

# トンネル掘削残土の溪谷への埋め立てが溪流水質に及ぼす影響

誌名	東京大学農学部演習林報告
ISSN	03716007
著者名	五名,美江 蔵治,光一郎 春田,泰次 大村,和也 千嶋,武 才木,道雄 齋藤,俊浩
発行元	
巻/号	126号
掲載ページ	p. 59-80
発行年月	2012年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



論文

トンネル掘削残土の溪谷への埋め立てが  
渓流水質に及ぼす影響

五名 美江<sup>1)</sup>・蔵治 光一郎<sup>1)</sup>・春田 泰次<sup>1\*)</sup>・大村 和也<sup>2)</sup>・千嶋 武<sup>2)</sup>・  
才木 道雄<sup>1)</sup>・齋藤 俊浩<sup>3)</sup>

Impact of Tunnel Excavation Muck dumped along the canyon  
on Streamwater Chemistry

Mie GOMYO<sup>1)</sup>, Koichiro KURAJI<sup>1)</sup>, Yasuji HARUTA<sup>1\*)</sup>, Kazuya OHMURA<sup>2)</sup>,  
Takeshi CHISHIMA<sup>2)</sup>, Michio SAIKI<sup>1)</sup>, Toshihiro SAITO<sup>3)</sup>

I. はじめに

日本の山地は急峻な地形にあり、鉄道や道路の敷設に際して山を貫通するトンネル開削工事がこれまで数多く行われてきた。近年のトンネル工事は長大化する傾向にあり、鉱山地帯や変質帯、海成堆積岩地域のような岩石中に硫化鉄鉱物を含む岩盤を掘削する場合もある。このような岩盤にトンネルを掘削し、残土を周辺の溪谷に埋め立てると、硫化鉱物が酸素を含んだ降水や地下水と接触し、酸化・分解することによる硫酸酸性浸出水が発生することが、欧米諸国 (Singer and Stumm, 1970; Stollenwerk, 1994; Kinniburgh *et al.* 1994; Evangelou, 1995) や日本 (黒沢ら, 1997, 五十嵐・大山, 1997) で報告されてきている。硫酸酸性浸出水は生物の斃死や有害金属類の流出などにより周辺環境に悪影響を及ぼす可能性がある。

一方、掘削残土の中に方解石や斜長石などの酸性化を緩衝する能力を有する鉱物が多く含まれる場合は、中和作用により浸出水の pH の低下が抑制されるため、浸出水の pH は、硫化鉱物の酸化により生ずる硫酸量と、緩衝鉱物の分解に消費される硫酸量の兼ね合いによって決まると考えられる (五十嵐ら, 2002)。

これまで、様々な性状の岩盤の酸性水発生ポテンシャルについての研究 (五十嵐ら, 2002)、周辺環境に影響を及ぼすトンネル掘削土を判定する指標や基準に関する研究 (服部ら, 2007)、基準を超過した掘削土の処理方法に関する研究 (細川ら, 2007) などが行われてきた。しかしこれらはいずれも採取した試料を実験室に持ち帰り、短期間 (最長 2 カ月) の溶出試験を行って得られた結果を検討しているのみであり、土捨て場の現場において長期間水質をモニタリング

1) 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所  
Ecohydrology Research Institute, The Tokyo University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,  
(11-44 Goizuka-cho, Seto City, Aichi 489-0031 Japan)

2) 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林秩父演習林  
University Forest in Chichibu, The Tokyo University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,  
(1-1-49 Hinodamachi, Chichibu City, Saitama 368-0034 Japan)

3) 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林教育研究センター  
Education and Research Center, The Tokyo University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,  
(1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657 Japan)

\* 元所属 Former affiliation

し、その結果に基づき、土捨て場の渓流水質への影響を調べた例は、本論文でもデータを使用した東京大学秩父演習林の滝川流域の一例（東京大学農学部附属演習林，1998）だけである。

そこで本研究では、トンネル掘削残土の埋め立てによる渓流水の溶存物質濃度の長期的な変化を明らかにするために、トンネル掘削残土の埋め立て区間の直上流、直下流で、埋め立て後5～6年を経過した1999年から2009年までの11年間の渓流水質モニタリングを行い、埋め立て前後のモニタリングデータ（東京大学農学部附属演習林，1998）と合わせて検討した。

## II. 試験地概要

試験地は奥秩父、埼玉・山梨県境の国道140号奥秩父トンネル、雁坂トンネルの土捨て場となった溪谷を含む3流域である（図-1）。雁坂トンネルは1998年4月23日に開通し、延長が6,625mあり、一般国道山岳トンネルでは日本最長である。3流域の基岩は中生層堆積岩であり、地質は中生代大滝層群の石灰岩を伴う砂岩・粘板岩である。掘削残土のX線回折装置を用いた成分分析の結果から、パイライト（ $\text{FeS}_2$ ）は含まれていないものの、いくつかの岩はグレイジャイト（ $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ）を含んでいることが確認されており、工事初期の急激な渓流水質のみならず、長期的に渓流水質に影響を及ぼす可能性が指摘されている（東京大学農学部附属演習林，1998）。年平均降水量は1,397mm、平均気温は11.2℃である（五名ら，2007）。流域の地形、掘削残土の埋め立て場所は図-1(b)に示すとおりである。ワサビ沢には、奥秩父トンネルの掘削残土埋め立てが1987年に行われ、1992～93年に雁坂トンネルの掘削残土が上積みされた。1993年と1996年には緑化工（配合飼料を含む植物生育基盤材ソイルファクターSにピートモスの粉末と在来種のヨモギ、イタドリ、コマツナギ、ヤマハギ、メドハギの種子を混合した土を7cmの厚さで客土）が行われた。トウバク沢には、雁坂トンネルの掘削残土埋め立てが1993～94年にかけて行われ、1995年にワサビ沢と同様の緑化工が行われた。各流域の植生はいずれも山地帯から亜高山帯下部の天然林である。なお、埋め立て直後から3年程度の短期的な渓流水質に与えた影響の大きさについては、EC、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、pH4.8アルカリ度（以下、単にアルカリ度と記載する）の上昇が見られたことが、すでに報告されている（東京大学農学部附属演習林，1998）。

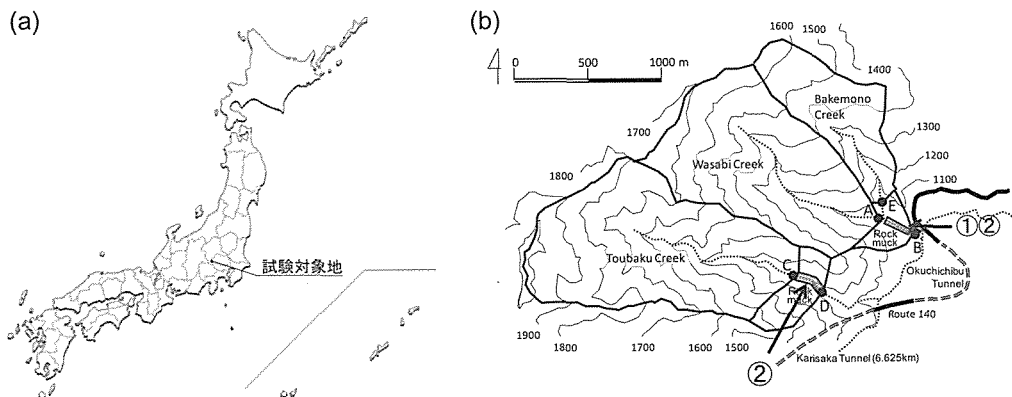


図-1 (a) 試験地の位置、(b) 流域の地形、掘削残土埋め立て場所（①奥秩父トンネル、②雁坂トンネル）および渓流水採水地点（A～E）。

Fig.1. (a) Location and (b) topography for study catchments, showing the tunnel excavation muck dumping sites (① Okuchichibu tunnel and ② Karisaka tunnel) and streamwater sampling points (A～E).

