

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24248058

研究課題名(和文) 森林 農地移行帯における放射性核種の移動・滞留と生態系濃縮の評価

研究課題名(英文) Transport and biological accumulation of radionuclide in transitions from forest to agriculture lands in watersheds

研究代表者

五味 高志 (Gomi, Takashi)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30378921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：森林-溪流生態系の構成物質では、林床落葉の放射性セシウム濃度が最も高く、福島原発事故によって放出された放射性物質の多くは、陸域に現存していた。流域のCs-137空間分布は、林相、微地形、立地などに影響されていた。森林土壌では、農地土壌と比べて有機物に吸着したCs-137が多かった。森林から溪流に供給されたリターは、溶脱によって放射性セシウムが流出し、Cs-137濃度は林床の25%程度であった。これに応じて、同じ栄養段階の生物では、林床に生息するものより溪流に生息する動物でCs-137濃度が高くなっていた。本研究結果から、有機物に付着したCs-137の長期的な観測の重要性を示唆できた。

研究成果の概要(英文)：Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants accident caused radiocaesium contamination in forested areas. We analyzed transport and concentration of radiocaesium in aquatic and terrestrial ecosystems in watersheds with forest and agriculture transitions. Cs-137 distribution varied depending on topography, forest types, and landscape position. Cs-137 concentrations on streams tended to be lower than that on forest floor by leaching Cs-137 in aquatic environment. Level of radiocaesium concentration in consumers depends on the level of contamination of primary producers available in consumers' habitat ranges. For fish species such as char, radiocaesium concentrations appeared to be greater in the individuals with greater body sizes. Findings of this study showed that the dynamics of radiocaesium via litter decomposition and transport in streams is a primal factor for understanding biological transfer of radiocaesium in terrestrial and aquatic environment of watershed ecosystems.

研究分野：流域水文学、生態系管理学

キーワード：放射性セシウム動態 溪流生態系 森林農地生態系 有機物動態 土壌特性 食物網 生物蓄積 流出

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所事故による放射性物質の大気放出後、福島県や東平野辺縁部に、除染対象となる高汚染地域が広く確認された。これらの地域は、森林-農地移行帯であるとともに、水資源管理上も重要な地域である。また、森林内における放射性物質は、樹木や落葉に、全降下物の90%が付着していることが報告されている。一方、原発事故以前から、大気中核実験により生成されたセシウム137を土壌侵食や土砂移動の指標として利用し、侵食された森林土壌が河川へ細流土砂として流出していることが報告されている。

これらの研究結果から、森林と農地や水田が隣接している森林-農地移行帯では、森林に降下している放射性物質は落葉および土壌の分解プロセスを経て土壌へ吸着し、河川内での移動と蓄積により、森林地域から水田への移動とともに、その移動過程で生態系での濃縮や農林産物への取り込みが進むと予想される。

放射性物質はその核種によって、環境中での異なる挙動を示す。セシウム137や134はカリウムと同様に、生物への蓄積が予想される。また、これまでの研究では、環境中の放射性セシウム137は細粒土壌に吸着し河川流路内や貯水池における泥に溜まる傾向がある。そのため、底性動物にも生物濃縮が予想される。森林-農地移行帯では、河川、貯水池、ダムなど、細流土砂が滞留、蓄積しやすい箇所が多い。生物種によっては、生息環境中の外部被曝と放射性物質を含む落葉や有機物の捕食分解による内部被曝が起きると考えられる。

しかし、現在の放射性物質汚染に関する調査研究では、「森林」や「農地」が個別に取り扱われている。チェルノブイリの影響は、欧米の森林内では今日も強く認められ、福島原発事故においても今後30年以上にわたって、放射性物質は環境中を継続的に移動することが予想されることから、森林-農地移行帯地域における森林と農地の連続性を考慮した物質移動や食物連鎖網の中での、放射性物質移動や滞留、生物体内への蓄積についての検討が重要となる。日本の国土は森林-農地移行帯を広く有している。また、森林と農地のみならず、河川、貯水池、治山ダムなどにおける水や土壌の移動を考慮した流域放射線空間分布図を作成し、放射性物質の移動量や蓄積量を把握する必要がある。このような視点での研究は、チェルノブイリ原発事故後の事例でも少ない。

2. 研究の目的

本研究では放射性物質の降下量が多く緊急対応の必要となる福島県および関東平野辺縁部の森林-農地移行帯生態系における放射性物質の移動、滞留、生物濃縮プロセスを解明し、森林から農地や水田への放射性物質の移動プロセスと蓄積箇所を特定すると

