

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-1909 土地利用変化による土壌炭素の変動量評価と国家インベントリへの適用に関する研究
(JPMEERF20192009)
令和元年度～令和3年度

Assessment of Soil Carbon Stock Changes due to Land Use Changes and Its Application to National Greenhouse Gas Inventories

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人森林研究・整備機構

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

公益財団法人 都市緑化機構

公益財団法人 地球環境戦略研究機関

〈研究協力機関〉

産業技術総合研究所

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 森林に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化	・・・・・・・・・・	8
(国立研究開発法人 森林研究・整備機構森林総合研究所)		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 農地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化	・・・・・・・・	20
(国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構)		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-3 開発地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明	・・・・・・・・	29
(公益財団法人 都市緑化機構)		
要旨		

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

II-4 土地利用変化時の土壌炭素量変化に関するインベントリ算定の実装に関する研究 44
 (公益財団法人 地球環境戦略研究機関)

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

II-5 リモートセンシングによる土地利用変化の分類に関する研究 59
 (国立研究開発法人 森林研究・整備機構森林総合研究所)

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細 71

IV. 英文Abstract 73

I. 成果の概要

課題名 2-1909 土地利用変化による土壌炭素の変動量評価と国家インベントリへの適用に関する研究

課題代表者名 石塚 成宏 (国立研究開発法人森林研究・整備機構/森林総合研究所/立地環境研究領域土壌資源研究室長)

重点課題 主：【重点課題⑥】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (2-5) 土地利用分野の人為活動による土壌炭素の変動量評価とGHG インベントリへの適用に関する研究

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

114,000千円 (合計額)

(各年度の内訳：元年度：38,000千円、2年度：38,000千円、3年度：38,000千円)

研究体制

(サブテーマ1) 森林に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化 (森林研究・整備機構)

(サブテーマ2) 農地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化 (農業・食品産業技術総合研究機構)

(サブテーマ3) 開発地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明 (都市緑化機構)

(サブテーマ4) 土地利用変化時の土壌炭素量変化に関するインベントリ算定の実装に関する研究 (地球環境戦略研究機関)

(サブテーマ5) リモートセンシングによる土地利用変化の分類に関する研究 (森林研究・整備機構)

研究協力機関

産業技術総合研究所

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

本研究のキーワード 土地利用変化、土壌炭素量変化、Equivalent Soil Mass法、活動量把握方法、温室効果ガスインベントリ報告

1. はじめに (研究背景等)

1) 国連気候変動枠組条約においてIPCC が作成中の2019年改訂版インベントリ・ガイドライン (現在二次レビュー中) においては、以前と同様に土地利用変化があった部分について各炭素プールの変化量を報告することになっている。中でも森林-農地間の土壌炭素の変化に関しては環境研究総合推進費2-1601「森林と農地間の土地利用変化に伴う土壌炭素変動量評価とGHG インベントリへの適用研究」において質量均等法 (Equivalent Soil Mass法、以下ESM法) による高度な変化係数を提供した。しかし、同ガイドラインにおいてはESM法の利用には全土地利用間での適用が推奨されており、森林、農地以外の土地利用においてもESM法による土地利用変化係数の算出が必要とされている。

2) 近年の森林からの土地利用変化に関しては、主として開発地への変化量が多いことがわかっており、開発地への土地利用変化の活動量の把握と科学的知見に基づいた土壌炭素の変化係数が求められて

いる。

3) 一方で、これらの土地利用変化量を行政データから正確に把握することは困難であり、衛星画像等の土地被覆から推定する方法の開発が期待されている。

2. 研究開発目的

- 1) 我が国の土地利用変化に伴う土壌炭素変動量を、IPCC2019 改訂版ガイドラインに則した形で評価できるようにする。科学的知見に基づく変化係数の取得、それをを用いた土壌炭素の変動量算定手法を開発する。これにより、気候変動枠組条約事務局に提出する国別温室効果ガスインベントリ報告書 (NIR) の精度向上に貢献できる。
- 2) IPCC2019 改訂版ガイドラインでは6つの土地区分 (森林・農地・草地・湿地・開発地・その他) に分け、最終的には土地利用全体を統合化してGHG 排出量について報告することを求めている。2-1601 では森林・農地間での土地利用変化に限定していたが、本研究により6つの土地利用区分に拡張され、土地利用セクター全体に関する方法が完成する。
- 3) 衛星画像等を利用した土地被覆による土地利用変化の把握方法のオプションを提供する。

3. 研究目標

全体目標	<p>森林・農地・草地間の土地利用変化に関しては気候、土壌特性、植生などの自然環境条件を反映する生態系モデルが適用可能なため、これらの土地利用間の土地利用変化に関しては現地調査とプロセスモデルの組み合わせによって変化係数を提供する。</p> <p>一方で大規模な表土処理が行われる開発地については、モデル地域における土地利用ごとの平均炭素蓄積量をEquivalent Soil Mass 法により評価し、これらの比較によって変化係数を算出する。</p> <p>また、活動量が正確に把握されていない開発地とその他土地利用との土地利用変化量について、衛星画像等から人工知能によって判別する技術を開発し、新たな活動量把握手法として提案する。</p> <p>これらの変化係数と活動量の関係を国家インベントリ報告に反映する手法を検討し、次世代の算定方法を提案する。</p>
サブテーマ 1	森林に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化
サブテーマリーダー /所属機関	石塚成宏 / 森林研究・整備機構
目標	森林-草地間を中心に、森林-農地間でもデータ数の少ないカテゴリーの調査地点において土壌調査を行い、Equivalent Soil Mass 法 (以下ESM 法) による土壌炭素蓄積量の比較を行う。ESM 法による土地利用変化係数を算出するとともに、モデルによる評価を行い、両者をサブテーマ 4 に受け渡し成果につなげる。また、サブテーマ 3 に必要な、開発地周辺の森林における土壌炭素量調査をおこなう。
サブテーマ 2	農地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化
サブテーマリーダー /所属機関	白戸康人 / 農業・食品産業技術総合研究機構
目標	農地-草地間を中心に、農地-森林間でもデータ数の少ないカテゴリーの調査

	地点 において土壌調査を行い、ESM 法による土壌炭素蓄積量の比較を行う。ESM 法による土地利用変化係数を算出するとともに、モデルによる評価を行い、両者をサブテーマ4に受け渡し成果につなげる。また、サブテーマ3に必要な、開発地周辺の農地における土壌炭素量調査をおこなう。
--	--

サブテーマ3	開発地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明
サブテーマリーダー /所属機関	外崎公知／都市緑化機構
目標	全国に分布するニュータウンの中から1～2ヶ所を選定し、過去の土地利用や地形要因がニュータウン内の土壌炭素蓄積量に与える影響を多点調査により評価し、地域全体を評価するのに必要な調査手法を開発する。開発された方法を用いて全国のニュータウンの中から数ヶ所を選定し、開発地と森林、農地の平均炭素蓄積量をESM 法によって比較し、これらの土地利用変化係数を算出する。この結果をサブテーマ4に受け渡し成果につなげる。

サブテーマ4	土地利用変化時の土壌炭素量変化に関するインベントリ算定の実装に関する研究
サブテーマリーダー /所属機関	梅宮知佐／地球環境戦略研究機関
目標	各国の土壌炭素変動量に関連する報告方法について調査・整理する。また、土地利用変化の有無における整合性を図るのに必要なインベントリ報告上の課題を特定し、解決策のオプションを提示する。各国の専門家らにヒアリング調査を行い、6 土地利用区分における課題を明らかにする。各サブテーマと協力し、統合的なインベントリ算定手法を提示する。活動量把握手法を土地被覆変化による把握手法に転換する可能性も視野に入れ、適切なNIR 作成に向けた解決方法のオプションを提示する。

サブテーマ5	リモートセンシングによる土地利用変化の分類に関する研究
サブテーマリーダー /所属機関	鷹尾元／森林研究・整備機構
目標	森林と開発地を中心に土地利用変化があった点を抽出する。委託業者を含めた4者において、これらを人工知能に学習させるために必要な手順を協議し、データセットを構築する。これらのデータセットを人工知能に学習させ、森林と開発地を判別する学習器を作成する。森林と開発地以外の土地利用変化についても適用可能性を評価する。これらの学習器の評価を行い、有効と判断された場合は、サブテーマ4に結果を受け渡して、統合的な算定手法に組み込む。

4. 研究開発内容

気候変動枠組み条約事務局に提出する国別温室効果ガスインベントリ報告書（NIR）においては、土地利用変化があった土地については20年間、土地利用変化に伴う土壌炭素の変動量を報告する。本研究では土地利用変化があった場合のCO₂排出量が多いと推定される開発地と森林・農地間の土地利用変化が起きたときの土壌炭素量の変化を中心に、すべての土地利用セクター間の変化係数について扱う。

気候、土壌特性、植生などの自然環境条件を反映する生態系モデルを適用可能な土地利用変化に関しては、現地調査とプロセスモデルの組み合わせによって変化係数を提供する。一方で大規模な表土処理が行われる開発地については、モデル地域における土地利用ごとの平均炭素蓄積量をEquivalent Soil Mass法により評価し、これらの比較によって変化係数を算出する。また、活動量が正確に把握されていない開発地とその他土地利用との土地利用変化量について、衛星画像等から人工知能によって判別する技術を開発し、新たな活動量把握手法として提案する。これらの変化係数と活動量の関係を国家インベントリ報告に反映する手法を検討し、次世代の算定方法を提案する。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

農地－草地間を中心に、農地－森林間でもデータ数の少ないカテゴリー（茶園・草地）の調査地点において土壌調査を行い、ESM法による土壌炭素蓄積量の比較を行った。土壌炭素蓄積量の比較は最新のガイドライン（2019年改訂版）に従い、ペアサンプリングとESM法を用いて評価した。果樹園→森林ではリンゴ（0.72）とミカン（1.28）で係数が異なること、茶園→森林（0.38）、草地→森林（0.83）、農地→草地（0.97）、草地→農地（1.45）、森林→草地（1.00）、森林→茶園（1.56）となった。また、これらの変化をモデルで評価し、さらに、森林と農地間の土地利用変化係数について、経過年数に応じて直線的な変化を示していることを利用して、土地利用変化の際の変化係数として、農地から森林への変化係数は40年で1.21、森林から農地への変化係数は40年で0.77を提案した。

開発地に関わる土地利用変化係数に関しては、当初IPCCの推奨するペアサンプリングによる比較を検討していたが、調査を進めた結果、土壌炭素蓄積量が周囲の農地や森林とは関係がなく、主として基盤素材の地質や表土の処理方法によって変動することが明らかになった。このことから研究計画を変更し、開発地については全国の平均土壌炭素蓄積量を算出し、変化係数は開発地と農地や森林の平均土壌炭素蓄積量同士の比較によって算出する従来の方法を適用とすることとした。開発地は宅地と道路が一体的に整備されるニュータウンと産業団地を対象に調査手法を開発するとともに、全国30地点以上で土壌調査を実施した。これらの結果と森林および農地から開発地に転用された地点の位置情報等を参考に、開発地における造成直後の炭素量の初期値を20.8tC/ha（森林からの転用）および22.9 tC/ha（農地からの転用）と算出した。既往資料や空中写真等により植生回復による土壌炭素変化量を初期値に加算し、開発地の平均炭素蓄積量を30tC/haと算出した。

主要先進国及び途上国を含めた各国の土壌炭素変動量に関する報告方法について調査・整理のうえ、専門家ヒアリングやオンラインでの質問票調査を経てインベントリ報告上の課題を特定し、それぞれの国の状況に応じて望ましい解決策を複数のオプションとして提示した。日本のインベントリについて、各サブテーマの成果を統合し、日本インベントリに反映する算定手法を開発した。環境省の温室効果ガス排出量算定検討会に提案の結果、令和4年度に作成されるGHGガスインベントリ（令和5年4月提出）から本課題で開発した算定方法を適用する方針が了承された。これにより、日本の土地利用、土地利用変化及び林業分野の排出・吸収量の算定結果の精度が、300～700万t-CO₂/年程度（同分野の純吸収量の約10%前後）向上する見込みとなった。FAOと共同で、土壌関連のインベントリ報告の実態と課題に基づき報告強化に向けた対応策のオプションを提示し、公開した。

開発地とその他土地利用との土地利用変化量を活動量として把握するために、入手可能な衛星画像を用い深層学習による画像分類により、開発地の中の土地被覆の細区分まで行う土地利用区分手法を開発し、それに基づく吸収排出量推定方法を提案した。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

環境省の令和3年度温室効果ガス排出量算定方法検討会の森林等の吸収源分科会において、本研究成果である、新たな土地利用変化係数、土壌炭素量、国独自の遷移期間を導入した土地利用変化に伴う排出・吸収量の試算結果を提示した。同分科会で、現行の京都議定書に基づく報告が終了し、新たなパ

リ協定に基づく報告が開始される、令和4年度の温室効果ガスインベントリの作成から、上記の改善を踏まえた方法論の適用を行う方針について了承が得られ、温室効果ガス排出量算定方法検討会（親検討会）への答申作成に貢献した（同検討会資料2-6のp9に、本研究成果をGHGインベントリに適用する方針が明記されている）。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

1) 森林、農地、草地間の土地利用変化に伴う土壌炭素変化量の算定方法の提供

日本では、各土地利用が存在している地形の特徴が異なるため、各土地利用の平均炭素ストック量同士を比較するTier2の方法を使用すると、常識的ではない炭素変化量の算定となってしまう欠点があるものの、科学的な知見が十分でないことから、従来、森林・農地ともに深さ30cmまでの平均炭素蓄積量を比較してインベントリ報告をおこなっていた。しかし、前期プロジェクトの成果によって、土地利用変化にともなって圧密・膨潤が起こるため、それぞれの深さ30cmまでの炭素量を比較することは不適當であることが分かった。そこで、科学ジャーナルへの掲載成果を踏まえて、土地利用変化を評価する標準法としてESM法の使用を我が国の温室効果ガス算定検討会に提案し、令和4年度に作成される温室効果ガスインベントリ（令和5年4月提出）から適用する方針が了承されている。

2) 開発地の平均炭素蓄積量の提供

日本における開発地の土壌炭素蓄積量はデータがないため暫定値として全土地利用の平均が使用されていた。本研究では開発地の土壌炭素量調査を行い、その他の実態調査に基づく諸数値から開発地の平均土壌炭素蓄積量を初めて提供した。これにより、近年土地利用変化の大半を占めている農地および森林から開発地に変化した際の土壌炭素蓄積量変化が実態に見合った数値に改善される見込みである。

3) 土地利用、土地利用変化及び林業分野の排出・吸収量の算定結果の精度向上

1) および2)の数値改定により、インベントリ報告値の精緻化に貢献する。具体的には、土地利用、土地利用変化及び林業分野の排出・吸収量の算定結果の精度が、300~700万t-CO₂/年程度（同分野の純吸収量の約10%前後）向上する見込みである。

4) IPCC への研究成果の反映

IPCC インベントリタスクフォース（TFI）は2019年に、2006年IPCCガイドラインの2019年改良を作成し、当研究プロジェクトの参画者が上記1)における成果を反映させている。本研究によって得られた結果は、このガイドラインの改訂部分を反映した最初の適用事例になるため、次期改訂の際に良好事例として取り上げられる可能性が高い。即ち、我が国の知見がIPCCの報告書において、最新の科学的知見として提供されることにより、世界の気候変動対策に貢献する。

5-3. 研究目標の達成状況

サブテーマ1および2において、最新のIPCCガイドラインに基づいた評価方法により森林・農地・草地間の土地利用変化時の土壌炭素蓄積量の変化係数を現地調査とモデルによって算出し提供した。サブテーマ3において、IPCCの推奨する方法に問題があることを早期に発見し、適切な研究計画に変更することにより、サブテーマ1およびサブテーマ2の協力を得ながら変化係数に必要な開発地の平均土壌炭素蓄積量を実測値に基づき日本で初めて算出し、これを算定方法の数値として提供した。サブテーマ5において、入手可能な衛星画像を用い深層学習による画像分類により、開発地の中の土地被覆の細区分まで行う土地利用区分手法を開発し、それに基づく吸収排出量推定方法を提案した。サブテーマ4において、各サブテーマから得られた成果を反映しながら統合的に日本インベントリに反映する算定手法を開発し、これらを環境省の温室効果ガス排出量算定検討会に提案した結果、令和4年度に作成されるGHGガスインベントリ（令和5年4月提出）から本課題で開発した次世代の算定方法を適用する方針が了承された。これにより、日本の土地利用、土地利用変化及び林業分野の排出・吸収量の算定結果の精度

が、300～700万t-CO₂/年程度（同分野の純吸収量の約10%前後）向上する見込みである。次世代の算定方法を提案するだけでなく、算定への実装が内定していることから、全体の研究目標は想定以上に達成されたと考えられる。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

2件

<主な査読付き論文>

- 1) Ishizuka, S., Hashimoto, S., Kaneko, S., Tsuruta, K., Kida, K., Aizawa, S., Hashimoto, T., Ito, E., Umemura, M., Shinomiya, Y., Morishita, T., Noguchi, K., Ono, K., Okamoto, T., Mizoguchi, T., Torii, A., Sakai, H., Inagaki, Y., Shichi, K., Toriyama, J., Sakai, Y., Inagaki, M., Shirato, Y., Obara, H., Kohyama, K., Takata, Y., Katayanagi, N., Kanda, T., Inoue, H., Kusaba, T., 2021. Soil carbon stock changes due to afforestation in Japan by the paired sampling method on an equivalent mass basis. *Biogeochemistry* 153, 263-281. (IF:4.825) ・
- 2) Koga, N., Shimoda, S., Shirato, Y., Kusaba, T., Shima, T., Niimi, H., Yamane, T., Wakabayashi, K., Niwa, K., Kohyama, K., Obara, H., Takata, Y., Kanda, T., Inoue, H., Ishizuka, S., Kaneko, S., Tsuruta, K., Hashimoto, S., Shinomiya, Y., Aizawa, S., Ito, E., Hashimoto, T., Morishita, T., Noguchi, K., Ono, K., Katayanagi, N., Atsumi, K., 2020. Assessing changes in soil carbon stocks after land use conversion from forest land to agricultural land in Japan. *Geoderma* 377, 114487. (IF:4.336)

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	1件
その他誌上発表（査読なし）	1件
口頭発表（学会等）	4件
「国民との科学・技術対話」の実施	0件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	0件

7. 国際共同研究等の状況

2021年4月から2022年3月、国連食糧農業機関（FAO）と「インベントリにおける土壌炭素変化量に関する報告実態及び課題の解明」について共同研究を実施した。カウンターパートは、FAOの気候変動オフィサーであるMirella SALVATORE氏を中心としたチームである。同氏及びそのチームは、UNFCCCの下、途上国がインベントリを含む報告書を作成、定期的に報告するための国際的支援・協力を長年実施しており、当該分野で世界をリードしている。サブテーマ4では、特に途上国における報告の実態と課

題を把握することを目的に共同でオンライン調査を実施し、その結果概要を「Understanding countries' status and challenges for the estimation of carbon stock changes from mineral soils in national greenhouse gas inventories: Preliminary survey findings」と題したレポートとして出版した。同チームの世界的なネットワークによって、オンライン調査には200名を超える各国の専門家から回答を得た。また本調査に基づいた提案を含めて、今後途上国の報告強化を前進させるためにはFAOの貢献は不可欠であり、本共同研究はその貢献の検討を後押しすると考えられる。更に、IPCC インベントリータスクフォース (TFI) 技術支援ユニットのヘッドであるSandro Federici氏は、FAOと出版した上記レポートにレビューとして貢献した。IPCCガイドラインの次期改訂作業を担う同ユニットに有用な情報を提供したと言える。

8. 研究者略歴

研究代表者

石塚 成宏

東京大学農学研究科修士課程修了、農学博士、現在、森林研究・整備機構・森林総合研究所
立地環境研究領域土壌資源研究室長

研究分担者

1) 白戸 康人

東北大学大学院農学研究科修士課程修了、農学博士、現在、農研機構農業環境変動研究センター温暖化研究統括監

2) 外崎 公知

北海道大学大学院農学研究科修士課程修了、博士（工学）、現在、公益財団法人都市緑化機構 都市緑化技術研究所研究員

3) 梅宮 知佐

早稲田大学人間科学学術院博士後期課程修了、現在、地球環境戦略研究機関 気候変動とエネルギー領域主任研究員

4) 鷹尾 元

東京大学、農学研究科修士課程修了、農学博士、現在、森林総合研究所 森林管理領域長

II. 成果の詳細

II-1 森林に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化

国立研究開発法人森林研究・整備機構

森林総合研究所	立地環境研究領域	土壌資源研究室	石塚 成宏
森林総合研究所	立地環境研究領域	土壌資源研究室	橋本 昌司
森林総合研究所	東北支所	森林環境研究グループ	森下 智陽
森林総合研究所	関西支所	森林環境研究グループ	岡本 透
〈研究協力者〉			
森林総合研究所	立地環境研究領域	土壌資源研究室	木田 仁廣

〔要旨〕

森林・草地間および森林・茶園間での土地利用変化に伴う土壌炭素変化係数を取得するため13地点において、土壌調査および土壌試料採取を行った。これらの分析結果をもとに、ESM法（単位面積当たりの農地の土壌重をベースとする）による農地、草地および森林の土壌炭素量の比較を行った。その結果、茶園から森林へ、リンゴ園から森林へ、ミカン園から森林へ、草地から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素変化係数の平均値は、それぞれ0.38、0.72、1.28、0.83であった。土壌炭素変化係数のばらつきについて、CENTURYモデルを用いて評価したところ、草地から森林の動態はモデルで再現できる範囲内でのばらつきであることが確認された。他方、茶園から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素変化係数は、現状のところモデルでは再現することができず、モデル改良が今後の研究課題として残る者となった。これまでの結果を利用して、農地から森林への土地利用変化時の土壌炭素変化係数を40年で1.21倍と算出し、サブテーマ4に受け渡した。さらに、IPCCの推奨する開発地と周辺森林の土壌炭素蓄積量を比較する手法に問題があることを発見し、年度計画を変更した後、開発地の平均土壌炭素蓄積量を算出するために必要な、森林から開発地への土地利用変化点の抽出法を開発し、その結果から得られた地質情報と地形情報をサブテーマ3に受け渡し、サブテーマ3の成果に貢献した。

1. 研究開発目的

1) 我が国の土地利用変化に伴う土壌炭素変動量を、IPCC2019改訂版ガイドラインに則した形で評価できるようにする。科学的知見に基づく変化係数の取得、それを用いた土壌炭素の変動量算定手法を開発する。これにより、気候変動枠組条約事務局に提出する国別温室効果ガスインベントリ報告書（NIR）の精度向上に貢献できる。

2) IPCC2019改訂版ガイドラインでは6つの土地区分（森林・農地・草地・湿地・開発地・その他）に分け、最終的には土地利用全体を統合化してGHG排出量について報告することを求めている。2-1601では森林・農地間での土地利用変化に限定していたが、本研究により6つの土地利用区分に拡張され、土地利用セクター全体に関する方法が完成する。

2. 研究目標

森林-草地間を中心に、森林-農地間でもデータ数の少ないカテゴリーの調査地点において土壌調査を行い、Equivalent Soil Mass法（以下ESM法）による土壌炭素蓄積量の比較を行う。ESM法による土地利用変化係数を算出するとともに、モデルによる評価を行い、両者をサブテーマ4に受け渡し成果につなげる。また、サブテーマ3に必要な、開発地周辺の森林における土壌炭素量調査をおこなう。

3. 研究開発内容

3-1. 現地調査による土地利用変化係数の算出

林野庁森林吸収源インベントリ情報整備事業「衛星画像等による土地利用変化状況調査」によって得られたARDポイントデータと国土地理院航空写真データベース、さらにGoogle Earth（Google社）のタイムライン機能および国土地理院の公開されている航空・衛星写真データを併用することにより、農

地（主として茶園および果樹園）または草地から森林への土地利用変化（以下、AR）および反対の土地利用変化（以下、D）が起こった場所を選定し、これらの地点に直接赴き本研究に合致したサンプリングに適しているかの判定を行った。Google Earthによる立体表示により同一斜面上にあるかどうかの検証を加え、下記の条件（a）の適合率を上昇させた。適不適の判断基準は、（a）隣接している農地または草地と林地が地質や母材などが同一と考えられるか、（b）人為的な土地改変が大きくなり、耕作等の人間活動や植生の回復の影響のみが土壤炭素量に影響している状況と考えられるか、（c）森林側の林齢が40年生以下程度と見込まれるかどうか、などとした。これらの条件を満たし、現地踏査の上サンプリングに適したと判定された地点のうち、所有者の承諾や法規制による調査許可を得られた地点で従来法およびESM法により評価ができるように土壤サンプルを採取した。隣接する農地または草地と林地それぞれに3箇所ずつの土壤断面（深さ40cm程度まで）を作成し、それぞれの土壤断面の左右から、土壤層位ごとに定体積土壤試料（仮比重測定用100mL円筒サンプル）および炭素濃度測定用サンプルを採取した。また、林地においては、地上部バイオマス量をおみとおし（日本森林技術協会製）および樹高測定器（Vertex等）によって測定した。これらの林地および農地および草地の過去の土地利用履歴（耕作作物の種類や堆肥や化学肥料の施肥量、土地利用の遍歴等）を土地所有者への聞き取り調査にもとづき記録した。

採取した堆積有機物試料と土壤試料を実験室に持ち帰り、通常の前処理（篩別、根・礫の除去、微粉砕処理）を行った後、全炭素濃度分析計（VarioMAX、エレメンタル社）で炭素濃度を測定した。

定体積土壤試料は実験室において105℃で乾燥して重量を計測した後、水洗により礫と根を分取し、その後これらの乾燥重量を測定した。全体の重量から礫と根の重量を減算して算出した重量を用いて仮比重（単位体積当たりの重量）に換算し、それに面積あたりの土壤体積を乗じることで面積あたりの細土量を算出した。

これらのデータから、以下の式を用いて土壤断面あたりの炭素蓄積量を計算した。

$$\text{土壤炭素量 (g m}^{-2}\text{)} = \sum \text{m}^2\text{あたり細土量 (kg m}^{-2}\text{)} \times \text{炭素濃度 (g kg}^{-1}\text{)}$$

（ Σ は層位毎に計算し、最後に全層位の炭素量を合計することを示す）

$$\text{ここで、m}^2\text{あたり細土量 (kg m}^{-2}\text{)} = \text{m}^2\text{あたり体積 (m}^3\text{ m}^{-2}\text{)} \times \text{仮比重 (kg m}^{-3}\text{)}$$

林地と農地および草地の炭素量は、IPCCの推奨する土壤重量が同じになるように計算する方法（ESM法）を使用した。ここで用いたESM法では、農地または草地の6地点の深さ30cmまでの細土量の平均値と同じになる林地の深さを計算した。具体的には、農地の30cm深さまでの細土量を計算し、農地または草地ならびに林地の各地点それぞれにその細土量になるのに必要な深さを計算し、その深さまでの炭素量を計算した。通常、農地・草地よりも林地の方が仮比重は小さいので、林地では深さ30cmよりも深いところまでの炭素量を計算することになる。

調査候補は、お茶のブランドがある地域を中心に、公設牧場、果樹の名産地などを中心に調べた。これらのうち、土地利用変化が多いお茶の産地5地域（狭山茶：埼玉県、猿島茶：茨城県、静岡茶：静岡県、知覧茶：鹿児島県、世知原茶：長崎県、伊勢茶：三重県）を調査対象とした。

3-2. モデルによる評価

上記現地調査結果に対し、土壤炭素動態モデルCENTURYを適用し、土壤炭素蓄積量の時間的な変化予測を行った。CENTURYの概要を図1.1に示す。土壤の性質や気象条件に基づきその環境下における炭素の動態をシミュレートするモデルである。オリジナルのCENTURYモデルは、植物体の成長を含むモデルであるが、ソースコードから土壤炭素に関わる部分だけを抜き出し、Rプログラムでモデルを構築した。CENTURYモデルは土壤中の炭素を、分解が速いActive、分解が遅いPassive、その中間の分解速度のSlowの3つのプール（コンパートメント）に分配し、シミュレートする。今回のシミュレーションでは、土壤への有機物投入量を既存の文献や聞き取り調査を元に設定した（図1.2）。土壤に供給される有機物の種類は、葉、枝、幹、細根、粗根、有機質肥料や敷き藁などの6つに区分されており、それぞれの区分に対して炭素含量、分解に関わるCN比とリグニン含量を設定する。土壤の性質は現地調査で採取した土壤を分析して設定した。また、有機物を貯留しやすい黒ボク土に対応するため、Takata et al.

(2011)¹⁾を参考に黒ボク土の判定基準となるリン酸吸収係数に応じて土壌有機物の分解が抑制されるよう補正した。気象条件はメッシュ平年値2010(気象庁 2012)²⁾の調査地が位置するメッシュの値を用いた。土壌へ供給される有機物の種類ごとの供給量とCN比とリグニン含量は表X(a:森林、b:草地、c:茶園)に示した文献と現地調査における聞き取り情報に基づき地点毎に設定した。

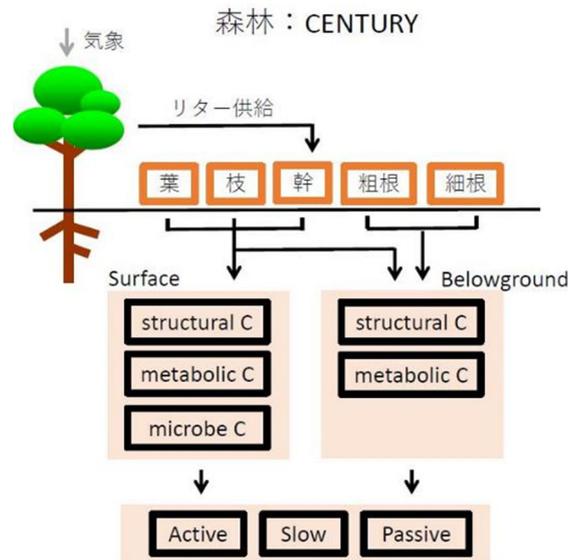


図1.1. CENTURYモデルの炭素動態フローの概要

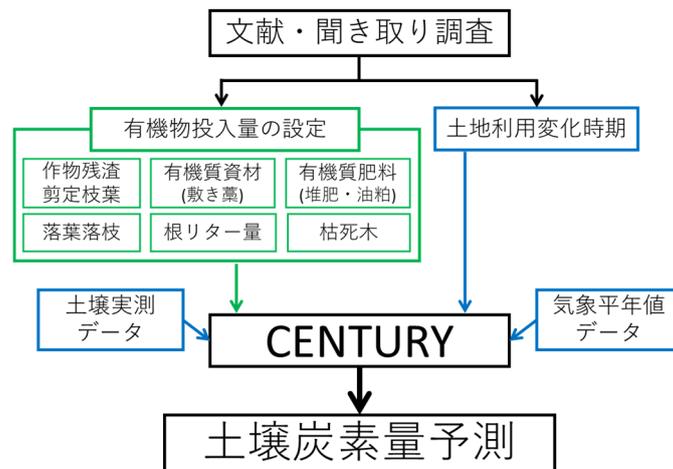


図1.2. CENTURYモデルを用いたシミュレーションにおけるパラメータの設定概要

森林の有機物供給の設定については、可能であれば樹種ごとあるいは針葉樹と広葉樹毎に区分し、以下の通り行った(表1.1参照)。葉および枝の土壌への供給の設定は、壮齡林の葉の炭素供給量は齋藤(1981)³⁾あるいは鈴木ら(2003)⁴⁾の文献値に日本国温室効果ガスインベントリ報告書(温室効果ガスインベントリオフィス 2020)⁵⁾の炭素含有率(針葉樹0.51・広葉樹0.48)を乗じることで設定した。葉および枝からの有機物供給量はウェブページの“森林づくり・木材利用の二酸化炭素 吸収・固定量の「見える化」”(林野庁 2016)⁶⁾の材積成長近似式を用い、森林の成長段階に応じて供給量を補正した。また、供給量の季節変化は井川原・中川(2002)⁷⁾および古野・齋藤(1981)⁸⁾を参考とした。CN比は渡邊(2008)⁹⁾、リグニン含量は菊池(1968)¹⁰⁾や坂井(1985)¹¹⁾の木質部の値を適用した。幹による炭素投入量はウェブページの“森林づくり・木材利用の二酸化炭素 吸収・固定量の「見える化」”の幹材積近似曲線による林齡ごとの幹材積量にChiba(1998)¹²⁾の幹枝リター率を乗じた値

から枝リター量を差し引いた値とした。幹のCN比は渡邊ら（2008）を参考にし、リグニン含量は菊池（1968）や坂井（1985）を参考とした。細根による炭素供給量はNoguchi et al.（2011）¹³⁾のヒノキの細根枯死量に日本国温室効果ガスインベントリの炭素含有率を乗じて設定した。参考となる文献が他に見つけれなかったため広葉樹も同じ値とした。細根のCN比はHishi & Takeda.（2005）¹⁴⁾、リグニン含量は菊池（1968）や坂井（1985）を参考とした。粗根による炭素供給量はウェブページの“森林づくり・木材利用の二酸化炭素 吸収・固定量の「見える化」”の幹材積近似曲線による林齢ごとの幹材積量から日本国ガスインベントリ報告書の地上部に対する地下部の比率を基に部位別の材積量を算出し、Chiba（1998）のRoot litterfall rateを乗じた値とした。CN比は渡邊ら（2008）、リグニン含量は菊池（1968）や坂井（1985）を参考とした。