### Ⅲ. 研究方法

両トンネルの掘削残土埋め立て区間の直上流に位置する自然河川のワサビ沢上 (A: 流域面積 95.5ha), トウバク沢上 (C: 95.5ha), バケモノ沢 (E: 41.1ha), 掘削残土埋め立て区間の直下流に位置するワサビ沢下 (B: 145.2ha), トウバク沢下 (D: 125.0ha) の計 5 地点での渓流水のサンプリングを行った。A~E 地点の位置は図-1(b)に示すとおりである。バケモノ沢はワサビ沢の掘削残土埋め立て区間の上流でワサビ沢に合流する。採取期間は 1999~2009 年の 11 年間で、頻度は、1999 年 1 月から 2003 年 7 月までは月 2 回、2003 年 8 月からは月 1 回である。採取した試料は秩父演習林事務所に持ち帰って冷凍保存し、東京大学愛知演習林 (現: 生態水文学研究所) に輸送し、0.2 $\mu$ m フィルターでろ過後、濃度の測定を行った。

濃度の測定項目は、渓流水の酸性化の有無、酸性化の要因、酸性水の中和、イオンバランス、岩石の風化等を評価するための指標となる物質やイオンとし、pH, EC,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Na, K, Mg, Ca, アルカリ度,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  の 11 項目とした。測定方法は、pH (ガラス電極法, HORIBA D-21), EC (EC メーター, HORIBA B-173),  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  (イオンクロマトグラフ法, 島津 HIC-6A), Na, K, Mg, Ca (原子吸光光度法, 日立 180-80), アルカリ度 (酸標準液による滴定法),  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  (モリブデン黄法, 島津 UV-1240) である。また本研究で測定した Na, K, Mg, Ca は、いずれも水溶液中で全量が電離しているとみなし、以下では原子吸光光度法で測定した元素の濃度を、その元素の溶存イオン濃度とみなすこととする。

### Ⅳ. 結果

図-2 から図-12 に、本研究で測定対象とした濃度等の年算術平均値を pH, EC,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , アルカリ度,  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  の順で示す。各図はそれぞれ (a) から (c) の 3 つの図からなり、(a) には掘削残土埋め立ての影響のない 3 つの自然河川、すなわちワサビ沢上 (A), トウバク沢上 (C) およびバケモノ沢 (E) の濃度を、(b) にはワサビ沢上 (A) と下 (B) の濃度を、(c) にはトウバク沢上 (C) と下 (D) の濃度を示す。濃度の標準偏差および平均濃度の差の t 検定を行った結果を示す。各図の 1987~1997 年の平均値および標準偏差は、東京大学農学部附属演習林 (1998) の第 18 章「大規模山岳道路の開設が山地小河川の水質に及ぼす影響」(pp.111-130) の付表 1 より計算した。1997 年はサンプル数が 3 個しかなかったため、検定はしていない。

図-2 より、pH は全地点、全期間を通じて 6.7~7.9 の間に入っており、いずれの地点でも埋め立て後に増加あるいは減少する傾向はみられない。(a) から、自然河川間で 2000~2006 年に有意な差があり、バケモノ沢の pH が低くなっている。一方、掘削残土埋め立ての影響はほとんど検出されなかった。

図-3 より、EC は自然河川で 43~63 $\mu$ S/cm の範囲で推移しており、自然河川間での差は一部の年を除いてなかった。一方、掘削残土埋め立ての影響は、ワサビ沢、トウバク沢とも明瞭に表れ、ワサビ沢下の EC は最大 145 $\mu$ S/cm (2000 年)、トウバク沢下の EC は最大 101 $\mu$ S/cm (1996 年) に増加した。上下間の有意な差は埋め立て開始後 17 年経過した 2009 年まで継続していた。

図-4 より、 $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は自然河川ではワサビ沢、バケモノ沢で 85~130 $\mu$ mol $\text{L}^{-1}$ 、トウバ

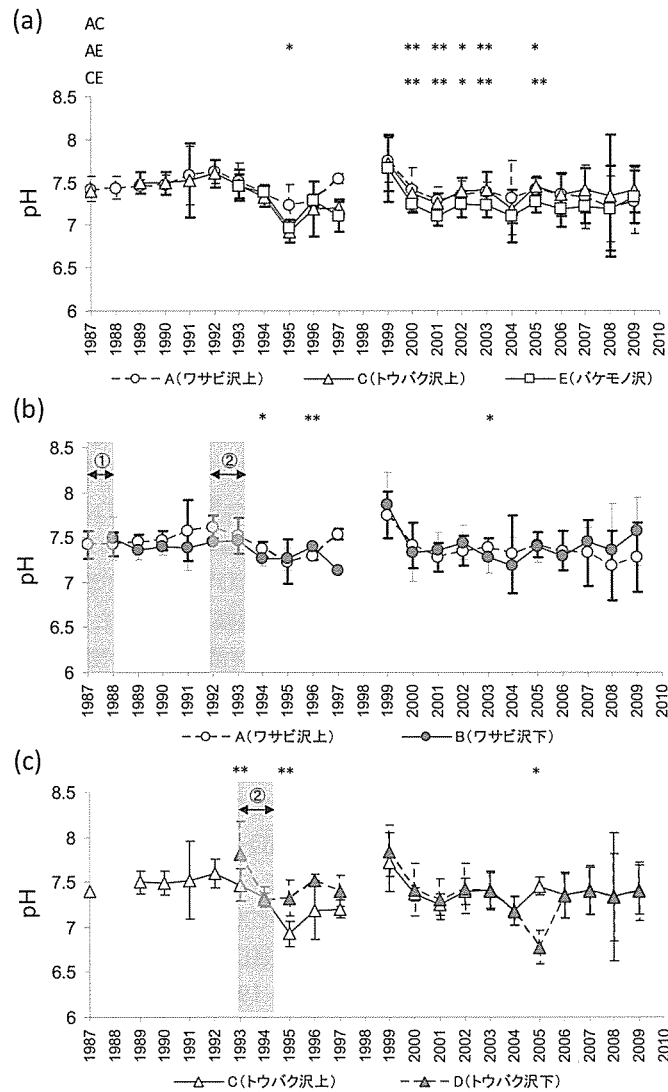


図-2 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均 pH の変動。エラーバーは標準偏差, \* は有意差 95%, \*\* は有意差 99% の検定で平均の差があることを示す。AC はワサビ沢上とトウバク沢上, AE はワサビ沢上とバケモノ沢, CE はトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1987~1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.2. Inter-annual variation of the mean annual pH in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate statistical differences between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1987 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

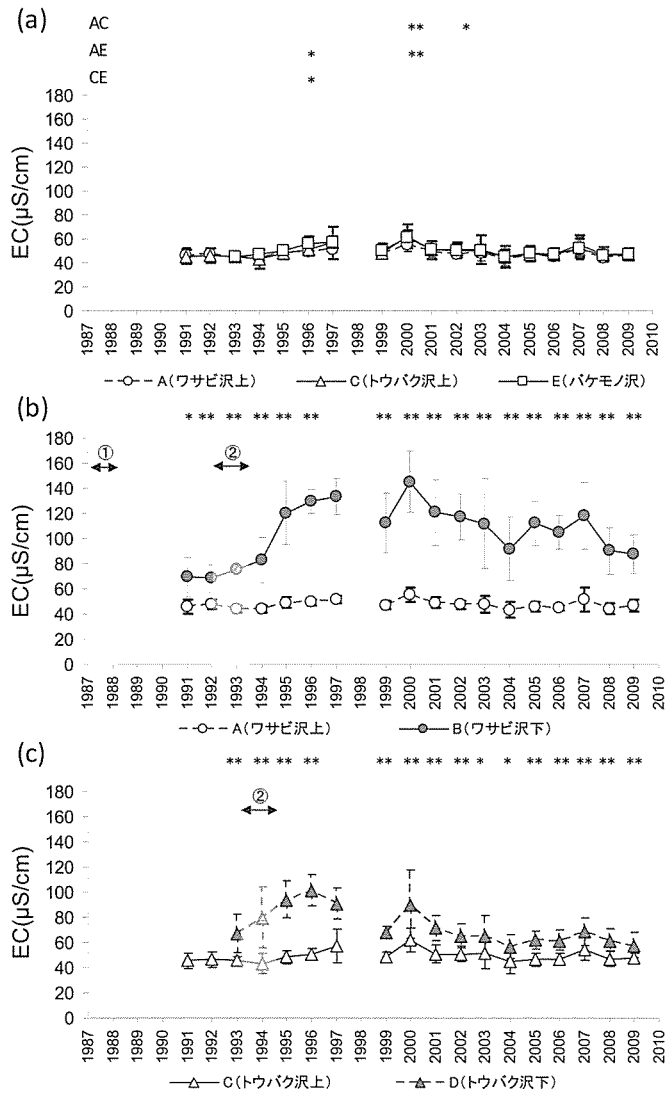


図-3 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均電気伝導度 (EC) の変動。エラーバーは標準偏差, \* は有意差 95%, \*\* は有意差 99% の検定で平均の差があることを示す。AC はワサビ沢上とトウバク沢上, AE はワサビ沢上とバケモノ沢, CE はトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1991 ~ 1997 年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林 (1998) の第 18 章 (pp.111-130) の附表 1 より計算した。

