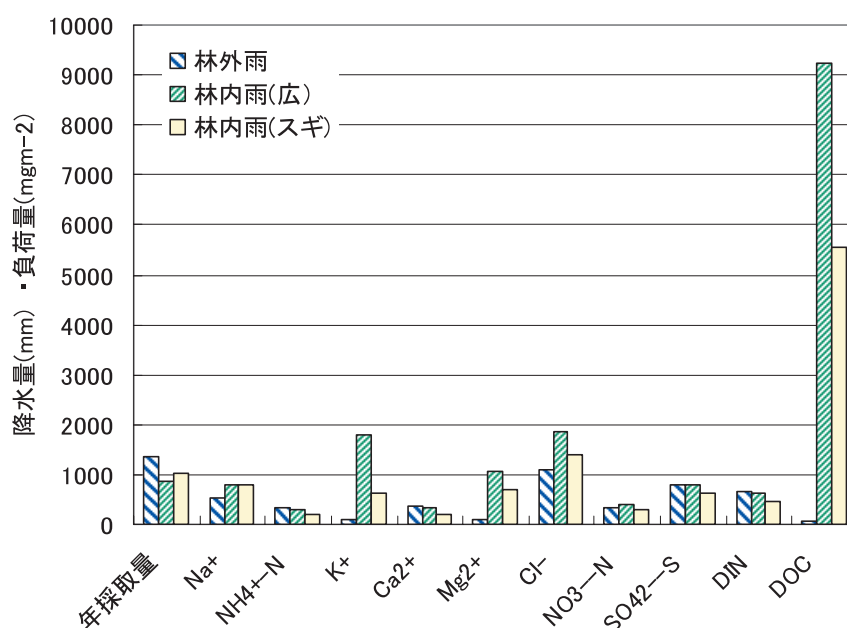


図 2.3.5 桂不動谷津流域における 2008 年の林外雨と林内雨による負荷量の違い

（３）土壌の浸透過程における溶存成分フラックスの変化

斜面上部の広葉樹林 1 地点、斜面下部のスギ林 2 地点の林内雨を計測している地点の近傍において、土壌中に圧力自動制御型ポラスプレートテンションライシメータ（図 2.3.6）を設置し、土壌水を採取して水移動量を測定するとともに、溶存成分濃度を測定した。ポラスプレートテンションライシメータを設置した深度は 30cm と 90cm である。なお、斜面下部のスギ林のうち 1 地点では 30cm、90cm 深ともに年水移動量が年降水量、年林内雨量よりも大きな値を示した。この地点は斜面脚部に近いため、斜面上方より土層中を流下してきた側方浸透流も含めて採水したものと推定されたため、今回の解析には用いなかった。そこで、斜面上部 1 地点と下部 1 地点について水移動量に溶存成分濃度を乗じて溶存成分のフラックスを概算した。

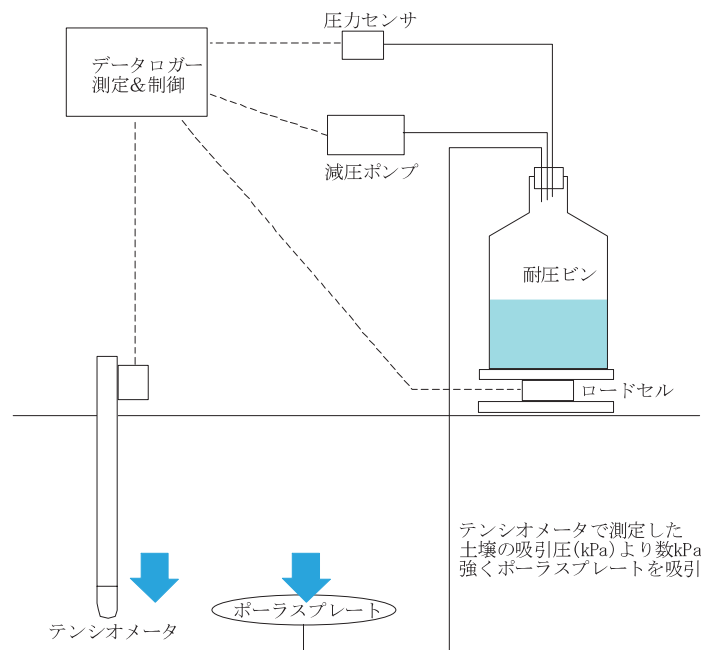


図 2.3.6 圧力自動制御型ポラスプレートテンションメータ

斜面上部における年水移動量は、2007 年には 30cm 深が 691mm、90cm 深が 774mm、2008 年には 30cm 深が 728mm、90cm 深が 706mm であった。Cl のフラックスは 2007 年には 30cm 深が 2247 mg m^{-2} 、90cm 深が 1866 mg m^{-2} であり、2008 年は 30cm 深が 4350 mg m^{-2} 、90cm 深が 1725 mg m^{-2} であった。林内雨による負荷量に比べて 30cm 深では 2007 年には同等、2008 年には 2 倍以上に増加したが、90cm 深では林内雨による負荷量と同等ないしはそれ以下の値を示した。K は 30cm 深においてほとんどフラックスが認められなくなり、樹冠において樹体から溶脱され林内雨に付加された K は、土壌表層において素早く吸収されていることを明らかにした。DOC も同様に林内雨によりフラックスが増加するものの、土壌中では深くなるにつれてフラックスが減少することから、吸着されていることが推定される。NO₃-N ならびに NH₄-N のフラックスはほとんど認められず、30cm 深に達するまでにほとんどの無機態窒素が植物に吸収ないしは土壌に吸着されていると推定した（図 2.3.7）。

一方、斜面下部における年水移動量は、2007 年には 30cm 深が 762mm、90cm 深が 561mm、2008 年には 30cm 深が 572mm、90cm 深が 523mm であった。Cl のフラックスは 2007 年には 30cm 深が 2328 mg m^{-2} 、90cm 深が 1362 mg m^{-2} であり、2008 年には 30cm 深が 1910 mg m^{-2} 、90cm 深が 1896 mg m^{-2} であり、2008 年は林内雨による負荷量よりやや大きい値を示した。K、DOC の土壌におけるフラックスの減少は斜面上部と同じである。30cm 深における NO₃-N のフラックスは 1375 mg m^{-2} であり、また、Ca のフラックスは 3505 mg m^{-2} であり、2007 年の NO₃-N のフラックスである 3141 mg m^{-2} 、Ca のフラックスである 5987 mg m^{-2} に比べて減少したが、それでも斜面上部と比較すると高く、養分の流亡が起きていた。

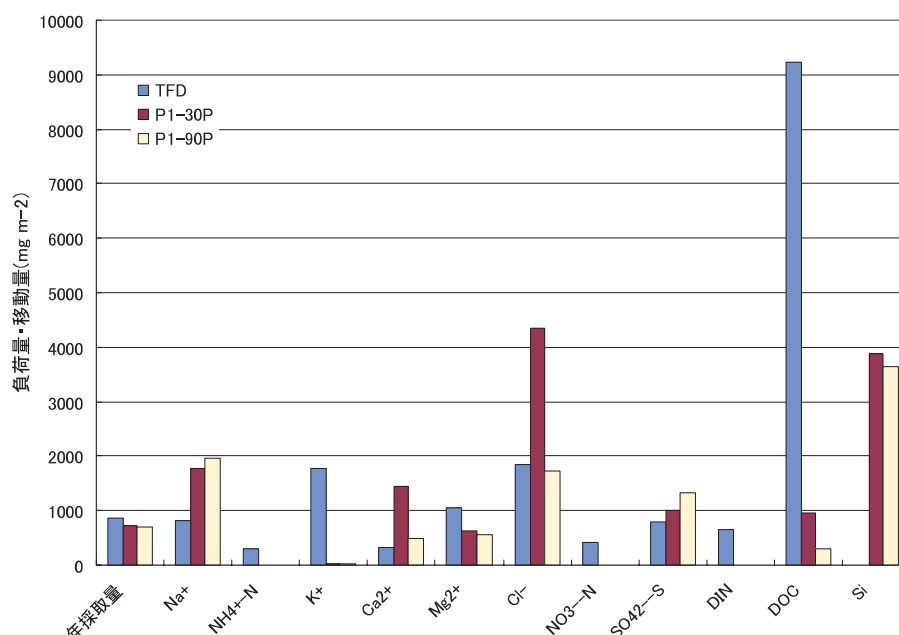


図 2.3.7 斜面上部における 2008 年の林内雨による負荷量と、30cm 深、90cm 深における土壤中の物質フラックス

(4) 茨城県中部における溪流水質の地域的変異

桂試験地周辺地域の中・古生層の分布域において 2005 年は 46 地点 (内、桂不動谷津流域(KS2)を含む) を選定し、梅雨時の降雨の合間の 6 月 28 日、29 日に溪流水の採取を実施した。また、2006 年は 48 地点を選定し、梅雨期の 7 月 4 日から 7 日にかけてと、夏期の比較的乾燥した時期である 8 月 22 日、23 日に溪流水の採取を実施した (図 2.3.8)。各調査地点の流域面積の最小は 6.86 ha であり、最大は 491.92 ha、平均は 47.55 ha であった。いずれの流域も桂試験地の流域面積(2.3 ha)よりは大きい。

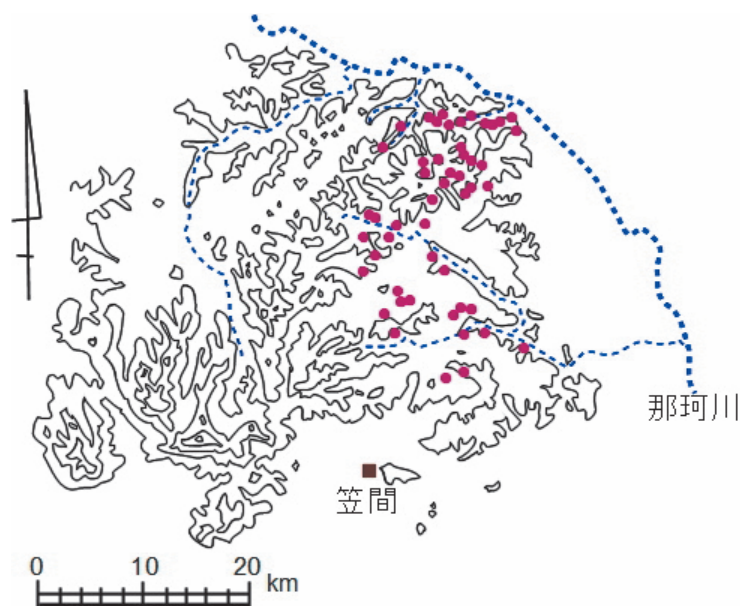


図 2.3.8 溪流水質の多点調査地点位置図

2005年の各渓流水のpHは6.4～7.6、ECは3.36～15.01 mS m⁻¹と幅広い値を示した(図2.3.9)。桂試験地のpHとECは他地点のpHとECに比べて、低い値を示した。Cl濃度の地域的な変動は少なかったが、NO₃濃度は0.6～3.5 mg L⁻¹、SO₄濃度は2.1～23.7 mg L⁻¹、Si濃度は5.1～11.5 mg L⁻¹と幅広い変動を示した。KS2における多点調査時の分析値、ならびにKS2における溶存成分濃度の年平均値は、調査地域の変動の中では概ね中央値に近い値を示した。

2006年7月の桂試験地における調査期間中の降水量は、7月4日：1mm、5日：43mm、6日：1mm、7日：5.5mmであり、8月は22日夕刻から3mm程度の降水があった。桂不動谷津流域における7月の調査期間中の流量は毎秒30L以上であり、増水時には毎秒100Lを越えることもあったが、8月の調査期間中の流量は毎秒10L以下と少なく安定していた。このように条件が異なる時期の採水結果であったが、Cl濃度はそれぞれの地点では若干異なる値を示すものの、地域的な変動は少なかった。また、それぞれの地点毎の2005年の6月、ならびに2006年の7月、8月の3回の濃度変動は少ない。これに対してNO₃濃度は、2006年7月の値が高い傾向を示す地点がほとんどであった。また、Si濃度は逆に2006年7月の値が低い値を示す地点が多く認められた。桂不動谷津流域の各溶存成分濃度の値は、調査地域の変動の中では概ね中央値に近い値を示した。

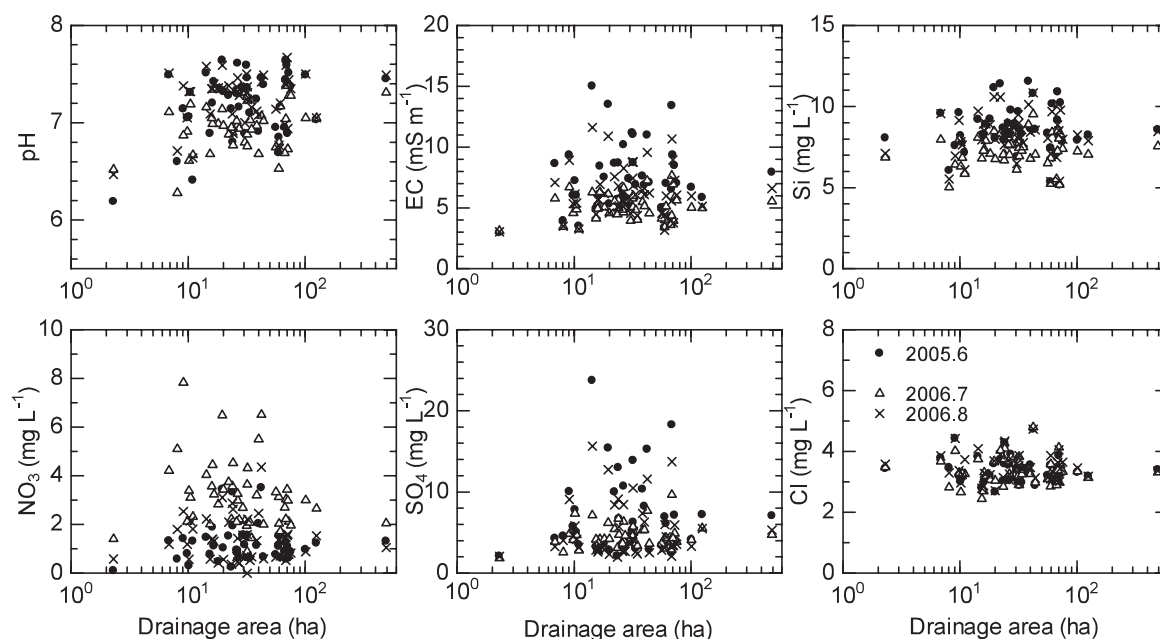


図 2.3.9 桂試験地周辺地域における流域面積と溶存成分濃度の関係

エ 考察

桂不動谷津流域における損失量の2005～2008年までの4年間における変動幅は530～900 mmであり(図2.3.3)、関東中部地域の他の流域で計測された損失量とほぼ同等の値を示した。このことから、流域としての水収支は取れていると判断できる。一方、2005年以降の無機態窒素の収支は、流入負荷量が流出負荷量より244～479 mg m⁻²多く、流域において無機態窒素が保持されていることを示している。一方、Na、Ca、Mg、Siなどの流出負荷量は流入負荷量より多い。これらの成分は風化によって生成され、渓流水の溶存成分として流出していることが明らかになった。

S の収支は流出負荷量が流入負荷量をやや上回っていた。桂不動谷津流域は中・古生層からなり、岩相は頁岩を主体としている。また、西方約 10km にはタングステン、銅、マンガン、錫を採取した高取鉱山も存在し、基盤岩石中には硫黄が含有されていることが知られている。したがって、桂不動谷津流域で S の流出が流入を上回することは、基盤岩石からの溶出によるものと考えられる。一方、Cl は、2001 年以降 2002 年に流入負荷量が流出負荷量を上回ったが、それ以外の 7 年間は流入負荷量の 1.5 倍から 2.5 倍の量が流出していた。後述するように、林内雨による負荷量は林外雨による負荷量よりも多く、流出負荷量とほぼ同等であること、桂不動谷津流域が太平洋から約 40km 内陸に位置し、大気の擾乱が激しいときには海塩起源の粒子の飛来があってもおかしくないと考えられる。林内雨において Cl の負荷量が林外雨のそれよりも多いのは、海塩起源の Cl が乾性沈着として流域に負荷されているためであろう。

林外雨による流入負荷量と林内雨による流入負荷量の成分による違いは、林冠において水質の変化が起こっていることを示している。林外雨に比べて林内雨の方が K、Mg、DOC の負荷量が多いことは、これらの成分が林冠において植物体、特に葉から溶脱していることを示している。そして、K、Mg、DOC の負荷量が広葉樹林とスギ林とで異なるのは、溶脱の様式が樹種によって異なっていることを示している。先に触れたように、Cl は海塩が風送されて乾性沈着として林冠に付着したと考えられる。したがって、Na は林冠における溶脱とともに乾性沈着によっても負荷量が増加するものと考えられる。無機態窒素については、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は林冠を通過すると負荷量がやや減少するのに対して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はスギ林では大きな変化はなく、広葉樹林ではやや増加する傾向が認められた。無機態窒素の林内雨による負荷量は林外雨による負荷量よりも減少している。このことは、林冠において、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が吸収されていることを示している。先に示したように、養分元素である K や Mg などが葉から溶脱されて林内雨に付加されているのに対して、無機態窒素に関しては顕著な付加は認められない。

土壌の浸透過程における水移動量は、流出水量と比較すると斜面上部ではやや高い値を、斜面下部ではほぼ同等の値であった。斜面下部の地点において、90cm 深を通過した水の大半は地下水面に到達し、やがては渓流水として流出すると考えられるので、この地点における水移動量は概ね妥当であると判断できる。一方、斜面上部において水移動量が流出水量より大きいのは、本調査地点では 90cm 深でも根の存在が認められ、90cm より深い層準からも蒸散によって損失している可能性があることから、流出水量より大きな値となったと考えられる。溶存成分のフラックスの変化については、それぞれの成分によって斜面上部、下部、ならびにそれぞれの地点において深さ毎に違いが認められた。K と $\text{NH}_4\text{-N}$ は、両地点、深さに関わらず、林内雨による負荷は、30cm 深になるとほとんど土壌水では検出できない。このことは、土壌表層における硝化、植物への吸収、または土壌への吸着によって、下層への流亡を防いでいることを示している。DOC も 30cm 深におけるフラックスは林内雨による負荷量の 10%程度に減少しており、土壌表層において消費されていることが明らかになった。一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は斜面上部では 30cm 深ではほとんど検出できず、土壌表層において植物に吸収されていると考えられるが、斜面下部では 30cm 深において林内雨による負荷量の数倍のフラックスが認められた。これは、湿潤な立地でスギ林である斜面下部では、植物は硝化によって生成された $\text{NO}_3\text{-N}$ を吸収しているにもかかわらず、すべてを吸収できずに流失していることを示している。Si の土壌中におけるフラックスは渓流水による流出負荷量とほぼ同等であった。このことから、渓流水に流出する Si のほとんどが土壌中で生

