

森林総合研究所研究報告

Vol.17 No.3 (No.447)

BULLETIN

of the
Forestry and
Forest Products
Research Institute



September 2018



国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

The Chief Editor

山中 高史 Takashi YAMANAKA (Principal Research Director, FFPRI)

The Vice-Chief Editor

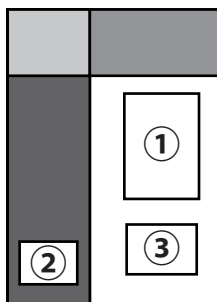
片岡 厚 Yutaka KATAOKA (Public Relations Division, FFPRI)

Editor

青井 秀樹 Hideki AOI (Department of Forest Policy and Economics, FFPRI)
福田 健二 Kenji FUKUDA (Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo)
五十嵐 哲也 Tetsuya IGARASHI (Department of Forest Vegetation, FFPRI)
石塚 成宏 Shigehiro ISHIZUKA (Department of Forest Soils, FFPRI)
松井 直之 Naoyuki MATSUI (Department of Forest Resource Chemistry, FFPRI)
毛利 武 Takeshi MOHRI (Department of Forest Molecular Genetics and Biotechnology, FFPRI)
小南 裕志 Yuji KOMINAMI (Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI)
黒川 潮 Ushio KUROKAWA (Kyushu Research Center, FFPRI)
渋谷 龍也 Tatsuya SHIBUSAWA (Department of Wood-based Materials, FFPRI)
小長谷 啓介 Keisuke OBASE (Department of Mushroom Science and Forest Microbiology, FFPRI)
岡 裕泰 Hiroyasu OKA (Forestry Division, Japan International Research Center for Agricultural Sciences)
岡 輝樹 Teruki OKA (Department of Wildlife Biology, FFPRI)
高務 淳 Jun TAKATSUKA (Department of Forest Entomology, FFPRI)
谷口 亨 Toru TANIGUCHI (Forest Tree Breeding Center, FFPRI)
山口 浩和 Hirokazu YAMAGUCHI (Department of Forest Engineering, FFPRI)
矢崎 健一 Kenichi YAZAKI (Department of Plant Ecology, FFPRI)

This journal is indexed in CAB Abstracts.

表紙写真 Photographs in Cover



- ① 中信森林管理署奈良井国有林のヒノキコンテナ苗植栽地(長野県)
Plantation of containerized Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings at Narai National Forest in Nagano Prefecture.
- ② カラマツ材を使用した木造庁舎(長野県長和町)
Wooden town hall constructed with Japanese Larch (*Larix kaempferi*) at Nagawa Town, Nagano Prefecture
- ③ (本文249～257ページ)
2011年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの野生フキ(*Petasites japonicus*)の葉柄への移行
The transfer of radiocesium released in the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident to petioles of wild butterbur (*Petasites japonicus*)

森林総合研究所研究報告 第17巻3号(通巻447号) 2018.9

目 次

論 文

- 2011年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの
野生ゼンマイ (*Osmunda japonica*) の葉への移行
清野 嘉之、小松 雅史、赤間 亮夫、松浦 俊也、広井 勝、
岩谷 宗彦、二元 隆 217

- 育林経営再編の諸相ー林業ビジネス化への示唆ー
大塚 生美、堀 靖人、山田 茂樹、岩永 青史、天野 智将、
駒木 貴彰、餅田 治之 233

- 2011年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの
野生フキ (*Petasites japonicus*) の葉柄への移行
清野 嘉之、赤間 亮夫、岩谷 宗彦、由田 幸雄 249

研究資料

- 帰還困難区域で発生した森林火災が樹木樹皮と表層土壌の
放射性セシウムの蓄積に及ぼす影響
金子 真司、後藤 義明、田淵 隆一、赤間 亮夫、池田 重人、
篠宮 佳樹、今村 直広 259

- 石狩川源流地域における大規模風倒跡地の森林再生過程のデータ
伊東 宏樹、中西 敦史、津山 幾太郎、関 剛、
飯田 滋生、河原 孝行 265

- 森林小流域における降水および溪流水の水質モニタリング
ー釜淵森林理水試験地における2000～2014年の結果ー
篠宮 佳樹、山田 毅、平井 敬三、小野 賢二、野口 正二、
久保田 多余子、阿部 俊夫 273

Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute
Vol.17 No.3 (No.447) September 2018

CONTENTS

Original article

- The transfer of radiocesium released in the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident to leaves of wild *Osmunda japonica*, an edible fern
Yoshiyuki KIYONO, Masabumi KOMATSU, Akio AKAMA,
Toshiya MATSUURA, Masaru HIROI, Munehiko IWAYA
and Takashi FUTAMOTO 217

- Diverse aspects of the forestry management reorganization
— Suggestion for forestry business —
Ikumi OTSUKA, Yasuto HORI, Shigeki YAMADA,
Seiji IWANAGA, Tomomasa AMANO, Takaaki KOMAKI
and Haruyuki MOCHIDA 233

- The transfer of radiocesium released in the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident to petioles of wild butterbur (*Petasites japonicus*)
Yoshiyuki KIYONO, Akio AKAMA, Munehiko IWAYA
and Yukio YOSHIDA 249

Research record

- The effect of forest fire on the radiocesium inventory of tree bark and surface soil in 'difficult-to-return zone'
Shinji KANEKO, Yoshiaki GOTOH, Ryuichi TABUCHI,
Akio AKAMA, Shigeto IKEDA, Yoshiki SHINOMIYA
and Naohiro IMAMURA 259

- Data on forest regeneration after catastrophic windthrow in the headwater region of the Ishikari River, Hokkaido, Japan
Hiroki ITÔ, Atsushi NAKANISHI, Ikutaro TSUYAMA,
Takeshi SEKI, Shigeo IIDA and Takayuki KAWAHARA 265

- Monitoring the chemistry of rainwater and streamwater from a small forested watershed: Results in the Kamabuchi experimental watershed, Yamagata prefecture, Tohoku district, Japan between 2000 and 2014
Yoshiki SHINOMIYA, Tsuyoshi YAMADA, Keizo HIRAI,
Kenji ONO, Shoji NOGUCHI, Tayoko KUBOTA
and Toshio ABE 273

論文 (Original article)

2011 年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの
野生ゼンマイ (*Osmunda japonica*) の葉への移行清野 嘉之^{1)*}、小松 雅史²⁾、赤間 亮夫³⁾、松浦 俊也⁴⁾、広井 勝⁵⁾、
岩谷 宗彦⁶⁾、二元 隆⁷⁾

要旨

2011 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所事故以降、高レベルの放射性セシウム ($^{134+137}\text{Cs}$) が検出された 10 種以上の日本の野生山菜に出荷制限が課されている (2017 年 7 月 31 日)。しかし、環境から野生山菜への放射性セシウムの移行やそれに影響を及ぼす要因を調べた研究がほとんどなく、出荷制限が維持されるべきかどうかの判断に利用できる情報は限られている。福島県郡山市の 131 地点で野生のゼンマイ (*Osmunda japonica*) の葉を 2015 年 7 月と 8 月に採取し、 ^{137}Cs の野生山菜への移行に影響を及ぼす可能性のある環境要因を調べた。重回帰分析によると、ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度は生育地のリター中の ^{137}Cs 量、空間線量率、上層木の被覆率、リターの被覆率と有意な関係があった。後 3 者をパラメータに用い、ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度を予測するモデルを 100 地点の検体を用いて構築し、残りの 31 地点の検体で検証した。予測の結果は系統誤差が小さく、モデルの正確さ (accuracy) は高かった。しかし、予測値は観測値の約 1/5 ~ 5 倍の間に分布しており、モデルの精度 (precision) は低かった。測定値と予測値の残差平方和が大きいため、生育環境に関する上記の 3 つの情報を利用しても、出荷制限を解除するために必要な検体数を現行の目安 (60) から減らすことはできないと考えられた。植物季節の違いが、今回観察されたゼンマイの葉における ^{137}Cs 濃度の変動に関与している可能性がある。今後の研究では、このような大きな変動を引き起こすメカニズムを明らかにする必要がある。

キーワード：空間線量率、山菜、シダ、放射性セシウム濃度の予測モデル、放射性セシウムの沈着、出荷制限、食品の基準値

1. はじめに

東京電力福島第一原発事故は、山菜にも深刻な放射性セシウム汚染をもたらした。市場に流通させる山菜を対象とする対策のひとつに、市町村単位で設けられる出荷制限がある。放射性セシウム濃度が基準値を超え、出荷を制限されている野生山菜が 2017 年 7 月 31 日現在、10 数種ある (林野庁 2017)。食品中の放射性物質に関する原子力災害対策本部 (2015) のガイドラインによると、都道府県は、国が行う出荷制限・摂取制限の品目・区域の解除を申請でき、管理が可能であれば県内を複数の区域に分割できる。解除の条件は 1 市町村当たり 3 か所以上で、直近 1 か月以内の検査結果が全て基準値以下であることが原則である。また、検査結果が安定して基準値を下回ることが確認できるよう検査すること、他の地点より高い放射性セシウム濃度の検出が見込まれる地点でも検体を採取し、繰り返し分析を行っても基準値を超える分析

値が出ないことが統計的に推定できることといった条件が付く。さらに、野生山菜は管理の困難性などがあるため、検体数を増やすこととされている。

2015 年に初めて 2 種の野生山菜で出荷制限の解除例が出た。宮城県加美町の野生品を含むクサソテツ (*Matteuccia struthiopteris*) (厚生労働省 2015a)、岩手県一関市の野生セリ (*Oenanthe javanica*) (厚生労働省 2015b) である。いずれも「原子力災害対策本部のガイドライン」に沿って、3 ~ 4 年の継続調査を複数か所で行って放射性セシウム濃度が下がる傾向 (Appendix 1 参照) にあることを示し、対象地域全体で濃度が高そうなところを含めて 60 あまりの地点で検体を取って全て基準値以下であることを示したうえで解除を申請している。その後、野生クサソテツ、もしくは野生品を含むクサソテツが、2017 年に 3 市町で出荷制限を解除されている (厚生労働省 2017a, b, c)。

原稿受付：平成 29 年 8 月 1 日 原稿受理：平成 30 年 3 月 30 日

1) 森林総合研究所 植物生態研究領域

2) 森林総合研究所 きのこと・森林微生物研究領域

3) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

4) 森林総合研究所 森林管理研究領域

5) 郡山女子大学

6) 日本特用林産振興会

7) 元日本特用林産振興会

* 森林総合研究所 植物生態研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

しかし、出荷制限解除のための検体採取の負担は軽いものではない。種の特性にもとづいて、合理的な検体採取計画を立てることが重要であり、例えば、生育地で比較的容易に測れる項目で山菜の放射性セシウム濃度やその時間的変化の傾向と関係があるものが見いだされれば、それを利用して精度を保ったまま検体数を減らすなど、解除要請の方法を改善できる可能性がある。これまでの調査から、空間線量率 (air dose rate, ADR, $\mu\text{Sv h}^{-1}$) や放射性セシウムの沈着量 (Bq m^{-2}) が野生山菜の放射性セシウム濃度と有意な関係を持つことや、放射性セシウムの環境から山菜への移行は山菜の種類によって異なる場合や類似する場合があることが示唆されている (Kiyono and Akama 2015, 清野・赤間 2017)。放射性セシウム濃度の経年変化の傾向も一部の種で報告されており、種によって異なる場合がある (田上・内田 2015, 清野・赤間 2017, 2018)。しかし、現状では、採取地における放射性セシウムの移行レベルのバラツキや経年変化の傾向、それらに影響する条件についての調査例は少なく、出荷制限解除の準備に利用できる情報は限られている。主要な山菜について順次情報を収集することにより、検体採取の負担を軽減化する手法の提案のための基礎的データが得られると考えられる。

そこで、本研究では、福島県で生産量が多いワラビ (*Pteridium aquilinum*)、ゼンマイ (*Osmunda japonica*)、フキ (*Petasites japonicus*) の3種 (農林水産省 2016) のうち、野生個体の生育地が刈払いなど人為攪乱を比較的受けにくいと考えられるゼンマイを選び、放射性セシウムの汚染レベルが多様になるよう、ある程度広い地域を対象に多数の検体を採取し、放射性セシウムの沈着量や地形など環境から山菜への放射性セシウムの移行と関係する条件を考慮しつつ、ゼンマイ葉の放射性セシウム濃度とそのバラツキ、それらに影響を及ぼす条件を明らかにすることとした。

ゼンマイは落葉性の多年生シダ植物で、日本全国に広く分布する (倉田・中池 1990)。春の新芽を食用にし、生産量のうち全国では8割、福島県でも6割が野生品 (農林水産省 2016) である。本研究の調査計画時点 (2015年3月20日) でゼンマイの出荷制限が出されている市町村は岩手県住田町、奥州市、一関市、宮城県気仙沼市、大崎市、丸森町、福島県相馬市、川俣町、南相馬市、二本松市、大玉村、葛尾村、郡山市、川内村、須賀川市、楡葉町、広野町、いわき市、栃木県那須町、日光市、鹿沼市であった (厚生労働省 2015a)。このうち福島県郡山市は、ゼンマイがよく見られ (倉田・中池 1990)、土地面積が広く、多様な立地環境条件や、放射性セシウムの汚染の程度がさまざまに異なる (文部科学省 2013) 場所が得られる。多様な立地環境条件や汚染の程度に応じた放射性セシウムの移行の状況を把握するのに適していることから、郡山市を本研究の調査地を選んだ。

なお、郡山市では4～5月がゼンマイの新芽の採取適

期であるが、葉の放射性セシウム濃度は一般に季節変化し (例えば、Bunzl and Kracke 1989)、特に春の展葉期は濃度の変化が速い可能性がある。本調査では多数の地点で検体を採取することから、採取期間が比較的長期にわたる可能性があるため、採取時期による濃度の違いが大きくならないよう、夏の成葉を検体にした。一方で、放射性セシウム濃度の季節変化を調べ、春から夏にかけての葉の濃度の変化の傾向にもとづいて、採取適期である春の新芽濃度を夏の成葉濃度から推定できるようにした。あわせて、植物季節の観点から放射性セシウムの移行濃度のバラツキについて考察した。

本研究の成果の一部は第5回環境放射能除染研究発表会で口頭発表した (清野ら 2016)。

2. 材料と方法

2.1 検体の採取と分析

2015年7月に郡山市 (Fig. 1) の地区1～5を観察し、ゼンマイの群生地をそれぞれ5～30 (計100) か所選んで、ゼンマイの成葉 (栄養葉, sterile leaf, Fig. 2) を1か所につき1検体 (生重15～70 g) 採取した。各地区は農地や市街地によって互いに隔てられている土地で、森林公園や林業に関する試験・調査施設などに使われていて樹木が多い。ゼンマイは群生することが多く、1つの群生地は1～数100個体からなる。選んだ群生地ごとに1～数個体から採取した葉を混合して1検体とした (以下、この成葉の100検体を郡山100と呼ぶ。検体を採取した群生地の場所を地点と呼ぶ)。採取地は暖温帯上部から冷温帯下部に位置する。土壌母材は堆積岩類、花崗岩類、流紋岩類、火砕流堆積物などである (産業技術総合研究所地質調査総合センター 2015)。採取地では、採取個体位置の緯度・経度 (GPS使用)、地形 (斜面上部、中部、下部に区分)、斜面傾斜角 (クリノメータ使用)、上木の被覆 (疎開地、林縁、林内を目視判定)、空間線量率 (地上高1 mの $\mu\text{Sv h}^{-1}$ 、CdTe半導体検出器 (株式会社テクノエーピー TA100U) あるいは固体シンチレータ (CsI (Tl)) 検出器 (株式会社堀場製作所 PA-1000 Radi) を使用)、採取したゼンマイの葉長 (m) を記録した。また、採取したゼンマイの個体全体と根元に堆積したリターの状況が分かる写真を撮り、画像を目視してゼンマイ個体の根元周りでリターに被われて鉍質土壌やコケが見えていない土地面積割合 (%) を計測し、リターの被覆率とした。

採取地5つにつき1つの割合で、ゼンマイの個体のわきでリター検体を一辺0.25 mの正方形枠で1点ずつ採取した。この際に植物の根とコケは生きているものもリターに含めた。また、リターを採取した正方形枠内で、土壌の検体を100 cc 採土円筒 (地表面積0.002 m²、深さ0.05 m) で1点ずつ採取した。リターと土壌採取地では再測に備え、杭を打って土地を標識した。

ゼンマイとリター、土壌の各検体の放射性セシウム濃度の計測は、日鉄住金環境株式会社分析ソリューション

Air dose ratio ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)
(6th airborne monitoring,
Oct-Nov 2012)

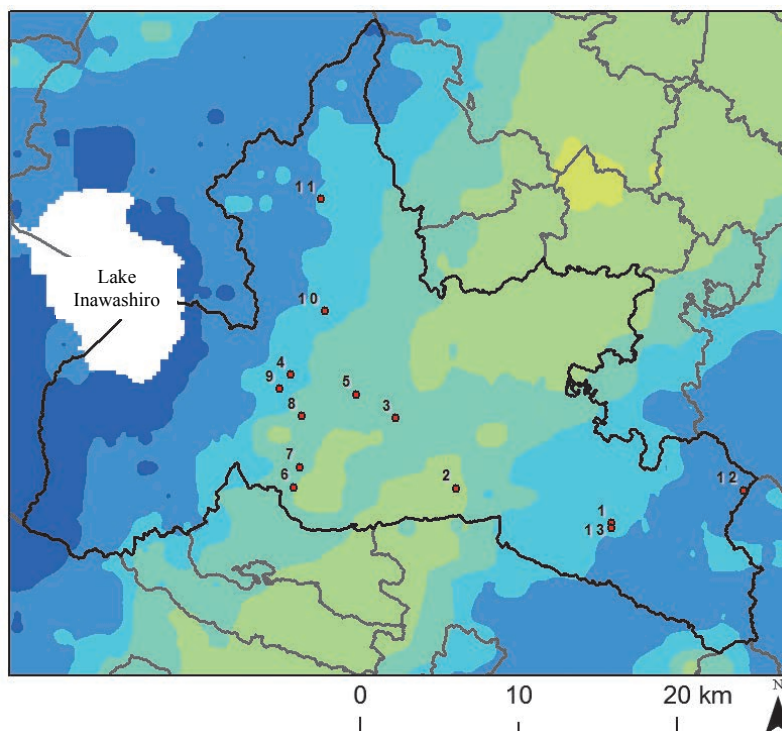
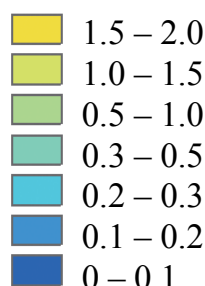


Fig. 1. ゼンマイの検体採取地区の位置

1. 郡山市東部森林公園、2. 福島県林業研究センター、3. 大槻公園、4. 郡山市高篠山森林公園、5. 逢瀬公園、6～13は検証データの採取地区で国有林と民地がある。背景は空間線量率 (air dose rate, ADR, $\mu\text{Sv h}^{-1}$) の分布で文部科学省 (2013) にもとづいて作成した。

事業本部で行った。ゼンマイは水道水で軽く洗って土などの汚れを落としたのち、生のまま U-8 容器に詰めた。リターは細かく裁断し、土壌は石や根を除いて細かく砕き、全量重の測定後、中身がまんべんなく混ざるようにして必要量を U-8 容器に入れた。いずれの検体も別に一部を取って含水率を測定した。ゲルマニウム半導体検出器 (キャンベラ社 GC-2520) を用いたガンマ線スペクトロメトリにより検体のセシウム 134 (^{134}Cs)、セシウム 137 (^{137}Cs)、カリウム 40 (^{40}K) の量を計測し、計測誤差、検出下限値とともに Bq dry-kg^{-1} の値を含水率 0% のときの値に換算した。計測の条件は以下とした。① ^{137}Cs の計測値は相対誤差 10% 以下、② ^{134}Cs の計測値は相対誤差 10% 超で良いが、検出限界 (計測値の標準偏差 SD の 3 倍, 3σ) 以上とした。③①②の条件を満たさなくても計測時間は 12 時間を上限として打ち切り、④ ^{40}K は ^{137}Cs や ^{134}Cs の計測を打ち切ったときの値を記載することとした。

2.2 検証調査におけるゼンマイの検体の採取と分析

立地環境条件や汚染の程度に応じた放射性セシウムの移行の状況に関して、郡山 100 で得られた結果を検証するため、8 月に Fig. 1 中の地区 6～13 の、それぞれ 2～9 地点 (計 31 地点) でゼンマイの成葉を 1 地点につき 1 検体 (生重 50～300 g) 採取し、生育地の環境条件を、採取個体位置の緯度・経度や地形など郡山 100 と同じ項目

について計測、記録した (以下、この成葉の 31 検体を郡山 31 と呼ぶ)。採取地は暖温帯上部から冷温帯に位置する。土壌母材は火山岩類、堆積岩類、花崗岩類などである (産業技術総合研究所地質調査総合センター 2015)。空間線量率はシンチレーションサーベイメータ (日立アロカメディカル株式会社 TCS-172B) で計測した。ゼンマイの検体は森林総合研究所において、熱風乾燥器で 75°C 、48 時間以上の条件で乾燥 (乾燥後の含水率約 4%) させてから、U-8 容器または 0.7 L マリネリ容器に入れ、同軸型ゲルマニウム半導体検出器 (セイコー・イージーアンドジー株式会社 GEM40P4-76) でガンマ線スペクトロメトリの計測値を求めた。計測の条件は 2.1 の①～④と同じである。さらに含水率 0% のときの濃度に換算した。

フキでは葉身の方が葉柄よりも ^{137}Cs 濃度が高い傾向があり (清野・赤間 2015)、ワラビの新芽も穂先が葉柄より高いことが報告されている (長谷川・竹原 2016)。ゼンマイは大きい葉では葉柄 (stipe, Fig. 2) がとくに長くなり、葉全体に占める葉身の割合が小さくなることから、生育地の環境条件の影響とは別に、採取する葉の大きさによっても葉 ^{137}Cs 濃度が変わる可能性がある。そこで 10 地点の検体は小羽片 (pinnule) と [羽片中肋 (midrib) + 中軸 (rachis) + 葉柄] (Fig. 2) に分け、それぞれの ^{137}Cs 濃度を測定した。

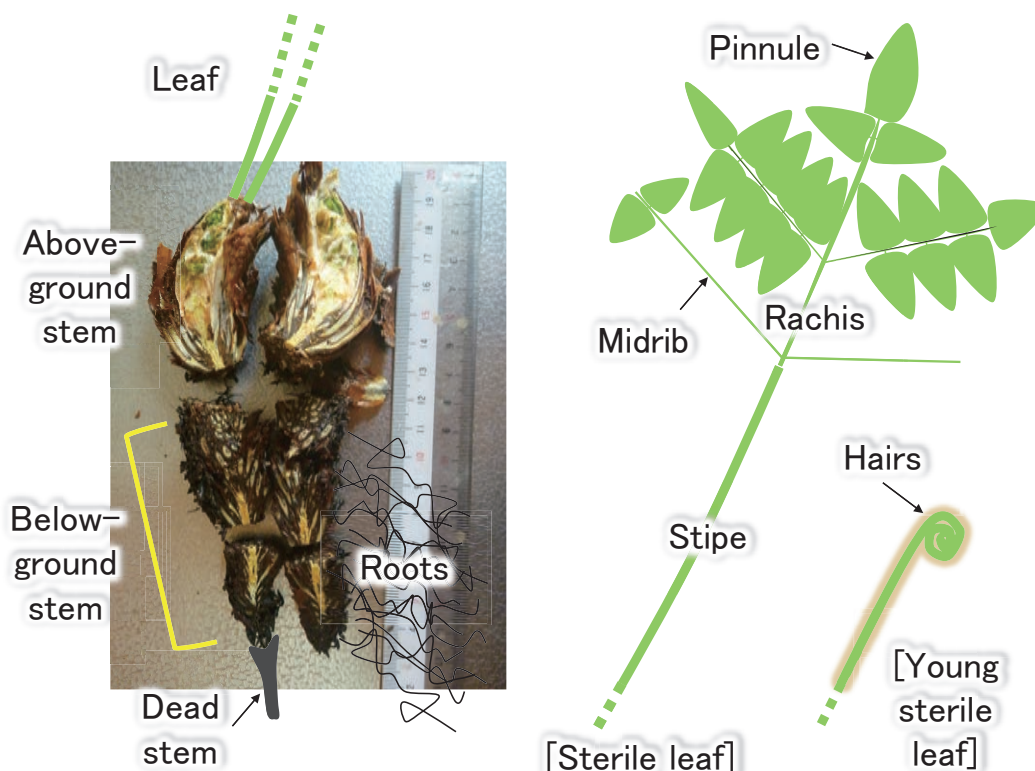


Fig. 2. ゼンマイ個体の形態と部位名
葉と枯死茎、根は模式的に描いた。

2.3 ゼンマイの成長と放射性セシウム濃度の季節変化

茨城県石岡市柗平国有林で2015年4月18日に林道の山側法面に生育するゼンマイ58個体を標識し、各個体の生育地の環境条件を計測、記録した(柗平プロット)。58個体は林道沿いの距離で約400m離れた2群(A、B群)に分かれ、A群は27個体、B群は31個体からなる。A、B群はいずれも斜面中～下部の林縁に分布し、斜面傾斜角の平均値とSDはそれぞれ 54 ± 18 度($n = 27$)、 60 ± 18 度($n = 31$)であった。生育地は暖温帯上部に位置し、土壌母材は領家変成岩(産業技術総合研究所地質調査総合センター2015)である。地上1mの平均空間線量率(シンチレーションサーベイメータ(日立アロカメディカル株式会社TCS-172B))は2015年4月18日にA群が $0.135 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、B群が $0.16 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、2016年6月17日にA群が $0.125 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、B群が $0.135 \mu\text{Sv h}^{-1}$ であった。

2015年4月18日は標識した全個体について、以降は5～9月の毎月中旬にA、B各群の3～6個体について栄養葉の長さを計測し、各計測個体から平均サイズの葉を1枚ずつ採取し、各月、群ごとに混合したものを検体とした。7月には標識した各個体について平均サイズの栄養葉の長さを計測した。2016年は2、4、5、6月に各群から1～3個体を掘り取って根系の空間的な広がりを観察するとともに、葉(leaf, Fig. 2; 栄養葉(sterile leaf)と孢子葉)、地上茎(aboveground stem, Fig. 2)、地下茎(belowground stem, Fig. 2)、根(roots, Fig. 2)、枯死茎(dead stem, Fig. 2)

に分け、個体(葉+茎+根)当たりのバイオマスや放射性セシウム、 ^{40}K の濃度、量の季節変化を求めた。また、11月に各群から1個体を掘り取ってバイオマスを求めた。ゼンマイの検体の放射性セシウム、 ^{40}K 濃度の測定方法は郡山31と同じであるが、採取月によって採取個体のサイズがやや異なった。ゼンマイは栄養葉の枚数(N)と絶乾個体重(W_t , g)との間に、ほぼ正比例の関係($W_t = 17.7N - 8.0$, $R^2 = 0.6293$, $P = 0.019$, $n = 8$)が成り立つことから、個体レベルでバイオマスや放射性セシウム、 ^{40}K の量を採取月間で比較するときは、栄養葉一枚当たりの量に変換した。その際、2月採取個体は当年の栄養葉が未展開であるため、枯れたまま脱落しない前年の栄養葉の数で代用した。

また、ゼンマイの同一個体から春と夏に栄養葉を採取して放射性セシウム濃度を計測した事例を、公表データ(清野・赤間2013, Kiyono and Akama 2013)や著者の未発表データから集めた。

2.4 ゼンマイの新芽の部位別の放射性セシウム濃度と葉柄の含水率

ゼンマイは主に栄養葉の新芽の葉柄を食用とし、綿毛(hairs, Fig. 2)や未展開の小羽片、大半の羽片中肋や中軸は除去される。しかし、過去に収集された栄養葉の新芽の検体の一部は食用部分以外も含んでいることから、食用部分の濃度に換算できるよう、茨城県石岡市の1群生

地の栄養葉の新芽 148 本（混合して 1 検体とした）について、調理の下ごしらえを念頭に置いて葉柄、綿毛、[小羽片＋羽片中肋＋中軸]に区分して検体を採り、それぞれの乾燥重と放射性セシウム濃度を計測した。また、葉柄の含水率を公表資料（清野・赤間 2013）や柵平プロットの検体で調べ、集計した。

2.5 生育地の環境条件とゼンマイの ^{137}Cs 濃度との関係

郡山 100 のデータについて、ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度を基準変数とする重回帰分析を行った。生育地の環境条件のうち、①空間線量率、②斜面上の位置（ダミー変数として上部に 1、中部や平坦地に 2、下部に 3 を与えた）、③斜面傾斜角（°）、④上木の多寡（ダミー変数として疎開地に 1、林縁に 2、林内に 3 を与えた）、⑤リターの土地被覆面積割合（%）の 5 つを選び、相互の相関を求めたところ、空間線量率と斜面傾斜角との間に負の相関（ $r = -0.4291$ ）があり、他は $-0.2570 \sim 0.2274$ の弱い相関があった。このため、斜面傾斜角を除いた 4 条件について、ダミー変数以外は値を対数変換して予測変数とし、変数減増法で重回帰式を求めた。得られた結果にもとづき、ゼンマイの ^{137}Cs 濃度を予測するモデルを作成し、郡山 31 のデータで検証した。

本研究では、文献値以外の放射性セシウム濃度を 2015 年 9 月 1 日を基準日に減衰補正した。統計解析には R3.3.1（R Development Core Team 2011）を使用した。データの分布の正規性の判定に正規性検定ツール（CivilWorks（シビルワークス）、<http://www.civilworks.jp/>）を使用した。空間線量率や ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度を異なる機器で測定している場合があるが、測定機器はいずれも定期的な校正を受けており、測定値は信頼できる。

3. 結果

3.1 ゼンマイの生育地

郡山 100 の生育地 100 地点の地形は、斜面上部が 7 地点、斜面中部ないし平坦地が 69 地点、斜面下部が 24 地点で、斜面中・下部が 93% を占めた。斜面傾斜角は $1 \sim 46$ 度とさまざまであった。疎開地は 2 地点と少なく、林縁が 12 地点、林内が 86 地点であった。リターの被覆率は概して高く、96 地点で 100% であった。被覆率が 60 ～ 70% とやや低い 4 例は林縁や疎開地の生育地であった。敷地管理のため林床の草木が定期的に刈り払われている森林公園では、大きく育ったゼンマイの、面積数 10 m^2 におよぶ群生地も見られた。20 地点で調べたリターの現存量は $0.32 \sim 8.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ （平均値と SD は $2.22 \pm 1.64 \text{ Mg ha}^{-1}$ ）であった。

郡山 31 の生育地は郡山 100 と同様で、斜面上部が 1 地点、斜面中部が 16 地点、斜面下部が 14 地点で、斜面中・下部が 97% を占めた。斜面傾斜角は $0 \sim 62$ 度とさまざまであった。疎開地はなく、林縁が 14 地点、林内が 17

地点であった。リターの被覆率は 27 地点で 100% であった。被覆率が 50 ～ 83% とやや低い 4 例は、斜面上部や林縁の生育地であった。人による植生管理に関しては、植物がよく刈り払われる道わき、法面などが 17 地点、数年以上刈り払いされていない林内が 14 地点であった。

空間線量率（地上高 1 m）は郡山 100 が $0.14 \sim 0.46 \mu\text{Sv h}^{-1}$ で、その平均値と SD は $0.30 \pm 0.089 \mu\text{Sv h}^{-1}$ （ $n = 100$ ）、郡山 31 が $0.08 \sim 0.41 \mu\text{Sv h}^{-1}$ と $0.23 \pm 0.084 \mu\text{Sv h}^{-1}$ （ $n = 31$ ）であった。

3.2 ゼンマイの葉の含水率、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度、生育地のリター、土壌の ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度と沈着量

郡山 100 の含水率の平均値と SD は $77 \pm 3\%$ （ $n = 100$ ）であった。 ^{134}Cs 濃度は $9 \sim 320 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ （100 検体中 9 検体は検出下限値未満であったため、検出下限値 $21 \sim 72 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ で代用：Appendix 2 参照）、 ^{137}Cs 濃度は $21 \sim 1200 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ 、 ^{40}K 濃度は $420 \sim 1500 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ （100 検体中 8 検体は検出下限値 $430 \sim 1300 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ で代用：Appendix 2 参照）であった。また、リターの ^{134}Cs 濃度は $260 \sim 5100 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ 、 ^{137}Cs 濃度は $950 \sim 20000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ であった。 ^{40}K 濃度は 20 検体中 18 検体が検出下限値（ $480 \sim 1200 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ ）未満であった。リターの沈着量は ^{134}Cs が $0.47 \sim 22.3 \text{ kBq m}^{-2}$ 、 ^{137}Cs が $1.8 \sim 92.5 \text{ kBq m}^{-2}$ 、 ^{40}K が $9.1 \sim 390 \text{ kBq m}^{-2}$ （20 検体中 18 検体は検出下限値で代用：Appendix 2 参照）であった。土壌の ^{134}Cs 濃度は $150 \sim 1600 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ 、 ^{137}Cs 濃度は $550 \sim 6700 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ 、 ^{40}K 濃度は $260 \sim 900 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ （20 検体中 10 検体は検出下限値 $260 \sim 430 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ で代用：Appendix 2 参照）であった。土壌の沈着量は ^{134}Cs が $2.9 \sim 46.4 \text{ kBq m}^{-2}$ 、 ^{137}Cs が $11.6 \sim 200 \text{ kBq m}^{-2}$ 、 ^{40}K が $7.6 \sim 3500 \text{ kBq m}^{-2}$ であった。福島第一原発事故で放出された ^{134}Cs と ^{137}Cs は事故時の Bq 値はほぼ同量で、その後は半減期の違いにより ^{134}Cs が早く失われている。2015 年 6 月の調査時点の Bq dry-kg^{-1} 値の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比の平均値と SD はゼンマイ葉で 0.28 ± 0.08 （ $n = 100$ ）、リターで 0.25 ± 0.02 （ $n = 20$ ）、土壌で 0.25 ± 0.02 （ $n = 20$ ）であった。

^{134}Cs 濃度が検出下限値を下回った検体を除外し、 ^{137}Cs 濃度と $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比との関係をゼンマイとリター、土壌についてそれぞれ求めたところ、ゼンマイ（ $P = 0.362$, $n = 91$ ）とリター（ $P = 0.981$, $n = 20$ ）では関係は有意でなく、土壌では ^{137}Cs 濃度が薄い場合に $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比がやや大きくなる傾向（ $P = 0.0251$, $n = 20$ ）があった。 ^{137}Cs 濃度が低い検体では、福島事故前に大気圏内での核実験で放出された ^{137}Cs の影響で、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比が小さくなると思われるが、今回のデータではそのような傾向はなかった。したがって、今回計測された ^{137}Cs は福島事故由来のものが殆どで、核実験の影響は無視できる程度と考えられた。

また、 ^{134}Cs 濃度が検出下限値を下回った検体は除外し

て $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比を求めたところ、郡山 100 ゼンマイ葉が 0.27 ± 0.04 ($n=91$)、郡山 31 検証用ゼンマイ葉が 0.25 ± 0.06 ($n=31$)、春-夏葉濃度比算出用ゼンマイ個体 ($n=8$) の春葉と夏葉がそれぞれ 0.27 ± 0.08 と 0.26 ± 0.09 、郡山 100 リターが 0.26 ± 0.01 ($n=20$)、郡山 100 土壌が 0.25 ± 0.02 ($n=20$) であった。分散分析の結果、群間に平均値の有意差はなかった ($P=0.1604$)。このため、以下では放射性セシウムに関しては ^{137}Cs 濃度の解析結果について述べることにする。

3.3 ゼンマイとその生育地のリター、土壌の ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度の範囲と頻度分布の形

郡山 100 の ^{137}Cs 濃度の分布は対数正規分布にしたがった (D'Agostino's K-squared test, $K^2 = 1.5054$, $P = 0.4711$; Anderson-Darling test, $A^2 = 0.2717$)。SD は 0.9291、対数平均値の真数は 165 (同平均値 + SD, 417; 平均値 - SD, 65) Bq dry-kg $^{-1}$ であった。 ^{40}K 濃度は 8 検体で検出下限値 (430 ~ 1,300 Bq dry-kg $^{-1}$) を下回った。検出下限未満の 8 検体の ^{40}K 濃度を検出下限値で代用したときの郡山 100 の ^{40}K 濃度は 420 ~ 1,500 Bq dry-kg $^{-1}$ であった。濃度分布は対数正規分布にしたがった ($K^2 = 0.1528$, $P = 0.9265$; $A^2 = 0.5464$)。SD は 0.2720、対数平均値の真数は 795 (平均値 + SD, 1,044; 平均値 - SD, 606) kBq dry-kg $^{-1}$ であった。 ^{40}K 濃度は ^{137}Cs 濃度との間に有意な関係が認められなかった

($P = 0.227$)。 ^{40}K 濃度は ^{137}Cs 濃度と比べて値の変動幅がごく小さかった。

リター、土壌それぞれ 20 検体の ^{137}Cs の沈着量も対数正規分布にしたがった (リターの ^{137}Cs , $K^2 = 0.5073$, $P = 0.7759$; $A^2 = 0.1963$ 、土壌の ^{137}Cs , $K^2 = 1.2604$, $P = 0.5325$; $A^2 = 0.3266$)。対数平均値の真数は、リター ^{137}Cs が 11 (平均値 + SD, 29; 平均値 - SD, 3.8) kBq m $^{-2}$ 、土壌 ^{137}Cs が 44 (平均値 + SD, 102; 平均値 - SD, 19) kBq m $^{-2}$ であった。深さ 0.05 m までの表層土壌にリターの約 4 倍の放射性セシウムが存在していた。

3.4 ゼンマイの葉の大きさが葉 ^{137}Cs 濃度に及ぼす影響

大きな葉では小羽片の葉全体に占める重量比が小さくなる傾向があり (Fig. 3a)、小羽片/[羽片中肋+中軸+葉柄] の ^{137}Cs 濃度比は高くなる傾向があった (Fig. 3b)。二つの傾向が打ち消しあった結果として、小羽片/[羽片中肋+中軸+葉柄] の ^{137}Cs 量比 (Fig. 3c) や葉全体の ^{137}Cs 濃度 (Fig. 3d) が葉の大きさによって変化する傾向は認められなかった。

3.5 ゼンマイのバイオマスとその ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度、量の時間的变化

棚平プロットのゼンマイは、2015 年 4 月に孢子葉に少し遅れて栄養葉を伸ばし始めた (Fig. 4a)。栄養葉は 5 月ま

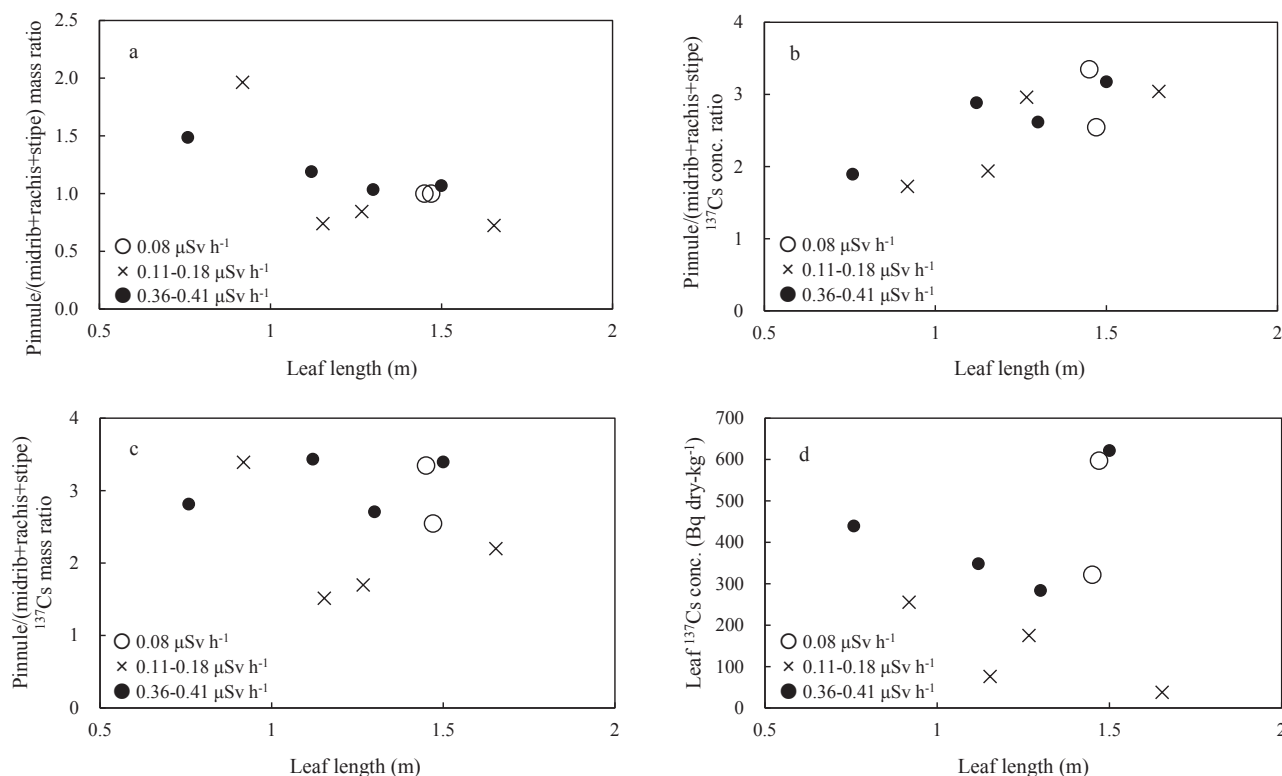


Fig. 3. ゼンマイの葉の大きさと小羽片、[羽片中肋+中軸+葉柄] の重量、 ^{137}Cs 濃度の関係

福島県と茨城県の 10 検体。a: 小羽片/[羽片中肋+中軸+葉柄] 重量比、b: 小羽片/[羽片中肋+中軸+葉柄] ^{137}Cs 濃度比、c: 小羽片/[羽片中肋+中軸+葉柄] ^{137}Cs 量比、d: 葉 ^{137}Cs 濃度

でほぼ伸び切り、以後夏までの成長はわずかであった。個体によって開葉開始の遅速はあったが、同じ個体の葉は一斉に開葉し、開葉後の葉数はほぼ一定であった。7月の個体ごとの平均サイズの栄養葉の長さの平均値とSDはA群 1.1 ± 0.3 m ($n = 25$)、B群 1.3 ± 0.2 m ($n = 31$) で、B群の方が平均個体サイズは大きかった ($P = 0.007$, 対応のない異分散の2組の平均値の差のt検定)。一部(2%)の個体は8~9月に新しい葉を1~2枚展ばした。これは、樹木等の土用芽に相当するものと考えられた。8~9月に展開した栄養葉は概して小さく、春の栄養葉が生存していれば、それより大きくなることはなかった。9月20日には小羽片の約1/3~1/2が黄葉ないし枯死していた。11月も一部の小羽片は生存していた。

ゼンマイの根はひげ根で、短い地下茎から周囲に広がっていた (Fig. 2, 写真)。根は概して浅く、その広がり水平方向には個体の葉群半径に近い0.3~0.5 m、垂直方向には地表面から深さ0.1ないし0.17 mまでの範囲であった。検体にした個体の解体時の観察によると、春の開葉後の個体でも茎頂に多数の未展開の幼葉(葉原基)を保持していた (Fig. 2, 写真)。この未展開の幼葉は植食動物に葉を損なわれたときなどに発芽させるスベアと考えられ、その数は個体サイズの小さいA群では少なかった。サイズの小さい個体は多くの資源を温存に割くことができない

ようである。春の開葉後の5、6月の同化/非同化部重比はA群が0.31と0.26、B群が0.67と0.39、両群込みの比の平均値とSDは 0.41 ± 0.18 ($n = 4$) であった。

葉の ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度は5月にピークを持ち、6月以降はより低い濃度でおおむね安定していた (Fig. 4b,c)。

2月から6月にかけて葉一枚当たりの個体(葉+茎+根)バイオマスは増加傾向にあった (Fig. 5a)。 ^{137}Cs の個体当たりの量も上昇し (Fig. 5b, c)、値の上昇はA群で著しかった。 ^{40}K の個体当たりの濃度も上昇傾向にあったが ^{137}Cs と異なり、A、B群間の違いは小さかった (Fig. 5d)。 ^{137}Cs の個体当たりの量の増加の開始はB群が早く、4月にピークを持った (Fig. 5e)。A群は開始が遅れ、6月まで増加を続けた。個体 $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ 濃度比は5月のA群が顕著に高かった (Fig. 5f)。葉一枚当たりの個体バイオマスは6月と11月の間で有意差がなかった ($P = 0.49099$, $n = 2$; 対応のある2組の平均値の差のt検定)。成長と枯死によりバイオマスが全て入れ替わるのに要する時間は、代謝回転率(八杉ら1996)の逆数である平均値/変化量で表せる。それを2016年2~11月に観測したバイオマスの((最大値+最小値)/2)/(最大値-最小値)で近似したところ、A群は1.4年、B群は5.7年で、A群の個体はB群の個体より短い時間でバイオマスを置き換えていると考えられた。

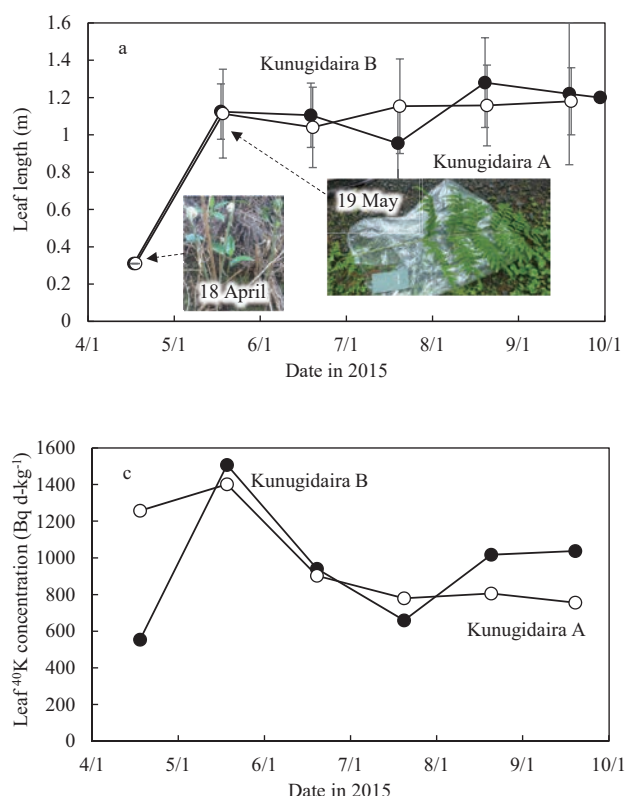


Fig. 4. ゼンマイの葉の長さ と ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度の季節変化
a: ゼンマイの葉長。A、B群それぞれ3~5以上の個体の各平均サイズの栄養葉の長さの平均値。バーは標準偏差。毎月同じ個体とは限らない。b: 葉の ^{137}Cs 濃度。c: 葉の ^{40}K 濃度。A、B群それぞれ3~5個体以上の栄養葉の混合。毎月同じ個体とは限らない。4月の検体は綿毛を除去した。

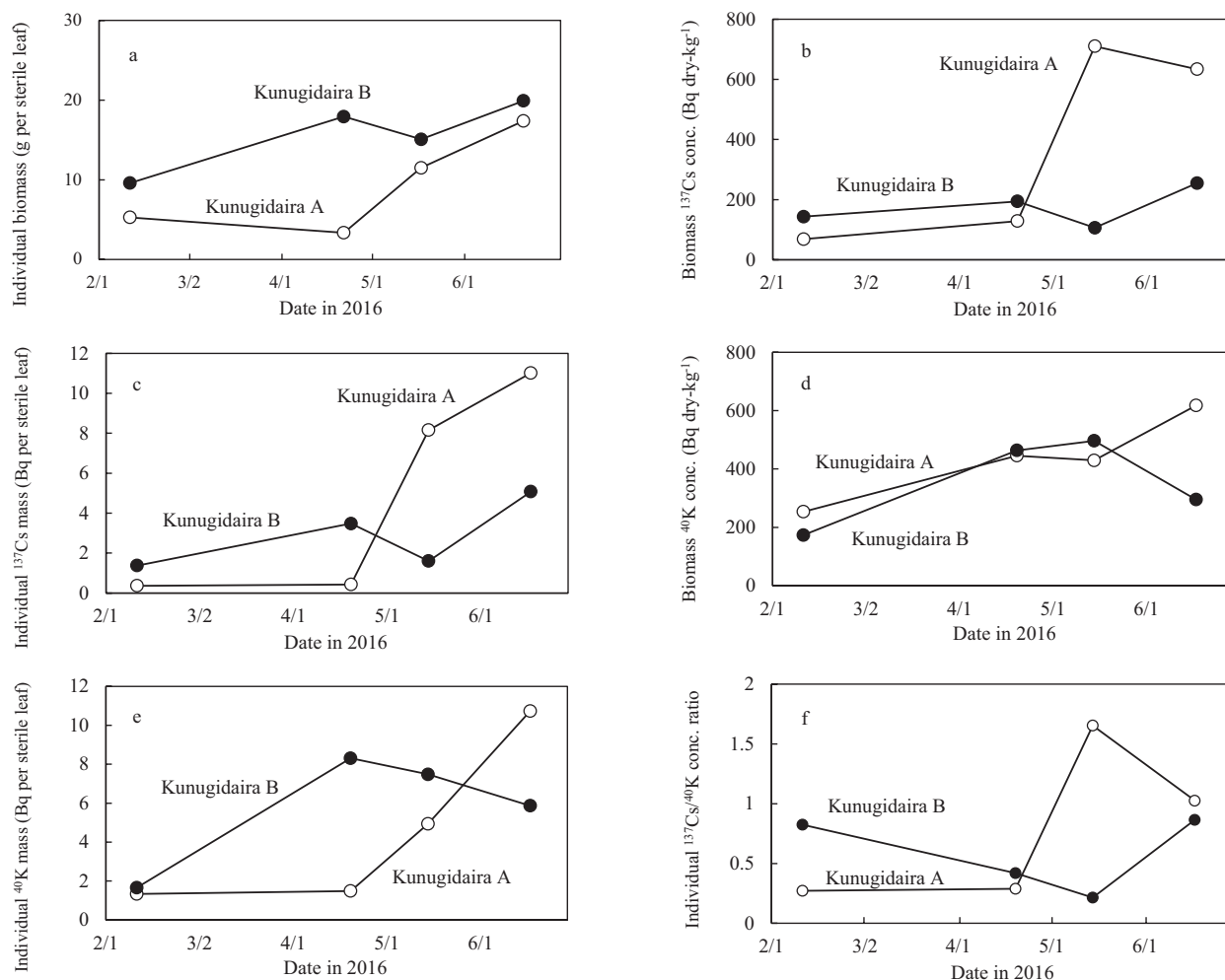


Fig. 5. ゼンマイの個体のバイオマスと ^{137}Cs 、 ^{40}K の濃度、量の季節変化

a: バイオマス、b: ^{137}Cs 濃度、c: ^{137}Cs 量、d: ^{40}K 濃度、e: ^{40}K 量。個体バイオマスは地上部（綿毛を含む葉、地上茎）と地下部（地下茎、根）の合計。個体のバイオマスと ^{137}Cs 量、 ^{40}K 量は葉一枚当たりの値で表した。

3.6 新芽の食用部分の濃度と夏の成葉濃度の関係

^{137}Cs の春の新芽濃度と夏の成葉濃度を比較できる事例が福島県川内村で3つ、郡山市、只見町、茨城県石岡市から1つずつ得られた。これに柗平プロットA、B群の4月と7月の値を加えた8事例について求めた新芽/成葉 ^{137}Cs 濃度比の平均値とSDは 2.4 ± 1.5 ($n = 8$) であった。 ^{137}Cs について、新芽全体の濃度を1としたときの綿毛、[小羽片+羽片中肋+中軸]、葉柄の各部分の濃度はそれぞれ0.32、1.39、0.77であった。新芽/成葉 ^{137}Cs 濃度比(2.4)、新芽全体に対する葉柄濃度比(0.77)から、春の新芽の食用部分の濃度は夏の成葉濃度の1.8倍と見積もられた。

新芽の葉柄の含水率は川内村で2つ（清野・赤間2013）、柗平プロットA、B群で2つの事例が得られた。含水率の平均値とSDは $90 \pm 3\%$ ($n = 4$) であった。

郡山100について、含水率を成葉77%、新芽90%とし、春の新芽の食用部分の絶乾重当たり濃度を夏の成葉濃度の1.8倍と仮定して春の新芽のときの $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ 濃度を推定したところ、100 Bq fresh-kg $^{-1}$ を超える検体数は100中81であった。

3.7 生育地の環境条件とゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度との関係

ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度はリターの ^{137}Cs 沈着量と有意 ($P = 0.0224$, $n = 20$, Fig. 6a) な正の相関関係があり、土壌の ^{137}Cs 沈着量とは有意な関係が認められなかった ($P = 0.8621$, $n = 20$, Fig. 6b)。空間線量率はリターの ^{137}Cs 沈着量との関係が有意でなく ($P = 0.097$, $n = 20$, Fig. 6c)、土壌の ^{137}Cs 沈着量との間に有意 ($P = 0.0413$, $n = 20$, Fig. 6d) な正の相関関係があった。空間線量率とリターと土壌の ^{137}Cs 沈着量の合計値との間にはより強い ($P = 0.013$, $n = 20$) 正の相関関係があった。

重回帰分析の結果、ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度との関係に意味があると判断されたのは、空間線量率 ($P = 0.0431$, $n = 100$) と上木の多寡 ($P = 0.1177$, $n = 100$)、リターの多寡 ($P = 0.0948$, $n = 100$) の3つであった。生育地の空間線量率が高い場合 (Fig. 7a) や、生育地が疎開地よりも林縁、さらに林内である (Fig. 7b)、個体周りのリターが多い (Fig. 7c) と ^{137}Cs 濃度が高くなると考えられた。

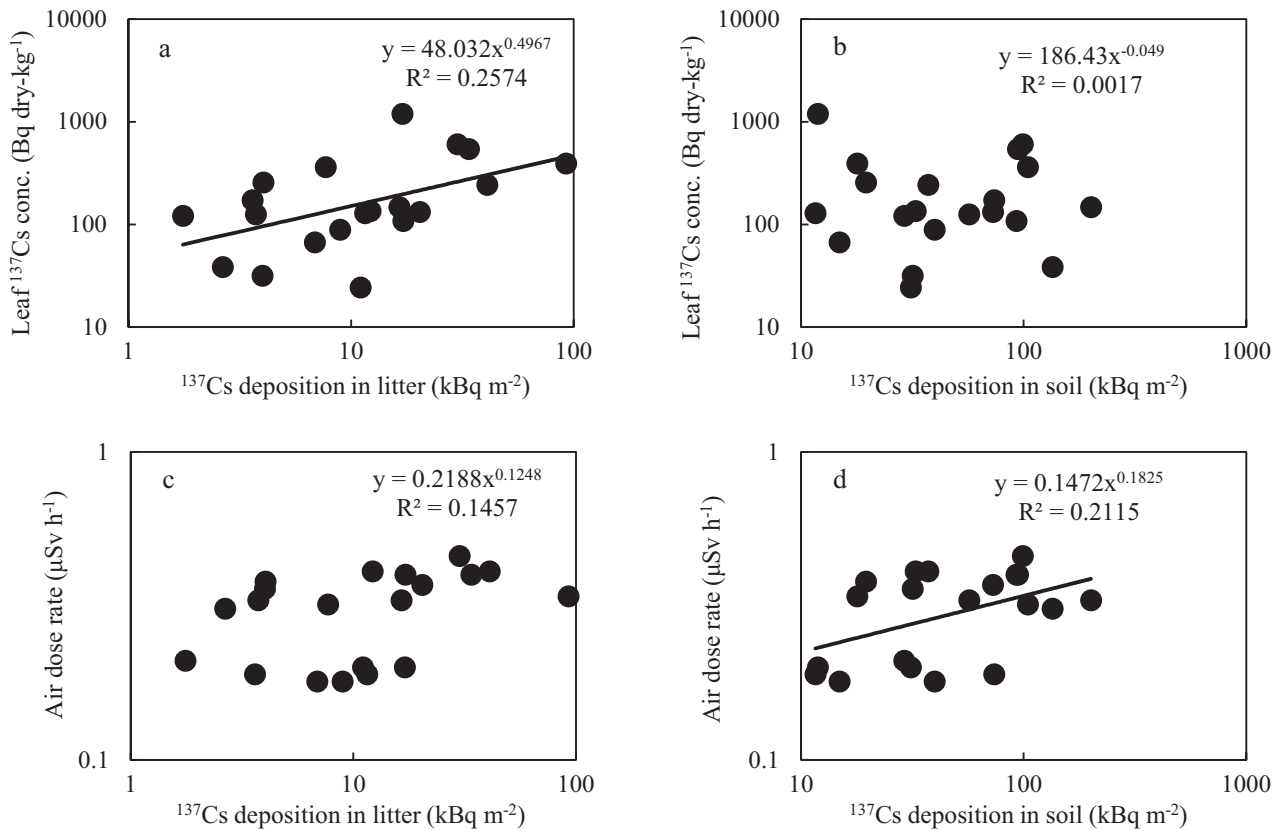


Fig. 6. リター、土壌への ^{137}Cs 沈着量と空間線量率、ゼンマイの葉 ^{137}Cs 濃度との関係

郡山市内 20 地点で調査。空間線量率は地上高 1 m の値。a: ゼンマイの葉 ^{137}Cs 濃度とリターへの ^{137}Cs 沈着量、b: ゼンマイの葉 ^{137}Cs 濃度と土壌への ^{137}Cs 沈着量、c: 空間線量率とリターへの ^{137}Cs 沈着量、d: 空間線量率と土壌への ^{137}Cs 沈着量。

