溪畔林における樹木から溪流生態系へのセシウム 137 の移動

金 指 努^{*、1}・綾 部 慈 子¹・竹 中 千 里¹・肘 井 直 樹¹

東京電力福島第一原子力発電所事故に起因する、森林から溪流生態系への落葉を介した放射性セシウムの移動を明らかにするために、福島県伊達郡川俣町の小溪流において、溪畔域に分布するコナラの生葉、林床の枯死・脱落葉（落葉）および溪流に堆積している落葉に含まれるセシウム 137 (^{137}Cs) 濃度の関係を明らかにした。コナラの葉は、生葉から落葉となり、溪流に堆積して分解される過程で、 ^{137}Cs 濃度が減少していた（2013 年）。2012 年と 2013 年の落葉期（11 月）に、林床に落下したコナラ葉と、各翌年の 3 月に、溪流に堆積しているコナラ落葉の ^{137}Cs 濃度を比較すると、溪流のコナラ落葉の方が低くなった。また、林床に落下したコナラ落葉、溪流に堆積しているコナラ落葉および溪流に堆積しているその他の落葉は、それぞれの各年における ^{137}Cs 濃度に大きな変化はなく、今後も長期間、溪畔林から溪流生態系へ落葉を介して ^{137}Cs が移動する可能性が示唆された。

キーワード：東京電力福島第一原子力発電所事故、セシウム 137、コナラ、溪流、落葉

Tsutomu Kanasashi,^{*、1} Yoshiko Ayabe,¹ Chisato Takenaka,¹ Naoki Hijii¹ (2015) Transfer of Cesium 137 from Riparian Forest to a Headwater Stream Ecosystem in Fukushima, Japan. *J Jpn For Soc* 97: 95–99 We elucidated cesium 137 (^{137}Cs) transfer from riparian forest to a headwater stream ecosystem through input of leaves contaminated by radionuclides due to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (NPP) Accident. In riparian zone of Kawamata-machi, Fukushima, living leaves of konara (*Quercus serrata*) were collected from crowns in 2013 and senescent leaves of that were collected from forest floor in November 2012 and 2013, respectively. In March 2013 and 2014, we collected senescent ones, which include konara leaves, deposited in a headwater stream running off the riparian zone. The comparison of ^{137}Cs concentration showed that living leaves of konara contained higher ^{137}Cs than fresh senescent ones. The ^{137}Cs concentrations of fresh senescent leaves in the forest floor were larger than those of senescent ones deposited in the headwater stream. Therefore, we consider that ^{137}Cs in the leaves was released to headwater stream while they were deposited in there. There was little change in ^{137}Cs concentration of senescent leaves on forest floor and in the stream between 2 and 3 years after the FDNPP Accident, suggesting that ^{137}Cs transfer from leaves to headwater stream ecosystems continues for a prolonged period.

Key words: The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, cesium 137, *Quercus serrata*, headwater stream, senescent leaves

I. は じ め に

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（以後、福島原発事故）により、原子炉から大量の放射性物質が大気中に放出された。3 年以上経過した現在でも、なお広域の森林が放射性物質に汚染されており、森林の土壌、落葉層および樹体に沈着した放射性セシウム (Cs) は樹木に吸収され、葉に移行している（杉浦ら 2013）。

放射性 Cs を含んだ葉はやがて枯死して落下するが、落下する先は林床だけでない。溪流沿いの森林（溪畔林）からは、溪流へと大量の枯死・脱落葉（落葉）が供給される。樹冠に覆われた溪流内では一次生産が抑制されるため、森林生態系から供給される、落葉を中心とした有機物が、溪流生態系にとって重要な養分源になっている（Fisher and Likens 1972；Vannote *et al.* 1980；Hall *et al.* 2001）。すなわち、森林が放射性物質に汚染されることにより、落葉等の森林由来の有機物を介して、溪流生態系も放射性物質に汚染されていると推測されるが、研究事例はきわめて少ない（例えば Murakami *et al.* 2014；Yoshimura and Akama

2014）。

溪流に落下・堆積した落葉は、水中で様々な物理化学的作用を受ける。過去の研究事例によると（Petersen and Cummins 1974；Webster and Benfield 1986）、まず葉内の可溶成分が、溪流に落下後、速やかに溶脱する。その後、微生物の作用（conditioning）により、落葉の強度低下および CN 比の低下をはじめとする変化が生じる。これらの変化を経て、落葉が餌資源として適した状態になると、落葉を摂食する水生昆虫（破砕食者）に消費される。落葉が溪流に堆積し、これらの要因による分解を経ることにより、葉内の放射性 Cs 濃度に変化が現れるか明らかにされていない。