Fig.3. Inter-annual variation of the mean annual electric conductivity (EC) in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1991 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

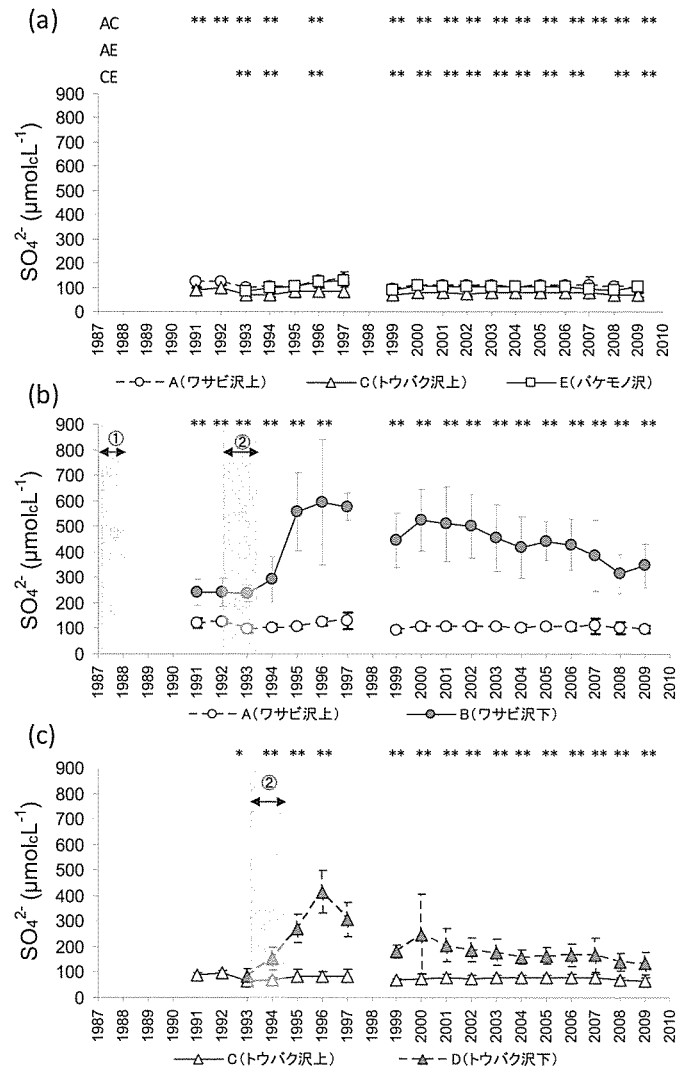


図-4 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の変動。エラーバーは標準偏差, \* は有意差 95%, \*\* は有意差 99% の検定で平均の差があることを示す。AC はワサビ沢上とトウバク沢上, AE はワサビ沢上とバケモノ沢, CE はトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1991~1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.4. Inter-annual variation of the mean annual  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1991 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

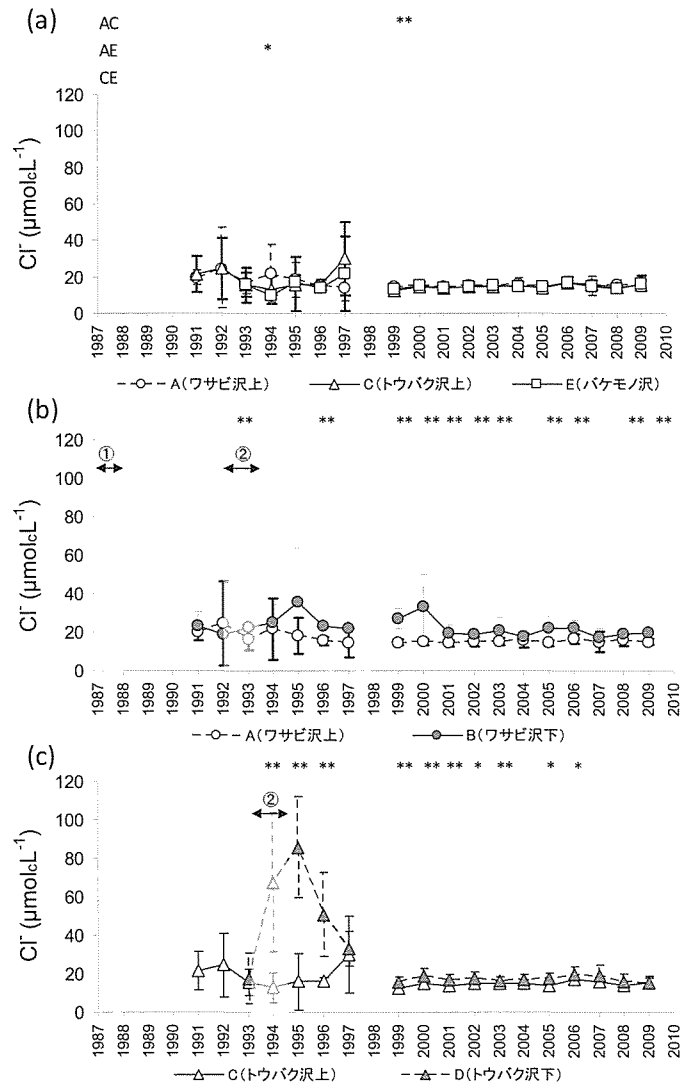


図-5 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均  $\text{Cl}^-$  濃度の変動。エラーバーは標準偏差, \*は有意差95%, \*\*は有意差99%の検定で平均の差があることを示す。ACはワサビ沢上とトウバク沢上, AEはワサビ沢上とバケモノ沢, CEはトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1991～1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.5. Inter-annual variation of the mean annual  $\text{Cl}^-$  concentration in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1991 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).