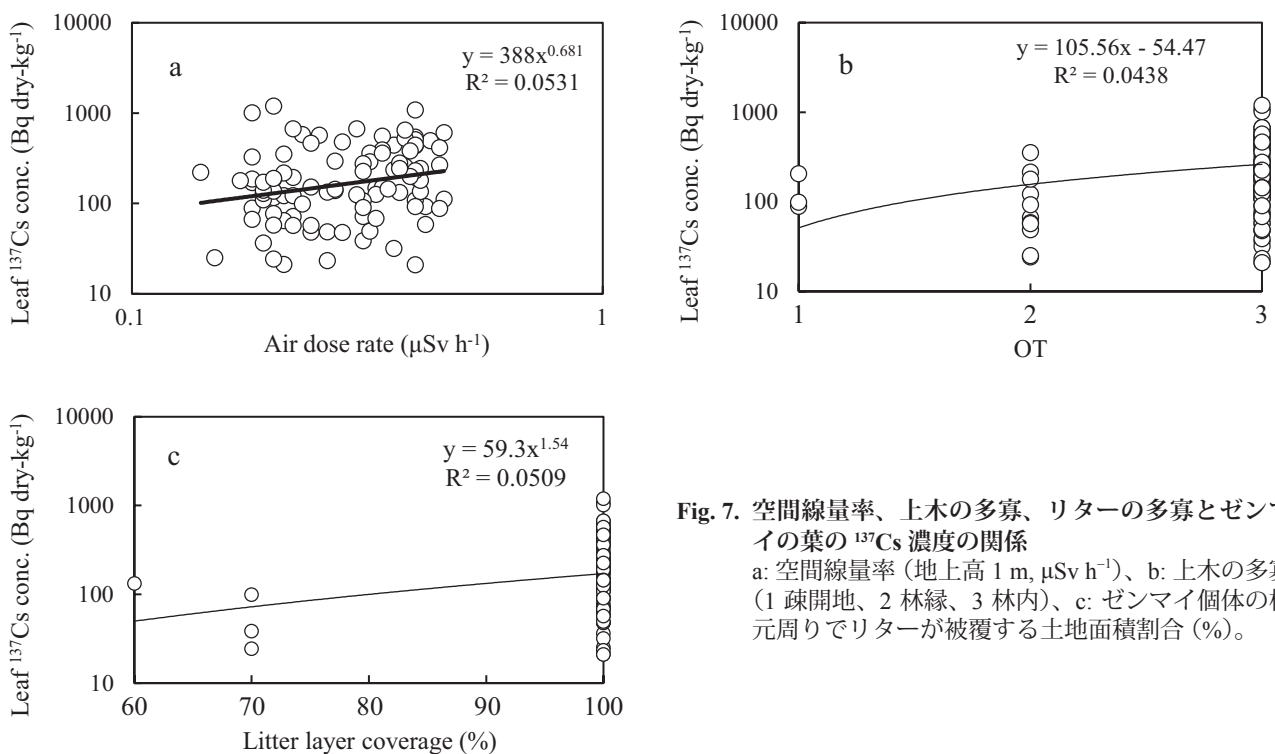


Fig. 7. 空間線量率、上木の多寡、リターの多寡とゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度の関係

a: 空間線量率 (地上高 1 m, $\mu\text{Sv h}^{-1}$)、b: 上木の多寡 (1 疎開地、2 林縁、3 林内)、c: ゼンマイ個体の根元周りでリターが被覆する土地面積割合 (%)。

3.8 生育地の環境条件からゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度を予測するモデルの作成

ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度との関係が見いだされた空間線量率、上木の多寡、リターの多寡の3つの一部あるいは全てを予測変数とする式 (Eqs. 1~7) を作成した。Eqs. 1~7 はいずれも有意であった ($P = 0.007 \sim 0.040$)。これらをゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度を予測するモデル 1~7 とした。AIC (Akaike 1973) の値から、3 要因のモデル 1 が最も当てはまりが良く、ついで空間線量率を含む 2 要因のモデル 2、3 が良いと考えられた。

$$\ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}) = 0.5905 \ln(\text{ADR}) + 0.3258 \text{OT} + 1.9559 \ln(\text{LT}) - 4.0519 \quad (R^2 = 0.1167, P = 0.0075, \text{AIC} = 265.7, n = 100) \quad (1)$$

$$\ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}) = 0.5779 \ln(\text{ADR}) + 0.4053 \text{OT} + 4.6837 \quad (R^2 = 0.0905, P = 0.0100, \text{AIC} = 266.6, n = 100) \quad (2)$$

$$\ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}) = 0.6716 \ln(\text{ADR}) + 2.3736 \ln(\text{LT}) - 4.9451 \quad (R^2 = 0.0938, P = 0.0084, \text{AIC} = 266.2, n = 100) \quad (3)$$

$$\ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}) = 0.4012 \text{OT} + 1.8943 \ln(\text{LT}) - 4.7244 \quad (R^2 = 0.0781, P = 0.0194, \text{AIC} = 267.9, n = 100) \quad (4)$$

$$\ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}) = 0.6808 \ln(\text{ADR}) + 5.9599 \quad (R^2 = 0.0531, P = 0.0211, \text{AIC} = 268.6, n = 100) \quad (5)$$

$$\ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}) = 0.4767 \text{OT} + 3.7557 \quad (R^2 = 0.0535, P = 0.0206, \text{AIC} = 268.6, n = 100) \quad (6)$$

$$\ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}) = 2.4148 \ln(\text{LT}) - 5.9778 \quad (R^2 = 0.0421, P = 0.0405, \text{AIC} = 269.8, n = 100) \quad (7)$$

ここで、 $\text{CON } ^{137}\text{Cs}_{\text{OIL}}$ はゼンマイ葉の ^{137}Cs 濃度 (Bq dry-kg^{-1})、 ADR (air dose rate) は空間線量率 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)、 OT は上木の被覆の程度を表す値で疎開地は 1、林縁は 2、林内では 3 を取る。 LT はゼンマイ個体の根元周りにおけるリターの土地被覆面積割合 (%) である。これらのモデルは ADR が $0.14 \sim 0.46 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、 LT が $60 \sim 100\%$ の範囲に適用される。

郡山 31 の生育地の空間線量率や上木、リターの値をモデル 1~7 に代入して求めた ^{137}Cs 濃度の予測値 (Fig. 8) は、モデルによって異なるが 31 地点中 25~30 の予測値は観測値の約 1/5 から 5 倍の間にあり、バラツキが大きかった。予測値の系統誤差は小さかった。予測値と観測値の関係をべき乗式で近似したときの回帰線 (一本鎖線, Fig. 8) を見ると、モデル 1、3、4 は 1:1 の線にほぼ重なり、式の傾きも 1 に近かった ($0.88 \sim 1.13$)。モデル 2、5、6 は回帰線の傾きが大きく ($1.82 \sim 1.94$)、 ^{137}Cs 濃度が低いときに実際より高い濃度を予測する傾向、また、モデル 7 は回帰線の傾きが小さく (0.648)、 ^{137}Cs 濃度が低いときに実際より低い濃度を予測する傾向があった。

対数変換した郡山 100 の ^{137}Cs 濃度の平均値と測定値の差の SD が 0.9291 であったのに対して、3 変数のモデル 1 の予測値の観測値からの隔たり (残差) の SD は 0.8732 と小さくなった。SD は同様に 2 変数のモデル 2 では 0.8860 、モデル 3 では 0.8844 、モデル 4 では 0.8920 、1 変数のモデル 5 では 0.9041 、モデル 6 では 0.9039 、モデル 7 では

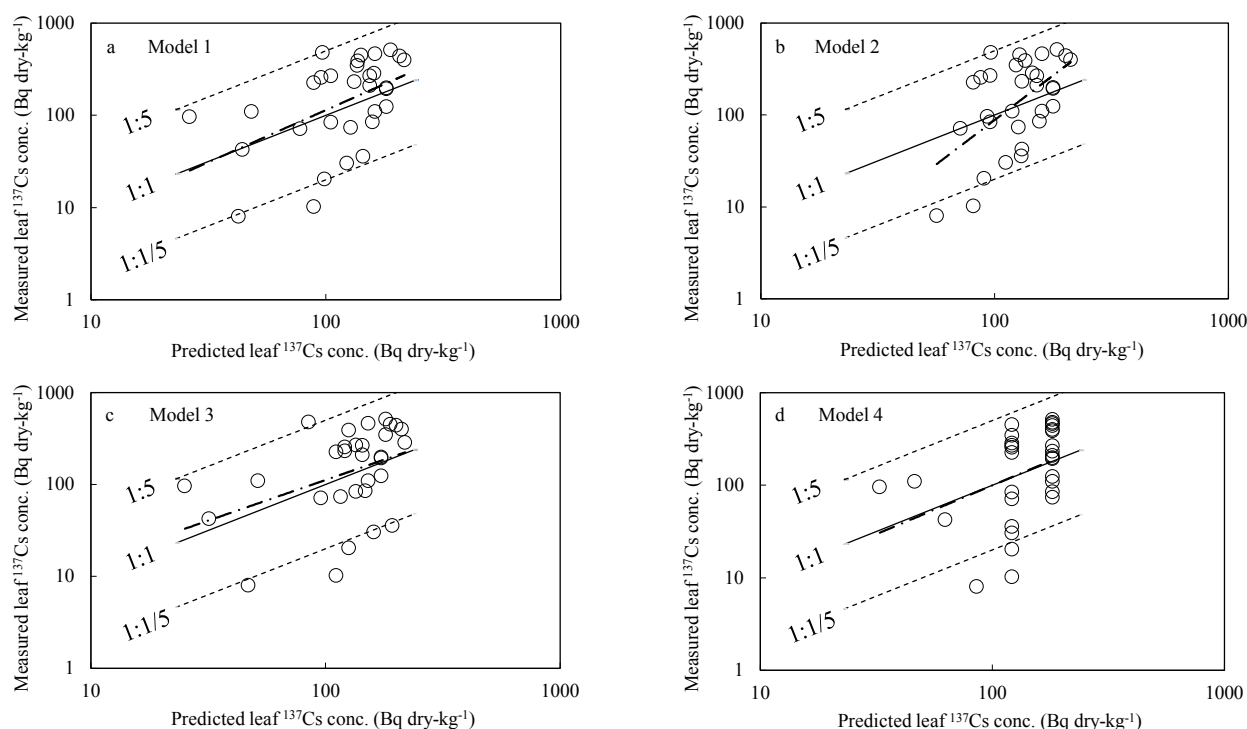


Fig. 8. モデルで予測したゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度の検証 (a~d)

a: 空間線量率 (ADR)、上木の被覆 (OT)、リターの被覆 (LT) の 3 要因モデル、b: ADR と OT の 2 要因モデル、c: 同 ADR と LT 、d: 同 OT と LT

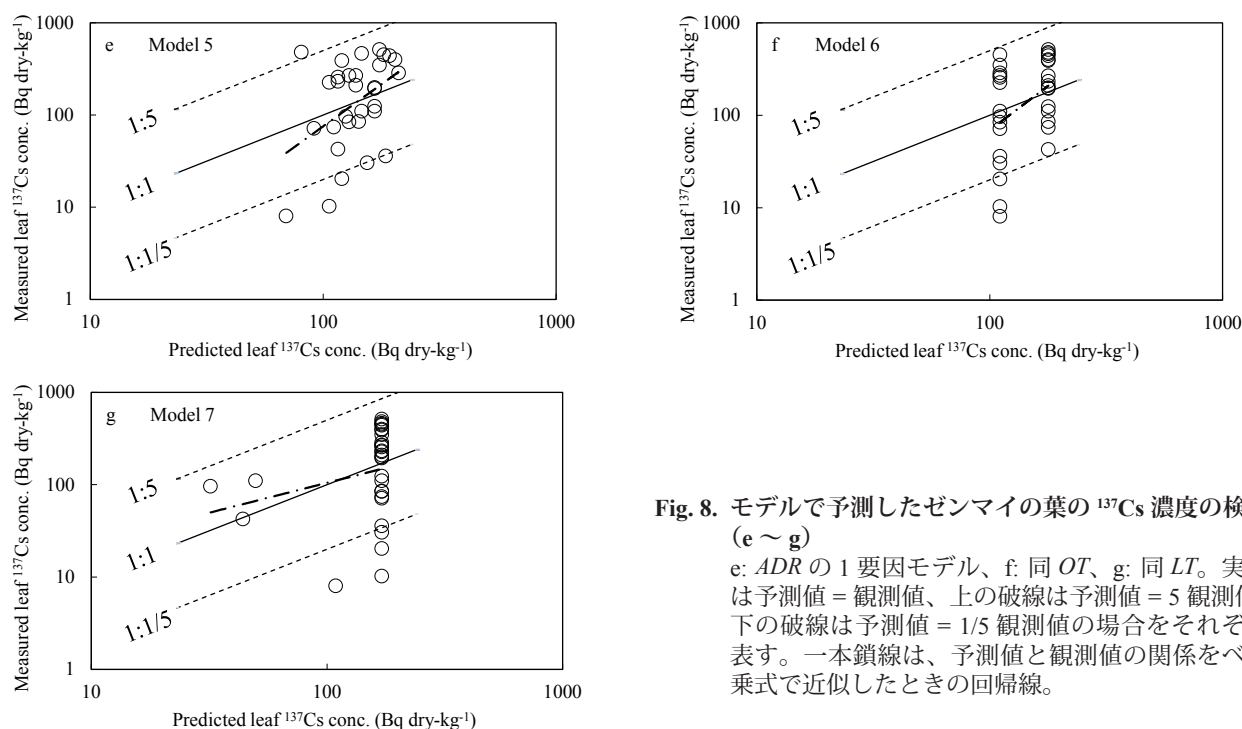


Fig. 8. モデルで予測したゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度の検証 (e ~ g)

e: ADR の 1 要因モデル, f: 同 OT, g: 同 LT。実線は予測値 = 観測値、上の破線は予測値 = 5 観測値、下の破線は予測値 = 1/5 観測値の場合をそれぞれ表す。一本鎖線は、予測値と観測値の関係をべき乗式で近似したときの回帰線。

0.9093 で、いずれも 0.9291 より小さい値であった。各モデルの 95% の予測区間は、マハラノビス距離を D_i 、変数の数を p 、残差平方和を RSS としたとき、予測値 $\pm 95\%$ の t 値 $x \left((1 + 1/n + D_i^2 / (n-1)) \times \text{RSS} / (n - p - 1) \right)^{0.5}$ で表される (豊田 2012)。SD が減り、RSS が小さくなれば、その分 n (検体数) を減らしても、同じ幅の予測区間を維持できる可能性がある。そこでモデルを用いなかったときの n を出荷制限の解除申請例 (厚生労働省 2015a, b) を参考に 60 とし、モデル 1 ~ 7 を用いたときに同等の予測区間が得られる n を計算したところ、変数が 3 つのモデル 1 では $n = 62$ であった。同様に、2 変数のモデル 2 ~ 4 では $n = 61$ 、1 変数のモデル 5 と 6 では $n = 60$ 、モデル 7 では $n = 61$ で、いずれの n も 60 未満にならなかった。

4. 考察

4.1 野生ゼンマイの生育地の特徴

野生ゼンマイの生育地はおもに斜面の中部から下部にかけての林縁や林内で、リターの被覆率の高い場所であった。ゼンマイは孢子で繁殖する植物で、孢子は小さいので鉍質土壌がむき出しになった場所で発芽・定着しやすい。自然条件では崖や侵食地などで表土の移動がしばらく止まっている場所がそれに当たるが、養分に恵まれないので、大きな個体には育たない。一方、そうした個体が土砂ごと斜面下部にずり落ちた場合や、法面や側溝のような人工物のそば、人や大型動物がよく立ち入る場所で落葉が剥がされて鉍質土壌が現れた場所に定着した個体は、大きくなれる。ゼンマイは土が深く肥沃な場所でよく育つ (愛媛県 1986)。また、林内では上木の間引きや

除草が行われ、日当たりが良い条件を好む (新潟県森林研究所 2011)。ゼンマイは茎頂に多数の未展開幼葉を持ち (Fig. 2)、新芽や葉を取り去られると速やかに新葉を展開するので、夏に下草刈りが行われることの多い場所では他の草木との競争がゼンマイに有利に働く。ゼンマイの大群生は人の助力の結果であることが少なくない。森林公園などで見られた、大きく育ったゼンマイの面積数 10 m^2 におよぶ群生地は、敷地管理のための下草刈りの結果でできたものと考えられる。

このような生育地の特徴が見られた郡山 100 のうち 81 例で、新芽の ^{134}Cs と ^{137}Cs 濃度の合計値が、出荷制限の基準値 ($100 \text{ Bq fresh}\cdot\text{kg}^{-1}$) を超えると推定された。郡山市では依然としてゼンマイの出荷制限が必要な状況にあることが確かめられた。

4.2 ゼンマイの成長と ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度、量の季節的变化

チェルノブイリ原発事故後や福島原発事故後の調査で、春から夏にかけて植物体が大きくなるときに ^{137}Cs 濃度が低下する傾向が、落葉性多年草のミネハリイ (*Trichophorum caespitosum*) やヌマガヤ (*Molinia coerulea*) (Bunzl and Kracke 1989)、フキ (清野・赤間 2015) で報告されている。ツツジ科の常緑樹 *Calluna vulgaris* では年によって葉の濃度に季節的な低下が認められないことがあった (Bunzl and Kracke 1989) が、同じ年に幹では顕著に濃度が低下しており、葉と幹を合わせたときの濃度には多年草と同様の傾向があると見られる。

しかし、ゼンマイでは葉がほぼ展開を終えた 5 月でも濃度が低下せず (Fig. 4b)、多年生植物でのこれまでの報

告とは異なるようである。地下部からの転流に加えて、根から新たな吸収があった可能性がある。ゼンマイで、2月から6月にかけて個体 ^{137}Cs 量が増えた (Fig. 5c) のは、その間に根から新たに ^{137}Cs が吸収されたことを表す。同じ時期、個体当たり ^{40}K 濃度はA、B群で似たような値で推移した (Fig. 5d)。葉も同様であった (Fig. 4c)。カリウムは植物の多量必須元素の一つであるので、これらはゼンマイにとって季節や部位に応じた適度なカリウム濃度があることを示していると考えられる。セシウムは植物の必須元素ではないが、カリウムとセシウムはともにアルカリ金属で、植物が根から吸収するときに競合する (小林 2013)。展葉期 (Fig. 4a) に必要なカリウムを吸収するときに ^{137}Cs も吸収し、結果としてA群はB群より多くの量を吸収した (Fig. 5c, f) と考えられる。 ^{40}K で見られたような濃度調節のしくみ (Fig. 4c, 5d) が ^{137}Cs には働かないために、 ^{137}Cs 濃度は変動が大きいのかも知れない。これは空間線量率と ^{137}Cs 濃度との関係 (Fig. 7a) のバラツキを大きくする一因となりうる。空間線量率はA群 ($0.125 \sim 0.135 \mu\text{Sv h}^{-1}$) がB群 ($0.135 \sim 0.16 \mu\text{Sv h}^{-1}$) より低かった。それにもかかわらず、A群の ^{137}Cs 濃度は5月にB群の7倍も高かった (Fig. 5c)。

こうした違いが生じた理由として考えられることの一つは、A、B群の春の成長開始時期の違いである。芽吹き時期は個体の栄養状態の影響を受ける (河合 2009)。A群は、B群より遅れてバイオマスの増加が始まっており (Fig. 5a)、この時期 (5月) の気温上昇で土壌有機物の分解がより進み、増えた交換性の ^{137}Cs を根が吸収していた可能性 (Burger and Lichtscheidl 2018) が考えられる。加えて、A群では個体が小さく、貯蔵されているものが少なく、新たな吸収分が占める割合が大きいことも影響している可能性も考えられる。A群はB群より短時間でバイオマスを置き換えているようであった (3.5)。濃度の季節変化は、貯蔵分の利用に加え、新たな吸収と個体の成長のバランスで決まる。B群は、A群と比べて吸収と成長のバランスが取れていたのに対して、A群は成長の開始が遅れたのでリターや土壌有機物の分解が始まってから急成長し、それにとまって ^{137}Cs の吸収も急激であったと考えられる。フキでも ^{40}K と比べ ^{137}Cs 濃度の季節変化が大きかった (清野・赤間 2017)。ゼンマイと同様に ^{40}K で見られたような濃度調節のしくみが ^{137}Cs に働かないために、 ^{137}Cs 濃度の変動が大きくなったと考えられる。

4.3 ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度と関係する環境条件

ゼンマイの葉 ^{137}Cs 濃度と有意な関係があると判断された環境条件は、空間線量率と上木の多寡、リターの多寡であった (Fig. 7)。ただし、それぞれとの単回帰の決定係数の値は小さく ($R^2 = 0.0421 \sim 0.1167$)、データのバラツキは大きかった。空間線量率や上木、リターの状態が同じでも ^{137}Cs 濃度が100倍違う場合があった。換言すると、空間線量率が数倍違っても、それでゼンマイの放射性セ

シウム濃度が違うとは限らないという結果であった。上木の多寡については、事故時に放出された放射性セシウムを周囲より高い木が樹冠にいったん捉えて樹下に落とし、ゼンマイがそれを吸収した結果と考えられる。地表付近の空間線量率が、孤立したアカマツ樹群の下で目立って高く、そのアカマツの落葉に事故時に直接付着したと考えられる比較的高濃度の ^{137}Cs が含まれていることが報告されている (清野 2014)。

空間線量率はリター中の ^{137}Cs とは有意な関係がなく (Fig. 6c)、土壌中の ^{137}Cs と有意な相関関係にあった (Fig. 6d)。表層0～0.05 mの土壌にはリター中の量の約4倍の放射性セシウムがあった。空間線量率を計測した地上高1 mの位置から見ると、リターまでの距離とその下の表層0～0.05 mの土壌までの距離の違いは殆ど無視できるので、地上高1 mの空間線量率はリターよりも土壌中の放射性セシウム量に影響されて変化しているようである。

ゼンマイへの ^{137}Cs の移行に関しては、ゼンマイの根は地表面から深さ0.1～0.17 mまでの間にもおに分布するので、表層数cmの土壌に多くが分布する土壌中の ^{137}Cs (松田・斎藤, fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf08/Part1-6.pdf) の位置に届いているはずである。しかし、土壌中の ^{137}Cs は、ゼンマイの葉 ^{137}Cs 濃度とは有意な関係がなかった (Fig. 6b)。これは土壌の ^{137}Cs の総量が多くても、交換性の ^{137}Cs が多いとは限らないことを示唆している。土壌中の ^{137}Cs がゼンマイの根にとって吸収しにくい状態にある理由として、事故から時間が経ち、土壌に吸着 (日本農学会 2011) された ^{137}Cs が増えていることが考えられる。

一方、リターはその ^{137}Cs 沈着量がゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度と有意な関係にあった。リターには表層土壌よりも多くの交換性セシウムが含まれており (山本ら 2014)、 ^{137}Cs がゼンマイに吸収され易い形態で維持されていると考えられる。落葉はゼンマイ自身 (Fig. 4b, 黄葉や枯れが進んだ9月の葉にも ^{137}Cs が含まれていた)、また、上木のあるところでは上木からももたらされるので、ゼンマイではリターが ^{137}Cs の重要な供給源と考えられる。

なお、空間線量率がゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度と有意ではあっても決定係数の低い関係しか見られなかった (Fig. 7a) 他の理由として、地表面から1 mの高さの空間線量率が、ゼンマイの根系の範囲 (柵平プロット A、B群では個体の中心から0.3～0.5 m) の物質からの放射線だけを計測しているのではなく、その周囲からの放射線も計測していることや、降水の有無 (大瀧ら 2013)、土壌の種類による遮蔽の違いといった計測対象や計測条件の影響が考えられる。

その他の環境条件については、事故の翌春 (清野・赤間 2013) や翌々春 (Kiyono and Akama 2013) の調査で、ゼンマイを含む山菜の放射性セシウム濃度が、窪地や谷型をした地形など地表面水や地下水が集まりやすい場所では高いことが報告されている。しかし、今回のゼンマイ

では、生育地の斜面上の位置はゼンマイの放射性セシウム濃度と有意な関係はなかった。事故から年数が経つにつれ、交換性の放射性セシウムの地形に沿った分布が変化し、地形による違いがなくなっているのかも知れない。地形は事故後1～2年は山菜の放射性セシウム濃度の指標として価値が高かったが、現在は価値が低下している可能性がある。

4.4 出荷制限解除のための新芽の検体採取の負担の軽減化の可能性

郡山100で作成した ^{137}Cs 濃度の予測モデルを郡山31で検証した結果、予測値と観測値の間の系統誤差は小さく(Fig. 8)、モデルの正確さ(accuracy)は高いと考えられた。「高い放射性セシウム濃度の検出が見込まれる地点」は空間線量率が高く、上木やリターが多い場所であった。新芽の検体採取の際にこうした情報を利用し、濃度が高いと考えられる場所を選んで優先することは、出荷制限解除のための検体採取の効率化につながる可能性がある。一方、ゼンマイの新芽の検体を採取する際に、空間線量率や上木、リターの状態を調べ、それらを変数に持つ予測モデルを利用すると、放射性セシウム濃度の予測値からの隔たりが減り、予測精度を上げられると期待した。しかし、このSDの減少の程度は大きなものではなく、モデルの変数の利用による自由度の減少に相殺され、モデルを利用しても現行の目安である60検体で得られる予測区間を、目安より少ない検体数で得ることはできなかった。

モデルの利用により検体数を減らせるのは、モデルの予測値と観測値の残差が、今回よりも顕著に小さくなる場合である。検体採取の際に放射性セシウム濃度と関係がある空間線量率などの条件の範囲が広く含まれるような方法でデータを収集することで、モデルの不確実性は低下できる(野間口・野間口 2007)。しかし、それでは予測値の残差は必ずしも小さくならない。検体採取の負担の大幅な軽減化を図るにはゼンマイの個々の検体の ^{137}Cs 濃度の違いの理由を十分に説明できるようにする必要がある。現時点では、出荷制限解除のための検体採取は、市町村など出荷制限対象の地理的スケールに応じて、系統的に多数の検体を採取して濃度の高いものが現れる確率を評価、利用する宮城県(厚生労働省 2015a)や岩手県(厚生労働省 2015b)のやり方が、ゼンマイについても現実的と考えられる。

5. 結論

空間線量率や上木、リターの被覆といった、生育地で比較的容易に測定でき、葉の ^{137}Cs 濃度と関係する環境条件の情報を変数に持つモデルを利用しても、ゼンマイの葉の ^{137}Cs 濃度の95%予測区間を同じ精度で求めるのに必要な検体数を減らせなかった。一見、同じような生育条件、放射性セシウムの汚染状況にあって、検体間で ^{137}Cs 濃度が非常に大きく異なる理由を解明する必要がある。

る。植物季節の違いにバラツキの理由の一端を知ることができた。バラツキが大きいことが、ゼンマイの特性にもとづくのか、他の植物にも通じることなのかまだ分からない。同様の調査を他の山菜についても行って、比較の材料を増やしたい。

謝 辞

福島県農林水産部林業振興課(郡山市東部森林公園)、福島県林業研究センター、学校法人新潟総合学院(大槻公園)、公益財団法人福島県都市公園・緑化協会(逢瀬公園)、郡山市森林組合(郡山市高篠山森林公園)、林野庁関東森林管理局福島森林管理署、磐城森林管理署、会津森林管理署南会津支署、茨城森林管理署の各位には現地調査と検体採取において協力を頂いた。国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所震災復興・放射性物質研究拠点の各位には検体の調整と放射性セシウムの測定をして頂いた。以上の皆様に、感謝の意を表する。

本研究は日本特用林産振興会のきのこ原木等の放射性物質調査事業の一環として実施した。また、JSPS 科研費JP15K07496の助成を受けた。

引用文献

- Akaike, H. (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Petrov, B. N., and Caski, F. (eds.), Akadimiai Kiado, Budapest, 267-281.
- Bunzl, K. and Kracke, W. (1989) Seasonal variation of soil-to-plant transfer of K and fallout 134 , ^{137}Cs in peatland vegetation. Health Physics, 57(4), 593-600.
- Burger, A. and Lichtscheidl, I. (2018) Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation., Science of the Total Environment, 618, 1459-1485.
- 愛媛県(1986)ゼンマイの栽培. 山菜の栽培技術指針—ゼンマイ・ワラビ・タラノメ・ワサビ—, 昭和60年度緊急技術改善, 普及事業, http://www.pref.ehime.jp/h35700/1461/5_guide/5_sansai.html, (参照 2017-11-15).
- 原子力災害対策本部(2015)“検査計画、出荷制限等の品目・区域の設定・解除の考え方”, 食品中の放射性物質に関する「検査計画、出荷制限等の品目・区域の設定・解除の考え方」の改正, 厚生労働省, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000043164.html>, (参照 2016-10-03).
- 長谷川 孝則・竹原 太賀司(2016)山菜類の放射性物質による汚染実態調査と汚染軽減法の検討. 福島県林業研究センター研究報告, 48, 65-76.
- 河合 昌孝(2009)奈良県における山菜類の調査. 奈良県林業技術センター研究報告, 38, 69-74.

- 清野 嘉之 (2014) 生垣ぞいの道の空間線量率の変化—2011 年秋から 2012 年末まで. 関東森林研究, 65(1), 163-164.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2013) 2012 年春の山菜の放射能濃度. 関東森林研究, 64(2), 77-80.
- Kiyono, Y. and Akama, A. (2013) Radioactive cesium contamination of edible wild plants after the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. The Japanese Society of Forest Environment, 55(2), 113-118.
- Kiyono, Y. and Akama, A. (2015) The amount of ^{137}Cs deposition and transfer ratio of ^{137}Cs to wild edible-wild-plants after the accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Proceeding of the International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future, Paruse Iizaka, Fukushima City, Japan, May 30–31 (Sat. –Sun.), 2015, 57-61.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2015) 栽培フキ (*Petasites japonicus*) の放射性セシウム汚染の季節変化. 日林誌, 97, 158-164.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2017) 山菜と放射性物質. 水利科学, 355, 36-50.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2018) 野生山菜の放射性セシウム濃度: 福島第一原発事故後の経年的トレンド. 関東森林研究, 69 (印刷中).
- 清野 嘉之・小松 雅史・赤間 亮夫・松浦 俊也・広井 勝・岩谷 宗彦・二元 隆 (2016) 野生ゼンマイ 131 個体の葉の放射性セシウム濃度. 第 5 回環境放射能除染研究発表会要旨集, 一般社団法人環境放射能除染学会, 18.
- 小林 奈通子 (2013) 放射性セシウムを減らす! なぜカリウムで?—植物研究者の思考回路—. 第 4 回サイエンスカフェ「放射性セシウムを減らす! なぜカリウムで?」配布資料, 東京大学大学院農学生命科学研究科食の安全研究センター, http://www.frc.a.u-tokyo.ac.jp/information/news/130727_report.html, (参照 2017-11-06).
- 厚生労働省 (2015a) 原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限の設定及び解除 (原子力災害対策本部長指示), 平成 27 年 5 月 25 日 医薬食品局食品安全部, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000086680.html>, (参照 2016-10-03).
- 厚生労働省 (2015b) 原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限の解除 (原子力災害対策本部長指示), 平成 27 年 12 月 21 日 医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000107702.html>, (参照 2016-10-03).
- 厚生労働省 (2017a) 原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限の解除 (原子力災害対策本部長指示), 平成 29 年 5 月 23 日 医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000165600.html>, (参照 2017-11-17).
- 厚生労働省 (2017b) 原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限の解除 (原子力災害対策本部長指示), 平成 29 年 7 月 24 日 医薬・生活衛生局, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000172292.html>, (参照 2017-11-17).
- 厚生労働省 (2017c) 原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限の解除 (原子力災害対策本部長指示), 平成 29 年 9 月 11 日 医薬・生活衛生局, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000176997.html>, (参照 2017-11-17).
- 倉田 悟・中池 敏夫 (1990) 日本のシダ植物図鑑 分布・生態・分類 <6>. 東京大学出版会, 881pp.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (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/seamless2015/2d/>, (参照 2016-10-03).
- 松田 規宏・斎藤 公明. 土壌中の放射性セシウムの深度分布調査. fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf08/Part1-6.pdf, (参照 2016-10-03).
- 文部科学省 (2013) ①第 6 次航空機モニタリングの測定結果、及び②福島第一原子力発電所から 80km 圏外の航空機モニタリングの測定結果について. 平成 25 年 3 月 1 日プレスリリース, 文部科学省, radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6749/.../191_258_0301_18.pdf, (参照 2016-10-03).
- 日本農学会 (2011) 東日本大震災からの農林水産業の復興に向けて - 認識・理解・テクニカル・リコメンデーション -. <http://www.ajass.jp/image/recom2012.1.13.pdf>, (参照 2016-10-03).
- 新潟県森林研究所 (2011) ゼンマイ (*Osmunda japonica*). 関東・中部地域で林地生産を目指す特用林産物の安定生産技術マニュアル, 農林水産省実用技術開発事業 (高度化事業) 18021, 「関東・中部の中山間地域を活性化させる特用林産物の生産技術の開発」成果集 I, 森林総合研究所, 194pp.
- 農林水産省 (2016) 特用林産物生産統計調査. 49: 山菜の生産量, II 品目別資料, 平成 26 年特用林産基礎資料, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokuyo_rinsan/, (参照 2016-10-03).
- 野間口 謙太郎・野間口 眞太郎 (訳) (2007) 一般線形モデルによる生物化学のための現代統計学—あなたの実験をどのように解析するか—. 原題: Modern statistics for the life sciences. Grafen A, Hails R (著), 共立出版, 335pp.
- 大瀧 慈・大谷 敬子・今中 哲二・遠藤 暁・星 正治 (2013) 東京電力福島第一原子力発電所近隣地域における空間放射線量率と直下土壌の放射能汚染度との関連について. 統計数理, 61(2), 247-256.
- R Development Core Team (2011) R: A language and

environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

林野庁 (2017) きのこと野生山菜の出荷制限等の状況について. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/kinoko/syukkaseigen.html>, (参照 2017-07-28).

田上 恵子・内田 滋夫 (2015) 山菜と果実の調理・加工による放射性セシウムおよびカリウムの除去割合について. 第4回 京都大学原子炉実験所 原子力安全基盤科学研究シンポジウム 福島復興に向けての放射線対策に関するこれからの課題 報告書, 47-50.

豊田 秀樹 (2012) 回帰分析入門 R で学ぶ最新データ解析. 東京図書, 252pp.

山本 理恵・小林 達明・江幡 知紗・篠崎 敬太・小嶋 大地・太田 祥子・宮本ウルルマ・高橋 輝昌・鈴木 弘行・関崎 益夫・星澤 保弘・小竹守 敏彦・保高 徹生・辻 英樹 (2014) 原発事故被災地の丘陵地広葉樹斜面林における林床放射能低減試験とその後の水土流出. 日緑工誌, 40(1), 130-135.

八杉 龍一・小関 治男・古谷 雅樹・日高 敏隆 (1996) 岩波生物学辞典第4版. 岩波書店, 2027pp.

Appendix 1

放射性セシウムの時間的変化の傾向(トレンド)の解明の課題

出荷制限解除の要件の一つである「検査結果が安定して基準値を下回ることを確認する」(原子力災害対策本部 2015) うえで、季節変化、経年変化といった、時間軸に沿った変化の傾向(トレンド)の把握(田上・内田 2015, 清野・赤間 2017, 2018) が重要である。同じような生育条件・放射性セシウムの汚染状況にあっても、検体間で ^{137}Cs 濃度のバラツキが非常に大きいことを考えると、山菜の放射性セシウム濃度の時間的変化に関しては、同じ個体(集

団)を調べることが非常に有利である。

森林に生育する同一個体(集団)について放射性セシウムの挙動を季節的・経年的に調べた事例(清野・赤間 2017, 2018) は、ゼンマイに限らず少ない。放射性核種の崩壊速度から見積もられる ^{137}Cs の物理的減衰と異なる速度変化が植物体中で観測された場合に、どのような条件が関係しているのか、判断する材料が現時点では乏しい。季節的・経年的変化の解明には、環境中の交換性の ^{137}Cs 量の変化とともに、個体レベルの ^{137}Cs 吸収や転流、排出といった代謝の解明が重要である。

Appendix 2

検出下限値に届かなかった場合(不検出)の測定値の扱いについて

今回、ゼンマイ葉の一部の検体で ^{134}Cs 濃度が不検出となったのは、検体量が少なかったことが一因であった。放射性セシウムの濃度が薄く、検体量が少ないと放射性セシウムの測定に長い時間がかかる。今回の場合は、濃度にもよるが、 ^{134}Cs の検出下限を上回るには、調査時点の生重で約 80 g 以上、できれば 200 g の検体の採取が必要であった。

不検出となったデータの取り扱いには必ずしも定まった決まりがない。検出下限値をそのまま使う例(厚生労働省 2015a)、検出下限値の 1/2 とする例(厚生労働省 2015b) がある。 ^{137}Cs が検出され、 ^{134}Cs だけ不検出のときは、他の検体で得られた $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比を使ったり、検出された ^{137}Cs が全て事故で排出されたと仮定し、放射性崩壊の理論比から ^{134}Cs 濃度を推定したりすることも考えられる。こうした扱いによって集計の結果が変わるのでその影響について注意が要る(Kiyono and Akama 2015)。

本研究では、山菜が食品であることから食品の取り扱いに準じ、放射性核種が不検出で実際の値(真値)が分からないときは検出下限値で代用した。

The transfer of radiocesium released in the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident to leaves of wild *Osmunda japonica*, an edible fern

Yoshiyuki KIYONO¹⁾*, Masabumi KOMATSU²⁾, Akio AKAMA³⁾, Toshiya MATSUURA⁴⁾, Masaru HIROI⁵⁾, Munehiko IWAYA⁶⁾ and Takashi FUTAMOTO⁶⁾

Abstract

Following the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident in March 2011, shipping restrictions were imposed on more than 10 Japanese edible wild-plant species (July 31, 2017) in which high levels of radiocesium ($^{134+137}\text{Cs}$) were detected. However, few studies have examined radiocesium transfer from the environment to edible wild plants or the factors that affect this transfer; therefore, it is difficult to assess current criteria for determining whether shipping restrictions should remain in place. In this study, we sampled leaves of wild *zenmai* (*Osmunda japonica*), an edible fern, from 131 habitats in Koriyama, Fukushima Prefecture, Japan, in July and August 2015. We also collected data for environmental factors that could affect ^{137}Cs transfer to wild plants. Multiple regression analysis showed that *zenmai* leaf ^{137}Cs concentrations had significant relationships with several environmental factors including litter ^{137}Cs amounts, air dose rates, canopy coverage, and litter coverage. Using the latter three environmental factors as parameters, models to predict ^{137}Cs concentrations in *zenmai* leaves were constructed using 100 samples and verified with the remaining 31 samples. The results showed low systematic error and high accuracy. However, model precision was low, with predicted values distributed between about 1/5 and 5 times observed values. Because the residual sums of squares between the measured and predicted values were large, we concluded that information about these three environmental factors could not reduce the number of samples required to cancel shipping restrictions on wild *zenmai* from the current standard (60) without also reducing prediction accuracy. Differences in phenology may have contributed to the variation in ^{137}Cs concentrations observed in this study. Future studies should clarify the mechanism that causes this large variation.

Key words: air dose rate, edible wild plant, fern, prediction model of radiocesium concentration, radiocesium deposition, shipping restrictions, standard concentration values for food

Received 1 August 2017, Accepted 30 March 2018

1) Department of Plant Ecology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Mushroom Science and Forest Microbiology, FFPRI

3) Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI

4) Department of Forest Management, FFPRI

5) Koriyama Women's University

6) Japan Special Forest Product Promotion Association

* Department of Plant Ecology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: kiono@ffpri.affrc.go.jp

論文 (Original article)

育林経営再編の諸相－林業ビジネス化への示唆－

大塚 生美^{1)*}、堀 靖人²⁾、山田 茂樹³⁾、岩永 青史³⁾、天野 智将¹⁾、
駒木 貴彰¹⁾、餅田 治之⁴⁾

要旨

今日のわが国林業は、丸太価格の低迷により森林所有者は経営意欲を喪失し、林地を売却したり、再造林や保育施業を放棄するといった動きがある。しかし同時に、木材加工業などの原木を必要とする事業体の一部には、事業規模を拡大するとともに、事業内容を高度化・多様化させ、林業経営までをも行うようになってきている。また、30年間、40年間といった経営委託ともいえる長期施業受委託ともみることができ、事例も見られるようになってきている。このように、今日、わが国林業を巡っては、林業経営の再編が進行しているようにみえる。振り返って、2008年、筆者らは森林信託の商品化を検討していた大手金融機関2行と、わが国での森林信託の可能性について、日本の林業の実態に基づき意見交換を実施する機会を得た。その結果、大手金融機関にとっての信託商品化として、次の点が主要な課題であることが明らかになった。①林業のキャッシュフロー確保が不透明であること、②協同する専門家・機関の不足感があること、③不動産の物的状況、権利態様が不安定であることの3つである。そこで、本論ではその3つの課題に対する林業経営再編の新たな動きを捉え、その要因を考察することを目的とした。研究方法は、上記の3つの課題に対して、主に2000年以降、新たな展開が確認できた事業体等への訪問調査により実態を把握した上で、それらの事業体から共通して得られた新たな展開の背景・要因について、追跡調査とともに公表データ等文献調査によった。結果、大手金融機関の信託商品化に比べ得るような林業ビジネス化の条件が浮き彫りになった。

キーワード：林業経営、林地集積、林地流動化、林業経営組織、森林政策、森林信託、森林管理

1. 研究目的と方法

今日、世界の林業経営が第三者に経営信託されている実態がある。たとえば、近代林学の発祥の一つであり、我が国に色濃く影響したドイツ林学の本質は、持続可能な林業経営を可能にする森林の保続思想にあり、今日の環境問題への対応の先駆けとも言えるものであった(石井2014)。ドイツでは、学校教育制度に及ぶ徹底したフォレストターの資格制度を構築し、保続経営を行っている(Moser and Strehlke 1996)。そのドイツ林学は、アメリカ、日本をはじめ世界に伝播され、各国の独自性を背景に技術的変容ももたらしている(水野2006)。また、イギリスを起源とする信託法理を応用し、いち早くビジネス・トラスト法を完成させたアメリカでは、1901年に制度化された住民投票制度が林業経営の監視人を務めてきた側面がある(大塚2016a)。100年後の今日では、森林を対象とする不動産投資信託の法改正等が行われたことで、機関投資家による林業経営を目的とする森林投資が活発化した(大塚ら2007, 2008, 餅田2015, 福田2007a, 2007b, 2016, 村嶋2008, 2013, 2016)。ハンガリーでは、以上の3

国の動きを技術面から融合する形で国有林からの原木供給を資本とするコ・ジェネレーションの仕組みが構築されつつある(堀ら2014, 2015)。こうした海外での林業経営に向けた積極的な動きは、1992年の森林原則声明以降、世界の林業が人工林育成林業への移行と並行して進行していることが注目される(Talbert 2004)。

こうした中、今日のわが国林業は、丸太価格の低迷により森林所有者は経営意欲を喪失し、立木を販売する際、林地そのものまで売却したり、林地は手離さないまでも、再造林や保育施業を放棄するといった動きがある。しかし同時に、素材生産業・原木市場・木材加工業などの原木を必要とする事業体の一部は、事業規模を拡大するとともに、事業内容を高度化・多様化させ、立木の購入のみならず、林地を積極的に購入し、林業経営までをも行うようになってきている。また、林地の購入まではしないまでも、規模のメリットを生かし、30年間、40年間といった経営委託ともいえる長期施業受委託の動き、さらに、林地を手放したい森林所有者の売買を促進する施策も見られるようになってきている。

原稿受付：平成29年12月8日 原稿受理：平成30年5月11日

1) 森林総合研究所 東北支所

2) 森林総合研究所 研究ディレクター

3) 森林総合研究所 林業経営・政策研究領域

4) 林業経済研究所

* 森林総合研究所 東北支所 〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25

このように、今日、わが国林業を巡っては、林業経営の再編が進行しているようにみえる。振り返って、2008年、筆者らは森林信託の商品化を検討していた大手金融機関2行と、わが国での森林信託の可能性について、日本の林業の実態に基づき意見交換を実施する機会を得た。森林信託の商品化に向けて独自の調査を実施していた大手金融機関の当時の結論は、信託商品としての基準を満たさないというものであった。その理由は、主に①林業のキャッシュフロー確保が不透明、②協同する専門家・機関の不足感、③不動産の物的状況、権利態様が不安定、の3つである。このことは、いわばわが国の林業は、いまだ林業経営の近代化を達成していないということを意味するのではないか。一方で、先に述べたとおり、今日ではわが国でも林業経営再編の動きがある。また、日本の森林組合法には信託が規定されており、財産信託の性格を持つ取り組み事例も見られるようになっている。さらにこれまでの海外事例の研究段階を踏まえ、日本における林業経営の新たなスキームが頻繁に論じられるようになっている（相川 2016, 遠藤 2016, 朝日新聞 2016, 菅野 2016）。

そこで、本論は、大手金融機関が示した①林業のキャッシュフロー確保が不透明、②協同する専門家・機関の不足感、③不動産の物的状況、権利態様が不安定の3つの項目に対応した林業経営再編の新たな動きを捉え、その要因を考察することを目的とした。この3つの課題に対して、次の観点から対象者を選択した。①の林業のキャッシュフロー確保が不透明であることに関しては、主に、所有規模が零細であること、財産保持的であることが指摘されたことから、所有規模の拡大と林業経営に着手している事例を検討した。②の協同する専門家・機関の不足感については、制度が最も整っているのは森林組合である。しかし、森林組合の経営水準のばらつきが大きいことや、森林組合では、資源造成の経験はあっても資源成熟後の資源循環に向けた経験に不安感が指摘されたことから、地域の森林管理を目指し新たに創設された経営体を取りあげた。③の不動産の物的状況、権利態様が不安定については、その解決に向けて取り組んでいる自治体の事例を取りあげた。その上で、それらの事例から得られた新たな展開の背景・要因として共通して示された1) 川下の大規模化、2) 川上の30年間、40年間といった経営委託ともいえる長期施業受委託行動、3) 林業経営担い手の縮小、以上の大きく3つの要因について、追跡調査とともに公表データ等文献調査による分析を進め、林業経営の新たな展開と課題について考察した。

2. 金融機関による信託商品化に対する課題

大手金融機関から提示された森林信託化のスキームの主なポイントは、①森林所有者からは立木出資、②銀行は林業経営に素人であるため経営は森林組合等専門組織に委託、③受益権を投資家に売却する、になる。だが、

わが国林業の現状を信託商品化の際の各行独自の安全基準のチェック事項に照らしてみると、1項で示したとおり、改めて、①林業のキャッシュフロー確保が不透明、②協同する専門家・機関の不足感、③不動産の物的状況、権利態様が不安定、という3つの問題が浮き彫りになった。具体的に大手金融機関が問題にした主な点は、①の林業のキャッシュフロー確保が不透明であることに関して、経営規模の零細性、政府の予算に左右される補助金、安価な輸入製品、低い林業生産性、林業労働力不足、林道整備の遅れ、木材需要等の見通しが明確でないことが指摘された。②の協同する専門家・機関の不足感については、林業経営を専門としない大手金融機関にとって森林所有者、森林組合他林業事業者等との連携は必須条件と考えている。しかし、連携すべき林業経営組織の経営水準が見通せないこと、とりわけ、全国に配置されている森林組合は、最も有力な候補になるもののその経営内容はバラツキが大きいこと、さらに、流通過程における専門組織の不足感も指摘された。③の不動産の物的状況、権利態様が不安定に関しては、隣地との境界が明確でない等物的範囲が特定できないこと、相続による権利者の増加と不在村所有者等権利者の特定が困難なことから、権利関係を整理するのにコストを要する、あるいは不可能になることが指摘された。これらの問題は、林政学や林業経済学を主たる研究領域とする者にとって周知のことであるが、信託商品化の観点からも近代化の遅れとして指摘されたと言える。以上の①から③で示された課題は、わが国の林業経営再編の現局面に照らすと、それぞれ次の対応として整理できる。①は林地集積と林業経営への参入、②は人工林育成林業の専門管理組織の創設、③は所有権の再編、になる。次項では、それら3つの実態について、事例を用いて論じたい。

3. 林業経営再編の現局面

3.1 林地集積と林業経営への参入

2000年代に入ると素材生産業者の中には、林地を取得し、自ら経営を行う動きが見られるようになった。そのことは、わが国の森林所有者の1990年代の特徴として指摘された窮迫販売に対して、素材生産事業体がやむをえず林地を取得せざるを得ない動きとは異なる様相を示したのである。北海道のC林業や東北地方のK社は、早くから注目を集めた（大塚 2016b）。2000年代後半になると、九州地方の原木市場の中には、再造林と5年間の保育施業を森林所有者の負担が無いことを条件として、立木購入の競争力を得る動きが出てくる（大塚 2010, 小池・興梠 2011, 興梠 2015）。さらに、森林所有者の負担無く5年間の施業が終了する時を迎え、5年を超える長期契約に基づく管理受託の安定性と一定規模以上の経営規模の維持を目的として、民事信託を活用した40年から50年という長期経営契約に踏み出している。こうした中、2011年に発生した東日本大震災による原発事故は、再生可能

エネルギーへの一大転機となり、それまでも少しずつ整備が進んでいた木質バイオマス発電所の建設ラッシュを招き、Table 1 の東北地方の木材需給に示すとおり、地域によっては原木供給に不足感をもたらし、需給調整の重要性が東北全体に広がっている。結果として、木材産業サイドも林地集積と林業経営に関心が広がっている。

振り返って、2000 年前後は丸太価格 1 立米 100 ドルが標語になるなど木材価格がグローバル化し、わが国においても 1 立米 1 万円が指標として認識されるようになった時代である。2002 年には、木材自給率は 18.8% と最低値を示したことで、林産加工施設の大規模・近代化、山土場直送、低コスト造林、高性能機械による生産性の向上等のコスト削減により、その果実の山元還元を目指し、「国産材新流通・加工システム」、「新生産システム」政策が登場する。だが、周知のとおり、今日、木材自給率の向上には至ったが、グローバル化した木材価格に対して、森林所有者の経営意欲の回復は依然として望めず、自営で山林事業を行ってきた大規模山林所有者でさえ、山林を売却し経営から撤退せざるをえない状況までに至っている。北海道の C 林業、東北地方の K 社は、1990 年代から 2000 年代にかけてのこうした山側の変化、すなわち木材生産の縮小に対する危機感から山林取得を進めた側面もある。

こうした素材生産事業体ならびに木材加工工場、木質バイオマス発電所等、原木を必要とするセクターによる林地取得と集積、さらに林業経営への参入事例は、生産活動が活発な北海道、九州、東北地方を中心に広がりをみせつつあるが、本項では、早い段階で林地取得を実行し、1 万 6,000 ha まで集積して林業経営に参入した C 林業を事例とした（2012 年、2013 年、2015 年、2016 年調査）。

C 林業は、1988 年の会社創業以来、早い段階で林地取得に着手し、前述のとおり、2016 年 3 月現在、会社、会社役職員等関係者の所有（以下、社有林）が 1 万 6,000 ha 余に至る素材生産業を主業とする事業体である。Table 2 に示すとおり、年間素材生産量は約 8～9 万 m³ に達して

いる。2015 年度実績では、年間の総素材生産量 8 万 m³ のうち社有林からの生産量は、1 万 4,500 m³ と全生産量の 2 割近くになる。社有林からの素材生産量は、2015 年度の実績では前年度の 8 割にとどまっているが、2014 年度の社有林からの素材生産量は 1 万 8,800 m³ と 2013 年度のおよそ 5 割増しであった。後に詳しくふれるとおり、現在の C 林業は、林地の集積中であり、購入した山林からの生産割合は一定ではない。

C 林業の本社社屋は、道南の倶知安町に位置し、道西側の白老町と栗沢町の 2 ケ所に出張所を持つ。2015 年素材生産の樹種別の内訳は、Table 2 に示したとおりである。主な生産樹種は、カラマツ、トドマツであるが、価格変動の少ないカラマツがとりわけ魅力的であるとする。用途別では、パルプ用材が最も多く、製材用と合板用がそれぞれパルプ用材の半分の生産量になる。北海道でも早くから機械化を進め、機械装備は、グラップル付バックホウ 27 台、ハーベスタ仕様バックホウ 5 台、フォワーダ 4 台を生産システムの主力とし、多様な事業地の集材に対応できるようクローラダンプ、集材ソリ、ロギングトラクタージャック、トラクター等々の機械を有し、生産性は高い。近年では、木質バイオマス集荷の効率化を目指し、北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場と協同で、木材生産とバイオマス集荷の両方の効率化を目指す試みとして、新たなハーベスタ・グラップルシステムにもチャレンジしている（酒井・栃木 2016）。具体的には、林内集材路が高密度に入った路網密度約 150 m/ha の皆伐林分に試験区を設定し、ハーベスタ伐倒・グラップル全木集材・ハーベスタ造材・グラップル巻立てを機械 2 台・オペレータ 2 名のシステムで実施した。その結果、ハーベスタ・グラップルシステムの労働生産性は 21.4 m³/人・日となり、同社のハーベスタ・トラクタシステムの 8.1 m³/人・日と比較し約 2.6 倍の労働生産性が確認されている。

また、素材生産事業が拡大できた背景には、商社を中心とする販売先への大口ロット安定供給がある。安定供給に向けて、25 年程前より、所有者から植伐一貫で受注し、

Table 1. 東北地方の木材需給(2017 年次)

(単位: 千 m³)

	素材生産 計	用途別需要			木材需要 計	過不足 計
		製材	合板	チップ		
青森県	834	228	300 [*]		528	306
岩手県	1,524	663	472	232	1,367	157
宮城県	537	208	856	143	1,207	-670
秋田県	1,239	563	810	908	2,281	-1,042
山形県	362	171	—	134	305	57
福島県	750	646	—	263	909	-159
計	5,246	2,479	4,118 [*]		6,597	-1,351

資料) 各県の林業統計より。

注) ※印は、合板とチップの合計値。

Table 2. 素材生産実績

	2013 年度 材積 (m ³)	2014 年度 材積 (m ³)	2015 年度 材積 (m ³)
カラマツ	24,575	25,927	23,164
トドマツ他	23,283	32,881	32,891
雑木	20,168	30,009	24,047
計	68,023	88,817	80,102
(うち社有林)	12,685	18,762	14,575

資料) C 林業業務資料より筆者作成

造林補助金の自己負担分（国庫補助 68%＋道市町村上乗せ 26%の残り）6%をC林業が負担することで、事業量を確保している。複数の商社と取引を行っており、合板用は道外への移出割合も大きい。年間 150 日以上就労する直接雇用労働者数は、約 80 人に上る。うち伐採班は 50 人程になる。

社有林面積の推移を Fig. 1 に、林地の道内分布割合を Fig. 2 に示した。1999 年に最初の林地購入を開始、2016 年 3 月 30 日時点の社有林面積は 1 万 6,434 ha、うち森林認証取得面積は、約 13,800 ha になる。

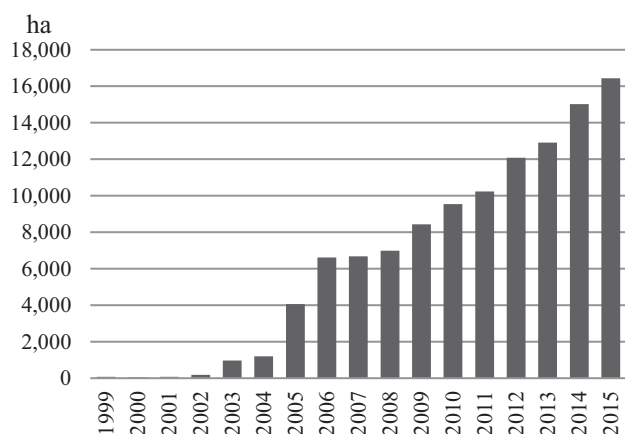


Fig. 1. C 社社有林面積の推移

資料) C 林業業務資料 (2016.3 現在) より筆者作成。

C 林業の林地購入は、2005 年頃から急激に増加しており、北海道でのカラマツ需要が飛躍的に伸びた時期と重なる。初期の林地購入は、他の多くの素材生産事業体と変わらず立木購入時の土地込み購入によるものが主であった。だが、林地の購入代金を差し引いても伐採後に利益が期待できることがわかり、その後は、積極的に林地購入に乗り出すことになった。購入している林地は、炭鉾備林や競売の林地が中心である。また、山林を手放したい森林所有者からの申し入れや、不動産業者からの持ち込みによるものも多い。一団地の面積は、1 ha 程度から 2,200 ha という大面積もあり様々である。林地購入の際の原則的な基準としては、①若齢林でも立木があり、伐採、搬出条件の良い地形、②林木の生長の良い、いわゆる地位級の高い林地、③納材先となる製材工場、チップ工場等加工工場が納材に際して採算ベースに見合う距離に位置する林地、④本州への販売も高い割合にあるため、港湾に近い林地、⑤市町村や森林組合がしっかりしている地域、になる。林地購入のための資金は、大部分が自前であり、一部、銀行借入れを行う場合もある。購入した林地の例で、60 年生のトドマツを購入して伐採したところ、見積もり以上の収益が出たため、購入元の所有者にも一部還元した。こうしたことが口コミで広がり、山を買って欲しいという森林所有者が増えている。

C 林業が山林を所有する理由は、山林購入開始当初は、事業を安定的に行うことができる産業備林としての意味が大きかったが、今日では、伐期に達していない森林で



Fig. 2. C 社社有林の分布と主な木材需要者

資料) Fig. 1 と同じ、ならびに北海道水産林務部業務資料 (2016.5 入手) より筆者作成。

も計画的に購入することで、いわゆる法正林をつくることが意図されている。将来には自社有林のみで計画伐採を行うことを目指している。原木需給のトレンドや林業労働力の現状を考えると、今のところ1年で300haを伐採し、50年伐期を目安として3万haの集積を目標としている。世界に目を向けると森林の価値が一層高まっており、道内でも木材加工工場が林地購入に乗り出している。C林業は、世界の動きもあわせてみると、カラマツに代表される優良な資源の価値は確実に上昇しており、企業の社有林を基盤とした林業経営が世界的にスタンダードになるのではないかとみている。このため、自社有林の経営について、世界を見据えた経営をしていきたいと考えている。さらに、C林業が立地する倶知安周辺は、豪雪地帯のため1～3月には山での作業ができない。そこで、C林業は、冬期間の事業が可能な苫小牧や日高に近い白老町に支所を設け、全従業員が通年雇用で従事できる体制を経営理念の一つにしている。通年雇用を確実にし、収益をあげる上でも、先にふれたとおり、早くから機械化に取り組んできた。機械化は、同時に複雑な操作が必要になるアタッチメントを扱える等の技術者が会社にとって大きな財産という考えにもつながっている。

持続可能な林業会社の経営では、伐採による収益だけではなく木を育てるところにつなげるという考えがある。市況の変化にもらみながら、常に全社一丸となって「いい山」「いい森づくり」を目指している。こうした取り組みは、2003年、2004年と連続して、全国林業経営推奨行事「農林水産大臣賞」、農林水産祭「天皇杯」の受賞にもつながっている。そもそも会社設立動機が、地元で数千ha所有する不在村地主から管理委託を受けたことにあるため、素材生産事業体であるとともに、森林管理への意識は高い。さらに、地元の素材生産業者の協同組織である「倶知安林産協同組合」でもリーダー的存在となり、機械技術の普及など地域の同業者の底上げにも貢献している。

C林業の社有林ならびに社有林以外も含む森林整備事業の2015年度の実績は、Table 3に示す通りである。企業

有林や公有林の管理も受託する。森林整備事業において注目されるのは、植林と作業道開設に力をいれていることで、植林で前年比25ポイント増、作業道で44ポイント増になる。今のところ、多くの社有林は主伐期になく、作業道の開設や間伐主体の森林整備を進め、いつでも伐採できる山づくりを行っている。さらに、林業経営を本格化する上で、森林整備事業を専門とする系列会社も設立した。先にふれた倶知安林産協同組合を母体として、C林業関連会社2社、C林業役員3人が兼務で経営を担う。従業員は17人である。社有林の森林経営計画樹立面積は、2012年より2015年実績で約6,000haに達する。民間会社は、金融機関からの借り入れによる経営が一般的であるため、会社設立当初は、納材先の前渡金に依存するなど資金繰りに苦労した。だが現在は、冒頭ふれた「植伐一貫」の経営方針によって、年商15億円に成長し、毎年の黒字決算を達成していることで、金融機関からの運転資金の借入がスムーズとなり、会社設立初期の前渡金に依存せざるを得ず納材先が自由に選択できない系列下から脱脚でき、さらに収益を第一に考えた取引が可能になった。こうした安定的な経営を維持する上で、社有林の存在は大きいという。ちなみに、2015年度の社員旅行は利益の一部を福利厚生費として全額会社が負担する形で林業地である九州の視察にあてている。

以上のように、C林業にとっての全国に先がけ林地集積に着手した初期の目的は、事業量確保の側面もあったが、林地の購入代金を差し引いてもそれなりに伐採後に利益が期待できることがわかり、その後は、積極的に林地購入に乗り出すことになった。その結果、今日では林業経営を事業の柱に据えるまでに至っていた。それにより、前渡金による系列化で、納材先の自由を奪われた創業当初と異なり、川下や川中との取引において、大ロット生産・供給体制の強みを生かすことができ、金融機関の信用も勝ち取り、将来的には法正林となった自社有林からの安定供給を目標とする経営方針を持つことになったのである。