そこで、水生昆虫をはじめとする溪流生態系への、落葉を介した放射性 Cs の移動を明らかにすることを将来的な目標に置き、本研究では、福島原発事故から約 2 年および約 3 年経過後の溪畔林において、生葉が枯死・脱落して溪流に堆積し、分解されることによる放射性 Cs 濃度の変化を測定し、溪流生態系への落葉を介した放射性 Cs 移動の実態を明らかにする。

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: kanasashi.tsutomu@g.nagoya-u.jp

¹ 名古屋大学大学院生命農学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 1（Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, 1 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan）

（2014 年 10 月 1 日受付、2015 年 2 月 25 日受理）

II. 方 法

1. 調査地

東京電力福島第一原子力発電所（以後、福島第一原発）から北西に位置する、福島県伊達郡川俣町山木屋地区の森林を流れる小溪流で、本研究を行った（図-1）。この溪流は飯館村および浪江町との境が源流で、阿武隈川の支流の口太川に合流する。溪流の東側は牧場として利用されていたため高木が存在していないが、溪流沿いは兩岸とも樹木が存在し、溪流上を樹冠が覆っている。溪畔林の樹種は、主にコナラ (*Quercus serrata*)、ミズナラ (*Quercus crispula*)、カエデ属 (*Acer* spp.) で構成され、植栽されたとみられるスギ (*Cryptomeria japonica*)、アカマツ (*Pinus densiflora*)、カラマツ (*Larix kaempferi*) がわずかに存在する。この溪流において、福島第一原発から約 33 km 離れた地点の流路長 100 m を調査対象区間として設定した。調査対象区間の川幅は 1.8 ± 0.5 (SD) m、平水時の平均流速は、瀬で 29.0 ± 9.5 cm s⁻¹、淵では 4.8 ± 9.5 cm s⁻¹ であり、日最高水温は 19.0°C (2013 年 10 月)、最低水温は 0.2°C (2014 年 2 月) であった。また、調査対象区間より上流の川沿い約 100 m は、石切場および田として利用されていたため、溪流沿いは疎林である。

調査対象区間の空間線量率は、2012 年 10 月の時点で 4.41 ± 0.5 (SD) μ Sv h⁻¹ を記録し (Ayabe *et al.* 2014)、2013 年 6 月になると 2.85 ± 0.4 μ Sv h⁻¹ まで低下した。2013 年 6 月に溪流沿いの林床から採取したリターおよび表層 5 cm の土壤に含まれる ¹³⁷Cs 濃度は、それぞれ 220 ± 160 kBq m⁻² dry, 334 ± 124 kBq m⁻² dry であった。

図-1. 調査位置図

The locations of sampling site and Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant.

2. コナラの落葉および生葉の採取および処理

調査対象区間の溪流沿いの林床に堆積しているコナラ落葉を、2012 年 11 月と 2013 年 11 月に、ランダムに設定した 5 地点から採取した。林床の最表層に堆積し、分解が進んでいない、各年の落葉期に落下した葉のみ採取した。また、2013 年 9 月から 10 月にかけて、溪畔域のコナラ立木から、樹冠の生葉を 8 サンプル採取した。落葉および生葉は、実験室内にて表面の付着物を洗い流し、80°C で 48 時間乾燥後、粉碎して U 型ねじ口容器 (56 mm ϕ $\times$ 35 mm, D24-365-110, 関谷理科, 東京) に詰めた。

3. 溪流内の落葉の採取および処理

溪流内に堆積している落葉を、2013 年 3 月と 2014 年 3 月に、流れの速い場所 (瀬) と遅い場所 (淵) から 3 カ所ずつ採取した。原則として堆積している落葉等堆積物の一塊を、目合い 100 μ m のナイロンネットを使用してすべて採取し、室内で処理を行うまで冷凍保存した。

解凍後、落葉等堆積物から落葉を分類し、落葉はさらに、量的に最も多く堆積していたコナラとその他の落葉広葉樹に分類した。また、落葉等有機物の中に常緑針葉樹のアカマツの落葉も認められたため、落葉広葉樹の落葉と区別した。その理由として、福島原発事故発生時に樹冠に存在していたアカマツの葉には、直接沈着した放射性 Cs が高濃度で存在している可能性があること (久留ら 2013; Tanaka *et al.* 2013)、本研究で採取したアカマツ葉の葉齢が不明であることが挙げられる。他の常緑針葉樹の落葉は認められなかった。