成されており、90cm より深い層準における生成がわずかであることを示している。

2001 年から 2008 年までの 8 年間のほとんどの溶存成分の年流出負荷量は年流出水量ならびに年降水量と正の相関を示した。このことは、森林流域からの溶存成分の流出が、流域における水移動量と深い関係を有していることを示唆する。日本のような降水量が可能蒸発散量を上回る地域においては、土壌中での水移動は、ほとんどの時期に鉛直下方への移動量が卓越する。一方で、土壌中に存在する水は、鉱物粒子と反応し、さまざまな成分を溶解する。このような水と鉱物の反応は可逆的であるが、成分を溶解させた水が除去されて新たな水が供給されると、また鉱物からの溶出が進行する。このため、土壌中における水移動量が鉱物からの溶存成分の溶出量を規定しているものと考えられる。一方、生物地球化学的な挙動をおこなう窒素の流出負荷量も水の移動量に影響されていることは、土壌水中に一時的に保持されている $\text{NO}_3\text{-N}$ が降水にともなう水移動によって、流亡していることを示している。いずれにせよ、桂不動谷津流域における溶存成分の渓流水への流出は水文的な影響を強く受けていると考えられる。

オ 今後の課題

年間値としての溶存成分のフラックスをもとに水質形成機構を明らかにしたが、より時間分解能を高めて、溶存成分のフラックスの季節毎の変化について解析する必要がある。また、大きな降雨イベントにおける地下水、土壌水の溶存成分濃度の変化を解析し、より詳細な渓流水の水質形成機構を解明することが必要である。

カ 要約

桂不動谷津流域において水・物質動態を明らかにするための流量計測と水質モニタリングを実施した。2005 年から 2008 年にかけての 4 年間の年降水量の平均は 1456 mm、年流出水量の平均は 643 mm であった。無機態窒素の年流入負荷量の平均は 789 mg m^{-2} 、年流出負荷量の平均は 386 mg m^{-2} であり、年平均で 463 mg m^{-2} が流域に保持されていた。硫黄の年流入負荷量の平均は 803 mg m^{-2} 、年流出負荷量の平均は 1015 mg m^{-2} であり、流出が流入を上回った。他の溶存成分も流出が上回るものが多く、風化によって生成され、渓流水の溶存成分として流出していることを明らかにした。溶存成分の流出負荷量は、降水量、年流出水量と強い相関を示すことから、森林流域からの物質の流出については、森林を通過する水の量が最も重要である。

(吉永秀一郎)

4. 木曽における水質モニタリングとフラックスの広域評価

ア 研究目的

近年、源流部における森林や渓流水を保全する取り組みが注目を集めている。中京圏の水瓶である木曽川上流域においても、平成 20 年には木曽川支流の一つである水木沢が環境省の「平成の名水百選」に選定され、木曽郡木祖村で第 9 回全国源流シンポジウムが開催された。本研究では、木曽川上流部に位置する 4 つの森林流域において、下流域である中京圏への環境負荷物質の流出実態を評価するため、林外雨と渓流水を採水して、それぞれに含まれる主要な溶存成分の濃度を測定する。さらに、林外雨の採取量と溶存成分濃度から流入量を求めるとともに、多目的ダムの流量データを利用して流域ごとに溶存成分の流出量を求め、両者のバランスを比較する。さらに、調査地域における定期採水地点の渓流水質の特徴を明確にするため、複数地点で採水を行い、水質の比較を行う。

イ 研究方法

木曽川上流地域の王滝川に設置された多目的ダムである牧尾ダム流域に白川 (N35° 47'60" E137° 27'07")、東俣沢 (N35° 46'28" E137° 33'59")、瀬戸川 (N35° 47'38" E137° 33'35") の 3 ヶ所、味噌川に設置された味噌川ダム流域にセンミ沢 (N36° 01'17" E137° 46'39") 1 ヶ所、計 4 ヶ所の定期調査地点を設定し (図 2.4.1)、2005 年 10 月から月 2 回程度の頻度で渓流水を採水した。降水成分の調査は 2000 年 11 月から採水が行われてきた八海山荘 (長野県木曽郡王滝村 N35° 51'10" E137° 42'17"、標高 1670m) での観測を継続し、2006 年 5 月からは滝越 (同 N35° 48'31" E137° 27'00"、標高 1060m) でも新たに観測を開始した (図 2.4.1)。八海山荘における降水の採取は外部委託とし、雪・雨水採取装置 (サンテクノ、ST-1F 型) を用いて週 1 回の頻度で行った。滝越での採取頻度は月 2 回程度とし、1 月～3 月にかけての降雪期は直径 46cm のポリペール、4～12 月にかけては直径 21cm のポリロートを用いて採取した。各調査地点の概要を表 2.4.1 に示した。各試料はポリエチレン瓶に入れて持ち帰り、実験室で pH をガラス電極法、EC を白金電極法程度で測定した。溶存無機イオン濃度はイオンクロマト法、Fe、Si、Al 濃度は ICP 発光分析法、HCO₃ 濃度は中和滴定法、溶存有機炭素濃度は乾式燃焼法を用いて測定した。渓流水採水地点の流量は、国土交通省がインターネット上に公開している水文水質データベースを利用し、独立行政法人水資源機構が管理する牧尾ダムと味噌川ダムの流入量を用いて算出する。採水日の平均流量と 2005 年 10 月から 2008 年 12 月までに実測された溶存成分濃度との関係に基づいて成分ごとの負荷量－流量式 (L・Q 式) を作成する。この L・Q 式と日流量から流域ごとの化学成分の流出量を算出する。

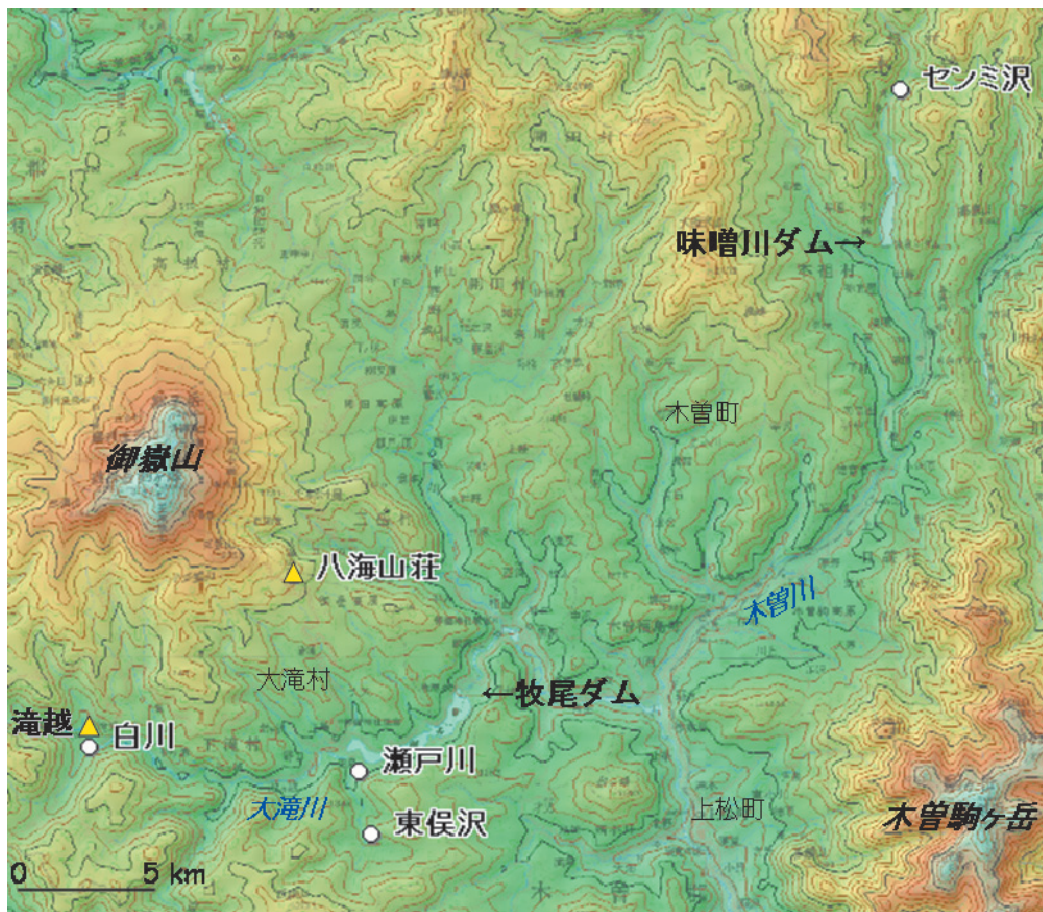


図 2.4.1 定期調査地点の位置（△降水採水地点，○溪流水採水地点）

表 2.4.1 採水地点の概略（降水：八海山荘，滝越；溪流水：白川，東俣沢，瀬戸川，センミ沢）

地点名	流域面積 (ha)	緯度	経度	標高 (m)	地質
八海山荘		北緯35° 51' 10"	東経137° 42' 17"	1670	
滝越		北緯35° 48' 31"	東経137° 27' 00"	1060	
[牧尾ダム]	30400				
白川	1594	北緯35° 47' 60"	東経137° 27' 07"	1062	濃飛流紋岩
東俣沢	537	北緯35° 46' 28"	東経137° 33' 59"	1040	美濃帯堆積岩類，上松花崗岩
瀬戸川	1976	北緯35° 47' 38"	東経137° 33' 35"	905	美濃帯堆積岩類，濃飛流紋岩，上松花崗岩
[味噌川ダム]	5510				
センミ沢	3690	北緯36° 01' 17"	東経137° 46' 39"	1155	美濃帯堆積岩類

ウ 結果

（1）林外雨

八海山荘での 2005～2008 年の年降水量は 2006 年の 3371mm が最も多く、その他の年は 2500mm 前後であった。2006 年は長野県内各地に被害をもたらした平成 18 年 7 月豪雨災害が発生し、木曽川上流域内においても多くの土砂災害が発生した。この期間（7 月 12～29 日）の八海山荘の降水量は 892mm を記録し、年降水量の 26%を占めていた。一方、滝越においては、通

年観測が行われた 2007、2008 年の降水量は 2600～2900mm 程度であり、兩年とも八海山荘よりもやや多かった。pH の加重平均値は八海山荘が 4.77～5.03、滝越が 4.65～4.83（図 2.4.2）、電気伝導度の加重平均値はそれぞれ 0.72～1.18 mS m⁻¹、0.84～1.29 mS m⁻¹ であった。

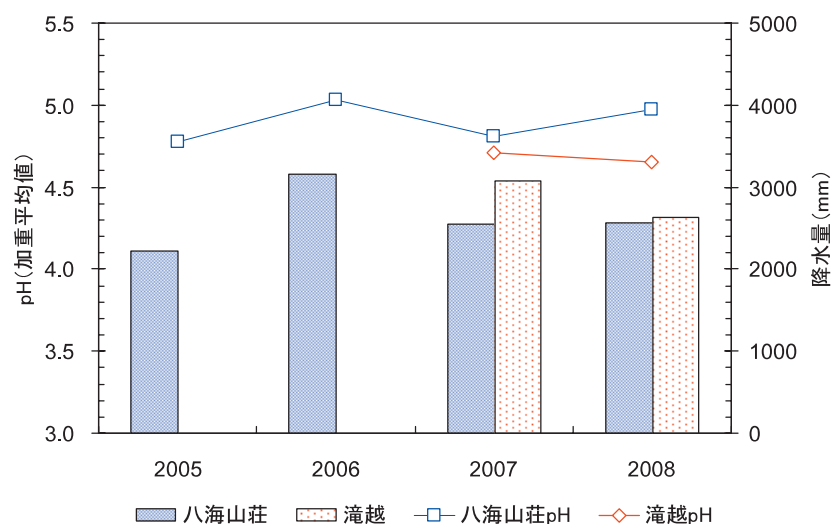


図 2.4.2 2005～2008 年の八海山荘と滝越の年降水量と pH（加重平均値）

（2）渓流水（定期採水地点）

牧尾ダム流域 3 地点では 1 年を通して月 2 回以上の採水を行った。味噌川ダム流域では林道が積雪で通行できない冬季は月 1 回程度で採水した。ただし、流域内の多くの場所で崩壊や土石流が生じた平成 18 年 7 月豪雨以降は、その復旧対策で林道が通行できない期間があったため、牧尾ダム流域の採水地点と比べると採水回数が少なくなった。電気伝導度および主な溶存成分濃度は、冬季および夏季の無降雨期の流量が少ないときに高く、融雪期と夏季の降雨時とくに梅雨末期に代表される豪雨時に流量が増大した場合に低下する傾向が認められた（図 2.4.3）。これに対して、NO₃ は流量の増加時に濃度が高くなる傾向が認められた。融雪期には、各流域ともに pH は年平均値より約 0.1～0.3 低下し、NO₃ 濃度は渇水期の約 1.5～2 倍増加し、その他の溶存成分濃度は低下した。各地点の渓流水の特徴を表 2.4.2 に示した。流域内の地質が濃飛流紋岩からなる白川は、NO₃ 濃度の平均値は 0.74 mg L⁻¹ と他の地点よりも高く、pH、EC、NO₃ 以外の溶存成分、とくに Ca、Mg、HCO₃ の濃度は低かった。流域内の地質が美濃帯堆積岩類からなるセンミ沢では、NO₃ を除く溶存成分濃度、pH、EC が、他の 3 地点よりも高かった。流域内の地質が濃飛流紋岩、美濃帯堆積岩など複数の地質からなる東俣沢と瀬戸川の水質は、白川とセンミ沢との中間程度の溶存成分濃度を示した。

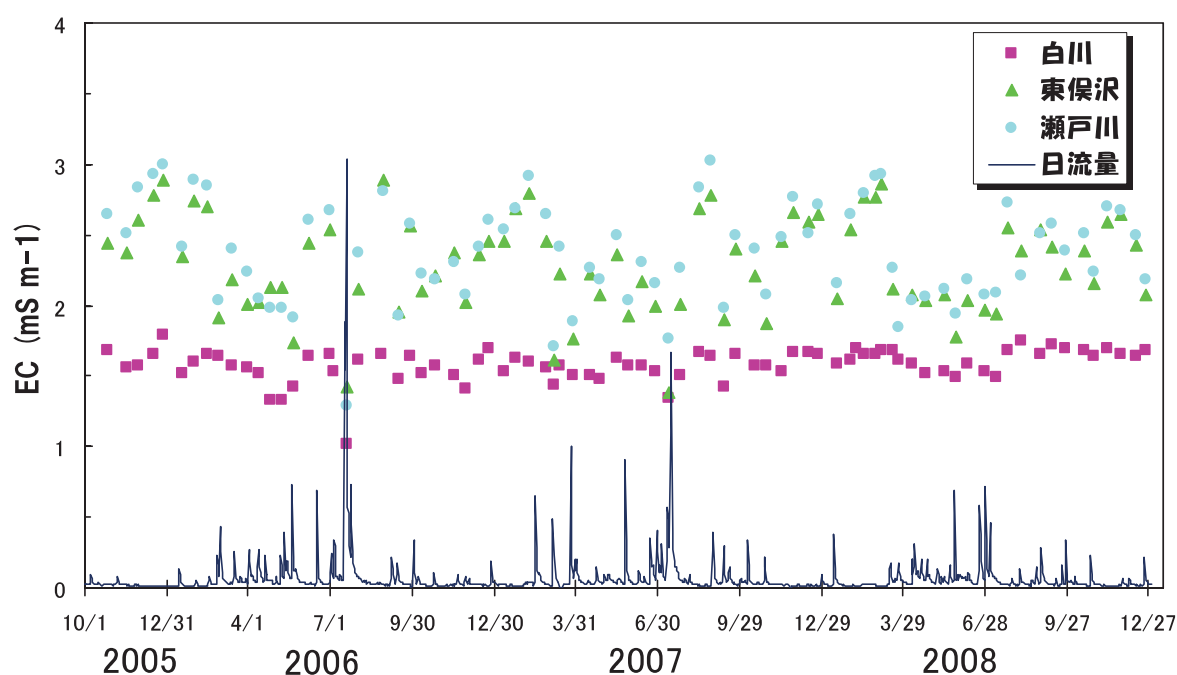


図 2.4.3 2005 年 10 月～2008 年の牧尾ダム流域の電気伝導度（EC）の変動
（日流量は国土交通省水文水質データベース牧尾ダムの流入量から算出した）

表 2.4.2 定期採水地点の渓流水の化学的特徴（平均値）

地点名	サンプル数	pH	EC mS m ⁻¹	Na mgL ⁻¹	K mgL ⁻¹	Ca mgL ⁻¹	Mg mgL ⁻¹	Cl mgL ⁻¹	NO3 mgL ⁻¹	SO4 mgL ⁻¹	HCO3 mgL ⁻¹	Si mgL ⁻¹	DOC mgL ⁻¹
白川	80	6.97	1.58	1.31	0.24	1.47	0.13	0.38	0.74	1.00	6.28	3.41	0.54
東俣沢	78	7.22	2.27	1.31	0.29	2.21	0.40	0.48	0.40	1.47	9.79	3.85	0.55
瀬戸川	79	7.22	2.37	1.16	0.20	2.56	0.39	0.41	0.53	1.50	10.30	3.61	0.57
センミ沢	62	7.65	5.39	1.82	0.39	6.23	1.25	0.38	0.50	3.91	25.20	3.89	0.41

調査期間内の牧尾ダム流域と味噌川ダム流域からの流出水量は、年降水量に対応して変動しており、2006 年が最も多く、2005 年が最も少なかった。数日間の流量観測値の欠測している年もあるが、年流出水量は牧尾ダム流域では 850～1500mm、味噌川ダムでは 1100～1900mm 程度であった。味噌川ダム流域が牧尾ダム流域よりも流出水量が多いため、ほとんどの成分の年流出量は味噌川ダム流域のセンミ沢が牧尾ダム流域よりも多かった。とくに、Na、Ca、Mg、SO₄、HCO₃ の流出量は著しく多かった。一方、牧尾ダム流域の DOC の年流出量はセンミ沢よりも多く、白川とセンミ沢の NO₃ の年流出量はほとんど変わらなかった。

（3）渓流水（多点調査）

定期採水地点の周辺の 51 地点で採水を行った。地質別の内訳は美濃帯堆積岩類が 10 地点、濃飛流紋岩が 31 地点、花崗岩類が 2 地点、第三紀火山岩類が 1 地点、御岳火山岩類が 3 地点、複数の地質からなる流域 4 地点である。表 2.4.3 に地質別の平均水質を示した。

表 2.4.3 渓流水の多点調査の地質別の水質平均値

地質	サンプル数	pH	EC mS m ⁻¹	Na mgL ⁻¹	K mgL ⁻¹	Mg mgL ⁻¹	Ca mgL ⁻¹	Cl mgL ⁻¹	NO ₃ mgL ⁻¹	SO ₄ mgL ⁻¹	HCO ₃ mgL ⁻¹	Si mgL ⁻¹
美濃帯堆積岩	10	7.26	3.10	1.47	0.25	0.92	4.45	0.35	0.48	2.81	17.5	4.00
濃飛流紋岩	31	6.75	1.26	0.99	0.27	0.11	0.92	0.34	0.88	0.95	4.1	2.99
花崗岩	2	7.24	2.16	1.53	0.14	0.27	2.03	0.40	0.76	1.10	8.9	4.59
第三紀火山岩	1	7.17	1.94	1.06	0.20	0.47	1.85	0.41	0.22	0.54	10.0	6.28
御岳火山岩	3	7.28	3.13	4.68	1.23	1.68	4.54	1.61	0.08	12.66	17.1	11.37
混在	4	7.18	2.35	1.11	0.26	0.36	2.36	0.36	0.61	1.39	11.1	3.64