Table 3. C社による森林整備事業実績(2015年度)

事業名	計	社有林	社員親族等 関係者	その他	前年比 (%)
人工造林 (ha)	172	69	12	91	125
被害地造林 (ha)	23	4	5	14	109
樹下植栽 (ha)	17	3	7	7	19
間伐 (ha)	805	437	15	353	234
除伐 (ha)	172	82	3	87	51
更新伐 (ha)	51	12	15	24	95
下刈 (ha)	1387	577	75	735	99
森林作業道開設延長 (m)	63,009	42,900	0	20,109	144

資料) Fig. 1と同じ。

C 林業の林地集積の事例から林業経営の有り方を学ぶとき、次の3つが注目される。一つ目は、林地の長期的な経済価値を評価、試算できる人材、二つ目は、需給調整可能なサプライマネジメントを担える人材、三つ目は、価格競争力を持つ資源量と生産・供給体制を自らの内に有すること、である。中でも、三つ目は、事業体自ら、事業のやり易さとして強調している点になる。

3.2 人工林育成林業の経営組織

林業基本法制定以降、わが国の民有林における林業経営は、中小規模層の農家林家が主たる担い手として措定された。だが、中小規模層の農家林家は戦後造林を中心とする資源造成には大きく貢献したが、小規模分散的所有構造から家産保持的行動がその本質とされた。高度経済成長以降は、都市に労働力が吸引されたことも重なり、森林整備は森林組合に、素材生産は素材生産業者に分業化され、主たる担い手として林業政策の対象として措定されてきた。だが、それはあくまで施業の担い手であった。特に、わが国は、戦後拡大造林の資源が成熟した現在においても先進林業国に比べて、人工林育成林業を産業とする経営組織の不在が際だっている（志賀 2016）。だが、そうした中でも 2000 年代以降、新たな形の林業経営組織が生まれている。一つ目は、「西粟倉村共有の森ファンド」に代表されるように、新たな組織形態として匿名組合を発足させ、補助金で不足する部分を個人投資による森林ファンドを組成し、伐採から商品開発、そして資源再生の循環の輪を実現している例である。二つ目は、三次地方森林組合の事例として、性格的には長期施業受委託契約の範囲ではあるが森林組合自ら森林組合法にのっとり 30 年の期間を設け信託に着手した例となる。三つ目は、大規模山林所有者の林業経営ノウハウに基づく管理組織の発足の例等がある。もちろん、数万 ha を所有する企業有林等自社有林の経営組織と技術者を備えている例もあるが、ここでは、木材価格がグローバル化した 2000 年代以降、新たに発足した経営組織に視点をあて、三つ目の大規模山林所有者の林業経営ノウハウに基づく経営組織の例を示す。

三重県の M 社は、林業経営を受託する会社で、社員は 15 人になる。M 社社長は、親子 2 代にわたる H 家山林の番頭でもあり、M 社の 15 人の社員のうち H 林業から 6 人が出向している。M 社は、この地域の 1,000 ha 規模の 5 つの大規模森林所有者を核として、林業経営を受託している。すなわち、地域の森林所有者の連合体が形成されるとともに、M 社の発足は、地域の林業経営の技術者集団の誕生ともみることができる（餅田 2012）。

M 社の林業経営技術は、H 林業の技術革新がベースにある。一つは、育林過程の低コスト化であり、一つは、木材販売手法にある。一つ目の育林過程の低コスト化について、かつて、この地域の植栽本数は、ha 当り 8,000 本を植えることが一般的であった。8,000 本植えの時代は、

小径木は足場丸太としての需要があったことで採算がとれた。今日では、足場丸太の需要は僅かとなり、主伐材も安価になる中、8,000 本植えの合理的理由が無くなり、むしろ、必要労働力だけが增加することになる。植栽本数を減らすことで苗木代や植付手間を削減でき、造林・保育費用の大幅な縮減につながる。

以上の結果を得る上で、H 林業は、自ら実証実験を行った。Table 4 は、H 林業が実生苗を灌水チューブ苗に変え、また、地拵えを行わなかった場合の実証実験結果になる。かつて、当地で一般的であった ha 当り 8,000 本植えとの比較では、確実にコストが削減されることがわかる。Table 5 は ha 当り 2,500 本植えと 4,000 本植えの比較になる。2,500 本植えは、4,000 本植えに比べて、地拵えが 10 人から 5 人に減らすことができたことで経費は 18 万円から 9 万円に、苗木代は 40 万円から 20 万円に、植付け手間は 25 人から 5 人に減らすことができ、45 万円から 9 万円へと造林費用を大幅に削減することができている。その後の下刈り、除間伐・枝打ちの労働力もそれぞれ 32 人から 16 人に、85 人から 67 人に省力化でき、下刈りが 64 万円から 32 万円、除間伐・枝打ちが 153 万円から 120 万円への削減を達成している。育林過程の低コスト化では、H 林業はわが国の造林費用の大きな割合を占める苗木生産の技術革新にも取り組んできた。その背景には、従来の苗木生産業者からの購入では、購入時期すなわち植付け時期の制約があったことが大きい。自社による苗木の生産体制を整えることは、作業種別のコスト削減に加えて、伐採、地拵え、植栽、保育までの生産過程の調整が可能となり、経営コストの削減にもつながっている。現在の植栽本数は、ha 当り 2,500 本植えまで減らすなど様々な試みた結果、4,000 本植えに落ち着いている。ちなみに、2,500 本植えによるコスト削減への意欲も捨てていない。

次に、木材販売手法について、その流通の技術革新の概念図を Fig. 3 に示した。従来の原木流通システムは原木市売市場を核として成り立っていた。新システムでは、M 社が組織・経営する山林所有者の材だけでなく、近隣の出材も含めて、指定の中間土場に材を集中させている。なるべく長材で中間土場に集約し、大ロットにした上で、最寄りの原木市売市場と連携して中間土場で採材する。並材は木材加工工場直送、枝葉は木質バイオマスとして運搬業者と連携する。横持ちコストの軽減ができるとともに、採材の無駄をなくすことで丸太 1 本の価値向上につながっている。中間土場を国道沿いに複数設け、原木市売市場が集荷して回るといったシステムとなっている。このシステム導入後は、山林所有者の市場における植積手数料、中間土場から原木市売市場までの輸送費等を合わせると 1 m³ 当たり 2,823 円軽減された。同じく木材加工工場側も原木市売市場での積込費用と輸送費を合わせると 1 m³ 当たり 217 円軽減された。中間土場に集めることで、大型トラックの輸送が可能となり、輸送そのものもコスト低下にもなった。こうした新たな流通システム

は、所有者や生産者の事業地ごとの丸太を長材のまま中間土場まで持ってくることによって、需要者が求める採材が可能となるなど、総コストの低下につながっている。

以上、本項では2000年以降に発足した新たな林業経営組織の取組み実態をみてきた。そこでは、約5,000 haの経営林を中心とした技術革新、すなわち新しいアイデアによって、林業生産から流通までの総コストを縮減するという新たな価値を生み出しながら林業経営を行っていることがわかる。こうした先駆的取組みには、まず林業

経営に対して現場に即した企画力を持つ経営者、卓越した技術者がいることが注目される。そして、技術革新には、言うまでも無く、人、金、時間への投資が必要である。国土保全や自然保護との共存が前提となる日本の林業生産において、とりわけ造林（資源造成）の技術革新は、自然の影響を受け、地域性をともない、時間も要すること等から社会資本に組み込むべき性格をももち得ており、民間の一事業体であっても、技術革新に向けた取り組みへの公的助成も重要である。

Table 4. 新生産システム（革新的整備モデル事業）における造林コスト削減実績

旧作業システム A（2004 年時）		新作業システム B（2007 年時）		2004/2007 対比（B/A）
a) 事業実績		a) 事業実績（0.22 ha）		123%
条件	植栽本数 4,000 本 /ha 実生苗 2 年生購入 80 円 / 本 200 本植栽 / 人日	条件	植栽本数 929 本（4,200 本 ha） 灌水チューブ苗 1 年生 140 円 / 本 200 本植栽 / 人日	
費用	苗木代 4,000 本 /ha*80 円 / 本 = 320,000 円 /ha 地拵え 10 人 /ha*12,000 円 / 人 = 120,000 円 /ha 植栽 20 人 /ha*12,000 円 / 人 = 240,000 円 /ha 計 680,000 円 /ha	費用	苗木代 929 本 *140 円 = 130,060 円 地拵え なし 植栽 4.5 人 *1.2 万円 = 54,000 円 計 184,060 円（837,000 円 /ha）	
b) 条件の悪い場合の事例		b) 新作業システムで条件の悪い場所で造林した場合の試算		93%
条件	植栽本数 4,000 本 /ha 実生苗 2 年生購入 80 円 / 本 120 本植栽 / 人日	条件	植栽本数 4,000 本 /ha 灌水チューブ苗 1 年生 140 円 / 本 225 本植栽 / 人日	
費用	苗木代 4,000/ha*80=32 万円 地拵え 10 人 /ha*12,000 円 / 人 = 120,000 円 /ha 植栽 33 人 /ha*12,000 円 / 人 = 39,600 円 /ha 計 836,000 円 /ha	費用	苗木代 4,000 本 /ha*140 / 本 = 560,000 円 /ha 地拵え なし 植栽 18 人 /ha*12,000 円 / 人 = 216,000 円 /ha 計 776,000 円 /ha	
c) 従来の尾鷲地方の平均		c) 新作業システムで平均的な場所を造林した場合の試算		76%
条件	植栽本数 8,000 本 /ha 実生苗 2 年生購入 80 円 / 本 200 本植栽 / 人日	条件	植栽本数 4,000 本 /ha 灌水チューブ苗 1 年生 100 円 / 本 400 本植栽 / 人日	
費用	苗木代 8,000/ha*80 / 本 = 64 万円 /ha 地拵え 30 人 /ha*12,000 円 / 人 = 360,000 円 /ha 植栽 40 人 /ha*12,000 円 / 人 = 480,000 円 /ha 計 1,480,000 円 /ha	費用	苗木代 4,000*100 = 400,000 円 /ha 地拵え なし 植栽 10 人 /ha*12,000 円 / 人 = 120,000 円 /ha 計 520,000 円 /ha	

資料) H 林業業務資料より。

Table 5. 育林コストに関する経費比較

作業区分	単価（円）	A：旧（2008 年まで）		B：新（2014.5 調査時）		2008 年までの 実績との対比 B/A（%）
		数量 （人・本）	経費 （円）	数量 （人・本）	経費 （円）	
地拵え（円／人日）	18,000	10	180,000	5	90,000	50.0
苗木代（円／本）	80	5,000	400,000	2,500	200,000	50.0
植え付け（円／人日）	18,000	25	450,000	5	90,000	20.0
下刈り（円／人日）	20,000	32	640,000	16	320,000	50.0
除伐・枝打（円／人日）	18,000	85	1,530,000	67	1,206,000	78.8
計		152	3,200,000	93	1,906,000	59.6

資料) Table 4 と同じ。

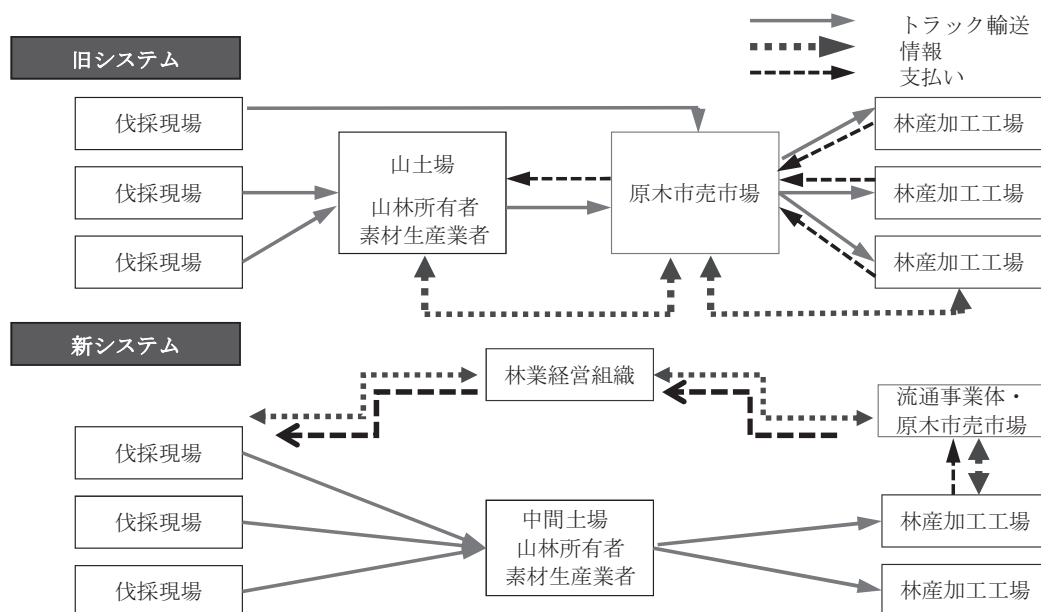


Fig. 3. 物流改革、原木安定供給システムの再編
資料) ヒアリングより筆者作成。

3.3 所有権再編の行政施策（熊本県）

熊本県では、2015年度より、経営意欲がなくかつ林地を手放したい森林所有者の情報を集約し、林業経営を行う企業、事業体に林地販売を斡旋するという施策「森と担い手をつなぐ集約化促進事業」を開始した。Fig. 4は、その概念図である。施策が議論になった背景には、森林経営計画の策定が伸び悩んでいることがある。熊本県の民有林における森林経営計画のカバー率は33%（2015年3月末現在）、不在村や相続未登記による所有者不明な森林、林業経営そのものに無関心な林地が点在することにより、計画策定に支障が生じるケースが多く、その解消を図ることが極めて重要となっていた。だが、森林組合などの林業事業体の有する情報やマンパワーのみでは、所有者の追跡は困難である中、今の時期を逸すると、所有者の高齢化、人口の減少、所有者の代替わりで所有者の特定が非常に困難になることが明らかであった。こうしたことから、熊本県では、この課題に取り組むことは単に森林・林業のみならず地域にとって喫緊の課題であるとして、施策に盛り込み、本事業に着手することになった。

施策創設の動力には、熊本県森林組合連合会（以下、熊本県森連）の危機感も大きく作用した。組合員でもある森林所有者の経営意欲は後退し、1990年代より指摘されていた土地込立木販売希望者も一層増加し、組合員の資源再生が危惧される状況であった。このため、一部の地域においては、施策樹立前年、森林所有者に対してアンケートを実施した。回答者数は15人と定量的に把握するには限界があるものの、各質問項目に対する回答の傾向は、それまでの座談会や県下の森林組合ヒアリング等

と同様の結果であった。質問を抜粋すると、①相続人の有無（いる93%、いない7%）、②相続人の山への関心（あり40%、ない50%、不明10%）、③買い手がいれば山林を売りたいか（はい33%、いいえ20%、不明47%）、④森林経営計画を知っているか（知っている20%、知らない60%、今後、説明会等に参加し内容を知りたい13%、不明7%）といった結果であった。相続人がいたとしても、現世代の段階で、既に、林業経営の相続意思が低い。すなわち、林業経営の後継者不在であることが窺える結果となっているのである。

こうした背景から、熊本県では、林地を手放したい所有者情報を集約し、林業経営を行おうとする企業等を認定する形で、県行政自ら、林地流動化に向けた基盤整備施策に着手した。売買のマッチングにあたり、県は様々な点で関わりを持つが、主なポイントは、①県と個人の所有者が直接関係するのではなく、市町村、森林組合、民間事業体等を構成員とする地域協議会を発足させ、地域の纏まりをもって、所有者の意向を取りまとめること、②林地を手放したい所有者がまとまった段階で、県は林業公社に所有者移転情報を提供、林業公社は森林の立木調査を実施、資産価値を明確にすること、③林地の購入希望者は、森林経営計画を樹立するなど、県が提示する一定の要件を満たすことで被斡旋対象になれること、以上の3つになる。熊本県の林地流動化に向けた基盤整備施策は、県の森林資源の現在価値を次世代に引き継ぐべく世代間衡平、すなわち、次世代が現世代と同じ森林資源からの効用を享受することにつながる公的関与ともいえる。

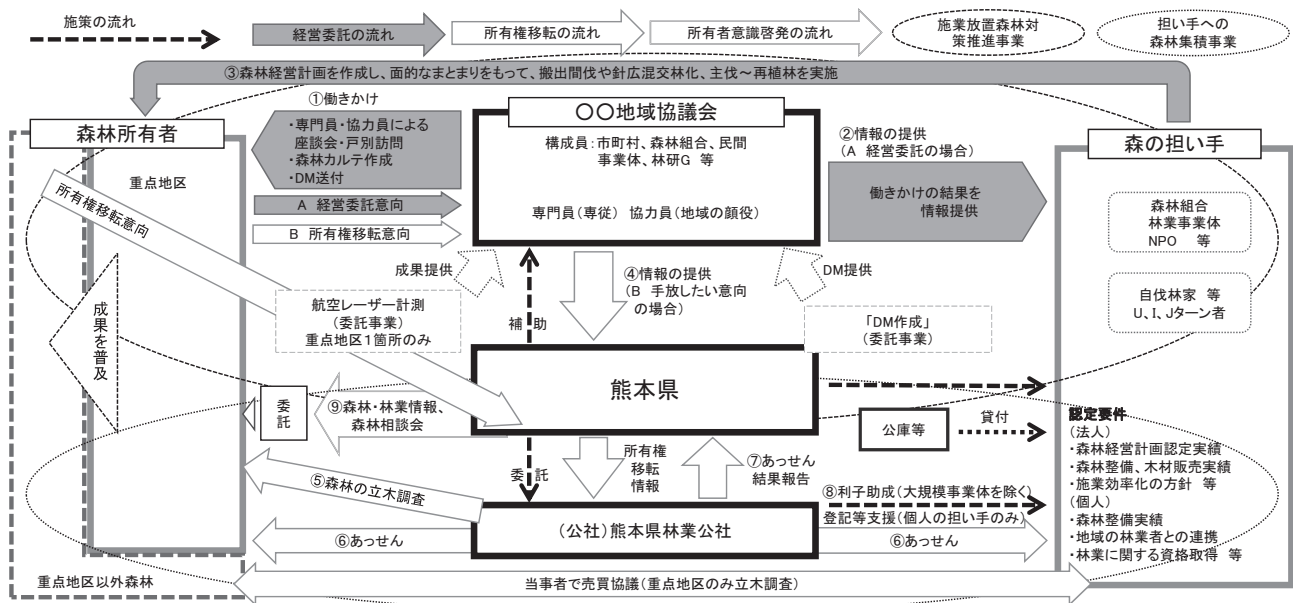


Fig. 4. 林地流動化に向けた基盤整備施策概念図
資料) 熊本県業務資料より筆者作成。

4. 林業経営再編の要因

4.1 大規模化する川下のプレイヤー

3項でみた林業経営の再編が生起する要因について、これまでの全国にわたる実態調査から、まず、川中、川下の流通・加工業が大規模化したことがあげられる。とりわけ2000年代の林野庁事業「新流通・加工システム」(2004～2006年度)ならびに「新生産システム」(2006～2010年度)の果たした役割は大きい(餅田ら2012a, 2012b, 山田2012)。いずれもモデル事業ではあったが、「新流通・加工システム」は、曲がり材や間伐材等を使用して集成材や合板を低コストかつ大ロットで安定的に供給する取組を目指した。具体的には、国産材の利用が低位であった集成材や合板等の分野で、地域における生産組織や協議会の結成、参加事業体における林業生産用機械の導入、合板・集成材等の製造施設の整備等を推進するものであった。その結果、曲がり材や間伐材等の利用量は、2004年の約45万 m^3 から、2006年には121万 m^3 まで増加し、合板工場が国産材自給率向上の牽引役を果たすことになった(林野庁2012)。続く、「新生産システム」は、地域材の利用拡大を図るとともに、森林所有者の収益性を向上させる仕組みを構築するため、合板に加え製材分野で、民間のコンサルタントによるプランニング・マネジングの助言の下、施業の集約化、安定的な原木供給、生産・流通・加工の各段階でのコストダウン、住宅メーカー等のニーズに応じた最適な加工・流通体制の構築等の取組を川上から川下までが一体となって実施するものであった(林野庁2012)。モデル地での評価は様々であるが、宮城県石巻地区を核とする「合板用県産材の供給等に関する検討会」や岩手県のノースジャパン素材流通協同組合をモデルとする都道府県森林組合連合

会の商社化等、確実に大ロット供給に向けた流通体制が整っていったといえる(大塚2008, 多田2012)。それは同時に、国産材挽き製材工場の大規模化も実現することになった。

本項で事例とするT社は、2004年時の年間生産量が5万 m^3 程の製材工場で母船方式の構想段階にあった。その数年後、母船方式を実現させたT社は、2013年調査時には30万 m^3 を越える国産材挽き製材工場に成長した。その要因は、主に次の5つであった。まず一つ目は、社長の発想に基づく母船方式にある。母船方式とは、以下のことである。T社は、1964年に操業開始、以来、閉鎖を決めた近隣の工場を順次、購入していった。2013年調査時には、本社がある栃木県に加え、群馬県、茨城県、福島県、新潟県に合計23の工場を持つに至っている。さらに、2016年には、山形県の工場が操業を開始した。2018年3月現在、31工場となっている。この31工場のうち、6工場を母船とし、母船に乾燥・仕上げ機能を集中させ、製品の品質管理と出荷調整をしている。母船以外に位置づく工場は、原木丸太の一次加工を中心に行う工場になり、必要に応じて、母船で二次加工を行う。T社では、現在、以上の母船方式を「母船式木材流通システム」と呼んでいる。この方式のメリットは、①各工場の設備稼働率を向上させ、乾燥コストを抑えることが可能となっていること、②母船に各種の製品が集まるため、在庫の一元管理が可能となり、品質・供給量を安定させることが可能となること、③最終商品の在庫が管理されることにより、顧客に対する供給がスムーズになること、である。各工場の機能ならびに原木消費量はTable 6のとおりである。なお、31工場のすべてを所有、経営しているわけではないところにも特徴がある。31工場のうち11の直営工場、

自らも組合員の一人となる協同組合方式で工場を営んでいるケースが7工場、他社の工場と連携・協力しているケース10工場、関連会社1工場2発電所で、「母船式木流システム」が組織化されている。連携・協力工場の存在は、各工場が得意分野の生産を行うことで、T社は製品の種類を多様化させることができ、連携・協力工場は、販路を確実にするメリットがある。

二つ目は、工場の立地が、栃木県、茨城県北部、群馬県、福島県南部、新潟県南部というように、これら北関東・東北部の地域は、戦後造林した人工林が豊富で、わが国でも有数な人工林地帯にあることである。T社は、このエリアを「ウッドロード」と呼んでおり、戦略的に工場を配置していることがわかる。ちなみに、この地域の人工林は、森林所有者の施業が細やかで適度に密植であるため、目の詰まった良質な原木が供給される。T社は、林地の取得はしないまでも地元森林組合と連携し、地位級の良い森林資源の再編を行ったともみることができる。T社がウッドロードと呼ぶ森林資源への地位級への注目は、世界最大の Timber-REIT（林業経営を行う上場不動産投資信託企業）であるウェアハウザー社が、製紙会社がアメリカ北西部地域の林業経営から撤退する中、製紙会社が所有していた地位級の良い林地を取得していく動きにも似ている。今後、アメリカ北西部地域において、ウェアハウザー社が所有した地位級の良い土地をまとめて保有することは困難であることも指摘されている（Best and Wayburn 2001）。

三つ目は、原木調達の変化である。従来、各工場の原木調達は、原則として工場ごとに行うことになっていた。それは、T社の多くの工場が立地する栃木県は、6つの原木市売市場があるため、工場をこれらの市場の近くに立地させることで、素材の輸送コストを抑えるとともに、特定の市場に左右されない形で原木を確保していたことにある。近年では素材生産業者からの直送による丸太購入割合が増え、国有林からの素材購入も一定量ある。このことは、素材の購入先や地域が広く分散することを意味し、原木入手に対するリスク分散の意味を持つ。さらに、原木獲得において、製材用原木のみならず製材用から燃料用チップ素材まで、いわゆるA材からD材までの立木の全量買取りといった原木確保にも展開している。T社は、「トロ（丸太の等級）を見分けることが出来るものが木の価値を高めることができる」と指摘する。そのことは、T社が買取り価格を左右し、丸太購入の競争力強化にもつながっている。

四つ目は、「とちぎ林業維新の会」の立ち上げと、代表自らが森林組合の組合員になっていることである。北関東のスギ地帯は、T社の他、年間原木消費量3~5万 m^3 規模の比較的規模の大きな製材工場、隣県には年間原木消費量10万 m^3 規模の製材工場が立地しており、これらの工場の原木集荷圏にある。つまり、T社が「ウッドロード」と呼んでいる北関東の人工林地帯は、原木確保をめぐ

て大手製材工場間の原木確保競争が激化することが予想された。このためT社は、2011年1月、栃木県北部の那珂川地域にある森林組合をメンバーとして「とちぎ林業維新の会」を組織した。メンバーは、T社と那珂川地域の6つの森林組合であり、事務局をT社が担う。この会の目的は、「栃木県北部地区の豊富な森林資源の利活用、森林組合の有り方、現場の問題点、国の政策などについて活発な意見・情報交換の場を設置し、那珂川地域の木材の様々な利用方法を検討する」とされている。T社のねらいは、①今後原木をめぐる獲得競争がより激化することが予想される中で、主伐を積極的に推進することによって、ウッドロード地域の原木生産力ならびに供給力を高めること、②主伐後の跡地に造林を行い再生産の仕組みをつくる上で、県森林環境税による補助金を投入することを要請しやすくすること、③再生産の担い手となる森林組合などを育成、保育事業の持続性を実現すること、④出来得る限り素材を高く購入することで、森林所有者の所得向上に貢献すること、にある。

五つ目は、大ロット供給である。本項で事例としたT社に代表されるように、年間原木取扱量が10万 m^3 を超えるような大規模木材加工工場に対して、原木の調達先である栃木県内の原木市売市場の原木取扱量は年間2~3万 m^3 程度と、大型木材加工工場の1社分の消費量より少ない状況である。また、周知のとおり、森林所有者の所有規模も零細規模から小規模のままで変わることなく、消費側と供給側の規模の乖離がますます大きくなってきている。

消費側と供給側の規模の乖離がますます大きくなってきているのは、川中に位置する流通の主要なアクターであるプレカット工場も例外では無い。1990年時、わが国の在来工法に占めるプレカット率は10%程度であったが、2014年時には90%に達している（林野庁2016）。こうした中、プレカット工場最大手のP社は、2014年、年間約80万坪（2014年）を加工する。原料となる製品は、全量購入である。2014年時、P社の産地別使用料割合は、欧州材45%、北米材25%、ロシア材11%、ニュージーランド材1%、国産材18%である。P社は住宅部門も有しており、最終消費者の国産材へのニーズは高いと認める。そうした中で、群をぬいて欧州材が高い理由は、①プレカット用集成材の原料となるラミナの乾燥基準が明確であること、②安定的に大ロット入荷が可能であること、③日本には集成材工場はそれなりにあるため、集成材用ラミナが安定的に入荷されることが重要なこと、をあげていた。一方の国産材は、P社が必要とする生産・出荷体制に追いつく同一規格の量が集まらなかったが、近年では、国産集成材の生産量も伸びてきたことで利用割合が増える傾向にある。

以上にみるように、川下の大規模化は、原木獲得競争を見据えた川上の変化をもたらす要因であったといえる。

Table 6. T 社母船方式の全体像

工場名	形態	母船	所在地	事業内容	主要生産物	原木消費量・ 取扱量 (m ³ /年)	製品 生産量 (m ³ /年)	従業員数
Da 工場	直営		栃木県矢板市	製材	柱・間柱 (3 m)	30,000	15,000	12
Db 工場	直営		栃木県矢板市	製材	柱・間柱 (4 m)	24,000	12,000	10
Dc 工場	直営	○	栃木県塩谷郡	乾燥・加工	柱・間柱・平角・FJ 間柱	—	4,800	12
Dd KD 物流センター	直営	○	栃木県矢板市	乾燥・加工	柱 (3 m)	—	24,000	10
De KD 加工センター	直営		栃木県矢板市	製材・FJ	FJ 間柱	19,000	10,000	21
Df 工場	直営	○	栃木県大田原市	乾燥・加工	柱・間柱	—	36,000	25
Dh ピッキングセンター	直営		栃木県那須塩原市	邸別配送拠点	構造材・羽柄材 (全般)	—	—	2
Di 中間土場	直営		栃木県矢板市	バイオマス材中継地	バイオマス材	35,000	—	3
Dj 工場	直営		栃木県鹿沼市	製材	柱・間柱	24,000	12,000	7
Dk 工場	直営		栃木県宇都宮市	製材	柱・間柱	30,000	12,000	5
DI 工場	直営		栃木県那須郡	製材	柱・間柱	24,000	12,000	10
Ca 工場	協同組合	○	栃木県那須塩原市	集成材	積層間柱、構造用集成材	—	15,000	18
Cb 工場	協同組合		栃木県那須郡	製材・乾燥仕上加工	柱・間柱	30,000	15,000	17
Cc 工場	協同組合		栃木県佐野市	製材	柱・間柱	20,000	10,000	6
Cd 工場	協同組合	○	群馬県藤岡市	製材・乾燥・加工	柱・間柱・平角・板	50,000	24,000	26
Ce 工場	協同組合		群馬県藤岡市	乾燥・FJ	FJ 間柱	—	4,000	14
Cf 工場	協同組合	○	新潟県村上市	製材・乾燥・集成	柱・間柱・集成材	24,000	12,000	35
Ch 工場	協同組合		山形県鶴岡市	チップ		48,000	—	5
Ta 加工所	提携		栃木県宇都宮市	木工加工	各種木工製品	—	1,000	6
Tb 工場	提携		栃木県那須郡那	製材	集成材ラミナ	5,000	2,500	2
Tc 工場	提携		群馬県渋川市	製材	柱・集成材ラミナ・チップ	20,000	10,000	13
Td 工場	提携		群馬県多野郡	製材	柱・間柱	5,000	2,500	3
Te 工場	提携		福島県郡山市	製材	柱・間柱	13,000	6,500	10
Tf 工場	提携		福島県石川郡	製材	柱・間柱	8,400	4,200	4
Th 工場	提携		山形県鶴岡市	製材	ラミナ	7,000	3,500	4
Ti 工場	提携		栃木県那須塩原市	製材	ラミナ	1,400	700	2
Tj 工場	提携		栃木県鹿沼市	製材	柱・間柱	6,000	2,500	4
Tk 工場	提携		栃木県塩谷郡	製材	柱・間柱・平角・板	12,000	6,000	5
Aa 加工所	関連会社		栃木県矢板市	木材加工・伐採	(非公表)	(非公表)	(非公表)	5
Ab バイオマス発電所	関連会社		栃木県那須郡那	発電会社 (2,500 kw)		60,000	—	12
Ac バイオマス発電所	関連会社		山形県鶴岡市	発電会社 (2,000 kw)		50,000	—	11
計						545,800	257,200	319

資料) T 社業務資料 (2018.3 現在) より。

4.2 「預け金」制度にみる川上の行動

長期施業委託の意義と課題を明らかにすることを目的とした既往研究において、5 ケ年にわたる伐採、造林・保育、防護柵・作業道開設の総収支が、プラスになることが明らかにされている (藤掛・大地 2015)。収支がプラスになる要因には、成熟した資源があり、伐採からスタートする長期施業受委託によるところが大きい。この考えをさらに前面に打ち出した例に、北海道の森林組合の一部で採用している「預け金」という仕組みがある^{注1)}。「預け金」は、森林組合が森林所有者から皆伐を委託された際、伐採収入から 1 ha 当たり 10 万円から 20 万円を預かり、造林補助金とあわせて再造林や保育施業の費用に充当するという仕組みである。北海道は、一般造林補助金 68% にさらに道と市町村が出資する造林基金から 26% の上乗せ分があるため、実際に森林所有者が負担する自己資金比率は 6% になる。「預け金」は、その 6% 分を造林・保育を行う経費として森林組合が預かるというもの

である。「預け金」の額は、利用間伐 2 回と主伐による収入と植付けから 10 年間の保育費用の収支から試算されている。この「預け金」に対して、伐採を委託する森林所有者のすべてから同意を得ており、また今のところクレームも無いという。この「預け金」は、森林組合法で制定されている信託規定に基づくものではなく、森林組合が組合員の造林資金の金庫番をしているに過ぎない。このため、貸借対照表には計上されず、経営状態に関する情報の指標とならない。だが、Table 7 に示すとおり、林業経営の施業計画をたてた上で、現在価額で採算を見通し「預け金」を運用しており、性格的には信託法理に即している。「預け金」の収支見通しの課題として、補助率を固定化しているため、将来の木材価格の変動により造林の補助率が変わると、運用のみならず森林所有者の合意を得ることにしても不確実になる可能性が高いということがあげられる。

Table 7. 「預け金」算定のためのカラマツ施業計画 (2000 本植/ha) 例

林齢 (年)		10	15	20	25	30	35	40	45	50
間伐前	平均樹高 (m)	10	13	16		20		23		25
	平均直径 (cm)	11	14	18		22		26		30
	材積 (m ³)	105	165	240		285		315		335
作業		つる伐り・除伐	除間伐① 枝打ち 2 m	除間伐② 枝打ち 4 m		利用間伐①		利用間伐②		主伐
実施間伐量	本数 (本)	380	456	319		223		104		417
	除間伐率 (%)	20	30	30		30		20		100
	材積 (m ³)	21	50	72		86		63		335

資料) A 森林組合業務資料 (2016.6 現在) より。

4.3 戦後政策対象となった林業経営担い手の縮小

周知のとおり、林業基本法では、林業経営の担い手として、中小規模の森林所有者が指定され、その近代化を進める上で森林組合の育成が今日に至る主要な政策対象になった。このことについて、志賀 (2013) は、「1951 年森林法体制の革新が第 1 歩」として、「国有林問題を基軸とした経路依存」を指摘し、そうした経路依存からの脱却とともに経営組織と経営対応の重要性を主張した。この主張を後押しする石井 (2014) は、さらに「ドイツ林政が森林所有規模 200 ha 以上の林業経営と農家林を中心とする零細森林所有者を概念的に分けて施業を実施していることに学んで、わが国林業の再生を図るために林業経営の担い手像を明確にして、林地の集約化や機械化を行い、林業経営の規模拡大を進める一方で、農家林を中心とする零細な自伐林家の持つ可能性を正當に位置づける必要がある」と指摘する。こうした中、協同組織としての森林組合の性格を規定し、基盤となる組合員の近年の動向をみてみると、Fig. 5 に示すとおり、組合員数ならびに管内森林面積に占める組合員所有林面積に占める組合員所有林面積割合が減

少トレンドにあることがわかる。

今日、森林計画制度に基づく民有林の森林経営計画策定率は 3 割に満たず、森林所有者の林業経営からの撤退は改善の兆しが無い。その要因の一つとして、Fig. 6 に示した O 森林組合の事例にみてとれるように、森林所有者の高齢化が著しいことをあげることができる。

さらに、O 森林組合の組合員の多くは、農家林家である。現在、組合員は、大きく①後継者のいる世帯、②夫婦世帯、③単身世帯に区分できる。このうち、農業や林業に従事してきた夫婦世帯や単身世帯の多くは、60 歳から国民年金を受給することが多いという。国民年金は 65 歳に基準を置き、受給開始年齢によって年金額が変動し、60 歳で受給を開始する場合は減額される。この結果、60 歳で年金を受給すると、その年金額は年間 50 万円に満たないのである。65 歳からの受給で 80 万円弱、70 歳からの受給で 150 万円弱といった年金額になる。もともと農林業に従事していたことから都市住民とは異なり、生活費のかなりの部分を占める食費は自給で賄えるというが、大型電化製品や住宅リフォーム等の大規模な出費に対しては、

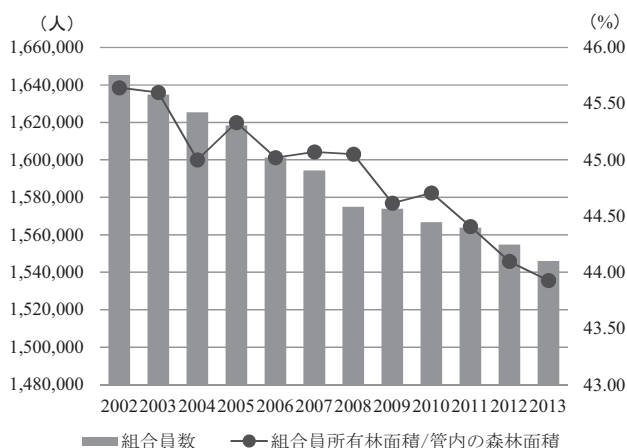


Fig. 5. 森林組合員数ならびに管内森林面積に占める組合員面積割合の推移

資料) 林野庁林政部経営課「森林組合統計」各年版より。

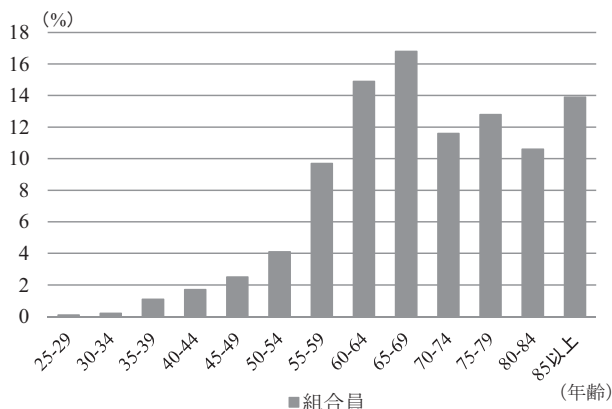


Fig. 6. O 森林組合組合員の年齢構成割合

資料) O 森林組合業務資料より筆者作成。

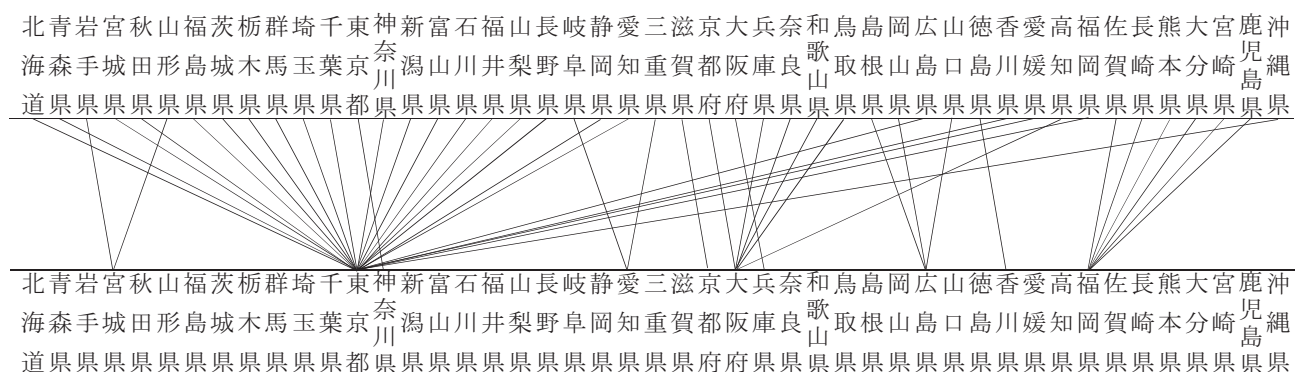
山林を伐採し、その現金収入に充てている。こうした現状において、組合員に持続可能な林業経営を望むことは非常に困難である。O 森林組合の年間素材生産量は3万 m³ 弱、うち主伐が7割、間伐が3割になる。面積では、主伐が141 ha、間伐が177 haになる。さらに、土地付き立木販売希望者は後をたたない。このためO 森林組合は、ある程度まとまった林地は、林地を積極的に購入している林業事業体、木材加工業等の企業に斡旋している。企業の林地売買条件に満たない小規模面積の林地は、森林組合自ら経営を行うことを目的として、超長期にわたる経営受委託を検討している。だが、さらなる問題は、子供のいない夫婦世帯や婚姻経験の無い単身世帯も多く、これら世帯が高齢化した後、所有者不在になってしまう林地の増加により、協同組織の根幹をなす個人所有の減少が懸念されている。国有地化による税収の減少等を孕む問題をも含んでいることから、より詳細な実態分析が必要である。

さらに、Fig. 7に示すとおり、地方から都市への人口移動は、企業や産業の集積ばかりでなく、個人預金、年金基金等首都圏への富の集中にもつながる現象といえる。地方から都市への人口移動が進む背景には、高い所得水準に加え、優れた学校の存在や、買い物、ビジネスなどに対するアクセシビリティの高さの影響が高いことが指摘されている（浦川 2016）。首都圏への労働や資本の集積は、生産性の拡大をもたらした日本の経済発展の原動力となってきたし、住宅着工数の推移にもみることができる。だが、こうした現象は、地方における生産年齢人口の縮小をもたらした、次世代不在の中、森林所有者にあっては森林の家産保持といった側面に生計維持が前面に現れ、森林資源の再生産を困難にしているのである。

5. まとめ

林業経営を近代的ビジネスとして投資対象と捉える海外動向に注目し、わが国の金融機関においても森林信託の形で林業経営のビジネス化の検討に着手した。だが、わが国の林業の現状、特質を理解する中で、森林信託の商品化は時期尚早という結論に至った。その理由は、主に、①林業のキャッシュフロー確保が不透明、②協同する専門家・機関の不足感、③不動産の物的状況、権利態様が不安定、の3つであった。他方、森林所有者は丸太価格の低迷や後継者不在等により経営意欲を喪失し、立木を販売する際、林地そのものまで売却したり、林地は手離さないまでも、再造林や施業放棄が深刻化した。そうした中、わが国でも森林信託の商品化の条件を満たすような動きが見られるようになってきた。本論では、そうした事例を踏まえ、新たな動きが生起する要因について分析を行った。①林業のキャッシュフロー確保が不透明なことに関わる事例では、林地集積と林業経営への参入の実態を確認した。そこでは、大規模所有という規模の経済性によって法正林の造成を目標とした安定的な林業経営の下で、持続的な生産活動を行おうとするものであった。それは、ややもすると林産企業の原料調達のためのコストだけが計上され、収益を計上しなくても済むいわゆる垂直的統合林産会社の産業備林とは異なる新たな経営形態を意味する動きに見えた。②の協同する専門家・機関の不足感について、本論では、約5,000 haに至る経営規模の拡大を梃に、コスト削減を試行しつつ林業生産・流通の技術革新を起こし、経営を行う新たな林業経営組織の実態を確認した。こうした新たな林業経営組織では、まず経営に対して現場に即した優れた企画力を持つ経営者、卓越した林業技術者がいることが注目された。③の不動産の物的状況、権利態様が不安定なことについて、

転出前の住所地



最も多い転出後の住所地

Fig. 7. 都道府県別にみた最も多い転出先の住所地（2015年）

出典：総務省「住民基本台帳人口移動報告 平成27年結果の概要」、図式は浦川邦夫（2016）経済成長には一極集中の解消を、エコノミスト2016年5月24日号、55を援用し、最新の公表データで筆者作成。

平成 29 年度施行の新たな森林・林業基本計画において林地台帳整備が位置づけられたが、これに先立ち熊本県では、経営意欲がなくかつ林地を手放したい森林所有者の情報を集約し、林業経営を行う企業、事業体に林地を斡旋するという林地流動化・集約化を梃とした林業経営の基盤整備施策ともいえるべき「森と担い手をつなぐ集約化促進事業」に着手した。その背景には、森林経営計画の策定が伸び悩んでいることにあった。熊本県の民有林における森林経営計画のカバー率は 33%、不在村や相続未登記による所有者不明の森林、森林経営そのものに無関心な森林が点在することにより、計画策定に支障が生じるケースが多く、その解消を図ることが極めて重要となっていた。だが、県としては森林組合などの林業事業体の有する情報やマンパワーのみでは、所有者の追跡は困難である中、今の時期を逸すると、所有者の高齢化、人口の減少、所有者の代替わりで所有者の特定が非常に困難になることが明らかであったことによる。以上のように、森林信託の商品化を指標とする林業経営近代化に残された課題は、森林所有者ならびに素材生産事業体といった私的セクター主導や公的セクターの関与によって、実体経済の中で解決方向に踏み出していた。

さらに本論では、以上の事例を生起させた要因について訪問調査の回答から得た共通した事項のうち、大きな要因と考えられた①大規模化する川下・川上のプレイヤー、②伐採から始める林業理解と 30 年間、40 年間といった経営委託ともいえる長期施業受委託行動、③戦後政策対象となった林業経営担い手の縮小を検討した。これらは、今までもそれなりに認知されてはいたが、地方の実情を踏まえると、もはやわが国の林業再生に向けた林地の再編は、まったなしの段階にあることが浮き彫りになった。

最後に、本論では、林業経営再編について、新たな動きとその要因に接近した。そこでは、所有の再編と経営の再編という 2 つの並行した動きを捉えることができた。いずれも規模の経済性を基本とし、それは、いわば社会費用をも縮減する市場の組織化ともいえる動きにもみえた。その育林経営再編の動力は、大規模化する川下の動きの影響と同時に、川上の内発的な要因も大きいことが見てとれた。中でも、人口減少の著しい地方において林業再生の体力が失われつつあることが浮き彫りになった。それは、資源の持続ある再生を損ねることを意味しており、国産資源による林業・木材産業の持続性への影響も懸念される結果でもあった。本論で明らかにした事例には、林業経営を行う上で多くの示唆が含まれており、今後、こうした点的な先進事例を有機的、複合的、面的な展開につなげるには、さらに地域特性を踏まえた分析と同時に、大規模や小規模といった経営規模や多様化する経営形態の違いを踏まえ、性格の異なる経営者が自らの林業経営の選択を可能とする人工林育成林業の経営指針の検討が急務である。

謝 辞

本論は、2015 年 10 月 29 日開催「森林総合研究所東北支所公開講演会」における報告の一部に 4 項を加筆したものである。数年にわたり度重なる訪問を快諾くださった関係者の皆様に、貴重なデータの提供ならびに示唆深いご意見をいただいた。本研究は JSPS 科研費 JP15K07501, JP24580238, JP24580237、さらに科研の採択に至る基礎研究の過程では、公益社団法人国土緑化推進機構の助成をいただいた。関係者の皆様ならびに助成に對し辞して感謝申し上げる。

注

- 1) 「預け金」は、筆者らが訪問した 3 つの森林組合で実施されている (2016 年 6 月現在)。

引用文献

- 相川 高信 (2016) 森林管理・林業経営への信託手法適用の意義と課題：施業提案から経営提案へ, MUFJ 政策研究レポート 2016.5.30, 三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング, 1-9.
- 朝日新聞 (2016) 森の活かし方. The Asahi Shinbun GLOBE, 朝日新聞社, 2016.9.4 発行.
- Best, C. and Wayburn, L.A. (2001) America's Private Forests: Status and Stewardship. Island Press, Washington, DC, USA, pp.268.
- 遠藤 暁 (2016) 本邦における森林資産の流動化とその課題—ファンド組成を念頭にいたフィールドワークを通じての報告—. 林業経済, 69(9), 18-24.
- 福田 淳 (2007a) 米国における林地投資の動きについて—林地投資管理会社 (TIMO) を中心として (上). 山林, 1476, 16-23.
- 福田 淳 (2007b) 米国における林地投資の動きについて—林地投資管理会社 (TIMO) を中心として (下). 山林, 1477, 21-27.
- 福田 淳 (2016) 世界における林地投資の最新動向について: UNECE/FAO「林産物市場年次報告書」より. 山林, 1586, 32.
- 藤掛 一郎・大地 俊介 (2015) 森林組合への長期施業委託の意義と課題：宮崎県美郷町有林, 日向市有林の耳川広域森林組合への委託を事例として. 林業経済, 67(10), 17-30.
- 堀 靖人・大塚 生美・餅田 治之 (2014) ハンガリーにおける造林投資会社によるエネルギー造林. 林業経済学会 2014 年秋季大会, B9.
- 堀 靖人・大塚 生美・餅田 治之 (2015) ハンガリーの農廢地造林. 第 126 回森林学会学術講演集, T4-2.
- 石井 寛 (2014) 林政学の 100 年を振り返る. 森林科学, 71, 13-15.
- 神沼 公三郎 (2012) ドイツ林業の発展過程と森林保続思想の変遷. 林業経済研究, 58(1), 3-13.

- 小池 芙美・興梠 克久 (2011) 株式会社原木市売市場の機能に関する：考察伊万里木材市場を事例に. 林業経済, 63(10), 2-16.
- 興梠 克久 (2015) 林業の主産地形成と原木市場の商社化. 山林, 1577, 19-27.
- Moser, U. and Strehlke, B. (1996) Joint FAO/ECE/ILO : Committee on Forest Technology, Mangement and training, Professions, Skills and Training in Forestry, Prepared, compiled and published with financial assistance of Swiss Federal Office of Enveironment, Forests and Landscape, 362pp.
- 餅田 治之 (2012) 森林・林業再生プラン. 遠藤 日雄編著 “改訂 現代森林政策学”, 日本林業調査会, 71-82.
- 餅田 治之 (2015) 育林投資の新段階：TIMO および REIT の現状とその世界史的意義について. 餅田 治之・遠藤 日雄編著 “林業構造問題研究”, 日本林業調査会, 81-102.
- 餅田 治之・堀 靖人・遠藤 日雄・鹿又 秀聡・肱黒直次・藤掛 一郎・山本 伸幸 (2012a) 林業経済研究所座談会：新生産システム政策の展開と帰結（前編）. 林業経済, 64(7), 1-18.
- 餅田 治之・堀 靖人・遠藤 日雄・鹿又 秀聡・肱黒直次・藤掛 一郎・山本 伸幸 (2012b) 林業経済研究所座談会：新生産システム政策の展開と帰結（後編）. 林業経済, 64(8), 1-17.
- 水野 祥子 (2006) イギリス帝国からみる環境史：インド支配と森林保護. 岩波書店, 240pp.
- 村嶌 由直 (2008) 米・木材巨大企業（VIFPCs）の森林経営からの撤退. 鳥取環境大学紀要, (6), 7-19.
- 村嶌 由直 (2013) アメリカにおける森林投資：木材生産から資産運用追求へ. 林業経済, 66(5), 1-18.
- 村嶌 由直 (2016) TIMO・REIT と育林資本：餅田論文への疑問. 林業経済, 69(3), 17-26.
- 大塚 生美 (2008) 宮城県における合板用国産原木安定供給体制. 森林誌研究, 7, 94-100.
- 大塚 生美 (2010) 商社・民間原木市場の参入から見えてくること. 森林誌研究, 12, 82-91.
- 大塚 生美 (2016a) 森林施業規制と住民投票制度, 林業税に関する研究：アメリカ・オレゴン州を事例として. 環境科学, 45(3), 79-84.
- 大塚 生美 (2016b) 素材生産業者による林地集積と育林経営の展開：秋田県を事例として. 関東森林研究, 67(1), 33-36.
- 大塚 生美・餅田 治之 (2007) アメリカにおける新たな林地投資. 林業経済学会 2007 年秋季大会報告要旨, <http://www.jfes.org/kenkyukai/abstract/A-2.pdf>.
- 大塚 生美・立花 敏・餅田 治之 (2008) アメリカ合衆国における林地投資の新たな動向と育林経営. 林業経済研究, 54(2), 41-50.
- 林野庁 (2012) 木材加工・流通体制の改革. “平成 23 年度森林・林業白書”, 155-157. (http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/23hakusyo_h/all/a56.html.)
- 林野庁 (2016) 資料IV -29 プレカット工場数及びプレカット率の推移（エクセルデータ）. 平成 27 年度森林・林業白書.
- 酒井 明香・栃木 幸広 (2016) 木材生産とバイオマス集荷の効率化を目指したハーベスタ・グラップルシステムの生産性：北海道 C 林業（株）の取り組み. 森林利用学会, 31(1), 13-19.
- 志賀 和人 (2013) 現代日本の森林管理と制度・政策研究：林野行政における経路依存性と森林経営に関する比較研究. 林業経済研究, 59(1), 3-14.
- 志賀 和人 (2016) 森林所有と林業経営体. 志賀 和人編著 “森林管理制度論”, 日本林業調査会, 109-150.
- 菅野 友之 (2016) 相続税増税が今後の森林経営に与える影響：平成 27 年度相続税増税が今後の森林経営や事業継承に与える影響に関する研究から. 山林, 1590, 大日本山林会, 20-27.
- Talbert, C. (2004) FAO, Global Forest Resources Assessment 2000, Forest management Division, Capter3Forest Plantation, 23-38.
- 多田 忠義 (2012) 東北地方における合板向け国産材供給体制の実態. 林業経済研究, 58(1), 68-77.
- 浦川 邦夫 (2016) 経済成長には一極集中の解消を. エコノミスト 2016 年 5 月 24 日号, 54-55.
- 山田 壽夫 (2012) 林業経済研究所座談会「新生産システム政策の展開と帰結」を読んで. 林業経済, 65(1), 25-32.

Diverse aspects of the forestry management reorganization — Suggestion for forestry business —

Ikumi OTSUKA¹⁾, Yasuto HORI²⁾, Shigeki YAMADA³⁾, Seiji IWANAGA³⁾,
Tomomasa AMANO¹⁾, Takaaki KOMAKI¹⁾ and Haruyuki MOCHIDA⁴⁾

Abstract

Downturns in Japanese timber prices are currently discouraging the participation of Japan's forest owners in management practices, to the extent that timberlands are being sold and reforestation and renewal projects are being abandoned. In contrast, some corporate entities that actively require a timber supply are engaging in, and even expanding, forest management investment; long-term forest management are also being established. Thus, Japan's approach to forest management is undergoing reorganization.

In 2008, we had an opportunity to discuss with two major financial institutions about the possibility of the forest trust in Japan. This study aims to clarify the factors regarding main difficulties of the forestry business through the forest trust indicated by major financial institutions. The obstacles that these institutions faced included uncertainty in securing cash flow for forestry projects, a potential shortage of cooperating experts and financial institutions, and instability in the physical status of and rights to the forest properties. In the context of these issues, we describe the conditions affecting the commodification of the forest industry, which has allowed the formation of forestry business active in Japan today.

