

論文 (Original article)

四万十川源流域の渓流水質の特徴 — 1999年から2000年にかけて実施した調査結果 —

吉永 秀一郎^{1)*}、山田 毅²⁾、稲垣 善之³⁾、三浦 覚⁴⁾、篠宮 佳樹⁴⁾

要旨

四万十川の平水時の清流環境に対する源流域の渓流水質の寄与を評価するために、広見川流域を除く源流域において夏季(92流域)と冬季(104流域)の渓流水の溶存成分濃度を測定した。溶存成分組成は地質の違いによる影響を受け、調査流域の大半を占める四万十帯流域ならびに秩父帯流域に対して、四万十帯石灰岩流域と秩父帯石灰岩流域は特異的にpH、ECが高く、Ca²⁺、HCO₃⁻濃度が高い傾向を示した。また、花崗岩が分布する流域はpH、ECが低く、溶存成分濃度が全体として低い傾向を示した。Na⁺、Cl⁻濃度は太平洋岸からの距離が大きいほど低い傾向を示し、海塩起源であることが推察された。Si、K⁺濃度は夏季の方が高く、Na⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻-N、全窒素(T-N)濃度は冬季の方が高い値を示した。夏季と冬季の溶存成分濃度の違いは、風化による岩石からの溶出と、降水の季節変動等に支配された各溶存成分の濃縮・希釈の影響によると考えられた。これらの源流域におけるT-N濃度は、高知県が制定した四万十川清流基準の基準値である0.3 mg L⁻¹以下の流域が多く、平均T-N濃度も夏季に0.17 mg L⁻¹、冬季に0.26 mg L⁻¹であった。このことから平水時の四万十川の清流環境の維持に森林流域からの渓流水が寄与していることが示唆された。

キーワード：四万十川、森林流域、渓流水質、T-N濃度、清流基準

1. はじめに

森林が有する水源涵養機能に対する期待は土砂災害防止・土壌保全機能、地球温暖化防止機能などに対する期待と並んで高い(農林水産省大臣官房統計部 2015)。水源涵養機能としては洪水緩和や水資源貯留への期待とともに、水質保全、すなわち森林から安定的に清浄な渓流水が供給されることへの期待も大きい。近年、森林から流出する渓流水の水質に関する広域的な評価も多々行われている(広瀬ら 1988, 仲川ら 1995, 戸田ら 2000, Shibata et al. 2001, 木平ら 2006 など)。

日本最後の清流といわれる四万十川は、高知県西部の不入山の中腹を源流点とし、高知県西部と一部愛媛県西部を流域として土佐湾に注ぐ全長 196 km、流域面積 2,270 km²の河川である。豪雨時には濁流となるものの、平水時には透明度の高い清澄な流れであり、人と河川との豊かなふれあいが確保されてきた。流域の森林面積率は85%以上に達し、また、流域人口が少ないため人口密度も1 km²あたり50人以下と低く、顕著な汚染点源は認められない。このような要因によって清流環境が維持されてきたと考えられており、環境省による名水百選にも選

定された。

しかし、比較的晴天が続く水質が安定している平水時の流況において実施される全国一級河川の水質現況によれば、四万十川の水質が際立って良いわけではない(国土交通省四国地方整備局 2017)。これは測定点が生活排水や農業排水などの影響の強い下流域に限られていることによる。また、中流域の四万十町窪川付近でも生活排水や農業排水によって支流の仁井田川、吉見川の水質汚濁が進行し、四万十川本流の水質にも影響を与えていることが古くから指摘されている(今井・北条 1989)。これらの状況を踏まえ、高知県は平成13年3月に「高知県四万十川の保全及び流域の振興に関する基本条例(略称：四万十川条例)」を制定し、市町村、住民とともに四万十川の清流を守るための取り組みを開始した。この中で、清流を守るための目安として清流基準を提示し(高知県文化環境部文化振興課 2005)、水質汚濁に係る環境基準(環境庁 1971)で定められた項目に、水の透明性を示す清流度、水生生物の出現状況、全窒素(T-N)濃度ならびに全リン(T-P)濃度を独自の項目として加え、平成14年度より本流に沿った4地点と主な支流が本流に合流する前

原稿受付：令和2年8月18日 原稿受理：令和3年2月1日

1) 森林総合研究所 多摩森林科学園

2) 森林総合研究所 立地環境研究領域

3) 森林総合研究所 四国支所

4) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

* 森林総合研究所 多摩森林科学園 〒193-0843 東京都八王子市廿里町 1833-81

の8地点において、平水の状態の日に年4回もしくは3回の頻度で定期的に測定してきた。T-N濃度、T-P濃度の基準値は農地や市街地の影響の強い3地点を除くとそれぞれ 0.3 mg L^{-1} 以下、 0.01 mg L^{-1} 以下とされた。しかし、T-N濃度については平成24年度までの11年間で継続して基準値を下回ったのは本流では中流部の1地点(四万十町、大正観測所)、支流では農地や市街地の影響が少ない2地点(栲原川:四万十町・田野々大橋、黒尊川:四万十市・四万十川合流前)だけであった(高知県林業振興・環境部環境共生課2014)。このことは、清流基準における支流の調査地点でも流域面積が大きいために、流域内における人為的な負荷の影響が強くと現れていることを示唆する。このように本流ならびに主な支流における水質指標についての知見は蓄積されつつあるものの、人為的な負荷の影響がより少ないことが期待される、流域の大半を占める源流域における水質の実態についての知見は未だ乏しい。また、清流基準などで取り上げられた水質指標を検討する上でも基礎的な情報となる溶存無機成分組成についての調査、解析自体も限られている(広瀬ら1988, 森貞・平井1996, 藤本ら1998など)。

四国支所では主査として平成11年度から14年度にかけて環境省国立機関公害等防止試験研究費による「四万十川における環境保全型農林水産業による清流の保全に関

する研究」を四国農業試験場、高知大学とともに実施した。この研究の遂行にあたり、四万十川流域源流部の大半を占める森林流域における平水時の渓流水質の実態とその溶存成分組成に影響を与える要因を把握するために、平成11年度に多点調査を実施した。本稿ではこの調査結果に基づき、最初に四万十川源流域における渓流水の溶存無機成分組成の特性に影響を与える要因を明らかにする。さらに、これらの源流域における渓流水中のT-N濃度の実態を明らかにし、本流ならびに主な支流においてモニタリングされてきた清流基準におけるT-N濃度と比較することで、源流域の渓流水による四万十川の清流環境への寄与について評価する。なお、本調査・分析自体は約20年前に実施したが、その後、四万十川流域の水質の状況を広域的に概観するような結果が稲垣ら(2007)による17地点以外には示されていないことから、流域環境の変化やそれにとまなう水質の変化を解析する上で基礎的な資料として提示する。

2. 研究手法

1) 調査流域の選定と分析試料の採取

本研究では四万十川流域の内、流域の大半が愛媛県に属する広見川流域を除く主として高知県内(1,870 km²)を調査の対象とした(Fig.1)。調査地域は高知県内が大半を

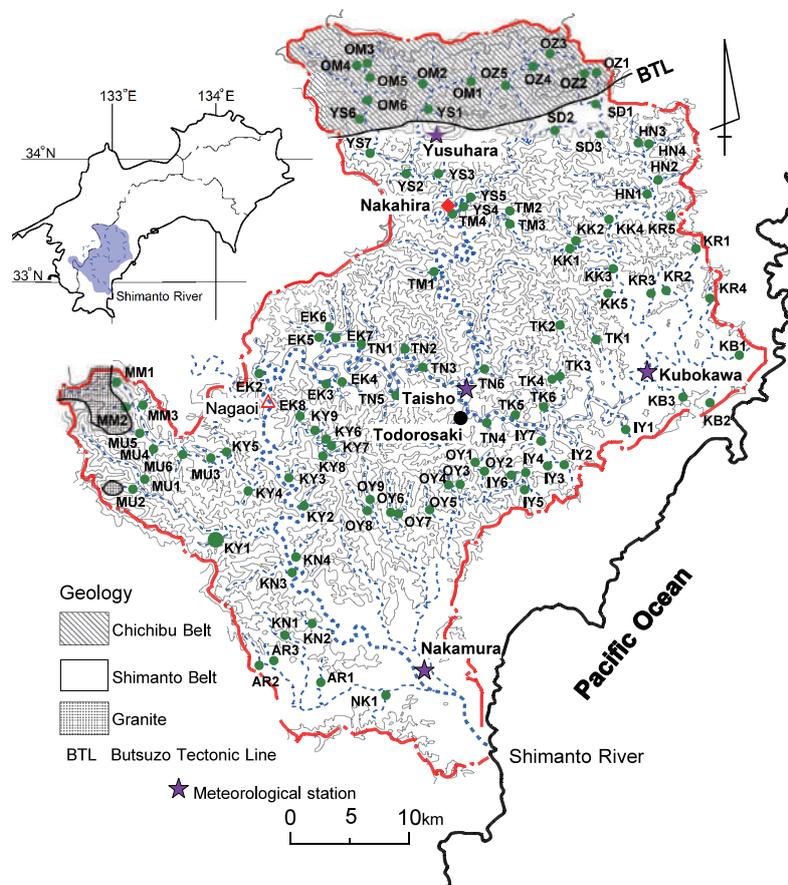


Fig. 1. 調査地域の地質構造ならびに採水地点

Distribution of major geologic groups in the study area and locations of stream water sampling point.

占め、四万十市(旧・中村市、西土佐村)、四万十町(旧・十和村、大正町、窪川町)、中土佐町の一部(旧・大野見村)、津野町の一部(旧・東津野村)、梶原町に跨がるが、支流の目黒川の源流部に愛媛県松野町と宇和島市の一部も含まれる。調査地域の北縁には 1000m 以上の峰が連なる四国山地西部が広がり、調査地域内の最高峰は天狗高原(1485 m)である。

調査地域は降水特性から 6 月から 10 月初頭にかけて梅雨と秋雨、それに加えて台風による多量の降水で特徴付けられる西南太平洋型(草薙 2006)の気候区に含まれる。年平均気温と年降水量の平年値は、河口近くの中村観測所(四万十市)では 16.3℃、2669 mm、中流域の窪川観測所(四万十町)では 14.8℃、3089 mm、上流域の梶原観測所(梶原町)では 13.3℃、2550 mm であった(気象庁 2018)。また、中流域の大正観測所(四万十町)では年降水量のみの観測であり、平年値は 2704mm であった。なお、上記 4 観測所では梶原を除き降雪はほとんど観測されず、積雪は四国山地の高標高地に限られる。また、上記 4 観測所では冬季でも同調して降水が認められることが多く、冬季でも北西季節風による降水ではなく、低気圧の通過に伴う前線性の降水が主体である。

広域的な渓流水質の評価を行うために、源流域から約 100 以上の流域を分布の偏りが無く、かつ広い流域面積を覆うように選定した。しかし、後述するように夏季の調査では 92 流域しか採取できず、特に調査地域中部に未調査の地点が集中した。そこで、冬季には中部から北部にかけて 12 流域を調査対象に加え、104 流域で試料を採取した。なお、四国山地では奥地であっても人家が点在し、小規模な耕作地も認められることが多い。そのため、採水地点はそより上流には大規模な農地や牧草地ならびに大きな集落が分布しない場所を選定した。1999 年当時の国土地理院 2 万 5 千分の 1 地形図で採水地点よりも上流に人家や耕作地を示す地図記号が認められなかった流域は 39 流域である。高知県内の調査の対象とした各市町村の人工林率は約 70% と高いため、各流域の林相については区別していない。

試料は降水の季節変化や植物のフェノロジーなどを考慮して、夏季(1999 年 7 月 14 ~ 16 日)と冬季(2000 年 1 月 11 ~ 14、20 ~ 21 日)に、平水時の流水を 250 mL 容のポリビンにて採取した。中村、窪川、大正、梶原における 1999 年 4 月から 2000 年 3 月までの日降水量の変化(気象庁 2018)、ならびに大正流量観測所における流量の変化(国土交通省水管理・国土保全局 2002)を Fig.2 に示した。調査日および調査日前の天候は良好であり、流量も平水状態であった。しかし、1 月 13 日に一部の流域において採水時に降雨があり、試料に薄い濁りが認められたため、その試料のデータは棄却し、20 ~ 21 日に試料を再度採取した。最終的に試料を採取した 104 流域の流域面積は最小 0.18 km²、最大 28.20 km²、平均は 6.17 km² であり、10 km² 以下の流域が 84 流域を占める。

また、源流域の渓流水質との比較のために、四万十川本流中流域の長生(四万十市西土佐)、ならびに支流の北川川の中平(梶原町)においても試料を採取した。長生を選定した理由は、約 2 km 下流の江川崎において本流に合流する広見川は上流域に多くの耕作地が分布するため代掻き排水時等農業活動に伴って大量の懸濁粒子を排水し、合流点より下流の水質への負荷が大きいことが指摘されており(藤原ら 2012)、その影響を避けるためである。また、中平は、四万十川最大の支流である梶原川のさらに支流の北川川に位置し、採水地点の約 800m 下流におい

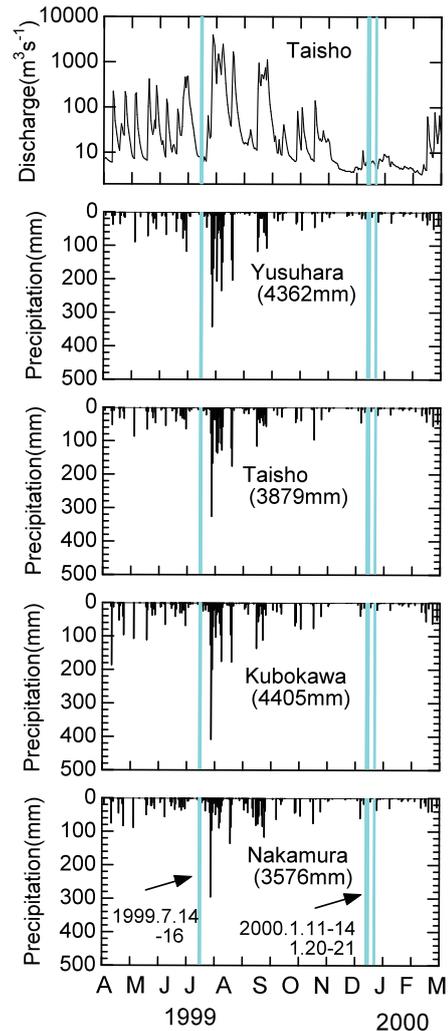


Fig. 2. 中村、窪川、大正、梶原における 1999 年 4 月 1 日から 2000 年 3 月 31 日までの日降水量の変化と大正流量観測所における流量の変化

Variations of daily precipitation from April 1, 1999 to March 31, 2000, at Nakamura, Kubokawa, Taisho, and Yusuhara meteorological stations and discharge at Taisho gaging station.

括弧内の数字は期間内の降水量を示す。また、多点調査の実施日を縦の線で示す。

Enclose values in parentheses show the integrated value of precipitation from April 1, 1999 to March 31, 2000 and light vertical lines show the date of comprehensive surveys.