表1.1. 森林の有機物供給の設定資料

供給物	参考資料
葉	齋藤（1981）、鈴木（2003）、温室効果ガスインベントリオフィス（2020）、林野庁（2016）、渡邊（2008）、井川原（2002）、古野（1981）、菊池（1968）、坂井（1985）
枝	齋藤（1981）、鈴木（2003）、温室効果ガスインベントリオフィス（2020）、林野庁（2016）、渡邊（2008）、井川原（2002）、古野（1981）、菊池（1968）、坂井（1985）
幹	Chiba（1998）、温室効果ガスインベントリオフィス（2020）、菊池（1968）、坂井（1985）
細根	Noguchi（2011）、Hishi（2005）、温室効果ガスインベントリオフィス（2020）、菊池（1968）、坂井（1985）
粗根	Chiba（1998）、渡邊（2008）、温室効果ガスインベントリオフィス（2020）、菊池（1968）、坂井（1985）
堆肥	供給なし
有機肥料	供給なし

草地における有機物供給の設定は以下のとおり行った（表1.2参照）。牧草は今回の調査地で用いられている寒地型永年牧草を想定し、有機物の供給時期は1番草収穫（6月）、2番草収穫（9月）、冬季の枯死（12月）に発生すると設定した。牧草の地上部はCENTURYの区分における葉として扱い、収穫が行われる場合は2番草まで収穫することとした。地上部の年間炭素供給量は三木（1993）¹⁵⁾のチモシーとオーチャードグラスの平均値とした。CN比は三木（1993）のオーチャードグラスの値とした。リグニン含量は原（2004）¹⁶⁾により開花期のリグニンは出穂始の約2倍という報告がなされていることを考慮し、Kondo et al.（1987）¹⁷⁾のオーチャードグラスの出穂始と出穂揃での平均値3.8%の2倍とした。牧草の地下部はすべて細根として扱い、総炭素供給量は三木（1993）チモシーとオーチャードグラスの平均値とした。CN比は三木（1993）のオーチャードグラスの値、リグニン含量は酒井・広田（1990）¹⁸⁾のオーチャードグラスの値を用いた。地下部の投入時期について、根のターンオーバーは山本ら（1994）¹⁹⁾から1年とした。収穫後に新しい茎が生える毎に新根が発生し、収穫された茎に対応する古い根が枯死し土壤に供給されると設定した。堆肥による有機物供給については、聞き取り情報が都道府県の施肥基準（北海道農政部 2015²⁰⁾；鳥取県 2011²¹⁾）を基に設定した。堆肥のCN比や炭素含量は各県の技術情報などを参考にし、リグニン含量は小柳ら（2011）²²⁾の乳牛糞堆肥の値を用いた。

表1.2. 草地の有機物供給の設定資料

供給物	参考資料
葉	三木（1993）、原（2004）、Kondo（1987）
枝	供給なし
幹	供給なし
細根	酒井（1990）、三木（1993）、山本（1994）
粗根	供給なし
堆肥	北海道農政部（2015）、鳥取県（2011）、小柳（2011）
有機肥料	供給なし

茶園における有機物供給の設定は以下のとおり行った（表1.3参照）。葉と枝の有機物供給量については南雲・森田（2018）²³⁾の樹齢に応じた剪枝・整枝量を渡部（2005）²⁴⁾の葉・枝・幹の重量割合で葉と枝に分配した。CN比は南雲・森田（2018）、リグニン含量はBernal et al.（2017）²⁵⁾のTea wasteの値を用いた。幹の有機物供給量は無しと設定した。細根の有機物供給については、年間の細根の枯死による供給量は森林で用いたNoguchi et al.（2011）の細根投入量と同値とし、3年に1回の深耕を仮定して深耕による細根の供給を山下（1993）²⁶⁾の無断根区の畝間細根量を3で割った値とし、枯死と深耕による細根供給量を足して年間の有機物供給量とした。細根量は一定でターンオーバーされ（青野ら 1980²⁷⁾、山下 1984²⁸⁾）、断根後1か月程度で再生すると報告されている（山下 1993）。細根のCN比は南雲・森田（2018）の枝と同値とし、リグニン含量はBernal et al.（2017）のTea wasteの値を用いた。粗根による有機物供給については、3年に1回深耕により断根が行われると仮定し、山下（1993）の無断根処理区の畝間粗根量を3で割った値とした。CN比は南雲（2018）の枝と同値とし、リグニン含量はBernal et al.（2017）のTea wasteの値を用いた。堆肥による有機物の供給設定については、聞き取り情報か都道府県の施肥基準（埼玉県 2018²⁹⁾；長崎県 2019³⁰⁾；鹿児島県 2020³¹⁾）で堆肥の供給量を設定した。CN比や炭素含量は鳥取県（2011）内の全国平均値（乳牛）の値を用いた。リグニン含量は小柳ら（2011）の乳牛糞堆肥を参考とした。油粕肥料による有機物の供給設定について、春と秋の窒素肥料として菜種油粕肥料（N:P:K=12:6:3）（金澤 2009）³²⁾が利用される場合、都道府県の施肥基準の油粕投入量のN量と内村・三浦（2004）³³⁾の油粕肥料のCN比（7.1）から炭素量を算出した。菜種油粕のリグニン含量は青木（2014）³⁴⁾の値を用いた。敷き藁による有機物供給については、鹿児島県（2020）の茶園施肥基準を参考に幼木園の敷草投入量を2~3t/10aとし、成木園では畝間の広さに合わせて、松元（1989）³⁵⁾を参考として成木園は幼木園の20%とした。鹿児島県（2020）に従い、黒ボク土では過湿を防ぐため稲わらの量を少なくするということから調査地が黒ボク土の場合は上記の半分とした。稲わらの炭素含量、CN比は三枝（1999）³⁶⁾を参考とし、リグニン含量は永西ら（1995）³⁷⁾の値を用いた。

表1.3. 茶園の有機物供給の設定資料

供給物	参考資料
葉	Bernal et al. (2017)、南雲 (2018)、渡部 (2005)
枝	Bernal et al. (2017)、南雲 (2018)、渡部 (2005)
幹	供給なし
細根	青野 (1980)、Bernal et al. (2017)、南雲 (2018)、Noguchi (2011)、山下 (1984)、山下 (1993)
粗根	Bernal et al. (2017)、南雲 (2018)、山下 (1993)
堆肥	鹿児島県 (2020)、長崎県 (2019)、小柳 (2011)、埼玉県 (2018)、鳥取県 (2011)
有機肥料	青木 (2014)、鹿児島県 (2020)、金澤 (2009)、長崎県 (2019)、埼玉県 (2018)、内村 (2004)
稲わらマルチ	鹿児島県 (2020)、松元 (1989)、三枝 (1999)、永西 (1995)

聞き取りが実施できなかった草地・茶園については一般的な施肥・施業管理から想定される有機物の投入を設定した。

土地利用変化の影響評価を行うモデルシミュレーションは、モデルの初期化（スピニアップ）を行ってから実行した。初期化では、初期化と土地利用変化後のシミュレーションで気象条件は共通の条件を用いた。土壌条件は対照地の分析値を用いた。土地利用変化直前のシミュレーションの初期値は対照地の炭素蓄積量とし、3000年のスピニアップ計算を行い、スピニアップ後の土壌炭素蓄積量と初期値との差が5%以内に収まるまでスピニアップ期間の有機物供給量を補正し、初期化を行った。

3-3. 土地利用変化係数の算出

土壌調査の結果による土壌炭素蓄積量の比較から、国家インベントリ報告の算定に必要な土地利用変化係数を算出するため、土地利用変化後の経過年数と、農地・草地／森林の土壌炭素蓄積量の比の関係を解析し、これらの関係から土地利用変化時の算定方法の根拠としてサブテーマ4に受け渡す。

3-4. 森林から開発地への土地利用変化地点の抽出法の開発

初年度の開発地の調査により、開発地の周辺森林と開発地の土壌炭素蓄積量に関係が見られないことが想定された。これはIPCCの推奨する、「ESM法を利用する場合はすべての土地利用についてESM法を適用すべき」というガイダンスは適当ではないことを示している。このため、最終年度の研究計画を変更し、開発地には従来から使用されている各土地利用の平均炭素蓄積量同士を比較して係数を算出する方法を適用することとし、開発地における平均炭素蓄積量を算出するために必要な森林から開発地への土地利用変化点の抽出法を開発し、この位置情報から地質情報および地形情報をサブテーマ3に提供することとした。

4. 結果及び考察

4-1. 現地調査による土地利用変化係数の算出

土地利用変化ポイントをPC上で選定し、これらの地点に直接赴き本研究で行うサンプリングに適しているかの判定を行った。

茶園から森林への変化点では15カ所の下見調査を行った。その結果、12カ所が常緑針葉樹の植林であり、茶園の転換は積極的な人為が認められた。このうち調査を行えたのは3カ所であり、いずれも茶園側の土壌炭素蓄積量の方が森林側の土壌炭素蓄積量よりも大きく、その比率はESM法で平均0.38となった。

果樹園から森林への変化点は27カ所の下見調査を行った。16カ所が常緑針葉樹の植林、7カ所が落葉広葉樹林への転換、残りの4カ所が常緑広葉樹と針広混交林への転換であった。果樹園は大きく分けてリンゴとミカンに分かれており、リンゴは平地に多いのに対し、ミカンは急斜面上に多かった。土壌炭素蓄積量は、リンゴ園の土壌炭素蓄積量は森林の土壌炭素蓄積量よりも多いのに対し、ミカン園の土

壤炭素蓄積量は森林の土壌炭素蓄積量よりも少なく、それぞれ比率は0.72および1.28であった。リンゴは草生栽培（下層植生を保護）なのに対し、ミカンは清耕栽培（下層植生を除草）であることが多く、これらの影響が反映された結果と考えられた。

草地から森林への変化点は12カ所の下見調査を行った。北海道が多く、9カ所がカラマツ林への転換であった。新型コロナウイルス感染症への対応によって2カ所しか調査を行うことができなかった。2-1602での調査地2カ所を加えて解析した結果、草地の土壌炭素蓄積量は森林の土壌炭素蓄積量よりも多く、その比率は平均で0.83であった。

以上をまとめると、茶園、草地、リンゴ園では森林に転換すると土壌炭素蓄積量は減少し、ミカン園を森林に転換すると土壌炭素蓄積量は増加する結果が得られた。また、茶園土壌は大量の土壌炭素を蓄積しており、これらを森林に転換すると、土壌炭素蓄積量は大きく減少することが明らかになった。

4-2. モデルによる評価

図1.3に森林から草地（D）、草地から森林（AR）のモデル適用結果を示す。土地利用変化（D）後に土壌炭素蓄積量が増加したHKD-D003ではモデル予測値は土地利用変化後に減少を続け、実測値を適切に予測していない。しかしながらその他の地点では土地利用変化後にカーブを描きながら土壌炭素蓄積量が減少するのが良好に再現されている（KYS-AR05は微増）。土地利用変化後の実測値と計算値を比較した散布図を図1.3（b）に示す。概ね1:1の線に乗っているのがわかる。

一方、森林から茶園（D）、茶園から森林（AR）の結果では、多くの地点でモデルの再現ができていない（図1.4）。いくつかのサイトにおいては（例えば、ARのKNT-AR007やDのKYS-D003）、土地利用変化後の現在の土壌炭素蓄積量が概ね再現されているが、土壌炭素蓄積量が森林から茶園への土地利用変化後に大きく増加するKNT-D002やKYS-D002では、モデルで土壌炭素の大きな増加を再現し切れていない。

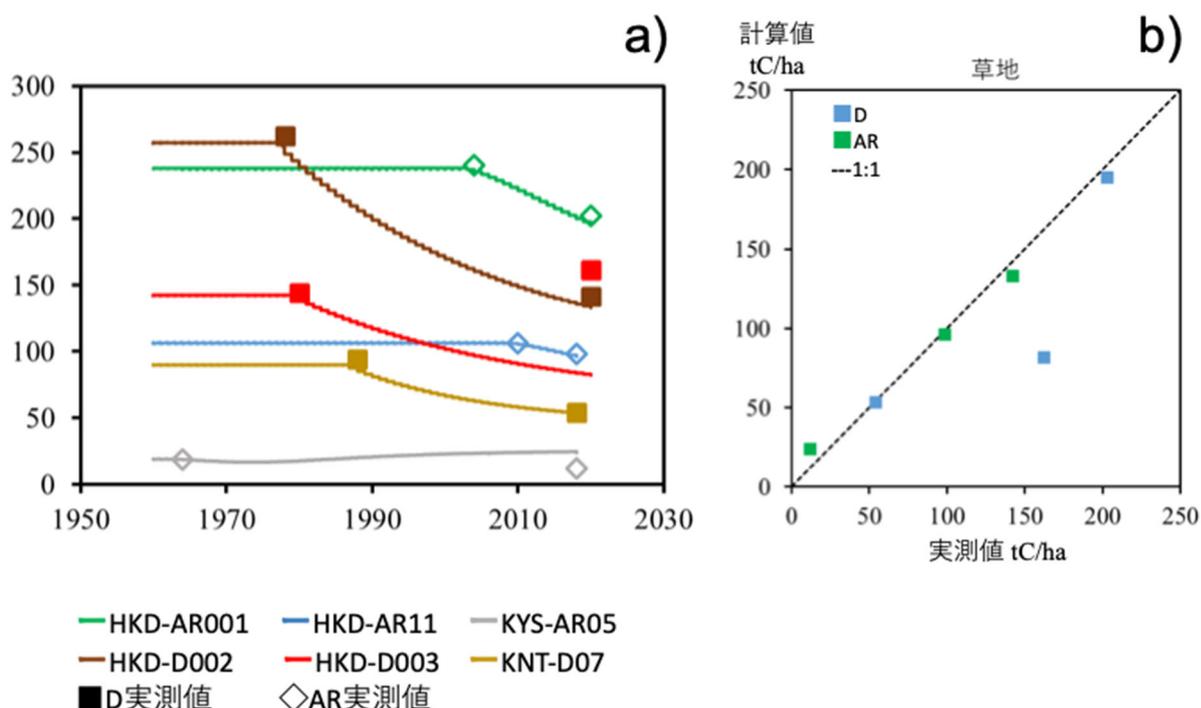


図1.3 森林⇄草地間のモデル適用結果。土地利用変化から現在までのモデル推定値（a）。土地利用変化後の値の実測値と計算値を散布図にプロット（b）。

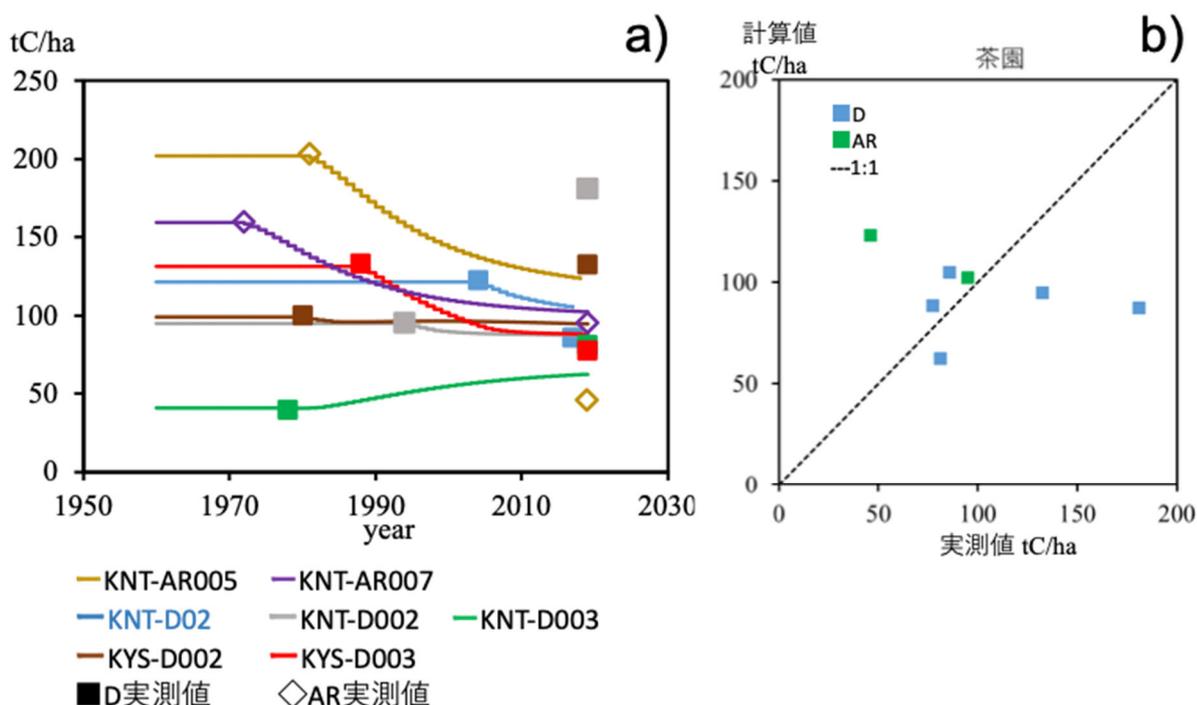


図1.4 森林⇄茶園間のモデル適用結果。土地利用変化から現在までのモデル推定値 (a)。土地利用変化後の値の実測値と計算値を散布図にプロット (b)。

今回のモデリングにおいては、草地における土地利用変化後の土壤炭素蓄積量を良好に再現することができた。土地利用変化後の有機物投入量など管理条件を入力することで、各調査地点の土壤炭素蓄積量変化をモデルを用いて捉えることができた。また、モデルの推定による土地利用後の土壤炭素蓄積量の変化は直線ではなく下に凸の曲線であり、またIPCCで利用される20年よりも長期にわたって起こったが、このことは観測地の解析結果とも一致する (Koga et al. 2020³⁸⁾; Ishizuka et al. 2021³⁹⁾)。

一方、聞き取り調査と文献調査から得られた管理状態を用いても、茶園における土壤炭素蓄積量の増加は今回のモデル化では再現が困難であった。いくつか原因は考えられるが、茶園においては剪定した枝葉を畝間の地表に大量に投入することがわかっており、深耕により土壤に鋤きこまれる場合もある。また、茶園では大量の肥料の投入があり、土壤が酸性化し、土壤有機物の分解を抑制している可能性もある。これらの剪定枝葉や肥料の投入は畝間に対して行われるため、その空間分布は園内で大きな偏りがある。いずれにせよ、茶園の管理は、茶園ごとに特徴があり、聞き取り調査と今回のモデル化では再現しきれなかった。

土壤モデルは通常、土壤炭素を異なる分解されやすさを持つ複数のプール (コンパートメント) を用いて表現する。CENTURYモデルでは、分解されやすい順にActive、Slow、Passiveの3つのプールがあるが、Passiveは難分解のプールであり、数十年程度では変化しない。今回のモデル化でも、分解されやすさと土壤炭素全体に占める割合の多さから、Slowプールの変化が、土壤炭素蓄積量の変化に寄与していた。このことは、観測においても分解されにくい土壤炭素・分解されやすい土壤炭素の各画分の比率が土地利用変化後の挙動に大きな影響を与えることを示唆している。

土壤炭素モデルが土地利用変化の土壤炭素蓄積量変化に適用できる可能性が見いだされた一方で、広く適用するための問題点も明らかとなった。茶園で顕著であったように、土壤炭素蓄積量は土地利用変化前・後の管理に大きな影響を受ける。今回は聞き取り調査によって、できる限り詳細な情報を得たが、それでもモデルによって十分に炭素蓄積量変化が再現できないケースが見られた。日本の土地利用変化が起こった地点にモデルを広く適用する際には、すべての地点において詳細な管理についての情報を得られない可能性が高く、モデルによる精緻な再現は難しい可能性が高い。全国的に管理に関する統

計を集めるなど、平均的な管理についての情報を集めていくことが必要と考えられる。

4-3. 土地利用変化係数の算出

土地利用変化係数と転用後の年数の間には弱い正の相関があり、転用後年数が長いほど農地よりも森林の土壌炭素蓄積量が大きくなる傾向がある（図1.5、Ishizuka et al. 2021³⁹⁾より改変）。転用後20年程度までは農地の土壌炭素蓄積量の方が大きいことが多く、森林の地上部・地下部バイオマスからの炭素投入量が少ない期間は森林への転用によって炭素は減少する可能性が考えられた。これは、転用前の農地への炭素投入量（主として堆肥施用）が大きいこと、転用時に伐根等の除去により炭素投入量が抑制されていることなどが影響していると考えられる。一方で、森林転用後20年以降では、森林の方が農地よりも土壌炭素蓄積量が多くなる場合が多くなり、これは森林の成長に伴って土壌への炭素投入量が多くなることが影響していると考えられる。また、40年以降でも経過年数が長いほど土地利用変化係数が大きくなる傾向があった。但し、40年以降は炭素比率が大きく変化していない。これらのことから、回帰直線の40年時の係数1.21を土地利用変化係数として採用することを提案することとして、サブテーマ4に提供した。

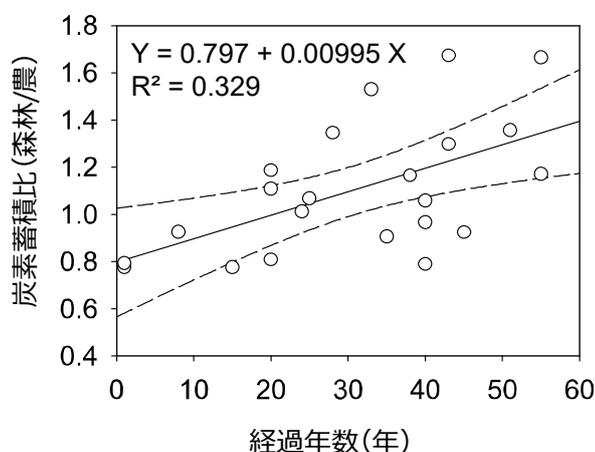


図1.5 農地と森林の土壌炭素蓄積量の比と林齢の関係(Ishizuka et al. 2021³⁹⁾より改変)

4-4. 森林から開発地への土地利用変化地点の抽出法の開発

Yagasaki and Shirato (2014)⁴⁰⁾に従い、国土数値情報土地利用細分メッシュデータをベースに環境省の植生図や農林水産省の土地利用基盤整備基本調査のデータを使用し、農地の区分を細分化した（以下、「農地LULUCデータ」）。この農地LULUCデータの1988～1991年と2007～2009年の土地利用を比較し、森林→開発地のメッシュを抽出した。抽出されたメッシュデータを国土数値情報土地利用データと重ね、「農地LULUCデータ」作成時に統合されていた開発地の細区分を復元した。更に、森林から開発地への土地利用変化点のメッシュと20万分の1シームレス地質図（産業技術総合研究所）を重ね地質情報を取得した。地質情報は岩相（堆積岩、火成岩、変成岩、付加体、その他）でまとめ、一つのメッシュに複数の岩相が存在した場合、メッシュ内で最も面積が大きい岩相を採用した。従前の土地利用（森林）と岩相毎にメッシュの数を集計し、サブテーマ3に提供した。また、森林から開発地への変化点データから道路に変化したメッシュを抽出し、20万分の1土地分類基本調査地形分類図と重ね地形情報を取得した。一つのメッシュに複数の地形分類が存在した場合、メッシュ内で最も面積が大きい地形分類を採用した。そして、火山地、山地、丘陵地を山間部、ローム台地、台地・段丘・砂礫台地、台地段丘、低地を平野部としてまとめ、メッシュの数を集計し、サブテーマ3に提供した。

5. 研究目標の達成状況

農地（果樹園、茶園）および草地から森林に土地利用が変化した場合の土壌炭素蓄積量の変化をペアサンプリングとESM法を用いて土壌炭素蓄積量の比較を行い、果樹園ではリンゴ（0.72）とミカン

(1.28) で係数が異なること、茶園は多くの炭素を蓄積しており、森林への土地利用変化によって大きく炭素を減少させる（変化係数で0.38）こと、草地から森林への土地利用変化によって炭素量は減少する（変化係数で0.83）ことなどが明らかになった。また、これらの変化をモデルで評価し、森林と農地、森林と草地の土地利用変化係数について、ESM法による土地利用変化係数として40年で1.21を算出し、サブテーマ4の算定方法の作成に受け渡した。さらに、IPCCの推奨する開発地と周辺森林の土壌炭素蓄積量の比較に問題があることを発見し、年度計画を変更した後、開発地の平均土壌炭素蓄積量を算出するために必要な、森林から開発地への土地利用変化点の抽出法を開発し、その結果から得られた地質情報と地形情報をサブテーマ3に受け渡し、サブテーマ3の成果に貢献した。以上のことから、当該サブテーマは当初の研究目標を達成することができた。

6. 引用文献

- 1) Takata, Y., Ito, T., Ohkura, T., Obara, H., Kohyama, K., Shirato, Y. (2011) : Phosphate adsorption coefficient can improve the validity of RothC model for Andosols. *Soil Science and Plant Nutrition* 57: 421-428
- 2) 気象庁 (2012) : メッシュ平年値2010. 気象庁
- 3) 齋藤 秀樹 (1981) : 森林におけるリターフォール研究資料. 京都府大演報 25: 78-89.
- 4) 鈴木 雅博, 渋谷 正人, 齋藤 秀之, 高橋 邦秀 (2003) : カラマツ人工林のリターフォール量及び窒素還元量. 日本林学会北海道支部論文集 51: 70-72.
- 5) 温室効果ガスインベントリオフィス (編) (2020年) : 「日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2020年」. 環境省地球環境局総務課脱炭素社会移行推進室 (監修) 国立環境研究所地球環境研究センター
- 6) 林野庁 (2016) : “CO₂吸収・固定量の計算について”. 森林づくり・木材利用の二酸化炭素 吸収・固定量の「見える化」.
http://www.foeri.org/co2calc/_files/common/co2_kotei_sanshutu.pdf (2020年11月閲覧)
- 7) 井川原 弘一, 中川 一 (2002) : 針葉樹人工林のリターフォール量と含有炭素量・窒素量. 岐阜県森林研究所研究報告 31: 7-12.
- 8) 古野 東洲, 齋藤 秀樹 (1981) : コナラ林におけるリターフォール量の季節変化および食葉性昆虫による被食量. 京都大学農学部附属演習林 53: 52-64.
- 9) 渡邊 仁志, 井川原 弘一, 大洞 智宏, 横井 秀一, 中川 一 (2008) : 未熟な土壌条件下における若齢針葉樹人工林の炭素・窒素貯留量. 岐阜県森林研究所研究報告 37: 1-10.
- 10) 菊池 文彦 (1968) : カラマツのクラフトパルプに関する研究. 林業試験場研究報 217: 115-154.
- 11) 坂井 克己 (1985) : 「III. リグニン1. リグニンの存在」. 原口 隆英 (編) . 『木材の化学』 . 111-116. 文英堂出版.
- 12) Chiba, Y. (1998) : Simulation of CO₂ budget and ecological implications of sugi (*Cryptomeria japonica*) man-made forests in Japan. *Ecological Modelling* 111 (2-3) : 269-281.
- 13) Noguchi, K., Han, QM., Araki, GM., Kawasaki, T., Kaneko, S., Takahashi, M., Chiba, Y. (2011) : Fine-root dynamics in a young hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) stand for 3 years following thinning. *Journal of Forest Research* 16: 284-291.
- 14) Hishi, T., Takeda, H. (2005) : Dynamics of heterorhizic root systems: protoxylem groups within the fine-root system of *Chamaecyparis obtusa*. *New Phytol* 167: 509-521.
- 15) 三木 直倫 (1993) : 寒冷地における草地土壌の有機物並びに窒素の経年的動態とそれに基づく窒素施肥管理法に関する研究. 北海道立農業試験場報告 79: 1-98.
- 16) 原 悟志 (2004) : 飼料設計のための新飼料成分表. 根釧農試研究通信 13: 5-6.
- 17) Kondo, T., Ara, S., Mizuno, K., Kato, T. (1987) : Influence of lignin determination

- procedures on relationship between lignin content and digestibility in forages.
Journal of Japanese Society of Grassland Science 33: 227-233
- 18) 酒井 隆, 広田 秀憲 (1990) : 数種イネ科牧草の経年変化にともなう根群集積について. 日本草地学会誌 36: 247-253.
- 19) 山本 嘉人, 斎藤 吉満, 桐田 博充 (1994) : 内視鏡による放牧草地における牧草根の観察 : 1. 根の伸長・枯死速度及び回転率の推定. 日本草地学会誌 39: 460-469.
- 20) 北海道農政部 (2015) : 「V 牧草・飼料作物」. 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 農業研究本部 (編). 『北海道施肥ガイド2015』. 224-229.
- 21) 鳥取県 (2011) : 「14 その他参考資料」. 鳥取県農林水産部農林総合研究所 企画総務部 技術普及室 (現 農林水産部農業振興戦略監とっとり農業戦略課研究・普及推進室) (編). 『らくらく土壌診断の手引き』. 39-57.
- 22) 小柳 渉, 村松 克久, 小橋 有里 (2011) : 分解特性からみたバイオマスおよび堆肥の利用方向. 新潟県農業総合研究所畜産研究センター研究報告 17: 9-14.
- 23) 南雲 俊之, 森田 明雄 (2018) : 茶園のもつ二酸化炭素吸収源機能. 日本土壌肥料学雑誌 89: 283-294.
- 24) 渡部 育夫 (2005) : 茶樹のせん枝処理が施用窒素の吸収量に及ぼす影響. 茶業研究報告 99: 37-40.
- 25) Bernal, MP., Sommer, SG., Chadwick, D., Qing, C., Li, GX., Michel, FC. (2017) : Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. *Advances in Agronomy* 144. 143-233. D L Sparks.
- 26) 山下 正隆 (1993) : 1) 茶樹の根群形成と断根後の根の再生に関する研究. 茶業研究報告 78: 77-89.
- 27) 青野 英也, 築瀬 好充, 田中 静夫 (1980) : チャの根群の発達とその土地保全機能. 茶業試験場研究報告 16: 191-319.
- 28) 山下 正隆 (1984) : 茶樹の根群に関する栽培学的研究 : 第2報 根のエージ別分級法による根群の解析. 日本作物学会紀事 53: 139-144.
- 29) 埼玉県 (2018) : 『主要農作物施肥基準』 (平成30年3月一部改正). 埼玉県農林部農業支援課. <https://www.pref.saitama.lg.jp/a0903/sehikijun.html> (最終アクセス2020年7月6日)
- 30) 長崎県 (2019) : “9. 土壌肥料部門”. 長崎県農林業基準技術. <https://www.pref.nagasaki.jp/bunrui/shigoto-sangyo/nogyo/nouringyoukijyungijyutu/427502.html> (2020年10月閲覧)
- 31) 鹿児島県 (2020) : “2 作物別の土壌管理指針 (6) 茶”. 鹿児島県土壌管理指針 (七訂版). http://www.pref.kagoshima.jp/ag05/documents/81177_20200508091544-1.pdf (2021年1月閲覧)
- 32) 金澤 健二 (2009) : 都道府県の施肥基準値及び堆肥の施用基準値のデータベース並びに作物の収穫物の養分含有率のデータベースとその利用法. 中央農業総合研究センター研究報告 12: 27-50.
- 33) 内村 浩二, 三浦 伸之 (2004) : 黒ボク茶園における有機物資材の窒素無機化特性. 茶業研究報告 98: 11-19.
- 34) 青木 康浩, 大下 友子, 根本 英子, 上田 靖子, 青木 真理 (2014) : 国産ダブルローナタネ (*Brassica napus* L.) 品種由来搾油粕の飼料特性および泌乳牛に対する給与効果. 日本草地学会誌 60: 178-185.
- 35) 松元 順 (1989) : 茶園における緑肥作物の利用. 牧草と園芸 37 (8) : 12-15.
- 36) 三枝 正彦, 花木 真由美, 伊藤 豊彰 (1999) : 1) 茶樹の根群形成と断根後の根の再生に関する研究. 日本土壌肥料学雑誌 70: 157-163.

- 37) 永西 修, 四十万谷 吉郎, 太田 久稔 (1995) : 稲 (*Oryza sativa* L.) の品種・系統の違いによる稲わらの化学成分と *in vitro* 乾物消化率の差異. 日本草地学会誌 41: 152-155.
- 38) Koga, N., Shimoda, S., Shirato, Y., Kusaba, T., Shima, T., Niimi, H., Yamane, T., Wakabayashi, K., Niwa, K., Kohyama, K., Obara, H., Takata, Y., Kanda, T., Inoue, H., Ishizuka, S., Kaneko, S., Tsuruta, K., Hashimoto, S., Shinomiya, Y., Aizawa, S., Ito, E., Hashimoto, T., Morishita, T., Noguchi, K., Ono, K., Katayanagi, N., Atsumi, K., 2020. Assessing changes in soil carbon stocks after land use conversion from forest land to agricultural land in Japan. *Geoderma* 377, 114487.
- 39) Ishizuka, S., Hashimoto, S., Kaneko, S., Tsuruta, K., Kida, K., Aizawa, S., Hashimoto, T., Ito, E., Umemura, M., Shinomiya, Y., Morishita, T., Noguchi, K., Ono, K., Okamoto, T., Mizoguchi, T., Torii, A., Sakai, H., Inagaki, Y., Shichi, K., Toriyama, J., Sakai, Y., Inagaki, M., Shirato, Y., Obara, H., Kohyama, K., Takata, Y., Katayanagi, N., Kanda, T., Inoue, H., Kusaba, T., 2021: Soil carbon stock changes due to afforestation in Japan by the paired sampling method on an equivalent mass basis. *Biogeochemistry* 153, 263-281.
- 40) Yagasaki, Y. and Shirato, Y., 2014: Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit landuse change inventories – Part 1: Historical trend and validation based on a nation-wide soil monitoring. *Biogeosciences* 11, 4429-4442.

