

## 東京電力福島第一原子力発電所事故に起因する放射性セシウムの落葉広葉樹混交林内における循環

著者	高橋 智之
号	67
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	環博第174号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00137259">http://hdl.handle.net/10097/00137259</a>

氏名	たかはし ともゆき 高橋 智之
授与学位	博士（環境科学）
学位記番号	環博第 174 号
学位授与年月日	令和 5 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科（博士課程）先進社会環境学専攻
学位論文題目	東京電力福島第一原子力発電所事故に起因する放射性セシウムの 落葉広葉樹混交林内における循環
指導教員	東北大学教授 井上 千弘
論文審査委員	主査 東北大学教授 井上 千弘 東北大学教授 岡本 敦 東北大学教授 新堀 雄一（工学研究科）

## 論文内容要旨

本研究は、福島県飯館村の旧居住制限区域内の落葉広葉樹混交林を対象として、東京電力福島第一原子力発電所事故(以降、事故という)から 6 年後の 2017 年から約 5 年間にわたり、林内の土壌や樹木の  $^{137}\text{Cs}$  濃度を継続的に調査した結果をもとに、対象林内における  $^{137}\text{Cs}$  循環の様相を明らかにしたものである。

事故に関しては、既に、農産物や野生動植物に与えた影響、森林や土壌における放射性物質の動向など陸海域に渡り多くの論文が発表されている。また、森林から外部へ放射性物質の流出は少なく森林内で循環していると考えられている。しかし、既往論文では主に人工林や二次林を調査対象としてきており、居住区近隣の長年放置されてきた雑木林(自然林)に関する調査は進んでいない。

また、日本は地形や地質の変化に富んでいるが、樹木や土壌の放射性物質の  $^{137}\text{Cs}$  濃度との関連性について論じられているものは少ない。そのため、本研究では地形の異なる雑木林(自然林) 4ヶ所を調査区として選定し、複数の樹木種(落葉広葉樹・常緑針葉樹の生葉)、林床土壌の  $^{137}\text{Cs}$  濃度調査および土壌化学分析を実施し、各調査区の比較調査を行った。その結果、調査区間の特徴と相違が表れ、樹木や林床土壌の  $^{137}\text{Cs}$  濃度は、初期  $^{137}\text{Cs}$  沈着量と地形や地質に影響を受けることが明らかとなった。また、調査区の土壌を使用した落葉広葉樹・常緑針葉樹の苗木栽培実験を行った結果、事故より 8 年経過し  $^{137}\text{Cs}$  の固定化が進んだ土壌からも一定量の  $^{137}\text{Cs}$  が経根吸収できていること、落葉広葉樹・常緑針葉樹の  $^{137}\text{Cs}$  吸収の経時的変化の相違を明らかにした。これらの結果をもとに、各調査区の  $^{137}\text{Cs}$  蓄積量、 $^{137}\text{Cs}$  循環の様相を推測した。

### ・調査区の選定とその特徴

福島県相馬郡飯館村の飯樋、下比曾、蕨平の落葉広葉樹混交林および長泥の草地を調査区とした。各調査区の特徴は以下のとおりである。

飯樋調査区 : 落葉広葉樹混交林 傾斜地。雨水は流出し林床植物はほとんど定着していない。

下比曾調査区 : 落葉広葉樹混交林。窪地。大雨時は湿地化。林床植物は多く繁茂。

蕨平調査区 : 落葉広葉樹混交林。山中の穏やかな傾斜地。雨水の流入・流出がある。

長泥調査区 : 草地。川沿いの平地。シダ類が繁茂。

落葉広葉樹混交林の調査木として各調査区に共通する落葉広葉樹 6 種と常緑針葉樹 1 種を選定した。各調査区の土壌分類はいずれも腐植質アロフェン質黒ボク土であった。