ともに、生態系への生物濃縮を評価することを目的し、(1)森林、農地、水田、貯水池やダムなどへの蓄積量評価、流域放射線空間分布図を作成するとともに、流路を通して移動流出する放射性核種を特定し、(2)森林、農地、水田の生物相への放射性物質の蓄積量と放射性核種を特定し、放射性物質の食物連鎖網を考慮した、放射性Csの生物への蓄積の評価を実施した。

3. 研究の方法

調査地は、福島県の二本松市東和地区大沢川と関東平野辺縁部に位置する、東京農工大学のFM唐沢山(栃木県)、FM大谷山(群馬県)、東京大学秩父演習林(埼玉県)、丹沢山地大洞沢(神奈川県)、東京大学樹芸研究所(静岡県)の小流域を対象に現地調査を行った。福島県と群馬県の調査地を集中観測地点として、その他の地域は、広域観測地点とした。農地における放射性物質動態は、降雨散水実験によって実施した。

各調査地の放射性物質の蓄積量については、土壌コアによる土壌採取、落葉採取により分析した。各調査対象地域における、土壌や有機物に含まれる放射性核種量と空間線量の相関関係を検討した。渓流や砂防ダムの土壌や水サンプルを定期的に採取した。ArcGISを用いた流域放射線空間分布図を作成し、蓄積量を把握した。

降雨時を含む土砂や有機物流出については、積算流下土砂有機物サンプラーを流路内に設置して採取した。流路への落葉供給については、リターフォールトラップを設置し、採取するとともに放射性核種を分析した。低水時の土砂や有機物の流下については、ドリフトネットを設置し、通過粒状物質の採取を行った。

生物体内の放射線物質量の評価は、生物種を採取し、放射性核種分析を行った。各生息環境の底質(泥など)に含まれる放射性物質量を考慮して、底生動物群集、流下有機物、流下水生昆虫、羽化水生昆虫、魚類を採取し分析した。底生水生昆虫群集については、サーバーネットを用い、サンプリングを実施した。魚類は、イワナなどの渓流魚を中心としてサイズを計測し、一部を分析用サンプルとして採取した。また、胃内容物を採取し、採餌量の起源(水生もしくは陸生)を特定した。

食物連鎖網の解明には、環境安定同位体を用いた。窒素と炭素のそれぞれの安定同位体比から、一次生産から高次の食物連鎖の階層構造についての解析を行った。この解析については、マススペクトル分析器を利用した。食物連鎖網の解析結果と、放射性核種の生物体内での蓄積量から、食物網で起こる生物濃縮について評価した。

4. 研究成果

(1)放射性物質の分布と移動
流域の放射性核種空間分布

ArcGIS を用いて文部科学省航空機モニタリングに位置する調査地の空間線量率、放射性セシウム (Cs-134, Cs-137) (Bq/m²) を評価した。標高が高い位置で、低い位置と比べていずれかの値が相対的に高くなっており、標高の高い地域に放射性物質が多く蓄積していたことが示唆された。

これらの空間分布に対応して、河川における放射性物質の流出観測から、空間分布に対応して、福島県における浮遊土砂流出に占めるセシウム濃度が最も高く、静岡県の大樹芸研におけるサンプルのセシウム濃度が最も低い値を示していた。

放射性 Cs 供給と土壤中の移動と蓄積

リターフォールとして林床に供給される有機物は、落葉期である秋に多く、その集中傾向は 2013 年・2014 年を通してナラ林・マツ林がスギ林よりも著しかった。林床で側方に移動するリターもリターフォールの多い秋に多く、ピークはリターフォールの 1 か月遅れでみられた。また、樹種間ではナラ林 > マツ林 > スギ林の順に側方移動が多く、それぞれ斜面の傾斜が大きいほど多くなる傾向がみられた。新鮮なリターフォールの粗大な状態の移動は、その供給された直後に大部分が移動し、傾斜の大きい斜面で著しいと考えられた。

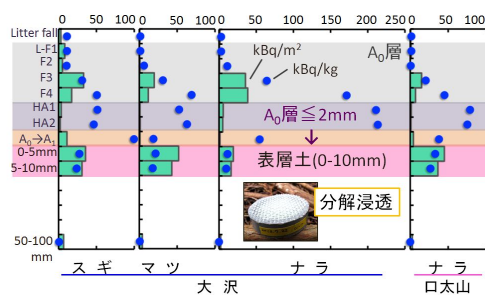


図1 鉛直方向の有機物の Cs-137 沈着量 (kBq)