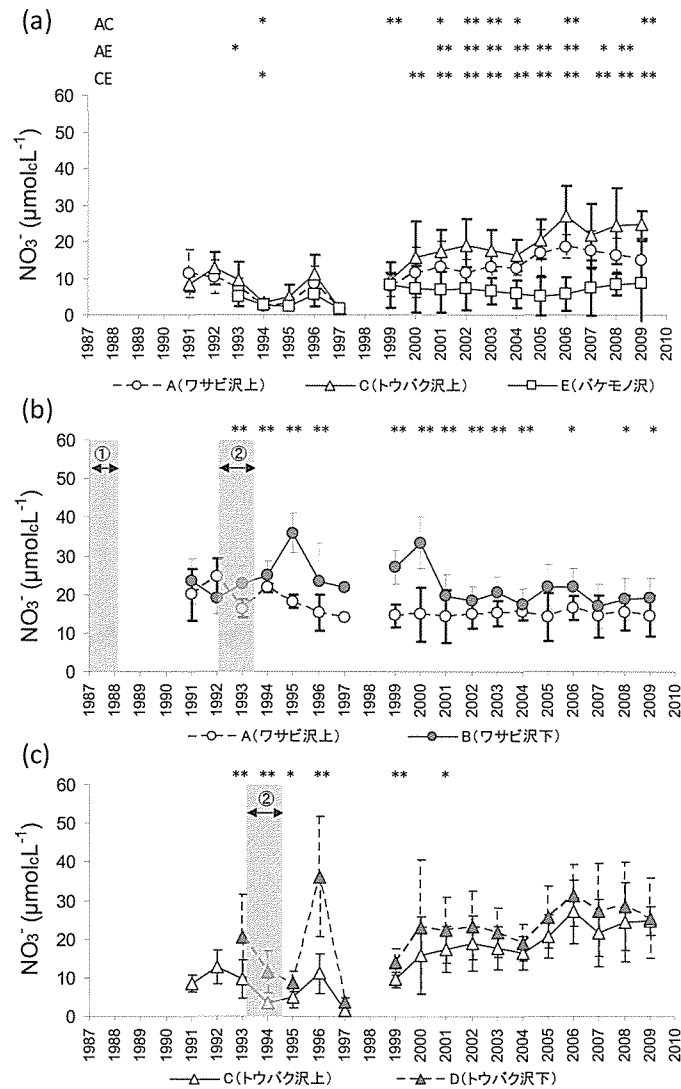


図-6 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均  $\text{NO}_3^-$  濃度の変動。エラーバーは標準偏差, \* は有意差 95%, \*\* は有意差 99% の検定で平均の差があることを示す。AC はワサビ沢上とトウバク沢上, AE はワサビ沢上とバケモノ沢, CE はトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1991~1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.6. Inter-annual variation of the mean annual  $\text{NO}_3^-$  concentration in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1991 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

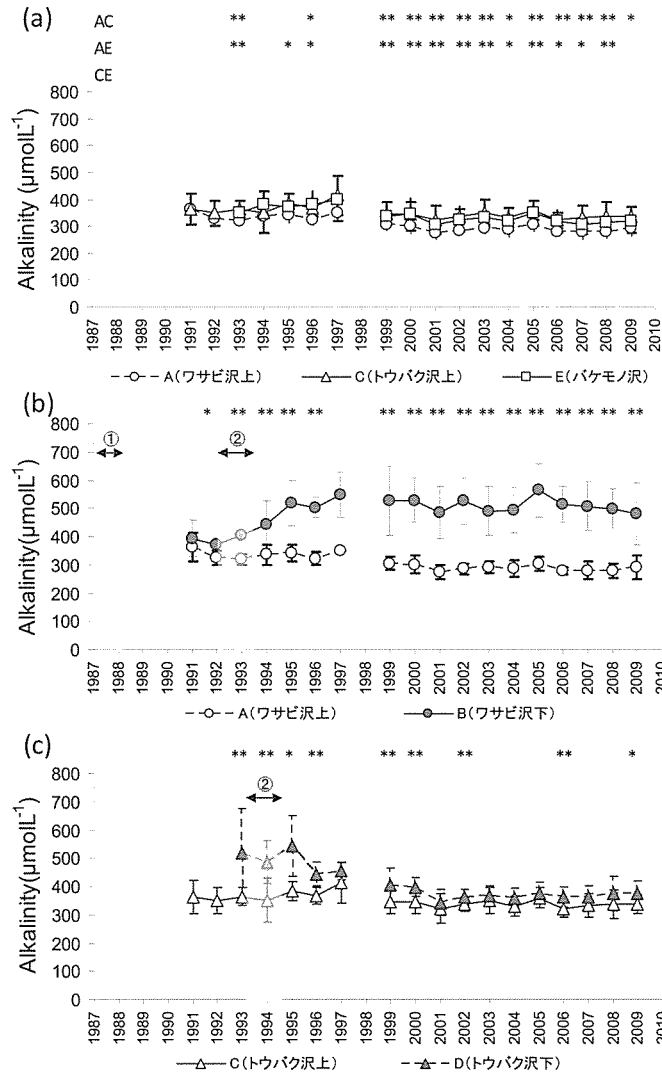


図-7 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均アルカリ度の変動。エラーバーは標準偏差, \*は有意差95%, \*\*は有意差99%の検定で平均の差があることを示す。ACはワサビ沢上とトウバク沢上, AEはワサビ沢上とバケモノ沢, CEはトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1991~1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.7. Inter-annual variation of the mean annual alkalinity in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1991 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

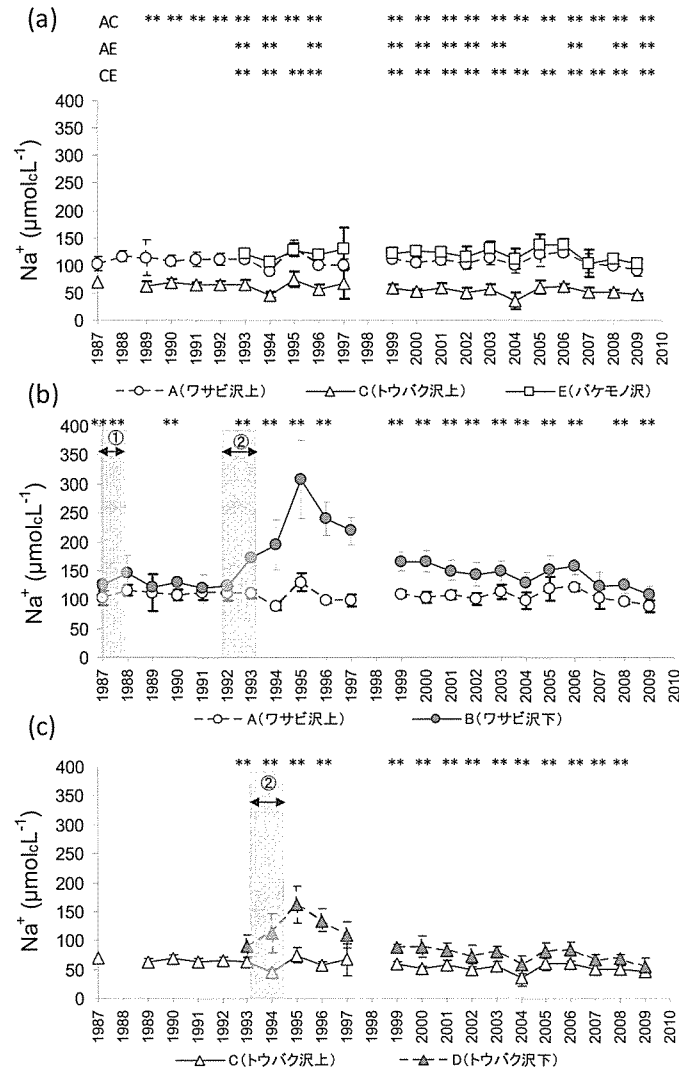


図-8 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均 $\text{Na}^+$ 濃度の変動。エラーバーは標準偏差, \*は有意差95%, \*\*は有意差99%の検定で平均の差があることを示す。ACはワサビ沢上とトウバク沢上, AEはワサビ沢上とバケモノ沢, CEはトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1987~1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.8. Inter-annual variation of the mean annual  $\text{Na}^+$  concentration in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1987 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