### ・各調査区の土壌化学成分：

各調査区の土壌の CEC，加里飽和度，リン酸吸収係数，有機炭素含有量を Fig. 1 に示した。

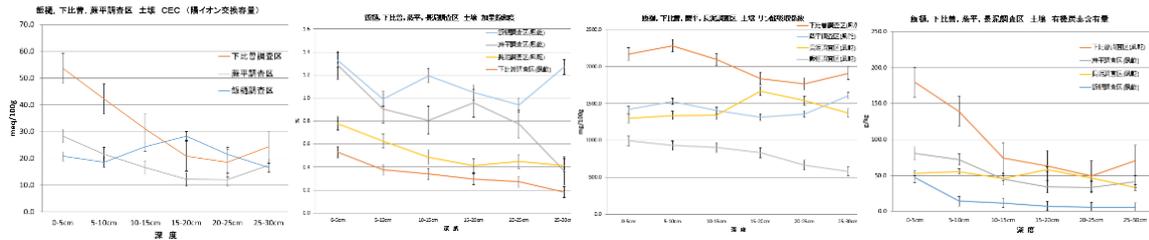


Figure 1 各調査区の土壌の CEC，加里飽和度，リン酸吸収係数，有機炭素含有量

・落葉広葉樹混交林の林床土壌中の  $^{137}\text{Cs}$  沈着量とその経時的変化

2017/7-2021/11 の期間における各調査区の林床土壌についての  $^{137}\text{Cs}$  沈着量( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ )の経時的変化を Fig. 2 に示す。傾向として  $^{137}\text{Cs}$  沈着量は 下比曽 > 蕨平 > 長泥 > 飯樋 の順で高くなっていったが、経時的な減少傾向は明確ではなかった。

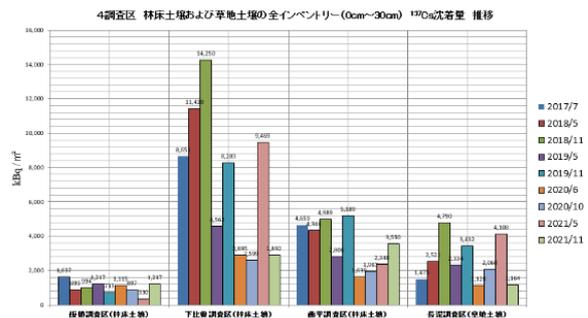


Figure 2 各調査区土壌の  $^{137}\text{Cs}$  沈着量の経時的変化

・各調査区の土壌の深度別  $^{137}\text{Cs}$  濃度の傾向と土壌化学分析結果

各調査区における表層(0-5cm)から30cmまでの5cm毎の土壌試料の  $^{137}\text{Cs}$  濃度( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )を調べたところ、表層(0-5cm)が最も高く、下層に行くほど指数関数的に減少しており、既往論文と同様の傾向を示した。各調査区の  $^{137}\text{Cs}$  濃度( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )の傾向と、土壌化学成分の分析結果(CEC, 加里飽和度, リン酸吸収係数, 有機炭素含有量)とは、調和的であり相関性が認められた。

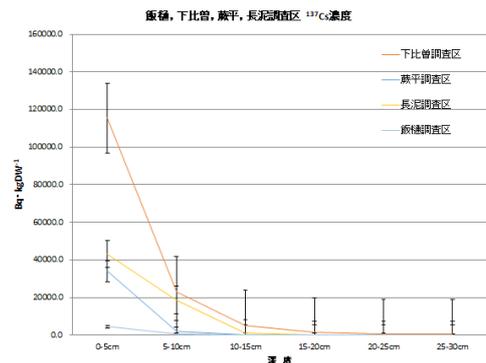


Figure 3 各調査区の土壌の深度別  $^{137}\text{Cs}$  濃度

・各調査区の初期  $^{137}\text{Cs}$  沈着量の推定

各調査区の森林における事故直後の  $^{137}\text{Cs}$  沈着量を指し示す公的なデータがないため、事故当時の飯舘村の農地や航空機モニタリング調査より、初期値を推定した。また、その値から  $^{137}\text{Cs}$  濃度の自然減衰曲線を描き各調査区の実測値と比較した。飯樋調査区(Fig. 4), 下比曽・蕨平調査区(Fig. 5)の実測値は、いずれも初期  $^{137}\text{Cs}$  沈着量( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ )の自然減衰曲線を上回っている。したがって森林における初期  $^{137}\text{Cs}$  沈着量は、周辺土壌より多くなっており、この現象は森林のフィルタリング効果によるものと推測される。