美濃帯堆積岩類流域の渓流水は、pH、EC、Ca、Mg、HCO₃濃度が高かった。泥岩分布域に位置する湧水はその傾向が顕著であり、さらにSO₄濃度が高い特徴を示した。濃飛流紋岩流域の渓流水は、pH、EC、NO₃を除く溶存成分濃度が低いことで特徴付けられる。源頭部付近の渓流水ではその傾向が顕著であり、NO₃濃度が高く、2.5 mg L⁻¹以上を示す地点もあった。花崗岩類流域の渓流水は、濃飛流紋岩流域とよく似るが、溶存成分濃度は濃飛流紋岩流域よりもやや高かった。御岳火山岩類流域では、溶存成分濃度が高く、Si濃度が高いことで特徴付けられる。とくに湧水ではその傾向が強く、加えてSO₄濃度も高かった。

エ 考察

(1) 林外雨

八海山荘と滝越において降水量の違いがあることは、御岳の周囲で地形によって降水パターンが異なることを示しており、周辺のアメダスなどの降水量データと比較すると御岳の東側ほど降水量が少なかった。八海山荘と滝越の降水による溶存成分の流入量は、nss・SO₄、NO₃は滝越が多く、それを中和するnss・Ca、K、Mgは八海山荘が多かった。滝越が八海山荘よりもpHの加重平均値が低い(H⁺の流入量が多い)ことは、酸性イオンの流入量が多いのに対して、それを中和する溶存成分の流入量が少ないことを反映している。

流入量の季節変化の特徴を代表的な成分について示す。Clのような海塩起源とする成分の流入量は、降水量の多い夏季と冬季に多く、年によっては春季も多かった。Hの流入量は梅雨末期の豪雨がしばしば発生する7月にピーク(3~9mg m⁻²)が認められ、次いで冬季も多かった。しかし、Clとは異なり、春季のHの流入量は比較的少なかった。一方、nss・Caは春季に著しく流入量が多く(多い年は一ヶ月間に120~130 mg m⁻²)、この時期に黄砂が多いことを反映している。春季にHの流入量が少ない要因として、春季の降水には黄砂起源の成分が多く含まれるため、Hが中和反応によって消費されたと考えられる。

(2) 渓流水(定期採水地点)

渓流水の定期採水はセンミ沢を除くと通年でほぼ月2回の頻度で行うことができた。採水時の流量についても、低水位時から牧尾ダム流域においてはここ数年では最も流量の多かった平成18年7月豪雨時まで幅広い範囲で採水できた。流量の変動に対してほとんどの溶存成分濃度は流量増加時に低下し、降雨や融雪水によって希釈されたことを示している。一方、NO₃とDOCは流量増加時に濃度が上昇する傾向が認められた。また、この2成分の流出量を算出するためのL・Q式の定数nは、流量増加時に濃度が上昇するタイプである洗い出し型(橘ほか, 1996)の基準値とされる1以上を示した。これらのことから、NO₃とDOCは主に土壌から渓流水に供給されて

いる。

木曽川上流域は 12 月～5 月にかけて積雪期間であり、融雪が活発化する 2 月下旬から 5 月中旬頃にかけては年間を通じて河川流量が最大になる時期となる。渓流水中の溶存成分もこの時期に流出が多くなり、例えば、 NO_3 は年間の 40～50% が融雪期に流出していた。また、融雪期には全ての定期採水地点において pH の低下が認められ、一時的な渓流水の酸性化を示していた。融雪期には NO_3 の濃度が上昇しているため、渓流水の pH の低下に対する関与が示唆される。以上のように、木曽川上流域のような積雪地域では、流域からの物質の流出および流域の酸性化を考えるためには、融雪期の動態を把握することが必要である。

(3) 渓流水（多点調査）

調査地域における渓流水の多点採水調査の結果は、定期採水地点の渓流水の水質が流域内に分布する地質の影響を強く受けていることを示した。濃飛流紋岩流域の渓流水の溶存成分は NO_3 を除いて濃度が低く（溝口ほか，2006）、とくに最上流部でその傾向が強かった。王滝川の支流である白川の下流部に設定した定期採水地点の水質は、濃飛流紋岩流域における多点調査の水質の中ではほぼ中間的な性質を有していた。濃飛流紋岩とその周囲に分布する花崗岩類の化学組成はよく似ているが、渓流水に含まれる化学風化によって供給される溶存成分の濃度は、濃飛流紋岩流域が花崗岩流域よりも低かった。一般に、花崗岩分布域は酸緩衝能が低いことから酸性降下物の影響を受けやすいとされる（鹿角ほか，1998）。今回測定された濃飛流紋岩流域と花崗岩流域の渓流水質を考慮すると、濃飛流紋岩分布域でも花崗岩分布域と同様に酸緩衝能が低いと考えられるため、今後注意が必要である。美濃帯堆積岩流域では、Ca、Mg、 HCO_3 など化学的風化によって供給される成分と SO_4 濃度が高かった。美濃帯堆積岩は黄鉄鉱を含む泥岩を伴っており、この黄鉄鉱の酸化で生成した硫酸が生成し、基岩中の鉱物が溶解されるため、センミ沢のような美濃帯堆積岩分布域の渓流水は上記に挙げたような水質が形成されたと考えられる。御岳火山岩流域の特徴は、溶存成分濃度が比較的高く、中でも SO_4 と Si 濃度が高いことである。この特徴は第四紀火山の周辺に分布する湧水や渓流水に共通しており、火山体を流下した地下水の影響を受けていると考えられる。

(4) 流域での物質収支

八海山荘と滝越で得られた降水による流入量と渓流水の定期採水地点で得られた流出量から求められた物質収支は、Ca、Si、 HCO_3 など主に基岩の化学的風化を起源とする成分は流入量よりも流出量をはるかに多かった。一方、無機態窒素と硫黄に関しては、八海山荘と滝越における 2008 年の降水による流入量は、それぞれ $563 \text{ mg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と $632 \text{ mg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、 854 mg m^{-2} と $905 \text{ mg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であるのに対して、溪流からの流出量は無機態窒素がいずれの地点も $200 \text{ mg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 以下、硫黄が牧尾ダム流域では $450 \text{ mg m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 以下であり、流域内に蓄積していた。一方、センミ沢における硫黄は、基岩中に含まれる黄鉄鉱の酸化によって生成された SO_4 が流出するため、流出量が流入量を上回っていた。降水起源とされる Cl は降水と各渓流水の濃度は $0.3 \sim 0.5 \text{ mg L}^{-1}$ とほぼ同じであり、流入量が流出量をやや上回っているが、オーダーとしてはバランスが取れていた。また、流域間での流出量の差も、Cl は他の成分と比べるとばらつきが小さかった。このことは、Cl は蒸発散による濃縮や降雨による希釈によって濃度は変動するものの、降水から溪流までの流出過程で生物的・物理的な影響がほとんど無いことを反映していると考えられる。

流域の酸性化の要因とされる硫黄と窒素の調査流域内における収支を明らかにするため、

SO₄-S と溶存無機態窒素 (DIN, Dissolved Inorganic Nitrogen: NO₃-N+NH₄-N) の 2005～2008 年の降水による流入量と調査流域からの流出量とを比較した (図 2.4.4)。八海山荘では、期間内で降水量が最も多かった 2006 年よりも 2007 年の方が SO₄-S と DIN の流入量が多いため、これらの成分の流入量は年降水量ではなく、SO₄-S と DIN が高濃度を示した期間の降水量に依存していた。SO₄-S と DIN は冬季から春先にかけてと秋季に高濃度になる傾向があるが、この時期の降水量が 2006 年は少なかったのに対して、2007 年は降水量が多かったことで流入量が多くなったと考えられる。春先の降水による成分の動態には、前述したように黄砂の影響が強いと考えられるため、SO₄-S と DIN の流入量に対しても黄砂が何らかの影響を及ぼしている可能性がある。2006 年は調査期間中で最も年降水量が多かったが、その多くが梅雨末期の集中豪雨でもたらされたこと、この時の SO₄-S と DIN は低濃度だったことから、流入量の増加にはそれほど寄与していなかったと考えられる。

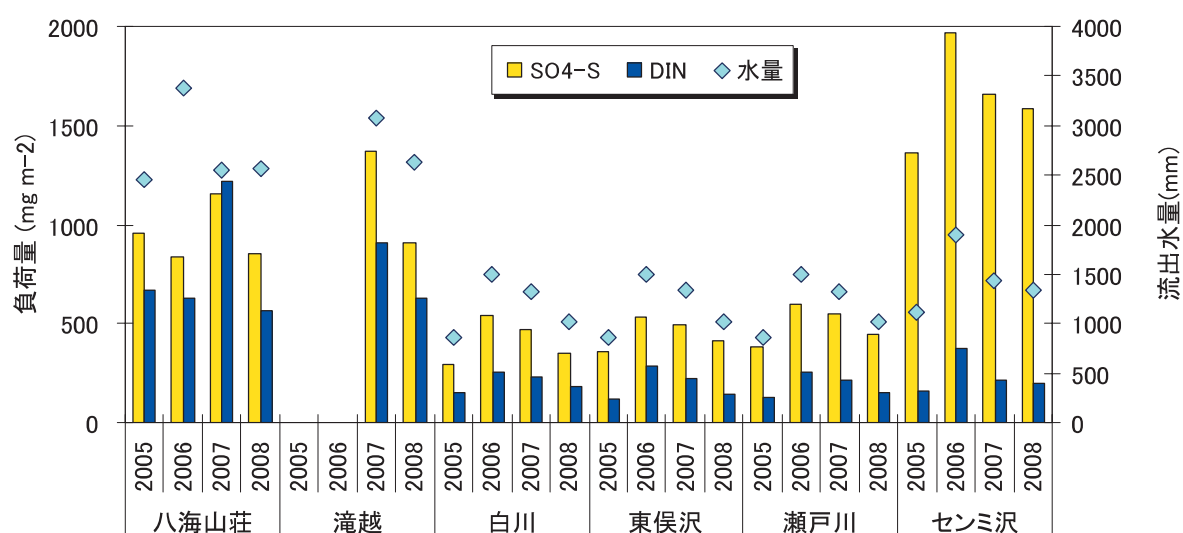


図 2.4.4 2005～2008 年の SO₄-S と DIN の降水による流入量と各流域からの流出量

一方、各調査流域における SO₄-S 流出量は河川流出水量の増減に対応しており、2006 年が最も多く、2007 年、2008 年、2005 年の順で少なかった。センミ沢を除く 3 地点では、SO₄-S は流入量に対して 2005 年が 30～40%、2006 年が 60～70%、2007 年が 30～50%、2008 年が 40～50% 程度の流出量を示し、Tanikawa *et al.*(2009)が述べているように、降水によってもたらされた硫黄の多くは土壤中に蓄積されている。センミ沢は基岩である美濃帯堆積岩から放出される SO₄-S が多いため、流出量が 1.2～2.3 倍程度流入量を上回った。八海山荘と滝越の DIN の流入量は 560～1200 mg m⁻²y⁻¹ であり、2007 年が期間内で最も多かった。DIN の流出量は河川流出水量の増減に対応し、2006 年が最も多かった。DIN の年流出率は、2006 年が 40～60%、その他の年は 20～35%程度を示し、流域間での差は小さく、2006 年以外の年の差も小さかった。NO₃ 濃度が 0.74±0.70 mg L⁻¹ と高かった白川を含め、全ての調査流域で DIN は流域内に蓄積されていた。なお、2006 年は 2005～2008 年の間で黄砂の観測日数が最も多かった (気象庁, 2009) が、木曽上流域では黄砂の多かった春季に降水量が少なかったため、乾性沈着によってもたらされた成

分量を過小評価した可能性がある。一方、2006年の降水量は調査期間中最大であり（八海山荘で3371mm）、河川流出水量も牧尾ダム流域で1501mm、味噌川ダム流域で1891mmと増大したため、流域からの成分流出量は大きくなった。以上のことから、 $\text{SO}_4\text{-S}$ とDINの2006年の流出率が他の年と比較して著しく高くなったと考えられる。

オ 今後の課題

木曽川上流域における溪流水の流出水量は国土交通省が公開している水文水質データベースの多目的ダム流入量から換算した比流量から求めた。しかし、流域面積の大きなダムの流域内では降雨・融雪パターンは均一ではないため、調査流域と流域全体との間の流量の変動パターンは必ずしも同一ではないことも考えられる。これらの差異がもたらす流量の違いや今回求められた溶存成分の流出量が妥当かどうか、などの検証が必要である。化学成分の流入量を正確に把握するには、乾性沈着による物質輸送量を評価する必要がある。

カ 要約

木曽地域の2005～2008年の降水量は2500～3300mm程度であった。八海山荘のpHの加重平均値は2005年が平年よりもやや低かったが、その他の年は5.0前後を示しこれまでと変わらなかった。木曽川上流部の溪流水質には地質が強く影響していた。濃飛流紋岩流域では基岩の化学風化起源の溶存成分濃度が低く、 NO_3 濃度が高い。一方、美濃帯堆積岩類、御岳火山岩類流域では溶存成分濃度が高かった。溪流水に含まれる溶存成分濃度は流量の増減によって変化し、 NO_3 とDOCは流量に同調して変化するが、その他の溶存成分は降雨や融雪に伴う河川流量の増加による希釈によって濃度が低下した。化学的風化にともなって放出されるSiなどの溶存成分は、流出量が流入量を上回った。一方、基岩の含有量が少ない硫黄や窒素は流入量が流出量を上回り、流域内に蓄積されていた。

キ 参考文献

- 鹿角孝男・宮島勲・塩澤憲一（1998）長野県南部の花崗岩地帯における酸性雨の溪流水への短期的影響，環境科学会誌，11，131-138.
- 気象庁（2009）黄砂観測日数の経年変化，気象庁ホームページ（http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/kosahp/kosa_shindan.html）.
- 溝口岳男・西山嘉彦・酒井寿夫（2006）溪流水の水質変動モニタリング（4）木曽 中・高海拔地域，森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集，7『酸性雨等の森林・溪流への影響モニタリング』，240-246.
- Tanikawa, T., Takahashi, M., Imaya, A. and Ishizuka, K. (2009) Highly accumulated sulfur constituents and their mineralogical relationships in Andisols from central Japan, Geoderma, 151, 42-49.
- 橘治国・吉澤香・山田俊郎・阿部正明（1996）石狩川の非特定汚染，寒地技術論文・報告集，12，76-80.

（岡本 透）

5. 関西における水質モニタリングとフラックスの広域評価

ア 研究目的

京阪神地域では森林が都市近郊に位置し、都市域から排出される環境負荷物質は降雨を介して相当量森林にも流入していると予想される。高レベルの負荷が定常的に続くことで、森林生態系内の物質循環プロセスへの影響を介して森林から流出する溪流水の水質にも影響が及ぶ可能性がある。以上の観点から、都市近郊林における溪流水の水質形成機構の実態を明らかにするため、2000 年以降山城試験地において行ってきた林外雨および溪流水のモニタリング調査を継続し、当該流域の森林における溶存成分のフラックスを評価する。また、モニタリング流域の溪流水質の地域代表性を評価するため、当該流域周辺の京都府南東部の森林において、多雨期（梅雨期）およびその後の少雨期における溪流水の一斉多点調査を実施し、モニタリング流域の溪流水質と比較する。

イ 研究方法

溪流水、林外雨のモニタリングは近畿中国森林管理局管内、北谷山国有林内の山城試験地（京都府木津川市）で行った。山城試験地は流域面積 1.6ha、標高 190～260m で、地質は花崗岩である。流域の植生は明治初期の砂防緑化工によって回復した森林で、観測流域は現在はコナラやソヨゴを優占種とする落葉広葉樹二次林となっている。当試験地は森林 CO₂ フラックス観測ネットワーク試験地の一つである。

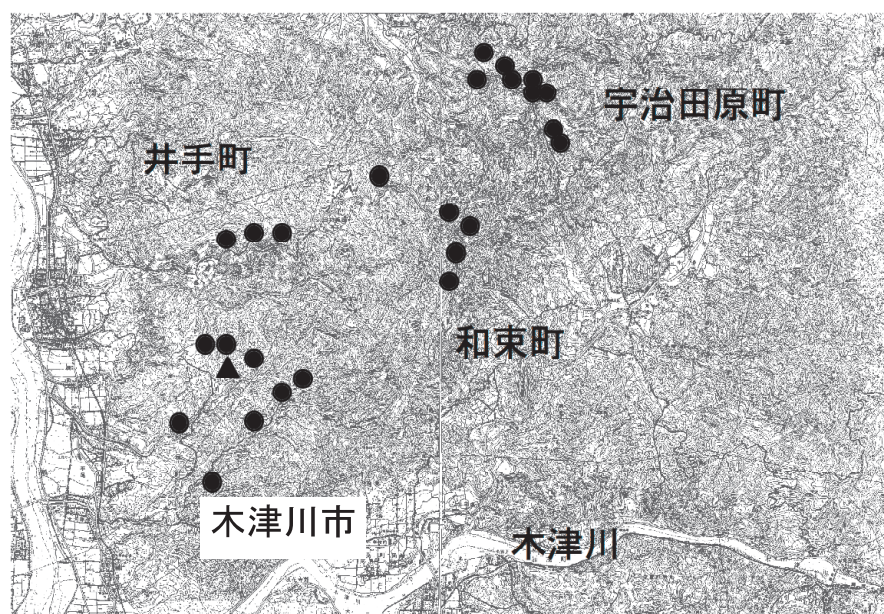


図 2.5.1 調査地位置図

▲ モニタリングサイト ● 溪流水広域多点調査地点

サンプリングは林外雨、溪流水ともおよそ月 2 回の頻度で行った。林外雨は、観測タワー上部に設置した直径 21cm のポリロートで受けて遮光処理した 10L ポリタンクに貯留・採取した。

採取した雨水、渓流水のサンプルは pH、EC (電気伝導度) を測定した後に孔径 $0.45\mu\text{m}$ の PTFE メンブレンフィルターでろ過し、イオンクロマトアナライザーにより溶存無機成分を解析した。渓流水については滴定によるアルカリ度の測定、もしくは全有機炭素測定装置による解析によって HCO_3^- 濃度を算出した。さらに、2005 年、2006 年の梅雨期、梅雨明け後 (2006 年のみ) に試験地周辺の山城町、井手町、和束町、宇治田原町の 25 ヲ所の森林内で渓流水を採取し (表 2.5.1)、溶存無機成分を解析した。

表 2.5.1 広域多点調査地点の概要

測点	標高(m)	母岩	植生	備考
1	89	花崗岩	広葉樹	山城試験地
2	89	花崗岩	広葉樹	山城試験地となり沢
3	154	花崗岩	広葉樹	
4	166	花崗岩	広葉樹	
5	103	花崗岩	スギ、ヒノキ	
6	133	花崗岩	広葉樹	
7	146	花崗岩	スギ	
8	150	花崗岩	広葉樹	山城公園
9	326	堆積岩	スギ、ヒノキ	
10	326	堆積岩	スギ、ヒノキ	
11	297	堆積岩	スギ、ヒノキ	
12	293	堆積岩	広葉樹、ヒノキ	
13	293	堆積岩	広葉樹、ヒノキ	
14	262	堆積岩	ヒノキ	神割、寸林
15	247	堆積岩	広葉樹	
16	221	堆積岩	スギ、ヒノキ	鎌砦橋
17	196	堆積岩	スギ、ヒノキ	御倫山の水
18	188	堆積岩	ヒノキ	
19	214	堆積岩	ヒノキ	
20	225	堆積岩	ヒノキ	
21	308	堆積岩	ヒノキ	玉川
22	357	堆積岩	スギ、ヒノキ	
23	373	堆積岩	スギ、ヒノキ	道沿い溪流、和束町
24	386	堆積岩	スギ、ヒノキ	
25	403	堆積岩	スギ、ヒノキ	