II-2 農地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明とモデル化

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域長	白戸 康人
農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域	松浦 庄司
農業環境研究部門土壌環境管理研究領域	前島 勇治
農業環境研究部門土壌環境管理研究領域	高田 裕介
東北農業研究センター水田輪作研究領域	戸上 和樹
東北農業研究センター農業放射線研究センター	若林 正吉
九州沖縄農業研究センター暖地水田輪作研究領域	淵山 律子
九州沖縄農業研究センター暖地畑作物野菜研究領域	新美 洋
九州沖縄農業研究センター暖地畑作物野菜研究領域	島 武男
九州沖縄農業研究センター暖地畜産研究領域	小林 創平
九州沖縄農業研究センター暖地畜産研究領域	古賀 伸久 (2019年)

[要旨]

農地・草地間、森林・草地間および森林・茶園間での土地利用変化に伴う土壌炭素変化係数を取得するため22地点（23処理区）において、土壌調査および土壌試料採取を行った。そして、ESM法（単位面積当たりの土壌重が大きい土地利用をベースとする）による農地、草地および森林の土壌炭素量の比較を行った。その結果、農地から草地へ、草地から農地へ、森林から草地へ、森林から茶園への土地利用変化に伴う土壌炭素変化係数の平均値は、それぞれ0.962、1.454、1.002、1.562であった。

また、農地・草地間および森林・草地間での土壌炭素変化係数はペアサンプリング地点間で大きくばらついた。土壌炭素変化係数のばらつきについて、ローザムステッド・カーボン・モデルを用いて堆肥投入量による影響を評価したところ、モデルで再現できる範囲内でのばらつきであることが確認された。他方、森林から茶園への土地利用変化に伴う土壌炭素変化係数の高さは、現状のところモデルでは再現することができず、モデル改良が今後の研究課題として残るかたちとなった。これまでの結果を利用して、森林から農地への土地利用変化時の土壌炭素変化係数を40年で0.77倍と算出し、サブテーマ4に受け渡した。さらに、IPCCの推奨する開発地と周辺農地の土壌炭素蓄積量の比較に問題があることを発見し、年度計画を変更した後、開発地の平均土壌炭素蓄積量を算出するために必要な、農地から開発地への土地利用変化点の抽出法を開発し、その結果から得られた地質情報と地形情報をサブテーマ3に受け渡し、サブテーマ3の成果に貢献した。

1. 研究開発目的

我が国の農地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素変動量を、IPCC2019改訂版ガイドラインに則した形で評価できるようにする。科学的知見に基づく変化係数の取得、それを用いた土壌炭素の変動量算定手法を開発する。これにより、気候変動枠組条約事務局に提出する国別温室効果ガスインベントリ報告書（NIR）の精度向上に貢献できる。

2. 研究目標

農地－草地間を中心に、農地－森林間でもデータ数の少ないカテゴリーの調査地点において土壌調査を行い、ESM法による土壌炭素蓄積量の比較を行う。ESM法による土地利用変化係数を算出するとともに、モデルによる評価を行い、両者をサブテーマ4に受け渡し成果につなげる。また、サブテーマ3に必要な、開発地周辺の農地における土壌炭素量調査をおこなう。

3. 研究開発内容

サブテーマ(1)の調査法に準じて、林野庁のARD（新規植林、再植林および森林伐採）調査ポイント

データ、過去～現在の空中写真（地理院地図等）をもとに森林から農地もしくは草地、草地から農地への土地利用変化が起こった場所を選定し、下見調査の候補地を決めた。下見調査では、まず、対照となる土地利用変化していない林地もしくは草地の存在や、林地もしくは草地と転用された農地の地形の連続性等も考慮して調査対象とすべきかを判断した。次に、周辺への聞き取り調査等により土地の所有者を探し、許可を得られた場所を土壌調査の対象地とした。

土壌調査実施地点として、農地から草地への土地利用変化は7地点（計8処理区）、草地から農地へは5地点、森林から草地へは5地点、森林から茶園へは5地点、森林からは普通畑へは1地点であった。農地（茶園含む）およびその農地に隣接する草地または森林をペアとして現地調査を行った。土壌調査は、深さ30cmまで断面記載を行い、層位ごとに土壌試料を採取した。その後、土壌試料ごとに全炭素含有率、仮比重を分析した。そして、ESM法（単位面積当たりの土壌重が大きい土地利用をベースとする）による農地、草地および森林の土壌炭素量の比較を行った。また、調査地における農地転用の時期、農地転用後の栽培作物や堆肥施用等の土壌管理について情報収集を行った。

初年度の開発地の調査により、開発地の周辺農地と開発地の土壌炭素蓄積量に関係が見られないことが想定された。これはIPCCの推奨する、「ESM法を利用する場合はすべての土地利用についてESM法を適用すべき」というガイダンスは適当ではないことを示している。このため、最終年度の研究計画を変更し、開発地には従来から使用されている各土地利用の平均炭素蓄積量同士を比較して係数を算出する方法を適用することとし、開発地における平均炭素蓄積量を算出するために必要な農地から開発地への土地利用変化点の抽出法を開発し、この位置情報から地質情報および地形情報をサブテーマ3に提供することとした。

4. 結果及び考察

4-1. 農地・草地間での土地利用変化

農地から草地への土地利用変化があった調査地点数は7地点（計8処理区）であり、土地利用変化後の経過年数の平均値は25年（15～35年）であった（表2.1および表2.2）。農地から草地への土地利用変化について調査を行った7地点の草地において、有機物投入を行っていないのは2地点であり、4地点では放牧時の畜ふん投入、1地点はスラリー施用（10kgN/10a）であった。他方、畑地においては7地点（8処理区）の内4地点で牛ふん堆肥の施用（2～5t/10a）が行われており、2地点（3処理区）ではスラリー施用（10kgN/10a、5t/10a）、1地点で有機物施用無しであった。

ESM法で算出した土壌炭素量は農地（平均値：126.0 MgC ha⁻¹, 31.0～250.7 MgC ha⁻¹）の方が草地（平均値：118.4 MgC ha⁻¹, 43.4～257 MgC ha⁻¹）よりも高い傾向であった。調査地点毎の土壌炭素変化係数（草地の炭素量/農地の炭素量）は0.68～1.40の範囲にあり、8処理区での平均値は0.962となった（表2.2）。土壌炭素変化係数は、調査地点間でのバラつきが大きく、その最大値（1.401）を示した山口市では農地側の有機物施用量は0となり、最小値（0.677）を示した宮崎市では牛ふん堆肥施用は確認できたがその施用量は不明であった。このように土壌炭素変化係数は草地・農地間の土地利用変化後の土壌管理（有機物施用量等）に影響を受けることが示唆された。

草地から農地への土地利用変化があった調査地点数は5地点（計8処理区）であり、土地利用変化後の経過年数の平均値は7年（3～10年）であった（表2.1）。土壌炭素量は草地（平均値：119 MgC ha⁻¹, 24.0～203 MgC ha⁻¹）の方が農地（平均値：137 MgC ha⁻¹, 63.2～223 MgC ha⁻¹）よりも低い傾向であった（表2.2）。調査地点毎の土壌炭素変化係数（農地の炭素量/草地の炭素量）は0.98～2.63の範囲にあり、5地点での平均値は1.45となった（表2.2）。草地・農地間の土地利用変化に着目すると、農地の方が草地よりも炭素貯留量が高くなる結果となった。

そこで、有機物施用が土壌炭素変化係数に及ぼす影響を評価するため、調査地の畑地と草地で堆肥施用量を変化させることで表層下30cmまでの土壌炭素変化係数がどのように推移するかローザムレット・カーボン・モデル（RothCモデル）を用いて評価を実施した。モデルへの入力条件は調査地点毎に下記の通り設定した。RothCモデルの操作は農研機構「土壌CO₂吸収量見える化サイト」

（<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>）を用いて行った。

表2.1 草地・農地間での土地利用変化のペアサンプリング地点情報

土地利用変化	土地利用変化後	土壌群名	草種	草地 有機物投入	農地 作付け	有機物投入量 / 年 牛ふん堆肥 (現物)
	合志	30年	アロフェン質黒ボク土	バヒアグラス	なし	トウモロコシ (飼料)、大豆 2 t / 10a
	球磨	約15年	アロフェン質黒ボク土	バヒアグラス	放牧時の畜糞	イタリアンライグラス (飼料作) 3 t / 10a
農地 ↓ 草地	都城	35年	アロフェン質黒ボク土	バヒアグラス	なし	トウモロコシ-イタリアン (2016年~休耕 (定期的に耕 耘)) スラリー (現物) 10t、30t / 10a
	島原	30年	アロフェン質黒ボク土	バヒアグラス	スラリー (N換算) 10 kg / 10a 年	エンバク (飼料作) スラリー (N換 算) 10 kg / 10a
	山口	約20年	普通灰色低地土	バヒアグラス	放牧時の畜糞	水稻 (WCS) 無し
	鹿島	約15年	風化変質赤黄色土	バヒアグラス他	放牧時の畜糞	果樹 (みかん) ただし2年ほど前 に1回 牛ふん堆肥 (現 物) 5 t / 10a
	高岡	約30年	褐色森林土	バヒアグラス	放牧時の畜糞	果樹 (みかん) 牛ふん堆肥
	都農	10年	アロフェン質黒ボク土	バヒアグラス	なし	麦、大豆 (残渣持ち出し) 牛ふん堆肥 (現 物) ①2t/10a ②無施用 過去2年無し
	島原	3年	アロフェン質黒ボク土	バヒアグラス	なし	ブロッコリー それ以前は施用履 歴あり
草地 ↓ 農地	高知	8年	粘土集積赤黄色土	シバ (野芝)	スラリー (N換算) 10 kg / 10a 年	エンバク (飼料作) スラリー (N換 算) 10 kg / 10a
	岡山	約10年	褐色森林土	リードカナリー	草地造成時に 牛ふん堆肥 5-10t / 10a	イタリアンライグラス (飼料作) 牛ふん堆肥 (現 物) 2.5-5 t / 10a
	盛岡	4年	アロフェン質黒ボク土	チモシー	牛ふん堆肥2t/10a	トウモロコシ (飼料) 牛ふん堆肥2t/10a

モデル入力パラメータ

熊本県合志市 (腐植質厚層アロフェン質黒ボク土)

草地: 牧草収量4.0t/10a (作物統計調査: 熊本県2007~2020の平均)、堆肥0、2 t/10a

畑地: トウモロコシ4.5 t/10a (作物統計調査: 熊本県2007~2020の平均)、堆肥1~5t/10a

熊本県球磨村 (腐植質厚層アロフェン質黒ボク土):

草地: 牧草収量4.0t/10a (作物統計調査: 熊本県2007~2020の平均)、堆肥0、2 t/10a

畑地: 牧草収量4.0 t/10a (作物統計調査: 熊本県2007~2020の平均)、堆肥1~5t/10a

宮崎県都城市 (礫質厚層アロフェン質黒ボク土):

草地: 牧草収量4.0t/10a (作物統計調査: 宮崎県2007~2020の平均)、堆肥0、2 t/10a

畑地: トウモロコシ4.9 t/10a (作物統計調査: 宮崎県2007~2020の平均)、堆肥1~5t/10a

長崎県島原市 (淡色アロフェン質黒ボク土):

草地: 牧草収量5.1t/10a (作物統計調査: 長崎県2007~2020の平均)、堆肥0、2 t/10a

畑地: 青刈りエン麦4.5t/10a (作物統計調査: 長崎県1993~2006の平均)、堆肥1~5t/10a,

山口県山口市 (中粒質普通灰色低地土):

草地: 牧草収量3.1t/10a (作物統計調査: 山口県2008~2020の平均)、堆肥0、2 t/10a

畑地: 水稻0.5t/10a (作物統計調査: 山口県1993~2006の平均)、堆肥1~5t/10a

佐賀県鹿島市 (細粒質ばん土質風化変質赤黄色土):

草地: 牧草収量4.3t/10a (作物統計調査: 佐賀県2007~2020の平均)、堆肥0、2 t/10a

畑地：ミカン、堆肥1～5t/10a

宮崎県宮崎市（細粒質ばん土質褐色森林土）：

草地：牧草収量4.0t/10a（作物統計調査：宮崎県2007～2020の平均）、堆肥0、2 t/10a

畑地：ミカン、堆肥1～5t/10a

なお、草地の堆肥投入量2t/10aは農林水産省令和3年度農地土壌炭素貯留基礎調査事業で行った草地管理に係るアンケート調査の堆肥施用量中央値を採用した。

表2.2 草地・農地間での土地利用変化に伴う土壌炭素変化係数

土地利用変化		土地利用	土壌炭素量 (mass equivalent法) (tC/ha)	土壌炭素変化係数
農地 ↓ 草地	合志	草地	257.1	1.025
		農地	250.7	
	球磨	草地	171.4	1.109
		農地	154.6	
	都城	草地	123.4	0.847
		農地 (スラリー10t/10a)	145.7	
	都城	草地	123.4	0.786
		農地 (スラリー30t/10a)	157.1	
	島原	草地	113.3	0.962
		農地	117.8	
	山口	草地	43.4	1.401
		農地	31.0	
	鹿島	草地	62.0	0.892
		農地	69.6	
高岡	草地	57.2	0.677	
	農地	84.5		
草地 ↓ 農地	都農	草地	203.2	1.100
		農地	223.4	
	島原	草地	115.9	1.129
		農地	130.8	
	高知	草地	50.7	1.431
		農地	72.6	
	岡山	草地	24.0	2.631
		農地	63.2	
	盛岡	草地	201.3	0.979
		農地	197.1	

土壌炭素変化係数は農地から草地への変化は草地土壌炭素量/農地土壌炭素量、
草地から農地への変化は農地土壌炭素量/草地土壌炭素量

草地および畑地の有機物施用量を0とした場合、7地点ともに土地利用変化後20年での土壌炭素変化係数（草地の炭素量/農地の炭素量）は1.000～1.352（平均値：1.23）と試算され、草地利用の方が炭素蓄積量は多くなると予測された（図2.1）。また、非黒ボク土の方が黒ボク土に比べて土壌炭素変化係数が高くなると予測された。次に、有機物施用量を草地で0と固定しておき、畑地で堆肥施用量を1、2、3、4、5t/10aと設定した場合、土壌炭素変化係数の7地点での平均値はそれぞれ、1.117、1.034、0.958、0.893、0.837と試算された（図2.1）。堆肥施用量が3t/10aを境に畑地の方が草地よりも土壌炭素量は高く推移することが予測された。更に、有機物施用量を草地で2t/10aと固定しておき、畑地で堆肥施用量を0、1、2、3、4および5t/10aと設定した場合、土壌炭素変化係数の7地点での平均値はそれぞ

れ、1.566、1.413、1.304、1.205、1.122および1.051と試算され、全ての設定条件で草地の方が畑地よりも土壤炭素量は高く推移することが予測された（図2.2）。

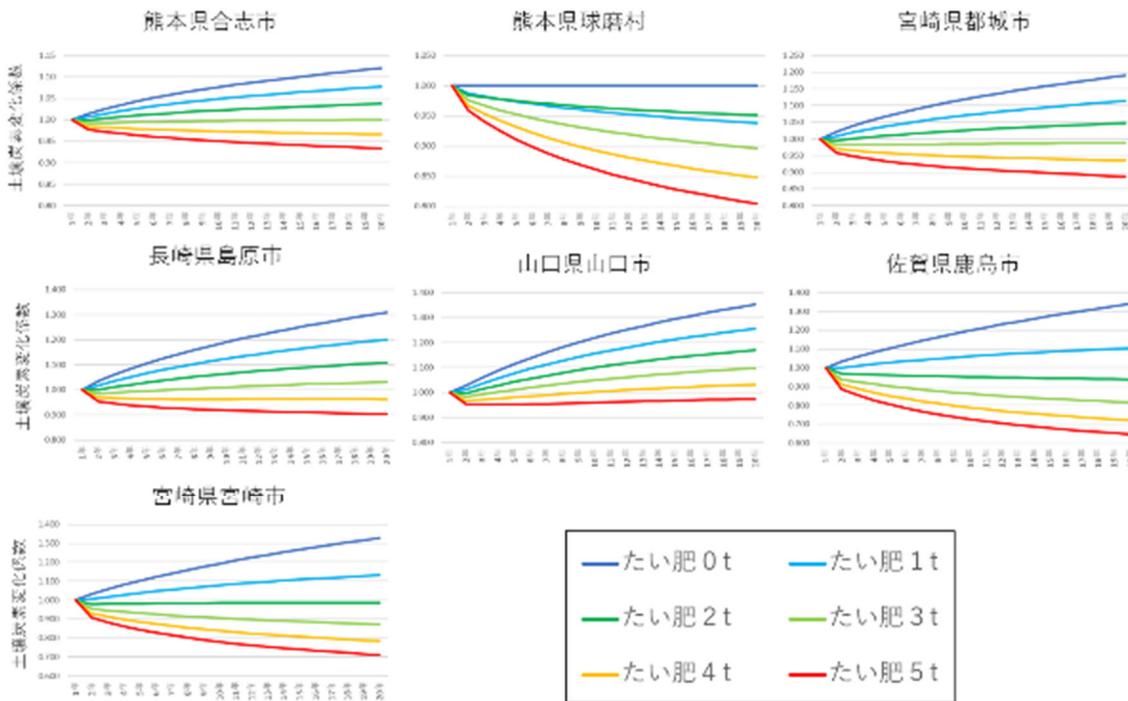


図2.1 RothCモデルを用いた草地・農地間での土地利用変化後の土壤炭素変化係数の推移評価（草地で有機物投入なし、農地で有機物投入量を0～5t/10aと設定）

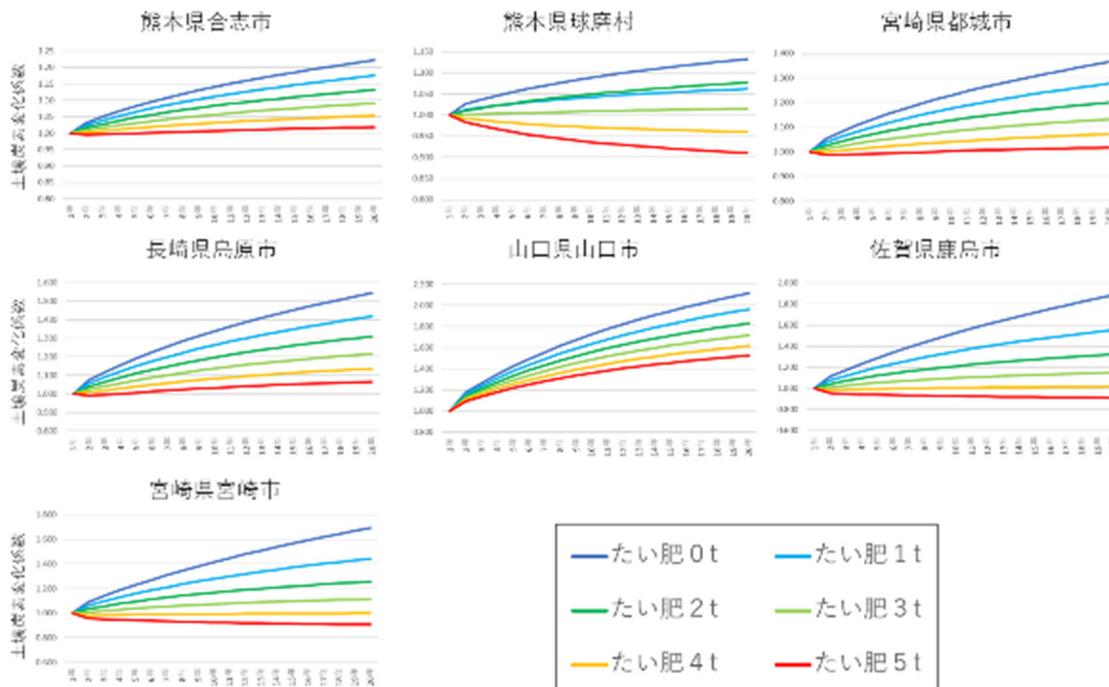


図2.2 RothCモデルを用いた草地・農地間での土地利用変化後の土壤炭素変化係数の推移評価（草地で堆肥投入量2t/10a、農地で堆肥投入量を0～5t/10aと設定）

以上のように、草地・畑地間での土地利用変化に伴う土壤炭素変化係数は、有機物施用状況に強く依存することが示された。また、本研究で実施したペアサンプリングによる土壤炭素変化係数は農地から草地への土地利用変化での平均値（25年間）は0.97、草地から農地への土地利用変化での平均値（7年間）は1.45であり、RothCを用いたモデル評価での計算結果の範囲内であることが明らかとなった。畑地・草地間の土地利用変化が生じやすい地域は酪農畜産の盛んな地域に近接することが考えられ、比較的堆肥等の有機物資材を畑地に施用しやすい環境であったことが考えられる。このような調査地の立地条件から畑地の方が草地よりも炭素貯留量が高くなる結果となったことが考えられた。

4-2. 森林から草地への土地利用変化

森林から草地への土地利用変化があった調査地点数は5地点であり、土地利用変化後の経過年数の平均値は34.6年（16～45年）であった（表2.3）。ESM法で算出した土壤炭素量は森林で39.1～262tC/haの範囲であり、草地では45.3～153tC/haの範囲であった。土壤炭素変化係数（草地の炭素量/森林の炭素量）は0.541～1.625の範囲でバラつきが大きかった。そして、森林から草地への土地利用変化に伴う土壤炭素変化係数の平均値は1.001であった。調査対象草地への堆肥等の有機物施用量は明らかではないが、1）草地・農地間での土地利用変化でも述べたように草地土壌中の炭素量は有機物施用量に影響を受けることから、土壤炭素変化係数のバラツキの大きさには調査地点間での有機物施用量の違いが起因しているものと考えられる。

表2.3 森林から草地への土地利用変化に伴う土壤炭素変化係数

土地利用変化	調査地	経過年数	土地利用	土壤炭素量 (mass equivalent法) (tC/ha)	土壤炭素変化係数
森林 ↓ 草地	北海道 鶴居村	40	森林	262	0.541
			草地	142	
	北海道 鶴居村	42	森林	162	0.893
			草地	145	
	福島県 白河市	30	森林	158	0.791
			草地	125	
	岩手県 滝沢市	16	森林	94.3	1.625
			草地	153	
	茨城県 城里町	45	森林	39.1	1.159
			草地	45.3	

土壤炭素変化係数は草地土壤炭素量/森林土壤炭素量

4-3. 森林から茶園への土地利用変化

森林から茶園への土地利用変化があった調査地点数は5地点であり、土地利用変化後の経過年数の平均値は35.6年（22～45年）であった。ESM法で算出した土壤炭素量は森林で39.4～132tC/haの範囲であり、茶園では77.3～243tC/haの範囲であった。土壤炭素変化係数（茶園の炭素量/森林の炭素量）は0.584～2.061の範囲であった。そして、森林から茶園への土地利用変化に伴う土壤炭素変化係数の平均値は1.562であり、茶園の方が森林よりも1.5倍程度土壤炭素を貯留するということが明らかとなった。所沢市の茶園（土地利用変化後22年経過）について、土壤炭素初期値を森林の土壤炭素量である95tC/haに設定し、RothCを用いてモデル評価を行ったところ（図2.3）、土地利用変化20年後の土壤炭素変化係数（20年後の茶園の炭素量/95）は1.177と予測され、ペアサンプリングによる変化係数（1.562）よりも低くなることが明らかとなった。

茶園は一般的に栽植密度が高く、また剪定枝葉を表土に多量に供給するような農地管理を行っている。更に生産物の品質向上を目的とした窒素肥料の多投入でも知られている。茶園における標準的な窒

素肥料投入量は50kgN/10a以上であり、他の園芸作物の2倍以上の窒素肥料を施用している。施肥された窒素肥料の大部分は硝化され、カルシウムやマグネシウム等の塩基類を伴いながら溶脱し、土壤酸性化を引き起こすことが知られている。RothCモデルの適用を行った所沢市の茶園土壤においても、土壤pHが2.8~3.2程度であり、強酸性を示した。このような強酸性条件下では、土壤微生物の活性が阻害されることが想定され、土壤中の有機物の分解が強く抑制される可能性がある。RothCモデルでは、土壤中の有機物の分解速度に土壤pHの影響は組み込まれていないため、強酸性条件下では有機物の分解を過大評価しているかもしれない。そのため、図2.3に示したRothCモデルによる土壤炭素変化係数の予測は現状

表2.4. 森林から茶園への土地利用変化に伴う土壤炭素変化係数

土地利用変化	調査地	経過年数	土地利用	土壤炭素量 (mass equivalent法) (tC/ha)	土壤炭素変化係数
森林 ↓ 茶畑	埼玉県 所沢市	22	森林	95.2	1.901
	茶畑		181		
	茨城県 城里町	45	森林	39.4	2.061
	茶畑		81.2		
	三重県 鈴鹿市	41	森林	125	1.937
	茶畑		243		
	長崎県 佐世保市	39	森林	99.8	1.326
	茶畑		132.3		
	長崎県 佐世保市	31	森林	132	0.584
	茶畑		77.3		

土壤炭素変化係数は茶園土壤炭素量/森林土壤炭素量

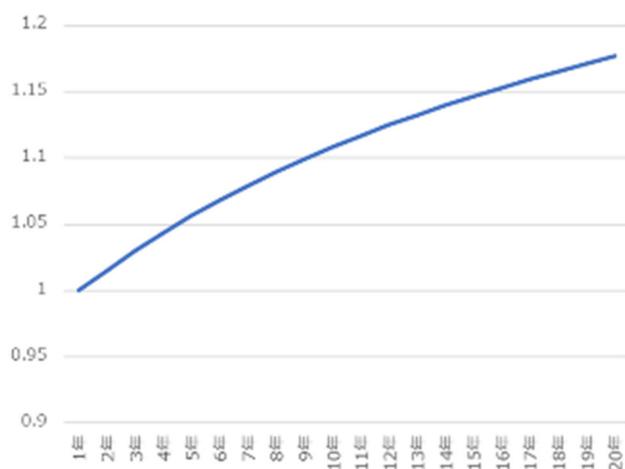


図2.3 RothCモデルを用いた森林から茶園への土地利用変化後の土壤炭素変化係数の推移評価（森林土壤の炭素量は20年間変化しないと仮定、茶園での堆肥投入量を0t/10aと設定）

よりも過少評価している可能性がある。今後、土壤中の有機物分解速度に及ぼす土壤pHの影響を詳細に検討することが、茶園を介した土地利用変化に伴う土壤炭素変化係数の算出には欠かせないであろう。

4-4 土地利用変化係数の算出

土地利用変化係数と転用後の年数の間には弱い正の相関があり、転用後年数が長いほど森林よりも農地の土壤炭素蓄積量が小さくなる傾向がある（図2.4、Koga et al. 2020¹⁾より）。転用後40~60年後程度まで単調に減少した。但し、40年以降は炭素比率が大きく変化していない。これらのことから、回帰式の40年時の係数0.77を土地利用変化係数として採用することを提案することとして、サブテーマ4に提供した。

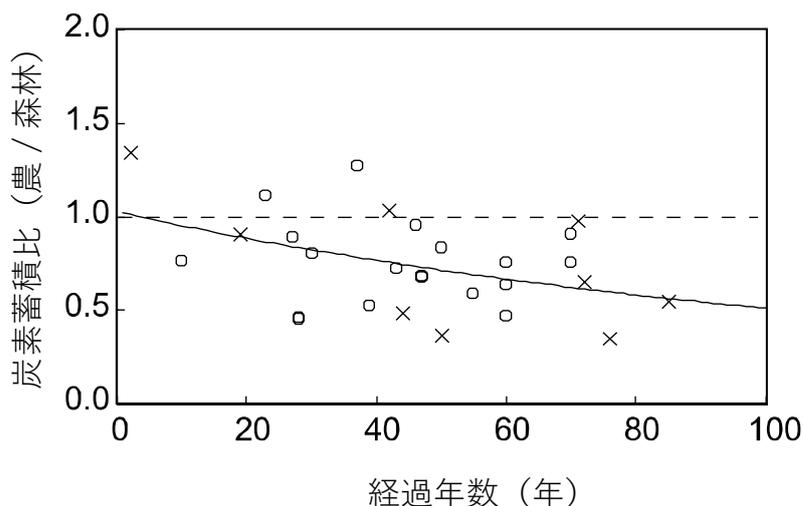


図2.4 農地と森林の土壌炭素蓄積量の比と経過年数の関係 (Koga et al. 2020¹⁾ を改変)

4-5. 農地から開発地への土地利用変化地点の抽出法の開発

Yagasaki and Shirato (2014)²⁾ に従い、国土数値情報土地利用細分メッシュデータをベースに環境省の植生図や農林水産省の土地利用基盤整備基本調査のデータを使用し、農地の区分を細分化した「農地LULUCデータ」の1988～1991年と2007～2009年の土地利用を比較し、農地→開発地のメッシュを抽出した。抽出されたメッシュデータを国土数値情報土地利用データと重ね、「農地LULUCデータ」作成時に統合されていた開発地の細区分を復元した。更に、農地から開発地への土地利用変化点のメッシュと20万分の1シームレス地質図（産業技術総合研究所）を重ね地質情報を取得した。地質情報は岩相（堆積岩、火成岩、変成岩、付加体、その他）でまとめ、一つのメッシュに複数の岩相が存在した場合、メッシュ内で最も面積が大きい岩相を採用した。従前の土地利用（農地区分）と岩相毎にメッシュの数を集計し、サブテーマ3に提供した。また、農地から開発地への変化点データから道路に変化したメッシュを抽出し、20万分の1土地分類基本調査地形分類図と重ね地形情報を取得した。一つのメッシュに複数の地形分類が存在した場合、メッシュ内で最も面積が大きい分類を採用した。そして、火山地、山地、丘陵地を山間部、ローム台地、台地・段丘・砂礫台地、台地段丘、低地を平野部としてまとめ、メッシュの数を集計し、サブテーマ3に提供した。

5. 研究目標の達成状況

農地－草地間を中心に、農地－森林間でもデータ数の少ないカテゴリー（茶園・草地）の調査地点において土壌調査を行い、ESM法による土壌炭素蓄積量の比較を行った。ESM法による土地利用変化係数を算出するとともに、モデルによる評価を行い、両者をサブテーマ4に受け渡し成果につなげることができた。さらに、IPCCの推奨する開発地と周辺農地の土壌炭素蓄積量の比較に問題があることを発見し、年度計画を変更した後、開発地の平均土壌炭素蓄積量を算出するために必要な、農地から開発地への土地利用変化点の抽出法を開発し、その結果から得られた地質情報と地形情報をサブテーマ3に受け渡し、サブテーマ3の成果に貢献した。以上のことから、当該サブテーマは研究目標を達成することができた。

6. 引用文献

- 1) Koga, N., Shimoda, S., Shirato, Y., Kusaba, T., Shima, T., Niimi, H., Yamane, T., Wakabayashi, K., Niwa, K., Kohyama, K., Obara, H., Takata, Y., Kanda, T., Inoue, H., Ishizuka, S., Kaneko, S., Tsuruta, K., Hashimoto, S., Shinomiya, Y., Aizawa, S., Ito, E., Hashimoto, T., Morishita, T., Noguchi, K., Ono, K., Katayanagi, N., Atsumi, K., 2020. Assessing changes in soil carbon stocks after land use conversion from forest land to

agricultural land in Japan. *Geoderma* 377, 114487.

- 2) Yagasaki, Y. and Shirato, Y., 2014: Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit landuse change inventories – Part 1: Historical trend and validation based on a nation-wide soil monitoring. *Biogeosciences* 11, 4429-4442.