Key words: forestry business, timberland accumulation, timberland fluidity, forestry management organization, forest policy, forest trust, forest management

Received 8 December 2017, Accepted 11 May 2018

1) Tohoku Research Center, Forest and Forestry Products Research Institute (FFPRI)

2) Principal Research Director, FFPRI

3) Department of Forest Policy and Economics, FFPRI

4) Forest Economic Research Institute (FERI)

* Tohoku Research Center, FFPRI, 92-25 Nabeyashiki, Shimokuriyagawa, Morioka, Iwate, 020-0123 JAPAN; e-mail: iotsuka@ffpri.affrc.go.jp

論文 (Original article)

2011 年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの野生フキ (*Petasites japonicus*) の葉柄への移行清野 嘉之^{1)*}、赤間 亮夫²⁾、岩谷 宗彦³⁾、由田 幸雄³⁾

要旨

2011 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所事故以降、高レベルの放射性セシウム ($^{134+137}\text{Cs}$) が検出された 10 種以上の日本の野生山菜に出荷制限が課されている (2017 年 7 月 31 日)。しかし、環境から野生山菜への放射性セシウムの移行やそれに影響を及ぼす要因を調べた研究はほとんどない。2016 年 6 月に福島県 4 町村の 100 地点で多年生草本のフキ (*Petasites japonicus*) の野生個体から葉柄を採取した。リター中の ^{137}Cs 量や深さ 5cm までの土壌 ^{137}Cs 量はともにフキ葉柄 ^{137}Cs 濃度 ($P < 0.001$) や空間線量率 (ADR, $P < 0.01$) と有意な関係があった。ADR とフキの葉柄 ^{137}Cs 濃度の関係を回帰分析し、ADR 値が広範囲に互る 28 地点で 2016 年 4 月に採取した葉柄データで検証した。6 月と 4 月の間で回帰式の傾きに有意差はなかった ($P = 0.494$) が、Y 切片は有意に異なった ($P = 0.0002$)。同じ ADR のときの 6 月の ^{137}Cs 濃度は 4 月の約 5 倍で、4 月と 6 月の間に ^{137}Cs 濃度が上昇したことを示唆した。葉柄の含水量と $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比にもとづいて、2016 年 6 月の葉柄生重当たりの $^{134+137}\text{Cs}$ 濃度の 95% 予測区間を求めたところ、予測区間は予測値の約 1/8 ~ 8 倍の間にあった。 ^{137}Cs 濃度の季節変化の幅が大きいことから、フキの ^{137}Cs 濃度の時間的変化についてさらなる研究が必要と考えられる。

キーワード：空間線量率、蕨、山菜、放射性セシウムの沈着、季節変化、出荷制限、食品の基準値

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故は、山菜にも深刻な放射性セシウム汚染をもたらした。市場に流通させる山菜をターゲットとする対策のひとつに、市町村単位で設けられる出荷制限がある。放射性セシウム濃度が食品の基準値を超え、出荷を制限されている野生山菜が 2017 年 7 月 31 日現在、10 数種ある (林野庁 2017)。野生山菜は採取地が広域に散在することから、出荷制限解除の方法も広域を単位とする必要がある。しかし、採取地における放射性セシウムの移行状況のバラツキや経年的トレンド (田上・内田 2015, 清野・赤間 2017a, 2018)、移行を制御する要因についての調査例が少なく、出荷制限解除の準備に利用できる情報は限られている。2015 年に野生山菜で初めて出た出荷制限の解除例 (厚生労働省 2015a, b) では 3 ~ 4 年の継続調査を複数か所で行って濃度のトレンドが下がる方向にあることを示し、かつ、調査対象地域全体で濃度が高そうなところを含めて 60 あまりの地点で検体を取って、全て基準値未満であることを示している。これまでの調査から、山菜への放射性セシウムの移行は山菜の種類によって異なる場合や類似する場合があることが予想されている (Kiyono and Akama 2013, 2015)。主要な山菜について順次情報を収集することによ

り、野生山菜の検体採取の負担を軽減化する手法の提案のための基礎的データが得られると考えられる。著者らはゼンマイ (*Osmunda japonica*) について、郡山市を対象に 131 か所の生育地で葉を採取し、放射性セシウムの沈着量やリターなどの環境条件と放射性セシウムの葉への移行程度の間に関連があること、空間線量率が同じでも葉の ^{137}Cs 濃度が最大 100 倍違うなど大きなバラツキがあることを明らかにした (清野ら 2016)。

本研究ではフキ (*Petasites japonicus*) を取り上げた。フキはユーラシア大陸東部の亜熱帯から亜寒帯までの広い範囲に天然分布する落葉性多年草 (Fig. 1) で、種子と地下茎で繁殖し、群生する性質がある。春と秋の年 2 回、出葉が盛んになる (清野・赤間 2015)。日本の主要な山菜の一つで、葉を食用にし、おもに葉柄が使われる。施設栽培ではフェノロジ (生物季節) を利用した春化处理や冬季加温により通年栽培も行われる。野生品もよく利用される (農林水産省 2016)。利用期間が春から秋までと他の山菜より長期間に及び、放射性セシウム濃度の評価において他種からの類推が難しい点があることや、生活史、放射性セシウムやカリウム 40 (^{40}K) の現存量、濃度の季節的・経年的変化についての基礎的研究 (田上・内田 2015, 清野・赤間 2015, 2017b, 2018) が比較的事実であることが、

原稿受付：平成 29 年 8 月 1 日 原稿受理：平成 30 年 7 月 12 日

1) 森林総合研究所 植物生態研究領域

2) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

3) 日本特用林産振興会

* 森林総合研究所 植物生態研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1



Fig. 1. フキの地上部の1年（常陸大宮市の暖温帯栽培地の例）

春の開花後から冬の霜雪期まで、葉を株（ラメット）の先端に束生する。暖温帯では葉の寿命が1～3ヶ月と短い（清野・赤間 2015）。ラメットの寿命は発生から花蕾枯死後しばらくの間までの、長くて数年と考えられる。

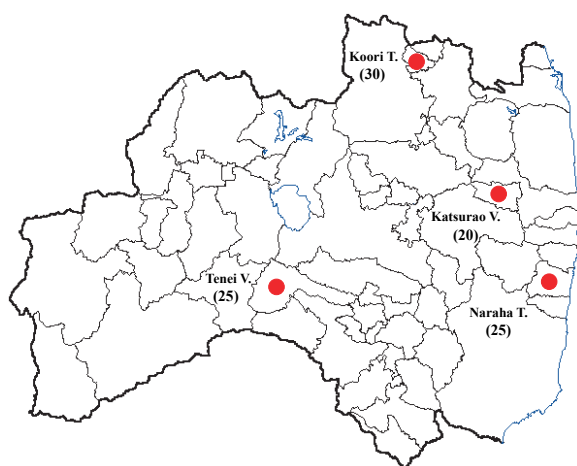


Fig. 2. 検体の採取地

町村名の下に数字は調査地点数。1 調査地点からフキの葉柄検体 1 つを採取した。

フキを取り上げる理由である。本研究では、フキが出荷制限を受けている福島県 4 町村から 100 か所の生育地を選んでフキの葉柄を採取し、放射性セシウムの沈着量や地形など環境から山菜への放射性セシウムの移行と関係する条件を考慮しつつ、フキ葉柄の放射性セシウム濃度とそのバラツキ、それらに影響を及ぼす条件を明らかにすることとした。

2. 材料と方法

2.1 検体の採取

野生フキの出荷が制限されている福島県桑折町、天栄村、葛尾村、楡葉町（福島県 2017）で検体を採取した（Fig. 2）。フキの葉の放射性セシウム濃度は季節変化する

（清野・赤間 2015, 2017b）。場所、年度にもよるが 7 月以降は濃度が著しく高くなる場合がある（清野・赤間 2015, 2017b）ことから、2016 年 6 月 6 日～29 日に検体を採取した。なお、葉柄の含水率もわずかではあるが季節変化した、春～夏に高く、秋～冬は低い（92～94% 常陸大宮市、91～94% つくば市、清野・赤間 未発表）。検体を採取した 6 月は、一年を通じて含水率が比較的高い時期に当たる。採取地点が調査地域全体にわたるよう、フキの群生地を 100 か所、さまざまな場所を選び（桑折町国有林 20 か所、民地 10 か所、天栄村国有林 15 か所、民地 10 か所、葛尾村国有林 10 か所、民地 10 か所、楡葉町国有林 15 か所、民地 10 か所）、フキの葉柄を採取した（以下、この葉柄 100 検体を Pj-100 と呼ぶ。検体を採取した群生地の場所を地点と呼ぶ）。採取地は暖温帯上部から冷温帯下部に位置する。土壌母材は堆積岩類、火山岩類、花崗岩類、変成岩類などであった（産業技術総合研究所地質調査総合センター 2015）。採取地では採取地点の位置（GPS 使用）、地形（斜面上部、中部、下部）、斜面傾斜角（クリノメータ使用）、上木の被覆（疎開地、林縁、林内を目視判定）、空間線量率（地上高 1 m と 0.1 m の $\mu\text{Sv h}^{-1}$ 。CdTe 半導体検出器（株式会社テクノエーピー TA100U, 測定範囲：0.01 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ～ 10 mSv h^{-1} , http://www.techno-ap.com/seihin_TA100.html）あるいはシンチレーションサーベイメータ（日立アロカメディカル株式会社 TCS-172B, 測定範囲：バックグラウンドレベル～30 $\mu\text{Sv h}^{-1}$, www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products.../catalog_survey_J_160308.pdf）を使用）を計測した。また、フキの生育地の全景と、株元のリターの被覆状態が分かるもの各 1 枚の写真をモノサシとともに撮った。後者の画像を目視して「土地面積に占める、鉍質土壌や礫、コケ植物が被覆していない土地面積の割合」、「土地面積に占める、鉍質土壌や礫、コケ植物、陽性草本が被覆していない土地面積の割合」を計測し、それぞれリター量の指標 A、指標 B とした。1 地点当たりのフキ葉柄の採取量は 10 数本以上、生重でおよそ 200 g 以上とした。採取したフキ葉柄の長さ（最短長、最長長, m）を記録した。

フキ葉柄を採取した 5 地点に 1 つの割合でリターと土壌の検体を各 1 点採取した。フキ株のわきでリター（落葉落枝など）の検体を一辺 0.25 m の正方形枠で 1 点ずつ採取した（計 20 地点）。また、リターを採取した正方形枠内で、土壌の検体を 100 cc 採土円筒（地表面積 0.002 m^2 、深さ 0.05 m）で 1 点ずつ採取した（計 20 地点）。リターと土壌採取地ではフキの濃度の時間的変化を調べられるよう、杭を打って土地を標識した。

採取した検体は乾かないよう採取地点ごとに標識したビニール袋に入れて密封し、全体を梱包して冷蔵条件（0～10℃）で速やかに検体分析者に送付した。

2.2 検体の分析

検体の放射性セシウム濃度の計測は、日鉄住金環境

株式会社分析ソリューション事業本部で行った。フキは水道水で軽く洗って土などの汚れを落としたのち、生のまま U-8 容器に詰めた。リターは細かく裁断し、土壌は石や根を除いて細かく碎き、全量重の測定後、中身がまんべんなく混ざるようにして 100 mL を U-8 容器に入れた。いずれの検体も別に一部を取って含水率を測定した (110 °C、12 時間)。同軸型ゲルマニウム半導体検出器 (キャンベラ社 GC-2520, 測定可能エネルギー範囲: 約 40 keV ~ 10 MeV, http://www.canberra.com/jp/products/detector_germanium.asp) を用いたガンマ線スペクトロメトリにより検体のセシウム 134 (^{134}Cs)、セシウム 137 (^{137}Cs)、 ^{40}K の量を計測し、計測誤差、検出下限値とともに Bq dry-kg^{-1} の値を含水率 0% で算出した。計測の条件として、① ^{137}Cs の計測値は相対誤差 10% 以下、② ^{134}Cs の計測値は相対誤差 10% 超で良いが、検出限界 (計測値の標準偏差 SD の 3 倍, 3σ) 以上、③①②の条件を満たさなくても計測時間は 12 時間を上限として打ち切り、④ ^{40}K は ^{137}Cs や ^{134}Cs の計測を打ち切ったときの値を記載することとした。

2.3 データの解析

放射性物質濃度が検出下限値以下となった場合は、検出下限値で代用した。目視計測したリター指標 A (%)、指標 B (%) は一辺 0.25 m の正方形枠により実測したリター量と有意な相関関係 (指標 A: $P = 0.048$, $r = 0.45$, $n = 20$, 指標 B: $P = 0.002$, $r = 0.65$, $n = 20$) があり、目視によるリター量推定の手法は有効であった。一般に、種子サイズの小さい植物は、リターが多いと乾燥で稚苗が枯れ易く (Jensen and Gutekunst 2003)、陽性草本は概して種子サイズが小さいのでリターの少ない場所で良く生存する。陽性草本を通したリター評価を加味した指標 B の方が正確であるが、目視者には稚苗の種同定力が求められる。この条件がいつも適うとは限らないので、次の重回帰式のパラメータには指標 A を用いた。山菜への放射性セシウム移行に影響を与える可能性のある 7 条件 (平均葉柄重 (g)、斜面位置 (ダミー変数として上部に 1、中部や平坦地に 2、下部に 3 を与えた)、斜面傾斜角 (°)、上木の被覆 (ダミー変数として疎開地に 1、林縁に 2、林内に 3 を与えた)、リター指標 A、空間線量率 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)、葉柄の ^{40}K 濃度 (Bq dry-kg^{-1}) の相関を調べた。斜面傾斜角とリター指標 A との間に負の相関 ($r = -0.4020$) があったことから、斜面傾斜角を外して 6 条件を説明変数、 ^{137}Cs 濃度を目的変数に、BIC (Schwarz 1978) を基準に変数減増法で変数を選び、重回帰式を求めた。

2.4 検証調査における検体の採取と分析

立地環境条件や汚染の程度に応じた放射性セシウムの移行の状況に関して、Pj-100 の結果を検証するため、同年の 6 月と葉柄濃度が大きくは変わらない (清野・赤間 2015) と考えられる 2016 年 4 月 2 日～5 月 1 日に福島県

内の民地と福島森林管理署、磐城森林管理署国有林、茨城県内の民地と茨城森林管理署国有林の計 28 地点で採取したフキの葉柄 (一地点当たりの生重 0.55 ~ 162 g) (以下、この葉柄 28 検体を Pj-28 と呼ぶ) のデータを利用した。Pj-28 の生育地は暖温帯上部から冷温帯に位置する。土壌母材は花崗岩類、堆積岩類、未固結の堆積物、変成岩類であった (産業技術総合研究所地質調査総合センター 2015)。Pj-28 の生育地の他の環境条件は Pj-100 の調査と同様の方法で計測、記録した。また、Pj-28 のうち、磐城森林管理署管内国有林の 2 地点では 7 月にも葉柄を採取して濃度を調べた。空間線量率はシンチレーションサーベイメータ (日立アロカメディカル株式会社 TCS-172B) で計測した。検体は森林総合研究所において、熱風乾燥器で 75°C、48 時間以上の条件で乾燥 (乾燥後の含水率約 4%) させてから、U-8 容器または 0.7L マリネリ容器に入れ、同軸型ゲルマニウム半導体検出器 (セイコー・イーザーアンドジー株式会社 GEM40P4-76, 測定可能エネルギー範囲: 3 keV ~ 10 MeV, <http://www.sii.co.jp/jp/segg/products/germanium-semiconductor-detector/284/>) を用いたガンマ線スペクトロメトリにより ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K の量を計測し、含水率 0% のときの濃度に換算した。

Pj-100 について求めた空間線量率と葉柄 ^{137}Cs 濃度の関係の回帰式を、Pj-28 についても求め、値を対数変換したうえで共分散分析を行って、Pj-100 と Pj-28 の回帰式の傾きと Y 切片を比較した。

本研究では、放射性セシウム濃度を 2016 年 9 月 1 日を基準日に減衰補正した。統計解析に R3.3.1 (R Development Core Team 2011) を使用した。空間線量率や ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度を異なる機器で測定している場合があるが、測定機器はいずれも定期的な校正を受けており、測定値は信頼できる。ちなみに検体を生のまま、あるいは乾燥器で乾燥させてから測定したときの放射性セシウム濃度に有意差はなかった (対応のある 2 組の平均値の差の t 検定, $P = 0.970$, $n = 6$, 濃度範囲 5 ~ 31000 Bq dry-kg^{-1})。

3. 結果

3.1 フキの生育地

Pj-100 の生育地の地形は、斜面上部が 2 地点、斜面中部ないし平坦地が 57 地点、斜面下部が 41 地点で、斜面中・下部が 98% を占めた。斜面傾斜角は 0 ~ 65 度とさまざまであった。疎開地は 2 地点 (いずれも最も近い高木の樹冠縁から 3 m 離れた場所) と少なく、林縁が 76 地点、林内が 22 地点であった。このうち路肩や石垣、側溝わきといった適度に日当たりが良く、よく草刈りが行われる場所に生育するものが計 66 地点、一次林におけるフキの典型的生育地の一つと考えられる斜面崩壊地は 2 地点であった。空間線量率は地上高 1 m では 0.05 ~ 12 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ (平均値と SD は $0.82 \pm 1.9 \mu\text{Sv h}^{-1}$)、地上高 0.1 m では 0.06 ~ 15 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ (同 $1.1 \pm 2.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$) であった。株元の

リターの被覆率は概して高く、指標 A の平均値と SD は $92 \pm 18\%$ 、指標 B は同 $56 \pm 27\%$ であった。また、20 地点で調べたリターの重量は $0.20 \sim 4.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ (平均値と SD は $1.0 \pm 1.0 \text{ Mg ha}^{-1}$) であった。

3.2 フキの葉柄、生育地のリター、土壌の ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K 、空間線量率

フキの葉柄の ^{134}Cs 濃度は $5 \sim 6500 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (平均値と SD は $412 \pm 1108 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ 、100 検体中 5 検体は検出下限値: $5 \sim 7 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ で代用)、 ^{137}Cs 濃度は $9 \sim 33000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $2100 \pm 5609 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$)、 ^{40}K 濃度は $920 \sim 4000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $2929 \pm 569 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$) であった。また、リターの ^{134}Cs 濃度は $36 \sim 19000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $1848 \pm 4379 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$)、 ^{137}Cs 濃度は $170 \sim 100000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $9737 \pm 22916 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$)、 ^{40}K 濃度は $130 \sim 550 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $300 \pm 115 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ 、20 検体中 13 検体は検出下限値: $130 \sim 550 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ で代用) であった。土壌の ^{134}Cs 濃度は $17 \sim 150000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $9026 \pm 33267 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$)、 ^{137}Cs 濃度は $77 \sim 760000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $46100 \pm 168518 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$)、 ^{40}K 濃度は $180 \sim 1100 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ (同 $630 \pm 274 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ 、20 検体中 6 検体は検出下限値: $360 \sim 910 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ で代用) であった。福島第一原発事故で放出された ^{134}Cs と ^{137}Cs は事故時の Bq 値はほぼ同量で、その後は半減期の違いにより ^{134}Cs が早く

失われている。2016 年 6 月の調査時点の Bq dry-kg^{-1} 値の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比の平均値と SD はフキ葉柄で 0.20 ± 0.03 (^{134}Cs が検出下限値未満の 5 検体は除いた)、リターで 0.19 ± 0.01 、土壌で 0.19 ± 0.01 であった。

フキの葉柄 ^{137}Cs 濃度はリター ($P = 0.0002$, $n = 20$)、土壌 ($P < 0.0001$, $n = 20$) (Eqs. 1, 2; Fig. 3a, b)、リター+土壌 ($P < 0.0001$, $n = 20$) の ^{137}Cs 沈着量とそれぞれ有意な関係があった。リターと土壌の ^{137}Cs 沈着量の間にも有意な関係 ($P = 0.0002$, $n = 20$) があり、両者をパラメータとする重回帰式は決定係数がより高くなった (Eq. 3)。

$$\text{Ln}(\text{CON } ^{137}\text{Cs-Pj-petiole-Jun}) = 0.8334 \text{Ln}(\text{DEP } ^{137}\text{Cs-litter-Jun}) + 5.1303 \quad (R^2 = 0.5757, P < 0.0002, n = 20) \quad (1)$$

$$\text{Ln}(\text{CON } ^{137}\text{Cs-Pj-petiole-Jun}) = 0.7160 \text{Ln}(\text{DEP } ^{137}\text{Cs-soil}_{0-5}\text{-Jun}) + 2.6166 \quad (R^2 = 0.5811, P < 0.0001, n = 20) \quad (2)$$

$$\text{Ln}(\text{CON } ^{137}\text{Cs-Pj-petiole-Jun}) = 0.4736 \text{Ln}(\text{DEP } ^{137}\text{Cs-litter-Jun}) + 0.4177 \text{Ln}(\text{DEP } ^{137}\text{Cs-soil}_{0-5}\text{-Jun}) + 3.5766 \quad (R^2 = 0.6661, P < 0.0001, n = 20) \quad (3)$$

ただし、 $\text{CON } ^{137}\text{Cs-Pj-petiole-Jun}$ は 2016 年 6 月におけるフキの葉柄 ^{137}Cs 濃度 (Bq dry-kg^{-1})、 $\text{DEP } ^{137}\text{Cs-litter-Jun}$ は 2016 年 6 月におけるリター ^{137}Cs 沈着量 (kBq m^{-2})、 $\text{DEP } ^{137}\text{Cs-soil}_{0-5}\text{-Jun}$ は 2016 年 6 月における深さ $0 \sim 5 \text{ cm}$ の土壌 ^{137}Cs 沈着量 (kBq m^{-2}) である。

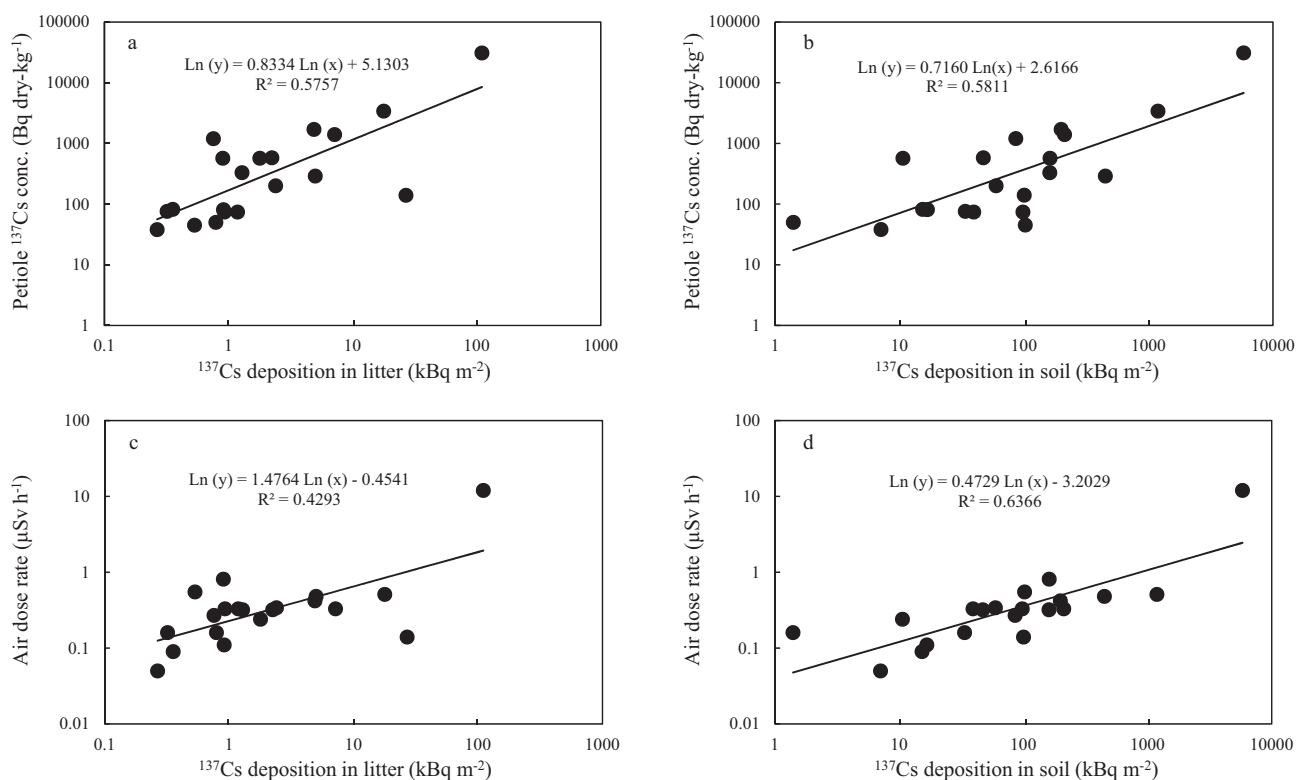


Fig. 3. リター、深さ $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土壌の ^{137}Cs 沈着量とフキの葉柄 ^{137}Cs 濃度、空間線量率の関係

a リター ^{137}Cs 沈着量と葉柄 ^{137}Cs 濃度, b 土壌 ^{137}Cs 沈着量と葉柄 ^{137}Cs 濃度, c リター ^{137}Cs 沈着量と空間線量率, d 土壌 ^{137}Cs 沈着量と空間線量率

空間線量率もリター ($P = 0.0017$, $n = 20$) や土壌 ($P < 0.0001$, $n = 20$) (Fig. 3c,d)、リター+土壌 ($P = 0.0001$, $n = 20$) の ^{137}Cs 沈着量と有意な正の相関関係を持った。深さ 0 ~ 5 cm の土壌にはリターの 2 ~ 192 (平均値と SD は 64 ± 57) 倍の ^{137}Cs があり、空間線量率との関係の決定係数はリター ($R^2 = 0.4293$) より土壌 ($R^2 = 0.6366$) の方が高かった (Fig. 3c, d)。リター+土壌 ($R^2 = 0.5714$) は両者の間にあった。

リター ^{40}K 濃度はフキ葉柄 ^{40}K 濃度より低く、リター / フキ葉柄 ^{40}K 濃度比の平均値と SD は 0.10 ± 0.04 ($n = 20$) であった。一方、リター ^{137}Cs 濃度はフキ葉柄 ^{137}Cs 濃度より高く、リター / フキ葉柄 ^{137}Cs 濃度比は同 17.4 ± 18.4 ($n = 20$) であった。リター / フキ葉柄 ^{40}K 濃度比よりリター / フキ葉柄 ^{137}Cs 濃度比が有意に大きかった (対応のある 2 組の平均値の差の t 検定, $P = 0.0002$, $n = 20$)。

3.3 フキの葉柄 ^{137}Cs 濃度と空間線量率の関係

重回帰分析の結果、葉柄 ^{137}Cs 濃度との関係が有意であったのは空間線量率 ($P < 0.0001$, $n = 100$) と葉柄 ^{40}K 濃度 ($P = 0.0016$, $n = 100$) であった。葉柄 ^{137}Cs 濃度は空間線量率と正の比例関係、葉柄 ^{40}K 濃度とは反比例に似た関係があった。葉のサイズ、生育地の地形、リターの多寡、上木との関係はほぼ無関係 ($P = 0.357 \sim 0.930$) であった。そこで、葉柄 ^{137}Cs 濃度を目的変数、空間線量率と葉柄 ^{40}K 濃度を説明変数とする式 (Eq. 4)、空間線量率だけを説明変数とする式 (Eq. 5) をそれぞれ作成した。また、葉柄 ^{40}K 濃度は現場では簡単には得られないので、空間線量率だけをパラメータとする Eq. 5 を、葉柄 ^{137}Cs 濃度を空間線量率で予測するモデルとした (Fig. 4a, 実線が回帰線)。

$$\begin{aligned} \ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs-Pj-petiole-Jun}) &= 1.284 \ln(\text{ADR}) - 1.480 \\ &\ln(\text{CON } ^{40}\text{K-Pj-petiole-Jun}) + 19.080 \quad (R^2 = 0.7347, P < 0.0001, n = 100) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \ln(\text{CON } ^{137}\text{Cs-Pj-petiole-Jun}) &= 1.3687 \ln(\text{ADR}) + 7.4005 \\ (R^2 &= 0.7017, P < 0.0001, n = 100) \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、ADR (air dose rate) は 2016 年 6 月における生育地の地上高 1 m の空間線量率 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)、CON $^{40}\text{K-Pj-petiole-Jun}$ は 2016 年 6 月における葉柄 ^{40}K 濃度 (Bq dry-kg^{-1}) である。これらのモデルは 2016 年 6 月における ADR が $0.05 \sim 12 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、葉柄 ^{40}K 濃度が $920 \sim 4000 \text{ Bq dry-kg}^{-1}$ の範囲に適用される。

Pj-28 について空間線量率と葉柄 ^{137}Cs 濃度との関係を求めた (Fig. 4a, 破線が回帰線) ところ、Pj-100 の場合と同様、有意な関係 ($R^2 = 0.8819$, $P < 0.0001$, $n = 28$) があつた。共分散分析の結果、Pj-100 と Pj-28 の区分と空間線量率との交互作用項は有意でなく ($P = 0.494$)、空間線量率と ^{137}Cs 濃度の関係の傾きは 4 月 (Pj-100, 1.2787) と 6 月 (Pj-28, 1.3687) の間で違いがあるとは言えなかった。一方、切片の違いは有意 ($P = 0.0002$; 空間線量率が 1 のとき Pj-

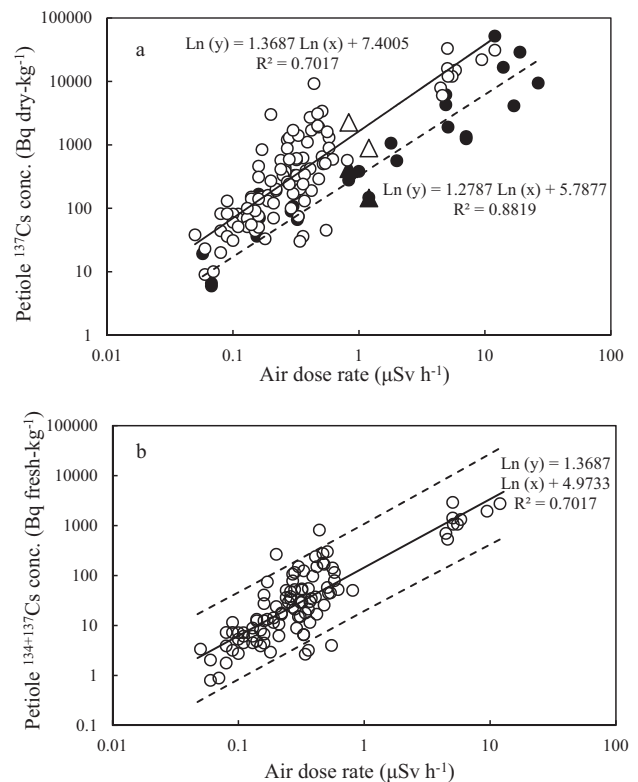


Fig. 4. 空間線量率とフキの葉柄 ^{137}Cs 濃度との関係

a 空間線量率とフキ葉柄の乾重当たり ^{137}Cs 濃度の関係

○, 福島県 4 町村 100 地点で 6 月採取, Pj-100。●, ▲, 福島県の他の場所と茨城県の 28 地点で 4 月採取, Pj-28。実線は Pj-100 の回帰線、破線は Pj-28 の回帰線。△, 福島県の 4 月採取の 2 地点 (▲) で 7 月再採取。

b 空間線量率とフキ葉柄の生重当たり $^{134+137}\text{Cs}$ 濃度の関係

Pj-100 を用いて作成。破線は 95% 予測区間。 ^{134}Cs は ^{137}Cs の 2 割の Bq 量 (Bq kg^{-1}) が存在していると仮定した。

100 が $1636.8 \mu\text{Sv h}^{-1}$, Pj-28 が $326.3 \mu\text{Sv h}^{-1}$) で、空間線量率から推定される葉柄の ^{137}Cs 濃度の値は 4 月と 6 月では異なった。同じ空間線量率のときの ^{137}Cs 濃度は Pj-28 と比べて Pj-100 は約 5 倍で、4 月から 6 月までの間に ^{137}Cs 濃度が上昇したことが示唆された。Pj-28 の 2 地点 (Fig. 4a, ▲) で 7 月に再採取した葉柄の ^{137}Cs 濃度 (Fig. 4a, △) は 4 月の 6.1 倍と 5.4 倍に上昇しており、Pj-28 と Pj-100 の濃度の約 5 倍の違いとほぼ符合した。

3.4 6 月のフキ葉柄の生重ベースの放射性セシウム濃度範囲の予測区間

Pj-100 の平均含水率の平均値と SD は $92.6 \pm 0.9\%$ ($n = 100$) であった。平均含水率と Bq dry-kg^{-1} 値の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比 (0.20) とを使い、フキの葉柄の生重ベースの $^{134+137}\text{Cs}$ 濃度を求めた (Fig. 4b)。空間線量率が $0.05 \sim 10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ のとき、濃度は、空間線量率から予測される値 (6 月の生の葉柄放射性セシウム濃度 = $1.3687 \ln(\text{ADR}) + 4.9733$,

$R^2 = 0.7017$, $P < 0.0001$, $n = 100$) の約 1/8 ～ 8 倍の範囲 (95% 予測区間) に収まる可能性が非常に高い。

4. 考察

4.1 野生フキの生育地の特徴

フキは林縁の路肩や側溝わきなど、よく草刈りされる、適度に日当たりの良い湿った場所に多かった。フキは地上部の刈払いに比較的耐性があるので、草刈りなどが定期的に行われ、背がフキより高くなる草木の背が刈り下げられることがフキの生存に有利に働いている (清野・赤間 2017a)。半栽培に当たる自生地管理 (阿部 2004) では雑草対策が重要で、春の収穫後の刈払いが推奨されている。

このような場所に生育していた Pj-100 のうち、 $^{134+137}\text{Cs}$ 濃度が出荷制限の基準値 ($100 \text{ Bq fresh-kg}^{-1}$) を超えると推定されるものが、天栄村以外の 3 町村で計 23 例あり、これらの町村では依然として出荷制限が必要な状況にあることが確かめられた。

4.2 フキの葉柄 ^{137}Cs 濃度と関係する環境条件

空間線量率はフキの葉柄 ^{137}Cs 濃度と有意な関係を持った (Fig. 4)。事故後の空間線量率と生物体の放射性セシウム濃度との有意な関係は、他の生物種や部位でも認められており、観測値に対する予測値のバラツキの範囲はスギ雄花 (Akama et al. 2013) やゼンマイ葉 (清野ら 2016)、カワラタケ子実体 (根田 2014) では 1/5 ～ 5 倍以下であった。これらと比較すると、今回の 6 月のフキの葉柄では観測値の約 1/8 ～ 8 倍の範囲に予測値が分布しており、予測の精度 (precision) は必ずしも高いものではなかった。

リターと土壌は、その ^{137}Cs 沈着量がフキの葉柄 ^{137}Cs 濃度と有意な関係にあったことから、フキの ^{137}Cs の供給源になっていると考えられる。関係式の決定係数はリター ($R^2 = 0.5757$) と土壌 ($R^2 = 0.5811$) でほぼ同じであり、両者をパラメータとする重回帰式では決定係数が高まる ($R^2 = 0.6661$) ので、リターと土壌はそれぞれに、また相補的にフキの葉柄 ^{137}Cs 濃度に影響を与えていると考えられる。

ゼンマイ (清野ら 2016) では、葉 ^{137}Cs 濃度はリター ^{137}Cs 沈着量と有意な正の相関関係があり ($r = 0.4599$, $P = 0.0224$)、土壌 ^{137}Cs 沈着量とは有意な関係が認められなかった ($P = 0.7823$)。リターと土壌の ^{137}Cs 沈着量の関係は明瞭でなかった ($r = 0.0904$, $P = 0.7046$)。また、コシアブラ (赤間・清野 2016) では、新芽 ^{137}Cs 濃度はリター ^{137}Cs 沈着量と比較的高い相関関係 ($r = 0.9069$, $P < 0.0001$) があり、土壌 ^{137}Cs 沈着量とはそれほどでもなく ($r = 0.5787$, $P = 0.0487$)、リターと土壌の ^{137}Cs 沈着量の関係は明瞭でなかった ($r = 0.2700$, $P = 0.3972$)。このようにゼンマイの葉やコシアブラの新芽ではリターが ^{137}Cs の主要な供給源と考えられるのに対して、フキでは、土壌から移行する ^{137}Cs も少なくないようである。なお、事故時に飛散した ^{137}Cs は、時間とともにリターから土壌への移行

が進んでいる。上記のゼンマイとコシアブラは事故から 3 ～ 4 年後 (ゼンマイ 2015 年 7 月、コシアブラ 2014 年 4 ～ 6 月)、本研究のフキは 5 年後に検体を採取しており、ゼンマイ、コシアブラとフキとで土壌の ^{137}Cs との関係が異なることに ^{137}Cs の土壌への移行程度の違いが影響した可能性もある。

フキは落葉性多年草で、土地面積当たりの地上部と地下部をあわせたバイオマスを一年単位で周期的に変える (Fig. 1)。春から初夏にかけて最大になったバイオマスはその 9 割以上が夏までに失われる (清野・赤間 2017b)。成長と枯死を通じてバイオマスが全て置き換わるのに要する時間は、代謝回転率 (八杉ら 1996) の逆数である平均値 / 変化量で表せることから、それを $((\text{最大値} + \text{最小値}) / 2) / (\text{最大値} - \text{最小値})$ により近似し、清野・赤間 (2017b) のフキ群落バイオマスの毎月値について計算すると 0.5 ～ 0.6 年であった。フキはバイオマスを年 2 回置き換えている計算になる。同じ式で計算した、同じ落葉性多年草のゼンマイの代謝回転率の逆数は 1.4、5.7 年 (2 例, 清野ら 2018) であるので、ゼンマイと比べて、フキは物質代謝の速い落葉性多年草といえる。枯れて間もないフキの遺体中の ^{137}Cs はフキに吸収され易い形態で維持されていると考えられることから、地下部を含め枯れるフキが供給した ^{137}Cs を、フキの根が速やかに吸収しているとも考えられる。

フキに吸収された ^{137}Cs の挙動は ^{40}K の挙動と同じではなかった。カリウムとセシウムはともにアルカリ金属で植物が根から吸収するときに競合するが、吸収後の挙動は違う可能性がある (小林 2013)。茨城県の栽培フキで枯死直後の葉柄と生きている葉柄を比べる (清野・赤間 未発表) と、枯死葉柄 / 生葉柄 ^{40}K 濃度比の平均値と SD は 0.84 ± 0.17 ($n = 4$)、枯死葉柄 / 生葉柄 ^{137}Cs 濃度比は同 2.0 ± 0.70 ($n = 4$) で違いは有意 (対応のある 2 組の平均値の差の t 検定 $P = 0.030$, $n = 4$) であった。カリウムと比べ、セシウムは枯れる葉柄にとどまり易いようである。これは、Pj-100 中の 20 地点で調べたリター / フキ葉柄 ^{40}K 濃度比より、リター / フキ葉柄 ^{137}Cs 濃度比が有意に大きく、 ^{40}K と比べて ^{137}Cs がリターにとどまり易い傾向があることと符合する。土壌表層の ^{137}Cs が植物によって経根吸収されて葉に至り、これが再び溶脱やリターとともに林床に返るという循環 (日本土壤肥料学会土壌・農作物等への原発事故影響 WG 2011) を通して、植物に吸収され易い形態の ^{137}Cs がリターの多い場所でしだいに増え、リターの少ない場所ではしだいに減って、存在量の空間分布のバラツキが拡大していくことも考えられる。

4.3 フキの葉柄 ^{137}Cs 濃度の季節変化

Pj-28 と Pj-100 を比較すると、同じ空間線量率のときの ^{137}Cs 濃度が後者は約 5 倍高かった。考えられる一つの理由は、濃度の季節変化である。Pj-28 の採取日が 4 月 2 日 ～ 5 月 1 日であるのに対して、Pj-100 の採取日は 6

月6日～29日と2か月遅い。フキの葉柄の ^{137}Cs 濃度は季節的に変化し、大きく上昇することがある(清野・赤間 2015)。清野・赤間(2015)の例では4～6月に濃度の著しい上昇は見られなかった。このため、本研究では6月のPj-100の濃度を4月のデータであるPj-28で検証することを計画したが、実際には本研究の調査地で6月には濃度が高くなっていたようである。Pj-28中の2地点(Fig. 4a, ▲)で7月に採取した葉柄の ^{137}Cs 濃度(Fig. 4a, Δ)は4月以降の濃度上昇を裏付けた。清野・赤間(2015)は顕著な夏の濃度上昇が上木のある調査区で起きていること、その調査区では空間線量率には有意な違いはないが、上木のない調査区と比べ、地表に堆積したリターに約3倍の放射性セシウムが含まれていたことから、上木からの脱落物に由来するリターや表層土壌の腐植から供給された ^{137}Cs がフキに移行した可能性を推察している。夏の ^{137}Cs 濃度上昇はイネでも観察されている。食品の基準値を超える玄米が収穫された福島市の谷地田では、玄米中の放射性セシウムのうち、盛夏に吸収した量の割合が高く、葉も盛夏に展開した葉で高濃度の放射性セシウムが検出された(根本 2012)。その理由として、周囲の山林の落葉や水田の土壌有機物の分解が夏に進んだ結果、イネへの放射性セシウム供給量が増えた可能性が考えられている(根本 2012)。

Pj-100は全てが上木の影響のある場所で生育しており、上層木からの脱落物に由来する ^{137}Cs が原因となって季節的な濃度上昇が起きた可能性を否定できない。フキのバイオマス中の ^{137}Cs 量の年変化速度はバイオマスの年変化速度より小さく(清野・赤間 2017b)、枯れる組織からの回収(ひき戻し)や根からの新たな吸収を通して、フキの体内に ^{137}Cs がバイオマスよりも効率的に保持される仕組みがあるようである。また、上述の通り、フキはバイオマスが年2回弱入れ替わり、物質代謝が速い。環境中の放射性セシウム供給の変化が植物体濃度に反映され易いことから、フキによる ^{137}Cs の回収や吸収が進むときに、上木に由来する落葉や腐植から供給される ^{137}Cs もフキが取り込み、葉柄の ^{137}Cs 濃度が上昇したことが考えられる。

清野・赤間(2015)と比べ、本研究で濃度上昇の時期が早まった理由としては、年による気象条件の違いが考えられる。清野・赤間(2015)で2013年と2014年に濃度上昇を認めた常陸大宮市の調査区の最寄りの常陸大宮の気象観測点(気象庁 2017)では、フキの発芽・成長が盛んになる2月から6月の気温が平年とあまり違わなかった(2～6月の平均気温の平年差の平均値とSDは2013年が $+0.2 \pm 1.2^\circ\text{C}$, $n=5$ 、2014年は $+0.3 \pm 0.7^\circ\text{C}$, $n=5$)。これに対して、本研究の4町村の調査地それぞれに最寄りの福島、白河、川内、広野の4気象観測点(気象庁 2017)では2016年の2月から6月の気温がどの月も平年より高く(同白河の $+1.5 \pm 0.4^\circ\text{C}$ ～広野の $+1.8 \pm 0.3^\circ\text{C}$, $n=5$)、発芽・成長期の高温傾向がフキの植物季節や土壌有機物分解の開始を早め、土壌からフキへの ^{137}Cs の移行を促進し

た(Burger and Lichtscheidl 2018)可能性がある。フキの葉の ^{137}Cs 濃度の季節変化のさらなる理解には、 ^{137}Cs の供給源の解明とともに、植物季節の年度間比較や、気候が異なる生育地間の比較が有益であろう。

5. 結論

野生山菜の情報収集のため、福島県の4つの町村で環境からフキの葉柄への放射性セシウムの移行とその要因を調べた。フキの ^{137}Cs 濃度は空間線量率と有意な関係があった。予測値のバラツキは大きく、同じ空間線量率のときの放射性セシウム濃度の予測値(95%予測区間)は観測値の約1/8～8倍の範囲に分布した。また、樹下で育つフキの ^{137}Cs 濃度が夏に大きく上昇している可能性を述べた。フキは山菜としての利用期間が春から秋までと長い特長があるので、フキの ^{137}Cs 濃度の時間的な変化の実態をさらに研究する必要がある。

謝 辞

林野庁関東森林管理局福島森林管理署、福島森林管理署白河支署、磐城森林管理署、茨城森林管理署、福島県農林水産部林業振興課、林業研究センター、川内村役場の各位には現地調査と検体採取において協力を頂いた。福島県伊達郡桑折町、岩瀬郡天栄村、双葉郡葛尾村、楡葉町、川内村、大熊町、茨城県常陸大宮市、つくば市の皆様には所有地、管理地での検体採取を許可して頂いた。国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所震災復興・放射性物質研究拠点の各位には検体の調整と放射性セシウムの測定をして頂いた。愛知県知多郡南知多町の石川勝則氏には栽培・収穫法をご教示頂いた。以上の皆様に、感謝の意を表する。本研究は日本特用林産振興会のきのこ原木等の放射性物質調査事業の一環として実施した。また、JSPS 科研費 JP15K07497 の助成を受けた。

引用文献

- 阿部 清(2004) 野ブキ・フキノトウ 株増殖法・露地栽培・自生地栽培・促成栽培・加工・新特産シリーズ, 農文協, 190pp.
- Akama, A., Kiyono, Y., Kanazashi, T. and Shichi, K. (2013) Survey of radioactive contamination of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) shoots and male flowers in Fukushima prefecture. *Japanese Journal of Forest Environment*, 55 (2), 105-111.
- 赤間 亮夫・清野 嘉之(2016) コシアブラの放射性セシウム汚染—汚染程度が異なる地域間の比較および季節変化—. 関東森林研究, 66(2), 225-228.
- Burger, A. and Lichtscheidl, I. (2018) Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation., *Science of the Total Environment*, 618, 1459-1485.

- 福島県 (2017) きのこと、山菜類のモニタリングと出荷制限品目・市町村について. 2017 年 9 月 11 日福島県林業振興課, <http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36055c/ringyo-monitoring.html>, (参照 2017-10-12).
- Jensen, K. and Gutekunst, K. (2003) Effects of litter on establishment of grassland plant species: the role of seed size and successional status. *Basic and Applied Ecology*, 4 (6), 579-587.
- 気象庁 (2017) 過去の気象データ・ダウンロード. 国土交通省気象庁, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, (参照 2017-10-30).
- Kiyono, Y. and Akama, A. (2013) Radioactive cesium contamination of edible wild plants after the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Japanese Journal of Forest Environment*, 55(2), 113-118.
- Kiyono, Y. and Akama, A. (2015) The amount of ^{137}Cs deposition and transfer factors of ^{137}Cs to wild edible-wild-plants after the accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Proceeding of the International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future*, Paruse Iizaka, Fukushima City, Japan, May 30–31 (Sat.–Sun.), 2015, 57-61.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2015) 栽培フキ (*Petasites japonicus*) の放射性セシウム汚染の季節変化. *日本森林学会誌*, 97(3), 158-164.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2017a) 山菜と放射性物質. *水利科学*, 355, 36-50.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2017b) 放射能汚染したフキ群落のバイオマスとそのカリウム 40・セシウム 137 量の季節変化. *関東森林研究*, 68(1), 71-72.
- 清野 嘉之・赤間 亮夫 (2018) 野生山菜の放射性セシウム濃度: 福島第一原発事故後の経年的トレンド. *関東森林研究*, 69, (印刷中).
- 清野 嘉之・小松 雅史・赤間 亮夫・松浦 俊也・広井 勝・岩谷 宗彦・二元 隆 (2016) 野生ゼンマイ 131 個体の葉の放射性セシウム濃度. 第 5 回環境放射能除染研究発表会要旨集, 一般社団法人環境放射能除染学会, 18.
- 清野 嘉之・小松 雅史・赤間 亮夫・松浦 俊也・広井 勝・岩谷 宗彦・二元 隆 (2018) 2011 年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの野生ゼンマイ (*Osmunda japonica*) の葉への移行. *森林総合研究所研究報告*, 17(3), 217-232.
- 小林 奈通子 (2013) 放射性セシウムを減らす! なぜカリウムで?—植物研究者の思考回路—. 第 4 回サイエンスカフェ「放射性セシウムを減らす! なぜカリウムで?」配布資料, 東京大学大学院農学生命科学研究科食の安全研究センター, http://www.frc.a.u-tokyo.ac.jp/information/news/130727_report.html, (参照 2017-11-06).
- 厚生労働省 (2015a) 原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限の設定及び解除 (原子力災害対策本部長指示), 平成 27 年 5 月 25 日 医薬食品局食品安全部, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000086680.html>, (参照 2016-10-03).
- 厚生労働省 (2015b) 原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限の解除 (原子力災害対策本部長指示), 平成 27 年 12 月 21 日 医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000107702.html>, (参照 2016-10-03).
- 根田 仁 (2014) きこの汚染と対策. *森林科学*, 72, 13-16.
- 根本 圭介 (2012) 放射性セシウムのイネへの移行 (第 2 報). 第二回放射能の農畜水産物等への影響についての研究報告会—東日本大震災に関する救援・復興に係る農学生命科学研究科の取組み—, 2012 年 2 月 18 日, 東京大学安田講堂, <http://www.a.u-tokyo.ac.jp/rpjt/event/20120218.html>, (参照 2017-10-08).
- 日本土壤肥料学会土壌・農作物等への原発事故影響 WG (2011) 森林生態系における放射性セシウム (Cs) の動態とキノコへの移行. 原発事故関連情報 (6), <http://jssspn.jp/info/nuclear/cs-2.html>, (参照 2017-11-06).
- 農林水産省 (2016) 特用林産物生産統計調査. 49: 山菜の生産量, II 品目別資料, 平成 26 年特用林産基礎資料, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokuyo_rinsan/, (参照 2016-10-03).
- R Development Core Team (2011) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- 林野庁 (2017) きこのこや野生山菜の出荷制限等の状況について. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/kinoko/syukkaseigen.html>, (参照 2017-07-28).
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (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/>.
- Schwarz, G. (1978) Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 6, 461-464.
- 田上 恵子・内田 慈夫 (2015) 山菜と果実の調理・加工による放射性セシウムおよびカリウムの除去割合について. 第 4 回京都大学原子炉実験所原子力安全基盤科学研究シンポジウム 福島の復興に向けての放射線対策に関するこれからの課題, 京都大学原子炉実験所原子力安全基盤科学研究プロジェクトシンポジウム報告書, 京都大学原子炉実験所 原子力安全基盤科学研究プロジェクト, 47-50, www.rii.kyoto-u.ac.jp/anzen_kiban/outcome/Symposium'15_Proceedings_JP.pdf, (参照 2017-10-08).
- 八杉 龍一・小関 治男・古谷 雅樹・日高 敏隆 (1996) 岩波生物学辞典第 4 版. 岩波書店, 2027 pp.

The transfer of radiocesium released in the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident to petioles of wild butterbur (*Petasites japonicus*)

Yoshiyuki KIYONO^{1)*}, Akio AKAMA²⁾, Munehiko IWAYA³⁾ and Yukio YOSHIDA³⁾

Abstract

Following the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident in March 2011, shipping restrictions were imposed on more than 10 Japanese edible wild-plant species (July 31, 2017) in which high levels of radiocesium ($^{134+137}\text{Cs}$) were detected. However, few studies have examined radiocesium transfer from the environment to edible wild plants and the factors that affect this transfer. We sampled the petioles of *fuki*, (wild butterbur: *Petasites japonicus*), an edible deciduous perennial, from 100 habitats in four municipalities in Fukushima Prefecture, Japan, in June 2016. The amounts of ^{137}Cs in litter and soil to a depth of 5 cm were each significantly associated with *fuki* petiole ^{137}Cs concentrations ($P < 0.001$) and with air dose rates (ADRs, $P < 0.01$). Regression analysis between ADRs and *fuki* petiole ^{137}Cs concentrations was performed and verified using a petiole dataset that was obtained in April 2016 from 28 habitats with a wide range of ADR values. The slopes of the regression equations for June and April were not significantly different ($P = 0.494$). However, their Y-intercepts were significantly different ($P = 0.0002$) and the June ^{137}Cs concentration was approximately five times that for April at the same ADR, suggesting an increase in ^{137}Cs concentrations between April and June. We determined the 95% prediction interval of $^{134+137}\text{Cs}$ concentration per fresh petiole weight for June 2016, based on petiole water content and $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ concentration ratio. The prediction interval of *fuki* petiole $^{134+137}\text{Cs}$ concentrations were distributed between about 1/8 and 8 times the predicted values. This dramatic seasonal variation in ^{137}Cs concentrations suggests that further examination of temporal shifts in *fuki* ^{137}Cs concentrations is required.

Key words: air dose rate, Japanese sweet-coltsfoot, edible wild plant, radiocesium deposition, seasonal change, shipping restrictions, standard concentration values for food

Received 1 August 2017, Accepted 12 July 2018

1) Department of Plant Ecology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI

3) Japan Special Forest Product Promotion Association

* Department of Plant Ecology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: kiono@ffpri.affrc.go.jp

研究資料 (Research record)

帰還困難区域で発生した森林火災が 樹木樹皮と表層土壌の放射性セシウムの蓄積に及ぼす影響

金子 真司^{1)*}、後藤 義明²⁾、田淵 隆一¹⁾、赤間 亮夫¹⁾、池田 重人¹⁾、
篠宮 佳樹¹⁾、今村 直広¹⁾

要旨

福島県十万山(浪江町・双葉町)の森林火災(2017年4月29日～5月10日)の延焼地において、火災直後に山頂部のアカマツ林と谷部のスギ林で樹木と土壌の試料を採取して放射性セシウム(RCs: $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$)濃度を測定して火災の影響を調べた。樹木については、同一木の幹の燃焼側と非燃焼側から樹皮を採取した。土壌は燃焼地と隣接する非燃焼地から堆積有機物層と表層土壌を採取した。アカマツでは燃焼樹皮が非燃焼樹皮に比べて現存量とRCs濃度とRCs蓄積量が小さかった個体が存在した。また、アカマツ林、スギ林で調査したすべての堆積有機物層のRCs濃度が燃焼箇所と比べて非燃焼箇所で高かった。

キーワード: 放射性セシウム、森林火災、樹木樹皮、堆積有機物層、表層土壌、アカマツ、スギ

1. はじめに

チェルノブイリ原発事故では、森林生態系にもたらされた放射性核種が森林火災によって再拡散することが懸念された(Evangeliou et al. 2013, 2014, 2015)。このため、人工的に森林火災を発生させて放射性物質の拡散が調査されている(Kashparov et al. 2000, Yoschenko et al. 2006a, b)。原発事故から29年後の2015年4月と8月にチェルノブイリ原発近くの森林や草地で大規模な火災が発生した。この際には放射性セシウム137(^{137}Cs)や放射性ストロンチウム90(^{90}Sr)をはじめ様々な放射性核種がヨーロッパ各地に飛散したと推定されている(Evangeliou et al. 2016)。2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故では、東日本が広範囲に放射性セシウム(RCs: $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$)によって汚染され、特に原子力発電所の北西方向の森林(428 km²)では1000 kBq/m²以上のRCs沈着があったと推定されている(Hashimoto et al. 2012)。わが国はチェルノブイリ原発周辺に比べて湿潤であることから、森林火災の発生原因はほとんどが人為的なものである。また、放射性物質の沈着量が多い帰還困難区域では人の立ち入りが制限されており、その他の区域でも放射性物質の汚染程度が大きい森林では林業等の森林利用が少なくなっている。このため森林火災は起こりにくい状況にある。そのような中、2017年4月29日に福島県浪江町と双葉町の境界付近に位置する十万山の森林で火災が発生した。火災は10日間以上にわたり、延焼面積は75 haに及んだ。この火災は、我が国の森林火災の中では比較的規模が大きかったことや、発生個所が

帰還困難区域内であったことから、火災によって放射性物質が拡散するのではないかと注目を集めた(福島民報社 2017)。著者らは火災が鎮火した直後の調査団に加わり現場を訪れて、延焼状況を確認するとともに、現地で燃焼箇所と非燃焼箇所から試料を採取して燃焼の影響について検討を行った。ここではその結果を報告する。

2. 調査

2.1 十万山および森林火災の概要

十万山は阿武隈山地の最東部に位置し、浪江町と双葉町にまたがる標高448 mの山である(奥田 1999)。東側は双葉断層を境に低地が広がり、その先は太平洋である。山塊全体の地質は花崗岩であり、植生は尾根付近を中心に広葉樹を交えたアカマツ林が広がり、斜面下部から谷付近の多くはスギ人工林である。東京電力福島第一原子力発電所からは西北西に10.7 kmに位置する(Fig. 1)。第2次の航空機モニタリングによればRCs沈着量は、1000–3000 kBq/m²と>3000 kBq/m²のエリアの境界付近に位置する(原子力規制委員会 2017)。火災は2017年4月29日に山頂の南約100 mの尾根付近から発生した。出火の原因は落雷によるものと推定されている。その後、火災は十万山の山頂南の尾根付近から尾根に沿って東西に拡がり、南側では斜面下方向にも拡がり、最下部は沢付近に及んだ。双葉消防本部をはじめ、福島県県内の各消防本部、福島県消防防災航空センター、陸上自衛隊などによる消火活動が行われた結果、5月10日に火災は鎮圧された。燃焼面積は75 haと推定されている(Fig. 1)。

原稿受付: 平成30年1月16日 原稿受理: 平成30年6月22日

1) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

2) 森林総合研究所 森林災害・被害研究拠点

* 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

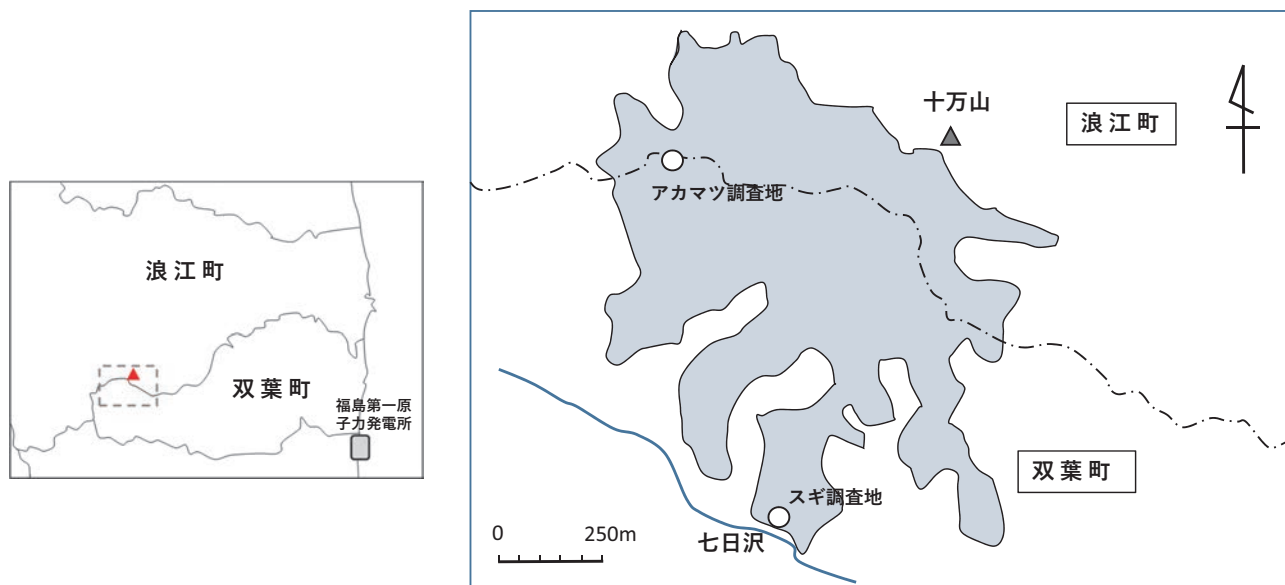


Fig. 1. 十万山における森林火災の延焼区域
Map of forest fire area in Mt. Juman

2.2 調査・分析方法

現地での燃焼状況を確認するため、火災鎮圧から1週間後の5月17日と18日に消防関係者が先導し、林野庁、福島県、地元自治体、復興庁、環境省、著者らが所属する森林総合研究所からなる調査団によって調査が行われた。17日は十万山尾根付近のアカマツ林で火災による延焼状況を調べるとともに空間線量率の測定や試料採取を行った。18日は十万山南側の谷に沿って七日沢林道を歩き、火災が谷付近まで到達したスギ林で延焼状況を調べるとともに試料採取を行った (Fig. 1)。

著者らは樹皮、堆積有機物層 (A0 層)、土壌の試料を採取した。それらの試料の内訳 (採取のサイズ、採取位置、サンプルの繰り返し数) を Table 1 に示した。

森林火災では幹の風下側における燃焼が激しくなり幹表面の焼け跡は非対称になる (井上 1999)。そこで、火

災の影響を受けた同一の樹木を対象に、樹幹の地上 1 m 高の位置において焼焦げた側と焼焦げていない側それぞれ 1 箇所から、縦 5 cm、横 10 cm の範囲で樹皮を剥いで樹皮試料とした (内樹皮と外樹皮ともに採取)。樹皮試料の採取はアカマツ林ではアカマツ 3 本、スギ林ではスギ 1 本を対象とした。樹皮試料名は、アカマツ 3 本を BA1、BA2、BA3、スギを BS1 とした (Table 1)。

林床においては、火災で焼焦げた箇所 (燃焼箇所) と焼焦げていない箇所 (非燃焼箇所) が隣接する場所を選び、それぞれに 19 cm × 19 cm の枠を置いて枠内の A0 層をすべて採取した。さらにその下の土壌 (0–5 cm) を土壌採取円筒 (100 mL、大起理化学工業 DIK-1801) で採取した。アカマツ林の A0 層試料は OA1、OA2、スギ林のそれは OS1、OS2 とした (Table 1)。土壌試料についてはアカマツ林を SA1、SA2、スギ林を SS1、SS2 とした (Table 1)。

Table 1. 採取試料の概要
Sample description

試料タイプ	採取サイズ	採取位置	繰り返し数	試料名
樹皮	高 5 cm × 幅 10 cm	幹の燃焼側と非燃焼側から高さ 1 m で採取	アカマツ 3 本	BA1
				BA2
				BA3
			スギ 1 本	BS1
堆積有機物層 (A0 層)	19 cm × 19 cm	燃焼箇所と非燃焼箇所から採取	アカマツ林 2 ケ所	OA1
				OA2
			スギ林 2 ケ所	OS1
				OS2
土壌	100 mL 採土円筒 (高 5 cm)	堆積有機物層と同じ地点で採取	アカマツ林 2 ケ所	SA1
				SA2
			スギ林 2 ケ所	SS1
				SS2

採取した試料は実験室に持ち帰り、樹皮は風乾後に全重量を測定し、剪定ばさみで小片にした。A0 層試料は風乾後に全重量を測定してから粉碎した。土壌は風乾した後に 2 mm の篩で石礫と粗大有機物を取り除いた。樹皮、A0 層は 75°C で 24 時間乾燥して含水比を求めた。土壌は 105°C、24 時間乾燥して含水比を求めた。各試料の ^{134}Cs と ^{137}Cs 濃度をゲルマニウム半導体検出器 (GEM20-70、GEM40P4-76、GEM-FX7025P4-ST、GWL-120-15-LB-AWT、ORTEC、Oak Ridge、米国) によるガンマ線スペクトロメトリ法で測定した。 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 濃度は 2017 年 5 月 1 日に減衰補正した。

なお、本稿で RCs の放射能濃度あるいは蓄積量と呼ぶ場合は、乾燥重量当たり (樹皮と A0 層は 75°C、土壌は 105°C) の ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計の濃度あるいは蓄積量を意味する。

3. 結果

同一木の樹皮における燃焼部位と非燃焼部位の現存量、RCs 濃度および RCs 蓄積量を Table 2 に示した。まず、樹皮に関しては、アカマツの 2 本 (BA1、BA2) が、燃焼部位が非燃焼部位に比べて樹皮の現存量 (幹の単位表面積当たりの乾重量) が小さかった。この 2 試料では RCs 濃度が低く、RCs 蓄積量 (幹の単位表面積当たりの RCs 量) も小さかった。ただし、アカマツの残りの 1 本 (BA3) やスギ (BS1) では、樹皮の現存量、RCs 濃度、RCs 蓄積量は燃焼部位と非燃焼部位の差は小さかった。

燃焼箇所と非燃焼箇所の A0 層の現存量、RCs 濃度および RCs 蓄積量を Table 3 に示した。A0 層の現存量 (単位面積当たりの乾重量) は、OA1 では燃焼箇所に比べて非燃焼箇所が大きかったが、OS2 では燃焼箇所の方が大きく、他の地点では両者の差は小さかった。A0 層の RCs 濃度は、全ての試料で非燃焼箇所に比べて燃焼箇所が高かった。A0 層の RCs 蓄積量は、非燃焼箇所では極端に現存量が大きかった OA1 では非燃焼箇所の方が大きかったが、そのほかでは燃焼箇所の方が高かった。