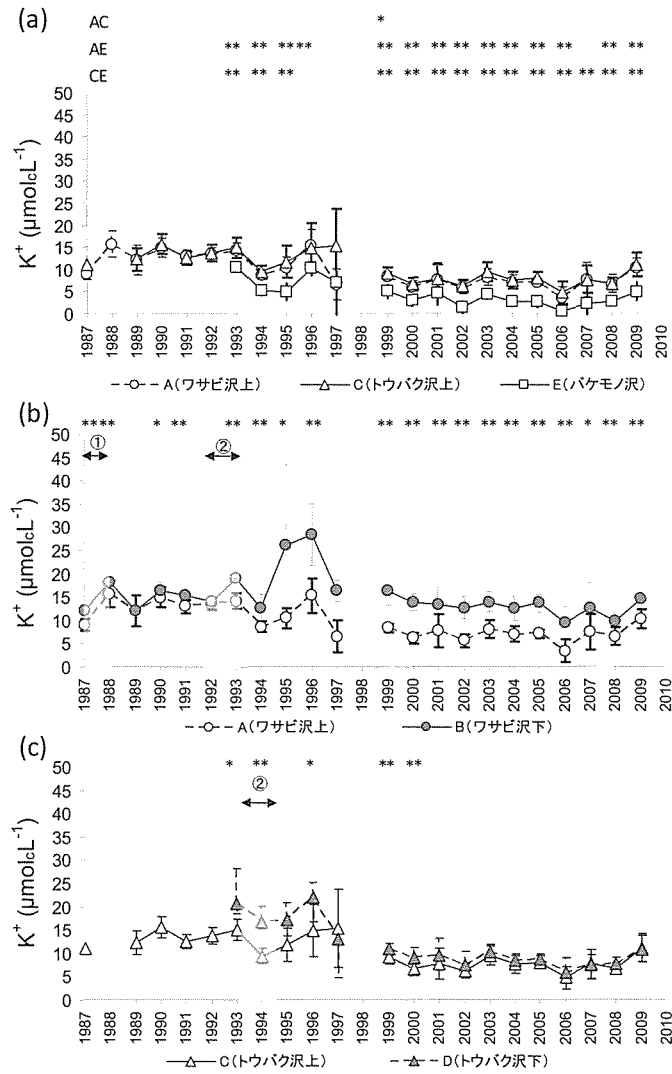


図-9 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均  $K^+$  濃度の変動。エラーバーは標準偏差, \* は有意差 95%, \*\* は有意差 99% の検定で平均の差があることを示す。AC はワサビ沢上とトウバク沢上, AE はワサビ沢上とバケモノ沢, CE はトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1987～1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林 (1998) の第 18 章 (pp.111-130) の付表 1 より計算した。

Fig.9. Inter-annual variation of the mean annual  $K^+$  concentration in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1987 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).





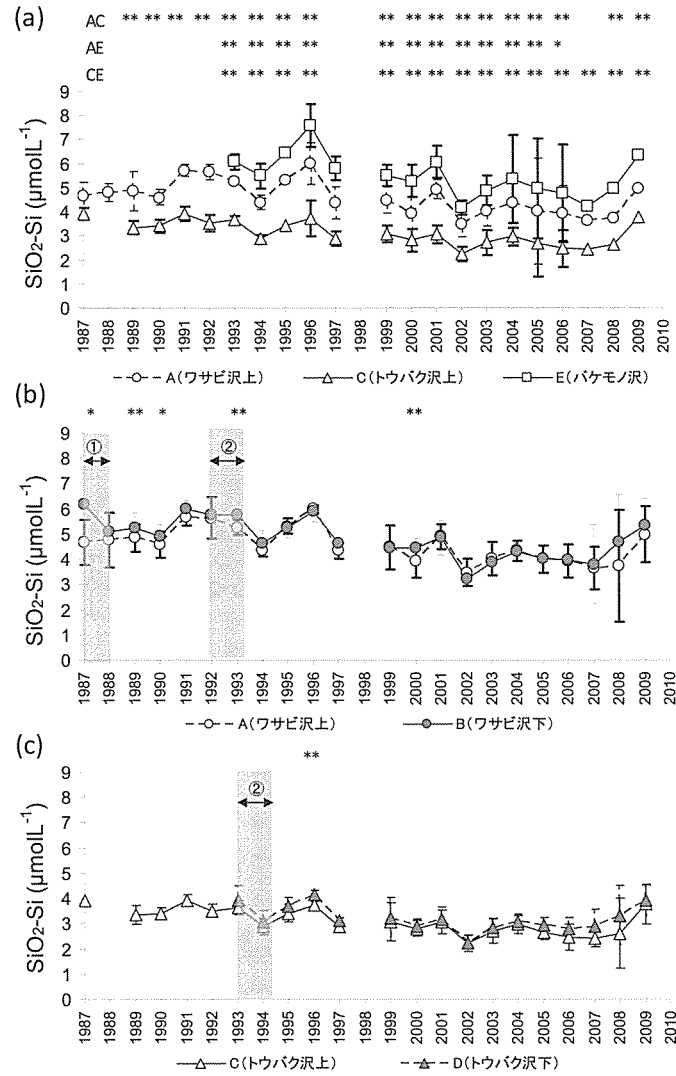


図-12 (a) 3つの自然河川, (b) ワサビ沢上下, (c) トウバク沢上下の年平均  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  濃度の変動。エラーバーは標準偏差, \* は有意差 95%, \*\* は有意差 99% の検定で平均の差があることを示す。AC はワサビ沢上とトウバク沢上, AE はワサビ沢上とバケモノ沢, CE はトウバク沢上とバケモノ沢の差の検定であることを示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1987 ~ 1997 年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林 (1998) の第 18 章 (pp.111-130) の付表 1 より計算した。

Fig.12. Inter-annual variation of the mean annual  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  concentration in (a) Three natural streams, (b) Wasabi Creek and (c) Toubaku Creek. The error bars indicate standard deviation and \* and \*\* indicate 95% and 99% significance levels respectively. AC, AE and CE indicate the statistical difference between Upper and Lower Wasabi Creeks, Upper and Lower Toubaku Creeks, and Upper Toubaku and Bakemono Creeks, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1987 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

ク沢で  $66 \sim 99 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  の範囲に入っていた。一方、掘削残土埋め立ての影響は、ワサビ沢、トウバク沢とも明瞭に表れ、ワサビ沢下の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は最大  $595 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1996年)、トウバク沢下の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は最大  $413 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1996年) に達した。この  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は、世界保健機関 (WHO) の飲料水水質ガイドライン、アメリカ環境保護局 (EPA) の飲料水基準、およびヨーロッパ連合 (EU) 指令で定められた水道水の最大許容濃度  $250 \text{mgL}^{-1}$  ( $=5,205 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ ) と比べて約 8 分の 1 であり、毒性のあるレベルではなかった。上下間の有意な差は埋め立て開始後 17 年経過した 2009 年まで継続していたが、差は年々減少する傾向にあった。

図-5より、 $\text{Cl}^-$  濃度は自然河川では 1991～97年の値は 1999年以降と比べてばらつきが大きいが、1999年以降は  $12 \sim 31 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  の範囲に入っていた。一方、掘削残土埋め立ての影響は、短期的にはトウバク沢の 1994～96年にかけて明瞭に表れ、トウバク沢下の  $\text{Cl}^-$  濃度は最大  $86 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1995年) であったが、有意な差が検出されたのは 2005年までであり、それ以降は差がなくなった。ワサビ沢下の  $\text{Cl}^-$  濃度は最大  $36 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1995年) であり、有意な差は 2009年まで検出されたが、その差は 2001年以降最大  $8 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  程度であった。

図-6より、 $\text{NO}_3^-$  濃度は 3つの自然河川で互いに異なっており、トウバク沢で最大  $28 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ 、ワサビ沢で最大  $19 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$ 、バケモノ沢で最大  $9 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  であった。掘削残土埋め立ての影響は、短期的にはワサビ沢で 1993～96年、トウバク沢では 1996年に現れたが、1999年以降の両沢の上下の差は、自然河川同士の差と同程度に過ぎなかった。

図-7より、アルカリ度は自然河川では  $273 \sim 424 \mu\text{molL}^{-1}$  の範囲にあり、トウバク沢上とバケモノ沢の間には統計的に有意な差はなかった。掘削残土埋め立て後にワサビ沢下では増加し、最大  $563 \mu\text{molL}^{-1}$  (2005年)、上との差は最大  $258 \mu\text{molL}^{-1}$  (2005年) に達した。その後 2009年まで有意な差がある状態が継続している。トウバク沢では 1993～95年に上下の差が  $134 \sim 158 \mu\text{molL}^{-1}$  あったが、2001年以降は  $40 \mu\text{molL}^{-1}$  以下で推移しており、有意な差がない年もある。

図-8より、 $\text{Na}^+$  濃度は 3つの自然河川間で有意な差があり、バケモノ沢、ワサビ沢、トウバク沢の順で高かった。掘削残土埋め立て後にワサビ沢下、トウバク沢下とともに増加し、ワサビ沢下で最大  $308 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1995年)、トウバク沢下で最大  $162 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1995年) に達した。しかしその後、差は有意ではあるものの、年々小さくなる傾向にあり、1999年以降はトウバク沢上とワサビ沢上の差よりも小さくなっている。