II-3 開発地に関する土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化の解明

公益財団法人 都市緑化機構

都市緑化技術研究所

〃

〃

外崎 公知

今井 一隆

手代木 純

<研究協力者>

都市緑化技術研究所

〃

鳥山 貴司

臼井 敦史

[要旨]

国内外における知見の蓄積が少ない森林および農地から開発地への土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化を明らかにするため、代表的な開発地として宅地と道路が一体的に整備されるニュータウンと産業団地を対象に調査手法を開発するとともに、全国30地点以上で土壌調査等を実施した。これらの結果と森林および農地から開発地に転用された地点の位置情報等を参考に、開発地の土壌炭素蓄積量の初期値を、森林からの転用時20.8MgC/ha、農地からの転用時22.9MgC/haと算出した。

IPCCのガイドラインに基づき、転用された開発地と周辺の農地または森林の土壌炭素蓄積量をペアサンプリング法とESM法により比較して係数を算出する予定であったが、初期調査の段階において、IPCCガイドラインの方法が適当ではないこと判明し、研究計画を変更した後、開発地には従来から使用されている各土地利用の平均土壌炭素蓄積量同士を比較して係数を算出する方法を適用することとした。多様な土地利用形態を開発地の平均土壌炭素蓄積量の算出に反映させるため、既往統計の区分等により土地利用形態を宅地系、道路系、草地系、公園系の4つの土地利用区分に集約するとともに、各土地利用区分の平均緑被率（敷地面積に対する緑被面積の割合）を既往資料と空中写真等により算出した。緑被地の土壌炭素蓄積量については、既往文献等により平均炭素蓄積速度を1.5MgC/ha/yrと設定し、IPCC2006ガイドラインのデフォルト値である遷移期間20年分を上記の初期値に加算することにより算出した。各土地利用区分の土壌炭素蓄積量を算出するとともに、これらを転用時の構成比により加重平均を行い、開発地の平均土壌炭素蓄積量を、森林からの転用時34.8MgC/ha、農地からの転用時28.6MgC/ha、森林および農地からの転用時30.0MgC/haと算出し、サブテーマ4の土地利用変化係数の算出のための数値として提供した。今後、開発地に転用される森林および農地の面積比や転用先の土地利用区分の構成比の変化に対応し、開発地の平均土壌炭素蓄積量を再計算することが可能である。

1. 研究開発目的

我が国の土地利用変化に伴う土壌炭素変動量を、IPCC2019改訂版ガイドラインに則した形で評価できるようにする。科学的知見に基づく変化係数の取得、それをを用いた土壌炭素の変動量算定手法を開発する。これにより、気候変動枠組条約事務局に提出する国別温室効果ガスインベントリ報告書（NIR）の精度向上に貢献する。本課題では、開発地の土壌における平均炭素蓄積量の精度向上に資することを目的とする。

2. 研究目標

全国に分布するニュータウンの中から1～2ヶ所を選定し、過去の土地利用や地形要因がニュータウン内の土壌炭素蓄積量に与える影響を多点調査により評価し、地域全体を評価するのに必要な調査手法を開発する。開発された方法を用いて全国のニュータウンの中から数ヶ所を選定し、開発地と森林、農地の平均炭素蓄積量をESM法によって比較し、これらの土地利用変化係数を算出する。この結果をサブテーマ4に受け渡し成果につなげる。

3. 研究開発内容

3-1. 調査手法の開発

開発地の土壤炭素蓄積量は、生物的・気候的要因と開発地固有の要因（土地利用・土地被覆の変化、表土の移動、管理形態等）の組合せにより、時間的・空間的に大きく変化すると考えられる。日本国温室効果ガスインベントリ報告書（2021年）¹⁾によると、2015年～2019年の5年間に開発地が約80kha増加しており、その多くが宅地と道路である。このことから、宅地と道路を対象に土壤調査とサンプリング及び関係者からのヒアリング等を行い、土壤炭素蓄積量に関する基本的な情報を収集した。

宅地については、国土交通省の全国ニュータウンリスト²⁾、日本立地センターの産業用地情報³⁾、国土地理院地図、Google社のGoogle Earth等を用いて、森林および農地から宅地への土地利用変化が起こったニュータウンや産業団地の宅地を選定した。所有者である地方公共団体等のヒアリングと現地踏査により、造成時期、従前土地履歴（森林、農地）、造成方法（切土、盛土）等を確認し、所有者等の許可が得られた未分譲又は造成中の宅地において土壤調査とサンプリングを実施した。調査初年度でもあり十分な協議回数を確保するため、調査地点は、アクセス性のよい関東地方の茨城県つくば市、北陸地方の新潟県柏崎市、長岡市、東北地方の福島県福島市、郡山市に所在する宅地を選定した。

道路については、上記と同様の理由から茨城県下の新設道路を対象とし、県が令和元年度施工中の国道・県道の内、森林および農地から道路への土地利用変化が起こった路線・区間を選定し、道路管理者等のヒアリングと現地踏査により、従前土地履歴（森林、農地）、造成方法（切土、盛土）、土砂の搬出入等を確認し、道路管理者の許可が得られた舗装工事直前の路床において、土壤調査とサンプリングを行った。

土壤炭素の変化量を計測する土壤深度については、IPCC2006 ガイドライン⁴⁾のTier.1適用時のデフォルト値である30cmとした。宅地および道路ともに1調査地点当たり3ヶ所ずつ、地表から深さ40cm程度までの土壤断面（石礫率を含む。）を作成し、攪乱土であることが想定されることから土壤断面の中央から深さ0～10cm、10～20cm、20～30cmごとに定体積土壤サンプル（仮比重測定 100 ml 円筒サンプル）と炭素濃度測定用サンプルを採取した。採取したサンプルを実験室に持ち帰り、風乾（30～40℃）後に2mmの篩にかけ石礫や根などを取り除き、細土及び石礫の重量を測定した。その後、塩酸処理により無機炭素を脱し、細土の有機炭素濃度（以下、「炭素濃度」という。）を乾式燃焼法元素分析装置（Elementar Analysensysteme GmbH 社製 Vario MAXCN）で測定した。採取した土壤の仮比重と炭素濃度および土壤断面の石礫率により、土壤炭素量（以下、「炭素量」という。）を算出した。

これらの結果より、造成方法、造成後の経過年数、盛土に使用した土砂等が開発地の土壤炭素蓄積変化に与える影響を検討するとともに、土地履歴情報の有無、調査の難易度及び今後の開発動向等について関係者からヒアリングを行い、森林および農地から転用された開発地の土壤炭素蓄積変化を調査する手法を開発した。

3-2. 森林および農地から転用された開発地における造成後の炭素量の初期値の算出

上記で開発した調査手法により、森林および農地から転用された開発地における炭素量の初期値を算出するため、日本立地センターの産業用地情報等による未分譲宅地のある産業団地を対象に、国土地理院等の航空写真・衛星画像により従前の土地履歴を、産業技術総合研究所地質調査総合センターの20万分の1日本シームレス地質図⁵⁾により表層地質を確認するとともに、地理的分布や事業主体・造成時期等を考慮し土壤調査の候補地を選定した。また、サブテーマ1および2から得られた森林および農地から開発地に転用された地点の位置情報と20万分の1日本シームレス地質図により、開発地に転用された地点の表層地質別構成比を算出し、その結果を候補地の選定に反映させた。

選定された候補地について、関係機関との協議を行い造成履歴及び管理状況等についての情報を収集し、現地踏査により調査地点として適しているかを判定した。調査地点としての適性については、従前の土地履歴に関する情報と切土・盛土に関する造成図等が残されているかを最も重視し、除草等の敷地管理が不適切な場所や暫定利用等により土地改変が行われた場所は除外した。

表層地質の区分については、堆積岩、火山岩、深成岩、変成岩がある。礫山ら⁶⁾による100万分の1日本地質図（第2版）における岩種・時代別分布面積によると、堆積岩（約58%）と火山岩（約26%）が全国の約84%を占め、深成岩は約12%、変成岩はわずか約4%にすぎない。そこで、マグマが冷えて固まってきた岩石である火山岩と深成岩をまとめて火成岩とし、表層地質が堆積岩と火成岩である地点を調査対象とした。

上記による候補地の選定後、所有者に調査許可の承諾を得て、3-1. で開発した調査手法に基づき土壌調査とサンプリングを行った。これらの結果等から、森林および農地から転用された開発地における造成後の炭素量の初期値を算出した。

3-3. 研究計画の変更と開発地の平均土壌炭素蓄積量の算出

当初の計画では、IPCCのガイドラインに基づき、転用された開発地と周辺の農地または森林の土壌炭素蓄積量をペアサンプリング法とESM法により比較して係数を算出する予定であった。しかし、3-1の方法論開発のための初期調査の段階において、開発地と周辺農地また森林の土壌炭素蓄積量に関係性がほとんどないことが予測された。そのため、IPCCガイドラインの方法である「ESM法を利用する場合はすべての土地利用についてESM法を適用すべき」というガイダンスは適当ではないことが明らかとなり、最終年度の研究計画を変更し、開発地には従来から使用されている各土地利用の平均炭素蓄積量同士を比較して係数を算出する方法を適用することとした。これは、IPCCに提言すべき成果である。

開発地の平均土壌炭素量を算出するには、多様な開発地の土地利用形態を反映し、土地利用形態別に炭素量を算出して、それらの構成比により加重平均を行う必要がある。土地利用形態については、サブテーマ1および2から得られた森林および農地から開発地に転用された地点の土地利用種別を参考に、我が国の温室効果ガスインベントリの活動量推計に用いられている農林水産省の土地転用に関する業務統計^{7),8)}に基づき、森林および農地から開発地に転用された転用先の土地分類を類似の区分に集約して土地利用区分を設定した。

土地利用区別の炭素量については、外崎ら⁹⁾の方法論を参考に土地被覆の形態を樹林・草地等の緑被地と舗装・建物等がある非緑被地とに二分し、主要都市の緑の実態調査や空中写真の判読等により敷地面積に対する緑地面積の割合（以下、「緑被率」という。）を算出するとともに、既往文献等から緑被地の土壌炭素変化量を推計しこれらを加算することにより算出した。森林および農地から開発地への土地利用変化に伴う炭素量の変動プロセスについては、既往知見がほとんどないことから、土地利用変化が生じたときから土地利用変化がない土地に併合するまでの遷移期間については、IPCC2006ガイドラインのデフォルト値である20年間とした。最後に土地利用区別の炭素量を転用先の面積比で加重平均し、開発地の平均炭素蓄積量を算出した。

4. 結果及び考察

4-1. 調査手法の開発

(1) 宅地における炭素濃度

○造成方法による違い

土壌調査は、工事中のニュータウンである茨城県つくば市のS地区とK地区の森林および農地から造成された宅地において実施した。両地区とも、切土・盛土の土量については地区内で均衡しており土砂の搬出入はない。従前土地履歴（森林、農地）、造成方法（切土、盛土）等を確認し、図3.1に示すように従前土地履歴と造成方法を組み合わせた4地点、各地点3ヶ所、合計12ヶ所で計36試料のサンプリングを行った。

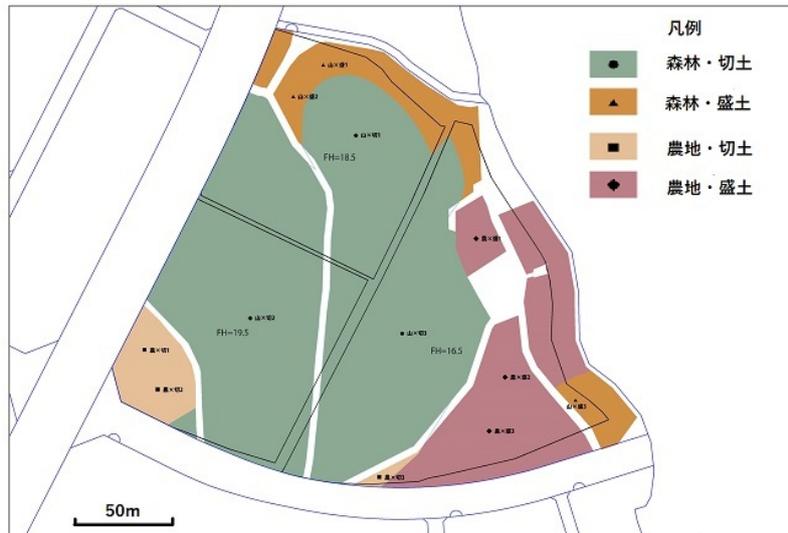


図 3.1 宅地における土壌調査地点の設定事例

注) 森林・農地は従前土地履歴を、切土・盛土は造成方法を示す。

以降、炭素濃度の違いは、箱ひげ図にて説明する。箱ひげ図は、×が平均値、箱中の横線が中央値、箱の下端が第一四分位、箱の上端が第三四分位、ひげの両端は箱の長さの1.5倍以内にある最大値と最小値、最大値と最小値の外側の点は外れ値を示している。深度の違いが炭素濃度に影響を与えていないことを確認するため、両地区の深度別炭素濃度を図 3.2、図 3.3 に示した。炭素濃度の平均値は両地区とも大きな差は確認できなかったが、バラツキを見ると S 地区は 0.1%~7.4%、K 地区は 0.7%~2.5% となり、S 地区の方が大きいことが示された。

両地区の従前土地履歴別の造成方法別炭素濃度を図 3.4、図 3.5 に示す。S 地区では、従前土地履歴の違いによらず、盛土の炭素濃度が切土よりも高かったが、K 地区では従前土地履歴・造成方法の違いは見られなかった。両地区の炭素濃度のバラツキに差異が生じた原因を検討するため、表土除去後の切土部の炭素濃度を測定し、両地区とも平均約 1.5%であることを確認し、両地区の差異は、造成工事により炭素濃度が高い表土が、S 地区では地表部の盛土材として、K 地区では谷底部の盛土材として用いられたためと考えられた。このことから、宅地の炭素濃度は、従前土地履歴の表層土と下層土の炭素濃度と造成方法の双方の影響を受けている可能性が示唆された。

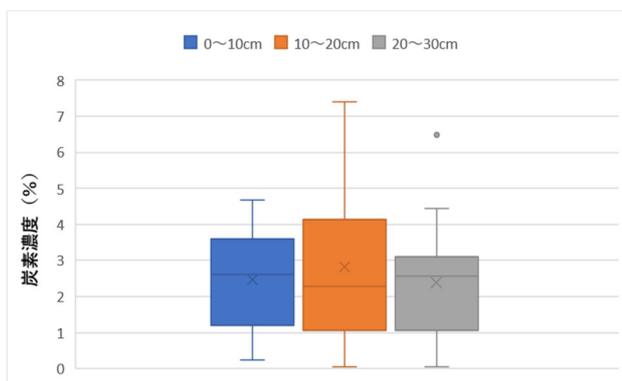


図 3.2 深度別炭素濃度 (つくば市 S 地区)

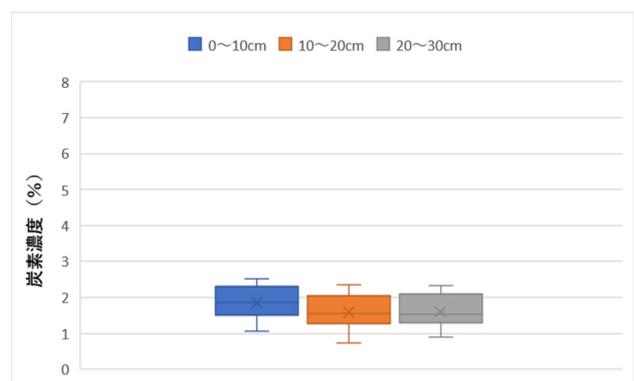


図 3.3 深度別炭素濃度 (つくば市 K 地区)

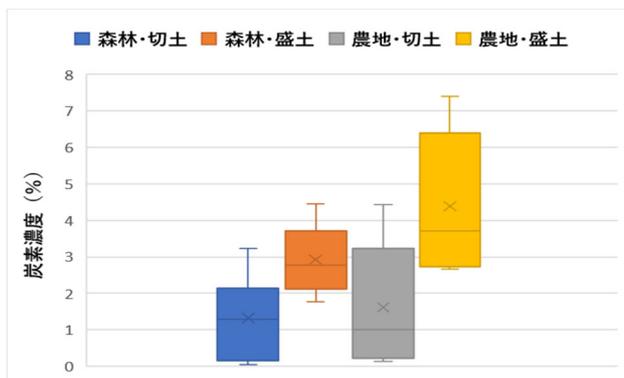


図 3.4 造成方法別炭素濃度（つくば市 S 地区）

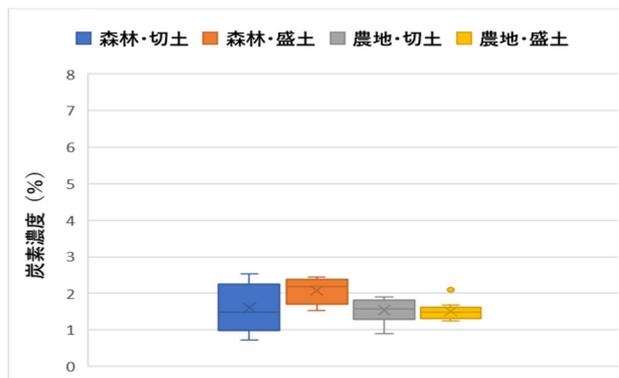


図 3.5 造成方法別炭素濃度（つくば市 K 地区）

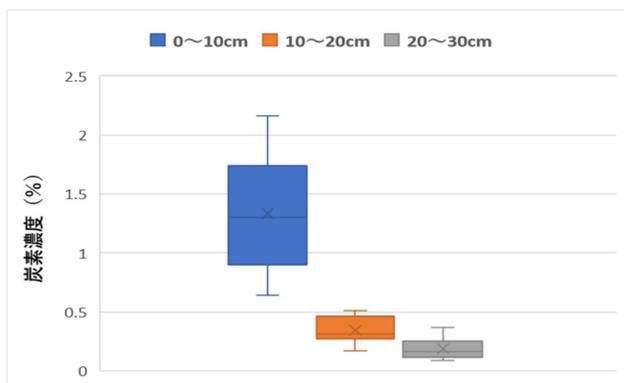


図 3.6 深度別炭素濃度（長岡市 O 地区）

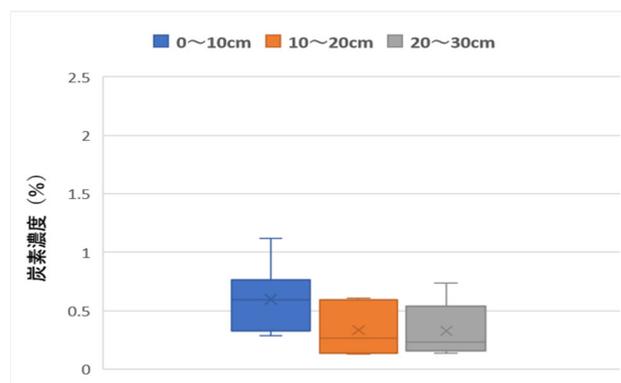


図 3.7 深度別炭素濃度（柏崎市 F 地区）

○造成後の経過年数による違い

造成後の経過年数による炭素濃度の違いを把握するため、既設の産業団地である新潟県長岡市の O 地区（分譲開始後 22 年経過）と柏崎市の F 地区（分譲開始後 11 年経過）の未分譲の宅地を対象に土壌調査を実施した。これらの宅地は、雑草刈り（数回／年）が実施されており、造成以降の土地改変や舗装等はない。従前土地履歴はいずれも森林であり、造成方法はそれぞれ切土と盛土であったことから、造成方法と採取地点の組み合わせから、合計 6 ヶ所、計 18 試料のサンプリングを行った。土壌深度に着目して造成後の経過年数による炭素濃度の違いを比較した。図 3.6、図 3.7 から、造成後の経過年数が異なる地区でも、深度 0～10cm の炭素濃度が 10～20cm、20～30cm よりも大きい値を示しており、造成後に侵入した雑草等による経年的な影響を受けている可能性が示唆された。

○盛土に使用した土砂の違い

農地から開発地に転用する場合、経済性の観点から敷地造成のために外部から公共残土等を搬入する機会が多い。地区外土砂の盛土による炭素濃度の違いを把握するため、工事中の産業団地である福島県福島市の O 地区を対象に土壌調査とサンプリングを実施した。O 地区は、農地（水田）を開発地に整備しており、近傍の①高速道路、②公立大学、③公共施設の建設発生土を搬入している。対照区は、地区内で発生した切土盛土を使用して、森林から造成された同県郡山市の K 地区とした。表層地質は、O 地区および盛土材発生地がいずれも堆積岩、郡山 K 地区が火成岩であった。盛土材による炭素濃度の違いを図 3.8 に示す。炭素濃度のバラツキは地点間で異なり、高速道路や公立大学からの盛土材が対照区と比較してバラツキが大きかった。平均炭素濃度に統計的な有意差があるか否かを確認するため、t 検定を行ったところ、有意水準 5%で、高速道路と公共施設、高速道路と対照区の盛土材の平均炭素濃度には有意な差があることが示された。このことから、宅地の炭素濃度は、盛土に使用した土砂の影響を受けていることが示唆された。

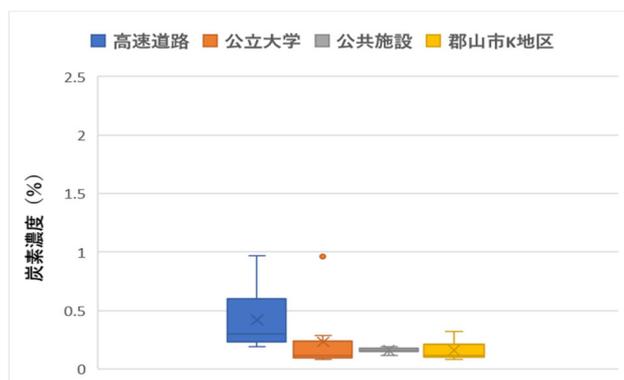


図 3.8 盛土材別炭素濃度

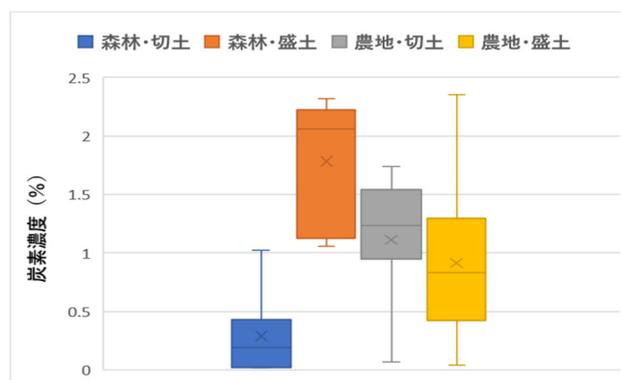


図 3.9 道路（路床）の炭素濃度

(2) 道路の炭素濃度

土壌調査は、茨城県下の令和元年度施工中の新設の国道及び県道の中から、従前土地履歴と造成方法を踏まえ、舗装工事を行う直前の土工事が完了した 10 区間を対象に、各区間 3 ヶ所、合計 30 ヶ所から計 90 試料をサンプリングした。対象とした 10 区間の従前土地履歴と造成方法は、森林・切土（1 区間）、森林・盛土（1 区間）、農地・切土（2 区間）、農地・盛土（6 区間）であった。これら 10 区間の炭素濃度を図 3.9 に示す。平均炭素濃度は、高い順に森林・盛土、農地・切土、農地・盛土、森林・切土となり、農地・盛土は 0.1%~2.4%とそのバラツキも 4 つの中で大きくなった。その原因として、盛土材として使用した土砂の影響によることが考えられた。

(3) 調査手法の開発

上記の結果から、森林および農地から転用された開発地の炭素濃度は、造成方法（切土、盛土）、造成後の経過年数、盛土に使用した土砂等の影響を受ける可能性があることが示唆された。また、関係者からのヒアリング結果から、土地履歴情報の有無、調査の難易度及び今後の開発動向等を踏まえ、代表的な開発地として宅地や道路等が一体的に整備される産業団地が、調査対象として適切であると判断された。

一般に、開発地においては、建造物の安全性や安定性等を確保するため、造成時に有機質土等の除去や地盤改良などが行われることから、従前の土壌における炭素濃度との連続性・関係性が断たれることが多い。

これらを踏まえ、調査手法は以下のとおりとした。

1. 全国の新設および既設の産業団地を対象に、従前土地履歴、造成方法、表層地質等を考慮し、未分譲で未利用の宅地を調査地点とする。
2. 産業団地内に造成工事による切土および盛土の宅地がある場合は、調査地点当たり切土および盛土各 3 ヶ所、合計 6 ヶ所で計 18 試料のサンプリングを行う。
3. 地区外からの盛土材の搬入先が異なる宅地がある場合は、搬入先毎に 1 調査地点として扱い、調査地点当たり 3 ヶ所、計 9 試料のサンプリングを行う。
4. 土壌調査、サンプリングおよび室内分析の方法は、3-1 に示した方法と同様とする。
5. 採取した土壌の仮比重と炭素濃度および土壌断面の石礫率により炭素量を算出し、以降の検討には炭素量を用いる。

4-2. 森林および農地から転用された開発地における造成後の炭素量の初期値の算出

(1) 転用された地点の表層地質別構成比

サブテーマ 1 および 2 から得られた森林および農地から開発地に転用された地点の位置情報を利用して、20万分の 1 日本シームレス地質図により、森林および農地から開発地に転用された地点の表層地質別構成比を算出した。森林から開発地に転用された地点の表層地質は、堆積岩（約 68%）と火成岩（約 23%）が全体の約 91%を占め、変成岩その他は約 9%であった。一方、農地から開発地に転用された地点の

表層地質は、堆積岩が全体の約88%を占め、火成岩が約9%、変成岩その他は約3%であった。これは、農地から開発地に転用された地点数の約70%が水田であることに起因するものと考えられた。

この結果を踏まえ、森林から開発地に転用された地点については、表層地質が堆積岩と火成岩の地点を調査対象とし、農地から開発地に転用された地点については、表層地質が堆積岩の地点のみを調査対象とすることとした。なお、日本立地センターの産業用地情報等により選定された土壤調査の候補地にも、表層地質が火成岩である農地から転用された地点はなかった。

(2) 調査地点の概要

選定された土壤調査の候補地のうち、調査適地と判定され、かつ土壤採取の許可が得られて土壤採取した地点は、研究期間全体（令和元年度から令和3年度）で33地点であり、岩盤等により3深度のデータに一部欠測があった地点は7地点であった。従前土地履歴別の調査地点の内訳は表3.1のとおりである。産業団地は、通常の造成から分譲開始まで数ヶ年を要することから、2015年以降に分譲開始または造成完了した調査地点を新設団地、それ以前に分譲開始した調査地点を既設団地とした。

表3.1 従前土地履歴別の調査地点数

従前土地利用	森林			農地	合計
	堆積岩	火成岩	計	堆積岩	
新設団地	3	5	8	8	16
既設団地	4	3	7	3	10
計	7	8	15	11	26

各調査地点の所在する市町村名、調査地点の従前土地履歴、造成方法、表層地質、造成時期、造成から調査までの経過年数および炭素量を表3.2に示す。造成方法については、大規模な切土盛土による造成を切盛土、小規模な切土盛土である不陸整正による造成を不陸整正、外部土砂の搬入による造成を盛土とした。造成時期については、2015年以降に分譲開始または造成完了した新設団地については新設とし、それ以前に分譲を開始した既設団地については既設とした。なお、産業団地の場合、立木伐採等から始まる工事着手から関連公共施設の整備を含め分譲開始まで数ヶ年を要する場合があります、分譲開始の時期と土地利用転換の時期とは必ずしも一致しない。

(3) 炭素量の初期値の算出

表3.2の結果より全数（n=26）の炭素量は、平均値20.1MgC/ha、標準偏差18.0MgC/haであった。また、2015年度以降に造成された新規団地の炭素量とそれ以前に造成された既設団地の炭素量を比較したところ、新設団地（n=16）の炭素量は、平均値21.2MgC/ha、標準偏差21.3MgC/ha、既設団地（n=10）の炭素量は、平均値18.3MgC/ha、標準偏差11.6MgC/haであった（図3.10）。新規団地と既存団地の平均炭素量に統計的な有意差があるか否かを確認するため、t検定を行ったところ、有意水準5%で、産業団地の造成時期による平均炭素量には差がないことが示された。

従前土地履歴が森林と農地の炭素量を比較したところ、従前土地履歴が森林（n=15）の炭素量は、平均値16.6MgC/ha、標準偏差14.5MgC/ha、従前土地履歴が農地（n=11）の炭素量は、平均値24.8MgC/ha、標準偏差21.7MgC/haであった。従前土地履歴が森林と農地の平均炭素量に統計的な有意差があるか否かを確認するため、t検定を行ったところ、有意水準5%で、従前土地履歴の違いによる平均炭素量には差がないことが示された。

表3.2 調査地点の概要と炭素量

地点番号	市町村名	従前土地履歴	造成方法	表層地質	造成時期	造成から調査までの経過年数	炭素量 (MgC/ha)	
							平均値	標準偏差
No.1	茨城県つくば市	森林	切盛土	堆積岩	新設	<5	47.5	29.0
No.2	〃	農地	〃	〃	〃	〃	74.1	53.5
No.3	新潟県長岡市	森林	〃	〃	既設	22	20.9	7.6
No.4	〃 柏崎市	〃	〃	〃	〃	13	15.1	8.2
No.5	福島県福島市	農地	盛土	〃	新設	<5	11.8	6.5
No.6	〃	〃	〃	〃	〃	〃	7.7	6.9
No.7	〃	〃	〃	〃	〃	〃	3.8	0.2
No.8	茨城県つくば市	農地	切盛土	〃	〃	〃	38.5	9.1
No.9	〃	森林	〃	〃	〃	〃	46.1	13.2
No.10	長崎県大村市	〃	〃	火成岩	〃	〃	3.5	3.1
No.11	群馬県甘楽町	農地	不陸整正	堆積岩	〃	〃	34.2	12.3
No.12	兵庫県上郡町	森林	切盛土	火成岩	〃	〃	12.6	6.2
No.13	滋賀県竜王町	〃	〃	堆積岩	〃	〃	4.8	2.9
No.14	石川県志賀町	〃	〃	火成岩	既設	41	12.5	5.4
No.15	〃 金沢市	〃	〃	堆積岩	〃	17	23.5	10.6
No.16	〃 加賀市	農地	盛土	〃	新設	<5	0.9	0.2
No.17	北海道千歳市	森林	切盛土	火成岩	〃	〃	9.3	4.6
No.18	広島県三原市	〃	〃	〃	〃	〃	1.3	1.7
No.19	山形県新庄市	〃	〃	堆積岩	既設	36	3.8	2.1
No.20	岩手県北上市	農地	盛土	〃	新設	<5	16.6	9.4
No.21	宮城県大衡町	森林	切盛土	火成岩	既設	19	16.2	7.9
No.22	静岡県小山町	〃	〃	〃	新設	<5	26.9	17.7
No.23	高知県香美市	農地	〃	堆積岩	既設	17	18.8	7.8
No.24	青森県青森市	森林	〃	火成岩	〃	21	5.1	3.4
No.25	長野県飯山町	農地	不陸整正	堆積岩	〃	32	21.3	6.1
No.26	〃	〃	〃	〃	〃	25	45.4	10.1

表層地質が堆積岩と火成岩の炭素量を比較したところ、表層地質が堆積岩(n=18)の炭素量は、平均値24.2MgC/ha、標準偏差19.8MgC/haであった。表層地質が火成岩(n=8)の炭素量は、平均値10.9MgC/ha、標準偏差8.2MgC/haであった(図3.11)。表層地質が堆積岩と火成岩の平均炭素量に統計的な有意差があるか否かを確認するため、t検定を行ったところ、有意水準5%で、表層地質による平均炭素量には差があることが示された。

以上のことから、造成工事により開発地の炭素量は、①表土の移動・攪乱等により従前土地履歴との連続性・関係性は低くなり、地盤である表層地質の炭素量に依存すること、②造成後の雑草侵入による増加や土砂流失・二次造成による減少等の影響は多少あるものの、その絶対量が小さいこともあり、経年的にはほとんど変化しないことが示唆された。

上記の表層地質別の平均炭素量と、4.2.(1)の従前土地履歴別の表層地質別構成比から算出した堆積岩と火成岩の比率より、表3.3に示すように森林および農地から開発地への土地転用時の炭素量の初期値を、森林からの転用時約21MgC/ha、農地からの転用時約23MgC/haと算出した。

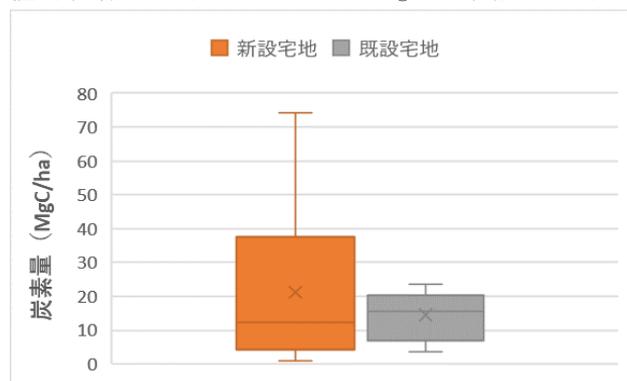


図 3.10 造成時期別の炭素量

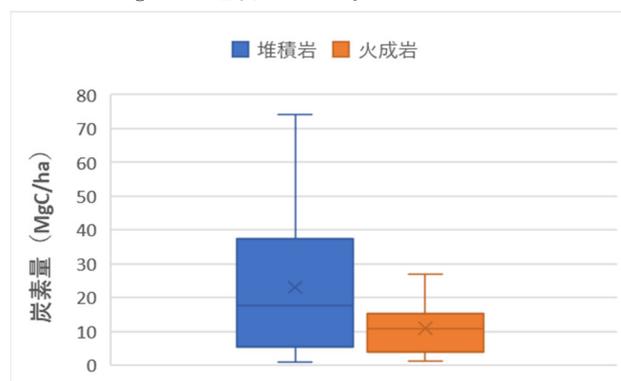


図 3.11 表層地質別の炭素量

表 3.3 土地転用時の炭素量の初期値

土地転用	表層地質別構成比		炭素量の初期値 (MgC/ha)
	堆積岩	火成岩	
森林→開発地	75%	25%	20.8
農地→開発地	90%	10%	22.9
炭素量(MgC/ha)	24.2	10.9	

4-3. 開発地の平均炭素蓄積量の算出

(1) 開発地の土地利用区分

サブテーマ1およびサブテーマ2において、森林および農地から開発地に転用された地点を国土数値情報等の利用により検出する方法が開発された。土地利用変化後のデータとして利用した平成21年度国土数値情報の土地利用種別のうち、開発地に該当する種別は表3.4に示す建物用地、道路、鉄道、その他の用地、ゴルフ場である。判読方法は、三次メッシュ1/10細分区画（100mメッシュ）の中で、最大面積を示す土地利用を100メッシュとして土地利用データを作成するという、ベクトル手法を取っている。このため、面積の小さい施設や線的な施設は過小評価される可能性がある。また、土地被覆の判読であるため、ゴルフ場等のように施設内の樹林被覆地が森林の種別に区分されていることに留意する必要がある。

表3.4 国土数値情報（平成21年度）の土地利用種別と定義

コード	種別	定義
0700	建物用地	住宅地・市街地等で建物が密集しているところとする。
0901	道路	道路などで、面的に捉えられるものとする。
0902	鉄道	鉄道・操車場などで、面的にとらえられるものとする。
1000	その他用地	運動競技場、空港、競馬場・野球場・学校・港湾地区・人工造成地の空地等とする。
1600	ゴルフ場	ゴルフ場のゴルフコースの集まっている部分のフェアウェイ及びラフの外側と森林の境目を境界とする。

森林から開発地への転用については、林野庁が実施している林地開発許可処分に関する業務統計の開発行為の目的に基づき、開発地に該当するものを抽出した。土砂の採掘については、国土数値情報で「採鉱地」が「荒地」の種別に分類されていること等から開発地から除外した。農地から開発地への転用については、農林水産省が実施している農地の移動と転用に関する業務統計の転用先の用途に基づき、開発地に該当するものを抽出した。土石等採取用地については、森林と同様に開発地から除外した。

これらを参考に森林および農地から開発地に転用された転用先の土地分類を類似の区分に集約し、表3.5に示す宅地系、道路系、草地系、公園系の4つの土地利用区分を設定した。林地開発のうち「別荘地の造成」と「レジャー施設の設置」については、「住宅用地の造成」に比べ残置森林率が高いことから公園系に、農地転用のうち「その他の業務施設（除く土石等採取用地）」については、駐車場等が多く含まれることから道路系に区分した。

