

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06140

研究課題名(和文) 環境同位体トレーサーを用いた森林-水相互作用の解明と物質循環解析手法の開発

研究課題名(英文) Clarifying Forest-Water Interactions using environmental isotope tracers and development of element cycling analysis method

研究代表者

加藤 弘亮 (Kato, Hiroaki)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：90732636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、森林生態系内の物質循環トレーサーとしての大気降下放射性核種の利用可能性を調査するため、調査森林において樹冠の水収支とリターフォール堆積速度を算出するとともに、それらとともに移行する放射性核種フラックスを明らかにした。樹冠を通過した雨水(樹冠通過雨及び樹幹流)と枝葉の放射性核種濃度を比較することにより、樹体から雨水への移行係数が時間とともに変化することが明らかになった。また、樹冠から林床への移行経路によって土壌への沈着フラックスが変化し、樹冠密度や選択浸透流により林床の物質偏在性が説明できることを示唆するフィールドデータが得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林の水・物質循環研究において、従来から水の安定同位体や溶存イオン等がトレーサーとして用いられており、近年では森林を含むクリティカルゾーンの環境動態解析に広く応用されている。一方で、福島原発事故後に放射性セシウムの環境動態研究が飛躍的に増加したものの、森林での物質循環トレーサーとしての利用可能性は未だ調査されていない。本研究課題においては、福島事故由来の放射性セシウムと天然放射性核種の森林環境動態を通じて、大気-森林-雨水-土壌間のシームレスな水・物質循環を定量的に解析できる可能性が示され、森林物質循環解析のツールとして国内外の森林水文・生態学のさらなる発展に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research project, to investigate the possibility of using atmospheric fallout radionuclides as tracers of material cycles in forest ecosystems, the canopy water balance and litterfall deposition rate were calculated and the radionuclide fluxes transferred with them in the experimental forests were clarified. By comparing radionuclide concentrations in rainwater that passed through the canopy (throughfall and stemflow) and tree components (e.g., branch and foliage), it was found that the transfer coefficient from tree body to rainwater changed with time. Field data were also obtained to suggest that deposition fluxes to the soil vary depending on the transfer pathway from the tree canopy to the forest floor, and that canopy density and preferential infiltration flow can explain the heterogeneous distribution of atmospheric fallout radionuclides and materials on the forest floor.

研究分野：環境動態解析

キーワード：森林 水循環 降下放射性核種 放射性セシウム Pb-210 トレーサー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自然資源や環境を構成する生態系サービスは、地球表層での水物質循環や植生との相互作用によって維持されている。近年では、この相互作用の領域をクリティカルゾーン (CZ) と定義し、新しい学際研究コミュニティが広がっている。しかし、大気-水-植生-土壌間のシームレスな水物質輸送と相互作用を結びつける総合的な研究はまだほとんど存在せず、CZ 研究に革新的な解析手法が求められている。特に日本では、個々の地球科学の研究は進んでいるが、大気-森林-土壌間の一連の物質動態を扱う学際研究はまだ少なく、国際的な競争力が低い状況である。

一方、東日本大震災と原子力発電所事故をきっかけに、多分野にまたがる放射性核種の環境動態研究が盛んに行われており、例えば放射性セシウムを共通トレーサーとして、大気から森林、森林から河川・海洋へとつながるシームレスな物質循環研究がなされ、新たな知見が続々と報告されるなど世界的にも注目が集まっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、環境同位体トレーサーを用いて森林-水相互作用の解明を行うとともに、新しい森林物質循環解析手法を開発することを目的とする。特に、福島原発事故由来の放射性セシウムの動態解析データをハブに、天然放射性核種や安定同位対比を相補的に併用した水・物質トレーシング研究を行い、国内外で利用可能な高精度かつ汎用性の高いマルチトレーサー手法の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

本課題では、これまでに森林の水収支観測と事故由来の放射性セシウムの移行モニタリングが集中的に行われている栃木県佐野市及び福島県川俣町・浪江町の既存森林モニタリングサイトを対象として、放射性核種の森林環境中動態をモニタリングする。それにより、事故初期の放射性セシウムの移行パラメータと比較を行うとともに、これらの核種のフラックスデータを相補的に解析することによって、大気-森林-土壌での分布特性とコンパートメント間での物質収支を明らかにする。