図-9より、 $\text{K}^+$  濃度は自然河川では  $0 \sim 11 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  の範囲にあった。ワサビ沢上とトウバク沢上の間では差がないが、2河川とバケモノ沢の間には有意な差があり、バケモノ沢では小さくなっていた。ワサビ沢下、トウバク沢下での濃度は掘削残土埋め立て後にワサビ沢上、トウバク沢上に比べてともに増加し、ワサビ沢下で最大  $29 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1996年)、トウバク沢下で最大  $21 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1996年) に達した。しかしその後、差は年々小さくなる傾向にあり、トウバク沢では 2001年以降は有意な差がなくなった。

図-10より、 $\text{Mg}^{2+}$  濃度は 3自然河川間で有意な差があり、バケモノ沢、トウバク沢、ワサビ沢の順で小さくなっていた。ワサビ沢下、トウバク沢下での濃度は掘削残土埋め立て後にワサビ沢上、トウバク沢上に比べて大きくなった。トウバク沢では自然河川間の差と同程度の差であり、ワサビ沢でも 1995年に大きな差があったが、その後、差は年々小さくなる傾向にある。

図-11より、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度は 3自然河川間で有意な差があり、トウバク沢、ワサビ沢、バケモノ沢の順で小さくなっていた。ワサビ沢下、トウバク沢下での濃度は掘削残土埋め立て後にワサビ沢上、トウバク沢上に比べて大きくなり、ワサビ沢下で最大  $827 \mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}$  (1996年)、トウバク



沢下で最大  $696\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (1996 年) に達したが、その後、差は年々小さくなる傾向にある。

図-12 より、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$  濃度は 3 自然河川間で有意な差があり、バケモノ沢、ワサビ沢、トウバク沢の順で小さくなっていた。掘削残土埋め立て前後を通じて、ワサビ沢下、トウバク沢下での濃度は、それぞれワサビ沢上、トウバク沢上との間に有意な差がある年はほとんどなかった。

## V. 考察

### 1) 掘削残土埋め立ての長期的影響とそのメカニズム

本工事に伴う埋め立てで最も危惧されたことは渓流水の酸性化であった。図-2 に示すように、本研究の期間中 pH の低下は見られなかったことから、掘削残土の埋め立てによる酸性化は少なくとも 2009 年までは起こらなかった。一方で  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は埋め立て地点の下流で有意な増加が検出されたこと、掘削残土の成分分析により硫化鉱物のグレイジャイトが検出されていること (東京大学農学部附属演習林, 1998; 第 18 章, pp.111-130) から、硫化鉱物が酸化して硫酸イオンとなり流出した可能性が高い。服部ら (2007) は八甲田トンネル工事の掘削岩から採取した泥岩の溶出実験および化学組成分析を行い、全岩の S 含有量と溶出水中の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度との間に相関があることを示し、そこから、S 含有鉱物が分解し、S 含有量に対応した量の硫酸 ( $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{H}^+$ ) が溶出するという見解を示している。

硫酸イオンが流出したにもかかわらず pH が下がらなかったのは、硫酸を中和するカチオン、特に  $\text{Ca}^{2+}$  が流出したためと考えられる。服部ら (2007) は、八甲田トンネル工事の掘削岩から採取した泥岩の溶出実験および化学組成分析から、溶出水中の  $\text{Ca}^{2+}$  濃度が  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度と対応し、全岩の CaO 量とは明瞭な関係がないことから、溶出水中の  $\text{SO}_4^{2-}$  に見合った量だけ方解石や斜長石が分解され、 $\text{Ca}^{2+}$  が溶出するという見解を示している。本研究においても、ワサビ沢下およびトウバク沢下の  $\text{Ca}^{2+}$  の濃度は、 $\text{SO}_4^{2-}$  の濃度と同様に埋め立て後増加し、その後少しずつ減少する傾向を示した。しかし埋め立て後 5 年を経過した後は、 $\text{Ca}^{2+}$  の濃度は必ずしも  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の減少傾向に対応して単純減少しているわけではない。

服部ら (2007) では、 $\text{Ca}^{2+}$  は方解石や斜長石の分解によって生成されると考察されている。本研究では埋め立てに伴う  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  の濃度上昇はみられず、一方でアルカリ度には明瞭な上昇がみられたこと、アルカリ度の上昇は  $\text{SO}_4^{2-}$  や  $\text{Ca}^{2+}$  と同じくワサビ沢で高く、トウバク沢で低いことから、掘削残土中の方解石や斜長石が化学風化して  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{HCO}_3^-$  を溶出したが、粘土鉱物が分解し  $\text{SiO}_2$  が溶出する段階には至らなかったと推察される。

### 2) 埋め立ての影響がなくなるまでに要する時間の推定

図-13 に、図-4~11 で示してきたカチオン、アニオン濃度、アルカリ度をイオンバランスの形で示す。アルカリ度は弱酸アニオンの当量に対応していると仮定した。イオン濃度はほぼバランスしており、本研究で分析していないイオンがイオンバランスに大きく寄与していることはないと推察される。また、埋め立てによって、埋め立て地点の下におけるイオンバランスの構成を大きく変化したイオンは  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  とアルカリ度であることが読み取れる。そこで以下では  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  濃度とアルカリ度を対象とし、埋め立て後にワサビ沢、トウバク沢上下間の濃度差は、埋め立てられた掘削残土からの溶存物質の流出によるものと仮定して論を進める。

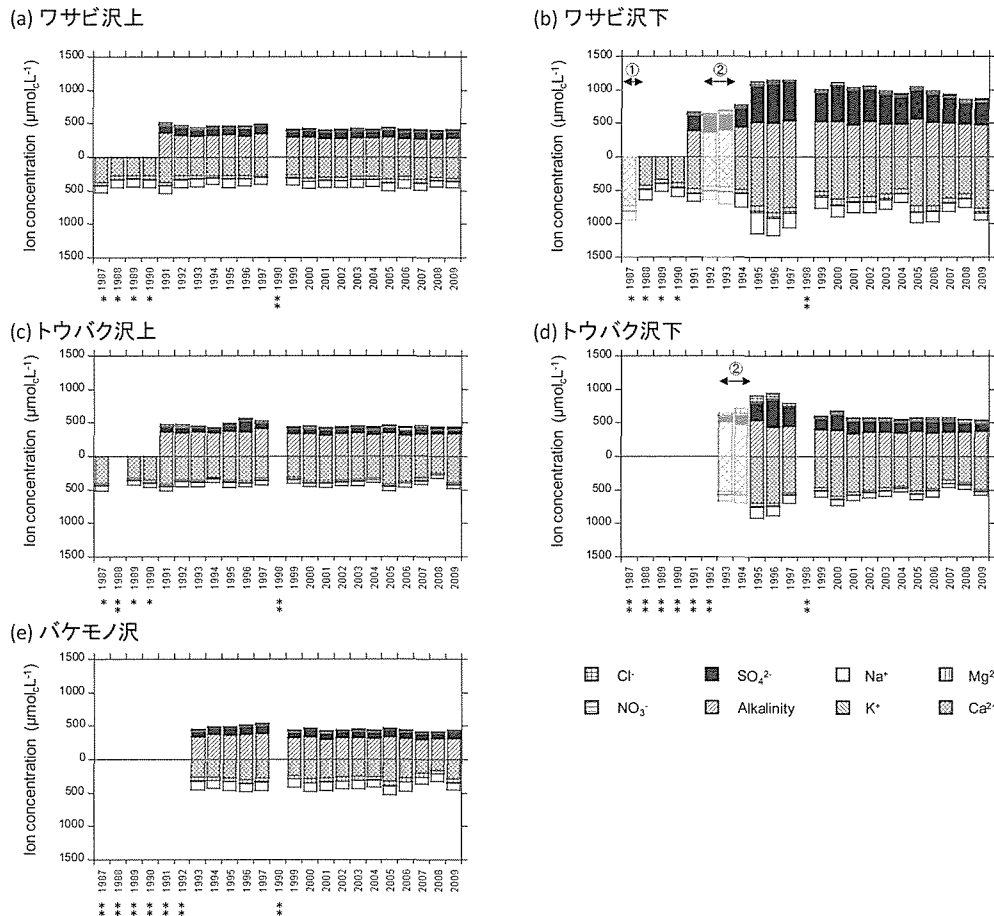
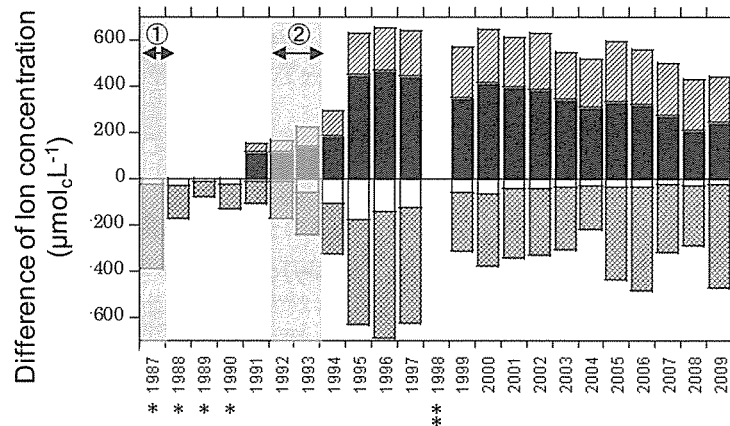