ウ 結果と考察

(1) 山城試験地流域における渓流水水質の季節および年間変動特性

当期モニタリング期間 (2005～2008 年) に 2004 年の観測値を加えた至近 5 年間の山城試験地渓流水の pH、EC の変動を図 2.5.1 に示した。5 年間の pH、EC の単純平均値はそれぞれ 7.04、 6.36 mS m^{-1} であり、pH は 6.43～7.75、EC は $4.42\sim 8.45\text{ mS m}^{-1}$ の範囲で変動した。pH の変動幅は測定年によって異なっていた。2007、2008 年は比較的小さく、季節に伴う明瞭な変化のパターンも見られなかったのに対し、2004～2006 年は変動幅が大きく、また夏もしくは冬に高まっていくパターンが見られた。EC は年度を問わず、多雨期およびまとまった降雨のイベントの後に低下する傾向を示した。

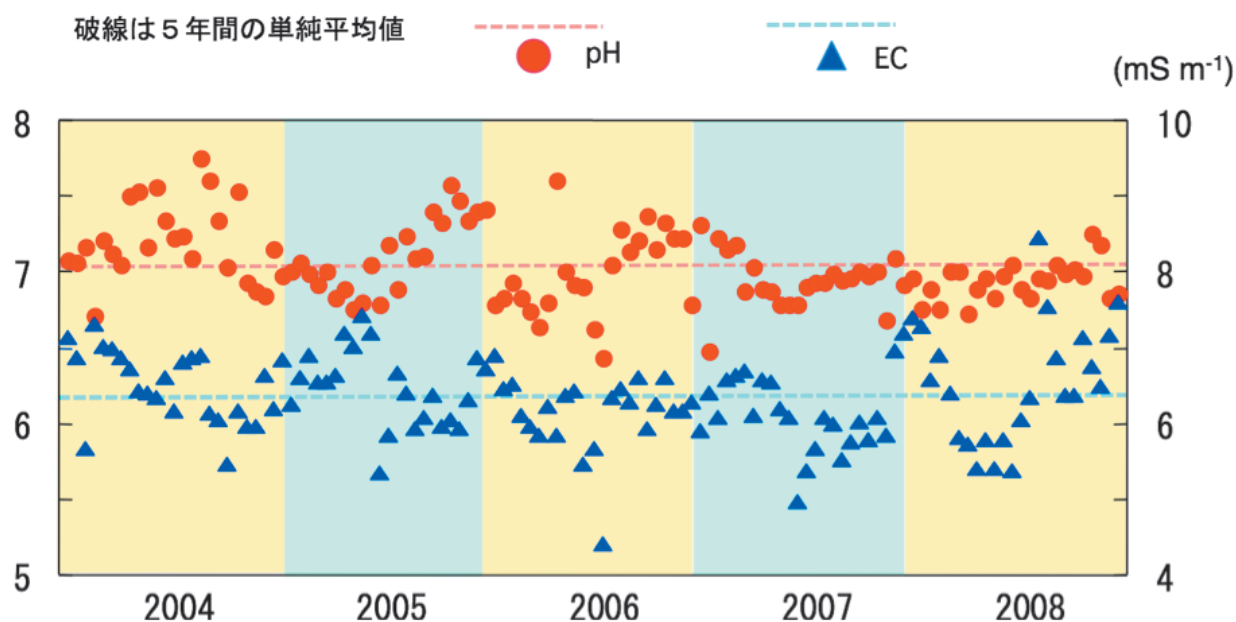


図 2.5.1 山城試験地の渓流水の pH, EC の季節変動 (2004-2008 年)

渓流水中の陰イオンの季節変化について図 2.5.2、図 2.5.3 に示した。硝酸、硫酸、塩素の各イオンの至近 5 年間の平均濃度はそれぞれ、3.99、7.18、5.01 mg L^{-1} であった。NO₃ 濃度は、夏に向かって濃度が低下し、その後濃度が上昇するというパターンを示したが、年度によっては散発的に高濃度を記録することがあった。SO₄ は NO₃ ほど明瞭ではないが、冬期に高く、夏期に低下する傾向を示した。また 2008 年の夏に明らかな濃度の急低下を示した。Cl については季節、年次による明瞭な濃度変化のパターンは見られなかった。

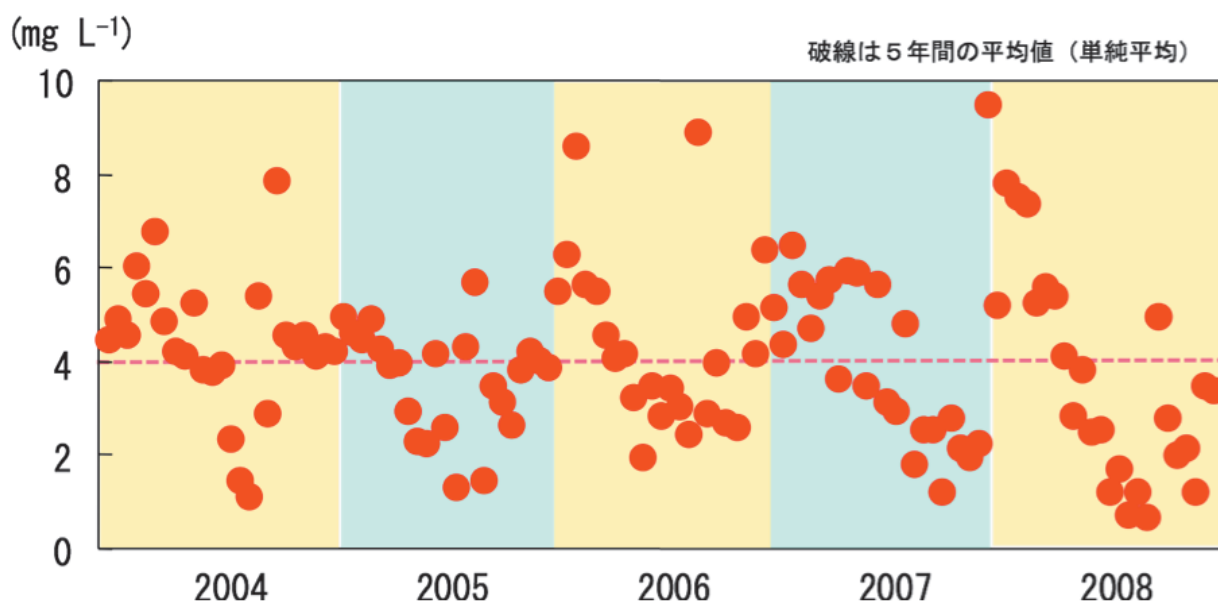


図 2.5.2 山城渓流水中の NO₃ 濃度の季節変動 (2004-2008 年)

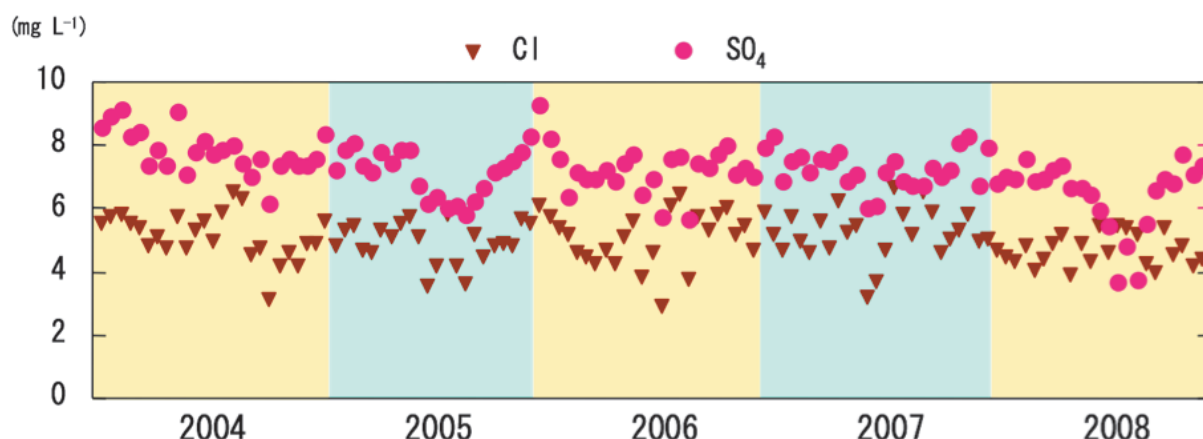


図 2.5.3 山城渓流水中の SO_4 および Cl 濃度の季節変動 (2004-2008 年)

陽イオンの季節変化について図 2.5.4 に示した。Na、K、 NH_4 、Ca、Mg の各イオンの至近 5 年間の平均濃度はそれぞれ、7.57、1.18、0.03、2.99、0.88 mg L^{-1} であった。濃度の極めて低い NH_4 を除けば、K および Mg の濃度は測定期間を通して大きく変動せず、また明瞭な季節変動も見られなかった。Ca 濃度も年間を通して一定の濃度で推移することが多かったが、変動幅に年度間差が見られた。Na 濃度は年間で 1.5～2 倍程度の幅の大きな変動を示したが、特定の季節変動パターンは見られなかった。

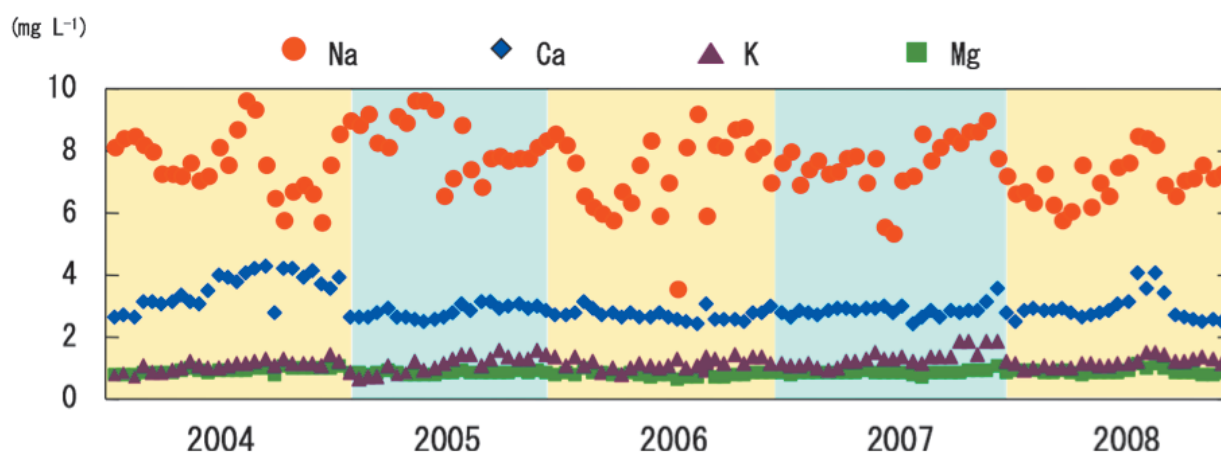


図 2.5.4 山城渓流水中の陽イオン濃度の季節変動 (2004-2008 年)

以上のように、当モニタリング期間中、渓流水の水質は比較的安定して推移したが、降雨量と大きな降雨イベントの発生頻度によって、水質変動の幅が大きく異なるようであった。2007 年、2008 年ともに降雨量が少なく、台風等による豪雨の影響もなかったせいか、この 2 年間は他年に比べて水質の変動が乏しかった。

（２）山城試験地流域における林外雨水質の年変動

2000 年以降のモニタリングサイトにおける年間林外雨量、pH、EC の推移を図 2.5.5 に示した。pH の加重平均値はおよそ 4.5～5.0 で推移し、期間中の明らかな増減傾向は見られなかった。EC の加重平均値はおよそ 1.2～1.8 mS m⁻¹ で推移し、年間林外雨量と負の相関を示した。

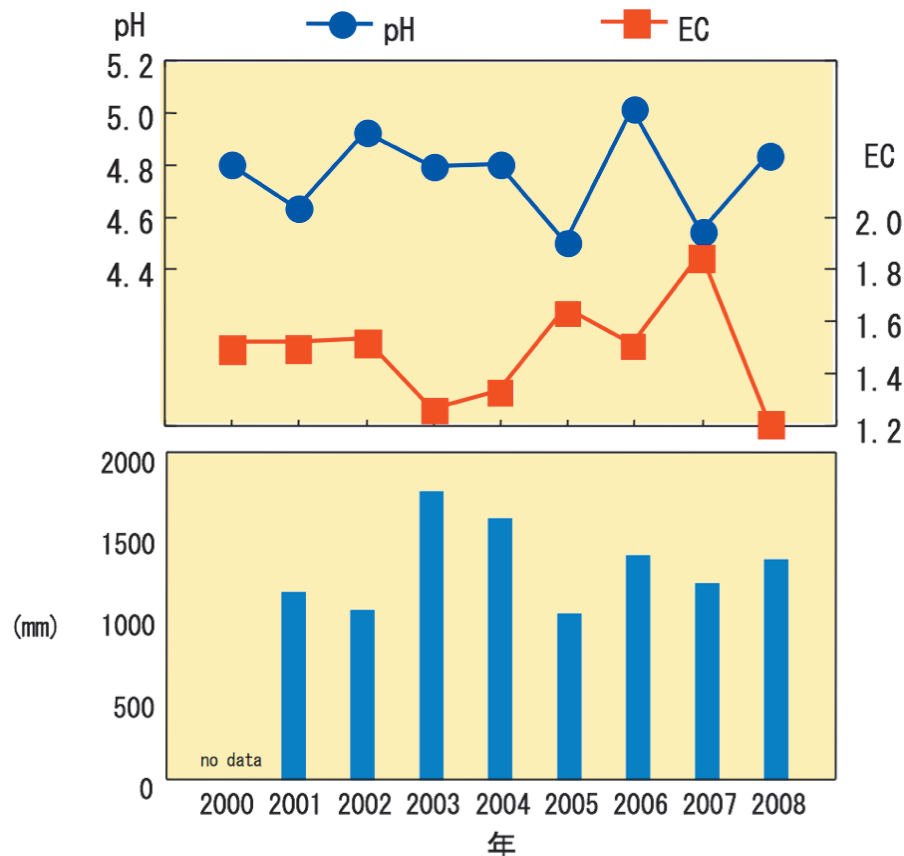


図 2.5.5 山城試験地における年間林外雨量および林外雨の平均 pH、EC の経年変化
(平均値は加重平均, 2000-2008 年)

（３）山城試験地流域における主要溶存成分の流入負荷量、流出負荷量

測定値に基づき濃度と降雨量の積算値から年間の流入負荷量を計算した。また、測定した渓流水の溶存成分濃度と流量のデータをもとに LQ 式を算出し、流出負荷量を計算した。陽イオンおよび Cl の流入負荷量、流出負荷量を図 2.5.6 に示した。陽イオンおよび Cl は流出負荷量が降雨による流入負荷量を常に 2～5 倍超過していた。無機態窒素および S の流入負荷量、流出負荷量を図 2.5.7 に示した。S では流出／流入比は 1.1 から 1.6、無機態窒素については流出／流入比は 1.2 から 2.0 であり、塩基類ほど差が大きいものの、いずれも流域内から流亡しているという計算結果になった。

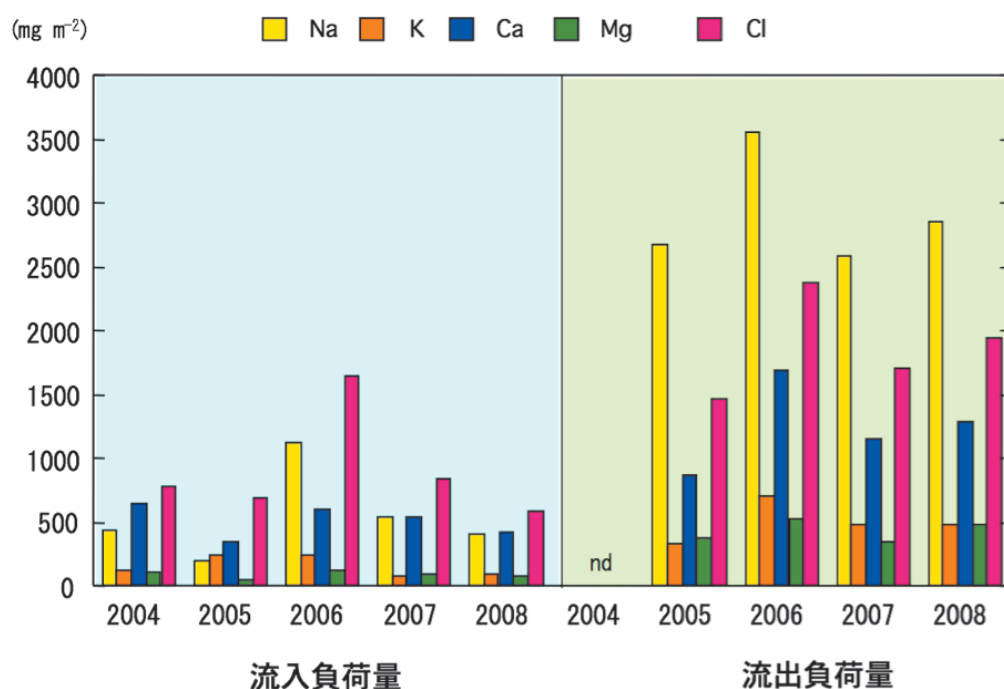


図 2.5.6 山城試験地における陽イオンと Cl の流入負荷量および流出負荷量（2004-2008 年）

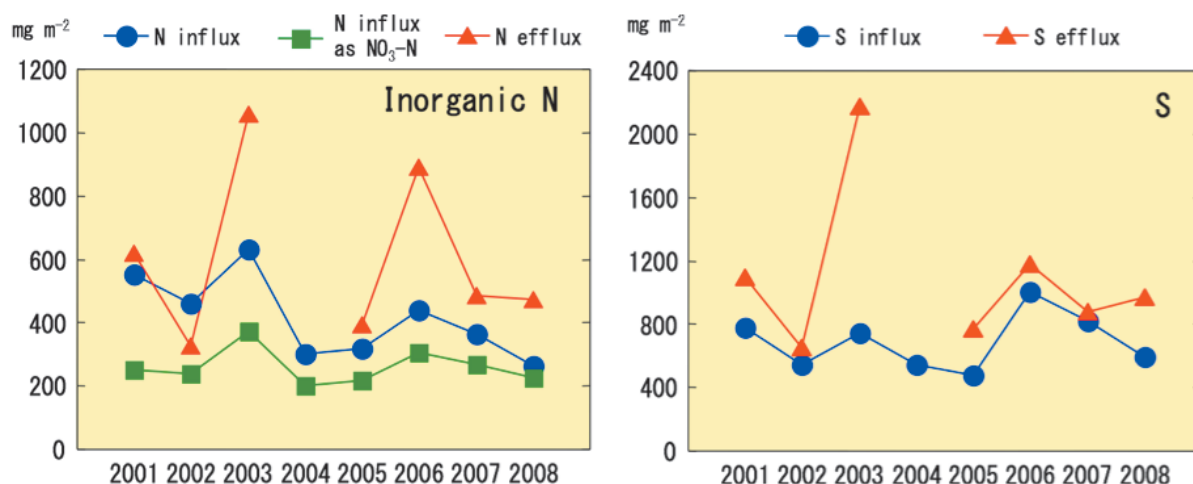


図 2.5.7 山城試験地における無機態窒素 (DIN) とイオウ (S) の流入負荷量および流出負荷量（2001-2008 年）

降雨による流入負荷の増減が、流出負荷に影響する程度はイオン種によってまちまちであり、Na、Cl では流入負荷の減少ほどは流出負荷量は低下せず、逆に二価の陽イオン (Ca、Mg) と NO₃ では、流入負荷量の変化が小さい反面、流出負荷量の増減が大きかった。前者は先行した負荷影響の持続を、また後者は、系内に貯留されているそれらの物質の挙動が降雨そのものの量に主に規定され、流入負荷の多寡で変化する部分よりも大きいことを示唆している。