て栲原川と合流する。さらに 21km 下流の栲原川には津賀ダムが建造されておりその湛水の影響を避けるため、また、合流点よりさらに 8km 上流の栲原川に建造されている初瀬ダムの影響を避けるためである。

さらに、溶存成分組成の季節変動を検討するために、上記の採水地点の中で支流の葛籠川の四万十川との合流より直上流の轟崎(とどろさき・四万十町大正)において、1998 年 4 月から 2000 年 3 月まで概ね月 2 回の頻度で試料を採取した。なお、轟崎は森貞・平井(1996)の地点 14 と同一地点である。

2) 調査地域の地質

調査地域の地質は古くより仏像構造線(BTL)を境として南側に四万十帯、北側に秩父帯の付加体が分布することが知られている(磯崎ら 2010)。20 万分の 1 日本シームレス地質図(産業技術総合研究所地質調査総合センター 2015)によれば、主として四万十帯は砂岩、泥岩を主体とする堆積岩からなる。秩父帯では堆積岩に加えて、玄武岩、泥質片岩等が分布する。また、北西部の一部に花崗岩が分布する。そこで、調査流域の地質として四万十帯(以下、四万十帯流域)、秩父帯(以下、秩父帯流域)、花崗岩類(以下、花崗岩流域)に大別した(Fig.1)。なお、北縁の天狗高原などの四国山地には秩父帯に属する石灰岩が東西方向に連続して分布する。また、四万十帯においても局所的に石灰岩が分布する。石灰岩が流域内に分布する場合には、特異的に pH、EC が高く、Ca²⁺ 濃度や HCO₃⁻ 濃度が高くなる(吉村・井倉 1998)。そのため、石灰岩が流域内に分布していることが 20 万分の 1 日本シームレス地質図において図示されている流域は秩父帯石灰岩流域、四万十帯石灰岩流域として区別した。調査流域の数は四万十帯流域 73 (冬季は 84)、四万十帯石灰岩流域 2、秩父帯流域 6 (冬季は 7)、秩父帯石灰岩流域 7、花崗岩流域 4 である。各調査流域を構成する地質、流域面積、採水地点の緯度経度、標高、流域内の最高地点の標高を Appendix Table 1 に示した。

3) 水質分析

現地で採取した試料は保冷庫に入れて実験室に持ち帰り、pH をガラス電極法(TOA DKK HM-26S)、電気伝導度(EC)を電気伝導度計(TOA DKK CM-40V)により測定した。また、0.45 μm のメンブランフィルターに通した試料について、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 濃度をイオンクロマトグラフ法(横河アナリティカルシステムズ IC7000D)により、Ca²⁺、Mg²⁺、Si 濃度を ICP 発光分光法(Perkin Elmer Optima 3000 XL-S)により測定した。T-N 濃度はペルオキソ二硫酸カリウムによる分解後、紫外線吸光度法(日本分光 Ubest V-560DS-AR)で分析した(長田 1997)。HCO₃⁻ 濃度は 0.01 M-H₂SO₄ による滴定法で測定した pH 4.8 アルカリ度から推定した(半谷・小倉 1995)。

4) 分析結果の精度の検証

分析結果については、陽イオン当量濃度の合計(C)と

陰イオン当量濃度の合計(A)の比較(R1)、ならびに EC の測定値(ECObs)と当量伝導率による EC の計算値(ECcalc)の比較(R2)を以下に示す(1)式と(2)式に従い検証した(EANET 2000)。

$$R1 (\%) = 100 \times (C-A) / (C+A) \quad (1)$$

$$R2 (\%) = 100 \times (ECcalc - ECobs) / (ECcalc + ECobs) \quad (2)$$

5) 統計解析

夏季と冬季の試験流域間の pH、EC、溶存無機成分濃度を対応のある 2 群間の t 検定により解析した。また、各溶存無機成分濃度間の相関ならびに溶存無機成分濃度と海からの距離の関係を Pearson の相関係数により解析した。解析には JMP 9.0.0 (SAS Institute Japan 株式会社)を用いた。

3. 結果

1) 調査流域の各溶存成分濃度の結果と検証

夏季の 92 流域ならびに長生、中平の分析結果を Appendix Table 2 に、冬季の 104 流域ならびに長生、中平の分析結果を Appendix Table 3 に示した。

本調査で分析した各溶存成分濃度についての R1 と R2 の値もそれぞれ Appendix Table 2、3 に示した。R1 については、夏季の 3 流域、冬季の 27 流域で基準の ± 8% を超える分析値が認められた。一方、R2 については、すべての分析値が基準の ± 9% 以内となっていた。C と A ならびに ECcalc と ECobs の関係をそれぞれ Fig. 3.A と Fig. 3.B に示した。C と A に関しては A の方が高い傾向が、ECcalc と ECobs に関しては ECcalc が高い傾向が認められたが、1:1 の直線から大きく離れた値は認められなかった。R1 について基準値を超える流域はあるものの、R2 では基準値以下であることから、以下の解析では分析値をそのまま用いることとした。

2) 地質による各溶存成分濃度の違い

夏季と冬季に試料を採取した 92 流域の pH、EC、各溶存成分濃度の平均値と括弧書きで標準偏差を Table 1 に示した。冬季については 104 流域の平均値と括弧書きで標準偏差も示した。また、5 区分した各地質の流域における夏季と冬季の平均値を Table 2 に示した。なお、調査流域の大半を四万十帯が占め、四万十帯石灰岩、秩父帯、秩父帯石灰岩、花崗岩は流域数が少ないために、各地質の流域を個々に比較するための統計的な解析は行っていない。全体としてみれば、本調査地域における各流域の溶存無機成分は、陽イオンでは Ca²⁺ と Na⁺ が、陰イオンでは HCO₃⁻ が主体を占めていた。

流域の大半を占める四万十帯流域と比較すると花崗岩流域は pH、EC が低く、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Si、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 濃度が低い (Table 2)。四万十帯石灰岩流域では pH、EC が高く、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 濃度が高く、Si 濃度がやや低い値を示した。秩父帯流域は四万十帯流域と比較すると EC がやや低く、Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、Si 濃度が低い値を示した。秩父帯

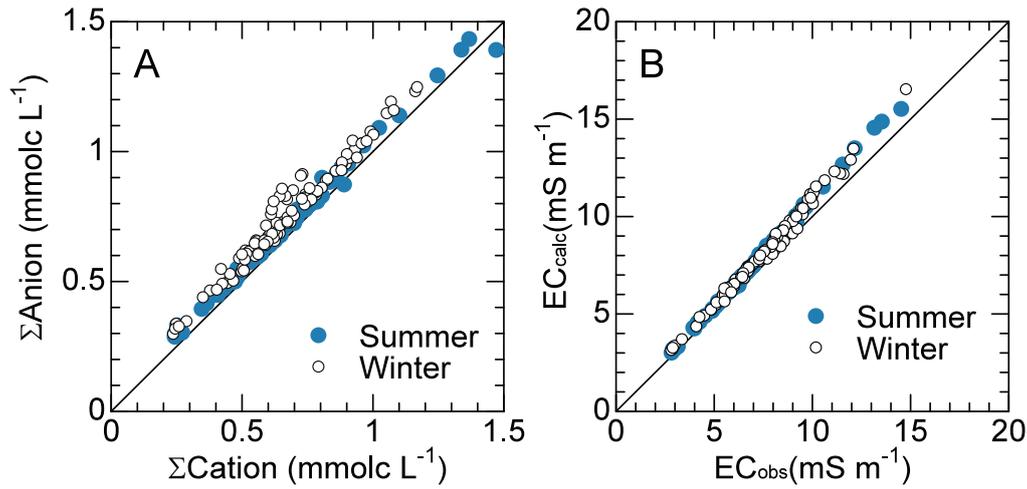


Fig. 3. EANET (2000) に基づく水質分析結果の精度検証・管理

Results of Quality Assurance/Quality Control (QA/QC) Program proposed by EANET (2000)

A: 陽イオン当量濃度の合計 (C) と陰イオン当量濃度の合計 (A) との関係

B: EC 測定値 (EC_obs) と当量伝導率による EC 計算値 (EC_calc) との比較

A: Relationship between total anion (A) of equivalent concentration and total cation (C) equivalent concentration and B: Comparison between observations (EC_obs) and calculations (EC_calc) in

electrical conductivity

Table 1. 夏季と冬季の多点調査における pH、EC、溶存無機成分濃度の平均値、および四万十川流域における既往研究の平均値

Arithmetic mean of pH, EC and solute concentrations of stream water collected in summer and winter in this study and mean concentrations of pH, EC and solute concentrations reported in previous studies in the Shimanto River basin.

	採水地点	地点数	採取年月 (回数)	pH	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻	Si	HCO ₃ ⁻	T-N
						mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹						
本研究	上流域	92	1999.7	(1) 7.46 (0.25)	7.27** (2.22)	4.64** (1.10)	0.59** (0.22)	7.35* (3.96)	1.17 (0.49)	3.28 (0.83)	0.15** (0.06)	6.48** (2.47)	6.59** (1.05)	29.69 (12.52)	0.16** (0.08)
本研究	上流域	92	2000.1	(1) 7.46 (0.25)	7.44** (2.20)	4.81** (1.17)	0.47** (0.14)	7.13* (3.58)	1.19 (0.51)	3.29 (0.78)	0.24** (0.08)	7.51** (2.79)	5.22** (0.95)	29.95 (11.45)	0.26** (0.10)
		104		(1) 7.47 (0.24)	7.53 (2.16)	4.82 (1.12)	0.47 (0.13)	7.30 (3.53)	1.20 (0.49)	3.28 (0.74)	0.24 (0.08)	7.66 (2.81)	5.22 (0.93)	30.30 (11.18)	0.26 (0.11)
今井・北条 (1989)	本流・主要支流	35	1985.11	(1) 7.1 (6.3 - 7.9)											0.47 (0.02 - 3.83)
堀内・山崎 (1998)	本流・主要支流	11	1998.9	(1) 7.89 (7.4 - 8.4)	10.21 (5.78 - 16.1)										0.34 (0.12 - 1.22)
堀内・山崎 (1998)	本流・主要支流	11	1999.3	(1) 7.62 (6.8 - 8.7)	10.56 (6.05 - 15.31)										0.81 (0.18 - 2.9)
小林 (1961)	下流域 具同	1	1958-59	(6) 7.1		4.6	0.87	7.8	1.3	2.6	0.16	5.1	5.47	30.7	
今井・北条 (1989)	下流域 具同	1	1986, 1988	(3) 7.97	4.89	1.34	8.67	2.01	10.39			8.84	23.5		
堀内ほか (1990)	湧水 櫛原	1990.11	(1) 8.1	14.4	1.5	0.22	32.76	0.4	3.8	0.46	5.1	1.64	79.1		
堀内ほか (1990)	湧水 大野見	1990.11	(1) 7.5	6.6	4.9	0.47	4.33	1.34	4.0	0.05	4.5	5.8	22.1		
堀内ほか (1990)	湧水 中津川	1990.11	(1) 7.5	4.9	4.5	0.62	3.1	0.65	4.7	0.02	4.8	7.43	14.4		
森貞・平井 (1996)	中流域 轟崎	1	1994	(12) 7.31	5.9	4.08	0.57	5.41	0.88	2.5	0.16	6.09			
広瀬ほか (1988)	上流域 松葉川	1	1987-88	(11) 6.78	6.44	4.22	0.85	4.18	1.22	1.85	0.01	11.46			
広瀬ほか (1988)	上流域 米の川	1	1987-88	(11) 6.81	5.99	4.07	0.94	3.59	1.18	2.18	0.13	8.31			
藤本ほか (1998)	上流域 川井	1	1997-98	(41) 6.67	7.01	4.51	0.65	9.09	1.00	3.24	0.29	5.57			
稲垣ほか (2007)	上流域*	20	2006.6	(1) 7.5	5.8	3.88	0.42	4.86	0.98	2.98	0.06	4.12	6.72		
稲垣ほか (2007)	本流*	18	2006.6	(1) 7.8	6.6	3.08	0.38	7.26	0.99	2.56	0.16	3.57	5.50		
稲垣ほか (2007)	上流域*	20	2006.9	(1) 7.6	6.3	4.17	0.44	5.50	1.10	2.87	0.09	4.27	6.74		
稲垣ほか (2007)	本流*	18	2006.9	(1) 8	7.1	3.31	0.41	8.17	1.03	2.55	0.16	3.69	5.23		

*、** は夏季と冬季で $p < 0.05$ 、あるいは $p < 0.001$ の有意差があることを示す

本研究の平均値の括弧は標準偏差を示す

四万十川流域における既往研究のうち、稲垣ほか (2007) の値は四万十川流域以外の高知県内の結果を森林流域では 3 地点、本流では 6 地点含む。

Significant level : * $p < 0.05$, ** $p < 0.001$

Enclose values in parentheses in this study show standard deviations.

Result of the previous studies by Inagaki et al. (2007) included the data obtained from other river basins in Kochi Prefecture.

石灰岩流域は四万十帯流域と比較すると pH、EC が高く、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度が高く、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、Si 濃度が低い値を示した。 NO_3^- -N、T-N 濃度については地質による顕著な差は認められなかった。 NH_4^+ -N 濃度は最大でも 0.02 mg L^{-1} であり、ほとんどの流域で検出されなかった。 NO_2^- はすべての流域で検出されなかった。

Ca^{2+} 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係には二つの傾向が認められ、四万十帯流域ならびに四万十帯石灰岩流域は、秩父帯流域ならびに秩父帯石灰岩流域と比べて Ca^{2+} 濃度に対する SO_4^{2-} 濃度が相対的に高い傾向を示した (Fig. 4)。秩父帯石灰岩流域と四万十帯石灰岩流域はともに Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度が高いという共通の特徴を示すが、 SO_4^{2-} 濃度には差が認められた。四万十帯流域の中でも秩父帯流域における Ca^{2+} 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係に類似した流域も数流域認められるが、これらの流域は四万十帯の中でも

北縁の秩父帯に近い地域に分布していた。

四万十帯流域と四万十帯石灰岩流域を合わせた Na^+ 濃度の平均値は夏季 5.04 mg L^{-1} (75 流域)、冬季 5.20 mg L^{-1} (86 流域) であり、秩父帯流域、秩父帯石灰岩流域、花崗岩流域を合わせた Na^+ 濃度の平均値である夏季 2.90 mg L^{-1} (17 流域)、冬季 3.03 mg L^{-1} (18 流域) と比べて夏季冬季共に有意に高い値を示した (共に $p < 0.001$)。一方 Cl^- 濃度は秩父帯流域と秩父帯石灰岩流域に比べて花崗岩流域、四万十帯流域、四万十帯石灰岩流域は高い値を示した。 Cl^- 濃度と各採水地点における土佐湾もしくは豊後水道までの距離と間には夏季も冬季も弱い負の相関が有意に認められた (Fig. 5, $p < 0.001$)。

全流域における Na^+ 濃度と Cl^- 濃度との関係は、平均的な海水の Na/Cl 重量比を示す

$$\text{Na}^+ = 0.556 \times \text{Cl}^- \quad (3)$$

Table 2. 各地質の流域における夏季と冬季の溶存無機成分濃度の平均値

Arithmetic mean solute concentrations in stream water collected in summer and winter among the watersheds classified by geologic groups.

採水時期	地質	流域数	pH	EC mS m^{-1}	Na^+ mg L^{-1}	K^+ mg L^{-1}	Mg^{2+} mg L^{-1}	Ca^{2+} mg L^{-1}	Cl^- mg L^{-1}	NO_3^- -N mg L^{-1}	SO_4^{2-} mg L^{-1}	Si mg L^{-1}	HCO_3^- mg L^{-1}	T-N mg L^{-1}
1999.7	四万十帯	73	7.44	7.21	5.00	0.63	1.16	6.82	3.44	0.14	6.97	6.95	28.14	0.16
2000.1	四万十帯	84	7.46	7.54	5.16	0.50	1.19	6.93	3.42	0.23	8.17	5.49	29.19	0.26
1999.7	四万十帯石灰岩	2	7.66	10.36	6.29	1.07	2.15	10.05	3.91	0.13	11.99	5.99	40.01	0.19
2000.1	四万十帯石灰岩	2	7.69	11.08	6.84	0.74	2.45	10.85	3.76	0.38	13.05	4.77	44.35	0.40
1999.7	花崗岩	4	6.95	3.59	3.28	0.30	0.52	2.25	3.53	0.20	3.16	5.08	10.45	0.21
2000.1	花崗岩	4	6.83	3.42	3.13	0.31	0.51	2.03	3.44	0.24	3.32	4.26	10.89	0.32
1999.7	秩父帯	6	7.39	5.35	2.81	0.38	0.95	5.76	2.24	0.19	3.59	5.50	24.94	0.19
2000.1	秩父帯	7	7.44	6.11	3.12	0.34	1.08	6.67	2.41	0.26	4.78	4.32	27.77	0.26
1999.7	秩父帯石灰岩	7	7.86	10.73	2.77	0.32	1.51	16.42	2.16	0.19	4.25	4.84	57.95	0.20
2000.1	秩父帯石灰岩	7	7.90	10.11	2.89	0.25	1.48	14.30	2.28	0.25	5.33	3.65	53.11	0.26

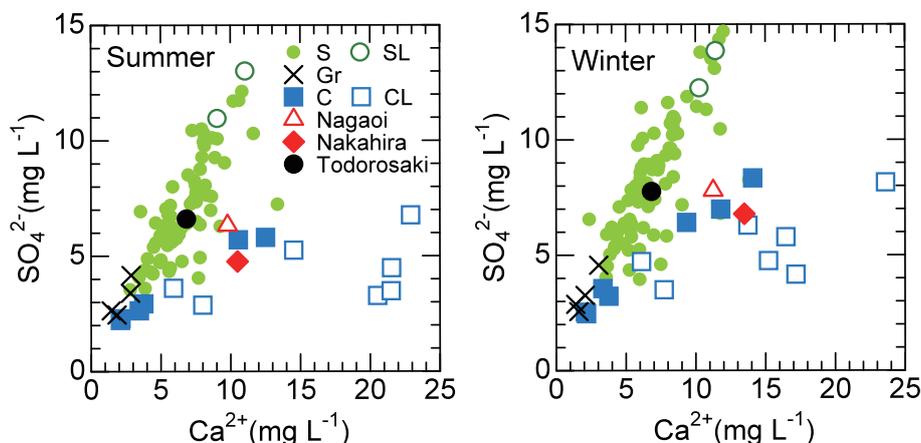


Fig. 4. Ca^{2+} 濃度と SO_4^{2-} 濃度との関係

Relationship between Ca^{2+} and SO_4^{2-} concentrations by geologic groups.