Figure 4 飯樋調査区の  $^{137}\text{Cs}$  沈着量の推定値と実測値

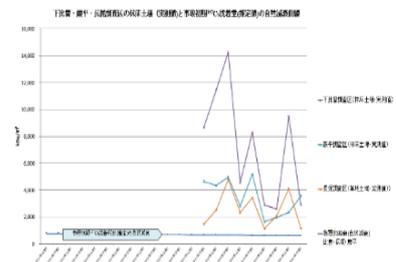


Figure 5 下比曽・蕨平調査区の  $^{137}\text{Cs}$  沈着量の推定値と実測値

- 各調査区に共通する落葉広葉樹混交林の樹木（生葉）の  $^{137}\text{Cs}$  濃度とその経時的変化

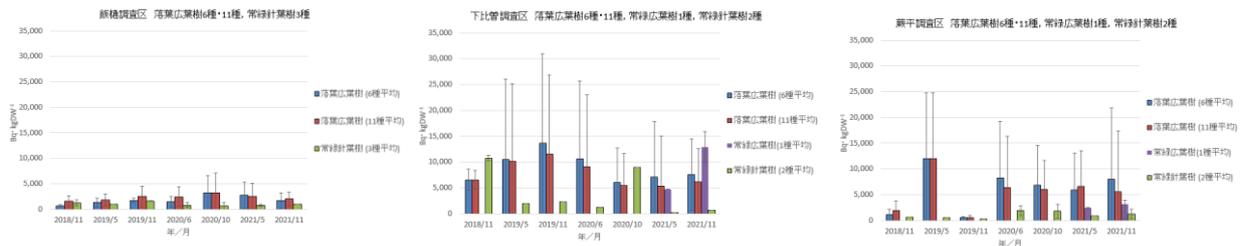


Figure 6 各調査区の落葉広葉樹混交林の樹木（生葉）の  $^{137}\text{Cs}$  濃度の経時的変化

各調査区の樹木（生葉）の  $^{137}\text{Cs}$  濃度は、同じ調査区の土壌  $^{137}\text{Cs}$  濃度 ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、土壌化学成分の分析結果とは調和的である。調査区間で土壌と樹木(生葉)の  $^{137}\text{Cs}$  濃度に差が生じている主な要因は地形・地質との関連が示唆された。

- 樹木(生葉)への移行係数

調査区内では樹種による相違があったが調査区間に共通する樹種では、ほぼ同じ移行係数 ( $T_{\text{ag}}$ : Aggregated transfer factor) を示した。樹種が同じであれば、土壌  $^{137}\text{Cs}$  沈着量 ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) の相違に関わらず同じ移行率を示すことが示唆された。