主要溶存成分の流入負荷量、流出負荷量の比較の結果、山城試験地においては各元素の流入負

荷を流出負荷が上回ることが明らかになった。中でも、無機態窒素の溪流からの流出負荷が降雨からの流入負荷を上回る流出超過が定常的に見られた。乾性沈着等の影響を過小評価している可能性はあるが、土壌の低い物質保持能を反映しているとも考えられる。イオウについても、流出負荷が流入負荷を常に上回っており、降雨からの負荷が小さい年に流出超過が著しいことから、土壌中に貯留されたイオウが流入負荷の多少によらず常時溪流水中に漏れ出していると考えられる。

(4) 山城試験地周辺の森林における溪流水質の地域的変異

溪流多点調査の結果、溪流水の pH のレンジは 2005 年 7 月で 5.63～7.66 (平均 7.15)、2006 年 7 月で 5.92～7.92 (平均 7.04)、同 8 月で 5.68～7.92 (平均 7.07) であり、採取時期による違いは見られなかった。溪流水の EC のレンジは 2005 年 7 月で 3.36～16.63 mS m^{-1} (平均 7.74 mS m^{-1})、2006 年 7 月で 3.20～14.37 mS m^{-1} (平均 6.88 mS m^{-1})、同 8 月で 2.96～16.92 mS m^{-1} (平均 7.80 mS m^{-1}) であり、少雨年 (2005 年)、もしくは少雨期に高くなる傾向が見られた。図 2.5.8 に示したように、調査した範囲においては山城試験地モニタリングサイトの溪流の pH はほぼ全体の平均値に近く、EC がやや平均値を下回った。また図 2.5.9 に示したように、二価の陽イオン、陰イオンの濃度が全体平均よりやや低かった。山城試験地周辺を含む花崗岩地質上の溪流では他の土壌母材のところに比べて全体にやや Na および HCO_3 濃度が高かった。

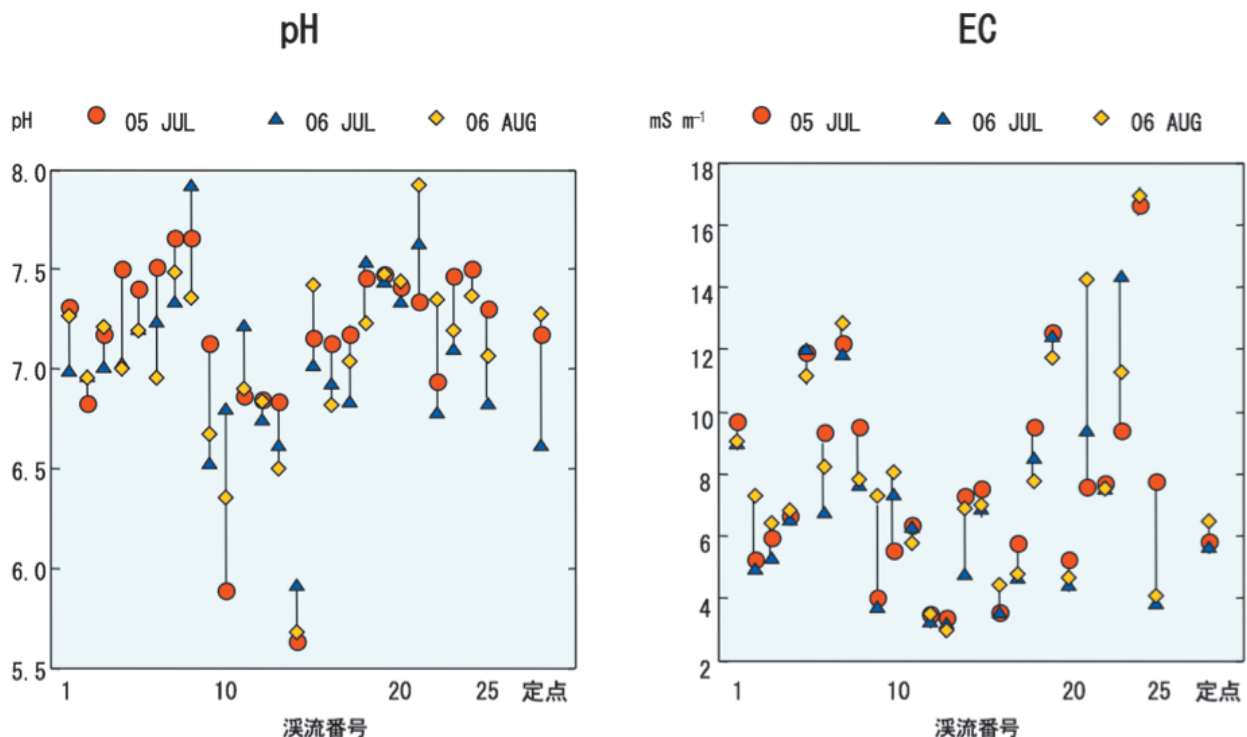


図 2.5.8 山城試験地およびその周辺森林内の溪流水の pH および EC
(右端が山城試験地モニタリングサイトの測定値)

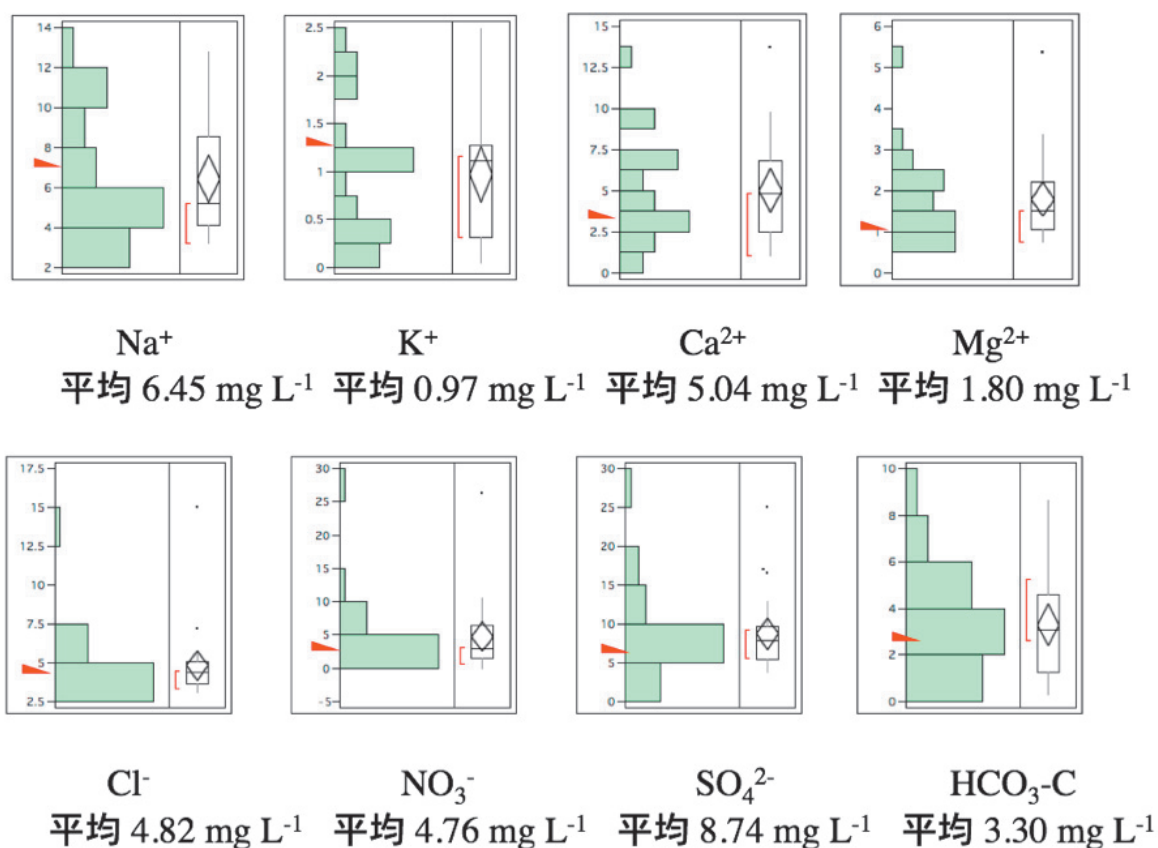


図 2.5.9 山城試験地周辺の渓流水の溶存イオン濃度
 (赤矢印がモニタリングサイトの値, 2005 年のデータ)

渓流多点調査の結果から、モニタリングサイトである山城試験地の渓流は、同じ土壌母材のサイトの中で比較する限り、この地域の渓流の平均的な水質を示しているものと考えられた。

エ 今後の課題

これまでの山城試験地での観測結果に基づく窒素の流入負荷量、流出負荷量の収支は常に流出超過になっているが、これについては乾性沈着の影響等も含めて解析を行う必要がある。

オ 要約

京都府木津川市の山城試験地内において、2005～2008 年の 4 年間、月 2 回の頻度で渓流水および林外雨を採取し、pH、EC と溶存無機成分を分析した。至近 5 年間の渓流水の pH、EC の加重平均値は 7.04、6.36 mS m⁻¹ であり、近年に至って、pH の低下傾向が見られた。硝酸および SO₄ 濃度は、冬期に上昇し、夏期に低下する傾向が見られた。林外雨の観測の結果、年降雨量は期間中 1008～1360mm であり、平年値を下回ることが多かった。至近 5 年間の林外雨の pH、EC の加重平均値はそれぞれ 4.70、2.56 mS m⁻¹ で、EC が近年増加する傾向が見られた。溶存成分の降雨による流入負荷量と溪流からの流出負荷量を比べると、ほとんどのイオン種で流入を流出が上回っていたが、窒素とイオウについてはその差は比較的小さかった。また、N の流入負荷量

は他元素に比べ降雨量の影響を受けにくく、年度間差が小さかった。溪流多点調査の結果、山城試験地の溪流の pH はほぼ全体の平均値に近く、EC がやや平均値を下回っていたが、溶存イオン濃度に他溪流に比べて極大、極小の値を示すものは見られず、当該地域の一般的な溪流の水質を示すものと考えられた。

(溝口岳男)

6. 四国における水質モニタリングとフラックスの広域評価

ア 研究目的

日本全国の森林生態系における物質の動態予測、下流域への環境負荷物質の流出実態の評価のために、森林流域における物質動態・収支を解明する必要がある。しかし、流域試験に基づく物質収支の研究は、流域毎の局所的な評価にとどまることが多く、全国的な評価や地域的な変異等は十分には解明されていない。このため、全国各地のモデル流域における詳細なフラックス観測を通じて広域的な評価を行う必要があり、四国地域でもその一部を分担する。四国地方の雨水、渓流水(天然林流域と人工林流域)の水質を測定し、降雨による森林への流入負荷量と渓流水による流出負荷量を算出するとともに、物質流出量の推定方法についても検討し、これまでの測定期間における物質負荷量の変動について考察する。

イ 研究方法

高知県高岡郡桺原町の鷹取山国有林内のモニタリング調査流域で、雨水と渓流水(約 180 年生のモミ・ツガ天然林 N3 流域 18.7ha、約 40 年生のスギ人工林 A1 流域 4.8ha、および四万十川支流の北川川本流 M) を月 2 回の頻度で定期的に採取し、主要溶存成分濃度を測定した。雨水はポリエチレン製漏斗(直径 21cm)を通じてポリタンクに貯留した。天然林(N3)流域では、パーシャルフリューム式流量計、水位計を設置し、流出水量を連続観測した。またプロペラ式流速計を用いて採水の都度、流出水量を実測した。試料水を研究室に持ち帰った後、EC(電気伝導度)、pH を測定した。0.45 μ m のフィルターでろ過後、Na、NH₄、Mg、Cl、SO₄、PO₄、NO₂、NO₃ 濃度はイオンクロマトグラフ法、Ca、Mg、Si、Al、Fe 濃度は ICP 発光分光分析法、IC(溶存無機炭素)、TOC(溶存有機炭素)濃度は光触媒 TiO₂ 酸化法で測定した。HCO₃ 濃度は IC 濃度より換算した。流入負荷量は採取した雨量に採取した雨水の溶存成分濃度を乗じて求めた。流出負荷量は特に記載がない場合、年流出水量に加重平均濃度を乗じて求めた。

樹冠通過過程における雨水の水質変化を検討するため、鷹取山国有林のモミを主とする天然林、スギ人工林で、ポリエチレン製漏斗(直径 24cm)を通じて樹冠通過雨をそれぞれ 4 ヶ所ずつ採取し、溶存成分濃度を測定した。観測は 2008 年の 4 月 4~9 日、5 月 8~22 日、8 月 6~20 日の計 3 回実施した(図 2.6.1)。

当地域におけるモニタリング調査流域の位置づけを検討するため、2 つの広域調査を行った。(a)モニタリング調査流域周辺・近隣の小流域(桺原町の調査流域周辺の 5 つの山地小流域・四万十町(旧大正町)の葛籠川流域内の 6 つの山地小流域と葛籠川本流 2 箇所)で月 2 回の採水と、(b)広域多点調査(四万十川、仁淀川、穴内川、鏡川、国分川流域の 18 山地小流域と本流 17 箇所)を年 2 回(2006 年 6 月下旬~7 月上旬と 9 月中下旬)行い、上記と同様の分析を行った。



図 2.6.1 鷹取山試験地における雨水・溪流水の採取位置

ウ 結果

(1) 2001～2008 年度の観測結果

鷹取山試験流域における 2001～2008 年の年雨量平均値は 2719mm であった。2004 年は年雨量 4278mm で最も多雨、2005 年と 2008 年は年雨量 2100mm 程度で寡雨であった。全期間を通じて雨水の pH は 4～6、溪流水は 7～8 と、常に溪流水で pH が高かった。EC と多くの溶存成分濃度に関して、雨水より溪流水で高い傾向にあった。Ca、Mg、SO₄、Si などの溶存成分濃度に季節変動がみられた。観測期間中、溶存成分濃度が継続的に上昇または低下する傾向はみられなかった。なお、人工林流域の溪流水の Cl 濃度は天然林流域より低い傾向が明瞭であった(図 2.6.2)。

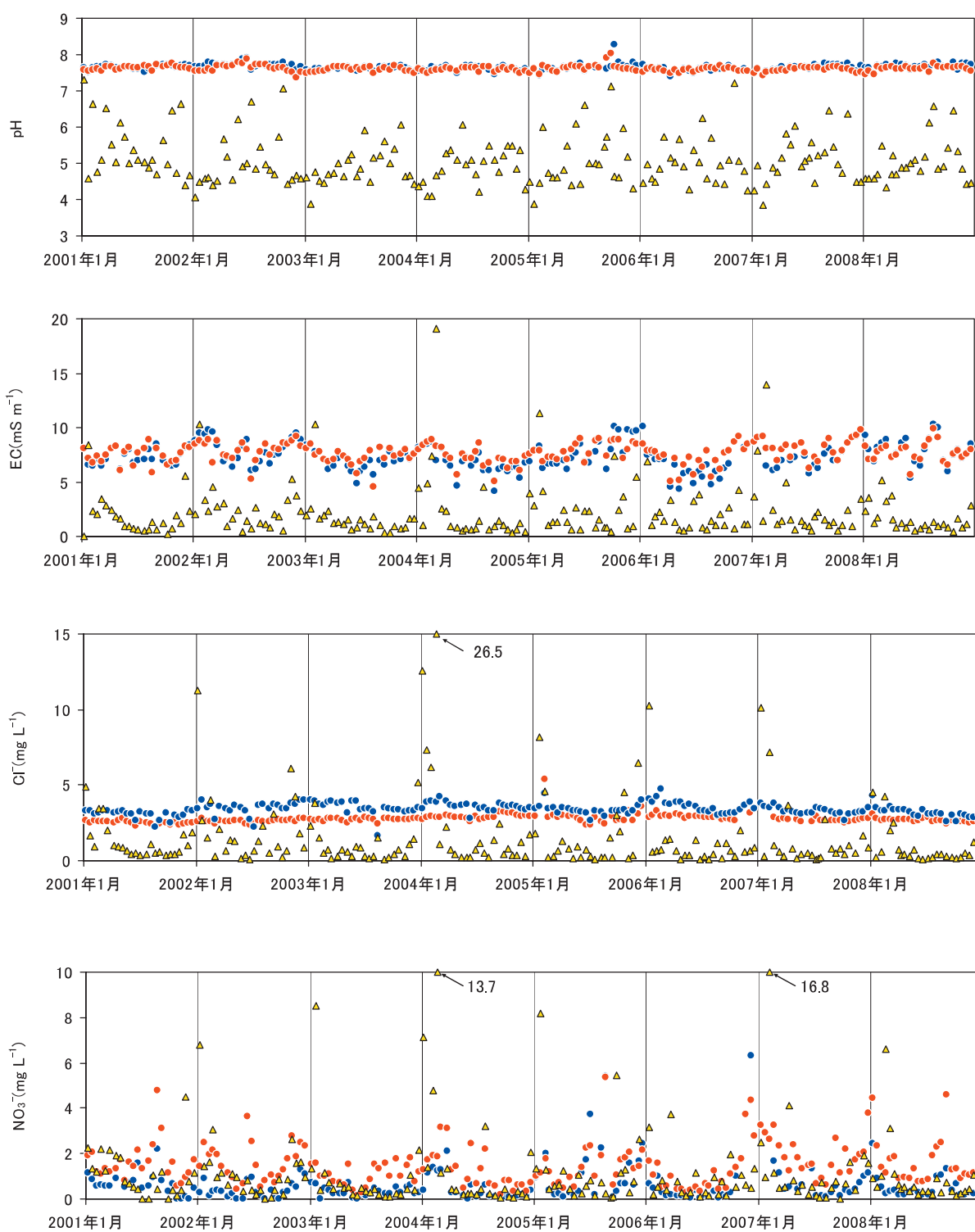


図 2.6.2 鷹取山試験地における雨水・溪流水の観測結果（その1）

▲雨水 ●溪流水(A1) ●溪流水(N3)