図-13 年平均アニオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , アルカリ度) 濃度および年平均カチオン ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) のバランス。(a) ワサビ沢上, (b) ワサビ沢下, (c) トウバク沢上, (d) トウバク沢下, (e) バケモノ沢。\* は、アニオンのデータがない年, \*\* は、アニオン、カチオンともにデータがない年を示す。ワサビ沢①②はそれぞれ奥秩父トンネル、雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1987～1997年の平均値および標準偏差は、東京大学農学部附属演習林（1998）の第18章（pp.111-130）の付表1より計算した。

Fig.13. Inter-annual variation of the mean annual anion ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , alkalinity) concentration and the mean cation ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) concentration balance at (a) Upper Wasabi Creek, (b) Lower Wasabi Creek, (c) Upper Toubaku Creek, (d) Lower Toubaku Creek and (e) Bakemono Creek. The \* and \*\* indicate years with cation data only, and years with no data, respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1987 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

図-14に年算術平均アルカリ度、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 濃度のワサビ沢上と下との差(a)、トウバク沢上と下との差(b)の長期変動を示す。掘削残土の埋め立てから16年が経過した2009年時点においても、ワサビ沢とトウバク沢の上下の $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度間には依然として有意な差があるが、濃度差は年々、減少傾向にある。図-15(a)にワサビ沢上と下の $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度差、(b)にトウ

## (a) ワサビ沢



## (b) トウバク沢

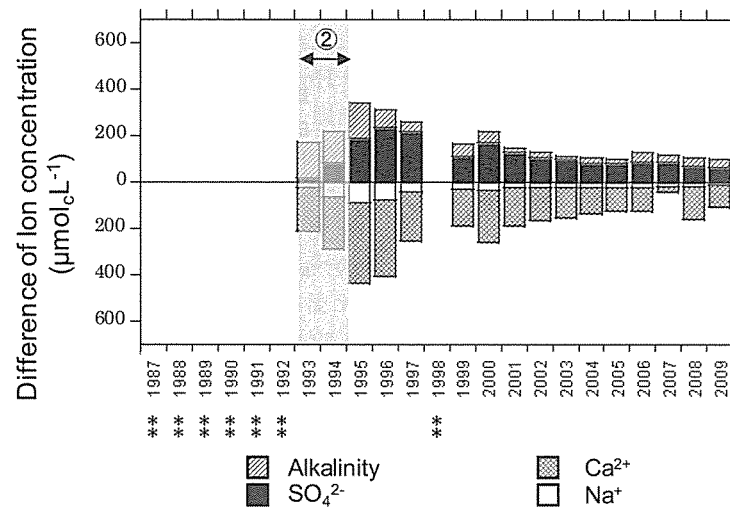
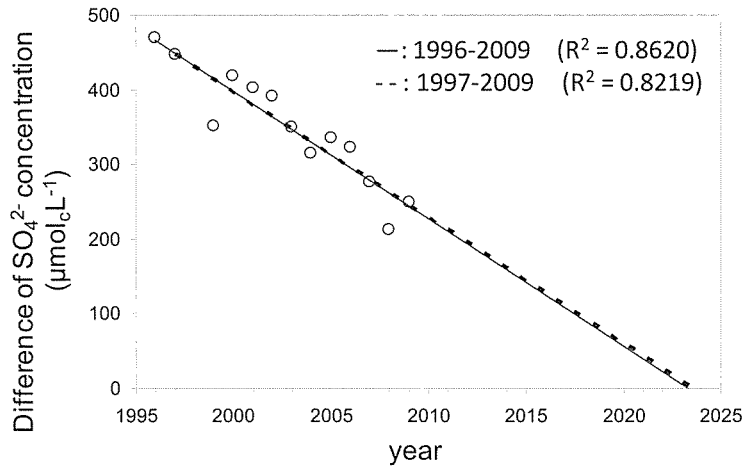


図-14 (a) ワサビ沢上と下との差, (b) トウバク沢上と下との差, の年算術平均アルカリ度,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  濃度の長期変動。\* は, アルカリ度と  $\text{SO}_4^{2-}$  のデータがない年, \*\* は, アルカリ度,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  のデータがない年を示す。①②はそれぞれ奥秩父トンネル, 雁坂トンネルの掘削残土埋め立て時期を示す。1987～1997年の平均値および標準偏差は, 東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.14. Temporal variation in the upstream – downstream difference of the annual arithmetic mean alkalinity,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  concentration in Wasabi (a) and Toubaku (b) Creeks. The \* and \*\* indicate years with cation data only and years with no data respectively. ① and ② indicate timings of Okuchichibu and Karisaka Tunnel excavation muck dumping, respectively. The mean and standard deviation from 1987 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

## (a) ワサビ沢



## (b) トウバク沢

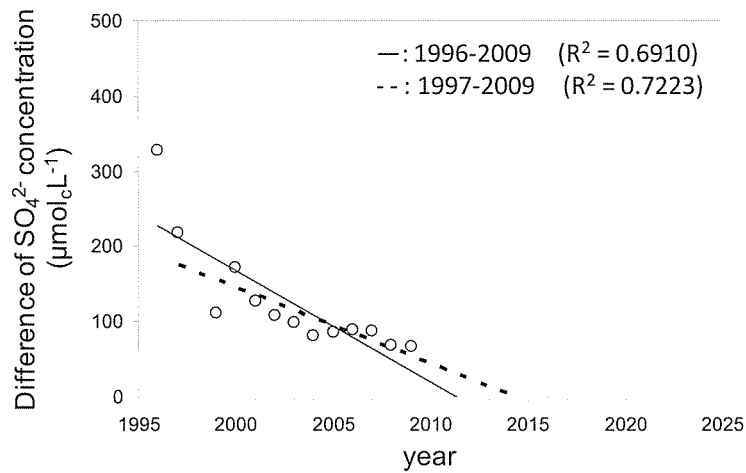


図-15 (a) ワサビ沢上と下の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度差, (b) トウバク沢上と下の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度差の年々変動。実線は1996年から2009年のデータを使用した回帰直線, 点線は1997年から2009年のデータを使用した回帰直線。1996～1997年の平均値および標準偏差は、東京大学農学部附属演習林(1998)の第18章(pp.111-130)の付表1より計算した。

Fig.15. Inter-annual variation in the upstream – downstream difference of the annual arithmetic mean  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration in Wasabi (a) and Toubaku (b) Creeks. The solid line and dotted line indicate linear regression lines using data from 1996 to 2009 and from 1997 to 2009, respectively. The mean and standard deviation from 1996 to 1997 shown here were calculated from the Supplement Table 1 in Chapter 18 (pp.111-130), The Tokyo University Forests (1998).