燃焼箇所と非燃焼箇所の土壌 (0–5 cm) の現存量、RCs 濃度および RCs 蓄積量を Table 4 に示した。アカマツ林の土壌の現存量は、SA1 では燃焼箇所が非燃焼箇所に比べて大きかったが、SA2 では非燃焼箇所の方が大きかった。RCs 濃度に関しては、現存量の場合と異なり、SA1 で非燃焼箇所が高く、SA2 で燃焼箇所が高く、燃焼箇所と非燃焼箇所の差はさらに大きかった。RCs 蓄積量は RCs 濃度の違いを反映して SA1 では非燃焼箇所が大きく、SA2 では燃焼箇所が大きかった。スギ林の土壌の現存量は、SS1、SS2 とも燃焼箇所と非燃焼箇所ではほぼ等しく、RCs 濃度も燃焼箇所が非燃焼箇所の差は小さかった。RCs 蓄積量は OS1 では燃焼箇所と非燃焼箇所ではほぼ等しく、OS2 では非燃焼箇所が大きかった。アカマツ林、スギ林の土壌を通して、燃焼箇所と非燃焼箇所の一方で現存量、RCs 濃度、RCs 蓄積量の値が大きくなる傾向は認められなかった。

Table 2. 同一木の樹皮における燃焼部位と非燃焼部位の現存量、RCs 濃度および RCs 蓄積量の比較
Comparison of mass and the RCs concentrations and inventories in the stem bark at burned side and at no burned side of same tree

試料	現存量 ^a (kg/m ²)		RCs 濃度 ^b (kBq/kg)		RCs 蓄積量 ^c (kBq/m ²)	
	燃焼	非燃焼	燃焼	非燃焼	燃焼	非燃焼
BA1	1.0	1.7	4.3	7.9	4.5	13.8
BA2	1.6	2.8	4.9	9.2	7.7	26.2
BA3	2.6	2.3	8.1	7.2	20.8	16.4
BS1	0.5	0.6	3.1	3.0	1.7	1.8

^a 現存量：幹の単位表面積当たりの樹皮量、^b 樹皮の RCs 蓄積量、^c 幹の単位表面積当たりの樹皮中の RCs 量

Table 3. 隣接する燃焼箇所と非燃焼箇所との A0 層の現存量、RCs 濃度および RCs 蓄積量の比較
Comparison of mass and the RCs concentrations and inventories in the O layers at burned side and at no burned side which were adjacent to each other

試料	現存量 ^a (kg/m ²)		RCs 濃度 ^b (kBq/kg)		RCs 蓄積量 ^c (kBq/m ²)	
	燃焼	非燃焼	燃焼	非燃焼	燃焼	非燃焼
OA1	1.1	7.7	151.1	43.1	170.3	332.5
OA2	4.5	4.0	83.0	59.6	370.2	238.8
OS1	1.7	2.0	110.2	46.3	182.6	94.2
OS2	2.0	0.7	148.0	24.9	301.3	17.8

^a 単位面積当たりの A0 層乾物重、^b A0 層の RCs 濃度、^c 単位面積当たりの A0 層中の RCs 量

Table 4. 隣接する燃焼箇所と非燃焼箇所の土壌 (0–5 cm) の A0 層の現存量、RCs 濃度および RCs 蓄積量の比較

Comparison of mass and the RCs concentrations and inventories in the soil layers of 0–5 cm depth at burned side and at no burned side which were adjacent to each other

試料	現存量 ^a (kg/m ²)		RCs 濃度 ^b (kBq/kg)		RCs 蓄積量 ^c (kBq/m ²)	
	燃焼	非燃焼	燃焼	非燃焼	燃焼	非燃焼
SA1	25.3	13.2	2.4	14.7	57.3	171.3
SA2	16.3	27.4	17.6	0.8	265.3	21.8
SS1	18.6	23.4	12.6	11.8	216.3	257.3
SS2	25.0	28.2	4.2	6.5	97.2	172.9

^a 単位面積あたりの 0–5 cm の土壌重、^b 土壌 (0–5 cm) の RCs 濃度、^c 単位面積あたりの土壌 (0–5 cm) の RCs 量

4. 考察

十萬山の火災発生時に、十萬山周辺 3 箇所に福島県が設置した可搬型モニタリングポストにおける空間線量率の測定結果は火災前と比較して大きな変動はなかったものの、大気浮遊じん（ダスト）の ¹³⁷Cs が火災発生時に高まり最大で 7.63 mBq/m³ を記録した（福島県 2017）。今回の調査で BA1 と BA2 では樹皮の燃焼部位の現存量、RCs 濃度、RCs 蓄積量が非燃焼部位に比べて小さかった（Table 2）。チェルノブイリ事故後の研究でも煤煙とともに放射性セシウムが飛散することが報告されており（Kashparov et al. 2000, Yoschenko et al. 2006a, b, Evangeliou et al. 2016）、今回の火災でも煤煙とともに放射性セシウムが拡散した可能性が考えられる。一方、樹皮が燃えた際には、灰や炭となって脱落して地面に落下したことも考えられる。A0 層では燃焼箇所の RCs 濃度が非燃焼箇所に比べて高かった（Table 3）ことは、燃焼によって A0 層に含まれていた RCs の濃縮が起きたことに加えて、樹木や下層植生が燃焼して RCs を含む灰や炭となり、それらが落下し付け加わったことも影響しているかもしれない。土壌に関しては、RCs の濃度と蓄積量とも燃焼箇所と非燃焼箇所の関係に一定の傾向が見られなかったので、火災の直接的な影響はなかったと言えるだろう。

Yoschenko et al. (2006b) はチェルノブイリ原発事故の立入禁止区域（Chernobyl exclusion zone）で草地や森林において実験的に火災を発生させ、その結果に基づきモデル計算したところ、林床可燃物からの放射性物質の再拡散が最大で 4% に達すると推定した。今回の火災でも再拡散が起きた可能性は考えられるが、森林に沈着した RCs の大半は 2015 年時点においてもその多くが土壌に移動していること（Imamura et al. 2017）や、A0 層の燃焼が表層部だけであったことから、火災によって拡散した RCs は少ないと推定される。一方で、森林火災の燃焼温度に関しては室内における燃焼試験から可燃物の真上の気流の最高温度は風のない場合でも 720°C まで達し、風がある場合は最高温度が 840°C に達すると推定されている（消防庁消防研究所 1988）。セシウムの沸点は 678.4°C である（長倉ら 1999）ので火災時に RCs の気化が起きた可能性

もある。今後、今回の火災で RCs の拡散がどの程度起きたかは、火災発生時の燃焼状況や気象条件、さらにはダストサンプラーで捕集されたダストの成分分析等を踏まえて検討していくことが必要であろう。

今回の調査は緊急に行ったものであり、採取した試料の繰り返しが少ないことなどから、火災の影響についてはさらに詳しい調査が必要であろう。そのほか、海外の調査事例では火災発生後に土壌侵食が増すという報告（Onodera and Van Stan II 2011）がある。燃焼で樹木や A0 層が炭や灰になることで RCs の溶解性が変化した可能性もあるので、土砂移動や RCs 流出についての継続調査が必要であろう。早期の植生回復が土壌の侵食防止につながり、森林火災跡地の保全上、きわめて重要である（後藤 2009）ことから、延焼した場所における今後の下層植生が早期に回復するかどうか侵食にともなう RCs 流出に関して重要であろう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、林野庁国有林野部業務課、関東森林管理局を始め、地元福島県の関係者には多大なる協力をいただきました。皆様に感謝申し上げます。また、本研究は平成 29 年度林野庁森林内における放射性物質実態把握事業、ならびに（国研）森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト（課題番号 201501）の研究成果である。

引用文献

- Evangelou, N., Balkanski, Y., Cozic, A. and Møller, A. P. (2013) Simulations of the transport and deposition of ¹³⁷Cs over Europe after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident: influence of varying emission-altitude and model horizontal and vertical resolution. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 7183–7198.
- Evangelou, N., Balkanski, Y., Cozic, A., Hao W. M. and Møller, A. P. (2014) Wildfires in Chernobyl-contaminated forests and risks to the population and the environment: A new nuclear disaster about to happen? *Environ. Int.*, 73,

- 346-358.
- Evangelidou, N., Balkanski, Y., Cozic, A., Hao W. M., Mouillot, F., Thonicke, K., Paugam, R., Zibtsev, S., Mousseau, T., Wang R., Poulter, B., Petkov, A., Yue, C., Cadule, P., Koffi, B., Kaiser, J. W. and Møller, A. P. (2015) Fire evolution in the radioactively contaminated forests of Ukraine and Belarus: future risks for the European population and the environment. *Ecol. Monogr.*, 85, 49-72.
- Evangelidou, N., Zibtsev, S., Myroniuk, V., Zhurba, M., Hamburger, T., Stohl, A., Balkanski, Y., Paugam, R., Mousseau, T. A., Møller, A. P. and Kireev, S. I. (2016) Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2015: An impact assessment. *Scientific Reports*, 6, 26062
- 福島民報社 (2017) “10ヘクタール焼き鎮圧状態、浪江の帰還困難区域で山林火災”, 平成29年5月1日
- 福島県 (2017) “浪江町井出地区の林野火災現場周辺の放射線モニタリングの結果”, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/namie-rinyakasai-201704-05/> (最終アクセス平成30年4月17日)
- 原子力規制委員会 (2017) 航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果 <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html> (最終アクセス平成30年1月16日)
- 後藤 義明 (2009) 山火事による土壌侵食と植生による侵食防止効果. *水利科学*, 63, 73-85.
- Hashimoto, S., Ugawa, S., Nanko, K. and Shichi, K. (2012) The total amounts of radioactively contaminated materials in forests in Fukushima, Japan. *Sci. Rep.* 2, 416.
- Imamura, N., Komatsu, M., Ohashi, S., Hashimoto, S., Kajimoto, T., Kaneko, S. and Takano, T. (2017) Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci. Rep.*, 7, 8179.
- 井上 章二 (1999) 林野火災の延焼拡大予測に関する基礎的・応用的研究. 愛媛大学農学部演習林報告, 36, 1-91.
- Kashparov, V. A., Lundin, S. M., Kadygrib, A. M., Protsak, V. P., Levchuk, S. E., Yoschenko, V. I., Kashpur, V. A. and Talerko, N. M. (2000) Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters. *J. Environ. Radio.*, 51, 281-298.
- 長倉 三郎・井口 洋夫・江沢 洋・岩村 秀・佐藤 文隆・久保 亮五 (1999) 岩波理化学辞典第5版 CD-ROM 版, 岩波書店.
- 奥田 博 (1999) うつくしま百名山 福島県のふるさとの山々. 福島テレビ, 119pp.
- Onodera, S. and Van Stan II, J. T. (2011) Effect of Forest Fires on Hydrology and Biogeochemistry of Watersheds. In Levina, D. F. et al. (eds.) “Forest Hydrology and Biogeochemistry”. Springer, New York, 599-621.
- 消防庁消防研究所 (1988) 林野火災の飛火延焼に関する研究. 消防研究所研究資料第21号, 60-81.
- Yoschenko, V. I., Kashparov, V. A., Protsak, V. P., Lundin, S. M., Levchuk, S. E., Kadygrib, A. M., Zvarich, S. I., Khomutinin, Yu. V., Maloshtan, I. M., Lanshin, V. P., Kovtun, M. V. and Tschiersch, J. (2006a) Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments. *J. Environ. Radio.*, 86, 143-163.
- Yoschenko, V. I., Kashparov, V. A., Levchuk, S. E., Glukhovskiy, A. S., Khomutinin, Yu. V., Protsak, V. P., Lundin, S. M. and Tschiersch J. (2006b) Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process. *J. Environ. Radio.*, 87, 260-278.

The effect of forest fire on the radiocesium inventory of tree bark and surface soil in ‘difficult-to-return zone’

Shinji KANEKO^{1)*}, Yoshiaki GOTOH²⁾, Ryuichi TABUCHI¹⁾, Akio AKAMA¹⁾,
Shigeto IKEDA¹⁾, Yoshiki SHINOMIYA¹⁾, and Naohiro IMAMURA¹⁾

Abstract

This study aimed to investigate the effect of forest fire on radiocesium (RCs: ^{134}Cs and ^{137}Cs) status in forest ecosystem, in Japanese red pine forest on the ridge area and Japanese cedar forest on the riparian zone in Mt. Juman, where a forest fire occurred on 29th April to 10th May in 2017. In both the forests, we sampled bark on the burned side as well as from the non-burned side of the same tree trunk, along with samples from organic layer and mineral surface soil in burned areas and those from adjacent non-burned areas. We analyzed RCs concentrations in each specimen. Lower value for the concentration and the inventory of RCs was observed for the biomass in burned bark in Japanese red pine. The RCs concentration of organic layer was also lower in burned area than in adjacent non-burned area in all specimens from Japanese red pine forest and Japanese cedar forest.

Key words: radiocesium, forest fire, tree bark, organic layer, surface soil, Japanese red pine, Japanese cedar

Received 16 January 2018, Accepted 22 June 2018

1) Center for Forest Restoration and Radioecology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Center for Forest Damage and Risk Management, FFPRI

* Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: kanekos@ffpri.affrc.go.jp

研究資料 (Research record)

石狩川源流地域における大規模風倒跡地の森林再生過程のデータ

伊東 宏樹^{1)*}、中西 敦史¹⁾、津山 幾太郎¹⁾、関 剛¹⁾、飯田 滋生²⁾、河原 孝行¹⁾

要旨

石狩川源流地域では、1954 年台風 15 号(洞爺丸台風)により大規模な風倒が発生した。森林総合研究所北海道支所では、この風倒からの森林の再生過程をモニタリングするため、風倒前には極相に近い針葉樹林であった林分内の 6 か所の調査地において、植生調査と毎木調査を継続している。植生調査は、1957～1968 年の各年と、1972、1976、1980、1984、1988、1998、2002、2009、2017 の各年に実施した。2 m×30～50 m の大きさの帯状調査区を設定し、2 m×2 m の方形区ごとに、階層(高木、亜高木、低木、草本、ツル植物、蘚苔類)別に、各出現種について植生被度階級を 6 段階(0～1%: +、1～10%: 1、10～25%: 2、25～50%: 3、50～75%: 4、75～100%: 5)で記録した。毎木調査は、1993 年、1998 年、2002 年、2009 年、2017 年に実施した。帯状調査区の幅を 10 m に拡大し、樹高 1.3 m 以上の幹について樹高と胸高直径を測定した。これらのデータを、機械可読な形式にまとめ、Creative Commons Attribution 4.0 International ライセンスのもとに公開した。

キーワード: 成長、長期観測、機械可読データ、更新、台風、植生被度、風倒

1. はじめに

1954 年 9 月に北海道西部から北部を通過した台風 15 号(洞爺丸台風)により、北海道内の森林では各地で大規模な風倒が発生した(北海道風害森林調査団 1959, 北海道森林風害記録作成委員会 1959, 玉手ら 1977)。この風倒による被害区域の面積は約 75 万 ha、被害立木材積は約 2 万 6800 m³であった(玉手ら 1977)。とくに、石狩川源流地域の旭川営林局上川営林署層雲峡経営区(当時)では蓄積量のほぼ半分が失われる激甚な被害に見舞われた(北海道風害森林調査団 1959, 北海道森林風害記録作成委員会 1959)。

この風倒の発生直前に層雲峡経営区において、石狩川源流原生林総合調査団による詳細な調査が実施されていた(石狩川源流原生林総合調査団 1955)。この総合調査では、54 か所の帯状調査区が設定され、毎木調査および植生調査が行なわれた(館脇ら 1955)。風倒発生後、そのうちの 9 か所において、林業試験場北海道支場(現、森林総合研究所北海道支所)の中野実らは、森林の再生過程をモニタリングするため調査地を設定した(内田ら 1960)。森林総合研究所北海道支所では、そのうちの 6 か所について調査を継続している。

これら調査地の位置する林分はいずれも風倒前には、アカエゾマツまたはエゾマツが優占し、これにトドマツが混ざるような、極相に近いと考えられる針葉樹林であったが(館脇ら 1955)、風倒により無立木地となった(中野

1960, 飯田ら 2015a)。風倒後は一時的にエゾイチゴが増加したが、その後減少し、岩礫地を除いてササが優占する植生となった(飯田ら 2015a)。森林の更新という点では、カンバ類やヤナギ類が風倒後 6 年目くらいまでの間に侵入し、その後 2009 年までの調査では、トドマツが優占する林分あるいはカンバ類やヤナギ類が優占する林分となった(飯田ら 2015a)。

この継続調査の成果は、中野(1960)、林ら(1982)、豊岡ら(1992)、Ishizuka et al.(1998)、飯田ら(2015a)により取りまとめ・解析されて公表されている。また、石狩川源流地域の森林についての総合的な調査結果は、日本林業技術協会(1977)、旭川営林支局・日本林業技術協会(1995)、森林環境リアライズ(2015)にまとめられている。

今回、2017 年の調査結果を含め、これまでのデータを機械可読な形式にまとめたので、研究資料として提供する。

2. 方法

2.1 調査地

本研究の調査地は、北海道森林管理局上川中部森林管理署(設定当時は旭川営林局上川営林署)管内の 2260、2276、2290、2320 林班にある。上川郡上川町の石狩川源流地域、大雪湖周辺に位置し、標高は 870～965 m の範囲である。調査地の概要を Table 1 に示す。なお、各調査地の地図上の位置は飯田ら(2015b)に記載されている。

原稿受付: 平成 30 年 4 月 20 日 原稿受理: 平成 30 年 6 月 28 日

1) 森林総合研究所 北海道支所

2) 森林総合研究所 九州支所

* 森林総合研究所 北海道支所 〒062-8516 札幌市豊平区羊ヶ丘 7

Table 1. 各調査地の概要

調査地 No.	緯度 (°N)	経度 (°E)	標高 (m)	傾斜方位	傾斜角度 (°)	带状調査区	毎木調査区
27	43.6493	143.0253	910	南	17	38 m × 2 m	38 m × 10 m
30	43.6486	143.0244	905	南	23	36 m × 2 m*	36 m × 10 m
35	43.6382	143.0219	900	北	28	38 m × 2 m	38 m × 10 m
36	43.6363	143.0241	965	平坦地	—	30 m × 2 m	30 m × 10 m
46	43.6411	143.0569	900	西北西	5	50 m × 2 m	50 m × 10 m
54	43.6514	143.1000	870	平坦地	—	50 m × 2 m	50 m × 10 m

* 1964 年までは 38 m × 2 m

これら調査地は、前述のとおり、館脇ら (1955) により設定された調査地の一部を、風倒発生後に復元したものである (内田ら 1960)。当初は 9 か所の調査地が設定されたが、大雪ダム建設あるいは山火事により 3 か所の調査が打ち切れ、6 か所のみ調査が継続されている (豊岡ら 1992)。風倒木については数年かけて処理がおこなわれたとあることから (高橋・猪瀬 1995)、原則として林外へ持ち出されたと考えられる。

2.2 調査方法

2.2.1 植生調査

各調査地に幅 2 m の带状調査区を設定し、この带状調査区において植生調査を実施した。带状調査区の長さは 30 ~ 50 m である (Table 1)。植生調査は、1957 ~ 1968 年の各年と、1972、1976、1980、1984、1988、1998、2002、2009、2017 の各年に実施した。

各带状調査区は 2 m × 2 m の大きさの方形区に分割した。各带状調査区における方形区の配置は Fig. 1 に示した。方形区ごとに、存在が確認された維管束植物の植生被度階級を階層ごと種ごとに記録した。階層はのように区分した (飯田 2015a)。高木 (樹高 8 m 以上)、亜高木 (樹高 2 m 以上、8 m 未満)、低木 (樹高 2 m 未満の本木植物およびササ、実生も含む)、草本 (草本植物およびシダ植物)、ツル (ツル性の本木および草本植物)。このほか、コケ植物は種を同定することなく、すべてコケ類として別に記録した。植生被度階級は、被度に応じて以下の 6 段階で記録した (飯田 2015a)。0 ~ 1%: +、1 ~ 10%: 1、10 ~ 25%: 2、25 ~ 50%: 3、50 ~ 75%: 4、75 ~ 100%: 5。

2.2.2 毎木調査

1993 年に带状調査区の幅を 10 m に拡大して毎木調査区とした。毎木調査は、1993 年、1998 年、2002 年、2009 年、2017 年に実施した。毎木調査区内の胸高 (1.3 m) 以上の幹すべてについて、マーキングの後、樹種と位置を記録し、胸高直径と樹高を測定した。位置は、各毎木調査区における XY 座標の位置として記録した (Fig. 1)。胸高直径は、原則としてスチールメジャーで周囲長を測定し、円周率で除して求めたが、周囲長の測定が困難な細い幹

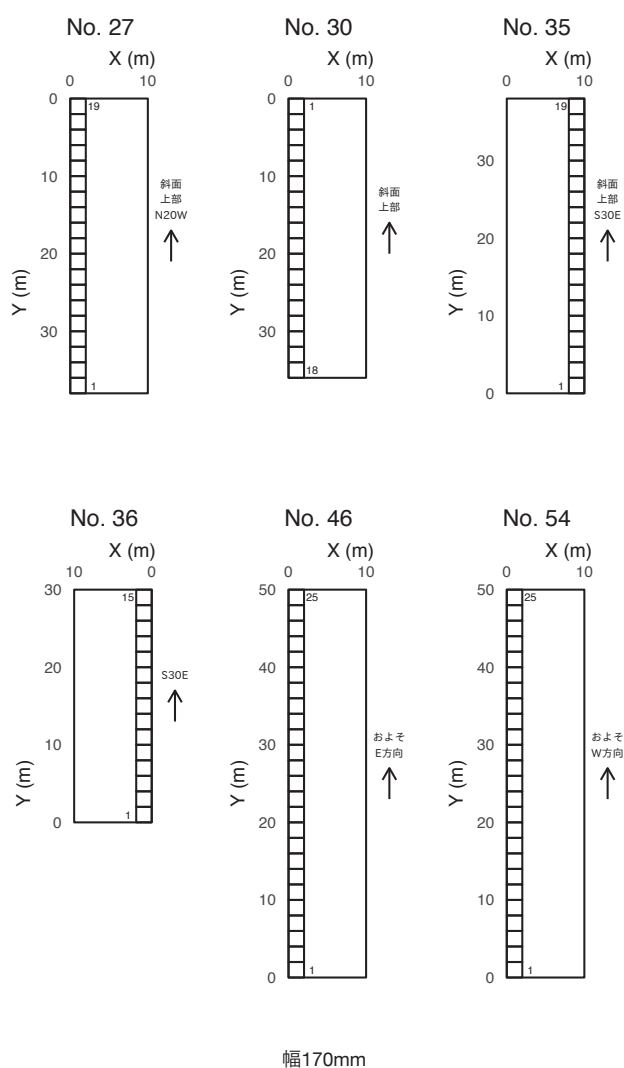


Fig. 1. 各調査地 (No. 27, 30, 35, 36, 46, 54) の模式図

幅 (短辺) 10 m の枠が毎木調査区であり、短辺が X 軸、長辺が Y 軸となっているが、原点の位置は調査区によって異なる。毎木調査区の中の右端または左端に植生調査のための幅 2 m の带状調査区が位置する。各带状調査区は 2 m × 2 m の方形区に分割されている。図中では、最初と最後の方形区番号を各带状調査区について示した。なお、調査地 No.30 の带状調査区の長さは 1964 年までは 38 m であった。

については、ノギスまたはスチールメジャーで直径を直接測定した。胸高直径の数値の精度は 0.1 cm である。樹高は、胸高を超えたばかりのような低いものについてはコンベックスルールまたは折尺で、それより高いものについては測棒または Vertex (Haglöf, Sweden) で測定した。1993 年の樹高測定においては、同じ株からの幹については株ごとに測定した。この場合の測定値は、胸高直径のもっとも大きかった幹の樹高とし、その他の幹の樹高は欠測とした。樹高の数値の精度は 0.1 m である。なお、幹が傾いたために、2 回目以降の測定に樹高が 1.3 m を下回った場合があったが、その場合も測定値をそのまま使用している。この場合の胸高直径の測定位置は、前回の測定位置のままである。

2.3 調査者

1957 年以降の調査に従事した林業試験場・森林総合研究所の職員は以下のとおりである。中野 実・林 敬太・森田健次郎・鮫島惇一郎・豊岡 洪・佐藤 明・石塚森吉・大澤 晃・九島宏道・金澤洋一・田内裕之・飯田滋生・阿部

真・宇都木 玄・山下直子・倉本恵生・松井哲哉・河原孝行・関 剛・伊東宏樹・津山幾太郎・中西敦史

3. データ

3.1 植生調査データ

1957 年から 2017 年までの植生調査で確認され、種まで同定された維管束植物を Table 2 に示す。和名および学名は米倉・梶田 (2003-) に準拠した。このため例えば、飯田ら (2015a) 以前の報告で「エゾノバッコヤナギ」とされていた種名は「バッコヤナギ」となっている。

この植生調査のデータを補足電子資料としてまとめた (Table S1)。ファイル形式はタブ区切りテキストファイル、文字コードは UTF-8、改行コードは LF である。データの構成は Table 3 のとおりである。また、このファイルを利用して、豊岡ら (1992) と同様の形式で、指定した調査区および調査年の植物組成表を出力する R スクリプトを補足電子資料として添付した (List S1)。ファイルの文字コードは UTF-8、改行コードは LF である。

Table 2. 調査期間内 (1957 ~ 2017 年) に植生調査で確認された種

科	和名	学名
ヒカゲノカズラ科	ホソバトウゲシバ	<i>Huperzia serrata</i> (Thunb.) Trevis. var. <i>serrata</i>
ヒカゲノカズラ科	スギカズラ	<i>Lycopodium annotinum</i> L.
ヒカゲノカズラ科	マンネンスギ	<i>Lycopodium dendroideum</i> Michx.
ナヨシダ科	ウサギシダ	<i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newman
ヒメシダ科	ミヤマワラビ	<i>Thelypteris phegopteris</i> (L.) Sloss. ex Rydb.
オシダ科	オクヤマシダ	<i>Dryopteris amurensis</i> (Milde) Christ
オシダ科	オシダ	<i>Dryopteris crassirhizoma</i> Nakai
オシダ科	シラネワラビ	<i>Dryopteris expansa</i> (C.Presl) Fraser-Jenk. et Jermy
ウラボシ科	エゾデンド	<i>Polypodium sibiricum</i> Sipliv.
マツ科	トドマツ	<i>Abies sachalinensis</i> (F.Schmidt) Mast.
マツ科	アカエゾマツ	<i>Picea glehnii</i> (F.Schmidt) Mast.
マツ科	エゾマツ	<i>Picea jezoensis</i> (Siebold et Zucc.) Carrière
マツブサ科	チョウセンゴミシ	<i>Schisandra chinensis</i> (Turcz.) Baill.
シュロソウ科	クルマバツクバネソウ	<i>Paris verticillata</i> M.Bieb.
シュロソウ科	ミヤマエンレイソウ	<i>Trillium tschonoskii</i> Maxim.
ユリ科	クルマユリ	<i>Lilium medeoloides</i> A.Gray
ユリ科	ヒメタケシマラン	<i>Streptopus streptopoides</i> (Ledeb.) Frye et Rigg subsp. <i>streptopoides</i>
ラン科	エゾスズラン	<i>Epipactis papillosa</i> Franch. et Sav.
キジカクシ科	マイヅルソウ	<i>Maianthemum dilatatum</i> (A.W.Wood) A.Nelson et J.F.Macbr.
イネ科	ミヤマヌカボ	<i>Agrostis flaccida</i> Hack.
イネ科	イワノガリヤス	<i>Calamagrostis purpurea</i> (Trin.) Trin. subsp. <i>langsдорffii</i> (Link) Tzvelev
イネ科	コメガヤ	<i>Melica nutans</i> L.
イネ科	イチゴツナギ	<i>Poa sphondylodes</i> Trin.
イネ科	クマイザサ	<i>Sasa senanensis</i> (Franch. et Sav.) Rehder
キンポウゲ科	ルイヨウショウマ	<i>Actaea asiatica</i> H.Hara

Table 2. 調査期間内 (1957 ~ 2017 年) に植生調査で確認された種 (つづき)

科	和名	学名
キンポウゲ科	アカミノルイヨウショウマ	<i>Actaea erythrocarpa</i> (Turcz. ex Ledeb.) Fisch. ex Freyn
キンポウゲ科	ヒメイチゲ	<i>Anemone debilis</i> Fisch. ex Turcz.
キンポウゲ科	ミヤマハンショウヅル	<i>Clematis alpina</i> (L.) Mill. subsp. <i>ochotensis</i> (Pall.) Kuntze var. <i>fusijamana</i> Kuntze
キンポウゲ科	ミツバオウレン	<i>Coptis trifolia</i> (L.) Salisb.
キンポウゲ科	アキカラマツ	<i>Thalictrum minus</i> L. var. <i>hypoleucum</i> (Siebold et Zucc.) Miq.
キンポウゲ科	エゾカラマツ	<i>Thalictrum sachalinense</i> Lecoy.
スグリ科	クロミノハリスグリ	<i>Ribes horridum</i> Rupr. ex Maxim.
スグリ科	エゾスグリ	<i>Ribes latifolium</i> Jancz.
スグリ科	トガスグリ	<i>Ribes sachalinense</i> (F.Schmidt) Nakai
ユキノシタ科	ズダヤクシュ	<i>Tiarella polyphylla</i> D.Don
カヤツリグサ科	ゴンゲンスゲ	<i>Carex sachalinensis</i> F.Schmidt var. <i>iwakiana</i> Ohwi
カヤツリグサ科	アブラガヤ	<i>Scirpus wichurae</i> Boeck. f. <i>concolor</i> (Maxim.) Ohwi
イラクサ科	ムカゴイラクサ	<i>Laportea bulbifera</i> (Siebold et Zucc.) Wedd.
イラクサ科	ミヤマイラクサ	<i>Laportea cuspidata</i> (Wedd.) Friis
イラクサ科	エゾイラクサ	<i>Urtica platyphylla</i> Wedd.
バラ科	タカネバラ	<i>Rosa nipponensis</i> Crép.
バラ科	エゾイチゴ	<i>Rubus idaeus</i> L. subsp. <i>melanolasius</i> Focke
バラ科	ヒメゴウイチゴ	<i>Rubus pseudojaponicus</i> Koidz.
バラ科	ホザキナナカマド	<i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A.Braun var. <i>stellipila</i> Maxim.
バラ科	ナナカマド	<i>Sorbus commixta</i> Hedl.
バラ科	マルバシモツケ	<i>Spiraea betulifolia</i> Pall. var. <i>betulifolia</i>
カバノキ科	ケヤマハンノキ	<i>Alnus hirsuta</i> (Spach) Turcz. ex Rupr. var. <i>hirsuta</i>
カバノキ科	ダケカンバ	<i>Betula ermanii</i> Cham.
カバノキ科	シラカンバ	<i>Betula platyphylla</i> Sukaczew var. <i>japonica</i> (Miq.) H.Hara
ニシキギ科	コマユミ	<i>Euonymus alatus</i> (Thunb.) Siebold var. <i>alatus</i> f. <i>striatus</i> (Thunb.) Makino
ニシキギ科	ヒロハツリバナ	<i>Euonymus macropterus</i> Rupr.
ニシキギ科	ツリバナ	<i>Euonymus oxyphyllus</i> Miq. var. <i>oxyphyllus</i>
ニシキギ科	クロツリバナ	<i>Euonymus tricarpos</i> Koidz.
カタバミ科	コミヤマカタバミ	<i>Oxalis acetosella</i> L.
ヤナギ科	バッコヤナギ	<i>Salix caprea</i> L.
ヤナギ科	オノエヤナギ	<i>Salix udensis</i> Trautv. et C.A.Mey.
スミレ科	ミヤマスミレ	<i>Viola selkirkii</i> Pursh ex Goldie
オトギリソウ科	エゾオトギリ	<i>Hypericum yezoense</i> Maxim.
フウロソウ科	ヒメフウロ	<i>Geranium robertianum</i> L.
アカバナ科	ヤナギラン	<i>Chamerion angustifolium</i> (L.) Holub
アカバナ科	ミヤマタニタデ	<i>Circaea alpina</i> L. subsp. <i>alpina</i>
ムクロジ科	オガラバナ	<i>Acer ukurunduense</i> Trautv. et C.A.Mey.
ミカン科	ツルシキミ	<i>Skimmia japonica</i> Thunb. var. <i>intermedia</i> Komatsu f. <i>repens</i> (Nakai) Ohwi
アブラナ科	コンロンソウ	<i>Cardamine leucantha</i> (Tausch) O.E.Schulz
ナデシコ科	カワラナデシコ	<i>Dianthus superbus</i> L. var. <i>longicalycinus</i> (Maxim.) F.N.Williams
ナデシコ科	シラオイハコベ	<i>Stellaria fenzlii</i> Regel
ミズキ科	ゴゼンタチバナ	<i>Cornus canadensis</i> L.
アジサイ科	ツルアジサイ	<i>Hydrangea petiolaris</i> Siebold et Zucc.
ツリフネソウ科	キツリフネ	<i>Impatiens noli-tangere</i> L.

Table 2. 調査期間内 (1957 ~ 2017 年) に植生調査で確認された種 (つづき)

科	和名	学名
マタタビ科	ミヤママタタビ	<i>Actinidia kolomikta</i> (Maxim. et Rupr.) Maxim.
ツツジ科	コイチヤクソウ	<i>Orthilia secunda</i> (L.) House
ツツジ科	イチヤクソウ	<i>Pyrola japonica</i> Klenze ex Alefeld
ツツジ科	コヨウラクツツジ	<i>Rhododendron pentandrum</i> (Maxim.) Craven
ツツジ科	ウスノキ	<i>Vaccinium hirtum</i> Thunb. var. <i>pubescens</i> (Koidz.) T.Yamaz.
ツツジ科	イワツツジ	<i>Vaccinium praestans</i> Lamb.
ツツジ科	オオバスノキ	<i>Vaccinium smallii</i> A.Gray var. <i>smallii</i>
アカネ科	エゾノヨツバムグラ	<i>Galium kamtschaticum</i> Steller ex Roem. et Schult. var. <i>kamtschaticum</i>
アカネ科	クルマバソウ	<i>Galium odoratum</i> (L.) Scop.
アカネ科	ヨツバムグラ	<i>Galium trachyspermum</i> A.Gray
アカネ科	オククルマムグラ	<i>Galium trifloriforme</i> Kom.
シソ科	ミヤマトウバナ	<i>Clinopodium micranthum</i> (Regel) H.Hara var. <i>sachalinense</i> (F.Schmidt) T.Yamaz. et Murata
モチノキ科	ツルツゲ	<i>Ilex rugosa</i> F.Schmidt
キキョウ科	ツルニンジン	<i>Codonopsis lanceolata</i> (Siebold et Zucc.) Trautv.
キキョウ科	タニギキョウ	<i>Peracarpa carnosus</i> (Wall.) Hook.f. et Thomson
キク科	ヤマハハコ	<i>Anaphalis margaritacea</i> (L.) Benth. et Hook.f. subsp. <i>margaritacea</i>
キク科	オオヨモギ	<i>Artemisia montana</i> (Nakai) Pamp.
キク科	チシマアザミ	<i>Cirsium kamtschaticum</i> Ledeb. ex DC.
キク科	ヒメムカシヨモギ	<i>Erigeron canadensis</i> L.
キク科	ヨブスマソウ	<i>Parasenecio hastatus</i> (L.) H.Koyama subsp. <i>orientalis</i> (Kitam.) H.Koyama
キク科	ミミコウモリ	<i>Parasenecio kamtschaticus</i> (Maxim.) Kadota
キク科	アキタブキ	<i>Petasites japonicus</i> (Siebold et Zucc.) Maxim. subsp. <i>giganteus</i> (G.Nicholson) Kitam.
キク科	コウゾリナ	<i>Picris hieracioides</i> L. subsp. <i>japonica</i> (Thunb.) Krylov
キク科	ハンゴンソウ	<i>Senecio cannabifolius</i> Less.
キク科	キオン	<i>Senecio nemorensis</i> L.
キク科	アキノキリンソウ	<i>Solidago virgaurea</i> L. subsp. <i>asiatica</i> (Nakai ex H.Hara) Kitam. ex H.Hara
キク科	セイヨウタンポポ	<i>Taraxacum officinale</i> Weber ex F.H.Wigg.
レンプクソウ科	レンプクソウ	<i>Adoxa moschatellina</i> L.
レンプクソウ科	エゾニワトコ	<i>Sambucus racemosa</i> L. subsp. <i>kamtschatica</i> (E.L.Wolf) Hultén
スイカズラ科	エゾヒヨウタンボク	<i>Lonicera alpigena</i> L. subsp. <i>glehnii</i> (F.Schmidt) H.Hara
スイカズラ科	チシマヒヨウタンボク	<i>Lonicera chamissoi</i> Bunge

Table 3. 植生調査データの構造

列名	説明	備考
Belt	調査区番号	
Quadrat	方形区番号	2 × 2 m 方形区の番号
Layer	階層	canopy: 高木, subcanopy: 亜高木, shrub: 低木, herb: 草本, vine: ツル, moss: 蘚苔類
Year	調査年度	[36] 調査区の 1988 年度の調査は 1989 年に行なわれた。
Date	調査日	調査日または月が不明の場合は、それぞれ調査月または調査年のみを記載している。
Scientific_name	学名	
Japanese_name	和名	
Cover	被度階級	+, 0, 1, 2, 3, 4, 5 の 6 段階

3.2 毎木調査データ

1993 年から 2017 年までの毎木調査で確認された樹種を Table 4 に示す。この毎木調査のデータを補足電子資料としてまとめた (Table S2)。ファイル形式はタブ区切りテキストファイル、文字コードは UTF-8、改行コードは LF である。データの構成は Table 5 のとおりである。また、

このファイルを利用して、指定した調査区の樹種ごとの幹密度または胸高断面積合計の推移を出力する R スクリプトを補足電子資料として添付した (List S2)。ファイルの文字コードは UTF-8、改行コードは LF である。List S1, S2 とも、動作確認は R 3.4.3 (R Core Team 2017) で行なった。

Table 4. 調査期間内 (1993 ~ 2017 年) に毎木調査で確認された種

科	和名	学名
マツ科	トドマツ	<i>Abies sachalinensis</i> (F.Schmidt) Mast.
マツ科	アカエゾマツ	<i>Picea glehnii</i> (F.Schmidt) Mast.
マツ科	エゾマツ	<i>Picea jezoensis</i> (Siebold et Zucc.) Carrière
カバノキ科	ケヤマハンノキ	<i>Alnus hirsuta</i> (Spach) Turcz. ex Rupr. var. <i>hirsuta</i>
カバノキ科	ダケカンバ	<i>Betula ermanii</i> Cham.
カバノキ科	シラカンバ	<i>Betula platyphylla</i> Sukaczew var. <i>japonica</i> (Miq.) H.Hara
ニシキギ科	ヒロハツリバナ	<i>Euonymus macropterus</i> Rupr.
ニシキギ科	ツリバナ	<i>Euonymus oxyphyllus</i> Miq. var. <i>oxyphyllus</i>
ヤナギ科	ドロノキ	<i>Populus suaveolens</i> Fisch.
ヤナギ科	バッコヤナギ	<i>Salix caprea</i> L.
ヤナギ科	オノエヤナギ	<i>Salix udensis</i> Trautv. et C.A.Mey.
ムクロジ科	オガラバナ	<i>Acer ukurunduense</i> Trautv. et C.A.Mey.
レンブクソウ科	エゾニワトコ	<i>Sambucus racemosa</i> L. subsp. <i>kamtschatica</i> (E.L.Wolf) Hultén

Table 5. 毎木調査データの構造

列名	説明	備考
ID	幹番号	
Individual_ID	個体番号	
Belt	調査区番号	
X	調査区内における幹の X 座標	
Y	調査区内における幹の Y 座標	
Scientific_name	学名	
Japanese_name	和名	
First	最初に測定された年	
Last	生存が確認された最後の年	生存中の幹は最後の測定年
H_1993	1993 年の樹高 (m)	NA は欠測を示す
D_1993	1993 年の胸高直径 (cm)	
H_1998	1998 年の樹高 (m)	NA は欠測を示す
D_1998	1998 年の胸高直径 (cm)	
H_2002	2002 年の樹高 (m)	
D_2002	2002 年の胸高直径 (cm)	
H_2009	2009 年の樹高 (m)	NA は欠測を示す
D_2009	2009 年の胸高直径 (cm)	
H_2017	2017 年の樹高 (m)	
D_2017	2017 年の胸高直径 (cm)	

3.3 著作権およびライセンス

これらデータの著作権は国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所が有する。本データの利用に関するライセンスは、Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> とする。

謝 辞

国有林の調査にあたっては、上川中部森林管理署から許可をいただいた。また、森林総合研究所元職員の豊岡洪氏からは過去の調査に関する情報の提供をいただいた。ここにお礼申し上げる。

引用文献

- 旭川営林支局・日本林業技術協会 (1995) 石狩川源流森林総合調査報告 (植生の遷移に関する調査研究). 旭川営林支局, 357pp.
- 林 敬太・豊岡 洪・佐藤 明・石塚 森吉 (1982) 大雪営林署管内層雲峡地区風倒跡地の植生変化. 林試研報, 317, 191-206.
- 北海道風害森林調査団 (1959) 北海道風害森林総合調査報告. 日本林業技術協会, 535pp.
- 北海道森林風害記録作成委員会 (1959) 北海道の森林風害記録. 北方林業会, 548pp.
- 飯田 滋生・関 剛・倉本 恵生・津山 幾太郎・阿部 真・松井 哲也 (2015a) 2-1. 森林植生. 森林環境リアライズ編 “石狩川源流森林総合調査 (第4次) 報告書”. 北海道森林管理局, 12-28.
- 飯田 滋生・関 剛・倉本 恵生・津山 幾太郎・阿部 真・松井 哲也 (2015b) 3-1. 森林植生. 森林環境リアライズ編 “石狩川源流森林総合調査 (第4次) 報告書”. 北海道森林管理局, 56-68.
- 石狩川源流原生林総合調査団 (1955) 石狩川源流原生林総合調査報告. 日本林業技術協会, 393pp.
- Ishizuka, M., Toyooka, H., Osawa, A., Kushima, H., Kanazawa, Y. and Sato, A. (1998) Secondary succession following catastrophic windthrow in a boreal forest in Hokkaido, Japan. *J Sustain For* 6:367-388.
- 中野 実 (1960) 植生の部. 内田 丈夫・中野 実・成田 孝一 “層雲峡地区における林冠破壊による植生、土壌の変化 (1)”. 旭川営林局, 2-32.
- 日本林業技術協会 (1977) 石狩川源流森林総合調査報告

第2次昭和48-50年度. 旭川営林局, 349pp.

- R Core Team (2017) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, <https://www.R-project.org/> (参照2018年2月1日)
- 森林環境リアライズ (2015) 石狩川源流森林総合調査 (第4次) 報告書. 北海道森林管理局, 128pp, <http://www.ffpri.affrc.go.jp/hkd/research/documents/h26ishikarigawaryuwiki.pdf> (参照2017年12月31日)
- 高橋 邦秀・猪瀬 光雄 (1995) 調査目的と風害林小史. 旭川営林支局・日本林業技術協会編 “石狩川源流森林総合調査報告 (植生の遷移に関する調査研究)”. 旭川営林支局, 10-15.
- 玉手 三稟寿・檜山 徳治・笹沼 たつ・高橋 亀久松・松岡 広雄 (1977) 洞爺丸台風による北海道の大森林風害の概要とその実況図. 林試研報, 289, 43-67.
- 館脇 操・内田 丈夫・石川 俊夫・鈴木 兵二・楠 宏・勝井 義雄・高橋 啓二 (1955) I-5 带状区調査. 石狩川源流原生林総合調査団編 “石狩川源流原生林総合調査報告”. 日本林業技術協会, 31-153.
- 豊岡 洪・石塚 森吉・大澤 晃・九島 宏道・金澤 洋一・佐藤 明 (1992) 石狩川源流地域における風倒後34年間の森林植生の変化. 森林総研研報, 363, 59-151.
- 内田 丈夫・中野 実・成田 孝一 (1960) 層雲峡地区における林冠破壊による植生、土壌の変化 (1). 旭川営林局, 32pp.
- 米倉 浩司・梶田 忠 (2003-) BG Plants 和名-学名インデックス (YList), <http://ylist.info/> (参照2017年12月31日)

補足電子資料

以下はオンライン版のみの掲載となります。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/447/index.html>

Table S1. 植生調査データ

Table S2. 毎木調査データ

List S1. 植生調査データ (Table S1) から、指定した調査年・調査区の組成表を出力する R スクリプト

List S2. 毎木調査データ (Table S2) から、指定した調査区の樹種ごとの幹密度または胸高断面積合計の推移を出力する R スクリプト

Data on forest regeneration after catastrophic windthrow in the headwater region of the Ishikari River, Hokkaido, Japan

Hiroki ITÔ^{1)*}, Atsushi NAKANISHI¹⁾, Ikutaro TSUYAMA¹⁾, Takeshi SEKI¹⁾,
Shigeo IIDA²⁾ and Takayuki KAWAHARA¹⁾

Abstract

In 1954, the 15th typhoon (also known as the Tōyamaru typhoon) caused catastrophic windthrow to trees in the headwater region of the Ishikari River, Hokkaido, Japan. To monitor forest regeneration, the Hokkaido Research Center of the Forestry and Forest Products Research Institute began periodic surveys of vegetation and tree stem at six study sites in stands that had, prior to the typhoon, been near-climax conifer forest. To date, surveys have been conducted in the following years: 1957–1968, 1972, 1976, 1980, 1984, 1988, 2002, 2009, and 2017. For the surveys, belts 2 m wide and 30–50 m long were chosen in each plot, each divided into 2×2 m quadrats. In each quadrat, every plant species present was recorded and its coverage ranked (0–1%: +, 1–10%: 1, 10–25%: 2, 25–50%: 3, 50–75%: 4, 75–100%: 5) in each layer (canopy, subcanopy, shrub, herb, vine, and moss). Surveys of tree stems were conducted in 1993, 1998, 2002, 2009, and 2017, with plot widths enlarged to 10 m. In each belt, height and diameter at breast height were measured for all stems whose heights were ≥ 1.3 m. All the survey data have been organized in machine-readable format and published under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Key words: growth, long-term monitoring, machine-readable data, regeneration, typhoon, vegetation cover, windthrow

Received 20 April 2018, Accepted 28 June 2018

1) Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Kyushu Research Center, FFPRI

* Hokkaido Research Center, FFPRI, 7 Hitsujigaoka, Toyohira, Sapporo, Hokkaido, 062-8516 JAPAN; e-mail: hiroki@affrc.go.jp

研究資料 (Research record)

森林小流域における降水および溪流水の水質モニタリング —釜淵森林理水試験地における 2000～2014 年の結果—

篠宮 佳樹^{1)*}、山田 毅²⁾、平井 敬三²⁾、小野 賢二³⁾、野口 正二⁴⁾、
久保田 多余子⁵⁾、阿部 俊夫³⁾

要旨

我が国でも有数の積雪地である東北地方山形県の釜淵森林理水試験地 1 号沢における 2000～2014 年の降水と溪流水の主要な溶存成分濃度の年平均値と降水による年流入負荷量を算出し、それらの経年変化について報告する。試験流域の面積は 3.06 ha、植生は針広混交林である。降水中の NO_3^- や SO_4^{2-} の濃度に明瞭な変動傾向はみられなかった。降水による溶存態無機窒素の年平均流入負荷量は $12.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で、そのうちの概ね 6 割が NO_3^- -N であった。 SO_4^{2-} の年平均流入負荷量は $63.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で、そのうちの約 2/3 が非海塩由来であった。 NO_3^- や SO_4^{2-} の年流入負荷量と年降水量との間に正の相関が認められた。 NO_3^- や SO_4^{2-} の降水による年流入負荷量は、濃度より降水量に依存することが示唆された。溪流水の NO_3^- の年平均濃度に変動はあったが、明瞭な経年変化は認められなかった。溪流水の SO_4^{2-} の年平均濃度に変化はみられなかった。

キーワード：森林、積雪、降水、溪流水、溶存成分濃度、経年変化、東北地方

1. はじめに

国土の約 2/3 を占め、その多くが山地に存在するわが国の森林には、清浄な水を安定的に供給する役割が期待されている。しかし、欧米において酸性降下物が森林衰退や生態系の攪乱、溪流水の酸性化を招くことが報告され (Oden 1976)、森林がもつ清浄な水を安定的に供給する機能を発揮できなくなることが危惧された。国内においてはスギやモミなどの衰退が確認され、酸性雨や酸性霧の影響が疑われた (梨本・高橋 1991, Igawa et al. 2002)。その結果、積雪地も含め国内各地の森林で降水、林内雨、樹幹流および溪流水の水質の実態が観測されるようになった (真田ら 1991, 飯田ら 1995, 相澤ら 2003, 高橋ら 2005, Kaneko et al. 2007, 釣田・大貫 2017 など)。観測を通じて、関東平野周辺部の森林で、溪流水中の NO_3^- 濃度の上昇が顕在化しつつあることが明らかになった (伊藤ら 2004, 吉永ら 2012)。一方、積雪地では、融雪に伴い積雪中の酸性物質が土壌や溪流に一時的かつ多量に供給される、アシッドショックと呼ばれる現象が認められている (鈴木 2012)。これまでのところ、国内の積雪地域においては融雪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著になる可能性もある。このような背景から、積雪地域においても降水を通じて流入する負荷量や森林から流出する溪流水の水質の実態を把握しておくことが重要である。森林総合研究所では、北海道から九州まで 7 箇所の森林流域において降水および溪流水の水質モニタリングを継続して行ってきた (森林総合研究所 2010a)。その成果は「森林降水溪流水データベース (FASC-DB)」として森林総合研究所のウェブサイトを通じて 2008 年までのデータが公開されている (稲垣ら 2008)。本報では、2009 年以降のデータを加えた 2000～2014 年の観測結果を基に、東北地方の積雪地に位置する森林流域の降水、溪流水の主要溶存成分濃度、降水による流入負荷量の経年変化について報告する。

2. 研究方法

2.1 調査地

調査地は森林総合研究所東北支所山形実験林に属する釜淵森林理水試験地 (以下、釜淵試験地) である (Fig. 1)。釜淵試験地の所在は山形県最上郡真室川町大字釜淵の山形森林管理署最上支署管内の鶴下田沢国有林であり、水系としては最上川の流域北部の支流である鮭川の支流の

原稿受付：平成 29 年 12 月 25 日 原稿受理：平成 30 年 7 月 12 日

1) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

2) 森林総合研究所 立地環境研究領域

3) 森林総合研究所 東北支所

4) 森林総合研究所 森林防災研究領域

5) 森林総合研究所 企画部

* 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1



Fig. 1. 試験地の位置

The location of research site

国土地理院の電子地形図(タイル)を利用して作成

The Geospatial Information Authority of Japan standard map was used

真室川の支沢にあたる。1971～2000年の年平均気温は11.1℃、年降水量は2405.6 mm、最大積雪深は153 cmである(細田ら2009)。釜淵試験地から最も近いアメダス気象観測所「差首鍋」(試験地から西南西へ約6 km、標高88 m)における1981年～2010年の年平均降水量は2,711.0 mm、年平均気温10.0℃である(気象庁2017)。なお、三浦ら(2006)、野口ら(2014)、阿部ら(2016)を参考にすると、例年12月以降より積雪が始まり、4月まで残雪がみられる。

水質分析用の渓流水は釜淵試験地の1号沢において採集した(Fig. 1)。1号沢の流域面積は3.06 ha、標高は162～252 m、地質は第三紀凝灰岩・頁岩質凝灰岩、土壌は褐色森林土、植生はブナ(*Fagus crenata*)、ミズナラ(*Quercus crispula*)、コナラ(*Quercus serrata*)などの落葉広葉樹林とスギ(*Cryptomeria japonica*)を主とする人工林から成る針広混交林である(森林総合研究所2010b)。なお、流域の植生はもともと広葉樹であったが、牧草地入手のための火入れや薪炭材入手のため部分皆伐が行われ、その後1912～1916年にスギ、ヒノキなどが部分的に植栽された。それ以降入手が加えられていない(三浦ら2006)。小野・佐藤(1984)によれば、1号沢の平均土壌深は45.6 cm、平均傾斜は32.0°、主流長は295 mである。

2.2 降水の採取方法

降水の採取は、森林総合研究所東北支所山形試験地の気象観測露場(標高160 m)において、雪雨水採取装置(サンテクノ製ST-1F型)を用いてポリタンクに貯水し、原則として毎月1～2回の頻度で降水を採取した(Fig. 1)。気象観測露場は1号沢からみて南東方向に約1 km離れている。ロート型受水器の直径は21 cmで、ロート型受水器以下全体がアルミ製の格納箱で遮蔽されている。雪雨水採取装置のロート型受水器には半導体ヒーターが取り付けられており、冬季(12月～4月)は電力を供給し温度制御により降雪中も採水することが可能である。ただし、三浦ら(2006)によれば、2000年5月から11月までポリエチレン製ロート(直径30 cm)を地上約70 cmの高さに設置して降水を20 Lのポリタンクに貯留して採水した(直射日光が当たるのを防ぐため、ポリタンクにポリバケツを被せた)。

2.3 渓流水の採取方法

渓流水の採取は量水堰に接する沈砂池の上流で行った。ただし、流量が非常に少ない時季や積雪に覆われた冬季は沈砂池付近で採取する場合があった。採水頻度は原則として月2回とし、降水量や気象条件等により月に1～6回とした。採水は500 mLポリ瓶を用いて通年行った。

2.4 分析方法

採取された試料水は研究室に持ち帰った後、電気伝導度 (EC) を白金電極法で、pH をガラス電極法で測定した。0.45 μm のメンブランフィルターでろ過後、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} および SO_4^{2-} 濃度はイオンクロマトグラフィー法 (YOKOGAWA 製 IC7000D、2004 年 1 月以降はメトローム製 CompactIC761) で、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、および Si 濃度は ICP 発光分光分析法 (PerkinElmer 製 Optima4300DV) で測定した。ただし、2000 年 9 月までの Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度は原子吸光光度法 (日立製作所製 Z-6100) により、2000 年 10 月から 2003 年 12 月までの Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度は原子吸光光度法 (日立ハイテクノロジーズ製 Z-5310) により、2004 年 1 月から 2005 年 12 月までの Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度はイオンクロマトグラフィー法 (メトローム製 CompactIC761) により測定された。 NO_2^- 濃度は 2005 年から、Si 濃度は 2006 年から測定を開始した。 HCO_3^- 濃度は、志知ら (2005) と同様に、全有機炭素分析計 (島津製作所製 TOC-5000A、2006 年 1 月以降は島津製作所製 TOC-Vcph) で測定した無機炭素濃度について、試料の pH 値からすべて HCO_3^- であるとの仮定により C の原子量で除し、 HCO_3^- の分子量を乗じて算出した。

2.5 除外データ

採取時や分析時に生じたと思われる異常データを除外するため、高橋ら (2005) にない、試料ごとにイオンバランス、EC、リン酸イオンの 3 項目で分析精度を管理し、基準を超えた試料について平均値や流入負荷量の算定対象から除外した。高橋ら (2005) の方法は酸性雨研究センター (2000) が東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) において使用した方法と計算手順は同様であるが、基準値が EANET より緩和されている。本報では降水や溪流水の水質の年変動の把握を目的としていること、多少イオンバランス等に問題があっても除外されるデータ数を少なくすることに重点を置いていることから、高橋ら (2005) の基準を用いた。詳細は高橋ら (2005) に示されているので、本報では分析精度管理の概要を示す。

① PO_4^{3-} 濃度が 0.01 mg L^{-1} 以上であるデータを除外する。

② イオンバランスに関する基準 (R1) を 1) 式で計算する。R1 は総陽イオン濃度 (Cations) と総陰イオン濃度 (Anions) から算出され、R1 が Cations と Anions の合計当量濃度をもとに以下の基準を超えたものを除外した。なお、Cations には水素イオン濃度 (pH より算出) も含まれている。また、総イオン濃度により、R1 は異なる 3 つの値が適用される。

$$\text{R1 (\%)} = 100 \times (\text{Cations} - \text{Anions}) / (\text{Cations} + \text{Anions}) \quad 1)$$

Cations + Anions (meq L^{-1})	R1 (%)
< 0.05	± 50
0.05–0.1	± 25
> 0.1	± 15

③ 主要イオンの当量濃度から EC の計算値 (EC_{cal}) を求め、この値と EC の実測値 (EC_{obs}) を用いて、2) 式に定義される R2 を計算する。R2 が基準値を超えたものを除外する。なお、R2 は EC_{obs} により 3 つの異なる値が適用される。

$$\text{R2} = 100 \times (\text{EC}_{\text{cal}} - \text{EC}_{\text{obs}}) / (\text{EC}_{\text{cal}} + \text{EC}_{\text{obs}}) \quad 2)$$

$\text{EC}_{\text{obs}} (\text{mS m}^{-1})$	R2 (%)
< 0.5	± 30
0.5–3	± 20
> 3	± 15

溪流水では全ての試料水について、降水に関しては pH が 6 を超えた試料について、 HCO_3^- 濃度も加味して、R1、R2 を算出した。なお、Appendix table 1、Appendix table 2 において R1、R2 の基準値を超えた試料、及び PO_4^{3-} の検出された試料についてフラグを掲出し、明示した。Table 1 に示されている降水データの完全度 (C_R)、Table 3 に示されている溪流水データの完全度 (C_S) は、釣田・大貫 (2017) と同様の方法で評価した。2000 年の 3 月 14 日、3 月 15 日、3 月 16 日の溪流水について、主要イオンである HCO_3^- 濃度が測定されていなかったため、分析精度管理を実施しなかった。そのため、2000 年 3 月 14 日、3 月 15 日、3 月 16 日の溪流水の他の成分について測定値はあっても年平均値の算定から除外されている。

2.6 溶存成分濃度の年平均値の計算方法

降水の溶存成分濃度の年平均値は採水量による加重平均により算出した。回収された年月日により該当年を決定した。2000 年の降水については、1 年を通じた観測が出来ていないため、年平均値を算出できなかった。

溪流水の溶存成分濃度の年平均値は算術平均により算出した。ただし、2007 年の 11 月 19 日、12 月 19 日の溪流水の Si について測定できなかったため、2007 年の Si 濃度の年平均値は 32 データ (他の成分は 34 データ) から算出した。

2.7 降水による溶存成分の年間流入負荷量の計算方法

降水による溶存成分の年間流入負荷量は、2.6 で算出された降水中的各溶存成分濃度の加重平均値と年降水量 (年降水量は除外データの期間雨量も含めて積算されている) の積により算出した。各年の 1 月から 12 月に回収された降水試料を該当年の試料としたため、12 月の最後の回収の後に降った降雨雪は翌年の試料となる。降水の溶

存成分の年平均値と同様の理由により、降水による溶存成分の年間の流入負荷量について 2000 年は算出しなかった。また、Table 1 および Table 2 に示した年降水量は雪雨水採取装置のポリタンク採集に基づく計測値であるため、細田ら (2009) に記載されている降水量と完全には一致しない。