落葉広葉樹であるナラでは、落葉が滑りやすく風でも動くため側方移動を起こしやすく、落葉広葉樹が混交しているマツ林の移動が多いと考えられた。スギは木化した小枝の部分とともに大きい状態で落ちるため、移動しにくいと思われた。傾斜が緩い立地に植栽されているスギ林では、林床リターの側方移動が起きにくいいため放射線量率が自然崩壊率と同程度であり、その他の林分ではリターの側方移動が林床の放射線量率の自然崩壊率以上の低下が発生したと推察された。

林床の鉛直方向の放射性 Cs 移動と蓄積では、放射性 Cs 濃度は細粒 (2mm 以下) 画分が高く、鉾物質土層へはこの細粒画分の有機物とともに移動していると考えられた (図1)。しかし、放射性 Cs の面積当りの蓄積量は、A0 層の F3 から F4 画分に多く保たれていた。スギ人工林に設置した微小流域試験地における A0 層厚と林床の放射線量率の分布は、

谷筋で A0 層厚の比較的厚い場所で放射性線量率が高くなっていった。

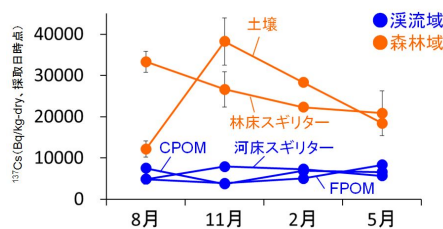


図2 林床と河床のスギ落葉 Cs-137 濃度

溪流周辺の土壌および落葉の汚染状況は、スギなどを中心とした落葉層が最も高く、A0 層下部が次いで高くなる傾向がみられた。森林と溪流内の状況については、有機物に注目すると、河床に堆積している粗粒有機物、河床内リター、細粒有機物の Cs-137 が 4856 ~ 7546 Bq/kg と高い傾向がみられた (図2)。林床と河川内の有機物の時系列変化についてみると、溪流内の有機物については、林床の有機物より汚染度が低い傾向がみられた。

逐次抽出法による土壌中の Cs 分画

畑土壌の水溶性画分は 1~3% と低かった。交換態画分も 1~5% であった。有機物態画分は 7~22% であった。水田土壌の水溶性画分は抽出されなかった。交換態画分は 1~7% であった。森林土壌の交換態画分は 6~33% の割合であった。森林土壌の逐次抽出試験結果においても、交換態画分・有機物態画分割合が多く、森林土壌内においては畑土壌、水田土壌と比較し、移行しやすい Cs-137 が多く存在していると考えられた。

画分間の相関分析では、有機物態画分と残渣画分の間には有意ではないが負の相関関係が見られ、有機物態画分の Cs-137 は残渣画分へ移行していく関係、あるいは互いに阻害しあう関係にあると考えられた。画分と土壌特性間の相関分析では、交換態画分とシルト含量の間には有意な正の相関関係が見られた。水溶性画分、残渣画分と土壌 pH 値の間には、有意な負の相関関係が見られた。森林土壌では腐植・土壌有機物量が多かったことから、pH 値が高いほど有機物のもつカルボキシル基に Cs-137 が多く保持されたと考えられた。

畑地からの放射性 Cs 流出

圃場プロット型人工降雨装置 (PRRS-P) を使用し福島県二本松市の 2 か所で現場試験を

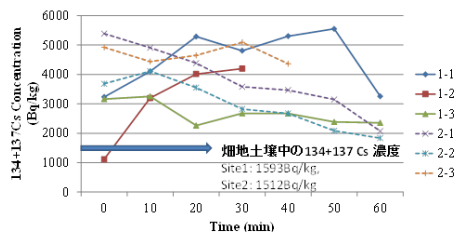


図3 流出土壌中の放射性 Cs 濃度 (Bq/kg)

行った。表面流出水の流出率は50~92%であった。流出土壌中のセシウム濃度は1115~5552Bq/kgで、畑地土壌中の蓄積量より高くなっていた。また、時間推移はプロットごとに異なっていた。いくつかのプロットで初期の流出土壌中のセシウム濃度が時間とともに低下する傾向が見られた(図3)。流出している放射性セシウム量はプロットの存在量により約2倍の違いがあった。また、降雨水の流出量および土壌流出量が多いほど、放射性セシウム濃度が高くなっていた。