- 林床土壌の  $^{137}\text{Cs}$  固定・固着化状況の確認

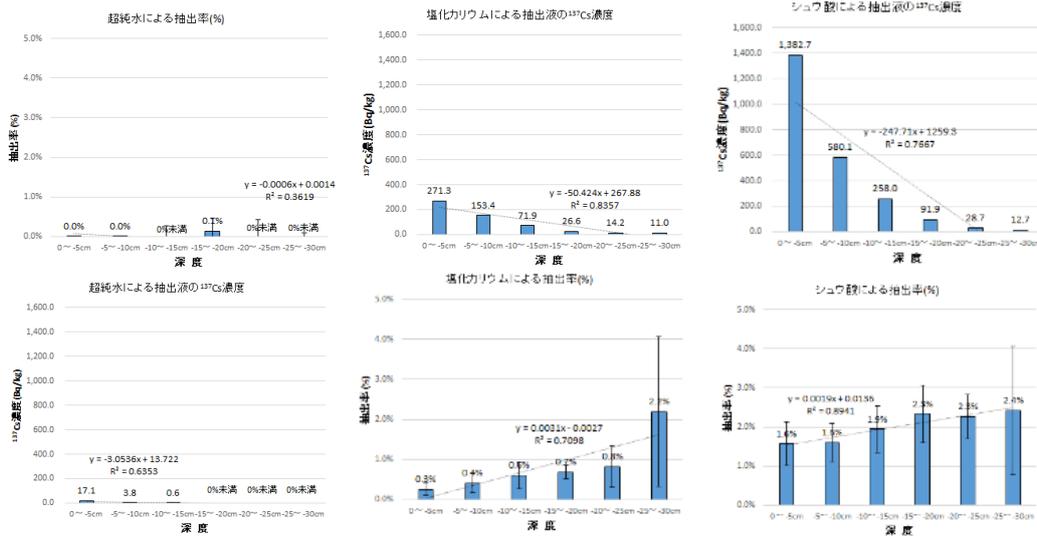


Figure 7 土壌からの溶媒別の  $^{137}\text{Cs}$  抽出試験結果

上段:濃度 ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 下段:抽出率(%), 左より溶媒は超純水, KCl, シュウ酸の順

事故より 8 年経過した林床土壌の  $^{137}\text{Cs}$  固定化状況を確認するため、抽出溶媒の種類を変えて抽出試験を実施した。結果を Fig. 7 に示すが、土壌中の  $^{137}\text{Cs}$  はシュウ酸 > KCl > 超純水の順で多く抽出された。全体的に抽出率は低かったが、固定化が進んでいると考えられる土壌でも抽出は可能であった。シュウ酸(根酸を想定)では  $^{137}\text{Cs}$  抽出濃度 ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )・率 (%) とともに他の溶媒より比較して高く、植物の根から放出される根酸によって FES 以外の固着が弱い粘土鉱物からの溶出によって  $^{137}\text{Cs}$  の吸収量が増えることが示唆された。

- 調査区の土壌と非汚染状態の苗木(落葉広葉樹・常緑針葉樹)を用いた栽培実験

下比曽調査区から採取した土壌を用い、 $^{137}\text{Cs}$  で汚染されていない苗木を用いて栽培実験を行い植物各部位の  $^{137}\text{Cs}$  濃度の経時的変化を測定した。落葉広葉樹では 10 月に生葉、12 月に落葉全て

を回収し<sup>137</sup>Cs濃度(Bq・kg<sup>-1</sup>)を測定したところ、12月に<sup>137</sup>Cs濃度(Bq・kg<sup>-1</sup>)の低下がみられ(Fig. 8(左))、落葉前に葉から養分を枝・幹に回収する(転流)が確認できた。常緑針葉樹の生葉では10-12月でも<sup>137</sup>Cs濃度(Bq・kg<sup>-1</sup>)の上昇がみられ(Fig. 8(右))、落葉広葉樹と常緑常緑樹の生活スタイルの違いが表れた。

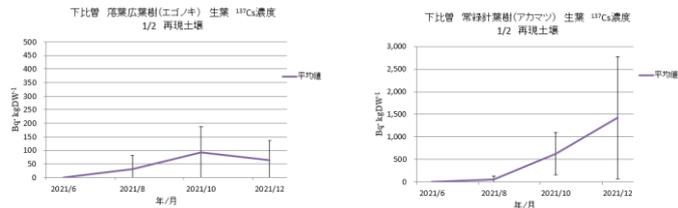


Figure 8 落葉広葉樹(エゴノキ,左),常緑針葉樹(アカマツ,右)の生葉中の<sup>137</sup>Cs濃度(Bq・kg<sup>-1</sup>)の推移

・植物各部位の重量比(%)と<sup>137</sup>Cs含有量(Bq)

Fig. 8 に示した落葉広葉樹(エゴノキ)の苗の各部位の重量比および<sup>137</sup>Cs含有量を測定し、結果をFig. 9に示した。土壌から経根吸収により樹体内に移動した<sup>137</sup>Csは、地上部の各部位に分配され、また根にも蓄積されていることが確認された。

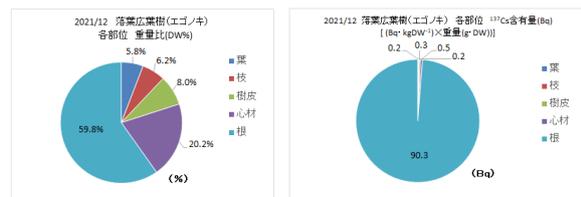


Figure 9 落葉広葉樹(エゴノキ)の各部位の重量比(左)、<sup>137</sup>Cs含有量(Bq)の比較

・各調査区の<sup>137</sup>Cs循環の様相

本研究により得られた飯館村の各調査区における土壌層、落葉層、樹木(各部位)の<sup>137</sup>Cs蓄積量(Bq・m<sup>-2</sup>)とその比率をFig. 10に示す。