S: 四万十帯流域, SL: 四万十帯石灰岩流域, Gr: 花崗岩流域, C: 秩父帯流域, CL: 秩父帯石灰岩流域
S: Shimanto belt (shale and sandstone), SL: Shimanto belt with limestone, Gr: Granitic rock, C: Chichibu belt (sedimentary rocks, metamorphic rocks, and basalt), and CL: Chichibu belt with limestone.

(3) 式より上位にプロットされる (Fig. 6)。このことは、渓流水中に溶存する Na^+ は、海塩起源の Na^+ に基盤岩石から風化によって溶出した Na^+ が付加されていることを示す。また、四万十帯流域と四万十帯石灰岩流域における Na^+ 濃度と Cl^- 濃度との関係は、秩父帯流域と秩父帯石灰岩流域と花崗岩流域における Na^+ 濃度と Cl^- 濃度との関係よりも上位にプロットされ、秩父帯流域、秩父帯石灰岩流域、花崗岩流域よりも、四万十帯流域、四万十帯石灰岩流域の方が基盤岩石起源の Na^+ が多いことが認められた。

3) 夏季と冬季の各溶存成分濃度の違い

夏季、冬季ともに試料を採取した 92 流域について、夏季と冬季の pH、EC、各溶存成分濃度を比較する (Table 1)。また、個々の地点における各溶存成分濃度の夏季と冬季の比較を長生、中平の値も加えて Fig. 7、8 に示した。

pH は夏季に 6.73 ~ 8.06 (単純平均 7.46)、冬季に 6.55 ~ 8.07 (単純平均 7.46) を示した (Table 1)。EC は夏季に 2.83 ~ 14.53 mS m^{-1} (平均 7.27 mS m^{-1})、冬季に 2.81 ~ 14.77 mS m^{-1} (平均 7.44 mS m^{-1}) の範囲であった。pH は夏季と冬季では有意な差は認められなかったが ($p=0.33$)、EC は冬季が有意に高かった ($p=0.013$)。

溶存陽イオンは夏季、冬季ともに Ca^{2+} と Na^+ が主体であり、 Mg^{2+} と K^+ は少ない。 K^+ 濃度は夏季に有意に高いが ($p<0.001$)、 Na^+ 濃度は冬季に有意に高く ($p<0.001$)、 Mg^{2+} 濃度については有意な季節間の差は認められなかった ($p=0.19$)。なお、 Ca^{2+} 濃度は 92 流域全体では夏季に高いが ($p=0.035$)、秩父帯石灰岩流域において Ca^{2+} 濃度が特徴的に高く、かつ夏季に高い値を示した。このため、秩父帯石灰岩流域と四万十帯石灰岩流域を除外した 83 流域で Ca^{2+} 濃度の季節間の差を検定したところ、有意な差

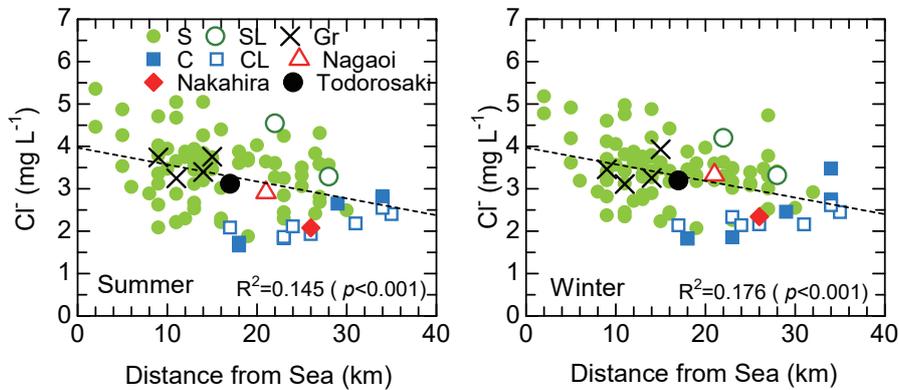


Fig. 5. Cl^- 濃度と各採水地点における土佐湾もしくは豊後水道までの距離との関係
Variation of Cl^- concentrations as a function of distance from Tosa Bay or Bungosuido Strait.

点線は全採取地点の回帰直線を表す

S: 四万十帯流域、SL: 四万十帯石灰岩流域、Gr: 花崗岩流域、C: 秩父帯流域、CL: 秩父帯石灰岩流域

The dotted line is the regression line of whole area

S: Shimanto belt (shale and sandstone), SL: Shimanto belt with limestone, Gr: Granitic rock, C: Chichibu belt (sedimentary rocks, metamorphic rocks, and basalt), and CL: Chichibu belt with limestone.

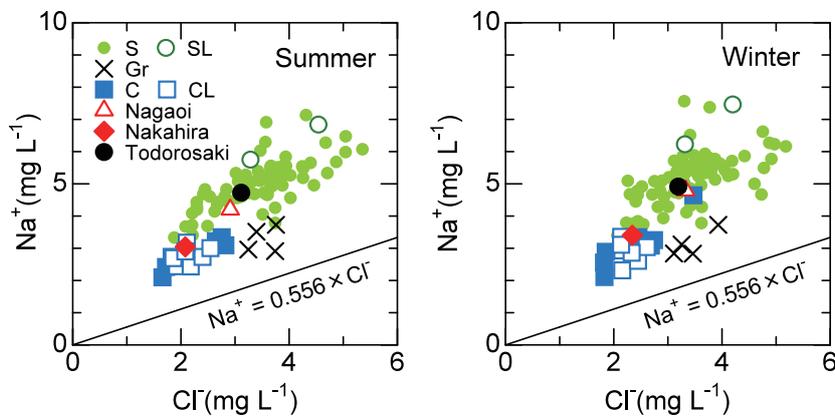


Fig. 6. Na^+ 濃度と Cl^- 濃度との関係
Relationship between Na^+ and Cl^- concentrations by geologic groups.

S: 四万十帯流域、SL: 四万十帯石灰岩流域、Gr: 花崗岩流域、C: 秩父帯流域、CL: 秩父帯石灰岩流域

S: Shimanto belt (shale and sandstone), SL: Shimanto belt with limestone, Gr: Granitic rock, C: Chichibu belt (sedimentary rocks, metamorphic rocks, and basalt), and CL: Chichibu belt with limestone.

は認められなかった ($p=0.84$)。

一方、溶存陰イオンは HCO_3^- が主体であり、全体としては夏季と冬季で濃度に有意な差は認められなかったが ($p=0.25$)、 Ca^{2+} と同様に秩父帯石灰岩流域と四万十帯石灰岩流域を除外した 83 流域で比較すると、 HCO_3^- 濃度には有意な季節間の差が認められた ($p=0.013$)。また、 Cl^- 濃度は夏季と冬季で有意な季節間の差は認められなかった ($p=0.41$)。一方、 SO_4^{2-} 濃度は冬季に有意に高い値を示した ($p<0.001$)。NO₃⁻-N 濃度は、夏季に 0.05 ~ 0.33 mg L⁻¹ (平均 0.15 mg L⁻¹)、冬季に 0.11 ~ 0.50 mg L⁻¹ (平均 0.24

mg L⁻¹) であり、冬季に有意に高い値を示した ($p<0.001$)。

Si 濃度は夏季に 4.18 ~ 8.88 mg L⁻¹ (平均 6.59 mg L⁻¹)、冬季に 2.97 ~ 7.38 mg L⁻¹ (平均 5.22 mg L⁻¹) であり、夏季に有意に高い値を示した ($p<0.001$)。

T-N 濃度も夏季に 0.05 ~ 0.40 mg L⁻¹ (平均 0.16 mg L⁻¹)、冬季に 0.11 ~ 0.56 mg L⁻¹ (平均 0.26 mg L⁻¹) であり、NO₃⁻-N 濃度と同様に冬季に有意に高い値を示した ($p<0.001$)。夏季には 92 流域中 6 流域、冬季には 104 流域中 35 流域において清流基準の基準値である 0.3 mg L⁻¹ を超過した。このうち、EK3、KY7、MU1、OM5、YS4

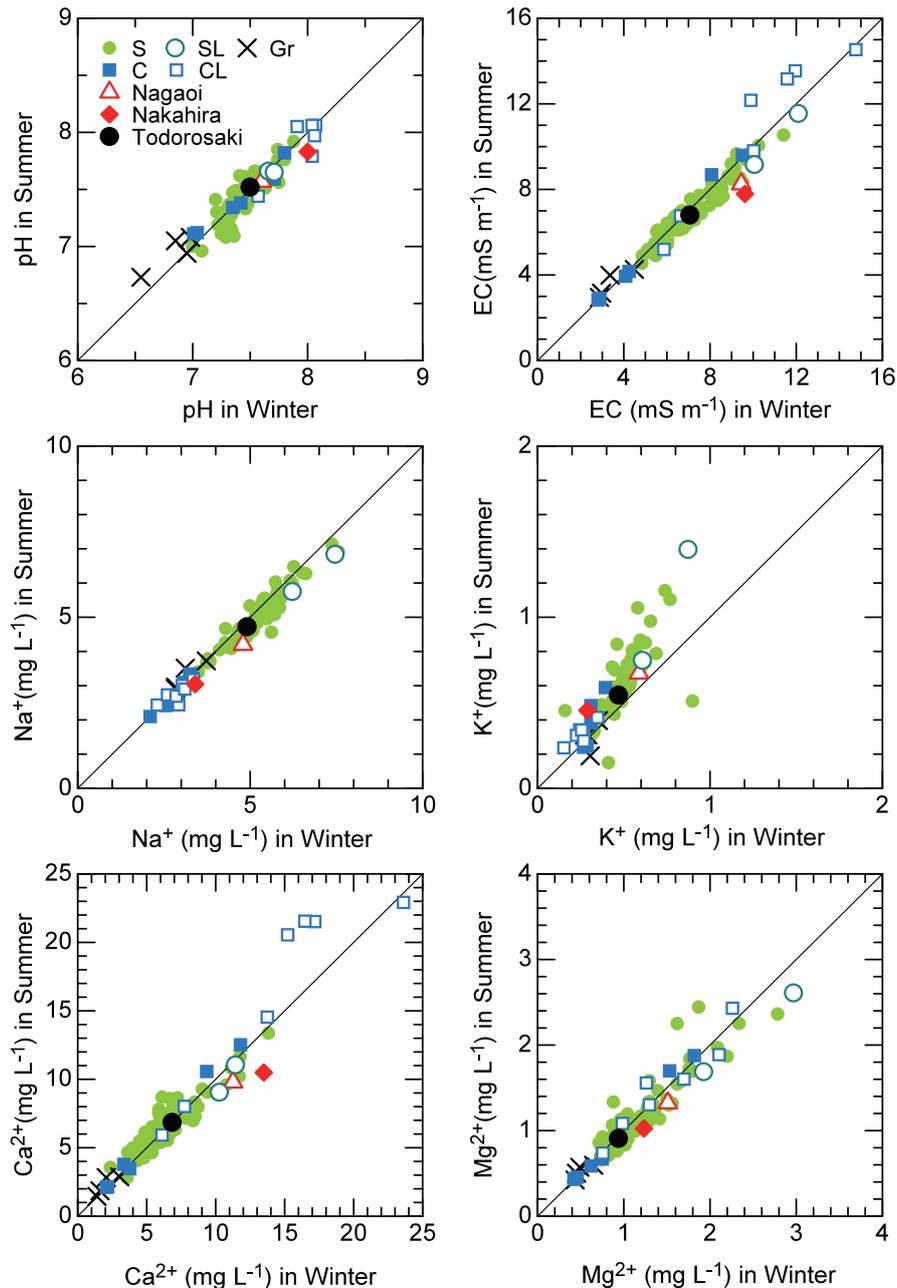


Fig. 7. pH、EC、陽イオン濃度の夏季と冬季の比較

Comparison of pH, EC and cation concentrations between summer and winter by geologic groups.

S: 四万十帯流域、SL: 四万十帯石灰岩流域、Gr: 花崗岩流域、C: 秩父帯流域、CL: 秩父帯石灰岩流域
 S: Shimanto belt (shale and sandstone), SL: Shimanto belt with limestone, Gr: Granitic rock, C: Chichibu belt (sedimentary rocks, metamorphic rocks, and basalt), and CL: Chichibu belt with limestone.

の5流域で夏季、冬季ともに基準値を超過した。また、冬季に新たに採取した12流域のうち5流域で基準値を超過し、2流域で基準値をわずかに下回る値を示した。夏季に基準値を超過した流域は調査地域内に点在しており、地理的な偏りは認められなかった (Fig.9)。また、花崗岩流域 (MU1) ならびに秩父帯流域 (OM5) もそれぞれ1流域で超過しており、地質による顕著な差異は認められなかった。一方、冬季のT-N濃度の分布 (Fig.10) は夏季に比べて調査地域全域で高く、基準値を超過した流域は中流域のみならず栲原川や目黒川などの源流域でも分布し

ており、顕著な地理的な偏りは認められなかった。

4) 長生ならびに中平における溶存成分組成

長生より上流域は源流部に秩父帯が分布するものの、大半が四万十帯からなる。このため、長生における溶存成分濃度は四万十帯流域73流域の値の範囲内にある (Fig. 7, 8)。ただし、pH、EC、Ca²⁺濃度、HCO₃⁻濃度は四万十帯流域の値の範囲内でも高い傾向を示し、Si濃度は四万十帯流域の値の範囲内でも低い値を示した。NO₃⁻-N濃度は四万十帯流域のみならず全92流域と比較しても低い値を示し、特に夏季にはNO₃⁻-N濃度は0.064 mg L⁻¹と

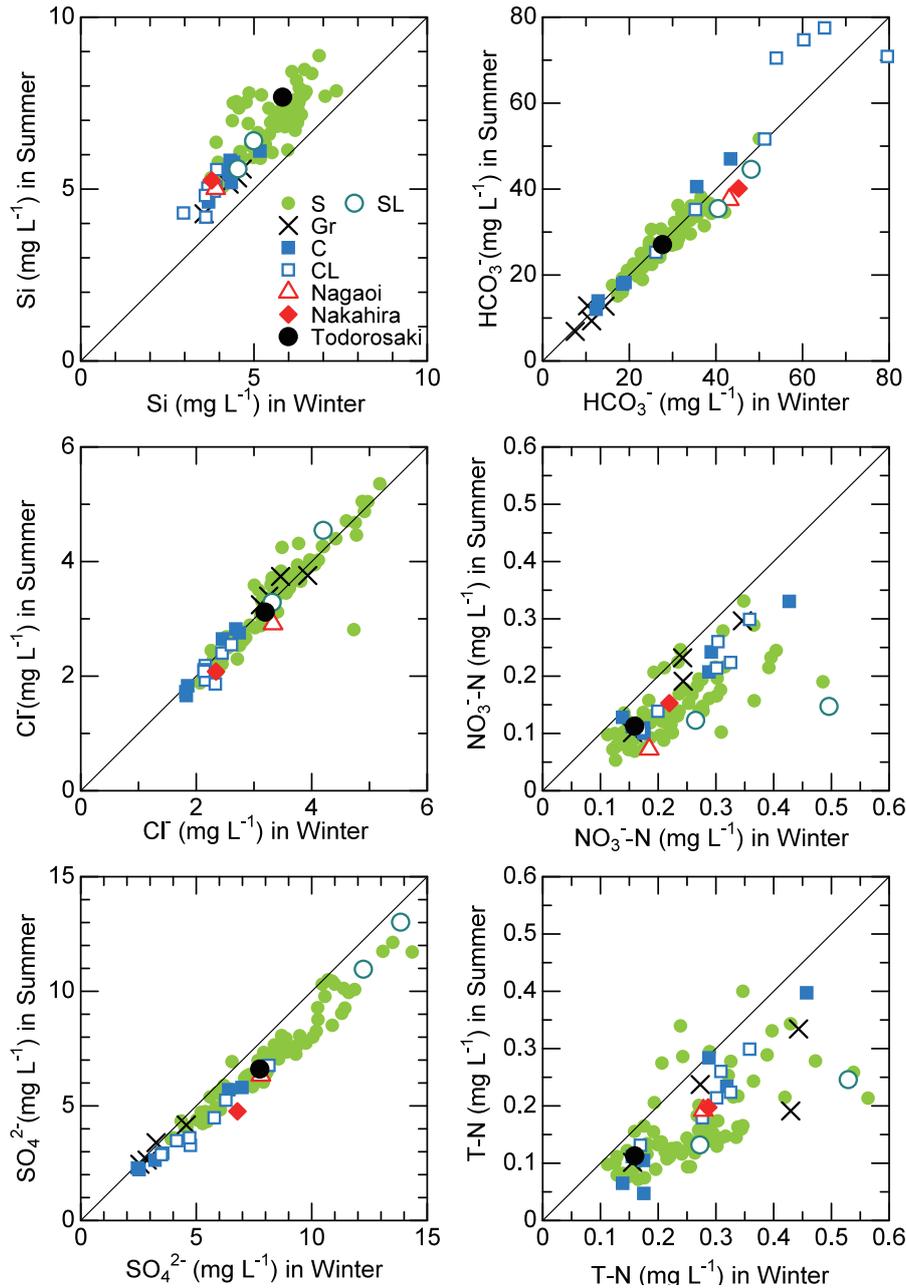


Fig. 8. Si濃度、陰イオン濃度、硝酸態窒素濃度、全窒素濃度の夏季と冬季の比較

Comparison of Si, anion concentrations, nitrate-nitrogen, and dissolved total nitrogen concentrations between summer and winter by geologic groups.