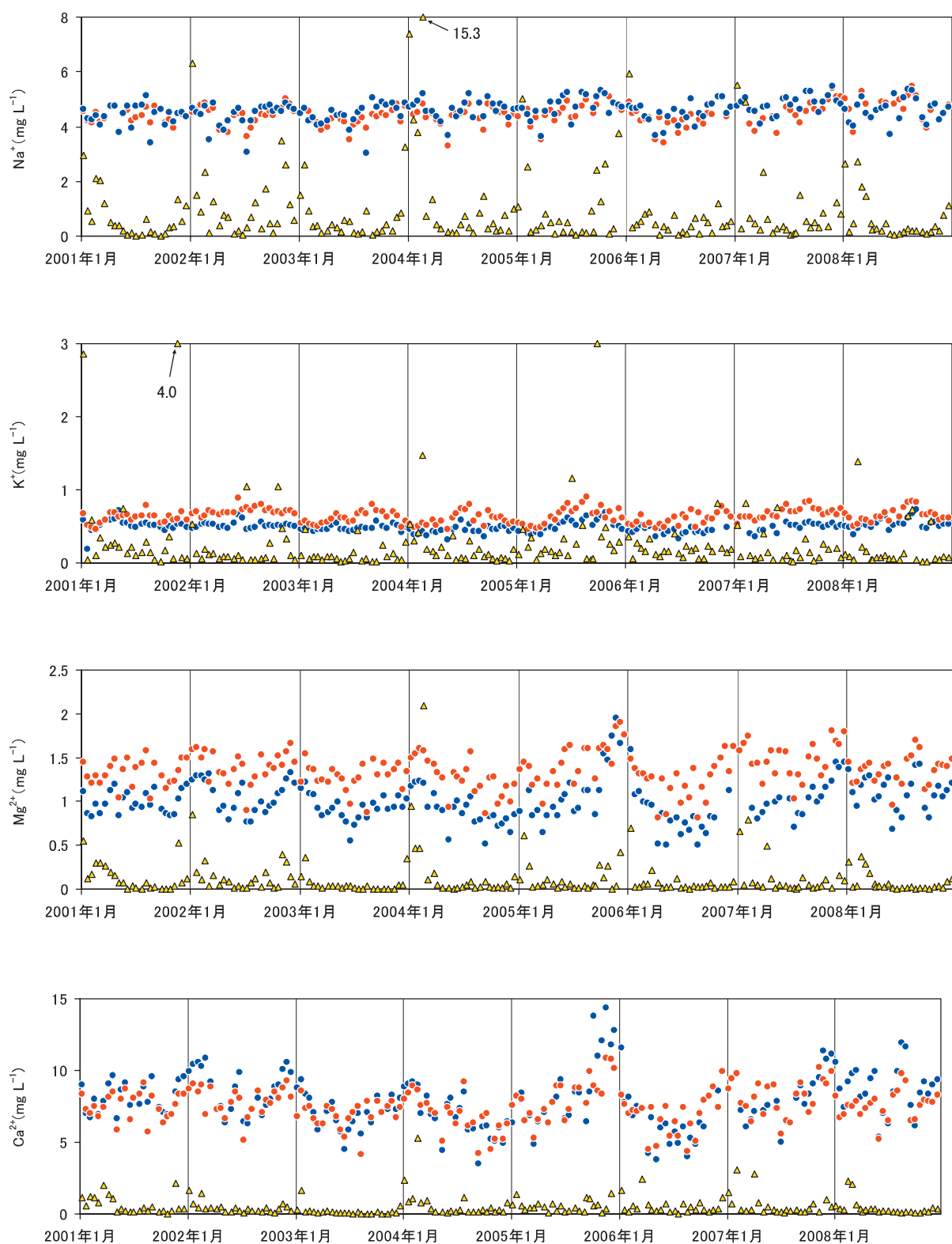


図 2.6.2 鷹取山試験地における雨水・溪流水の観測結果（その 2）

▲ 雨水 ● 溪流水 (A1) ● 溪流水 (N3)

(2) 年雨量と年流出水量の関係

年雨量と年流出水量の関係を図 2.6.3 に示す。流出水量の長期欠測、計器トラブルがなかった、2001～2004、2006 年の 5 年分の結果を示す。年損失量(=年雨量－年流出水量)は 734～1077mm であった。年雨量の増加に伴い流出水量は正比例した。その回帰直線の傾きが 0.99 なので、年雨量によらず年損失量は概ね一定である。本流域の年損失量約 850mm は服部 (1992)、近藤ら (1992)、服部ら (2001) など、既往の報告から予想される当地域の損失量(蒸発散量)と概ね一致していた。

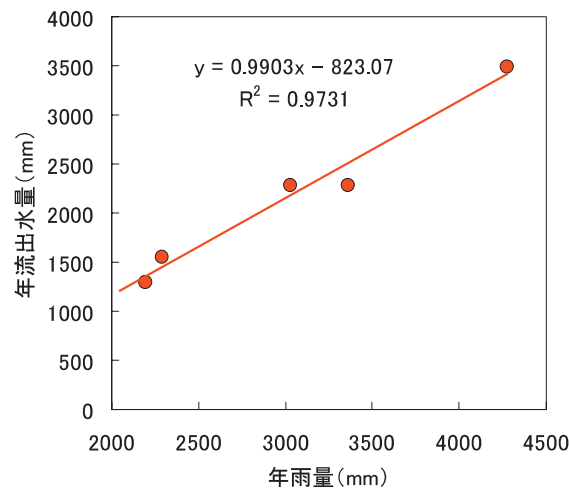


図 2.6.3 年雨量と年流出水量の関係

(3) 流入・流出負荷量の年変動

年雨量と各溶存物質流入量の関係を図 2.6.4 に示す。2001～2008 年で年雨量は 2049mm (2005 年) から 4278mm (2004 年) まで変化した。Cl、Na の流入負荷量は年雨量の増加に伴って多くなった ($p < 0.05$)。一方、 SO_4 と $\text{NO}_3\text{-N}$ の年流入量は年雨量によらず、それぞれ $25\text{kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ 、 $3\text{kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ 程度と概ね一定を示し、Mg、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Ca、Mg のそれは年雨量と明瞭な傾向は見られなかった。各溶存成分の年流出負荷量 (2001～2004、2006 年) は定期調査と降雨イベント調査 (総雨量 18～289mm の 17 イベント) の結果を基に流出水量 (Q) と負荷量 (L) との関係式 (L・Q 式) を作成し、時間単位で流出水量から流出量を算出・積算し、年間の物質流出量を求めた。Na、Mg、Ca、Mg、Cl、 SO_4 、Si の L・Q 式の決定係数は 0.986 以上であった。一方、 NO_3 のそれは 0.788 と他より格段に低かった。その理由は本流域の NO_3 濃度は流出水量に対する変動が大きいためである (図 2.6.5)。そこで、1 降雨の $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量 (ΣL : g ha^{-1}) を、1 降雨の流出水量 (ΣQ : mm) と降雨前の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 (C: mg L^{-1}) の 2 変数から求める重回帰式 ($\Sigma L = 18.6 \Sigma Q^{0.786} C^{0.929}$; 決定係数 0.961) を考案した。これに基底時の $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量を合計して $\text{NO}_3\text{-N}$ の年流出量とした。Na、Mg、Ca、Mg、Cl、 SO_4 、Si に関して年間の物質流出量は年雨量 (および年流出水量) の増加に伴って直線的に増加する傾向がみられた ($p < 0.01$)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 年流出量は年雨量と相関がなく、3～5 $\text{kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ 程度で推移した。年間の物質収支を図 2.6.6 に示す。いずれの年も Na、Mg、Ca、Mg、Cl、 SO_4 、Si に関して流入 < 流出、無機態窒素は流入 > 流出であった。



図 2.6.4 2001～2008 年の鷹取山試験地における雨水による流入負荷量

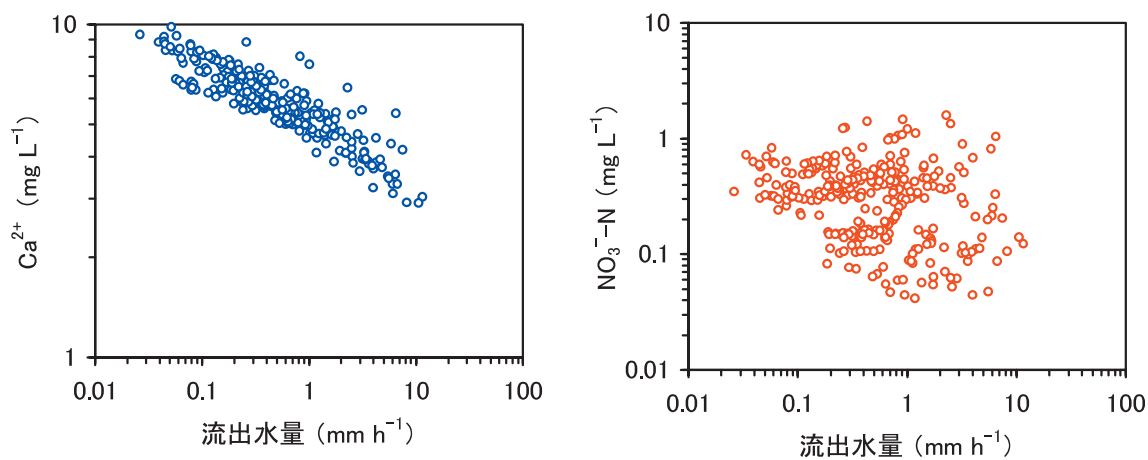


図 2.6.5 鷹取山試験地における流出水量と濃度の関係

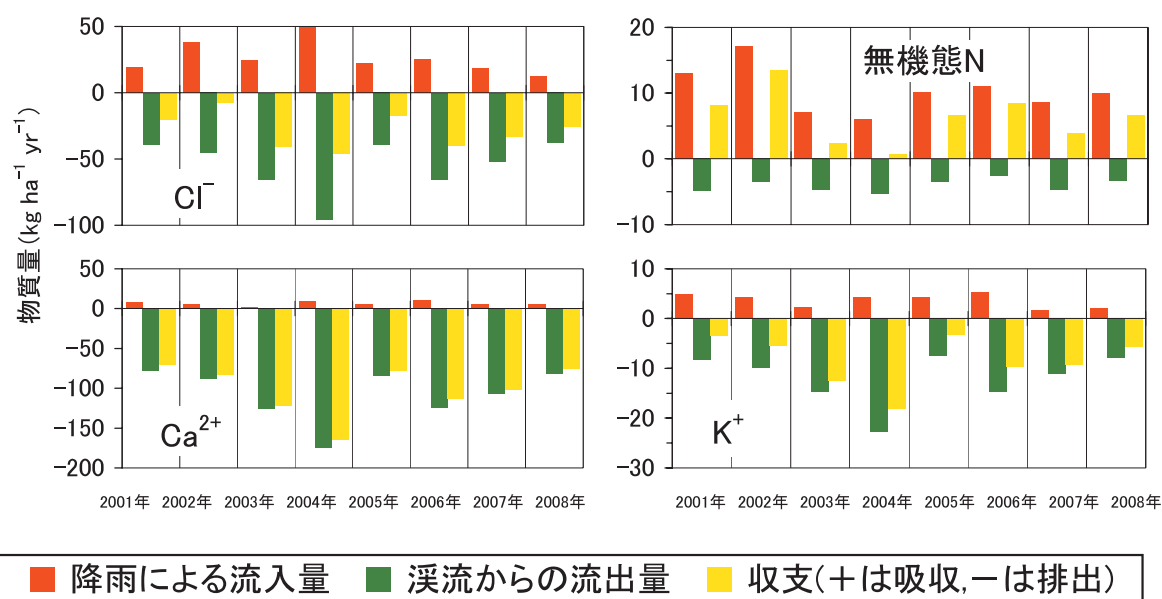


図 2.6.6 鷹取山試験地における年間の物質収支

(4) 林種による樹冠通過雨の主要溶存成分の濃度及び負荷量の比較

3回の林外雨量はそれぞれ25.3mm、77.4mm、49.5mmであった。樹冠通過雨量に関して林種による明瞭な違いはなかった。樹冠通過雨のNa、Mg、Cl濃度は天然林で人工林よりも明らかに高く、樹冠通過雨のNa、Mg、Cl流入量も人工林より天然林の方が明らかに多かった(図2.6.7)。Mg、NO₃、SO₄の濃度および流入量についても3回のうち2回で同様の傾向が認められた。NO₃濃度が検出限界低下になる場合があった。

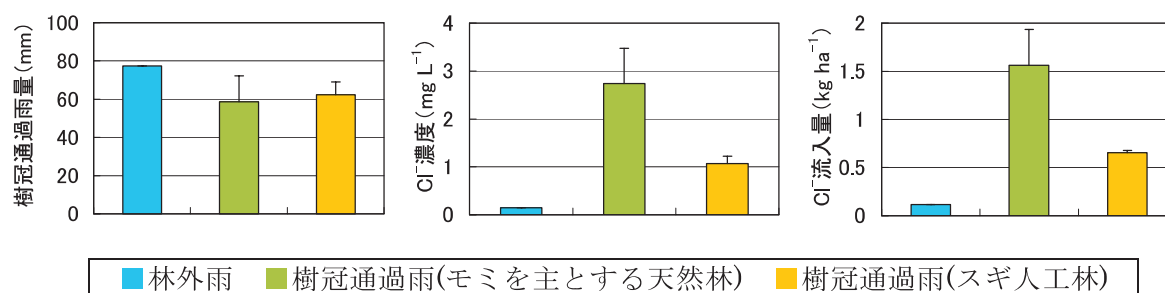


図 2.6.7 林種による樹冠通過雨量及びそのCl濃度、流入量の比較

(2008年5月8~22日)

(5) 広域調査

モニタリング調査流域と周辺・近隣の山地小流域の渓流水質を比べると(図2.6.8)、人工林(A1)流域のpH、ECは平均的であるが、NO₃濃度は低い。天然林(N3)流域はいずれも平均的であり、北川川本流(M)はpHが高い。広域多点調査の結果(表2.6.1)をみると、やはり人工林(A1)流域でNO₃濃度が低いことが分かる。

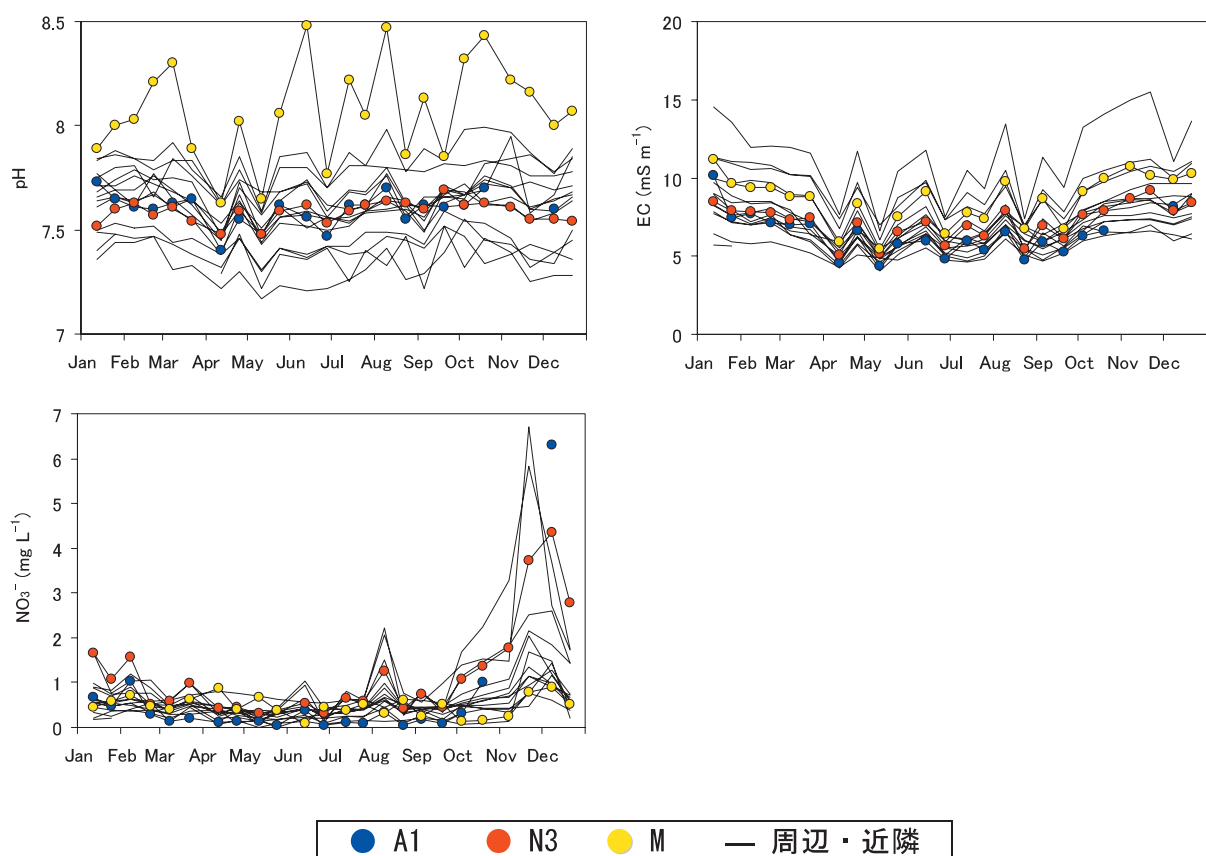


図 2.6.8 2006 年のモニタリング調査流域と周辺・近隣の渓流水の pH、EC、 NO_3^- 濃度

表 2.6.1 2006 年の広域多点調査の結果

	pH		EC (mS m^{-1})		NO_3^- (mg L^{-1})	
	6月	9月	6月	9月	6月	9月
鷹取山A1流域	7.47	7.61	4.81	5.25	0.04	0.08
鷹取山N3流域	7.53	7.69	5.68	6.12	0.32	0.46
18小流域平均	7.50	7.57	5.84	6.35	0.27	0.43
標準偏差	0.25	0.25	1.92	2.38	0.14	0.25
北川川本流M	7.77	7.85	6.42	6.73	0.45	0.52
17本流平均	7.70	7.87	6.37	6.85	0.59	0.64
標準偏差	0.16	0.38	0.93	1.57	0.31	0.48

エ 考察

EC や Ca、Mg などに見られた、雨水より渓流水で濃度が高いことは、単純には流入より流出が多いこと、つまり森林生態系を通過することによってミネラル類が付加されていることが示唆される。年雨量の増加に伴って Na、Cl の流入量は増加し、本流域では海塩の影響を受けている

ことがわかった。特に台風の時、海塩の影響が大きい（鳥居，2007）。要因は特定できなかったが、 SO_4 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 Mg 、 NH_4 、 Ca 、 Mg の年流入量は年雨量に影響されていないことがわかった。これに対して、 Na 、 Mg 、 Ca 、 Mg 、 Cl 、 SO_4 、 Si の年流出量は年雨量に正比例した。本流域と異なる立地条件（地形、地質、流域面積など）、観測条件（観測実施年、物質流出量の算定方法など）で行われた、岩坪・堤（1968）、村岡・平田（1988）や本所桂試験流域の報告によると、年間の物質流出量は水量（雨量、流出水量）に強く依存することが指摘されている。それらの年雨量は 1000～2000mm 程度の地域にあるが、本報告ではそれらを超える年雨量の範囲においても年間の物質流出量が水量に依存することを示した。これは溶存成分濃度の変動が流出水量の変動に比べて小さく、物質流出量の流出水量に対する依存度合が高いためである。これに対して本流域の NO_3 は、従来の知見があてはまらず、水量に依存しないことがわかった。年間の物質収支はいずれの年も無機態窒素を除いて流入＞流出で、森林生態系を通過する際、 Ca 、 Mg などのミネラルが基岩より溶出、付加されていると考えられる。但し、 Cl の流入と流出の差については樹冠等によって捕捉された乾性沈着物の影響と考えられる。無機態窒素の 2001～2008 年における平均的な収支は、流入負荷量が $10\text{kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 、流出負荷量が $4\text{kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ であり、流域内への蓄積は $6\text{kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ となった。これより、森林生態系内での窒素保持機能が働いていることを示した。