分類後、蒸留水で落葉表面の付着物を取り除き、80°C で 48 時間乾燥後、粉碎して U 型ねじ口容器に詰めた。U 型ねじ口容器の底面を完全に覆えない少量のサンプルは、栄研チューブ (12.6 mm ϕ $\times$ 72 mm, JB2000, 栄研化学, 東京) に詰めた。

4. 放射性物質 (¹³⁷Cs) の測定および統計解析

¹³⁷Cs の測定は、高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにより行った。U 型ねじ口容器に入れたサンプルはクロードエンド型 (GEM-30195-P, SEIKO EG&G, 東京)、栄研チューブに入れたサンプルは井戸型の HPGe 半導体検出器 (GWL-300-15-S, SEIKO EG&G, 東京) を使用した。サンプルは、測定誤差が 5% 未満になるか、測定時間 (ライブタイム) が 8 万秒を超えるまで測定し、乾燥重量当りの ¹³⁷Cs 濃度 (kBq kg⁻¹ dry) を算出した。

コナラの葉に関しては、生葉、2012 年および 2013 年の林床の落葉、2013 年および 2014 年に溪流に堆積している落葉それぞれに含まれる ¹³⁷Cs 濃度を多重比較した。Bartlett 検定によって等分散性が確認されなかった (有意水準 5%) ため、Steel-Dwass 法を用い、有意水準を 5% とした。2013 年と 2014 年に採取した、溪流に堆積しているコナラ落葉と、その他の落葉広葉樹の落葉に含まれる ¹³⁷Cs 濃度についても、同様に等分散性が確認されなかったため、Steel-Dwass 法による統計処理を行った。溪流内のアカマ

ツ落葉については、存在しなかった採取地点があり、また採取された地点においても、その量は乾燥重量で、採取地点における全落葉量の1%から12%程度と少なかったため、解析の対象から除いた。

それぞれの測定結果から、コナラの生葉と林床の落葉、および林床と溪流の落葉について、¹³⁷Csの濃度比を算出した。溪流に落葉が供給される経路は二つあり、樹冠から直接溪流に落下する経路と、河畔域の林床に落下後、風によって溪流に移入する経路である（例えば Cillero *et al.* 1999; Kochi *et al.* 2010）。本研究において、林床から採取した落葉は、樹冠から落下後1カ月未満と短期間であるため、直接溪流に落下する落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度と同じと仮定した。

III. 結 果

1. コナラの生葉および林床と溪流に堆積している落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度

コナラの生葉および、林床と溪流の落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度を図-2に示す。2013年9~10月に採取したコナラ生葉に含まれる¹³⁷Cs濃度の平均値および標準偏差は、 $8.8 \pm 4.3 \text{ kBq kg}^{-1} \text{ dry}$ を示した。同年の林床から採取した落葉は $2.9 \pm 1.0 \text{ kBq kg}^{-1} \text{ dry}$ を示し、生葉との濃度差に統計的有意性は認められないものの、濃度が低下していた(表-1)。

また、落葉期(11月)に落葉が溪流に落下し、翌年3月まで溪流に堆積していたと仮定して、林床と溪流における比較を行った。2013年および2014年の3月に溪流から採取したコナラ落葉の¹³⁷Cs濃度の平均値は、落下前の初期値と考えられる、2012年および2013年の11月にそれぞれ林床から採取した落葉より低濃度であった。特に、2013年の林床の落葉と2014年の溪流の落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度の差は統計的に有意であった。コナラの生葉から溪流の落葉における¹³⁷Csの濃度比は、それぞれ対応

図-2. コナラの生葉と林床および溪流に堆積している落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度

¹³⁷Cs radioactive concentrations in *Q. serrata* among living leaves in the crown and senescent leaves on the forest floor and in the stream.

Vertical bars show standard error.