本研究の飯館村(各調査区)では、既往の研究で得られている川俣町(Ondaらレビュー<sup>1)</sup>)、川内村(林野庁<sup>2)</sup>)と比較して各層合計の<sup>137</sup>Cs蓄積量(Bq・m<sup>-2</sup>)は多く、特に下比曽調査区は最も多くなっている。各調査区間の相違は、主に初期<sup>137</sup>Cs沈着量(Bq・m<sup>-2</sup>)と地形・地質の相違によって生じていると推測される。

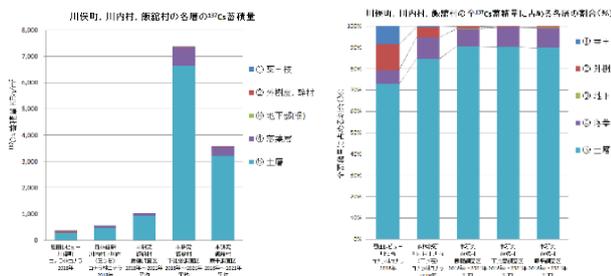


Figure 10 各調査区における土壌層、落葉層、樹木(各部位)の<sup>137</sup>Cs蓄積量(Bq・m<sup>-2</sup>,左)とその相対値(右)

・結論

各調査区の<sup>137</sup>Cs蓄積量は、森林全体では土壌層が最も多く90%以上、樹木には数%が蓄積、落葉による循環は1%未満である。既往論文の他調査区とは異なっている。落葉広葉樹の事故直後からの<sup>137</sup>Cs蓄積量の経時的变化は未解明であったが、事故直後からの半年間は成長期であったため、土壌にまだ固定化されていない状態の<sup>137</sup>Csを他の栄養塩とともに多く吸収し、樹体内の<sup>137</sup>Cs蓄積量が高まった。その後、樹体内に蓄積した<sup>137</sup>Csは落葉に含まれ樹体外に出るがその量は少なく、事故より1年後以降は経根吸収によって<sup>137</sup>Csが補われたため、樹体内の<sup>137</sup>Cs蓄積量はほぼ均衡に近い状態で推移したと推測される。

・参考文献

1) Y.Onda, K.Taniguchi, K.Yoshimura, H.Kato, J.Takahashi, Y.Wakiyama, F.Coppin, and H.Smith, "Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems." *Nature Reviews Earth and Environment*, **1**, pp.644-660, (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0099-x>

2) 林野庁, "令和2年度 森林内の放射性物質の分布状況調査結果について。【調査2】令和2(2020)年度帰還困難区域とその隣接区域の森林に存在する放射性セシウムの調査結果について", <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/jyosen/attach/pdf/210316-3.pdf>

## 論文審査結果の要旨及びその担当者

論文提出者氏名	高橋 智之
論文題目	東京電力福島第一原子力発電所事故に起因する放射性セシウムの落葉広葉樹混交林内における循環
論文審査担当者	主査 教授 井上 千弘 教授 岡本 敦 教授 新堀 雄一 (工学研究科)

## 論文審査結果の要旨

2011年に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故により放射性 Cs (現時点で主に残存するのは $^{137}\text{Cs}$ )が大量に放出され、現在でも高い空間放射線量を示す場所が数多く存在している。特に福島県全体の面積の約7割を占める森林に関しては、除染が進められた居住地周辺に比べて高い空間放射線量が示されているものの、その詳細は調査されておらず、また針葉樹林では一定の検討がなされているものの、落葉広葉樹主体の自然林における $^{137}\text{Cs}$ の動態は明らかになっていない。本研究は福島県飯館村の旧居住制限区域内の落葉広葉樹混交林を対象として、事故から6年後の2017年から約4年間にわたり林内の土壌や樹木の $^{137}\text{Cs}$ 濃度を継続的に調査した結果をもとに対象林内における $^{137}\text{Cs}$ 循環の様相を明らかにしたものであり、全5章で構成される。