(2) 土地利用区分別の緑被率

4つの土地利用区分のうち公園系と草地系の緑被率については、都市公園とゴルフ場の緑被率に関する既往研究^{9),10)}の値を採用し、樹林地と草地を合わせ公園系の緑被率を約61%、草地系の緑被率を約96%と設定した。

宅地系の緑被率については、主要都市の「緑の実態調査」や「緑の基本計画」等の中から、土地利用区分別の緑被データが取得可能な23都市^{11)~33)}を選定し、都市ごとに宅地系土地利用の緑被率を計算した。これら、23都市の宅地系の緑被率平均値として13%を採用した。

表3.5 開発地の土地利用区分と林地開発の目的・農地転用先の用途

区分	林地開発の目的	農地転用先の用途
宅地系	工事・事業場用地の造成	住宅用地
	学校・博物館用地の造成	学校用地
	住宅用地の造成	官公・病院等公的施設
		鉱工業（工場）用地
		商業サービス等用地（除くゴルフ場）
道路系	道路の新設又は改築	道水路・鉄道用地
	鉄道・軌道・索道の新設又は改築	その他の業務用地（除く土石等採取用地）
草地系	ゴルフ場の設置	ゴルフ場
公園系	公園・運動場等の造成	公園・運動場用地
	別荘地の造成	
	レジャー施設の設置	

表3.6 対象とした23都市の宅地系土地利用の緑被率と報告年

都	市	名	緑被率	報告年	都	市	名	緑被率	報告年
東京都	中央区		6.1%	2018	東京都	荒川区		7.6%	2018
〃	港区		20.4%	2017	〃	板橋区		14.2%	2020
〃	文京区		13.2%	2019	〃	狛江市		18.4%	2011
〃	台東区		7.1%	2019	北海道	札幌市		8.2%	2015
〃	墨田区		6.7%	2019	埼玉県	さいたま市		17.3%	2011
〃	江東区		12.1%	2018	千葉県	流山市		15.2%	2020
〃	品川区		12.6%	2020	愛知県	名古屋市		10.1%	2021
〃	目黒区		15.7%	2015	福岡県	福岡市		16.6%	2009
〃	大田区		10.2%	2019	〃	北九州市		12.4%	2012
〃	世田谷区		19.0%	2017	〃	行橋市		17.9%	2020
〃	杉並区		20.8%	2018	佐賀県	佐賀市		11.8%	2014
〃	北区		8.1%	2019					
平均値								13.1%	
標準偏差								4.6%	

道路の緑被率に関する既往研究はほとんどないことから、道路平面図等をオルソ化し、GIS上で航空写真判読により緑被地を抽出し、緑被地面積を道路面積で除し緑被率を算出した。道路の構造は、その種類や存在する地域、地形の状況、計画交通量により異なることから、東京都が管理する世田谷区、青梅市、檜原村の都道等を「一般道路」、東日本高速道路株式会社が管理する東北自動車道を「高規格道路」とし、平野部および山間部の区間に分けて、分析に使用した。なお、道路幅員5.5m未満、橋・高架、トンネル等の区間は調査対象から除外した。

分析対象の総延長は、都道100km以上（平野部50km以上、山間部50km以上）、東北自動車道100km以上（平野部50km以上、山間部50km以上）となった。この分析対象を、1区間あたり道路延長900m～1,100mの範囲内に収まるように切り出し、平野部50区間、山間部50区間の計100区間を抽出して、緑被地の判読に使用した。表3.7に緑被地の判読に用いたデータを、表3.8に道路規格・地形別の緑被率を示す。なお、箱ひげ図による外れ値は除外した。

表3.7 緑被率の算出に用いたデータと使用方法

データ名称	使用方法
東京都 道路台帳平面図PDF	道路敷地境界を示すラインをGIS上でデジタル化して道路敷地データを作成した。
東北自動車道平面図CAD	道路敷地境界を示すラインをGIS上で抽出して道路敷地データを作成した。
Google Earth 航空写真	画面上で緑被を判読し、ポリゴン化した。
Google ストリートビュー	緑被や現場状況の確認の参考とした。

表3.8 道路規格・地形別の緑被率

	一般道路		高規格道路	
	平野部	山間部	平野部	山間部
緑被率	6.2%	36.7%	39.3%	55.0%
標準偏差	5.0%	21.0%	12.1%	8.3%
N	48	50	50	50

一般道路と高規格道路の整備量は時代とともに変化することから、サブテーマ1および2において開発地に転用された地点の抽出に用いた1988～1991年と2007～2009年の期間設定に準じ、この間に整備された道路について道路規格別面積構成比と地形別地点数構成比を求め、これらの構成比と道路規格・地形別の緑被率により道路系の緑被率を算出した。

表3.9に示す道路規格別面積構成比については、道路統計年報³⁴⁾の1989年度末から～2009年度末の20年間の変化量により算出した。道路規格については、高速自動車国道、一般国道指定区間を高規格道路、それ以外を一般道路とした。表3.10に示す地形別地点数構成比については、サブテーマ1および2において森林および農地から開発地に転用された地点のうち道路に転用された地点について、20万分の1土地分類基礎調査地形分類図³⁵⁾の地形情報により算出した。地形分類上のローム台地、台地・段丘・砂礫台地、台地段丘、低地を平野部、火山地、山地、丘陵地を山間部とした。表3.8の道路規格・地形別の緑被率を、道路規格別面積構成比と地形別地点数構成比により加重平均し、表3.11に示すように道路系の緑被率を約24%と算出した。

表3.9 道路規格別面積構成比

	一般道路	高規格道路	計
1989年度末	7,246	746	7,992
2009年度末	8,975	1,187	10,162
変化量	1,728	441	2,169
構成比	79.7%	20.3%	

単位：km²

表3.10 地形別地点数構成比

土地転用	平野部	山間部
森林→道路	38.6%	61.4%
農地→道路	80.6%	19.4%
森林+農地→道路	60.8%	39.2%

表3.11 道路規格別緑被率

	一般道路	高規格道路	道路全体
緑被率	18.1%	45.5%	23.7%

(3) 緑被地の炭素蓄積速度

開発地における緑被地の形態は様々であり、樹木に覆われた部分もあれば草本類・芝・地被類に覆われた部分もある。また、都市公園やゴルフ場のように土壌改良等が行われ整備・管理される緑地もあれば、空き地に雑草が繁茂している緑地などもある。このため、立地条件、植栽方法、管理状況等により緑被地の炭素蓄積速度は異なることが予想された。

開発地における緑被地の炭素蓄積速度に関する文献調査^{9), 36)～55)}の結果を表3.12に示す。表中のデータの一部については、外崎ら⁵⁶⁾の上下差分法により土壌深0-30cmの炭素量と土壌深30cm以下の炭素量の差分を変化量と見做し、経過年数で除して算出した。炭素蓄積速度を比較すると、日本では0.06～3.10MgC/ha/yr、米国では0.25～5.4MgC/ha/yrであった。また、Vindus`kov & Frouz⁵⁵⁾による北半球で

の露天掘り跡地（石炭・オイルシェール）の植生回復地（自然遷移を含む。）を対象とした研究によると、植生回復地の炭素蓄積速度は植生タイプによる有意な差はなかった。

航空写真による緑被判読において多くの都市が樹林地と草地の2区分を目視により行っており、これ以上の細分化は困難であること、既往研究によると樹林地と草地の炭素蓄積速度の平均値に大きな差がないことから、アドバイザー会合の意見等を踏まえ、開発地の緑被地については土地利用区別の差異を設けず、平均炭素蓄積速度を1.5MgC/ha/yrと設定した。

(4) 転用後の土地利用区別の構成比

森林や農地から開発地への転用は、社会経済情勢により量的にも質的にも大きく変化する。森林および農地から開発地に転用された土地の転用後の土地利用区別構成比を、(1)で用いた林野庁の林地開発許可処分に関する業務統計と農林水産省の農地の移動と転用に関する業務統計により算出した。算定対象の期間は、サブテーマ1および2の検討結果を踏まえ1990年から2009年の20年間とした。

表3.13に示すように森林から転用された開発地の構成比は、宅地系が約37%、道路系が約23%、草地系が約34%、公園系が7%であった。また、表3.14に示すように農地から転用された開発地の構成比は、宅地系が約53%、道路系が約45%、草地系が約0%、公園系が2%であった。

2000年以降の約20年間及び直近の約10年間の構成比と比較すると、森林から転用された開発地のうち草地系すなわちゴルフ場の構成比が高い時期であった。農地から転用された開発地については、構成比の経年的な変化は少なかった。

(5) 平均炭素蓄積量の算出

これまでの検討結果を踏まえ、森林および農地から転用された開発地について、造成後の植生回復活動を加味した転用後20年時点の平均炭素量を算出した。森林から転用された開発地については表3.15に示すように約35MgC/ha、農地から転用された開発地については表3.16に示すように約29MgC/haであった。また、これらを転用時の面積比により加重平均し、表3.17に示すように森林および農地から転用された開発地全体の平均炭素蓄積量を約30MgC/haと算出した。この方法により、今後、開発地に転用される森林および農地の面積比や転用先の土地利用区分の構成比の変化に対応し、開発地の平均炭素蓄積量を再計算することが可能である。

精度向上に向けた今後の課題としては、①造成により除去・埋没等された土壌炭素量の取り扱い、②多様な土地利用形態がある開発地の炭素蓄積速度および遷移期間の改善、③社会経済情勢の変化に対応した係数の見直しなどの検討を進める必要がある。

表3.12 開発地の炭素蓄積速度

地域	種別	植生	炭素蓄積速度 (Mg C/ha/y)	備考	出典
日本	都市公園	芝生地	3.10	植栽後20年まで	外崎ら 2013
		樹林地	1.73	〃	
	都市公園等	緑被地	1.94	植栽後20年まで	GHGインベントリの値 と緑被率により再計算
			2.09	植栽後20～30年	
	高速道路路面	草地	2.47	西洋芝・ホワイトクロー バー, 植栽後15年まで	外崎 2013
	宅地切土法面	樹林地	0.87	アラカン, コナラ, クヌギ 等のポット苗, 植栽後18年	小宅ら 2016 上下差 分により再計算
	博覧会跡地 盛土	〃	0.98	マサ土, 照葉樹等, 密植, 土壌改良なし, 植栽後30年	佐々木ら 2007 上下 差分により再計算
			1.29	大阪層群(堆積岩系), 以 下は上記と同じ	
	道路緑地帯	街路樹	0.06～1.01	マサ土, ホルトノキ, マテ バシイ等, 植栽後15年	朱ら 1989 上下差分 により再計算
	屋上緑化	芝生地	1.07	コウライシバ, 植栽後13年	黒沼ら 2014
	発電所緑地帯	樹林地	0.22～1.33	ヤマモモ, ウバメガシ, ス ダジイ等, 植栽後16～19年	松井ら 2005
	御岳岩屑流 堆積地	〃	0.95	サワラ, 植栽後17年	酒井ら 2006
1.57			ヤマハンノキ, 植栽後17年		
三宅島火山灰 堆積地	非植栽地	0.32～0.87	ハチジョウススキ, ヤシャ ブシ等, 噴火後8年	川越ら 2011	
阿蘇半自然 草地	〃	0.55	14c 年代測定等, 蓄積期間 10年間	当真ら 2011	
米国	都市公園	芝生地	1.43	観賞用芝生地, 植栽後35年 まで, 深さ20cm	Townsend-Small & Czimczik 2010
	宅地	〃	0.9～5.4	住宅の庭	Selhorst & Lal 2013
	〃	〃	0.25～2.04	管理の異なる芝生地	Zirkle et al. 2011
	〃	〃	0.82±0.30	従前農地(46.9±4.7 Mg C/ha), ~45年, 深さ1m	Raciti et al. 2011
	ゴルフ場	フェアウェイ	3.55	従前農地, 深さ15cm	Selhorst & Lal 2011
		ラフ	2.64		
	〃	芝生地	0.9～1.0	開設後25-30年急増、45年 まで増加	Qian & Follett 2002
	〃	〃	0.9～1.2	開設後30～40年	Bandaranayake et al. 2003
再自然化緑地	野草地	1.1	従前農地, Conservation Reserve Program, ~15年	Gebhart et al. 1994	
ニュージー ランド	ゴルフ場	〃	0.69	40年まで, 深さ25cm	Huh et al. 2008
米国	露天掘り採掘 跡地(石炭・ オイルシェ ール)	10年目	1.88	植生回復地(自然遷移を含 む) 93地点, 造成後4～65 年	Vindus'kov & Frouz 2013
チェコ		20年目	1.55		
ドイツ		30年目	1.22		
エストニア		針葉樹林	0.81		
トルコ	落葉樹林	2.31	30年まで, 42地点		
		草地	1.81		

表3.13 森林から転用された開発地の構成比

土地利用区分	1990-2009	2000-2019	2010-2019
宅地系	36.5%	63.0%	77.7%
道路系	22.9%	31.5%	20.8%
草地系	33.7%	1.2%	0.3%
公園系	6.9%	4.4%	1.2%

表3.14 農地から転用された開発地の構成比

土地利用区分	1990-2009	2000-2018	2010-2018
宅地系	53.3%	52.3%	50.5%
道路系	44.5%	46.4%	48.6%
草地系	0.2%	0.3%	0.2%
公園系	2.1%	1.0%	0.8%

表3.15 森林から転用された開発地の平均炭素量

土地転用先	転用時面積比	土地被覆面積比		土壌炭素量 (Mg-C/ha)	
		緑被地	その他	転用先別平均	開発地平均
宅地系	36.5%	13%	87%	24.7	34.8
道路系	22.9%	24%	76%	28.0	
草地系	33.7%	96%	4%	49.6	
公園系	6.9%	61%	39%	39.1	
計	100%	47%	53%	緑被地炭素蓄積変化	
土壌炭素量(t-C/ha)		50.8	20.8	1.5t-C/ha/yr×20年間	

表3.16 農地から転用された開発地の平均炭素量

土地転用先	転用時面積比	土地被覆面積比		土壌炭素量 (Mg-C/ha)	
		緑被地	その他	転用先別平均	開発地平均
宅地系	53.3%	13%	87%	26.8	28.6
道路系	44.5%	24%	76%	30.1	
草地系	0.2%	96%	4%	51.7	
公園系	2.1%	61%	39%	41.2	
計	100%	19%	81%		
土壌炭素量(t-C/ha)		52.9	22.9		

表3.17 開発地全体の平均炭素量

土地転用元	転用時面積比	土壌炭素量 (Mg-C/ha)	
		転用元別平均	開発地平均
森林	22%	34.8	30.0
農地	78%	28.6	

5. 研究目標の達成状況

代表的な開発地として宅地と道路が一体的に整備されるニュータウンと産業団地を対象に多点調査を行い、地域全体の土壌炭素蓄積量を評価する調査手法を開発した。この手法を用いて、全国30地点以上で土壌調査を実施した。IPCCの推奨する方法に問題があることを発見したため、研究計画を変更し、従来から使用されている各土地利用の平均炭素蓄積量同士を比較して係数を算出する方法を適用することとし、開発地の平均土壌炭素蓄積量を算出することとした。サブテーマ1およびサブテーマ2から提供された森林および農地から開発地に転用された地点の位置情報等を参考に、開発地における造成直後の炭素量の初期値を算出した。既往資料や空中写真等により植生回復による土壌炭素変化量を初期値に加算し、開発地の平均土壌炭素蓄積量を算出し、これを基にサブテーマ4と協力して土地利用変化係数をサブテーマ4において算出した。IPCCの推奨する方法が適用できないという困難な状況から、代替する手法を考案し、あらゆる科学的根拠のあるデータから開発地の平均土壌炭素蓄積量を算出することができたため、研究目標は計画を上回って達成された。

6. 引用文献

- 1) 温室効果ガスインベントリオフィス. 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2021年, 6-57pp
- 2) 国土交通省. “全国のニュータウンリスト (平成30年度作成)” .
https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/totikensangyo_tk2_000065.html?
- 3) 日本立地センター. “産業用地情報” . <https://www.jilc.or.jp/pages/33/>
- 4) IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS et al. editors. Kanagawa (JP): I GES.
- 5) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター. “20万分の1日本シームレス地質図 “. <https://gbank.gsj.jp/seamless/index.html?lang=ja>
- 6) 磯山功・斎藤英二・渡邊和明・橋本知昌・山田直利 (1984) 100万分の1目本地質図 (第2版) から求めた各種岩石・地層の分布面積, 地質調査所月報, 35(1), 25-47
- 7) 林野庁. “林地開発許可処分の推移” .
https://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/con_4.html
- 8) 農林水産省. “農地の権利移動・借賃等調査” .
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/nouti_kenri/
- 9) TONOSAKI, Kochi et al. (2013) Estimation of Soil Carbon Accumulation Rate in Urban Parks, J. Jpn. Soc. Reveget. Tech., 38(3), 373-390
- 10) 縣和一 (2018) 大気の浄化、地球温暖化防止に寄与するゴルフ場 - 現状における試算値 -, 公益社団法人ゴルフ緑化促進会 <https://www.ggg.or.jp/public/> (参照:2019年8月8日)
- 11) 中央区 (2018) 中央区緑の実態調査 (第5回) 報告書, 34pp
- 12) 港区 (2017) 港区みどりの実態調査 (第9次) 報告書, 33pp
- 13) 文京区 (2019) 第8次 文京区緑地実態調査報告書, 99pp
- 14) 台東区 (2019) 台東区みどりの実態調査報告書, 43pp
- 15) 墨田区 (2019) 墨田区緑と生物の現況調査報告書, 28pp
- 16) 江東区 (2018, 平成29年度 江東区緑被率等調査報告書, 31pp
- 17) 品川区 (2020, 品川区みどりの実態調査報告書, 19pp
- 18) 目黒区 (2015, 平成26年度 みどりの実態調査報告書, 31pp
- 19) 大田区 (2019, 平成30年度 大田区みどりの実態調査報告書, 43pp
- 20) 世田谷区 (2017) 平成28年度 世田谷区みどりの資源調査報告書, みどり-56pp
- 21) 杉並区 (2018) 平成29年度 杉並区みどりの実態調査報告書, 40pp
- 22) 北区 (2019) 平成30年度 北区緑の実態調査報告書、資料10pp
- 23) 荒川区 (2018) 平成29年度 荒川区みどりの実態調査 (第5次) 報告書, 資-5pp
- 24) 板橋区 (2020) 板橋区緑地・樹木の実態調査 (X) 報告書, 33pp
- 25) 狛江市 (2011) 狛江市緑の現況調査報告書, 23pp
- 26) 札幌市 (2015) 平成26年度 札幌市緑被現況調査 (データ貸与)
- 27) さいたま市 (2006) さいたま市緑被現況調査, 24pp
- 28) 流山市 (2020) 流山市 みどりの基本計画, 資料編9pp
- 29) 名古屋市 (2021) 令和2年度 緑の現況調査, 53pp
- 30) 福岡市 (2009) 福岡市 新・緑の基本計画, 23pp
- 31) 北九州市 (2012) 北九州市 緑の基本計画, 90pp
- 32) 行橋市 (2020) 行橋市 緑の基本計画, 9pp
- 33) 佐賀市 (2014) 佐賀市 みどりの基本計画, 11pp
- 34) 国土交通省. “道路統計年報” . <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html>
- 35) 国土交通省. “20万分の1土地分類基本調査” .

https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_20-1.html

- 36) 1)と同じ. pp11-33
- 37) 外崎公知 (2013) 高速道路のり面における植生別の土壤炭素ストック変化量, 日緑工誌, 39(2), 301-306
- 38) 小宅由似・今西純一・吉田博宣・柴田昌三 (2016) 京都府木津川市の大坂層群切土法面における植栽18~19年後の植生及び土壤の解析, 日緑工誌, 42(2), 308-319
- 39) 佐々木剛・森本幸裕・今西純一 (2007) 施工後30年経過した大規模造成樹林地の林分構造と土壤条件, ランドスケープ研究, 70(5), 413-418
- 40) 朱城賢・須崎民雄・玉泉幸一郎 (1989) 緑地の土壤環境に関する研究 (1) 沿海地における常緑街路樹の土壤と生育, 九大演報, 60, 17-34
- 41) 黒沼尊紀・橋本早織・石原竜彰・吉岡孝治・渡辺均 (2014) 屋上緑化の芝地における土壤の経年変化とCO2固定能の定量化, 日緑工誌, 40(1), 20-24
- 42) 松井直弘・小野由紀子・植野誠二 (2005) エコロジー緑地帯造成後の土壤有機物集積, 日緑工誌, 31(1), 143-146
- 43) 酒井寿夫・森澤猛・溝口岳男・西山嘉彦・森貞和仁 (2006) 御岳岩屑流堆積地における緑化植林後17年目の土壤炭素・窒素貯留量、第117回 日本森林学会大会, PG28
- 44) 川越みなみ・上條隆志・田村憲司 (2011) 三宅島の火山灰堆積地における発達程度の異なる植生が炭素蓄積量と土壤構造発達に与える影響, 日本生態学会誌, 61, 203-210
- 45) 当真要・杉山真二・中坊真・波多野隆介・Fabián Fernández・Ryan Steawart・西脇亜也・山田敏彦 (2011) 阿蘇ススキ半自然地における炭素蓄積速度の定量的評価, 土肥要旨集, 57, 1-34
- 46) Amy Townsend-Small and Claudia I. Czimczik (2010) Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in urban turf, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 37, L02707
- 47) Adam Selhorst・Rattan Lal (2013) Net Carbon Sequestration Potential and Emissions in Home Lawn Turfgrasses of the United States, Environmental Management, 51, 198-208
- 48) Gina Zirklel・Rattan Lal・Bruce Augustin (2011) Modeling Carbon Sequestration in Home Lawns, HORTSCIENCE, 46(5), 808-814
- 49) Steve M. et al. (2011) Accumulation of Carbon and Nitrogen in Residential Soils with Different Land-Use Histories, Ecosystems, 14, 287-297
- 50) Adam L. Selhorst・Rattan Lal (2011) Carbon budgeting in golf course soils of Central Ohio, Urban Ecosystems, 14, 771-781
- 51) Yaling Qian・Ronald F. Follett (2002) Assessing Soil Carbon Sequestration in Turfgrass Systems Using Long-Term Soil Testing Data, 94(4), 930-935
- 52) Bandaranayake W. et al. (2003) Estimation of Soil Organic Carbon Changes in Turfgrass Systems Using the CENTURY Model, Agro. J. 95, 558-563
- 53) D. L. Gebhart・H. B. Johnson・H. S. Mayeux・H. W. Polley (1994) The CRP increases soil organic carbon, Journal of Soil and Water Conservation September, 49 (5), 488-492
- 54) Huh K. Y. et al. (2008) Carbon sequestration in urban landscapes: the example of a turfgrass system in New Zealand, Australian Journal of Soil Research, 46(7), 610-616
- 55) Olga Vindus'ková & Jan Frouz (2013) Soil carbon accumulation after open-cast coal and oil shale mining in Northern Hemisphere: a quantitative review, Environ Earth Sci, 69, 1685-1698
- 56) 外崎公知・鳥山貴司 (2012) 高速道路のり面土壤の二酸化炭素固定量調査, J. Jpn. Soc. Reveget. Tech., 38(1), 137-140

II-4 土地利用変化時の土壤炭素量変化に関するインベントリ算定の実装に関する研究

公益財団法人 地球環境戦略研究機関

気候変動とエネルギー領域/生物多様性と森林領域 梅宮 知佐

気候変動とエネルギー領域/生物多様性と森林領域 天野 正博

<研究協力者>三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 佐藤 淳

【要旨】

UNFCCCの下、各国は定められたIPCCガイドラインに則して温室効果ガス(GHG)インベントリを作成することとなっており、本サブテーマの目的は、他のサブテーマで得られる研究成果をこのガイドラインに基づき統合的に日本のインベントリに反映する方法を開発することである。また、土地利用変化に伴う土壤炭素量変化に関する報告強化の必要性が高い途上国（UNFCCC附属書I国以外）を対象に、本課題の成果の応用を含めた対応策を提示する。主要先進国（UNFCCC附属書I国）のインベントリの詳細な調査及び専門家へのヒアリング調査から、土壤炭素量変化に関する報告の課題は大きく①遷移期間、②算定・報告の区分、③開発地への転用に関する取扱いがあることが分かった。日本の土地利用に関するデータの入手可能性と精度、各土地利用の管理方法、及び各国の各課題に対する取組みを踏まえ、サブテーマ1および2から提供された土地利用変化係数ならびにサブテーマ3から提供された開発地の平均土壤炭素蓄積量を使用して算定方法を定め、日本のGHGインベントリに適用した結果、土地利用、土地利用変化及び林業分野の排出・吸収量の算定結果の精度が、300～700万t-CO₂/年程度（同分野の純吸収量の約10%前後）向上する見込みである。本算定方法については、日本の温室効果ガス算定検討会に提案し結果、令和4年度に作成されるGHGインベントリ（令和5年4月提出）から適用する方針で了承を得た。途上国については、GHGインベントリ上の土壤炭素変化量に関する報告が限定的であったことから、オンラインで質問票調査を実施し、報告の実態と課題の状況を把握した。結果、報告が出来た国・機関は、自ら関連機関との協力強化やインベントリ専門家と土壤研究者の連携強化を通して、追加的に土地利用管理や排出係数等の土壤データを収集していることが分かった。土壤炭素量変化に関する課題認識は、国や機関の状況によって異なり、①GHGインベントリ作成全般、②土壤専門性、③データ収集に関する課題に大きく分類できる。本課題の成果は特に、③土壤データ収集についての意識が強い国・機関に向けて普及するのが効果的であり、今後ベアサンプリング法のマニュアル開発やトレーニングを実施することを提案する。同時に、国際的には、途上国のGHGインベントリの報告強化のため、①、②の課題対応も合わせて進める必要がある。

1. 研究開発目的

各サブテーマで得られる研究成果を、IPCC2006年及び2019年改良版インベントリ・ガイドラインに則して統合的に日本のGHGインベントリ報告・NIRに反映する方法を開発する。加えて、土壤炭素の報告強化の必要性が高い途上国に本課題で開発する研究手法を応用するオプションを示す。

2. 研究目標

各国の土壤炭素変動量に関連する報告方法について調査・整理する。また、土地利用変化の有無における整合性を図るのに必要なインベントリ報告上の課題を特定し、解決策のオプションを提示する。各国の専門家らにヒアリング調査を行い、6土地利用区分における課題を明らかにする。各サブテーマと協力し、統合的なインベントリ算定手法を提示する。活動量把握手法を土地被覆変化による把握手法に転換する可能性も視野に入れ、適切なNIR作成に向けた解決方法のオプションを提示する。

3. 研究開発内容

AFOLU分野における土地利用変化が温室効果ガス吸排出量に大きな変化を与えることに着目し、各国のGHGインベントリを収集・整理し、土壤炭素の変動に関するGHGインベントリ報告上の課題を含めた各

国の報告方法について調査、整理した。また、主要先進国の専門家らにヒアリング調査を行い、土地利用変化の有無における整合性の確保や6土地利用区分の報告における課題について情報を収集した。途上国については、GHGインベントリの報告自体が限定的であったため、同じく途上国の限定的な報告状況に問題意識を持つ国連食糧農業機関（FAO）と協力して、オンラインで現状と課題を把握するための質問票調査を実施した。最後に、先進国の事例も踏まえながら各サブテーマと協力し、各サブテーマの成果を統合的に日本のGHGインベントリに反映する方法を開発し、日本の適切なインベントリ作成の実現に向けて政策担当者らとの協議を進めた。途上国については、質問票調査で収集したデータの分析を基に、本課題の成果の応用を含めた報告改善に向けた対応策のオプションをFAOと共同で考察、提示した。

4. 結果及び考察

4-1. 各国の土壤炭素変動量のインベントリ報告方法、報告上の課題と解決策のオプション

【主要先進国】

2019年4月時点提出のGHGインベントリを調査したところ、新規報告（チェコ）、算定方法の見直し（ベルギー、ブルガリア、イタリア）等、改善と見られる事例が散見された。GHGインベントリ審査やインベントリ提出を経てきたことで、初期に導入していた算定に不備や不適切な点がある場合の問題点が認識されるようになり、科学的側面から妥当性ある方法論に改善される傾向がみられる。また土地面積・土地利用変化面積把握方法に問題を抱えていたが独力での改善に限界があった国において大規模な支援プロジェクトが実施されたことで土地把握のアプローチが大きく改善される様な事例が出ており、本研究課題に基づき日本のインベントリを改善、発信することは、国際的な傾向を踏まえても時宜を得ている。

①開発地への変化

開発地への変化の扱いについては、日本では土地造成に伴い、切土・盛土として表層土の移動が伴う場合がほとんどである。デフォルト値である土壤深度30cmに従った場合、開発地では数mに及ぶ深度で土壤移動があるにも拘わらず、この移動した表層土の一部のみ測定することを意味しかねない。

開発地の土壤量や土壤変化を実測から把握している国は、森林・農地に比べると少なく、2006年IPCCガイドラインのデフォルト想定を利用している国が多い。また、森林・農地の土壤炭素量を細分化して設定していたとしても、開発地についてのパラメータはそこまで細分化をせずに全国一律の土壤炭素量や、土壤炭素変化量にまとめている国が多いことも特徴である。表4.1は、各先進国の開発地の算定概要をまとめたものである。a.に近いほど実測に基づき、f.に近いほど実測はないが保守性を重視している。

このうち、造成に伴う表土の扱いに言及している国は、ブルガリア、ドイツ、スイス、ロシア、アイスランドなどがあるが、ブルガリアは、造成過程において土壤炭素の10%が失われるという想定、ドイツは表土層が移動したとしても土壤炭素量には変化はない、スイスは法律において工事中に発生した土壤は再利用が義務付けられており、工事過程の攪乱で20%の炭素量が失われ土壤は現場で維持されるというIPCCデフォルト想定が国情に合致する、ロシアは土木工事等では土壤は搬出され、現場では炭素量ゼロとなるが非被覆地ではそのまま維持される、アイスランドは個別事例を元にパイプライン敷設に伴う土地利用変化において枯死木・土壤持ち出しはなく土壤炭素ストックは維持される、という説明である。

土壤炭素量や土壤炭素損失量の設定を、開発地のタイプごとに検討するような場合は、舗装等の被覆地と緑地（樹木植生や草生地）別に検討する事例が多い（2006年IPCCガイドラインの転用された開発地の土壤炭素ストック変化の説明において、炭素係数が被覆地、農地利用、草地利用などに分けて説明されていることがその一因であると考えられる）。被覆地における土壤炭素量は、何らかの値を設定しているもの（実測による場合と、他の土地利用の値を代用している場合がある）、減衰量（デフォルトの0.8など）を設定しているもの、ゼロと置くものの、大きく3パターンがある。ただし、この設定において造成に伴う表土層と深土層の混合と言った過程に言及しているもの、土壤炭素量をゼロと設定する場合にその科学的・実測面の詳細説明を提供しているもの国は、基本的に見当たらない状況である。なお、開発地の土地細区分の面積割合については、特定の都市の値を参考にしている場合（オーストリア、ブルガリアなど）と、全国的な土地利用データから設定している場合がある。個別都市の事例が国の代表値として機能するかは開発地の算定における問題点であり、2019年改良IPCCガイドラインの作成過程に

においても、多くの都市のデータを集めたものの、その状況の多様性によって標準的な値を出すことを断念した事例があり、原則的には全国的な代表値として判断できる数値の検討を進める必要がある（例えば、ロシアにおいては、都市と地方における開発地の転用傾向を別々に設定している）。都市レベルの調査結果の利用例としては、ドイツにおいては開発地の土壤炭素量は全国の土壤図を元に作成しているが、その妥当性検証としてベルリンにおける調査結果を利用している。

表4.1 先進国の開発地への転用に伴う土壤炭素量変化に関するインベントリの算定方法まとめ

大分類	方法論	主な対象国
a. 国特有の開発地への転用状況を国独自のデータで考慮	モデルや実測で、実際の損失量を見積もる (Tier 3)	イギリス、カナダ、
	転用のパターンごとに炭素量の減少を考慮して、国独自の減衰量を設定 (Tier 2)	スウェーデン、アメリカ
	転用パターンも考慮して、転用後の土壤炭素量を設定 (Tier 2)	チェコ、ルーマニア、ロシア
b. 国特有の開発地の実測結果を利用、もしくはデフォルト値も含めて変化係数を設定	転用のパターンごとに炭素量の減少を考慮して、デフォルト値も利用しつつ国独自の減衰量を設定 (Tier 2)	フィンランド、アイルランド
	開発地全体の細区分を反映した開発地の土壤炭素量を転用後の値として利用 (Tier 2)	オーストリア、ブルガリア、フランス、ドイツ、ルクセンブルク
c. 国情検討の上で炭素係数利用	Tier 1の炭素係数適用 (国情判断あり、細区分あり等)	キプロス、アイスランド、オランダ、スイス
	開発地の単純平均的な土壤炭素量を転用後の値として利用	スロバキア、トルコ
	転用後の開発地土壤炭素量を、仮定を置いて設定	イタリア、カザフスタン、ポーランド
d. 単純にパラメータを利用	Tier 1の炭素係数適用 (細区分なし)	オーストラリア、デンマーク、ハンガリー、ギリシャ、ラトビア、マルタ、ノルウェー、スペイン、ウクライナ
e. 単純な平均値利用	他の土地の土壤炭素量を開発地への転用後の値として代用	ベルギー、ニュージーランド、スロベニア
f. 単純な保守的算定	データがなく転用後の土壤炭素量ゼロと設定	リトアニア、ポルトガル