懸濁体物質の流出と放射性Cs濃度

河床堆積物における放射性核種を粒径毎に分析すると、細粒土砂成分におけるセシウム蓄積量が多い傾向がみられた。浮遊土砂流出については、放射性セシウムの降下量を反映して、福島県のサイトが群馬県のサイトのおおよそ4倍であった。Cs-137の流出は、降雨量が大きくなるほど、濃度が高くなる傾向が見られた。河川流出に対して、大沢川流域末端部に位置する、砂防ダムの下流部では、その半分程度になっていた。砂防ダムにおける懸濁体物質の蓄積が下流への汚染物質を緩衝する効果があると考えられた。

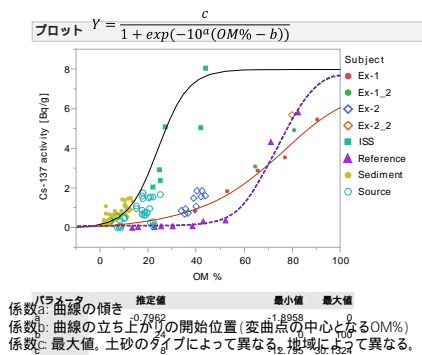


図4 有機物含量とCs-137濃度の関係

大谷山において浮遊土砂サンプラーで採取された浮遊土砂はセシウム濃度が高く、森林表土の最表層やスギリターと同程度の範囲であった。そこで、表土の有機物中のCs濃度を明らかにするため、尾根表土から異なる有機物含量の土壌試料を調製し、有機物含量とCs濃度との関係を調べたところ、Cs濃度は有機物含量に対して増加傾向を示し、ロジスティック曲線によって近似できた。流域土砂も同様の曲線で近似でき、最大値や傾き、変曲点に関する係数が異なることがわかった(図4)。このことから、流域斜面の表土に蓄積された放射性Csが、鉱物分や有機物分に吸着された形で河川に供給され、浮遊土砂として流域外に流出する一方、河川内に滞留するものは少ないことを示唆していた。

落葉の分解と溶脱によるCs流出

分解実験によるCs-137のリターからの流出は瀬と淵のバッグともに、設置後の時間経過に伴い、Cs-137濃度が減少した。瀬は、0

~4日に約40%減少し、淵では約30%減少した。240日後には、瀬で0日目濃度の約25%、淵で約10%となった。重量については瀬・淵両方で、75日後には約70~80%であるものの、150日後には瀬で約30%、淵で約50%の残存重量であった。

同様に、室内実験の結果から、水にリターを浸す時間が長いほどリターからの放射性セシウムの溶脱量は増えることが明らかとなった。中央値による比較では、対照無処理リターと比べて1日、7日、30日の実験後のリターのCs-137濃度は、それぞれ71%、66%、56%となっていた。このことから、リターからのカリウム溶脱と類似し、リターからの放射性セシウムが溶脱したと考えられた。

(2) 食物網と生物相への放射性物質の蓄積 生物への放射性Cs蓄積

森林の林冠や林床表層部に多くの放射性セシウムが蓄積していることが判明しており、これらが森林 渓流生態系における物質移動に伴って渓流へと移動していた。様々な放射性セシウム濃度の動物種が存在することが明らかとなり、種ごとの放射性セシウムの蓄積様式が異なることが示唆された(図5)。Cs-137の崩壊や流亡などのみではなく、環境中から動物体内へ供給される増加要因の存在を示していると考えられた。

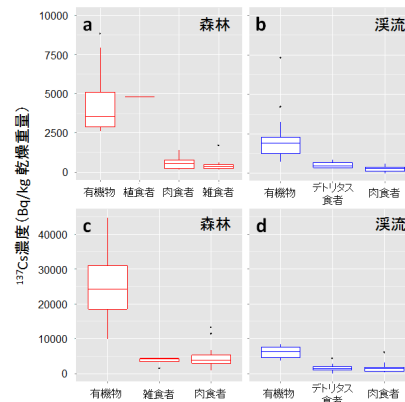


図5 有機物・動物のCs-137濃度

渓流内の河床土砂に蓄積した放射性セシウム量を見てみると、瀬と淵どちらでも粒径が小さい土砂ほどCs-137濃度が高いことが明らかとなった。放射性セシウム濃度が高い細粒土砂が淵で多く堆積しているために、河床へのCs-137蓄積量は淵で瀬よりも多くなることが考えられた。そこで、瀬と淵それぞれに選好して生息する底生動物の放射性セシウム濃度を比較すると、淵を好む底生動物で有意にCs-137濃度が高くなっており、生息地におけるCs-137蓄積量は生物汚染を決定する要因になり得ることが考えられた。