既存森林モニタリングサイトは、申請者らが福島原発事故以前から森林水文素過程の観測を行ってきた栃木県佐野市の東京農工大・FM 唐沢山演習林のほか、事故直後の 2011 年 6 月から森林の放射性セシウム移行モニタリングを実施している試験林流域(山木屋サイト:福島県川俣町山木屋地区のスギ 2 林分及びコナラ・アカマツ混交林、町有林)、2018 年 4 月からモニタリングを開始した高濃度汚染地域の試験林流域(浪江サイト:福島県浪江町赤宇木地区のスギ林及びコナラ・クリ林、国有林)である。これらの試験林流域において、水文素過程の観測に加えて、林内の福島事故由来の放射性セシウムの分布・移行状況の調査を継続して行った。具体的には、雨水、林内雨(樹冠通過雨・樹幹流)、土壌水、渓流水、地下水を定期的(月 1 回)あるいは降雨イベントごと(年 5 回程度)に採取し、溶存態・懸濁態の放射性セシウム濃度とその他の放射性核種濃度、主要溶存イオンとをそれぞれ定量するとともに、水の安定同位対比を測定し、樹体-水-土壌間での水・放射性セシウムのコンパートメント間での輸送フラックス及び主要な輸送経路を定量化した。

### 4. 研究成果

大気から森林に沈着した放射性核種の動態を明らかにするため、詳細な水文観測により雨水及び落葉・落枝(リターフォール)に伴うそれら核種の移行フラックスを定量化したほか、森林コンパートメントごとの存在量の変化をモニタリングした。それらのモニタリング結果に基づいて、森林内での放射性核種の分布と各経路の移行フラックスの時間経過を明らかにすることにより、森林樹冠(枝葉や樹皮)と雨水間での大気降下物質の移行速度及びその時間変化を明らかにした。本研究の主な結果は以下の通りである。

(1) 2011 年の福島原発事故により森林に降下した放射セシウムについて、樹冠(枝葉及び樹皮)と森林雨水成分(樹冠通過雨及び樹幹流)の濃度の時間変化を比較した。それにより、樹体から雨水への移行係数は沈着初期に移行速度が速いが、時間経過とともに指数関数的に移行速度が低下することが明らかになった。

既存研究よれば、植物体から雨水への放射性核種の移行速度は、初期沈着からの時間経過とともに表面汚染から内部汚染へと変化することにより減少することが報告されているが、これまでフィールドでの移行速度の変化を検証した研究例はなかった。本研究により、実際の森林において、樹体から雨水への移行係数の時間変化が明らかになったことで、森林樹冠での大気降下物質の滞留時間の推定や、原子力災害初期から長期にかけての森林林床の汚染濃度の時間変化の予測精度の向上が期待される。

(2) 森林に沈着した大気降下物質はまず樹冠に捕捉され、その後は林内雨やリターフォールの

ような経路により林床に移動し、最終的に森林土壌に集積する。本研究では、大気から沈着する放射性核種動態を通して、福島原発事故由来の放射性セシウムでは初期沈着から時間経過とともに最大で4オーダーも濃度が低下した後も、それぞれの森林コンパートメントでの分布や移行成分(雨水やリターフォール)のフラックスを高精度に定量化できることがわかった。その他の天然放射性核種(例えば鉛-210)については、福島原発事故由来の放射性セシウムの沈着量が多い地域では、ガンマ線バックグラウンドの増加により測定が困難な場合が多いが、水サンプルは亜鉛置換体プルシアンブルー担持不織布フィルターを通過させることにより放射性セシウムの

バックグラウンドを低下させ、ガンマ線のピークが検出できる場合があることがわかった。このことから、福島事故初期に採取された雨水サンプルについても放射性セシウム以外の天然放射性核種を組み合わせたマルチトレーサー手法が適用出来る可能性があり、事故初期の森林樹冠における放射性セシウムの遮断や雨水への溶出メカニズムをより詳細に解明できることを示唆する結果が得られた。

(3) 大気-森林-土壌への大気降下物質の輸送においては、林分スケールでは樹冠通過雨やリターフォールがその主要な移行経路である。一方で、森林の樹冠は上向きにした漏斗のように枝葉を伝って水や物質を幹に導水し、樹幹の基部に集中的に輸送浸透させる機構(ダブルファンネリング)を持つと考えられている。本研究では、樹幹基部と、樹幹から離れた地点に土壌浸透水の採取装置を設置し、それぞれの地点で異なる深度の土壌への雨水及び放射性セシウムの浸透フラックスを調査した。その結果、樹幹基部においては、樹幹から離れた地点と比較して土壌への雨水浸透フラックスが2.2~3.2倍多く、溶存態放射性セシウムの浸透フラックスは3.0~3.4倍多かった。また、樹幹基部と樹幹から離れた地点の土壌を深度別に採取し、土壌に含まれる放射性セシウム存在量を調査した結果、樹幹基部の土壌においては、樹幹から離れた地点と比べて放射性セシウム存在量が1.8倍も大きいことがわかった。一方で、いずれの地点の土壌でも放射性セシウムの深度分布には有意な差はなく、土壌浸透水の観測で得られたような2地点間での浸透深度の違いは認められなかった。