S: 四万十帯流域, SL: 四万十帯石灰岩流域, Gr: 花崗岩流域, C: 秩父帯流域, CL: 秩父帯石灰岩流域
 S: Shimanto belt (shale and sandstone), SL: Shimanto belt with limestone, Gr: Granitic rock, C: Chichibu belt (sedimentary rocks, metamorphic rocks, and basalt), and CL: Chichibu belt with limestone.

低い値を示した。NH₄⁺-Nは検出できなかった。T-N濃度は夏季に0.19 mg L⁻¹、冬季に0.28 mg L⁻¹であり、冬季の値は清流基準値をわずかに下回った。

中平における溶存成分濃度も長生と同様にpH、EC、Ca²⁺濃度、HCO₃⁻濃度は四万十帯流域の値の範囲内でも高く、Si濃度は低い値を示した。一方、中平におけるNa⁺、Cl⁻、K⁺濃度は長生よりも低い値を示し、秩父帯流域、秩父帯石灰岩流域の値に近い値を示した。NO₃⁻-N濃度は夏季に0.15 mg L⁻¹、冬季に0.22 mg L⁻¹であり、四万十帯流域の値の範囲内である。NH₄⁺-Nは夏季には検出できず、冬季に0.02 mg L⁻¹の値を示した。T-N濃度は夏季に0.20 mg L⁻¹、冬季に0.29 mg L⁻¹であり、長生と同様に冬季の値は清流基準値をわずかに下回った。

5) 轟崎における溶存成分組成の季節変動

轟崎における各溶存成分の2年間の平均濃度は、森貞・平井(1996)と比較すると、pH、EC、Ca²⁺、SO₄²⁻、Na⁺、Cl⁻濃度がやや高い値を示したが、いずれも変動の範囲内にある。Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻濃度は1998年、1999年共に6月から9月にかけて低下し、日降水量100mmを越すような豪雨の襲来が少ない1998年9月から1999年2月にかけてと1999年8月から2000年2月にかけて緩やかな上昇する傾向を示した(Fig. 11)。森貞・

平井(1996)でも同様のCa²⁺濃度の季節変動が認められている。これに対して、Si濃度は夏季に高く、冬季に低い傾向を示した。また、K⁺濃度も変動幅は小さいものの、Si濃度と同様の変動を示した。Cl⁻濃度は3.0～3.4 mg L⁻¹(平均3.19 mg L⁻¹)の値を示し、2年間を通じて大きな変動は認められない。T-N濃度とNO₃⁻-N濃度は概ね0.15 mg L⁻¹以下の低い値を示し、降水イベントの影響による変動も認められたが、計測期間中はほぼ同調した変動を示した。季節変動としては春季に濃度が低下する傾向が認められた。

轟崎で認められた溶存成分濃度の季節変動の傾向は、Fig.7、8に示した92流域におけるpH、EC、各溶存成分濃度の夏季と冬季との差異と整合的である。

考察

1) 溶存無機成分組成に関する既往の調査結果との比較

本流の溶存無機成分組成については、小林(1961)により下流の四万十市中村・具同において1958年から59年にかけて6回測定された平均値と、同地点において今井・北条(1989)により1986年から1988年にかけて3回実施された分析値が公表されている。これらの結果と本研究の結果とは、今井・北条(1989)によるK⁺、Cl⁻濃度と

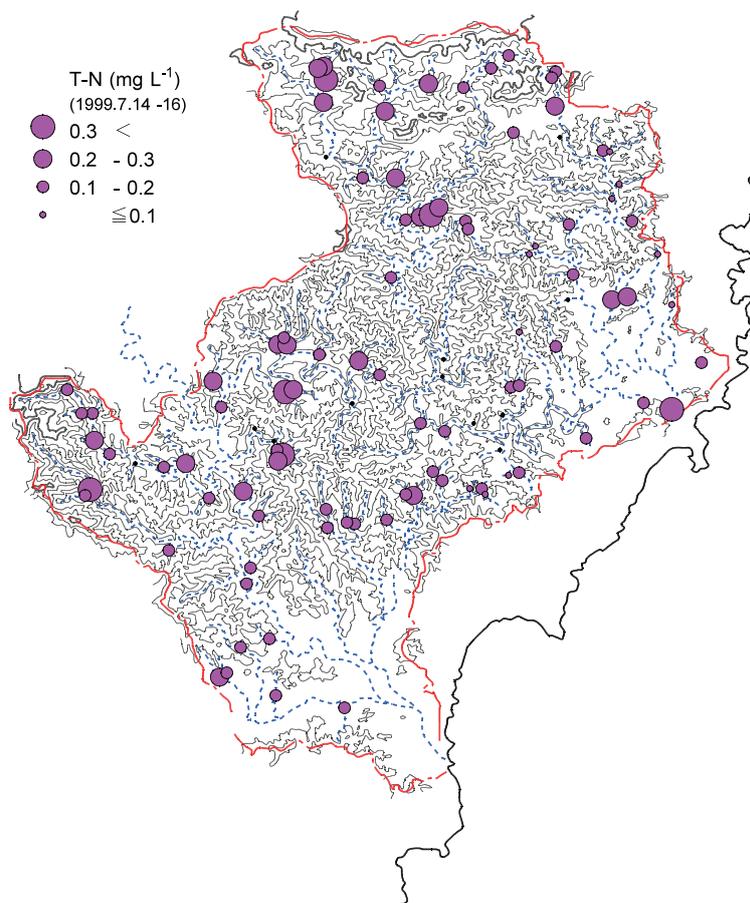


Fig. 9. 夏季における全窒素濃度の地理的分布
Spatial distribution of dissolved total nitrogen concentration in summer.

は大きな差が認められるものの、それ以外の溶存無機成分濃度とは整合的な値を示した (Table 1)。また、稲垣ら (2007) は、四万十川 (17 地点) だけではなく仁淀川 (3 地点) も含めた値ではあるものの、森林流域の溶存無機成分濃度の 2006 年 6 月と 9 月についての平均値を提示し、特に秩父帯の流域において EC、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 濃度が低い傾向を指摘している。これらの分析値は本研究の結果に比べて全般的に濃度が低いが、秩父帯で低い値を示す傾向は同じであった。

小流域に関しては、広瀬ら (1988) による四万十町松葉川と米の川、森貞・平井 (1996) による四万十町葛籠川流域の 7 地点、藤本ら (1998) による梶原町川井において定期的に溶存無機成分組成を測定した平均値が公表されている。これらの流域における溶存無機成分濃度の平均値は、広瀬ら (1988) の 2 地点において SO₄²⁻ 濃度が高い値を示す以外は本研究の成果と整合的である。

堀内ら (1990) による湧水の溶存無機成分濃度も、四万十帯における湧水 2 地点 (四万十町大正中津川と中土佐町大野見久万秋) の結果は本研究の平均値と類似した値を示した。さらに秩父帯石灰岩における湧水 (梶原町本も谷丸野公園) において Ca²⁺、HCO₃⁻ 濃度が著しく高く、Si 濃度が低い値を示しており、本研究の成果と整

合的である。

既往の調査結果における各溶存無機成分濃度の値の範囲や成分組成における四万十帯流域と秩父帯石灰岩流域の差異などの特徴は、本研究の結果でも確認できた。これらのことから本研究で計測した各源流域の溶存成分濃度とその組成は、少なくとも調査地域とした四万十川流域における溶存成分組成の全体像を把握するのに十分な地点数と精度を有していると考えられる。

2) 溶存無機成分組成に与える立地要因の影響

調査地域の大半を占める四万十帯流域と比較すると花崗岩流域や秩父帯流域、秩父帯石灰岩流域では溶存無機成分組成が異なる傾向が認められた (Table 2, Fig. 7, 8)。花崗岩や堆積岩を構成するケイ酸塩鉱物は、大気中の CO₂ や土壤呼吸によって生成された CO₂ を溶存した水と反応して、土壤水や地下水に Si とともに Ca²⁺、Mg²⁺ などの陽イオンを溶脱させる。また、その過程で HCO₃⁻ も生成する。したがって、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Si などの濃度は流域における風化の進行を示す指標となる。

花崗岩流域では四万十帯流域、秩父帯流域に比べて pH、EC が低く、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、HCO₃⁻、Si などの各溶存無機成分濃度も低い傾向が認められた。花崗岩は目黒川源流や黒尊川源流の急傾斜の山地に局所的に分布する。

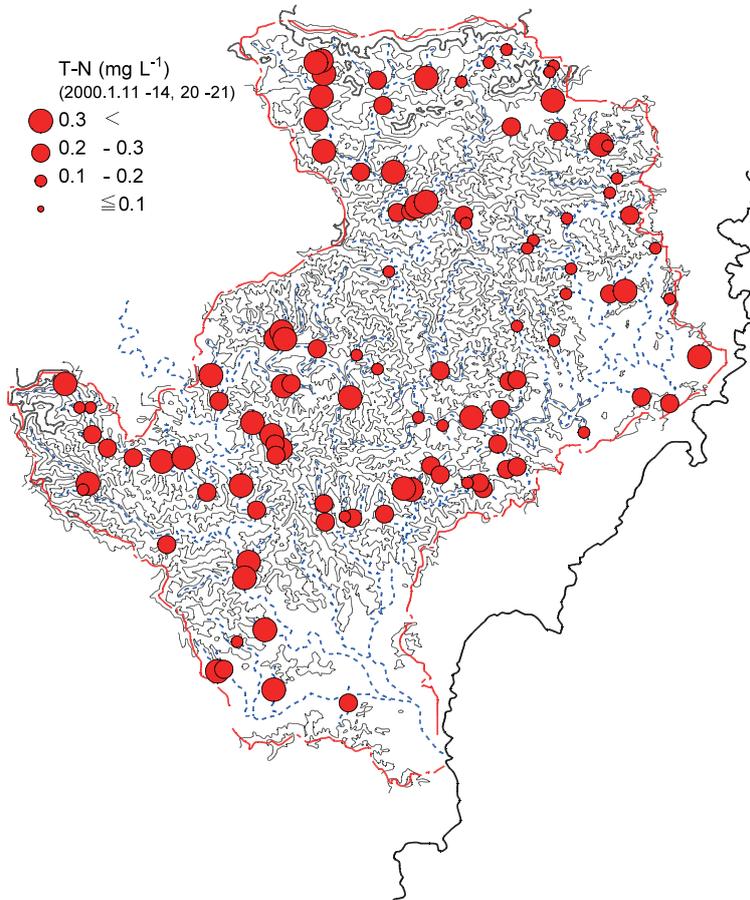


Fig. 10. 冬季における全窒素濃度の地理的分布
Spatial distribution of dissolved total nitrogen concentration in winter.

調査地域の花崗岩流域の水質は金井ら(1998)による水質の類型化によれば、表層地下水におけるCa・Mg-HCO₃型に分類され、ECも低く、陰イオンに占めるHCO₃⁻の割合も低い。このことから、本研究の花崗岩流域では、雨水と基盤岩との反応がまだ充分に進んでいない比較的新しい地下水が表流水として流出していると推定される。

一方、石灰岩では主要構成成分である炭酸塩鉱物(代表的なものとして方解石(CaCO₃))が、大気や土壌中のCO₂を溶存した水と反応して、Ca²⁺とHCO₃⁻を生成する

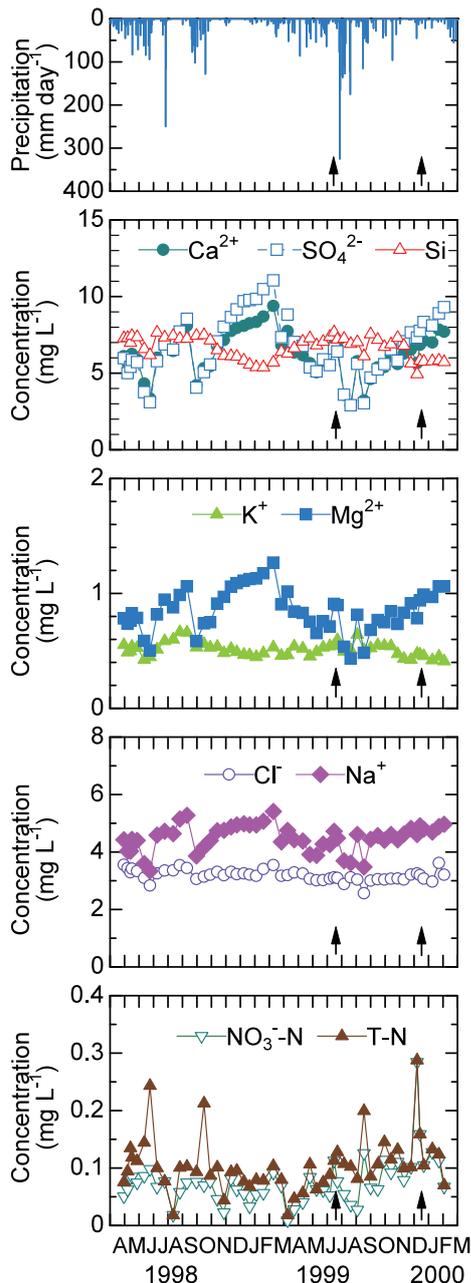


Fig. 11. 轟崎における降水量、溶存無機成分濃度の変動(1998.4 ~ 2000.3)

Seasonal variations of precipitation and solute concentrations at Todorosaki (1998.4 ~ 2000.3).