②遷移期間：デフォルト20年以外の適用状況

インベントリの算定は、1990年以降の計算値を報告する必要があるため、1990年から遷移期間分の年次（デフォルト値で20年）を遡った土地利用変化面積を把握しないと、1990年時点の土地利用変化に伴う土壤炭素変化の計算を正確な量で計算できないこととなる。開発地への転用において、デフォルト20年以外の遷移期間を用いているのは、デンマーク（100年）、イギリス（50～150年）、ロシア（農地からの転用のみ）、イタリア（1年）のみである。土地利用変化全体では、オーストラリア、カナダ（50年）も遷移期間に独自の値を用いているが、開発地への転用では低次のTierを適用し遷移期間は20年である。

オーストラリア、イギリスは、遷移期間を十分に含められるように、土地利用面積データを1970年以前にも遡って把握している（オーストラリアは1950年～、イギリスは1940年～）。なお、過去の時系列作成においては、近年の情報と過去の情報には精度や質に差があることが一般的であり、その点は割り切って、過去データは無理に近年の情報との精度を合わせることなく、可能な範囲で利用している国が多い。その一方、欧州の一部の国を中心に、データの質が低い年は敢えて土地利用変化面積を把握しにいかず、例えば1990年以降でのみ土地利用変化を把握するという方法論を適用する国も増えているが、排出・吸収量の時系列トレンドが不正確となる算定であり標準的な手法として受け入れられる可能性は

低いものの、1990年という起点の国際的な扱いにも波及しうる問題ではある。

また、2019年改良IPCCガイドラインにおいては、バイオ炭や貯水池の新規方法論において、長期間（～100年）に渡る排出を、現行のデフォルト遷移期間に合わせて20年間で全量が排出する形の排出係数が提示された。長期間にわたる変化をこのような形式で係数化することも一案であるが、これまでになかった新しい発想であり、Tier 2以上の国独自の算定にどこまで反映されるかは、現時点は未知数である。

③土壌深度：デフォルト30cm以外の適用状況

土壌深度について、30cmよりも深い深度で算定を行っている国も多い。例外的に農地土壌において25cmを適用している事例もある（ロシア、スウェーデン）。基本的には、各土地利用・土地利用変化で同一の深度を利用している国が大半であるが、別々の値を用いている場合もある。科学的に土地利用間の土壌変化のプロセスや量は行き先が違う（例：森林からの変化、森林への変化）と必ずしも対称にならないため、転用が開始される土地利用の土壌炭素量・深度に数値を合わせるといったやり方を取っている限り問題は生じないと考えられる。

④土壌炭素設定区分

土壌算定における土地利用の細分化（下位区分の設定）について、森林や農地において細分類を設定していても、開発地は国一本、もしくは別分類となるパターンが一般的である（表4.2）。

表4.2 各主要先進国の土壌炭素算定における土地利用区分方法

	区分方法（森林、農地等）	区分方法（開発地）
カナダ	土地ユニット毎	モデル算定
チェコ	土地ユニット毎	土地ユニット毎
オーストリア、スイス	生態系別	土地利用タイプ別
フランス、ハンガリー、 アイルランド、ルクセンブルク、アメリカ	土壌タイプ別／気候帯別	国全体
イギリス、ベルギー	地域別	地域別

【途上国】

途上国より2015年以降に英語で作成、提出されたGHGインベントリ（n=87）における土壌炭素に関する報告状況を調査すると、土地利用変化に伴う土壌炭素変化を報告できている国は、わずか6カ国であり（バルバドス、レバノン、マレーシア、ネパール、モルドバ、南アフリカ）、このうちTier2を一部でも採用しているのはモルドバと南アフリカのみであった。そもそも、2019年9月時点で、2015年以降まだGHGインベントリを提出できていない国（n=42）も相当数あることを考慮すると、年間200万ha程度の森林減少⁸⁾が進む途上国における土地利用変化に伴う土壌炭素変化量の算定強化の必要性は極めて高い。国際社会としてこれに対処しなければ、UNFCCCの下で把握する世界の総排出・吸収量の精度に大きな影響を及ぼすこととなる。また、途上国による報告が限定的ということ踏まえて、本課題では、オンラインによる質問票調査で幅広く報告の実態と課題に関する情報を収集することにした。

4-2. 統合的なGHGインベントリ算定手法及び適切なNIR 作成に向けた解決方法のオプション

【日本のGHGインベントリへの適用】

①遷移期間

以下の理由から農地・草地から森林への転用、森林から農地への転用のいずれにおいても40年を用いることとした。

- ✓ IPCCガイドラインのデフォルト値の20年を用いるのは、サブテーマ1および2で得られた、20年以降も変化が続くとする成果を十分に活用できない。遷移期間はもう少し長くとるべきである。
- ✓ 算術平均の値と遷移期間を活用する場合、森林は31年となるが、樹冠閉塞におよそ30年かかり、最大炭素供給状態に達してから土壌中炭素量が平衡状態に達するまで更に年月が必要とする、サブテーマ1の成果であるIshizuka et al. 2021¹⁾の見解からすると遷移期間が短すぎる。

経過年数がヒアリングによる、若干不確実性の高い情報を基準にしており、森林と農地への転用で別々の期間を用いる程の正確性を持たない。

- ✓ 森林については、人工林の標準伐期齢（スギ35～50年、ヒノキ45～60年、カラマツ30～40年）を考慮すると、長期の遷移期間を設定しても主伐により条件が変化してしまう。土地転用後の遷移期間としては30～40年程度で設定することが、一つの方向性となる。
- ✓ GHGインベントリの報告期間である1990年以降の時系列を考慮すると、活動量として統計的な情報を用いるには過去40年程度が限度となる。

また、遷移期間を40年と設定するにあたり、土壌変化係数の適用においては、サブテーマ1および2の回帰モデルを用いることとした。すなわち、年間変化係数は、農地・草地から森林への転用は $(1.21 - 1.00) / 40 = 0.00525$ 、森林から農地への転用は $(0.77 - 1.00) / 40 = -0.00575$ となる。この方法では、特に農用地から森林に転用された場合の、初期炭素蓄積減少量を適切に評価はできないが、徐々に減衰した後増え始める、という様なパスの再現はTier 3モデルの適用が必要となり、Tier 2では考慮しない。なお、遷移期間を従来の20年間から、40年間に変更する結果、土壌炭素の遷移期間下にあると評価される面積は表4.3の様に變更される。

表4.3 遷移期間延長による面積区分の変化

年	森林面積 (kha)				農地面積 (kha)			
	現行値		変更後		現行値		変更後	
	転用なし	転用下	転用なし	転用下	転用なし	転用下	転用なし	転用下
1990	24,502	448	24,000	950	4,597	216	3,994	819
1995	24,675	222	23,993	904	4,659	173	4,005	659
2000	24,715	161	24,025	851	4,417	111	4,104	424
2005	24,870	122	24,246	746	4,385	62	4,144	303
2010	24,875	92	24,426	540	4,339	32	4,187	184
2015	24,830	77	24,608	299	4,279	33	4,137	175

なお、現在、森林土壌はCENTURY-jfosモデルで、農地土壌はRoth Cモデルで炭素蓄積変化の算定をしているが、今回設定する土地利用変化に関する土壌炭素蓄積変化量が、これらのモデル内でも考慮されており、内数扱いとなるか、モデル計算対象地から外れており、外数として足し合わせが可能かも検討が必要である。この点については、GHGインベントリ上のモデルの適用は、森林土壌については転用の無い森林に対して、農地土壌については土地転用分も含めて全農地に対して実施している。従って、今回の算定改善で計算される結果については、森林土壌はモデル算定の外数、農地土壌はモデル算定の内数として整理される。なお、草地への転用については、転用の行き先が牧草地ではない採草放牧地等の粗放的な管理草地であった場合、Roth C計算の外数で、採草放牧地自体はnominally managedの状態が継続するため土壌炭素蓄積変化が生じないと想定していることも踏まえ、別途転用に伴う排出量の計算が必要と整理される。しかしながら、現在、森林から草地への転用において、牧草地と採草放牧地への転用面積を分けて把握しているデータが無いことから、牧草地への転用とみなして試算を進めたが、実態としては方法論的な課題となる。

②算定・報告区分の整理

算定方法を改善にするにあたり、土地利用変化の計算はサンプル数や係数の性質を踏まえ、表4.4の様な土地のまとめ方を行うことが適当と整理した。

表4.4 農地・草地・森林間の土地利用変化計算を実施する細分土地利用区分

区分	細区分化の方法	理由
森林への転用	農地／草地まとめて一つの係数を適用 ⇒サブテーマ1 (Ishizuka et al.2021) から係数設定	論文で農地、草地にほとんど差がないと言及。草地サンプル数が極端に少ない。
森林からの転用	水田への転用 ⇒2019年改良版IPCCガイドラインのPaddy Riceの係数 (1.35, Table 5.5 (updated)) を適用	1970年代に多少実績があるが、減反政策を進めてきたこともあり、日本では水田への転用は稀で、今回の土壌サンプリングの対象外。実態がないとは報告できないことからデフォルト値を用いた計算を実施。
	普通畑・果樹園 (茶園も含む) への転用 ⇒サブテーマ2 (Koga et al.2020 ²⁾) から係数設定	論文で普通畑・果樹園と草地を分離した値を提示。茶園の値はまだ論文化前で、活動量としても茶園への転用を直接的に把握できない。
	草地 (牧草地、放牧地含む) への転用 ⇒サブテーマ2 (Koga et al.2020) から係数設定	論文で普通畑・果樹園と草地を分離した値を提示。

③転用開始時点の初期土壌炭素量の設定

ESM法適用に当たり、転用開始時点の初期土壌炭素量は、各土地利用の深さ30cmまでの平均値を用いることとした。現行GHGインベントリにおける適用値があまり正確な数値ではないことから、近年モニタリング調査を基にまとめられた日本全国の森林土壌、農地土壌の炭素量評価結果 (Yamashita et al. 2022³⁾、Matsui et al. 2021⁴⁾)の結果を用いて新たな土地利用変化係数の適用に合わせて変更を行う (表4.5)。

表4.5 土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化量算定に用いる初期土壌炭素量

土地利用	現行適用値 (t-C/ha)	設定方法	改定予定値 (t-C/ha)	備考
森林	約85	CENTURY-jfosによる計算	76	Yamashita et al. 2022 ³⁾ モニタリング調査結果を踏まえた日本の全森林の3Dマッピングモデル算定値
水田	71.38	1979年の土壌調査結果をインベントリコンパイラ側で集計した数値	73.2	Matsui et al. 2021 ⁴⁾ 2015～2018年の土壌モニタリングデータをまとめた値 ※GHGインベントリ反映値は継続検討
普通畑	86.97		92.1	
樹園地	77.46		79.2	
牧草地	134.91		128	

④開発地への転用

開発地への土地転用に伴う土壌炭素蓄積変化量の算定においては、2006年IPCCガイドラインでは、転用前の土地利用における土壌炭素量を基準に、被覆地は0.8倍、農地的利用・草地的利用の場合は、それぞれ農地・草地への転用時に用いる炭素変化係数を適用するとのガイダンスが存在する。一方、今回サブテーマ3でも議論されてきたように、開発地への転用は、基本土地造成を受けることから、表土を残したままの土地転用とはならず、実態としてIPCCガイドラインが提示する様な方法論の適用が難しい。今回サブテーマ3で検討された図4.1に示す開発地平均炭素量設定の方法を適用するにあたり、図中①～③のデータはサブテーマ3にて設定しているが、GHGインベントリへの適用に向けて、特に④の面積加重方法の検討を行った。

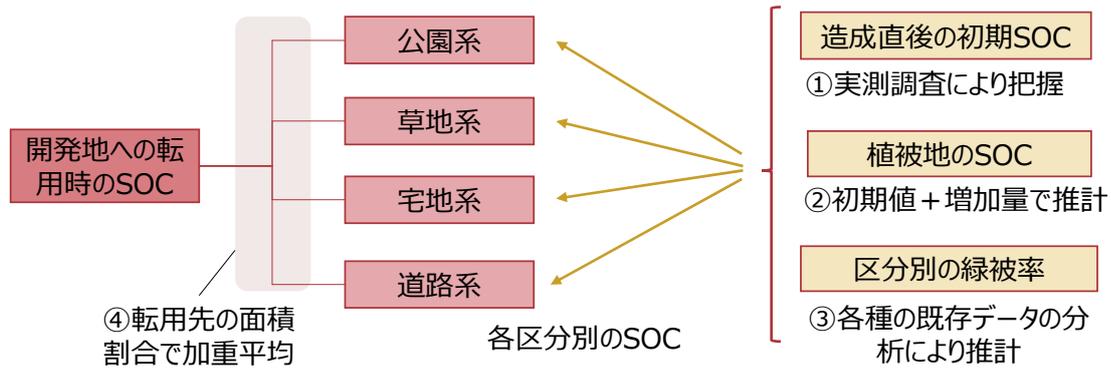


図4.1 開発地の平均土壌炭素量（SOC）設定方法フロー

森林から開発地への転用については、サブテーマ5において1990～2013年の森林減少調査（D調査）対象地点で、詳細な転用先の土地利用の調査を実施しているため、統計情報（「林地開発許可制度資料」（林野庁）⁵⁾、1ha以上の民有林からの転用を把握）を用いて時系列変化と衛星判読結果の検証を行った。農地からの転用についてはGIS分析を実施していないことから、統計情報（「農地の移動と転用」（農林水産省）⁶⁾）の転用先情報から算定を行った。林野庁業務統計は、最低面積以下の転用を把握していないこと、国有林の転用を把握していないことに問題はあるが、D調査解析と同じ1990～2013年の期間において、民有林の転用先別面積を累積したところ、D調査解析の結果と比較をすると植生被覆地の割合がそれぞれ38.7%と38.6%、宅地系の割合が39.3%と37.1%、道路系の割合が21.9%と24.3%でほぼ差がない結果となった。時系列的には、2000年代のころからゴルフ場への転用面積が激減していることから、年々植生被覆地の割合が少なくなっており、開発地の土壌炭素量を固定期間の転用面積状況で設定するか、統計情報などに連動させて更新をしていくかは、この先検討が必要である。

農用地からの転用については、ほとんどが、宅地や道路への転用であり、その割合は時系列的にほとんど変わらない。従って、土地転用時の開発地土壌炭素量は、特定の期間で設定した場合と、時系列的な転用先面積に連動させた場合ではほとんど差がない。

表4.6 開発地への転用先面積

区分	森林から開発地への転用				農用地から開発地への転用			
	含まれる土地利用	D調査： 1990- 2013	統計値		含まれる土地利用	統計値		
			1990- 2013	2000- 2019		1980- 2016	1990- 2016	2000- 2016
公園系	公園・緑地、河川・砂防緑地	20.0%	6.6%	4.4%	公園運動場用地	2.1%	1.9%	1.1%
草地系	ゴルフ場、荒地、レクリエーション施設	18.7%	32.0%	1.2%	ゴルフ場	0.1%	0.1%	0.3%
宅地系	宅地、学校、ソーラー、建物、工場	39.3%	37.1%	63.0%	住宅用地、学校用地、官公・病院等、商業サービス	52.8%	53.1%	53.1%
道路系	道路、高速道路、交通施設用地、採石場、環境衛生用地、残土処理上	21.9%	24.3%	31.5%	導水路鉄道用地、その他（農林漁業用施設、駐車場・資材置場等）	45.0%	44.8%	45.5%

統計値は、森林からの転用は「林野庁業務資料」、農用地からの転用は「農地の移動と転用」を用いた。具体的な、森林から開発地、農地から開発地への転用時の土壌炭素量の設定例は下表のようになる。この際、土壌炭素量の計算を森林からの転用と農地からの転用でわけた数値を採用する場合と、両

方まとめ全平均を採用する場合で、土地転用後の開発地土壤炭素量の値には若干差が出てくる。

表4.7 森林から開発地への転用時の各土地被覆別の土地被覆割合と土壤炭素量

土地転用先	森林転用時の面積比 *1		土地被覆面積割合			土壤炭素量:全平均利用 (t-C/ha)			土壤炭素量:森林転用値利用 (t-C/ha)		
			植被地		その他	転用先別平均	植被地/非 植被地	開発地平均	転用先別平均	植被地/非 植被地	開発地平均
			草地	樹林地							
公園系	6.9%	40.6%	15%	46%	39%	40.4	49.1	36.1	39.1	47.8	34.8
草地	33.7%		58%	38%	4%	50.9			49.6		
宅地	36.5%	59.4%	13%		87%	26.0	27.3		24.7		
道路	22.9%		24%		76%	29.3			28.0		
計	100.0%		47%		53%						
土壤炭素量 (t-C/ha)	全平均		52.1	52.1	22.1						
	森林からの転用時		50.8	50.8	20.8						

*1 1990~2009年の林地開発許可の土地利用先分析の結果を利用した場合

表4.8 農地から開発地への転用時の各土地被覆別の土地被覆割合と土壤炭素量

土地転用先	農地転用時の面積比 *2		土地被覆面積割合			土壤炭素量:全平均利用 (t-C/ha)			土壤炭素量:農地転用値利用 (t-C/ha)		
			植被地		その他	転用先別平均	植被地/非 植被地	開発地平均	転用先別平均	植被地/非 植被地	開発地平均
			草地	樹林地							
公園系	2.1%	2.2%	15%	46%	39%	40.4	41.2	27.8	41.2	42.0	28.6
草地	0.2%		58%	38%	4%	50.9			51.7		
宅地	53.3%	97.8%	13%		87%	26.0	27.5		26.8		
道路	44.5%		24%		76%	29.3			30.1		
計	100.0%		19%		81%						
土壤炭素量 (t-C/ha)	全平均		52.1	52.1	22.1						
	農地からの転用時		52.9	52.9	22.9						

*2 1990~2009年の「農地の移動と転用」を利用した場合

また、時系列的な統計情報による転用先面積の変化傾向を設定値に反映させた場合の試算値が下図のようになる。今後、GHGインベントリへの採用においては、固定値を用いるか時系列連動を行うか、森林と農地で別の値を使うか、統合した値を使うかを決定する必要がある。

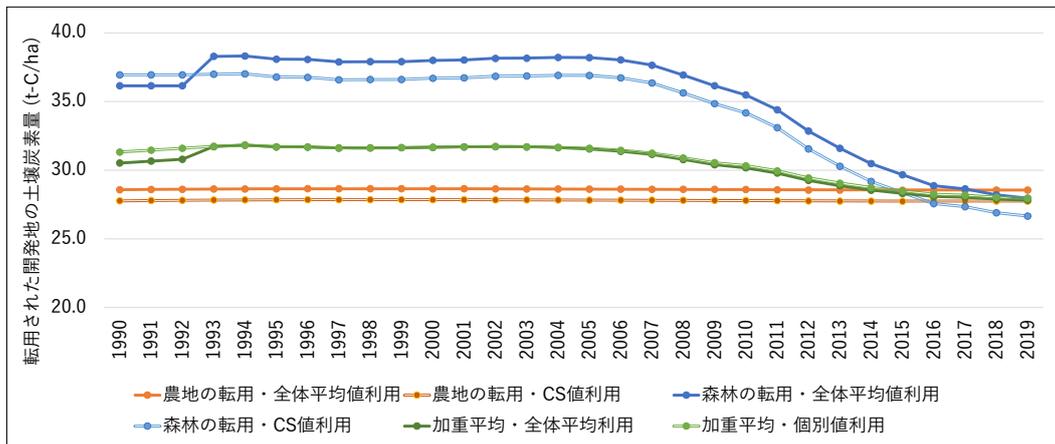


図4.2 森林・農用地から開発地転用時に転用面積先の時系列変化を反映した場合の土壤炭素量推移

⑤ 統合的なGHGインベントリへの適用結果

今回検討した改善方法を基に計算した森林からの転用時の土壤炭素蓄積変化の排出・吸収量は図4.3の通り。森林から普通畑・樹園地への転用においては従来よりも20~30万t-CO₂/年程度の排出増、(現状は、転用前の森林よりも畑の土壤炭素量を多く設定しているため吸収報告)、水田への転用は0~15万t-CO₂/年程度の吸収増(現状は、転用前の森林よりも水田の土壤炭素量を少なく設定しているため排出報告)、草地への転用は2~35万t-CO₂/年程度の排出増(現状は、転用前の森林よりも牧草地の土壤炭素量を相当大きく設定しているため吸収報告)となる。

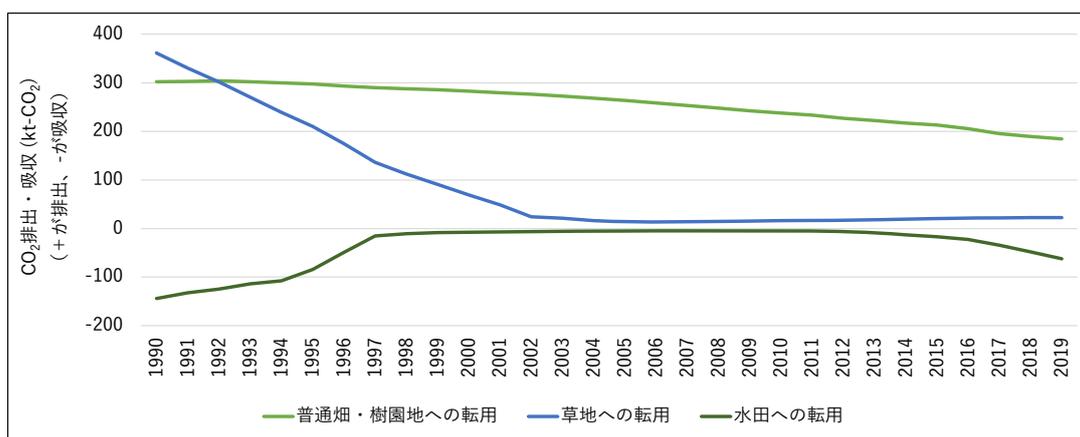


図4.3 森林から農地・草地への土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化による排出・吸収量

農用地から森林への転用時の土壌炭素変化量は、図4.4の通り。遷移期間の対象面積、年間変化量ともに増えるため、吸収増の方向に再計算（8～38万t-CO₂/年程度の吸収増）される。

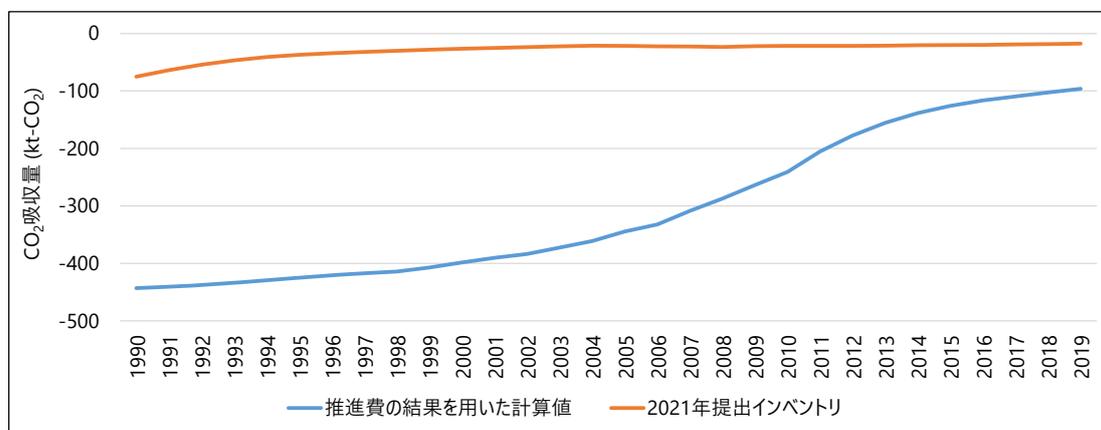


図4.4 農地・草地から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積変化による排出・吸収量

森林、農地・草地から開発地への転用時の土壌炭素変化量は下図の通りで、転用後の土壌炭素量が現行設定値から大きく減少するため、大きな排出で計算される。この際、転用後の開発地の土壌炭素量は、①森林からの転用時と農地からの転用時で別の転用後SOCを用いる場合（森林からの転用：FS-SOC、農地からの転用：CS-SOC）と、両者のFS-SOC・CS-SOCを転用時の面積加重を行い一本の値（LS-SOC）にする場合、②個別のFS-SOC・CS-SOCの計算において、それぞれの転用時の値を用いるか、全平均を用いるか、の組み合わせで4通りの推計を行った。加えて、森林からの転用時は時系列的な面積連動を行わず、1990～2013年の面積割合で固定したケースも追加している。

森林から開発地の転用においては、再計算による排出増は150～300万t-CO₂/年程度となる。この計算において、開発地転用時の土壌炭素量設定方法、全体平均を利用する（により、15～40万t-CO₂/年程度の幅が生ずることから、今後の論文化時に検討が必要である。また、造成後の植栽による炭素蓄積増加量の貢献分の計算も可能で、10～70万t-CO₂/年程度となる。

農地・牧草地から開発地への転用においては、再計算による排出増は120～300万t-CO₂/年程度となる。開発地転用時の土壌炭素量設定値により0～20万t-CO₂/年程度の幅が生じ、造成後の植栽による炭素蓄積増加は20～60万t-CO₂/年程度となる。

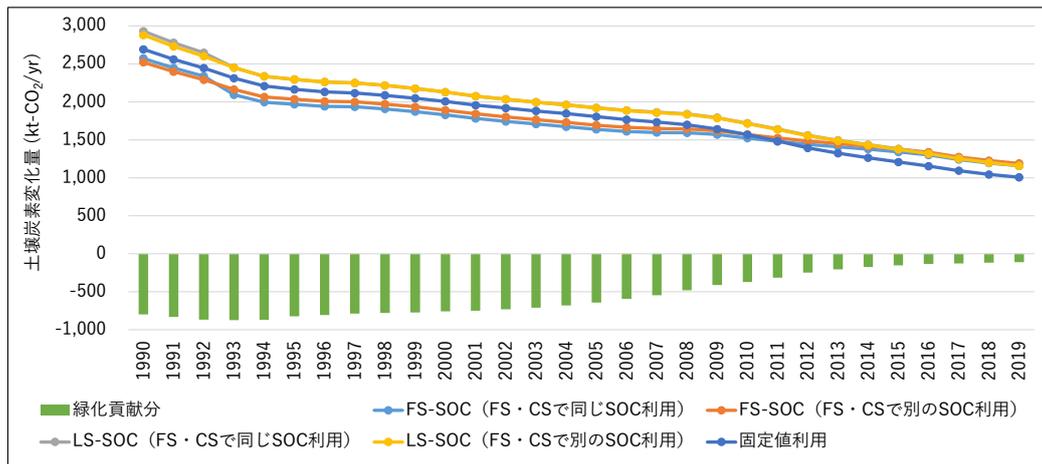


図4.5 森林から開発地への土地利用変化に伴う土壤炭素蓄積変化による排出・吸収量

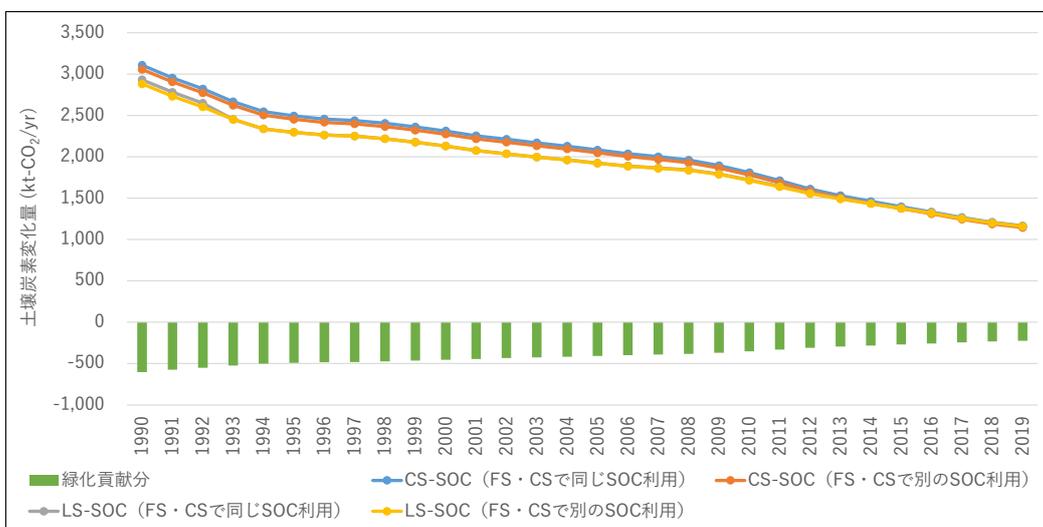


図4.6 農地・草地から開発地への土地利用変化に伴う土壤炭素蓄積変化による排出・吸収量

なお、今回の結果を踏まえて、現在開発地と同様の80t-C/haの仮置き値で土壤炭素量を設定しているその他の土地への転用（土石の採掘地、裸地化を分類）についても開発地の造成後の初期値（22.1 t-C/ha）を用いた改善が可能と考えられる。その場合、森林、農地・草地から開発地への転用時の再計算による排出増は70～160万t-CO₂程度となる。

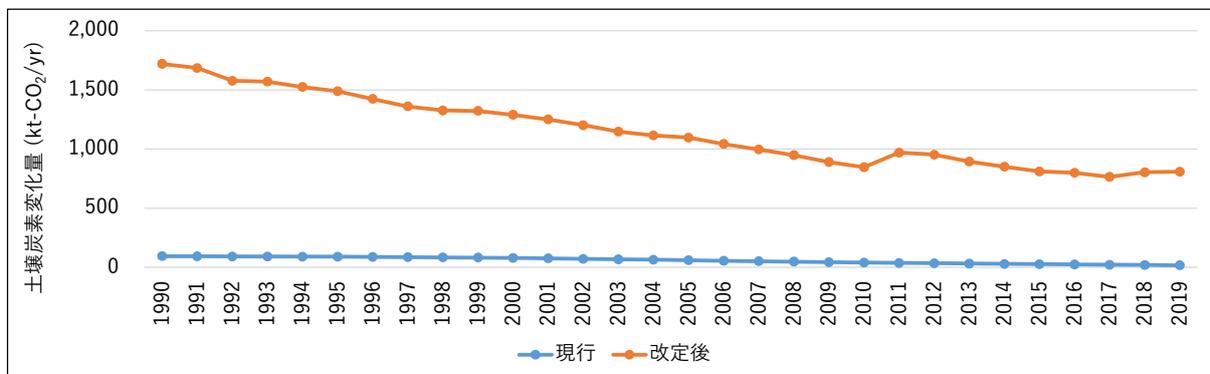


図4.7 森林・農用地からその他土地への土地利用変化に伴う土壤炭素蓄積変化による排出・吸収量

今回の試算では、行政データによる活動量把握に基づく計算を行ったが、サブテーマ5による活動量の把握が土地被覆の変化で行われるようになれば、より現実と乖離の少ない算定が行えると考えられる。

【途上国のインベントリ報告強化】

2021年9月～10月、FAOと共同でオンラインによる質問票調査を実施したところ、合計で104か国、226名のインベントリ専門家及び土壌研究者から回答を得た。本調査では先進国と比較した場合の途上国の状況についても把握するため、対象を限定せず回答への協力を呼び掛けた。このうち、GHGイ

ンベントリ作成に直接関与したことがある回答者が居た国は、82か国（途上国：70か国、先進国：12か国）、インベントリ専門家は109名、土壌研究者は30名であった。以下、これらの回答者の回答結果を中心に示す。

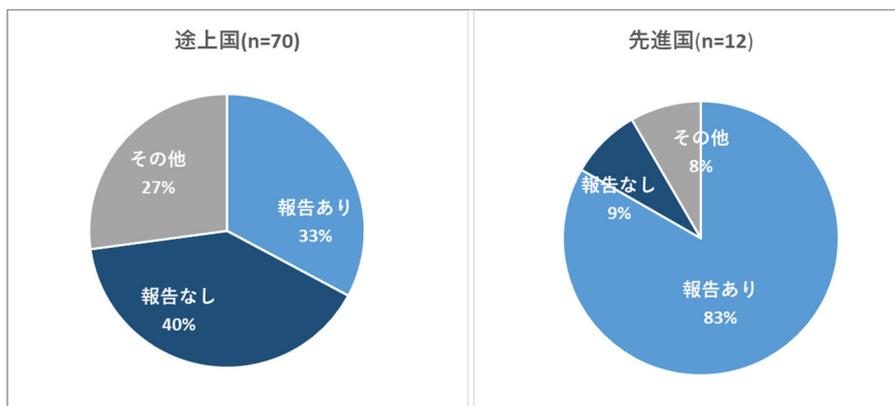


図4.8 土壌炭素変化量に関する報告の有無の実態

① 報告の実態

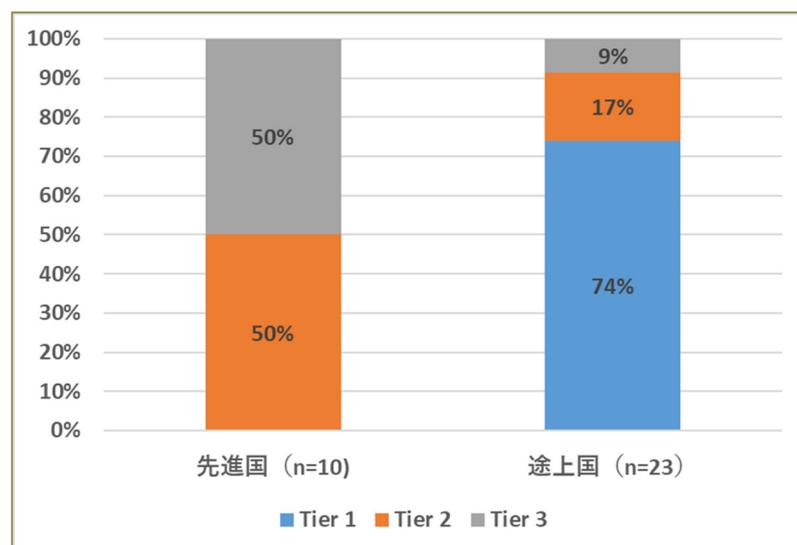


図4.9 土壌炭素変化量に適用したIPCC算定方法

途上国と先進国では、土壌炭素変化量の報告実態の差が顕著であった。回答のあった途上国のうち約3割が土壌炭素変化量をGHGインベントリで報告したことがあると回答したのに対して、先進国のその割合は8割を超える（図4.8）。途上国では報告をまだしたことがないとしたのは約4割である。また、報告をしたことがある国においても途上国の場合、7割以上がIPCCの低次（Tier1）の算定方法を適用しているのに対して、先進国ではTier2またはTier3を適用しているのが主流である（図4.9）。