樹幹流に含まれる溶存態放射性セシウムの供給源を明らかにするため、スギ及びコナラから調査対象木をそれぞれ選定し、樹幹中の枝を伝って流下する枝流(Branch flow)を採取するとともに、樹幹の上部(樹冠直下)と下部(胸高)で樹幹流を採取した。このように、樹冠から幹へと集水される雨水と、樹幹を流下する過程での樹幹流の溶存態セシウム濃度の変化を比較することによって、樹幹流に含まれる溶存態放射性セシウム濃度の供給源の推定と流下過程での濃度変化について調査を行った。その結果、スギとコナラでは、樹幹流に含まれる溶存態放射性セシウムの71%と48%が樹冠からの溶出に起因しており、残りの29%と52%は雨水が樹幹を流下する過程で樹皮から溶出したと推定された。

以上の結果から、福島事故由来の放射性セシウムをトレーサーとして、森林樹冠の枝葉に捕捉された大気降下物が雨水により溶脱されながら樹幹へと集水し、幹を伝って樹幹基部の土壌へと選択的に輸送されることが明らかになった。また、樹幹流が流入しやすい樹幹基部の土壌においては、樹幹から離れた地点と比べて雨水の浸透フラックスが多いだけでなく、より深部の土壌へと雨水や溶存物質を輸送しやすいことが明らかになった。