上向き黒矢印は多点調査の実施日を示す。

Upward arrows show the date of comprehensive surveys

ため、石灰岩流域ではこれらの成分濃度が高くなる(吉村・井倉 1998)。秩父帯石灰岩流域では秩父帯流域に比べてpH、ECが高く、Ca²⁺、HCO₃⁻などの各溶存無機成分濃度も高い傾向が認められたが、一方でNa⁺、K⁺、Cl⁻濃度は低い傾向が認められた(Table 2)。また、相対的にケイ酸塩鉱物に乏しいため、Si濃度が低い値を示す。ただし、本研究において秩父帯石灰岩流域として分類した流域でも必ずしもpH、ECが高くはなく、Ca²⁺、HCO₃⁻などの各溶存無機成分濃度も高い傾向を示さない流域も認められた。秩父帯の石灰岩は瀬戸内海側との分水界となる四国山地の稜線部に局所的に分布するため、これらの流域では構成面積としては大半を占める他の秩父帯の堆積岩・玄武岩・泥質片岩等の影響の方が強く表れると考えられる。

秩父帯石灰岩流域と四万十帯石灰岩流域はともにCa²⁺、HCO₃⁻濃度が高いという石灰岩流域特有の共通した特徴を示す一方で、SO₄²⁻濃度には差が認められた(Table 2, Fig. 4)。秩父帯でも四万十帯でも石灰岩の分布は局所的であり、流域の大半では四万十帯では砂岩と泥岩を主体とする堆積岩が分布するのに対して、秩父帯では堆積岩に加え、玄武岩、変成岩等が分布する。このような両地質帯を構成する堆積岩の占める割合の違いにより、秩父帯石灰岩流域では秩父帯流域と同様にSO₄²⁻濃度が低く、四万十帯石灰岩流域では四万十帯流域と同様にSO₄²⁻濃度が高い値を示したと考えられる。

一般的に堆積岩や火成岩におけるClの含有量は0.1%以下と極めて少ないことが報告されており(Imai et al. 1994, 1996)、基盤岩石からの供給は無視できる。また、Cl⁻濃度は土佐湾もしくは豊後水道までの距離が大きいほど低くなる傾向が有意に認められた(Fig. 5)。このことから、渓流水のCl⁻の起源は降水に含まれる海塩であると推察される。本調査地域では四国山地の高標高地を除くと冬季でも北西季節風による降雪はほとんど観測されず、前線性の低気圧による降雨が主体であることから、一年を通じて太平洋からの海塩が降水によって供給されており、その影響の程度が海洋からの距離として表れていることを示唆している。このような海洋からの距離に応じてCl⁻濃度が減少する傾向は、仲川ら(1995)や金子(1998)でも報告されている。なお、花崗岩流域ではCl⁻濃度が秩父帯流域、秩父帯石灰岩流域と比べて高い値を示す。このことは本調査地域における花崗岩の分布が、より土佐湾や豊後水道に近い四万十帯の中にあるためと考えられる。一方、Na⁺濃度も各採水地点における土佐湾もしくは豊後水道までの距離と間に、弱い負の相関が夏季も冬季も有意に認められ($p < 0.05$)、海塩の影響が現れていることを示唆する。しかし、Na/Cl重量比は0.556よりも大きいことから(Fig. 6)、風化によって基盤岩石から溶出したNa⁺が渓流水中のNa⁺濃度に大きく貢献していることは明らかである。花崗岩流域のNa/Cl重量比(約0.9)から海水起源のCl⁻を1として非海水起源のNa⁺の

比率を算出すると、渓流水中に含まれる Na^+ の約 37% が基盤岩石由来となる。さらに、Fig. 6 において花崗岩、秩父帯流域に比べて上位にプロットされる四万十帯流域ならびに四万十帯石灰岩流域岩では過半の Na^+ が基盤岩石由来であると推察できる。

このように、本調査地域の源流域における渓流水の各溶存無機成分濃度は地質の違いと海からの距離という立地条件に大きく影響されていると考えられる。

3) 溶存無機成分濃度の季節変動要因

轟崎において認められた Ca^{2+} の季節変動は森貞・平井 (1996) でも同様の季節変動が報告されており、また、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 濃度の季節変動は、藤本ら (1998) でも認められている。なお、藤本ら (1998) の調査流域は本研究における YS2 のさらに上流に位置する。一方、夏季に有意に高い値を示す Si は、主としてケイ酸塩鉱物の風化によって生成されるため、夏季より高温環境下において風化が促進され、濃度が上昇したと考えられる。ところで、風化による Si の生成に伴って、 Ca^{2+} 等の陽イオンとともに HCO_3^- が生成される。このため、温度条件に支配された風化による基盤岩石からの溶存無機成分の生成が主要因であれば、これらの成分の季節変動は同じ傾向を示すはずである。夏季に Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度が特徴的に高い値を示した秩父帯石灰岩流域の 4 流域では、夏季の高温環境下において炭酸塩鉱物の溶解が進んで濃度が上昇した影響が強い。

しかし、轟崎では Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 濃度の変動は Si 濃度の変動とは相反する変動を示した (Fig. 11)。 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 濃度については夏季に低く、冬季に高い季節変動が認められた。また、轟崎におけるこれらの溶存無機成分濃度は降水イベント後に急激に低下する傾向を示した。このような降水イベントによる濃度の低下と無降雨期における濃度の漸増は、基底流出時における高濃度の地下水起源の渓流水が降水量の増加とともに低濃度の降水や土壌水等の混入によって希釈され濃度が低下し、さらに晩秋から春にかけての寡雨期に回復していることを示唆する。本調査地域と同じ西南太平洋型気候区に含まれる宮崎県に位置する去川森林理水試験地でも、上記 5 溶存成分濃度には同様の季節変動が認められるとともに、これらの濃度が日流出水量の対数値と強い負の相関を示すことが明らかにされている (吉永ら 2011)。このことは、これらの溶存無機成分の濃度が、日流出水量が夏季に多く冬季に少ないという水文特性に支配されていることを示している。轟崎における季節変動も同様の水文特性に影響された希釈効果による変動が現れていると考えられる。なお、 K^+ 濃度も変動幅は小さいものの Si 濃度と同様に夏季に高くなる季節変動を示した。このことはケイ酸塩鉱物からの溶出の増加に加え、本調査地域における夏季の降水量の増加により植物-土壌系からの溶脱の増加が貢献していることが推定されるが、そのメカニズムに関しては今後の課題としたい。

一方、渓流水中の NO_3^- -N 濃度の季節変化は、大きく見れば土壌における窒素の無機化や硝化と植物による吸収とのバランスに支配される。冬季が多雨期である欧米では、夏季には植物による吸収が卓越するために NO_3^- -N 濃度が減少し、冬季に植物による吸収の減少とともに流出水量の増加にともなって NO_3^- -N 濃度が高くなる傾向が認められている (Stoddard 1994)。一方、日本を含むモンスーンアジアでは夏季が多雨期と重なるため、夏季に生成された無機態窒素が植物に吸収されるとともに渓流水としても流出し、結果として夏季に高濃度の NO_3^- -N 濃度が観測されることが指摘されている (Ohte 2012 など)。轟崎では NO_3^- -N 濃度と T-N 濃度が低下する春季以外にも降雨イベント等により急激な濃度の低下が認められることもあり、明瞭な季節変動は認められない。日本において NO_3^- もしくは NO_3^- -N 濃度の季節変動が議論されている流域は、梅雨、秋雨、台風といった多雨期とそれ以外の寡雨期が共通する年降水量が 2000mm 以下の地域が多い。一方、本調査地域や去川森林理水試験地のように年降水量が 2500mm 以上で多雨期には日降水量 100mm 以上の降雨イベントが発生し、寡雨期でも日降水量 30mm 程度の降雨イベントが通常でも認められるような西南太平洋型気候区の流域では、渓流水への NO_3^- -N の流出も水文特性によって支配され、季節変動が不明確になっている可能性が高い。また、92 流域の比較に関しては、轟崎における季節変動が不明瞭なこともあり、調査地域全体としての NO_3^- -N 濃度や T-N 濃度の季節変動を議論するには不十分である。しかし、系統的に冬季の NO_3^- -N 濃度が高い傾向を示すことは、採水時における水文条件が調査地域全体にわたって共通していた可能性もあり、また、植物、特に樹木による吸収量の季節的な差異の影響が現れた可能性も高い。これらのことについても今後の課題としたい。

4) 長生ならびに中平における溶存無機成分組成への源流域の影響

長生と中平における溶存無機成分濃度は両地点の周辺の四万十帯流域と比べると、 Ca^{2+} 濃度や HCO_3^- 濃度が高い (Fig. 7, 8)。また、 Ca^{2+} と SO_4^{2-} の関係も四万十帯の系列よりは秩父帯の系列に近い領域にプロットされる (Fig. 4)。これらのことは、長生と中平における溶存無機成分組成には源流域の秩父帯石灰岩の影響が強く表れていることを示唆する。

なお、四万十川は大局的に見れば北部の四国山地から流出し、本流水系と支流の梶原川水系に集約され、四万十町大正で合流して流下する。しかし、本流水系は四万十町家地川に設置された佐賀取水堰 (家地川ダム) から大半が取水され、別の水系である伊与木川へ放流され、取水堰より下流側は瀬切れを起こさない程度の維持放流によって水流が保たれている。このため、梶原川との合流点より下流域の河川水は四万十川本流とはいえ、その大半が梶原川水系からの河川水である。このことが長生

における溶存無機成分組成が中平における溶存無機成分組成と類似しているのとともに、秩父帯、秩父帯石灰岩流域の溶存無機成分組成に近い組成を示す要因であると推察される。

5) 四万十川清流基準における T-N 濃度基準値との整合性

四万十川清流基準（高知県文化環境部文化振興課 2005）では T-N 濃度を指標の一つとして採用し、その基準値は農地や市街地の影響の強い地点を除くと 0.3 mg L^{-1} である。本研究における T-N 濃度の夏季の平均値は 0.17 mg L^{-1} 、冬季の平均値は 0.26 mg L^{-1} であり、平均値としては基準値を下回っている。また、四万十川流域における既往の調査結果における NO_3^- -N 濃度も基準値を満たしている（Table 1）。木平ら（2006）による高知県 34 流域における溶存無機態窒素濃度の平均値も 0.26 mg L^{-1} である。これらの結果は、多くの四万十川源流域の森林流域からは平水時には清流基準を満たす水質の渓流水が流出していることを示す。また、調査の対象とした流域のうち約 6 割の流域では、採水地点よりも上流域に人家や耕作地が点的に認められたものの、それらの存在による T-N 濃度への影響も限定的であることを示している。

しかし、夏季に 6 流域、冬季に 35 流域において、特に EK3、KY7、MU1、OM5、YS4 の 5 流域では夏季、冬季ともに清流基準値である 0.3 mg L^{-1} 以上の値を示した。YS4 は天然林からなる流域であり、2001～2009 年にかけての月 2 回の定期採水時の NO_3^- -N 濃度は平均 0.33 mg L^{-1} 、（最大 1.21 mg L^{-1} 、最小 0.03 mg L^{-1} ）であることが報告されている（篠宮ら 2014）。この平均値は本研究の値と整合的であるものの清流基準値と同等であり、年間を通じて基準値を超すことが頻繁に起きていることを示している。一方、本調査地域にはヒノキ・スギ人工林が広く分布するが、これらの人工林では植栽後の成長過程において窒素の吸収量が増加するとともに、森林管理等によって窒素の流出が増加することが明らかにされている（例えば Fukushima et al. 2011）。森林を主体とする流域といえども必ずしも窒素の流出が低く抑制されているわけではない。本調査地域と同じ西南太平洋型気候区に含まれ去川森林理水試験地では森林管理以外の人為影響は認められないが、平均 NO_3^- -N 濃度がⅡ号沢、Ⅲ号沢では約 0.2 mg L^{-1} であるのに対して、Ⅰ号沢では 0.4 mg L^{-1} 以上の値を示す（吉永ら 2011）。このように、清流基準値への適合という観点からすれば T-N 濃度が 0.3 mg L^{-1} という基準値はこの地域の森林流域としてはやや厳格な値であるのかもしれない。

一方で、本調査地域における T-N 濃度については、今井・北条（1989）により 35 地点で $0.02 \sim 3.83 \text{ mg L}^{-1}$ （単純平均 0.47 mg L^{-1} ）、堀内・山崎（1998）により 11 地点で 1998 年 9 月に $0.12 \sim 1.22 \text{ mg L}^{-1}$ （単純平均 0.34 mg L^{-1} ）、1999 年 3 月に $0.18 \sim 2.90 \text{ mg L}^{-1}$ （単純平均 0.81 mg L^{-1} ）の値が報告されている（Table 1）。なかでも今井・北条

（1989）は長生と中平においても T-N 濃度を測定しており、それぞれ 0.24 mg L^{-1} 、 0.03 mg L^{-1} と本研究の結果と整合的な値が得られている。また、本流では奈路橋（中土佐町大野見奈路）にて 0.10 mg L^{-1} 、大正流量観測所にて 0.04 mg L^{-1} 、大井川（四万十町十川）にて 0.02 mg L^{-1} の値を報告している。しかし本流であっても山間部の奈路橋から流下し、両岸に耕作地が広く分布しはじめる鍛冶屋瀬橋（四万十町）では T-N 濃度が 0.75 mg L^{-1} と上昇する。また、四万十町窪川周辺では農畜産排水等の影響を強く受け、仁井田川支流の大井川（四万十町土居）では 1.43 mg L^{-1} の高い T-N 濃度が報告されている。さらに仁井田川、吉見川でも 1 mg L^{-1} 以上の高い T-N 濃度が観測されており、これらの支流からの影響を受け、本流の T-N 濃度が 0.6 mg L^{-1} 以上に上昇することが報告されている。

清流基準調査における 2002～2013 年の T-N 濃度の平均値は、本流では鍛冶屋瀬橋では 0.31 mg L^{-1} と基準値を超える。また、根々崎橋（仁井田川、四万十町）では 1.38 mg L^{-1} 、吉見川合流前では 1.05 mg L^{-1} であり、今井・北条（1989）の値と大きな変化は認められない。また、吉田ら（2009）は仁井田川支流の与津地川流域において、山林からの渓流水の T-N 濃度が $0.22 \sim 0.27 \text{ mg L}^{-1}$ 、平均 0.25 mg L^{-1} であるのに対して、流域末端では畜産排水や農業排水の負荷により T-N 濃度が 1 mg L^{-1} 以上、イベント時には約 6 mg L^{-1} にまで上昇することを示した。本研究における仁井田川源流部（KB1、KB2、KR1、KR2、KR3、KR4）ならびに吉見川源流部（KB3）における T-N 濃度は、夏季には KB2 において 0.34 mg L^{-1} 、冬季には KB1 で 0.30 mg L^{-1} 、KR2 で 0.39 mg L^{-1} と清流基準値を超えたが、それ以外の地点では基準値以下である。吉田ら（2009）が山林からの渓流水として採取した地点は KB2 の近傍であるが、吉田ら（2009）の値と KB2 における T-N 濃度とはほぼ同等の値を示した。これらのことは四万十川流域内で人間活動による水質汚濁が顕著とされる窪川周辺であっても、森林からの渓流水は濃度の低い清澄な水質であることを示している。ただし、仁井田川や吉見川による四万十川への負荷の影響は佐賀取水堰における分流により大半が除去される。

佐賀取水堰より下流の四万十川は相去川や打井川などの支流を集め、四万十町大正において葛籠川（轟崎）や四万十川最大の支流である梶原川と合流する。これらの支流の源流部（相去川：TK3、TK4、TK6、打井川：IY2、IY3、IY7 など）ならびに轟崎（葛籠川）における T-N 濃度は夏季も冬季も基準値以下の地点が多い。また、梶原川の四万十町田野々大橋における清流基準調査の T-N 濃度の平均値は 0.19 mg L^{-1} である。これらの支流の影響を受け、本流の大正流量観測所における清流基準調査の T-N 濃度の平均値は 0.25 mg L^{-1} と基準値以下の値を示す。このように佐賀取水堰における分水、梶原川をはじめとする比較的清澄な支流の影響、さらには流下過程における河川水内での脱窒などの影響も合わさり、長生など中

流域の清流環境が維持されていると考えられる。

なお、今回の調査区域からは除外した広見川の T-N 濃度については、本流との合流点近くにかかる川崎橋（四万十市西土佐）において調査が継続されており、今井・北条（1989）では 0.36 mg L^{-1} 、堀内・山崎（1998）では 9 月に 0.21 mg L^{-1} 、3 月に 0.66 mg L^{-1} の値が報告されている。清流基準調査における T-N 濃度の平均値も 0.44 mg L^{-1} と基準値を超える値を示した。この影響は広見川との合流点よりも下流の本流の水質に及ぶことが推察される。しかし、広見川合流点より約 3km 下流に位置する四万十市西土佐橋では清流基準調査における T-N 濃度の平均値は 0.28 mg L^{-1} であり、長生より上流域の本流からの流水や支流の流入による希釈の影響により基準値よりも低い値を示したと考えられる。