イワナのCs-137濃度は、体長が大きくなるにしたがって、イワナのCs-137濃度は大きくなっていった(図6)。このことから、大きい個体では、イワナの固有代謝率が低下し、

放射性セシウムの排出率が下がるために、大きな個体ほど放射性セシウム濃度が高くなることが考えられた。とくに、イワナがCs-137を体内に取り込む過程として最も重要なのは、採餌に伴うCs-137の取り込みであると考えられた。

食物網と放射性Csの生物への移行
炭素・窒素安定同位体比分析結果から、森林域・渓流域のほとんどの動物は、スグリタ

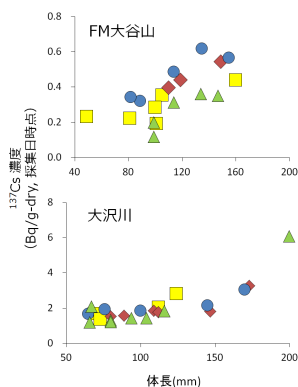


図6 イワナのCs-137濃度と体長

ーの右上方向にプロットされていた。両調査地において森林・溪流生態系食物網構造は、スグリターを起点としたものが主要であることが特定できた。

食物網構造とCs-137濃度との関係では、デトリタス食者と肉食者のCs-137濃度は、年間を通して森林と溪流におけるスグリターの放射性セシウム濃度の違いを反映していた。したがって、生態系内や生態系間における放射性セシウムの動態を予測したり、汚染管理手法を開発したりするためには、森林と溪流の間に生じるCs-137濃度の差異を考慮に入れることが高い再現性や有効性を導くことに繋がると考えられた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

Sakai M, Gomi T, Naito RS, Negishi JN, Sasaki M, Toda H, Nunokawa M, Murase K. Radiocesium leaching from contaminated litter in forest streams. Journal of Environmental Radioactivity, 査読有, 144: 15-20 (2015)

Aung HP, Djedidi S, Yokoyama T, Suzuki S, Bellingrath-Kimura SD. Transfer of radiocesium to four cruciferous vegetables as influenced by organic amendment under different field conditions in Fukushima Prefecture. Journal of Environmental Radioactivity, 査読有, 140, 148-155

(2015)

Teramage MT, Onda Y, Kato H, Gomi T. The role of litterfall in transferring Fukushima-derived radiocesium to a coniferous forest floor: Science of The Total Environment, 査読有, 490: 435-439 (2014)

Teramage MT, Onda Y, Patin J, Kato H, Gomi T, Nam S. Vertical distribution of radiocesium in coniferous forest soil after the Fukushima nuclear power plant accident. Journal of Environmental Radioactivity, 査読有, 137, 37-45 (2014)

Djedidi S, Kojima K, Yamaya H, Ohkama-Ohtsu K, Bellingrath-Kimura SD, Watanabe I, Yokoyama T. Stable cesium uptake and accumulation capacities of five plant species as influenced by bacterial inoculation and cesium distribution in the soil. Journal of Plant Research, 査読有, 127: 585-597 (2014)

渡邊泉、野村あづみ、増川武志、尾崎宏和、渡井千絵、林谷秀樹、五味高志、吉田誠、横山正. 福島県二本松市東部で採取された野生動物(数種の鳥類および哺乳類)の放射性セシウム蓄積. 環境放射能除染学会誌、査読有、2: 241-250 (2014)

Sakai M, Gomi T, Nunokawa M, Wakahara T, Onda Y. Soil removal as a decontamination practice and radiocesium accumulation in tadpoles in rice paddies at Fukushima Environmental Pollution, 査読有, 187: 112-115 (2014)

浅野友子. 日本の山地流域の降雨流出データ 収集データの概要と観測の課題 水文・水資源学会誌、査読有、27, 19-28 (2014)

Kato H, Onda Y, Nanko K, Gomi T, Yamanaka T, Kawaguchi S. Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations. Journal of Hydrology, 査読有, 504: 1-11 (2013)

[学会発表](計16件)