樹冠通過雨を観測した結果、 Na 、 Cl など多くの成分（ NH_4 、 NO_3 を除く）で林外雨に比べて樹冠通過雨で濃度が高く、流入量が大きかった。このことは乾性沈着による付加が、 Mg については樹冠からの溶脱があることを示している。スギ人工林よりモミ天然林で Na 、 Mg 、 Cl をはじめとして樹冠通過雨の溶存成分濃度が高い及び流入量が多い傾向が認められた。 Cl の性質（土壌に吸着されにくく、風化で溶出はない）や鷹取山国有林の天然林・人工林の林相の違いに今回の結果を合わせて考えると、林種による渓流水の Cl 濃度の差は樹冠による乾性沈着物の捕捉効果の違いによる可能性がより濃厚になった。 NO_3 については、天然林、人工林ともに樹冠通過雨の濃度が著しく低下する場合があります、樹冠での N 吸収が起きている可能性を示唆している。

広域調査の結果、天然林 N3 のモニタリング調査流域は周辺・近隣の小流域と大きな違いは認められなかったことから、モニタリング調査流域として当地域の平均的な水質を持つ流域であることが示された。

オ 今後の課題

地下水、土壌水の溶存成分濃度の変化を解析し、鷹取山試験地における渓流水の水質形成機構を解明するとともに、樹冠通過過程における物質の流出入について明らかにする必要がある。

カ 要約

2001～2008 年の観測結果によると、鷹取山試験流域における平均的な年雨量は約 2700mm、年流出水量は約 1800mm、無機態窒素の流入負荷量は約 $10\text{kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 、流出負荷量は $4\text{kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ で、全期間を通じて無機態窒素は流入＞流出、それ以外の多くの溶存成分は流入＜流出であった。年雨量と年流入量、年流出量の関係について、年雨量 2000mm を超える多雨条件下であっても林外雨による年流入量は年雨量に依存しないこと、一方年流出量は水量に強く依存し、年雨量から直線回帰により算定可能であることを示した。ただし、流入量は Na 、 Cl が、流出量は NO_3 が例外である。スギ人工林における樹冠通過雨の Cl 濃度が天然林より低いことが明らかになったこ

とから、溪流水の Cl 濃度が林種で異なる要因は樹冠による付着物の捕捉効果の違いである可能性が大きい。

キ 引用文献

服部重昭（1992）林況と蒸発散量の関係，（現代の林学 6 森林水文学．塚本良則編，319pp，文永堂，東京），96-102.

服部重昭・志水俊夫・荒木誠・小杉賢一郎・竹内郁雄（2001）森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方（Ⅰ）—渇水地域上流森林整備指針策定調査報告—，水利科学，260, 1-40.

岩坪五郎・堤利夫（1968）森林内外の養分量について（Ⅲ）流亡水中の養分量について，京都大学農学部演習林報告，40, 140-156.

近藤純正・中園信・渡辺力・桑形恒男（1992）日本の水文気象（3）—森林における蒸発散量—，水文・水資源学会誌，5, 8-18.

村岡浩爾・平田健正（1988）溪流水質から見た森林の浄化機能に関する研究（第4報）水収支と物質収支，国立公害研究所研究報告，116, 75-97.

鳥居厚志（2007）台風時の降雨による陸域への海塩負荷量の評価，環境情報科学論文集，21, 567-572.

（篠宮佳樹）

7. 九州における水質モニタリングとフラックスの広域評価

ア 研究目的

環境変動や施業等の人為インパクトに対する森林生態系の応答は時間的な遅れをともなって発現するため、養分バランスの変化やその下流域への影響を評価するためには、溪流水質の長期的なモニタリングが不可欠である。日本の森林生態系からの N 等の環境負荷物質の流出特性理解する上で、日本の各地域の森林流域の水および主要溶存成分の流入・流出フラックスを明らかにし、その地域的な変異を評価することが有効と考えられる。九州地域は降水量が多く、また台風の影響の大小による降水量の年変動が大きい地域であり、これが森林生態系の主要溶存成分の流入・流出フラックスに大きく影響していると考えられる。また、アジア大陸に近い九州地域は、大陸由来の黄砂や酸性降下物などの越境大気降下物の影響が大きい地域と予想される。

本研究では、熊本県北部に位置する鹿北流域試験地 3 号沢において、主要溶存成分の流入・流出フラックスの算出を行い、降水量や流出水量の年々変動が窒素等の溶存物質の収支に及ぼす影響を明らかにする。さらに、鹿北流域試験地の周辺において溪流水質の多点調査を行い、周辺地域の中における鹿北流域試験地の水質の特徴を明らかにする。

イ 研究方法

(1) 試験地

熊本県山鹿市にある鹿北流域試験地 3 号沢（熊本森林管理署長生国有林内）を固定試験地とした（図2.7.1）。調査流域の面積は3.69ha、地質は結晶片岩、土壌は乾性から適潤性の褐色森林土である。植生は30～50年生のスギ・ヒノキ人工林で、アラカシ・ツブラシイ等が混在している。

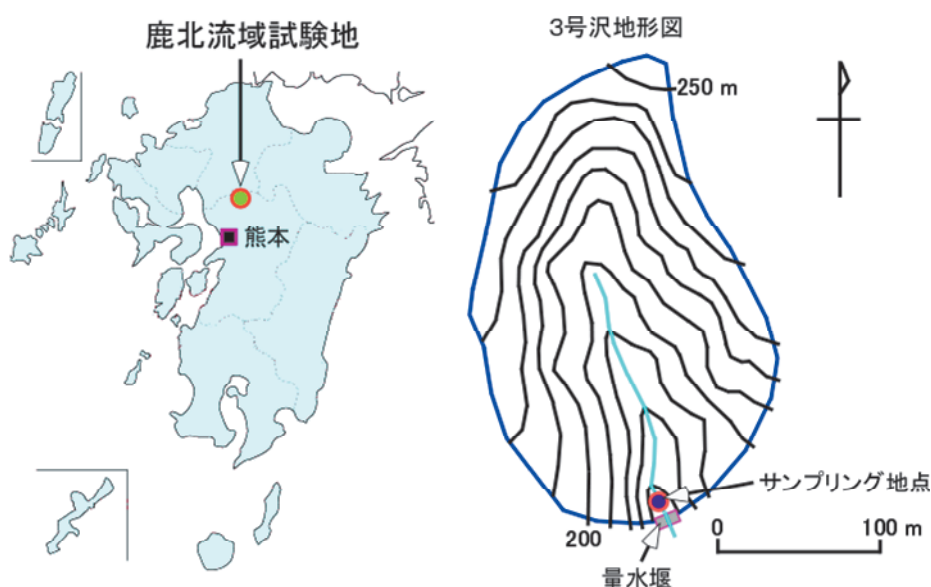


図 2.7.1 鹿北流域試験地の位置図

(2) 流入・流出負荷量の算出

林外雨は、露場に設置した直径**210 mm**のロートで受けてポリタンクに貯留し、原則月**2回**の頻度で採取した。渓流水は、3号沢の堰の上流側で原則月**2回**の頻度で採取した。採取試料のpH（ガラス電極法）、EC（白金電極法）を測定し、**0.25～0.45 μm** のフィルターでろ過後、溶存無機イオン濃度（イオンクロマト法）、Fe、Si、Al濃度（ICP発光分析法）、 HCO_3 濃度（pH**4.8**アルカリ度から推定）を測定した。流入負荷量は、採水期間毎の林外雨量と各溶存成分濃度の積を一年分積算して算出した。流出負荷量は、まず渓流水の各溶存成分濃度と採水時の流出水量を用いて流出水量と各溶存成分流出量の関係式（**L・Q式**）を作成し、次にその**L・Q式**を用いて日流出水量から各溶存成分の日流出量を算出し、一年分積算して算出した。なお、林外雨と渓流水の分析結果は、**Technical Documentations for Wet Deposition Monitoring in East Asia の Quality Assurance / Quality Control Program** に従いチェックを行った。

(3) 渓流水質多点調査

鹿北流域試験地周辺において、異なる地質の流域を含む**22**地点で、**2007年7月**の梅雨期と同年**8月**の乾燥期に渓流水を採取して溶存成分濃度を測定し、基盤地質の違いに着目して解析した。

ウ 結果

(1) 林外雨・渓流水の水質の変動

観測期間を通じて、pHは**4.23～7.26**、ECは**0.42～8.77 mSm^{-1}** の範囲で変動した（図**2.7.1**）。降雨毎の変動が大きく、経年変動として一定の傾向は認められなかった。pHのほとんどは**7**以下の酸性を示したが、**2008年**の一回（**3月5日**採取）のみ、pH**7.26**でアルカリ性を示した。この時のECは、**8.77 mSm^{-1}** で期間中の最大値であった。溶存成分濃度の変動を見ると、降雨毎の変動が大きく、全体的に採水量が多い時は溶存イオン濃度が低い傾向が認められた。Ca濃度が、**2006後半～2007年前半**にかけて高い傾向が認められた。また、ECの最大値を示した**2008年**の雨もCa濃度が著しく高かった。この時、陰イオンでは SO_4 、 NO_3 、 HCO_3 濃度が高かった（図**2.7.2**）。

渓流水のpHは**6.60～7.49**、ECは**2.87～5.05 mSm^{-1}** の範囲で変動した（図**2.7.3**）。毎年梅雨末期から夏期の採取時流量が大きい時期にpH、ECとも低下する傾向が認められた。**2007年**は、採水時の流量の変位が小さく、pH、ECの変動も小さかった。pH、ECに経年変動として一定の傾向は認められなかった。溶存成分濃度の変動を見ると、夏期のpH、EC低下時に、Ca、Na、Mg濃度が低下する傾向が認められた。また同様に、 HCO_3 、Si濃度も低下する傾向が認められた。一方、 NO_3 濃度は、採取時流量が大きい時に高い傾向が認められた（図**2.7.3**）。

(2) 年々の水・物質収支の変動

鹿北流域試験地における主要な溶存物質の流入量は、必ずしも降水量に比例しておらず、Na、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Clは、降水量が最も少ない**2005年**の年間流入量が最も大きかった（図**2.7.4**の上段）。一方、Ca、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{SO}_4\text{-S}$ は、降水量が最も多かった**2006年**の流入量が最も大きくなっており（図**2.7.4**の下段）、溶存物質の種類によって降水量との対応関係が異なっていた。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の流入量は $\text{NO}_3\text{-N}$ の流入量と同等かやや多い傾向を示した。