バク沢上と下の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度差の年々変動を示す。図上の実線は 1996 年から 2009 年のデータを使用した回帰直線、点線は 1997 年から 2009 年のデータを使用した回帰直線を示している。1996 年から 2009 年までの減少傾向はワサビ沢で  $17\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}\text{year}^{-1}$  ( $r^2 = 0.8620$ ), トウバク沢で  $15\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}\text{year}^{-1}$  ( $r^2 = 0.6910$ ), 1997 年から 2009 年までの減少傾向はワサビ沢では  $17\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}\text{year}^{-1}$  ( $r^2 = 0.8219$ ), トウバク沢では  $10\mu\text{mol}_c\text{L}^{-1}\text{year}^{-1}$  ( $r^2 = 0.7223$ ) であり, この減少傾向が今後も継続すると仮定すると, 埋め立て区間の直下における掘削残土からの  $\text{SO}_4^{2-}$  溶出の影響がほぼなくなるのは, ワサビ沢では 2024 年, トウバク沢では 2011 年~2014 年と試算された。これはそれぞれ埋め立て終了時点から 31 年, 17 年~20 年後に相当する。服部ら (2007) は  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度と S 含有量との相関関係を報告しているが, この見解が本研究の対象としたトンネル掘削残土からの  $\text{SO}_4^{2-}$  流出にも当てはまると仮定すると, トウバク沢よりもワサビ沢で  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の差および埋め立ての影響がなくなるまでの年数が長い理由は, 埋め立てられた残土の S 含有量 (残土の量  $\times$  S 含有率) がトウバク沢よりもワサビ沢で大きかったためではないかと推察される。

## VI. 結論

トンネル掘削残土の埋め立てによる渓流水の溶存物質濃度の長期的な変化を明らかにするために, 本研究では, トンネル掘削残土の埋め立て間の直上流, 直下流で, 埋め立て後 5~6 年を経過した 1999 年から 2009 年までの 11 年間, 渓流水質をモニタリングした。このモニタリングのデータと, 埋め立て前後のモニタリングデータ (東京大学農学部附属演習林, 1998) とを合わせて長期的な変化を解析した。その結果, 1993~94 年に埋め立てが終了した後 16 年を経過しても, 埋め立てによる渓流水質への影響は続いていた。埋め立て地点下では  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , アルカリ度が有意に高い状態が続いているが, 渓流水の pH の低下はみられず,  $\text{Ca}^{2+}$  を主とするカチオンが, S 含有鉱物の分解によって生じた硫酸を中和し, pH を中性に保ったと考えられる。埋め立てが  $\text{Ca}^{2+}$  以外のカチオン濃度を増加させた期間は 3~5 年間にとどまり,  $\text{SiO}_2$  には埋め立ての影響がなかった。影響の継続期間については, ワサビ沢では 31 年, トウバク沢では 17 年~20 年と試算された。

## 謝辞

本研究は科学研究費基盤研究 A「流域生態圏における水・熱・物質循環の長期変動モニタリングと広域比較研究」(代表: 小川滋・九州大学特任教授) および科学研究費基盤研究 A「森林生態系における水・物質動態の流域特性の広域比較研究」(代表: 丹下健・東京大学教授) の支援を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

## 要旨

岩石中に硫化鉄鉱物を含む岩盤にトンネルを掘削し, 残土を周辺の溪谷に埋め立てると, 硫化鉄鉱物が酸素を含んだ降水や地下水と接触し, 酸化・分解することにより硫酸酸性浸出水が発生し, 生物の斃死や有害金属類の流出などにより周辺環境に悪影響を及ぼす可能性がある。掘削残土の

中に酸性化を緩衝する能力を有する鉱物が含まれる場合は、中和作用により浸出水の pH の低下が抑制されるため、浸出水の pH は、硫化鉱物の酸化により生ずる硫酸量と、緩衝鉱物の分解に消費される硫酸量の兼ね合いによって決まると考えられる。本研究では、トンネル掘削残土の埋め立てによる渓流水の溶存物質濃度の長期的な変化を明らかにするために、トンネル掘削残土の埋め立て区間の直上流、直下流で、埋め立て前後 11 年間の渓流水質モニタリングのデータ（東京大学農学部附属演習林, 1998）と、その後 11 年間、著者らが引き続いて行ったモニタリングのデータを合わせて検討した。その結果、1993～94 年に埋め立てが終了した後 16 年が経過しても、埋め立てによる渓流水質への影響は続いていた。埋め立て区間の直下流では  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、アルカリ度が有意に高い状態が続いているが、渓流水の pH の低下はみられず、 $\text{Ca}^{2+}$  を主とするカチオンが、S 含有鉱物の分解によって生じた硫酸を中和し、pH を中性に保ったと考えられる。埋め立てが  $\text{Ca}^{2+}$  以外のカチオン濃度を増加させた期間は 3～5 年間にとどまり、 $\text{SiO}_2$  には埋め立ての影響がなかった。影響の継続期間については、ワサビ沢では 31 年、トウバク沢では 17 年～20 年と試算された。

キーワード：渓流水質、掘削残土、酸性化、硫酸イオン、中和

### 引用文献

- Evangelou, V. P. (1995) Pyrite oxidation and its control. CRC, 299pp.
- 服部修一・太田岳洋・菊地良弘 (2007) 八甲田トンネルにおける掘削残土の酸性水溶出に関する判定手法の評価. 応用地質 47: 323-336.
- 五名美江・蔵治光一郎・春田泰次・鴨田重裕・小田智基・堀田紀文・鈴木誠・木村徳志・五十嵐勇治・大村和也・渡邊良広 (2007) 東京大学 5 演習林 8 試験流域における渓流水質の特性. 東京大学農学部演習林報告 118: 65-83.
- 細川迭男・菅井皇人・山崎充 (2007) 自然的原因により重金属等を溶出するトンネル掘削土判定と処理－日本海沿岸東北自動車道 大館～小坂 雪沢第二トンネル－. 応用地質 47: 346-353.
- 五十嵐敏文・井筒崇文・岡泰道 (2002) 2 段階溶出モデルによる黄鉄鉱の酸化・溶解速度の評価. 応用地質 43: 208-215.
- 五十嵐敏文・大山隆弘 (1997) 黄鉄鉱の酸化に伴う貯水池水質の酸性化とアルミニウムの溶出. 応用地質 38: 244-251.
- Kinniburgh, D.G., Gale, I.N., Smedley, P.L., Darking, W.G., West, J.M., Kimblin, R.T., Parker, A., Rae, J.E., Aldous, P.J. and O'Shea, M.J. (1994) The effects of historic abstraction of groundwater from the London Basin aquifer on groundwater quality. Applied Geochemistry 9: 175-195.
- 黒沢幸二・中村玄正・高橋幸彦・松本順一郎 (1997) 猪苗代湖の水質に及ぼす酸性河川長瀬川の水質および底質特性. 環境工学研究論文集 34: 111-120.
- Singer, P. C. and Stumm, W. (1970) Acidic mine drainage: the rate determining step. Science 167:1121-1123.
- Stollenwerk, K. G. (1994) Geochemical interactions between constituents in acidic groundwater and alluvium in an aquifer near Globe, Arizona. Applied Geochemistry 9: 353-369.
- 東京大学農学部附属演習林 (1998) 秩父演習林自然環境調査成果集—秩父演習林の環境—, 東京大学農学部附属演習林, 368pp.

(2010 年 9 月 8 日受付)

(2011 年 5 月 9 日受理)

### Summary

To show the long-term changes in streamwater quality after dumping tunnel excavation muck along the canyon, streamwater chemistry monitoring was undertaken at points upstream and downstream from the site where rock muck had been dumped in Wasabi and Toubaku Creek over 11 years. The concentrations of  $\text{SO}_4^{2-}$  below the dumping site were significantly increased which is consistent with the results found in the previous study that some of the rock muck contained Greigite. The pH of streamwater below the dumping site was, however, not significantly different from that above the dumping site, suggesting that  $\text{SO}_4^{2-}$  was neutralized by some cations such as  $\text{Ca}^{2+}$  which was also significantly increased below the dumping site. Although the difference of mean annual  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration between the points upstream and downstream of the dumping site became smaller, the difference was still significant for 17 years after dumping. It takes about 31 years in the Wasabi creek and from 17 to 20 years in the Toubaku Creek for the  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration of streamwater downstream of the rock muck to be returned to the level found upstream.

**Key Words** : Streamwater chemistry, tunnel excavation muck, acidification, sulfate ion, neutralization