五味高志・境優・細田幸介: 第126回日本森林学会「溶脱・分解プロセスに伴う溪流内リターからの放射性セシウムの流出: フィールドと室内実験による結果」(2015年3月26~29日、北海道大学(北海道札幌市))

水垣滋・五味高志・境優: 第126回日本森林学会「森林山地における流域土砂の放射性セシウム濃度と有機物含量」(2015年3月26~29日、北海道大学(北海道札幌市))

幌市)

五味高志、境優、岡田健吾、岩本愛夢、根岸淳二郎、布川雅典：応用生態工学会第18回大会「山地森林流域におけるイワナへの放射性セシウム蓄積量評価：摂食・代謝解析」(2014年9月18~20日、首都大学東京(東京都八王子市))

寺崎晶美、Salem Djedidi、横山正、鈴木創三、木村園子ドロテア：日本土壌肥料学会「土壌性質の違いが福島農地の放射能汚染における放射性セシウムの存在画分に及ぼす影響」(2014年9月9~11日、東京農工大学(東京都小金井市))

Gomi T, Sakai S, Okada K, Iwamoto A, Negishi JN, Nunokawa M: Joint Aquatic Sciences Meeting, Oregon, USA "Radiocesium concentrations in Salvelinus leucomaenis via resource subsidy in a headwater stream" (2014年5月18~23日、オレゴン州ポートランド(米国))

Sakai M, Gomi T, Iwamoto A, Okada K, Nunokawa M, Negishi JN: Joint Aquatic Sciences Meeting, Oregon, USA "Radiocesium transfer in forest-stream ecosystem of a headwater of Fukushima, Japan" (2014年5月18~23日、オレゴン州ポートランド(米国))

佐々木道子、藤原佳祐、戸田浩人、崔東寿：第125回日本森林学会大会「福島県二本松市の大沢流域における有機物と放射性Csの動態」(2014年3月26~30日、大宮ソニックシティ(埼玉県さいたま市))

岩本愛夢・岡田健吾・境優・根岸淳二郎・布川雅典・五味高志：第61回日本生態学会大会「スギ人工林における溪流・溪畔生態系の食物網構造と放射性セシウム動態の関係」(2014年3月14~18日、広島国際会議場(広島県広島市))

岡田健吾・岩本愛夢・境優・根岸淳二郎・布川雅典・五味高志：第61回日本生態学会大会「山地溪流におけるイワナの摂食・代謝を通じた放射性セシウム濃度の季節的変動」(2014年3月14~18日、広島国際会議場(広島県広島市))

天野浩美・境優・五味高志：第61回日本生態学会大会「低線量被曝がアズマヒキガエルの発生・成長過程に及ぼす影響と放射性セシウムの生物学的半減期の推定」(2014年3月14~18日、広島国際会議場(広島県広島市))

藤原佳祐、佐々木道子、戸田浩人、崔東寿：第124回日本森林学会大会「福島県二本松市の針葉樹および落葉広葉樹林における表層土壌の放射性Cs」(2013年3月25~28日、岩手大学(岩手県盛岡市)) Somjunyakul P, Ok J, Jaikaew P, Thuyet DQ, Watanabe H, Ishihara S, Iwafune I, Kitamura Y: 日本農薬学会第38回大会

"Development of a rainfall-runoff simulator for investigating pesticide transport in agricultural soil" (2013年3月14~16日、筑波大学(茨城県つくば市))

〔図書〕(計1件)

戸田浩人：森林生態系の基盤サービス、調整サービスの原発事故による再認識。日本森林学会監修「教養としての森林学」(文永堂出版) pp.272 (2014)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五味 高志 (GOMI TAKASHI)
東京農工大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号：30378921

(2) 研究分担者

戸田 浩人 (TODA HIROTO)
東京農工大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号：00237091

木村 園子 ドロテア (KIMURA SONOKO DOROTEA)
東京農工大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号：6037015

渡邊 裕純 (WATANABE HIROZUMI)
東京農工大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号：80323757

浅野 友子 (ASANO YUKO)
東京大学・大学院農学生命研究科・講師
研究者番号：80376566

水垣 滋 (MIZUGAKI SHIGERU)
独立行政法人土木研究所寒地土木研究所・研究員
研究者番号：10559686

布川 雅典 (NUNOKAWA MASANORI)
北海道大学・大学院農学研究院・研究員
研究者番号：90389651

根岸 淳二郎 (NEGISHI JUNJIRO)
北海道大学・大学院地球環境科学研究科・准教授
研究者番号：90423029