するサンプル間で0.3前後の値となった(図-3)。

一方、採取年による比較をすると、林床および溪流どちらもコナラ落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度の平均値に大きな変化はなく、林床では2012年と2013年でそれぞれ $3.3 \pm 1.9 \text{ kBq kg}^{-1} \text{ dry}$ および $2.9 \pm 1.0 \text{ kBq kg}^{-1} \text{ dry}$ 、溪流では2013年と2014年で $0.80 \pm 0.48 \text{ kBq kg}^{-1} \text{ dry}$ および $1.1 \pm 0.21 \text{ kBq kg}^{-1} \text{ dry}$ であった。

2. 溪流の落葉等リターに含まれる¹³⁷Cs濃度

溪流に堆積しているコナラ落葉とその他の落葉広葉樹の落葉との間で、¹³⁷Cs濃度に有意な差は認められなかった(表-2)。しかし、コナラを除く落葉広葉樹の落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度の平均値は、瀬・淵に関係なく、コナラ落葉よりも高い傾向を示した(図-4)。コナラを除く落葉には、カエデ属、ミズナラ、クリ(*Castanea crenata*)、フジ(*Wisteria floribunda*)、ミズキ(*Swida controversa*)等が含まれたが、採取箇所によって種構成は異なっていた。瀬で採取したコナラ落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度の平均値は、2013年よりも2014年で約2倍高くなったが、淵に堆積していたコナラ落葉では大きな違いは認められなかった。

表-1. コナラの生葉と林床および溪流に堆積している落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度の多重比較の結果(Steel-Dwass検定)

Result of Steel-Dwass test of ¹³⁷Cs radioactive concentrations in *Q. serrata* among living leaves in crown and senescent leaves on the forest floor and in the stream.

		Forest floor 2012	Forest floor 2013	Stream 2013	Stream 2014
Crown	2013	$t = 2.05$ $p = 0.243$	$t = 2.34$ $p = 0.132$	$t = 3.10$ $p = 0.017^*$	$t = 3.10$ $p = 0.017^*$
Forest floor	2012		$t = 0.104$ $p = 1.000$	$t = 2.37$ $p = 0.123$	$t = 2.37$ $p = 0.123$
Forest floor	2013			$t = 2.74$ $p = 0.049^*$	$t = 2.74$ $p = 0.049^*$
Stream	2013				$t = 1.92$ $p = 0.306$

The symbols t and p show the values of test statistic and percentage of risk, respectively. * $p < 0.05$.

図-3. コナラの生葉、林床および溪流の落葉に含まれる¹³⁷Csの濃度比

The concentration ratio of ¹³⁷Cs in *Q. serrata* among living leaves in crown and senescent leaves on the forest floor and in the stream.

Values above arrows show the concentration ratio of right factors to left factors.

表-2. 溪流に堆積しているコナラおよび他の落葉広葉樹の落葉に含まれる ^{137}Cs 濃度の多重比較の結果(Steel-Dwass 検定)
Result of Steel-Dwass test of ^{137}Cs radioactive concentrations among *Q. serrata* leaves and other deciduous broadleaves with different years deposited on the stream.

		2013		2014	
		Others	<i>Q. serrata</i>	Others	
2013	<i>Q. serrata</i>	$t = 1.92$	$t = 1.92$	$t = 2.24$	
		$p = 0.219$	$p = 0.219$	$p = 0.112$	
2014	Others		$t = 1.76$	$t = 0.641$	
			$p = 0.292$	$p = 0.919$	
	<i>Q. serrata</i>			$t = 1.92$	$p = 0.219$

The symbols t and p show the values of test statistic and percentage of risk, respectively.

図-4. 溪流の瀬と淵に堆積しているコナラおよび他の落葉広葉樹の落葉に含まれる ^{137}Cs 濃度

The results of ^{137}Cs radioactive concentration in *Q. serrata* and other deciduous broadleaves deposited in riffles and pools in the study reach of stream.

Vertical bars show standard error.

IV. 考 察

本研究では、生葉、林床の落葉および溪流に堆積している落葉間における、 ^{137}Cs の濃度比を明らかにした。林床のコナラ落葉および溪流に堆積しているコナラと、その他の落葉に含まれる ^{137}Cs 濃度は、福島原発事故から2年後と3年後の結果に大きな変化はなく、今後も長期間、 ^{137}Cs が溪畔林から溪流生態系へ落葉を介して移動することが示唆される。

コナラの生葉と林床の落葉の濃度比は0.33(2013年試料)であり、生葉が枯死し、林床に堆積するまでの間に ^{137}Cs が葉から失われたと考えられる。この要因として、転流による ^{137}Cs の樹体内への移動と、落葉前および落葉後の降雨による溶脱が可能性として挙げられる。

一般的に、樹木は落葉前に葉内の養分を樹体内に転流するといわれている(Bormann *et al.* 1977)。セシウムと同じアルカリ金属のカリウムも転流されているため(Morton