まとめ

流域の大半を占める森林流域の渓流水質の実態とその溶存成分組成が平水時の四万十川の水質に及ぼす影響を評価するために、源流域において夏季（92 流域）と冬季（104 流域）の渓流水、ならびに四万十川本流中流域の長生と支流の北川川の中平において河川水の溶存成分濃度を測定した。

渓流水の溶存無機成分組成はそれぞれの流域を構成する地質に大きく影響を受け、調査流域の大半を占める四万十帯が分布する流域と比べると、石灰岩が分布する流域では特異的に pH、EC が高く、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度が高い傾向を示した。また、花崗岩が分布する流域では pH、EC が低く、溶存無機成分濃度が全体として低い傾向を示した。一方、 Cl^- 濃度は太平洋岸からの距離が大きいほど低い傾向を示し、海塩起源であることが推察された。夏季と冬季の溶存成分濃度を比較すると、風化による岩石からの溶出と降水条件に支配された各溶存成分の濃縮・希釈の影響を受けて Si、 K^+ 濃度は夏季の方が高く、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- -N、T-N 濃度は冬季の方が高い値を示した。

多くの調査流域における T-N 濃度は高知県が制定した四万十川清流基準の基準値である 0.3 mg L^{-1} 以下の値を示した。森林流域からの渓流水は平水時の四万十川の清流環境に対してバックグラウンドとしての良好な水質を供給するとともに、人間活動に伴い水質が低下した河川水に対して濃度の希釈としても寄与し、中下流域における清流基準を満たすことに貢献していることが示唆された。しかし、夏季に 6 流域、冬季に 35 流域で基準値を超えた。超過した流域には天然林も含まれ、特定の汚染源は存在しない。森林流域であっても森林管理や成長にともなう養分吸収量の変化により、流出する T-N 濃度の変化が起こりうる。本研究の結果からは T-N 濃度に関する清流基準値はやや厳格な値であることを指摘したい。また、現在の調査地域の大半を占める人工林は、本研究の実施から 20 年間の成長を経ており、伐期を迎えた林分も多い。このような森林の成長や利用を含めた変化にとも

なう森林の四万十川における清流環境への寄与については今後の課題である。

なお、本研究は環境省公害防止研究「四万十川における環境保全型農林水産業による清流の保全に関する研究」及び森林総合研究所特定研究「酸性雨等の森林生態系影響モニタリング」によって実施した。

引用文献

- EANET (2000) Quality Assurance/Quality Control (QA/QC) Program for Monitoring on Inland Aquatic Environment in East Asia, 22 pp., <https://www.eanet.asia/wp-content/uploads/2019/04/qaqc inland.pdf>
- 藤原 正幸・ラボン エドワード・泉 智揮・濱上 邦彦・小林 範之・垣原 登志子（2012）四万十川支流広見川の SS 負荷量とそれに及ぼす水田農業の影響. 土木学会論文集 B1（水工学）, 68（4）, I_631-I_636.
- 藤本 浩平・山下 雅子・押岡 茂紀・西村 武二・日浦 啓全・有光 一登（1998）四万十川の山地小流域における渓流水の水質変動. 日本林学会論文集, 109, 263-266.
- Fukushima, K., Tateno, R. and Tokuchi, N. (2011) Soil nitrogen dynamics during stand development after clear-cutting of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations. Journal of Forest Research, 16, 394-404.
- 半谷 高久・小倉 紀雄（1995）水質調査法. 第3版. 丸善, 239-245.
- 広瀬 顕・岩坪 五郎・堤 利夫（1988）森林流出水の水質についての広域的考察（1）. 京都大学演習林報告, 60, 162-173.
- 堀内 泰男・邑岡 和昭・伊藤 瑞穂・板原 佑子・津野 雅彦・河渕 雅恵（1990）「土佐の名水」の水質評価について. 高知県公害防止センター所報, 7, 63-72.
- 堀内 泰男・山崎 靖久（1998）高知県内河川における生物による水質評価 一第7報一. 高知県環境研究センター所報, 15, 23-55.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1994) 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ Geochemical Reference samples, "igneous rock series". Geostandards Newsletter, 19, 135-213.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1996) 1996 compilation of analytical data on nine GSJ Geochemical Reference samples, "sedimentary rock series". Geostandards Newsletter, 20, 165-216.
- 今井 嘉彦・北条 正司（1989）四万十川の水質. 高知大学学術研究報告 自然科学, 38, 91-99.
- 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, 48, 19-20.
- 磯崎 行雄・丸山 茂徳・青木 一勝・中間 隆晃・宮下 敦・大藤 茂 (2010) 日本列島の地体構造区分再訪—太平洋型(都城型)造山帯構成单元および境界の分類・定義—. 地学雑誌, 119, 999-1053.
- 金井 豊・関 陽児・上岡 晃・金沢 康夫・月村 勝宏・濱崎 聡志・中嶋 輝允 (1998) 水と地表物質との相互作用による水質について—福島・茨城県における湧水・地表水の調査例—. 地質調査所月報, 49 (8), 425-438.
- 金子 真司 (1998) 近畿地方における渓流水の広域調査—渓流水質の形成にかかわる要因について—. 水利科学, 41 (6), 35-55.
- 環境庁 (1971) 水質汚濁に係る環境基準について. 環境庁告示第 59 号.
- 気象庁 (2018) "過去の気象データ検索", <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>.
- 小林 純 (1961) 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究. 農学研究, 48, 63-106.
- 高知県文化環境部文化推進課 (2005) 四万十川清流基準調査手引書. 28pp. http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/030701/files/2017100600014/2013041600441_www_pref_kochi_lg_jp_uploaded_attachment_93799.pdf
- 高知県林業振興・環境部環境共生課 (2014) 高知県四万十川流域保全振興委員会目標指標【54 項目】平成 14 年度～平成 24 年度総括報告. 84 pp. <http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/030701/files/2017100600090/soukatuhoukoku.pdf>
- 国土交通省水管理・国土保全局 (2002) 水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=308031288809010>
- 国土交通省四国地方整備局 (2017) 平成 28 年四国内一級河川の水質現況. 24 pp. <http://www.skr.mlit.go.jp/pres/h29backnum/kasen/170707/170707-1.pdf>
- 木平 英一・新藤 純子・吉岡 崇仁・戸田 任重 (2006) 我が国の渓流水質の広域調査. 日本水文科学会誌, 36, 145-149.
- 草薙 浩 (2006) 平年日降水量時系列のクラスター分析による日本の 9 気候地域区分の提案. 天気, 63, 5-12.
- 森貞 和仁・平井 敬三 (1996) 高知県葛籠川流域における水質変動. 日本林学会関西支部論文集, 5, 37-38.
- 仲川 泰則・徳地 直子・西村 和雄・岩坪 五郎 (1995) 森林流出水の水質特性に関する広域的比較. 京都大学演習林報告, 67, 40-50.
- 農林水産省大臣官房統計部 (2015) 平成 27 年度農林水産情報交流ネットワーク事業全国調査「森林資源の循環的利用に関する意識・意向調査(平成 27 年 10 月 9 日公表)」。61pp. https://www.maff.go.jp/j/finding/mind/pdf/sinrin_27.pdf
- Ohte, N. (2012) Implications of seasonal variation in nitrate export from forested ecosystems: a review from the hydrological perspective of ecosystem dynamics. *Ecological Research*, 27, 657-665.
- 長田 隆 (1997) "土壤環境分析法". 土壤環境分析法編集委員会編, 博友社, 390-391.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編) (2015) 20 万分の 1 日本シームレス地質図 2015 年 5 月 29 日版. 産業技術総合研究所地質調査総合センター. <https://gbank.gsj.jp/seamless/>
- Shibata, H., Kuraji, K., Toda, H. and Sasa, K. (2001) Regional comparison of nitrogen export to Japanese forest streams. *The Scientific World*, 1, 572-580.
- 篠宮 佳樹・山田 毅・稲垣 善之・吉永 秀一郎・鳥居 厚志 (2014) 四万十川源流部の森林における硝酸態窒素の年間流出負荷量とその流出機構. 水環境学会誌, 37, 91-101.
- Stoddard, J. L. (1994) Long-term changes in watershed retention of nitrogen, its causes and aquatic consequences. In Baker, L. A. (eds.) "*Environmental chemistry of lakes and reservoirs*". *Advances in chemical series*, 237, American Chemical Society, Washington D. C., 223 - 284.
- 戸田 浩人・笹 賀一郎・佐藤 冬樹・柴田 英昭・野村 睦・市川 一・藤戸 永志・鷹西 俊和・清和 研二・塚原 初男・飯田 俊彰・谷口 憲男・中田 誠・桑原 繁・内田 武次・春田 泰次・井上 淳・八木 久義・塚越 剛史・蔵治 光一郎・二田 美穂・小野 裕・鈴木 道代・今泉 保二・山口 法雄・竹中 千里・万木 豊・川那辺 三郎・安藤 信・中西 麻美・西村 和雄・山崎 理正・長山 泰秀・土肥 奈都子・片桐 成夫・小藤 隆一・新村 義昭・井上 章二・江崎 次夫・河野 修一・藤久 正文・岩松 功・今安 清光・中村 誠司・塚本 次郎・野上 寛五郎・榎木 勉 (2000) 全国大学演習林における渓流水質. 日本林学会誌, 82, 308-312.
- 吉田 正則・村上 敏文・吉川 省子・藤原 伸介 (2009) 四万十川の一流域における窒素, リン, 無機イオンの濃度変動および負荷流出特性. 近畿中国四国農業研究センター研究報告, 8, 75-89.
- 吉村 和久・井倉 洋二 (1998) 地下水水質化学の基礎 8 「石灰岩地域の地下水水質」. 地下水学会誌, 40, 53-63.
- 吉永 秀一郎・稲垣 善之・山田 毅・三浦 覚・清水 晃・清水 貴範・小川 泰浩・宮縁 育夫 (2011) 去川森林理水試験地における流出水の水質. 森林総合研究所研究報告, 10, 147-161.

Appendix Table 1 各調査流域の地質、流域面積、流域内の最高地点の標高、採水地点の緯度、経度、標高
 Characteristics of headwater catchment; bedrock geology, catchment area, the elevation of highest peak within the catchment, elevation, longitude, and latitude of the sampling point

地点	地質	緯度	経度	流域面積 (km ²)	採水地点 標高 (m)	流域内最高 標高 (m)
長生		33° 11' 40" N	132° 47' 28" E			
中平		33° 20' 8" N	132° 57' 20" E			
轟崎	四方十帯	33° 11' 0" N	132° 58' 9" E	21.23	150	779
AR1	四方十帯	32° 58' 42" N	132° 50' 35" E	2.65	20	383
AR2	四方十帯	32° 59' 28" N	132° 47' 50" E	3.18	30	570
AR3	四方十帯	32° 59' 29" N	132° 47' 51" E	2.60	30	460
EK2	四方十帯石灰岩	33° 12' 47" N	132° 46' 56" E	11.62	70	764
EK3	四方十帯	33° 12' 17" N	132° 50' 47" E	7.42	60	636
EK4	四方十帯	33° 12' 27" N	132° 51' 9" E	4.36	80	660
EK5	四方十帯	33° 14' 22" N	132° 50' 40" E	20.06	90	790
EK6	四方十帯	33° 14' 22" N	132° 50' 43" E	9.06	100	922
EK7	四方十帯	33° 14' 21" N	132° 51' 59" E	5.65	100	760
EK8*	四方十帯	33° 10' 35" N	132° 49' 14" E	2.11	120	654
HN1	四方十帯	33° 20' 58" N	133° 8' 4" E	20.28	300	1053
HN2	四方十帯	33° 21' 44" N	133° 8' 20" E	4.11	300	842
HN3	四方十帯	33° 23' 3" N	133° 7' 55" E	8.76	320	738
HN4	四方十帯	33° 23' 3" N	133° 7' 58" E	13.95	320	842
IY1	四方十帯	33° 10' 0" N	133° 7' 6" E	0.49	230	392
IY2	四方十帯	33° 8' 49" N	133° 3' 4" E	5.99	220	596
IY3	四方十帯	33° 8' 51" N	133° 2' 55" E	1.91	230	538
IY4	四方十帯	33° 8' 8" N	133° 1' 26" E	0.91	190	508
IY5	四方十帯	33° 7' 59" N	133° 1' 28" E	7.81	180	687
IY6	四方十帯	33° 7' 58" N	133° 0' 44" E	2.74	170	498
IY7*	四方十帯	33° 9' 46" N	133° 2' 19" E	4.45	175	578
KB1	四方十帯	33° 13' 57" N	133° 13' 32" E	0.56	290	457
KB2	四方十帯	33° 11' 44" N	133° 11' 25" E	2.64	265	560
KB3	四方十帯	33° 11' 58" N	133° 9' 47" E	1.47	250	610
KK1	四方十帯	33° 18' 35" N	133° 4' 11" E	14.32	280	875
KK2	四方十帯	33° 18' 52" N	133° 4' 18" E	14.75	270	1053
KK3	四方十帯	33° 17' 42" N	133° 6' 16" E	4.29	240	806
KK4	四方十帯	33° 19' 59" N	133° 6' 3" E	6.27	280	856
KK5*	四方十帯	33° 16' 32" N	133° 5' 49" E	2.49	250	780
KN1	四方十帯	33° 0' 52" N	132° 48' 42" E	10.21	100	681
KN2	四方十帯	33° 1' 27" N	132° 49' 51" E	4.48	40	635
KN3	四方十帯	33° 3' 41" N	132° 49' 8" E	22.39	30	751
KN4	四方十帯	33° 4' 17" N	132° 48' 59" E	6.32	20	649
KR1	四方十帯	33° 18' 42" N	133° 10' 38" E	0.90	300	556
KR2	四方十帯	33° 17' 22" N	133° 9' 5" E	2.20	290	692
KR3	四方十帯	33° 17' 28" N	133° 8' 36" E	2.22	270	692
KR4	四方十帯	33° 16' 26" N	133° 11' 30" E	1.90	290	690
KR5	四方十帯	33° 20' 3" N	133° 9' 13" E	3.97	305	570
KY1	四方十帯	33° 5' 20" N	132° 45' 3" E	8.35	90	751
KY2	四方十帯	33° 6' 50" N	132° 49' 21" E	10.35	30	735
KY3	四方十帯	33° 7' 46" N	132° 48' 59" E	4.48	30	682
KY4	四方十帯	33° 7' 45" N	132° 46' 56" E	5.86	60	563
KY5	四方十帯	33° 8' 49" N	132° 45' 28" E	3.03	80	456
KY6	四方十帯	33° 9' 44" N	132° 50' 44" E	5.34	200	856
KY7	四方十帯	33° 9' 29" N	132° 50' 52" E	1.82	220	856
KY8	四方十帯	33° 9' 18" N	132° 50' 37" E	5.96	220	831
KY9*	四方十帯	33° 10' 2" N	132° 50' 14" E	2.89	170	636
MM1	花崗岩	33° 12' 13" N	132° 39' 32" E	10.52	360	1228
MM2	花崗岩	33° 11' 26" N	132° 40' 18" E	5.59	270	1200
MM3	四方十帯	33° 11' 14" N	132° 40' 41" E	2.39	240	683
MU1	花崗岩	33° 7' 46" N	132° 40' 41" E	17.66	210	1200
MU2	四方十帯	33° 7' 37" N	132° 40' 37" E	7.12	200	1105
MU3	四方十帯	33° 8' 43" N	132° 44' 38" E	2.81	120	430
MU4	四方十帯	33° 9' 32" N	132° 41' 54" E	4.54	170	888
MU5	花崗岩	33° 9' 51" N	132° 41' 14" E	6.11	190	1156
MU6*	四方十帯	33° 8' 56" N	132° 42' 52" E	3.85	145	725
NK1	四方十帯	32° 57' 51" N	132° 54' 4" E	5.74	10	477
OM1	秩父帯石灰岩	33° 26' 12" N	132° 58' 13" E	11.20	530	1455
OM2	秩父帯石灰岩	33° 26' 5" N	132° 55' 49" E	9.06	510	1342
OM3	秩父帯石灰岩	33° 27' 11" N	132° 52' 55" E	2.94	580	1320
OM4	秩父帯石灰岩	33° 27' 4" N	132° 52' 32" E	4.02	560	1402
OM5	秩父帯	33° 26' 21" N	132° 52' 54" E	2.93	520	1052
OM6	秩父帯	33° 25' 16" N	132° 52' 52" E	2.95	460	1098
OY1	四方十帯	33° 8' 44" N	132° 58' 54" E	3.77	180	594
OY2	四方十帯	33° 8' 35" N	132° 59' 24" E	1.13	180	560
OY3	四方十帯	33° 7' 46" N	132° 57' 29" E	2.24	120	560
OY4	四方十帯	33° 7' 46" N	132° 57' 28" E	3.99	120	659
OY5	四方十帯	33° 6' 46" N	132° 56' 7" E	3.52	120	730
OY6	四方十帯	33° 6' 16" N	132° 54' 26" E	5.64	140	779
OY7	四方十帯	33° 6' 18" N	132° 54' 28" E	8.06	140	779
OY8	四方十帯	33° 6' 16" N	132° 53' 34" E	4.95	90	745
OY9	四方十帯	33° 6' 15" N	132° 53' 37" E	11.35	90	856
OZ1	秩父帯	33° 26' 25" N	133° 4' 53" E	1.64	650	1336
OZ2	秩父帯	33° 26' 31" N	133° 5' 6" E	1.50	620	1183
OZ3	秩父帯石灰岩	33° 27' 30" N	133° 2' 14" E	8.61	570	1336
OZ4	秩父帯	33° 26' 46" N	133° 1' 25" E	9.75	500	1336
OZ5	秩父帯石灰岩	33° 26' 6" N	133° 0' 11" E	4.50	450	1050
SD1	秩父帯石灰岩	33° 25' 11" N	133° 4' 51" E	2.56	440	1336
SD2	四方十帯	33° 23' 57" N	133° 2' 51" E	3.51	430	925
SD3*	四方十帯	33° 23' 52" N	133° 5' 23" E	3.41	390	880
TK1	四方十帯	33° 13' 51" N	133° 5' 31" E	10.30	250	808
TK2	四方十帯	33° 14' 26" N	133° 3' 32" E	16.29	250	908
TK3	四方十帯	33° 12' 40" N	133° 3' 9" E	2.41	220	560
TK4	四方十帯	33° 13' 4" N	133° 2' 35" E	3.06	250	720
TK5*	四方十帯	33° 11' 1" N	133° 1' 1" E	3.92	170	514
TK6*	四方十帯	33° 11' 33" N	133° 2' 51" E	3.10	175	608
TM1	四方十帯	33° 19' 39" N	132° 56' 16" E	3.34	220	1000
TM2	四方十帯	33° 19' 41" N	132° 59' 33" E	1.56	310	790
TM3	四方十帯	33° 19' 40" N	132° 59' 34" E	7.39	310	922
TM4	四方十帯	33° 20' 8" N	132° 57' 37" E	0.39	290	520
TN1	四方十帯石灰岩	33° 14' 1" N	132° 52' 51" E	28.20	90	1128
TN2	四方十帯	33° 13' 48" N	132° 54' 44" E	13.11	120	924
TN3	四方十帯	33° 13' 12" N	132° 54' 49" E	2.94	100	714
TN4	四方十帯	33° 10' 44" N	132° 59' 26" E	2.75	170	580
TN5*	四方十帯	33° 12' 12" N	132° 59' 44" E	12.92	110	856
TN6*	四方十帯	33° 13' 5" N	132° 59' 16" E	18.23	160	758
YS1	秩父帯	33° 25' 4" N	132° 55' 8" E	4.22	450	1103
YS2	四方十帯	33° 21' 51" N	132° 54' 59" E	3.91	360	1022
YS3	四方十帯	33° 21' 45" N	132° 56' 37" E	5.30	330	1103
YS4	四方十帯	33° 20' 19" N	132° 57' 45" E	0.19	280	750
YS5	四方十帯	33° 20' 24" N	132° 57' 47" E	0.19	285	750
YS6*	秩父帯	33° 23' 53" N	132° 53' 1" E	5.93	420	1055
YS7*	四方十帯	33° 22' 50" N	132° 53' 2" E	1.50	440	900