## 5. 結論

森林の水・物質循環研究において、従来から水の安定同位体や溶存イオン等がトレーサーとして用いられており、近年では森林を含むクリティカルゾーンの環境動態解析に広く応用されている。一方で、福島原発事故後に放射性セシウムの環境動態研究が飛躍的に増加したものの、森林での物質循環トレーサーとしての利用可能性は未だ調査されていない。本研究課題においては、福島事故由来の放射性セシウムと天然放射性核種の森林環境動態解析を通じて、大気-森林-雨水-土壌間のシームレスな水・物質循環を簡便かつ高感度に解析が可能なツールとして利用可能性を示した。天然放射性核種の利用に関しては、低濃度サンプルの分析方法の確率や、福島事故由来の放射性セシウムに起因するバックグラウンドの低減などに課題が残るものの、放射性セシウムに加えて、天然の降下放射性核種をトレーサーとして利用することで、森林物質循環解析のツールとして国内外の森林水文・生態学のさらなる発展に寄与することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Anderson Donovan, Kato Hiroaki, Onda Yuichi	4. 巻 56
2. 論文標題 Mode of Atmospheric Deposition in Forests Demonstrates Notable Differences in Initial Radiocesium Behavior	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 15541 - 15551
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.est.2c03451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kato Hiroaki, Onda Yuichi, Maejima Keita	4. 巻 314
2. 論文標題 Distribution of radiocesium and its controlling factors under the Japanese cedar canopies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Management	6. 最初と最後の頁 115064
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jenvman.2022.115064	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saidin Zul Hilmi, Levia Delphis F., Kato Hiroaki, Kurihara Momo, Hudson Janice E., Nanko Kazuki, Onda Yuichi	4. 巻 818
2. 論文標題 Vertical distribution and transport of radiocesium via branchflow and stemflow through the canopy of cedar and oak stands in the aftermath of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 151698 ~ 151698
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scitotenv.2021.151698	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Holiaka Dmytrii, Kato Hiroaki, Yoschenko VasyI, Onda Yuichi, Igarashi Yasunori, Nanba Kenji, Diachuk Petro, Holiaka Maryna, Zadorozhniuk Roman, Kashparov Valery, Chyzhevskyi Ihor	4. 巻 295
2. 論文標題 Scots pine stands biomass assessment using 3D data from unmanned aerial vehicle imagery in the Chernobyl Exclusion Zone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Management	6. 最初と最後の頁 113319 ~ 113319
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jenvman.2021.113319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Onda, Y., Taniguchi, K., Yoshimura, K., Kato, H., Takahashi, J., Wakiyama, Y., Coppin, F., Smith, H.	4. 巻 1
2. 論文標題 Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Reviews Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 644-660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43017-020-0099-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hisadome, K., Onda, Y., Loffredo, N., Kawamori, A., Kato, H.	4. 巻 326
2. 論文標題 Spatial variation and radiocesium flux of litterfall in hardwood-pine mixed forest and cedar plantations based on long-term monitoring data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 1491-1504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-020-07433-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 加藤弘亮, 恩田裕一, サイディン ズル ヒルミ, 飯田光, 赤岩哲, 篠塚友輝
2. 発表標題 福島原発事故から10年間の森林における放射性セシウムの移行と分布
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤弘亮, 赤岩哲, 庭野佑真, 飯田光, 篠塚友輝, 恩田 裕一
2. 発表標題 福島における放射性物質分布調査(8) 高沈着量地域の森林源頭部流域における溶存態 <sup>137</sup> Csの流出経路の推定
3. 学会等名 日本原子力学会2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田光, 加藤弘亮, 篠塚友輝, 赤岩哲, 庭野佑真, 恩田裕一
2. 発表標題 福島における放射性物質分布調査(9)福島県浪江町のスギ林における雨水及びCs-137の深部浸透に対する樹幹流の影響
3. 学会等名 日本原子力学会2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Kato, Tomoki Shinozuka, Satoru Akaiwa, Hikaru Iida, Zul Hilmi Saidin, and Yuichi Onda
2. 発表標題 Transfer of the Fukushima accident-derived radiocesium by hydrological processes in Japanese forests
3. 学会等名 Europe Geoscience Union General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田光、加藤弘亮、篠塚友輝、赤岩哲、庭野佑真、Anderson Donovan、恩田裕一
2. 発表標題 スギ樹幹基部における雨水及び溶存態Cs-137の浸透フラックスと樹幹流の影響
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤弘亮、篠塚友輝、赤岩哲、飯田光、恩田裕一、ズル・ヒルミ・サイディン
2. 発表標題 福島原発事故から10年目の森林における 水文過程にともなう放射性セシウムの移行状況
3. 学会等名 福島大学環境放射能研究所第7回成果報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤弘亮、篠塚友輝、赤岩哲、飯田光 恩田裕一、ズル・ヒルミ・サイディン
2. 発表標題 日本の森林における 水文過程にともなう放射性セシウムの移行
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田光、加藤弘亮、篠塚友輝、赤岩哲、恩田裕一
2. 発表標題 ギ人工林における林内雨が土層へのセシウム137の下方浸透に及ぼす影響
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤弘亮、篠塚友輝、飯田光、ズル・ヒルミ・サイディン、赤岩哲、恩田裕一
2. 発表標題 福島における放射性物質分布調査（9）福島県川俣町及び浪江町の森林における放射性セシウム移行状況
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田光、加藤弘亮、篠塚友輝、赤岩哲、恩田 裕
2. 発表標題 福島における放射性物質分布調査（12）福島県浪江町のスギ林における樹幹流が放射性セシウムの土層への浸透に及ぼす影響
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Kato, Hikaru Iida, Tomoki Shinozuka, Yuma Niwano, and Yuichi Onda
2. 発表標題 Effects of stemflow on radiocesium infiltration into the forest soil
3. 学会等名 European Geoscience Union General Assembly 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤弘亮、庭野佑真、飯田光、恩田 裕一
2. 発表標題 福島における放射性物質分布調査 (1)福島県の森林における放射性セシウムの長期移行状況
3. 学会等名 日本原子力学会2022年秋の大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 庭野佑真、加藤弘亮、赤岩 哲、Anderson Donovan、飯田光、中西美夕、恩田裕一
2. 発表標題 福島における放射性物質分布調査(2) 高沈着量地域の森林源頭部流域における溶存態 Cs-137の流出経路の推定
3. 学会等名 日本原子力学会2022年秋の大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤弘亮、Anderson Donovan、恩田裕一
2. 発表標題 大気沈着形態が森林の放射性セシウムの初期挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 庭野佑真、加藤弘亮、赤岩 哲、Anderson Donovan、飯田 光、中西美夕、恩田裕一
2. 発表標題 斜面土層地下水によるCs-137移行フラックスの推定と表流水への影響評価
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤裕亮、庭野佑真、恩田裕一
2. 発表標題 福島 of 森林環境における放射性セシウム of 長期移行状況
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Kato, Yuma Niwano, Hikaru Iida, Yuichi Onda
2. 発表標題 Long-term transfer of radiocesium within the forest in Fukushima Prefecture - Interactions between forest and water-
3. 学会等名 The 9th Annual Symposium of the Institute of Environmental Radioactivity (IER), Fukushima University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤弘亮、庭野佑真、恩田裕一
2. 発表標題 福島における放射性物質分布調査(6) 福島の森林における放射性セシウムの分布及び移行速度の長期変化
3. 学会等名 日本原子力学会2023年秋の大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Hashimoto, S., Komatsu, M., Imamura, N., Ohashi, S., Kato, H., Nishina, K., Tagami, K., Uchida, S., Shaw, G., Wood, M., Beresford, N., Howard, B., Fesenko, S., Thiry, Y.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria	5. 総ページ数 360
3. 書名 Environmental transfer of radionuclides in Japan following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power plant. Report of Working Group 4 transfer processes and data for radiological impact assessment subgroup 2 of Fukushima data.	

1. 著者名 Yoschenko, V., Nanba, K., Ohkubo, T., Kato, H.	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 510
3. 書名 Behavior of Fukushima-Derived Radiocesium in Forest Ecosystems In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (Eds.), Behavior of Radionuclides in the Environment III -Part VI Radionuclide Transfer in Terrestrial Environment	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------