② 報告に際して直面した課題及び対応策

次に、土壌炭素変化量の報告に際して直面した課題としては、複数選択式回答で、「土地管理に関する活動量データの不足」及び「土壌特有のデータの不足」が最も多い回答数を集めた（図4.10）。これに対して、「IPCC算定方法の理解が難しい」及び「土壌炭素動態に関する知識が限られている」を選んだ回答者は最も少なかった。一方で報告を実現するための課題への対応策としては、「データ開発のための関係機関との協力強化」、「インベントリ専門家と土壌研究者の協力強化」が最も多く選択された（図4.11）。対して、「土壌炭素動態に関するトレーニング」、「資金の獲得」を課題への対応策として選択した回答数は最も少ない。

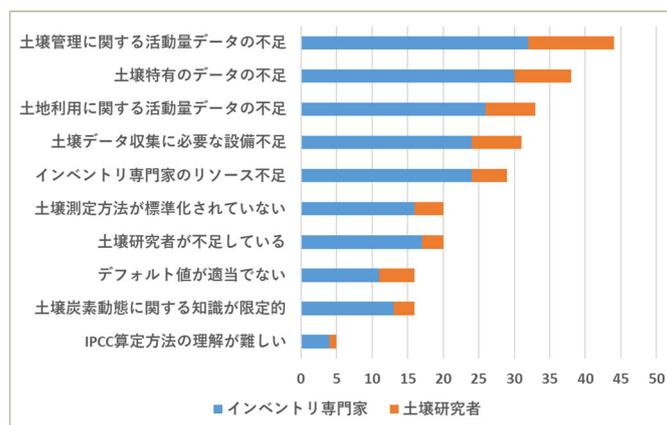


図4.10 土壌炭素変化量報告に際し直面した課題：インベントリ専門家及び土壌研究者による回答数（複数選択式回答）

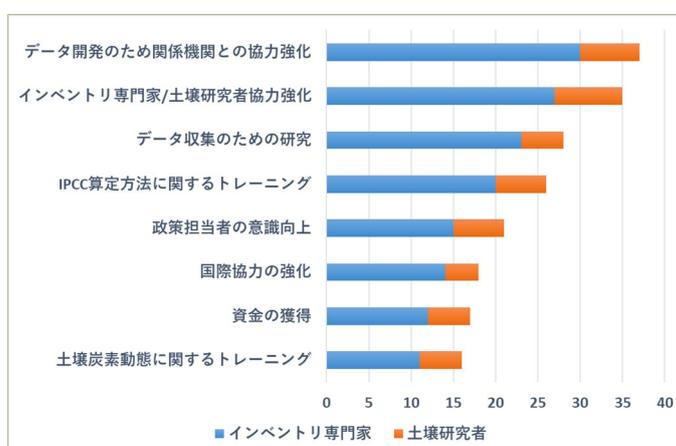


図4.11 土壌炭素変化量報告に際し取り組んだ課題への対応策：インベントリ専門家及び土壌研究者による回答数（複数選択式回答）

続いて上記の報告に際して直面した課題として選択された課題項目について数量化3類を適用し、課題認識のバラつきを分析した。数量化3類は、今回の質問票調査のように設定した課題項目とその回答数が多い場合、似た回答パターンを集めた課題をグルーピングすることによって、より少ない次元で回答のバラつきを解釈するための質的データに適した統計手法である。結果、次の3つの軸を抽出し、図4.12は、1軸と2軸に基づく各課題項目の位置関係を示す。

- ・ 1軸：GHGインベントリ全般に対する課題があると認識しているか否か
- ・ 2軸：土壌専門性に課題があると認識しているか否か
- ・ 3軸：土壌のデータ収集に課題があると認識しているか否か

GHGインベントリ全般に対して課題があると認識している回答者は、「インベントリ専門家に必要なリソース不足」、「IPCC算定方法の理解が難しい」を共に選択し、土壌専門性に課題があると認識している回答者は、「土壌知識の不足」や「土壌研究者の不足」をより重視している。また、土壌専門性に課題があると認識している場合、GHGインベントリ全般に課題はないと認識している傾向がある。これは、回答者による課題認識の優先順位の現れと解釈できる。つまり、土壌炭素変動量に関する報告は、数多くある排出・吸収源を網羅するインベントリの一部であり、そもそもGHGインベントリ全般に課題があると認識している場合は、土壌専門性は次に対処すべき課題として捉えられて自然である。同様に、2軸と3軸の比較では、土壌専門性に課題があると認識している場合、土壌のデータ収集まではまだ十分意識が及んでいないことが分かった。つまり、データ収集が課題であると認識している国は、ある程度の土壌専門性を備えた国・機関の回答者である可能性が高いと考えられる。

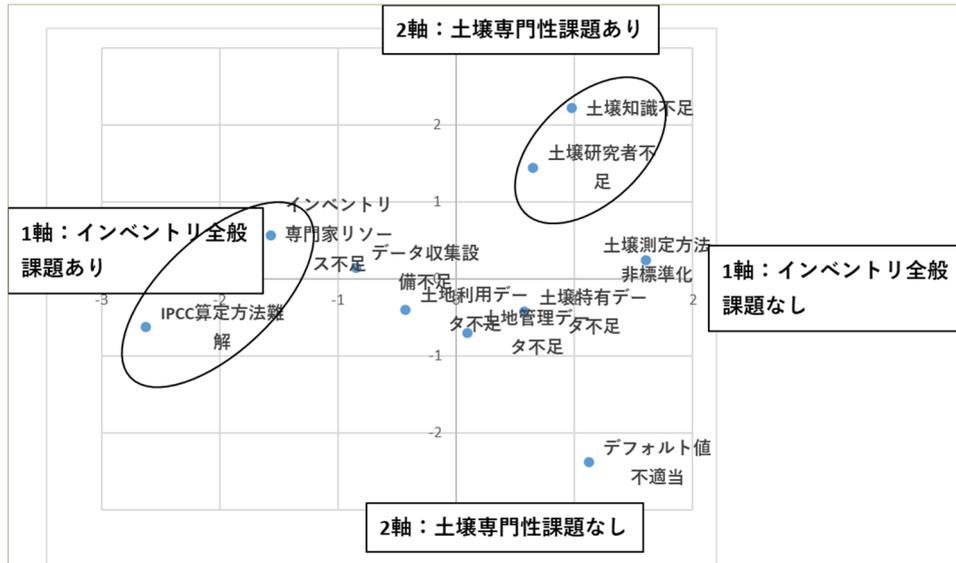


図4.12 土壌炭素変化量報告における課題項目のカテゴリスコア（1軸（上下）・2軸（左右）、課題項目の詳細は図11を参照）

② 報告強化に向けた対応策の考察

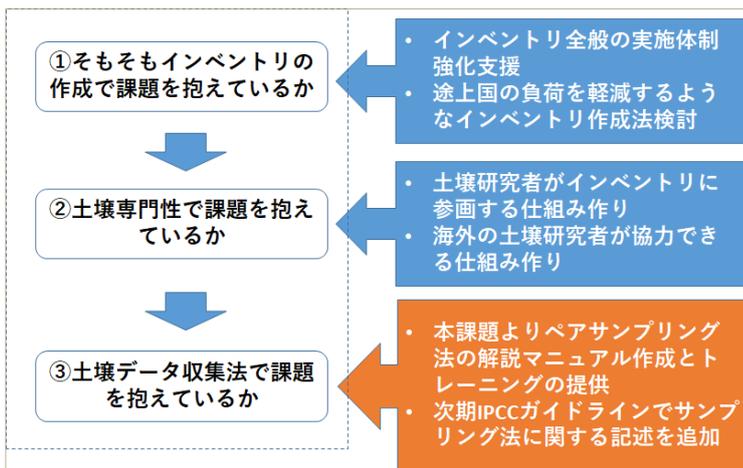


図4.13 途上国における土壌炭素変化量報告強化に向けた段階的アプローチのイメージ

手間取っている国が多いと考えられる。また土壌炭素変化量に関する報告に対する課題認識は、その国の状況によってバラつきがあることが分かった。以上から、土壌炭素変化量に関する報告強化に向けた国の状況に応じた段階的なアプローチの検討が必要であり（図4.13）本課題の研究結果の普及、応用は③に該当する国・機関にとってより効果的であると考えられる。同時に、①、②についても国際的な対応を検討しなければ、より多くの途上国での土壌炭素変化量に関する報告は実現できない可能性があることも示唆する。

- ① そもそもGHGインベントリの作成自体に課題を抱えている国・機関への対応策：
 - ・ インベントリ全般の実施体制強化に資する対応策（例：法整備、インベントリ作成計画）
 - ・ より負担の少ないIPCC算定方法の検討
- ② 土壌専門性に課題がある国・機関への対応策：
 - ・ 土壌研究者がインベントリ作成プロセスに関与できる国内体制構築
 - ・ 必要な場合、海外の研究者が協力できる体制構築
- ③ 土壌データ収集に課題がある国・機関への対応策：

- ・ 本課題の土壌データ開発手法（ペアサンプリング法）を普及するためのマニュアル作成とトレーニング
- ・ IPCCガイドラインにおけるデータ収集に関する記述内容の充実

5. 研究目標の達成状況

主要先進国及び途上国を含めた各国の土壌炭素変動量に関する報告方法について調査・整理のうえ、専門家ヒアリングやオンラインでの質問票調査を経てインベントリ報告上の課題を特定し、それぞれの国の状況に応じて望ましい解決策を複数のオプションとして提示した。主要先進国（UNFCCC附属書I国）のインベントリの詳細な調査及び専門家へのヒアリング調査から、6土地利用区分の土壌炭素量変化に関する報告における課題として、①遷移期間、②算定・報告の区分、③開発地への転用に関する取扱いがあることが分かった。日本のインベントリについて、サブテーマ1、2、3、から得られたモデルや平均土壌炭素蓄積量をもとに、本課題の成果を統合的に日本インベントリに反映する算定手法を開発した。環境省の温室効果ガス排出量算定検討会に提案の結果、令和4年度に作成されるGHGガスインベントリ（令和5年4月提出）から本課題で開発した算定方法を適用する方針が了承された。これにより、日本の土地利用、土地利用変化及び林業分野の排出・吸収量の算定結果の精度が、300～700万t-CO₂/年程度（同分野の純吸収量の約10%前後）向上する見込みである。また、これはIPCC2019年改良ガイドラインを適用した世界でも数の少ない最初の事例と見られるため、優良事例として次期IPCCガイドラインの策定にも貢献できる可能性がある。更に、報告強化の必要性が高い途上国について、FAOと共同で、報告の実態と課題に基づき報告強化に向けた対応策のオプションを提示した。途上国のAFOLU分野における報告支援を世界的にリードするFAOの今後の方針検討を後押しすると考えられる。サブテーマ5によって開発された土地被覆の変化からの活動量把握が可能になった場合には、今回算出した係数によってより精度の高い吸収・排出量の報告が可能となると考えられる。目標を達成できた上に、統合的なインベントリ算定手法を社会実装するところまで達成したため、目標を上回って達成したと考えられる。

6. 引用文献

- 1) Shigehiro Ishizuka, Shoji Hashimoto, Shinji Kaneko, Kenji Tsuruta, Kimihiro Kida, Shuhei Aizawa, Toru Hashimoto, Eriko Ito, Mitsutoshi Umemura, Yoshiki Shinomiya, Tomoaki Morishita, Kyotaro Noguchi, Kenji Ono, Toru Okamoto, Takeo Mizoguchi, Atsushi Torii, Hisao Sakai, Yoshiyuki Inagaki, Koji Shichi, Jumpei Toriyama, Yoshimi Sakai, Masahiro Inagaki, Yasuhito Shirato, Hiroshi Obara, Kazunori Kohyama, Yuusuke Takata, Nobuko Katayanagi, Takashi Kanda, Haruna Inoue & Takashi Kusaba. 2021 Soil carbon stock changes due to afforestation in Japan by the paired sampling method on an equivalent mass basis, *Biogeochemistry* 153, 263-281, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00786-8>
- 2) Nobuhisa Koga, Seiji Shimoda, Yasuhito Shirato, Takashi Kusaba, Takeo Shima, Hiroshi Niimi, Tsuyoshi Yamane, Katsufumi Wakabayashi, Katsuhisa Niwa, Kazunori Kohyama, Hiroshi Obara, Yusuke Takata, Takashi Kanda, Haruna Inoue, Shigehiro Ishizuka, Shinji Kaneko, Kenji Tsuruta, Shoji Hashimoto, Yoshiki Shinomiya, Shuhei Aizawa, Eriko Ito, Toru Hashimoto, Tomoaki Morishita, Kyotaro Noguchi, Kenji Ono, Nobuko Katayanagi, Kazuyuki Atsumi, 2020 Assessing changes in soil carbon stocks after land use conversion from forest land to agricultural land in Japan, *Geoderma* 377, 2020, 114487, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114487>.
- 3) Naoyuki Yamashita, Shigehiro Ishizuka, Shoji Hashimoto, Shin Ugawa, Kazuki Nanko, Yoko Osone, Junko Iwahashi, Yoshimi Sakai, Motoko Inatomi, Ayumi Kawanishi, Kazuhito Morisada, Nagaharu Tanaka, Shuhei Aizawa, Akihiro Ima, Masamichi Takahashi, Shinji Kaneko, Satoru Miura, Keizo Hirai, National-scale 3D mapping of soil organic carbon in a Japanese forest considering microtopography and tephra deposition, *Geoderma*, 406, 2022

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115534>.

- 4) Kayo Matsui, Yusuke Takata, Yuji Maejima, Hideo Kubotera, Hiroshi Obara & Yasuhito Shirato (2021): Soil carbon and nitrogen stock of the Japanese agricultural land estimated by the national soil monitoring database (2015-2018), Soil Science and Plant Nutrition, <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.2000324>
- 5) 林地開発許可制度 (林野庁) https://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/con_4.html
- 6) 農地の権利移動・借賃等調査 (農林水産省)
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/nouti_kenri/
- 7) 令和3年度算定方法検討会 <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/committee/r03-agenda1.html>
- 8) FAO, Global Forest Resources Assessment 2020 Key findings p4

II-5 リモートセンシングによる土地利用変化の分類に関する研究

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所

森林管理研究領域

鷹尾 元

<研究協力者>

産業技術総合研究所

人工知能研究センター

中村 良介

//

神山 徹

筑波大学

大学院生命環境科学研究科

笹川 大河

//

佐竹 峻

[要旨]

開発地とその他土地利用との土地利用変化量を衛星画像から人工知能によって判別する技術を開発した。まず、森林から／への土地利用変換点を、林野庁の「森林吸収源インベントリ情報」から抽出した。その傾向の解析結果から、森林から／への土地利用変換は現在では非常に少なくなっており、最近10年ほどの速度の水準が維持されるなら、今後30年間で土地利用変換により失われる森林の面積率は0.6%程度となる見込みであることが明らかになった。これらの結果を受けて4者と協議した結果、土地利用・被覆の何らかの変化の検出とその変化の種類の判別を同時に行うことは効率が悪く、特に森林減少に対しては、何らかの森林攪乱の発生の検出と、検出された森林攪乱の種類の判別を分けた二段階検出が望ましいと考えられた。

そこで、検出された森林攪乱の種類の判別を行うために、高分解能衛星画像を用いてデータセットを構築し、土地利用区分を深層学習で自動的に行う手法を開発した。衛星画像による区分はより土地被覆に近い分類となる事を考慮し、樹林地、農地・草地、舗装、裸地、道路、建物、太陽電池パネル、温室、水面、陰影その他、以上10区分を設定した。その結果、総合精度は84.9%であった。区分ごとのバイアスは少なく、またバイアスを補正可能であった。総合精度は既に高いが、さらにバイアスを理論的に補正可能であることから、土地利用区分ごとの活動量をマクロに推定するためには十分な精度があると考えられた。また、これらの手法は森林と開発地以外にも適用可能と考えられた。最後に、森林から転用された開発地を本課題で提案した集約した土地利用区分に分解し、IPCCガイドラインに準拠して、吸収排出量を推定する方法を提案した。

1. 研究開発目的

国家インベントリ報告における開発地の算定方法は既存の科学的データに乏しく、土地利用変化時の炭素量変化係数とともに、開発地への転用の活動量が正確に把握されていない問題がある。特に、様々な土地利用が開発地に分類されているため、土壌炭素量に影響する植被率や舗装面あるいは裸地の割合に応じた土地分類と、それに対応した活動量の把握が可能になれば、開発地への転用の算定に大きく貢献することになる。そのため、衛星画像等から人工知能によってこれらの土地分類を自動判別する技術を開発すれば、新たな活動量把握手法を通して、より正確な算定手法が開発できる。

2. 研究目標

森林と開発地を中心に土地利用変化があった点を抽出する。委託業者を含めた4者において、これらを人工知能に学習させるために必要な手順を協議し、データセットを構築する。これらのデータセットを人工知能に学習させ、森林と開発地を判別する学習器を作成する。森林と開発地以外の土地利用変化についても適用可能性を評価する。これらの学習器の評価を行い、有効と判断された場合は、サブテーマ4に結果を受け渡して、統合的な算定手法に組み込む。

3. 研究開発内容

3-1. 土地利用変化量の概要と傾向の統計値からの把握

森林から／への土地利用変化量を全国規模で推定するための統計として、林野庁が実施する「森林吸収源インベントリ情報」がある。これは、京都議定書による新規植林(A)、再植林(R)、森林減少(D)の我が国における発生状況を推定するために、国土を500m格子で覆いその交点での森林・非森林およびA/R/Dの発生状況を2005年より2年に一度、衛星画像の肉眼判読により推定したものである。この調査結果を解析することにより、我が国における土地利用変化量の概要とその経時的・地域的傾向を把握でき、衛星画像等から人工知能によって判別する技術を開発する際の指針となりうる。そこで、林野庁の許可を得てこの非公開情報を解析する。

「森林吸収源インベントリ情報」(以後、「ARD情報」と略す)の概要を以下に記す。ARD情報は京都議定書に基づく森林の吸収・排出量の報告のために、森林の消長を全国の500m格子点において判読し記録する。森林かどうかの判断は、格子点にちょうど樹林地があるかどうかばかりでなく、森林として以下の要件を満たすことで行っている。

- ・面積 : 0.3ha 以上
- ・樹高 : 5m 以上
- ・樹冠被覆率 : 30%以上
- ・森林幅 : 20m 以上

ただし、樹高と樹冠被覆率は成熟時に閾値を満たすことが予想されれば森林と判断してよい。

主な判読項目は以下の通りである。

- ・基準年(1990年)と把握対象年度(期末)現況の森林・非森林別
- ・ARD・森林施業等の現況変化

- ・AR地点における基準年の土地利用区分、またはD地点における現況の土地利用区分

このうち、土地利用区分はIPCCガイドラインに基づいて、「森林」、「農地」、「草地」、「湿地」、「開発地」、「その他」の6つに分類される。

ARD情報は2005年度から隔年で実施されており、本課題では2017年度までの7回分の情報を利用した。格子点数は全国で1,486,579点ある。そのうち、衛星画像が雲で覆われるなどの理由で1回でも判読が欠落した点を除いた合計1,259,520点を利用した。

これらのARD情報を用い、以下の傾向を解析した。

- ・1990年から2017年までの森林・非森林の変化
- ・土地利用変化(D/AR)の経時的傾向
- ・土地利用変化(D/AR)の地域的傾向

3-2. 衛星画像による土地利用変化種類の判別

高分解能衛星画像を用いて、森林から他の土地利用への変換が発生した際に、新たな土地利用の区分を行う手法を、委託業者を含めた4者(委託業者の他、産総研、森林総研、農環研)と協議の上開発する。全国の森林から／への土地利用変化の傾向の分析より、森林攪乱の発生の検出の段階と、検出された森林攪乱の種類の種類判別の段階を分けた二段階検出が適当であると示唆された(4-1参照)。森林攪乱の発生の検出についてはShimizu and Saito¹⁾などが既にあるので本課題では取り扱わず、検出された森林攪乱の種類判別の手法の開発を行う。

土地利用の区分は、基本的には3-1と同様にIPCCガイドラインに基づく「森林」、「農地」、「草地」、「湿地」、「開発地」、「その他」の6つの分類である。このうち「開発地」は、用途により様々な土地被覆が特徴的に組み合わせられた多様な利用形態で構成されており、そこからの吸収・排出量推定の精度を高めるために、より細かな区分が必要である。我が国において「開発地」は「交通用地」、「宅地」、「学校施設用地」、「レクリエーション用地」、「環境衛生施設用地」、「ゴルフ場」、「スキー場」、「公園・緑地」などに細区分されている。しかし、これらの細区分のそれぞれにはさらに様々な土地被覆が含まれ、しかもその構成比率は同じ細区分の中でもばらつきが多い。サブテ

テーマ3では、「開発地」を「緑地系開発地」と「非緑地系開発地」とに大きく分け、さらに「緑地系開発地」を「樹林地系」と「草地系」とに、「非緑地系開発地」を「宅地系」と「道路系」とに分けた4区分を提案した。そして、それぞれの区分について土地被覆としての「草地」、「樹林地」、「その他」の平均構成比率を提示した。

衛星画像による土地利用変化種類の判別では、土地利用ごとの境界の検知が困難な場合がある。例えば、森林に取り巻かれたゴルフ場において、どこまでが森林でどこまでがゴルフ場の樹林地か、隣接する建物はゴルフ場内の施設かどうかなど、判別が困難な場合がある。そこで、サブテーマ5ではサブテーマ3よりもさらに土地被覆を指向した以下の区分を設定する。

表5.1 衛星画像による土地利用区分

区分	説明
樹林地	森林の定義に関わらず、樹木の存在
農地・草地	農地および草地
舗装	駐車場など、道路以外の舗装面
裸地	裸地、植生の無い法面、駐車場、鉄道敷地など、道路以外の無植生非舗装面
道路	幅6m以上の舗装・非舗装の道路
建物	あらゆる建築物、ただし太陽電池パネルと温室を除く
太陽電池パネル	太陽電池パネル
温室	温室
水面	水面
陰影その他	建物や立木などの影、斜面の陰、雲など、土地の状態を観測できない部分

このうち、農地と草地は衛星画像の肉眼による判別が困難な場合もあるため、ここでは一つの区分に統合した。太陽電池パネルと温室はそれぞれ特異な形状・パターン・色などを示すため、建物の中でも特別に区分を設けた。

使用する高分解能衛星画像は、Google Earthで公開されている画像である。ARD情報により何らかの森林攪乱(森林減少および森林施業を含む、誤判読が疑われるものを除く)が発生したと考えられる地点において、最新の画像から、その地点を中心として東西128m、南北128mの正方形に解像度0.5mで256×256画素の画像を切り出してサンプル画像とした。

サンプル画像の区分の方法については、画像ごとにただ一つの区分を与える方法と、複数の区分を与える方法がある。ただ一つの区分を与える方法は、その画像を代表する対象物を抽出して区分のラベルを与える方法である。例えば、ある写真の中に移っているものを「犬」、「猫」、「リンゴ」、「ミカンなどと判別する場合である。衛星画像による土地被覆分類に関しても、不均質な景観を切り取った画像ごとにそれを代表する土地被覆区分を一つ与えて、それを深層学習により分類することが試されている(例えば2))。しかし、この方法では画像上の最大面積を占める土地被覆またはその画像上で何らかの基準により最も重要な土地被覆に区分される。本課題には土地利用区分ごとの面積比を推定することが求められているため、区分をただ一つだけ与える場合には重要な区分を過大評価し、重要でない区分を過小評価する恐れがある。また、重要性を評価するルールを定めたとしても、実際の不均質な景観にそのルールをあてはめて画像分類のための教師データを肉眼判読により作成する場合、判読を行う者の負担が大きくなり、効率が低くなる恐れがある。

画像ごとに複数の区分を与える方法の一つは、上記のただ一つの区分を与える方法を拡張し、画像内の主な土地被覆区分を複数与える方法である。しかし、これも上記と同様の理由で困難である。もう一つの方法は、サンプル画像内の画素ごとに区分を与え、サンプル画像全体の土地被覆区分図を作成する方法である。この方法であれば、面積比や重要性に関わらず画像上で判読できる全ての区分を面積比に従い与えられる。肉眼判読による教師データ作成においても直感的に区分を与えられる。

そこで、ここではサンプル画像をセマンティックセグメンテーションにより画素ごとにwall-to-wallで区分する。

サンプル画像を100枚ずつランダムに抽出して肉眼判読し表5.1の土地利用区分を行い、そのうち70

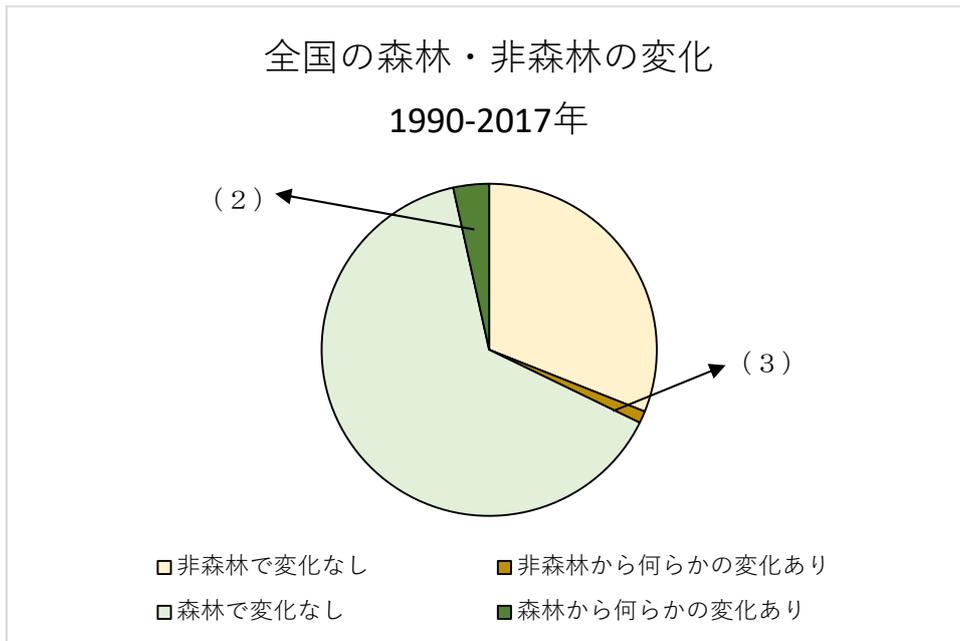
枚を学習用データとして深層学習用に、残りの30枚を評価用に用いるデータセットを作成した。そして、100枚ずつ追加しながら精度が安定するまで学習と評価を繰り返した。

用いたソフトウェアは、Python上で実行されるPyTorch EfficientNetである。

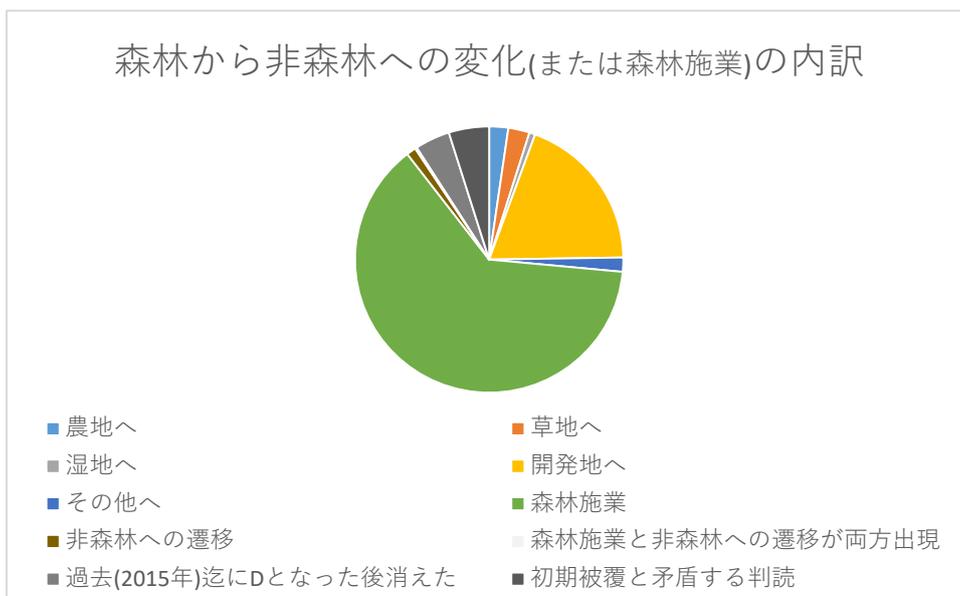
4. 結果及び考察

4-1. 土地利用変化量の概要と傾向の統計値からの把握

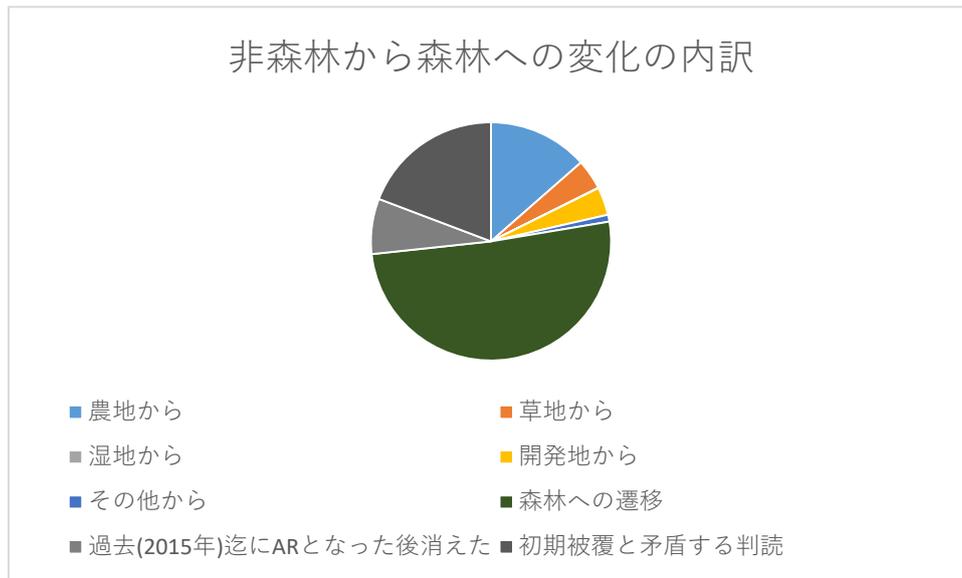
森林と開発地の土地利用変化点を中心に、土地利用変化点の抽出を行った結果、1990年から2017年までの森林・非森林の変化の概要を図5.1に示す。



(1) 全国の森林・非森林の変化



(2) 森林から非森林への変化(または森林施業)の内訳



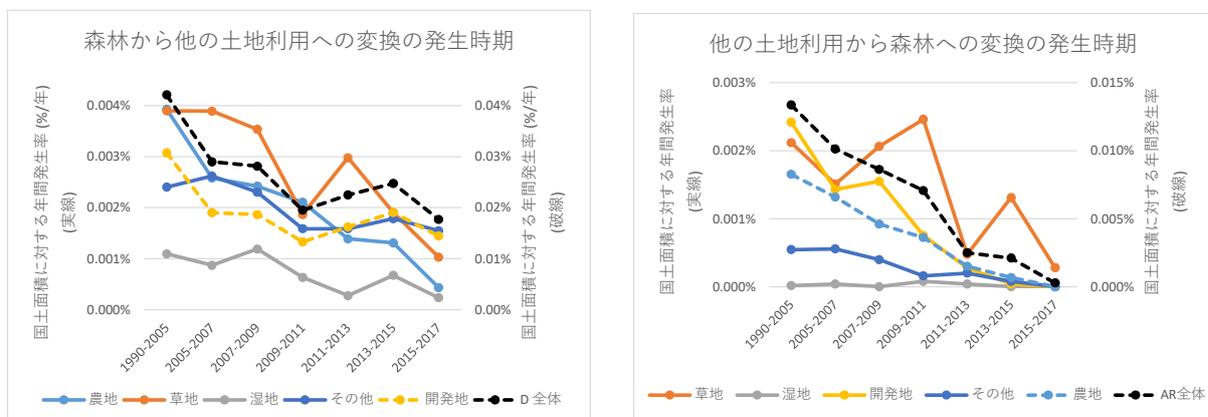
(3) 非森林から森林への変化の内訳

図5.1 1990年から2017年までの森林・非森林の変化

1990年当時に土地利用が森林であったのは全体の67.76%であった(図5.1(1))。そのうち2017年までに何らかの変化が認められたものが3.45%、森林減少(D)と認められるものは0.91%であった。さらに、Dのうち開発地に変換されたと認められるものは0.66%、すなわちDの約7割を占めた。2017年までに何らかの変化が認められたもののうち、その後森林被覆が回復して土地利用としては森林から変化せず、森林施業であったと考えられるものが2.18%、すなわち何らかの変化が認められたもののうち森林施業は6割以上あった。なお、判読結果に一貫性がないなど、誤判読が疑われるものが0.32%、すなわち何らかの変化が認められた森林のうち1割近くを占めた(図5.1(2))。