1977), ^{137}Cs も葉から樹体内へ転流することにより、落葉の濃度が低くなる可能性が示唆される。また、カリウムは着葉状態で溶脱しやすい元素であることが知られており(Tukey 1970; Parker 1983), セシウムが同様の性質を持つとすれば、落葉前に溶脱したことも考えられる。林床の落葉からもカリウムの溶脱は起こるため(Attiwill 1968; Osono and Takeda 2004), 林床に落下後、採取するまでに溶脱した可能性もある。

一方、11月に林床から採取したコナラ落葉よりも、翌年3月に溪流から採取したコナラ落葉の方が、低い ^{137}Cs 濃度を示した。溪流内に堆積した落葉は、物理化学的作用によって分解され、それとともに、葉内の様々な化学成分の含有濃度は変化する(Webster and Benfield 1986)。そのため、溪流から採取した落葉の ^{137}Cs 濃度も、前年の11月から3月までの4カ月間に、分解のプロセスによって減少した可能性が示唆される。

分解に伴い落葉中の ^{137}Cs 濃度が減少する要因の一つとして、破砕食者の落葉摂食に伴う取込みが考えられる(Murakami *et al.* 2014; Yoshimura and Akama 2014)。破砕食者は落葉の葉肉部を積極的に摂食し、葉脈部に対する選好性は弱いといわれている(Sparkes *et al.* 2008)。葉脈部より葉肉部で ^{137}Cs が高濃度になっていると仮定するならば、破砕食者の摂食によって葉肉部分が減少することにより、落葉の ^{137}Cs 濃度が減少する可能性がある。

葉内における溶存態 ^{137}Cs の溶脱は、溪流においても濃度低下の要因として示唆される。過去の報告により、落葉に一般的に含まれる元素の中で、セシウムと同じアルカリ金属のカリウムは、水中で容易に溶脱し、水中へ溶出することが明らかになっている(Webster and Benfield 1986; Gessner *et al.* 1999)。そのため、落葉が溪流に落下後、比較的初期の段階で ^{137}Cs も水中に溶脱している可能性がある。上記の溪流内における落葉の ^{137}Cs 濃度減少メカニズムは、仮説の域を出ていないため、溪流に堆積した落葉に含まれる ^{137}Cs 濃度の時間変化を測定し、落葉分解に関わる要因との関係を明らかにし、検証する必要がある。

また、溪流に落葉が供給される経路は、樹冠から直接溪流に落下する経路と、林床に落下後、風によって溪流に移入する経路がある(Cillero *et al.* 1999; Kochi *et al.* 2010)。本研究では、林床のコナラ落葉に含まれる ^{137}Cs 濃度が、同時期に溪流に落下・堆積したコナラ落葉の ^{137}Cs 濃度と同程度であったと仮定した。しかし、樹冠から直接溪流に落下する場合と比較して、林床から移入する落葉は、ある期間、林床に堆積することになる。その間に ^{137}Cs 濃度に変化が生じる可能性を、現時点では否定できないため、林床から移入する落葉は、樹冠から直接溪流に移動する落葉と ^{137}Cs 濃度が異なるかもしれない。そのため、溪流へ移動する経路が異なる落葉の ^{137}Cs 濃度の調査を行う必要があると考える。

V. ま と め

本研究では、森林から溪流生態系への¹³⁷Csの移動を解明するため、福島県伊達郡川俣町の小溪流において、溪畔林に存在するコナラの生葉および落葉と、溪流に落下後、翌年3月まで堆積していた落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度を測定・解析した。2013年に採取したコナラ生葉に含まれる¹³⁷Cs濃度は、枯死・脱落して林床に堆積する過程において減少し、その濃度比は0.33であった。そのため、生葉が枯死して林床に堆積するまでの間に、葉中の¹³⁷Csが失われていると考えられる。また、落葉が溪流に堆積すると¹³⁷Cs濃度はさらに減少し、2012年および2013年の11月に林床から採取したコナラ落葉と、翌年3月に溪流から採取したコナラ落葉への¹³⁷Csの濃度比は、それぞれ0.24および0.32であった。そのため、分解に伴い、落葉から溪流生態系の他の構成要素へ¹³⁷Csが移動したと推察される。林床のコナラ落葉と、溪流に堆積しているコナラとその他の落葉に含まれる¹³⁷Cs濃度は、どちらも事故から2年後と3年後との間に大きな変化はなく、今後も長期間、溪畔林から溪流へ落葉を介して¹³⁷Csが移動する可能性がある。