Appendix Table 2 夏季の調査流域における各溶存無機成分濃度
Results of stream water chemistry in summer

地点	pH	EC mS m ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	T-N mg L ⁻¹	R1	R2
長生	7.57	8.25	4.20	0.01	0.67	1.32	9.78	2.91	0.06	6.33	5.01	37.53	0.19	-2.2	-4.3
中平	7.83	7.79	3.04	0.00	0.46	1.02	10.50	2.08	0.15	4.76	5.25	40.14	0.20	-4.6	-4.8
轟崎	7.52	6.80	4.72	0.00	0.54	0.91	6.85	3.12	0.11	6.60	7.67	27.07	0.11	-3.1	-4.1
AR1	7.44	9.20	6.47	0.00	0.49	2.44	7.82	5.05	0.21	6.36	7.50	35.55	0.21	1.0	-2.9
AR2	7.50	9.66	5.98	0.02	0.87	2.25	8.69	5.04	0.21	10.12	6.36	36.17	0.28	-3.1	-4.5
AR3	7.47	9.38	6.27	0.00	0.71	2.25	8.07	4.68	0.12	9.94	7.06	36.09	0.12	-3.3	-4.4
EK2	7.66	11.55	6.84	0.02	1.40	2.61	11.05	4.54	0.13	13.01	5.59	44.57	0.25	-1.7	-4.6
EK3	7.53	9.50	5.16	0.00	0.81	1.26	10.61	3.50	0.24	11.74	7.49	35.08	0.34	-3.1	-4.5
EK4	7.48	8.64	5.07	0.00	0.76	1.28	9.05	3.31	0.19	10.08	7.02	31.60	0.20	-2.3	-3.7
EK5	7.59	9.68	7.13	0.00	1.16	1.97	8.09	4.31	0.23	10.31	6.26	36.66	0.28	-2.6	-4.0
EK6	7.58	9.07	6.91	0.00	1.10	1.87	7.26	3.58	0.10	10.44	5.89	34.62	0.16	-2.7	-3.8
EK7	7.48	8.99	6.29	0.00	0.98	1.69	7.94	3.56	0.18	10.50	6.49	33.62	0.22	-2.8	-3.9
EK8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
HN1	7.55	5.61	3.67	0.00	0.41	0.89	5.68	2.09	0.07	4.49	5.51	25.40	0.07	-4.1	-3.8
HN2	7.25	4.91	4.14	0.00	0.39	0.86	3.88	2.62	0.08	3.60	6.15	21.07	0.08	-4.6	-3.3
HN3	7.56	6.97	3.71	0.00	0.44	1.28	7.70	2.21	0.14	4.05	5.07	33.97	0.15	-3.6	-3.3
HN4	7.52	5.77	3.40	0.00	0.31	1.00	5.98	2.22	0.07	3.56	5.27	27.29	0.07	-4.6	-2.9
IY1	7.21	7.55	5.68	0.00	0.61	1.47	6.52	4.87	0.07	4.77	6.06	30.67	0.11	-2.4	-3.3
IY2	7.37	6.06	5.26	0.00	0.67	0.82	4.90	4.02	0.10	4.75	7.46	22.85	0.13	-3.1	-3.3
IY3	7.16	6.10	5.51	0.00	0.72	0.86	4.65	3.79	0.09	5.57	7.52	22.56	0.09	-3.2	-3.5
IY4	7.15	6.42	6.03	0.00	0.72	0.92	4.98	3.47	0.13	5.89	7.68	25.00	0.13	-2.7	-4.0
IY5	7.49	6.72	5.56	0.00	0.67	1.13	5.49	3.94	0.10	5.47	7.08	25.95	0.09	-2.4	-3.2
IY6	7.39	6.84	5.50	0.00	0.70	0.91	6.12	3.65	0.09	5.75	8.16	27.12	0.09	-2.6	-3.4
IY7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
KB1	6.96	4.90	4.95	0.00	0.73	0.66	2.81	4.46	0.16	3.55	6.13	16.00	0.17	-4.6	-2.4
KB2	7.09	7.00	6.07	0.02	0.85	0.99	5.59	5.36	0.23	4.34	7.85	25.65	0.34	-2.3	-3.2
KB3	7.28	6.10	5.48	0.00	0.63	0.81	5.03	4.26	0.11	4.72	7.70	23.10	0.11	-2.7	-4.1
KK1	7.41	5.44	4.09	0.00	0.57	0.76	4.64	2.21	0.10	6.43	6.82	19.69	0.10	-3.8	-2.8
KK2	7.57	6.25	4.20	0.00	0.52	0.83	5.53	2.30	0.08	6.80	5.92	24.15	0.08	-5.8	-1.6
KK3	7.37	6.25	4.60	0.00	0.47	0.71	6.02	2.53	0.05	6.20	6.95	25.15	0.12	-3.8	-3.0
KK4	7.47	5.62	4.28	0.00	0.43	0.88	5.01	2.30	0.12	4.83	6.31	24.28	0.13	-4.5	-3.5
KK5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
KN1	7.43	6.46	5.18	0.00	0.59	1.17	5.17	4.26	0.10	6.04	7.26	23.36	0.13	-3.3	-3.8
KN2	7.27	8.48	5.65	0.00	0.65	1.54	8.33	4.40	0.17	7.63	7.35	32.67	0.17	-1.5	-4.1
KN3	7.33	6.25	4.95	0.00	0.60	1.00	5.22	3.88	0.09	5.83	6.93	23.98	0.16	-4.6	-4.1
KN4	7.37	6.99	5.56	0.00	0.71	1.07	5.86	3.67	0.13	8.00	7.93	24.16	0.13	-2.6	-3.6
KR1	7.11	5.48	4.56	0.00	0.51	0.75	4.49	3.04	0.08	5.39	6.93	20.66	0.08	-4.3	-3.3
KR2	7.33	6.64	4.60	0.00	0.79	0.85	6.47	3.12	0.29	6.20	7.00	25.18	0.29	-2.8	-3.7
KR3	7.08	6.36	4.68	0.02	0.76	0.78	5.80	3.36	0.20	5.60	6.71	24.48	0.29	-4.0	-3.3
KR4	7.19	5.30	4.72	0.00	0.52	0.72	4.06	3.53	0.10	4.88	7.16	19.02	0.10	-3.9	-3.3
KR5	7.15	5.05	4.41	0.00	0.60	0.70	3.83	2.89	0.12	4.39	7.20	19.27	0.13	-4.2	-2.8
KY1	7.38	6.10	4.66	0.00	0.50	0.90	5.35	3.60	0.13	6.34	7.25	21.74	0.13	-3.6	-3.8
KY2	7.26	7.51	5.16	0.00	0.67	0.99	7.50	3.64	0.17	8.06	7.61	26.92	0.17	-1.7	-3.8
KY3	7.61	7.68	5.54	0.00	1.05	1.14	6.97	4.25	0.22	8.51	7.75	28.42	0.22	-4.4	-5.1
KY4	7.48	6.38	4.71	0.00	0.59	1.02	5.38	3.25	0.14	7.05	7.40	22.45	0.14	-3.6	-3.0
KY5	7.64	9.14	4.56	0.00	0.51	2.36	7.97	4.03	0.16	9.28	5.53	35.47	0.21	-5.5	-2.4
KY6	7.53	8.15	5.01	0.00	0.73	1.17	8.13	3.27	0.15	9.77	7.30	30.34	0.15	-3.1	-4.3
KY7	7.52	7.62	5.13	0.00	0.73	1.11	7.43	3.59	0.33	8.25	7.83	27.22	0.33	-2.5	-4.1
KY8	7.33	6.48	4.77	0.00	0.68	0.85	5.72	3.61	0.21	6.71	7.35	22.74	0.27	-3.9	-3.2
KY9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
MM1	6.73	2.95	2.91	0.00	0.31	0.42	1.44	3.74	0.19	2.64	4.28	6.88	0.19	-8.2*	-3.4
MM2	7.05	3.15	2.96	0.00	0.31	0.50	1.85	3.25	0.10	2.45	5.14	9.33	0.10	-5.4	-2.6
MM3	7.41	5.25	4.26	0.00	0.49	0.86	4.26	3.74	0.12	4.32	6.81	18.92	0.16	-3.3	-3.5
MU1	7.08	4.26	3.73	0.02	0.40	0.59	2.87	3.76	0.28	4.17	5.58	12.75	0.33	-7.1	-3.7
MU2	7.30	4.55	3.78	0.00	0.33	0.76	3.44	3.74	0.14	4.07	6.26	15.12	0.13	-4.6	-3.7
MU3	7.50	8.35	5.33	0.00	0.81	1.84	7.84	3.71	0.12	8.76	6.30	32.08	0.14	-1.6	-4.4
MU4	7.30	5.19	4.05	0.00	0.45	0.76	4.44	3.51	0.13	4.23	6.86	18.47	0.14	-2.7	-2.9
MU5	6.94	3.99	3.51	0.00	0.19	0.57	2.82	3.40	0.23	3.40	5.32	12.84	0.24	-6.4	-3.1
MU6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
NK1	7.00	6.03	5.33	0.00	0.15	1.33	3.56	4.71	0.13	6.93	6.90	17.57	0.15	-4.7	-2.6
OM1	8.05	12.16	2.44	0.00	0.32	1.30	20.54	1.93	0.21	3.27	4.18	70.46	0.21	-1.8	-5.2
OM2	7.65	6.76	2.43	0.00	0.24	1.60	8.01	2.18	0.14	2.87	5.05	35.21	0.18	-4.7	-3.5
OM3	8.06	14.53	2.73	0.00	0.34	2.43	22.91	2.40	0.30	6.77	4.30	70.84	0.30	2.8	-3.3
OM4	8.06	13.54	3.00	0.00	0.31	1.89	21.51	2.55	0.26	3.48	4.94	77.48	0.26	-2.3	-4.7
OM5	7.59	8.68	3.34	0.00	0.59	1.70	10.56	2.75	0.33	5.70	5.45	40.54	0.40	-3.3	-4.0
OM6	7.82	9.59	3.09	0.00	0.38	1.88	12.51	2.82	0.24	5.80	5.78	47.01	0.24	-3.4	-4.2
OY1	7.44	7.30	5.39	0.00	0.64	0.92	7.32	3.43	0.12	7.33	8.47	29.60	0.12	-3.5	-4.9
OY2	7.58	7.87	5.32	0.00	0.60	1.04	8.19	3.65	0.14	8.07	8.88	30.28	0.14	-2.2	-4.3
OY3	7.61	8.27	5.84	0.00	0.76	1.06	8.58	3.94	0.22	6.98	8.42	34.27	0.24	-2.7	-4.6
OY4	7.58	8.02	5.29	0.00	0.65	1.04	8.64	3.45	0.15	7.58	7.73	32.63	0.15	-2.2	-4.5
OY5	7.52	8.10	5.54	0.00	0.78	1.58	7.54	3.88	0.17	7.74	6.99	32.21	0.17	-2.7	-4.5
OY6	7.45	7.12	5.14	0.00	0.59	1.00	6.85	3.84	0.12	6.40	7.52	28.30	0.15	-3.6	-4.1
OY7	7.54	7.65	5.37	0.00	0.69	1.19	7.45	3.68	0.14	7.48	7.54	30.28	0.14	-3.0	-4.4
OY8	7.47	7.25	4.93	0.00	0.59	0.90	7.31	3.69	0.16	7.37	7.36	27.28	0.16	-3.4	-4.0
OY9	7.51	7.48	5.10	0.00	0.59	0.94	7.54	3.46	0.13	7.35	7.79	29.55	0.13	-3.7	-3.8
OZ1	7.11	2.83	2.09	0.00	0.24	0.45	2.14	1.73	0.11	2.29	4.62	12.00	0.11	-10.2*	-3.1
OZ2	7.12	2.90	2.41	0.00	0.25	0.43	2.10	1.66	0.10	2.22	5.19	13.95	0.10	-13.5*	-4.9
OZ3	7.44	5.19	2.69	0.00	0.34	0.74	5.92	1.86	0.11	3.61	5.03	25.28	0.13	-6.6	-4.1
OZ4	7.38	3.94	2.73	0.00	0.33	0.59	3.78	1.83	0.13	2.93	5.83	17.86	0.13	-6.4	-4.3
OZ5	7.79	9.80	3.17	0.00	0.41	1.08	14.53	2.11	0.11	5.24	5.56	51.63	0.11	-3.0	-4.5
SD1	7.97	13.16	2.90	0.00	0.28	1.56	21.54	2.08	0.22	4.48	4.81	74.71	0.22	-2.0	-5.0
SD2	7.56	6.70	3.33	0.00	0.32	1.15	7.81	1.88	0.11	4.93	5.78	31.41	0.11	-3.0	-3.6
SD3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
TK1	7.35	6.17	4.46	0.00	0.58	0.73	5.86	2.88	0.07	6.03					