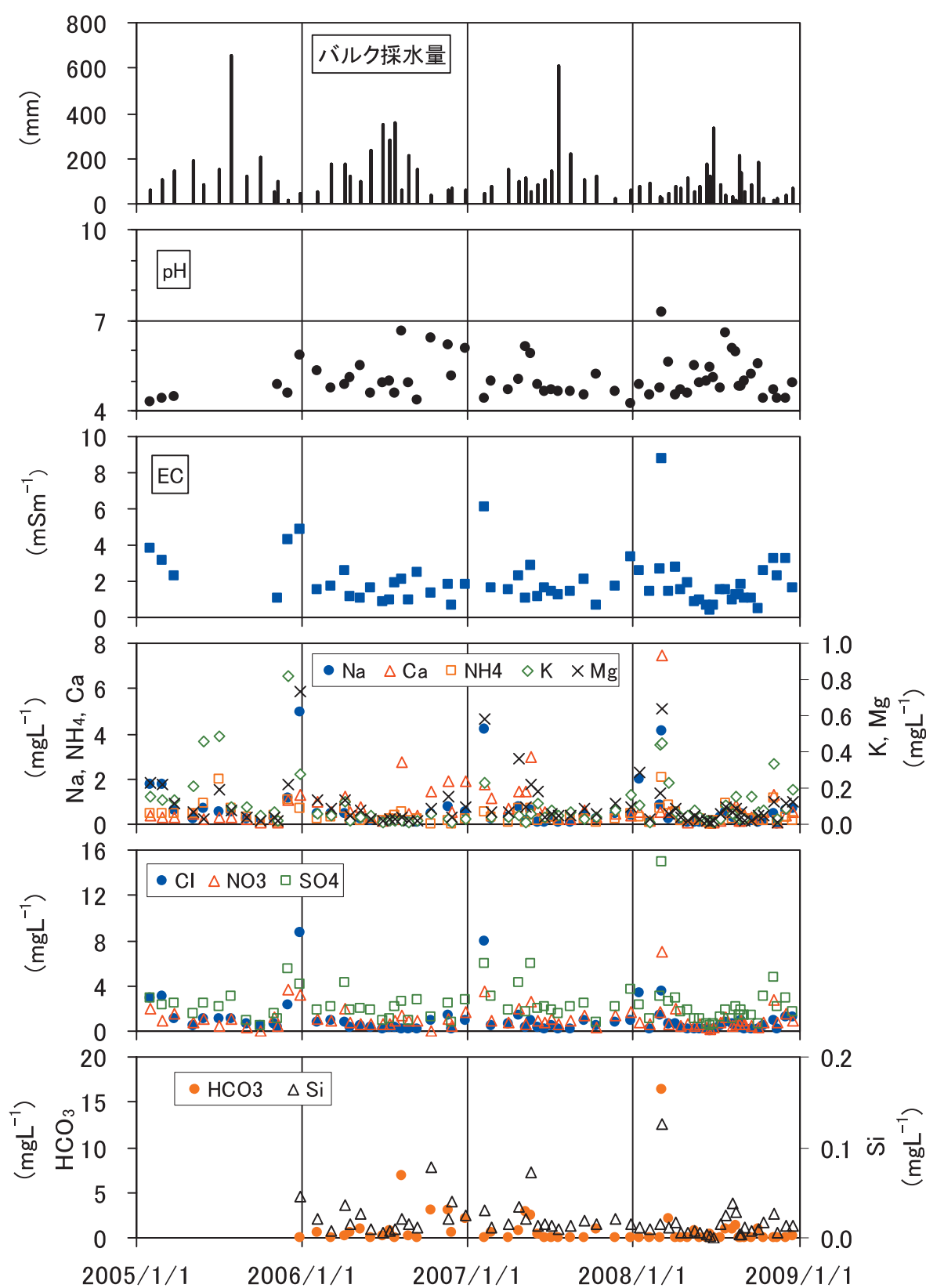


図 2.7.2 鹿北流域試験地の林外雨量および水質の観測結果

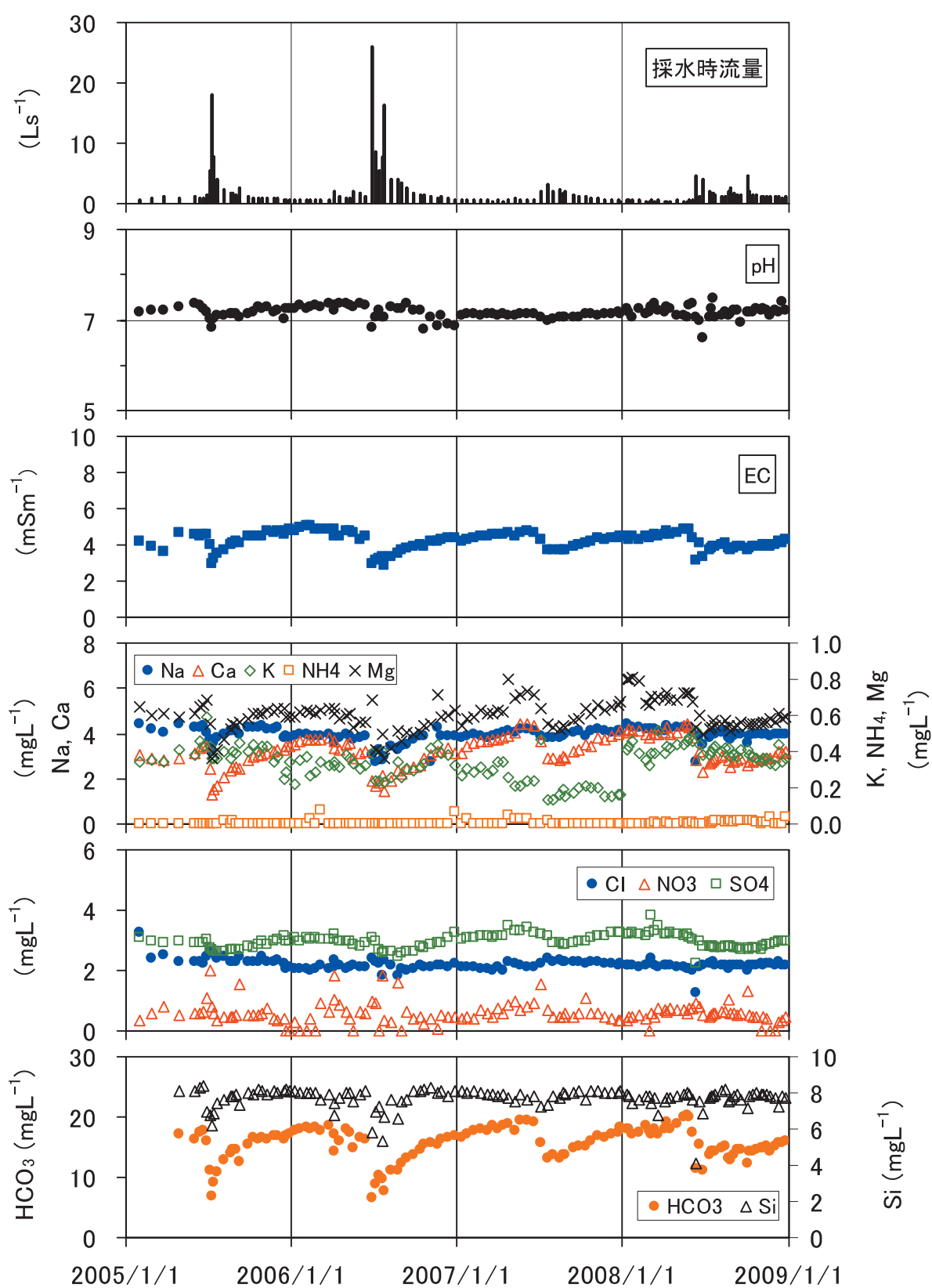


図 2.7.3 鹿北流域試験地3号沢渓流水の流出水量および水質の観測結果

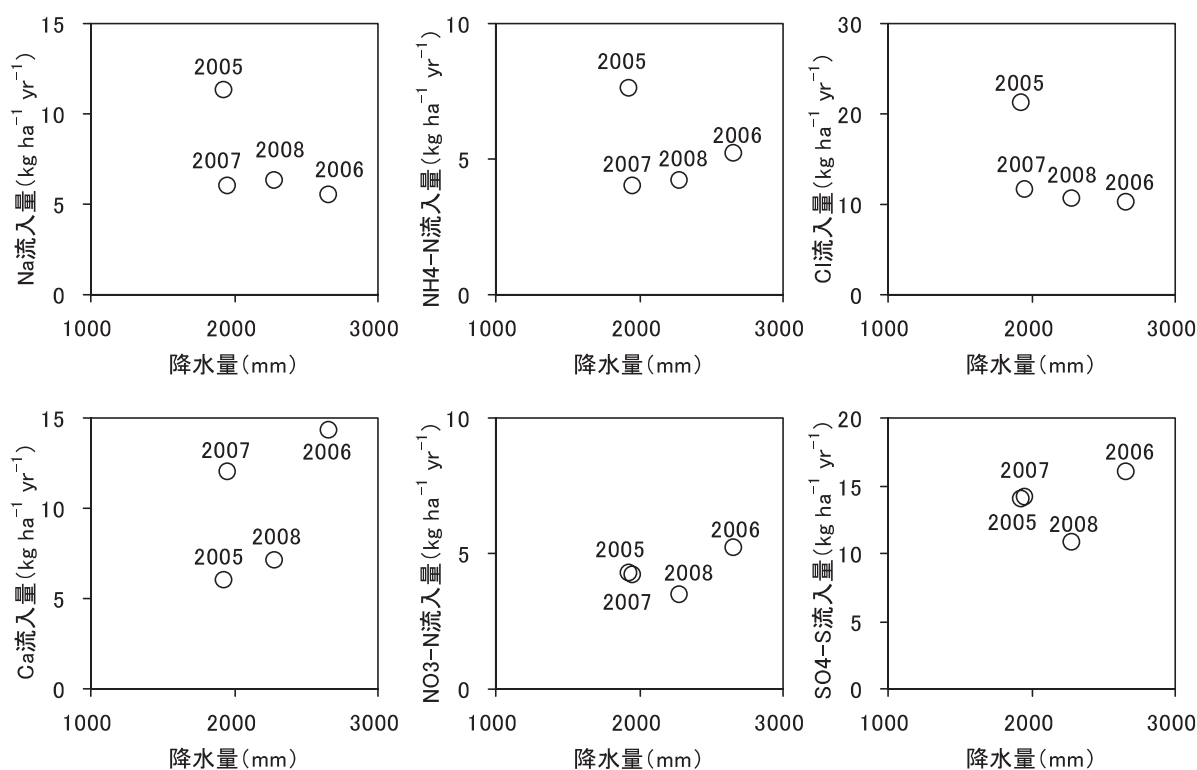


図 2.7.4 鹿北流域試験地における降水量と各種物質の流入量の関係

主要な溶存物質の収支を見ると、N ($\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計) は流入量が $7.7\sim 11.8\text{ kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ に対して流出量が $1.5\sim 2.9\text{ kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ の範囲で変動しており、観測期間を通じてN流出量がN流入量を下回っていた (図2.7.5)。一方、Clは流入量が $10.1\sim 21.3\text{ kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ に対して流出量が $21.0\sim 27.1\text{ kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ の範囲で変動しており、観測期間を通じてCl流出量がCl流入量を上回っていた。また、 $\text{SO}_4\text{-S}$ は流入量が $10.8\sim 16.1\text{ kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ に対して流出量が $10.2\sim 17.4\text{ kg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ の範囲で変動しており、流入量と流出量の差が小さく、ほぼ釣り合っていた (図2.7.5)。

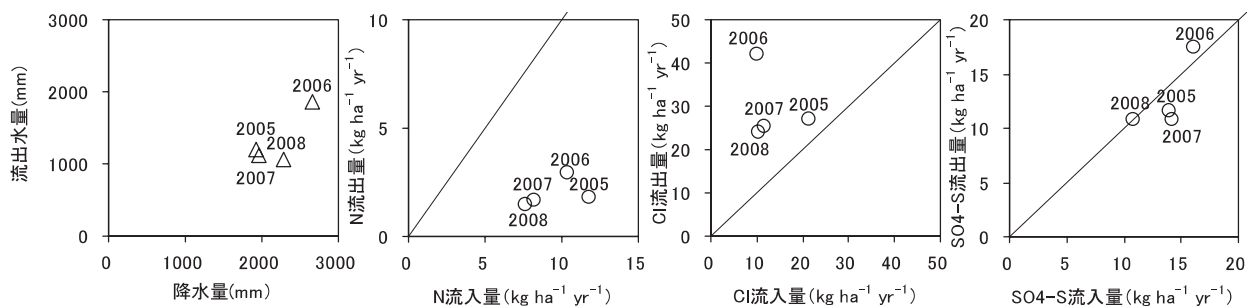


図 2.7.5 鹿北流域試験地3号沢における水および主要な物質の収支

(3) 渓流水質多点調査

鹿北流域試験地（KHK）周辺（図2.7.6）の渓流水のECは、梅雨期よりも乾燥期の方が高い（乾燥期のA4地点は水涸れで欠測）傾向が認められた（図2.7.7）。同様の傾向が、陽イオンではCaとMg、陰イオンではHCO₃に認められた。多点調査の結果を4つの基盤地質ごとに見ると、結晶片岩（KHKおよびS1～7）は流域ごとにpH、EC、溶存成分濃度の変動が大きく、その中で鹿北流域試験地（KHK）はpH、EC、溶存成分濃度が比較的低い流域であった。花崗岩（G1～2）は鹿北流域試験地と同程度のpH、EC、溶存無機イオン濃度であるが、Si濃度の平均値は4つの基盤地質の中で最も高かった。安山岩（A1～10）は、pH、EC、溶存成分濃度（NO₃を除く）の平均値が4つの基盤地質の中で最も低かった。はんれい岩（H1～2）はpH、ECの平均値が4つの基盤地質の中で最も高く、溶存成分では、CaとHCO₃濃度の平均値が最も高かった（図2.7.6）。また、4つの基盤地質に共通して、CaとHCO₃濃度の間に正の相関関係が認められた（図2.7.8）。

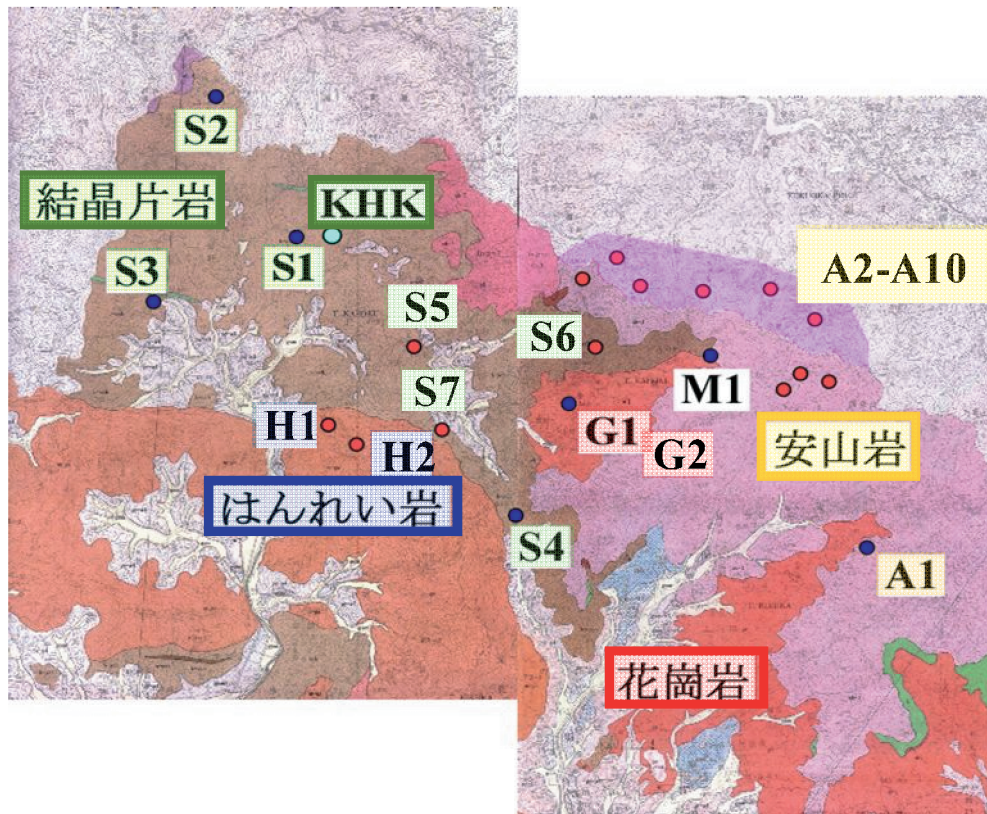


図 2.7.6 鹿北流域試験地周辺の渓流水の採取位置

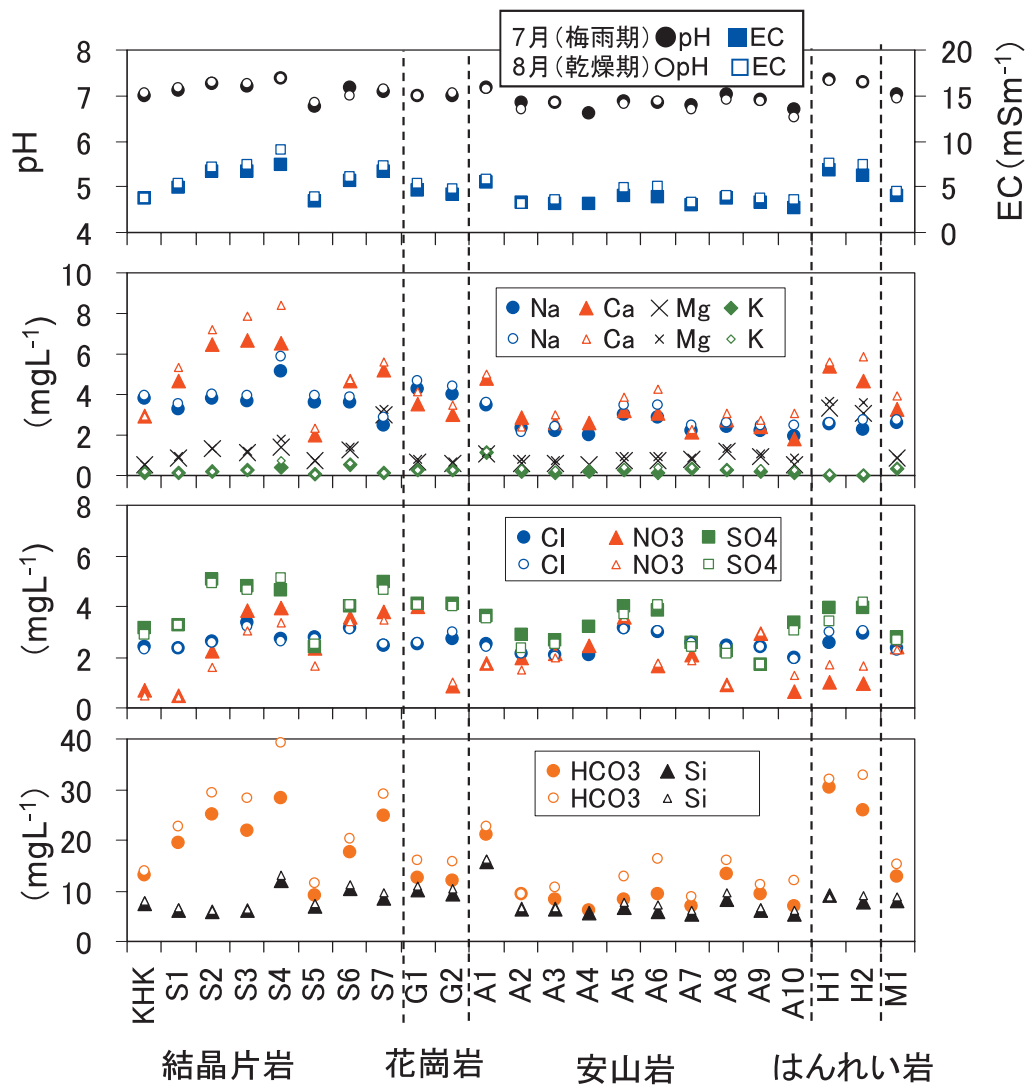


図 2.7.7 鹿北流域試験地（KHK）周辺の渓流水の水質

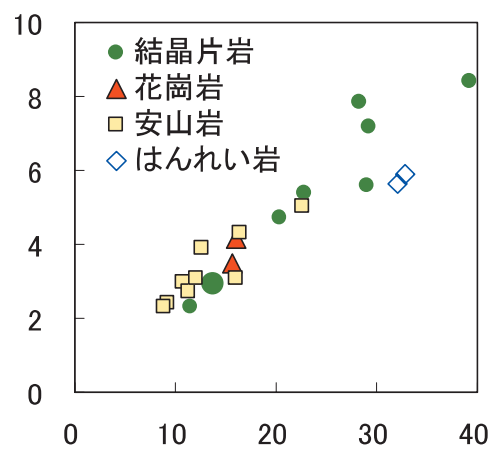


図 2.7.8 鹿北流域試験地（KHK）周辺の渓流水のCaとHCO₃濃度との関係

エ 考察

(1) 鹿北流域試験地における溶存物質の流入量の変動

鹿北流域試験地の降水量と主要な溶存物質の流入量との間には明瞭な関係が認められず、乾性で流入してくる物質の動態も影響していると推察された。観測期間中のN ($\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計)の流入量の平均値は $9.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で、これはわが国の平均N沈着量の $8.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (酸性雨研究センター、1999)に比べて大きかった。また、最小年と最大年では1.5倍変動した。Caの流入量は最小年と最大年では2倍変動しており、Nより変動幅が大きかった。熊本における黄砂観測日数は、多い年順に2006年(25日)、2007年(22日)、2005年(11日)、2008年(3日)となっており(気象庁ホームページ)、Caの流入量が大きかった2006年と2007年は黄砂の観測日数の多い年に対応していた。日本上空に飛来した黄砂粒子中には炭酸カルシウムや硫酸カルシウムの存在が指摘されており、(井上ら、1994)黄砂の影響を強く受けた林外雨が流入した結果として、2006年と2007年のCaや $\text{SO}_4\text{-S}$ の流入量が大きくなった可能性がある。なお、2008年3月5日に採取した林外雨は、Ca、 SO_4 、 HCO_3 濃度が顕著に高く、また、採水期間中の3月3日と4日には熊本で黄砂が観測されており(気象庁ホームページ)、黄砂の影響を強く受けたと推察される。しかし、この時の雨量は24mmと少なく、またこの時以外に黄砂観測日は1日しかなかったため、2008年の年間値としてのCaの流入量は小さかったと推察される。

(2) 鹿北流域試験地の物質収支の特徴

鹿北流域試験地3号沢では、わが国の平均N沈着量を超えるNが平均的に流入しているにもかかわらず、観測期間を通じてN流出量がN流入量を下回っていた。また、渓流水の NO_3 濃度は、年間を通じて 2 mg L^{-1} 以下であり、日本で森林生態系の窒素飽和が認められている他の渓流水の NO_3 濃度の平均値である $6.3 \sim 10.4 \text{ mg L}^{-1}$ (Mitchell et al. 1997)に比べて低い。Nの流入量に対する流出量の割合が最も高かった2006年でもその値は0.28であり、対象試験地の森林生態系ではNは吸収されていることを示している。なお、2006年は、降水量が多いわりにN流入量が少ないことと、流出水量が多いためにN流出量が多いことが重なったために、Nの流出割合が高くなったと推察される。土壌への吸脱着がほぼ無視できるとされるClの収支は、流出量が流入量を上回っており、乾性沈着による流入負荷量が十分評価できていない可能性も考えられる。流出割合が最も高かった2006年は、流入量の4.1倍のClが流出したが、Nの場合と同様、降水量が多いわりにClの流入量が少ないことと、流出水量が多いためにClの流出量が多いことが重なったためと推察される。Sは流入量と流出量の差が小さく、ほぼ釣り合っていると考えられる。Sの吸着能が高いとされる黒色土など火山灰由来の土壌が分布する森林流域ではSの流出量が流入量より小さい事例があるが、結晶片岩母材の鹿北流域試験地は、土壌へのS吸着の影響が小さいと推察される。

(3) 周辺地域の中における鹿北流域試験地の水質の特徴

渓流水多点調査の結果、鹿北流域試験地を含む結晶片岩の流域は、流域毎にpH、EC、溶存成分濃度の変動が大きい特徴を示し、その中でも鹿北流域試験地はpH、EC、溶存成分濃度が低い地点であった。また、8月の各地点のCaと HCO_3 濃度の関係においても、鹿北流域試験地はどちらの濃度も低い地点に位置付けられた。一般的に、Caと HCO_3 は岩石の風化にともなって溶出し、土壌水の滞留時間が長いほどその濃度が上昇する傾向がある。したがって、鹿北流域試験地は、同一地質の中では比較的滞留時間の短い水が流出している流域であると推察される。

オ 今後の問題点

Cl収支から、乾性沈着による流入量が十分評価できていない可能性も考えられるため、乾性沈着の測定手法を検討する必要がある。本研究では、月2回程度の採水データで作成したL・Q式から流出負荷量算出したが、降雨時の採水データが少なく、降雨時のN流出量の評価が不十分な可能性がある。今後、降雨時の溪流水の連続採水のデータを用いて、降雨時のL・Q式の妥当性を評価する必要がある。

カ 要約

鹿北流域試験地の、観測期間中のN(NH₄-NとNO₃-Nの合計)の流入量の平均値は9.5 kg ha⁻¹ yr⁻¹で、わが国の平均N沈着量の8.0 kg ha⁻¹ yr⁻¹に比べて大きかった。Caの流入量が大きかった2006年と2007年は黄砂の観測日数の多い年に対応しており、黄砂の影響を受けた林外雨が流入した結果として、2006年と2007年のCaやSO₄-Sの流入量が大きくなった可能性がある。観測期間を通じてN流出量がN流入量を下回っており、対象試験地の森林生態系ではNは吸収されていることを示している。溪流水多点調査の結果、鹿北流域試験地を含む結晶片岩の流域は、流域毎にpH、EC、溶存成分濃度の変動が大きい特徴を示し、その中でも鹿北流域試験地はpH、EC、溶存成分濃度が低い地点であった。また、鹿北流域試験地のCa、HCO₃濃度はどちらも低く、同一地質の中では比較的滞留時間の短い水が流出している流域であると推察される。

引用文献

井上克弘・張一飛・成瀬敏郎(1994) 東アジア中緯度域における雨水の水質に及ぼす広域風成塵の影響, 土肥誌, 65, 619-628.

Mitchell M.J., Iwatsubo G., Ohnui, K., Nakagawa Y. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation, Forest Ecology and Management, 97, 39-51.

酸性雨研究センター(1999) 環境省第3次酸性雨対策調査データ集, <http://www.adroc.gr.jp>, 環境庁(現 環境省)

(釣田竜也)

「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものである。

この冊子は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集」として刊行するものである。

ISSN 1349-0605

森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集 24

「森林流域の水質モニタリングとフラックスの広域評価」

発 行 日 平成22年3月18日

編 集・発 行 独立行政法人 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

電話. 029-873-3211 (代表)

印 刷 所 株式会社 大塚カラー

〒312-0032 茨城県ひたちなか市津田2031-113

TEL 029(273)1221(代) FAX 029(274)1046