3. 結果と考察

3.1 降水中の溶存成分濃度の年平均値の変化

釜淵試験地における降水に含まれる溶存成分の平均濃度 (加重平均) の変化を示す (Table 1)。年降水量は 2001 ~ 2014 年の算術平均で 2,671 mm であり、このうち 2013 年が最大で 3,685 mm、2008 年が最小で 2,041 mm であった。なお、2013 年 7 月 19 日に回収した降水は貯留容器をオーバーフローしたため、2013 年 6 月 20 日 ~ 年 7 月 19 日の雨量は気象観測露場に設置された転倒マス式雨量計の結果を用いた。降水中の溶存成分の年平均値の変化を Fig. 2 に示す。NO₃⁻ や SO₄²⁻ に関する年平均濃度の経年変化について、明確な増加や減少の傾向は認められなかった。Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、EC_{obs} について 2003 年で低く、2010 年で高く、2011 年で低いという変化の傾向が共通していた。K⁺ 濃度の年平均値は 2004 年の 0.26 mg L⁻¹ (相対比 2.12) から、2011 年の 0.04 mg L⁻¹ (0.32) の範囲となり、変動が大きかった。

3.2 降水による溶存成分の年流入負荷量の変化

釜淵試験地における降水を通じた溶存成分の年間の流入負荷量の変化を示す (Table 2)。溶存態無機窒素 (DIN) の年流入負荷量は 8.1 ~ 17.6 (平均 12.4) kg ha⁻¹ yr⁻¹ で、DIN の NH₄⁺-N と NO₃⁻-N の比率は、NO₃⁻-N が 47 ~ 71 (平均 56) % を占めた。SO₄²⁻ の年平均流入負荷量は 63.0 kg ha⁻¹ yr⁻¹ で、このうち非海塩由来の SO₄²⁻ は 58 ~ 72 (平均 66) % を占めていた。この値は、釣田・大貫 (2017) の 95% に比べて低い割合である。降水による溶存成分の年流入負荷量の変化を Fig. 3 に示す。NO₃⁻-N、SO₄²⁻、年降水量の変動は 2008 年で低く、2013 年で高いなど、それらの増減パターンが非常に類似していた。年降水量と NO₃⁻-N の年間流入負荷量との関係について相関を調べたところ、有意な正の相関 ($r_s=0.77$ 、 $P<0.01$ 、 $n=14$) が認められた。同様に、SO₄²⁻ ($r_s=0.77$ 、 $P<0.01$ 、 $n=14$)、非海塩由来の SO₄²⁻ ($r_s=0.76$ 、 $P<0.01$ 、 $n=14$) も年降水量と正の相関が認められた。なお、NO₃⁻、SO₄²⁻ の年平均濃度と年降水量との関係について有意差は確認されていない。これらのことから、NO₃⁻-N、SO₄²⁻ の年流入負荷量は、濃度よりもむしろ降水量の影響が大きい可能性が示唆された。この他、K⁺ の年流入負荷量は 2004 年に多かった。これは 2004 年の K⁺ 濃度が高かったためと考えられる (Fig. 2)。その他の成分で明瞭な傾向は認められなかった。

3.3 渓流水中の溶存成分の年平均値の変化

釜淵試験地 1 号沢における渓流水の平均濃度 (算術平均) の経年変化を示す (Table 3)。pH について、2010 年までは 6.5 以上であったが、2011 年は 6.31 へ低下した。これは 2010 年 9 月 24 日に 6.32 に低下 (前回の採水日 2010 年 9 月 8 日の 6.88、前年同時期 2009 年 9 月 24 日の 6.80 と比べても約 0.5 低下) し、その後も低い傾向が続いたためである。2010 年 9 月 13 日に日降水量 192 mm、最大 1 時間降水量 47.5 mm (9 月 11 ~ 13 日の総降水量 259 mm) の豪雨が発生しており、この豪雨に伴い何らかの影響を受けた可能性が考えられたが、詳細な理由については不明である。

渓流水中の主要溶存成分濃度の年平均値の変化を Fig. 4 に示す。NO₃⁻ は 2006 年に 1.22 mg L⁻¹ (相対比で 1.4) と高くなった。しかし、その要因は明らかになっていない。2013 年は年降水量が多く、NO₃⁻-N の流入負荷量も多かったが、渓流水の NO₃⁻ 濃度については特に変化は認められなかった。SO₄²⁻ についても変動はあまり大きくなく、明確な傾向は見いだせなかった。その他の成分についても同様であった。

4. まとめ

わが国でも有数の積雪地に位置する釜淵試験地において 2000 年から 2014 年に採取した降水、渓流水の観測結果に基づいて、主要溶存成分の年平均濃度や年流入負荷量について報告した。降水中の NO₃⁻-N や SO₄²⁻ の濃度や流入負荷量に関する明確な増加もしくは減少の傾向は認められなかった。流入負荷量の変動に対応する渓流水の NO₃⁻、SO₄²⁻ 濃度の変動の兆候も認められなかった。以上のことから、近年注目されている渓流水中の NO₃⁻ 濃度の上昇傾向は確認されなかった。なお、都市や産業の発達や越境汚染とは別に近年地球温暖化の傾向が顕在化し、わが国の積雪地域では積雪量の減少や融雪期間の短縮等が認められるなど、森林からの水流出に変化がみられる。こうした現象が主要な栄養塩の循環や溶存成分の流出に影響を及ぼしていないか、良質な水資源を安定的に供給できているか評価するためにも、降水・渓流水の水質モニタリングの継続が重要と考えられる。

謝 辞

本研究では、山形森林管理署最上支署管内鶴下田沢国有林を試験地として借用させていただいた。2000 ~ 2008 年のデータは当時森林総合研究所東北支所に在籍されていた、池田重人氏、三浦覚氏、相澤州平氏、岡本透氏、志知幸治氏、橋本徹氏が採取・分析されたものであり、細田育広氏、村上亘氏には降水・渓流水の採集に関して多大なご協力をいただいた。元森林総研職員の栗田稔美氏には、試験地の除雪や渓流水採取にご協力いただいた。さらに、長期間の試験が実施できたのは、東北森林管理局、林野庁、森林総合研究所・東北支所の関係各位による試

験地の維持・管理に対するご支援のお陰である。以上の方々に深く感謝の意を表します。本研究は、森林総合研究所運営交付金プロジェクト「森林流域の水質モニタリングとフラックスの広域評価」、森林総合研究所運営交付金基盤事業「降雨渓流水質モニタリング」による成果である。

引用文献

- 阿部 俊夫・久保田 多余子・野口 正二 (2016) 東北地方の多雪地帯における 2013 / 2014 年冬季の落葉広葉樹林、スギ林の降雪遮断特性および融雪特性. 東北森林科学会誌, 21, 6-10.
- 相澤 州平・岡本 透・池田 重人 (2003) 東北地方内陸部森林地帯における降水中の溶存成分濃度の季節変化および溶存成分負荷量. 森林総合研究所研究報告, Vol.2, No.3 (No.388), 157-164.
- 細田 育広・村上 亘・野口 正二 (2009) 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, Vol.8, No.1 (No.410), 51-70.
- Igawa, M., Okumura, K., Okochi, H., and Sakurai, N. (2002) Acid fog removes calcium and boron from fir tree: one of the possible causes of forest decline. *Journal of Forest Research*, 7, 213-215.
- 飯田 俊彰・上木 勝司・塚原 初男・上木 厚 (1995) 東北地方日本海沿岸地域における湿性酸性降下物の特性. 農土論集, 175, 47-56.
- 稲垣 昌宏・池田 重人・金子 真司・高橋 正通 (2008) 森林降水渓流水水質データベース (FASCDB) の構築. 森林科学, 54, 53-55.
- 伊藤 優子・三浦 覚・加藤 正樹・吉永 秀一郎 (2004) 関東・中部地方の森林流域における渓流水中の NO_3^- 濃度の分布. 日林誌, 86, 275-278.
- Kaneko, S., Akieda, N., Naito, F., Tamai K. and Hirano, Y. (2007) Nitrogen budget of a rehabilitated forest on a degraded granitic hill, *Journal of Forest Research*, 12, 38-44.
- 気象庁 (2017) “過去の気象データ検索”, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照 2017-09-20).
- 三浦 覚・橋本 徹・志知 幸治・細田 育広・相澤 州平・岡本 透・池田 重人・齋藤 武史・森 茂太・金指 達郎 (2006) (2) 東北 釜淵. 高橋 正通編 “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”. 森林総合研究所, 192-210.
- 梨本 真・高橋 啓二 (1990) 関東甲信・関西瀬戸内地方におけるスギの衰退現象. 森林立地, 32 (2), 70-78.
- 野口 正二・澤野 真治・玉井 幸治・久保田 多余子 (2014) 2012/2013 年冬季における樹冠通過降水量の観測. 東北の雪と生活, 29, 59-62.
- Oden, S. (1976) The acidity problem - an outline of concepts, *Water, Air, Soil Pollut.*, 6, 137-166.
- 小野 茂夫・佐藤 正平 (1984) 多雪地帯, 各種地文条件が洪水流出に及ぼす影響. 上村 武・松井 光瑤編 “プロジェクト研究成果シリーズ 157 山地崩壊及び洪水発生危険地区判定法の確立”. 農林水産技術会議, 118-123.
- 真田 勝・太田 誠一・大友 玲子・真田 悦子 (1991) 札幌近郊におけるトドマツ, エゾマツ人工林の樹幹流・林内雨および林外雨について. 森林立地, 33 (1), 8-15.
- 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.
- 森林総合研究所 (2010a) 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. 森林総合研究所, 83pp.
- 森林総合研究所 (2010b) “森林理水試験地データベース”, <http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/fwdb/index.html>, (参照 2017-09-06).
- 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渓流水質. 日林誌, 87, 340-350.
- 鈴木 啓助 (2012) 季節積雪地域の雪氷化学. 低温科学, 70, 119-129.
- 高橋 正通・加藤 正樹・石塚 和裕 (2005) 日本の森林域における梅雨期の降水成分 — 1990 年代における降水成分の全国分布と年変動 —. 森林総合研究所研究報告, Vol.4, No.1 (No.394), 1-37.
- 釣田 竜也・大貫 靖浩 (2017) 九州の鹿北流域試験地 3 号沢における 2001 ~ 2014 年の雨水と渓流水の水質. 森林総合研究所研究報告, Vol.16, No.1 (No.441), 29-60.
- 吉永 秀一郎・伊藤 優子・相澤 州平・釣田 竜也 (2012) 関東平野北東部の森林流域における渓流水の NO_3^- 濃度分布と東京都心からの距離との関係. 日林誌, 94, 84-91.

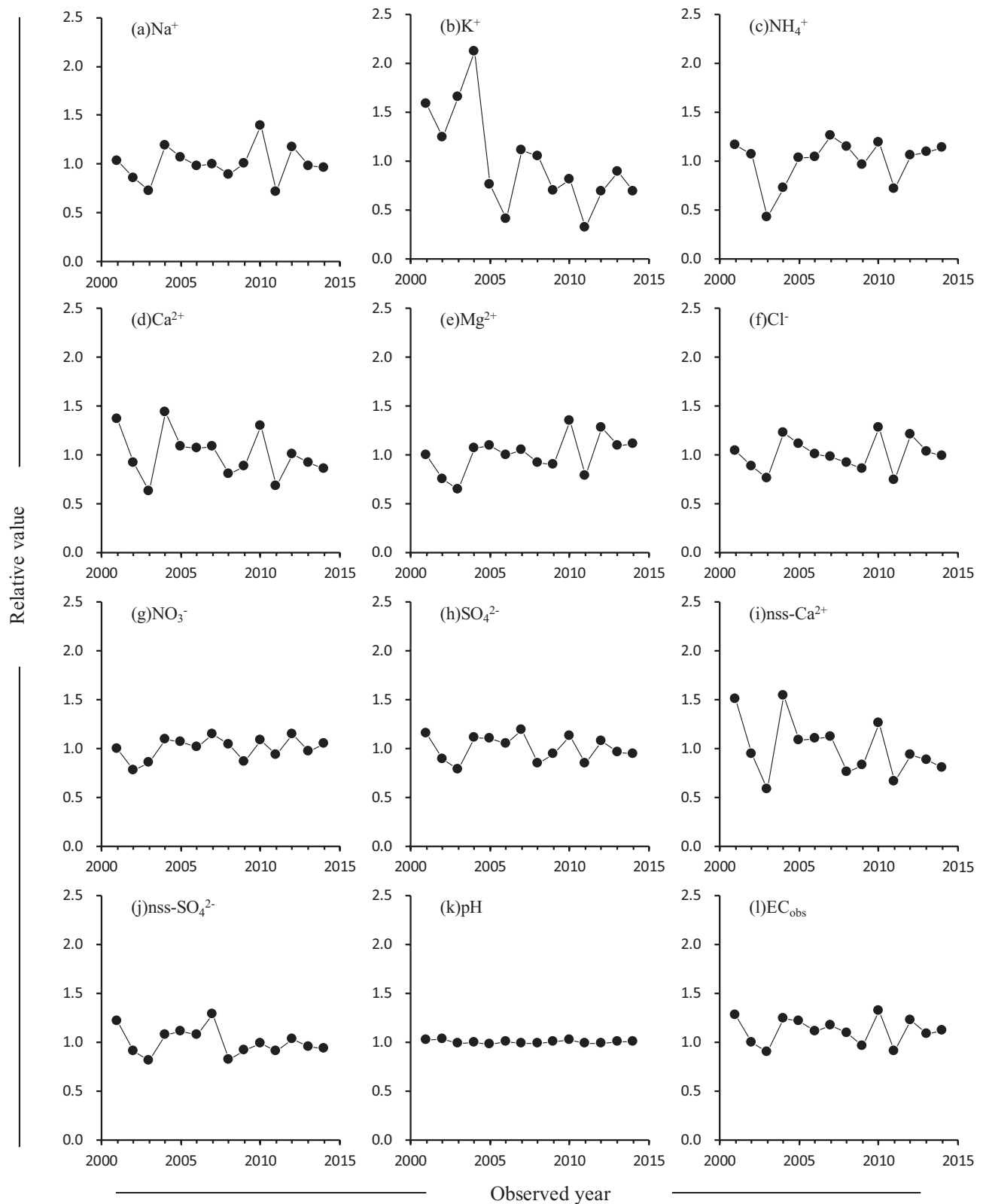


Fig. 2. 釜淵試験地における降水の (a) Na^+ 、(b) K^+ 、(c) NH_4^+ 、(d) Ca^{2+} 、(e) Mg^{2+} 、(f) Cl^- 、(g) NO_3^- 、(h) SO_4^{2-} 、(i) nss-Ca^{2+} 、(j) nss-SO_4^{2-} 、(k) pH、(l) EC_{obs} の年平均値の変化

Change of mean annual value of (a) Na^+ 、(b) K^+ 、(c) NH_4^+ 、(d) Ca^{2+} 、(e) Mg^{2+} 、(f) Cl^- 、(g) NO_3^- 、(h) SO_4^{2-} 、(i) nss-Ca^{2+} 、(j) nss-SO_4^{2-} 、(k) pH and (l) EC_{obs} in rainfall at the Kamabuchi experimental watershed

2001 年～2014 年の平均値を 1 としたときの相対的变化

Relative change to the average value between 2001 and 2014, which is defined as one.

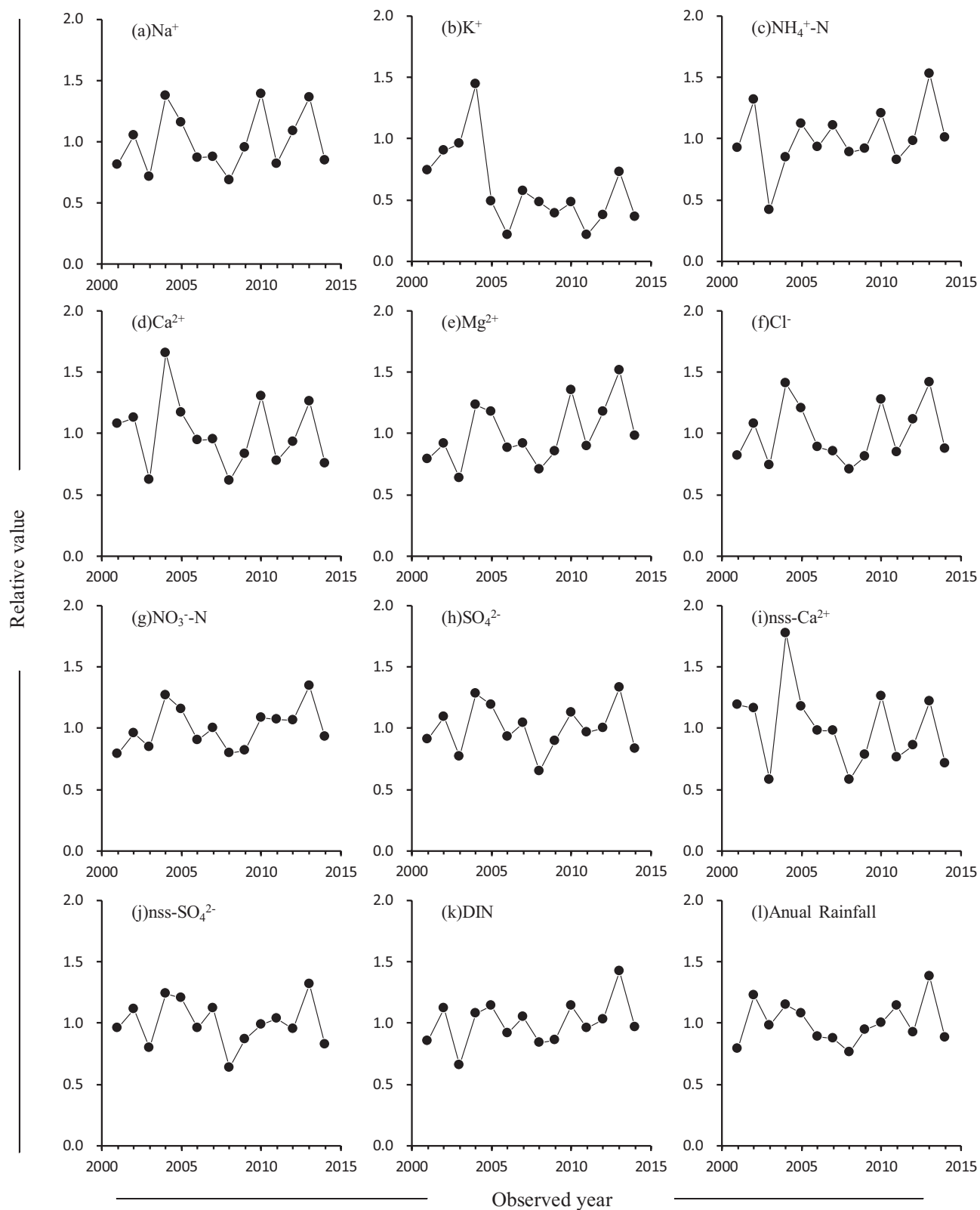


Fig. 3. 釜淵試験地における降水による (a) Na^+ 、(b) K^+ 、(c) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、(d) Ca^{2+} 、(e) Mg^{2+} 、(f) Cl^- 、(g) $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、(h) SO_4^{2-} 、(i) nss-Ca^{2+} 、(j) nss-SO_4^{2-} 、(k) DIN の年流入負荷量および (l) 年降水量の変化

Change of annual input of (a) Na^+ 、(b) K^+ 、(c) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、(d) Ca^{2+} 、(e) Mg^{2+} 、(f) Cl^- 、(g) $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、(h) SO_4^{2-} 、(i) nss-Ca^{2+} 、(j) nss-SO_4^{2-} 、(k) DIN through rainfall and (l) annual rainfall at the Kamabuchi experimental watershed 2001 年～2014 年の平均値を 1 としたときの相対的变化

Relative change to the average value between 2001 and 2014, which is defined as one.

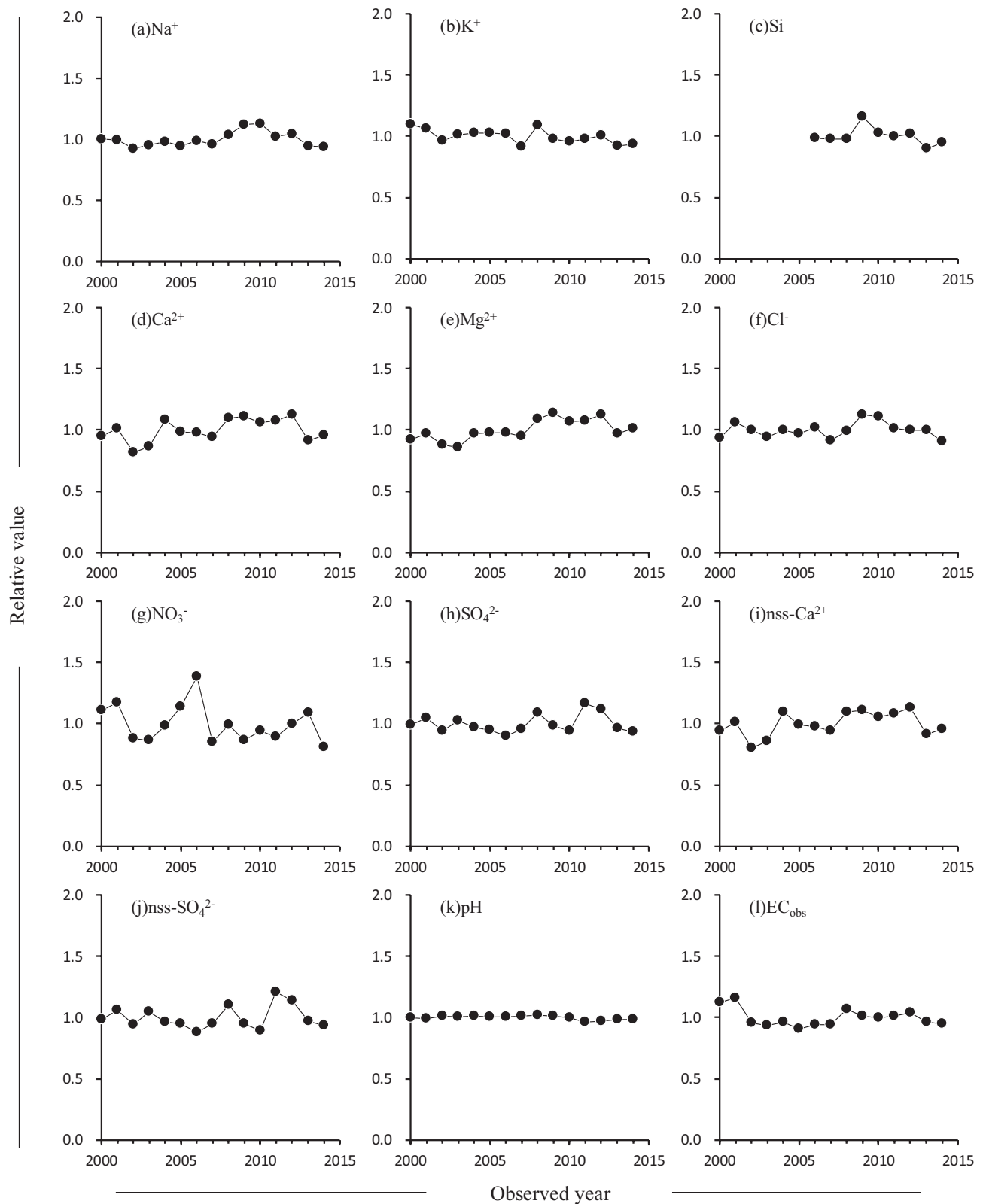


Fig. 4. 釜淵試験地1号沢における渓流水の (a) Na^+ 、(b) K^+ 、(c) Si 、(d) Ca^{2+} 、(e) Mg^{2+} 、(f) Cl^- 、(g) NO_3^- 、(h) SO_4^{2-} 、(i) nss-Ca^{2+} 、(j) nss-SO_4^{2-} 、(k) pH 、(l) EC_{obs} の年平均値の変化

Change of mean annual value of (a) Na^+ 、(b) K^+ 、(c) Si 、(d) Ca^{2+} 、(e) Mg^{2+} 、(f) Cl^- 、(g) NO_3^- 、(h) SO_4^{2-} 、(i) nss-Ca^{2+} 、(j) nss-SO_4^{2-} 、(k) pH 、(l) EC_{obs} in the streamwater at the Kamabuchi experimental watershed No.1

2000年～2014年の平均値を1としたときの相対的变化

Relative change to the average value between 2000 and 2014, which is defined as one.

Table 1. 釜淵試験地における降水の主要溶存成分濃度の年平均値^{*1}
Mean annual solute concentrations^{*1} of rainfall at the Kamabuchi experimental watershed

Year	RF ^{*2} mm	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	C _R ^{*3} %
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2001	2104	4.84	4.06	3.27	0.19	0.31	0.54	0.40	5.73	1.14	2.73	0.41	1.90	100
2002	3275	4.89	3.16	2.73	0.15	0.29	0.36	0.30	4.85	0.88	2.10	0.26	1.42	100
2003	2612	4.67	2.86	2.31	0.20	0.11	0.25	0.26	4.17	0.97	1.86	0.16	1.28	100
2004	3068	4.72	3.94	3.79	0.26	0.20	0.56	0.42	6.77	1.24	2.63	0.42	1.68	92
2005	2884	4.65	3.87	3.41	0.09	0.28	0.43	0.43	6.15	1.21	2.60	0.30	1.74	100
2006	2361	4.77	3.51	3.11	0.05	0.28	0.42	0.39	5.56	1.15	2.47	0.30	1.69	100
2007	2327	4.68	3.71	3.18	0.14	0.34	0.43	0.42	5.39	1.30	2.81	0.31	2.01	100
2008	2041	4.67	3.48	2.85	0.13	0.31	0.31	0.36	5.08	1.18	2.00	0.21	1.29	98
2009	2511	4.76	3.06	3.21	0.09	0.26	0.35	0.36	4.74	0.98	2.24	0.22	1.43	91
2010	2664	4.82	4.19	4.42	0.10	0.32	0.51	0.54	7.05	1.23	2.66	0.34	1.55	93
2011	3050	4.68	2.87	2.28	0.04	0.19	0.27	0.31	4.11	1.06	1.99	0.18	1.42	100
2012	2462	4.67	3.88	3.74	0.08	0.28	0.40	0.51	6.65	1.30	2.55	0.25	1.61	100
2013	3685	4.75	3.43	3.12	0.11	0.30	0.36	0.44	5.68	1.10	2.27	0.24	1.49	98
2014	2352	4.76	3.54	3.05	0.08	0.31	0.33	0.44	5.47	1.19	2.23	0.22	1.46	91
average ^{*4}	2671	4.74	3.54	3.18	0.12	0.27	0.39	0.40	5.53	1.14	2.37	0.27	1.57	97

*1 採水期間の降水量で重み付けした加重平均値 Weighted averages with rainfall amount of each sampling period

*2 年降水量 Annual rainfall

*3 降水データの完全度 Completeness of rainfall data

*4 算術平均 Arithmetic mean

Table 2. 釜淵試験地における降水による主要溶存成分の年流入負荷量
Annual element input through rainfall to the Kamabuchi experimental watershed

Year	RF ^{*1} mm	Na ⁺ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	K ⁺ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	Ca ²⁺ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	Mg ²⁺ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	Cl ⁻ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	SO ₄ ²⁻ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	nss-Ca ²⁺ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	DIN ^{*2} kg ha ⁻¹ yr ⁻¹
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2001	2104	68.8	4.1	5.1	11.3	8.3	120.5	5.4	57.4	8.6	40.1	10.5
2002	3275	89.3	5.0	7.3	11.8	9.7	158.9	6.5	68.9	8.4	46.5	13.8
2003	2612	60.4	5.3	2.3	6.5	6.7	108.9	5.7	48.5	4.2	33.3	8.1
2004	3068	116.1	8.0	4.7	17.3	13.0	207.9	8.6	80.8	12.9	51.7	13.3
2005	2884	98.3	2.7	6.2	12.3	12.5	177.3	7.9	74.9	8.5	50.2	14.1
2006	2361	73.3	1.2	5.1	9.9	9.3	131.2	6.1	58.3	7.1	39.9	11.3
2007	2327	73.9	3.2	6.1	9.9	9.7	125.5	6.8	65.4	7.1	46.8	13.0
2008	2041	58.1	2.6	4.9	6.4	7.4	103.7	5.4	40.9	4.2	26.3	10.3
2009	2511	80.5	2.2	5.1	8.7	9.0	119.1	5.5	56.2	5.6	36.0	10.6
2010	2664	117.8	2.6	6.6	13.6	14.3	187.8	7.4	70.8	9.1	41.2	14.0
2011	3050	69.6	1.2	4.6	8.2	9.5	125.2	7.3	60.7	5.5	43.2	11.8
2012	2462	92.0	2.1	5.4	9.8	12.4	163.8	7.2	62.8	6.3	39.7	12.7
2013	3685	115.1	4.0	8.4	13.2	16.0	209.3	9.1	83.7	8.8	54.8	17.6
2014	2352	71.7	2.0	5.6	7.9	10.4	128.7	6.3	52.3	5.2	34.3	11.9
average ^{*3}	2671	84.6	3.3	5.5	10.5	10.6	147.7	6.8	63.0	7.3	41.7	12.4

*1 年降水量 Annual rainfall

*2 溶存態無機窒素 Dissolved inorganic nitrogen (= NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)

*3 算術平均 Arithmetic mean

Table 3. 釜淵試験地 1 号沢における溪流水の主要溶存成分濃度の年平均値^{*1}
 Mean annual solute concentrations^{*1} of streamwater at the Kamabuchi experimental watershed No.1.

Year	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	C _{st} ^{*2} %
2000	6.57	7.18	6.82	1.48	0.03	2.57	0.87	8.29	0.97	7.65	— ^{*3}	2.31	5.93	86
2001	6.52	7.38	6.80	1.44	0.03	2.75	0.92	9.43	1.03	8.08	— ^{*3}	2.49	6.38	100
2002	6.64	6.12	6.32	1.31	0.04	2.21	0.83	8.86	0.77	7.30	— ^{*3}	1.96	5.65	100
2003	6.61	5.95	6.49	1.36	0.06	2.35	0.81	8.32	0.76	7.93	— ^{*3}	2.11	6.30	100
2004	6.62	6.14	6.69	1.38	0.02	2.94	0.91	8.86	0.86	7.48	— ^{*3}	2.68	5.81	100
2005	6.58	5.78	6.46	1.38	0.02	2.68	0.92	8.62	1.00	7.32	— ^{*3}	2.43	5.70	100
2006	6.60	6.01	6.73	1.38	0.02	2.65	0.92	9.00	1.22	6.97	12.10	2.40	5.28	100
2007	6.64	6.01	6.54	1.23	0.01	2.56	0.90	8.12	0.75	7.37	12.01	2.31	5.73	100
2008	6.69	6.82	7.06	1.47	0.02	2.96	1.03	8.78	0.87	8.41	11.96	2.70	6.64	100
2009	6.66	6.45	7.63	1.32	0.03	3.02	1.07	9.94	0.76	7.62	14.19	2.73	5.70	100
2010	6.57	6.38	7.71	1.29	0.00	2.88	1.01	9.86	0.83	7.31	12.63	2.59	5.37	100
2011	6.31	6.47	6.97	1.32	0.00	2.92	1.01	8.97	0.78	9.01	12.25	2.66	7.26	100
2012	6.34	6.63	7.14	1.36	0.00	3.05	1.06	8.83	0.87	8.64	12.49	2.78	6.85	100
2013	6.46	6.14	6.45	1.25	0.00	2.48	0.91	8.85	0.95	7.45	11.05	2.24	5.83	100
2014	6.44	6.04	6.41	1.27	0.00	2.59	0.95	8.01	0.71	7.24	11.63	2.35	5.64	100
average ^{*1}	6.55	6.37	6.81	1.35	0.02	2.71	0.94	8.85	0.88	7.72	12.26	2.45	6.00	99

*1 算術平均 Arithmetic mean

*2 溪流水データの完全度 Completeness of streamwater data

*3 Si 濃度未測定 Si concentration was not measured

Appendix table 1. 釜淵試験地における 2000 ～ 2014 年の降水の水質分析結果 (つづき)
Analytical data of rainwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed (continued)

Date	RF ^{*1} mm	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*2}
2008/5/8	28.9	4.95	1.89	0.01	0.63	0.12	0.56	0.39	0.12	1.10	0.00	1.91	0.00	1.63	0.06	0.37	1.47	0.10	0.10	1.68	3.36	-5.91	
2008/5/23	36.4	5.69	1.00	0.00	0.53	0.16	0.40	0.19	0.07	0.78	0.00	0.71	0.00	0.74	0.06	0.17	0.61	0.07	0.05	0.84	15.01	-8.78	
2008/6/10	46.8	5.85	0.90	0.00	0.18	0.11	0.69	0.14	0.04	0.27	0.00	0.89	0.00	0.68	0.06	0.13	0.64	0.06	0.04	0.72	24.66	-11.02	
2008/6/25	11.5	5.55	1.60	0.00	0.64	0.24	0.69	0.27	0.10	1.19	0.00	1.51	0.32	1.29	0.13	0.25	1.13	0.10	0.09	1.40	1.06	-6.35	P
2008/7/9	42.7	4.65	1.59	0.02	0.06	0.07	0.50	0.12	0.03	0.20	0.00	1.46	0.00	1.54	0.06	0.12	1.53	0.06	0.06	1.53	1.67	-1.84	
2008/7/25	154.8	4.47	1.93	0.03	0.09	0.03	0.41	0.12	0.03	0.23	0.00	1.41	0.00	1.47	0.04	0.12	1.45	0.07	0.06	1.88	7.21	-1.21	
2008/8/11	53.1	4.87	1.18	0.01	0.35	0.03	0.24	0.11	0.05	0.67	0.00	0.86	0.00	0.86	0.07	0.09	0.77	0.05	0.05	1.09	1.67	-3.73	
2008/8/26	288.1	4.75	1.01	0.02	0.25	0.04	0.17	0.07	0.03	0.48	0.00	0.62	0.00	0.77	0.13	0.06	0.71	0.04	0.04	1.09	6.47	3.76	
2008/9/11	86.0	4.61	1.14	0.02	0.04	0.02	0.12	0.11	0.02	0.25	0.00	0.48	0.00	0.81	0.12	0.10	0.80	0.04	0.03	1.20	12.02	2.48	
2008/9/25	32.3	5.08	1.01	0.01	0.16	0.04	0.62	0.15	0.04	0.46	0.00	0.56	0.00	0.62	0.24	0.15	0.58	0.06	0.04	0.92	27.46	-4.84	R1
2008/10/9	87.8	4.79	3.01	0.02	2.58	0.07	0.59	0.31	0.33	4.68	0.00	0.81	0.00	1.57	0.14	0.21	0.92	0.21	0.18	2.98	7.31	-0.44	
2008/10/24	52.5	4.88	1.55	0.01	0.75	0.07	0.27	0.22	0.16	1.47	0.00	0.72	0.00	1.13	0.04	0.19	0.94	0.09	0.08	1.47	5.92	-2.82	
2008/11/11	181.3	4.53	3.32	0.03	2.24	0.10	0.44	0.30	0.29	3.91	0.00	1.43	0.00	2.28	0.03	0.21	1.71	0.19	0.18	3.32	3.15	-0.02	
2008/11/27	180.7	4.78	2.02	0.02	1.79	0.08	0.11	0.15	0.20	3.01	0.00	0.42	0.00	0.98	0.01	0.08	0.53	0.13	0.11	2.02	6.08	0.03	
2008/12/9	101.1	4.58	4.05	0.03	3.98	0.10	0.11	0.30	0.47	7.17	0.00	0.73	0.00	1.88	0.02	0.15	0.88	0.26	0.25	4.09	1.73	0.45	
2008/12/25	88.9	4.73	3.05	0.02	2.03	0.08	0.47	0.74	0.29	3.42	0.00	1.81	0.00	2.69	0.03	0.66	2.18	0.20	0.18	3.04	3.70	-0.12	
2009/1/7	152.4	4.47	17.70	0.03	29.37	0.79	0.00	1.11	3.21	28.85	0.00	1.11	0.00	9.05	0.00	-0.01	1.68	1.65	1.02	17.31	23.61	-1.10	R1
2009/1/30	252.9	4.53	4.57	0.03	5.50	0.18	0.13	0.35	0.60	8.23	0.00	0.92	0.00	2.68	0.00	0.14	1.30	0.35	0.30	5.01	6.89	4.61	
2009/2/8	72.8	4.50	3.41	0.03	2.47	0.12	0.33	0.37	0.29	3.68	0.00	1.50	0.00	2.62	0.00	0.27	2.00	0.20	0.18	3.44	5.28	0.49	
2009/2/25	177.8	4.81	4.00	0.02	4.57	0.13	0.35	0.75	0.55	6.85	0.00	1.21	0.00	3.22	0.00	0.57	2.07	0.32	0.28	4.32	6.60	3.82	
2009/3/10	36.4	4.74	3.77	0.02	4.81	0.07	0.16	0.51	0.53	7.11	0.00	0.64	0.00	2.62	0.00	0.33	1.41	0.31	0.27	4.19	7.28	5.24	
2009/3/26	131.7	4.71	6.17	0.02	7.51	0.26	0.45	1.32	0.91	11.08	0.00	2.35	0.00	5.48	0.00	1.04	3.59	0.52	0.46	6.91	5.54	5.68	
2009/4/7	31.8	4.28	5.63	0.05	4.54	0.16	0.38	0.72	0.56	6.85	0.00	2.83	0.00	4.55	0.00	0.55	3.40	0.36	0.33	6.03	3.44	3.42	P
2009/4/24	61.8	6.54	2.60	0.00	1.33	0.21	3.10	0.41	0.22	2.22	0.00	1.48	0.57	2.31	0.00	0.36	1.98	0.27	0.25	3.41	4.51	13.49	
2009/5/7	66.4	5.53	0.67	0.00	0.62	0.00	0.18	0.12	0.07	0.95	0.00	0.21	0.00	0.37	0.00	0.10	0.22	0.05	0.04	0.67	15.30	0.09	
2009/5/26	102.2	4.87	1.69	0.01	0.92	0.00	0.35	0.34	0.13	1.40	0.00	1.14	0.00	1.86	0.00	0.31	1.63	0.10	0.10	1.72	2.09	0.79	
2009/6/9	15.0	4.74	2.15	0.02	0.43	0.09	0.92	0.64	0.13	0.86	0.00	2.14	0.00	3.12	0.02	0.62	3.01	0.13	0.12	2.32	3.39	3.80	
2009/6/26	71.0	4.74	1.65	0.02	0.60	0.00	0.45	0.22	0.08	1.00	0.00	1.14	0.00	1.68	0.00	0.19	1.53	0.09	0.08	1.67	2.59	0.75	
2009/7/10	155.3	4.77	1.17	0.02	0.18	0.00	0.37	0.10	0.02	0.40	0.00	0.73	0.00	1.10	0.00	0.09	1.05	0.05	0.05	1.17	5.69	0.05	
2009/7/24	272.0	4.97	0.93	0.01	0.33	0.00	0.30	0.05	0.03	0.55	0.00	0.56	0.00	0.84	0.00	0.04	0.76	0.05	0.04	0.92	5.25	-0.71	
2009/8/11	88.9	4.97	0.81	0.01	0.07	0.00	0.34	0.07	0.00	0.19	0.00	0.57	0.00	0.64	0.00	0.07	0.63	0.04	0.03	0.77	13.20	-2.49	
2009/8/27	79.1	4.72	1.48	0.02	0.29	0.00	0.51	0.12	0.03	0.51	0.00	0.95	0.00	1.50	0.00	0.11	1.43	0.07	0.06	1.45	5.25	-0.82	
2009/9/9	75.1	4.74	0.99	0.02	0.12	0.00	0.18	0.07	0.00	0.21	0.00	0.63	0.00	0.85	0.00	0.06	0.82	0.04	0.03	1.02	4.65	1.71	
2009/10/1	84.9	4.77	2.38	0.02	2.20	0.06	0.30	0.15	0.24	3.27	0.00	0.94	0.00	1.60	0.03	0.07	1.05	0.16	0.14	2.43	5.85	1.12	
2009/10/9	85.5	4.94	1.12	0.01	0.71	0.00	0.12	0.09	0.07	1.05	0.00	0.51	0.00	0.75	0.00	0.06	0.57	0.06	0.05	1.07	4.93	-2.28	
2009/10/23	81.4	4.75	4.24	0.02	4.86	0.23	0.29	0.79	0.58	7.19	0.00	1.66	0.00	3.69	0.00	0.60	2.47	0.34	0.31	4.68	4.88	4.98	
2009/11/10	80.8	4.47	2.80	0.03	1.60	0.00	0.16	0.22	0.19	2.39	0.00	1.39	0.00	2.29	0.00	0.15	1.89	0.14	0.14	2.80	0.28	0.01	

*1 採水期間の降水量 Rainfall amount of each sampling period

*2 品質管理の結果 “P” はりん酸の検出を示し、“R1”、“R2”は R1、R2 の基準値超えを示す Results of Quality Control “P”, “R1” and “R2” represents detection of PO₄³⁻, over-criteria in R1 and over-criteria in R2, respectively.

“n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Appendix table 1. 釜淵試験地における 2000 ～ 2014 年の降水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of rainwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed (continued)

Date	RF ^{*1} mm	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*2}
2009/11/25	143.2	4.72	5.51	0.02	8.33	0.24	0.00	0.34	0.86	11.72	0.00	0.45	0.00	2.89	0.00	0.02	0.80	0.48	0.40	6.06	8.83	4.76	
2009/12/7	75.1	4.36	6.36	0.04	7.30	0.13	0.11	0.35	0.78	10.78	0.00	1.22	0.00	4.09	0.00	0.07	2.26	0.45	0.41	6.77	4.99	3.13	
2009/12/22	117.8	4.69	4.92	0.02	6.96	0.10	0.00	0.33	0.74	10.10	0.00	0.50	0.00	2.65	0.00	0.06	0.90	0.40	0.35	5.34	7.30	4.12	
2010/1/13	258.1	4.39	9.78	0.04	11.98	0.40	0.09	0.67	1.46	19.77	0.00	1.37	0.00	5.07	0.04	0.21	2.07	0.73	0.69	10.25	3.21	2.34	
2010/2/11	263.3	4.53	5.59	0.03	5.99	0.16	0.00	0.43	0.72	9.93	0.00	1.13	0.00	3.06	0.06	0.21	1.56	0.38	0.36	5.59	1.80	0.03	
2010/2/22	28.3	4.59	3.69	0.03	2.68	0.00	0.00	0.50	0.36	4.36	0.00	0.94	0.00	2.82	0.10	0.40	2.15	0.20	0.20	3.31	0.14	-5.45	
2010/3/8	67.0	4.83	1.78	0.01	0.70	0.00	0.05	0.35	0.11	1.01	0.00	1.14	0.00	1.51	0.06	0.32	1.33	0.07	0.08	1.44	-2.84	-10.63	
2010/3/24	140.9	6.46	4.00	0.00	4.73	0.00	0.00	1.78	0.63	7.43	0.01	0.76	0.00	3.39	0.07	1.60	2.21	0.35	0.34	4.30	1.33	3.66	
2010/4/9	82.0	4.79	4.87	0.02	1.84	0.16	0.87	1.88	0.40	2.92	0.00	4.33	0.00	5.14	0.08	1.81	4.68	0.28	0.26	4.08	3.00	-8.88	
2010/4/26	71.0	4.84	6.16	0.01	8.20	0.33	0.30	0.97	0.98	12.77	0.00	1.94	0.00	3.82	0.07	0.66	1.76	0.52	0.47	6.80	5.39	4.95	
2010/5/12	57.2	5.05	2.27	0.01	0.97	0.06	0.30	1.31	0.25	1.28	0.00	2.93	0.00	3.08	0.07	1.27	2.84	0.16	0.15	2.29	2.69	0.36	
2010/5/28	103.9	4.86	1.08	0.01	0.32	0.00	0.09	0.11	0.05	0.55	0.00	0.53	0.00	0.92	0.03	0.10	0.84	0.04	0.04	0.98	-1.03	-4.66	
2010/6/9	6.7	5.14	1.70	0.01	0.25	0.18	1.07	0.52	0.14	0.55	0.00	2.20	0.00	2.33	0.23	0.51	2.27	0.12	0.10	1.75	9.05	1.50	
2010/6/25	70.7	4.53	2.04	0.03	0.52	0.00	1.08	0.17	0.08	0.89	0.00	1.67	0.00	2.05	0.04	0.15	1.92	0.13	0.09	2.40	14.47	8.06	R1
2010/7/8	54.9	5.27	0.47	0.01	0.12	0.00	0.45	0.06	0.02	0.15	0.00	0.42	0.00	0.37	0.07	0.05	0.34	0.04	0.02	0.57	36.59	9.79	
2010/7/26	134.0	4.98	0.97	0.01	0.17	0.00	0.59	0.05	0.02	0.24	0.00	0.87	0.00	1.09	0.02	0.04	1.05	0.05	0.04	1.00	10.87	1.56	
2010/8/4	44.5	4.61	1.89	0.02	0.32	0.00	0.96	0.13	0.04	0.40	0.00	1.65	0.00	2.18	0.06	0.11	2.10	0.10	0.08	2.01	9.47	3.24	
2010/8/26	157.4	4.56	2.01	0.03	0.33	0.00	0.84	0.11	0.04	0.53	0.00	1.34	0.00	1.97	0.03	0.10	1.88	0.10	0.08	2.02	11.19	0.29	
2010/9/8	56.6	5.14	0.75	0.01	0.46	0.00	0.30	0.08	0.05	0.66	0.00	0.38	0.00	0.33	0.04	0.06	0.22	0.05	0.03	0.76	24.35	0.55	
2010/9/24	386.9	5.07	0.64	0.01	0.13	0.00	0.32	0.03	0.02	0.22	0.00	0.39	0.00	0.45	0.01	0.03	0.42	0.04	0.02	0.64	22.63	0.08	
2010/10/6	43.3	4.83	1.14	0.01	0.45	0.00	0.36	0.07	0.05	0.80	0.00	0.47	0.00	0.70	0.02	0.05	0.58	0.06	0.04	1.15	16.79	0.26	R1
2010/10/24	78.0	4.83	1.20	0.01	0.42	0.00	0.56	0.09	0.05	0.62	0.00	0.80	0.00	1.01	0.02	0.07	0.90	0.07	0.05	1.28	17.41	3.18	R1
2010/11/11	185.4	4.50	6.19	0.03	7.48	0.00	0.46	0.35	0.83	11.87	0.00	1.22	0.00	3.33	0.01	0.06	1.46	0.47	0.42	6.65	5.02	3.56	
2010/11/24	18.8	5.59	7.95	0.00	11.32	0.33	0.32	1.84	1.35	17.24	0.02	2.17	0.00	5.31	0.05	1.41	2.47	0.72	0.63	8.74	6.76	4.72	
2010/12/6	161.1	4.47	9.23	0.03	12.44	0.34	0.31	0.75	1.41	19.16	0.00	1.47	0.00	4.90	0.02	0.28	1.78	0.75	0.67	10.04	6.21	4.20	
2010/12/24	194.5	4.70	4.10	0.02	4.71	0.00	0.17	0.53	0.53	7.07	0.00	1.39	0.00	2.35	0.01	0.35	1.17	0.30	0.27	4.26	5.77	1.86	
2011/1/14	270.8	4.61	3.93	0.02	4.04	0.07	0.00	0.29	0.52	7.21	0.00	0.52	0.00	1.92	0.02	0.13	0.90	0.26	0.25	4.00	1.39	0.85	
2011/1/24	114.4	4.31	6.49	0.05	6.21	0.13	0.00	0.35	0.78	11.61	0.00	1.04	0.00	3.08	0.02	0.12	1.52	0.40	0.41	6.67	-0.52	1.34	
2011/2/10	140.3	4.34	5.14	0.05	4.44	0.04	0.08	0.47	0.61	8.31	0.00	1.43	0.00	2.94	0.02	0.30	1.83	0.32	0.32	5.46	-0.14	2.99	
2011/2/24	60.0	4.58	3.76	0.03	3.19	0.06	0.08	0.27	0.43	5.75	0.01	1.19	0.00	2.20	0.02	0.15	1.40	0.22	0.23	3.67	-1.67	-1.22	
2011/3/4	98.7	4.23	5.17	0.06	3.59	0.06	0.26	0.46	0.50	6.83	0.00	2.53	0.00	3.28	0.03	0.32	2.38	0.30	0.30	5.62	-1.05	4.21	
2011/3/24	68.7	4.52	4.24	0.03	3.69	0.06	0.34	0.83	0.50	6.35	0.00	2.75	0.00	2.96	n.a.	0.69	2.04	0.29	0.29	4.65	1.39	4.63	
2011/4/12	69.9	4.24	3.62	0.06	1.36	0.21	0.16	0.67	0.26	2.44	0.00	2.95	0.00	2.77	0.04	0.62	2.43	0.19	0.17	4.06	3.18	5.67	
2011/4/22	18.5	4.37	4.00	0.04	0.98	0.60	0.65	1.05	0.32	1.93	0.00	3.32	0.00	4.65	0.05	1.02	4.40	0.22	0.20	4.11	2.56	1.35	
2011/5/9	150.7	4.57	2.53	0.03	1.03	0.04	0.47	0.56	0.20	1.98	0.00	1.57	0.00	3.13	0.03	0.52	2.87	0.14	0.15	2.75	-1.09	4.11	
2011/5/25	185.4	5.27	0.90	0.01	0.18	0.08	0.21	0.44	0.06	0.25	0.01	0.81	0.00	1.35	0.04	0.44	1.30	0.05	0.05	0.86	5.83	-2.00	
2011/6/9	57.7	5.14	0.79	0.01	0.02	0.00	0.20	0.19	0.03	0.13	0.00	0.78	0.00	0.71	0.05	0.19	0.71	0.03	0.03	0.65	-0.08	-10.08	

*1 採水期間の降水量 Rainfall amount of each sampling period

*2 品質管理の結果 “P” はリン酸の検出を示し、“R1”、“R2”は R1、R2 の基準値超えを示す Results of Quality Control “P”, “R1” and “R2” represents detection of PO₄³⁻, over-criteria in R1 and over-criteria in R2, respectively.

“n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Appendix table 1. 釜淵試験地における 2000 ～ 2014 年の降水の水質分析結果 (つづき)
Analytical data of rainwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed (continued)

Date	RF ^{*1} mm	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*2}
2011/6/27	328.0	5.07	0.63	0.01	0.09	0.00	0.08	0.06	0.01	0.17	0.00	0.45	0.00	0.39	0.02	0.05	0.36	0.02	0.02	0.53	2.05	-9.01	
2011/7/13	256.4	4.78	1.12	0.02	0.08	0.00	0.25	0.07	0.02	0.17	0.00	0.78	0.00	0.80	0.02	0.06	0.78	0.04	0.03	0.99	6.34	-6.41	
2011/8/11	103.9	4.72	1.49	0.02	0.25	0.00	0.38	0.18	0.04	0.49	0.00	1.18	0.00	1.69	0.04	0.17	1.63	0.06	0.07	1.47	-3.59	-0.64	
2011/8/23	283.5	4.60	1.42	0.03	0.16	0.00	0.36	0.04	0.02	0.25	0.00	0.79	0.00	1.69	0.03	0.03	1.65	0.06	0.05	1.51	0.78	3.10	
2011/9/7	52.0	5.66	0.81	0.00	0.40	0.00	0.31	0.11	0.05	0.66	0.01	0.50	0.00	0.69	0.13	0.10	0.59	0.05	0.04	0.66	5.74	-10.31	
2011/9/27	184.2	5.16	0.55	0.01	0.20	0.00	0.06	0.06	0.03	0.34	0.00	0.34	0.00	0.44	0.03	0.05	0.39	0.02	0.02	0.53	0.14	-2.09	
2011/10/11	103.9	4.32	3.19	0.05	2.10	0.00	0.34	0.20	0.27	3.52	0.00	1.31	0.00	2.82	0.05	0.12	2.29	0.19	0.18	3.82	2.99	9.03	
2011/10/27	98.7	4.44	3.38	0.04	3.09	0.00	0.28	0.26	0.39	5.13	0.00	1.46	0.00	2.40	0.03	0.14	1.63	0.23	0.22	3.98	2.90	8.11	
2011/11/8	23.1	4.41	2.15	0.04	0.96	0.00	0.21	0.16	0.13	1.47	0.01	1.42	0.00	1.66	0.10	0.12	1.42	0.11	0.10	2.52	5.41	7.83	
2011/11/29	138.0	4.29	7.26	0.05	7.97	0.00	0.21	0.43	1.06	14.32	0.00	1.48	0.00	4.46	0.05	0.13	2.45	0.52	0.52	8.21	-0.20	6.12	
2011/12/7	54.9	4.58	6.09	0.03	7.93	0.00	0.05	0.36	1.03	13.91	0.00	0.75	0.00	3.35	0.04	0.06	1.36	0.48	0.47	6.87	0.26	5.99	
2011/12/27	188.2	4.38	5.51	0.04	6.23	0.10	0.11	0.31	0.82	11.15	0.00	1.16	0.00	3.27	0.02	0.07	1.71	0.40	0.40	6.41	0.33	7.52	
2012/1/11	110.3	4.34	5.65	0.05	6.32	0.15	0.14	0.34	0.83	11.39	0.00	1.20	0.00	3.12	0.02	0.10	1.53	0.42	0.41	6.64	1.47	8.02	
2012/2/8	184.2	4.41	6.73	0.04	7.82	0.26	0.12	0.44	1.02	14.16	0.00	1.10	0.00	3.40	0.02	0.14	1.43	0.50	0.49	7.48	1.09	5.31	
2012/3/14	217.7	4.41	3.91	0.04	3.58	0.00	0.20	0.32	0.47	6.24	0.00	1.56	0.00	2.44	0.02	0.19	1.54	0.26	0.25	4.45	1.67	6.50	
2012/4/12	265.6	4.60	7.33	0.03	8.21	0.15	0.53	0.98	1.14	14.84	0.00	2.63	0.00	4.45	0.03	0.67	2.39	0.56	0.55	7.94	0.40	4.02	
2012/4/25	24.8	5.42	0.92	0.00	0.28	0.00	0.04	0.42	0.10	0.41	0.01	0.88	0.00	0.84	0.13	0.41	0.77	0.05	0.04	0.70	3.82	-13.18	
2012/5/10	73.3	4.81	1.39	0.02	0.40	0.00	0.35	0.36	0.09	0.64	0.00	1.27	0.00	1.51	0.05	0.35	1.41	0.08	0.07	1.45	5.44	2.31	
2012/5/24	53.7	4.36	2.36	0.04	0.34	0.00	0.63	0.47	0.09	0.54	0.00	2.34	0.00	2.90	0.04	0.45	2.81	0.12	0.11	2.90	4.20	10.27	
2012/6/13	39.8	4.44	2.88	0.04	0.19	0.00	1.10	0.49	0.08	0.32	0.00	2.98	0.00	3.63	0.06	0.48	3.58	0.14	0.13	2.96	1.56	1.34	
2012/6/27	74.5	4.87	0.80	0.01	0.18	0.00	0.08	0.10	0.03	0.33	0.00	0.71	0.00	0.59	0.03	0.10	0.55	0.03	0.03	0.84	-0.55	2.52	
2012/7/11	205.6	4.65	1.54	0.02	0.04	0.00	0.58	0.09	0.01	0.13	0.00	1.20	0.00	1.90	0.01	0.09	1.88	0.06	0.06	1.54	-0.31	0.17	
2012/7/25	101.6	4.54	1.53	0.03	0.11	0.00	0.28	0.08	0.02	0.21	0.01	1.10	0.00	1.40	0.03	0.08	1.37	0.05	0.05	1.58	1.80	1.83	
2012/8/10	26.0	4.43	2.01	0.04	0.32	0.00	0.62	0.27	0.06	0.49	0.00	2.32	0.00	2.23	0.06	0.25	2.15	0.10	0.10	2.47	3.09	10.36	
2012/8/24	87.2	4.77	0.86	0.02	0.18	0.00	0.12	0.07	0.03	0.29	0.00	0.67	0.00	0.73	0.03	0.07	0.69	0.04	0.03	0.98	4.22	6.60	
2012/9/11	62.9	4.77	1.00	0.02	0.14	0.00	0.20	0.11	0.02	0.20	0.01	0.72	0.00	0.85	0.03	0.10	0.81	0.04	0.03	1.01	8.30	0.84	
2012/9/28	70.4	4.81	1.06	0.02	0.27	0.00	0.16	0.10	0.05	0.47	0.01	0.95	0.00	0.77	0.03	0.09	0.70	0.05	0.04	1.06	0.60	-0.09	
2012/10/10	50.8	5.18	0.69	0.01	0.28	0.00	0.02	0.10	0.04	0.44	0.00	0.42	0.00	0.42	0.02	0.09	0.35	0.03	0.03	0.56	1.52	-10.09	
2012/10/23	64.1	4.55	3.96	0.03	3.37	0.11	0.37	0.41	0.45	5.77	0.00	1.60	0.00	2.78	0.02	0.28	1.93	0.25	0.25	4.10	1.70	1.70	
2012/11/26	463.7	5.02	3.35	0.01	3.54	0.21	0.21	0.44	0.47	6.04	0.01	0.77	0.00	2.20	0.01	0.30	1.32	0.24	0.23	3.32	2.56	-0.43	
2012/12/18	285.3	4.50	6.62	0.03	7.33	0.00	0.18	0.52	0.96	13.21	0.00	1.21	0.00	3.99	0.02	0.24	2.15	0.47	0.48	7.00	-1.01	2.81	
2013/1/30	420.9	4.51	5.92	0.03	6.17	0.14	0.27	0.36	0.83	11.33	0.00	1.20	0.00	3.37	0.02	0.12	0.45	0.40	0.41	6.17	-0.71	2.06	
2013/2/27	356.3	4.55	7.94	0.03	8.54	0.36	0.38	0.62	1.17	15.69	0.00	1.25	0.00	4.24	0.02	0.30	0.50	0.56	0.55	8.00	0.61	0.37	
2013/3/21	165.1	5.14	8.46	0.01	8.10	0.37	1.31	2.00	1.24	14.62	0.00	3.83	0.00	7.56	0.07	1.70	1.82	0.64	0.63	8.61	0.98	0.90	
2013/4/11	96.4	4.83	4.46	0.01	4.48	0.22	0.33	0.63	0.62	7.94	0.00	1.54	0.00	2.79	0.04	0.46	0.58	0.32	0.31	4.48	1.50	0.25	
2013/4/25	102.8	5.37	2.63	0.00	1.18	0.07	0.63	1.24	0.27	1.88	0.00	2.56	0.00	3.50	0.05	1.19	1.07	0.18	0.17	2.45	2.58	-3.64	
2013/5/9	114.3	4.61	2.74	0.02	1.12	0.06	0.53	0.45	0.18	1.93	0.00	1.79	0.00	2.58	0.03	0.41	0.83	0.14	0.14	2.59	1.53	-2.75	

*1 採水期間の降水量 Rainfall amount of each sampling period

*2 品質管理の結果 “P” はリン酸の検出を示し、“R1”、“R2”は R1、R2 の基準値超えを示す Results of Quality Control “P”, “R1” and “R2” represents detection of PO₄³⁻, over-criteria in R1 and over-criteria in R2, respectively.