Appendix Table 3 冬季の調査流域における各溶存無機成分濃度
Results of stream water chemistry in winter

地点	pH	EC mS m ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	T-N mg L ⁻¹	R1	R2
長生	7.60	9.45	4.79	0.00	0.59	1.51	11.26	3.33	0.18	7.80	3.90	43.08	0.28	-3.5	-4.9
中平	8.00	9.62	3.40	0.02	0.29	1.23	13.49	2.34	0.22	6.78	3.78	45.24	0.29	-1.8	-4.0
轟崎	7.50	7.07	4.91	0.00	0.47	0.94	6.85	3.20	0.16	7.75	5.83	27.68	0.16	-5.3	-4.2
AR1	7.44	8.99	6.27	0.00	0.37	1.87	5.90	4.88	0.39	7.30	4.40	36.31	0.42	-11.1*	-0.8
AR2	7.43	9.24	6.23	0.00	0.60	1.62	6.12	4.97	0.23	11.39	3.91	31.28	0.33	-11.1*	-0.7
AR3	7.35	9.66	6.62	0.00	0.60	2.34	8.03	4.76	0.21	11.61	5.74	34.31	0.26	-3.0	-4.4
EK2	7.66	12.10	7.46	0.00	0.87	2.97	11.43	4.20	0.50	13.85	4.54	48.17	0.53	-2.9	-5.4
EK3	7.59	9.86	5.19	0.00	0.57	1.97	11.38	3.08	0.40	13.08	6.19	37.00	0.43	-3.9	-5.4
EK4	7.56	8.85	5.16	0.00	0.55	1.35	9.40	3.13	0.27	11.86	5.57	32.52	0.27	-4.0	-5.0
EK5	7.62	9.85	7.37	0.00	0.74	2.09	8.41	3.78	0.40	11.00	4.93	38.61	0.47	-3.3	-4.8
EK6	7.68	9.99	7.56	0.00	0.77	2.20	8.51	3.30	0.31	10.89	5.19	42.04	0.34	-3.8	-5.0
EK7	7.49	9.15	6.51	0.00	0.66	1.80	8.21	3.41	0.31	10.71	4.98	35.62	0.34	-3.7	-4.7
EK8	7.52	10.63	5.54	0.00	0.63	1.63	12.00	3.39	0.30	14.69	5.35	39.89	0.34	-4.1	-5.5
HN1	7.46	5.86	3.77	0.00	0.34	0.98	5.97	2.37	0.15	5.25	4.43	25.27	0.17	-4.3	-4.4
HN2	7.32	4.86	4.28	0.00	0.36	0.85	3.58	2.82	0.13	4.04	5.05	19.59	0.15	-5.3	-3.5
HN3	7.60	6.93	3.83	0.00	0.38	1.28	7.50	2.45	0.28	4.60	4.11	33.22	0.34	-5.2	-4.4
HN4	7.58	5.75	3.50	0.00	0.31	1.02	5.98	2.35	0.18	3.95	4.12	28.31	0.18	-7.1	-5.1
IY1	7.31	7.11	5.77	0.00	0.53	1.40	5.40	4.91	0.12	5.79	5.52	27.32	0.13	-4.8	-3.7
IY2	7.32	5.91	5.24	0.00	0.52	0.74	4.21	4.12	0.22	5.39	6.25	22.85	0.26	-9.3 *	-3.9
IY3	7.28	5.58	5.38	0.00	0.54	0.71	3.63	3.70	0.19	5.90	6.30	21.04	0.26	-9.3 *	-4.3
IY4	7.34	6.02	5.74	0.00	0.52	0.75	4.00	3.56	0.18	6.20	6.37	22.75	0.21	-7.8	-3.2
IY5	7.38	6.36	5.42	0.01	0.51	0.97	4.50	4.05	0.20	6.09	5.70	24.55	0.25	-8.5 *	-3.6
IY6	7.41	6.53	5.45	0.00	0.52	0.77	4.90	3.81	0.16	6.37	6.23	24.65	0.20	-8.0 *	-2.3
IY7	7.36	6.09	4.79	0.00	0.42	0.74	5.40	3.42	0.21	6.36	6.37	24.65	0.24	-8.2 *	-5.2
KB1	7.08	5.48	5.49	0.00	0.62	0.74	3.59	4.78	0.29	3.93	5.98	18.41	0.30	-4.0	-3.6
KB2	7.36	6.69	6.16	0.00	0.63	0.94	5.26	5.18	0.24	4.35	7.38	24.52	0.24	-2.4	-3.6
KB3	7.34	6.37	5.71	0.00	0.49	0.85	5.19	4.19	0.15	5.22	7.06	24.54	0.22	-4.0	-4.0
KK1	7.43	6.03	4.45	0.00	0.45	0.92	5.39	2.41	0.11	7.83	5.66	21.88	0.11	-4.1	-4.1
KK2	7.49	6.69	4.65	0.00	0.44	1.02	6.51	2.44	0.14	8.12	4.98	27.06	0.14	-5.2	-5.1
KK3	7.48	6.78	5.08	0.00	0.44	0.83	6.67	2.75	0.13	7.63	6.02	27.12	0.17	-4.3	-4.7
KK4	7.44	6.03	4.66	0.00	0.44	0.98	5.34	2.71	0.19	6.05	5.20	23.74	0.20	-3.7	-4.1
KK5	7.40	6.89	5.09	0.00	0.57	0.85	6.77	2.89	0.17	7.31	6.23	26.81	0.17	-3.1	-4.2
KN1	7.41	6.63	5.30	0.00	0.45	1.19	5.17	4.21	0.14	7.37	5.84	23.69	0.17	-5.6	-4.4
KN2	7.27	9.01	5.86	0.00	0.53	1.62	8.51	4.42	0.30	9.39	5.43	33.81	0.35	-4.0	-4.0
KN3	7.30	6.82	5.13	0.02	0.53	1.10	5.60	3.88	0.19	7.44	5.49	24.85	0.34	-6.0	-3.9
KN4	7.34	7.49	5.74	0.00	0.57	1.18	6.22	3.60	0.21	10.05	6.31	25.69	0.30	-5.2	-4.3
KR1	7.25	5.44	4.78	0.00	0.49	0.75	4.42	3.19	0.14	5.60	6.26	20.32	0.14	-4.4	-4.5
KR2	7.34	6.89	4.86	0.00	0.69	0.91	6.60	3.41	0.37	7.10	6.11	25.13	0.39	-3.6	-4.2
KR3	7.29	6.47	4.71	0.00	0.58	0.81	6.26	3.20	0.21	6.18	6.19	25.78	0.24	-4.5	-4.4
KR4	7.22	5.55	4.96	0.00	0.45	0.76	4.34	3.61	0.13	5.83	6.37	18.88	0.13	-3.3	-3.8
KR5	7.30	5.10	4.59	0.00	0.53	0.73	3.86	2.93	0.19	5.03	5.91	18.44	0.22	-3.7	-3.6
KY1	7.34	6.59	4.74	0.01	0.44	1.00	5.72	3.46	0.21	8.00	6.11	23.16	0.25	-5.8	-4.0
KY2	7.30	8.18	5.38	0.00	0.52	1.13	8.24	3.59	0.26	9.48	6.21	29.89	0.29	-3.5	-4.2
KY3	7.45	8.61	5.88	0.00	0.58	1.42	8.36	3.49	0.30	10.90	6.46	31.36	0.33	-3.3	-5.0
KY4	7.36	6.95	4.93	0.00	0.46	1.19	6.04	3.17	0.22	8.57	6.21	25.19	0.25	-5.4	-4.1
KY5	7.61	9.97	5.62	0.00	0.90	2.79	8.72	3.97	0.37	10.26	4.33	40.09	0.56	-3.9	-4.4
KY6	7.50	8.51	5.19	0.01	0.54	1.50	8.40	3.26	0.25	10.58	5.78	30.78	0.30	-3.2	-4.1
KY7	7.50	8.48	5.56	0.00	0.57	1.30	8.37	3.63	0.35	10.20	6.51	30.63	0.40	-3.7	-4.5
KY8	7.46	6.78	5.04	0.00	0.50	0.93	6.25	3.30	0.19	7.68	6.27	24.49	0.21	-3.7	-4.0
KY9	7.54	9.78	5.61	0.00	0.60	1.51	10.36	3.47	0.31	13.78	5.51	35.60	0.35	-4.7	-5.3
MM1	6.55	2.87	2.83	0.00	0.27	0.43	1.40	3.46	0.24	2.87	3.56	7.51	0.43	-11.4 *	-5.1
MM2	6.85	2.97	2.84	0.00	0.29	0.45	1.62	3.11	0.16	2.56	4.28	11.29	0.16	-15.0 *	-6.1
MM3	7.20	5.65	4.28	0.00	0.42	0.97	4.81	3.63	0.18	5.49	5.90	23.05	0.18	-8.0 *	-5.8
MU1	6.98	4.49	3.73	0.02	0.35	0.65	3.04	3.93	0.33	4.57	4.66	14.38	0.44	-10.4 *	-4.4
MU2	7.21	4.84	3.78	0.00	0.33	0.85	3.66	3.62	0.14	4.52	5.26	17.35	0.18	-7.1	-3.8
MU3	7.55	8.12	5.32	0.00	0.55	1.77	7.03	3.32	0.27	10.28	5.33	31.00	0.31	-5.9	-4.9
MU4	7.30	5.12	4.11	0.02	0.16	0.75	4.17	3.35	0.18	5.28	5.73	19.02	0.21	-7.6	-4.4
MU5	6.95	3.36	3.12	0.00	0.30	0.49	2.07	3.25	0.24	3.26	4.52	10.38	0.27	-9.3 *	-4.8
MU6	7.23	5.52	4.32	0.00	0.37	1.05	4.54	3.42	0.26	7.09	5.36	19.59	0.29	-6.7	-6.7
NK1	7.00	5.53	5.00	0.00	0.41	0.88	2.38	4.60	0.23	6.55	4.84	16.15	0.28	-13.2 *	-1.0
OM1	7.91	9.90	2.93	0.01	0.27	1.30	15.22	2.10	0.29	4.75	3.61	53.97	0.30	-3.1	-5.9
OM2	7.64	6.64	2.31	0.01	0.15	1.70	7.74	2.16	0.19	3.50	3.90	35.30	0.28	-7.0	-4.8
OM3	8.07	14.77	2.61	0.02	0.25	2.26	23.62	2.45	0.34	8.15	2.97	79.62	0.36	-2.7	-5.6
OM4	8.04	11.96	3.03	0.01	0.23	2.11	17.19	2.61	0.29	4.16	3.86	65.10	0.31	-3.3	-3.8
OM5	7.71	8.08	3.25	0.02	0.39	1.53	9.36	2.74	0.41	6.41	4.28	35.60	0.46	-5.0	-3.8
OM6	7.80	9.51	3.08	0.01	0.31	1.82	11.81	2.69	0.28	6.98	4.41	43.41	0.32	-3.9	-3.0
OY1	7.40	7.29	5.44	0.00	0.54	0.76	5.95	3.42	0.22	7.92	6.46	29.40	0.24	-10.8 *	-2.8
OY2	7.48	7.98	5.33	0.00	0.52	0.91	6.91	3.67	0.24	8.70	6.89	32.08	0.29	-10.9 *	-2.7
OY3	7.46	8.10	5.81	0.00	0.54	0.87	6.68	3.76	0.32	7.68	6.10	32.18	0.37	-9.6 *	-1.5
OY4	7.59	8.56	5.62	0.00	0.53	0.91	7.24	3.56	0.28	9.09	5.22	33.07	0.32	-10.1 *	-0.9
OY5	7.51	8.36	5.77	0.00	0.58	1.30	5.87	3.87	0.24	9.76	4.38	30.49	0.29	-10.9 *	-0.8
OY6	7.49	7.70	5.32	0.00	0.51	0.90	5.93	3.80	0.17	7.85	4.78	30.21	0.19	-11.7 *	-0.8
OY7	7.58	8.09	5.48	0.00	0.52	1.04	6.13	3.75	0.17	8.78	4.49	32.17	0.20	-12.5 *	-1.2
OY8	7.51	7.98	5.24	0.00	0.49	0.80	6.31	3.57	0.18	8.94	4.57	31.03	0.27	-13.1 *	-0.6
OY9	7.63	8.39	5.40	0.00	0.50	0.88	6.67	3.49	0.19	8.93	4.86	34.11	0.23	-13.5 *	-0.5
OZ1	7.01	2.81	2.10	0.00	0.27	0.46	2.17	1.83	0.17	2.46	3.69	12.36	0.17	-13.0 *	-5.8
OZ2	7.04	2.89	2.55	0.00	0.29	0.42	2.10	1.82	0.18	2.53	4.35	12.83	0.18	-11.6 *	-6.1
OZ3	7.57	5.87	2.86	0.01	0.26	0.76	6.12	2.33	0.16	4.72	3.67	26.16	0.17	-9.5 *	-2.0
OZ4	7.42	4.09	2.89	0.01	0.26	0.62	3.35	1.85	0.13	3.55	4.31	18.49	0.14	-11.1 *	-3.2
OZ5	8.04	10.03	3.35	0.01	0.35	0.99	13.75	2.14	0.15	6.29	3.93	51.28	0.16	-6.1	-3.0
SD1	8.06	11.59	3.11	0.01	0.27	1.26	16.47	2.14	0.32	5.78	3.60	60.32	0.33	-5.4	

Stream water chemistry of forested headwater areas in the Shimanto River basin

Shuichiro YOSHINAGA^{1)*}, Tsuyoshi YAMADA²⁾, Yoshiyuki INAGAKI³⁾, Satoru MIURA⁴⁾
and Yoshiki SHINOMIYA⁴⁾

Abstract

In this study, the spatial distribution of stream water chemistry was investigated in headwater areas within the Shimanto River basin to evaluate the effect of forested headwater on the quality of downstream waters under ordinary flow condition. The study area was mainly underlain by Paleozoic/Mesozoic sandstone and shale, with partially exposed limestone and granite. The difference in the bedrock geology of the catchments strongly affected the solute composition of the stream water. The catchments underlain by limestone were characterized by high pH, EC, and Ca^{2+} and HCO_3^- concentrations, and the ones underlain by granite were characterized by low pH, EC, and concentrations of major ions as compared to the catchments underlain by sandstone and shale. The concentrations of Na^+ and Cl^- negatively corresponded to a distance from the coastline of the Pacific Ocean, thereby suggesting the difference in the deposition of sea salt during storm events that frequently occur from June to October. High runoff rate during rainy season affected the decreasing Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , and SO_4^{2-} concentrations in the stream water by dilution with the rainwater. Warm and humid summer climate may further accelerate the dissolution of silicate minerals in the bedrock and soils, resulting in an increase in the Si concentrations. The mean concentration of dissolved total nitrogen in the headwater was 0.17 mg L^{-1} in summer and 0.26 mg L^{-1} in winter. These results satisfy one of clear stream standards of the Shimanto River (i.e., 0.3 mg L^{-1} for dissolved total nitrogen) established by Kochi Prefecture Government and indicate that the forested headwaters would contribute to the clear downstream water environment.

Key words : Shimanto River, forested headwater area, stream water chemistry, dissolved total nitrogen, clear stream standard.

Received 18 August 2020, Accepted 1 February 2021

1) Tama Forest Science Garden, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Forest Soils, FFPRI

3) Shikoku Research Center, FFPRI

4) Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI

* Tama Forest Science Garden, FFPRI, 1833-81 Todorii, Hachioji, Tokyo, 193-0843 JAPAN; E-mail: yoshinag@ffpri.affrc.go.jp