今後、落葉分解とともに葉内の放射性Cs濃度が低下する主な要因と、溪流生態系における放射性Csの動態を明らかにする必要がある。また、溪流生態系に供給された落葉に含まれる¹³⁷Csの一部は、水溶性あるいは微細な粒子となって、流下していくことが予測される。河川流域全体において、落葉起源の¹³⁷Csがどの程度関与しているかを評価することは、今後の¹³⁷Cs汚染の管理に非常に重要な課題であるため、濃度変化だけでなく、フラックスを明らかにしていくことが必要だと考える。

川俣町の菅野富雄様には、調査地の選定をはじめ、現地調査に際して多大なるご協力をいただいた。福島県林業研究センターの小澤創様には、落葉等のサンプル採取をはじめ、様々なご助力をいただいた。両名に心より感謝を申し上げる。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金24110007の助成を受けた。

引用文献

- Attiwill PM (1968) The loss of elements from decomposing litter. *Ecology* 49: 142-145
- Ayabe Y, Kanasashi T, Hijii N, Takenaka C (2014) Radiocesium contamination of the web spider *Nephila clavata* (Nephilidae: Arachnida) 1.5 years after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J Environ Radioactiv* 127: 105-110
- Bormann FH, Likens GE, Melillo JM (1977) Nitrogen budget for an aggrading northern hardwood forest ecosystem. *Science* 196: 981-982
- Cillero C, Pardo I, López ES (1999) Comparisons of riparian vs. over stream trap location in the estimation of vertical litterfall inputs. *Hydrobiologia* 416: 171-179
- Fisher SG, Likens GE (1972) Organic energy budget. *BioScience* 22: 33-35
- Gessner MO, Chauvet E, Dobson M (1999) A perspective on leaf litter breakdown in streams. *Oikos* 85: 377-384
- Hall RO, Likens GE, Malcom HM (2001) Trophic basis of invertebrate production in 2 streams at the Hubbard Brook Experimental Forest. *J N Am Benthol Soc* 20: 432-447
- 久留景吾・恩田裕一・河守 歩・加藤弘亮 (2013) 落葉広葉樹-アカマツ混交林およびスギ人工林における落葉に伴う放射性セシウムの移行. *日林誌* 95: 267-274
- Kochi K, Mishima Y, Nagasaka A (2010) Lateral input of particulate organic matter from bank slopes surpasses direct litter fall in the uppermost reaches of a headwater stream in Hokkaido, Japan. *Limnology* 11: 77-84
- Morton AJ (1977) Mineral nutrient pathways in a Molinietum in autumn and winter. *J Ecol* 65: 993-999
- Murakami M, Ohte N, Suzuki T, Ishii N, Igarashi Y, Tanoi K (2014) Biological proliferation of cesium-137 through the detrital food chain in a forest ecosystem in Japan. *Sci Rep* 4: 3599 doi:10.1038/srep03599
- Osono T, Takeda H (2004) Potassium, calcium, and magnesium dynamics during litter decomposition in a cool temperate forest. *J For Res* 9: 23-31
- Parker GG (1983) Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv Ecol Res* 13: 57-133
- Petersen RC, Cummins KW (1974) Leaf processing in a woodland stream. *Freshwater Biol* 4: 343-368
- Sparkes TC, Mills CM, Volesky LA, Talkington JA, Brooke JS (2008) Leaf degradation, macroinvertebrate shredders & energy flow in streams: a laboratory-based exercise examining ecosystem processes. *Am Biol Teach* 70: 90-94
- 杉浦佑樹・竹中千里・金指 努・緒方良至・小澤 創 (2013) 福島県に自生する野生植物中の放射性セシウムの経年変化. (The 14th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings. 第14回環境放射能研究会). 301-314
- Tanaka K, Iwatani H, Sakaguchi A, Takahashi Y, Onda Y (2013) Local distribution of radioactivity in tree leaves contaminated by fallout of the radionuclides emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *J Radioanal Nucl Chem* 295: 2007-2014
- Tukey HB (1970) The leaching of substances from plants. *Ann Rev Plant Physiol* 21: 305-321
- Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE (1980) The river continuum concept. *Can J Fish Aquat Sci* 37: 130-137
- Webster JR, Benfield EF (1986) Vascular plant breakdown in freshwater ecosystem. *Annu Rev Ecol Syst* 17: 567-594
- Yoshimura M, Akama A (2014) Radioactive contamination of aquatic insects in a stream impacted by the Fukushima nuclear power plant accident. *Hydrobiologia* 722: 19-30