“n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Appendix table 1. 釜淵試験地における 2000 ～ 2014 年の降水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of rainwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed (continued)

Date	RF ^{*1} mm	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*2}
2013/5/28	24.8	5.00	2.05	0.01	0.49	0.18	0.38	1.00	0.17	0.69	0.00	2.54	0.00	2.76	0.08	0.98	0.93	0.12	0.12	1.92	1.14	-3.24	
2013/6/20	68.7	5.47	1.23	0.00	0.12	0.07	0.30	0.47	0.06	0.19	0.01	1.20	0.00	1.16	0.05	0.46	0.47	0.05	0.05	0.82	5.75	-20.42	R2
2013/7/19	856.0 ^{*3}	4.93	0.89	0.01	0.07	0.00	0.19	0.06	0.01	0.13	0.00	0.53	0.00	0.64	0.01	0.06	0.24	0.03	0.03	0.72	6.55	-10.68	
2013/8/23	252.9	4.51	1.43	0.03	0.08	0.00	0.39	0.11	0.02	0.18	0.00	1.21	0.00	1.57	0.02	0.10	0.57	0.06	0.06	1.74	5.15	9.82	
2013/9/10	251.2	4.91	0.68	0.01	0.17	0.00	0.18	0.07	0.03	0.28	0.00	0.57	0.00	0.73	0.02	0.07	0.25	0.04	0.03	0.83	5.51	9.36	
2013/10/28	259.8	4.94	1.38	0.01	1.25	0.00	0.12	0.16	0.18	2.23	0.00	0.56	0.00	0.93	0.02	0.11	0.23	0.09	0.09	1.55	2.00	5.86	
2013/11/15	125.9	4.53	4.05	0.03	4.26	0.15	0.16	0.30	0.56	7.66	0.00	0.92	0.00	2.43	0.02	0.13	0.37	0.29	0.28	4.55	1.15	5.76	
2013/11/27	229.2	4.70	3.36	0.02	3.75	0.10	0.05	0.19	0.49	6.80	0.00	0.51	0.00	1.64	0.01	0.05	0.19	0.24	0.23	3.62	0.85	3.70	
2013/12/5	150.7	4.42	4.46	0.04	4.60	0.10	0.19	0.27	0.60	8.30	0.00	1.32	0.00	2.69	0.02	0.10	0.46	0.31	0.31	5.16	0.39	7.25	
2013/12/17	210.2	4.57	4.88	0.03	5.19	0.22	0.20	0.33	0.72	9.50	0.00	1.11	0.00	2.81	0.05	0.14	0.41	0.35	0.34	5.25	0.10	3.65	
2014/1/8	255.2	4.53	5.27	0.03	5.16	0.20	0.35	0.51	0.70	9.23	0.00	1.71	0.00	3.13	0.03	0.31	1.84	0.36	0.35	5.50	1.17	2.14	
2014/2/5	232.7	4.27	6.63	0.05	5.38	0.21	0.55	0.44	0.67	9.77	0.00	1.96	0.00	4.42	0.04	0.24	3.07	0.40	0.40	6.81	0.18	1.31	
2014/3/5	129.9	4.36	5.28	0.04	4.70	0.12	0.33	0.43	0.67	8.39	0.00	1.75	0.00	3.29	0.07	0.25	2.11	0.35	0.33	5.68	1.81	3.65	
2014/4/8	262.2	4.53	4.67	0.03	4.51	0.18	0.48	0.52	0.63	8.08	0.00	2.13	0.00	3.00	0.05	0.35	1.86	0.33	0.32	5.16	1.50	4.97	
2014/5/8	28.9	4.58	4.19	0.03	1.67	0.23	1.10	1.51	0.42	2.53	0.00	4.65	0.00	5.50	0.09	1.44	5.08	0.28	0.26	4.40	2.65	2.48	
2014/5/23	138.6	4.90	1.28	0.01	0.78	0.09	0.20	0.17	0.13	1.34	0.00	0.63	0.00	1.09	0.07	0.14	0.89	0.08	0.07	1.36	5.60	3.22	
2014/6/3	18.5	5.39	1.31	0.00	0.20	0.00	0.75	0.43	0.08	0.26	0.02	1.63	0.00	2.08	0.12	0.42	2.03	0.08	0.08	1.25	3.30	-2.54	
2014/7/3	162.8	5.08	0.75	0.01	0.22	0.00	0.26	0.19	0.04	0.35	0.00	0.75	0.00	0.86	0.06	0.18	0.81	0.05	0.04	0.83	6.11	4.75	
2014/7/31	132.8	4.95	0.89	0.01	0.11	0.00	0.32	0.12	0.03	0.21	0.00	0.87	0.00	1.03	0.03	0.11	1.01	0.04	0.04	0.91	-0.01	0.85	
2014/8/28	209.6	5.16	0.70	0.01	0.09	0.00	0.09	0.07	0.02	0.14	0.00	0.25	0.00	0.39	0.03	0.07	0.38	0.02	0.02	0.46	13.94	-20.36	R2
2014/9/26	173.2	6.06	0.73	0.00	0.29	0.00	0.53	0.05	0.03	0.38	0.01	0.48	0.00	0.63	0.04	0.04	0.55	0.05	0.05	0.67	-5.32	-4.06	
2014/10/24	207.3	4.98	0.77	0.01	0.41	0.00	0.00	0.10	0.06	0.62	0.00	0.37	0.00	0.60	0.03	0.08	0.50	0.04	0.04	0.78	2.10	1.22	
2014/11/21	171.5	4.57	6.22	0.03	4.95	0.00	0.00	0.41	0.97	9.24	0.00	0.58	0.00	2.34	0.03	0.22	1.08	0.35	0.32	5.09	4.57	-9.95	
2014/12/5	228.7	4.51	3.77	0.03	4.26	0.00	0.10	0.31	0.57	7.67	0.00	0.55	0.00	2.04	0.03	0.15	0.97	0.28	0.27	4.45	3.02	8.23	

*1 採水期間の降水量 Rainfall amount of each sampling period

*2 品質管理の結果 “p” はリン酸の検出を示し、“R1”、“R2”は R1、R2 の基準値超えを示す Results of Quality Control “p”, “R1” and “R2” represents detection of PO₄²⁻, over-criteria in R1 and over-criteria in R2, respectively.

“n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

*3 太字は雨水貯留タンクがオーバーフローしたため、雨量は転倒マス式雨量計より算定 The number in bold represents the amount of rainfall measured by a rainfall gauge because the rainfall reservoir was over-flow.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の溪流水の水質分析結果
Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2000/1/12	6.34	6.32	0.000	6.20	1.25	0.06	2.03	0.76	8.54	n/a	1.28	n/a	6.16	2.43	n/a	1.79	4.60	0.47	0.43	5.74	4.36	-4.82	
2000/1/17	6.50	6.56	0.000	6.58	1.23	0.00	2.34	0.81	9.55	n/a	0.64	n/a	6.53	2.38	n/a	2.09	4.88	0.50	0.45	6.11	4.86	-3.56	
2000/1/26	6.51	7.05	0.000	6.87	1.23	0.00	2.63	0.90	9.51	n/a	0.72	n/a	7.74	2.18	n/a	2.37	6.02	0.54	0.48	6.49	5.81	-4.17	
2000/1/28	6.45	6.85	0.000	6.70	1.18	0.00	2.49	0.86	9.12	n/a	0.72	n/a	7.70	3.51	n/a	2.24	6.02	0.52	0.49	6.39	2.98	-3.50	
2000/2/8	6.64	7.18	0.000	6.91	1.24	0.00	2.70	0.93	9.52	n/a	0.82	n/a	8.02	3.36	n/a	2.44	6.29	0.54	0.50	6.68	3.79	-3.63	
2000/2/15	6.56	7.30	0.000	7.08	1.26	0.00	2.70	0.94	9.55	n/a	0.81	n/a	8.23	3.52	n/a	2.43	6.45	0.55	0.51	6.77	3.83	-3.73	
2000/2/23	6.61	7.43	0.000	7.18	1.31	0.06	3.15	1.00	9.34	n/a	0.84	n/a	9.46	3.20	n/a	2.88	7.66	0.59	0.53	7.13	5.58	-2.06	
2000/2/29	6.61	7.74	0.000	7.22	1.30	0.07	3.05	1.00	9.23	n/a	0.87	n/a	9.45	3.26	n/a	2.78	7.64	0.59	0.52	7.09	5.50	-4.36	
2000/3/8	6.50	8.04	0.000	7.57	1.33	0.07	2.91	1.03	11.44	n/a	0.92	n/a	8.12	2.60	n/a	2.62	6.22	0.60	0.55	7.36	4.18	-4.42	
2000/3/14	6.56	8.82	0.000	7.81	1.35	0.10	3.20	1.10	12.27	n/a	1.02	n/a	8.47	n/a	n/a	2.90	6.51	0.63	0.54	7.60	n/a	n/a	
2000/3/15	6.51	8.79	0.000	7.56	1.34	0.11	3.12	1.08	11.82	n/a	1.00	n/a	8.54	n/a	n/a	2.83	6.64	0.61	0.53	7.43	n/a	n/a	
2000/3/16	n/a	n/a	n/a	7.56	1.34	0.00	3.11	1.09	11.56	n/a	0.98	n/a	8.65	n/a	n/a	2.82	6.75	0.61	0.52	7.35	n/a	n/a	
2000/3/25	6.17	7.75	0.000	7.31	1.29	0.00	2.86	1.00	12.48	n/a	1.08	n/a	6.29	2.00	n/a	2.58	4.46	0.58	0.53	7.13	3.86	-4.15	
2000/4/5	6.20	7.85	0.000	5.81	1.00	0.00	2.15	0.78	10.06	n/a	0.85	0.00	5.60	1.05	n/a	1.93	4.14	0.45	0.43	5.71	2.10	-15.78	R2
2000/4/6	6.18	7.18	0.000	5.38	0.91	0.00	1.93	0.70	9.35	n/a	1.02	0.00	4.74	1.38	n/a	1.73	3.39	0.41	0.40	5.25	1.19	-15.56	R2
2000/4/26	6.30	5.21	0.000	4.85	0.87	0.00	1.63	0.57	7.15	n/a	0.82	0.00	5.04	1.04	n/a	1.45	3.82	0.36	0.34	4.51	3.52	-7.25	
2000/5/9	6.29	5.22	0.000	4.98	0.96	0.06	1.41	0.56	6.69	n/a	0.75	0.00	5.63	0.85	n/a	1.22	4.38	0.36	0.33	4.48	4.18	-7.60	
2000/5/18	6.56	6.44	0.000	6.12	1.27	0.00	2.02	0.71	7.89	n/a	0.76	0.00	7.86	2.60	n/a	1.79	6.32	0.46	0.44	5.77	1.87	-5.47	
2000/6/9	6.39	6.97	0.000	6.70	1.78	0.03	2.68	0.88	7.09	n/a	1.55	0.00	8.14	5.64	n/a	2.43	6.46	0.54	0.49	6.46	5.61	-3.76	
2000/6/19	6.50	7.70	0.000	7.30	1.79	0.00	2.69	0.90	7.63	n/a	0.90	0.00	8.74	6.49	n/a	2.41	6.91	0.57	0.52	6.80	4.91	-6.21	
2000/6/26	6.82	8.11	0.000	7.47	1.74	0.00	2.87	0.94	7.63	n/a	0.89	0.00	8.44	8.56	n/a	2.59	6.57	0.59	0.55	7.00	3.91	-7.35	
2000/6/29	6.73	6.66	0.000	6.29	1.42	0.04	2.20	0.73	7.01	n/a	1.09	0.00	7.22	4.36	n/a	1.96	5.64	0.48	0.44	5.79	4.88	-7.02	
2000/7/10	6.60	6.40	0.000	6.29	1.44	0.03	2.15	0.72	6.90	n/a	1.02	0.00	6.89	4.88	n/a	1.91	5.31	0.48	0.43	5.72	4.83	-5.63	
2000/7/14	6.68	6.95	0.000	6.82	1.70	0.03	2.40	0.79	6.86	n/a	0.80	0.00	7.59	6.46	n/a	2.14	5.88	0.53	0.47	6.19	5.64	-5.82	
2000/7/19	6.59	6.05	0.000	5.74	1.31	0.00	1.94	0.67	7.23	n/a	1.00	0.00	5.39	3.70	n/a	1.72	3.95	0.44	0.39	5.21	5.09	-7.47	
2000/7/27	6.64	6.94	0.000	6.91	1.71	0.04	2.45	0.81	7.02	n/a	0.94	0.00	7.32	10.10	n/a	2.19	5.59	0.54	0.53	6.51	0.40	-3.23	
2000/7/28	6.81	7.37	0.000	7.23	1.78	0.03	2.62	0.87	7.18	n/a	0.92	0.00	7.43	9.43	n/a	2.35	5.62	0.56	0.53	6.66	3.43	-5.04	
2000/8/2	6.98	8.54	0.000	8.17	2.19	0.04	3.30	1.06	7.69	n/a	0.99	0.00	8.04	12.43	n/a	2.99	5.99	0.67	0.60	7.67	4.84	-5.35	
2000/8/9	6.92	8.49	0.000	8.22	2.22	0.02	3.44	1.09	7.22	n/a	1.12	0.00	7.49	14.10	n/a	3.13	5.43	0.68	0.61	7.68	5.29	-5.00	
2000/8/15	6.77	9.48	0.000	8.74	2.25	0.00	3.50	1.15	7.15	n/a	0.74	0.00	8.33	16.47	n/a	3.17	6.14	0.71	0.66	8.09	3.67	-7.91	
2000/9/14	6.63	7.11	0.000	6.57	1.63	0.02	2.18	0.73	7.21	n/a	1.35	0.00	7.71	4.58	n/a	1.93	6.06	0.50	0.46	6.04	3.83	-8.11	
2000/10/18	6.71	6.93	0.000	6.82	1.64	0.03	2.74	0.90	6.60	n/a	1.88	0.00	9.09	6.49	n/a	2.48	7.38	0.55	0.51	6.64	3.66	-2.11	
2000/11/16	6.48	7.73	0.000	6.86	1.50	0.03	2.78	0.95	8.31	n/a	0.92	0.00	9.87	5.62	n/a	2.52	8.15	0.56	0.55	6.98	0.77	-5.07	
2000/11/20	6.46	7.54	0.000	6.47	1.42	0.11	2.58	0.89	9.23	n/a	1.19	0.00	8.02	5.19	n/a	2.33	6.40	0.53	0.53	6.72	-0.55	-5.75	
2000/12/18	6.27	7.37	0.000	6.47	1.22	0.05	2.55	0.89	10.66	n/a	0.84	0.00	7.43	3.19	n/a	2.30	5.81	0.52	0.52	6.67	-0.51	-4.97	
2001/1/12	6.23	8.68	0.000	7.38	1.24	0.03	3.26	1.13	13.15	n/a	1.04	0.00	8.24	3.75	n/a	2.98	6.39	0.61	0.62	7.92	-0.87	-4.59	
2001/1/16	6.37	8.50	0.000	7.21	1.27	0.04	3.20	1.10	12.06	n/a	1.02	0.00	8.83	4.15	n/a	2.93	7.02	0.60	0.61	7.75	-0.83	-4.61	
2001/2/13	6.40	8.11	0.000	7.14	1.25	0.06	3.21	1.09	10.69	n/a	1.10	0.00	10.08	5.09	n/a	2.94	8.29	0.60	0.61	7.73	-1.39	-2.40	
2001/3/8	6.22	9.57	0.000	7.97	1.31	0.04	3.66	1.28	15.57	n/a	1.45	0.00	7.98	3.15	n/a	3.36	5.98	0.67	0.68	8.73	-0.74	-4.59	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
“n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000～2014 年の渓流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2001/4/14	6.32	4.98	0.000	5.17	0.89	0.04	1.92	0.66	8.57	n/a	1.12	0.00	4.79	2.19	n/a	1.72	3.49	0.40	0.40	5.10	0.57	1.23	
2001/4/16	6.27	4.71	0.000	4.52	0.76	0.05	1.63	0.56	7.07	n/a	1.23	0.00	4.00	2.02	n/a	1.46	2.87	0.35	0.34	4.36	1.55	-3.89	
2001/5/12	6.64	6.67	0.000	6.04	1.22	0.07	2.55	0.85	8.29	n/a	1.18	0.00	7.45	5.03	n/a	2.32	5.93	0.50	0.49	6.24	0.46	-3.36	
2001/5/14	6.58	6.99	0.000	6.40	1.40	0.08	2.45	0.83	8.32	n/a	0.81	0.00	8.37	7.57	n/a	2.21	6.76	0.51	0.55	6.62	-3.50	-2.75	
2001/6/15	6.65	7.57	0.000	7.06	1.64	0.00	2.93	0.93	6.74	n/a	1.41	0.00	8.71	13.31	n/a	2.66	6.94	0.57	0.61	7.16	-3.43	-2.76	
2001/7/11	6.42	7.92	0.000	7.26	1.69	0.02	3.15	0.97	9.31	n/a	1.10	0.00	8.91	7.32	n/a	2.87	7.09	0.60	0.59	7.42	0.95	-3.24	
2001/7/16	6.69	6.91	0.000	6.68	1.66	0.00	2.55	0.82	8.01	n/a	1.11	0.00	7.18	5.79	n/a	2.30	5.50	0.53	0.49	6.36	3.89	-4.15	
2001/8/15	6.57	8.08	0.000	7.68	1.89	0.00	2.80	0.91	8.98	n/a	0.92	0.00	9.81	5.79	n/a	2.51	7.88	0.60	0.57	7.36	2.55	-4.67	
2001/8/17	6.67	8.28	0.000	7.91	1.94	0.00	2.69	0.92	9.16	n/a	0.77	0.00	10.33	5.54	n/a	2.39	8.34	0.60	0.58	7.48	2.28	-5.08	
2001/9/17	6.65	7.13	0.000	6.84	1.69	0.00	2.54	0.83	8.24	n/a	1.09	0.00	7.62	5.14	n/a	2.28	5.90	0.54	0.49	6.47	4.17	-4.82	
2001/10/9	6.75	7.69	0.000	7.32	1.67	0.04	2.93	0.95	8.41	n/a	0.78	0.00	9.25	6.40	n/a	2.65	7.41	0.59	0.55	7.12	3.56	-3.82	
2001/10/15	6.76	7.39	0.000	6.87	1.56	0.06	2.64	0.88	9.01	n/a	0.82	0.00	7.86	5.51	n/a	2.38	6.14	0.55	0.52	6.73	2.33	-4.65	
2001/11/8	6.55	7.13	0.000	6.76	1.43	0.00	2.74	0.91	9.48	n/a	0.68	0.00	8.00	4.40	n/a	2.48	6.30	0.54	0.52	6.73	2.38	-2.88	
2001/11/15	6.64	7.62	0.000	6.85	1.56	0.04	2.94	0.98	9.30	n/a	1.16	0.00	8.89	4.41	n/a	2.68	7.17	0.57	0.54	7.05	2.62	-3.90	
2001/12/14	6.45	6.20	0.000	6.12	1.21	0.07	2.42	0.81	8.89	n/a	0.79	0.00	7.28	3.24	n/a	2.19	5.74	0.49	0.47	6.12	2.12	-0.64	
2002/1/14	6.46	8.59	0.000	8.02	1.37	0.00	2.75	1.28	15.31	n/a	1.13	0.00	9.63	3.88	n/a	2.45	7.62	0.63	0.71	8.70	-6.54	0.64	
2002/1/15	6.44	8.68	0.000	7.96	1.42	0.00	3.41	1.27	15.19	n/a	1.12	0.00	9.67	3.63	n/a	3.11	7.67	0.66	0.71	8.85	-3.67	0.97	
2002/1/30	6.58	7.07	0.000	7.02	1.32	0.11	2.40	1.06	13.27	n/a	0.83	0.00	8.06	3.04	n/a	2.13	6.30	0.55	0.61	7.52	-4.59	3.09	
2002/2/5	6.63	6.91	0.000	7.02	1.32	0.11	3.03	1.05	13.24	n/a	0.83	0.00	8.32	4.17	n/a	2.76	6.56	0.58	0.63	7.82	-3.77	6.20	
2002/2/14	6.44	7.26	0.000	6.85	1.21	0.00	2.31	1.02	12.20	n/a	0.92	0.00	8.44	2.67	n/a	2.27	6.72	0.54	0.58	7.26	-3.52	-0.03	
2002/2/15	6.47	7.46	0.000	6.91	1.29	0.00	2.50	1.03	12.17	n/a	0.92	0.00	8.81	3.39	n/a	2.05	7.08	0.53	0.60	7.33	-5.62	-0.88	
2002/2/20	6.52	7.40	0.000	7.21	1.34	0.12	2.64	1.10	12.62	n/a	0.98	0.00	9.29	3.85	n/a	2.37	7.48	0.58	0.63	7.80	-4.27	2.63	
2002/2/26	6.47	7.12	0.000	7.04	1.30	0.00	2.60	1.09	13.46	n/a	1.00	0.00	8.02	2.91	n/a	2.33	6.25	0.56	0.61	7.59	-4.41	3.22	
2002/3/4	6.60	6.95	0.000	6.75	1.27	0.00	2.70	1.01	12.59	n/a	0.86	0.00	7.82	2.99	n/a	2.44	6.13	0.54	0.58	7.29	-3.28	2.38	
2002/3/11	6.36	6.16	0.000	6.15	1.11	0.00	1.95	0.86	11.68	n/a	0.79	0.00	5.97	2.55	n/a	1.72	4.43	0.46	0.51	6.29	-4.56	1.07	
2002/3/15	6.45	5.72	0.000	5.66	1.06	0.10	1.83	0.78	10.32	n/a	0.70	0.00	5.55	2.27	n/a	1.61	4.13	0.43	0.46	5.75	-2.34	0.29	
2002/3/16	6.42	5.29	0.000	5.40	1.02	0.00	1.94	0.70	9.67	n/a	0.65	0.00	4.94	1.70	n/a	1.73	3.58	0.42	0.41	5.36	0.17	0.64	
2002/3/25	6.53	5.76	0.000	5.85	1.00	0.00	2.18	0.79	10.18	n/a	0.77	0.00	6.20	3.12	n/a	1.96	4.73	0.45	0.48	6.00	-2.78	2.04	
2002/4/10	6.59	4.37	0.000	4.70	0.88	0.13	1.71	0.57	6.69	n/a	0.89	0.00	4.94	4.21	n/a	1.53	3.76	0.37	0.37	4.68	-1.15	3.38	
2002/4/15	6.68	4.34	0.000	4.39	0.94	0.10	1.31	0.51	5.89	n/a	0.80	0.00	4.54	3.27	n/a	1.14	3.44	0.33	0.33	4.14	0.11	-2.32	
2002/4/24	6.82	4.24	0.000	4.61	1.01	0.02	1.49	0.52	5.00	n/a	0.62	0.00	5.02	4.30	n/a	1.31	3.86	0.34	0.33	4.17	2.77	-0.80	
2002/4/30	6.85	4.83	0.000	5.20	1.08	0.13	1.99	0.66	5.67	n/a	0.72	0.00	6.63	6.39	n/a	1.79	5.32	0.41	0.41	5.15	0.04	3.17	
2002/5/9	6.58	5.19	0.000	5.56	1.08	0.01	1.88	0.68	8.21	n/a	0.57	0.00	5.24	3.87	n/a	1.67	3.84	0.42	0.41	5.27	0.78	0.73	
2002/5/15	6.70	5.84	0.000	5.74	1.30	0.00	1.76	0.73	7.65	n/a	0.69	0.00	7.49	3.96	n/a	1.54	6.05	0.43	0.45	5.60	-1.93	-2.07	
2002/5/23	6.82	6.33	0.000	6.60	1.35	0.03	2.51	0.86	7.79	n/a	0.66	0.00	8.75	6.67	n/a	2.26	7.09	0.52	0.52	6.53	-0.25	1.53	
2002/5/29	6.72	6.65	0.000	6.79	1.37	0.11	2.77	0.96	7.53	n/a	0.87	0.00	8.63	6.68	n/a	2.51	6.93	0.55	0.52	6.68	3.56	0.19	
2002/6/4	6.89	6.80	0.000	7.05	1.50	0.10	2.78	0.94	7.24	n/a	0.92	0.00	9.68	6.48	n/a	2.51	7.91	0.57	0.53	6.85	3.64	0.37	
2002/6/14	6.73	6.18	0.000	6.74	1.58	0.11	2.37	0.84	6.99	n/a	0.89	0.00	8.39	5.80	n/a	2.11	6.70	0.53	0.48	6.31	4.54	1.07	
2002/6/26	6.77	6.16	0.000	6.54	1.40	0.01	2.37	0.85	7.13	n/a	0.81	0.00	7.69	7.98	n/a	2.12	6.05	0.51	0.51	6.26	0.39	0.83	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
 “n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の溪流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2002/7/9	6.88	6.29	0.000	6.47	1.49	0.00	2.47	0.85	6.43	n/a	0.92	0.00	7.43	7.37	n/a	2.22	5.81	0.51	0.47	6.07	4.17	-1.82	
2002/7/15	6.44	4.79	0.000	4.89	1.15	0.04	1.60	0.57	5.70	n/a	0.76	0.00	3.80	3.58	n/a	1.41	2.57	0.37	0.31	4.23	8.83	-6.16	
2002/7/19	6.72	5.21	0.000	5.47	1.30	0.02	1.94	0.68	6.11	n/a	1.05	0.00	4.84	5.46	n/a	1.73	3.47	0.43	0.38	4.96	5.66	-2.43	
2002/7/27	6.67	7.09	0.000	7.38	1.53	0.00	2.49	0.97	8.06	n/a	0.44	0.00	10.94	6.73	n/a	2.21	9.09	0.56	0.57	7.16	-0.73	0.51	
2002/7/30	6.91	7.22	0.000	7.41	1.54	0.00	2.67	0.93	8.39	n/a	0.83	0.00	9.07	7.36	n/a	2.39	7.21	0.57	0.56	7.06	1.06	-1.13	
2002/8/7	6.57	5.99	0.000	6.22	1.30	0.00	1.81	0.68	8.81	n/a	0.64	0.00	6.97	1.78	n/a	1.57	5.41	0.45	0.43	5.70	1.92	-2.49	
2002/8/15	6.50	4.81	0.000	5.35	1.05	0.00	1.59	0.57	7.36	n/a	0.58	0.00	4.44	4.12	n/a	1.39	3.10	0.39	0.38	4.78	1.16	-0.32	
2002/8/26	6.80	5.86	0.000	6.54	1.45	0.10	2.04	0.76	7.69	n/a	0.63	0.00	7.30	4.75	n/a	1.79	5.66	0.49	0.46	5.97	3.64	0.94	
2002/8/29	6.91	6.39	0.000	7.07	1.73	0.07	2.24	0.83	8.03	n/a	0.75	0.00	8.57	5.04	n/a	1.97	6.80	0.54	0.50	6.54	3.49	1.14	
2002/9/13	6.71	6.98	0.000	7.80	1.76	0.00	2.48	0.92	7.98	n/a	0.77	0.00	10.75	5.63	n/a	2.18	8.79	0.58	0.55	7.18	2.65	1.43	
2002/9/25	6.90	6.37	0.000	6.85	1.52	0.08	2.28	0.82	6.41	n/a	1.02	0.00	8.54	5.78	n/a	2.02	6.82	0.52	0.47	6.19	5.31	-1.41	
2002/9/27	6.84	6.56	0.000	7.23	1.52	0.08	2.45	0.88	6.83	n/a	0.79	0.00	9.94	6.59	n/a	2.18	8.13	0.55	0.52	6.71	2.99	1.12	
2002/10/3	6.83	5.74	0.000	6.32	1.50	0.05	2.14	0.78	6.90	n/a	0.77	0.00	7.21	6.33	n/a	1.90	5.62	0.49	0.46	5.90	2.75	1.35	
2002/10/10	6.81	5.98	0.000	6.55	1.48	0.04	2.33	0.83	7.15	n/a	0.69	0.00	7.46	6.98	n/a	2.08	5.82	0.51	0.48	6.15	2.72	1.41	
2002/10/16	6.65	4.67	0.000	4.76	1.35	0.00	1.74	0.63	5.21	n/a	1.25	0.00	4.13	4.74	n/a	1.56	2.94	0.38	0.33	4.39	6.95	-3.14	
2002/10/23	6.70	5.95	0.000	6.26	1.38	0.07	2.20	0.80	8.19	n/a	0.57	0.00	7.01	6.85	n/a	1.96	5.44	0.49	0.50	6.16	-1.15	1.70	
2002/10/30	6.52	5.21	0.000	5.71	1.20	0.08	1.82	0.67	8.34	n/a	0.43	0.00	5.33	4.90	n/a	1.60	3.90	0.43	0.43	5.43	-0.47	2.06	
2002/10/31	6.52	5.66	0.000	6.04	1.29	0.00	2.04	0.75	8.57	n/a	0.43	0.00	6.48	5.33	n/a	1.81	4.96	0.46	0.47	5.86	-1.26	1.73	
2002/11/7	6.59	5.72	0.000	5.88	1.23	0.00	1.89	0.70	8.38	n/a	0.51	0.00	5.89	4.35	n/a	1.67	4.41	0.44	0.44	5.54	0.07	-1.56	
2002/11/18	6.49	5.73	0.000	5.57	1.29	0.00	2.00	0.72	8.50	n/a	0.86	0.00	6.25	4.35	n/a	1.79	4.85	0.43	0.46	5.66	-2.33	-0.65	
2002/11/27	6.39	5.51	0.000	6.07	1.21	0.08	1.95	0.73	9.30	n/a	0.43	0.00	5.88	4.82	n/a	1.72	4.36	0.46	0.47	5.87	-1.50	3.14	
2002/12/3	6.50	5.64	0.000	6.06	1.16	0.00	2.05	0.75	8.94	n/a	0.44	0.00	7.01	4.55	n/a	1.82	5.49	0.46	0.48	5.95	-2.40	2.71	
2002/12/16	6.48	5.49	0.000	5.92	1.25	0.00	1.98	0.72	8.32	n/a	0.68	0.00	6.58	4.99	n/a	1.76	5.09	0.45	0.46	5.76	-1.85	2.41	
2003/1/16	6.46	6.65	0.000	6.80	1.30	0.17	2.66	0.94	10.66	n/a	0.96	0.00	8.14	4.15	n/a	2.40	6.43	0.55	0.55	7.07	-0.47	3.03	
2003/1/28	6.40	6.92	0.000	6.94	1.22	0.11	2.82	1.04	12.01	n/a	1.12	0.00	6.94	4.59	n/a	2.56	5.20	0.57	0.58	7.29	-0.97	2.60	
2003/2/14	6.57	6.71	0.000	6.73	1.16	0.08	2.66	0.97	11.07	n/a	0.78	0.00	7.64	3.67	n/a	2.40	5.95	0.54	0.54	6.95	-0.43	1.75	
2003/2/28	6.46	6.54	0.000	6.63	1.14	0.07	2.68	0.96	10.08	n/a	0.72	0.00	8.31	3.92	n/a	2.43	6.65	0.53	0.53	6.83	0.09	2.18	
2003/3/14	6.38	6.20	0.000	6.34	1.12	0.09	2.54	0.91	9.73	n/a	0.65	0.00	7.65	4.26	n/a	2.30	6.06	0.51	0.51	6.54	-0.29	2.67	
2003/3/31	6.46	5.24	0.000	5.49	0.88	0.07	1.91	0.65	8.70	n/a	0.81	0.00	5.86	3.42	n/a	1.70	4.48	0.41	0.44	5.44	-2.65	1.84	
2003/4/15	6.58	4.57	0.000	4.86	0.83	0.00	1.67	0.54	6.85	n/a	0.66	0.00	5.40	3.35	n/a	1.49	4.18	0.36	0.37	4.64	-1.48	0.81	
2003/5/14	6.75	6.12	0.000	6.68	1.31	0.00	2.37	0.77	7.97	n/a	0.97	0.00	9.52	5.40	n/a	2.12	7.84	0.51	0.53	6.55	-2.08	3.42	
2003/5/19	6.61	5.85	0.000	6.88	1.44	0.00	2.58	0.81	7.71	n/a	0.76	0.00	9.65	7.05	n/a	2.32	7.92	0.53	0.55	6.76	-1.36	7.25	
2003/5/30	6.68	7.72	0.000	8.38	1.81	0.00	3.47	1.07	8.23	n/a	1.22	0.00	14.28	9.15	n/a	3.15	12.18	0.67	0.70	8.63	-1.98	5.56	
2003/6/16	6.77	7.38	0.000	8.05	1.78	0.00	2.92	1.05	7.15	n/a	1.50	0.00	12.27	8.42	n/a	2.61	10.25	0.62	0.62	7.75	0.02	2.43	
2003/6/18	6.65	6.54	0.000	8.02	1.78	0.00	2.95	0.91	7.27	n/a	1.14	0.00	10.95	5.36	n/a	2.65	8.94	0.62	0.54	7.27	6.68	5.31	
2003/6/30	6.47	4.37	0.000	5.11	1.18	0.00	1.68	0.52	6.80	n/a	0.61	0.00	4.60	4.43	n/a	1.49	3.32	0.38	0.37	4.69	1.21	3.51	
2003/7/15	6.66	5.45	0.000	6.26	1.46	0.00	1.99	0.64	7.94	n/a	0.56	0.00	7.57	4.34	n/a	1.75	6.00	0.46	0.46	5.86	-0.01	3.66	
2003/7/28	6.69	5.71	0.000	6.46	1.50	0.09	2.05	0.66	7.61	n/a	0.51	0.00	7.45	4.90	n/a	1.80	5.83	0.48	0.46	5.92	2.41	1.83	
2003/8/14	6.73	5.60	0.000	6.43	1.62	0.00	2.12	0.68	7.31	n/a	0.57	0.00	7.15	5.87	n/a	1.88	5.54	0.48	0.46	5.89	2.38	2.57	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
 “n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の渓流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2003/8/28	6.70	5.36	0.000	6.31	1.54	0.11	1.55	0.68	7.75	n/a	0.47	0.00	6.53	8.08	n/a	1.31	4.95	0.45	0.49	5.87	-4.36	4.54	
2003/8/30	6.73	5.66	0.000	6.54	1.63	0.13	2.44	0.89	7.11	n/a	0.81	0.00	7.41	7.16	n/a	2.19	5.77	0.53	0.49	6.28	4.25	5.22	
2003/9/16	6.78	5.51	0.000	6.34	1.58	0.14	2.09	0.66	7.68	n/a	0.56	0.00	6.51	6.88	n/a	1.85	4.92	0.48	0.47	5.95	0.90	3.86	
2003/10/15	6.72	5.86	0.000	6.17	1.51	0.18	2.41	0.90	6.79	n/a	0.66	0.00	7.87	8.12	n/a	2.18	6.32	0.51	0.50	6.26	1.21	3.27	
2003/10/28	6.74	6.16	0.000	6.62	1.36	0.08	2.53	0.92	7.60	n/a	0.55	0.00	8.52	6.93	n/a	2.28	6.86	0.53	0.51	6.51	1.43	2.79	
2003/11/13	6.77	6.51	0.000	6.81	1.46	0.01	2.73	1.03	8.29	n/a	0.75	0.00	9.33	6.71	n/a	2.47	7.62	0.56	0.55	6.94	0.45	3.22	
2003/11/27	6.62	5.91	0.000	6.28	1.32	0.06	2.23	0.86	9.12	n/a	0.55	0.00	7.22	4.15	n/a	1.99	5.64	0.49	0.48	6.22	0.80	2.52	
2003/12/15	6.45	4.89	0.000	5.32	1.06	0.07	1.81	0.63	8.11	n/a	0.52	0.00	5.13	4.39	n/a	1.61	3.79	0.40	0.42	5.18	-1.38	2.92	
2003/12/25	6.41	5.37	0.000	5.75	1.12	0.12	1.96	0.70	8.48	n/a	0.58	0.00	6.43	7.36	n/a	1.74	4.99	0.44	0.50	5.90	-6.59	4.74	
2004/1/15	6.57	6.17	0.000	6.69	1.44	0.00	3.01	0.98	8.99	n/a	1.17	0.00	8.57	3.80	n/a	2.76	6.89	0.56	0.51	6.83	4.25	5.09	
2004/1/30	6.59	6.60	0.000	6.90	1.85	0.00	3.39	1.06	9.26	n/a	0.87	0.00	8.87	5.38	n/a	3.13	7.14	0.60	0.55	7.29	4.84	4.98	
2004/2/16	6.50	7.94	0.000	8.07	1.31	0.00	3.78	1.22	14.12	n/a	1.81	0.00	8.57	4.30	n/a	3.47	6.54	0.67	0.68	8.66	-0.21	4.32	
2004/2/20	6.57	7.54	0.000	7.71	1.44	0.00	3.61	1.22	12.49	n/a	1.10	0.00	8.90	4.87	n/a	3.34	6.96	0.65	0.64	8.22	1.44	4.33	
2004/3/17	6.55	6.92	0.000	7.02	1.21	0.00	3.21	1.11	12.70	n/a	1.01	0.00	6.68	3.78	n/a	2.94	4.92	0.59	0.58	7.44	1.05	3.62	
2004/3/30	6.48	5.60	0.000	5.95	0.88	0.00	2.75	0.79	9.68	n/a	0.78	0.00	5.50	3.84	n/a	2.52	4.01	0.48	0.46	6.00	2.16	3.44	
2004/4/15	6.64	4.31	0.000	4.81	0.88	0.08	1.89	0.66	6.49	n/a	0.78	0.00	4.35	4.40	n/a	1.71	3.14	0.38	0.36	4.63	3.56	3.60	
2004/4/28	6.49	5.35	0.000	5.65	0.74	0.08	2.45	0.83	8.60	n/a	0.61	0.00	5.57	4.01	n/a	2.24	4.15	0.46	0.43	5.64	2.86	2.64	
2004/5/15	6.58	5.25	0.000	5.74	1.17	0.00	2.37	0.67	8.17	n/a	0.51	0.00	5.22	4.24	n/a	2.15	3.78	0.45	0.42	5.47	4.15	2.03	
2004/5/28	6.72	6.08	0.000	6.59	1.61	0.09	2.90	0.89	8.20	n/a	0.46	0.00	7.33	6.47	n/a	2.65	5.68	0.55	0.50	6.54	5.09	3.66	
2004/6/15	6.80	6.17	0.000	6.78	1.38	0.00	2.81	0.91	7.89	n/a	1.10	0.00	7.89	5.67	n/a	2.55	6.19	0.55	0.50	6.53	4.58	2.82	
2004/6/29	6.59	5.49	0.000	6.01	1.55	0.09	2.67	0.81	7.80	n/a	0.53	0.00	5.57	6.59	n/a	2.44	4.06	0.51	0.45	5.94	5.57	3.92	
2004/7/15	6.58	5.22	0.000	5.74	1.07	0.09	2.18	0.73	7.87	n/a	0.56	0.00	5.14	4.45	n/a	1.96	3.70	0.45	0.41	5.40	4.63	1.68	
2004/7/29	6.54	6.06	0.000	6.89	1.53	0.07	2.74	0.82	7.84	n/a	0.70	0.00	8.49	5.03	n/a	2.48	6.76	0.55	0.49	6.54	5.32	3.84	
2004/8/17	6.69	6.79	0.000	7.56	1.86	0.09	3.26	0.97	7.23	n/a	0.99	0.00	10.10	7.27	n/a	2.97	8.20	0.62	0.55	7.32	6.35	3.72	
2004/8/30	6.61	6.43	0.000	7.21	1.46	0.00	2.94	0.80	7.69	n/a	0.67	0.00	9.24	6.42	n/a	2.67	7.43	0.56	0.53	6.81	3.51	2.90	
2004/9/13	6.75	6.72	0.000	7.68	1.63	0.00	3.29	0.99	7.48	n/a	0.78	0.00	9.84	7.87	n/a	3.00	7.91	0.62	0.56	7.31	5.43	4.20	
2004/9/27	6.69	5.89	0.000	6.71	1.52	0.00	2.75	0.90	7.33	n/a	0.77	0.00	7.30	7.19	n/a	2.50	5.62	0.54	0.49	6.37	5.14	3.92	
2004/10/15	6.75	5.74	0.000	6.51	1.70	0.00	2.73	0.86	6.94	n/a	0.75	0.00	7.09	7.09	n/a	2.48	5.46	0.53	0.47	6.21	6.16	3.92	
2004/10/29	6.70	6.08	0.000	6.79	1.48	0.00	3.11	0.83	6.99	n/a	0.72	0.00	8.89	6.93	n/a	2.85	7.19	0.56	0.51	6.62	4.63	4.28	
2004/11/16	6.61	6.19	0.000	6.56	1.30	0.00	3.01	0.97	8.70	n/a	1.13	0.00	7.38	6.05	n/a	2.76	5.73	0.55	0.52	6.67	3.02	3.74	
2004/11/28	6.60	6.60	0.000	7.18	1.67	0.00	3.15	1.08	11.15	n/a	0.72	0.00	6.92	5.42	n/a	2.88	5.12	0.60	0.56	7.32	3.62	5.19	
2004/12/15	6.72	6.08	0.000	6.67	1.07	0.00	2.86	0.87	8.36	n/a	1.37	0.00	8.36	5.23	n/a	2.61	6.69	0.53	0.52	6.62	1.34	4.26	
2004/12/29	6.56	6.14	0.000	7.06	1.45	0.00	3.58	0.96	10.57	n/a	0.83	0.00	7.86	4.19	n/a	3.31	6.09	0.60	0.54	7.29	5.06	8.54	
2005/1/14	6.20	5.92	0.001	6.57	1.10	0.07	2.61	0.92	9.92	n/a	0.87	0.00	8.04	8.14	n/a	2.36	6.39	0.52	0.59	7.02	-6.34	3.91	
2005/1/28	6.58	6.33	0.000	6.61	1.02	0.00	2.97	1.07	9.93	n/a	0.83	0.00	8.62	7.06	n/a	2.72	6.96	0.55	0.59	7.18	-3.39	1.81	
2005/2/15	6.61	6.31	0.000	6.71	1.00	0.00	2.94	1.04	9.83	n/a	0.97	0.00	9.01	9.91	n/a	2.68	7.33	0.55	0.64	7.43	-7.84	-2.15	
2005/2/24	6.51	6.47	0.000	6.95	1.10	0.00	3.18	1.11	10.89	n/a	0.77	0.00	9.08	6.35	n/a	2.91	7.34	0.58	0.61	7.57	-2.74	0.97	
2005/3/15	6.36	7.52	0.000	7.71	1.28	0.00	3.54	1.29	14.31	n/a	1.37	0.00	8.39	5.35	n/a	3.25	6.45	0.65	0.69	8.57	-2.80	2.31	
2005/3/29	6.28	6.53	0.001	6.75	1.10	0.00	2.90	1.08	12.75	n/a	1.34	0.00	5.66	4.49	n/a	2.64	3.97	0.55	0.57	7.18	-1.59	1.22	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
 “n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の溪流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2005/4/20	6.33	4.46	0.000	4.97	0.88	0.06	1.98	0.69	8.06	0.00	0.77	0.00	4.79	4.12	n/a	1.79	3.54	0.40	0.41	5.09	-1.16	-0.01	
2005/4/26	6.30	3.49	0.001	4.01	0.75	0.00	1.49	0.52	5.92	0.00	1.06	0.00	3.33	4.56	n/a	1.33	2.32	0.31	0.33	3.97	-2.80	-0.52	
2005/4/27	6.35	3.57	0.000	3.92	0.70	0.00	1.47	0.50	5.87	0.00	0.84	0.00	3.47	3.74	n/a	1.32	2.49	0.30	0.31	3.86	-1.56	-2.33	
2005/5/11	6.60	4.76	0.000	5.07	1.06	0.00	2.09	0.73	7.20	0.14	0.76	0.00	5.86	4.55	n/a	1.90	4.59	0.41	0.41	5.21	-0.40	-0.06	
2005/5/17	6.61	4.82	0.000	5.49	0.86	0.00	2.20	0.75	7.61	0.00	0.74	0.00	6.21	4.68	n/a	1.99	4.83	0.43	0.43	5.45	0.02	-0.77	
2005/5/31	6.58	6.25	0.000	6.70	1.23	0.00	3.04	1.04	8.20	0.27	1.14	0.00	8.70	7.66	n/a	2.78	7.02	0.56	0.56	7.00	-0.17	1.39	
2005/6/9	6.66	6.71	0.000	7.24	1.97	0.00	3.06	1.05	8.19	0.02	2.26	0.00	9.87	8.07	n/a	2.79	8.05	0.60	0.61	7.58	-0.09	1.01	
2005/6/16	6.63	6.44	0.000	7.29	1.75	0.00	3.21	1.08	7.85	0.19	1.62	0.00	9.01	9.26	n/a	2.93	7.18	0.61	0.59	7.43	1.63	1.78	
2005/6/29	6.49	5.28	0.000	5.90	1.49	0.00	2.32	0.79	8.40	0.00	1.08	0.00	6.47	4.77	n/a	2.10	4.99	0.48	0.47	5.96	0.90	-0.71	
2005/7/13	6.56	5.17	0.000	5.89	1.45	0.00	2.27	0.77	8.82	0.01	0.58	0.00	5.58	5.57	n/a	2.04	4.10	0.47	0.47	5.87	0.45	-1.47	
2005/7/15	6.61	5.65	0.000	6.30	1.60	0.00	2.49	0.84	8.87	0.06	0.70	0.00	6.62	5.83	n/a	2.25	5.04	0.51	0.50	6.31	1.23	-0.84	
2005/7/28	6.66	5.44	0.000	6.28	1.59	0.00	2.43	0.81	7.69	0.08	0.90	0.00	6.50	7.14	n/a	2.19	4.92	0.50	0.49	6.12	1.67	-1.41	
2005/8/10	6.79	5.93	0.000	6.96	2.09	0.00	2.81	0.92	7.10	0.01	1.45	0.00	7.43	8.16	n/a	2.55	5.68	0.57	0.51	6.68	5.50	0.08	
2005/8/14	6.55	5.18	0.000	6.07	1.93	0.06	2.68	0.88	6.72	0.00	1.38	0.00	5.85	7.24	n/a	2.45	4.33	0.52	0.45	6.01	7.26	-0.04	
2005/8/31	6.70	6.24	0.000	7.33	1.78	0.11	3.14	0.97	7.74	0.01	0.88	0.00	8.65	9.12	n/a	2.86	6.81	0.61	0.56	7.22	3.84	0.81	
2005/9/6	6.77	6.04	0.000	7.07	1.92	0.00	2.84	0.93	7.08	0.03	1.01	0.00	8.05	8.14	n/a	2.57	6.28	0.58	0.52	6.74	5.27	-0.60	
2005/9/12	6.79	6.12	0.000	7.20	2.26	0.09	2.81	0.96	7.52	0.00	0.92	0.00	7.98	9.14	n/a	2.54	6.17	0.60	0.54	7.01	4.61	-0.13	
2005/9/30	6.76	6.12	0.000	7.10	1.15	0.13	2.87	0.98	7.97	0.00	0.89	0.00	8.81	8.53	n/a	2.60	7.03	0.57	0.56	7.01	0.64	-0.41	
2005/10/14	6.82	6.25	0.000	7.07	1.41	0.00	3.02	1.05	8.35	0.00	0.74	0.00	8.79	8.24	n/a	2.75	7.02	0.58	0.57	7.11	1.31	-0.11	
2005/10/20	6.85	6.31	0.000	7.08	1.62	0.11	2.94	1.01	7.85	0.00	0.74	0.00	9.16	8.70	n/a	2.67	7.38	0.59	0.57	7.15	1.63	0.62	
2005/10/31	6.65	5.81	0.000	6.33	1.41	0.00	2.72	0.95	7.89	0.00	0.85	0.00	7.85	7.78	n/a	2.45	6.04	0.56	0.53	6.73	3.31	-0.33	
2005/11/15	6.65	5.93	0.000	6.40	1.35	0.00	2.71	0.94	9.06	0.00	0.86	0.00	7.32	8.87	n/a	2.47	5.73	0.52	0.57	6.77	-4.10	0.30	
2005/11/18	6.72	5.82	0.000	7.20	1.31	0.00	2.62	0.94	9.24	0.00	0.88	0.00	7.35	6.37	n/a	2.38	5.74	0.52	0.53	6.61	-1.19	-0.58	
2005/11/28	6.56	5.33	0.000	6.37	1.36	0.00	2.43	0.82	8.66	0.00	0.85	0.00	6.00	7.49	n/a	2.19	4.40	0.50	0.51	6.24	-0.46	1.29	
2005/12/22	6.59	6.39	0.000	7.06	1.48	0.00	2.99	1.08	10.12	0.00	0.88	0.00	7.93	7.38	n/a	2.72	6.16	0.58	0.59	7.32	-0.25	2.02	
2005/12/28	6.51	6.32	0.000	7.25	1.33	0.00	2.91	1.06	10.26	0.00	0.97	0.00	8.00	6.53	n/a	2.63	6.18	0.58	0.58	7.29	0.24	0.55	
2006/1/13	6.60	6.21	0.000	6.99	1.12	0.00	3.00	1.04	9.65	0.08	1.37	0.00	8.06	5.59	12.09	2.74	6.31	0.57	0.56	7.09	1.15	6.65	
2006/1/31	6.61	7.08	0.000	7.48	1.45	0.00	3.45	1.20	11.05	0.00	1.10	0.00	8.67	5.51	12.16	3.17	6.79	0.63	0.60	7.82	2.68	4.96	
2006/2/8	6.67	7.34	0.000	7.59	1.29	0.00	3.48	1.22	11.06	0.00	1.57	0.00	8.82	5.93	11.86	3.19	6.92	0.64	0.62	7.94	1.59	3.94	
2006/2/20	6.41	8.94	0.000	9.07	1.45	0.12	4.35	1.60	17.17	0.00	1.60	0.00	9.06	4.86	11.79	4.00	6.79	0.79	0.78	10.06	0.56	5.88	
2006/3/15	6.54	7.25	0.000	7.55	1.43	0.10	3.37	1.22	12.97	0.00	1.35	0.00	7.62	4.15	11.55	3.08	5.72	0.64	0.61	8.02	1.96	5.04	
2006/3/26	6.37	6.22	0.000	6.60	1.01	0.00	2.64	0.95	11.19	0.00	1.05	0.00	5.76	3.60	10.52	2.39	4.11	0.52	0.51	6.60	1.15	2.96	
2006/4/17	6.46	4.81	0.000	5.60	0.48	0.23	2.03	0.72	8.71	0.00	1.07	0.00	4.59	3.10	8.74	1.82	3.18	0.43	0.41	5.32	2.43	5.07	
2006/4/28	6.52	4.30	0.000	4.91	0.76	0.19	1.83	0.64	6.95	0.00	1.05	0.00	4.25	4.01	8.03	1.64	3.02	0.39	0.37	4.74	2.71	4.90	
2006/5/15	6.63	5.32	0.000	6.03	0.86	0.00	2.28	0.81	8.34	0.00	1.67	0.00	6.26	4.23	11.64	2.05	4.75	0.46	0.46	5.86	0.32	4.81	
2006/5/26	6.66	5.89	0.000	6.72	1.42	0.00	2.66	0.93	8.84	0.11	0.88	0.00	7.84	6.18	12.36	2.41	6.15	0.54	0.53	6.72	0.79	6.58	
2006/6/15	6.99	6.40	0.000	7.66	1.95	0.00	2.99	1.01	8.20	0.00	1.92	0.00	8.02	8.25	12.91	2.70	6.10	0.62	0.56	7.30	4.38	6.57	
2006/6/30	6.61	6.88	0.000	7.68	1.73	0.00	3.26	1.07	8.14	0.00	1.62	0.00	7.77	8.77	13.32	2.97	5.84	0.63	0.56	7.32	5.71	3.12	
2006/7/4	6.74	5.50	0.000	6.50	1.57	0.00	2.55	0.86	7.82	0.00	1.31	0.00	5.73	6.74	12.61	2.30	4.09	0.52	0.47	6.14	5.05	5.49	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す Results of Quality Control "R1" and "R2" represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

"n/a" は該当無しを表す "n/a" represents "Not applicable".