一方、1990年当時に土地利用が非森林であったのは全体の32.24%であった(図5.1(1))。そのうち2017年までに何らかの変化が認められたのが1.17%、新規植林(A)または再植林(R)と認められるのは0.26%であった。さらに、AまたはRのうち農地から変換されたと認められるのは0.16%、すなわちAまたはRの約6割を占めた。2017年までに何らかの変化が認められたもののうち、人為的な変換ではなく森林への遷移と考えられるものが約半分であった。なお、判読結果に一貫性がないなど、誤判読が疑われるものが0.31%、すなわち何らかの変化が認められた非森林のうち約1/4を占めた(図5.1(3))。

次に、土地利用変化(D/AR)の経時的傾向を図5.2に示す。



(1) 森林から他の土地利用への変換(D)の発生時期 (2) 他の土地利用から森林への変換(AR)の発生時期

図5.2 土地利用変化(D/AR)の経時的傾向

D、ARに共通して言えるのは、土地利用変化の速度が年と共に鈍る傾向にあることである。国土全体

に対しD全体では(図5.2 (1)), 1990~2005年では0.042%/年、2009~2017年では0.021%/年であり、この期間にはほぼ半減した。特に農地・草地への変換は減少傾向が続く。開発地への変換でもおおよそ半減した。一方、国土全体に対しAR全体では(図5.2 (2)), 1990~2005年では0.013%/年、2009~2017年では0.003%/年であり、急速に減少している。

最後に、森林減少(D)後の土地利用の地域的傾向を図5.3に示す。また、都道府県別の森林率と森林減少(D)速度を図5.4に示す。

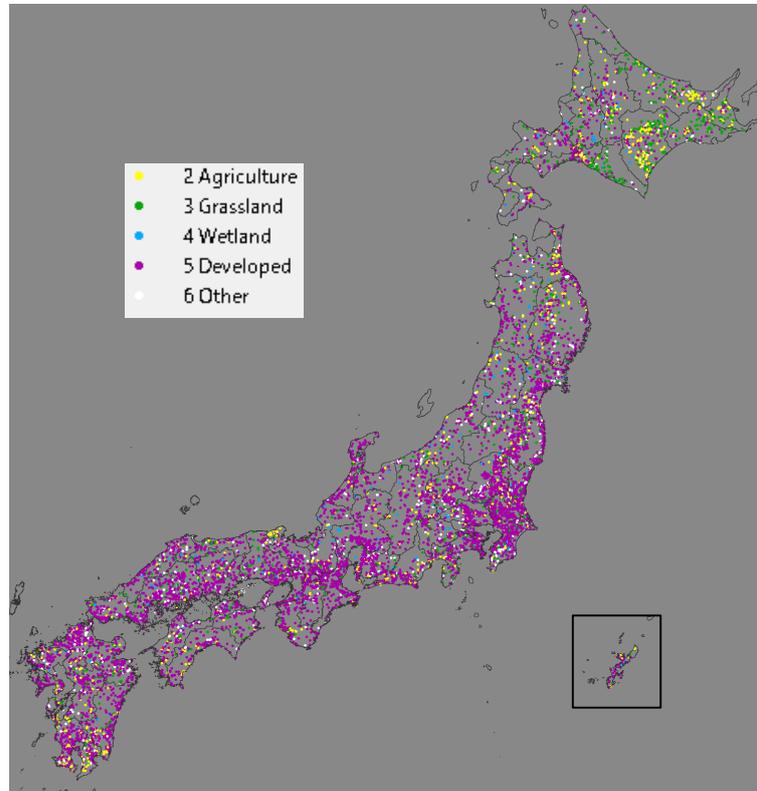


図5.3 森林減少後の土地利用の地域的傾向(1990年~2017年)

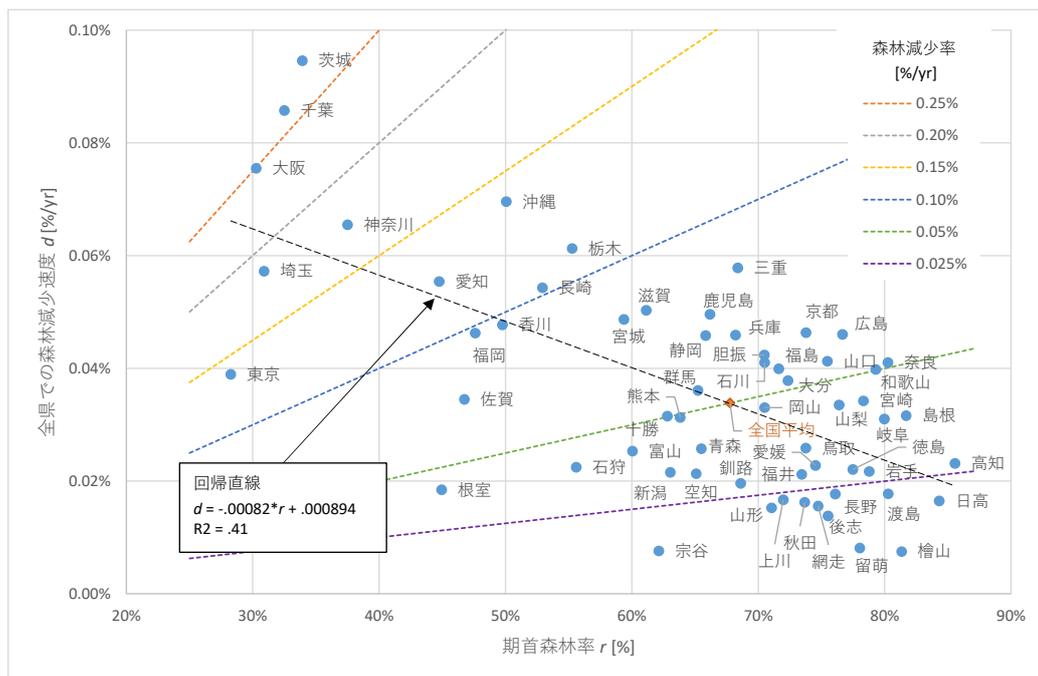


図5.4 都道府県別の期首森林率と森林減少速度(1990年~2017年)

森林減少は全国の平野部を中心に広く発生しているが、変換後の土地利用は開発地が多いものの、北海道東部では農地・草地が目立つほか、農地開発が進む地域もみられる(図5.3)。

都道府県別の期首森林率は各都道府県内のARD情報格子点総数に対する1990年に森林だった格子点数の比として推定している。また、森林減少速度はARD情報格子点総数に対する2017年までに森林減少が発生した点数の比を期間(27年間)で除して推定している。すなわち、森林減少速度とは、全県面積に対する年間森林減少面積の比の推定値である。一方、森林減少率は1990年に森林だった格子点数に対する森林減少が発生した点数の比として推定しており、期首(1990年)森林面積に対する森林減少率の推定値である。分析の結果、もともと森林率の低い都道府県ほど失われる森林面積率が高いことが明らかになった(図5.4)。例えば、大阪府、千葉県および茨城県ではもともと森林率が30%から40%程度だったにもかかわらず10年間で森林の2.5%が失われた一方、高知県や岩手県ではもともとの森林率が80%前後と高いが10年間で失われた森林は0.25%程度であり、森林の少ない都道府県ほどさらに森林減少が加速していることが明らかになった。全国平均では森林減少速度は0.034%/年、森林減少率は0.050%/年であった。

以上の分析をまとめると、森林からへの土地利用変換は減速しており、最近10年ほどの速度の水準が維持されるなら、今後30年間で土地利用変換により失われる森林の面積率は0.6%程度となる見込みである。一方、森林減少速度には地域差があり、一般的に森林の少ない都道府県ほど森林減少速度が速い。

以上の分析から以下の点が考察される。衛星画像の肉眼判読に基づくARD情報について、土地利用変化の経時的・地域的傾向が明らかになるなど、ある程度信頼性における直感的な情報である。しかし、ARDと判読されたものの複数年の相互検証により実際には発生していないと考えられる点がかんりの比率を占めている。また、何らかの森林の攪乱と判読されたもののうち最終的には森林施業と判断されて土地利用変化は発生していなかった点は半数近くを占めた。このように、複数年に渡り観測する間の一貫性や再現性に難がある。また、森林施業による皆伐と土地利用変換のための皆伐とが伐採直後には見分けがつきにくく、変化後の利用方法の最終的な確定までは伐採から数年を要する場合もあった。

衛星画像の自動判別による土地利用変化とその種類の検出に向けて、以下の点が示唆される。近年の森林の減少速度、植林速度はそれぞれ0.021%/年、0.003%/年と非常に低く、森林を取り巻く土地利用の変化はほとんど起きていないことから、土地利用・被覆の何らかの変化の検出とその変化の種類の判別を同時に行うことは効率が悪い。特に森林減少に対しては、何らかの森林攪乱の発生を検出と、検出された森林攪乱の種類を分けた二段階検出が望ましい。その場合、森林攪乱発生を検出と攪乱種類の判別との間に複数年の時間差を設けることにより、攪乱種類の判別をより正確かつ安定的に実施できる可能性がある。

4-2. 衛星画像による土地利用変化種類の判別

肉眼判読による教師データ作成の例を図5.5に示す。

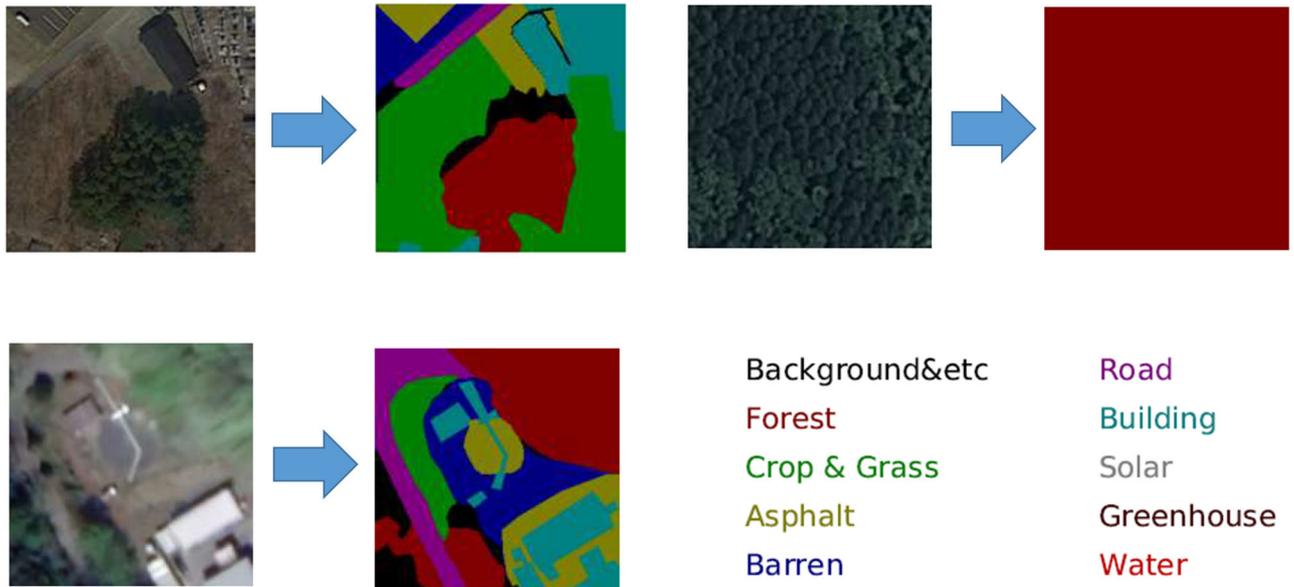


図5.5 高分解能衛星画像の肉眼判読の例

土地利用判別器を作成するために、これらの教師データの70%を学習データ、残り30%を評価データとして用いた学習過程を図5.6に示す。教師データ数が増えるにつれて精度が上昇する傾向があり300点で最高となったが400点では著しく低下し、500点の時に精度約93%でほぼ安定した。そこで、以下の解析では教師データ数600点(うち教師データ420点、評価用データ180点)の結果を採用した。

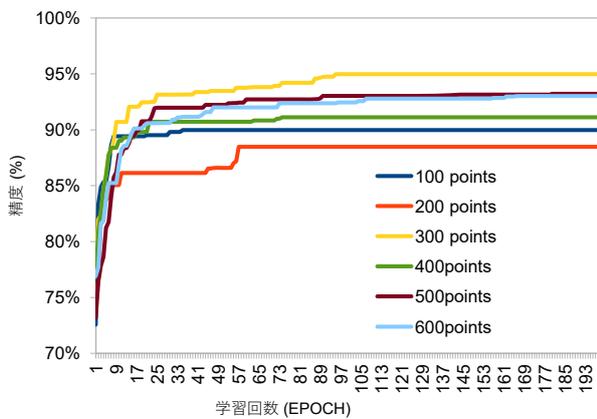


図5.6 学習データ数と学習過程

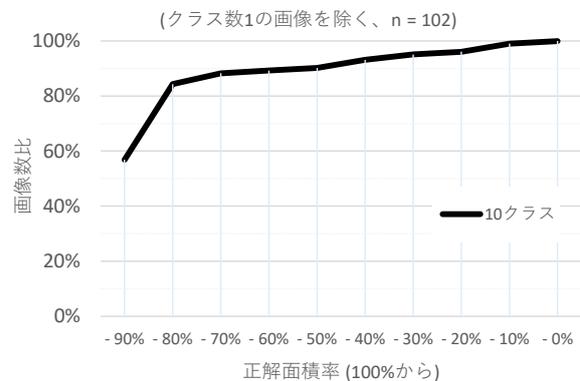


図5.7 正解面積率を満たす分類結果の割合

サンプル画像ごとに、評価用の教師データとその分類結果とを比較した正解面積率の分布を図5.7に示す。サンプル画像の約60%では画像内の正解面積比が90%以上あり、サンプル画像の80%以上では正解面積比が80%以上ある。一方、正解面積比が50%未満となるサンプル画像も10%ほど含まれた。教師データと分類結果との比較例を図5.8に示す。

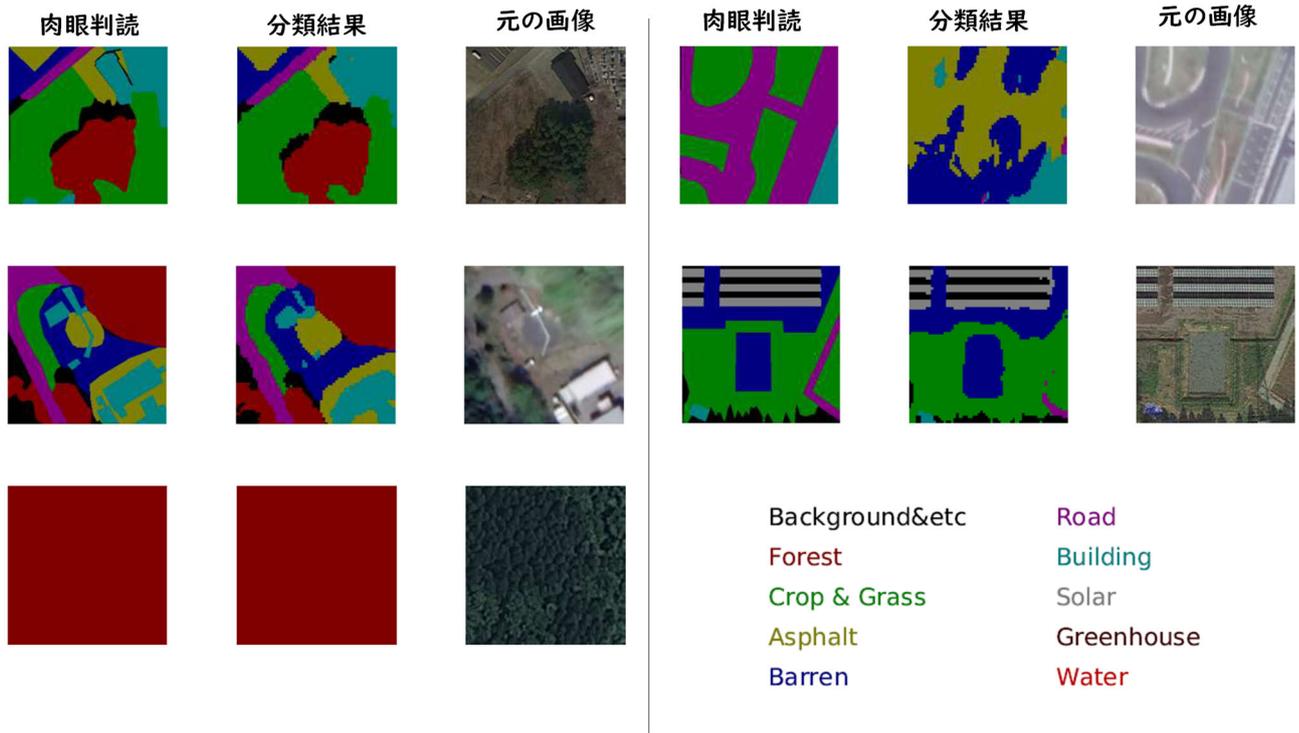


図5.8 分類結果の例

評価用サンプル画像全体での土地利用区分ごとの分類精度(利用者精度=分類結果のうち正しく分類された結果の比率)を図5.9に示す。総合精度は84.9%、 κ 係数は0.794であった。総合精度が図5.6による精度93%より低いのは、分類精度の評価の際に肉眼判読による土地利用区分の数が1つのもの(例えば、図5.8の左下)を除去したためである。

	影、その他	森林	農地・草地	アスファルト	裸地	道路	建物	太陽電池パネル	温室	水面
影、その他	71.3%	1.8%	1.5%	2.6%	1.3%	1.2%	1.0%	1.3%	0.3%	2.3%
森林	20.9%	94.0%	3.5%	3.5%	2.9%	8.8%	0.6%	0.0%	0.0%	3.5%
農地・草地	2.0%	3.1%	87.9%	14.7%	11.6%	13.1%	7.4%	10.0%	21.3%	24.7%
アスファルト	0.1%	0.0%	0.1%	35.9%	0.5%	2.9%	3.3%	0.0%	0.0%	0.0%
裸地	0.6%	0.3%	5.0%	6.4%	80.5%	10.7%	20.0%	20.5%	0.0%	0.0%
道路	0.2%	0.6%	1.5%	28.9%	2.7%	61.8%	10.9%	0.0%	0.0%	0.0%
建物	1.0%	0.1%	0.5%	7.9%	0.5%	1.6%	56.8%	0.0%	0.0%	0.0%
太陽電池パネル	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	68.2%	0.0%	0.0%
温室	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	78.3%	0.0%
水面	3.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	69.5%

図5.9 土地利用区分ごとの区分結果と利用者精度(太字)
(クラス数1の画像を除く)

評価用サンプル画像全体での教師データ(真値)と分類結果(推定値)の面積率を比較した(図5.10)。その結果、真値と推定値の乖離はどの区分においても1%前後であった。このことは、たとえサンプル画像によっては著しく分類精度が劣っていても(図5.7参照。例えば図5.8の右上)、総計すると面積比の推定に著しいバイアスは含まれていないことを示す。また、図5.10に表れたバイアスを、判別効率表(図5.9の算出に用いた真値と分類結果の土地利用区分ごとの二次元頻度分布)を用いて、理論的に修正することが可能である³⁾⁴⁾。

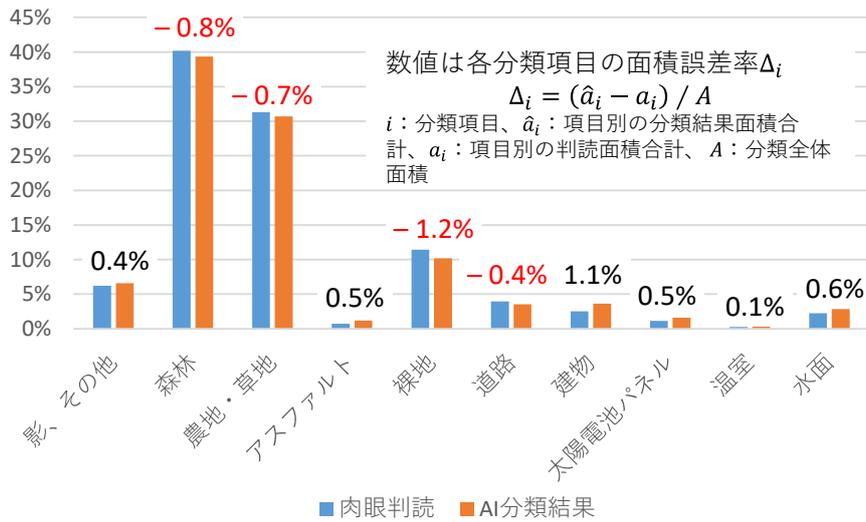


図5.10 面積比の真値と推定値の比較 (クラス数1の画像を除く)

土地利用区分の数を減らして単純化し、分類精度を高めるために、土地被覆の形態が類似した土地利用区分を統合して6つの区分に集約し(図5.11)、分類精度を比較した(図5.12)。しかし、総合精度は86.3%、 κ 係数は0.810と、統合前に比べて大きくは改善されなかった。真値と推定値の面積率の乖離も統合前と同様に1%前後であった(図5.13)。



図5.11 土地利用区分の集約

	影、その他	森林	農地・草地	人造物	裸地	水面
影、その他	70.7%	0.7%	1.3%	1.3%	1.1%	2.3%
森林	21.5%	97.1%	2.9%	4.4%	2.2%	3.8%
農地・草地	2.0%	1.8%	89.5%	10.8%	11.3%	24.6%
舗装	1.3%	0.3%	1.8%	68.6%	2.6%	0.0%
裸地等	1.2%	0.1%	4.5%	14.9%	82.8%	0.0%
水面	3.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	69.3%

図5.12 土地利用区分(集約)ごとの区分結果と利用者精度(太字) (クラス数1の画像を除く)

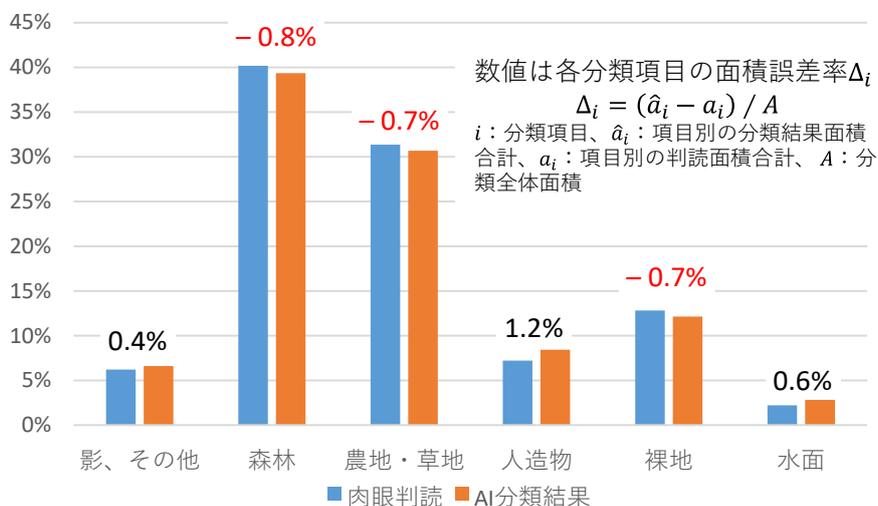


図5.13 面積比の真値と推定値の比較(集約した土地利用区分)

(クラス数1の画像を除く)

以上の通り、深層学習を用いた高分解能衛星画像の土地利用区分は高い精度で行われた。従来の画素単位の画像分類では難しかったそれぞれの土地被覆に特有なテクスチャ(質感)も、深層学習による分類では肉眼判読と大きな矛盾なく分類された。画像による土地利用区分を機械で行えるようになり、これまでの全国の全ての標本点で肉眼判読により推定していた場合と比べて、効率的に推定できるようになることが期待される。

しかし、平板な質感の草地・農地と裸地、水面などとの混同が起きることがあり、そのためにある一定割合で著しく分類精度の劣るサンプル画像が出現したと考えられる。これらのことを考慮すると、今回開発された深層学習による判読を、算定方法として実装するには、より広範囲における試験と検証を行い、従来の方法と比較しても十分な精度を確保できることを確認するプロセスが必要と考えられる。本課題では天然色(RGB)画像を用いており、それに新たな情報を加えれば精度を向上させる可能性があるが、中でも近赤外画像も加えれば植生の状態が異なるこれらの土地利用区分をより正確に分類することが期待される。近赤外画像は現在のパンクロではない高分解能衛星画像では通常天然色と同時に撮影されており、既に十分な情報の蓄積がある。

草地と農地の区分も上記と同様の可能性がある。しかし、我が国ではすでに別途農地の区画情報(筆ポリゴン)を整備している⁵⁾。また、森林撈乱の発生の検知についても¹⁾等の事例がある。これらの既往の統計や成果と組み合わせて、目的に合わせた細かな区分に特化した分類手法を開発することにより、目的とする土地利用区分ごとの面積比の推定を効率的に行える可能性がある。

現在使われている土地利用区分(「交通用地」、「宅地」、「学校施設用地」、「レクリエーション用地」、「環境衛生施設用地」、「ゴルフ場」、「スキー場」、「公園・緑地」など)、あるいはサブテーマ3で提案された区分(「樹林地系」、「草地系」、「宅地系」および「道路系」)ごとに、土地被覆としての「草地」、「樹林地」、「その他」の平均構成比率は、本課題で行う土地利用区分を所管官庁あるいは自治体が有するそれぞれの施設等の境界でくりぬき集計することで推定可能である。

最後に、森林から転用された開発地を本課題で提案した集約した土地利用区分に分解し、IPCCガイドラインに準拠して、吸収排出量を推定する方法を提案する(表5.2)。転用後の植生の経年変化をモニタリングすることにより、単純かつ正確に推定できることが期待される。

表5.2 森林から転用された開発地のIPCCガイドラインに準拠した吸収排出量推定(案)

cプール	土地利用	開発地				
	土地被覆	森林(樹林地)	草地	人造物	裸地	水面(湿地)
生体バイオマス	土地利用変化	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出
	経年変化	単木成長法樹冠被覆面積法	なし	なし	なし	なし
枯死木	土地利用変化	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出	転用前の蓄積が全排出
	経年変化	なし	なし	なし	なし	なし
リター	土地利用変化	全排出または全除去	全排出または全除去	全排出または全除去	全排出または全除去	全排出または全除去
	経年変化	樹木に掘る増加	草本に掘る増加	なし	なし	なし
鉱質土壌	土地利用変化	開発地の造成直後値まで全排出	開発地の造成直後値まで全排出	開発地の造成直後値まで全排出	開発地の造成直後値まで全排出	開発地の造成直後値まで全排出
	経年変化	樹木による増加	草本による増加	なし	なし	なし

5. 研究目標の達成状況

森林と開発地を中心に土地利用変化があった点を抽出した。この点の特性を考慮し、人工知能への学習には、被覆変化点の抽出と被覆の種類判別の二段階判別が有効であると判断し、これらに必要な教師データを入手可能な衛星画像を用いて作成した。これを深層学習による人工知能に学習させ、開発地の中の土地被覆の細区分まで判別可能な土地利用区分手法を開発した。この評価をテストデータで行ったところ、高い判別率を示し、さらに活動量の推定としてはより高い精度を示すことが明らかになった。土地被覆の判別が可能になったことで、森林と開発地以外の土地利用でも適用可能であると考えられた。この人工知能に基づく吸収排出量推定方法を提案した。但し、算定方法への実装に関しては、検討が必要な事項も多く、この人工知能による算定方法の提案までは至らなかった。以上から、当初の目標を達成したと考える。

6. 引用文献

- 1) Shimizu, K., Saito, H. 2021. Country-wide mapping of harvest areas and post-harvest forest recovery using Landsat time series data in Japan. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 104: 102555
- 2) Naushad et al. 2021. Deep Transfer Learning for Land Use and Land Cover Classification: A Comparative Study. *Sensors* 21 (23) 8083
- 3) Card D.H. 1982. Using Known Map Category Marginal Frequencies to Improve Estimates of Thematic Map Accuracy. *Photo Engin Rem Sens* 48:431-439
- 4) 鷹尾元. 精度評価 in 平田・鷹尾・佐藤・鳥山編. 2013. REDD-プラスブックブック 102-107
- 5) 農林水産省. 農地の区画情報 (筆ポリゴン) のデータ提供・利用.
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/polygon/> 最終アクセス : 2022/04/23

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

1) Ishizuka, S., Hashimoto, S., Kaneko, S., Tsuruta, K., Kida, K., Aizawa, S., Hashimoto, T., Ito, E., Umemura, M., Shinomiya, Y., Morishita, T., Noguchi, K., Ono, K., Okamoto, T., Mizoguchi, T., Torii, A., Sakai, H., Inagaki, Y., Shichi, K., Toriyama, J., Sakai, Y., Inagaki, M., Shirato, Y., Obara, H., Kohyama, K., Takata, Y., Katayanagi, N., Kanda, T., Inoue, H., Kusaba, T., 2021. Soil carbon stock changes due to afforestation in Japan by the paired sampling method on an equivalent mass basis. *Biogeochemistry* 153, 263-281. (IF:4.825)

【サブテーマ2】

1) Koga, N., Shimoda, S., Shirato, Y., Kusaba, T., Shima, T., Niimi, H., Yamane, T., Wakabayashi, K., Niwa, K., Kohyama, K., Obara, H., Takata, Y., Kanda, T., Inoue, H., Ishizuka, S., Kaneko, S., Tsuruta, K., Hashimoto, S., Shinomiya, Y., Aizawa, S., Ito, E., Hashimoto, T., Morishita, T., Noguchi, K., Ono, K., Katayanagi, N., Atsumi, K., 2020. Assessing changes in soil carbon stocks after land use conversion from forest land to agricultural land in Japan. *Geoderma* 377, 114487. (IF:4.336)

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ5】

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

1) Umemiya, C., Tzamtzis, I., Sato, A., Salvatore, M., Bernoux, M. & Amano, M. (2022) Understanding countries' status and challenges for the estimation of carbon stock changes from mineral soils in national greenhouse gas inventories: Preliminary survey findings. *FAO/IGES Working Paper*. <https://www.iges.or.jp/en/pub/mineral-soil-2022/en>.

【サブテーマ5】

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

1) 石塚 成宏・橋本 昌司・木田 仁廣・相澤 州平・酒井 寿夫・篠宮 佳樹・森下 智陽・岡本

透・鳥山 淳平・白戸 康人・古賀 伸久・佐藤 淳（2022）土地利用が変化した場合の土壤炭素蓄積量変化を解明、令和4年度森林総合研究所成果選集

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ5】

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】

1) 石塚成宏ら、日本土壤肥料学会2019年静岡大会（2019）

農地から森林への土地利用変化における土壤炭素量の変化係数について

2) 木田仁廣ら、第131回日本森林学会大会（2019）

農地から森林への土地利用変化に伴うリン酸吸収係数の上昇

【サブテーマ2】

1) 古賀伸久、草場敬、島武男、新美洋、山根剛、日本土壤肥料学会2019年静岡大会（2019）

西日本を対象とした森林から農地への土地利用変化に伴う土壤炭素量変動の評価ーEquivalent soil mass法の適用ー

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

1) Umemiya, C et al. (2022) Understanding countries' status and challenges for estimating carbon stock changes in mineral soil in national GHG inventories. At the FAO' s virtual workshop, titled as "Scaling up Climate Actions in Pacific Small Island Developing States (SIDS)".

【サブテーマ5】

特に記載すべき事項はない。

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ5】

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ5】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞**【サブテーマ1】**

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ5】

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Assessment of Soil Carbon Stock Changes due to Land Use Changes and Its Application to National Greenhouse Gas Inventories

Principal Investigator: Shigehiro ISHIZUKA

Institution: 1, Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN

Forestry and Forest Products Research Institute

Tel: +81-29-829-8227 / Fax:+81-29-874-3720

E-mail: ishiz03@ffpri.affrc.go.jp

Cooperated by: National Agriculture and Food Research Organization, Organization for landscape and Urban Green Infrastructure, Institute for Global Environmental Strategies, Mitsubishi UFJ Research and Consulting

[Abstract]

Key Words: Land-use change, Soil carbon stock change, Equivalent soil mass, Method for measuring activity, National Greenhouse Gas Inventory Report

In the National Greenhouse Gas Inventory Report (NIR), the amount of change in soil carbon due to changes in land-use needs to be reported for 20 years for land with land-use change. In this study, our objectives were to provide land-use factors for all land-use changes in soil carbon content, especially between land used for settlements and forest land / cropland.

Soil surveys were conducted using the paired sampling method to compare soil carbon stock at a depth of 0-30cm between land-use categories, such as cropland (tea gardens and orchards), grassland, and forest land. Soil carbon stock was measured by using the equivalent soil mass method as recommended in the IPCC guidelines. Because the land-use change factor between forest land and cropland showed a linear change in line with the number of years that had elapsed since the land-use change occurred, we recommend that the land-use factor from cropland to forest land is 1.21, and from forest land to cropland is 0.77 for a period of 40 years.

To obtain the average soil carbon stocks in Japan for settlements, soil surveys were conducted at more than 30 locations nationwide. Based on these results, the initial values for carbon content right after land development were estimated at 20.8 tC/ha (from forest land) and 22.9 tC / ha (from cropland). We evaluated the effect of vegetation cover after land development, and the average carbon stock for settlements was calculated to be 30 tC/ha.

Challenges and good practices related to inventory reporting in other countries were also identified through expert hearings and online questionnaire surveys. Based on these, an estimation method integrating the results of each sub-theme was developed for Japan's GHG inventory. The estimation method developed in this study was approved by the Committee for Greenhouse Gas Emissions Estimation Methods of Japan and is expected to be used for the Japan's GHG inventory to be submitted in April 2023. As a result, the accuracy of Japan's GHG inventory for land use, land-use change, and the forestry (LULUCF) sector is expected to improve by about 10% of net removals in the same sector.

A land-use classification that subdivides land cover in settlement land was developed by satellite image classification through deep learning, and was applied to identify areas of land-use changes between settlements and other land uses. A method for estimating GHG emissions and removals based on the land-use classification was proposed.