第1章は序論であり、本研究に関わる背景や研究目的について述べている。

第2章「調査区の選定とその特徴」では、飯館村の飯樋、下比曾、蕨平地区から各1ヶ所の針葉樹が混在する落葉広葉樹混交林、および比較用として長泥地区より草地を調査区として選定し、地形、地質、植生などの特徴を記載するとともに土壌構成成分の化学分析を行った結果を述べている。

第3章「落葉広葉樹混交林の土壌および樹木生葉中の $^{137}\text{Cs}$ 濃度とその経時的変化」では、各調査区にて継続的に調査した $^{137}\text{Cs}$ 濃度の測定結果により、林床土壌および落葉広葉樹生葉中の $^{137}\text{Cs}$ 濃度は調査期間内を通じ高濃度で推移し、明確な減少傾向が認められないことを明らかにしている。林床土壌や樹木の生葉の $^{137}\text{Cs}$ 濃度には調査区毎に違いが見られ、第2章に記した地形や地質と深く係わりあっていることが示されている。また林床土壌については既存の調査データに基づく各調査区の fallout 時の $^{137}\text{Cs}$ 沈着量から推定される調査区周辺の $^{137}\text{Cs}$ 沈着量のバックグラウンド値と、各調査区の $^{137}\text{Cs}$ 沈着量の実測値を比較している。その結果、いずれの調査区でも実測値の方がバックグラウンド値を大幅に上回り、特に窪地地形の下比曾調査区では10倍以上の値が得られている。その要因として地形的な影響とともに森林の生態系が保有する $^{137}\text{Cs}$ の蓄積・循環のメカニズムが関与していると推測されている。

第4章「落葉広葉樹混交林における $^{137}\text{Cs}$ の循環」では、落葉広葉樹混交林における $^{137}\text{Cs}$ 循環の要因を解明するために、根酸を模擬した溶媒による林床土壌からの $^{137}\text{Cs}$ 抽出試験、および非汚染状態の苗木を用いた栽培実験を行っている。既往論文で事故直後の土壌を用いた有機酸による $^{137}\text{Cs}$ 抽出試験では、4割程度の $^{137}\text{Cs}$ が抽出されているが、本研究で使用した原発事故後7年の土壌で同様の抽出試験をすると1%程度しか $^{137}\text{Cs}$ が抽出されていないことから、原発事故後7年の土壌では $^{137}\text{Cs}$ の固定化が進んでいることが示されている。非汚染状態の苗木の栽培試験では、調査区に自生している落葉広葉樹(エゴノキ)と常緑針葉樹(アカマツ)の苗を用意し、下比曾調査区の土壌を用いて栽培実験を行い、植物各部位における $^{137}\text{Cs}$ 濃度の経時変化を調べている。落葉広葉樹のエゴノキでは、一度生葉に蓄積した $^{137}\text{Cs}$ が秋の落葉前に幹や根に移動する転流という現象や、植物体内の $^{137}\text{Cs}$ 総量の1/4程度が根に蓄積されていることなどが新たに確認されている。これらの結果を踏まえ、事故後10年程度の時間が経過した状況では、調査区の落葉広葉樹混交林内における $^{137}\text{Cs}$ の9割以上が林床土壌に固定化されていること、また落葉広葉樹の樹体内にも $^{137}\text{Cs}$ が蓄積され、そのごく一部が落葉により林床土壌に還元されるものの、同程度の $^{137}\text{Cs}$ が根から吸収されることを明らかにしている。

第5章は結論である。

以上、本論文では、福島県内の落葉広葉樹混交林を対象に、原発事故後10年程度の時間が経過した時点における $^{137}\text{Cs}$ の蓄積と循環の状況を3つの独立した調査区での検討により明らかにしたものであり、原発事故後の放射能汚染対策を検討する上で重要な知見を提出するとともに、 $^{137}\text{Cs}$ の森林生態系での循環の理解を中心とした環境科学への学術面での貢献が少なくない。

よって、本論文は博士(環境科学)の学位論文として合格と認める。