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の渓流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2006/7/13	6.42	5.23	0.000	5.74	1.32	0.00	2.13	0.74	8.28	0.00	1.31	0.00	4.49	4.75	11.51	1.91	3.04	0.45	0.43	5.50	2.85	2.50	
2006/7/31	6.57	6.81	0.000	7.72	1.86	0.00	2.54	0.88	9.06	0.21	0.84	0.00	9.28	5.38	14.93	2.25	7.34	0.58	0.56	7.20	2.43	2.80	
2006/7/31	6.47	5.77	0.000	6.49	1.40	0.00	2.16	0.75	9.19	0.03	0.85	0.00	6.37	4.24	14.11	1.91	4.74	0.49	0.48	6.11	1.30	2.89	
2006/8/21	6.56	6.94	0.000	8.47	2.17	0.00	2.76	0.94	8.81	0.47	0.52	0.00	10.15	7.29	15.15	2.44	8.02	0.64	0.60	7.75	3.33	5.52	
2006/8/29	6.54	5.62	0.000	6.96	1.71	0.00	2.40	0.80	6.53	0.00	2.75	0.00	7.11	5.47	12.85	2.14	5.37	0.53	0.47	6.22	6.62	5.07	
2006/9/14	6.78	5.32	0.000	6.57	1.58	0.00	2.53	0.81	6.46	0.00	2.13	0.00	6.81	5.97	13.73	2.28	5.16	0.52	0.46	6.05	6.42	6.39	
2006/9/29	6.76	6.09	0.000	7.01	1.25	0.02	2.66	0.89	6.89	0.00	1.06	0.00	8.38	6.95	12.88	2.40	6.62	0.54	0.50	6.47	4.25	3.03	
2006/10/10	6.80	5.93	0.000	6.75	1.33	0.00	2.56	0.87	7.61	0.02	0.95	0.00	7.03	6.51	12.92	2.31	5.33	0.53	0.48	6.27	4.28	2.77	
2006/10/30	6.88	6.35	0.000	7.23	1.69	0.00	2.95	1.00	7.93	0.00	0.55	0.00	9.37	7.17	12.71	2.68	7.55	0.59	0.55	7.07	3.72	5.37	
2006/11/13	6.67	6.63	0.000	6.91	1.65	0.00	3.00	1.04	10.18	0.00	1.26	0.00	6.87	5.66	12.94	2.74	5.14	0.58	0.54	7.07	3.09	3.20	
2006/11/29	6.62	5.47	0.000	5.93	1.54	0.00	2.32	0.80	8.62	0.00	0.97	0.00	5.43	4.70	11.92	2.09	3.94	0.48	0.45	5.85	3.25	3.33	
2006/11/29	6.57	5.57	0.000	6.20	1.27	0.00	2.35	0.82	9.08	0.00	0.86	0.00	5.69	4.40	12.17	2.11	4.13	0.49	0.46	5.98	2.80	3.56	
2006/12/13	6.42	5.04	0.000	5.80	1.13	0.00	2.27	0.79	8.26	0.00	0.91	0.00	6.01	3.96	11.30	2.05	4.56	0.46	0.44	5.69	2.44	6.03	
2006/12/28	6.42	4.14	0.000	4.58	1.25	0.00	1.62	0.57	6.27	0.00	0.96	0.00	4.23	3.54	8.40	1.45	3.08	0.36	0.34	4.40	2.99	3.07	
2006/12/29	6.42	5.28	0.000	5.84	0.85	0.00	2.12	0.75	8.90	0.00	0.58	0.00	5.48	3.90	11.82	1.90	4.01	0.44	0.44	5.59	0.64	2.82	
2007/1/11	6.50	5.81	0.000	6.09	1.17	0.00	2.50	0.90	9.06	0.00	0.81	0.00	6.95	3.41	12.76	2.27	5.42	0.49	0.47	6.15	2.58	2.84	
2007/1/23	6.59	6.07	0.000	6.35	1.17	0.00	2.72	0.97	8.80	0.00	0.67	0.00	8.51	4.91	12.51	2.48	6.91	0.52	0.52	6.60	0.48	4.15	
2007/1/29	6.47	5.78	0.000	6.47	1.04	0.13	2.58	0.92	9.21	0.00	0.70	0.00	7.18	4.79	12.45	2.33	5.56	0.52	0.50	6.45	2.08	5.49	
2007/2/8	6.54	6.17	0.000	6.57	1.09	0.00	2.74	0.99	9.65	0.00	1.02	0.00	7.91	4.72	12.57	2.49	6.26	0.53	0.53	6.76	0.13	4.54	
2007/2/21	6.51	6.25	0.000	6.78	1.03	0.15	2.75	0.97	10.41	0.00	0.59	0.00	7.53	3.57	12.70	2.49	5.83	0.55	0.52	6.81	2.70	4.31	
2007/2/23	6.39	6.11	0.000	6.49	0.86	0.00	2.59	0.95	10.40	0.00	0.59	0.00	7.43	4.09	12.38	2.34	5.80	0.51	0.52	6.62	-1.19	4.01	
2007/3/9	6.59	5.85	0.000	6.18	1.11	0.00	2.53	0.93	9.48	0.00	0.62	0.00	7.06	4.18	12.17	2.29	5.50	0.50	0.49	6.32	0.71	3.84	
2007/3/23	6.38	7.13	0.000	7.30	1.44	0.00	3.08	1.15	12.80	0.00	0.95	0.00	7.50	3.95	11.59	2.80	5.67	0.60	0.60	7.70	0.48	3.86	
2007/3/28	6.35	5.56	0.000	5.93	0.92	0.00	2.41	0.87	9.97	0.00	0.98	0.00	4.85	3.58	9.11	2.19	3.36	0.47	0.46	5.91	1.92	3.08	
2007/4/10	6.57	5.02	0.000	5.69	0.94	0.14	2.19	0.77	7.48	0.00	0.85	0.00	5.66	4.81	10.39	1.97	4.23	0.45	0.42	5.48	3.56	4.37	
2007/4/27	6.54	5.49	0.000	5.85	1.07	0.00	2.13	0.78	7.95	0.15	0.57	0.00	6.57	4.15	11.49	1.91	5.10	0.45	0.44	5.66	1.26	1.54	
2007/4/28	6.53	5.37	0.000	6.08	0.91	0.00	2.25	0.83	7.91	0.00	0.44	0.00	6.88	4.40	12.07	2.02	5.35	0.47	0.45	5.76	2.56	3.53	
2007/5/8	6.75	5.78	0.000	6.37	1.34	0.00	2.34	0.84	7.64	0.00	0.91	0.00	7.55	5.06	12.17	2.09	5.95	0.50	0.47	6.08	2.81	2.57	
2007/5/24	6.73	6.01	0.000	6.82	1.31	0.00	2.52	0.90	7.74	0.01	0.61	0.00	8.27	6.97	12.50	2.26	6.55	0.53	0.51	6.51	1.49	3.97	
2007/5/30	6.74	6.12	0.000	6.68	1.03	0.00	2.52	0.89	7.62	0.19	0.54	0.00	8.12	7.19	12.78	2.27	6.45	0.52	0.51	6.41	0.18	2.30	
2007/6/13	6.84	6.64	0.000	7.29	1.49	0.00	2.82	0.99	7.40	0.02	1.12	0.00	8.85	8.41	13.40	2.55	7.02	0.58	0.55	6.96	2.48	2.36	
2007/6/27	6.79	6.01	0.000	6.67	1.60	0.00	2.46	0.85	6.62	0.01	1.24	0.00	7.54	7.32	13.22	2.21	5.87	0.52	0.48	6.23	3.95	1.76	
2007/7/12	6.54	5.21	0.000	5.76	1.43	0.00	2.04	0.73	7.46	0.01	0.60	0.00	5.39	4.91	12.39	1.83	3.95	0.45	0.41	5.40	4.21	1.75	
2007/7/25	6.78	6.31	0.000	7.04	1.36	0.00	2.47	0.86	7.17	0.00	0.79	0.00	7.72	7.04	14.29	2.20	5.95	0.54	0.49	6.35	4.34	0.29	
2007/8/9	6.76	6.13	0.000	7.18	1.23	0.00	2.49	0.85	6.58	0.16	0.43	0.00	7.68	7.89	14.10	2.22	5.88	0.54	0.49	6.26	5.16	1.08	
2007/8/24	6.52	5.67	0.000	6.58	1.34	0.00	2.14	0.76	7.27	0.12	0.80	0.00	7.37	4.08	14.10	1.89	5.72	0.49	0.44	5.87	5.25	1.71	
2007/8/28	6.71	5.26	0.000	5.65	1.59	0.05	2.50	0.72	5.44	0.01	1.27	0.00	5.68	6.90	12.83	2.29	4.26	0.47	0.41	5.39	7.76	1.23	
2007/9/11	6.83	5.84	0.000	6.77	1.36	0.00	2.34	0.81	6.43	0.00	0.98	0.00	6.74	6.41	14.62	2.08	5.04	0.51	0.44	5.88	7.35	0.30	
2007/9/20	6.84	6.31	0.000	6.80	1.61	0.00	2.41	0.84	7.66	0.07	0.57	0.00	6.85	6.08	14.79	2.15	5.14	0.53	0.47	6.18	5.71	-1.02	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
 “n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の溪流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2007/10/2	6.75	6.11	0.000	7.37	1.65	0.00	2.70	0.95	6.80	0.34	0.59	0.00	8.84	7.43	14.03	2.42	6.99	0.58	0.51	6.74	5.60	4.91	
2007/10/12	6.87	5.96	0.000	6.75	1.19	0.00	2.74	0.92	6.00	0.02	0.79	0.00	7.87	7.35	13.83	2.48	6.18	0.54	0.47	6.15	6.95	1.61	
2007/10/19	6.83	6.71	0.000	7.59	1.26	0.00	3.16	1.05	6.36	0.00	0.70	0.00	10.29	8.12	13.05	2.88	8.38	0.61	0.54	7.05	5.98	2.50	
2007/10/24	6.81	6.13	0.000	6.84	1.27	0.00	2.76	0.94	6.84	0.00	0.71	0.00	7.88	7.30	13.51	2.50	6.17	0.54	0.49	6.37	5.50	1.89	
2007/11/9	6.84	6.53	0.000	6.94	1.25	0.00	2.96	1.01	7.66	0.00	0.76	0.00	8.52	6.32	13.96	2.70	6.78	0.57	0.51	6.69	4.63	1.25	
2007/11/19	6.48	6.25	0.000	6.03	1.52	0.00	2.64	0.91	8.80	0.00	0.69	0.00	6.80	5.22	n/a	2.41	5.28	0.51	0.49	6.29	2.19	0.29	
2007/11/26	6.65	6.42	0.000	6.69	1.07	0.00	2.78	0.97	9.69	0.00	0.71	0.00	6.71	4.81	13.71	2.52	5.03	0.54	0.50	6.56	3.28	1.08	
2007/12/11	6.61	6.09	0.000	6.47	0.94	0.00	2.50	0.90	8.84	0.00	0.66	0.00	6.96	4.26	13.41	2.25	5.33	0.50	0.47	6.18	3.02	0.74	
2007/12/19	6.56	6.11	0.000	5.72	1.20	0.00	2.62	0.90	8.42	0.00	0.69	0.00	7.30	4.60	n/a	2.41	5.86	0.48	0.48	6.10	0.93	-0.07	
2007/12/27	6.51	6.16	0.000	6.47	1.21	0.00	2.52	0.89	8.46	0.00	0.52	0.00	7.54	4.74	12.81	2.28	5.91	0.51	0.48	6.27	3.02	0.88	
2008/1/11	6.54	6.46	0.000	6.50	1.20	0.00	2.73	0.98	9.83	0.00	0.87	0.00	7.52	4.50	12.01	2.48	5.89	0.53	0.52	6.69	0.87	1.78	
2008/1/19	6.62	6.53	0.000	6.54	1.15	0.00	2.78	1.00	9.37	0.00	0.74	0.00	8.19	4.48	12.32	2.53	6.55	0.53	0.52	6.71	1.39	1.34	
2008/1/23	6.69	6.59	0.000	6.63	1.17	0.00	2.80	1.01	9.27	0.00	0.71	0.00	8.62	4.72	12.33	2.55	6.96	0.54	0.53	6.81	1.06	1.61	
2008/2/13	6.65	6.99	0.000	6.98	1.12	0.00	3.04	1.11	10.21	0.00	0.87	0.00	9.23	4.39	11.93	2.77	7.48	0.57	0.57	7.29	0.76	2.08	
2008/2/21	6.60	7.12	0.000	7.10	1.31	0.00	3.21	1.16	10.18	0.00	0.92	0.00	9.46	4.84	12.05	2.94	7.68	0.60	0.58	7.50	1.68	2.58	
2008/2/28	6.66	7.20	0.000	7.13	1.15	0.00	3.21	1.17	10.25	0.00	0.98	0.00	9.41	4.70	12.22	2.93	7.62	0.60	0.58	7.48	1.50	1.88	
2008/3/11	6.17	9.14	0.001	8.85	1.47	0.00	3.69	1.47	17.90	0.00	1.60	0.00	7.30	2.81	9.94	3.35	5.07	0.73	0.73	9.43	-0.03	1.57	
2008/3/19	6.39	6.30	0.000	6.51	1.10	0.00	2.49	0.94	11.96	0.00	0.92	0.00	5.36	2.81	9.71	2.24	3.73	0.51	0.51	6.57	0.26	2.11	
2008/3/27	6.48	5.75	0.000	5.87	0.98	0.00	2.24	0.84	10.03	0.00	0.98	0.00	5.26	3.36	9.53	2.02	3.78	0.46	0.46	5.90	-0.22	1.32	
2008/4/11	6.58	4.44	0.000	4.70	0.79	0.00	1.81	0.63	6.74	0.00	0.90	0.00	3.97	3.94	7.25	1.63	2.79	0.37	0.35	4.50	2.13	0.72	
2008/4/22	6.67	5.87	0.000	6.06	1.24	0.00	2.55	0.86	7.55	0.07	0.75	0.00	7.12	6.70	10.44	2.32	5.60	0.49	0.48	6.09	0.89	1.88	
2008/4/25	6.67	5.96	0.000	6.15	1.19	0.00	2.58	0.87	7.92	0.00	1.01	0.00	7.03	4.75	10.57	2.35	5.49	0.50	0.46	6.06	3.60	0.82	
2008/5/8	6.87	6.84	0.000	6.96	1.52	0.00	3.03	1.03	8.18	0.14	0.85	0.00	8.89	7.58	11.88	2.77	7.14	0.58	0.56	7.08	1.83	1.69	
2008/5/23	6.82	7.12	0.000	7.34	1.62	0.00	3.35	1.08	7.70	0.00	1.20	0.00	9.00	9.62	12.61	3.08	7.16	0.62	0.58	7.38	3.01	1.81	
2008/5/26	6.65	6.24	0.000	6.46	1.43	0.05	3.04	0.95	6.96	0.00	0.95	0.00	7.39	8.29	12.31	2.80	5.77	0.55	0.50	6.47	4.63	1.81	
2008/6/10	6.80	7.23	0.000	7.61	1.69	0.00	3.40	1.09	7.68	0.35	1.14	0.00	9.11	10.09	13.10	3.11	7.20	0.63	0.60	7.56	2.89	2.25	
2008/6/19	6.84	8.91	0.000	8.92	1.97	0.00	4.58	1.40	7.94	0.48	1.32	0.00	13.55	13.10	12.85	4.24	11.31	0.78	0.75	9.45	1.94	2.92	
2008/6/25	6.90	9.35	0.000	9.92	2.14	0.00	4.10	1.43	7.92	0.00	1.47	0.00	14.60	14.60	12.84	3.73	12.11	0.81	0.79	9.79	1.18	2.30	
2008/7/9	6.97	8.70	0.000	9.59	2.29	0.00	3.86	1.32	7.48	0.00	1.78	0.00	12.88	13.59	13.51	3.49	10.48	0.78	0.73	9.21	3.04	2.83	
2008/7/22	6.92	7.10	0.000	7.78	2.00	0.00	3.09	1.01	6.39	0.00	1.43	0.00	8.57	10.74	12.59	2.80	6.61	0.63	0.56	7.19	5.87	0.65	
2008/7/25	6.62	5.82	0.000	6.06	1.34	0.00	2.25	0.79	8.30	0.04	0.81	0.00	5.67	5.16	11.79	2.02	4.15	0.48	0.45	5.81	2.65	-0.11	
2008/8/11	6.68	9.39	0.000	9.79	2.29	0.00	4.06	1.44	8.16	0.03	0.81	0.00	15.27	13.70	13.14	3.69	12.81	0.81	0.79	9.81	1.23	2.20	
2008/8/22	6.66	5.79	0.000	6.08	1.35	0.00	2.26	0.79	9.39	0.00	0.46	0.00	5.14	4.93	12.70	2.03	3.61	0.48	0.46	5.90	1.82	0.93	
2008/8/26	6.74	6.14	0.000	6.50	1.46	0.00	2.41	0.84	9.28	0.00	0.44	0.00	6.16	6.54	13.35	2.16	4.53	0.51	0.50	6.34	0.56	1.57	
2008/9/11	6.86	7.17	0.000	7.78	1.71	0.00	3.01	1.04	8.25	0.00	0.70	0.00	9.50	8.65	13.51	2.71	7.54	0.62	0.58	7.45	2.89	1.88	
2008/9/18	6.85	8.02	0.000	8.53	1.96	0.00	3.76	1.24	8.36	0.00	0.70	0.00	11.30	12.38	13.55	3.44	9.16	0.71	0.69	8.56	1.86	3.28	
2008/9/25	7.02	7.38	0.000	8.11	1.83	0.08	3.30	1.12	7.65	0.00	0.47	0.00	10.24	11.01	12.80	2.99	8.20	0.66	0.62	7.83	3.44	2.97	
2008/10/9	6.92	7.06	0.000	7.47	1.74	0.00	3.17	1.09	8.05	0.00	0.58	0.00	8.96	10.61	13.43	2.88	7.08	0.62	0.60	7.45	1.69	2.69	
2008/10/20	6.84	8.06	0.000	8.19	1.91	0.13	3.66	1.23	8.21	0.00	0.41	0.00	11.30	12.88	12.70	3.35	9.24	0.70	0.68	8.47	0.87	2.49	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す Results of Quality Control "R1" and "R2" represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

"n/a" は該当無しを表す "n/a" represents "Not applicable".

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の渓流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2008/10/24	6.57	5.79	0.000	5.90	1.63	0.00	2.75	0.94	7.36	0.00	1.46	0.00	5.57	6.83	11.39	2.53	4.09	0.51	0.46	6.01	5.52	1.90	
2008/11/11	6.79	6.97	0.000	7.08	1.55	0.07	2.84	1.00	9.07	0.00	0.46	0.00	9.15	7.21	13.05	2.58	7.37	0.58	0.57	7.21	0.35	1.71	
2008/11/20	6.57	5.94	0.000	6.25	1.31	0.00	2.51	0.90	9.45	0.00	0.61	0.00	6.55	5.37	12.16	2.27	4.98	0.51	0.50	6.35	0.44	3.35	
2008/11/27	6.57	5.93	0.000	6.13	1.21	0.06	2.42	0.88	9.34	0.00	0.47	0.00	6.43	5.29	12.53	2.19	4.89	0.49	0.49	6.22	0.24	2.42	
2008/12/9	6.53	5.87	0.000	6.12	1.15	0.05	2.34	0.85	9.17	0.00	0.42	0.00	6.72	4.98	11.99	2.10	5.18	0.48	0.49	6.15	-0.20	2.35	
2008/12/18	6.72	6.16	0.000	6.23	1.13	0.09	2.60	0.91	8.75	0.00	0.47	0.00	7.91	5.41	12.36	2.36	6.35	0.51	0.51	6.44	0.23	2.24	
2008/12/25	6.54	4.33	0.000	4.43	0.98	0.10	1.79	0.61	5.96	0.00	0.74	0.00	4.57	4.53	8.25	1.62	3.45	0.36	0.35	4.46	1.89	1.47	
2009/1/7	6.61	8.72	0.000	10.65	1.63	0.17	4.22	1.56	16.99	0.00	0.94	0.00	9.07	4.83	14.26	3.81	6.40	0.85	0.76	10.28	5.66	8.20	
2009/1/21	6.48	8.35	0.000	10.15	1.29	0.11	3.99	1.47	16.17	0.00	0.64	0.00	8.02	4.47	13.48	3.61	5.47	0.80	0.71	9.56	6.25	6.76	
2009/1/30	6.59	8.09	0.000	9.83	1.27	0.12	4.00	1.45	14.78	0.00	0.59	0.00	8.58	4.78	14.03	3.62	6.11	0.79	0.68	9.29	6.98	6.93	
2009/2/8	6.66	7.57	0.000	9.39	1.31	0.06	3.61	1.31	13.46	0.00	0.55	0.00	8.50	4.48	13.86	3.25	6.14	0.73	0.64	8.68	6.92	6.84	
2009/2/23	6.43	7.29	0.000	9.05	1.25	0.00	3.49	1.27	13.85	0.00	0.78	0.00	6.80	3.91	12.20	3.15	4.53	0.71	0.61	8.31	7.32	6.54	
2009/2/25	6.53	6.98	0.000	8.77	1.19	0.07	3.38	1.22	12.63	0.00	0.62	0.00	7.39	4.15	13.41	3.05	5.18	0.69	0.59	8.04	7.64	7.08	
2009/3/10	6.53	6.26	0.000	8.10	1.17	0.09	2.91	1.06	11.70	0.00	0.49	0.00	6.35	4.32	13.20	2.60	4.32	0.62	0.54	7.31	6.81	7.75	
2009/3/23	6.23	5.41	0.001	6.99	0.89	0.08	2.37	0.86	10.24	0.00	0.50	0.00	4.70	3.53	10.85	2.11	2.95	0.52	0.45	6.13	7.04	6.25	
2009/3/26	6.53	6.03	0.000	7.74	1.02	0.09	2.74	1.00	10.62	0.00	0.45	0.00	6.49	3.61	13.16	2.45	4.55	0.59	0.50	6.86	7.86	6.45	
2009/4/7	6.47	4.80	0.000	6.34	0.80	0.08	2.13	0.75	8.22	0.00	0.53	0.00	4.63	4.32	10.43	1.89	3.03	0.47	0.41	5.46	6.99	6.41	
2009/4/20	6.59	4.97	0.000	6.64	0.82	0.05	2.29	0.80	7.77	0.00	0.44	0.00	5.70	5.12	10.74	2.04	4.03	0.49	0.43	5.71	6.97	6.93	
2009/4/24	6.65	5.39	0.000	7.08	0.97	0.07	2.46	0.86	8.52	0.00	0.35	0.00	6.33	5.04	11.99	2.19	4.56	0.53	0.46	6.17	7.10	6.76	
2009/5/7	6.75	5.18	0.000	7.09	1.21	0.00	2.16	0.77	7.02	0.00	0.13	0.00	6.84	6.36	11.77	1.89	5.06	0.51	0.45	5.89	6.69	6.42	
2009/5/25	6.78	6.10	0.000	6.54	1.32	0.00	2.95	1.02	8.46	0.00	0.56	0.00	8.55	6.34	13.69	2.70	6.91	0.55	0.53	6.78	1.85	5.25	
2009/5/26	6.86	6.33	0.000	6.73	1.39	0.00	2.96	1.03	8.59	0.00	0.53	0.00	9.09	6.03	14.04	2.70	7.40	0.56	0.54	6.93	1.95	4.50	
2009/6/9	6.92	7.01	0.000	7.57	1.63	0.00	3.39	1.17	8.31	0.00	1.11	0.00	10.35	7.69	15.03	3.10	8.45	0.64	0.59	7.68	3.44	4.59	
2009/6/17	6.79	7.06	0.000	7.64	1.47	0.00	3.54	1.21	8.43	0.00	2.22	0.00	10.36	8.32	14.51	3.25	8.45	0.65	0.63	7.94	1.59	5.85	
2009/6/26	6.79	6.89	0.000	7.53	1.55	0.00	3.36	1.14	8.15	0.00	2.17	0.00	9.65	7.68	15.10	3.07	7.76	0.63	0.59	7.61	3.03	4.97	
2009/7/10	6.53	5.08	0.000	5.58	1.03	0.00	2.34	0.82	8.47	0.00	0.60	0.00	5.05	4.48	12.52	2.13	3.65	0.45	0.43	5.54	3.01	4.30	
2009/7/21	6.43	5.72	0.000	8.16	1.23	0.00	2.43	0.86	9.59	0.45	0.53	0.00	6.31	4.75	15.41	2.12	4.26	0.58	0.50	6.72	7.51	8.03	
2009/7/24	6.54	5.94	0.000	6.53	1.48	0.00	2.53	0.89	9.27	0.00	0.57	0.00	7.53	3.98	15.79	2.28	5.89	0.52	0.49	6.46	2.87	4.23	
2009/8/11	6.70	6.09	0.000	6.93	1.58	0.00	2.74	0.94	7.97	0.00	0.85	0.00	8.19	5.65	16.46	2.48	6.45	0.56	0.50	6.63	5.15	4.28	
2009/8/20	6.74	6.88	0.000	7.59	1.66	0.00	3.15	1.10	8.73	0.00	2.03	0.00	8.93	6.83	16.64	2.86	7.02	0.62	0.58	7.49	3.62	4.25	
2009/8/27	6.82	6.83	0.000	7.51	1.69	0.00	2.98	1.07	8.50	0.00	2.25	0.00	9.26	5.94	16.23	2.70	7.38	0.61	0.57	7.38	3.44	3.88	
2009/9/9	6.75	6.61	0.000	7.90	1.59	0.00	3.05	1.07	8.04	0.00	0.65	0.00	8.72	6.98	16.15	2.75	6.73	0.62	0.53	7.17	7.91	4.09	
2009/9/24	6.80	6.26	0.000	7.36	1.52	0.00	3.12	1.07	7.37	0.00	0.63	0.00	7.17	10.02	16.01	2.84	5.33	0.60	0.53	6.88	6.27	4.73	
2009/9/25	6.84	6.63	0.000	7.72	1.77	0.00	3.00	1.07	7.84	0.00	0.55	0.00	8.04	8.98	16.02	2.70	6.10	0.62	0.54	7.13	6.34	3.62	
2009/10/23	6.74	6.45	0.000	7.37	1.44	0.00	3.08	1.09	8.91	0.00	0.53	0.00	7.51	6.46	15.95	2.80	5.66	0.60	0.52	6.98	7.01	3.96	
2009/11/10	6.81	6.95	0.000	7.57	1.61	0.00	3.40	1.20	9.41	0.00	0.51	0.00	8.45	7.08	16.15	3.12	6.55	0.64	0.57	7.51	6.06	3.85	
2009/11/24	6.66	6.29	0.000	7.15	1.28	0.00	2.96	1.05	9.78	0.00	0.43	0.00	7.27	6.07	15.67	2.68	5.48	0.58	0.53	6.96	3.97	5.03	
2009/11/25	6.81	6.51	0.000	7.38	1.39	0.00	3.04	1.08	9.85	0.00	0.42	0.00	7.72	6.16	15.94	2.76	5.86	0.60	0.55	7.16	4.50	4.76	
2009/12/7	6.50	6.22	0.000	6.97	1.26	0.00	2.86	1.04	11.04	0.00	0.60	0.00	5.86	4.42	13.12	2.60	4.11	0.56	0.52	6.82	4.47	4.60	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
 “n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の溪流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2009/12/15	6.73	6.26	0.000	7.08	1.25	0.00	2.99	1.06	9.85	0.00	0.48	0.00	7.70	5.23	15.24	2.72	5.92	0.58	0.53	6.98	4.03	5.45	
2009/12/22	6.69	6.24	0.000	6.94	1.00	0.00	3.01	1.08	9.41	0.00	0.60	0.00	7.82	5.01	13.49	2.74	6.08	0.57	0.52	6.84	4.26	4.57	
2010/1/13	6.63	7.50	0.000	8.14	1.06	0.00	3.45	1.24	13.33	0.00	0.59	0.00	7.88	3.99	11.97	3.14	5.84	0.66	0.62	8.10	3.22	3.83	
2010/1/20	6.65	7.57	0.000	8.29	1.22	0.00	3.65	1.29	13.03	0.00	0.64	0.00	8.64	4.42	12.62	3.33	6.56	0.68	0.63	8.34	3.84	4.83	
2010/2/11	6.69	7.53	0.000	8.02	1.04	0.00	3.68	1.29	13.17	0.00	0.62	0.00	8.13	3.84	12.62	3.38	6.12	0.67	0.61	8.16	4.06	3.99	
2010/2/22	6.74	7.37	0.000	8.08	1.24	0.00	3.78	1.34	12.24	0.00	0.64	0.00	8.94	3.89	13.33	3.48	6.91	0.68	0.61	8.20	6.00	5.34	
2010/2/24	6.72	6.47	0.000	7.07	0.90	0.00	2.94	1.02	11.52	0.00	0.47	0.00	6.75	3.68	11.88	2.67	4.97	0.56	0.53	6.97	2.57	3.70	
2010/3/8	6.56	7.28	0.000	7.94	1.19	0.00	3.37	1.22	13.25	0.00	0.67	0.00	7.72	3.34	12.49	3.07	5.73	0.64	0.60	7.96	3.58	4.48	
2010/3/19	6.57	6.25	0.000	6.93	0.90	0.00	2.72	0.98	10.88	0.00	0.46	0.00	6.65	3.27	11.91	2.46	4.91	0.54	0.51	6.67	3.26	3.24	
2010/3/24	6.55	6.18	0.000	6.90	1.03	0.00	2.68	0.97	11.33	0.00	0.53	0.00	5.84	3.17	10.94	2.42	4.11	0.54	0.50	6.63	3.69	3.55	
2010/4/9	6.51	5.09	0.000	5.67	0.94	0.00	2.06	0.73	8.16	0.00	0.65	0.00	4.96	2.76	9.76	1.85	3.54	0.43	0.39	5.21	5.43	1.21	
2010/4/19	6.45	5.47	0.000	6.30	0.90	0.00	2.43	0.86	9.58	0.00	0.48	0.00	5.68	3.17	11.05	2.19	4.10	0.49	0.45	5.95	4.44	4.21	
2010/4/26	6.54	4.12	0.000	4.81	0.71	0.00	1.77	0.61	6.29	0.00	0.73	0.00	3.79	3.45	7.43	1.59	2.58	0.37	0.32	4.31	5.97	2.21	
2010/5/11	6.61	5.64	0.000	6.44	1.16	0.00	2.53	0.88	7.79	0.00	0.43	0.00	6.98	4.74	11.05	2.29	5.36	0.51	0.45	6.00	6.18	3.12	
2010/5/12	6.57	5.30	0.000	6.10	1.04	0.00	2.52	0.87	7.68	0.00	0.48	0.00	5.86	5.95	11.19	2.29	4.33	0.49	0.44	5.79	4.89	4.40	
2010/5/28	6.68	5.70	0.000	6.69	1.25	0.00	2.61	0.90	8.62	0.00	0.36	0.00	6.45	4.24	12.55	2.35	4.77	0.53	0.45	6.15	7.59	3.82	
2010/6/9	6.75	7.18	0.000	8.19	1.67	0.00	3.43	1.17	8.59	0.00	0.92	0.00	9.63	9.34	13.79	3.12	7.58	0.67	0.61	7.88	4.41	4.67	
2010/6/25	6.71	6.23	0.000	8.28	1.53	0.00	2.92	0.98	8.12	0.00	2.56	0.00	7.13	8.02	13.45	2.61	5.05	0.63	0.55	7.22	6.49	7.35	
2010/7/8	6.72	7.21	0.000	9.73	2.05	0.00	3.51	1.19	8.67	0.00	2.69	0.00	8.82	10.93	14.79	3.14	6.38	0.75	0.65	8.52	7.00	8.34	
2010/7/26	6.62	6.31	0.000	8.21	1.68	0.07	2.97	1.00	8.44	0.00	1.34	0.00	7.26	8.44	13.97	2.66	5.20	0.63	0.55	7.26	7.17	6.98	
2010/8/4	6.71	6.68	0.000	8.96	1.89	0.00	3.13	1.05	8.61	0.08	1.31	0.00	7.54	10.13	14.72	2.79	5.29	0.68	0.59	7.74	7.04	7.38	
2010/8/26	6.86	6.62	0.000	9.00	1.65	0.00	3.21	1.06	8.13	0.42	1.31	0.00	7.63	9.93	15.02	2.86	5.37	0.68	0.58	7.66	7.93	7.28	
2010/9/8	6.88	6.61	0.000	7.22	1.63	0.00	3.18	1.05	7.80	0.00	0.90	0.00	8.28	9.67	14.69	2.91	6.47	0.60	0.57	7.16	3.06	4.02	
2010/9/24	6.32	5.75	0.000	7.64	1.47	0.05	2.16	0.76	9.29	0.51	0.67	0.00	6.38	3.87	14.12	1.87	4.46	0.54	0.48	6.46	6.24	5.81	
2010/10/6	6.19	5.84	0.001	8.07	1.25	0.00	2.18	0.77	7.82	0.61	0.93	0.00	8.28	4.08	13.76	1.87	6.25	0.56	0.49	6.57	6.52	5.86	
2010/10/24	6.35	6.65	0.000	9.19	1.50	0.00	2.76	0.98	8.65	0.00	0.60	0.00	10.64	5.68	13.17	2.41	8.34	0.66	0.57	7.67	7.22	7.12	
2010/10/24	6.37	6.27	0.000	8.30	1.54	0.00	2.60	0.93	10.59	0.00	0.45	0.00	6.83	5.16	13.45	2.29	4.74	0.61	0.53	7.14	6.55	6.49	
2010/11/24	6.37	7.23	0.000	9.30	1.39	0.00	3.26	1.16	10.62	0.00	0.69	0.00	10.67	5.67	13.07	2.91	8.33	0.70	0.63	8.34	5.55	7.15	
2010/12/6	6.36	6.86	0.000	8.66	1.43	0.00	2.95	1.06	12.37	0.00	0.63	0.00	6.95	4.00	13.04	2.62	4.77	0.65	0.57	7.70	6.49	5.77	
2010/12/15	6.39	6.08	0.000	7.76	1.18	0.00	2.59	0.90	10.70	0.00	0.54	0.00	5.73	4.41	12.02	2.30	3.78	0.57	0.50	6.74	6.44	5.13	
2010/12/24	6.34	6.05	0.000	7.66	1.06	0.00	2.55	0.92	10.67	0.00	0.55	0.00	5.93	4.09	12.44	2.26	4.01	0.56	0.50	6.70	5.97	5.08	
2011/1/13	6.37	6.56	0.000	6.61	1.11	0.00	2.92	1.03	10.29	0.00	0.64	0.00	8.48	5.27	11.81	2.67	6.82	0.55	0.56	7.07	-1.54	3.76	
2011/1/24	6.38	6.51	0.000	6.58	1.20	0.00	3.04	1.06	9.93	0.00	0.70	0.00	8.91	5.01	12.13	2.79	7.26	0.56	0.56	7.11	-0.26	4.42	
2011/2/9	6.36	6.65	0.000	6.68	1.11	0.00	3.11	1.08	9.61	0.00	0.79	0.00	9.24	5.43	11.88	2.86	7.57	0.56	0.57	7.18	-0.12	3.82	
2011/2/24	6.26	7.40	0.001	7.44	1.25	0.00	3.68	1.29	12.96	0.00	0.91	0.00	9.22	4.90	12.17	3.39	7.35	0.65	0.65	8.33	-0.50	5.89	
2011/3/4	6.27	7.67	0.001	7.56	1.33	0.00	3.72	1.32	13.55	0.00	1.04	0.00	9.05	4.61	11.49	3.43	7.15	0.66	0.66	8.48	-0.42	5.03	
2011/3/10	6.18	7.87	0.001	7.80	1.38	0.00	3.83	1.36	14.03	0.00	1.18	0.00	9.29	4.31	11.45	3.53	7.33	0.68	0.68	8.74	-0.06	5.23	
2011/3/24	6.16	7.32	0.001	7.37	1.22	0.00	3.54	1.26	13.35	0.00	1.25	0.00	8.03	4.91	10.96	3.26	6.18	0.63	0.64	8.18	-0.93	5.53	
2011/4/12	6.13	5.46	0.001	5.66	0.96	0.00	2.43	0.86	9.28	0.00	0.77	0.00	5.85	4.68	9.77	2.21	4.43	0.46	0.47	5.94	-1.02	4.21	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す Results of Quality Control "R1" and "R2" represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

"n/a" は該当無しを表す "n/a" represents "Not applicable".

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の渓流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2011/4/22	6.20	4.88	0.001	5.09	0.78	0.00	2.11	0.74	7.90	0.00	0.56	0.00	5.19	4.46	9.17	1.91	3.91	0.41	0.41	5.18	-0.62	3.03	
2011/5/9	6.19	3.19	0.001	3.50	0.61	0.00	1.32	0.45	4.28	0.00	0.69	0.00	3.27	4.19	5.52	1.19	2.39	0.27	0.27	3.34	0.51	2.35	
2011/5/24	6.11	5.64	0.001	6.08	1.16	0.00	2.52	0.88	7.96	0.00	0.57	0.00	8.04	5.21	11.28	2.29	6.51	0.49	0.49	6.21	0.65	4.79	
2011/5/25	6.47	6.15	0.000	6.60	1.37	0.00	2.73	0.92	8.24	0.00	0.54	0.00	9.11	5.83	11.77	2.48	7.45	0.53	0.53	6.70	0.75	4.30	
2011/6/9	6.46	7.69	0.000	8.18	1.76	0.00	3.51	1.23	8.53	0.00	0.91	0.00	12.96	8.44	12.23	3.20	10.91	0.68	0.66	8.43	1.02	4.58	
2011/6/27	6.49	4.54	0.000	5.02	1.13	0.00	1.92	0.64	6.57	0.00	0.57	0.00	4.50	4.92	10.48	1.73	3.24	0.40	0.37	4.76	3.60	2.36	
2011/7/13	6.28	6.78	0.001	7.25	1.79	0.00	2.88	1.00	8.48	0.00	0.81	0.00	9.26	7.04	13.82	2.60	7.44	0.59	0.56	7.21	2.39	3.06	
2011/7/22	6.42	9.14	0.000	9.40	1.99	0.00	4.65	1.50	8.84	0.00	0.77	0.00	15.46	12.16	13.41	4.30	13.10	0.82	0.78	9.94	2.03	4.17	
2011/7/26	6.25	9.46	0.001	10.12	2.32	0.00	4.32	1.51	9.04	0.00	0.82	0.00	16.12	13.00	13.33	3.93	13.58	0.84	0.82	10.28	1.41	4.18	
2011/8/11	6.26	7.12	0.001	7.95	1.98	0.00	3.12	1.05	7.38	0.00	1.71	0.00	10.42	7.61	13.52	2.82	8.43	0.64	0.58	7.59	5.07	3.20	
2011/8/22	6.22	6.13	0.001	6.86	1.29	0.00	2.55	0.87	7.61	0.00	0.78	0.00	8.88	4.81	13.40	2.29	7.16	0.53	0.49	6.46	3.93	2.61	
2011/8/23	6.52	5.57	0.000	6.22	1.38	0.00	2.42	0.78	7.04	0.00	0.90	0.00	7.84	5.61	13.64	2.18	6.28	0.49	0.47	6.02	2.34	3.90	
2011/9/7	6.07	7.36	0.001	8.18	1.77	0.00	3.20	1.10	7.98	0.00	0.86	0.00	12.24	7.54	13.82	2.89	10.19	0.65	0.62	7.99	2.73	4.09	
2011/9/22	6.47	5.17	0.000	5.98	1.21	0.00	2.08	0.70	7.26	0.00	0.71	0.00	5.37	7.15	12.64	1.85	3.86	0.45	0.45	5.53	0.87	3.37	
2011/9/27	6.20	6.38	0.001	7.31	1.53	0.00	2.73	0.95	7.64	0.00	0.69	0.00	9.76	7.25	13.47	2.45	7.93	0.57	0.55	7.01	2.10	4.72	
2011/10/11	6.22	6.01	0.001	7.02	1.25	0.00	2.60	0.88	7.45	0.00	0.74	0.00	8.97	7.77	13.16	2.34	7.21	0.54	0.54	6.70	0.41	5.42	
2011/10/20	6.27	5.86	0.001	6.93	1.27	0.00	2.65	0.90	8.20	0.00	0.47	0.00	8.64	6.98	13.23	2.39	6.90	0.54	0.53	6.72	0.72	6.83	
2011/10/27	6.30	6.29	0.001	7.11	1.37	0.00	2.86	0.96	8.20	0.00	0.53	0.00	9.21	8.19	13.43	2.59	7.42	0.57	0.57	7.06	0.11	5.74	
2011/11/8	6.32	6.58	0.000	7.61	1.42	0.00	3.07	1.03	8.40	0.00	0.67	0.00	10.08	8.11	13.28	2.79	8.17	0.61	0.59	7.47	1.29	6.32	
2011/11/18	6.40	6.27	0.000	6.99	1.09	0.00	2.72	0.99	8.66	0.00	0.74	0.00	8.95	6.96	13.27	2.45	7.20	0.55	0.56	6.94	-0.65	5.04	
2011/11/29	6.60	6.59	0.000	7.38	1.22	0.00	2.96	1.06	9.74	0.00	0.63	0.00	9.27	6.32	13.81	2.67	7.42	0.59	0.58	7.37	0.46	5.57	
2011/12/7	6.34	6.27	0.000	7.01	1.02	0.00	2.79	1.03	9.81	0.00	0.61	0.00	8.74	5.60	13.50	2.52	6.98	0.55	0.56	7.06	-0.49	5.93	
2011/12/19	6.41	6.23	0.000	6.71	1.03	0.00	2.72	0.98	9.29	0.00	0.65	0.00	8.73	5.46	12.87	2.47	7.04	0.54	0.54	6.84	-0.76	4.66	
2011/12/27	6.49	6.44	0.000	6.98	0.96	0.00	2.88	1.07	9.59	0.00	0.76	0.00	9.31	6.40	12.24	2.62	7.56	0.56	0.58	7.21	-1.88	5.64	
2012/1/11	6.45	6.76	0.000	7.15	1.24	0.00	3.20	1.11	9.53	0.00	0.82	0.00	9.51	4.99	13.08	2.93	7.72	0.59	0.56	7.34	2.78	4.11	
2012/1/18	6.30	6.73	0.001	7.24	1.15	0.00	3.28	1.13	9.61	0.00	0.61	0.00	9.75	5.33	13.22	3.00	7.93	0.60	0.57	7.44	2.60	4.99	
2012/2/8	6.38	8.09	0.000	8.27	1.47	0.00	4.06	1.42	13.39	0.00	1.16	0.00	10.33	4.75	12.65	3.75	8.26	0.72	0.69	9.01	2.02	5.40	
2012/2/21	6.37	7.57	0.000	7.75	1.21	0.00	3.67	1.26	10.69	0.00	0.79	0.00	10.42	5.84	12.74	3.38	8.47	0.66	0.63	8.14	2.24	3.60	
2012/3/9	6.08	8.52	0.001	8.56	1.51	0.00	3.98	1.46	16.29	0.00	1.36	0.00	7.71	3.86	10.87	3.65	5.56	0.73	0.71	9.23	1.73	4.01	
2012/4/12	6.05	5.54	0.001	5.93	0.93	0.00	2.41	0.89	11.15	0.00	0.96	0.00	4.17	2.92	7.66	2.19	2.68	0.48	0.46	6.02	1.21	4.19	
2012/4/20	6.16	5.11	0.001	5.65	0.80	0.00	2.21	0.79	9.19	0.00	0.70	0.00	4.93	3.45	9.66	2.00	3.51	0.44	0.43	5.54	1.43	4.07	
2012/4/25	6.24	3.95	0.001	4.31	0.51	0.00	1.47	0.53	6.39	0.00	0.75	0.00	3.33	3.14	6.50	1.31	2.25	0.32	0.31	3.97	0.86	0.31	
2012/5/10	6.29	5.20	0.001	5.60	1.05	0.00	2.22	0.78	7.30	0.00	0.46	0.00	6.51	4.55	9.99	2.00	5.10	0.45	0.42	5.48	2.51	2.60	
2012/5/21	6.28	5.78	0.001	6.31	1.18	0.00	2.59	0.90	8.16	0.00	0.32	0.00	7.52	5.38	11.63	2.35	5.93	0.51	0.48	6.22	2.86	3.68	
2012/5/24	6.13	6.25	0.001	6.84	1.40	0.00	2.78	0.97	8.29	0.00	0.71	0.00	8.73	5.88	12.10	2.52	7.01	0.55	0.52	6.78	2.71	4.10	
2012/6/13	6.16	8.00	0.001	8.54	1.69	0.00	3.79	1.33	8.01	0.00	0.95	0.00	12.30	9.62	13.58	3.46	10.16	0.71	0.66	8.50	4.27	3.03	
2012/6/22	6.37	5.79	0.000	6.38	1.20	0.00	2.55	0.87	7.53	0.00	0.65	0.00	7.02	6.04	12.54	2.31	5.42	0.51	0.47	6.08	4.04	2.45	
2012/6/27	6.14	7.08	0.001	7.88	1.56	0.00	3.37	1.17	7.74	0.00	0.78	0.00	10.72	8.61	13.11	3.07	8.75	0.65	0.60	7.72	4.22	4.35	
2012/7/11	6.19	6.37	0.001	7.08	1.55	0.00	2.83	0.99	8.86	0.00	0.66	0.00	8.38	5.81	13.44	2.56	6.60	0.57	0.53	6.94	3.70	4.27	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
 “n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.
 Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の溪流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2012/7/23	6.19	7.08	0.001	7.43	1.36	0.00	3.26	1.14	8.68	0.00	0.73	0.00	9.92	8.71	14.12	2.98	8.06	0.61	0.61	7.61	0.75	3.60	
2012/7/27	6.43	5.24	0.000	5.94	1.32	0.00	2.51	0.81	6.18	0.00	1.47	0.00	5.53	7.00	12.15	2.29	4.04	0.48	0.43	5.59	6.16	3.20	
2012/8/10	6.70	8.01	0.000	9.26	1.86	0.00	3.98	1.29	8.35	0.00	0.54	0.00	12.39	13.15	15.22	3.63	10.07	0.76	0.72	9.01	2.53	5.87	
2012/8/20	6.33	7.44	0.000	8.16	1.74	0.00	3.47	1.20	7.77	0.00	0.73	0.00	10.69	11.24	14.80	3.16	8.64	0.67	0.64	8.04	2.58	3.86	
2012/8/24	6.28	8.10	0.001	8.75	1.95	0.00	3.72	1.29	7.93	0.00	0.75	0.00	11.77	13.04	14.78	3.39	9.58	0.72	0.69	8.67	2.02	3.42	
2012/9/11	6.32	7.39	0.000	8.70	1.97	0.00	3.60	1.26	7.09	0.00	0.77	0.00	11.81	13.64	14.68	3.27	9.62	0.71	0.68	8.49	2.24	6.90	
2012/9/24	6.37	6.39	0.000	6.99	1.59	0.00	3.00	0.97	6.20	0.00	0.23	0.00	8.21	7.77	14.38	2.73	6.46	0.57	0.51	6.70	5.84	2.37	
2012/9/28	6.85	7.47	0.000	8.37	1.77	0.00	3.52	1.22	7.06	0.00	0.78	0.00	11.87	11.15	14.08	3.20	9.77	0.69	0.64	8.14	3.31	4.32	
2012/10/10	6.28	7.98	0.001	8.43	1.56	0.00	3.77	1.31	7.24	0.00	0.74	0.00	12.89	11.84	13.83	3.45	10.77	0.70	0.68	8.50	1.76	3.16	
2012/10/23	6.66	6.18	0.000	6.88	1.53	0.00	3.15	1.01	6.60	0.00	1.52	0.00	8.84	7.59	12.12	2.89	7.12	0.58	0.52	6.80	5.39	4.76	
2012/11/8	6.36	5.75	0.000	5.85	1.16	0.00	2.41	0.84	9.29	0.00	1.13	0.00	4.78	4.73	10.90	2.19	3.31	0.47	0.46	5.86	1.78	0.98	
2012/11/19	6.48	6.17	0.000	6.48	1.19	0.00	2.70	0.94	9.68	0.00	0.79	0.00	7.27	4.75	13.69	2.45	5.65	0.52	0.52	6.60	0.94	3.35	
2012/11/26	6.58	6.50	0.000	6.66	1.01	0.00	2.77	0.97	9.68	0.00	0.63	0.00	8.49	4.71	13.90	2.52	6.81	0.53	0.54	6.82	-0.25	2.40	
2012/12/18	6.42	6.07	0.000	6.19	1.06	0.00	2.58	0.92	10.54	0.00	0.87	0.00	6.01	3.65	11.54	2.34	4.45	0.50	0.50	6.37	0.46	2.42	
2012/12/21	6.50	6.41	0.000	6.51	1.23	0.00	2.67	0.97	10.52	0.03	0.69	0.00	7.30	4.09	11.78	2.42	5.67	0.53	0.53	6.74	0.00	2.53	
2013/1/21	6.55	7.12	0.000	7.12	1.12	0.00	3.21	1.15	10.07	0.00	0.99	0.00	9.77	3.63	12.18	2.94	7.99	0.59	0.56	5.65	2.66	2.00	
2013/1/30	6.57	7.08	0.000	7.15	1.06	0.00	3.18	1.13	9.87	0.00	1.03	0.00	9.97	3.83	11.82	2.91	8.17	0.59	0.57	5.64	2.18	2.18	
2013/2/25	6.55	7.50	0.000	7.49	1.11	0.00	3.42	1.22	10.77	0.00	1.09	0.00	10.68	3.93	11.64	3.13	8.80	0.63	0.61	6.08	1.42	2.70	
2013/2/27	6.59	7.53	0.000	7.47	1.20	0.00	3.65	1.30	10.78	0.00	1.09	0.00	10.92	4.00	12.13	3.37	9.04	0.65	0.61	6.22	2.46	3.52	
2013/3/17	6.22	8.48	0.001	8.27	1.38	0.00	3.62	1.40	16.19	0.00	1.75	0.00	7.99	3.11	10.02	3.31	5.92	0.69	0.70	6.96	-0.75	3.11	
2013/3/21	6.33	7.82	0.000	7.22	1.18	0.00	3.23	1.23	14.35	0.00	1.49	0.00	6.76	2.89	9.61	2.95	4.95	0.61	0.62	6.12	-0.81	0.58	
2013/4/11	6.30	6.03	0.001	5.84	0.97	0.00	2.28	0.87	10.26	0.00	0.98	0.00	5.65	3.11	9.07	2.06	4.18	0.46	0.47	4.57	-1.01	-0.08	
2013/4/18	6.29	4.98	0.001	4.99	0.79	0.00	1.80	0.70	7.92	0.00	1.20	0.00	4.80	3.06	7.06	1.61	3.55	0.38	0.39	3.73	-1.01	-0.19	
2013/4/25	6.35	4.15	0.000	4.52	0.68	0.00	1.61	0.60	7.08	0.00	1.01	0.00	4.00	3.03	6.57	1.44	2.86	0.34	0.35	3.29	-0.64	2.93	
2013/5/9	6.41	3.41	0.000	3.78	0.60	0.00	1.26	0.47	5.13	0.00	0.96	0.00	3.40	3.11	5.45	1.11	2.45	0.28	0.28	2.60	-0.08	1.85	
2013/5/22	6.53	5.89	0.000	6.05	1.16	0.00	2.46	0.89	7.07	0.00	1.20	0.00	8.28	5.37	9.96	2.23	6.76	0.49	0.48	4.57	1.03	1.77	
2013/5/28	6.62	7.23	0.001	7.27	1.49	0.00	3.09	1.14	8.18	0.00	1.21	0.00	10.89	6.52	11.23	2.82	9.06	0.60	0.58	5.62	1.59	1.72	
2013/6/20	6.61	6.96	0.001	6.92	1.33	0.00	2.70	0.97	7.26	0.00	1.00	0.00	8.28	6.65	12.32	2.44	6.54	0.55	0.50	4.78	4.53	-3.11	
2013/6/24	6.75	7.98	0.000	7.75	1.52	0.00	3.21	1.14	7.67	0.00	0.96	0.00	10.18	8.08	12.18	2.91	8.23	0.63	0.58	5.51	4.46	-3.21	
2013/7/19	6.18	5.80	0.001	5.59	0.93	0.00	1.73	0.65	8.55	0.00	0.63	0.00	5.48	2.62	11.55	1.52	4.08	0.41	0.41	3.84	-0.12	-5.12	
2013/7/21	6.25	5.80	0.001	6.13	1.23	0.00	2.04	0.76	8.70	0.00	0.82	0.00	7.10	3.13	12.22	1.81	5.56	0.46	0.46	4.34	0.59	0.91	
2013/8/19	6.62	7.11	0.001	7.79	1.93	0.00	2.68	0.99	8.63	0.00	0.60	0.00	9.53	7.09	13.43	2.38	7.57	0.60	0.57	5.27	3.03	1.54	
2013/8/23	6.68	7.19	0.001	8.02	1.99	0.00	2.74	1.00	8.46	0.00	0.63	0.00	9.72	6.76	13.28	2.43	7.71	0.62	0.56	5.27	4.82	1.38	
2013/9/10	6.56	4.89	0.001	6.38	1.33	0.00	2.09	0.77	7.91	0.00	0.65	0.00	6.37	5.44	13.27	1.84	4.76	0.48	0.46	4.20	2.51	8.88	
2013/9/18	6.60	5.32	0.000	6.86	1.63	0.00	2.27	0.83	7.21	0.00	0.73	0.00	7.76	5.94	13.12	2.01	6.04	0.52	0.47	4.41	4.79	7.76	
2013/10/21	6.56	5.34	0.001	6.17	1.38	0.00	2.12	0.76	6.83	0.00	0.94	0.00	6.50	5.45	12.27	1.89	4.95	0.47	0.43	4.04	4.45	2.74	
2013/10/28	6.55	5.71	0.001	6.44	1.42	0.00	2.25	0.83	7.68	0.00	0.57	0.00	7.45	4.98	12.68	2.01	5.84	0.50	0.46	4.37	3.59	2.80	
2013/11/15	6.48	5.17	0.000	5.45	1.46	0.00	2.13	0.77	7.63	0.00	1.38	0.00	5.44	3.78	10.02	1.92	4.07	0.44	0.41	3.97	3.69	2.45	
2013/11/22	6.38	4.87	0.000	5.45	1.35	0.00	1.84	0.68	7.99	0.00	0.71	0.00	4.98	3.47	11.11	1.63	3.61	0.42	0.40	3.75	2.70	3.14	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す
 “n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

Appendix table 2. 釜淵試験地 1 号沢における 2000 ～ 2014 年の渓流水の水質分析結果 (つづき)

Analytical data of streamwater between 2000 and 2014 at the Kamabuchi experimental watershed No.1 (continued)

Date	pH	EC _{obs} mS m ⁻¹	H ⁺ mg L ⁻¹	Na ⁺ mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₂ ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	Si mg L ⁻¹	nss-Ca ²⁺ mg L ⁻¹	nss-SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹	Cations meq L ⁻¹	Anions meq L ⁻¹	EC _{cal} mS m ⁻¹	R1	R2	QC ^{*1}
2013/11/27	6.38	5.31	0.000	5.77	1.15	0.00	2.04	0.76	8.86	0.00	0.75	0.00	5.27	3.51	11.32	1.82	3.82	0.45	0.43	4.08	1.81	2.28	
2013/12/5	6.30	5.33	0.001	5.94	1.08	0.00	2.01	0.77	8.36	0.00	0.66	0.00	6.59	3.55	11.69	1.79	5.09	0.45	0.44	4.19	0.96	3.20	
2013/12/18	6.20	5.67	0.001	6.44	1.18	0.00	2.39	0.89	9.57	0.00	0.71	0.00	7.31	3.56	11.29	2.14	5.69	0.50	0.49	4.74	1.14	5.79	
2014/1/7	6.27	6.37	0.001	6.71	1.27	0.00	2.64	0.99	10.19	0.00	0.86	0.00	8.05	3.94	11.17	2.38	6.36	0.54	0.53	5.16	0.40	3.70	
2014/1/20	6.13	6.36	0.001	6.70	1.10	0.00	2.77	1.05	9.36	0.00	0.91	0.00	8.72	4.00	11.51	2.52	7.04	0.54	0.53	5.18	1.74	3.65	
2014/2/4	6.20	6.76	0.001	7.08	1.27	0.00	3.01	1.16	12.42	0.00	1.27	0.00	7.05	3.11	11.19	2.75	5.27	0.59	0.57	5.65	1.59	4.74	
2014/2/20	6.33	6.85	0.000	7.17	1.04	0.00	2.66	0.99	10.81	0.00	1.04	0.00	9.29	4.27	11.54	2.39	7.49	0.55	0.59	5.55	-2.79	3.25	
2014/3/4	6.30	6.66	0.001	7.16	1.14	0.00	3.12	1.17	11.39	0.00	1.27	0.00	8.29	3.68	10.98	2.84	6.49	0.59	0.57	5.71	1.53	5.79	
2014/3/17	6.15	7.00	0.001	7.20	1.15	0.00	3.24	1.23	12.36	0.00	1.77	0.00	7.48	3.26	10.80	2.97	5.67	0.61	0.59	5.88	1.70	4.54	
2014/4/8	6.15	4.49	0.001	4.94	0.84	0.00	1.79	0.67	7.52	0.00	0.82	0.00	4.51	3.03	7.98	1.60	3.27	0.38	0.37	3.54	1.71	3.04	
2014/4/19	6.20	4.48	0.001	4.97	0.80	0.00	1.88	0.69	6.86	0.00	0.86	0.00	4.93	3.51	8.56	1.69	3.69	0.39	0.37	3.54	2.73	3.18	
2014/5/8	6.26	4.36	0.001	4.89	1.00	0.00	1.86	0.67	5.10	0.00	0.79	0.00	5.58	4.74	7.31	1.68	4.36	0.39	0.35	3.33	4.94	2.52	
2014/5/22	6.35	4.90	0.000	5.54	1.12	0.00	2.15	0.78	7.06	0.00	0.45	0.00	6.01	4.31	10.51	1.94	4.62	0.44	0.40	3.89	4.68	3.99	
2014/5/26	6.54	5.57	0.000	6.06	1.25	0.00	2.48	0.90	7.18	0.00	0.53	0.00	7.30	5.47	10.07	2.25	5.78	0.49	0.45	4.37	4.37	3.09	
2014/6/3	6.87	6.77	0.000	7.20	1.60	0.00	3.10	1.14	7.59	0.00	0.72	0.00	9.48	7.44	11.31	2.83	7.67	0.60	0.55	5.27	4.99	2.64	
2014/6/20	6.60	6.21	0.000	6.83	1.40	0.00	2.71	0.98	7.17	0.00	0.59	0.00	8.25	6.90	12.07	2.45	6.54	0.55	0.50	4.74	5.03	2.21	
2014/7/3	6.69	6.11	0.000	6.90	1.60	0.00	2.68	0.97	6.60	0.00	0.59	0.00	7.84	7.04	12.08	2.42	6.11	0.55	0.47	4.54	7.85	1.87	
2014/7/24	6.64	5.65	0.000	6.64	1.41	0.00	2.59	0.91	5.84	0.00	0.81	0.00	6.68	6.80	12.74	2.34	5.02	0.53	0.43	4.14	10.54	1.74	
2014/7/31	6.79	6.92	0.000	7.79	1.81	0.00	3.18	1.15	6.54	0.00	0.28	0.00	9.07	10.16	13.44	2.88	7.11	0.64	0.54	5.15	7.93	1.89	
2014/8/22	6.60	5.70	0.000	6.27	1.65	0.00	2.35	0.84	6.63	0.00	0.54	0.00	6.29	6.12	13.36	2.11	4.71	0.50	0.43	4.06	8.08	0.36	
2014/8/28	6.67	6.57	0.000	7.30	1.76	0.00	2.83	1.03	7.18	0.07	0.63	0.00	7.81	8.10	13.10	2.55	5.97	0.59	0.51	4.82	7.19	1.30	
2014/9/24	6.75	7.04	0.000	5.93	1.33	0.00	2.79	0.96	4.81	0.01	0.19	0.00	7.40	8.94	12.67	2.57	5.91	0.51	0.44	4.20	7.47	-10.14	
2014/9/26	6.60	5.69	0.000	6.38	1.36	0.00	2.46	0.89	6.42	0.00	0.58	0.00	6.58	6.55	13.10	2.22	4.98	0.51	0.43	4.16	7.78	0.98	
2014/10/20	6.55	5.91	0.000	6.19	1.26	0.00	2.50	0.91	7.16	0.00	0.32	0.00	7.21	5.95	13.19	2.27	5.66	0.50	0.45	4.37	4.90	0.39	
2014/10/24	6.52	6.13	0.000	6.26	1.34	0.00	2.47	0.92	7.43	0.00	0.41	0.00	7.33	5.76	13.36	2.23	5.75	0.51	0.46	4.44	4.41	-0.61	
2014/11/20	6.34	6.10	0.000	6.25	1.34	0.00	2.54	0.94	8.84	0.00	0.50	0.00	6.88	4.62	13.42	2.31	5.31	0.51	0.48	4.63	3.49	1.17	
2014/11/21	6.32	6.30	0.000	6.35	1.15	0.00	2.68	0.99	8.82	0.00	0.54	0.00	7.53	4.77	13.33	2.44	5.94	0.52	0.49	4.81	2.85	0.88	
2014/12/5	6.22	6.10	0.001	5.69	1.01	0.00	2.33	0.88	9.16	0.00	0.46	0.00	5.37	3.61	11.94	2.11	3.94	0.46	0.44	4.28	2.86	-3.27	

*1 品質管理の結果 R1、R2 はそれぞれの基準値超えを示す Results of Quality Control “R1” and “R2” represent over-criteria in R1 and R2, respectively.

“n/a” は該当無しを表す “n/a” represents “Not applicable”.

Monitoring the chemistry of rainwater and streamwater from a small forested watershed: Results in the Kamabuchi experimental watershed, Yamagata prefecture, Tohoku district, Japan between 2000 and 2014

Yoshiki SHINOMIYA ^{1)*}, Tsuyoshi YAMADA ²⁾, Keizo HIRAI ²⁾, Kenji ONO ³⁾,
Shoji NOGUCHI ⁴⁾, Tayoko KUBOTA ⁵⁾ and Toshio ABE ³⁾

Abstract

The Kamabuchi experimental watershed, which is located alongside the sea of Japan in the Tohoku district, northern Japan, receives considerable amount of snowfall in winter. We reported the mean annual solute concentrations of the rainwater and streamwater obtained between 2000 and 2014 in a small, forested watershed of this experimental watershed. The area of this watershed was 3.06 ha, and the vegetation was a mixed forest of deciduous and evergreen species. The mean annual NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations in rainwater showed no trend. The mean annual dissolved inorganic nitrogen input through rainwater was $12.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, about 60% of which was in the form of NO_3^- -N. SO_4^{2-} input was $63.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, and about two third of that was the non-sea salt SO_4^{2-} input. Annual NO_3^- -N and SO_4^{2-} input had a positive correlation with the annual precipitation, suggesting that the loads of these inputs were mostly dependent on the amount of precipitation rather than the concentrations. There was a fluctuation in the mean annual NO_3^- concentration in streamwater, but an obvious annual change was not recognized. A change was not observed in the mean annual SO_4^{2-} concentrations in streamwater.

Key words: forest, snowpack, rainwater, streamwater, solute concentration, annual change, Tohoku district

Received 25 December 2017, Accepted 12 July 2018

1) Center for Forest Restoration and Radioecology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Forest Soils, FFPRI

3) Tohoku Research Center, FFPRI

4) Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI

5) Research Planning and coordination Department, FFPRI

* Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: sinomiya@affrc.go.jp

担 当 者 御 中
To the person concerned

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所研究報告を送付させていただきますのでお受け取り下さい。
貴刊行物と交換願えれば幸いです。なお、貴研究所の名称、住所などを変更
された場合は、下記まで連絡を御願い致します。

Please, find an enclosed Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute.
We greatly appreciate receiving any relevant publications in exchange.
Let us know when the name of your institution and mailing address are changed.

Officer in charge at publication section
Forestry and Forest Products Research Institute
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 Japan
Tel : + 81-29-829-8373 Fax : + 81-29-873-0844
e-mail : kanko@ffpri.affrc.go.jp

2018年9月 発行 森林総合研究所研究報告 第17巻3号（通巻447号）

編 集 人 森林総合研究所研究報告編集委員会

発 行 人 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地
電話：029-829-8373 Fax：029-873-0844

製 版・印 刷 松枝印刷株式会社
〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町2438番地
電話：0297-23-2333（代） Fax：0297-23-5865

©2018 Forestry and Forest Products Research Institute

本誌から転載・複写する場合は、森林総合研究所の許可を得てください。

森林総合研究所研究報告

Vol.17 No.3(No.447)



page217

2011年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの
野生ゼンマイ(*Osmunda japonica*)の葉への移行

:清野 嘉之、小松 雅史、赤間 亮夫、松浦 俊也、広井 勝、岩谷 宗彦、二元 隆

The transfer of radiocesium released in the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident to
leaves of wild *Osmunda japonica*, an edible fern

by Yoshiyuki KIYONO, Masabumi KOMATSU, Akio AKAMA, Toshiya MATSUURA,
Masaru HIROI, Munehiko IWAYA and Takashi FUTAMOTO

page233

育林経営再編の諸相 — 林業ビジネス化への示唆 —

:大塚 生美、堀 靖人、山田 茂樹、岩永 青史、天野 智将、駒木 貴彰、餅田 治之

Diverse aspects of the forestry management reorganization — Suggestion for forestry business —

by Ikumi OTSUKA, Yasuto HORI, Shigeki YAMADA, Seiji IWANAGA, Tomomasa AMANO,
Takaaki KOMAKI and Haruyuki MOCHIDA

page249

2011年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの
野生フキ(*Petasites japonicus*)の葉柄への移行

:清野 嘉之、赤間 亮夫、岩谷 宗彦、由田 幸雄

The transfer of radiocesium released in the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident to
petioles of wild butterbur (*Petasites japonicus*)

by Yoshiyuki KIYONO, Akio AKAMA, Munehiko IWAYA and Yukio YOSHIDA

page259

帰還困難区域で発生した森林火災が樹木樹皮と表層土壌の放射性セシウムの蓄積に及ぼす影響

:金子 真司、後藤 義明、田淵 隆一、赤間 亮夫、池田 重人、篠宮 佳樹、今村 直広

The effect of forest fire on the radiocesium inventory of tree bark and surface soil in 'difficult-to-return zone'
by Shinji KANEKO, Yoshiaki GOTOH, Ryuichi TABUCHI, Akio AKAMA, Shigeto IKEDA,
Yoshiki SHINOMIYA and Naohiro IMAMURA

page265

石狩川源流地域における大規模風倒跡地の森林再生過程のデータ

:伊東 宏樹、中西 敦史、津山 幾太郎、関 剛、飯田 滋生、河原 孝行

Data on forest regeneration after catastrophic windthrow in the headwater region of
the Ishikari River, Hokkaido, Japan

by Hiroki ITÔ, Atsushi NAKANISHI, Ikutaro TSUYAMA, Takeshi SEKI,
Shigeo HIDA and Takayuki KAWAHARA

page273

森林小流域における降水および溪流水の水質モニタリング

— 釜淵森林理水試験地における2000～2014年の結果 —

:篠宮 佳樹、山田 毅、平井 敬三、小野 賢二、野口 正二、久保田 多余子、阿部 俊夫

Monitoring the chemistry of rainwater and streamwater from a small forested watershed: Results in
the Kamabuchi experimental watershed, Yamagata prefecture, Tohoku district, Japan between 2000 and 2014
by Yoshiki SHINOMIYA, Tsuyoshi YAMADA, Keizo HIRAI, Kenji ONO, Shoji NOGUUCHI,
Tayoko KUBOTA and Toshio ABE